

전기자동차용 전동식 워터펌프 해석

Analysis of Electric Water Pumps for Electric Vehicles

신동화^{1*}, 이병호², 정대환³

Dong-Hwa Shin^{1*}, Byung-Ho Lee², Dae-Hwan Jung³

〈Abstract〉

This paper is about an electric water pump used in an electric vehicle cooling system. An electric water pump is operated by a BLDC motor compared to a mechanical one, so it operates only as much as necessary, improving fuel efficiency. The use of an electric water pump reduces exhaust gas and has the advantage of being free to install, so it can be applied to automobiles, ships, and aircraft. In order to optimize the production of a BLDC motor used as an electric water pump, FEM and electromagnetic field analysis were performed. The dimensions and materials of the stator and rotor were selected by applying the values obtained through the analysis. In addition, the output characteristics of the motor were analyzed through parameter analysis and shape change through self-equivalent circuit analysis to reduce the outer diameter and increase the torque. The electromagnetic hazard of the PCB board was verified, and power integrity analysis was performed to reduce resonance and noise.

Keywords : Electric water pump, BLDC Motor, FEM, Electromagnetic field analyses, Power integrity analysis

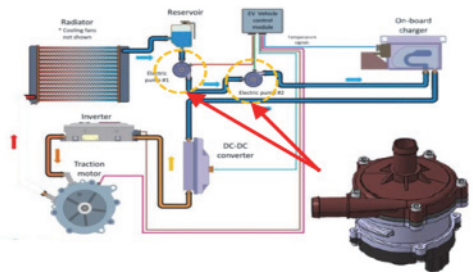
1* 정회원, 주저자, 한국폴리텍대학교 구미캠퍼스 전기과 교수 E-mail: sdh2@kopo.ac.kr	1* Author, Prof., School of Dept. of Electrical Engineering, Gumi Campus of Korea Polytechnic
2 정회원, 경남정보대학교 전기수소자동차과 교수 E-mail: lbh@eagle.kit.ac.kr	2 Prof., Dept. of Electrical Hydrogen Automotive Engineering, Information & Technology KyungNam College
3 정회원, (주)대길산업 연구소장 E-mail: dwjeong1971@naver.com	3 Company : Daegil Industry Address : 158-10, Gokcheongeomdan-ro, Ungchon-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea

1. 서론

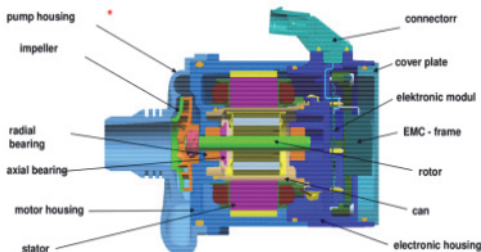
전기자동차의 구동 모터, 배터리 등의 온도를 설정 값 이하로 냉각하는데 필요한 전동식 워터 펌프는 내연기관의 냉각 시스템 이외에도 Hybrid Electric Vehicle[1], Electric Vehicle, Fuel Cell Vehicle 등과 같은 친환경 차량의 배터리 냉각[2]을 위해 많이 사용되고 있다. 기계식 워터펌프는 엔진에 의하여 동작을 하며 냉각수의 유량은 엔진의 회전수에 비례하여 동작하므로 과냉각 등의 문제가 발생 될 수 있다.

이에 반해 전동식 워터펌프는 모터로 동작되어 냉각에 필요한 냉각수가 필요한 만큼 작동이 되어 연료 효율이 3[%]이상 좋아지며 배기가스 배출량 또한 감소한다[3]. 본 논문에서는 전기자동차에 사용되는 전동식 워터펌프의 설계와 해석을 통하여 BLDC 모터의 기반기술의 초석이 되고자 한다.

Fig. 1은 전동식 워터펌프이다. 전동식 워터펌



(a) Electric water pump system



(b) Electric Water Pump

Fig. 1 Electric water pump for electric vehicles

프에 사용되는 BLDC 모터는 부품을 설치하는 위치가 자유로운 장점이 있어 자동차, 선박, 항공 등 다양한 부분에서의 적용이 가능하다.

2. 전동식 워터펌프 해석

전동식 워터펌프의 해석을 위하여 유한요소법을 이용한 방법과, 전자장 해석을 통한 방법을 이용하여 최적화 된 BLDC(Brushless Direct Current motor)의 해석 값을 찾기 위하여 연구하였다.

2.1 FEM 및 전자장 해석

Fig. 2는 본 연구에서 해석된 최고의 출력 향상을 위한 전동식 워터 펌프의 극과 슬롯이다. 모터 성능의 주요 인자로 작용하는 영구자석의 극수와 고정자 코어 슬롯은 기존 BLDC 모터에서 사용하는 일반적인 2극 3슬롯의 배수 조합이 아닌, 10극 12슬롯의 특수 조합을 사용함으로써 모터 출력을 106[%] 이상 향상 시킬 수 있었다.

또한 효율이 낮은 페라이트 마그네트는 영구자석이 회전자에 삽입되어 있는 IPM (Interior Permanent magnet Motor) Type의 ND 소결 마그네트를 사용하여 효율 향상과 신뢰성을 확보하였다.

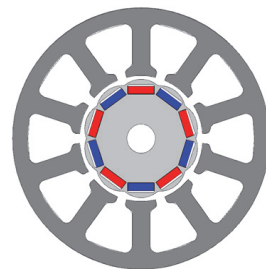


Fig. 2 Motor's pole and slot (10 pole 12 slots)

전동식 워터펌프에 사용되는 BLDC 모터는 Fig. 3과 같이 FEM 기법을 사용하여 전자계 해석을

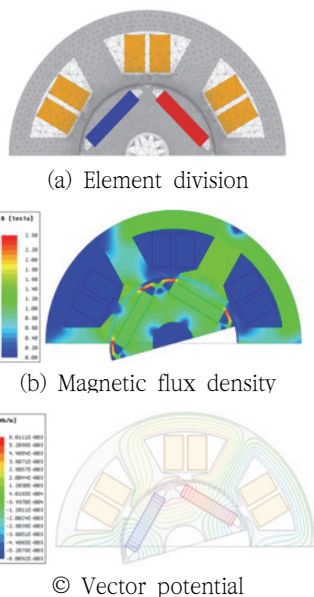


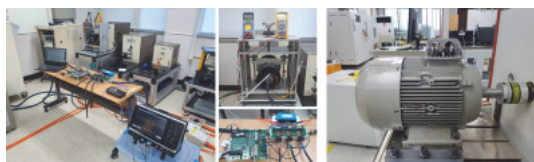
Fig. 3 FEM analysis

하였으며, 이를 통한 최적화를 통하여 초기설계 값보다 Stator의 점적율과 Rotor Core를 최적화 하였다.

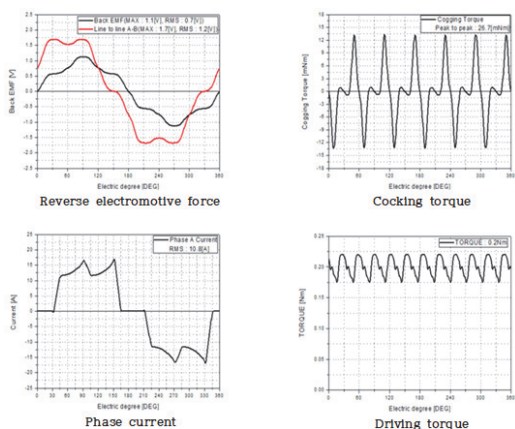
최적화 된 모터의 동력성능 평가는 Fig. 4의 모터 다이내모를 이용한 시험평가를 하였으며, Fig. 4(a)와 같이 제동형/능동형 다이내모 테스트 벤치를 이용하였으며, Fig. 4(b)의 토크와 역기전력의 값을 측정하였다.

내부 Stator 형상의 최적화 설계를 적용하여 점적율이 6[%]정도 증가하였으며, Rotor Core 및 Magnet의 전체 효율이 4[%] 증가하였다. 또한, 영구자석 및 코어, 권선 재질 특성을 반영하여 성능 해석을 예측할 수 있었다.

Table 1은 전자장 해석을 통한 설계 값의 최종 값을 나타낸 표이다. 모터는 Y결선으로 하였으며, 기존에 사용되는 모터에 비하여 Rotor는 IPM(내전형)으로 하여 회전자외경을 작게 할 수 있었



(a) Dynamo Test



(b) Power Performance

Fig. 4 Motor power evaluation

Table 1. Design through electron field interpretation

항목	구분	구분	60[W]	단위
Motor Ass'y	STATOR CORE	Air-Gap	1.4	[mm]
		외경/내경	60/26.8	[mm]
	STATOR Ass'y	적층 길이	15	[mm]
		CORE 재질	50PN470	
		슬롯수	9	[Slot]
	WINDING	슬롯 Opening	2.4	[mm]
		선경	0.94	[mm]
		상당 턴수	28	[Turns]
		결선법	Y	
ROTOR Ass'y	ROTOR CORE	WIRE 재질	AI-EIW	
		TYPE	IPM	
	MAGNET	외경	24	[mm]
		적층 길이	15	[mm]
		CORE 재질	50PN470	
MAGNET	극수	6	[mm]	
	재질	N38SH		
	Br	1.23	[mm]	

으며, 관성모멘트를 기존의 모터보다 작게 할 수 있었다.

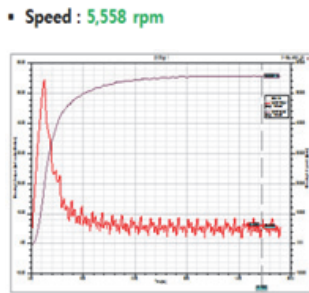
구동방식은 정현파 구동형과 구동파 구동형의 두 가지를 고려하였다. 정현파 구동형은 전기자 권선을 분포권으로 시행하여 정현적인 역기전력 분포를 가지도록 하며, 입력 전류의 스위칭을 정현파 형태로 행하는 방법으로 자극 위치를 검출하여 동기로 스위칭 하는 전력변환 소자에 의해 스위칭 함으로 이러한 것은 DC전동기 보다는 동기

기 혹은 유도기 회전자계와 유사한 동작이 된다.

반면에, 구형파 구동형은 두 개의 상에만 전류가 여자 되는 전기각이 120[°]로 통전하는 방식으로 역기전력은 보통의 구형파 또는 사다리꼴 형태를 취하게 되며, 이러한 역기전력 파형을 얻기 위하여 권선은 집중권으로 권선하였다.

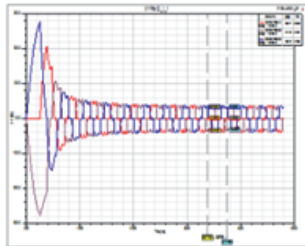
Fig. 5는 이러한 구동방식의 차이를 고려하여 정현파 구동형 또는 구형파 구동형의 분류에 따른 전동기의 역기전력 제어에 의한 정현파를 구현한 자가 등가 회로 법에 의한 자속선도 분석으로 해석한 결과 값이다.

기준에 사용되는 모터의 효율을 최댓값으로 도출하기 위하여 식(1)을 이용하여 해석하였다. 난류 모델은 K-E모델을 이용하였으며, 난류 운동에너지와 소산속도를 계산하고 난류 혼합 길이를 동적으로 찾아서 적용하였다.

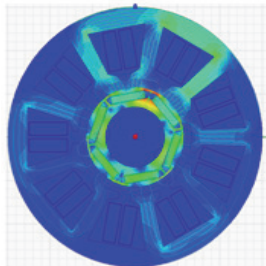


(a) Motor Speed

- Pk-Pk: 7.53 A
- RMS : 2.78 A



(b) Motor Current



(c) Vector saturation

Fig. 5 Back electromotive force control

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{m_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (1)$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$G_k = \mu_i \left(\frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i}, \quad G_b = -g_i \left(\frac{\mu_i}{\rho \sigma_k} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)$$

Fig. 6은 식(1)을 이용하여 해석한 고정자 및 회전자의 치수 값이다. 최종적으로 BLDC 모터의 권선 직경은 1.25[mm], 슬롯 당 19[turn], 상당 턴 수는 38[turn]이며, 고정자 외경은 60[mm]로 하였다.

Table 2는 BLDC 모터의 자가 등가회로 해석을 위한 방법으로 특성해석을 통한 파라미터 계산 및 성능분석을 한 것이다. 모터 해석은 기본 설계를 기준으로 해석을 진행 하였으며, 해석의 결과 로터 코어의 적층을 위한 리벳 홀이 마그네트 자로 경로에 영향을 미쳐 모터의 출력 손실을 가져오고

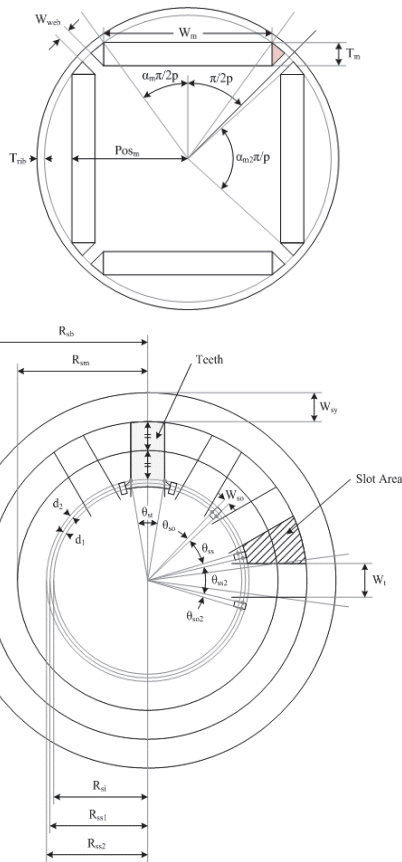


Fig. 6 Dimensions of stator and rotor

Table 2. Rotor partial analysis

항목	값
극수/슬롯 수	8/12
정격속도[rpm]	3000
정격토크[Nm]	1.0
영구자석 Br [T]	1.3
한상 당 턴[turn] 수	8
상 저항 [mΩ]	29

그에 따른 대책으로 로터 코어 형상 변경을 하였다. 모터 역기전력이 제어에 유리한 정현파의 구현을 초래 하였다. 모터 출력 특성을 해석하기 위하여 마그네틱의 두께별(4.0[t], 4.5[t]) 두 종류를 토크 대비 전류, rpm 분석 결과 둘 다 목표사양을

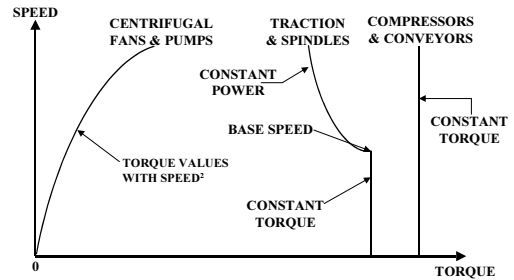


Fig. 7 Speed/torque characteristics for load

만족함으로 일반적으로 사용되는 모터보다 더 나은 4.0[t]로 최적화 하여 결정하였다.

BLDC 모터의 동작 특성을 이해하는 가장 빠른 방법은 Fig. 7의 Speed vs torque 곡선을 사용하는 것이다. 이 곡선은 구동되는 여러 가지 형태의 부하에서 전동기의 정상 상태 출력을 보여준다.

BLDC 모터의 특성곡선을 유추하기 위한 수식은 식(2)과 같이, 일정 속도에서 발생하는 토크와 전류 사이에는 다음과 같은 방정식이 성립함을 알 수 있다.

$$P_{out} = E \cdot I = \omega_m \cdot T [W] \quad (2)$$

식에서 $E[V]$ 는 선간 역기전력, $I[A]$ 는 공급 전류이다.

2.2 전력 무 결성 해석

전자파 유해성 검증을 위한 방법으로 전력 무 결성(Power Integrity) 해석을 하였다. 일반적으로 PCB 기판에서의 고주파 민감성에 영향을 미치는 공진은 그라운드 면과 파워 면 또는 그라운드 면 사이에서 발생하는 모드 공진을 말하며, 특정 주파수의 공진은 노이즈 결합 및 전자파 적합성(EMC) 문제를 유발하게 되므로 PCB 기판에서의 모드 공진과 노이즈 신호 주파수 사이의 관계를

해석하였다.

Fig. 8은 공진모드와 방사노이즈의 상관관계를 보여주는 파형이다. 층간의 공진 모드는 공진 주파수의 노이즈를 외부로 발산하거나 주변에 노이즈를 전달하게 하므로 공진 모드 분석을 통하여 발생 할 수 있는 공진 모드를 특정하여 EMI를 규제하는 대역에서 가능하면 공진 모드가 발생하지 않도록 해석 하였다.

PCB에서의 평판 공진은 주로 파워 면과 마주 보고 있는 그라운드 면과의 사이에서 발생하는 모드 공진을 말한다. 특정 주파수에서 마치 패치 안테나와 같이 동작하므로 이는 공진 주파수의 EMI를 유발하게 되므로 파워 면에 의한 공진이 동작 주파수 대역에서 잘 억제되도록 해석하여 설계 하는 것이 중요하다. 공진 해석 결과에서 특정 위치에서의 특정 주파수의 공진이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이와 같이 파워 면과 그라운드 면에 부품이 실장 된 상태에서의 공진을 예측하고 억제하는 것이 잠재적인 EMI를 줄이는 열쇠가 될 수 있었다.

또한, 공진 모드라는 것은 단지 신호가 인가되었을 때의 존재할 수 있는 모드를 나타내는 것이

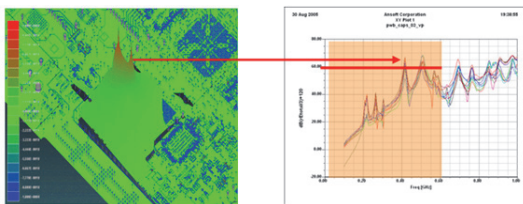


Fig. 8 Radiated Emission

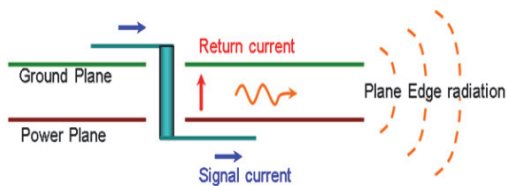


Fig. 9 Edge radiation on the PCB plane

므로, 실제로 신호를 인가시키는 경우를 살펴야 하는데, 예를 들어 내층에 라우팅하기 위해 비아(via)가 수직으로 지나가는 경우 층간의 공진과 커플링 되어 층의 내부에 공진 모드를 발생시키게 되고 이는 마주보고 있는 평판에서 표면파 형태로 PCB 최외각(edge)까지 전달되어 EMI를 발생하게 된다. 그러므로 신호가 지나가는 비아의 위치와 공진 모드의 분포를 확인하여 설계하였다.

Fig. 9는 공진모드와 PCB 평면에 의한 Edge radiation 이다. PCB 최외각(edge) 에서의 마주보는 plane에 의한 Edge radiation을 줄이기 위해 Power plane 은 Ground plane에 비하여 안쪽으로 plane면을 축소하여 들어가게 함으로써 최외각에서의 EMI를 10[dB]이상 줄일 수 있었다. 이때 내부로 들어가는 깊이는 마주보는 면 두께의 20 [배] (20h rule) 이상이 되도록 배치를 하였다.

2.3 DC IR Drop

DC 전압강하 시뮬레이션으로 빠르고 정확하게 전원에서의 전압강하와 전류밀도를 분석할 수 있다. DC IR Drop을 이용하여 전동식 워터펌프 제어 Board 면에 흐르는 전류와 Power의 분포를 알 수 있다.

Fig. 10은 워터펌프의 제어 보드 전류 분포를

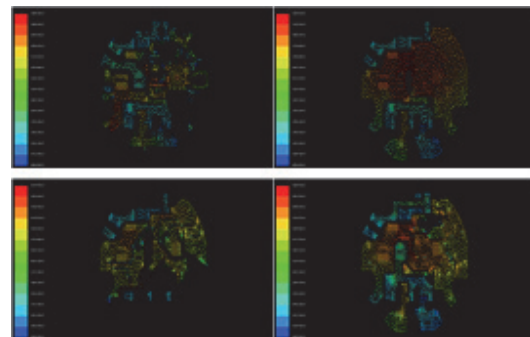


Fig. 10 Water pump control board current distribution

나타낸 것이다. Power plane은 그라운드 면과 마주보고 있어 평판 공진 모드에 의한 모드 주파수에서의 노이즈 특성을 가질 수 있으므로, 공진 주파수와 공진 모드를 확인하여 노이즈의 영향을 최소한으로 줄일 수 있도록 하였다.

그라운드 면과 파워 면은 보드의 외각 끝 부분에서 서로 마주 보게 되면 특정 공진모드 주파수에서의 신호 방사가 크게 되어 EMI 문제를 일으키므로, 파워 면을 그라운드 면에 비하여 안쪽으로 들어가게 축소하여 EMI에 대한 대비를 하였다. Fig. 10은 각 면에서의 전류 흐름을 나타내며, 이를 통하여 전류밀도와 방향을 분석할 수 있었다.

2.4 PCB 열 유동 해석

전동식 워터펌프 PCB의 열 유동 해석은 25[°C] 자연대류로 대기조건을 규정하였다.

Fig. 11은 전동식 워터펌프 PCB 부품을 설정한 것이다. 열 유동 해석을 위한 전자부품의 모델링을 먼저 하였다.

Fig. 12는 FEM 해석을 위한 격자를 생성한 것이다. 저항성분의 실제적인 저항 중 0.1[%]만 열로 변환된다고 가정하였다.

Fig. 13은 0.05[W], 0.7[W]일 때의 FEM해석을 통한 최적의 PCB 적합성을 찾기 위한 비교 그림이다. 전자과 적합성 검사를 통하여 회로 및 레이아웃을 최적화 하였으며, 신호 반사를 방지하고 필터링 기술을 사용하여 불필요한 노이즈를 제거하였다.

2.5 모터 구조 및 형상 설계

Table 1의 전자장 해석을 통한 설계 값을 보완하여 60[W]급 전동식 워터펌프용 BLDC 모터의 구조 및 형상을 설계하였다. Fig. 14는 Core 및 영구

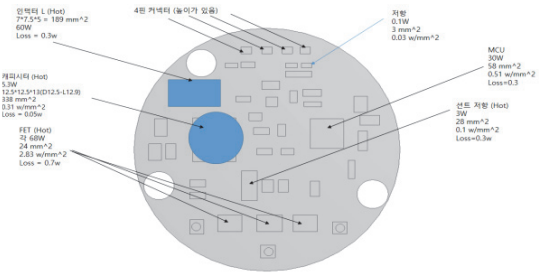


Fig. 11 PCB component setup

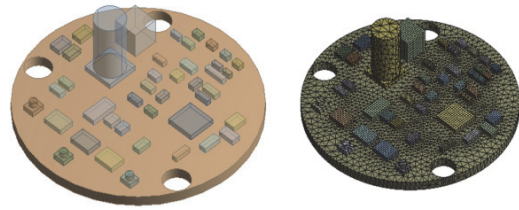


Fig. 12 Grid generation for FEM analysis

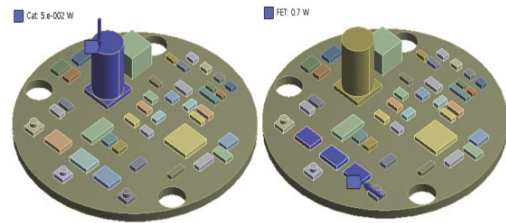


Fig. 13 0.05W(0.1%), 0.7W(0.1%)

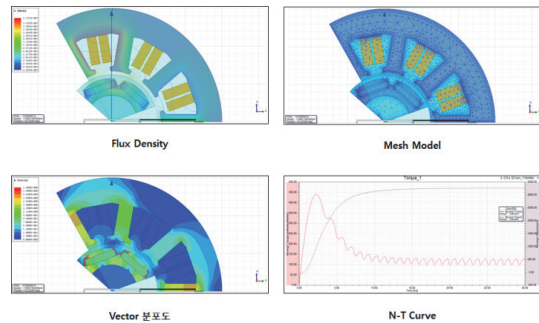


Fig. 14 Core and permanent magnet shape design

자석의 형상 설계에 사용된 전자계 해석도이다.

전자계 해석으로 모터의 전압은 13.5[V], 정격 전류는 6[A], 정격 토크는 1.5[kg·cm], 정격속도

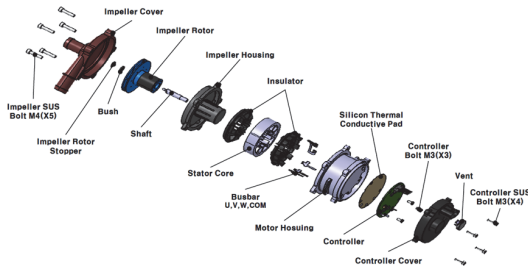


Fig. 15 Schematic diagram of BLDC motor

4,050[rpm]이 최적의 값이 된다는 것을 알 수 있었다.

모터의 전자계 해석은 순수한 모터의 성능을 나타내므로, 제어가 포함된 시스템의 구동상태에서는 성능차이가 일부 발생할 수 있다. 이러한 값의 원인은 제어기 효율의 영향으로 인하여 발생한다.

Fig. 15는 본 연구에서 해석되는 BLDC 모터의 개략도이다. 제어를 포함하고 있으며, 임펠러와 모터를 일체형으로 설계 하였다.

3. 결론

본 논문에서는 전기자동차에서 사용하는 전동식 워터 펌프의 전자장 해석과 최적화 된 효율의 극과 슬롯을 해석하였으며, FEM기법을 사용하여 고정자 및 회전자를 기존 사용 모터보다 점적율을 향상시켰다.

최적화 해석의 적용으로 동일 출력 대비 점적

율 6[%], 연료효율 3[%], 전체 효율 4[%], 모터출력 106[%] 상승과 마그넷 두께를 0.5[t] 정도로 치수를 줄일 수 있었다.

60[W]급에서 낼 수 있는 권선의 직경과 슬롯 당 턴 수 및 특성해석을 통한 파라미터 해석으로 동작 특성에 맞게 최적화된 출력을 낼 수 있도록 해석하였다. 추후 시제품을 제작하여 신뢰성 평가 및 성능평가를 통하여 다용도로 응용이 가능한 전기자동차용 전동식 워터펌프 BLDC 모터를 제작하고자 한다. 본 연구를 통하여 전동식 워터 펌프의 자립적인 기술개발의 초석이 되고자 한다.

참고문헌

- [1] S. K. Baek, and S. J. Park: "Thermal Analysis of a Battery Cooling System with Aluminum Cooling Plates for Hybrid Electric Vehicles and Electric Vehicles", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 3, pp. 60-67, (2014).
- [2] D. W. Lee: "Development of BLDC Motor for HEV Engine Cooling and Battery Cooling System," Transactions of KSAE, Vol. 23, No. 2, pp. 153-160, (2015).
- [3] H. J. Kim, H. K. Lee, S. D. Oh, C. W. Nam and C. B. Oh: "An Study on Fuel Economy and Emission Improvement of a Diesel Engine with Clutch type Electric Water Pump", KSAE 2015 Annual Spring Conference, pp. 240-243, (2015).

(접수: 2024.08.23. 수정: 2024.09.10. 게재확정: 2024.09.19.)