

자동차 고전압 장치용 전동 모터 개발에 관한 연구

김병우*, 허진*

A Study on Development of Electric Motor for High Voltage Automotive System

Byeong-Woo Kim* and Jin Hur*

ABSTRACT

A lot of conventional automotive components driven by mechanical power source are being replaced with electrical ones to comply with the demands of market and customer, therefore the amount of electric energy used in a vehicle will be increased continuously. The increment of electric power demand causes interest on new higher power system such as 42V Power Net, and furthermore necessity for development of energy storage device is highlighted recently. This paper present the design of the BLDC motor for electric air-conditioner in 42V system and compare with the characteristics of several type BLDC motor.

Key Words : 42V Air-conditioner (42볼트 공조기), Compressor (압축기), SPM (표면 부착형 영구자석 전동기), IPM (매입형 영구자석 전동기), Electric power steering (전동식 조향장치)

1. 서론

지구 환경 오염이 급격하게 진행되면서 세계적으로 이에 대한 연구가 급속히 진행되고 있다. 자동차 분야에 있어서 친환경과 에너지 저감이 가능한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다.¹ 이의 대표적인 예로서 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차를 들 수 있는데, 여기에 적용되는 전압체계는 200에서 500V를 적용하고 있다. 자동차에 대한 전압체계가 기존 12V에서 고전압 체계로 발전됨에 따라서 새로운 전동 부품 및 장치가 등장하기 시작하였다. 예를 들어, 일체형 시동 및 전원공급 장치

(Integrated starter & generator:ISG), 전기자기식 엔진 밸브(Electro-magnetic valve:EMV), 차량 제어 성능 향상과 에너지 저감을 위한 전동식 조향장치 (Electronics power steering:EPS), 전동식 워터펌프, 브레이크 바이 와이어(Brake-By-Wire), 스톱 바이 와이어(Throttle-By-Wire)는 물론이고 성능개선 및 편의성 향상을 위한 전동식 공조기 등이 등장하고 있다. 기존 기계식 장치를 전동식 장치로 대체하는 차체 및 샤시 부분의 전동 구동기 체계는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 앞서 언급한 고전압(200에서 500V)을 직접 이용하거나 이를 적절한 전압(12, 24, 42V)으로 제어하여 활용하는 방법이

접수일: 2007년 6월 13일; 게재승인일: 2007년 11월 23일

교신저자 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

E-mail: bywokim@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-1287

* 전자부품연구원 정밀기기연구센터

있다.¹ 전자의 방법은 에너지 효율성 측면에서 유리하나 감전사와 같은 치명적인 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 차체 및 샤시 장치 등에는 적용되지 않고 있는 실정이다. 후자인 경우, 전압 강하를 위한 변환기 등이 추가되어 비용이 상승하는 문제가 있으나 감전사를 예방할 수 있기 때문에 국제 표준(ISO)으로 제정되어 일부 상용화가 진행되고 있다. 본 연구에서는 자동차 고전압 추세에 대응할 수 있는 고전압(42V) 기반 전동 모터를 설계. 제작하여 자동차에 적용되는 고전압 모터의 설계 기준을 제시하고 실제 응용 장치에 적용 가능성을 확인하고자 한다. 본 연구에서 적용하고자 하는 응용 분야는 공조용 압축기를 선정하였다. 자동차 에어컨을 기계식으로부터 전동식으로 변환함으로써 발생하는 장점은 팬 벨트에 의존하는 장치를 제거함으로써, 장착 유연성 확보가 가능하기 때문에 차체 설계에서 중요한 자유도를 갖게 된다.

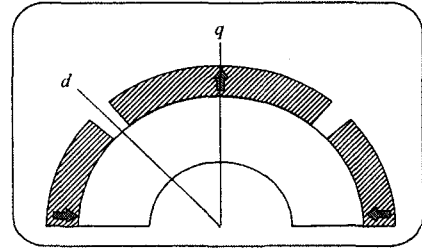
현재 일반적으로 적용되어 사용되고 있는 자동차용 팬 모터와 달리 공조용 모터는 부하조건이 크게 다르므로 운전특성을 고려한 부하산정 및 적용 대상에 따른 부하특성을 파악하여야 한다. 이와 함께, 에너지 저장장치의 수명/충전상태에 따른 전압 변동을 고려한 모터적용 및 설계연구가 시행되어야 한다. 일반적으로 가전 및 일반 산업용에 적용되는 BLDC 모터는 이미 다양하게 개발되어 사용되고 있다. 그러나, 자동차용에 적합한 12V BLDC 모터 적용은 초보적 수준에 머물러 있다. 특히, 42V 전압 체계에 적합한 BLDC 모터 설계 기술은 최근 연구가 활발하게 진행되고 있는 초보적 수준에 머물러 있다.² 현재 차량용 전기모터로서 차량에 적용되고 있는 브러쉬 모터가 정류자와 브러시의 존재로 인해 고효율화에 한계가 있고 소음이 크며 내구성의 한계 및 전자기적 잡음이 문제가 되기 때문에 본 연구에서는 BLDC 모터를 대상으로 설정하였다.

따라서 본 논문에서는 차량용 에어컨에 적용할 수 있는 고효율 구동이 가능한 표면 부착형 영구자석 전동기(SPM) 형태의 BLDC 모터를 설계하고 그 특성을 분석하고자 한다.

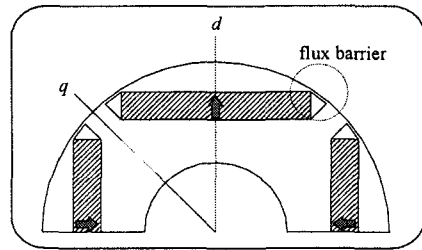
2. BLDC Motor의 기본설계

영구자석을 이용한 BLDC 모터는 자기회로를 구성하는 영구자석과 회전자의 형태에 따라 Fig. 1과 같이 크게 표면 부착형 영구자석 전동기와 매입

형 영구자석 전동기(IPM)로 분류된다.



(a) Surface mounted permanent magnet



(b) Interior permanent magnet

Fig. 1 Structure of permanent magnet motor

전동기의 회전자는 영구자석 표면 부착형 로터를 기준으로 하고 고정자는 전철 집중권과 돌극 집중권을 각각 조합하여 설계 및 특성해석을 수행하였다. SPM 형의 BLDC 모터 설계를 위한 설계 제원은 국내 완성차업체(H사) 사양을 기준으로 하였는데, Table 1과 같다.

Table 1 Design specifications

Item	Data
Voltage	42[V]
Speed	6,400[rpm]
Load	38[kgfcml]
Max. speed	8,500[rpm] at 38[kgf-cm]
Load pattern	constant
Driving mode	3phase bipolar(six step 120°)

SPM 모터의 설계 방법으로는 등가자회로법과 유한요소법을 병행하여 극당 자속을 계산하였다. 등가자기회로법에 의한 BLDC 모터 설계과정은 장하비 M 의 결정으로부터 전기장하와 자기장하를 분배하여 자기회로를 설계하였으며 특성해석은 먼

저 자기회로 해석으로부터 회로정수(L, Ke, Kt)를 산정한 후 수행하였다. 자기회로 특성은 등가자기회로법을 이용하여 해석하였으며 특성해석은 등가자기회로법으로 산정한 회로정수를 전압방정식에 결합하여 수행하였다.

2.1 자기회로 설계

등가자기회로법에 자기회로 해석 및 회로정수 산정은 등가자기회로 해석으로부터 공극자속을 영구자석의 동작특성과 외부자기회로로부터 결정한다. 영구자석의 2상한 감자특성과 퍼미언스 선도를 Fig. 2에 나타내었다. 영구자석의 무부하 동작점 자속밀도 B_m 은 퍼미언스계수 P_c 로부터 결정된다. 퍼미언스 계수 P_c 와 자속의 연속성으로부터 공극자속밀도 B_g 는 식(1), 식(3)과 같다. 여기서 A_g 는 공극의 단면적, A_m 은 영구자석의 단면적이며 f 는 누설계수로써 등가자기회로 해석에서는 1.05로 하였다.^{3,6}

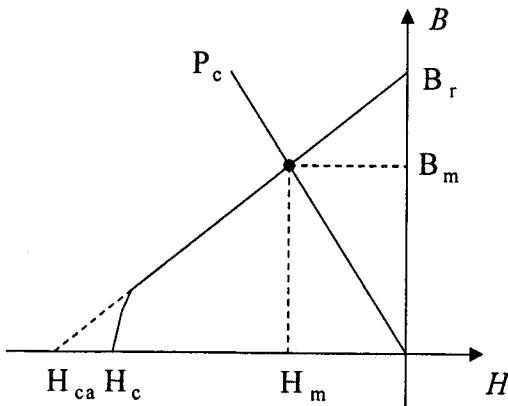


Fig. 2 B-H characteristics of permanent magnet

$$P_c = f \frac{l_m}{A_m} \cdot \frac{A_g}{l_g} \cdot \mu_0 = \frac{B_m}{H_m} \quad (1)$$

$$B_m A_m = f B_g A_g \quad (2)$$

$$B_g = \frac{B_m A_m}{f A_g} \quad (3)$$

공극자속으로부터 기전력 및 토크, 리액턴스 상수는 다음과 같다. 해석모델의 구동방식은 3상

바이폴라 구동방식이다.

$$K_T = \frac{1.6554}{9.8} p K_w \cdot w \Phi_g \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$K_E = \frac{\pi p K_w \cdot W \Phi_g}{30} \times 10^{-8} \quad (5)$$

$$K_X = \frac{\pi^2}{89.2} \cdot \frac{\Phi_g}{F_m} (K_w \cdot w)^2 \times 10^{-8} \quad (6)$$

여기서, p 는 Pole Pair이며, K_w 권선계수, W 는 상당 직렬 도체수이고 F_m 은 영구자석의 감자 기자력이다. 전기자 권선의 저항은 아래 식들과 같다. 분포권인 경우 식(7)과 같고 집중권인 경우는 식(10)과 같다.

① 분포권

$$R_a = \frac{2\rho(t)\omega}{a q_a} \left(4.2(D_a + t_h) \frac{S_c}{S_n} + L_a \right) \times 10^{-2} \quad (7)$$

$$R_a = (1.0 \sim 1.1) \cdot R_a \quad (8)$$

여기서 a 는 병렬회로수, D_a 는 전기자 직경, S_n 은 총 슬롯수, S_c 는 권선 피치, t_h 는 슬롯 깊이이며 L_a 는 전기자 축 방향 길이이다. 도체직경 q_a 과 저항률 $\rho(t)$ 는 다음과 같다.

$$q_a = \pi \cdot d_c^2 / 4 [mm^2] \quad (9)$$

$$\rho(t) = (0.00376t + 0.873) / 55 \quad (10)$$

② 집중권

$$R_a = \frac{2\rho(t)\omega}{a q_a} \left(\frac{C\pi D_a}{(6-m)p} + L_a \right) \times 10^{-2} \quad (11)$$

$$C = 0.6 \sim 1.0$$

구속 시 상전류 및 토크는 식(12), 식(13)이다.

$$I_s = (V_s - V_d) / R [A] \quad (12)$$

$$\tau_s = K_T \cdot I_s - \tau_0 [kg-cm] \quad (13)$$

여기서, V_d 는 구동기의 전압 강하이고 τ_0 는 무부하

손실토크이다. 또한, 무부하 상전류 및 회전속도는 다음과 같다.

$$I_0 = \tau_0 / K_T \quad [A] \quad (14)$$

$$N_t = V_t / K_E \quad [rpm] \quad (15)$$

$$N_0 = N_t \times \frac{\tau_s}{\tau_s + \tau_0} \quad [rpm] \quad (16)$$

3상 바이폴러 구동방식의 BLDC 모터 특성은 다음과 같다.⁷

$$I_s = (\tau + \tau_0) / K_T \quad [A] \quad (17)$$

$$N = N_t \times \left(1 - \frac{\tau + \tau_0}{\tau_s + \tau_0}\right) [rpm] \quad (18)$$

$$P = 1.027 \times \tau \times N \times 10^{-2} [W] \quad (19)$$

$$V_s = \sqrt{(E_0 + RI)^2 + (XI)^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{IX}{(E_0 + RI)} \quad (20)$$

$$W_e = 2 \times V_s I \cdot \cos \varphi \quad (21)$$

$$\eta = P / W \quad (22)$$

저온 불가역 감자를 고려한 상전류의 한계치는 식 (23)와 같다.

$$F_n(t_L) = \frac{2p(l_m + K_c) H_n(t_L)(\mu_r + \alpha p_u - B_r(t_L))}{0.4\pi \alpha_i m k_w \omega \alpha p_u}$$

$$\alpha_i = p \frac{\phi}{\pi} \quad (23)$$

여기서 λ 는 기자력 손실계수, K_c 는 carter's 계수이고 σ 는 누설계수다. 저온 구속시의 자석 동작점은 식(24)과 같다.

$$H_{d \cdot \max} = \frac{B_r(t_L) + \sigma p_u \cdot H_n \cdot \max}{\mu_r + \sigma \cdot p_u} \quad (24)$$

$$H_n \cdot \max = \frac{0.4\pi \alpha_i \cdot m \cdot k_w \cdot \omega I_s^*(t_L)}{2p\lambda(l_m + K_c \cdot l_g)} \quad (25)$$

$$H_{d \cdot \max} \leq H_n(t_L) \quad (26)$$

Table 2는 상기 이론에 기초한 설계결과를 나타내고 있다.

Table 2 Design results of SPM motor

Item	Data	Item	Data
Pole	6	Stator length	36 [mm]
Constant	3	Stator out. length	114 [mm]
Slot number	18	Slot opening	2 [mm]
Stator inner length	62 [mm]	Air gap length	1 [mm]
Tooth width	4.5 [mm]	Rotator out. length	60 [mm]
Slot height	17.4 [mm]	Rotator length	36 [mm]
Stator yoke width	8.6 [mm]	Permanent magnet	
Serial conductor No.	12	Magnetic density	1.2 [T]
Conductor distance	4.63 [mm]	Magnetization	Radial
Current	90 [A]	Mag. direction length	4 [mm]
Current density	5.35 [A/mm ²]	Permanent magnet length	36 [mm]
Space factor	40 [%]	Magnet pole angle	47°

2.2 등가자기회로법에 의한 해석

SPM 형태 전동기의 등가회로 해석에 의한 설계 결과를 다음에 나타내었다. 정격속도는 6400[rpm], 일정 토크 부하의 최대속도는 8500[rpm]이고 전원은 DC 링크단 전원이 42[V]이므로 속도 증가는 PWM 전압의 듀티 비율을 이용한다. 따라서 정격에서는 32[V]의 전원으로 해석하였으며 최대속도에서는 40[V] 전원을 가정하여 특성해석을 실시하였다. Fig. 3, 4는 속도에 따른 전류 및 토크 특성이고, Fig. 5는 속도에 따른 출력특성을 나타내었다. 해석결과 설계된 SPM형 전동기는 42[V]에서 38[kgfc_m]의 부하로 운전할 수 있는 최대속도는 8270[rpm]으로 설계목표치인 8500[rpm]에는 2.7[%] 차이가 나지만 해석 정밀도를 고려한다면 매우 근접된 설계가 수행되었음을 알 수 있었다.

2.3 유한요소법에 의한 해석

초기 설계된 SPM 전동기의 특성을 유한요소법을 이용하여 모터 특성을 분석하였다. SPM형전동기의 등 포텐셜 분포도를 Fig. 6에 나타내었으며 영구자석만 여자한 경우의 공극의 자속밀도 특성을

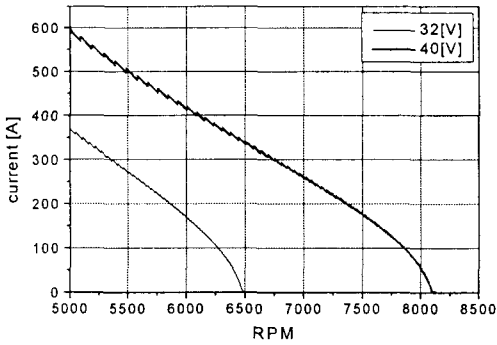


Fig. 3 Current characteristics as a function of velocity

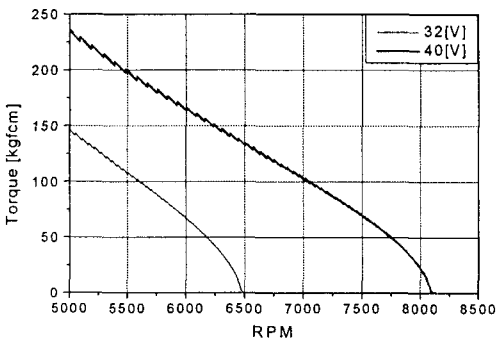


Fig. 4 Torque characteristics as a function of velocity

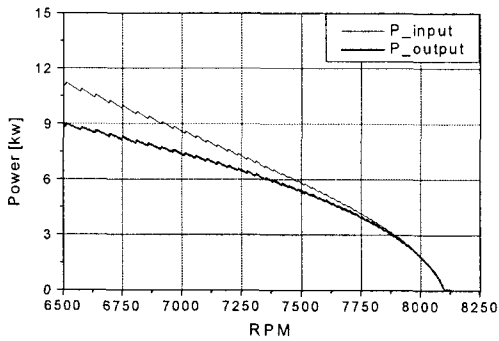


Fig. 5 Power characteristics as a function of velocity(40[V])

Fig. 7에 나타내었다. 치 자속밀도의 경우 약 1.83[T]로 극심한 포화가 발생함을 알 수 있다. 따라서 전동기 설계의 보완을 위해서는 회전자 및 권선의 제원은 동일하게 두고 치 자속을 줄이도록 설계해야 함을 알 수 있다. 초기 설계된 SPM 전동기

의 역기전력 및 운전 중의 역기전력 특성을 Fig. 8, 9에 나타내었다. 해석결과 역기전력은 13.9[V]로 등가회로 해석의 15.7[V]와 비교하여 10[%]의 오차가 발생하였다. 이는 치 부분의 포화에 의한 자기저항이 증가한 영향으로 유한요소 해석의 결과를 이용

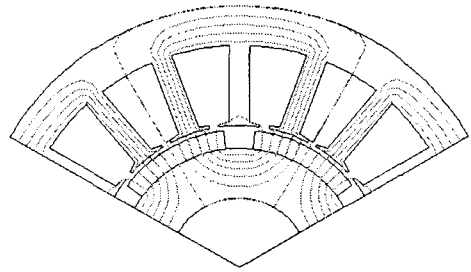
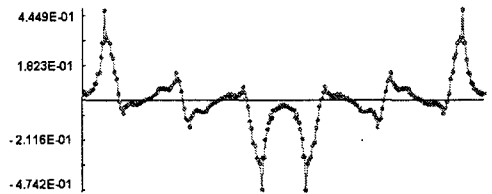
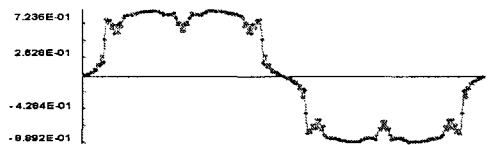


Fig. 6 Equivalent potential diagram of permanent magnet



(a) Tangential case



(b) Normal case

Fig. 7 Magnetic density of air gap at permanent magnet

한 속도-출력 특성해석이 요구됨을 알 수 있었다. Fig.10과 11은 96 [A]의 구형과 전류 인가 시 토크 특성을 나타내었다. 96[A]인가 시 발생토크는 41 [kgfcm]로 설계목표치를 만족하고 있다. 유한요소 해석의 결과를 이용하여 속도-출력 특성을 해석한 결과를 Fig. 12에서 15에 나타내었다. 이때 역기전력 상수는 유한요소 해석의 결과는 K_e 가 0.002172[V/rpm]이며, 등가자기회로 해석에 의한 역기전력 상수는 0.002453[V/rpm]이다. Fig. 16은 모터

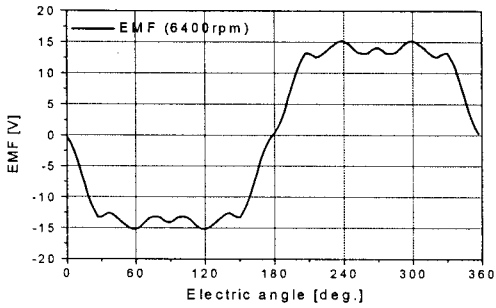


Fig. 8 EMF characteristics at no load condition (6400rpm)

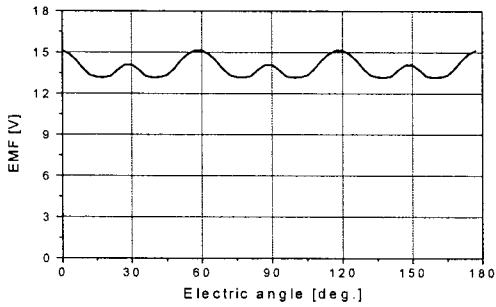


Fig. 9 EMF characteristics at operating condition (6400rpm)

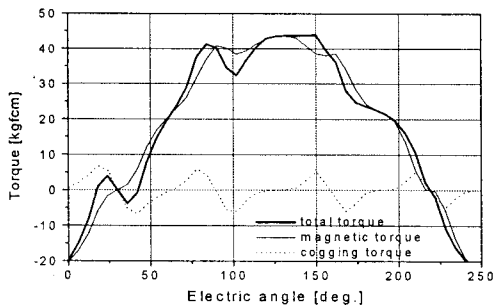


Fig. 10 Torque characteristics as a load angle

속도가 가변 될 때, 발생되는 모터 효율을 나타낸 것이다. 이때 출력은 3.46[kW], 효율은 92[%]로서 설계목표치를 잘 만족함을 알 수 있다. 이 결과는 철손이 없다는 조건의 결과이기에 손실 및 온도 상승의 문제를 해결하기 위해서 철심의 포화 정도를 낮추는 설계가 이루어져야함을 알 수 있다. 초기설계에서 전동기 특성은 요구사항을 만족하나 치의 포화에 의한 철손의 증가로 부터 효율 감소 및 전

동기 온도상승의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 회전자 및 권선의 제원은 동일하게 두고 치 폭을 증가시켜 치 자속을 감소하도록 고정자의 수정 설계가 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 치 자속밀도는 1.5[T], 고정자 요크 자속밀도는 1.2[T], 권선 점적 비율이 35[%]가 되도록 치 폭 및 슬롯 단면적을 변경하여 설계하였다. 이 같은 설계 변경을 통하여 얻어진 SPM 모터의 위치에 따른 코깅 토오크 특성을 Fig. 17에 나타내었다.

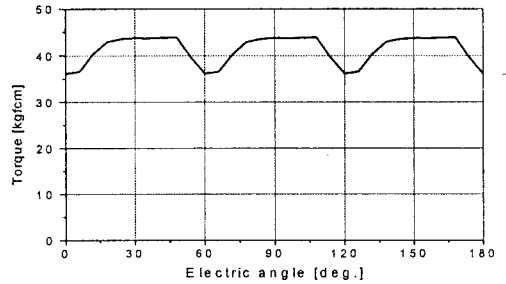


Fig. 11 Commutation torque as an load angle

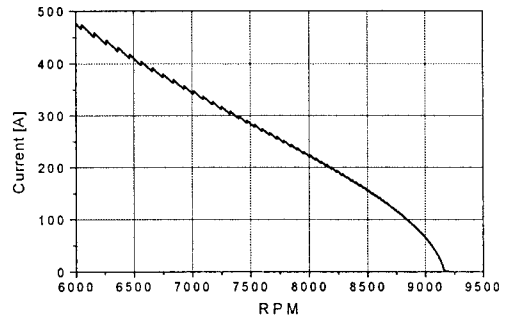


Fig. 12 Current characteristics as a velocity

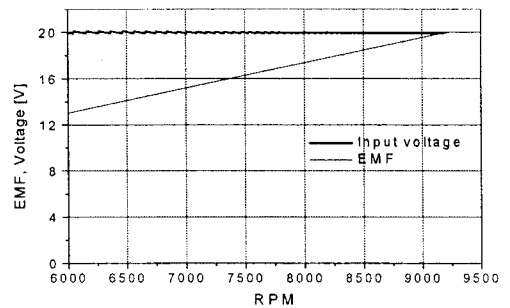


Fig. 13 Voltage and EMF as a velocity

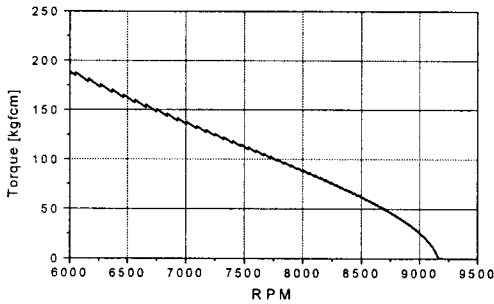


Fig. 14 Torque characteristics as a velocity

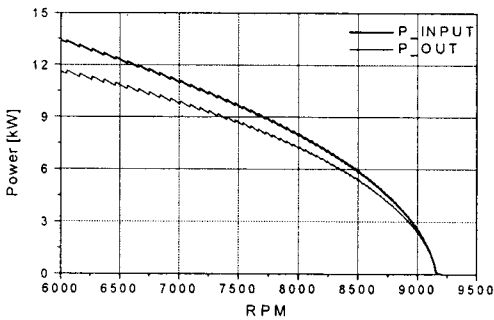


Fig. 15 Power characteristics as a velocity

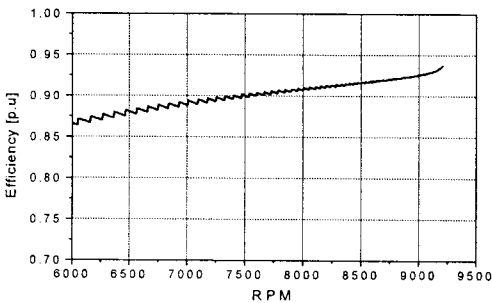


Fig. 16 Efficiency characteristics as a velocity

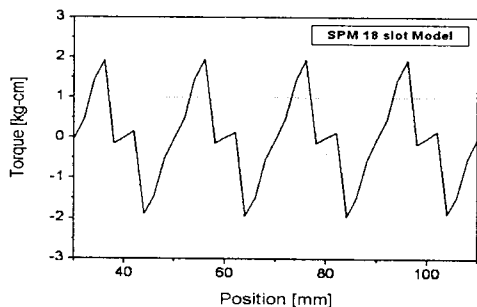


Fig. 17 Cogging torque characteristics as a position

SPM 모터에서 발생하는 철심 포화에 의한 영향을 줄이기 위한 설계 변경을 통하여 기존대비 1/2 정도의 코깅 토크를 축소시킬 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 고전압 기반의 미래형 자동차 구동기에서 가장 핵심적인 역할을 담당하는 표면부착형로터(SPM)형 BLDC 모터에 대한 설계 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 SPM 모터에 대하여 등가 자기회로법과 유한요소법을 달리 적용하여 두 가지 방법으로 모터특성을 비교 평가함으로써 등가 자기회로법의 유용성 및 정확성을 확인하였다. 특히, SPM 모터 치 부분의 포화로 인한 자기저항 변화에 따라서 발생하는 속도-출력 특성 해석인 경우에 유한요소법의 상대적 유용성을 확인할 수 있었다. 고전압 기반의 자동차에 적용 가능한 BLDC 모터의 설계 및 제작에 있어서 코깅 토크 저감(기존대비 1/2)의 중요 설계인자가 철심 포화도 저하임을 확인할 수 있었다. 또한, 고전압기반 자동차 모터 설계에서 SPM 모터 성능을 향상시키기 위해서는 치 자속밀도 저감이 가능하도록 회전자 및 권선보다는 모터 치의 형상 최적화가 필요하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 도출한 설계 및 해석 인자를 기준으로 실제 응용 시스템에 적용 가능한 모터 제작과 IPM 형태의 BLDC 모터와의 비교 평가를 실시하고자 한다.

후기

본 논문은 2007년 산업자원부 지역혁신인력양성사업과 중소기업청 중소기업기술혁신사업 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korea Industrial Technology Foundation, "National Technical Road-map," Korea Industrial Technology Foundation, pp. 215-236, 2005.
2. Kim, T. H. and Mehrdad, E., "Sensorless Control of BLDC Motor from Near-Zero to High Speeds," IEEE Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1635-1645, 2004.
3. Hiroshi, M., "Performance Comparison of SPMSM,

- IPMSM and Synrm in Use as Air Conditioning Compressor,” Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, Vol. 2, No. 11, pp. 840-845, 2001.
4. Rim, K. H. and Lee, E. K., “Vibration Analysis of Spin Etcher,” KSSET, Vol. 2, No. 1, pp. 15-19, 2003.
 5. An, C. H. and Rim, K. H., “Dynamic Analysis of a Slider in Near-field Optical Recording Disk Drive,” KSNVE, Vol. 13, No. 3, pp. 164-171, 2003.
 6. Nam, K. Y., Hong, J. P., Lee, C. M. and Chung, W. J., “Research of Torque Ripple Reduction of BLDC Motor,” Proceeding of KSPE Spring Conference, pp. 1455-1458, 2005.