Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 3, pp.44-51 (2008)

Copyright © 2008 KSAE
1225-6382/2008/093-07

고전압 기반의 자동차 압축기용 BLDC 모터의 특성 해석

김 병 우[*1] · 조 현 덕[2] · 이 도 희[2]

울산대학교 전기전자정보시스템공학부[1] · 울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학부[2]

Characteristic Analysis of BLDC Motor for Vehicle Compressor Based on High Voltage

Byeongwoo Kim[*1] · Hyundock Cho[2] · Dohee Lee[2]

[1]*Department of Electrical, Electronics & Information Systems, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea*
[2]*Graduate School of Electrical, Electronics & Information Systems, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea*
(Received 19 June 2007 / Accepted 28 December 2007)

Abstract : The performance design and analysis of an electric motor for vehicles is very complicated due to the variety of parameters. This paper presents the design of the BLDC motor for electric air compressor in high voltage(42V) system and compares with the characteristics of IPM, SPM type BLDC motor. Futher, optimal design for the electric motor has been carried out using Equivalent Magnetic Circuit and FEM Modelling. By analyzing the design results, it is found that design parameters for BLDC motor provided an useful tool for vehicles motor design.

Key words : SPM(Surface permanent magnet motor:표면 부착형 영구자석 전동기), IPM(Interior permanent magnet motor : 매입형 영구자석 전동기), 42V high voltage(42V 고전압), Electric air compressor(전동식 공기 압축기), Magnetic torque(자기 토크)

Nomenclature

a : number of parallel circuit, N
A_m : area, mm^2
B_m : magnetic density, Wb
D_a : amature distance, mm
F_m : magnetomotive force, AT
K_c : coefficients of carter's
L : inductance, H
L_a : distance of axle direction, mm
K_e : voltage constant, V/rpm
K_t : torque constant, kgf-mm/A
N_t : rotation speed, rpm
Q_a : conductor distance, mm
S_c : pitch of winding wire, mm
S_n : number of slot, N
t_h : depth of slot, mm
V_d : voltage drop, V

*Corresponding author, E-mail: bywokim@ulsan.ac.kr

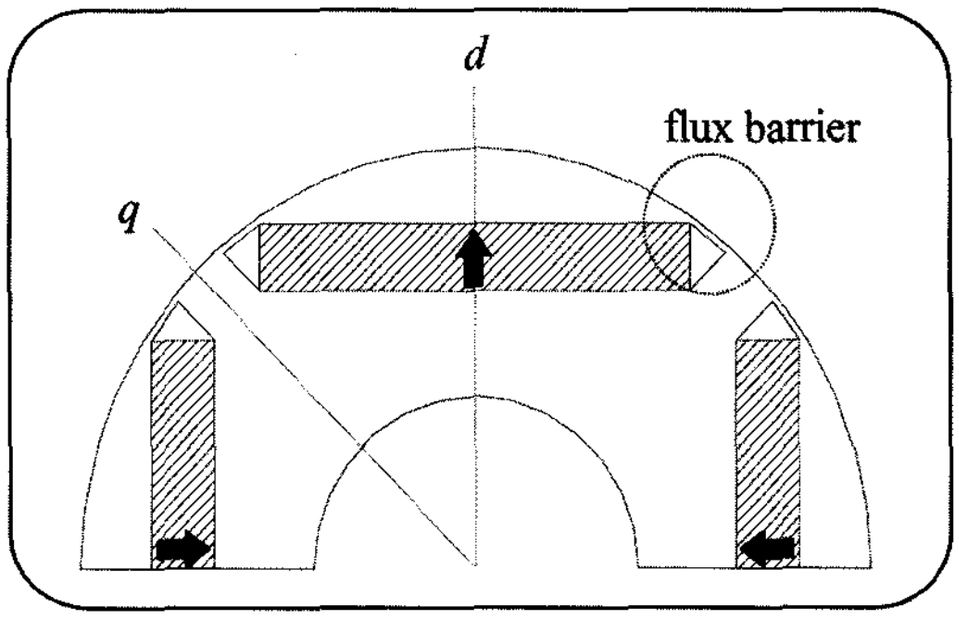
1. 서 론

기계 기반의 기술을 적용하여 자동차 성능을 획기적으로 향상시키는 것은 한계성이 존재하기 때문에 전기·전자 기술의 자동차 접목 필요성이 급증하고 있다. 자동차에 적용되는 전기·전자 기술의 대표적 사례로서 전동 구동부는 솔레노이드 밸브, 피에조 액추에이터, 모터 등을 들 수 있는데, 가장 보편적인 구동부는 전동모터를 들 수 있다.[1)]

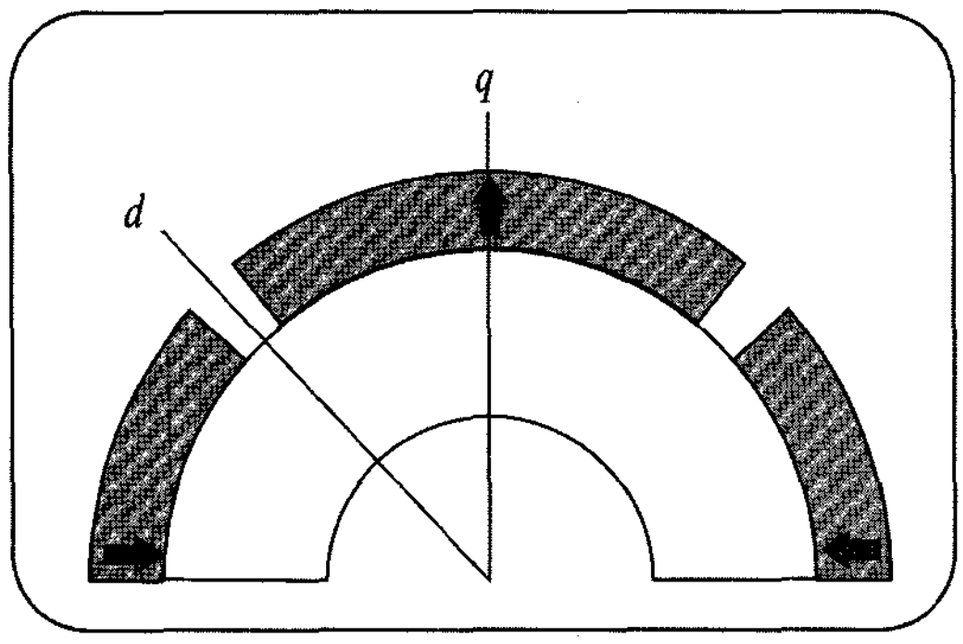
일반 가전 및 산업용에 사용되는 전동 모터는 다양한 종류가 사용되고 있으나 자동차용 전동 모터는 브러시 DC 모터(DC motor)와 브러시리스 DC 모터(BLDC motor)를 들 수 있다. 최근, 하이브리드 자동차와 연료전지 자동차 등장과 자동차 전장부품 증가로 인하여 자동차 구성 부품에 부가되는 인가 전압이 급격하게 고전압화되고 있다. 특히, 자동차 차체 및 새시 장치에 적용되는 전기·전자 장치는 42V 기반의 고전압이 국제 표준 전압으로 제정되어 운영되고 있다. 본 연구에서는 기존 전압체계에서 42V 고전압체계로 적용될 때, 에너지 저감효과와 상징성이 크다고 판단되는 전동식 공기 압축기를 대상으로 설정하였다. 전동식 공기 압축기에 적용되는 모터는 브러시리스 DC 모터를 선정하였다.

기존 자동차에 적용되고 있는 전동 대부분의 모터는 브러시 DC 모터를 이용하고 있다. 이 모터는 정류자와 브러시 존재로 인하여 고효율화에 한계가 있고 소음과 내구성의 한계 및 전자기적 잡음을 유발한다. 그러나, 브러시리스 DC 모터는 기존 브러시 DC 모터가 지니고 있는 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 인가 전류를 1/3 수준으로 낮출 수 있기 때문에 전력용 소자의 가격저감이 가능하다. 그러나, 국내·외를 불문하고 자동차에 대한 BLDC 모터 적용은 가격적 측면의 문제점 때문에 활성화되지 못하였으나 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. 자동차에 적용되는 BLDC 모터는 영구자석과 회전자 형상에 따라서 표면 부착형 영구자석 전동기(SPM)와 매입형 영구자석 전동기(IPM)로 분류된다.

따라서, 본 연구에서는 자동차 전동식 공기 압축기에 적용 가능한 IPM 방식 BLDC 모터를 중심으로 설계 및 특성 평가를 실시하고자 한다.



(a) Interior permanent type



(b) Surface mounted permanent type

Fig. 1 Rotator structure of BLDC motor

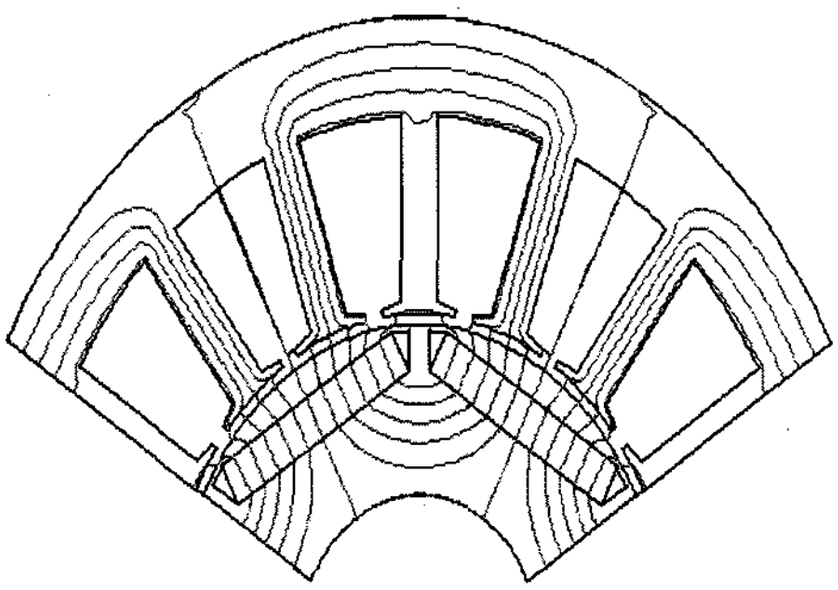
2. 고전압 BLDC 모터 해석방법

매입형 영구자석 전동기는 표면 부착형 영구자석 전동기와는 달리 영구자석이 회전자 내부에 삽입된 구조로써 회전자 자극과 고정자 자극의 상대적 위치에 따라 자기저항의 차가 발생되는 돌극 구조를 가진다. 즉, 자기저항의 차로부터 발생하는 릴럭턴스 토크가 자기적 토크에 중첩되므로 단위전류 당 토크 및 출력은 표면 부착형 전동기에 비하여 증가한다. 본 연구에서 해석 대상으로 설정한 영구자석 모터의 구조를 Fig. 1에 나타냈다.

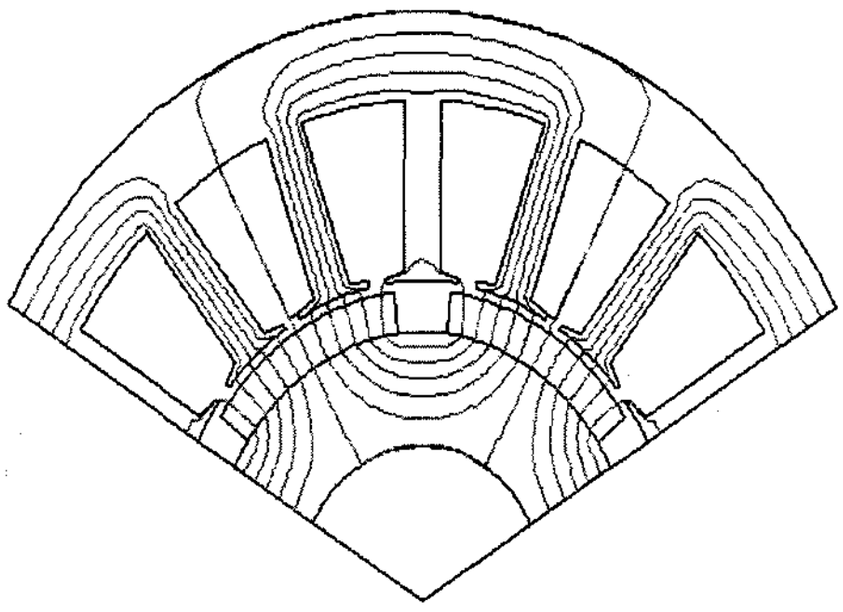
IPM 형을 기준으로 하고 SPM형을 비교 대상으로 하여 효율적인 자기회로 설계 및 특성해석을 위한 자기회로의 최적 설계가 필요하다. 이를 위하여, BLDC 모터 자체의 자로특성, 자속밀도 등의 해석을 위하여 유한요소법을 적용하였고 토크, 출력 등과 같은 모터 동특성 해석을 위한 등가자로 해석을 병행하였다.

2.1 유한요소법에 의한 해석

BLDC 모터에서 발생되는 토크는 맥스웰 방정식의 스트레스 텐서(stress tensor)에 의해서 표현할 수 있기 때문에 유한요소법을 이용하여 전자장을 해석하였다. 유한요소법을 이용한 해석을 위하여 먼저, 지배방정식과 경계조건을 결정하고 전체 해석 영역을 23,728개의 삼각요소로 분할하였다. 그리고, 각 요소에 대한 stiffness 행렬과 force 행렬을 구한 후에 이를 통합한 시스템 방정식을 구성하였다. 다음에



(a) Interior permanent type



(b) Surface mounted permanent type

Fig. 2 Magnetic characteristics of BLDC motor

는 자연경계 조건과 고정경계 조건을 적용하고 전체 시스템 방정식에 대한 가우스 소거법을 이용하여 행렬식을 찾았다.

Fig. 2는 유한요소법을 이용하여 IPM, SPM 모터에 발생되는 자로(magnetic path)를 나타낸 것이다. IPM, SPM 모터의 자속밀도는 1.83[T], 1.82[T]로서 큰 포화가 발생됨을 확인하였다. 이를 해결하기 위해서는 회전자 및 권선 사양은 그대로 두고 가능한 한 자속이 줄어들도록 설계하여야 할 것이다.

2.2 등가자기회로에 의한 해석

등가자기회로법에 의한 BLDC 모터 설계과정은 장하비 M의 결정으로부터 전기장하와 자기장하를 분배하여 자기회로를 설계하였으며 특성해석은 먼저 자기회로 해석으로부터 회로정수(L, L_e, K_e, K_t)를 산정한 후에 수행하였다. 자기회로 특성은 등가자기회로법을 이용하여 해석하였다.[2-6)]

자기회로 해석 및 회로정수 산정은 영구자석의 동작특성과 외부자기회로에서 결정된다. 영구자석

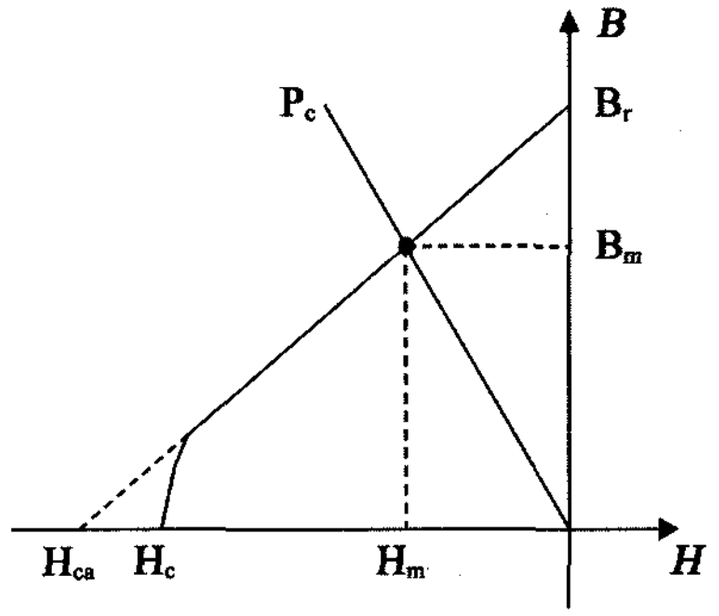


Fig. 3 Operating characteristics of permanent magnet

의 2상한 감자특성과 퍼미언스 라인을 Fig. 3에 나타냈다. 영구자석의 무부하 동작점의 자속밀도 B_m은 퍼미언스 계수로부터 결정된다. 퍼미언스 계수 P_c와 자속의 연속성으로 부터 공극 자속밀도 B_g는 식 (3) 이 된다.

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

$$B_m A_m = f B_g A_g \tag{2}$$

$$B_g = \frac{B_m A_m}{f A_g} \tag{3}$$

Fig. 3의 기본적인 자장특성을 이용하여 무부하 상전류 및 회전속도를 구하면 다음과 같은 식 (4), (5), (6) 을 얻을 수 있다.

$$I_0 = \tau_0 / K_t \quad \text{(A)} \tag{4}$$

$$N_t = V_t / K_e \quad \text{(rpm)} \tag{5}$$

$$N_0 = N_t \times \frac{\tau_s}{\tau_s + \tau_0} \quad \text{(rpm)} \tag{6}$$

3상 바이폴러 구동방식의 BLDC 모터의 대표적 특성인 전류, 회전수, 출력, 전압 등을 식 (7)에서 (13)까지 나타냈다.

$$I_s = (\tau + \tau_0) / K_t \quad \text{(A)} \tag{7}$$

$$N = N_t \times (1 - \frac{\tau + \tau_0}{\tau_s + \tau_0}) \quad \text{(rpm)} \tag{8}$$

$$P = 1.027 \times \tau \times N \times 10^{-2} \quad \text{(W)} \tag{9}$$

$$V_s = \sqrt{(E_0 + RI)^2 + (XI)^2} \quad \text{(W)} \tag{10}$$

$$\tan\varphi = \frac{IX}{(E_0 + R\,I)} \tag{11}$$

$$W = 2\times V_s I \cdot \cos\varphi \tag{12}$$

$$\eta = P/W \tag{13}$$

저온 불가역 감자를 고려한 상전류의 한계치는 식 (14)와 같다.

$$I^*_n(t_L) = \frac{2p(l_m + K_c l_g)}{0.4\pi\alpha_i m k_\omega \omega} \frac{H_n(t_L)(\mu_r + \alpha p_u - B_r(t_L))}{\alpha p_u}$$

$$\alpha_i = \mathrm{p}\frac{\phi}{\pi} \tag{14}$$

저온 구속시의 자석 동작점은 식 (15)와 같다.

$$H_{d\cdot\max} = \frac{B_r(t_L) + \sigma p_u \cdot H_{a\cdot\max}}{\mu_r + \sigma \cdot p_u} \tag{15}$$

$$H_{a\cdot\max} = \frac{0.4\pi\alpha_i \cdot m \cdot k_w \cdot w\hat{I}^*_s(t_L)}{2\mathrm{p}\lambda(l_m + K_c \cdot l_g)} \tag{16}$$

$$H_{d\cdot\max} \leqq H_n(t_L) \tag{17}$$

Table 1 Design specifications

Item	Data
Voltage	42[V]
Rated speed	6,400[rpm]
Rated load	38[kgf-cm]
Max. speed	8,500[rpm] at 38[kgf-cm]
Output	3.62[kW]
Rated current	90[A]
Pole nunber of rotor	6EA

3. 고전압 BLDC 모터 해석결과 및 고찰

3.1 IPM과 SPM BLDC 모터의 특성 비교

IPM형 모터를 해석하기 위하여 고정자 제원은 SPM형과 동일하게 두고 회전자만 변경하여 유한요소법으로 해석한 결과를 Fig. 4, 5에 나타냈다.

Fig. 4, 5의 해석결과는 IPM형 모터의 영구자석만을 여자한 경우로서 공극 및 철심 각부의 자속밀도 특성을 나타내고 있다. IPM형 모터는 SPM형 모터와 유사하게 치 자속밀도가 1.82[T]일 때, 포화가 발생됨을 알 수 있었다.

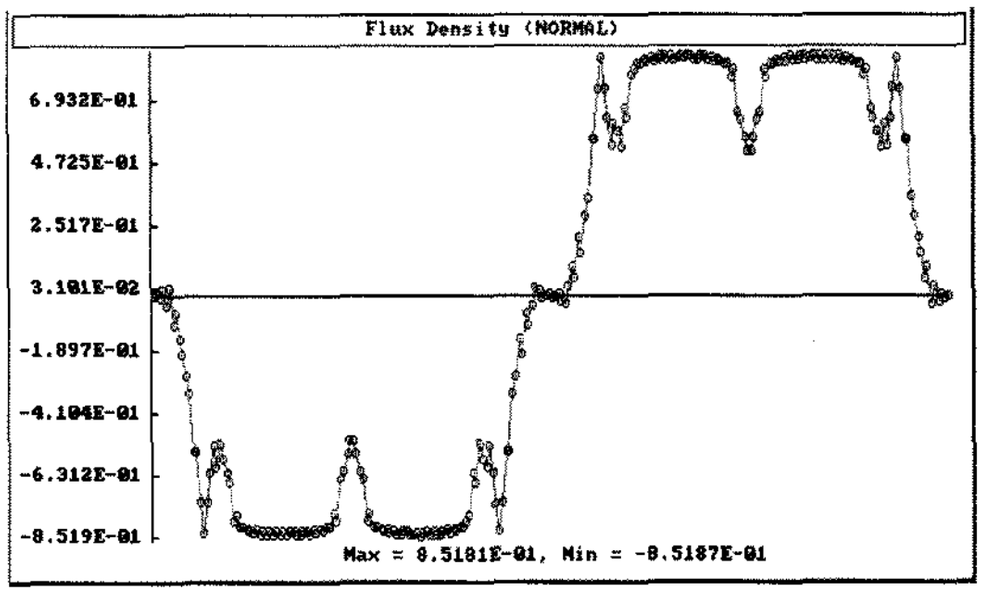


Fig. 4 Magnetic density of air gap at permanent magnet(IPM)

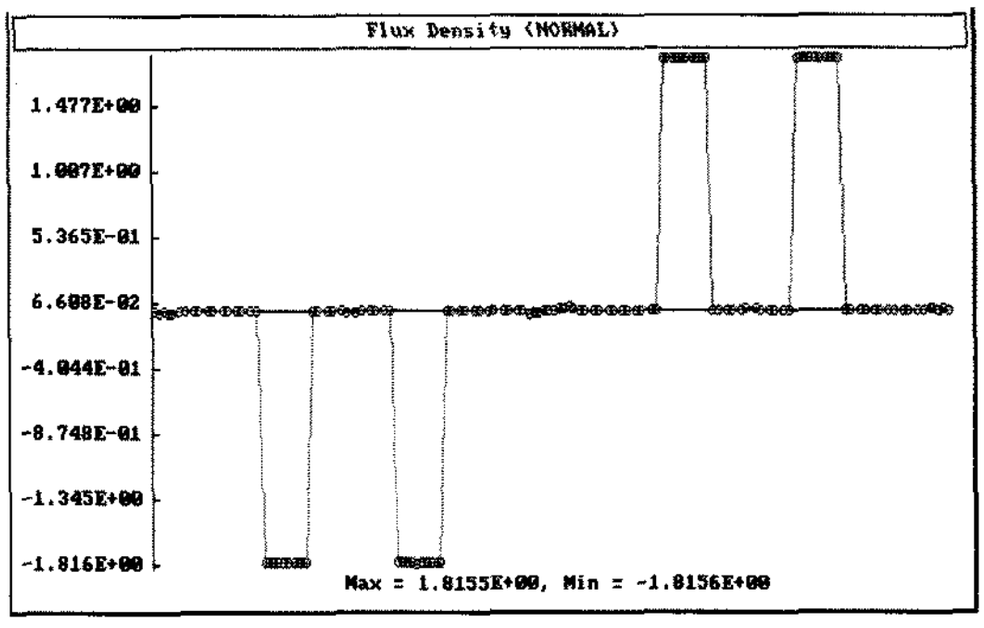


Fig. 5 Magnetic density of tooth at permanent magnet(IPM)

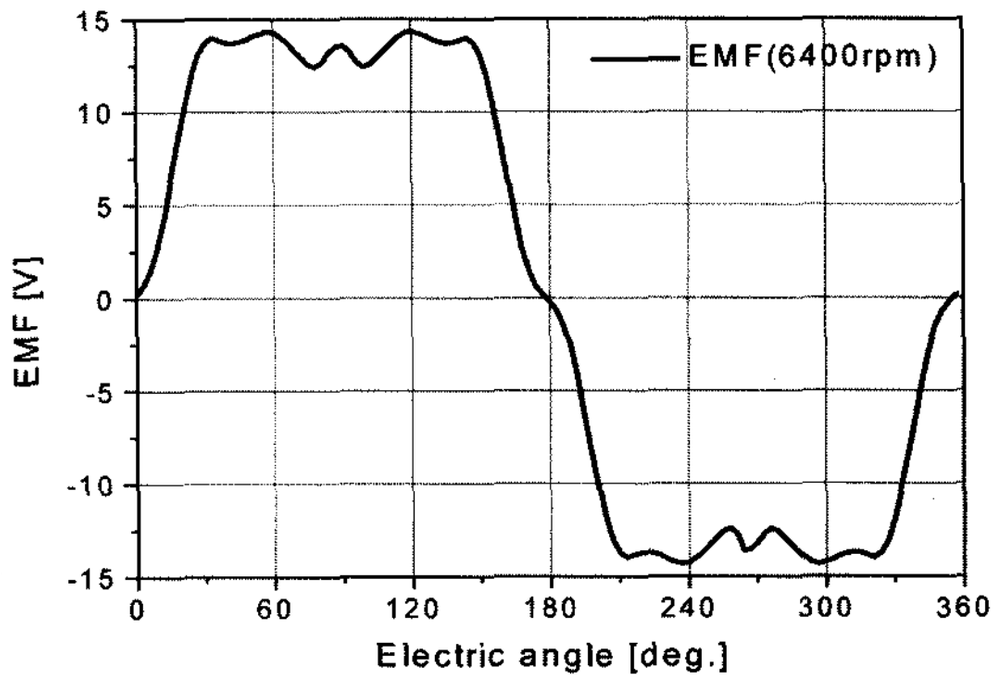


Fig. 6 EMF characteristics at no load of SPM motor (6400 rpm)

Fig. 6은 SPM 모터의 역기전력을 나타내는 것으로서 역기전력 상수는 Ke = 0.002172(V/rpm)를 나타냈는데 반하여 Fig. 7은 IPM 모터의 역기전력을 나타내는 것으로서 역기전력 상수는 Ke = 0.002082 (V/rpm)를 나타냈다. 이 역기전력 상수를 통하여 IPM 전동기의 역기전력 상수는 SPM의 96[%]임을 확인할 수 있었다. IPM 모터가 SPM 모터에 비하여 역기전력이 감소되는 주요 인자는 링크부에서 발생

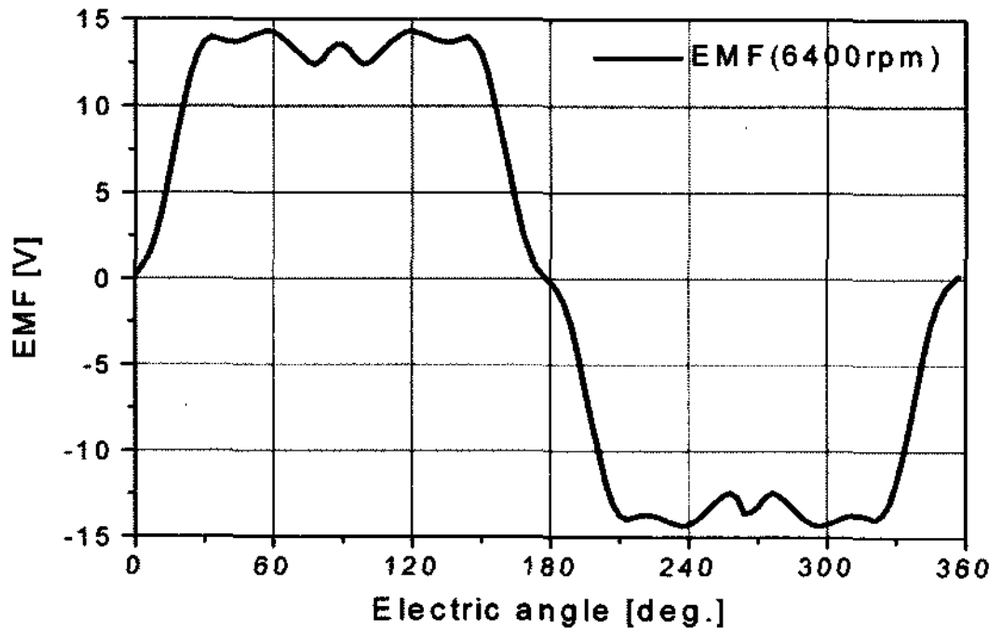


Fig. 7 EMF characteristics at no load of IPM motor (6400 rpm)

되는 누설에 의한 영향이라 사료된다.

따라서, IPM 모터는 SPM 모터에 비하여 역기전력이 적게 발생되어 내구신뢰성이 요구되고 있는 자동차용 전동기에 적합하다고 판단된다. 왜냐하면, 전동기에서 발생되는 높은 역기전력은 고전압 동력발생 장치의 FET 열화 및 내구 측면의 문제를 유발시키기 때문이다.

Fig. 8, 9는 96[A]의 구형파 전류를 인가할 때, 부하각 변화에 따른 토크 특성을 나타낸 것이다. IPM 전동기의 경우, SPM 전동기에 비하여 릴럭턴스 토크가 부가적으로 발생되기 때문에 넓은 부하각에서 상대적으로 큰 토크가 발생되었다.

따라서, IPM 모터의 토크 특성을 얻기 위해서는 유도 절환시에 단위 전류당 최대 토크가 발생되도록 통전각도를 변경시켜 운전하여야 할 것이다. 또한, IPM 모터의 속도변화에 따른 전류, 역기전력, 토크 특성을 Fig. 10, 11, 12에 나타냈다.

Fig. 10은 압축기용 BLDC 모터의 속도에 따른 전류특성 해석결과로서 회전속도에 비례하여 발생 전류가 선형적으로 저하되다가 9,000rpm 대역에서 비선형적인 변화가 나타났다. 이 같은 현상은 속도 증가에 따라서 순수 코일에 의하여 발생되는 전류 값 저하가 풍손 및 기계손에 의한 전류 값 상승보다 크기 때문에 발생되는 현상이다. 물론, 본 연구에서 목표로 하고 모터보다 고속으로 회전하는 모터인 경우, 일정 속도 이상에서는 풍손 및 기계손에 의하여 발생되는 전류증가가 상대적으로 확대 될 것이기 때문에 상대적인 고속 모터 설계 시에는 풍손 및 기계손에 대한 고려가 필요할 것이다.

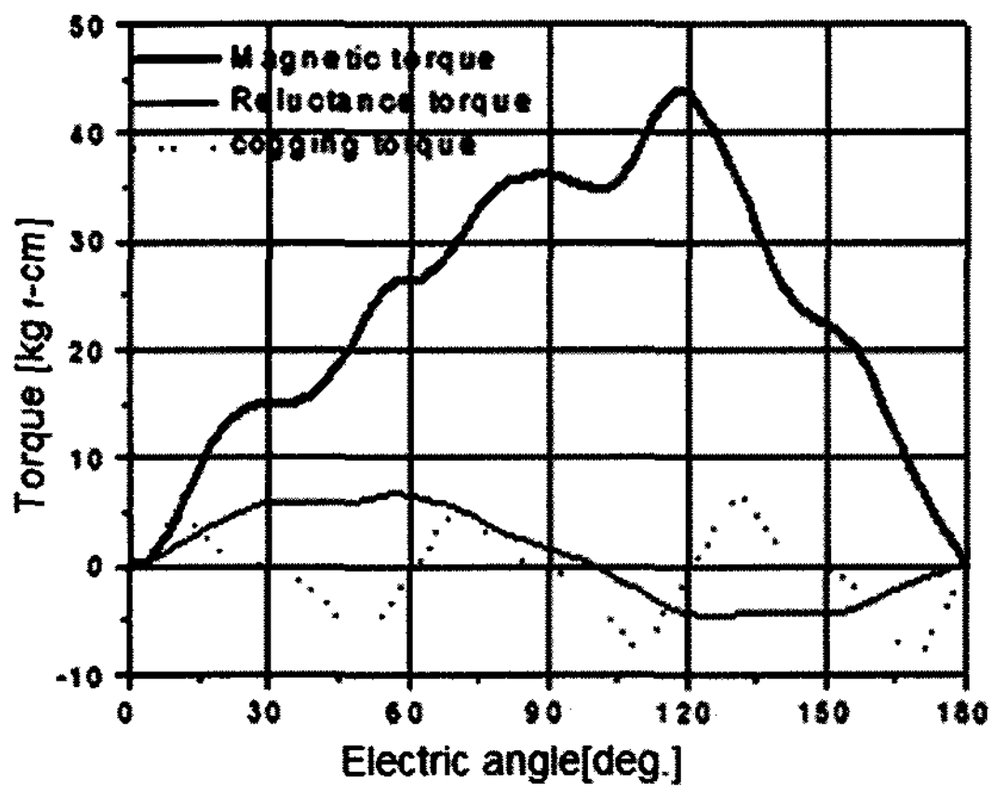


Fig. 8 Torque characteristics vs. load angle of IPM motor

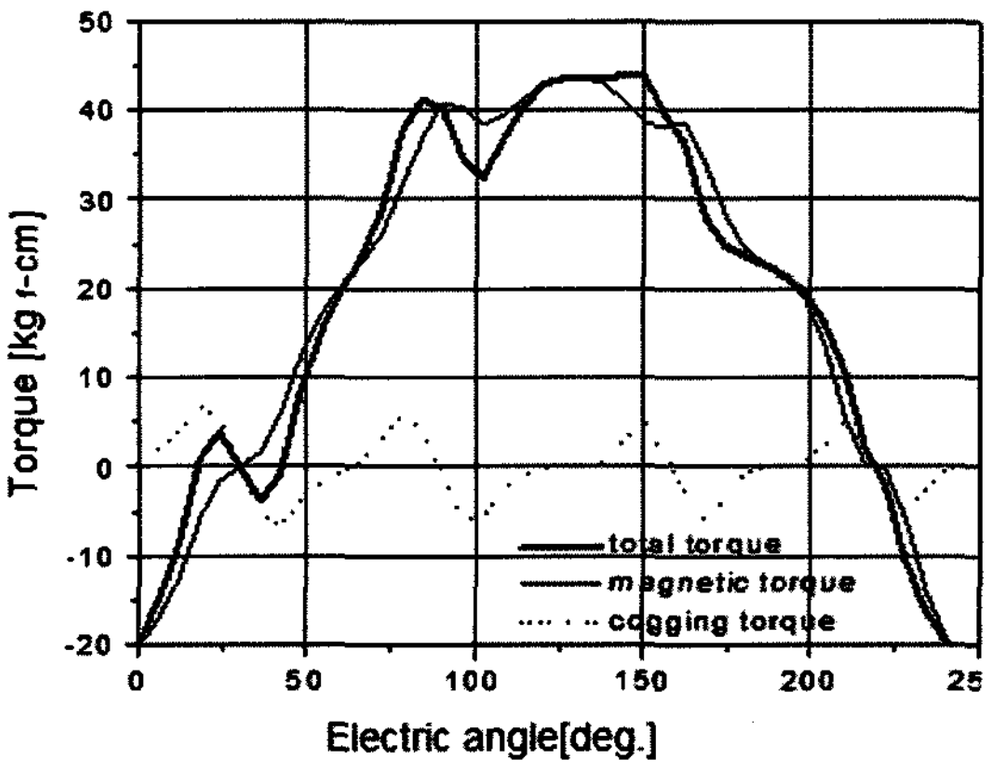


Fig. 9 Torque characteristics vs. load angle of SPM motpr

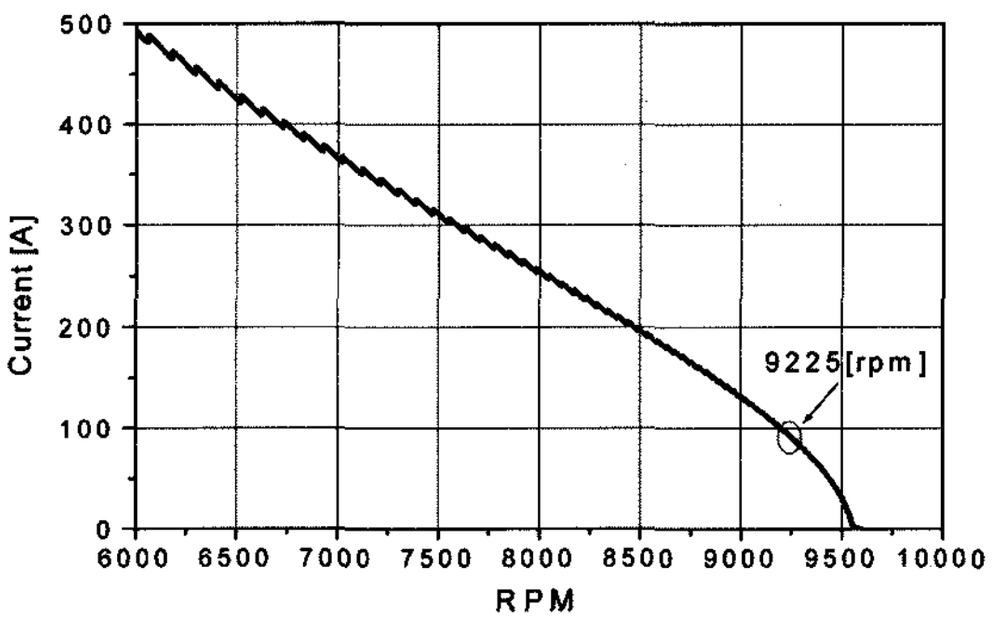


Fig. 10 Current characteristics vs. motor speed of IPM motor

따라서, 본 연구에 적용된 모터의 속도보다 고속인 모터를 설계할 경우에는 풍손 및 철손 손실변화를 고려하여 설계할 필요가 있다. 또한, 모터 속도 9,000rpm 대역에서 전류 값이 비선형적으로 변화되는 현상은 모터에 적용된 자성물체의 자속이 임계

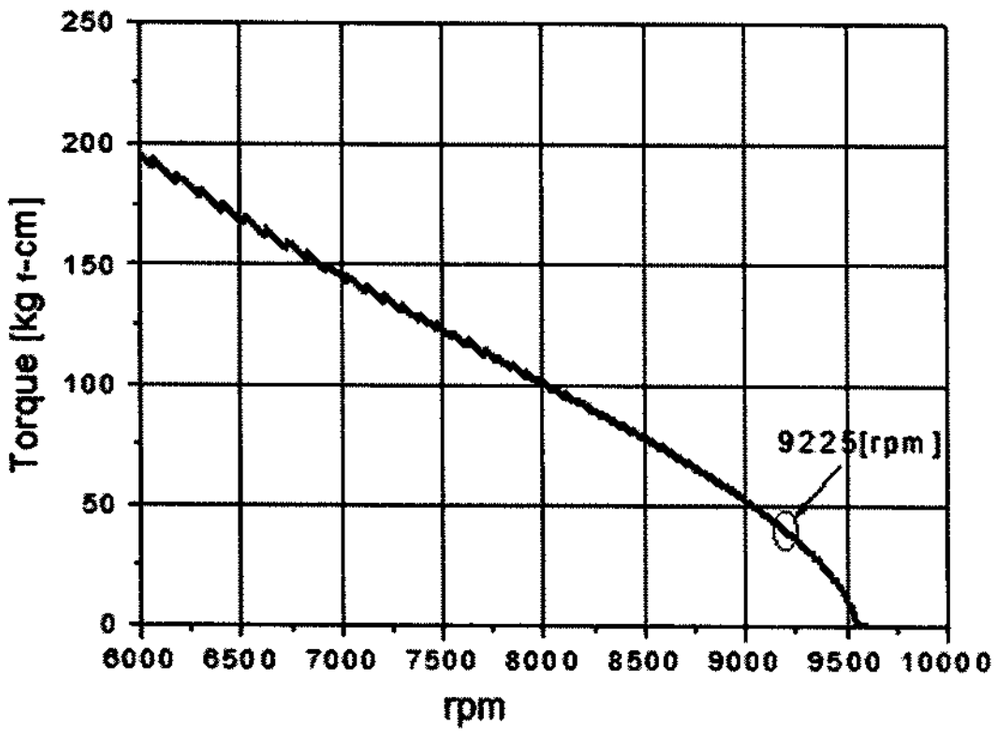


Fig. 11 Torque characteristics vs. speed of IPM motor

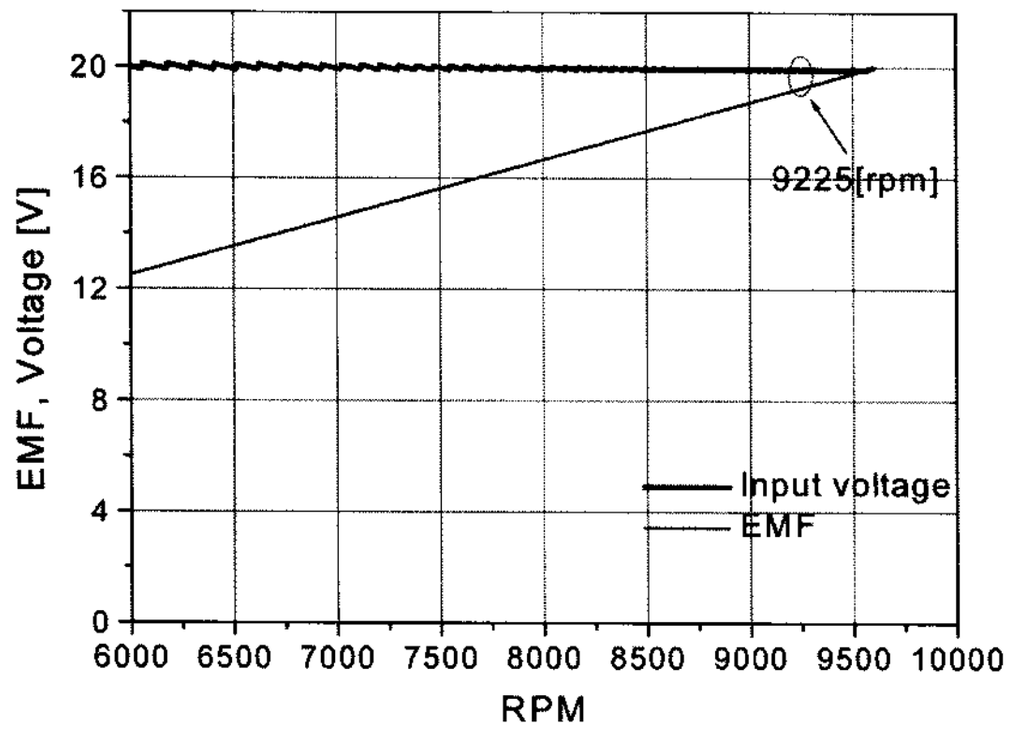


Fig. 12 Voltage and EMF characteristics vs. speed of IPM motor

점 이상에서 급격하게 변화되는 것에 기인한다.

Fig. 12는 입력 전압을 20V로 공급했을 때, 발생되는 역기전력 변화를 나타낸 것이다. 압축기 모터의 회전속도가 증가함에 따라서 역기전력이 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 여기에서 입력전압이 20V로 설정한 것은 42V 전압체계에서 실제적으로 발생되는 최저 전압 영역을 고려한 것이다. 왜냐하면, 자동차에 적용되는 전동 모터는 일반적으로 저전압인가 시에 발생되는 동특성을 중요한 설계 인자로 보기 때문이다. Fig. 13, 14는 모터 회전속도 변화에 따른 IPM 모터출력과 효율을 나타낸 것이고 Table 2, 3은 IPM 모터 특성을 기준으로 SPM 모터의 특성을 비교분석한 것이다. IPM 형 모터인 경우, 동일한 인가전압 40[V]에서 38kgf-cm의 토크 특성을 만족시킬 수 있는 최대 속도는 9225[rpm]으로 SPM에 비해 4[%] 정도 증가하였다. 이는 역기전력 상수의 감

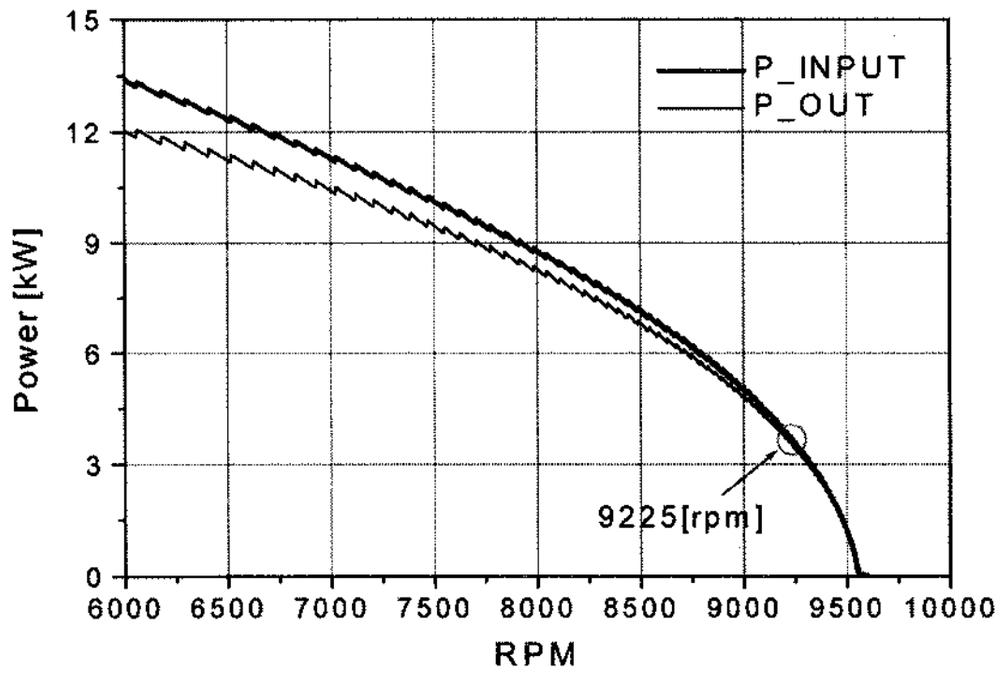


Fig. 13 Power characteristics vs. IPM motor speed

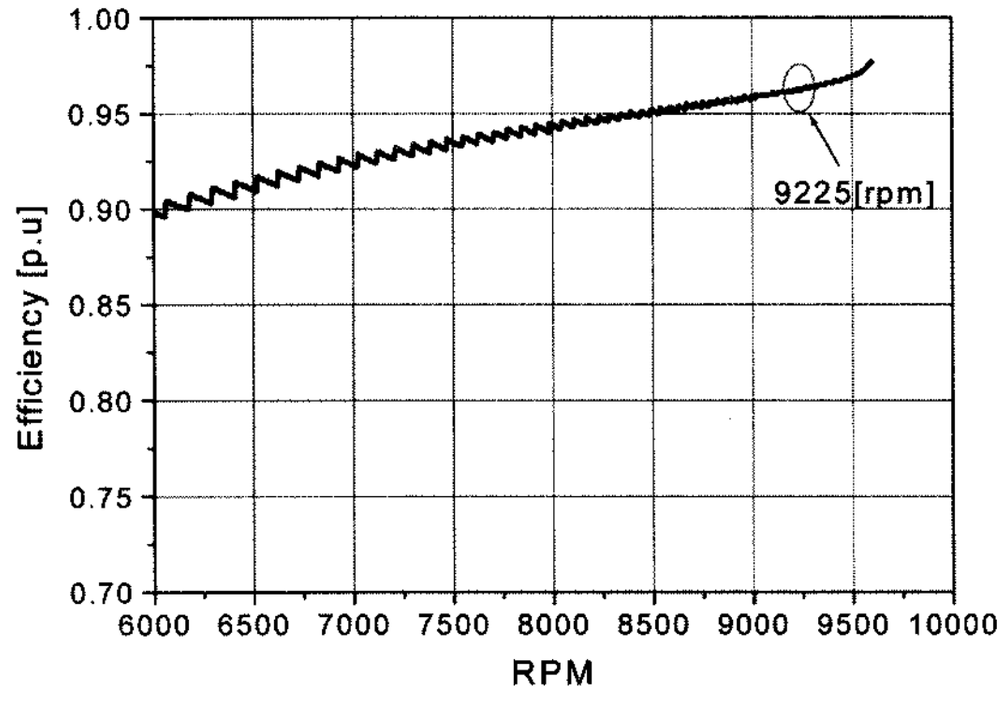


Fig. 14 Efficiency characteristics vs. IPM motor speed

Table 2 Comparision of characteristics at constant voltage

Item	SPM BLDC	IPM BLDC
Input voltage	40	40
EMF constant	0.002172	0.00208234
Max. velocity at 38[kgf-cm]	8860[rpm]	9225[rpm]
Output[kW]	3.46	3.62
Efficiency[%]	92.3	96.3

Table 3 Comparision of characteristics at constant speed and output power

Item	SPM BLDC	IPM BLDC
Max. velocity at 38[kgf-cm]	8500[rpm]	8500[rpm]
Input voltage	38.2[V]	36.7[V]
Torque[kgf-cm]	38	38[
Output[kW]	3.3	3.3
Efficiency[%]	92.2	96.1

소에 따른 속도증가라 판단된다. 역기전력 상수의 저감은 토크 및 출력의 감소로 나타나지만, IPM형

모터는 SPM형 모터와 달리 릴럭턴스 토크가 부가적으로 발생되기 때문에 출력 및 토크는 오히려 증가한다. 이 같은 측면에서 일정한 회전속도 8500 [rpm]인 경우에 IPM형 모터는 SPM형 모터에 비하여 4[%] 정도의 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 특히, Fig. 14에서 모터 효율이 98% 부분까지 지속적으로 증가하고 있는데, 이는 모터 해석 시에 발생될 수 있는 풍손실 및 기계손실을 고려하지 않음에 기인하여 발생하는 현상이기 때문에 보다 정확한 해석을 위해서는 이에 대한 고려가 필요하다.

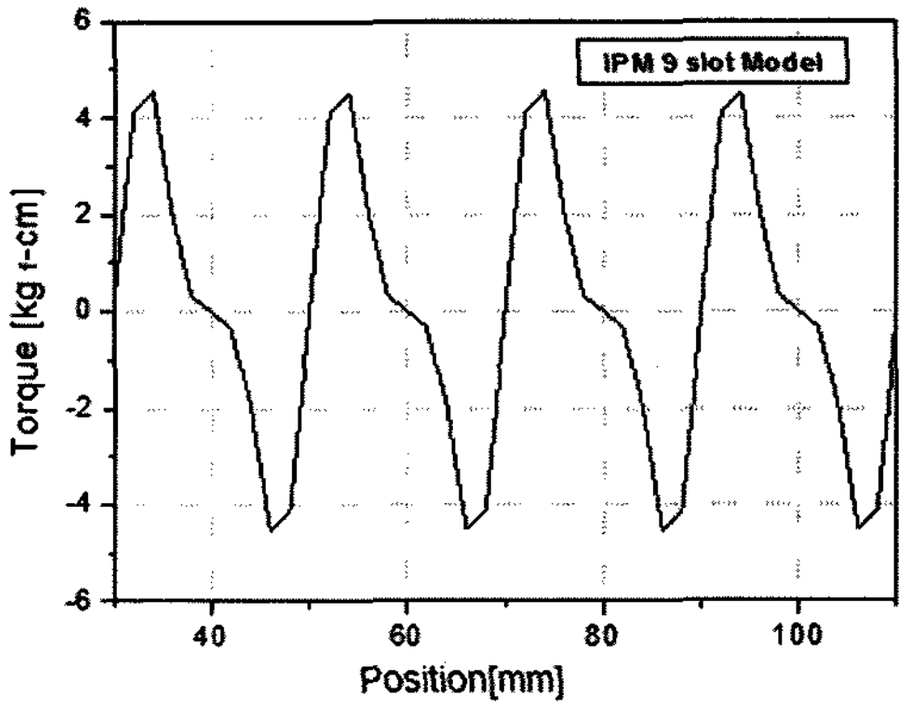
3.2 고전압 BLDC 모터의 성능 향상 방안

앞서 언급한 SPM, IPM 모터의 코깅 토크에 대한 해석을 통하여, 공기 압축기용 구동기는 IPM 방식의 모터가 상대적으로 우수함을 확인하였다. 그런데, IPM과 SPM 모터는 공히 치의 포화에 따른 철손 증가가 발생된다. 이로 인하여 모터 효율감소와 온도상승으로 인한 특성저하가 발생되기 때문에 이를 저감시킬 수 있는 방안 모색이 요구된다. 이를 위하여 SPM과 IPM 모터의 회전자 및 권선의 제원은 동일하게 두고 고정자의 치 폭을 증가시켜 치 자속이 감소되도록 고정자의 수정 설계를 실시하였다. 본 장에서는 IPM, SPM 모터의 최적 설계 인자인 자속밀도 1.5[T], 고정자 요크 자속밀도 1.2[T], 권선 점적율이 35[%]가 되도록 고정자의 치 폭 및 슬롯의 단면적 변경을 통한 최적 설계를 실시하였다. Table 4는 IPM, SPM 모터의 고정자 슬롯 수가 분포권(9개)와 집중권(18)일 때, 도출된 최적 설계 인자이고 이의 대표적 특성인자인 코킹 토크를 Fig. 15에 나타냈다.

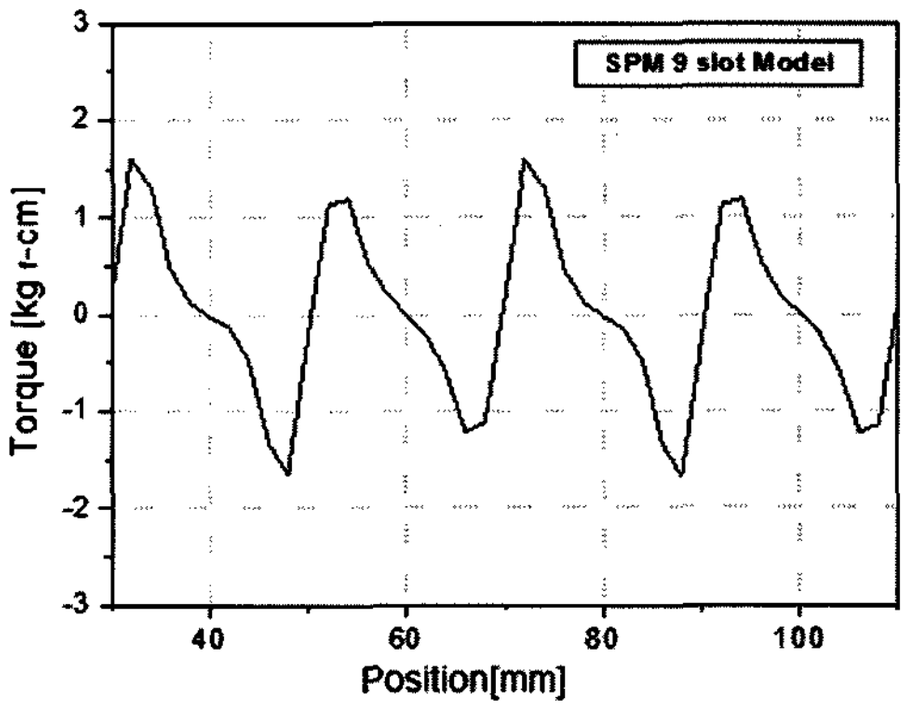
Fig. 15는 분포권으로 9개 슬롯을 갖는 IPM과 SPM 모터의 코깅 토크를 나타낸 것이다. 분포권 IPM형 모터에서는 -5에서 5[kgf-cm] 대역, SPM 모터에서는 -2에서 2[kgf-cm] 대역을 나타냈다.

Table 4 Specification results of revision design

항 목	분포권(18슬롯)	집중권(9슬롯)
치 폭	5.5 [mm]	9.5 [mm]
슬롯 높이	23.4 [mm]	22.9 [mm]
고정자 요크 폭	6.5 [mm]	10 [mm]
고정자 외경	121.8 [mm]	127.8 [mm]
슬롯 opening	2 [mm]	3 [mm]



(a) IPM-9 slot cogging torque



(b) SPM-9 slot cogging torque

Fig. 15 Characteristics of cogging torque of BLDC motor

일반적으로 코깅 토크는 슬롯수와 극수의 최소 공배수를 기본 주파수로 하여 맥동이 발생되어 전동기의 속도제어 및 위치제어에 악영향을 끼치게 되는데, 코깅 토크 측면에서 SPM 모터는 IPM 모터에 비하여 적게 발생됨을 알 수 있었다. 이 같은 현상은 IPM 모터가 SPM 모터와 달리 영구자석이 회전자 내부에 삽입된 구조를 갖고 있기 때문에 발생되는 구조적 원인에 기인하고 있다. 이를 저감시키기 위해서는 보조 슬롯을 사용하거나 슬롯 치 폭을 축소시키는 작업이 요구된다.

4. 결 론

본 논문에서는 향후 자동차의 전장시스템에서 중요 전기부하로 예상되는 자동차 전동 공기 압축기 구동 BLDC 모터의 설계 및 특성해석을 수행하였다. 모터 회전자인 영구자석 표면 부착형(SPM)과 매입형 영구자석(IPM) 두 가지 형태를 비교 분석한 결과,

IPM 방식이 공기 압축기용 전동모터로서 적합함을 확인할 수 있었다. 특히, 고속으로 구동되는 전동 공기 압축기용 전동모터는 코깅 토크를 제외하고 9 슬롯의 IPM모터가 최적의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, 치의 포화에 의한 철손의 증가로부터 효율 감소 및 전동기 온도상승의 문제를 해결하기 위해서는 회전자 및 권선의 제원은 동일하게 두고 치 폭 변화를 통한 치 자속의 감소 유도 필요성을 확인하였다. 이를 통하여, IPM 모터는 SPM 모터에 비하여 4% 내외의 효율 향상이 가능하였는데, 이는 IPM형 모터가 SPM형 모터와 달리 부가적으로 발생되는 릴럭턴스 토크에 기인하는 현상이라 사료된다.

본 연구결과를 바탕으로 향후에는 고전압 기반의 공기 압축기와 이와 연계된 시스템 측면의 구동특성 해석 및 평가가 요구된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역혁신인력양성사업과 중소기업청 기술혁신사업 지원으로 수행하였습니다.

References

1) S. M. Jang, Technology and Application of Linear Motor, Prentice Hall, pp.3-24, 1999.
2) G. W. Lee, Y. J. Cho and C. S. Song, "Development a Brushless Linear DC Motor for High Speed and Precise Position Control," KSPE, Vol.15, No.10, pp.73-81, 1998.
3) Z. Q. Zhu and D. Howe, "Analytical Prediction of the Cogging Torque in Radial-field Permanent Magnet Brushless Motors," IEEE Trans. Mag., Vol.28, No.2, pp.1371-1374, 1992.
4) N. Bianchi and S. Bologani, "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-mounted PM Motors," IEEE Trans. Mag., Vol.38, No.5, pp.1259-1265, 2002.
5) S. M. Hwang, "Reduction of Electromagnetic Torque Ripple in High Speed, High Load Brushless DC Motors used for Automobiles," Transactions of KSAE, Vol.6, No.4, pp.39-46, 2003.
6) J. Hur and I. S. Gyeong, "Analysis of Irreversible Magnet Demagnetization in Line-Start Motors based on Finite Element Method," IEEE Trans. Mag., Vol.39, No.3, pp.1488-1491, 2003.