



KIEE Summer Conference 2013

대한전기학회 제44회 하계학술대회

2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금) 제주국제컨벤션센터

KIEE Summer Conference 2013

일시 : 2013년 7월 10일 (수) ~ 12일 (금)

장소 : 제주국제컨벤션센터



01. Home



02. 목차(Contents)



03. 저자색인



04. 검색(Search)



• 주최 :  대한전기학회

• 후원 : 산업통상자원부, 미래창조과학부,
제주특별자치도, 한국전력공사,
한국전기공사협회, 한국과학기술단체총연합회

• 협찬 : 2013 하계 협찬업체

전시회 참가업체

● EMP017	SMC 재질을 이용한 IPMSM 특성 검토 김도진*, 채승희, 정영훈, 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP046	수냉식의 ISG 전동기의 열등가화로 해석 김규섭 (한양대), 정재우 (한양대), 박민로 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP068	유한요소해석에서 적층에 따른 고정자 기계적 이방성 물성치 고려 방법 김두영 (한양대), 박현진 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP077	유한요소 해석법과 등가회로 해석법의 결합에 의한 유도전동기의 특성해석 이수진 (한양대), 김지민 (한양대), 심재한 (한양대), 김동민 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● EMP078	이방성 Nd-Fe-B 보드자석을 이용한 브러쉬리스 영구자석 동기 전동기 개발 김해중 (한양대), 김규섭 (한양대), 홍정표 (한양대)	[논문보기]
● REP033	육상 해상 풍력타워 리프트 개발에 관한 연구 김영수 (한국승강기대), 김창일 (한국승강기대), 이상훈 (한국승강기대), 홍정표 (동의과학대학), 이건복 (해성산전), 박종열 (해성산전), 권순재 (부경대)	[논문보기]

이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 이용한 브러쉬리스 영구자석 동기 전동기 개발

김해중, 김규섭, 홍정표
한양대학교

Development of Brushless Permanent Magnet Motor Using an Nd-Fe-B Anisotropic Bonded Magnet

Kim Hae-Joong, Kim Kyu-Seob, Hong Jung-Pyo
Hanyang University

Abstract - 현재까지 회로류 소결자석을 사용하는 브러쉬리스 영구자석형 동기전동기는 세탁기나 냉장고와 같은 가전분야나, 차량용 파워휠들, 공기 블로어와 같은 자동차분야 등, 다양하고 폭넓은 분야에서 사용되어 지고 있다. 그러나 회로류의 가격이 상승하면서 비회로류 전동기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 회로류 소결자석 대신 디스프로슘이 포함되지 않은 이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 이용하여 자속집중타입 가전용 전동기 개발을 수행하였다. 비교를 위하여 회로류 소결 자석을 이용한 Interior Permanent Magnet(IPM) 모델을 설계하였으며, 이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 사용한 동일 모델(자속집중타입)에 대해 영구자석을 페라이트로 대체해 보았다. 이방성 Nd-Fe-B 본드자석의 비선형 자화특성을 고려하기 위하여 해석방법을 연구하였으며, 해석방법에 대한 검증을 위해 C-Core 모델을 이용하였다. 2D 유한요소 정자기 해석을 통하여 각 모델의 영구자석 비선형 특성을 고려한 파라미터 해석을 수행하였으며, 산정된 파라미터를 바탕으로 d, q축 등가회로를 이용한 특성해석을 수행하였다. 설계 결과, 동일한 토크 및 출력의 페라이트 전동기보다 이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 이용할 경우 약 34.5%의 체적을 줄일 수 있었다.



〈그림 1〉 영구자석 비선형 자화특성을 고려한 해석프로세스

1. 서 론

오늘날 영구자석형 전동기는 우수한 성능을 갖추고 동시에 저렴한 가격과 소형화를 필요로 하고, 또한 에너지 절감을 위해 고효율화가 이루어져야 한다. 이를 위하여 현재까지 회로류 소결자석을 사용하는 브러쉬리스 영구자석형 동기전동기가 세탁기나 냉장고와 같은 가전분야나, 차량용 파워휠들, 공기 블로어와 같은 자동차분야 등, 다양하고 폭넓은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 최근 회로류 소결자석은 생산비용의 상승 및 생산량 감소 등으로 인하여 가격이 상승하고 있고, 이를 대체하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 디스프로슘을 제거한 이방성 Nd-Fe-B 본드자석은 페라이트보다 높은 에너지밀도를 가지고 있으며 에너지적 향상을 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 이러한 노력의 결과로서 일본의 Aichi Steel사에서는 Dynamic Hydrogenation Decomposition Desorption Recombination(HDDR)공법을 이용한 고에너지 밀도를 갖는 이방성 Nd-Fe-B 본드자석인 MAHGINE를 개발하였다[1].

일반적으로 Nd-Fe-B 영구자석은 제조과정에 따라 소결자석과 본드자석으로 나눌 수 있고, 미세구조에 따라서 이방성 혹은 등방성을 갖는다. 소결자석은 단단한 구조이며, 형상의 자유도가 낮은 단점을 갖는다. 그러나 본드자석은 영구자석이 놓이게 되는 공간에 자석재질을 주입하고, 굳히는 방식으로서, 형상의 자유도가 높지만 배향율의 문제점이 있다.

이방성 Nd-Fe-B 본드자석은 디스프로슘을 사용하지 않으므로 회로류 소결자석보다 가격이 저렴하지만 영구자석 잔류자속밀도가 낮다. 반대로 페라이트 보다 가격이 높고, 잔류자속밀도가 높은 특징을 갖는다. 또한 페라이트나 회로류 소결자석의 경우 영구자석 자화곡선 2사분면에서 Knee Point 이전과 후에서 선형적인 특성을 갖지만 이방성 Nd-Fe-B 본드자석은 Knee Point가 존재하지 않고, 자화곡선 전 구간에서 비선형적인 특징을 갖는다. 그러므로 역기전력이나 인덕턴스와 같은 전동기 파라미터들에 대한 산정 및 정확한 토크 산정을 위해서는 이와 같은 특성을 고려해 주어야 한다. 본 논문에서는 이방성 Nd-Fe-B 본드자석의 비선형적 자화특성을 고려한 해석방법을 검토하였으며, 검토된 해석방법에 대한 신뢰성을 높이기 위해 C-core 모델을 이용하여 자기등가회로와 유한요소해석을 통한 영구자석 비선형 해석 결과를 비교하였다.

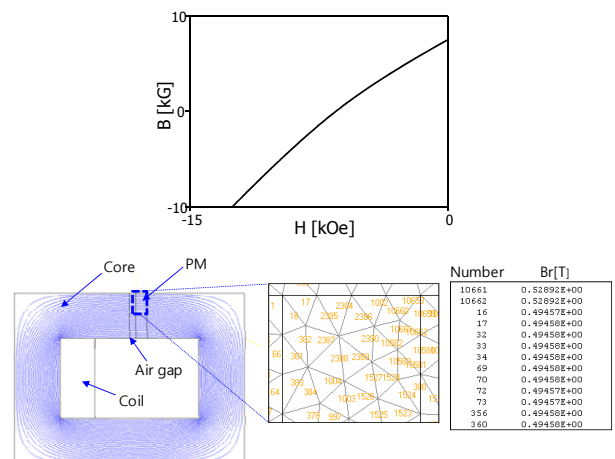
검토된 영구자석 비선형 해석 방법을 이용하여 이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 적용한 가전용전동기의 설계를 진행하였다. 무부하역기전력과 인덕턴스와 같은 전동기 파라미터를 산정하였으며, 산정된 파라미터를 이용하여 d, q축 등가회로를 이용한 특성해석을 수행하였다. 비교를 위해 회로류소결 자석을 이용한 IPM 모델을 설계하였으며, 이방성 Nd-Fe-B 본드자석을 사용한 동일 모델(자속집중타입)에 대해 영구자석을 페라이트로 대체해 보았다[2][3].

2. 본 론

2.1 Magfine의 영구자석 비선형 해석

유한요소법을 이용하여 전동기 자기해석을 수행할 때 영구자석의 자화곡선을 선형으로 가정하고 해석할 경우 영구자석 동작점에 관계없이 모든 삼각요소에서 잔류자속밀도가 동일하다. 그러나 비선형특성을 갖는 Magfine은 동작점에 따라 각 요소의 잔류자속밀도가 바뀌어야 한다. 그림 1은 Magfine의 비선형적인 자화 특성을 고려한 해석 프로세스를 보여주고 있다. 초기에 영구자석 잔류자속밀도를 가정하고 철심의 비선형 특성을 고려하여 유한요소해석을 수행한다. 그러면 각 영구자석 삼각요소에서 동작점이 계산되고, 이 동작점을 비선형자화곡선에서 확인한다. 영구자석 recoil permeability를 고려하여 잔류자속밀도를 갱신하고, 갱신된 잔류자속밀도를 이용하여 다시 철심의 비선형 특성을 고려한 유한요소해석을 수행하게 된다. 결국 반복수렴법을 이용하여 잔류자속밀도가 수렴하게 되면 해석이 종료된다.

그림 2는 Magfine의 비선형적인 특성을 갖는 자화곡선과 C-core의 영구자석 삼각요소 및 각 요소에서의 잔류자속밀도 해석결과를 보여주고 있다. 영구자석의 각 요소에서 잔류자속밀도가 다른 것을 알 수 있다.



〈그림 2〉 C-core 및 이방성 Nd-Fe-B 본드자석 비선형 해석

C-core의 두께는 4mm이고, 공극길이는 0.5mm, 영구자석 두께는 1mm이며, 300A/m의 반작용자계를 인가하였다. 표 1은 C-core의 유한요소법을 이용한 영구자석 비선형 해석결과와 자기등가회로를 이용한 영구자석 비선형 해석 결과를 보여주고 있다. 두 해석 방법으로 계산된 영구자석의 평균 동작점과 쇄교자속, 감자율이 거의 동일함을 알 수 있다.

〈표 1〉 해석결과 비교

항 목	PM 동작점[T]	쇄교자속[mWb]	감자율[%]
FEA	0.305	1.22	3.96
자기등가회로	0.301	1.20	3.97

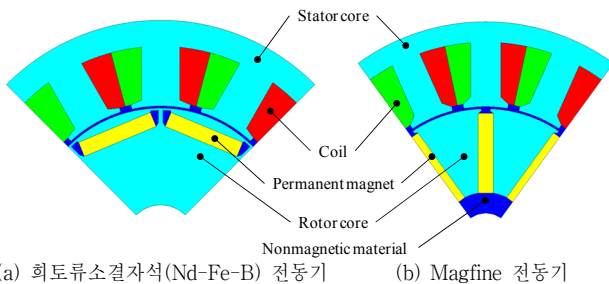
2.2 Magfine을 이용한 가전용 전동기 설계 결과 비교

앞에서 제시한 해석 방법을 이용하여 Magfine전동기의 설계를 진행하였다. 동일 모델에 대해 Magfine을 페라이트로 대체하여 성능을 비교하였다. 이때 동일 출력을 만족시키기 위해 적층길이를 증가시켜야 했다. 또한 비교를 위하여 기존모델이 되는 회토류소결자석을 사용한 IPM 전동기를 설계하였다. 각 전동기의 고정자와 회전자 외경, 입력전압과 전류밀도는 동일하다. 그림 3은 1.5kW급 가전용 전동기 설계 결과를 보여주고 있다. 회토류소결자석을 사용한 기존모델은 8극 12슬롯 IPM타입이다. Magfine을 이용할 경우 잔류자속밀도가 40%정도 감소하므로 영구자석 자속량 확보를 위하여 극수를 증가시킨 10극 15슬롯 자속집중타입으로 설계를 진행하였다. 스위칭 주파수를 고려해볼 때 매우 높은 극수를 택할 경우 영구자석 자속량 확보에 도움이 될 수 있으나 최대속도에서 전류파형의 왜곡으로 전동기특성이 나빠질 수 있다.

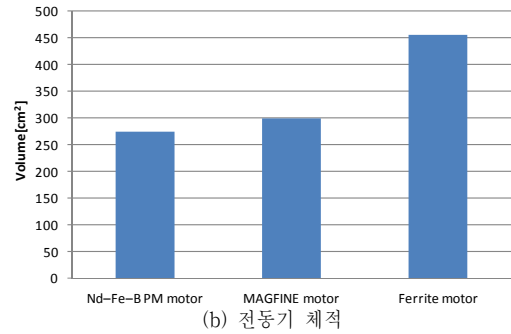
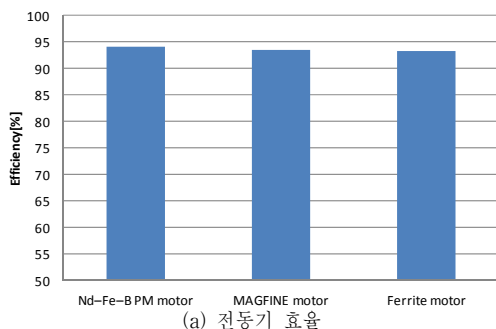
앞서 제시한 방법을 이용하여 Magfine을 사용한 전동기의 역기전력과 인덕턴스 등의 파라미터를 산정하였다. 그리고 산정된 파라미터를 이용하여 d, q축 등가회로를 이용한 특성해석을 진행하였다.

그러나 무부하역기전력을 사용한 d, q축 등가회로 특성 해석 결과는 무부하역기전력이 Magfine의 비선형 자화특성을 고려하였다 할지라도 부하 시 비선형성을 고려하지 못하므로 오차를 발생시킨다. 그래서 본 논문에서는 영구자석 비선형성을 고려한 전류와 전류위상에 따른 부하 시 역기전력을 산정하고, 이것을 특성해석에 반영하였다. 인덕턴스 또한 자화곡선의 비선형성이 고려되어야 하지만 본 논문에는 적용되지 않았고, 추후에 적용할 계획이다. 철손은 각 요소의 자속밀도와 주파수를 이용하여 철손데이터를 통해 요소별 철손을 합하는 방법으로 산정되었고, 기계손은 기존모델의 실험데이터를 이용하였다.

그림 4는 설계된 전동기들의 효율과 전동기 체적을 보여주고 있다. Magfine 전동기가 회토류소결자석 전동기보다 약 0.6%정도 효율이 낮은 것으로 나타났고, 페라이트보다는 약 0.2% 높게 나타났다. 전동기 사이즈는 Magfine 전동기가 회토류소결자석 전동기보다 약 8.6%정도 증가하였지만 페라이트 전동기는 약 65.7%나 증가하였다. 그러므로 기존 회토류소결자석 전동기를 대체하는데 있어서 Magfine 전동기가 페라이트 전동기보다 매우 유리할 것으로 판단된다.



〈그림 3〉 전동기 형상



〈그림 4〉 전동기 효율 및 체적

표 2는 각 전동기의 설계 결과를 보여주고 있다. 회토류소결자석의 잔류자속밀도가 1.3T이고, Magfine는 이보다 40% 낮은 0.78T이며, 페라이트는 66% 낮은 0.44T이다. Magfine 전동기는 잔류자속밀도 감소에 비하여 전동기 체적증가가 크지 않다. 그러나 페라이트 전동기의 사이즈는 크게 증가하였다.

〈표 2〉 전동기 설계 결과

구분	값	
	극수/슬롯수	값
회토류소결자석 전동기	극수/슬롯수	8/12
	잔류자속밀도[T]	1.3
	전동기체적[cm³]	274.9
Magfine 전동기	극수/슬롯수	10/15
	잔류자속밀도[T]	0.78
	전동기체적[cm³]	298.5
페라이트 전동기	극수/슬롯수	10/15
	잔류자속밀도[T]	0.44
	전동기체적[cm³]	455.5
	효율[%]	93.3

3. 결 론

본 논문에서는 Magfine의 비선형 자화특성을 고려한 해석방법을 제시하고, 제시된 방법을 이용해 Magfine 전동기를 설계하였다. 또한 성능 비교를 위하여 회토류소결자석 전동기와 페라이트 전동기도 설계하였다. 성능 비교 결과, 효율에는 큰 차이가 없었고, 전동기 사이즈는 페라이트 전동기가 크게 증가한 반면 Magfine 전동기는 사이즈 증가가 크게 않았다. 그러므로 페라이트 전동기보다 Magfine 전동기가 경쟁력이 있는 것으로 생각된다.

“본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.”
(No. 2012T100201723)

〈참 고 문 헌〉

- [1] Hyo Jun Kim, Chang Seop Koh and Pan Seok Shin, “A New Anisotropic Bonded NdFeB Permanent Magnet and Its Application to a Small DC Motor,” *IEEE Trans. on Magn.*, vol.46, no.6, pp. 2314-2317, 2010.
- [2] R. Nakayama, T. Takeshita, M. Itakura, N. Kuwano, and K. Oki, “Magnetic properties and microstructures of the Nd-Fe-B magnet powder produced by hydrogen treatment,” *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 7, pp. 3770-3774, Oct. 1991.
- [3] S. Sugimoto, S. Ohga, K. Inomata, M. Okada, K. Suzuki, T. Konno, and K. Hiraga, “Thermodynamic and microstructure studies of the HDDR treatment in the Sm-Fe-N and Nd-Fe-B compound,” in *Proc. 17th Int. Workshop Rare-Earth Magnets and Their Applications*, pp. 636-643, 2002.