

복합재료인증체계를 통한 UAM 용 복합재료 부분품 인증 적합성 확인 방안

조성인^{1,†} · 양용만² · 정석호³ · 김제준⁴

¹한국산업기술시험원

²항공안전기술원

³(주)효성

⁴(주)티비카본

Compliance Validation Method of UAM Composite Part Manufacturing System based on Composite Material Qualification System

Sung-In Cho^{1,†}, Yong Man Yang², Seok-Ho Jung³ and Je-Jun Kim⁴

¹Korea Testing Laboratory

²Korea Institute of Aviation Safety Technology

³Hyosung Co.,Ltd, ⁴TB CARBON

Abstract

UAM (Urban Air Mobility) is a new safe, secure, and more sustainable air transportation system for passengers and cargo in urban environments. Commercial operations of UAM are expected to start in 2025. Since production rates of UAM are expected to be closer to cars than conventional aircraft, the airworthiness methodology for UAM must be prepared for mass production. Composite materials are expected to be mainly used for UAM structures to reduce weight. In this paper, the composite material qualification method was derived and the materials were applied for small aircraft application. It is expected to reduce the airworthiness certification time by applying composite material qualification system and its database.

초 록

UAM(Urban Air Mobility) 은 승객과 화물을 운반할 수 있는 새로운 형태의 안전하고 적합한 운송수단으로써 각광받고 있다. UAM 의 상업적인 사용은 2025년부터 시작될 것으로 예측되고 있다. UAM의 생산률은 기존 항공기 생산률보다 자동차 생산률에 더 가까울 것으로 예측되므로, 대량 생산 항공기에 대비한 새로운 인증 방안을 구축할 필요가 있다. 이러한 UAM은 구조물의 중량을 줄이기 위해 복합재료가 주 재료로써 사용될 것으로 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 항공기용 복합재료 시범인증을 수행함으로써 국내 복합재료 인증 방안을 제시하고 인증소재를 소형 항공기용 부품에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 대량생산이 필요한 UAM 항공기의 인증 시간을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

Key Words : UAM(Urban Air Mobility), Composite Material(복합재료), Material Qualification System(재료인증체계), Equivalency Test(동등성 시험), Design Value(설계허용치)

1. 서 론

Received: Feb. 11, 2022 Revised: May 16, 2022 Accepted: May 23, 2022

† Corresponding Author

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

© The Society for Aerospace System Engineering

UAM (Urban Air Mobility) 은 승객과 화물을 운반

할 수 있는 새로운 형태의 안전하고 적합한 운송수단으로써 각광받고 있다. UAM의 상업적인 사용은 2025년부터 시작될 것으로 예측되고 있다[1]. UAM의 생산물은 기존 항공기 생산물보다 자동차 생산물에 더 가까울 것으로 예측되므로, 대량 생산 항공기에 대비하여 인증 소요시간을 절감할 수 있는 인증 방안을 도입할 필요가 있다[2].

이러한 UAM은 구조물의 중량을 줄이기 위해서 복합재료가 주 재료로써 사용될 것으로 예상되고 있다. 복합재료는 기존의 금속 소재에 비해 비강성(specific stiffness) 및 비강도(specific strength)가 높은 우수한 기계적 성질을 가지고 있으며, 부식 저항성이 크고, 우수한 진동감쇠, 고온강도, 긴 피로수명, 파괴인성(fracture toughness) 등과 같은 역학적 특성이 대단히 우수하고, 환경변화에 쉽게 물성이 변하지 않는 장점과 특히, 중요한 소재 특징 중의 하나인 방향에 따른 기계적, 물리적 성질이 다른 이방성(anisotropic) 특성을 가지고 있기 때문에 구조 자체에 요구되는 강도나 강성을 변화시킬 수 있으므로 구조물 각 위치에 주어지는 하중을 고려하여 적절한 섬유 적층의 방향과 두께를 적용함으로써 최적의 경량화된 효율이 높은 구조로 만들어 낼 수 있는 특징이 있다. 또한, 공기역학적으로 유리한 곡선 형태의 제작이 가능함으로써 항력을 줄이고, 경량화된 무게로 항공기의 항속거리를 크게 할 수 있고, 일부의 부품들은 패스너(fastener) 등 체결 부품을 사용하지 않게 되어 구조물의 중량 감소 및 복잡한 형상을 쉽게 만들 수 있으므로 구조를 구성하는 단품의 갯수 절감과 함께 제작 가공성을 향상시킬 수 있고 운용 유지비가 저렴하고 넓은 실내공간 확보가 가능하기 때문에 최신 항공기에 널리 사용되고 있는 추세이다[3, 4].

항공기 구조물에 복합재료를 적용하기 위해선 재료 및 공정은 항공기 인증의 대상이 아니나 항공기 부품들에 적용된 재료의 적합성 입증은 위해서는 반드시 선제적으로 형식증명의 일부 기준(KAS Part 23, 25, 27, 29, 33의 603(재료), 605(공작법), 613(재료의 강도특성 및 재료 설계값) 충족 여부를 판정받고 재료규격서와 공정규격서를 감항기관의 승인을 받아야 한다[5].

FAA에서는 재료단위의 적합성 입증에서 발생할 수

있는 반복적인 활동비용을 절감하기 위하여 NASA와 협업하여 AGATE (Advanced General Aviation Technology Experiments) 조직을 출범하고 복합재료에 대한 전문적인 인증 심사를 수행하는 역할을 부여하였다[6]. AGATE에서 인증한 재료 데이터베이스는 공유하여 사용하며 항공기 제작사가 사용하고자 할 때에는 동등성 시험을 통해 시험 세트를 줄여 비용과 시간을 절약할 수 있게 하였다. 현재는 NIAR (National Institute for Aviation Research) 내에 NCAMP (National Center for Advanced Materials Performance) 기관에서 복합재료인증 역할을 수행하고 있다. 국내에서는 항공우주연구원에서 항공기용 국산 복합재료 인증체계에 대한 연구를 수행한 바 있다[7]. 하지만 국내 복합재 인증 전문검사기관이 항공안전기술원(KIAST)으로 새롭게 지정되고 한국산업기술시험원(KTL)이 시험평가기관으로 지정됨에 따라 국내 실정에 적합한 새로운 복합재료 인증체계의 출범이 필요하게 되었다[8].

본 연구에서는 항공기용 복합재료 시범인증을 수행함으로써 국내 항공기용 복합재료 인증 방안을 제시하고 복합재료 DB(Database)를 구축하였다. 또한 복합재료 DB와의 동등성 시험을 통해 부품제작 공정의 적합성을 확인하고 부품 적용 연구를 수행함으로써 복합재료 DB의 활용 방안을 입증하였다. 본 연구결과를 통해 UAM 등 대량생산이 필요한 항공기의 인증 시간을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 항공기용 복합재료 인증

2.1 국내 항공기용 복합재료 인증 체계

항공기 표준인증을 위한 지상시험방법으로 일반적으로 빌딩블록어프로치를 사용한다. 이는 소재단위부터 구조물, 전기체 단계까지의 시험과 해석을 병행하여 구조물의 건진성을 입증하는 방안이다. 대량생산이 필요한 UAM 항공기에 복합재료를 적용하기 위해선 반복되는 시험을 최소화 하여 항공기 개발 일정과 인증 시간을 줄여야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 국내 항공기용 복합재료 인증체계를 활용하는 방안을 제시하였다. 국내 항공기용 복합재료 인증 체계는 2020년 항공안전기술원과 한국산업기술시험원의 공동 연구를

통하여 수립되었다. 국내 복합재료 인증조직은 항공안전기술원이 전문검사기관, 한국산업기술시험원이 시험평가기관의 역할을 수행하며 그 역할은 Fig. 1 과 같 이 나타낼 수 있다.

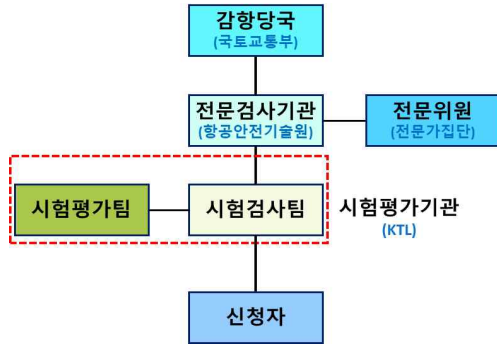


Fig. 1 Composite Material Qualification System

항공기용 복합재료 인증 과정은 Fig. 2와 같다. 신청자가 재료 및 공정을 개발한 후 재료인증을 신청하면 해당 재료 제작과정과 패널제작 공정을 합치성검사를 통해 확인한다. 제작된 패널은 시편으로 가공하여 인증시험을 수행하고 재료물성을 획득한다. 재료인증이 완료되면 재료인증 시험결과보고서, 재료인증 통계분석보고서를 DB로서 공유함으로써 반복되는 시험 비용과 시간을 절감할 수 있다[9].

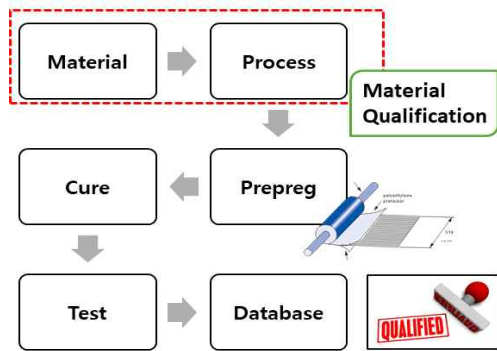


Fig. 2 Material Qualification Process

2.2 복합재료 제작 공정 승인

국내 항공기용 복합재료 시범인증 및 체계구축을 위한 실증 연구로써 국산 T700급 탄소섬유 복합재료를 적용하였다. 복합재료 제작은 Fig. 3과 같이 합치성 검사를 통해 제작공정에 대한 적합성 평가를 전문검사기관(KIAST)과 시험평가기관(KTL)의 공정 합치성 검사

후 수행하였다. 시험용 패널 제작 후에는 시편가공과 시편 합치성 검사를 수행한 후 재료인증시험을 수행하였다.

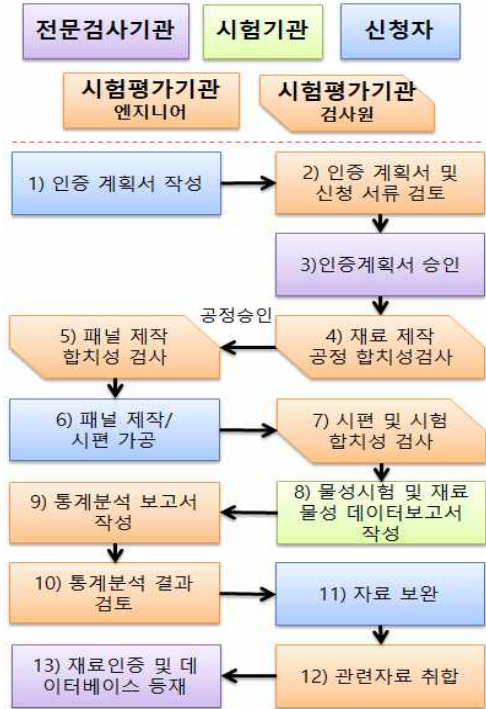


Fig. 3 Material Qualification Flow Chart

2.3 복합재료 인증시험

복합재료인증 시험은 Fig. 4와 같이 FAA 에서 제시하는 Reduced Sampling 시험에 기반하여 진행하였다 [10]. 복합재료를 인증받기 위해 3개 배치를 활용하였으며 두 개의 경화 사이클에서 복합재료 패널을 제작하였다.

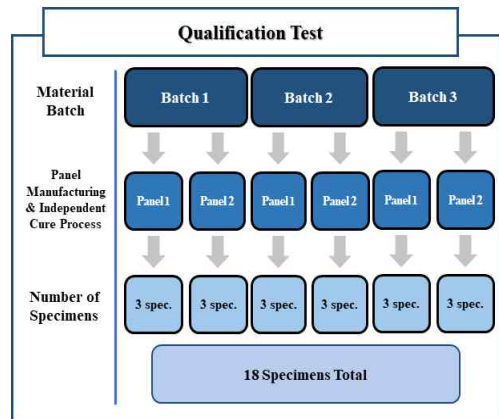


Fig. 4 Reduced Sampling

경화 프리프레그에 대한 복합재료 인증시험은 물리적 특성 측정을 위한 섬유 면적 중량, 매트릭스 함량, 기공 함량 측정시험과 인장, 압축, 전단 시험 등의 기계적 물성시험으로 구성된다. 경화 프리프레그 기계적 물성시험은 Fig. 5와 같이 인장(0° & 90° 방향), 압축(0° & 90° 방향), 면내전단(In Plane Shear), 층간전단(SBS) 시험으로 구성하였으며 시험 환경조건은 CTD (Cold Temperature Dry), RTD (Room Temperature Dry), ETD (Elevated Temperature Dry) 그리고 ETW (Elevated Temperature Wet)의 4 가지 조건으로 구성하였다.

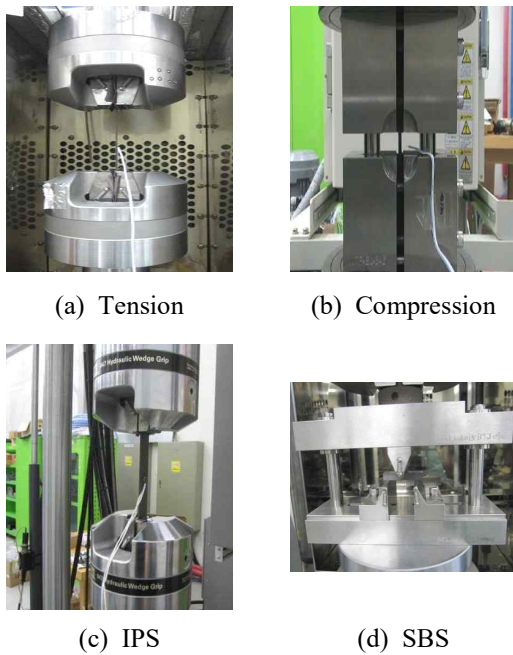


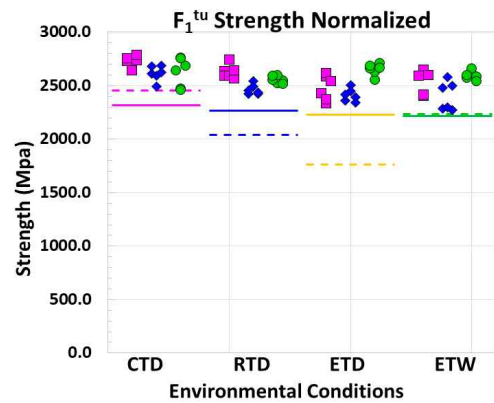
Fig. 5 Cured Prepreg Test

2.4 복합재료 설계허용치

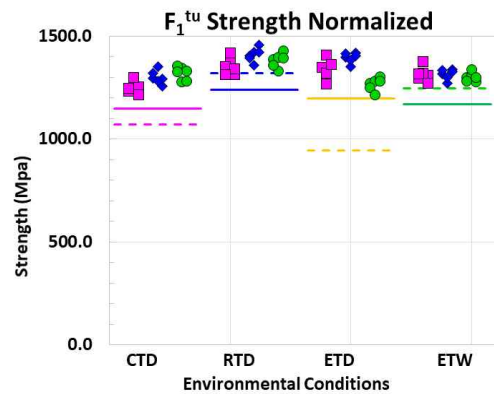
복합재료 설계허용치(design value)는 감항기관의 승인을 받은 재료규격서에서 제시하는 재료 물성값으로부터 계산하여야 한다. 설계허용치 계산은 CMH-17-1G, Volume 1 of 6에서 제시하는 적합한 통계 절차를 기반으로 Shyprykevich가 제안한 데이터 축약 방법론(Data reduction methodology)을 활용하여 B-basis를 계산하였다. Fig. 6은 Carbon UD/Fabric 프리프레그에 대한 재료허용치(B-basis)를 STAT-17 프로그램을 통해 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 6의 (a)는 UD 0° 인장

강도, (b)는 fabric 90° 인장강도를 나타낸다. 각 그래프의 x축에는 재료 배치별 시험결과를 환경조건으로 구분하여 나타내었고, y축은 인장강도를 나타내었으며 B-basis는 실선으로 표기하였다.

본 연구를 통해 국산 T700급 탄소섬유 복합재료를 적용한 UD/Fabric 프리프레그에 대한 재료인증을 항공안전기술원으로부터 승인받을 수 있었다. 승인받은 복합재료 설계허용치 및 관련 문서는 항공안전기술원의 국내 복합재료 인증 DB에 등재되었다.



(a) UD Prepreg LT Strength



(b) Fabric Prepreg LT Strength

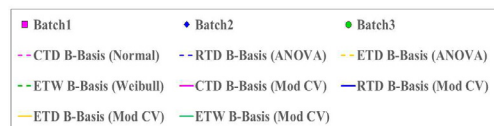


Fig. 6 B-basis Batch Plot for UD/Fabric Prepreg

3. 항공기용 복합재료 부분품 적합성 검토

3.1 복합재료 부품적용 적합성 검토 절차

항공기용 복합재료 부분적용 적합성을 검토하기 위한 일련의 연구 과정은 Fig. 7과 같다. 먼저 복합재료 프리프레그 2종 제작 및 재료인증시험을 본 논문 2절에 기술한 바와 같이 수행하였다. 재료인증시험결과는 2.4절의 통계분석 과정을 통해 항공안전기술원으로부터 재료인증의 적합성을 확인받았다. 복합재료물성 DB 등재 후에는 해당 소재에 대한 항공기 부품제작사의 복합재료 동등성 시험을 수행하였다. 동등성 검토를 통해 재료제작 공정과 부품제작 공정의 동등성을 확인할 수 있었다. 복합재료 부품제작 후에는 물리적 물성시험을 통해 제작공정의 적합성을 최종 검토하였다.



Fig. 7 Compliance Validation Process for Composite Part Manufacturing

3.2 복합재료 동등성 시험

복합재료 공유 DB를 활용한다면 대량생산되는 UAM의 인증 비용 및 시간을 크게 절감할 수 있다. 국

내 복합재료 인증 DB를 활용하기 위해선 동등성 시험을 통해 항공기 부품제작사에서 생산하는 재료 물성 DB가 원소재 DB의 물성값과 동등함을 입증하는 동등성 시험을 검증해야만 한다.

복합재료 동등성시험이란 기 인증된 복합재료의 재료 및 공정에서 Level 3 이상의 변화가 있을 때 수행하는 시험으로써 프리프레그 인장, 압축, 면내전단, 층간전단 시험 등으로 구성된다. 항공기용 복합재료 동등성 검토를 위하여 본 연구에서는 국내 복합재료 시범인증 대상인 탄소섬유 UD/Fabirc 프리프레그 복합재료를 사용하였다. 동등성 시험을 위한 복합재료 패널 제작 과정은 Fig. 8과 같이 프리프레그 재단, 적층, 진공, 경화 과정으로 진행하였다.

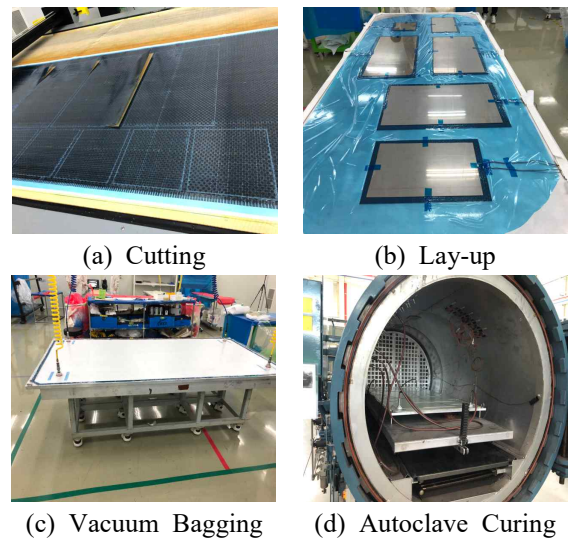
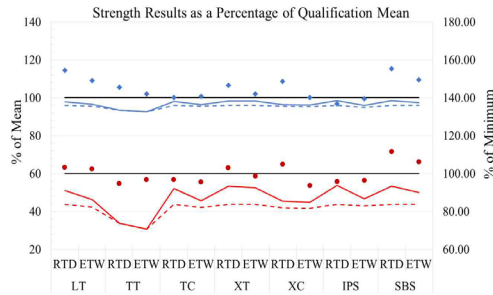


Fig. 8 Composite Panel Manufacturing Process

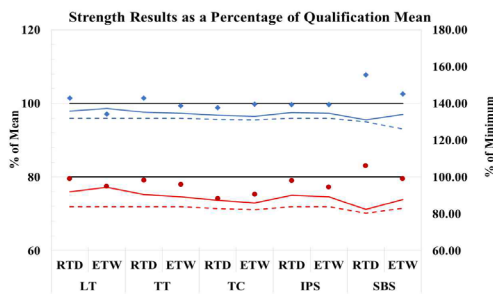
3.3 복합재료 동등성 검증 결과

복합재료 동등성 시험 결과는 CMH-17-1G를 준용하여 검토하였으며 재료 강도에 대한 검토 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 동등성 시험 결과는 재료 DB 강도의 평균값으로 정규화(normalize) 하여 비교값을 나타내었다. X축은 시험 항목이며 각각 0°인장(LT, Longitudinal Tension), 90°인장(TT, Transverse Tension), 90°압축(TC, Transverse Compression), Cross-ply 인장(XT), Cross-ply 압축(XT), 면내전단(IPS, In Plane Shear), 층간전단(SBS, Short Beam Strength) 시험을 나타낸다. 좌측 Y축은 DB 강도의

평균값을 나타내고 우측 Y축은 개별최솟값을 나타낸다. 그래프의 점선은 DB로부터 구한 평균 및 개별최솟값의 Pass/Fail 기준을 나타내며 각 심볼(symbol)은 동등성 시험 결과를 나타낸다.



(a) UD Prepreg Equivalency Results



(b) Fabric Prepreg Equivalency Results

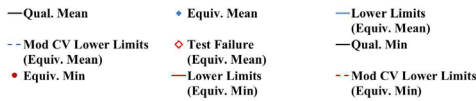


Fig. 9 Equivalency Test Results

Fig. 9로부터 동등성 시험 결과 0°인장, 90°인장, Cross-ply 인장, Cross-ply 압축, 층간전단 시험에서 재료 DB의 물성보다 높은 값을 나타내었다. 반면 90° 압축, 면내전단 시험결과에서는 재료 DB 물성보다는 낮지만 동등성 합격 기준(Lower Limit)보다 높게 나타났음을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 수행한 UD/Fabric 프리프레그 복합재료의 동등성 시험 결과가 재료 DB Pass/Fail 기준을 통과하였음을 확인하였다.

3.4 UAM 적용을 위한 복합재료 부품 제작

대량생산이 필요한 UAM 비행체에 복합재료를 적용

하기 위해선 반복되는 시험을 최소화하여 항공기 개발 일정과 인증 소요 시간을 절감해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 국산 항공기 경량화를 위한 복합재료 시범인증 및 인증 소재 DB와의 재료 동등성 검증을 수행하였다. 본 연구에서는 3.3절의 동등성 시험 결과로부터 부품제작 공정이 재료 DB 제작 공정에 사용된 재료제작 공정과 동등함을 입증하였다. 복합재료 제작 공정 동등성이 입증된 공정을 활용하여 비행체의 부품인 소형 헬리콥터 도어와 UAM 용 프로펠러를 Fig. 10, Fig. 11과 같이 제작하였다. 제작이 완료된 부품은 공정보증 시료를 채취하여 섬유 분율(fiber volume fraction)과 기공률(void contents) 검증을 통해 부품 제작 공정의 적합성을 최종 확인하였다.

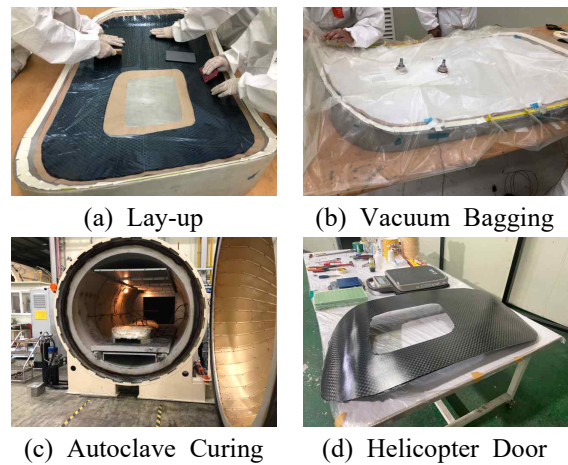


Fig. 10 Helicopter Door Manufacturing Process

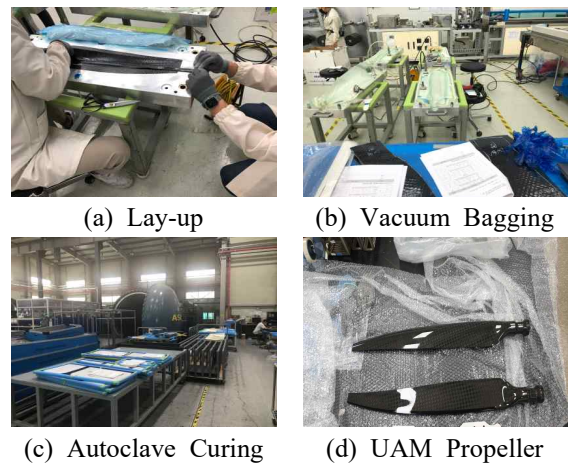


Fig. 11 Rotor Blade Manufacturing Process

4. 결 론

항공기 표준인증을 위한 지상 시험방법인 BBA는 소재시험시편 단위부터 구조물, 전 기체 단계까지의 시험과 해석을 병행하여 구조물의 건전성을 입증하는 방안이다. 대량 생산이 필요한 UAM 비행체에 복합재료를 적용하기 위해선 반복되는 시험을 최소화하여 항공기 개발 일정과 인증시간을 줄일 수 있어야만 한다.

이러한 항공기 개발 일정과 인증시간을 줄이고 국내 항공기용 복합재료 인증체계를 새롭게 출범시키기 위해 본 연구에서는 국내 항공기용 복합재료 인증모델을 제시하였다. 제시된 인증모델을 활용하여 항공기용 복합재료 시험인증을 수행하고 복합재료 DB를 구축하였다. 또한 복합재료 DB와의 동등성 시험 및 비행체 부품 적용 연구를 수행함으로써 복합재료 DB의 활용 방안을 입증하였다.

이러한 항공기용 복합재료 소재인증 체계구축은 항공기뿐만 아니라 UAM 등의 신 비행체의 인증비용 및 개발시간 절감과 항공기 제작 및 설계 등에 인증소재 DB는 설계허용값으로 반영됨으로써 항공기 개발에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다. 향후 항공용 복합재료 인증체계를 통해 복합재료들이 적용될 수 있도록 다양한 제작공법과 재료물성들이 반영된 항공용 복합재료 DB 확보를 위한 노력을 지속 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘20011022’).

References

- [1] EASA, “Study on the Societal Acceptance of Urban Air Mobility in Europe,” 2021.
- [2] P. Kopardekar, “Supply Chain Ecosystem for Urban Air Mobility,” *Aviation Week Urban Air Mobility Conference*, 2019.
- [3] W. Seneviratne and J. Tomblin, Dynamic Response

of Composite Structures Subjected to Blast Loading, *Joint Advanced Materials & Structures Center of Excellence*, 2010.

- [4] Y. M. Yang, J. S. Kwon, J. S. Kim, S. Y. Lee, “A Study on Manufacturing Methods of Cocuring Composite Wings of Solar-Powered UAV”, *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol.10, No.1, pp.43-50, 2016.
- [5] “Certification, Type Design, Material and Process Qualification for Composite Light Aircraft”, *CM-S-006 Issue 01*, 2015.
- [6] J. S. Tomblin, J. D. Tauriello and S. P. Doyle A Composite Material Qualification Method that Results in Cost, Time and Risk Reduction, *Journal of Advanced Materials*, 2002
- [7] I. Kim, A Study on the Certification System and Development Plan of Domestic Composite Material for Aircraft Use, *Journal of Aerospace System Engineering*, 2015
- [8] SI. Cho et al. Development of Composite Material Qualification System for Aerospace Application, *SASE 2019 Fall Conference*, 2019.
- [9] G. Bogucki, W. McCarvill, S. Ward, and J. Tomblin, “Guidelines for the Development of Process Specifications, Instructions, and Controls for the Fabrication of Fiber-Reinforced Polymer Composites,” *FAA report DOT/FAA/AR-02/110*, 2003.
- [10] Composite Materials Handbook, CMH-17-1G, Volume 1 of 6, 2012.