

3차원 등가자기회로방법을 이용한 영구자석형 역추에이터의 영구자석 오버행 효과에 대한 연구

°권호, 임성엽, 이주, 권삼영*, 최승길**, 백수현***
 한양대학교 전기공학과, 한국 철도기술연구원*, 안산공과대학 전기공학과**, 동국대학교 전기공학과***

A Study on the Permanent Magnet Overhang Effect in Permanent Magnetic Actuator Using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method

°H. Kwon, S.Y. Lim, J. Lee, S.Y. Kwon*, S.G. Choi**, S.H. Baek***
 Hanyang University, Korea Railroad R&I*, Ansan College of Technology**, Dongguk University***

Abstract - This paper presents the analysis of the permanent magnet overhang effect for permanent magnetic actuator. Generally, The overhang is often used to increase the force density in permanent magnet machineries. The overhang is especially profitable to reduce the volume after increasing the force density per volume when using the overhang effect of the permanent magnet. Therefore, 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method (3D EMCNM) has been used in this paper. According to the plunger position, flux distribution per the overhang length, and the holding force are quantitatively compared. Furthermore, an appropriate length of the overhang has been proposed. To confirm the accuracy of the analysis method, the results of 3D EMCNM and FEM(2D, 3D) are compared for the basic model.

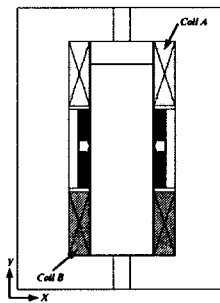
이 변화에 따른 유지력을 정량적으로 비교하였으며 적절한 오버행 길이를 제안하였다.

1. 서 론

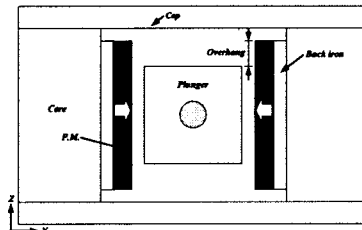
1987년 맨체스터 대학 에너지 시스템 그룹에서 Leading Switchgear 제조자를 위한 새로운 형태의 Permanent Magnetic Actuator (PM-Type Actuator)가 고안되었다. [1] 이 새로운 형태의 actuator는 기존의 스프링 축쇄 방식에 비해 수요부품수가 적고 간단한 구조를 가지며 간단한 구동원리에 의해 동작되기 때문에 동작의 신뢰성과 수명을 크게 높일 수 있다. 또한 차단속도가 변속 제어 및 제어응답성이 뛰어나며 차단과 투입을 단시간 내 여러 번 반복 할 수 있는 장점을 갖는다.[2]

최근 PM actuator의 빠른 동작시간과 신뢰성을 바탕으로 Vacuum Circuit Break(VCB)의 구동장치로 이용하는 사례가 늘고 있다.[3] 특히 VCB용으로 이용 될 경우 큰 고장전류에 대해 신속한 동작이 요구되며 압력 스프링을 포함한 두 접점간 적당한 압력을 유지시켜야 하기 때문에 영구자석에 의한 큰 유지력이 요구된다. VCB차단용량은 압력스프링의 용량과 비례하기 때문에 차단용량 증가에 따른 PM actuator의 유지력 증가가 요구된다. 따라서 유지력 증가를 위한 방법으로 PM actuator의 체적 증가가 불가피하나 영구자석 오버행 효과 이용 시 체적당 힘 밀도를 증가시키므로써 체적을 줄일 수 있어 오버행을 시행하는 것이 유리하다. 일반적으로 영구자석 기에서 체적당 힘 밀도를 높이기 위해 오버행을 시행하는 경우가 일반적이며 선형기와 화전기에 대해 정량적인 특성을 해석한 연구결과가 발표된바 있다.[4][5] 그러나 PM actuator에 대한 오버행 효과의 역할이나 기능에 대해 정량적으로 제시한 문헌은 미미한 실정이기 때문에 이에 대한 정밀 해석 및 검토가 필요하다.

영구자석의 오버행 구조는 해석 단면의 수직방향으로 기하학적 물리학적 성질이 변화하지 않는다는 가정 하에 적용하는 2차원 해석은 오버행에 따른 유효자속의 증가를 적절히 고려할 수 없어 3차원 해석이 요구된다. 따라서 본 논문은 PM actuator의 오버행구조를 해석하기 위해 해석방법으로 3차원 등가자기회로방법(3D EMCNM)을 이용하였고 가동자 위치에 따른 힘 분포와 오버행길



(a) X-Y 단면



(b) X-Z 단면
 그림 1. 해석 단면

2. 본 론

2.1 해석모델 및 사양

본 논문의 해석모델은 그림 1.과 같이 직육면체의 일반적인 PM actuator로서 총 7개의 부품으로 구성된 매우 간단한 구조이며 가동자가 Y축 방향으로 상하 이동하는 가동 철심 형 구조를 갖는다. 또한 Z축 End Winding 영역으로 대칭 오버행을 시행할 수 있다. PM actuator는 코일A와 코일B에 인가되는 전압을 적절히 on, off하여 조절함으로써 가동자의 움직임을 제어한다. 차단 작용시 코일A에 전압을 인가하면 여자 코일의 기자력이 영구자석의 보자력 보다 커질 경우 가동자는 상단으로 이동하고 코일A에 인가된 전압이 off된 경우, 영구자석만의 보자력에 의하여 정지상태를 유지한다. VCB용 PM actuator는 차단작용 시 접점 내 아크에 의한 고열과 여자 코일의 저항손에 의해 큰 온도상승이 발생하여 열에 의한 감자가 예상되기 때문에 고온에 의한 감자영향이 적은 Alico는 이러한 구동 환경에 적합한 영구자석 재질이다. 그러나 Alico는 기타 영구자석재질보다 보자력이 낮아 코일 기자력이나 공극에 의해 쉽게 감자되는 특성

을 갖기 때문에 해석 시 각별한 주의가 필요하다. 표.1은 해석모델의 제원을 나타낸다.

표 1. 해석모델의 제원

구분	제 원	
코일	턴수	1500 turn
	입력전압	DC 200 V
고정철심	재질	S23
	재질	S23
가동자	포화 자속밀도	2.5 T
	폭 / 두께	77 mm
	길이	232 mm
	이동거리	20 mm
영구자석	재질	Alnico
	잔류자속밀도	1.05 T
	영구자석에 의한 힘	3450 N

2.2 3차원 등가 자기 회로방법

3차원 등가자기회로방법은 기존의 자기회로법에 수치적 기법을 도입하여 퍼미언스를 분포적인 회로정수로 사용함으로써 3차원적 형상을 비교적 쉽게 해석할 수 있는 방법이다. 본 방법에서는 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로 자기스칼라 포텐셜을 사용하며 해석모델에 대하여 전체영역을 매질의 종류에 따라 영역을 구분한 후, 영역을 세밀히 요소분할하고, 각 요소의 중점에 절점을 잡고 이를 잇는 등가자기회로망을 구성하게 된다. X방향으로의 자속과 자속밀도는 인접하는 두 절점 (i,j,k) 와 $(i+1,j,k)$ 사이의 자위가 각각 $U_{i,j,k}$, $U_{i+1,j,k}$ 일때, 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.[4]

$$\Phi_{i,j,k}^x = P_{i,j,k}^x (U_{i,j,k} - U_{i+1,j,k} + E_{i,j,k}^x) \quad (1)$$

$$B_{i,j,k}^x = \Phi_{i,j,k}^x / S_{i,j,k}^x \quad (2)$$

여기서 $P_{i,j,k}^x$ 는 X방향 두 절점사이의 퍼미언스, $U_{i,j,k}$ 는 절점 (i,j,k) 에서의 자기스칼라 포텐셜, $E_{i,j,k}^x$ 는 소스내부에 해당하는 영구자석과 권선의 기자력이 분포하는 권선 영역과 가동자 그리고 영구자석내부의 기자력, $S_{i,j,k}^x$ 는 X방향 두 절점 사이의 단면적이다.

임의 절점에 대하여 각 방향의 자속식을 구성한 후 해석 영역의 모든 절점에 대하여 "한 절점에서 자속의 유출입 양은 불변"이라는 자속의 연속조건을 적용하여, 조합하면 식 (3)과 같은 미지절점수 만큼의 대수방정식인 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (3)$$

여기서, $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬, $\{U\}$ 는 절점자위행렬, $\{F\}$ 는 구동벡터(기자력 × 퍼미언스)를 나타낸다. 퍼미언스 계수행렬 $[P]$ 는 절점수가 n 이면 $n \times n$ 대칭행렬로서 주 대각 성분은 구고자 하는 절점과 인접한 6개의 절점 사이에 존재하는 퍼미언스의 합으로 구성되며 이산도(sparsity)가 3차원 유한요소법 보다 좋다. 따라서 행렬 계산시 소요되는 메모리가 감소하고 계산시간이 단축되는 장점을 가지고 있다.[5]

2.3 영구자석 감자특성을 고려한 비선형 해석

Alnico제질의 영구자석은 높은 잔류자속밀도와 열에 강한 특성을 갖지만, 보자력이 Ferrite나 NdFeB 보다 작아 공극이나 코일 기자력에 의한 감자영향이 크게 나타나며 비선형적인 감자특성을 갖기 때문에 정확한 동작점을 찾기 위해서는 감자곡선을 이용한 비선형 해석이 요구된다. 따라서 그림 2.의 해석순서를 통하여 영구자석

의 비선형 감자특성과 자성체 재료의 비선형 처리를 3D EMCNM에 적용하였다. 또한 3D EMCNM 해석결과와 타당성을 검증하기 위해 오버행이 없는 기본 모델에 대해 가동자 위치별 유지력을 FEM(2D, 3D)의 해석결과와 비교하였다.

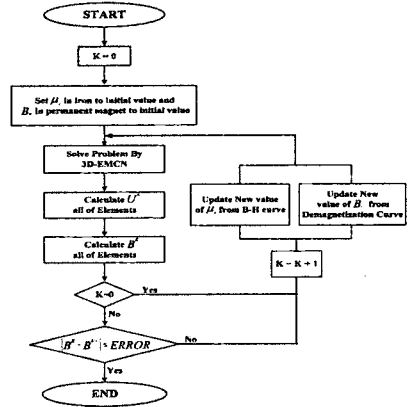


그림 2. 영구자석 감자특성을 고려한 비선형해석 순서도

2.4 영구자석 오버행변화에 따른 유지력 해석

PM actuator는 Z축 방향으로 오버행이 가능한 구조이며 대칭 오버행을 시행하였다. 기본 모델의 오버행 최대 시행 길이는 Z축 외함을 벗어나지 않는 길이만큼 오버행을 시행할 수 있으나, 오버행 증가에 따른 Z축 외함으로의 누설자속의 증가가 예상되기 때문에 오버행의 최대 시행길이는 Z축 가동자 길이의 65%로 제한하였다. PM actuator동작 시 가동자는 큰 힘과 빠른 가속도로 이동하기 때문에 외함에서 받는 기계적 충격과 외부로부터 유입되는 이 물질이 영구자석 내부에 흡착하여 가동자의 이동을 방해하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 Z축 외함은 기계적 충격과 이 물질로부터 영구자석 보호 등의 기계적 성능을 위해 고려되었다. 그러나 Z축 외 함으로의 누설에 의한 유효 자속의 감소가 예상되며 오버행 증가에 제약이 따르는 등의 자기적 특성에 영향을 끼치게 된다. 따라서 외함이 미치는 자기적 특성과 오버행효과를 정량적으로 분석하기 위해 Z축외함이 있는 모델과 외함이 없는 모델에 대해 각각 오버행을 시행하였다. 그림 3.은 해석모델의 요소 분할도를 나타내며 요소 수 및 절점 수는 77,880, 83,700이다.

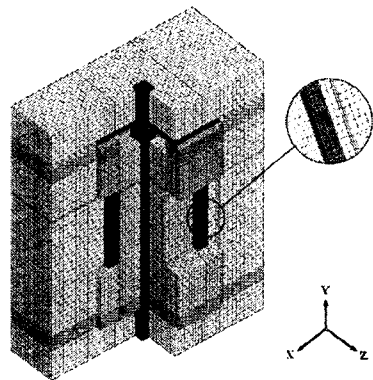


그림 3. 해석모델의 요소 분할도

2.5 해석결과

그림 4는 3D EMCNM과 2D, 3D FEM을 이용한 가동자의 위치별 유지력을 보여주고 있다. 3차원 등가자기회로방법과 3차원 유한요소법과의 해석오차는 약 2% 이내로 해석결과와 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 2차원 해석과 3차원 해석의 유지력 차는 Stroke가 0mm일 때 대략 32%로 매우 큰 차를 보이는데 이는 가동자를 관통하고 있는 shaft에 의한 영향과 Z축 외함으로의 누설 자속의 증가가 하단 부 공극자속 밀도 분포에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 본 해석모델은 오버행을 고려하지 않더라도 3차원 해석이 필수적이다.

그림 5는 Z축 외함을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대해 각각 오버행 증가에 따른 가동자의 유지력을 보여주고 있다. 두 경우 모두 오버행 시행 시 공극 내 유효 자속 증가에 따른 유지력의 증가를 볼 수 있으며 오버행을 18% 증가시켰을 때부터 유효 자속의 포화로 인해 더 이상 유지력의 증가가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 더욱이 Z축 외함을 고려한 모델의 경우 포화시점 이후부터 오히려 유효자속의 감소로 인한 유지력 감소현상이 나타나는데 이는 오버행 증가에 따라 Z축 외함으로 새로운 자로가 형성되어 누설 자속의 양이 급속히 증가함에 따른 현상이다. 그림 6, 7은 오버행 증가에 따른 외함으로의 누설자속 밀도분포를 보여주고 있다. 따라서 본 해석모델에 대해 오버행 시행길이는 18%가 가장 적당하며 외함이 있는 모델의 경우 오버행에 의한 유지력은 5.5% 증가하였으며 외함이 없는 모델의 경우 4.4%의 증가 효과를 얻을 수 있었다. Z축 외함이 없는 모델의 경우 오버행 길이에 따른 유지력의 증가비율은 상대적으로 낮으나, 18% 오버행 시행 시 외함이 없는 모델의 경우 외 함이 있는 모델보다 전체 유지력이 7% 큼을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 영구자석 오버행효과가 PM Actuator의 특성에 미치는 영향을 해석하기 위해 영구자석의 감자곡선을 고려한 3D EMCNM 해석을 시행하였으며 또한 Z축 외함이 미치는 영향에 대해 추가적으로 해석하였다. 특히 Z축 외함을 제거함으로써 유지력을 8% 증가시킬 수 있었으며, 또한 오버행에 따른 유효자속의 포화점 이전의 값인 오버행 시행길이 18%일 때 기본모델 대비 13% 유지력 증가 효과를 얻을 수 있었다. 따라서 Z축 외함을 제거하더라도 기계적 충격이나 이 물질에 대한 영향이 적다면 Z축 외함을 제거하는 것이 자기적 특성향상에 도움이 될 것이며 오버행을 병행하여 시행한다면 체적 당 힘 밀도를 크게 증가시킬 수 있으므로 PM actuator의 체적을 줄이는데 보다 효과적일 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업(기초전력)에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Introduction to Magnetic Actuator of IPEC Ltd.
- [2] 전희득, 권병일, 우경일, 김병택, "자기등가회로법에 의한 영구자석형 차단기 조작기의 동작특성 해석" 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 B권, pp.669-671, 2001
- [3] L.Xin, G.Huijun, C.Zhiyuan, "Magnetic field Calculation and Dynamic Behavior Analysis of The Permanent Magnetic Actuator", Discharge and Electrical Insulation in Vacuum 2000, Proceedings. [SDEIV. Volume: 2, 2000
- [4] Jin Hur and Dong-Seok Hyun, Jung-Pyo Hong, "A method for Reduction of cogging Torque in Brushless DC Motor Considering the Distribution of Magnetization by 3DEMCM", Magnetics, IEEE Trans. on, vol.34, No 5, September, 1998
- [5] In-Soung Jung, Jin Hur, Dong-Seok Hyun, "3-D analysis of permanent magnet linear synchronous motor with magnet arrangement using equivalent magnetic circuit network method", Magnetics, IEEE Trans. on, Volume: 35 Issue: 5, September, 1999

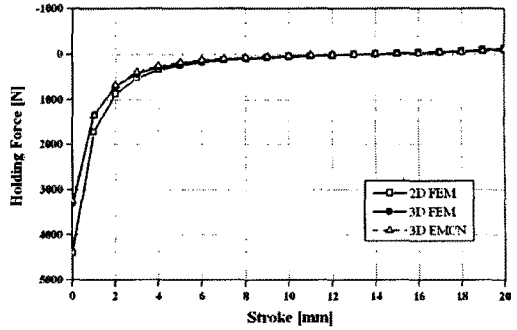


그림 4. Stroke 길이별 유지력 해석

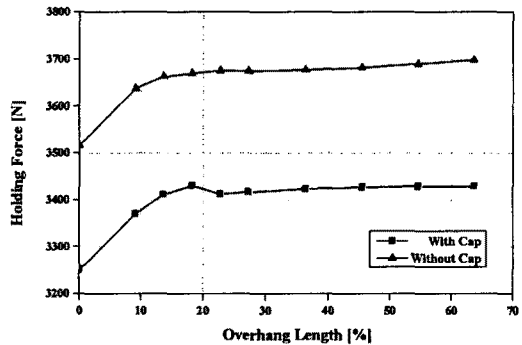


그림 5. 오버행 길이에 따른 유지력 해석

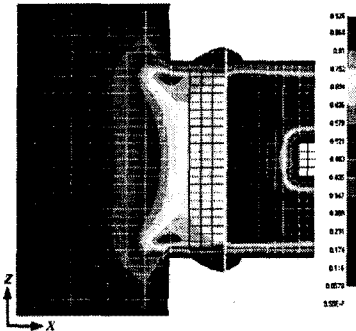


그림 6. 영구자석 오버행 0% 시행 시 자속밀도 분포

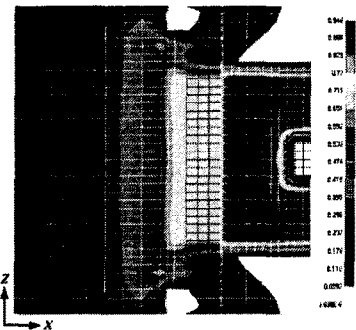


그림 7. 영구자석 오버행 36% 시행 시 자속 밀도분포