

## 상용차 팬 구동용 BLDC 모터 개발

### Developed a BLDC Motor for Driving a Commercial Vehicle Fan

신동화<sup>1\*</sup>, 이병호<sup>2</sup>

Dong-Hwa Shin<sup>1\*</sup>, Byung-Ho Lee<sup>2</sup>

#### 〈Abstract〉

This paper is the research result of designing and developing a BLDC motor for driving a condenser fan, which is widely used in air conditioners of commercial vehicles and specially equipped vehicles, and produced with a target value. The design of the motor was carried out in the order of designing the electric and magnetic circuits after determining the motor specifications. The process was repeated with different set values until the designed target condition was satisfied, and the electric and magnetic field distributions were made to be equal by reflecting the characteristics of the material. As a structural feature of the motor, it is a rotating field type composed of multipoles, and has a structure in which a permanent magnet is attached to the surface of the rotor. The manufactured BLDC motor is a 3-phase square wave driving method, with a rated voltage of 24 [V], a rotational speed of 2,500 [rpm], a rated current of 10 [A], and a power consumption of 180 [W]. A microcontroller for driving and controlling the motor was also manufactured.

*Keywords : BLDC Motor, Vehicles, A Rotating Field Type, Multipoles, Microcontroller*

---

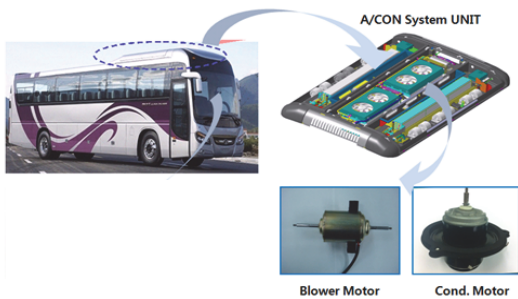
1\* 정회원, 주저자, 한국폴리텍대학교 구미캠퍼스 전기과 교수 1\* Author, Prof., School of Dept. of Electrical Engineering, Korea Polytechnic Gumi Campus  
E-mail: sdh2@kopo.ac.kr

2 정회원, 경남정보대학교 전기수소자동차과 교수 2 Prof., Dept. of Electrical Hydrogen Automotive Engineering, Information & Technology KyungNam College  
E-mail: lbh@eagle.kit.ac.kr

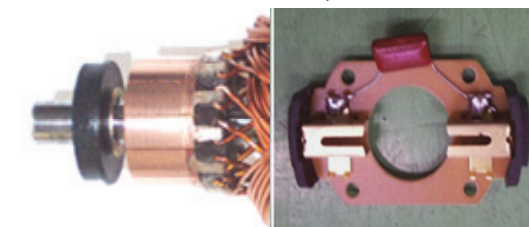
### 1. 서론

국내 버스에 설치된 에어컨 시스템은 지붕 위에 설치된 Roof On 방식을 많이 사용하며, 버스 차체의 공간 활용도 및 공력 저항과 소음 및 진동을 줄이기 위하여 증발기와 응축기가 일체화된 초박형 구조(Super Slim Structure)로 되어 있다. 기존의 버스에 사용되는 콘덴서 팬 구동용 모터는 Fig. 1과 같이 브러시를 사용하므로 정류기와 브러시의 마찰로 인하여 소음 발생과 함께 주기적인 교체가 필요하였다.

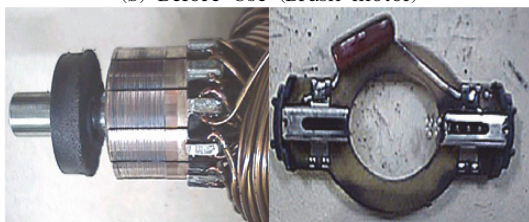
BLDC 모터는 산업 전반에 많이 사용되고 있으



(a) Bus Cooler System



(b) Before Use (Brush motor)



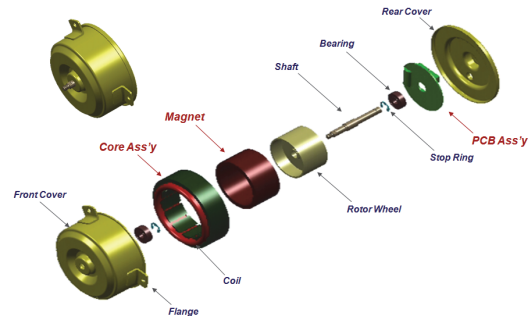
(c) After Use (Brush motor)

Fig. 1 Comparison before and after brush motor use

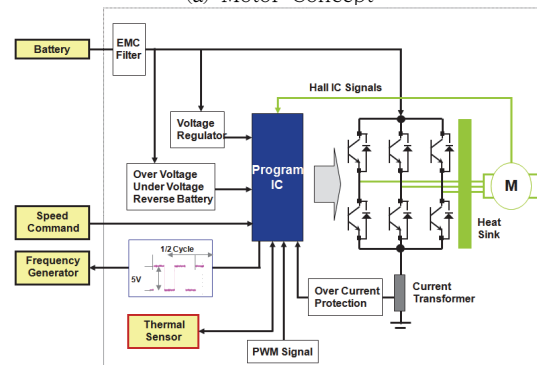
며[2-4], 본 연구에서 개발하고자 하는 콘덴서 팬 구동용 BLDC 모터는 브러시가 없으므로 구조가 단순해지고 모터 교체 주기의 증가 및 내구성 향상과 국산화로 인한 경제적 파급효과가 크므로 개발로 인한 이득이 크다.

### 2. BLDC 모터 설계

Fig. 2(a)는 개발하려는 국내 상용차에 사용되는 콘덴서 팬 구동용 BLDC 모터의 개념도이며 Fig. 2(b)는 제어 동작 개념도이다. 모터의 제어방식은 PWM 방식이며, Noise Level은 43[dB] 이하, 회전속도는 2500[rpm], 정격전압 24[V], 정격 전류는 10[A]으로 설계하고자 한다.



(a) Motor Concept



(b) Control operation concept diagram

Fig. 2 Motor and control concept diagram

콘덴서 팬 구동용 BLDC 모터의 구조적인 특징으로는 다극으로 구성된 회전 계자형이며, 직류전동기와 같이 속도/토크 특성이 선형적으로 감소하는 동작의 특징을 가지고 있다. 설계하고자 하는 모터는 발생 토크와 전류 사이에는 다음과 같은 방정식을 적용하였다.

$$P_{out} = EI = \omega_m T [W] \quad (1)$$

여기서  $E[V]$ 는 선간 역기전력이고  $I[A]$ 는 공급 전류이다. 역기전력  $E[V]$ 는 아래의 식 (2)와 같이 역기전력 상수  $k_E [V \cdot s/rad]$ 와 각속도  $\omega_m [rad/s]$ 의 곱과 같다.

$$E = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \Phi \cdot \frac{N}{60} = k_E \omega_m [V] \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 아래의 전류에 대한 토크 식(3), (4)로 표현할 수 있다.

$$T = \frac{P\Phi Z}{2\pi a} I = k_T I [N \cdot m] \quad (3)$$

$$T = T_{eff} + T_{loss} [N \cdot m] \quad (4)$$

식 (3)의 비례상수  $k_T [N \cdot m/A]$ 는 토크 상수이다. 이상적인 경우  $k_E = k_T$ 이다. 식 (4)는 전동기 축 상에 발생하는 유효 토크  $T_{eff} [N \cdot m]$ 와 무부하 손실 토크  $T_{loss} [N \cdot m]$ 의 합과 같다.

외부 공급 전압  $V_s [V]$ 는 역기전력과 전동기 권선의 전압 강하와 같으며 식 (5)와 같다. 식 (5)에 식 (2)와 (3)을 대입하여 식 (6)의 속도-토크 특성 곡선의 값을 얻을 수 있다.

$$V_s = E + RI [V] \quad (5)$$

$$V_s = k_E \omega_m + R \frac{T}{k_T} [V] \quad (6)$$

외부 공급 전압  $V_s [V]$ 는 역기전력  $E[V]$ 와 전동기 권선에서의 전압 강하  $RI$  그리고 두 개의 브러시와 정류자로부터 전압 강하  $V_b [V]$ 을 합한 식 (7)과 같다. 이 방정식은 만일  $V_b [V]$ 가 직렬로 연결된 두 개의 전력 소자 내의 전압 강하를 나타낸다면, BLDC 모터에도 적용된다.

$$V_s = E + RI + V_b [V] \quad (7)$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_{NL}} = 1 - \frac{T}{T_{LR}} = 1 - \frac{I}{I_{LR}} \quad (8)$$

식 (8)에서 무부하 속도  $\omega_{NL} [rad/s]$ 와 구속 토크(locked-torque), 혹은 정동 토크(stall torque)  $T_{LR} [N \cdot m]$ 은 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\omega_{NL} = \frac{V_s}{k_E} \quad (9)$$

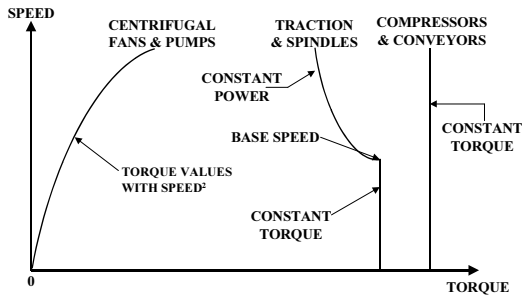
$$T_{LR} = k_T I_{LR} = k_T \frac{V_s}{R} [N \cdot m] \quad (10)$$

여기서,  $I_{LR} [A]$ 은 구속 전류(locked-stator current) 혹은 정동 전류(stall current)라 하며 이것은 권선 저항에 의해서 제한될 수 있다.

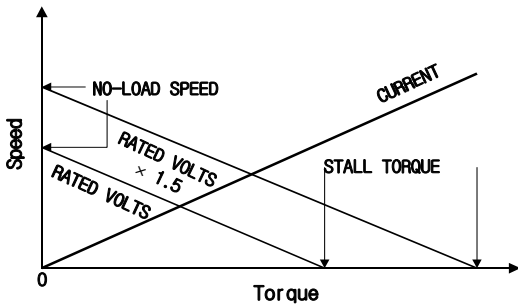
Fig. 3(a)은 BLDC 모터의 구동 특성이며 Fig. 3(b)은 속도-토크 특성곡선이다. 정격 운전은 Fig. 3(b)의 좌측 영역으로 제한한다.

이상적인 분석은 고정자 권선에서  $I^2R$  손실을 제외하고는 모든 손실의 효과를 무시하는 것으로 하였으나 추가적인 손실은 적층 철심에서 코어 손실(히스테리시스와 와전류), 풍손과 베어링 마찰손이 포함된다. Fig. 3(c)은 BLDC 모터의 전형적인 연속-단시간 운전 영역 특성을 보여준다.

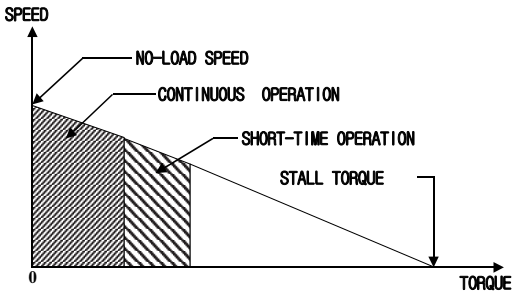
Fig. 4는 BLDC 모터를 구동시키기 위한 시스템의 구성도이며, Fig. 4(a)는 전동기의 권선이  $\Delta$  또는 Y 결선인 경우의 각 상의 단자 전압이 구동 드라이버의 H-bridge 회로에 연결된 상태를 나타



(a) Driving characteristics of BLDC motors



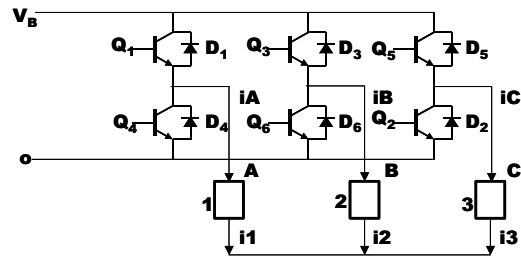
(b) Speed-torque characteristics



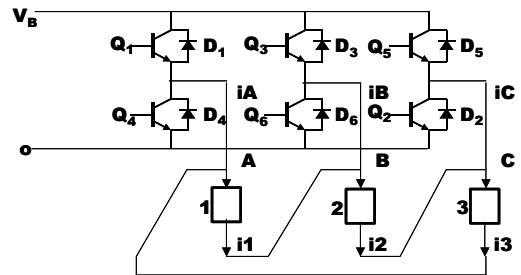
(c) continuous-short-time operation

Fig. 3 BLDC motor characteristics

낸 그림이며, Fig. 4(b)는 구동 방식에 따른 스위칭 순서도를 나타낸 것으로 상단은 구형파 구동, 하단은 정현파 구동인 경우의 스위칭 순서도 및 전류 파형이다. 3상 구형파 구동형 BLDC 전동기는 운전시 항상 두 상이 여자되므로 영구자석의 극성을 기준으로 회전자의 위치에 따라 위치 센서인 홀 센서를 이용하여 회전자의 위치 정보를 컨트롤러에 보냄으로써 각상의 여자 순서도를 이용하여 회전자의 회전을 가질 수 있

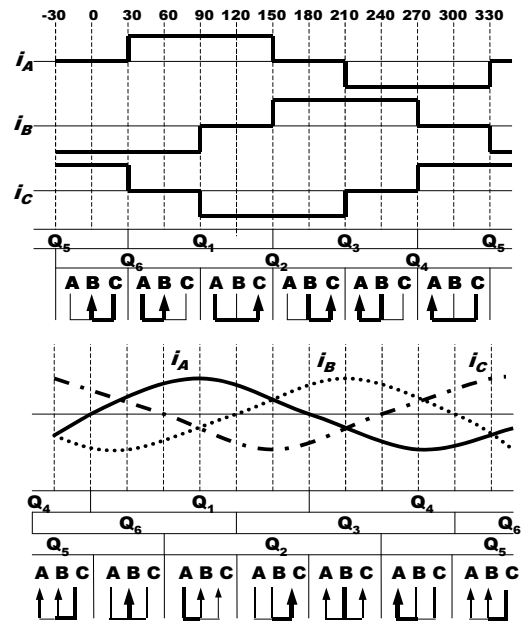


a : wye connection



b : delta connection

(a) Three-phase bridge circuit



(b) Current Waveform and Switching Flowchart

Fig. 4 BLDC motor system block diagram

다. 각 상간의 정류 각도는  $120^\circ$  마다 이루어지며, 전기각  $360^\circ$  에 대하여 6회의 스위칭 횟수

를 가짐을 알 수 있다. 스위칭에 의해 전기적인 주기당 여섯 번의 정류가 이루어지는 “Six-step drive”로 설계하였다.

BLDC 전동기에서 영구자석은 전동기의 성능을 결정짓는 중요한 파라미터 중 하나이므로 영구자석의 동작 특성과 함께 자기회로를 설계하였다. 자속을  $\Phi$ [Wb], 기자력을  $F$ [AT], 회로의 자기저항 및 그 역수인 퍼미언스를 각각  $R_m$ [AT/Wb] 및  $P$  라고 하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{F}{R_m} [Wb] \\ \Phi &= FP [Wb] \\ P &= \frac{1}{R_m} \left[ \frac{Wb}{AT} \right] \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 자기회로의 길이를  $L$ [m] , 단면적을  $S$ [m<sup>2</sup>], 자속밀도 및 자계를 각각  $B$ [Wb/m<sup>2</sup>] 및  $H$ [AT/m]라고 하면, 자속 및 기자력은 식(12)과 같으며, 자기저항 또는 퍼미언스는 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi &= BS [Wb] \\ F &= HL [AT] \\ R_m &= \frac{F}{\Phi} = \frac{LH}{SB} \left[ \frac{AT}{Wb} \right] \\ P &= \frac{S}{L} \frac{B}{H} \left[ \frac{Wb}{AT} \right] \end{aligned} \tag{12}$$

$$\tag{13}$$

여기서  $B/H$  는 자기회로를 구성하는 매체의 투자율이며, 이것을  $\mu$ [H/m] 로 놓으면 식 (14)가 된다.

$$\begin{aligned} R_m &= \frac{L}{\mu S} \left[ \frac{AT}{Wb} \right] \\ P &= \frac{\mu S}{L} \left[ \frac{Wb}{AT} \right] \end{aligned} \tag{14}$$

자기회로에 옴의 법칙을 적용하면 식 (15)와 같

이 표현된다.

$$P = \frac{\Phi}{F} \left[ \frac{Wb}{AT} \right] \tag{15}$$

자석의 단면적  $A_m$ [m<sup>2</sup>], 자석 길이  $l_m$ [m], 자석 내 감자력  $H_m$ [AT/m], 계자의 평균 단면적  $a_m$ [cm<sup>2</sup>] 이라고 하면 기자력은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= l_m H_m [AT] \\ \Phi &= a_m B_m [Wb] \end{aligned} \tag{16}$$

따라서 퍼미언스 계수는 식(17)과 같다.

$$p = \frac{B_m}{H_m} = P \frac{l_m}{A_m} \tag{17}$$

이 값은 외부 퍼미언스  $P$  를 자석의 단위 체적으로 환산한 값이다.

Table 1은 일반적인 영구자석 재질에서 평균 온도 계수 수치를 나타낸 것으로 Nd, Sm 계열의 영구자석은 온도가 상승할수록 보자력과 잔류 자속밀도는 감소하는 고온 불가역 감자특성을 가지며, 알니코 계열과 페라이트 계열은 잔류자속은 감소하고 보자력은 증가하여 저온 불가역 감자 특성을 가진다.

본 연구에서 개발하는 콘덴서 팬 구동을 위한 고

Table 1. Temperature coefficient according to type of permanent magnet

종류	$\alpha$ (%/K) 잔류자속	$\beta$ (%/K) 보자력
Nd-Fe-B	-0.13	-0.6
SmCo	-0.045	-0.25
Ferrite	-0.18	+0.4
Alnico	-0.02	+0.01

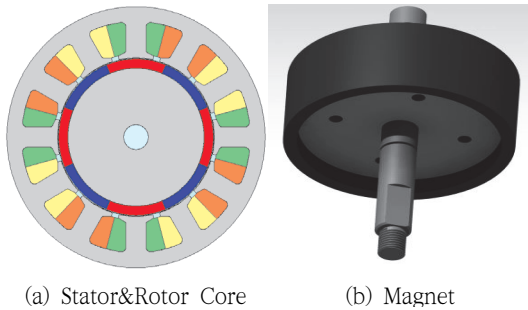


Fig. 5 Motor Design

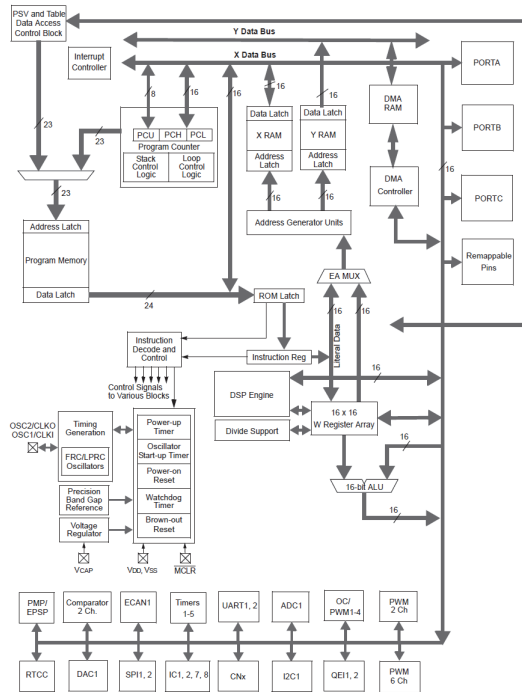


Fig. 6 Microcontroller block diagram

효율 고성능 팬 모터의 전동기는 3상 구형파 구동 방식으로 하고, 회전 계자형으로 영구자석이 회전자의 표면에 부착된 내전형SPM(Surface Permanent Magnet) 전동기로 설계하였다.

모터의 설계과정은 크게 부하 곡선의 추출로부터 모터 사양의 결정, 전기회로 및 자기회로의 설계 순서로 진행하였다. 모터의 구동 성능을 예측하여 모터의 설계 조건을 만족할 때까지 동일한 과

Table 2. Design target value

항 목	Unit	목표 사양
입력 전압 범위	V	DC 18~28
정격 회전수	RPM	2,500
정격 전류	A	10
정격 토크	kgf-cm	5.0
소음	dB	45
제어방식	-	3상 /PWM

정을 반복하였으며, 자성 재료의 특성을 반영하여 고정자 또는 회전자의 값이 만족하지 않는 경우 치수를 변경하여 적용하는 과정으로 진행하였다.

모터 부품의 최적화 설계로 Stator&Rotor Core 의 설계 결과 Fig. 5(a)와 같이 8극/12 슬롯으로 하였으며, Ring Type으로 설계한 Magnet은 Fig. 5(b)와 같다.

Table 2는 BLDC 모터의 설계 목표값이다.

또한, BLDC 모터를 구동 제어하기 위한 마이크로컨트롤러의 내부 블록선도는 Fig. 6과 같으며, 드라이브 전원 부품 및 파워 소자의 최적화 설계 및 선정을 위하여 다음과 같이 하였다.

- 1) 6채널 16bit 전동기제어 PWM 포트 3개의 듀티 사이클 발생기 및 16/11bit 해상도의 PWM 주파수(40MIPS)
- 2) 2채널 16bit 전동기제어 PWM 포트 1개의 듀티 사이클 발생기 및 16/11bit 해상도의 PWM 주파수(40MIPS)
- 3) 2상한 엔코우더 인터페이스 모듈로 상A, 상B, 인덱스 펄스 입력을 적용하였으며 위치측정 (×2 및 ×4) 모드로 하였다.

### 3. BLDC 모터 제작

목표한 설계값과 온도의 영향을 고려하여 제작

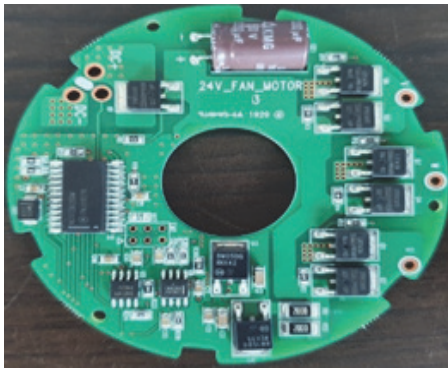


Fig. 7 Motor drive

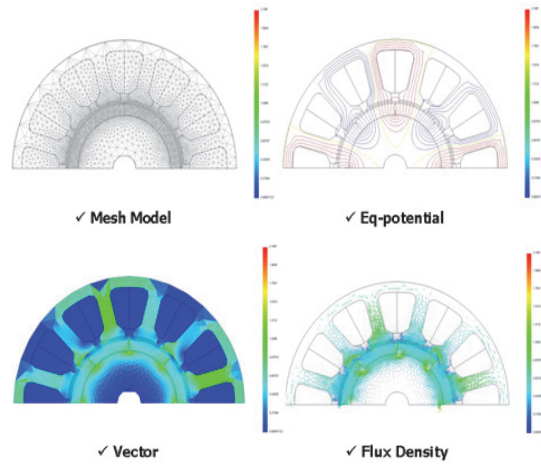
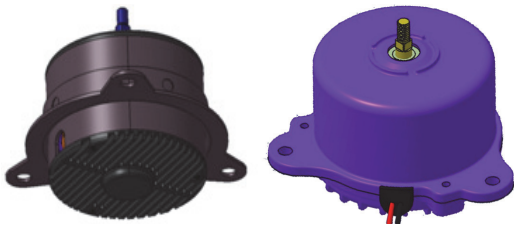
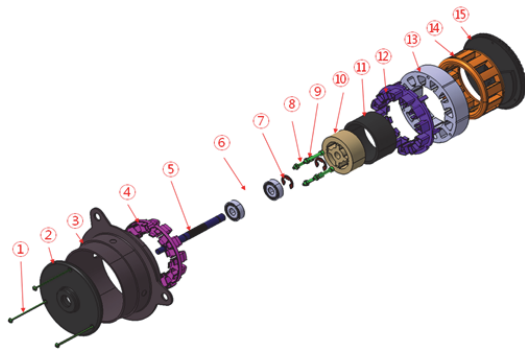


Fig. 9 Electromagnetic field analysis



(a) BLDC Motor appearance



(b) BLDC Motor Lay out

No	PART NAME	No	PART NAME
1	MAIN BOLT	9	ROTOR-NUT
2	COVER-TOP	10	ROTOR
3	ASSY-BRACKET	11	MAGNET
4	INSULATOR-UPPER	12	INSULATOR-LOWER
5	SHAFT	13	STATOR
6	BEARING	14	WIRE
7	E-RING	15	COVER-BOTTOM
8	ROTOR-BOLT		

Fig. 8 BLDC Motor

한 모터 드라이브는 Fig. 7이다.

최종 완성된 BLDC 모터는 Fig. 8과 같다.

BLDC 모터 설계 후 요소 분할 및 전자장 해석을 이용하여 모터의 전자장 분포와 자속의 분포를 해석한 결과는 Fig. 9와 같다. 계자와 전기자 두 계와 전기자의 권회수 등을 고려한 최적의 설계로 인하여 모터 전체적으로 균등한 전기장 및 자기장의 분포로 기존 브러시 모터의 단점을 보완한 모터가 제작되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 상용차 및 특장차 에어컨에 사용되는 콘덴서 팬 구동용 모터를 개발하기 위하여 BLDC 모터를 설계하였으며 모터를 구동 제어하기 위한 마이크로컨트롤러도 함께 제작하였다. 개발된 BLDC 모터는 구조적인 장점과 모터의 동력변환 효율의 개선 및 속도의 정밀 제어, 부하에 따른 가변 제어와 연비 개선의 기술개발 효과를 기대할 수 있다. 본 연구로 인하여 브러시리스 모터 관련 기술의 국산화 기술 우위의 확보 및

BLDC 모터의 적용으로 인한 국내 상용차 및 특장차의 에어컨 시스템 기술의 선진화와 수입대체 및 대외 기술 의존 탈피가 가능하게 될 것으로 사료 된다.

### 참고문헌

- [1] M. Kim: "A Numerical Simulation of a Roof Spoiler for Aerodynamic and Air-conditioning Performance Improvement in a Large-sized Bus," The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 26, no. 5, pp.590-597, (2018).
- [2] T. K. Jung, and S. Y. Lee: "Development of BLDC Motor Driven Cryogenic Thrust Control Valve for Liquid Propellant Rocket Engine," The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 38, no. 10, pp.107-114, (2010).
- [3] D. Y. Kim: "Developing Unity BLDC motor controller adding TCP/IP for Vapor Recovery Syst," Korea Information Electron Communication Technology, vol. 3, no. 4, pp.3-9, (2010).
- [4] T. J. Lho, S. H. Lee. and M. Y. Park: "Development of 2-Axis Solar Tracker with BLDC Motor-Cylinder Actuator and Hall Sensor Feedback," Korea Academy Industrial Cooperation Society, vol. 11, no. 7, pp.2334-2340, (2010).

---

(접수: 2022.05.19. 수정: 2022.06.10. 게재확정: 2022.06.16.)