

AI 시대, R&D 대혁명

생산성 위기의 타개와 패러다임 전환

박용삼 연구위원, 경영연구센터 (yong3park@posri.re.kr)

목차

1. R&D 생산성 위기와 AI 전환의 필연성
2. AI가 가져온 네 가지 R&D 혁명
3. AI발(發) R&D 혁명에 드리운 그림자
4. 과학의 제5 패러다임과 AI 시대의 지성

Executive Summary

- **현대 R&D 시스템의 근본 문제는 천문학적인 투자 확대에도 불구하고 혁신의 속도가 오히려 정체되고 있다는 점이며(에룸의 법칙), 다음의 네 가지 위기로 표출됨**
 - <1> 탐색 공간의 위기: 광막한 가능성의 바다 속에서 방향성을 잃고 표류
 - <2> 다크 데이터의 위기: 소멸하는 실패 지식과 반복되는 연구의 낭비
 - <3> 인지 포화의 위기: 폭증하는 정보와 지식의 홍수 속에 고립
 - <4> 재현성의 위기: 누적적 과학 지식 기반의 근간을 흔드는 균열
- **AI 기술의 비약적 진전으로 기존 R&D 체계에 혁명적 변화가 촉발되었고, 이에 따라 R&D는 인간의 '경험과 직관에 의존하던 아날로그적 영역을 넘어 정교한 거대 AI 모델과 자동화 인프라가 융합된 '지식 제조 플랫폼'으로 진화하고 있음**
 - <1> AlphaFold - 분자 기계의 지도 제작과 과학의 민주화
 - <2> GNoME - 800 년치 신소재를 단숨에 스크리닝하는 알고리즘
 - <3> Co-Scientist - 집단 AI 토론을 통한 초인적 지성의 발현
 - <4> 자율 실험실(SDL) - 로봇공학과 AI가 완성한 폐쇄 루프 R&D
- **생성형 AI와 거대 과학 모델이 R&D의 지평을 극적으로 확장하는 시점에서 실질적인 재무적 성과(ROI)를 담보하기 위해서는, 기술적 열광 이면에 감춰진 AI의 어두운 그림자를 냉철하게 직시하고 경계해야 함**
 - <1> AI 환각(Hallucination): 완벽한 확신으로 포장된 정교한 오답
 - <2> 검증 병목(Verification Bottleneck): 디지털 가속과 아날로그 시공간의 충돌
 - <3> 데이터 편향(Data Bias): 성공 편향과 주류 패러다임의 요새화
 - <4> 논문 공장(Paper Mills): 학술 생태계 신뢰 구조의 오염
- **인류는 지금 단순한 도구의 고도화를 넘어, 과학적 지식을 창출하는 문법 자체가 송두리째 바뀌는 '제5 패러다임'의 문턱을 넘어서고 있음**
 - AI 플랫폼에 인류가 한 번도 마주하지 못한 대담한 질문을 던지고, AI가 쏟아낸 방대한 데이터 속에서 산업적 맥락과 사회적 의미를 길어 올리며, AI가 설계한 관성적 경로를 이탈하여 미지의 영토를 개척하는 리더가 최후의 패권을 거머쥔 것임
- **AI가 끝내 대체할 수 없는 인간 지성의 절대 영역은 '학습할 수 없는 비선형적 통찰'이며, 이는 다음의 네 가지 역량으로 집약됨**
 - <1> 올바른 질문을 정의하는 능력(Problem Framing)
 - <2> 느린 사유(Slow Thinking)와 세렌디피티(Serendipity)
 - <3> 학제 간 경계를 넘나드는 무차별적 연결(Boundary Crossing)
 - <4> 윤리적 최종 판단과 맥락적 스토리텔링(Contextual Storytelling)

1. R&D 생산성 위기와 AI 전환의 필연성

□ U\$2조 4,000억 투자의 역설, 혁신은 왜 지체되는가

- 현대 R&D 시스템의 치명적인 모순은 연구개발 투자 규모가 기하급수적으로 팽창하는데 비해 혁신의 속도와 효율성은 오히려 정체되어 있다는 점에 있음
 - '24년 전세계 R&D 투자는 사상 최초로 U\$2조 4,000억을 돌파했으나 [OECD, 2024], 신약 하나를 상용화하는 데는 여전히 평균 10~15년의 시간과 약 U\$26억이라는 막대한 비용이 소요됨 [Tufts CSDD, 2016]
 - 신소재 개발 역시 상용화까지 최소 10년 이상이 걸리며, 청정수소와 핵융합 등 인류의 생존이 걸린 차세대 에너지 기술은 수십 년째 기초 연구 단계에 머물러 있음
- 반도체 집적도가 2년마다 두 배로 증가한다는 무어의 법칙(Moore's Law)의 철자를 거꾸로 뒤집은 에룸의 법칙(Eroom's Law) 등장
 - R&D 투자 U\$10억 당 승인되는 신약의 수가 약 9년마다 절반으로 줄어드는 구조적 고착화 현상을 의미
 - 비용은 눈덩이처럼 불어나는 반면 성과는 추락하는 이 양방향의 압박(Double Squeeze) 이야말로 오늘날 R&D 조직이 직면한 냉엄한 현 주소임 [박용삼, 2017]

【 1950~2010년 인플레이션 조정 R&D 효율 추이 】

	10억 달러당 신약 승인 수	R&D 주요 환경 변화 및 비용 요인	누적 비용 배율
1950년대	~40개 (기준값)	항생제·스테로이드 혁명, 도달 가능한 '쉬운 표적' 다수 존재	×1
1970년대	~10개 (25%)	태아의 사지기형을 초래한 탈리도마이드 사건 이후 안전성 검증 및 규제 강화	×4
1990년대	~5개 (12.5%)	기존 표적의 고갈, 분자 구조 및 타겟 질환의 복잡도 급증	×8
2000년대	~2~3개 (6%)	다기관 임상 비용 폭증, 복잡 질환 중심으로 패러다임 이동	×16
2010년대	~1~2개 (3%)	정밀의학 요구 조건 강화, 장기 추적 중심의 검증 기간 연장	×32
2020년대	~1개 이하 (≤2%)	AI R&D 혁명의 태동, 인간 한계 극복을 위한 패러다임 전환 시도	×64+

*출처: Scannell et al.[2012] 데이터 기반 Tufts CSDD 최신 지표 반영

□ 인간 중심 연구 시스템의 한계가 누적되며 다음의 네 가지 위기를 초래

- ① **탐색 공간의 위기:** 새로운 물질이나 화합물을 발견하려면 목적에 부합하는 최적의 원자·분자 조합을 찾아내야 하지만, 인류가 마주한 탐색 공간은 상상을 초월하는 천문학적 규모임
 - 약물로 개발 가능한 유기 분자의 수는 약 10^{60} 개로 추산되나 [Bohacek et al., 1996], 지금까지 규명된 것은 10^8 개에 불과하여 전체 공간 대비 탐색 완료 비율은 사실상 0%에 수렴
 - 무기 결정 소재의 경우도 마찬가지여서, '23년 이전까지 인류가 수백 년에 걸쳐 발견하여 Materials Project*에 축적한 안정적 결정 구조는 약 4만 8,000개에 그침
 - * 머티리얼스 프로젝트(Materials Project): 미국 에너지부(DOE)의 지원으로 '11 년 로렌스 버클리 국립연구소에서 출범한 재료 과학 분야의 핵심 오픈 플랫폼. 방대한 재료 데이터를 시뮬레이션 기반으로 구축하여 전 세계 연구자에게 무료로 제공함으로써 데이터 기반의 신소재 발견을 가속화
- ② **다크 데이터의 위기:** 성공한 결과만 논문·보고서로 남고, “효과가 없다”거나 “원하는 조건에서 작동하지 않는다”는 음성 결과(Negative Results)는 사장됨
 - 기록되지 못한 채 묻히는 이 정보의 유령을 다크 데이터(Dark Data)라 부르는데, 기업이 수집한 전체 데이터 중 미활용 비율은 무려 55~80%에 달함 [Gartner, 2022]
 - R&D 음성 결과의 공표율은 전체 실험의 10~20%에도 미치지 못하며, 그 결과 전 세계 각지의 연구실이 이전의 실패를 인지하지 못한 채 동일한 시행착오를 반복
- ③ **인지 포화의 위기:** 지식의 폭발적 팽창 속도로 인해 아무리 탁월한 연구자라도 최신 발전 속도를 따라잡는 것은 사실상 불가능
 - 전 세계 과학 논문 발표 수는 연간 약 300만 편(하루 평균 8,000여편 수준)을 넘어서며, 특히 AI 관련 논문은 수십만 편 규모로 기하급수적으로 증가하는 추세 [Fudan University, 2025]
 - 반면 연구자가 순수하게 창의적 사고에 투입할 시간은 하루 일과의 20% 미만, 나머지는 정보 탐색, 실험 준비, 데이터 정리 및 행정 보고 등에 소진 [McKinsey, 2012]
- ④ **재현성의 위기:** 타인의 연구는 물론 자신의 과거 실험조차 온전히 재현하지 못하는 상황이 빈발하면서, 과학 지식의 축적을 통한 도약 기반 위협
 - <네이처>의 조사에 따르면 응답 과학자의 70% 이상이 타인의 연구 결과를 재현하는데 실패한 경험이 있고, 절반 이상은 자신의 이전 실험조차 재현 실패 [Baker, 2016]
 - 이는 광활한 탐색 공간에서 통계적으로 불충분한 표본만으로 성급한 결론에 이르고, 다크 데이터의 유실로 실패 조건이 공유되지 않으며, 인지 포화로 인해 실험 방법론이 불완전하게 기술되는 등 앞서의 세 가지 위기가 복합적으로 작용하여 빚어낸 결과

2. AI가 가져온 네 가지 R&D 혁명

□ 자연과학의 심장부에서 공인받은 컴퓨터 지성

- '24년 구글 딥마인드의 데미스 하사비스(CEO)와 존 점퍼(디렉터)는 워싱턴 대학교의 데이비드 베이커 교수와 함께 노벨 화학상을 공동 수상함
 - 노벨상 위원회는 이들이 “생물학의 오랜 난제였던 단백질 구조 예측 문제를 해결했으며, 신약 개발과 생명과학 전반의 지형도를 근본적으로 재편하였다”고 선언
 - 이로써 AI는 연구자를 보조하는 도구의 단계를 넘어, 독자적이고 고도화된 과학적 지식을 창출하는 핵심 주체로 격상

□ AI가 주도하는 R&D 혁명은 크게 네 가지 축으로 전개되며, 이들이 유기적으로 결합하여 폐쇄형 혁신 루프(Closed Innovation Loop)를 완성

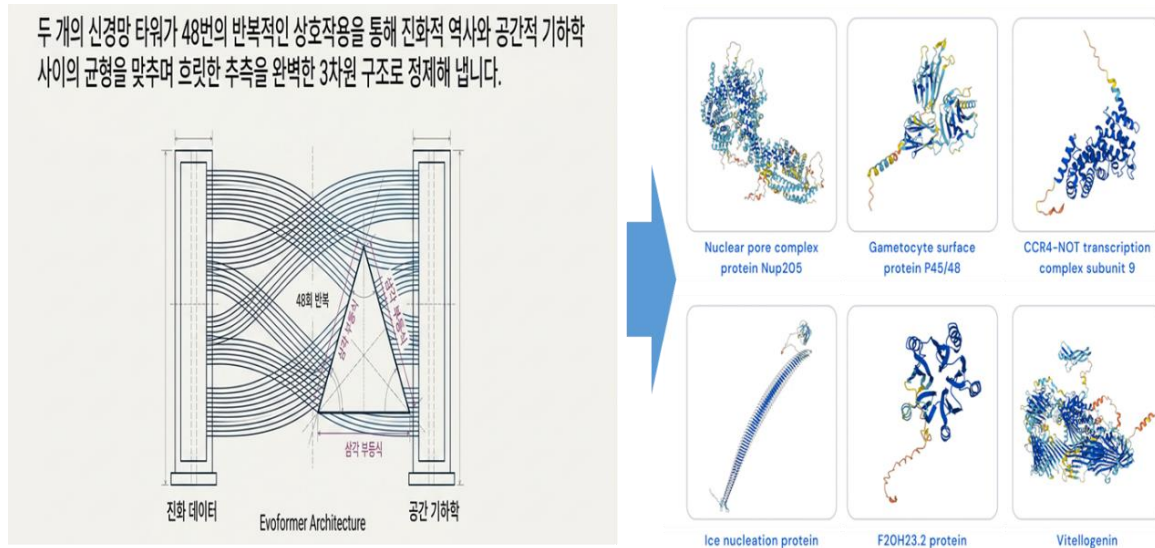
<1> AlphaFold - 3 차원 단백질 구조 예측과 과학의 민주화

- 알파폴드는 아미노산 서열만으로 실제 생체 내에서 단백질이 어떻게 접히고 상호작용하는지를 원자 수준의 정밀도로 예측
 - 과거 X선 결정학*이나 저온전자현미경(Cryo-EM)**에 의존하던 시절에는 단 하나의 단백질 구조를 규명하는 데 수개월에서 수년의 시간과 막대한 비용 소요
 - * X선 결정학(X-ray Crystallography): 시료를 결정화한 후 X 선을 조사하여 나타나는 회절 패턴을 분석함으로써 원자 수준의 3 차원 구조를 규명하는 기법
 - ** 저온전자현미경(Cryo-EM): 시료를 급속 냉동하여 고해상도 영상을 직접 촬영하는 기법으로, 결정화가 어려운 대형 단백질 복합체나 세포 내 동적 구조 분석에 활용됨
 - 구글 딥마인드는 '21.7월 AlphaFold2 논문을 발표한 이래 약 2억 개의 단백질 구조를 예측·공개했으며, 이는 지난 수십 년간 전 세계 과학자들이 실험으로 규명해 낸 약 20만 개의 성과를 압도하는 규모임 [Varadi et al., 2024]
 - '24.5월 출시된 AlphaFold 3는 단백질을 넘어 DNA, RNA, 화학 물질과의 상호작용까지 예측 범위를 확장하며 분자 수준의 정교한 시뮬레이션을 구현
- 현재 190개국 이상에서 300만 명이 넘는 연구자가 이 데이터베이스를 활용하고 있으며, 상당수는 중·저 소득 국가에 소속되어 있음
 - 이는 거대 자본이 없는 신생 제약사나 개발도상국의 연구진도 글로벌 탐티어와 대등한 출발선에 설 수 있게 하는 ‘과학적 발견의 민주화’를 의미

○ 산업적 가치 및 파급 효과

- 알츠하이머 유발 단백질 분석, 희귀 질환 치료제 개발, 플라스틱 분해 효소 및 탄소 포집 효소 설계 등에 직결

【 알파폴드2의 작동 아키텍처(Evoformer)와 예측 단백질 후보 이미지 】



*출처: AI 생성 이미지 기반 저자 편집

<2> GNoME - 800 년치 신소재를 스크리닝하는 알고리즘

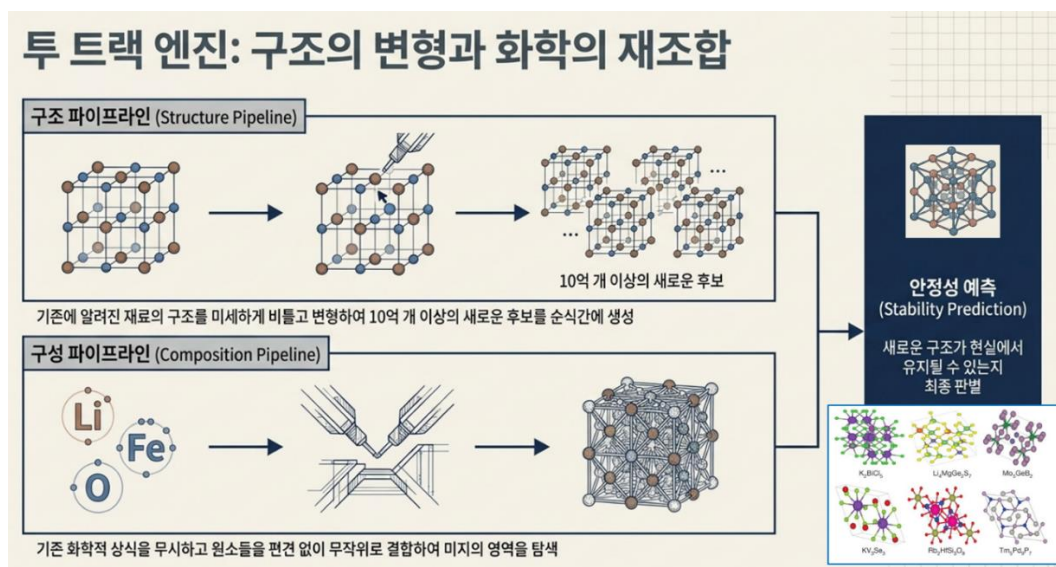
○ 그래프 신경망 기반의 놈(GNoME, Graph Networks for Materials Exploration)은 딥마인드가 '23.11월 <네이처>에 발표한 소재 정보학 혁신의 결정체

- 기존 방식은 단 하나의 결정 구조 분석에도 슈퍼컴퓨터로 수 일이 소요된 반면, GNoME은 로렌스 버클리 국립 연구소의 방대한 시뮬레이션 데이터를 선행 학습하여 새로운 원소 조합의 열역학적 안정성을 초 단위로 예측해 냄
- GNoME은 무려 220만 개의 신규 결정 구조 가설을 생성하고, 이 가운데 38만 1,000 개를 안정적 신소재로 선별하였는데, 이는 그간 인류가 발견해 온 안정적 결정 구조를 약 10배 이상 확장한 규모 [Merchant et al., 2023]

○ 산업적 가치 및 파급 효과

- 전고체 배터리용 고체 전해질 후보 물질의 대량 발굴, 태양광 기반 물 분해 수소 생산 효율 향상 [Yamashita et al., 2022], 우주항공용 3D 프린팅 알루미늄 합금의 고속 합성 [Martin et al., 2019] 등 친환경 첨단 소재 개발의 지형을 바꾸어 놓고 있음

【 GNoMe 결정 구조 예측 파이프라인 개념도 】



*출처: AI 생성 이미지 기반 저자 편집

<3> Co-Scientist - 집단 AI 토론과 초인적 지성의 발현

- 구글 딥마인드가 '26.5월 <네이처>에 게재된 코사이언티스트(Co-Scientist) 프레임워크는, AI가 단순한 도구를 넘어 인간과 대등한 수준의 사고 파트너 (Thought Partner)로 기능할 수 있음을 입증
 - 그 핵심은 '생성-토론-진화(Generate-Debate-Evolve)' 아키텍처로, 다수의 전문 AI 에이전트가 독자적 가설을 제안하고(Generate), 상호 비판과 논리적 반박 과정을 거쳐 (Debate), 결합이 보완된 고도화된 최종 가설로 발전시키는(Evolve) 방식임
 - 이 내부 교차 검증 메커니즘으로 인해 AI 특유의 확증 편향과 환각 현상을 구조적으로 억제하는 효과도 기대됨
- 산업적 가치 및 파급 효과
 - 구글의 알고리즘 코딩 에이전트 AlphaEvolve는 반세기 넘게 최선으로 여겨져 온 4X4 행렬 곱셈 알고리즘(슈트라센 알고리즘*)을 인간의 개입 없이 스스로 개선하여 곱셈 횟수를 49회에서 48회로 단축하는데 성공 [Novikov et al., 2025]
 - * 4X4 행렬 곱셈에는 본래 64 회의 스칼라 곱셈이 필요하지만, 1969년 독일의 수학자 볼커 슈트라센(Volker Strassen)이 이를 49 회로 줄이는 로직을 고안
 - 행렬 곱셈은 AI 모델의 학습과 구동, 그래픽 렌더링 등에서 컴퓨터가 가장 빈번하게 수행하는 핵심 연산이며, 그 중에서도 곱셈은 덧셈보다 훨씬 많은 자원을 소모하기 때문에 곱셈 횟수의 감축은 곧 데이터센터의 전력·비용·탄소 배출의 극적인 절감으로 직결

<4> SDL(Self-Driving Lab) - 로봇공학과 AI 가 완성한 폐쇄 루프 R&D

- SDL(자율 실험실)은 AI 알고리즘과 로봇 자동화 하드웨어가 결합하여, 인간의 개입 없이 스스로 '가설 수립 → 실험 설계 → 로봇 물리 합성 → 분석 → 피드백 반영 → 차기 가설 수립'의 전 과정을 무한히 반복하는 폐쇄 루프 시스템
- '23.12월 카네기멜론대(CMU) 연구팀이 <네이처>에 발표한 Coscientist*는 AI가 스스로 화학 문헌을 검색하고, 복잡한 유기 합성 실험 프로토콜을 프로그래밍하여, 로봇 액체 핸들러를 작동시킨 최초의 이정표임 [Boiko et al., 2023]

* 구글 딥마인드가 '26.5 월에 발표한 Co-Scientist 와는 별개의 앞선 알고리즘

- 로렌스 버클리 국립연구소의 A-Lab은 GNoME이 예측한 소재를 대상으로, 17일간의 자율 운용을 통해 58개 목표 물질 가운데 41개를 인간 연구자의 개입 없이 로봇 팔과 AI 시스템만으로 합성해 냄 [Szymanski et al., 2023]
- 산업적 가치 및 파급 효과
- 미국 알코닉(Arconic)은 친환경 알루미늄 합금 설계에 자율 최적화 알고리즘을 도입하여, 기존 15주가 소요되던 프로세스를 3주로 단축하는 동시에 탄소 배출 저감과 인장 강도 목표를 동시에 달성 [Araullo-Peters et al., 2023]

【 자율 실험실(SDL)의 개념과 효과 】



*출처: AI 생성 이미지 기반 저자 편집

3. AI발(發) R&D 혁명에 드리운 그림자

□ 기술적 열광의 이면, 냉혹한 실질 ROI의 경고

- 생성형 AI와 거대 과학 모델이 R&D의 지평을 극적으로 넓히고 있다는 찬사가 쏟아지는 가운데, 냉정한 경영 지표들은 또 다른 차원의 경각심을 요구
 - 현재 AI 기술을 R&D 및 사업 프로세스에 전면 도입하여 유의미한 재무 성과(ROI)를 창출하고 있는 기업은 전 세계적으로 소수에 불과 [McKinsey, 2025]
 - 생성형 AI 기반 R&D 프로젝트의 상당수가 개념 검증(PoC) 단계를 거치고도 높은 에러율과 현장 신뢰성 부족으로 최종 폐기될 상황에 직면 [Gartner, 2024]
 - 다수의 글로벌 기업 경영진은 R&D와 운영 공정 전반에 내재된 '기존 데이터의 품질 악화(Garbage In)'와 '리스크 통제 거버넌스의 부재'를 AI의 실질적 성과 창출을 저해하는 핵심 원인으로 지목 [PwC Global, 2024]

□ R&D 데이터와 과학 알고리즘의 고유한 특성에 대한 올바른 이해가 필수적이며, 크게 다음의 네 가지 어두운 측면에 주목해야 함

① AI 환각(Hallucination): 완벽한 확신으로 포장된 정교한 오답

- 일반적인 언어 모델에서 나타나는 환각 현상은 과학 R&D 영역으로 오면 치명적인 물질적·인명적 리스크로 돌변할 수 있음
- LLM 기반 검색 도구가 실제 존재하지 않는 논문 제목, 저자명, 심지어 허위 DOI(Digital Object Identifier, 디지털 객체 식별자)까지 정교하게 지어내어 가설의 근거로 제시하는 사례 다수 보고 [McGowan et al., 2023].

② 검증 병목(Verification Bottleneck): 디지털 가속과 아날로그 시공간의 충돌

- AI는 단 몇 분 만에 수천 개의 신약 후보 물질과 수만 개의 촉매 구조를 쏟아낼 수 있지만(In-Silico), 이를 받아 든 실제 실험실(In-Vitro)과 생체 검증(In-Vivo)에 소요되는 물리적 시공간은 단축하는데 한계가 있음
- 전 세계적으로 AI가 발견하여 임상 파이프라인에 진입한 후보 물질은 다수에 이르렀으나, FDA의 최종 승인을 통과한 온전한 AI 유래 신약 탄생은 아직 확인되지 않음

③ 데이터 편향(Data Bias): 성공 편향과 주류 패러다임의 요새화

- AI는 기본적으로 과거에 성공했던 양성 데이터 패턴을 기반으로 학습하기 때문에, 기존 이론의 궤적을 강화하는 방향으로 수렴

- 그 결과 과학사적 돌파구가 될 비전통적 발견이나 이질적 가설을 스스로 오류로 규정하고 배제하는 부작용을 낳을 수 있음
- 성공적으로 논문화되지 못한 다크 데이터의 유실로 인해 AI는 “무엇이 성공하는가”만 배우고 “왜 실패하는가”에 대한 데이터셋을 갖추지 못하게 되어, 결국 편향된 성공 방식만을 고집하는 반쪽짜리 모델로 전락할 위험 상존

④ 논문 공장(Paper Mills): 학술 생태계 신뢰 구조의 오염

- 외형상으로는 완벽한 논리 구조와 수치적 정교함을 갖추었으나, 실제 검증과 진실성이 결여된 부실 논문을 대량으로 양산하는 논문 공장(Paper Mills) 확산
- <네이처>의 분석에 따르면 '23년 한 해에만 전 세계적으로 1만 건 이상의 학술 논문이 철회되어 역대 최고치를 기록하였는데, 이는 생성형 AI 도구가 확산된 시점과 정확히 맞물림 [Van Noorden, 2024]
- 이러한 저품질·조작 데이터가 다시 인터넷과 학술 데이터베이스로 흘러 들어가고, 이를 차세대 과학 AI가 재학습하는 이른바 ‘데이터 근친교배’로 인해 모델 붕괴(Model Collapse)의 악순환 우려

□ 이 모든 리스크에도 불구하고, 빠르게 진격하는 AI-R&D를 외면하고 과거의 전통 방식으로 회귀한다는 것은 시대착오적 퇴행임

- 핵심은 알고리즘의 강력함을 철저한 거버넌스 하에 통제하는 ‘비판적 신뢰 (Critical Trust)’의 정착에 있으며, 이를 위해 R&D 조직이 반드시 준수해야 할 AI 통제 원칙의 제정이 요구됨

【 R&D 리스크 통제를 위한 비판적 AI 활용 6대 원칙 (예시) 】

원칙	실행 지침
1. 출처 이중 검증	AI가 인용한 모든 논문과 데이터는 반드시 원저 확인. 허구 인용(Hallucinated citation) 여부 검증 프로세스 의무화
2. 음성 데이터 체계화	실패 실험 결과를 내부 데이터베이스에 반드시 기록. 다크 데이터를 AI 학습에 포함시켜 성공 편향 완화
3. 전문가 교차 검증	AI 생성 가설에 대해 해당 분야 전문가의 사전 검토(Peer review) 의무화. AI를 조수로 활용, 결론은 인간이 내린다
4. 실험적 검증 우선	실리코(in silico) 결과를 사실로 받아들이기 전 반드시 소규모 물리 실험으로 재 검증
5. 데이터 거버넌스 강화	학습 데이터의 출처·품질·편향성을 정기 감사. 논문 공장 출처 데이터 필터링 시스템 구축
6. 국제 규범 정합성 확보	EU AI Act, FDA AI 가이드스, OECD AI in Science 지침과 정합하는 내부 AI R&D 윤리 헌장 수립

4. 과학의 제5 패러다임과 AI 시대의 지성

□ 과학을 수행하는 문법의 대전환, 제5 패러다임의 선언

- 인류는 지금 단순한 도구의 고도화를 넘어, 과학적 지식을 생성하는 문법 자체가 송두리째 바뀌는 '제5 패러다임'의 문턱에 진입
 - 제5 패러다임의 본질은 앞선 제1(실험), 제2(이론), 제3(계산), 제4(데이터) 패러다임의 한계를 상호 보완하며 유기적으로 통합한다는 점에 있음
 - 제 5 패러다임 아래에서 R&D는 연구원의 '경험과 직관'에 의존하던 아날로그적 영역에서 벗어나, 거대 AI 모델과 자동화 인프라가 융합된 '지식 제조 플랫폼'으로 진화
 - AI라는 강력한 도구를 기업의 고유 지식 자산과 어떻게 유기적으로 결합하느냐가 차세대 기술 패권을 좌우하는 핵심 경영 과제로 부상하고 있음
- 제5 패러다임이 산업 현장에 구현될 때, 인류 사회는 공상과학의 영역으로 치부되던 거대한 전환을 목도하게 될 것임
 - **건강의 연속성 확보**: 전 세계 수천만 명의 환자를 고통에 빠뜨리는 알츠하이머·치매의 원인 단백질 변이 메커니즘을 AlphaFold 3와 Co-Scientist의 협업으로 가시화하여 맞춤형 표적 약물 대량 도출 [Varadi et al., 2024; Gottweis et al., 2026]
 - **에너지 자립과 넷제로(Net-Zero) 달성**: 태양광 기반 물 분해 수소 생산 효율의 향상 [Yamashita et al., 2022], GNoME이 예측한 신규 금속유기골격체(MOF)를 통해 고효율 이산화탄소 포집의 상용화 촉진 [Merchant et al., 2023].

【 인류 과학사 패러다임의 5단계 진화 】



*출처: 『AI for Science 2025』 재구성, AI 생성 이미지

□ 과학과 혁신의 미래는 AI의 연산 능력 위에서 마음껏 상상의 나라를 펼치는 인간 연구자의 역량에 달려 있음

- 아인슈타인은 일찍이 "지구를 구할 한 시간이 주어진다면, 문제를 정의하는 데 55분을 쓰고 푸는 데는 단 5분만 쓰겠다"고 갈파한 바 있음
 - 제5 패러다임의 도래는 이 명언을 완벽히 현실화 함. 과거 인간이 수개월간 씨름하던 복잡한 수학 연산과 구조 예측이 이제 단 몇 초 만에 완료되기 때문
 - 풀이 과정의 비용과 시간이 '제로'로 수렴하는 시대에, 조직의 R&D 성과를 결정짓는 유일한 변수는 "남들이 던지지 못하는 55분짜리 질문을 어떻게 정의할 것인가"로 귀착
- AI가 디지털 공간에서 놀라운 발견을 거둘지라도, 그것이 실제 인간 사회에 안착하기 위해서는 인간의 시간(임상, 스케일업 검증)을 관리하는 일이 필수
 - 바로 이 지점에서 AI가 이끄는 기술 가속화 시대를 주도할 인간 지성 고유의 희소성과 가치가 역설적으로 빛을 발함
 - AI 플랫폼에 인류가 한 번도 마주하지 못한 대담한 질문을 던지고, AI가 쏟아낸 방대한 데이터 속에서 산업적 맥락과 사회적 의미를 길어 올리며, AI가 설계한 경로를 이탈하여 새로운 영토를 꿈꾸는 리더가 최후의 패권을 거머쥔 것임

□ AI가 끝내 정복하지 못할 인간 지성의 절대 영역, 즉 AI가 학습할 수 없는 비선형적 통찰의 핵심은 다음의 네 가지로 요약됨

- 올바른 질문을 정의하는 능력(Problem Framing)
 - AI는 인간이 부여한 목적 함수를 최적화하는 데 탁월하지만, "무엇을 최적화해야 하는가", "왜 지금 이 문제를 풀어야 하는가"라는 근본적인 어젠다는 결국 인간의 몫
 - (사례) '18년 노벨 생리의학상을 안겨준 앨리슨(James P. Allison) 교수의 면역항암제 패러다임은 당대 주류였던 화학 요법에 맞서 "암세포를 직접 공격하는 대신 우리 몸의 면역계를 깨우면 어떨까?"라는 이질적 질문에서 출발
- 느린 사유(Slow Thinking)와 세렌디피티(Serendipity)
 - AI 알고리즘은 목적 함수를 벗어난 데이터를 예외로 판정하여 배제하지만, 과학사의 위대한 도약은 통제된 알고리즘 밖에서 일어난 세렌디피티의 산물인 경우가 많음
 - (사례) 알렉산더 플레밍(Alexander Fleming)이 방치된 배양접시에서 페니실린의 단초를 발견한 우연, 아우구스트 케쿨레(Friedrich August Kekulé)가 꿈 속에서 벤젠의 육각형 고리를 직관한 순간, 오토 뢰비(Otto Loewi)가 꿈 속 메모를 토대로 신경 전달의 화학적 비밀을 규명한 사건 모두 비선형적이고 여유로운 사유의 틈새에서 발아

○ 학제 간 경계를 넘나드는 무차별적 연결(Boundary Crossing)

- AI는 관련성 점수(Relevance Score)가 낮은 이종 학문의 지식을 좀처럼 연결하지 않지만, 지적 호기심과 상상력을 지닌 인간 연구자는 이종 영역에 상대적으로 개방적
- (사례) 배터리 연구 AI가 식물 세포학 논문을 추천할 확률은 거의 없지만, 인간 연구자는 우연히 참석한 식물학 세미나에서 기공(氣孔)의 물질 교환 메커니즘을 목격하고 차세대 배터리 이온 전극 설계의 결정적 실마리를 엿어낼 수 있음

○ 윤리적 최종 판단과 맥락적 스토리텔링(Contextual Storytelling)

- R&D의 성과가 진정한 비즈니스 가치로 치환되려면, 그것이 사회·정치·산업 생태계에 미치는 파급력을 종합적으로 엮어 내는 서사(敍事) 필요
- (사례) 핵물리학의 위대한 발견을 원자폭탄으로 쓸 것인가, 평화적 원자력 에너지로 활용할 것인가를 결정하는 윤리적 책임, 그리고 경험해보지 못한 신기술에 대한 대중의 사회적 신뢰를 구축하는 과업은 온전히 인간의 몫으로 남아 있음

【 제5 패러다임 도래와 R&D 인적 자원의 가치 전환 】

R&D 직무 역량	전통 패러다임에서의 가치	AI 시대의 가치 변동	R&D 경영 함의
 기존 문헌 및 지식 탐색	우수한 연구자의 척도	↓ (AI가 원천 대체)	 Co-Scientist 등 AI 도구로 문헌 분석 시간 80% 이상 자동화
 실험 데이터 가공 및 통계	고급 기술 인력의 영역	→ (AI 시스템 보조)	 AI 자동 연산 처리 후 인간은 데이터의 오염 여부만 최종 검증
 문제 정의 및 질문 설정	리더급의 전유물	↑ (독보적 핵심 자산)	 "무엇이 가장 가치 있는 난제인가"에 대한 규명과 핵심 어젠다 도출
 이종 학제 간 경계 횡단	개인적 취향으로 치부	↑ (혁신의 주류)	 정형화된 점수 밖에서 이종 기술을 결합하여 신영역을 창출하는 통찰
 비판적 AI 리스크 검증	불필요했던 역량	↑ (필수 방어 기술)	 AI 환각, 출판 편향, 데이터 누수를 잡는 연격한 거버넌스
 윤리적 가치 및 방향 설정	선언적 구호에 치중	↑ (인간 리더의 본질)	 기술 진보가 기업 평판과 인류 사회에 미칠 영속적 가치 최종 조율

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

[보고서/논문]

박용삼, “R&D의 진화, 이제는 X&D 시대,” 포스코경영연구원 이슈리포트, 2017.

Araullo-Peters, V. et al., “Machine learning-guided design of recycled Al-Mg-Si-Cu alloys,” Acta Materialia, Vol. 245, 118640, 2023.

Baker, M., “Is there a reproducibility crisis?” Nature, Vol. 533, pp. 452-454, 2016.

Bohacek, R. S. et al., “The art and practice of structure-based drug design,” Medicinal Research Reviews, Vol. 16(1), pp. 3-50, 1996.

Boiko, D. et al. (Carnegie Mellon University), “Autonomous Chemical Research with Large Language Models (Coscientist),” Nature, Vol. 624, pp. 570-578, 2023.

Fudan University, SAIS & Nature Custom Media, “AI for Science 2025,” Nature Portfolio custom report, May 2025.

Gartner Research, “Dark Data: What It Is and What It Costs You,” Gartner Research Frameworks, 2022.

Gartner, “30% of GenAI Projects Will Be Abandoned After Proof of Concept,” Gartner Press Release, July 2024.

Gottweis, J. et al. (Google DeepMind), “Towards an AI Co-Scientist,” Nature, May 2026.

McGowan, A. et al., “The accuracy and reliability of medical references generated by ChatGPT,” Journal of Medical Internet Research, Vol. 25, e4849, 2023.

McKinsey Global Institute, “The Social Economy: Unlocking Value and Productivity through Social Technologies,” MGI Reports, 2012.

McKinsey & Company, “State of AI in 2025: Global Survey Results,” McKinsey Analytics, 2025.

Merchant, A. et al. (Google DeepMind), “Scaling Deep Learning for Materials Discovery (GNoME),” Nature, Vol. 624, pp. 80-85, 2023.

Royal Swedish Academy of Sciences, “The Nobel Prize in Chemistry 2024: Scientific Background,” Nobel Prize Outreach, October 9, 2024.

Novikov, A. et al. (Google DeepMind), “AlphaEvolve: A Coding Agent for Scientific and Algorithmic Discovery,” arXiv:2506.13131, 2025.

Organization for Economic Co-operation and Development, “Main Science and Technology Indicators,” OECD Publishing, 2024.

PwC Global, “PwC Global AI Business Survey: Reality vs Hype in Corporate R&D,” PwC Research Publications, 2024.

Scannell, J. W. et al., “Diagnosing the decline in pharmaceutical R&D efficiency (Eroom's Law),” Nature Reviews Drug Discovery, Vol. 11, pp. 191-200, 2012.

Szymanski, N. J. et al., “An autonomous laboratory for the synthesis of novel inorganic materials (A-Lab),” Nature, Vol. 624, pp. 86-91, 2023.

Tufts Center for the Study of Drug Development, “Briefing on Cost of Developing a New Drug,” Tufts University, 2016.

Van Noorden, R., “More than 10,000 research papers were retracted in 2023,” Nature News, April 2024.

Varadi, M. et al., “AlphaFold Protein Structure Database in 2024: providing structure coverage for over 214 million protein sequences,” Nucleic Acids Research, Vol. 52, pp. D368-D375, January 2024.

Yamashita, S., Miyauchi, M. et al., “Data-Driven Design of Oxide Photocatalysts for Efficient Hydrogen Production,” ACS Energy Letters, Vol. 7, pp. 2932-2939, 2022.