



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.3400-5250 F.535-8836 / 편집 : 학술진흥과

2021년도 특정연구과제 학술토론회

2021. 11. 12(금)  大韓民國學術院



2021년 특정연구과제 학술토론회 개최 (2021.11.12.)

이달의 주요기사

| | | |
|----------------|---|------------------|
| 회 원 기 고 | 노벨과학상 | 趙完圭 會員 2면 |
| | 분자생물학의 이정표 | 任正彬 會員 4면 |
| | 예상 못한 가운데 일어나는 죽음 '돌연사'에 대한 小考 | 文國鎭 會員 13면 |
| 분과 및 학계동향 | 자연제3분과 회원 동정 및 학계 동향 | 劉丁烈 會員 16면 |
| 학 술 교 류 | 2021년 지속가능성 연구 및 혁신 회의(SRI2021) 온라인 참가기 | 金璟東 會員 22면 |
| | 제63차 국제통계학회(ISI) 학술대회 온라인 참가 보고서 | 朴聖炫 會員 33면 |
| 학 술 원 상 수상자 기고 | FDM 방식의 3D프린터를 위한 블록 구조의 내부지지대 생성 알고리즘 | 李建雨 教授 · 李柱聖 39면 |
| | 통증의 신경생물학적 이해: 통증의 정체와 치료 | 吳碩培 教授 44면 |
| 학술원 소식 | 회의 및 행사 안내 | 49면 |

[회원기고]

노벨과학상



趙完圭 會員(발생생물학, '과학키움' 이사장)

매해 10월 초 스웨덴 왕립과학아카데미가 노벨과학상 수상자를 발표한다. 그럴 때쯤 되면 언제쯤 우리나라에 노벨상 수상자가 나올 것인가 라고 묻는 친구가 많다. 30~40년 전에는 아직 멀었다고 대답했었다. 5년 전부터 한국벤처신문사 이도수 대표가 월간 '노벨사이언스' 잡지를 발간하여 왔다. 노벨수상자의 업적소개, 세계 저명과학자의 연구활동 취재 그리고 과학계 동향을 신는 매우 수준이 높은 잡지다. 과학계가 해야 할 노벨상 관련 잡지를 그간 우리 모르게 꾸준히 발행해 온 이도수 대표는 주기적으로 노벨사이언스 포럼을 개최하고 국내 및 세계 과학계 연구동향을 소개하는 등 우리 과학계 활성화에 기여하여 왔다. 근래 우리 과학자는 잡지 '노벨사이언스'로 인하여 우리나라 노벨과학상 배출 가능성에 관심을 갖게 되었다.

노벨과학상은 다이나마이트를 개발한 스웨덴의 노벨이 기탁한 기금으로 설립된 노벨과학아카데미가 매년 10월, 연구업적이 뛰어난 물리학, 화학, 생리학 분야 과학자를 선발하여 수여하는 상이다. 1901년, X-선을 발견한 렌트겐을 위시한 각 분야 학자가 최초의 노벨과학상을 수상한 이래 오늘에 이르고 있다. 노벨과학아카데미 말고도 상을 수여하는 단체가 여럿이지만 권위와 명예를 감안하여 과학자는 노벨과학상 수상자가 되기를 바란다. 한평생 과학 분야 교수로, 그리고 연구에 시간을 보내온 나도 한 때 노벨과학상 꿈을 품기도 하였다. 대학 보직으로 중도에 연구생활을 접게 된 것이 못내 아쉽다.

일본 통치 중 대학을 졸업한 우리나라 이학사 학위 취득자 수는 단지 4, 5명에 불과하였다. 1946년 문리과대학 등 여러 개 단과대학으로 구성된 서울대학교가 개교하였다. 문리과대학 이학부 5개 학과에 교수 수는 단 14명이었고, 그 중 이학사는 5, 6명에 불과하였으며 나머

지는 중학교 교사를 발탁하여 교수 수를 채웠다. 물론 교육 및 연구시설은 빈약하였다. 나는 1946년 2년의 예과 과정을 수료하고 1948년 문리과대학 생물학과로 진학하였다. 대학 3학년 때인 1950년 6월 25일 북의 남침으로 발발한 전쟁으로 대학 건물과 시설 거의가 파괴되었고 다수의 교수와 학생을 잃었다. 1952년 생물학과 동기생 20명 가운데 결국 나 혼자만 졸업하였다. 그런 상황에서 노벨상은 우리와는 관계가 없는 상이라 여겨 왔다.

그런 가운데 1961년 5.16 군사혁명으로 집권한 박정희 대통령은 경제발전의 근원인 과학기술력을 키우지 않고서는 배고픈 백성을 먹여 살릴 수 없다며 1966년 미국 존슨 대통령이 월남 파병 대가로 제공한 600만 달러 전액을 한국과학기술연구원(KIST) 설립에 투입하였다. 또한 서독 파견 광부, 간호사의 피땀 묻은 돈, 가발 팔아 번 돈, 그리고 IBRD 등 국제은행으로부터 얻은 차관금으로 대학의 교육 및 연구시설을 갖추었고 대덕연구단지를 조성하였다. 당시 초빙된 재미교포 과학기술자를 연구소 연구요원으로 초빙하거나 대학교 교수로 등용하는 등 모국의 과학기술 역량 신장 및 인력 양성을 크게 도왔다. 이같은 과학기술력 제고정책으로 말미암아 우리나라 연구경쟁력은 단시일 내에 국제수준급에 도달하였다. 이런 시점에서 노벨과학상 수상자 탄생 가능성을 확신하게 되었다.

이 시점에서 노벨상 수상자를 배출한 여러 나라의 예를 참고할 필요가 있다. 우선 일본의 이화학연구소(RIKEN)를 예로 들어 본다. 이 연구소는 100여 년의 역사를 지닌 일본의 대표적 기초과학 연구소다. 일본은 1949년 '유가와 히데기' 교수를 시작으로 그동안 25명의 노벨과학상 수상자를 배출하였으며, 그 중 11명이 RIKEN 연구원 혹은 관련 학자다. 나는 1994년부터 3년간 첨단연구사업부 국제자문위원으로 RIKEN 연구사업

에 관여하였으며 그 과정에서 배운 것이 많다. RIKEN은 연구과제 자문 혹은 평가를 위하여 수시로 노벨상 수상자 혹은 그의 급인 과학자를 초청한다. 그들의 자문비용이 만만치 않지만 RIKEN은 이를 아끼지 않는다. 결국 일본이 다수의 노벨상 수상자를 배출한 것은 당연하다고 할 것이다. 한편 노벨과학상 수상자가 없는 우리는 어떤가. 물론 과학자로서 국민에게 얼굴을 들 상황이 아니다. 우리는 연구과제 자문 혹은 평가에 극히 소극적이다. 이에 소요되는 비용을 낭비로 보고 또한 연구 간섭, 혹은 연구비밀 누설이라며 이를 기피하는 경향이 강하다. 이제는 그런 생각을 바꾸어야 한다. 특히 기초분야 연구과제를 수행하는 연구원 개개인 그리고 연구가담 대학원 학생이 세계 학자로부터 자문과 평가를 받는 일은 우리나라 연구의 질 향상 뿐 아니라 우리 과학자가 세계 과학계의 일원이 될 기회가 되며, 이런 점을 감안하면 자문에 든 비용보다 몇 배의 비용효과가 있다는 점을 알아야 할 것이다.

관례로 노벨과학상 수상자는 박사학위 과정 혹은 초기의 연구, 그리고 그 뒤 이어진 3, 40년의 연구가 창의적인가, 그리고 연구결과가 인류사회 복지 증진에 기여하였는가 여부를 평가한 뒤 선정한다. 이 점 우리 민족의 창의성은 전래로 우월하다. 신라시대 첨성대를 건축하여 천문학을 시도하였고, 구텐베르그보다 앞서 고려시대 금속활자를 발명하였고, 1400년대에 장영실이 시간 측정을 위한 자격루(물시계)를 발명하였다. 혹은 세종대왕 때 한글을 창제한 것도 우리 민족의 창의성을 보여주는 예가 된다. 이같이 창의성이 뛰어난 우리 민족이 아직 한 명의 노벨상 수상자도 배출하지 못한 이유를 찾아보아야 한다. 우선 우리나라 과학교육은 창의성과는 거리가 먼 교과서 위주요, 대학입시 준비를 위한 암기식 교육

인 점을 꼽을 수 있다. 이런 교육체제에서 창의적 학생을 찾아 기르기는 힘들다.

10년 전 S-오일이 창설한 우수 이학박사학위 취득자 시상제도는 오늘에 이르도록 계속 이어지고 있다. 이들의 연구내용은 가히 세계수준급이며 이들이 연구활동을 계속한다면 노벨상 수상 후보자로 성장할 수 있다. 그러나 정원에 묶인 대학, 연구비 제약에 허덕이는 연구기관이라 이들 우수박사학위 취득자가 교수 혹은 연구요원으로 발탁될 기회는 거의 막혀 있다. 이들이 계속 연구활동을 지속할 수 있도록 정부는 근본적 해결책을 마련하여야 한다.

최근 우리나라에 연구업적이 뛰어난 과학자 수가 늘고 있다. 이들 가운데 노벨상 수상 가능한 학자를 발견할 수 있다. 노벨과학상 수상 가능한 후보자를 발굴, 지원, 그리고 육성하여 끝내 국민의 꿈이고 소망인 노벨과학상 수상자를 배출하겠다는 뜻을 가진 학계 및 산업계 유지가 ‘과학키움’이라는 단체를 구성하였다. 연구업적이 혁혁한 과학자를 발굴하여 노벨상 수상 후보자로 육성하는 단체다. 화장품 사업으로 성공한 박성률 회장은 이 단체의 활동에 필요한 비용을 지원하기로 하였고, 이미 서울 시내 필동에 ‘과학키움’ 사무실 공간을 제공하였다. 물론 노벨상 수상자 탄생을 소망하는 온 국민의 뜻을 안고 ‘과학키움’이 국민운동의 본거지가 되기를 기대한다. 끝내 ‘과학키움’이 노벨상 수상자 배출의 산모가 되고 필동 사무실은 첫 번째 노벨과학상 수상자 산실로 기록될 것이다. ‘과학키움’ 운동에 참여하는 각계 유지들의 헌신적 봉사에 감사하며 끝내 우리 소망 성취의 결실 있기를 기대한다. ㉠

[회원기고]

분자생물학의 이정표



任正彬 會員(분자생물학)

1950년대 이후 생명과학의 눈부신 발전이 있었다. 이제 현대생물학은 분자수준에서 생명현상을 이해하고 생명신비에 접근하고 있다. 한편으로 생물학은 기초연구 성과와 축적된 생물 정보에 기반한 새로운 산업을 탄생시켜 인간생활을 보다 건강하고 풍요롭게 하고 있다. 이 글에서는 지난 50여년 간 생명의 비밀을 배우고 연구하며 가르치는 동안 우리를 흥분시켰던 중요한 발견들을 중심으로 분자생물학을 조명하고자 한다.

분자생물학이 태동하던 70년대 연구의 한 축을 담당했던 중심에서 공부하는 기회가 있었다. 이제는 현대생물학의 이정표가 되는 수많은 연구 논문들을 읽으며 꿈을 키웠던 곳 - 위즈너 과학도서관 (Wiesner Science Library). 이 곳은 MIT의 자연과학대학 도서관으로, 당시에는 생물산업이 미미하던 때여서, 여기서 읽고 공부하던 논문들은 호기심 충족이 주 목적이었다. 그러나 위즈너 도서관 벽면에 크게 걸려있던 문구; “과학은 인류 복지에 기여해야 한다”는 이십대 초반 유학생에게 깊은 영향을 주었고 항상 내 마음속에 자리 잡고 있었다. 보는 관점에 따라 더 훌륭한 그러나 아직 그 가치가 꽃피지 못한 위대한 업적들이 많을 것이다. 아래 열 가지는 나의 주관적인 의견으로, 특히 인류복지에 크게 기여한 발견들을 중심으로 선정 기술하였다.

1. DNA 이중나선 구조 발견

1952년 가을, 20대 중반의 젊은 미국인 포스트닥이 케임브리지 대학 카벤디쉬 연구소에서 프란시스 크릭을 만나 서로의 생각을 공유하며 당시로는 무모하게 여겨졌던 DNA의 입체구조 규명에 도전하였다. 이들은 킹스 칼리지의 모리스 윌킨스 등과 함께 이중나선 구조 결정에 결정적인 역할을 하였는데, 당시의 뒷이야기는 왓슨의 “The Double Helix” 책자로 발간되었고, 이 책은 생물학

도의 필독서로 많은 영감을 주고 있다.

DNA(디옥시라이보스 핵산)는 당, 인산, 염기의 세 요소가 결합된 뉴클레오타이드가 구성단위로, 당-인산을 기본 골격으로 하는 나선 구조로 되어있다. X-선 회절 데이터로 두 가닥, 세 가닥(삼중나선) 등 여러 가능성을 열어 놓고 연구하던 중 윌킨스 그룹의 로잘린드 프랭클린의 데이터로부터 당과 인산의 뼈대가 구조의 바깥쪽에, 그 축을 따라 염기들이 안쪽으로 향하고 있음을 알 수 있었다. 퓨린과 피리미딘 염기 즉, 아데닌과 티민, 구아닌과 사이토신이 한 평면에서 수소결합을 통해 서로 상보적인 결합을 하고 있으리란 생각은 유전 물질로서의 DNA 역할과 “샤가프 룰”을 깊이 인지하고 있던 왓슨으로부터 나왔다. 이 생각을 들은 크릭은 그러면 두 가닥의 방향이 서로 역평행 할 것이라 즉석에서 말했다. 이날 이후, 이들의 생각을 정리하여 Nature지에 발표하는데 2개월이 걸리지 않았다(1954년 4월 발표). 논문을 제출하며 왓슨은 이토록 단순하고 아름다운 구조가 진실이 아닐 수 없다고 생각했고, 이들의 이중나선 구조는 같은 시기 삼중나선의 구조를 발표한 구조생물학의 거장 라이너스 폴링을 포함하여 학계에서 급속히 받아들여지게 되었다.

DNA 구조 규명은 비들과 테이텀이 단백질의 화학적 특성이 유전자에 의해 결정됨을 붉은빵곰팡이 실험으로 밝힌지 10여년 만에 나온 쾌거로 분자생물학의 출발점으로 받아들여진다. 이후, 모든 생명체(일부 바이러스 제외)의 유전정보가 DNA에서 RNA를 거쳐 최종산물인 단백질로 전달된다는 분자생물학의 중심원리(Central Dogma)가 확립되었다. DNA 염기서열에서 RNA 염기서열이 결정되고, RNA 염기서열에서 단백질의 아미노산 서열이 결정된다. 크릭은 RNA 염기서열에서 단백질 합성을 매개하는 물질의 존재를 예측하고 이를 아답터 분자라 불렀다. 그 후 아답터는 잠시 sRNA로 불리다 tRNA(운반 RNA)의 명칭을 갖게 되었다.

2. 유전암호의 해독

DNA 입체구조가 밝혀지면서 학계의 관심은 이 분자 내의 유전정보가 어떻게 암호화 되어 있는가에 집중되었다. 1953년 핵물리학자 가모프의 주도로 단순한 DNA 구조 속에 내재된 유전정보 전달 방식을 토론하기 위한 학제 간 연구 모임으로 “RNA 타이 클럽”이 만들어졌다. 이 모임은 크릭, 왓슨, 브레너, 델브뤼크 등 암호화 문제에 관심 있는 학자들로 구성되었고, 회원 수는 아미노산당 한 명씩 20명으로 제한하고 자신의 아미노산 약자가 새겨진 넥타이핀을 받았다. 이들은 유전암호는 4개의 다른 염기를 사용하여 20개의 아미노산을 지정하는데, 두 개의 염기가 하나의 아미노산을 지정하면 16개로 아미노산 수에 모자라고, 네 개의 염기는 256개의 코드를 지정함으로 정보의 큰 손실을 가져와서, 세 개의 염기가 한 아미노산을 지정하는 삼중자 암호(Triplet Codon)일 것으로 예상하였다.

NIH의 니렌버그는 무세포 번역시스템을 도입하여 방사능으로 표지된 아미노산과 폴리뉴클레오타이드 인산화효소를 사용하여 합성한 mRNA(전령 RNA)를 넣어 생성된 폴리펩타이드를 분석하여 유전 코드를 밝혔다. 즉, 우라실 염기만으로 된 전령 RNA에서는 페닐알라닌으로만 구성된 펩타이드를 얻은 것으로 삼중자 암호 UUU가 페닐알라닌으로 번역된다는 것을 알게 되었다. 이를 시작으로 유전암호를 규명하는 일이 경쟁적으로 진행되었는데, 코라나는 합성 가능한 짧은 올리고디옥시뉴클레오타이드와 DNA 중합효소, RNA 중합효소를 함께 사용하여 염기서열을 예측할 수 있는 mRNA를 만들어 무세포 번역시스템으로 코돈을 밝혀나갔다. 이와 함께 방사능으로 표지된 아미노아실-tRNA와 삼중자의 결합을 니트로셀룰로오스 상에서 분석하는 방법으로 1966년 드디어 64개 코돈과 20개 아미노산의 대응 관계가 모두 밝혀지게 되었다. 64개의 삼중자 암호 중 3개 UAA, UAG, UGA는 단백질 합성 종결 신호이고, 61개의 암호가 20 종류의 아미노산을 지정하는데, 이러한 코돈의 축퇴성은 돌연변이의 해로운 효과를 상당부분 줄일 수 있게 해준다.

지구라는 행성에 생명체가 생겨나고, 생명체는 후손에

게 전달되는 생명정보를 DNA 분자의 형태로 저장 유지하여 왔다. 모든 생명체에 공통적으로 적용되는 이 유전암호의 해독은 생명 신비를 밝히는데 한 걸음 다가간 획기적인 사건으로 당시 우리를 흥분시키기에 충분하였다.

3. 재조합 DNA 기술

유전공학의 총아인 재조합 DNA 기술은 서로 개별적으로 발전해온 핵산생화학과 미생물유전학의 융합으로 이룬 결실이다. 우선 DNA 발견과 함께 핵산을 기질로 하는 효소들이 다수 발견 정제되고 그 특성이 밝혀졌다. 이 분야에서 선구자적인 역할을 한 분은 아서 콘버그와 그의 스승 오초아로 각각 DNA 중합효소와 ‘RNA 중합효소’를 최초로 발견하였다. 콘버그가 발견한 효소는 실제로 DNA 복제에 관여하는 것이 아니었고, 오초아의 효소도 세포내에서는 RNA를 분해하는 효소였지만, 이들은 시험관에서 이 효소를 사용하여 핵산을 합성할 수 있었다. 이어서 유전자 재조합의 핵심도구인 특정 염기서열을 인식하여 절단하는 제한효소, 잘려진 가닥을 연결시켜주는 DNA 연결효소, 폴리뉴클레오타이드 카이네즈를 포함한 핵산을 표지하는데 필요한 효소들이 속속 발견되었다.

멘델과 모르간의 유전학은 고등생체인 완두콩과 초파리를 재료로 하여 이들에서 발현되는 유전형질을 분석한 데 반하여, 미생물유전학은 1950년대 후반에서 60년대 주로 대장균을 이용하여 분자수준에서 유전현상을 이해하는데 기여했다. 미생물유전학자들의 노력으로 세균에서 유전물질의 전달은 접합, 형질전환, 형질도입의 방법으로 이루어진다는 것을 알게 되었다. 대장균에서 접합에 의한 유전물질 교환은 레더버그에 의해 처음 연구되어 이 과정에 관여하는 F-팩터가 발견되었고, 이를 이용한 대장균의 유전자 지도가 작성되었다. 바이러스에 의해 매개되는 형질도입은 델브뤼크와 루리아에 의해 최초로 연구되었으며, 형질전환 실험은 이보다 앞서 그리피스, 애버리 등에 의해 폐염쌍구균을 사용하여 수행되었다. 이 과정에서 연구자들은 세균 내에 세균의 염색체와 별도로 존재하는 작은 원형의 DNA로 에피솜(F-팩터 포함, 세균 염색체에 삽입 가능)과 플라스미드가 있음을 발

견하였고 이는 재조합 DNA 탄생에 기반이 되었다. 플라스미드는 세균 염색체와 독립적으로 복제 가능한 원형 DNA로, 항생제, 중금속 등에 내성을 주는 유전자를 흔히 가지고 있다.

스탠포드 대학의 폴 버그는 1972년 최초로 세균 DNA를 SV40 바이러스에 삽입하여 “하이브리드 DNA”를 만들었고, 재조합 DNA를 탄생하게 한 이 기초연구로 노벨 화학상을 수상했다. 그러나 이 기술에 대한 특허는 1980년 같은 대학의 스탠리 코헨과 허버트 보이어에게 주어졌고, 수년 후 보이어는 플라스미드 DNA에 제한효소를 사용하여 연구하고자 하는 유용한 유전자를 끼워 넣고, 세균이나 배양 동물세포에 넣어 다량 증폭 발전시킬 수 있게 하였다. 그는 벤처투자자 로버트 스완슨과 ‘제네틱’사를 설립하여 여지껏 돼지의 채장을 갈아 정제하여 얻었던 인슐린을 1978년 유전자재조합 방법으로 생산, 휴물린(인간 인슐린) 상용화에 성공하였다.

아서 콘버그가 그의 저서 “The Golden Helix”에서 처음 사용했듯이 DNA는 이제 이중나선에서 황금의 나선으로 변모해가고 있다. 재조합 DNA 기술은 새로운 생명공학 시대를 여는 트레일블레이저의 역할을 담당했고, 이 방법으로 연구하고자 하는 유전자나 단백질을 손쉽게 다량 얻을 수 있게 되어, 생물학의 연구 방법론에서도 획기적인 변화를 가져오게 되었다.

4. 세포융합, 하이브리도마 기술

세포를 둘러싸고 있는 외벽을 제거하면 세포들끼리 융합시킬 수 있다. 미생물은 이러한 원형질체 융합 방법으로 높은 알코올에서 생존하는 이스트나 유용 물질을 더 많이 생산 배출하는 유용한 미생물 균주 개발에 이용해왔다. 식물에서도 이 방법이 널리 이용되어 새로운 내염, 내열, 다수확 품종 등 우수한 형질을 보유한 작물 개발에 활용되고 있다.

1970년대 중반 확립된 단일클론항체 생산법은 서로 다른 성질의 동물세포 융합 결과로 얻은 성과이다. 하나의 단백질에는 항체를 생성하게 하는 여러 개의 항원결정기(에피통)가 있다. 항원을 쥐에 주입하여 지라에서 여러 종류의 항체를 만드는 B림프구들을 얻고 이를 골수암

세포 마이엘로마와 융합시켜 (폴리에틸렌글라이콜이나 섀다이 바이러스 사용) 하이브리도마를 만든 뒤 이를 HAT 배지에서 스크린 하여, 반영구적으로 분열하며 항체를 만드는 하이브리드 세포를 얻는다. 이렇게 얻은 하이브리도마 세포를 분리 배양하고 ELISA와 같은 면역학적 방법으로 확인하여 단일클론항체(mAb)를 얻는다. 켈러, 밀스테인 등이 확립한 이 단일클론항체 기술은 면역학, 의학분야에서 이룬 연구 방법론적 진보 중 가장 중요한 것 중 하나로, 이들은 바젤 면역학연구소 소장 닐스 예르네와 함께 1984년 노벨 생리의학상을 수상하였다. 근래에는 이러한 세포융합에 의한 전통적인 방법에서 새로운 진보된 단일항체 제조방법들이 속속 등장하고 있다. 현재 단일클론항체는 인간질병의 진단과 치료에 큰 몫을 담당하고 있다. 휴미라(류마티스 관절염), 리툭산(비호지킨 림프종), 레미케이드(류마티스 관절염), 아바스틴(대장암, 폐암, 황반변성), 시나지스(RS바이러스 질환), 허셉틴(악성 유방암) 등의 단일클론항체가 바이오 의약품 시장에서 차지하는 비중은 점점 증가하고 있다.

이종 간의 융합은 세포 수준에서는 가능하나 세포의 윗 단계로 가면 면역시스템의 거부로 힘들다. 라이거(숫사자, 암호랑이), 노새(암말, 수탕나귀)처럼 근접한 이종 간의 교배는 가능하지만 이들은 일반적으로 번식 가능한 후손을 만들지 못한다. 그러나 장기 부족을 해결하기 위한 연구가 여러 각도에서 계속되고 있어 면역억제제 없이 안전한 이종 장기이식이 가능한 날이 곧 다가올 것이다.

5. 발암 유전자, 발암 기작

닉슨 대통령은 1970년, 앞으로 10년 내에 암을 정복하겠다는 야심찬 계획을 발표하였다. 이는 정치적 라이벌이었던 케네디 대통령이 소련의 스포트닉 발사에 자극을 받아 1960년대가 끝나기 전에 달에 인간을 보내겠다 약속하고 NASA를 통해 이를 실현한 것에 자극을 받은 정치적 선언이었다. 그러나 당시 암 정복을 위해서 기초연구의 필요성을 인식하고 있던 관련 학자들은 NIH에 RO1연구비 등을 신설하였고, 이는 암연구와 기초의학 연구 저변 확대에 크게 기여했다.

1970년대 중반 해롤드 바무스와 마이클 비숍은 레트

로바이러스인 라우스 육종바이러스의 유전자(v-src)가 숙주 세포의 c-src를 하이잭하여 (v-src을 역전사하여 숙주 DNA에 끼어 들어감) 닭에서 육종암이 유발됨을 알아냈다. 이어서, MIT 화이트헤드 연구소의 밥 와인버그는 최초로 인간세포에서 발암유전자 Ras, 종양억제유전자 Rb를 발견했고, 이를 계기로 여러 연구실에서 수많은 발암 및 종양억제유전자들이 발견되고 이들의 생체 내 기능이 밝혀지게 되었다. 발암유전자의 발견은 정상세포가 암세포로 전환되는 과정을 분자 수준에서 이해하는데 크게 기여했다. 원발암유전자는 발암유전자가 될 수 있는 잠재성을 가진 유전자로 정상세포에서는 세포 분열의 제어와 분화 발생 등 생명현상의 기본이 되는 중요 기능을 담당하고 있다. 인간에는 약 40여종이 현재 알려져 있는데, 세포분열이 왕성히 일어나는 줄기세포나 생식세포를 제외하고는 비활성화되어 있다. 원발암유전자가 돌연변이(점 돌연변이, 결실, 삽입 등), 유전자 증폭, 염색체 이동 등에 의해 활성화되고, 여기에 방사선을 비롯해서 환경에서 유래한 발암물질, 바이러스, 담배, 석면, 태운 고기에서 발생하는 나이트로소아민, 곰팡이 아플라톡신 등이 작용하여 암세포로 전환되면, 암세포의 특징적인 염색체 이수성이 관찰된다.

근래에는 축적된 인간 유전체 정보를 사용하여 많은 암의 조기진단이 가능해졌고, 사망의 주요원인이 되는 타 조직으로의 전이현상을 분자 수준에서 이해하는데도 큰 진전이 있었다. 분자생물학은 새로운 암 치료제 개발에 기여하고 있는데 각종 표적항암제, 면역항암제, 키메라항원수용체 T세포(CAR-T) 등의 개발은 기존 항암제의 부작용에서 오는 고통을 크게 덜어주고 있다. 이와 더불어, 중성자방사선 치료를 포함한 방사선 암치료 분야의 발달, 감마나이프 방사선 수술 장비 등 새로운 수술법들이 빠르게 발전하고 있다. 1960년대가 다양한 항생제들의 개발로 감염성질환 치료의 황금기가 되었던지, 21세기는 분자생물학과 생명정보학, 기초의학의 발전으로 암 정복의 황금기로 다가오고 있다.

6. 구조생물학의 발전

칼텍의 라이너스 폴링이 단순한 펩타이드의 결정으로

부터 알파나선, 베타병풍 구조를 제안한 것이 1951년이다. 이 무렵 영국 케임브리지 대학에는 카벤디쉬 연구소장 로렌스 브랙 휘하에 퍼루츠, 켄드루가 있었고, 이들은 X-선 회절분석 장치로 마이오글로빈, 헤모글로빈 단백질의 삼차원 구조를 연구하였다. 이후 X-선 결정구조학 기술과 전자계산기의 발달로 좋은 결정을 얻으면 수일 내에 거대생체분자의 입체구조를 밝힐 수 있게 되었다. 빠르게 발전하는 결정구조학의 백미는 광합성반응센터와 라이보솜복합체의 구조를 원자 수준에서 밝힌 것이라 하겠다. 이로써 생명의 기본 현상인 광합성과 라이보솜에서의 단백질 합성과정을 보다 상세히 이해할 수 있게 되었다.

후버, 다이센호퍼, 미첼은 분리하기 어려운 막단백질들과 색소체, 여러 보조인자들의 복합체로 구성된 광합성반응센터의 결정 구조를 밝힘으로써 생태계 에너지 흐름의 시작점인 태양 에너지 전환 과정에서 일어나는 일련의 반응, 전자 이동을 추적할 수 있게 되었다. 세균의 라이보솜은 30S와 50S 두 종류 단위체에 55개의 단백질과 3종류의 rRNA로 구성된 초거대 핵산단백질이다. 2009년 노벨 화학상을 공동 수상한 라마크리슈난, 스타이츠, 요나스는 동결 X-선 결정학 방법으로 이 복합체의 삼차원 구조를 밝혔다. 이로써 라이보솜에서 유전정보 설계도에 따라 단백질을 합성하는 과정과, 항생제가 박테리아 병원체에 있는 라이보솜을 공격하는 작동 원리를 알게 되었으며 이는 항생제 내성 박테리아에 대항하는 신규 항생제 개발에 기여하였다.

1930년대에 전자현미경(TEM, SEM)이 최초로 발명된 이래, 초저온 투과전자현미경의 발달은 저온 단층촬영으로 이미지화된 세포 소기관에서 거의 원자 분해능 수준의 단일입자 분석을 가능하게 하였고, 주사 터널링 현미경은 원자 수준의 표면 이미지 관찰을 가능하게 하였다. 원자간력 현미경, 컴퓨터 단층촬영, 공초점 레이저 주사현미경들의 발달은 발전하는 세포 분리기술, 단일 세포 분석 시스템의 도움으로 단일 세포의 세포내 구조를 분자, 원자 수준에서 관찰, 추적할 수 있게 되었다. 레이우엔훅이 17세기 말 단순한 광현미경을 만들어 눈에 보이지 않는 미생물의 세계가 있음을 세상에 알린 후 300여 년에 걸쳐 이뤄낸 놀라운 발전이다.

7. 인간게놈 프로젝트

인간게놈 프로젝트는 인간의 23쌍 염색체에 있는 30억 개 이상의 뉴클레오타이드 염기 서열을 알아내어 인간 유전자의 종류와 기능을 밝히고, 이를 통해 질병의 원인 규명, 진단, 난치병 예방, 신약 개발, 맞춤형 치료 등에 이용하기 위한 것이다. 이 야심찬 계획은 1990년 미국 보건원이 중심이 되어 영국, 일본, 독일, 프랑스, 중국 등 6개국의 공동 노력과 민간의 참여로 출범하였다. 정부와 민간에서 프란시스 콜린스와 크레이 벤터(셀레라지노믹스 사)가 각각 주도했는데, 2003년 4월, 두 사람은 백악관에 초대되어 클린톤 대통령 앞에서 서로 약속하며, 서열 분석이 어려운 전체 게놈의 ~8%를 제외하고, 인간 유전체 분석 프로젝트의 조기 달성을 세계에 알렸다. 전체 염기서열 중 약 1.1%가 단백질이나 RNA를 코드 하는 엑손, 24%가 인트론, 75%는 유전자 간 DNA 임을 알았고, 21,000~23,000개의 유전자도 밝혀졌다. 인간의 유전자 수가 예상했던 것보다 적은 것은 선택적 RNA 이어맞추기에 의해 한 유전자 내에서도 여러 단백질 산물을 만들 수 있기 때문이다. 인간과 침팬지는 98.8% 염기서열이 같음도 알게 되었다. 그 후 2021년 5월, 민간이 주도한 “T2T(Telomere-to-Telomere) 콘소시엄”의 노력으로 염기서열 분석이 어려웠던 그리고 특별한 유전자가 있지 않으리라 여겨졌던 반복염기서열 부위를 모두 분석하여 완전한 인간 유전체의 염기서열이 밝혀지게 되었다.

인간게놈 프로젝트는 염기서열 분석 기술의 혁신을 가져왔다. 대학원생 시절 학과세미나에서 화학적 염기서열 결정법으로 박테리오파지 람다의 억제인자 부위 염기 서열을 발표하는 길버트의 강연을 듣고 흥분했던 기억이 새롭다. 그 후 생거의 시슬결합법에 기초한 자동화 분석기기의 상용화, 미세관 전기영동법의 발전, 샷건 서열분석, 근래에는 차세대 염기서열분석 등의 발전으로 인간유전체를 미화 천불 이하 가격으로 분석할 수 있게 되었다. 개별 배양이 어려운 토양이나 장내 미생물 유전체 전체를 샷건 시퀀싱으로 분석 활용하는 메타지노믹스가 가능해졌고, 생물정보학의 발전은 유전자의 기능검색(기능유전체학) 뿐 아니라 유전자의 발현 예측, 단백

질 구조 예측, 단백질-유전자 및 단백질 간의 상호작용 연구를 가능하게 하였다.

자동화된 염기서열분석기를 개발하여 인간게놈 프로젝트에 크게 기여한 리로이 후드는 미래의학을 “4P 의학”으로 예측하였다. 이제는 인간 유전체의 염기서열 정보와 병원에서 축적된 환자의 의료 정보를 활용하여 다양한 인간질환을 예측하고, 예방하고, 개인의 특성에 따라 개별 치료가 가능한 정밀의학(Precision Medicine)의 시대가 도래하였다.

8. 복제양 돌리 탄생

1997년 스코틀랜드 에딘버러 교외에 있는 로슬린 연구소에서 탄생한 복제양 돌리는 번식생물학 분야에서 획기적인 사건이었다. 이는 존 거든이 제노프스 상피세포의 핵이식으로 성체 개구리를 탄생시킨 지 35년이 지나서 이룬 성과로 성숙한 양의 체세포 핵을, 핵을 제거한 난자에 이식하는 방법으로 탄생한 최초의 포유류이다. 돌리를 탄생시킨 월멧은 유선세포의 핵에서 만들었다는 것을 강조하기 위해 가슴이 큰 테네시 출신 가수 돌리 파튼의 이름을 따서 이 복제양을 명명했는데, 그 후 돌리는 6마리의 후손을 생산하고 6년 6개월 동안 생존하다 선종암으로 사망했다. 돌리의 탄생 이전에는 포유류의 수정란에서 발생 과정을 통해 구조와 기능이 다른 세포로 분화되는 과정은 비가역적이라 믿어졌다. 돌리는 분화된 체세포 핵이 탈핵 난자에서 유전적 재프로그래밍을 거쳐 전분화능력이 있는 세포로 전환되고, 여기에서부터 새로운 개체가 탄생된 것이다. 체세포핵이식을 통한 개체 복제는 즉각적으로 이 방법이 인간에 적용될 수 있는 가능성을 열어 주었고, 이로써 인간은 생명 윤리 문제에 봉착하게 되었다.

교토대학의 신야 야마나카는 한 걸음 나아가 유전적 재프로그래밍을 통해 성체 세포에서 역분화줄기세포(iPSC, 유도만능줄기세포)를 만들 수 있음을 보여주었다. 2006년 생쥐 피부의 섬유아세포에 세포 분화에 관여하는 세포 만능성 부여에 필요한 4종의 전사인자를(Oct4, Sox2, Klf4, c-Myc) 레트로바이러스를 사용하여 도입 발현시켜 만들었고, 이듬해에는 인간 피부 세포에 같은 유전자들을 도입하여 유도만능줄기세포를 만드는

데 성공했다. 인간 iPSC는 환자 자신의 체세포로 만들기 때문에 환자에 적용 시 면역 거부반응이 없을 뿐 아니라, 수정란으로부터 배아를 파괴하여야만 얻을 수 있는 배아 줄기세포(ESC) 연구에서 비난받았던 윤리문제에서 벗어날 수 있다. 현재 iPSC는 환자 맞춤형 재생의학이나 신약개발, 난치병 정복 등의 목적으로 의학 전반에 두루 쓰이고 있다.

유전자 재프로그래밍과 관련한 기초 연구로 후성유전학이 새로운 관심을 받고 있다. 후성유전학은 DNA 염기서열이 변화하지 않은 상태에서 일어나는 유전자 발현 조절을 연구하는 분야로, 세포 분화 과정에서 DNA 메틸화와 탈메틸화, 히스톤 단백질 변형에 의해 조절되는 크로마틴 리모델링이 중요한 역할을 하는 것으로 알려졌다.

9. 유전자 치료, 유전자 편집

1923년 영국인 의사 아치볼드 개로드에 의해 선천성 대사질환인 알칼톤뇨증이 특정 유전자 결함에 의한 것임을 알게 된 후 결손 유전자에 대한 치료법 연구가 시작되었다. 유전자 치료는 결손 유전자를 정상 유전자로 대체시켜 근본적으로 결함을 치료하거나, 새로운 유전자를 세포에 도입하여 항암이나 면역증강 등의 새로운 기능을 추가하여 난치병을 치료하는 방법이다. 유전자를 운반하는 벡터로는 유전자 조작을 통해 부작용을 최소화시킨 레트로바이러스, 아데노바이러스, 아데노 연관 바이러스, 렌티바이러스 등이 있고, 히스톤이 제거된 DNA를 직접 환자에 주입하거나 리포솜을 사용하여 전달할 수 있다. 대상세포로는 체세포, 생식세포, 줄기세포(조혈모세포, 신경줄기세포, 중간엽줄기세포)를 이용한 유전자 치료가 있다.

1990년 미국 NIH의 프렌치 앤더슨은 중증복합면역결핍증(SCID)으로 고생하는 4세의 여아 아산티 데실바에게 정상적인 아데노신탈아미노효소(ADA) 유전자를 도입하였고, 이는 최초의 성공적인 유전자 치료 사례로 기록된다. 당시 외부와 완전 차단된 공간에서 생활하던 이 버블 베이비는 성장하여 현재도 건강한 생활을 영위하고 있다. 이후 유전자 치료는 탄력을 받아 세계 여러 병원에서 수행되었는데 이에 따른 각종 부작용들이 발생하여

1999년에는 모든 임상시험이 일시적으로 중단되었으나, 부작용에 대한 원인 규명이 세심하게 진행되었고, 그 후 보다 개선된 임상 프로토콜들이 각국 규제기관들의 승인에 의해 실행되고 있다. 최근의 성공사례로는 2020년 근이영양증(MD) 소년 9명에 대한 화이자의 유전자요법 치료, 영국 옥스퍼드대의 노인성황반변성 환자 치료 성공 등을 들 수 있다.

2020년 노벨화학상은 제3세대 유전자 가위 크리스퍼-카스9 기술 개발에 기여한 두 여성과학자 샤르팡티에와 다우드나에게 돌아갔다. 크리스퍼-카스9 시스템은 세균이 파아지에 감염되면 일부는 살아남아 바이러스 DNA 일부를 자신의 유전체에 삽입하는데, 이 삽입된 크리스퍼 영역은 RNA로 전사되고 잘게 쪼개진 후 세포 내의 카스단백질(RNA에 의해 유도되는 핵산 분해효소)과 결합 복합체를 형성하여 같은 바이러스가 다시 그 세균에 침입하면 바이러스 염기서열을 인식해 절단하는 일종의 미생물의 면역체계이다. 이를 이용하여 가이드 RNA와 상보적인 염기서열을 찾아내어 카스9이 표적부위를 절단하고, 절단된 부위는 스스로 복구되거나 다른 DNA를 삽입하여 교정하게 된다. 이 시스템은 세균에서 뿐 아니라 콤팩트한 크로마틴 구조로 되어 있는 인간세포, 동식물에서도 유전자 교정 도구로 사용할 수 있다. 이 새로운 방법으로 병충해에 강한 동식물, 불임 말라리아모기, 장기이식에 적합한 돼지가 개발되었고, 인간에서도 다양한 유전질환, 혈액암 치료를 위한 임상시험이 진행되고 있다. 최근 MIT의 30대 젊은 과학자 조나탄 구텐버그는 Cas9의 단점을 보완하는 Cas13을 이용하는 편집 방법을 개발하여 이를 상용화한 회사 “설록 바이오사이언스”를 설립하였고, 버클리 대학의 다우드나 실험실에서 박사학위를 받은 제니스 첸은 크리스퍼 기술을 사용하여 Covid-19를 포함한 여러 바이러스의 진단 방법을 개발하여 “멤모스 바이오사이언스” 회사를 설립하였다. (이들은 MIT ‘Technology Review’지에서 올해의 “35 Innovators under 35”에 선정되었다.)

유전자 편집기술은 질병치료 뿐 아니라 인간의 외모, 대사 작용, 지능을 포함한 신체적 정신적 능력 향상에 이용(오용)될 수 있다. 생식세포의 유전체를 변형시키는 것에 대해서는, 태아는 유전적으로 변형되지 않은 채로 태

어나야 한다는 주장과 아이들은 예방이 가능한 모든 질병에서부터 자유로울 권리가 있다는 서로 다른 주장이 존재한다.

10. mRNA 백신 기술

인류는 지구상에 출현한 이래 감염병과의 전쟁을 계속 해오고 있다. 1920년대 페니실린을 시작으로 효과적인 항생제들이 개발되자 이에 대응하여 항생제 저항성 병원균이 출현하였고, 이는 새로운 더욱 강력한 항생제와 백신 개발로 이어지고 있다. 바이러스에 의해 유발되는 여러 질병들; 20세기 흑사병으로 불렸던 후천성면역결핍증(AIDS)은 3종류의 항레트로바이러스제를 병용하는 카테일 요법으로 제어 가능하게 되었고, 효과적인 백신 개발과 보급으로 천연두, 소아마비와 같이 지구상에서 자취를 감추는 것도 있으나, 앞으로도 새로이 출현하는 또 재출현하는 병원성 바이러스와 전쟁은 지속될 것이다.

2019년 말 중국 우한에서 시작하여 순식간에 전 세계를 덮친 신종 독감바이러스(SARS-CoV-2)는 2003년 유행한 중증급성호흡기증후군(SARS-CoV), 2015년 유행한 중동호흡기증후군(MERS-CoV)과 같은 코로나바이러스의 일종이다. 약 100~200nm 크기의 구형이고, 단일가닥의 (+)RNA를 유전물질로 가지고 있으며, 지질이 포함된 외피에는 스파이크 단백질들이 박혀있어 왕관의 형태를 보인다. 이 바이러스의 공통적 중간 숙주는 박쥐로 알려져 있고, 사람에게는 일반적으로 경미한 호흡기 증상을 일으키지만 치명적인 감염을 유발하기도 한다.

코로나바이러스는 스파이크 단백질의 수용체결합부위(RBD)를 통해 숙주세포로 침입하는데 숙주세포 표면의 스파이크 단백질 수용체는 ACE2 단백질이고, 모든 백신은 스파이크 단백질을 타겟으로 하여 제조된다. 전통적으로 사용되고 있는 백신으로 사백신, 병원균의 독성을 약화시킨 생백신이 있고, 재조합 DNA로 스파이크 단백질을 발현시켜 얻는 재조합단백질 백신이 있는데, 이들은 통상적으로 면역증강제를 부착시켜 사용한다. 2019년 코로나 사태를 겪으며 개발되어 신속한 임상시험을

거쳐 사용 가능하게 된 백신에는 아데노바이러스(침팬지 유래) 벡터에 스파이크 DNA를 넣어 만든 백신, 스파이크 DNA를 직접 혹은 플라스미드에 넣어 전달하는 DNA 백신, 그리고 mRNA 백신이 있다. 아데노바이러스 벡터 백신으로는 아스트라제네카, 얀센(존슨앤존슨), 감마레아(모스크바의 유서 깊은 감마레아 미생물연구소에서 개발되어 스포트닉V로 명명되었으나, 미국에서는 이를 감마레아로 부름)백신이 있고, DNA 백신은 미국기업 이노비오, 한국의 제넥신, 진원생명과학 등에서 개발 임상시험 중에 있다.

mRNA 백신 개발은 세계 의료과학사에 기록될 큰 성과이다. 불안정한 mRNA를 세포에 주입하여 이를 주형으로 단백질을 얻으려 했던 헝가리에서 1985년 미국으로 건너온 이민 연구자 카탈린 카리코와 펜실베이니아 대학의 동료교수 와이스만의 집념, 그리고 이 기술의 가능성을 보고 선제적으로 회사를 만들고 투자하여 연구를 진행시킨 바이오엔텍-화이자와 모더나-NIH 연구진의 공동 노력의 결과이다. 이와 함께 mRNA를 효율적으로 세포내로 전달하는데 필요한 지질나노입자(LNP) 기술도 큰 몫을 하였다. 그러나 그 밑바탕에는 지난 40여년간 미국 NIH에서 HIV백신을 만들기 위해 쏟은 축적된 노력의 결과와 이를 통해 백신 효율성 검증 분야에서 양성된 많은 전문가들 덕분에 위프속도로 백신 후보물질의 개발과 임상시험, 접종이 가능하였다.

전파력이 강한 델타 변이 바이러스의 출현은 우리 생활을 코로나 이전으로 되돌리는데 큰 장애가 되고 있다. 새로운 변이는 바이러스의 복제과정에서 일어남으로 조속한 백신 접종으로 집단 면역에 도달하는 것만이 새로운 변이의 출현을 막는 첩경이다. 어린이들은 하부기도 부위에 코비드 수용체 ACE2가 발현되지 않아 폐렴이나 중증으로 발전하지는 않지만, 타인을 무증상 감염시킬 수 있기 때문에 특히 젊은 층의 주의와 백신 접종이 필요하다. 이제 세계적 대유행에서 풍토병화 될 것으로 예상되는 Covid19와 앞으로 출현할 새로운 변이를 제어하기 위해서는 mRNA 백신이 유리하다. 이 기술은 비단 백신 제조 뿐 아니라 유용한 물질을 생체 내에서 발현시켜 각종 난치병에 대처할 수 있는 혁신적인 플랫폼 신기술로 우리도 조속히 자체 기술을 확보하여야 한다. 최근 미국

의 30세 젊은이 제이크 비크래프트에 의해 설립된 “스트랜드 테라퓨틱스”사는 특정 세포에서만 특정시간에 발현되는 mRNA, 자가 복제가 가능하여 그 효과를 증강시킬 수 있는 mRNA 제조법을 개발하여 피부암 유방암 치료에 활용하고 있다. 우리의 젊은 생물학도들에게 시사하는 바 크다.

분자생물학의 발전 속도는 상상을 초월할 정도다. 현대생물학을 혁신시킨 새로운 연구 방법, 첨단 기술, 연구기기들의 출현으로 예전에는 수개월 수년이 걸리던 일들을 전문회사에 맡겨 며칠 안에 끝낼 수 있고, 빅 데이터, 인공지능을 활용하여 많은 일들을 in silico 상에서 손쉽게 처리할 수 있게 되었다. 이제는 경쟁에서 이기기 위해 우리 세대가 해왔던 것처럼 실험실에서 밤새워 가며 오랜 시간을 실험에 몰두하기보다, 누가 더 참신하고 창의적인 아이디어로 가설을 세우고 실험을 고안하느냐 하는 아이디어의 싸움이 되었다. 이를 위해서는 더 많이 더 넓게 읽고, 치열하게 생각하고, 자신의 생각을 남과 나누고 토론하는 과정이 무엇보다 필요하다. 우리나라의 젊은 과학자들이 분자생물학 분야에서 길이 남을 세상을 바꾼 마일스톤 업적들을 쏟아 내는 날이 오기를 기대한다. ㉠

Keywords#

1. DNA(Deoxyribose Nucleic Acid, 디옥시라이보스 핵산), Double Helix(이중나선), Sugar-Phosphate Backbone(당-인산 기본골격), Complementary Base Pairing(상보적 염기결합), Chargaff Rule(샤가프 룰), Central Dogma(중심원리), Adapter Molecule(아답터 분자). James Watson(1962M), Francis Crick(1962M), Maurice Wilkins(1962M), Rosalind Franklin, Linus Pauling(1954C), George Beadle(1958M), Edward Tatum(1958M).
2. Genetic Code(유전 암호), RNA Tie Club(RNA 타이 클럽), Triplet Codon(삼중자 암호), Nonsense Codon(중결신호), In vitro Translation(무세포 번역 시스템), Triplet Binding Assay(삼중자 결합 분석법), Degenerate Codon(암호의 축퇴성). George Gamow, Sydney Brenner(2002M), Max Delbruck(1969M), Marshall Nirenberg(1968M), Gobind Khorana(1968M).
3. Recombinant DNA(재조합 DNA), DNA Polymerase(DNA 중합효소), Restriction Endonuclease(제한효소), Conjugation(접합), Transduction(형질도입), Transformation(형질전환), Episome(에피솜), Plasmid(플라스미드), Gene Cloning(유전자 클로닝), Humulin(인간인슐린). Arthur Kornberg(1959M), Severo Ochoa(1959M), Thomas Morgan(1933M), Joshua Lederberg(1958M), Salvador Luria(1969M), Frederick Griffith, Oswald Avery, Paul Berg(1980C), Herbert Boyer.
4. Cell Fusion(세포융합), Protoplast Fusion(원형질체 융합), Myeloma Cell(골수암세포), Hybridoma(하이브리도마), HAT(Hypoxanthine-Aminopterin-Thymidine 배지, 하이브리도마 세포를 선별하는데 사용), ELISA(Enzyme-linked Immunosorbent Assay, 효소면역측정법), Monoclonal Antibody(mAb, 단일클론항체), Therapeutic Antibody(항체치료제), Humira(휴미라), 리툭산(Rituxan), 레미케이드(Remicade), 아바스틴(Avastin), 시나지스(Synagis), 허셉틴(Herceptin), Allogenic Cell Fusion(동종이형 세포융합), Xenotransplantation(이종 장기이식). Georges Koehler(1984M), Cesar Milstein(1984M), Niels Jerne(1984M).
5. Oncogene(발암유전자), Proto-oncogene(원발암유전자), Tumor Suppressor Gene(종양억제유전자), Oncogenesis(종양발생, 종양형성), Carcinogens(발암물질), Aneuploidy(염색체 이수성), Chemotherapy(화학요법), CAR-T(Chimeric Antigen Receptor T Cell, 키메라항원수용체 T세포),

- Radiation Oncology(방사선 종양학). Harold Varmus(1989M), Michael Bishop(1989M), Robert Weinberg.
6. Structural Biology(구조생물학), X-ray Crystallography(X-선 결정구조학), Photosynthetic Reaction Center(광합성 반응중심), Ribosome Complex(라이보솜 복합체), Cryo-EM(초저온 투과 전자현미경), Scanning Tunneling Microscope(주사 터널링 현미경). Lawrence Bragg(1915P), Max Perutz(1962C), John Kendrew(1962C), Robert Huber(1988C), Johann Deisenhofer(1988C), Hartmut Michel(1988C), Thomas Steitz(2009C), Venki Ramachrishnan(2009C), Ada Yonath(2009C), Antonie van Leeuwenhoek.
7. Human Genome Project(인간게놈 프로젝트), DNA Sequencing(DNA 염기서열 결정), Alternative RNA Splicing(선택적 RNA 잇기), Chain Termination Method(사슬종결 염기서열 결정법), Shotgun Sequencing(샷건 서열분석), Next Generation Sequencing(NGS, 차세대 염기서열분석), Metagenomics(군유전체학), Bioinformatics(생물정보학), Functional Genomics(기능유전체학), “4P Medicine”(Predictive, Personalized, Preventive, Participatory). Francis Collins, Craig Venter, Walter Gilbert(1980C), Frederick Sanger(1958C, 1980C), Leroy Hood.
8. Dolly(복제양 돌리), Genetic Reprogramming(유전자 재프로그래밍), Somatic Cell Nuclear Transfer(SCNT, 체세포핵이식), Reproductive Cloning(번식용 복제), Therapeutic Cloning(치료용 복제), Embryonic Stem Cell(ESC, 배아줄기세포), Totipotent(전분화능력), Induced Pluripotent Stem Cell(iPSC, 유도만능줄기세포), Epigenetics(후성유전학), Chromatin Remodeling(염색질 리모델링). John Gurdon(2012M), Ian Wilmut, Shinya Yamanaka(2012M).
9. Gene Therapy(유전자 치료), Inborn Error of Metabolism(선천성 대사질환), Adenosine Deaminase(아데노신 탈아미노효소), SCID(중증복합 면역결핍증), CRISPR-Cas9(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-CRISPR Associated Protein9, 크리스퍼-카스9), Gene Editing(유전자 편집). Archibald Garrod, French Anderson, Emmanuelle Charpentier(2020C), Jennifer Doudna(2020C), Jonathan Gutenberg, Janice Chen.
10. mRNA Vaccine(mRNA 백신), SARS-CoV(중증급성호흡기증후군 코로나바이러스), Spike Protein(돌기 단백질), ACE2 Receptor(Angiotensin Converting Enzyme2 수용체), Operation Warp Speed(워프속도 작전, Star Trek의 우주선 USS Enterprise 속도에서 유래), BioNTech(바이오엔텍, 터키 출신 이주노동자 우구르 사힌과 외즐렘 튀레지 부부가 설립한 독일 회사), Moderna(모더나 사), Delta Variant(델타변이), Lipid Nano Particle(지질 나노입자). Katalin Kariko, Drew Weissman, Jake Becraft.

각 단원에서 사용한 주요어를 영문과 국문으로 병기하였고, 인명 뒤 괄호 안에는 노벨상 수상년도를 표시함.
M은 생리의학상, C는 화학상, P는 물리학상.

[회원기고]

- 학술원 동료 회원 여러분과 함께 생각해 보는 글 -

예상 못한 가운데 일어나는 죽음 ‘돌연사’에 대한 小考

文國鎭 會員(법의학)



집권유지를 위해 독살 인체실험한 임금 이야기

죄수를 사용하여 인체독물 실험하기로 유명한 것은 이집트의 클레오파트라 여왕이다. 이 세상의 여인네들 중에서 클레오파트라만큼 그 미와 매력을 행사한 여인도 드물 것이다. 유능한 세기적인 통치자 두 사람을 딱 주무르듯이 자기 마음대로 요리한 것은 여인의 육체로서의 매력도 있었겠지만, 그를 능가하는 무엇인가 작용한 것이 분명하다. 과연 그것이 무엇인가에 대해서는 많은 추리와 의견이 대립하는 가운데 아직까지도 두고두고 여운을 남긴다.

클레오파트라의 아름다움을 둘러싸고 여러 화가가 그녀의 아름다움을 그림으로 표현하였는데, 그 그림들 중에서 저자가 보기에는 영국의 화가 워터하우스(John William Waterhouse 1849-1917)의 ‘클레오파트라’(1888)가 그녀의 미를 가장 잘 파악하고 표현하였다고 생각한다.



그림 1. 워터하우스 작: ‘클레오파트라’ (1888) 개인 소장

아름다움을 유지한다는 것은 클레오파트라로서는 자기의 생명과도 같이 여겼다. 따라서 언제나 새로운 감각의 미를 추구하던 여왕은 영구히 잠든 후에도 추태를 보

이지 않고 미를 유지하고 싶었던 것이 그녀의 간절한 염원이었다. 그래서인지 그녀는 고통 없이 죽는 비법을 알아내려고 백방으로 노력하고 직접 인체실험까지 하였다. 즉 사형수를 처형하는데 나일강변에 모아 놓고 자기 주치의로 하여금 죄인에게 독약을 투여하게 하고는 어떤 독약이 고통 없이 편안하게 죽을 수 있는가를 직접 관찰하였다. 그리고는 사형수를 평안한 방법으로 처형하는 방법을 택해 고통을 주지 않고 처형하려는 것이 여왕의 뜻이라 자화자찬하였다.

이런 상황을 잘 묘사한 것이 화가 카바넬(Alexandre Cabanel 1823-1889)이 그린 ‘사형수들에게 독약을 투여하여 실험하는 클레오파트라’(1887)이다. 그림에서 보는 바와 같이 여왕은 하인이 부채를 부쳐 주는 그늘에 앉아서 주치의가 독약을 먹여 처형하여 운반하는 죄수의 시체를 보고 있으며 여왕 가까이에서 독약을 먹고 괴로워 뒹구는 죄수도 보인다.



그림 2. 카바넬 작: ‘사형수들에게 독약을 투여하여 실험하는 클레오파트라’(1887) 앙베르, 왕립 조형 미술관

그래서 여왕이 알게 된 것은 효과가 신속한 독약은 심한 고통과 육체의 추악한 변형을 초래하며, 반대로 독 효과가 완만한 독약은 죽는데 시간이 걸리나 육체의 변형은 거의 없다는 것을 알게 되었다.

그리고 동물과 식물의 독액(毒液)에 대해서도 연구하

였다. 즉 자기 눈앞에서 여러 가지 실험동물에다 독액을 투여하고는 그 동물에 나타나는 증상과 죽는 모양을 자세하게 검토하였다. 이렇게 그녀가 인체실험과 동물실험을 통해서 얻은 독에 대한 지식을 심분 발휘한 일화를 소개하기로 한다.

로마의 장군 안토니우스는 황금의 나라 이집트를 손에 넣으려는 야심을 갖고 클레오파트라를 타르소스로 불러냈다. 그녀는 기다렸다는 듯이 기쁜 마음으로 달려갔다. 즉 여왕에게도 다른 속셈이 있었다. 안토니우스의 힘을 빌려 불안한 이집트의 왕위를 지켜보겠다는 야심이 있었던 것이다. 아름다운 용모와 뛰어난 말솜씨에 흠뻑 반해버린 안토니우스도 그녀의 포로가 되었다. 그래서 안토니우스는 클레오파트라와 결혼하고 로마에 있는 부인(옥타비아누스의 여동생)과는 이혼하게 되었다. 이렇게 해서 두 사람은 부부가 되었지만 안토니우스는 그녀가 독에 대한 지식이 풍부하며 어찌면 자기가 그녀에게 독살당할지도 모른다는 생각 때문에, 맛있게 그리고 보기에도 화려하게 만든 요리는 그녀가 그렇게도 권하였지만 손도 대지 않았다. 남편으로부터 자기가 의심받고 있다는 것을 느낀 그녀는 슬펐다. 그래서 어느 날은 생화로 만든 화관을 쓰고 만찬식탁에 앉은 그녀는 남편에게 술을 권하면서 쓰고 있던 화관의 꽃잎 하나를 떼서 술잔에 띄워 권했다. 안토니우스는 무심코 그 술잔을 받아 마시려 하자 클레오파트라는 그 술잔을 손으로 쳐서 떨어뜨렸다. 그리고는 이야기하기를 “내가 당신을 죽일라면 언제든 죽일 수 있으며 그런 기회는 얼마든지 있었지요. 그러나 나는 당신 없이는 살 수 없다는 것을 알아주었으면 좋겠어요.”라고 이야기하고는 한명의 노예를 불러 그 술을 마시게 하였다. 잔을 받아 마신 노예는 그 자리에서 쓰러지며 의식을 잃고 죽고 말았다.

이 클레오파트라와 안토니우스의 독배(毒杯)에 관한 이야기를 화가가 자기의 가족을 모델로 하여 표현한 그림이 있다. 즉, 브레이(Jan de Bray 1627-97)라는 화가는 ‘안토니우스와 클레오파트라의 만찬’(1669)이라는 그림에서 자기가 안토니우스 그리고 부인이 클레오파트라가 되어 앞서의 독배사건을 재현하여 클레오파트라가 얼마나 영리한 여인이었는가를 전해주고 있다.

이렇게 르네상스를 전후해서 유럽에는 정치적인 정적



그림 3. 브레이 작: '안토니우스와 클레오파트라의 만찬'(1669) 뉴함프사

이나 개인적인 원한을 위한 독살사건이 성행되었던 시기이다. 그래서 유럽의 군주들은 이에 대한 대비책으로 은식기나 수정 그라스를 사용하여 음식에 함유된 독을 미리 아는 방법으로 삼았다. 유럽의 화려한 식기나 술잔 등이 호화스럽고 사치스러웠던 배경에는 이러한 독살에 대한 우려가 암암리에 포함된 배경이라는 것이다.

그 외에 독으로부터 몸을 보호하기 위하여 부적이나 보석, 뱀의 혀나 일각수(一角獸)의 뿔 등을 몸에 간직한다는 것은 미신적인 행위이나 그래도 이러한 것을 택한 군주들이 적지 않았다는 것이다. 또한 해독제라 불리는 약품을 고가로 사들이거나 속국이나 점령한 나라에서 상납받았다고 한다.

프랑스의 샤르르 9세의 경우는 매우 희한한 해독제를 상납받았다. 소위 ‘사슴의 눈물 돌(鹿之淚石)’이라는 스페인 산의 만능 해독제라는 것이었다. 샤르르 9세는 궁정의(宮廷醫) 파레를 불러 그 해독 효과를 확인할 것을 지시하였다. 난처한 입장에 처한 궁정의는 생각다 못해 인체실험을 할 것을 제안하였다. 지금 같아서는 엄두도 못 낼 일이지만 당시가 16세기이니만큼 가능하였던 것으로, 왕도 꽤히 승낙하여 실험대상은 사형에 처할 죄수에게 인체실험을 하기로 하였다. 궁정의 파레는 사형집행이 임박한 사형수들을 모아놓고 해독약을 시음해 볼

의사가 있는 죄수를 골라냈다. 즉 어차피 교수형에 처해서 죽게 되니, 독약을 먹고 죽나 죽기는 마찬가지인데, 혹시 운이 좋아 해독제가 효과가 있어 해독이 되어서 살아날 수 있다면, 모든 죄는 면죄가 되어 석방된다는 것이니 해볼만 하다고 권하였다. 그래서 왕을 모신 자리에서 인체해독실험을 하게 되었다. 사형수에게 치사량의 독약을 먹인 후 얼마 있다가 해독제인 '사슴의 눈물 돌'을 먹여 해독이 되는가를 관찰하는 것이었다. 일정한 시간이 흐르자 죄수는 구토와 설사를 하다가 몸이 점점 꼬이기 시작하더니만 경련을 일으키며 괴로워 하다가 피를 토하고 그 자리에 쓰러져 죽는 것이었다. 즉 '사슴의 눈물 돌'이라는 해독제는 전연 듣지 않는 것으로, 어떤 의미에서는 왕의 생명을 노렸던 의도가 포함되었던 것인지도 모른다는 결론이었다. 그래서 샤르르 9세는 대발노발하여 '사슴의 눈물 돌'을 해독제라고 상납한 상대를 잡아들여 처형하였다는 것이다.

어린 정자(精子)도 냄새 쫓는 후각각이 소실되면 사라진다.

사람들은 일상생활에서 후각각의 절실성을 잘 느끼며 지낸다. 예를 들어 꽃밭에 가면 꽃의 향기로운 내음에 취해 기분이 좋아지고, 고기 굽는 냄새에는 식욕이 발동되어 허기를 느끼게 된다. 이렇듯 살아가며 보다 풍요로운 생활을 위해서는 후각각의 역할이 중요하다는 것은 누구나 인식하면서도 다른 감각에서 느끼는 것과 같은 절실성은 느끼지 못하고 지내는 것도 사실이다.

아기가 태어나자마자 모자간의 의사소통이라 할 수 있는 첫 교류가 이루어지는 것은 전적으로 후각(嗅覺)에 의한 것이다. 실험 삼아 생후 4일된 아기에게 자기 어머니의 젖을 듬뿍 문힌 스펀지와 다른 어머니의 젖을 문힌 스펀지를 아기의 좌우에 동시에 접근시키면 어머니 젖이 문은 스펀지 쪽으로 고개를 향하는 아기는 10명 중 6명이었으며, 생후 1개월이 되면 완전히 자기 어머니의 젖 냄새를 알아차린다는 것으로 아기들은 어른들보다도 놀랍게 뛰어난 후각 기능을 지닌 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 아기가 태어날 때부터 어머니 자궁 내의 양수(羊水)를 통해 어머니의 냄새를 감지해왔기 때문인 것으로

보아, 사람의 감각 중에서 제일 먼저 발달되는 것은 후각각이 아닌가 생각된다.

아기의 냄새능력을 잘 표현한 그림으로는 오스트리아의 화가 구스타프 클림트(Gustav Klimt, 1862~1918)의 '여자의 세시기'(1905)라는 그림을 들 수 있다. 아기의 출생에서 성장, 결혼, 분만, 노화에 이르는 과정을 표현한 그림인데, 탄생된 아기는 어머니의 품에 안겨있는 것으로 표현되었으며, 사람들의 주변에는 빛깔과 모양 그리고 크기가 다른 문양으로 사람들 간의 관계를 표현하였다. 눈도 아직 뜨지 못해 보는 것에 익숙지 못한 아기가 어머니의 젖꼭지에서 나는 냄새를 결사적으로 맡고 있는 것을 빨아먹음으로써 자기의 생명을 이어나가는 것으로 보아 아기에게는 무엇보다도 냄새를 맡는 것이 이 세상을 살아가는 데 없어서는 안되는 제일 소중한 생명유지의 기능이라 할 수 있다. 그래서 아기는 낳아서 수일 내에 자기 어머니의 가슴 내음을 식별하게 되는 것이다.

이렇듯 어린 것이 후각능력을 발휘하는데, 자기가 지닌 능력도 발휘하지 못하고 사는 사람도 있으니 사람들이 어릴 적을 생각해 자기 능력을 감지발휘하며 살면 어떨까 싶다.㉔

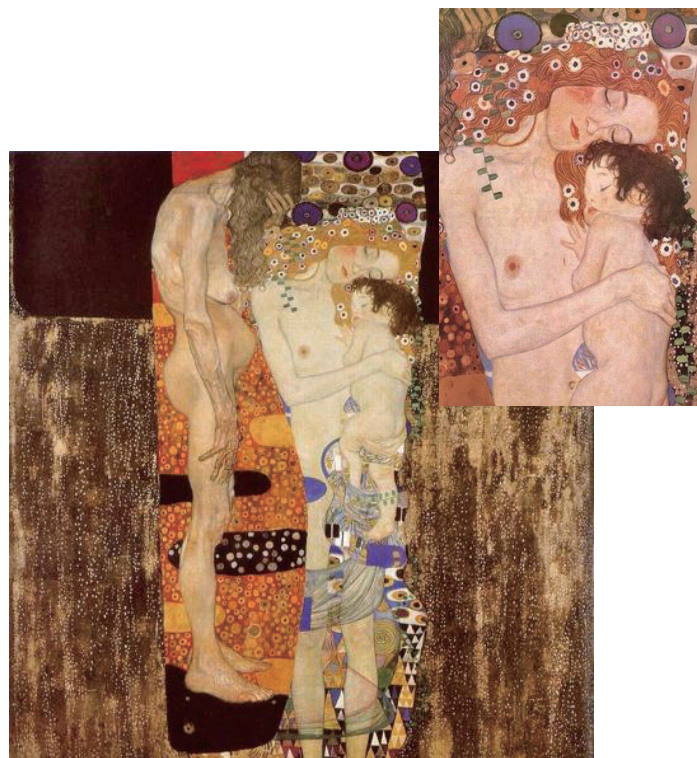


그림 4. 클림트 작: '여자의 세시기'(1905) 로마, 국립현대미술관

[분과 및 학계 동향]

자연제3분과 회원 동정 및 학계 동향



劉丁烈 會員(유체역학)

자연제3분과는 토목공학, 건축공학, 전기공학, 기계공학, 조선공학, 항공공학, 전자공학, 자원공학, 금속공학, 섬유공학, 정보공학 등 다양한 공학 학문분야 전공 회원들로 구성되어 있으므로 본고에서는 회원들의 학술연구(학술원 외부 활동 포함), 국제학술교류, 회원경륜 사회공유사업과 학술원 내부 위원회 활동만을 다루고자 한다.

나정웅 회원은 “그 시대 공학문제에 도전하다”라는 제목으로 학술연구총서 지원사업(2020-21)에 참여하고 있다. 마이크로웨이브 오븐(전자레인지)의 개발, 그리고 땅굴 탐사와 같은 그 시대의 공학 문제를 대학원 석사와 박사 학위 논문의 주제로 만들어, 학위 논문 연구가 기술 개발로 이어지는 연구 과정과 결과를 체계적으로 그리고 전문 학술적인 수준으로 기술한 학술연구보고서와 같이 저술 중이다. 또한, 나정웅 회원은 국제과학이사회(ISC)가 후원기관으로 이탈리아 로마에서 8월 28일 - 9월 4일 동안 개최되었던 제34회 국제전파과학연합 총회 및 과학 심포지엄(URSI GASS 2021) 화상회의에 참가하였는데, 이 국제학술대회는 URSI 창립 100주년 기념학술회의의 의미도 있다. URSI(International Union of Radio Science)는 10개의 A-K 전문분야로 나누어지는데, 전자파 표준과 측정(A), 전자파의 이론 및 응용(B), 무선통신(C), 전자파 전파와 원격탐사(F), 이온층 전파(G), 전파 천문학(J), 생물학과 의학의 전자파 응용(K) 등이다. 모든 분야의 연구동향을 종합하기는 불가능하여, B를 주로 하고, F와 K 분야의 흥미로운 연구문제를 몇 가지 소개한다. 한때 연구했던 유전체썩기와 연관된 문제로, Daniele 등의 원통좌표계의 Wiener-Hopf 방법, Shirai 등의 물리광학(PO) 근사의 광선법, 김세운 등의 균일 점근식을 이용한 유전체썩기 산란 등의 논문 발표가 보인다. 복잡한 구조의 2차원 또는 3차원 유전체에 의한 반사파, 굴절파와, 모서리 회절파의 계산에 광선을

따라 물리광학근사를 얻어 계산함이 중요해지고 있음을 보인다. 복잡한 계산에 응용될 수 있는 기초원리적인 논문으로는, Kobayashi의 부분적 자성도체성 무한 반평면의 평면파 산란을 Wiener-Hopf 방법으로 해석해를 얻는 방법과, Heyman의 원뿔형 도체에 복소수 전원점으로 만든 빔파가 원뿔 끝점에서 산란한 전자파를 계산한 논문이 보인다. 여러가지 수치계산 방법이 보이지만, 확률적으로 전구간 최소점을 찾는 Accelerated Particle Swarm Optimization 알고리즘이 흥미롭다. 역산란방법으로 산란체의 전기적 특성을 알아내는 문제들로, 전자파 가열로 암치료 연구, 마이크로웨이브로 유방암 검출과 치료 등, 생물학적이거나 의학적인 문제에서의 응용 논문이 보인다. 과일 등 신선도를 측정할 수 있는 전자파로 단면 영상을 재구성하는 연구도 보이며, 철근 콘크리트 내의 철근 영상을 재구성하는 연구라던지, 지하 문화유적의 탐사연구도 보인다. 큰 반사체 안테나는 물론, 5세대와 6세대의 휴대폰 안테나, 우리가 입을 수 있는 전자장치의 각종 안테나 연구, 그리고 인공 매질 박막을 사용한 안테나의 연구 등이 보인다. 한편, 나정웅 회원은 학술원 간행물편집위원회 위원으로서 학술원이 발간하는 모든 간행물에 관한 기본계획 수립, 원고의 위촉 및 심사 등 편집에 따른 제반 직무를 수행하고 있다.

한송엽 회원은 4차 産業革命 시대를 맞이하여 학술원 외부 학술연구로서 공학교육 혁신에 많은 노력을 기울이고 있다. 2016년 1월 스위스 다보스에서 개최된 세계경제포럼에서 클라우스 슈밥 회장은 4차 産業革命이 시작되었다고 하였다. 4차 산업혁명 시대의 핵심기술은 AI(인공지능)이다. 따라서 미국 MIT를 비롯하여 세계의 유명대학에서는 AI를 ‘미래의 언어’로 규정하고 이공계는 물론 인문 사회계 모든 학생들에게 AI를 가르치기 시작하였다. 미국 MIT의 경우는 이공계는 물론 인문 사회계 모든 학생들에게 AI를 가르치기 위하여 10억 달러(1

조 1,000억원)를 투자하여 ‘인공지능’ 단과대학을 신설하였다. 한송엽 회장은 이 기사를 읽고 4次 産業革命의 중심에서 변화의 주역이 될 우리나라의 대학교육은 어떻게 변화되어야 할지를 생각하였다. 그 해답은 우리도 이공계는 물론 인문 사회계 모든 학생들에게 AI를 가르치는 것이다. 그러나 국내의 대학들은 정부의 지원만 기다리고 있었으며, 서울대학교조차도 이와 같은 계획이 없어 한송엽 회장은 2017년 9월에 차국현 공대학장에게 모든 서울대 학생들이 수강할 수 있는 “IoT·인공지능·빅데이터 개론 및 실습” 교과목을 개발할 것을 건의하였다. 이 제안이 받아들여져서 한송엽 회원과 강현구(공학교육혁신센터장) 교수 등 10여명의 교수가 1년간 준비 끝에 2018년 2학기부터 강의가 개설되었다. 본 교과목의 구성과 운영 방식의 특징은 아래와 같다.

- (가) Team Teaching: IoT분야 2인, 인공지능분야 3인, 빅데이터분야 3인의 교수가 Team Teaching 함.
- (나) Flipped Learning: 학생들이 예습 후 강의에 임할 수 있도록 강의동영상을 녹화하여 제공함.
- (다) 실습: 학생들에게 각종 센서 키트를 지급하여 예습을 시킨 후 교실에서 실습할 수 있게 함.
- (라) 고속컴퓨터: 수준 높은 인공지능 과제를 수행할 수 있도록 학생당 GPU(고속컴퓨터) 1대씩 배정함.
- (마) 지원인력: 실습과 과제 수행의 완성도를 높이기 위하여 전문 조교 4인을 배정함.
- (바) 선행학습: AI 프로그래밍 언어인 Python을 수강 신청 전에 Tutoring을 통해 미리 습득하게 함.

한송엽 회장은 위와 같이 시대가 요구하는 우수한 인재를 적기에 양성하기 위하여 새로운 교과목을 기획, 개발하였고 학기말 과제평가에 참여하여 지속적인 교과목 개선에 적극 참여하고 있다. 그리고 한송엽 회장은 이 교과목 운영에 필요한 GPU 20대(5,000만원)를 기증하였고 조교 인건비를 매년 1,000만원씩 후원하고 있으며 앞으로도 계속 후원할 계획이다. 이상과 같이 본 교과목은 새로운 교육방법을 적용하여 수업효과를 극대화하였으며, 지난 3년간 약 500명의 학생이 이 교과목을 이수하였고 인문계 학생도 상당수 수강하였다. 또한, 한송엽

회원은 4次 産業革命 시대에 공과대학 졸업생이 갖추어야 할 주요 능력 중의 하나가 批判的 思考能力임에 주목하였다. 사실상 한국의 대학에서 비판적 사고 교과목을 수강하는 공대 학생은 10%도 안 되는 것을 인지하여 오래 전부터 공학도의 비판적 사고 교육의 필요성을 절감한 한송엽 회장은 한국공학교육학회에 “비판적 사고 교육 연구회” 설립을 건의하였고 2017년 4월에 연구회(회장 황영미 교수)가 발족되었다. 인문학 교수들과 공학 교수들이 모여 여러 차례 콜로키엄을 개최한 결과 공대생의 비판적 사고 교육은 공대 교수가 담당하는 교과목, 특히 설계 교과목에서 다루는 것이 효과적이라는 결론을 얻었다. 3년간의 연구 끝에 본 연구회는 공대 교수들이 담당 교과목에서 비판적 사고 교육을 잘 할 수 있도록 참고가 되는 “공학도를 위한 비판적 사고 교육” 책자를 2021년 9월에 발간하였다. 한송엽 회장은 본 연구회 설립의 제안부터 운영에 주도적 역할을 하였고 운영비 2,000만원을 후원하였다.

이리형 회장은 “초고성능 콘크리트 구조의 인장 겹침 이음 길이에 관한 연구”라는 제목으로 전문학술활동 지원사업(2021)에 참여하고 있다. 본 연구에서는 초고성능 콘크리트 부재에 대하여 섬유 혼입량과 이음길이에 따라 초고성능콘크리트 부재의 휨거동이 어떻게 영향을 받는지를 실험적으로 검토하였다. 콘크리트 구조물의 이음길이 설계에 대한 현행 설계기준에 대한 평가가 이음된 보에 대한 휨실험을 통해 수행되었다. 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 현행 설계기준 및 초고강도콘크리트 구조설계지침의 이음길이 산정식들을 검토한 결과 모두 보수적인 평가를 하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 이리형 회장은 “초고층 건물의 현황과 미래기술”이라는 제목으로 특정연구과제(2021)를 수행하고 있다. 초고층은 첨단기술, 구조안전성, 경제성을 고려한 그 시대 최첨단 기술 달성에 대한 상징이 되는 랜드마크적 성격을 띄고 있다. 세계 여러 국가들은 도시의 가용 면적 부족으로 인한 문제를 해결하기 위해 복합용도의 초고층을 건립하였다. 이 초고층건축물 안에는 상가, 호텔, 주거시설, 사무공간이 적절히 배치되어 다양한 경제활동과 사회 문화 활동을 영위할 수 있다. 여기서는 먼저 초고층건축물(Super High-rise Building)의 국내와 해외(미국(뉴욕,

시카고, LA 등), 중국, 일본, 대만, 동남아시아 등)의 50층 이상의 건축물을 대상으로 하여 각 초고층건축물의 구조적 특징, 경제성, 환경영향정도를 분석하고 있는 중이다. 국내에서는 국내 최초의 초고층 건축물인 63빌딩(높이 245m, 60층), 롯데슈퍼타워(123층, 높이 555m), 부산 해운대 엘시티 더샵(101층, 높이 411m) 등에 대한 분석을 추진중에 있다. 해외의 초고층건축물로는 세계 최고층인 Burj Khalifa 빌딩(163층, 높이 828m), 대만의 Taipei 101 빌딩(101층, 508m), 말레이시아의 페트로나스 타워(88층, 451.9m), 중국의 상하이타워(128층, 632m), 진마오빌딩(88층, 420.5m), 일본의 스미토모 빌딩, 도쿄 스카이트리 타워 등과 기타 국가에 세워진 초고층건축물을 분석하고 있다. 특히, 최근에는 특이한 형태를 가진 틸팅(Tilting) 건축물, 토손(Torsion) 건축물, 스크레이퍼(Scraper) 건축물 등도 조사·분석 중에 있다. 이 과제와 관련하여 이리형 회원은 “초고층 건축의 기술적 이해와 미래”라는 제목으로 학술원통신 제331호(2021. 2. 1.) 회원기고란에 투고하였다. 한편, 이리형 회원은 “알기 쉬운 지진과 건물 이야기”를 집필하여 최근 원고교정을 거쳤고 2021년 내에 출판을 예정하고 있다. 이 책은 한국과학기술한림원의 「석학, 과학기술을 말한다.」 시리즈의 일환으로 출판되어 초판 1,000부는 도서 벽지의 학생들에게 무료로 배부되며, 2판부터는 시중에 판매된다. 책의 내용이나 수준은 고3 학생 정도나 일반인이 이해할 수 있도록 구성하였으나, 아쉽게도 부분적으로 필요한 부분에 한해 전공서적 수준으로 집필되기도 하였다. 이 밖에도 이리형 회원은 최근 건설분야에서 연구발전시켜야 할 미래 건설기술들로서 건축물의 장수명화 기술, 첨단 건설재료 및 자재 적용 기술, 지능형 그린 건축물 관리 기술, 극한환경 건설 기술, 차세대 인프라 구조물 건설 기술, 모듈러 건설 기술, 스마트시티 운영 기술, 다양한 라이프스타일형 친환경 건강 주택, 수자원 관리, 도시인프라 및 초고층 복합시설, 재난/재해 대응 통합관리기술을 비롯하여, 교통기술로는 유라시아 대륙간 연계수송기술, 첨단 철도 수송시스템 기술, 지능형 교통시스템을 건설계 석학들이 지향해야 할 연구과제로 생각하고 있다. 세부적인 현황과 이슈를 정리하면 다음과 같다.

◎ 국내외 주요 현황

- (일본) 건설현장의 자동화 및 로봇화와 시공관리 자동화 기술 개발: 스마트 건설기술 도입을 통해 생산성을 50% 향상하는 것이 가능하다고 예측(일본 교통성)
- (미국과 유럽) 건설 안전향상 및 효율 상향을 위해 로봇 시공 기술 개발: IT 기술을 이용한 협업 시스템 도입으로 건설생산성 25% 향상 예측(미국 통계청)
- (대한민국) 국토교통부를 중심으로 ICT 기술의 활용 및 로봇 시공 기술개발 수행 중: 향후 스마트 건설 기술에 대한 활용이 정책을 통해 확대될 것으로 예상

◎ 건축의 주요 이슈

- 시공 모듈화 및 자동화 관련 주요 이슈
 - (1) 유형별(아파트, 다세대주택, 연립주택, 단독주택 등) 모든 주택에 대한 표준화 방안을 마련하여 건축자재, 설계과정에서 범용성이 확보되어야 함 - 어떤 자재를 어느 곳에 사용하든 호환성 좋게 사용해야 하며, 예측 가능하게 사용할 수 있어야 함
 - (2) 건축의 기획-설계-시공-운영-해체 등 생애주기 전반에 걸친 연계가 되는 통합적 프로세스의 적용을 통해 건축 프로세스의 변화를 가져올 수 있는 신기술 건축(모듈러 건축, 프린팅 건축, ICT 등) 시스템의 적극적 지원 필요
 - (3) 건축재료의 경량화 및 하이테크화: 경량 고강도 건축재료 개발, 건축물 구조 시스템에 내장되는 하이테크 기술의 일체화
 - (4) 건축물의 다품종 대량생산 체제에 대응하기 위해 3D 프린팅 건축기술을 도입하고 관련 법·제도 마련 및 시장 거래 플랫폼 활용
- 전기 및 자율주행차와 건축 사이의 이슈
 - (1) 도시 교통 인프라인 자동차 기술의 혁신
 - (2) 단순한 이동수단을 넘어 자동차의 활용성을 도시와 건축의 공간으로 확장
 - (3) 전기자동차 확대에 따른 건축물과 자동차의 연계성 강화

(4) 자율운전 자동차 도입에 따른 주차 시스템의 변화

금년 3월에 대한민국의학술원 제39대 회장으로 선출되어 4월 1일부터 2년 임기를 수행하고 있는 이장무 회장은 공학 분야에서 최근 주목을 받는 분야 중 하나가 자율주행(Autonomous Driving)이며, 전자·컴퓨터 기술과 융합하여 탄생한 이 신기술은 자동차, 드론 등의 비행체와 선박과 무인 잠수함 등에 응용되고 있음에 많은 관심을 가지고 있다. 그러므로 이장무 회장은 학술원 외부 학술연구로서 자율주행 자동차(기계·컴퓨터) 분야의 학계 동향에 관해 간략하게 소개한다. 올해 독일의 세계 최대 자동차 박람회인 'IAA 모빌리티 2021'에서 많은 최신 전기차와 수소차들이 선을 보였지만, 2035년 내연기관차의 종료를 앞둔 자동차업계의 게임 체인저는 단연 자율주행차로 알려져 있다. 무인 운전자 형태의 자율주행차 상용화 시도는 그림 1에 보인 구글 웨이모(Google Waymo) 자율자동차가 첫 번째라고 할 수 있다. 우리나라의 현대자동차도 최근 미국의 모셔널 및 애플티브와 아이오닉5로 자율주행 택시를 공개한 바 있다. 그러나 현재 아직도 상용화에 필요한 100% 안전이 보장되지 못해 끝없는 연구가 진행되고 있다. 우리나라 학계에서도 자율주행에 대해서 여러 곳에서 매우 활발한 연구가 진행되고 있다. 서울대학교 미래모빌리티연구센터의 소장인 이경수(K. Yi) 기계공학부 교수는 시흥시 배곧에 세계적인 자율주행시험장 시설과 첨단 장비를 갖추고 새로운 연구 결과를 계속 발표하고 있다. 2015년부터 KT와, 그리고 2017년에는 SK텔레콤과 자율주행차 연구를 해왔

고, 2016년에 대학 1호로 고속도로에서 자율주행 시연을 보였다. 작년부터는 시흥시 배곧 지구에서 자율주행 택시를 시범적으로 운행하고 있다.

국제자동차기술협회(SAE International)는 자율주행의 단계에 대해 기준을 정하였다. 운전 조작, 주행 환경 주시, 시스템 오류 시 보정, 자동화 시스템 범위 등의 영역에서 운전 주체가 누구인지에 따라, 그리고 완성도에 따라 자율주행 6단계(레벨 0~레벨 5)로 분류하였다. 레벨 0 자율주행은 운전자가 주행을 책임지는 통상적인 주행을 의미한다. 레벨 1 자율주행은 레이더와 카메라를 이용해서 운전자를 돕고, 차선 유지 보조 장치가 있는 주행이다. 레벨 2 자율주행은 속도와 조향을 보조하는 제어 기능이 있으며, 테슬라의 오토파일럿(Tesla Autopilot)은 레벨 2/레벨 3에 해당한다. 레벨 3 자율주행은 조건부 자동화 주행으로 고속도로와 같이 이상적인 조건에서만 운전자가 운전대를 잡지 않고 운전할 수 있다. 레벨 4 자율주행은 고도의 자동화 주행으로 운전자와 상관없이 자동차가 스스로 주행할 수 있으나, 목적지가 알려진 경우로 제한된다. 최고 단계인 레벨 5 주행은 어느 도로에서든 사람의 개입이 전혀 불필요한 완전 무인 자동화 자율주행이다. 주행 중에 다른 차량이나 장애물과의 충돌을 방지하기 위해서는 자동차에 부착된 센서들과 GPS로 주변 사물의 위치와 형상과 움직임을 정확하게 측정하고 정밀 도로 정보를 활용하며, 자율주행 데이터 기반의 주행알고리즘 등에 의해 위험 여부를 판단하여 속도를 제어하고 급제동도 하며 방향을 조정해야 한다. 이를 위해서 카메라, 레이더, 라이다 등의 센서 기술과 고성능 화상처리 프로세서 등이 사용된다. 카메라는 사물을 촬영하여 그 영상으로부터 다른 자동차나 사물과의 거리와 움직임을 파악한다. 카메라 센서는 저가이나 수십 미터를 초과하는 거리에서는 사용하기 어렵다. 레이더는 전파를 물체에 방사해서 되돌아오는 전파를 통해 거리, 방향, 고도를 측정하여 물체의 위치를 판단한다. 레이더는 일기가 나쁜 날이나 밤에도 측정할 수 있고, 원거리의 물체도 인식할 수 있으나, 사물의 정확한 형상을 파악하기가 어려워서 통상 카메라와 함께 사용된다. 라이다(Light Detection And Ranging)는 빛(Light)과 레이더(Radar)의 합성어로 레이더의 전파보다



그림 1. 구글 웨이모 자율자동차(Reuters 자료)

매우 작은 파장의 레이저를 주변에 비추어서, 사물의 거리와 방향, 속도를 정밀하게 측정할 수 있다. 이외에 차량-사물 통신인 V2X 정보 등도 고려해서 자동차의 주행을 제어한다. 현대자동차그룹이 앵티브(Aptiv)사 및 모셔널(Motional)사와 함께 개발하여 공개한 그림 2의 아이오닉5 로보택시는 라이다 센서, 카메라, 레이더 등 약 30개의 센서로 주변 상황을 파악해서 레벨 4의 자율주행을 하는 자동차이다. 구글 웨이모 상용 자동차도 레벨 4의 자율주행 자동차로 볼 수 있다. 라이다가 정밀하나 고가이고 다수의 이종 센서를 사용할 경우, 통합 제어가 복잡해져서 테슬라는 고가의 라이다 없이 다수의 카메라와 초음파 센서 및 레이더를 사용하여 자율주행차를 개발하고 있다.



그림 2. 현대자동차와 모셔널 및 앵티브의 자율주행 자동차 아이오닉5 로보택시

경쟁력 있는 자율주행 자동차를 개발하기 위해서는 센서와 주행 제어 알고리즘을 연구하는 학계와, 센서와 자율주행 플랫폼을 개발하는 산업계가 긴밀하게 협력해야 한다. 정부는 해외 의존도가 높고 고성능·고가인 센서, 통신, 제어 등 8대 핵심 부품인 주변 상황 인식용 고해상도 카메라, 레이더/라이다, 차량-외부 통신 모듈, 차량 위치 측정 모듈, 고정밀 3D 디지털 맵, 운전자모니터링, 자율주행 통합제어기, 자율주행 기록장치가 조기에 개발될 수 있도록 지원하고 있다. 그리고 핵심 부품을 구성하는 자율주행 4대 시스템 반도체 기술인 영상처리, 통신, 보안, HMI(Human Machine Interface) 분야의 기술을 고도화하기 위한 노력도 진행되고 있다. 자율주행은 기계, 전자, 컴퓨터 등 여러 학문이 융합된 분야로서 자동차 분야의 전통적인 연구자인 기계 분야 학자들 뿐

만 아니라 전자, 컴퓨터, 인지과학, 심리, 법률, 교통, 안전, 보안 등 다방면의 학자들이 단독으로 또는 서로 협력하여 연구를 진행하고 있다. 자율주행 연구는 인간 운전자를 대체하는 수준을 넘어 주행의 안전성을 더욱 고도화하는 방향으로 이루어지고 있다. 고등 차량 동역학과 제어기술을 활용한 급한 코너링 등 주행 중의 타이어의 미끄럼 및 차량 안정성 확보 연구, 딥 러닝과 차량 무선 통신을 이용한 자율주행 시 인체에 발생하는 위해(Threat) 평가, 정적 장애물 지도와 형상 모델-프리 기법을 활용한 도심 자율주행 자동차의 이동 물체 탐지 및 추적 연구, 가상 목표물 기반의 자율주행 중 추월 결정, 이동 계획 및 제어 연구 등 기계·컴퓨터 분야 만에서도 광범위한 연구가 진행되고 있다. 한편, 이장무 회장은 2021년 5월 13일 - 15일 중국 광둥성 광저우 LN가든호텔에서 온라인으로 개최되었던 제20회 아시아학술회의(Science Council of Asia, SCA) 총회 및 학술대회에 참가하였다. 즉, 이장무 회장은 학술회의 기간 중 SCA 이사회 및 폐막식에 온라인으로 참가하였으며, 특히 2021년 5월 14일 - 2023년 총회까지 임기 2년의 SCA 신임 회장에 선출되어 폐회식에서 인사 말씀을 하였다.

최향순 회원은 국제교류협력위원회 위원으로서 외국 학술원과 국제학술기구와의 학술교류 및 협력에 관한 사항, 국제학술기구에의 대표자 파견에 관한 사항, 국제적인 학술상 추천 및 관련기관과의 협력 등의 직무를 수행하고 있다. 한편, 최향순 회원은 “한국산업기술발전사, -우리나라 산업기술의 70년을 조망하다-”라는 제목으로 학술원통신 제330호(2021. 1. 1.) 회원기고란에 투고하였다.

이병기 회원은 2021 회원경륜 사회공유사업에 참여하여 그의 학문적 삶을 EBS 다큐멘터리로 제작·방영하기 위하여 준비 중이다. 다큐멘터리 방영은 금년 11월중으로 계획되어 있다. 회원경륜 사회공유사업은 우리 사회 원로인 학술원 회원의 경륜을 사회 일반과 공유하여 학문 친화적 사회분위기 조성 및 건강한 시대정신을 제시하는 것이 목적이다. 한편, 이병기 회원은 “오늘의 정치·사회적 병리 현상과 과학적 배경에 대한 고찰”이라는 제목으로 학술원통신 제333호(2021. 4. 1.) 회원기고

란에 투고하였다.

유정열 회원은 8월 22일 - 27일 동안 이탈리아 밀라노에서 화상회의로 개최되었던 제25회 이론및응용역학 국제대회(ICTAM Milano 2020+1, 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics)에 참가하였는데, 이 학술대회의 주관기관은 국제이론및응용역학연합(IUTAM, Int. Union of Theoret. and Appl. Mech.)이고, 후원기관은 국제과학이사회(ISC)이다. 우리나라의 한국이론및응용역학위원회(KCTAM, Korean Committee for Theoret. and Appl. Mech.)는 IUTAM의 47개 소속단체 중 일원이다. IUTAM은 1924년 제1회 ICTAM을 네델란드 델프트에서 개최한 이래 1948년 제7회 이전에 두 차례를 제외하고는 4년 주기로 ICTAM을 주관함으로써, 산업 발전에 맞추어 빠르게 진보하고 있는 유체역학(Fluid Mechanics) 및 고체역학(Solid Mechanics)을 주축으로 하는 이론및응용역학의 다양한 세부 분야들의 현황 및 발전 동향을 제시하고 있다. 2024년에 우리나라 대구에서 개최 예정인 26th ICTAM은 100주년 기념대회로서 그 의미가 매우 크다고 할 수 있으며, KCTAM은 이에 만반의 준비를 하고 있다. 이 학술대회에서 다루어진 논제들은 이론및응용역학 분야

의 전통적인 세부분야인 난류, 경계층, 유체 내의 파동, 탄성, 파괴, 트라이볼러지, 유체·구조(Fluid-Structure) 상호작용 등으로부터 비교적 신생 세부분야인 생물유체역학, 마이크로/나노 플루이딕스, 생체역학 및 생체재료, 메타물질 등에 이르기까지 매우 광범위하게 분포되어 있다. 또한, 유정열 회원은 “제4세대 원자로용 초임계수의 열수력학에 관한 연구”라는 제목으로 2020년도 전문학술활동 지원사업을 수행하였는데, 금년에는 그 연구결과를 공유하기 위하여 학술원논문집 제 60집 1호(2021)에 논문으로, 그리고 학술원통신 제336호(21. 7. 1.) 회원기고란에 투고하였으며, 당초 금년 5월에 학술세미나로 발표하고자 하였으나, 코로나19로 계획변경하여 금년 11월 분과세미나로 발표하기로 되어 있다.

이상 자연제3분과 회원들의 학술연구 활동 등 동정을 소개하면서 자료 수집에 많은 도움을 주신 회원님들과 사무국 최미정 팀장에게 감사의 말씀을 드린다. 미공개를 요하는 각종 심사위원회 활동을 포함하여 본 기고자가 미처 파악하지 못한 부분들이 있다면, 회원님들의 양해를 구하고 피드백을 받아서 내년도에는 보다 완성도가 높은 기록이 남겨지도록 반영하겠다. ㉠

[학술교류]

2021년 지속가능성 연구 및 혁신 회의(SRI2021) 온라인 참가기

金璟東 會員(사회학)



I. 서론

현대 문명의 급속한 전개 과정에서 인류는 스스로 감당하기 어려운 수많은 문제를 야기하게 되었지만, 그러한 쟁점의 의미를 한 마디로 요약하면 ‘지속성 내지 지속가능성의 과제’라 할 수 있다. 우선 인류의 보금자리 지구 자체의 생태계를 얼마나 더 안전하게 유지할 수 있는가 하는 문제를 비롯하여 거기에서 파생하는 삶의 질적 저하와 가용 자원 배분의 불균형으로 인한 사회경제적 불평등과 같은 심각한 고민을 하루 속히 해소하지 않으면 현재까지 쌓아온 문명의 성과를 과연 얼마나 더 오래 지속적으로 향유하게 될지가 근본적인 문제로 떠오른 것이다.

따라서 이 지속성이라는 과제는 단순히 생태적 환경의 보존에 머무는 것이 아니고 전 지구적 차원에서 인간의 삶의 조건이 호전하기는커녕 오히려 열악해지는 암울한 미래의 인간상을 시급히 정상화해야 하는 성질의 것이다. 그러므로 이러한 과업은 어떤 한 분야의 전문적 연구와 혁신의 과제가 아니고 그야말로 전 지구적 차원에서 다학문적인 접근을 요하는 것이다. 이러한 인식에 근거하여 이 문제를 전담하는 국제기구인 <미래 지구>가 <벨몬트 포럼>과 공동으로 이 문제를 초학문적 관점에서 단순히 학계의 전문가 뿐 아니라 정부, 기업, 과학기술, 문화예술, 시민사회 등 사회의 모든 분야가 함께 머리를 맞대고 해결책을 강구해야 한다는 취지에서 금년에 <제1차 지속성 연구 및 혁신 회의>를 개최하게 된 것이다.

특기할 것은 이 지속성 문제를 다루는 국제회의를 호주, 그것도 브리즈번(Brisbane)이라는 도시에서 개최하기로 한 데는 그만한 이유가 또한 있다. 이 도시는 일찍부터 세계수준의 지속성 연구와 녹색혁신, 각계의 공동참여와 포괄적 교류로 이름난 도시이고 호주 또한 세계

의 남북부 간 연결고리 역할을 충실히 하는 나라로 유명하다. 이런 환경에서 세계 지속성 회의를 개최하는 것도 의미 있는 일이라 할 것이다.

우리나라도 이 문제에 관한 전 국민적 관심을 고취할 필요가 있으므로 학술원을 대신하여 본 회원이 참가하여 식견을 넓히고 새로운 동향을 파악하여 우리나라에서도 이 문제를 더 진지하게 다학문, 다부문 차원에서 미래지향적으로 접근할 수 있도록 하는데 기여하고자 하는 것이 본 참가연구의 주목적이다.

이 글은 본회원이 <미래 지구>(Future Earth)와 <벨몬트 포럼>(Belmont Forum)의 공동주최로 금년 6월12일부터 15일까지 호주 브리즈번 시에서 세계 최초로 개최한 “지속가능성 연구 및 혁신 회의”(Sustainability Research & Innovation Congress 2021: 이하 SRI2021)에 참가한 국제교류 연구의 결과 보고서다. 사상 정상 화상회의로만 참여하였다. 다만 구체적인 참가 내용을 서술하기 전에, 우리에게 비교적 생소한 회의 주최 기구와 회의의 주목적에 관한 간략한 소개가 필요할 것 같다.

먼저 <미래 지구>는 2012년 6월 유엔 지속가능한 발전 회의(the UN Conference on Sustainable Development)에서 발족한 국제 연구 프로그램이다. 생태환경과 인류에게 미치는 전지구적인 변동의 영향에 관한 지식을 축적하여 지속가능한 발전을 위한 해결책을 탐구하려는 취지로, 자연과학, 사회과학, 인문학, 기술공학 및 법학 등의 여러 분야의 전문가들과 학문분야 외부 영역 각계의 사회적 이해관계자들이 협력하여 연구를 기획하고 결과를 생산함으로써 과학적 연구가 지속가능한 발전에 기여할 역량을 증대할 목적으로 설립한 기구이다. 그리고 <벨몬트 포럼>은 2009년 설립한 연구기금

조성 조직체로서, 국제과학이사회(International Science Council) 및 지역별 기금조성 기구들과 협업으로, 전지구적인 변동을 이해하고, 완충시키고, 또 그에 적응하기 위한 지식을 제공하는 국제적 초학문적 연구를 증진시키려는 목적으로 설립한 조직체이다.

그리고 이번 SRI2021 회의는 그 성격이 매우 특이한 점에 주목할 필요가 있다. 우선, 주목적이 인류가 당면한 지속가능성의 문제를 학술적으로 연구하고 (scholarship), 그 결과를 실생활 속에서 혁신 (innovation)을 추구하는 데 적용함에 목표를 두고, 이를 위한 국제적 및 국내의 여러 영역 간의 협업에 의한 (collaboration) 실천(action)을 조장하고자 하는 것이다. 그러기 위해서 이 회의에는 학자나 연구 전문가 뿐만 아니라 학계의 테두리 밖인 일반 사회의 각 부문과 영역에서 실제적인 활동에 종사하는 전문직 종사자 및 시민사회 운동의 책임자와 주요 구성원 등 다양한 부문과 계층의 인사들을 망라하여 참여할 수 있도록 문호를 활짝 열어 둔 국제적인 모임이라는 것이 특징이다.

여기에 더하여, SRI2021 회의에는 특별히 강조하는 성격이 두드러진다. 그 첫째는 주제가 지속가능성 연구 및 혁신이라는 것이고, 다음은 지속가능성 문제를 초학문적(transdisciplinary) 접근으로 논의하겠다는 점이다. 단순한 연구에 그치지 않고 혁신이라는 현실적 실천의 문제를 함께 다룬다는 것인데, 그것도 그냥 흔히 말하는 여러 학문 분야의 학제간(interdisciplinary) 내지 다학문적(multidisciplinary) 연구에 그치지 않고 학문을 초월하여 접근하는 연구를 수행하되 그 과정에서 처음부터 학계의 범위를 넘어 사회의 여러 영역과 협업한다는 초학문적인 접근을 주제의 주요 일부로 부각시킨 점이 더욱 새롭다고 할 것이다.

따라서 여기에 그 초학문적이라는 말의 뜻을 되새겨 보기로 한다. 이 개념은 스위스의 심리학자이자 자연과학자인 Jean Piaget 가 1970년과 1987년에 도입, 활용하였고, 1994년 11월에는 폴투갈에서 국제초학문적연구센터(the International Center for Transdisciplinary Research: CIRET)가 개최한 제1차 초학문적 연구 세계

대회(the 1st World Congress of Transdisciplinarity)에서 <초학문적 연구 장전>(the Charter of Transdisciplinarity)도 채택하였다.

이 개념의 핵심적인 특징은 아래와 같다. 어떤 문제의 본질적인 성격이 논의의 대상으로 떠올랐을 때, 이 초학문적 접근은 거기에 개재하는 가장 유관적합한 문제가 무엇이며 연구하려는 질문이 어떤 것인지를 결정하는 데 도움을 주는 연구의 접근법이다. 이때 제기하는 첫번째 유형의 질문은 현재 대두한 문제의 원인과 그것이 전개할 미래의 양상(시스템 관련 지식: system knowledge)을 다루고, 둘째는, 그 문제 해결 과정에서 추구할 목표를 형성하는 가치와 규범에 관련하며(표적 지식: target knowledge), 세번째로는, 그러한 문제적 상황을 어떻게 변환하고 개선하는지에 관여한다(변환용 지식: transformation knowledge). 요컨대, 초학문적 접근(transdisciplinarity)은 문제의 복잡성과 그에 관한 다양한 인식을 적정하게 파악하고 취급할 역량과 자세가 필수적이며, 추상적이고 사례에 따라 특수한 지식을 상호 연계하고, 이를 실천할 때는 공통의 선을 증진시키는 것이 필수적인 그런 접근이다.

초학문적 접근은 참여하는 전문가들이 열린 자세로 각각의 관점에 대등한 무게를 두면서 상호 연계하는 가운데 열린 토론과 담론으로 상호작용하는 모습으로 진행된다. 실은 이런 논의형식은 거기서 다뤄야 하는 정보의 엄청난 분량과 그리고 참가자들의 전문분야에서 사용하는 특화된 언어의 상호 간 부정합 때문에 난관이 없지 않다. 그러므로 이런 조건에서 두각을 나타내려면 연구자들은 거기에 관여하는 여러 분야 하나하나에 관한 심층 지식과 방법론을 이해해야 할 뿐 아니라, 토론 과정에서 중용의 절제, 조정력, 조합력 및 전달력에도 능통해야 한다.

학문의 성격 상, 초학문적 연구는 일종의 지식의 통일(융화, 통합, 단일한 일관성: unity of knowledge)을 의미한다. 학제적 및 다학문적 접근에서는 각기 분과의 경계를 넘어 연구방법을 이전하면서도 개개 분과 연구의 틀은 그대로 유지하는 데 비해, 초학문적이란 뜻은 서로 다른 분과학문 간의 상호 전이는 물론 그 경계를 넘어, 각기 개별 분과를 초월하여 주어진 문제를 한 번에 동시

에 다룬다는 의미다. 그리하여 현재 세계의 이해를 목표로 하되, 그것을 모두 포용하는 하나의 지식의 통일을 추구한다. 세계란 여러 수준의 현실 혹은 실재(Reality)로 존재한다. 단일 분과 학문의 연구는 거의 한 수준의 현실, 오히려 그 현실의 일부분에만 관여하는 한계를 지니는데 비해, 초학문적 연구는 여러 수준의 현실의 작용으로 창출하는 역학(dynamics)을 다룰 수 있다. 이 같은 역학의 발견 과정에는 단일 분과학문의 지식을 관통하기도 하므로, 단일 분과학문의 연구는 초학문적 연구에 영양분을 제공하기도 한다. 동시에, 단일 분과학문의 연구는 초학문적 연구에 의해 문제를 더욱 명확하게 파악하기 위한 새로운 그리고 풍부한 길을 제시해 줄 수 있다. 이런 의미에서 초학문적 접근은 단일 분과학문적, 학제적, 다학문적 방법과는 상호 보완적인 관계를 갖지 적대적 관계에 놓이지는 않는다.

그 뿐 아니라, 이런 접근은 학문의 범위를 초월하여 연구에서 학습한 결과를 사회전체에 더욱 효율적으로 전파하는 과제를 애초의 연구기획에 반영하기 위하여 연구목적과 전략을 규정하는 단계에서 사회 각계의 이해당사자들의 참가를 장려한다. 이처럼 학문 간의 학술적 협업은 물론 이런 연구의 직접적인 영향을 받는 사람들 뿐 아니라 공동체에 속해 있는 다양한 이해당사자들과도 적극적으로 협업하는 일은 초학문적 접근의 긴요한 특징이다. 이렇게 함으로써 초학문적 연구는 세상을 이해하는 지식을 다기한 방법으로 얻고, 새로운 지식을 창출하며, 모든 이해당사자들로 하여금 그와 같은 연구에서 얻은 결과나 교훈을 잘 이해하고 이를 실생활에 적용하는 데 도움을 제공할 수 있는 역량을 갖추게 된다.

한 가지 더 추가할 점은 최근에 중남미 지역에서는 대역사(Big History)라는 명목으로 과학적 지식과 그 지역 원주민의 전통 속 지혜를 융합하여 우주와 자연 속에 공존하는 인간의 다양한 현실(실재)의 수준 간의 상호연관성을 이해하려는 연구를 추구한다는 사실이다. 이는 과학적 연구와 과학사, 특히 실증주의 과학사에서는 잊혀진 차원의 현실, 즉 영성(spirituality), 예술, 감성, 신비로운 경험과 같은 조상들의 지혜 등을 융합하려는 연구와 교육을 실시하고 있다는 것이다[이상의 초학문적 연

구의 참고문헌: Nicolescu, Basarab ed. 2008. Transdisciplinarity: Theory and Practice, Cresskill, NJ: Hampton Press].

주최 측의 공식 집계에 의하면, 이번 SRI2021 회의에는 전 세계 100개국에서 2,000명의 인원이 110개 이상의 주제를 내걸고 각각 분과회의, 포럼, 기타 대안적 회합 등에 참여하여 700건의 발표를 경청하고 토론하는 거대 규모의 국제회합이었다. 그 중에서 사회과학적 접근으로 다룰 수 있는 내용만 해도 30개 정도였으나 여기에 전부 참여하기는 불가능하였다. 더구나 화상회의라 약간의 시차로 인하여 한국 현지 시간으로는 오전 6시부터 시작한 회의도 있었고 동시에 진행되는 모임도 있었으므로 선별 참여가 불가피하였다. 적어도 사회과학적 관심과 혁신 노력과 관련하여 주로 국가와 기업 및 시민 사회의 관점에서 이 문제를 어떻게 접근하는지를 다루는 주제를 골라 그 주된 내용을 학습하고 토론에도 일부 참여하였다. 특히 초학문적 접근과 다부문적 대화 및 참여라는 관점은 이처럼 복합적인 분야의 문제를 효율적으로 연구하고 이를 국가, 시장 및 시민사회의 공동협업에 의하여 실천하는 혁신적인 방안 등을 관심을 가지고 관찰하였다. 그 중에서도 본 회원은 특별히 사회과학과 교육을 다루는 주제에 관심이 있었다. 매우 부분적이고 개략적이지만 몇몇 회의의 내용을 주제별, 날짜별로 간추리면 아래와 같다.

II. 지속가능성 일반주제 회의

1. 생물다양성 보존의 지속가능성: 인류에게 너무 과도한 비용인가, 아니면 해결책은 찾을 수 있는가? (2021. 6. 13, 일, 06:00시 한국시간)

생물다양성 보존을 위한 정책 수단은 인류의 삶과 번영에 역효과를 자아낸다는 견해를 자주 듣는 것이 현실이다. 이 분과에서는 ‘유엔 지속가능한 발전의 목표’의 범주 안에서 훌륭한 생물다양성 보존의 목표를 달성하기 위하여, 과학적 증거와 각국의 토착문화의 가치관 및 실천에서 얻은 통찰을 활용하여, 활발한 토론과 지식공유

경험을 얻고자 하였다. 다섯 명(교수 2명, 연구단체 대표 3명)의 발표자가 실천에 임하는 공동체와 정부의 태도와 행동, 토착적 문화의 개입, 그리고 기술혁신과 지식공유에서 연유하는 기회에 영향을 미치는 사회경제적 요인을 둘러싼 해결책과 관점을 제시하였다. 발표자 전원은 이와 같은 보존 실천 행동의 영향을 받고 있는 공동체 출신이다. 이들이 제기한 토론의 초점은 다음과 같은 쟁점에 맞추었다.

- 인류의 공동체는 장기적으로 지속가능하기에 충분한 만큼 생물다양성 보존을 구체적으로 전담하여 실천(own)하고 있는가? 우리는 상호간에 학습할 수도 있는가?
- 보존의 비용은 실지로 과도한가? 아니면 우리가 그렇게 의식하고 있는가? 이를 시정할 수는 있는가?
- 우리의 실천 행동의 효과(비용 대 혜택, 또는 우리의 신념)는 실지로 측정가능한가?
- 어떻게 하면 공동체가 그냥 말로만 하지 않고 실지로 보존에 투자하고 그 혜택을 얻고 있는가?
- 어떤 혁신적인 해결책과 새로운 수단이 가장 유망한가?
- 공개적 과학과 공개적 자료가 도움이 될 수 있는가?

2. 전체회의 2: 누구를 위한 지속가능성인가?(2021. 6. 13, 일, 19:00시 한국시간)

전지구적 지속가능성은 가장 취약하고 소외된 공동체를 위한 공평한 정의 없이는 달성할 수 없다. 이들은 대개 저소득 내지 중위 소득 국가에 있거나 고소득 국가에서조차 점차적으로 뒤로 밀린 공동체들이다. 하지만 지속가능성의 개념 형성의 틀 자체나 혁신을 위한 투자나, 또한 학술적 분석은 주로 이들 취약 공동체에 비교적 관심이 적고 저들의 참여도 거의 없이 이루어지는 과정이 지배적이고, 심지어 실제 그 주요 대상이 저들 취약 집단일 때조차도 거의 예외 없이 저들은 관심 밖에 있다. 이러한 편파적 태도가 중요한 이유는, 지속가능성에 관련한 의사결정에는 매우 중요한 가치의 교환과 타협의 여지가 있기 때문이며, 포용성과 다양성을 결여하는 과정 자체는 자칫 상이한 사회, 문화 및 인구의 속성 등에서

연유하는 많은 기회를 놓칠 수가 있는 것이다. 이 회의는 두 번째 전체회의였고 2명의 교수와 4명의 연구기관 책임자 등 6명의 발표가 있었다.

3. 사회-생태적 건강을 위한 아시아-태평양 지역 중추 구축: 도넛경제의 삼중고 해소 구상(2021. 6. 14, 월, 07:00시 한국시간)

이 분과는 영국의 옥스퍼드-케임브리지 대학의 경제학자 Kate Raworth[2017, *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*, New York: Random House]이 제안한 소위 도넛 경제학이라는 개념을 중심으로 의견 교환을 하는 모임이었다. 도넛 경제학이란 인류의 삶에 있어서 사회-생태적 체계(social-ecological systems: SES)를 도식적으로 규명하는 이론으로, 두개의 원을 도넛 모양으로 배치하고, 내부의 원에는 '유엔 지속가능 발전의 목표'에서 제시한 12가지 인간의 삶의 사회적 기반(Social Base or Foundations: SB)을 배치하고, 외부의 원에는 지구 시스템 과학자들이 제안한 9가지 생태적 최고한도 혹은 상한선(Ecological Ceilings: EC)을 위치한 다음, 사회적 기반의 항목은 최대한으로 보장하고 생태적 상한선은 최소한도로 침해하지는 논리를 펴는 이론이다.

이 도식에서 말하는 12가지 사회적 기반은 다음과 같다. ① 식량 안정성; ② 건강; ③ 교육; ④ 소득과 취업; ⑤ 평화와 정의; ⑥ 정치적 발언; ⑦ 사회적 공평성; ⑧ 양성 평등; ⑨ 주거; ⑩ 연결망; ⑪ 에너지; 그리고 ⑫ 물이다. 그리고 생태적 상한선의 영역은 ① 기후변화; ② 해수 산화; ③ 화학적 오염; ④ 질소와 인의 부하; ⑤ 담수 남용; ⑥ 토지 전용; ⑦ 생물다양성 상실; ⑧ 공기 오염 및 ⑨ 오존층 소모 등이다.

현재 진행 중인 사회-생태계 시스템의 급격한 변동은 인간의 사회적 기반과 생태계의 상한선에 점증하는 위협으로 다가온다. 인류의 건강은 자연생태계의 변성과 사회-생태계의 지혜로운 관리의 영향을 크게 받는다. 따라서, 이 방면의 유용한 지식의 공동생산, 지혜로운 정책의 시행 및 미래 비전을 지향한 단호한 결정 행사를 요

청한다. 이런 문제를 두고 연구자, 실무자 및 정책 입안자 등이 무엇을 알아야 하고 무엇을 해야 하는지에 관한 모임을 근자에 서울대학교 아시아연구소에서는 “아시아의 사회-생태적 건강”이라는 주제로 <미래지구 동아시아 국제 심포지움>을 개최한 바 있다. 이 회합에는 12개국에서 약 200명의 참가자가 모여 두 가지 근본적인 질문: 1) 지속가능성을 지향하는 우리의 제일 원칙은 무엇인가? 그리고 2) 다중의 관점을 초월하여 지식과 실천을 연계하는 파트너십을 어떻게 설정하는가? 에 관한 의견 교환을 하였고, 그 결과 이를 위한 아시아-태평양 지역 중추를 설립하기로 의견을 모으고, 마침내 이번 SRI2021에서 본 분과 회를 조직하여 참가하게 되었다. 인류는 그 동안 지속적으로 생태적 상한선을 침범해왔고, 사회적 기반을 붕괴시키면서까지 자연법칙에 반하는 생활양식을 채택해온 결과 코로나-19 팬데믹과 같은 재해를 초래하였다. 이런 팬데믹을 극복하는 데 있어서, 복합시스템론의 관점은 인류가 직면하고 있는 생태적 상한선, 사회적 기반의 하한선, 그리고 열역학적 지상명령의 삼자택일의 궁지, 즉 트릴레마(trilemma)에 관한 통찰을 제공할 뿐 아니라, 건강하고 지속가능한 사회-생태적 체계를 지향하는 예견의 역량을 제공하기도 한다. 이런 취지로 이 분과에서는 상기의 도넛 경제 시스템의 틀을 활용하여 활발한 논의를 전개하였다.

이 분과에는 한국의 참여가 주종을 이루었는데, 서울대학교 아시아센터의 미래지구 담당 김준 교수가 진행을 맡았고, 세계은행의 경제연구원 서희권(Samuel) 박사, 한국국제기아대책기구의 한두리 선생, 서울대학교 환경대학원 환경계획학과의 윤민지 학생, 미얀마 산림정책부의 직원으로 서울대학교 박사과정의 Ei Sandi Sett 씨, 일본의 <미래지구>담당관 Fumiko Kasuga 여사, 방글라데시의 Sylhet Agricultural University의 농림학과 Mohammad Samiu Ahsan Talucder 교수, 인도 The University of the West Indies의 연구원 Sandeep Mharaj 씨 등 8명이 발표하고 여러 참가자들이 토론에 참여하였다.

4. 지속가능한 식량, 물 및 에너지를 위한 새로운 기술: 기회, 한계, 그리고 위험성(2021. 6. 14. 월, 13:00시 한국시간)

앞으로 2050년이면 세계 인구가 98억명에 이른다는 예측 앞에서 급변하는 기후의 조건 아래 식량과 물과 및 에너지의 수요에 대처하기 위해서는, 안전한 지구를 유지하는 범위 안에서 작동하는 기술의 필요성을 더 강조할 수가 없다. 이와 같은 도전에 대응하는 데 기술을 이용할 수 있는 방법은 다양하지만, 주요한 보기를 들면 다음과 같다. ① 토지와 물과 비료를 적게 쓰는 식량생산을 강화하기 위하여 데이터에 기반한 위성 작물 모니터링 시스템; ② 작물 소실과 질병을 최소화하는 안전하고 비화학물질의 농약을 제공하는 미세(나노)기술; ③ 재생 에너지의 생물 산업 생산에 필요한 효율적인 미생물학적 세포 공장을 디자인하는 합성 생물학; ④ 농장에서 식탁에 이르는 공급사슬의 과정에서 식량의 낭비를 추적하고 축소하기 위한 인공지능과 결합한 고리사슬(블록체인) 등이다. 다만, 오늘날 우리가 경험하는 기술변동의 속도와 규모는 정부와 사회로 하여금 그런 기술변동이 자아낼 수 있는 잠재적 위험성을 관리하는 동시에 그 혜택을 충분히 활용해야 하는 전례 없는 도전을 창출하기도 한다. 과거의 경험에 비추어보면 혁신에 의한 개선은 의도하지 않은 사악한 결과를 초래할 수도 있다.

이 분과는 이런 쟁점을 다루기 위해, 새로운 기술과 혁신의 기회, 한계 및 위험성에 관한 지식을 갖추고, 인문학, 역사학, 사회학, 정치학, 경제학, 거기에 분자생물학과 공학 등 분야에서 훈련을 받은, 연구, 정책, 산업계 등의 전문가들이 모였다. 주로 호주 현지 대학의 관련 분야 연구자 6명이 발표를 하고 활발한 토론을 펼쳤다.

5. 위험성에 정통한 지속가능성 계획(2021. 6. 14. 월, 16:00시 한국시간)

발전과 위험성 사이에는 밀접한 상호접합점이 있다. 지속불가능하거나 공평하지 못한 발전은 오히려 위험성을 더 악화시킬 수도 있다. 위험성이 아주 없는 발전이 있을 수는 없지만, 비교적 새로운 개념이랄 수 있는 위험성에 정통한 발전계획은 고도로 탄력이 있고 지속가능한 발전 과정을 확실히 추진할 수 있다. ‘2030 지속가능 발전 의제’(the 2030 agenda for Sustainable Development)는 정부의 전 부문과 전 계층의 발전 정책과 계획에 위험성 의식을 내면화하지 않고서는 순조롭게

달성하기가 거의 불가능할 것이다. 이 분과에서는 위험성에 정통한 계획(Risk informed Planning: RIP)을 정부의 기구 안에서 제도화하는 주제를 탐색하였다. 이 정도의 강력한 조정이 있어야, 위험성의 충격을 감소할 수 있을 뿐 아니라 발전의 혜택을 각국의 지방과 세계의 지역에서 지속적으로 향유할 수 있을 것이다.

극단적인 기후와 변화의 유형에다, 급속하게 증가하는 인구, 무계획적인 도시화, 환경의 퇴락, 그리고 빈곤, 갈등 및 전염병 전파 등의 기술적, 사회경제적 조건 등에서 증대하는 위험성은 관심의 대상이 아닐 수 없다. 수십년에 걸쳐 이룩한 발전의 성과는 단 한 번의 위험천만한 사건으로 허무하게 무력화할 수 있다. 만일 개발 사업에 종사하는 정부와 시민사회의 조직체들이(공식 기획이나 시책으로) 위험성에 정통한 계획을 위한 시너지를 창출하고 이를 위한 메커니즘을 제도화한다면, 소실을 최소화함으로써 경제와 사회의 미래에 가져다줄 변환의 효과는 실로 어마어마할 것이다. 그러나, 주류사회에서 효과적인 위험성에 정통한 계획(RIP)으로 가는 노선은 나라에 따라 결코 선형적이지도 않고 단일하지도 않다. 모든 나라는 각기 특이한 역사, 정치적 이념 및 열망이 다르고, 따라서 어떻게 위험성에 정통한 계획을 달성할지에 관한 청사진이나 규칙이 있는 것도 아니다. 여기에는 맥락에 특수한 역동적인 접근이 관건이다. 아직은 이 RIP 활동의 성과를 측정할 지표나 모본이 될 만한 결정적인 사례는 없다. 그래서 이를 모니터하고 평가하는 데 유용한 틀에 관한 의견을 환영하고 토론하였다. 이 모임에서는 주로 인도 출신 연구자들과 교수들이 이런 다분야 사회 발전 계획이 직면할 수 있는 위험에 대처하는 법적, 제도적 그리고 정책적 틀을 중심으로 토론을 펼쳤다.

6. 지속가능한 스마트 시티를 위한 이해관계당사자의 공동협업: 공동체의 위험성을 최소화 하는 동시에 데이터에 기초한 혁신의 잠재력 극대화(2021. 6. 14, 월, 18:00시 한국시간)

스마트 시티 혹은 스마트 도시(smart cities)라는 개념은 2015-2016년 경에 유럽에서 등장한 도시 관리 이론에 해당한다. 우리나라에서도 국토교통부와 과학기술정보통신부가 혁신성장 8대 핵심 선도사업 중 하나로,

2018년부터 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트로 연구개발 사업을 시작했다. 2022년까지 5년 동안 총 1,159억 원의 연구비를 투입해 세계선도형 스마트시티 모델을 개발하여 실제 도시에 적용시키겠다는 목표다. 2018년 혁신성장동력 프로젝트 실증도시로 대구광역시와 경기도 시흥시를 선정하였으며, 각각 지역 거점의 데이터센터를 구축하고 각종 데이터를 통합관리해 필요한 정보로 재생산하는 스마트시티 데이터허브 모델을 만들어 스마트시티 서비스를 시민들에게 제공할 계획이다[국토교통과학기술진흥원 2020, KAIA Insight vol.12 참조].

금번 SRI2021에서 개최한 이 분과는 학계와 연구기관의 3명이 발표를 하고 아시아-태평양 지역 국가의 정부, 기업, 시민사회 부문 참가자들이 토론에 참여하여 지속가능한 스마트 시티를 위한 자료와 관련한 사회적 관심사로서 자료에 기초한 혁신의 위험성을 관리하기 위한 전략과 정책적 함의를 탐색하는 토론을 진행하였다. 스마트 시티는 대기오염 감축, 에너지 효율 증대, 교통혼잡 완화, 사고와 자연재해에 대처하는 회복력 지탱 등 분야에서 지속가능성 도전에 대처하는 데에 결정적인 역할을 하리라 기대하고 있다. 예컨대, 사물 인터넷(IoT), 블록체인, AI 등을 포함하는 자료에 기초한 혁신은 위와 같은 다중적이고 상호의존적인 도전을 다루는 데 지대한 잠재력을 갖는다. 현재, 건물, 자동차 및 사회기간시설 등에 장착한 정밀기기와 장치 등 다양한 원천에서 획득하는 각종의 자료는 방대한 규모로 늘어나고 있다. 스마트 시티를 위한 혁신을 촉진하는 데에는 이해관계당사자들 간의 협조와 공동협업에 의한 효과적인 자료의 수집, 공유 및 사용은 결정적인 역할을 할 수 있다. 물론, 개방적인 자료 접근성과 관리는 사회적인 혜택을 증진하는데 기여하지만, 다른 한편으로는 다양한 분야와 영역에 속한 이해관계당사자들은 각자 나름대로 상이한 이해관심과 동기가 있어서 자료의 공개나 교환을 쉽게 용납하지 못하는 수가 있다. 즉, 개방해도 좋은 자료와 지적 재산권이 걸린 자료 사이의 균형도 유지할 필요가 있는 것이다.

자료 공유를 지원하려면 질의 통제, 청소와 오류 제거, 그리고 여러 가지 표준 간의 상호동작 가능성 등 자료와 관련한 위험성이 여러 가지로 발생한다. 또한 안전성,

안전보호 및 사생활 보호 등 개인 정보를 포함한 민감한 자료의 수집, 공유, 그리고 사용에서도 심각한 위험성이 따른다. 따라서 이 분과에서는 스마트 시티의 자료 수집, 공유, 사용과 관련한 현재의 상황을 검토하는 이론 및 경험적 연구결과를 논의하고 혁신에 있어서 자료관리의 제도적 및 조직차원의 조처의 결과를 토론하였다. 여기서 핵심 관심사는 개인과 공동체에 미치는 위험을 최소화하고 동시에 혁신의 잠재력을 극대화하기 위한 이해당사자의 협업을 어떻게 추진하는가 하는 문제다. 따라서 이 분과에서는 아시아-태평양 지역의 학계, 기업부문, 정부 및 시민사회 부문 등의 참가자들이 지속가능한 스마트 시티를 위한 데이터에 관한 사회적 관심을 반영하는 데이터에 기초한 혁신을 위협하는 위험요소를 관리하는 전략적이고 정책지향적인 의미를 탐색하고자 하였다.

이 분과에서는 홍콩과기대 교수와 전지구적 환경문제 전략 전문 연구자 1명이 발표를 하고 토론이 있었다. [참고문헌: McLaren, Duncan & Julian Agyeman 2015. *Sharing Cities: A Case for Truly Smart and Sustainable Cities*. Cambridge, MA: MIT Press; Peris-Ortiz, Marta, Dag R. Bennett Yábar, & Diana Pérez-Bustamante 2016. *Sustainable Smart Cities: Creating Spaces for Technological, Social and Business Development*. London: Springer].

7. 전체회의 3: 코로나19 이후 세계를 위한 신속한 회복력 구축(2021. 6. 14. 월, 19:00시 한국시간)

이 전체회의의 주제는 본회의의 주제 중 하나인 “지식에서 실천으로”라는 구호를 실현하는데 있어서 신속한 회복력(resilience)이란 단순한 “제자리로 튀어 돌아오기”(bouncing back)에 그치는 것이 아니다. 이는 시스템의 가장 핵심적인 기능을 지속하기 위한 학습과 적응, 나아가 변화를 피할 용의가 있음을 의미한다. 우리는 인류에게 생명의 지원을 제공하는 지구라는 사회-생태적 시스템이 언제든지 신속하게 회복력을 찾기를 요청한다. 한편으로는, 현재의 경제적 모델과 소비의 모델 모두가 특히 한층 더 공평한 세계를 위해서는 지속가능하지 않음을 우리는 안다. 다른 한편, 현재의 인류가 전염병 대

유행에 대응하는 수많은 양식은 경제적으로 가능하면서 바람직한 변화가 대단히 급속도로 변할 수 있음을 보여준다. 신속한 학습과 적응이 필요한 이유가 바로 여기에 있다. 여기에서는 호주 대학의 교수 3명, 시스템 과학자, 기업 총수 및 벨몬트 포럼 상임이사가 연설하였다.

8. 장애를 가지고 지속가능한 세상에서 존엄과 함께 살아가기(2021. 6. 15. 월, 13:00시 한국시간)

거대하고 비인격화한 세상의 얼굴 없는 도시에서는, 사회적 서비스나 보건시스템 및 장애가 있는 사람들의 존엄을 무시하는 경험 등은 누구도 문제 삼거나 관심을 갖지 않는다. 물리적, 신체적, 심리적, 경제적, 그리고 환경적 장애물은 장애인으로 하여금 그들의 삶의 질적 향상을 증진하는 데 도움이 되는 새로운 기술, 교육, 의미 있는 고용 및 각종 발전의 결실에서 계속 배제하고 있다. 특별히 오늘날의 코로나 팬데믹 상황에서는 지속가능성에 초점을 맞추고 있는 전 지구적인 공동의 사회적 맥락에서는 장애를 가지고서 존엄을 느끼며 살 수 있는 가능성은 현실적으로 여러 가지 지속가능한 발전의 사유구도와 목표와 정책적 개입과는 심각하게 빗나가고 있다. 모든 사람들이 물리적인 환경과 인연을 맺으면서 자기네의 욕구를 충족시킬 수 있도록 할 만한 사회는 어차피 장애가 있는 10억명 세계 인구의 권리를 박탈하고 배제해야 하는 위험성을 지니게 되어 있다. 이 대목에서 우리는 지속가능한 발전이란 누구를 위한 것이며 장애인은 이런 지속가능한 세상에서 어떻게 존엄을 지키며 살 수 있는지를 물어야 한다. 이 90분의 패널 토론에서는 발표자와 다양한 배경의 참가자들이 장애가 있는 사람들이 존엄을 지키며 살 수 있는 지속가능한 삶에 방해가 되는 요소를 두고 발표하고, 토론하고, 그리고 해결책을 논의하였다. 여기에서는 호주의 대학 교수 4명과 도시교통전문가 1명, 기타 1인이 발표하였다.

9. 누구를 위한 기술인가?(2021. 6. 15. 월, 17:30시 한국시간)

지속가능성은 인류가 브룬트란트 보고서(Brundland Report: 전 노르웨이 수상 주제, 1987년 유엔환경위원

회 보고서), 2천년대 발전 목표(the Millennium Development Goals: 2000년 유엔 새천년 정상회의에서 2015년 목표로 천명한 8가지 목표) 및 지속가능한 발전 목표(The Sustainable Development Goals: SDGs: 2015년 유엔 총회에서 채택한 2030년 대비 발전 목표 17가지 항목) 등에 명기한 공정하고 정의로운 방법으로 지구가 제공하는 수단의 범위 안에서 살아갈 것을 필수 요건으로 삼는다. 이 같은 목표를 실현하기 위해 인간이 개입할 여지의 규모와 범위 그리고 발달한 기술의 중요성은 자주 강조를 하는데, 이러한 지속가능성에 이르는 길목의 장애는 엄청나게 복잡적이다. 기술이란 누구에게 자랑하기 위한 수단이 결코 아니며, 때로는 당면 문제를 심각하게 고려할 때 선택할 일차적 도구도 아니다. 지속가능성을 위한 기술의 개발과 적용을 하려면 적어도 기술이 과연 지속가능성이라는 영역에서 차지할 적절한 자리와 역할이 있는지를 먼저 물어보아야 한다. 만일 그렇다면, 그리고 기술이 주요 문제와 관련한 해답이 될 수 있다면, 지속가능한 발전 목표 달성을 신속히 이룰 수 있는 전략적으로 중요한 기술은 과연 어떤 것이며, 가장 큰 이득을 제공할 수 있는 최선단과 해결 공간은 무엇인지를 물어보아야 한다. 호주 미래지구와 퀴즈랜드기술대학은 이 분과를 주재하면서 이처럼 중요한 문제를 다루는 혁신가, 이용고객 및 지도자로서 경험과 배경을 가진 인사들을 참여시켰다. 이 분과의 발표자는 2명의 퀴즈랜드기술대학 교수 외에 3명의 이 분야 전문가와 시민사회단체 책임자다.

10. 미래 변동과 지속가능성을 위한 전략의 지표로서 과거의 전 지구적 변화(2021. 6. 15, 월, 18:00시 한국시간)

기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 1988년 설립)와 생물 다양성 및 생태계 서비스 관련 정부간 과학정책 협의기구(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES) 보고서에는 지난 한 세대 정도의 기간에 지구 체계에 일어난 전례가 없는 변동의 양상을 서술하고 있다. 그러나 기후와 삶의 조건에는 지구의 전 역사 속에서 계속 일어난 것이

다. 그러므로 변화의 정확한 시점을 명확히 지적하는 일과 인간이 기후와 지구 체계에 어떤 변형을 가하는지를 인식하는 일이 중요하다. 지질시대의 지구 고시대 연구는 수십년 전부터 기후변화의 위험성과 다중충격을 감소하기 위한 변동의 기준선(시발점), 변환점 및 상한선 등을 분명히 밝히는데 주목하여 왔다. 고시대 생태학과 고시대 지리학도 화재, 수로의 조건, 해양 생산성, 연안지대 안정성, 육상의 생물다양성 등에 관한 연구에서 유사한 접근을 취하고 있다. 물론 기후와 인간 활동의 다중적인 영향이 변화의 예측을 어렵게 하지만, 과거 변동의 장기적인 재구성으로 자연적이고 인간적인 원인을 풀어낼 수가 있다. 과거의 변천과 그것이 생태계와 인간사회에 미치는 충격의 연구는 잠재적인 미래의 변화와 그것이 삶의 조건에 주는 충격에 관한 통찰력을 제공할 수 있으며, 변천하는 경계선 상의 조건에서 신속한 회복의 역량과 변환에 관한 단서를 얻게도 하고, (전환치나 위험수준 등을 피하면서) 잠재하는 관심사와 안전한 작동 공간의 변환선을 명확히 하는 데 도움을 준다. 과거의 홍수나 화재의 제 조건; 과거 화재, 가뭄, 홍수, 화산 활동 등이 사회에 미친 영향; 지질 엔지니어링에 유사한 화산 폭발의 결과 등의 과거에 관한 정보가 미래 예측과 지속가능성에 어떻게 유용할지를 보여주는 많은 주요 보기 중의 일부에 해당한다. 그래서 이 분과에서는 이 같은 과거 변천이 미래 변화에 어떤 유효성이 있는지를 보여주는 구체적인 예를 환영한다고 선언하였고, 다음과 같은 주요 문제를 집중적으로 다루었다.

1. 어떤 고시대정보가 생태계와 사회에 주는 위험에 관한 정보를 잘 전달할 수 있는가?
2. 어떻게 이 같은 고시대 정보를 기업의 파트너들, 실무자들 그리고 정책입안자들이 쉽게 이해할 수 있는 자료로 전환할 수 있는가?
3. 고시대 정보를 다루는 시각에서 얻는 어떤 통찰을 의사결정 과정을 지원하는 데에 유용하게 활용할 수 있는가?

이 분과에는 호주의 3개 대학 교수 4명, 프랑스 그르노블대 교수 1명, 그리고 전문연구기관 책임자 1명이 발표하였다.

Ⅲ. 지속가능성 관련 교육과 사회과학 주제 분과

1. 미래에 내구력 있는 환경 교육: 정서적 회복력, 정신건강 및 기후 응급상황의 실천행동(2021. 6. 13, 일, 14:00시 한국시간)

이 분과의 목적은 크게 두 가지였다. 첫째는, 다음과 같은 현대사회의 네 가지 주요 영역(과학과 매체 독해력; 위기에 태연한 태도; 위기대처의 정신적 틀; 문제해결 사고방식 개발을 위한 미래예측 방법) 등을 둘러싸고 발생하는 긴장, 모순 및 기회를 밝히는 데 있어서 교육과 학습이 할 수 있는 중대한 역할을 탐색하는 것이다. 둘째는, 호주 여러 대학의 학생과 교육자의 경험과 ‘위기’ 관련 과목의 강의에 관한 그들의 반응을 점검하려는 것이다. 이 분과는 학생들을 위한 기후 관련 독해력, 매체 독해력, 위험성의 틀 구축하기 및 미래예측 방법 등을 개선하기 위해서 대학 수준의 교육의 핵심 주제를 연구하는 목적의 연구과제를 수행한 일군의 연구성과를 기초로 진행한 것이었다. 주최 측의 의도는 학생과 교수의 개인적이고 전문적인 활동을 지원할 수 있는 교육적인 전략을 공유하는 것이었다. 특히 기후 관련 분야의 학생과 교수의 ‘위기’ 상황의 정서적인 차원의 문제를 탐색하고 이 문제를 다루는 특수 용구(toolkit)를 제시하고자 함이었다.

이런 용구의 목적은: ‘기후 변화와 관련하여 발생하는 딜레마에 직면하여 정신적으로 건전하게 생존하기이고, 그 내용은 정서적 회복력, 정신건강 및 기타 딜레마에 대처하기 위하여 새로이 대두하는 아이디어를 정리한 실천 용구’이다. 학생들 사이에서 환경 관련 불행, 허무주의, 생태 관련 우울증, 그리고 기후 불안증 등이 점차 보편적으로 나타나고 있으므로, 교육자에게는 이런 학생들의 정서적 충격을 다루기 위한 지식과 자원이 필요하다. 이는 우선 다양한 학습 자원과 자료가 학생들의 주관적 수준에서 어떤 영향을 미치는지를 이해하는 데 중요하며, 우리의 미래 전문가, 시민 및 정치 지도자들의 이해 내용과 이런 문제에 대처하는 효능의 통합을 지원하는 교육적 전략의 개발에 유용하다. 이 분과에는 호주 시드니기술포럼의 교수 2명이 발제를 하고 토론을 진행하였다.

2. 초학문적 연구와 지속가능성 목표를 위한 대학의 대변환(2021. 6. 13, 일, 16:00시 한국시간)

본 분과에서는 오늘날 전 세계가 직면하는 중차대한 지속가능한 발전을 위한 도전에 대응하기 위하여 대학과 고등교육 기관이 어떻게 대변환(transformations)을 시도해야 할지를 탐색하는 문제를 주제로 다루었다. 대학은 특별히 연구와 교육에서 지속가능한 발전과 지속가능한 발전 목표에 필요한 사회적 대변환을 실현하는 일에 결정적인 역할을 하게 되어 있다. 그러한 도전의 복잡성을 제대로 파악하기 위한 새로운 종류의 연구와 수업이 필요하고, 교수요원과 졸업생들이 미래의 전문가 및 연구자로서 필수적인 정도와 범위의 대변환을 창출하는 데 기여할 역량을 구비하도록 훈련할 필요가 있다는 점에 관한 인식이 증대하고 있다. 특히, 학문분과의 경계를 초월하고 다양한 이해당사자들을 포괄하여 실제 세계의 실질적인 문제를 직접 다루는 초학문적 접근을 일정 정도 증진할 필요가 있다. 다만 이처럼 새로운 접근은 전통적인 대학의 구조와 과정 안에서 실행하기는 쉽지 않다. 주최 측은 우리의 대학이 이러한 막대한 사회적 대변환에서 일정한 역할을 하기 위해서는 스스로의 대변환을 시도해야 한다고 주장한다. 대학이란 원래 다양한 교육 기관으로서 아주 다기한 맥락에서 운영하고 있다. 이와 같은 대변환은 필연적으로 다양한 시발점과 다양한 종착점과 수많은 경로를 거치게 될 것이다. 따라서 이 분과에서는 이러한 대학 자체의 대변환의 경로에 관하여 상호 영감을 제공하고 격려하는 토론을 이끌어 가고자 하였다. 개략적인 발표, 의문시하기 어려운 사례연구, 그리고 광범위한 토론을 위한 충분한 시간을 배려하여 그 대변환과 대학이 취해야 할 다양한 경로 등을 탐색하였다. 이 분과에는 대학은 물론 기타 사회의 여러 실천가와 함께 이러한 경로와 시각을 공유하고 논의하였다. 여기 참여하는 동료들이 자신들의 영역에서 변화를 추진하고 지역과 전 지구적 연결망을 강화하는 데 자신들이 처한 상황과 상응하는 지혜를 얻어 갔다. 분과의 주제 발표자는 초학문적 접근 전문가 2명이었다.

3. 우리가 원하는 세상 만들기: 환경교육 사례연구 (2021. 6. 14, 월, 09:00시 한국시간)

전 지구적 사회가 전례 없는, 인간이 자아낸 환경과 사회적 도전에 직면하고 있다. 다양한 부문에서 대규모의 해결책을 탐색하고 있는 가운데, 특히 환경교육(Environmental Education, EE)은 문제 해결을 위한 집합적 역량을 구축하고, 체계적으로 사고하며, 여러 관련 부문과 지속가능한 발전 목표 사이의 가교 역할을 구성하는 일에 결정적인 역할을 할 수 있다. 이와 같은 목표는 대만의 환경보호청(the Environmental Protection Administration of Taiwan, EPA Taiwan), 미합중국 환경청(the United States Environmental Protection Agency, US, EPA), 그리고 북미주 환경교육학회(the North American Association for Environmental Education, NAAEE) 등이 공동으로 구성하여 운영하는 전지구적 환경교육 협업체(the Global Environmental Education Partnership, GEEP)의 핵심 목표 중 하나다. 이러한 공동 협의 모임에서 우리가 학습한 바에 의하면, 강력한 환경교육(EE)의 노력은 전 세계적으로 다양하지만, 이런 노력이 전 세계적인 학습과 공유의 이해를 증진하는 데 유용한 방식으로 공유를 하지 못하고 있다. 이 분과회의는 상기 GEEP의 사무처 격인 NAAEE가 운영을 맡아서, 지속가능한 발전 목표(SDGs)를 다룰 때 연구에 기초한 EE 접근법을 소개하고, 동시에 실천에 응용하는 이론을 예시하면서 비판적 사고와 문제 해결 역량을 구축하는 용구로서 전 세계의 개별사례 연구를 소개하였다. 특히 이 분과는 참여자들로 하여금 상호작용 형식으로 기후변화, 긍정적 청소년 발달, 생물다양성 및 순환적 경제 등의 주제를 다루는 데서 EE의 역할을 탐색하도록 하였다. 여기서는 사례연구에서 EE 분야 연구가 전달하는 내용이 무엇인지, 그리고 현실세계의 실제 사례들은 어떤 것인지를 토론하였다. 이런 모임에서 참가자들은 정의롭고 지속가능한 미래를 창조하는 일에서 자신들이 수행할 역할에 관한 새로운 기능역량과 더 진전한 미래를 습득하고 돌아갈 수 있다고 하였다. 이 모임에서는 상기 NAAEE의 국제문제 담당 책임자와 실무자, 미국 코넬대학의 연구원 및 일반 전문가 등 4명이 발제와 진행을 담당하여 운영하였다.

4. 지속가능한 발전 목표 달성에 유용한 교육에 있어서 기술공학적 혁신(2021. 6. 15, 화, 17:00시 한국 시간)

이 분과는 코로나19 팬데믹으로 인하여 망가진 현황 교육의 체제 문제에 대응하기 위하여 결성한 코로나19 교육 연대(COVID Education Alliance, COVIDEA)에서 그동안 진행해온 프로그램에 기초하여 앞으로 수행할 과제를 논의하기 위하여 조직한 것이다. 실은, 이러한 교육 체제는 지난 150년 동안 근본적인 변화를 이룩하지 못했으며 현재도 디지털 시대로 전이하는 데도 미치지 못하고 이번의 팬데믹과 같은 외적인 충격에 적절히 대응할 준비를 구비하는 데 실패하고 있다. 따라서 COVIDEA 교육연대는 전 세계의 정책입안자, 교육자, 그리고 학습자들이 쉽게 이해하고 접할 수 있는 디지털 용구와 관련 자원을 만드는 일을 추구한다. 그리하여 급격하게 변동하며 점증적으로 디지털화 하는 복합적이고 상호연결지어져 있는 세상에 적합한 교육 시스템의 변환을 도모하려는 것이다. 말하자면, COVIDEA 교육연대 식 접근의 핵심은 인류로 하여금 책임성 있고 실천적인 시민의 지식, 성품, 판단력, 회복력 및 사회의식을 길러 주고자 하는 일이다. 디지털 기술공학의 지원으로 개조한 교육 시스템이야말로 지속가능한 발전 목표와 기후변화 문제를 다루는 목표를 달성하고, 인류사회로 하여금 한층 더 지속가능하고 회복력 있고 공평한 발전의 틀로 전환하는 데 기여할 잠재력을 지닌다고 할 것이다. 이 분과의 목적은 이 COVIDEA 교육연대의 접근법에 관한 발표와 토론에 의해서 미래 교육의 구축에 기여할 수 있는 방법을 개선하고 그것이 제대로 작동할 수 있도록 더 많은 협력관계를 촉구하려는 목적을 지향하는 것이었다. 여기에는 이 방면의 전문가 4명이 발표하였고 그 중에는 국제과학이사회의 과학담당 책임자도 있었는데, 실은 이 분과는 바로 그 이사회가 후원한 것이었음을 밝힌다.

5. 문화: 지속가능성의 제4의 기둥(2021. 6. 14, 월, 17:30시 한국시간)

지금까지의 지속가능성 개념화의 핵심 요점은 경제, 사회 및 환경 문제의 고려라는 세 가지에 초점을 맞추어

왔다. 그러나 근자에는 점차 더 많은 논자들이 지속가능성 개념의 네번째 핵심 요점으로 문화를 포함시켜야 한다는 점을 촉구하기 시작하였다. 그러한 주장이 있었음에도 유엔의 지속가능한 발전 목표에는 여태껏 문화를 특정해서 항목으로 포함하지 않고 있다. 다만 특히 호주에서는 이 문화적 지속가능성이라는 개념에 관심이 점차 증대하고 있다. 이 분과는 학자, 연예인, 예술 관리자 등을 초치하여 왜 문화가 지속가능성의 제4 핵심 요점으로 인정해야 하는지를 포함해서 문화와 지속가능성 사이의 관련성을 탐색하기로 한 것이다. 이 분과는 현장의 음악 연주로 시작해서 문화와 지속가능성의 상관성을 주제로 패널 토론을 전개하였다. 특히 문화영역도 일종의 “생태계”로 인정하는 문제, 문화적 다양성이 왜 중요한지의 문제, 그리고 정부, 기업부문 및 시민단체(NGO) 등이 어떻게 문화적 지속가능성을 지원할 지의 문제 등을 논의하였다. 특히 이 분과는 호주의 퀸즈랜드대학교 미래지구 호주 지부가 주관하였다. 그리하여 퀸즈랜드대학 교수, 연극계와 오페라 단체의 대표 등 4명이 발표를 맡아 진행하였다.

6. 기타 지속가능성을 위한 대변환에 관한 사회과학적 시각: 생성중인 구도작성 과정과 접근방법(2021. 6. 14, 월, 18:00시 한국시간)

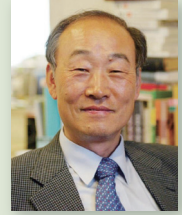
이 분과회의는 직전의 상기 문화 관련 회의와 시간적으로 겹쳤으므로 참여하지 못했으나 사회과학적 쟁점을 다루는 내용이 주된 관심사이므로 여기에 그 논의의 주요 주제만 소개한다. 참고로 이 내용은 *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol 49에 실렸다.

- (1) 지식의 공동생산과 지속가능성을 위한 대변환: 전지구적 연구 네트워크의 기획
- (2) 생물다양성 공학적 조정: 합성생물학의 국제적 관리, 유전자 조작, 자연보존을 위한 절멸 중지
- (3) 제조업에 있어서 지속가능한 전환: 지적 재산권의 역할
- (4) 지속가능성을 지향하는 사회기술적 대변환의 관리
- (5) 이동이 심한 세계에서 이민과 지속가능성의 역설
- (6) 지속가능성을 지향하는 대변환에 있어서 데이터의 역할: 비판적인 연구 어젠다
- (7) 자연보존을 넘어 대변환으로: 비판적 사회과학이 생물다양성 보존에 있어서 근본적인 새로운 어젠다

[학술교류]

제63차 국제통계학회(ISI) 학술대회 온라인 참가 보고서

朴聖炫 會員(통계학)



1. 머리말

2021년 7월 11일~16일 간에 걸쳐 네델란드에서 국제통계학회(ISI, International Statistical Institute)가 주최하는 제63차 2021 세계통계대회(WSC, World Statistics Congress 2021)가 열렸다. ISI는 국제과학이사회(ISC) 산하에 있고, 이번 대회의 주관기구는 ISC이나 사실상 ISI가 주최하는 대회이다. 본인은 학술원을 대표하여 본 대회에 온라인으로 참가하였다.

본 대회는 ISI가 설립된 1887년부터 시작되었으며, 제1차 대회는 이탈리아 로마에서 1887년에 열렸고, 그 후 격년으로 계속 열리고 있으며, 2차 대회는 파리(1889년), 3차 대회는 비엔나(1891년)에서 개최되었고, 한국 서울(2001년 8월 22일~29일)에서도 53차 대회가 열렸었다. 62차 대회는 말레이시아 칼라룸푸르(2019년)에서 열렸고, 올해 63차는 네델란드(암스테르담과 헤이그)가 중심이나 화상회의이므로 장소는 별 의미가 없음)에서, 그리고 64차 대회는 캐나다 오타와(2023년)에서 열릴 계획이다. 본인은 과거 통계학자로서 이들 ISI 대회에 10여 차례 참석한 적이 있으며, 매우 유익한 대회들이었다.

ISI 산하에는 다음과 같은 7개의 협회(association)가 있으며, 이들이 각각 기능을 발휘하면서, 이번과 같은 ISI 대회에는 모두 참가하여 큰 규모의 학술대회를 열었다.

- BS: Bernoulli Society
- IAOS: International Association for Official Statistics
- IASC: International Association for Statistical Computing
- IASE: International Association for Statistical Education

- IASS: International Association for Survey Statistics
- ISBIS: International Association for Business and Industrial Statistics
- TIES: The International Environmetrics Society

본인이 대회에 참가하는 목적은 화상으로 학술대회에 참여하여 되도록 많은 session에 참석하고, 열리는 session들의 동향을 파악하고 학술원에 보고하며, 우리나라의 학계에 어떤 도움이 될지를 탐색하는 것이었다. 이번 대회의 주제는 “더 나은 세계를 위한 통계와 데이터 과학(Statistics and Data Science for a Better World)”으로, 통계와 데이터 과학이 어떻게 더 나은 세계를 건설하기 위해 기여할 수 있는가를 토론하고 소통하고 건의하는 중요한 화상회의였다. 본 대회에서 다루려는 주요 연구 및 실무 분야는 다음과 같다.

- (1) 우리나라의 통계청과 같은 모든 국가의 중앙통계조직이 참여하여 더 나은 공식통계 작성을 위한 방법론 연구.
- (2) 우리나라의 한국통계학회(Korean Statistical Society)와 같은 모든 나라의 통계학회가 참여하며, 통계학의 이론 및 실무 적용 방법에 대한 연구.
- (3) 최근 4차 산업혁명의 주요 기술로 떠오르고 있는 데이터 기반의 빅데이터, 인공지능, 사물인터넷 등과 관련하여 이를 다루는 데이터 과학(data science)이 어떻게 발전하고 있으며, 그 역할이 무엇인지 연구.
- (4) 통계학과 데이터 과학이 인류의 더 나은 미래를 위하여 어떻게 기여할 수 있는지에 대한 전반적인 연구.

2. 학술대회의 주요 내용

엄중한 코로나 상황에서도 60여국에서 2,500여명이

온라인 참여하고 777편의 단일논문이나 연합논문(combined paper), 그리고 video 발표가 있었던 방대한 규모의 학술대회로, 본받을 만한 모범적인 온라인 학술대회였다. 연합논문이란 하나의 주제 아래 2-3개의 별개의 논문이 발표되어 묶어서 하나의 논문을 이룬 것을 말한다. 따라서 발표된 총 개별 논문의 수는 777편을 훨씬 상회한다. 본 온라인 학술대회는 7월 11일부터 16일 사이에 다음과 같이 진행되었다.

7월 11일 오후 1-3시 : 개회식(Opening Ceremony)과 환영식(Welcoming Reception) 개최: 한국시간은 11일 오후 9-11시. 한국과 네델란드는 8시간의 차이가 있음.

7월 12일 - 7월 16일 : 총 777개의 논문이 발표되고, 참석자의 수는 약 2,500명임. 이 중 특별초청논문 세션(SIPS, Special Invited Paper Session)에서 22개, 초청논문 세션(IPS, Invited Paper Session)에서 486개, 기여논문 세션(CPS, Contributed Paper Session)에서 210개, 포스터 세션(PS, Poster Session)에서 59개의 연합논문이 발표됨.

7월 16일 오후 4-5시 : 폐회식(Closing Ceremony) 열리며 대회가 종료됨.

모든 777개의 논문의 제목을 리스트할 수 없으므로 핵심이 되는 22개의 특별초청논문 세션의 이름을 낱짜별로 리스트하면 다음과 같다. 이 중 고딕체로 된 SIPS는 그 주요 내용을 뒤에 간단히 소개하였다. SIPS는 보통 90분으로 잡혀 있으며, 1-3명이 주제 강연을 하고, 다른 1-3명이 토론하고 질의 응답하는 형식으로 이루어지며, 이를 보통 연합논문 형식이라고 한다.

7월 11일

- 0. Opening and Welcoming Reception

7월 12일

- 1. SIPS 20: Ethel Newbold Award Lecture
- 2. SIPS 72: ASMBI(Applied Stochastic Models in

Business and Industry) Journal Session

- 3. SIPS 223: International Statistical Review Session

7월 13일

- 4. SIPS 226: IASS President's and Cochran-Hansen Prize Invited Session
- 5. SIPS 237: ISI Jan Tinbergen Awards Session
- 6. SIPS 73: Gosset Lecture
- 7. SIPS 222: Telling Truth with Scientific Data
- 8. SIPS 227: Recent statistical research and development on COVID-19
- 9. SIPS 235: ISI Founders of Statistics Prize Winner Presentation - Sponsored by Elsevier
- 10. SIPS 236: ISI Mahalanobis International Award Session in honour of Prof. Heleno Bolfarine.
- 11. SIPS 111: Taking statistics to school, How to nurture the development of young students' statistical reasoning
- 12. SIPS 221: BS Journal Special Invited Paper Session

7월 14일

- 13. SIPS 15: Bernoulli Presidential Invited Lecture
- 14. SIPS 217: Unintended Consequences of COVID-policy on Health and the Environment
- 15. SIPS 184: Effectiveness of the outreach of official statistics standards and guidelines, methodologies and recommendations to developing statistical systems

7월 15일

- 16. SIPS 230: Session of the IASE Journal - Statistics Education Reserch Journal(SERI)
- 17. SIPS 241: Insights and Observations from Leaders of Statistical Societies
- 18. SIPS 229: Measuring the Performance of National Statistical Systems

19. SIPS 94: Journal of Data Science, Statistics, and Visualization session

7월 16일

20. SIPS 238: IAOS and IBS Early Career Award Presentations

21. SIPS 224: Some Fun Applications of Text Analysis

22. SIPS 225: Issues with big amounts of data for survey statistics

참석으로 인한 주요 활동 내용은 개회식 및 폐회식을 비롯하여 많은 session들 중에서 본인이 관심이 있는 session들에 가급적 많이 참석하는 것이다. 본인은 개회식 이외에 session이 열리는 5일 동안(7월 12일부터 7월 16일까지) 하루에 4개 정도의 중요한 session에 참가하였으며, 총 20여개의 session에 참가하여 강연을 듣고 정리하였다. 참가한 모든 session의 내용을 여기에서 소개할 수 없으므로 대표적으로 특별논문 세션(SIPS) 22개 중에서 6개 session을 선택하여 이 참가기의 마지막 부분에서 그 상세내용을 기술하기로 한다.

3. 학술대회에 참가하는 방법

본 학술대회에 온라인으로 참여하려면 등록비를 내고 등록하여 참가자 자격이 있는 사람이 <그림 1>과 같은 Virtual Platform인 <https://virt-us.app/e/isi-world-statistics-congress/>에 들어가서, 오른쪽 상단에 보이는 Sessions, Resources, Exhibitors, View Abstracts, Network Chat, Delegates 중에서 자기가 원하는 곳에 들어가 강연이나 video를 듣거나 볼 수 있으며, 질의응답도 가능하다.



<그림 1> ISI WSC 2021에 온라인으로 참여하는 화면

Virtual Platform에 들어가면 매일 매일의 프로그램도 소개되며, SIPS, IPS, CPS 등에서 각 논문의 abstract도 볼 수 있으며, 자기가 원하는 논문을 경청할 수 있다. 이 논문들의 발표 모습이 ISI가 종료된지 한 달 동안 볼 수 있게 서비스되고 있다.

4. 발표의 주요 내용

SIPS는 상호 중복이 안 되도록 열리고 있으나, 그 외의 IPS, CPS 등은 동시다발적으로 7-8개 정도의 session이 열리므로, 이 중에서 관심이 있는 분야를 골라서 실시간으로 듣게 된다. 그러나 다른 session도 관심이 있으면 녹화되어 있으므로 뒤에 들어가 들을 수도 있게 시스템이 되어 있다. 777개의 발표된 논문 중에서 SIPS에 속해 있으면서 필자가 관심을 가지고 들어 본 것들은 개회식 이외에 다음의 6개 SIPS이며, 그 내용을 간단히 소개한다.

(0) Opening and Welcoming Reception (개회식 및 환영 리셉션), 7월 11일 오후 1-3시 (한국시간 7월 11일 오후 9-11시)

학술대회 행사에서 가장 중요한 'opening and welcoming reception'는 대회 첫째 날인 7월 11일 오후 1시(한국시간 오후 9시)부터 1시 45분까지 개회식이 진행되고, 그 후 오후 3시까지 환영 리셉션이 진행되었다. Jennifer Rogers 교수가 개회식의 사회를 보았고, 시작되면서 ISI의 John Bailer 회장의 개회사가 있었다. 그 후 네델란드 여왕 Maxima의 환영사를 사회자가 읽었다. 그 다음으로 통계국제상(The International Prize in Statistics)이 Nan Laird 교수에게 수여되었다. 그 다음으로 네델란드 통계청장인 Angelique Berg의 환영사가 있는 후에, WSC 2021의 Scientific Programme 위원장인 Nalini Ravishanker의 전반적인 프로그램 설명이 있었다. 그 후 간단한 여흥으로 현대 데이터 과학의 발전을 상징하는 'compilation video'을 보여주었다. 매우 흥미스러웠다.

오후 1시 45분부터 오후 3시까지 환영 리셉션이 있었는데, 비대면대회이므로 관심 분야를 9개(data science, official statistics, statistical education 등)로 나누어 참

가자가 원하는 관심 분야에 들어가 서로 화상으로 소개하고 친교를 나누는 시간이었다. 필자는 ‘data science’ 분야에 들어가 참가한 60여명과 함께 서로 만나고 환영하는 즐거운 시간을 가졌다. 재미있는 비대면 환영 리셉션으로 일종의 ‘networking reception’이라고 생각한다.

(1) SIPS 222: Telling Truth with Scientific Data (과학적 데이터로부터 진실을 얘기하기) (7월 13일 오전 11:00 - 12:30분)

이 세션의 사회는 Ayesha Ali이고, 발표자는 3인(Tilman Ruff, Kevin Lane, Lelys Bravo de Guenni)이고 토론자는 Elena Naumova였다. 이 세션에서는 지구상의 인류에게 심대한 영향을 주고 있는 기후변화, 인종갈등, 팬데믹(pandemic), 환경오염 등에 대한 데이터의 국가별 통계, 국제조직의 통계 등을 상호 공개하고 공동으로 사용하는 정보공유시스템이 중요하며, 이런 데이터의 신뢰성 확보는 모든 데이터 분석가들에게 매우 중요함이 강조되었다. Tilman Ruff 박사(1985년 노벨평화상 수상자)는 국제 보건 및 인도주의 조직이 생산하는 데이터의 신뢰성이 보건 및 인도주의에 대한 진실을 밝히는데 매우 중요함을 강조하였다. Kevin Lane 박사는 건강과 COVID-19 팬데믹 관련 데이터가 주는 사회적 및 환경적 영향에 대해 발표하였다. Lelys Bravo de Guenni 박사는 각 국가와 국제조직에서 발표되는 해양 관련 데이터로부터 해양건강지수의 신뢰성에 관한 논문을 발표하였다. 이들 발표자들은 과학적 데이터로부터 어떻게 진실을 밝혀내고, 데이터의 신뢰성이 매우 중요함을 지적하였다.

(2) SIPS 227: Recent statistical research and development on COVID-19 (COVID-19에 대한 최근 통계적 연구와 발전) (7월 13일 오후 2:00 - 3:30분)

이 세션의 사회는 Hao Zhang이고, 발표자는 3인으로 Justin Slater, Launa Ventura, William Palmer였다. 3인이 각각 발표하고 종합 토론하는 형식으로 진행되었다. 발표의 주요 내용은 다음과 같다. COVID-19이라는 글로벌 질병은 통계학자와 데이터 과학자들에게 이들의 영향력을 발휘할 수 있는 도전과 기회를 제공하고 있다.

지난 1년간 이 질병에 대한 새로운 통계적 모델, 방법론, 연구 결과들이 발표되고 전세계에 큰 영향을 주고 있는 COVID-19의 발생, 전파, 억제, 백신 개발 등에 대한 과학적이고 통계적인 분석 등이 다수 제안되었다. 이 세션에서는 COVID-19과 싸우기 위한 통계학자, 데이터 과학자들의 자세, 방법론, 통계적 모델 등에 대한 연구 결과가 발표되고 토론되었다.

(3) SIPS 111: Talking statistics to school: How to nurture the development of young students’s reasoning (학교에서 통계 강의하기: 젊은 학생들의 사고력 함양 방안) (7월 13일 오후 7:00 - 8:30분)

이 세션의 사회는 Joachim Engel이 맡고, 발표자는 Dani BenZvi 교수였다. 통계 교육을 담당하는 교사들이나 연구자들은 젊은 학생들(초, 중, 고등학교 학생)에게 통계를 이해하는 힘(literacy), 사고력(reasoning), 생각하는 방법(thinking)을 키워주는 것이 통계교육의 핵심이라고 말한다. 그러나 젊은 학생들은 통계가 배우기 어렵고 별로 즐거운 교육이 아니라고 흔히 말한다. 발표자들은 젊은이들에게 통계교육을 할 때 실 사회에서의 데이터를 활용하여 학생들이 이해하기 쉽도록 흥미를 유발한 후에 통계적 방법을 활용하여 정보를 창출하는 과정을 보여주는 것이 좋다고 제안한다. 또한 통계교육을 위해서는 교육적으로 그리고 기술적으로 잘 기획하고 설계하는 노력이 필요하며, 학생들에게 통계를 이해하는 힘, 사고력과 생각하는 방법 등을 함양해주는 것이 중요함을 강조하고 있다. 발표자들은 사례를 들어서 설명하고 있어 듣는 사람들에게 유익한 통계교육 시간이었다.

(4) SIPS 217: Unintended consequences of COVID-policy on health and the environment (건강과 환경에 대한 COVID-정책의 의도하지 않은 결과) (7월 14일 오후 1:00 - 2:30분)

이 세션의 사회자는 Ayesha Ali이고, 발표자는 3명으로 Elena Nauvova, Nathaniel Newlands, Patrick Brown이다. 발표자 세분이 20분 정도씩 발표하고 질의 응답을 받는 형식으로 진행되었다. 발표의 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다. 우선 2020년에 인류를 괴롭힌 COVID-19은 건강과 환경을 지키려는 각국의 COVID-

19 정책 노력을 벗어나 과거 전례가 없는 전파속도를 보였고, 인류에게 예측하기 어려운 여러 가지의 건강 위험(health risk)을 주었다. 발표자들은 COVID-19의 세계적인 전파가 건강과 음식 안보에 주는 의도하지 않은 결과를 살펴보고, 주요국들의 COVID-19 정책의 부족한 점들을 살펴보고, 보완할 점들을 지적하였다.

특히 Nauvova 교수는 잘못된 COVID-19 질병 예측 모델들을 지적하고, 이런 예측 모델에 근거한 COVID-19 정책의 부적절함을 지적하였다. Newlands 교수는 COVID-19이 주는 식량 안보에 유의할 것을 지적하면서, COVID-19이 식량 수급에 주는 영향 분석에 인공지능 기법을 활용할 것을 추천하였다. Brown 교수는 COVID-19 정책이 호흡기 건강에 주는 영향에 대해서 발표하면서, 각국이 COVID-19 대응 정책을 입안하고 시행하면서 통계와 올바른 통계적 분석법을 적극적으로 활용할 것을 제안하였다.

(5) SIPS 229: Measuring the performance of national statistical systems (국가통계제도의 성과 측정) (7월 15일 오후 6:00 - 7:30분)

이 세션의 사회자는 John Pullinger이고, 발표자는 Umar Serajuddin이며, 발표 후 참석자들과 질의응답과 토론의 형식으로 진행되었다. 발표의 주요 내용은 다음과 같다. 각국의 국가통계제도는 큰 도전에 직면해 있다. 왜냐하면, 빅데이터 등 데이터 생산방식에 혁신이 발생하면서 각국은 데이터의 품질과 신뢰성 문제가 발생하고, 이들 데이터로부터 의사결정을 어떻게 진행해야 하는지 등에 대하여 도전에 직면해 있기 때문이다. 세계은행(World Bank)은 각국의 국가통계제도의 성과를 측정하기 위해 통계성과지수(SPI, Statistical Performance Indicators)를 개발하였다. 발표자는 이 SPI를 설명하고, 장단점을 토론하는 시간을 가졌다.

각국의 국가통계제도는 그 나라의 성공적인 지배구조의 핵심이다. 국가통계제도는 근본적인 공공서비스 방법을 마련해 주고, 정부로 하여금 경제, 사회, 환경 등의 제반 문제에서 올바른 결정을 하도록 도와주고 있기 때문이다. 그러나 각국은 그 나라의 사정에 적합한 재정적, 인재적, 기술적 능력에 맞는 국가통계제도를 갖고 있는지 여부에 대하여 고민해야 한다. 특히 IT와 인공지

능 기법들이 발전하면서 국가통계제도를 어떻게 운영하면 좋은지 고찰해볼 시기이다. 최근 인류에게 큰 도전이 되고 있는 COVID-19 팬데믹은 이와 관련된 각종 통계를 효율적으로 생산하고 활용하기 위한 국가통계제도가 무엇인지 고민을 안겨주고 있다. 이 팬데믹에 대한 순발력 있고 신뢰할 수 있는 통계는 팬데믹을 극복하는데 매우 중요한 역할을 할 것이다. 각국이 그 나라의 사정에 적합한 국가통계제도를 만들어 나가는데 세계은행이 제안하고 있는 SPI가 도움이 될 것이다.

(6) SIPS 225: Issues with big amounts of data for survey statistics (조사통계에서 다량의 통계와 관련된 이슈들) (7월 16일 오후 2:00 - 3:30분)

이 세션의 사회자는 Danute Krapavickaite 박사이고, 발표자는 3인으로 Jean-Francois Beaumont, Anders Holmberg, Ashly Amaya였고, 토론자는 Frauke Krauter였다. 그 주요 발표 내용은 다음과 같다. 현대는 무한히 커지는 행정적인 데이터, 인터넷 거래 자료, 사회 미디어 관련 자료들로 인하여 정책 결정자들은 조사 대상 통계를 무엇으로 어떻게 잡을지 고민하고 있다. 공식통계를 만들 때에도 대상이 되는 통계에 대한 모집단 전수조사를 할지, 아니면 확률을 사용하는 표본조사를 해야 할지 망설이기 쉽다. 큰 규모의 빅데이터는 간혹 “큰 에러(big errors)”를 유발할 수 있음에도 유의해야 한다.

Amaya 박사는 1조 가구의 데이터를 가진 상업적 데이터베이스로부터 빅데이터 분석에 의하여 얻은 정보와, 이로부터 6,000 가구를 표본 조사하여 얻은 조사통계 결과를 비교할 때 표본 조사 결과가 더 정확한 추정치를 제공한 케이스를 들어 설명하였다. 즉, 모집단 전체를 전수 조사하여 얻은 통계 결과치는 간혹 모집단 자체의 구성 문제 등으로 인하여 더 부정확할 수 있음을 설명하였다. Beaumont 박사는 작은 지역 추정(small area estimation)에서 전수조사 방식과 표본 조사 방식을 병행하여 상호 보완하는 것이 좋을 수 있음을 강조하였다. Holmberg 박사는 빅데이터 분석을 할 때 다른 창의적인 방법을 제안하여 흥미를 끌었다. 마지막으로 토론자 Krauter는 세션에서 발표된 3인의 발표 내용을 요약하고 장단점을 설명하였다.

5. 학술대회 온라인 참가 소감

대한민국 학술원은 국제과학이사회(ISC, International Science Council)의 회원으로, 이번에 ISC의 산하기관인 국제통계학회(ISI, International Statistical Institute)가 주최한 63차 세계통계대회(WSC, World Statistics Congress 2021, 2021년 7월 11-16일 간 네덜란드에서 열림)에 필자는 학술원을 대표하여 온라인으로 참가하게 되었다. 이 대회를 참가하고 나서 느낀 소감을 정리하면 다음과 같다.

(1) 코로나 상황에서도 행해진 방대한 규모의 학술대회

이 학술대회의 규모가 60여 개국에서 2,500여 명이 전 세계적인 코로나 상황에서도 온라인으로 참여하였고, 777개의 세션에서 이루어져 방대한 규모였다. 한 세션에서는 한 명이 주제강연을 하고 여러 명이 토론할 수도 있고, 여러 명(보통 2-3명)이 주제 발표를 하고 소수(1-2명)가 토론할 수도 있다. Session이 많아서 동시다발적으로 열려 여러 개 중에서 하나를 골라 시청해야 하였으나, 못 듣는 session들은 녹음이 되어 있어 필요하면 나중에 온라인으로 들어가 시청할 수 있어, 매우 편리하게 관리되고 운영된 대회였다. 온라인 학술대회의 새로운 면모를 보았다.

(2) 통계학이나 데이터 과학 분야에 학술원 회원이 적은 것에 대한 아쉬움

이 학술대회의 내용을 상당 부분 이해할 수 있는 전공 분야는 통계학, 데이터 과학, 계량경제학, 조사통계를 다루는 사회학 등이다. 그러나 우리 학술원에는 전체 회원수가 적은 관계로 이들 분야에 전공하신 회원이 적다. 학술대회의 내용이 좋았으므로 필자 이외에 1-2명이 더 참석하면 좋았을 것이다. 필자는 통계학 전공이고 데이터 과학에 관심이 많으므로 참가가 적절하였으나 같이 참석하는 학술원 동료 회원이 있었으면 더 좋았을 것으로 생각한다.

(3) 데이터 과학의 무한한 발전 가능성

이번 학술대회의 주제가 'Statistics and Data Science

for a Better World, 더 나은 세계를 위한 통계와 데이터 과학'으로, 더 나은 세계를 구축하기 위한 통계학과 데이터 과학의 역할을 알아보는 학술대회였다. 이 대회 참여를 통해서 새삼 느끼는 것은 데이터 과학이 인류를 괴롭히고 있는 COVID-19 팬데믹, 기후변화, 에너지 부족 등을 극복하기 위한 기간 학문으로도 활용될 수 있으며, 그 발전 역량이 무한하다는 것이다. 이런 측면에서 서울대에 설치된 데이터사이언스 대학원의 발전을 바란다.

4차 산업혁명이 우리 주위에 자리 잡으면서 우리 사회에 많은 빅데이터가 양산되고 있으며, 이들 빅데이터의 수집, 저장, 활용 등이 우리 사회의 중요한 문제로 부상하고 있다. 이런 빅데이터의 활용 효율성을 증대시키기 위한 통계학의 발전, 데이터 과학의 발전은 매우 중요한 국가적 과제이다. 우리나라도 국가통계제도의 효율성 제고, 공식통계의 공개, 빅데이터의 관리 등에서 선진국 수준으로 향상되어 4차 산업혁명 시대에 한국이 진정한 선진국이 되기를 기원한다.

(4) 온라인 화상회의의 발전 가능성

이번 학술대회의 규모가 방대하였으나 매우 효율적으로 진행되어 참가자로서 전혀 불만이 없었다. 직접 발표자를 만나볼 수 없어 아쉬움도 있었으나, 좋은 점은 777개의 session이 있음에도 불구하고 시간이 있으면 모든 session에 참가할 수 있다는 점이다. ISI WSC는 종료 후 한 달 동안 참가자들에게 모든 session을 그대로 open하여 녹화된 내용을 시청할 수 있도록 조치했다. 이러한 방대한 규모의 학술대회가 온라인으로도 잘 진행될 수 있음을 보고, 향후 코로나가 극복되더라도 이런 방식의 학술대회가 열릴 것으로 생각되며, 우리나라도 배울 필요가 있을 것으로 판단된다.

(5) 차기 COSPAR 학술대회 참가

이번 학술대회는 ISC(국제과학이사회) 산하의 조직인 ISI(국제통계학회)에서 연 63차 대회로, 2년에 한 번씩 열린다. 우리 학술원도 ISC 산하의 각종 조직의 국제적 학술대회에 적극적으로 참여하면 좋을 것이다. 2년 후 캐나다 오타와에서 열리는 차기 64차 ISI WSC 회의에도 학술원 회원이 참여하기를 희망한다.🌐

[학술원상 수상자기고]

FDM 방식의 3D프린터를 위한 블록 구조의 내부지지대 생성 알고리즘

李建雨¹⁾ 特任教授(국민대학교) · 李柱聖²⁾(삼성전자)

초록

이 원고는 학술원상 수상 대표 논문으로 2017년 International Journal of Advanced Manufacturing Technology에 실린 논문을 요점 정리한 것이다. 그 내용은 3D printing 시 입체 내부를 다 채우지 않으면서도 강도를 유지할 수 있도록 내부 형상을 자동으로 모델링 해 주는 기능을 제시한 것으로, 기존의 단순한 2차원 형상을 적층 방향으로 sweeping 해 가는 방식에 비해 적층 속도나 재료 사용을 획기적으로 줄였다는데 그 의미가 있다고 하겠다. 좀 더 구체적으로 설명하면, 프린팅 하고자 하는 형상의 내부를 self printing이 가능한 orientation을 갖는 작은 크기의 정육면체(voxel)의 집합으로 변환한 후 이들을 합쳐서 전체 공간을 다면체의 집합으로 바꾸고, 이들 다면체의 경계면이 입체 내부에 존재하는 지지대가 되도록 하는 방법이다. voxel을 합치는 방법은 많겠으나, 합쳐진 후의 형상이 self printable하고 또 합쳐진 다면체 간의 경계면의 면적의 합이 최소가 되도록 구현하여 최소의 재료 사용량을 보장하도록 하였다. 본 논문에서 제시한 방법에 의하면 만들고자 하는 입체의 외부 경계면 근처에서는 많은 지지대가 생기고 내부에는 성긴 지지대가 생겨 적층시간이나 재료의 사용면에서 획기적인 장점이 있다.

I. 서론

우선 논문의 구체적 내용 설명에 앞서 일반 독자를 위해 3D 프린팅의 개괄적인 소개로 시작하겠다. 3D 프린

팅은 3차원 모델 데이터로부터 복잡한 형상을 구조물을 만들어내기 위해 사용하는 적층 제조(AM, additive manufacturing) 공법을 말한다. 이 공정은 재료를 한 층씩 순차적으로 쌓아 올리면서 부품을 제조하는 방법으로서, 1986년 Charles Hull에 의해 광조형(SLA, stereolithography) 공정이 최초로 개발되었고, 그 후 FDM, 잉크젯프린팅(inkjet printing) 및 SLS(Selective Laser Sintering) 공정 등이 계속적으로 개발되었다. 이 중 FDM방식은 wire 형태의 플라스틱 재료가 노즐을 통하여 액체로 떨어지면서 형상을 쌓아가는 방식으로, 저가의 재료와 기계 구조의 단순함으로 인해 널리 사용되고 있다.^{참1}

FDM 방식을 이용하여 제품을 제작할 때, 출력물은 크게 3가지로 나눌 수 있는데, 스킨과, 서포트라고 불리는 아웃터 서포트, 인필이라고 불리는 인너 서포트(내부 지지대)로 구분할 수 있다. 스킨은 출력하려는 물체의 외형을 표현하는 부분이다. 아웃터 서포트를 설명하기 전에 layered angle에 대해서 설명하겠다.

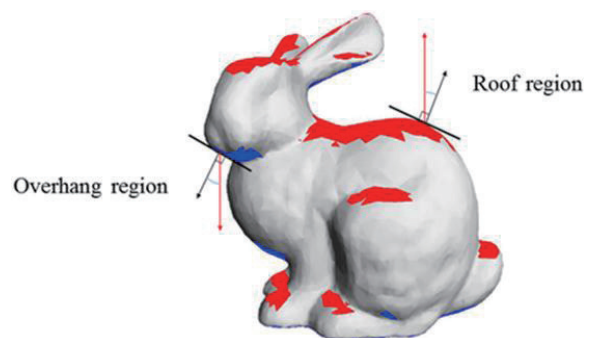


그림 1. Roof region, overhang region, layered angle 예시

1) 제66회 대한민국학술원상 자연과학응용 부문 수상자
2) 삼성전자 DS DIT센터 물류자동화그룹 Staff Engineer(책임)

한층 한층 쌓아올리는 3D 프린팅의 특성상, 현재 적층하는 레이어의 직전 레이어에 형상이 없다면 안정적으로 적층을 할 수가 없다. 적층할 수 없는 영역은 layered angle이라는 값을 통해 얻어내는데, 그림1에서와 같이 face의 법선과 적층 방향이 이루는 각도의 절대값을 layered angle이라고 한다. 3D 프린터의 하드웨어 스펙에 따라 다르지만 일반적으로 layered angle이 45도 이하이면 안정적으로 적층할 수 없다고 한다.

이렇게 적층할 수 없는 영역을 물체의 외부에서 지지하면 outer support 혹은 support 라고 부른다. 이와 반대로 물체의 내부에서 지지하면, 이 영역을 roof 영역이라고 하고 이 지지 구조를 inner support 혹은 infill이라고 한다. 만들고자 하는 형상의 내부를 꽉 채운다면 infill이 필요 없겠지만 재료의 낭비를 막고 또 프린팅 시간을 줄이려면 내부를 infill 구조로 채우는 것이 훨씬 유리할 것이다. 따라서 전체 형상은 껍데기에 해당하는 skin 과 이 skin의 overhang 영역을 밖에서 지지하는 support, 그리고 skin의 roof 영역을 내부에서 지지하는 infill로 구성되고, 이 세 개의 구조물을 프린팅해야 하는 것이다. 이들 세 개의 구조물을 프린팅 하는데 걸리는 시간을 비교해 보면 총 프린팅 시간의 50% 정도가 infill을

프린팅 하는데 걸리는 것으로 알려져 있다. 따라서 FDM 방식의 단점인 느린 제작 시간을 극복하기 위해서, 또 재료 사용량을 줄이기 위해서는 효율적으로 infill을 설계해야 한다.

인필 구조로 가장 널리 쓰이는 방법이 2차원의 패턴 방식이다. 즉 그림2에서와 같이 동일한 2차원 패턴을 반복적으로 쌓아 올리는 방식이다. 이 방법은 단순하여 infill을 생성하기가 쉽고, 적층 방향으로 동일하게 쌓아 올리기 때문에 인필 구조를 생성하다가 무너지는 일이 발생하지 않는 장점이 있다. 이를 self-supporting 조건이라고 정의하겠다.

하지만 2차원 패턴 방법은 물체의 형상을 고려하지 않고 균일하게 생성하기 때문에 재료 사용면이나 적층 속도 면에서 비효율적인 면이 있다. 또한 동일한 패턴을 한 방향으로 적층하기 때문에 skin이 외부에서 하중을 받을 때 적층 방향의 하중에는 강하지만 다른 방향에는 취약할 수가 있다.

이 외에도 흔히 사용하는 방법으로 그림3에 보이는 것과 같이 물체의 내부에 트러스 구조와 유사한 skin-

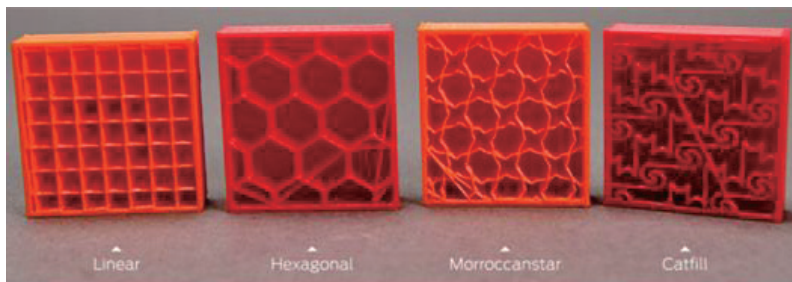


그림 2. 흔히 사용되는 단순한 infill의 형태 (적층 방향이 지면에 수직임)



그림 3. Skin-frame을 이용한 infill 생성의 예 (왼쪽 두 그림은 내부 구조를 보이기 위해 스킨을 생성하지 않은 모습임)

frame이라는 구조를 만드는 방식이 있다.^{4,2} 최소의 재료를 사용하여 가볍고 튼튼하게 skin을 지지해 주지만 내부 구조물이 self-supporting 조건을 만족시킬 수 없는 경우가 생기고 원형의 적층 경로를 사용해서 적층 시간이 오래 걸리는 문제가 있다.

이러한 기존 방식의 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 조건을 만족하는 infill 생성 방법을 제안하였다. 첫 번째로 출력하려는 형상을 고려하여 사용 목적에 맞는 최소한의 양으로 infill이 생성되어야 한다. 두 번째로 roof 영역에 대해 특정 밀도 이상을 유지하여 출력물의 적층 가능성을 보장할 수 있어야 한다. 세 번째로 생성되는 인필 구조가 스스로 안정적으로 적층 가능해야 한다. 이를 self-supporting 조건이라 하겠다. 네 번째로 인필의 tool-path는 단순한 선으로 구성되어야 FDM에서 제작시간을 감소시킬 수 있다. 마지막으로 생성된 infill은 하중에 대해서 등방성 특징을 가져야 한다.

다음 장에서는 이 조건들을 모두 만족시키도록 본 연구에서 제안한 infill 생성 방법을 소개하겠다.

II. 제안한 infill 생성 방법

본 연구에서 제안하는 infill 생성을 위한 전체 프로세스를 간략히 설명하겠다. 이해를 돕기 위해서 2차원과 3차원의 예를 병행해서 사용하도록 하겠다.

첫 번째 단계로 출력하려는 형상을 3개의 평면으로 분할하여 단위 블록들을 얻어낸다. 일반적으로 서로 직교하는 3개의 평면을 이용하여 물체를 분할하면 그림4(a)와 같이 분할될 것이다. 이때 블록 사이 접촉면이 infill 구조이므로, 이를 적층하려고 하면 infill 구조에 roof 영역이 존재하여 self-supporting 조건을 만족하지 못하게 된다.

이를 해결하기 위해서 그림4(b)에 보인 것과 같이 서로 직교하는 평면을 약간 회전시켜, 각 단면의 적층 각도를 self-supporting이 되는 각도로 해줄 수 있다.

두 번째 단계로 roof 영역을 포함하는 단위 블록을 제외하고 물체 내부에 존재하는 유닛 블록들을 모두 병합

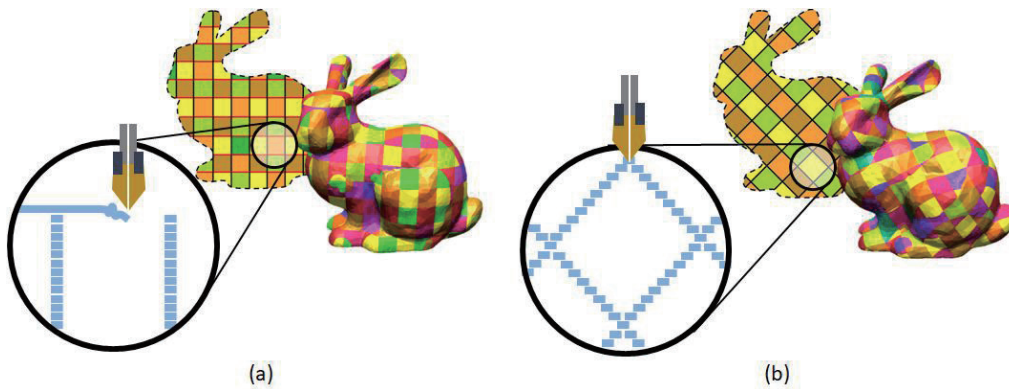


그림 4. Self supporting이 가능한 육면체로 내부 공간의 분할

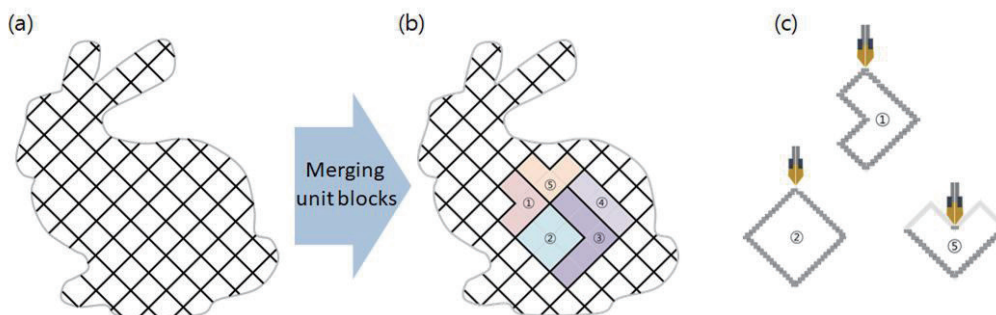


그림 5. 단위 블록의 합병

한다. 단순히 3개의 평면을 이용하면 오히려 블록 사이의 접촉면이 증가하여 infill이 증가하게 된다. infill은 블록 사이의 접촉면에 생성되므로 단위 블록을 병합하여 접촉면을 제거하면 infill의 양이 줄어든다. 그림5(b)와 같이 유닛블록들을 병합했을 때의 결과는 매우 다양하다. 하지만 모든 경우에 병합 결과가 적층이 가능한 것은 아니다. 예를 들어 1,2와 같은 병합 결과는 적층이 가능하지만 5번과 같은 병합의 결과는 적층 도중에 적층이 불가능한 지점이 발생한다. 이 점을 roof point라고 하겠다.

마지막 단계로 병합된 블록 내에 존재하는 적층할 수 없는 지점, 즉 roof point들을 찾아 이들을 제거하기 위해서 병합된 블록을 루프 포인트를 지나는 평면으로 분할한다. 평면으로 분할할 경우, 병합된 블록이 단순한 단면을 가지게 되고 simple-path 조건을 만족하게 된다. 또한 분할되는 순간, 인필 구조가 생성되어 그 roof point는 더이상 지지할 수 없는 지점이 아니게 된다.

앞에 설명한 전 과정을 그림6에 도시하였다. 그림6(b)는 self supportable한 단위 블록으로 분할한 결과를 보이고, (c)는 외부 경계면 인근의 단위 블록을 제외하고 내부 단위 블록들이 합병된 결과를 보이고, (d)는 (c)의 결과에서 roof point에서 병합된 블록들을 다시 분할하여 roof point가 제거된 결과를 보이고 있다. roof point

에서 블록을 분할하는 방법은 여러 가지가 가능하나 기본적으로 분할 후 생성되는 infill 면이 작아지는 방법을 선택하도록 하였다.^{참3,4}

단위 블록을 병합하는 방법에 따라서 다양한 목적의 infill 구조를 생성할 수 있다.

특정 단위 블록을 병합 단계에서 제외시킴으로써 해당 영역의 infill의 밀도를 증가시킬 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 세 가지 병합 방법을 고안하였고 편의상 이를 M1, M2, M3라고 지칭하였다. 빠른 제작을 위해 루프 영역을 포함하는 단위 블록을 제외시키면 M1, 여기에 물체 전체의 강도 보강 효과를 위해 물체의 외곽에 존재하는 단위 블록까지 제외시키는 M2, 물체의 특정 영역의 강도를 보강하기 위해서 그 부위를 제외하는 M3 방법으로 분류하였다.

III. 결과

그림7에 보이는 다양한 형상에 대해 본 연구에서 제시한 방법으로 infill을 생성하였고, 그때의 재료 사용량과 적층 시간을 단순한 grid pattern을 사용했을 때와 비교하여 그림7에 나타내었다. 제시한 방법 M1, M2 모두 단순 grid pattern에 비해 재료 사용량이나 적층시간 면에서 월등함을 보이고 있다.🌀

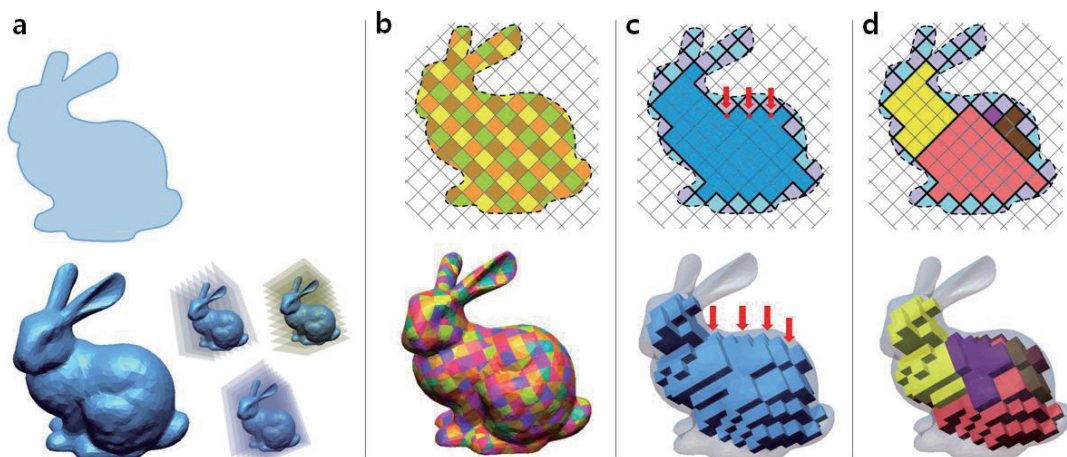


그림 6. 전체 병합 및 분할 과정의 예시

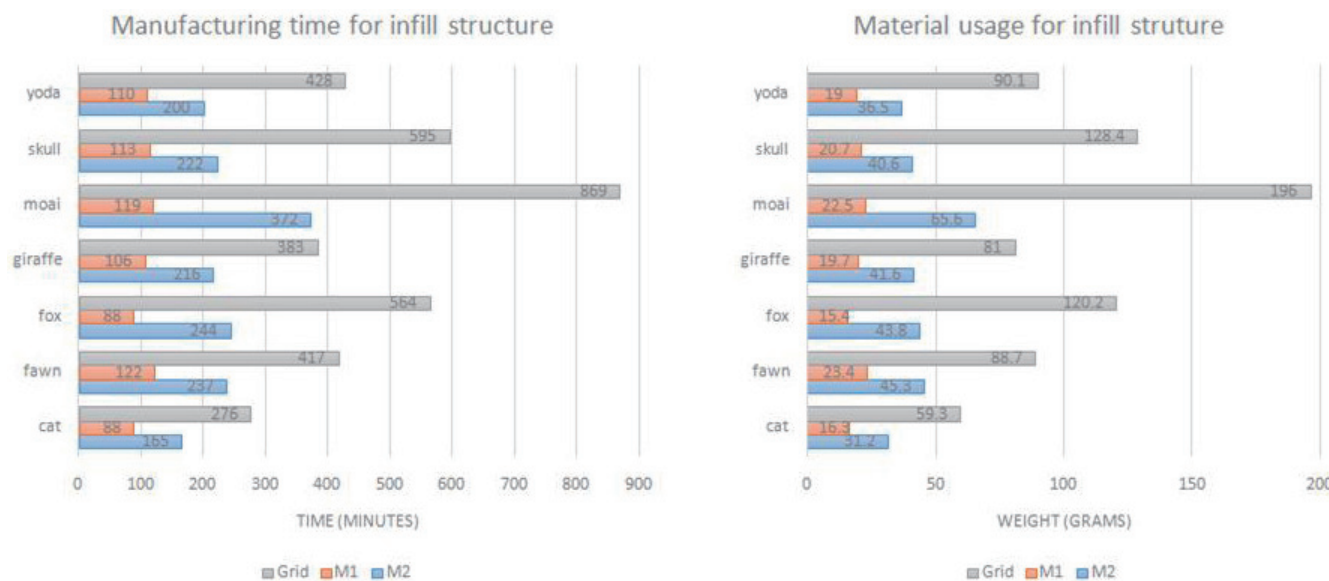
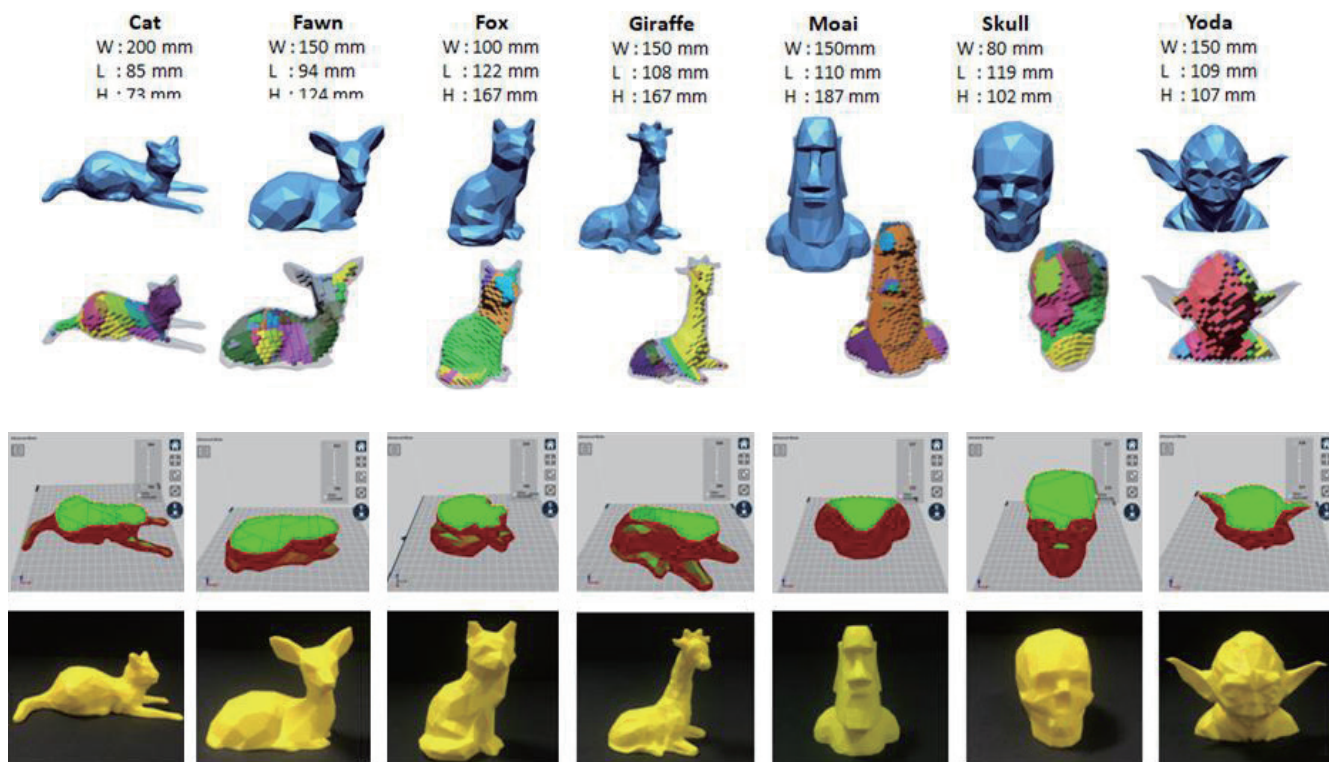


그림 7. 다양한 모델에 대해 grid pattern에 대한 재료사용량과 적층시간의 비교

참고문헌

1. 나덕주 3D 프린팅 기술의 현황과 미래 전망 <https://scienceon.kisti.re.kr> > srch > selectPORSrch Report, 2019
2. Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, X., Chen, B. Build-to-last: strength to weight 3D printed objects, ACM Transactions on Graphics, 33(4), 1997
3. Jusung Lee, Optimal generation of inner support structure for FDM type 3D printer, PhD thesis, Seoul National University, 2017
4. Junsung Lee and Kunwoo Lee, Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling, Int J Adv Manuf Technol 89: 2151-2163, 2017

[학술원상 수상자기고]

통증의 신경생물학적 이해: 통증의 정체와 치료



吳碩培* 教授(서울대학교)

우리나라도 고령화 사회로 접어들면서 통증을 호소하는 환자들은 매우 증가하고 있고, 통증 환자 중 반 이상이 난치성 만성 통증으로 이행되고 있는 것으로 보고되고 있으나, 많은 경우에 통증을 질환으로 간주하여 그 자체를 치료하기보다는 단지 환자가 겪고 있는 다른 기저 질환의 증상으로서 대증적으로 진통제가 처방되는 경우가 허다하다. 미국에서는 만성 통증 환자들에게 마약성 진통제가 많이 처방되어 해마다 5만 명 이상이 마약성 진통제의 오남용으로 사망하고 있을 정도이며, 이에 미 행정부에서는 2017년 오피오이드 위기 (opioid crisis)를 선언하여 (<https://www.hhs.gov/opioids/about-the-epidemic/index.html>) 마약성 진통제를 대체할 수 있는 신약이나 치료방법 개발에 막대한 연구비를 투입하고 있으나 전 세계적으로 여전히 통증을 제대로 치료하지 못하고 있는 것이 현실이다. 이와 같은 상황에서 올해 노벨 생리의학상에 최초의 통증 수용체인 TRPV1 이온 통로를 발견한 미국 샌프란시스코 소재 UCSF의 데이비드 줄리어스와 기계적인 자극에 의한 촉각 뿐만 아니라 통증에도 관여하는 것으로 확인되고 있는 Piezo 이온 통로를 발견한 미국 라호야 소재 Scripps 연구소의 아템 파타푸티언이 공동 수상하였다 (<https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2021/press-release>)는 사실은 시사하는 바가 매우 크다고 볼 수 있다.

본 연구자는 지난 30여 년간 통증 연구를 수행해 오면서 통증에 대한 신경생물학적 정체를 파악하고자 하였고, 그 이해를 바탕으로 통증을 치료할 수 있는 방법을 찾아내기 위해 노력해 왔다. 이 글에서는 신경과학이 현재까지 알아낸 ‘통증의 정체’와 통증 신경전달 경로의 특이적 신호를 표적으로 하는 통증 치료방법에 대해서 간략하게 논의하면서 본 연구자의 연구 성과를 함께 소개

하고자 한다.

1. 통증의 생물학적 정체: 통각 수용체의 발견

1997년 10월 Nature 지에 최초의 통증 수용체이자 온도 수용체인 TRPV1이 발견되었다는 미국 UCSF 데이비드 줄리어스 교수의 논문이 실렸다. TRPV1은 고추의 매운맛을 내는 캡사이신에 의해서도 활성화되는 이온 통로로 통증을 전달하는 감각 신경세포들에 존재하는 것으로 확인되었고, 이후 TRPV1이 결핍된 형질전환 쥐를 만들어 확인한 결과 뜨거운 온도(열)를 감지할 뿐만 아니라 열 자극에 의해 발생하는 통증을 감지하는 통증 수용체라는 것이 밝혀졌다. 많은 사람들이 경험하는 듯이 고추를 먹게 되면 입안에서 매운맛 뿐만 아니라 작열감을 느끼게 되는데, 이는 캡사이신이 입안 점막 아래의 감각신경 말단에 존재하는 TRPV1에 작용하기 때문이며, 특이한 점은 TRPV1이 캡사이신 뿐만 아니라 섭씨 43C 이상의 온도 자극에 의해서도 활성화되어 우리 몸에 가해지는 열 자극을 감지하는 수용체로 작용한다는 사실이었다. 우리 몸은 TRPV1이 말초 감각신경 말단에 발현되어 있기 때문에 외부에서 가해지는 유해한 자극 (예, 열 자극)을 바로 통증으로 감지할 수 있고 그에 따른 반사작용으로 유해 환경에서 회피할 수 있어, TRPV1과 같은 통각 수용체는 우리 몸에서 경고등 (alarm)의 역할을 담당하고 있다. 따라서, 이 TRPV1의 발견은 통증 연구에 있어 가장 획기적인 발견이었다. 그 다음으로 통증 연구자들이 관심을 가졌던 것은 우리 몸이 어떻게 기계적인 자극에 반응하는가 하는 문제였다. 일정 범위를 벗어난 온도 자극이 통증을 유발하듯이, 촉각의 범주를 벗어나는 강한 기계적인 자극도 통증을 유발한다. 따라서, 연구자

* 제66회 대한민국학술원상 자연과학응용 부문 수상자

들은 온도 자극이 TRP 이온 통로에 의해 감지되는 것처럼, 기계적인 자극을 감지하는 이온 통로가 존재할 것으로 생각하였는데, 2010년 아템 파타푸티언은 TRP 이온 통로와는 전혀 다른 종류인 기계적 자극에 의해 활성화되는 이온 통로인 Piezo를 발견하여 보고하였다. 이어서 Piezo2가 우리 몸에서 촉각을 매개하는 수용체라는 것을 알아내었고, 고유수용성 수용체로서 작용한다는 사실도 규명하였다. 앞서 말했듯이 이 두 연구자는 2021년도 노벨 생리의학상을 수상하였다.

2002년에 서울대학교 치의학 대학원 교수에 임용된 본 연구자는 첫 연구주제로 ‘치통 발생의 세포 분자 기전’을 연구했다. TRPV1이 발견되고 나서 다른 온도 수용체들이 발굴되고 있던 시기였기 때문에, 이와 같은 온도 민감성 이온 통로들이 치아에 와 있는 신경 말단에도 존재하여 치통을 매개할 것이라는 가설 아래 연구를 진행하였다. 흰쥐의 치아에 와 있는 신경세포를 배양하여 차가운 온도와 뜨거운 온도로 자극하여 치아에 와 있는 신경세포가 온도 자극에 반응하여 신경 활성이 생기는 것을 알아내었다. 마찬가지로 캡사이신이나 멘톨(박하) 등을 적용했을 때도 같은 신경세포가 반응을 보였고 해당 신경세포에는 TRPV1이나 TRPM8 등이 발견되어 있는 것을 확인하여, 치아가 왜 온도에 예민하게 반응하여 통증을

느끼는지를 세포 및 분자 수준에서 파악할 수 있었다 (그림 1).

치아는 이가 닳아 상아질이 노출되면 온도 자극에 매우 민감할 뿐만 아니라, 칫솔이 닿거나 치과에서 치료를 받을 때 기구나 바람이 닿으면 갑자기 치통을 느끼게 된다. 따라서 Piezo2가 발견된 이후 나는 Piezo2가 치통에도 관여할 가능성이 있다고 생각하였다. 연구 결과, 흥미롭게도 치아 신경세포에 Piezo2 현저히 많이 발현되어 기계적인 자극에 의해 활성화된다는 관찰할 수 있었고, Piezo2가 치아에 와있는 신경 말단에 존재하여 치아에 가해지는 기계적인 자극에 반응하여 통증을 전달할 수 있다는 사실을 규명하였다 (그림 1).

사실 2002년 교수로 임용된 후 첫 번째 연구과제가 치통이었고 치통을 매개하는 수용체이자 이온 통로를 발견하겠다는 것이 연구목표 중에 하나였기 때문에 한편으로는 아템 파타푸티언의 Piezo2 발견에 아쉬움을 가지게 된다. 현재는 단일세포 RNA 염기서열 읽기 (single-cell RNAseq)의 방법으로 치아에 존재하는 새로운 기계적인 수용체를 발굴하는 작업도 진행해 나가고 있다. 이 외에도 본 연구자는 앞서 언급했던 노벨상 수상자들의 접근과는 달리 피부 아래의 말초신경 말단 수용체가 아니라, 중추신경계에 존재하는 TRPV1에 관심을 두고 연구하여 TRPV1이 열 통증 뿐만 아니라 신경 손상 후에 발생하는

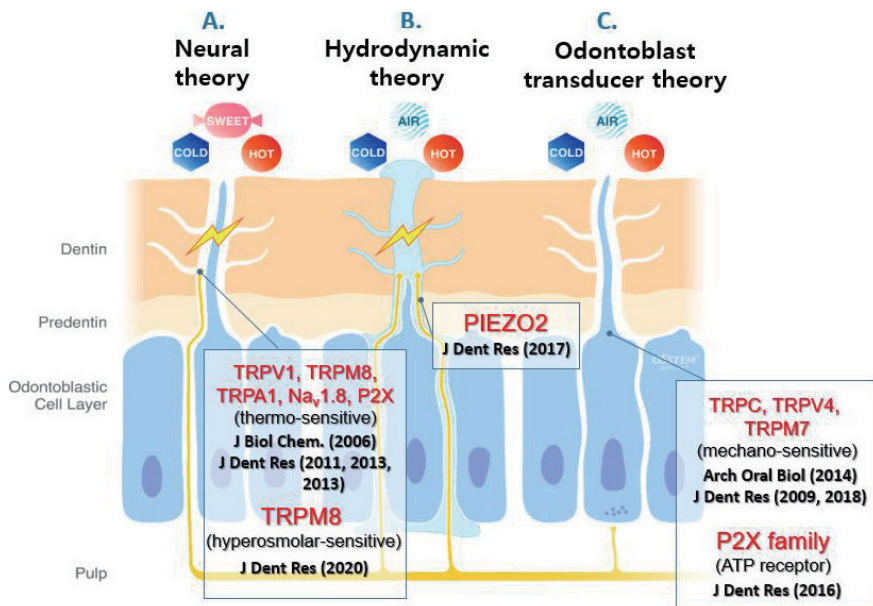


그림 1. 본 연구실에서 규명한 치통 발생의 세포 분자 기전

만성 통증에도 기여하고 있음을 규명하여, 말초 TRPV1 이 아니라 중추 TRPV1이 신약 타깃이 될 수 있다는 사실을 제시한 바 있다.

2. 통증의 신경전달 경로: 진통제 신약의 표적

신경 말단에 존재하는 TRPV1와 같은 통증 수용체에 의해 받아들여진 통증 신호는 말초신경을 통해 중추로 전달되고, 척수와 뇌간을 거쳐 뇌 (체성감각피질)에서 통증으로 인지된다. 이와 같은 통증의 전달경로는 통각이라는 감각을 매개로 이루어지는 유해 자극에 대한 우리 몸의 보호 기전으로 작동하고 있으며, 이때의 통증을 '생리적 통증 (physiological pain)'으로 규정하고 있고 이는 우리 생존을 위해서 필수적인 아주 유익한 감각이라고 볼 수 있다.

통증 신경전달 경로는 보통 4단계로 구분하여 설명할 수 있다. 즉, 손상된 조직에서 발생한 통증 신호를 감각 신경세포의 말초신경 말단에 존재하는 통증 수용체 (예, TRPV1 등)가 감지하여 전기신호로 변환되는 단계 (transduction), 말초신경에서 활동 전압으로 변환된 전기신호가 중추 쪽, 즉 사지 몸통에서는 척수 쪽, 얼굴에서는 뇌간 쪽의 중추로 전달되는 단계 (transmission), 통증 신호가 척수와 뇌간 상위로 전달되어 뇌의 일정 영역에서 통증으로 인지되는 단계 (perception), 말초에서 상위로 뇌까지 전달되는 과정 중에 신경세포가 교체되는 시냅스 (특히, 척수나 뇌간)에서 통증 신호가 조절되는 단계 (modulation)로 나눌 수 있다. 연구자들은 이와 같은 통증의 신경 경로에 선택적으로 발현되어 통증 신호를 감지하거나 전달하거나 혹은 인지하거나 조절하는데 기여하고 있는 인자를 찾아내고 있고, 만일 발굴된 인자가 통증 신호 전달경로 이외의 조직에는 존재하지 않는다면 (혹은 최소로 존재한다면) 그 인자는 부작용이 적은 신약을 개발하기 위한 최적의 표적이 될 수 있다. 그 대표적인 예가 앞서 언급했던 통증 수용체인 TRPV1을 들 수 있는데, 1997년 처음 발견된 후 TRPV1을 표적으로 한 진통제 신약이 개발될 수 있을 것이라는 기대감이 한껏 부풀어 올랐다. 하지만 우리나라를 포함하여 전 세계

의 연구자들과 연구소 및 제약회사에서 TRPV1 억제제를 개발하였으나, 아쉽게도 임상시험 단계에서 모두 실패하여 아직까지 임상에 적용되고 있지는 못하고 있다. 그 이유는 TRPV1이 통증 신호만을 받아들이는 수용체가 아니라 뜨거운 온도에도 반응하는 이온 통로이기 때문에, TRPV1 억제제를 투여하면 우리 몸의 체온조절에도 이상이 생겨 '과체온증'이라 심각한 부작용이 발생하였기 때문이다. 하지만 여전히 전 세계적으로 TRPV1처럼 통증 신경전달경로에 특이적으로 발현되어 있는 인자들을 발굴하고 그 분자 표적을 대상으로 한 진통제 신약 개발이 추진되고 있다.

3. 통증 치료의 새로운 표적: 자연살해세포

염증이나 감염, 신경 손상 등 병적인 상황에 처해 있을 때 우리는 '병적 통증 (pathological pain)'을 경험한다. 물론 이 병적 통증도 위 '생리적 통증'을 전달하는 경로를 통하여 뇌까지 전달되어 인지되게 되지만, 병적인 상황에서는 통증 경로의 감작화 (sensitization)가 이루어져 통증 반응이 훨씬 증폭되는 일이 말초신경계와 중추신경계에서 발생하고, 또한 감각을 전달하는 신경전달로 이외에도 감정이나 정서를 담당하고 있는 뇌의 다른 영역들도 활성화되어 뇌의 반응도 훨씬 더 증폭된다. 따라서 병적 통증은 우리가 경험하기에 훨씬 더 극심한 통증(고통) 형태로 나타나며 난치성 만성 통증으로 이행되기도 한다. 만성 통증은 많은 경우에 신경병증성 통증 (neuropathic pain)과 관련되어 있다. 신경병증성 통증은 신경의 손상이나 신경계 질환으로 야기되는 통증을 말하는데, 임상적으로는 말초신경병증 (peripheral neuropathy)에 의해서 많이 발생한다. 말초신경병증이 발생하는 경우는 당뇨병이나 감염증과 같은 질환에 이환되거나, 항암 화학요법치료의 부작용이나 수술 과정 중의 신경 손상, 외상에 의한 신경 손상에 의해 발생하는 경우도 있다. 고령화 사회로 진입한 우리나라에서는 주변에 만성 통증으로 고생하고 있는 환자들을 많이 볼 수 있는데, 대부분의 환자들은 자신의 통증이 병원에서 잘 치료되지 못하고 있다고 호소하고 있다. 그 이유는 현재 처방되고 있는 진통제들이 환자의 통증을 완화시키는 데

그리 성공적이기 못한 현실 때문이다.

본 연구자는 통증 신경전달 경로의 분자 표적을 발굴하여 신약을 개발하는 방법이 아니라 다른 전략을 생각해 하게 되었다. 즉, 만성 통증이 난치성인 경우가 매우 많은데 이는 우리 몸에서 통증 신호를 전달하는 신경 활성화 증폭된 채로 남아있기 때문이고, 통증 신호를 증폭시키는 원인들이 너무도 다양하여 그 원인 하나하나를 다 타깃할 수 있는 신약을 개발하는 것은 현실적으로 그리 쉽지 않을 것으로 판단하고 있다. 오히려 ‘통증 신호를 증폭시키고 있는 비정상적인 신경 자체를 선택적으로 제거할 수 있는 방법이 없을까?’ 하는 생각을 하게 되었고, 암세포에 대한 살해 효과를 가지고 있는 자연살해세포(Natural Killer cell, NK세포)에 관심을 가지게 되었다. NK세포는 바이러스에 감염된 세포나 암세포를 직접 공격해 제거하는 세포독성을 가지고 있는 선천적 면역세포이다. 따라서 NK세포에 관한 연구는 주로 암세포나 바이러스의 살해 효과에 집중되어 왔으며, 실제 NK세포를 이용한 면역세포치료법이 상용화되는 초기 단계에 와있다. 하지만 NK세포를 이용하여 신경계 질환을 치료하려는 시도는 거의 없었는데, NK세포가 우리 몸에 존재하는 비정상적인 세포들을 제거하는 능력을 가지고 있다면, 손상을 받아 정상적으로 기능하지 못하는 신경세포에도 작용하여 그 신경세포를 제거하는 효과를 가질 수도 있다는 가설을 가지고 연구를 진행하였고, 그 결과를 지난 2019년 2월 Cell 지에 발표하게 되었다. 본 연구를 통하여 우리 연구진은 말초 신경 손상에 대한 반응으로 NK세포가 손상된 축삭 돌기의 퇴화를 촉진하여 손상 후

감각 과민성을 감소시킴으로써, 말초신경 손상 후 발생하는 만성 통증을 NK세포의 활성을 조절하여 치료할 수 있는 가능성을 제시할 수 있었다.

말초 신경 손상에 대한 대표적인 반응으로는 월러 변성(Wallerian degeneration)이 잘 알려져 있다. 본 연구진은 말초신경 손상 후 발생하는 신경퇴화와 재생 과정에서 세포독성을 가지고 있는 NK세포가 침투하여 축삭 변성에 관여하여 손상된 축삭을 제거한다는 사실을 확인하였다. 즉, 손상받은 말초 감각신경세포에 NK세포에 대한 리간드인 RAE1의 발현이 증가되어 NK세포의 NKG2D 수용체와 물리적으로 결합하는 ‘신경·면역시냅스’를 매개로 신경돌기의 퇴화를 거쳐 제거되는 현상이 일어나는 것을 발견하였다(그림 2). 이 과정을 통하여 결과적으로는 건강한 축삭이 재생될 수 있는 환경을 제공할 수 있지만, 생리적인 조건에서는 NK세포의 축삭 제거 작용이 충분치 않아 결국 신경병증성 통증이 발생하는 일이 벌어진다. 하지만, NK세포의 활성을 인위적으로 증가시켜주면 손상된 축삭을 충분히 제거함으로써 궁극적으로 신경재생 후에 발생할 수 있는 만성 통증을 완화시킬 수 있다는 사실을 확인하여, NK세포의 활성을 조절하여 만성 통증에 대한 면역세포치료법이 개발될 수 있다는 가능성을 제시할 수 있었다. 즉, 난치성 만성 통증은 제거되지 않고 남아있는 손상된 신경에 의해서 유발되는 것이며, NK세포를 이용한 면역치료법이 만성 통증의 근본적 치료법이 될 수 있음을 제시하면서 만성 통증의 신경생물학적 정체와 새로운 치료법의 개발 방법을 제안하였다.



그림 2. (가) NK세포는 손상된 신경세포돌기만 선택적 제거함.
(나) NK세포와 신경세포의 직접 접촉에 의한 신경·면역시냅스를 매개로 이루어짐.

4. 맺음말

우리가 느끼는 통증은 ‘양날의 칼’이라고 볼 수 있다. 통증은 유해한 자극에 반응하여 회피반사를 유도함으로써 해로운 환경에서 우리가 생존해 나갈 수 있도록 도와주는 유익한 감각 (생리적 통증)일 뿐만 아니라, 통증은 생존에 가장 중요한 충동 (motivation)의 서열 중 맨 위에 위치하여 우리가 극심한 통증을 경험하는 상황에 처하게 되면, 다른 모든 일을 뒤로 미룬 채 휴식을 취하면서 우리 몸을 보호하고 회복하는 시간을 가질 수 있도록 도와준다. 반면에, 염증이나 감염질환, 신경 손상 등 우리 몸이 질환을 겪게 될 때 발생하는 통증은 병적 통증으로, 제대로 치료되지 못하는 경우에는 만성화된 난치성 통증으로 진행되게 된다. 만성 통증으로 이행되게 되면 우울증, 불안장애, 불면증 등 중추신경계의 기능 이상과 관련된 신경질환을 동반하는 경우가 많아지면서 통증만을 선택적으로 치료하는 것이 더욱 힘들어지게 된다. 따라서 통증 연구자들은 병증이 실제로 존재하는/하였던 말초신경계를 대상으로 통증의 발생 기전을 규명하여 통증을 치료하는 방법을 모색하고 있고, 다른 한편으로는 통증이 중추신경계에서 처리되고 있는 뇌 회로나 신경 활성을 조절함으로써 만성 통증을 제어하려는 시도를 하고 있다. 이 두 가지 전략 중에 어떤 시도가 성공적인 방법이 될지는 앞으로 연구가 더 많이 진행되어야 판단할 수 있을 것이다.

본 연구자는 자연살해세포의 세포독성 능력을 이용하

여 손상 신경섬유의 퇴화를 유도함으로써 만성 통증이 완화되는 현상을 발견하여 ‘만성 통증의 면역세포 치료법’이라는 새로운 통증 제어 방법을 제시할 수 있었다. 또한 이 연구를 통하여 우리 몸에서 손상받은 신경섬유가 우리 몸의 내재적 치유능력에 의해서 완전히 제거되지 못하는 것이 만성 통증이 생기는 근본 원인 중에 하나가 될 수 있다는 사실도 또한 확인하여, ‘만성 통증의 신경생물학적인 정제’에 대한 하나의 단초를 제시할 수 있었다. 우리 연구가 정말로 의미를 가지기 위해서는 앞으로 통증 환자를 대상으로 하는 중개 연구를 수행하여 환자가 겪고 있는 통증과 자연살해세포의 활성이나 자연살해세포의 타깃 세포의 리간드 발현, 그리고 손상받은 신경섬유의 존재 등 만성 통증과 자연살해세포 활성과의 관련성에 대한 의학적인 증거를 더 많이 확보할 필요가 있다. 이와 같은 중개 연구를 통하여 자연살해세포를 활용한 만성 통증에 대한 면역세포치료법의 가능성이 확인되면 더 나아가 환자를 대상으로 하는 임상시험도 진행되어야 한다. 이를 추진하기 위해서는 본 연구실의 단독 연구로 불가능하여 면역학자와의 공동 연구가 필수적이며, 자연살해세포를 대량으로 만들거나 활성이 강화된 자연살해세포를 제공할 수 있는 산업체나 연구소, 그리고 임상연구를 수행할 수 있는 병원 등 여러 기관이 참여하는 연구를 수행할 필요가 있다. 모쪼록 앞으로 계획하고 있는 연구들이 성공적으로 수행되어 만성 통증으로 고생하고 있는 환자들에게 실질적인 도움을 줄 수 있는 날이 오기를 기대해 본다. ㉔

학술원 소식

▣ 제9차 임원회 개최

2021년 11월 5일(금) 14시 학술원 중회의실에서 제9차 임원회를 개최하였다. 이번 회의에서는 2022년도 학술원 통신 기고회원 추천계획, 2022년도 전문학술활동 연구책임자 및 학술연구총서 집필자 추천결과 등을 보고받고, 2022년도 학술원 명예회원 선출계획 등을 심의하여 원안대로 가결하였다.



〈제9차 임원회〉

▣ 2021년 특정연구과제 학술토론회 개최

2021년 11월 12일(금) 14시 학술원 대회의실에서 2021년 특정연구과제 학술토론회를 개최하였다. 금년에는 코로나19 확산방지를 위해, 대면과 비대면(Youtube 생중계) 방식으로 진행하였다. 첫번째 세션에서는 조동일 회원(인·사 제2분과)이 ‘한·일 학문 선진화 방안 비교’라는 주제로 발표하였고 이정복 부회장이 지정토론자로 참여하였다. 두번째 세션에서는 안진흥 회원(자연 제2분과)이 ‘기후변화가 개화 시기에 미치는 영향’이라는 주제로 발표하였고, 박종욱 회원(자연 제2분과)이 지정토론자로 참여하였다.



〈조동일 회원 연구결과 발표〉



〈안진흥 회원 연구결과 발표〉

▣ 2021년 하반기 간행물편집위원회 개최

2021년 11월 17일(수) 14시 학술원 중회의실에서 2021년 하반기 간행물편집위원회를 개최하였다. 이번 회의에서는 2021년 하반기 간행물 발간예정 현황에 대해 보고받고, 학술원논문집 제60집 2호 논문게재 심사위원 위촉 건에 대해 협의하였다. 그리고 2022년도 학술원 간행물 발간 계획(안)을 심의하여 원안대로 가결하였다.



〈2021년 하반기 간행물편집위원회〉

회의 및 행사 안내

▣ 제10차 임원회 개최

- 일시 : 2021년 12월 3일(금) 14시
- 장소 : 학술원 중회의실(3층)

▣ 제4차 국제교류협력위원회 개최

- 일시 : 2021년 12월 21일(화) 14시
- 장소 : 학술원 중회의실(3층)

회원 동정

◆회원 기초연설 및 초청강연

이정민 회원(인·사 제2분과)은 2021년 11월 6일(토) The 35th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation(PACLIC)(증회의, 상하이국제대)에서 ‘Typology of Factivity Alternation in Different Languages’라는 주제로 plenary keynote speech를 하였다. 또한 지난 6월 1일에는 독일 Bochum 대 언어-철학 콜로퀴엄(증회의)에 초청되어 ‘Factivity in English and Chinese: Viewed from the Altaic alternation type’라는 주제로 두시간 동안 강연과 질의응답을 한 바 있다.

◆대한법의학회 제8회 도상법의문화상 시상식 개최

대한법의학회는 2021년 11월 12일(금) 제45회 추계학술대회에서 제8회 도상법의문화상 수상자로 엠디포스트 김은식 기자를 선정하고 상장과 감사패를 전달했다. 도상법의문화상은 한국 법의학의 시조인 도상 문국진 회원(자연 제4분과)의 뜻을 기려 대한민국 법의학의 발전과 검시에 대한 대중의 인식을 새롭게 해 법의학 발전에 중요한 역할이 인정되는 인물에게 수여하는 상이다.

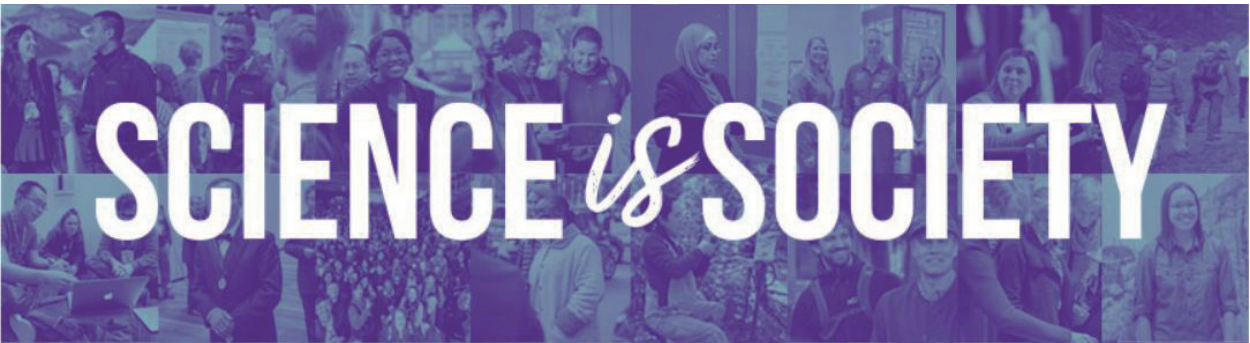
학술원사무국 소식

◆사무국 인사

- 공무직 채용 : 안혜진 주무관(학술진흥과 근무, 2021.12.1.)

국제학술기구 및 외국학술원 행사 안내

▣ AGU21: AGU Fall Meeting “Science is Society”



- 일시 및 장소 : 12월 13일 ~ 17일, 미국 뉴올리언즈 및 온라인
 - 주관 : AGU(Advancing Earth and Space Science) 본부
 - 내용 : AGU는 지구 및 우주과학 분야의 전문가 집단으로서 전세계 13만 여명의 네트워크입니다. 이번 Fall Meeting은 지구 및 우주과학 분야의 전문가, 학생 및 관련 분야의 사람들이 과학적 발견을 공유하고 혁신적인 해결책을 찾아가는 모임입니다. 대면 및 온라인 참여를 통해 참가자는 정부기관, 과학 전문가 및 관련 업계의 사람들과 네트워크를 형성할 수 있는 수많은 기회를 갖게 됩니다.
 - 홈페이지 : <https://www.agu.org/Fall-Meeting>
 - 등록 : \$700, <https://bit.ly/3wMImF2>
- ※ 관심 있으신 회원님께서서는 담당자(이슬, esther08@korea.kr)에게 문의주시기 바랍니다.