

---

# 제2발표장

---

## 우주항공청 항공혁신임무보증프로그램 소개

# Introduction to the Aeronautics Innovation Mission Assurance Program of the KASA

\*최미진<sup>1</sup>, 이명직<sup>1</sup>, 박형욱<sup>1</sup>, 김지현<sup>1</sup>, 김현빈<sup>1\*</sup>  
\* M.J. Choi<sup>1</sup>, M.J. Lee<sup>1</sup>, H.W. Park<sup>1</sup>, J.H. Kim<sup>1</sup>, H.B. Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 우주항공청  
\* E-mail: hyunbin5067@korea.kr

**Keywords:** Quality Assurance, Product Assurance, R&D, Aeronautics Innovation, Material & Component, Eco-friendly technology

### 1. 서론

항공산업은 지속 가능한 기술 개발과 안전성 강화를 위한 제도적 기반 마련이 중요한 시점에 있다. 우주항공청은 국가 차원에서 우주항공 분야의 경쟁력 강화를 담당하고, 항공혁신임무보증은 항공기술 발전과 안정성을 보장하는 핵심 활동을 수행한다. 본 발표에서는 우주항공청의 주요 업무와 항공혁신임무보증의 역할, 그리고 소관 R&D 과제들이 항공산업 경쟁력 강화에 기여하는 방안을 다룬다.

### 2. 본론1 우주항공청 소개

#### 2.1 우주항공청 소개

우주항공청은 국가 차원에서 우주항공 분야의 경쟁력을 강화하고, 우주항공 관련 산업의 지속 가능한 성장을 도모하는 핵심적인 기능을 수행하며, 주요 업무는 국가 우주항공 정책 수립, 핵심기술 확보, 산업 육성, 위험 대비, 국제 협력, 민군 협력 등을 포함한다.

#### 2.2 항공혁신임무보증 소개

항공혁신부문은 ‘글로벌 신시장 선점을 위한 미래항공 핵심기술 개발’, ‘항공부품 세계 생산 기지화를 위한 생태계 구축’, ‘민군협력 및 국제공동개발 확대’ 라는 정책 방향을 통해서 신 항공산업의 주도권을 확보하는데 주력을 하고 있다. 그 중에서 항공혁신임무보증은 항공 기술의 발전과 안전성을 보장하기 위한 핵심적인 전략적 활동을 수행하고 있으며, 기존 항공분야 품질보증, 제품보증을 넘어 임무의 안정적 달성을 위한 항공혁신 임무보증 전략을 마련하고 있다.

### 3. 본론2 항공혁신임무보증 소관 R&D 소개

항공혁신임무보증 소관 R&D는 항공산업의 기술적 혁신과 경쟁력 강화를 위한 다양한 연구 개발 과제를 수행하고 있으며, 항공용 소재 및 부품의 성능 향상, 국산화, 친환경 혁신 기술 등을 R&D 과제로 수행하고 있다. 본 발표에서는 ‘항공용 경량소재 데이터 국산화 시험개발 사업’, ‘항공 우주 부품 공정 고도화 사업’, ‘신 항공산업

생태계 구축을 위한 친환경 첨단소재/부품 개발 기획’ 을 중심으로 설명하고자 한다.

### 4. 결론 및 향후과제

항공혁신임무보증은 항공 산업의 다양한 분야에서 기술적인 혁신을 실현하고, 이와 같은 과정에서 발생할 수 있는 위험을 최소화하고, 유지하기 위한 제도적 기반을 구축하고 있다. 향후에는, 민군 협력 및 국제 공동 개발을 통한 글로벌 협력 네트워크 강화를 통해 기술적 리더십을 지속적으로 확대할 것이며, 이를 바탕으로 국제 경쟁력 있는 기술 개발을 이어갈 것이다.

# 항공용 Al합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 Development of Material Database for Aerospace Al Alloys

\*손진일<sup>1</sup>, 김효진<sup>2</sup>, 마태동<sup>3\*</sup>  
\* J.I. Son<sup>1</sup>, H.J. Kim<sup>2</sup>, T.D. Ma<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> 테스코(주) CTO, <sup>2</sup> 테스코(주) 시험평가부, <sup>3</sup> 테스코(주) 시험평가부  
\* E-mail: jison@testcor.co.kr

**Keywords:** Aerospace, MMPDS, Al alloy, AMS (Aerospace Material Specification), MMPDS, Tensile, Compression, Shear, Bearing, High-cycle fatigue, Fracture toughness, Fatigue crack growth rate, Stress-corrosion

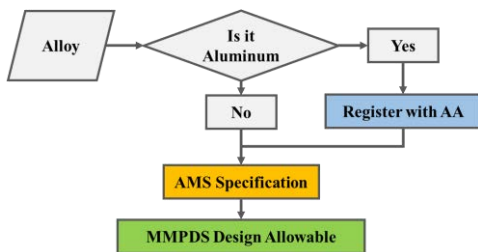
## 1. 서론

본 과제는 우주항공청 지원으로 수행하고 있으며, 과제의 목표는 항공용 Al 합금의 국산화를 추진하며 해당 합금을 대상으로 알루미늄 설계허용치 DB 개발 및 한국형 항공소재 물성 통계분석 기술 확보에 있다.

## 2. 본론

항공기용 소재 중 Al합금은 우수한 비강도 특성으로 인해 항공우주 재료로 널리 사용되고 있으며 고부가가치 소재로 개발에 따른 산업적 파급효과가 높은 소재이다. 특히, 2000 계열 합금은 고온 및 극저온에서의 뛰어난 강도와 고온 크리프 저항성을 가지며, 7000 계열 합금은 계열 합금 중 상대적으로 높은 강도 특성을 가진다.

항공용 금속 소재는 AMS(Aerospace Material Specification) 규격에서 제조 방법 및 물성 요구도를 규정하고 있으며, 특정 물성 요구도의 경우 통계적 기법을 사용한 S-Basis 설계허용치를 요구한다. 이러한 항공기 설계에 사용되는 소재의 설계허용치 및 시험 요구사항은 MMPDS Handbook에 규정되어 있다. 항공 소재 국산화를 위해 우선 AMS 규격을 만족하는 소재의 제조 기술과 제조된 소재에 대한 설계허용치가 확보되어야 한다.



※ The FAA(Federal Aviation Administration) views the MMPDS handbook as a vital tool for aircraft certification and continued airworthiness activities.

Fig. 1. MMPDS 등재를 위한 프로세스

본 과제에서는 테스코(주) 주관으로 항공기 OEM인 한국항공우주산업이 사용하는 다양한 형상의 2000

및 7000 계열 Al합금을 국내 5개 업체가 참여하여 설계 및 개발하였다. 이후, 개발 소재는 일련의 설계, 시제품 제작, 시편 제작, 5개 기관의 시험평가 및 설계허용치 산출 과정을 거치게 되어 신뢰성 높은 물성 데이터가 확보된다.

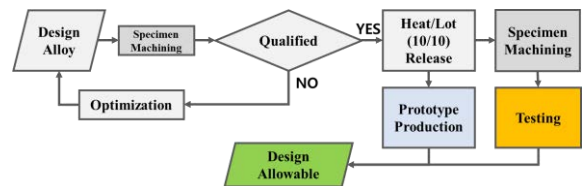


Fig. 2. 소재 개발 프로세스

본 세션을 통해 개발된 소재의 시험평가 항목, 시험평가 프로세스 및 설계허용치 산출과정을 간략히 소개하고 항공 소재 국산화 개발을 앞당길 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

## 3. 결론 및 향후과제

항공용 Al 합금의 소재물성 DB 확보는 국내 항공산업의 경쟁력을 강화하기 위한 핵심 과제 중 하나로, 고신뢰성 데이터를 기반으로 한 설계허용치 구축이 필수적이다. 이를 위해 다양한 제조공정 및 열처리 조건에 따른 물성 데이터를 체계적으로 수집·분석하여 신뢰성 높은 DB를 구축해야 한다. 특히, 항공 소재 분야는 뿌리산업과 밀접하게 연관되어 있으며, 국내 제조업 전반의 기술 고도화와도 직결된다. 따라서 국내 기업들의 기술력을 향상시키고, 해외 의존도를 낮추기 위해서는 국가 차원의 지속적인 연구 및 지원이 필요하다.

이에 따라, 우주항공청과의 긴밀한 협력을 통해 국가 항공 소재 개발 전략을 수립하고, 국제 표준(MMPDS)과 부합하는 물성 통계분석 기술을 정립함으로써 한국형 항공소재의 신뢰성을 높이는 것이 중요하다. 궁극적으로, 이러한 연구 성과는 국내 항공우주산업의 글로벌 경쟁력을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

## 후기

본 연구는 우주항공청 지원으로 수행되었습니다.

# 항공용 Ti 합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 Development of Materials Database for Aerospace Grade Ti Alloys

\*권용남<sup>1+</sup>, 박현일<sup>1</sup>  
\* Y.-N. Kwon<sup>1+</sup>, H. I. Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국재료연구원 항공우주재료연구센터  
+ E-mail: kyn1740@kims.re.kr

**Keywords:** Ti alloys, fastener, MMPDS, design allowable,

## 1. 서론

대부분 수입에 의존하고 있는 항공용 Ti 합금 및 패스너의 국산화를 추진하며 해당대상으로 항공기 설계용 소재 물성 데이터베이스를 개발하는 과제를 우주항공청 지원으로 수행하고 있다. 본 과제를 통해 국내 항공소재기업 지원하여 항공용 Ti 합금의 국산화를 달성하고자 하였으며 과제를 통해 개발된 내용을 본 발표에서 공유하고자 하였다.

## 2. 본론

항공우주용 소재는 AMS로 대표되는 규격을 만족하더라도 항공기 제작업체에서 설계에 필요한 물성 허용값을 제시하지 않으면 항공기 제작에 사용되기 어렵다. 우리나라의 항공 소재 국산화가 미진한 이유는 항공 소재가 요구하는 높은 품질뿐만 아니라 물성 허용값 데이터를 제시하지 못한 것이 국산화가 미진한 원인으로 작용하였다.

본 과제에서는 한국재료연구원이 주관하고 항공기 OEM인 한국항공우주산업이 사용하는 Ti 합금 및 패스너를 다양한 국내기업들이 참여하여 개발하였으며 해당 소재들을 다수의 기관들이 참여하여 시험하였다. 시험결과를 항공기 설계용 물성 허용값을 개발 및 국내기업들의 항공 소재 국산화 현황을 소개하고 항공 소재 국산화 개발을 앞당기는 방안에 대해 토의할 예정이다.

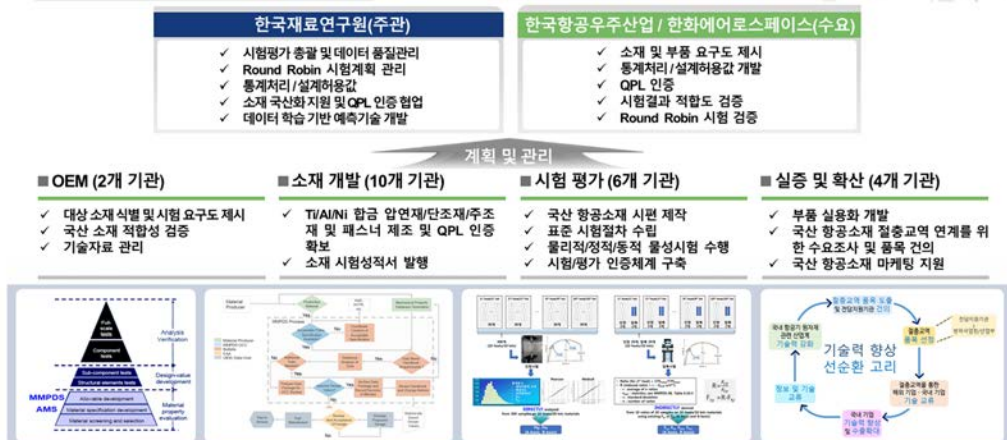
## 3. 결론 및 향후과제

항공 Ti 합금의 소재물성 DB 확보는 항공 소재 국산화의 필수적인 사항으로 항공소재기업의 고부가가치를 실현할 수 있으며 국내 항공 OEM에게는 해외 제작사들이 진행하는 RSP 사업에 참여할 수 있는 기회를 확대하는 계기가 될 수 있다. 본 과제를 통해 항공기 기체에 사용되는 대표적인 합금의 물성 데이터를 확보하였으나 항공기 엔진 및 기체에 사용되는 다양한 합금의 국산화를 위해 항공소재물성 DB 개발이 지속적으로 진행될 수 있기를 기대한다.

### 후기

본 연구는 우주항공청 지원으로 수행되었습니다.

## 항공소재 국산화를 위한 소재 데이터베이스 개발



# 엔진구조용 Ni계 고온부품 소재 국산화 개발 및 Database 구축 Development of high-temperature Ni-based engine structural parts materials and establishment of a database

\*최현선<sup>1\*</sup>, 송영석<sup>2</sup>, 주영규<sup>3</sup>, 이재현<sup>4</sup>, 민기득<sup>1</sup>  
\* G.D. Hong<sup>1</sup>, G.S. Hong<sup>2</sup>, B.J. Hangoon<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> (주)피레타, <sup>2</sup> (주)세아창원특수강, <sup>3</sup> 한화에어로스페이스(주), <sup>4</sup> 창원대학교  
\* E-mail: hyunsun.choi@pileta.co.kr

**Keywords:** IN738LC, MMPDS, Material database

## 1. 서론

항공 엔진에 사용되는 고온부품은 고온·고압의 가혹한 환경에서 사용된다. 고온부품에 사용되는 소재는 우수한 고온강도, 안정한 미세구조 및 내산화성 등 다양한 기계적·화학적 물성이 요구된다. 특히, 국내에서는 4세대 전투기가 개발되었음에도 불구하고 가장 중요한 엔진은 GE의 해외 선진사 제품을 사용하고 있다. 최근에는 국산 엔진 개발을 진행하면서 엔진 품질에 대한 요구도도 해외 선지사 수준으로 높아졌다. 고온부품 소재의 경우 전세계적으로 전략 무기 소재로 구분되고, 희토류 함유가 높아 국제 정세에 따라 수입에 큰 문제가 발생한다. 따라서, 국산 엔진을 개발함에 있어 소재부터 부품까지 국산화를 수행할 수 있는 소재 공정 개발 및 Database를 구축하였다.

## 2. 본론

### 2.1 IN738LC 공정개발

항공용 엔진에는 많은 종류의 고온소재가 사용된다. 그중에서 대상 소재는 엔진에 널리 사용되는 IN738LC에 대하여 합금 제작 공정, 정밀 주조 공정 개발을 수행하였다. 항공용 엔진에 사용되는 IN738LC 경우 고청정/고품질의 제조기술이 필요하다. 이를 위해 Master Ingot 기술 확보가 필요하며, 특히 규격 요구도에 따른 주요 성분비율 관리 및 비금속 개재물 혼입 방지 기술에 대한 제조 기술 확보가 필수적이다.

### 2.2 IN738LC 물성 database 구축

국내 생산 ingot이 항공용 부품으로 사용하기 위해서는 외산 소재와의 동등성 입증과 신뢰성 검증을 위해 MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization) 기반 소재 평가 DB가 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 체계적인 평가 DB를 구축하지 못해 제작사 필수적 요구사항을 만족시키지 못하고 있다. 특히, MMPDS 핸드북에 일부 니켈 합금의 특성이 기재되어 있으나, 상온 인장강도

위주의 데이터들이며, 근래에 개발된 고성능 소재는 기재되어 있지 않은 경우가 대부분이다. 본 연구에서 구축하고자 하는 IN738 LC의 소재 DB 역시 MMPDS 문서에는 기재되어 있지 않기 때문에 개발소재에 대한 DB구축은 필수적이다. 개발기술을 활용한 부품 소재 국산화 성공은 필수적으로 국내외 항공기 제작사의 인증제품목록(QPL, qualified product list)에 반드시 등재되어야 해당 소재를 활용한 설계가 가능하다. 이러한 QPL 등재를 위해서는 설계사가 요구하는 필수 평가 Data package 제공과 제조 기술 검증 또한 필수적으로 수행되어야 한다.

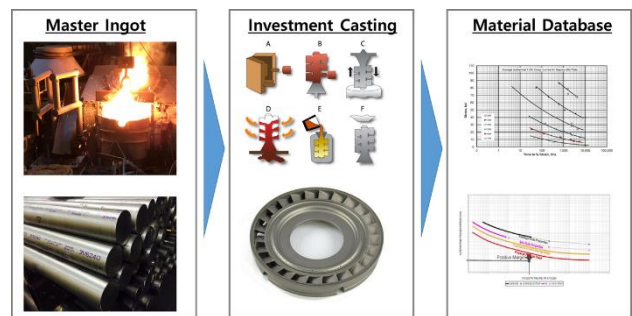


Fig. 1. Procedure for building a database of domestic master ingots.

## 3. 결론 및 향후과제

성공적인 항공용 국산화 소재 개발을 통하여 소재 강국으로의 발돋움을 수행할 수 있다. 다양한 항공용 소재 개발함에 따라 소재 생산업체의 경쟁력 강화 및 산학연 독자 소재 개발이 지속 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

[1] MMPDS-16, Chapter9

### 후기

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20016472)

# 민·군 항공기 탄소소재 적용 날개 부품의 RTM 공정 고도화 기술 개발 Development of RTM process advancement technology for wing parts using carbon materials for civil and military aircraft

\*김태곤<sup>1</sup>, 신도훈<sup>1</sup>  
\* T.G. Kim<sup>1</sup>, D.H. Shin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 대한항공 항공우주사업본부  
\*E-mail: taigkim@koreanair.com

**Keywords:** Resin Transfer Molding, Wingtip Structure, BIS(Built In Sensor) Mold, Automated Preforming

## 1. 서론

탄소 중립 달성을 위한 항공기의 연비 향상, 신규 친환경 연료 개발 등의 기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 금속 대비 비강도, 비강성이 높은 탄소 섬유는 항공기 경량화를 위해 주목받고 있는 소재이다.

기존 항공기에 적용되는 복합재 부품은 Autoclave 성형 기술로 제작되고 있으며 이는 높은 에너지 소모와 생산 비용에 대한 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 이를 탈피하고자 탈오토클레이브(OoA) 공정인 RTM 공정의 핵심 요소 기술들을 개발하고 Boeing 787 항공기 Wingtip 구조물에 개발된 기술을 적용하여 시제품을 제작하고자 한다.

## 2. 연구개발제품 정의

개발 대상품은 열경화성 탄소복합소재 항공기 날개 구조물이며, Boeing 787 항공기 날개 끝단에 장착되어 날개 끝 와류에 의해 발생하는 항력을 감소시켜주는 기능을 수행한다. 해당 구조물은 스킨(Skin), 스파(Spar) 및 리브(Rib)로 구성되며 기계적 체결을 통해 조립되는 형태이나 이번 개발품은 부품 일체화를 통해 무게 절감 및 조립 비용 감소를 추구하고 RTM 고도화 공정 기술 적용으로 생산성 확대 및 가격 경쟁력 확보를 목적으로 한다.

## 3. 핵심 요소 기술

### 3.1 RTM 일체형 Wingtip 설계 기술 개발

RTM 기반 일체형 구조물 설계 최적화 기술을 개발하고 Digitalization을 구현한 3D 도면(MBD) 체계 구축을 목표로 하고있다. 또한 프리폼 도면 생성, Net Edge 요건 및 건조 섬유 성형성과 주름 등 RTM 특성에 맞는 제작 요구도를 고려하여 정의하고자 한다.

### 3.2 프리폼 자동화 기술 고도화

건조 섬유의 적층 및 성형 공정은 수작업 위주의 노동집약적 생산 방식이며 수지가 함침되어 있지 않아 프리프레그(Prepreg) 대비 작업성이 떨어진다. 또한

주름 및 보풀 발생 가능성이 높기 때문에 안정적이고 균일한 적층/성형 공정이 요구된다.

따라서, 주름 방지 공정 설계 및 자동화 기반 프리폼 적층/성형 공정 개발을 통해 생산성과 품질을 향상시키고자 한다.

### 3.3 센서 기반 치공구 기술 고도화

상하 금형과 다수의 내부 치공구를 요구하는 RTM 금형은 수지주입과 경화를 위한 열전달 및 기밀 기능이 요구되며, 높은 에너지 효율 및 온도 균일도를 달성하기 위해 금형의 경량화 및 정밀 조절 열원 개발을 필요로 한다.

따라서, 금형 경량화 및 내장형 정밀 센서 설치/운용 기술 개발 등 치공구 기술 고도화를 수행하고자 한다.

### 3.4 실시간 데이터 기반 RTM 복합재 부품 개발

고품질 RTM 복합재 부품 개발을 위해 시뮬레이션을 이용한 수지 유동 경로 예측과 정밀 센서 시스템 실측 정보를 비교 분석하여 수지 주입/배출구를 설계하고 주입 및 경화 공정 최적화를 수행 하고자 한다.

개발된 일체형 RTM 공정 복합재 부품과 기존 레저시 공정(A/C) 적용 리벳 체결형 형상 부품과의 비교분석을 통해 개선 효과를 산출하고자 한다.

## 4. 결론 및 향후과제

본 과제는 1차년도(2024) 목표인 Wingtip 개념 설계, 축소형 시제 및 치공구 설계 수행을 완료 하였으며, 요소기술 개발을 위해 대형 일체형 RTM 공정 설계 조사, BIS 기반 치공구 조사 그리고 섬유 및 수지 물성 정량화 등을 수행하였다.

2차년도(2025)는 축소형 시제를 제작하고 결과를 반영하여 Wingtip 상세 설계를 진행하고 Upper skin용 치공구를 설계하고 제작 착수할 예정이다.

# 신항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단 소재/부품 개발 Development of Eco-Friendly Advanced Materials and Components for a New Aviation Industry Ecosystem

\*이현수<sup>1+</sup>, 송운형<sup>2</sup>  
\* H.S. Lee<sup>1+</sup>, W.H.Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술연구원 Ramp 융합연구단, <sup>2</sup> (주) 대한항공  
+ E-mail: a123@kist.re.kr

**Keywords:** Aviation, Ecosystem, Material, Components.

## 1. 서론

2024년 10월 시작된 우주항공청 신항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단 소재/부품 개발 탐색과제의 우선추진과제가 논의된다.

## 2. 사업 개요

### 2.1 사업의 목적

신항공산업 생태계 경쟁력 강화를 위한 항공기 열가소성 기체구조 핵심 기술 개발을 목적으로 함.

### 2.2 추진배경

항공산업은 규제 변화, 산업 재편, 환경 문제, 기술 혁신 등 다양한 요인의 영향을 받고 있다. 최근 미국 정부가 원자재에 대해 25% 관세를 예고함에 따라 항공기 제조비용 및 부품·소재 수입 비용이 증가할 것으로 예상되며, 이는 항공기 부품·소재 산업 전반에 걸쳐 심각한 영향을 미칠 우려가 제기되고 있다. 또한, 코로나19 팬데믹 이후 항공부품 업계는 재편의 시기를 맞이하고 있으며, 급변하는 산업 환경에 효과적으로 대응하기 위해 주기적인 소재 및 부품 수요 회복에 대비할 필요성이 강조되고 있다. IATA에 따르면, 글로벌 항공 여객 수요는 2024년 팬데믹 이전 수준을 초과하고, 2025년에는 약 47억 명에 이를 것으로 전망된다.

이와 더불어 기존 항공기 복합재료로 주로 사용되는 열경화성 소재는 재활용이 어려운 특성을 가지며, 폐기물 대부분이 소각 및 매립에 의존하고 있어 환경오염 문제가 심화되고 있다. 특히, 항공기 부품의 교체 및 정비 과정에서 발생하는 폐기물은 2021년 5,978톤에서 2024년 11,215톤으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 배경에서, 친환경 항공 부품의 고속 자동화 생산 기술은 작업시간 단축 및 수작업 감소를 통해 최소 40% 이상의 인건비 절감을 가능하게 하며, 新항공산업에서 글로벌 원가 경쟁력을 확보하는 핵심 전략으로 주목받고 있다.

## 3. 추진체계

주관부처인 우주항공청의 관리 하, 아래와 같은 추진체계로, 우선추진과제 총괄기획위원회와 기술분과위원회의 협의를 통해 과제 기획이 진행 중이다.



Fig. 1. 추진체계

## 4. 결론 및 향후과제

본 학회에서 제시된 의견은 우선추진과제 총괄기획위원회와 기술분과위원회에 공유되어 과제 기획 시 참고할 예정이다.

# 탄소섬유보강재 및 긴장재 연구 동향 및 적용현황

## Research Trends and Application Status of Carbon Fiber Reinforced Polymer Rebars and Prestressing Tendon

\*김장호<sup>1</sup>  
\* JHJ Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 건설환경공학과  
\*E-mail: jjhkim@yonsei.ac.kr

**Keywords:** Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Rod, Grid, Tendon

### 1. 서론

CFRP는 기존 철근 대비 높은 강도를 가지면서도 무게가 훨씬 가벼워 구조물의 하중을 줄일 수 있으며, 부식에 강하기 때문에 해양 구조물이나 염해 환경에 노출된 교량 및 건축물에서 활용 가능성이 크다. 본 연구에서는 CFRP 보강재를 철근 대체재로 활용하기 위한 기술 개발 및 실용화 연구를 수행하고, 이를 통해 국내 건설 산업에서 CFRP의 적용 가능성을 높이고자 재료적 특성, 부재 성능, 실구조물 적용에 대한 연구를 진행하고 있다.

### 2. CFRP 복합체 건설분야 연구 현황

#### 2.1 CFRP Rod 연구 현황

CFRP Rod의 적용 및 사용성을 평가하기 위해 CFRP Rod의 섬유와 폴리머의 혼합비율, 재료의 물성(인장, 압축, 내구성(염해, 탄산화, 내알칼리성))을 평가하였다. 또한 CFRP Rod를 보, 슬래브, 벽체에 적용하여 구조실험을 진행하였다. 보, 슬래브 실험에서는 휨, 전단, 부착력, 균열, 하중-처짐, 에너지 흡수율을 주요 변수로 평가하여 구조적 성능 및 내구성을 검토하였고 벽체 실험에서는 압축, 전단 저항성, 균열 거동을 주요로 평가하였다. 그림. 1과 같이 CFRP Rod의 실용화를 위하여 철도교 45m ZiPC 실물거더에 22.3%를 대체하여 적용하였다.

#### 2.2 CFRP Grid 연구 현황.

콘크리트 구조물에 CFRP Grid는 그림. 2와 같으며 CFRP Grid 규격은 가로x세로(3,000mm x 1,000mm), 중간재 규격은 두께 1mm, 폭 20mm로 중간재 사이의 간격은 100mm이다. CFRP Grid는 CFRP Rod와 같이 재료의 물성, 콘크리트에 적용한 구조실험을 수행하였다.

#### 2.3 CFRP Tendon 연구 현황

CFRP Tendon은 기존 PC(Prestressed Concrete) 강선이 가지는 부식과 피로, 자중 프리스트레스 손실 문제 등을 효과적으로 해결할 수 있어 건설 구조물의 내구성을 향상시키는데 기여할 수 있으나 CFRP

케이블의 성능 평가 기준 및 CFRP 케이블-콘크리트 복합체의 설계기준은 아직 전 세계적으로 확립되지 않은 상태이다. 따라서 CFRP 케이블의 안정적인 적용을 위해서는 표준화된 성능 평가 방법과 설계 기준을 마련하는 것이 중요하다.



Fig. 1. CFRP Rod 적용 ZiPC 실물거더.

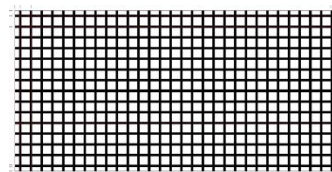


Fig. 2. CFRP Grid

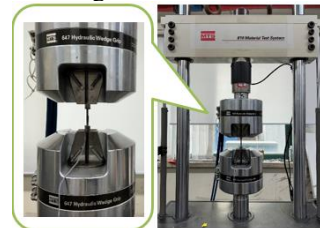


Fig. 3. CFRP Tendon 직접인장시험

### 3. 결론 및 향후과제

CFRP Rod의 경우 실구조물 적용을 위하여 철도교 시공을 향후 목표이며, CFRP Grid의 실용화를 위하여 교량 슬래브 하부에 거더와 연결되어있는 데크에 적용할 예정이다. CFRP Tendon의 경우 단기손실(정착, 마찰, 부착, 비부착, 릴렉세이션 등)과 장기손실(크리프, 건조수축) 성능에 대한 연구가 지속적으로 수행할 예정이다.

#### 참고문헌

[1] 탄소교분자 부식 ZERO 철근대체재 기술 연구개발 계획서, 국토교통과학기술진흥원, 2021.

# FRP튜브보강 부분충전 콘크리트파일의 해석 및 설계 Analysis and design of partially filled concrete piles reinforced with FRP tubes

\*정흥진<sup>1</sup>  
\* H. Chung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 전주대학교 토목환경공학과 (주)코어텍  
\* E-mail: hjchung@jj.ac.kr

**Keywords:** CFRP, Composite Piles, FRP Tubes, Numerical Analysis

## 1. 서론

콘크리트말뚝은 압축강도가 인장강도에 비하여 매우 크기 때문에 수직하중에 대한 저항성은 우수하나, 수평하중에 의하여 발생하는 휨에 대한 저항성은 상대적으로 취약하고, 강관말뚝은 압축강도와 인장강도가 동일하기 때문에 휨강도가 우수하지만, PHC 말뚝에 비해서 경제성이 떨어지고, 부식에 의한 단면 손실이 발생할 우려가 있으며, 압축부에서 좌굴이 발생할 우려가 있다.

일반적인 콘크리트 말뚝에 섬유보강 플라스틱 (FRP) 으로 제작한 튜브를 합성한 콘크리트 FRP합성말뚝의 경우, 휨강도와 부식에 대한 저항성이 우수하여 기존 말뚝의 대안으로 적용할 수 있으나 설계방법 및 해석 모델을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 콘크리트 FRP합성말뚝의 현장적용을 위한 기초연구로서 이론적인 방법, 수치해석적인 방법, 실험적인 방법으로 휨거동 및 휨강도를 각각 비교, 분석하였다

## 2. 수치해석모델 및 설계강도 산정

수치해석 모델의 적용성을 검증하기 위해 원심력으로 다져진 콘크리트의 압축강도시험 방법 (KS F 2454)을 적용한 실험값과 콘크리트 소성모델을 이용한 해석값을 비교하여 콘크리트손상 소성모델을 검증하였다. 콘크리트의 비선형거동은 ABAQUS의 CDP (Concrete Damage Plasticity)모델을 사용하였고 FIB-Model-Code-1990 concrete Model에서 제시한 계수값을 적용 하였다. 변형률적합법은 선형분포를 보이는, 변형률에 대응하는 각 재료의 응력을 구하여 단면의 강도를 산정하는 방법으로 각 재료의 응력-변형률 관계만 정확하게 주어지면 적합조건 및 평형조건을 만족시키게 되므로, 정해에 가까운 결과가 얻어질 수 있다. 본 연구에서는 변형률적합법을 이용하여 각 변형률에 대응하는 힘과 모멘트를 산정하고 축방향 힘의 평형 조건을 이용하여 FRP합성말뚝의 휨강도를 산정하였다.

## 3. 수치해석 및 실물실험 결과

수치해석 모델의 적용성을 검증하기 위해 직경이 500 mm인 콘크리트 FRP합성말뚝의 휨실험을 수행하였고 그 결과를 수치해석결과와 비교하였다.

초기 강성에서 보이는 차이는 콘크리트 재료모델과 실제 강성과의 차이에서 비롯된 것으로 판단되며 최종적인 휨강도는 비교적 정확하게 예측하였다.

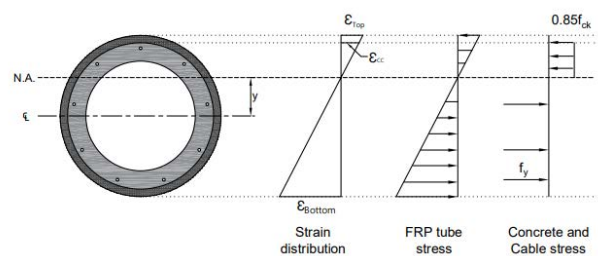


Fig. 1. Stress Distribution of .

Table 1 Caption in 1 line, English only w/o period

		Flexural strength (kN·m)		
Equation	Analysis	Test1	Test2	Test3
		Test ave.		
770.3	816.8	789.0	764.2	785.1
		779.4		

## 4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 FRP합성말뚝의 현장적용을 위한 기초연구로서 변형률적합법을 이용한 이론적인 휨강도산정방법을 제시하였고, 콘크리트 손상거동을 고려할 수 있는 수치해석모델을 개발하였으며 이를 실험결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

## 참고문헌

- [1] Chung, H. J., and Paik, K. H. (2018), Analysis on Flexural Behavior of Hollow Prestressed Concrete Filled Steel Tube Piles, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 22, No. 2, 133-140.
- [2] Mohamed, H. M., and Masmoudi, R. (2010), Flexural strength and behavior of steel and FRP-reinforced concrete-filled FRP tube beams, Engineering Structures, Vol. 32, 3789-3800. Aenean et est sem. Phasellus nec lectus bibendum,.

# 건설분야 복합재 적용 현황 및 최신 연구동향 Current Status of Composite Material Applications in the Construction Sector and Latest Research Trends

\*김정희<sup>1\*</sup>  
\* J.H. Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 아이에스동서(주) 기술연구소  
\*E-mail: special9373@isdongseo.co.kr

**Keywords:** FRP, Construction sector, CFRP Tube, CFRP Concrete pile, cable, CFRP cable

## 1. 서론

건설 분야에서는 복합재료의 특성 중 가볍고 내구성이 우수하며, 고강도인 재료의 특징을 반영한 연구가 활발히 진행되고 있었다. 그러나, 가격이 비싸고 국내 적용 기준이 명확하지 않아 그 활용도가 보수보강 부분에 국한되어 사용되어 왔다. 그러나 최근 GFRP 보강근의 설계기준(KDS 24 50 05:2024), 건설 표준시방서(KCS 24 50 05:2024)와 FRCM 복합재 구조설계 지침(KCI-PM217.1-24) 등이 제정되며 건설분야에 복합재 적용 기반이 다져지고 있다. 특히, 탄소섬유, 유리섬유 등이 건축 및 토목 구조물에 적용되고 있는 대표적 복합재료로 최근 주요 구조재로 사용을 위한 연구개발(R&D)이 활발히 진행되고 있다.

## 2. 보수보강

복합재의 건설분야 적용은 보수보강 분야에서 많이 활용되고 있다. 교량의 휨 강도 증대를 위해 CFRP 시트를 부착하여 구조적 안정성을 강화하거나, 내진 성능을 강화하기 위해 건축물의 기둥과 보에 복합재를 적용한 사례가 있다. 특히, 지진 다발 지역인 일본에서는 내진 보강에 활발히 적용되고 있으며, 부두나 교각에 적용하여 부식 방지와 수중 내구성 증대에도 활용되고 있다.



그림 1. 보 보강

그림 2. 슬래브 보강

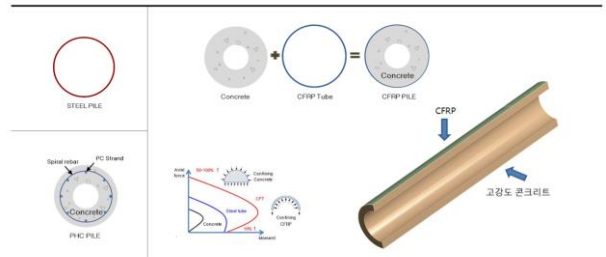


그림 3. 수중 구조물 부식

## 3. 연구동향

2024년 4월부터 2028년 12월까지 연구중인 산업 통상자원부 K Carbon 플래그십 과제는 총 15개의 세부 과제로 구성되어 있으며, 이중 건설분야 과제는 2개로 복합재의 건설 주요 부재의 대표적인 최근 연구과제이다.

“강관 파일 대체용 200톤급 CFRP 튜브 합성 콘크리트 파일 개발” 연구과제는 CFRP Tube와 원심성형 고강도 콘크리트를 합성하여 내부식성, 고기능/고성능, 재료의 효율성 증대를 통한 탄소발생저감형 파일 개발을 목표로 하고 있다.



내부식성이 우수한 CFRP Tube + 원심성형으로 고강도 콘크리트를 구현하여, 이중 부재간 압축효과(confinement effect)를 통해 내력을 극대화한 CFRP 복합재 적용 합성 콘크리트 파일(Carbon Fiber Reinforced Plastic composite Concrete Pile, 이하 CFRP-CP)

그림 4. 파일 연구과제 개념

“건설용 강연선 대체를 위한 2,600MPa급 7연선 CFRP 케이블 제조 및 활용기술 개발” 과제는 경량화 및 내부식성 그리고 진동 감쇄 효과로 PSC 구조물의 안전성 확보를 목표로 한 연구과제이다.

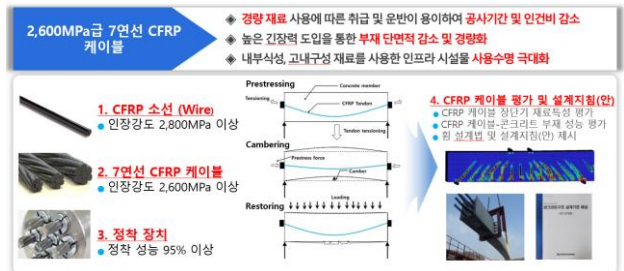


그림 5. 케이블 연구과제 개념

# Highly Transparent, Colorless Optical Engineering Film with Outstanding Mechanical Strength and Folding Reliability Using Mismatched Charge-Transfer Complex Intensification

Sung Woo Hong

Green Circulation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

<sup>†</sup>E-mail: swhong@kitech.re.kr

**Keywords:** flexible displays, optical film, charge-transfer complex, folding reliability

## 1. Introduction

Flexible displays and electronics are advancing rapidly, which necessitates flexible display cover windows (fDCWs) that can replace rigid and fragile glass substrates while withstanding repeated folding and unfolding cycles. fDCWs generally require materials with high optical quality, mechanical strength, folding reliability, and processability for mass production.

In the development of fDCWs, extensive research has focused on ultrathin glass (UTG) and polymeric films. While UTG offers hardness and transparency, it lacks impact strength and manufacturability. On the other hand, polymeric films are more flexible but generally exhibit lower mechanical strength and optical quality. Among potential polymeric materials for fDCWs, polyimides (PIs) are particularly promising due to their exceptional mechanical robustness and thermal stability, which is attributed to the unique charge-transfer complex (CTC). However, conventional colorless polyimides (cCLPIs) often present a trade-off between mechanical and optical properties, typically exhibiting a yellowness because of CTC interactions.

This study presents a highly transparent, colorless, and flexible window film based on a functional CLPI, employing the concept of mismatched CTC intensification through multiple hydrogen bonding and salt complexation interactions.<sup>1</sup> The developed window film demonstrates excellent optical properties and outstanding bulk and surface mechanical strengths. To our knowledge, it exhibits the best-recorded balance between mechanical and optical properties for a highly flexible optical film.<sup>2</sup> Furthermore, it possesses remarkable mechanical durability and folding reliability.<sup>2</sup> These remarkable properties are attributed to the unique supramolecular structure with multiple hydrogen bonding and salt complexation interactions, which exhibits mismatched CTC intensification. The mismatched CTC intensification mechanism is also proposed in this study.

## 2. Results and Discussion

A series of window film (CLPI-X) samples were prepared as follows. An amine-terminated amide oligomer (AAO) was reacted with diamine and dianhydride monomers to synthesize CLPI-X. CLPI-X/S-Y samples were also prepared by adding salt to CLPI-X. The mechanical and optical properties of CLPI samples and commercial engineering plastic films (PC and PET) were analyzed using a universal testing machine and spectrophotometer. The resulting window film exhibited Young's modulus of 10.3 GPa, total transmittance close to 90%, and YI below 2.0. This is the best-recorded balance between mechanical strength and optical properties for a highly flexible optical film.

Window films must have excellent mechanical durability and folding reliability to successfully develop next-generation flexible displays. However, conventional polymers often suffer from significant wrinkling and creasing in folded areas due to permanent deformation beyond their elastic limits. A U-shaped dynamic folding experiment (a folding radius of 1.5 mm and a

folding/unfolding time of 1 s) was performed to measure the mechanical durability and folding reliability. Surprisingly, unlike conventional polymers, the folded surface of CLPI-X/S-Y remained intact and showed no observable deformation, fracture, or damage even after over 300,000 folding/unfolding cycles.

In traditional PI systems, CTCs are formed by specific consecutive interactions between alternately formed electron donors and acceptors. This is the cause of the trade-off effect between the mechanical and optical properties. When the electron donors are replaced with AAO containing amide groups, the alternating electron donor/electron acceptor structure is broken, leading to mismatched CTC interactions. As a result, decolorization can be achieved owing to the weakened interactions resulting from the unique mismatched CTC structure. The weakening of the CTC interactions usually also decreases the mechanical strength; however, CLPI-X exhibited good optical properties and an excellent mechanical strength compared to those of the cCLPIs. It is also noted that multiple amide groups are localized in the AAOs, which means that multiple hydrogen bonds are created between the AAOs of the CLPI-X chains. As a result, the mismatched CTC interactions are intensified, which plays an important role in overcoming the trade-off effect. In addition, because CLPI-X/S-Y chains are connected via multiple hydrogen bonds, salt ions can be maximally complexed by four adjacent CLPI-X/S-Y chains. Owing to this unique supramolecular structure with multiple hydrogen bonding interactions and multiple complexation interactions, the interactions between CLPI-X/S-Y chains are more intense than those between CLPI-X chains.

## 3. Conclusions

In this study, we developed a novel, highly transparent, colorless window film for a flexible display cover window, employing the concept of CTC intensification. The resulting window film demonstrated excellent optical and mechanical properties upon optimizing the monomer compositions and intensifying the CTC interactions. More importantly, the window film showed the best-recorded balance between mechanical strength and optical properties among previously reported optical materials, including commercially available optical-grade engineering plastic films and glass substrates. In addition, the window film exhibited excellent mechanical durability and folding reliability over 300,000 folding/unfolding cycles. These were achieved by intensifying the mismatched CTC interactions based on a combination of multiple hydrogen bonding salt complexation interactions, leading to a unique supramolecular structure. We expect this work to provide a new avenue for fabricating highly flexible optical films for next-generation flexible displays and electronics.

## References

- [1] Hong et al. *Adv. Funct. Mater.* 32:2111040-2111050 2022.
- [2] Unpublished Results.

# 인간 뇌/고분자 바이오복합재료 기반 3D 멀티스케일 분자지도화 기술 Processing human brain/polymer biocomposites for 3D multiscale molecular mapping

박주혁<sup>+</sup>  
Juhyuk Park<sup>+</sup>

서울대학교 공과대학 재료공학부, 신소재공동연구소, 협동과정 바이오엔지니어링

<sup>+</sup>E-mail: juhyukp@snu.ac.kr

**Keywords:** Biocomposites, Polymer Hydrogels, Tissue Processing, Brain Engineering

## 1. 서론

인간 뇌 기능과 질환 이해를 위해서는 조직 내 단백질, RNA 등 생체분자의 3차원 이미징과 그에 기반한 표현형 분석이 필요하다 [1]. 이를 달성하기 위해 다양한 분자 표지 및 이미징 기술이 개발되었지만, 뇌의 약한 기계적 물성과 불투명성, 낮은 분자투과성 등 재료물성적 한계 때문에 거대 조직의 고품질 3차원 분자 지도화를 달성하는 데에 한계가 있어 왔다. 본 연구에서는, 고분자 하이드로젤과 인간 뇌를 복합 재료화 하는 바이오복합재료 가공 기술을 개발하여 투명하고 탄성력이 높으며, 크기가 제어될 수 있는 신개념 인간 뇌 조직 가공 기술을 개발하였다 [2]. 이를 통해 초고속 분자 표지, 멀티스케일 형광 이미징을 시연하고, 알츠하이머병 병리를 탐구하였다.

## 2. 투명, 고탄성, 크기가변, 하이드로젤 가공

목표로 하는 조직 가공 기술 개발을 위해, 투명하고 탄성이 우수하며, 크기 조절이 가능한 고성능 고분자 하이드로젤을 합성하였다. 탄성을 극대화하기 위해, 분자량이 높은 고분자를 저속 합성하여 고도로 엉킨 구조를 형성하였으며, 동시에 기능기의 가수분해를 크기 가변형 기능을 부여하였다. 이 고분자 하이드로젤 신소재를 mELAST (magnifiable entangled link-augmented stretchable tissue-hydrogel)라 명명하였다 (Fig. 1) [2].



Fig. 1. mELAST 하이드로젤 및 인간 뇌/하이드로젤 복합재료 가공 [2].

## 3. 인간 뇌/하이드로젤 복합재료화 기술

개발된 mELAST와 인간 뇌 조직의 복합재료화를 통해 조직의 재료 물성을 강화하였다. 복합재료

공정에서 널리 사용되는 수지 이송 성형 (Resin Transfer Molding)에 착안하여, 고분자 단량체를 인간 뇌 조직 내에 균질하게 분산시킨 후, 열 개시제 기반 현장 중합(in-situ polymerization)을 통해 가공하였으며, 이후 후처리 공정을 거쳐 완성하였다.

## 4. 인간 뇌 3D 멀티스케일 분자지도화

가공된 인간 뇌/고분자 복합체(mELAST)의 고기능화된 물성을 활용하여 인간 뇌의 3차원 분자 지도를 제작하였다. 탄력성을 기반으로 한 분자 표지 가속화 와 크기 가변성을 활용한 초고해상도 멀티스케일 이미징을 달성하였으며 (Fig. 2), 투명성을 이용해 이를 3차원으로 영상화할 수 있었다. 이러한 기술을 활용하여 인간 알츠하이머 질환의 원인 규명에 기여할 수 있었다.

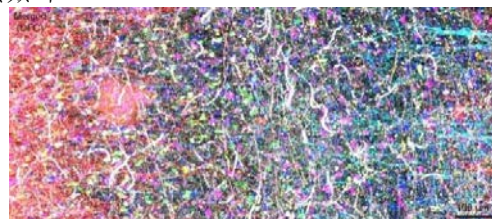


Fig. 2. 인간 뇌 3D 멀티스케일 분자 지도 [2].

## 5. 결론 및 향후과제

본 연구는 고분자 하이드로젤과의 복합재료화를 통해, 인간 뇌 분석의 큰 장애물로 작용해 온 부족한 재료 물성을 해결하는 기술을 개발하였다. 기능화된 하이드로젤의 지속적인 개발과 적용, 그리고 다양한 질병에의 응용을 통해 재료과학과 뇌과학의 동반 발전을 이끌 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] K Chung et al. *Nature* 497 (7449), 332-337, 2013.
- [2] J Park, et al. *Science* 384 (6701), eadh9979, 2024.

### 후기

본 연구는 JPB Foundation, National Institutes of Health, Institute for Basic Science 등에 의해 지원 받았음.

# 3DSW continuous fiber-reinforced 3D printing mold for the autoclave / compression molding process

\*Gu-Hyeok Kang<sup>1+</sup>, Jonathan Haas<sup>1</sup>, Andreas Menrath<sup>1</sup>, Bjoern Beck<sup>1</sup>, Young-Bin Park<sup>2</sup> and Frank Henning<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT, Karlsruhe, 76327, Germany, <sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), UNIST-gil 50, Ulsan-gun, Ulsan 44919, Republic of Korea  
<sup>+</sup>E-mail: gu.hyeok.kang@ict.fraunhofer.de

**Keywords :** BAAM, 3DSW, continuous fiber reinforcement, composite autoclave mold

## 1. Introduction

In this study, we apply existing BAAM (Big Area Additive Manufacturing) technology with 3DSW (3D Skeleton Winding) to enhance molds for compression molding. This approach improves shape and surface quality through a machining process after BAAM, including the 3DSW process, to manufacture high-strength, continuous fiber-reinforced composite molds. The reinforced molds will be effectively used continuously and provide sufficient usability under autoclave processing conditions.

## 2. Manuscript

**2.1 BAAM:** The mold was produced using BAAM. It employs the mirror skirt mold and seat bracket side mold used by 'H' Motors, which were created through BAAM and finished through machining. The materials used for production include three types: PC, PPS, and ABS.

**2.2 3DSW reinforcement:** The 3DSW reinforcement method for composite molds has been studied, leading to the implementation of continuous fiber reinforcement. Using the reinforced molds, compression tests are conducted to verify their ability to withstand pressure during processing as shown in the Fig. 1.

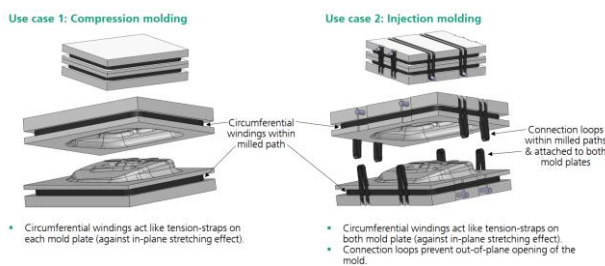


Fig. 1. 3DSW reinforced molds for compression molding

## 3. Results and Discussion

By simulating the molds produced using BAAM, we were able to assess the strain during the process. As shown in Fig. 2, we identified that not only does mold failure occur during typical use, but also that the deformation of the mold affects the precision of the product.

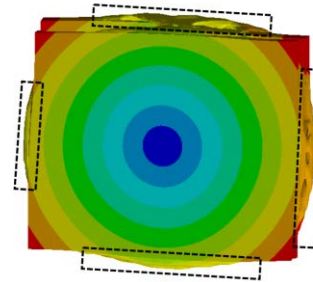


Fig. 2. BAAM compression mold simulation

Through simulation, we identified the areas that require reinforcement and devised methods to strengthen the corresponding locations, as shown in Figure 1. To validate this, we produced a scaled-down version of the BAAM + 3DSW mold and conducted experiments. To verify the reinforcement effect of 3DSW, we performed compression tests using a universal testing machine, allowing for a comparison of the reinforcement effects based on the number of windings. This enabled us to predict effective reinforcement methods and the required number of windings for appropriate reinforcement.

## 4. Conclusions, Significance and/or Future Works

Molds used for producing composite products typically have high costs when made of metal, presenting a significant issue. Through this BAAM + 3DSW mold study, we were able to address these concerns. The BAAM molds reinforced with continuous fibers demonstrated sufficient material properties, effectively suggesting a suitable mold manufacturing method for small-scale production.

### Acknowledgement

This work was supported by Machinery Equipment Industry Technology Development Program (Grant No. RS-2024-00441896) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) of Korea through Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT).

# Transferred Nanomaterials for Load-Bearing and Broadband Radar Absorbing Structures

\*Kinal Kim<sup>1\*</sup>, Seongjun Kim<sup>1</sup> and Sang-Eui Lee<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University

<sup>†</sup>E-mail: selee@inha.ac.kr

**Keywords** : Nanocarbon, radar-absorbing structure, frequency-selective surface, glass fiber, interlaminar shear strength

## 1. Introduction

Stealth technology often relies on frequency-selective surfaces (FSS) for radar absorption. Traditional FSS-RAS fabrication requires time-consuming steps involving conductive inks and metallic masks. This study replaces these with nanomaterial (NM) [1] patterns transferred onto glass fiber prepregs, forming an FSS-RAS based on a Jerusalem cross design. Nanocarbon is deposited on polyimide film, then pressure-rolled transferred on glass fiber fabric. The composite is vacuum-bagged and cured, achieving over a required radar absorption across an interesting frequency band with a less than 3.0 mm thickness. This scalable, straightforward approach facilitates precise patterning without complex tasks. Short-beam shear test results also shows that interlaminar shear strength (ILSS) of composite increases when integrating NM as interlayer between each ply of glass fabric.

## 2. Experimental Method

The NM-based FSS pattern was produced by depositing NM on polyimide (PI) film. The electrical conductivities of NM was measured using 4-point methods. With these values, FSS-based RAS was designed based on Jerusalem-cross pattern and simulated using CST Microwave Studio. After that, NM was transferred onto glass fabric prepreg using pressure-rolling technique. The composite RAS was fabricated using vacuum-bagging process. Finally, the electromagnetic absorption performance was measured using free-space measurements. The short-beam shear test were fabricated and tested according to ASTM D2344 standard using universal testing machine.

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Radar Absorbing Performance

**Fig. 1a** shows the final FSS-RAS with optimized shapes of Jerusalem-cross FSS. The total thickness of the FSS-RAS is under 3.0 mm. The free-space measurement results shows that the return losses are less than a required absorption in the orthogonal angles ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) modes (**Fig. 1b**). This result means that the fabricated RAS is capable of absorbing more than the required absorption of electromagnetic wave in the frequency range of interest.

### 3.2 Short-Beam Shear Test

Optical images of the fractured specimens are shown in

**Fig. 1c**. Failure due to delamination was observed in all specimen. For the  $[GF_2/NM]$  specimens, delamination occurred only at the interfaces without NM, while the interfaces containing NM remained intact, even after fiber breakage. The calculated ILSS values (**Fig. 1d**) are 23.2 MPa, 24.0 MPa, and 29.0 MPa for  $[GF]$ ,  $[GF_2/NM]$ , and  $[GF_1/NM]$ , which correspond to increases of 3.2% and 25.1% for  $[GF_2/NM]$  and  $[GF_1/NM]$ , respectively.

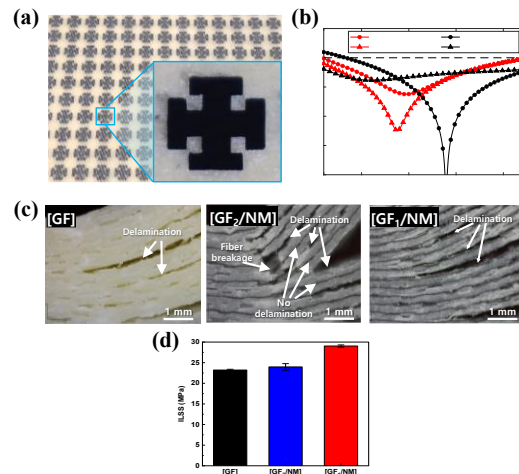


Fig. 1. (a) Schematic of NM pattern, (b) electromagnetic absorption performance, (c) Optical images of fractured SBS test specimens, and (d) interlaminar shear strength (ILSS) of GF composite with and without NM

## 4. Conclusion

An composite RAS based on FSS using transferred NM was fabricated, achieving over the required absorption across the interesting frequency band at less than 3.0 mm thickness. Short-beam shear test also revealed that the ILSS of glass-fiber composite was enhanced by integrating NM as interlayer. This novel technique has proven to be effective and scalable.

## References

[1] S. E. Lee, et al. *Compos. Stru.* 76(4), 397 (2006).

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT). (No. NRF-2022R1A2C1006020).

# 산소분압에 따른 캐노피 투명체 코팅의 성능 변화 연구 Effects of Oxygen Partial Pressure on Canopy Transparency Coatings

\*황민제<sup>1</sup>, 최광식<sup>1</sup>  
 \* M.J. Hwang<sup>1</sup>, K.S. Choi

<sup>1</sup> 한국항공우주산업(주)  
 † E-mail: minje.hwang@koreaero.com

**Keywords** : Transparency, Canopy, Coating

**Acknowledgement** : 이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 제원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-020)

## 1. 서론

캐노피 투명체의 소재적 특성으로 인한 전자기파 및 태양광 투과 성능을 제한하기 위하여 다양한 캐노피 투명체 코팅기술 연구가 수행되고 있다. 본 연구를 통해 코팅을 통한 투명체에 전도성을 부여하는 연구를 수행하였으며 진공증착 시 산소분압을 달리하여 코팅을 수행하고 특성을 분석하였다.

## 2. 제작

150 x 150 mm 평판의 스트레치드 아크릴 기판에 캐노피 투명체 코팅을 수행하였다.

## 3. 결과

산소분압 비율이 감소됨에 따라 기존 공정보다 더 낮은 면저항 및 광투과도를 확보할 수 있었으며, 추가적으로 두께를 감소시킴에 따라 면저항 및 광투과도가 일부 상승하나 기존보다 우수한 성능이 유지되는 것을 확인하였다.

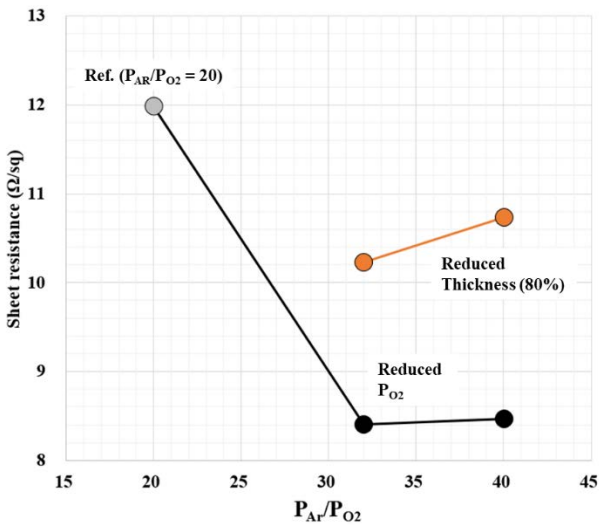


Fig. 1 Sheet resistance measurement results

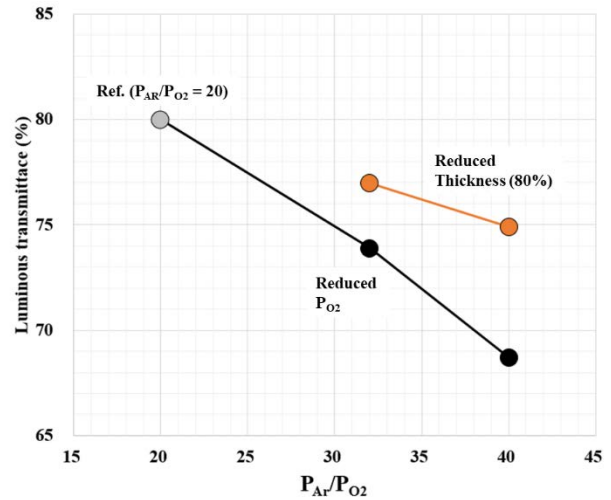


Fig. 2 Transmittance measurement results

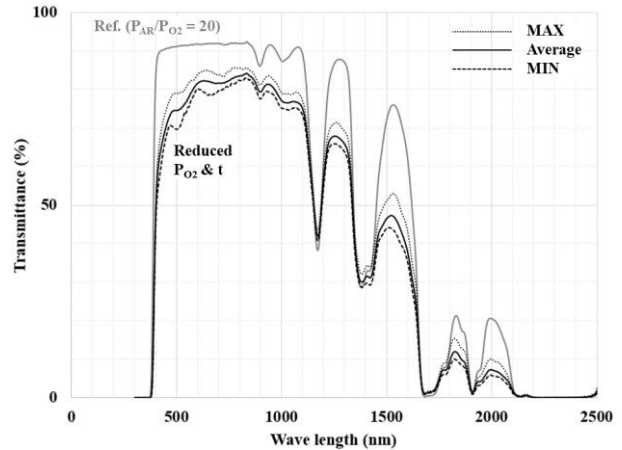


Fig. 3 UV-Vis-NIR measurement results

## 4. 결론 및 향후과제

산소분압에 따른 캐노피 투명체 코팅 성능의 변화를 확인하였다. 공정개선을 통해 더 낮은 두께에서 면저항 및 태양방사투과율을 추가적으로 낮출 수 있었다.

# 저온 저압 신제조 공정을 활용한 고성능 산화물/산화물 세라믹 매트릭스 스텔스 복합재 구조 물성 평가

## Evaluation of mechanical properties in oxide/oxide ceramic stealth composites through innovative manufacturing techniques

\*홍동준<sup>1</sup>, 장한나<sup>1</sup>, 임채환<sup>1</sup>, 최원호<sup>2</sup>, 홍성원<sup>2</sup>, 이현석<sup>2</sup>, 고현석<sup>3</sup>, 이상훈<sup>3</sup>, 남영우<sup>1,4\*</sup>  
\* D.J Hong<sup>1</sup>, H. Jang<sup>1</sup>, C.H. Lim<sup>1</sup>, W.H. Choi<sup>2</sup>, S.W. Hong<sup>2</sup>, H.S. Lee<sup>2</sup>, H.S. Ko<sup>3</sup>, S.H. Lee<sup>3</sup>, Y.W. Nam<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup> 한국항공대학교 일반대학원 항공우주 및 기계공학과, <sup>2</sup> 대한항공 항공기술연구원,  
<sup>3</sup> 한국세라믹기술원 수소·디지털융복합센터, <sup>4</sup> 한국항공대학교 스마트드론공학과

\* E-mail: ywnam@kau.ac.kr

**Keywords:** Stealth vehicles, Oxide/oxide CMCs, Ni-plated ceramic oxide fiber, Micro-structure

### 1. 서론

기존 연구된 세라믹 매트릭스 복합재(CMCs)는 주로 SiCf/SiC와 같은 비산화물 계열이며 극초음속 환경에서 추가적인 구조설계가 필요하다. 또한, 문헌 조사 결과 기존 소재들은 극초음속 환경에서 요구되는 고온 성능을 충족하지 못하는 한계가 있다 [1-2]. 이에 본 연구에서는 산화물 세라믹 매트릭스 복합재(O-CMCs)를 개발하기 위해 저온·저압 성형 공정을 적용하였으며 고내열 산화물 섬유 및 세라믹 매트릭스를 이용하여 대형화 및 정밀 형상화 구현의 어려움을 개선하고자 하였다 [3-5]. 제작된 복합재는 기계적 물성과 온도 변화에 따른 전자기적 물성을 평가하였으며 고내열 세라믹 폼을 이용한 전파 흡수 구조체를 설계·제작하여 상온 및 고온 환경에서의 광대역 전파 흡수 성능을 평가하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 재료 준비

고온 환경에서도 구조적 안정성과 고내열 특성을 가지는 세라믹 산화물 섬유를 선정하였으며 전자기적 물성 개질을 위해 섬유 표면 OO 무전해 도금 공정을 적용하여 유전 손실 특성을 조절하였다. 세라믹 매트릭스는 저온·저압 성형 공정을 활용하여 알루미늄 기반 슬러리 형태로 제작하였으며 기존의 지오폐리머 기반 매트릭스의 변형 구조를 적용하였다. 세라믹 폼은 전파 산란 효과와 열 차단 성능을 고려하여 선정되었다. OOO 폼은 실리콘 카바이드 폼에 비해 낮은 열전도도와 우수한 화학적 안정성을 가지며 경량성과 다공성 구조를 통해 전파 흡수 성능을 극대화할 수 있어 최종적으로 적용되었다.

#### 2.2 설계 및 방법

본 연구에서는 ASTM Standard 기반으로 세라믹 매트릭스 복합재의 상온 기계적 물성 시험을

수행하였다. 광대역 전파 흡수 구조체는 폼 코어와 다층 구조의 최적화를 통해 흡수 성능을 극대화하였다. 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 활용하여 최적 두께를 도출하고 광대역에서 우수한 전파 흡수 성능을 갖는 구조를 설계하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 세라믹 매트릭스 복합재 기반의 광대역 전파 흡수 구조체를 개발하고 기계적 및 전자기적 특성을 평가하였다. CT-scan과 SEM 단면 이미지를 통해 기공률을 분석한 결과, 매트릭스 조성에서 입자 크기와 복합재 경화 공정이 기공률 및 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통해 균일한 매트릭스 분포와 우수한 기계적 특성을 확보하였다. 상온 및 고온 환경에서 전파 흡수 성능을 평가한 결과, 광대역에서 최대 9.22 GHz 대역폭에서 90% 이상의 흡수 성능을 보였으며 고온 환경에서 온도 변화에 따른 전파 흡수 특성을 평가하였으며 성능을 유지함을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] L. P. Zawada et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 86(6):981-990, 2003.
- [2] A. Tontisakis et al.. *Ceramic International*. 47(4):5347-5363, 2021.
- [3] A. Débarre et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 42(15):7149-7156, 2022.
- [4] E. Volkmann et al. *Journal of Material Science*. 49:7890-7899, 2014.
- [5] A. B. Peters et al. *Materials Science*. 15:3328, 2024.

#### 후기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구(KRIT-CT-22-028)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

## 회전의 항공기의 레이더 반사 면적 측정에 관한 연구

### A Study on the Measurement of Radar Cross Section of Rotary Wing Aircraft

\*박동진<sup>1</sup>, 진도현<sup>1</sup>, 이정률<sup>1\*</sup>

\* D.J. Park<sup>1</sup>, D.H. Jin<sup>1</sup>, J.R. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> KAIST 항공우주공학과

\* E-mail: [leejrr@kaist.ac.kr](mailto:leejrr@kaist.ac.kr)

**Keywords:** RCS(Radar Cross Section), Anechoic chamber, Rotary aircraft.

#### 1. 서론

현대 전장 환경에서는 적의 탐지를 회피할 수 있는 스텔스 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 KF-X 사업과 F-35 도입 등으로 인해 고정익 스텔스 항공기에 대한 국내 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 생존성 향상을 위한 회전의 항공기의 스텔스 기술 확보에 대한 관심도 증대되고 있다.

회전의 항공기는 복잡한 회전체 구조와 다양한 운용 환경으로 인해 고정익에 비해 RCS(Radar Cross Section) 분석 및 측정이 더 어렵고 정밀한 기술이 요구된다. [1] 이에 따라 본 연구에서는 회전의 항공기의 스텔스 기술 개발 동향과 함께, 실제 RCS 측정에 필요한 시험 환경 및 분석 기술에 대해 고찰하고자 한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 회전의 항공기의 RCS 측정의 특수성

회전의 항공기는 메인로터, 테일로터 등의 회전체가 포함된 구조로, 이들의 회전 반경, 속도, 블레이드 각도 등의 요소에 따라 RCS 값이 시간에 따라 변화하게 된다. 특히 회전체가 레이더 빔 방향으로 접근하거나 이탈할 때 발생하는 도플러 쉬프트(doppler shift) 효과는 고정익 항공기에서는 나타나지 않는 동적인 주파수 변조(RCS modulation)를 유발한다. 따라서 회전의 항공기의 RCS는 고정된 값이 아니라 시간-주파수 영역에서 변화하는 스펙트럼 형태로 해석되어야 한다.

##### 2.2 동적 RCS 측정을 위한 시험평가 기술

이러한 특성을 고려하기 위해서는, 단순히 정적인 조건에서 RCS를 측정하는 기존 방식이 아닌, 회전체의 회전 동작이 포함된 동적 환경에서의 시험평가 시스템이 필요하다. 예를 들어, 레이더 송수신기와 회전 시험대(로터 테스트 장치)를 동기화하고, 회전 상태에서 측정된 RCS 데이터를 스펙트로그램으로 분석함으로써 doppler 효과를 정량화할 수 있다.

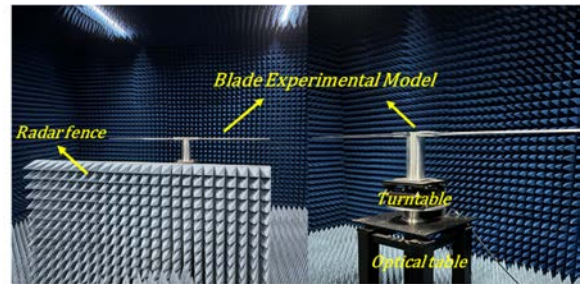


Fig. 1. Experimental setup for rotating blade RCS measurements

#### 3. 결론 및 향후과제

회전의 항공기의 회전체 구조는 고정익에 비해 RCS 측정 시 훨씬 복잡한 물리적 현상을 유발하며, 특히 doppler 효과를 고려한 동적 시험 환경이 필수적임을 확인하였다. 기존의 정적 RCS 분석이나 수치 해석 기반의 접근만으로는 실험적 검증이 어렵기 때문에, 실제 회전의 구조에 대한 시험 기반 데이터 확보가 시급한 과제로 남아 있다.

향후에는 실제 회전의 항공기의 RCS를 동적 환경에서 실험적으로 측정할 수 있는 시스템을 설계하고, 이를 기반으로 도플러 주파수 변화와 RCS 변동 간의 상관관계를 정량화할 수 있는 분석 체계를 구축하고자 한다.

#### 참고문헌

[1] Timothy Conn (2005), "Time-Frequency Analysis of Time-Varying Spectra with Application to Rotorcraft Testing", IEEE, NRTF Operations, USA

#### 후기

이 논문은 2022년 12월부터 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.KRIT-CT-22-082), 고속 장거리 기동 헬기 개발 기술(Build-I)

# 유전 알고리즘과 멱 법칙을 통합한 마이크로파 흡수체의 최적 설계 Optimal design of Microwave Absorbers integrating genetic algorithm and power law

\*신승철<sup>1</sup>, 홍명진<sup>1</sup>, 이상의<sup>1\*</sup>  
\* S.C. Shin<sup>1</sup>, M.J. Hong<sup>1</sup>, S.E. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 인하대학교 기계공학과  
\* E-mail: selee@inha.ac.kr

**Keywords:** MWNT, Radar absorbing materials, Power law, Genetic algorithm(GA).

## 1. 서론

전자기 기술의 발전과 동시에 전자기기에서 발생하는 전자파 공해와 군사 시설 및 정교한 기기의 작동을 방해하는 전자파 간섭에 대한 관심이 많아지고 있다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전자파를 열에너지 또는 다른 형태의 에너지로 변환할 수 있는 전자파 흡수 소재의 합리적인 설계 및 제작이 필요하다. 본 연구에서는 유전 알고리즘과 멱 법칙을 결합하여, MWCNT 단일 filler를 이용한 X-band (8.2~12.4GHz) 전영역을 모두 커버하면서 최적의 두께를 갖는 레이더 흡수체를 설계하였다.

## 2. 실험

PDMS Base와 PDMS Curing agent를 10:1 비율로 혼합하였다. 이후 MWCNT를 0.0~2.0wt% 함량으로 PDMS와 혼합하였으며 Paste mixer를 사용하여 MWCNT가 matrix에 골고루 분산하도록 하였다. 이후 100 °C 이상의 온도에서 MWCNT-PDMS 복합체를 경화 시켰다. MWCNT-PDMS 복합체의 전자기 특성 평가를 위해 X-band 자유공간측정 장비를 이용하였다. 이후 Matlab과 CST studio 상용 소프트웨어를 사용하여 레이더 흡수체 설계 및 해석을 진행하였다.

## 3. 결과 및 토론

PDMS의 유전 특성을 고려하여 퍼콜레이션 이론에 기반한 기존 스케일링 법칙의 수치방정식을 수정하였으며, 복합체의 복소 유전율을 주파수와 필러 함량의 함수로 도출하였다.

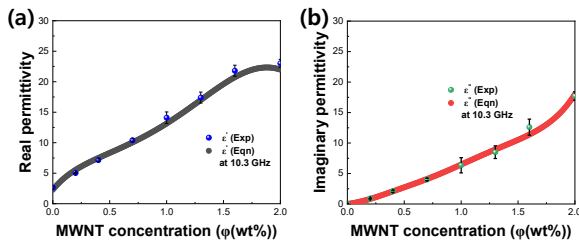


Fig. 1. Prediction of (a) Real and (b) Imaginary permittivity of composite at 10.3GHz

Fig. 1 (a,b)를 보면 수정된 모델이 측정된 값과 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 이는 수정된 모델이 유전체 특성을 잘 예측한다고 볼 수 있다.

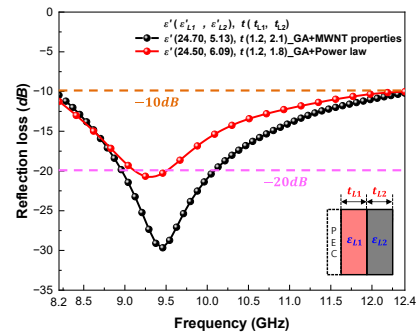


Fig. 2. Comparison of reflection loss

제작된 물성의 유전율에서 예측가능한 물성의 유전율까지 범위를 늘려 변수로 설정하였으며 GA를 통해 X-band에서 최적의 두께를 갖는 소재를 설계하였다. Fig. 2를 보면 X-band 에서 reflection loss가 모두 -10dB을 만족하였으며 흡수체의 두께는 3.0mm이었다.

## 4. 결론 및 향후과제

제안된 최적 설계 방법은 주파수 및 필러 농도에 따른 손실 유전체 복합체의 복소 유전율을 정량적으로 예측함으로써, 레이더 흡수체 설계 시 각 층에 대해 보다 다양한 변수 조합을 제시할 수 있었다. 이를 통해 측정된 물성 기반 기존 설계 방법에 비해 흡수체의 두께를 0.3mm 감소시켰다.

## 참고문헌

[1] X. Chen, H. Liu, D. Hu, H. Liu, W. Ma, Ceramics International 47, 2021, 23749-23761

## 후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받는 중견연구사업인 '단분자 플러렌 유도체를 이용한 금속 복합재료의 물성 제어 기술 개발' (2022R1A2C1006020)에 의해 수행되었습니다.

# 연속 섬유 3D 프린트 기반 전파흡수구조의 RCS 저감 효과에 관한 연구 Study on the RCS reduction effect of continuous fiber 3D printing-based Radar absorbing structure

\*진도현<sup>1</sup>, 박동진<sup>1</sup>, 이정률<sup>1\*</sup>  
\* D.H. Jin<sup>1</sup>, D.J. Park<sup>1</sup>, J.R. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 항공우주공학과  
\*E-mail: leejrr@kaist.ar.kr

**Keywords:** 3D Printing, Optimization design, Radar absorbing structure, Radar cross section

## 1. 서론

3D 프린팅 공정은 복잡한 형상의 구조물을 빠르고 정확하게 제작할 수 있는 장점을 가져 3D 프린팅 기술 기반 복잡한 형상의 전파흡수체 설계 및 제작 연구가 활발히 수행되었다 [1]. 이러한 전파흡수구조는 전파의 경사 입사 조건에서 높은 흡수성능을 가지도록 설계 및 제작 가능하다 [2]. 본 논문은 경사 입사 전파 흡수에 특화된 전파흡수구조 (RAS, Radar absorbing structure)를 설계 및 제작한 뒤 wedge 형상의 시편에 적용하여 RCS (Radar cross section) 측정을 통해 전파흡수구조 적용에 따른 구조의 RCS 저감 효과를 분석하였다.

## 2. 연속 섬유 3D 프린팅 기술 기반 전파흡수구조의 RCS 저감 효과 연구

### 2.1 사각 블록 요철면 다층 전파흡수구조 설계

본 논문에 사용된 필라멘트는 두종류로 고유전율 특성을 가진 Onyx ESD (Electrostatic discharge) 필라멘트와 절연성 특성을 가진 Fiberglass 필라멘트가 사용되었다. Onyx ESD와 Fiberglass로 제작된 다층 구조와 그 위에 사각 블록 요철면 표면 구조를 합쳐 요철면 다층 전파흡수구조를 설계하였다. 요철면 표면이 돌출되지 않도록 구조 상부에 fiberglass 소재의 upper plate를 부착하여 전파흡수구조를 설계하였다. 각 설계 파라미터를 조절하여 변수로 TE/TM 모드의 경사 입사의 전파에 대한 최적의 전파 흡수 성능을 가지도록 Ansys HFSS 전자기 해석 소프트웨어를 통해 최적화 설계를 수행하였다. 설계된 전파흡수구조의 모식도는 Fig.1 (a) 와 같다.

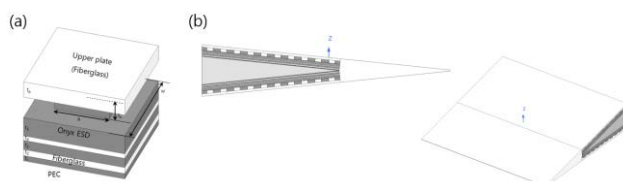


Fig. 1. (a) 최적 설계된 전파흡수구조 및 (b) 전파흡수구조가 적용된 wedge 시편에 관한 모식도

### 2.2 전파흡수구조 적용된 wedge 시편 제작 및 RCS 측정

초음속 항공의 날개의 앞전 형상에 해당되는 wedge 형상 시편에 2.1절에 설계한 전파흡수구조를 적용하였다. 전파흡수구조가 적용된 wedge 시편 모식도는 Fig.1 (b)와 같다. 연속 섬유 3D 프린트를 통해 전파흡수구조를 제작하여 wedge 시편 양 옆면에 적용하였고 가장자리 부분은 절연 소재인 fiberglass 소재로 제작하였다. 제작된 전파흡수구조 적용 wedge 시편에 대하여 RCS를 측정하였으며 동일 형상 및 크기의 알루미늄 소재의 wedge pec 시편의 RCS와 비교하였다.

## 3. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 경사 입사 전파 흡수에 특화된 전파흡수구조를 적용한 실구조에 대하여 RCS 저감 효과를 실험적으로 분석 및 확인하였다. 향후 전파흡수구조가 적용된 다양한 형상의 시편을 제작하여 RCS 저감 효과를 분석할 예정이다.

### 참고문헌

- [1] J. Ren et al. *Materials*. 11:1249, 2018.
- [2] D. Yubing et al. *Materials & Design*. 208:109900, 2021.

### 후기

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행되었습니다 (NRF-2020 M3C1C1A01084220).

# 전파 흡수 재료의 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가 Evaluation of High-Temperature Electromagnetic Performance of Radar-Absorbing Materials According to Coating Thickness

\*최병우<sup>1</sup>, 강태웅<sup>1</sup>, 배경훈<sup>1</sup>, 백상민<sup>2</sup>, 이종광<sup>1\*</sup>  
 \* B.W. Choi<sup>1</sup>, T.W. Kang<sup>1</sup>, K.H. Bae<sup>1</sup>, S.M. Baek<sup>2</sup>, J.K. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 한밭대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 국방과학연구소  
 † E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

**Keywords:** Stealth, Radar Absorbing Material, Reflection Loss, Free-Space Measurement, Resonant Frequency

## 1. 서론

스텔스(stealth)란 전파, 적외선, 음향 탐지 장치 등 다양한 탐지 장치의 추적에 탐지를 최소화하는 것을 의미한다[1]. 이러한 스텔스 기술이 적용된 항공기는 적의 탐지방을 쉽게 무력화할 수 있으며, 아군의 생존성 향상에도 직결된다[2]. 탐지 방법 중에서 전자기파에 의한 탐지 방법이 원거리에서 효과적으로 탐지가 가능하기 때문에, 이를 최소화하는 것은 매우 중요하다[3]. 최근에 레이더 탐지 기술이 발전함에 따라 비행체 배기구 및 침투부 영역과 같은 고온 영역에 스텔스 기술 적용이 필수적으로 요구되고 있다[4]. 이 연구에서는 전파 흡수 재료(radar absorbing material)의 재료 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 코팅 두께에 따른 상온에서의 반사 손실

전파 흡수 재료의 코팅 두께에 따라 상온에서의 반사 손실(reflection loss)을 비교하였다. 시편은 코팅 두께가 얇은 순으로 A, B, C로 표기하였다. 전자기 성능 측정은 측정 시편의 가공 및 온도에 따른 측정이 용이한 자유 공간 측정(free-space measurement) 방법을 사용하였다.

실험 결과, Fig. 1과 같이 전파 흡수 재료의 코팅 두께가 증가할수록 전자기파의 파장이 길어지면서 공진 주파수(resonant frequency)의 위치가 저주파 쪽으로 이동한 것을 확인하였다.

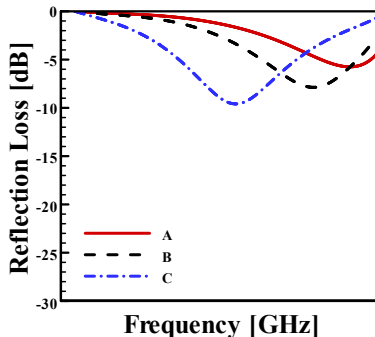


Fig. 1. Reflection loss at room temperature according to coating thickness.

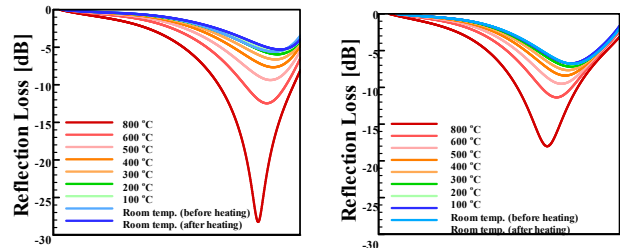


Fig. 2. Case 01

Fig. 3. Case 02

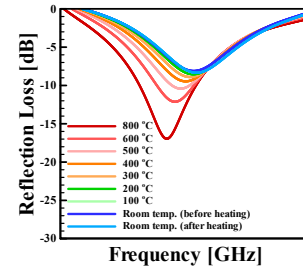


Fig. 4. Case 03

## 3. 고온 전자기 성능 평가

Fig. 02 ~ Fig. 04는 각각 시편 A, B, C에 대한 고온 반사 손실 결과이다. 세 시편 모두 온도가 증가할수록 최대 반사 손실이 증가하는 것을 확인하였다. 800 °C에서의 공진 주파수를 비교한 결과, C시편이 목표 주파수에 가장 근접하였다.

## 4. 결론 및 향후계획

이 연구에서는 동일한 재료 및 재료 함유량을 가진 3개의 시편에 대해 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가를 진행하였다. 실험 결과, 향후 목표 주파수에 더욱 근접한 시편 제작이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- [1] CM Choi et al. *KIICE*. pp. 1331~1337, 2010.
- [2] DY Kim et al. *KMS*. pp. 210~215, 2012.
- [3] KS Choi et al. *KSCM*. pp. 201~215, 2022.
- [4] HS Lee et al. *KSPE*. pp. 583~583, 2020.

# 국내외 무인협동전투기 개발동향 및 시사점 Trends and Implications for the Development of Collaborative Combat Aircraft

\*이창원, 이승현, 임종묵, 이현석, 성기문, 김무섭<sup>1</sup>  
\* C.W. Lee, S.H. Lee, J.M. Lim, H.S. Lee, K.M. Seong, M.S. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 대한항공

+E-mail: changwonlee@koreanair.com

**Keywords:** CCA, NCA, UAV, MUMT

## 1. 서론

미국 국방부는 부상하는 중국의 군사적 도전에 효율적으로 대응하기 위하여 다수 무인 자율 시스템을 신속하게 도입하는 Replicator Initiative를 2023년 8월 발표하였고, 이에 미국 공군은 무인 협동 전투기(CCA; Collaborative Combat Aircraft)라는 새로운 유형의 무인 무기시스템 개발을 적극적으로 추진 중이다.

본 논문에서는 미국에서 새롭게 제시한 무인 협동 전투기의 개념을 정리하고, 미국의 최신 개발 동향과 국내 현황을 살펴봄으로써, 향후 무인 협동 전투기의 향후 적절한 개발 방향을 모색해보고자 한다.

## 2. 무인협동전투기(CCA) 개념

무인협동전투기는 AI 기반 소프트웨어를 바탕으로 인간 조종사와 협업하며, 공대공 전투, 공대지 전투, 전자전, 타겟팅, 감시 및 정찰 임무 등 다양한 임무를 수행할 수 있는 체계로서, 낮은 비용으로 전투기의 임무 범위를 확장하고 생존성을 극대화할 수 있을 것으로 예상되고 있다. 이는 AI, IoT 등 4차 산업혁명 기술을 기반으로 미국 DARPA에서 새롭게 정립한 미래 작전수행방식인 모자이크전(Mosaic Warfare)에 부합하는 체계라고 할 수 있다.

## 3. 미국 CCA 사업 개발현황

2024년 4월, 미국 공군은 General Atomics 및 Anduril을 CCA Increment 1 개발업체로 선정하였다. 두 회사는 CCA 상세 설계, 생산, 그리고 시험 비행을 진행하고 있으며, 2026년에 최종 생산 결정을 내리고 2029년까지 첫번째 시스템을 전력화할 계획이다. 미국 공군은 최소 100대의 CCA를 초기 도입할 예정이며, 장기적으로는 1,000대 이상을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.



Fig. 1. CCA Increment 1.

현재 개념 정립중인 Increment 2는 스텔스 성능 향상, 전자전 능력 추가 등 다양한 기능이 포함될 것으로 예상되며, 엔진 추력은 3,000~8,000 lbf의 범위가 될 것으로 예상된다. Increment 2에서는 Increment 1에 선정되지 않은 업체(보잉, NG, LM 등)들을 포함하여 다양한 산업 파트너와 협력할 계획이며, 국제 파트너십까지도 모색하고 있다고 밝히고 있다.

## 4. 국내 CCA 개발현황

국내에서는 ADD와 대한항공이 유인전투기와 복합 편대를 구성해 미래 작전을 수행할 중형급 CCA인 저피탐 무인편대기를 개발 중에 있다. 저피탐 무인 편대기는 금년도 2월 기술시범기 1호기가 출고된 바 있으며, 2027년에 유무인 복합 비행시험에 진입하는 것을 목표로 하고 있다.

그리고 한국항공우주산업이 KF-21과 연계한 차세대 공중전투체계를 구성하기 위하여 다목적 무인기와 무인 전투기에 대한 개발을 진행중인 상황이다.

## 4. 결론 및 향후과제

미국의 CCA Increment 1 선정결과를 살펴보면 적정 성능, AI를 활용한 자율화 및 기체의 모듈화를 특징으로 볼 수 있으며, Increment 2에서는 수직 이착륙, 스텔스 성능 등이 주요한 옵션이 고려되고 있다. 향후 CCA의 성공적 국내개발을 위해서는 미국의 개발 동향을 참고하며, 한국의 지형적/작전적 특수성, 미래 수출을 위한 확장성 등을 복합적으로 고려하여 적절한 운영개념 및 개발 요구조건을 설정해야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] AllAllen, G. C. and Goldston, I. , “The Department of Defense’s Collaborative Combat Aircraft Program: Good News, Bad News, and Unanswered Questions,“ CSIS, 2024.
- [2] Hadley, G., “Now CCAs Can Do Things ‘We Didn’t Think Were Possible’,“ Air & Space Forces Magazine, 2025.
- [3] U.S. Air Force Collaborative Combat Aircraft (CCA), CRS, 2025

# 자가수리를 포함한 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램 New Aircraft Structural Integrity Program including Self-repair

\*이정률<sup>1\*</sup>  
\* J.R. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 항공우주공학과  
\* E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

**Keywords:** Aircraft Structural Integrity Program(ASIP), Wireless Ultrasonic Device(WUD), Self-Repair, Thermoplastic composite

## 1. 서론

최근 제작되는 항공기는 구조재료로 복합재의 사용 비율이 높아지고 있으나, 복합재로 제작된 항공기 기체의 경우 분해조립이 어렵고, 단순한 형태가 아닌 복잡한 구조의 부품 또한 존재하므로, 손상 탐지를 위해 기존의 비파괴검사 방법을 적용하기 어려운 경우가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 항공기 구조 건전성 프로그램을 개선하기 위해 항공기구조 일체형 열가소성 자가수리 기술을 포함하는 새로운 복합재 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하고자 한다.

## 2. 자가수리 기술 적용 항공기 구조 건전성 프로그램

본 연구에서는 항공기구조 일체형 열가소성 복합재 자가수리 기술[1]과 무선 손상 모니터링/탐지 기술[2], 레이저초음파 기반의 정밀 손상 가시화 기술[3], AI 기반 손상 평가 기술, 데이터 기반의 손상예측/수리시기 판단 기술을 포함하는 새로운 복합재 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하고자 한다. Fig. 1과 같이 운영중인 복합재 항공기에서 반복적으로 노출되는 피로하중에 의해 증가하는 복합재 구조의 모재 균열을 주기적인 전영역 자가수리를 통해 미세한 모재균열을 수리하여 손상으로의 확대를 억제시킬 수 있다. 이 과정에서 억제되지 않고 영구 변형, 층간 분리, 디본딩 (Debonding) 등의 손상으로 진행될 경우 구조 일체형 PZT/FBG 기반의 무선 손상 모니터링/탐지 기술을 통해 손상을 실시간으로 탐지한다. 이때 손상영역은 자가수리 시스템을 통해 국부적으로 수리하고, 수리 전후의 손상 영역을 레이저초음파 검사 기반 정밀가시화 기술과 AI 기반 손상평가 기술을 통해 가시화하고 평가한다. 평가된 손상정보 데이터 기반 구조위험분석을 통해 복합재 항공기의 수명을 예측하고 적절한 수리시기를 판단한다. 이러한 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램을 통해 복합재 항공기의 구조안전성을 증대시키고, 정비 비용 절감 및 작전지원을 향상이 가능할 수 있을 것으로 전망된다.

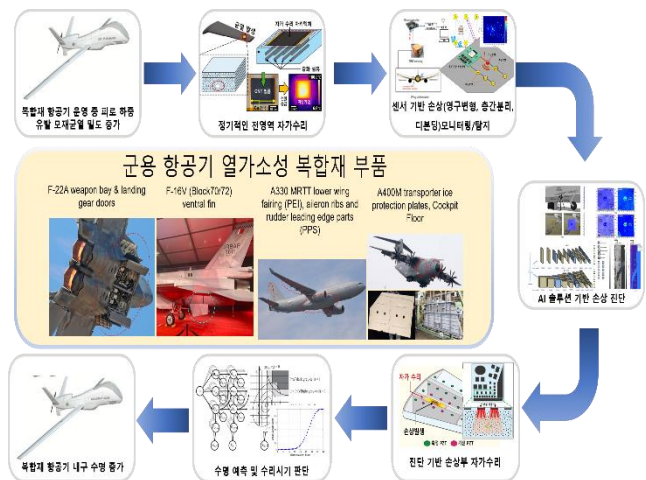


Fig. 1. Configuration of damage Detection/diagnosis-based self-repair and life prediction.

## 3. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 항공기구조 일체형 열가소성 복합재 자가수리 기술과 무선 손상 모니터링/탐지 기술, 레이저초음파 기반의 정밀손상가시화 기술, AI 기반 손상 평가 기술, 데이터 기반의 손상예측/수리시기 판단 기술을 포함하는 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하였다. 향후 각 요소기술을 개발하여 제안된 새로운 구조 건전성 프로그램을 구현할 계획이다.

### 참고문헌

- [1] X Li et al. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 262, 110814: 1-8, 2023.
- [2] J Park et al. Li et al. *Smart Structures and Systems*, Vol. 28(3): 333-341, 2021.
- [3] SC Hong et al. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 99: 58-65, 2017

### 후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인 이동체 원천기술 개발사업단의 지원을 받아 무인 이동체 원천기술 개발사업을 통해 수행되었음.(NRF-2020M3C1C1A01084220)

# 적층 복합재 제조를 위한 탈오토클레이브 공정 최신 연구 동향 Recent Advances and Research Trends in Out-of-Autoclave Processes for Manufacturing Composite Laminates

김재웅<sup>1</sup>, 이전윤<sup>1\*</sup>  
J.W. Kim<sup>1</sup>, J.Y. Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 항공우주공학과  
\* E-mail: jlee@kaist.ac.kr

**Keywords:** Prepreg, Laminate, Out-of-Autoclave

## 1. 서론

항공기의 효율적 운항을 위한 경량화는 필수적이며, 이를 달성하기 위한 대표적 방안으로 기존 금속 구조물을 복합재로 대체하는 전략이 널리 활용되고 있다. 복합재는 금속과 유사한 강도를 제공하면서도 낮은 비중으로 인해 뛰어난 경량화 효과를 발휘한다. 특히 항공우주 분야의 복합재는 주로 프리프레그 (prepreg)를 적층하여 라미네이트 형태로 제작되며 [1], 일반적으로 오토클레이브 (autoclave) 공정을 통해 생산된다. 오토클레이브 공정은 고온 및 고압 환경에서 복합재 내부의 기공을 효과적으로 제거할 수 있지만, 높은 설비 비용, 운영 비용 및 낮은 공정 효율성 등의 단점이 지속적으로 지적되어 왔다 [2,3]. 이에 따라 오토클레이브 공정을 사용하지 않고도 우수한 품질의 복합재 라미네이트를 제조할 수 있는 탈오토클레이브 (Out-of-Autoclave, OoA) 공정 기술에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다.

## 2. 탈오토클레이브 공정

### 2.1 탈오토클레이브 공정의 종류

오토클레이브 공정에서 제공되는 고온·고압 조건을 대체하기 위해 다양한 탈오토클레이브 공정 기술이 개발 및 연구되고 있으며, 현재까지 보고된 주요 기술을 Table 1에 정리하였다. 이 중에는 최근 개발되었거나 새로운 기술적 돌파구를 통해 활발히 연구가 진행 중인 공정들도 포함되어 있다. 대표적인 탈오토클레이브 공정으로는 탈오토클레이브 프리프레그 공정, 직접 전기 발열 (direct electric heating), 마이크로파 발열 (microwave heating), 유도 가열 (induction heating) 등이 있으며, 본 연구에서는 이 네 가지 공정을 중심으로 최근 연구 동향을 분석하고자 한다.

### 2.2 탈오토클레이브 프리프레그

탈오토클레이브 프리프레그는 오토클레이브 없이 무결합 복합재를 제작하기 위해, 프리프레그 내부에 기공 배출 경로 (engineered vacuum channel)를 사전에 마련하고 레진의 유동성을 향상시켜 대기압만으로도

기공 제거가 가능하도록 설계한 프리프레그를 말한다. 이를 통해 고압 없이도 복합재 내부의 기공을 제거할 수 있으나, 기공 제거 성능의 안정성이 낮다는 한계가

Table 1 Summary of out-of-autoclave processes

Process	Heat transfer mechanism	Explanation	Ref.
OoA prepreg	Convection	Modification of prepreg configuration and composition for improved void removal	[2,4,5]
Hot press molding	Conduction	Compression with a high-temperature mold	[6]
Quickstep		Simultaneous application of heat and pressure via a heat-transfer fluid	[7,8]
SQRTM (Same-Qualified Resin Transfer Molding)		Injection of prepreg-compatible resin to maintain uniform pressure throughout the composite	[9]
Direct electric heating	Conduction or volumetric heating	Resistive heat generation via electrical current	[3,10]
Microwave heating		Internal heat generation through dielectric rotation by microwaves	[11,12]
Induction heating	Volumetric heating	Eddy current-based internal heating of conductive fibers	[13,14,15]

탈오토클레이브 프리프레그 공정은 오토클레이브를 사용하지 않고도 무결함 복합재를 제조하기 위해 개발된 기술로서, 프리프레그 내부에 기공 배출을 위한 특수한 진공 배출 경로 (engineered vacuum channel)를 사전에 형성하고 레진의 유동성을 개선하여 대기압 조건에서도 효과적인 기공 제거가 가능하도록 설계된 프리프레그를 활용하는 방법이다. 이를 통해 고압 없이도 복합재 내부의 기공 제거가 가능하지만, 기공 제거 성능의 일관성과 안정성이 낮다는 한계점이 지적되어 왔다 [2]. 최근 연구에서는 프리프레그의 두께 방향으로 추가적인 배출 경로를 형성하여 기공 제거 성능을 더욱 향상시키려는 시도가 활발히 진행되고 있다 [4,5].

### 2.3 직접 전기 발열

접 전기 발열 (direct electric heating) 공정은 라미네이트 내부의 탄소섬유 또는 라미네이트 외부에 배치된 전도성 막 (conductive membrane; 예: 탄소나노튜브 필름, 그래핀 나노판 필름 등)에 전류를 통과시켜 발생하는 저항 열을 이용하여 복합재를 성형하는 방식이다. 본 공정은 오토클레이브 공정이 대류를 이용해 열을 전달하는 것과 달리, 전도를 통한 직접적인 열 공급 방식으로 공정 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 탄소섬유 배열 방향에 따라 발열 성능의 편차가 발생할 수 있으며 [10], 고성능 전도성 막의 높은 제조 비용이 단점으로 지적된다. 최근 연구에서는 전도성 막을 이용하여 복합재에 열을 균일하게 공급하는 동시에, 나노 다공성 네트워크 (nanoporous network)를 라미네이트 적층 계면에 삽입하여 모세관압 (capillary pressure)을 유도해 내부 기공 제거를 촉진하는 기술이 활발히 연구되고 있다 [3].

### 2.4 마이크로파 발열

마이크로파 발열 (microwave heating) 공정은 마이크로파를 활용하여 복합재 내부의 레진과 섬유 내 유전체 성분을 진동시켜 직접적으로 열을 발생시키는 방식이다. 본 공정은 높은 열전달 효율을 제공한다는 장점이 있으나, 탄소섬유 강화복합재의 경우 섬유 배열 방향에 따라 마이크로파의 침투도가 불균일하게 나타날 수 있는 한계가 보고되고 있다 [11]. 이를 극복하기 위해 최근 연구에서는 중간 매개체 (intermediate medium)를 마이크로파로 먼저 가열한 후, 간접적으로 복합재에 균일한 열을 전달하는 방식이 시도되고 있으며, 이를 통해 열 전달의 균일성과 공정 안정성 측면에서 유의미한 성능 개선이 이루어지고 있다 [12].

### 2.5 유도 가열

유도 가열 (induction heating) 공정은 고주파 교류 전류가 흐르는 금속 코일에서 생성되는 자기장에 의해 복합재 내부 탄소섬유에 와전류 (eddy current)가 유도 되어 저항 열이 발생하는 방식이다. 주로 열경화성 (thermoset) 수지보다 열가소성 (thermoplastic) 수지를 사용하는 경우에 대한 연구가 활발히 이루어지고

있으며, 이 공정은 유도 가열 접합 (induction welding)이라는 명칭으로도 널리 알려져 있다. 유도 가열 방식은 복합재와 직접적인 접촉 없이 빠르게 승온시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다 [13]. 그러나 금속 코일과 라미네이트 간의 근접 배치가 필수적이며, 와전류의 효과적인 발생을 위해서는 직교 적층을 포함한 다방향 적층 구조를 구현해야 한다는 제약이 존재한다 [14]. 본 분야는 상대적으로 연구 역사가 짧아 복합재의 수지 종류와 적층 순서가 유도 가열 성능에 미치는 영향을 분석하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다 [15].

### 3. 결과 고찰

탈오토클레이브 공정은 오토클레이브 공정에서 제공하는 고압 및 고온 환경을 대체하기 위해 개발된 일련의 기술을 포괄한다. 그 중 탈오토클레이브 프리프레그 공정은 고압 조건 없이도 무결함의 복합재 제조가 가능하도록 설계된 소재 기술이며, 직접 전기 발열, 마이크로파 발열 및 유도 가열 공정은 기존 오토클레이브 공정의 열 전달 방식을 더욱 효율적인 발열 방식으로 대체하려는 기술적 접근이라 할 수 있다. 그러나 현 단계에서 각 탈오토클레이브 공정은 오토클레이브 공정을 완전히 대체하기에는 명확한 기술적 한계를 지니고 있으며, 이를 극복하기 위한 지속적인 후속 연구와 기술 개발이 활발히 요구되고 있다.

### 참고문헌

- [1] ISBN 978-1-85617-495-4
- [2] T Centea et al. *Composites, Part A* 70:132-154, 2015.
- [3] J Lee et al. *Adv. Mater. Interfaces* 7:1901427, 2020.
- [4] S Schechter et al. *Composites, Part A* 130:105723, 2020.
- [5] J Janzen et al. *Polym. Compos.* 44:8153-8167, 2023.
- [6] J Xie et al. *Mater.* 12:2430, 2019.
- [7] V Coenen et al. *MPE-EuROPE conf. Proc.* 2005.
- [8] J Zhang et al. *Mater. Manuf. Processes* 22:768-772, 2007.
- [9] S Black. *Composites World*, 2010.
- [10] S Liu et al. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 103:3479-3493, 2019.
- [11] J Zhou et al. *Mater. Today Commun.* 26:101960, 2021.
- [12] J Zhou et al. *Compos. Sci. Technol.* 218:109200, 2022.
- [13] A Mariani et al. *Energies* 16:4535, 2023.
- [14] M Li et al. *Polym. Test.* 130:108318, 2024.
- [15] W Groupe et al. *Procedia Manuf.* 47:29-35, 2020.

### 후기

본 연구는 한국연구재단 (NRF)의 우수신진연구 사업 지원을 받아 수행된 연구이다. (과제번호: RS-2023-00213782)

# 고온용 전파흡수체 적용을 통한 노즐의 레이더 반사 단면적 분석 RCS Analysis of a Nozzle with a High-Temperature EM wave absorber

\*윤도형<sup>1</sup>, 백상민<sup>2</sup>, 이원준<sup>1,2\*</sup>  
\* D.H. Yoon<sup>1</sup>, S.M. Baek<sup>2</sup>, W.J Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 과학기술연합대학원대학교 국방과학연구소캠퍼스, <sup>2</sup> 국방과학연구소  
\*E-mail: lwj@add.re.kr

**Keywords:** High-Temperature Electromagnetic Wave Absorber, Radar Cross Section, Metamaterials, Aircraft Exhaust

## 1. 서론

항공기 배기구는 RCS에 큰 영향을 미치며, 금속 소재는 전자기파를 강하게 반사해 스텔스 성능을 저하시킨다. 특히 고온 환경에서는 기존 전파 흡수체의 성능이 저하되므로 개선이 필요하다. 본 연구에서는 3D 메타구조의 전파흡수체 [1]를 배기구에 적용하여 RCS 변화를 분석하였다. X-band 대역에서 기존 금속 배기구 및 온도에 따라 비교하여 스텔스 성능 개선 가능성을 검토하였다.

## 2. 본론

### 2.1 고온용 전파 흡수체 설계

고온 환경에서도 전자기파 흡수 성능을 유지할 수 있도록 SRR (Split-Ring Resonator) 기반의 메타물질 구조를 설계 하였다 [1]. 흡수체는 금속 기반의 SRR 구조에 YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia) 세라믹 코팅을 적용하여 높은 온도에서도 안정적이며 금속 구조와 결합하여 전자기파 흡수 성능을 구현하였다. 설계 과정에서 CST Studio Suite를 활용하여 X-band 주파수 대역에서 최적화를 진행하였으며, Genetic Algorithm을 적용하여 SRR 구조 형상 및 코팅 두께의 최적 변수를 설계 하였다.

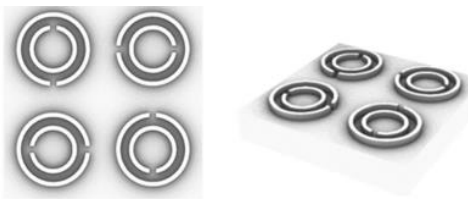


Fig. 1. Design of RAS.

### 2.2 고온용 전파흡수체 시험

설계된 고온용 전파흡수체의 성능을 검증하기 위해 플라즈마 고온 전자파 측정장비를 이용한 시험을 수행하였다. 흡수체 시편은 DED (Directed Energy Deposition) 금속 3D 프린팅을 활용하여 제작 되었으며, 표면에 YSZ 플라즈마 코팅을 적용하였다. 제작된 시편을 RT, 100°C, 300°C,

500°C, 700°C의 온도조건에서 측정하여 전자기파 흡수 특성을 분석하였다. 반사 손실은 X-band 주파수 대역에서 측정되었으며, 각 온도 조건에서의 흡수 성능을 비교하였다.

### 2.3 Nozzle RCS 분석

설계된 고온용 전파흡수체를 항공기 배기구에 적용하였을 때, RCS 변화를 분석하기 위해 CST를 활용한 해석을 수행하였다. 기존 금속 배기구와 비교하여, 흡수체 적용 시 RCS 저감효과를 평가하고, 배기구 구조물 적용 범위에 따른 성능 변화를 검토하였다.

RCS 해석은 X-band 주파수 대역 (8-12 GHz)에서 진행되었으며, 배기구 형상과 입사각에 따른 반사 특성을 분석하였다. 고온용 전파 흡수체가 적용된 배기구는 특정 주파수에서 RCS가 감소하는 효과를 보였으며, 구조물 적용 범위에 따른 RCS 변화를 확인하였다.

## 3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 고온용 전파흡수체를 설계하여 항공기 배기구에 적용하고, RCS 저감 효과를 분석하였다. 3D metamaterial 기반 YSZ 코팅 시편의 등가의 유전율을 적용하여 시뮬레이션 결과, 기존 금속 배기구 대비 RCS가 감소하는 효과를 확인하였으며, 향후 연구에서도 흡수체의 내구성 및 열 충격에 대한 신뢰성 평가를 수행할 예정이며, 온도 변화 조건에서의 RCS 분석을 통한 스텔스 성능 최적화를 위한 연구를 진행할 예정이다.

### 참고문헌

[1] DH Yoon et al. Metal-Ceramic Meta Structure for Electromagnetic Wave Absorption in High-Temperature Environments. *Electromagn. Eng. Sci* 35(9):687-69110:1-10,2024.

# 금속 3D 프린팅된 얇은 벽 구조의 공정 변수에 따른 에너지 흡수 성능 평가 Evaluation of Energy Absorption Performance Based on Process Variables of Thin-Walled Structures Manufactured by Metal 3D Printing

\*박건태, 김윤호\*  
\*Geon Tae Park, Yun Ho Kim\*

서울대학교 항공우주공학과 극한환경 및 충돌 연구실  
\*E-mail: spaceyhk@snu.ac.kr

**Keywords:** Laser Powder Bed Fusion(LPBF), Linear Energy Density(LED), AlSi10Mg, Thin-wall structure

## 1. 서론

LPBF(Laser Powder Bed Fusion)기술은 레이저로 금속 분말을 용융 시켜 부품을 제작 하는 금속 적층 제조 기술이다. 이 기술은 높은 정밀도와 우수한 기계적 성질을 제공하며 전통적인 제작 방식으로 구현하기 어려운 복잡한 구조를 제작할 수 있어 산업에서 널리 활용된다. 얇은 벽 구조는 경량화와 충격 흡수에 효율적이므로 항공우주 및 자동차 산업에서 널리 활용된다. 그러나 LPBF 공정으로 제작된 얇은 벽은 높은 온도 구배로 인해 Laser power, Scan speed같은 공정변수에 따라 물성이 크게 달라진다. 따라서 균일한 품질과 안정적인 제조를 위해 적절한 공정변수를 설정하는 것이 중요하지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다.

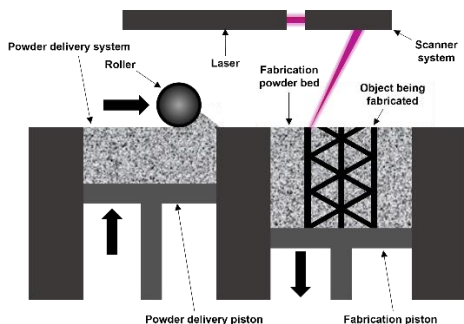


Fig. 1. LPBF process schematic.

## 2. 연구 방법 및 내용

### 2.1 공정변수에 따른 얇은 벽 구조 물성 평가

금속을 용융 시키기 위해 레이저가 금속 분말에 전달하는 단위길이당 에너지를 LED(Linear Energy Density)라 하며 식(1)과 같이 Laser Power ( $P$ )와 Scan Speed( $v$ )의 비율로 정의된다. 본 연구에서는 EOS M290 금속 3D 프린터를 이용하여 얇은 벽 구조를 출력하였다. LED의 공정 변수인 Laser Power 와 Scan Speed를 120W ~360 W 와 200 mm/s ~ 1200 mm/s 수준에서 변경해가며 제작하였고 표면 거칠기, 기공성에 따른 상대 밀도를 평가하였다. Figure2는 LED 0.45, 1.4로 제작된 시편 표면을 금속현미경으로

관찰한 결과이다. 에너지가 너무 높을 경우 넓은 범위의 용융풀이 형성되며 불완전 용융된 분말이 표면에 함께 소결되어 있음을 확인할 수 있다.

$$LED = \frac{P}{v} \quad (1)$$

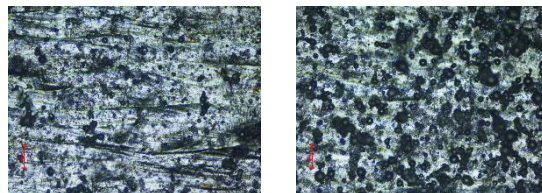


Fig. 2. Surface of thin-walls with different LED values.

### 2.2 허니콤 구조의 에너지 흡수율 평가

허니콤 구조는 질량대비 높은 강도를 가지며 높은 에너지 흡수율을 제공한다. 얇은 벽 구조의 공정 변수에 따른 에너지흡수율을 평가하기 위해 금속 3D프린터로 허니콤 구조를 제작한 후 압축 실험을 진행하였다. 결과로 Specific Energy Absorption을 추출하여 공정변수에 따른 얇은 벽의 표면 거칠기와 상대밀도의 변화가 에너지 흡수율에 영향을 주는 것을 확인하려고 한다.

## 3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 다양한 수준의 공정변수로 제작된 얇은 벽 구조의 표면 거칠기, 상대밀도가 에너지 흡수율에 미치는 영향을 허니콤 압축 실험을 통해 평가하고자 한다. 향후 LPBF공정의 다른 변수인 Hatch Distance, Layer Thickness가 에너지흡수 성능에 미치는 영향을 분석할 계획이다.

### 참고문헌

[1] J. Lee, et al. *Additive Manufacturing*. 2024  
[2] Y. Zhang, et al. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021  
[3] F. Calignano, et al. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018

# 변동하중조건에서 누적손상모델을 이용한 구리의 피로수명 예측 Fatigue Life Prediction of Copper Under Variable Loading Conditions Using a Cumulative Damage Model

\*김윤아, 하형철, 김윤호\*  
Y.A. Kim<sup>1</sup>, H.C. Ha<sup>1</sup>, Y.H. Kim<sup>+</sup>

서울대학교 항공우주공학과 극한환경 및 충돌연구실  
\*E-mail: spaceyhk@snu.ac.kr

**Keywords:** Fatigue Life Prediction, Fatigue Cumulative Damage, Variable Loading, Linear Damage Accumulation Rule

## 1. 서론

최근 우주 산업에서는 1단 로켓 재사용 연구가 활발히 진행되며, SpaceX의 Falcon 9과 같은 상용 재사용 로켓의 성공이 기술 발전을 가속화하고 있다. 국내에서도 누리호 발사 성공 이후 재사용 발사체 기술에 대한 관심이 증가하며 개발 논의가 활발하다. 특히, 재사용 발사체의 핵심은 엔진 부품의 내구성으로, 반복 사용 시 발생하는 열 피로와 진동 피로를 고려해야 한다. [1]

본 연구에서는 연소기 주요 재료인 구리의 피로 수명을 예측하는 코드를 작성하였다.

## 2. 연구 개요

랜덤 하중 조건에서 인탈산동(C1220)의 피로 수명을 예측하기 위해 MATLAB 프로그램이 개발되었으며, 전체적인 알고리즘은 Figure 1에서 확인할 수 있다.

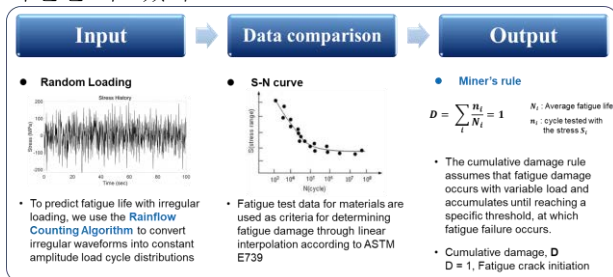


Fig. 1. Overview Diagram of the Life Prediction Program

## 3. 본론

### 3.1 하중파형 사이클계산법(Cycle Counting)

발사체 발사와 같은 불규칙한 하중 조건에서 수명을 예측하려면, 피로 수명에 가장 큰 영향을 미치는 이벤트(event)를 추출하고 이를 일정 진폭 하중 분포로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 하중 파형 사이클 계산법(Cycle Counting)이라 하며, 표준화된 방법은 ASTM E1049에서 규정하고 있다[2]. 특히, 레인플로법(Rainflow Counting)은 해석 과정이 복잡하지만, 피로 특성을 가장 정확하게 반영하는 기법으로 널리 활용된다.

### 3.2 누적손상법칙(Cumulative Damage Rule)

누적 손상 법칙은 변동 하중이 가해질 때 각 하중 사이클에 의해 피로 손상이 발생하고, 이 손상이 점진적으로 누적되어 특정 한계 값에 도달하면 피로 파괴가 발생한다고 가정하는 이론이다. 대표적인 선형 누적 손상 법칙인 Miner's rule은 피로 하중에 의해 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 파괴가 일어난다는 개념을 기반으로 한다[3]. 이 법칙에 따르면, 레인플로법을 이용해 일정 진폭 하중으로 변환된 변동 하중은 S-N 선도를 통해 피로 손상의 누적으로 인한 파손 여부를 평가할 수 있다. 또한, Miner의 법칙에서는 누적 손상 계수(Cumulative Damage, D) 개념을 도입하여 피로 수명을 정량적으로 평가하며, 이에 대한 수식은 식(1)에서 확인할 수 있다.

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

## 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 인탈산동(C1220)의 진동 피로 수명을 예측하는 프로그램을 제작하였다. 향후, 실험 데이터와의 비교를 통해 프로그램 검증을 진행하고, 다양한 하중 조건과 재료 특성을 반영하여 항공우주 산업에 활용 가능한 예측 도구로 발전시키는 것을 목표로 한다.

### 참고문헌

- [1] KO Lee et al. *An Energy Method about Fatigue Life of Copper Alloy for Reusable Launch Vehicle*, Proceeding of the SASE 2018 Spring Conference, 2018.
- [2] ASTM E1049-85, *Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*, ASTM International, 2023.
- [3] YH Kim et al. *An expert system for fatigue life prediction under variable loading*, Expert Systems with Applications, 2009.

### 후기

이 논문은 서울대학교 창의선도 신진연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임

# 3D 프린팅된 Kevlar-Onyx 복합재의 FDM 공정 특성에 따른 충격 저항성 분석 Impact Resistance Analysis of 3D Printed Kevlar-Onyx Composites Based on FDM Process Characteristics

\*김현수<sup>1</sup>, 송인해<sup>1</sup>, 김윤호<sup>1\*</sup>  
\* H.S. Kim<sup>1</sup>, I.H. Song<sup>1</sup>, Y.H. Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 서울대학교 항공우주공학과  
\* E-mail: mouseboy0427@snu.ac.kr

**Keywords:** 3D printed composite materials, Ballistic impact, Kevlar, Manufacturing defects

## 1. 서론

FDM(Fused Deposition Modeling) 방식은 열가소성 폴리머의 3D 프린팅 기술 중 가장 일반적으로 사용되는 방법으로, 연구에 따르면 이러한 폴리머에 짧은 섬유 또는 연속 섬유를 추가하여 구조물의 전체 강도와 강성을 크게 향상시킬 수 있다[1,2]. 또한, 3D 프린팅된 부품의 응용분야 확장과 성능 개선을 위해 동적 거동 특성에 관한 연구들이 주목받고 있다. Parametric Izod/Charpy 충격 시험[3,4], 낙하 충격 시험[5,6], 탄도 충돌 시험[7,8] 등 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 3D 프린팅된 복합재의 성능이 전통적인 제조 방법에 비해 여전히 떨어지는 경우가 많다. 이러한 성능 저하의 이유는 명확히 밝혀지지 않았으며, 특히 FDM 공정에서 발생하는 섬유 사이의 미세 간격이 복합재의 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 탄도 충돌 실험을 통해 Kevlar 연속섬유 보강이 있는 Onyx 복합재 구조의 동적 파단 거동 및 모델링에 대해 분석하고자 하며, 특히 FDM 공정 중 생성되는 섬유 사이의 미세 간격이 복합재의 충격 저항성 및 기계적 특성에 미치는 영향을 알아보려 한다.

## 2. 연구 방법 및 내용

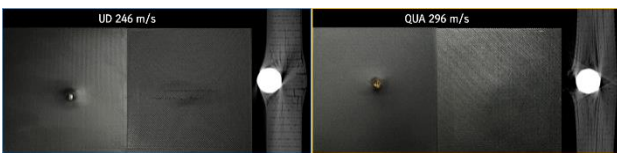


Fig. 1. Front and back images of the specimen and Micro-CT scans after Ballistic Impact testing

### 2.1 3D 프린팅 복합재 제작 및 고속 충돌 실험

본 연구에서는 Markforged Mark Two 프린터를 사용하여 Kevlar 연속 섬유 보강 Onyx 복합재 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 300m/s~500m/s의 속도로 Ballistic Impact 실험을 진행하였으며, 시편의 변형 및 파괴 형태를 분석하였다. 관통 여부에 따라 시편을 두 그룹으로 나누어 비교하였으며, 3D 프린팅 공정 중 발생하는 섬유 간 간격이 복합재의 충격 저항성에 중요한 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 특히,

간격이 큰 영역에서 충격 하중이 집중되고, 기계적 강도가 저하되는 경향을 보였다.

### 2.2 충격 거동 분석을 위한 모델링 및 Micro-CT 촬영 결과

고속 충돌 실험에서 섬유 사이의 간격은 충격 하중 분산을 저해하고, 균열 전파를 촉진하는 요인으로 작용할 수 있다. 이를 정량적으로 분석하기 위해, 실험 데이터를 바탕으로 3D 프린팅된 복합재 내부의 적층 구조와 간격 분포를 모델링하였고, 이를 바탕으로 유한 요소 해석(FEM) LS-Dyna 프로그램으로 충격 거동을 시뮬레이션하였다. 또한, 실험 전후의 시편을 Micro-CT 촬영하여 적층 구조와 충격 후 손상 분포를 정밀하게 분석하였다. CT 분석 및 시뮬레이션 결과, 간격이 큰 부위에서 충격 하중이 집중되는 것을 볼 수 있었다.

## 3. 결론 및 향후과제

본 연구는 FDM 공정에서 발생하는 섬유 간 간격이 복합재의 충격 저항성에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 시사하며, 향후 연구에서는 섬유 결합 강도와 같은 추가적인 요소들이 복합재 성능에 미치는 영향을 분석할 계획이다

### 참고문헌

- [1] Blok, L. G. et al. *Additive Manufacturing*. 22: 176-186, 2018.
- [2] Peng, Y. et al. *Composite Structures*. 207: 232-239, 2019.
- [3] Caminero, M. A. et al. *Composites Part B: Engineering*. 148: 93-103, 2018.
- [4] Zotti, A. et al. *Composites Part B: Engineering*. 153: 364-375, 2018.
- [5] Gu, G. X. et al. *Extreme Mechanics Letters*. 9: 317-323, 2016.
- [6] Ko, K. et al. *Composite Structures*. 238: 111951, 2020.
- [7] Islam, M. N. et al. *Procedia Structural Integrity*. 37: 217-224, 2021.
- [8] Islam, M. N. et al. *Procedia Structural Integrity*. 42: 785-792, 2022.

### 후기

본 연구는 서울대학교 창의선도 신진연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임

# 설명 가능한 인공지능 기반 유한 요소 데이터 활용 손상 탐지 기법 Finite Element Data-Based Damage Detection Method Using Explainable Artificial Intelligence

\*정인호<sup>1</sup>, 김혜진<sup>1</sup>, 박형범<sup>2</sup>, 김태성<sup>3</sup>, 조해성<sup>1+</sup>  
\* I.H. Jeong<sup>1</sup>, H.J. Kim<sup>1</sup>, H.B. Park<sup>2</sup>, T.S. Kim<sup>3</sup>, H.S. Cho<sup>1+</sup>

<sup>1</sup> 전북대학교 항공우주공학과, <sup>2</sup> 인천대학교 기계공학부, <sup>3</sup> 덴마크공과대학교 풍력에너지시스템학과  
+ E-mail: hcho@jbnu.ac.kr

**Keywords:** Damage detection, Digital image correlation, Class activation map, Explainable artificial intelligence.

## 1. 서론

항공우주 구조물의 국소 손상은 전체로 전파될 위험이 있어, 초기 탐지가 중요하다. 비접촉 방식인 Digital Image Correlation (DIC)을 활용할 수 있지만, 넓은 영역의 육안 분석에 한계가 있다. 본 연구에서는 Class Activation Map (CAM)을 적용해 손상 탐지 기법을 개발했으며[1], ASTM D638 Type 1 시편 검증 결과 99% 이상의 정확도를 보였다. 이때, 실제 손상 위치와 예측 결과의 높은 일치도를 확인하였다.

## 2. 설명 가능한 인공지능 기반 손상 탐지

CAM은 Convolutional Neural Network (CNN) 기반 인공지능으로 입력된 데이터를 손상 또는 손상 없음으로 분류하며 큰 가중치를 가지고 있는 영역을 제시하는 설명 가능한 인공지능의 일종이다.

본 연구에서는 CAM을 활용한 구조물 손상 탐지 프레임워크를 제안하였다. 먼저, Step 1에서는 DIC로 획득한 구조물의 변위를 Gaussian quadrature를 이용해 Gauss 적분점에서의 변형률로 변환한 후, 입력 차원 감소를 위해 주변형률로 변환한다. Step 2에서는 전체 영역에서 얻어진 주변형률을 활용하여 부영역에서의 주변형률을 생성함으로써, 구조물 전체가 변형되더라도 모델을 지속적으로 적용할 수 있도록 한다. 마지막으로, Step 3에서는 CAM을 학습하여 부영역에서의 주변형률을 바탕으로 손상의 유무를 판별하고, 손상으로 인해 변화가 발생한 영역을 시각적으로 나타내는 CAM 이미지를 생성한다.

## 3. ASTM D638 Type 1 시편 인장 시험 데이터

본 연구에서는 ASTM D638 Type 1 시편(Fig. 1)으로 탐지 모델을 검증하였다. ABAQUS를 활용해 관심 영역의 변위를 도출하고, 유한 요소 데이터만으로 손상 탐지 모델을 생성한 결과, 99% 이상의 정확도로 손상의 유무를 분류하였다. 이후 DIC를 이용해 실험 데이터를 측정하고, CAM 이미지를 생성한 결과(Fig. 2), 실제 손상 위치(하얀 박스)와 예측된 손상 영역이 잘 일치함을 확인하였다.



Fig. 1. ASTM D638 Type 1 specimen.

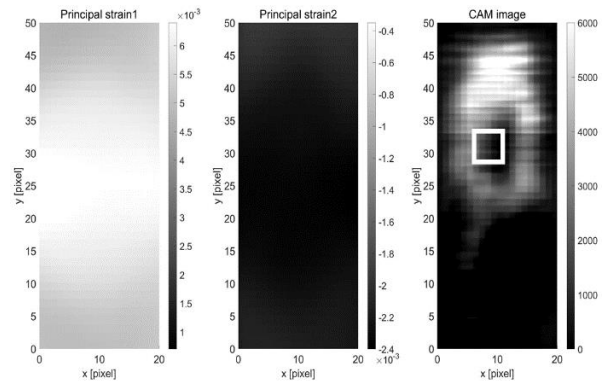


Fig. 2. Principal strain fields and CAM image.

## 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 설명 가능한 인공지능을 활용해 DIC 기반 구조물 손상 탐지 기법을 개발하였다. ABAQUS 수치해석 데이터를 학습한 모델을 ASTM D638 Type 1 시편 실험으로 검증한 결과, 99% 이상의 정확도로 손상의 유무를 분류하고 실제 손상 위치를 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

[1] IH Jeong et al. *Struct Health Monit.* 22(5):3225-3249, 2023.

### 후기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(RS-2022-KP002707, Jeonbuk Regional Energy Cluster Training of human resources).

# Development of a Robotic Antenna Measurement System for Conformal Load-Bearing Antenna Structures

\*Tomasz Korgul<sup>1</sup>, Jin-Dong Park<sup>1</sup> and Jung-Ryul Lee<sup>1+</sup>

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

\*E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

**Keywords:** Conformal Load-Bearing Antenna Structures, Antenna Gain Measurement, Robotic Positioning, 3D Radiation Pattern

## 1. Introduction

The integration of antenna technology with composite load-bearing structures has led to the development of Conformal Load-Bearing Antenna Structures (CLAS), which are critical for aerospace and defense applications [1][2]. This research presents a novel robotic measurement system designed to characterize the gain and radiation patterns of CLAS in an anechoic chamber. The system enables real-time acquisition and visualization of 3D and 3D radiation patterns, facilitating efficient analysis of antenna performance.

## 2. Measurement System Description

### 2.1 Measurement Setup

The setup employs a 6-axis robotic arm for precise positioning of the Antenna Under Test (AUT) across a  $\pm 90^\circ$  angular range in both vertical and horizontal planes, effectively covering a hemispherical measurement space. Gain measurements are conducted using a horn antenna as a reference, while automated positioning enhances accuracy and repeatability. The system operates in the C-band (4-6 GHz), with the AUT optimized for 5-5.5 GHz. Compared to conventional turntable-based methods, the proposed system provides broader measurement coverage, enabling more comprehensive evaluation of conformal antenna designs.

### 2.2 Experimental Validation

A custom-designed Graphical User Interface (GUI) is integrated into the setup, enabling the configuration of Vector Network Analyzer and defining the robot arm's movement path. The interface also provides real-time 3D gain visualization, allowing immediate analysis of antenna performance. Experimental validation was performed on two CLAS prototypes developed in our laboratory, confirming the effectiveness of the system in characterizing antenna gain and radiation patterns. The setup overcomes limitations of traditional measurement techniques, offering an accurate and efficient method for evaluation conformal antennas.

## 3. Results and Discussion

Results indicate that the developed measurement setup provides reliable and automated solution for CLAS performance evaluation. The robotic system accurately captures gain measurements and dynamical updates

radiation patterns in real time. The integration of the robotic positioning system with a precision measurement process ensures repeatability and consistency in the obtained results. Figure 1 illustrates the experimental setup used for CLAS gain measurement in the anechoic chamber.

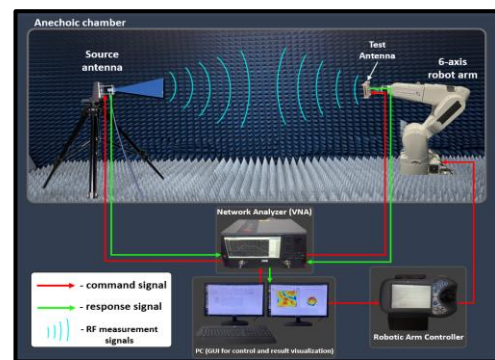


Fig. 1. Automated antenna measurement setup.

## 4. Conclusion and Future Work

This research introduces an advanced robotic antenna measurement setup tailored for conformal antenna structures. The system effectively characterizes gain and radiation patterns, offering an innovative alternative to conventional measurement methods. Future work will focus on refining the system's precision and expanding capabilities to accommodate a broader frequency range and structural configurations. The proposed setup can contribute to the design and evaluation of next-generation load-bearing antenna structures in aerospace applications.

### References

- [1] CS You, W Hwang. Compos Struct., 2010. (Journal paper)
- [2] L Boehm et al. IEEE Trans. Antennas Propag., 2020. (Journal paper)

### Acknowledgement

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(NRF-2020M3C1C1A01084220).

This work has been supported by the R&D Program of the Korea planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) through a grant funded by the Korea government (MOTIE) (No.RS-2024-00442735).

# Inspection of Complex-Shaped Composite Structures Using a Robotic Pulse-echo Ultrasonic Propagation Imaging System

\*King Sum Ma<sup>1</sup>, Kyu-Jin Lee<sup>1</sup> and Jung-Ryul Lee<sup>1+</sup>

<sup>1</sup> Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

<sup>+</sup>E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

**Keywords :** Laser ultrasonic testing, Robotics, Complex-shaped composites, Non-destructive testing

## 1. Introduction

Composite materials are increasingly used in aircraft structures and they require effective non-destructive testing (NDT) to ensure structural integrity [1]. Laser ultrasonic testing (LUT) is a contactless, medium-free NDT technique applied to various composite materials. The robotic pulse-echo ultrasonic propagation imaging (PUPI) system is designed for LUT of curved structures [2]. However, its algorithm is restricted to mathematically representable surface geometries, limiting its applicability to practical inspection scenarios. This study addresses this constraint by utilizing a 3D scan-generated path to control robot arm movement, enabling the inspection of complex-shaped specimens using the robotic PUPI system.

## 2. Method

**2.1 Robotic PUPI system:** A Q-switched pulsed laser serves as the excitation source to generate ultrasonic signals, while a laser Doppler vibrometer (LDV) detects the echo signals. Both laser beams are focused on the same point on the inspection surface, with the specimen mounted on a six-axis robot arm during inspection (Fig. 1). Precise control of the robot arm's tool center point (TCP) maintains a constant standoff distance and a perpendicular beam incident angle between the specimen and the LDV. This setup ensures a high signal-to-noise ratio (SNR) in the detected ultrasonic signals and enables clear visualization of subsurface conditions.

**2.2 Scan path generation:** Generating a raster scan path for robot arm control is particularly challenging for composite structures with arbitrary curvatures. This study incorporates 3D scan data of the inspection target as the input for scan path generation. By translating the physical shape into executable robot arm control commands, the robotic PUPI system can inspect real-world composite specimens with complex geometries.

## 3. Results and Discussion

A non-planar CFRP specimen with pillow inserts embedded at different ply depths to simulate disbonding was inspected using the robotic PUPI system with a raster scan path generated from its 3D scan. These artificial subsurface defects were clearly visualized, and the entire region of interest (ROI) achieved high mean SNR with low

mean errors. To demonstrate the feasibility of this approach in practical applications, it was further applied to an aircraft composite structure, successfully visualizing the positions and sizes of honeycomb cores beneath the laminates.

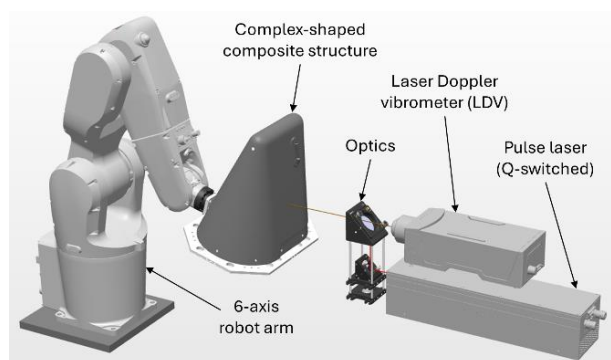


Fig. 1. Inspection of a complex-shaped composite structure using the robotic PUPI system.

## 4. Conclusions and Future Work

The experimental results demonstrate that the robotic PUPI system effectively inspects complex-shaped composite structures by integrating scan paths generated based on the shape of the inspection target. The scan path derived from the 3D scan enhances the system's feasibility for real-world applications. To further expand its inspection capability for larger curved composite structures, an improved configuration with a fixed specimen and moving lasers will be developed.

## References

- [1] A. Zarei et al. *Ultrasonics*, 136: 107163, 2024.
- [2] K. J. Lee et al. *Advanced Composite Materials*, 34(2): 329-351, 2024.

## Acknowledgement

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(NRF-2020M3C1C1A01084220). This work has been supported by the R&D Program of the Korea planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) through a grant funded by the Korea government (MOTIE) (No.RS-2024-00442735).