

회전익 항공기 메인로터 블레이드 트림 탭 내구성 개선연구

이광은^{1*}, 구정모¹, 나성현¹, 김민호²
¹국방기술품질원, ²한국항공우주산업(주)

The Study on Durability Improvement of the Trim Tab for Main Rotor Blade of Rotorcraft

Gwang-Eun Lee^{1*}, Jeong-Mo Koo¹, Seong-Hyeon Na¹, Min-Ho Kim²
¹Defense Agency for Technology and Quality, ²Korea Aerospace Industries

요약 회전익 항공기에서 메인로터 블레이드는 메인기어 박스(MGB : Main Gear Box)로부터 동력을 전달 받으며, 항공기의 양력, 추력 및 방향력을 제공하는 기능을 수행한다. 하지만, 블레이드 제작 편차로 인해 불가피하게 양력의 편차가 발생하게 되며, 이를 해결하기 위해 블레이드에 두 개의 알루미늄 판재를 접착한 트림 탭을 부착하여 블레이드 동적밸런싱, RTB(Rotor Track & Balancing) 과정에서 양력의 편차를 조절하는 절차를 수행하고 있다. 하지만, 항공기 운용 중 트림 탭에서 두 판재의 접착력 약화에 따른 접착분리 현상이 발생하였고, 비행안전성 확보를 위하여 조속한 원인분석과 품질개선이 요구되었다. 발생 원인으로는 알루미늄 판재 접착과정에서 발생하는 접착제 불균일 도포 현상 및 경사도 조절 시 발생하는 초기 굽힘 응력에 의한 접착면 내부 손상발생으로 추정되었다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 접착분리 현상을 해결하기 위하여, 메인로터 블레이드 제작공정에 대한 4M1E 기반의 프로세스 검토를 수행하여 문제점을 분석하였고, 접착제 불균일 현상에 따른 두께 차이를 해소하기 위하여 기존 혼합물 형식의 접착제 대신, 두께가 균일한 필름형 접착제를 적용하였다. 이에 따른 효과를 확인하기 위하여 박리시험을 통한 구조강도 개선정도, 표면 분석을 통한 접착제 분포 개선정도를 분석하였다.

Abstract In a rotorcraft, the main rotor blade receives power from the MGB and provides lift/thrust of the aircraft. However, a deviation in lift inevitably occurs due to deviations in blade manufacturing. To solve this problem, a procedure to adjust the deviation of the lift force was performed by attaching a trim-tab with two aluminum plates bonded to the blade. Despite this, adhesive separation occurred due to weakening of the adhesive strength at the trim-tab during aircraft operation. Hence, careful analysis is needed to ensure flight safety. The cause of the occurrence is presumed to be damage to the adhesive surface caused by the initial bending stress that occurs during the adjustment of the inclination and the non-uniform application of the adhesive occurring in the process of bonding the aluminum plate. In this study, to solve this adhesive separation, a 4M1E-based process review for the main rotor blade manufacturing process was performed to analyze the problem. A film adhesive with a uniform thickness was applied instead of the conventional mixture adhesive to solve the thickness difference due to the non-uniform adhesive phenomenon. Strength improvement and adhesive distribution improvement analysis were performed to confirm the effect.

Keywords : Rotorcraft, Main Rotor Blade, Trim-Tab, Adhesive Separation, Film Adhesive

*Corresponding Author : Gwang-Eun Lee(Defense Agency for Technology and Quality)

email: naseh12@naver.com

Received March 23, 2021

Accepted July 2, 2021

Revised April 13, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

회전의 항공기에 Fig. 1과 같이 장착되어 있는 메인로터 블레이드는 메인기어박스(MGB : Main Gear Box)에서 발생하는 동력을 전달 받아 비행에 필요한 양력, 추력, 방향력을 제공하는 역할을 수행하고 있다.

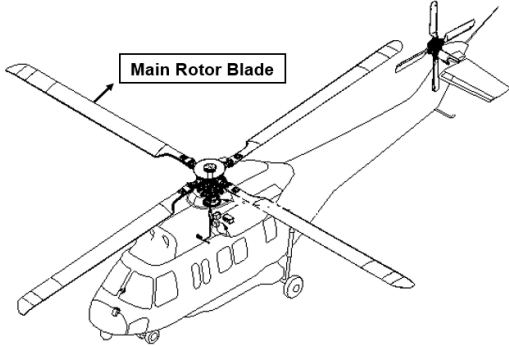


Fig. 1. Configuration of Main Rotor Blade

하지만, 메인로터 블레이드 제작 과정에서 발생하는 편차로 인하여, 불가피하게 양력의 편차가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 2와 같이 블레이드에 두 개의 알루미늄 판재를 접착하여 제작한 트림 탭을 부착하고 있다. 이를 통해 제작과정에서 수행하는 메인로터 동적 밸런싱, RTB(Rotor Track & Balancing)에서 양력의 편차를 기준 값에 맞도록 조절하고 있다.

하지만, 접착제를 사용하여 제작한 두 알루미늄 판재의 특성 상, 복합적인 요인에 의한 접착분리 현상이 발생하였고, 현상 원인분석을 위해 유사한 형상의 금속접합 연구에 대한 분석을 수행하였다.

Chung 등은 알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 접착강도를 평가하기 위하여, 에폭시 수지를 사용한 알루

미늄 접합시편을 제작하였고, 시험 및 구조해석을 통하여 접합강도를 평가하는 기법을 제시하였다[1]. Kim 등은 본 연구에서 사용된 접착제와 유사한 형태인 EA-9320 페이스트형 접착제에 대한 환경적 요인을 분석하고, 그 영향에 따른 접착강도와 접착계면 분리현상을 연구하였다[2]. Cho 등은 알루미늄 폼으로 된 DCB(Double Cantilever Beam) 접착 구조물의 Mode II에 대한 접합 강도를 유한요소법으로 평가하였고, 실제 구조물을 기준으로 접착제 두께를 변화시키며 두께에 따른 Mode II 전단강도를 분석하였다[3]. Zheng 등은 알루미늄 접합 시, 접착제의 종류에 따른 정적강도를 Single-Lap Joint 시험을 통해 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 알루미늄 표면처리 시 환경 요소 및 접착 특성에 따른 파손모드(Cohesive Failure, Adhesive Failure) 등을 분석하였다[4]. Lee 등은 본 연구에서 적용한 동일 회전의 항공기의 메인로터 블레이드에 대한 품질개선 연구를 수행하였다. 메인로터 블레이드의 앞전에는 티타늄 및 니켈 등으로 제작된 보호판이 부착되어 있고, 그 하부에 폴리우레탄 띠(Poly-Urethane Strip)를 적용하여 표면 손상을 방지하게 된다. 하지만, 운용 중 PU Strip 갈라짐 현상이 발생하였고, 이에 따른 내구성 개선연구를 수행하였다. 원인분석/개선방안 검증 시 주로 고려한 인자는 열화/경화 온도조건, 페인트 종류, 열충격 등이었고, 최종적으로 본 연구와 동일하게 접착력 시험을 통해 개선효과를 입증하였다[5]. 위 내용들을 참고하여, 본 연구에서는 접착분리 현상에 대한 원인을 분석하고, 내구성 향상을 위한 개선방안을 도출하였다. 전체적인 연구 절차의 흐름은 Fig. 3과 같다.

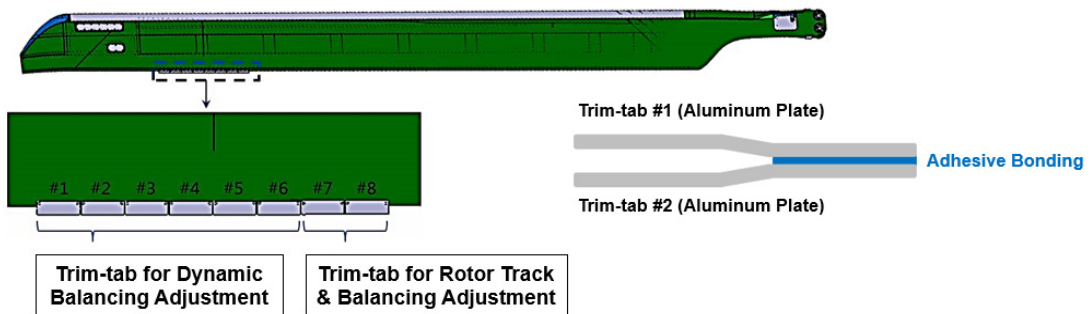


Fig. 2. Trim-tab Configuration & Attachment Location

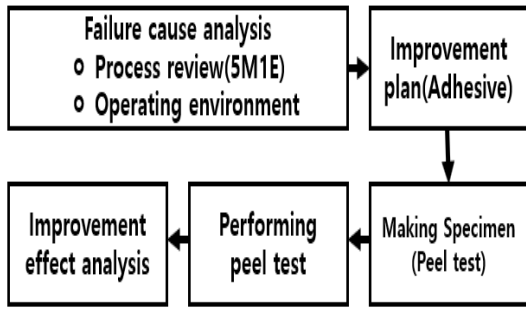


Fig. 3. Research Flow Chart

2. 본론

2.1 결함 현상 개요

회전의 항공기 운용 중 Fig 4와 같이 메인로터 블레이드에 부착되어 있는 트림 탭에서 두 개의 알루미늄 판재의 접착력이 약화되면서 접착부가 분리되는 De-bonding 현상이 다수의 항공기에서 발생되었다.

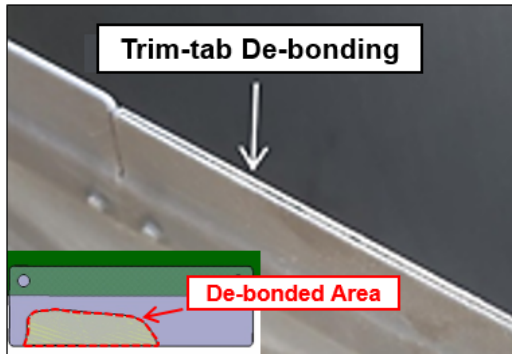


Fig. 4. Trim-tab De-bonding Phenomenon

2.2 결함 원인 분석

결함 원인을 분석하기 위하여, 두 가지 측면에서의 원인 분석을 수행하였다. 먼저, Fig. 5와 같이 두 개의 알루미늄 판재를 접착하는 트림 탭 접착공정에서의 영향을 분석하였다. 분석 결과, 트림 탭 접착 시 접착부위 압력을 치구의 체결 볼트 토크적용으로 조절하였고, 이에 따라, Fig. 6과 같이 치구 체결 시 탭에 적용된 접착제가 일부 빠져 나가는 현상이 발견되었다.

결과적으로, 접착면 내부에 접착제의 두께가 불균일하게 도포되는 현상에 의하여, 접착력이 약해진 것으로 추정된다.

두 번째로, 운용환경에 대한 검토를 수행하였다. 메인로터 블레이드는 항공기 장착 전, 동적밸런싱 및 RTB 공정을 수행하게 되는데, 이때, 메인로터 블레이드에 부착된 트림 탭의 각도를 조절하며 양력 편차를 조절한다. 탭의 각도를 조절할 때, 굽힘 응력이 불가피하게 작용하게 되며, 이에 따라, 지속적인 응력 누적에 의한 접착력이 약화되어 결함이 발생하는 것으로 추정된다. 추가적으로, 명확한 원인 분석을 위하여, 트림 탭 접착 공정에 대한 프로세스 검토를 수행하였다. 프로세스 검토는 4M1E (Method, Material, Machine, Man, Environment) 기반으로 수행하였다. 그 결과, Table 1과 같이 트림 탭 접착 공정 중 두께차이가 발생 가능한 것으로 식별되었고, 프로세스 검토 결과를 바탕으로 개선방안을 도출하였다.

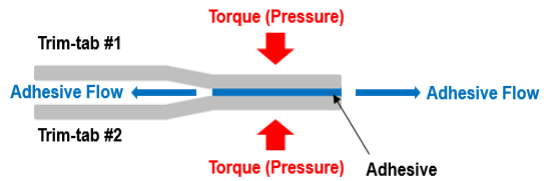


Fig. 6. Adhesive Flow in Bonding Process

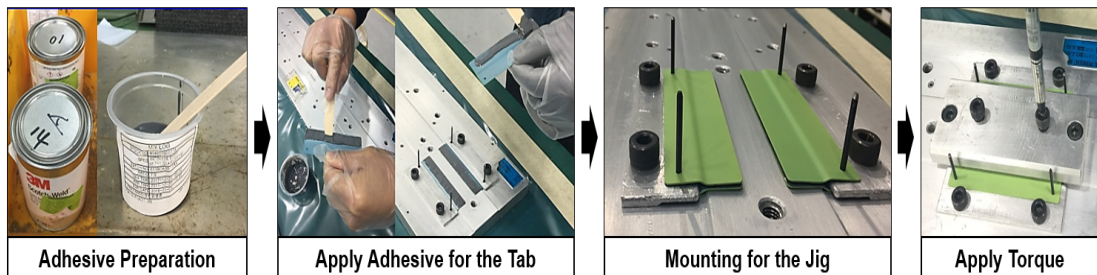


Fig. 5. Trim-tab Bonding Process

Table 1. Results of Process Review based on 4M1E

Category	Process Review Items / Results
Method	<ul style="list-style-type: none"> ○ No specific matters as a result of confirmation of changes in manufacturing documents(production changes, etc.) ○ Suitability of the process → Identification of possible adhesive thickness differences during the trim-tab bonding process
Material	<ul style="list-style-type: none"> ○ No specific matters as a result of checking the materials used(Bonding Primer, Adhesive) ○ No specific matter as a result of checking the adhesive application time, mixing ratio, drying time ○ No abnormality in the result of checking the inspection report/certificate of compliance
Machine	<ul style="list-style-type: none"> ○ No functional changes as a result of equipment verification(Aluminum plate anodizing tank, Bonding tool, Inspection(UT) tool)
Man	<ul style="list-style-type: none"> ○ All operator have process certification(Anodizing, Bonding, Inspection) ○ No operator association with specific trim-tab where adhesive separation occurred
Environment	<ul style="list-style-type: none"> ○ No changes/specialities as a result of workplace(Anodizing, Painting, Oven) verification

3. 개선방안 도출 및 검증

3.1 개선방안 도출

접착분리 현상을 방지하기 위하여 원인분석결과와 프로세스 검토결과를 참고하여 개선방안을 선정하였다. 접착분리 현상의 가장 큰 원인이 되는 두께 불균일 현상을 방지하기 위하여, 탭 접착용 접착제를 기존 페이스트형 접착제(Liquid Adhesive)에서 필름형 접착제(Film Adhesive)로 변경하였고, 추가적으로 수리용 접착제를 적용하여 총 3가지 접착제 재질에 따른 접착강도 및 접착단면을 비교하였다. 각 재료의 적용 시기 및 혼합 형태는 Table. 2와 같다.

Table 2. Adhesive Type for Verification

Adhesive A	Adhesive B	Adhesive C
Original	Improvement	Repair
Epoxy Base + Hardener	Resin + Net	Epoxy Base + Hardener

3.2 개선방안 검증

총 3가지 접착제에 따른 접착강도(Peel Stress)를 확인하기 위하여 Fig. 7과 같이 시편을 제작하여 KOLAS 인증을 완료한 공인시험기관에서 박리 시험을 수행하였다. 시편은 접착제에 따라 접착과정을 2가지로 달리하여 제작하였고, 시험은 각 접착제 종류 별로 4개씩 수행하여 결과를 분석하였다. 시험규격은 Fig. 8과 같이 ASTM (American Society for Testing Materials) D3167을 준용하였다[6]. 박리 시험 시 사용한 재료시험기는 대경 엔지니어링에서 제작한 50 kN 만능재료시험기(모델명 : DUT-3000CM)이다. 시험환경 온도조건(Temperature Condition)은 $23 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였으며, 습도조건(Humidity)은 $40 \pm 10\%$ R.H를 유지하였다.

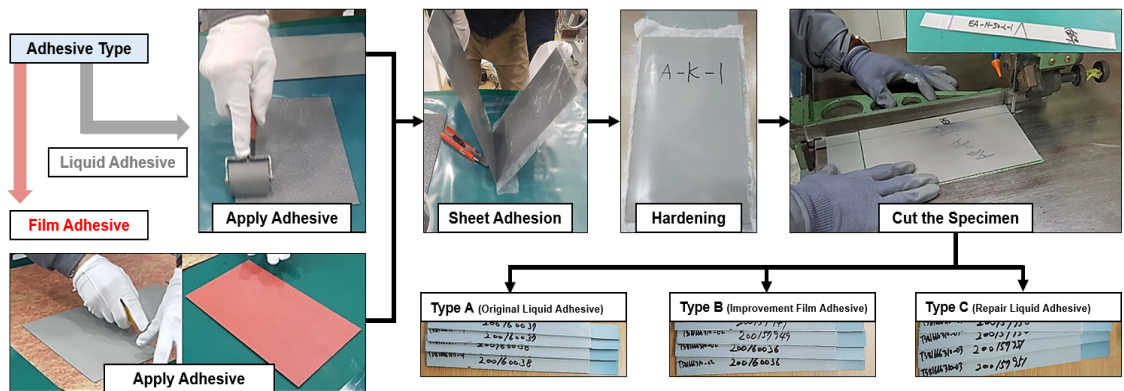


Fig. 7. Test Specimen Manufacturing Procedure



Fig. 8. Configuration of Test Set-up

Table. 3,4,5와 같이, 총 3가지 종류의 접착제에 따른 박리시험 결과를 확인할 수 있으며, 최대 하중과 박리 응력에 대한 시험결과 그래프를 Fig. 9,10,11에 나타내었다.

Table 3. Test Results for "Type A(Original)" Specimen

	#1	#2	#3	#4	Avg.
Load [N]	161	129	163	161	154
Peel Stress [N/mm]	5.48	4.29	5.46	5.47	5.18

Table 4. Test Results for "Type B(Improvement)" Specimen

	#1	#2	#3	#4	Avg.
Load [N]	243	241	255	231	243
Peel Stress [N/mm]	7.06	8.46	7.77	7.06	7.59

Table 5. Test Results for "Type C(Repair)" Specimen

	#1	#2	#3	#4	Avg.
Load [N]	104	102	114	114	109
Peel Stress [N/mm]	3.44	3.44	3.18	3.57	3.41

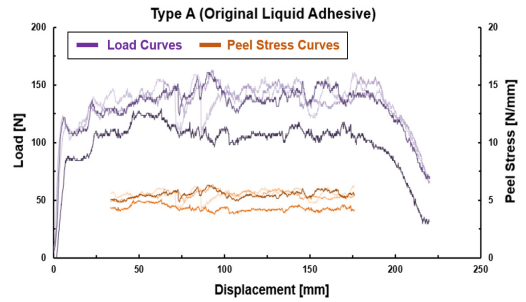


Fig. 9. Load-Displacement/Peel Stress Curves of Type A

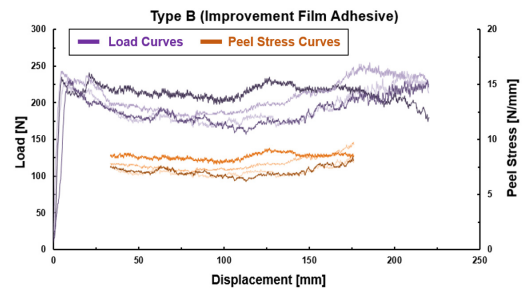


Fig. 10. Load-Displacement/Peel Stress Curves of Type B

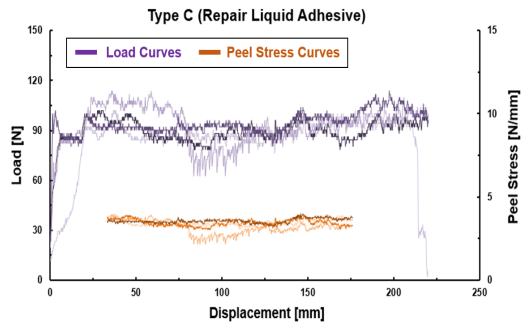


Fig. 11. Load-Displacement/Peel Stress Curves of Type C

시험결과 분석 결과, 기존 페이스트 타입의 접착제 대비, 필름형 타입의 접착제에서 최대 하중이 약 58% 증가하였고, 박리 응력은 약 47% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 두께의 불균일 현상으로 인한 접착 계면의 불규칙성 또한 개선되는 것을 Fig. 12,13과 같이 확인할 수 있었다. 먼저, 기존 접착제의 계면에서는 접착제 분포의 차이 및 내부 기공이 다수 식별되었고, 이로 인하여 탭 중앙부 접착제 부족영역이 식별되었다. 하지만, 개선된 필름형 접착제 계면의 경우, 필름 내부의 Net을 중심으로 접착제 분포가 균일한 것을 확인할 수 있다.

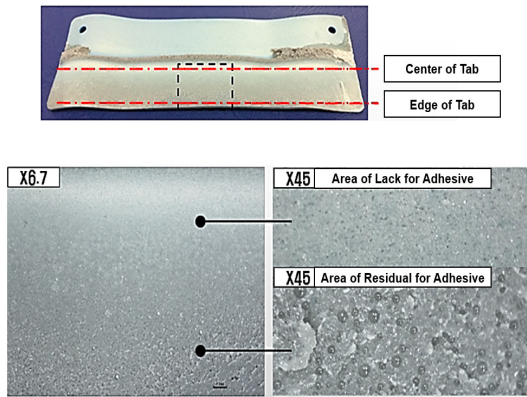


Fig. 12. Adhesive Interface Microscopy for Type A

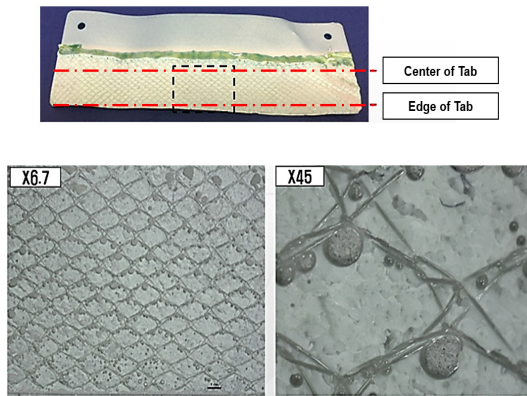


Fig. 13. Adhesive Interface Microscopy for Type B

4. 결론

본 연구에서는 회전익 항공기 운용 중 발생한 메인로터 블레이드 트림 탭 접착분리 현상에 대한 원인분석, 개선방안 도출, 검증을 수행하였다. 먼저, 결함 현황을 파악하고, 관련 참고자료를 토대로 원인분석을 수행하였다. 추정 원인으로서는 트림 탭 제작 과정에서 접착제의 불균일 도포 및 동적밸런싱, RTB 과정에서 발생하는 굽힘응력으로 분석되었다. 이를 바탕으로 접착제 타입을 필름형으로 변경하는 개선방안을 도출하였고, 박리 시험과 접착제면 표면분석을 통하여, 개선방안의 효과를 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해, 원인분석 시 수행한 5M1E 기반의 프로세스 검토 결과를 토대로, 제작 공정 상의 문제점을 분석할 수 있었고, 향후 작업 시 접착제 형태 변경/체결작업의 개선을 통하여, 접착제의 불균일 도포에 따른 구조적 강도가 감소하는 현상을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] N. Y. Chung, J. H. Yi, "Evaluation Method of Bonded Strength in Adhesively Bonded Structures of the Aluminum Alloys", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 8, No. 1, pp.35-44, 1999
- [2] C.S.KIM, S.I.Baek, K.S.Park, "An Experimental Study on the Adherence Strength Characteristics of EA-9320 Adhesive and Aluminum Alloy", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 27, No. 3, pp.24-29, 2019
DOI : <https://doi.org/10.12985/ksaa.2019.27.3.024>
- [3] H. S. Cho, J. U. Cho, "Simulation Analysis on Shear Strength Evaluation of Aluminum Foam Joined with Adhesive", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 48, No. 3, pp.373-377, 2013
DOI : <https://doi.org/10.17958/ksmt.15.3.201306.373>
- [4] Rui Zheng, Jianping Lin, "Effect of adhesive characteristics on static strength of adhesive-bonded aluminum alloys", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 57, pp.85-94, 2015
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.10.007>
- [5] Y. W. Lee, Y. J. Kim, Y. J. Seo, M. H. Kim, "A study on PU Strip Quality Improvement through a Change of Primer-process for SURION Main Rotor", Journal of Korean Society for Quality Management, Vol. 47, No. 3, pp. 401-415, 2019
DOI : <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.3.401>
- [6] ASTM D3167, "Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives", 2017

이 광 은(Gwang-Eun Lee)

[정회원]



- 2019년 2월 : 경상대학교 기계항공공학부 항공우주공학 (공학석사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료

구 정 모(Jeong-Mo Koo)

[정회원]



- 2018년 2월 : 경상대학교 항공우주공학과 (공학사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료

나 성 현(Seong-Hyeon Na)

[정회원]



- 2017년 2월 : 충남대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 2019년 12월 : 국방과학연구소 연구원
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

품질경영, 기계공학, 항공공학, 신뢰성공학

김 민 호(Min-Ho Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 경상대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 11월 ~ 현재 : 한국항공우주산업 책임연구원

<관심분야>

기계공학, 블레이드, 복합재료