

# 항공기용 액상성형공정(Liquid Composite Molding) 복합재료 인증방안 개발

조성인<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>한국산업기술시험원

## Development of Material Qualification Method for LCM(Liquid Composite Molding) Process

Sung-In Cho<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>KTL

### Abstract

Liquid Composite Molding (LCM), an Out of Autoclave (OoA) composite manufacturing process, has big advantages when making large and complex structures of airplanes. Since the importance of LCM process is increasing, FAA has suggested recommended guidance and criteria for the development of material and process specifications for LCM materials and process. The importance of LCM process is also raised by domestic composite material suppliers and OEM. This study suggested structures of material specifications and process specification of LCM materials. Material qualification method for LCM process and material was also developed in this study.

### 초 록

액상성형공정(LCM, Liquid Composite Molding) 은 복합재료 오토클레이브(Autoclave) 성형공정의 단점을 극복할 수 있는 탈 오토클레이브(OoA, Out of Autoclave) 공정의 하나로 매우 복잡한 형상이나 대형 구조물을 일체형으로 만들 수 있어 항공산업에서 큰 경쟁력을 가진 공법으로 알려져 있다. 이러한 장점 때문에 액상성형공정을 적용한 항공 부품제작 수요가 늘고 있으며 FAA에서는 액상성형공정을 적용한 복합재료에 대한 인증(Qualification) 방법을 제시한 바 있다. 국내에서도 액상성형공정 적용 복합재료에 대한 부품제작 수요 및 재료인증 수요가 꾸준히 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 구축된 프리프레그 복합재료 인증방안 이외에 LCM 공정을 적용한 복합재료에 대한 인증방안을 수립하기 위한 연구를 진행하였다.

**Key Words** : Composite Material(복합재료), LCM(액상성형공정), Material Qualification(재료인증), Out of Autoclave(탈 오토클레이브)

## 1. 서 론

액상성형공정(LCM, Liquid Composite Molding) 은 복합재료 오토클레이브(Autoclave) 성형공정의 단점을 극복할 수 있는 탈 오토클레이브(OoA, Out of

Autoclave) 공정의 하나로 수지가 미리 함침된 상태로 사용되는 프리프레그 자재와 달리 프리폼(Preform)상태의 섬유에 수지를 직접 주입한 후 경화하여 제작하는 복합재료 제작 공정이다. 액상성형공정을 사용할 경우 매우 복잡한 형상이나 대형구조물을 일체형으로 만들 수 있어 항공산업에서 큰 경쟁력을 가진 공법으로 알려져 있다[1]. 최근에는 LCM 공정이 발전되면서 단점으로 지적되던 복합재료 섬유함량(Fiber Volume

Received: Jan. 02, 2023 Revised: Mar. 16, 2023 Accepted: Mar. 19, 2023

† Corresponding Author

Tel: +82-031-500-0424, E-mail: sicho@ktl.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

Fraction)과 기공률(Void Content)이 개선되어 저비용/고품질의 대형 부품 제작이 가능해졌다.

이러한 장점 때문에 액상성형공정을 적용한 항공 부품제작 수요가 꾸준히 늘고 있다. FAA에서는 액상성형공정을 적용한 복합재료에 대한 인증(Qualification) 방법을 제시한 바 있다. FAA에서는 본 가이드라인을 통해 액상성형공정 복합재료인증을 위한 재료/공정 규격서 작성 방법과 재료인증(Qualification)을 위한 시험 매트릭스(Test Matrix)를 제시하였다. 또한 AGATE(Advanced General Aviation Transport Experiments)에서는 RTM(Resin Transfer Molding) 공법을 적용한 복합재료에 대한 물성시험을 수행하고 데이터베이스를 공유하였다[2]. 하지만 아직까지 NCAMP(National Center for Advance Material Performance) 등 해외 복합재료인증을 담당하는 기구에서는 수지주입형 복합재료 제작공정 및 재료에 대한 인증 계획만 수립하였을 뿐 재료인증 절차를 수립하고 진행한 사례는 전무하다.

본 연구에서는 국내 항공기용 액상성형공정 복합재료 데이터베이스 공유를 위한 소재인증방안을 개발하였다. 이를 통해 확보된 인증 프로세스는 항공 부품 제작사들에게 신뢰성을 제공하며, 항공분야에서 요구되는 다양한 성능의 복합재료 개발 확대가 가능하다. 또한 소재 인증에서 시작하여 부품 성형기술 개발 확대를 통해 시험·설계·생산·인증까지 기체 제조 전 범위에서 국내업체의 시장 점유율을 점차 늘릴 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 액상성형공정 복합재료

### 2.1 액상성형공정

액상성형공정은 Fig. 1과 같이 강화재(섬유)가 수지와 독립되어 몰드(Mold)에 고정된 후 수지가 주입되는 복합재료 제작공정으로 중간재 형태를 갖는 프리프레그 복합재료와 차이를 갖는다[3]. 프리프레그 복합재료를 사용한 오토클레이브 경화공정은 품질이 우수한 장점이 있지만 초기 투자비용이 크고 생산성이 낮은 문제와 형상의 제약이 있다는 단점을 갖는다. 따라서 최근에는 복잡한 형상을 일체형으로 제작할 수 있는 액상성형공정 복합재료에 대한 관심이 많아지고 있는

추세이다[4].

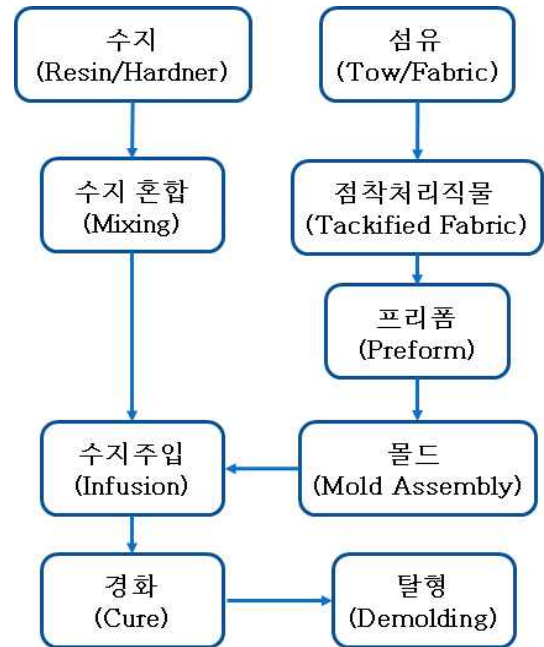


Fig. 1 Liquid Resin Molding Process

액상성형공정은 강화섬유에 수지가 충전되는 방식에 따라 크게 RIM(Resin Infusion Molding) 방식과 RTM(Resin Transfer Molding) 방식으로 구분할 수 있다. RIM 방식은 개방몰드(Open-Cavity Mold)를 사용해 진공백 외부 대기 압력과 내부 압력 차이를 이용해 수지를 주입하여 오븐에서 경화하는 방식이고 RTM 방식은 상하형 몰드(Closed-Cavity Mold)를 사용해 액상 수지를 가압/주입하는 방식이다.

### 2.2 액상성형재료

액상성형공정 복합재료제작에 사용되는 재료는 보강재(Reinforcement), 기지재료(Matrix), 첨가재, 소모성 재료로 구분할 수 있다. 강화재료는 유리(Glass)섬유, 탄소(Carbon)섬유, 아라미드(Aramid)섬유 등이 사용되며 경화 공정간 중합(Polymerize) 반응하지 않아야 한다. 액상성형공정을 위한 섬유는 직물(Fabric)형태로 주로 사용되며 최근에는 UD 탄소섬유에 열가소성 베일(Veil)을 결합하여 고정된 HITape<sup>®</sup> 제품이 개발되어 UD-tape 또한 액상성형공정에 사용되고 있다[5]. 액상성형공정에 적용하기 위해서는 직물을 에폭시 분

말 등의 점착부여제(Tackifier)를 사용하여 바인딩(Binding) 한 후 프리폼(Preform)형태로 몰드에 위치시킨 후 수지를 주입해야 한다[6]. 점착부여제가 도포된 직물을 점착처리직물(Tackified Fabric)이라 하며 점착처리부여제가 수지 및 섬유 사이징(Sizing)과 화학적 화합반응을 일으켜야 한다.

기지재료는 경화과정에서 화학적으로 반응하는 하나 혹은 두 개로 구성된 수지 시스템이다. 기지재료로 사용되는 수지 시스템을 직물의 점착부여제로 사용할 수 있다.

액상성형공정 복합재료는 중간재 형태를 갖는 프리프레그와는 다르게 섬유와 수지를 각각 다른 공급사(Supplier)로부터 제공받아 복합재료로 제작한다. 따라서 부품 제작사(Part Manufacturer)는 서로 다른 공급사를 관리하며 재료 구매를 위한 재료규격서(MS, Material Procurement Specification)를 각 재료별로 작성해야 한다. 또한 부품제작사는 액상성형공정을 통해 제작한 복합재료의 물성을 나타낼 수 있는 공정규격서를 작성해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2의 구조도와 같이 액상성형공정 복합재료의 재료 구매, 제작 공정, 복합재료 물성을 포함할 수 있는 규격서 체계를 수립하여 표준화하고자 하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 액상성형공정 복합재료 제작을 위해서는 수지(Resin), 섬유(Tow), 점착처리직물(Tackified Fabric)에 대한 재료규격서 3종을 각 재료별 요구도를 포함하여 작성해야 한다. 또한 공정규격서는 액상성형공정을 통한 제작 과정과 제작된 복합재료의 물리적/기계적 물성 요구도를 포함하여 작성되어야 한다. 본 연구에서는 Fig.2를 통해 나타난 구조도를 활용하여 재료/공정 규격서 표준화 방안을 제시하고자 한다.

### 3. 복합재료 인증서류의 구성

#### 3.1 재료규격서(Material Specification)

액상성형공정 복합재료 제작을 위한 재료규격서는 2.2 장에 나타난 바와 같이 섬유구매를 위한 재료규격서와 수지구매를 위한 재료규격서가 각각 작성되어야 한다. 또한 섬유 재료규격서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 섬유/직물 제작을 위해 필요한 재료규격서(Fiber MS)와 점착처리직물 제작을 위한 재료규격서(Tackified Fabric MS)의 두 단계로 구분하여 작성해야 한다. 1단계 섬유 토우 제작을 위한 재료규격서는 점착처리직물 공급사에서 작성하며 2단계 점착처리직물 제작을 위한 재료규격서는 부품제작사에서 작성해야 한다. Table 1은 규격서의 표준화를 위해 필요한 액상성형공정 재료규격서의 필수 구성요소를 나타낸다.

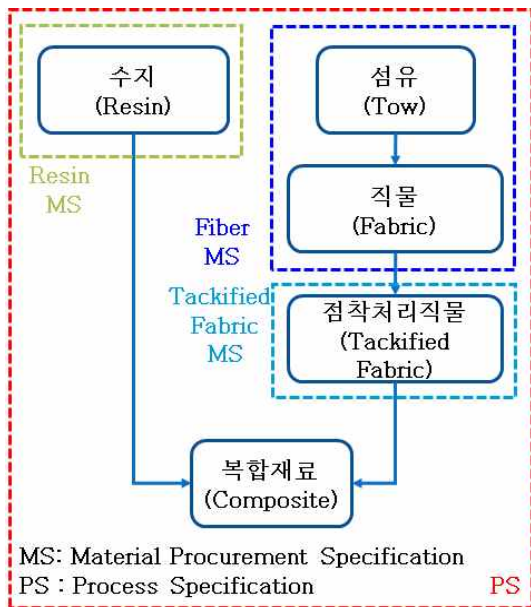


Fig. 2 Structures of LCM Material & Process Specification

Table 1 Subjects of Material Specification

1. 개정이력
2. 범위
3. 적용문서
4. 용어
5. 기술적 요구조건
  - 5.1 원소재 요구사항
  - 5.2 공정관리문서
  - 5.3 재료 요구사항
6. 저장 및 취급
7. 재료 재인증 및 동등성
8. 품질보증
9. 배송
10. 구매자 품질관리

액상성형공정 재료규격서는 원소재, 제품, 저장 및 취급에 대한 요구사항과 제품에 대한 품질보증 방안 등 Table 1의 구성요소를 포함하여 작성되어야 한다.

### 3.2 공정규격서(Process Specification)

액상성형공정을 통한 복합재료 제작 과정을 문서화한 공정규격서에는 상세한 제작 과정과 제작된 복합재료의 경화 물성이 포함되어야 한다. Table 2는 규격서의 표준화를 위해 필요한 액상성형공정 복합재료 공정규격서의 필수 구성요소를 나타낸다.

**Table 2** Subjects of Process Specification

1. 개정이력
2. 범위
3. 적용문서
4. 용어
5. 경화 복합재료 요구사항
  - 5.1 물리적/기계적 요구사항
  - 5.2 외관 및 치수
  - 5.3 통계적 공정관리
6. 공정 요구사항
  - 6.1 개요
  - 6.2 인원 및 자격
  - 6.3 재료
  - 6.4 장비
  - 6.5 시설
  - 6.6 공구
  - 6.7 공정변수(KPP)
7. 패널 제작
  - 7.1 개요
  - 7.2 저장 및 취급
  - 7.3 재단
  - 7.4 Preform 및 진공백 작업
  - 7.5 수지 배합 및 주입
  - 7.6 경화 Cycle
  - 7.7 검사
8. 패널 요구도
9. 운송
10. 품질보증

액상성형공정 복합재료 공정규격서는 제작 공정에 필요한 절차, 장비, 설비, 제품 요구도, 외관 및 치수, 공정변수, 재료(점착처리직물, 수지)에 대한 요구도 등 Table 2의 필수 구성요소를 포함하여 작성되어야 한다.

### 3.3 공정관리문서(PCD, Process Control Document)

공정관리문서는 재료제작을 위한 제작 지침으로 재료규격서를 만족하기 위한 지침을 원소재 구매부터 제작 절차, 검사, 배송까지 이르는 모든 공정을 규정한다 [7]. 공정관리문서는 Table 3에 나타낸 바와 같이 각 재료규격서에 대응하여 작성해야 한다. Table 3은 액상성형공정 복합재료 재료규격서와 공정관리문서의 작성자 및 승인자의 역할을 나타낸다.

**Table 3** Responsibility of MS & PCD

	역할	재료규격서 (MS)	공정관리문서 (PCD)
수지	작성	부품제작사	수지공급사
	승인	전문검사기관	부품제작사
섬유	작성	점착처리직물 공급사	섬유공급사
	승인	부품제작사	점착처리직물 공급사
점착처리 직물	작성	부품제작사	점착처리직물 공급사
	승인	전문검사기관	부품제작사

항공기용 프리프레그 복합재료 제작을 위한 공정관리문서 작성 지침은 NCAMP 에서 세부적인 작성 지침을 규정하였으며 국내에서도 탄소섬유 프리프레그 복합재료 공정관리문서 작성법과 관련한 연구가 진행된 바 있다[8]. 하지만 액상성형공정 복합재료 제작을 위한 섬유 및 수지 제작을 위한 공정관리문서 작성법을 나타낸 규정과 관련한 연구는 부족한 실정이다. 따

라서 본 연구에서는 액상성형공정 복합재료 제작에 필요한 공정관리문서를 표준화하기 위하여 Table 4와 같이 공정관리문서의 필수 구성요소를 나타내었다.

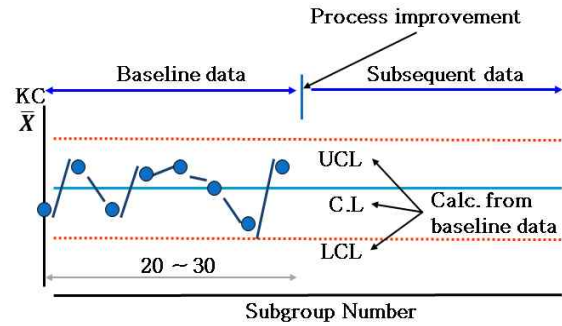
**Table 4** Subjects of PCD

1. 개정이력
2. 범위
3. 적용문서
4. 용어
5. 원소재
6. 제작 공정
6.1 공정흐름도
6.2 주특성(KC)
6.3 공정변수(KPP)
7. 검사
8. 품질보증
9. 통계적 공정관리

**3.4 통계적 공정관리(SPC, Statistical Process Control)**

통계적 공정관리란 공정관리문서에서 필수적으로 요구하는 제품의 품질관리를 위한 데이터 처리 기법을 말한다. 통계적 공정관리는 직접적으로 공정을 제어하는 수단은 아니며 공정을 개선할 수 있도록 관련 정보를 제작자에게 제공해주는 역할을 수행한다. 공급사는 통계적 공정관리를 통해 공정관리문서에서 정의한 각각의 KC에 대하여 Two-side Monitoring 으로 공정변수를 관리하고 있음을 입증해야 한다[9].

일반적으로 섬유 및 수지에 대한 통계적 공정관리 기법으로써 X-bar 차트를 사용한다. X-bar 차트란 Fig. 3과 같이 재료 물성의 평균값을 CL(Center Line)으로 적용하고 표준편차를 UCL(Upper Control Limit)과 LCL(Lower Control Limit)로 사용하여 나타낸 공정관리 차트를 나타낸다. 섬유와 수지 공급사는 KC를 X-bar 차트로 나타내고 해당 물성이 Control limit 영역안에 유지됨을 입증할 수 있어야 하며 값이 영역 밖을 벗어난다면 원인분석을 통해 품질이 유지되지 않은 사유를 도출해야 한다.

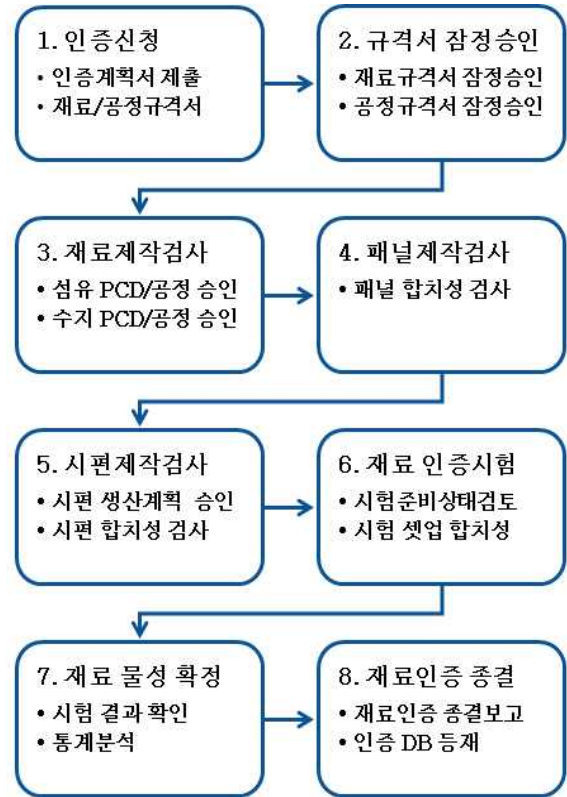


**Fig. 3** SPC using X-bar Chart

**4. 복합재료 인증 절차**

**4.1 액상성형공정 복합재료 인증 절차**

3 장에서는 액상성형공정 복합재료 인증을 위한 필수 구성서류를 나타내고 규격서의 요구사항을 기술하였다. 4 장에서는 액상성형복합재료 인증을 위한 절차를 수립하여 Fig. 4와 같이 나타내었다.



**Fig. 4** Material Qualification Process for LCM Composite Material

부품 제작사는 재료 구매를 위한 재료규격서와 복합 재료 제작 및 물성을 나타낼 수 있는 공정규격서를 3.1 장과 3.2 장에 의거하여 작성해야 한다. 공급사는 3.3 장과 3.4 장에 의거하여 각 재료규격서와 합치하는 공정관리문서를 작성하고 통계적 공정관리를 통해 재료의 품질관리를 보증해야 한다. 해당 복합재료 인증서류가 구성된 후에는 재료인증신청서와 계획서를 작성하여 복합재료인증을 신청할 수 있다.

전문검사기관은 부품 제작사가 진행하는 공정관리문서(PCD) 검토과정에 대한 입회 완료 후 재료/공정규격서를 승인할 수 있다. 규격서 승인 후 시험평가기관은 패널제작 과정에 대한 공정간 검사와 제품 검사를 통해 부품 제작사의 공정규격서와 패널제작 공정간 합치성 검사를 수행한다.

#### 4.2 복합재료 인증시험

시험평가기관은 제작된 시편에 대한 합치성검사와 시험준비상태검토(TRR, Test Readiness Review)를 마친 후 물성시험을 착수할 수 있다. 시험준비상태검토를 통해 제시된 복합재료 인증시험계획서를 토대로 재료인증 요구사항의 일관성/추적성, 시험절차의 완전성, 시험계획의 적절성 등을 확인할 수 있다. 이때 시험 항목 및 조건이 재료인증 요구사항의 충족을 충분히 입증할 수 있는지 점검 및 확인해야 한다.

복합재료 인증시험은 전문검사기관의 지정을 받은 시험평가기관 또는 시험평가기관의 승인을 받은 시험기관에서 수행할 수 있다. 액상성형공정 복합재료에 대한 경화 Lamina/Laminate 인증시험 Test matrix는 프리프레그 복합재료 인증시험과 동일하며 Table 5와 같이 구성할 수 있다[10]. Table 5의 Test matrix는 부품 제작사와 전문검사기관의 협의를 통하여 조정할 수 있다.

인증시험 합치성 검사가 종료된 후에는 결과의 유효성을 확인하여 재료물성 데이터를 확정하고, 재료물성 데이터 통계분석을 통한 재료허용값을 산출하며 이를 통해 재료물성 데이터 보고서와 통계분석 보고서를 작성해야 한다. 재료허용값 산출을 위한 통계분석은 CMH-17에서 제공하는 STATS 통계분석프로그램을 활용하여 계산할 수 있다[11].

시험평가기관에서는 통계분석 보고서 작성 후 전문검

사기관에 재료인증종결보고를 진행한다. 전문검사기관에서는 재료인증종결보고 검토 결과에 따라 재료인증을 승인하고 최종 복합재료인증 데이터베이스를 공유할 수 있다.

**Table 5** LCM Material Qualification Test Matrix

시험항목	시편개수 (배치 x 패널 x 시편)				소계
	CTD	RTD	ETD	ETW	
0° T	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
0° C	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
90° T	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
90° C	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
IPS	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
SBS	3x2x3	3x2x3	3x2x3	3x2x3	72
NHT	3x2x3	3x2x3	-	3x2x3	54
NHC	-	3x2x3	-	3x2x3	36
OHT	3x2x3	3x2x3	-	3x2x3	54
OHC	-	3x2x3	-	3x2x3	36
FHT	3x2x3	3x2x3	-	3x2x3	54
FHC	-	3x2x3	-	3x2x3	36
총계					702

T: Tension (ASTM D3039)

C: Compression (ASTM D6641)

NHT: No-hole Tension (ASTM D3039)

NHC: No-hole Compression (ASTM D6641)

OHT: Open-hole Tension (ASTM D5766)

OHC: Open-hole Compression (ASTM D6484)

FHT: Filled-hole Tension (ASTM D6742)

FHC: Filled-hole Compression (ASTM D6742)

## 5. 결 론

탈 오토클레이브 제작 공정인 액상성형공정 복합재료 부품과 재료에 대한 품질안정화 연구가 정부 R&D를 통해 다수 진행되고 있으며 항공기 제작사와 재료 공급사를 통해 액상성형공정 복합재료인증 수요가 증대됨에 따라 본 연구에서는 액상성형공정 복합재료에 대한 인증방법을 개발하여 제시하였다. 기존 프리프레

그 복합재료에 대한 인증방안과 관련한 연구는 국내외 다수의 연구자에 의해 제시된 바 있으나 액상성형공정 복합재료에 대해서는 국내 규정에 맞는 인증 절차가 전무하였고 해외에서도 액상성형공정에 대한 공정 승인 절차 및 관련 사례에 대한 연구는 계획단계에 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액상성형공정 복합재료인증 절차와 재료/공정 규격서 작성 지침을 개발하여 제시하였다. 본 연구를 통해 제시된 액상성형공정 복합재료인증 절차와 규격서 작성 지침을 활용한다면 향후 수요가 계속해서 증가될 탈 오토클레이브 방식의 복합재료에 대한 재료인증체계 수립과 관련 데이터베이스 확보가 가능할 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (“20011022”)

## References

- [1] Y. C. Roth, M. Weinholdt, L. Winkelmann, “Liquid Composite Molding-Enabler for the Automated Production of CFRP Aircraft Components,” *ECCM16*, June, 2014
- [2] J. Tomblin, W. Seneviratne, and Y. Ng, “Material Qualification Methodology for 2X2 Biaxially Braided RTM Composite Material Systems,” *AGATE-WP*, October, 2001
- [3] G. Bogucki, J. Bayldon, L. Gintert, S. Ward, and W. McCarvill, “Preliminary Guidelines and Recommendations for the Development of Material and Process Specifications for Carbon Fiber-Reinforced Liquid Resin Molded Materials”, *DOT/FAA/AR-06/25*, 2007.
- [4] D. Park, T. Kim, S. Kim, D. Shin, H. Kim, J. Han, “Evaluation of Physical and Mechanical Properties based on Liquid Composite Molding,” *Composites Research*, 2007.
- [5] L. Bouquerel, N. Moulin and S. Drapier, “Contribution to the Study of the Forming of Dry Unidirectional HiTape Reinforcements for Primary Aircraft Structures.” *Frontiers in Materials*, 2021
- [6] R. W. Stratton, “Resin Transfer Moulding for Aerospace Applications,” *Stringer*, 1998
- [7] Y. Ng, “Composite Structure Engineering Safety Awareness Course,” *NCAMP/CMH-17/P-17 initiatives*, 2010
- [8] S. Rhee, “Management of Process Control Document of Carbon Fiber for Composite Material Qualification,” *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 2015
- [9] T. M. Young, P. K. Lebow S. Lebow and A. Taylor, “Statistical Process Control and Related Methods for Improvement of the Treated-Wood Industries,” *Forest Product Journal*, 2020
- [10] CMH-17-1G, volume 1 of 6, Composite Materials Handbook, *Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization*, 2012
- [11] D. Nam, Y. Lee, Y. Cho, H. Jung, and J. Lee, “Design Allowable Prediction of Composite Laminates Using Statistical Method and Finite Element Analysis,” *Korean Society for Precision Society*, 2017