

# 유한요소법을 이용한 V형상 극변환 메모리 모터의 특성 분석

## Characteristics Analysis of V Shape Pole Changing Memory Motor using Finite Element Method

김영현\* · 김수용\* · 김정우\* · 이중호†

(Young-Hyun Kim · Su-Yong Kim · Jung-Woo Kim · Jung-Ho Lee)

**Abstract** – The Permanent Magnet (PM) machine used at speed control using field-weakening control method. But the field-weakening current, which reduces the field flux for high speeds, causes significant copper and core losses. Therefore, this paper deals with the PM performance evaluations in a pole changing memory motor (PCMM). The PCMM can change the number of magnetic poles and produce two types of torque. When the motor operates with eight poles, it produces a magnetic torque at low rotational speeds. When the motor changes to four poles, it produces both magnetic torque and reluctance torque at high speeds. The paper explain the principle and basic characteristics of the motor by using a finite element method magnetic-field analysis, which consists of a PM magnetized by a pulse d-axis current of the armature winding. The results of our experiment show that the proposed motor reduces core loss by 10% and 55% under no-load and load conditions, and doubles the speed range of the motor.

**Key Words** : Pole Changing Memory Motor, FEM, Field-weakening Control Method

### 1. 서 론

전기 에너지를 운동에너지로 변환하는 장치의 전동기는 산업 현장 및 가정 등 어느 곳에서도 사용되며 일상생활에서는 필수 불가결한 존재가 되어있다. 최근에는 생활 가전 분야 또는 자동차 분야 등에서 고속 저토크 또는 저속 고토크 등의 넓은 범위의 가변속 운전 조건을 요구하는 고효율 전동기의 개발이 이루어지고 있다. 이전 연구는 영구 자석 전동기의 가변속 운전을 가능하게 쇄교 자속을 변화시키는 방법을 제안 했다[1]–[10]. Weschta는 고속에서 영구 자석에 유도된 전압을 줄이기 위해 감자에 의해 변화하는 자속의 영구자석 전동기를 제안 했다[1]. Ostovic는 고정자 필스를 이용하여 영구 자석에 극수 및 자속을 변화할 수 있는 기기(메모리 모터)의 개념을 제시하였다. 이 메모리 모터는 AlNiCo 및 ferrite 자석을 사용하여 압착된 자속 형태의 매입형 영구자석 전동기이다[2]–[3]. Liu는 메모리 전동기에 자체 분석을 수행하였고[4], 그리고 Sakai는 영구 자석의 감자 및 재자화에 의해 자속이 변화될 수 있는 가변 자기력 모터를 제안했다[5]–[8]. Lee는 프라이자흐 모델링을 사용하여 극변환시의 영구자석의 감자 전류 산정 및 특성 해석을 하였다[9]–[10].

Sakai는 실험 결과 및 분석에 의한 기초로 전동기 부하에 자속을 변화할 수 있음을 확인 했다[5]–[6].

유도전동기는 구조가 간단하고, 제작 단가가 영구자석 전동기보다 저렴하므로 가변속 전동기를 가능하게 하는 일반적인 방법이다. 그러나 유도 전동기는 영구자석 전동기보다 효율적이지 못하다. 전형적인 영구자석 전동기는 항상 같은 극수를 유지하고 있으며, 어떤 속도에서 일정한 주파수로 동작한다. 만약, 영구자석 전동기가 메모리 모터의 원리로부터 동작한다면, 농형 유도기와 같이 간단하게 극수를 변환할 수 있다. 극변환 하는 영구 자석 전동기는 가변속 드라이브 시스템에서 에너지가 효율적으로 증가한 결과를 얻는다. 극변환 하는 영구자석 전동기는 고정자 권선으로부터 감자전류가 공급된다. 전형적인 영구자석 전동기는 정상 동작 조건에서는 감자를 막도록 설계하는 반면, 메모리모터의 동작은 짧은 고정자 전류로 영구자석의 자화량을 변화시킬 수 있는 특성을 기초로 한다. 메모리모터의 성능 평가에 자화방향 및 자화량은 중요한 요소이며, 이러한 특성들은 자화재료에 영향을 받기 때문에 수치 해석적 분석이 반드시 필요하다. 현재, 극변환 하는 영구자석 전동기는 Spoke 타입 형태의 회전자를 가진 것이 일반적이다. 하지만 그림1(a)의 Spoke 타입 형태의 회전자는 영구 자석이 샤프트 부근에서 많은 누설 자속이 발생한다. 또한, 제작할 때 코어와 영구자석의 고정을 위하여 특별한 구조물이 요구되는 단점이 있다. 극변환 하는 전동기를 그림1(b)와 같이 V 형상으로 영구자석을 고정하여 제작한다면 영구자석의 누설 자속을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 극변환 메모리 모터(PCMM)의 회전자에 들어가는 영구자석을 V 형상으로, 고정자의 필스 전류에 의한 영구자석

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea.

E-mail : limotor@hanbat.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea

Received : February 17, 2015; Accepted : May 29, 2015

의 착자가 이상적일 때 자화-감자시 극변환에 따른 특성 분석을 유한요소법을 이용하여 수행하였다.

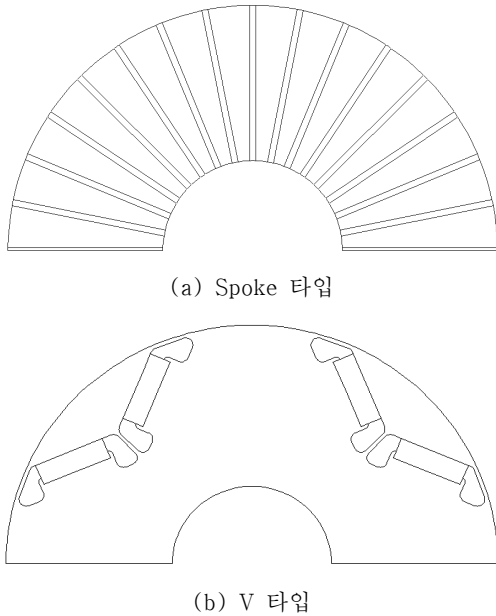


그림 1 PCMM의 회전자 형상  
Fig. 1 Rotor Shape of PCMM

## 2. 본 론

그림 2는 극변환 메모리 모터(PCMM)의 재질 및 기본적인 구성을 나타낸다. 극변환 메모리 모터의 회전자는 영구 자석을 V-형상으로 회전자 철심에 매입하여 기계적으로 강인한 회전자 구조를 가지도록 하였다. 고정자 전기자 코일은 슬롯에 8극과 4극으로 이중권 구조로 권선법을 채택하였다. 메모리 모터는 8극 PM모드와 4극 IPM모드로 나뉜다. 극수에 따라 d축, q축 인덕턴스 차이에 의해 발생한 톨력턴스 토크가 마그네틱 토크와 결합하여 단위 체적 당 발생하는 토크가 타 전동기에 비해 큰 장점을 가진다. 메모리 모터에 삽입된 영구자석 AlNiCo9는 낮은 보자력으로 인해 극변환을 가능하게 한다. 그림 3은 극수 및 토크의 모드 변환 원리에 대해 설명한다. 여기에서 회전자에 삽입된 8개의

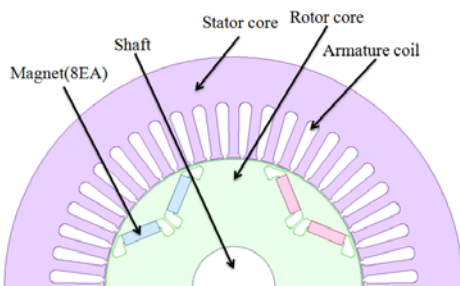


그림 2 PCMM의 구성  
Fig. 2 Structure of PCMM

영구 자석은 모두 같은 자화 방향을 가질 때 그림 3(a)과 같이 8극을 형성한다. 8극에서 4극으로 바꾸기 위해서 전기자 권선의 연결은 8극 권선에서 4극 권선으로 전환하게 된다. 그림 3(b)은 전기자 권선이 4극으로 재접속된 후 짧은 펄스 전류(10[ms])로 인해 일부 자석의 극성이 반대로 바뀌고 4극을 형성하는 것을 나타낸다.

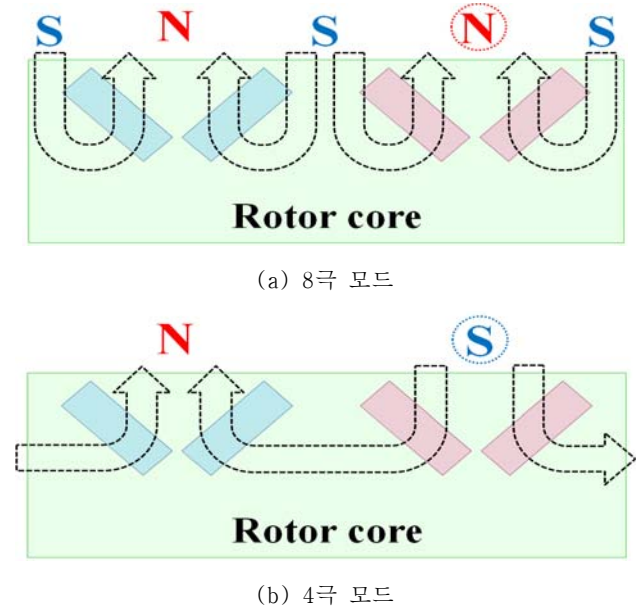


그림 3 PCMM의 극변환 모드  
Fig. 3 Pole Changing Mode

### 2.1 극변환의 특성 2.1.1 분석 모델

FEM 자체 분석은 그 특성을 분석하기 위해 해석 시간을 줄이고자, 그림 4와 같이 극변환 메모리 모터의 1/2모델을 선정하여, 그림 5와 같이 요소분할을 통해 유한요소해석을 이용하였다. 전

#### 표 1 분석 모델의 사양

Table 1 Specification of Analysis Model

상수	3
극수	8극/4극
고정자 외경	122[mm]
회전자 외경	68[mm]
적층 길이	55[mm]
공극	0.5[mm]
정격 전류	5[Arms]
턴수	30
슬롯수	48
영구자석 재질	AlNiCo9(1.05[T], 120[kA/m])
영구자석 수	8
영구자석 두께	3[mm]
전기강판 재질	50PN800

체 전동기의 크기에 비해 공극이 작으므로 많은 요소로 균등하게 분할되어야 하며, 특히 에너지가 전달되는 공극은 정밀한 분석이 필요하다. 해석을 위해서 유한요소법을 사용하기로 하였으며, 이를 위하여 상용소프트웨어를 사용하여, 제안된 극변환 메모리 모터 모델의 실행 가능성을 증명하였다. 분석한 극변환 메모리 모터 모델(그림 4)에서 보이는 것과 같이, 영구 자석은 V자 형태로, 회전자 철심에 매입하여 고정하였다. 표 1은 분석 모델의 사양을 보여준다. 전기자 코일은 그림 6에서 보듯이 고정자 슬롯에 배열되어 있고, 그림 6은 8극 및 4극의 권선을 보여준다.

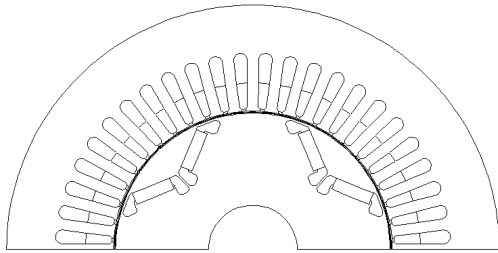


그림 4 PCMM의 단면도  
Fig. 4 Sectional View of PCMM

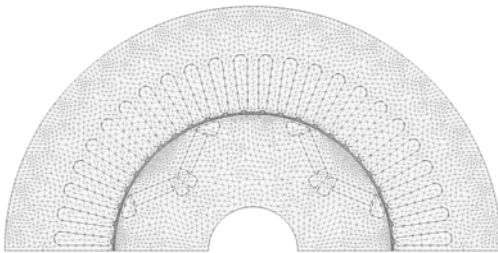


그림 5 PCMM의 요소분할도  
Fig. 5 Element Dividing View of PCMM

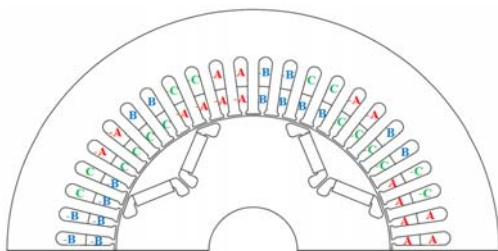
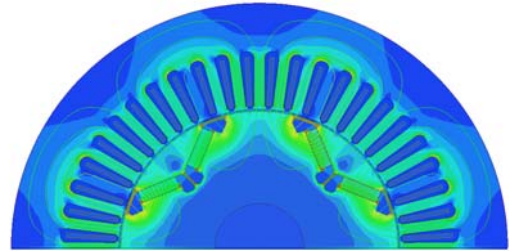


그림 6 코일 결선도 (위 : 8극, 아래 : 4극)  
Fig. 6 Winding View (up: 8-pole, down: 4-pole)

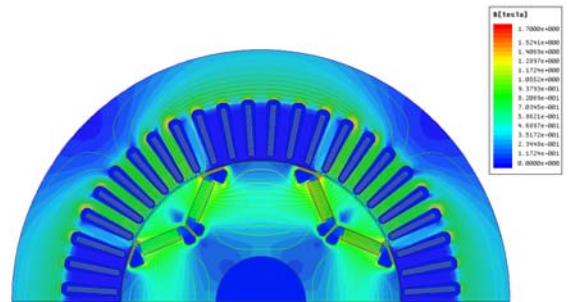
## 2.2 극변환과 가변 자속

FEM 자체 분석을 통한, 그림 7은 무부하 조건에서 8극 모드 및 4극 모드에서의 서로 다른 자속 밀도 분포를 보여준다. 모든 영구 자석이 같은 방향으로 자화되었을 때, 그림 7(a)와 같이 자속은 8극 자속 분포를 나타낸다. 일부 자석이 반대의 극성으로

자화되었을 때, 그림 7(b)와 같이 자속은 4극 자속 분포를 보인다. 그러므로 영구자석의 가변 가능한 자화는 영구자석 모터에서 극변환을 가능하게 한다. 그림 8은 3600[rpm]에서의 역기전력의 변화 특성을 보여준다.

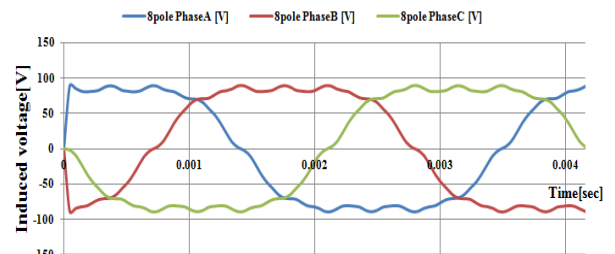


(a) 8극

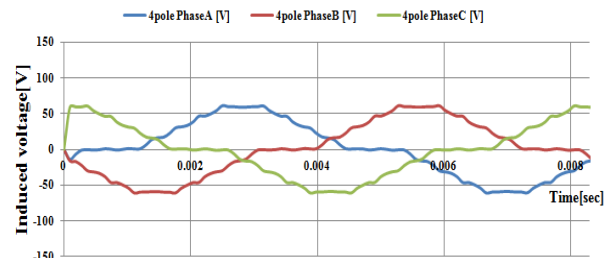


(b) 4극

그림 7 무부하 조건에서 PCMM의 자속밀도 및 분포  
Fig. 7 Flux Density and Distribution of PCMM in No-load Condition



(a) 8극



(b) 4극

그림 8 극변환에 따른 유도 기전력의 변화  
Fig. 8 Variation of EMF according to the Pole Change

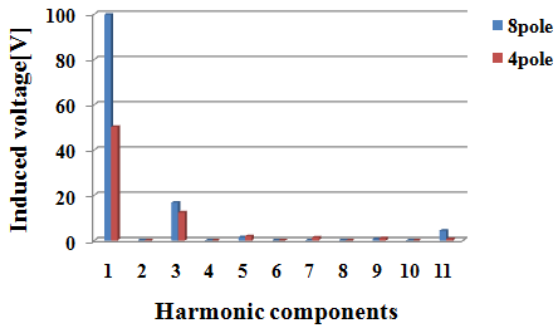
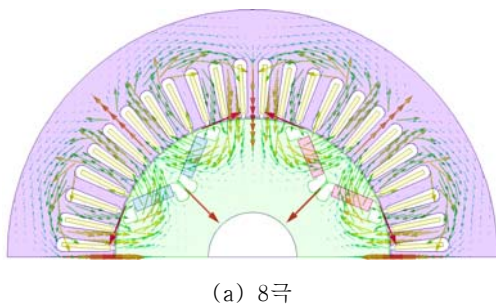


그림 9 유도 기전력의 고조파 성분 비교  
Fig. 9 Comparison of Harmonic of EMF

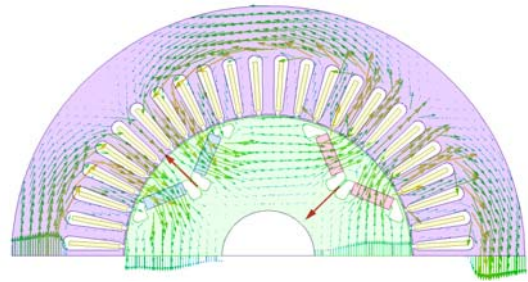
그림 8(a)의 유기전압은 71[Vrms]이고 그림 8(b)의 유기전압은 36[Vrms]이다. 모터가 8극에서 4극으로 변할 때, 유기 전압은 50%까지 줄어든다. 그림 9는 역기전력의 고조파 성분을 보여준다. 무부하 역기전력 3600[rpm]에서 8극 모드와 4극 모드에 대해 포함된 고조파 성분의 비율은 23.09%이며, 4극 모드의 경우는 34.07%이다.

### 2.3 PCMM의 자화특성

영구자석은 자화-감자시 회전자 극수가 바뀌는 것을 가능하게 한다. 자계 분석은 영구 자석의 극성이 바뀔 수 있는지 없는지 증명하기 위해 수행되었다. 자화 전류가 모터의 전기자 권선을 통해 흐른 후, 모터의 영구자석의 자화를 분석한다. 자화 전류는 극에서의 자계를 발생한다. 그러므로 극변환 후에, 자화 전류는 새로운 극에서 d-축 전류가 된다. 또한, 이전에 했던 실험적 결과[7]에서는 자석 분석을 사용하여 얻은 모터에서 영구자석은 감자-자화될 수 있다. 그림 10은 회전자의 영구자석에서 극성이 바뀐 자화 벡터를 보여주고 있다. 그림 11은 부하 조건에서 8극 및 4극의 자속 밀도 및 자속의 분포를 보여준다. 그림 11에서 알 수 있듯이 최대 자속밀도는 약 1.7[T]이며, 대부분 영역에서 1.2[T] 이하의 자속밀도를 나타내는 것을 보였다. 이를 통하여 설계된 고정자와 회전자의 치수는 적당함을 알 수 있었다. 만약, 설계가 잘못되어 자속밀도의 값이 너무 크게 나오면 모터는 포화영역에서 작동하게 되며, 이에 따라 손실이 커지게 된다. 유한요소해석을 통하여 모터 내부에서 발생하는 자속밀도의 분포가 적절한 것을 알 수 있다.



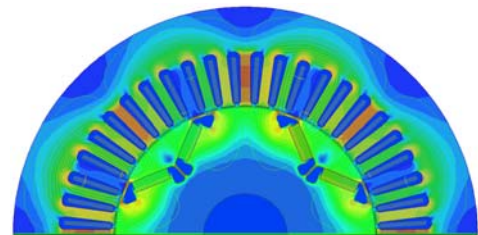
(a) 8극



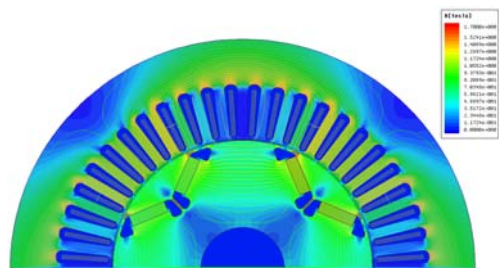
(b) 4극

그림 10 PCMM의 자화 벡터

Fig. 10 Flux Vector of PCMM



(a) 8극



(b) 4극

그림 11 부하 조건에서 PCMM의 자속밀도 및 분포

Fig. 11 Flux Density and Distribution of PCMM in Load Condition

### 2.4 PCMM의 토크특성

모터의 토크 성분은 회전자의 극수에 따라 달라진다. 토크 성분을 결정하기 위해, FEM 해석단계에서 주어진 전류값은 5[Arms]이다. 그림 12에서 8극의 토크는 2.8[Nm] 토크 리플은 14[%]이다. 4극의 토크는 1.6[Nm] 토크 리플은 21[%]이다. 4극 모드에서 토크는 8극 모드에서 토크의 약 0.58배이다. 4극 모드에서 유기 전압과 8극 모드에서 유기전압은 약 0.5배이기 때문에 이러한 결과는 다른 속도에 정출력으로 동작하는 모터가 극변환이 가능하게 하는 것을 보여준다. 토크 리플은 90° 당 리플수가 12(48슬롯/회전)이기 때문에 토크 리플은 고정자 슬롯에서 발생한다. 따라서 고정자-치형상의 최적화 또는 스텝-스큐의 기술은 토크 리플을 줄일 수 있게 한다. d축 펄스 전류가 영구자석을 매우 짧은 시간에 걸쳐 흐를 때, d축 펄스 전류는 릴러턴스 토크를 생성한다. 과도 토크를 위한 q축 전류의 제어는 과도 릴러턴스 토크를 감소시키



고 총 토크가 일정하게 유지될 수 있도록 한다.

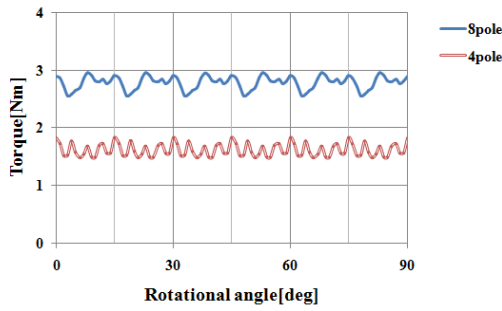


그림 12 PCMM의 토크 곡선  
Fig. 12 Torque Curve of PCMM

### 2.5 PCMM의 철손 분석

극변환에 의한 모터의 손실 감소를 분석했다. 철손은 고속에서 중요하므로, 모터의 효율은 그에 따라 감소한다. 그러나 모터의

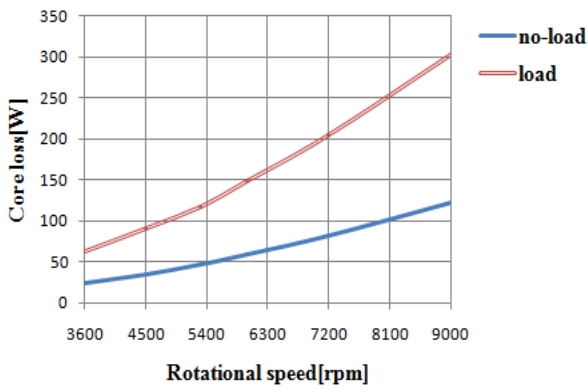


그림 13 8극 모드에서의 철손  
Fig. 13 Iron Losses of 8-pole Condition

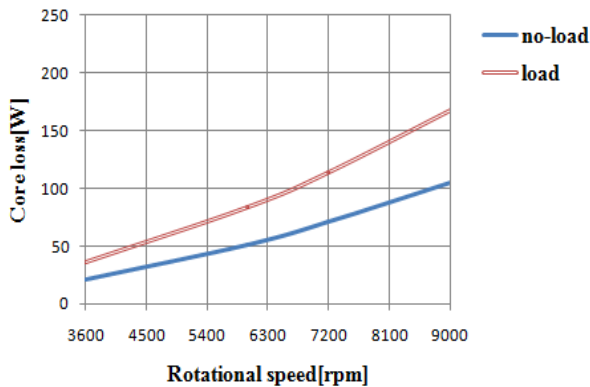


그림 14 4극 모드에서의 철손  
Fig. 14 Iron Losses of 4-pole Condition

극수가 감소한다면, 그만큼의 더 낮은 주파수로 구동할 수 있기 때문에 철손을 감소시킬 수 있다.

그림 13, 14는 FEM 분석을 사용하여 계산된 부하 및 무부하 조건에서 각각 8극 및 4극 모드에서의 철손을 보여준다. 이 결과들은 무부하 조건에서 4극 모드에서 철손은 8극 모드와 비교해서 약 10% 감소하고, 부하 조건에서 4극 모드 철손은 8극 모드와 비교해서 최대 55% 감소한다. 그림 13은 부하 조건에서 고속으로 회전할 때 일정한 주파수가 넘어가면 철손이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션에 사용된 전기 강판 재질은 POSCO 전기강판 50PN800이다. 이 전기강판 재질은 400[Hz]가 한계인 전기강판으로 400[Hz]가 넘어가는 회전속도 구간(8극 모드 6,000[rpm])에서는 손실이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 4극 모드 6,000[rpm] 구간에서는 주파수가 200[Hz]로 절반으로 줄어들기 때문에, 안정적으로 손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 고효율 극변환 모터를 위해서는 전기강판 재질의 선정은 매우 중요한 요소이다.

### 2.6 토크-속도 특성

모터의 전류 자속과 주파수는 모터의 손실에 큰 영향을 미치기 때문에 모터의 효율과 손실은 극수에 따라 변한다는 것을 제시하는 것은 타당하다. 토크-속도 곡선은 자계 분석에 기반을 둔 FEM에 의해 얻어진다. 최대 전압의 크기는 125[Vrms]이고, 최대 전류의 실효값은 5[Arms]이다. 그림 15는 다양한 속도의 모터 성능을 나타낸다. 4극 모드의 경우에는 톨러턴스 토크 성분이 증가하기 때문에,  $I_d$ 의 절대값이 0 ~ 4000[rpm] 범위의 토크와 함께 증가한다.  $I_d$ 의 절대값이 회전속도 4000 ~ 14000[rpm] 범위에서 발생하는 것과 같은 방식으로 약계자 제어로 인하여 증가한다. 그림 16에서 나타낸 바와 같이 결과적으로 회전속도는 6000[rpm] 이상으로 증가한다. 따라서 4극 모드 최대토크 조건에서의 최고 속도는 8극 모드 보다 대략 2배 정도인 것을 알 수 있다. 그러므로 4극 모드는 고속 영역에서 높은 출력용량으로 향상한다.

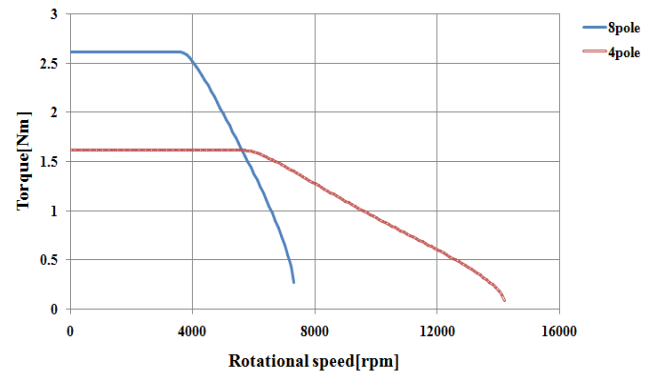


그림 15 가변속 드라이브 시스템에 의한 PCMM의 토크-속도 곡선  
Fig. 15 Torque-Speed Curve of PCMM by Variable Speed Drive System

## 3. 결 론

본 논문은 극수를 변환할 수 있는 영구자석 전동기를 제안하였고, 극변환 메모리 모터의 원리 및 기본 특성에 대해 다뤘다. FEM 분석의 결과로 극변환 메모리 모터의 역기전력 변화는 50 ~ 100%로 다양하다. 게다가, 극변환 메모리 모터는 각각 무부하와 부하 조건에서 철손을 10%와 최대 55%까지 줄일 수 있다. 또한, 가변속 드라이브를 사용한 극변환 메모리 모터는 극변환에 따른 최대 토크 조건에서 속도 범위는 2배로 증가하고, 폭넓은 속도 범위를 가지는 것을 확인하였다. 그러므로 제안된 모터는 상황에 따라 극변환 하여 높은 성능과 효율을 가지는 가변속 드라이브 시스템에 사용할 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 2015년도 산업통상자원부와 미래창조과학부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다(20124030200090 & 2013R1A2A2A04007384).

**References**

[1] A Weschta, "Schwächung des erregfeldes bei einer dauermagneterregren synchronmaschine", ETZ Arch., vol. 7, no. 3, pp. 79~84, 1985

[2] V. Ostovic, "Memory Motors", IEEE Industry Applications Magazine, vol. 9, pp. 52~61, Jan/Feb. 2003

[3] V. Ostovic, "Pole-changing permanent-magnet machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6, pp. 1493~1499, Nov/Dec. 2002.

[4] H. Liu, H. Lin, Z. Q. Zhu, M. Huang, and P. Jin: "Permanent Magnet Remagnetizing Physics of a Variable Flux Memory Motor", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 1679~1682, 2010.

[5] K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, and K. Yasui, "Principle of the variable-magnetic-force memory motor", in ICEMS 2009, pp. LS6A-1.

[6] K. Sakai, D. Misu, K. Yuki, K. Yasui, Y. Hashiba, and N. Takahashi, "New generation motor for energy saving", in Proc. 2010 International Power Electronics Conf., pp. 1354~1358

[7] K. Sakai, H. Hashimoto, and S. Kuramochi, "Principle of hybrid variable-magnetic-force motors", in Proc. 2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conf., pp. 53~58

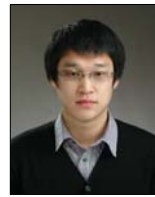
[8] K. Sakai, H. Hashimoto, and S. Kuramochi, "Principle and basic characteristics of hybrid variable-magnetic-force motors", in Proc. 2011 14th European Conf. on Power Electronics and Applications, paper 0087

[9] J. H. Lee, J. P. Hong "Permanent Magnet Demagnetization Characteristic Analysis of a Variable Flux Memory Motor Using Coupled Preisach Modeling and FEM", IEEE

Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 6, pp. 1550~1553, Jun. 2008.

[10] J. H. Lee, S. C. Lee "Magnetization Characteristics Analysis in a Pole Changing Memory Motor Using Coupled FEM and Preisach Modeling", Journal of Magnetics, vol. 16, no. 4, pp. 386~390, Nov. 2011

**저 자 소 개**



**김 영 현(Young-Hyun Kim)**

1982년 07월 06일생. 2008년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원전기 공학과 박사과정.

Tel : 042-821-1626

E-mail : [kimyh@hanbat.ac.kr](mailto:kimyh@hanbat.ac.kr)



**김 수 용(Su-Yong Kim)**

1987년 07월 02일생. 2013년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사).

Tel : 042-821-1626

E-mail : [forx2@nate.com](mailto:forx2@nate.com)



**김 정 우(Jung-Woo Kim)**

1987년 04월 13일생. 2013년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사).

Tel : 042-821-1626

E-mail : [sayzz1507@naver.com](mailto:sayzz1507@naver.com)



**이 중 호(Jung-Ho Lee)**

1968년 08월 21일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원전기 공학과 졸업(공박). 1999년 9월 ~ 2000년 2월 한양대학교 부설 산업과학연구소 선임 연구원. 2000년 3월 ~ 2002년 2월 독립 충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월 ~ 현재 국립한밭대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 시니어 회원.

Tel : 042-821-1098

E-mail : [limotor@hanbat.ac.kr](mailto:limotor@hanbat.ac.kr)

