

극한 환경 대응을 위한 첨단 소재 기술 및 지능형 공정 제어 시스템 (APCS) 융합 분석

임성주 박성욱(멘토)

대전대신고등학교(Daejeon Daeshin High.) A.C.T.(KE)

ABSTRACT: 극한 환경 엔지니어링은 초고온·고응력 조건에서도 안정성을 유지하기 위해 첨단 소재(CMC, Alloy 617 등)와 지능형 제어 기술(MPC, AI)을 융합하여 시스템 효율과 내구성을 극대화함으로써 청정에너지 항공우주 반도체 산업의 지속가능한 경쟁력을 강화하는 기술이다.

서론

1.1. 극한 환경 엔지니어링의 정의 및 전략적 중요성

극한 환경 엔지니어링(Extreme Environment Engineering)은 시스템이 초고온, 고압, 공격적인 화학 반응성, 또는 극심한 기계적 응력 변동과 같은 가혹한 조건 하에서도 본래의 기능과 내구성을 장기간 유지하도록 보장하는 기술 영역을 포괄한다. 이는 항공우주, 차세대 에너지 생산(예: 초고온가스로, 청정 수소), 그리고 정밀 첨단 제조(예: 반도체)와 같은 국가 핵심 산업의 근본적인 경쟁력을 결정짓는 핵심 요소이다.

에너지 및 운송 부문에서는 고출력/고효율화를 달성하기 위해 연소기나 터빈 같은 핵심 고온 구조부품의 내열 온도와 고온 내구성을 향상하는 것이 절대적으로 중요하며, 이는 곧 극한 소재 기술 혁신을 의미한다. 동시에 방위 및 군사 응용 분야에서도 미사일 노즐이나 추진 시스템에 사용되는 내열 소재는 재진입 온도와 고속 마찰을 견뎌야 하며, 첨단 세라믹과 복합 소재는 고속 발사체 충격으로부터 보호하는 도금에 활용된다. 이처럼 소재의 극한 성능 확보는 곧 시스템의 운용 한계를 확장하는 전략적 기반이다.

1.2. 고성능 시스템 설계의 핵심 동인

고성능 시스템 설계의 패러다임은 소재의 잠재적 성능 한계를 높이는 기술과 그 잠재력을 실제 운전 환경에서 안전하고 효율적으로 실현하게 하는 제어 기술의 이원적 발전으로 특징지어진다. 전통적으로 고온 구조부품에 사용되는 니켈기 초내열 합금은 내열온도 한계가 약 900°C 미만이었어서 그 이상의 환경에서는 표면 열차폐 코팅(TBC)이나 복잡한 냉각 구조를 필요로 한다. 이 한계를 돌파하는 것이 소재 기술 혁신의 목표이다.

한편 아무리 우수한 소재가 개발되더라도 비선형적이고 다변수적인 산업 공정을 정밀하게 제어하지 못하면 시스템은 설계 잠재력에 미치지 못하는 낮은 효율성으로 운영될 수밖에 없다. 이러한 공정의 안정화 및 최적화를 담당하는 산업 자동화 제어 시장은 2025년부터 2031년까지 10.7%의 글로벌 연평균 성장률(CAGR)로 급속도로 성장할 것으로 예측되며, 2031년까지 3,916억 3천만 달러 규모에 이를 전망이다. 이는 극한 소재의 도입이 곧 지능형 제어 시스템(APCS)의 필요성을 더욱 증폭시키는 기술 상호 의존 관계를 형성하고 있음을 시사한다.

1.3. 본 보고서의 목적 및 구성

본 보고서는 항공우주 및 에너지 분야에서 요구되는 초고온/고내식성 첨단 소재 기술(세라믹 복합재, 초합금)의 현황을 분석하고, 이러한 소재가 적용된 시스템의 안정적인 운용을 위한 모델 예측 제어(MPC) 및 인공지능(AI) 기반 자동화 기술의 발전 동향을 심층적으로 다룬다. 궁극적으로 소재 혁신과 지능형 제어 기술 간의 상호 의존적 관계를 규명하고, 미래 청정 에너지 및 첨단 제조 분야의 기술 투자 및 표준화 방향을 제시하는 것을 목적으로 한다.

고온 및 고응력 환경용 첨단 소재 기술

2.1. 초고온 발전용 구조 재료 기술

2.1.1. 니켈기 초합금의 한계와 CMC(Ceramic Matrix Composite)의 등장

고효율 가스 터빈 및 발전 시스템의 개발은 운전 온도의 지속적인 상승을 요구한다. 기존 고온 구조부품에 주로 사용되는 니켈기 초내열 합금은 900°C 미만의 내열 온도 한계를 갖고 있어 이 한계를 초과하는 환경에서는 부품의 내구성을 유지하기 위해 표면 열차폐 코팅(TBC)을 적용하거나 복잡하고 정교한 냉각 구조를 설계해야 한다. 이러한 복잡성은 시스템의 설계 및 제조 난이도를 높이는 주된 요인이 된다.

이러한 기술적 한계를 극복하고 항공우주 및 발전 분야의 고출력/고효율화를 실현하기 위한 핵심 대안으로 세라믹 복합재(CMC)가 부상하였다. CMC는 니켈기 초합금의 내열 한계를 돌파하며 가스 터빈 슈라우드 등의 개발에 성공적으로 적용되고 있다.

CMC 와 같은 고온 섬유는 극한 온도와 열악한 작동 조건을 견딜 수 있는 경량의 튼튼한 솔루션을 제공하며, 이러한 특성은 항공우주 및 방위 응용 분야의 수요 증가를 견인하는 중요한 동인으로 작용하고 있다. CMC 는 TBC 나 복잡한 냉각 시스템 없이도 고온 내구성을 제공함으로써 시스템의 설계 복잡성을 현저히 낮추고 궁극적으로 무게 감소와 유지보수 비용 절감이라는 긍정적인 파급 효과를 유발한다.

2.1.2. 고온가스로(VHTR) 시스템 설계 재료 요건 및 신뢰성 확보

고온가스로(VHTR)는 고온 작동을 통해 높은 열효율을 추구하며 원자로용기, 중간열교환기(IHX) 등 개별 초고온 기기의 설계 특성에 맞는 극한 재료 요건을 요구한다. 이러한 발전소의 작동 온도가 계속 증가하는 추세에 따라 구조물에 가해지는 크리프(Creep) 현상의 영향이 점차 커지고 있으며, 이는 갑작스러운 파단으로 이어질 수 있다.

VHTR 고온 설계를 위한 재료 현안은 기술 기준 측면에서 상당히 해소되었다. 초고온재료인 Alloy 617 합금과 흑연이 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 기술 기준에 등재되었기 때문이다. 그러나 흑연은 압력경계소재가 아니며, 일반 금속소재 고온 기기의 일차압력경계가 주요 대상인 Class A 설계 등급 분류 취지와 일치하지 않는다는 이견이 ASME 내에서 지속적으로 제기되고 있으며, 이에 대한 기준 개정이 추후 예정되어 있다. 이러한 기술 기준 정립의 지연은 차세대 원자로의 상용화 속도를 늦추는 핵심 병목 현상으로 작용할 수 있다.

설계 분석 측면에서는 VHTR 기기의 초고온 설계 분석 결과, 헤더 모서리 부위에서 높은 열응력값이 도출되어 곡률 반경을 증대시키는 형상 최적화의 필요성이 제기되었다. 설계는 일차막응력 2.05 MPa, 일차국부응력 2.16 MPa, 이차응력 16 MPa 등의 기준을 만족해야 한다. 재료의 장기 신뢰성을 평가하기 위해, Alloy 617 합금의 피로와 크리프 손상곡선 및 평가 절차는 ASME 에서 연동 효과를 기준으로 제정 중에 있다. 특히, 크리프 손상 예측식에는 7 개의 상수(A, B, k, m, r, q)가 사용되며, 이 중 k 와 m 은 응력 지수, q 와 r 은 손상 파라메타 지수를 나타낸다. 극한 환경에서 소재의 복잡한 열화 메커니즘을 정량화하는 이 과정은 규제 기관의 승인 속도를 결정짓는 주요 변수이다.

첨단 극한 환경 재료 특성 및 응용 비교

재료 분류	주요 구성 요소	최대 운용 온도/ 환경	핵심 응용 분야	주요 기술적 과제
니켈 기 조합금	Ni 기반 합금	900°C 미만	가스 터빈 블레이드, 엔진 부품	내열 한계, 복잡한 냉각 시스템 필요
CMC (세라믹 복합재)	SiC/SiC 또는 C/C	900°C 이상 (고온 내구성)	가스 터빈 슈라우드, 연소기	제조 복잡성, 높은 비용, 충격 저항
Alloy 617	Ni-Cr-Co-Mo 합금	VHTR 설계 온도 (800°C 이상)	초고온가스로(IHX, Vessel)	크리프 손상 누적, ASME 설계 기준 정립
고온 단열재	세라믹 섬유, 내화 벽돌	고온 제조 환경	제조 단열, 에너지 효율 향상	원료 가용성 및 비용 문제

3.1. 고내식성 세라믹 소재의 정밀 제조 응용

3.1.1. 반도체 제조 환경의 변화와 SiC의 중요성

반도체 제조 공정은 고순도, 고정밀, 그리고 극도의 내부식성을 요구하는 극한 환경이다. 특히 실리콘 카바이드(SiC) 세라믹스는 연삭 및 연마, 열 처리(어닐링, 산화, 확산), 리소그래피, 증착, 에칭 및 이온 주입을 포함한 다양한 제조 단계에서 필수적인 재료로 광범위하게 응용된다.

점점 더 공격적인 플라즈마 환경을 견뎌야 하는 플라즈마 에칭 및 증착 공정에서, SiC는 탁월한 내화특성과 내열성을 바탕으로 SiC 기반 포커스 링의 채택을 빠르게 증가시키고 있다. 이는 고성능 반도체 소자를 생산하기 위해 공정 환경이 더 가혹해지고 있음을 반영한다. 다만, 반도체 세라믹 암과 같은 부품 제조 시, SiC는 알루미늄 세라믹 암에 비해 성능 우위가 명확함에도 불구하고, 재료 가격과 가공 난이도 등의 경제적 요소를 고려할 때 알루미늄 세라믹 암이 여전히 더 비용 효율적이며 일반적으로 널리 사용된다. 따라서 고성능 SiC 부품의 제조 수율 향상 및 정밀 가공 기술 확보는 반도체 장비 부문의 국산화 전략 달성에 있어 핵심 과제로 남아있다.

3.2. 구조물 내구성 저하 메커니즘 및 관리

3.2.1. 콘크리트 및 강재의 대표적 열화 현상 분석

토목 및 산업 구조물의 장기적인 안전성을 확보하는 것은 극한 환경 엔지니어링의 또 다른 축이다. 콘크리트 구조물의 대표적인 부식 및 열화 메커니즘으로는 중성화, 염해, 동해, 알칼리골재반응, 화학적 침식, 그리고 피로 등이 있다. 주목할 점은 콘크리트 구조물의 내구성이 콘크리트 자체의 문제보다는 내부에 사용되는 강재의 부식 문제와 직결되는 경우가 많다는 것이다.

구조물의 내구성에 영향을 미치는 환경적 요인으로는 CO₂, 염화물 이온, 동결융해, 수분 등이 있으며, 구조물 자체 요인 중에서는 콘크리트의 치밀성을 나타내는 지표인 물-시멘트비(W/C)가 가장 중요한 관리 요소이다. 부식은 일단 발생하면 콘크리트의 원래 성능을 회복하기가 매우 어렵기 때문에, 좋은 재료의 사용, 물-시멘트비 최소화, 그리고 수분의 침투 방지와 같은 예방적 조치 및 지속적인 관찰과 유지관리가 절대적으로 중요하다.

3.2.2. 도장 부품의 전기화학적 부식 메커니즘

금속 부품에 적용된 도장 역시 환경적 요인에 의해 열화되며, 대표적인 부식 메커니즘 중 하나는 음극 박리(Cathodic Delamination)이다. 이는 물과 산소에 의한

환원 반응이 도장을 열화시키는 과정으로, 도장의 내부 결함이나 고분자 구조 사이의 틈새로 물이 흡수(Water-uptake)되어 소재 표면에서 부식이 발생하게 된다.

재료 열화 관리는 이제 수동적인 사후 복구 단계를 넘어, 첨단 센싱 기술과 인공지능을 활용한 예방 및 예측 단계로 전환되어야 한다. 특히 전기화학적 열화와 크리프 손상은 미세한 결함과 환경 조건 변화에 민감하므로 센서를 통한 실시간 모니터링 데이터를 기반으로 부식 환경(예: 염화물 이온 농도, 습도)을 예측하고 운전 조건을 제어하는 지능형 시스템(APCS)과의 융합이 필수적이다.

지능형 공정 제어 시스템 (APCS) 및 최적화

4.1. 다변수 및 비선형 공정 제어 기술의 발전

4.1.1. 모델 예측 제어(MPC)의 역할 및 산업 적용 확대

모델 예측 제어(MPC)는 다변수 공정을 조정하는 데 있어 핵심적인 도구로서 명성을 확고히 했다. MPC 솔루션은 공장 동작을 모니터링하고 개별 설정점을 변경하여 프로세스를 실제 잠재력에 맞게 제어하고 최적화할 수 있는 인텔리전스를 제공한다. 예를 들어, 플루오린 변환 분야의 선도 기업인 Fluorsid S.p.A.는 MPC를 도입하여 원자재 사용량, 에너지 소비량, CO₂ 배출을 줄이는 데 성공하였다.

MPC는 선형(Linear) 모델과 비선형(Non-linear) 모델로 구분된다. 선형 MPC는 원유 증류 및 에틸렌 분해와 같이 열역학적 관계가 비교적 안정적인 대규모 연속 공정에서 주로 사용된다. 그러나 특수 화학 및 제약 공장처럼 비정상 상태 반응과 엄격한 품질 관리 기준에 직면하는 분야에서는 비선형 MPC가 필수적이다. 실제로 비선형 MPC 시장은 연평균 12.8%의 높은 성장률을 기록하며 성장세를 보이고 있으며 2030년까지 1.1억 달러 규모에 이를 것으로 예상된다. 이는 미래 공정 자동화의 R&D가 단순한 설정점 제어를 넘어 공정의 복잡성(예: 형식 원료 품질 및 투입 에너지량의 불안정성)을 다루는 모델링 능력에 집중될 것임을 시사한다.

4.1.2. 다변수 제어 이론 및 적용

다변수 및 비선형 시스템에 대한 모델링 연구와 더불어 이에 적용할 수 있는 다양한 제어 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있다. 비선형 제어 분야에서는 비선형 궤환 선형화 제어가 자기 부상 시스템에 적용되어 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었으며 다변수 제어 이론에서는 LQG/LTR(Linear Quadratic Gaussian/Loop Transfer Recovery)이 터보 발전기와 같은 복잡한 시스템에 적용되어 안정적인 제어 성능을 보였다.

이러한 연구는 극한 환경에서 작동하는 첨단 기기의 응답 속도와 강인한 제어 성능을 확보하는 데 기여한다.

지능형 공정 제어 기술의 산업별 적용 및 효과

제어 기술	주요 적용 산업	해결 공정 문제	주요 기대 효과
선형 MPC	석유 및 가스, 석유화학 (연속 공정)	안정적인 열역학적 공정 최적화	원자재 사용량 절감, CO ₂ 배출 감소
비선형 MPC	특수 화학, 제약 (배치 공정)	비정상 상태 반응 및 엄격한 품질 기준	다변수 비선형 공정의 정밀 제어 및 안정화
AI 기반 ESS 제어	전력 계통, 신재생 에너지	전력 변동성, 피크 부하 관리, 주파수 조정	전력 손실 최소화, BMS 최적화, 계통 복원력 향상
LQG/LTR	터보 발전기, 항공우주	다변수 시스템의 강인한 제어 및 안정도 확보	시스템 응답 속도 향상, 예측 오류 감소

4.2. AI 기반 에너지 시스템 최적화 및 안정성 확보

4.2.1. ESS(Energy Storage System)의 지능형 에너지 관리 및 계통 안정화

태양광 및 풍력과 같은 간헐적인 신재생 에너지원의 발전 비중이 증가하면서 에너지 저장 장치(ESS) 기술을 통한 지능형 에너지 관리의 필요성이 커지고 있다. ESS는 AI 기술과 결합하여 더욱 진화하고 있다. AI는 재생 에너지의 다양한 전력 변수를 분석하여 에너지 저장 및 방출 시점을 예측하는 알고리즘을 개발함으로써, 전력 손실을 최대한 줄이고 효율을 높이는 대안을 마련한다.

AI 기반 ESS 기술은 단순히 발전이 많은 시간대에 전기를 저장했다가 수요가 많을 때 방전하는 수준을 넘어 수요 반응, 주파수 조정, 피크 부하 완화 및 전력 계통의 복원력을 높이고 안정성을 확보하는 데 결정적인 역할을 수행한다. 특히 전력 공급망이 불안정할 경우 즉시 전력을 공급하여 데이터 센터의 다운타임을 최소화하는 등 서비스 연속성을 유지하는 데 필수적이다.

4.2.2. AI를 활용한 BMS 최적화 및 열관리

AI 기술은 ESS의 핵심 구성 요소인 배터리 관리 시스템(BMS)의 최적화 및 극대화에도 크게 기여한다. 수천 개의 배터리 셀을 실시간으로 모니터링하거나 셀의 불균형을 최소화하는 기술이 AI를 통해 발전하고 있다. 또한 대용량 셀을 저장해야 하는 ESS 기술에서 발생하는 오차를 줄이는 데도 AI의 기여도가 매우 높다.

가장 중요한 안전성 측면에서 AI는 배터리 열폭주에 의한 폭발 위험을 줄이기 위해 냉각 시스템을 효과적으로 제어함으로써 열관리 문제를 해결하는 데 큰 도움을 준다. 이는 AI가 예측 분석과 자기 진단 기능을 통해 에너지 효율을 높이고 운용 비용을 절감할 수 있는 미래 성장 기술임을 입증한다.

4.2.3. AI 연산으로 인한 시스템 열 발생 문제 해결 방안

AI 기반 시스템의 도입에는 기술적 역설이 존재한다. AI는 ESS의 효율을 높이고 열폭주를 관리하는 데 사용되지만 AI 연산 자체에 사용되는 GPU의 전력량 증가로 인해 자체적인 열 발생 문제가 해결해야 할 과제로 남아있다. 완벽한 AI 구현을 위해서는 완벽한 전력 공급이 필요하며, 이는 AI 시스템의 실제 효율성(Net Gain)이 연산에 필요한 에너지 소모와 추가적인 열 관리 비용을 상쇄하고도 남아야 함을 의미한다.

이러한 문제는 결과적으로 첨단 소재 기술의 필요성으로 다시 회귀한다. 즉 제어 시스템의 효율을 높이거나 하는 요구가 고성능 저전력 칩 설계, 그리고 극한 환경 단열재 및 SiC 기반의 고효율 냉각 및 전력 변환 시스템 기술 개발을 요구하는 순환적인 기술 수요 고리를 형성하게 된다.

5.1. 소재 및 제어 기술 융합의 시너지 효과

극한 환경 시스템의 발전은 첨단 소재 기술(CMC, VHTR 합금)의 잠재적 성능 확장과 지능형 공정 제어 시스템(APCS: MPC, AI)의 안전 및 효율 최적화 간의 긴밀한 융합을 통해서만 달성될 수 있다. CMC와 VHTR 합금 같은 소재는 시스템의 최대 운용 온도를 정의하며, MPC/AI는 그 소재가 견딜 수 있는 안전 한계 내에서 운전 조건을 실시간으로 조정한다.

이러한 융합은 시스템의 신뢰성 확보에 필수적이다. 예를 들어, 크리프 손상 예측식의 7개 상수와 같은 재료 열화 모델 데이터를 AI 플랫폼에 통합함으로써, 시스템은 소재의 수명 예측 정확도를 획기적으로 높이고, MPC를 통해 운전 부하를 능동적으로 조정하여 갑작스러운 파단 위험을 최소화할 수 있다. 소재의 내구성과 제어 시스템의 지능화는 상호 보완적으로 작용하며, 극한 환경에서의 안전 운용 여유(Safety Margin)를 극대화한다.

5.2. 글로벌 시장 동향 및 산업 자동화 전망

글로벌 시장은 지능형 제어 기술과 극한 소재 기술 모두에서 강력한 성장세를 보이고 있다. 산업 자동화 제어 시장은 2031년까지 3,916억 3천만 달러 규모, 10.7%의 CAGR 성장이 예상되며, 특히 복잡하고 비선형적인 공정의 증가에 대응하는 비선형 MPC 시장은 12.8%의 연평균 성장률을 기록할 전망이다. 이는 정밀하고 복잡한 제어 수요가 미래 산업 자동화의 주류를 이룰 것임을 명확히 보여준다.

이러한 기술 발전의 핵심 동인 중 하나는 '지속 가능성'이다. MPC는 원자재 사용량과 CO2 배출 절감에 기여하며, 고온 섬유 시장에서도 환경 친화적인 옵션 개발과 에너지 효율 향상이 중요한 트렌드로 자리 잡았다. 극한 환경 기술의 혁신은 고효율화를 통해 궁극적으로 환경 발자국을 줄이는 방향으로 진행되고 있다.

5.3. 정책적 및 기술적 우선순위

5.3.1. 청정 에너지 소재 및 시스템 국산화 전략 가속화

정부는 2030년까지 청정 수소 생산 기술 국산화 100% 달성 목표를 위해 관련 시스템의 극한 소재 개발을 최우선 과제로 설정해야 한다. 이는 수소 터빈용 고온 CMC나 수소 저장 및 운송을 위한 고압/저온 특수 재료 개발을 포함한다. 또한 고온 섬유의 특정 원료 제한 가용성 및 반도체 SiC 부품의 높은 가공 난이도와 같은 공급망 취약점을 극복하기 위해 핵심 원료의 국내 소싱 및 재활용 기술 R&D에 대한 집중적인 투자가 필요하다.

5.3.2. 지능형 시스템 R&D 투자 및 표준화 선점

첨단 공정 제어 기술의 확보는 시스템 경쟁력의 핵심이다. 재료의 열화 모델(크리프 상수 등)을 실시간으로 반영하여 예측 수명을 관리하고 운전 조건을 최적화하는 AI/MPC 통합 플랫폼 구축에 R&D 자원을 집중해야 한다.

기술 표준화 측면에서는, VHTR과 같은 차세대 에너지 기술의 상용화를 가속하기 위해 ASME 등 국제 기술 기준의 개정 과정에 적극적으로 참여하고 주도권을 확보해야 한다. 특히 신소재(흑연 등)의 설계 기준 등재 및 초고온 환경에서 발생하는 크리프/피로 연동 효과 평가 절차 정립에 있어 기술 선도국으로서의 입장을 관철하는 것이 필요하다. 이는 첨단 기술의 상업적 확산을 가속화하고, 향후 글로벌 시장에서 기술 우위를 점하는 데 결정적인 역할을 할 것이다.

참고 문헌

Development of Gas Turbine Shroud using Ceramic Matrix Composite(CMC)

https://www.researchgate.net/publication/393062383_Development_of_Gas_Turbine_Shroud_using_Ceramic_Matrix_CompositeCMC

고온 소재의 응용 분야는 무엇인가요? 항공우주, 에너지 등에서의 역할 살펴보기

<https://kr.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-applications-of-high-temperature-materials>

산업 자동화 제어 시장 성장, 규모, 점유율, 동향, 주요 업체 분석 및 2025년까지의 예측

<https://www.theinsightpartners.com/ko/reports/industrial-automation-control-market>

고온 섬유 시장 - 섬유 유형별, 형태별, 응용 분야별 및 예측, 2024-2032

<https://www.gminsights.com/ko/industry-analysis/high-temperature-fiber-market>

VHTR 초고온기기 설계특성 분석

https://kpvp.org/k/?module=file&act=procFileDownload&file_srl=7342&sid=67f2843ae72d1d40d60fe7f6b1494609&module_srl=215

316LN 스테인레스강의 크리프 모델링

https://www.kns.org/files/pre_paper/27/9%EA%B9%80%EC%9A%B0%EA%B3%A4.pdf

글로벌 고온 단열재 시장 - 2028년까지의 산업 동향 및 예측



<https://www.databridgemarketresearch.com/ko/reports/global-high-temperature-insulation-market>

SiC 세라믹: 반도체 제조의 고정밀 부품에 없어서는 안 될 소재

<https://ko.semicorex.com/news-show-6629.html>

반도체 세라믹 파트 종류

<https://shenminghu456.tistory.com/1211>

콘크리트 구조물의 부식 및 열화 메커니즘과 대책

<https://www.reseat.or.kr/porta/cmmn/file/fileDown.do?menuNo=200019&atch-FileId=4264ae9b3dd14be5921691126b15a8bc&fileSn=1&bbsId=>

도장된 부품의 가속화 부식시험법 개발 이야기

<https://developers.hyundaimotorgroup.com/blog/475>

고급 공정 제어 시장 규모 및 점유율 분석 - 성장 동향 및 예측

<https://www.mordorintelligence.kr/industry-reports/global-advanced-process-control-market-industry-analysis-gro>

Fluorsid, MPC 로 원자재 사용량 절감

<https://www.rockwellautomation.com/ko-kr/company/news/case-studies/fluorsid-halves-waste-and-reduces-emissions.html>

[국가 R&D 연구보고서] 비선형 다변수 시스템의 Robust Control 에 관한 연구

<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO200200005108>

환경을 고려한 미래의 ESS 신에너지 변화(11)

<https://ksme.or.kr/Newsletter/202510/data/08.%EC%A0%84%EB%AC%B8%EA%B0%80%20%EC%97%B0%EC%9E%AC.pdf>