

과제계획요청서

PROJECT PROPOSAL REQUEST (PPR)

과불화 화합물 대체 생체친화적 윤활코팅 소재 기술
(ILUCO: Innovative Lubricant Coatings with Eco-friendly and
Bio-compatible Materials)

PPR No. ASTRA01_2402PPR1

과제계획요청서(PPR) 공고일: 2024. 4. 4.

연구개발계획서 접수 마감일: 2024. 5. 9.

공모유형: 분야공모

보안과제여부: 일반



과학기술정보통신부



한국연구재단

한계도전전략센터

Advanced Science & Technology Research Agency (ASTRA)

1. 과제 개요

한국연구재단 한계도전전략센터에서는 과불화 화합물(PFAS¹⁾)기반의 윤활코팅 물질을 대체할 수 있는 환경·생체친화적 윤활코팅 신소재를 개발하는 프로젝트(ILUCO²⁾)를 추진합니다.

과불화 화합물(PFAS)은 저마찰성, 우수한 방오 성능, 고온 안정성과 내구성 등의 장점 때문에 수십 년간 일상생활과 산업 전반에 걸쳐 널리 활용되었습니다. 그러나 최근 인체 유해성과 환경 오염에 대한 우려로 인해 사용규제 조치가 본격적으로 논의되고 있습니다. PFAS 규제가 본격화되면 산업 전반에 미치는 임팩트가 매우 클 수 있으나, 현재 PFAS에 상응하는 저마찰·내마모 특성을 지닌 물질을 개발하지 못한 실정입니다.

본 ILUCO 프로젝트의 주요 목표는 PFAS계 코팅재에 상응하는 윤활 특성을 보이면서, 인체와 환경 유해성에 대한 우려가 없는 새로운 코팅 소재를 개발하는 데 있습니다. 표면에서의 물리화학적 윤활 메커니즘을 이해하고 탐구하는 원천소재 기술이지만, 그 산업적 활용을 위해 경제성과 공정 편의성까지 고려해야 하는 도전적 과업입니다. 이는 인류와 지구의 지속가능성을 위해 반드시 해결해야 할 이슈라 판단합니다.

2. 추진 배경

PFAS 중에서 가장 잘 알려진 물질이라 할 수 있는 테플론(PTFE)은 1938년 듀폰사에서 개발되어 다양한 산업 및 가정용 제품에 널리 사용되었습니다. 이는 PFAS의 높은 내화화성과 고온 안정성, 내마모성 및 비점착성 등 물리화학적 특성이 유연제, 방수제, 방오제 및 윤활제로 매우 유용하게 활용되기 때문입니다. 그동안 PFAS는 비활성이면서 독성이 없는 것으로 인식되어 생태계에 미치는 영향을 고려하지 않은 채, 인류는 4천7백여 종의 PFAS계 화합물을 제조하여 활용하였습니다. 자동차를 비롯한 기계 장비 부자재, 반도체와 연료전지 원재료, 의류 직물, 포장재 등에 사용되는 PFAS의 시장 규모는 연 280억 달러를 넘는 수준입니다.³⁾

PFAS가 지닌 비활성이라는 특징은 분해되기 어렵고 생산 또는 폐기 과정에서 환경에 유입·잔류·축적된다는 문제점을 일으킵니다. ‘영원히 사라지

1) PFAS: Per- and polyfluoroalkyl Substances

2) ILUCO: Innovative Lubricant Coatings with Eco-friendly & Bio-compatible Materials

3) https://www.g-enews.com/article/Global-Biz/2023/12/20231211091906630037926aa152_1

지 않는 화학물질’이라는 오명을 얻은 PFAS에 대하여 이제 세계 각국은 사용규제 조치를 내리고 있습니다. PFAS는 사용 중 변형 및 이탈되어 미세 플라스틱 형태로 음식물 등을 통해 인체에 흡수될 수 있습니다. 타 미세플라스틱에 비해, PFAS는 각종 암, 호르몬 기능 장애, 면역 질환, 발달 장애 등을 일으킬 수 있는 유해성이 클 것으로 우려됩니다. 이미 미국은 인체 유해성이 확인된 PFOA⁴⁾와 PFOS⁵⁾에 대한 엄격한 상수도 모니터링을 시행하고 있으며, EU 집행위원회는 2023년 PFAS에 대한 규제를 강화하고, 지속 가능한 화학물질 규정(REACH)의 규제 대상에 포함하는 안을 발표했습니다. EU는 10,000종 이상의 PFAS를 대상으로 하여 사실상 불소가 포함된 모든 PFAS를 사용 제한한다는 안을 마련하고, 제한 규정을 최종 검토·합의하기 위한 이해관계자 의견수렴을 하였습니다.⁶⁾ 자동차 산업에서는 PFAS 대체 물질의 부재에 따른 심각성을 지적하며, 개별 PFAS 물질에 대한 위해성 평가 없이 모든 PFAS를 제한하는 것은 불합리하다는 의견을 제시하며 무기한 유예기간을 요청한 바 있습니다. 반도체 산업에서도 PFAS물질 없이는 반도체 공정에 차질이 발생하기 때문에 면제 혹은 최소 12년의 유예기간을 요청하는 의견을 제시하였습니다. 위와 같이 PFAS는 그 자체의 시장 규모보다는 각종 산업에 미치는 파급력이 막대한 물질이라 할 수 있습니다. 우리나라의 대표 산업이라 할 수 있는 반도체, 디스플레이, 자동차 산업에서도 PFAS 규제에 대한 대책 마련이 절실한 시점입니다.

PFAS를 구성하는 핵심 원소인 불소는 지구상에 존재하는 원소 중 가장 높은 전기음성도를 가지고 있어, 다른 원자와 결합할 때 전자를 강하게 끌어당깁니다. 이에 따라 PFAS 물질이 코팅된 표면은 음성 전하들의 반발력으로 인해 저마찰 윤활 특성을 나타냅니다. 불소계 소재가 갖는 고유의 특성을 일괄적으로 대체하는 소재를 개발하는 것은 불가능하다고 인식됩니다. PFAS 응용 분야별로 적합한 대체기술을 개발한 사례는 존재합니다. 기능성 의류의 발수 처리와 방수막 소재로 PFAS-free 기술이 개발되어 일부 제품에 적용되고 있으며,⁷⁾ 내시경, 카테터, 튜브 등 의료 제품에 사용되는 테플론 코팅을 대체하는 기술 개발도 이루어지고 있습니다.⁸⁾ 위 사례들은 대부

4) Perfluorooctanoic acid

5) Perfluorooctanesulfonic acid

6) <https://echa.europa.eu/-/echa-receives-5-600-comments-on-pfas-restriction-proposal>

7) <https://www.patagonia.com/stories/say-goodbye-to-forever-chemicals/story-133800.html>

8) <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/sustainable-coating-forever-chemicals-medical-de>

분 발수기능 표면처리를 통한 방오성 구현에 있어서는 만족스러운 결과를 보이지만, 산업계의 폭넓은 활용을 위해 요구되는 기계적 마찰 환경에서 충분한 내마모성과 내구성을 확보하지 못합니다.

각종 기계설비의 성능과 서비스 수명을 높이기 위해 낮은 마찰성과 높은 내마모성이 요구되며, 액체 윤활제와 그리스를 대체할 수 있는 대안으로 고체 윤활제가 주목받고 있습니다. 고체 윤활제는 항공우주, 미래 모빌리티, 로봇, 의료용 제품 등에서 중요한 역할을 할 것이며, 그 대표적 물질로 테플론 기반의 고체 윤활 복합재료가 개발되고 있습니다. 테플론만 단독으로 사용하는 경우는 내마모성이 부족하여서 일반적으로 마이크로미터 크기의 금속/세라믹 입자를 도입합니다. 추가적인 윤활 특성의 개선을 위해 오일 캡슐을 포함하는 예도 있습니다.⁹⁾¹⁰⁾ 오일 캡슐을 함유한 코팅층은 운행 초기에 주로 발생하는 표면 손상으로 코팅층의 캡슐이 파괴되어 캡슐에서 오일이 흘러나와 장치의 표면에 얇은 유막을 형성하여 추가적인 기계 손상을 보호합니다. 그러나 위의 고분자 기반 고체 윤활 복합재 역시 테플론을 주요 성분으로 합니다. 그 대안으로 하이드로젤의 수화 윤활 메커니즘을 이용한 윤활 하이드로젤도 최근 연구되고 있으며, 기계적 강도와 내구성의 한계를 개선하는 다양한 소재 설계가 제안되고 있습니다.¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾

고분자 유기물질과 무기 소재(세라믹)의 장점을 결합한 하이브리드 코팅소재에 대한 연구개발도 이루어지고 있습니다. 독일 프라운호퍼 ISC에서 개발한 ORMOCER[®] 소재는 개별 구성 요소가 비가역적 공유결합으로 연결된 물질로 솔젤 공정을 통해 합성됩니다.¹⁵⁾ 유기 네트워크와 무기 네트워크의 병렬 네트워크가 형성되며, 무기 네트워크의 기능화를 통해 재료에 추가적인

vices-surface-solutions-group/

9) Xiaolei Li, et al., Preparation and tribological properties of solid-liquid synergetic self-lubricating PTFE/SiO₂/PAO6 composites, Composites Part B: Engineering, 196, 108133 (2020)

10) Weitang Xiong, et al., Tribological performances of polytetrafluoroethylene/Kevlar fabric liner reinforced by oil-containing microcapsules, Tribology International 191, 109119 (2024)

11) Jiawei Zhang, et al., Durable hydrogel-based lubricated composite coating with remarkable underwater performances, J. Colloid Interface Sci. 654, 568 (2024)

12) Wenjing Li, et al., Lubricating organohydrogel with ultrahigh durability and super-weatherability enabled by molecular chains aligned strategy for drag-reduction coating, Chem. Eng. J. 454, 140057 (2023)

13) Jiajun Huang, et al., One-Pot Construction of Articular Cartilage-Like Hydrogel Coating for Durable Aqueous Lubrication. Adv. Mater. 2309141 (2024)

14) Yunfei Ru, et al., Organohydrogels with High-Speed Lubrication by Confining Polymer Chain Mobility by an Interpenetrated Heteronetwork. Angewandte Chemie 135, e202302765 (2023)

15) Schmidt H., Wolter H., Organically modified ceramics and their applications, J. Non-Crystalline Solids 121, 428 (1990)

기능을 부여할 수 있어 표면의 비점착성과 경도를 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있습니다. 일부 응용 분야에서 PFAS를 대체하는 코팅 물질로 이용되지만, 윤활 코팅제로 활용되지는 못하는 실정입니다. 유사한 건식 윤활 코팅 소재로서 금속-유기 골격체(Metal-organic framework, MOF)을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있습니다.¹⁶⁾ 무기 소재의 높은 표면 강성과 유기 소재의 낮은 표면 자유 에너지가 윤활 특성에 미치는 영향을 분석하여 금속과 유기 리간드의 배위 결합 강도를 조절하여 초윤활성을 확보할 수 있음을 제시하였습니다.¹⁷⁾

위에서 제시한 윤활코팅 기술 이외에도 다양한 접근방식이 현재 시도되고 있으나, PFAS계 고체 윤활제에 상응하는 내구성을 지닌 대체제가 개발되지 않고 있습니다. 더구나, 친환경성과 경제성까지 고려한다면 실용적 가치를 지닌 기술을 개발한다는 것은 매우 큰 어려움이 있을 것입니다. 본 ILUCO 프로젝트는 그림1과 같이 기술적 지향점을 제시합니다.

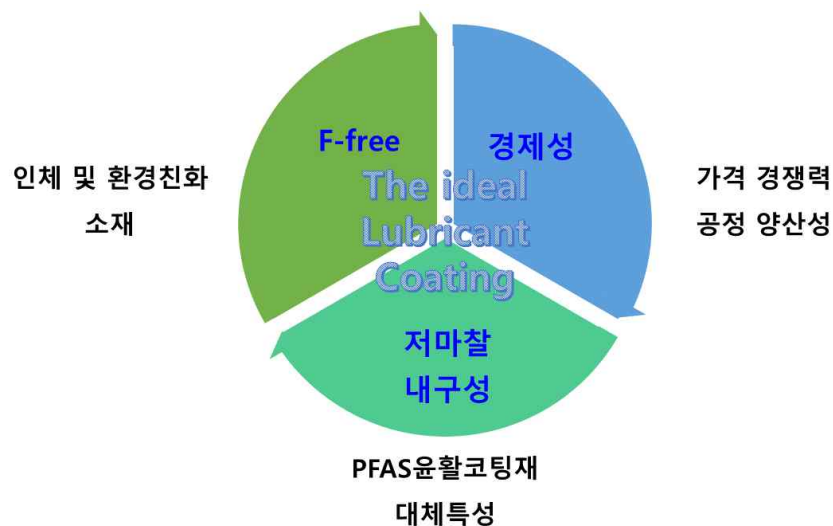


그림 1. PFAS 대체 윤활 코팅제의 요구 사항

본 과제 of 기획이 PFAS의 유해성 우려로 인한 환경규제에서 출발한 것이기에 불소를 포함하지 않는 환경·생체친화적 윤활 소재를 개발한다는 미션을 가지고 있습니다. 새로운 윤활 메커니즘을 지닌 소재를 설계하고 제조 방법과 코팅

16) Chenxia Wang, et al., Recent advances in metal-organic frameworks for lubrication, Molecular Systems Design and Engineering 9, 243 (2024)

17) Yuxin Li, et al., Superlubricity modulation by molecular structure of two-dimensional zeolite imidazole frameworks, Materials Today Nano 24, 100414, (2023)

공정을 개발해야 합니다. 코팅층의 저마찰, 내마모성 및 내구성을 보장할 수 있는 물리화학적 특성 평가와 더불어, PTFE를 함유하는 기존 고분자 코팅 소재와의 직접적 물성 비교를 위한 실증 평가를 진행할 예정입니다. 실질적인 타겟 산업 적용을 위해서는 경제성과 양산성도 고려한 재료 및 공정 개발이 요구됩니다.

본 과제는 실용성이 담보되지 않은 기초탐색이나 기존 소재의 단순 조합을 통한 성능 개선을 목적으로 하지 않습니다. 인체와 환경 유해성 이슈에서 자유롭고, 실용적 가치를 지닌 고체 윤활제를 개발한다면 다양한 산업의 기반 소재로 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대합니다.

3. 과제 목표 및 범위

(최종 목표)

ILUCO 프로젝트의 목표는 PFAS 물질을 대체할 수 있는 환경·생체친화적 고체윤활코팅 신소재를 개발하는 것입니다.

과제 제안자는 아래의 조건을 만족하는 새로운 윤활코팅 소재 개발에 관한 도전적이고 독창적인 아이디어를 제안하고, PTFE 물질 기반 기존 윤활코팅 소재와 비교하여 기술적 우위와 실용적 가치를 입증할 방안을 제시해야 합니다.

- 환경·생체친화적 소재일 것: 불소를 포함하지 않으며, 제조/활용/폐기 전주기에 걸쳐 유해성 우려가 없을 것
- High-throughput 물질 발굴 전략과 윤활 메커니즘에 대한 물리화학적 근거를 제시할 것
- 대상으로 하는 PFAS계 코팅 적용처에서 요구하는 물성(마찰계수, 내마모율, 고온 안정성, 내화학적, 생체적합성, 표면 조도, 밀착력 등)에 관한 목표치와 과학 기술적 근거를 제시할 것
- 실용성(경제성, 양산성)을 고려한 소재 합성과 코팅 공정을 제안할 것

상기 열거된 관련 지표는 전체 목록이 아닐 수 있습니다. 과제 제안자는 새롭게 조정하거나 향상할 수 있는 지표를 제안할 수 있으며, 이 경우 해당 지표가 윤활 코팅제의 성능과 관련된 의미를 설명해야 합니다.

과제 제안자는 본 ILUCO 프로젝트에서 개발하고자 하는 새로운 물질의 비교평가 대상이 되는 상용 PTFE기반 윤활코팅 소재를 선정하고, 특성 평가 방법(ASTM, ISO 등 국제규격)과 기준(실험조건, 두께, 하중 등)에 따른 물성값을 1년 이내(6개월 권장)에 확보해야 합니다. 이는 1단계 마일스톤 평가의 근거로 이용될 것입니다.

(기술 영역)

본 ILUCO 프로젝트의 핵심 연구개발 초점은 불소를 포함하는 고분자 기반의 윤활코팅 물질을 대체하는 새로운 재료를 개발하는 것입니다. 이러한 목표를 달성하기 위해 물질 디자인, 원료 선택과 합성 방법, 마모 및 변형 메커니즘의 이해, 코팅 공정, 내구성 평가 등에 관한 철저한 연구와 실험이 필요할 것입니다.

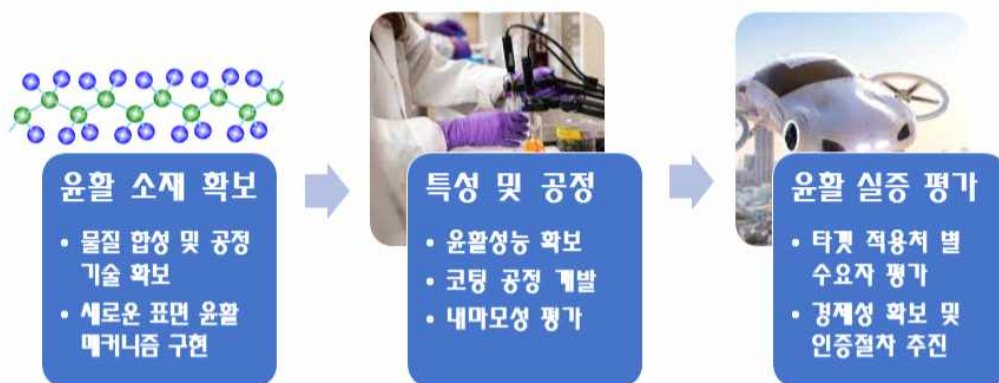


그림 2. ILUCO 프로젝트의 기술 개발 영역

과제 제안자는 이 프로젝트의 목표를 고려하여 제안하는 소재와 윤활 메커니즘에 대한 자세한 설명을 제공해야 합니다. 이는 자신의 접근 방식의 타당성, 프로젝트의 목표와 지표를 충족시킬 수 있는 실험적 실행 가능성, 그리고 제안된 소재가 실제 산업에서 활용될 수 있을 것이라는 명확한 설명을 포함해야 합니다.

제안서는 최소한 다음 사항을 포함해야 합니다.

- 제안된 접근 방식에 대한 설명, 과제 수행 기간에 개발 및 시연될 내용에 대한 설명과 기술 개발 로드맵, 성과 이정표(milestone)를 함께 제공해야 합니다.
- 제안자는 해당 분야에서 현재까지 연구되어 온 소재에 대한 글로벌 선단 기술과의 비교를 포함해야 합니다. 이는 제안자의 접근 방식이 왜 혁신적이고 차별화된 것인지는 설명하는 것으로, 이론적 근거와 개념 증명 데이터를 포함할 수 있습니다. 이 분석은 단순히 문헌에 보고된 데이터와의 비교 차원이 아닌, 새로운 고체 윤활제가 실제 응용의 관점에서 대체 적용될 수 있는지에 대한 논의를 포함해야 합니다.
- 본 프로젝트의 핵심은 새로운 고체윤활 물질 개발이지만 궁극적인 목표인 PFAS 대체 실용화를 위해서는 적용처별로 상이한 요구 사항을 만족해야 하는 난관이 있을 것입니다. 과제 제안자는 제안서 작성 시 잠재적 적용처를 명시하고 그에 부합하는 요구 사항을 제시해야 합니다. 적용처 선정 시 PFAS 대체기술의 시장 파급력과 국가·사회적 임팩트가 큰 응용 분야를 선택할 것을 적극 권장합니다. (예, 자동차 기계부품, 미래 모빌리티, 반도체, 디스플레이, 로봇, 의료기기 등)

(제외 대상)

본 프로젝트에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 하지 않습니다.

- 기존 PFAS계 소재의 분자구조 변경을 통한 유해성 완화 연구
- 물질 표면의 요철 구조 도입 또는 장기 내구성을 보장할 수 없는 표면처리
- 기존 선도 기술의 추적 혹은 점진적 성능 향상과 최적화 연구

4. 추진 일정

(프로그램 구조, 과제 구성)

한계도전전략센터는 ILUCO 프로젝트의 수행을 위해 선정 과제별 연간 4억원 내외의 예산 규모¹⁸⁾와 최대 3년 7개월의 연구 기간을 계획하고 있습니다. 본 프로젝트의 수행에 있어 전문성을 갖춘 연구자가 도전 의식을 가지고 연구에 몰입할 수 있도록, 1인의 연구책임자 중심의 단독 과제 수행을 권장합니다. 과제 제안자는 센터가 계획하는 자원과 기간의 범위 내에서 상기 목표의 달성을 위한 독창적인 아이디어와 새로운 접근 방식, 연구 내용을 자유롭게 제시합니다.

본 과제는 각 단계별(19개월/12개월/12개월) 평가를 통해, 다음 단계 연구 수행에 대한 진행 여부(Go/No-Go)가 결정될 것이며, 연구비는 책임PM의 연구 수행 내용 검토를 통해 가감 가능할 것입니다.

(기술 로드맵, 점검 평가 일정)

ILUCO 프로젝트의 제안자는 그림 3의 과제 추진 주요 일정을 참고하여, 수행 기간 전체에 걸쳐 연구개발 로드맵과 마일스톤 목표를 구체적으로 명시해야 합니다. 연구개발 로드맵에는 특정 작업 혹은 과제 수행 중간 단계에서 적용할 수 있는 성과 지표를 인용하여 세부 작업 분할을 제공해야 합니다. 제안자는 전체 프로그램 일정을 준수하고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간 단계 및 최종 성과물을 완전히 해결하기 위한 공격적인 계획을 제시해야 합니다.

한계도전 사업에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구 수행자와 소통하며 매 분기 현장 방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 진행합니다. 이를 통해 연구 과정의 지식화와 진화적 Risk 관리를 계획하고 있습니다. 단계 점검을 통해 연구자가 설정한 마일스톤 목표가 달성되었는지 확인함으로써 다음 단계 연구 과제의 진행 여부를 결정할 수 있습니다. 프로젝트의 파급 효과를 최대화하기 위해 도전적인 연구를 시도하는 과제를 선정하여 책임PM 중심의 협력·융합 연구를 추진합니다.

18) 단계별 예산규모는 공고문을 참고

- 주요 일정



그림 3. ILUCO 프로젝트의 주요 일정

5. 제공 성과물

연구 책임자는 최소한 다음과 같은 성과물을 제공해야 합니다.

- 분기별 책임PM과의 회의(현장 방문, 전문가 리뷰)에서 연구 수행의 진척 상황을 파악할 수 있는 실험 데이터 및 결과 요약 자료
- 단계 점검일 10일 전까지 제출되어야 하는 단계 완료 보고서
- PFAS 대체 고체 윤활코팅 재료와 코팅이 적용 부품
- 연구 수행 과정에서의 의미있는 성과물 혹은 시행착오 대처 방안 등을 포함한 연구자의 목표 달성을 위한 노력을 입증하는 자료

6. 기타

(협업 관련)

본 프로젝트에서는 연구과제 심사를 통해 상이한 접근 방법으로 제안된 다수의 과제를 선정할 수도 있습니다. 한계도전전략센터는 본 프로젝트의 모든 연구 수행자가 이 프로젝트의 목표 달성을 위해 협업할 것을 기대하며, 비록 접근 방식이 다를지라도 전문성에 기반한 상호 협력과 소통을 도모할 것입니다. 지적 재산권 혹은 이해상충의 문제가 없는 조건 하에서 투명성이 보장된 협업을 추진할 수 있습니다.