



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



제16회 한·일학술포럼 참가자 협의회 개최(2024.8.26.)

이달의 주요기사

신 임 회 원 업 직 소 개	인문사회 제1분과 (교육학-교육행정)	陳東燮 會員 2면
	인문사회 제4분과 (헌법)	金文顯 會員 5면
	인문사회 제6분과 (경제학)	田炳憲 會員 9면
회 원 기 고	식물의 운동성	安鎭興 會員 14면
	인공지능(AI)은 어떻게 작동하는가? (2)-작동 기술 -	李秉基 會員 20면
분과 및 학계 동향	자연 제2분과 회원 동정 및 학계 동향	張浩完 會員 30면
학술원 소식	회의 및 행사 안내	34면

[신임회원 업적소개]

인문사회 제1분과 진동섭 회원 (교육학-교육행정)



진동섭 교수는 1989년 8월 서울대학교 사범대학 교육학과 조교수로 임용되었고, 2017년 8월 교수로 정년퇴직했다. 이후 현재까지 명예교수로 학문 활동을 수행하고 있다. 2018년부터 2년간은 한국교원대학교 교육학과 석좌교수로 근무했다. 교육학은 종합 학문이자 응용 학문적인 성격이 강하다. 연구 분야도 교육 철학, 심리학, 교육과정(curriculum)과 행정 등 매우 광범위하다. 진교수의 주 전공 분야는 교육행정이다.

교육학자로서 진교수가 수행한 30여 년 간의 연구, 교수, 사회봉사 활동의 중점은 크게 3단계로 변해 왔다.

1단계는 교수 생활 초기인 1990년대이고 핵심적인 연구 주제는 우리나라 학교 조직의 특성을 규명하는 데 초점을 두었다.

2단계는 2000년대 초반 10여 년으로 학교컨설팅(school consulting) 이론을 개발하고 실천하는 데 중점을 두었다.

3단계는 2010년부터 현재까지이고 교육디자인(education design) 이론을 개발하고 실천하는 것이 핵심 과제였다.

각 단계별로 수행한 연구의 대표적인 결과물은 ① 「한국 학교조직 탐구」(2005, 학지사, 공저), ② 「학교컨설팅-교육개혁의 새로운 접근방법」(2003, 학지사, 단독저서), 그리고 ③ 「교육디자인 이론」(2022, 교육과학사, 단독저서) 등이다. 이들 연구의 주제와 연구물들은 각각 별개로 존재하는 것이 아니다. 1단계는 2단계의 기초가 되었고, 2단계는 3단계의 기초가 되었다. 이것을 대표저서로 기술하면, 「한국 학교조직 탐구」는 「학교컨설팅-교육개혁의 새로운 접근방법」의 기초가 되었고, 「학교컨설팅-교육개혁의 새로운 접근방법」은 「교육디자인 이론」으로 발전했다.

진동섭 교수의 업적을 ① 전반적인 연구 활동, ② 주요

연구 주제와 결과, 그리고 ③ 주요 경력 등으로 소개하면 다음과 같다.

1. 전반적 연구 활동의 특징

진동섭 교수의 학문적 관심사는 학교 조직의 특성에 기반을 둔다. 보다 구체적으로는 단위 학교의 변화 전략, 교원들의 자율적인 전문성 개발을 강조하는 교직원화, 그리고 일선 학교의 자생적 활력과 경영 역량의 강화를 통한 교육개혁이다. 이런 교육개혁의 관점(frame, perspective), 접근 방법, 혹은 실행 방법으로 창안한 것이 “학교컨설팅 이론”과 “교육디자인 이론”이다. 진교수의 연구 활동의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 진교수는 우리 교육계에서 지난 60여 년간 일관되게 유지하던 중앙집권적이고 통제적인 교육개혁의 문제점과 한계를 지적하고 대안을 제안했다. 그것은 일선 학교와 교원이 주체가 되어서 수행하는 개혁이다. 그는 이것을 “현장 지식 기반 교육개혁”과 “개혁 없는 개혁”(Reform Without Reform)으로 규정한다.

전통적인 교육개혁은 교육부가 주도하는 개혁이었다. 전국의 교육기관을 개혁의 대상으로 삼고 소위 ‘정책’이라는 이름으로 전국 단위의 개혁 청사진을 만들어 하급 교육행정기관과 일선 학교에게 하달하는 하향식(top-down) 방식이다. 개혁 없는 개혁은 학교 하나하나가 개혁의 기본 단위이면서 동시에 개혁의 주체로 존중하는 개혁이다. 그리고 교원들이 공유하는 전문적 지식, 기술, 지혜가 원동력이기 때문에 “현장 지식 기반 교육 개혁”이라고 불린다.

둘째, 진교수의 학문적 관심은 교육행정이나 정책 현안에 대한 구체적인 방안보다는 그것을 이해하고, 설명

하고, 처방하기 위한 이론을 개발하는 데 초점을 두었다. 그 결과물로 발표된 것이 “느슨하면서 단단한 교육 체제”(Loosely and tightly coupled system), 학교컨설팅(school consulting) 이론, 그리고 교육디자인(Education design) 이론 등이다.

셋째, 진교수는 이런 이론들을 개념적 차원에서 구안하는 데 그치지 않고, 일선 교육 현장에 적용하고 실험하는 과정을 거쳐서 발전시켰다. 이것은 교육학 이론이 일선 교육 현장에 기반을 두고 형성되고 그것의 변화를 위한 것이어야 한다는 신념을 반영한다.

2. 주요 연구 주제와 결과

진동섭 교수의 주요 연구 주제와 결과는 다음과 같다.

가. 학교 조직의 특성

학교라는 조직은 다른 유형의 조직과 공통점이 있고 차이점도 있다. 진교수는 시카고대학에서의 박사 과정과 서울대 교수 초기에는 이것에 관심을 가지고 연구했다. 교육학계에서는 1970년대 초반까지만 해도 학교 조직을 관료제(bureaucracy)의 한 유형으로 인식하는 것이 주류였다. 그러나 1976년 Karl Weick이 “loosely coupled system”이라는 새로운 관점을 제시함으로써 변화가 시작되었다. 1980년대 미국 시카고대학 유학 중이던 진교수는 학교 조직은 ‘구조적으로는’ 느슨하지만 ‘문

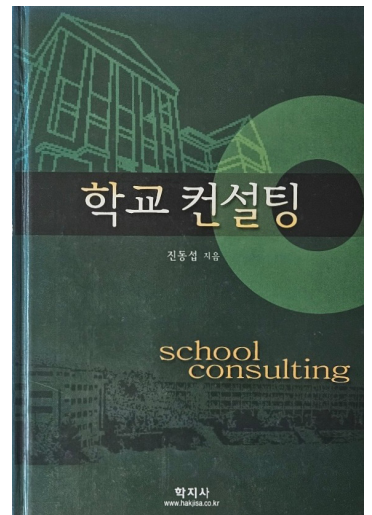
화적으로는’ 단단한 조직임을 규명하려고 노력했다.

1988년 귀국한 이후 한국 학교 조직의 특징을 규명하는 데 연구의 중점을 두었다. 그 결과를 정리한 저서가 『한국 학교조직 탐구』(2005, 학지사, 공저)이다.

진교수는 학교 조직과 교사직의 특징을 규명한, Dan Lortie(시카고대학 지도교수)의 저서 『Schoolteacher - A Sociological study』를 1993년 『교직사회 - 교직과 교사의 삶』으로 번역하기도 했다. 이 번역서는 우리나라에서 이루어진 학교 조직의 특성과 교사직의 특성에 관한 연구와 논의에서 현재까지도 유용하게 활용하고 있다.

나. 학교컨설팅

학교컨설팅 이론은 2000년대 초반 진교수가 창안한 이론으로 최초의 저서는 『학교컨설팅 - 교육개혁의 새로운 접근방법』(학지사, 2003)이다. 학교컨설팅은 학교가 자생적 활력을 함양하고 교육의 질을 높이기 위해서 자율적으로 수행하는 노력을 전문성을 갖춘 학교 내외의 전문가들이 동료의 입장에서 협업하면서 도와주는 활동이다. 학교 변화를 위한 자발적인 노력을 장학사나 행정가가 아니라 교사들이 컨설턴트가 되어서 도와주는 서비스다.



학교컨설팅은 일선 학교에서 이루어지는 권위적이고 위계적인 장학(supervision)에 커다란 변화를 가져왔고, 그것을 대체하는 활동으로까지 언급될 정도로 자리를 잡아가고 있다. 또한 교육부가 추진하는 각종 정책들, 예를 들면, 방과후학교, 영어교육, 전문계 고등학교 개편 등과 같은 정책을 시행하는 과정에서 일선 학교와 교육행정기관을 도와주는 서비스로 활용되고 있다.

새로운 이론을 창안하고 발전시키는 일은 어느 한 학자 혼자만의 힘으로는 불가능하다. 진교수의 연구 활동

은 대학원에서의 석·박사 학생 지도, 학자들과의 공동 연구 그리고 연구 실천 조직의 창립과 운영 등으로 이루어졌다. 학교컨설팅이 처음 소개된 2003년 이후 10년간 발표된 석사·박사학위 논문은 60여 편에 달했다. 학술지와 정기간행물 논문은 90여 편, 단행본도 40여 편이나 된다. 연구와 함께 실천을 위한 활동도 전국 17개 시도 교육청과 교육부로 크게 확산되었다.

진교수는 2006년 「한국학교컨설팅연구회」라는 조직을 창립해서 1대와 2대 회장직을 수행했다. 한국학교컨설팅연구회는 2015년부터 학교컨설팅트 민간자격증 과정을 운영한다. 2021년부터는 사단법인이 되면서 법적인 기반을 갖추었다. 2023년에는 15억원 그리고 2024년에는 25억원 규모의 교육부 학생맞춤형통합지원체제 구축을 위한 학교컨설팅 사업을 위탁받아서 수행할 정도로 발전했다.

다. 교육디자인

「교육디자인 이론」은 2022년에 펴낸 저서다(교육과학사). 이 책은 교육을 ‘디자인’ 관점에서 보고 개념, 원리, 절차 등에 관한 이론적 체계를 구안한 것이다. 교육디자인은 행복한 인간을 양성하기 위해서 여러 전문가들이 협업을 통해 쓰임새(용)와 아름다움(美)이 어울리는 교육을 창조적으로 구안하고 실행하는 서비스다. 교육디자인의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.



첫째, 다양한 교육 현상(교수-학습, 학교·학급경영, 학교공간 건축, 교육행정, 교육정책 등)을 디자인 관점

에서 기술하고, 설명하고, 처방하는 새로운 이론이다. 교육을 ‘서비스 디자인’(service design)의 대상으로 설정하고 그 특성을 새롭게 규명했다.

둘째, 교육디자인은 교육, 예술, 테크놀로지의 융합이 이루어지는 활동(영역)으로 본다. 교육디자인 이론은 미학과 철학의 기반과 함께 예술과 첨단 테크놀로지에 관한 식견의 기초 위에 정립할 수 있다. 교육디자인 이론은 교육행정학자인 진동섭 교수가 이런 타 학문 영역에까지 탐구의 범위를 확대해서 만들어낸 의미 있는 결과이다.

셋째, 교육디자인 이론은 선행 문헌에만 의존해서 만든 개념적인 상태의 것이 아니다. 일종의 형성적 연구 방법(formative study)으로 구안했다. 진 교수는 지난 10년간 교육디자인의 구체적인 특성을 구비한 교수-학습 방법을 만들어 실행하고(「스마트폰 영화 제작활용 교수법」), 학교와 학급경영의 사례를 분석하고(제주 애월초등학교 더덕분교), 학교 공간의 개선 사업을 분석하는 등의 연구 활동을 하면서 하나의 이론으로 다듬었다.

교육디자인 이론은 인간의 이성과 감성의 조화, 교육활동의 쓸모/쓰임새(用)와 아름다움(美)의 균형, 그리고 교육학의 과학성과 예술성의 융합을 강조하는 새로운 이론이다. 교육디자인 이론은 앞으로 매우 유의미한 많은 후속 연구 과제들을 창출할 것이다.

3. 주요 경력

진동섭 교수는 현직에 있는 동안 2013년 9월부터 2016년 2월까지 서울대학교 교육연구소가 발행하는 Asia Pacific Education Review (SSCI급 영문학술지, Springer) 편집장으로 활동했다. 진 교수의 활동의 장은 대학에만 제한되어 있지 않았다. 그는 한국교육개발원 원장(2008년 8월~2009년 8월)직을 수행하는 한편, 학교컨설팅 이론에 대한 연구와 실천의 확산을 위해 노력했다. 그리고 대통령실 교육(과학)문화수석비서관(2009년 9월 ~ 2011년 2월)으로 근무하면서 교육 제도와 정책의 현실과 이상에 대한 이해의 폭을 넓혔다. 2015년 1월부터 2016년 12월까지는 26개 분과학회로 구성된 한국교육학회의 회장으로 봉사했다.📍

[신임회원 업적소개]

인문사회 제4분과 김문현 회원(헌법)



1981년 대학교원으로 임용된 후 40여년 헌법학을 연구하면서 연구업적은 헌법 전반에 걸쳐 있으나 주요 연구분야로는 헌법해석, 선거·정당제도, 헌법상 사회·경제질서, 재산권보장, 양성평등, 헌법재판 제도 등을 들 수 있다. 그 밖에 저항권과 국가긴급권, 사형·낙태 관련 헌법적 문제, 대학의 자치, 헌법개정안, 헌법사례 연구 등에 관한 연구가 있다.

1. 헌법해석

헌법은 국가의 최고법으로서 추상성과 개방성을 특성으로 한다. 그에 따라 자칫 헌법해석기관이 헌법해석이라는 가면 아래 자신의 정치적 선호를 헌법이라 주장하는 문제가 생길 수 있다. 그런 점에서 헌법해석의 방법과 기준의 문제는 헌법학의 기본과제임과 동시에 현실적으로 중요한 문제가 아닐 수 없다. 특히 최종적 유권적 헌법해석기관이라 할 수 있는 헌법재판 기관의 헌법해석은 중요한 의미를 가진다. 그럼에도 우리 헌법재판소의 결정에는 헌법해석 방법에 대한 깊이있는 논의를 찾아보기 어렵다. 헌법재판 기관의 헌법해석은 헌법의 본질이나 법적 성격, 헌법과 헌법현실의 관계, 효력근거 등 헌법해석 방법 자체에 관한 것뿐 아니라 헌법재판과 민주주의의 조화, 헌법재판 기관의 성격과 기능 등의 문제와도 연관되어 있다.

1) 미국에서의 헌법해석 논의는 근래 미국 헌법학계의 가장 중요한 이슈가 되어왔다. 미국에서의 헌법해석 논의는 학리적 헌법해석 방법론을 중심으로 하는 독일과 달리 현실적으로 헌법재판을 담당하는 법원의 헌법해석을 중심으로 전개되고 있다는 점에서 현실적 의미가 크다. 법원의 헌법해석 방법으로서 원의주의(originalism)와 비원의주의(nonoriginalism)-살아있는 헌법주의

(living constitutionalism)에 관하여 그 주장내용이나 해석기준, 유형, 논거 등을 분석하고 그것이 가지는 문제점을 지적하였다. 또한 문제점에 따른 새로운 대안으로 제시되고 있는 주장들에 대해서도 살펴보았다.

2) 이러한 논의에 바탕하여 법으로서의 헌법, 헌법의 정당근거, 헌법의 성문성, 헌법해석의 객관성, 민주적 헌법해석, 헌법해석과 헌법구성(constitutional construction)의 구별 등을 분석하여 우리 헌법해석 방법과 기준을 제시하였다. 헌법에는 고정성과 변동성이 공존하여 성문헌법은 기본적으로 고정성을 가지며 성문헌법에 나타난 기본틀이나 기본가치, 그리고 개별규정을 통해 표현된 일반적·추상적 의미는 고정되어 있다고 할 수 있다. 그러나 헌법해석은 헌법규정의 헌법현실에서의 조용이며 헌법조항의 의미는 맥락(context)을 떠나서 이해될 수 없으며 맥락에는 문제가 된 조항의 다른 조항과의 체계적 연관성뿐 아니라 역사적 현실과 가치의식도 포함되어 있다고 보아야 할 것이다. 그런 점에서 ‘과거의 헌법규정과 현세대와의 대화’(Jack Balkin)가 헌법해석의 본질이라는 점에서 헌법의 일반적·추상적 의미는 고정되어 있으나 구체적 의미는 변화한다고 보아야 할 것이라는 기본입장을 제시하였다. 헌법규정이 그대로 있음에도 헌법의 의미가 변화를 가져올 수 있는 경우로 a) 법문의 언어적 의미가 바뀐 경우, b)현실이 바뀐 경우, c)가치의식이 바뀐 경우를 생각할 수 있는데 a)의 경우는 헌법의 변화를 가져오지 않으나, b) c)의 경우는 구체적 의미는 변화한다고 본다.

2. 헌법상 사회·경제질서

우리 헌법은 사회·경제질서에 관해 비교적 상세한 규정을 두고 있는 것을 한 특징으로 한다. 그러나 복지국가

에 관한 헌법규정의 성격이나 내용, 경제질서의 성격과 경제규제의 허용범위 등을 둘러싸고 다양한 주장들이 제기되고 있다. 필자는 복지국가 원리에 관한 헌법규정의 성격과 수용가능한 복지국가 모델을 분석, 규명하였다. 또한 사회(복지)국가가 가지는 법치국가와의 안티노미를 분석하고 양자의 충돌과 조정, 그리고 그 결합의 내용에 대해서 연구하였다. 생존권적 기본권에 관해서는 최소한의 인간다운 생활의 보장에 대해서는 구체적 권리성을, 그리고 그 수준을 넘는 생활수준의 보장에 대해서는 입법이나 예산정책에 개방적인 추상적 권리성을 인정하고 생존권적 기본권 보장의 실현과정을 분석하여 그 사법적 실현방법을 제시하였다.

한편 종래 우리 헌법상 경제질서를 독일식의 사회적 시장경제 질서로 이해해 왔는데 과거 독일의 사회적 시장경제의 성립과 경과, 내용을 살펴보고 그것으로 우리 헌법상 경제질서를 규정하는 것의 부적절성을 지적하였다. 또한 우리 헌법상 경제조항은 기본적으로 자본주의-시장경제에 바탕하고 있으나 국가의 시장에 대한 개입과 규제의 범위 및 정도는 광범위하게 입법과 정책에 맡겨져 있으며, 헌법재판소나 법원의 위헌심사는 최소한의 합리성 심사에 그쳐야 함을 주장하였다.

3. 선거 · 정당제도

헌법상 민주주의의 핵심제도로써 선거제도와 정당제도에 있어 제기되는 다양한 문제들, 특히 선거구간 인구불균형, 비례대표제의 문제를 지적하고, 정당국가 현상에 따른 대의제 민주주의와의 충돌과 헌법해석 방향을 연구하였다.

1) 국회의원 정수 배정문제는 미국의 경우 1960년대 미국 연방대법원 판례상 가장 중요한 이슈의 하나였고, 일련의 판례를 통해 one person-one vote, one vote-one value의 원칙이 확립되었다. 그러나 과거 우리의 경우 선거구간 인구불균형이 심각하였다. 필자는 일찍이 국회의원 선거구 획정이 지역이나 경제적 이익이 아니라 개인대표 개념에 기초하여야 하며, 당시의 우리나라 선

거구 획정이 one vote, one value의 원칙에 어긋남을 지적하였다. 또한 헌법상 평등선거의 원칙이 일반적 평등 원칙과는 다른 역사적 배경과 의미를 가짐을 지적하고 비례대표 의석배분에 있어 봉쇄조항과 기본의석조항 등의 문제를 검토하였다.

2) 현대 대중민주주의에 있어 정당국가 현상과 이에 따른 대의제 민주주의의 구조변화를 검토하고, 대의제 민주주의에 기초한 헌법이 이러한 변화를 어떻게 수용하고 제한하여야 할 것인가에 대하여 연구하였다. 그리하여 정당국가에 있어 프레비시트 민주주의로의 구조변화, 국민대표 개념의 변화, 국회의원상의 변화, 선거의 의미변화, 국회에서의 토론과 공개성의 의미변화, 정당강제의 강화 등을 살펴보고, 정당국가의 위기와 정당국가론이 가지는 문제를 고찰하였다. 특히 대의제 민주주의의 핵심개념이라 할 수 있는 자유위임과 정당국가에 있어 국회의원의 정당구속성의 충돌에 관해 헌법해석상 정당국가 현상을 수용하되 자유위임을 부인하는 것은 허용되지 않는다고 보았다. 그에 따라 헌법현실에서 제기되는 위헌정당 해산시 소속의원의 의원직 상실 여부, 국회의원 당적변경과 의원직 상실 여부, 합당, 분당의 문제, 정당강제, 정당내부의 민주화와 자유위임의 문제 등에 관한 헌법해석 방향을 제시하였다. 또한 헌법 제8조4항의 정당해산 제도에 관해 그 제도적 의의와 요건, 효과 등을 연구하였다. 해산요건으로서 정당의 목적이나 활동이 민주적 기본질서에 위배될 것이 요구되는데 종래의 이론들의 문제를 지적하고 동 규정은 방어적 민주주의의 표현으로서 민주주의 자체를 부정하거나 침해하는 전체주의 정당을 금지하는 것으로 자유민주주의나 사회민주주의를 주장하는 정당을 해산할 수 없다는 점을 지적하였다. 또한 의원신분 상실문제에 있어 자유위임과의 문제를 논하였다.

4. 양성평등

양성평등 문제는 헌법현실과 국민들의 의식변화로 가장 논쟁적 헌법적 주제가 되고 있다.

1) 1995-1996 한미교육위원회의 Fulbright Senior Research Award를 받아 미국에 체류하면서 미국 연방 대법원의 양성평등에 관한 판례동향과 그 위헌심사 기준에 대해 연구하여 이에 관한 논문을 발표하였다. 여기에서 과거의 영역분리이데올로기, 우호적 우선처우 (benign preference), 그리고 ‘같은 것은 같게, 같지 아니한 것은 같지 아니하게의 원칙’(sameness/difference framework), 지나친 일반화나 정형화 금지 등의 기준과 중간심사 기준 등에 대해 논하였다.

2) 또한 양성평등에 관한 미국의 다양한 법여성학자들의 시각에 대한 논문을 발표하였다. 여기서 양성평등에 관한 과거의 전통적 시각, 평등처우 모델, 특별처우 모델, 그리고 포스트모던 법여성학의 시각 등에 대해 분석, 평가하였다. 그래서 가)남녀간의 임신, 출산과 같은 신체적·생리적 차이는 인정하되 그에 따른 사회적 역할의 차이는 최소한으로 제한하고, 나)각 성은 다른 성과 다른 차이로 인하여 불이익을 받아서는 안되며, 다)여성이 남성과 대등한 사회적 지위를 가지기까지는 잠정적 우대조치(affirmative action)가 허용되어야 한다고 보았다.

3) 그 뒤 이러한 연구를 바탕으로 우리 헌법재판소의 양성평등에 관한 많은 결정들을 분석·비판하고, 성에 기한 분류인지 여부의 판단기준, 심사강도 등에 관한 의견을 제시하였다.

5. 재산권보장과 사회적 구속성

재산권은 사회의 핵심제도임과 동시에 인간의 자유실현과 자기책임적 삶의 기초이다. 재산제도는 그 사회의 사회·경제체제에 따라 그 구체적 내용이 정해진다. 오늘날 재산권은 과거의 개인주의적·자유주의적 재산권 개념으로부터 사회공동체와의 구속성을 인정하고 국가의 재산질서의 형성에 대한 임무와 권한을 부여하는 사회구속적 재산권 개념으로 변화하였다. 그런 점에서 헌법상 재산권이 어느 범위까지 보장되고 또 제한될 수 있는지, 또 어떤 경우에는 손실보상을 해야하는지는 가장

논쟁적 문제의 하나라 할 수 있다.

1) 먼저 필자는 헌법상 재산권 보장의 법적 성격이나 보장범위 및 한계에 대한 헌법해석의 기본방향을 도출하기 위해 사유재산제 보장의 사상적 근거를 연구하였다. 사유재산제를 둘러싼 철학자나 경제사상가들의 다양한 주장을 살펴보고 우리 헌법상 재산권 보장에 관한 해석 방향을 제시하였다.

2) 재산권은 다른 기본권과 그 보장구조가 다르다. 역사적으로 재산권 보장은 전국가적 자연권으로, 또는 법질서의 산물로서 사유재산제의 보장과 구체적·실정법적 권리로 이해되어 왔다. 필자는 재산권 보장이 단계적 구조를 가진다고 보고, 육체적 존재형식을 가진 인간의 자유실현과 자기책임적 삶의 기초로서 인간의 권리로서의 측면, 이를 실현하기 위해 특정시대·사회에 존재하는 사회·경제체제에 바탕한 법제도의 측면, 그리고 이러한 법제도에 의해 구체적으로 내용과 한계가 정해지고 각 개인에게 배분된 구체적 재산권의 현존보장이라는 보장구조를 주장하였다.

3) 재산권의 사회구속성의 강화는 현대사회의 보편적 경향이고 우리 헌법 제23조 제2항도 이러한 경향을 수용하고 있다. 필자는 재산권의 사회구속성의 강화현상과 그것이 가지는 의미, 사상적 근거, 국가체제와 사회구속성, 법적 근거, 사회구속성의 범위와 한계, 우리 헌법해석의 방향, 그리고 토지소유권의 사회구속성의 표현으로서 토지공개념 등에 관해 연구하였다.

4) 재산권의 사회구속성과 공용수용의 구별기준, 손실보상 규정을 두지 않은 수용적 침해에 대해 연구하였다. 특히 헌법재판소의 도시계획법 제21조에 대한 위헌소원 사건을 계기로 독일연방최고법원(BGH)과 연방헌법재판소의 판례에서 제시된 경계이론(Schwellentheorie)과 분리이론(Trennungstheorie)에 대한 분석과 우리 헌법상 양 이론의 수용이 가지는 문제를 지적하고 손실보상에 관한 입법부작위에 대한 위헌성을 인정하는 대안을 제시하였다.

6. 헌법재판

현행 헌법상 헌법재판소 제도가 도입되면서 헌법재판 제도의 운영과 그 문제 및 개선방향에 대한 논의는 헌법학계의 주요 연구대상이 되었다.

1) 우리 헌법재판 제도의 취지와 내용, 문제점을 파악하기 위해 세계각국의 주요 헌법재판 제도의 유형으로 집중형과, 비집중형-사법심사형-, 혼합형에 대해 제도의 유래, 취지, 내용과 세부유형, 제도적 장점과 문제점 등을 연구하였다. 특히 앞으로 개헌시 일본에서의 논의를 참고하여 현행 헌법재판소 제도를 폐지하여 비집중형으로 전환하고 대법원에 헌법재판부를 둘 것을 주장하는 견해에 대해 그것이 가지는 여러 가지 문제들을 제도적 측면과 미국이나 일본, 과거의 우리 제3공화국 헌법 하의 운영실태 등의 분석을 통해 비판하였다.

2) 현행헌법은 헌법재판소를 두면서도 헌법 제107조 제2항을 두어 헌법재판소와 대법원 간의 갈등소지를 낳고 있다. 이에 관해 양기관 간의 관할분쟁과 헌법재판소 결정의 법원에 대한 기속력 문제, 그리고 양기관의 헌법해석의 불일치 문제를 분석하고 이에 대한 제도적 개선 대안으로서 헌법 제107조 제2항의 삭제, 최종적 헌법해석 기관의 일원화, 제한적 재판소원의 인정 등을 제도적

대안으로 제시하였다.

3) 헌법재판 제도에는 민주주의와의 부조화 문제가 내재하고 있다. 특히 미국의 경우 Bush v. Gore 사건(2000) 이후 많은 진보 헌법학자들이 법원이 아니라 국민이 최종적 헌법해석자라는 주장을 하였다. 우리나라에서도 현행 헌법재판소 제도에 대해 ‘제왕적 헌법재판소’, ‘후견주의’ 라고 비판하는 의견이 있다. 이러한 주장의 내용과 논거, 그리고 사법최고성(judicial supremacy)을 인정하는 학자들의 비판 등을 분석하고, 미국헌법과 달리 헌법이 명문으로 헌법재판 제도를 인정하고 있는 우리 헌법해석상 이러한 논의가 가지는 함의를 살펴보고 고도의 통치행위에 대한 국회나 정부의 판단 존중, 헌법재판관 자격확장, 헌법재판에 있어 국민여론의 존중 등을 주장하였다.

4) 헌법소원 심판제도는 현행헌법에서 처음 도입되었고 헌법재판소 심판청구 사건에서 가장 많은 수를 차지하고 있을 뿐 아니라 논란도 많은 제도이다. 현행 헌법소원제도가 가지고 있는 헌법재판소법 제68조 제2항의 헌법소원 문제, 보충성의 원칙의 예외문제, 명령·규칙·처분에 대한 헌법소원 인정 여부, 재판소원 등의 문제에 관해 현행법 하의 해석과 제도적 문제점, 개선방향에 대해 연구한 바 있다.㉔

[신임회원 업적소개]

인문사회 제6분과 전병헌 회원(경제학)



경제학의 한 가지 매력은 빈곤한 사람들을 구제하는데 실질적인 도움을 줄 수 있다는 점이다. 또 한 가지 매력은 이를 감정에 치우치지 않고 이성적으로 처리한다는 점이다. 나는 후자에 이끌려 경제학을 더욱 깊이 알고 싶어 대학원에 진학했고, 이성적 논리의 공통 언어인 수학의 매력에 빠져들었다. 나의 분야는 미시경제이론이라 할 수 있다. 이 글에서는 주요 논문들을 게재된 시점에 따라 요약함으로써 연구내용을 소개하고자 한다.

1. 협상이론

박사학위를 준비하는 시기에 경제이론 분야의 주요 연구 토픽은 게임이론이었고, 내가 다니던 펜실베니아 대학에도 협상이론의 대가인 Ken Binmore, Ariel Rubinstein, Asher Wolinsky 등이 방문하여 강의 및 특강을 진행하였다. 당시 협상이론은 노벨 경제학상 수상자인 내쉬의 공준적 협상해를 비협조적 게임의 균형으로 설명한 Rubinstein의 연구를 중심으로 활발하게 연구가 이루어지고 있었고, 그런 분위기에 힘입어 협상이론을 노조 결성에 응용한 논문으로 첫 논문을 발표하게 되었다.

(1) 비협조적 협상과 노조형성

논문의 주제는 서로 성격이 다른 두 노동자 그룹이 사용자를 상대로 노사협상을 진행할 때 하나의 노동조합을 결성하는 것은 언제이고, 각각 별개의 노동조합으로 협상하는 것은 언제인가 하는 것이었다. 이를 분석하기 위해 먼저 모형을 만들었다. 첫 기에는 두 노조 대표가 만나 하나의 노조를 결성할 것인지 결정한다.

두 노조는 생산성과 노조원 수에 있어 차이가 난다. 생산성이 높은 노조를 H, 낮은 노조를 L로 표기하고, 노조원의 수를 각각 n_H, n_L 로 표기한다. 생산성이 낮은 노조

의 생산성을 1로 했을 때 생산성이 높은 노조의 생산성을 $\gamma (> 1)$ 라 한다.

먼저 H가 하나의 노조를 구성할 것인지 두 개의 개별 노조를 구성할 것인지, 하나의 노조를 구성한다면 임금에 차별을 둘 것인지 선택한다. 두 개의 노조를 구성하기로 선택하면 다음 단계로 넘어가 두 노조가 동시에 사용자와 협상을 진행한다. 하나의 노조를 구성하고 동일한 임금을 받기로 선택하면 L의 동의를 얻어 하나의 노조로 사용자와 협상한다. 하나의 노조를 구성하되 임금을 다르게 하려고 하면, 임금 격차에 대해 두 노조가 협상을 시작한다. 중간에 협상이 결렬되면 다음 단계로 넘어가 두 노조가 각각 사용자와 협상을 시작하고, 협상이 타결되면 하나의 노조로 사용자와 협상을 시작한다.

이 게임의 결과는 생산성의 차이(γ)와 노조 구성원의 상대적 크기($\lambda = n_L/n_H$)에 의해 결정된다. (그림 1 참조) 생산성의 차이가 적거나(I, IV) 생산성으로 환산한 크기($n_L/\gamma n_H = \lambda/\gamma$)가 비슷하면(III) 하나의 노조가 구성되고, 그렇지 않은 경우에는(II, V) 별개의 노조가 구성된다.

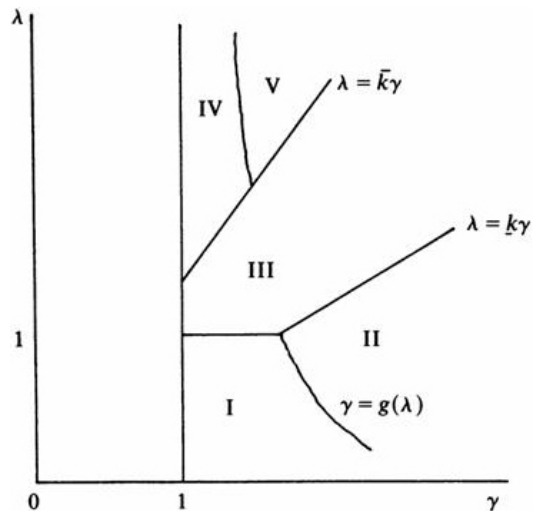


그림 1.

다. I과 IV는 비슷한 생산성과 동일한 임금을 받는다는 점에서 직업별 노조의 특성을 갖고 있다. 또한 상대적으로 구성원의 숫자가 적을수록 더 큰 협상력을 갖는다는 것이 λ 가 작을수록 더 큰 생산성 격차를 극복하는 것으로 나타난다. 하나의 노조를 구성했을 때 H가 L과 차별화된 임금을 받을 수 있는 것도 H 구성원의 수가 L보다 작을 때뿐이다 ($\lambda > 1$, III).

(2) 비대칭적 정보 하의 협상에서 종업원 인수

이 연구는 뉴욕주립대 스토니브룩에 재직할 때 노사관계론을 전공하는 Avner Ben-Ner 교수와 함께 시작하였다. 연구 주제에 대해 논의하던 중 회사를 종업원이 인수하는 일이 회사가 재정적인 어려움을 겪을 때 흔히 나타난다는 사실에 착안하여 이를 비대칭적 정보 하의 협상으로 설명하고자 하는 생각을 하게 되었다.

당시 협상이론은 주어진 파이의 크기를 어떻게 나누느냐에 관심을 두고 모든 모형이 파이 크기를 놓고 협상하는 형태로 구성되었다. 대칭적 정보 하에서는 협상이 지체 없이 타결되지만 비대칭적 정보 하에서는 시차를 두고 파이가 큰 경우부터 순차적으로 협상이 타결된다는 것이 이러한 모형의 결론이었다. 즉, 결여된 정보를 해결해주는 선별자의 역할을 시간이 담당하는 것이다. 협상이 지체될수록 손해가 큰 (파이가 큰) 사람부터 일찍 양보하여 순차적으로 협상이 타결된다.

협상 대상에 파이의 크기뿐 아니라 파이를 나누는 방법까지 포함시키면 어떤 결과가 나타날 것인가가 이 논문의 주요 연구 내용이다. 즉, 사업주와 종업원이 임금만 놓고 협상할 것이 아니라 종업원이 회사를 인수하는 경우를 염두에 두고 인수가격도 협상에 포함시키는 것이다.

모형을 소개하면 다음과 같다. 회사가 창출할 수 있는 가치는 H 또는 L이다 ($H > L$). 사업주는 이 가치의 크기를 알고 있지만 종업원은 이를 알지 못하고, 다만 H일 확률이 π_0 라는 것(따라서 L일 확률이 $1 - \pi_0$ 라는 것)만을 안다. 먼저 종업원이 협상안 (w, v)를 제시하는데, 이것의 의미는 w의 임금을 받고 종업원으로 일하든가 v의

가격에 회사를 인수하겠다는 것이다. 만일 사업주가 둘 중 어느 하나를 수락하면, 협상이 종결되고 임금이 타결된 경우에는 종업원이 w, 사업주가 $R - w$ (R은 H 또는 L)의 이득을 얻게 된다. 회사 인수를 수락한 경우에는 종업원이 $R - v$, 사업주가 v의 이득을 얻게 된다. 만일 사업주가 모두 거부한 경우에는 다음 기에 사업주가 협상안 (w, v)를 제시한다. 이처럼 협상이 타결될 때까지 번갈아가며 협상안을 제시하는 것이다. 협상이 한 기 지체되면 파이의 가치는 δR ($\delta < 1$)로 줄어든다.

이 모형의 유일한 균형은 종업원이 첫 기에 $(H/(1 + \delta), \delta L/(1 + \delta))$ 를 제시하고, 사업주는 $R = H$ 일 때는 임금안을 $R = L$ 일 때는 회사 인수안을 수락하는 것이다. 즉, 회사 인수 가능성을 함께 논의함으로써 협상이 지체될 때 발생하는 손실을 막을 수 있고 협상 당사자들은 완전 정보 하에서 얻는 것과 동일한 이득을 얻을 수 있게 된다. 달리 표현하면 시간이 담당했던 정보 선별자의 역할을 종업원의 회사 인수안을 포함한 메뉴가 대신 담당할 수 있게 된 것이다.

이 모형은 R이 H와 L 두 개의 값을 갖는 경우뿐 아니라 여러 개의 값을 가질 때는 물론 R이 [L, H] 구간의 임의의 값을 취할 수 있는 확률변수일 경우에 대해서도 확장된다. 중요한 것은 이 경우에도 회사가 창출할 수 있는 가치 R이 낮을수록 종업원에 의한 회사 인수가 더 높은 확률로 발생한다는 점이다.

2. 동태적 복점 경쟁

동태적 복점 경쟁에 대한 연구는 펜실베니아대학 박사과정에서 만난 Xavier Vives 교수와 함께 진행하였다. Vives 교수는 산업조직론 분야의 대가로 바르셀로나의 경제연구소로 이직할 때까지 나의 지도교수였던 분이다.

복점이란 두 개의 기업이 경쟁하는 시장구조를 말한다. 두 기업의 경쟁수단에는 가격 또는 수량이 있다. 정태적 분석이란 한 시점에서 이 가격 또는 수량을 선택하

는 것을 분석하는 것으로 이 선택을 두 기업 간의 게임으로 모형화 하고, 균형을 구한다. 동태적 분석은 목적에 따라 시간을 이산적(discrete)으로 또는 연속적으로 구분하여 매 시점에서의 선택을 연구하는 것이다.

우리의 연구는 경쟁수단인 가격이나 수량이 변할 때 조정비용(adjustment cost)이 발생한다면, 연속적인 시점에서 어떤 선택이 이루어지고 장기적인 균형은 어떤 특성을 갖는가를 분석하는 것이었다. 장기적인 균형이란 시간이 흘러도 가격이나 수량이 변하지 않는 상태를 말하며, 이 중에서 open loop 균형(OLE)과 Markov 완전균형(MPE)이 많이 사용된다.

연속적 시간의 동태적 모형은 미분게임(differential game)으로 분석한다. 매 시점에서 기업의 이윤은 상태변수(state variable)에 의해 결정되고 기업은 상태변수를 얼마나 변화시킬 것인지 즉, 상태변수의 미분을 얼마나 할지 선택하는데 이를 제어변수(control variable)라 한다. OLE는 제어변수가 시간만의 함수인 경우로 장기 균형 상태는 정태적 모형의 내쉬균형과 일치한다. MPE는 제어변수가 상태변수들의 함수인 경우다. OLE는 동태적 환경에서의 전략적 요소가 결여된 균형으로서 전략적 요소가 포함된 MPE와의 비교를 위해 사용된다.

이전까지의 연구는 조정비용이 자신의 제어변수의 함수인 경우만을 분석했는데 우리의 연구는 조정비용이 상태변수와 다른 경우, 예컨대 상태변수가 가격이고 조정비용이 수량의 미분에 따라 결정되는 경우를 포함한다. 또한 비선형 모형을 포함하는 일반적인 모형을 분석하므로 얻어진 결과에 대해 보다 정성적인 설명을 제공한다.

두 기업의 상태변수를 (y_1, y_2) , 그때에 기업 i 의 이윤을 $R_i(y_1, y_2)$, 제어변수를 u_i 라고 하면 $u_i = dy_i/dt$ 이다. 조정비용이 발생하는 변수를 z_i , 조정비용을 $F(dz_i/dt)$ 라 하면 기업은 $R_i(y_1, y_2) - F(dz_i/dt)$ 의 현재가치의 합을 극대화하려 한다. Markov 전략은 제어변수가 상태변수 (y_1, y_2) 의 함수이며, MPE의 장기균형에서는 다음 식이 성립한다.

$$\frac{\partial R_i}{\partial y_i} + \frac{\frac{\partial R_i}{\partial y_j} \frac{\partial u_j}{\partial y_i}}{r - \frac{\partial u_j}{\partial y_j}} = 0 \quad (r \text{은 할인율}) \quad (1)$$

두 기업이 모든 면에서 동일하고(따라서 대칭적인 균형을 고려한다), 안정적인 MPE를 (y^*, y^*) 라 하면 $\frac{\partial u_j}{\partial y_j} < 0$, 따라서 $r - \frac{\partial u_j}{\partial y_j} > 0$ 이 성립한다. OLE (y^N, y^N) 이 유일하고 안정적이라면 $\phi(z) \equiv \frac{\partial R_i}{\partial y_i}(z, z)$ 라 할 때, $\phi'(y^N) < 0$ 이고 y^N 이 $\phi(y^N) = 0$ 을 만족하는 유일한 해이므로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{sign}(y^* - y^N) &= -\text{sign} \frac{\partial R_i}{\partial y_i}(y^*, y^*) = \\ &\text{sign} \left(\frac{\partial R_i}{\partial y_j}(y^*, y^*) \frac{\partial u_j}{\partial y_i}(y^*, y^*) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

(2)번 식 우변의 첫째 항 $\frac{\partial R_i}{\partial y_j}$ 가 음수이면 상대가 선택 변수의 값을 증가시킬수록 나의 이윤이 감소하는데 이때 두 변수 y_i 와 y_j 는 전략적 대체관계, $\frac{\partial R_i}{\partial y_j}$ 가 양수이면 전략적 보완관계에 있다고 말한다. (2)번 식 우변의 둘째 항 $\frac{\partial u_j}{\partial y_i}$ 는 시점간 전략적 관계를 나타내는 변수로 그 부호가 양수이면 나의 선택변수 y_i 가 증가하면 경쟁자의 선택변수의 미분 dy_j/dt 가 증가한다. $\frac{\partial u_j}{\partial y_i}$ 가 양수이면 두 변수가 시점간 전략적 보완관계, 음수이면 시점간 전략적 대체관계에 있다고 말한다. 동태적 경쟁에서 전략적 효과는 이 두 관계에 의해 결정됨을 알 수 있다.

마지막으로 선형-이차 모형(수요함수가 일차함수, 조정비용이 이차함수인 모형)을 분석한 결과는 다음과 같다. 선택변수가 수량이고 (Cournot 경쟁) 수량의 변화가 조정비용을 초래한다면 $\frac{\partial R_i}{\partial y_j}(y^*, y^*) < 0$, $\frac{\partial u_j}{\partial y_i}(y^*, y^*) < 0$ 이고, 따라서 (2)번 식에 의해 $y^* > y^N$ 가 성립한다. 즉, 동태적으로 더 유리한 위치에 서려고 하는 경쟁이 정태적 모형보다 더 경쟁적인 (큰) 생산설비로 나타난다. 선

택변수가 가격이고 (Bertrand 경쟁) 가격의 변화가 조정 비용을 초래한다면 $\frac{\partial R_i}{\partial y_j}(y^*, y^*) > 0$, $\frac{\partial u_j}{\partial y_i}(y^*, y^*) > 0$ 이고, 따라서 역시 $y^* > y^N$ 가 성립한다. 즉, 이 때는 두 변수의 전략적 보완관계와 시점간 전략적 보완관계가 더해져 가격이 정태적 모형보다 더 높아지는 담합적 결과가 얻어진다. 마지막으로 선택변수는 가격이지만 수량의 변화가 조정비용을 초래하는 경우에는 $\frac{\partial R_i}{\partial y_j}(y^*, y^*) > 0$, $\frac{\partial u_j}{\partial y_i}(y^*, y^*) < 0$ 이고, 따라서 $y^* < y^N$ 가 성립한다. 즉, 동태적 균형이 정태적 Bertrand 경쟁보다 더 치열한 경쟁의 결과를 초래한다.

3. 불완전 정보 하의 기술사용 허가

새로운 기술의 도입은 생산비용을 낮춰 기업의 이윤을 증가시킨다. 그러나 경쟁기업이 새로운 기술을 도입하면 내 기업의 이윤은 감소한다. 이러한 경쟁 관계 때문에 기술 특허를 가진 사람이 어떤 방법으로 누구에게 기술 사용을 허가하는가에 따라 특허권자의 수입이 달라질 수 있다.

특허권자는 서로 경쟁관계에 있는 기업 중 하나일 수도 있고 (인사이드), 기업과 관계없는 독립된 연구자일 수도 있다 (아웃사이드). 완전정보 하에서는 특허권자가 아웃사이드인 경우에는 고정가격이나 경매처럼 생산량에 관계없이 일정한 금액을 지불하는 것이 특허권자에게 유리하고, 인사이드인 경우에는 생산량에 비례해 대가를 지불하는 사용료(royalty) 계약이 유리하다고 알려져 있다.

이 연구에서는 서로 경쟁관계에 있는 두 기업 중 하나 (인사이드)가 새로운 기술을 개발했을 때 이 기술을 경쟁 기업에게 사용하도록 허가해 주는 것이 유리한지, 허가한다면 어떤 계약을 맺어야 하는지 분석한다. 이 연구는 Elmar Wolfstetter 교수와 그의 제자인 Cuihong Fan 교수와 함께 수행하였다.

두 기업이 경쟁하고 있는 복점 산업에서 기업 1이 새로운 기술을 개발하여 단위당 비용이 c 에서 d 로 낮아졌다. 이 기술을 2가 사용하도록 허가하면 2의 단위당 생산비용이 c 에서 x 로 낮아진다. 2는 x 를 알고 있으나 1은 x 가 $[\underline{x}, \bar{x}]$ 구간에 속하고 c.d.f.가 G 인 확률분포를 하고 있다는 사실만 알고 있다 ($0 \leq \underline{x} < \bar{x} \leq c$). 1은 2에게 x 를 알려 달라고 하고 2의 답변에 따라 기술사용 계약이 체결된다. 계약이 체결된 후에는 두 기업이 Cournot 경쟁을 한다. 즉, 두 기업이 각각 생산량 q_1, q_2 를 선택하고 가격이 $P(q_1 + q_2)$ 로 정해지면, 이윤 $\pi_i = (P(q_1 + q_2) - c_i)q_i$ 를 얻는다 ($i = 1, 2, c_1 = d, c_2 = x$). 가격함수(역수요함수)는 1차 함수이고 기울기는 -1 , 절편은 1로 정규화 한다. 즉, $P(q_1 + q_2) = 1 - (q_1 + q_2)$ 이다.

물론 2가 자신의 단위당 비용 x 를 정직하게 말한다는 보장은 없다. 이 연구의 주제는 2가 자신의 x 를 속일 인센티브가 없고 1의 총이윤, 즉 생산물 판매이윤과 기술 이전 수입의 합을 극대로 할 수 있는 계약함수를 찾는 것이다. 계약함수란 2와 체결할 기술사용 계약을 2의 답변의 함수로 표시한 것이다. 이 함수를 마치 메뉴처럼 2에게 제시하여 2로 하여금 이 중 하나의 x 에 해당하는 계약을 선택하라고 요구하는 것이다. 2는 이중 하나를 선택하거나 모두 거절할 수 있다. 계약은 고정가격 f 와 사용료율 r 로 이루어져 있다. 계약함수는 각각 $f(x)$ 와 $r(x)$ 로 표시되고, 2의 답변이 x 이면 2의 생산량 q_2 에 따라 총 $f(x) + r(x)q_2$ 의 기술사용료를 지불하게 된다. 반독점당국의 규제(기술이전 이후의 시장가격이 기술이전 전보다 높지 않아야 한다)에 따라 다음 식을 만족해야 한다.

$$x + r(x) \leq c, r(x) \geq 0 \tag{3}$$

또한 거짓 답변을 하지 않도록 하려면, x 라고 답변한 기업에게 기술이전을 한다면 $z < x$ 라고 답변을 한 기업에도 기술이전을 해야 한다. 따라서 다음과 같은 숫자를 정의할 수 있다.

$$\hat{x} = \text{Sup}\{x | \text{답변이 } x \text{일 때 기술이전}\} \tag{4}$$

거짓 답변을 막기 위한 또 하나의 조건으로 다음 식이

도출된다.

$$\frac{r(x) - r(z)}{x - z} \geq -\frac{1}{4}, x, z \leq \hat{x} \quad (5)$$

(3) - (5)의 제약조건 하에 $r(x)$, $f(x)$ 를 상태변수, $r'(x)$ 를 제어변수로 하여 최적제어문제를 풀면 계약함수 $r(x)$, $f(x)$ 를 구할 수 있는데 이를 예시하면 그림 2와 같다.

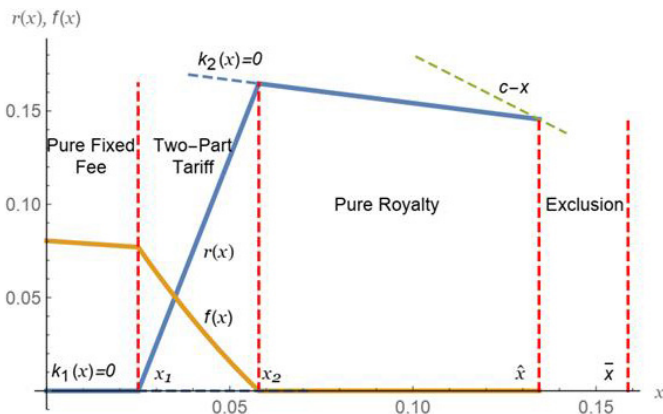


그림 2.

k_1 은 (3)의 제약에 의해, k_2 는 \hat{x} 과 (5)의 제약에 의해 얻어진다.

기술이전 계약은 x 가 가장 낮은 수준에서는 고정가격 만으로, x 가 높아질수록 생산에 비례한 사용료(royalty)가 포함되는데 사용료 r 은 경쟁자의 단위당 비용 x 가 높아질수록 증가하다가 제약에 걸려 감소한다. 이러한 형태를 갖는 기본적인 이유는 비용이 낮은 경쟁자에게 한계비용($x + r(x)$)을 낮춰 더 많은 양을 생산하도록 하는 것이 생산의 효율성을 높이기 때문이다. 생산의 효율을 높여 얻어진 이윤을 고정가격의 형태로 특허권을 가진 기업이 흡수하게 된다.

$r(x) = 0$ 인 구간에서 $f(x)$ 가 감소하는데, 그림에도 불구하고 거짓 답변이 방지되는 것은 무슨 이유일까? 낮은 f 를 선택하면 기업 1은 상대의 한계비용(x)이 높은 것으로 인식하고 생산량(q_1)을 높게 책정하기 때문이다. 즉, x 가 낮으면 높은 고정가격을 지불하더라도 낮은 q_1 (이는 높은 시장가격을 의미한다)으로 충분히 보상이 되는 것이다.

같은 이유로 $f(x) = 0$ 인 구간에서 $r(x)$ 가 감소하는 것도 거짓 답변할 인센티브를 발생시키지 않는다. ㉔

[회원기고]

식물의 운동성

安鎮興 會員(식물분자생물학)



대부분의 식물은 땅에서 물과 양분을 흡수하기 때문에 고정된 위치에서 산다. 따라서 동물처럼 이동하지 않고 한 자리에서 환경변화에 대처하며 산다. 그렇다고 해서 식물이 한평생 제힘으로 움직이지 못하는 돌덩어리처럼 살지는 않는다. 뿌리는 고정되어 있지만 지상부는 능동적으로 움직이며 주변의 상황에 대처한다. 일부 식물은 동물의 활동에 못지 않게 빠르게 움직이며 환경변화에 대응하지만, 대부분의 경우 식물의 움직임은 느끼기 때문에 육안으로는 쉽게 관찰되지 않는다. 그러나 식물의 운동성은 이들이 살아가는데 필수적인 활동 중 하나이다.

앞으로 구성되어 있는데 저녁이 되면 잎이 처지며 작은 잎을 가지런히 접는다. 이러한 모습이 잠을 자는 것 같아서 ‘자는 귀신’이라 하여 자귀나무라고 부른다 (그림 1). 아카시나무, 강낭콩, 토기풀 등 대부분의 콩과식물은 밤에 작은잎을 단았다가 아침에 펼친다. 팽이밥도 저녁이 되면 잎을 움츠린다.

1. 빠른 움직임

동물은 근육의 수축 기작에 의해 움직이지만 식물은 근육이 없어 다른 방법을 사용한다. 식물은 물의 압력을 이용하여 움직인다. 식물 세포에는 세포벽이 있어 세포 안에 물이 많이 들어와 세포 주변보다 압력이 높아져도 세포가 상하지 않고 견딜 수 있다. 이렇게 생긴 수압을 팽압(turgor pressure)이라고 하는데, 세포 안의 용매 농도가 세포 밖보다 높으면 물이 들어와 세포 안의 팽압이 올라가서 세포 주변으로 밀어내는 힘이 생긴다. 팽압이 올라가면 세포벽이 팽창하거나 구부러지기도 하며 비틀어지기도 한다. 이렇게 변형된 조직은 에너지를 저장하고 있다가 갑자기 에너지가 방출되면 움직이는 힘이 생긴다. 반대로 용매가 밖으로 나가면 세포의 팽압이 내려가서 원래의 위치로 돌아간다.



그림 1. 자귀나무 잎. 밤에 잎을 접었다가 아침에 펼친다.

1.1 잎을 움직이게 하는 엽침

산기슭에 한여름이 되면 분홍색 꽃을 피우는 나무가 있다. 이 나무의 잎은 아카시나무 잎처럼 여러 장의 작은

햇빛의 밝기에 따라 이러한 주기성 수면운동을 하게 하는 것은 엽침(pulvini)이다. 잎이나 작은잎의 아래 부분이 줄기와 만나는 곳에 부풀어진 곳을 엽침이라고 하는데, 세포의 팽압에 의해 움직여 잎이나 작은잎을 움직이게 한다. 물리적 자극에 의해 작은잎을 수초 안에 닫는 미모사도 엽침이 움직임을 조절한다. 기온이 22도 이상으로 올라가면 두 개의 작은잎이 눈에 보이는 속도로 회전운동을 하는 무초도 엽침에 의해 잎의 운동이 조절된다. 흥미롭게도 무초의 잎은 소리에 반응하여 움직인다.

엽침에는 여러 개의 유세포가 원통 모양으로 배열되어 있는데, 세포벽이 얇고 유연성이 커서 팽압에 의해 빠르게 팽창하거나 수축한다. 자극을 받으면 바깥쪽에 배열된 유세포는 팽창하고 그 안쪽에 배열된 유세포는 수축

을 하여 그 결과 엽침이 굽어져 이에 달려있는 잎이 접히게 된다. 엽침 유세포의 팽창과 수축은 S-type 음이온 채널 단백질이 Cl^- 이온을 이동시켜서 일어나는데, 이 단백질을 만드는 유전자가 아침에 발현이 가장 높아서 잎을 벌리게 한다. 추가로 K^+ 이온을 이동시키는 단백질을 만드는 유전자도 하루의 리듬을 타며 발현을 하여 유세포의 이온 농도를 조절한다.

이온의 농도를 변화시켜 세포 내의 삼투압이 변화하여 물이 이동함으로써 엽침이 움직이는데 걸리는 시간은 몇 분에서 몇 시간이나 되어 육안으로 그 움직임이 쉽게 포착되지는 않는다. 그러나 미모사는 진동의 변화를 인지하여 수 초 안에 잎을 닫는다. 아마도 미모사는 K^+ 와 Cl^- 채널이 활발하여 빠르게 물이 이동하도록 하거나, 아직 알려지지 않은 다른 기작에 의해 엽침에서 물이 빠져나가도록 할 것이다.

1.2 곤충이나 작은 동물을 잡아먹는 식충식물

질소와 인 등의 영양분이 부족한 사막이나 습지 등에서 살아가는 식물 중에는 파리나 모기와 같은 작은 벌레를 잡아서 영양분을 보충하는 식충식물(insectivorous plants)이 있다. 이 식물에는 먹잇감을 유인해서 잡는 특수한 기관(포충기)이 있는데, 이 기관 내부에 있는 분비샘 조직에서 효소를 분비하여 잡은 벌레를 소화하여 양분을 섭취한다. 식충식물은 포획형, 함정문형, 포충낭형, 끈끈이형, 유도형 등 다양한 방법으로 먹이를 잡는다. 포획형은 먹이가 포충기 안에 들어오면 빠르게 접어서 잡는다. 함정문형은 함정 안에 먹이가 들어오면 문을 닫아서 포획한다. 반면 포충낭형은 주머니 형태로 변형된 잎 안쪽이 왁스로 덮여있어 곤충이 미끄러져 주머니 안쪽으로 떨어지도록 해 놓았다. 끈끈이형은 잎이 털로 덮여 있는데 이곳에서 끈끈한 액체를 분비해서 먹이가 붙도록 한다. 유도형은 포충낭 안으로 벌레가 들어오도록 유도해서 잡는다.

포획형과 함정문형 식충식물은 먹잇감을 포획하기 위해 포충잎을 눈 깜짝할 사이에 움직인다. 뒷에 들어온 동물이 달아나기 전에 잡기 위해 포충잎이 재빠르게 움직이는 과정을 관찰하려면 고속촬영을 해서 느린 동작으로 재생해야 볼 수 있다.

가장 잘 알려진 식충식물로는 파리지옥을 들 수 있다(그림 2). 넓게 벌어진 포충잎 안쪽에 있는 감각모를 먹잇감이 건드리면 전기 신호가 형성되며, 이 신호는 포충잎 내의 Ca^{2+} 이온 농도를 증가시켜 잎이 닫히도록 한다. Ca^{2+} 이온 농도 증가는 음이온을 세포 밖으로 몰아내어 세포 내 용매 농도를 떨어뜨리고 이 변화는 물의 이동을 야기시켜 잎이 움직인다. 그러나 물의 이동만으로는 0.1 초 안에 닫히는 속도를 낼 수 없다. 이렇게 빠르게 움직이는 것은 포충잎의 구조 때문이다. 포충잎은 열려있을 때 볼록하게 굽어 있는데, 볼록한 형태를 유지하는 과정에서 탄력에너지가 쌓인다. 먹잇감이 걸리면 저장된 탄력에너지가 급격히 방출되어 잎이 오목하게 굽고 그 결과 잎이 빠르게 닫힌다.



그림 2. 파리지옥. 잎 안쪽의 감각모로 먹잇감을 인지하여 잎을 빠르게 닫는다.

또 다른 예로 빠르게 움직여 먹잇감을 포획하는 식충식물은 통발이다. 연못이나 늪지에서 자라는데 뿌리 없이 물을 떠다니다가 통발처럼 생긴 포충낭 안으로 작은 벌레를 빨아들여 잡는다. 포충낭 안쪽에서 물을 밖으로 퍼내어 통발 안에 음압이 생기면 입구에 있는 문을 닫아 물이 안으로 들어오지 못하게 막아놓는다. 문 밖에는 털이 달려있는데 털을 건드리면 볼록한 형태의 문이 오목하게 바뀌며 문이 열려 순식간에 물이 안으로 들어가며

털을 건드린 벌레도 함께 들어간다. 문은 다시 닫히고 포획된 먹잇감은 통 안에서 식물에 의해 소화된다. 통발의 문이 열리는 것은 털이 움직임으로써 생기는 물리적인 에너지로 일어나며 세포 내의 물의 이동은 일어나지 않는 것으로 보인다.

1.3 모체로부터 멀리 이동하는 열매

자손을 멀리 보내서 새로운 곳에서 자라도록 식물은 다양한 방법을 사용한다. 열매가 바로 아래 떨어져 발아하면 어미의 그늘 때문에 잘 자라지 못하고, 만약 살아남으면 부모자식 간에 경쟁을 하게 된다. 변화하는 환경에 적응하려면 자식들을 여러 곳으로 보내서 보다 적합한 환경에서 살도록 해야 한다. 많은 식물은 자연의 힘을 이용해서 열매를 이동시킨다. 바람은 열매를 날려 보내기에 좋은 매체이다. 민들레는 열매에 달려 있는 파라솔 모양의 털을 이용해서 날아간다. 봄철 공기 중에 솜털 같은 것이 떠다니는데 이것은 버드나무의 열매이다. 단풍나무는 열매에 달린 날개로 회전을 하며 날아간다. 코코넛과 모감주나무는 물가에서 주로 자라는데 물을 이용해서 종자를 이동시키기 때문이다. 연꽃 열매도 물에 의해 이동한다. 이들은 밀도가 낮은 조직으로 열매를 만들거나 열매 안에 공기 주머니를 만들어 열매가 물에 뜨도록 하여 열매가 먼 곳으로 움직이도록 한다. 동물을 이용하여 이동하는 열매들도 많다. 열매를 맛있게 만들어 놓고 동물에게 먹혀 이동하기도 하고, 도깨비바늘이나 집신나물처럼 씨앗에 갈고리를 만들어 지나가는 동물에 붙어서 이동하기도 한다. 제비꽃이나 애기똥풀 열매에는 지방체가 달려있어 개미가 열매를 개미집으로 운반함으로써 이동된다.

식물 자체의 힘으로 씨앗을 모체로부터 멀리 날려 보내는 경우도 있다. 예를 들면 노랑게 익은 봉선화 열매를 건드리면 터지면서 씨앗이 날아간다. 회양목 열매는 한여름이 되어 날씨가 건조해지면 갑자기 셋으로 갈라지며 씨앗을 날려 보낸다. 콩 열매도 익으면 껍질이 터지며 꼬이는 힘으로 씨앗을 먼 곳으로 보낸다. 팽이밥 씨앗은 투명한 막에 싸여있는데, 열매가 터질 때 막이 쪼개지며 뒤집어지는 힘으로 날아간다.

2. 더딘 움직임

식물의 움직임은 대부분 매우 느리다. 그러나 환경 변화에 대응하기 위해서 식물은 지속적으로 움직이며, 성장 과정에서도 최적의 환경을 찾기 위해 식물은 능동적으로 움직인다.

2.1 햇빛을 향해 구부러지는 굴광성

대부분의 식물은 햇빛을 향해 굽는다 (그림 3). 빛을 보다 많이 받아서 광합성 양을 올리기 위함이다. 이러한 굴광성 현상을 깊게 연구한 사람은 찰스 다윈(1809-1882)이다. 진화론을 발표한 후 찰스 다윈은 그의 아들과 식물의 운동성 연구에 많은 시간을 보냈는데, 그들은 어린싹이나 줄기 끝 부위가 빛을 감지하면 세포를 신장시키는 화학물질이 싹의 꼭대기에서 아래로 이동하여 중간 부분이 굽는다고 추측하였다. 이 화학물질은 식물성장 호르몬 중 하나인 옥신이며 이 호르몬은 세포의 신장을 촉진한다는 것이 후세에 밝혀졌다. 옥신은 줄기 끝에서 주로 만들어지며 옥신수송체에 의해 다른 부위로 이동하여 기능한다. 세포막에는 광수용체인 포토트로핀 (phototropin)이 있어서 빛을 인지한다. 포토트로핀은 푸른빛을 받으면 활성화되어 또 다른 세포막 단백질인 NPH와 결합하고 이 단백질에 탈인산화가 일어나서 옥신의 이동을 촉진시킨다고 알려졌다.



그림 3. 어린 오이 싹의 굴광성. 식물은 광합성을 최대화하기 위해 햇빛을 향해 굽는다.

2.2 중력 쪽으로 구부러지는 굴중성

씨앗이 발아하면 뿌리는 땅을 향해 자란다. 어린 식물을 옆으로 누어 놓으면 뿌리는 아래쪽으로 구부러지는데, 뿌리가 꺾여 아래쪽으로 내려가서 땅에 도달하기 위함이다. 사람이 침대에 누워 있다가 다리를 내려 땅을 디디는 것과 마찬가지로 행동이다. 다윈 부자는 어떤 부위가 뿌리를 땅 쪽으로 굽게 하는가를 알기 위해 뿌리 끝을 잘라버리거나 태워서 없앴더니 뿌리가 땅을 향해 굽지 않는 것을 발견하였다. 굽는 곳은 끝에서 좀 떨어진 곳이지만 이곳이 굽도록 하는 것은 뿌리 끝이라는 것을 밝힌 것이다. 다음 실험에서 다윈 부자는 모종을 눕혀 놓고 90분을 기다렸다가 뿌리 끝을 잘랐더니 끝이 잘려나갔는데도 뿌리가 아래로 굽었다. 뿌리가 굽게 하는 신호가 식물을 눕히자마자 뿌리 끝에서 만들어져 굽는 부위로 이동해 나갔기 때문이다.

뿌리 끝에서 중력을 인식하는 곳은 뿌리끝무 중앙부에 있는 평형세포이다. 이 세포 안에 녹말을 다량 함유한 평형석(statolith)이 들어 있는데, 평형석은 인간의 귓속에서 몸의 평형을 잡아주는 이석과 유사한 기능을 한다. 평형석은 중력에 의해 세포 아래쪽으로 모이고 그쪽으로 뿌리가 자란다. 식물을 옆으로 눕히면 평형석이 새로운 바닥으로 이동하고 그 방향으로 뿌리가 굽는다.

눕힌 식물의 싹 부분은 뿌리가 굽는 반대 방향으로 구부러진다. 침대에 누워있던 사람이 다리를 굽혀 땅을 짚고 머리를 치켜세우는 것과 같다. 식물의 윗부분은 뿌리 끝과 반대 방향으로 굽으나 뿌리와 마찬가지로 중력을 인식하여 반응한다. 흥미롭게도 뿌리 반대편에서 중력을 인식하는 곳은 싹의 끝이 아니고 줄기의 내피(endodermis) 세포이다. 이 세포 안에 평형석이 들어 있어 중력에 반응함으로써 지상부가 중력의 반대쪽으로 굽는다.

중력 방향으로 평형체가 가라앉으면 이러한 물리적인 변화가 옥신을 이동시키는데, 뿌리의 경우는 아래쪽으로 이동시켜 중력 쪽으로 자라게 하며, 줄기의 경우 중력의 반대쪽으로 이동하여 위쪽으로 자라게 한다.

2.3 회전운동을 하는 새싹

다윈은 여러 식물 모종 끝의 움직임을 관찰한 결과 모

든 식물은 회전운동을 반복적으로 하는 것을 발견하였다. 실험 자료로 쓴 다양한 속씨식물(angiosperm) 및 겉씨식물(gymnosperm), 양치식물(fern)에서 모두 회전운동이 관찰되었다 (그림 4). 회전 패턴은 종마다 달라 원형을 그리는 것이 있고 타원형으로 도는 것이 있었다. 회전 반경이 10cm에 달하는 큰 원을 그리는 식물이 있는 반면 아주 작은 원을 그리는 식물도 있었다. 어떤 식물은 비교적 고정된 속도로 움직인 반면 불규칙적인 속도로 움직이는 식물이 있었다. 이러한 현상을 보고 다윈은 모든 식물에 회전운동을 하는 능동적 능력이 내재하고 있다고 주장하였다. 그러나 이러한 견해는 다른 과학자들에게 널리 받아들여지지 않았다. 바람 등의 외부 자극에 의해 싹의 끝이 이동하면 중력에 의해 싹은 자극의 반대쪽으로 움직이게 되고 그러한 과정에서 회전운동이 일어난다고 이들은 주장했다. 회전운동이 중력에 무관하게 식물이 갖고 있는 행동인지 여부는 중력이 없는 우주공간에서 밝혀졌다. 우주정거장에서 발아시킨 모종의 행동을 관찰한 결과 무중력 상태에서도 식물은 회전운동을 하였다. 다윈의 가설 즉 “식물은 회전운동을 능동적으로 한다”는 것을 증명한 것이다. 식물은 자신의 힘으로 싹의 끝을 회전시키고 바람과 중력에 의해 그 움직임의 크기와 속도가 증가되는 것이다. 모종 끝이 회전운동을 하는 이유는 자라날 공간을 찾기 위함일 것이다. 공간이 넓은 곳으로 자라야 햇빛을 많이 받을 수 있기 때문이다.

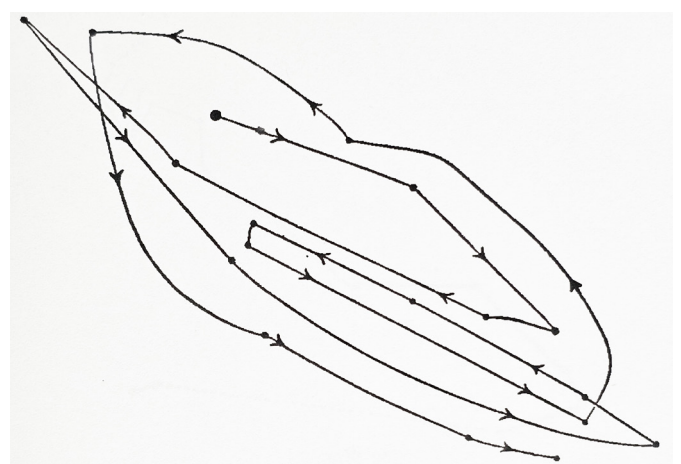


그림 4. 양배추 모종 끝의 움직임. 아침 10시부터 오후 8시 45분까지 약 40분 간격으로 모종 끝의 위치를 기록함 (Charles Dawin and Francis Dawin, 1880. The Power of Movement in Plants)

2.4 덩굴식물

대부분의 식물은 자신을 지탱하기 위해 줄기를 튼튼하게 하면서 자라기에 많은 에너지와 시간을 들이지만, 덩굴식물은 줄기를 만드는데 에너지를 최소한 쓰고 남에게 의존하여 자란다. 그래서 덩굴성 식물은 빨리 자란다. 다른 나무를 타고 올라가 햇빛을 많이 받기 위해서이다.

덩굴식물이 다른 식물 위로 올라가는 방법은 다양하다. 흔한 방법 중 하나는 다른 식물을 감고 올라가는 것이다. 덩굴식물의 끝은 다른 식물을 찾기 위해 한두 시간 마다 반경이 몇 cm에서 크게는 1m가 넘게 회전운동을 한다. 이러한 회전운동은 줄기의 서로 반대쪽에 있는 세포가 번갈아 수축과 팽창을 반복하며 일어난다. 이렇게 회전운동을 하다가 끝이 다른 식물의 줄기나 지지물에 닿으면 이를 휘어 감으며 올라간다 (그림 5).



그림 5. 시계방향으로 감으며 올라가는 나팔꽃 덩굴.

회전 방향은 식물에 따라 다른데, 약 95%의 덩굴식물이 시계 방향으로 감으며, 나머지는 시계 반대 방향으로 감는다. ‘갈등(葛藤)’은 칙(葛)과 등나무(藤)를 뜻한다. 칙은 오른쪽으로 감아 올라가고, 등나무는 왼쪽으로 감아 올라가는데, 반대 방향으로 감고 자라는 두 식물이 만나면 서로 엉켜서 제대로 자라지 못한다.

또 다른 방법은 덩굴손을 이용해 다른 식물이나 물체를 붙잡고 자라는 것이다. 덩굴손은 주로 잎이나 작은 잎이 손처럼 변형된 것으로, 잡을 만한 대상을 찾으면 휘감는다. 덩굴손은 접촉에 매우 민감하여 거미줄 정도로 가는 줄기에 접촉해도 회전 운동을 시작한다. 휘감은 후에도 빙빙 돌기를 계속해서 단단히 끌어안는다. 이러한 운동은 줄기를 접촉한 세포들이 수축을 하는 반면 바깥쪽의 세포들이 팽창하기 때문으로 알려졌으나 정확한 기작은 알려져 있지 않다. 덩굴손은 항상 같은 방향으로 도는 곳이 아니고 시계 방향과 반대 방향이 교대로 바뀌어서 너무 심하게 꼬는 것을 방지하는 것으로 보인다. 덩굴식물은 완두콩이 들어 있는 콩과에 많으며, 포도과에도 덩굴식물이 많이 있다. 오이나 호박, 박이 속한 박과에도 덩굴식물이 흔하다 (그림 6). 하천이나 호숫가에 번성하는 가시박은 북미에서 도입된 외래종인데, 물가 식물들을 덩굴손으로 타고 자라나 고사 시킨다. 2009년 생태교란종으로 지정되었으나 번식력이 강해 우리 고유의 식물들이 크게 위협을 받고 있으며 농가의 피해도 심각하다. 으아리속에도 덩굴성 식물이 많은데 이들의 잎은 변형이 일어나지 않고 대신에 잎자루가 접촉에 민감하여 지지물을 휘어 감는다.



그림 6. 호박 덩굴손. 잡을 대상을 찾으면 회전운동을 계속하여 단단히 잡는다.

2.5 식물의 숨구멍인 기공의 움직임

식물에서 가장 활발하게 움직이는 기관은 잎의 표면에 형성되어 있는 기공이다. 기공은 광합성에 필요한 이산화탄소(CO₂)를 흡수하고 증산작용을 위해 물을 방출하는 곳으로 주변 환경에 따라 기공이 열리거나 닫힌다. 물의 증산에 의해 뿌리로부터 물이 흡수되어 지상부로 이동하는 속도가 조절됨으로 땅으로부터 영양소를 흡수하는 속도가 기공의 개폐에 의존한다. 또한 기공 개폐는 식물의 온도를 조절하는 역할을 한다. 따라서 기공은 다양한 스트레스에 식물이 반응하는 첫 번째 관문이다.

기공은 광합성을 활발히 하는 낮에 열리고 밤에는 닫히는 경우가 대부분이다. 그러나 사막과 같은 건조한 환경에서 사는 식물들은 더운 낮에 기공을 닫아 수분 손실을 막고 밤에 기공을 열어 호흡을 한다. 밤에 흡수한 이산화탄소는 말산(malic acid)으로 전환되어 저장하고 있다가 다음날 낮에 분해하여 광합성을 하는데 사용한다. 이렇게 낮에 물 손실을 줄이고 광합성을 하는 현상을 돌나물과(Crassulaceae)가 속한 식물에서 발견하였기에 crassulacean acid metabolism(CAM)이라고 부른다. 기공이 열리는데 걸리는 시간은 수 분 정도이나 수 시간이나 걸리는 경우도 있다. 기공은 한 쌍의 공변세포(guard cell)에 의해 열리거나 닫힌다. 공변세포 안에 용매의 농도가 증가하면 물이 안으로 들어와서 생기는 팽압에 의해 공변세포가 굽어지며 그 결과 공변세포 사이에 구멍이 생긴다. 용매가 나가면 팽압이 떨어지고 공변세포는 제 모습으로 돌아가 구멍이 닫힌다.

Cl⁻, NO³⁻, K⁺ 등 다양한 이온이 공변세포로 들어가거나 나오는 용매로 작용한다. 식물에 물이 부족하면 다양한 이온이 공변세포 밖으로 나가서 세포 내 용매의 농도가 낮아져 공변세포가 닫히는데, Cl⁻ 이온의 이동은 세포막에 존재하는 S-type 음이온 채널 단백질인 SLAC1에 의해서 이루어진다. NO³⁻ 이온 및 말산 등도 각각에 해당하는 특이한 세포막 단백질에 의해 이동한다. 이렇게 음이온이 세포 밖으로 나가면 세포막에 탈분극이 일어나 K⁺ 이온이 따라서 나간다. 물 부족 스트레스에서

식물이 벗어나면 나갔던 이온이 다시 공변세포 안으로 들어와서 세포 안의 용매 농도를 높여 공변세포가 열린다. ㉠

〈참고문헌〉

- Armengot L, Marque's-Bueno MM, Jaillais Y (2016) Regulation of polar auxin transport by protein and lipid kinases. *J Exp Bot* 67: 4015-4037.
- Darwin C, Darwin F (1880) The power of movement in plants. John Murray, London.
- Mano H, Hasebe M (2021) Rapid movements in plants. *J Plant Res* 134: 3-17.
- Minorsky PV (2019) The functions of foliar nyctinasty: a review and hypothesis. *Biol Rev* 94: 216-229.
- Muller UK, Berg O, Schwaner JM et al. (2020) Bladderworts, the smallest known suction feeders, generate inertia-dominated flows to capture prey. *New Phytol* 228: 586-595.
- Negi J, Matsuda O, Nagasawa T et al. (2008) CO₂ regulator SLAC1 and its homologues are essential for anion homeostasis in plant cells. *Nature* 452: 483-486.
- Oikawa T, Ishimaru Y, Munemasa S et al. (2018) Ion channels regulate nyctinastic leaf opening in *Samanea saman*. *Curr Biol* 28: 2230-2238.
- Sack FD (1997) Plastids and gravitropic sensing. *Planta* 203: S63-S68.
- Saito C, Morita MT, Kato T et al. (2005) Amyloplasts and vacuolar membrane dynamics in the living graviperceptive cell of the Arabidopsis Inflorescence Stem. *Plant Cell* 17: 548-558.
- Zadnikova P, Smet D, Zhu Q, Straeten DVD, Benkova E (2015) Strategies of seedlings to overcome their sessile nature: auxin in mobility control. *Front Plant Sci* 6: 218.

[회원기고]

인공지능(AI)은 어떻게 작동하는가? (2) - 작동 기술 -



李秉基 會員(정보통신공학)

2022년 11월 챗GPT-3.5의 출시를 계기로 불붙은 빅테크 기업 간의 AI 개발 경쟁은 날이 갈수록 과열되고 있다. 이들이 디지털 플랫폼 사업으로 축적한 부(富)를 아낌없이 AI 개발에 쏟아붓는 가운데, AI 핵심 칩인 GPU의 값이 천정부지로 치솟고, 엔비디아의 주가 총액이 정점을 향해 치달고 있다. 그 치열한 경쟁 속에 디지털 시대는 서서히 인공지능(AI) 시대로 무르익어 가고 있다.

빅테크 기업들의 과열 경쟁이 AI 시대로의 진입을 앞당기면서, 머지않아 'AI 격차'가 사회적 문제로 부상하게 될 것을 예고하고 있다. AI를 이해하고 사용할 수 있는 사람과 그렇지 못한 사람 간의 사회적 격차가 벌어지게 되는 것이다. 그래서 '디지털 문해력'의 필요성이 'AI 문해력'으로 확장되어, 사회생활의 필수 요소로 부상하고 있다.

이와 같은 변화에 부응하여 AI에 관한 산업적 관심은 물론, 사회적, 개인적 관심도 날로 고조되고 있다. 그런데 관심은 많지만, 접근이 쉽지 않아서 애를 먹게 된다. AI가 마치 블랙박스와 같아서 어떻게 접근해야 할지 종잡을 수가 없다. 인터넷을 찾아보고 챗GPT에게 물어보아도 쉽사리 가닥이 잡히지 않는다. 일단 용어의 장벽에 막히면 더 이상 진도가 나가지 않는다. 그런 중에 AI의 위험성에 관한 글을 접하게 되면 막연한 공포감에 젖게 된다.

AI의 전모를 쉽게 파악하는 방법이 없을까? AI에 관한 무성한 이야기를 걷어내고 핵심 내용에 접근하는 방법은 무엇일까? 그것은 AI가 어떻게 작동하는지 이해하는 것일 것이다. 그런데 만일 곧바로 작동 기술을 설명하면 방

향을 가늠하기 어렵고 용어의 미로에 갇힐 수 있다. 그래서 AI 작동 기술에 앞서 AI의 인지기능을 살펴보는 것이 효과적일 수 있다. AI가 어떻게 질문을 이해하고 답변하는지 짚어보면서, AI의 인지기능을 사람의 경우와 비교하며 이해하는 것이다. 그렇게 해서 AI의 인지기능에 관하여 이해할 수 있게 되면, 그러한 인지기능을 과연 어떻게 기계로 구현할 수 있는지 궁금해지게 된다. 그때 AI의 작동 기술을 살펴보면 AI를 좀 더 쉽게 접근할 수 있을 것이다.

이와 같은 취지에서 먼저 작성한 글이 '인공지능(AI)은 어떻게 작동하는가? -인지 기능-'이다.¹⁾ 본 고는 이 글의 후속편으로 AI의 작동 기술 측면을 다룬다. 앞서 발표한 AI의 인지기능, 즉, AI가 질문을 이해하고 답변하는 기능을 어떻게 AI 시스템으로 구현하는지 살펴본다. 또 그렇게 구현된 AI 시스템을 어떻게 훈련하는지, AI 시스템과 훈련과정은 얼마나 복잡한지, 훈련에는 어떠한 데이터가 사용되는지, 아울러 살펴본다.

1. AI는 어떻게 질문을 이해하고 답변하는가?

사람이 질문을 이해하고 답변하는 과정을 간략하게 요약하면 다음과 같다.²⁾ 이 과정은 인지 및 주목, 해독 및 해석, 정보 검색, 통합 및 추론, 답변 구성, 표현 및 피드백 등의 과정으로 구성된다. 먼저 글 또는 말로 받은 질문을 감각 기관을 통해서 수신하여 인지하면, 이를 해독하고 질문의 문법 구조를 분석하고 단어의 사용과 의미를 해석한다. 질문을 이해하면 기억에서 답변을 구성하는 데 사용할 수 있는 정보를 검색하고, 검색된 정보를

1) 이병기, "인공지능(AI)은 어떻게 작동하는가? -인지 기능-", 대한민국학술원통신 372호, 2024년 7월 1일.
2) AI의 인지 기능에 대한 상세한 내용은 상계서 참조.

질문의 맥락과 비교하고 통합한다. 또한 가장 적절한 응답을 결정하기 위해 논리와 추론을 적용한다. 답변할 내용이 결정되면 이 응답을 어떻게 표현할지 구상하고 적절한 단어와 문장을 선택하여 글로 쓰거나 말로 답변한다. 그와 동시에 답변 내용이 의도된 답변과 일치하는지 점검하고 실시간으로 조정한다 (그림 1(a) 참조).

AI도 사람과 마찬가지로 질문을 이해하고 답변을 생성하지만, 그 작동 방식이 전혀 다르다. AI가 질문을 이해하고 답변하는 과정은 일련의 복잡한 계산 과정을 통해서 이루어진다. 현재 가장 널리 사용되는 트랜스포머 구조를 채택한 AI 모델인 GPT를 예로 들어, AI가 질문을 이해하고 답변하는 과정을 사람의 인지과정과 유사한 형식으로 살펴보면 다음과 같다 (그림 1(b) 참조).

첫째, GPT가 질문을 받으면 입력 텍스트를 토큰화하여 작은 단위로 나누고, 이 토큰들을 임베딩 과정을 통해 수치 벡터로 변환한다. 토큰은 입력 텍스트를 단어 또는 단어의 일부 크기로 나눈 것이다. 훈련 초기에는 수치 벡터를 임의의 값으로 두고 시작하여 차츰 의미론적인 의미를 통합하여 적응해 나간다. 일단 입력 토큰이 수치 벡터로 변환되면, 그 뒤로는 모든 과정이 수치계산으로 처리된다.

둘째, GPT는 자기주목(自己注目, self-attention) 메커니즘을 사용하여 토큰 간의 관계와 상대적 중요성을 분석하고, 질문의 구조, 문법, 맥락을 깊이 있게 이해하여 주제와 의도를 파악한다. 임베딩된 데이터를 여러 단계의 자기주목 계층을 통해 처리하며, 학습된 패턴을 활용하여 이해 내용을 정제한다.

셋째, GPT는 사람처럼 기억(즉, 시스템 내부 메모리)에서 관련 정보를 검색하는 것은 아니지만, 사전훈련을 통해 습득한 광범위한 주제에 대한 지식을 구비하고 있

다. GPT는 그 지식을 바탕으로 입력 데이터의 특징이나 패턴을 식별하고 맥락을 파악한다.

넷째, 입력 토큰 분석으로 질문의 문맥이 파악되면, GPT는 훈련 시 습득한 지식을 토대로 추론하여 답변을 종합한다. 아직 추론 기능이 충분히 발달하지 못했지만, 훈련된 가중치 파라미터와 입력된 토큰 간의 상호작용을 통하여 어느 정도 추론할 수 있다. 따라서 프롬프트(입력 텍스트)에서 예시를 주어 답변을 유도하거나 논리적 사고의 순서를 제시하면 GPT의 추론 능력을 상당 부분 높여줄 수 있다.³⁾

다섯째, 답변할 내용을 자연어로 생성한다. 이때 GPT는 연속적으로 응답 토큰을 생성하며, 질문의 맥락과 이전에 생성된 토큰을 사용하여 다음 토큰을 예측한다. 이 과정은 복잡한 계산과 광범위한 사전훈련 데이터에 의존한다. 생성된 토큰 시퀀스는 텍스트로 변환되어 질문에 대한 답변으로 제시된다.

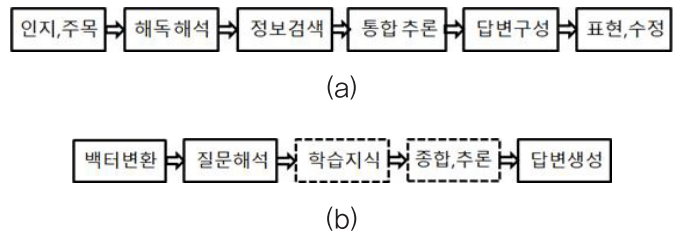


그림 1. 인지 과정: (a) 사람, (b) AI.

그림 1(a)와 (b)를 비교하면 사람과 AI의 인지능력이 서로 비슷한 것처럼 보이지만, 실제로는 구성만 비슷할 뿐, 내용은 다르다. 단적으로 AI는 정보 검색 기능이 없고, 다만 사전 학습된 지식이 내부 정보 검색의 효과를 낼 수 있을 뿐이다. 이것은 추론 기능에 대해서도 마찬가지이며, AI의 추론 기능은 아직 취약한 상태이다. 그림 1(b)에서 ‘학습 지식’과 ‘추론, 종합’ 블록을 점선으로 처리한 것은 이러한 점들을 나타낸다.⁴⁾

3) 프롬프트를 이용하여 AI의 추론 능력을 향상시키는 대표적인 방법으로 맥락 학습(in-context learning, ICL)과 사고 사슬(chain-of-thought, CoT)이 있다. ICL은 AI 모델이 추가 학습 없이 입력 데이터 자체에 들어있는 맥락을 분석하여 학습하고 예측하는 방법이다. CoT는 문제를 단계별로 구분하여 연쇄적으로 해결하도록 유도하는 방법으로, AI 모델이 다단계 추론과 논리적 전개를 더 잘 할 수 있게 해준다.

4) GPT가 일관된 텍스트를 이해하고 생성할 수 있는 능력은 사전에 언어 모델로서 훈련해둔 것에서 비롯된다. 다양한 디지털 텍스트에 대한 사전훈련으로 언어, 문법, 사실, 나아가 추론의 패턴을 학습해 둔 것이 GPT가 관련성 높고 정확하고 일관된 응답을 생성할 수 있게 해준다.

2. AI가 이해하고 답변하는 기능은 시스템적으로 어떻게 구현되는가?

사람이 질문을 이해하고 답변을 구상하는 기능이 뇌의 전두엽을 중심으로 이루어지는 것처럼, AI 모델의 경우에는 이해하고 답변하는 기능이 주로 AI 모델의 내부에 장착된 트랜스포머 블록과 후속 블록들을 통해서 이루어진다. 이러한 기능이 어떻게 시스템적으로 구현되는지 GPT의 구조를 통해서 살펴보자.

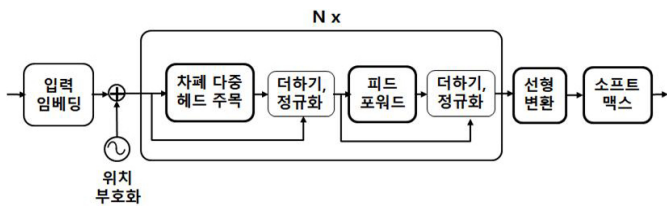


그림 2. GPT의 구조.

GPT 모델의 구조는 그림 2에 보인 것과 같다. 그림의 맨 왼쪽 화살표로 질문이 들어가면, 트랜스포머 구조의 내부에서 질문을 해석하고 맥락을 이해하여 답변을 생성하는 기능이 다 이루어지고, 끝으로 그림의 맨 오른쪽 화살표로 질문에 대한 답변이 나온다.

GPT 모델은, 기능별로 구분하면, 입력 임베딩(input embedding), 차폐 다중 헤드 주목(masked multi-head attention), 피드포워드(feedforward), 선형 변환(linear transform), 소프트맥스(softmax) 등의 블록으로 구성된다. 큰 네모 상자라 표시한 것(차폐 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록 포함)이 트랜스포머 블록이며, 'Nx'는 트랜스포머 블록이 연쇄적으로 N번 반복된다는 표기이다. 큰 틀에서 설명하면, 입력 텍스트를 이해하는 기능은 트랜스포머 블록에서 이루어지고, 답변하는 기능(즉, 출력 텍스트를 생성하는 기능)은 선형 블록과 소프트맥스 블록에서 이루어진다.

1) 입력 임베딩:

입력 임베딩 블록은 그림 1(b)의 '벡터 변환' 기능을 수행한다. 이 블록에서는 입력 텍스트를 단어 또는 그보다 작은 단위의 토큰으로 나누고 그 각각을 수치 벡터로 변환한다. 즉, 입력 임베딩 과정을 통해서 입력 텍스트가

수치 행렬로 변환되는 것이며, 그 뒤로 GPT 내부에서의 모든 과정은 수치계산을 통해서 이루어진다. 입력 텍스트가 토큰으로 분절되어 벡터로 처리되기 때문에 각 토큰의 위치 식별을 위해서 위치 정보를 부호화하여 덧붙여주는 과정이 필요한데, 그림에서 '위치 부호화'(positional encoding)가 그 기능을 담당한다.

2) 차폐 다중 헤드 주목:

이 블록은 (뒤이은 피드포워드 블록과 함께) 질문을 해석하고 맥락적으로 이해하는 기능을 한다. 이러한 기능은 자기주목 메커니즘에 의해서 이루어지는데, 자기주목(自己注目, self-attention)이란 텍스트 시퀀스(sequence, 配列)를 구성하는 각 토큰 벡터가 같은 시퀀스 내의 다른 모든 토큰 벡터를 대상으로 하나씩 주목하며 상호 관련성, 중요도 등을 파악한다는 뜻이다. 이러한 자기주목 기능을 수행하는 블록을 헤드라고 부르는데, GPT는 자기주목 기능을 여러 개의 헤드로 병행하여 처리한다. 이때 헤드마다 입력 데이터의 서로 다른 특징에 주목한다. 이를 '다중 헤드 주목'이라고 부르며, '차폐'라는 접두어를 붙인 것은 과거의 데이터에 의해서만 미래 데이터를 예측하도록 하고 미래 데이터의 영향을 차단한다는 뜻이다. 차폐 다중 헤드 주목을 통과하면, 입력 데이터 내의 패턴을 효과적으로 확인하면서 단어 간의 관계와 맥락을 파악할 수 있다.

다중 헤드 주목 기능을 부연 설명하면, 예를 들어, "강가의 은행은 미끄럽다"는 문장에 대해서 어떤 헤드는 문법 구조에 주목하여 '강가의 은행'을 명사구로 인식하고, 다른 헤드는 의미론적 의미에 주목하여 '은행'이 금융기관이 아닌 식물임을 인식하고, 또 다른 헤드는 텍스트 어조에 주목하여 '미끄럽다'라는 형용사에 집중할 수 있다. 각 헤드는 서로 다른 가중치를 써서 자기 주목 과정을 수행하고, 다중 헤드는 이러한 헤드 여러 개를 병렬로 구성하여 다양한 표현 공간에서 입력 시퀀스의 여러 측면을 동시에 주목한다. 이와 같이 다중 헤드 주목은 여러 헤드를 통해서 서로 다른 특징을 통찰하여 결합함으로써 입력 시퀀스에 대한 포괄적이고 미묘한 내용을 이해할 수 있게 되고, 복잡한 관계에 대한 포착 능력을 향상하게 된다.⁵⁾

3) 피드포워드:

다중 헤드 주목 블록을 통과한 데이터는 피드포워드 블록에서 추가로 변환되면서 복잡한 패턴을 포착한다. 피드포워드 블록은 두 개의 피드포워드 신경망(feedforward neural network, FNN)과 그 중간에 낀 비선형 활성화 함수로 구성된다. FNN은 내부 노드들이 피드백 없이 순방향으로 연결되는 단순한 구조의 신경망이다(그림 5 참조). 첫 번째 FNN은 데이터의 차원을 확장해주고, 비선형 활성화 함수는 비선형성을 통해 더 복잡한 패턴을 학습할 수 있게 해주며, 두 번째 FNN은 데이터를 원래 차원으로 환원해준다. 이러한 구조는 데이터에 복잡한 비선형 변환을 적용함으로써 토큰 간의 고차원적인 상호 관계를 포착할 수 있게 해준다.⁶⁾

차폐 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록의 뒤에 오는 ‘더하기 및 정규화(Add & Norm)’ 블록은 각각 잔차(殘差) 연결과 계층 정규분포화 처리를 나타낸다. 잔차 연결은 블록의 출력에 입력을 더해줌으로써 심층신경망에서 기울기가 소실(消失)되는 문제를 완화해 주고, 계층 정규분포화는 각 계층의 출력에 대한 평균과 분산을 계산하여 출력을 평균 0, 분산 1로 정규분포화해줌으로써 학습 과정을 안정하게 만들어주고 수렴 속도를 빠르게 해준다.

그림 1(b)와 비교하면, 트랜스포머 블록의 차폐 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록은 질문 해석과 학습 지식, 나아가 추론 종합의 기능까지 수행한다고 말할 수 있다.

4) 선형변환 및 소프트맥스:

선형변환 블록과 소프트맥스 블록은 그림 1(b)의 답변 생성 기능을 담당한다. 선형변환 블록은 입력 데이터를 모델의 어휘 크기와 일치하는 공간으로 변환하는 피드포워드 신경망이다. 이 블록은 입력을 로짓(logit, 정규화되지 않은 예측값) 집합으로 확장한다. 소프트맥스 블록은 이 로짓에 소프트맥스 연산을 적용한다. 소프트맥스 함수는 모든 출력값을 음수가 아닌 값으로 변환하고 합이 1이 되도록 하여, 모델이 로짓을 확률 분포로 해석할 수 있게 해준다.⁷⁾ 그리고 이 확률은 각 토큰이 출력 시퀀스의 다음 토큰이 될 확률을 나타낸다. 따라서 확률값이 가장 높은 토큰이 다음 토큰으로 선택되어 출력된다.

3. AI 시스템은 실제로 얼마나 복잡한가?

위에서 살펴본 것과 같이 질문을 이해하고 답변을 생성할 수 있는 AI 시스템은 실제로 얼마나 크고 복잡한지, GPT(구체적으로, GPT-3 175B 모델)를 예로 들어 살펴보자.⁸⁾

1) 입력 임베딩:

임베딩 블록에서는 입력 텍스트가 토큰으로 나뉘고 수치 벡터로 변환된다. 토큰을 단순한 수치로 변환하는 것도 가능하지만, 수치 벡터로 변환하는 것은 토큰 간의 의미적 관계, 구문 역할, 문맥 정보 등을 담고, 트랜스포머 구조에서의 계산을 효율적으로 할 수 있도록 만들기 위함이다. 각 임베딩 벡터의 크기 T는 12,288이다. 이것은 각 토큰이 12,288차원의 벡터로 표현된다는 것을 의미한다. 각 벡터는 32비트 또는 64비트의 부동소수점 숫자로 표시된다.⁹⁾

5) 반면에, 단일 헤드 주목은 헤드를 한 개만 장착하여 입력 시퀀스의 관계나 특징을 한꺼번에 포착하며, 이때 사용하는 헤드의 크기는 다중 헤드 주목의 단위 헤드보다 훨씬 클 수 있다.

6) 일반적으로 사용되는 활성화 함수에는 시그모이드(sigmoid), 쌍곡 탄젠트(hyperbolic tangent, *tanh*), 정류 선형 단위(rectified linear unit, ReLU), 가우스 오류 선형 단위(Gaussian error linear unit, GELU) 등이 있는데, GPT-3의 경우에는 GELU 함수를 사용한다. GELU 함수는 변수에 가우스 누적 분포 함수를 곱하거나 변형 tanh 함수를 곱해서 얻는다.

7) 예를 들어, 각 입력값(s)의 지수(e^s)를 계산한 다음, 그것을 각 입력값의 지수를 모두 합한 값($\sum e^s$)으로 나누는 방식으로 정규화할 수 있다.

8) GPT-4 등 GPT-3보다 더 새로운 모델들이 있지만 시스템 데이터가 공개되지 않았기 때문에 편의상 GPT-3 175B 모델을 대상으로 복잡도를 검토한다. 다른 최신 모델들의 구조, 기능, 복잡도 등도 이 모델의 연장선에 있다고 간주할 수 있다.

9) 이것은 가중치 파라미터의 수 W가 1,750억 개인 GPT-3 175B 모델의 경우이고, 모델에 따라서 수치 벡터의 크기가 달라진다. 예를 들어 W=1억 2,500만 개인 GPT-3 Small 모델의 경우에는 T=768차원이고, W=13억 개인 GPT-3 XL 모델의 경우에는 T=1,600차원이며, W=130억 개인 GPT-3 13B 모델의 경우에는 T=5,120차원이다.

각 토큰에 대해서 변환된 임베딩 벡터를 토큰 전체에 대해서 변환하여 모으면 하나의 행렬 형태가 되는데, 이를 임베딩 행렬이라고 부른다. 토큰 전체의 집합을 어휘라고 부르며, 어휘의 수가 D 인 경우, 임베딩 행렬 W^E 의 크기는 $D \times 12,288$ 이 된다. 실제로, GPT-3 175B 모델의 경우는 어휘의 수가 50,257이므로, 임베딩 행렬의 크기는 $50,257 \times 12,288$ 이다.¹⁰⁾

임베딩 행렬은 다른 가중치 행렬들과 마찬가지로 훈련 과정에서 결정된다. 훈련이 끝나면 임베딩 행렬은 가로축이 입력 토큰이고 세로축이 토큰 벡터인 표의 형태로 저장된다. 사용 단계에서는 이 표에서 각 입력 토큰에 해당하는 임베딩 벡터의 값을 읽어내는 것으로 입력 임베딩 과정이 간단히 끝난다.

2) 차폐 다중 헤드 주목:

차폐 다중 헤드 주목 블록은 트랜스포머 구조의 핵심 블록으로 자기주목 메커니즘을 수행하며, 그 세부적인 기능은 그림 3에 보인 것과 같다.

받아서 자기주목 메커니즘을 수행한다. 먼저, 임베딩 벡터를 서로 다른 가중치 행렬 W^Q, W^K, W^V 로 선형 변환하여 각각 쿼리(query) 벡터 Q , 키(key) 벡터 K , 값(value) 벡터 V 를 계산한다. 여기서 W^Q 는 관련 정보를 찾는 쿼리를 생성하기 위해, W^K 는 그러한 쿼리와 매칭될 수 있는 키를 생성하기 위해, W^V 는 최종적으로 집중될 값을 생성하기 위해, 최적화되도록 훈련되는 가중치 행렬들이다.¹¹⁾ 실제 계산에서는 임베딩 벡터를 다수 모아서 행렬로 만들어 처리하기 때문에, Q, K, V 는 행렬이 된다. 다음, Q 와 K 의 내적 S 를 계산하고 K 벡터의 차원 d_K 의 제곱근으로 나눈 뒤에 소프트맥스(softmax) 함수를 통과하여 확률 분포 A 로 변환한다. 여기서 내적 S 는 각 현재 토큰 벡터가 다른 토큰들을 얼마나 주목해야 하는지를 나타내는 주목 점수이고, 확률 분포 A 는 각 토큰의 상대적 중요성을 나타내는 주목 가중치이다. 끝으로, 값 벡터 V 에 주목 가중치 A 를 곱하여 합산하면 단일 자기주목 출력 O 를 얻고, 다중 자기주목 전체의 출력을 연속연결(concatination)하여 가중치 행렬 W^O 로 선형 변환하면 다중 헤드 주목의 출력 O_{concat} 을 얻는다. 이 출력은 곧 자기주목을 통하여 재구성한 입력 시퀀스의 새로운 표현이다.

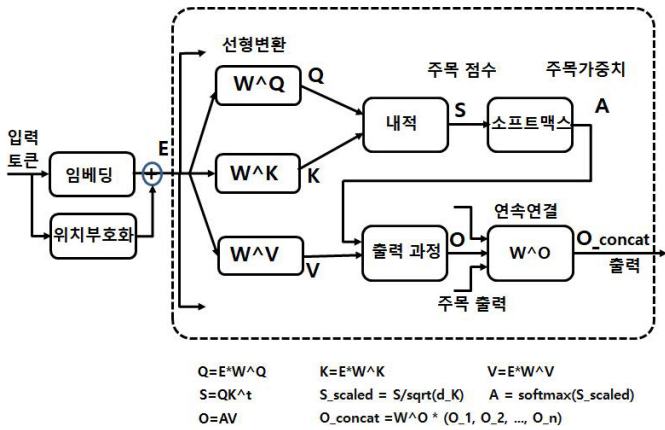


그림 3. 다중 헤드 주목 메커니즘.

그림 3은 다중 헤드 주목 블록에서 수행하는 전체 계산 과정을 보인 것이다. 임베딩 벡터 E 는 복수 개의 헤드(즉, 다중 헤드)에 동시에 입력되며, 각 헤드는 이 입력을

다중 헤드 주목은 단일 헤드 주목에서라면 임베딩 벡터를 일괄적으로 처리했을 것을 헤드 수만큼으로 분할하여 병렬로 처리하는 것에 해당한다. 즉, 임베딩 벡터 차원 T 를 헤드 수 H 로 나누어 각 헤드가 T/H 차원의 벡터를 처리한다. 이때 임베딩 벡터의 차원을 줄이는 일은 각 임베딩 벡터가 가중치 행렬 W^Q, W^K, W^V 각각을 통과하면서 이루어지며, 이를 위해서 각 가중치 행렬의 크기는 $T \times (T/H)$ 로 잡는다. 그 결과로 얻어지는 Q, K, V 벡터는 각각 T/H 차원으로 줄어든다. GPT-3 175B 모델의 경우, 임베딩 벡터의 차원은 $T=12,288$, 다중 헤드의 수는 $H=96$ 이며, 가중치 행렬 W^Q, W^K, W^V 은 각각 $12,288 \times 128$ 크기의 행렬이 된다. 따라서 $Q, K,$

10) 대표적인 영어 사전인 옥스퍼드 영어 사전이 약 60만 단어를 수록한 것과 대조적으로, GPT-3 175B 모델이 상대적으로 적은 약 5만 개의 토큰을 어휘 크기로 사용한다. 그 이유는 모델의 복잡성과 언어의 다양한 뉘앙스 포착 능력 간의 균형을 취하여, 과도한 계산 부하와 메모리 증가 없이 다양한 언어 구조와 어휘를 처리할 수 있도록 하기 위함이다.
 11) 가중치 행렬 W^Q, W^K, W^V 는 각각 쿼리, 키, 값 행렬이라고 부르는데, 훈련 초기에는 단순히 서로 다른 선형변환일 뿐 서로 차이가 없다.

V 벡터는 각각 $T/H=128$ 차원으로 줄어들며, H개의 다중 헤드 주목 블록의 출력을 연속연결한 가중치 행렬 W^O 의 크기는 $12,288 \times 12,288$ 가 된다.¹²⁾

3) 피드포워드:

첫 번째 FNN은 입력 벡터의 차원을 확장해주는 선형 변환이고, 비선형 활성화 함수 처리 후의 두 번째 FNN은 벡터의 차원을 원래 크기로 축소해주는 선형 변환이다. GPT-3 175B 모델의 경우는 차원을 4배로 확장해준다. 따라서 첫 번째 선형변환을 위한 가중치 행렬 W^{F1} 의 크기는 $12,288 \times 49,152$ 이고 두 번째 가중치 행렬 W^{F2} 의 크기는 $49,152 \times 12,288$ 이다. 그 중간의 비선형 활성화 함수인 GELU는 계산이 간단하다.

차폐 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록으로 구성되는 트랜스포머 블록은 연쇄적으로 N 차례 반복된다. 따라서 N은 트랜스포머 신경망의 깊이라고 할 수 있고, GPT-3 175B 모델의 경우, $N=96$ 이다.

4) 선형 및 소프트맥스:

선형 블록에서는 입력 데이터를 어휘 크기와 일치하는 공간으로 선형 변환하여 로짓 집합으로 확장한다. 이를 수행하는 가중치 행렬의 크기는 어휘의 수에 의해서 결정된다. GPT-3 175B 모델의 경우, 어휘 크기가 $D=50,257$ 이므로 선형 블록 가중치 행렬 W^L 의 크기는 $12,288 \times 50,257$ 이다.

소프트맥스 블록에서는 선형 블록의 출력 로짓에 소프트맥스 연산을 적용한다. 소프트맥스는 로짓을 확률 분포로 변환하는 수학적 함수로, 계산이 단순하다.

이상의 논의에서 언급된 가중치 행렬들을 종합하면 그림 4와 같다.

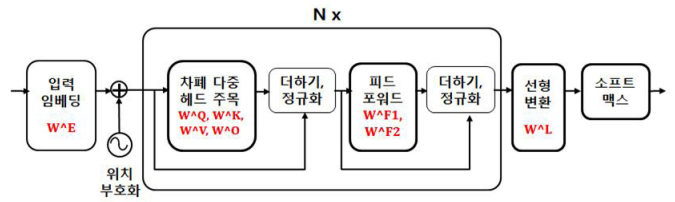


그림 4. GPT-3의 가중치 행렬.

4. AI는 훈련과정에서 어떻게 학습하는가?

AI는 기계 학습을 통해서 학습하는데, 일반적으로 신경망(즉, 인공지능망)이라는 계산 모델을 통해서 학습한다. GPT의 경우에는 여러 가지 신경망 중에서 트랜스포머 구조의 신경망을 채택한다.¹³⁾

1) 신경망 구조

(인공) 신경망은 인간 뇌의 생물학적 신경망 구조와 기능에서 영감을 받은 인공 계산 모델이다. 신경망은 사람이 인지하는 것과 유사한 방식으로 패턴을 인식하고 복잡한 문제를 해결하도록 설계되었다. 사람의 뇌가 뉴런이 상호 연결되어 구성되는 것처럼, 신경망은 상호 연결된 노드들로 구성된다.

일반적으로 신경망은 하나의 입력 계층과 다수의 은닉 계층과 하나의 출력 계층이 연쇄적으로 연결된 구조를 갖는다 (그림 5 참조). 입력 계층은 입력 데이터를 받아들이고, 은닉 계층은 중간에 있는 복수 개의 계층이며, 출력 계층은 출력을 생성한다. 신경망이 구성 계층의 수가 많은 경우에는 심층신경망이라고 부른다.

12) 다중 헤드의 수 H은 모델마다 다르며, GPT-3 Small은 12개, GPT-3 XL은 32개, GPT-3 13B는 40개 등이다. 따라서 가중치 행렬 W^Q, W^K, W^V 의 크기는 GPT-3 Small 모델의 경우 768×64 , GPT-3 XL 모델의 경우 $1,600 \times 50$, GPT-3 13B 모델의 경우, $5,120 \times 128$ 이 된다.
 13) 신경망에는 작업의 특성에 맞춰 설계된 다양한 유형이 있는데, 일반적으로 피드포워드 신경망(FNN), 순환 신경망(RNN), 합성곱 신경망(CNN), 변분 자동부호기(VAE) 신경망, 생성적 대립 신경망(GAN) 등이 널리 사용된다. 트랜스포머 구조는 비교적 최근에 출현한 생성형 신경망으로, 순차적 데이터 처리에 적합하고 긴 시퀀스를 병렬로 처리할 수 있는 장점이 있어서 최신의 AI 모델 대부분에 채택되고 있다.

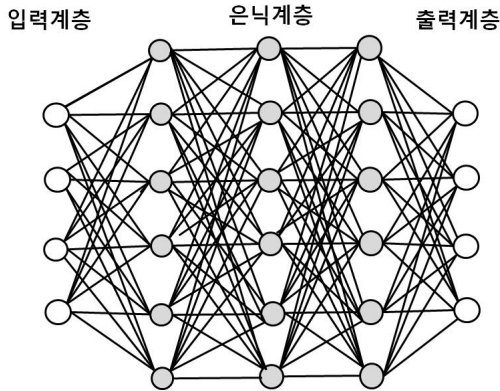


그림 5. 신경망의 구조.

그림 5의 신경망 구조에서 원으로 표시한 노드는 뉴런에 해당하고, 노드를 연결하는 선이 가중치(加重値, weight)에 해당한다. 각 노드는 입력 데이터 x_i 를 받아 가중치 w_i 를 곱하고 합한 다음 편향치 b 를 더해서 활성화 함수 f 를 통과하여 출력을 생성한다. 수식으로 표현하면 $y = f(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_n x_n + b)$ 가 된다 (그림 6 참조). 이때 편향치는 활성화 함수의 작용 지점을 조절해주고, 활성화 함수는 학습의 수렴 속도를 빠르게 해주는 효과가 있다.

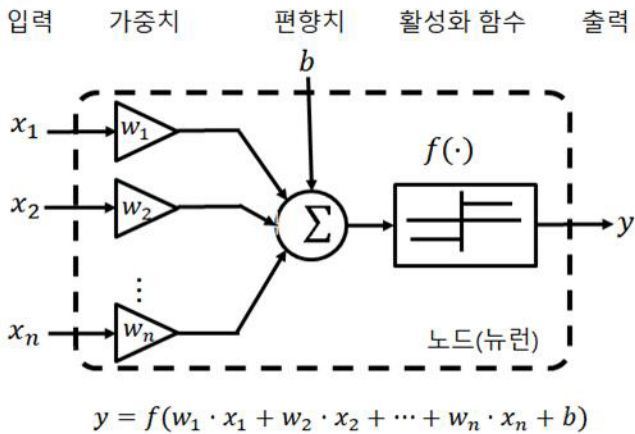


그림 6. 노드(뉴런)의 연산.

위의 계산은 뉴런 한 개에 대한 출력의 계산이며, 각 계층은 복수 개(예, m 개)의 뉴런으로 구성되므로 복수 개의 출력을 내게 된다. 따라서 각 계층의 출력은 m 개의

성분으로 구성된 벡터 Y 로 표기할 수 있다. 입력신호는 n 개의 성분으로 구성된 벡터 X 로 표기할 수 있으므로, 결국 한 계층에 대한 입출력의 관계는 $Y = W \cdot X$ 가 된다. 여기서 W 는 크기가 $n \times m$ 인 가중치 행렬이다. 그러므로 신경망의 각 계층은 가중치 행렬 W 에 의한 선형변환을 수행한다고 말할 수 있다. 물론 선형변환 후에 편향치와 활성화 함수 관련 후속 처리가 뒤따른다.

2) 학습 과정

신경망이 학습하는 과정은 다음과 같다. 먼저 학습용 데이터가 입력되면 입력에서 출력 방향으로 노드 연산 과정을 거쳐서 출력을 생성하는 ‘순방향 전파(傳播)’가 이루어진다. 이 출력값을 목표값과 비교하여 오차를 계산해서 정량화하는 과정을 거치는데 이때 사용하는 함수를 비용함수라고 부른다. 비용함수는 출력값이 목표값에 수렴하면 0에 수렴하도록 설계된다.¹⁴⁾ 따라서 신경망의 학습 과정은 비용함수가 0에 수렴하도록 가중치를 변화시키는 과정이 된다. 이 과정에서 두 가지 요소가 중요한데, 하나는 가중치를 변화시킬 방향, 즉 기울기를 찾는 계산이고, 다른 하나는 그 방향으로 가중치를 변경하는 행동이다. 이중 앞의 요소에 적용되는 기술이 ‘역방향 전파’ 즉 역전파(逆傳播) 기법이고 뒤의 요소에 적용되는 기술이 ‘경사하강법(傾斜下降法)’이다.

최적화 이론에 의하면 비용함수를 최저치로 만들려면 경사도가 가장 큰 방향(즉, 급경사 방향)으로 변화시키면 되고, 그 방향의 기울기는 비용함수를 각 가중치에 대한 편미분을 취해서 구할 수 있다. 그런데 모든 계층에 있는 모든 가중치에 대해서 편미분을 계산하는 것은 계산량이 과도하므로, 미분의 연쇄법칙(chain rule)을 적용하여 계층별로 계산하는 것이 효과적이다. 먼저 비용함수를 맨 마지막 계층인 출력 계층의 가중치들에 대해서 편미분을 취한 후에 끝에서 두 번째 계층의 가중치들에 대해서 편미분을 취한다. 이와 같이 뒤에서 앞으로 거슬러 올라가면서(즉, 역전파 하면서) 맨 앞의 입력 계층까지 계

14) 비용함수로 가장 널리 사용되는 것은 평균자승오차(mean square error, MSE)와 교차 엔트로피(cross entropy) 함수이다. 평균자승오차는 계산된 출력과 목표값의 차이에 제곱을 취하여 평균을 낸 것으로, 계산값이 목표값에 가까울수록 MSE가 낮아진다. 교차 엔트로피 함수는 계산된 확률 분포가 목표값의 분포에 가까울수록 엔트로피가 낮아진다.

산을 마치면, 모든 계층의 모든 가중치에 대해서 기울기를 구할 수 있게 된다. 이렇게 역방향으로 전파하면서 편미분을 구하는 방법이 역전파 기법이다.

역전파 기법으로 각 가중치에 대해 편미분을 계산해서 기울기를 구한 다음에는, 경사하강법을 적용하여 비용함수를 가장 많이 줄이는 방향으로 가중치를 조정한다. 그것은 곧 계산된 경사(즉, 기울기)를 따라서 하강하는 방법이다. 만일 비용함수를 $J(w)$, 기울기를 $\nabla J(w)$ 라 하면, 가중치 w 를 기울기의 반대 방향으로 $w^{(n+1)} = w^{(n)} - \alpha \cdot \nabla Jw^{(n)}$ 만큼 보정하면 된다. 여기서 n 은 시간, α 는 학습률을 나타내는데, 학습률은 변화의 크기를 조절하는 하이퍼파라미터로 사람이 결정한다.¹⁵⁾

이와 같이 AI의 학습은 순방향 전파, 비용함수 계산, 역방향 전파, 가중치 업데이트의 과정을 반복하는 가운데 진행되며, 그 과정에서 가중치가 점진적으로 조정된다. 종국에 비용함수가 0으로 수렴할 때의 값으로 가중치가 결정되며, 그로써 학습이 종료된다.

5. 실례로, GPT 모델은 무엇을 어떻게 학습하나?

앞 절에서 예로 들었던 GPT-3의 경우, 훈련과정을 통하여 학습해야 하는 대상은 가중치 파라미터, 정규분포화 파라미터, 편향치 파라미터 등이며, 그중에 절대다수를 차지하는 것이 가중치 파라미터이다.¹⁶⁾

가중치 파라미터는 가중치 행렬에 들어있는 파라미터이다. 가중치 행렬로는 입력 임베딩 블록에서 W^E , 차폐 다중 헤드 주목 블록에서 W^Q, W^K, W^V, W^O , 피드포워드 블록에서 W^{F1}, W^{F2} , 선형 블록에서 W^L 등이 학습 대상이다 (그림 4 참조). 각 행렬의 크기는, GPT-3 175B 모델을 기준으로, 각각 $W^E: 50,257 \times 12,288$, $W^Q: 12,288 \times 128$, $W^K: 12,288 \times 128$, $W^V: 12,288 \times 128$, $W^O: 12,288 \times 12,288$, $W^{F1}: 12,288 \times 49,152$, $W^{F2}: 49,152 \times 12,288$, $W^L: 12,288 \times 50,257$ 등이다. 특기할 사항은 차폐 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록은 $N=96$ 번 연쇄적으로 반복된다는 점이다.

그림 4를 토대로 GPT-3 175B 모델의 가중치 파라미터의 수를 계산하면 표1과 같다. 위에서 열거한 각 가중치 행렬의 크기와 반복 회수를 반영하여 계산한 것이다. 계산 결과, 가중치 파라미터 수는 총 175,187,060,832

표 1. 가중치 파라미터 수 계산 (GPT-3 175B 모델)

	입력 임베딩	차폐 다중 헤드 주목	피드 포워드	선형 변환
가중치 행렬 크기	$W^E: 50,257 \times 12,288$	$W^Q, W^K, W^V: 12,288 \times 128$ $W^O: 12,288 \times 12,288$	$W^{F1}: 12,288 \times 49,152$ $W^{F2}: 49,152 \times 12,288$	$W^L: 12,288 \times 50,257$
가중치 파라미터 수	$W^E: 617,588,016$	$W^Q, W^K, W^V: 1,572,864 \times 3 \times 96$ $= 452,984,832$ $W^O: 12,288 \times 12,288$ $= 150,994,944$	$W^{F1}: 603,979,776$ $W^{F2}: 603,979,776$	$W^L: 617,588,016$
반복 회수	1	96	96	1
총 가중치 파라미터 수	617,588,016	$(452,984,832 + 150,994,944) \times 96$ $= 57,982,058,496$	$(603,979,776 + 603,979,776) \times 96$ $= 115,964,116,992$	617,588,016
전체 가중치 파라미터 수	175,181,351,520			

15) 만일 학습률 값이 너무 크면 변화의 속도가 빠른 대신에 최적값을 지나칠 수 있게 되고, 만일 너무 작으면 수렴하는 데 시간이 오래 걸리게 된다. 가중치의 수렴 속도를 향상하려면, 기울기가 변화한 이력을 토대로 각 가중치의 학습률을 조절하는 방법을 쓸 수 있다.

16) 실제로, GPT-3 175B 모델의 경우, 가중치 파라미터는 대략 1,750억 개인데, 정규분포화 파라미터는 약 5백만 개, 편향치 파라미터는 약 1천만 개이다.

개 (대략 1,750억 개)이며, 이것은 모델명 175B가 의미하는 것과 부합한다.

GPT-3는 모든 가중치 행렬에 대해서 동시에 학습을 진행한다. 그림 5의 신경망 구조와 비교하면, 위에 열거한 가중치 행렬 각각이 다층 신경망 구조의 한 계층에 해당한다. 다만 각 계층 노드(뉴런)의 계산 결과가 바로 다음 계층에 입력되지 않고 추가 처리 과정을 거친 후에 입력된다는 차이가 있을 뿐이다. 만일 다중 헤드 주목 블록의 3가지 행렬 W^Q , W^K , W^V 가 동시에 계산되는 것으로 간주하면, 가중치 행렬은 입력 임베딩 블록이 1개 계층, 차폐 다중 주목 블록이 2개 계층, 피드포워드 블록이 2개 계층, 선형변환 블록이 1개 계층을 형성한다. 그런데 차폐 다중 주목 블록과 피드포워드 블록이 96번 연쇄적으로 반복되므로, GPT-3 175B 모델은 총 $1+(2+2) \times 96 + 1 = 386$ 개의 계층으로 구성되는 심층신경망이라고 할 수 있다.

그러므로 GPT-3 훈련과정은 386개의 계층으로 구성된 심층신경망에 대한 훈련과정과 같다. 훈련 시, 각 행렬에 들어있는 가중치들을 처음에는 임의의 값으로 설정하고 학습이 진행되는 과정에 수정해간다. 훈련 데이터를 받아서 위에서 설명한 것과 같이 순방향 전파, 비용함수 계산, 역방향 전파, 가중치 업데이트의 과정을 반복하는 가운데 학습을 진행한다. 비용함수가 0으로 수렴하거나 가중치 파라미터들이 변하지 않게 되면 학습이 종료되고, 그 시점에서의 가중치들이 최종 가중치 행렬을 구성한다.

구체적으로, GPT-3 175B 모델은 훈련과정에 자기 지도 학습을 사용한다. 이것은 입력 데이터에서 자체적으로 레이블(목표값, 즉 다음 토큰)을 생성하여 스스로 학습하는 학습 방식이다. 비용함수로는 교차 엔트로피 함수를 사용하며, 예측된 토큰 확률 분포와 다음 토큰의 실

제 분포를 비교하여 계산한다. 입력 데이터는 복수 개의 배치(batch, 즉, 토큰 모음)로 나누어서 처리하며 (배치의 크기는 최대 2,048 토큰), 트랜스포머 블록 내의 모든 계산도 배치 단위로 처리한다. 이때 다음 토큰을 예측하는데 미래의 토큰이 개입되지 않도록 차폐(masking) 처리하며, 비용함수를 토큰 단위로 계산하고 배치 단위로 평균을 취해서 가중치 파라미터 업데이트에 사용한다. 첫 배치에 대해서 순방향 계산, 손실 계산, 역전파 계산 과정을 거쳐 가중치 파라미터를 한 차례 업데이트한 후, 바로 두 번째 배치로 넘어가서 이 과정을 반복하여 두 번째로 업데이트한다. 이런 방식으로 모든 배치에 대해 가중치 파라미터 업데이트가 끝나면, 한 에포크(epoch)가 끝났다고 말한다. 에포크를 거듭 반복하면서 가중치 파라미터를 업데이트하여 비용함수가 0이 되거나 가중치에 변화가 없게 되면 주어진 입력 데이터에 대한 훈련이 종료된다. 그러면 그 최종 가중치를 시작점으로 하여 그 다음 입력 데이터에 대한 훈련이 시작되며, 이와 같은 훈련과정은 모든 훈련용 데이터가 소진될 때까지 계속된다.¹⁷⁾

6. AI는 훈련과정에서 얼마나 많은 데이터를 학습하나?

AI를 훈련하는 목적은 앞의 토큰들을 기반으로 다음에 나올 토큰을 예측할 수 있도록 하는 데 있다. 훈련과정에서 학습의 대상은, 위에서 살펴보았듯이, 가중치 파라미터이고 학습 결과는 가중치 값으로 저장된다.¹⁸⁾ 가중치 파라미터 대부분은 트랜스포머 블록 내의 다중 헤드 주목 블록과 피드포워드 블록에 집중되어 있다. GPT-3 175B 모델의 경우, 트랜스포머 계층 수가 96개이고 가중치 파라미터는 1,750억 개에 달하며, 이렇게 큰 시스템을 구현하려면 매우 많은 수의 메모리와 그래픽 프로세서(GPU)와 텐서 프로세서(TPU)가 필요하다.¹⁹⁾

17) GPT-3은 다양한 출처에서 나온 570기가바이트(GB)의 텍스트 데이터로 훈련된 것으로 알려져 있다. 여기에는 수백억 개의 토큰이 포함되며, 반복된 에포크 수가 수백만 번에 달한다. 이 훈련은 엔비디아 V100 GPU 1,024개를 사용하여 약 34일 걸린 것으로 추정된다.

18) 상대적으로 숫자가 아주 작지만, 편향치와 정규분포화 파라미터도 학습 대상이다.

19) GPU는 원래 그래픽 렌더링을 위해 설계된 것으로, 고도의 병렬처리를 할 수 있고 텐서플로우(TensorFlow), 파이토치(PyTorch) 등 다양한 기계 학습 프레임워크를 지원한다. TPU는 구글이 심층 학습 등 기계 학습 작업을 가속화하기 위해 개발한 것으로, 대규모 계산을 처리할 수 있고 텐서 플로우에 최적화되어 있다.

GPT 모델(GPT-3, GPT-4, GPT-4o 등)은 방대한 양의 다양한 텍스트 데이터를 수집하고 전처리하여 사전훈련을 수행하며, 그러한 과정을 통해 패턴을 학습한다. 전처리 과정이 필요한 것은 각종 정보원에서 수집된 데이터가 형태와 내용의 측면에서 편차가 크고, 또한 잘못되거나 관련이 없는 정보가 포함될 수 있기 때문이다. 뒤 이어 후속 처리로 특정 데이터셋과 사람의 피드백을 통해서 미세조정 과정을 수행하고, 그 과정에서 성능을 세부적으로 조정한다. 특히, 사람의 피드백을 이용한 강화학습(reinforced learning by human feedback, RLHF)을 채택하여 사람이 모델의 출력을 평가하고, 모델의 성능이 소기의 정확도와 신뢰성을 만족하는지 검증하고, 모델의 편향이나 결함을 식별하고 수정한다.

AI 모델의 성능은 훈련 시 사용된 학습 데이터의 양과 질에 좌우된다. 학습 데이터의 정보가 바르면 빠르게 학습하게 되고, 학습 데이터에 편향적인 정보가 들어 있으면 AI모델의 답변에 편향성이 나타난다. GPT-3나 GPT-4와 같은 대규모 AI 모델을 훈련하는 데에는 다량의 다양한 데이터셋이 필요한데, 여기에는 커먼크롤(Common Crawl) 데이터 셋,²⁰⁾ 위키피디아, 책, 기사 및 저널, 기타 텍스트 등이 포함된다. GPT-4o의 경우에는 이미지, 오디오, 비디오 등 멀티모드 데이터도 필요하다. 이러한 다량의 데이터셋을 확보하는 데 비용이 많이 들며, AI 모델을 훈련하는 것 또한 매우 고비용의 작업이다. 계산량이 많은 만큼 전력 소모도 크다.²¹⁾

AI는 훈련과정에서만 학습하고 일단 훈련 기간이 끝나면 더 이상 학습하지 않는다.²¹⁾ 즉, 훈련이 끝난 가중치 파라미터는 변하지 않는다. 질의응답 서비스 중에 새로운 사실을 알게 될지라도 (그것을 별도로 저장해둘 수는 있어도) 바로 학습하여 가중치 파라미터에 반영하지 않는다. 이것이 인공지능이 인간의 지능과 차별화되는 점이다. 사람의 경우는 질문을 이해하고 답변을 생성하는 과정에서 여러 가지 생각을 하고 그 내용을 기억에 저장해두지만, AI는 이해한 것을 토대로 답변하는 것으로 끝이다. 그 때문에 AI가 변화하는 상황에 적응적으로 판단하고 대처하는 능력이 떨어지는 한계가 있다.

지금까지 AI의 인지기능이 어떻게 시스템으로 구현되는지 질의응답 과정을 통해서 살펴보았다. 결론적으로, AI도 사람과 마찬가지로 질문을 이해하고 답변하는데, 모든 과정은 수치계산에 의해 이루어지며, 시스템 구현이란 이를 실행하는 계산 구조를 설계하고 그 안에 포함된 가중치 파라미터들을 결정하는 것을 말한다. 질문에 대한 이해는 계산 구조 내 트랜스포머 블록에서 이루어지고, 답변은 후속 블록들에서 생성된다. 가중치 파라미터들의 값은 훈련을 통해서 결정되며, 그 훈련에 방대한 양의 데이터와 컴퓨팅 파워가 소요되고 막대한 에너지가 소모된다. 그러나 일단 훈련이 끝나면, 사용 단계에서는 소요 계산량이나 소모 에너지가 크지 않다.㉔

20) 커먼크롤은 웹을 정기적(예, 월 단위)으로 크롤링(crawling, 체계적으로 웹사이트를 탐색하여 데이터를 수집하는 행위)하고 그 아카이브와 데이터셋을 대중에게 무료로 제공하는 비영리 조직이며, 커먼크롤의 웹 아카이브는 2008년부터 수집된 페타바이트(즉, 1천조 바이트) 규모의 데이터로 구성되어 있다.

21) 그럼에도 불구하고 그러한 '강(強)훈련'을 하는 것은 그러지 않고서는 AI가 제대로 기능할 수가 없기 때문이다. AI가 세계 각국의 언어를 구사할 수 있지만, 학습 데이터가 부족한 언어에 대해서는 대규모 AI 모델로도 좋은 성능을 제공할 수 없는 것은 그러한 이유 때문이다.

22) GPT-4를 예로 들면, 마지막 훈련이 끝난 것이 2023년 3월 14일이다. 2024년 5월 13일에 출시된 GPT-4o는 GPT-4를 새로 훈련한 것이 아니라 새로운 기능을 추가하고 최적화하여 GPT-4를 향상시킨 응용프로그램이다.

[분과 및 학계 동향]

자연 제2분과 회원 동정 및 학계 동향



張浩完 會員(지구화학)

자연 제2분과에서는 2023년 11월에서 2024년 4월까지 경사스러운 일과 슬픈 일이 연속으로 일어나, 회원들에게 이것이 인생이고 삶을 새삼 느끼게 해주었다. 2023년의 마지막 분과회의(11월 21일)를 마친 후에, 論巖 李商萬 회원님의 白壽를 기념하는 白壽 기념 축하회를 했다. 이상만 회원님은 이날을 기념하여 탈고한 백수 기념 문집 2권 『인생 최고의 날은 바로 오늘이다』, 『너는 누구인가』를 대한민국학술원의 모든 회원에게 선물로 증정하셨다. 이상만 회원님은 불모지였던 우리나라 지질과학계의 암석학 분야의 태두로서, 수많은 학문적 업적을 이루셨고, 1980년대에는 12년 동안 유네스코의 후원에 의한 세계 최초의 ‘아시아 변성지질도’를 완성하였는데, 이의 공로를 인정받아 2024년 5월 22일 학술원 창립 70주년 기념식에서 윤석열 대통령으로부터 우리나라 최고의 훈장인 대한민국 무궁화장을 서훈받으셨다.

한편 존경하는 海峯 朴相大 회원님께서 2024년 4월 20일 소천하셨다. 생년이 1937년 8월 20일(음력)이니만 86년 8개월의 삶을 영위하시었다. 요즘은 100세 시대라고 하는데, 故 박상대 회원님이 우리나라의 생명과학계나 과학기술계에서 이루어 내신 다양한 업적을 생각해 볼 때 너무도 일찍 세상을 떠나신 것 같아 울적한 마음을 금하기 어려웠다. 故 박상대 회원님은 2002년 8월 서울대학교 생명과학부 교수를 정년퇴임하시고 같은 해인 2002년에 대한민국학술원 회원으로 선정되셨다. 기초기술연구회 이사장(2003~2006), 한국과학기술단체총연합회 회장(2011~2014), 대통령 직속 국가과학기술자문회의 부의장(2013~2014) 및 대한민국학술원 부회장(2018~2020) 등을 역임하셨다. 故 박상대 회원에 대한 생전의 업적은 학술원 통신(제371호)에 게재된 조완규 회원님의 회고와 홍승환 전 서울대 교수의 추모사에서 잘 알 수 있다.

학술연구 활동

李貞珩 會員은 생활과학 전공 학자로서 가정자원·경영학 분야의 연구를 주로 하여 왔으며, 여성의 생활 예절 의식, 수행 및 가정생활 만족도에 관한 연구를 통하여 건전한 사회문화를 형성하고자 노력하고 있다. 또한 2002년도부터 지금까지 10여 년간 생활과학 부문의 우수학술도서 대한민국학술원 심사위원으로 활동하며, 우리나라 생활과학 부문의 우수도서 활성화와 선정에 심혈을 기울여 왔다. 올해에도 3회(2024년 5월 27일; 6월 4일; 6월 18일)에 걸쳐 30여 종의 도서를 심사하였다. 또한 이정우 회원은 본 학술원 주최의 학술모임인 특정연구과제 학술토론회, 나치 독일의 황제법학자들, 대한민국학술원(2023. 11. 10); 학술원 개원 70주년 기념, 통찰과 전망 포럼(2024. 03. 29); 학술원 개원 70주년 기념 학술대회(2024. 06. 12); 학술세미나, 대한민국학술원(박종욱: 한반도 관속식물의 초기 학명에 관한 연구, 2024년 6월 5일)에 적극 참여하였다.

孟元在 會員은 영양학자로서 대한민국학술원과 EBS가 공동으로 제작한 다큐멘터리 ‘시대와의 대화’에 출연하였고, 2023년 12월 30일에 방영되었다. 올해 4월 19일에는 국가보훈부 주관의 수유리 국립 4.19 민주 묘지에서 거행된 제64주년 4·19 혁명 기념식에 참여하여 고인이 되신 4·19혁명 주역들의 명복을 빌었다. 이보다 하루 앞선 4월 18일에는 1년 전 건국대학교 교정에 건립한 4.19 민주혁명 기념탑 앞에서 추모행사를 가졌고 맹원재 회원이 추모사를 낭독하였다. 오는 8월 23일에는 한국 반추위 연구회가 주관하는 총회 및 학술발표회에 참석할 예정이며, 학술대회의 주제는 축산 부분 탄소중립 정책 및 연구·개발 프로그램 및 현황과 계획이다.

林繁藏 會員은 저서 “한국스포츠의 현상과 과제”를

2022-2023년도에 걸쳐 대한민국학술원의 지원으로 대한민국학술원 학술연구총서 39, 455쪽을 집필하였다. 이 저술은 개화기에 우리나라에 도입된 근대 스포츠가 쇠국정책으로부터 전환하여 문호개방으로 비롯되는 반봉건적 근대화과 반 침략적 자주독립의 수호라는 당면과제에 대응하면서 전개되어 정착한 한국 스포츠를 비판적인 관점에서 기술하였다. 임변장 회원은 본 학술원 주최의 각종 학술모임과 전공 관련 학술단체의 학술활동에도 아래와 같이 적극 참여하였다. 대한민국학술원 집담회(2023. 07. 13; 2023. 11. 29); 나치 독일의 황제법학자들, 특정연구과제 학술토론회, 대한민국학술원(2023. 11. 10); 한일스포츠사회학학술대회, 축사 및 환영사, 강원도평창 알펜시아(2023. 11. 16); 스포츠사회학회 총회 및 학술세미나, 건국대학교 충주캠퍼스(2023. 11. 24); 한국체육학회 정기총회 및 학술발표회, 연세대학교 스포츠과학관(2024. 01. 23); 스포츠포럼21. 학술연구 20년 회고 발표회, 손기정 기념관 (2023. 12. 01); 학술원 개원 70주년기념, 통찰과 전망 포럼 (2024. 03. 29); 학술원 개원 70주년기념 학술대회(2024. 06. 12); 한국 스포츠발전을 위한 문화체육부장관과의 토론회, 국립현대미술관(2024. 07. 15)

張浩完 會員은 포항 영일만항에서 '최첨단 3D/4D 물리탐사연구선 한국지질자원연구원 '탐해 3호'(6,862톤, 길이 92m; 폭 21m)의 취항식(2024년 5월 31일 오후 2시)에 내빈으로 참석하였다. 이 배는 금년 6월부터 석유 가스 등 해저 자원 탐사, 이산화탄소 해저 저장소 선정, 해저 지층구조 변화 탐지 등 다양한 임무를 수행할 예정이다. 또한 이상만 회원의 백수 기념 기념 저서인 『인생 최고의 날은 바로 오늘이다』, 『너는 누구인가』를 읽고 이에 대한 서평을 학술원 통신(367호: 2024. 2)에 게재하였다. 학술원 창립 70주년을 맞이하여 발간한 '학술원 70년사'에는 自然科學部 第2分科에 관련된 내용을 기술하였다. 순서는 회원의 동향, 학술연구 활동, 학술원 통신의 기고 및 기타 등으로 회원들이 10년 동안에 수행한 학술원의 모든 활동을 기술하였다. 아울러 돌아가신 故 鄭昌熙 선생님의 생애와 학문의 발자취에 관한 내용도 회상할 기회를 가졌다. 우수학술도서 선정위원회 총괄 심사위원으로도 참여했다. 한편, 전문학술활동 연구과

제인 '한반도 중서부 Fe-Ti 광상을 배태한 고철질-초고철질 관입암의 지체구조적 의미'에 대한 연구를 진행하고 있다. 또한 '학문연구의 동향과 쟁점(제15집)' 지질과학 분야(2024. 7~2025. 11)의 총괄 집필 책임자를 맡아 집필 계획서와 더불어 30여 명의 공동집필자 섭외 및 주제 선정에 최선을 다하고 있다. 또한 장호완 회원은 부산 BEEXO에서 개최되는 '2024 IGC(International Geological Congress) 부산 세계지질과학총회의 슬로건 [The Great Travelers: Voyages to the Unifying Earth]에 맞게 국제학술·문화행사가 진행되도록 자문위원을 맡아 행사를 지원하고 있다.

金相九 會員은 2023년도 제4차 학술원 집담회가 2023년 11월 29일 학술원 중회의실에서 '식물의 감각, 청각'을 주제로 열렸는데 집담회 사회자로 참여하고, 자연 제2분과의 안진홍 회원이 기조 발표를 하였다. 발표자는 식물은 동물과 같은 체계적으로 발달한 감각기관은 없으나 스스로 환경에 적응해서 감각 능력을 발달시켜 왔다고 했다. 사회자로서 집담회 발표 내용을 상세하게 정리해서 학술원통신 제366호(2024. 1)에 실었다. 2024년 제1회 학술원 집담회가 3월 27일에 학술원 중회의실에서 열렸는데 인문·사회 제5분과의 김경동 회원이 '민주주의의 위기와 선비 사상의 대안적 구상' 기조 발표에서 자유토론에 참여했다. 2024년 학술세미나(6월 5일)에 자연 제2분과 박종욱 회원이 '한반도 관속식물의 초기 학명에 관한 연구'를 발표했는데 사회자로서 참여했다. 기타 2024년도 학술원 활동은 학술원상 추천위원회 위원, 국제교류협력위원회 위원, 우수학술도서 심사위원으로 참여했다.

鄭鎭河 會員은 말레이시아 쿠알라룸푸르 컨벤션센터에서 "Race toward Net Zero: Leadership for Climate Action"이라는 주제와 함께 개최된 2023년 국제과학이사회(ISC)에 임정빈 회원과 함께 참석하였고(2023년 10월 4~6일), 대회 참가기(제목: 2023 IGEM 및 ISC-GKD 참가기)를 학술원 통신문 2024년 1월호에 게재하였다. 2024년 2월 1일에는 서울-컨퍼런스하우스에서 단백질대사 분과학회와 오토파지 분과학회가 공동으로 개최한 '분해생물학 심포지엄'에 초청되어 참석하였다.

2024년 2월 5~7일에 용평리조트에서 개최된 ‘2024년도 한국분자세포생물학회 동계학술대회’에 초청되어 참석하였다. 2024년도 5월 28일에는 2023년도 전문학술연구(과제명: UFM1에 의한 발암 조절 기구)의 수행 결과를 자연 제2분과에서 세미나로 발표하였다. 현재에는 학술원 주최의 ‘외국학술원 석학 초청 학술회의’의 조직 위원으로 활동하고 있고, Elsevier에서 발간하는 Biochemical Biophysical Research Communication이라는 저널의 편집장 역할을 수행 중이다.

李基和 會員은 학술원통신 제367호(2024년 2월)에 인간 행위의 중요한 규범이 되는 선과 악의 기준에 대한 불교적 관점을 논의한 “선(善)의 기준”을 기고하였다. 한반도에서 지난 2,000여 년간 발생한 역사지진들을 분석하여 실제로 심부지각에서 지진들이 발생하였음을 밝힌 논문 “한반도 심부지각에서 발생한 지진들”을 학술원 논문집에 투고하였다. 한반도의 지진들은 서기 1세기에서 20세기까지 각종 사료에 기재된 역사지진들과 그 이후 기상청의 관측망에 포착된 계기지진들로 구분된다. 현재까지 대략 2,100여 회의 역사지진들이 수집되었고 이들에 의하여 방출된 지진에너지는 한반도에서 지난 2,000여 년간 방출된 에너지의 97% 정도에 해당한다. 현재 이 역사지진들을 종합 분석한 학술원 총서 “한반도의 역사지진”을 집필 중이며 이 저술에는 추가 지진들을 수집하고 또 한반도 지진에 관심을 갖는 외국 학자들을 위하여 영문으로 저술된다. 아울러 2024년 제1회 집담회(2024. 3. 27)에서는 “민주주의의 위기와 선비사상의 대안적 구상”에 지정토론자로 참여하였다.

安鎮興 會員은 “식물의 감각, 청각”이라는 제목으로 2023년 11월 29일 집담회에서 발표자로 참여하였다. 식물이 음악을 좋아하며 노래를 틀어주면 생산량이 증가한다는 보고가 있다. 식물이 실제로 음악을 좋아하는지에 대한 찬반 의견이 엇갈려 보다 정밀한 실험이 필요하나 식물이 주변에서 나오는 자연의 소리를 듣고 이에 반응하는 것은 분명하다. 벌이 웅웅 거리를 소리를 듣고 꽃꿀을 준비하여 수정을 촉진하는 것은 잘 알려진 현상 중 하나이다. 가뭄에 식물이 소리를 내는데 이것이 실제로 어떤 신호로 작용하는 것인지 아니면 단순한 물리적 현상

인지 규명이 필요하다. 2024년 6월 14일의 학술세미나에서는 지정토론자로 참석하여 박종욱 위원의 “한반도 관속식물의 초기 학명에 관한 연구” 발표에 관한 질문을 하였다.

任正彬 會員은 말레이시아 쿠알라룸푸르 컨벤션센터에서 개최된 국제과학이사회 아시아-태평양 글로벌 지식 대화(International Science Council Asia-Pacific Global Knowledge Dialogue; ISC-GKD)와 말레이시아 국제 그린테크 에코 제품 전시회 및 컨퍼런스(International Greentech & Eco Products Exhibition and Conference Malaysia; IGEM) (2023. 10. 5~10. 6)에 정진하 회원과 함께 참석하였다. 이 회의에 참석한 학술교류의 결과를 학술원통신 제366호(2024. 1)에 보고하였다. 또한 천안 라마다 호텔에서 개최된 제29회 동아시아 공동 심포지엄(The 29th East Asia Joint Symposium on Biomedical Research, EAJS)(2023. 10. 24~10. 27)에 참석하여 “Lifetime Achievement Award”를 수상하였다. EAJS은 임정빈 회원의 주도로 1994년 서울대 유전공학연구소와 동경대 의과학연구소 간의 학술교류 목적으로 창설되었다. 현재는 두 창립연구소 이외에 교토대, 오키나와과기대, 대만국립대, 중국 과학원, 상해 기술대, 순천향대 연구소 등 총 4개국 8개 기관에서 교수, 대학원생, 연구원들이 참여하여 매년 최신 연구 결과를 발표하고 토론하는 동아시아지역의 대표적인 의과학 분야 연구 협력 프로그램으로 자리매김하였다. 그리고 학술원이 한국연구재단 지원으로 2022년부터 신규사업으로 추진한 정책 연구 “바이오 최선진국을 지향하는 대한민국에 대한 통찰과 전망, Insights and Prospects for Bio-Korea” 과제의 최종 연구보고서를 출간 배포하였다(2024. 2. 25~3. 10). 2024년 3월 29일에는 [대한민국학술원 개원 70주년 기념]으로 거행된 “통찰과 전망” 포럼에 참여하였다. 포럼 제2부에서 “바이오 최선진국을 지향하는 대한민국에 대한 통찰과 전망”(연구책임자 임정빈 회원)에 대한 연구발표가 있었다.

朴鍾郁 會員은 학술원 전문학술활동 연구과제로 2023년 2월 1일부터 11월 30일까지 “한반도 관속식물의 초기 학명에 대한 연구”를 수행하여 최종 결과보고서를 제

출하였다. 이 연구에서는 한반도 관속식물상의 초기 연구에 크게 이바지한 Takenoshin Nakai(1882-1952) 박사에 의해 한반도 지역에서 발표된 신분류군, 신조합명 및 신계급명을 포함한 모든 학명을 조사하여, 전체 목록을 작성하고, 각 학명의 출전을 확인, 제시하며, '조류, 균류, 식물 국제 명명규약(International Code of Nomenclature for Algae, Fungi and Plants; ICN)' 상 적법성을 검증하여 한반도 관속식물상 규명을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다. 또한 이 연구의 하나로써 2023년 11월 5일부터 11월 8일까지 일본 도쿄대학교 표본관(TI) 및 도쿄대학교 부속 코이시가와식물원을 방문하여 국내에서 확보할 수 없는 초기 문헌들을 확보, 조사하고, 출처가 불분명한 일부 학명에 대한 표본 검증을 수행하였다. 이 연구 결과, Nakai는 1908년부터 1953년까지 259편의 문헌에서 한반도 지역으로부터 총 2,284개의 새로운 관속식물 학명을 발표한 것으로 밝혀졌으며, 이러한 연구 결과를 정리하여 2024년 6월 14일에 개최된 "2024년도 대한민국의학술원 학술세미나"에서 발표하였으며, 최종 작성된 논문은 2024년 7월에 발간된 학술원논문집 제63집 1호에 게재되었다. 또한 환경부 국립생물자원관 지원으로 수행되고 있는 '한반도 식물지발간 연구 사업'의 편집위원장으로, 2023년도에는 영문 식물지인 'Flora of Korea, Vol. 5a-2. Rosidae: Rosaceae 2' 및 'Flora of Korea, Vol. 5a-3. Rosidae: Fabaceae' 등 2권을 편집하였고, 대표 편집자와 저자로 참여하였다. 그리고 2023년 4월 10일부터 11월 30일까지 환경부 국립생물자원관의 생물자원 국제 협력사업의 일환으로 미국 Santa Barbara Botanical Garden 및 California Native Plant Society 소속 식물분류학자들과 함께 생물다양성이 높은 California 남부 지역에 대한 채집 조사를 수행하여, 그 식생의 특징으로 파악하고 California 자생식물 422 분류군 693점의 표본을 확보하였으며, 이를 환경부 국립생물자원관과 서울대학교 표본관에 소장하였다.

禹卿植 會員은 국제자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature, IUCN) 내 국제보호지역위원회 지질유산전문가그룹 의장으로 활동하고

있다. 2023년 12월, 2024년 2월과 5월에 전 세계 학자들로 구성된 임원위원회를 온라인으로 주관하였다. 2021년부터 수행하고 있던 유네스코한국위원회 인문사회·자연과학분과위원회 위원장직을 2024년 5월까지 수행하였다. 2023년 11월 23일에는 인천대 평생교육원에서 주관한 인천 해양 교육 강사 육성 과정에서 "서해와 동해의 차이"라는 제목으로 강연하였으며, 2023년 11월 30일에는 인천대 평생교육원에서 주관한 인천 해양교육 강사 육성 심화 과정에서 강의하였다. 2024년 4월에는 국제동굴연맹(International Union of Speleology, UIS) 산하인 국제 용암동굴학 위원회에서 2024년 4월에 에콰도르 갈라파고스에서 개최한 The 21st International Symposium on Vulcanospeleology에서 "Justification for recognition of lava tube caves for domestic and international significance"라는 제목으로 논문발표를 하였다. 2024년 8월에는 국제지질학연맹(International Geological Union)의 정기 총회와 학술대회가 부산에서 열린다. 이 학술대회에서 총 6개의 주제 발표를 하며, 그 내용은 북극의 고해양 연구 관련 논문인 "Brackish and anoxic environments in the western Arctic Ocean during the last glacial period: insights from authigenic calcites", 해양지질 연구 관련 논문인 "Integrated geological and geophysical monitoring of the Udo beach sediments (Natural Monument) for geoheritage conservation", 지질유산 관련 논문인 "Key Geoheritage Areas: a promising IUCN initiative for geoheritage conservation of national and global significance", 지질공원 관련 논문인 "Samcheok Geopark: Promising and aspiring national geopark in Korea"이다. 한국의 갯벌 지역은 국제지질연맹에서 인정하는 제2차 100대 지질명소에 선발되었다. 이에 대한 발표를 "Outstanding geoheritage values of the Korean Getbol"이라는 제목으로 발표한다. 국제지질보전학회(ProGEO)의 국제워크숍에서 초청 연사로 "Geoheritage Conservation in Korea"라는 제목으로 대한민국의 지질유산 보전 활동을 소개할 예정이다. ㉔

학술원 소식

◆ 대한민국학술원-한국연구재단 업무협력 회의 개최

2024년 8월 9일(금) 11시 학술원 중회의실에서 대한민국학술원-한국연구재단 제2차 미래동향보고서 발간을 위한 업무협력 회의를 개최하였다. 이번 회의에서는 2024년 신규 지원되는 정책연구용역과제에 대한 세부 연구 방향과 미래동향보고서 연구 결과의 추후 정책적 적용을 위한 방안 등을 논의하였다.



◆ 제16회 한·일학술포럼 참가자 협의회 개최



2024년 8월 26일(월) 14시 학술원 중회의실에서 제16회 한·일학술포럼 참가자 협의회를 개최하였다. 이번 회의에서는 한·일학술포럼 전체일정과 일자별 세부사항을 보고받고 각 역할별 주지사항 등을 논의하였다.

회의 및 행사 안내

▣ 제16회 한·일학술포럼 개최

- 일시 : 2024년 9월 5일(목) 10:00 ~ 17:40
- 장소 : 서울대학교 호암교수회관
- 분야 : 역사학 및 수학
- 발표자 및 발표주제

분야	발표자	주제
역사학	김영식(인·사3)	조선 후기 역(曆)과 역 계산 전문 관원에 대한 국왕과 조정신료들의 인식
	TASHIRO Kazui (田代和生)	에도(江戸)시대의 일조(日朝)무역과 '인삼대왕고은'(人參代往古銀)의 구조
수학	김도한(자연1)	한국 수학의 역사 - 거의 무(無)에서 필즈 메달까지
	MORI Shigefumi (森重文)	수학의 유용성·아름다움

▣ 2024년 제7차 임원회 개최

- 일시 : 2024년 9월 6일(금) 11시
- 장소 : 학술원 중회의실(3층)

▣ 2024년 제3회 학술원 집담회 개최

구 분	내 용
발표자/주제	임돈희(인·사3) / 유네스코 무형유산 정책: 한국은 무형유산 선진국
사회자/토론자	김호동(인·사3) / 장경렬(인·사2), 최항순(자연3)
일시/장소	2024년 9월 11일(수) 10:30~12:30 / 학술원 중회의실(3층)
참석대상	학술원 회원 중 희망자 ※ 참석을 희망하시는 회원은 담당 이지은 주무관(02-3400-5254, love1024@korea.kr)에게 9월 4일(수)까지 연락 요망

▣ 제69회 대한민국학술원상 시상식 개최

- 일시 : 2024년 9월 20일(금) 14시
- 장소 : 학술원 대회의실(2층)
- 참석자 : 국무총리, 학술원 회원, 학술원상 수상자, 축하객 등

▣ 2024년 제5차 분과회 개최

인문·사회과학부		자연과학부	
분과	회의 일시	분과	회의 일시
1	9.27.(금) 11:00	1	9.26.(목) 11:00
2	9.27.(금) 11:00	2	9.24.(화) 11:00
3	9.27.(금) 14:00	3	9.26.(목) 11:00
4	9.27.(금) 11:00	4	9.26.(목) 11:00
5	9.26.(목) 11:00	5	9.25.(수) 11:00
6	9.24.(화) 11:00		

국제학술기구 및 외국학술원 행사 안내

인공지능(AI) 기술 및 연구 동향에 대한 온라인 토론회 (Webinar)



- 일시 : 2024년 9월 4일(수), 오전 09:00 ~ 10:30(한국 시간)
- 장소 : 온라인(화상회의)
- 주관 : 국제학술원위원회(IAP), 세계예술과학아카데미(The World Academy of Art and Science, WAAS)
- 주제 : 세계 각국의 학술원들의 관점으로 보는 인공지능 연구의 현황과 패널 토론
(Navigating the Artificial Intelligence Landscape: Perspectives from National Academies)
- 내용 : 인공지능(AI) 기술이 건강관리, 교육, 거버넌스 및 산업 분야까지 인간의 삶의 모든 측면에 점점 스며들고 있다. 과학, 공학 및 의학 분야에 있는 세계 각국의 학술원들이 AI 개발과 활용의 궤적을 이해하고 적극적으로 형성하는 것이 중요하다. AI의 급속한 발전은 혁신의 기회를 제공할 수 있지만 다양한 윤리적 문제, 개인 정보 보호 및 규제와 구조의 필요성과 같은 문제들을 야기할 수 있다. 국제학술원위원회(IAP)과 세계예술과학아카데미(WAAS)는 학술원 네트워크를 중심으로 AI 활동과 인간 중심적인 방식으로 AI의 개발과 적용을 형성하고, 윤리적 기준을 우선시하며 사회적 이익을 위한 과학 기술의 적용을 촉진하려고 한다. 이런 목표를 위해 세계 학술원들의 고유한 역할을 활용할 수 있는 방법을 탐구하기 위해 이번 온라인 회의가 준비되었다. 해당 회의의 녹화본과 요약본은 IAP 홈페이지에 게시될 예정이다.
- 참가비 : 무료 ※ 참가 전 회의 신청 필수
- 신청 링크 : <https://worldacademy.org/conference-page/navigating-the-artificial-intelligence-landscape-perspectives-from-national-academies>

※ 관심 있으신 회원님께서서는 담당자(이정연 janneylly99@korea.kr)에게 문의주시기 바랍니다.