

자기부상 및 추진일체형 LHSM의 자기형상계수 산정

장석명, 정상섭, 이성래
충남대학교 전기공학과

Determination the appearance coefficients of Linear Homopolar Synchronous Motor for Integrated Suspension/Propulsion System

S.M. Jang, S.S. Jeong, S.L. Lee
Chungnam National Univ.

Abstract - The 4-poles LHSM with transverse bar track was designed on the base of the performance equations and the equivalent circuit model. However, the magnetic shape factors, such as Carter's and Green's coefficients, B_{min}/B_{max} and leakage factors, were important in the design and analysis of LHSM. Consequently, these coefficients were computed from the analytical expressions and examined from FEM analysis in detail.

의 단순한 형태는 경제성과 가공성이 좋고, 그림.1(b)와 같은 8차형 아마추어 권선이 필요하다.

1. 서 론

최근에는 동극형 동기 리니어모터(Linear Homopolar Synchronous Motor : 이하 LHSM이라 말한다)와 같이 추진력과 부상력을 單一 시스템에서 同時에 발생시키는 모델도 개발하여 응용하는 추세이다. 즉 상전도식으로는 독일의 자기부상열차인 Transrapid 시스템, Braunschweig 연구그룹, 미국 보잉사의 LSUM에 의한 시스템, Rohr 시스템, 루마니아의 Magnus가 1985년경부터 차량 추진 부상용으로 개발이 이루어진 바가 있고, 초전도식으로는 일본의 자기 부상열차인 MLU시스템은 물론이고 영구자석과 하이브리드형으로 미국의 Grumann 항공사, 백텔사, Fost-Miller사, Magne Plane 시스템, 이탈리아의 PFT2시스템 등과 같이 자기부상열차용으로 각각 국가적인 프로젝트에 의하여 개발중이 있다.

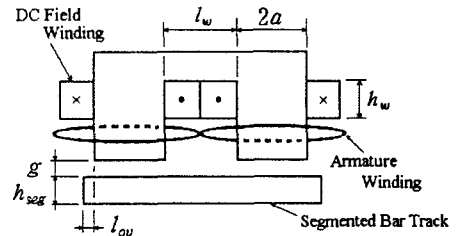
LHSM은 이동자계와 추진력을 발생시키는 3상 교류 권선과, 횡방향으로의 자속을 발생시키는 별도의 직류권선을 설치하는 인덕터와 같은 특수구조로, 추진력과 흡인 부상력이 단일체에서 동시에 발생하는 전자기시스템이다. 따라서 LHSM 자체로는 구조가 복잡하여 설계, 해석 및 제작은 물론 운전제어의 어려움 등의 문제가 수반되지만, 추진용 LIM과 부상용 전자석을 개별적으로 구성하는 시스템과 비교하여 전자석이 배제되는 등 전체 시스템이 간결해지는 등의 특징을 갖게 되어 중량당, 체적당 출력이 커진다. 또한 동일 조건에서 LIM에 비해 역률이 크므로 차량에 탑재하는 전력공급장치의 정격과 무게가 감소하는 등으로 컴팩트화되는 잇점이 있다.

위에서 언급했듯이 LHSM은 구조적 복잡성으로 인하여 설계와 해석이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이를 고려하기 위하여 자기형상계수인 그린(Green) 계수와 카터계수, 공극자속밀도의 맥동비, 누설계수를 이론적 수식과 FEM 해석을 통해 구했다.

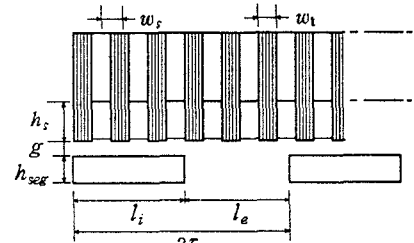
2. 본 론

2.1 선정모델과 설계사양

그림. 1은 본 논문에서 다루고자 하는 LHSM의 모델로써 정면도와 측면도를 보여준다. 횡방향으로 성층된 1차측에 3상 아마추어 권선과 직류 계자권선이 감기고, 2차측은 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는다. 이러한 2차측



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 1. 모델 형상과 설계 파라미터

표. 1 LHSM의 설계 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
스택폭	40 [mm]	트랙 폭	189 [mm]
창폭	109 [mm]	트랙 두께	33 [mm]
창높이	53 [mm]	트랙 길이	120 [mm]
공극	8 [mm]	트랙 간격	120 [mm]
극수	4		
1차측 길이	480 [mm]	코일피치	100 [mm]
슬롯수	24	코일수/극/상	2
슬롯간격	20 [mm]	코일 턴수	58
치폭	9 [mm]	권선계수	0.966
슬롯깊이	25 [mm]		
극간격	120 [mm]	계자권선수	1000

2.2 자기형상 계수

LHSM의 1차측 슬롯구조와 2차측 돌극구조는 공극 자속밀도를 감소시키고, 2차측의 세그먼트 구조에 의한 공극자계의 맥동비는 공극자속의 기본과 성분의 크기에 영향을 미친다. 그리고 1차측 양 스택구조는 횡방향-누설에 의해 공극자속을 감소시킨다. 따라서 이들 계수들 면밀히 계산하는 것은 LHSM을 설계하고 해석하는데 있어서 매우 중요하다.

2.2.1 유효공극

LHSM의 설계에서 유효공극은 자기형상계수인 Green계수와 Carter계수로부터 구해진다. 모터의 1차측 슬롯구조와 2차측의 돌극구조는 공극 자속밀도를 감소시키므로, 이는 공극의 증가, 즉 유효공극으로 가할 수 있으며 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$g_e = k_c * k_C * g \quad (1)$$

여기서 g 는 실제 공극, k_C 는 Carter계수, k_c 는 Green계수이다. Carter계수는 다음 식(2)을 통해 구할 수 있다.

$$k_C = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma g} \quad (2)$$

여기서 γ 는 근사적으로

$$\gamma = \frac{\left(\frac{w_s}{g}\right)^2}{5 + \frac{w_s}{g}} \quad \text{for } \frac{w_s}{g} > 1 \quad (3)$$

이다. 여기서 w_l 는 치폭, w_s 는 슬롯폭이다.

Green계수는 다음 식(4)을 통해 구할 수 있다.

$$k_c = \frac{l_i + l_e}{l_i + k_f \times g} \quad (4)$$

여기서 l_i 는 세그먼트의 길이; l_e 는 세그먼트 사이의 길이, k_f 는 fringing 계수이다.

2.2.2 세그먼트 길이와 공극자속밀도의 맥동비

2차측의 세그먼트 구조는 모터의 길이방향에 따라 맥동하는 DC 공극자계를 만든다. 그런데 추력은 이러한 공극자계의 기본과 성분의 크기에 비례하므로 자계의 맥동비가 클수록 효과적인 추력을 얻을 수 있다.

LHSM을 자기부상 및 추진 일체형 시스템에 응용할 경우에는 단지 추진력만 얻기 위한 시스템에서보다 좀더 긴 세그먼트가 필요하다. 하지만 공극자속의 기본과 성분의 감소에 따른 추력의 현저한 감소를 고려하기 위해 세그먼트 길이는 극간격과 같게 한다. 또한 누설자속을 줄이기 위해 세그먼트의 두께와 공극의 비는 0.25보다 작아야 한다[2]. 이러한 경우에 공극자속밀도의 최소값 B_{min} 와 최대값 B_{max} 의 비는 다음과 같다.

$$B_{min} / B_0 \leq 0.15 \sim 0.24 \quad (5)$$

2.2.3 창폭과 횡방향 누설계수

LHSM의 직류계자과 전기자 권선 모두 횡방향 성층의 창에서 누설자속을 만들며, 이러한 누설은 공극자속을 감소시킨다. LHSM의 1차측은 "U"자형 철심으로 이를 설계하는데 있어서, 누설자속은 설계의 제한치가 된다. 또한 길이방향으로의 1차측 슬롯구조와 2차측 돌극구조는 누설자속의 계산을 더욱 어렵게 만든다.

만약 1차측 창폭 l_w 을 작게 할 경우, 횡방향 누설과 여자코일의 누설인덕턴스가 증가하여 시정수가 커진다. 그리고 전기자 코일을 구부림 각도를 작게 해야 하기 때문에 누설자속의 최소화와 코일 가공 사이에는 절충의 문제가 야기된다. 그러나 전기자 코일의 구부림각을 일반적으로 30° 로 가정할 때, 창폭 l_w 은 다음 식(6)에 의해 얻어진다.

$$l_w = 0.02 + \frac{\tau\sqrt{3}}{2} \quad (6)$$

2.3 자기형상계수 산정을 위한 FEM 해석 모델

본 논문에서는 자기형상계수 산정을 위해 그림 2와 같이 모터의 정면과 측면에서의 등가 모델을 통해 2-D FEM 해석이 이루어졌다. Carter계수는 그림 2(a)의 모델에 의해 구해지는데 1차측 슬롯구조에 의한 형상계

수이므로 2차측 돌극구조가 없다. 그러나 Green계수는 돌극구조에 대한 자기형상계수이므로 그림 2(b)와 같이 슬롯구조는 없애고 돌극구조만이 존재한다.

그림 2(c)는 모터 측면모델로 LHSM을 길이방향으로 펼친 모습으로 모터의 1/4 해석영역을 갖는다. 따라서 모델을 둘러싼 프레임중 철심영역은 요크와 세그먼트의 1/2로 구성되고, 그 길이와 폭은 자속경로의 자기저항과 같도록 정했다. 따라서 해석 영역 슬롯 끝에 벡터 포텐셜을 취함으로써 공극자속밀도의 맥동비를 구할 수 있다. 그림 2(b)는 정면방향 모델로 대칭성을 고려하여 1/2 해석영역을 갖고 공극은 Carter계와 Green계수가 고려된 유효공극으로 정격공극보다 크다. 이 모델을 통해 1차측 창에서 발생하는 횡방향 누설을 구할 수 있다.

그림 2(a)(b)(c)에서 철심영역사이에는 손실없는 magnetic shunt와 자속의 집중을 돕는 magnetic insulator의 가상물질로 구성하였다.

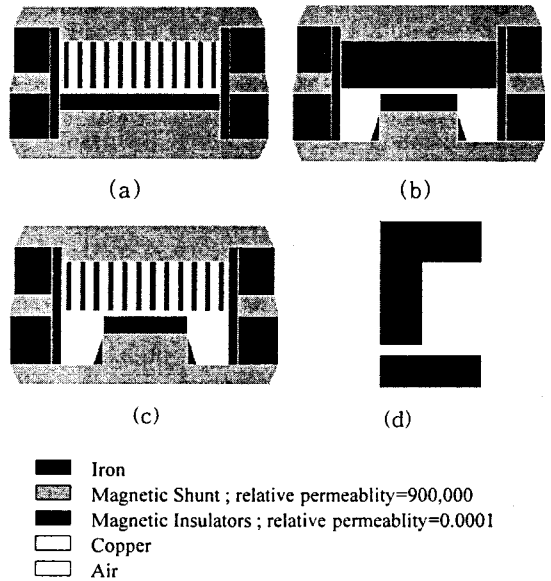


그림 2 자기형상계수 산정을 위한 FEM 해석 모델
(a) Carter계수 (b) Green계수
(c) 공극자속밀도의 맥동비 (d) 횡방향 누설계수

2.4 해석 결과

앞절에서 설명한 그림 2(a)(b)의 FEM 모델에 의해 해석한 결과, 공극에서의 자속밀도 파형은 그림. 3과 같다. 이 파형을 통해 다음과 같은 정의식에 의해 Green계수와 Carter계수를 얻어낼 수 있다.

$$k_C \text{ or } k_G = \frac{B_{max}}{B_{mean}} \quad (7)$$

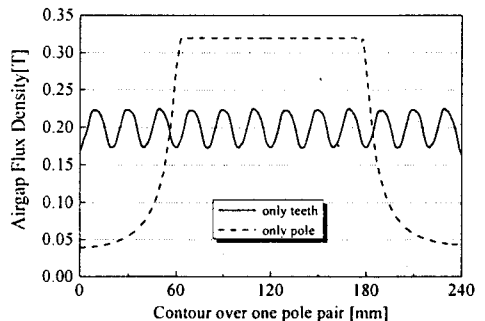


그림 3. 슬롯 또는 돌극 구조일 때 FEM 해석에 의한 공극자속밀도 파형

그리고, 그림 2(c)의 FEM 모델에 의해 해석한 결과 공극에서의 자속밀도 파형은 그림 4와 같다. 이 파형을 통해 B_{min}/B_{max} 를 계산할 수 있다. 그 결과 공극 자속밀도의 기본파 성분은 전체의 실효치의 55%임을 알 수 있다.

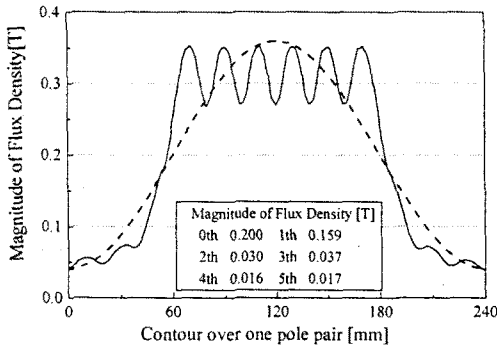


그림 4. 슬롯과 돌극구조일 때 기본파와 고조파 성분

그림 2(d)의 정면방향 해석을 통해 그림 5와 같은 1/2 정면모델에서의 자속분포를 볼 수 있다. 전기기기에서 누설자속의 상대치를 누설계수로 표현되는데, 이 계수는 자극에서의 총 자속에 대한 유용한 총 자속의 비로 정의된다. 따라서 횡방향 누설계수는 다음 식(8)에 의해 얻어진다.

$$\text{leakage coefficient} = \frac{B_y \times h_y - B_{seg} \times h_{seg}}{B_y \times h_y} \quad (8)$$

여기서 B_y , B_{seg} 는 FEM 해석값으로 요크와 세그먼트에서의 자속밀도이다.

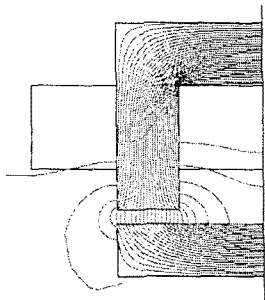


그림 5. 1/2 정면모델에서의 자속분포

따라서 FEM 해석을 통해 구해진 계수들을 이론치와 비교해 보면 표 2와 같이 대체적으로 일치하였다.

표. 2 자기형상 계수

Coefficient	Theoretical value	FEM Analysis
Carter's	1.135	1.127
Green's	1.6	1.6
B_{min}/B_{max}	$\leq 0.15 \sim 0.24$ [2]	0.13
Transverse leakage	1.18	1.2

3. 결 론

LHSM의 설계 및 해석에 있어서도 중요한 자기형상 계수 - Green계수, Carter계수, DC 공극자계의 맥동비, 누설계수 - 들을 면밀히 검토하기 위해 FEM 모델을 설정하였다. 그리고 이를 해석한 결과 이론값과 비교적 일치하였다.

따라서 이를 토대로 앞으로 제작과 시험 등의 연구가 진행될 것이다. 그리고 향후 자기부상열차는 물론이고 반도체 공정에서의 웨이퍼 이송장치 등의 분야의 응용 개발을 위한 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", pp268, chapter 4, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] I. Boldea and S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", pp268, chapter 7, John Wiley & sons, Inc., 1985
- [3] A.R. Eastham, G.E. Dawson, R. Ong, and L.W. Coathup, "The design and operation of the homopolar linear synchronous motor for linear drive and for integrated suspension/propulsion applications", Malev'84, pp95-103, C397/84 © IMechE 1984
- [4] G. E. Dawson and E. Unteregelsbacher, "A transverse laminated linear synchronous homopolar machine," IEEE paper CH 1575-0/80/0000-0270.

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910 -060-2로 지원되어 수행된 연구결과의 일부입니다.