

## Development of the Design Algorithm Using the Equivalent Magnetic Circuit Method for Colenoid Type Electromagnetic Linear Actuator

Dong-Ki Han and Jung-Hwan Chang\*

Department of Electrical Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

(Received 31 March 2016, Received in final form 19 April 2016, Accepted 20 April 2016)

This study proposes the design algorithm of an electromagnetic linear actuator with a divided coil excitation system, such as the colenoid (COL) system, using the equivalent magnetic circuit (EMC) method. Nowadays, the clamping device is used to hold workpiece in the electrically driven chucking system and is needed to produce a huge clamping force of 40 kN like hydraulic system. The design algorithm for electromagnetic linear actuator can be obtained using the EMC method. At first, the parameter map is used to decide the slot width ratio in the initial design. Next, to make the magnetic flux density uniform at each pole, the pole width is adjusted by the pole width adjusting algorithm with EMC. When the dimensions of the electromagnetic linear actuator are decided, the clamping force is calculated to check the desired clamping force. The design results show that it can be used to hold a workpiece firmly instead of using a hydraulic cylinder in a chucking system.

**Keywords** : colenoid, electromagnetic linear actuator, equivalent magnetic circuit, electrically driven chucking system

### 등가자기회로를 활용한 콜레노이드 타입 선형 액츄에이터 설계 알고리즘 개발

한동기 · 장정환\*

동아대학교 전기공학과, 부산시 사하구 낙동대로 550번길 37, 49315

(2016년 3월 31일 받음, 2016년 4월 19일 최종수정본 받음, 2016년 4월 20일 게재확정)

본 논문에서는 설계변수 변화에 따른 특성을 빠른 시간 내에 파악할 수 있는 등가자기회로법(equivalent magnetic circuit method)을 활용하여 콜레노이드(colenoid) 타입의 선형 액츄에이터 설계 알고리즘을 제시하였다. 우선 선형 액츄에이터의 중요치수가 결정되면 등가자기회로법에 의해 슬롯 폭 비율 및 인가전류에 따른 클램핑력으로 파라미터 맵(parameter map)을 완성하고 이를 활용하여 효율적인 슬롯 폭 비율을 결정하였다. 또한 최대 클램핑력(clamping force)을 얻기 위해 극 폭 조절 알고리즘을 수행하여 최적의 극 폭 치수를 선정하였으며 이를 바탕으로 인가전류에 따른 클램핑력을 계산하여 40 kN 이상 출력하기 위한 최적의 극 수, 극 폭 치수 및 인가전류를 결정하였다. 제안된 설계 알고리즘은 최적설계 방법인 반응표면법(response surface method)과 비교하여 제안한 설계 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

**주제어** : 선형 액츄에이터, 콜레노이드, 등가자기회로, 전기구동 척킹 시스템

### I. 서 론

공작기계 핵심 부품의 하나로 가공할 공작물을 파지하기 위한 척(chuck)의 대부분은 유압으로 구동되고 있다. 그러나 유압으로 구동되는 척은 오일탱크, 유압펌프, 유압밸브, 밸브모듈, 연결호스 등 많은 부가 구조물이 요구되며 이에 따라 넓은 설치공간을 필요로 한다. 또한 오일의 누유로 인해 작업

장을 청결하게 유지하기 곤란하고 오일 교환을 비롯해서 지속적인 유지 보수가 요구된다. 또한 유압 시스템은 응답속도가 느리고 척의 파지력을 연속적으로 정밀하게 제어하기 곤란하여 재료의 특성에 따라서는 공작물의 변형을 초래하게 된다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 전기구동 척킹 시스템의 기술 개발이 필요하다. 하지만 대부분의 전기구동 시스템은 이동부의 변위에 따라 추력이 급격하게 감소하는 것이 일반적이며 이동부의 위치변화에 관계없이 일정한 힘을 유지하는 경우에는 매우 큰 전자기적 시스템이 요구된다.

이를 극복하기 위해 전기구동 척킹 시스템에서는 전동모터

에 의해 선형 이동하는 선형이동축과 척의 과지력을 제공하는 선형 액추에이터를 독립적으로 분리하여 동작되게 함으로써 단위체적당 높은 추력밀도를 구현하는 방법이 제시되었다 [1]. 그러므로 유압을 사용하지 않고 유압에 비견될만한 클램핑력을 제공하기 위해서는 전자기력을 활용한 선형 액추에이터의 높은 출력을 필요로 한다.

전자기력을 활용한 선형 액추에이터는 고정부의 형상에 따라 솔레노이드(solenoid: SOL), 다극 솔레노이드(multipolar solenoid: MPS) 그리고 콜레노이드(coienoid: COL) 타입이 제안되었다[2]. 전기구동 척킹 시스템에서는 척의 과지력 증가를 위해 큰 클램핑력이 필요하므로 COL 타입 선형 액추에이터를 선정하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 설계변수 변화에 따른 특성을 빠른 시간 내에 분석하기 위해 등가자기회로(equivalent magnetic circuit: EMC)를 적용한 COL 타입 선형 액추에이터의 설계 알고리즘을 제시하였다. 선형 액추에이터의 중요치수가 결정되면 슬롯 폭 비율과 인가전류에 따른 파라미터 맵을 통해 효율적인 슬롯 폭 비율을 결정하였다. 슬롯 폭 비율 선정 후, 해석모델은 각 극에서의 공극자속밀도가 균일할 때 최대 클램핑력을 출력한다는 조건을 바탕으로 반응표면법 대신 EMC를 활용한 극 폭 조절 알고리즘을 설계에 적용하였다. 극 폭 조절 알고리즘을 수행하였다. 이후, 결정된 설계치수를 활용하여 40 kN 이상의 클램핑력을 출력하기 위한 최적의 극 수, 극 폭 치수 및 인가전류를 선정하였다.

## II. 해석모델 및 중요치수

### 1. 해석모델

Fig. 1은 다극 선형 액추에이터의 3D 형상을 나타낸 것이다. 다극 선형 액추에이터의 경우 크게 고정부(Stationary part)와 이동부(Mover plate)로 나뉘며 고정부는 극과 슬롯으로 구성된다. 각각의 슬롯에는 코일이 감겨있으며 코일에 전류 인가 시 방향으로 흡입력이 발생된다. 흡입력은 전기구동 척킹 시스템에서 가공물을 파지하기 위한 힘으로 활용되므로 이는 클램핑력으로 정의한다. 슬롯의 코일에 인가되는 전류의

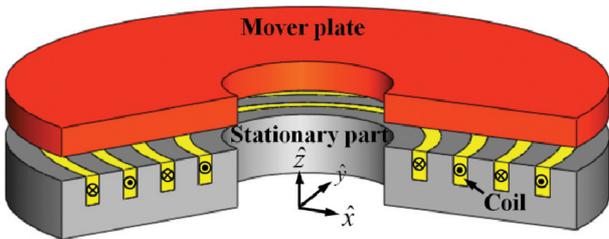


Fig. 1. (Color online) 3D view of the electromagnetic linear actuator.

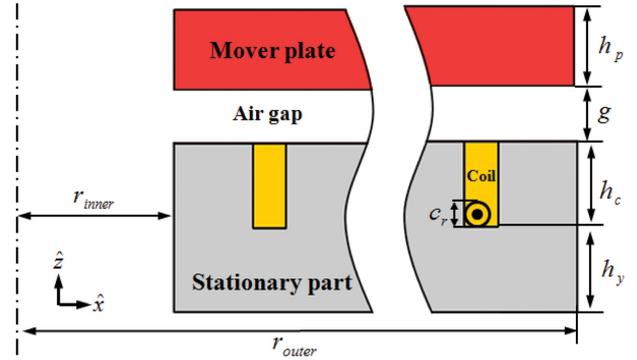


Fig. 2. (Color online) Cross section of the electromagnetic linear actuator including dimensions.

Table I. Dimensions of electromagnetic linear actuator.

Parameter	Description	Unit	Value
$r_{inner}$	Inner radius	mm	47.5
$r_{outer}$	Outer radius	mm	142.5
$h_c$	Slot height	mm	17.0
$h_p$	Plate height	mm	17.0
$h_y$	Yoke height	mm	17.0
$g$	Airgap	mm	0.1
$c_r$	Coil width	mm	0.7
.	Fill factor	.	0.5
.	Current	A	$\leq 18$
.	Clamping force	kN	$\geq 40$

방향에 따라 선형 액추에이터의 타입이 결정된다. 인가전류의 방향이 모두 동일한 경우는 MPS 타입이며 서로 인접한 슬롯의 코일에 교번하여 전류가 인가되는 경우는 COL 타입이다. 본 시스템의 경우, 척의 큰 과지력이 요구되므로 COL 타입 선형 액추에이터가 선정되었다.

### 2. 중요치수

Fig. 2는 해석모델의 단면도이며 Table I은 선형 액추에이터의 초기설계를 위한 중요치수를 나타낸 것이다. 전기구동 척킹 시스템용 클램핑 장치는 외경 285 mm, 높이 55 mm, 공극 0.1 mm를 가지며 유압 시스템과 비교할 경우, 제한 전류 18 A 이내에서 40 kN 이상의 클램핑력을 필요로 한다.

## III. 해석방법

### 1. 등가자기회로(EMC)법

Fig. 3은 해석모델의 EMC망을 나타낸 것이다. EMC 해석 시, 매질에 따라 영역을 구분한 뒤 노드(node)로 영역을 분할하여 각 영역별 퍼미언스(permeance)를 정의하였으며 고정부 권선의 기자력과 연결하여 전체 EMC망을 구성하였다. 영역별 퍼미언스는 이동부 퍼미언스( $P_p$ ), 고정부 퍼미언스( $P_s$ ), 공

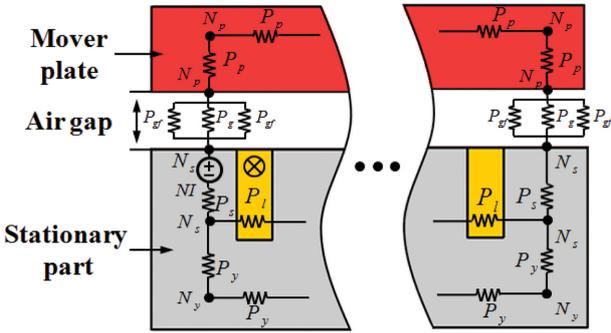


Fig. 3. (Color online) Equivalent magnetic circuit of the electromagnetic linear actuator.

Table II. B-H curve coefficients of SS400.

Metal sheet	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
SS400	2120	1.1	1	1	36.5	10.6

극 퍼미언스( $P_g$ ), 요크 퍼미언스( $P_y$ )로 구성되며 EMC의 정확도 향상을 위해 프린징 퍼미언스( $P_{gf}$ )와 누설 퍼미언스( $P_l$ )가 추가로 고려되었다[3].

2. 비선형 해석

본 논문에서는 철심의 포화를 고려하기 위해 식 (1)과 같이 해석모델의 B-H 곡선을 고려하였다[4].

$$H(B) = k_1 B^{k_2} + k_5 B^{k_3} \frac{e^{(B-k_3)^{k_4}}}{1 + e^{(B-k_3)^{k_4}}} \quad (1)$$

여기서,  $B$ 는 자속밀도,  $H$ 는 자계의 세기이다. 이동부와 고정부에 사용된 철심 재료는 모두 SS400이며 Table II는 식 (1)에서 SS400의 B-H 곡선을 얻기 위한  $k$  값을 나타낸 것이다. 이후 해석모델의 클램핑력을 계산하기 위해 식 (2)가 활용되었다[5].

$$Clamping\ force = \sum_1^n \frac{1}{2} \phi_{pole, n}^2 \frac{\partial R_{pole, n}}{\partial g} \quad (2)$$

여기서  $\phi_{pole, n}$ 은 각 극의 자속 값,  $n$ 은 각 극의 고유번호,  $R_{pole, n}$ 은 각 극의 자기저항,  $g$ 는 공극이며 각 극에서 발생하는 힘을 모두 합하여 전체 클램핑력을 계산하였다.

Fig. 4는 비선형 특성을 고려한 해석모델의 클램핑력 계산 알고리즘을 나타낸 것이다. 철심의 포화를 고려하기 위해 선형을 가정한 B-H 곡선의 자속밀도( $B_{linear}$ )와 비선형 B-H 곡선의 자속밀도( $B_{non-linear}$ )를 비교하였다. 만약 두 값의 차이가  $\pm 0.5\%$ 를 넘으면 다시 선형을 가정한 B-H 곡선의 자계( $H_{linear}$ )와 비선형 B-H 곡선의 자계( $H_{non-linear}$ )를 비교하여 반복적으로 투자율 값을 조절하였다. 이후, 결정된 투자율 값을 식 (2)에 적용하여 해석모델의 클램핑력을 계산하였다.

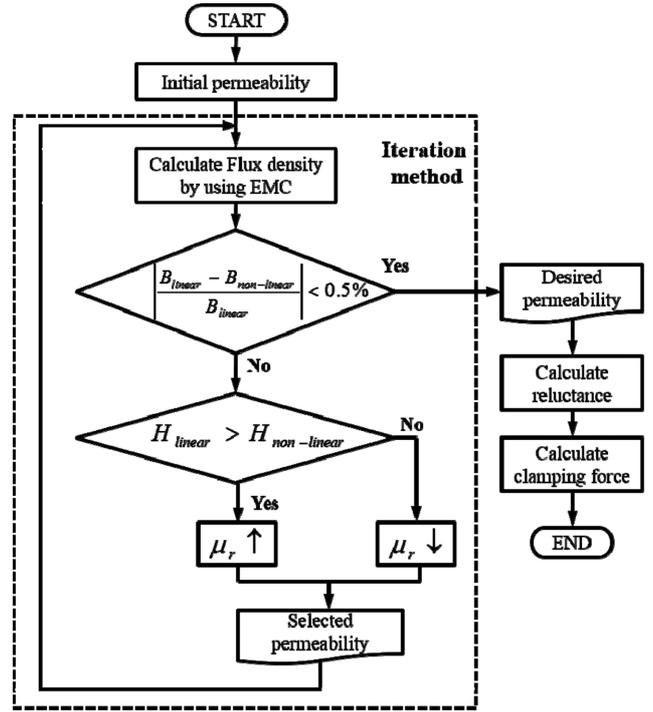


Fig. 4. Calculation algorithm of clamping force considering non-linear characteristics.

IV. EMC를 이용한 선형 액츄에이터 설계 알고리즘

일반적으로 설계모델 분석 시 유한요소법이 사용되지만 설계변수 변화에 따른 특성을 파악하기 위하여 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이에 비해 EMC법은 설계변수 변화에 따른 특성을 빠른 시간 내에 얻을 수 있으며 특히 많은 설계변수를 가지는 COL 타입의 선형 액츄에이터의 설계에 효과적으로 적용될 수 있다.

Fig. 5는 EMC를 활용한 설계 알고리즘의 전체 흐름을 나타낸 것으로 설계 알고리즘의 과정을 기술하면 다음과 같다. 주어진 설계조건을 바탕으로 모델의 중요치수를 결정한 다음, 슬롯 폭 비율과 인가전류에 따른 클램핑력을 계산하여 파라미터 맵을 완성하고 이를 바탕으로 효율적인 슬롯 폭 비율을 결정하였다. 슬롯 폭 비율 선정 후, 해석모델은 각 극에서의 공극자속밀도가 균일할 때 최대 클램핑력을 출력한다는 조건을 바탕으로 반응표면법 대신 EMC를 활용한 극 폭 조절 알고리즘을 설계에 적용하였다. 이를 통해 각 모델의 최적 치수를 얻을 수 있으며 결정된 설계 치수를 바탕으로 슬롯 수 2부터 인가전류에 따른 클램핑력을 계산하였다. 최대 전류 18 A가 넘어서도 목표 힘에 도달하지 못할 경우 슬롯 수를 증가시켜 반복적으로 계산하며 만약 40 kN 이상의 클램핑력이 출력되면 설계 알고리즘은 종료된다. 이를 통해 40 kN 이상 출력하기 위한 COL 타입 선형 액츄에이터의 최적의 슬롯 수,

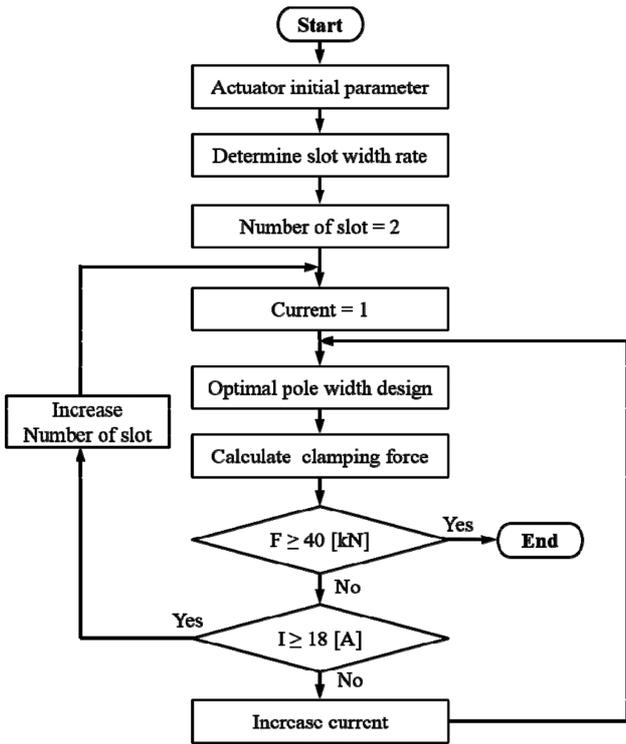


Fig. 5. COL type electromagnetic linear actuator design algorithm.

극 폭 치수, 인가전류를 구하였다.

1. 슬롯 폭 비율 결정

Fig. 6은 COL 타입 선형 액츄에이터의 초기 설계 시 극 폭 비율(A)과 슬롯 폭 비율(B)의 조절구간을 나타낸 것이다. 슬롯 폭 비율(Slot width rate)은 고정부에서 극 폭 대비 슬롯 폭이 차지하는 비율이다. 각각의 극 폭과 슬롯 폭 치수는 일정하다는 전제하에서 슬롯 폭이 증가하면 동일한 비율로 극 폭은 감소된다. 따라서 슬롯 폭 비율이 0%에서는 슬롯이 존

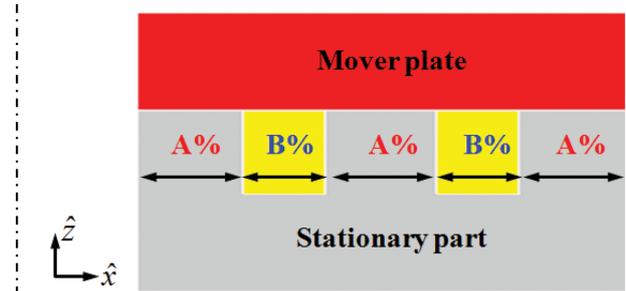


Fig. 6. (Color online) Adjustment range of slot and pole width rate in COL type electromagnetic linear actuator.

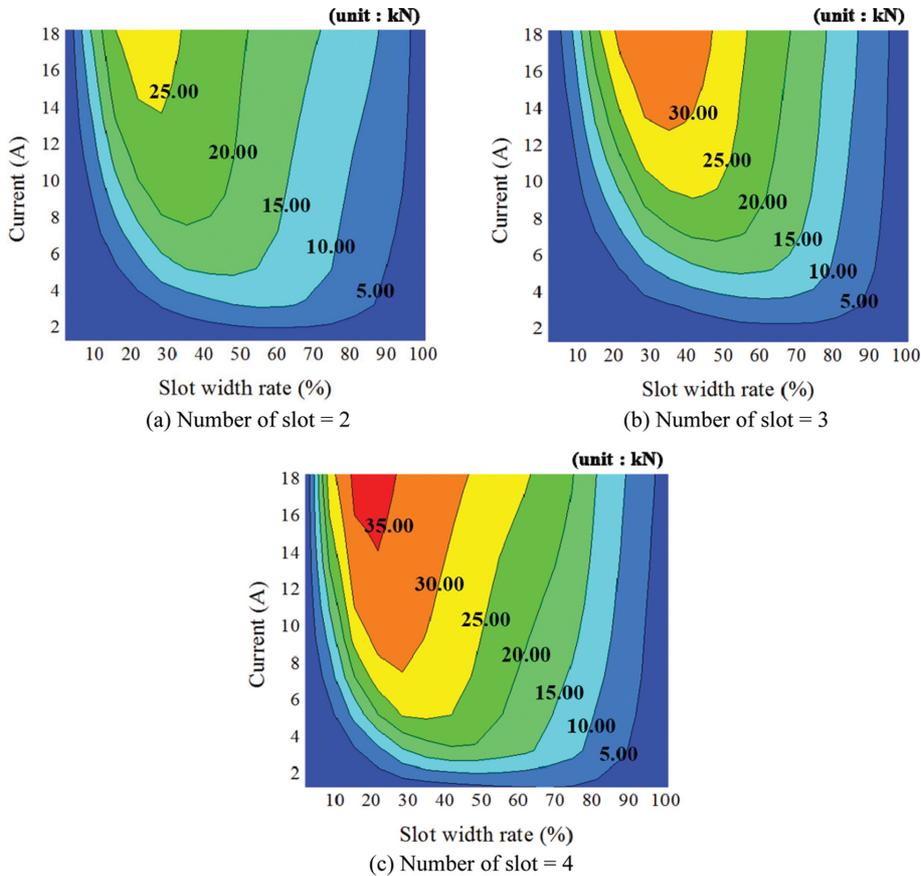


Fig. 7. (Color online) Parameter map (clamping force according to the slot width ratio and current).

재하지 않으며 반대로 100% 도달 시 극 폭이 존재하지 않는 상태이다.

슬롯 폭 비율에 따라 액츄에이터의 특성은 변하므로 초기 설계 시 비율선정은 매우 중요한 요소이다. 만약 슬롯 폭 비율이 증가할 경우, 접적률에 따라 턴 수 및 기자력은 증가하지만 고정부의 철심면적이 감소하면서 액츄에이터는 쉽게 포화되는 특성을 가진다. 반면에 슬롯 폭 비율이 감소할 경우, 철심면적 증가로 쉽게 포화되지는 않지만 기자력이 감소되는 특성을 가진다.

선형 액츄에이터의 효율적인 슬롯 폭 결정을 위하여 파라미터 맵을 이용하였다. 파라미터 맵을 활용한 설계는 전 범위의 슬롯 폭 비율에 따른 다양한 출력특성을 확인할 수 있으며 요구사양을 만족시키기 위한 슬롯 폭 비율을 효과적으로 얻을 수 있다[6]. Fig. 7은 슬롯 수가 2~4일 경우 슬롯 폭 비율에 따른 클램핑력을 나타내는 파라미터 맵이다. 인가 전류 18 A를 기준에서 볼 때 모든 슬롯 수에서 슬롯 폭 비율이 30% 근방까지는 클램핑력이 증가하다가 그 이후로는 다시 감소하는 특성을 볼 수 있다. 그러므로 선형 액츄에이터 초기 설계 시 효율적인 슬롯 폭 비율은 30%로 결정하는 것이 바람직하다.

2. 최적 극 폭 설계

각 모델 별 최대 클램핑력을 출력하기 위해 철심의 포화를

고려할 필요가 있다[7]. 슬롯 폭 선정 후, 해석모델은 고정부 극에 지속이 집중되는 현상으로 인하여 일부 극에서는 높은 포화를 보이며 이것은 클램핑력을 감소시키는 주된 원인으로 작용한다. 따라서 철심의 포화가 집중되는 현상을 해소하기 위해 고정부의 극 폭 조절이 반드시 필요하다. 이전의 논문은 반응표면법을 활용한 COL 타입 선형 액츄에이터 최적 설계 방법을 제시하였다[8]. 그 결과, COL 타입의 경우 각 극 주위에서 발생하는 공극지속밀도가 균일할 때 최대 클램핑력을 출력하였다. 하지만 반응표면법을 활용한 최적 설계는 유한요소법을 활용해야 하므로 슬롯 수와 같은 설계 변수의 변화에 따라 최적의 값을 얻기 위해 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 COL 타입 선형 액츄에이터의 경우에 한하여 각 극에서의 공극지속밀도가 균일할 때 최대 클램핑력을 출력한다는 선행 연구 결과를 바탕으로 반응표면법 대신 EMC를 활용한 극 폭 조절 알고리즘을 설계에 적용하였다[9].

Fig. 8은 EMC를 활용한 COL 타입 선형 액츄에이터의 극 폭 조절 알고리즘을 나타낸 것이다. 각 극에서의 공극지속밀도를 균일하게 만들기 위해 극 당 공극지속밀도( $B_{pole}$ )와 극에서의 평균 공극지속밀도( $B_{pole, average}$ )를 비교하여 두 값의 차이가  $\pm 0.2\%$ 를 만족할 때까지 극 폭 치수를 반복적으로 조절하였다. Table III은 선정된 슬롯 폭 비율인 30%에서 최대 클램핑력을 위한 각 슬롯 수 별 최적의 극 폭 치수를 나타낸

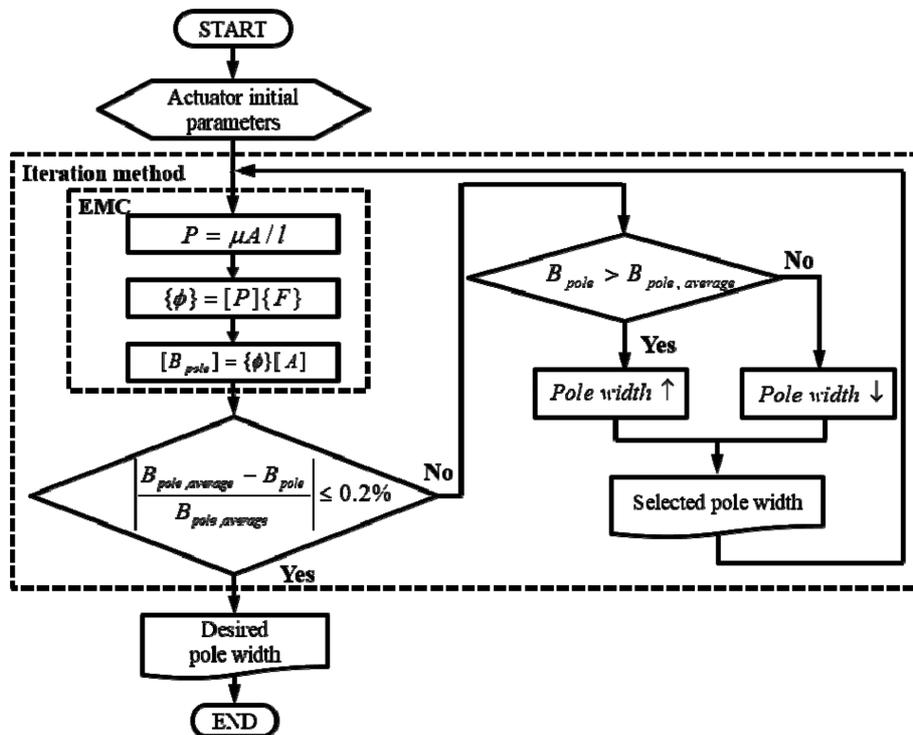


Fig. 8. Pole width adjustment algorithm with EMC for maximum clamping force.

**Table III.** Pole width dimensions of stationary part according to the optimal pole width algorithm.

Slot width ratio		Number of slot			
		2	3	4	
30%	Width of poles (mm)	Pole 1	19.4	13.6	9.5
		Pole 2	32.2	21.1	16.4
		Pole 3	15	21.4	16.3
		Pole 4	·	10.3	16.5
		Pole 5	·	·	7.8

**Table IV.** Result of dimensions for COL type electromagnetic linear actuator with over 40 kN.

Number of slot	Pole width (mm)				Current (A)	Clamping force (kN)
	Pole1	Pole2	Pole3	Pole4		
3	15	23.8	23.8	11.4	18	40.33

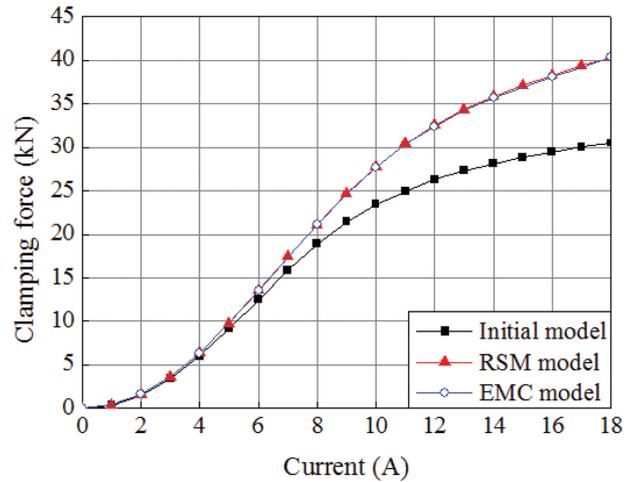
것이다.

### 3. 해석결과

Table IV는 본 논문에서 제시한 설계 알고리즘을 활용하여 계산된 값을 나타낸 것이다. 슬롯 수 3에서 최적의 극 폭 치수를 적용했을 때, 인가 전류 18 A에서 클램핑력은 목표인 40 kN보다 큰 40.33 kN이 출력되었다. Fig. 9는 슬롯 폭 비율 30%를 가지는 초기모델과 최적의 극 폭 치수를 적용한 설계 모델의 포화를 비교한 것이다. 최적 설계 모델은 초기 모델에 비해 고정부 일부 극에서 발생하던 포화가 해결된 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 슬롯 폭 비율 30%를 가지는 초기모델, 반응표면법을 이용한 설계모델 및 EMC를 이용한 설계모델의 클램핑력을 비교한 것이다. EMC를 이용한 설계 모델은 초기모델에 비해 클램핑력이 31.3% 증가하였으며 반응표면법을 이용한 설계모델과 동일한 출력 특성을 가지므로 제안한 설계 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

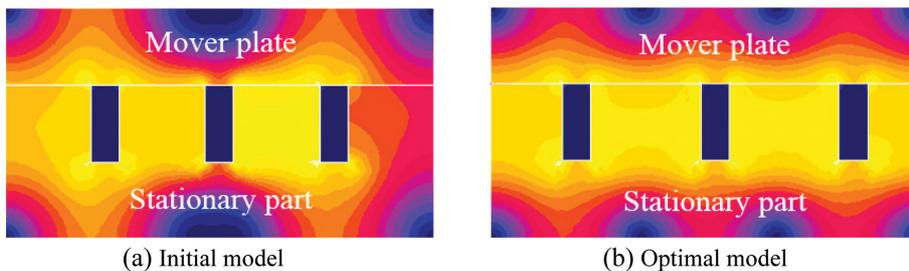
## V. 결 론

본 논문에서는 등가자기회로법을 활용한 COL 타입 선형



**Fig. 10.** (Color online) Comparison of clamping force between initial model and the optimized model (number of slot = 3).

액츄에이터의 설계 알고리즘을 제시하였다. 선형 액츄에이터의 설계를 효율적으로 수행하기 위해 설계변수에 따른 특성을 빠른 시간 내에 얻을 수 있는 등가자기회로법을 설계 알고리즘에 적용하였다. 선형 액츄에이터의 중요치수가 정해지면, 슬롯 폭 비율 및 인가전류에 따른 클램핑력으로 파라미터 맵을 완성하고 가장 효율적인 슬롯 폭 비율을 결정하였다. 또한 COL 타입 선형 액츄에이터에 한하여 공극자속밀도가 균일할 경우 최대 클램핑력을 출력한다는 조건을 바탕으로 반응표면법 대신 EMC를 활용한 극 폭 조절 알고리즘을 수행하여 최적의 극 폭 치수를 결정하였으며 선정된 설계 치수를 바탕으로 인가전류에 따른 클램핑력을 계산하였다. 최종적으로 목표 클램핑력인 40 kN에 도달할 때까지 반복적으로 알고리즘을 실행하였다. 제안된 설계 알고리즘을 통하여 목표 클램핑력을 얻기 위한 최적의 고정부 극 수, 극 폭 치수 및 인가전류를 결정하였으며 제안된 설계 알고리즘은 반응표면법을 활용한 설계 방법과 비교하여 동일한 출력 특성을 가지므로 설계 알고리즘의 타당성이 검증되었다. 제안된 알고리즘은 등가자기회로법을 이용하므로 유한요소법을 활용한 최적설계 방법에 비해 간편하며 빠른 설계시간을 가지는 이점이 있다. 또한 여러 설계변수에 따른 특성변화를 쉽게 파악할 수 있어



**Fig. 9.** (Color online) Comparison of flux density distribution between initial model and the optimized model (number of slot = 3).

COL 타입 선형 액츄에이터 초기설계 시 매우 유용하게 활용  
이 가능하다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 한국에너지기술평가원 사업  
“50 kN급 전기구동 선반용 스피들 및 클램핑 통합시스템 개  
발”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다  
(20152020000750).

### References

[1] J. H. Chang and Y. S. Yoon, Korea Patent 1015826300000  
(2015).

- [2] H. Mutai and K. Yamasawa, IEEE Trans. Magn. **31**, 2245 (1995).
- [3] J. Cale, S. D. Sudhoff, and L. Q. Tan, IEEE Trans. Magn. **42**, 40 (2006).
- [4] C. Espanet, Ph.D. Thesis, Franche-Comté University, France (1999).
- [5] M. A. Batdorff and J. H. Lumkes, IEEE Trans. Magn. **45**, 3064 (2009).
- [6] H. J. Kim, C. S. Lee, and J. P. Hong, J. Korean Magn. Soc. **25**, 92 (2015).
- [7] S. Gibson, G. W. Jewell, and R. E. Clark, IET Electr. Power Appl. **3**, 352 (2009).
- [8] T. W. Kim and J. H. Chang, Int. Conf. ICEMS 1461 (2013).
- [9] D. K. Han and J. H. Chang, IEEE Trans. Magn. **52**, 7002104 (2015).