

고온 환경에서의 전투차량용 BLDC 모터 신뢰성 향상에 관한 연구

윤효진^{*,#}, 남윤욱^{*}, 박경식^{**}
^{*}국방기술품질원, ^{**}(주)금아하이드파워

A Study on Reliability Improvement of BLDC Motor for Combat Vehicle in High Temperature Environment

Hyo-Jin Yoon^{*,#}, Yoon-Wook Nam^{*}, Kyoung-Sik Park^{**}

^{*}Defense Agency for Technology and Quality, ^{**}Kumahydpower Co., Ltd.

(Received 1 August 2018; received in revised form 13 August 2018; accepted 20 August 2018)

ABSTRACT

Combat vehicles require high levels of maneuverability, firepower, armor, and operability. A high-performance power system is required for optimal maneuverability. The fuel pump which supplies fuel stably is very important to achieve this. The fuel pump consists of a pump part, a motor part, and a control part. It is equipped with a BLDC motor. Numerous failures of the fuel pump occurred during vehicle operation when exposed to vibration, shock, and high temperature. The cause of failure was confirmed to be stator slip of the BLDC motor. Stator slip is a consequence of the interference loss between the stator and the housing of the motor part in an high temperature environment. The failure of the fuel pump was solved through size control of the motor housing and the stator. We performed vibration testing at high temperature for verification. This study contributes to improving the reliability of combat vehicles.

Key Words : Combat Vehicle(전투차량), BLDC Motor(BLDC 모터), High Temperature(고온), Fuel Pump(연료 펌프)

1. 서 론

전투차량은 특수한 전투기능을 수행하기 위해 장갑 또는 비장갑으로 된 차량을 말하며 용도에 따라 기동력, 화력, 방호력(생존성), 운용성 등의 다양한 성능이 고려된다. 일반적으로 전투차량은 우수한 가속성, 조향성, 최대속도 등의 기동성능이 요구되

며 산악 및 하천이 많은 한국형 지형조건에서 전술 운행에 최상의 기동성능을 발휘하기 위해 고성능의 동력장치계가 요구되고 있으며 주로 디젤 엔진이 적용된다.^[1]

디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 출력 및 토크 등의 측면에서 우수하여 중장비 및 차량용 엔진, 대용량의 발전기 등과 같이 다양한 분야에 이용되고 있다.^[2] 디젤 엔진의 지속적 운용을 위해서는 안정적으로 연료가 공급되어야 하므로 연료를 저장하고 있는 연료탱크로부터 엔진으로 연료를 공급하는

Corresponding Author : yoonhj@dtaq.re.kr

Tel: +82-55-279-4114, Fax: +82-55-287-4780

장치인 연료펌프의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다. 연료펌프는 일반적으로 전동 모터에 의해 구동되며 장비의 전체 수명에 걸쳐서 지속적으로 작동하는 장치로 반복적이고 상승적인 고압, 마찰, 진동 환경 하에서 연료를 충분히 공급하기 위한 안정적인 성능과 높은 내구성이 요구된다.^[3] 연료펌프를 구동하기 위한 모터는 과거의 브러시형 DC모터에서 최근 고효율, 저소음, 제어용이성, 고내구성의 특징을 가지고 있는 BLDC 모터로 변경되고 있으며 지속적으로 활발한 연구가 진행되고 있다.^[4]

본 연구에서 사용되는 전투차량용 연료펌프는 차량 주전원 작동 시 작동되며, 연료펌프의 토출단에는 압력감지 센서가 설치되어 연료펌프의 압력과 엔진 요구압력을 감지하여 연료펌프의 정상작동 여부를 확인할 수 있다. 일반적으로 차량의 연료펌프는 연료탱크 내에 위치하여 연료 속에 잠기어 작동(습식)하므로 비교적 낮은 온도 환경에서 운용이 된다. 하지만 본 연구에서 사용되는 전투차량용 연료펌프는 연료탱크 외부에 장착된 건식 타입으로 고온의 엔진실 내부에 설치되어 있다. 차량 기동 시 발생하는 진동, 충격 뿐만 아니라 엔진 작동 시 발생하는 열에 의한 고온의 환경에 노출되어 있어 상당히 가혹한 조건에서 운용되고 있다. 이에 따라 전투차량 운용 중 연료펌프의 고장이 다수 발생하여 시동불가 및 시동꺼짐에 의해 운용이 중단되어 전투차량의 전력공백이 우려되었다.

따라서 본 연구에서는 연료펌프의 고장 원인을 분석하고 설계 개선을 통하여 연료펌프의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 고장원인 분석

2.1 연료펌프 구성 및 기능

본 연구에서의 연료펌프는 Fig. 1과 같이 펌프부, 모터부, 제어부로 구성되며 연료탱크에서 엔진으로 연료를 공급하는 역할을 한다. 펌프부는 베인형 방식으로 연료에 원심력을 가해 압력에너지를 생성하여 연료를 송출하는 역할을 한다. 모터부는 BLDC 모터가 장착되어 펌프부의 구동축을 회전시키는 역할을 하며, BLDC 모터는 고정자 및 회전자, 3개의

홀센서(Hall sensor) 등으로 구성되어 있다. 홀센서는 자력을 감지하는 센서로 회전자의 위치 정보를 검출하여 제어부로 전달하며 이를 활용하여 BLDC 모터를 제어한다. 이러한 위치센서는 설치 비용 증가를 초래하며 고온, 다습, 진동, 충격, 먼지 등의 열악한 환경에 노출될 경우 고장 또는 오동작의 확률이 높아진다. 따라서 최근에는 역기전력으로 회전자의 위치를 예측하는 센서리스 제어 기법이 활발하게 연구되고 있다.^[5]

2.2 고장현상 분석

전투차량 운용을 위한 엔진 시동 시 시동불가 현상 및 운용 중 시동꺼짐 현상이 다수 발생하였다. 전투차량과 같이 기동 성능이 중요한 장비에서 엔진 시동 불가 및 꺼짐 현상은 원활한 작전 수행을 저해하는 치명적인 결함이라고 할 수 있다.

전투차량 시동불가 및 시동꺼짐 현상을 확인한 결과 연료펌프 미작동에 의한 것임을 알 수 있었다. 고장이 발생한 연료펌프의 홀센서 신호를 Fig. 2와 같이 시험용 모터를 활용하여 연료펌프의 축을 돌려 확인한 결과 Fig. 3과 같이 홀센서 신호가 정상신호와 대비하여 천이(shifting)되어 있는 것을 확인하였다. 비정상 신호의 발생 원인은 고정자 또는 회전자, 홀센서 고장 등이 있을 수 있다. 모터부를 분해하여 확인한 결과 Fig. 4와 같이 고정자가 정상 위치로부터 약 30° 슬립(slip)이 되었음을 알 수 있었다. 고정자 위치가 약 30° 슬립되면 모터의 정상적인 제어가 불가하며 비정상적인 발열 발생, 전자 소자류 등의 손상이 초래되어 연료펌프 고장의 원인이 된다.

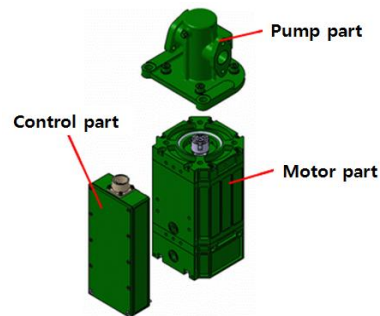


Fig. 1 Components of the fuel pump

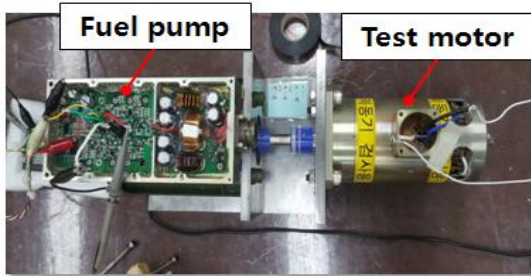
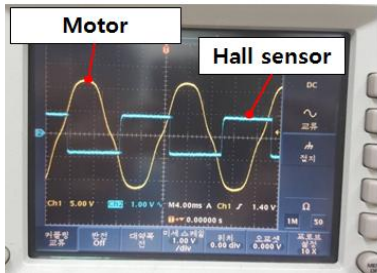
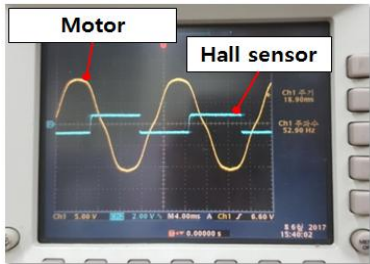


Fig. 2 Tests for checking fuel pump failure



(a) Waveforms of the normal product



(b) Waveforms of the defective product

Fig. 3 Voltage waveforms of the hall sensor and motor

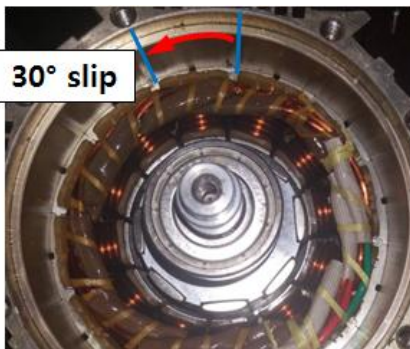


Fig. 4 Stator slip of the motor part

모터부는 여러 단계의 공정을 거쳐서 제작된다. 먼저 고정자를 제작하여 치수를 확인한 후 고정자를 조립할 하우징을 100°C에서 1시간 고온 저장하여 하우징을 팽창시킨다. 내경이 팽창된 하우징에 고정자를 Fig. 5와 같이 억지 끼움한 후 하우징을 상온에서 서서히 냉각시켜 고정자를 조립하게 된다. 이후 회전자를 결합하면 모터부가 완성되며 최종적으로 모터부와 제어부를 연결한 뒤 시험장비를 활용하여 기본 성능확인, 홀센서 초기 셋팅 신호 측정 등 정상작동 여부를 확인한다.

연료펌프는 완성품 출하 시 및 운용 초기에는 정상작동을 했으나 운용 중에 지속적으로 노출되는 가혹한 환경에 의해 고정자의 슬립현상이 유발되어 연료펌프의 정상작동을 저해한 것으로 확인되었다. 따라서 고정자 슬립 현상은 고정자와 하우징의 열간 압입 제작 과정에서 문제가 있음을 예측하게 되었다. 이에 따라 상온에서 정상품 및 고장품의 고정자 외경 및 하우징 구멍 내경 치수를 측정하여 Table 1과 같이 쥘새의 크기를 확인하였다. 확인결과 정상제품은 쥘새 크기가 최소 0.094mm 및 평균 0.129mm의 쥘새를 가지고 있었다. 하지만 고정자 슬립이 발생한 고장품은 쥘새 크기가 평균 0.021mm로 정상품 대비 약 84% 부족한 쥘새 크기를 가지고 있음을 알 수 있었다.



Fig. 5 Housing and stator assembly process of the motor part

Table 1 Interference dimension of housing inner diameter and stator outer diameter

Product	Housing diameter (mm)	Stator diameter (mm)	Interference (mm)	
Normal	#1	100.009	100.13	0.121
	#2	100.010	100.13	0.120
	#3	100.008	100.19	0.182
	#4	100.006	100.10	0.094
Defective	#5	100.008	100.04	0.032
	#6	100.009	100.02	0.011

2.3 고장 메커니즘 분석

고장 메커니즘 분석을 위하여 주위 온도 변화에 의한 연료펌프 고정자 슬립 확인 및 성능 변화 여부 확인을 위한 고장 재현시험을 수행하였다. 시험 장비는 Fig. 6과 같이 펌프 구동을 위한 전원인가 장비, 고온 챔버 등으로 구성하였으며, 시험 시료는 정상제품 1대와 고장제품 1대 모두 칩새 크기가 가장 작은 시료를 선정하였다. 시험을 위해 Fig. 7과 같이 시료번호 #4(정상제품)와 시료번호 #6(고장제품)을 고온챔버 내에 위치시켰다. 시험은 50°C, 60°C, 70°C로 설정된 온도챔버에 연료펌프를 설치한 후 2시간 동안 작동시키는 방법으로 수행하였으며 소모전류, 연료 토출압력, 모터부 하우징 표면온도 확인, 연료펌프 ON/OFF시험을 통해 정상작동 여부를 확인하였으며, 제품별 시험결과를 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 정상제품은 70°C에서 4시간 경과 후에도 성능에 이상이 없었으나, 고장품은 70°C에서 1시간 30분 경과 시 소모전류가 약 21A로 상승됨과 동시에 연료 토출압력이 약 4bar로 하락되었으며, ON/OFF시험 수행 시 비정상 작동을 하였다. 참고로 정상적인 소모전류는 약 13A이며, 연료 토출압력은 약 8bar이다. 또한 전류값이 상승함에 따라 발열이 발생하여 Fig. 8과 같이 모터부 하우징 표면온도가 88°C로 측정되어 비정상적으로 상승함을 확인하였다.



Fig. 6 Reproduction test equipments for high-temperature operation of the fuel pump

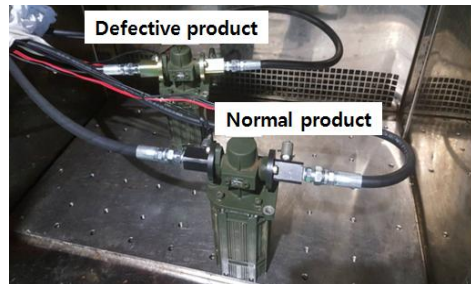


Fig. 7 Samples for reproduction test of the fuel pump



Fig. 8 Abnormal heat generations of the defective fuel pump

Table 2 Reproduction test results for high temperature of the normal fuel pump

Temperature	Test time	Results		
		Current	Pressure	ON/OFF
50°C	2hour	Fine	Fine	Fine
60°C	2hour	Fine	Fine	Fine
70°C	2hour	Fine	Fine	Fine
	4hour	Fine	Fine	Fine

Table 3 Reproduction test results for high-temperature of the defective fuel pump

Temperature	Test time	Results		
		Current	Pressure	ON/OFF
50°C	2hour	Fine	Fine	Fine
60°C	2hour	Fine	Fine	Fine
70°C	2hour	Rise	Drop	Abnormal

모터부를 분해하여 확인한 결과 Fig. 9와 같이 고정자가 모터 회전 방향과 반대 방향으로 약 30° 슬립이 발생한 것을 알 수 있었다. 이 현상은 전투차량 운용 중 발생한 연료펌프 고장 현상과 동일하였다. 모터부의 재질을 확인한 결과 하우징은 알루미늄으로 제작되었고, 고정자는 철로 제작되어 재질이 상이하였다. 이에 따라 연료펌프의 주변 온도가 상승할 경우 재질에 따라 열팽창률이 상이하게 되어 고온에서는 하우징과 고정자의 씰새가 상실될 수 있다. Table 4는 고장품의 온도별 하우징 구멍 내경과 고정자 외경을 재질별 열팽창계수를 활용하여 계산한 결과이다. 70°C에서의 씰새 크기는 상온(20°C) 대비 0.058mm 하락하였으며, 30°C 초과 온도에서는 씰새가 유지되지 않고 오히려 틈새가 발생하는 것을 알 수 있다. 수치적으로는 열팽창계수 차이에 따라 30°C 이후 씰새 상실 및 고정자 슬립이 발생되어야 하나 현실적으로 하우징 내경과 고정자의 가공공차 및 제작공차에 의해 완벽한 원이 아니기 때문에 70°C에서 고정자 슬립이 발생된 것으로 판단한다.

따라서 연료펌프 제작 시 상온에서 하우징 구멍 내경과 고정자의 씰새 크기는 최소 0.058mm 이상 확보해야 70°C의 고온환경에서 고정자 슬립을 방지할 수 있음을 확인하였다. 또한 실제 전투차량용 연료펌프의 환경 조건인 90°C에서 고정자 슬립을 방지하려면 상온에서의 씰새 크기를 0.081mm 이상 확보해야 한다.

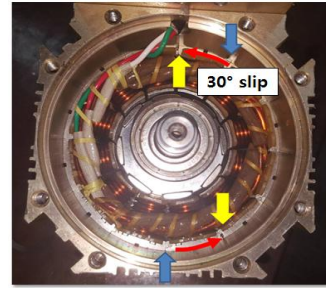


Fig. 9 Reproduction test results for the fuel pump

Table 4 Interference dimension of housing inner diameter and stator outer diameter by temperatures

Temperature (°C)	Housing diameter (mm)	Stator diameter (mm)	Interference (mm)
20	100.009	100.020	0.011
30	100.032	100.032	0.000
70	100.128	100.081	-0.047
90	100.175	100.105	-0.070

3. 설계 개선 및 검증

연료펌프 고장 원인 분석 결과에 따라 모터부 하우징과 고정자의 씰새 관리를 위해 설계 개선을 추진하였다. 고장 원인분석 결과를 바탕으로 따라 하우징 내경 및 고정자 외경을 관리하여 상온에서 씰새 크기가 0.20~0.22mm로 되도록 개선을 수행하였다. 이는 최소 씰새 크기인 0.081mm보다 약 2.5배 설계 마진을 확보한 것이다. 씰새가 증대됨에 따라 하우징과 고정자 조립 시 기존 100°C로 가열 후 압착기를 사용한 억지 끼워맞춤 방법에서 200°C로 가열하여 하우징 내경을 충분히 팽창시킨 후 Fig. 10과 같이 수동 프레스기로 눌러 조립하는 방법으로 개선하였다.

개선효과를 검증하기 위해 개선품을 제작하여 Fig. 11과 같이 시험을 수행하였다. 시험은 기본 성능시험, 고온시험, 진동시험, 고온·진동 복합시험 순으로 진행되었다. 고온·진동 복합시험은 실제 전투

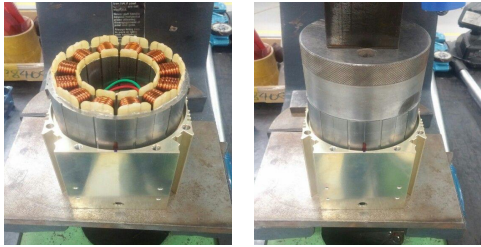


Fig. 10 Improved assembly process of the motor part



(a) Test equipments



(b) Test sample

Fig. 11 Vibration test in high temperature for fuel pump improvement verification

차량용 연료펌프의 작동 조건과 유사하게 90°C 고온환경과 진동 하중을 동시에 부가하였다. 모든 시험 결과 소모 전류, 연료 토출압력, ON/OFF 시험에서 이상없음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 전투차량 운용 중 발생된 연료펌프 고장에 대한 원인 분석 및 설계 개선을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료펌프 고장은 모터부 하우징과 BLDC 모터의 고정자 썬새가 고온 작동 환경에서 상실됨에 따

라 고정자의 슬립 발생 때문임을 알 수 있었다.

2. 모터부 하우징과 고정자의 설계 개선을 추진하여 썬새 크기를 최소값인 0.081mm 보다 약 2.5 배 설계 마진을 확보한 0.20~0.22mm가 되도록 하였다. 개선 입증을 위해 기본 성능시험 및 고온·진동 복합시험을 수행하였으며 모든 시험에서 이상없음을 확인할 수 있었다.
3. 본 연구를 통해 제품 설계 시 실 사용환경이 고려되어야 함을 강조할 수 있다. 또한 연료펌프의 신뢰성 개선을 통해 전투차량의 기동성 및 운용성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

1. Kang, T. W., Shin, H. Y., Ryu, J. M., Park, K. C., Kim, J. K. and Lee, H. K., "A Study on the Improvement of the Separation Phenomenon of Coolant Hose in the Tracked Combat Vehicle", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp. 59-64, 2018.
2. Sim, H. S. and Jun, J. O., "A Design for Water Cooling of a Marine Diesel Engine with Verification of Improvement", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 58-63, 2016.
3. Jung, Y. S., Roh, C. S., Lee, G. I. and Kim, J. Y., "Reliability Evaluation of a Motor Core Applied Ultrasound Infrared Thermography Technique", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 60-66, 2016.
4. Chang, J. W. and Yoon, D. Y., "Sensorless Starting Method and Fuel Pressure Control of BLDC Motor for Fuel Pump of Vehicle", Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 21, No. 2, pp. 114-121, 2013.
5. Tran, Q., Chun, T. W., Lee, H. H., Kim, H. G. and Nho, E. C., "Control Techniques of Sensorless BLDC Motor Drive for a Vehicle Fuel Pump Application," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 10, pp. 1858-1864. 2011.