대한민국학술원과 함께 여는
청렴韓세상

2026년 10월 1일(목) | 제 399 호

大韓民國學術院通信

Monthly Newsletter
The National Academy of Sciences, Republic of Korea

발행인 **대한민국학술원 회장** | 06579 서울시 서초구 반포대로 37길 59 | **http://www.nas.go.kr** | **T. 3400-5255 F. 535-8836** | 편집 **학술진흥과**



제71회 대한민국학술원상 시상식 개최(2026.9.17.)

이달의 주요기사

회원기고	낙태는 기본권일까? -고대 로마법에 대한 소묘를 겸하여-	崔秉祚 會員	2면
	식물표본과 표본관	朴鍾郁 會員	10면
신임회원 업적소개	자연 제1분과 노태원 회원(물리학)	盧泰元 會員	16면
	자연 제2분과 이강근 회원(수리지질학/지하수학)	李岡根 會員	21면
	자연 제3분과 권욱현 회원(전기공학)	權旭鉉 會員	27면
	자연 제3분과 김낙준 회원(금속재료공학)	金洛俊 會員	32면
	자연 제4분과 박승정 회원(내과학)	朴勝楨 會員	37면
분과 및 학계 동향	자연 제2분과 회원 동정 및 학계 동향	鄭鎭河 會員	43면
학술교류	IAWS 60주년 학술대회 참가기	金潤受 會員	53면
학술원 소식	회의 및 행사 안내		63면

회원기고

낙태는 기본권일까?
-고대 로마법에 대한 소묘를 겸하여-

崔秉祚 會員 (로마법)



I.

올해 5월 29일 열린 학술원 인문사회 제4분과 분과회의에서 김문현 회원의 좋은 발표가 있었다. 비교적 열띤 토론이 이어진 발표의 주제는 “낙태권(right to abortion)은 헌법상 권리인가? - 로판결(1973) 대 돕스 판결(2022)을 중심으로”라는 현실적 문제였다. 발표는 미국의 연방대법원 판결들을 중심으로 한 미국 헌법학계의 논의 및 관련된 독일과 우리나라 헌법재판소의 판결을 중심으로, 아주 객관적인 논조로 진행되었다. 발표자는 이 주제를 택한 주된 이유로 헌법 해석방법론의 여러 측면이 명료하게 드러난 사례여서 오랫동안 관심을 가졌던 방법론을 살필 아주 좋은 계기였기 때문이라고 토로하였다. 실로 발표문에 드러난 갑론을박의 모습은 다양한 관점들이 평행선을 그으며 충돌하여 어느 하나의 관점으로 수렴하지 않는, 아니 어쩌면 수렴할 수 없는, 이 문제의 심각성을 보여주는 듯했다. 극도로 제한된 발표시간 내에 착종된 국내외 논의 상황을 차분히 소개하는 데 초점을 둔 발표자의 입장에서는 “원칙적으로 인간의 생명은 인간의 통어를 벗어난 영역 아니냐”는 취지의 필자가 피력한 견해에 대해서도 하나의 견해일 뿐이라는 논리적 결론으로 답변할 수밖에 없었을 것이다. 회의가 끝나고 가진 회식자리에서 형사법 전공의 신동운 회원이 ‘로마법의 낙태죄는 어떠했는지’를 물었는데, 솔직히 로마형법 공부를 한 지가 오래되어 딱히 기억나는 것이 없어 답변을 하지 못하였다.

이 글은 김문현 회원의 발표와 신동운 회원의 질문을 계기로 나 자신도 궁금해진 로마법상 낙태문제를 사료 중심으로 대충 살펴보려는 것이다. 어차피 이 문제는 한 법공동체가 처한 현실의 제반사정(정치체제, 사법제도, 경제상황 등등을 포함하는 모든 물적 토대)과 그에 대한 그 구성원들의 정신적·종교적 태도(남녀간의 관계를 위시한 사회적 관습, 신앙체계 등등을 포함하는 모든 정신문화)의 매트릭스 속에서 의식과 무의식의 양 차원이 교착하는 복잡다기한 문화현상이다. 그래서 여전히 평행선을 달리는 소신과 견해들이 난무하는 것 아닐까? 필자 생각에 이러한 평행선은 이 문제가 근원적으로는 생명 현상이 인간의 손을 벗어난 영역임을 증시하는 한 증좌가 아닐까도 싶다.

II.

위 발표 중 가장 눈에 띄었던 것은 프랑스가 놀랍게도 헌법에서 낙태할 자유를 명문으로 규정한다는 사실이었다. AI에 물어본 결과, 현행 프랑스 헌법 제34조에 추가된 낙태의 자유 조항은 “여성이 자발적으로 임신을 중단할 수 있는 자유가 보장되는 조건을 법률로 정한다.”[1]이다. 2024년 3월 5일 에마뉘엘 마크롱 대통령의 제안 하에 프랑스 의회(상·하원 합동 회의)에서 압도적으로 5분의 3 이상의 찬성을 얻어 헌법 개정에 성공하며 명문화되었다고 한다. 그리고 그 취지

1) La loi fixe les conditions dans lesquelles s'exerce la liberté qu'a la femme de faire cesser sa grossesse.

는 이미 1975년부터 합법화한 낙태 접근성 자체를 확대하기보다는 낙태의 자유를 헌법의 차원에서 기본권으로 항구적으로 보장한다는 상징적·법리적 의미가 크다고 한다. 즉 향후 어떤 정치적 세력이 집권하더라도 낙태권을 일반법률의 개정만으로 제한하거나 폐지하는 것을 방지하는 것이 그 목적이었다고 한다. 같은 방향의 조치를 최근인 2026년 6월 24일 룩셈부르크도 취했다고 한다. 헌법 제15조에 추가된 조항은 "자발적 임신중절에 의거할 자유는 보장된다. 이 자유가 실행되는 조건들은 법률이 정한다."고 하여 프랑스의 경우와 사실상 동일하다. 이 두 사례를 제외하면 낙태의 자유를 헌법에서 규정하는 경우는 없다. 다른 나라들은 강약의 정도 차이는 있지만, 전면적인 엄격한 금지와 원칙적인 광범한 자유 사이에서 모두 나름으로 그 중간 어디쯤에서 절충적인 입장을 법률로써 정하고 있다. 가장 전형적인 것이 일정한 임신기간(보통 12~14주 사이)의 전후에 따른 차별 취급과 임신한 여자의 제반 사정(임신에 이른 경위, 임신녀 내지 태아의 건강 악화 및 생명 위험, 임신녀의 중대한 사회경제적 어려움 등)을 고려하여 그 허용 여부를 판단하는 방식이다. 이 문제는 수많은 주장과 갑론을박에도 불구하고 어느 하나의 방책만을 정답이라고 확신하기도, 다른 방식들은 모두 틀렸다고 주장하기도 매우 어려운 난제임에 틀림이 없다. 보다 궁극적으로는 과연 이 문제의 해법을 헌법을 포함하여 실정법에서 찾아야 하는가 하는 것조차도 자명하지가 않다.

III.

이러한 사정을 잘 보여주는 실례가 바로 우리나라의 법현실이다. 주지하듯이 2019년 4월 11일, 헌법재판소는 낙태를 처벌하는 형법 조항에 대해 재판관 7대 2 의견으로 '헌법불합치' 결정을 내렸다(헌법재판소 2019. 4. 11. 선고 2017헌바127 전원재판부 결정). 2012년의 합헌 결정(헌법재판소 2012. 8. 23. 선고 2010헌바402 전원재판부 결정)을 7년 만에 뒤집은 이 결정은 해당 조문의 즉시 폐지 시 발생할 법적 공백을 막기 위해, 2020년 12월 31일까지 법을 개정하라는 시한을 국회에 명하였다. 이 기한까지 적용되었던 낙태 관련 규정은 다음과 같았다. 다만 형법상 낙태의 위법성을 배제하는 규정이 모자보건법에 구체화되어 있었고, 이 규정은 지금도 현행법이다.

형법

제269조(낙태)

① 부녀가 약물 기타 방법으로 낙태한 때에는 1년 이하의 징역 또는 200만원 이하의 벌금에 처한다.

② 부녀의 촉탁 또는 승낙을 받아 낙태하게 한 자도 제1항의 형과 같다.

③ 제2항의 죄를 범하여 부녀를 상해에 이르게 한 때에는 3년 이하의 징역에 처한다. 사망에 이르게 한 때에는 7년 이하의 징역에 처한다.<개정 1995.12.29>

제270조(의사 등의 낙태, 부동의낙태)

① 의사, 한의사, 조산사, 약제사 또는 약종상이 부녀의 촉탁 또는 승낙을 받아 낙태하게 한 때에는 2년 이하의 징역에 처한다.<개정 1995.12.29>

② 부녀의 촉탁 또는 승낙없이 낙태하게 한 자는 3년 이하의 징역에 처한다.

③ 제1항 또는 제2항의 죄를 범하여 부녀를 상해에 이르게 한 때에는 5년 이하의 징역에 처한다. 사망에 이르게 한 때에는 10년 이하의 징역에 처한다.<개정 1995. 12.29>

④ 전3항의 경우에는 7년 이하의 자격정지를 병과한다.

모자보건법

제14조(인공임신중절수술의 허용한계)

① 의사는 다음 각 호의 어느 하나에 해당되는 경우에만 본인과 배우자(사실상의 혼인관계에 있는 사람을 포함한다. 이하 같다)의 동의를 받아 인공임신중절수술을 할 수 있다.

1. 본인이나 배우자가 대통령령으로 정하는 우생학적(優生學的) 또는 유전학적 정신장애나 신체질환이 있는 경우

2. 본인이나 배우자가 대통령령으로 정하는 전염성 질환이 있는 경우

3. 강간 또는 준강간(準强姦)에 의하여 임신된 경우

4. 법률상 혼인할 수 없는 혈족 또는 인척 간에 임신된 경우

5. 임신의 지속이 보건의학적 이유로 모체의 건강을 심각하게 해치고 있거나 해칠 우려가 있는 경우 (이하 생략)

[전문개정 2009. 1. 7.].

제28조(「형법」의 적용 배제)

이 법에 따른 인공임신중절수술을 받은 자와 수술을 한 자는 「형법」 제269조제1항·제2항 및 제270조제1항에도 불구하고 처벌하지 아니한다. [전문개정 2009. 1. 7.]

모자보건법시행령

제15조(인공임신중절수술의 허용한계)

① 법 제14조에 따른 인공임신중절수술은 임신 24주일 이내인 사람만 할 수 있다. (이하 생략)

헌법재판소가 헌법불합치 결정을 내린 핵심 논리는 기존의 형법이 태아의 생명권 보호라는 공익만을 절대시하여 낙태를 범죄화함으로써 임신한 여성의 자기결정권을 과도하게 제한한다는 것이었다. 그 결과 특히 태아가 모체 밖에서 독자적으로 생존할 수 있는 시기(약 임신 22주) 이전에는 여성의 자기결정권이 우선한다고 보았다. 이것은 정확히 2012년 헌법재판소 전원재판부가 설시한 바와 정반대되는 논리였다. 같은 논거로 이루어진 창을 180도 돌린 형국이었다. 이것은 실상 모든 세부적인 이유 제시에도 불구하고 결국은 임신녀의 자기결정권과 포태된 존재의 생명권 중 어느 쪽을 더 무게 있는 것으로 보느냐 하는 가치판단이 절대적으로 결정적임을 잘 보여준다. 이후 국회에 맡겨진 후속 입법이 이 글을 쓰고 있는 2026년 8월 현재까지도 이루어지지 못하고 있음은 이 문제의 성격으로 보면 이상한 일도 아니다. 입법 논의 과정에서 정부는 '임신 14주까지 전면 허용, 24주까지 조건부 허용' 안을 제출했으나, 낙태죄 완전 폐지를 주장하는 진보 진영과 태아 생명권 보호를 강조하는 보수 진영 사이의 간극을 좁히지 못했고, 급기야 국회는 2020년 12월 31일까지 대체 입법을 완성하지 못했으며, 이에 따라 헌법재판소의 결정에 의해 2021년 1월 1일 자정부터 형법상 낙태죄 조항(제269조, 제270조)은 자동으로 효력을 상실하였다. 21대 국회에서도 여러 대체 입법안이 발의되었으나 임기 만료로 폐기되었고, 아직까지 입법 공백 상태가 계속되고 있다.

IV.

결국 가장 중요한 것은 낙태에 대한 법공동체 주류의 관념과 태도이다. 이제 원래의 물음으로 돌아가서 로마법의 모습을 살펴보기로 한다.

1. 일찍이 로마에서는 임신 중 사망한 여자는 제왕절개로 태아(partus; venter; qui in untero est; qui nondum natus est)를 꺼내기 전에는 매장을 금지하였는바, 이에 위반한 자는 그로써 생명력 있는 존재의 생존 희망(spes animantis)을 앗아간 것으로 여겼기 때문이었다.[2] 칠삭동이도 히포크라테스의 견해를 좇아서 완벽한 출생아로 인정되었고,[3] 또 피우스 황제는 역시 히포크라테스를 좇아서 182일째에 태어

2) 누마 폼필리우스(기원전 716-673년) 왕법 12 (D.11.8.2 Marcel. 28 dig.).
3) D.1.5.12 Paul. 19 resp.
4) D.38.16.3.12 Ulp. 14 ad Sab.
5) D.28.2.12.pr. Ulp. 9 ad Sab.
제왕절개술이 언급된 개소들로는 가령 D.6.2.11.5 Ulp. 16 ad ed.; D.5.2.6.pr. Ulp. 14 ad ed.; D.38.8.1.9 Ulp. 46 ad ed.; D.38.17.1.5 Ulp. 12 ad Sab.; D.50.16.141 Ulp. 8 ad leg. Iul. et Pap. 다만 아우구스투스 이래로 피해방녀는 4자녀, 자유인 여자는 3자녀를 낳으면 母에게 후견면제와 자녀 재산에 대한 일정한 법정상속권을 부여했던 多子의 특권(ius liberorum)을 인정함에 있어서는 사망한 모에게서 꺼낸 아이는 출산한 것으로 보지 않았는데(D.50,16,132,1 Paul. 3 ad leg. Iul. et Pap.) 어차피 의미가 없기에 어휘의 원의대로 해석한 것이다. 유스티니아누스가 폐지한 이 특권을 위해서는 당연히 살아있는 자식을 낳아야만 했고(PS.4,9,1), 당연히 조산이나 임신중절로 사산한 경우는 출산아로 보지 않았다(PS.4.9.6). 따라서 死産한 경우에는 비록 父의 유언에서 간과되었을지라도 이 유언을 파훼하지 않았다(C.6.29.2 Diocl./Maxim. [a.294]).

난 아이도 정상적인 시기에 태어난 것으로 인정하였다.[4] 분만은 자연분만뿐만 아니라 제왕절개술에 의한 것 역시 모두 출산으로 인정되었다.[5]

하드리아누스 황제의 한 칙답은 임신한 자유인 여자가 사형선고를 받은 경우 출산할 때까지 사형집행을 유예한다고 결정하였다.[6] 같은 황제는 또 태아의 유산권(bonorum possessio)으로 인해 상속재산에 대한 사압류가 허여된 부인의 경우 간통의 소추는 출산 때까지 연기한다는 칙답을 내린 바도 있다. 그 이유는 아이가 출생했을 때 선입견에 의한 낙인이 찍히는 것을 막기 위한 것이었다.[7] 출생하여 아이로 인정받기 위해서는 인간의 형상을 크게 벗어난 이른바 괴물이나 鬼子가 아니어야 했으나,[8] 肢體의 다소간의 異態(가령 육손이[9])는 문제가 없었다.[10] 남녀 양성을 모두 가진 자(hermaphroditus 兩性人, 陰陽人)는 성적 충동이 강한 쪽으로 인정되었다.[11]

또한 이미 기원전 5세기 중반의 12표법이 살아서 태어나면 가내상속인 자격이 있는 태아는 상속 개시 시에 아직 모태 속에 있더라도 마치 출생자처럼 상속권을 인정하였다.[12] 임신한 처를 남긴 자는 자식 없이 사망한 것으로 여기지 않았고,[13] 태아는 피상속인인 父의 사망 시에 이미 존재하는 것으로 간주해야만 하였다.[14] 이처럼 태아는 그의 이익이 관련된 경우에는 이미 인간 세상에 존재하는 것(in rebus himanis esse)처럼 대우를 받았는데,[15] 잉태된 것만으로도 이 지상세계에 존재하는 것(in rerum natura esse)으로 여겨졌다.[16] 또 법정관은 모태 속의 잉태아를 위하여 反유언 유산권(bonorum possessio contra tabulas)을 인정하고 태아를 위한 보좌인을 임명하였다.[17] 특히 그는 고시의 적용에 있어서 매우 관후하게 보호를 부여하였는데, 상속이 기대되는 태아가 출생하기 전에 살해당하는 것을 방지하기 위한 것이었다.[18] 더욱이 법정관은 출생한 아이(puer)의 보호보다 태아의 보호를 위한 부양의 확보에 있어 더 관대하게 처리하였는데, 그 이유는 아이는 가정에서 양육되기 위한 것임에 비하여 태아는 세상의 빛을 보도록 부양받는 것이고, 그의 경우는 비단 그의 父를 위하여 태어날 뿐만 아니라 나라를 위해서도 태어나는 것이기 때문이라는 것이다.[19] 반면에 死産의 경우에는 자식이기에 돌아가는 이 모든 법적인 보호조치가 아무 의미가 없으므로 출생하지 않은 것은 물론 처음부터 잉태되지 않은 것으로 보았다.[20]

---

6) D.1.5.18 Ulp. 27 ad Sab. 다른 형의 집행 및 고문도 마찬가지였다(D.48.19.3 Ulp. 14 ad Sab.).
7) D.37.9.8 Paul. 1 de adult. Cf. D.37.10.13 Paul. 11 resp.; D.48.5.12.8~9 Pap. l. s. de adult.
8) D.1.5.14 Paul. 4 sent. = PS.4.9.3; C.6.29.3.1 Iust. (a.530). 물론 그 판단은 그때그때 개별적인 사정을 고려하여 결정하였다. Cf. D.50.16.38 Ulp. 25 ad ed.
9) D.21.1.10.2 Ulp. 1 ad ed. aedil. curul.
10) D.1.5.14 Paul. 4 sent. = PS.4.9.4.
11) D.22.5.15.1 Paul. 3 sent. = PS.3.4a.15; D.28.2.6.2 Ulp. 3 ad Sab.; D.1.5.10 Ulp. 1 ad Sab.
12) D.38.16.3.9 Ulp. 14 ad Sab. 우리 민법도 같다(제1000조 제3항).
13) D.50.17.187 Cels. 16 dig.
14) D.50.16.153 Clem. 11 ad leg. Iul. et Pap.; D.36.2.18 Iul. 37 dig.
15) D.1.5.7 Paul. l. s. de portion. quae liberis damnatorum conceduntur.; D.27.1.2.6 Mod. 2 excus.; D.37.9.7.pr. Ulp. 47 ad ed.; D.50.16.231 Paul. l. s. ad sc Tert.; Gai.1.147 = Inst.1.13.4.
16) D.38.16.7 Cels. 28 dig.; D.1.5.26 Iul. 69 dig.
17) D.37.9 DE VENTRE IN POSSESSIONEM MITTENDO ET CURATORE EIUS.
18) D.37.9.1.9 Ulp. 41 ad ed.
19) D.37.9.1.15 Ulp. 41 ad ed.; 同旨 Cicero, Pro A. Cluentio 11.32 (후술).
20) D.50.16.129 Paul. 1 ad leg. Iul. et Pap.

2. 이처럼 아직 태어나지 않은 생명에 대한 고려와 배려가 일찍이 인정됨과 동시에, 타인 소유의 임신한 여자 노예를 가격하여 유산시킨 자는 동물의 경우처럼[21] 불법행위로 인하여 아퀼리우스법에 따른 손해배상책임을 졌다.[22] 자유인 임신녀의 악의적 자기낙태는 남편에게서 자식을 앗아가는 행위로 사형에 처하였는데,[23] 이혼 후라면 有期 추방형에 처하였다.[24] 임신녀에게 낙태약을 음용시킨 경우에는 고의가 없었더라도 하류층은 광산노역형에, 상류층은 재산의 일부 박탈과 함께 섬으로 輕유배형에 처하였고, 致死의 경우에는 사형이었다.[25] 출산이 해방조건이었던 사례도 전해진다. 가령 여자노예의 해방조건이 세 자식의 출생인데 재산이 줄어드는 것을 불원한 상속인이 불임약을 주거나 달리 낙태시키는 등으로 이를 저지한 경우 즉시 자유인이 되었다.[26] 조건법의 논리[27]와 자유 우대(favor libertatis)의 법정책, 그리고 출산 방해라는 반사회적 행위에 대한 제재가 동원된 결정이었다.

3. 家의 계승과 遺産의 상속을 극히 중시한 로마에서는 친생자를 확정하기 위하여 父의 사망 후 모태에 대한 검사와 출산의 감독을 법정관의 고시에서 자세하게 규정하였다.[28] 전제는 임신은 정상적인 건강의 표지이고,[29] 임신을 하고 태아를 보호하는 것은 여성의 가장 중요하고 독점적인 과업이며, 자연은 출산을 하도록 여자를 産生하였고, 이것이 그들에게 가장 큰 갈망으로 정해져 있다는 것이다.[30] 이것은 로마법의 저변을 구축한 자연법의 한 축인 兩性의 결합인 혼인과 출산 및 양육[31]을 일관성 있게 설명하는 것일 뿐이다.

이 맥락에서 흔히 오해된 중요한 개소가 하나 전해진다. 즉

D.25.4.1.1 Ulp. 24 ad ed.

Ex hoc rescripto evidentissime apparet senatus consulta de liberis agnoscendis locum non habuisse, si mulier dissimularet se praegnatem vel etiam negaret, nec immerito: partus enim antequam edatur, mulieris portio est vel viscerum. ¶ post editum plane partum a muliere iam potest maritus iure suo filium per interdictum desiderare aut exhiberi sibi aut ducere permitti. extra ordinem

21) D.9.2.39.pr. Pomp. 17 ad Q. Muc.

22) D.9.2.27.22 Ulp. 18 ad ed.
참고로 노예의 자식은 동물의 새끼와 달리 果實로 관념되지 않았다(D.7.1.68.pr. Ulp. 17 ad Sab.; D.22.1.28.1 Gai. 2 rer. cott. = Inst.2.1.37; D.5.3.27.pr. Ulp. 15 ad ed.; D.45.1.75.4 Ulp. 22 ad ed.). 노예는 또한 다른 물건의 종물이 될 수 없었다. 근거는 '인간의 존엄'(dignitas hominum) 때문이라는 것이었다(D.21.1.44 Paul. 2 ad ed. aedil. curul.). 그에 따라 유류분 계산에 있어서 다른 과실은 피상속인의 사망 시에 이미 성숙한 경우에는 아직 수취하지 않았더라도 상속재산에 가산되었던 반면에, 노예의 태아는 성숙도를 따지지 않고 가산되지 않았다. 그 이유는 아직 태어나지 않은 자는 'homo'(인간, 노예)라고 정당하게 말할 수 없기 때문이라는 것이었다(D.35.2.9.pr.-1 Pap. 19 quaest.).

23) D.48.19.39 Tryph. 10 disp.; Cicero, Pro A. Cluentio 11.32; 11.34.

24) D.48.19.39 Tryph. 10 disp.; D.47.11.4 Marcian. 1 reg.; D.48.8.8 Ulp. 33 ad ed.

25) D.48.19.38.5 Paul. 5 sent. Cf. D.48.8.3.2 Marcian. 14 inst.
여자 노예의 경우에는 치사하면 아퀼리우스법에 의한 손해배상책임을 졌으나, 직접 먹인 경우에는 살인이었고, 건네주어서 본인이 음용한 경우에는 사망의 원인을 제공한 것으로서 사실소권이 적용되었다(D.9.2.9.pr. Ulp. 18 ad ed.). 이것은 아퀼리우스법의 구성요건적 특징으로 인한 것이고 刺殺犯과 毒殺犯에 관한 코르넬리우스법에서는 양 행위유형에 차이가 없었다(D.48.8.15 Ulp. 8 ad leg. Iul. et Pap.).

26) D.40.7.3.16 Ulp. 27 ad Sab.

27) 우리 민법 제150조 제1항도 로마법을 수용하여 같은 취지이다.

28) EP. Tit. XXI. § 118 DE INSPICIENDO VENTRE CUSTODIENDOQUE PARTU (D.25.4.1.10).

29) D.21.1.14.1 Ulp. 1 ad ed. aedil. curul.

30) C.6.40.2.1 Iust. (a.531).

31) D.1.1.1.3 Ulp. 1 inst.

igitur princeps in causa necessaria subvenit.

이 칙답(D.25.4.1.pr.)으로부터 명명백백한 것은 자녀의 認知에 관한 원로원의결(D.25.3.1.pr. Ulp. 34 ad ed.)이 부인이 자신이 임신했음을 숨기거나, 또는 심지어 否認하는 경우에는 적용되지 않았다는 점이다. 그리고 이는 까닭 없이 그런 것이 아닌데, 왜냐하면 태아는 출산하기 전에는 부인의 몫이거나 모태의 몫이기 때문이다. ¶ 출산 후에는 물론 남편은 즉시 부인으로부터 자신의 권리로써 특시명령을 통하여 자식인 출산아를 자신에게 제시하거나 또는 자신이 데려가는 것을 허용하도록 요구할 수 있다. 그러므로 황제는 필요한 사안에서 비상심리절차로 도움을 준다.)

이곳에서 관심 있는 "partus ... antequam edatur, mulieris portio est vel viscerum." 어구 속의 portio는 종래 흔히 pars, 즉 '부분' 또는 '일부'로 이해되었다. 이 점은 각국의 대표적인 기존 번역들을 살펴보면 잘 드러난다.

英譯: (Scott) for the child is a part of the woman, or of her entrails, before it is born.
(Watson) since the child is part of the woman or her insides before it is born.

獨譯: (Behrends) Bevor nämlich das Kind geboren ist, ist es Teil der Mutter oder des Mutterleibes.
(Otto 등) denn die Leibesfrucht ist, ehe sie geboren wird, ein Theil der Mutter oder des Mutterleibes.

佛譯: (Gaurier) en effet, avant que l'enfant soit né, il est une partie de la femme ou de ses entrailles.

伊譯: (Foramiti) poiché il parto, prima di uscire alla luce, forme parte della donna o delle sue viscere.
(Schipani) infatti, il concepito, prima di essere dato alla luce, è parte della donna o delle sue viscere.

다만 Hulot의 불역(car l'enfant qui est dans le sein de sa mère forme avant sa naissance une portion des entrailles de la mère.)은 원문에 그대로 대응한달까 portion을 사용하였으나 프랑스어에서의 그 語域을 생각하면 그 의미한 바가 앞의 번역들과 달랐는지는 의심스럽다. 어쨌든 이러한 번역들은 후대에 특히 1970년대 이후 독일에서 "내 배는 나에게 속한다. 내 배는 내 것이다"(Mein Bauch gehört mir.)라는 극단적인 페미니스트 주장의 잘못된 근거로 쓰일 수도 있었을 번역이다.[32] 이곳에서 portio의 의미는 문맥을 고려하여 이해해야 한다. 이 개소에 선행한 D.25.4.1.pr.은 마르쿠스 아우렐리우스와 루키우스 베루스(161~169년 사이)가 시민담당 법정관 발레리우스 프리스키아누스에게 그의 문의에 대해 내린 칙답을 전하는데, 루틸리우스 세베루스라는 남자가 이혼한 前妻가 임신을 부인한다며 이의 검증을 신청한 사안에서, 이것은 亡夫 사건이 아닌 새로운 사건이라며, 남편이 신청을 고집하면 품위있는 부인의 집을 선정하여 신청인의 부인 도미티아가 그곳에서 검사받게 하는 것이 합리적이라며, 3인의 숙달되고 신빙할만한 산파를 골라서 검사를 시행하라고 명하였다. 산파의 전원이나 2인이 임신 사실을 천명하면 前妻 자신이 검사를 신청한 경우와 마찬가지로 그녀가 감독인을 받아들이도록 설득해야 하지만, 아이를 낳지 않으면 남편은 부인에게 인격침해(iniuris)를 저지른 것으로 반감을 조장하고 자신의 평판이 걸려있음을 알아야만 한다. 산파 전원이나 2인이 임신이 아니라고 천명하면 감독인을 둘 아무런 이유가 없다. 이어진 이 개소는 부인이 임신을 부정하는 경우에는 임신을 주장하는 경우에 적용되는 원로원의결은 논리상 당연히 배제되고, 임신과 관련한 모든 것은 이제는 부인의 몫이라는 의미이다. 이 대목에서 태아가 부인 몸의 일부

32) 그러나 portio = pars로 보더라도 과연 로마법이 페미니스트적 주장으로 나아갔을지는 의문이다. 왜냐하면 로마법에서는 인간(자유인)은 하물며 자신의 지체에 대한 소유자로 관념되지 않았기 때문이다(D.9.2.13.pr. Ulp. 18 ad ed.). 그렇다고 한다면 태아는 母의 일부가 아니라 母와 생각할 수 있는 한 가장 밀접한 관계 구조 속의 타자일 뿐이다.

라는 일견 '상식적'인 이야기는 다른 맥락에서도 얼마든지 할 수 있는 것인데도, 유독 이 대목에서만 이런 표현이 쓰였다는 것은 이 대목이 단순히 태아와 모체의 육신적 관계를 전체와 부분의 관계로 보고 있지 않음을 적시한다. 그리고 태아는 모체의 부분이기 때문에 母의 자유처분에 맡겨져 있다는 이야기는 더더욱 아니다. 이곳에서 논하는 것은 임신과 관련하여 모체와 태아에 관한 모든 돌봄의 책임은 母의 몫, 즉 母에게 귀속한다는 의미이다.

4. 지금까지 태아 및 낙태와 관련된 로마법의 법사료를 일별하였다. 결론은 로마인들은 태아의 보호를 위하여 매우 신경을 썼고, 아이를 家系 계승의 주역이자 나라의 주축으로 여겼으며, 그래서 특히 남편의 의사와 무관한 유부녀의 자기낙태를 남편의 자식에 대한 기대를 앗아가는 명백한 범법으로 여겨서 중한 형사처벌을 하였다. 다만 법사료만으로는 로마사회의 실상을 다 밝힐 수가 없다. 다양한 인간관계와 사회환경에서 발생하는 낙태에 대해서는 일부 비법률 문헌자료들도 전해지지만, 이것들 역시 매우 불충분하다. 여기서 연구자들은 로마사회의 전체적 규범 구조가 중요한 역할을 했을 것으로들 본다. 즉 로마는 사회기강을 유지하기 위하여 호구총감(censor)이 풍속을 다스렸고, 강력한 가부장제 하에서 가부장(pater familias) 역시 집안의 대소사를 자기 결정으로 마무리할 수가 있었다. 임신중절과 같은 중한 사태는 공공의 법이 개입하기 전에 이러한 기제들을 통하여 당시의 사회관념에 따라 적절한 선에서 해결되었을 것이다. 특히 아우구스투스의 유명한 혼인 관련 입법은 시민 인구의 증대를 위하여 여성들에게 출산을 장려하고 이를 확보하기 위한 다양한 대책들을 마련하였는데, 유스티니아누스 때까지도 유지된 것들이 있는 것으로 보아 낙태에 관한 로마인들의 일반적인 관념은 그리스도교에 의한 금지 이전에도 상당히 굳건한 문화적 기반을 유지했던 것으로 생각된다. 일찍이 키케로가 남긴 한 연설문(기원전 66년)에서 특히 언급된 뇌물 받고 낙태한 이유로 사형에 처해진 여인 밀레시아의 이야기는 어느 시대나 어느 곳에서나 일어날 수 있는 사건 자체보다도 키케로가 토로하고 있는 태아에 대한 관점이 더욱 의미가 있다.

Cicero, Pro A. Cluentio 11.32.

memoria teneo Milesiam quandam mulierem, cum essem in Asia, quod ab heredibus secundis accepta pecunia partum sibi ipsa medicamentis abegisset, rei capitalis esse damnatam; nec iniuria quae spem parentis, memoriam nominis, subsidium generis, heredem familiae, designatum rei publicae civem sustulisset.

(나는 기억한다. 내가 아시아 속주에 있었을 때 제2순위 상속인들로부터 돈을 받고 자기자신이 약을 써서 자신에게서 태아를 낙태시켰기에 극형 범죄로 유죄판결 받았던 밀레시아란 여인을. 그리고 이는 불법이 아닌데, 그녀는 아버지의 희망을, 이름의 기억을, 가문의 예비군을, 家의 상속인을, 나라의 시민 역군을 박탈했기 때문이다.)

V.

1. 끝으로 '낙태권'을 이야기할 수 있는가를 살펴본다. 현실적으로 어떤 상황에서는 낙태가 불가피할 수도 있다. 인간의 삶이란 하나의 잣대로만 재단하기에는 너무나도 복잡다단하기 때문이다. 그중 가장 현실적인 사유들에 대해서는 우리 모자보건법이 모아서 규정하고 있다. 이를 좇아서 일정한 경우 낙태를 허용한다고 하더라도 그것이 과연 '권리'인 것인가는 숙고를 요한다. 모든 권리는 타인을 해치지 않는다는 전제하에서 인정된다. 그러나 낙태는 기간주의를 취하여 일정기간 이전에만 허용하더라도 그 행위 자체가 태아를 죽이고 임산부의 건강에 영향을 미치며, 심지어는 생명을 해칠 수도 있다. 이것은 다른 자유권에서는 결코 찾아볼 수 없는 특이점이고 내재적 한계이다. 이에 대하여 김문현 회원은 전술한 발표문의 결론부에

서 다음과 같이 맺고 있다.

> "낙태문제는 임산부의 낙태권과 태아의 생명보호라는 헌법상의 기본가치가 충돌하는 문제로서 … 국민과 그 대표의 정치적 과정에 맡겨둘 사안은 아니라 볼 것이나, 낙태권과 태아의 생명보호의무의 실현이나 조정이라는 측면에서 엄격심사기준보다는 완화된 기준이 타당하다고 생각한다"[33]

이 결론의 결과적 타당성은 수긍할 수 있다. 그러나 일관되게 '낙태권'을, 그것도 마치 그것이 태아의 "생명권"과 대치되는 것처럼, 말하는 것은 용어의 개념확정적 기능을 생각할 때 대단히 못마땅하다. 특히 이것이 프랑스처럼 헌법적 권리로 선언되는 것은 더욱더 그러하다.

또 낙태가 태아를 해친다는 움직일 수 없는 사실[34]은 우리 현행법상으로도 문제를 일으킬 수 있다. 우리 민법 제1004조의2(상속권 상실 선고)에 의하면 피상속인은 상속인이 될 사람이 법정의 사유가 있는 경우 공정증서에 의한 유언(제1068조)으로 상속권 상실의 의사를 표시할 수 있고, 유언집행자가 가정법원에 해당인의 상속권 상실을 청구하여야 한다. 이로써 제한적인 법정사유가 있어야 하지만, 로마법에서 인정되던 상속배제(exheredatio)가 새삼 인정되고 있는 셈이다. 여기서 법정사유 중 하나는 피상속인에 대한 부양의무를 중대하게 위반한 경우이고, 다른 하나는 피상속인 또는 그 배우자나 피상속인의 직계혈족에게 중대한 범죄행위를 하거나 그밖에 심히 부당한 대우를 한 경우이다. 그러나 이 행태보다 다 심하여, 고의로 직계존속, 피상속인, 그 배우자 또는 상속의 선순위나 동순위에 있는 자를 살해하거나 살해하려 한 자는 제1004조(상속인의 결격사유) 제1호에 의해 상속인이 되지 못한다. 그렇다면 母가 상속순위에 관하여는 이미 출생한 것으로 보는 태아(제1000조[상속의 순위] 제3항)에게 낙태를 시도하거나 출생아가 이로 인해 심신상 손상을 보이거나, 아니면 낙태에 성공하였거나, 아니면 가령 낙태의 의도는 없으나 단식을 통하여 태아가 영양실조로 미숙아로 태어나게 한 경우라면 이것을 상속법의 적용에 있어서 어떻게 처리해야 할 것인가? 이런 母에게 자기낙태가 허용된다고 하여 상속상 아무런 제재가 가해지지 않는 것이 과연 타당할까? 아니 그 이전에 과연 민법과 합치하는가? 이들 민법규정 자체가 낙태는 분명히 피해자가 존재하는 행위임을 웅변으로 증명한다. 그리고 그 피해자는 비단 태아에 국한되지 않고 피상속인도 포함된다. 잉태 직후라고 해서 사정이 달라지지 않는다. 낙태는 결코 권리가 될 수 없다. 그것은 인간이 지상의 삶을 영위하는 중 불가피할 경우에 그저 용인되는 것일 뿐이다. 로마의 유명한 법률가 말을 빌리자면 그것은 허용되는 경우에도 결코 명예로운 것도, 도덕적인 것(honestum)도 아니다.[35] 임신을 위하여 씨받이를 맞이하는 대신에 인공수정을 하는 시대라면 임신의 예방을 위하여 중절이 아니라 피임을 하는 것이 오히려 honestum일 것이고 균형에도 맞는다. 불가피한 경우가 아닌 때 이를 형사처벌할 것인가는 또 다른 문제이고, 우리나라의 경우 일단은 헌법불합치 판정을 받았다.

2. 결론적으로 "낙태의 자유권", 줄여서 "낙태권"이란 사람들의 생각을 오도하는 용어이다. 낙태는 절대로 권리가 될 수 없다. 과연 우리는 태아의 "생명"을 존중하여 낙태 의료행위를 거부한 의사를 임신한 여성의 소위 '낙태권' '침해'를 이유로 처벌하거나 민사책임을 물어야 하는가?

33) 김문현, 학술원논문집(인문·사회과학편) 제65집 1호 (2026) 503-560, 556.
34) 김문현, 556: "낙태는 태아의 생명을 박탈하는 행위라는 점에서 임산부의 낙태권은 제한적 권리일 수 밖에 없다."
35) D.50.17.144.pr. Paul. 62 ad ed. Non omne quod licet honestum est.

회원기고

식물표본과 표본관

朴鍾郁 會員 (식물계통분류학)



식물표본의 역사적 기원

표본은 특정 시간 및 공간에 존재했던 종의 영구적인 역사적 기록으로, 종의 존재와 특징의 증거이며, 진화 역사와 유연관계의 표징이고, 환경 변화에 대한 종의 반응 기록이며, 유전물질을 포함하고 있는 잠재적 유전자원이다.

현대적 식물표본 제작 기법은 16세기 이탈리아의 피사 대학교(University of Pisa)의 식물학 교수였던 Luca Ghini(1490-1556)에 의해 최초로 고안된 것으로 알려져 있다. 그는 채집한 식물을 종이 사이에 끼워 압착, 건조하는 방식을 사용하였으며, 제작된 압착 건조표본들은 책의 형태로 묶여져 식물학 연구에 활용되었다. 이후 이러한 기법은 유럽에 널리 확산되었으며, 책의 형태로 묶여진 표본집은 '*Hortus siccus* (말린 정원)' 등으로 불리면서 책처럼 도서관에 소장, 관리되고 인용되었다.

이후 18세기에 이르러 스웨덴의 유명한 식물학자였던 Carolus Linnaeus(1707-1778)는 식물표본의 소장, 관리에 새로운 혁신적인 방식을 도입하였다. 그는 과거 방식과는 달리 식물표본을 낱장의 대지에 따로 부착하여 제작하고, 특수 제작한 캐비닛 서랍에 수평으로 집적하여 소장하는 방식을 사용하였다. 이러한 새로운 방식은 새로운 종의 표본이 추가될 때마다 언제든 분류체계에 따라 자유롭게 배치, 소장할 수 있어 급속히 유럽에 확산되었고, 이로부터 표본을 체계적으로 대량 관리하는 현대적 식물표본관의 기틀이 확립되게 되었다.

식물표본의 종류

식물표본의 가장 대표적인 유형은 채집한 식물 전체 또는 일부를 흡습지 사이에서 납작하게 압착, 건조한 후 대지에 고정하여 제작한 석엽표본(臘葉標本)이다. 석엽표본에는 학명, 일반명, 채집지, 서식지 정보, 채집일, 채집자 등을 상세히 기록한 라벨을 부착하며, 식물계통분류학 연구에 있어 가장 널리 사용되는 기본적인 재료이다.

한편 압착 건조할 경우 그 형태가 변형되거나 미세구조를 관찰하기 힘든 식물체/식물기관의 경우에는 이를 보존액(FAA 또는 70% 에탄올 용액 등)과 함께 밀폐용기에 넣어 액침표본으로 제작하기도 한다. 목재표본은 목본식물 줄기를 특정 각도로 절단하여 목재 조직의 횡단면 및 종단면의 특징을 관찰할 수 있게 제작한 표본으로, 식물해부학, 임학, 목재의 특성 및 식별 연구 등에 활용된다. 종자/열매표본은 식물체의 종자 또는 열매를 보존한 표본으로, 식물계통분류학 연구뿐만 아니라 유전자원 보존 측면에서 매우 중요하며, 특히 보전생물학 및 농업 분야에서 활용성이 높다. 한편, 종자표본은 분류학적 연구 목적으로 소장하는 경우 주로 상온에 보관하나, 종자표본의 발아력을 장기간 유지하기 위해서는 종자를 일정 수준으로 건조시킨 뒤, 밀폐된 용기에 담아 -20℃의 저온 환경에 소장한다. 최근 분자계통분류학이 급속히 발전함에 따라 DNA시료 표본의 중요성이 급격히 증대되고 있으며, DNA시료 표본은 채취한 식물 생체조직을 silica gel과 함께 밀봉된 형태로 급속 건조하여 보

관하거나, 생체조직 또는 생체조직으로부터 추출한 total genomic DNA를 -70℃이하의 초저온 냉동고 또는 액체질소에 보관, 관리한다. DNA시료 표본은 채취한 종의 분류학적 실체를 확인할 수 있도록 석엽표본으로 제작된 확증표본(voucher specimen)과 연계하여 소장되며, 분자계통학, 유전체학, 진화학 연구 등에 있어 핵심적인 재료로 활용된다.

식물표본의 중요성

1) 식물 명명법의 근간

모든 식물의 학명은 '조류, 균류, 식물 국제 명명규약'에 따라 붙여지며, 현재 적용되는 명명규약은 2024년 제20차 International Botanical Congress에서 채택된 Madrid Code이다. 모든 식물 분류군에 대한 이름(학명)의 적용은 명명기준형(nomenclatural type)에 의거하여 결정되며(원칙 II), 1958년 1월 1일 이후부터는 속이하 계급에서 새로운 분류군을 학계에 공표할 때에는 해당 분류군의 이름과 영구적으로 결부되는 요소인 명명기준형을 반드시 지정해야 한다(40조 1항). 또한 종 및 종이하 분류군(아종, 변종, 품종)의 명명기준형은 표본관에 소장되어 있는 표본 또는 도판이어야 하고(8조 1항), 2007년 1월 1일 이후부터는 일부 미세조류와 미세균류를 제외하고는 반드시 표본(기준표본)으로 지정하여야 한다(40조 6항). 이러한 기준표본들은 학명의 분류학적 실체를 정의하는 핵심 요소인 동시에 분류학적 또는 명명법상 혼란이 발생했을 때 정명 선정 및 이명 처리의 절대적인 기준이 되며, 따라서 식물 명명법체계를 유지하는 근간을 이룬다.

2) 계통분류학의 일차적 연구 재료

식물다양성 나아가서는 생물다양성을 구성하는 가장 기본적인 단위는 종(species)이다. 식물을 포함한 모든 생물종의 분류학적 실체 및 한계는 표본에 의해 정의되며, 표본은 종간 유연관계를 파악하는 계통분류학 및 관련 학문의 일차적인 연구 재료이다.

형태적 형질에 근간한 분류학적 종의 개념에서는 종을 '하나 또는 여러 개의 구조적 특성에 의해 다른 개체들의 집단과 구분되는 형태적으로 유사한 개체들의 집단'으로 정의한다. 그러나 대부분의 식물종들은 고착성으로, 서식환경에 따라 매우 복잡한 양상의 형태적 변이를 나타내기 때문에 종의 한계를 정확히 파악, 설정하기 위해서는 표본관에 집적되어 있는 다양한 지역 및 서식환경에서 채집된 동일 종의 표본들을 비교, 분석하는 것이 필수적으로 요구된다.

한편, 최근 DNA 분석 기술의 발달로 인하여 잘 보관된 압착표본으로부터 직접 DNA를 추출하여 분석하는 것이 가능해져, 분자계통학적 연구의 재료로서 널리 사용되고 있으며, 일차적인 유전자원으로서의 표본의 중요성도 점차 증대되고 있다. 또한 식물표본에 비파괴적 방법인 반사분광법(reflectance spectroscopy)을 적용하여 종 판별을 위한 정보를 추출하고, 기능적 특성(functional traits)을 추론하는 연구가 최근 이루어지고 있으며, 이러한 식물표본에서 얻어진 분광 데이터를 형태, 유전체 및 시공간 데이터와 통합하면 종의 한계, 분류학적 위치, 표현형의 진화, 군집 구조, 환경 변화에 대한 식물의 기능적 특성 변화 등에 관한 이해를 크게 증진시킬 수 있을 것으로 예측된다.

3) 식물다양성 규명 및 모니터링 연구의 근거 자료

특정 지역의 식물상 규명 및 식물다양성의 동태 파악은 일차적으로 현장 조사에서 얻어진 표본 자료에 근거한다. 표본은 특정 시간 및 공간에 존재했던 종

의 영구적인 역사적 증거로, 동정된 식물표본의 라벨에는 분류군의 학명, 일반명, 채집 장소 및 서식지 특징, 채집 날짜, 채집자, 기타 특이 사항 등의 정보가 포함되어 있어, 종의 분포 및 서식지 파악, 변화 상태 감시 등 생물/식물다양성과 생물자원의 체계적 관리를 위한 기초 자료를 제공한다. 예를 들면, 수세기에 걸쳐 특정 지역에서 채집된 동일 종의 표본들을 비교 분석하면, 지구온난화로 인한 기후변화가 식물의 개화 시기, 전엽 시기, 결실 시기 등 생물계절학적 주기에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 또한, 분류학적 연구 또는 특정 지역의 식물상 조사 연구에서 채집되어 인용된 표본은 확증표본(voucher specimen)으로서 종의 실체 및 존재를 판단하고 증명하는 중요한 학문적 증거가 된다.

우리나라의 식물표본 소장 현황

한 지역 나아가서는 지구 전체의 식물상 또는 식물다양성을 파악하는데 가장 일차적인 자료는 표본관 또는 자연사박물관 등에 소장되어 있는 식물표본이다. 전 세계의 주요 표본관 및 자연사박물관에 소장되어 있는 식물표본들은 수세기에 걸쳐 이루어진 야외탐사의 결과물이며, 따라서 종의 분포 및 다양성의 시간적, 공간적 변화에 대한 중요한 정보를 제공한다.

구미 선진국들은 오랜 전통의 표본관, 자연사박물관, 식물원 등을 주축으로 17, 8세기경부터 전 세계의 식물종을 지속적으로 확보, 축적하고 있으며, 현재에도 전문 연구팀을 중 · 남미, 아프리카 및 동남아시아 여러 나라 등 전 세계에 파견하여 다양한 지역의 식물다양성/식물상 조사 및 주요 유용 식물자원의 발굴, 그리고 주요 분류군에 대한 계통분류학적 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

영국 런던 자연사박물관(Natural History Museum; BM)의 경우에는 525만점의 식물표본뿐만 아니라, 전 세계로부터 수집된 곤충표본 약 3,400만점, 곤충을 제외한 기타 동물표본 약 2,900만점을 소장하고 있다. 큐 왕립식물원(Royal Botanic Gardens, Kew; K)의 경우 전 세계 식물표본 약 735만점을 소장하고 있으며(Index Herbariorum, 2026), 또한 Millennium Seed Bank에는 4만여 종의 야생식물에서 채집한 25억점의 종자표본이 -20℃의 지하 수장고에 보존되어 있다.

특히, 미국은 이미 19세기 초부터 자연사박물관과 식물원이 주축이 되어, 정부와 여러 비영리 재단으로부터 전폭적인 지원을 받아 자생식물뿐만 아니라 전 세계의 식물자원을 대량 발굴, 수집, 축적하고 있으며, 미국 국립자연사박물관(National Museum of Natural History)은 전 세계로부터 수집된 약 1억 2,600만점의 표본을 현재 소장하고 있고, 이중 식물표본은 약 510만점이다. 미국 뉴욕식물원(New York Botanical Garden; NY)의 경우 약 792만점, 하버드대학교 표본관(Harvard University Herbaria; HUH)의 경우 약 500만점, 미주리식물원 표본관(Missouri Botanical Garden; MO)은 현재 약 700만점의 관속식물 및 선태류 표본을 소장, 관리하고 있다.

한편, 우리나라의 식물상 및 식물자원에 대한 초기 연구는 19세기말 주로 서구 학자들에 의해 시작되었으며, 20세기 초에 들어서면서 일본인 학자들에 의해 집중적으로 수행되었다. 따라서 이 기간 중 외국인 학자들에 의해 한반도로부터 채집, 기재된 많은 신분류군의 기준표본들과 식물상 조사 보고서 및 연구 논문에 인용된 확증표본들은 대부분 반출되어 유럽 또는 일본의 주요 표본관에 소장되어 있다. 예를 들면, 한반도 식물상에 대한 최초의 종합적인 논의를 수행한 일본인 학자인 Nakai(1882-1952)가 평생에 걸쳐 기재한 1,475개의 한반도산 분류군(종, 변종, 품종)의 기준표본들과 Flora Koreana(Part I,

II; 1909, 1911)를 비롯한 많은 한반도 식물상 및 자생식물에 대한 논문의 확증표본들은 현재 모두 일본의 도쿄대학 식물표본관(TI)과 국립과학박물관 표본관(TNS)에 소장되어 있다. 또한, 러시아인 식물학자인 Komarov(1869-1945)가 19세기말-20세기 초에 압록강 및 두만강 지역에서 기재한 한반도산 분류군들의 기준표본은 모두 러시아의 V. L. Komarov Botanical Institute 표본관(LE)에 소장되어 있어, 한반도 식물상 및 자생식물의 실체 연구에 많은 지장을 초래하고 있다.

1945년 해방과 더불어 한국인 학자에 의한 한반도 식물상에 대한 본격적인 연구가 드디어 시작되었으나, 곧 이은 6.25 전쟁으로 인해 그나마 여러 한국 학자들의 노력에 의해 당시까지 채집되었던 대부분의 식물표본들이 이 기간 중에 소실되었다. 또한, 도서관과 표본관에 소장 중이던 귀중한 초기 분류학 문헌들도 모두 소실되었으며, 더욱이 남북 분단으로 인해 북한지역의 채집이 불가능해짐에 따라 학문적으로는 오히려 퇴보하는 경향마저 나타나게 되었다. 그러나 거의 최근까지도 생물다양성에 대한 인식 부족과 이에 따른 국가적 차원의 연구지원 부재 등으로 인해 현재의 표본관 규모도 극히 일부를 제외하고는 외국과 비교해 볼 때 매우 빈약한 수준에 머물고 있다. 현재 우리나라의 경우, 뉴욕식물원에서 운영하는 세계 식물표본관 총람인 Index Herbariorum에 총 57개 표본관이 등록되어 있으나, 이중 10만점 이상의 표본을 소장한 기관은 12개에 불과하다. 이러한 소장 규모는 선진국의 큰 식물표본관 소장 표본수의 1/10-1/5에도 미치지 못하는 수준이며, 소장 표본도 대부분 한반도 자생 분류군에 편중되어 있다. 특히 북한지역 식물표본은 서울대학교 생명과학부 식물표본관(SNU)에 소장되어 있는 분단 이전에 채집된 25,000점이 유일하다.

이러한 문제점을 인식한 환경부(현 기후에너지환경부)는 국가 생물다양성의 규명과 생물자원의 발굴, 확보, 소장 및 연구에 중추적 역할을 담당할 국립생물자원관을 2007년 설립하였다. 국립생물자원관은 그간 자생생물 조사·발굴 사업, 전략지역 및 특정분류군 표본 확보 사업, 국가 생물종 확증표본 시스템 구축 사업 등을 비롯한 다양한 연구 사업을 집중적으로 추진하여 총 3,559,105점의 생물표본 및 유전자(DNA)시료를 확보하였고, 이 중 식물표본은 약 88만점에 달한다. 산림청 국립수목원도 한국 자생생물종의 분포학적 연구, 국내·외 유용식물자원 탐사 및 자원 확보 등의 연구 사업을 추진하여 식물표본을 확보하고 있으며, 현재 약 61만점의 식물표본을 소장하고 있다. 또한, 2015년 해양생물자원관과 국립낙동강생물자원관, 2021년 국립호남권생물자원관이 잇달아 개관하였고, 이러한 인프라 구축의 노력으로 우리나라의 식물/생물표본 소장 규모는 최근 꾸준히 증가하고 있으나, 아직도 선진국에 비해 질적, 양적으로 큰 격차가 존재한다.

식물표본 데이터베이스의 구축과 표본 기반 연구의 패러다임 전환

지구 전체의 식물다양성 나아가서는 생물다양성을 구명하고, 그 변화를 모니터링하기 위해서는 지역 또는 국가 생물상/식물상 정보의 유기적 연계 및 체계적인 집적이 필수적이다. 이에 전 세계 주요 표본관들은 소장 표본의 분류 정보 및 화상자료를 디지털화하여 웹기반 데이터베이스를 구축하고, 필요시 인터넷을 통해 누구나 다양성/분류 정보의 검색, 획득, 가공이 가능한 소장 표본 데이터베이스 시스템을 구축하고 있다.

식물표본의 디지털화는 일반적으로 1) 표본 라벨 정보를 데이터베이스로 전사(transcribing)하는 작업, 2) 라벨 정보를 표준화하고 지리 좌표를 부여하는 지리 참조(georeferencing), 3) 각 표본의 고해상

도 디지털 이미지를 생성하는 작업을 포함한다. 이러한 데이터는 궁극적으로 온라인 데이터베이스와 통합 플랫폼을 통해 공유되며, 이중 가장 대표적인 것이 GBIF(Global Biodiversity Information Facility; http://www.gbif.org)와 iDigBio(Integrated DIGitized BIOcollections; https://portal.idigbio.org)이다. 특히 GBIF는 1999년 OECD Mega Science Forum의 인준에 따라, 지구상에 존재하는 생물체에 대한 모든 정보를 인터넷을 통해 자유롭게 공유, 이용하는 것을 목적으로 설립된 국제 프로젝트로서, 2026년 현재 44개 투표회원국을 포함하여 총 111개국/기관이 참여하고 있으며, 우리나라는 2001년부터 투표회원국으로 참여하고 있다. 현재 GBIF에는 1억3천만점 이상의 식물표본 정보가 집적되어 있으며, 이중 지리 참조가 되어 있는 표본이 6천만점 이상, 디지털 이미지가 확보되어 있는 표본이 6천만점 이상이다.

이러한 식물표본 자료의 디지털화와 온라인 공유를 통해 최근 표본 기반 연구의 영역이 급속히 확장되고 있으며, 식물다양성 변화 연구의 패러다임이 데이터 중심으로 전환되고 있다. 특히 집적된 식물표본 데이터베이스로부터 수세기에 걸쳐 전 세계에서 채집된 표본들의 개화 시기, 개엽 시기 등의 생물계절학적 데이터와 줄기의 길이, 잎의 크기/면적, 꽃잎의 크기 등의 정량적 형질 데이터를 대량 추출하고 이를 지리 참조된 채집지 정보 및 기후 정보와 결합 분석하여, 지구 환경변화가 식물체의 생물계절학적 특징 및 형질 특성에 미치는 시공간적 영향을 다양한 스케일에서 구명하고자 하는 연구가 최근 활발히 수행되고 있다. 또한 표본의 좌표 데이터와 지리정보시스템(GIS)을 결합하여, 특정 종의 분포 변화 모델을 예측하고 식물/생물다양성 핫스팟을 탐색하는 생물지리학적, 보전생물학적 연구도 최근 활성화되고 있다.

표본 기반 연구의 경우, 식물의 형태적 특징을 전통적인 방식으로 직접 관찰, 측정하려면 많은 시간과 노력이 소요되어 대규모 분석이 어려웠으나, 이러한 한계를 극복하기 위해 최근 디지털화된 식물표본 정보에 인공지능(AI)을 적용하여 분석하는 연구가 시도되고 있다. 예를 들면 LeafMachine2와 같은 AI 도구는 디지털 표본 이미지로부터 잎뿐만 아니라 엽병, 열매, 꽃, 줄기, 뿌리 등 식물의 다양한 기관을 식별, 분리, 측정하고, 아카이브 및 텍스트 데이터를 인식하여 추출하는 것이 가능하다. 또한 최근 연구에 의하면 거대언어모델(LLM)을 적용할 경우 인간이 직접 수작업으로 수행하는 것보다 훨씬 짧은 시간과 적은 비용으로 대규모 표본의 지리 참조를 처리할 수 있으며, 거의 인간수준의 정확도를 제공하는 것으로 밝혀졌다.

식물표본 디지털 이미지 데이터로부터 종을 정확하고 신속하게 동정할 수 있는 AI 모델을 개발하기 위한 연구도 진행되고 있다. 예를 들면 중국의 경우, 중국내 표본관들에 소장된 관속식물 309과, 3,144속, 21,589종에 속하는 650만점 이상의 표본을 사용하여 중국 관속식물을 동정하는 AI 모델을 최근 개발한 바 있으며, 개발된 AI 모델은 21,589종 전체를 성공적으로 동정하였고, 분류 전문가가 동정한 244,749점의 표본 이미지를 사용하여 그 정확도를 테스트한 결과, 종 수준에서 Top-1 정확도는 67.3%, Top-5 정확도는 88.2%를 기록하였다. 한편 FireNetSEz는 선태식물인 물이끼아속(*Sphagnum* subgen. *Sphagnum*)에 속하는 분류군들을 대상으로 현미경을 사용한 해부학적 관찰 없이 표본 이미지를 사용하여 종을 동정하기 위해 최근 개발된 딥러닝 기반 AI 모델로서, 표본 이미지에만 기반하여 DNA 및 해부 형태학적으로 검증된 물이끼아속 종들을 성공적으로 분류하였고, 일반 식물학자 및 물이끼 전문가보다 더 정확한 예측 결과를 도출하였다. 이러한 기술 발전은 앞으로 주요 표본관에 적체되어 있는 수많은 미동정 표본을 신속하게 정리할 수 있게 하여 분류학의 연구 효율성을 극대화하고, 전반적으로 식물표본 기반연구의 공간적, 시간적 스케일 그리고 대상 분류군을 크게 확장하는데 기

여할 것으로 예견된다.

이와 같이 전 세계의 표본관 및 식물원에 소장되어 있는 수세기에 걸쳐 수집된 식물표본은 단지 과거의 유산이 아니라, 미래의 지구 생물다양성 연구를 견인할 식물다양성 빅데이터의 핵심 구성 요소로 자리잡고 있다. 최근 들어 전 세계 주요 식물표본관/식물원에 소장되어 있는 표본들의 분류 정보 및 고해상도 디지털 이미지 자료의 웹기반 데이터베이스가 구미 선진국을 중심으로 빠르게 구축되고 있으며, 이를 통해 표본 기반 연구의 영역이 급속히 확장되고 있다. 또한 AI 기술의 적용은 식물표본 기반 연구의 효율성을 극대화하고, 나아가 다양성 연구의 스케일을 범지구적 차원으로 확장하는 것을 가능케 하고 있다.

우리나라의 경우 기후에너지환경부(생물다양성 관리기관 통합 관리체계 구축 사업; 2014-), 산림청 국립수목원(식물·곤충표본 DB 구축사업; 1998-2012) 등의 지원 하에 일부 대학표본관, 식물원 등에 소장되어 있는 표본 정보(학명, 일반명, 채집정보)의 데이터베이스 구축 사업이 진행되고 있다. 이와 병행하여 기관별로 자체 소장표본의 데이터베이스를 구축하고 있으며, 국립생물자원관의 경우 16,973종 1,047,688점의 소장 표본 정보와 4,687종 42,553점의 표준화된 고해상도 디지털 이미지, 국립수목원의 경우 약 70만 점의 표본 정보와 일부 표본의 이미지를 포함하는 데이터베이스를 현재까지 구축, 운영하고 있으나, 미국, 유럽 국가들과 비교해 볼 때 아직 초기 단계에 머물러 있다.

신임회원 업적소개

자연 제1분과 노태원 회원(물리학)



- 산화물 박막에서 새로운 양자물성을 찾아온 여정 -

들어가는 말

도자기, 돌멩이, 쇠 표면에 붉게 슨 녹의 공통점이 무엇일까? 바로 지구 표면 도처에서 가장 흔하게 마주치는 '산화물(oxide)'이라는 점이다. 우리는 보통 산화물이라 하면 전기가 거의 통하지 않는 단단한 암석이나 도자기 같은 절연체(즉, 부도체)를 떠올린다. 실제로 규소나 알루미늄의 산화물은 지각을 구성하는 모래나 화강암의 주성분으로, 화학적으로 매우 안정하며 전형적인 절연체의 성질을 보인다.

그러나 산소와 결합하는 금속이 주기율표 중앙에 위치한 '전이금속'이나 '희토류' 원소가 되면 이야기는 완전히 달라진다. 이들 물질은 원자의 배열 방식이나 미세한 결함, 혹은 원자 몇 개 층에 불과한 박막의 두께를 조금만 바꾸어 주어도 도체, 부도체는 물론이고 강력한 자석, 저항이 완전히 사라지는 초전도체, 스스로 빛을 내는 발광 소재 등 전혀 다른 성질을 갖는 물질들로 탈바꿈하는 놀라운 '변신의 귀재'이다.

지난 반세기 동안 인류가 경험하고 있는 디지털 혁명과 정보 문명을 이끌어온 주역은 실리콘(즉, 규소) 기반의 반도체였다. 그러나 반도체 소자의 크기가 작아짐에 따라 실리콘 반도체는 구조적·물리적 한계점에 직면해 있다. 기존 실리콘 소자는 전자가 가진 다양한 양자역학적 성질 중 오직 전하(전기적 성질을 결정하는 기본적인 속성) 하나만을 이용하여 0과 1이라는 디지털 정보를 처리하고 저장한다. 트랜지스터가 원자 수준에 가까울 정도로 극도로 미세화되면서 전하가 새어 나가는 누설 전류와 심각한 발열, 동작 속도의 정체라는 거대한 물리적 장벽에 부딪히게 된 것이다.

이에 전 세계 물리학계와 재료공학계는 실리콘의 한계를 뛰어넘을 새로운 대안 물질을 절실히 모색하기 시작했다. 특히 1980년대 후반 구리산화물 고온초전도체의 발견을 계기로 전이금속 산화물의 다양하고 새로운 물성에 전 세계 학계의 관심이 크게 높아졌다. 변신의 귀재인 전이금속 산화물을 활용하여 전자의 전하뿐만 아니라 스핀(자성을 결정하는 전자의 양자역학적 성질), 그리고 원자 격자의 역학적 변형까지 동시에 통합 제어하려는 새로운 학문 분야가 태동하였으니, 이것이 바로 '산화물 전자공학(oxide electronics)'이다.

산화물 전자공학은 전원을 꺼도 정보를 보존하는 초고속 비휘발성 메모리, 인간의 뇌신경망처럼 극초저전력으로 복잡한 연산을 수행하는 뉴로모픽 소자 등을 구현하는 것을 목표로 한다. 요컨대 흔한 돌멩이 같던 물질에 미시 세계의 양자물리학적 마법을 불어넣어 실리콘 이후(post-silicon) 시대를 이끌 새로운 전자 문명을 빚어내고자 하는 현대판 '물리 연금술'이라 할 수 있다.

필자는 미국 오하이오 주립대학교에서 '복합재료의 광학적 성질'이라는 학위논문으로 박사학위를 받고 코넬대학교에서 박사후연구원을 마친 뒤, 1989년 서울대학교 물리학과에 부임하였다. 당시 국내의 실험물리 연구 환경과 연구비 지원은 선진국에 비하면 턱없이 열악한 수준이었다. 미국 유학 시절 주력했던 고가의 분광학 장비를 도입하여 외국의 유수 연구그룹들과 정면으로 경쟁하기는 현실적으로 거의 불가능했다. 열악한 자원의 한계를 한탄하기보다, '최소한의 자원으로 우리만의 독창적인 물리 현상을 탐구할 수 있는 새로운 길'을 개척해야만 했다.

그 돌파구로 주목한 것이 당시 전 세계적으로도 막 태동하던 '펄스레이저증착법(pulsed laser deposition, PLD)'이라는 박막 증착법이었다. 만일 고출력 레이저에 접근할 수만 있다면, 비교적 단순하고 저렴한 진공 챔버 안에서도 레이저 펄스로 표적 물질을 순간적으로 기화시켜, 양질의 금속산화물 박막을 합성해낼 수 있겠다는 판단이 섰다. 이에 필자는 대학원생들과 함께 청계천 공구상가를 매일같이 오가며 진공 챔버를 직접 설계·제작하고, 밸브와 전기 배선을 손수 조립하여 연구실의 첫 PLD 장비를 자체 구축하였다.

지금의 시각에서 보자면 '과연 이런 장비로 제대로 된 연구를 할 수 있을까?'라는 생각이 들 정도의 변변찮은 장비를 갖고 시작한 이 산화물 박막 연구는 우리나라 금속산화물 박막 연구의 초석을 놓는 계기가 되었다. 이후 우리나라 기초과학에 투자가 늘어감에 따라 필자의 연구진은 원자 수준의 정밀한 신물질 합성기술과 첨단 분광학 장비를 갖추게 되었다. 이러한 장비들을 바탕으로 필자는 지난 36년 동안 산화물 내부에서 전자들이 빚어내는 기묘하고 복잡한 양자 현상을 탐구해 왔다. 그 노력의 결과, 450편이 넘는 국제학술지 논문을 발표하였다. 이 글에서는 가장 기억에 남는 네 가지 주요 발견을 중심으로 필자의 연구 결과와 활동을 기술하려고 한다.

1. 강유전체 피로 메커니즘 규명과 차세대 비휘발성 메모리 소재 개발

1990년대 후반, 전원이 차단되어도 데이터가 지워지지 않으며 처리 속도가 획기적으로 빠른 차세대 메모리로 세계의 이목을 집중시킨 소자기술은 바로 '강유전체 메모리(ferroelectric RAM: FRAM)'였다. 강유전체(ferroelectrics)란 외부 전기장을 걸어주지 않아도 물질 내부의 양전하와 음전하가 스스로 분리되어 전기적 분극(electrical polarization) 상태를 유지하는 물질을 말한다. 이 분극의 방향을 위(0)와 아래(1)로 스위칭시켜 디지털 신호를 안전하게 기록하게 되면 FRAM을 구현할 수 있다.

그러나 FRAM 상용화에는 큰 난제가 있었다. 메모리 셀에 전압을 가해 0과 1을 반복적으로 쓰다 보면, 어느 순간 분극 특성이 급격히 나빠져 정보를 제대로 기록하지 못하게 되는 '분극 피로(polarization fatigue)' 현상이 발생한다. 이 난제를 해결하기 위해 세계 유수의 반도체 기업과 학계가 막대한 시간과 노력을 쏟아부었으나, 피로 현상이 일어나는 근원적인 원인은 명확히 밝혀지지 않고 있었다.

필자의 연구팀은 펄스레이저증착법으로 합성한 강유전체 산화물 $Bi_4Ti_3O_{12}$ 박막의 전기 전도 특성이 원자 결함에 따라 어떻게 변화하는지를 추적하였다. 산화물에 강한 전기장이 가해지면, 산소 원자들이 이동하여 산소 빈자리(oxygen vacancy)가 형성된다. FRAM에 반복적으로 전압을 인가하면 산소 빈자리가 이동·집적되어 분극의 스위칭을 방해하고 고착시킨다는 사실을 밝혔다.

이러한 물리적 메커니즘의 규명에 착안하여, 필자의 연구팀은 결함의 생성을 근본적으로 차단하는 신물질 설계 전략을 도출하였다. $Bi_4Ti_3O_{12}$에서 산소 결함이 주로 발생하는 불안정한 비스무트(Bi) 원자 자

리에 화학적으로 안정한 란타넘(La) 원자를 치환한 $(Bi,La)_4Ti_3O_{12}$(BLT) 박막을 합성하는 데 성공하였다. 이렇게 탄생한 BLT 신소재는 수백억 번 이상의 가혹한 반복 스위칭 작동에도 불구하고 분극 특성이 전혀 저하되지 않는 탁월한 피로 저항 특성을 갖고 있음이 입증되었다. 이 연구 성과는 산화물 메모리 및 전자소자 연구 분야에 '조성 제어 및 결함 엔지니어링'의 중요성을 확립한 중요한 이정표가 되었다. (*Nature* 1999)

나아가 연구팀은 강유전체 박막의 두께가 나노미터 수준으로 얇아질 때 자발 분극이 소멸하지 않고 유지될 수 있는 물리적 한계 두께를 실험적으로 규명하였다. 이 과정에서 강유전체 분극 반전에 필요한 에너지에 관한 오랜 난제였던 '란다우어 패러독스(Landauer paradox)'를 강유전 도메인의 동역학적 관점에서 설명하고, 나노 강유전체의 스위칭 현상을 이해하는 새로운 물리적 토대를 제시하였다. (*Phys*. *Rev*. *Lett*. 2005, 2007)

2. 고체 박막에서의 '초거대 플렉소전기효과' 발견과 물성 제어

현대 사회에서 초정밀 모터, 초음파 트랜스듀서, 음향 센서, 에너지 하베스팅 소자 등 첨단 소자에 널리 사용되는 압전체는 기계적 변형과 전기적 분극이 상호 변환되는 특성을 지닌 물질이다. 특정한 결정 구조(즉, 내부 원자 격자의 중심 대칭성이 결여된 결정 구조)에 균일한 응력(uniform stress)이 가해지면 물질 내의 양이온과 음이온의 상대적인 위치 변화로 분극이 유도되어 전기적인 특성을 지니게 된다. 그러나 중심 대칭성이 있는 대부분의 물질들에서는 균일한 응력을 가해도 분극이 유도되지 않기에 압전효과가 나타나지 않는다.

중심 대칭성의 유무에 관계없이 물체의 위치에 따라 서로 다른 크기의 변형을 가하면 내부에 '변형률 기울기(strain gradient)'가 생긴다. 이에 따라 내부 원자 격자의 대칭성이 깨져 전기적 분극이 유도된다. 이를 '플렉소전기효과(flexoelectricity)'라고 부른다. 이 현상은 이미 1950년대에 이론적으로 제안되었으나, 일반적인 덩어리(bulk) 고체에서는 변형의 정도가 위치에 따라 달라지는 변형률 기울기가 너무 작아 유도된 전기의 양이 미미했고, 따라서 실제 측정 및 응용이 거의 불가능한 물리적 호기심 정도로 치부되어 왔다.

이러한 고정관념을 뒤집어 필자의 연구팀은 나노 박막의 계면에 주목하였다. 즉 기판 위에 얇은 산화물 박막을 성장시킬 때, 초기에는 기판과 박막 물질 간의 원자 간격 차이(격자 불일치)가 생길 수밖에 없다. 박막의 두께가 두꺼워지면서 수십 나노미터 영역에 이르면, 격자 불일치가 완화되고 일반적인 덩어리 물질에서보다 수백만 배 큰 변형률 기울기가 형성된다는 사실을 발견하였다. 따라서 나노 산화물 박막을 이용하면, 덩어리 물질보다 매우 큰 '초거대 플렉소전기효과'가 발현하게 됨을 세계 최초로 실험적으로 입증하였다. (*Phys*. *Rev*. *Lett*. 2011)

이 발견은 산화물 나노박막은 물론 다양한 물질의 나노박막에서 기계적 변형과 전기적 특성을 상호 변환할 수 있는 새로운 물리적 원리를 제공한다. 연구팀은 원자힘 현미경(atomic force microscope: AFM)의 미세 탐침으로 박막 표면을 누를 때 국소적인 플렉소전기장이 형성되며, 이를 통해 오직 탐침의 기계적 압력만으로 강유전체 분극의 스위칭을 선택 제어할 수 있음을 입증하였다. 또한 이러한 현상을 활용하여 산화물 박막의 다양한 물성을 조정할 수 있는 방법들도 고안하였다. (*Adv*. *Mater*. 2013, 2014; *Nature Comm*. 2017, 2019; *Nature Nanotech*. 2018, 2025)

최근까지 플렉소전기효과에 대한 연구는 절연체를 중심으로 이루어졌다. 도체 내부에서는 자유 전자가

전하의 효과를 차폐하기 때문에 강유전체와 같은 전기 분극이 존재하기 어렵다는 것이 오랜 통념이었다. 필자의 연구팀은 2024년 강자성 도체 $SrRuO_3$ 박막 내부에서 플렉소전기장이 유도될 수 있음을 밝히고, 이를 이용하여 전자의 수송과 자기적 성질을 정밀하게 제어할 수 있음을 세계 최초로 보고하였다. 기존의 통념을 깨뜨린 이 연구는 앞으로 새로운 연구 방향을 열 것으로 기대된다. (*Nature Phys*. 2024)

3. 상대론적 J_{eff}=1/2 모트 절연체 상태 발견 및 5*d* 산화물 연구 분야 개척

현대 고체물리학의 기본 이론에 따르면, 주기율표 아래쪽에 위치한 무거운 5*d* 전이금속 원소들은 최외각 5*d* 전자가 존재하는 전자 궤도(오비탈)가 바깥쪽으로 넓게 퍼져 있다. 따라서 전자들끼리 서로 밀어내는 쿨롱 반발력이 상대적으로 약해져 전자 간 상관관계가 줄어들게 되며 에너지 밴드이론(band theory)으로 기술할 수 있게 된다. 최외각 전자가 차지하는 에너지 밴드가 부분적으로 채워지면, 해당 5*d* 전이금속 산화물들은 전기가 잘 통하는 도체여야 한다. 그러나 실제 자연계에 존재하는 상당수의 5*d* 산화물들은 이론적 예측과 반대로 절연체의 성질을 갖고 있다.

필자의 연구팀은 정밀한 광학 분광학 측정과 이론적 계산을 결합하여 5*d* 이리듐 산화물 Sr_2IrO_4의 미시적 전자구조를 심층적으로 추적하였다. 무거운 이리듐 원자에서는 상대론적 효과가 커지면서 전자의 스핀과 궤도 운동이 강하게 결합하는 '스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling: SOC)'이 중요한 역할을 한다. 즉 SOC와 전자 간 상관관계가 함께 작용하면, 전자 상태를 새롭게 재구성하여 절연체의 기저상태를 만들어낸다는 사실을 세계 최초로 규명하였다. 이것이 바로 '상대론적 J_{eff}=1/2 모트 절연체(relativistic Mott insulator)'의 발견이다. (*Phys*. *Rev*. *Lett*. 2008) 이 발견은 전 세계 물리학계의 주목을 받았으며, 5*d* 산화물이 강상관계 양자물질 연구의 주요 대상으로 떠오르는 계기가 되었다. 또한 SOC의 중요성은 이후 키타에프(Kitaev) 양자 스핀 액체와 위상 양자물질 등 새로운 양자 상태를 탐색하는 중요한 출발점이 되었다. (*Phys*. *Rev*. B 2012; *Nature Mater*. 2021; *Adv*. *Mater*. 2021, 2024)

4. 산화물 인공 계면에서 전기장으로 구동 가능한 '자기 스커미온' 발견

자석 내부의 미세한 스핀들이 평면상에서 소용돌이치며 둥글게 뭉쳐진 나노미터 크기의 위상학적 스핀 구조체를 '자기 스커미온(magnetic skyrmion)'이라고 부른다. 스커미온은 마치 견고하게 묶인 매듭과 같아서 외부의 열적 요동이나 물질 내부의 불순물 충격에도 쉽게 형태가 깨지지 않는 탁월한 안정성을 자랑한다. 이를 0과 1의 정보 단위로 활용하면 기존 자기 메모리보다 훨씬 높은 밀도의 차세대 스핀트로닉스 메모리를 만들 수 있다. 그러나 많은 기존 연구에서는 스커미온의 생성에 자기장이 필요했고, 스커미온의 이동에는 강한 전류를 흘려주어야 해서 실용화의 거대한 걸림돌이 되어왔다.

필자의 연구팀은 강유전체 산화물 $BaTiO_3$과 강자성 금속산화물 $SrRuO_3$을 원자 한 층 단위로 정교하게 접합한 계면들을 갖는 이종접합 구조물을 제작하였다. 두 물질이 만나는 극도로 얇은 계면에서는 중심 대칭성이 깨지며 특수한 양자역학적 상호작용인 '드잘로신스키-모리야 상호작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction: DMI)'이 강하게 발현되고, $SrRuO_3$ 내에 자기 스커미온을 만들어 냈다. 또한 강유전체 층의 전기적 분극을 미세한 전압으로 반전시킴으로써, 순수한 전기장의 인가만으로 상온에서 자기 스커미온을 생성·소멸시키고 스핀 소용돌이의 회전 방향을 제

어하는 데 세계 최초로 성공하였다. 이는 에너지 소모를 획기적으로 줄일 수 있는 전압 제어형 초저전력 나노 스핀 메모리 소자의 가능성을 제시하고 있다. (*Nature Mater*. 2018)

5. 후학 양성과 기초과학 공동체를 위한 활동

과학자의 진정한 업적은 단순히 좋은 논문을 남기는 것에 머물지 않고, 학문의 씨앗을 뿌려 울창한 숲을 이룰 후학들을 길러내는 데 있다. 필자는 34년간 서울대학교 강단과 연구실을 지키며 석사 35명, 박사 55명을 배출하였고 30여 명의 박사후연구원을 지도하였다. 제자들 대부분이 국내외 유수 대학의 교수, 주요 연구소의 연구원, 그리고 첨단산업계의 연구자와 리더로 임용되어 국제학계 및 첨단 산업체에서 중추적인 역할을 하고 있다. 이러한 제자들이 훌륭한 성과를 내는 모습을 지켜보는 것은 필자의 학문 인생에서 가장 큰 보람이자 긍지이다.

필자는 학문 생태계를 가꾸는 일에도 지속적으로 헌신해 왔다. 한국물리학회 회장, 한국유전체물성학회 초대회장, 그리고 세계 물리학계를 대표하는 국제기구인 국제물리연맹(International Union of Pure and Applied Physics: IUPAP) 부회장을 역임하며 한국 물리학계의 국제적 위상을 높이는 데 기여하였다. 특히 2012년에는 기초과학연구원(IBS) 강상관계 물질연구단 단장으로 선정되어, 10여 년간 연구단을 이끌며 국내 연구진과 해외 석학들이 모여 연구할 수 있는 세계적 수준의 연구 허브를 구축하였다. 또한 연구단이 구축한 고가의 첨단 분광학 및 박막 성장 장비들을 국내 연구자들에게 개방함으로써, 우리나라 응집물질물리학 분야의 연구 인프라와 역량을 높이는 데 힘을 쏟았다.

이러한 연구와 헌신을 인정받아, 필자는 2004년 한국과학상, 2009년 경암학술상, 2011년 대한민국 최고과학기술인상, 2019년 성봉물리학상, 2022년 과학기술훈장 도약장을 수상하였다. 또한 2026년에는 대한민국학술원 회원으로 선출되는 영예를 안게 되었다. 현재는 이론 기초과학의 산실인 고등과학원(Korea Institute for Advanced Study: KIAS) 원장으로서, 고등과학원이 세계를 선도하는 기관으로 한 단계 더 도약하는 데 힘을 보태고 있다.

나가는 말

새로운 소재와 소자를 탐구하는 과정에서도 필자의 연구는 언제나 “이 미지의 현상을 지배하는 가장 근본적인 물리 법칙은 무엇인가?”라는 기초과학적 질문에서 출발하였다. 눈앞의 현상을 기술적으로 활용하는 것에 그치지 않고, 그 배후의 자연 원리를 이해할 때 더 큰 혁신으로 이어질 수 있다고 믿는다. 당장의 실용성을 넘어 원자 수준의 미시세계가 품은 원리를 깊이 파고들 때, 우리는 미래 세상을 바꾸는 혁신적 발견을 이룰 수 있다.

이제 대한민국학술원의 일원으로서, 다양한 학문 분야의 석학들과 깊이 소통하고 지혜를 나누기를 희망한다. 아울러 우리의 뒤를 이을 젊은 후속 세대들이 실패를 두려워하지 않고 자연의 새로운 신비에 과감한 질문을 던질 수 있는 비옥한 학문적 토양을 가꾸는 데 이바지하고 싶다. 흔한 돌멩이 속에서 무한한 양자세계를 발견해 온 지난 여정처럼, 우리 학문 공동체가 더 깊은 진리의 빛을 발할 수 있도록 힘을 보태고자 하는 바람이다.

신임회원 업적소개

자연 제2분과 이강근 회원(수리지질학/지하수학)



이번에 대한민국학술원 자연 제2분과 회원으로 선출되었다는 소식을 듣고, 기쁨에 앞서 먼저 제가 이 자리에 있기까지 많은 도움을 주신 분들의 얼굴들이 떠올랐습니다. 스승님과 제자들께 우선 마음 깊이 감사드립니다. 돌이켜보면 제가 이루었다고 내세울 만한 학문적 성과가 있다면, 작은 성과들이라도 온전히 저 혼자의 힘으로 얻어낸 것이 아니라 실험실에서, 또 험난한 야외 연구 현장 실험에서 함께해 준 제자들이 있었기에 가능한 것이었습니다. 그래서 이 지면을 저의 연구를 소개하고 자랑하는 자리로 삼기보다, 우선 지난 30여 년의 여정에서 저를 이끌고 함께 하고 또 지탱해 주신 분들께 감사의 말씀을 먼저 전하는 자리로 삼고자 합니다.

지하수를 주로 다루는 수리지질학을 공부하면서, 저는 처음에는 교과서에 실린 수리학과 수문학의 지배방정식과 이론을 충실히 익힌 후에 적용하는 것이 이 분야 학문 연구의 본질이라고 여겼습니다. Darcy의 법칙과 지하수 유동방정식, 경계조건과 초기조건을 세우고 풀어내는 일련의 과정이 자연을 이해하는 가장 확실한 길이라고 믿었던 시절이었습니다. 그러나 시간이 지나고 현장에서 직접 마주한 자연의 모습은 그보다 훨씬 복잡하고 예측하기 어려운 것이었습니다. 암석이 갈라진 균열 하나, 대수층이라 표현되는 지하수가 흐르는 지층 하나하나마다 교과서의 방정식만으로는 다 설명되지 않는 미묘한 결이 있거나 완전히 반대 현상이 나타나기도 했습니다. 그 앞에서 저는 자연의 위대함을 새삼 실감하게 되었습니다. 그러면서 한편으로는 자연현상을 몇 개의 단순한 원리식만으로 진단하기보다는, 다소 주관적이고 포괄적으로 보일지라도 더 큰 규모에서 통합적으로 이해하려는 태도가 필요하다는 것을 깨닫게 되었습니다.

그 무렵부터 저는 오래전 성현들이 물을 관찰하고 사유했던 방식에 자연스레 눈길이 가기 시작했습니다. 레오나르도 다빈치는 소용돌이치는 물의 흐름을 세밀하게 관찰하고 스케치하며 유체의 원리를 직관으로 포착하려 했고, 노자는 상선약수(上善若水)라 하여 물이 만물을 이롭게 하면서도 다투지 않고 낮은 곳으로 임하는 데서 으뜸가는 선(善)을 보았습니다. 공자 또한 쉼 없이 흘러가는 물을 보며 근원이 있는 물과 허장성세의 물의 차이를 보며 흐르는 시간과 세상의 이치를 읽어냈습니다. 방정식 하나로 환원되지 않는 이러한 성현들의 관찰과 직관을 제 연구와 나란히 두고 음미해보면, 수리지질학이라는 학문 역시 결국 자연이라는 거대한 흐름 속에서 작은 이해의 조각들을 하나씩 얻어가는 과정이었다는 생각이 듭니다. 그런 마음으로 이 글에서는 제가 걸어온 구체적인 연구의 발자취와, 그 길에서 부딪힐 수밖에 없었던 고민, 그리고 성취라는 작은 기쁨의 순간들 이야기를 함께 전하고자 합니다.

저의 학문적 여정

저는 서울대학교 지질과학과에서 학사(지질과학)와 석사(지구물리학 전공) 과정을 마친 뒤, 미국 Purdue University에서 수리지질학을 전공하여 박사 학위

를 취득하였습니다. 유학 시절 대학 근처의 도시 매립장 주변의 지하수 오염을 진단하는 과제에 연구원으로 참여하여 연구인건비를 지원받으며 보고서 작성을 맡았습니다. 제가 유학했던 도시는 수돗물의 근원이 땅속 지하수에서 오기 때문에 지하수 오염의 방지와 관리는 특별하고도 최우선적인 환경 현안이 될 수밖에 없었습니다. 그래서 정기적으로 지하수 관측정의 물 시료를 채취하고 지하수의 흐름을 분석하는 역할을 수행하였습니다. 지금은 이곳에 SK하이닉스가 미국 인디애나주에 건설하는 반도체 공장이 들어서고 있고 필요한 용수가 지하수로 공급될 예정입니다. 박사 학위 과정에서 대수층의 수리전도도 장(field)을 다중스케일로 추정하는 역산 기법과 경계적합좌표계(boundary-fitted coordinate) 기반의 지하수 유동과 오염물질 이동 모델 개발 및 모델링을 연구하며 수리지질학의 이론적 토대를 공부하였습니다. 학업과 박사후 과정 연구를 수행한 후 저는 1993년 서울대학교에 부임한 이래 현재까지 30여 년 이상 한 자리에서 후학을 기르고 연구에 매진해 왔습니다.

지하수를 주로 다루는 수리지질학이라는 학문에서 박사과정까지 체계적인 교육을 받은 학자들은 제가 서울대학교에 부임할 당시 한국에 손가락에 꼽을 정도로 적었습니다. 그렇지만 가뭄과 물 문제는 늘상 있었기에 지하수 개발업에 종사하는 중소 회사는 많이 있었고 극심한 가뭄 때마다 지하수 공급문제, 그리고 이에 연계된 오염 문제는 종종 사회적 현안이 되었습니다. 그래서 1994년에 지하수법이 만들어지고, 현재 일반인들이 '생수'로 알고 있는 '먹는 샘물'의 판매가 허용된 것도 거의 같은 시기였습니다. 그리고 원자력발전소에서 나오는 사용후 핵연료의 심지층 처분도 국가·사회적 과제로 등장하고 있었기에 제가 전공한 수리지질학의 사회적 역할이 커지면서 1994년에 한국지하수환경학회(2000년에 한국토양환경학회와 통합하여 한국지하수토양환경학회가 됨) 창립 당시 저도 총무간사로서 역할을 수행하였습니다. 사회적 필요성이 커지면서 다행히도 이 분야를 연구하려고 대학원에 진학하려는 제자들이 많아서 초기 연구실 구성과 발전에 큰 힘이 되었습니다.

그런데 제가 공부했던 미국 중서부의 지하수 부존지층과 한국의 지층이 현저히 달라서 초기에 큰 어려움에 봉착하였습니다. 미국 중서부의 빙하 퇴적층으로 구성된 대수층은 비교적 균질한 대수층으로 공부한 대수층 수리시험과 이를 유동방정식에 적용하고 해석하는 일련의 과정이 가능했다면, 한국은 주로 결정질 암반으로 변형을 많이 받았고 깨진 단열면이 불규칙하여 적용할 방정식이 거의 없는 상태나 마찬가지였습니다. 그래서 1993년 귀국 이후에는 단열암반 내 지하수 유동과 오염물질 이동이라는 제가 학위과정에 제대로 공부하지 못했던 다소 생소했던 주제를 연구하면서 국내 필요에 맞는 인력을 기르는 데 주력하였습니다. 그 당시에 함께했던 제자들이 현재 캐나다와 호주 등에서 교수로 관련 분야에서 많은 역할을 하고 있고, 국내 연구기관과 대학에서 사용후핵연료 심지층처분 대형 연구프로젝트에서 핵심적인 역할을 하고 있습니다.

암반 단열 연구와 함께 단열망(fracture network) 내 용질 이동 및 비수용성 유체(NAPL)의 거동을 규명한 연구를 바탕으로 환경부의 연구단 사업에 'SEEDS 지하수 연구단'이 선정되었고, 저는 연구단장으로서 역할을 맡게 되었습니다. 이 연구를 통해 'OO공단'의 고밀도 비수용성 유체인 DNAPL의 오염 정화에서 직접적인 효과를 내는 성과도 도출하여 국가연구개발우수성과 100선에 선정되기도 하였습니다. 단열에서의 수리적 현상과 단열 내 오염 현상과 관련하여 *Water Resources Research*, *Geophysical Research Letters*, *Journal of Hydrology*, *Water Research*, *Environmental Pollution*, *Journal of Hazardous Materials* 등 지구과학 및 지구환경 분야 최상위 국제학술지에 다수 논문이 게재되며 국내

수리지질학 연구의 국제적 위상을 끌어올리는 데 기여할 수 있었습니다.

이후 연구 영역을 오염 지하수의 진단과 정화, 지하수-지표수 상호작용 현상 연구와 통합 물관리에의 적용, 동위원소 및 미생물 지표를 이용한 오염원 추적, 지하수의 재생에너지로서의 잠재력을 이용한 지하수 냉난방 실증연구, 기후변화에 따른 지하수 함양과 수자원 전망 등으로 넓혀 왔으며, 최근에는 지진과 지하수의 상호작용, 우라늄과 라돈 등 자연방사성 핵종의 지하수 내 거동 연구로까지 관심을 확장하며 연구를 진행하였습니다. 저의 연구 분야가 다양화되고 변화된 것은 연구를 진행하면서 얻게 된 여러 호기심이 주요 동기인 것이 많지만, 때로는 국가적 또는 사회적 필요성에 갑자기 진행된 것들도 있습니다. 그 대표적인 사례가 2010년에서 2011년에 걸쳐 소와 돼지 약 350만 두를 매몰하고 전국적으로 약 4,500개소의 구제역 가축매몰지가 조성된 후 그로 인한 지하수 오염을 파악하기 위한 전국 단위 가축매몰지 주변 지하수 환경 영향 평가 연구와 2017년 11월 15일 포항지진 발생 이후 그 원인을 규명하기 위한 정부조사연구단 사업으로 제가 원한 것은 아니지만 불가피하게 책임자를 맡게 되었습니다.

이러한 연구 과정 중에서 지하수를 재생에너지원으로 하는 지하수 지열 활용 연구사업은 2016년 국가연구개발 우수성과 100선 수상으로 이어졌습니다. 그리고 DNAPL 오염 정화 연구는 국가연구개발 우수성과 100선과 환경기술개발 30주년을 맞아 지난 30년간 대표기술 50선에 선정되는(2022년) 영예도 얻었습니다. 아울러 서울대학교 학술연구상(2018년)과 한국과학기술한림원 정회원(2018년)과 한국환경한림원 정회원(2020년)으로도 선임되는 영예를 얻었습니다. 국제적으로는 지질학 분야 국제학술지 *Geosciences Journal*의 편집장(Editor-in-Chief)을 6년간 맡았고, 수리지질학 분야 여러 국제학술지의 편집위원으로 활동해 왔습니다. 현재는 2027년 인천에서 열리는 IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics) 총회의 과학프로그램위원회(SPC) 위원장을 맡아 총회 학술프로그램 준비를 이끌고 있습니다.

땅속의 에너지 활용: 지하수 지열에너지 연구

제 연구 이력에서 특히 애착이 가는 분야 중의 하나는 지하수를 매개로 한 지열에너지 활용 연구입니다. 1995년 산지 지역의 지하수 유동과 지열 흐름에 관한 수치해석 연구를 시작으로, 저는 지하수를 이용한 냉난방 시스템, 즉 지하수 히트펌프(Groundwater Heat Pump, GWHP) 시스템의 설계와 운영 최적화 문제를 30년 가까이 꾸준히 파고들었습니다. 2010년에는 천부 지열에너지 활용을 위한 시추공 열교환기(borehole heat exchanger) 설계를 현장 규모에서 검증한 연구와 강변 여과수와 대기와의 온도 차이를 지열에너지원으로 평가한 연구를 각각 발표하며, 여러 제자·동료 연구자들과 함께 국내 지열 연구의 실증적 기반을 넓혀 왔습니다. 2016년에는 지하수의 온도차 에너지를 활용하여 도심 열섬 현상을 완화하기 위한 연구로 당시 융합연구이자 실패를 허용한 모험연구였던 X-프로젝트에 선정되어 온도차를 전기로 전환하는 열전모듈을 활용하여 지하수와 태양열로 데워진 물의 온도차를 발전에 이용하는 연구에 도전하였습니다. 이후 이 성과를 장기적으로 이어가기 위해 한국연구재단의 연구과제로 현재까지 10년간 지하수 에너지 활용 연구를 진행하고 있습니다. 또, 국토교통부의 수변 지하수 활용 연구의 일환으로 제가 책임자로 국립환경과학원 산하 한강물환경연구소 부지에 지하수 개방형 지열냉난방 실증 연구시설을 구축하여 2016년까지 5년간 연구를 진행하고 에너지 절감 효율성을 실제 시스템 가동으로 증명한 후 이 성

과를 바탕으로 2016년 국회에서 개방형 지열 관련 세미나를 개최하여 정부 정책으로 연결시키고자 노력하였습니다.

이러한 실용적, 정책적 노력과 함께 근본적인 과학적 미결과제이자 궁금증을 풀기 위해 지하 매질 내 열분산 관련 연구를 꾸준히 진행하고 있습니다. 지하수 지열 활용에 따른 지하의 열간섭 현상과 지속가능성 평가에 중요한 열분산계수(thermal dispersivity)를 현장·수치 실험으로 규명하는 일련의 연구를 이어갔으며, 여기에는 지하수 유동 조건에서의 열분산계수 실험적 산정, 매질에서의 국소 열비평형(local thermal non-equilibrium) 현상 규명, 입자·공극 규모 불균질성이 열분산에 미치는 영향 분석 등이 포함됩니다.

재난과 위기의 현장에서

구제역 가축매몰지와 지하수 안전

저에게 예상하지 못하게 갑자기 대규모 연구에 착수하게 된 계기는 가축매몰지 주변 지하수 환경 연구였으며, 이는 제가 2011년 초 지하수토양환경학회장이던 때의 일입니다. 당시 주요 일간지 1면 톱기사로 매몰지 문제가 제기될 정도로 매몰지 주변 지하수 수질 안전 문제가 제기되어 정부에서 긴급 연구로 학회가 그 조사 임무를 맡았고 저는 학회장으로서 연구책임자를 맡아 연구를 시작하여 거의 7여 년간 이 연구를 지속하게 되었습니다. 2010~2011년 전국적으로 확산된 구제역으로 인해 단기간에 전국적으로 4,500여 곳에 이르는 대규모 가축매몰지가 조성되면서, 매몰지에서 유출되는 침출수가 인근 지하수를 오염시킬 수 있다는 우려가 사회적 현안으로 떠올랐습니다. 저희 연구팀은 이 문제에 대응하여 전국 단위의 가축매몰지 주변 지하수 관정을 대상으로 한 수질 모니터링을 수행하였고, 그 결과를 2017년 대한지질학회지에 발표한 데 이어, 2019년에는 국제학술지 *Environment International*에 「Nationwide groundwater monitoring around infectious-disease-caused livestock mortality burials in Korea」라는 제목으로 발표하였습니다.

이 연구에서 저희는 매몰지 인근 지하수에서 오염물질의 존재 여부를 확인하는 데 그치지 않고, 매몰지에서 유래한 침출수의 영향이 기존에 존재하던 농업·생활계 오염원의 영향과 어떻게 중첩되어 나타나는지를 규명하고자 하였습니다. 전국 규모의 관정을 대상으로 한 장기 모니터링 자료를 바탕으로 오염원을 판별하고 그 시공간적 변화 양상을 분석함으로써, 매몰지 사후관리와 지하수 안전 기준을 마련하는 데 필요한 과학적 근거를 제공할 수 있었다는 점에서 개인적으로 뜻깊게 여기는 연구입니다.

포항지진과 지하수 주입에 따른 위험 관리

2017년 발생한 모멘트 규모(Mw) 5.5의 포항지진은 국내에서 처음으로 지열발전을 위한 고압의 많은 지하수 주입이 지진을 유발 또는 촉발하였을 것이라는 가능성이 국내외적으로 제기된 사건으로, 저는 이 사안의 과학적 원인 분석에 무거운 책임감을 갖고 참여하였습니다. 제가 원했던 것은 아니지만 당시 대한지질학회장으로 그 책임성이 강조되어 2018~2019년 포항지진정부조사연구단의 단장을 맡아 국내외 20여 명의 참여 학자들로 조사연구단을 구성하여 지진 발생 원인을 종합적으로 분석하였고, 그 성과의 일부는 *Nature Communications*에 게재된 유발지진 메커니즘 연구로 이어졌습니다. 나아가 2019년에는 세계적 권위의 학술지 *Science*의 *Policy Forum*에 제1저자로 「Managing injection-induced seismic risks」라는 논문을 발표하여, 고압 지하수 주입에 따른 유발지진 위험을 관리하기 위한 국제적 기준의 필

요성을 강조하였습니다. 과학적 분석 결과는 2019년 3월 정부조사연구단 보고서와 기자회견을 통해 이미 공개되었습니다. 이에 엠바고가 필요 없는 Policy Forum에서 포항지진을 통해 얻은 교훈을 바탕으로, 향후 전 세계에서 수행되는 지하의 유체 주입 사업의 안전 확보를 위한 위험관리 방향을 제시하였습니다. 이 연구는 국내 언론은 물론 *Nature*지 기사와 미국 스탠포드대학 뉴스에도 소개되며 예상보다 큰 반향을 얻었는데, 이는 1년간의 짧은 기간이지만 혼신을 다해 분석에 함께해 주신 국내외 공동연구자들의 헌신 덕분이었다고 생각합니다.

사용후 핵연료 심층 처분 안전성 사례 확보를 위한 자연유사 연구

국내 대학의 세 분 교수님들과 함께 연구팀을 구성하여 제가 연구책임자로 한국원자력연구원과 함께 고준위 방사성폐기물(사용후 핵연료) 심지층처분의 안전성을 평가하기 위한 연구를 수행하고 있습니다. 적어도 10만 년 이상 장기간의 핵종 이동이 억제되어야 하는 심지층처분에서 안전성 증명은 단기간의 실험실 실험이나 모델링 수행으로 이루어질 수 없습니다. 우리 연구팀은 우리나라 우라늄 광체 주변과 땅속에서 오랜 지질시대에 걸쳐 우라늄의 거동이 어떤 과정으로 진행되었는지를 분석함으로써 장기간의 안전성에 대한 진단을 하려고 합니다. 즉, 자연 상태의 지질환경에서 방사성 원소인 우라늄이 어떻게 거동하는지를 규명하는 자연유사(natural analogue) 연구를 수행하고 있습니다. 사용후 핵연료의 심부처분 환경에서 우라늄의 용존 및 이동이 제한될 가능성을 제시하고, 이와 관련한 국내 현장 자료를 구축하는 것을 목표로 하고 있습니다. 이 연구를 통하여 궁극적으로 고준위 방사성폐기물의 심부지층처분이 갖는 안전성과 유의점을 뒷받침할 국내 현장 기반 근거를 마련하는 데 기여하고자 합니다.

지하수-지표수 상호연계성 기반 유역 통합 물관리 연구

기후변화로 인한 물 순환의 불확실성이 커지면서, 지표수와 지하수를 분리하여 관리해 온 기존 체계로는 하천의 수질 악화와 녹조 발생 등 공공수역의 물환경 문제에 효과적으로 대응하기 어려워지고 있습니다. 특히 평상시 하천 오염부하의 상당 부분이 지하수를 통한 기저유출에서 기인하며, 강우 시에는 고농도의 단기 오염부하가 하천으로 유입되는 등, 지하수가 지표수 수질·수량에 미치는 영향은 시공간적으로 매우 복잡한 양상을 보입니다. 이에 저는 국립환경과학원과 산학 공동 연구팀을 구성하여 지난 5년여 간 수량·수질 측면에서 문제가 되는 소유역을 대상으로, 그 원인을 규명하고 실효적인 해결방안을 마련하는 연구를 지속해 오고 있습니다.

교육과 학문공동체, 그리고 과학문화 확산을 위한 노력

1993년 서울대학교 부임 이래 박사 35명, 석사 64명(박사 진학자 중복 계산)의 졸업생을 배출하였습니다. 제가 가르쳤다고 하지만 실은 이들과 함께 연구현장에서 동고동락하며 서로 배우고 성장해 온 시간이었다고 생각하며, 이 자리를 빌려 그동안 함께해 준 모든 제자들에게 고마움을 전합니다.

학문공동체를 위해서도 미력하나마 힘을 보태고자 하였습니다. 대한지질학회장(2018~2019년)과 한국지하수토양환경학회장(2011~2012년)을 맡아 학회 발전에 힘을 보탰고, 서울대학교 자연과학대학에서는 학생부학장과 대외협력부학장을 맡아 대학 행정에도 참여하였습니다. 이 밖에 서울대학교 자연과학대학의 최고위 과정인 과학기술산업융합최고전략과정(SPARC)의 주임교수를 2012년부터 2022년까지 맡

아 사회 지도층 인사들이 자연과학의 필요성과 국가적 중요성을 실감할 수 있도록 과정 구성과 운영에 노력하였고, 2021년부터는 자연과학 공개강연 소위원회 위원장을 맡아 대중(특히 고등학교 학생)들과 과학을 잇는 일에도 성심껏 노력하였습니다. 이 모든 시간 동안 저를 믿고 함께 일해 주신 동료 교수님들과 직원 분들께 깊이 감사드립니다.

과학의 대중화에도 관심을 기울여 왔습니다. 비영리 과학문화재단인 카오스재단의 이사 겸 과학위원으로 「지구인도 모르는 지구」(2016년), 「전지적 지구 시점」(2025년) 강연 시리즈를 기획·주관하였으며, 같은 제목의 대중 교양서 『지구인도 모르는 지구』(반니, 2017년)의 대표저자로도 참여하였습니다. 고교생 대상 과학경진대회인 한화사이언스챌린지의 운영위원과 기술자문단으로도 활동하며 다음 세대 과학기술 인재들에게 조금이나마 도움이 되고자 하였습니다.

학계를 넘어 국가 정책 자문에도 참여할 기회가 여러 차례 있었습니다. 대통령직속 국가물관리위원회 위원으로 국가 물 문제 해결을 위한 최고 자문기구에 참여하였고, 국가과학기술자문회의 에너지환경전문위원회 환경·기상 소위원장을 역임하였으며, 현재는 원자력안전위원회 위원으로 활동하고 있습니다. 서울대학교 자연과학대학의 기부금 기반 도전적 창의연구사업인 무주·쎈 학술기금의 실행위원장을 맡아 자연과학의 세계 선도적 창의 연구 체계 구축에 힘쓰고 있으며, 2020년부터는 서울대학교 BK21 지구환경과학교육연구단 단장으로서 4단계 BK21사업을 이끌며 대학원 교육과정과 연구 지원 체계를 정비하는 데 힘쓰고 있습니다. 이러한 자리들은 모두 사회와 국가가 저에게 베풀어 준 신뢰라고 생각하며, 그 신뢰에 조금이라도 보답하고자 하는 마음으로 임해 왔습니다.

맺음말 — 다시 한번 감사드리며

지하수는 눈에 보이지 않는 땅속을 흐르지만, 우리의 식수와 농업, 생태계, 그리고 에너지 이용에 이르기까지 삶의 근간을 이루는 자원입니다. 저는 지난 30여 년간 이 보이지 않는 물길을 과학의 언어로 읽어내는 일에 매진해 왔습니다. 단열암반 속 오염물질의 미세한 거동을 규명하는 이론 연구에서부터, 지하수를 이용한 재생에너지 시스템의 현장 활용, 구제역 가축매몰이라는 국가적 재난 현장의 환경 안전 문제, 포항지진이라는 사회적 파장이 큰 사안에 이르기까지 걸어온 이 길은, 되돌아보면 저 혼자가 아니라 스승과 동료, 제자, 가족, 그리고 제 연구에 기회와 지원을 아끼지 않은 우리 사회와 국가가 함께 걸어준 길이었습니다.

이번 대한민국학술원 회원 선출을 계기로, 그동안 받은 은혜에 조금이나마 보답하는 마음으로 앞으로 더 성실히 연구하고 후학을 기르며, 물과 관련된 우리 사회의 현안 해결에 작은 힘이나마 보태겠다는 다짐을 새롭게 해봅니다. 부족한 저를 이 자리까지 이끌어 주신 모든 분들께 다시 한번 깊이 감사드립니다.

신임회원 업적소개

자연 제3분과 권욱현 회원(전기공학)



시작하며

대학교수의 주요 임무는 흔히 교육, 연구, 봉사의 세 가지로 구분된다. 연구는 다시 기초연구와 응용연구 등으로 나눌 수 있으며, 응용연구는 실용적인 기술개발로 이어지고, 경우에 따라서는 그 성과가 창업으로 발전할 수도 있다. 봉사 역시 다양한 형태로 이루어진다. 대학 안에서는 교육과 연구에 관한 제도를 개선하거나 새로운 교육·연구 조직을 창설함으로써 대학 발전에 기여할 수 있다. 더 나아가 대학 밖에서는 학술단체 활동을 통하여 학문과 기술의 발전, 그리고 사회 발전에 기여할 수 있다.

이러한 관점에서 필자는 그동안의 활동 가운데 다음의 다섯 가지를 중심으로 주요 업적을 정리하고자 한다. 첫째, 기초연구 분야에서는 이동구간제어(Receding Horizon Control)에 관한 연구와 그 성과를 소개하고자 한다. 둘째, 또 하나의 기초연구 분야로서 시간지연시스템(Time-Delay Systems)의 제어에 관한 연구와 그 성과를 설명하고자 한다. 셋째, 응용연구 분야에서는 대학원생들과 함께 수행한 실용적인 기술개발 연구를 소개하고자 한다. 이러한 연구를 통하여 학생들이 실제 기술을 습득하고 연구 성과를 산업 현장에 적용할 수 있었으며, 일부는 이를 바탕으로 창업에까지 이르게 되었다. 이는 대학의 연구가 인재양성과 기술개발을 거쳐 창업으로 이어진 사례라고 할 수 있다. 넷째, 대학 내 봉사와 관련하여 교육·연구 제도의 개선과 새로운 조직의 창설을 위해 수행한 활동과 그 성과를 설명하고자 한다. 다섯째, 대학 밖에서는 국내외 학술단체에서의 봉사 활동을 통하여 학문 공동체의 발전과 사회 발전에 기여하고자 했던 노력과 그 성과를 소개하고자 한다.

이와 같이 필자의 활동을 기초연구, 응용연구와 창업, 대학 내 제도 및 조직 발전, 그리고 학술단체를 통한 사회봉사라는 관점에서 살펴보고자 한다.

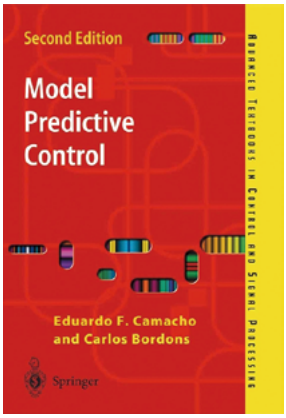
1. 이동구간제어에 관한 업적

여러 분야의 공학 문제에서 최적제어 문제가 많이 활용되고 있다. 처음에는 유한(시간)구간에서의 최적제어, 즉 유한구간제어(Finite Horizon Control)와 무한(시간)구간에서의 최적제어, 즉 무한구간제어(Infinite Horizon Control)만을 다루어왔다. 그러나 유한구간제어기는 연속으로 작동되고 있는 제어문제에는 적용 불가능하다. 무한구간제어기는 시변형(Time-varying) 시스템이나, 임의로 인가되는 입력이나, 변수에 구속조건이 있는 경우에는 계산이 어려워 적용하기 힘들다.

이상의 문제를 해결하기 위하여 필자는 “이동구간제어(Receding Horizon Control)”를 세계 처음으로 제안하고 그 특성을 규명하였다. 처음 결과는 1977년에 미국전기전자학회(IEEE) 자동제어 학술지에 발표한 논문 “A Modified Quadratic Cost Problem and Feedback Stabilization of a Linear System”이다. 일정한 조건에서 유한구간의 최적제어를 반복하여 사

용함으로써, 이동구간제어기를 얻는 방법을 제시하고, 어떤 조건에서 안정도가 보장됨을 증명하였다. 이 논문은 이 분야를 연구하는 학자에게는 꼭 읽어야 하는 바이블로 여겨지고 있다. 이 논문의 우수성을 나타내는 SCI(Google Scholar, GS) 인용수는 273(613)회이다.

이후에 이와 관련하여 많은 논문을 계속 발표하였다. 1978년도에 미국전기전자학회(IEEE) 자동제어 학술지에 발표한 논문 “On Feedback Stabilization of Time-Varying Discrete Linear System”은 이산시간(discrete time)에 관한 이동구간제어를 다루었으며 SCI(GS) 인용수가 150(364)회에 이르고 있다. 필자가 발표한 국제논문 148편 중 이동구간제어 분야에서만 60편을 발표하였다. 이동구간 제어기는 모델예측제어(Model Predictive Control, MPC)라는 이름으로 더 알려져 있다. 필자 외에 여러 학자가 다양한 조건에서 이론을 확장하여 이제는 MPC가 여러 제어기 중에서 산업계에서 가장 많이 쓰는 제어기가 되었다. 즉 기계장치산업, 전기전자산업, 화공플랜트, 항공산업 등 다양한 산업 분야의 자동제어에 필수적으로 활용되기 때문에 필자의 연구 결과의 파급효과는 아주 크다고 볼 수 있다.



[사진 1] Receding Horizon Control 영문 교과서

필자는 필터에 이 개념을 적용하여 다양한 결과를 얻었고, LQG 제어에도 확장하였다. 필자가 연구한 내용을 중심으로 대학원 교육에서 사용되는 영문서 “Receding Horizon Control”를 Springer 출판사에서 2005년 7월 출판하였으며, 책 내용의 절반 정도는 필자의 연구 결과에 바탕을 두고 있다. 이 영문 교과서는 이동구간제어기가 여러 분야에서 다양하게 적용할 수 있음을 보여주고 있다. GS 인용수가 964회에 이를 정도로 인용이 많이 되고 있다.

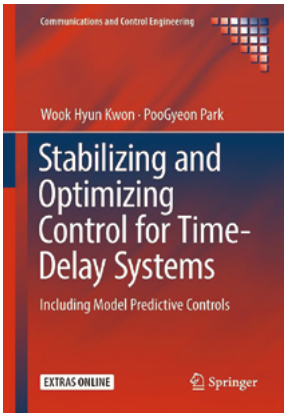
2. 시간지연 시스템 제어에 관한 업적

산업 시스템이나 자연의 동적 시스템에서 상태 변수와 입력 변수에 시간지연이 존재하는 경우가 많다. 대표적인 시간지연 시스템으로는 화학 공정 시스템, 수송 시스템, 통신 시스템, 생물 시스템 등이 있다. 이러한 시스템에서 시간지연은 시스템의 성능 및 안정성을 크게 저하시키는 요인이다. 따라서 이러한 지연시간을 보상하는 방법이 학계에서 중요한 연구 테마가 되어왔다. 필자는 시간지연시스템(Time-delay system)에 3가지 혁신적인 제어기를 세계 최초로 제안하고 널리 사용하게 하였다.

필자는 입력에만 시간지연이 있는 시스템에서 “지연소거변환(Delay Reduction Transformation)” 방법을 최초로 1980년도에 미국전기전자학회(IEEE) 자동제어 학술지에 논문 “Feedback Stabilization of Linear Systems with Delayed Control”을 발표하였다. 시간지연이 있는 시스템을 지연소거변환을 통하여 시간지연이 없는 시스템으로 변환하여 설계할 수 있는 획기적인 방법을 제시하였다. 현재까지 SCI(GS) 인용수가 425(656)회에 이를 만큼 많다. 시간지연이 상태변수에 있는 시스템에서 계수 변화 영향을 최소화 시키면서 시스템의 성능 및 안정성을 보장할 수 있는 “매개변수강인제어(parameter robust control)”에서 세계 수준의 업적을 이루었다. 최초로 2001년 *International Journal of control* 에 “Delay-dependent robust stabilization of

uncertain state-delayed systems”라는 논문을 발표하였다. 유명한 Integral Inequality(적분 부등식)를 세계 처음으로 제안하고, 그것을 응용함으로써 가능하게 하였다. 현재까지 SCI(GS) 인용수가 1,324(1,872)회에 이를 만큼 대단히 많이 인용되고 있다. 이 인용수는 서울대학교 전기정보공학부에서 가장 많이 인용되는 인용수로 선정되기도 하였다.

위의 두 가지 외에, 또 다른 것으로, 외란의 변화 영향을 최소화시키면서 시스템의 성능 및 안정성을 보장할 수 있는 “외란강인제어(robust control)”에서도 세계 수준의 업적을 이루었다. 2004년도 *Automatica*에 “Delay-dependent Robust H-infinity Control for Uncertain Systems with a State-delay”라는 논문을 발표하였다. 현재까지 SCI(GS) 인용수가 345(543)회에 이르고 있다.



[사진 2] *Stabilizing and Optimizing Control for Time Delay Systems* 영문 교과서

이들 3가지 결과와 더불어, 시간지연시스템에 적용되는 이동구간제어를 집대성하여 영문교과서 “Stabilizing and Optimizing Control for Time-delay Systems-Including Model Predictive Control”을 Springer 출판사에서 2018년 7월에 출간하였다. 책의 부제로 모델예측제어(MPC)를 포함하였음을 밝혔다. 필자가 발표한 국제 저널 논문 148편 중 시간지연을 보상하는 제어 분야에서 12편의 논문을 발표하였다.

3. 응용연구와 대학원생의 벤처기업 창업

필자는 기술 중심의 중소기업이 국가경쟁력을 높이고 젊은이들의 일자리를 창출하는 데 중요하며, 공과대학 출신들이 기술 창업에 적극적으로 나서야 한다고 생각하였다. 이에 대학원생들이 이론적인 연구뿐만 아니라 산업에 활용할 수 있는 실용적인 기술을 습득하도록 지도하였다.

연구실에서는 마이크로프로세서의 이론과 응용을 비롯한 디지털 기술을 연구하고 이를 활용한 디지털 제어기를 개발하였으며, 산업 시스템에 여러 시스템을 연결하는데 필요한 산업용 네트워크 기술도 습득하도록 하였다. 또한 여러 산업체로부터 의뢰받은 연구개발 프로젝트에 학생들을 참여시켜 실제 제품개발에 필요한 기술과 함께 팀워크와 인력관리 능력을 익히도록 하였다. 아울러 책임감, 희생정신과 기업가정신을 강조하여 기술 창업에 필요한 자질을 갖추도록 지도하였다.

이러한 교육과 응용연구는 대학원생들의 벤처기업 창업으로 이어졌다. 1980년대 후반부터 연구실 출신들이 기술 중심의 기업을 잇달아 창업하여 현재까지 10여 개의 벤처기업이 설립되었다. 당시에는 벤처기업에 대한 제도적·사회적 기반이 충분히 갖추어져 있지 않아 대학 연구실 출신의 기술 창업이 매우 어려웠다. 그러한 시기에 한 연구실에서 다수의 기술기업이 연이어 창업되었다는 점에서 우리나라 대학발 기술벤처 창업의 선구적인 사례라고 할 수 있다.

필자는 교수로 재직하는 동안 총 55명의 박사와 110명의 석사를 배출하였다. 석사와 박사과정을 모두 지도받은 학생을 중복하지 않으면 약 130명이며, 이 가운데 34명이 연구실 출신 벤처기업의 창업과 성장에 참여하였다. 주요 창업기업으로는 휴맥스(창업연도 1989, 대표 변대규, 대표 제품 인공위성수신기), 우

리기술(1991, 김덕우,원자력 제어기), 젤파워(1991, 이기원, 전력 보호계전기), 파인디지털(1992, 김용훈, 내비게이션), 바텍(1992, 임석훈, 엑스레이 검사장비), 세니온(1998, 이동률, 보호계전기), 토필드(1998, 이용철, 인공위성 수신기), 리얼게인(1999, 최성규, 제어계측기기), 슈프리마(2000, 이재원, 지문인식시스템), 파이오링크(2000, 문홍주, L4 스위치), 셈웨어(2009, 김광진, 교육용 소프트웨어) 등이 있다. 이 가운데 휴맥스, 우리기술, 파인디지털, 바텍, 토필드, 슈프리마, 파이오링크가 상장기업으로 성장하였다. 지도 학생들이 창업한 기업들의 매출액을 합하면 2024년 말 기준 약 1조 3,000억 원에 이른다.

이와 같이 필자의 응용연구는 대학원생들에게 실용적인 기술을 습득하게 하는 데 그치지 않고, 연구와 교육을 기술 창업과 산업 발전으로 연결하는 성과로 이어졌다.

4. 대학의 교육·연구 제도 개선과 연구조직 창설

필자는 서울대학교에 재직하면서 교육·연구 제도를 개선하고 새로운 연구조직을 창설하는 데 적극적으로 참여하였다.

1978년 국내 최초로 설립된 서울대학교 제어계측공학과의 발전에 처음부터 참여하여 실험교육과 졸업프로젝트를 강화하고, 마이크로로봇 경연대회와 한국전자전 등에 학생들의 참여를 적극 장려하는 등 실용적인 공학교육을 강조하였다. 이러한 노력과 구성원들의 적극적인 참여에 힘입어 제어계측공학과는 빠르게 성장하였으며, 여러 해에 걸쳐 서울대학교 전체 학과 가운데 입학시험 합격선이 가장 높은 학과가 될 정도로 국내 최고 수준의 학과로 발전하였다.

또한 전기공학과, 전자공학과, 제어계측공학과를 통합하여 1992년 서울대학교 최초의 학부제인 전기공학부를 창설하는 데 주도적으로 참여하였다. 이후 학부장을 맡아 교육·연구 제도와 규정을 정비하였으며, 관련 연구소와 학부를 연계하여 교육과 연구의 효과를 높였다. 전기공학부의 학부제는 이후 서울대학교와 전국 여러 대학으로 학부제가 확산되는 데 하나의 모델이 되었다.

제어·계측 및 자동화 분야의 연구 기반을 강화하기 위해 고명삼 교수와 함께 자동화시스템연구소의 설립을 주도하였다. 건축기금을 확보하여 약 1,500평 규모의 독립 연구시설을 건립하였으며, 4년간 연구소장을 맡아 연구 기반을 확충하였다. 우리나라 자동화 기술 교육과 발전에 큰 역할을 하였다.

이와 함께 1991년 한국과학재단 지정 제어계측신기술연구센터를 설립하여 전국 대학의 교수 약 30명이 참여하는 공동연구체제를 구축하고 소장으로 9년간 운영하였다. 센터는 과학재단 평가에서 계속 A등급을 받았으며, 1996년 미국 생산공학회(SME)의 University LEAD Award를 수상하고 2001년 한국과학재단의 30대 우수 연구성과에 선정되었다. 1995년에는 한국과학재단 지정 자동화연구정보센터를 설립하여 소장으로 약 10년간 운영하면서 자동화 분야의 연구 정보 구축과 연구지원 시스템 개발에 기여하였다.

5. 국내외 학술단체에서의 봉사

필자는 과학기술의 발전을 위해서는 연구와 교육뿐만 아니라 이를 뒷받침하는 학술단체와 제도적 기반이 중요하다고 생각하여 국내외 학술단체의 창설과 발전에 적극적으로 참여하였다.

국내에서는 전기·전자·기계·항공·화공 등 여러 분야의 연구자들과 협력하여 1995년 제어로봇시스템학회

의 창립을 주도하였다. 초대 부회장과 추후 회장 등을 맡아 학회의 정착과 발전에 기여하였으며, 학회가 국제자동제어연맹(IFAC)의 한국대표 학회가 되고, 아시아제어협회(ACA)의 사무국을 맡도록 하였다. 또한 '권욱현젊은연구자상'을 제정하고, 학회 공간기금으로 상당액을 기부하여 장기적인 발전 기반을 마련하였다. 대한전기학회에서는 회장을 맡아 여러 학술상을 신설하고 전문 분야별 부문학회가 발전할 수 있는 체제를 마련하였으며, 학회 최초의 영문 학술지 발간을 추진하였다.

한국공학한림원과 한국과학기술한림원에서도 부회장과 회원심사위원장 등을 맡아 장기간 봉사하면서 새로운 사업의 기획과 회원심사 및 운영 제도의 발전에 기여하였다.

국제적으로는 국제자동제어연맹(International Federation of Automatic Control, IFAC)에서의 활동이 가장 중요하였다. 2005년부터 2008년까지 IFAC 회장을 맡아 IFAC Foundation을 창설하여 개발도상국의 젊은 연구자들을 지원하는 기반을 마련하였다. 또한 IFAC 논문을 온라인으로 출판하는 Papers-OnLine(POL)을 준비하여 2008년 서울 IFAC 세계대회에서 출범시켰다. 같은 해 서울에서 개최된 IFAC World Congress는 당시 IFAC 역사상 최대 규모로 성공적으로 개최되었으며, 서울시로부터 컨벤션 부문 관광대상을 받았다. 이후 필자의 IFAC에 대한 기여를 기려 IFAC Foundation Kwon Award가 제정되었다.

아시아 제어 분야의 국제협력 기반을 구축하는 데에도 지속적으로 참여하였다. 1992년 아시아제어학술대회(Asian Control Conference, ASCC) 운영위원회 창설 당시 한국을 대표하는 초대 위원으로 참여하였으며, 1997년 한국에서 열린 제2회 ASCC의 공동대회장을 맡았다. 1996년에는 일본의 Kimura 교수와 함께 아시아제어교수협의회(Asian Control Professors Association, ACPA)의 창설을 주도하였고, 이를 발전시켜 2006년 아시아제어협회(Asian Control Association, ACA)을 창설하는 데에도 주도적으로 참여하였다. 이러한 공헌을 기려 ACA에는 Wook Hyun Kwon Education Award가 제정되어 있다.

이와 같이 필자는 국내 주요 학술단체와 한림원의 발전에 기여하고, 국제적으로는 IFAC과 아시아 제어 분야의 학술조직 및 새로운 제도를 구축함으로써 과학기술과 학술 활동의 발전 기반을 마련하는 데 기여하였다.

마치며

이상 필자의 활동 가운데 대표적이라고 생각하는 다섯 가지 업적을 살펴보았다. 기초연구 분야에서는 이동구간제어와 시간지연시스템 제어에 관한 연구를 수행하였고, 응용연구에서는 대학원생들과 실용적인 기술을 개발하여 그 성과가 벤처기업 창업으로 이어지도록 하였다. 또한 대학 내에서는 교육·연구 제도를 개선하고 새로운 연구조직을 창설하였으며, 대학 밖에서는 국내외 학술단체의 창설과 발전에 참여하였다.

이러한 활동을 인정받아 대한민국학술원상과 대한민국최고과학기술인상을 수상하고 대한민국과학기술유공자로 지정되었다. 또한 미국전기전자학회(IEEE)와 국제자동제어연맹(IFAC)의 석학회원(Fellow), 세계과학한림원(TWAS) 회원, 미국공학한림원(NAE) 국제회원, 최근에는 대한민국학술원 회원으로 선출되는 영예를 얻었다.

그러나 이러한 성과는 필자 혼자만의 노력으로 이루어진 것이 아니다. 오랜 기간 함께 연구하고 새로운 일에 도전해 온 많은 재능 있는 제자들과 동료 연구자들의 협력과 헌신이 있었기에 가능하였다. 이 자리를 빌려 그동안 함께해 준 모든 분들에게 깊은 감사의 뜻을 전하고 싶다.

신임회원 업적소개

자연 제3분과 김낙준 회원(금속재료공학)



21세기 들어 과학기술과 산업이 눈부시게 발전하면서 지구온난화, 에너지자원 고갈 등은 21세기 인류가 해결해야 할 대표적인 문제로 대두되고 있다. 특히 지구온난화는 가장 심각한 문제 중 하나로, 화석연료의 급격한 사용 증가에 따른 대기 중 이산화탄소 등 온실가스 농도의 상승이 주요 원인이다. 또한 현대 산업사회는 막대한 양의 에너지를 필요로 하므로 에너지의 고갈 역시 점차 심각한 문제로 부각되고 있다.

현대 산업의 가장 큰 축을 담당하는 자동차와 항공기 등 수송기기는 전 세계 석유 수요의 55% 이상을 사용하고 있으며(U.S. Bureau of Transportation Statistics, 2007), 미국 내 온실가스 배출량의 20% 이상이 자동차에서 발생한다는 사실도 잘 알려져 있다(US Department of Energy, 2007). 이러한 관점에서 수송기기의 경량화는 지구온난화와 에너지 절감이라는 두 가지 문제를 극복하기 위한 중요한 기술적 수단이 될 수 있다. 또한 전기자동차의 경우 배터리와 전기모터의 추가로 증가하는 차량 중량을 경량 부품의 사용으로 상쇄할 수 있어 전기자동차의 효율 향상에도 중요하다.

수송기기의 경량화를 실현하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 기존 재료보다 비중이 낮은 경량재료를 사용하는 방법이고, 다른 하나는 재료의 물성을 극대화하여 고강도·고탄성화를 실현함으로써 부품의 두께와 중량을 줄이는 방법이다. 이 중 저비중 경량재료의 적용이 훨씬 큰 파급효과를 가져올 수 있다(*Limat* 2001). 그러나 이러한 경량재료를 기기에 실제 적용하기 위해서는 강도뿐만 아니라 연성, 성형성 등 다양한 물성의 종합적인 향상이 필요한데, 문제는 이러한 물성들이 서로 상충한다는 점이다. 또한 재료의 비중, 즉 밀도가 감소할수록 강도가 낮아지는 것이 일반적이므로 높은 비강도(specific strength)를 달성하는 것은 매우 어려운 과제이다.

필자는 연구자로서의 길을 택한 이후 이 분야의 연구를 집중적으로 수행해 왔다. 1988년 포항공과대학교(포스텍) 교수로 부임한 이래 여러 과제를 수행하면서 초경량/고강도 구조재료와 항공·자동차·방산 산업의 핵심 금속소재 연구의 체계적인 성장 기반을 구축하였다. 특히 재료 현상의 기본 원리에 기반한 합금설계 개념을 확립하여 기존의 시행착오 중심 신소재 개발 방식을 혁신하였다. 본고에서는 필자의 연구 분야 가운데 대표적인 연구 성과 2가지를 중심으로 소개하고자 한다.

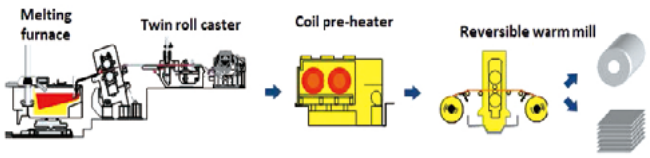
1. 초경량 마그네슘 합금 개발

자동차 등 수송기기에 사용되는 대표적인 경량재료로는 마그네슘 합금, 알루미늄 합금, 티타늄 합금 및 탄소섬유강화복합재료(CFRP) 등이 있다. 이 가운데 가장 큰 파급효과가 기대되는 재료는 마그네슘 합금으로 철강에 비해 약 75%, 알루미늄에 비해 35% 이상 낮은 비중을 갖으며, 경쟁 재료에 비해 우수한 진동감쇠능 및 차폐능을 갖고 있어 자동차 부품과 같이 경량화가 중요한 다양한 분야에서 응용 가능성이 매

우 크다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 마그네슘 합금의 자동차 분야 적용, 특히 판재와 같은 가공재(wrought) 마그네슘 합금의 적용은 매우 제한적이었으며, 이들이 상업적으로 폭넓게 적용되기 위해서는 강도와 성형성 등 핵심 물성의 향상뿐만 아니라 철강 및 알루미늄 합금과 경쟁할 수 있는 가격경쟁력 확보 등 몇 가지 근본적·기술적 문제가 해결되어야 한다.

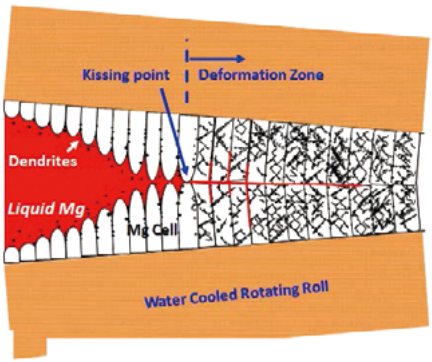
1-1. 마그네슘 판재 제조기술 - 쌍롤주조법 개발

앞서 언급한 바와 같이 마그네슘 합금 판재를 자동차에 적용하기 위해서는 강도 및 성형성 등 필요한 물성의 향상이 필수적이나, 실제 적용을 가로막는 또 하나의 직접적인 문제는 높은 판재 제조비용이다. 이는 마그네슘 합금의 낮은 가공성과 낮은 열용량(heat capacity) 때문에 열간압연 시 중간 재가열을 반복해야 하는 등 제조공정이 복잡하여, 일반적인 DC 주조(Direct Chill Casting) 방식으로 제조한 마그네슘 합금 판재의 제조비용은 알루미늄 합금보다 높으며, 그 결과 마그네슘 합금 판재의 광범위한 적용이 제한되어 왔다. 필자 연구팀에서는 이러한 근본적인 문제를 해결하기 위해 새로운 제조공정인 쌍롤주조법(Twin-Roll Casting)을 개발하였다(그림 1). 쌍롤주조법의 최초 개념은 1846년 Bessemer에 의해 고안되었으며, 이후 Hazelett과 Hunter caster 등으로 발전하였으나, 주조 스트립 내부의 결함과 편석 등 불균일한 미세조직이 형성되는 문제 때문에 상업적인 적용에는 한계가 있었다(*JOM* 2009).



[그림 1] 쌍롤주조법과 후속 압연공정

쌍롤주조법은 두 개의 회전하는 롤 사이에 용융금속을 공급하고, 롤과의 접촉에 의한 빠른 냉각 및 응고와 함께 응고된 스트립이 롤 사이를 통과하면서 압연되도록 하는 공정이다(그림 2). 즉 주조와 압연을 동시에 수행하며, 일반적인 잉곳주조에서 제조되는 300 mm 이상의 두꺼운 마그네슘 슬래브와 달리 10 mm 이하의 비교적 얇은 마그네슘 스트립을 직접 제조하여, 후속 압연 공정을 크게 줄일 수 있다는 경제적 장점이 있다. 또한 쌍롤주조법은 잉곳주조의 응고속도(1~50 K/s)보다 훨씬 빠른(10^2~10^3 K/s) 응고속도를 제공하며, 이 경우 응고 편석의 감소, 미세조직의 미세화, 합금원소의 고용도 증가 등 미세조직 형성에 여러 가지 유리한 효과를 제공한다(*Scr Mater, JOM* 2007). 따라서 쌍롤주조법의 핵심적인 야금학적 장점은 판재를 얇게 제조할 뿐 아니라, 빠른 냉각속도를 이용하여 기존 잉곳주조에서는 얻기 어려운 미세조직과 새로운 합금설계 가능성을 확보하는 데 있다.



[그림 2] 쌍롤주조시 미세조직 변화

마그네슘 합금의 쌍롤주조법을 상업화 단계로 발전시키기 위해서는 여러 가지 문제를 해결해야 했다. 특히 마그네슘은 알루미늄보다 훨씬 빠르게 응고하므로 스트립 폭 방향 전체에서 균일한 응고를 달성하기가 어려우며, 또한 마그네슘 합금의 응고범위는 일반적으로 50 K를 초과하기 때문에 쌍롤주조 공정에서 추가적인 어려움이 발생한다. 따라서 건전한 마그네슘 스트립을 제조하기 위해서는 여러 공정변수, 특

히 주조속도와 열간변형량을 정밀하게 제어해야 한다. 또한 적절한 팁(tip) 설계를 통한 균일한 금속 공급, 롤 냉각 시스템의 개선, 계면 열전달의 정밀한 제어 및 불활성가스 차폐를 통한 표면 산화 방지 등을 통해 응고결함의 형성을 제어하여야 한다. 용질량(solute content)이 많은 마그네슘 합금에서는 역편석(inverse segregation)이 발생하기도 한다. 이는 회전하는 롤에 의해 발생하는 유체역학적 효과로 인해 용질이 풍부한 액상이 판재 두께 중앙부에서 외부 표면 방향으로 이동하면서 발생하는 현상이며, 용질 함량이 증가할수록 문제는 더욱 심각해질 수 있다.

이 쌍롤주조법은 필자 연구실에서 개발을 완료한 후 포스코에 기술 이전하였으며, 포스코는 신소재 사업 육성을 위해 마그네슘 판재공장을 설립하여 자동차(독일 포르쉐, 프랑스 르노)와 모바일기기(LG 그램, 삼성 노트북) 등에 사용되는 마그네슘 합금 판재를 생산하였으며, 현재 공장은 기존 설비를 인수한 PPM사가 운영하고 있다.

1-2. 고강도/고성형성 마그네슘 합금 개발

쌍롤주조법은 공정 단순화의 이점 외에도 빠른 응고속도에 따른 미세조직 미세화와 합금원소의 고용도 증가라는 장점을 얻을 수 있다. 마그네슘 합금에 주로 첨가되는 합금원소는 알루미늄, 아연 등 비교적 고용도가 큰 원소들이지만, 쌍롤주조법의 특성을 이용하면 마그네슘에서 고용도가 제한적인 다양한 전이금속 원소를 첨가하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어 고용도가 매우 낮은 망간(Mn)을 다량 첨가하고, 알루미늄과 결합시켜 미세한 분산상을 다량 형성한 합금은 고강도와 고연신율을 동시에 갖고 있으며(*Scr Mater* 2007), 또한 고온에서 무려 740%의 연신율을 나타내는 초소성(superplasticity) 특성을 보여주는 등 뛰어난 성형성도 갖고 있다(*Scr Mater* 2009).

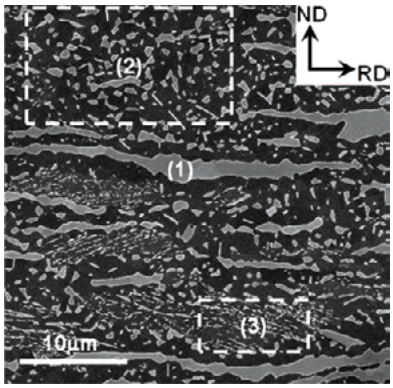
앞서 설명한 합금계는 고강도와 우수한 고온 성형성을 갖고 있으나 상온 성형성이 충분히 확보되지 않아 응용 분야가 일부 부품으로 제한되어 있다. 일반적으로 상온 성형성을 향상시키기 위해 사용하는 방법은 강도를 저하시키는 결과를 초래하기 때문에, 지금까지 높은 강도와 우수한 상온 성형성을 동시에 나타내는 마그네슘 합금은 존재하지 않았다(*Scr Mater* 2009). 마그네슘 합금의 낮은 성형성의 주요 요인인 강한 기저면 집합조직(basal texture)을 약화시키면 성형성이 향상되나 동시에 강도가 낮아진다. 따라서 상온에서 높은 강도와 우수한 성형성을 동시에 갖는 마그네슘 합금을 개발하기 위해서는 새로운 합금설계 개념이 필요하다. 필자 연구실에서는 결정립계에 합금원소의 공동 편석(co-segregation)을 유도하여 기저면 집합조직을 약화시키는 동시에, 집합조직 약화에 따른 강도 저하를 방지하기 위해 분산강화용 금속간화합물의 다량 석출을 유도하였다(*Nature Comm* 2018). 새롭게 개발된 AZMX 합금계는 기존 상용 및 실험용 마그네슘 합금과 비교하여 성형성과 항복강도의 조합이 크게 향상되었으며 이 합금계의 조성은 가장 널리 사용되는 마그네슘 합금 중 하나인 AZ31과 매우 유사하므로, 기존에 AZ31을 사용해 온 수요자들이 비교적 쉽게 받아들일 수 있을 것으로 기대된다.

2. 경량철강

철강은 1920년대 이후 자동차 산업의 주력 소재로 사용되어 왔지만, 평균 차량 중량에서 차지하는 철강의 비율은 1995년 68.1%에서 2011년 60.1%로 점차 감소하고 있다(*STAM* 2013). 이처럼 철강 사용 비율을 감소시키는 주요한 물성상의 한계는 낮은 비강도, 즉 중량 대비 강도비이다. 이러한 문제를 극복하기 위해 최근에는 밀도를 감소시켜 비강도를 향상시킬 수

있는 저비중강, 즉 경량철강(lightweight steel, low-density steel)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 철강의 비중을 감소시키는 방법으로는 경량원소인 알루미늄 함량을 증가시키는 것이 가장 효과적이다(*STAM* 2013). 그러나 이 합금계에서 얻을 수 있는 비강도 수준은 알루미늄이나 티타늄 합금과 같은 기존 경량 금속재료에 비해서는 여전히 낮다. 그 이유는 주 강화상인 κ-탄화물이 활주하는 전위에 의한 전단변형에 대한 저항성이 낮아 변형경화율(strain-hardening rate)이 낮고, 이에 따라 달성할 수 있는 강도가 제한되기 때문이다.

필자 연구실에서는 기존 석출물인 κ-탄화물과 다른 결정구조를 가지고 있어 전단변형에 대한 저항성이 클 가능성이 있는 FeAl계 B2 금속간화합물에 주목하였다. B2상은 취성이 있지만 높은 경도를 가지고 있으므로, 이를 경량철강의 효율적인 강화용 제2상으로 활용하고, 동시에 B2상의 형상을 제어하여 연성에 미치는 유해한 영향을 완화하고자 하였다(*Nature* 2015). 그러나 이러한 합금설계 접근법에는 B2상이 안정하게 존재하는 영역이 극히 제한적이라는 문제가 있다. 본 연구에서는 B2상을 안정화하기 위해 알루미늄과 결합력이 강한 니켈을 첨가하여 (Fe, Ni)Al계 B2상을 형성시키고 안정 영역을 크게 확대하였으며, 다음 과제로서 B2상을 작은 입자로 분할하여 오스테나이트 기지에 다양한 형태로 분산시키고자 하였다. 오스테나이트 기지 내에 미세한 입자를 균일하게 분포시키는 일반적인 방법 가운데 하나는 입자의 석출을 유도할 수 있는 강력한 핵생성 사이트를 적극적으로 활용하는 것이며, 본 연구에서는 어닐링 과정에서 B2상의 잠재적인 핵생성 사이트로 재결정된 오스테나이트 결정립계와 변형 전단밴드(deformation shear band) 등을 활용하였다. 그 결과 어닐링 후의 미세조직은 어닐링 전에 존재하던 B2 스트링거 밴드(1)와 함께 200~1,000 nm 크기의 결정립계 미세 입자(2) 및 그보다 더 미세한 50~300 nm 크기의 전단밴드 내 입자(3)가 형성되어 있음을 보여준다(그림 3). 즉, 하나의 연속적인 B2상만 존재하는 것이 아니라, 큰 B2 밴드와 미세한 B2 입자가 오스테나이트 기지에 함께 존재하는 복합적인 미세조직이 형성된다. 본 연구에서 개발한 경량철강은 상용 Ti-6Al-4V 합금 및 초고강도 마르텐사이트 강종과 비교해도 매우 큰 연성과 높은 변형경화능을 나타내며 비강도 관점에서 비교하면 경량철강에서 얻을 수 있는 비강도–연성 조합의 한계가 기존에 알려진 가장 가볍고 강한 금속재료가 설정한 기준을 크게 넘어설 수 있음을 보여준다. 이는 구조용 금속재료에서 달성할 수 있는 밀도 보정 인장 손상허용능(density-compensated tensile damage tolerance)의 한계를 확장하는 결과이다. 본 연구 결과는 경량철강의 새로운 합금설계 경로를 제시하였으며, 동시에 철강산업에서 사용되는 상용 공정과 양립할 수 있는 간단한 열처리만으로도 우수한 물리적·기계적 특성의 조합을 얻을 수 있음을 보여주었다. 또한 후속연구를 통해 파괴특성과 내식성 등이 대폭 향상되면서 그 응용 분야가 점차 확대되고 있다(*Acta Mater* 2017, 2018, 2020).



[그림 3] 경량철강의 미세조직

3. 결언

앞서 소개한 몇 가지 연구개발 사례에서 알 수 있듯이, 필자는 지난 50여 년간 고성능 구조금속재료, 특

히 경량재료와 고강도 재료의 개발에 전념해 왔다. 경량재료와 고강도 재료의 사용은 환경보존과 에너지 절감에 기여할 뿐 아니라 내구성을 향상시켜 폐기물 발생을 줄이고 재활용을 통해 자원순환경제 구축에도 기여할 수 있다. 따라서 경량재료 및 고강도 재료의 지속적인 연구개발과 산업적 적용은 탄소중립 사회와 지속가능한 미래를 실현하기 위한 핵심 전략이라 할 수 있다.

기존의 재료개발은 연구자의 경험과 시행착오에 의존하여 새로운 소재를 발견하고 최적의 조성과 공정을 찾는 데 많은 시간과 비용이 필요했다. 그러나 최근 급속하게 발전하고 있는 인공지능(AI) 기술을 활용하면 빅데이터를 기반으로 재료개발 전 과정에서 탐색 속도와 예측 정확도를 높이고, 실험과 시뮬레이션의 효율을 향상시키는 핵심 도구로 활용할 수 있다. 다만 재료 분야에서는 동일한 재료라도 실험조건이나 측정 방법에 따라 결과가 달라질 수 있어 신뢰성 높은 고품질 데이터의 확보가 무엇보다 중요하며, 인공지능의 예측 결과를 실제 소재와 공정으로 연결하는 능력이 중요하다. 따라서 인공지능은 재료개발에서 연구자를 대체하는 기술이라기보다 재료 탐색과 의사결정을 지원하는 강력한 연구 도구로 보는 것이 바람직하다.

1994년 과학재단·과학기술부 선정 우수연구센터로 항공재료연구센터를 설립하고 당시 불모지였던 항공재료 연구 분야의 활성화를 위해 노력해 온 필자는, 국내 기술로 T-50과 FA-50을 거쳐 KF-21 등이 개발되는 모습을 보며 그동안 센터 소속 교수와 연구원, 재료연구원(당시 기계연구원 창원분원) 등 출연연구소, 당시 대우중공업과 삼성항공산업을 비롯한 기업체 및 소재·부품 기업들의 노력이 늦게나마 결실을 맺고 있는 것 같아 뿌듯한 마음을 금할 수 없다. 그간 학위과정을 지도했던 석·박사 학생들과, 나름대로 멘토의 역할을 하며 진정한 연구자로서 나아가야 할 길에 대해 함께 토론했던 연구원들이 성장하여 각자의 자리에서 연구 분야를 개척하는 모습을 보며 큰 보람을 느낀다. 앞으로도 대한민국학술원 회원으로서 후학들이 최고의 연구를 수행할 수 있는 최적의 연구 환경을 만드는 데 기여하고자 한다.

신임회원 업적소개

자연 제4분과 박승정 회원(내과학)



한국 심장 중재치료의 역사: 나는 행운아다.

1. 1988년, 경피적 승모판막 풍선확장성형술(Percutaneous Mitral Balloon Valvuloplasty, PMV)를 시작하다.

승모판막이 좁아져 있는 승모판 협착증환자(Mitral Stenosis)의 기본 치료는 가슴을 열어 좁아진 판막을 째거나 인공판막으로 치환하는 개흉 수술만이 유일한 방법이었다. 경피적 승모판막 풍선확장성형술(PMV)는 좁아진 판막을 풍선을 이용해 넓혀주는 방법으로 판막수술을 대치할 수 있는 획기적인 치료법이었다. 1984년 일본의 심장외과 의사인 칸지 이노우에(Kanji Inoue) 박사가 세계 최초로 승모판막 협착 환자에게 자체 개발한 특수 풍선 카테터(Inoue Balloon)를 이용해 판막을 넓히는 데 성공했다. 1986년 사우디아라비아 알-자이백(Al Zaibag) 박사는 일반 카테터 풍선 2개를 좁아진 판막에 나란히 집어넣어 팽창시키는 더블 풍선법(Double-Balloon Technique)을 세계 최초로 개발했다. 이후 미국 하버드 의과대학 매사추세츠 종합병원의 이고르 팔라시오스(Igor F. Palacios) 교수와 피터 블록(Peter C. Block) 교수가 더블 풍선법을 체계화하고 대규모 임상 연구와 초음파 평가 기준(Wilkins score 등)을 결합하여 전 세계에 표준 술기로 확산시켰다.

연구강사 3년을 심도자실(Cath Lab)에서 먹고 자고 살았다. 방사선을 차단하기 위해 에이프런(방사선 차폐복)을 입고 일하지만, 방사선을 너무 많이 쪼여 백혈구 수가 2000개 이하로 떨어져 한번은 심도자실에서 2달간 쫓겨난 적도 있었다. 심장시술에 대해 어느 정도 자신이 생겨 있을 때였다. 하루는 과장님(고 이웅구선생님)이 찾으셨다. “닥터 박, ‘승모판막 풍선확장성형술(PMV)’이란 시술을 할 수 있겠는지 한번 찾아 보게나, 우리가 이 시술을 시작할 수 있으면 환자 치료에 어마어마한 변화를 만들어 낼 수 있을 거야.” 그 당시 우리나라 심장질환 환자 중에는 류마티스성 판막 질환, 특히 승모판 협착증 환자들이 많았다는 사실을 고려하면, PMV 시술은 시기적으로 엄청난 파급 효과를 기대할 수 있었다. 시술은 쉽지 않았다. 논문을 찾아 시술법을 검토하면서 머리 속에서 가상시술(Virtual Simulation)을 만들기 시작했다. 첫 번째 단계로, 다리의 정맥으로 심장에 들어가서 오른쪽 심방에서 왼쪽 심방으로 심방벽에 구멍을 만들어야 했다. 좌우 심방 벽 사이에 있는 난원공(foramen ovale)을 천자해서 두꺼운 관을 삽입해야만 풍선 기구들이 좌측의 승모판에 다다를 수 있기 때문이었다. 물론 난원공 자리에 구멍을 내기 위해 특별히 고안된 긴 바늘(Brockenbrough needle)이 있었지만 엑스레이 투시조영 만으로 난원공의 정확한 자리를 찾는 것은 쉬운 일이 아니었다. 의과 대학을 졸업하고, 거의 10년 만에 처음으로 다시 해부학 교실을 찾았다. 교수님의 허락을 받고 사체의 심장에서 난원공의 해부학적인 자리를 다시 눈으로 확인한다. 긴 바늘 끝을 난원공에 대고 위쪽으로 밀어 올리면서 바늘이 난

원공의 위쪽 가장자리(edge)에 닿는 감각을 손끝으로 느껴 본다. 눈을 뜨고 보면서 느끼고, 눈을 감고 느껴본다. 하지만 실제로 형광 투시아래 긴 바늘로 난원공의 엣지를 느끼는 것은 쉽지 않았다. 승모판 협착증 환자에서는 좁아진 판막 때문에 좌심방이 커져 있어서 대부분의 경우 난원공의 위치가 정상적인 사람보다 훨씬 뒤쪽, 아래에 위치한다는 것도 나중에 알았다. 바늘로 난원공을 통과하고 나서는 좌심방 뒤쪽으로 공간이 작기 때문에 긴 바늘을 시계 반대 방향으로 돌려 위쪽으로 밀어 넣어야만 좌심방 뒤쪽 심장벽의 손상을 피할 수 있다는 것도 심장의 해부학적인 구조를 다시 보고서야 알 수 있었다.

수없이 PMV 가상시술을 반복했다. 그리고 2주쯤이 지나서였다. 과장님이 승모판 협착증 환자를 한 분 준비해 두고 물으셨다. "할 수 있겠어?", "네, 한번 해 보겠습니다." 환자는 38세 여자 분이었다. 환자를 만났다. 승모판이 좁아졌다는 사실은 5년전에 알았는데 요즘 들어 부쩍 숨도 차고, 아이를 갖고 싶다고 했다. 시술에 대해 자세히 설명을 드렸다. 본인은 연구강사지만 3년 동안 시술에만 집중을 한 의사로써 시술에 대한 이해도는 누구보다도 충분하다고 했다. 하지만 이번 시술은 환자분에게 처음 시도하는 시술이라고 설명드렸다. 의외로 환자분이 적극적이었다. "제가 잘 부탁드릴게요." 심방벽을 뚫고, 가는 도자를 이용해서 철선 2개를 좌심방에서 좁아진 승모판막을 통과해 좌심실을 돌아서 대동맥으로 걸어 넘겼다. 이제 좁아진 판막에 2개의 풍선을 위치시키고 부풀리기만 하면 시술은 끝난다. 철선을 따라 좁아진 풍선을 밀어 넣는다. 첫 번째 풍선은 쉽게 들어 갔는데 2번째 풍선이 아무리 힘있게 밀어도 들어가질 않았다. 네다섯 시간 애를 쓰고 결국엔 물러 설 수밖에 없었다. 왜 풍선이 들어가지 않았는지 이해할 수 없었다. 그때 환자가 나를 위로했던 이야기를 잊을 수가 없다. "선생님, 감사합니다. 제가 급한 상황이 아니라면 다음에 다시 한번 저를 시술해 주실 수 있겠습니까? 선생님의 시술이 성공할 때까지 기다리겠습니다."

1988년 1월, 하버드 의과대학 메사추세츠 병원에서 처음으로 PMV 시술 워크샵이 열렸다. 과장님이 먼저 제안해 주셨다. "닥터 박, 한번 가서 보고 오는 게 어때?" "네! 가서 배워오겠습니다!"

이고르 팔라시오스(Igor F. Palacios) 교수와 피터 블록(Peter C. Block) 교수가 PMV를 직접 실연해 보여 주었다. 좁아진 판막에 풍선을 2개 위치시키고 힘껏 부풀려서 좁아진 판막을 열었다. 시술이 이루어지는 과정이 거칠게 없었다. 내가 이해하고 있는 시술과 다르지 않았다. '뭐가 문제였을까?'

나중에 팔라시오스 선생의 기구 설명에서 그 구체적인 이유를 확인할 수 있었다. 대동맥을 가로 지르는 철선이 훨씬 가늘고 부드러웠고 좁은 판막에 밀어 넣는 풍선도 작고 가늘게 만들어진 새로운 풍선이었다. 이 시술의 핵심은 풍선인데, 정작 한국에는 아직 새로운 풍선이 수입되어 있지 않았다. 워크샵이 끝나는 마지막 날, 팔라시오스 교수 방으로 찾아갔다. 한국에서 온 심장의사라고 소개하고 새로운 풍선을 몇 개 좀 빌려줄 수 있겠냐고 조심스럽게 이야기를 건넸다. 정말 어이없다는 표정이었다. 한참을 고민하던 팔라시오스 교수가 결연한 나의 의지를 읽었는지 기꺼이 풍선 두 개와 새로운 철선 2개를 건네 주었다. 소독해서 여러 번 사용이 가능하니 새로운 풍선이 수입될 때까지는 도움이 될 거라고 했다. 새 풍선, 새 철선을 직접 가방에 넣어 가지고 비행기를 탔다. 세상을 다 얻은 기분이었다. 한국에 돌아온 다음 다음날, 지난번 시술에 실패한 환자가 기다리고 있었다. 시술방에 들어가기 전에 다시 환자를 만났다. "걱정하지 마세요. 이번에는 잘될 겁니다." 환자도 환하게 웃었다. 과장님과 여러 선생님들이 지켜보는 가운데 시술을 시작했다. 긴 바늘 끝에서 심방벽 난원공엣지의 '딸깍'걸리는 감각이 손끝에 뚜렷하게 느껴졌다. 바늘을 찔러 심방벽에

작은 구멍을 냈다. 새로 받아온 철선 2개가 부드럽게 좌심실을 돌아서 대동맥으로 넘어갔다. 그리고 미국에서 가져온 새 풍선 2개를 철선을 따라 좁아진 판막으로 밀어 넣었다. 아무런 저항 없이 부드럽게 풍선이 밀려 들어갔다. 뒤에 서있던 레지던트에게 힘있게 소리쳤다. "인플레이트(inflate)!" 풍선이 힘껏 부풀려지면서 좁아진 판막이 열렸다. 시술은 1시간 만에 끝났다. 초음파로 넓어진 판막을 확인한다. 좁아져 있던 승모판막이 크게 열려 신나게 춤추고 있었다.

환자들이 몰려들었다. 초기 65명의 환자 중 95%에서 성공적인 판막 확장과 환자의 증상 개선을 입증한 연구 결과를 1989년 미국심장학회(ACC 1989)에 발표했다. 한국에서 PMV시술이 시작하게 된 것은 돌아가신 이웅구 선생님의 의지였다. 2025년 미국심장학회(ACC/AHA) 및 유럽심장학회(ESC) 가이드라인에서 PMV시술은 해부학적으로 적합한 중증 승모판 협착증 환자의 1차 표준 치료(Class I)로 공식 지정되어 있다.

- Park SJ, et al. Percutaneous mitral valvuloplasty using the double balloon technique: immediate results and determinant factors of increasing mitral regurgitation. *The Korean Journal of Internal Medicine*. 1991 Jul;6(2):51-7.
- Park SJ, et al. Immediate and one-year results of percutaneous mitral balloon valvuloplasty using Inoue and double-balloon techniques. *The American Journal of Cardiology*. 1993 Apr 15;71(11):938-43.

2. 1991년, 팔마-샤츠(Palmaz-Schatz) 스텐트를 시작하다.

1979년 그룬치히라는 스위스 의사가 처음으로 협심증 환자에서 좁아진 심장혈관을 풍선으로 넓히는 시술(PTCA, percutaneous transluminal coronary angioplasty)을 시작한 이후로 협심증 환자에서 PTCA 시술은 이미 효과적인 치료 시술로 보편화되고 있었다. 하지만 PTCA 시술은 시술 후 혈관이 갑자기 막히거나 다시 좁아지는 문제가 남아 있었다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로 작은 철물 구조물 스텐트가 개발되었다. 스텐트 시술은 풍선도자 풍선 부위에 스텐트를 실어서 좁아진 병소에 옮겨 놓고 확장시켜 혈관에 고정한다. 기술적으로는 PTCA와 크게 다르지 않았다.

미국 존슨앤드존슨(J&J) 사에서 개발된 팔마-샤츠(Palmaz-Schatz) 스텐트가 이제 막 캐나다에서 임상연구를 시작했다는 소식이 들렸다. 1991년, 캐나다의 런던이란 작은 도시에 있는 빅토리아 병원에 갔다. 팔마-샤츠 스텐트 제1상 임상연구를 하고 있었다. 이미 120건 이상의 스텐트를 시술하여 높은 성공률과 낮은 재협착률에 관한 좋은 결과를 만들어내고 있었다. 이 결과를 이끌어 낸 인물은 바로 이안 펜(Ian Penn)이었다. 그는 동양에 대해서 많이 알고, 무속신앙에 대해서도 알고, 철학을 공부하다가 우연히 의사가 되었다는 독특한 사람이었다. 미리 준비한 스텐트 시술을 여섯 차례에 걸쳐서 시연해 보여주었다. 스텐트를 넣은 좁은 혈관이 아주 크게 열려 있었다. 작은 코일 하나가 만들어낸 기적이 놀라울 따름이었다. 오후 내내 이미 찍어 놓은 영상 50건 이상의 케이스를 들여다본다. 스텐트 시술은 앞으로 중재치료시술에 큰 변화를 만들 거라는 확신이 들었다. 이안펜과 존슨앤존슨 회사의 허락을 받고 스텐트 2세트를 가지고 귀국한다. 1991년 4월 귀국하고 얼마 지나지 않아 좌관동맥 기시부에 병변이 있는 환자에게 처음으로 스텐트 시술을 시행했다. 늘 하던 PTCA시술에 스텐트 그물망 하나만 추가되었을 뿐이었다. 큰 어려움 없이 시술에 성공했다. 동남아에서는 처음이었다. 스텐트 시술 40여 건의 결과를 정리해 학회에 발표하는 날이었다. 다

른 대학의 한 원로 교수님이 크게 꾸짖듯이 말씀하셨다. “그걸 왜 해?” 그 당시 새로 시작한 스텐트 시술에 대한 불신이 팽배해 있었다. 이상하리만치 노교수님의 꾸짖음이 하나도 마음에 와닿지 않았다. 스텐트가 미국 FDA 승인 및 상용화된 시기는 그로부터 3년 후 1994년 8월이었다. 그리고 스텐트 시술은 세계적으로 보편화 되었다. 그때 만난 캐나다의 이안펜은 지금 의사를 그만두고 화가로 활동 중이지만 지금까지도 오랜 인연을 유지하고 있는 절친한 친구가 되었다.

3. 1994년, ‘금기의 영역’ 좌주간부 병변의 스텐트 시술을 시작하다.

좌관상동맥 주간부(Left Main Coronary Artery. LM)란 좌측의 큰 2개의 관상동맥, 좌전하행지와 좌회선지가 갈라지기 전의 시작 부위로 심장 전체 근육의 2/3 이상을 먹여 살리는 아주 중요한 혈관 부위이다. 지난 40여년간은 좌관동맥 주간부 부위의 협착 병변 치료는 관상동맥 우회수술(Coronary Artery Bypass Graft Surgery, CABG)이 유일한 표준 치료법(Gold Standard)이었다. 미국 연수에서 돌아온 후 스텐트 시술에 몰두했다. 많은 자료 분석을 통해서 논문을 만든다. 그 논문이 결국 환자의 좋은 치료와 연결되어 있다는 사실을 배운다.

하루는 좌관상동맥 주간부(LM) 입구부위가 좁아져 있는 환자를 설득해서 스텐트로 치료하자고 동의서를 받는다. 사실 LM 혈관 병변은 혈관이 아주 굵고 시술하기 좋은 자리에 있기 때문에 기술적으로는 스텐트 치료가 어렵지 않다고 생각했다. 양적으로 많은 스텐트 시술 경험이 엉뚱한 생각을 하게 만들었다. 스텐트 시술이 이미 보편화 되었지만, LM 병변에 스텐트 치료를 한 데이터는 없었다. 밤새 잠을 설친다. 다음날 아침 6시, LM 스텐트 시술을 끝냈다. 생각했던 대로 어렵지 않았다. 10분 만에 치료가 끝났다고 하자, 환자가 의아해하면서도 너무 좋아했다. 자신감이 생겼다. “이걸 왜 수술을 하지?” 그리고 연속해서 LM 협착환자 42여명을 스텐트 시술로 치료한다. 1년이 걸렸다. 성공율 100%, 시술에 따른 합병증, 사망은 없었다. 너무 흥분되고 무서웠다. 그동안 했던 LM 스텐트 시술 환자 데이터를 정리하려고 필름을 찾았다. 그런데 환자 40명의 필름이 모두 없어졌다. 같은 병원의 한 외과 선배님이 찾으셨다. ‘당신 시술 필름은 내가 다 가지고 있는데, 당신은 지금 불법 치료를 하고 있는 거야!’ 고소를 하겠다고 협박을 했다. 스텐트를 시술했던 환자를 통해서 병원에 이의를 제기하게 하고 병원 로비에서 꽹과리를 치며 소란을 피우기 시작했다. 부원장님이 불러 병원이 시끄러우니 일단 시술을 멈추라고 했다. 그리고 1년 넘게 LM 병변에 스텐트 시술을 포기해야 했다. 숫자는 작지만 그동안에 시행했던 42명 LM 환자들의 스텐트 시술 결과를 모아 논문을 만들었다. 그리고 6개월 쯤이 지나서 미국심장 학회 잡지(JACC, 1998)에 논문이 실렸다. 평가는 고무적이었다. 논문 카피본을 원장님께 보내 드렸다. 다음날 아침 원장님이 부르셨다. “LM 병변에 스텐트 시술은 어떻게 시작하게 된 거야?” 아주 큰 혈관이라 기술적으로는 스텐트 시술이 어렵지 않은 병변이라고 설명드렸다. “이 시술 얼른 다시 시작하지!” 원장님(고 민병철 선생님)은 외과 의사였는데도 학문에 대한 이해의 폭이 넓으셨다. 선생님의 현명한 판단이 없었다면 LM 스텐트 치료시술은 지금쯤 누군가 다른 사람에 의해서 선도되었을 것이라 생각해 본다. 그래서 난 행운아다.

그러고도 오랜 시간이 걸렸다. 미국학회에 처음 데이터를 발표하면서, 미국의 한 유명한 외과 의사로부터 면전에서 ‘미친놈(crazy)’이라는 욕을 들었다. 1995년, LM 스텐트 시술에 관한 실연회(Angioplasty Summit이 나중에는 TCTAP로 명명됨)를 만들었다. 처음에는 병원내 강당에서 시작했다. 스탠포드(Standford) 대학의 Alan Young교수, 에모리(Emory) 대학의 Spencer King교수, 그리고 지금

은 미국 심장학회 회장이 된 마운트 시나이(Mount Scinai) 대학의 Roxana Mehran교수가 매년 우리 실연회에 참석하면서 LM 스텐트 시술에 대한 이해가 세계적으로 확산되었다. 그들은 지난 30년 동안 지식을 나눈 멘토(Mentor)이면서 지금도 매년 우리 미팅에 참석하는 친구가 되었다.

2008년, 그동안에 이루어졌던 LM 스텐트 환자 등록 연구(MAIN-COMPARE Registry)를 통해 스텐트 시술과 수술(CABG) 환자들의 장기 예후를 비교하여 대등한 안전성과 효과를 입증한 논문을 *NEJM(New England Journal of Medicine)*에 실었다. 그리고 2011년에는, LM 환자를 대상으로 스텐트 시술과 수술(CABG)을 비교한 1:1 무작위 대조 임상시험 연구(PRECOMBAT, RCT) 결과를 다시 *NEJM*에 발표했다. 주요 심뇌혈관 사건 발생률에서 스텐트 시술이 수술에 결코 뒤지지 않음(Non-inferiority)을 명백히 증명해 냈다. 그후 LM 스텐트 시술에 관한 글로벌 대규모 무작위 대조 임상시험 연구(EXCEL, NOBLE)들이 이루어졌다. 그리고 2025년, 미국심장학회/유럽심장학회 치료지침을 보면 적어도 LM 병변 환자의 2/3에서는 '스텐트 시술이 수술을 대치할 수 있다'로 지침이 바뀌었다. 30년이 넘게 걸렸다. 난 'Crazy 박'에서 진화해 '메인 박(Main Park)'이라는 별명을 얻었다.

- Park SJ, et al. Stenting of unprotected left main coronary artery stenoses: immediate and late outcomes. *Journal of the American College of Cardiology*. 1998 Jan;31(1):37-42.
- Seung KB, Park DW, Park SJ, et al. Stents versus coronary-artery bypass grafting for left main coronary artery disease. *NEJM*. 2008 Apr 24;358(17):1781-92.
- Park SJ, et al. Randomized trial of stents versus bypass surgery for left main coronary artery disease. *NEJM*. 2011 May 5;364(18):1718-27.

4. 2010년, 판막 질환의 패러다임 혁신: 경피적 대동맥판막 치환술(Transcatheter Aortic Valve Implantation/Replacement, TAVI/TAVR)을 시작하다.

대동맥판막협착증(Aortic Valve Stenosis, AS)은 심장 혈액을 온몸으로 보내기 위해 계속 열리고 닫히는 '대동맥판막'이 퇴행성으로 석회화되고 섬유화되어 좁아지는 현상이다. 2011년 풍선확장형(Edwards SAPIEN) 스텐트 판막이 미국 FDA 승인을 받을 때까지는 가슴을 열고 하는 수술적인 판막치환술(Surgical Aortic Valve Replacement, SAVR)이 유일한 치료 방법이었다. 하지만 현재 TAVI 시술은 심장을 열거나 판막 자체를 제거할 필요가 없으며, 시술 시간도 약 30분 정도로 짧고, 개흉 수술에 비해 환자의 체력 소모가 덜하고 수술 후 입원 기간도 3일 가량으로 짧다. 가히 대동맥 판막치료의 혁신적인 치료 방법이 아닐 수 없다.

경피적 대동맥판막 치환술(TAVI)은 2002년, 프랑스의 알란 크리비에(Alain Cribier) 선생이 처음으로 스스로 제작한 풍선확장형 판막을 환자에게 삽입하는데 성공했다. 그 이후 2007년 풍선확장형(Edwards SAPIEN)과 자가확장형(Medtronic CoreValve) 기구가 유럽 CE 마크를 획득하며 상용화가 시작했다. PARTNER 1B 연구(Edwards SAPIEN)를 통해 수술 불가능 환자에서 표준 약물치료에 비해 사망률을 대폭 감소시켰고, PARTNER 1A 연구로 고위험군(High-risk) 환자에서 외과적 수술에 비해 뒤지지 않음(Non-inferiority)을 명백히 증명해 냈다. 그리고 2011년 미국 FDA 승인을 받았다.

2010년, 서울아산병원에서도 TAVI 시술을 시작했다. 지금은 돌아가셨지만 TAVI 시술을 처음 시작하신 크리비에 선생이 프록터(proctor)로 첫번째 시술을 도와주셨다. 10년이 지난 지금 우리는 양이나 질적인

면에서 TAVI 시술의 세계적인 리딩 그룹에 들어섰다. 2025년 시술 건수 2500예를 넘어섰으며, 최근에는 의료진의 숙련도와 스텐트 기구의 발전으로 99.5%의 성공률의 우수한 성적을 기록했다. TAVI 시술을 위해서 가장 중요한 것은 내과외과 팀의 협력이다. 지금은 이 시술만을 위한 독립적인 교육 프로그램도 운영한다.

2025년, TAVI 시술은 수술 불가능 환자의 구제 요법에서 시작해서, 저위험군을 포함한 대부분의 대동맥판막협착증 환자에서 수술적인 방법을 대치하는 표준 치료 방법으로 발전했다. 현재 TAVI 시술은 미국/유럽 가이드라인에서 65~75세 이상 환자의 1차 표준 치료로 자리 잡았으며, 이엽성 판막(Bicuspid AS) 및 재시술(TAVI-in-TAVI), 장기 내구성(Durability) 연구가 활발히 이어지고 있다.

지식의 나눔: 심장중재시술 관련 국제학회를 30년째 이끌어 오고 있다.

1995년부터 TCT-AP(Transcatheter Cardiovascular Therapeutics, Asia -Pacific)라고 명명된, 심장중재시술 관련 국제학회를 30년 넘게 이끌어 오고 있다. 처음에는 LM 스텐트 시술의 이해를 돕기 위해서 케이스를 보여주는 시연회였다. 지금은 서울아산병원 심장내과를 중심으로, 세계 여러 나라에서 시술 실연을 통한 심장혈관질환의 중재술에 새로운 개념과 구체적인 술기를 소개하고, 최근 학술 자료를 발표하는 교육의 장으로 발전했다. 지난 30년간 환태평양지역 최대의 심장중재시술 국제학회로 발전하여 매년 4월말 전 세계에서 4000여명의 심장중재시술 관련 의학자들이 서울에 모인다.

에필로그: 세계 1위 연구팀의 자부심.

1989년부터 지금까지 서울아산병원 심장내과에서는 10편의 NEJM, 1편의 Lancet, 703편의 SCI index 논문을 만들어 냈다. 2024년 미국 중재심장학회(TCT)가 선정한 전 세계 10대 의학 선도 연구 그룹(Leading Group) 평가에서 서울아산병원 심장내과 연구팀이 세계 1위(글로벌 톱)의 영예를 차지했다. 작은 심장 카테터실에서 시작된 우리의 여정은 세계 의학의 중심에 섰다. 이는 지난 40여 년간 동고동락한 동료 의료진과 연구진이 함께 이루어 낸 결실이었다. 개인적으로는 유럽 심혈관중재학회(PCR)에서 수여하는 에치카상(Ethica Award, 2005)을, 미국 심혈관중재학회(TCT)에서 수여하는 최고업적상(Achievement Award, 2008)을 받았다. 국내에서는 분쉬의학상(2005), 유일한상(2010), 아산의학상(2011), 대한민국최고 과학기술인상(2011), 연세의학대상(2016), 호암상(2020)을 받았다. 로버트 프랭크의 『실력과 노력으로 성공했다는 당신에게』라는 책을 통해 얻은 깨달음이 있다. 성공은 운이다. 개인의 성공은 오랜 시간 공들여 만들어진 우리 사회의 인프라와 환경 덕분이기 때문이다. 그래서 개인의 성공은 시대적 환경의 무작위 선택이라고 볼 수 있다. 그러고 보면 난 아주 재수가 좋은 행운아라고 생각한다.

분과 및 학계 동향

자연 제2분과 회원 동정 및 학계 동향



鄭鎭河 會員 (분자생물학)

자연 제2분과는 지난 7월, 한 달 동안에 哀慶事가 겹쳐 일어났다. 대한민국 과학계의 巨木이신 조완규 회원께서 7월 13일, 향년 98세에 노환으로 별세하셨다. 조완규 회원께서는 서울대 생물학과 교수, 제18대 서울대 총장, 제32대 교육부 장관, 한국과학기술한림원 초대 원장, 대한민국 학술원 회원 등을 역임하면서, 한국 기초생물학 발전과 과학기술 행정의 토대를 마련하셨다. 다시금 삼가 고인의 명복을 빕니다.

7월 16일에는 이강근 교수를 신입회원으로 맞이한 경사가 있었다. 이강근 회원은 서울대에서 학사학위(1984), 미국 Purdue 대학에서 박사학위(1992)를 취득하였고, 1993년부터 서울대 지구환경과학부 교수로 재직중이다. 이강근 회원은 지하수의 보존과 활용, 기후변화와 수자원의 미래, 오염지하수의 진단과 정화 연구에서 국제적으로 탁월한 연구업적을 내었다. 특히 국내 단열암반 지하수 유동 연구의 토대를 마련하고, 비수용성 유체로 오염된 지하수의 정화 기술을 개발하였다. 최근에는 지진과 지하수의 상호작용, 우라늄 등 자연방사성 핵 종의 지하수 내 거동으로 연구 범위를 넓히고 있다. 2017년 포항지진에 대한 정부조사연구단 단장을 맡아 원인 규명에 기여했으며, 그 성과를 *Science*의 Policy Forum에 발표하였다. 대한지질학회와 한국지하수토양환경학회의 회장을 역임한 바 있고, 현재에는 대통령 직속기관인 원자력안전위원회와 물관리위원회의 위원 역할을 수행 중에 있다.

학술연구활동

林繁藏 회원은 2026년 1월에 대한에어로빅협회 정병권 회장을 접견하여 한국에어로빅학회 신년도 학술활동 계획수립에 대한 의견을 교환하였고, 2월에는 한국에어로빅학회 창립총회에서 회장으로 선출되었다. 또한 안민석 전 국회의원을 접견하여 한국체육학회 및 한국스포츠사회학회 지원을 위한 의견을 교환하였다. 그리고 대한민국 저작권협회 이사회에 참석하였다. 3월에는 아시아태권도협회 이규석 회장을 접견하였으며, 한국체육과학연구원 원장을 만나 면담하였고, 서울대학교 사범대학 체육교육과 학과장을 만나 학부생 학술활동 활성화를 위한 의견을 교환하였다. 4월에는 국회의원회관 2층 세미나실에서 개최된 스포츠포럼2.1 불법도박 예방을 위한 토론회에 참석하고 총평을 하였다. 5월에는 올림픽회관에서 개최된 한국체육학회 학술세미나에서 개회사를 하였고, 한국스포츠과학원 개원 46주년 기념식에서 축사를 하였다. 또한 부산에서 개최된 전국소년체육대회에 참석하였고, 부산 해운대 극동호텔에서 개최된 대한에어로빅협회 정기 이사회에 참석하여 에어로빅학회 학술활동을 보고하고 '에어로빅 활성화를 위한 특강'을 하였다. 학술원 활동으로는 5월에 학술원 우수학술도서 심사에 참여하였다.

張浩完 회원은 대한민국학술원의 지원으로 학술연구총서인 저서 '북한의 지질 및 광물자원 현황 연구'을 집필하게 되었다(2026년 1월~2027년 8월). 한반도를 삶의 바탕으로 삼고 있는 남·북한은 분단된 상황에서 발전되어 온 지질학적 지식과 이에 관한 남·북한의 학

문적 동향과 상대적 발전 방향을 비교하고, 지질학적 지적 자산을 융합하는 것은 꼭 수행해야 할 매우 의의 있는 과업이라 할 수 있다. 이러한 의미에서 통일된 한반도 전체 경제발전의 바탕이 될 수 있는 북한의 지체구조와 지질 및 광물자원에 대한 이해가 부족한 현 상황을 극복하고자 하는데, 이 연구를 하게 되었다. 현재 북한 지질 및 자원에 관한 자료를 구하기 어려워 연구 진행 속도가 늦지만, 중국 학술지를 통해 필요한 자료를 확보하고 있다.

2025년 10월 23일, '한국 교육의 현실, 문제점과 과제, 그리고 새로운 접근방법'이라는 주제로 열린 제3차 집담회(10월 23일)의 지정 토론자로 참석하여, 현 한국교육의 문제점과 새로운 과제를 주제로 토론하였다. 학술원 주최 국제학술대회(2025년 10월 17일), 외국학술원 석학초청 학술회의(2025년 11월 4일), 특정연구과제 학술토론회(2025년 11월 14일), 학술세미나(2026년 5월 15일) 등 각종 학술모임에 참여하였으며, 학술원상 기초과학 부문 심사(2026년 4월20일; 5월 8일)와 우수학술도서 심사(2026년 5월 21일; 6월 15일)위원으로 참여하였다. 또한 학술원에서 간행한 지질과학 분야의 2025년 [학문연구의 동향과 쟁점](총 989페이지)이 지질과학계에서 호평을 받게 되었다. 이에 따라 대한지질학회의 요청으로 학술원의 동의를 얻어, 지질학회지에 특별호(2026년 9월, 11월)에 나누어 게재하게 되었으며, 관련 내용에 관한 발간사로 서문을 투고하였다.

金相九 회원은 태평양과학협회(Pacific Science Association; PSA) 제24회 총회에 참석하였다. PSA 총회 및 학술대회는 2025년 11월 20일부터 24일까지 5일간 중국의 광둥성 산터우시 화이트 스완 호텔 컨벤션 센터에서 산터우대학교(Shantou University)와 샤먼대학교(Xiamen University) 그리고 PSA 중국위원회가 공동으로 개최되었다. PSA는 아시아·태평양 지역의 지속 가능한 발전을 지원하기 위해 과학과 기술을 발전시키고자 하는 지역별 비정부 학술 단체이다. PSA는 아시아 태평양 지역에서 학제 간 및 국제 연구와 협력을 촉진하며, 지역의 주요 문제와 과제를 중심으로 과학이 인간의 필요를 충족시키고, 지역 주민들의 삶의 질과 모든 생명이 의존하는 자연환경을 향상하고자 노력하고 있는데 이번 학술대회의 주제는 "지속 가능한 미래를 향하여"였다. 김 회원은 기조연설 세션의 사회자로 강연을 진행하였다.

학술연구총서 55권 "식물분자생물학"을 출판하였다. 본 단행본은 국내에서는 처음으로 소개된 관련 저서이다. 총서는 식물의 기초 이론과 응용 연구를 고루 다루었다. 학술원의 2026년도 전문학술활동지원사업의 연구자로 선정되었으며, 연구 과제는 "애기장대에서 꽃차례 발달의 유전적 조절"이다. 애기장대의 꽃차례 발달은 줄기정단분열조직(shoot apical meristem, SAM)의 형성, 유지, 활성 조절과 영양생장에서 생식생장으로의 전환이 연속적으로 통합되는 복합적인 발달 과정이다. 꽃차례 형성을 조절하는 유전자는 식물체의 내외적 환경 변화에 민감하게 반응하여 발현되는데, 내적으로는 식물호르몬의 조절 작용이 주된 역할을 담당하고 있으며, 외부 환경으로는 밤낮의 길이, 광도, 온도 등에 크게 영향을 받는다. 논문에서는 꽃차례 발달의 내외적 환경 조절과 이 과정에 관여하는 유전자를 집중적으로 분석할 예정이다.

2026년 제2회 학술원 집담회가 6월 17일에 있었는데 지정 토론자로 참여하였다. 인문사회 4분과 김효전 회원이 "한국에 있어서 근대 국가학의 발전"이란 제목으로 발표하였다. 김효전 회원은 한국 근대 국가학의 발달 과정을 외세의 침략, 민족의식의 각성, 일본 메이지유신을 통한 서구화의 모색, 그리고 일제 강점기의 억압 속에서 조명하였는데, 단순한 학문사적 발전만이 아니라, 한국 사회가 근대 국가 체제를 수립하는 과정에서 어떤 지적 기반을 마련했는지를 집중적으로 토론하였다. 김상구 회원은 학술원의 "대한민국

학술원상” 추천위원회 위원과 학술원의 국제교류협력위원회 위원으로 활동하였다.

鄭鎭河 회원은 2025년도 학술원 특정연구과제로 “감기의 종류와 관련 바이러스(Types of Respiratory Syndromes and Associated Viruses)” 제목의 연구를 수행하여 2026년 6월에 보고서를 제출하였고, 2026년 11월 13일에 학술원 학술토론회에서 이 연구의 결과를 발표할 예정이다. 학술회의로는, 2026년 1월 5~7일에 개최된 ‘2026년도 한국분자세포생물학회 동계학대회’(장소: 용평리조트)에 참석하였다. 2025년 12월 15~17일에는 발렌시아대학을 방문하였다. 또한, 2026년 6월 28일~7월 1일에는 학술원의 지원으로 임정빈 회원과 함께 ‘2026 유럽생명공학 학술대회(ECB, European Conference of Biotechnology)’(장소: 벨기에, Antwerp)에 참석하였다. 2026 ECB의 주제는 “내일을 형성하다: 건강, 식품, 에너지, 환경을 위한 바이오 기술(Shaping Tomorrow: Biotechnology for Health, Food, Energy, Environment)”이었다. ‘2026 ECB 참가기’는 「학술원통신」 제398호(2026.9.1)에 게재되었다.

학술원 위원회 활동으로는, 2025년 11월 4일에 개최된 제2회 외국학술원 석학초청 학술회의의 조직위원 역할을 하였다 (위원장, 임현진 회원). 제2회 학술대회의 주제는 “글로벌 과제 해결을 위한 학문과 학술원의 역할 (Role of Sciences and Science Academies in Addressing Global Challenges)”이었다. 이 외의 학술 활동으로, 2026년 4월 1일에는 “mRNA 백신”이라는 기고문을 「학술원통신」 제393호에 발표하였다. Elsevier에서 발간하는 *Biochemical Biophysical Research Communication*이라는 저널의 editor로 매년 100여편의 논문을 심사하고 있다. 그리고 8월 28일에 개최된 서경배 과학재단 설립 10주년 기념회에서 축사를 하였다. 서경배 과학재단은 2016년 서경배 이사장이 3,000억을 기부하여 설립되었으며, 그 후 매년 3~5명의 젊은 과학자(조교수 급)를 선발하여 매년 3~5억씩 5년간 연구비를 지원하고 있다.

李基和 회원은 학술활동으로, 2025년 12월에 대한민국학술원 학술원총서 56권으로 “Historical Earthquakes of Korea”을 출간하였다. 본 저서는 서기 2년부터 1904년 사이에 한반도에서 발생한 2,234회의 지진 기록을 삼국사기, 고려사, 고려사절요, 조선왕조실록, 승정원일기, 증보문헌비고, 일성록 등 10종의 사료에서 수집하여, 이 지진들의 진앙과 규모 등을 결정하고 한반도 역사지진활동의 특성을 분석하였다. 지난 2,000년간 한반도에서 지진에너지의 95% 이상이 역사지진들에 의하여 방출되었으며 지진활동은 15~18세기에 이례적으로 활발한 기간을 제외하고는 대체로 낮은 편이었다. 이는 한반도의 지진활동이 매우 불규칙한 판내부지진활동의 범주에 속함을 보여준다. 한반도 북동부 지진활동이 타지역에 비하여 매우 낮았고 대부분의 주요 역사지진들이 중생대에 한반도에서 발생한 대규모 지각변동으로 생성된 주요 단층과 지체구조구의 경계에서 발생했다. 2026년 1월부터는 학술원 전문학술활동 지원사업으로 “한반도의 지진지체구조구”에 관한 연구를 진행하고 있다. 한반도의 확률론적 지진재해 분석에 기본 자료가 되는 지진지체구조구의 설정을 위해 작년에 출간된 “Historical Earthquakes of Korea”의 역사지진 자료와 1905년 이후의 일본 기상청 및 우리나라 기상청 자료를 포괄하여 반도 내 주요 지진원들의 지진활동의 특성을 분석하고 있다. 그리고 2026년 4월 이후로는 학술원 정책연구 과제로 “대한민국을 위한 지진재해대책의 통찰과 전망”에 관한 연구를 수행하고 있다. 판내부지진활동은 판경계지진활동에 비하여 낮은 편이고 수천년의 간격을 두고 활성화되는 매우 불규칙한 특성을 갖는다. 이러한 이유로 판내부 지역의 합리적인 지진재해 대책을 수립하는 데 어려움이 있다. 본 연구의 목적은 일본, 미국, 중국 등 판경계 및 판내부지진활동이 활발한 지역의 국가적 지진재해 대책을 조사하여

전형적인 판내부지진활동의 범주에 속하는 우리나라에 적합한 지진재해대책을 정부에 건의하는 데 있다.

기타 활동으로, 2025년 12월에는 재경 광주서중일고 동창회보 <무등산 아침해>에 수필 “지복론(至福論)”을 기고하였고, 20세기 가장 아름답고 심오한 시로 생각하는 R. M. Rilke의 묘비명(epitaph) “장미여, 오 순수한 모순이여. 수많은 눈꺼풀 아래 어느 누구의 잠도 아닌 기쁨이여”를 소개하고 인생의 지복이 “수많은 눈꺼풀 아래 어느 누구의 잠도 아닌 기쁨”임을 선(禪)불교의 본지풍광(本地風光)과 연관하여 해설하였다. 그리고 2026년 1월에는 동산불교대학에서 열린 경기고 불자 모임에서 “정토불교 (淨土佛敎)” 강의를 하였다. 불교는 오직 자력으로 전생의 모든 죄업(罪業)을 소멸해야 성불한다는 자력불교(自力佛敎)와 단지 불보살의 공덕과 원력에 의존하여 모든 죄업을 소멸하지 않고도 성불할 수 있다는 타력불교(他力佛敎)로 나누어진다. 정토불교는 타력불교로 무지하거나 악한 중생에게도 성불의 길을 열어준 아름답고 위대한 가르침임을 설명했다. 2026년 3월에는 조선호텔에서 열린 67회 3.1 문화상 시상식에 참석하였다.

安鎭興 회원의 연구 내용과 그 결과를 발표한 논문은 다음과 같다. 건강에 필요한 원소 중 하나는 철이다. 그런데 곡물에 들어 있는 대부분의 철분은 피트산(phytic acid)으로 저장되어 있어 인간이나 가축이 소화하지 못한다. 이에 피트산의 함량을 낮추고 장이 흡수할 수 있는 철 형태인 니코티아나민(NA)과 2'-데옥시무기네산(DMA) 함량이 증가된 벼를 생산하였다. 개량된 벼 라인을 포장에서 재배한 결과 생장이 정상적으로 일어났으며, 철이 흡수하기 용이한 형태로 열매에 저장된 것이 관찰되었다. 이 결과는 2025년 9월 *Journal of Agricultural and Food Chemistry*에 발표되었다. 광주기는 식물의 개화시기를 결정하는 핵심적인 환경 요인이다. R2R3 유형의 MYB 단백질인 OsMYB44를 과발현시켰을 때 단일 조건에서는 개화가 촉진되는 반면, 장일 조건에서는 개화가 지연되었다. OsMYB44의 C-말단 영역이 벼의 주요 광주기 개화 조절자인 Heading date 1(Hd1)과 상호작용하는 것을 밝혔다. 또한 OsMYB44는 Days to heading 8(DTH8) 및 OsNF-YC2와도 상호작용하여, Hd1과 함께 NF-Y 전사 복합체를 형성함으로써 전사 조절에 참여함을 확인하였다. 이 결과는 2026년 1월 *Plant Physiology*에 게재되었다.

식물에 이로운 다양한 균이 존재한다. 곰팡이는 뿌리 표피에 침투해 수지상체나 낭상체를 형성하며, 이를 통해 식물은 질소·인·황·철·칼륨 등 무기영양소와 물을 공급받는다. 곰팡이는 여러 식물 뿌리를 연결해 탄수화물과 인을 이동시켜 어린 개체나 그늘 식물에 자원을 전달하는 역할도 한다. 박테리아도 세포 내외에 공생하며, 대표적으로 뿌리혹박테리아는 콩과식물 뿌리혹에서 질소를 고정해 제공하고 탄수화물을 얻는다. 다양한 뿌리 미생물은 병원균을 억제하고, 유익균은 뿌리 분비물을 먹으며 근권에 서식해 유기산·효소를 분비, 불용성 광물을 녹여 식물 흡수를 돕는다. 또한 병균과 경쟁하거나 항생제를 분비해 식물 방어력을 높인다. 일부는 염분·가뭄 스트레스 내성을 강화하고, 2차 대사산물을 늘려 병 저항성과 과실 품질을 향상시킨다. 이러한 연구 내용을 학술원논문집(자연과학편) 제65집1호에 개재하였다.

任正彬 회원은 2025년도 학술원 전문학술활동지원사업으로 “H4-folic acid의 생합성 및 조효소 기능(Biosynthesis and Coenzyme Function of H4-Folic Acid)” 제목의 연구를 수행하여 2025년 11월 30일에 보고서를 제출하였고, 2026년 4월 21일에 학술원 자연 제2분과 세미나에서 이 연구의 결과를 발표하였다. 학술원 위원회 활동으로는, 2025년 12월 2일 이후로 제3회 외국학술원 석학초청 학술회의의 조직위원장으로 활동하고 있다. 제3회 학술대회의 주제는 “글로벌 과제 해결을 위한 학문과 학술원의 역할(Role of

Sciences and Science Academies in Addressing Global Challenges)"이며 2026년 11월 3일에 개최될 예정이다. 또한 2026년 4월 30일 이후로 제25회 학술원 국제학술대회 조직위원으로 활동하고 있다(위원장, 이병기 회원). 제25회 대회의 주제는 "인공지능과 지식, 인간, 문명의 미래(AI and the Future of Knowledge, Humanity, and Civilization)"이며, 2027년 5월 11~12일에 개최될 예정이다.

학술회의로는, 2025년 9월 30일~10월 2일에 개최된 '2025년도 한국분자세포생물학회 국제학술대회'(장소: 제주 국제컨벤션센터)에 참석하였고, 2025년 10월 26~29일에 개최된 '2025년도 한국미생물학회 국제학술대회'(장소: 수원 컨벤션센터)에 참석하였고, 2026년 1월 5~6일에 개최된 '2026년도 한국분자세포생물학회 동계심포지움' (장소: 용평리조트)에 참석하였다. 또한 2025년 11월 11~14일에 개최된 'Cold Spring Harbor Asia Symposium on Immunoreceptor Signaling and Therapeutic Applications'(장소: Awaji Yumebutai Convention Center, Kobe, Japan)에 참석하여 "Journey with a Dreamer" 제목의 특강을 하였다. 2026년 6월 28일~7월 1일에는 학술원의 지원으로 정진하 회원과 함께 '2026 유럽생명공학 학술대회(ECB, European Conference of Biotechnology)'(장소: 벨기에, Antwerp)에 참석하였다. 2026 ECB의 주제는 "내일을 형성하다: 건강, 식품, 에너지, 환경을 위한 바이오 기술(Shaping Tomorrow: Biotechnology for Health, Food, Energy, Environment)"이었다. '2026 ECB 참가기'는 「학술원통신」 제398호(2026.9.1)에 게재되었다.

朴鍾郁 회원은 환경부 국립생물자원관 지원으로 수행되고 있는 '한반도 식물지 발간 연구 사업'의 편집위원장 및 저자로서 2001년부터 현재까지 연구에 참여하고 있으며, 2025년 3월부터 현재까지 '*Flora of Korea*. Vol. 7b-2. Commelinidae: Cyperaceae (2)','*Flora of Korea*. Vol. 8a. Zingiberidae and Liliidae (1): Musaceae to Dioscoreaceae' 및 '*Flora of Korea*. Vol. 8b. Liliidae (2): Orchidaceae' 등 식물지 3권(총 12과 463종)에 대한 분류학적 수정연구, 원고 작성, 분류군 기재 통일을 위한 최종 교열 및 편집을 수행하고 있으며, 이중 Vol. 8a와 Vol. 8b는 올해 12월 출간을 목표하고 있다. 2026년 6월 12일에는 식물지 발간 연구 사업 저자 회의를 국립생물자원관과 함께 개최하여, 분류가 매우 어렵고 많은 문제점이 누적되어 있는 벼과(Poaceae) 및 사초속(Carex)의 기재 용어 통일방안, 원고 보완, 향후 편집 및 식물지 출판계획 등에 대해 논의하였다.

2026년 4월부터 환경부 국립생물자원관에서 지원하는 '생물다양성 관리기관 통합관리체계 구축 사업'에 참여하고 있으며, 이를 통해 서울대학교 식물표본관(SNU)에 소장되어 있는 약 25만점 이상의 표본에 대한 분류군명, 채집 정보 등을 포함한 상세한 database를 매년 4,000점 이상 구축하고 있다. 또한 2026년 7월 13~15일에 개최된 제81회 한국생물과학협회 정기학술대회에서 현재 IUCN 적색목록에서 위기종으로 평가되어 있는 *Aldrovanda vesiculosa* L.(벌레먹이말)의 한반도 분포를 재검토한 연구 결과를 발표하였고, 2025년 5월부터 현재까지 학술원의 집담회 준비위원회 위원으로 활동하고 있다.

禹卿植 회원은 대한민국학술원에서 2025년 1월에 출간한 [학문연구의 동향과 쟁점 제15집: 지질과학 분야] 편집 책임을 맡았다. 최근까지 한국해양과학기술원 부설 극지연구소와 함께 북극해 심해 퇴적층을 이용한 고해양 연구를 공동 수행 중이다. 그동안 학술활동은 다음과 같다. 저술한 서적으로는 2025년 12월에 어린이를 대상으로 서술한 지질과학에 관련된 전자 서적을 어린이과학동아와 협력하여 출판하였다. 또한 2025년 12월 태평양학회에서 "글로벌사우스와 태평양의 경이로운 얼굴들"이라는 제목으로 "태평양

도서국 해양지역학 연구총서1”을 출판하였는데, 이 중에서 자연과학 부문 “태평양 북서 도서 지역 주변에 분포하는 천해 탄산염 퇴적물의 구성성분”이라는 제목으로 단원을 저술하였다.

발표한 논문으로는 *Nature* 시리즈인 *Communications Earth & Environment*에 북극해의 심해퇴적물을 획득하여 분석한 자료를 이용한 고해양에 관련된 논문을 교신저자로서 게재하였다. 제4기 학회지에 “전 세계 지질유산 보전의 현황과 전망”이라는 제목으로 논문을 게재하였으며, 국립문화재연구원에서 출판하는 헤리티지 잡지에 “우리나라 지질유산 국제화 추진 위한 IUCN 핵심지질유산지역(KGA) 프로그램 활용 전략”이라는 논문을 발표하였다. 현재 지질유산의 보전에 관련된 국제 최고 전문학술지인 *Geoheritage*에 “Geomorphological Significance of Geosites in Cheongsong UNESCO Global Geopark (Republic of Korea) – Evaluation Framework and Opportunities for Enhancement”와 “Developing ‘geo-stories’ in the aspiring Samcheok Geopark: An effective approach for geotourism”의 제목으로 두 편의 논문을 투고하여 현재 심사 중이다. 학회를 참석하여 발표한 논문은 다음과 같다. 2025년 10월 8~14일 UAE의 Abu Dhabi에서 열렸던 세계자연보전총회(World Conservation Congress)에 대한민국학술원의 지원으로 참석하여 “Introduction of a cave system and its protection status”와 “IUCN Key Geoheritage initiative”라는 제목으로 구두 발표하였다. 2025년 10월 2~4일 루마니아 Tulcea에서 열린 제12차 International ProGEO Symposium에서 Organizing Committee로 활동하였고, “Aspiring Samcheok Geopark in Korea”와 “Development strategy of geosites by linking geological processes with non-geological resources of the Samcheok Geopark in Korea”라는 제목으로 구두 발표를 수행했다. 2025년 10월 28~31일에 열린 대한지질학회 학술 총회에서 “자생광물 지화학 분석을 통한 과거 북극 환경 해양 복원”과 “지질관광 실현을 위한 지질명소 개발 전략: 삼척지질공원의 사례”라는 제목으로 구두 발표하였다.

그 외의 초청 강연은 다음과 같다. 2025년 9월 4일에는 한국해양학회 해양지질분과위원회에서 “Carbonates in Korea”라는 제목으로 강의하였다. 2025년 9월 10일에는 포천미래포럼에서 초청을 받아 “한탄강 유네스코 지질공원과 자연유산”이라는 제목으로 강의하였다. 2025년 9월 17일, 문화도시 김해 국제포럼에서 좌장을 수행하였으며, 2025년 9월 22일에는 모교인 은석초등학교에서 재학생을 대상으로 “자랑스러운 한국의 지질유산”이라는 제목으로 초청 강연을 하였다. 다산고등학교의 초청으로 2026년 10월 22일에 “한탄강 세계지질공원의 의미”라는 제목으로 강의를 하였으며, 2025년 12월 12일, 제4기학회 초청으로 “Meaning of the new IUCN Key Geoheritage Area program for geoconservation in the world”라는 제목으로 특별강연을 수행하였다. 2026년 2월에는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 개최한 CA-MAP II-ARCTIC GATE Symposium: Past and Future of Arctic Paleoceanography and Paleoenvironmental change라는 회의에서 “The occurrence of authigenic carbonate minerals in Arctic Ocean: Its puzzling meaning”라는 제목으로 석학 초청 발표를 수행하였다. 2026년 5월 27일 국가유산청의 주관으로 주최한 국제워크숍에서 “Global geoheritage conservation and the justification for KGA”와 “Potential KGAs in Korea”라는 제목으로 두 차례 초청 강연을 수행하였다.

姜奉均 회원은 최근 1년간 “Astrocytic ankyrin-2 enables memory persistence in the mouse hippocampus”. *Nature Commun*. 17: 5730, “Comprehensive protein synthesis inhibition

impairs natural and artificial memory recall". *Molecular Brain* 19(1):46 등을 비롯하여, 학습과 기억의 분자세포생물학적 메커니즘을 규명하는 국제 학술논문 5편(교신저자 4편)을 발표하였다.

학술활동으로는 2025년 9월 8~11일 사이에 프랑스 스트라스부르에서 개최된 'The 18th International Conference for Neurons and Brain Disease'에서 발표하였고, 2025년 9월 28일~10월 4일 사이에 독일 마그데부르크에서 개최된 'XV Learning and Memory Conference 2025'에서 기조강연을 하였다. 또한 2025년 11월 10~12일에 중국 시안에서 개최된 생화학분자생물학회 국제화 및 세계학술대회 유치를 위한 전략회의 워크숍에 참여하였고, 2025년 12월 6~9일 사이에 홍콩에서 개최된 'Neural Circuits in Health and Disease Symposium'에서 기조강연을 하였다. 2026년 6월 16~20일에 중국 쑤저우에서 개최된 'CSHA Meeting on Illuminating the Brain – A Symposium on Neural Imaging'에서 "Imaging the Engram Synapse"를 주제로 발표하였으며, 2026년 7월 3~12 사이에 스페인 바르셀로나에서 개최된 'FENS Forum 2026 및 EMCCS/ESN Conference'에서 "Memory Engram"를 주제로 발표하였다. 이어 2026년 7월 19~23일에 일본 오키나와에서 개최된 'OIST Developmental Neuronal Circuit Course'에서 "Engram Synapse Structure and Function"을 주제로 강연하였다.

국내에서는 2025년 10월 17일에 부산대학교 정기세미나, 2025년 10월 29일에는 충북대학교 세미나, 2026년 7월 24에는 이화여자대학교에서 집현 네트워크 초청 세미나에서 초청강연을 하였다. 또한 2025년 9월 1일에 개최된 '제2회 섬유화학연구분과 심포지엄', 2025년 9월 22일에 개최된 'BEXCO 제6회 희귀유전질환 심포지엄', 2026년 1월 7~9일에 개최된 KSBMB-EMM Winter Conference'에 참석하여 국내 생명과학 분야의 최신 연구성과를 공유하고 연구자 간 학술교류 및 협력에 참여하였다. 2025년 11월 5일에는 '생화학분자생물학회 유달학술대회'에, 2025년 11월 6일에는 '제77차 대한약리학회 추계학술대회'에 참석하였으며, 2025년 11월 28~29일에는 생화학분자생물학회에서 개최한 IUBMB 유치를 위한 장기발전전략 워크숍에 참여하여 국내외 연구자들과의 학술적 교류를 강화하고 국제학술행사 유치를 위한 발전 전략을 논의하였다. 또한 2026년 2월 6일에 개최된 '한국뇌신경과학회 시냅스 분과 정기학술대회'와 2026년 5월 27~29일에 개최된 '2026 KSBMB'에 참여하고 세션 좌장을 수행하는 등 연구자 간 학술교류와 국내 생명과학 분야의 연구 활성 및 학술발전에 기여하였다. 그리고 2026년 4월 21일에 개최된 '2026 과학정보통신의 날' 기념식에서, 과학기술 분야의 연구 및 학술 발전에 기여한 공로를 인정받아 과학기술훈장 혁신장을 수상하였다.

李岡根 회원은 지난 한 해 동안 지하수 유동, 지열에너지, 오염물질 거동 등 다양한 분야에서 폭넓은 연구활동을 이어 갔다. 또한 과학문화 확산에 기여하고자 카오스(KAOS)재단 과학위원으로서 재단이 2025년 5월부터 10월까지 진행한 강연 시리즈 '전지적 지구 시점'을 총괄 기획하였다. 이 강연은 기후위기가 인간과 생물의 생존에 미치는 영향을 지구의 관점에서 과학적으로 성찰하고자 마련되었다. 흔히 기후위기로 '지구가 아프다'라고 표현하지만, 실제로는 지구 자체보다 인간을 비롯한 생명체의 생존이 위협받고 있다는 문제의식을 담았다. 총 10강으로 구성된 강연은 재단의 공식 유튜브 채널 '카오스 사이언스'를 통해 순차적으로 공개되었으며, 이강근 회원은 마지막 10강에서 앞선 1강~9강을 정리하는 '위험천만 지구, 천만다행 지구과학' 강연하였다. 현재 서울대학교 BK21 지구환경과학교육연구단 단장으로서 학문 후속 세대의 지원과 양성에 힘쓰고 있다. 또한 2027년 7월 인천에서 개최될 IUGG 2027의 과학 프로그램 위원회(SPC, Scientific Program Committee) 위원장 역할을 하고 있다. 고등

학생 과학경진 프로그램인 한화사이언스챌린지의 기술자문단 운영위원으로서 과학 인재 발굴에 힘쓰고 있으며, 원자력안전위원회 위원으로서 원자력 및 방사선 이용 관련 최고 의사결정기구의 활동에 참여하고 있다.

주요 학술회의 발표 내용은 다음과 같다. 지진과 지하수 유동의 관계를 규명하기 위해 토론(thoron), 라돈 및 미생물 지표를 결합한 지진 유발 지하수 흐름 변화 연구를 2026년 Goldschmidt 학술대회에서 발표하였다. 또한 소규모 보(weir)가 하상대(hyporheic zone)에 미치는 계절별 누적 열적 반응을 분석한 연구, 국내 방사성폐기물 처분장 자연유사 부지의 단열대수층 수리특성을 통합 규명한 연구, 홍수에 의한 제방여과가 하상대 지하수 연령분포에 미치는 영향을 평가한 연구를 각각 2026년 유럽지구과학연맹 총회(EGU26)에서 발표하였다. 기후변화에 따른 남극 표면 융해 현상을 재조명하고 미래 빙하 역학에 대한 함의를 도출한 연구를 2025년 미국지구물리학회 가을학술대회(AGU Fall Meeting)와 유럽지구과학연맹 총회(EGU25)에서 각각 발표하였다. 아울러 단열암반 대수층에서 반응성 이동 모델링을 통해 우라늄 이동성을 규명한 연구, 우라늄 함유 지층 내 지하수 유동 특성화를 위한 다중 연령 추적자 적용 연구, 라돈과 미생물 군집 조성을 활용한 DNAPL 추적 및 건강위해성 평가 연구, 수리경사 조건에서의 용존 CO_2 플룸 이동 가시화 실험 제안 연구를 2025년 Goldschmidt 학술대회에서 발표하였다.

2025년부터 현재까지 국제학술지에 게재한 주요 논문의 제목과 내용은 다음과 같다. 산화환원 변화가 우라늄 이동에 미치는 영향을 현장 추적자 시험과 반응성 이동 모델링으로 분석하였다(IH Cho, SH Lee, IW Park, J Kim, WT Joun, KK Lee, *Journal of Hazardous Materials*, 2026). 하천-대수층 시스템의 산화환원 혼합대에서 발생하는 미량원소 이동 기작을 다중 추적자 베이지안 혼합 모델로 분석하였다(YJ Ju, DC Koh, J Mahlknecht 외, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2026). 코로나19가 대학 도서관 지중열펌프 시스템 운영과 지하수 반응에 미친 영향을 분석하였다(HR Oh, JY Baek, SW Ha, KM An, KK Lee, *Energy Reports*, 2026). 인도네시아 동롬복 셈발룬 지열시스템의 함양 및 수문지질학적 모델을 구축하였다(MSD Hadian, S Satrio, R Prasetio 외, *Geosciences Journal*, 2026). 대기 중 비활성기체와 라돈을 이용하여 대수층 내 잔류 DNAPL을 정량화하고 분배 거동을 규명하였다(YJ Kim, R Kipfer, D Kaown 외, *Journal of Hazardous Materials*, 2025). 딥러닝 기반 설명 가능 인공지능 기법으로 기후변화에 따른 국내 미래 지하수위 변동을 예측하였다(J Hwang, KK Lee, *Groundwater for Sustainable Development*, 2025). SWAT-MODFLOW 6와 CMIP6 시나리오를 결합하여 지하수-지표수 상호작용의 미래 변동성이 하천유량에 미치는 영향을 분석하였다(SH Lee, HJ Kim, IH Cho 외, *Journal of Hydrology*, 2025). 대전 화강암질 도시지역의 지속가능한 수자원 관리를 위한 수문지화학적 개념모델을 구축하였다(HN Ko, J Kim, KK Lee, *Environmental Geochemistry and Health*, 2025). 제주 화산섬 내 두 농업지역의 지하수 유동계를 특성화하여 질산염 오염의 부지별 관리방안을 제시하였다(EH Koh, KK Lee, S Moon, HJ Koh, *Journal of Environmental Management*, 2025). 우라늄 함유 지층의 계절별 지하수 수질 변화와 잠재적 위해성을 수문지질·미생물학적 조사로 분석하였다(J Kim, YJ Kim, SH Lee 외, *Environmental Research*, 2025). 시추공 특성이 열응답시험(TRT) 해석에 미치는 영향을 분석적 모델로 규명하였다(HR Oh, JY Baek, BH Park, SK Kim, KK Lee, *Applied Thermal Engineering*, 2025). 염수 및 집중호우가 염소화에텐류의 지하수 내 거동에 미치는 영향을 화합물별 동위원소 및 미생물 자료로 분석하였다(D Kaown, KC Carroll, J Mahlknecht 외, *Journal of Hazardous Materials*, 2025). 전주 오송제 지하수 시스템의 연직유속 평가 방법을 비교

하였다(HN Ko, S Oh, Y Hyun 외, *Environmental Earth Sciences*, 2025). 단열대수층 자연장벽시스템의 지하수 함양구역 내 방사성핵종 이동성을 다중 동위원소 및 미생물 지표로 평가하였다(YJ Ju, KW Park, E Kwon 외, *Journal of Hazardous Materials*, 2025). 개방된 암반단열이 다공성 균열매체 내 CO_2 거동에 미치는 영향을 규명한 가시화 실험을 수행하였다(SW Ha, JY Baek, IW Park, KK Lee, *Advances in Water Resources*, 2025).

학계동향 (지구과학 분야)

지난 1년간 지구과학계는 “위기에 처한 행성”이라는 문제의식과 AI·위성관측과 기존 지구과학 연구의 결합이라는 두 축을 중심으로 전개되었다. 2026년 5월 유럽지구과학연합(EGU) 총회(비엔나)는 행성의 경계부, 기후위험 시대의 과학과 정책, AI 윤리 등을 중심의제로 22,000여명이 참가해 역대 최대 규모를 기록했고(European Geosciences Union, 2026), 2025년 12월 미국지구물리연합(AGU) 가을 총회(뉴올리언스)에는 100여개국 이상에서 25,000여명(American Geophysical Union, 2025), 2025년 10월 미국지질학회의 GSA Connects 2025(샌안토니오)는 4,200여명이 참석해 ‘에너지·자원 혁신’과 ‘지구에서 우주로’를 주제로 열렸다(Geological Society of America, 2025). 방법론 면에서는 NASA·IBM의 지구관측 AI 파운데이션 모델(NASA & IBM Research, 2025)과 마이크로소프트와 구글 등 빅테크기업들의 대기 모델 Aurora·GraphCast(Bodnar et al., *Nature*, 2025; Lam et al., *Science*, 2023) 등 강력한 AI 도구가 확산되고 있으며, 이 흐름은 지진파형 자동판독이나 지하수·기후 관측망 분석에도 이어지고 있다.

지구 내부·심부 연구에서는 서던캘리포니아대가 반복 지진 자료로 지구 내핵 표면 형태의 변화 가능성을 제시했고(Yang & Song, *Nature Geoscience*, 2025), 마그마-수소 반응으로 물이 생성될 수 있음을 입증해 외계행성 내부진화에 시사점을 준 연구(Horn et al., *Nature*, 2025), 맨틀전이대 조건의 규산염 용융체 내 탄산염 구조를 NMR로 규명한 연구(Kim et al., *GRL*, 2025), 비정질 산화물 네트워크의 압축 거동을 밝힌 연구(Lee et al., *Nature Communications*, 2025) 등이 발표되었고, 이런 연구들에 한국 과학자들이 주저자나 공동 저자로 참여하였다.

탄소저감과 AI 시대로 전환하는데 필수적인 광물자원·희토류 확보 연구에서는 KIGAM이 2025년 7월 탐해3호로 서태평양 5,800m 해저에서 최대 3,100ppm의 고농도 희토류 부존을 확인했고(한국지질자원연구원, 2025), 2026년에는 중희토류 공급망 자립을 위한 ‘K-플랜트’ 구축에 착수했다. 한국해양과학기술원(KIOST)의 종합해양연구선 이사부호는 국제해저기구(ISA)와 체결한 탐사계약에 따라 인도양 해저열수광상 광구에서 대규모 자원 형성 가능성이 높은 분포지역을 확인했으며, 2025~2026년에 걸쳐 자원 규모를 정밀 예측하고 개발영향평가를 거쳐 개발유망광구를 확정하는 작업을 진행하고 있다. 서태평양 마젤란 해역에서는 코발트·니켈·희토류를 함유한 망간각 자원탐사도 병행 중이다(한국해양과학기술원, 2025~2026).

기후 및 수문 지질에서는 전 세계 담수위기(Rodell & Li, *Science Advances*, 2025)와 수자원 고갈 경향이 구체적으로 보고되었고, 반면에 중국 화북평원에서는 대수층 회복 사례(Zhou et al., *Nature Communications*, 2025)가 대비되어 보고되었다. 세계기상기구(WMO)는 2025년을 역대 2~3위 온난연도로 확인했으며(WMO, 2026), 남극해 온난화가 동아시아 여름 강수를 늘린다는 연구(Kang & Kim, *Nature Geoscience*, 2026)가 국내에 보도되었다. 극지·해양 환경 분야에서는 극지연구소(KOPRI)가 북극 해빙 감소-미세먼지 생성 메커니즘을 설명하였다.

고준위방사성폐기물 처분 지질연구는 지난 1년 국내 지질학계의 가장 실용적·정책적인 화두로 부상했다. 2025년 2월 '고준위방사성폐기물 관리 특별법'이 국회를 통과하고 국무총리 소속 고준위방사성폐기물 관리위원회가 출범했으며, 산업통상자원부와 한국원자력환경공단은 부지공모를 거쳐 2024년 12월 강원도 태백시를 처분기술 실증을 위한 지하연구시설(URL) 부지로 최종 확정하였다. 태백 URL은 지하 500m 안팎까지 시추조사를 진행하여 기반암의 상태를 확인하였으며, 2026년 건설에 착수해 2032년 준공을 목표로 하며 2030년부터 약 20년간 운영될 예정이다. 관리위원회는 2026년 4월 '고준위방사성폐기물 관리시설 부지 적합성 조사계획안'을 의결해 부적합 지역 배제, 기본조사 후보부지 도출, 공모, 기본·심층조사, 주민투표로 이어지는 전국 단위 처분부지 선정 절차를 구체화했으며, 2038년 처분부지 선정과 2060년 최종처분시설 운영을 목표로 제시하고 있다. 이 작업의 핵심에는 암석·지질구조·지진·제4기지질·수리지질·지구화학·지질공학·암반역학 등 지질학 전 분야를 아우르는 부지 적합성 규명 연구가 놓여 있으며, 한국지질자원연구원, 한국원자력연구원, 한국원자력환경공단을 중심으로 국내외 대학의 연구진이 협력 체계를 구축하고 있다. 이러한 흐름을 반영하듯 2025년 추계지질과학연합학술대회에서는 '심층처분을 위한 지질학의 역할'을 다룬 현안세션이 별도로 마련되어 처분시설의 장기 안전성 평가를 위한 핵종 거동 연구, 한반도 중서부 지역의 제4기 단층 조사 성과 등이 함께 논의되었다.

국내외 학회와 국제활동으로는 자원환경지질학회 주관 춘계 지질과학연합학술대회가 자원·환경·지질학분야 학문 후속세대 양성을, 대한지질학회 등 5개 학회가 공동주관한 추계지질과학연합학술대회(2025.10.28~31)가 '지질학이 해결하는 안전하고 지속가능한 미래'를 주제로 다루었다. 한국해양학회는 부산·광주에서 춘·추계학술대회를 열었다. 한국에서 개최된 국제행사로는 2025년 7월 부산에서 IAMAS-IACS-IAPSO 합동총회 BACO-25가 한국기상학회·한국해양학회·대한지질학회 공동주최로 열렸다. 그리고 2027년 IUGG2027 인천 대회를 앞두고 2025년 7월에 집행위원회 회의가 열려 대회 진행사항과 과학 프로그램 구성에 대한 심층적 논의가 진행되었다.

지질유산 분야의 국제적 노력으로 대한지질학회는 지질유산분과위원회를 중심으로 한국 사이트를 등록하기 위한 노력을 전개하고 있으며 IUGS 'Third 100 Geological Heritage Sites'에 한국 유산을 추천하였다. 지질유산 보전과 활용 움직임도 활발했다. 관련하여 2026년에 지질유산 보전 회의와 유네스코 세계유산위원회라는 중요한 국제행사가 있었다. 국가유산청은 2026년 5월 27일 부산에서 국제워크숍 「Global geoheritage conservation and the justification for KGA」를 주관하였다. 이 행사는 국제적으로 중요한 지질유산을 발굴·평가·보전하기 위한 핵심지질유산지역(Key Geoheritage Areas, KGA) 제도의 필요성을 논의하는 자리였다. 대한민국학술원의 우경식 회원은 「Potential KGAs in Korea」를 주제로 두 차례 초청강연을 수행하며 한국의 잠재적 KGA 후보지와 보전 방향을 소개하였다. 이를 통해 한국의 지질·지형 유산을 세계유산 체계와 연계할 수 있는 학술적·정책적 기반이 강화되었다. 이어 2026년 7월 19일부터 29일까지 부산에서는 제48차 유네스코 세계유산위원회가 개최되었다. 이 회의는 세계유산의 등재, 보존상태 검토, 국제보호 협력 방안 등을 논의하는 유네스코의 핵심 정부간 회의이다. 한국은 개최국으로서 세계유산 보전의 국제적 책임과 협력 리더십을 보여주었으며, 국내 유산정책의 위상도 높였다. 회의 기간에는 가치 기반 보전 원칙, 세계유산 관련 카테고리 2센터 간 협력 등 다양한 부대 논의도 이루어졌다. 전반적으로 이 행사는 한국이 문화유산·자연유산·지질유산을 아우르는 국제 보전 담론의 중요한 거점으로 부상했음을 보여준다.

학술교류

IAWS 60주년 학술대회 참가기



金潤受 會員 (임산목재공학)

1. 학술대회 개요와 일정

국제 목재 과학아카데미(Int. Academy of Wood Science, 이하 IAWS) 창립 60주년 기념 학술대회가 지난 5월 31일부터 6월 4일까지 스위스 취리히 연방공과대학교(ETH Zurich)에서 개최되었다. 이번 대회에서는 1편의 기조강연(Academy Lecture)와 9편의 총회발표(Plenary Speech), 그리고 7개 세션에 걸친 54편의 논문 발표가 진행되었다. 구두 발표의 절반은 Fellow들이 맡았고 나머지 절반은 비 회원 중견 학자들과 2025년 최우수 박사학위 논문상 수상자들의 발표로 채워졌다. 특히 이번 총회발표에는 이탈리아, 벨기에, 슬로베니아, 중국 출신의 여성 펠로우들에게 그 영예가 주어졌다.

필자는 이번 학술대회의 조직위원으로서 준비 단계부터 참여하여 프로그램의 원활한 진행을 도왔다. 학술대회의 꽃이라 할 수 있는 기조강연자로 일본 동경대 Akira Isogai 명예교수를 지명하고, 북경임업대 Feng Xu 교수를 총회발표자로 추천함으로써 아시아 학자들의 위상을 높이는데 기여하였다. 또한 대한민국학술원의 지원을 받은 연구 결과를 직접 발표하는 한편, 직전 IAWS 회장으로서 그동안 화상으로만 소통하던 동료 펠로우들에게 직접 감사의 인사를 전하며 임기를 마무리했다. 이번 대회에는 지금까지 참여가 저조했던 중국학자들과 미국, 캐나다, 뉴질랜드에서 활동하는 중국계 학자들이 부부 동반으로 참가한 것이 눈에 띄었다.

1.1. 학술대회의 일정

5월 31일 일요일 오후 6시부터 9시까지 ETH 본관에서 등록 및 환영 리셉션이 열렸다. 궂은 날씨에도 불구하고 전세계에서 모인 펠로우들과 와인과 스낵을 나누며 재회의 기쁨을 나누었다.



[그림 1] 왼쪽: 개막식에 이어 한 시간 동안 진행된 Akira Isogai 동경대 명예교수의 Academy Lecture; 오른쪽: 월요일 오후 전시 발표

6월 1일 월요일 오전 8:45 공식 학술 행사가 시작했다. 회장인 캐나다 UBC 대학의 Stavros Avramidis의 개회사와 조직위원장인 스위스 ETH의 Ingo Burgert의 일정 안내로 공식 행사가 시작되었다. 오전에는 동경대 명예교수 Isogari 명예교수의 Academy Lecture가 한 시간 동안 진행됐다. 이어 총회 발표 연사로 초청된 세 명의 여성 펠로우들의 발표가 정오까지 계속됐다. 대학 구내식당에서의 점심 후 오후 1시부터 5시까지는 두 개의 세션으로 나뉘어 병행 발표가 진행되었다. 필자는 오후 세션 첫 번째 발표자로 나서 “What have wood anatomists oversights in the studies on wooden cultural heritages”의 제목으로 연구 결과를 발표했다. 오후 5시부터는 약 90분간 포스터 발표가 진행됐다. 이어 오후 6시 반부터 직전 회장(outgoing President) 자격으로 마지막 집행위원회(Executive Board Meeting)에 참석하여 주요 현안을 논의하고 수요일 오후에 개최될 Fellow 총회 준비를 마친 후 만찬을 함께 했다.

6월 2일 화요일 회의는 오전 8시 30분부터 시작됐다. 어제와 마찬가지로 오전 세션은 5명의 펠로우가 총회발표로 채워졌고 오후 세션은 오후 6시까지 진행됐다. 오후 7시 30분부터 10시까지 취리히호수에서 선상 Conference Dinner를 가졌다. 이 만찬은 회의에 참석한 모든 사람이 참가비를 내고 참석하게 되어 있었다. 포스터 발표의 시상자에 대한 시상식도 함께 가졌다. 임기 3년의 신임 회장직을 6월 2일자로 시작하는 Burgert(ETH 교수)가 그동안의 IAWS 회장직 수행에 대한 감사패와 기념 선물을 주었다.

6월 3일 수요일 회의는 오전 9시부터 시작됐다. 필자는 오전 세션 좌장을 맡아 총회 발표와 2025년 최우수 박사학위로 선정된 두 편의 논문 발표를 이끌었다. 오후 1시반부터 3시까지 Fellow 총회가 개최되어 IAWS 활동 영역 확장과 젊은 과학자와의 연대 방안에 대해 주로 의견을 나누었다. 오후 3시부터 2시간 반 동안 Hönggerberg에 있는 ETH 연구동을 방문하여 Burgert 교수가 주도하고 있는 목재 건축재 연구시설과 진행 상황을 들었다. 오후 7시부터 IAWS Fellow Dinner가 ETH 부근 식당에서 있었다. Conference Dinner와 달리 펠로우와 그 동반자들로 참석이 제한돼서 와인과 함께 격의 없는 세 시간을 즐겼다.

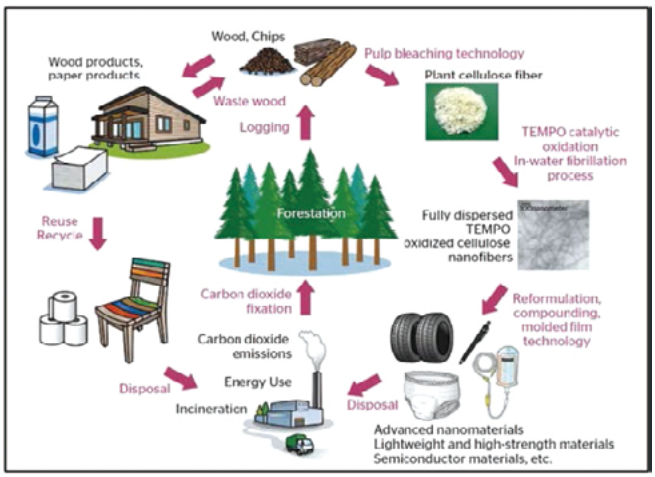
6월 4일 목요일 오전에는 스위스 목조건축공장을 대표하는 Kaufmann Oberholzer 공장을, 오후에는 Blumer Lehmann 회사 두 곳을 견학했다. 두 곳 모두 스위스에서 생산된 목재의 90% 이상을 그것도 침엽수재만을 사용하고 있었다. 오후 5시 ETH 본부 캠퍼스로 돌아오는 것으로 해서 이번 대회의 모든 일정이 마쳐졌다. 6월 5일 스위스 항공에 탑승해 귀국길에 올랐다.



[그림 2] 취리히 호수 선상 컨퍼런스 디너. 포스터 발표 우수자에 대한 시상과 전임 회장단에 대한 기념패와 선물 증정도 함께 있었다.

2. 학술대회 주요 발표 내용

목재 이용은 크게 두 가지 접근 방식으로 구분할 수 있다. 첫째는 목재 구조를 완전히 해체한 후 나노 규모의 소재를 생산하는 상향식(bottom-up) 접근법이다. 나노셀룰로오스 제조가 대표적인 사례이다(그림 3의 오른쪽). 이번 학술대회의 기조강연을 맡은 Isogai 교수의 연구 역시 이러한 흐름을 대표한다. 이 분야는 일본과 중국 연구자들이 주도하고 있으며, 상대적으로 논문 발표가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 연구 성과의 산업화와 시장 진입은 또 다른 과제로 남아 있다. 실제로 나노셀룰로오스는 10여 년 전 차세대 혁신 소재로 큰 주목을 받았으나, 미국 FDA 승인이 장기간 지연되면서 상용화에 어려움을 겪고 있다.



[그림 3] 목재 이용의 두가지 접근법 모식도.
오른쪽은 상향식 접근으로 목재를 완전 해체해, 나노 규모의 물질 생산에 집중한다. 왼쪽은 하향식 접근으로 목재 구조를 보존한 채 그 성능 향상을 통해 순환경제을 꽤하고 있다. 자료: JST News, 2017

반면 목재의 고유한 구조를 유지한 채 성능을 향상시키는 하향식(top-down) 접근법은 북미 대륙과 서유럽 국가에서 활발히 추진되고 있다. 이 방법은 실제 산업적 수요와 긴밀히 연계되어 높은 상업적 가치를 창출하고 있다. 특히 서유럽 국가들은 목재를 단순한 건축재료가 아니라 재생 가능한 생태 소재이자 미적 가치를 지닌 재료로 인식하고 있으며, 이에 따라 건축물의 수명 연장, 적절한 구조 설계, 내구성이 우수한 지역산 수종의 활용 등에 높은 관심을 기울이고 있다. 실제로 독일에서는 지난 20여 년 동안 원목 기반 목조 건축의 비중이 꾸준히 증가해 왔다. 유럽은 또한 화학 약품 사용을 최소화한 친환경 목재보존 기술 개발에도 적극적이다. 유럽은 여전히 원목의 사용을 선호하고 있으며 목질재료(wood-based materials)에 대한 수요가 상대적으로 낮다.

이번 학술대회에서는 지금까지의 하향식 목재 과학의 패러다임을 뛰어넘는 연구를 확인할 수 있었다. 탈리그닌와 고밀화 과정(densification)을 거쳐 목재를 뛰어난 강도의 합성재나 투명 목재 등의 첨단 신소재로의 개발이 그것이었다. 또한 지구온난화로 인한 서부 유럽의 목재 자원의 고갈에 따른 대체재의 사용과 순환경제라는 프레임 속에서 목재 자원의 효율적 이용을 위한 강요된(?) 대안 찾기에 골몰하는 노력 역시 눈에 띄었다. 이 참가기는 상향식 연구에 대한 발표는 최소화하고 대신 하향식 연구를 업사이클링(upcycling) 차원에서 전개하고 있는 분야와 지구온난화에 따른 연구 경향의 재편을 중심으로 전개하고자 한다.

2-1. 지구온난화로 인한 침엽수 자원 고갈과 미이용 활엽수재 이용의 대비

유럽의 목재 산업계는 가공 효율성을 위해 전통적으로 침엽수 단일림(monoculture)을 조성하고, 자원의 균질화를 도모해 왔다. 침엽수재를 절삭하고 이것들을 합성 접착제로 결합한 공학 목재(CLT)를 만들어 자원의 가변성을 억제해 왔다. 그러나 기후 변화로 인해 건축재로 주로 쓰이고 있는 침엽수 자원은 가뭄과 고온에 취약하여 2080년 경에는 유럽의 저지대에서는 거의 사라질 것으로 전망한다. 이에 따라 지구온난화에 더 잘 적용하는 활엽수(참나무, 유럽 너도밤나무 등)로 목재산업을 전환해야 하지만 현재의 목재 선별 및 등급 분류 기준은 침엽수 표준에 고착되어 있어 다른 수종으로의 전이가 어려워지고 있다. 문제는 목재는 구

조적으로나 화학적으로 복잡한 재료라는 점이다. 또한 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 리그닌 및 추출물로 이루어진 비선형적 천연 구조체일 뿐만 아니라 수종, 나이, 성장 환경에 따라 세포 수준에서 밀도와 기계적 특성의 편차가 매우 심한 특성을 가지고 있다. 특히 활엽수재는 침엽수재에 비해 그 편차가 큰데다, 올곧게 자란 나무를 찾기 힘들어 기존의 가공 방식은 한계를 드러내고 있다.

ETH Zurich 연구진은 목재의 역학적 특성이 옹이(knots)의 크기와 분포, 그리고 섬유 방향의 비선형적 편차와 밀접하게 관련되어 있다는 점에 착안하였다. 이들은 이미 기계적 특성이 확인된 가문비나무 목재 1만 5천 장 이상의 고해상도 컬러 이미지를 수집하고, 이를 인공지능 기반 이미지 인식 모델에 적용하였다. 다중회귀분석과 데이터 증강 기법을 통해 학습된 모델은 단순한 표면 이미지 정보만으로도 X-ray나 3차원 CT 스캔에 필적하는 수준의 강도 예측 정확도를 나타냈다. 이 연구는 고가의 대형 장비 없이 일반 카메라 기반의 컴퓨터 비전(vision) 기술만으로 목재 등급 분류가 가능함을 입증하였다. 또한 모델을 처음부터 새롭게 만들 필요 없이 기존 학습 모델을 다른 수종에 적용할 수 있는 전이 학습(transfer learning) 기법을 활용함으로써 활엽수에서도 응용 가능성을 제시했을 뿐 아니라, 자금력이 부족한 중소 규모 제재소에서도 쉽게 활용할 수 있는 “저비용·고효율”이라는 현실적 대안을 제시했다.

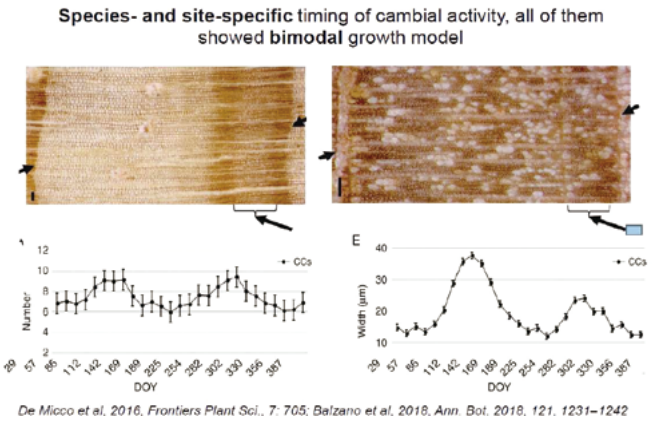
연구진은 정보이론의 관점에서 목재 표면 이미지가 강도 예측에 필요한 유효정보를 가장 효율적으로 담고 있는 스케일임을 제시하였다. 이는 목재의 거시적 구조와 미시적 구조를 연결하는 새로운 분석 접근법이라는 점에서 매우 인상적이었다. 목재를 분자 수준이나 세포 수준처럼 너무 미시적으로 관찰하면 전체적인 섬유 흐름이나 옹이 같은 거시적 패턴을 놓치게 된다. 반대로 나무 전체를 보면 세부 패턴이 뭉개지기 때문이다.

2-2. 지중해 기후 변화에 따른 목본 식물의 가뭄 적응 기작

기후변화로 인해 지중해 지역에서는 가뭄의 빈도와 강도가 지속적으로 증가하고 있으며, 이는 지역 산림 생태계에 심각한 영향을 미치고 있다. 이탈리아 나폴리대학교 De Micco 교수 연구팀은 지중해 지역 목본 식물을 대상으로 성별에 따른 가뭄 적응 전략을 비교 분석하였다. 특히 암수딴그루(dioecious) 식물에서는 암수 개체 간에 생리적·해부학적·분자생물학적 수준에서 서로 다른 적응 전략이 나타남을 확인하였다. 이러한 성별 차이는 식물의 환경 적응과 생존 전략을 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다.

또한 연구팀은 야생종과 재배종 사이에서 표현형 가소성(phenotypic plasticity)에 유의한 차이가 존재함을 보여주었다. 연구진은 향후 기후변화에 대한 식물의 적응력과 회복력을 정확하게 예측하기 위해서는 기능형질(functional traits), 생태생리학적 지표, 그리고 멀티오믹스(multi-omics) 정보를 통합한 연구가 필수적이라고 강조하였다.

연구팀은 지구온난화에 따른 목본식물의 대응 연구를 위해서는 목부 조직만을 분석하는 데 그쳐서는 안 되며, 잎의 해부학적 특성과 동위원소 정보까지 함께 고려해야 보다 정확한 해석이 가능하다고 주장했다. 목재해부학과 잎 해부학은 독립된 연구 영역이 아니라 상호 보완적인 하나의 생태학적 시스템으로 이해되어야 한다는 것이다. 흥미롭게도 연구팀은 지중해 지역의 여러 목본식물에서 연륜이 한 해에 두 번 형성되는 쌍봉형(bimodal) 생장 패턴을 관찰했다(그림 4). 이는 봄철 생장 이후 여름철 가뭄으로 생장이 일시 중단되었다가 가을 강우 이후 다시 생장이 재개되는 현상으로 해석되며, 기후변화가 목재 형성 과정에 직접적인 영향을 미치고 있음을 보여주는 중요한 사례라 할 수 있다.



[그림 4] 지중해에서 자라고 있는 침엽수와 활엽수의 연륜에 나타나고 있는 bimodal형 연륜 (De Micco et al. 2016; Balzano et al. 2018)

2-3. 미이용 목재의 Upcycling: Healed Wood와 Super black Wood

저급목재를 고성능 구조재로 전환하는 이른바 'Wood Healing' 기술과 초저반사 광학소재인 'Super Black Wood'의 개발은 이번 학술대회에서 큰 관심을 받았다. 이들 연구는 목재의 계층적 구조(hierarchical structure)를 유지하면서 기능을 재설계한다는 점에서 기존의 소재 개발 방식과 차별성을 가진다. 캐나다 UBC 대학의 Orlando Rojas 교수 연구팀은 고성능 구조재와 광학소재로 전환하는 다양한 업사이클링 기술을 소개하였다. 이들의 연구는 목재의 활용 범위를 획기적으로 확장하고 지속가능한 생물경제 실현의 새로운 가능성을 제시했다.

Wood Healing 기술은 폐가구 목재나 저급목재를 활용하여 셀룰로오스를 부분적으로 용해한 뒤 다시 재생시키는 방법이다. 이 과정에서 셀룰로오스 미세섬유 사이에 새로운 수소결합 네트워크가 형성되며, 결과적으로 목재 구조가 복원될 뿐만 아니라 기존보다 더욱 우수한 기계적 성질을 갖게 된다(Wang et al., 2022, *Nature Sustainability*). 연구진이 발사목(Balsa wood)에 적용한 결과, 재료의 두께는 약 90% 감소하였으나 밀도는 약 5배 증가하였으며, 인장강도와 경도 역시 크게 향상되었다. 특히 비인장강도(specific tensile strength)는 일부 알루미늄 및 마그네슘 합금을 능가하는 수준에 도달하였다(그림 5). 균열이 존재하는 목재에 적용한 경우에도 재생된 셀룰로오스가 균열면을 연결하여 천연목재보다 약 5배 높은 접합강도를 나타냈다. 기존 에폭시 접착제를 이용한 보수 방식보다 우수한 성능을 보였다. 이 기술은 폐목재를 단순히 재활용하는 수준을 넘어 원래보다 높은 성능의 구조재로 전환하는 진정한 의미의 업사이클링 기술로 평가받고 있으며, 향후 지속가능한 건축재 개발과 순환형 산림 바이오경제 구현에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.



[그림 5] 폐가구에서 나온 목재를 탈리그닌화 시킨 다음 regeneration(d) 후 만들어진 치유 목재(e)와 인장강도의 증가(f) (Wang et al. 2022. Nat. Sustain)

Rojas 연구팀은 또 초저반사 광학소재인 Super Black Wood를 개발했다. 연구진은 유한요소해석을 통해 목재 세포벽, 노출된 섬유 말단, 방사조직(ray cells)이 주요 반사원임을 규명한 뒤, 탈리그닌화와 고온 탄화를 결합한 새로운 공정을 개발하였다. 그 결과 세포벽 표면에 수십 나노미터 크기의 탄소 미세섬유 구조가 형성되었으며, 이 구조는 빛의 후방 산란을 억제하고 내부 다중반사를 유도하여 거의 모든 입사광을 흡수하였다. 최종적으로 입사광의 99.64%를 흡수하고 총반사율은 0.36%에 불과한 초저반사 특성을 구현하였다(Zhao et al., 2023, *Nature Communications*). 더욱 주목할 점은 이 소재가 반복적인 접촉과 테이프 박리, 수침, 고온 건조 및 장기 저장 이후에도 우수한 광학적 성능을 유지하였다는 사실이다. 연구진은 이러한 성능이 단순한 화학조성 변화가 아니라 목재 세포벽 미세구조의 재설계에 기인함을 입증하였다. 이들은 목재를 단순한 구조재가 아닌 정교한 광학 구조물(hierarchical optical architecture)로 전환하고 있었다.

2-4. 미이용 리그닌의 이용 방안

리그닌은 목재 구성 성분의 약 25~30%를 차지하는 주요 고분자 물질로, 자외선 차단, 방수성 부여, 병해충 방어, 세포 간 접착 및 기계적 강도 유지 등 다양한 기능을 수행한다. 그러나 복잡한 화학구조와 높은 안정성 때문에 활용이 쉽지 않아 현재까지 대부분이 저부가가치 용도로 사용되고 있다. 예를 들어 미국에서는 펄프·제지 산업에서 매년 약 1억 톤의 리그닌이 발생하지만, 상당 부분이 단순 소각을 통해 에너지원으로 소비되고 있다.

이번 학술대회에서는 리그닌을 활용하기 위한 상이한 두 가지 접근법이 소개되었다. 첫 번째는 리그닌 자체를 새로운 소재로 전환하는 방법이며, 두 번째는 목재 내 리그닌의 기능을 재설계하여 새로운 기능성 소재를 개발하는 방법이다.

미국 테네시대학교 Wang 교수 연구팀은 펄프 제조 공정의 부산물인 리그닌을 나노 크기의 분말로 제조하여 지속가능한 포장재로 활용하는 방안을 제시하였다. 연구팀은 현재 전 세계적으로 매년 약 4,300억 개 이상의 플라스틱 식품 및 음료 용기가 생산되고 있다는 점에 주목하고, 이를 대체할 수 있는 바이오 기반 포장재 개발 가능성을 제시하였다. 한편 경북대학교 박병대 명예교수는 활엽수 크라프트 리그닌을 이용한 100% 바이오 기반 목재 접착제 개발 성과를 발표하였다. 이는 화석연료 기반 합성수지를 대체할 수 있는 친환경 접착 시스템 구축 가능성을 보여준 사례라 할 수 있다. 벨기에 Laborie 교수 연구팀은 리그닌 기반 물질에 polycarboxylic acids를 이용한 에스터화 반응을 적용하여 액정(liquid crystalline) 구조를 형성하는 데 성공하였다. 이로부터 제조된 필름은 물에 용해되지 않으면서도 수분 흡수에 따라 팽윤하는 특성을 보였다. 특히 물을 흡수하면 일시적으로 연화되지만 구조적 이방성은 유지되어 직접 잉크 압출 공정에 적합한 소재임이 확인되었다. 연구진은 이를 적층제조공정에 적용하여 바이오 기반 원료만으로도 고성능 3차원 구조체를 제작할 수 있음을 입증하였다.

반면 Rojas 교수 연구팀은 목재의 계층적 구조를 유지하면서 리그닌의 기능을 재설계하는 업사이클링 전략을 제시하였다. 이들은 목재 형태를 그대로 유지한 상태에서 리그닌을 제거하여 이른바 holo-wood(셀룰로오스와 헤미셀룰로오스로만 구성된 목재)를 제조한 뒤, 화학적 표면 개질을 통해 탄성 목재 폼(elastic wood foam)을 개발하였다. 이 소재는 우수한 단열 특성을 바탕으로 건축용 열에너지 관리 소재로 활용될 가능성을 보여주었다. 또한 헤미셀룰로오스를 선택적으로 제거한 후 셀룰로오스와 리그닌을 재배열하여 리그닌의 소수성을 극대화함으로써 고도의 발수성을 갖는 목재로 전환시켜 빗물 집수 패널로 활용할 수 있음을 제안하였다(그림 6). 나아가 목재 내 리그닌 분포를 재조정하여 연소 효율이 향상된 바이오매스 펠렛 제조 기술도 소개하였다. 이들 연구는 리그닌을 단순한 산업 부산물이 아니라 차세대 바이오 소재의 핵심 자원으로 재인식하게 했다는 점에서 중요한 의미를 가진다.



[그림 6] 펄프 제조 공정의 부산물로 나오는 리그닌(상)과 목재의 리그닌를 이용한 새로운 소재 개발 시안

2-5. 미래 사회에서 목재과학의 역할과 방향

체코 멘델대학교의 Rupert Wimmer 교수는 이번 학술대회에서 미래 목재과학의 방향성을 제시했다. 그는 목재과학이 더 이상 목재라는 재료 자체만을 연구하는 학문에 머물러서는 안 되며, 기후변화 대응과 순환경제, 그리고 바이오경제 실현을 위한 핵심 학문으로 발전해야 한다고 주장하였다. 그에 따르면 목재는 탄소를 장기간 저장할 수 있는 재생 가능한 자원이며, 철강·콘크리트·플라스틱 등 화석 기반 재료를 대체할 수 있는 미래 사회의 핵심 소재이다. 따라서 목재의 순환 이용은 단순한 구호가 아니라 성능 설계, 단계적 이용(cascading use), 재활용 및 최종 처리까지 포함하는 과학적 시스템으로 접근해야 한다. Wimmer 교수는 목재과학의 출발점은 여전히 목재 자체에 대한 깊은 이해에서 출발해야 함을 강조하였다. 목재는 세포벽에서부터 조직, 연륜, 제재목, 패널, 건축부재에 이르기까지 복잡한 계층 구조를 형성하고 있으며, 이방성과 자연 변이는 가공성과 사용 성능에 직접적인 영향을 미친다. 또한 화학조성, 함수율, 미세구조의 차이는 접착 성능과 내구성, 장기적 안정성을 결정한다.

그는 앞으로의 목재과학이 부산물과 폐기물을 새로운 자원으로 전환하는 기술 개발에 더욱 집중해야 한다고 강조하였다. 나무껍질, 톱밥, 목분, 재활용 목재, 저이용 수종 등은 더 이상 폐기물이 아니라 새로운 원료로 인식되어야 한다는 것이다. 이를 위해서는 정밀한 특성 분석과 분류 기술, 그리고 각 자원을 가장 높은 부가가치를 창출할 수 있는 분야에 배치하는 단계적 이용 전략이 필요하다. 특히 순환경제를 실현하기 위해서는 제품 설계 단계에서부터 해체, 수리, 재사용, 재활용을 고려해야 하며, 이를 지원하기 위한 재료 여권(Material Passport), 산업 표준, 순환형 비즈니스 모델 구축이 필수적이라고 주장하였다.

또한 그는 목재 제품의 '생애 이력(life history)' 관리의 중요성을 강조하였다. 산림에서 생산된 목재가 가공, 사용, 재사용 및 최종 처분에 이르는 전 과정을 하나의 데이터 체계로 연결함으로써 보다 효율적인 순환적 가치 창출이 가능하다는 것이다. Wimmer 교수는 미래의 목재과학자는 목재해부학과 인공지능, 균류학과 제조공학, 재료역학과 생애주기평가(LCA)를 동시에 이해할 수 있어야 하며, 산림과 산업, 실험실과 공장, 데이터와 정책을 유기적으로 연결할 수 있는 융합형 연구자로 성장해야 한다고 주장했다. 마지막으로 "목재는 인류가 가장 오래 사용해 온 재료이지만, 새로운 질문을 계속 던지는 한 목재과학은 언제나 젊은 학문으로 남을 것"이라고 강조했다.

2-6. 목재과학에서 학제적 연구의 긴요성

이번 학술대회에서는 목재과학의 미래 발전을 위해 학제적 연구가 필수적이라는 점이 반복적으로 강조되었다. 이탈리아 토리노대학교의 Marco Crivellaro 교수는 목재해부학을 고고학, 생태학, 공학, 문화유산 과학을 연결하는 "공통의 구조적 언어(common structural language)"라고 정의했다. 그는 목재해부학의 진정한 가치는 단순히 세포 구조를 관찰하는 데 있는 것이 아니라, 구조적 정보를 생태적·문화적 맥락과 통합하여 지식으로 전환하는 해석 과정에 있다고 강조했다. 그는 목재해부학의 미래를 위해 1) 목재형성과정(xylogenesis)을 연구의 중심축으로 삼아야 한다. 2) 해부학적 관찰과 동위원소 분석 등 다양한 분석 기법을 통합해야 한다. 3) 연구 대상 수종의 생존 전략과 생활사를 충분히 이해해야 한다. 4) 지금까지 상대적으로 관심을 받지 못한 '숨겨진 절반(hidden half)'에 대한 연구를 확대해야 한다. 5) 타 학문과의 지속적인 협력을 통해 목재해부학을 학제적 지식 허브로 발전시켜야 함을 강조했다.

독일 함부르크대학교의 Gerald Koch 교수는 전통적인 목재해부학이 디지털 기술과 결합하면서 새로

운 전환점을 맞이하고 있다고 평가하였다. 그는 목재해부학이 150년 이상 축적된 경험을 바탕으로 여전히 가장 신뢰할 수 있는 수종 식별 방법임을 강조하면서도, 현대 산업이 요구하는 대규모 검증 체계에 대응하기 위해서는 인공지능과 디지털 데이터베이스 구축이 필수적이라고 지적하였다. 최근 유럽에서는 MDF에 사용된 목섬유나 목탄의 원산지와 수종을 판별하여 멸종위기 수종(CITES)의 불법 사용 여부를 확인하려는 수요가 급증하고 있다. 이에 대응하기 위해 Koch 교수 연구팀은 CT 기반 이미지와 인공지능 기술을 결합한 자동 수종 인식 시스템 개발에 집중하고 있었다.

한편 호주국립대학교와 캐나다 UBC에서 활동하고 있는 Phillip Evans 교수는 목재과학의 주요 돌파구가 종종 새로운 분석기법의 도입이나 타 재료과학 분야의 방법론을 수용하는 과정에서 등장했다고 평가하였다. 그는 현재 목재과학이 해결해야 할 가장 중요한 과제 가운데 하나로 혁신적 목재소재의 장기 내구성을 예측할 수 있는 메커니즘 기반 가속열화시험법의 개발을 제시하였다. 그는 호주의 강한 자외선 환경에서 목재의 셀룰로오스 분해가 매우 빠르게 진행된다는 사실을 발견하였으며, 이를 해결하기 위해 지난 30여년간 계속해왔던 연구 결과를 소개했다. 그는 미래의 목재 표면처리가 단순한 코팅 기술을 넘어 정밀한 화학적 보호 시스템과 기능성 소재 설계를 결합하는 방향으로 발전할 것이라고 전망하였다.

마지막으로 독일 드레스덴공과대학교의 Peter Pfriem 교수는 바이오 기반 섬유-매트릭스 복합재를 이용한 현악기 보강 기술을 소개하였다. 연구 결과에 따르면 복합재로 보강된 콘트라베이스는 습도 변화에 따른 팽창과 수축이 감소하여 균열 발생 위험이 줄어들었으며, 기계적 성능 또한 향상되었다. 흥미로운 점은 이러한 구조적 개선이 음향 성능 저하로 이어지지 않았다는 사실이다. 오히려 객관적 음향 측정과 연주자 평가 모두에서 기존 악기보다 우수한 결과를 나타냈다. 이러한 연구는 목재과학이 건축과 재료공학뿐만 아니라 음악, 문화유산 보존, 생태학, 인공지능 등 다양한 분야와 결합하면서 새로운 연구 영역을 창출하고 있음을 보여주는 좋은 사례라 할 수 있다.

3. 견학 후기

3-1. ETH 연구동 방문

ETH 취리히는 두 개의 캠퍼스로 나뉘어져 있다. 구도심에 있는 Zentrum 캠퍼스(본부)와 도심 외곽에 자리잡은 Hönggerberg 캠퍼스로 운영되고 있다. 이 가운데 Hönggerberg 캠퍼스는 'Science City'라 불릴 만큼 첨단 연구시설이 집적된 연구 중심 공간이다. 학술대회 셋째 날 오후, 참가자들은 20분 간격으로 운행되는 셔틀버스를 이용해 Hönggerberg 캠퍼스로 이동하여 Burgert 교수가 이끄는 건축재료 연구실을 방문하였다. Burgert 교수는 세계적으로 잘 알려진 '생물영감목재(Bio-inspired Wood)' 연구의 선구자로, 목재가 지닌 자연 본래의 구조와 기능을 모방하여 새로운 고기능성 소재를 개발하는 연구를 수행하고 있다.

연구동에 들어서자 가장 먼저 눈에 띈 것은 넓은 층고와 체계적으로 정비된 연구 공간이었다. 특히 실험실 곳곳에 설치된 안전 설비와 배관 시스템은 연구 안전을 최우선으로 고려한 스위스 연구 환경의 수준을 보여주고 있었다. Burgert 교수는 연구 내용의 보안 유지를 위해 사진 촬영을 허용하지 않았으며, 대신 박사후연구원과 박사과정 학생들이 직접 연구 내용을 설명하고 질의응답을 진행하였다.

약 2시간 30분 동안 이어진 연구실 투어 가운데 특히 인상적이었던 것은 레이저를 이용해 목재 내부에 직경 약 3 μm 크기의 미세 통로를 형성하여 수분과 열의 이동을 정밀하게 제어하는 연구였다. 이는 목재

의 본래 구조를 유지하면서도 기능을 극대화하는 생물영감 설계의 대표적인 사례로, 머지않아 상용화 단계에 도달할 수 있을 것으로 보였다. 또한 이 연구실은 센서 기술과 로보틱스, 기계학습을 결합하여 목조건축물의 상태를 실시간으로 모니터링하고, 유지관리 시점을 예측하는 연구도 수행하고 있었다. 특히 기존의 시행착오(trial-and-error) 방식에서 벗어나 인공지능 기반 예측 모델을 활용하여 최적의 소재 설계와 제조 공정을 구현하려는 시도는 미래 목재과학이 나아갈 방향을 잘 보여주고 있었다. 이번 방문을 통해 목재 연구가 더 이상 전통적인 재료 연구에 머물지 않고 데이터 과학, 인공지능, 센서 공학과 융합되는 새로운 단계로 진입하고 있음을 확인할 수 있었다.

3-2. 스위스 목재산업 현장 견학

학술대회 마지막 날인 6월 4일에는 스위스를 대표하는 두 개의 목재기업을 방문하는 산업 시찰이 진행되었다.



[그림 7] 쾌적한 공간이 돋보인 Kaufmann Oberholz 공장 내부와 Lehmann Blume 본사 4층 건물 중앙을 연결하는 아트리움. 교차적층목재(cross laminated timber)를 360도로 휘감는 공법을 사용한 소위 Free Form 공법으로 마치 나무 줄기가 4층까지 매끄럽게 올라가는 것처럼 만들어졌다. (두 사진 모두 회사 화보에서 가져옴)

오전에는 Thurgau주에 위치한 Kaufmann Oberholzer사를 방문했다. 이 회사는 스위스산 침엽수재를 원목 단계부터 조립식 건축부재 생산까지 일괄 처리하는 종합 목재가공 기업으로, 원료의 90% 이상을 자국산 목재에 의존하고 있었다. 회사 관계자는 컴퓨터수치제어(CNC) 기술을 이용하여 제재 수율을 약 55%까지 향상시켰다고 설명했다. 45% 내외에 머무는 우리나라의 제재 수율과 비교할 때 상당히 높은 수준이다. 이러한 높은 생산성은 무엇보다도 원목 품질의 균질성에 기인하고 있었다. 스위스의 가문비나무와 소나무는 체계적인 산림 관리 아래 곧고 균일하게 성장하기 때문에 자동화된 절삭 및 제재 시스템에 적합하다. 흥미로운 점은 현재 유럽 목재산업이 직면하고 있는 가장 큰 과제가 바로 이러한 자동화 체계를 활엽수재에 적용하는 것이었다. 기후변화로 인해 침엽수 자원의 감소가 예상되면서 유럽은 활엽수 이용 확대를 추진하고 있으나, 활엽수는 수형과 조직 구조의 변이가 크기 때문에 기존의 자동화 생산 시스템으로는 대응하기 어렵다. 이번 견학은 학술대회에서 논의되었던 '활엽수 이용 확대를 위한 인공지능 기반 목재 등급 분류 기술'의 필요성을 현장에서 직접 확인하는 기회이기도 하였다.

오후에는 St. Gallen 지역에 위치한 Blumer Lehmann사를 방문했다. 150년 역사를 가진 이 회사는 스위스를 대표하는 목조건축 전문기업으로, CEO인 Katharina Lehmann 여사가 직접 참가자들을 안내하였다. 경제학을 전공하던 중 부친의 건강 문제로 가업을 이어받게 된 그녀는 현재 회사의 6대 경영자로서 기업을 이끌고 있었다. 이 회사 역시 스위스산 침엽수재를 대부분 사용하고 있었다. 다만 세계 최고 수준의 디지털 설계 기술과 결합하여 혁신적인 목조건축을 구현하고 있었다. 이 회사는 파라메트릭 설계(parametric design)와 3차원 디지털 제작기술을 적극 활용하여 기존 목조건축의 한계를 뛰어넘는 자유곡면 형태(Free Form)의 건축물을 실현하고 있었다. 본사 건물 중앙에 설치된 대형 아트리움은 그 대표적인 사례였다. 교차적층목재(CLT)를 360도로 휘감아 마치 하나의 거대한 나무줄기가 건물 중앙을 관통하는 듯한 인상을 주었으며, 목재가 직선 구조에만 적합하다는 기존의 고정관념을 완전히 뒤집고 있었다 (그림 8). 이 회사는 생산 과정에서 발생하는 부산물을 거의 100% 활용하고 있었다. 톱밥은 펠릿 제조에 이용되고, 수피와 기타 부산물은 바이오매스 에너지 생산에 활용되었다. 직원들에게 전기

자동차를 제공하는 등 탄소중립 실현을 위한 기업 차원의 노력도 적극적으로 이루어지고 있었다. 순환경제와 지속가능성을 단순한 구호가 아니라 실제 기업 운영의 핵심 원리로 실천하고 있음을 보여주고 있었다.

3-3. ETH와 취리히에 대한 인상

이번 학술대회가 개최된 ETH Zurich는 세계 최고의 공과대학 가운데 하나로 평가받고 있지만, 유럽 대학의 역사라는 관점에서 보면 상대적으로 젊은 대학에 속한다. 1854년 Polytechnikum으로 설립했다. 현재까지 30명에 가까운 노벨상 수상자를 배출했다. ETH는 학문적 잠재력을 중시하는 개방적 교육 철학으로 유명하다. 독일 대학들이 입학 자격을 엄격히 제한하던 시기에도 ETH는 보다 유연한 기준을 적용하여, 고교 졸업장(Abitur)이 없었던 아인슈타인과 빌헬름 뢴트겐에게 입학을 허락해 그들이 과학자로 성장할 수 있는 토대를 제공했다. 학술대회 기간 동안 ETH 본부 건물에서는 세 개의 국제학회가 동시에 개최되고 있었다. 휴식 시간마다 다양한 분야의 연구자들이 복도를 오가며 토론하는 모습은 세계적인 연구중심 대학의 활력을 그대로 보여주고 있었다.

한편 취리히는 인구 50만 명이 채 되지 않는 도시임에도 세계 금융과 과학기술의 중심지 중의 하나로 자리하고 있다. 자연과 도시가 조화를 이루는 모습은 항시 보아도 인상적이다. 스위스의 날씨는 예상보다 훨씬 변화무쌍하다. 같은 날에도 반소매 차림의 사람과 봄 코트를 입은 사람이 함께 보일 정도로 기온 변화가 심했으며, 하루에도 몇 차례씩 날씨가 바뀌곤 했다. 여행객 입장에서는 최소 두세 계절의 옷을 준비해야 할 정도였다. 또한 높은 물가는 이곳의 방문을 언제나 두렵게 한다. 숙박비와 식비는 물론 일상적인 소비 비용까지 인접 국가에 비해 상당히 높아 여행 계획을 세울 때 숙박에서부터 레스토랑과 메뉴의 선택에 이르기까지 세심한 준비가 필요하다.

4. 맺음말

이번 IAWS 창립 60주년 기념 학술대회는 단순한 연구성과 발표의 장을 넘어, 기후변화와 순환경제라는 시대적 요구 속에서 목재과학이 나아가야 할 방향을 확인하는 자리였다. 특히 목재의 계층 구조를 활용한 고기능성 신소재 개발, 인공지능 기반 목재 이용 기술, 바이오 기반 순환경제 구축, 그리고 학제적 연구의 확대는 향후 목재과학 발전을 이끌 핵심 키워드로 확인되었다.



[그림 8] ETH 정문 앞. 테네시대학 Wang 교수,
프랑스 로랭 대학 Xavier 교수와 필자.
취리히에 있는 스위스 교회 개혁자 쯔빙글리와 페스탈로치 동상

목재는 인류가 가장 오래 사용해 온 재료 가운데 하나이지만, 동시에 기후 위기와 탄소중립 시대에 가장 큰 잠재력을 지닌 미래 소재이기도 하다. 이번 학술대회는 목재과학이 전통적인 재료 연구를 넘어 생명과학, 데이터과학, 인공지능, 건축공학 및 문화유산 과학과 융합하면서 새로운 도약의 시기를 맞이하고 있음을 보여주었다.

필자 역시 이번 학술대회를 통해 목재문화유산 연구의 중요성을 다시 한번 확인할 수 있었으며, 앞으로 국내 연구자들이 국제적 연구 흐름에 보다 적극적으로 참여해야 할 필요성을 절감하였다. 창립 60주년을 맞은 IAWS가 앞으로도 세계 목재과학 발전을 선도하는 학술 공동체로서 역할을 이어가기를 기대한다. 유익한 기회를 경험할 수 있게 지원해 주신 대한민국학술원에 깊은 감사를 드린다.

학술원 소식

♦ 2026년 제7차 임원회 개최



2026년 9월 4일(금) 11시 학술원 중회의실에서 제7차 임원회를 개최하였다. 이번 회의에서는 제71회 대한민국학술원상 시상식 개최계획, 제51회 국제학술대회 개최계획, 외국학술원 석학초청 학술회의 개최계획, 국제학술기구 프로젝트 회의정보 수집 등 보고사항이 있었다. 그리고 2027년도 학술원 명예회원 선출계획 등을 심의하여 원안대로 가결하였다.

♦ 대한민국학술원-카자흐스탄학술원 교류 협정 체결



2026년 9월 16일(수) 10시30분 학술원 자연 제2분과실에서 대한민국학술원과 카자흐스탄 공화국 대통령 산하 국립학술원과 학술 분야 협력을 위한 양해각서(MOC)를 체결하였다. 이번 체결식에는 카자흐스탄 국립학술원의 아킬벡 쿠리시바예프(Akhylbek Kurishbayev) 회장을 대리하여 아바이 세릭카노프(Abay Serikkhanov) 부회장이 참석하였다. 양 기관은 이번 양해각서 체결을 계기로 과학기술 및 학술 분야의 정보와 경험을 공유하고, 연구자 및 회원 간 교류 등 상호 협력을 확대해 나갈 예정이다.

♦ 제71회 대한민국학술원상 시상식 개최

2026년 9월 17일(목) 14시 학술원 대회의실에서 한성숙 국무총리, 최은옥 교육부 차관, 학술원 회원, 수상자, 축하객 등이 참석한 가운데 제71회 대한민국학술원상 시상식을 개최하였다. 이번 학술원상은 인문학 부문에 정병준 이화여자대학교 교수, 사회과학 부문에 남형두 연세대학교 교수·권형기 서울대 교수, 자연과학기초 부문에 박홍규 서울대학교 교수, 자연과학응용 부문에 사동민 충북대학교 석좌교수, 총 5명을 수상자로 선정하였다. 수상자에게는 상장과 메달, 상금 1억원을 수여하였다.



| 한성숙 국무총리 축사



| 수상자 가족 포함 단체사진

♦ 제71회 대한민국학술원상 수상자 소개

• 인문학 부문



정병준(鄭秉峻)

출생년도 1965년
현직 이화여자대학교 교수
전공 한국사(한국현대사)
학력 서울대학교 국사학과 문학박사
대표저서 『김규식과 그의 시대』 1~3, 돌베개, 2025.

업적 개요

정병준 교수는 한국 독립운동사와 근현대사를 연구해 온 역사학자로, 국내외에 산재한 방대한 사료를 발굴·분석하여 김규식의 생애와 활동을 종합적으로 복원하였다. 대표 저서 『김규식과 그의 시대』 1~3에서는 김규식의 삶과 활동을 당시의 국제적 환경과 시대적 배경 속에서 다각적으로 분석하고, 특히 파리강화회의를 비롯한 한국 독립운동의 국제 활동을 치밀하게 고증하였다. 새롭게 발굴한 자료를 토대로 그동안 충분히 규명되지 않았던 사실과 쟁점에 새로운 해석을 제시함으로써 한국 근현대사와 독립운동사 연구의 지평을 넓혔다.

• 사회과학 부문



남형두(南馨斗)

출생년도 1964년
현직 연세대학교 교수
전공 법학, 지식재산권법, 저작권법
학력 University of Washington School of Law 법학박사(Ph.D.)
대표저서 『공정이용의 역설 - 시소에 올라탄 거인, 균형의 복원』, 경인문화사, 2025.

업적 개요

남형두 교수는 저작권법 분야를 연구해 온 법학자로, 공정이용 제도의 역사와 법리를 체계적으로 고찰하고 디지털 기술과 인공지능 시대에 새롭게 제기되는 저작권 문제를 분석하였다. 대표 저서 『공정이용의 역설 - 시소에 올라탄 거인, 균형의 복원』에서는 빅테크와 인공지능 개발사의 대규모 저작물 이용에 공정이용 법리가 적용되면서 나타나는 문제에 주목하였다. 이를 통해 인공지능 시대에 저작권 보호와 공익 사이의 균형을 다시 조정할 필요성을 제기하고, 변화하는 기술 환경에 대응하는 저작권법 연구에 새로운 논의를 제시하였다.

• **사회과학 부문**



권형기(權熒基)

출생년도 1966년
현직 서울대학교 교수
전공 정치이론, 유럽정치, 정치경제
학력 University of Chicago 정치학 박사
대표저서 『Changes by Competition: The Evolution of the South Korean Developmental State』, Oxford University Press, 2021.

업적 개요

권형기 교수는 정치경제와 발전국가 연구에 천착해 온 정치학자로, 세계화와 급격한 기술 변화 속에서 한국 발전국가가 변화에 적응하며 발전을 지속해 온 과정을 연구하였다. 특히 주요 경제주체 간 '경쟁과 협력'에 주목하고, 변화하는 여건에 맞게 경쟁을 조직하고 조정하는 국가의 역할을 새롭게 조명하였다. 이를 바탕으로 한국 발전국가의 적응 모델을 제시하여 국가와 시장을 대립적으로 바라보던 기존의 시각을 넘어 발전국가 연구와 비교정치경제의 이론적 논의를 확장하였다.

• **자연과학기초 부문**



박홍규(朴鴻圭)

출생년도 1976년
현직 서울대학교 교수
전공 광학
학력 KAIST 물리학 박사
대표논문 Vortex nanolaser based on a photonic disclination cavity. *Nature Photonics* 18, 286-293 (2024)

업적 개요

박홍규 교수는 나노광학과 나노레이저 분야를 연구해 온 물리학자로, 빛을 정밀하게 제어하는 새로운 원리를 발견하고 이를 활용해 초소형 나노레이저를 구현하였다. 특히 위상학적 결함을 적용한 새로운 광공진기 구조를 통해 각운동량을 갖는 빛을 초소형 나노레이저에서 구현함으로써 나노광학 분야의 오랜 난제를 해결하였다. 이러한 연구는 초소형·고효율 광소자 구현의 가능성을 보여주었으며, 차세대 광통신의 채널 용량 확대와 첨단 반도체를 비롯한 미래 광기술로의 응용 가능성을 넓혔다.

• **자연과학응용 부문**



사동민(史東珉)

출생년도 1960년
현직 충북대학교 석좌교수
전공 비료학, 토양미생물학
학력 North Carolina State University 농학박사
대표논문 Enhancement of growth and salt tolerance of red pepper seedlings (*Capsicum annuum* L.) by regulating stress ethylene synthesis with halotolerant bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase activity, *Plant Physiology and Biochemistry* 49, 427–434 (2011)

업적 개요

사동민 교수는 비료학과 토양미생물학을 연구해 온 농생명과학자로, 토양미생물을 활용하여 식물의 환경 스트레스를 완화하고 생육을 개선하는 원리를 규명하였다. 특히 고염 환경에서 분리한 미생물이 식물의 스트레스 호르몬인 에틸렌 생성을 조절하여 염분에 대한 내성과 영양분 흡수를 높이고 생육을 향상시키는 과정을 밝혀냈다. 이러한 연구는 고염·가뭄 등 다양한 환경 스트레스에 대응하는 토양미생물의 역할을 이해하는 학문적 기반을 제시하고, 기후변화 시대의 친환경적이고 효율적인 농업기술 개발에 기여할 수 있는 토대를 마련하였다.

회의 및 행사 안내

♦ 2026년 제8차 임원회 개최

• **일시** : 2026년 10월 7일(수) 14시
• **장소** : 학술원 중회의실(3층)

♦ 2026년 제3차 학술원 집담회 개최

구분	내용
발표자/주제	이형목(자연1) / 지구 밖을 향한 도전과 지구 안의 책임 : 우주 시대의 학문과 사회
사회자/토론자	김진의(자연1) / 김영식(인·사3), 우경식(자연2)
일시/장소	2026년 10월 22일(목) 10:30~12:30 / 학술원 중회의실(3층)
참석대상	학술원 회원 중 희망자 ※ 참석을 희망하시는 회원은 박승호 주무관(02-3400-5254, psh20214@korea.kr)에게 10월 15일(금)까지 사전 신청

♦ 제51회 국제학술대회 개최

• **일시** : 2026년 10월 16일(금) 10:00~16:30 • **장소** : 학술원 대회의실(2층)

• **주제** : 인공지능과 문명의 전환

• **세부일정**

일정	주요 내용	발표 및 좌장
10:00	▶ 개회 및 전체 사회	사회자 : 정찬섭 회원
10:00~10:10	▶ 개회사 ▶ 환영사	이돈희(조직위원장) 이정복(학술원 회장)
기조 강연	**인공지능과 문명의 전환**	**사회자 : 정찬섭 회원**
10:10~10:50	▶ 인공지능은 왜 문명사적 전환점인가?	이한구 회원
주제발표 1	**AI가 제기하는 철학적 문제**	**좌장 : 오종환 회원**
10:50~11:30	▶ 체화된 AI와 그 철학적 관념의 틀: 지배, 종말론, 인간-사물의 이분법을 넘어서	Mark Coeckelbergh (빈대학 미디어 및 기술철학 교수)
11:30~11:45	▶ 지정 토론 / 질의응답	신중섭(강원대학교 명예교수)
	〈 오찬 : 3층 중회의실 〉	
13:00~13:30	음악연주 ▶ 현악 5중주 및 바리톤 솔로	
주제발표 2	**AI와 인간의 협력적 관계**	**좌장 : 신민섭 회원**
13:30~14:10	▶ 메타인지란 무엇이며, 기계가 메타인지를 가질 수 있는가?	Steve Fleming (유니버시티 칼리지 런던 인지과학 교수)
14:10~14:25	▶ 지정 토론 / 질의응답	우충완(성균관대학교 글로벌바이오메디컬공학 교수)
주제발표 3	**AI와 교육의 변혁**	**좌장 : 진동섭 회원**
14:25~15:05	▶ AI와 함께하는 미래교육: 학습도구의 진화	조영환(서울대학교 학습과학연구소장)
15:05~15:20	▶ 지정 토론 / 질의응답	이길재(충북대학교 사범대학장)
	〈 휴식 및 다과 〉	
	종합정리 및 폐회	**좌장 : 정진홍 회원**
15:40~16:20	▶ 종합토론 및 질의응답	전체 발표자
16:20~16:30	▶ 폐회	**사회자 : 정진홍 회원**

♦ 2026년 제6차 분과회 개최

인문·사회과학부		자연과학부	
분과	회의일시	분과	회의일시
1	10.30.(금) 11:00	1	10.30.(금) 11:00
2	10.30.(금) 11:00	2	10.27.(화) 11:00
3	10.30.(금) 14:00	3	10.29.(목) 11:00
4	10.30.(금) 11:00	4	10.27.(화) 16:00
5	10.29.(목) 11:00	5	10.28.(수) 11:00
6	10.27.(화) 14:00		

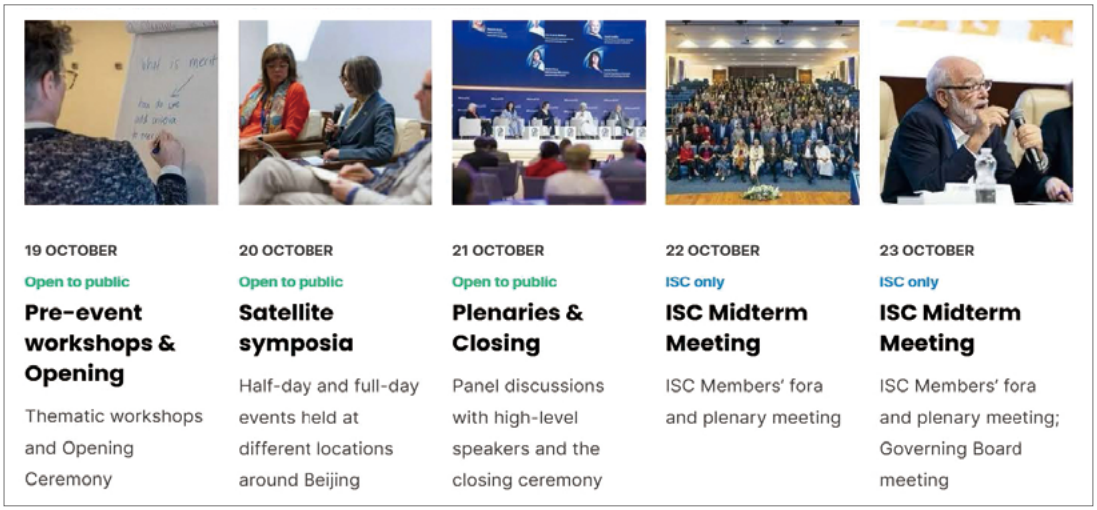
학술원사무국 소식

♦ 학술원사무국 인사발령(2026.9.1.)

• **전입** : 학술진흥과 진태훈 교육연구사(수원 칠보고등학교)

국제학술기구 및 외국학술원 행사 안내

♦ 국제과학이사회(ISC) 베이징 과학대화 및 중간 회원회의 (Beijing Science Dialogue & ISC Midterm Members' Meeting)



기 간 2026. 10. 19.(월) ~ 23.(금)

장 소 중국 베이징

주 최 국제과학이사회(ISC), 중국과학기술원(CAST)

주 제 Science in a Complex World – Science for a Better Future

내 용 국제과학이사회(ISC)는 2026년 10월 19일부터 23일까지 중국 베이징에서 「Science in a Complex World – Science for a Better Future」를 주제로 Beijing Science Dialogue 및 ISC Midterm Members' Meeting을 개최합니다.

이번 행사는 전세계 과학계가 모여 국제 과학협력의 주요 현안과 과학이 더 나은 미래를 위해 수행해야 할 역할을 논의하는 자리입니다. 10월 19일부터 21일까지 진행되는 Beijing Science Dialogue에서는 주제별 워크숍, 분야별 심포지엄, 고위급 전체회의 등이 개최되며, 10월 22일부터 23일까지는 ISC 회원 기관 및 펠로우를 대상으로 중간 회원회의가 진행됩니다.

홈페이지 : https://council.science/Beijing/

※ 관심 있으신 회원님께서는 담당자(이슬 esther08@korea.kr)에게 문의주시기 바랍니다.