



# 2015 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회

## KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

기간: 2015. 11. 18(수)~21(토)

장소: **HICO** 경주화백컨벤션센터  
GYEONGJU Hwabaek International Convention Center

후원:  **KOFST**  
한국과학기술단체총연합회

 **Gride**  
Gyeongbuk

 **Gyeongju**  
CVB

 **Gyeongju**  
CVB



Km/h



**한국자동차공학회**  
The Korean Society of Automotive Engineers

- 1185 소형 하이브리드 전기 자동차 제어 시스템 개발을 위한 BenchTop Test Simulator 제작  
김익환\*(국민대학교), 김정용(국민대학교), 최웅철(국민대학교)
- 1186 공기공급장치 변경에 따른 상압형 자동차용 연료전지시스템의 효율 분석  
김일중\*(서울과학기술대학교), 이정재(서울과학기술대학교), 김한상(서울과학기술대학교)
- 1189 양전자교환막 연료전지 기체 확산층 두께에 따른 단일 유로 채널에서의 물방울 특성 횡단면 가시화 연구  
김한상\*(서울과학기술대학교)
- 1192 태양전지 파노라마 루프의 글라스 구동에 따른 접촉스위치의 최적화  
라명수\*(베바스토동회홀딩스), 최수윤(베바스토동회홀딩스), 전병윤(베바스토동회홀딩스), 정전기(베바스토동회홀딩스)
- 1197 EV용 WFSM의 최대효율 제어를 통한 효율 개선  
박진철\*(한양대학교), 차경수(한양대학교), 채승희(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1202 마그파인 자석의 불가역 감자 특성을 고려한 전기 자동차 구동용 전동기 설계  
박호용\*(한양대학교), 이수경(한양대학교), 정영훈(한양대학교), 정경태(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1206 전기차 에어컨용 베인 압축기의 열유동 해석을 통한 성능 설계  
배석정\*(자동차부품연구원), 허형석(자동차부품연구원), 이준용(자동차부품연구원)
- 1214 EPS용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계  
손형수\*(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 김두영(한양대학교)
- 1218 고조파 전류 인가 방법을 이용한 Electric Power Steering용 매입형 영구자석 동기 전동기의 토크리플 저감  
신창욱\*(한양대학교), 김두영(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 1223 Kalman Filter와 Least Squares Method를 이용한 전방 타깃의 위치 추정 시스템  
유동연\*(성균관대학교), 박찬호(성균관대학교), 황성호(성균관대학교)
- 1225 PMP 기반 병렬형 플러그인하이브리드 차량의 동력분배 제어  
이성화\*(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 1227 연료전지 시스템 운전 시 수소 크로스오버 발생량에 대한 고찰  
정애리\*(서울대학교), 김민수(서울대학교)
- 1228 ISG 시스템의 테스트 벤치 기반 성능시험 환경 구축  
정연수\*(한양대학교), 김영준(한양대학교), 박태호(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 1230 HEV LDC의 성능 평가를 위한 실차 환경 모사 시스템 개발  
조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
- 1232 1.5 kW급 HEV LDC의 실차 시험을 통한 동작 성능 검증  
조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)

# 마그파인 자석의 불가역 감자 특성을 고려한 EV 구동용 전동기 설계

박호용·이수경·정영훈·정경태·홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

## EV Traction Motor Design Considering Irreversible Demagnetization Characteristic of Magfine Magnet

Ho-Yong Park\* · Soo-Gyung Lee · Young-Hoon Jung · Kyung-Tae Jung · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : Recently, the high power density and efficiency of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for electric vehicle traction has been attracting attention. Particularly in order to overcome the cost issues of rare-earth dependent on China, Magfine magnet, which consists of neodymium without Dysprosium (Dy) and has enhanced coercive force, has been developed. However, Magfine magnet is vulnerable to irreversible demagnetization by external magnetic field. And it is essential to prevent this phenomenon. This paper suggests a design using the magnetic flux barriers in order to decrease the irreversible demagnetization of the permanent magnet (PM). Also, by using the 2-D finite element analysis (2-D FEA), it was confirmed that the permanent magnet irreversible demagnetization characteristic of the proposed model is improved. Thus, when advancing research in consideration of the Magfine fabrication process, it is expected that the commercialization of Magfine magnet can be accelerated with a more accurate performance prediction.

**Key words** : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM, 매입형 영구자석 동기전동기), Irreversible demagnetization (불가역감자), Magfine magnet (마그파인 자석), Rare-earth element (희토류 원소), Two-dimensional Finite Element Method (2-D 유한요소해석)

### Nomenclature

$B$  : magnetic flux density, T  
 $B_r$  : residual induction, T  
 $d$  : demagnetizing ratio, %  
 $D$  : external diameter of rotor, m  
 $h$  : magnet width, m  
 $H$  : magnetic field intensity, A/m  
 $H_c$  : coercive force, A/m

$k_w$  : winding factor  
 $L$  : length  
 $N$  : number of turns  
 $p_c$  : permeance coefficient  
 $t$  : thickness of permanent magnet, m  
 $\lambda$  : linkage flux, Wb  
 $\mu$  : permeability

### Subscripts

$a$  : armature  
 $g$  : air gap  
 $m$  : max  
 $rec$  : recoil

\* 박호용, E-mail: baramhy7@hanyang.ac.kr

## 1. 서론

회전자 내부에 영구자석을 매입한 형태의 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 높은 출력 밀도와 넓은 속도 범위를 가져 전기자동차 구동용 전동기, 가전용 소형 전동기 등 다양한 응용분야에서 사용되고 있다. 회전자에 사용되는 대표적인 영구자석에는 잔류자속밀도와 보자력이 큰 네오디뮴(Nd-Fe-B)자석이 있다. 그러나 최근 희토류 자석의 공급과 수요의 불균형으로 인해 자원 수급의 문제가 발생하면서 이러한 문제를 극복하기 위해 디스프로슘(Dysprosium, Dy)을 첨가하지 않고 결정립을 미세화시켜 보자력을 높인 마그파인(Magfine)자석이 개발되었다<sup>1)</sup>.

기존 논문에서 마그파인 자석의 단면적을 증가시킨 전동기의 출력 특성을 검토하였으나 회전자 리브(rib)측 자석에서 불가역 감자 현상이 두드러짐을 확인하였다<sup>2)</sup>. 본 논문에서는 마그파인 자석의 불가역 감자 특성에 대해 검토하고, 자속 장벽을 이용한 설계 방안<sup>4)</sup>을 적용하였다. 또한 2-D 유한요소해석 프로그램을 이용하여 제안된 모델의 마그파인 자석 불가역 감자 특성이 개선되는 것을 확인하였다. 이를 통해 향후 마그파인 자석의 불가역 감자 특성 개선의 필요성을 시사한다.

## 2. 마그파인 자석의 불가역 감자 특성

희토류 소결자석의 경우 영구자석 자화 곡선의 2사분면에서 Knee point를 전후로 선형적인 특성을 갖지만 마그파인 자석의 경우 Knee point가 존재하지 않아 전 구간에서 비선형적인 특성을 갖는다<sup>3)</sup>. 본 논문에서는 마그파인 자석의 불가역 감자 특성과 감자 해석 프로세스를 검토하고, 검토된 프로세스에 의해 기존 모델과 자속 장벽을 적용한 모델의 감자율을 비교하였다.

### 2.1 영구자석의 불가역 감자 해석 프로세스

다음 Fig. 1은 영구자석의 불가역 감자 해석 프로세스를 나타낸다. 쇄교 자속 비교를 위해 고정자 전류를 인가하기 전의 쇄교 자속을  $\lambda_1$ , 고정자 전류를 인가한 후의 쇄교 자속을  $\lambda_2$ 로 정의하였다. 2-D FEA(Finite Element Analysis)를 통해 무부하

시 한 상의 쇄교 자속 ( $\lambda_1$ )을 구한 후, Fig. 2(a)에 제시된 바와 같이 영구자석에 반작용 자계가 가해지도록 기자력 축을 d축에 정렬하였다. 회전자의 초기 위치에서만 고정자 전류를 인가해준 후 나머지 위치에서는 Fig. 2(b)에서와 같이 다시 무부하 해석을 진행하여 쇄교 자속 ( $\lambda_2$ )을 얻었다. 그 결과, 고정자 전류를 인가하기 전후의 무부하 쇄교자속을 비교하여,  $\lambda_1 = \lambda_2$  이면 불가역 감자가 발생하지 않은 것으로 판단하고,  $\lambda_1 > \lambda_2$  이면 불가역 감자가 발생한 것으로 판단하였다. 마그파인 자석은 비선형적인 특성으로 인해 이 과정이 반드시 필요하다.

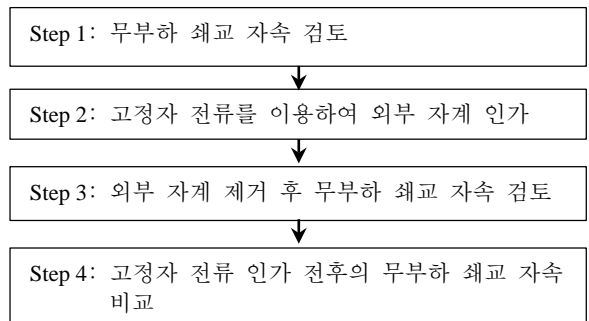


Fig. 1 Demagnetization Analysis Process of Permanent Magnet

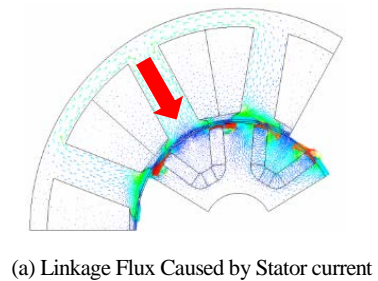


Fig. 2 Linkage Flux



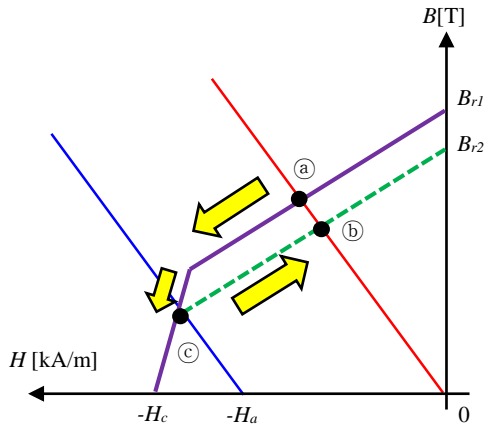


Fig. 3 Demagnetization Curve of Permanent Magnet

영구자석을 감자시키는 여러 경우 중에서도 외부 자계에 의한 감자를 중심으로 살펴본다. Fig. 3은 영구자석의 감자 특성 곡선을 이용하여 감자해석 프로세스를 도식화한 것이다. 초기 동작점 ①은 전동기 형상에 의해 결정되며, 외부 자계인가 시 동작점이 knee point를 넘어 ③으로 이동한다. 외부 자계가 제거되었을 때 동작점은 ②로 변한다. 이처럼 불가역 감자가 발생할 경우, 동작점이 바뀌면서 영구자석의 자속밀도가 감소하게 되는데, 해석적인 방법을 이용하여 영구자석에 의한 자속밀도의 최대값은 식(1)로 표현할 수 있다. 또한, 최대 쇄교 자속은 식(2)와 같다. 영구자석의 잔류자속밀도가 감소하면, 식(1)에 의해 영구자석에 의한 최대자속밀도가 감소하며, 식(2)에 의해 영구자석에 의한 최대 쇄교자속도 감소한다. 따라서 쇄교자속의 변화량을 통해 영구자석의 불가역 감자 여부를 판단할 수 있다.

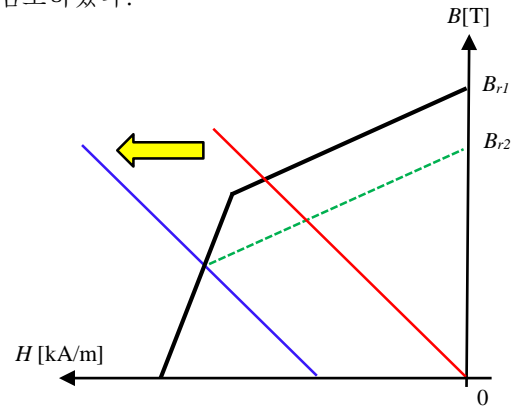
$$B_{gm} = B_r \cdot \frac{1}{\left( \frac{\pi}{2P} \cdot \frac{D}{h} \right) + \left( \frac{\mu_{rec} \cdot L_g}{t} \right)} \quad (1)$$

$$\lambda_m = \frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{k_w \cdot N}{2P} \right) \cdot D \cdot L_{stk} \cdot B_{gm} \quad (2)$$

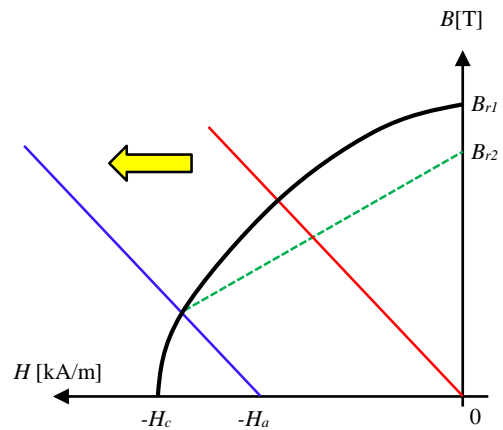
$$d = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \times 100[\%] \quad (3)$$

## 2.2 마그파인 자석의 감자 특성

Fig. 4 에서와 같이 영구자석은 종류에 따라 다른 감자 특성 곡선을 갖는다. 대표적으로 주로 사용되는 네오디뮴 자석과 마그파인 자석의 감자 특성 곡선을 비교해 본 결과 네오디뮴 자석은 knee point 전후로 선형적인 특성을 보이며, 마그파인 자석은 knee point가 존재하지 않아 비선형적인 특성을 보인다. 네오디뮴 자석의 경우, 무부하 시 쇄교 자속의 변화량을 비교하여 불가역 감자 여부를 판단하는 반면에, 마그파인 자석의 경우 불가역 감자를 피할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 감자율을 식(3)과 같이 정의하고 이를 개선하기 위한 방안을 검토하였다.



(a) Demagnetization Curve of Nd-Fe-B Magnet



(b) Demagnetization Curve of Magfine Magnet

Fig. 4 Demagnetization Curve of Permanent Magnet

### 3. 마그파인 자석의 감자율 개선 방안

마그파인 자석의 감자에 취약한 특성을 개선하기 위해 기존 모델과 자속 장벽을 추가한 모델의 감자율을 비교하였다. 마그파인 자석의 모든 요소는 동일하게 착자되었다고 가정하며, 비교 모델의 축 방향 길이, 고정자의 형상은 동일하게 유지하였다. Fig. 5(a)와 같이 기존 모델의 경우 외부 자계가 인가될 경우, 회전자 리브측에 있는 자석이 외부 자계의 영향에 노출되어 감자에 취약한 특성을 보인다. 본 논문에서는 마그파인 자석의 감자율을 줄이는 방안으로 Fig. 5(b)와 같이 자속 장벽을 적용하였으며, 기존 모델의 회전자 리브측 마그파인 자석을 자속 장벽으로 대체하여 길이에 따른 감자율 변화를 확인하였다. 앞서 제시한 감자해석 프로세스에 따라 확인한 결과 Fig. 6에서처럼 감자율이 12[%]에서 7.5[%]까지 감소하였다.

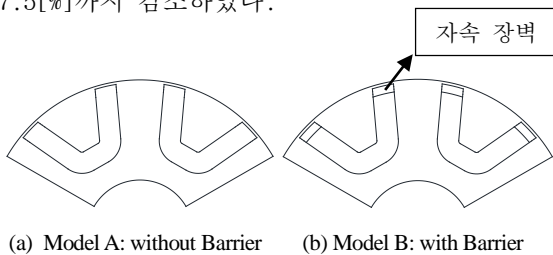


Fig. 5 Analysis Model According to Shape of Rotor

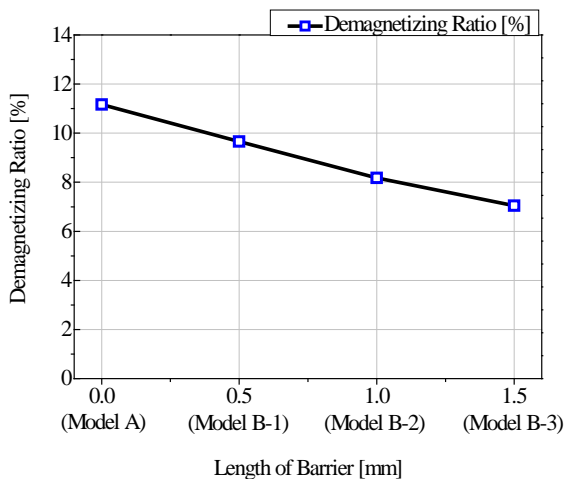


Fig. 6 Demagnetizing Ratio According to length of Barrier

### 4. 결 론

본 논문에서는 마그파인의 비선형 자화 특성을 고려하여 감자율을 정의하고, 감자율을 낮추기 위한 방안을 검토하여 적용해 보았다. 2-D FEA를 이용하여 해석한 결과 전동기 설계 시 회전자 리브측 자석을 자속 장벽으로 대체하면 마그파인의 감자율이 감소하는 것을 확인하였다. 영구자석의 불가역 감자를 개선하기 위한 여러 방안이 제시되었지만, 아직 마그파인의 감자율 개선에 대한 연구가 더 필요하다. 마그파인 감자율 개선을 통해 추후 마그파인의 제작공정을 고려한 연구를 진행하면 보다 정확한 성능 예측으로 마그파인 자석의 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

### References

- 1) Soo-Gyung Lee, Young-Sung Kim, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong, "Characteristic Analysis of Double Layer MAGFINE Magnet Shaping in Automotive Motor", The Korean Society Of Automotive Engineers, pp.1024-1028, 2015.
- 2) Young-Sung Kim, Young-Jin Shin, Ning Wang, Shuang Liu, Jung-Pyo Hong, Characteristic Analysis of Magfine Magnet Shaping in IPM Machines", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp.890-891, 2014.
- 3) Hae-Joong Kim, Kyu-Seob Kim, Jung-Pyo Hong, "Development of Brushless Permanent Magnet Motor Using an Nd-Fe-B Anisotropic Bonded Magnet", The Korean Institute of Electrical Engineers, pp.807-808, 2013.
- 4) Cheol-Min Kim, Gyu-Won Cho, Gyu-Tak Kim, "The Rotor Barrier Design of the BLDC Motor Consider that Irreversible Demagnetization of Permanent Magnets", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp.48-53, 2014.