

전투차량용 전기식 연료펌프의 고장분석 및 내열성능 평가

곽대환
국방기술품질원 기동화력센터

Failure Analysis and Heat-resistant Evaluation of Electric Fuel Pump for Combat Vehicle

Daehwan Kwak
Land Systems Center, Defence Agency for Technology and Quality

요약 전투차량의 연료탱크에 설치되어 엔진으로 연료를 이송하는 장치인 전기식 연료펌프에 대하여 고장분석과 내열성능 평가가 수행되었다. 고장의 원인을 파악하기 위하여 직류 전동기가 적용된 연료펌프를 분해하여 검사를 수행하였다. 하우징 내부를 관찰한 결과를 바탕으로 고장 현상을 권선 소손, 브러시 조기 마모, 연료 혼입의 세 가지로 분류하였다. 연료펌프 내부 검사를 실시한 결과를 바탕으로, 과열에 의한 권선 소손을 고장을 발생시킨 주된 원인으로 추정하였다. 이에 따라서 전기식 연료펌프의 권선이 과열로 소손될 가능성을 확인하기 위하여 온도 센서를 고정자 표면과 브러시 홀더에 설치한 후 무부하 조건으로 24시간동안 가동을 실시하였다. 연료펌프의 주변 온도를 68 °C로 설정하였을 때 고정자 온도는 최대 135.9 °C까지 상승하였으며, 전동기의 고정자 및 회전자 권선이 소손되었다. 이 결과를 통해서 전기식 연료펌프를 위한 전동기 권선의 내열성능이 부족함을 확인할 수 있었으며, 이를 해결하기 위하여 현재 155 °C 이하에서 사용할 수 있는 절연등급 F종의 권선 및 함침액을 180 °C 이상에서도 사용할 수 있는 C종 이상의 절연등급으로 대체하도록 제안하였다.

Abstract Failure analysis and heat-resistant were performed for an electric fuel pump that is installed in the fuel tank to transfer fuel to the engine of combat vehicles. The fuel pump with a DC motor was disassembled and inspected to determine the cause of failure. The failure phenomenon was classified into three categories based on observations of the inside of the housing: burnt winding, quick brush abrasion, and fuel leak into the pump. Based on the inspection results, it was estimated that overheating was the main cause of failure. The thermal test was conducted under the no-load condition in 24 hours, and the thermal sensor was installed on the stator surface and the brush holder to check the possibility of damage to the winding due to overheating. When the ambient temperature of the fuel pump was set to 68 °C, the stator temperature increased to 135.9 °C, and the winding of the motor was almost damaged. The test results confirmed the lack of heat resistance of fuel pump windings, and suggested that the type F of insulation class (below 155 °C) of the windings and varnish should be replaced with type C or higher that can be used above 180 °C.

Keywords : Fuel Pump, Heat-resistant, DC Motor, Failure Analysis, Insulation Class

*Corresponding Author : Daehwan Kwak(Defence Agency for Technology and Quality)

email: dhkwak@dtaq.re.kr

Received September 14, 2020

Accepted November 6, 2020

Revised October 13, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

본 연구는 전투차량의 연료탱크에 설치되어 엔진으로 연료를 이송하는 전기식 연료펌프의 고장분석 및 내열성능 평가에 관한 것으로 사용자가 해당 연료펌프의 고장을 확인 후 기술검토를 요청하면서 시작되었다. 본 연구에서 다루고 있는 전투차량용 전기식 연료펌프는 저단가이며 단순 교환하는 품목이지만, 고장시에 필요한 정비인사를 고려할 때 근원적인 개선이 필수적이다. 다루어지는 전기식 연료펌프에는 직류 전동기가 사용되었는데 적용이 쉽고 가격이 저렴하여 광범위하게 사용되고 있어 지속적으로 연구되고 있는 전기기기이다[1-5]. 이 중에서 전투차량에 적용되는 소형전동기는 단가는 낮으나 제작수량이 적어 고장분석에 많은 자원을 투입하기 곤란한 경우가 많다. 본 논문에서는 이러한 특성을 고려하여 전투차량용 전기식 연료펌프의 고장현상을 파악하고 그에 대한 개선방안을 제안한다.

2. 전기식 연료펌프의 구조

전동기는 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 전기기기로 전류가 흐르는 도선이 자기장에 놓여질 때 발생하는 힘을 이용한다. 전기식 연료펌프는 전동기를 연료의 송출에 이용한 차량의 구성품이다. 연료펌프는 연료탱크 내에 위치하여 연료에 항상 잠겨있는 상태에서 전원을 받아 동작하게 된다. 이때 전동기는 외부로부터 밀폐된 구조를 가지지만, 연료의 송출을 위해 연료펌프 하단에 별도의 펌프실을 두고 있는데 이곳에 회전력을 전달하기 위해 회전자의 축 하단에 자석원판을 부착한다. 이 원판이 펌프실의 자석원판과 결합하여 회전력을 전달한다. 그 형상을 Fig. 1에 보인다.

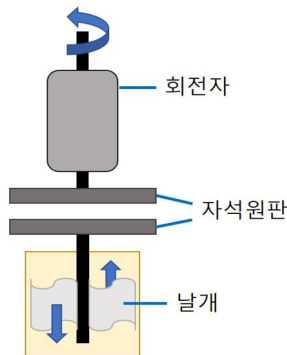


Fig. 1. Schematic of electric fuel pump

전기식 연료펌프에 사용된 전동기는 직류 직권전동기 형태로 고정자의 계자저항과 회전자의 전기자저항이 브러시와 정류자에 직렬로 연결되어 있는 타입이다. 그 등가회로는 Fig. 2와 같다.

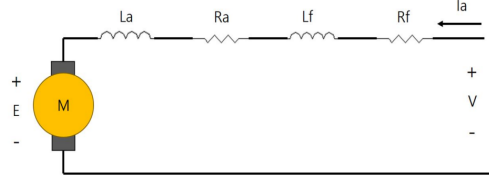


Fig. 2. Equivalent circuit of series motor

고정자는 2개의 코일로 직렬로 연결되어 있으며 양품 전동기의 계자저항 측정결과 1.8~2.1 Ω으로 확인되었다. 회전자는 총 12개의 정류자편과 연결이 되어 있으며, 중권(lap winding) 방식으로 결선되어 있다. 즉, 12개의 코일이 환형으로 직렬로 연결되어있는 형태이다. 브러시가 2개이므로 전동기에 장착시에는 저항은 6개의 코일이 1개의 직렬회로를 이루고, 그 회로 2개가 병렬로 결선되어 있는 형태와 같다. 양품 전동기의 정류자 편간(180° 위치) 저항측정 결과 계자저항과 마찬가지로 전기자저항은 1.8~2.1 Ω이었다.

3. 고장분석

3.1 고장현상

제기된 고장은 연료펌프가 정지하여 연료송출이 되지 않는 현상으로, 사용자로부터 고장품을 수령후 전원을 인가하여 실제로 동작하지 않음을 확인한 6개의 연료펌프를 분석 대상으로 하였다. 분해하여 내부를 육안확인한 결과, 권선 소손, 브러시 과다마모, 연료혼입 등이 발생했음을 추정할 수 있었다. 이를 분류한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 'O'로 표기한 것이 해당 현상이 발생했다는 표기이며, 'X'는 해당 현상이 발생하지 않음을 의미한다.

Table 1. Resistances of field and armature winding

Serial No.	burnt winding	quick brush abrasion	fuel leak into pump
033	O	O	O
113	O	O	X
171	O	O	O
172	X	O	X
179	O	X	X
180	O	O	O

고정자 또는 회전자 권선이 소손되는 경우 로렌츠힘을 발휘할 수 없게 되어 연료펌프의 전동기가 정지할 수 있다. 그러나 브러시는 과다하게 마모되더라도 접촉상태이면 실험실 환경에서 전원을 인가하였을 때 동작해야 하므로 본 고장의 원인으로서 제외하였다. 또한 연료 역시 혼입되더라도 직접적으로 전원에 즉시 영향을 주지 않으며, 연료가 혼입되지 않은 펌프에서도 권선소손 등이 발생하였기 때문에 고장원인 분석에서는 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 권선 소손이 발생한 원인에 대하여 추가 분석을 진행하였다. 권선이 소손된 전동기 내부의 예를 Fig. 3 및 Fig. 4에 보인다.



Fig. 3. Damaged stator winding of fuel pump



Fig. 4. Damaged rotor winding of fuel pump

고정자는 소손되어 권선 외부의 코팅에 손상이 있었으며, 회전자에는 연소 부산물로 추정되는 물질이 부착되어 있었다. 고정자 또는 회전자 권선이 소손되었을 경우 선간 개방 또는 단락 등이 발생하면서 저항값이 바뀌게 된다[6]. 따라서 저항값을 측정하여 권선소손여부를 파악할 수 있다. 먼저 연료펌프를 분해하기 전 저항측정 결과, 172번 연료펌프의 저항 14.7 Ω을 제외하고 전부 개방상태로 확인되었다. 보다 상세히 파악하기 위해 계자저항, 전기자저항값을 측정하였으며 결과는 Table 1과 같다.

Table 2. Resistances of field and armature winding

Serial No.	Armature R[Ω]	Field R[Ω]					
		* between segments of commutator					
		1-7	2-8	3-9	4-10	5-11	6-12
033	-	1.8	1.9	1.7	1.7	1.8	1.7
113	-	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
171	-	1.9	2.0	1.9	3.2	2.0	5.5
172	2.0	1.9	2.0	2.0	2.2	2.0	1.9
179	-	2.2	2.1	2.2	2.0	2.1	2.0
180	-	2.0	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0

172번 연료펌프의 고정자 및 회전자에서는 권선의 소손을 확인할 수 없었다. 고장발생한 상태를 유지하면서 내부확인을 수행하기가 곤란하나 전체 저항값이 높은 것을 고려, 브러시와 정류자간의 접촉불량이 있었던 것으로 추정된다. 브러시가 과다하게 마모되어 스프링의 압축력이 낮아진 경우 접촉불량이 발생할 수 있다. 직류 전동기의 브러시 수명은 재질 및 거칠기, 사용전압, 전류, 스프링 탄성, 회전속도, 사용온도 등 다양한 요소들에 의하여 좌우되므로[7,8] 추후 이에 대한 연구가 추가로 진행될 필요가 있다. 본 연구에서는 연료펌프 정지의 주요 원인인 권선의 소손에 대하여만 다루기로 한다.

3.2 발생가능한 고장원인

전체 6개의 연료펌프 중 172번을 제외한 5개의 고정자 권선에서 소손이 확인되었다. 소손된 고정자의 외관을 면밀히 관찰한 결과, 고정자와 회전자간의 간섭이나 베어링의 마모, 외력 등은 확인할 수 없어 고장의 원인을 전기적인 것으로 추정하였다. 과열이나 과전압으로 권선간의 절연층이 파괴되면 소손이 발생할 수 있다[9-11]. 전기식 연료펌프에 과열을 일으킬 수 있는 원인을 Fig. 5에 보인다.

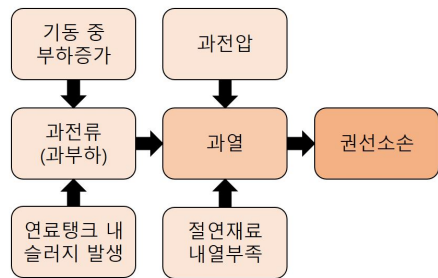


Fig. 5. Possible causes of failure for overheating

기동간 많은 연료를 사용하여 부하가 과다하게 걸릴 경우 회전속도가 느려지면서 전류가 크게 증가할 수 있고, 과열이 발생할 수 있다. 확인결과, 정지간 연료펌프에 흐르는 전류는 약 1.8~2.0 A였고 기동간 연료펌프에 흐르는 전류는 약 2.1~2.2 A로 약간 증가하였다. 이것은 부하 특성이 실험실 조건과 달라 그런 것이 아니라 체제 장착상태에서 연료펌프에 인가되는 전압이 실험실에 비하여 다소 높기 때문으로 추정된다. 또한 슬러지나 이물이 다량 발생할 경우 과부하로 과전류가 발생할 수 있으나, 연료펌프의 거름망을 확인한 결과 이물질은 존재하지 않았다. 따라서 연료펌프 체제 장착시의 부하 증가가 과열에 미치는 영향은 적을 것으로 추정하였다.

체제 과전압이 발생할 경우 흐르는 전류량이 증가하는 경우에는 과열이 발생할 수 있다. 이를 단품에서 확인하기 위하여 사용전압인 28 V보다 6 V가량 높은 34 V에서 24시간 동작시켰으며, 약 2.7 A의 전류가 흘렀으나 소손없이 정상 동작하였다. 본 체제장비의 발전기는 일반적으로 28~29 V의 전압이 출력되기 때문에 전압에 의한 과열발생 가능성은 낮을 것으로 추정하였다. 다음 장에서 내열성능에 관하여 주로 다룬다.

4. 연료펌프의 내열성능 평가

4.1 온도측정 준비

과열은 지나치게 뜨거워진 상태나 그 열을 이르는데, 결국 어떤 상태나 그 열보다 지나친 정도를 평가하는 것이므로 상대적인 개념이 녹아있음을 알 수 있다. 그러므로 과열의 원인을 판단하기 위하여는 본래의 설계목적에 파악하고, 어떤 항목이 충족하지 못하였는가를 먼저 확인할 필요가 있다. 그러나 해당 연료펌프는 현재 제작업체가 제작도면과 설비만을 인수하여 제작하고 있었고, 설계에 대한 자료와 인력이 보전되지 않아서 관련사항에 대한 확인이 제한되었다. 본 논문에서는 과열을 판단하기 위하여 소손발생부위인 고정자의 온도를 측정하고, 실제 제품에 권선 및 코일의 주요 사양을 확인하여 과열을 판단하였다. 이 과정은 Fig. 6과 같다.

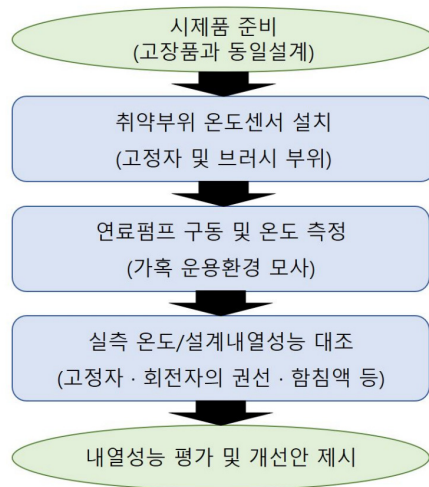


Fig. 6. Task flow for Heat-resistant Evaluation

모터를 설계할 때 일반적으로 상용 전자계해석 및 열 해석 프로그램을 수행하여 요구되는 사항을 만족하는 설계를 얻어낸다. 그러나 이 프로그램들은 가격이 높아 중소기업에서 보유하기 곤란하며, 전투차량에 적용되는 소형 모터는 수량과 단가가 낮아 설계검토를 의뢰하기 어렵다. 본 연구에서는 자원을 비교적 적게 활용하면서도 직관적으로 내열성능을 확인할 수 있도록 하였다. 소손이 발생한 고정자 부위 2개소와 마찰 등으로 열이 많이 발생될 것으로 예상되는 브러시 부위 2개소, 총 4개소에 열전대소선을 직접 설치하여 온도를 측정하였다. 열전대소선이 설치된 연료펌프 내부 형상은 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

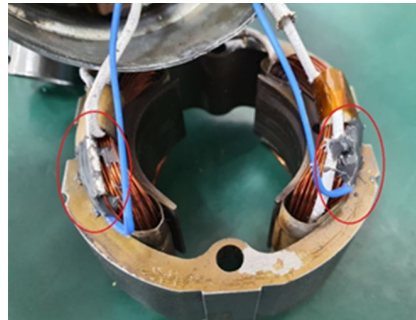


Fig. 7. Thermocouple wire of stator to measure temperature

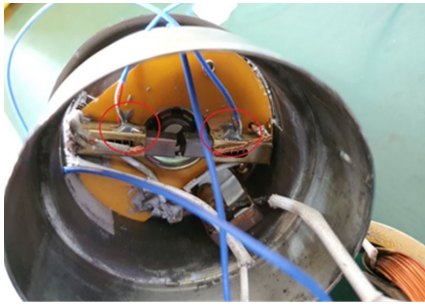


Fig. 8. Thermocouple wire of brush to measure temperature

온도 측정에는 최소 10 ms 간격으로 10 채널에 대해 샘플링을 수행할 수 있는 Graphtec사의 midi LOGGER GL220이 사용되었다. 여기에 선경 0.32mm의 K타입 열전대소선을 연결하였다. 1분 간격으로 24시간동안 측정된 데이터는 전용 소프트웨어인 GL220_820-APS(Ver.1.12)를 적용하여 처리하였다.

4.2 고정자 및 브러시 온도측정

전투차량용 전기식 연료펌프는 연료탱크 속에 연료가 충분할 때는 부하조건으로, 연료탱크 속에 연료가 없을 때는 무부하 조건으로 운용된다. 비록 무부하 조건에서 전류의 크기가 작아 동손이 적다고 하더라도, 무부하 조건에서는 하우징이 연료 밖의 공기 중에 노출되어 있어 연료펌프의 방열이 불리하다. 상온인 25 ℃ 및 체계운용시 노출될 것으로 예상되는 최고 온도인 68 ℃ 조건에서 무부하로 고정자 2개소 및 브러시 2개소에서 내부 온도를 측정하였다.

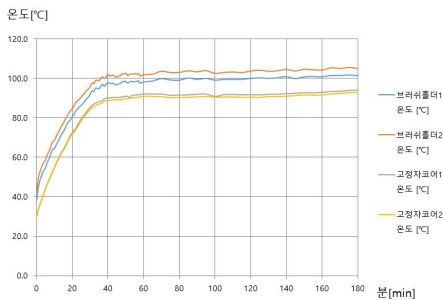


Fig. 9. Profiles of stator and brush temperature with 25 ℃ of ambient temperature

먼저 25 ℃ 무부하 상태로 24시간 연료펌프를 구동시키며 온도를 측정한 결과, 최대 온도는 브러시 111.1~112.8 ℃, 고정자 103.3~101.8 ℃, 고정자 최대온도의 90 %에 도달하는 시간은 약 3시간이었다. 24시간

운용 후에도 정상적으로 동작하였다. 이때의 온도 프로파일은 Fig. 9와 같다.

68 ℃ 무부하 상태로 24시간 연료펌프를 구동시키며 온도를 측정한 결과, 최대 온도는 브러시 146.5~152.4 ℃, 고정자 135.7~135.9 ℃, 고정자 최대온도의 90 %에 도달하는 시간은 약 70분이었다. 24시간 시험을 한 직후에는 정상 동작하였다. 이후 확인을 위하여 다시 25 ℃ 무부하의 조건에서 성능확인을 실시하였고, 약 40분 만에 연기를 발생시키며 전소하였다. 이때의 온도 프로파일은 Fig. 10과 같으며, 전소한 모터의 고정자와 회전자를 Fig. 11 및 Fig. 12에 보인다.

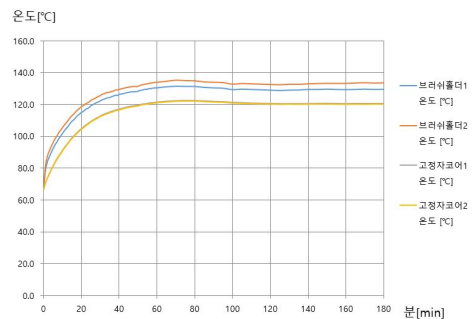


Fig. 10. Profiles of stator and brush temperature with 68 ℃ of ambient temperature

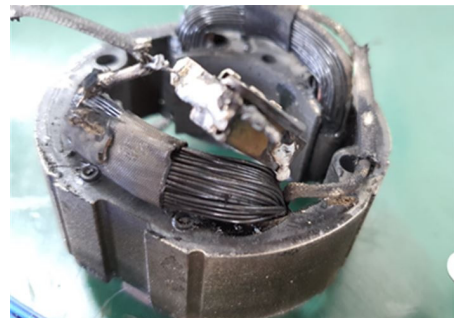


Fig. 11. Damaged stator by overheating



Fig. 12. Damaged rotor by overheating

4.3 고정자 내열특성

어느 시점에서 문제가 발생하였는가를 확인하기 위하여 상온에서 시험한 결과와 비교한 온도상승곡선을 Fig. 13에 보인다. 68 ℃ 고온시험 후에 상온에서 무부하 가동한 연료펌프는, 상온 무부하 가동한 연료펌프에 비하여 온도 상승의 기울기가 일관되게 크다. 이는 이미 시험 전에 소손 등으로 코일의 저항값 등이 바뀌면서 부하특성이 달라졌기 때문으로 판단된다. 즉, 제품의 주변온도가 68 ℃인 조건에서 무부하에 노출되었을 때 전투차량용 전기식 연료펌프는 영구적인 손상을 입을 수 있음을 확인했다.

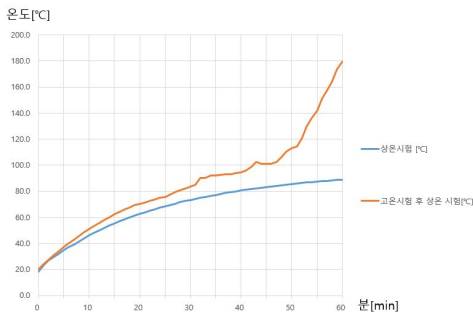


Fig. 13. Profiles of normal and damaged stator temperature with 25 ℃ of ambient temperature

실 제품에는 155 ℃ 이하에서 사용가능한 F종 권선 및 함침액이 적용되었다. 고정자 권선의 최대 온도는 135.9 ℃ 임을 고려할 때 안전율을 1.2배만 적용하더라도 온도 상한의 여유가 부족함을 알 수 있으며, 실제로 주위 온도 68 ℃ 무부하 조건에서 소손되어 내열성능이 부족함을 확인할 수 있었다. 이 경우 전기식 연료펌프를 재설계하여 내열성능을 높이는 방법도 고려할 수 있다. 그러나 해당 연료펌프는 수량이 적고 단가가 낮아 현실적으로 설계변경에 요구되는 비용의 보전이 어렵다. 본 논문에서는 내열성능 향상을 위해 절연성능이 높은 권선을 적용, 내열온도가 180 ℃ 를 초과하는 C종 이상의 권선 및 함침액을 적용하도록 제안하였다. 이 방법은 이미 타 연구에서 전투차량의 모터 개선에도 적용된 바 있다[12].

5. 결론

다품종 소량 생산되는 군수품 부속의 특성상 재설계를

수행하였을 때의 비용에 대한 기대효과는 낮을 수밖에 없다. 본 연구에서는 실현가능한 개선을 위하여 적은 개선비용으로 최대한의 효과를 발생시킬 수 있는 방법으로, 권선 및 함침액에 대하여 기존의 F종(155 ℃ 이하)에서 C종(180 ℃ 초과)로 대체하는 개선안을 제시하였다. 본 연구에서 개선안을 찾기 위하여 수행하였던 원인분석 방법은 유사 모터에 대한 고장원인분석 접근을 용이하게 할 것이다. 고장의 직접 원인으로서는 제외된 브러시의 조기마모 현상과 연료혼입 현상의 개선은 추후의 연구과제로서 다를 것이다.

References

- [1] H.J. Park, "Design of DC Small Motor Fixings and Rotors for Torque Improvement", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.36, No.11, pp.1039-1042, Nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.11.1039>
- [2] Y.S. Kim, "Commutation Modeling and Characteristic Analysis of DC Motor using Circuit Parameters", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.62, No.1, pp.57-62, Jan. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.62.1.057>
- [3] J.I. Bae, J.S. Kim, and Y.M. Lee, "Current Control of DC Series Wound Motor for Software Bang-Bang Controller", 2002 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers, pp.2180-2182, Jul. 2002.
- [4] J.E. Kim, J.H. Oh, and S.Y. Jung, "Characteristic Analysis of DC Motor Under Winding Method", 2014 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers, pp.745-746, Jul. 2014.
- [5] K.H. Ha, S.B. Yeom, J.P. Hong, G.T. Kim, and J.O. Jo, "Design of DC Motor by Using Experimental Data of Tested Motor", 2000 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers, pp.738-740, Jul. 2000.
- [6] C.O. Yang, Y.J. Pyo, J.Y. Kim, K.N. Park, and M.H. Song, "Diagnosis for Winding Open Fault of DC Motor", 2011 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers, pp.2073-2074, Jul. 2011.
- [7] Y.M. Park, B.U. Kim, S.H. Kim, and S.W. Noh, "A Study on Durability Life Improvement of Blower for Military Armored Vehicle and Self-propelled Artillery", J Korean Soc Qual Manag, Vol.47, No.3, pp.453-465, Sep. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2019.47.3.453>
- [8] H.Y. Eom, S.O. Kim, S.H. Wei, S.W. Park, and G.R. Kim, "Development of Accelerated Life Test Method for

- Brush Wear of the Vehicles DC Motor", *2010 fall Conference and exhibition on the Korean Society of Automotive engineers*, pp.2003-2008, Nov. 2010.
- [9] J.H. Shin, "A Method to Prevent Motor Insulation Failures from Partial Discharge", *2010 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers*, pp.846-847, Jul. 2010.
- [10] M.H. Oh, E.C. Lee, S.T. Hong, and S.G. Lee, "Damage Analysis of High Voltage Motor for Intake Pump", *1999 Summer Conference on the Korea institute of Electrical engineers*, pp.1324-1326, Jul. 1999.
- [11] S.H. Jung, "A Study on the Burning Damage of a Driving Motor for Warship Fire Pump", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.31, No.8, pp.1035-1041, Nov. 2007.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.8.1035>
- [12] Y.J. Lee, J.M. Ryu, K.I. Son, and M.S. Shin, "Improvement of Heat Resistance of Condenser Fan Motor for Combat Vehicle", *2019 Spring Conference on the Korean Society of Automotive Engineers*, pp.1354-1354, May. 2019.

곽 대 환(Daehwan Kwak)

[정회원]



- 2012년 2월 : 강원대학교 전기전자공학전공 (공학사)
- 2017년 2월 : 과학기술연합대학원대학교 에너지변환공학전공 (공학박사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 전기전자, 펄스전원