

회전의 항공기 보조동력장치 시동모터 운용성 개선연구

이광은*, 강병수, 나성현
국방기술품질원

The Study on Operability Improvement of the start motor for Auxiliary Power Unit of Rotorcraft

Gwang-Eun Lee*, Byoung-Soo Kang, Seong-Hyeon Na
Defense Agency for Technology and Quality

요약 회전의 항공기의 보조동력장치(APU, Auxiliary Power Unit)는 지상 운용/비행 중 주 동력 기관의 시동, 환경제어 시스템용 고압 공기 공급, 비상발전기 등의 역할을 수행한다. 보조동력장치(이하 'APU')는 소형 가스터빈엔진형태로 구성되어 있으며, 해당 구성품의 시동 원리는 전기 시동 모터를 사용하는 방식으로, 축을 회전시켜 시동에 필요한 동력을 발생시킨다. 본 연구에서는 회전의 항공기에 장착된 APU의 시동 모터 운용성 확보를 위해 APU와 APU 시동 모터 간 축간 분리 장치(Over-Running Clutch) 적용을 통한 품질개선을 수행하였다. APU 시동 모터는 초기 APU 시동이 주 역할이지만, 운용 시 실제 작동 시간 이후에도 APU 기어축의 회전력에 의해 무 부하 회전을 하게 되어 구성품/부품 간 과도한 마찰력이 지속적으로 발생하였다. 이러한 현상은 시동 모터 내부 브러시 마모를 유발하게 되고, 결과적으로 항공기 운용을 위한 APU 작동 시간 증가 시 브러시 운용 수명 감소와 APU의 운용성에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 APU 시동 모터의 운용성/내구성 향상을 위하여 시동 모터 브러시 마모와 APU 작동시간의 연동성을 분리하는 축간 분리 장치(Over-Running Clutch)적용하여 시험으로 효과를 검증하였고, 설계변경에 따른 기술적 타당성을 분석하였다.

Abstract The auxiliary power unit (APU) of a rotorcraft starts the engine during operation/flying. The APU is composed of a gas turbine engine type. The starting principle of the component is that the electric start motor generates the power required for starting by rotating the shaft. In this study, quality improvement was performed by applying an over-running clutch (ORC) between the APU and the starter motor to secure the operability of the starter motor of the APU mounted on the rotorcraft. The starter motor has the main role of starting the APU, but during operation, it is rotated without load by the rotational force of the APU gear shaft, resulting in friction at the brush. This phenomenon causes abrasion of the brush of the starter motor. Consequently, when the APU operation time increases, the brush life decreases, and the operability of the APU is affected. In this study, an ORC that separates the interlocking between the start motor brush abrasion and the APU operation time was applied to improve the operability/durability of the APU starter motor. The effect was verified through a test, and the technical feasibility of the design change was analyzed.

Keywords : Rotorcraft, Auxiliary Power Unit(APU), Start Motor, Over-running Clutch(ORC), Operability Improvement

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

email: naseh12@naver.com

Received September 25, 2020

Accepted February 5, 2021

Revised November 2, 2020

Published February 28, 2021

1. 서론

회전의 항공기에 장착되어 있는 보조동력장치 (Auxiliary Power Unit, 이하 'APU')는 Fig. 1과 같이 소형 가스터빈엔진 형태로 제작되며, 각각의 기능을

수행하기 위한 추가로 장착되어 있다. APU의 주된 역할은 항공기 엔진시동을 위한 압축공기를 제공하는 것이며, 추가적으로, 객실 내 환경제어 및 비상 발전의 기능을 수행한다. 이때, APU 전방에 장착된 APU 시동모터는 APU 시동을 위한 전기적 출력을 공급하며, 브러시 타입 모터의 구조를 가지고 있다. 브러시 타입 모터에서 브러시는 내부 회전자와 물리적 접촉상태를 유지하며 전원을 공급하는 역할을 수행한다[1,2].

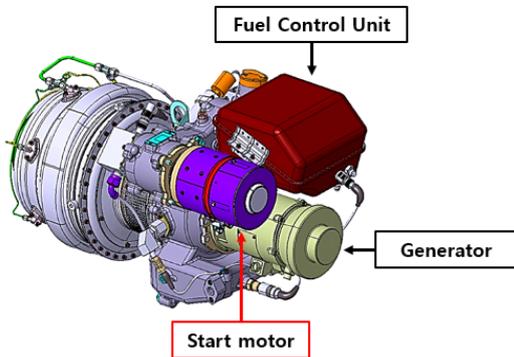


Fig. 1. Configuration of Auxiliary Power Unit

하지만, 브러시 타입 모터의 특성상 필연적인 접촉으로 인하여, 운용 시간이 증가함에 따라 마모가 발생하게 된다. 이러한 이유로, 회전의 항공기 운용 과정에서 APU 시동모터 브러시가 마모되는 현상이 다수 발생하였다.

앞선 타 연구에서 동일 구성품에 대한 품질개선을 수행하였고, 브러시 스프링 압력 조절, 브러시 끝단 형상 변경 등을 적용하였다. 하지만, 지속적인 결함이 발생하여, 본 연구에서는 항공기 운용 중 발생한 APU 시동모터 결함의 원인을 찾고, 그에 따른 개선책을 제시하였다. 또한, 개선책의 검증을 위하여 내구성/환경시험을 수행하여 개선효과를 입증하였다.

세부적으로, 개선책이 적용된 구성품에 대한 성능시험, 환경시험을 수행하였고, 운용성 향상을 위하여 신뢰성/정비성/안정성 요구도 개선정도를 분석하였다.

2. 본론

2.1 결함 현상 개요

회전의 항공기 운용 중 APU 시동모터 결함이 Fig. 2와 같이 다수 발생하였다. 그 내용으로는 APU 시동모터 브러시가 마모되어 APU 시동실패 등 기능저하가 발생하였고, 이에 따라 조속한 결함원인 분석 및 재발방지 대책이 요구되었다. 이에 따른 연구 개념도는 아래와 같다.

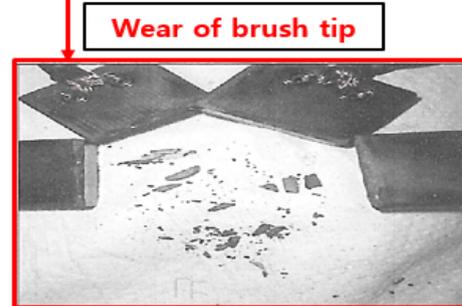
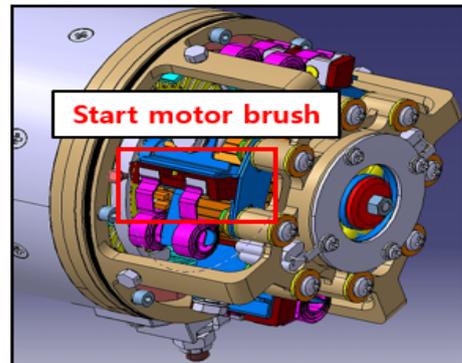
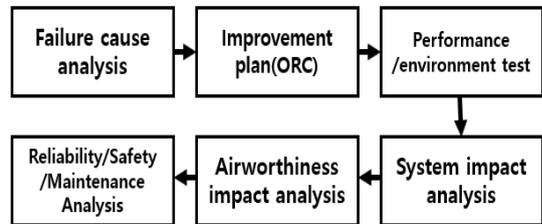


Fig. 2. Configuration of start motor brush & wear defect

2.2 결함 원인 분석

조속한 원인분석을 위해 APU 시동모터 제작사 및 항공기 제작업체와 고장탐구를 수행하였고, 결함원인을 아래와 같이 도출하였다.

앞서 서론에 언급한 바와 같이, APU 시동모터는 브러시 타입 모터 형태를 기반으로 제작되었기 때문에 접촉에 의해 전력을 공급하게 된다. 따라서, 운용 중 지속적인 마찰에 주의하여야 하며, 이에 따른 내구성 또한 고려되어야 한다.

하지만, 운용 과정에서 APU 시동 완료 후에도 Fig. 3과 같이 APU와 APU 시동모터간 연결된 축의 회전력에 의하여 불필요한 회전을 계속하게 되며, 이로 인하여 과도한 마찰이 발생하게 된다. 이에 따라, 브러시가 마모되며 기능을 상실하는 현상이 발생하게 되었다.

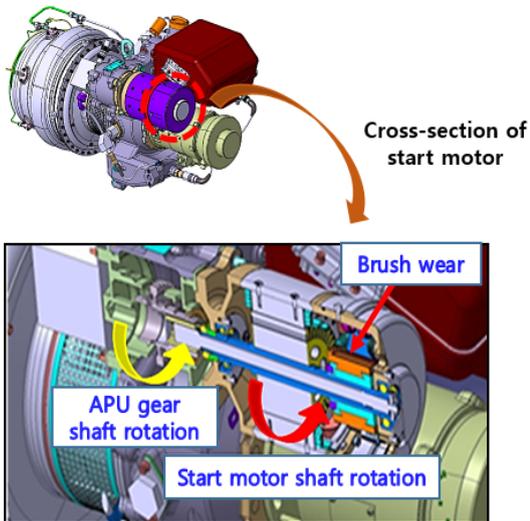
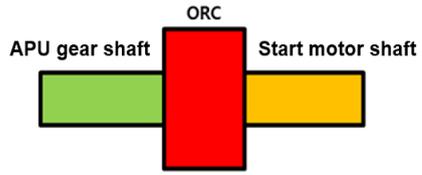


Fig. 3. Start motor cross-section and operating principle

3. 개선방안 도출 및 검증

3.1 Over Running Clutch

APU 시동모터 결함현상을 해결하기 위하여, 구동축의 회전속도 차에 의해 축이 분리되는 Over Running Clutch(이하 'ORC') 방법을 APU 시동모터에 적용하였다. ORC의 원리는 Fig. 4와 같이 피동축(APU 기어 축)의 회전이 구동축(APU 시동모터 축)보다 빠르면 두 개의 축을 분리하여 축을 통해 전달되는 회전력 전달을 차단시켜주는 것으로 다음과 같이 정리할 수 있다[3].



- ① APU 기어 축 RPM < APU 시동모터 축 RPM
→ 시동모터 회전력이 ORC를 통해 전달
- ② APU 기어 축 RPM > APU 시동모터 축 RPM
→ ORC에 의해 회전 축 분리

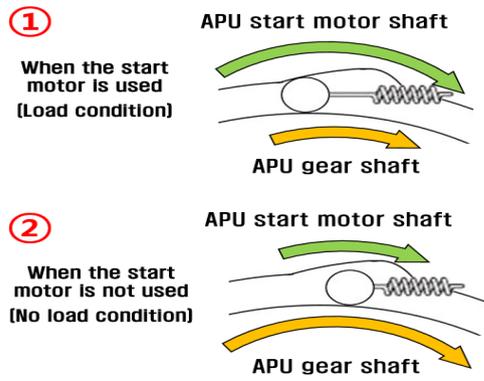


Fig. 4. Operation concept of over running clutch

이를 적용하기 위해, Decouple 장치를 적용하여 APU 시동 후 APU 기어 축과 APU 시동모터 축을 분리하여 불필요한 마찰을 제거하였으며, 결과적으로 Fig. 5와 같이 구동축과 브러시의 마모를 최소화 할 수 있는 효과를 확인할 수 있었다.

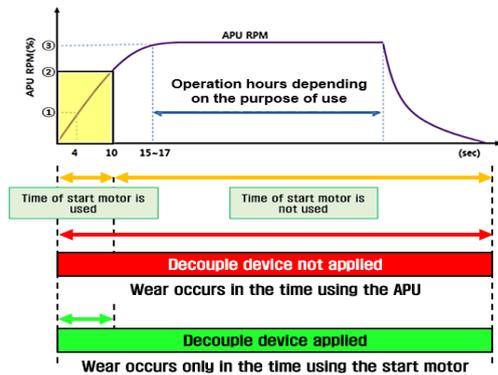


Fig. 5. Start motor operation concept according to ORC application

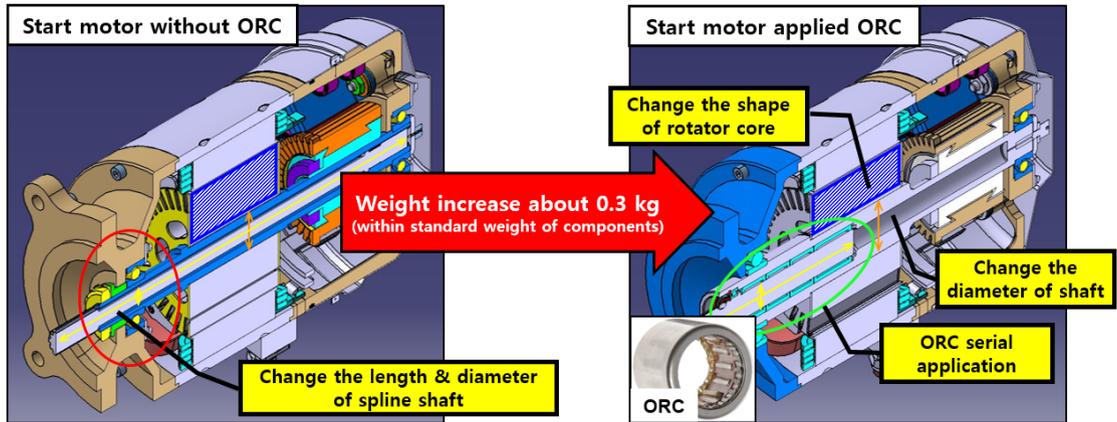


Fig. 6. Configuration of start motor applied ORC

3.2 Over Running Clutch 적용

APU 시동모터의 회전축에 ORC 구조를 적용하였으며, 기존 시동모터와 동등 이상의 시동토크를 만족하기 위하여 APU 기어축과 시동모터 축에 베어링 형태의 Decouple 장치를 4개 적용하였다. Fig. 6과 같이 ORC 장착을 위하여 샤프트 직경 및 회전자 코어 형상을 변경하였으며, 샤프트 직경 증가에 따른 베어링 및 프린트 브라켓을 수정하여 적용하였다. 마지막으로, 스플라인 샤프트 길이 변경 및 전용 베어링을 적용하였다. 중량은 약 0.3 kg 증가하였지만, 구성품 규격중량 이내로 중량 영향성은 없는 것으로 판단된다.

ORC가 적용된 APU 시동모터의 내구성을 확인하기 위하여, 내부 브러시 마모 개선정도를 시험으로 확인하였다. 약 250시간 APU 운용환경을 모사하여 Fig. 7과 같이 시험 전/후 브러시 마모 상태를 확인하였다. 그 결과, 시험 전/후에서 브러시 마모와 같은 특이사항은 발생하지 않았으며, 회전수/전압/전류/토크 역시 시험 전 상태와 크게 차이를 보이지 않았다.

3.3 개선방안 검증

3.3.1 브러시 마모현상 개선 검증

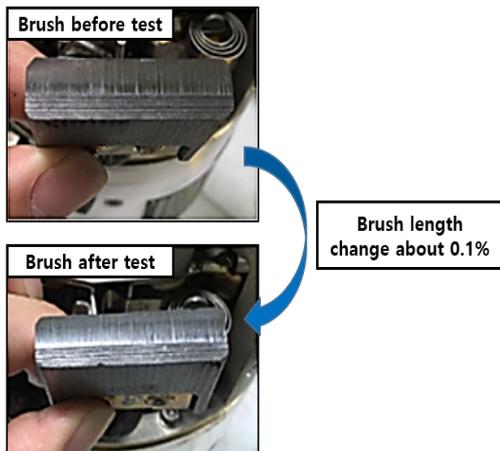


Fig. 7. Test result of brush improvement effect verification

3.3.2 감항 영향성/체계 영향성 검증

추가적으로 FAR-29를 근간으로 작성한 해당 기종별 감항인증 기준(TACC, Tailored Airworthiness Certification Criteria)의 시스템 엔지니어링 항목 만족 여부를 확인하였다. 해당 항목은 아래와 같다[4].

※ TACC 29.1301

- (a) 의도된 기능에 적합한 종류와 설계일 것
- (d) 장착되었을 때, 적절히 기능할 것

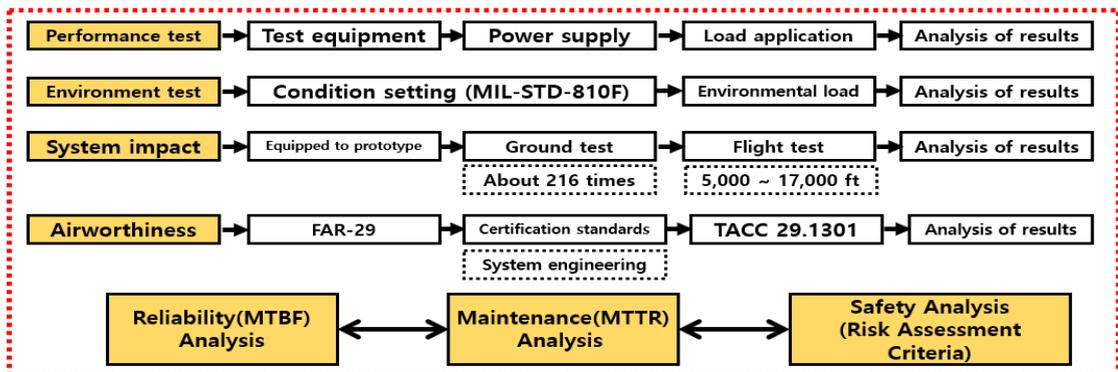
먼저 (a) 항목에 대한 감항영향성 입증 을 위하여, 개발 단계 시 수행한 성능시험 및 ORC 적용에 따른 기계적 특성 관련 환경시험을 수행하였다. 먼저 기능시험은 Table 1과 같이 해당 항목 별로 수행하였으며, ORC 적용에 따른 APU 시동모터의 기능 저하가 발생하지 않음을 입증하였다. 환경시험은 Table 2와 같이 MIL-STD-801F에 따라 총 6가지 항목에 대하여 수행하였고, 환경에 대한 요구도를 만족함을 확인하였다[5].

Table 1. Performance/Durability test details and results

| Verification test details | Verification test requirements | Result |
|---------------------------|---|--------|
| No load test | Satisfies the no-load rotation speed standard when DC power is applied | Pass |
| Rated load test | Satisfies the torque and current standards at a specific rotation speed when load torque is applied | Pass |
| Restraint test | Satisfies the restraint current standard when DC power is applied | Pass |
| Number of starting time | Satisfies the torque and current standard when applying a load under the rated load condition | Pass |
| Continuous operation | No mechanical damage after 5 minutes rotation at a specific rotation speed | Pass |
| Overspeed test | No mechanical damage after 30 seconds rotation at a specific rotation speed | Pass |
| Burst guarantee speed | No mechanical damage after 10 seconds rotation at a specific rotation speed | Pass |
| Durability | No deterioration of function due to repeated cooling when start motor is operated | Pass |

Table 2. Environmental test details and results

| Verification test details | Verification test requirements | Result |
|------------------------------------|---|--------|
| High temperature storage/operation | After holding at 120°C for 4 hours , perform the no-load test for the last 10 minutes (MIL-STD-801F Method 501.4 procedure II) | Pass |
| Low temperature storage/operation | After holding at -55°C for 4 hours and at -40°C for 2 hours, perform no-load test for the last 10 minutes (MIL-STD-801F Method 502.4 procedure II) | Pass |
| Temperature shock | After holding at -40°C for 2 hours, reaching 120°C within 1 minute and holding at 120°C for 2 hours, reaching -40°C within 1 minute, repeating 3 times and perform the rated load test (MIL-STD-801F Method 503.4 procedure I) | Pass |
| Acceleration | Fore/Aft/Right/Left/Down/up for each limit load factor and ultimate load factor for 1 minute each, perform rated load test (MIL-STD-801F Method 513.5) | Pass |
| Vibration | Vibration in the X-axis direction, in the Y-axis direction, in the A-axis direction each for 4 hours, perform the rated load test (MIL-STD-801F Method 514.5 procedure I) | Pass |
| Shock | After 3 shocks in the '+' and '-' directions of the x, y, and z axes, perform the rated load test (MIL-STD-801F Method 516.5 procedure I) | Pass |



(b) 항목에 대한 시험은, 지상/비행시험을 통한 체계 영향성 검증을 기반으로 수행하였다. 먼저 시제기를 활용한 지상시험을 통해 반복시동을 수행하였고, 총 216회 APU 시동 수행 결과 기능/성능에 특이사항이 발생되지 않았다. 또한 비행시험 결과, 고도조건 5000 ft, 10,000 ft, 17,000 ft 각각 2회 APU 시동을 수행하였으며, 비행 중에도 기능/성능 상 특이사항이 발생되지 않았다.

3.3.3 신뢰성/정비성/안정성 분석

기능/성능 시험 결과 ORC를 적용한 시동모터가 기존 APU 시동모터 대비 동등이상의 성능을 나타내는 것을 확인하였고, 추가적으로 운용단계에 있어서 영향을 미치는 신뢰성/정비성/안정성에 대해 분석을 수행하였다.

먼저 신뢰성 요구도 분석을 수행하였다 APU 시동모터는 규정된 환경조건에서 운영 될 때, 고장 간 평균 시간(Mean Time Between Failures, MTBF)이 일정 시간(Hours)을 만족하여야 한다. 이를 토대로, 개선 전/후의 APU 시동모터 MTBF 분석을 수행하였고, 개선 후 APU 시동모터가 개선 전 MTBF 대비 103%의 MTBF를 확보하였음을 확인하였다.

정비성 요구도 분석 결과, 부대정비/야전정비 등 관련 규격에 명시된 평균 수리시간 기준을 참고하였을 때, 개선 후 APU 시동모터의 평균 수리시간이 개선 전 대비 약 5% 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 안정성 요구도 분석을 수행하였다. MIL-STD-882에 의거한 안정성 원리를 적용하였으며, 고장안전(Fail-Safe)개념을 적용하여 단일고장이 안전한 비행 및 착륙을 방해하거나 치명적인 상태를 유발하지 않도록 안전성 목표를 선정하였다. 이를 토대로 APU 시동모터 결함에 따른 APU 시동능력 상실 가능성을 분석해본 결과, 개선 후 발생확률이 개선 전 대비 약 53% 감소하는 것을 확인할 수 있었다[6].

3.3.4 기대효과

현재까지는 구조적인 이유로 APU를 가동하는 시간과 APU 시동모터의 브러시 사용시간이 동일하게 소비되었다. 하지만, ORC를 적용함에 따라, APU 시동모터의 축이 기능을 다하는 순간부터 작동이 정지되기 때문에 브러시에 과도한 마찰이 가해지는 시간을 줄일 수 있었다. 그 시간을 분석해본 결과, 동일한 APU 가동조건 하에서 개선 전 APU 시동모터 브러시 대비 개선 후 브러시 마찰 시간이 작게는 84%에서 최대 96%까지 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 회전의 항공기에 장착되는 APU의 구성품 중 하나인 APU 시동모터의 결함원인을 분석하고, 향후 개선방안을 제시하였다. 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Improvement Effect

| | Before improvement | After improvement |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| Brush Change Cycle | 2,000 cycle | 12,000 cycle |
| Systemic influence | - | Equal or higher |
| Responsibility | - | + 3% |
| Maintainability | - | + 5% |
| Safety | - | + 53% |

먼저, 결함의 현상에 대해 고장탐구를 수행하였다. 결함의 원인으로는 APU 기어축과 시동모터 축의 연결구조에 의해 발생하는 불필요한 회전에 의한 과도한 마찰 발생으로 판단되었다.

이를 해결하기 위해, 두 개의 축을 분리하는 ORC를 시동모터 내부 구조에 적용하였고, 개선방안 적용에 따른 기능/성능과 환경영향성을 분석하였다. 또한, 운용에 영향을 미치는 신뢰성/정비성/안정성을 분석하였고, 감항인증 영향성과 수명 증대에 대한 기대효과를 확인하였다.

향후 회전의 항공기에 사용되는 브러시 타입 시동모터 결함 발생 시 본 연구의 결과를 활용한다면, 원인분석/개선방안 도출/검증 과정에서 효율적으로 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] R Honbo, Y Murakami, K Sawa, "Development of the Lead-free Brush Material for the High-load Starter", *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E90-C, No.8, pp.1634-1642,2007
DOI : <https://doi.org/10.1093/ieteleee90-c.81634>
- [2] BK Ganesan, V neelakandan, T ganesan, PC Rao, "Enhancement of Starter Brush Life for Micro Hybrid (Start/Stop) Application", *SAE International*, 2018
DOI : <https://doi.org/10.4271/2018-28-0102>
- [3] GM Roach, LL Howell, "Evaluation and Comparison of Alternative Compliant Overrunning Clutch Designs", *Journal of Mechanical Design*, Vol.124, No.3 pp.485-491,2002

DOI : <https://doi.org/10.1115/1.1480414>

- [4] FAR Part.29, "Airworthiness Standards : Transport Category Rotorcraft"
- [5] MIL-STD-810, "Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests", 2010
- [6] MIL-STD-882, "Department of Defense Test Method Standard for System Safety", 2010

나 성 현(Seong-Hyeon Na)

[정회원]



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

이 광 은(Gwang-Eun Lee)

[정회원]



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

<관심분야>

품질경영, 항공공학, 항공기구조, 복합재료

<관심분야>

품질경영, 기계공학, 항공공학, 신뢰성공학

강 병 수(Byoung-Soo Kang)

[정회원]



- 2012년 2월 : 부산대학교 하이브리드소재 솔루션 협동과정 (공학석사)
- 2012년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

품질경영, 기계공학, 재료공학, 신뢰성공학