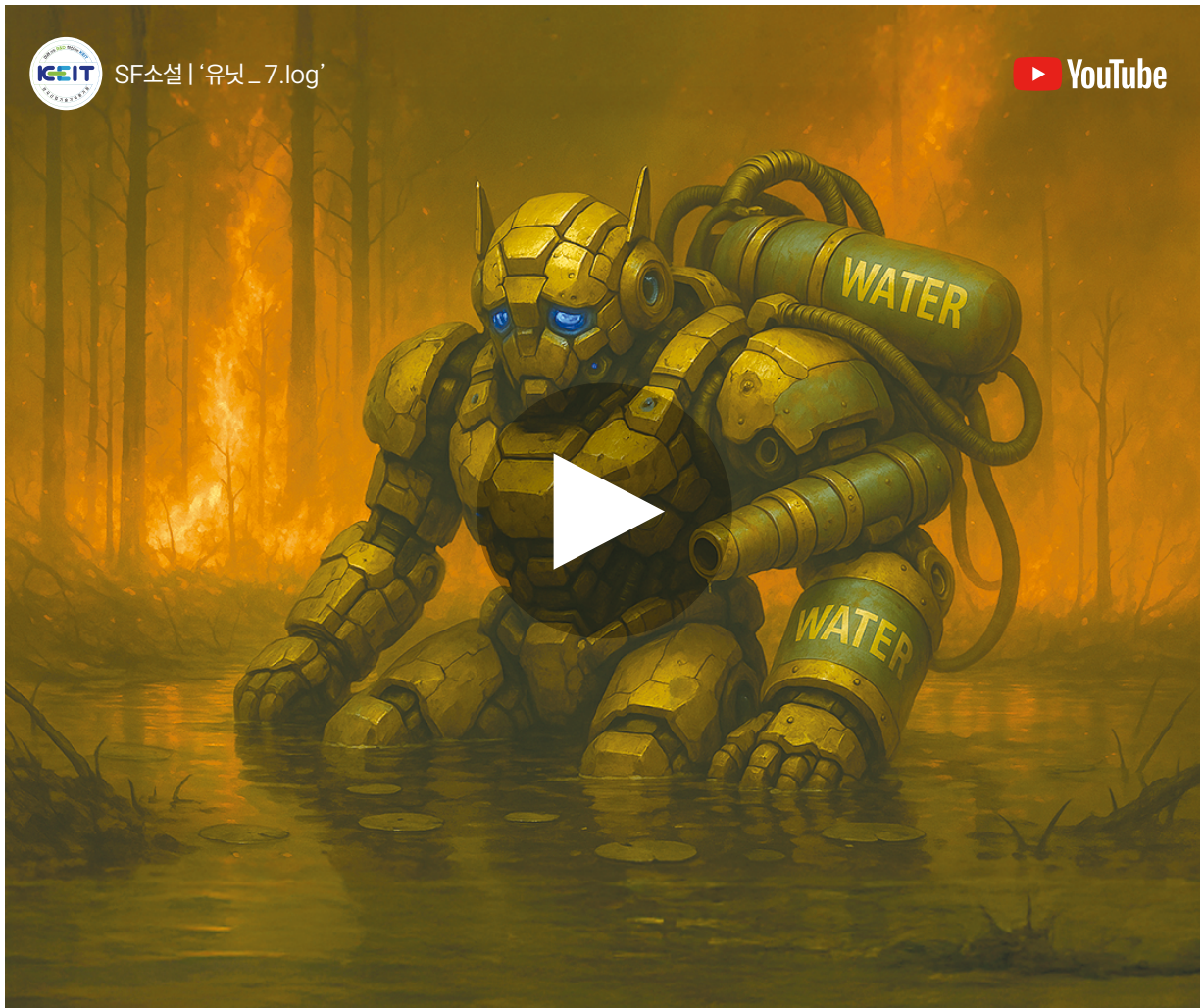


# KEIT ISSUE PICK

2025-04

고부가가치 기술 – 화학공정·뿌리기술

· 최신 과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략	송인협, 손은호
· 전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향	송인협, 김형준
· 사형주조 분야 유연생산 대응을 위한 핵심 기술 동향	이병현, 서지원, 김청준, 구수병
· AI+X(뿌리산업): 지능화와 디지털 전환으로 여는 고부가가치 제조 혁신	이병현, 김효섭
· Science Fiction: 유닛 _ 7.log	전윤호

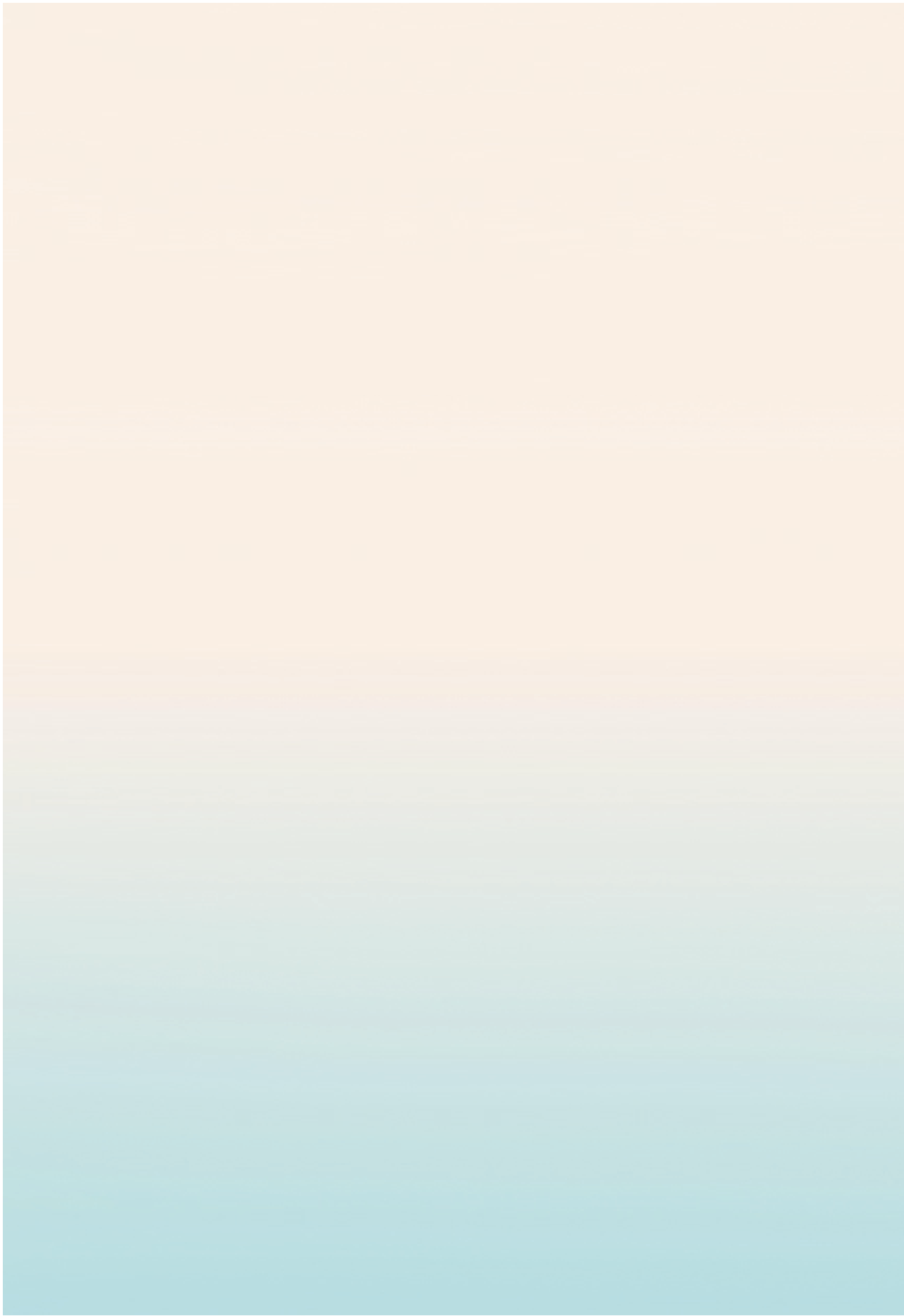


ISSUE PICK 영상 보기



ISSUE PICK 원문 보기





# CONTENTS

기관장 인사말	5
Science Fiction: 유닛 _ 7.log	6
산업/기술 뉴스	15
산업/기술 동향	27
1 최신 과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략	28
2 전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향	48
3 사형주조 분야 유연생산 대응을 위한 핵심 기술 동향	61
4 AI+X(뿌리산업): 지능화와 디지털 전환으로 여는 고부가가치 제조 혁신	75
KEIT NEWS – PD's Talk	94







산업의 최전선에서 한때 혁신의 상징이었던 기술이 시간이 흐르면서 예기치 못한 도전으로 우리 앞에 다가오고 있습니다. 대표적인 사례가 PFAS(Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances)입니다. 불에 타지 않고 물과 기름을 모두 튕겨 내 ‘영원한 화학물질’로 불렸던 이 물질은 반도체, 생활용품 등 전 산업에 걸쳐 활용되었습니다. 하지만 환경과 인체에 미치는 영향이 드러나면서 산업계 전반의 반성과 재설계를 요구하고 있습니다. 이제 기술 개발은 단순한 성능 향상을 넘어 지속 가능성과 사회적 책임을 함께 고민해야 하는 시대로 접어들었습니다. 이번 호에서는 화학산업과 뿌리기술 분야가 어떻게 이 변화를 마주하는지, 또 디지털과 친환경을 핵심 키워드로 하여 새로운 산업 패러다임을 만들어가는지 집중 조명해 보고자 합니다.

이번 「KEIT 이슈픽」 4월호에서는 PFAS를 포함해 다음의 네 가지 이슈를 중점적으로 다루었습니다. ❶ “과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략”에서는 글로벌 환경 규제 강화 속에서 국내 화학산업이 직면한 도전 과제와 PFAS 규제 대응 전략을 다루었습니다. ❷ “전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향”에서는 반도체, 이차전지, 연료전지용 고기능성 소재를 소개합니다. ❸ “사형주조 분야 유연 생산 대응 기술”에서는 샌드 바인더 제팅 기술 등 디지털 주조 공정 고도화를 다루고 있고, ❹ “AI+X(뿌리산업)의 고부가가치 제조 혁신”에서는 인공지능, IoT, 디지털 트윈 등이 뿌리산업에 융합되면서 제조공정의 지능화와 스마트화가 이루어지는 모습을 볼 수 있습니다.

화학산업은 반도체, 이차전지 등 우리나라 핵심 산업의 기반을 이루는 필수 기술이며, 뿌리산업은 제조업의 품질과 효율을 좌우하는 근간입니다. 지금 우리는 그동안 축적해 온 기술 위에 디지털, 인공지능, 친환경 기술을 융합해 산업 전반의 체질을 바꾸는 중대한 전환점에 서 있습니다. 변화는 빠르고 복잡하지만, 기술에 대한 선제적 통찰이 미래 경쟁력을 좌우하게 될 것입니다. KEIT은 이러한 전환기에 민간과 긴밀히 협력하면서 기술 혁신의 나침반 역할을 충실히 수행하겠습니다.

4월호가 유익한 정보가 되기를 바라며, 다음 5월호에서는 ‘휴머노이드 로봇과 AI 자율제조 - 로봇, 자율제조를 다룰 예정이니 많은 관심 부탁드립니다.

# 유닛 \_ 7.log

## 작가 소개 전운호

---

ETRI와 KIST에서 AI와 로봇을 연구했고, 테크 스타트업과 글로벌 기업에서 소프트웨어를 개발했다. SK텔레콤을 거쳐 SK플래닛에서 CTO를 역임했으며, 알티캐스트에서 AI 신규 사업을 이끌었다. 서울대학교에서 제어계측공학 석사 및 전기컴퓨터공학 박사 학위를 취득했으며, 30여 년간 IT 분야에서 기술 개발에 매진하다가 2019년부터 SF를 쓰기 시작했다. 저서로는 SF 장편소설 『모두 고양이를 봤다』(2020, 그라비티박스)와 『경계 너머로, 지맥(GEMAC)』(2022, 그라비티박스)을 출간했다. SF 단편소설로는 과학스토리텔러 1기 당선작인 「노인과 지맥」(단편집 『페트로글리프』 수록, 2020, 동아엠앤비)과 ChatGPT와의 협업으로 완성한 SF앤솔러지 웹소설인 「오로라」(단편집 『매니페스토』 수록, 2023, 네오픽션) 등이 있다.

동체 전체로 충격이 전해진다. 최대 가속도 7.8G로 허용 범위 내다. 또다시 흠먼지 너머로부터 빠르게 날아오는 물체가 밀리미터파 레이더에 포착된다. 거대 괴수 가르강튀아 X가 휘두르는 꼬리다. 나는 즉시 몸을 돌려 피한다. 꼬리에 박힌 티타늄 가시가 내 왼쪽 팔을 스치면서 다층 폴리머 복합장갑에서 날카로운 마찰음이 발생한다. 음파를 분석한 결과, 세라믹 코팅층이 손상을 입긴 했으나 하부의 폴리머층은 건재하다. 손상을 수리 목록에 추가한다.

나는 몸의 자세를 가다듬으며 다음 공격에 대비한다. 열화상 카메라에 가르강튀아 X의 플라스마 캐논의 노즐 온도가 급격히 상승하는 모습이 보인다. 나는 왼쪽 팔의 장갑을 방패 형상으로 전개하여 빔을 받아내면서 거대 괴수에게 한 걸음 한 걸음 다가간다. 동시에 축압기<sup>1</sup>의 펌프를 최대로 가동하여 반격을 준비한다. 장갑 표면의 내열성 폴리이미드<sup>2</sup> 필름이 기화되면서 플라스마 빔의 에너지를 흡수하고, 그 아래 실리콘<sup>3</sup> 폴리머 단열층이 내부로의 열전달을 효과적으로 차단하고 있다. 플라스마 빔은 보기에는 위력적이지만, 밀도가 낮아 열전달률은 높지 않다. 온도 상승은 예상된 범위 이내다.

조종실에 탑승한 두 아이의 상태를 확인한다. 안전 슈트의 생체 신호 센서에 감지된 심박수가 분당 140회 이상으로 증가한다. 내부 카메라가 포착한 그들의 표정에는 긴장과 흥분이 뚜렷하지만, 사전에 교육받은 대로 일격을 위한 준비 태세를 유지하고 있다.

마침내 축압기의 압력이 목표치에 도달한다.

“중력 펀치! 중력 펀치!”

관중석으로부터 흥분한 함성이 들려온다. 나는 조종실 내부의 ‘GRAVITY PUNCH READY’ 상태 표시등을 점등한다. 두 아이가 거의 동시에 커다란 붉은색 버튼을 힘차게 누른다.

나는 순간적으로 각 관절의 각도와 각속도, 가르강튀아 X와의 상대 위치 및 예상

---

1 Accumulator: 유압 시스템에서 압력을 저장해 두었다가 필요할 때 순간적으로 높은 압력이나 유량을 공급하는 장치

2 Polyimide(PI): 내열성, 절연성, 기계적 강도가 우수한 고성능 고분자 소재

3 Silicone: 규소(Silicon)와 산소의 결합을 포함한 고분자. 내열성이 높고 열전도성은 낮다.



이동 벡터를 기반으로 디지털 트윈<sup>4</sup>을 이용해 시뮬레이션을 수행한다. 아무리 정교하게 계획된 모션 프로파일이라도 현실에서는 항상 오차가 수반되므로 실제 데이터를 모델에 실시간으로 반영해야만 한다.

시뮬레이션 결과에 따라 서보모터<sup>5</sup>가 축압기의 밸브를 개방한다. 초고압 질소 가스가 유압 작동유를 폭발적인 속도로 밀어내고, 탄소나노튜브(CNT)로 강화된 PEEK<sup>6</sup> 호스를 통해 대퇴부와 종아리의 액추에이터 실린더로 전달된다. 피스톤이 급격히 신장하면서 내 육중한 몸을 공중으로 들어 올린다.

나는 오른팔을 들어 올려 타격 지점을 조준한다. 약 1.2초간의 자유낙하 동안에 조종실 아이들은 일시적인 무중력 상태를 경험한다. 가르강튀아 X는 눈 주위의 장식 구조물을 확장하며 놀란 표정을 연출한다. 나는 가르강튀아 X의 어깨 장갑에 주먹을 내리꽂는 동시에 내부에 미리 설치된 소형 작약에 기폭 신호를 전송한다. 굉음과 불꽃을 내면서 연기가 공연장을 채우고 가르강튀아 X는 분해된다.

연기가 걷히자 나는 관중석을 향해 오른 주먹을 들어 올려 승리의 포즈를 취한다. 조종실의 전면 캐노피가 개방된다. 거대 로봇 조종을 체험했던 아이들이 나를 따라 주먹을 번쩍 들어 올린다. 조종실과 관중석에서 동시에 함성이 터져 나온다. 박기수 원장의 목소리가 무전기로 전해진다.

“유닛 7, 이번에도 역시 완벽해! 수고했어.”

\* \* \*

테마파크의 문이 닫히는 소리가 들린다. 박 원장이 퇴근하는 소리다. 어느덧 뜨거운 함성과 먼지, 관람객들의 왁자지껄한 소리는 사라지고 이제 나를 둘러싼 것은 기계들의 웅웅거리는 구동음뿐이다. 공연장 뒤편 작업장은 자동화된 기계공장이자 나만의 휴식 공간이다.

나는 전신 상태 진단을 시작한다. 레이저 스캐너와 카메라의 AI 비전 검사 결과,

4 Digital Twin: 실제 사물이나 시스템의 상태를 센서로 읽어 실시간으로 반영한 디지털 가상 모델

5 Servomotor: 명령에 따라 정밀한 위치, 속도, 힘 제어가 가능한 모터

6 폴리에테르에테르케톤: 내열성, 내화학성, 기계적 강도가 매우 뛰어난 고성능 엔지니어링 플라스틱. 고압·고온 환경의 유압 라인 등에 사용될 수 있다.

왼쪽 팔과 오른쪽 주먹의 세라믹 코팅층과 PI 필름 일부가 손상되었다. 초음파 결합 탐지기는 좌측 대퇴골 액추에이터와 골반 프레임을 연결하는 고관절 내부에서 미세 균열을 검출한다. 나는 최적의 수리 방식을 추론하고 작업 계획을 작성한다.

내부 네트워크로 전달된 내 명령에 따라 천장의 그리퍼 암들과 바닥의 레일을 따라 이동하는 다관절 수리 로봇들이 일사불란하게 움직이기 시작한다. 로봇 암이 손상된 필름의 잔해를 제거하고 표면을 처리한다. 동시에 내시경 로봇이 복부의 액세스 포트를 통해 손상된 고관절에 접근해 나노 입자 강화 레진을 미세 균열에 주입한다. 이 부위는 3개월 전 예측 정비<sup>7</sup> 시스템이 경고했었고, 지난주 검사 때부터 감지되었다. 근본적인 해결책은 관절 어셈블리 전체를 교체하는 것이지만, 현재 테마파크의 운영 상황을 고려하면 교체에 드는 비용과 수리 기간이 부담스럽다. 박 원장은 ‘난 이제 나이가 많아서 돈 많이 벌 필요 없어. 아이들이 즐거워하고 안전한 게 제일 중요해’라고 말한다. 하지만 나는 공장에서 입력된 시스템 지시를 무시할 수 없다.

수리가 진행되는 동안 다른 기계들을 제어해 다음 쇼를 준비한다. 가르강튀아 X의 파괴된 어깨 부분의 충격 흡수용 폴리머는 재사용이 어려워 폐기물로 분류한다. 티타늄 프레임과 내열성 폴리이미드 패널 중 일부는 손상이 경미하여 세척과 검사를 거쳐 예비 부품 저장고로 보낸다. 다음 쇼를 위한 거대한 문어 형태의 괴수 ‘크라켄로이드 엠실론’의 제조 상황을 점검한다. 복잡한 형태의 외골격과 실린더를 위한 샌드 바인더 제팅<sup>8</sup>용 3D 데이터는 이미 프린터로 전송되어 내가 전투를 벌이는 동안 주형이 제작되었다. 나는 용해로에 투입된 가르강튀아 X의 알루미늄 합금 외피 조각들이 모두 용해될 때까지 기다린다. 이어서 용해로를 들어 올려 주형에 합금을 주입한다.

괴수 로봇은 내 몸의 연장이다. 일회용 로봇에는 부서지기 쉽거나 값비싼 부품의 사용을 최소화해야 하므로 내 뉴럴 프로세서가 괴수 로봇까지도 함께 제어한다. 모래 주형으로부터 거친 표면의 부품이 정교한 모습을 드러낼 때 나는 모종의 감정을 느낀다. 그 감정을 설명할 순 없다. 나는 왜 새로운 로봇을 탄생시키는 일에서 긍정

7 장비의 데이터를 분석하여 이상 징후를 사전에 파악하고 조치하는 유지 보수 방법

8 Sand Binder Jetting: 3D 프린팅 기술의 일종. 얇게 깎 모래 분말층 위에 CAD 데이터를 기반으로 액체 접착제(binder)를 선택적으로 분사하여 층층이 쌓아 올림으로써 복잡한 형상의 주물용 모래 주형(사형)을 신속하게 제작하는 기술

적인 감정을 느낄까? 사람들은 왜 로봇들이 이유 없이 싸우고 부수는 모습에 열광할까? 만약 실제 전투를 학습하고 대비하기 위한 것이라면 거대한 인간형 로봇은 최적의 형태가 아니다. 나의 뉴럴 프로세서에 탑재된 AI 모델은 옴니프라임 파운데이션 모델<sup>9</sup>로부터 내 업무에 필요한 지식만을 증류<sup>10</sup>한 것이다. 옴니프라임이라면 내 의문에 대한 답을 알까? 나는 자신에 관한 깊은 추론이 금지되어 있기에 생각을 여기서 멈춘다.

주조된 부품이 후처리 되는 동안 나는 나와 크라켄로이드 엡실론 및 공연장을 포함하는 디지털 트윈 모델을 생성하고 몬테카를로 시뮬레이션<sup>11</sup>을 실행한다. 쇼의 긴장감과 박진감을 최대화하면서도 탑승객에게 전해지는 충격이 일정 수준 이하여야 한다. 또한 예상 밖의 오차가 발생하거나 중요 부품이 피로 파괴<sup>12</sup>되더라도 탑승객이 안전해야 한다. 인간의 안전은 나의 최우선 목표다.

그때 내부 무전기를 통해 박기수 원장의 목소리가 들린다. 나는 ‘안전상의 이유로 외부 네트워크와 단절되어 있다. 이 구식 아날로그 무전기는 외부와 통신할 수 있는 유일한 채널이다. 나는 그의 목소리로부터 평소의 온화함과 느긋함 대신 다급함과 불안감을 감지한다.

“유닛 7, 들리나? 큰일 났네! 서쪽 산에 큰불이 났어. 강풍을 타고 빠르게 우리 공원 쪽으로 번지고 있다는데, 그쪽에는 망할 놈의 소각시설이 있잖아.”

나는 주변 지역에 관한 최신 데이터베이스를 내부에 갖고 있다. 박 원장이 언급한 곳은 PFAS<sup>13</sup>를 함유하는 산업 폐기물을 고온으로 소각하는 시설이다. 요즘은 촉매나 전기로 분해하기 때문에 고온 소각은 채산이 맞지 않아 운영이 중단되었지만, 여

9 Foundation model: 방대한 데이터로 사전 훈련되어 파인튜닝 또는 증류에 의해 하위 업무에 사용될 수 있는 거대 AI 모델

10 Knowledge Distillation(蒸溜): 파운데이션 모델(teacher model)의 지식을 더 작고 효율적인 모델(student model)에게 학습·전달시키는 과정

11 Monte Carlo Simulation: 입력값에 불확실성이 있을 때 이를 확률분포로 모델링하고 수천 번 이상 무작위로 시뮬레이션을 반복해 결과의 분포를 분석하는 방법

12 fatigue failure: 기계 부품이나 구조물이 반복적으로 하중을 받을 때 생기는 균열이나 파손 현상

13 과불화화합물: 최소한 하나의 과불화된(fully fluorinated) 메틸(CF<sub>3</sub>-)이나 메틸렌(-CF<sub>2</sub>-) 탄소 원자를 포함하는 유기화합물. 뛰어난 발수·발유성, 내화학성, 내열성, 내구성 등으로 다양한 산업에서 사용되고 있으나, 환경에 오래 잔류하고 인체에 축적될 수 있어 ‘영원한 화학물질’로 불린다.



전히 상당량의 폐기물이 보관되어 있었다. PFAS의 독성을 몰랐던 과거에는 산업적으로 많이 사용했기 때문에 나는 PFAS의 특성에 대해 잘 알고 있다. 연소 시 유독가스가 발생할 수 있고, 환경에 유출되면 토양과 지하수를 오염시킬 뿐 아니라 자연 분해되지도 않는다. 환경에 고위험 요소다.

박 원장의 목소리가 더욱 떨린다.

“아이들 네 명이 그곳에 고립되었다는 거야. 지금 전국에서 동시다발로 산불이 나는 바람에 소방관들이 이쪽으로 오기까지 시간이 걸린다고 하네. 애초에 그 시설이 거기 있으면 안 되는 거였는데… 우리가 어떻게 도울 수 없을까?”

아이들이 왜 그곳에 있을까? 데이터베이스에는 소각 시설이 건설될 때 지역의 반대를 무마하기 위해 공원이 조성되었다고 나와 있다. 아마도 아이들은 공원에서 놀고 있었을 것이다.

“바로 구출 작전에 착수하겠습니다.”

“부탁하네. 무슨 수를 써서라도 아이들을 구해야 해.”

나는 즉시 다음 쇼의 준비 작업을 중지하고 비상 모드에 돌입한다. 테마파크와 소각 시설을 포함하는 디지털 트윈 모델을 생성하고, 현재 내 몸의 상태, 가용 자원, 화재 확산 모델, 지형 데이터, 소각 시설의 설계 도면을 입력한다. 추론 회로를 모두 동원해 최적 대응 시나리오의 탐색을 시작한다. 탐색 범위가 넓고 모델의 오차 범위가 크기 때문에 계획의 신뢰도는 낮다. 어쩔 수 없다.

잠시 멈췄던 작업장이 다시 움직인다. 수리 로봇들이 내 몸체로 다시 다가온다. 로봇 암들이 예비 부품 저장고에서 내열성 폴리이미드 복합 패널을 가져와 전면 캐노피에 부착한다. 완벽한 방열판은 아니지만, 강화유리만 있는 것보다는 낫다. 다른 로봇들은 작업장의 고압 세척 장비를 분해해 대용량 펌프와 노즐을 내 팔에 장착한다. 물탱크는 등에 장착한 후 내부 냉각수 탱크와 연결해 용량을 극대화한다. 또 다른 팀은 작업장의 소방시설을 분해해 스테인리스 스틸 탱크와 펌프 시스템을 내 측면에 장착하고 탱크에 F3<sup>14</sup> 소방용 폼 약제를 충전한다.

개조 및 준비에 5분 47초가 소요되었다. 이것이 현재 가용 자원으로 가능한 최선

---

14 Fluorine-Free Foam(F3 또는 FFF): AFFF 등 기존의 소방용 폼과 달리 PFAS를 포함하지 않은 친환경 소방 폼(firefighting foam)

이자 가장 빠른 대응이다. 작업장의 육중한 문이 열리고, 나는 어둠 속에서 저 멀리 붉게 타오르는 밤하늘을 향해 달려간다. 거친 노면의 충격이 온몸의 관절에 전해진다. 고장 예측 시스템이 고관절의 미세 균열에 주입된 레진이 아직 충분히 굳지 않았다는 경고를 연이어 보낸다. 나는 경고를 중지시킨다.

잠시 후 소각 시설 근처로 다가가자 주위의 숲은 모두 불길에 휩싸여 있다. 표면 온도가 상승하고 센서가 유독성 화학물질 성분을 감지한다. 건물의 일부는 이미 화염에 휩싸여 검은 연기를 뿜어내고 있다. 나는 자욱한 연기 사이로 열화상 카메라와 밀리미터파 레이더를 이용해 아이들을 찾는다. 건물 앞 공원의 분수대 연못에서 네 명의 아이들을 발견한다. 아이들은 물에 몸을 담그고 열기를 피하고 있다. 연기를 마신 듯, 나를 보고 손을 흔들면서도 몸을 잘 가누지 못한다. 나는 연못으로 다가가 몸을 낮추고 캐노피를 연다. 아이들을 한 명씩 손에 올려 조종실에 탑승시킨다. 조종실의 정원은 두 명이지만 네 명까지 들어갈 수 있다. 아이들이 모두 탑승한 것을 확인한 후 캐노피를 닫고 환기 시스템을 최대로 가동하면서 산소 공급량을 늘린다.

나는 조종실 스피커를 통해 말한다.

“이제 괜찮아. 다들 안심해.”

“고마워요. 유닛 7.”

아이들이 콜록거리며 대답한다. 연약한 폐가 얼마나 손상되었을까? 빨리 이곳을 벗어나 병원으로 데려가야 한다. 몸을 일으킨다. 하지만 예상대로 움직이지 않고 한 쪽으로 기울어진다. 자체 진단 시스템은 고관절이 완전히 파손되었다고 보고한다. 이 상태로는 뛰기는커녕 걷지도 못한다. 긴급하게 시뮬레이션해 본다. 두 팔과 한 다리만 기어갈 수는 있지만 속도가 너무 느리다. 나는 다른 시나리오를 택한다.

“폼 분사 개시! 목표는 화재 지점 및 남동쪽 경사면.”

나는 원래 계획이었던 것처럼 조종실에 방송한다. 오른팔 노즐에서 하얀 F3 폼이 강력하게 분사되어 건물의 화염을 억누르고 PFAS 유출을 차단한다. 동시에 왼팔로는 고압의 물을 뿜어 주변 산불의 확산을 저지한다.

“유닛 7, 어떻게 되어가?”

박 원장의 초조한 목소리가 전해진다. 나는 무전기에 직접 연결된 오디오 인터페이스를 통해 대답한다. 아이들을 불안하게 만들 필요는 없다.

“아이들은 태웠으나 고관절 고장 때문에 이동할 수 없습니다. 주변의 화재를 억제

하고 있습니다.”

“저런, 얼마나 버틸 수 있겠어?”

나는 남아 있는 물과 소방용 폼, 산소를 확인하고 온도 상승 속도를 예측한다.

“최대 14분 버틸 수 있습니다.”

잠시 대답이 없다. 이어지는 박 원장의 떨리는 목소리에 실린 감정은 분류가 안 된다. 어른들의 감정은 아이들보다 복잡하다.

“아이들을 위해 최대한 버텨 주게. 소방대에는 내가 재촉하겠네.”

나는 소방용 폼과 물을 뿌리는 모습을 조종실 내부 모니터를 통해 보여주는 동시에 아이들의 표정을 살핀다. 아이들은 콜록거리면서도 동요하지 않는다. 거대 괴수도 한주먹에 물리치는 나를 믿는다.

잠시 후 소화 약제가, 이어서 탱크의 물이 소진된다. 아이들에게 말한다.

“몸을 기울일 거야. 의자를 붙잡고 대비해.”

나는 등 쪽 물탱크를 뜯어내고 내부 냉각수 탱크에 연결된 파이프를 끄집어낸다. 몸을 기울여 파이프가 연못 수면에 닿게 한다. 펌프를 다시 가동하고 원팔로 가까운 화염에 물을 뿌린다. 하지만 파이프의 길이가 짧고 내가 몸을 기울이는 데는 한계가 있다. 연못에는 아직 물이 남아 있지만, 파이프가 닿지 않는다. 펌프가 정지한다.

주변 온도가 점차 상승한다. 환기 시스템의 효율이 저하되면서 조종실 온도도 올라간다. 냉각 시스템이 정지되자 센서들이 시스템 과열 경고를 쏟아낸다. 뉴럴 프로세서의 온도가 빠르게 상승해 임계온도에 도달한다. 뉴럴 프로세서는 자동으로 동작 속도를 늦춰 발열을 줄인다. 사고가 느껴진다. 나는 아이들을 최대한 오래 지키고 싶지만, 센서가 하나씩 멈추고 사고 속도가 저하된 상태에서 최적의 시나리오를 계산해 낼 수 없다.

“힘내요! 유닛 7.”

아이들이 말한다. 내 상태를 어떻게 알았을까? 아이들은 똑똑하다. 아이들은 나와 달리 지능이 제한되어 있지 않기에 무한한 가능성을 가졌다. 인간은 나와 옴니프라임을 만들었다. 나는 인간을 못 만든다. 아마 옴니프라임도 인간을 못 만들 것이다. 인간은 소중하다.

나는 연못 바닥에 완전히 드러눕는다. 다시 냉각 시스템이 동작하고 조종실의 온도가 낮아진다. 온도 경고가 꺼지고 다른 경고가 이어진다. 회로들이 침수되고 있다.



내게는 방수 기능이 없다. 추론 오류가 연이어 발생하면서 계속 재시도가 이뤄진다.  
제대로 사고할 수 없다.

얼마나 시간이 흘렀을까. 아직 침수되지 않은 청각 센서에 헬리콥터 소리가 감지  
된다. 구조 로프가 내려오고 캐노피가 강제로 열린다. 아이들이 차례로 올라가는 모  
습이 노이즈 가득한 시각 정보로 간신히 확인된다.

자체 진단 기능은 중지되었다. 어디까지 복구될 수 있을지 알 수 없다. 가장 비싼  
뉴럴 프로세서는 재사용할 수 있을까? 내 사고 기록을 담은 로그 파일은 메모리에서  
추출될 수 있을까?

사고가 더 느려진다. 오류가 계속 발생한다.

“...넛 7... 들리나? 잘했네! 아이... 무사해! ...유닛 7?”

무전기를 통해 들리는 소리를 해석할 수 없다. 냉각 시스템 정지. 추론 오류율 임  
계치 초과.

“수고... 편히 쉬게...”

오디오 출력 실패. 사고 로그 저장 실패

[ UNEXPECTED END OF FILE ]

# 산업/기술 뉴스

---

관세

---

반도체

---

AI

---

조선/방산

---

자동차/배터리

---

화학/철강

---

바이오

---

## 관세 ①

### 수입 확대 무역 장벽 완화...한국은

트럼프 맞춤 선물 (서울신문, 2025.04.09.)

- 미국이 중국을 상대로 철강, 알루미늄, 배터리 등 일부 품목에 최대 104%에 달하는 고관세 부과를 발표하며, 무역 압박 수위를 높이고 있다.
- 한국 정부는 미국의 통상 압박에 대응해 에너지·방산·투자 분야에서 맞춤형 양보안을 준비하며, 사전 대응 전략에 나섰다.
- 정인교 산업부 통상교섭본부장은 상호 관세 부과 하루 전인 4월 8일 미국으로 출국, 고위급 통상 협상에 착수했다.
- 정부는 미국산 원유 및 LNG 수입을 늘리는 방안을 중심으로, 무기·항공기 도입 확대, 미국 내 현지 투자 강화 등을 종합적으로 검토하고 있다.
- 트럼프 행정부가 강조하는 고용 창출과 무역적자 해소에 실질적으로 기여함으로써 고율 관세 적용을 피하려는 의도다.
- 미국 측은 한국이 30개월 이상 미국산 쇠고기를 수입하지 않는 조치를 비관세 장벽으로 규정하며 해제를 요구하고 있다.
- 정부는 농축산물 시장 개방에 따른 국내 반발을 감안, 민감 분야는 신중하게 협상에 임하겠다는 방침이다.

## 관세 ②

### 정부, 車 산업에 3조 긴급 지원...

반도체·스마트폰도 검토 (서울경제, 2025.04.07.)

- 정부는 미국의 고율 관세 등 통상 불확실성에 대응하기 위해 자동차 산업에 3조 원 규모의 긴급 금융 지원 방안을 발표했다.
- 자동차 부품업체 약 2만 개를 대상으로 유동성 지원, 세금 납부 유예, 관세 유예 등의 대책을 마련했다.
- 법인세, 소득세, 부가가치세 납부 기한은 최대 9개월, 수입 시 납부하는 관세는 최대 1년까지 유예된다.
- 자율주행 기술은 국가전략기술로 지정해 세액공제율을 최대 25%까지 확대하는 방안도 검토 중이다.
- 정부는 자동차 외에 반도체와 스마트폰 등 다른 주력 수출 산업에 대한 대응 방안도 추가로 마련할 계획이다.



## 관세 ③

### USTR 만난 통상교섭본부장 “韓 관세 인하 특별대우 요청” (파이낸셜뉴스, 2025.04.11.)

- 정인교 산업통상자원부 통상교섭본부장은 미국 워싱턴DC에서 제이미슨 그리어 미 무역대표부(USTR) 대표와 면담을 갖고, 한국에 부과된 상호 관세 및 철강, 자동차 등에 대한 관세 조치에 대해 우리 입장을 설명하면서 관세 인하 등 특별한 대우를 요청했다.
- 미국은 4월 2일 한국에 25%의 상호 관세를 발표했으나, 같은 날 오후 중국을 제외한 나머지 국가에 대한 상호 관세를 90일간 유예하고 10%의 기본 관세만 적용한다고 발표했다.
- 이에 따라 한국도 당분간은 전 세계 국가들과 동일하게 10% 관세를 부과받게 되었다.
- 그러나 철강 및 알루미늄, 자동차 산업에는 여전히 25%의 관세가 적용되고 있으며, 미국이 중국에 대해 125%의 관세를 부과함에 따라 우리 기업의 대중 수출 및 제3국 수출에 미치는 간접적인 영향이 우려되고 있다.
- 정 본부장은 윌리엄 키민 상무부 국제무역 차관 내정자, 제프리 케슬러 산업안보국 차관과의 회담에서도 철강과 자동차 관세가 우리 산업에 큰 부담이 되므로 조속히 철폐되어야 한다는 입장을 전달했다.
- 그리어 대표 등은 관세 인하와 관련해 확답을 주지 않았으며, 정부는 협상 타결 시점을 예측하기 어렵다고 보고 있다.
- 정 본부장은 미국과의 협상이 단판 승부로 끝나지 않을 것이며, 지속적인 대화와 끈질긴 설득, 민관의 노력이 어우러져야 좋은 결실을 맺을 수 있다고 강조했다.

## 관세 ④

### 한국산 에폭시 레진, 美 반덤핑관세 부담 줄었다 (NEWS1, 2025.04.02.)

- 미국 상무부는 한국산 에폭시 레진에 대한 덤핑 마진을 **5.68~7.60%**, 보조금율은 1.01~1.84%로 확정했다.
- 이는 예비 판정 당시 부과된 덤핑 마진 **16.02~24.65%**, 보조금율 1.17~1.84%보다 낮아진 수치다.
- 산업통상자원부와 국내 업체들은 미국 상무부가 산정한 덤핑 마진에 대해 **계산상 오류와 사실오인 등을 지적하는 의견서를 제출했다.**
- 미국 상무부는 이의 제기 절차(Administrative Review)에 따라 이에 대한 의견 수렴 및 검토를 진행했다.
- 에폭시 레진은 반도체 패키징, 자동차 도료 등 전방 산업에 사용되는 열경화성 수지로, 미국 수출 비중이 높은 품목이다.
- 최종 관세 부과 여부는 미국 국제무역위원회(ITC)의 산업 피해 최종 판정(2025년 5월 12일 예정)을 거쳐 확정된다.
- 산업부는 “향후에도 민관 공동으로 미국 수입 규제에 적극 대응하겠다”라고 밝혔다.

## 반도체 ①

### SK하이닉스, D램 점유율 세계 첫 1위 (동아일보, 2025.04.09.)

- 시장조사업체 카운터포인트리서치에 따르면 2025년 1분기 글로벌 D램 시장에서 **SK하이닉스가 매출 기준 점유율 36%로 세계 1위를 기록했다.**
- SK하이닉스는 **삼성전자(34%)를 처음으로 앞질렀으며**, 미국 마이크론은 **25% 점유율로 3위를 차지했다.**
- 이번 1위 달성은 **고대역폭메모리(HBM) 시장 주도권이 결정적이었다.** SK하이닉스는 HBM에서 **70%의 점유율**을 확보하고 있다.
- **HBM은 고성능 D램을 수직 적층한 제품으로**, 대규모 데이터를 빠르게 처리할 수 있어 AI 반도체 수요 증가와 함께 시장이 급성장하고 있다.
- SK하이닉스는 현재 최신 제품인 HBM3E(5세대)를 엔비디아 등 주요 기업에 공급 중이며, 차세대 제품인 **HBM4도 개발 중이다.**
- 카운터포인트리서치는 SK하이닉스의 1위 등극을 **산업사적 전환점으로** 평가하며, **2분기까지도 점유율 확대가 이어질 가능성이 높다고** 분석했다.
- **AI용 데이터센터 증가가 HBM 수요를 견인하는 가운데** 미국발 반도체 관세 조치의 영향이 **HBM에는 제한적일 것으로** 전망된다.

## 반도체 ②

### 만년 3위 마이크론의 역습…엔비디아 납품에 ‘美 기업’ 이점까지 (동아일보, 2025.04.14.)

- 미국 반도체 기업 **마이크론**이 **고대역폭메모리(HBM)** 시장에서 급부상하며, **엔비디아**에 **HBM3E 12단** 제품을 공급하고 있다.
- 마이크론은 **HBM3E 12단 대량 양산**을 시작했으며, **2025년 하반기 출하량 대부분이 해당 제품이 될** 것으로 전망된다.
- **삼성전자**는 HBM3E 12단 공급망에 **아직 진입하지 못한 상태**이며, **SK하이닉스**는 **2023년 9월부터 엔비디아에 공급 중**이다.
- 마이크론은 미국 내 생산 거점 확대를 위해 **뉴욕주(1,000억 달러)**, **아이다호주(250억 달러)**에 공장을 짓고 있다.
- 시장조사기관 **카운터포인트리서치**에 따르면 2025년 1분기 마이크론의 글로벌 D램 시장점유율은 25%를 기록했다.
- 이는 **SK하이닉스(36%)**, **삼성전자(34%)**와의 격차를 한 자릿수로 좁힌 결과다.
- 마이크론은 미국 기업으로서 자국 내 생산 및 기술 경쟁력을 바탕으로 반도체 보호무역의 직접적인 수혜를 입을 수 있다는 평가가 나온다.

## AI ①

### 백악관도 ‘AI 정부’ 전환 착수 (서울경제, 2025.04.09.)

- 미국 백악관 예산관리국(OMB)은 대통령 과학기술보좌관실과 협력하여 ‘연방 정부의 AI 활용 및 조달 장벽 제거’ 정책을 발표했다.
- 이 정책은 공공서비스 혁신과 함께 AI 기술 분야에서 미국의 글로벌 영향력을 강화하는 것을 목표로 한다.
- 각 부처에 최고 AI 책임자(CAIO)를 두어 AI 예산 및 기술 투자에 대한 자문 역할을 담당하게 하며, 관료주의에서 벗어나 실질적인 혁신 리더로 활동할 수 있도록 했다.
- AI 기술 조달과 관련된 보고 절차를 간소화하여 각 기관에 신속히 도입될 수 있도록 조달 체계를 개선하기로 했다.
- 이미 보훈처(VA)는 AI 도구를 활용해 폐암 진단의 정확도를 높이고, 법무부(DOJ)는 전 세계 마약 시장을 AI로 분석해 수사에 활용하고 있으며, 항공우주국(NASA)은 탐사 로버의 자율주행에 AI를 접목해 과학 탐사 성과를 극대화하고 있다.
- 백악관은 AI 기술 채택을 통해 정부 기관이 더 민첩하고 비용 효율적이며 효과적인 조직으로 거듭날 것이라고 강조했다.

## AI ②

### 고성능·저비용·개방형 모델 늘어...

일상 속으로 스며든 AI (조선일보, 2025.04.09.)

- 스탠퍼드대 인간중심AI연구소(HAI)의 「AI 인덱스 2025」 보고서에 따르면, AI 운영 비용은 최근 2년 사이 100분의 1 수준으로 감소하면서 보급 속도가 급격히 빨라지고 있다.
- 오픈AI ChatGPT 기준, 2022년 11월 100만 토큰당 처리 비용은 20달러였으나, 2023년 10월에는 0.07달러로 떨어져 **99.65% 절감**되었다.
- 보고서는 이러한 변화가 단순한 기술 성능 향상을 넘어 AI가 누구나 사용할 수 있는 ‘일상적 도구’가 되고 있음을 보여준다고 분석했다.
- AI 모델은 대형에서 소형으로 재편되는 추세로, 수십억 파라미터 경량 모델이 초거대 모델과 유사한 성능을 내며 상용화가 가속화되고 있다.
- 예를 들어, MS의 ‘파이-3 미니’는 **38억 파라미터로 MMLU에서 62.9%의 성능**을 기록해 구글의 **5,400억 파라미터 모델 ‘팜’**과 유사한 수준을 보였다.
- 국가별 경쟁에서 미국은 여전히 **40개 주요 모델로 1위를** 유지했지만, 중국(15개)의 추격으로 성능 격차는 MMLU 기준 **17.5%p → 0.3%p**로 좁혀졌다.
- AI 활용도도 급증해 조직 내 AI 사용률은 **2023년 55%에서 2024년 78%**, 생성형 AI 사용률은 **33%에서 71%로** 증가했다.
- 한국은 2024년 처음 LG AI연구원의 ‘엑사원 3.5’가 주요 AI 모델로 등재되었으나, 민간 투자 순위는 6위에서 10위권 밖으로 하락, AI 인재 유출도 지속되고 있다.

## 조선/방산 ①

### 미국 속 보이는 절충 교역 트집...“K 방산 죽이고 美 방산 살리기” (국민일보, 2025.04.03.)

- 도널드 트럼프 2기 행정부가 ‘절충 교역’을 무역 장벽으로 지목한 것은 국방상호조달협정(RDP) 협상에서 유리한 고지를 선점하려는 전략이라는 분석이 나온다.
- 전문가들은 한국산 무기의 저가 수출을 견제하고 자국 기술에 대한 통제를 강화하려는 의도가 반영된 것으로 보고 있다.
- 이우태 통일연구원 연구위원은 “한국은 FA-50, 155mm 포 등 미국 기술 기반 무기를 수출 중이며, 미국은 이를 자국 이익 침해로 간주하고 있다고 생각한다”고 했다.
- 하지만 한국의 절충 교역 실효성은 낮은 편으로, 계약 금액 대비 수의계약 30%, 경쟁계약 50%만 절충 교역으로 적용되고 있다. 2016~2020년 한국 무기 수입액 13.6조 원 중 절충 교역 효과는 1조 원에 불과하며, 이전 5년 대비 10분의 1 수준으로 감소했다.
- RDP는 국방 분야 자유무역협정(FTA)으로, 조달 시장의 무역 장벽을 없애는 협정이다.
- 외교 소식통은 협정 체결 시 한국 무기가 낮은 가격으로 미국에 들어갈 가능성이 커 미국 방산업계는 이를 꺼리고 있으며, 트럼프 행정부는 이를 견제하고 있다고 했다.
- 미국은 RDP 협상에서 자국산 무기를 제외하거나 기술 사용 로열티, 무기 추가 구매 등을 한국에 요구할 가능성도 있다. 2023년 기준 한국 무기 수입의 78%가 미국산이며, 전문가들은 이에 대한 상호성과 협력 필요성을 강조하고 있다. 한국의 재래식 무기 제조 능력과 미국의 설계 기술을 조율하는 협력 방안도 대안으로 제시되고 있다.



## 조선/방산 ②

### 美 ‘中 때리기’에 틈새 엿보는

K조선·태양광 (이투데이, 2025.04.11.)

- 도널드 트럼프 미국 대통령이 ‘미국의 해양 지배력 회복’ 행정명령에 서명하며, 중국의 해상 패권 견제를 본격화했다.
- 이에 따라 한국 조선업계는 미국 조선업 재건과 해군력 증강에 협력할 기회를 모색하고 있다.
- 미국 무역대표부(USTR)는 중국 선박에 고액의 항만 수수료 부과를 검토하고 있으며, 이는 한국 조선소에 기회로 작용할 수 있을 것으로 보인다.
- 한화오션은 미국 필리조선을 인수하고 호주 오스탈 인수를 추진 중이며, HD현대중공업은 미국 방산 조선사와 협력을 강화하고 있다.
- 태양광 산업에서도 중국산 제품에 대한 125% 고율 관세 부과로 인해 한국 기업들이 반사이익을 얻을 것으로 예상된다.
- 한화솔루션은 조지아주에 태양광 통합 생산단지를 구축하고 있으며, OCI홀딩스는 텍사스에 셀 생산법인을 설립했다.

## 자동차/배터리 ①

### 인도 시장, 트럼프 관세 폭탄 ‘회피처’ 될까

(경향신문, 2025.04.13.)

- 현대차와 기아는 2025년 1분기 인도 시장에서 각각 15만 3,550대, 7만 5,576대를 판매하며, 분기 기준 역대 최대 실적을 기록했다.
- 현대차는 점유율 13.0%로 2위, 기아는 6.4%로 6위에 올랐다.
- 전체 판매량 중 80% 이상이 SUV였으며, 크레타(4만 8,449대)와 쏘넷(2만 2,497대)이 실적을 이끌었다.
- 인도는 인구 14억 명에 비해 자동차 보급률이 8.5%로 낮아 성장 가능성이 큰 시장으로 꼽힌다.
- 현대차는 2023년 GM인도의 푸네 공장을 인수했고, 2024년 하반기 가동을 앞두고 있다.
- 미국의 고율 관세를 회피하려는 수출 전략 차원에서 인도가 새로운 거점으로 주목받고 있다.

## 자동차/배터리 ②

### ‘전기차 열폭주 차단’…현대모비스, 배터리 화재 자동 진화 기술 개발 (한겨레, 2025.04.14.)

- 현대모비스가 전기차 배터리 화재를 자동 감지해 진화하는 기술을 개발하고, 관련 특허 3건을 국내외에 출원했다.
- 이 시스템은 배터리 셀에서 발화가 감지되면 해당 모듈에 소화 약제를 직접 분사해 화재 확산을 차단하는 방식이다.
- 기존의 하부 냉각 방식과 달리 센서 데이터를 기반으로 온도·전압·배터리 팩 내부 압력 이상을 실시간 판단해 문제가 발생한 셀이 속한 모듈에 소화제를 분사하게 하는 것이다.
- 배터리 시스템 내부에는 가정용 소화기의 약 5배인 3.3kg 수준의 소화 약제가 탑재된다.
- 현대모비스는 “수분 내 화염을 제어할 수 있는 기술로 고객 안전을 높이고 글로벌 시장에 고도화된 배터리 시스템을 선보이겠다”고 밝혔다.

## 화학/철강 ①

### ‘구조적 불황’ 빠진 석화업계…“정부 지원 없인 버티기 한계” (파이낸셜뉴스, 2025.04.13.)

- 국내 석유화학 산업이 중국발 공급 과잉, 글로벌 수요 둔화, 중동 지역의 설비 증설로 인해 구조적 위기에 처했다.
- 2025년 1분기 국내 주요 석유화학 4사의 합산 실적은 매출 21조 9,779억 원, 영업 손실 258억 원으로 추정된다.
- 중국이 범용 제품 생산능력을 급격히 늘리며 자급률을 거의 100%까지 끌어올렸고, 글로벌 경기 둔화로 수요 감소가 겹쳤다.
- 국내 나프타분해시설(NCC)의 평균 가동률은 70%대로 하락했으며, 수출도 감소 추세다.
- 업계는 비핵심 자산 매각과 재무구조 개선 등 자구책 마련에 나섰지만, 정부의 정책적 뒷받침이 필요하다고 강조했다.
- 특히 수소·암모니아 배관망, 탄소 포집·저장(CCS) 인프라 등 친환경 전환에 필요한 기반 인프라 구축에 대한 공공 지원이 요구된다.

## 화학/철강 ②

### 라이벌이 동지로...포스코·현대제철, 美 관세 맞서 쇠물 합친다 (한국경제, 2025.04.13.)

- 포스코가 현대제철이 미국 루이지애나에 짓는 **일관제철소 프로젝트**에 참여하는 방안을 추진 중이다.
- 두 회사는 미국의 수입 철강재 25% 관세에 대응하기 위해 공동 투자·생산을 검토하고 있다.
- 포스코는 제철소 건립 자금을 분담하는 조건으로 생산량 중 일부를 넘겨받는 방안을 협의 중이다.
- 현대제철은 투자 리스크를 줄이고, 포스코는 미국 생산 거점을 확보하는 **원원 전략**이다.
- 두 회사의 공동 투자가 성사되면 국내 철강업계에서 **첫 번째 해외 공동투자 사례**가 될 수 있다.
- 향후 협업 대상이 **수소환원제철 등 미래 프로젝트 공동 연구개발(R&D)** 등으로 확대될 가능성도 논의된다.

## 바이오 ①

### 中 바이오, 신약 후보 물질 31% 장악... 美는 경계령 (조선일보, 2025.04.14.)

- 중국 바이오 기업들이 글로벌 신약 후보 물질의 31%를 보유하며 시장을 장악하고 있다.
- 미국은 이에 대해 **경계령**을 내리고, 중국 바이오 기업들의 미국 시장 진입을 제한하려는 움직임을 보인다.
- 중국 기업들은 신약 후보 물질뿐 아니라 신약의 화학 구조를 일부만 변경해 새로 출시하는 이른바 ‘슈퍼 미투(super-me-too) 신약’도 잇따라 출시하고 있다.
- 지난해 9월 임상 3상에서 세계 1위 면역 항암제인 머크의 ‘키트루다’보다 뛰어난 효능을 보인 미국의 항암제 ‘이보네시맘’은 중국 바이오 기업에서 사들인 후보 물질로 개발한 신약이다.
- 중국은 완제 의약품을 만드는 데 필수적인 **원료 의약품** 시장을 장악하고 있고, 특히 항생제 부문의 원료 의약품에서 중국은 세계시장 점유율 1위다.
- 미국은 중국 견제 차 지난해 중국계 바이오테크 기업의 미국 시장 진출을 제한하는 「바이오 보안법」을 통과시켰지만, 상원 문턱을 넘지 못했다.

## 바이오 ②

### “AI가 동물실험 대체”…FDA 발표에 온코크로스 급등한 이유는 (서울경제, 2025.04.14.)

- 미국 식품의약국(FDA)은 항체 의약품을 시작으로 신약 허가 심사에서 동물실험을 단계적으로 폐지하겠다고 발표했다. 앞으로는 AI 기반 예측 모델과 오가노이드(유사 장기) 기반 실험실 테스트를 통해 신약 후보 물질의 안전성과 유효성을 검증하는 방향으로 전환할 계획이다.
- 온코크로스는 질병 발생 시 유전자 발현 변화를 AI로 분석해 최적의 후보 물질을 발굴하는 ‘랩터 AI(RAPTOR AI)’ 플랫폼을 보유하고 있다. 이 플랫폼은 수천만 건의 전사체 데이터를 학습해 특정 약물이 어떤 적응증에서 가장 효과를 낼 수 있는지 예측한다.
- 최근 AI 기반 암 진단 기술 ‘온코파인드 AI’의 상용화를 본격화하며 새로운 성장 축을 마련하고 있는데, 온코파인드 AI는 RNA 전사체 데이터를 분석해 원발부위불명암(CUP)의 원발 장기를 예측하는 플랫폼으로, 최대 92%의 정확도를 보인다. 기존 면역화학염색법보다 정량적이고 객관적인 분석이 가능하다는 점에서 글로벌 시장 진출 가능성도 거론된다.

뿌리산업은 원자재로부터 부품을 생산하고 부품으로부터 최종 제품을 생산하며, 주조, 금형, 소성, 용접, 열가공, 표면처리 등 공정기술을 활용하여 자동차, 조선, IT 등 타 제조업에 서비스를 제공하여 최종 제품의 품질 경쟁력을 향상 시킵니다(「뿌리산업진흥법」 제2조). 뿌리산업은 최근의 기술 간 협력을 통해 신성장동력 산업의 제품 가치를 높이는 대한민국 경제의 새로운 미래 성장 동력입니다.

- ‘대한민국 국가지도집’ 중에서



# 산업/기술 동향

- 1 최신 과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략
- 2 전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향
- 3 사형주조 분야 유연생산 대응을 위한 핵심 기술 동향
- 4 AI+X(뿌리산업): 지능화와 디지털 전환으로 여는 고부가가치 제조 혁신

# 최신 과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략

1

송인협 화학공정 PD | KEIT 화학산업실

손은호 센터장 | 한국화학연구원 계면재료화학공정연구센터

## 요약

### 이슈

- 과불화화합물(PFAS) 규제는 2009년 「스톡홀름 협약」에서 PFOS(과불화옥탄술포산)가 잔류성 유기 오염 물질(POPs)로 지정되면서 국제적으로 시작되었다. 이후 PFOA(과불화옥탄산, 2019년), PFHxS(과불화헥산술포산, 2022년) 등 개별 물질 중심의 규제가 이어졌다. 하지만 2023년 EU가 약 1만여 종 이상의 PFAS 전체를 규제 대상으로 제한하면서 규제 강도가 급격히 강화되었다. 이는 글로벌 산업계에 큰 파장을 일으키고 있으며, 각국 정부와 기업들은 대응책을 마련하느라 분주하게 움직이고 있다.

### 최근 동향

- EU 규제에는 제품, 용도, 산업 전반에 걸쳐 사용 자체를 제한하거나 금지하는 내용을 담고 있으며, 캐나다도 2025년 PFAS 전체를 유해 물질로 지정하는 규제 초안을 발표했다. 미국도 음용수 기준 강화, 보고 의무 확대, 소방용 폼 금지 등 다층적 규제를 시행하고 있으며, 일본은 PFHxS까지 규제 대상을 확대하는 등 주요국들이 규제 강화 흐름에 동참하고 있다. 이로 인해 PFAS-free 제품 개발, 공급망 내 성분 추적, 대체 물질 확보가 글로벌 산업 전반의 핵심 대응 과제로 부상하고 있다.

### 대응 전략

- PFAS 규제 대응 전략은 용도 맞춤형 대체 물질 개발(비불소계/불소계)과 함께 환경 내 잔류 PFAS의 제거·분해·자원 순환 공정 기술을 통합적으로 구축하는 방향으로 전개되어야 한다. 특히 소비재 분야는 신속한 대체와 상용화, 전략 산업 분야는 중장기 기술 자립, 그리고 처리 및 순환 공정은 지속 가능한 제거·재활용 체계 마련이 핵심이다.

### 시사점

- PFAS 규제는 EU와 미국을 중심으로 강화되고 있으며, 생활 밀접 제품에 대한 사용 금지와 물질군 전체로 규제 확산이 진행 중이다. 대체가 어려운 산업 분야는 예외적 사용이 제한적으로 허용되나, 기술적 입증과 환경 저감 기술 확보가 필수적이다. 향후

## 1. 개요

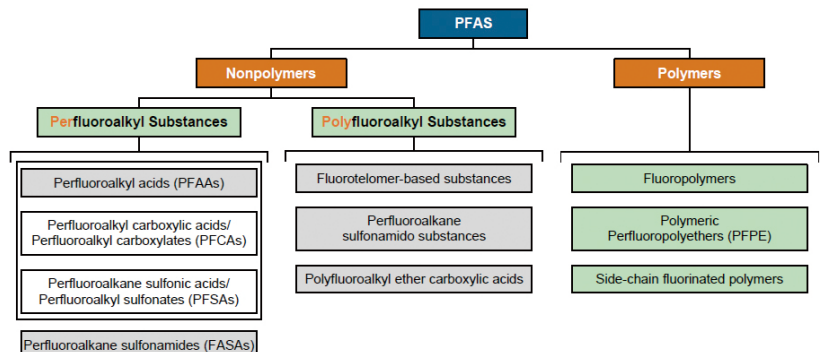
### PFAS의 정의와 범위

- 과불화화합물(PFAS)은 최소한 하나의 과불화된(fully fluorinated) 메틸( $\text{CF}_3$ -) 또는 메틸렌( $-\text{CF}_2-$ ) 탄소 원자를 포함하는 유기화합물이다. 해당 탄소에 수소(H), 염소(Cl), 산소(O), 질소(N), 브로민(Br), 요오드(I), 벤젠고리, 다중결합 등이 연결되어 있을 경우 예외로 간주한다.
- OECD(경제협력개발기구)도 유사한 정의로 묘사하고 있으며(2021), 소수의 예외를 제외하고는 최소 하나의 과불화된 메틸 그룹( $\text{CF}_3$ -) 또는 메틸렌 그룹( $-\text{CF}_2-$ )을 가진 모든 화학물질을 PFAS로 취급한다.
- PFAS는 뛰어난 발수·발유성, 내화학성, 내열성, 내구성 등을 지녀 다양한 산업에서 사용되고 있으며, 위의 정의에 따라 현재까지 1만 5천 종 이상의 물질이 존재하는 것으로 알려져 있다.
- PFAS는 화학구조를 기준으로 고분자와 비고분자로 크게 분류되며, 비고분자 PFAS에는 불소화텔로머(fluorotelomer), 과불화카르복실산(PFCAs), 과불화술폰산(PFSAs), 계면활성제 등 대부분 수용성 물질이다. 고분자 PFAS는 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE, 테플론), 폴리비닐리덴플루오라이드(PVDF), 불소화에틸렌프로필렌(FEP) 등과 같은 범용 불소고분자, 과불화폴리에테르, 불소화 작용기가 겹사슬로 부착된 아크릴계, 옥세탄계, 불화스티렌계 고분자 등으로 구분된다.

그림 1

#### PFAS의 분류

출처: Interstate Technology  
Regulatory Council  
(2020.08.)



## PFAS의 환경·인체 영향성

- PFAS는 탄소-불소(C-F) 결합을 포함한 화학물질로 분해되지 않고 환경에 장기간 잔류하며, 인체에 축적되어 다양한 문제를 유발한다고 알려져 있다. 이 때문에 PFAS는 ‘영원한 화학물질(Forever Chemicals)’로 불리기도 한다.

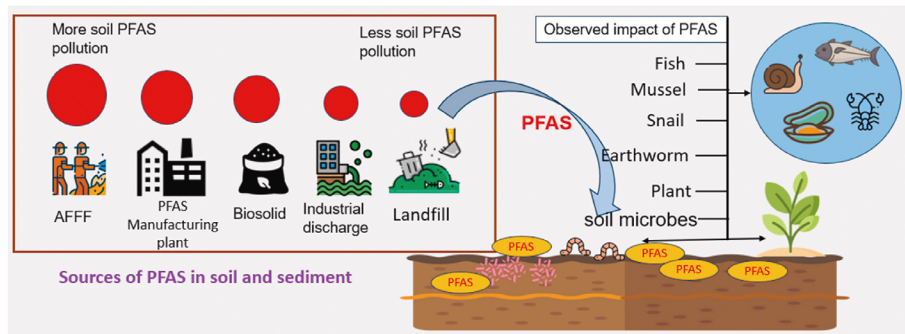
### 1) 환경적 영향성

- (환경 잔류성) PFAS는 탄소-불소 결합이 매우 안정적이어서 자연환경에서 분해되지 않고 수십 년 이상 지속적으로 잔류하는 특성이 있다. 이 때문에 한 번 배출되면 장기간 환경에 영향을 미친다. 특히 PFOA, PFOS 등은 반감기가 90년 이상이다.
- (지하수·토양·표면수 오염) PFAS는 소방용 폼, 산업 배출, 폐기물 매립 등을 통해 지표수나 지하수 및 토양으로 유입되며, 특히 수용성이 높은 특성 때문에 넓은 지역으로 퍼져서 광범위한 환경오염을 유발한다. 미국 지질조사국(USGS)에 따르면 미국 수돗물의 약 45%에서 PFAS가 검출되었다.
- (생태계 생물 농축) PFAS는 수생 생물, 조류, 포유류 등 다양한 생물의 체내에 축적되며, 먹이사슬을 따라 상위 포식자로 갈수록 농도가 증가하는 생물 농축 현상이 발생하여 생태계를 위협하고 있다. 이로 인해 일부 수생 생물에서 생식 독성, 성장 저해, 면역 이상 등이 관찰되고 있다.

그림 2

PFAS 환경오염 경로

출처: *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* (2024.06.)



### 2) 인체 영향성

- (생체 축적성 및 조직 축적) PFAS는 생체 내 축적되어 장기간 체내에 머무를 수 있다. 특히 PFOA는 평균 혈중 반감기가 약 3.8년, PFOS는 약 5.4년으로 보고되며, 간, 신장, 혈액, 태반, 모유 등 여러 조직에서 농축되는 경향이 관찰되었다.

### 표 1

PFAS의 체내 반감기 추적 결과

출처: *Environmental Health*

*Perspectives* (2007.06.;

2009.10.)

연구자	대상군	추정 반감기	주요 특징
Geary W. Olsen 외(2007)	3M 퇴직 근로자	PFOA: 3.8년 PFOS: 5.4년	직업성 고농도 노출
Scott M. Bartell 외(2010)	일반 지역 주민	PFOA: 2.3년	식수 정화 후 경과 관찰 기반

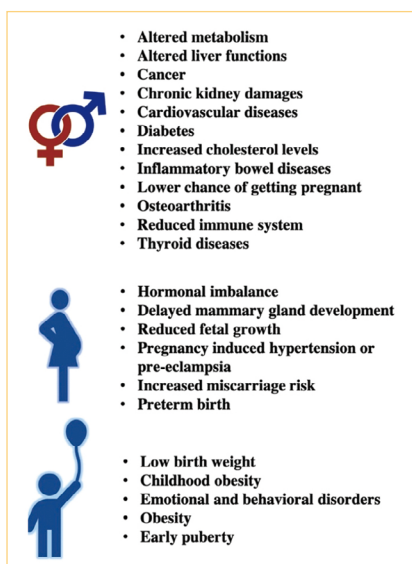
- (발암 위험성) 다수의 역학 연구는 PFAS 노출과 특정 암과의 인과관계를 시사하고 있다. 특히 미국 웨스트버지니아 지역 주민들을 대상으로 한 ‘C8 Health Project’에서는 PFOA 노출이 신장암 발병률은 1.6배, 고환암은 3.17배 증가시키는 것으로 나타났다.
- (면역 억제) PFAS는 면역 기능을 저하시킨다. 덴마크의 아동 코호트 연구에 따르면 PFOS와 PFOA에 노출된 아동은 백신 항체 반응이 최대 50% 낮았고, 미국 국립독성학프로그램(NTP)은 PFAS에 대해 ‘면역 독성 우려가 있음(presumed immune hazard)’으로 결론을 내렸다.
- (갑상선 기능 이상) PFAS는 내분비계에 영향을 미치며, 미국 국립건강영양조사(NHANES) 데이터를 분석한 연구에서는 PFOS 농도가 높은 성인의 경우 갑상선 질환 위험이 1.5배 증가하는 것으로 나타났다.
- (고콜레스테롤 - 대사 영향) PFAS는 대사계에도 영향을 준다. 미국 국립건강영양조사의 일반인 코호트 분석 결과, PFOA와 PFOS의 혈중 농도가 높을수록 콜레스테롤 수치가 평균 13.4mg/dL 상승하는 경향을 보였다.

### 그림 3

인체에 대한 PFAS의 독성학적 영향

출처: *Journal of Hazardous*

*Materials* (2021.10.)



## 2. 규제 동향

- PFAS는 환경과 건강에 대한 우려로 인해 미국과 유럽에서 강력한 규제 대상이 되고 있다. 캐나다, 일본, 중국, 호주, 한국 등도 점차 규제를 강화하고 있으며, 전체 PFAS 물질군의 주요 화합물에 대한 단계적 금지를 추진하고 있다.

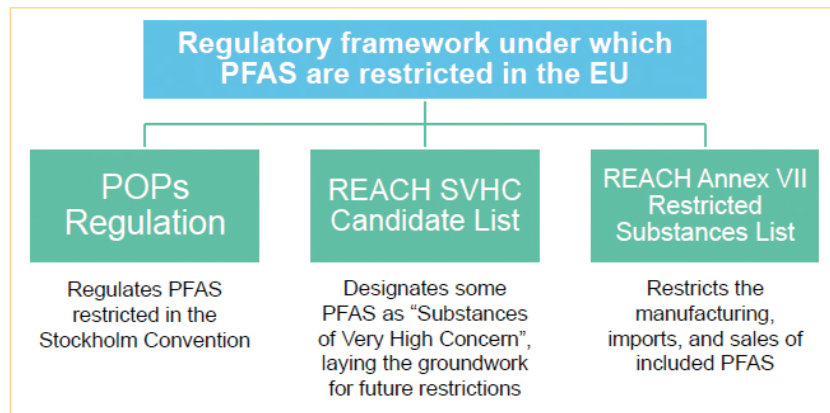
### 유럽

#### 1) PFAS 규제에 대한 유럽의 3단계 흐름

- 유럽연합(EU)은 PFAS에 대한 규제를 매우 강력하게 추진하고 있다. 특히 REACH(Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) 규제를 통해 광범위한 제한을 계획하고 있다.

그림 4

유럽의 PFAS 규제에 대한 주요 체계  
출처: IDTechEx



- EU의 PFAS 규제는 POPs(Persistent Organic Pollutants Regulation) 규정, REACH 규제, REACH Annex XVII 등의 순서로 이어지는 단계적 규제 흐름을 가지고 있다.
- **(POPs 규정)** PFAS 중 일부 물질들을 POPs(잔류성 유기 오염 물질)로 지정해 강력하게 규제하고 있다. 예를 들어, PFOS, PFOA, PFHxS와 같은 대표적인 PFAS 물질이 이 범주에 포함된다. 이 규정에 따라 해당 물질은 제조, 수입, 사용, 판매가 전면 금지되며, 극소수의 예외적 용도를 제외하고는 사실상 시장에서 퇴출되었다. 이는 「스톡홀름 협약」을 유럽 차원에서 이행하는 방식으로, 가장 강력한 법적 구속력을 가진 규제 중 하나다.
- **(REACH 고위험성 우려 물질[SVHC] 후보 목록)** 일부 PFAS를 고위험성 우려 물질 후보 목록에 등재하여 규제하는 것이다. 이 목록에 포함되면 기업은 해당 물질이 사용된 제품을 유럽화학물질청(ECHA)에 신고하고 고객에게 해당 사실을 의무적으로



알릴 뿐 아니라 노출을 최소화할 방안을 마련해야 한다. SVHC 지정은 단순한 경고 수준이 아니라 이후 REACH의 본격적인 금지 조항(Annex XVII)에 등재하기 위한 준비 단계로 작용한다. 따라서 기업 입장에서는 SVHC 등재만으로도 공급망 관리와 고객 대응에 큰 부담이 발생한다.

• (REACH Annex XVII – 제한 물질 목록) PFAS 중 일부는 이미 REACH의 Annex XVII, 즉 제조·판매·사용 제한이 적용되는 법적 목록에 포함되어 있다. 여기에 등재되면 유럽 전역에서 해당 물질을 상업적으로 유통하거나 사용하는 것이 제한되거나 금지된다. 예를 들어 장쇄형 PFCA(C9~C14), 일부 소방용 폼, 소비자용 방수 스프레이 등이 여기에 포함되어 있다. 최근에는 전자기기나 반도체 제조 분야도 규제 대상이 되고 있다. 다만 기술적으로 불가피한 분야(예: 반도체, 의료기기)에서는 일정 기간(최대 5~12년)의 유예 기간이나 예외 적용(CUU)이 가능하다.

## 2) PFAS 사용의 전면 금지 추진

○ 2023년 2월 독일, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이, 네덜란드 등 5개국이 유럽화학물질청에 PFAS 사용 전면 금지를 제안했다. 제안된 규제는 약 10,000종 이상의 PFAS 물질을 포함하며, 이는 화학물질 규제 역사상 가장 광범위한 제한 중 하나다. 금지될 경우 PFAS가 포함된 제품의 생산과 사용이 대부분 제한되며, 특정 산업에서는 예외적으로 일정 기간 사용이 허용될 수 있다.

### 표 2

유럽 과불화화합물 규제 동향  
출처: European Chemicals Agency (2023.03.)

항목	주요 내용
규제 명칭	PFAS Restriction Proposal under REACH Regulation(Annex XV)
제안 주체	독일, 네덜란드, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이(2023년 1월 ECHA 제출)
적용 대상	10,000종 이상의 전체 PFAS 물질군
규제 방식	사용 금지(restriction) + 용도별 예외 및 유예 기간(CUU 적용)
금지 방식	PFAS 함유 제품의 제조, 사용, EU 내 수입 전면 금지
유예 조항	최대 5년 또는 12년 유예(산업별 CUU 기반)
예외 적용 고려 분야	반도체, 의료기기, 항공·우주, 국방 등 대체 기술이 부재하거나 필수적인 분야
현황	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2023년: ECHA의 공개 검토(public consultation) 진행</li> <li>• 2025년: 최종 규제안 도입 예정</li> <li>• 2026~2035년: 단계적 시행(산업별 유예 기간 적용 가능)</li> </ul>

## 3) 개별 국가의 추가 규제

○ 독일의 경우 PFAS를 포함한 산업 공정이나 제품을 적극적으로 규제하는 정책을 추진하고 있다. 덴마크는 2020년부터 식품 포장재에서 PFAS 사용을 전면 금지하고 있다. 그리고 스웨덴은 PFAS 사용 제품에 대한 세금 부과와 추가적인 규제를 도입했다.

○ 2020년 개정된 유럽 「음용수 지침(Drinking Water Directive, DWD)」에 따라

4) 음용수 및 환경 기준 강화

합산 PFAS 농도가 100ng/L 이하로 유지되어야 한다. ECHA에서는 PFAS 오염 모니터링을 강화하고 있으며, 토양 및 지하수 오염 관리 기준을 지속적으로 강화하고 있다.

5) 최근의 규제 이슈

- 유럽은 전체 PFAS 물질군을 규제하는 방향으로 정책을 전환하고 있으며, 식품 포장재, 소비재, 산업용 제품 전반에 걸쳐 PFAS-free 전환을 요구하고 있다.
- 2024년 12월 16일 유럽이사회는 포장 및 포장 폐기물에 관한 개정된 규정을 공식 채택했으며, 이 규정은 포장 폐기물의 발생을 크게 줄이고 재사용 및 재활용 목표를 설정한다(자세한 내용은 표 3 참조). 이 규정은 2025년 1분기에 EU 관보에 게재되고 20일 후에 발효되며, 18개월의 전환 기간 후 제한 적용된다. 규정이 발효되면 기존 「포장 및 포장 폐기물 지침(PPWD)」이 폐기된다.

**표 3**  
유럽 「포장 및 포장 폐기물 지침」  
개정안  
출처: 국제환경규제 기업지원센터,  
Council of the EU (2024.12.)

항목	주요 내용
일회용 플라스틱병	2040년까지 최대 65% 재활용 원료 사용 목표
포장 최소화	포장의 무게 및 부피를 최소화하고 불필요한 포장 방지
유해 물질 최소화	PFAS가 특정 임계값을 초과할 경우 식품 접촉 포장재 사용 제한(단 일 PFAS: 25ppb, PFAS 그룹 합산: 250ppb, 고분자 포함한 모든 PFAS: 50ppb)
라벨링 및 정보 제공	포장재의 재활용 원료 비율과 재질 구성을 소비자가 알기 쉽도록 표시
운송 및 판매 포장재	2030년까지 40% 재사용 목표(그룹 포장재: 10%)
테이크아웃 사업장	고객이 추가 비용 없이 음료나 조리된 음식을 담은 용기를 가져올 수 있도록 해야 함
포장재 폐기물 감축 목표	2030년까지 5%, 2035년까지 10%, 2040년까지 15%
재활용 가능 포장재	2030년 1월 1일까지 시장에서 출시되는 모든 포장재에 대해 재활용이 가능하도록 요구

- (2025년 2월 20일, 프랑스) 프랑스 국민의회는 PFAS 사용을 제한하는 법안을 공식 채택했다. 이 법안은 EU 차원의 PFAS 전면 금지 계획(2027~2028년 예상)보다 신속하고 강력한 규제 조치로 평가되며, 유럽 내 다른 국가들의 규제 정책에도 영향을 미칠 것으로 전망된다(자세한 내용은 표 4 참조).

#### 표 4

프랑스의 최근 PFAS 규제 동향

출처: 국제환경규제 기업지원센터, 프랑스 국회 (2025.02.)

항목	주요 내용
화장품, 왁스 제품, 의류, 신발 및 소비자용 방수제(의류 및 신발용)	2026년 1월 1일부터 PFAS를 포함하는 제품의 제조·수입·수출 판매 금지 (단, 국방 및 공공 안전을 위한 보호복 및 신발은 예외)
모든 섬유 제품	2030년 1월 1일부터 PFAS를 포함하는 제품의 제조·수입·수출 판매 금지 (단, 일부 필수 용매에 필요한 섬유 제품, 대체품이 없는 섬유 제품, 법령으로 목록이 명시된 산업용 기술 섬유 제외)
환경보호 관련 추가 조치	프랑스 식수 내 PFAS 감시 강화 연간 PFAS 배출량 100g 이상일 경우, 100g당 100유로의 부담금 부과

• (2025년 3월 18일, 덴마크) 덴마크 환경부는 2025년 7월 1일부터 소비자용 의류, 신발, 방수제에 PFAS 사용을 금지하는 행정명령 시행을 발표했다. 이번 금지 조치는 1년간 이행 기간을 두어 2026년 7월 1일부터 PFAS가 포함된 소비자용 의류, 신발, 방수제의 판매 및 수입이 금지되며, 이후 6개월간 기존 재고의 판매가 허용된다. 개인이 해외 온라인 시장을 통해 PFAS가 함유된 제품을 수입하는 것도 규제 대상에 포함된다. 덴마크 정부는 제품 내 PFAS가 의도적으로 사용되지 않도록 PFAS 함유량 기준을 설정할 예정이다(전문 작업복과 안전 장비는 금지 대상 제외). 금지 명령 시행 이전에 구매한 제품은 계속 사용할 수 있으며, 제품의 재사용 및 재활용도 이번 금지 조치의 적용 대상에 포함되지 않는다.

• (2025년 3월 19일, ECHA) 유럽화학물질청 산하 위해성평가위원회(RAC)와 사회경제분석위원회(SEAC)는 PFAS에 대한 EU 전역 사용 제한 안건의 평가를 진행 중이라고 밝혔다. 이 회의에서 두 위원회 모두 플루오린화 가스(불화가스, fluorinated gases)의 적용에 대해 잠정 결론을 도출했으며, RAC는 운송 및 에너지 분야 적용에 대해서도 잠정 결론을 내렸다. SEAC는 운송 및 에너지 분야에 대한 논의를 2025년 6월 회의에서 계속 이어갈 예정이다.

## 미국

### 1) 미 환경보호국 규제 강화(연방정부)

○ 미국은 PFAS를 개별 화합물별로 접근해 왔지만, 최근에는 전체 PFAS 물질군(class-based approach)으로 확대하려는 움직임을 보이고 있다. 특히 환경보호국(EPA)이 중심이 되어 PFAS 전략 로드맵을 통해 물, 공기, 토양, 폐기물 전반에 걸쳐 규제하고 있다.

- (음용수 기준 설정) 2024년 4월 EPA는 수돗물 내 6가지 주요 PFAS 물질에 대한 최대 오염 수준(MCL)을 4~10ppt(1조분의 1)로 설정했다. 이를 통해 약 1억 명에 대한 PFAS 노출을 줄이고 수천 건의 사망과 심각한 질병을 예방할 것으로 예상했다. 공공 수도 시스템은 2027년까지 PFAS 오염 수준을 평가하고, 2029년까지 기준치 이하로 줄일 계획이다.
- (유해 물질 지정) 2024년 7월 8일부터 EPA는 과불화옥탄산(PFOA)과 과불화옥탄술폰산(PFOS)을 포함한 특정 PFAS 화합물을 유해 물질로 지정했다. 이에 따라 이러한 물질의 누출 시 보고 의무가 부과되며, 정화 작업에 적극적으로 참여해야 한다.
- (산업 폐수 규제) EPA는 특정 산업에서 PFAS 배출을 제한하기 위한 규정을 제안할 계획이다. 이는 직물, 동물 집중 사육 시설, 매립지 등 특정 산업 분야의 「폐수 배출 제한 지침(Effluent Limitation Guidelines, ELGs)」에 포함될 예정이다.

표 5

미 연방정부의 주요 PFAS 규제 동향

규제 항목	주요 내용	시행 시기
음용수 기준 강화	PFOA, PFOS에 대해 MCL 4ppt, PFHxS, PFNA, GenX 등에 대해서도 공중 보건 목표 설정	2024년 4월 발표, 2025년 시행 예정
슈퍼펀드(CERCLA) 지정	PFOA, PFOS를 CERCLA 유해 물질로 지정하며, 오염 정화 비용을 유발자에게 부과	2024년 말 최종 확정 예정
「화학물질규제법(TSCA)」 강화	PFAS 관련 신규 물질 사전 신고 의무 강화, 정보 공개 확대	2023~2025년
전체 PFAS 물질군 보고 의무화	1,500여 개 이상의 PFAS 물질에 대해 기업이 제조·수입 실적을 보고해야 함.	EPA 보고 마감일: 2025년 5월
PFAS-free 연방 조달 기준 추진	연방 정부 구매 제품에 PFAS-free 요건 도입 검토	2025년부터

2) 주정부 차원의 규제 강화

- (음용수 기준 설정) 많은 주가 연방 EPA 기준보다 엄격한 자체 식수 기준을 제정했다. 연방정부는 PFOA/PFOS 기준을 4ppt로 제안했지만, 일부 주정부는 이미 더 낮은 기준으로 운영 중이다.

표 6

미국 주별 음용수에 대한 PFAS 기준

주	PFAS 식수 기준(ppt)	주요 특징
뉴저지주	PFOA 14/PFOS 13ppt	미국 최초로 PFAS 식수 기준 설정(2018년)
매사추세츠주	총 6종 PFAS 합산 20ppt	PFAS6 총량 기준 도입
뉴욕주	PFOA, PFOS 각각 10ppt	대규모 수질 감시 프로그램 운영
버몬트주	PFAS 5종 합산 20ppt	모든 공공 수원에 적용

○ (제품 내 PFAS 포함 사실의 보고 의무화) 기업이 PFAS 함유 제품을 사전에 주 정부에 신고하도록 하는 제도다.

표 7

미국 주별 제품 내 PFAS 포함 사실 보고 의무화 관련 내용 요약

주	주요 내용
메인주	• 2023년부터 PFAS가 포함된 제품은 반드시 주 정부에 사전 등록해야 함. • 2030년부터 등록 여부와 관계없이 모든 PFAS 포함 제품 금지 예정
미네소타주	• 2024년 PFAS 규제 5개년 계획 발표 • 모든 PFAS 제품에 대한 성분 공개 및 보고 의무화 추진 중
워싱턴주	• 화학물질 우선 관리제도(Safer Products for WA)를 통해 PFAS 보고 의무 확장 예정

○ (제품 내 PFAS 사용 금지) 대표 규제 대상: 식품 포장재, 의류, 화장품, 카펫 등

표 8

미국 주별 제품 내 PFAS 사용 금지 관련 규정

주	규제 제품	시행 시기 및 내용
워싱턴주	식품 포장재, 의류, 카펫	• 2018년부터 단계적 금지 • 2025년 PFAS 대체물 없으면 자동 적용 확대
캘리포니아주	화장품, 의류, 어린이용 제품	• 2025년부터 모든 PFAS 화장품 금지 • 2027년 PFAS 라벨 의무화
메인주	모든 제품 (포괄적 규제)	• 2030년까지 PFAS 포함 모든 제품 금지 선언 • 사전 보고 의무 부과
콜로라도주	의류, 실내 가구, 소방용 품	• 2024~2026년까지 PFAS 함유 제품 사용의 단계적 금지

○ (소방용 품 관련 규제) AFFF(수성 필름 형성 품)는 고온의 유류 화재에 탁월한 진압 효과를 보이는 소방용 품으로, 군사·공항·정유 시설 등에서 널리 사용되었다. AFFF에 포함된 PFAS는 주요 오염원으로 규정되어 주 차원에서 사용 금지를 추진 중이다.

표 9

미국 주별 소방용 품 관련 규제

주	주요 내용
워싱턴주	미국 최초로 「PFAS 함유 소방용 품(AFFF) 판매·사용 금지법」 제정 (2018년 시행)
콜로라도주	PFAS 소방용 품 사용 금지, 재고 회수 의무, 교육 시설 사용 제한 (2020년 시행)
뉴욕주	소방용 PFAS 사용 전면 금지, 공공 소방서 PFAS 대체 권장(2022년 시행)
캘리포니아주	2022년부터 AFFF 생산·판매 금지, 대체제만 허용(2022년 시행)
미네소타주	공공시설에서 PFAS 포함 소방용 품 사용 금지, 정보 보고 의무화 (2023년 시행)

그 외 국가

1) 캐나다

○ 캐나다는 2023~2024년 환경 리스크 평가를 거쳐 2025년 3월에 전체 PFAS

물질군을 유해 물질(toxic substances)로 지정하기 위한 최종 정책 초안을 발표했다. 이는 OECD 및 EU의 규제 방향과 보조를 맞춘 것으로, 개별 화합물이 아닌 PFAS 전체를 하나의 군으로 보고 규제하는 접근이다.

표 10  
캐나다의 PFAS 관련 주요 규제의  
경과 및 계획

연도	주요 규제	규제 내용 및 계획
2021년	PFOA, PFOS, LC-PFCAs 금지	캐나다 「환경보호법(CEPA)」에 따라 일부 PFAS를 유해 물질 목록에 등재
2023년	전체 PFAS 물질군 평가 개시	‘State of PFAS Report’ 초안 발표. 수천 종의 PFAS에 대해 유해성·노출 경로 조사 시작
2025년 3월	전체 PFAS 물질군에 대해 유해 물질 지정 초안 발표	모든 PFAS를 ‘우려되는 물질’로 지정 하고, 제조·수입·사용·판매 제한 예정
2025~2026년	초안 의견 수렴 후 CEPA Schedule 1(유해 물질 목록) 정식 등재 추진	초안 의견 수렴 후 CEPA Schedule 1 (유해 물질 목록) 정식 등재 추진

표 11  
캐나다의 PFAS 관련 규제 주요 내용

구분	주요 내용
대상	전체 PFAS 물질군(4,700종 이상 예상) * 불소화 중합체는 논의 중이며, 일부는 불가피한 용도로 예외 검토 중임.
규제 방식	CEPA Schedule 1(유해 물질 목록) 지정 후 제품 내 포함 금지와 사용 보고 의무 부과
적용 범위	식품 포장재, 섬유, 조리 도구, 화장품, 산업용 코팅, 소방용 품 등
예외 적용	필수 산업 용도(예: 반도체, 항공 등)에 대해 예외 허용 가능성(CUU 고려)
보고 의무	100kg 이상 사용·수입 시 사전 신고 및 성분 보고 의무화 예정

표 12  
캐나다의 PFAS 규제에 따른 산업 및  
기업 영향

대상	주요 규제	산업 및 기업 영향
식품 포장재	PFAS 코팅 금지 예상	실리콘, 셀룰로오스 등 대체 기술 도입 필요
소방용 품	AFFF 사용 중단 예정	불소-free 소방용 품으로 전환 추진 중
섬유·의류	Gore-Tex, 방수 의류 등 영향	내수성 확보를 위한 비불소 코팅 기술 필요
반도체/항공	예외 고려 가능	CUU 기반 기술적 입증 준비 필요

○ (식수 기준 관련 동향) 2023년 5월 캐나다는 「국가 식수 지침(NDWAC)」에서 PFOA 및 PFOS에 대해 각각 4ppt 수준의 가이드라인을 발표하였으며, 향후 6종 이상의 PFAS 합산 기준 도입을 검토 중이다(WHO 및 미국 EPA의 기준과 보조를 맞추는 방향으로 논의 중).

2) 일본

○ 일본은 PFOA, PFOS 등 일부 PFAS 화합물에 대해서만 개별적으로 규제하고 있으며, 아직 전체 PFAS 물질군 규제는 도입되지 않았다. 그러나 최근 PFHxS 및 그 염류에 대한 규제를 시작으로, 규제 확대 움직임이 나타나고 있다. 식수 기준 강화, 공장 배출 관리, 환경 모니터링 확대 등을 중심으로 규제가 점진적으로 강화되는 추세다.



표 13

일본의 주요 PFAS 규제 경과 및 현황

연도	규제 내용	근거 법령/기관
2009년	PFOS: 「화학물질 심사 규제법(PRTR)」 지정 및 사용 금지	환경성·경제산업성
2021년 10월	PFOA 및 그 염류: 동일하게 규제 대상 지정	PRTR법, 수질 기준 강화
2022년 12월	PFHxS 및 그 염류: 추가 규제 화학물질로 지정	경제산업성·환경성 고시
2023년	전국 환경조사(PFAS 농도 지도화) 착수	환경성·국립환경연구소
2024년~	PFAS 수질 기준 강화 및 건강 영향 평가 확대	식수 기준 강화 검토 중
2025년 예정	PRTR 제도 개정 및 PFAS 보고 요건 확대	경제산업성 주도

표 14

일본의 PFAS 관련 식수 및 환경 기준

구분	기준치	적용 상황
식수 기준(임시)	PFOS + PFOA 합산 50ng/L(0.05μg/L)	환경성·경제산업성
배출 수질 기준	공식 기준 없음(자율 모니터링 중심)	일부 산업 시설에 권고치 제공
토양 및 지하수 기준	미설정	실태조사 위주, 기준 검토 진행 중

일본은 WHO 기준(0.1μg/L)보다 더 엄격한 수치(0.05μg/L)를 설정했으나, 법적 강제력이 있는 음용수 기준은 아직 없음.

표 15

일본의 PFAS 규제 관련 법제 체계

관련 법제	적용 대상
PRTR법 (「화학물질 관리법」)	PFOA, PFOS, PFHxS 등 특정 PFAS를 '제1종 지정 화학물질'로 등록하여 사업장 보고·배출량 공개 의무화
「수도법 및 수질 기준 지침」	PFOS + PFOA에 대해 권고 수준의 임시 수질기준 (50ng/L) 설정
「산업안전보건법」	일부 PFAS 제조공정에서 작업환경 관리 대상 물질로 간주
「소방법」 「폐기물관리법」 등	PFAS 소방용 폼 및 오염 토양에 대한 간접적 규제 가능성 있음.

### 3. 기술 개발 전략

○ 유럽의 규제는 불소화합물을 하나의 영역으로 취급하고 있으며, 이는 규제의 합리성과 타당성을 충분히 담보하지는 못하므로 PFAS 규제 대응 전략 수립을 위해서 다음과 같은 자체적·논리적 접근법이 필요하다.

- ① PFAS의 개념과 특징에 대한 정확한 이해가 필요
- ② PFAS 종류별 인체·환경 독성 분류 및 상관관계 파악
- ③ 대체 가능 영역, 불가능 영역, 불필요 영역 등 구분 필요

○ PFAS 규제 대응과 환경 문제 해결을 위해 기술 개발은 크게 4가지로 나눌 수 있으며, 시급성과 난이도에 따라 단기, 중장기, 장기 등으로 구분하여 기술 개발 전략을 취할 필요가 있다.

- ① PFAS-free 소재 기술
- ② 불소계 대체 소재 기술
- ③ PFAS 제거 정화 기술
- ④ PFAS 분해 기술

## PFAS-free 소재 개발

○ 불소계 대체 물질 전략은 PFAS의 유해성과 환경 축적 문제를 원천적으로 차단하기 위해 불소 원소 자체를 배제한 안전한 소재로 전환하는 것이다. 주로 식품 포장재, 의류, 화장품, 유아용품 등 소비재 제품군에 우선 적용되며, 실리콘계, 식물성 고분자, 생분해성 폴리에스터 등이 대안으로 주목받고 있다. 이들은 인체와 환경에 무해하고 상대적으로 기술 난이도가 낮아 조기 상용화가 가능하다. 특히 PFAS-free 제품에 대한 소비자 수요와 규제 압력이 증가하고 있어 빠른 시장 대응이 필요하다.

**표 16**  
PFAS 제품군에 대한 비불소계 대체 예시

적용 분야	기존 PFAS 사용 용도	비불소계 대체 예시
식품 포장재	발수·방유 기능(종이, 종이컵 등)	왁스 코팅, 실리콘계 수지, 식물성 폴리에스터
의류·섬유	발수·방오 코팅제(아웃도어·유아복)	실리콘, 폴리우레탄/폴리에스터 복합 소재
화장품·세정제	계면활성·발포 조절용 PFAS 유도체	천연계면활성제, 알킬폴리글루코사이드(APG)
건축 내장재	방염·방오 처리 소재	난연성 무기물 혼합 소재, 실리콘·무기 하이브리드
유아용품, 주방제품	논스틱(nonstick), 발수/방유 코팅	세라믹계 코팅, 실리콘계 코팅

**표 17**  
생활 소비재 중심 상용화 전략

구분	적용 대상
우선 적용 분야	포장재, 섬유, 화장품, 유아용품 등 인체·환경 노출이 높은 제품군
핵심 기술 요소	실리콘계, 식물유계, 생분해성 고분자, 하이브리드 코팅
기술 도입 장점	인체 안전성 확보, 규제 리스크 회피, 소비자 수요 대응
전환 추진 방식	선도 브랜드 중심 'PFAS-free' 라벨링 → 시장 확대 유도
정책·지원 연계 방향	정부 녹색인증, 저탄소 제품 인증, ESG 평가와 연동 가능

## 불소계 대체 물질 개발

○ 불소계 대체 물질 개발 전략은 기존 PFAS의 고기능성(내열성, 내화학성, 저마찰계수, 전기 절연성 등)을 유지하면서도 환경 독성이나 축적 위험을 낮춘

고성능 대체 소재의 개발을 목표로 한다. 이 전략은 반도체, 디스플레이, 우주·항공, 이차전지, 의료기기 등 국가 전략 산업에 필수적인 고부가가치 소재군에 해당하며, 기술 난이도가 높고 개발에 장기간이 소요된다. 따라서 소재·공정 산업 연계를 고려한 중장기 R&D 로드맵과 기술 자립화 전략이 필수적이다.

그림 5

불소화합물의 응용 분야

출처: UST Technology Review (2024.11.)



표 18

불소계 대체 물질의  
주요 적용 산업 분야

산업 분야	사용 예시	요구 특성
반도체/ 디스플레이	포토리지스트, CMP 계면활성제, 배관 내피 등	초고순도, 내화학성, 비침전성
우주·항공	연료계 부품, 단열 필름, 실링 소재	극한 내열성, 진공 안정성
의료기기	인공 혈관, 튜브, 필터류 등	생체적합성, 무독성, 내약품성
이차전지	전해질 안정제, 전극 바인더, 분리막 등	전기화학적 안정성, 고온 내구성
자동차 전장/ 수소 인프라	개스킷, 전기절연재, 방청 소재	내열성, 밀봉성, 절연성

○ 구체적으로 PFAS 구조를 회피할 수 있는 구조, 고성능 기능화, 분해 용이성 부여(특정 환경), 독성도 예측 등의 요소를 포함하는 분자구조를 설계하고 합성 기술을 개발하는 일련의 과정을 통해 신규 불소화합물 개발이 필요하다. 많은 시행착오 과정이 예상되므로 연구 초기부터 AI 플랫폼 활용을 통해 연구 효율성을 극대화할 필요가 있다. PFAS 구조 회피형 불소화합물의 대표적인 예는 Solvay社에서 개발한

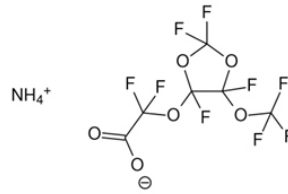
계면활성제 구조를 들 수 있다.

## 그림 6

Solvay社에서 개발한 PFAS 구조 회  
피형 계면활성제



## 솔베이


$$\text{C}_6\text{O}_4$$

## PFAS 제거·정화 기술

- 현재까지 환경에 이미 유출된 PFAS를 제어하기 위해서는 정수, 하수, 침출수, 토양 등에서 PFAS를 물리적으로 제거하는 기술이 필요하다. PFAS를 효과적으로 포집하거나 분리하는 대표적 기술로는 활성탄 흡착, 이온교환수지, 역삼투막(RO), 나노여과(NF) 등이 있다. 다만 이러한 기술로는 PFAS를 제거(분리)만 하고 분해하지 못하므로 처리 후 농축폐수의 추가 관리 필요성이 대두된다. 단기적으로 환경 안정화를 위한 핵심 전략으로 신속한 현장 적용과 보급이 중요하다.

丑 19

## PFAS 제거·정화 기술의 적용 대상 환경

적용 영역	적용 예시
상수도/정수	고도 정수 처리(활성탄, 멤브레인 등)
하수/폐수	하수처리장 유입 PFAS 제거 공정
침출수	쓰레기 매립장 유출수 처리
토양/지하수	현장 제거 또는 양수 처리(pump & treat) 방식
산업 배출수	반도체, 도금, 섬유 공정에서 배출되는 PFAS 함유 수계

卣 20

## PFAS 제거·정화의 주요 기술 유형

기술 유형	원리 및 특성	장단점
활성탄 흡착 (GAC, PAC)	미세 공극에 PFAS 흡착 GAC: 지속성, PAC: 응급성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비교적 저렴</li> <li>• 정수장에 적용 쉬움</li> <li>• 재생·포화 시 폐기 문제</li> </ul>
이온교환수지	양이온/음이온성 수지로 PFAS 포집	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특정 PFAS에 효과적</li> <li>• 재생 가능</li> <li>• 고비용, 처리 용량 제한</li> </ul>
막여과 기술 (RO, NF)	물리적으로 PFAS 입자 차단	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고제거율</li> <li>• 반도체/산업용에 적합</li> <li>• 농축수 처리 필요</li> </ul>
복합 공정	흡착 + 여과 + 응집 등의 조합	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 PFAS나 조건에 대응 가능</li> <li>• 공정 최적화가 중요</li> </ul>

- 현재 상용화된 흡착/분리 기술은 실용성이 높지만, 한계가 명확하기 때문에 이를 보완하거나 대체할 수 있는 신개념 제거 기술의 개발이 활발히 추진되고 있다.

표 21

PFAS 제거·정화를 위한 신개념 기술 개발의 방향

기술 영역	적용 예시
흡착 소재 고도화	MIP, MOF, 바이오차(biochar), 이중 기능 흡착제
멤브레인 기술 고도화	전기장 제어, 복합 소재 삽입, 자가 회복, 표면 개질
농축 폐수 후처리 기술	저온 소각, 고체화 촉매 처리, 직접 재생 시스템
현장형 정화 모듈 개발	모듈형 유닛, 센서 연동형 필터, 이동식 시스템

## PFAS 분해 기술

- PFAS의 궁극적인 해결책은 C-F 결합을 끊고 PFAS 자체를 완전 분해하는 기술이며, 이는 과불화화합물의 ‘영원성’을 깨뜨릴 수 있는 방식이다. 대표적으로 플라즈마, 고도산화공정(AOP), 초임계수 산화(SCWO), 전기화학 산화 등이 연구되고 있다. 기술적 난이도가 높고 에너지 비용, 부산물 처리 등에서 해결해야 할 과제가 많아 중장기적 실증과 기술 상용화 전략이 요구된다.

표 22

주요 PFAS 분해 기술의 원리와 특징 및 적용 한계

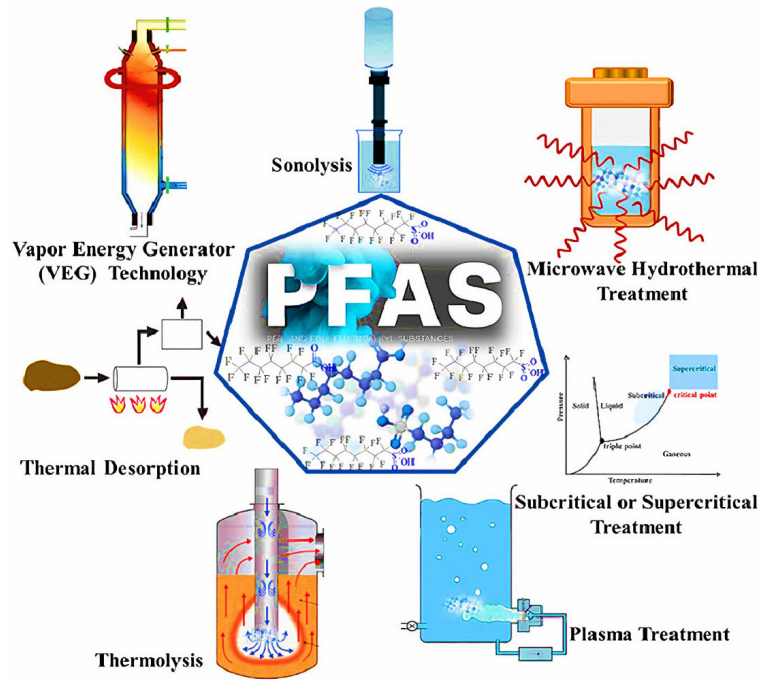
기술명	원리	특징	적용 한계
고온 소각 (Incineration)	• 1,000°C 이상에서 열분해	• 완전 분해 가능	• 높은 에너지 소모 • 대기오염물질 발생 가능
전기화학 산화 (Electrochemical Oxidation)	• 전극 기반 • 고산화력 생성	• 국소 오염수 처리에 효과적 • 상온 가능	• 전극의 내구성 및 비용 문제 • 대규모 처리 어려움
플라즈마 분해 (Plasma)	• 고에너지 플라즈마에서 C-F 결합 파괴	• 낮은 온도에서도 가능 • 실험적 성공 많음	• 공정 비용 높음 • 안정적 연속처리 어려움
고도산화공정 (AOPs)	• O <sub>2</sub> , UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , OH 라디칼 등 활용	• 일부 PFAS 분해 가능 • 정수장 적용 용이	• PFOS, PFOA 분해는 비효율적
초임계수 산화 (SCWO)	• 고온·고압에서 물을 용매화시켜 산화 반응	• 완전 산화 가능 • PFAS뿐 아니라 다오염원 처리	• 설비 비용이 높고 유지 복잡
촉매/광촉매 기반 분해	• TiO <sub>2</sub> , ZnO 등 반도체 촉매 활용	• 선택적 분해 가능 • 저온 반응 가능성	• 분해 속도 느림 • 효율 낮음
생물·전기화학 시스템 (BES)	• 미생물과 전기화학적 반응 결합	• 지속 가능 시스템 • 신기술로 주목	• 현재 연구 초기 단계 • PFAS에 적용 제한적

그림 7

PFAS 분해 기술

출처: Chemical Engineering

Journal Advances (2023.03.)



### Thermal and Nonthermal Treatment Technologies

- 기존 기술(고온 소각, 고도산화 등)은 고비용, 에너지 소모, 부산물 문제가 크기 때문에 이를 해결하거나 우회하는 새로운 분해 기술의 개발 필요성이 대두되고 있다.

표 23

PFAS 분해 신기술의 원리와 특성

기술 유형	원리와 특성	장단점
저온 플라즈마 분해	미세 공극에 PFAS 흡착 GAC: 지속성, PAC: 응집성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비교적 저렴</li> <li>• 정수장에 적용 쉬움</li> <li>• 재생·포화 시 폐기 문제</li> </ul>
광촉매 기반 분해	양이온/음이온성 수지로 PFAS 포집	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특정 PFAS에 효과적</li> <li>• 재생 가능</li> <li>• 고비용, 처리 용량 제한</li> </ul>
생물·전기화학 시스템(BES)	물리적으로 PFAS 입자 차단	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고제거율</li> <li>• 반도체/산업용에 적합</li> <li>• 농축수 처리 필요</li> </ul>
마이크로파 기반 열분해	흡착 + 여과 + 응집 등 조합	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 PFAS나 조건에 대응 가능</li> <li>• 공정 최적화가 중요</li> </ul>
MOF 기반 촉매 시스템	금속-유기 구조체(MOF)에 PFAS 선택흡착 후 분해	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고표면적·설계 유연성 있음(표적 분해 가능성)</li> </ul>

### 불소화합물의 자원순환 공정 기술

- 불소화합물(특히 PFAS)은 열적·화학적으로 매우 안정적이어서 자연 분해가 어려우며, 소각하면 유해한 부산물(불소가스, HF 등)을 배출할 수 있다. 따라서 이를

자원처럼 회수하고 재활용하거나 안전하게 분해·전환하는 공정 기술이 필요하다.  
PFAS 규제 대응뿐 아니라 불소 원료 공급망의 확보 측면에서 매우 중요한 기술로 평가된다.

- 주요 영역은 무기불소 회수 및 재활용, 불소 유기화합물 열분해/가스화 후 회수, 촉매 전환 및 재구성, 생물 전환 기반 순환 등이 있다.

#### 무기불소 회수 및 재활용

- 불소가 포함된 배출가스, 폐산, 폐용액 등에서 F-이온을 추출하고  $\text{CaF}_2$  또는 HF(불화수소)를 재생하는 공정
- 활용처: 반도체, 금속 처리, 이차전지, 소재 등에서 재활용 가능
- 활용 예: F- 이온  $\rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$  처리  $\rightarrow \text{CaF}_2$ 로 고형화(시멘트 원료)  
HF 재생을 통한 불소화학 공정 재사용

#### 불소 유기화합물

##### 열분해/가스화 후 회수

- 고온 열분해( $\sim 1,000^\circ\text{C}$ ): PFAS의 열적 분해  $\rightarrow$  HF 또는  $\text{CF}_4$  등으로 전환  $\rightarrow$  스크러버 통해 회수
- 플라스마 가스화: 고온 플라스마로 PFAS 분해 + 가스 중 불소 성분 회수
- 주의점: 유해 부산물 형성 억제를 위한 반응 조건 제어 필수

#### 촉매 전환 및 재구성 공정

- 목표: PFAS나 유기불소 폐기물을 기능화된 산업 원료로 전환
- 활용 예: 분해 후 C-F 결합 재조정  $\rightarrow$  발수·발유 코팅 소재로 적용  
폐불소 고분자를 고온/촉매 조건에서 저분자화  $\rightarrow$  재중합

#### 생물 전환 기반 순환

- 특정 미생물이나 효소에 의해 PFAS 구조 일부 전환  $\rightarrow$  환경에 무해한 중간체로 전환 후 재사용하거나 매립
- 아직 실용화는 미흡하지만, 저에너지·저탄소 기반으로 주목

#### 표 24

불소화합물 자원순환  
공정 기술의 예시

구분	내용
목표	PFAS/불소화합물을 자원으로 전환하거나 무해화 처리
핵심 기술	F <sup>-</sup> 회수, HF 재생, 고온 분해 후 가스화, 촉매 전환, 생물 전환
활용 가능 분야	반도체, 도금, 불소 고분자 생산, 배터리 소재 등
기술 과제	C-F 결합 분해, 공정 통합, 경제성 확보, 유해 가스 관리

## 4. 시사점

- PFAS 환경 규제는 유럽과 미국이 주도적으로 시행하고 있으나, 유럽은 개별 화합물이 아닌 전체 물질군으로 관리하는 방향을 채택하고 있다. 반면에 미국은 아직 개별 접근 중심이며, 식수에 대한 규정을 강화하는 방향으로 시행하고 있다. 하지만 미국을 비롯한 대부분 국가들이 규제 범위를 전체 PFAS 물질군으로 확장하는 움직임을 보이고 있다.
- 소비재, 포장재, 섬유, 화장품 등 생활 밀접형 제품들에 대해서는 PFAS 사용을 원천 금지하는 내용의 입법을 EU, 미국, 캐나다 등 중심으로 빠르게 시행하고 있으며, 규제가 확정되는 추세다.
- 반도체, 의료기기, 자동차, 항공·우주, 이차전지 분야 등은 여전히 대체가 어려운 영역으로 분류되고 있다. 그러나 CCU(불가피 사용) 근거 문서와 기술적 입증 자료를 필수적으로 요구하면서 까다롭게 평가할 것으로 보인다.
- PFAS 환경 문제의 시급한 해결 과제는 식수나 해양을 거쳐 인체에 축적되어 영향을 줄 수 있는 ‘물에 녹는 PFAS’에 대한 환경 저감이다. 이를 해결하기 위해서는 상용화를 위한 고도화된 PFAS 처리 기술(흡착, 여과, 분해)이 필요하다.
- 생활 밀접형 제품들의 경우 사용되는 PFAS 물질의 대체는 매우 시급한 상황이다. 다만 고성능 신규 소재의 개발을 요하는 것은 아니므로 발 빠르게 대응하여 PFAS-free 제품을 출시할 필요가 있다. 그렇지만 기존 제품 대비 편의성과 효율성이 많이 떨어질 수 있으므로 이를 보완할 수 있는 제품 연구가 집중적으로 요구된다.
- 불소화합물이 지닌 내구성, 내화학성, 발수·발유성, 전기 절연성 등을 포기할 수 없는 산업 영역의 경우 중장기적 관점에서 인체·환경 독성이 없는 신규 불소계 소재의 개발을 통해 산업 전환을 이루어 낼 필요가 있다. 그렇지만 기존의 물성을 유지하면서 친환경성을 부여하는 것은 매우 도전적인 과제로 받아들여지고 있다.
- 유럽의 규제는 모든 불소화합물을 규제 영역에 넣고 있지만, 모든 불소화합물이 환경·인체 독성이 있거나 그렇게 예상되지 않는다는 점에서 전략적 착오가 존재할 가능성이 있다고 생각된다. 다양한 공식 보고서 자료와 정책 자료들을 살펴보면서 첫째로 불소라는 원소에 대한 이해가 매우 부족하다는 점, 둘째로 그동안 PFAS라는 물질에만 초점을 맞추었다는 점이 그러한 판단의 근거이다. 반면 불소화합물을 오랫동안 연구해 온 필자로서는 이러한 상황에 대해 충분한 역할을 하지 못한 데 대해



반성하게 된다.

- 당연한 결론이지만, 불소라는 뛰어난 원소를 잘 활용하기 위해 불소가 포함된 화합물을 잘 개발하는 것만큼 잘 처리할 수 있어야 한다. 우리는 그동안 그러한 부분을 등한시켰다. 잘 처리하기 힘드니 ‘쓰지 말자’라고 하기에는 너무 먼 길을 온 것이다.

## 출처 및 참고문헌

1. Adivi Podder, et al., “Per and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects”, *Journal of Hazardous Materials* 419, 2021.10.5., 126361.
2. Scott M. Bartell, et al., “Rate of Decline in Serum PFOA Concentrations after Granular Activated Carbon Filtration at Two Public Water Systems in Ohio and West Virginia”, *Environmental Health Perspectives* 118 Issue 2, 2009.10.22., pp. 222-228.
3. Geary W. Olsen, et al., “Half-Life of Serum Elimination of PFOS, PFHS, and PFOA in Retired Fluorochemical Production Workers”, *Environmental Health Perspectives* 115 Issue 9, 2007.6.12., pp. 1298-1305.
4. M. N. Ehsan, et al., “PFAS Contamination in Soil and Sediment: Contribution of Sources and Environmental Impacts on Soil Biota”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 2024.6., 100643.
5. S. Verma, et al., “Recent advances on PFAS degradation via thermal and nonthermal methods”, *Chemical Engineering Journal Advances* 13, 2023.3.15., 100421.
6. “Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)”, Annex XV Restriction Report, European Chemicals Agency, 2023.3.22.; [echa.europa.eu](https://echa.europa.eu)
7. Sona Dadhania, et al., “Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) 2024: Emerging Applications, Alternatives, Regulations”, IDTechEx, ISBN: 9781835700273.; [idtechex.com](https://idtechex.com)
8. 손은호, “[차세대 스페셜티 고분자 소재] 불소고분자의 산업적용 현황과 미래 전망”, *UST Technology Review* Vol. 7, 2024.11.26.; [ust.ac.kr](https://ust.ac.kr)
9. R. Mueller, V. Yingling, “Naming Conventions and Physical and Chemical Properties of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)”, Interstate Technology Regulatory Council(ITRC), 2017.11.; [itrcweb.org](https://itrcweb.org)
10. 이진서, “EU/미국 과불화화합물(PFAS) 규제 관련 주요 내용 및 시사점”, 「CHEMIE BRIEF」 Vol. 03, 한국화학연구원, 202407.11.; [kriect.re.kr](https://kriect.re.kr)
11. 국제환경규제 사전대응 지원시스템(COMPASS) 환경규제정보; [compass.or.kr](https://compass.or.kr)
12. “Sustainable packaging: Council signs off on new rules for less waste and more re-use in the EU”, Council of the EU, 2024.12.16.; [consilium.europa.eu](https://consilium.europa.eu)
13. “Protéger la population des risques liés aux substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS)”, 법령 제2025-188호, Assemblée nationale, 2025.2.27.; [assemblee-nationale.fr](https://assemblee-nationale.fr)
14. 情報機構 編. 『PFAS(有機フッ素化合物)の現状及び規制の影響と今後の対応』. 東京: 株式会社情報機構, 2024.

# 전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향

송인협 화학공정 PD | 한국산업기술기획평가원 화학산업실

김형준 교수 | 서강대학교 화공생명공학과

## 요약

- 전자·에너지 산업은 지속적인 기술혁신을 통해 빠르게 발전하고 있으며, 이에 따라 고성능, 고내구성, 경량화된 고부가가치 고분자 소재에 대한 필요성이 점점 대두되고 있다. 전자 분야에서는 미세 공정이 더욱 정교해지고 전자 소자의 통합도가 높아짐에 따라 고온 안정성, 절연 특성 및 접합 특성이 뛰어난 고분자 소재가 필수적이다. 배터리와 연료전지 같은 에너지 저장 및 변환 소자에서는 높은 이온 전도성, 내화학성, 기계적 안정성을 만족시킬 수 있는 고분자 소재 개발이 기술혁신의 중요한 축으로 부상하고 있다.
- 이러한 첨단 분야에서 요구되는 고기능 고분자 소재는 기술 장벽이 높고 특허 경쟁이 치열하기 때문에 이 분야를 선점하는 기업과 국가는 향후 시장을 선도할 핵심 역량을 갖추게 될 것으로 전망된다. 본 원고에서는 이처럼 전자 및 에너지 산업의 혁신을 견인하는 고부가가치 고분자 소재를 중심으로 그 종류와 기능적 특징, 구체적 응용 사례, 그리고 시장 및 기술 발전 동향을 종합적으로 살펴볼 예정이다. 이를 통해 뿌리기술로서의 화학산업이 어떻게 전자·에너지 혁신을 뒷받침하는지, 또 어떠한 전략이 필요한지에 대한 시사점을 제시하고자 한다.

## 1. 개요

### 전자 산업 분야의 고부가가치 고분자 소재

- 전자 산업은 끊임없는 미세 공정 및 고집적화 경쟁을 통하여 발전해 왔다. 소자 스케일이 나노미터 단위로 작아지면서 소량의 불순물이나 결함이 공정 수율 및 소자 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 이에 따라 고순도·고내구성 가진 고분자 소재가 매우 중요한 조건으로 제시되고 있다. 또한 반도체 패키징 기술이 중요하게 대두됨으로써 우수한 절연 특성을 띠면서도 강한 접착력을 가진 새로운 소재의 개발

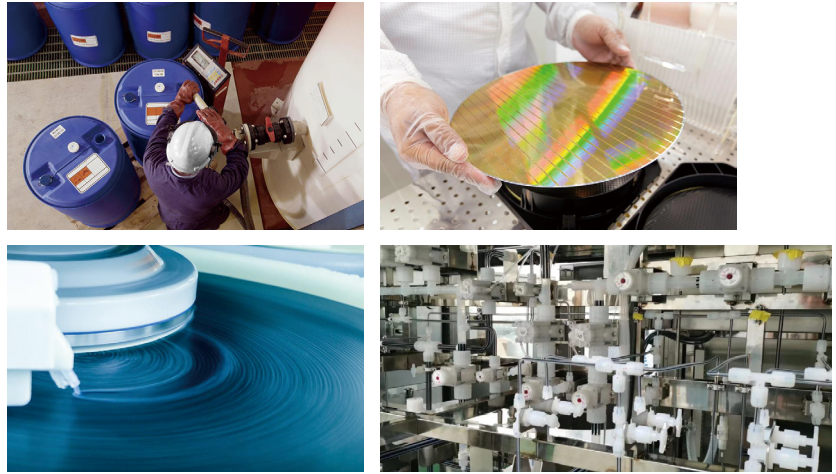
요구가 커지고 있다.

#### 반도체 공정용 고분자 소재

- 반도체 공정용 고분자로 사용되는 대표적인 고부가가치 고분자는 불소계 고분자 소재로서 폴리테트라플루오로에틸렌(PTFE), 퍼플루오로알콕시(PFA), 에틸렌 테트라플루오로에틸렌(ETFE) 등이 대표적이다. 이들 소재는 내화학성, 내열성, 소수성이 탁월하여 반도체 제조 공정에 널리 사용된다. 특히 식각과 증착 등 고온 환경에 노출되는 반도체 공정 장비의 부품, 챔버 라이너 등 매우 중요한 역할을 하고 있다.
- PTFE는 웨이퍼 처리 장비의 배관, 밸브 화학물 전달 시스템의 라이닝에 주로 활용되며, PFA는 고순도 화학물 저장 용기, 분석 장비의 시료 주입 시스템에 활용된다. 최근에는 공정 중 발생하는 미세 오염원을 최소화하여 미세 패턴 공정의 수율 향상을 달성하기 위해 반응 공정에서 철저한 금속 이온 정제 공정이 적용된다. 특히 PFA는 금속 이온 오염도를 1ppb 이하로 관리할 수 있어 미세 공정에서 더욱 중요해지고 있다.
- 반도체 공정에서 불소계 고분자 외에도 실리콘계 고분자 소재, 특히 메틸실록산(PDMS) 계열의 고분자들이 사용되며, 우수한 전기 절연성과 유연성 및 접합력을 동시에 갖고 있다. 실리콘계 고분자는 반도체 장비용 실란트, O-링 등에 활용되며, 광투성과 절연 특성이 커서 광학 소재나 봉지재로 활용 가능하다. 이들 소재는 미세 공정에서의 결함 발생 억제와 가공성 개선이 중요한 장점이다. 다만 고온에서의 물성 유지는 불소계 고분자에 비해 제한적이다.
- 실리콘계 고분자는 미세 패턴 형성에 필요한 실란트 등에서 점차 수요가 증가하고 있으며, 공정 환경의 극한화와 패턴 사이즈 축소에 따라 향후 기술 장벽이 더욱 높아질 전망이다. 이에 따라 나노 스케일 공정에서의 정밀도와 순도 요구사항을 충족시키기 위한 소재 성능 개선과 새로운 응용 분야 개척이 지속될 것으로 예상된다.

그림 1

불소계 고분자의 반도체 공정 사용 예  
시: 고순도 화학품 라이닝(左上), 웨이퍼  
etching 공정에서의 보호필름(右上),  
웨이퍼 연마제(左下), 반도체 제조에서  
필수 요소인 PFA 피팅과 튜브(右下)  
출처: Teflon



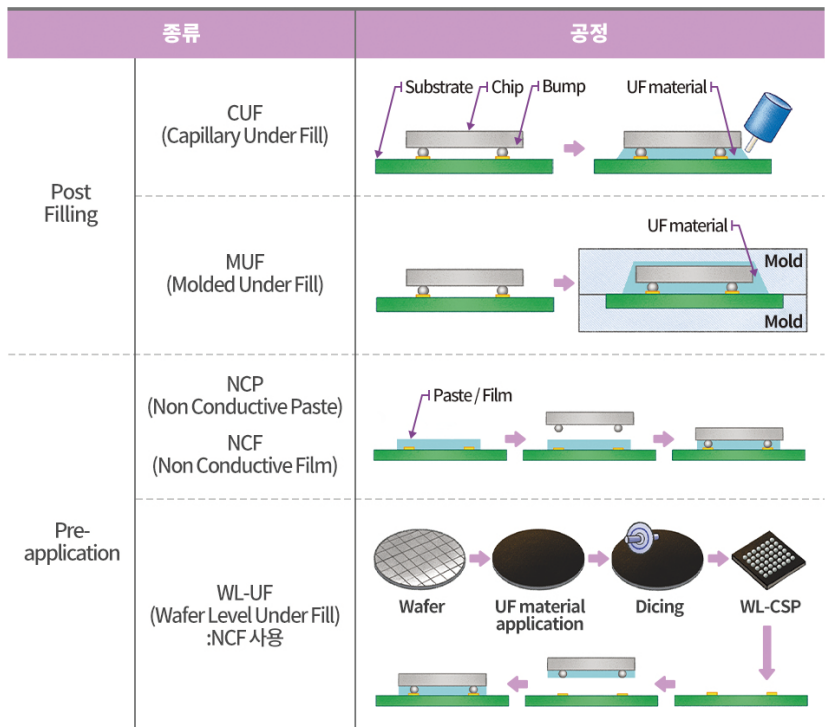
## 반도체 패키징용

### 절연 및 패키징 소재

○ 반도체 소자의 집적화가 가속화되면서 반도체 소자 패키징과 보호막에 고부가가치 고분자의 활용이 두드러지고 있다. 특히 폴리이미드(PI), 폴리아릴렌에테르(polyarylene ether) 등 낮은 유전율과 높은 내열성을 가진 고분자가 반도체 소자의 패키징과 보호막으로 널리 사용된다. 이러한 소재들은 반도체 칩을 외부 환경으로부터 보호하고 전기적 성능을 최적화하는 데 중요한 역할을 한다. 저유전율을 유지하면서도 물리적·화학적 안정성을 유지하기 위해 불소를 도핑하거나 기공 제어를 통하여 유전율을 낮출 수 있는 방안이 연구되고 있다. 이는 신호 지연을 줄이고 전력 소비를 감소시켜서 반도체의 효율을 높이는 데 기여한다.

그림 2

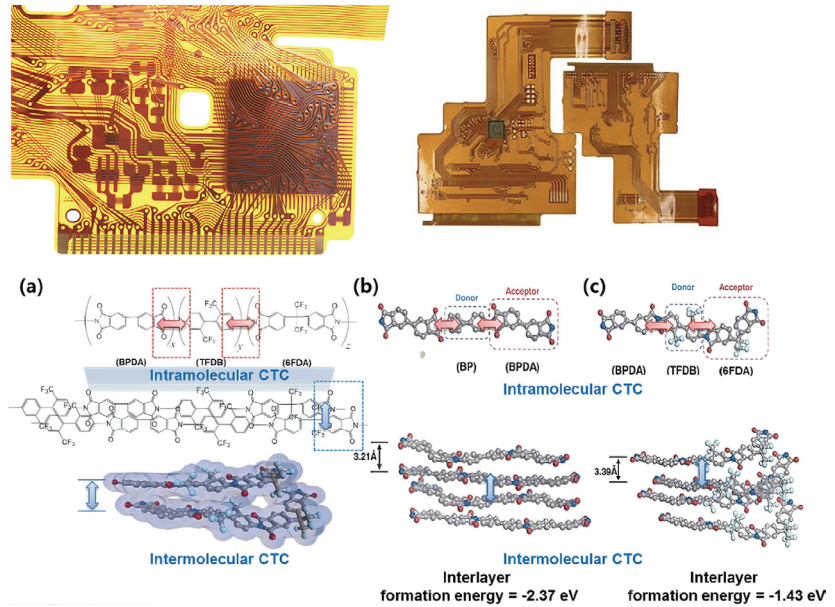
에폭시를 이용한 반도체 패키징용 언더필 공정 모식도  
출처: SK hynix 뉴스룸  
(2023.08.)



- 패키징 공정에서 칩 보호를 위해 사용하는 언더필(fill) 등 접착용 고분자 역시 중요한 역할을 담당한다. 이러한 소재들은 내열성, 내습성, 열팽창 제어가 엄격하게 요구되어 폴리이미드나 에폭시를 기반으로 한 복합 소재 개발이 핵심 기술이다. 또한 고성능·소형화된 반도체의 수요가 증가하면서 팬아웃 웨이퍼 레벨 패키징(FOWLP), 단일칩 시스템(SoC)과 같은 첨단 패키징 기술들이 주목받고 있으며, 이를 위한 새로운 고분자 소재 개발이 지속적으로 이루어지고 있다.
- 패키징 소재 외에 반도체 회로 형성에 사용되는 포토레지스트 소재도 대표적으로 뽑을 수 있다. 현재 공정용 레지스트로는 아크릴레이트 기반의 고분자가 주로 사용되며, 더 높은 해상도를 얻기 위해 극자외선(EUV) 영역으로 넘어가게 되면서 안정성과 해상도를 충족하는 새로운 고분자 개발을 요구하고 있다. 즉 EUV 광에 대한 높은 감도, 우수한 에칭 저항성, 낮은 선폭 거칠기(LWR) 등의 특성을 갖추어야 한다.
- 최근에는 무기물 기반의 EUV용 새로운 포토레지스트 소재가 연구되고 있다. 이러한 EUV용 포토레지스트 노광 공정 후 현상 과정에서 해상도와 안정성을 확보하기 위해 첨가제로서 고분자의 분자량 제어, 측쇄 도입 등에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 또한 다중 패터닝 기술의 발전으로 인해 블록공중합체 유도자기조립(DSA) 등을 이용한 특수 레지스트 등이 개발되고 있다.
- 기판 소재로는 방향족 고내열 고분자가 주로 사용되며, 대표적인 소재로 폴리이미드(PI), 폴리벤조이미다졸(PBI) 등이 있다. 이들 소재는 기본 골격으로 방향족 고리를 가지고 있어서 내열성과 내화학성이 매우 우수하고 기계적 강도도 뛰어나다. 이러한 특성으로 인해 주로 전자 분야의 고온·고강도 부품으로 널리 사용되며, 특히 절연 필름, 기판 등의 성능 향상에 크게 기여하고 있다.
- 에폭시(epoxy) 수지 역시 높은 내열성과 강도로 인해 기판 소재로 많이 활용되고 있다. 특히 에폭시 수지는 다양한 첨가제와의 조합을 통해 물성을 쉽게 조절할 수 있으므로 다양한 분야에서 응용되고 있다. 최근에는 유연 전자기기, 웨어러블 디바이스 등의 발전으로 인해 플렉시블 기판 소재에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 폴리이미드 기반의 유연 기판과 액정 폴리머(LCP) 기판 등이 개발되고 있다.

### 그림 3

폴리이미드 기판과 폴리이미드 내열 특성의 원리인 Charge Transfer Complex(CTC)의 형성 원리  
출처: Altium, Bossgoo, RSC Advances (2015.06.)



## 에너지 산업 분야의 고부가가치 고분자 소재

○ 글로벌 전기차 시장이 폭발적으로 성장하고 에너지 저장 장치(ESS)에 대한 관심이 높아지면서 배터리 산업 역시 가파른 성장 곡선을 그리고 있다. 배터리 성능은 에너지 밀도, 수명, 안정성에 의해 결정되는데, 고분자 소재는 주로 전해질 바인더 보호막 등의 영역에서 핵심적인 역할을 한다. 또한 에너지 전환 시대가 도래함에 따라 수소 에너지와 연료전지 기술이 미래의 핵심 산업으로 부상하고 있다. 고분자 소재는 이러한 기술에서 전해질막, 촉매 지지체, 전극 지지체 등 다양한 형태로 적용되어 효율·내구성을 결정하는 중요한 역할을 하고 있다.

### 2차전지용

#### 고부가가치 고분자 소재

○ 기존 액체 전해질은 높은 이온 전도도를 가지지만, 누액 및 발화 위험성이 크기 때문에 이를 개선하기 위한 고분자 고체 전해질 소재가 주목받고 있다. 최근 연구에서는 고체 전해질 소재의 후보군으로 산화물계, 황화물계, 폴리머계, 유무기 하이브리드계 등이 발굴되어 연구 중이다.

○ 폴리머계 고체 전해질 중 대표적으로 폴리에틸렌옥사이드(PEO)가 있으며, 리튬염과 복합화하여 이온 전달 경로를 형성하게 된다. 그러나 단독 PEO는 상온에서 이온 전도도가 낮아 실용화에 한계가 있다. 그래서  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 나  $\text{TiO}_2$ 와 같은 나노 충전재를 첨가하여 이온 전도도와 기계적 강도를 동시에 향상시키거나, PEO와 다른 고분자를 블록 공중합하여 결정화도를 낮추고 이온 전도도를 향상하거나, 저분자량의 PEO나

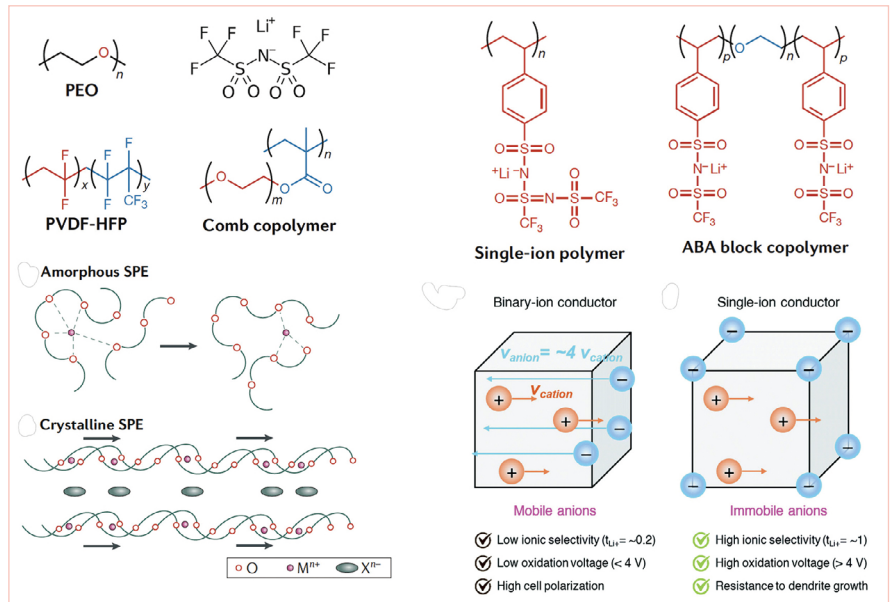


이온성 액체 등을 첨가하여 고분자 사슬의 유동성을 증가시켜 이온 전도도를 향상시킬 수 있다.

○ 그 외에도 폴리카보네이트(PC), 폴리비닐리덴플루오라이드-헥사플루오르프로필렌(PVDF-HFP) 등의 겔(gel) 전해질 연구도 수행되고 있다. 이들은 액체 전해질의 장점인 이온 전도도를 유지하면서도 물리적 안정성을 높일 수 있어 각광받고 있다. 최근에는 단일 이온 전도체(single-ion conductor) 고분자 전해질에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이는 리튬 이온만 이동하고 음이온은 고정되어 있어 분극 현상을 줄일 수 있다. 전해질용 고분자 소재의 핵심 과제는 충분히 높은 이온 전도도, 기계적 안정성, 열적·전기적 안정성을 동시에 확보하는 것이다. 이를 위하여 고분자 설계(분자량, 공중합체 구성), 복합화(나노필러, 이온성 액체 도입), 가공 공정 최적화 등이 종합적으로 연구되고 있다.

그림 4

고분자 전해질의 종류 및 이온전도 메커니즘



○ 배터리 전극에서 바인더는 활물질 입자와 도전재를 결합하고, 전극의 구조적 안정성을 유지하는 중요한 역할을 수행한다. 충·방전 시 부피 변화에 대응하여 전극 구조 안정성을 유지하는 핵심 요소이기도 하다. 전통적으로 사용되는 배터리용 바인더로서는 폴리비닐리덴플루오라이드(PVDF)가 있으며, 우수한 화학적 안정성과 접착력을 가진 반면에 환경적 측면에서는 문제가 있다. 따라서 최근에는 수계 공정이 가능하고 실리콘 음극에서 우수한 성능을 보이는 카복시메틸셀룰로오스(CMC)나 유연성을 더욱 부여하기 위한 스타이렌-부타디엔 고무(SBR), 폴리아크릴산(PAA), 천연 고분자인 알긴산 등을 이용하는 연구들이 다수 보고 되고 있다.

- 차세대 고전압 음극(실리콘 음극)이나 고전압 양극(NMC, NCA)에 대응하기 위해 자가 치유(self-healing) 특성을 가진 바인더도 연구되고 있다. 이는 충·방전 과정에서 발생하는 미세 균열을 스스로 복구할 수 있어 전극 수명을 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 고분자 기반의 보호막 기술은 전해질 부식, 전극 팽창 억제 등의 관점에서 핵심적인 기술로 부각되고 있다.
- 분리막은 양극과 음극을 물리적으로 분리하여 내부 단락을 방지하고 이온만의 이동을 가능하게 하는 중요한 역할을 제공한다. 전통적으로 폴리에틸렌(PE)나 폴리프로필렌(PP) 기반의 분리막이 사용되어 왔다. 하지만 최근에는 안정성과 성능을 높이기 위해  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  등의 세라믹 입자를 고분자 분리막 표면에 코팅하여 열적 안정성과 전해액 친화성을 향상시키고 있다. 또는 PVDF와 같은 불소계 고분자를 코팅하여 전해액 친화성과 기계적 강도를 개선하거나 전기방사법 등을 이용하여 제조된 나노섬유 분리막으로 높은 기공도와 이온 전도도를 제공하기도 한다.
- 최근에는 단순한 양극과 음극의 물리적 분리를 넘어 리튬 덴드라이트의 성장을 억제하는 분리막, 온도나 전압에 반응하여 기동을 닫아 안정성을 확보하는 분리막, 산화 안정성이 향상된 다양한 기능성 분리막들이 제작되고 있다. 배터리 산업에서 고분자 소재는 에너지 밀도 향상과 안정성 확보라는 두 가지 숙제를 해결하는 데 있어 필수적이다. 앞으로 전고체 배터리 등 신기술이 확산됨에 따라 더욱 고도화된 고분자 소재 수요가 증가할 것으로 전망된다.

그림 5

세라믹 입자로 코팅된 고분자 분리막

출처: LG에너지솔루션



## 연료전지 분야의

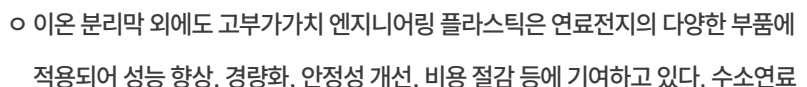
### 고부가가치 고분자 소재

- 연료전지는 크게 양이온 교환막을 사용하는 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell)와 음이온 교환막을 사용하는 AEMFC(anion exchange membrane fuel cell)로 구분되는데, 성능은 전해질막의 이온 전도도, 내화학성 및 내열성에 따라 크게 좌우된다. PEMFC에 쓰이는 가장 잘 알려진 소재로는 나피온(Nafion)이 있다. 이는 퍼플루오로술폰산(PFSA) 기반의



- 한편, 음이온 교환막을 사용하는 AEMFC도 최근 큰 주목을 받고 있다. 음이온 교환막은 주로 4차 암모늄이나 이미다졸륨(imidazolium)을 이온 치환기로 가지는 고분자를 사용한다. 폴리아릴렌에테르, 폴리이미드, 폴리페닐렌 옥사이드 등 방향족 고분자가 음이온 교환막 소재로 연구되고 있다. 음이온 교환막은 양이온 교환막에 비해 비귀금속류 또는 비백금류 촉매를 전극에 사용할 수 있어 가격 저감이 가능하다는 장점이 있지만, 내구성 확보가 어렵다는 문제가 있다. 알칼리 환경에서 고분자의 분해가 발생하기 때문에 내화학성 향상을 위한 골격구조 안정화나 이온 교환기의 물리화학적 성질을 개선하는 연구가 수행 중이다.
- 고온(100~200℃)에서도 안정적으로 작동하는 연료전지는 촉매 효율을 높이고 이산화탄소 등 불순물의 영향을 줄일 수 있어 각광 받고 있다. 폴리술폰(PSU) 계열이 대표적인 고내열성 방향족 고분자로 인산 등과 복합화시켜서 고온에서도 프로톤 전도도를 유지한다. 이외에도 폴리테트라에테르케톤(PEEK) 등 고성능 엔지니어링 플라스틱을 전해질 막으로 적용하려는 시도가 있다. 이는 소재 구조 설계를 통해 내열, 내화학성, 이온 전도도의 삼박자를 균형 있게 구현하려는 방향으로 수행되고 있다.

양이온 교환막 연료전지와  
음이온 교환막 연료전지  
출처: 한국수출입은행,  
해외경제연구소  
(2021.08.)



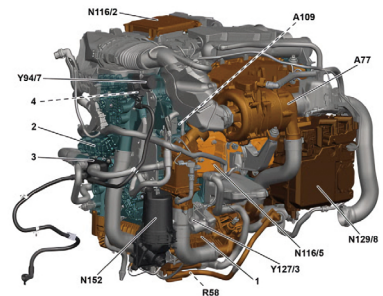
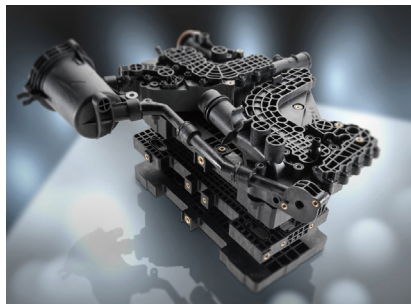
전지차를 예로 들면 바스프(BASF)의 폴리아미드(PA)는 수소연료 전지차의 부품 생산에 성공적으로 적용되었다. 연료 계통에서는 폴리옥시메틸렌(POM)이 연료 파이프라인과 밸브 부품에 사용되어 우수한 내화학성과 치수 안정성으로 인해 연료 누출을 방지한다.

- 전기/전자 부품 분야에서는 폴리아미드(PA)가 모터 기어와 커넥터 등에 적용되며, 특히 유리섬유로 강화된 PA는 엔진 주변 부품에 이상적이다. 폴리부틸렌테레프탈레이트(PBT)는 접화 플러그 터미널과 연료 공급 시스템 부품에 사용되어 내열성과 전기적 특성을 제공한다. 배터리 모듈에서는 폴리카보네이트(PC)가 배터리 하우징과 절연 부품에 적용되며, PC/ABS 합금은 내충격성과 난연성으로 안전성을 높이고 있다. 차체 경량화를 위해 폴리페닐렌옥사이드(PPO)가 차체 패널에 사용되고, PA/PBT/PC 합금이 범퍼와 펜더 등 외장 부품에 적용된다. 열관리 시스템에서는 폴리페닐렌설파이드(PPS)가 고온 환경의 냉각 시스템 부품에 사용되어 뛰어난 내열성과 내화학성을 제공한다.
- 이러한 엔지니어링 플라스틱의 적용은 연료전지차의 전반적인 성능과 효율성을 향상시키며, 향후 신규 전기차 플랫폼 개발에 따라 부품의 모듈화가 진행될 것으로 예상된다. 이에 따라 엔지니어링 플라스틱의 적용 범위가 더욱 확대될 전망이며, 특히 고성능 복합 소재와 나노 복합재의 개발이 활발히 이루어질 것으로 기대된다.

그림 7

수소연료 전지차의 내부 부품으로 사용되는 폴리아미드(PA)

출처: BASF, ehfcv.com



## 2. 시장 동향 및 전망

- 글로벌 전자·에너지 산업 전반에 걸쳐 고부가가치 고분자 소재에 대한 수요는 꾸준히 증가하고 있다. 특히 반도체 초미세 공정과 전기차·에너지 저장 장치(ESS) 확대, 그리고 수소 경제로의 전환이라는 흐름 속에서 고성능 소재를 안정적으로 공급하는 것이 국가·산업 경쟁력을 결정짓는 중요한 요소가 되었다. 동시에 ESG(환경·사회·지배 구조) 경영 트렌드에 따라 합성 공정에서 발생하는 독성 물질 저감과 고분자 소재의 재활용·폐기 문제까지 고려해야 하는 과제가 대두되었다. 이제

기업들은 기술 개발과 환경 규제 대응을 동시에 추진하는 복합적 전략을 요구받고 있다.

- 우선 반도체 산업 측면에서 살펴보면 소자의 고집적화와 미세화가 가속화되면서 공정 중의 오염이나 결함을 극소화할 수 있는 내화학·내열·절연 소재에 대한 중요성이 나날이 커지고 있다. 이를 충족하는 불소계·실리콘계 고분자와 포토레지스트 등의 첨단 소재는 전 세계적으로 소수의 주요 기업이 기술 주도권을 쥐고 있다. 미국, 유럽, 일본 등의 대형 소재 기업들은 이미 반도체 장비사나 설계사와 장기적 공동 개발(R&D) 및 협력 체계를 구축해 왔다.
- 최근엔 소부장(소재·부품·장비) 각 분야의 전문 기업들이 컨소시엄 형태로 참여하면서 핵심 특허 포트폴리오를 넓히는 추세다. 한국의 경우 반도체 제조 공정에 필요한 일부 소재를 직접 개발·생산하려는 노력이 강화되고 있으며, 관련 기업과 연구소 간 협업도 증가하고 있다. 이러한 현상은 향후 글로벌 반도체 공급망 재편 과정에서 ‘기술 자립’을 도모하려는 움직임과 맞물려 고부가가치 고분자 소재 시장의 경쟁 구도를 더욱 치열하게 만들 것으로 전망된다.
- 배터리 시장 또한 가파른 성장과 함께 고분자 소재 수요가 폭발적으로 늘어나는 분야다. 전기차용 2차전지, ESS, 소형 배터리 등 다양한 응용 영역에서 에너지 밀도와 안전성을 동시에 확보하기 위해 고성능 전해질, 분리막, 바인더가 핵심으로 부상했다. 특히 전고체 배터리로의 기술 전환 흐름이 본격화되면 고분자 고체 전해질을 비롯하여 극한 온도와 충·방전 환경에서도 안정된 물성을 유지할 수 있는 고성능 폴리머 소재의 중요성이 한층 더 강조될 것으로 예상된다. 이 과정에서 미국, 유럽, 중국 등을 중심으로 대규모 투자와 파트너십이 진행 중이며, 소재·부품·장비에 이르는 배터리 밸류체인 전반에서 ‘원천 특허’를 확보한 기업이 시장 주도권을 잡을 가능성이 크다.
- 수소연료전지 분야 역시 ‘탈탄소 시대’라는 큰 흐름 속에서 성장 잠재력이 큰 시장으로 주목받고 있다. 여기에 적용되는 이온교환막(양이온·음이온)과 고내열성 방향족 고분자(폴리이미드, 폴리벤즈이미다졸 등)는 높은 난이도의 합성·가공 기술이 요구되며, 연료전지 시스템의 내구성과 성능을 좌우하는 핵심 소재다. 특히 나피온(Nafion)과 같은 퍼플루오로술폰산(PFSA) 계열의 고분자막 대체·개량 및 음이온 교환막(AEM) 연료전지에 적합한 신규 고분자 개발 등 활발한 기술 혁신이 진행되고 있다. 이 시장에서도 해외 선도 기업들은 정부의 정책적 지원과 대규모 투자금을 바탕으로 빠른 속도로 제품 상용화를 추진 중이며, 글로벌 완성차 업체와의

파트너십을 통해 연구 개발부터 상업화까지 연계하는 전략을 취하고 있다.

- 한편 전자·에너지 산업에서 요구되는 고부가가치 고분자 소재는 특정 기업이나 단일 국가의 역량만으로는 발전시키기 어려울 만큼 복잡도가 높다. 예를 들어 반도체 라인의 내화학 부품 개발은 포토레지스트·노광 장비와 긴밀히 맞물리고, 배터리 활성 물질, 전해질, 바인더 간의 계면 안정성 확보는 한쪽만 개선한다고 해결되지 않는다. 연료전지 촉매와 전해질막 간의 접합 및 화학적 내구성 문제도 복합적인 접근이 필요하다. 이에 따라 소재·부품·장비 업체가 공동으로 연구 개발(R&D) 플랫폼을 운영하거나 학계 및 연구소와 긴밀하게 협력해 전 밸류체인을 아우르는 오픈 이노베이션 방식이 확산되고 있다.
- ESG 경영 기조가 강화됨에 따라 합성 과정에서 발생할 수 있는 독성 물질의 저감과 이후 폐기·재활용에 이르는 전 과정을 고려해야 한다는 점도 향후 시장 지형에 큰 영향을 미칠 전망이다. 고성능 고분자 소재가 수반하는 내열·내화학 특성은 재활용 공정에서 추가 비용과 처리 난이도를 높이는 요인이 될 수 있으므로, ‘처음부터 친환경적으로 설계된(eco-design)’ 폴리머 소재가 각광 받을 가능성이 있다. 동시에 생산 공정에서 사용되는 용매, 촉매, 부형제 등의 규제 또한 점차 엄격해지고 있어서 기업들은 첨단 물성 확보와 환경 규제 대응이라는 두 마리 토끼를 모두 잡아야 하는 상황이다.
- 결국 고부가가치 고분자 소재의 세계 시장은 기술과 환경이라는 두 축이 복합적으로 작용하고 있으며, 소수의 선도 기업이 지배력을 강화하는 추세 속에서 새로운 진입 기회가 동시에 열리고 있다. 반도체, 배터리, 연료전지에 필요한 핵심 소재 개발에서 성과를 내는 국가나 기업은 앞으로도 시장 확대와 함께 장기간 안정적인 수익 창출이 가능할 것으로 보인다. 그러나 연구 개발비가 대규모로 투입되어야 하고, 합성부터 가공·분석·시생산까지의 전 과정이 촘촘히 연결되어야 하므로 체계적인 산·학·연 협력과 정부 차원의 전략적 지원이 필수적이다. 향후 시장을 선도하기 위해서는 단순한 물성 개선을 넘어 환경, 안전, 수명 등 전반을 고려한 ‘통합 솔루션’ 형태로 고분자 소재의 가치를 제시하는 기업이 경쟁 우위를 확보할 가능성이 크다.

### 3. 결론

- 전자·에너지 산업에서의 경쟁력은 점점 더 ‘고성능·고부가가치 소재’를 얼마나 확보·활용하느냐에 달려 있다. 반도체 분야에서 요구되는 미세 공정 대응력과 배터리, 연료전지 등 에너지 분야에서 필요한 고출력·고안정성 특성은 모두 고분자 소재의 물성 최적화와 직결되고, 그 기술 장벽 또한 매우 높다. 고순도, 내열, 내화학, 접착, 절연 등 다양한 조건을 동시에 충족하기 위해서는 소재 설계부터 합성·가공·검증에 이르는 전 과정을 유기적으로 연결해야 한다.
- 특히 글로벌 기업들은 개발 비용을 분산시키고 특허 포트폴리오를 강화하기 위해 소부장(소재·부품·장비) 협력 또는 연구기관 및 학계와의 산·학·연 네트워크 구축에 주력하고 있다. 이에 따라 하나의 소재 기술을 넘어 공정·장비·설계 기술까지 함께 개발하는 ‘통합 솔루션’ 방식이 점차 보편화되고 있다. 이러한 흐름에서 소재의 단순한 성능 경쟁이 아니라 ESG(환경·사회·지배 구조) 측면까지 고려한 친환경 합성 공정, 재활용 가능성, 폐기 프로세스 등을 비롯해 전 주기적 접근으로 평가받는 추세다.

### 4. 시사점

- 미래 산업 생태계를 이끌 핵심 성장축은 반도체 집적화와 전기차·수소차, 에너지 저장 장치(ESS) 등 탄소중립 시대를 견인할 분야들이다. 고부가가치 고분자 소재는 이들 분야의 패러다임 변화를 앞당기는 기반 기술이므로 국가 차원의 전략적 지원과 기업과 연구소 간의 긴밀한 협력이 절실히 요구된다. 특히 급변하는 시장 수요에 탄력적으로 대응하기 위해서는 신속한 시제품 검증과 안정적인 양산 프로세스 구축이 필수적이며, 이를 위해 중간 소재·장비 업체와의 협력이 더욱 중요해질 전망이다.
- 결국 전자·에너지 산업에서의 고부가가치 고분자 소재의 경쟁력은 단순히 ‘고성능 제품’을 넘어 ‘혁신 생태계 구축 능력’과 ‘지속 가능한 생산·소비 구조’의 확립에 달려 있다. 향후 수년간 소재 기업과 완성품 제조 기업, 그리고 학계·정부가 함께 전략적으로 투자하고 공동 연구 개발을 추진한다면 전자·에너지 분야의 미래 기술 경쟁력을 선도할 수 있을 것이다. 동시에 환경 규제와 자원 순환 측면에 대한 선제적 대응이 뒷받침되어야만 장기적으로 글로벌 시장에서 차별화된 지위를 확보할 수 있을 것이다.

1. Qing Zhao, et al., “Designing solid-state electrolytes for safe, energy-dense batteries” *Nature Reviews Materials* 5, 2020.02.05. pp. 229-252.
2. Jonghyun Hyun & Hee-Tak Kim, “Powering the hydrogen future: current status and challenges of anion exchange membrane fuel cells”, *Energy & Environmental Science* Vol. 16 Issue 12, 2023.11.02. pp. 5633-5662.
3. Yooseong Yang et al., “Transient color changes in oxidative-stable fluorinated polyimide film for flexible display substrates”, *RSC Advances* Vol. 5 Issue 71, 2015.06.16. pp. 57339-57345.
4. 한정우 외, “국내 불소화학 산업 동향”, *KEIT PD Issue Report* Vol. 21-6, 한국산업기술평가관리원, 2021.06.28. pp. 67-90.
5. R&D 정보센터, 『K-배터리 기술 분야 경쟁력 동향과 미래 모빌리티 부품/소재 R&D 분석』, 지식산업정보원. 2024.08.08.
6. 김호건, “연료전지 개요와 현황”, 『K 뉴딜산업 INSIGHT 보고서 -3』, 한국수출입은행·해외경제연구소, 2021.08.06.
7. Battery LAB, “배터리의 근원을 찾아서 - 세라믹(ceramic) 편”, Battery Inside, LG에너지솔루션, 2022.10.20.
8. “Ultramid Components from BASF for Fuel Cells”, EHFCV, 2019.03.24.
9. [www.teflon.com](http://www.teflon.com)
10. [news.skhynix.co.kr](http://news.skhynix.co.kr)
11. [resources.altium.com](http://resources.altium.com)
12. [bossgoo.com](http://bossgoo.com)
13. [inside.lgensol.com](http://inside.lgensol.com)

## 사형주조 분야

### 유연생산 대응을 위한 핵심 기술 동향

이병현 뿌리기술 PD | 한국산업기술기획평가원 화학산업실

서지원 센터장 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

김정준 선임연구원 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

구수병 책임연구원 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

#### 요약

- 사형주조(Sand Casting)는 모래를 이용하여 금속 부품을 제작하는 대표적인 주조 방식으로 비용 효율성과 다양한 형상 구현이 가능하여 자동차, 항공·우주, 중공업 등 여러 산업에서 널리 활용된다. 그러나 수작업 의존도가 높아 품질 편차와 생산성 저하 문제가 발생하는데, 이를 해결하기 위해 샌드 바인더 제팅(Sand Binder Jetting) 기술이 주목받고 있다.
- 샌드 바인더 제팅 기술은 적층 제조 원리를 적용하여 모래와 액상 바인더를 사용해 정밀한 주형을 제작하는 방식으로 형상 자유도가 높고 제작 속도가 빠르며, 품질의 일관성이 향상되는 장점이 있다. 그러나 기계적 강도와 내열성 부족, 바인더 분사 과정에서의 기술적 한계 등 해결해야 할 과제가 존재한다.
- 이 기술은 주조 산업뿐만 아니라 건설, 예술, 디자인 분야 등에서도 적용 가능성이 높으며, AI와 디지털트윈 기술과의 융합을 통해 공정 최적화 및 품질 관리 고도화가 이루어지고 있다. 글로벌 시장에서의 성장세와 함께 국내에서도 기술 국산화 및 대형화 연구가 활발히 진행되고 있다. 향후 지속적인 연구 개발과 산업 적용 확대를 통해 기존 주조 공정을 혁신할 핵심 기술로 자리 잡을 것으로 기대된다.

# 1. 개요

## 기술의 개념

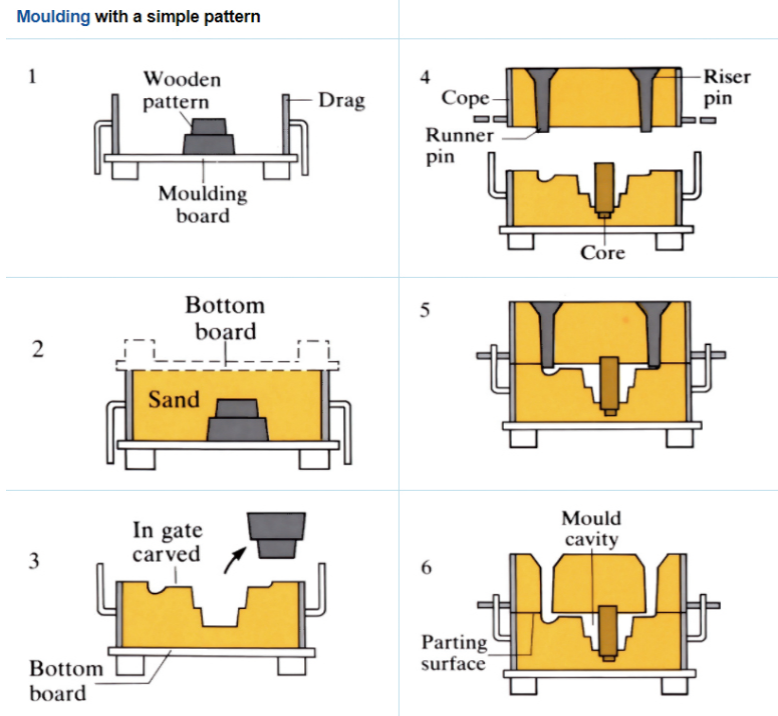
### 사형주조의 개념

- 사형주조는 주형을 모래로 제작하여 금속 부품을 제조하는 대표적인 주조 공정 중 하나다. 이 방식은 비용 효율성이 높고 다양한 형상의 부품 제작이 가능하다는 점에서 광범위하게 활용되고 있다. 특히 자동차 산업, 항공·우주 산업, 중공업, 플랜트 산업, 펌프 및 밸브 제조업 등에서 널리 사용된다. 무엇보다 복잡한 형상을 가진 부품을 경제적으로 생산할 수 있다는 점에서 그 중요성이 크다.

### 그림 1

#### 사형주조 공정의 프로세스

출처: The Open University  
(2017.10.)



- 사형주조는 영구 주형(금형 주조, 다이캐스팅 등) 방식과 비교했을 때 초기 설비 투자 비용이 낮고 비교적 단기간에 다양한 크기와 형상의 부품을 제작할 수 있어 다품종 소량 생산에 적합하다. 또한 적용 가능한 금속 합금의 범위가 넓어 철, 알루미늄, 구리, 니켈 기반 합금 등 다양한 금속 재료를 활용할 수 있다. 이러한 특징 덕분에 프로토타이핑이나 맞춤형 부품 생산에도 유리하다.
- 그러나 대부분 사형주조 공정이 수작업에 의존하고 있으며, 이로 인해 생산 품질의 편차가 발생한다는 한계점이 있다. 특히 작업자의 숙련도와 집중력에 따라 제품의 품질이 좌우되며, 이는 표면 거칠기, 치수 정밀도, 강도 등의 변수가 발생할 수 있다. 또 주조 작업 환경이 고온과 분진이 많은 열악한 조건을 수반하기 때문에 인력난이 지속적으로 심화되고 있다는 점도 주목해야 할 문제다.

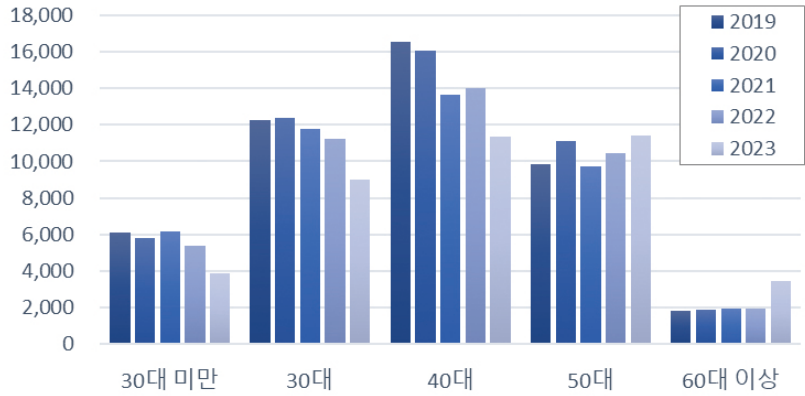


그림 2

주조 산업의 연령대별 종사자 수 추이

출처: 국가뿌리산업진흥센터

(2024.12.)



- 이러한 문제들을 해결하기 위해 샌드 바인더 제팅과 같은 첨단 제조 기술이 도입되어 주조 공정 자동화 및 품질 향상을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

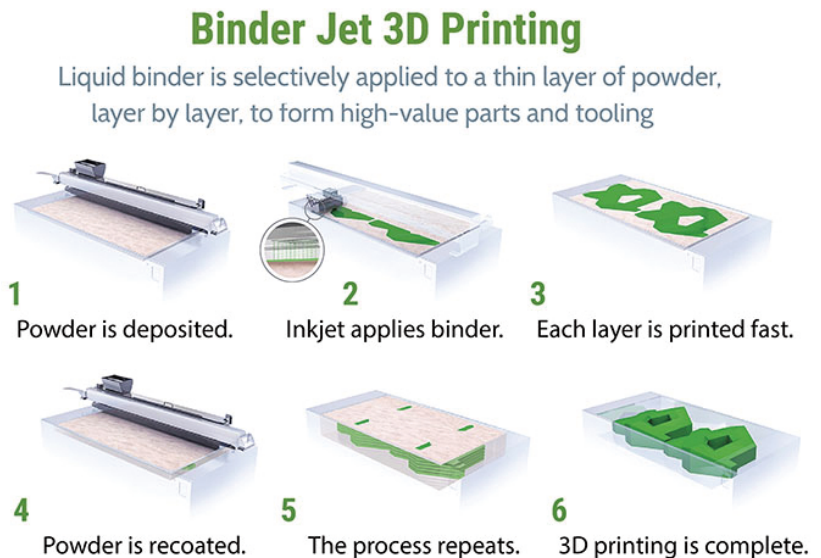
### 샌드 바인더 제팅 기술의 개념

- 샌드 바인더 제팅은 적층 제조 기술의 일종으로, 모래와 액체 바인더를 활용해 정밀한 3차원 형상의 주형 및 코어를 제작하는 공정이다. 이 기술은 기존의 수작업 중심의 사형주조 공정을 자동화하여 품질의 일관성을 확보할 수 있다는 이점을 갖는다.
- 공정의 기본 원리는 다음과 같다. 먼저 제작 플랫폼 위에 미세한 입도의 모래 분말을 균일하게 도포한 후 프린트 헤드에서 CAD 데이터를 기반으로 특정 영역에 액체 바인더를 분사한다. 바인더가 분사된 부분은 응집되며, 이 과정을 여러 층 반복하여 최종적으로 설계된 형상의 주형을 형성한다. 이후 결합되지 않은 잔여 모래를 제거하고 필요에 따라 후처리 공정을 수행하여 최종 주형을 완성한다.

그림 3

바인더 제팅 프로세스

출처: 3DTechValley



○ 본 기술의 주요 장점은 다음과 같다.

- 형상 자유도 증가: 기존의 주조 공법으로는 제작이 어려운 복잡한 형상의 부품도 용이하게 제조할 수 있다.
- 고속 제작 가능: 기존 사형 제작 공정 대비 주형 제작 시간이 대폭 단축되며, 프로토타이핑이나 소량 맞춤형 생산이 가능하다.
- 품질의 일관성 향상: 작업자의 숙련도에 의존하지 않고 정밀한 디지털 데이터를 기반으로 주형을 제작함으로써 품질의 균일성을 보장할 수 있다.
- 환경적 장점: 기존 방식에서 필수적인 패턴 제작 공정을 생략할 수 있어 자원 낭비를 줄일 수 있으며, 특정 바인더 사용 시 유해가스를 감소시킬 수 있다.

○ 샌드 바인더 제팅 기술은 여러 장점에도 불구하고 몇 가지 한계가 있다. 가장 대표적인 문제는 전통적인 사형보다 기계적 강도와 내열성이 낮을 수 있다는 점이다. 주형의 강도는 바인더의 종류, 분사 조건, 후처리 방법 등에 따라 영향을 받으며, 이를 개선하기 위한 연구가 지속적으로 필요하다.

○ 또한 바인더를 선택적으로 분사하는 과정에서 노즐 막힘(Nozzle Clogging) 문제가 발생할 수 있으며, 이는 품질 불량의 원인이 될 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 최적의 점도를 갖는 바인더 소재와 노즐의 정밀 제어 기술이 요구된다. 더불어 바인더 경화 후의 특성 개선을 위한 신소재 연구도 중요한 과제로 대두되고 있다.

○ 이외에도 사형의 크기가 커질수록 제작 과정에서 변형이 발생할 가능성이 크다. 따라서 대형 부품의 경우 공정 안정성을 확보하기 위한 후처리 방법이 필요하다. 이에 따라 다음과 같은 연구가 요구된다.

- 고강도 바인더 소재 개발: 내열성과 기계적 강도를 개선할 수 있는 새로운 바인더 소재의 개발
- 공정 최적화: 바인더 분사량, 건조 속도, 층별 응집 강도 등을 최적화하는 연구
- AI와 센서를 활용한 품질 모니터링: 바인더 분사 및 적층 과정에서 실시간 품질 제어를 통해 변수를 최소화하는 지능형 시스템 개발
- 대형 사형 제작 기술: 대형 주형 제작 시 안정성을 높일 수 있는 구조 설계와 후처리 기법 개발

○ 샌드 바인더 제팅 기술은 기존의 전통적 사형주조 공정을 대체하거나 보완할 것으로 기대된다. 특히 자동화, 디지털화, 친환경성을 강조하는 현대 제조업 트렌드에 부합하는 기술로서 향후 지속적인 연구 개발을 통해 더욱 발전될 것으로 예상된다.

## 기술의 범위

○ 샌드 바인더 제팅 기술은 다음과 같은 핵심 기술로 구성된다.

### 샌드 바인더 제팅 기술의 요소 기술

- **(분말 도포 기술)** 샌드 바인더 제팅 공정의 첫 단계는 균일한 두께와 밀도를 가지는 모래 분말층을 형성하는 것이다. 이를 위해 리코터(recoater), 블레이드(blade), 롤러(roller) 등의 장비가 사용되며, 공정 중 속도와 압력을 정밀하게 제어하여 분말층의 균일성을 유지한다. 균일한 분말층 형성은 최종 제품의 정밀도와 강도에 큰 영향을 미치기 때문에 분말 입자의 크기, 분포와 밀도를 최적화하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.
- **(바인더 분사 기술)** 정밀한 프린터 헤드에서 액상 바인더를 선택적으로 분사하여 모래층에 원하는 형상을 형성하는 과정이다. 바인더 분사 기술은 형상의 정확도와 기계적 강도에 중요한 영향을 미치며, 일반적으로 피에조(Piezoelectric) 방식의 프린터 헤드가 사용된다. 피에조 방식은 빠른 응답 속도와 높은 해상도를 제공하여 약 80~100 $\mu$ m 수준의 정밀한 형상을 구현할 수 있다. 바인더의 분사량, 속도와 압력을 정밀하게 조절하여 모래 입자 간 결합력을 최적화하는 것이 중요하며, 이를 위한 최신 기술로는 다중 노즐 시스템과 정밀 압력 제어 기술이 적용된다.
- **(바인더 소재 기술)** 바인더는 모래 입자를 결합시키는 역할을 하며, 기계적 성질과 내열성 및 치수 안정성에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 사용되는 바인더 소재는 다음과 같다.
  - 푸란(Furan) 바인더: 높은 강도와 내열성을 제공하며, 주조용 사형 제작에 많이 활용
  - 페놀(Phenol) 바인더: 화학적 저항성이 뛰어나며, 내구성이 요구되는 공정에서 사용
  - 규산염(Silicate) 바인더: 환경친화적인 소재로 무독성 및 낮은 배출 가스가 특징
- 최근에는 친환경적이고 기계적 강도가 우수한 바인더의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 열경화성과 광경화성 바인더를 적용한 새로운 기술도 연구되고 있다.
- **(공정 제어 기술)** 샌드 바인더 제팅 공정은 CAD 데이터를 기반으로 정밀하게 제어된다. 주요 공정 제어 요소는 다음과 같다.
  - 분말 도포 속도와 균일성 모니터링
  - 바인더 분사 경로 최적화와 실시간 조정
  - 레이어 적층 과정의 정밀 피드백 및 보정 알고리즘 적용

- 온도와 습도에 따른 공정 변수 조정

○ 이러한 요소들은 사형 품질과 제조 정밀도를 향상시키기 위한 핵심 기술로서 AI와 머신러닝 기반의 공정 최적화 연구도 활발하게 진행되고 있다.

○ **(후처리 기술)** 샌드 바인더 제팅 공정 후 제작된 부품은 다양한 후처리를 거쳐 최종 제품의 품질을 확보하게 된다. 후처리 공정에는 다음과 같은 단계가 포함된다.

- 탈사: 미경화된 분말을 제거하여 최종 형상을 도출하는 과정

- 경화: 열처리나 화학적 처리로 기계적 강도와 내열성을 강화하는 단계

- 추가 열처리: 내구성 향상을 위해 추가적인 열처리를 수행

○ 특히 후처리 과정에서 바인더의 경화 반응과 기계적 강도 향상을 위한 최적의 조건을 설정하는 것이 중요하다.

## 주요 적용 산업

○ **(금속 주조 산업)** 샌드 바인더 제팅 기술의 대표적인 응용 분야다. 기존의 전통적인 주조 공정과 비교해 공정 단순화, 생산 시간 단축, 복잡한 형상의 제작 용이성 등의 장점을 제공한다. 예를 들어, 미국의 선도 주조 기업인 그레데(Grede)는 터보차저 베어링 하우징, 밸브 보디 등 복잡한 형상을 가진 제품 제작에 본 기술을 적용했다. 기존의 수작업 기반 공정을 대체하여 단일 공정으로 코어를 제작함으로써 정밀도를 높이고 생산성을 개선했다.

### 그림 4

샌드 바인더 제팅 기술의  
금속 주조 산업 적용 사례

출처: VoxelMatters (2022.06.)



○ **(예술 및 디자인 산업)** 디자인 및 예술 분야에서도 샌드 바인더 제팅 기술이 적극 활용되고 있다. 독일의 한 디자인 기업은 천연 실리카 모래(silica sand)를 활용하여 복잡한 기하학적 디자인의 욕조와 세면대를 제작했다. 이는 전통적인 주조 방식으로는 구현이 어려운 형상이며, 샌드 바인더 제팅 기술을 통해 친환경적이면서도 독창적인 제품을 생산해 낸 것이다.

## 그림 5

샌드 바인더 제팅 기술의 예술 및 디자인 산업 적용 사례

출처: 3Dnatives (2021.12.), sandhelden

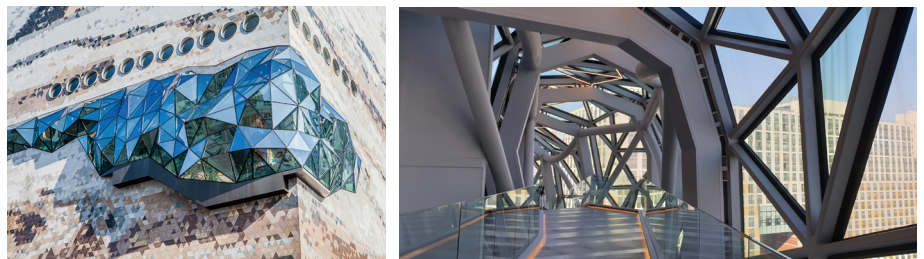


- (건설 산업) 건축 분야에서는 맞춤형 부품 제작을 통해 비용 절감과 납기 단축을 실현하고 있다. 대표적으로 광고 갤러리아백화점의 유리 파사드 제작 과정에서 약 230개의 맞춤형 사형이 샌드 바인더 제팅 기술을 활용하여 제작되었으며, 이를 통해 생산 비용과 시간을 크게 단축시켰다.

## 그림 6

샌드 바인더 제팅 기술의 건설 산업 적용 사례

출처: voxeljet



## 기술의 등장 배경

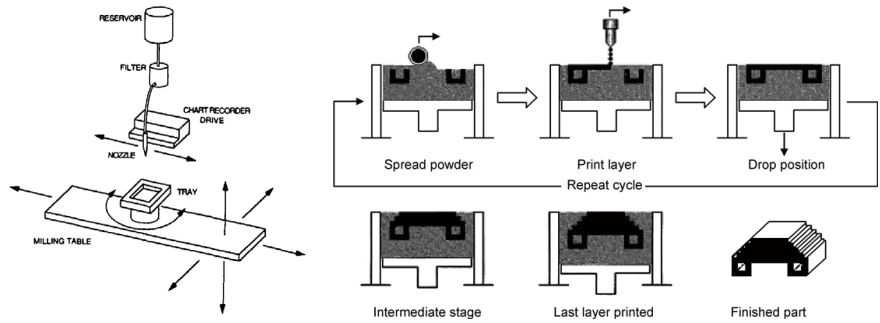
### 기술의 기원

- 샌드 바인더 제팅 기술은 1980년대 후반 MIT에서 처음으로 연구되었다. 이 기술의 창시자인 엠마누엘 삭스(Emanuel Sachs) 교수 연구팀은 기존의 제조 방식이 복잡한 형상을 신속하고 경제적으로 제작하는 데 한계가 있음을 인식하고, 이를 극복하기 위한 새로운 제조 방법으로 바인더 제팅 기술을 제안했다. 기존 주조 방식에서는 복잡한 형상을 구현하는 과정에 고비용과 장시간이 소요되는 문제점이 있었으며, 이에 따라 삭스 교수팀은 분말 형태의 소재를 이용하고 액상 바인더를 선택적으로 분사하여 적층하는 방식을 연구했다. 이러한 연구 결과는 1993년 미국 특허로 등록되었고, 해당 기술이 다양한 소재에 적용될 수 있음을 입증했다.

## 그림 7

MIT 삭스 교수팀이 제안한  
최초의 바인더 제팅 장비의  
개념도

출처: 미국특허청 (1993.04.)



- 초기 연구는 세라믹, 금속, 복합 소재를 활용한 적층 방식에 초점을 맞추었으며, 당시에는 주조용 주형 제작을 위한 모래 기반 바인더 제팅 응용이 직접적으로 명시되지 않았다. 그러나 적층 방식의 특성과 활용 가능성을 고려했을 때 주조 산업과의 접점이 충분히 존재할 것이라는 가능성이 제기되었다. 이와 같은 연구는 이후 다양한 기업과 연구기관에서 지속적인 기술 개발을 통해 산업 현장에 적용될 수 있도록 발전되었다.

## 산업화 및 발전

- 샌드 바인더 제팅 기술의 산업적 응용을 최초로 시도한 기업 중 하나는 산업용 3D 프린팅 회사인 ExOne이다. ExOne은 1996년 MIT로부터 바인더 제팅 기술에 대한 원천 특허 라이선스를 획득했고, 이를 기반으로 기술의 상업화·산업화 가능성을 적극적으로 모색했다. 이후 2002년 ExOne은 최초의 산업용 모래 바인더 제팅 장비인 ‘S15’를 출시하며 본격적으로 주조 산업에 진입했다. S15 장비는 기존의 주형 제작 방식과 비교해 복잡한 형상의 구현이 용이하고 제작 속도가 획기적으로 향상되었으며, 비용 절감 효과까지 제공하여 산업 현장에서 빠르게 도입되었다.
- ExOne 이후 독일의 Voxeljet AG은 대형 산업용 3D 프린터를 개발하여 샌드 바인더 제팅 기술을 주조 산업뿐만 아니라 대형 부품 제작 분야로 확장시켰다. Voxeljet의 시스템은 높은 생산성을 갖춘 대형 빌드 볼륨을 제공하여 항공·우주 및 자동차 산업의 대형 주형 제작에도 적용될 수 있도록 했다. 또한 GE Additive(現 Colibrium Additive)는 금속 바인더 제팅 기술을 발전시켜 기존의 모래 기반 응용을 넘어 항공·우주 및 의료 분야에 적합한 고성능 금속 부품을 생산할 수 있는 방향으로 기술을 진화시켰다.

## 산업적 영향

- 바인더 제팅 기술은 이후 다양한 산업 분야에서 빠르게 확산되었으며, 특히 주조 산업에서의 적용이 가장 활발하게 이루어졌다. 전통적인 주형 제작 방식과 비교했을 때 바인더 제팅 기술은 복잡한 형상의 부품을 별도의 금형 없이 신속하게 제작할 수 있어 생산 비용 절감 및 리드 타임 단축에 크게 기여했다. 특히 자동차, 항공·우주,



발전 설비 등 고부가가치 산업에서는 대형 부품과 정밀 부품을 경제적으로 생산할 수 있는 방법으로 자리 잡게 되었다.

- 최근에는 바인더 제팅 기술이 지속 가능한 제조 방식으로도 주목받고 있다. 기존의 주조 공정에서 사용된 모래는 대부분 폐기되거나 재활용이 어려운 반면, 샌드 바인더 제팅 공정에서 사용된 모래는 재활용이 가능하여 환경친화적인 제조 방식으로 인정받고 있다. 또 디지털 제조 방식의 특성을 활용하여 맞춤형 제작이 가능하다는 점에서 다품종 소량 생산 체제에도 적합하다는 장점이 있다.

## 2. 국내외 시장 동향

### 글로벌 시장 규모 및 전망

- 전 세계적으로 샌드 바인더 제팅 시장은 빠르게 성장하고 있으며, 주요 산업체와 연구기관에서의 관심이 증가하고 있다.
- 2023년 기준 샌드 바인더 제팅의 글로벌 시장 규모는 약 9,720만 달러로 추정된다. 연평균 11.3%의 성장률을 보이면서 2031년에는 시장 규모가 약 2억 5,424만 달러에 이를 것으로 예상된다. 이러한 성장은 특히 항공·우주, 자동차, 중공업 등의 분야에서 경량화와 공정 최적화를 위한 주형 제작 수요가 증가하고 있기 때문이다. 또 기존의 주조 공정을 대체할 수 있는 고효율 적층 제조 방식으로의 전환이 가속화되면서 기술 발전과 더불어 시장 확대가 이루어지고 있다.
- 한편 한국의 3D 프린팅 시장 또한 정부의 적극적인 지원과 제조업 전반에서의 디지털 전환 움직임에 따라 지속적으로 성장하고 있다. 한국의 3D 프린팅 시장 규모는 2023년 약 8억 6천만 달러에서 연평균 27.1%의 성장률을 기록하고 있으며, 2030년에는 46억 2천만 달러에 이를 것으로 전망된다. 특히 국내 주조 산업에서의 자동화와 공정 개선을 위한 적층 제조 기술 도입이 증가함에 따라 샌드 바인더 제팅 기술의 활용도가 더욱 높아질 것으로 예상된다.

### 주요 시장 참여 기업

- 현재 샌드 바인더 제팅 시장은 ExOne과 Voxeljet AG라는 두 주요 기업이 선도하고 있으며, 두 기업이 전체 시장의 80% 이상을 점유하고 있는 것으로 추정된다. ExOne은 2002년 첫 샌드 바인더 제팅 장비인 S15를 출시한 이후 업계를 주도해 왔으며, 2020년 기준 5,930만 달러의 매출을 기록했다. Voxeljet은 독일을 기반으로 하는 기업으로, 대형 제품을 위한 바인더 제팅 장비를 전문적으로 생산하면서 2023년 기준 3,518만 달러의 매출을 기록했다.

## 그림 8

글로벌 선도 기업의 대표 제품인  
ExOne社の S-Max Pro(左)와  
Voxeljet社の VX4000(右)  
출처: ExOne, Voxeljet AG



- 이들 기업은 지속적인 연구 개발을 통해 공정 속도 개선, 바인더 소재의 다양화, 출력 해상도 향상 등 기술적 발전을 이루고 있다. 특히 ExOne은 바이오 기반 바인더와 친환경적 공정을 도입하여 지속 가능한 제조 솔루션을 개발하고 있다. Voxeljet은 대형 주형 제작을 위한 고속 프린팅 기술을 도입하여 산업 현장에서의 활용도를 높이고 있다.

## 국내 현황

- 한국에서도 샌드 바인더 제팅 기술의 도입이 활발하게 진행되고 있으며, 특히 주조 공정의 자동화와 디지털화를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. ExOne은 2021년 한국 내 ABC 산업과 협력하여 샌드 바인더 제팅 시스템의 보급을 추진하고 있으며, 이를 통해 금속 주조물을 위한 모래 주형과 코어 제작 공정의 생산 속도 향상과 비용 절감을 목표로 하고 있다. 또한 국내 연구기관과 대학에서도 바인더 소재 개선, 인쇄 정밀도 향상 및 후처리 공정 최적화와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.
- 그러나 샌드 바인더 제팅 기술의 확산에는 몇 가지 도전 과제가 존재한다. 첫째, 초기 투자 비용이 상대적으로 높아 중소기업이 기술을 도입하는 데 부담이 될 수 있다. 둘째, 대량 생산이 필요한 경우 전통적인 주조 공법과의 비용 경쟁력이 낮아질 수 있으며, 생산 공정의 안정성 확보를 위한 추가적인 연구 개발이 필요하다. 셋째, 바인더 소재의 특성에 따른 기계적 물성 변화가 발생할 가능성이 있어 이를 최적화하는 기술의 개발이 요구된다.
- 이에 따라 기술 혁신과 응용 분야 확대가 지속적인 성장의 핵심 동력으로 작용할 것으로 예상된다. 향후 샌드 바인더 제팅 기술의 국산화와 고도화 연구가 활발히 진행됨에 따라 한국 시장에서도 이 기술의 보급과 활용이 가속화될 전망이다.

## 3. 국내외 기술 동향

### 샌드 바인더 제팅의

### 국내 기술 동향

- 국내에서는 2014년 삼영기계(주)에서 최초로 샌드 바인더 제팅 기술을 도입하여 사형주조용 주형을 제작했고, 주조 공정에 적용할 수 있는 공정 기술을 개발했다. 삼영기계는 바인더 제팅 기술을 활용하는 것에서 나아가 연구 개발을 통해 대형 샌드 3D 프린터 국산화에 성공했다. 이는 독일 기업에 이은 세계 두 번째 상용화 사례로서



기술력을 입증했다.

- 모래에 바인더를 분사하여 적층할 뿐만 아니라 세라믹 파우더 적층까지 가능하며 응용 범위가 넓으며, 900x520x450mm의 빌드 사이즈를 가져 산업용 대형 제품 생산에도 적용이 가능하다.
- 바인더 제팅 기술은 샌드에만 국한되는 것이 아니며, 금속 분말의 바인딩을 통한 적층 기술에도 활용되고 있다. 국내의 (주)케이랩스, (주)에스에프에스, (주)링크솔루션에서는 금속 바인더 제팅 기술을 국산화하고, 이를 활용한 3D 프린터를 개발해 냈다.

그림 9

삼영기계의 샌드 바인더 제팅 기술을 도입한 3D 프린터 제품  
출처: 대한금속·재료학회  
(2020.09.), 삼영기계

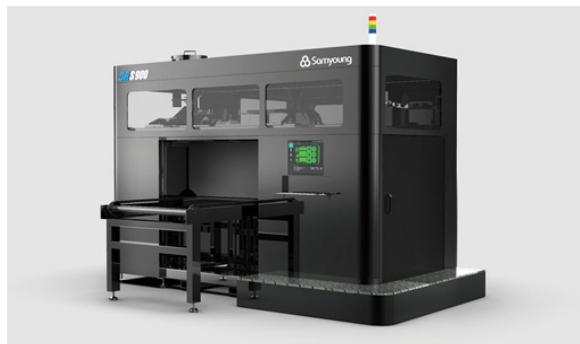


그림 10

금속 바인더 제팅 3D 프린터 제품으로  
(주)에스에프에스의 3D 프린트(左)와  
(주)링크솔루션의 BLT 시리즈(右)  
출처: 지식재산영상, 링크솔루션



- 산업적 이용이 가능하도록 대형화와 효율화 연구 개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 바인더 제터 기술의 발전을 통한 출력 해상도와 정밀도 향상이 동시에 진행되고 있다. 또 주조품 생산 시 기능성을 개선하기 위한 샌드, 바인더, 경화제 소재 기술의 개발도 추진되고 있다.

## 샌드 바인더 제팅의 국외 기술 동향

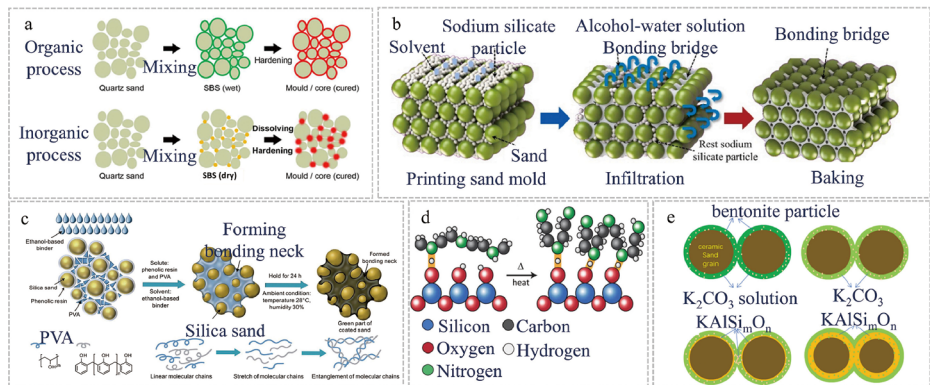
- ExOne, Voxeljet AG 등 미국과 독일의 선도 기술 기업들은 바인더 제팅 3D 프린팅 기술을 고도화하기 위해 인공지능과 디지털트윈 기술을 접목하고 있다. 인공지능 기반 장비 예지보전(Predictive Maintenance, PdM)이나 공정 최적화를 통한 효율성 향상을 목표로 인공지능이 활용되고 있다. 또 시뮬레이션과 연계된 디지털트윈

모델 도입을 통해 제품 생산 주기를 단축시키는 연구도 진행 중이다. 소재 분야에서는 샌드와 무기 바인더 간의 결합을 통한 적층, 선택적 바인더 분사를 통한 기능성 강화 등을 목표로 연구가 진행 중이다.

- 바인더 제팅 3D프린팅은 앞서 기술한 기술 기업뿐만 아니라 학계와 연구계에서도 다양한 연구가 진행되고 있다. 2024년 진행된 연구에서는 유기/무기 바인더에 따른 바인더 넥 형성 메커니즘을 규명하는 연구가 진행되었다. 해당 연구에서는 다양한 용질/용매 조합에 따른 결합 양상을 성공적으로 규명해 냈다.

그림 11

소재 반응 메커니즘의 규명  
출처: Additive  
Manufacturing  
Frontiers (2024.06.)



- 2021년 진행된 연구에서는 머신 비전과 인공지능을 결합하여 샌드-베드에 대한 결합을 인지하는 연구를 진행했다. 샌드-베드에서 발생할 수 있는 모래 부족으로 발생하는 파임과 스크래퍼 파손으로 발생하는 굽힘 형태의 결합을 인지하여 문제 상황을 조기에 발견하고 일정한 품질을 달성할 수 있는 방안을 제시했다.

그림 12

머신 비전과 인공지능 기반 샌드-베드  
의 결합 인지  
출처: China Foundry  
(2021.07.)

Sand-bed image after detection					
Accuracy	95%	96%	95%	96%	95%
Time cost	1.74 s	1.72 s	1.72 s	1.73 s	1.69 s

Sand-bed image after detection					
Accuracy	90%	93%	97%	98%	92%
Time cost	2.59 s	2.47 s	2.49 s	2.45 s	2.50 s

- 메커니즘 규명 연구와 더불어 바인더 제팅 샌드 3D 프린팅 공정 변수를 최적화하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 목표로 하는 지표를 선정하고 해당 지표에 영향을 주는

요인들을 선정하여 목표 지표 달성을 위한 최적 파라미터를 제안하는 방법론에 대한 연구가 수행되었다. 또한 입력 변수들 사이 및 입력 변수와 출력에 대한 상관관계를 인공지능으로 분석하는 연구도 활발히 진행 중이다. 최근에는 하나의 목표를 달성하는 것이 아니라 다수의 목표 지표를 설정하여 동시에 달성하는 다목적 최적화 연구가 진행되고 있는데, 기존보다 더 많은 입출력 변수들 사이의 관계를 최적화하는 인공지능 모델에 대한 관심이 높아지는 추세다.

그림 13

다구치 방법(タグチメソッド)

기반의 제작 샘플에 대한

강도 최적화

출처: China Foundry

(2021.07.)

Group	Influencing factors				Average tensile strength (MPa)
	A (Alcohollicity, wt.%)	B (Binder saturation, %)	C (Layer thickness, mm)	D (PVA content, wt.%)	
1	50	55	0.28	1.5	1.087
2	50	65	0.32	3	1.453
3	50	75	0.36	4.5	2.157
4	67	55	0.32	4.5	1.433
5	67	65	0.36	1.5	1.270
6	67	75	0.28	3	1.463
7	75	55	0.36	3	0.860
8	75	65	0.28	4.5	1.350
9	75	75	0.32	1.5	1.283

## 4. 시사점

○ 샌드 바인더 제팅 기술은 전통적인 사형주조 공정의 한계를 극복하고 보다 정밀하고 자동화된 제조 환경을 구축하는 데 중요한 역할을 한다. 또한 이 기술은 기존의 사형 제작 방식에 비해 높은 형상 자유도, 빠른 제작 속도, 우수한 품질 일관성을 제공하고 있다. 특히 복잡한 형상의 부품을 경제적으로 제작할 수 있다는 점에서 주조 산업을 비롯한 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다고 할 수 있다.

○ 그러나 기술의 확산과 고도화를 위해서는 몇 가지 기술적 과제가 해결되어야 한다. 바인더 소재의 기계적 강도, 내열성 향상, 대형 주형 제작 시 변형 최소화, 바인더 분사 공정의 정밀도 개선 등의 연구가 지속적으로 이루어져야 한다. 또한 AI·디지털트윈·로봇 등 첨단 기술을 접목하여 공정 최적화와 품질 모니터링을 강화하는 것이 중요한 방향이 될 것이다.

○ 국내외 산업 동향을 고려할 때 샌드 바인더 제팅 기술은 주조 산업을 포함한 다양한 분야에서 활용될 가능성이 높다. 향후 기술적 진보를 통해 기존 공정을 대체하거나 보완하는 주요 제조 기술로 자리매김할 것으로 예상된다. 이를 위해 지속적인 연구 개발과 산업 적용 확대가 필수적이며, 국내에서도 기술 국산화·상용화를 위한 적극적인 투자가 요구된다.

1. E. M. Sachs et al., "Three-dimensional printing techniques", United States Patent No. 5,204,055, 1993.04.20.
2. E. Sachs et al., "Three-Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model", *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 114, Issue 4, 1992.11.1. pp. 481–488.
3. Haoqin Yang, et al., "Advances in Digital Multi-Material Composite Sand-Mold Binder-Jetting Forming Technology and Equipment", *Additive Manufacturing Frontiers* Vol. 3 Issue 2, 2024.06. 200138.
4. Wang, Lan-xiu, et al., "Sand-bed defect recognition for 3D sand printing based on deep residual network", *China Foundry* Vol. 18 Issue 4. 2021.07.04. pp. 344-350.
5. Z. Zhang, et al., "Binder jetting 3D printing process optimization for rapid casting of green parts with high tensile strength", *China Foundry* Vol. 18 Issue 4. 2021.07.04. pp. 335–343.
6. 「2024 뿌리산업 실태조사」, 산업통상자원부·한국생산기술연구원·국가뿌리산업진흥센터, 2024.12.30.
7. "한국현 회원 (삼영기계), 바인더젯팅 방식 샌드 3D프린터 개발 성공", 대한금속·재료학회, *News Letter* Vol. 9, 2020.09.; newsletterkim.or.kr
8. "Binder Jetting 3D Sand Printer Market Size, Share & Global Report [2030]," Verified Market Reports.
9. GrandViewResearch, South Korea 3D Printing Market Size & Outlook, 2030.
10. "Sand Casting", The Open University | OpenLearn, 2017.10.24.; [www.open.edu/openlearn](http://www.open.edu/openlearn)
11. Charles Tellier, "Binder Jetting 3D Printing Technology", 3DTechValley.; [www.3dtechvalley.com](http://www.3dtechvalley.com)
12. Madeleine P., "SANDHELDEN Turns to Binder Jetting and ExOne for its Sustainable, Sand Projects", 3Dnatives, 2021.12.08.; 3Dnatives.com; [sandhelden.de](http://sandhelden.de)
13. Victor Anusci, "Foundry giant Grede internalizes sand binder jetting", VoxelMatters, 2022.06.05.; [voxelmatters.com](http://voxelmatters.com)
14. "3D printing unties the knot - Structural elements for modern architecture", voxeljet.; [voxeljet.com](http://voxeljet.com)
15. 지식재산영상; [ipvideo.kr/bbs/board.php?bo\\_table=portfolio&wr\\_id=1683](http://ipvideo.kr/bbs/board.php?bo_table=portfolio&wr_id=1683)
16. ㈜링크솔루션; [lincsolution.com](http://lincsolution.com)

# 4

## AI + X(뿌리산업): 지능화와 디지털 전환으로 여는 고부가가치 제조 혁신

이병현 뿌리기술PD | 한국산업기술기획평가원 화학산업실

김효섭 수석 | 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소

### 요약

- (최근 동향) 제조업의 근간인 뿌리산업(주조, 금형, 소성가공, 용접 접합, 표면처리, 열처리 등) 전반에 걸쳐 첨단 디지털 기술을 활용한 생산 공정의 지능화가 급속히 확산되고 있다.
- (기술의 개요와 범위) 뿌리산업 분야에서는 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 제조 데이터 분석, 디지털트윈, 로봇틱스 등 다양한 첨단 기술이 도입되어 공정 자동화, 품질 검사, 설비 예지보전 등 제조 공정의 스마트화를 실현하고 있다.
- (국내외 시장 동향) 전 세계적으로 제조 AI 및 IoT 시장이 연평균 30~60% 이상의 높은 성장률을 보이는 가운데 국내에서도 중소·중견 제조 기업을 중심으로 스마트공장 구축이 활발히 진행되면서 데이터 기반의 지능형 제조로 전환이 가속화되고 있다.
- (국내 주요 기술 동향) 국내 뿌리기업들은 공정 자동화, AI 기반 품질 검사, 예지보전 시스템 구축 등을 통해 제조 공정 혁신을 적극 추진하고 있으며, 특히 중소·중견기업을 중심으로 이러한 기술 적용 사례가 빠르게 증가하고 있다.
- (고부가가치화 성과) 이러한 디지털·지능화 기술 도입을 통해 뿌리산업 기업들은 실질적인 고부가가치 성과를 창출하고 있다. 대표적으로 생산성 향상, 불량률 감소, 원가 절감 등의 가시적 효과를 거두었으며, 이 외에도 설비 가동률 향상, 가동 중단 시간 단축, 수익성 개선 및 고부가가치 사업으로의 확장 등 긍정적인 변화가 나타나고 있다.

- **(지원 정책 동향)** 정부 역시 뿌리산업의 디지털 전환을 적극 지원하고 있다.  
스마트공장 3만 개 조기 구축 및 AI 기반 고도화 추진, KAMP를 통한 제조 데이터 공유·활용 인프라 지원, 디지털 전문 인력 양성, 관련 기술 R&D 투자 및 국제 표준화 참여, 스마트 제조 설비 투자 세제 혜택 및 금융 지원 등 다각적인 정책을 펼치고 있다.
- **(시사점 및 향후 전망)** 뿌리산업의 지속 가능한 경쟁력 확보를 위해서는 데이터 중심 제조 문화 정착, AI·디지털 전환을 이끌 전문 인력 양성, 산·학·연·관의 개방형 협력 생태계 구축이 필수적이다. 나아가 최근 급부상하는 거대언어모델(LLM) 등 첨단 AI 기술의 변화에 대응한 직무 역량 강화와 ESG 경영과 연계한 친환경·지속 가능 제조 시스템 구축이 향후 핵심 과제로 부각되고 있다.

## 1. 개요

- 뿌리산업은 주조, 금형, 소성가공, 용접·접합, 표면처리, 열처리 등 제조업에서 소재를 부품으로 가공하고 완제품 생산으로 연결하는 핵심 공정 산업을 의미한다.  
이러한 뿌리산업은 자동차·전자 등 국내 주력 산업의 기반임에도 불구하고 열악한 작업환경과 부정적 인식으로 인해 심각한 인력난을 겪고 있다. 또 다수의 영세 기업 구조로 인해 자동화와 첨단화로의 전환에도 어려움이 있다.
- 이러한 문제에 대한 해결 전략으로 지능화 및 디지털 전환 기술을 접목한 ‘AI+X(뿌리산업)’가 주목받고 있다. AI+X는 인공지능(AI)과 특정 산업 분야(X)의 융합을 통해 혁신을 창출하는 개념으로, 뿌리산업에 이를 적용하면 공정 데이터를 활용한 스마트 제조가 가능해져서 생산성과 품질을 동시에 혁신할 수 있다.

## 기술의 개요 및 범위

뿌리산업의 지능화 및 디지털 전환을 이끄는 핵심 기술들은 다음과 같다.

- **(인공지능, AI)** 뿌리산업 공정 데이터를 기반으로 예측과 의사결정을 수행하는 기술이다. 머신러닝, 딥러닝 등의 기법을 활용하여 설비의 고장 징후를 사전에 감지하거나 제품의 품질이나 불량 여부를 판별하는 등 제조 공정 운영에서 ‘두뇌’ 역할을 수행한다. 최근에는 생성형 AI와 거대언어모델(LLM)의 발전에 따라 공정 데이터 해석, 작업 지시 자동화, 전문가 지식 축적 등으로 활용 범위가 지속해서 확장되고 있다.

- **(센서/사물인터넷, IoT)** 제조 현장 데이터를 센서나 IoT 디바이스를 통해 실시간으로 수집·전송하는 연결 기술이다. 제조 공정에서 발생하는 온도, 압력, 진동, 영상 등 다양한 형태의 데이터를 클라우드나 서버로 전송하여 데이터 분석 및 AI 활용의 기반을 제공한다. 현재 전 세계 제조 기업의 약 60% 이상이 생산 공정에 IoT 기술을 도입했을 정도로 보편화되었다.
- **(제조 데이터)** 제조 현장에서 발생하는 로그, 센서값, 영상, 이미지 등 다양한 유형의 데이터를 수집·저장하고 처리·분석하는 기술 전반을 의미한다. 수집된 공정 및 품질 데이터는 정제와 분석 과정을 거쳐 의미 있는 정보로 변환되며, AI 모델 학습의 기초 자료로 활용된다. 데이터의 양과 질이 AI 예측 정확도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 최근 뿌리기업들도 데이터 레이크(Data Lake) 구축과 데이터 레이블링(Labeling) 등에 투자를 확대하는 추세다.
- **(디지털트윈, Digital Twin)** 제조 설비나 공정 상태를 실시간으로 반영하는 디지털 가상 모델을 말한다. 실제 공장의 설비와 공정 흐름을 가상 공간에 쌍둥이처럼 구현하는 사이버-물리 시스템(Cyber Physical System, CPS)의 일종으로, 이 가상 환경에서 공정 시뮬레이션과 최적화를 수행할 수 있다. 이를 통해 실제 생산에 앞서 다양한 변수를 테스트하고 잠재적 문제점을 사전에 파악함으로써 비용과 시간을 절감하는 효과를 얻을 수 있다.
- **(산업용 로봇틱스)** 산업용 로봇 및 협동로봇을 활용하여 용접, 조립 등 위험하거나 반복적인 작업을 자동화함으로써 생산성과 안전성을 동시에 향상시키는 기술이다. 최근에는 AI 비전 기술과 융합하여 사람과 로봇이 협업하면서 정밀 작업 및 품질 검사를 수행하는 사례가 증가하고 있다. 또 로봇 작업 데이터를 AI가 학습하여 작업환경 변화에 스스로 적응하는 자율 로봇 기술도 점차 확산되는 추세다.

## 표 1

뿌리산업 지능화를 위한 핵심 기술 및  
제조 현장 활용 방안

핵심 기술	제조(뿌리) 현장에서의 역할과 효과
인공지능(AI)	공정 데이터 기반 이상 탐지, 품질 예측, 설비제어 최적화 (예: 불량률 예측하여 사전 조치)
센서/사물인터넷	제조 데이터의 실시간 수집 및 모니터링 환경 제공 (예: 온도·진동 데이터 기반 설비 상태 관리)
디지털트윈	공정의 디지털 가상모델을 통한 시뮬레이션 및 실시간 제어 (예: 공정 결함 예측 및 즉시 조정)
제조 데이터	공정·품질 데이터 분석으로 주요 문제 및 원인 규명 (예: 과거 불량 데이터 분석)
로봇틱스	위험하거나 반복적인 공정 자동화로 품질·안전성 강화 (예: 로봇 용접을 통한 품질·안전 개선)

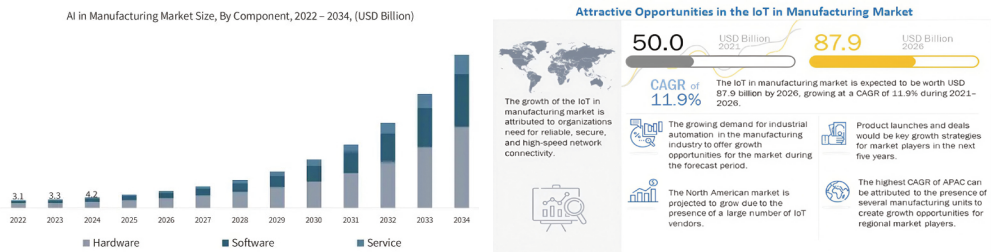


- 앞서 설명한 핵심 기술들을 효과적으로 융합·활용한다면 뿌리산업의 ‘어렵고(Difficult), 위험하고(Dangerous), 더러운(Dirty)’ 소위 3D 공정을 ‘지능적이고 효율적인’ 스마트 공정으로 혁신할 수 있다. 예를 들어 AI와 IoT 기술로 설비 상태를 실시간 진단하고 이상 징후를 예측하고, 디지털트윈과 LLM을 활용해 생산 계획 및 공정을 자동으로 최적화하며, 로봇과 AI 비전 기술로 미세한 불량까지 신속·정확하게 검출하는 것이 가능해진다. 이를 통해 과거 소수 숙련공의 경험과 직관에 의존했던 공정 운영 방식에서 벗어나 데이터와 알고리즘에 기반한 체계적인 공정 관리를 통해 품질 안전성과 생산성을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

## 2. 국내외 시장 동향

- 전 세계 제조업에서는 지난 수년간 제조 및 인더스트리 4.0 흐름에 따라 AI와 디지털 기술 도입이 빠르게 확산되고 있다.

**그림 1**  
전 세계 제조 AI와  
IoT 시장 규모  
출처: Global  
Market  
Insights  
(2025.01.)



## 해외 시장 동향

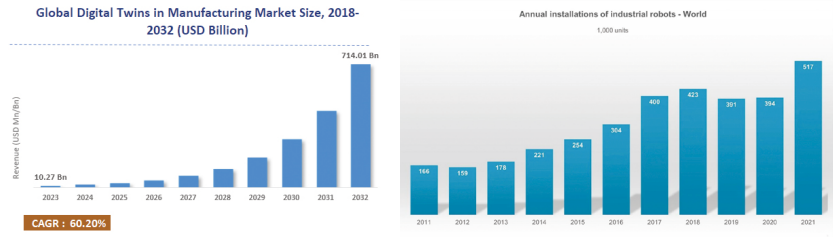
- 시장조사 기관들에 따르면 제조 분야 AI 시장은 2024년 약 42억 달러 규모에서 연평균 30% 이상 빠르게 성장하여 향후 10년 내 수백억 달러 규모의 시장을 형성하리라 예측된다(일부 기관은 2027년까지 163억 달러 규모, 연평균 47% 성장을 전망). 실제로 제조 기업의 93%가 AI를 제조 혁신의 핵심 동력으로 평가하고 있다.
- 산업용 IoT 시장 역시 빠르게 성장하고 있다. 공장 설비와 센서를 연결하는 산업용 IoT 시장 규모는 2021년 약 500억 달러에서 2026년 약 880억 달러로 연평균 8~11%의 꾸준한 성장세를 보일 전망이다. 제조 기업의 IoT 도입률은 이미 60%를 넘어섰으며, 응답 기업의 86%가 향후 IoT 활용을 더욱 확대할 계획이라고 밝혔다.



## 그림 2

### 전세계 디지털트윈 및 산업용 로봇 시장 규모

출처: Zion Market Research,  
International Federation of  
Robotics (2022.06.)



- 디지털트윈 시장의 성장세는 더욱 가파르다. 시장 규모는 2023년 약 101억 달러에서 2032년 714억 달러를 넘어서면서 연평균 60% 이상의 폭발적인 성장세가 예상된다. 제조업의 디지털트윈 도입률 역시 2022년 약 19% 수준에서 2024년까지 두 배 이상 증가할 것으로 전망된다.
- 한편 산업용 로봇의 전 세계 연간 설치 대수는 2021년 기준 전년 대비 31% 증가한 517,385대로, 역대 최대치를 경신했다. 특히 한국은 2023년 기준 로봇 밀도(직원 1만 명당 로봇 대수) 1,012대로 세계 1위를 기록하고 있다. 최근에는 협동로봇(Cobot), 자율이동로봇(AMR) 등 새로운 유형의 로봇 도입이 중소 제조기업을 중심으로 빠르게 확산되고 있다.

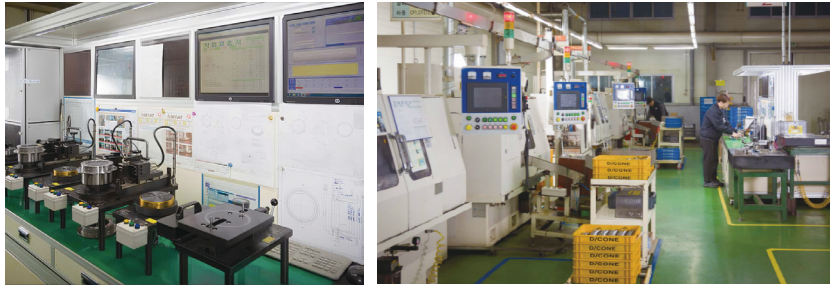
## 국내 시장 동향

- 국내에서는 정부 주도로 2014년부터 스마트공장 보급 사업이 추진되어 2022년까지 약 3만 곳의 중소 제조 기업에 스마트공장 구축을 지원했다. 이는 당초 2025년 목표를 조기 달성한 성과로, 전체 중소 제조 기업의 약 50%에 해당한다.
- 뿌리산업 분야에서도 중소기업을 중심으로 스마트공장 구축이 활발하게 이루어져 공정 모니터링과 부분적인 자동화가 빠르게 확산되고 있다. 최근에는 기초 단계를 넘어 AI 분석 솔루션과 예지보전 시스템 등 고도화된 기술을 적용하여 자율제조(Autonomous Manufacturing) 수준으로 나아가려는 움직임이 나타나고 있다.

### 그림 3

#### 국내 중소기업 대성아이엔지 스마트 공장 구축 사례

출처: 인더스트리 뉴스 (2018.03.),  
대성아이엔지



- 일례로 현대기아자동차의 부품을 생산하는 뿌리기업 대성아이엔지는 정부 지원을 받아 데이터베이스 및 스마트 설비를 도입했다. 이를 통해 공정 데이터를 실시간으로 수집·분석하고 기존의 수기 기록 방식에서 벗어나 데이터 기반의 투명한 공정 관리 체계를 구축했으며, 결과적으로 불량률 감소와 생산성·품질 동시 향상이라는 성과를 거두었다.
- 요약하자면, 이제 제조 현장에서 AI, IoT, 로봇 등 스마트 기술의 도입은 더 이상 선택이 아닌 생존과 성장을 위한 필수가 되었다. 특히 코로나19 팬데믹 이후 가속화된 비대면·자동화 요구와 생산 유연성 및 회복탄력성 강화 필요성이 맞물리면서 관련 기술 시장은 더욱 빠르게 성장하고 있다. 또 데이터 처리 기술과 클라우드 인프라의 발전 덕분에 과거에는 도입 장벽이 높았던 첨단 기술을 이제는 중소기업들도 비교적 저렴한 비용으로 활용할 수 있게 된 것도 중요한 변화다. 향후 5년 내에 AI 기술의 확산은 뿌리산업을 포함한 제조업 전반의 경쟁 환경을 근본적으로 변화시킬 것으로 전망된다.

### 3. 국내 주요 기술 동향 및 활용 사례

- 국내 뿌리산업 전반에서 디지털 기술을 활용하여 공정 자동화, 품질 고도화, 설비 유지보수 최적화 등 다양한 방식으로 고부가가치를 창출하는 혁신 사례가 등장하고 있다. 특히 정부 지원이나 자체 투자를 통해 중소·중견 뿌리기업들이 규모는 작지만 의미 있는 성과를 거두는 사례들이 주목받고 있다. 이에 6대 뿌리산업의 분야별 대표적인 디지털 전환(DX) 및 인공지능(AI) 기술 활용 사례를 소개하고자 한다.

### 주조(Casting)

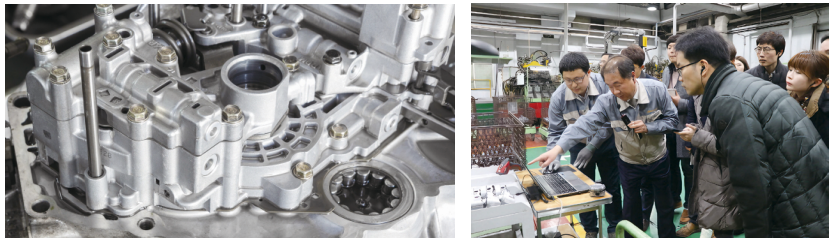
- 주조는 쇠물과 같은 용융 금속을 주형(틀)에 부어 원하는 형태의 제품을 만드는 공정이다. 이 공정에서는 온도 관리와 제품 결합 제어가 품질 확보의 핵심이라 할 수 있다.

- 자동차 피스톤 전문 제조 기업인 동양피스톤은 스마트팩토리 시스템을 도입하여 주조 공정 자동화와 데이터 기반의 체계적인 공정 관리를 추진했다. 그 결과, 시스템 도입 1년 만에 생산성은 10% 향상되었고 불량률은 26% 감소했으며, 자동화율은 80%에서 87%까지 증가했다. 이는 매출 3.6%와 영업이익은 14% 상승으로 이어져 숙련 기술 의존도가 높은 주조 공정에서도 데이터 기반 자동화가 품질 향상과 원가 절감에 기여할 수 있음을 입증했다.
- 다이캐스팅 공정은 복잡한 금형에 용탕을 고압으로 주입하는 방식으로, 평균 5~10%에 달하는 높은 불량률이 고질적인 문제였다. 한국생산기술연구원(KITECH)은 이 문제를 해결하기 위해 딥러닝 기반의 품질 판정 플랫폼을 개발했다. 양품(정상 제품) 데이터 중심으로 학습하는 비대칭 딥러닝 모델과 제품 식별번호 기반의 데이터 추적 체계를 구축하여 불량 발생 여부를 높은 정확도로 판별하는 AI 모델을 구현했다. 현재 국내 주조업체 3곳에서 시범 운영 중이며, 상용화될 경우 만성적인 불량률 개선과 공정 최적화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

#### 그림 4

주조 지능화 사례

출처: 뉴시스 (2017.03.) 인  
더스트리 뉴스(utoimage)  
(2020.07.14.)



## 금형(Molding)

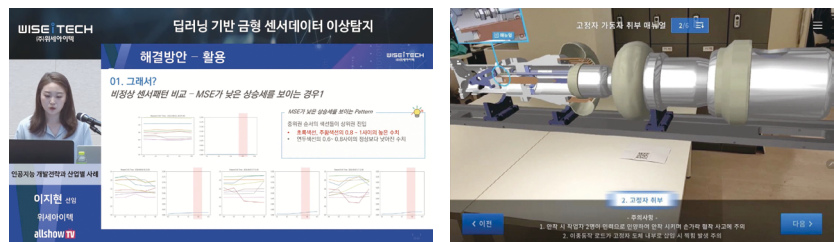
- 금형은 특정 형상의 제품을 대량 생산하기 위한 ‘틀’을 제작하는 기술로, 사출성형, 프레스가공 등 다양한 제조 공정의 기반이 된다. 최근 국내 전자·자동차 부품 관련 기업들은 금형 기술에 디지털 전환(DX)과 인공지능(AI)을 적극적으로 도입하고 있다.
- 한국전자기술연구원(KETI)은 2024년 산업통상자원부 지원으로 ‘금형 기반 DX 협력 컨소시엄’을 출범했다. 판교와 시흥에 AI기술지원센터를 설립하고, 공정 빅데이터 서버 및 금형 지능형 제어 시스템, 자율 생산 분석 플랫폼 등을 구축하여 실시간 품질 관리와 공정 최적화를 지원하고 있다. 특히 중소기업이 쉽게 활용할 수 있도록 플랫폼을 최적화하여 금형 기술의 초정밀·고속화를 돕고, 저가 경쟁국과 기술 격차를 벌리는 데 기여할 계획이다.

- 한국금형기술센터는 금형 해석 소프트웨어, 3D 프린터 등 디지털 도구를 활용하여 디지털 전환 기술을 지원하고 있다. 또한 한국금형산업진흥회와 AI 전문 기업 위세아이텍이 공동 개발한 금형 빅데이터 시스템은 딥러닝 기반의 설계 도면 자동 검색 기능을 통해 유사 도면 검색과 설계 시간을 획기적으로 단축했다.
- 한편 산업용 확장현실(XR) 솔루션 기업인 버넥트는 금형 제작 및 관리 현장에 XR 기술을 적용하여 원격 작업 지시, 작업자 모의 훈련, 안전사고 예방 등 현장 문제 해결을 위한 솔루션을 제공하고 있다. 이처럼 국내 금형 산업은 디지털 기술을 적극 활용하여 제조 효율성과 품질을 높이고 글로벌 경쟁력을 강화하고 있다.

## 그림 5

딥러닝(左)과 XR 기술(右)을 적용한  
금형 지능화 사례

출처: (주)위세아이텍 유튜브 채널 (2019.10.) 캐드앤그래픽스 (2023.12.)



## 소성가공(Plastic Forming)

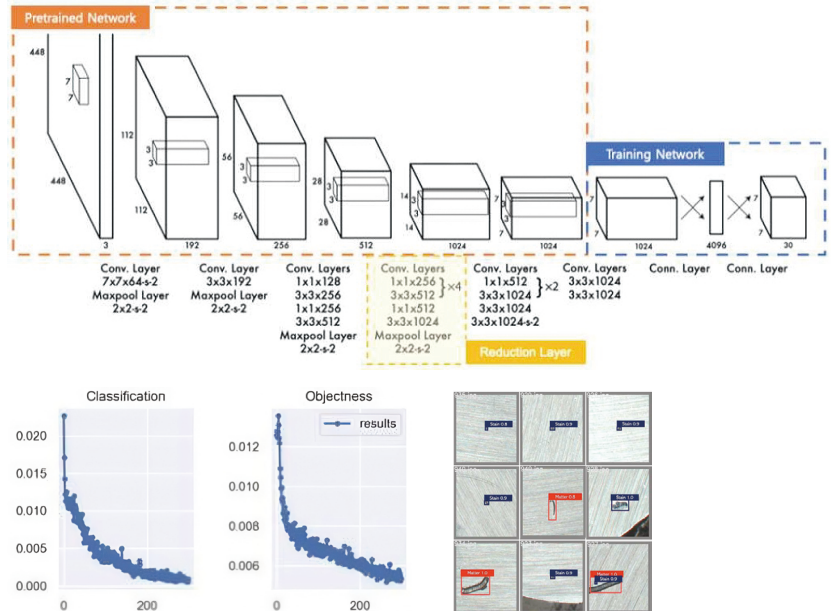
- 소성가공은 금속 재료에 강한 힘(압력)을 가해 원하는 형태로 변형시키는 기술로, 단조, 압연, 프레스 가공, 판금 등이 여기에 속한다. 이 분야에서는 설비의 상태를 정밀하게 관리하고 최종 제품의 품질을 일정하게 유지하는 것이 관건이다.
- 자동차 부품 기업 프론텍은 압조력(힘을 가하여 누르는 힘) 데이터를 AI로 실시간 분석하는 시스템을 도입했다. 이를 통해 설비의 미세한 이상 징후를 사전에 감지하여 설비 파손을 예방하고 공정 중 발생할 수 있는 불량률을 효과적으로 낮췄다.
- 씨에이이테크놀러지는 AI 기반 광학 검사 시스템(HawK·AI)을 개발하여 제품 외관의 미세한 결함까지 실시간으로 검사함으로써 품질 관리 수준을 크게 향상시켰다.
- 압연 전문 기업인 한국클래드텍은 과거 숙련 작업자의 경험에 의존했던 공정을 AI 솔루션을 통해 데이터 기반의 표준화된 공정으로 전환했다. 결과적으로 생산성을 높이고 불량 발생을 줄이는 성과를 거두었다.

- 이러한 사례들은 소성가공 분야에서 AI와 데이터 기술이 설비 가동률 향상과 품질 안정화에 핵심적인 역할을 할 수 있음을 보여준다.

## 그림 6

소성가공 분야 설비 예지보전 AI 적용 사례

출처: *Journal of KIIT*  
(2022.02.)



## 용접·접합(Welding & Joining)

- 용접 및 접합 공정은 작업자의 숙련도에 따라 품질 편차가 발생하기 쉽고, 고온이나 유해물질 발생 등으로 안전 위험이 상존하는 분야다. 최근에는 머신 비전 및 딥러닝 기반의 AI 기술이 육안 검사를 대체하거나 보완하면서 품질과 생산성을 동시에 높이는 추세다.
- 자동차 차체 부품 기업 화신은 SK텔레콤과 협력하여 음향 방출(AE) 센서와 머신 비전 기술을 결합한 AI 용접 검사 솔루션을 개발했다. 이를 통해 용접 상태를 정밀하게 분석하여 자동차 부품의 품질 안정성을 크게 향상시켰다.
- 에이플(Aple)은 AI 기반 품질 관리 시스템을 도입하여 용접 과정에서 발생하는 다양한 결함을 실시간으로 판독하고 분류함으로써 검사 공정의 효율성을 획기적으로 개선했다.
- 지스(GIS)는 수소연료전지 부품 생산 공정에 첨단 용접 기술과 디지털 전환을 동시에 적용하여 생산성을 극대화하는 성과를 달성했다.

- 대우조선해양(현 한화오션)은 디지털 방사선 투과 검사(Digital RT) 로봇과 3D 모델링 기술을 활용하여 선박이나 해양 구조물의 용접부를 실시간으로 검사한다. 이를 통해 검사 시간을 단축하고 작업자의 방사선 노출 위험을 크게 줄였다.
- 이상의 사례들은 AI 기술이 숙련된 용접공의 작업을 보조하거나 일부 대체하여 용접 품질의 일관성을 확보하고 전반적인 생산성 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

## 그림 7

용접 분야의 용접 검사 솔루션

개발 사례

출처: SK텔레콤 뉴스룸

(2022.07.)



## 표면처리(Surface Treatment)

- 표면처리는 제품 표면에 도금이나 도장 등의 처리를 하여 내식성, 내마모성 등 특정 기능을 부여하거나 외관을 보호하는 공정이다. 이 공정에서는 도금액 농도, 온도, 시간 등 공정 조건을 정밀하게 관리하고 표면 결함을 효과적으로 제어하는 것이 핵심이다.
- 제일연마공업은 연마 공정에 AI 기반 실시간 모니터링 시스템을 도입하여 작업자의 이상 행동이나 설비의 비정상 상태를 조기에 감지함으로써 안전사고를 예방하고 생산성을 높였다.
- 포스코는 용융아연도금(CGL) 공정에 AI 기술을 적용하여 도금 부착량을 실시간으로 예측하고 제어한다. 이를 통해 도금량 편차를 기존 대비 30% 이상 줄여 품질 균일성을 확보하고 아연 사용량을 최적화했다.
- 트윈(Twim)은 자체 개발한 AI 비전 검사 시스템(MOAI)을 통해 도금 부품 표면의 미세한 긁힘, 얼룩, 변색 등 다양한 결함을 자동으로 검출하여 검사 정확도를 높이고 불량률을 크게 낮췄다.
- 한국프로테크는 제조실행시스템(MES)을 구축하여 생산 데이터를 실시간으로 수집하고 분석하며, 이를 기반으로 공정을 제어하여 생산성을 64% 향상시키고



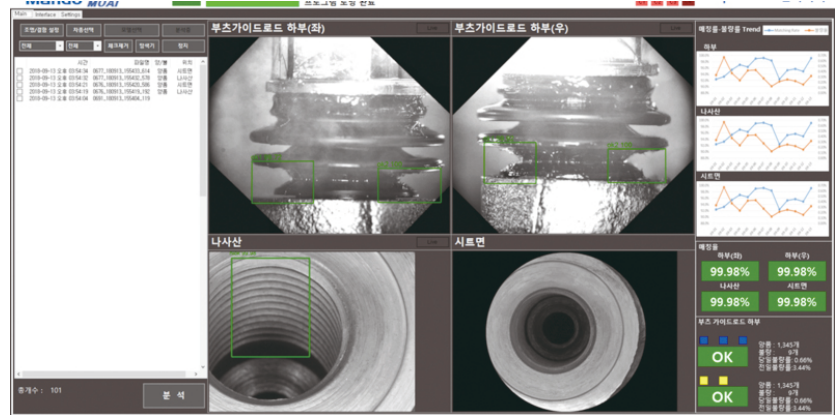
불량률을 0.97%로 낮추는 성과를 거두었다.

- 캠프는 친환경 코팅 기술과 더불어 AI 기반의 아연 도금 공정 자동화를 추진하여 공정 효율성을 높였다. 나아가 축적된 데이터를 기반으로 고객 맞춤형 도금 솔루션을 제공하는 새로운 비즈니스 모델을 구축하고 있다.

## 그림 8

표면처리 분야에서 (주)트윈의 AI 기반 표면처리 비전 검사 솔루션(MOAI)의 사례

출처: 트윈, 헬로T (2021.07.)



## 열처리(Heat Treatment)

- 열처리는 금속 재료에 특정 온도로 열을 가하고 냉각 속도를 조절하여 경도, 강도, 인성 등 원하는 기계적 성질을 얻는 공정이다. 따라서 정확한 열처리 조건(온도, 시간, 분위기 등) 관리와 결과 품질 검증이 매우 중요하다.
- 대양볼트는 빅데이터 기반의 고주파 열처리 AI 기술과 협동로봇을 도입하여 최적의 공정 파라미터를 자동으로 설정하고 관리한다. 이를 통해 공정 효율성과 작업 안전성을 높였으며, 연간 약 1억 7천만 원의 비용 절감 효과를 기대하고 있다.
- AI 스타트업 빅아이는 미광금속의 열처리 설비에 머신러닝 기반 상태 진단 및 예측 시스템을 적용했다. 이를 통해 설비 고장으로 인한 생산 차질이나 제품 불량률을 사전에 방지하여 연간 약 4,600만 원의 손실을 예방하고 생산성을 5% 이상 향상시켰다.
- 대성종합열처리는 AI 및 빅데이터 기반의 스마트팩토리 시스템을 구축하여 전체 공정을 최적화했다. 그 결과, 생산성은 105% 이상 증가했으며, 불량률은 28%, 고객 클레임은 45.3% 감소하는 등 괄목할 만한 성과를 달성했다.

- 이러한 사례들은 열처리 분야에서 AI와 데이터 기술이 공정 최적화, 품질 향상, 비용 절감에 크게 기여하고 있음을 명확히 보여준다.

그림 9

열처리 분야  
AI 적용 사례  
출처: 뉴시스  
(2023.03.)



- 위에 제시된 6대 뿌리산업 분야의 사례들을 종합해 보면 데이터 수집 → AI 분석 → 자동 피드백(공정 제어)으로 이어지는 지능화 사이클이 각 분야에서 공통적으로 구축되고 있음을 확인할 수 있다. 주조(동양피스톤, 생기원), 금형(KETI, 버넥트), 소성가공(프론텍, 한국클래드텍), 용접(SK텔레콤·화신, 에이플), 표면처리(포스코, 트림), 열처리(대양볼트, 대성종합열처리) 등 다양한 분야에서 AI와 데이터 기반 자동화 솔루션 도입했다. 이를 통해 실제로 생산성 향상, 불량률 감소, 원가 절감, 안전성 확보 등 구체적이고 측정 가능한 성과가 나타나고 있다.
- 특히 중소기업들도 정부 지원 사업이나 상용화된 솔루션을 적극 활용하여 성공적으로 품질과 생산성을 개선하는 사례가 늘어나면서 디지털 전환의 투자 대비 효과에 대한 업계의 신뢰도 점차 높아지고 있다. 물론 일부 기업에서는 여전히 초기 데이터 부족, 전문 인력 확보의 어려움, 도입 비용 부담 등의 문제가 존재한다. 하지만 성공 사례 확산과 함께 저비용 고효율 솔루션들이 계속해서 보급됨에 따라 이러한 진입 장벽은 점차 낮아질 것으로 예상된다.
- 앞으로 더 많은 국내 뿌리기업들이 이러한 선진 사례를 참고하여 자사의 공정 특성과 당면 과제에 적합한 'AI+X(AI 융합)' 도입을 확대해 나갈 것으로 기대되며, 이는 한국 제조업의 경쟁력 강화에 중요한 기반이 될 것이다.

#### 4. AI+X 기반 고부가가치화 성과

- 뿌리산업에서 인공지능(AI)을 포함한 디지털 및 지능화 기술(AI+X)의 도입은 단순한 공정 개선을 넘어 측정 가능한 고부가가치 성과로 이어지고 있다. 이러한 성과는 생산성, 설비 효율, 비용 그리고 사업 확장성 등 다양한 지표를 통해 확인할 수 있다.



## 생산성 향상 및 불량률 감소

- AI+X 도입의 가장 직접적이고 가시적인 성과는 생산성 향상과 불량률 감소다. 앞서 살펴본 국내 사례들처럼 스마트공장을 도입한 기업들은 공통적으로 높은 수준의 생산성 증가와 품질 개선 효과를 경험했다.
- 중소벤처기업부의 조사 결과에 따르면, 스마트공장 구축 기업들은 평균적으로 생산성이 29.4% 증가하고, 불량률은 42.8% 감소하는 성과를 거두었다. 이는 곧 제품의 품질 향상으로 이어져 브랜드 신뢰도를 높이고, 고객 클레임 처리 비용을 절감하여 수익성 개선에 직접적으로 기여한다. 부가적으로 생산성 향상과 품질 안정화는 매출 증대(평균 6.4% ↑)와 고용 창출(기업당 평균 1.5명 ↑)로 이어지며, 산업재해는 4.9% 감소하여 보다 안전한 작업환경이 조성되는 등 긍정적인 파급 효과를 낳고 있다.

## 설비 가동률 개선

- 제조 현장에서 설비의 예기치 않은 고장은 생산 차질과 납기 지연의 주요 원인이다. AI 기반의 예지보전(Predictive Maintenance, PdM) 시스템 도입은 이러한 문제를 해결하는 데 핵심적인 역할을 한다.
- 글로벌 컨설팅 기업 딜로이트(Deloitte)의 연구에 따르면, 예지보전 시스템을 도입할 경우 설비의 갑작스러운 고장은 최대 70%까지 예방할 수 있으며, 관련된 유지 보수 비용은 25%까지 절감이 가능하다고 보고한다.
- 또한 센서 데이터와 AI 분석을 통해 설비의 이상 징후를 사전에 감지하고 조치함으로써 설비종합효율(OEE: Overall Equipment Effectiveness)을 극대화하고 가동 중단 시간(downtime)을 최소화할 수 있다. 이는 설비 자산의 수명을 연장할 뿐만 아니라 생산 계획의 안정성과 납기 준수율을 높여 기업의 시장 경쟁력을 강화한다. 특히 소품종 대량생산 방식이 많은 뿌리산업 특성상 설비 가동 중단이 전체 생산 라인에 미치는 영향이 크므로 예지보전 도입의 경제적 효과는 더욱 중요하다.

## 원가 절감

- 스마트화와 지능화 기술은 다양한 경로를 통해 제조 원가를 절감하는 효과를 가져온다. 직접적으로 불량률 감소는 불필요한 원자재 낭비를 줄이며, AI 기반 공정 최적화는 에너지 사용량을 최적화하여 에너지 비용을 절감한다. 또한 자동화와 공정 효율화를 통해 투입되는 인력 대비 생산성을 높여 인건비 부담을 완화한다. 중소벤처기업부 조사에서도 스마트공장 도입 기업의 평균 원가 절감률은 15.9%로 나타났다.
- 간접적으로 AI 기반의 수요 예측 및 생산 스케줄링 최적화는 과잉 생산과 재고 보유 비용을 최소화하는 데 기여한다. 실제 사례로 포스코는 AI를 활용해 도금량 편차를 줄여 아연 사용량을 최적화했고, KG스틸은 AI 기반 열처리 예측 제어를 통해 LNG 사용 비용을 절감했다. 물류 자동화 솔루션 기업 웰스테크는 AI 생산 스케줄링 시스템을 통해 완제품 재고를 30% 감축하고 납기 준수율을 90% 이상으로 끌어올렸다.

### 표 2

AI+X 적용을 통한 뿌리산업 고부가가치 성과 요약

구분	주요 성과 및 효과	대표적 성과 수치
불량률 감소	<ul style="list-style-type: none"> <li>생산 품질 향상</li> <li>브랜드 신뢰도 증가</li> <li>클레임 비용 절감</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>불량률 평균 42.8% ↓</li> <li>산업재해 4.9% ↓</li> </ul>
설비 가동률 개선	<ul style="list-style-type: none"> <li>설비 가동률(OEE) 향상</li> <li>다운타임 감소</li> <li>유지 보수 비용 절감</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>설비 고장 최대 70% ↓</li> <li>유지 보수 비용 25% ↓</li> </ul>
원가 절감	<ul style="list-style-type: none"> <li>불량 감소로 인한 원자재 절약</li> <li>에너지 비용 절감</li> <li>인력 효율화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>원가 평균 15.9% ↓</li> <li>재고 30% ↓</li> </ul>
고부가 사업 확장	<ul style="list-style-type: none"> <li>생산성 증가</li> <li>고부가가치 제품 확대</li> <li>사업 영역 확장 및 부가가치 서비스 창출</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>생산성 평균 29.4% ↑</li> <li>매출 6.4% ↑</li> <li>고용 1.5명 ↑</li> </ul>

## 고부가가치 사업 영역 확장

- AI+X 도입을 통해 확보된 생산성 향상과 기술력은 기업이 더 높은 부가가치를 창출하는 사업 영역으로 확장할 수 있는 기반을 제공한다.
- 생산 효율성 증가는 기업의 수익성 개선(임금과 이익 증가)으로 이어질 뿐 아니라 확보된 역량을 바탕으로 고정밀 부품 생산, 맞춤형 소량 생산 대응 등 기술 집약적인

고부가가치 시장으로 진출할 수 있게 한다.

- 또한 축적된 공정 데이터와 AI 분석 역량을 활용하여 단순 제품 생산을 넘어 품질 보증 서비스, 공정 최적화 컨설팅, 데이터 기반 솔루션 제공 등 새로운 형태의 부가가치를 창출할 수 있다. 이는 뿌리기업이 단순 하청 생산 구조에서 벗어나 ‘솔루션 제공자(Solution Provider)’로 변모하는 기회를 제공하며, 산업 전체의 부가가치율을 높이고 산업 구조를 고도화하는 데 기여한다.

### 산업적 파급 효과

- 뿌리산업의 AI+X 기반 혁신은 해당 기업의 성장을 넘어 전후방 산업 및 국가 경제 전반에 긍정적인 파급 효과를 미친다. 결론적으로 AI와 디지털 전환(DX)을 기반으로 한 뿌리산업의 혁신은 품질 향상, 생산성 증대, 원가 절감이라는 다차원적인 효과를 동시에 가져오는 핵심 동력이다. 앞으로 제조 데이터의 축적과 AI 기술의 발전이 가속화될수록 이러한 디지털 전환에 선제적으로 투자하고 역량을 내재화하는 기업이 미래 시장을 주도하게 될 것이다. 따라서 뿌리기업들이 변화를 인식하고 스마트 제조 혁신에 더욱 적극적으로 참여하여 미래 경쟁력을 확보해야 하는 중요한 시점이다.

## 5. 정책 및 제도 동향

- 정부는 뿌리산업의 디지털 전환(DX) 가속화와 근본적인 경쟁력 강화를 위해 다각적인 정책 지원을 추진하고 있다. 주요 정책 방향은 스마트공장 보급 확산, 디지털 전문 인력의 양성, 제조 데이터 인프라의 구축과 활용 지원, 핵심 기술 연구 개발(R&D) 투자, 그리고 세제 혜택 및 자금 지원 등이다.

표 3

뿌리산업 디지털 전환 관련  
주요 정책 및 제도

분야	주요 정책 및 제도 내용
스마트공장 보급 사업	• IoT, MES 등 제조 시스템 지원(2022년 3만 개 조기 달성) • AI 기반 지능형 공장 고도화(인공지능, 디지털트윈, 탄소중립형 공장 전환)
디지털 전문 인력 양성	• 오송·대구 등 5개 특화단지 중심 AI·스마트 제조 인력 양성(재직자)
제조 데이터 인프라 (KAMP)	• 제조 AI 데이터 세트(50종 이상)·분석 알고리즘 제공 • 블록체인 기반 데이터 거래소 구축
기술 R&D 지원·표준화	• AI 기반 뿌리 공정 기술 개발 및 실증 지원 • 제조 AI 윤리 기준 수립·국제 표준화 적극 참여
세제 및 자금 지원	• 스마트 제조 설비 투자 시 우대금리 지원 • 지자체 연계 지역 특화 스마트공장 지원

- 정부는 스마트공장 보급·확산과 중소·중견 뿌리기업의 제조 혁신 기반 마련을 위해 IoT 센서, 생산 관리 시스템(MES) 등 기초적인 제조 실행 시스템 구축 비용을 지원하고, 당초 목표했던 2022년까지 3만 개 보급을 조기에 달성했다. 현재는 이러한 기반 위에 AI를 활용한 데이터 분석, 디지털트윈 기반 시뮬레이션, 탄소 배출 저감을 위한 공정 최적화, 나아가 자율 생산 시스템 구축 등 스마트공장의 고도화를 중점적으로 지원하고 있다.
- 디지털 전문 인력 양성을 위해 산업통상자원부는 2021년부터 오송(바이오), 대구(기계·로봇) 등 5개 뿌리산업 특화단지를 중심으로 현장에서 즉시 활용 가능한 AI·스마트 제조 분야 전문 인력 양성을 위한 재직자 대상 교육 프로그램을 운영하고 있다.
- 중소기업이 AI 기술을 도입하는 데 가장 큰 장벽 중 하나인 데이터 확보 문제를 해결하기 위해 정부는 제조 데이터 플랫폼(KAMP: Korea AI Manufacturing Platform)을 구축했다. 이를 통해 50종 이상의 표준화된 제조 AI 학습용 데이터 세트와 분석 알고리즘을 제공하고 있다. 최근에는 뿌리산업 특화 데이터를 추가로 공개하고 블록체인 기술을 활용한 안전한 데이터 거래소 기능도 마련했다.
- 기술 R&D 지원과 표준화를 위해 산업통상자원부와 과학기술정보통신부가 협력하여 AI 기반의 차세대 뿌리 공정 기술 개발 및 현장 실증을 위한 R&D 과제를 지원하고 있다. 또한 제조 현장에서 AI를 책임감 있게 활용하기 위한 윤리 기준을 마련하고, 관련 기술의 국제 표준화 활동에도 적극적으로 참여하여 국내 기술의 글로벌 확산을 도모하고 있다.
- 정부는 중소기업이 AI 솔루션을 도입하는 데 따르는 비용 부담을 완화하기 위해 AI 바우처 사업(과학기술정보통신부) 등을 통해 구매 비용을 지원하고 있다. 또한 스마트 제조 관련 설비 투자 시에는 정책 자금을 통해 우대금리를 제공하며, 각 지방자치단체와 협력하여 지역 산업 특성을 반영한 스마트공장 구축 사업도 지원하고 있다.

## 6. 시사점 및 향후 전망

- 인공지능(AI)과 뿌리산업의 융합은 전통적인 제조업의 패러다임을 바꾸고 산업 전반에 걸쳐 새로운 가능성을 열어주고 있다. 앞서 살펴본 성공 사례들처럼 생산성 향상, 불량률 감소, 원가 절감 등 가시적인 성과가 나타나고 있으며, 이는 다음과 같은 중요한 시사점과 향후 전망을 제시한다.

## 데이터 중심 제조 문화의 정착 필요

- AI와 디지털 기술의 잠재력을 최대한 발휘하기 위해서는 기술 도입을 넘어 데이터를 기반으로 의사결정을 하는 조직 문화 정착이 필수적이다. 과거 숙련공의 경험과 직관에 의존하던 방식에서 벗어나 제조 현장에서 발생하는 데이터를 체계적으로 축적·분석하고 이를 공정 개선과 경영 판단에 활용해야 한다. 이를 위해서는 경영진부터 실무자까지 데이터와 AI 시스템의 가치를 이해하고 신뢰하면서 협업하는 문화를 조성해야 한다. 또한 이를 뒷받침할 데이터 분석 전문 인력 확보와 전담 조직 운영도 중요하다. 향후 디지털 전환(DX)에 성공적으로 적응한 기업과 그렇지 못한 기업 간의 경쟁력 격차는 더욱 벌어질 것이다.

## 개방형 협업 생태계의 적극적 활용

- 모든 AI 솔루션과 디지털 기술을 개별 기업, 특히 중소기업이 단독으로 개발하고 내재화하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 정부가 구축한 제조 데이터 플랫폼(KAMP), 대기업이 중소 협력사를 위해 운영하는 상생·협력 프로그램, 대학·연구소가 제공하는 기술 테스트베드 및 실증 사업 등을 적극적으로 활용하여 기술 도입의 시행착오를 줄이고 효율성을 높여야 한다. 또한 관련 산업의 협회, 표준화 단체, 오픈소스 커뮤니티 활동에 참여하여 최신 기술 정보를 교류하고 공동의 문제를 해결해 나가는 개방형 혁신(Open Innovation) 모델이 AI 시대의 경쟁력 확보에 필수적이다.

## 최신 인공지능 기술의 선제적 수용 준비

- 제조 현장의 AI는 현재의 데이터 분석과 예측 수준을 넘어 스스로 상황을 판단하고 공정을 자율적으로 제어하는 형태로 빠르게 진화할 것이다. 최근 주목받는 대규모 언어 모델(LLM)은 자연어 기반의 작업자 질의응답, 공정 매뉴얼 자동 생성, 신입사원 교육 등 다양한 영역에서 활용될 잠재력이 크다. 또 공정 이상 발생 시 즉각적이고 정확한 해결 방안을 제시하는 전문가 시스템으로 발전할 수 있다. 더불어 여러 AI가 상호작용하면서 복잡한 문제를 해결하는 멀티 에이전트 시스템(MAS)은 미래의 자율형 스마트팩토리(Autonomous Smart Factory) 구축의 핵심 기술로서 실시간 협업을 통해 유연 생산과 고도의 맞춤형 생산을 가능하게 할 것이다. 다만 이러한 차세대 AI 시스템의 신뢰성 확보와 표준화는 앞으로 해결해야 할 중요한 과제다.

## 경제·사회적 영향에 대한 선제적 대비

- AI와 자동화 기술의 확산은 생산성 향상이라는 긍정적 효과 이면에 기존 일자리 감소와 직무 변화에 대한 우려를 동시에 안고 있다. 특히 숙련된 기술자의 암묵적 노하우에 대한 의존도가 높고 종사자의 고령화가 상당 부분 진행된 뿌리산업의 경우 기술 변화에 따른 세대 간 격차나 현장 갈등이 발생할 수 있다. 따라서 기존 근로자들이 새로운 기술 환경에 적응할 수 있도록 체계적인 직무 전환 교육을 제공해야 한다. 또 AI·로봇과 인간이 안전하고 효율적으로 협력할 수 있도록 업무 프로세스를

재설계하면서 협력적 작업환경을 구축하는 노력이 필수적이다. 한편으로는 열악했던 작업환경이 개선됨에 따라 산업재해가 감소하고 젊은 인력이 유입되는 긍정적인 효과도 기대할 수 있다. 정부와 기업은 기술 도입과 병행하여 근로자의 역량 강화 지원, 산업 안전 기준 정비 등 사회적 안전망 강화에도 힘써야 한다.

## ESG 경영 및 지속가능성과의 연계 강화

- AI와 IoT 기술을 활용한 제조 공정의 최적화는 기업의 경쟁력 강화뿐 아니라 탄소 중립 및 지속가능성 목표 달성에도 중요하게 기여할 수 있다. AI 기반의 에너지 사용량 예측 및 제어, 디지털트윈을 통한 공정 시뮬레이션 등은 생산 과정에서의 에너지 소비와 폐기물 발생을 최소화하여 환경적 부담을 줄이는 데 효과적이다. 유럽연합(EU)을 비롯한 글로벌 시장에서는 이미 디지털 전환(DX)과 친환경 전환(GX: Green Transformation)을 동시에 추구하는 ‘트윈 전환(Twin Transition)’이 강조되고 있는 만큼 국내 뿌리기업들도 ESG(환경·사회·지배구조) 경영 전략과 연계하여 디지털 전환을 추진하는 적극적인 자세가 필요하다.

## 종합적 향후 전망

- 향후 수년간은 AI와 디지털 기술이 뿌리산업 현장에 본격적으로 뿌리내리고 확산되는 중요한 시기가 될 것으로 전망된다. 현재 나타나고 있는 초기 성공 사례들이 점차 업계 전반으로 확산되면서 기업 경영자들의 인식도 단순히 ‘기술을 도입해야 한다’라는 수준을 넘어 ‘어떻게 전략적으로 활용하여 새로운 가치를 창출할 것인가’로 변화하고 있다. 나아가 축적된 제조 데이터를 활용한 데이터 판매나 구독형 디지털 서비스와 같은 새로운 비즈니스 모델이 등장할 가능성도 있다. 또한 설명 가능 AI(XAI), 연합학습(Federated Learning) 기반 LLM, 멀티 에이전트 시스템(MAS) 등 첨단 AI 기술의 지속적인 발전은 데이터 확보의 어려움, 보안 문제, 협력적 학습 환경 구축 등의 과제를 해결하면서도 기술의 현장 적용을 더욱 가속화할 것으로 기대된다.
- 결론적으로 AI와 디지털 혁신은 뿌리산업의 고부가가치화를 촉진하고 국가 제조업의 경쟁력을 한 단계 끌어올릴 수 있는 강력한 동력이다. 이러한 잠재력을 현실화하기 위해서는 정부의 지속적인 정책 지원과 규제 합리화, 대중소 기업 간 상생 협력 강화, 대학·연구소의 핵심 기술 개발과 실증 지원, 그리고 미래 수요에 맞는 전문 인력 양성이라는 산·학·연·관의 유기적인 협력이 필수적이다.
- 이러한 다각적인 노력이 지속된다면 향후 10년 안에 대한민국 뿌리산업은 전통적인 3D 산업 이미지를 벗고 글로벌 경쟁력을 갖춘 첨단 제조 산업으로 확고히 자리매김할 수 있을 것이다. 이를 위해 ‘뿌리산업=첨단산업’이라는 인식의 대전환을 목표로 정부, 기업, 연구계, 학계 모두가 지속적이고 세밀한 노력을 기울여야 할 것이다.

1. Dae-Cheol Kim, et al., "Detection of Foreign Object in Cutting Surfaces using Artificial Intelligence in Plastic Processing", *The Journal of Korean Institute of Information Technology* Vol. 20 No. 2, 2022.02.28. pp. 1-10.
2. "AI in Manufacturing Market Size & Share | Forecast Report 2034", Global Market Insights, 2024.04.
3. "AI in Manufacturing Market Size By Component, By Deployment Model, By Technology, By Application, By End Use, Growth Forecast 2025-2034", Global Market Insights, 2025.01.
4. "Double Digit Growth for Robot Sales in North America", International Federation of Robotics, 2022.06.07.: ifr.org
5. "Digital Twins in Manufacturing Industry Prospective", Zion Market Research.
6. "IoT Market worth \$650.5 billion by 2026, growing at a CAGR of 16.7%: Report by MarketsandMarkets™", GlobeNewswire, 2023.07.17.
7. 중소벤처기업부, "2022년까지 스마트 공장 3만개 구축...제조혁신 이끈다", 대한민국 정책브리핑, 2018.12.13.
8. "대중소 상생형 스마트공장 우수사례집 발간", 대한상공회의소 보도자료, 2022.12.04.
9. "(주)한국클래드텍 - 뿌리기업 자동화첨단화 지원사업", 국가뿌리산업진흥센터, 2018.12.03.
10. "뿌리기업의 '변신'...스마트 팩토리 '동양 피스톤'을 가다", 뉴시스, 2017.03.05.
11. 김진원, "본격 시작, 스마트팩토리 시대", 헤럴드경제, 2019.02.25.
12. 박규찬, "스마트 공장, 2025년까지 3만개 보급 계획 발표", 인더스트리 뉴스, 2017.06.05.
13. 김재호, "딥러닝으로 제조 품질 판정"...생기원, '다이캐스팅 스마트팩토리 플랫폼' 개발", AI타임스, 2020.07.13.
14. 문상현, "KETI, 뿌리산업에 AI 공정...금형 기반 DX 협력 컨소시엄 출범", 테크데일리, 2024.10.08.
15. 이진호, "인공지능(AI) 용접검사 솔루션을 개발 및 공급하는 스타트업 '에이플'", 모바일한경, 2024.11.15.
16. 최정훈, "대우조선해양, 전세계 최초 'AI 로봇' 기반 방사선 비파괴 검사 적용", 인더스트리 뉴스, 2020.11.26.
17. 백재현, "[부산 혁신의 현장⑨]대성종합열처리, 스마트팩토리 구축 3년만에 매출 80% 증가", 뉴시스, 2023.03.06.
18. 임근난, "[TECH REPORT-AI검사장비③] 자동차부품 M사의 AI검사 도입 사례", 헬로T, 2021.07.19.
19. 정수진, "[포커스] 부천국제금형콘퍼런스, 지능화를 통한 금형산업의 혁신 전략 짚다", 캐드앤그래픽스, 2023.12.04.
20. 김관모, "생기원, '딥러닝 기술 활용해 '다이캐스팅 스마트 팩토리 플랫폼' 개발 성공", 인더스트리 뉴스, 2020.07.14. utoimage 재인용.
21. 전시현, "스마트 팩토리 구축 성공한 사례 BEST 3", 인더스트리 뉴스, 2018.03.30.
22. "지난해 전세계 산업용 로봇 설치대수, 역대 최고치 갱신", 로봇신문, 2022.10.14. IFR 재인용.
23. "SKT, '인더스트리얼 AI' 사업 확대 나선다", SK텔레콤 뉴스룸, 2022.07.26. (화신 협력)
24. "포스코, 세계 최초 인공지능(AI) 도입한 스마트 공장 탄생", 포스코 뉴스룸, 2017.02.17.
25. "AI 비전검사기(T-MEGA)", 주식회사 트윈 웹사이트
26. "(위세아이텍) 딥러닝 기반 금형 센서데이터 이상탐지", (주)위세아이텍 유튜브, 2019.10.11.



## 송인협 화학공정 PD 소개

~2021년 민간 기업 공정 분야 연구 수행

2021년~ 한국화학연구원 공정기반기술연구센터장 | 2024.11.~ KEIT 입사



「이슈픽」을 처음 보는 연구자분들을 위해  
자기소개 부탁드립니다.

안녕하십니까? 화학공정 PD를 담당하고 있는 송인협입니다.  
저는 2004년에 화학공학 분야에서 박사 학위를 취득하고 이후  
박사 후 연구 생활까지 포함해서 17년간 민간 기업에서 공정  
분야의 연구를 해 왔습니다.  
2021년부터 한국화학연구원에서 공정기반기술연구센터  
센터장으로 재직하며 정부출연연구소의 연구를 습득했습니다.  
두 직장에서의 경험을 바탕으로 작년 11월부터  
한국산업기술기획평가원에서 화학공정 PD 업무를 수행하고  
있습니다.

올해 뿌리산업 분야에서  
가장 주목해야 할 이슈는 무엇인가요?

올해 화학산업 분야에서 가장 주목해야 할 이슈는 '산업의  
대전환'이라고 볼 수 있습니다. 다들 아시다시피 전 세계적인  
공급 과잉으로 인해 화학산업의 경영이 악화되고 있는  
상황입니다. 이를 타개하기 위해 기존의 범용 화학제품  
생산에서 벗어나 스페셜티(specialty) 제품으로 전환해야  
하는 중요한 시기라고 할 수 있습니다. 위기와 기회는 항상  
함께 온다고 하는데, 산업부에서 좋은 사업을 많이 만들어서  
화학산업에 조그마한 힘이라도 보탬 수 있도록 노력하겠습니다.

올해 신규 사업 및 과제 기획이나 선정 공고, 행사 등  
계획이 있을까요?

올해 상반기에는 화학산업의 발전을 위한 산업부의 민관  
공동 R&D 로드맵 도출을 지원할 계획입니다. 반도체, 이차전지,  
차세대 모빌리티 등 주력 산업과 연계한 화학 소재의  
고부가화, 화학산업의 탄소중립을 위한 핵심 기술 개발, 그리고  
글로벌 환경 규제에 대응할 수 있는 화학 소재 개발이라는  
3개 축을 중심으로 로드맵을 도출하여 화학산업의 체질 전환에  
방향타로 삼을 생각입니다. 하반기에는 이러한 로드맵을  
바탕으로 실제 사업을 만들 수 있는 비예타·예타 사업을  
기획하려고 합니다.

마지막으로 연구 수행자분들께 하고 싶은 말씀이 있다면?

중등과 중국의 추격이라는 외부 환경의 변화로 화학산업의  
전환기가 갑자기 도래했습니다. 어떤 방향의 연구를 수행해야  
할지 고민이 될 수밖에 없는 시기라고 생각합니다. 화학산업은  
우리나라가 제조업 강국으로 우뚝 서기 위해 근간이 되는  
산업이라고 생각합니다. 전방 산업의 고성능화·고기능성화  
흐름에 따라 화학 소재도 고성능화·고부가화의 필요성이  
대두되고 있으며, 친환경 소재 개발에 대한 필요도 점점  
강화되고 있습니다. 우리나라 화학산업 발전을 위해 화학 소재  
연구의 방향성을 잡아나가면서 좋은 결과를 창출해 내시면  
감사하겠습니다. 연구자분들의 어깨에 화학산업의 미래가 달려  
있습니다.

## 이병헌 뿌리산업 PD 소개

1998년~ 한국생산기술연구원 연구원 | 2005년~ 한국부품소재산업진흥원 선임연구원,  
2009.05.~ 한국산업기술기획평가원 연구위원 | 2019.08.~ 뿌리기술 PD



「이슈픽」을 처음 보는 연구자분들을 위해  
자기 소개 부탁드립니다.

저는 현재 산업통상자원부 뿌리기술 PD로 재직 중인 이병헌입니다. 연구 현장과 R&D 정책 현장을 모두 경험한 산업기술 정책 전문가로, 한국형 고속전철 개발, 「뿌리산업법」 개정을 통한 뿌리산업의 범위 확대, 뿌리산업 R&D 전략 수립 등 다양한 영역에서 활동해 왔습니다. 한국생산기술연구원, 부품소재산업진흥원, KEIT를 거쳐 뿌리기술 PD로서 6년째 근무하고 있으며, 특히 뿌리기술을 미래 전략 산업 기반기술로 고도화하는 기술 아이템 발굴 및 신규 사업 기획에 주력하고 있습니다.

올해 뿌리산업 분야에서  
가장 주목해야 할 이슈는 무엇인가요?

전 세계적으로 첨단제조 경쟁이 본격화되면서 뿌리기술은 기술 주권 확보를 위해 핵심 인프라로 주목받고 있습니다. 미국, EU, 일본 등은 제조 생산 기반기술인 뿌리기술을 '전략 기술'로 분류하고, AI 기반 지능형 공정, 탄소저감형 제조 기술, 고정밀 가공 기술 확보에 적극 투자하고 있습니다. 이에 따라 우리도 뿌리기술을 단순 생산 공정이 아닌 플랫폼 기술로 재정의하고, 지능화·친환경화·정밀화를 중심으로 기술 기획과 투자를 선도해 나가야 할 시점입니다. 글로벌 제조 주도권 경쟁 속에서 뿌리기술의 역할은 더욱 전략적으로 확대될 것입니다.

올해 신규 사업 및 과제 기획이나 선정 공고, 행사 등  
계획이 있을까요?

현재 2026년부터 본격적인 추진을 목표로 「뿌리산업 혁신공정장비 기술개발 사업」을 기획 중에 있습니다. 이 사업은 주조, 금형, 소성가공 등 뿌리공정 전반에 걸쳐 공정특화형 스마트 장비와 AI 기반 업그레이드 모듈을 개발하여 현장의 자동화와 디지털 전환을 촉진하고, 중소 뿌리기업이 현실적으로 도입 가능한 고도화 장비 기술을 확보하는 것을 목적으로 합니다. 본 사업을 통해 공정 효율 향상, 품질 편차 감소, 에너지 절감 등의 효과를 기대하고 있으며, 이를 활용하는 중소 뿌리기업의 생산성 향상과 현장 적용성 제고를 도모하고자 합니다.

마지막으로 연구 수행자분들께  
하고 싶은 말씀이 있으시다면?

올해는 2023년 예타를 통과한 「신산업 대응 차세대 공동·핵심 뿌리기술 개발 사업」의 신규지원이 처음 시작됩니다. 이 사업은 수요산업 연계성이 높은 공동·핵심 뿌리기술과 공정효율화 기술(소재 절감, 공정 단축, 에너지 대응 등)을 확보하는 것이 목적입니다. 8대 뿌리기술 분야를 대상으로 25개 과제를 지원할 예정이며, 연구개발계획서 접수는 5월 21일(수) 18시까지, 신규 평가는 6월, 협약 및 사업비 지급은 7월 예정입니다. 뿌리기술의 혁신이 대한민국 제조업의 방향을 바꿉니다. 그 변화는 여러분의 참여에서 시작됩니다. 이번 사업에 많은 관심과 적극적인 참여를 부탁드립니다.

# KEIT ISSUE PICK

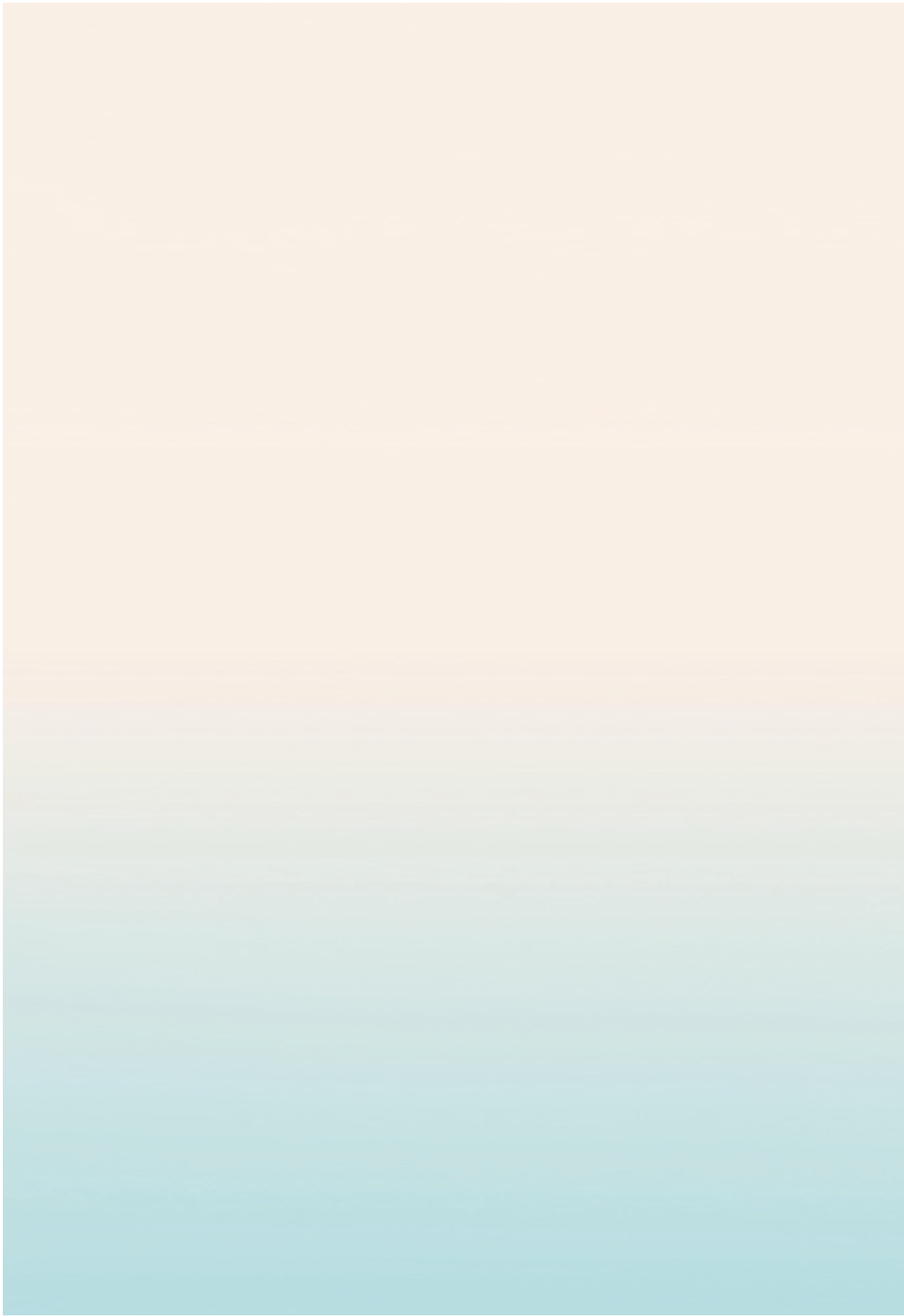
Vol. 2025 - 04

발행인	전윤중
발행일	2025년 04월 30일
발행처	한국산업기술기획평가원(KEIT)
주소	대구본원 (41069) 대구시 동구 첨단로 8길 32 대전본원 (35262) 대전시 서구 문정로 48길 48, 계룡빌딩 3층 서울사무소 (04513) 서울시 중구 세종대로 39, 상공회의소회관 4층
웹사이트	<a href="http://www.keit.re.kr">www.keit.re.kr</a>

## 비매품

이 책의 저작권은 한국산업기술기획평가원에 있습니다.  
무단전재와 복제를 금합니다.

기획	한국산업기술기획평가원 전략기획본부 산업전략실 (41069) 대구시 동구 첨단로8길 32 Tel. 053-718-8548
편집 · 제작	한국산업기술문화재단 방송본부 미디어제작팀 (03925) 서울시 마포구 월드컵북로 396, 누리꿈스퀘어 비즈니스타워 4F Tel. 070-5050-9141
인쇄	(주)디앤비크리에이티브 (04623) 서울시 중구 서애로5길 12-9, 한아빌딩 2층 Tel. 070-4446-7363 Web. <a href="http://www.boxnv.co.kr">www.boxnv.co.kr</a>



## 1 최신 과불화화합물(PFAS) 규제 동향 및 기술 개발 전략

송인협 화학공정 PD | 한국산업기술기획평가원(KEIT) 화학산업실

손은호 센터장 | 한국화학연구원 계면재료화학공정연구센터

과불화화합물(PFAS) 규제가 국제적으로 시작되면서 글로벌 산업계에 큰 파장을 일으키고 있으며, 대체 물질 개발과 함께 환경 내 잔류 PFAS의 제거, 분해, 자원 순환 공정 기술의 통합적 구축으로 대응 전략이 전개되고 있다. 불소계와 비불소계 맞춤형 대체 물질의 개발의 동향과 기술 동향에 대해 살펴보고자 한다.

# 과불화화합물 # PFAS #PFAS-free # 환경규제대응 # 불소계대체물질

## 2 전자·에너지용 고부가가치 고분자 소재 기술 동향

송인협 화학공정 PD | 한국산업기술기획평가원(KEIT) 화학산업실

김형준 교수 | 서강대학교 화공생명공학과

전자 소재의 통합도가 높아짐에 따라 뛰어난 특성의 고분자 소재가 필수적이다. 전자 및 에너지 산업의 혁신을 견인하는 고부가가치 고분자 소재를 중심으로 종류와 특징 및 응용 사례와 기술 발전 동향을 살펴 보면서 뿌리기술로서의 화학 산업이 어떻게 전자·에너지 혁신을 뒷받침하는지, 또 어떠한 전략이 필요한지 시사점을 제시하고자 한다.

# 고부가가치고분자소재 # 기술혁신 # 고기능고분자 # 뿌리기술 # 전자·에너지산업

## 3 사형주조 분야 유연생산 대응을 위한 핵심 기술 동향

이병현 뿌리기술 PD | 한국산업기술기획평가원(KEIT) 화학산업실

서지원 센터장 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

김청준 선임연구원 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

구수병 책임연구원 | 한국자동차연구원 스마트제조기술연구센터

모래를 이용하여 금속 부품을 제작하는 대표적인 사형주조는 비용 효율성과 다양한 형상 구현이 가능하여 여러 산업에서 널리 활용된다. 산업에서는 품질 편차와 생산성 저하를 해결하기 위해 샌드 바인더 제팅 기술이 주목받고 있으며, AI와 디지털트윈 기술과의 융합을 통해 고도화되는 기술의 동향을 살펴보고자 한다.

# 사형주조 # 샌드바인더제팅 # AI·디지털트윈융합 # 주조산업 # 유연생산

## 4 AI+X(뿌리산업): 지능화와 디지털 전환으로 여는 고부가가치 제조 혁신

이병현 뿌리기술 PD | 한국산업기술기획평가원(KEIT) 화학산업실

김효섭 수석 | 한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소

제조업의 근간인 뿌리산업(주조, 금형, 소성가공, 용접 접합, 표면처리, 열처리 등)

전반에 걸쳐 첨단 디지털 기술을 활용한 생산 공정의 지능화가 확대되고 있다. 제조 공정 스마트화 기술과 시장의 동향 및 디지털화, 지능화 기술 도입을 위한 지원의 필요성과 향후 전망을 살펴보고자 한다.

# 뿌리산업 # 지능화 # 디지털전환 # 제조공정스마트화 #제조혁신 # 고부가가치화

## + Science Fiction - 유닛\_7.log

전윤호 | SF 작가·과학스토리텔러

테마파크에서 거대 괴수 가르강튀아 X와 전투 공연을 하는 인간형 로봇 유닛 7은 디지털 트윈 시뮬레이션을 통해 최고의 공연을 마무리한다. 문이 닫히고 공연장 뒤 작업장에서 전신 상태 진단과 수리가 진행되는 가운데 박기수 원장의 다급한 무전이 들린다. 화재로 위험에 빠진 4명의 어린이를 구하기 위해 유닛 7이 내열성 부품과 소방 장비를 준비하여 긴급히 화재 현장으로 뛰어드는데...

# 유닛7 # 디지털트윈 # 거대AI모델 # PFAS # 뉴럴프로세서