

그린카 BLDC 모터의 신뢰성 시험

유기훈*·박부희*·김기태*·김기영*·김달석*·장중순*·한창수**·조한삼***

아주대학교 산업공학과*·자동차부품연구원 금속소재공정연구센터**·코모텍 부설연구소***

Reliability Tests for BLDC Motors Used in Green-Cars

KiHoon Yoo*·BooHee Park*·KiTae Kim*·GiYoung Kim*·DalSeok Kim*·JoongSoon Jang*
·ChangSu Hahn**·Hansam Cho***

Department of Industrial & Information and System Engineering - Ajou University*·
Korea Automotive Technology Institute - Metal Materials and Processing Engineering Center**·
Komotek Assistant Research***

Abstract

BLDC(Brushless Direct Current) motor is a powerful device to control the automotive electronic components used in green cars such as HEV/EVs(Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle). This study is to propose reliability test items derived through pretesting, suitability analysis and classification of previous BLDC motor tests. For environmental stress tests are determined by analysing environmental conditions and relevant failure mechanisms induced by climate loads, mechanical loads, chemical loads, etc. ATL and HALT are also considered for life testing and screening.

Keywords : BLDC Motor, Reliability Test, Environmental Tests, ALT, HALT, Safety Test

1. 서 론

브러쉬리스(Brushless Direct Current, 이하 BLDC) 모터는 기존의 DC 모터의 브러쉬에 의한 기계적 정류구조를 홀(Hall) 소자와 같은 반도체 소자를 이용하여 정류되는 모터이다. 일반적으로 전기자 권선이 있는 고정자(Stator), 영구자석이 요크 표면에 부착 또는 매입되어 있는 형태의 회전자(Rotor)로 구성되어 있다 김한수(2005). 또한 회전자의 위치를 검출하기 위한 레졸버와 같은 홀 센서(Hall Sensor), 센서로부터 자극의 위치정보를 획득하여 BLDC 모터를 제어하는 제어장치(Drive)로 구성되어 있다. 고정자의 경우에는 다수의 철심이 감싸고 있는 구조로 구성되어 있으며, 회전자는 몇 쌍의 N극/S극으로 구성되는지에 따라 2극, 4극, 6극, 8극 등으로 분류되고 있다 김영조와 신재화(2008). 또한 홀 센서는 고정자 또는 BLDC 모터의 하단부 등에 부착된 작은 회로기판에 장착되며 제어장치는 외부에 장착된다. BLDC 모터의 형태는 자기회로 구조, 철심의 유무, 구동방식, 위치센서의 유무에 따라 센서 타입, 센서리스 등과 같은 다양한 형태의 BLDC 모터로 분류될 수가 있으며 적용범위에 따라 300W, 800W, 5kW 등 다양한 등급의 사양이 결정된다.

BLDC 모터는 기존 DC 모터와는 다르게 소음이 적고 브러쉬에 의한 마찰손실이 없으며, 수십에서 수만 RPM과 같은 광범위한 동작 속도 범위를 갖고 있다 김영조와 신재화(2008). 또한 속도-토크와 같은 동적 특성이 우수하며, 특히 고효율, 내구성 증가로 인한 고수명의 장점을 갖고 있다 김영조와 신재화(2008). 최근에는 가전제품, 자동차, 산업 자동화 등의 다양한 분야에 적용이 되면서 기존의 브러시 타입의 DC 모터 및 유도 전동기 등의 대안으로 급속히 성장하고 있다.

또한 BLDC 모터는 HEV/EV(Hybrid and Electric Vehicle)와 같은 그린카에 장착되는 시스템의 사용률이 증가되면서 사용 환경에 적합한 신뢰성의 중요성이 높아지고 있다. 특히 EC(Electric Compressor), EPS(Electronic Power Steering), EOP(Electric Oil Pump), EWP(Electronic Water Pump), EMB(Electro Mechanical Brake), ISG(Integrated Starter & Generator : Idle Stop & Go) 시스템에 적용되는 BLDC 모터는 도로 환경에서의 고온, 고습 조건 등과 같은 환경에 노출되어 고장 발생을 초래할 수 있다. 따라서 개발단계에서의 다양한 종류의 신뢰성 시험 평가를 통하여 제품에 대한 품질과 신뢰성을 보증해야 한다.

자동차용 모터를 신뢰성을 평가할 수 있는 시험에 대한 연구결과로는 신외경 외(2005)는 실제 차량으로부터의 수집된 데이터를 등가하중을 통하여 냉각팬모터의 가속수명시험(Accelerated Life Test)방법을 개발하였으며, 신외경 외(2006)는 자동차 와이퍼 시스템에 장착되는 모터의 신뢰성 수명평가의 설계 및 분석을 수행하였다. 또한 RS R 0005, 0008 등(2006, 2002 등)에서는 자동차 시스템에 장착되는 모터들의 신뢰성 시험의 항목과 절차를 제시하고 있다. 기존의 제안된 연구들은 자동차용 DC 모터에 대한 신뢰성 평가를 수행하였으며, HEV/EC에 사용되는 BLDC 모터에 대한 신뢰성 시험에 관한 연구는 미비하다고 할 수 있다.

BLDC 모터에 대한 연구결과로 이태구 외(2005)와 JH Hur et al.(2008)은 가속수명시험에 의한 고속팬용 밀폐구조형 BLDC 모터의 열신뢰성 분석을 수행하였으며, 그 결과로 특성수명 등을 도출하였다. 또한 KW Lee et al.(2008) 에어컨에 사용되는 BLDC 모터의 자성품질을 평가할 수 있는 품질보증에 대한 연구를 수행하였으며, RS B 0266(2009)에서는 중형 팬 구동용

BLDC 모터의 신뢰성 시험의 항목과 절차를 제안하였다. 기존의 BLDC 신뢰성 시험에 대한 연구들은 개발 및 양산단계에서의 전자제품과 가전제품에 적용할 수 있는 가속수명시험에 대한 연구만을 수행하였으며, HEV/EC와 같은 그린카 개발단계에서의 다양한 종류의 환경 시험과 수명시험 등과 같은 신뢰성 시험에 대한 연구는 미비하다고 할 수 있다.

즉, BLDC 모터 개발 이후, 제품을 보증하기 위한 신뢰성 평가 시험에 대한 항목과 기준의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 해결하기 위하여 신뢰성 시험항목 개발 절차에 따라 시험 항목을 개발하고, 시험기준을 수립하기 위해서 고려되어야 하는 요구사항을 제시하고자 한다. 따라서 BLDC 모터의 개발단계에서 수행되어야 하는 5단계의 신뢰성 시험항목 개발 절차를 관련 연구 조사를 통하여 수립하였다. 1단계 사전조사 단계에서는 BLDC 모터의 부품분석과 자동차가 노출되는 환경 및 사용조건을 조사하였다. 2단계 주요고장 메커니즘 예측 단계에서는 BLDC 모터 관련 규격 수집을 통하여 요구성과 잠재고장 메커니즘의 상관관계를 분석하였다. 3단계 시험 적합성 분석 단계에서는 잠재고장메커니즘과 시험항목과의 상관관계를 분석하여 BLDC 모터에 적용할 수 있는 신뢰성 시험항목을 도출하였다. 4단계에서는 도출된 시험 항목을 목적과 가속화 여부에 따라 환경시험(Environmental Test), 수명시험(Life Test), 초가속수명시험(Highly Accelerated Life Test), 가속수명시험, 안전시험(Safety Test)으로 분류하였다. 5단계에서는 BLDC 모터의 신뢰성 시험의 기준수립을 하기 위해 고려되어야 하는 요구사항에 대하여 제시하였다. 그 결과 필드에서 발생할 수 있는 마모 및 우발 고장 발생에 대한 신뢰성 시험을 수행하여 개발 제품의 신뢰성을 보증할 수 있다. 또한 취약부위 및 문제점에 대한 개선점을 도출할 수 있어 완성차 조립 후의 고장발생을 예방하여 안전을 도모할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 BLDC 모터와 같은 신제품 개발에 적합한 신뢰성 시험 개발절차를 조사하고 제시하였으며, 3절에서는 개발절차에 따라 사전조사, 주요 고장메커니즘 예측, 시험 적합성 분석을 수행하여 시험항목을 도출하였다. 4절에서는 도출된 시험 항목을 시험목적에 맞게 분류하였으며, 신뢰성 시험 개발단계에서 시험기준을 결정하기 위한 요구사항에 대해서 제시하였다. 5절에서는 결론 및 향후 연구방향을 제시하였다.

2. BLDC 모터 시험항목 개발 절차

BLDC 모터의 개발 및 설계단계에서 신뢰성 평가의 목적은 아이템의 잠재적 약점과 예상하지 못한 상호 작용에 의한 고장을 추출하는 것이며, 추출된 고장에 대한 메커니즘과 원인을 규명하여 개선대책을 수립하고 설계에 반영하여 고장 없는 아이টে을 개발하도록 하는 것이다. 특히, 양산이전의 개발/설계 단계에서 실시되어야 할 신뢰성 시험에는 기본적인 기능 및 성능 시험과 고장발견을 위한 환경시험, 수명시험과 이 시험을 가속화하기 위한 초가속수명시험, 가속수명시험 등이 있다. 이러한 시험들은 고장 없는 제품을 개발하기 위한 신뢰성 설계를 위하여 필수불가결한 업무이다 박부희 외(2005), 박부희(2008).

따라서 본 연구에서는 그린카 BLDC 모터를 평가하기 위한 신뢰성 시험항목을 개발하기

위하여 기존의 NASA, RAC, MIL-HDBK-189에서는 제안하는 신뢰성 평가 절차를 검토하였다 박부희(2008). 위 3가지의 신뢰성 평가 절차에서 제안하는 시험항목들은 매우 다양하여 설계/개발 단계에서 모두 적용하기에는 많은 인원, 시간과 비용이 소요된다 박부희(2008). 따라서 본 연구에서는 박부희 et al.이 제안하는 고장메커니즘 기반의 2-단계 QFD 기법을 적용하여 BLDC 모터의 최적 시험항목을 결정하는 절차를 수립하였다.



<그림 1> 개발단계에서의 BLDC 모터의 신뢰성 시험항목 개발 절차

개발단계에서의 BLDC 모터의 신뢰성 시험항목 개발 절차는 총 5단계로 구성된다. 1단계는 사전조사 단계로 BLDC 모터를 구성하는 부품의 분석과 노출되어 있는 환경 및 사용조건을 조사하는 목적이 있다. 이 단계에서는 부품의 분해부터 세부부품에 대한 기능, 재질, 공법 등을 조사하여 분석표를 작성한다. 또한 분해된 모터의 세부부품들이 노출되어 있는 자동차 환경인자와 사용조건을 조사한다. 이러한 사전조사된 정보의 정확성과 유용성 여부에 따라 고장메커니즘 예측력이 결정된다 박부희(2008).

2단계는 BLDC 모터의 주요 고장 메커니즘 예측위한 단계로 부품의 잠재고장 모드 및 메커니즘을 조사하고 각 부분의 전문가들로 이루어진 전문가 위원회를 구성한다. 구성된 위원회 회의에서 사전 조사된 아이템의 기능, 성능 그리고 사용/환경조건과 고장메커니즘과의 상관관계를 1-단계 QFD 기법에 의해 분석하여 주요 고장메커니즘을 추출한다 박부희 외(2005), 박부희(2008). BLDC 모터의 고장메커니즘 예측의 결과는 주요 고장메커니즘 예측표로 작성하여 정보화 한다.

3단계는 시험 적합성 분석단계로 2-단계 QFD 기법을 이용하여 BLDC 모터의 주요 고장 메커니즘과 사전 조사된 시험항목과의 상관관계를 평가하여 최적의 시험항목을 결정한다. 이 때 시험 적합성 평가 매트릭스를 작성하여 실시하게 된다. 단계 2 에서 추출된 주요 고장메커니즘은 시험 적합성 평가 매트릭스의 세로축에 순위화 하여 기입하고, 가로축에는 관련 시험방법을 기입하여 상관관계를 평가한다 박부희 외(2005), 박부희(2008).

4단계는 3단계에서 결정된 신뢰성 시험항목을 종류, 목적, 가속화 여부에 따라 분류한다. 신제품 개발단계에서 수행해야 할 시험으로는 우발고장에 대한 환경시험과 마모고장에 대한 수명시험이 있다. 이 시험들을 수행하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되므로 초가속 수명시험과 가속수명시험을 수행하여 이 문제점들을 해결해야 한다.

5단계는 신뢰성 시험기준 요구사항 수립 단계로 3, 4단계에서 결정된 BLDC 모터의 시험항목에 대한 조건, 수준, 방법을 구체화하기 위하여 고려되어야 하는 요구사항에 대해 조사한다. 기존의 구체화 방법은 사전조사에서 조사된 자료와 정보를 기본으로 BLDC 모터에 대한 각 시험별 국제/국가/기관 규격과 선진업체 규격을 벤치마킹하여 전문가 위원회에서 결정한다. 이러한 방법은 시간과 비용을 절약할 수는 있는 반면 시험기준의 정확성이 불분명하므로 자료조사를 통하여 기준설정을 위한 방법 및 요구사항에 대하여 제시한다.

3. BLDC 모터의 신뢰성 시험항목 개발

3절에서는 2절에서 정의된 신뢰성 시험항목 개발절차에 따라 사전조사, 주요메커니즘 조사, 시험적합성 분석을 수행하였으며, 그 결과 총 16가지의 신뢰성 시험을 개발하였다.

3.1 사전조사 단계

3.1.1 BLDC 모터의 부품분석

BLDC 모터는 일반적으로 고정자와 회전자로 구성되며, 그 이외의 세부부품으로 구성된다. 회전 역할을 하는 회전의 세부부품으로는 기계적 에너지를 전달하는 축, 자계를 발생시키는 영구자석, 영구자석을 지지하고 자계통로역할을 하는 회전자 코어, 축을 지지하고 원활한 회전 역할을 하는 베어링으로 구성된다. BLDC 모터에서 고정부분 역할을 하는 고정자는 고정자 계층을 구성하고 자계통로 역할을 하는 고정자 코어와 코어와 권선된 코일과의 절연 기능을 하는 보빈으로 구성된다. 또한 회전자계를 발생시키는 코일, 절연지, 프레임 브래킷 등으로 구성된다. BLDC 모터의 세부부품과 기능에 대한 분석표는 <그림 2>에 제시하였으며 BLDC 모터의 재질과 제조공법은 산업과 적용 시스템에 따라 다양하게 결정된다.

설계 구조 및 구성	BLDC Motor의 구조 및 명칭	재질	제조공법	기능	
	회전자 (Rotor)	축	탄소강	기계적 에너지 전달	
		영구자석	네오디뮴(Nd)	소결 후 가공	자계 발생
		회전자 코어	전기강판	타발 후 적층, 몰드체결	영구자석 지지, 자계 통로 역할
	고정자 (Stator)	베어링	베어링강	-	축 지지, 원활한 회전
		고정자 코어	전기강판	타발 후 적층, 용접	고정자 계층을 구성, 자계 통로 역할
		보빈	니알론	사출	고정자 코어와 권선된 코일과의 절연
		코일	구리	권선	회전자계 발생
		절연지	Nonex	-	고정자 코어와 권선된 코일과의 절연
		프레임	알루미늄	가공	모터 몸체 역할, 고정자 발열 효과
		브래킷			
플렌지			베어링을 지지하여 회전자와 고정자 공극 유지		
홀 센서(Hall Sensor)	센서	-	-	회전자 위치 및 속도 검출	
제어장치(Drive)	트랜지스터, ICs	-	-	자극위치 정보를 획득하여 모터 제어	
	인쇄회로기판(PCB)	-	-		

<그림 2> BLDC 모터의 부품 분석표

3.1.2 BLDC 모터의 환경 및 사용조건 조사

자동차는 온도, 습도와 같은 기후적 환경과 진동과 같은 기계적 환경, 염수 및 분진과 같은 화학적 환경 등에 노출되어 있어 자동차의 내구성에 영향을 주어 고장을 발생시킬 수 있다. 따라서 본 절에서는 고장을 발생시킬 수 있는 환경인자들을 조사하기 위하여 SAE J1211(2009), ISO 16750(2006), IEC 60721(2002)의 라이브러리 데이터를 참조하여 기후적, 기계적, 화학적 환경 및 사용조건을 <그림 3>에 제시하였다.

○ 기후적 부하 : 온도, 습도, 온도 및 습도로 크게 분류되며 온도의 경우에는 저온, 고온, 주기적인 저온 및 고온 변화에 노출되어 있다. 또한 고온으로 인하여 열과 같은 충격에도 노출되어 있으며 여름철과 같은 날씨에는 습도와 같은 환경 인자에 노출되어 있다. 더욱 가혹하게는 온도와 습도가 복합된 환경조건에도 노출되어 있다고 할 수 있다.

○ 기계적 부하 : 진동, 충격, 자갈충격으로 크게 분류되며 진동의 경우에는 정현파, 랜덤적으로 자동차에 영향을 줄 수 있으며 부품이 장착위치에 따라 진동강도 차이가 있다. 또한 자동차가 도로 주행 시 일정한 평면도로가 아닌 굴곡이 심한 경우에는 특히 진동과 충격에 노출되어 있다. 또한 자갈과 같은 도로에서는 더욱 가혹하게 충격에 노출되어 있다고 할 수 있다.

○ 화학적 부하 : 물, 먼지, 산으로 크게 분류되며 세부적으로는 강수, 빙수, 염수, 가스, 화학약품, 먼지 등에 의해서 자동차에 영향을 줄 수가 있다. 물에 의한 영향으로는 강수, 빙수에 의해서 자동차 부품 표면에 영향을 주어 부식을 발생 시킬 수 있으며, 염수는 지역에 따라 노출정도가 틀리며 자동차의 장착위치에 따라 염수의 영향 정도가 틀릴 수 있다. 예를 들어 자동차 몸체 아랫부분에는 염수의 침투가 쉬워 부품의 오염과 부식을 발생시킬 수 있다. 또한 산과 같은 약품성에 의해서 자동차에 영향을 미칠 수 있다.

환경파라미터	단위	등급							
		5K1	5K2	5K3	5K4	5K4H	5K4L	5K5	5K6
낮은 상대습도	%	10	10	10	10	10	10	10	10
	°C	+30	+30	+30	+30	+30	+30	+30	+30
낮은 기압	kPa	70	70	70	70	70	70	70	70
주변물질,공기의 유적입	환경 파라미터	단위	등급						
강수량, 비	해수 염분	-	5C1		5C2		5C3		
일사	도로 염분	-	없음		없음		열무 발생		
열방사, 엔진 실 이외	이산화황	-	없음		소금입자와 염수				
방사열, 엔진 실	황화수소	환경파라미터	단위	등급				5M3	
비 이외의 소스로부터의 물	산화질소	고정계 진동: 변위진폭	mm	5M1		5M2		5M3	
표면의 축축함	염화수소	가속진폭	mm/s²	1.5	5	3.3	10	15	7.5
		진동범위	Hz	2-9	9-200	2-9	9-200	200-500	2-8
플루오르화 수소	암모니아	고정계 진동, 랜덤: 가속분광 밀도		0.3	0.1	1	0.3	5	1
		진동범위		10-200	200-500	10-200	200-500	10-200	200-500
모래	먼지집진	비고정계 진동,중계포함: 충격반응 스펙트럼 type1	nr/n²	90		100		300	
		충격반응 스펙트럼 type2	Hz	없음		300		1000	
외부물체로부터의 충격, 돌방이		J		없음		5		20	

<그림 3> 자동차의 환경 및 사용조건

3.2 주요고장 메커니즘 예측

3.2.1 고장모드 및 메커니즘 조사

BLDC 모터의 주요 고장메커니즘 예측을 위하여 회전자, 고장자에 대한 고장모드 및 메커니즘을 조사하고 FMMEA(Failure Mode Mechanism Effect Analysis)를 수행하였다. 또한 FMMEA 수행 후 전문가 회의에서 브레인스토밍 방법으로 검토를 실시하였다. 그 결과 회전자의 경우에는 베어링의 마모에 의하여 소음 및 진동이 발생하고 상황에 따라 분리되는 현상이 발생하고 있다. 또한 회전자에 장착되는 영구자석은 자석의 종류의 따라 온도, 진류에 의해 감자되는 현상이 발생하여 BLDC 모터의 작동 불능을 가져올 수 있다. 고정자의 경우에는 과전압에 의한 코일의 열화로 단선을 초래하여 모터의 작동불능이 발생할 수 있다. 본 절에서는 FMMEA의 결과를 기반으로 하여 BLDC 모터의 요구사항과 주요 메커니즘의 상관관계를 <그림 4>에 제시하였다.

<표 1> BLDC 모터의 FMMEA(Failure Mode Mechanism Effect Analysis)

주요 구성품	세부 구성품	고장모드	고장 메커니즘	고장 원인	고장영향
회전자	축	마모	피로	진동	이상소음 발생
		마모	부식	부식축진성분	이상소음 발생
		고착	과부하	저온	부적절한 회전
	영구 자석	변형	피로	과부하, 온도변화	자성 저하
	회전자 코어	단선, 단락	열화	과전압	이상 작동
		변형	피로	외부 충격	이상 소음
	베어링	스폴링, 마모	피로	반복하중(고온고속)	소음 및 진동 발생
변형		피로	과부하	베어링 분리	
고정자	고정자 코어	단선, 단락	열화	과전압	이상 작동
		변형	피로	외부 충격	이상 소음
	보빈	변형	피로	외부 충격	누전
	코일	단선, 단락	코일 열화	과전압	회전자계 특성저하
	절연지	손상	절연, 열화	과전압	누전
	프레임	폴립	변형(들뜸)	진동	이상소음 및 조립체 붕괴
	브래킷	변형	피로	과부하	폴립현상 발생
플랜지	고착	부식	부식축진성분, 환경	기동불량	
홀 센서	리졸버	손상	변형	진동, 충격	이상 작동
제어장치	트랜지스터 ICs	단선	확산	고온	이상 작동
		단락	결정성장	습기	이상 작동
		균열	피로	반복하중	이상 작동
	인쇄회로기판 (PCB)	단선	피로	고온, 충격	이상 작동

주요 고장메커니즘 추출은 1-단계 QFD 기법을 이용한 주요 고장메커니즘 평가 매트릭스를 작성하여 수행하였다. 주요 고장메커니즘 추출표에서는 세로축을 BLDC 모터의 신뢰성 요구 항목으로 가로축을 고장메커니즘으로 하여 매트릭스 표를 작성하고, 신뢰성 요구항목별 고장 메커니즘의 상관관계를 점수화하여 주요 고장메커니즘을 순위화하였다. 이때 상관관계는 매우상관(◎, 5점)-상관(○, 3점)-보통(△, 1점)-상관없음(공란, 0점)으로 표기하고, 점수는 고장메커니즘별 상관점수를 합산하여 산출하였다. 산출된 결과를 가지고 주요 항목을 도출한다.

No.	잠재고장부위 고장메커니즘 요구시험 (성능 및 내환경조건)	회전자						고정자					출력서		제어장치			
		축		영구자석	베어링	회전자코어	고정자코어	보빈	코일	절연지	프래임	브래킷/동력지	센서	센서	트랜지스터, Ics		인쇄회로기판	
		피로/마모	부식	피로/마모	피로/마모	열화	열화	피로	열화	열화	변형	피로, 부식	변형	확산	성장	피로	피로	
1	절연저항			◎		△	△		◎	◎								
2	온도저항			◎				○	◎					◎				◎
3	병수성		△															
4	내부식		◎		△								◎					◎
5	진동	○		◎		○	○					◎	◎	◎				◎
6	내열성				△				○									
7	내마모	○			◎													
8	내구속성				△			○										
Score		6	6	10	11	4	4	9	11	5	5	8	9	5	5	5	5	5

<그림 4> 주요고장 메커니즘 추출표

1-단계 QFD를 수행한 결과 BLDC 모터는 고속회전으로 인한 베어링의 마모, 열화에 의한 코일이 높았으며, 저온 및 고온, 전류에 의한 영구자석이 감자되는 현상 순으로 중요성이 순위화되었다. 또한 주요고장 메커니즘을 추출표는 3.3절의 시험 적합성 분석을 위한 기초 자료로서 사용되었다.

3.3 시험 적합성 분석

본 절에서는 2-단계 QFD 기법을 이용하여 3.2절에서 조사된 BLDC 모터의 주요 고장메커니즘을 평가 매트릭스의 세로축에 순위화 하여 기입하고, 기존 조사된 자동차 모터 관련 시험을 가로축에 작성하였다. 자동차 부품의 관련 시험 조사를 위하여 ISO 16750(2006), GMW 3172(2004), 국내외 유명 자동차 회사 A, B의 규격과 RS 규격 시리즈를 수집하여 전문가 회의를 통하여 주요 시험항목에 대해서 나열하였다. 그 후 BLDC 모터의 시험 적합성 평가 매트릭스를 작성하여 시험 적합성 분석을 수행하였다. 상관관계 평가는 1-단계 QFD와 동일하게 실시하며 주요 고장메커니즘의 점수와 상관관계 점수를 곱한 점수를 순위화한다. 그 결과 BLDC 모터에 적합한 최적의 시험항목을 결정하였다.

No.	시험항목			저온보존	저온동작	고온보존	고온동작	고,저온 작동관계시험	고온 동작내구시험	온도 사이클 시험	열충격시험	내정상온 습도시험	연립 진동시험	진동 강도시험	공진점 시험	충격시험	염수분무시험	내수성시험	내약품성시험	
	고장메커니즘	중요도																		
1	배대영	피로/마모	11					55	55	55										
	코일	열화	11					55	55											
2	영구자석	피로/마모	10	50	50	50	50			50	50									
3	축	피로/마모	6										18	30	18					
4		부식	6									18					6	18	6	6
5	브래킷/플렌지	피로, 부식	6						18			18	18	30	18	18	18	6	18	6
6	결연지	열화	5						5											
7	프레임	변형	5										15	15	15	15				
8	트랜지스터, Ics	확산	5								15									
10		피로	5								15									15
11	연쇄회로기판	피로	5								15									
12	회전자코어	열화	4						4											
13	고장자코어	열화	4						4											
14	보편	피로	3						3											
15	센서	피로	3										3							
Totia Score				50	50	50	50	110	144	105	95	36	54	75	51	31	12	51	12	
Ranking				9	7	7	7	2	1	3	7	13	5	4	5	12	15	13	15	

<그림 5> BLDC 모터의 시험 적합성 평가 매트릭스

본 연구에서는 2-단계 QFD를 통하여 기후적, 기계적, 환경적 환경에 노출되어 수행되어야 하는 16가지의 신뢰성을 결정하였다.

- 기후적 환경에 대한 시험 : 저온보존시험, 저온동작시험, 고온보존시험, 고온동작시험, 고,저온작동관계시험, 고온동작내구시험, 온도사이클시험, 열충격시험, 내정상온습도시험
- 기계적 환경에 대한 시험 : 진동시험, 진동강도시험, 충격시험, 공진점 검증시험
- 화학적 환경에 대한 시험 : 염수분무시험, 내수성시험, 내약품성시험

4. 신뢰성 시험항목 분류 및 시험기준 요구사항 설정

본 절에서는 3절에서 도출된 16가지의 시험을 종류, 목적, 가속화 여부 등에 따라 분류하였으며, BLDC 모터의 적용 시스템 및 장착위치에 따라 수행해야 하는 시험법의 차이점을 제시하였다. 또한 분류된 시험의 기준을 수립하는 경우, 적용대상 및 장착위치에 따라 수준 차이가 발생하므로, 시험기준을 설정하기 위한 요구사항을 제시하였다.

4.1 신뢰성 시험의 종류

신뢰성 시험의 종류는 환경시험, 초가속수명시험, 수명시험, 가속수명시험, 안전시험 등이 있다.

환경시험은 특정 환경조건에서 내환경성을 확인하기 위한 시험으로 우발고장 발생을 재현하여 예방하는 목적이 있다. 또한 초가속수명시험은 환경시험을 가속화하기 위한 시험으로 취약 부위에 발견하기 위한 목적으로 비용과 시간을 절약할 수 있는 장점이 있다. 수명시험은 제품의 수명 또는 고장률을 평가하기 위한 시험으로 마모고장 발생을 재현하여 수명을 예측하는 목적이 있다. 또한 가속수명시험은 수명시험을 가속화하기 위한 시험으로 초가속 수명시험과 같은 장점이 있다. 안전시험은 설계에 안전상의 문제가 없는지를 평가하는 시험이라고 할 수 있다. 따라서 3절에서 도출된 16가지의 신뢰성 시험들은 위의 4가지 시험을 모두 포함하고 있으며 이를 시험목적과 가속화 여부에 따라 분류해야 한다.

4.2 신뢰성 시험항목 분류

본 절에서는 위에서 제시한 BLDC 모터의 신뢰성 시험을 목적, 적용단계, 시험장소 및 가속 여부에 따라 환경시험, 수명시험(가속수명시험), 초가속수명시험, 안전시험으로 분류하여 <표 2>에 제시하였으며, 각 시험의 내용과 적용시스템을 고려하여 수행해야 하는 시험의 차이점을 제시하였다.

<표 2> 신뢰성 시험 항목 분류

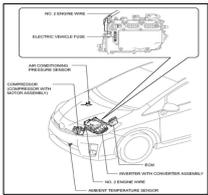
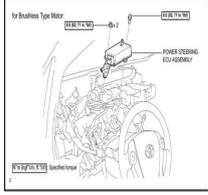
대분류	중분류	소분류	환경 시험	수명 시험 (ALT)	HALT	안전 시험
기후적부하	온도	저온보존시험	•			
		저온동작시험	•			
		고온보존시험	•			
		고온동작시험	•			
		저온 및 고온 작동한계시험			•	
		고온동작내구시험			•	
	온도변화	온도사이클시험			•	
		열충격시험	•			
	온습도	내정상온습도시험	•			
기계적부하	진동	랜덤 진동시험	•			
		진동강도시험			•	
		공진점검증시험				•
	충격	충격시험	•			
화학적부하	염수	염수분무시험	•			
	내수	내수성시험	•			
	약품	내약품성시험	•			

○ 환경시험 - 환경시험으로는 기후적 부하에 의해서 온도 환경에서의 영향 정도를 평가하기 위한 시험목적으로 저온보전, 저온동작, 고온보전, 고온동작 시험이 있으며, 저온 및 고온 시동시험으로 대체하여 수행할 수도 있다. 또한 그 이외에 온도변화에 의한 열충격시험과 온습도 영향에 의한 내정상온습도 시험이 있다. 기계적 부하에 대한 환경시험으로는 자동차

내부 및 외부에서 복합적으로 발생하는 진동정도를 평가하기 시험으로 랜덤진동시험이 있으며, 도로표면과 사용자의 운전자 습관으로부터 오는 충격시험이 있다. 화학적부하에 대한 환경 시험으로는 염수, 내수, 약품에 노출되어 부식정도를 평가하기 위한 시험으로 염수분무시험, 내수성시험, 내약품성 시험이 있다.

○ 수명시험과 가속수명시험 - 수명시험과 가속수명시험으로는 고온동작내구시험이 있으며, 특히 수명시험의 경우에는 BLDC 모터의 특성과 적용시스템을 고려하여 취약부위를 선정해야 한다. 예를 들어 EC에 적용되는 BLDC 모터는 공기 압축기의 역할을 하며 고속회전으로 인하여 베어링이 마모되는 현상이 있다. 따라서 베어링에 대한 수명시험이 요구된다. 또한 EPS의 경우에는 운전자의 조향력을 보조해주는 장치로 저회전과 저전류를 사용하여 모터를 구동하고 있다. 이 경우에는 저전류로 인하여 저항의 증가를 야기 시켜 코일이 열화되는 현상이 발생한다. 따라서 코일에 대한 열적 내구수명시험이 요구된다. 또한 모든 BLDC 모터의 경우에는 영구자석의 재질에 따라 저온 및 고온의 영향을 받아 감자되는 현상이 발생하기 때문에 열적 내구수명시험이 요구되어 진다. 즉, BLDC 모터의 적용시스템의 특성에 따라 수명시험이 결정된다. <표 3>은 BLDC 모터가 적용되는 EC, EPS 시스템의 특성의 예를 제시하였다. 이 2가지 시스템 이외에도 다양한 시스템이 존재하며 많은 특성을 고려하여 시험을 수행해야 한다.

<표 3> BLDC 모터의 적용시스템 및 특성 예

적용시스템	EC(Electric Compressor)	EPS(Electronic Power Steering)
장착위치	 <p>Close to Engine</p>	 <p>Chassis</p>
출력특성	5kW : 15,000RPM@5.0Nm	800W : 2,500RPM@0.3Nm
	고속회전 → 마모특성	저전류 → 열특성
핵심부품	베어링, 영구자석	코일, 영구자석
특기사항	<ul style="list-style-type: none"> 엔진 근접부위 장착에 따른 열적환경이 고려 고속회전에 따른 마모특성이 중요 냉매의 영향(온도, 밀도, 속도 등)을 고려 	<ul style="list-style-type: none"> 안전에 대한 평가를 고려 외부의 기계적 충격에 의한 평가 요구

○ 초가속수명시험 및 안전시험 - 초가속수명시험으로는 기후적부하에 의한 저온 및 고온 작동 한계시험, 온도사이클시험이 있으며, 기계적부하에 의한 진동강도시험이 있다. 이 3가지 시험은 환경시험을 가속화하기 위한 시험으로 BLDC 모터의 취약부위를 도출하는데 있어

유용하게 사용될 수 있다. 안전시험의 경우에는 BLDC 모터가 적용되는 시스템을 고려해야 한다. 예를 들어 EPS의 경우에는 운전 중에 고장이 발생한다면 조향력이 저하되어 핸들의 작동 불능을 발생시켜 치명적인 영향을 줄 수 있다. 따라서 사용자의 안전과 직결되는 적용 시스템에 장착되는 BLDC 모터의 경우에는 공진점검증시험을 필수적으로 수행해야 한다.

4.3 시험기준 수립을 위한 요구사항 설정

신뢰성 시험 결정 이후에는 시험환경에 부합되는 시험기준을 설정해야 한다. 기존의 시험기준 수립을 위한 방법으로 입력 프로파일을 조사하고 규격비교 방법에 의해서 사용환경 프로파일을 도출하여 신뢰성 시험 기준을 설정하였다 박부회(2008). 이러한 방법은 시간과 비용을 절약할 수 있는 반면 조건의 정확성이 낮아 활용도가 낮다는 단점이 있다. 이 방법을 통하여 안전과 직결되는 시스템에 사용되는 BLDC 모터의 신뢰성 시험을 수행할 경우, 보증 및 평가에 대한 문제로 인하여 필드에서 발생하는 고장에 대처할 수가 없게 된다.

또한 자동차의 경우에는 적용 시스템의 장착위치가 다양하기 때문에 노출되는 환경 파라미터의 수준이 차이가 있다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 실사용 조건을 고려한 신뢰성 시험을 수행하고 있다 박부회(2007). 즉, 차량 시스템에서 센서를 통하여 수집된 실제 차량 데이터를 분석하여 정상적인 사용환경 프로파일을 생성하고 입력프로파일을 고려하여 신뢰성 시험을 수행하고 있다.

이러한 실차 데이터 분석을 통하여 정상적인 사용환경 프로파일을 적용하여 시험을 수행할 경우에는 사용자의 운전성향에 따라 부하의 영향 정도를 고려하지 않았다. 예를 들어 급가속을 자주하는 사용자의 경우에는 순간적인 진동, 충격, 과전압의 영향이 높을 수가 있다. 따라서 정상적인 사용환경 프로파일 이외에도 BLDC에 인가되는 부하의 형태를 과도적 시나리오 별로 구성하고 정상적인 환경프로파일과 정량화하여 시험을 수행해야 한다.

- 입력프로파일 - BLDC 모터에 인가되는 전류와 전압의 입력값의 프로파일을 의미한다.
- 사용환경 프로파일 - 자동차에서 수집된 실제 차량 데이터를 분석하여 정상적인 부하 프로파일 설정하여 시험조건 기준수립에 활용한다.
- 부하프로파일 - 사용환경 프로파일과 마찬가지로 다양한 상황의 실제 차량 데이터를 분석하여 과도적 프로파일을 생성하고 정량화 하여 기준수립에 활용한다.

예를 들어 BLDC 모터의 충격시험을 수행할 경우, 입력 프로파일은 기본적으로 12V이고 정상적인 가속도는 11m/s^2 , 시험시간은 500시간이라고 가정하자. 이 경우 과도적인 부하 프로파일 시나리오를 추가하여 50시간 마다 순간적으로 11m/s^2 이상의 가속도와 12V 이상의 입력프로파일을 인가하여 시험을 수행해야 한다. 따라서 본 절에서 제시한 입력 프로파일, 정상적인 사용환경 프로파일, 과도적인 부하 프로파일을 고려하여 위에서 결정된 신뢰성 시험의 시험기준을 수립해야 한다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 개발단계에서의 그린카 BLDC 모터의 환경시험, 수명시험, 초가속수명시험, 가속수명시험, 안전시험 평가항목을 개발하고, 시험기준을 설정하기 위해 고려되어야 하는 요구사항을 제시하였다.

서론에서 제시한 BLDC 모터의 신뢰성 시험에 대한 문제점을 다음과 같이 개선하였다. 그린카 BLDC 모터에 특화된 신뢰성 시험 항목을 개발함으로써 다양한 자동차 적용시스템에 사용할 수 있어 시간과 비용을 절약의 효과를 가져 올 수 있다. 또한 이러한 신뢰성 시험을 통하여 차후의 필드에서 발생할 수 있는 마모 및 우발 고장발생에 대한 개발 제품의 신뢰성을 보증할 수 있다. 그 결과 취약부위 및 문제점에 대한 개선점을 도출할 수 있어 완성차 조립 후의 고장발생을 예방하여 안전을 도모할 수 있다. 추후의 연구에서는 개발된 시험항목들의 시험조건을 수립하고 시험절차를 개발해야 한다.

참고문헌

- [1] 김영조, 신재화(2008), 소형모터, 보문당
- [2] 김한수(2005), 민감도 기법을 이용한 300W급 BLDC 전동기의 자극형상 최적설계 연구, 홍익대학교 석사학위 연구.
- [3] 박부희(2008), 유효성 평가에 의한 효과적인 신뢰성 시험 설계, 아주대학교 박사학위 연구
- [4] 박부희, 고병각, 김성진, 김진우, 장중순, 김광섭, 이해영(2005), 초소형 CMOS RF 전압제어발전기 IC 신제품 개발을 위한 신뢰성 평가 프로세스 개발, 한국경영과학회 춘계학술대회, 906-913.
- [5] 박부희, 장중순, 김기태, 양인범, 정기윤, 김성곤(2007), 실사용 조건을 고려한 하이브리드 자동차 부품의 신뢰성 시험 설계, 대한설비관리학회, 제12권 제2호, 95-107.
- [6] 신외경, 이수홍, 송영식(2005), 자동차용 냉각팬모터의 수명시험방법개발, 대한기계학회 추계학술대회
- [7] 신외경, 이수홍, 송영식(2006), 자동차용 와이퍼 모터의 신뢰성 수명평가설계 및 분석, 자동차공학회 추계학술대회, 1968-1973.
- [8] 이태구, 문중선, 유호선, 이재현(2005), 가속수명시험에 의한 고속팬용 밀폐구조형 BLDC 모터의 열신뢰성 분석, 설비공학논문집, 제17권 제12호, 1169-1176.
- [9] RS R 0005(2006), 자동차용 와이퍼 모터, 산업자원부 기술표준원
- [10] RS R 0008(2002), 자동차용 교류 발전기, 산업자원부 기술표준원
- [11] RS R 0010(2006), 자동차용 송풍기 모터, 산업자원부 기술표준원
- [12] RS R 0040(2006), 승용차용 윈도 모터, 산업자원부 기술표준원
- [13] RS R 0042(2003), 승용차용 냉각팬 모터 및 모듈, 산업자원부 기술표준원
- [14] RS R 0053(2005), 자동차용 시동전동기, 산업자원부 기술표준원

- [15] RS R 0067(2005), 자동차용 전동식 선루프, 산업자원부 기술표준원
- [16] RS B 0266(2009), 중형 팬 구동용 BLDC 모터, 산업자원부 기술표준원
- [17] GMW 3172(2004), General Specification for Electrical/Electronic Components Environmental/Durability, General Motors Company
- [18] IEC 60721(2002), Classification of environmental conditions - Parts 1 : Environmental parameters and their severities, International Engineering consortium
- [19] ISO 16750-1(2003), Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - General, International Organization for Standard
- [20] ISO 16750-2(2006), Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Electrical loads, International Organization for Standard
- [21] ISO 16750-3(2003), Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Mechanical loads, International Organization for Standard
- [22] ISO 16750-4(2006), Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Climatic loads, International Organization for Standard
- [23] ISO 16750-5(2003), Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment - Chemical loads, International Organization for Standard
- [24] SAE J1211(2009), Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules, SAE International
- [25] JH Hur, TG Lee, SA Moon, SJ Lee, H Yoo, SJ Moon and JH Lee(2008), Thermal reliability analysis of a BLDC motor in a high-speed axial fan by the accelerated-life test and numerical methods, Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung, 1355-1369.
- [26] KW Lee, JM Hong, SB Lee and ST Lee(2008), Quality Assurance Testing for Magnetization Quality Assessment of BLDC motors used in Compressors, IEEE Transactions on Industry Applications, 2452-2458.