

단부효과 최소화를 위한 치 및 슬롯형상 최적화

金奎卓, 姜圭洪, 李定奎
昌原大學校 電氣工學科

Optimization of teeth and slot shape for minimization End effect

Gyu-Tak Kim, Gyu-Hong Kang, Jung-Gyu Lee
Dept. of Electrical Eng., Chang-won Nat'l Univ.

ABSTRACT

This paper is proposed a method that optimizes teeth shape of Linear induction motor for high efficiency and slot shape for static end effect minimization in linear induction motor. As a result, unbalance current of each phase in minimized.

1 서론

리니어 모터가 본격적으로 연구된지도 사반세기가 지나 리니어 모터의 해석방법 및 그 구조적인 특수성으로 인하여 나타나는 고속에서의 단부효과, 2차전류의 진행방향 성분에 의한 횡방향 Edge효과, 매우 큰 공극, 2차속 철판에서의 표피효과등이 직선 추진 시스템의 특성에 미치는 영향등은 규명이 이루어져 철도 차량, 반송 시스템 및 FA, OA기기등 산업계의 여러분야에 이용되고 있으며 앞으로 그 응용분야는 더욱 더 확대될 것으로 기대된다[1, 2].

그러나, 리니어 모터의 최적 설계에 대한 연구는 일반 회전형 기기의 데이터 베이스 및 CAD화에 비해 아직 초보단계이며 CAD화는 엄두도 내지 못하고 있는 실정으로 동기회로법에 의해 설계정수의 최적화에 대한 연구가 부분적으로 이루어지고 있는 단계이다[1, 2].

그러나 전자계는 본질적으로 분포계이므로 집중정수로 취급하여 해석하기에는 문제점이 많으며 형상변화에 따른 특성변화를 고려할 수 없어 파라메터의 최적화에만 이용되고 있는 실정이다. 특히 리니어 모터에서와 같이 단부가 존재하는 특수한 현상들은 고려할 수 없다.

리니어 모터는 그 구조적 특성인 양 단부의 존재로 자기회로가 불연속이 되며 이로 인하여 각 상의 임피던스가 불명형이 되어 입력 전류 및 역률 불평형 및 제특성의 저하를 초래한다. 또한 권선을 2층권으로 시행하여도 리니어 모터의 양단부에서는 단층권으로만 권선이 시행되므로 누설증가 및 기자력도 중심부보다 작다. 또한 상층부에 권선이 존재하는 단부가 하층부에 권선이 존재하는 단부보다 자속밀도도 낮아지게 된다. 이를 보정하기 위하여 양단부의 슬롯깊이를 중심부의 1/2로 하여 하층부에만 권선을 시행하는 방법도 제안되었으나 이는 모터의 중량증가를 초래하게 된다[3, 4]. 이와 같은 단점을 줄이기 위하여 양단부의 슬롯깊이를 단부에서 중심부로 갈수록 반슬롯 깊이를 단층부의 슬롯수대로 나눈 크기만큼 일정비율로 증가시키는 방법이 제안되었으나 이것이 최적이라고 할 수는 없다[3, 4].

따라서 본 연구에서는 유한요소법과 비선형 최소화 기법인 SUMT법을 결합하여 효율최적화를 위한 치형상 최적설계를 도모한 다음 양단부의 공슬롯이 존재하는 슬롯깊이를 독립변수로 설정하여 정적 단부효과를 최소화 하기 위한 리니어 모터의 최적설계를 행하였다.

2. 유한요소법 및 SUMT법에 의한 정식화

Maxwell의 전자 방정식으로부터 편축식 리니어 모터에 대한 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y}) - \sigma(\frac{\partial A_z}{\partial t} + (1-s) v_s \frac{\partial A_z}{\partial x}) = -j_s \quad (1)$$

(1)식에 유한요소법을 적용하여 이산화 하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[K] \{A\} = \{J\} \quad (2)$$

여기서 [K]는 시스템 행렬이며 {A}는 절점 포텐셜, {J}는 구동방향 입력전류항이다. 또한 리니어 모터의 회로 방정식은 (3)식으로 주어진다.

$$[R + j\omega L] \{I\} + d/dt\{\phi\} = \{V\} \quad (3)$$

전류밀도와 전류, 역기전력과 벡터포텐셜의 관계식으로부터 식 (2) 및 (3)을 다시 쓰면 다음식으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} (K_{11}) & (K_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{0\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} (K_{21}) & (K_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{V\} \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 (5)를 결합하면 전압입 문제기가 되며 이는 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} (K_{11}) & (K_{12}) \\ (K_{21}) & (K_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{V\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

일반적으로 비선형 최적화 프로그래밍의 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$g_j(x) < 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \text{의 조건하에서} \quad (7)$$

$$F(x) \text{를 최소화시키는 } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \text{을 구한다.}$$

본 연구에서는 유한요소법과 SUMT법을 결합하여 리니어 모터를 최적설계하기 위하여 내점법을 택하였으며 이때의 변환함수는 식 (8)과 같이 된다[5].

$$\phi(x, r_k) = F(x) - r_k \sum_{j=1}^m 1/g_j(x) \quad (8)$$

3. 유한요소법에 의한 LIM의 특성해석
 최적화를 위한 리니어 모터의 제원은 표 1에 나타내었다.

표 1 SLIM의 제원

출력 - 극수	300W-4P	슬롯 폭	7.5 mm
전압 - 주파수	220V-60Hz	슬롯 깊이	40 mm
동기 속도	8.28 m/s	공극	2.5 mm
정격 속도	3 m/s	1 차 권선	
정격 전류	5.5 A	단철율	5/6
1 차 철심	상당직렬권수	480	
철심 길이	338 mm	도체수 / 슬롯	120
철심 적층폭	80 mm	2 차 축	
극간격	69 mm	A1판 두께	3 mm
슬롯수/극, 상	2	폭	134 mm
슬롯 피치	11.5 mm	Back iron	10 mm

유한요소법을 적용하기 위한 해석 모델은 자기회로의 불연속성을 고려하기 위하여 1차축 철심의 양단부도 해석영역으로 설정하였다.

그림 1은 주파수 60[Hz], 평형 3상의 선간전압 220[V]를 리니어 모터에 인가한 경우 시간변화에 따른 자속분포의 변화를 나타낸 것이다. 자속분포의 양상은 시간이 지날수록 왼쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 따라서 자동반송장치와 같이 리니어 모터의 2차축이 고정되고 1차축이 이동하는 경우 1차축 철심은 왼쪽에서 오른쪽으로 전자력에 의해 이동하게 되므로 오른쪽이 입구단, 왼쪽이 출구단이 된다. ωt 에 관계없이 리니어 모터의 입구단부의 자속은 1차축의 권선분포가 자체진행방향으로 불연속이 되어 나타나는 단부효과에 의해서 맴돌이 현상이 발생한다. 이는 입구단에서 자속이 공간적으로 급변하여 2차도체만에 와전류가 유도되어 리니어 모터 내부로 침투하며 감소하는 진행파 자속에 의하여 나타나는 현상이다. 또한 출구단부에서는 철심면에서 수직으로 나가는 자속성분도 존재하여 철심의 길이가 유한하여 존재하는 철심단 단부효과도 나타났으나 그다지 큰 영향은 미치지 않아 저속에서는 동적 단부효과의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

그림 2는 공극자속밀도 x방향 및 y성분의 공간적 분포를 도시한 것이다. 철심 양단부에서의 자속밀도는 철심 중심부 자속의 1/2정도로 나타났다. 이는 양단부에서 권선이 단층권으로 시행되었기 때문이며 공슬롯부가 하층에 있는 출구단부가 상층에 있는 입구단보다 자속밀도가 작게 나타났다. 따라서 유한요소법을 이용하여 리니어 모터의 양단부에서의 슬롯형상 최적화를 도모하여 슬롯깊이를 줄이면 출구단부의 하층부 공슬롯이 감소하여 공극자속밀도가 상승하게 되어 이와같은 현상은 줄일 수 있다. 입구단에서의 반대방향의 피크치는 기자력의 급변에 의한 와전류의 영향이며 출구단부에서의 피크치는 철심길이가 유한하기 때문으로 이에 대한 보상은 어렵다. 공극에서의 평균자속밀도는 0.23[T]로 나타났다.

한편, 추력 및 수직력 분포에서는 양단부에서의 추력 및 수직력은 철심 중앙부에 비해 1/4크기로 나타났다. 따라서, 전기기기의 발전추세인 경, 박, 단, 소화를 위하여는 양단부의 에너지 밀도를 높이도록 최적화를 수행하여야 하겠다. 즉, 하층부의 슬롯이 공슬롯으로 존재하는 곳의 슬롯 깊이를 줄여 단부에서의 자속밀도를 높이면 추력밀도도 증가되리라 본다. 추력의 공간분포에서 0보다 큰 부근은 정추력, 0보다 작은 부분은 부추력이다. 부추력은 공극자속밀도와 와전류 밀도의 공간적인 위상차에 기인하며 수직력의 (+)는 흡인력을, (-)는 반발력을 의미한다. 그림 4.10에서 알 수 있는 바와 같이 어떤곳에서는 발생추력은 정으로, 수직력은 흡인력으로, 또다른 곳에서는 추력은 제동력으로

수직력은 반발력등으로 작용하는 뒤를림력으로 작용하는 Dolpin Force가 발생하므로 리니어 모터의 기계적 강도를 크게 하여야 됨을 알 수 있으며 실험치와 잘 일치하고 있다. 또한 역률은 $\text{COS}\theta_a = 55.93[\%]$, $\text{COS}\theta_b = 53.63[\%]$, $\text{COS}\theta_c = 49.18[\%]$ 로 나타나 불평형의 차가 최대 6.75[%]로 나타났다. 한편, 각 상 전류의 실효치는 $I_a = 5.15[A]$, $I_b = 5.21[A]$, $I_c = 5.46[A]$ 이다. 따라서 그 차의 최대치가 0.31[A]로 나타났다. 이는 자기회로의 불연속에 의한 정적 단부효과의 영향이다.

4. 유한요소법과 SUMT법에 의한 형상 최적화

4.1 치형상 최적화

전자계는 본질적으로 분포계이므로 집중정수로 취급하여 해석하기에는 문제점이 많으나 최적화 문제에서 집중정수로 취급하면 시간절약은 많으나 이와같은 방법은 개략적인 설계변수의 최적화에는 유리하므로 현재 널리 이용되고 있으나 형상변화에 따른 특성변화를 고려할 수 없다. 따라서 본 장에서는 유한요소법과 SUMT법을 결합하여 치부분의 형상최적화를 도모하였다. 즉, 특성 개선을 위하여 치부분의 형상 최적화를 행한 다음 자기회로의 불연속에 의한 입력전류의 불평형을 최소화하기 위한 슬롯형상최적화의 순서로 진행하였다.

일반적으로 리니어 모터의 설계에서는 공극이 매우 커 누설자속을 다소나마 줄이기 위하여 개방슬롯으로 설계하는 것이 일반적이다. 이 경우 치밀부분에는 자속이 집중되고 슬롯밀부분에는 자속이 거의 존재하지 않아 자속밀도의 리플이 크게 되어 소음 및 진동의 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 자속분포의 리플을 줄이고 리니어 모터의 성능향상을 위한 치형상 최적화를 도모하였다.

따라서 본 연구에서는 치머리부분의 4 절점의 x 좌표 를 독립 변수로 택하여 최적화를 진행하였다.

목적함수는 식 (10)과 같이 효율 최대화로 하였다. 효율 향상을 위한 한 방면으로 같은 입력에서 발생추력의 증가를 목적함수로 택할 수 있으나 이때는 자속밀도 및 힘의 공간 분포에 더 큰 리플이 포함되어 효율극대화 그자체를 목적함수로 택하였다[6]. 이때의 제약조건으로는 슬롯폭이 7[mm]이므로 폐슬롯으로 향하는 치부분의 절점간은 3.5[mm]이상 증가할 수 없도록 하였다.

$$\text{목적 함수} : F(x) = \max[\text{Efficiency}] \quad (10)$$

최적화된 형상의 경우, 개슬롯 형상에서보다 공극자속의 리플이 많이 개선됨을 알 수 있다. 그림 2의 자속밀도의 공간분포에서 알 수 있듯이 자속의 공간적인 분포가 개발슬롯보다 정현적에 가깝다. 그러나 자기저항의 감소로 인한 리액턴스의 증가로 입력전류는 $I_a = 5.15[A]$ 에서 4.90[A]로, $I_b = 5.21[A]$ 에서 4.96[A]로, $I_c = 5.46[A]$ 에서 5.12[A]로 감소하였다. 이로인하여 공극자속밀도도 다소 감소하여 발생추력은 개슬롯시보다 1.7[N] 감소하였다. 그러나 입력전류의 감소에 비해 발생추력의 감소는 작아 효율은 21.6[%]에서 22.4[%]로 0.8[%] 증가하였다. 그림 3의 힘밀도 분포에서 볼 수 있는바와 같이 발생추력의 리플도 감소하므로 소음 및 진동도 작아져 양호한 설계가 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 각상의 역률은 $\text{COS}\theta_a = 55.93[\%]$ 에서 56.22[%], $\text{COS}\theta_b = 53.63[\%]$ 에서 53.75[%], $\text{COS}\theta_c = 49.18[\%]$ 에서 48.28[%]로 되 역률 불평형은 더욱 심화되었다.

4.2 슬롯 형상 최적화

리니어 모터에서는 각 상의 권선저항이 일정하여도 자기회로의 불연속에 의하여 각 상의 임피던스의 불평형이 발생하며 이로 인하여 각 상의 전류 및 역률이 불평형이 된다. 따라서 본 연구에서는 리니어 모터의 구조적 특징때문에

양단부에서 권선이 단층으로만 시행되므로 슬롯의 1/2부분이 공슬롯이 존재하게 된다. 따라서 이 공슬롯의 깊이를 조정하면 자기저항의 변화로 자기회로의 불평형을 줄일 수 있으며 자로의 증가로 역률이 상승하게 된다. 본 연구의 시작기는 매극대상당 슬롯수가 2이므로 양단부에서는 5개의 공슬롯이 존재하므로, 먼저 치형상 최적화를 이룬 해석 모델에서 슬롯깊이를 독립변수로 택하여 슬롯 형상 최적화를 시행하였다. 양단부의 슬롯이 모터의 중심을 기준으로 좌우 대칭이므로 출구단의 y축 좌표값을 독립변수로 택하고 입구단은 출구단의 좌표값과 동일하게 변화하도록 처리하였다. 이때의 목적함수는 다음식과 같이 택하였다.

$$F(x) = \text{Min}(I_1 - I_2) \quad (11)$$

한편, 제약조건으로서의 슬롯내의 도체절적율, 모터의 중량, 전류, 수직력, 출력/용량등을 포함시켰으며 독립변수의 변화폭도 슬롯깊이가 40[mm]이므로 20[mm]이하 제한하였다. 전류의 최대치는 6[A], 슬롯내의 도체절적율은 60[%]이하로 KW/KVA는 0.16이상으로 설정하였다. 한편, 수직력은 본 리니어 모터의 용도가 산업용이므로 수직력은 정격추력의 2.0배이하, 중량은 10[Kg]이하로 설정하였다.

최적화를 시행한 결과 출구단부에서는 슬롯하층부의 공슬롯이 줄어들어 누설자속의 감소로 치형상 최적화보다 자속밀도에서는 이동방향성분은 감소하고 이차속과 채교자속이 증가함을 알 수 있다. 또한 출구단부에서의 피크치도 감소로 자속의 급변에 의한 정적 단부 효과는 다소 줄어들었다. 그러므로 2차속과의 채교자속이 증가하여 2차속의 와전류의 증가하며 2차속기자력을 상쇄시키기 위하여 입력전류는 증가되리라 사료된다. 그러나 공슬롯이 상층부에 있는 입구단 및 중심부의 자속분포는 치형상 최적화의 경우와 같았다.

한편 공극자속분포가 출구단부를 제외하면 치형상 최적화와 대동소이하여 힘밀도 및 수직력 분포에서는 큰 차이가 나타나지 않았으나 출구단에서의 제동력이 다소 감소하였다. 따라서 슬롯형상 최적화를 통하여 출구단에서의 자속급변이 줄어들었기 때문에 정적 단부효과는 양단부의 슬롯깊이의 최적화를 통하여 개선시킬 수 있다. 총 발생 추력은 치형상 최적화시에서는 슬롯형상 최적화시의 94.95[N]에서 99.91[N]으로 증가하였다. 한편 입력 전류는 리액턴스의 감소로 $I_a = 4.90[A]$ 에서 5.30[A]로, $I_b = 4.96[A]$ 에서 5.33[A]로, $I_c = 5.12[A]$ 에서 5.30[A]으로 증가하였으며 전류불평형은 없었다. 따라서 정적 단부효과에 의한 전류 불평형을 해소할 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 목적함수를 전류 불평형 최소화로 하였으므로 역률은 $\text{COS}\theta_a = 56.22[\%]$ 에서 57.06[%], $\text{COS}\theta_b = 53.75[\%]$ 에서 54.60[%], 으로 오히려 증가하였으나 역률이 가장 나빴던바 $\text{COS}\theta_c = 48.28[\%]$ 에서 48.20[%]으로 돼 역률 불평형은 조금 심해졌으나 평균 역률은 개선되었으며 효율은 22.41[%]에서 22.22[%]로 변화가 없어 양호한 설계가 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결론

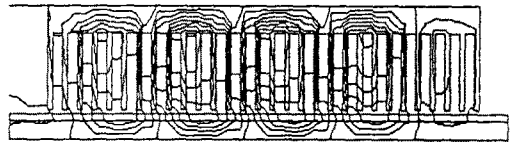
본 연구에서는 리니어 모터의 고유특성인 단부효과에 의한 각 상 임피던스의 불평형에 의한 전류 불평형 최소화를 위하여 유한요소법과 순차 비제약 최소화 기법을 결합하여 치형상 최적화 및 슬롯형상 최적화를 도모하였다. 먼저, 출력을 극대화 하기위하여 치좌표를 독립변수로 선택하였고, 리니어 모터의 단부효과에 의한 상간 전류불평형을 개선하기 위한 독립변수로서는 양단부의 공슬롯부의 슬롯깊이를 택하였다.

앞으로, 계산기의 용량 증가와 함께 독립변수로서 치좌표 및 슬롯 깊이를 함께 채택하여 역률 불평형도 포함된 다

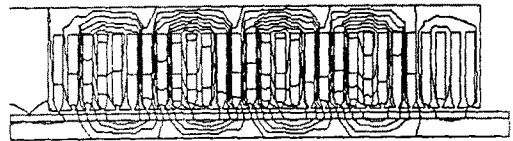
중목적함수를 채택하여 최적화를 진행하는 것은 다음의 과제로 삼는다.

參考文獻

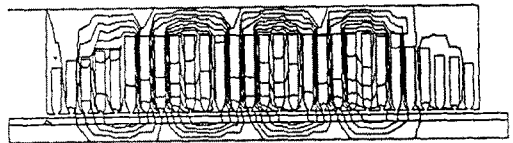
1. S.A. Nasar & I. Boldea, "Linear motion electrical machines", John Wiley & Sons., 1976.
2. 水間毅 外 2人, "リニア誘導モータの設計データと特性(その2)", 日本電氣學會資料會資料 LD-92-59, pp 19-28, 92.
3. 横井利彰 外 4人, "ラダ-型 2次導體を有するリニア誘導機の推力脈動の解析", 電氣學會研究會資料 LD-92-5, pp. 39 - 47, 1992.
4. 大澤 悟 外 3人, "リニア誘導電動機の輕量化とその特性", 電氣學會研究會資料 LD-92-6, pp. 49 - 54, 1992.
5. S. S. Rao, "Optimization(theory and application)", John Wiley & Sons, 1984
6. 임달호 외 3인, "고출력 SLIM 설계를 위한 치형상 최적화에 대하여", '91주계학술대회 논문집, pp 83-86, 1991



(a) 개방슬롯



(b) 치형상 최적화



(c) 최종형상

그림 1 자속 분포도

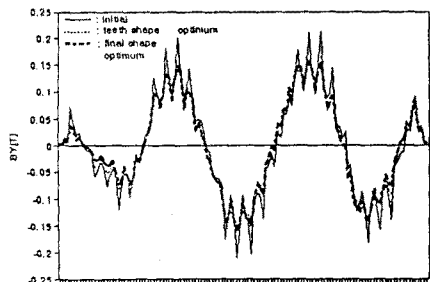


그림 2 자속밀도의 By성분 분포

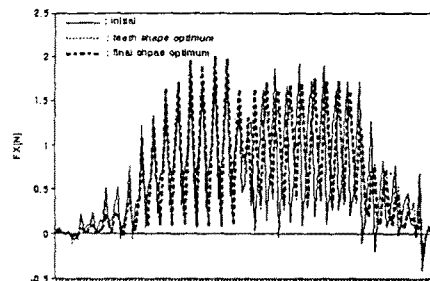


그림 3 발생 추력