

한국형 기동헬기 APU 시동모터 결함원인 분석 및 신뢰성 개선

강태우*, 염효원, 이희량, 안종무
국방기술품질원 항공센터

Research on fault analysis and reliability improvement of APU start motor for Korea Utility Helicopter

Tae-Woo Kang*, Hyo-Won Yeom, Hee-Rang Lee, Jong-Moo Ahn

Aeronautical systems Center, Defence Agency for Technology and Quality

요약 한국형 기동헬기(이하 수리온) 사업은 군이 운용중인 노후헬기를 국산헬기로 대체하기 위하여 연구개발한 사업으로 소요군의 전투력 향상과 운용, 유지 경제성을 고려한 사업이다. 수리온 보조동력장치는 주 발전기의 고장 시 장착된 교류발전기로 체계에 비상 전원을 공급하는 장치이며 시동모터는 배터리의 전기적 에너지를 기계적 회전에너지로 변환 하여 보조 동력장치 엔진을 회전시키는 장치이다. 수리온의 전력화 및 운용이 지속됨에 따라 시동모터의 결함이 발견되었고 이를 해소하기 위한 개선 활동을 진행하였다. 고장모드 분석에서는 결함발생에 대한 현상을 확인하고 결함원인을 5가지로 분류하였다. 5가지 인자에 대한 분석결과 결함의 주요 원인은 기계적 마모이며 이는 스프링 압력과 관련이 있다는 사실을 확인 하였다. 이론적으로 결정 된 압력조절을 통해 250회의 시험검증을 수행하였고 4개의 샘플링 마모량으로 회귀분석을 수행한 결과 모두 0.05이하의 유의수준을 보였기에 대립가설을 채택 하였다. 결론적으로 브러쉬 이상마모와 마모로 인한 파손은 압력조절을 통해 해결할 수 있었으며 시험을 통해 마모량 예측 및 결과 타당성을 확인 할 수 있었다.

Abstract Korea Utility Helicopter(KUH) is a project to replace the aging helicopter presently being operated by the military with a domestic helicopter. The auxiliary power unit is a device that supplies emergency power to the system by an alternator installed when the main generator fails and the start motor converts the electrical energy of the battery into mechanical rotational energy to rotate the auxiliary power unit engine. With continuing power and operation, defects of the starting motor were found and improvements were carried out to solve it. In the failure mode analysis, the causes of possible defects were classified into 5 categories. Analysis of the 5 factors revealed that the main cause of defects is mechanical wear, which was found to be related to spring pressure. 250 tests were conducted through the theoretically determined pressure and regression analysis was performed with 4 sampling. The results showed that pressure was related to wear rate. In conclusion, early wear and breakage due to wear can be controlled through spring force and test showed the prediction of wear and the validity of the result were confirmed.

Keywords : Auxiliary power unit, Brush, Failure mode, Mechanical wear, Spring force, Start motor

1. 서론

1.1 추진배경

국내 최초의 군용 헬리콥터인 한국형 기동헬기(이하 수리온)의 보조동력장치(Auxiliary Power Unit, APU)는 주 동력기관의 시동, 환경제어시스템용 고압공기 공급,

비상발전기의 역할 또는 그 일부를 담당하는 장치로서 비행 중에는 주 엔진의 재시동, 여압조절 및 비상발전 등 비행안전을 확보할 수 있도록 비상용 동력 공급원으로 작용한다. 그 중 시동과 직접적인 영향이 있는 것은 시동 모터로서 배터리 또는 지상 전원장치(Ground Power Unit, GPU)와 같은 전원을 입력받아 보조동력장치 가스

*Corresponding Author : Tae-Woo Kang(Defence Agency for Technology and Quality, DTaQ)

Tel: +82-55-751-5818 email: twkang12@dtaq.re.kr

Received March 17, 2017

Revised (1st April 17, 2017, 2nd April 20, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

터빈엔진을 시동 시키는 역할을 한다. 초도양산시 시동 모터의 내부 구조물 파손결함이 발생하여 시동실패 현상이 발생하였고 양산이 시작되면서 운용 빈도가 증가하고 추가 결함들이 발생함에 따라 이를 해결하기 위한 개선 활동이 요구되었다.

1.2 시동모터 형상 및 역할

수리온의 보조동력장치는 항공기 우측 상부에 위치하고 있으며 시동모터는 Fig.1과 같다.

수리온 시동모터는 Fig.2처럼 스플라인 축, 전/후면 브라켓, 요크 및 아마추어 조립체, 커버로 구성되어 있으며 내부는 실질적인 기능을 위해 브러시와 정류자로 구성되어 있다.

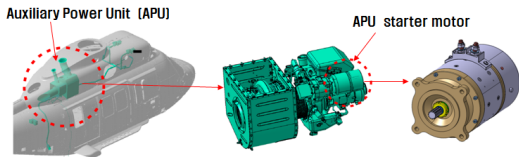


Fig. 1. APU starter motor configuration

전면 브래킷은 보조동력장치의 기어박스 패드에 장착되는 부품으로 회전자의 원활한 회전을 위한 구성품의 조립체이며, 요크 조립체는 회전자에 회전력을 생성하기 위한 계자 기전력을 발생시키고 자기 회로를 구성하는 통로 역할과 기계적 강성을 유지하고 전류를 공급/인가하기 위한 단자로 구성되어 있으며 커버는 후면 브래킷을 보호하는 역할을 한다.[1]

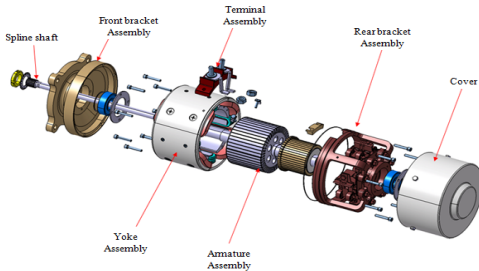


Fig. 2. Starter motor components

2. 고장 모드 분석

2.1 현 실태 및 문제점

후속양산 진행 중 초기에 보조동력장치 시동실패의

원인중 하나로 시동모터 결함이 식별되었고 시동모터 결함현상은 Fig.3과 같이 내부 구조물인 브러쉬 파손으로 확인되었다.



Fig. 3. Fracture of brush

우선, 현상의 현황과 특징을 살펴보기 위해 운용부대 시동모터 확인결과 Table 1처럼 전 항공기 00대 중에 12건의 결함을 확인할 수 있었다.

Table 1. The type of deflection

| Defect | Failure distribution | Note |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
| Early wear of brush | 6 | Over the wear limit/2ea |
| | | Early wear/4ea |
| Fracture of brush | 6 | 4ea |

전 항공기 일시검사를 수행한 결과 12건의 유사결함이 발생했으며 결함형태를 분류해 보니 브러쉬 조기마모와 브러쉬 파손으로 정리할 수 있었다. 먼저 이러한 이상 현상이 특정 로트(Lot)성 결함인지를 확인하기 위하여 보조동력장치의 일련번호를 확인 해 본 결과 특정 로트성 결함은 아니라는 판단을 할 수 있었다. 이와 같은 결함현상이 로트성 결함이 아니라면 일반적인 문제처럼 내구성 문제가 유력하다 판단하여 브러쉬 조기마모/파손의 내구성에 영향을 미치는 요소를 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2. Distribution of failure mode

| Type of defect | Assumed a cause | Review (caused factors) |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Early of brush wear and fracture | material | Possible |
| | Configuration | Possible |
| | Holder clearance | Possible |
| | Commutator out of round | Possible |
| | Spring force | Possible |

2.2 브러쉬 조기마모 및 파손 고장탐구

결함유형별 결함요소는 크게 두 가지이며 먼저 브러

쉬 조기마모 및 파손에 관한 추정원인과 발생 영향에 대한 고장탐구를 진행하였다. 이러한 결함의 추정원인으로 브러쉬 재질 및 가공형상, 주변 구조물(홀더, 정류자 가공성, 스프링 포스)간의 영향성이 주요 요소로 판단되었다.

2.1.1 브러쉬 재질 영향성 검토

현재 사용 중인 브러쉬 재질은 카본 흑연질(Copper-graphite)로 해외 업체로부터 구입해 오는 기성품이다. 많은 산업현장에서 브러쉬형 모터에 사용되고 있으며 수리용 시제기 부터 사용되었다. 시제품에 조기마모 또는 파손현상이 미 발생했기 때문에 재질에 의한 결함 가능성은 낮다고 판단되었으나 정확한 검증을 위해 내구성과 관련된 경도시험을 확인해 보았다. 검증 결과 규격대비 만족함을 확인 할 수 있었다.

Table 3. Hardness verification

| Spec. | Hardness | | Result |
|--------------------|----------|--------------|--------|
| | once | 97 (HR10/40) | |
| 90 ~ 110 (HR10/40) | twice | 103(HR10/40) | Pass |

2.1.2 브러쉬 가공형상 영향성 검토

파단 된 브러쉬 블록을 살펴보면 공통적으로 Fig.4와 같이 중간부위가 파단된 것을 확인 할 수 있다.

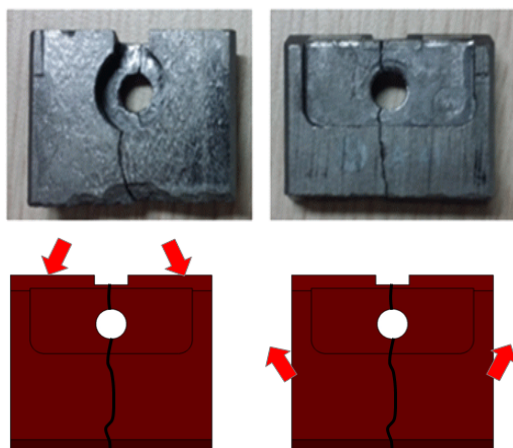


Fig. 4. Fracture configuration of brush

일반적으로 중간에서 파단 현상이 일어나기 위해서는 위/아래, 앞/뒤 모멘트가 발생해야 하며 벤딩모멘트를 계

산하기 위해 파손단면을 등가면적으로 고려하여 계산해 본 결과 위/아래 모멘트가 인가 될 경우 81.7 kgf·cm, 앞/뒤에서 발생하는 모멘트는 약 121.5 kgf·cm로 계산되었다. 계산결과를 바탕으로 브러쉬에 파손이 일어나기 위해서는 위/아래에서 작용하는 모멘트 보다 큰 하중이 외부에서 작용해야 가능하다. 하지만 현재 시동모터 운용 조건에서는 외력이 존재하지 않으며 브러쉬 자체 굽힘을 고려하더라도 파단응력에는 미치지 못하기 때문에 가공형상에 의해 균열이 발생되었다고는 판단하기 어렵다.

2.1.3 브러쉬 홀더간극 및 정류자 진원도 영향성 검토

브러쉬 원제작사의 브러쉬 관련 기술 자료 Fig. 5에 따르면 스파크 현상 및 브러쉬 이상마모를 일으키는 요소 중의 하나로 홀더 간극 및 정류자의 진원도가 제시되어 있다.

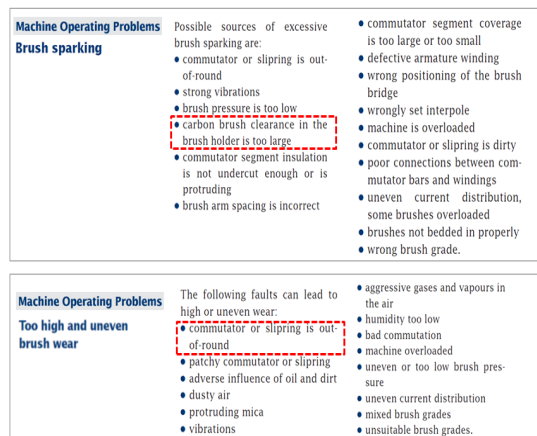


Fig. 5. Factors of defection

결함품목에 대한 홀더간극을 측정해 본 결과 Table 4.와 같이 도면 규격과 벗어나는 치수를 확인하였으나 이는 초기 제품에는 문제가 없다는 것을 확인하였고 운용 중 진동에 의해 간극이 커진 것 이라는 사실을 추정할 수 있다. 또한 결함현상을 보면 진동이 발생하여 앞/뒤로 전달되는 구조가 아니며 최소 하중인 브러쉬 체결 덮개 하중에 의한 모멘트가 작용한다 하더라도 파단응력에 미치지 못하기 때문에 치수 파손에 대한 영향성은 미미하다고 판단하였다.

Table 4. The Clearance of brush holder

| no. | Spec. | | Measurement | | | |
|-----|-------------|------|-------------|-------|-------|-------|
| | | | #1 | #2 | #3 | #4 |
| 1 | 9.05 ~ 9.20 | up | 9.25 | 9.28 | 9.28 | 9.28 |
| | | down | 9.24 | 9.29 | 9.26 | 9.24 |
| 2 | 36.1 ~ 36.3 | up | 36.33 | 36.34 | 36.33 | 36.32 |
| | | down | 36.32 | 36.35 | 36.35 | 36.32 |

2.1.4 스프링 압력 영향성 검토

브러쉬 조기마모 및 파손원인을 검토하던 중 시제호기 대비 양산형상에서 스프링 압력이 증가된 사실을 확인 할 수 있었다. Fig. 6을 통해 스프링 압력이 브러쉬에 미치는 영향을 참고할 수 있었다. [2-4]

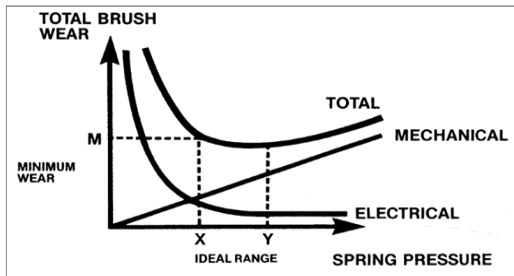


Fig. 6. Total wear related to spring pressure

스프링 압력의 증가는 브러쉬와 정류자간의 마찰력 증가를 발생시키며 브러쉬 마모속도를 가속화 시킨다는 것을 알 수 있었다. 실제로 시제호기 대비 증가된 스프링 압력과 마모량에 대해 Table. 5에 제시하였다.

Table 5. Brush wear rate related to spring force

| | prototype starter motor (0.4 kgf) | operation starter motor (0.5 kgf) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| operation time (avg. HR) | 289 | 201 |
| wear (avg. mm) | 3 | 12.75 |

시제호기 3대와 브러쉬 이상마모 발생한 운용호기 2대의 브러쉬 평균 운용시간을 고려하여 압력과 마찰력의 관계를 살펴보았다. 압력이 증가함에 따라 마모량이 상당히 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라, 브러쉬 제작업체가 제시한 브러쉬 권장압력(0.495 kgf) 보다 양산호기에 적용된 브러쉬 압력이(0.5 kgf) 크다는 사실은 이상마모가 일어날 수 있는 충분한 가능성을 가지고 있다고 판단하였다.

3. 개선방안 검토 및 검증

3.1 개선방안 검토

일반적인 브러쉬 마모모델은 Holm 이론에 따라 기계적(W_m), 전기적 마모(W_e), 스파크(W_s)에 의한 마모로 구분된다.

$$W = W_m + W_e + W_s \tag{3.1}$$

전체 마모량은 3가지 마모형태의 정량적인 합으로 나타낼 수 있으며 고장모드 분석 및 시동모터의 운용 상태를 고려해 보면 기계적 마모에 의한 이상 현상이 가장 크다고 판단된다. 지금까지 조기마모 및 파손이 일어날 수 있는 추정원인 검토결과 스프링 압력이 유력한 요소로 추정되었고 기계적 마모량은 아래 수식과 같이 압력과 속도에 비례한다고 일반적으로 알려져 있다.

$$W_m = KAP_c V \tag{3.2}$$

여기서, K는 비 마모율이며, A는 브러쉬 접촉면적, V는 속도, P_c 는 접촉압력이다. 동일한 브러쉬로 부피와 면적은 일정하며 요구도에 의한 속도가 0,000 rpm 으로 같다. 따라서 이전 검토 내용을 토대로 접촉압력을 조절시켜 마모량을 감소시키는 방안을 검토하였다. [5,6]

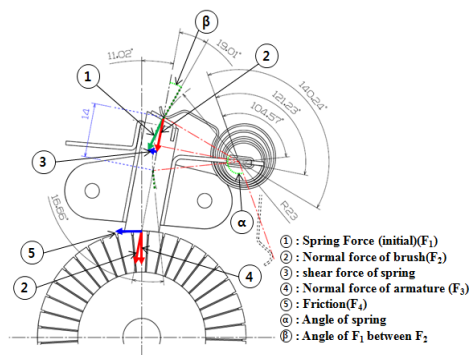


Fig. 7. Spring force path to friction

브러쉬 및 스프링에 작용하는 힘의 도식도를 Fig.7에 작성하였고 스프링 조립위치에 따라 마찰력이 전달된다. 브러쉬가 정류자면과 접촉하여 회전에 의해 발생하는 마찰력은 접선방향으로 작용하며 최초 스프링 압력과 조립 위치에 따라 변한다. 양산호기와 시제호기의 스프링 압

력, 조립위치에 따라 마찰손실이 변하게 되며 원제작사의 추천 압력을 고려하여 타당한 스프링 압력을 검토해 보았다.

Table 6. Wear loss and pressure for spring position

| | | prototype brush spring (0.4 kgf) | operation brush spring (0.5 kgf) |
|----------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| wear loss [W] | initial | 47.03 | 61.27 |
| | middle | - | 58.43 |
| | wear limit | 42.64 | 46.24 |
| pressure [kgf] | initial | 0.566 | 0.737 |
| | middle | - | 0.673 |
| | wear limit | 0.513 | 0.556 |

Table. 6은 스프링 위치에 따른 마찰손실과 압력의 계산 결과이다. 스프링 위치는 스프링이 감긴 각도에 따라 초기, 중간, 마모한계 위치로 나타내었고 마찰손실 계산을 위한 속도는 기계적 마모가 발생하는 시점의 회전수 00,000 rpm으로 계산하였다. 계산결과 마찰손실 및 위치에 따른 압력은 스프링 압력이 클 때 그리고 최초 조립 시에 가장 크게 작용하는 것을 예측할 수 있었다. 따라서 브러쉬 이상마모를 줄이기 위해서는 스프링 압력을 줄여야 함을 확인하고 적절한 스프링 압력을 검토해 보았다.

Table. 7은 스프링 압력 개선안을 적용하여 계산한 마찰손실과 위치별 작용 압력이다. 원제작사 적정압력은 브러쉬 단면적을 고려하여 계산한 결과 0.495 kgf 이나 보조동력장치 시동모터는 공회전 운용 시간이 많이 발생하는 운용 특수성을 고려할 때 추천 압력보다 작은 압력을 선정하는 것이 타당하다고 판단되었다. 기계적 마모로 인한 마모량에 가중치를 두어 시제압력보다 적고 적용하기 효과적인 0.3 kgf의 스프링 압력을 선정하였다.

선정된 압력 값을 가지고 마찰손실과 압력을 계산해 본 결과 마모성능이 향상 된다는 것을 예측할 수 있었다.

Table 7. Calculation of spring improvement

| | | prototype brush spring (0.5 kgf) | brush spring (0.3 kgf) |
|----------------|------------|----------------------------------|------------------------|
| wear loss [W] | initial | 61.27 | 36.76 |
| | middle | 58.43 | 30.06 |
| | wear limit | 46.24 | 27.74 |
| pressure [kgf] | initial | 0.737 | 0.442 |
| | middle | 0.673 | 0.404 |
| | wear limit | 0.556 | 0.334 |

3.2 개선안 검증

스프링 압력 감소 후 기계적 마모성능이 향상된다는 사실을 이론적으로 확인 할 수 있었다. 선정된 압력 결과를 통해 시동모터 성능이 제대로 발휘되는지 확인해 보았고 시동성능에는 문제가 없다는 사실을 확인할 수 있었다. 다음과정으로 마모성능을 확인하기 위해 요구도 입증시험을 수행하였다. 수리온 시동모터의 요구도는 1회 1분 작동기준으로 하여 0,000회 동안 시동이 가능해야 하며 마모한계치 14 mm를 넘어서지 말아야 한다. 시동모터 내에 브러쉬는 정류자면의 수직으로 4개가 장착되며 시동모터 장착상태를 기준으로 Fig.8과 같이 부착되어 있다.

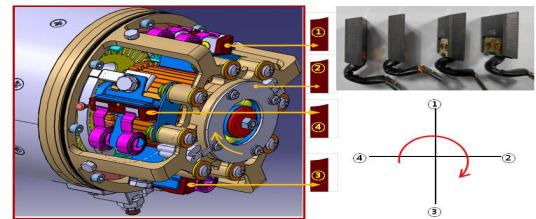



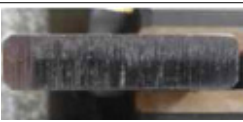
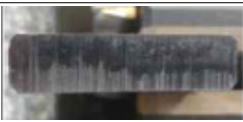

Fig. 8. The mounted position of brushes

우선 0,000회를 진행하기 위한 시간적 한계 때문에 시험횟수를 250회로 축소하여 잔여 작동횟수에 대한 마모를 예측하기로 하였다. Table. 8은 개선압력 브러쉬 입증시험 결과이며 Table. 9에 브러쉬 상태를 제시하였다. 브러쉬 제조공차 및 시동모터 조립공차로 인해 장착위치에 따라 마모량은 조금씩 다르지만 4개 브러쉬 모두 유의수준(p) 0.05보다 작기 때문에 대립가설을 채택하였고, 평균 결정계수(R-squared)가 0.89로 회귀선에 적합하다는 사실을 알 수 있었다. 추가적으로 마모량이 많은 #2번 브러쉬의 실험 결과를 통해 최대 마모량 8.8 mm를 예측할 수 있었다.

Table 8. Test evaluation of improvement

| | | Result of test (mm) | | | | | wear (prediction) |
|-------|-----|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| | | 50 (cycle) | 100 (cycle) | 150 (cycle) | 200 (cycle) | 250 (cycle) | |
| Brush | #1 | 0.06 | 0.09 | 0.17 | 0.19 | 0.21 | Max. 3.2 |
| | #2 | 0 | 0.22 | 0.26 | 0.29 | 0.32 | Max. 8.8 |
| | #3 | 0.08 | 0.2 | 0.25 | 0.28 | 0.32 | Max. 4.8 |
| | #4 | 0 | 0.12 | 0.14 | 0.18 | 0.21 | |
| | avg | 0.035 | 0.158 | 0.205 | 0.235 | 0.265 | |

Table 9. Wear loss and pressure for spring position

| Brush no. | Brush length (mm) | Brush wear (mm) | State of brush |
|-----------|-------------------|-----------------|---|
| #1 | 32.02 | 31.81 (-0.21) |  |
| #2 | 32.02 | 31.70 (-0.32) |  |
| #3 | 32.02 | 31.70 (-0.32) |  |
| #4 | 32.02 | 31.81 (-0.21) |  |

4개의 브러시를 통해 이 결과는 선형적인 관계를 가지는 스프링 압력과 마모량에 대한 이론에 적용 가능하며 250회로 예측된 최대 마모량이 마모 한계치 14 mm 보다 충분히 작을 것으로 예측되므로 스프링 압력조절을 통한 이상마모 현상 개선은 타당하다고 판단된다.

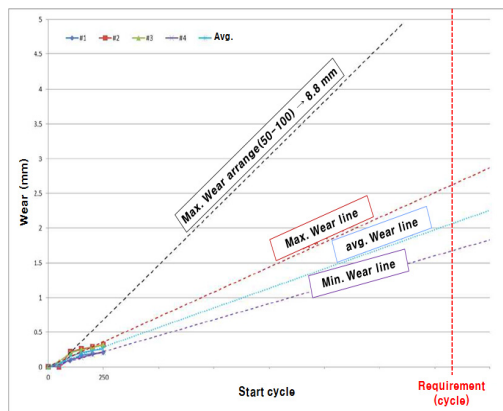


Fig. 9. A predicted diagram of wear rate

4. 결론

본 논문은 수리용 보조동력장치 가스터빈엔진을 시동시키는 역할을 하는 시동모터의 운용 중 발생한 결함으로부터 제기되었다. 양산 중, 시동실패 현상이 발생하였

고 시동모터 내부 구조물 브러쉬 이상마모 현상과 그로 인한 파손이 확인되었다. 결함원인을 확인하기 위해 결함을 야기 시킬 수 있는 요소를 분류 및 분석하였고 원인을 도출하였다. 고장분석 결과 스프링 압력이 결함을 야기하는 주요 인자임을 확인하고 스프링 압력조절을 통해 개선방안 활동을 수행하였다. 선정된 스프링 압력을 통해 입증시험을 수행한 결과 최대 마모량은 마모한계치 보다 충분히 작을 것으로 예측되며 시동성능에 문제가 없다는 것을 확인하였다. 추후 0,000회 시험검증 수행을 통해 조기마모 예측결과와 비교분석 후 향후 개발 및 개선이 필요한 브러쉬형 형태의 시동모터에 활용 예정이다. 또한 조기마모로 인한 파손 뿐 아니라 구조적 문제로 인한 파손 영향성이 예측됨에 따라 추가 개선 후 시동성능에 대한 검증이 필요하다고 판단된다.

References

- [1] Korea Defence Standard, "HELICOPTER, UTILITY", KDS1450-4001., Korea, 2012.
- [2] Shobert E., "Carbon Brushes", New york chemical publishing Co., 1965.
- [3] Myshkin N. K., "Tribological problems in electrical contacts", Tribology International, vol. 24, no. 1, pp. 35-49, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(91\)90062-E](https://doi.org/10.1016/0301-679X(91)90062-E)
- [4] Marshall R. A., "The mechanism of current transfer in high current slidingcontacts", Wear, vol. 37, pp. 233-240, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(76\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(76)90030-2)
- [5] Holm R. "Electrical contacts", Springer Verlag, Berlin, 1967. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06688-1>
- [6] Dow T. A. & Stockwell, "Experimental verification of thermoelastic instabilities in sliding contact", J. of Lub. Tech., vol. 99, no. 3, pp. 359-364, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3453223>

강 태 우(Tae-Woo Kang)

[정회원]



- 2012년 2월 : 경상대학교 항공우주 특성화 대학원 항공우주공학과 (항공학석사)
- 2012년 12월 ~ 현재 : 국방기술 품질원 항공센터 감항인증팀

<관심분야>
국방, 기계/재료

안 종 무(Jong-Moo Ahn)

[정회원]



- 2014년 2월 : 경상대학교 일반 대학원 기계공학과 (기계학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 항공센터 감항인증팀

<관심분야>
국방, 기계/재료

염 효 원(Hyo-Won Yeom)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 (석박사 통합과정 수료)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 항공센터 항공3팀

<관심분야>
국방, 기계/재료

이 희 랑(Hee-Rang LEE)

[정회원]



- 2013년 2월 : 경상대학교 항공우주 특성화 대학원 항공우주공학과 (항공학석사)
- 2013년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원 항공센터 감항인증팀

<관심분야>
국방, 기계/재료