

슬릿형 선형 유도 전동기의 최적 설계

오 근용*, 윤 상백, 허 진, 정 인성, 현 동석
한양 대학교 전기공학과

Optimum Design of the Slit Type Linear Induction Motor

Geun-Ung Oh, Sang-Baeck Yoon, Jin Hur, In-Sung Jung and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract - This paper presents the optimum design of the slit type linear induction motor (LIM). For the analysis of the slit type LIM, as the boundary problem, the equivalent circuit is composed from the analysis method given the slit pitch boundary condition. Using the deterministic method and the stochastic method among the optimization methods, each of the optimum design variables is derived. The analysis result by the proposed method is compared with the experimental result.

1. 서론

직선 추력을 얻을 수 있는 선형 유도 전동기(LIM)의 특성은 해석과 수치 최적 기법을 통하여 발전하였다.[1][2] 최근에 슬릿형 LIM에 대한 연구가 자체를 강화하기 위해 효과적으로 2차 외연류 통로를 제한하여 횡방향 단 효과를 감소시키기 위해 진행되고 있다.

1995년에, Onuki씨가 처음으로 3 차원 유한요소법을 사용하여 슬릿형 LIM을 해석하였다. 그러나, 수치 해석 기법은 대형 행렬을 계산하기 위해 많은 시간이 소요되고, 설계 변수의 영향이 고려될 때마다 매번 모델링이 요구되어 비효율적이다.

본 논문에서는, 이러한 단점을 극복하기 위해, 슬릿과 도체에 상응하는 단위 영역에 피치 경계 조건을 부여하여 해석하고, 그림 1에 나타낸 바와 같이 전 영역으로 확장하는 방법을 제시한다. 제안한 해석 방법에 의하여 공극자속밀도를 구하여 역기전력을 산출한 후 이로부터 등가 회로를 구성하였다.[4]

최적 설계 방법으로는 결정론적 방법인 순차 이차 계획과 확률적 방법인 유전 알고리즘(GA)을 사용하여, 최적 설계 변수를 도출하였다. 결정론적인 방법은 탐색 방법을 목적 함수와 제약 함수의 최대구배를 이용하여 구함으로써 최적화에 소요되는 계산 시간은 빨라지게 되어 확률적인 방법의 계산 시간보다 효율적이다. 그러나, 이 방법은 전역적인 최소치를 찾기 위한 제약으로 설계자의 경험에 의한 초기 치에 의존되며 알고리즘의 특성상 국소 최소치를 가지기 쉽다. 반면, 유전 알고리즘의 계산 시간은 결정적인 방법에 비해 느리지만 목적 함수가 복잡한 비선형이나 이산화 함수일지라도, 탐색 방향을 구할 수 있으며, 수학적으로 적자생존의 자연법칙을 모델화함으로써 전역 최소치를 찾을 수 있다.[7]

본 논문에서는 슬릿형 LIM의 최적설계를 위하여 본 연구에서 슬릿 피치 경계 조건을 이용한 단위 영역의 합으로서 모터 전체를 해석하는 방법을 적용하여 이로부터 구성한 등가 회로와 최적화 알고리즘을 이용하여 최적 설계 변수를 도출하였다. 실험치와 모사치를 비교 검토하여 슬릿형 LIM의 성능 향상을 확인하였다. 표 1은 편축식 팬형 LIM의 제원이다.

그림 1(b)의 단위 영역으로부터 특성 방정식은 다음과 같다.

2. 등가 회로의 구성

A. 영역 1, 3 (슬릿 영역)

$$g_m \frac{\partial \bar{H}_{nf}}{\partial x} = J_{mnf} e^{(-j\beta_m x)} \quad (\text{진행파 성분}) \quad (1)$$

$$g_m \frac{\partial \bar{H}_{nb}}{\partial x} = J_{mbn} e^{(j\beta_m x)} \quad (\text{반사파 성분}) \quad (2)$$

표 1. 편축식 LIM의 제원

치수	
극 수(p)	3, 적층폭(h) = 0.08[m],
슬롯폭	0.0055[m], 구간격 = 0.051[m],
1차축	단절율 = 5/6, 매극 매상 슬롯수 = 2,
	상당 턴수(Nph) = 540
2차축	AI 두께(d) = 0.0025[m], 오버행 = 0.02[m]
	AI 도전율(σ) = 3.48×10^7 [S/m]
공극	기계적 공극(g) = 0.002[m]

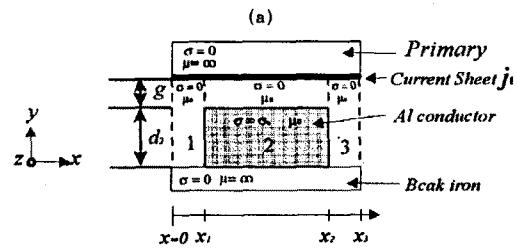
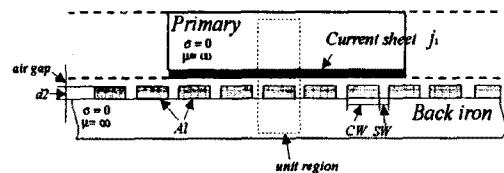


그림 1. (a) 슬릿형 LIM의 해석 모델 (b) 단위 영역

여기서, n은 고조파 차수, g_m 은 각 고조파에 대한 미정 계수로써 유효공극이다. [4][5]

각 고조파의 진행파 방향과 반사파 방향 성분으로 \bar{H}_{nf} , \bar{H}_{nb} 는 자계의 세기이고, 그리고 J_{mnf}, J_{mbn} 는 등가 표면 전류의 최대치이다. 식(2)로부터, 영역 1, 3의 해는 식(3), 식(4)처럼 나타낼 수 있다.

$$\bar{H}_{1n} = \bar{D}_{nf} e^{(-j\beta_m x)} + \bar{C}_{1nf} + \bar{D}_{nb} e^{(j\beta_m x)} + \bar{C}_{1nb} \quad (3)$$

$$\bar{H}_{3n} = \bar{D}_{nf} e^{(-j\beta_m x)} + \bar{C}_{2nf} + \bar{D}_{nb} e^{(j\beta_m x)} + \bar{C}_{2nb} \quad (4)$$

B. 영역 2 (도체 영역)

도체 영역은 Ampere의 주회법칙으로부터 자계강도와 등가 표면 전류 밀도, 와 전류 밀도 사이의 관계에서 진행파 성분과 반사파 성분은 식(5)과 식(6)과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \bar{H}_{nf}}{\partial x^2} = \frac{\mu_0 \sigma v_x d_2}{g_{en}} \frac{\partial \bar{H}_{nf}}{\partial x} - \frac{j\omega \mu_0 \sigma d_2}{g_{en}} \bar{H}_{nf} \quad (5)$$

$$= \frac{-j\beta_{nf} J_{mnf}}{g_{en}} e^{(-j\beta_{nf} x)} \quad (\text{진행파 성분})$$

$$\frac{\partial^2 \bar{H}_{nb}}{\partial x^2} = \frac{\mu_0 \sigma v_x d_2}{g_{en}} \frac{\partial \bar{H}_{nb}}{\partial x} - \frac{j\omega \mu_0 \sigma d_2}{g_{en}} \bar{H}_{nb} \quad (6)$$

$$= \frac{j\beta_{nb} J_{mnf}}{g_{en}} e^{(j\beta_{nb} x)} \quad (\text{반사파 성분})$$

위 특성 방정식의 일반 해는 다음 식으로 표현된다.

$$\bar{H}_{2n} = \bar{A}_{1n} e^{(\bar{\gamma}_{1n} x)} + \bar{B}_{1n} e^{(\bar{\gamma}_{2n} x)} + \bar{B}_n e^{(-j\beta_n x)} \quad (7)$$

$$+ \bar{A}_{1nb} e^{(\bar{\gamma}_{1nb} x)} + \bar{B}_{1nb} e^{(\bar{\gamma}_{2nb} x)} + \bar{B}_{nb} e^{(j\beta_n x)}$$

식 (7)에서, 세 번째, 여섯 번째 항은 정상 상태의 해이고, 나머지는 경계 조건으로부터 결정되는 항이다. 계변수를 식(3), 식(4), 식(7)의 미정 계수를 주어진 경계 조건을 계산하여 구할 수 있다.[4] 해석 방법에 의한 궁극 자속밀도로 부터 1차 유기 기전력을 구하고 이로부터 등가 회로를 구성한다.[4] 추력, 역률, 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$F_x = P_g / v_x \quad (8)$$

$$\cos \varphi = (r_1 + r_{2e}) / Z_t \quad (9)$$

$$\eta = [(1-s) r_{2e}] / (r_1 + r_{2e}) \quad (10)$$

여기서 $P_g (= m I_1^2 r_{2e}(1-s))$ 는 2차 출력, v_x 는 LIM의 속도, x_1 1차축 누설 리액턴스, r_1 은 1차축 코일 저항, $r_{2e} (= \sum_{n=1}^{\infty} r_{2e,n})$ 는 2차축 저항 성분, Z_t 는 전 임피던스, $x_{2e} (= \sum_{n=1}^{\infty} x_{2e,n})$ 는 2차축 누설 리액턴스 성분이다.

3. 수치 최적화 기법

A. 순차 이차 계획(SQP)

순차 이차 계획 법은 원래의 목적 함수와 제약 함수를 테일러급수 진계로 선형화된 부문제로 변환시킨다. 부 문제에서, 목적 함수는 2차이고 제약 함수는 선형이다. 일반적 QP 문제는 다음과으로 표현된다.

$$\text{minimize : } Q(x) = C^T X + 0.5 X^T H X \quad (11)$$

$$A^T X \leq b$$

$$\text{subject to : } N^T X = e \quad (12)$$

$$\text{and } X \geq 0 \quad (13)$$

여기서, 행렬 C, A, N 은 목적 함수와 부등호, 등호 제약 함수의 구배이고, 그리고 H 는 옛세 행렬, b, e 는 부등호와 등호 제약의 음의 값이다. x 의 점에서 Pshenichny's 강하 함수 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi(x) = f(x) + RV(x) \quad (14)$$

여기서 $f(x)$ 는 목적 함수이고, R 은 양의 별치 매개 변수, $V(x)$ 는 최대 제약 위배이다. 옛세 행렬 H 는 BFGS 공식에 의해 k번 반복에 의해 수정될 수 있다. 수렴 알고리즘으로는 강하 조건을 사용한다.[6]

B. 유전 알고리즘(GA)

유전 알고리즘(GA)은 자연 선택과 유전학의 기술을 토대로 한 최적화 탐색 과정으로, Human search와 같은 혁신적인 재능을 가진 탐색 알고리즘을 만들기 위해, 구조적으로 정보를 임의로 교환(information exchange)을 하고, 스트링 생성 과정에 적자 생존의 원리를 결합시킨 것이다. 한 점으로부터 순차적으로

해를 구하는 국부 탐색이 아니라, 다점에서 탐색하는 전역적 탐색이다. 유전 알고리즘에서는 단순한 임의의 선택(random search)에 의한 개체를 생성하는 것이 아니라, 탐색을 이끄는 도구로써, 개선된 탐색 공간 영역으로 향하도록 유전학적으로 개체를 선택한 것이다. 유전 알고리즘의 다음 세대(개체군) 생성 과정에는 재생(reproduction), 교차(crossover), 돌연변이(mutation)의 기본 과정이 있다.

한 세대의 개체들의 INTEGER(f_i / \bar{f})갯수만큼 스트링을 복사하는 Roulette wheel 기법이 대상을 위해 사용하고, 두 스트링의 교차를 위해 임의로 짹짓기(mating)를 하며, 돌연변이에 의해 다음 세대의 개체가 생성된다.

스트링의 각 비트가 어떤 확률을 가지고 교체되기 위해 균일한 한 점 교배를 이용하였다. 여기서는 교배와 돌연변이 확률을 각각 0.6, 0.003 으로 하였다.[7][8]

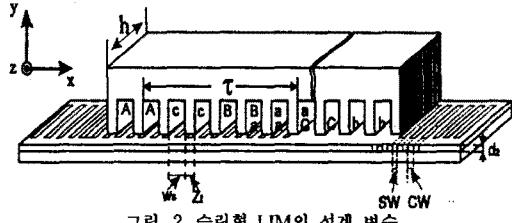


그림. 2. 슬릿형 LIM의 설계 변수

C. 최적화 문제

본 논문에서는 그림 2에서 보는 것처럼, 슬릿형 LIM의 설계 변수를 극간격, 적층폭, 2차 알루미늄 두께, 슬롯폭/슬롯 피치, 도체폭, 슬롯폭, 정격 출력으로 하였다. 목적 함수는 다음과 같다.

$$F_{100} = kW/kVA \quad (8)$$

$$F_2(X) = \text{기동 추력} \quad (9)$$

$$F_3(X) = 1 \text{ 차축 중량} \quad (10)$$

제약 함수로는 1차축 치에서의 최대 자속밀도(B_{1m}), 모터의 길이(L), 정격 추력의 상한치(F_u), 하한치(F_l) 그리고 최대 추력 대 정격 추력의 비(F_{max}/F_u)로 하였다. 이들의 제약 값 G_1, G_2, G_3, G_4 , 와 G_5 는 다음과 같다.

$$g_1(x) = G_1 - B_{1m} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_2(x) = G_2 - L \leq 0 \quad (12)$$

$$g_3(x) = G_3 - F_u \leq 0 \quad (13)$$

$$g_4(x) = G_4 - F_l \geq 0 \quad (14)$$

$$g_5(x) = G_5 - (F_{max}/F_u) \geq 0 \quad (15)$$

여기서, 정격 추력 $\pm 3[N]$ 의 오차에서 $60[N]$ 과 F_{max}/F_u 이 1.5에서, $B_{1m}=1.2[T]$, $L=30[cm]$, $F_u=63[N]$, 와 $F_l=57[N]$. 설계와 관련된 식들은 참고문헌[1]을 참조하였다.

4. 모사치와 실험 결과

표 2는 공간고조파 해석을 사용하여 등가 회로를 적용한 목적 함수의 최적 설계 값을 나타내었다.

여기서 50 고조파까지만 고려하고, 순차 이차 계획에서 수렴 비율은 0.1%, 계산 시간은 4800(sec), 그리고 유전 알고리즘에서 개체수는 10, 세대수는 1000, 계산 시간은 76800(sec)(586 120 Hz)이 소요되었다. 표 2에서 보는 것처럼, 유전 알고리즘의 결과는 순차 이차 계획(SQP)보다 더 효율적이다. 또한 유전 알고리즘의 모터 길이와 극간격은 순차 이차 계획보다 크다. 그럼 3은 판형 LIM과 각각의 최적화 방법에 의하여 목적함수를 kW/kVA로 하였을 때의 결과이다. 그럼 3에 나타난 바와 같이 유전 알고리즘에 의한 최적 설계 결과가 순차 이차 계획(SQP)보다 더욱 향상된 결과를 나타내고 있으며, 모터 길이와 극간격은 유전 알고리즘에 의한 방법이 순차 이차 계획(SQP)보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 최적 설계에 의하여 특성이 향상됨을 알 수 있다.

표 2. 실험 결과

	SQP			GA		
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₁	F ₂	F ₃
전 압 (V)	220	220	220	220	220	220
주파수 (Hz)	60	60	60	60	60	60
일차 전류 (A)	2.78	5.17	3.11	2.53	5.11	2.60
kVA	0.612	1.137	0.684	0.557	1.124	0.573
슬립	0.35	1.0	0.35	0.351	1.0	0.424
주 력 (N)	59	95.79	63.82	57.49	96.05	58.26
모터 길이 (m)	0.241	0.260	0.220	0.299	0.259	0.244
상 3	3	3	3	3	3	3
극 수 3	3	3	3	3	3	3
극간격 (mm)	62.96	67.84	57.41	78.06	67.68	63.71
슬롯 깊이 (mm)	63.28	80.33	74.04	50.34	79.78	50.22
슬롯 폭/슬롯 끼치	0.55	0.7	0.55	0.551	0.699	0.697
슬롯 폭 (mm)	5.77	7.91	5.26	7.17	7.89	7.40
슬롯 끼치 (mm)	10.54	11.31	9.57	13.01	11.28	10.62
치 폭 (mm)	4.77	3.39	4.31	5.84	3.39	3.22
슬롯 깊이 (mm)	35.8	65.33	59.04	35.34	64.78	35.22
단결계수 5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6	5/6
상당면수 540	540	540	540	540	540	540
반코일길이 (mm)	143.5	144.9	142.83	149.8	144.9	143.7
적층폭 (mm)	64.8	60.14	71.7	52.27	60.28	64.04
공 극 (mm)	2	2	2	2	2	2
백 Iron 길이 (mm)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Al 길이 (mm)	3.24	2.44	4.0	1.75	2.34	1.78
도체 폭 (mm)	4	7	7.0	5.55	6.97	4.13
슬릿 폭 (mm)	0.84	0.55	0.4	1.30	0.4	0.84
kW/kVA	0.3	0	0.241	0.36	0.0	0.258
역률 (%)	65	73.8	57.68	72.5	73.8	62.0
효율 (%)	46	0	41.85	49.9	0.0	41.6
1 차측 중량 (kg)	7.84	8.69	7.80	6.11	8.624	5.40

(제약조건; $0.35 \leq \text{슬립} \leq 0.6$, $45 \leq \text{극간격} \leq 80[\text{mm}]$, $60 \leq \text{적층폭} \leq 100[\text{mm}]$, $0.55 \leq \text{슬롯 폭}/\text{슬롯 끼치} \leq 0.7$, $4 \leq \text{도체 폭} \leq 7[\text{mm}]$, $0.4 \leq \text{슬릿 폭} \leq 1.4[\text{mm}]$, $1 \leq \text{AI 길이} \leq 4[\text{mm}]$, 극간격 \times 적층폭 = 0.408[m]

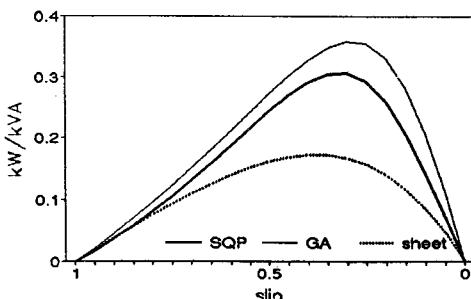


그림 3. 판형 LIM과 최적화된 슬릿형 LIM의 슬립에 따른 kW/kVA의 특성(목적 함수는 kW/kVA).

표 3은 2차측 설계 변수만의 최적 설계이다. 판형 LIM의 경우 기동 추력은 69.53[N], kW/kVA 는 0.152인 반면, 순차 이차 계획과 유전 알고리즘의 슬릿형 LIM의 경우 각각 기동추력이 14.93[%] 와 15.49[%] 증가하였고, kW/kVA는 31.57[%], 32.89[%] 증가하였다. 그림 4에서 볼 때, 해석치와 실험치는 잘 일치함으로써 본 해석방법이 타당함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 슬릿형 LIM을 경제적 문제로써 새로운 해석 방법을 적용하여 등가 회로를 구성하고 2개의 최적 설계 기법을 이용하여 최적화를 수행하였다.

표 3. 수치 결과

명 칭	SQP		GA	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
전 압 (V)	220	220	220	220
주파수 (Hz)	60	60	60	60
1 차 전류 (A)	2.667	3.609	2.661	3.436
kVA	0.587	0.794	0.585	0.756
슬립	0.35	1.0	0.35	1.0
주 력 (N)	51.5	79.91	51.40	80.30
AI 두께 (mm)	4	3.2	4.0	2.74
도체 폭 (mm)	6	7	7.1	7
슬릿 폭 (mm)	1.	0.6	1.22	0.4
kW/kVA	0.20	0	0.202	0
역률 (%)	48.3	59.43	48.63	62.26
효율 (%)	41.44	0	41.48	0

(제약조건; $0.35 \leq \text{슬립} \leq 0.6$, $4 \leq \text{도체 폭} \leq 7[\text{mm}]$, $0.4 \leq \text{슬릿 폭} \leq 1.4[\text{mm}]$, $1 \leq \text{AI 두께} \leq 4[\text{mm}]$, AI 도전율 = $3.175 \times 10^7[\text{S/m}]$)

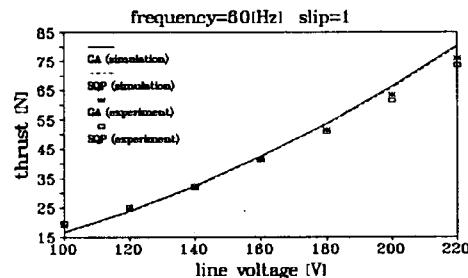


그림 4. 2 차측 설계 변수만으로 최적화한 슬릿형 LIM의 전압에 따른 추력 특성

2개의 최적 설계 결과를 비교했을 때, 유전 알고리즘에 의한 최적화가 순차 이차 계획에 의한 최적화보다 향상된 결과를 나타남을 알 수 있었다. 등가회로와 최적화 알고리즘을 이용한 최적 설계는 유전 알고리즘에 의한 방법이 보다 효과적이라고 생각된다.

REFERENCES

- S. Nonaka, T. Higuchi, "Design of Single-Sided Linear Induction motors for Urban Transit," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 37, No. 3, pp. 167-173, August 1988.
- J. F. Geras, *Linear Induction Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- Takashi Onuki, Yushi Kamiya, Woojin Joon, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Slotted Reaction Plate in Linear Induction Motor," *Proceedings-D of IEE*, Vol. 114, No. 11, pp. 1122-1129, 1994.
- 윤상백, "2 차측 구조에 따른 선형 유도 전동기의 해석 및 최적 설계에 관한 연구," 한양대학교 대학원, 박사 학위논문, 1, 1996.
- R. M. Pai, I. Boldea and S. A. Nasar, "A Complete Equivalent Circuit of a Linear Induction Motor with Sheet Secondary," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 24, No. 1, pp. 639-654, January 1988.
- Dal-Ho Im, Sang-Baeck Yoon, Tae-Hyeong Kim, "A Study on The Design of The Reaction Plate in The High-Speed and Super High-Speed SLIM," *IEEE Conference on CEFC*, July 1994.
- D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- G. Fuat Uler, Osama A. Mohammed, and Chang-Seop Koh, "Utilizing Genetic Algorithms for the Optimal Design of Electromagnetic Devices," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 6, pp. 4296-4298, November 1994.