

코깅력이 저감된 3상 9극 10슬롯 구조의 영구자석 선형 전동기

論 文

55B-11-2

A Low Cogging Force Permanent Magnet Linear Motor Having 3 Phase 9 Pole 10 Slot Structure

延承桓* · 李鍾鎭** · 高彰變†

(Sung Whan Youn · Jong Jin Lee · Chang Seop Koh)

Abstract - The detent force of a permanent magnet linear motor(PMLM) consists of the end force and cogging force, and should be reduced for high precision purpose applications. The cogging force comes from the electromagnetic interaction between the permanent magnets and interior teeth(or the slots) of the stator, and of which the magnitude depends on the ratio of the numbers of the armature and permanent magnet poles as well as the geometrical shape of the permanent magnet and armature pole. In order to reduce the cogging force of a PMLM, this paper proposes a new configuration which has 9 permanent magnet poles and 10 armature winding slots. By theoretical investigation of the principle of cogging force generation and simulating using finite element method, the proposed PMLM configuration is proven to give much less cogging force than the conventional configuration which has 8 permanent magnet poles and 12 armature winding slots. A proper winding algorithm, modified (A, A, A) winding method, for the proposed configuration is also suggested when the proposed PMLM is operating as a 3 phase synchronous machine. A theoretical and numerical calculation shows that the proposed configuration makes slightly bigger back-emf and thrust force under same exciting current and total number of winding turns condition.

Key Words : Permanent magnet linear motor(PMLM), detent force, cogging force, thrust force

1. 서 론

직선운동을 요하는 많은 분야에서 회전 운동을 스크류, 크랭크, 캠, 체인, 벨트 등의 기구들을 사용하여 직선운동으로 바꾸어 사용하고 있다. 이러한 시스템은 복잡하고 효율과 정밀도가 떨어지는 등의 단점이 있다. 반면에 선형 전동기는 추력을 발생시키므로 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 별도의 동력 변환 장치가 필요 없어 회전을 사용하는 시스템의 단점을 극복할 수 있다.

영구자석 선형 동기전동기(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)를 비롯한 영구자석 선형 전동기(PMLM)는 다른 전동기에 비해 개루프 제어 성능이 떨어지고 제조 원가가 비싸다는 단점에도 불구하고, 계자원으로 영구자석을 사용하기 때문에 효율 및 추력/중량비가 높아 고속화 및 고추력화가 가능하다는 이점이 있다. 그러나 PMLM은 그 특성상 디텐트력(detent force)이 발생하여 추력에 맥동(thrust force ripple)이 발생하고, 이로 인하여 원치 않는 진동과 소음이 발생함은 물론 정밀제어를 어렵게 하는 단점이 있다[1]. PMLM의 디텐트력은 전동기에 전원이

인가되지 않는 상태에서 영구자석과 전기자 사이에 작용하는 불평형 인력에 의하여 발생하는 것으로, 이는 영구자석과 전기자의 상대적인 위치에 따라 일정한 주기로 발생한다. 따라서 디텐트력은 전원을 인가하여 전동기를 구동 할 때에도 추력에 합성되어 나타나게 된다. 단 1차형(short primary type) PMLM에서의 디텐트력은 두 가지 원인에 의해 발생한다. 그중 하나는 코깅력(cogging force)으로 전기자의 치(teeth) 또는 슬롯(slot)과 영구자석 사이에서 발생하는 것으로, 회전기에서의 코깅 토크(cogging torque)에 대응하는 힘이며, 이는 단 2차형(short secondary type) PMLM에서도 나타난다. 또 다른 하나는 단부력(end force)으로 전기자의 양 단부와 영구자석 사이에 작용하는 인력에 의하여 발생하는 것으로 단 1차형 PMLM에서만 나타나는 힘이다.

PMLM의 단부력은 전기자의 양끝에 위치한 전기자 치와 영구자석 사이에서 발생하는 힘으로, 단 1차형 PMLM의 경우 그 크기는 코깅력에 비하여 상대적으로 크게 나타난다. 그러나 단부력은 전기자의 길이를 조정하거나[2] 또는 전기자 양끝에 위치한 치의 형상을 최적으로 설계함으로써 비교적 쉽게 저감할 수 있는 것으로 알려져 있다[3, 4].

한편, PMLM의 코깅력 저감을 위해서 그동안 많은 연구가 있어 왔다. 영구자석의 폭 및 영구자석의 배치조정법은 코깅력의 현저한 감소효과가 있으나 추력이 다소 감소하는 단점이 있고[5, 6], 전기자 슬롯의 개구 폭(slot opening) 조정법은 슬롯 개구 폭이 줄어드는 경우 코깅력은 크게 감소하고 전자기력은 증가하나, 누설 자속이 증가하고 형상이 복잡해지는 단점이 있다. 전기자의 치 폭 조정법은 전기자의

† 교신저자, 正 會 員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

* 學生會員 : 忠北大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : Samsung DA研究所 研究員

接受日字 : 2006年 7月 24日

最終完了 : 2006年 10月 2日

치 폭이 증가함에 따라 코깅력은 감소하고 전자기력은 증가하나, 치 폭을 일정 이상 증가시킬 수 없고, 또한 치 폭의 증가로 인하여 권선영역이 줄어들어 단점이 있다[7]. 반폐형 전기자 슬롯을 채용하는 것은 코깅력은 현저하게 감소하나 누설 리액턴스가 증가하여 효율은 다소 떨어지고, 형상이 복잡해지는 단점이 있다[8]. 한편 슬롯 또는 영구자석에 사구를 설치하는 방법은 구조가 복잡해지고 누설 인덕턴스가 증가하여 출력을 감소시키는 단점이 있으며[9], 전기자의 치에 보조구를 설치하는 방법은 코깅력의 감소효과가 있지만 동시에 추력이 감소하는 단점이 있다[10]. 이러한 이유로 일부 문헌에서는 슬롯이 없는 전기자를 사용하고 있으나, 이 방법은 코깅력을 근본적으로 제거할 수 있는 장점이 있는 반면 추력이 현저하게 떨어지는 단점이 있다[11]. 한편 문헌[12]에서는 회전기에서 코깅 토크가 현저하게 감소하는 것으로 널리 알려진 8극 9슬롯 구조를[13] 선형모터에 적용하고 있다. 그러나 이 경우는 집중권을 설치하기 위하여 한 개의 치를 추가로 설치해야 하고, 이로 인하여 전체적인 구조가 8극 9슬롯에서 변형 되어 코깅력의 저감효과가 떨어지게 된다.

본 논문에서는 PMLM의 코깅력을 줄이기 위하여 영구자석의 극수와 전기자 슬롯 수의 비가 9:10인 새로운 구조의 단 1차형 구조를 제안하고 여기에 적합한 새로운 권선법을 제시하였다. 제안된 구조에 대하여 이론적 고찰과 유한요소법을 이용하여 코깅력과 추력을 계산함으로써 본 논문에서 제안한 새로운 구조의 PMLM이 기존의 영구자석 극수와 전기자 슬롯 수의 비가 2:3인 전동기에 비하여 코깅력이 획기적으로 감소함은 물론 동일 여자전류 및 여자권선 수의 조건에서 추력도 다소 증가함을 보였다.

2. 기본모델

2.1 코깅력의 발생원리

단 1차형 PMLM의 디텐트력(detent force)은 그림 1에 나타난 것과 같이 아마추어 코어의 단부와 영구자석사이에 작용하는 단부력(end force), 그리고 아마추어 코어의 각 슬롯과 영구자석 사이에 작용하는 코깅력(cogging force)으로 구성된다[2].

PMLM의 코깅력은 아마추어 코어의 슬롯과 영구자석 사이에 작용하는 힘으로, 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력을 해석하기 위하여 그림 2 (a)와 같이 단부력을 무시할 수 있는 모델을 제안한다. 영구자석의 폭(w_p)과 극 피치(τ_p)가 각각 12[mm], 18[mm]이고, 슬롯 폭(w_s)이 8[mm]인 경우, 아마추어 코어의 비선형성을 고려하여 유한요소법을 이용하여

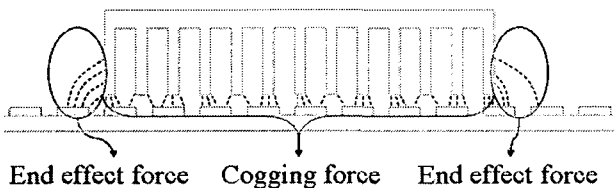
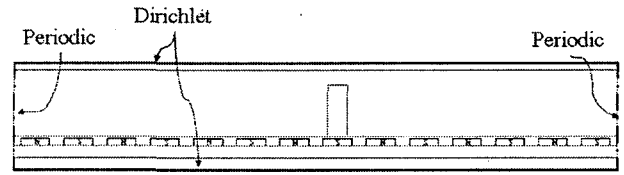
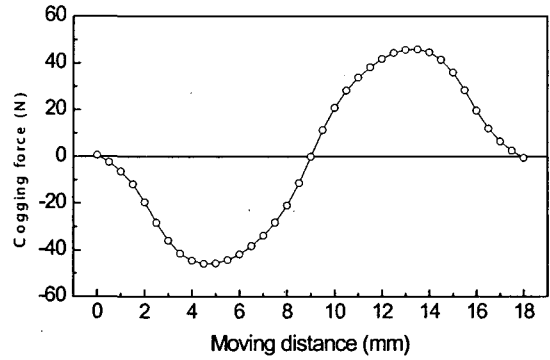


그림 1 단 1차형 PMLM의 디텐트력
Fig. 1 Detent force in a short primary PMLM



(a) 코깅력 계산 모델



(b) 코깅력 파형

그림 2 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력
Fig. 2 Cogging force due to a slot

계산한 코깅력의 파형은 그림 2 (b)와 같다. 그림에서와 같이 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력은 주기가 영구자석의 극 피치(τ_p)인 함수가 된다. 이 함수를 $f(x)$ 라 하고 이동거리를 $x = \omega t$ 로 표현하면, ω 는 영구자석의 극 피치(τ_p)를 2π 로 하는 전기각을 이용하여 $\omega = 2\pi/\tau_p$ 로 표현된다. 이를 이용하여 하나의 슬롯에서 발생하는 코깅력 $f(x)$ 을 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같이 된다.

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (1)$$

2.1.1 3상 8극 12슬롯 구조의 PMLM의 코깅력

그림 3은 현재 널리 이용되고 있는 집중권을 채용한 3상 구동 8극 12슬롯 구조의 PMLM을 나타내며, 표 1은 동기 전동기로 구동되는 경우의 제원을 나타내었다. 이 구조는 8극 12슬롯 구조의 회전기를 펼친 것으로 집중권을 설치하기 위하여 한 개의 치를 추가로 설치하여, 전기자는 전체적으로는 14개의 치와 13개의 슬롯으로 구성되어 있다. 이때 전기자의 슬롯 피치(τ_s)와 영구자석의 극 피치(τ_p) 사이에는, 그림 3에서 보듯이 다음의 관계가 성립하도록 τ_p 와 τ_s 가 각각 정해진다.

$$8\tau_p = 12\tau_s \quad (2)$$

이 구조는 기본적으로 4개의 2극 3슬롯 구조의 전동기로 이루어져 있기 때문에, 코깅력 특성 역시 2극 3슬롯 전동기의 특성이 4배로 확대되어 나타나게 된다[14, 15]. 지금 1번 슬롯과 영구자석 사이에서 발생하는 코깅력에 주목하면 영구자석의 극 피치($\tau_p=18.0$)을 주기로 하는 함수가 되고,

이것은 식 (1)의 형태로 표현되어 진다. i 번 슬롯에 의하여 발생하는 코깅력을 $f_i(x)$ 라고 하면, 8극 12슬롯 PMLM의 전체 코깅력은 다음 식으로 표현된다.

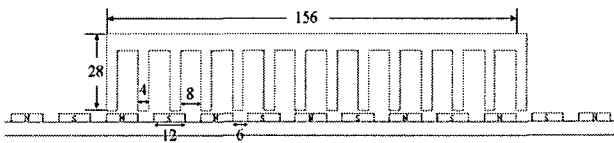
$$F(x) = \sum_{i=1}^{12} f_i(x) \quad (3)$$

한편, 그림 3에서 알 수 있듯이 2번과 3번 슬롯은 1번 슬롯으로부터 각각 $\tau_s (=12)$ 와 $2\tau_s (=24)$ 만큼 떨어진 곳에 위치하고(여기서, τ_s 는 아마추어 슬롯 피치임), 따라서 2번과 3번 슬롯에 의하여 발생하는 코깅력은 다음과 같이 표현된다.

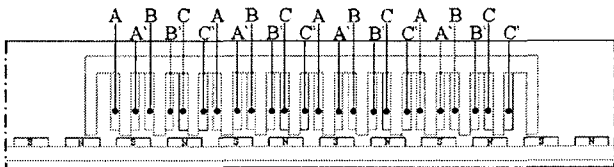
$$f_k(x) = f_1\{x + (k-1)\tau_s\}, k=2,3 \quad (4)$$

이것은 식 (1)에서와 같이 전기각을 이용하여 나타내면 2번과 3번 슬롯은 각각 1번 슬롯으로부터 240° 와 120° 만큼 떨어진 곳에 위치하고, 따라서 i 번 슬롯에서 발생하는 코깅력을 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같이 된다.

$$f_i(\omega t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin\{k(\omega t + \theta_i) + \alpha_k\}, i=1,2,3 \quad (5)$$



(a) 8극 12슬롯 PMLM의 구조



(b) 8극 12슬롯 PMLM의 권선

그림 3 3상 8극 12슬롯 구조의 PMLM의 구조 및 전기자 권선

Fig. 3 Configuration and armature winding of a 3 phase 8 pole 12 slot PMLM

표 1 8극 12슬롯 구조의 PMLM의 제원

Table 1 Specification of a 8 pole 12 slot PMLM

Item	Specification	
Primary	Number of phase	3
	Slot width	8(mm)
	Slot pitch	12(mm)
	Laminated height	100(mm)
	Pole pitch(τ_p)	18(mm)
Secondary	Thickness	3(mm)
	Width	12(mm)
	Material	NdFeB
	Residual flux density	1.23(T)
Air-gap	Mechanical tolerance	1.0(mm)

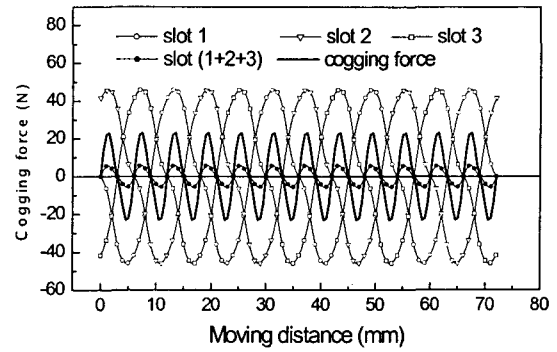


그림 4 8극 12슬롯 PMLM의 코깅력 파형
Fig. 4 Cogging force of a 8 pole 12 slot PMLM

여기서, $\theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 240^\circ, \theta_3 = 120^\circ$ 이다. 따라서 그림 3의 8극 12슬롯 구조의 PLMM에서 발생하는 전체 코깅력은 다음과 같이 표현되고,

$$F(\omega t) = 4 \sum_{i=1}^3 f_i(\omega t) \quad (6)$$

$$= 4 \sum_{i=1}^3 \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n) \right\}$$

$$= 4 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sum_{i=1}^3 \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n)$$

따라서 전체 코깅력의 n 차 고조파 성분은 다음과 같이 정리된다.

$$F_n(\omega t)/A_n = 4 \sum_{i=1}^3 \sin(n\omega t + \alpha_n + \theta_i, n)$$

$$= 4 \left\{ \sin(n\omega t + \alpha_n) (1 + 2(-1)^n \cos(60n)) \right\}$$

$$= \begin{cases} 0 & n = 3k+1 \text{ 또는 } n = 3k+2 \text{ 일 때} \\ 12\sin(n\omega t + \alpha_n) & n = 3k \text{ 일 때} \end{cases} \quad (7)$$

이로부터 그림 3에 나타난 8극 12슬롯 구조의 PMLM에서 발생하는 전체 코깅력은 영구자석의 극 피치에 대하여 3의 배수인 고조파 성분으로 구성됨을 알 수 있으며, 따라서 전체 코깅력은 다음과 같이 표현된다.

$$F(\omega t) = 4 \sum_{k=1}^{\infty} 3A_{3k} \sin(3k\omega t + \alpha_{3k}), \quad k=1,2,3,\dots \quad (8)$$

또한 이것은 영구자석의 극 피치를 전기각 2π 로 하여 표현한 것이고, 영구자석의 N극과 S극 한 쌍을 주기로 하는 경우에는 6의 배수인 고조파 성분으로 구성됨을 알 수 있다 [16]. 그림 4는 8극 12슬롯 구조의 PMLM의 코깅력의 파형을 나타낸다. 특히 본 논문에서 다른 경우와 같이 집중권을 사용하는 경우에는 그림 3에서와 같이 하나의 치가 추가적으로 더 필요하고, 이로 인한 코깅력이 추가되어, 코깅력은 더욱 커지게 된다.

2.1.2 9극 10슬롯 구조의 PMLM의 코깅력

9극 10슬롯 구조의 PMLM에서 발생하는 코깅력을 규명하기 위하여 그림 5에 나타난 모델을 대상으로 하였다. 종래

의 8극 12슬롯 구조의 전동기에서 발생하는 코깅력과 정량적으로 비교하기 위하여 선형 전동기의 전체 길이가 그림 3의 8극 12슬롯 전동기와 일치하도록 영구자석의 폭과 아마추어의 슬롯 및 치의 폭을 선정하였다. 그림 5와 같이 9극 10슬롯 PMLM의 전기자는 10개의 슬롯과 11개의 치로 구성되며, 전기자 슬롯 피치(τ_s)와 영구자석의 극 피치(τ_p)는 다음의 관계식을 만족하는 것으로,

$$9\tau_p = 10\tau_s \quad (9)$$

회전기에서는 영구자석의 극수를 홀수로 할 수 없기 때문에 불가능한 구조이다. 9극 10슬롯 구조의 PMLM에서 영구자석의 극 피치 τ_p 는 아마추어 길이를 영구자석의 개수로 나눈 $156/9=17.34[\text{mm}]$ 이고, 아마추어의 극 피치 τ_s 는 아마추어 전체 길이를 슬롯의 개수로 나눈 $156/10=15.6[\text{mm}]$ 이다. 표 2는 3상 동기 전동기로 구동되는 경우 9극 10슬롯 구조의 PMLM의 제원을 나타낸다.

그림 6은 회전기에서 코깅토크가 획기적으로 저감되는 것으로 널리 알려진 8극 9슬롯 구조의 회전기를[13] 선형전동기에 응용한 것으로, 집중권을 설치하기 위하여 한 개의 치를 추가로 설치한 것이다. 이때 전기자 슬롯 피치(τ_s)와 영구자석의 극 피치(τ_p)는 다음의 관계식을 만족한다[12].

$$8\tau_p = 9\tau_s \quad (10)$$

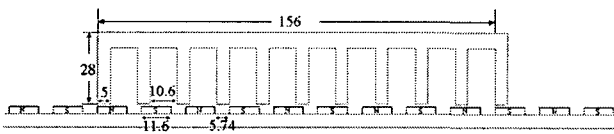


그림 5 9극 10슬롯 구조의 PMLM
Fig. 5 Configuration of a 9 pole 10 slot PMLM

표 2 9극 10슬롯 구조의 PMLM의 제원
Table 2 Specification of a 9 pole 10 slot PMLM

Item	Specification	
Primary	Number of phase	3
	Slot width	10.6(mm)
	Slot pitch	15.6(mm)
	Laminated height	100(mm)
Secondary	Pole pitch(τ_p)	17.34(mm)
	Thickness	3(mm)
	Width	11.6(mm)
	Material	NdFeB
Air-gap	Residual flux density	1.23(T)
	Mechanical tolerance	1.0(mm)

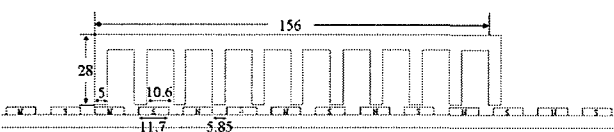


그림 6 8극 9슬롯 구조의 PMLM
Fig. 6 Configuration of a 8 pole 9 slot PMLM

표 3 9극 10슬롯 PMLM에서 각 슬롯의 위치
Table 3 Slot position of a 9 pole 10 slot PMLM

Slot	θ_i (degree)	Slot	θ_i
1	0	6	180
2	324	7	144
3	288	8	108
4	252	9	72
5	216	10	36

8극 9슬롯 구조의 PMLM은 그림 5의 9극 10슬롯 구조의 PMLM과 비교하면, 전기자의 구성은 비슷하나 전기자 슬롯 피치와 영구자석 극 피치간의 관계가 근본적으로 다를 수 있다. 이와 같이 8극 9슬롯 구조의 PMLM과 9극 10슬롯 구조의 PMLM은 전기자 권선이 설치되는 전기자 치의 위치가 영구자석의 위치를 기준으로 할 때 서로 다르기 때문에 즉, 전기각으로 표시한 전기자 치의 위치가 서로 다르기 때문에 코깅력의 발생은 물론 전기자 전류에 의한 추력의 발생 역시 달라지고, 더욱이 각각의 전기자 치에 설치되는 권선의 상도 다를 수 있다[12, 13].

9극 10슬롯 구조의 PMLM에서 발생하는 코깅력을 분석하기 위하여, 앞에서와 같이 3상 9극 10 슬롯 구조의 PMLM에서 1번 슬롯과 영구자석 사이에서 발생하는 코깅력은 주기가 영구자석의 극 피치(=17.34[mm])인 함수가 되고, 이 함수를 $f_1(x)$ 라고 하고, i 번 슬롯에서 발생하는 코깅력을 $f_i(x)$ 라고 하면, 전체 코깅력은 다음 식으로 표현된다.

$$F(x) = \sum_{i=1}^{10} f_i(x) \quad (11)$$

지금 $f_1(x)$ 이 주기 $T(17.34[\text{mm}])$ 인 함수이므로 이동거리를 $x = \omega t$ 라고 하면, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 가 된다. 이를 이용하여 $f_1(x)$ 을 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$f_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (12)$$

9극 10슬롯 구조의 PMLM의 슬롯은 각각 아마추어의 극 피치(τ_s)만큼 떨어져 위치함을 감안하면, 영구자석의 극 피치($\tau_p = 17.34$)를 2π 로 하는 전기각(electrical angle)을 이용하여 각각의 슬롯에서 발생하는 코깅력은 다음 식으로 표현되며,

$$f_i(\omega t) = f_1(\omega t + \theta_i), \quad i = 2, 3, 4, \dots, 10 \quad (13)$$

Fourier 급수로 전개하면, 식 (11)과 식 (12)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$f_i(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n) \quad (14)$$

여기서 θ_i 는 각 슬롯의 위치를 나타내며 표 3과 같이 정의된다.

식 (14)을 이용하여 9극 10슬롯 구조의 PMLM에서 발생하는 전체 코깅력을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 F(\omega t) &= \sum_{i=1}^{10} f_i(\omega t) \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \\
 &\quad + \sum_{i=2}^{10} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n) \right\} \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sum_{i=1}^{10} \sin(n\omega t + n\theta_i + \alpha_n)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

식 (7)으로부터 에서 전체 코깅력의 제 n차 고조파 성분은 다음과 같이 되며, $\theta_0 = 36^\circ$ 로 정의하면, 삼각함수 공식을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 F_n(\omega t)/A_n &= \sin(n\omega t + \alpha_n) \\
 &\quad + \sin(n\omega t + \alpha_n + 5n\theta_0) \left(1 + 8\cos\frac{n}{\theta_0} \cos n\theta_0 \cos\frac{5}{2}n\theta_0 \right)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

우선, $n = (2k-1), k = 1, 2, 3, \dots$ 인 경우, 즉 홀수 차 고조파에 대하여 정리하면 $\cos\frac{n}{\theta_0} \cos n\theta_0 \cos\frac{5}{2}n\theta_0 = 0$ 이 되고, 따라서 홀수 차 고조파 성분에 의한 코깅력은 다음과 같이 영이 된다.

$$\begin{aligned}
 F_n(\omega t)/A_n &= \sin(n\omega t + \alpha_n) \\
 &\quad + \sin(n\omega t + \alpha_n + (2k-1)\pi) = 0
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

또한 $n = 2k, k = 1, 2, 3, \dots$ (단, $n \neq 10k, k = 1, 2, 3, \dots$)인 경우에도 $\theta_0 = 36^\circ$ 이고 $\cos\frac{n}{\theta_0} \cos n\theta_0 \cos\frac{5}{2}n\theta_0 = -\frac{1}{4}$ 이대로, 10의 배수를 제외한 짝수 차 고조파 성분에 의한 코깅력도 다음과 같이 영이 된다.

$$\begin{aligned}
 F_n(\omega t)/A_n &= \sin(n\omega t + \alpha_n) \\
 &\quad + \sin(n\omega t + \alpha_n + 2k\pi)(1-2) = 0
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

마지막으로 $n = 10k, k = 1, 2, 3, 4, \dots$ 인 경우를 고려하면, $\cos\frac{n}{\theta_0} \cos n\theta_0 \cos\frac{5}{2}n\theta_0 = 1$ 이 되어, 10의 배수의 고조파 성분에

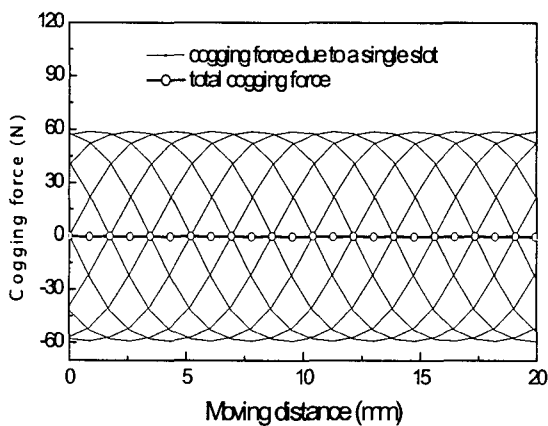


그림 7 9극 10슬롯 구조의 PMLM의 코깅력 파형
Fig. 7 Cogging force of a 9 pole 10 slot PMLM

의한 코깅력은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 F_n(\omega t)/A_n &= \sin(n\omega t + \alpha_n) + 9\sin(n\omega t + \alpha_n + 10k\pi) \\
 &= 10\sin(n\omega t + \alpha_n)
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

따라서 9극 10슬롯 구조를 갖는 PMLM에서는 영구자석의 극 피치를 한 주기로 할 때 10의 배수인 고조파 성분의 코깅력이 발생하고, 이것은 영구자석의 극 피치의 9배를 주기로 하는 경우에는 90의 배수인 고조파 성분이 된다. 이것은 회전기에서 코깅 토크의 주파수가 영구자석의 극수와 전기자 슬롯 수의 최소공배수가 된다는 기존의 이론과도 부합하는 것이며, 일반적으로 고조파 성분에 의한 코깅력의 크기는 그 차수가 높아질수록 급격하게 작아지기 때문에 3상 9극 10슬롯 구조의 경우에는 그 크기가 매우 작아지게 된다 [13]. 그림 7은 3상 9극 10슬롯 PMLM의 코깅력의 파형을 나타낸다.

이상의 분석을 바탕으로 참고문헌 [13]에서 제안한 8극 9슬롯 구조의 PMLM에서 발생하는 코깅력을 분석하면, 전체 10개의 슬롯 중, 1번부터 9번까지의 슬롯에서 발생하는 코깅력은 앞에서 설명한 이론에 의하여 서로 상쇄됨을 알 수 있다. 그러나 집중권을 설치하기 위하여 추가로 설치된 하나의 치(또는 슬롯)에서 발생하는 코깅력은 상쇄되지 않기 때문에 전체적으로 코깅력은 커지게 된다. 참고문헌 [12]에서는 이를 저감하기 위하여 전기자의 양끝에 위치하는 치의 위치, 길이, 형상, 그리고 적층높이를 조절하고 있다.

2.2 유한요소법을 이용한 코깅력의 계산

유한요소법을 이용하여 현재 널리 이용되고 있는 3상구동 8극 12슬롯 구조의 단 1차형 PMLM과 본 논문에서 제안된 3상구동 9극 10슬롯 구조의 단 1차형 PMLM의 코깅력을 계산하고 비교하였다.

단 1차형 PMLM의 디텐트력은 서론에서 설명한 바와 같이 코깅력과 단부력의 합으로 주어지고, 일반적으로 단부력을 최소로 하기위한 설계를 적용하지 않는 경우 코깅력에 비하여 단부력이 매우 크게 나타나기 때문에 코깅력을 비교하기 위해서는 단부력이 배제된 순수한 코깅력만을 계산할

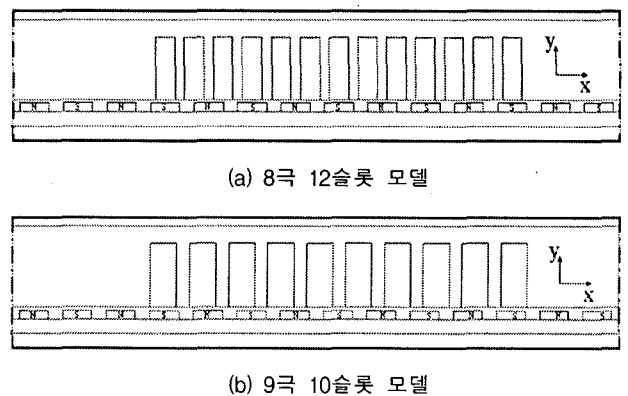


그림 8 단부력을 배제한 코깅력 계산 모델
Fig. 8 Cogging force calculation models extracting the end force

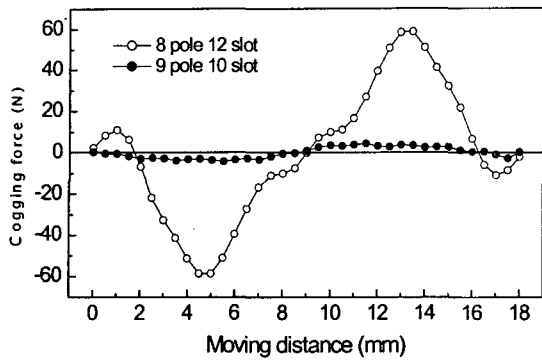


그림 9 8극 12슬롯과 9극 10슬롯 구조의 PMLM의 코깅력 분포

Fig. 9 Cogging force distribution between 8 pole 12 slot and 9 pole 10 slot PMLMs

수 있는 모델이 필요하다[17]. 본 논문에서는 단부력이 배제된 코깅력만을 계산하기 위하여 그림 8과 같이 전기자 양끝에 위치한 치의 폭을 확장하고 Periodic 경계조건을 부여하였다.

그림 9는 8극 12슬롯과 9극 10슬롯 구조의 PMLM에 대하여 유한요소법을 이용하여 계산된 코깅력을 비교하고 있다. 그림에서 보듯이 본 논문에서 제안된 9극 10슬롯 구조의 PMLM은 기본 모델인 8극 12슬롯 구조에 비하여 코깅력의 크기가 대략 7%정도로 줄어들고 극피치의 감소로 인하여 그 주기가 17.34[mm]가 됨을 알 수 있다.

2.3 권선 (Winding)과 유기기전력 및 추력

3상 구동 8극 12슬롯 구조의 PMLM에서 각각의 전기자 치는 영구자석의 극 피치를 π 로 하는 전기각으로 $2\pi/3$ 만큼 떨어져 위치하고, 따라서 3상 구동을 위한 권선은 A, B 및 C상의 권선이 순차적으로 설치되는 통상의 (A, B, C) 권선법을 이용하여 이루어지며, 각상의 권선은 표 4에 나타난 이상적인 위치에 설치된다. 그러나 본 논문에서 제안된 9극 10슬롯 구조의 PMLM은 전기자의 치간 간격이 $9\pi/10$ 이고, 전기자 치의 수가 극상수의 정수배가 아니기 때문에 통상의 (A, B, C) 권선법을 적용하기 어렵고, 더욱이 각 상의 권선은 이상적인 위치에 설치할 수 없게 된다. 따라서 9극 10슬롯 PMLM에서 각 상의 권선은 이상적인 위치에 가장 근접한 전기자 치에 실시하게 되고 변형된 (A, A, A) 권선법을 이용하게 된다. (A, A, A) 권선법은 (A, B, C) 권선법에서 A, B 및 C상의 권선이 순차적으로 설치되는 것에 비하여 각 상의 권선이 이웃한 3개의 치에 설치되는 것이다[13, 18].

본 논문에서 제안한 9극 10슬롯 구조의 PMLM에서는 전기각으로 표시한 전기자 치의 위치가 8극 12슬롯 구조는 물론 8극 9슬롯 구조와도 다르기 때문에 종래의 (A, B, C) 권선법이나 (A, A, A) 권선법을 적용할 수 없게 된다. 본 논문에서는 변형된 (A, A, A) 권선법을 제시하며, 이를 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 예를 들면, 그림 8의 9극 10슬롯 모델에서 5번 전기자의 위치를 기준으로 할 때 1번 전기자 치는 그 위치가 전기각으로 72° 이고, 이것은 -C상의 이

표 4 3상 구동시 각 상 권선의 이상적인 위치(전기각)

Table 4 Ideal location of the 3 phase windings in electrical angle

상	+A	-C	+B	-A	+C	-B
각도(전기각)	0	60	120	180	240	300

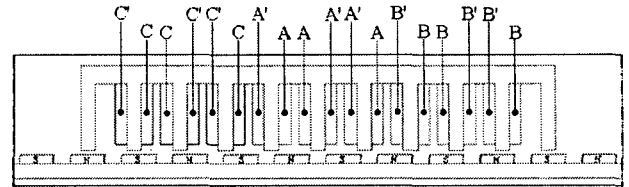


그림 10 3상 9극 10슬롯 영구자석 선형모터의 전기자 권선
Fig. 10 Armature winding of a 3 phase 9 pole 10 slot PMLM

표 5 제안된 모델에서 전기자 치의 전기각 및 권선의 상

Table 5 Electrical angle and corresponding winding phase of each teeth in proposed model

치 번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9
위치(전기각)	72	234	36	198	0	162	324	126	288
권선의 상	-C	C	-C	-A	A	-A	-B	B	-B
이상적인 위치와의 차이	12	-6	-24	18	0	-18	24	6	-12

상적인 위치 60° 와 가장 가까우므로 -C상의 권선이 실시된다. 또한 2번 전기자 치는 그 위치가 전기각으로 234° 이고 이것은 C상 권선의 이상적인 위치 240° 와 가장 가까우므로 C상의 권선이 설치된다. 이와 같은 과정을 반복하면 각각의 전기자 치에 설치되는 권선의 상을 알 수 있으며, 표 5는 각각의 전기자 치에 대하여 그 위치와 실시되는 권선의 상, 그리고 이상적인 위치로부터의 차이를 비교한 것이다. 그림 10은 각 상의 권선이 전기자 치에 설치된 모습을 나타낸다.

각 상의 권선에 유기되는 기전력은 영구자석에서 발생된 자속이 전기자 권선을 채교하는 양의 변화에 의하여 결정된다. 전기자 권선의 채교자속을 계산하기 위하여 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 분포를 그림 11과 같이 $B = B_m \sin\theta [T]$, 전기자 권선의 전체 권선 수를 $N[\text{turn}]$ 이라 가정한다. 8극 12슬롯 구조의 PMLM에서 하나의 전기자 치에 설치된 전기자 권선의 이상적인 최대 채교자속은 그림 11 (a)로부터 다음과 같이 계산되고,

$$\phi_{8P12S} = \frac{N}{12} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} B_m \sin\theta d\theta = \frac{\sqrt{3}N}{12} B_0 \quad [Wb] \quad (20)$$

따라서 각 상의 최대 채교자속은 4개의 전기자 권선이 직렬로 연결되고, 또한 4개 전기자 권선의 최대 채교자속이 동시에 발생하므로 다음과 같이 계산된다.

$$\Phi_{8P12S} = \frac{N}{\sqrt{3}} B_m \approx 0.577NB_m \quad [Wb] \quad (21)$$

한편 본 논문에서 제안한 9극 10슬롯 구조에서는 3개의

전기자 권선이 직렬로 연결되고, 3개의 전기자 권선은 표 5에서와 같이 위상차를 갖기 때문에, 그림 11 (b)로부터 각상의 최대 쇄교자속이 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_{9P10S} = \frac{N}{9} \int_{\pi/20}^{19\pi/20} B_m \sin\theta d\theta = 0.22NB_0 \quad [Wb] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{9P10S}^{(a)} &= 0.22NB_0 \{ \cos(0) + \cos(18) + \cos(18) \} \\ &= 0.638NB_m \quad [Wb] \end{aligned} \quad (23-a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{9P10S}^{(b)} &= \Phi_{9P10S}^{(c)} = 0.22NB_0 \{ \cos(24) + \cos(6) + \cos(12) \} \\ &= 0.635NB_m \quad [Wb] \end{aligned} \quad (23-b)$$

식 (21)과 식 (23)으로부터 본 논문에서 제안된 9극 10슬롯 구조의 PMLM은 기존의 8극 12슬롯 구조의 전동기와 비교하여 동일한 전기자 권선수와 영구자석에 대하여 각 상에 유기되는 기전력이 대략 10%정도 증가하며, 각 상 유기기전력의 불평형은 0.47% 수준으로 통상의 방법으로 구동이 가능한 수준임을 알 수 있다. 이것은 동일한 전류를 인가하는 경우 본 논문에서 제안된 모델은 기존의 모델에 비하여 대략 10%정도의 추력이 향상됨을 의미한다.

그림 12는 3상 8극 12슬롯과 9극 10슬롯 구조의 PMLM에 대하여 유한요소법을 이용하여 계산한 유기기전력을 비교한 것으로, 8극 12슬롯의 경우 back-emf가 54.2[V]에서 9극 10슬롯인 경우 59.8[V]로 약 10% 증가하여, 식 (21) - 식 (23)의 결과가 타당함을 보였다.

또한 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 코강력과 디

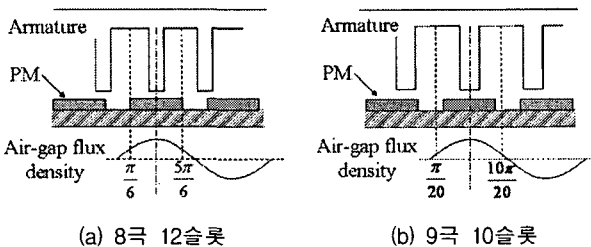


그림 11 전기자 권선의 최대 쇄교자속
Fig. 11 The maximum flux linkage of armature winding

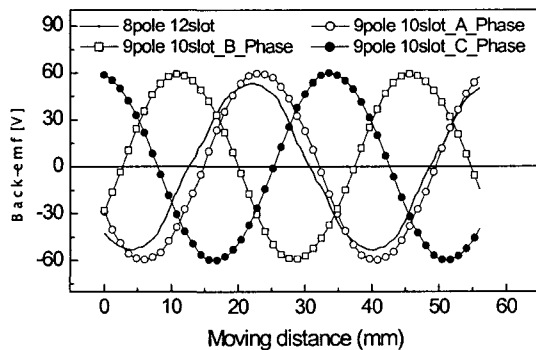


그림 12 8극 12슬롯과 9극 10슬롯 PMLM의 Back emf
Fig. 12 Back emf of the 8 pole 12 slot and 9 pole 10 slot PMLMs

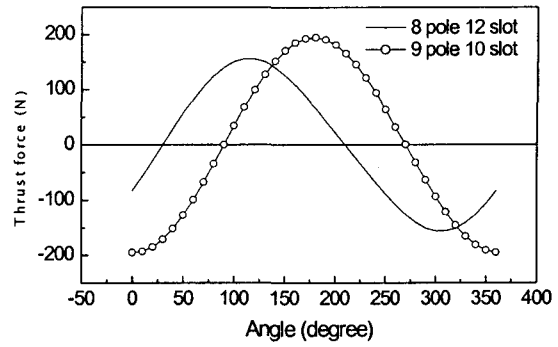


그림 13 3상 동기전동기인 경우 8극 12슬롯과 9극 10슬롯 선형 전동기의 추력
Fig. 13 Thrust forces of the 8 pole 12 slot and 9 pole 10 slot PMLMs when used as synchronous motor

텐트력이 배제된 상태에서 3상 동기기로 구동되는 경우 전기자 전류에 의하여 발생하는 추력을 계산하고 비교하였다. 전기자 전류는 8극 12슬롯 모델과 9극 10슬롯 모델 공히 각 상에 최대치가 960[A · turn]인 정현파 전류가 흐르는 것으로 하였으며, 그림 3 (b) 및 그림 10과 같이 코강력과 디텐트력이 동시에 영이 되는 영구자석과 전기자의 상대위치에서 계산하였다. 그림 13은 전기자 전류의 위상 변화에 따라 계산된 추력을 비교한 것으로, 본 논문에서 제안한 9극 10슬롯 모델의 최대 추력은 195[N]으로 종래의 8극 12슬롯 모델의 최대 추력 155.8[N]에 비하여 대략 23%정도 증가하였음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 코강력이 획기적으로 저감된 영구자석의 극수와 전기자 슬롯 수의 비가 9:10인 새로운 구조의 PMLM을 제안하였다. 제안된 9극 10슬롯 구조의 PMLM은 기존에 널리 이용되는 8극 12슬롯 구조의 전동기와는 달리 전기자 치가 3상 권선을 위한 이상적인 위치에 존재하지 않기 때문에 변형된 (A, A, A) 권선법을 이용할 것을 제안하였다. 코강력의 발생에 대한 이론적 고찰과 유한요소법을 이용한 수치모사 결과, 본 논문에서 제안된 9:10 구조의 PMLM은 기존의 8:12 구조의 전동기에 비하여 코강력이 약 90% 이상 감소하고, 동일 전동기 크기 및 동일 기자력 조건에서 추력은 약 23% 증가함을 확인하였다. 한편, 제안된 구조의 전동기에서 상간에 발생하는 유기기전력의 불평형은 그 최대치가 대략 0.47% 수준으로 통상의 제어기에서 감당할 수 있는 것임을 확인하였다. 또한 본 논문에서 다룬 단 1차형 영구자석 선형 동기기는 코강력 뿐만 아니라 단부력 또한 매우 크게 나타나기 때문에 추후 단부력을 저감하기 위한 연구가 진행될 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성의 사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, D. S. Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and an short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1265 - 1270, 1999.

[2] Masaya Inoue, Kenji Sato, "An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors", IEEE Trans. on Magn., Vol. 36, No. 4, pp. 1890 - 1893, 2000.

[3] 정인성, "개선된 수치해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석", 한양대학교 박사학위논문, 1999. 12

[4] 이종진, 연승환, 고창섭, "원통형 영구자석 선형 동기전동기의 디텐트력 저감" 대한 전기 학회 논문지 B권, 55권 4호, pp. 209-215, 2006년 4월

[5] T. Yoshimura, J. J. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No. 6, pp. 3728 - 3730, 1995.

[6] K. C. Lim, J. K. Woo, G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors", IEEE Trans. on Magn., Vol. 38, No. 2, pp. 1157 - 1160, 2002.

[7] Mohammad S. Islam, Sayeed Mir, Tomy Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent magnet brushless DC motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 40, No. 3, pp. 813 - 820, 2004.

[8] R. J. Cruise, C. F. Landy, "Reduction of cogging forces in linear synchronous motors", AFRICON 1999 IEEE, Vol. 2, pp. 623 - 626, 1999.

[9] In-Soung Jung, Jin Hur, Dong-Seok Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters", IEEE Trans. on Magn., Vol. 37, No. 5, pp. 3653 - 3657, 2001.

[10] Z. Q. Zhu, David Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 4, pp. 407 - 412, 2000.

[11] M. Y. Kim, Y. C. Kim, G. T. Kim, "Design of slotless-type PMLSM for high power density using divided PM", IEEE Trans. on Magn., Vol. 40, No. 2, pp. 746 - 749, 2004.

[12] 川原 敦志, 리니어 모터, 일본국특허청, 특허출원공개 번호 特開 2004-364374(P2004-364374A)

[13] 가와시마긴지, 돌극치를 가지는 전기자와 계자자석을 가지는 모우터, 대한민국특허청, 출원번호 특 1988-0007477.

[14] C. S. Koh, J. S. Seol, "New cogging-torque reduction method for brushless permanent-magnet motors", IEEE Trans. on Magn., Vol. 39, No. 6, pp.

3503 - 3506, 2003.

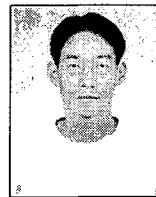
[15] Leila Parsa, Lei Hao, Hamid A. Toliyat, "Optimization of average and cogging torque in 3-phase IPM motor drives", IEEE Industry Applications Conference 2002, 37th IAS Annual Meeting, pp. 417 - 424, 2002.

[16] Humio Tajima, Kunio Miyasjota, Motoya Itou, Akira Tamura, Takeo Konno, "Analysis of cogging torque by finite element methods", 일본 전기학회 논문지, D-107권, 5호, pp. 635 - 641, 1987.

[17] Carl G. Jeans, Rupert J. Cruise, Charles F. Landy, "Methods of detent force reduction in linear synchronous motors", IEEE International Conference on Electric machines and drives, IEMD'99, pp. 437 - 439, 1999.

[18] J.R.Hendershot, and TJE Miller, Design of brushless permanent magnet motor, Magna Physics Publications, 1994, Chapter 3.

저 자 소 개



연 승 환 (延 承 桓)

2005년 충북대학교 전기공학과 졸업.
2006년~현재 동대학원 전기공학전공 석사과정.
Tel : 043-274-2426
Fax : 043-274-2426
E-mail : whan0416@chungbuk.ac.kr



이 증 진 (李 鍾 鎭)

2004년 충북대학교 전기공학과 졸업.
2006년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).
2006년~현재 삼정전자(주) 연구원.
Tel : 043-274-2426
Fax : 043-274-2426
E-mail : jjlee@chungbuk.ac.kr



고 창 섭 (高 彰 燮)

1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사).
1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).
1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터 공학과 객원 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합 연구소 선임연구원. 1996~현재 충북대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수.
Tel : 043-261-2426
Fax : 043-274-2426
E-mail : Kohcs@chungbuk.ac.kr