

클로폴형 리니어 모터의 개발 The Design of Claw Pole Type Linear Motor

이봉섭*, 김중기**, 김남훈***
Bong-Seob Lee*, Jung-Ki Kim**, Nam-Hun Kim***

<Abstract>

In this paper, the new claw pole type linear stepping motor(CPLSM) is proposed. And the magnetic equivalent circuit of CPLSM is derived by the structure of the CPLSM. The design parameter and the magnetic flux density of CPLSM are performed with three-dimensional finite element method.

Key words: CPLSM, finite element method, equivalent circuit

1. 서론

최근 산업사회의 발달과 함께 생활 수준의 향상으로 사무자동화(OA), 공장자동화(FA), 각종 정보처리기기 및 가전기기 등의 수요가 급속도로 증가하고 있으며, 기기들의 성능도 고정밀화, 다기능화, 자동화, 고급화되는 추세이다.

특히, 컴퓨터 보급의 확대에 따라 플로피 디스크 드라이브(FDD), 하드 디스크 드라이브(HDD), 프린터, 플로터등의 주변기기 구동용으로 사용되는 회전형 스텝핑 모터를 리니어 스텝핑 모터로 대체하여 기록매체의 읽기 및 쓰기의 속도와 정밀성을 향상시키고자 하는 연구가 이루어지고 있다¹⁾⁻³⁾. 그러나, 기존 리니어 스텝핑

모터를 정보처리기기등에 응용하기 위해서는 소형화, 경량화, 박형화가 요구되고 있는 실정이다⁴⁾⁵⁾.

여기에 대응하기 위해, 본 연구에서는 기존 리니어 스텝핑 모터의 구조를 획기적으로 변형한 새로운 클로폴형 리니어 스텝핑 모터 (Claw Pole type Linear Stepping Motor : 이하 CPLSM이라 한다.)를 제안하였으며, 이의 설계 및 해석을 위하여 3차원 자계해석 (Flux3d)을 하였다.

2. 본론

2.1 CPLSM의 기본구조

* 정회원, 삼척대학교 컴퓨터응용제어공학과 조교수, 工博
영남대학교 대학원 졸업/mirine@samchok.ac.kr
245-711/강원도 삼척시 교동 산 253번지

** 정회원, 영남이공대학 전기전자계열 교수, 工博
영남대학교 대학원 졸업/kjk@ync.ac.kr
705-703/대구광역시 남구 대명 7동 1737번지

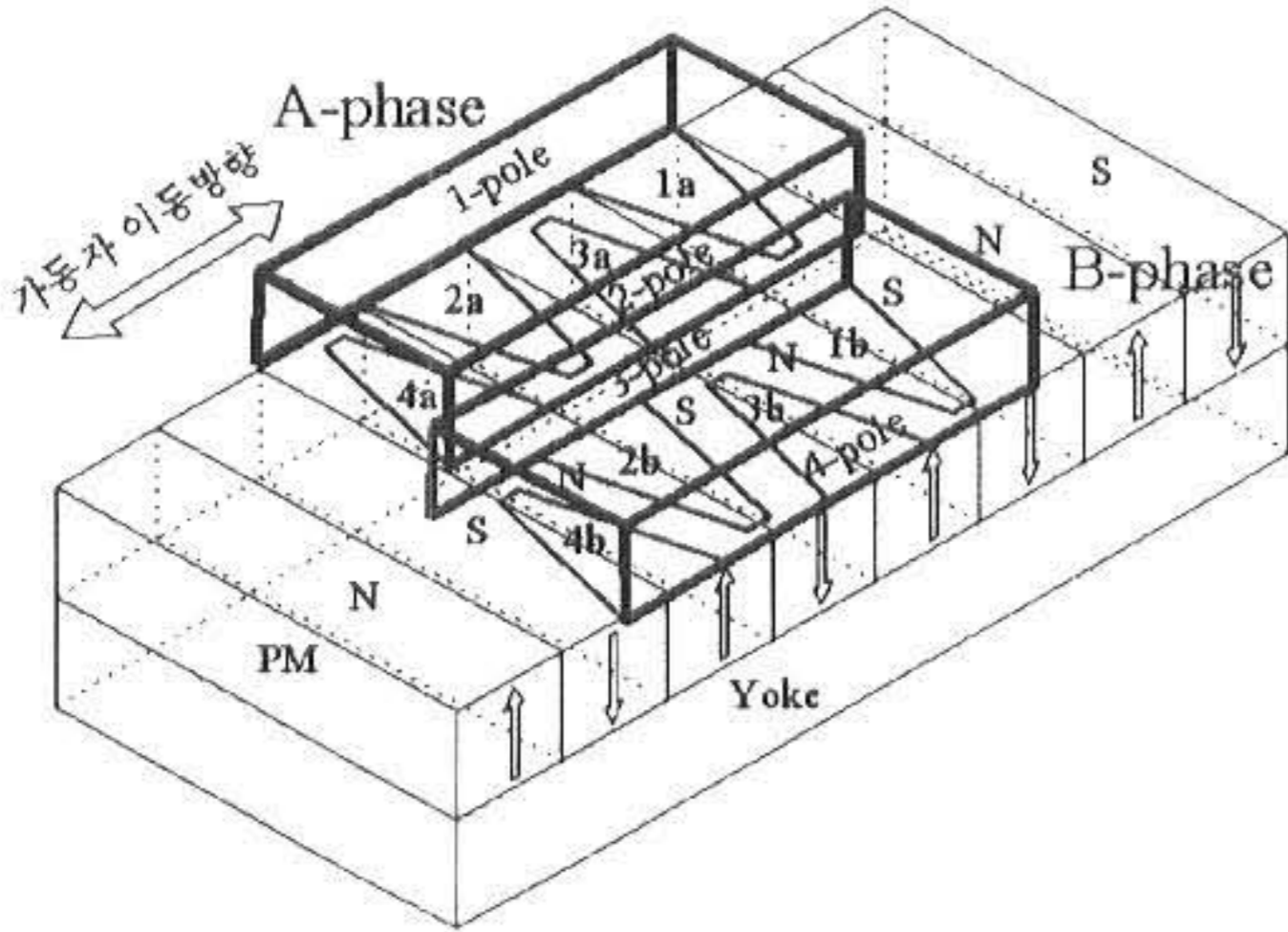
*** 정회원, 영남대학교 전기공학과 박사과정
영남대학교 전기공학과 대학원/cop1288@yahoo.com
712-749/경북 경산시 대동 214-1번지

* Assistant Professor, Dept. of Computer Control Eng.
Samchok National University.

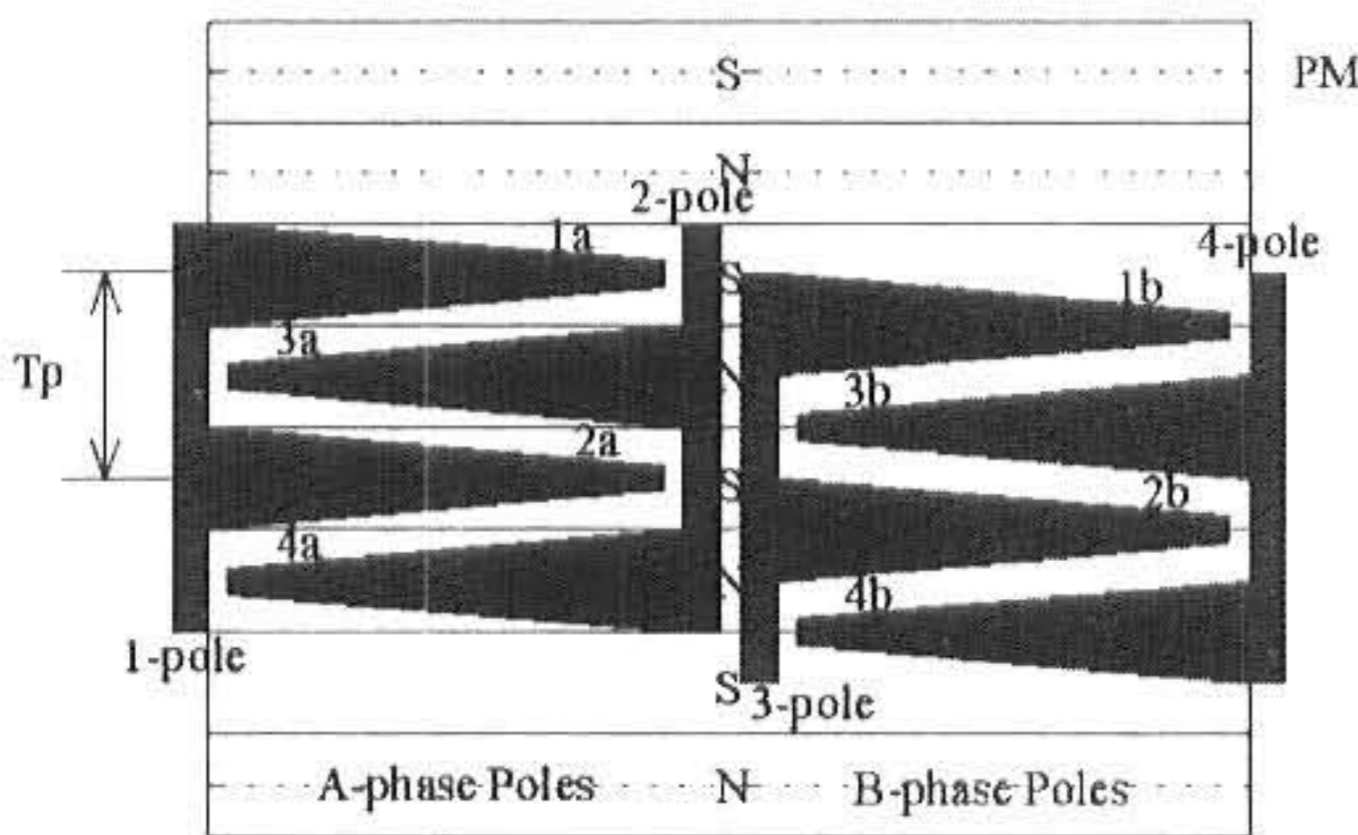
** Professor, School of Electrical & Electronic Eng.
Yeungnam College of Science & Technology.

*** Doctorial Course, Electrical Eng.
Yeungnam University.

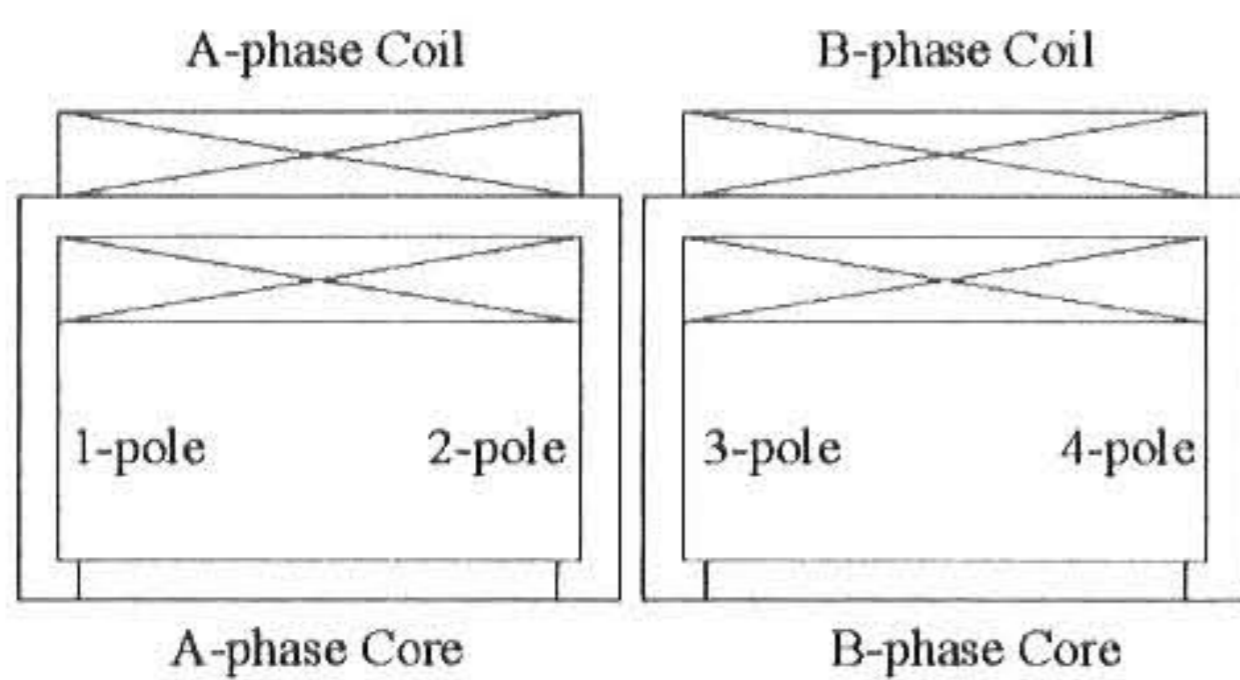
Fig.1은 본 연구에서 새롭게 제안한 클로폴형 리니어 스테핑 모터(CPLSM)의 기본구조를 나타낸다. Fig.1(a)는 CPLSM의 전체 구성도를 나타내며, (b)는 CPLSM에 배치된 극(pole) 구조를 나타내고, (c)는 CPLSM의 정면도를 나타낸다.



(a) The whole structure of CPLSM



(b) The structure of poles



(c) Front of view

Fig.1 The structure of CPLSM

CPLSM에서 가동자의 이동속도는 주어진 입력 펄스의 주파수로 결정되며, 가동자의 이동거리는 입력 펄스의 수로 결정되므로 속도 제어의 요소는 주파수가 된다. CPLSM은 입력펄스 신호에 동기되어 이동하기 때문에 반드시 기어 형태의 치와 슬롯을 가지며, 직선 추력의 발생은 가동자의 변위에 따라 가동자와 고정자사이의 공극 퍼미언스 값의 변화로 발생하기 때문에 가동자와 고정자 사이에 일정한 공극을 유지하여야 한다. Fig.1(a)와 (b)에서 가동자는 전자석 A상과 B상이 이동방향의 좌우로 배치되며, 전자석 A상과 B상에는 각각 두 개의 극(pole)으로 되어 있고, 각 극에는 두 개의 치(tooth)가 있다. 또한 인접한 치 사이의 거리를 치 피치(Tooth pitch : T_p)라고 부른다. 전자석 A상의 자극1(1-pole)에 위치한 치1a,치2a와 자극2(2-pole)에 위치한 치3a,치4a는 각각 $(1/2)T_p$ 만큼 엇갈리며, 전자석 B상의 자극3(3-pole)에 위치한 치1b,치2b와 자극4(4-pole)에 위치한 치3b,치4b 역시 각각 $(1/2)T_p$ 만큼 엇갈려 있는 구조이고, A상의 자극1과 B상의 자극3 및 A상의 자극2와 B상의 자극4는 $(1/4)T_p$ 만큼 엇갈려 배치되어 있다. 또한, 고정자는 영구자석의 N극 및 S극 연속 배열로써 구성되어진 헤테로폴러형(heteropolar) 자계로 이루어져 있으며 요크를 통하여 자로가 형성된다. 따라서 A상의 1극과 2극 및 B상은 3극과 4극이 $(1/4)T_p$ 만큼 엇갈려 배치되어 있으므로 CPLSM은 풀스텝 구동시 $(1/4)T_p$ 만큼 이동하게된다.

Fig.1(c)에서 알 수 있듯이, 여자코일은 각상에 이동방향으로 감겨져 있으며, 각상 여자코일의 전류방향을 순차적으로 바꿈으로써 가동자를 이동시킬 수 있다.

2.2 자기등기회로

Fig.2는 CPLSM의 자기등가회로를 나타낸다. 그림2에서 구한 전자석 A상의 전체 자속을 이용하여 전자석 A상의 자기수반에너지 W_{mcA} 를 나타내면 식(1)과 같으며, 여기서, $N_A I_A$ [AT] 는 상당 기자력을 나타낸다.

$$W_{mcA} = \int_0^{I_A} \Psi dI_A = N_A \int_0^{I_A} \Phi_A dI_A = \frac{1}{2} N_A I_A \Phi_A \quad (1)$$

따라서, 추력 F_A 는 식(2)와 같이되며, 전자석 A 상의 변위에 따른 전체자속의 변화율을 알면 추력을 구할 수 있다.

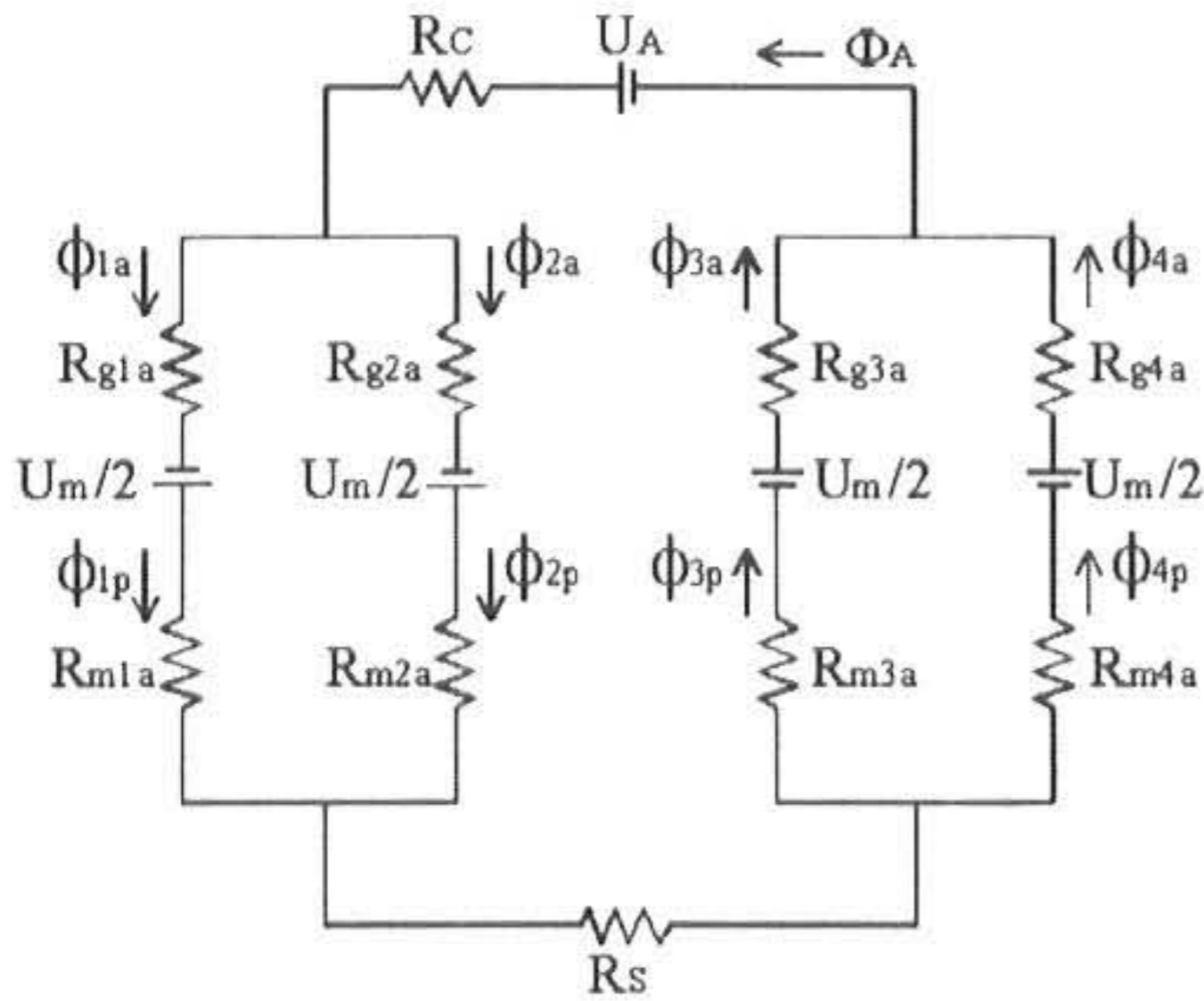
$$F_A = \frac{dW_{mcA}}{dx} = \frac{1}{2} N_A I_A \frac{d\Phi_A}{dx} \quad (2)$$

상기와 같은 방법으로 전자석 B상이 여자될 때, 추력 F_B 는 식(3)과 같다.

$$F_B = \frac{dW_{mcB}}{dx} = \frac{1}{2} N_B I_B \frac{d\Phi_B}{dx} \quad (3)$$

따라서, 전체 추력 F 는 식(4)와 같다.

$$F = F_A + F_B \quad (4)$$



- U_A : mmf by A-phase exciting current
- U_m : mmf by PM
- R_{gia} : the reluctance of air gap (i : tooth number)
- R_{mia} : the reluctance of PM
- R_c : the reluctance of mover
- R_s : the reluctance of stator
- ϕ_{ia} : the flux by A-phase exciting current
- ϕ_{ip} : the flux by PM
- Φ_A : the total flux

Fig.2 The magnetic equivalent circuit of CPLSM(A-phase)

2.3 자장해석

전류원이 존재하는 해석모델에서 자계 H와 전류 밀도 J의 관계는 Ampere 주회 법칙의 미분형 식(5)와 같고, 정자계에서 자속밀도의 발산은 식(6)으로 정의된다.

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

전류 연속성으로부터 전류 벡터포텐셜 K를 정의하면 식(7)과 같다.

$$J = \nabla \times K \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하여 정리한 벡터량을 새로운 자기스칼라포텐셜 Ω^* 로 정의하면 식(8)이 얻어진다.

$$H - K = -\nabla \Omega^* \quad (8)$$

식(8)을 H로 나타내어 식(6)에 대입하면 지배방정식 식(9)를 얻는다.

$$\nabla \cdot \mu(K - \nabla \Omega^*) = 0 \quad (9)$$

이 지배방정식을 정식화하기 위해 Galerkin법을 이용하여 각 요소에 대한 잔차 R_{ei} 를 구하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} R_{ei} &= \int_v [N_i \nabla \cdot \{\mu(K - \nabla \Omega^*)\}] dV \\ &= \int_v [\nabla \cdot \{N_i \mu(K - \nabla \Omega^*)\}] dV \\ &= \int_v [\{\mu(K - \nabla \Omega^*)\} \cdot \nabla N_i] dV \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, N_i 는 형상함수이다.

식(10)의 우변 첫 항에 대해 Gauss 정리를 사용하여 정리하면 식(11)과 같고, 경계조건을 적용하면 식(11)은 "0"이 되므로 잔차 R_{ei} 는 식(12)가 된다.

$$\int_v [\nabla \cdot \{N_i \mu (K - \nabla \Omega^*)\}] dV = \int_s N_i \{ \mu (K - \nabla \Omega^*) \} \cdot n ds \quad (11)$$

$$R_{ei} = \mu \int_v [\nabla \Omega^* \cdot \nabla N_i] dV - \mu \int_v [K \cdot \nabla N_i] dV \quad (12)$$

일차식으로 근사화시킨 자기스칼라포텐셜 Ω^* 을 식(12)에 대입하고 모든 요소에 대해 적용하면 식(13)과 같은 행렬식이 얻어진다.

$$[R] = \mu [S][\Omega^*] - [F] = 0 \quad (13)$$

여기서, [S]는 계수행렬이고, [F]는 구동벡터이다.

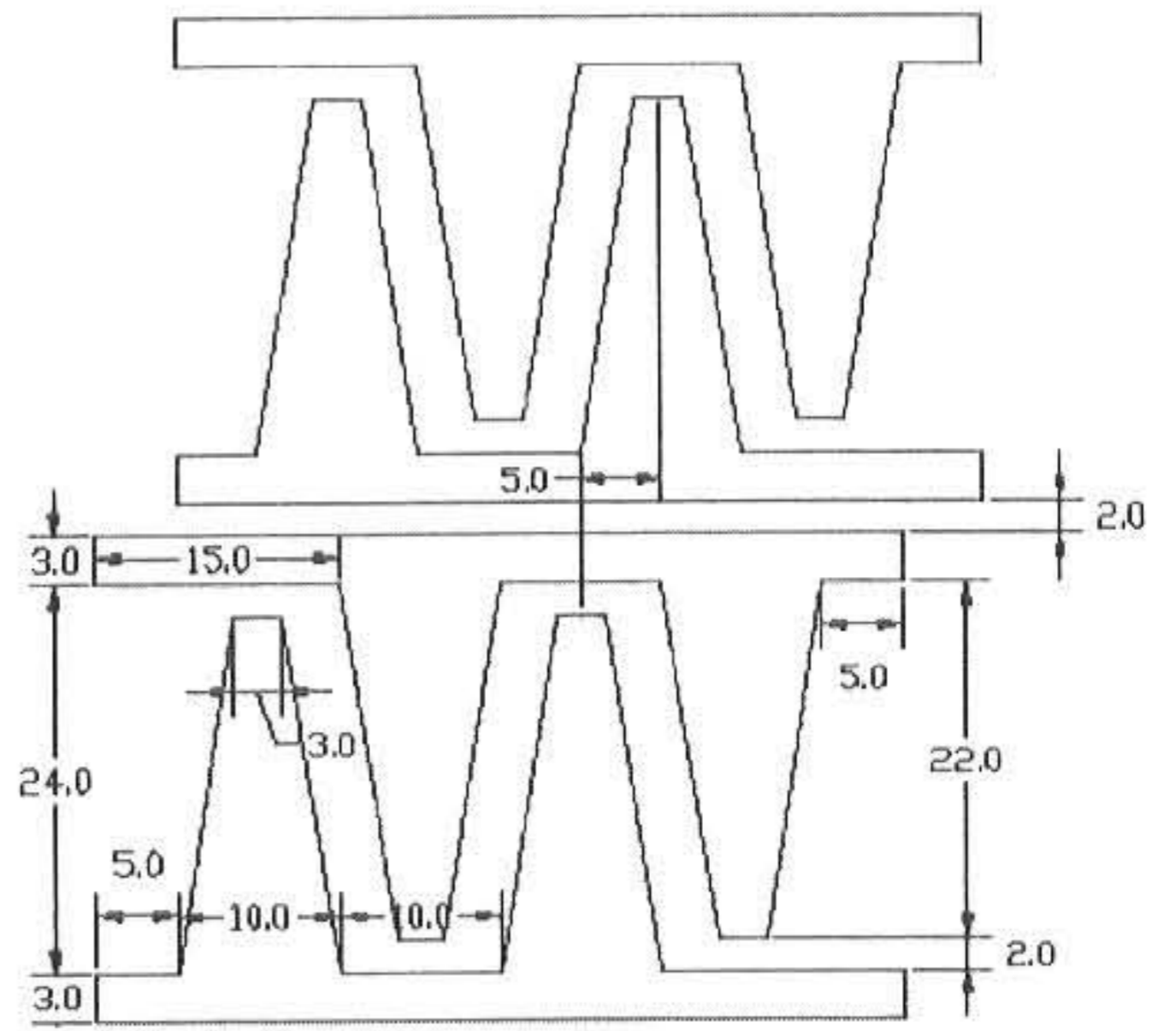
2.4 CPLSM의 설계

Table 1은 본 연구에서 제안한 CPLSM의 설계사양을 나타내고 있다.

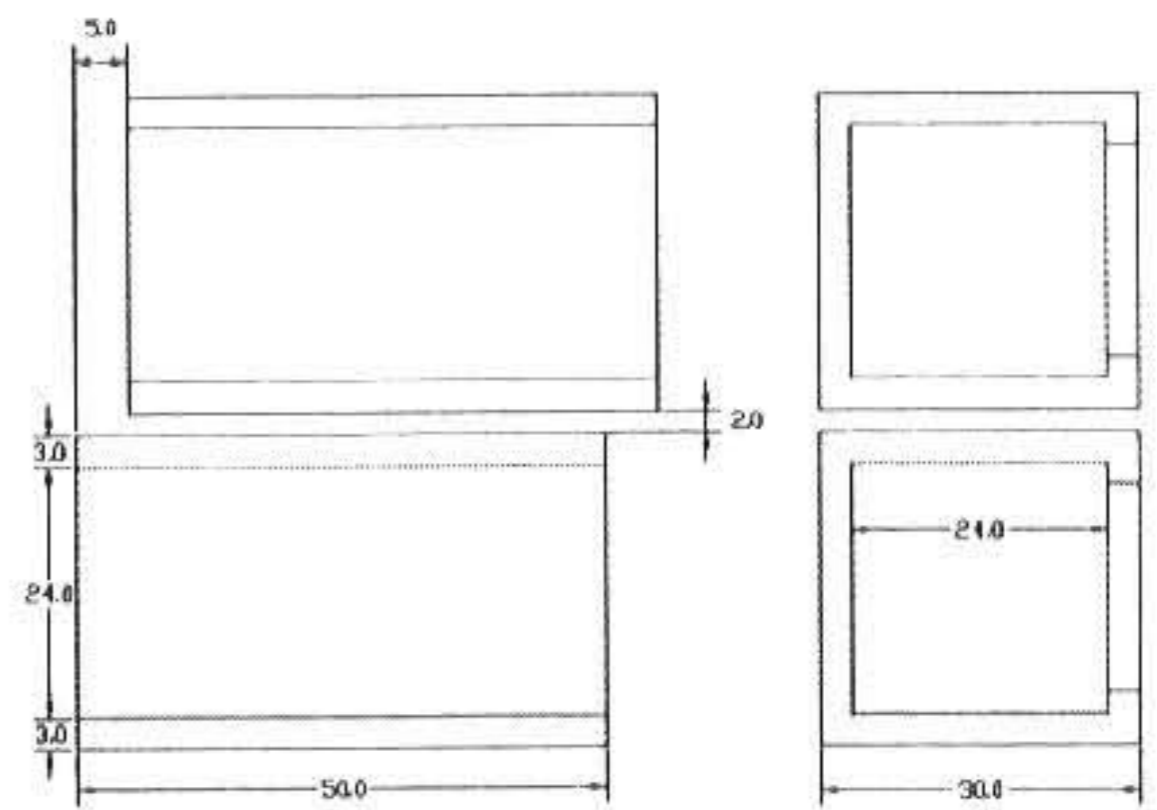
Table.1 The design specification of CPLSM

항 목	수치[단위]	비 고
구동전압	DC 10[V]	
구동전류	0.25[A/상]	
입력전력	5[W]	
턴 수	200[회/상]	
최대추력	7[N]	1상여자시

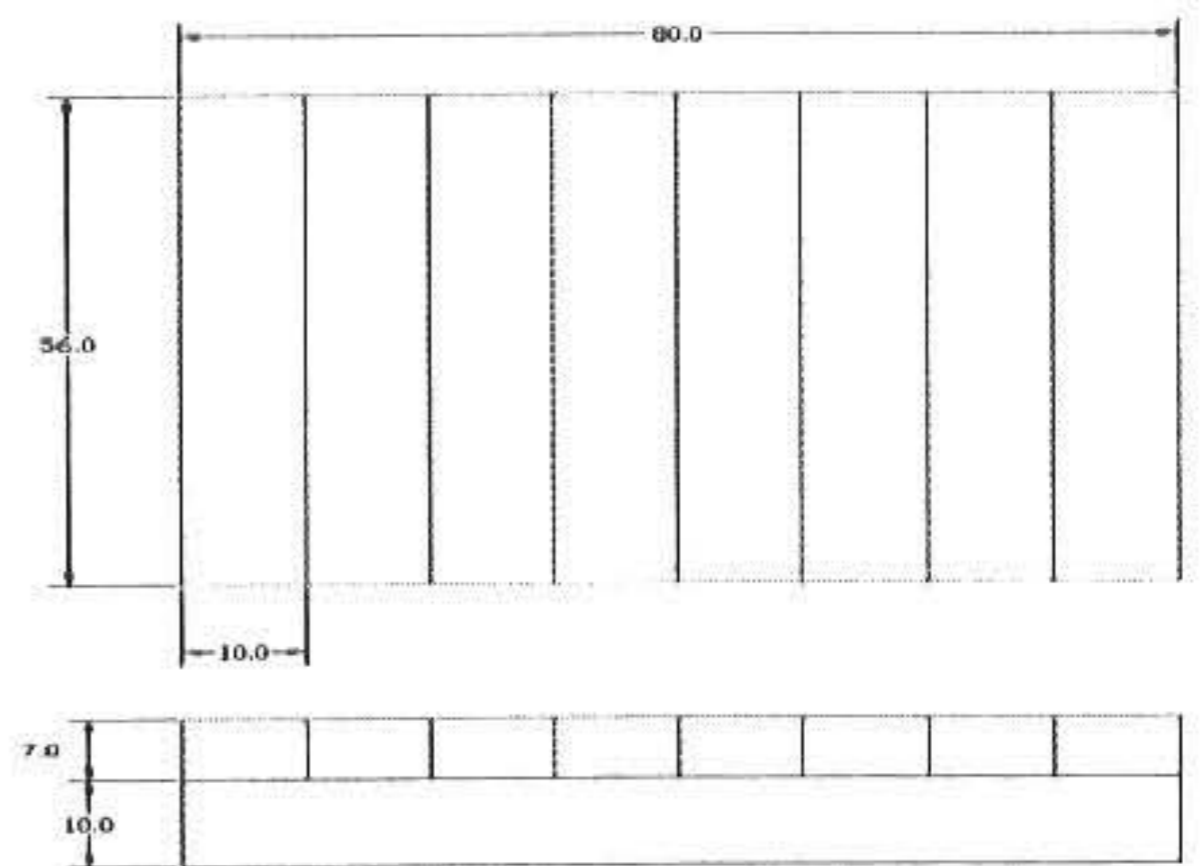
Fig.3은 상기에서 제시한 이론을 바탕으로 본 연구에서 설계한 CPLSM의 각 부분의 치수를 나타낸다. Fig. 3(a)는 CPLSM의 극의 치수를 나타내며, Fig. 3(b)는 CPLSM의 가동자의 치수를 나타내고, Fig. 3(c)는 CPLSM의 영구자석과 고정자의 치수를 나타낸다.



(a) The poles of CPLSM



(b) The mover of CPLSM



(c) The PM and the stator of CPLSM

Fig.3 The Dimension of CPLSM

2.5 3차원 유한요소해석

본 연구에서는 상기에서 설계한 새로운 CPLSM을 3차원 유한요소법(Flux3d)으로 자체 해석을 하였으며, Fig.4는 CPLSM의 3차원 유한요소해석 모델을 나타내고 있다. 그림5는 CPLSM의 영구자석과 각 치들만의 3차원 유한요소모델을 나타내고 있다.

Fig.6은 CPLSM의 3차원 유한요소해석 결과인 자속밀도 분포를 나타내고 있으며, 상기에서 제시한 자기회로와 3차원 유한요소해석을 통한 자기회로가 거의 일치함을 알 수 있었다. 또한, Fig.7은 CPLSM의 영구자석과 각 치들의 유한요소해석 결과인 자속밀도 분포를 나타내고 있으며, 가동자의 각 극에 배치된 치와 고정자의 자극 위치에 따라 순서적으로 흡인력과 반발력이 작용함으로써 가동자의 순차적인 이동이 발생됨을 알 수 있었다.

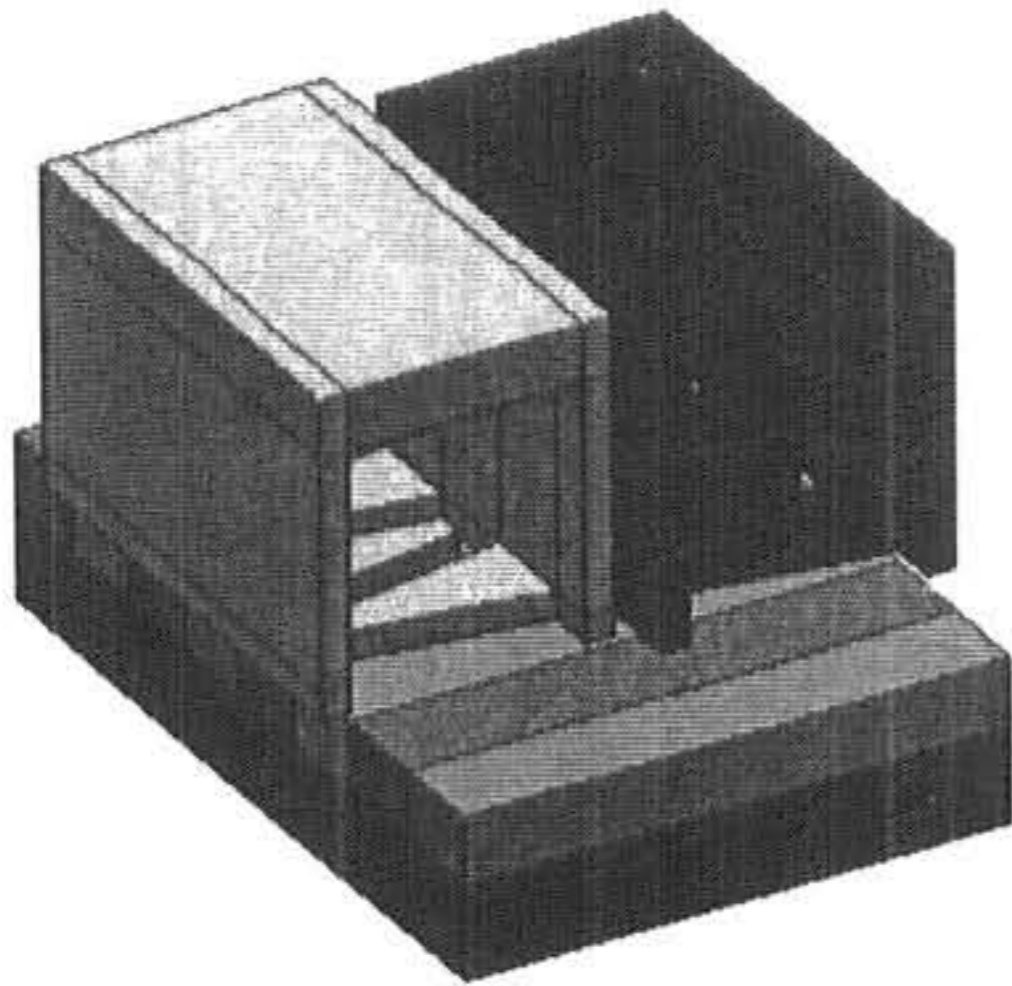


Fig.4 The 3D's finite element analysis model of CPLSM

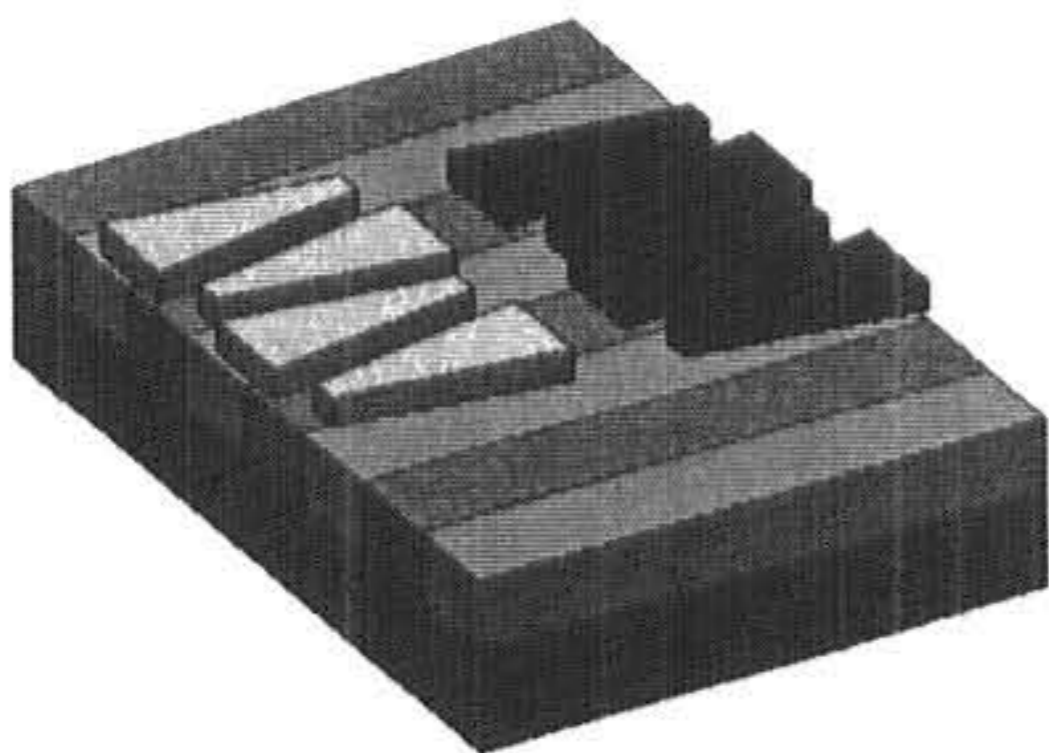


Fig.5 The 3D's finite element analysis model of CPLSM(PM and each teeth)

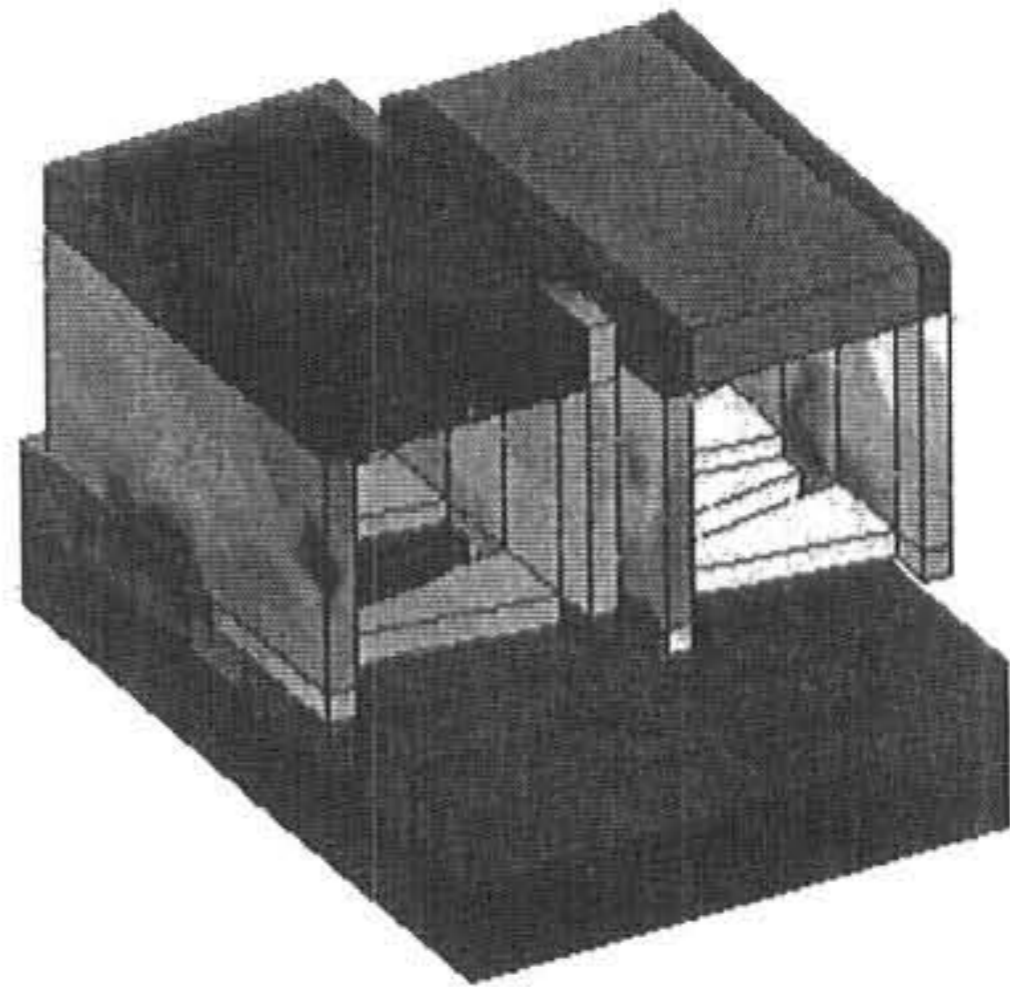


Fig.6 The flux density of CPLSM

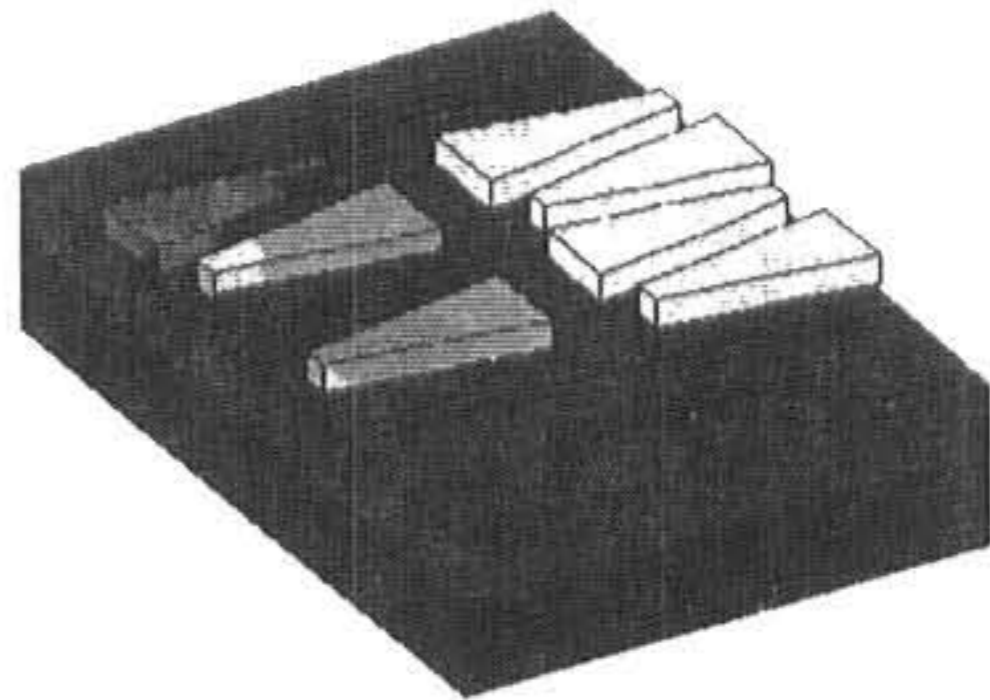
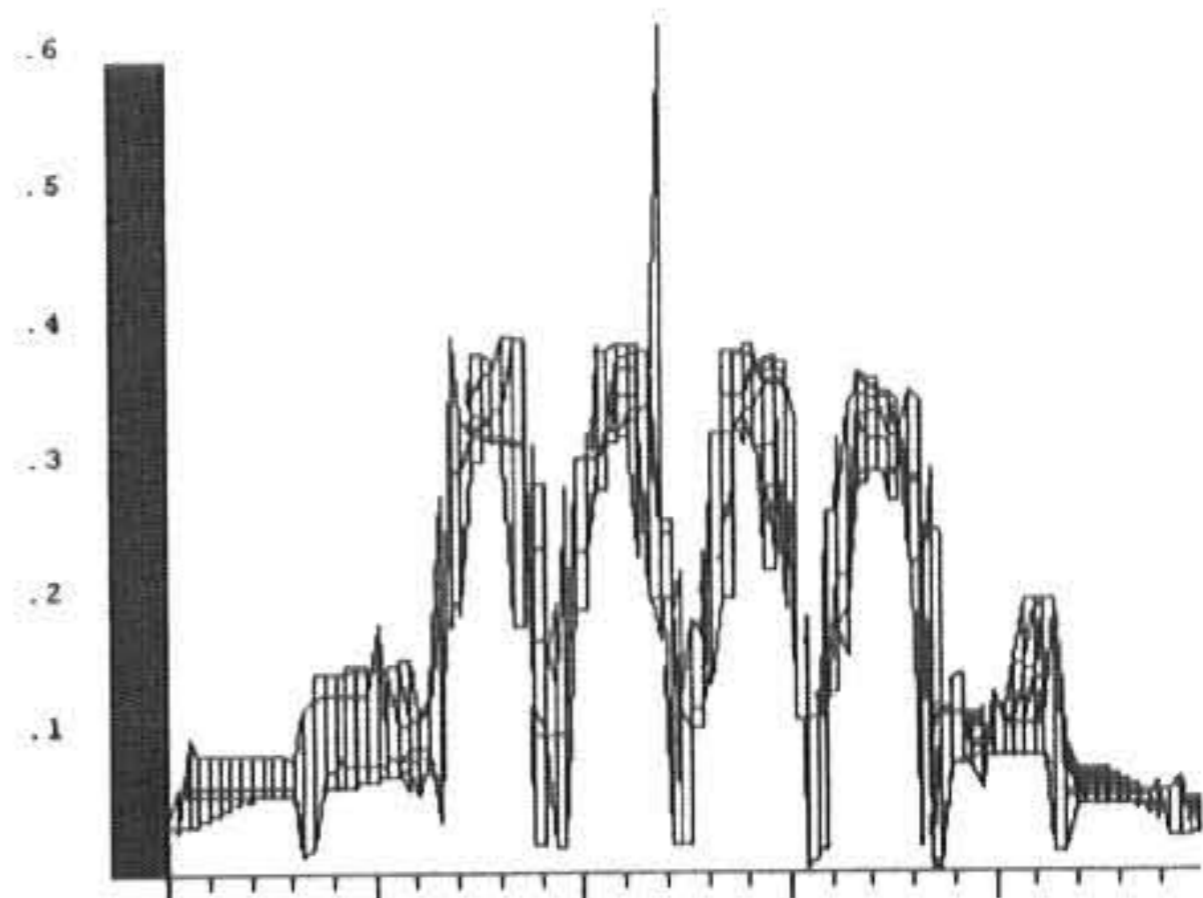
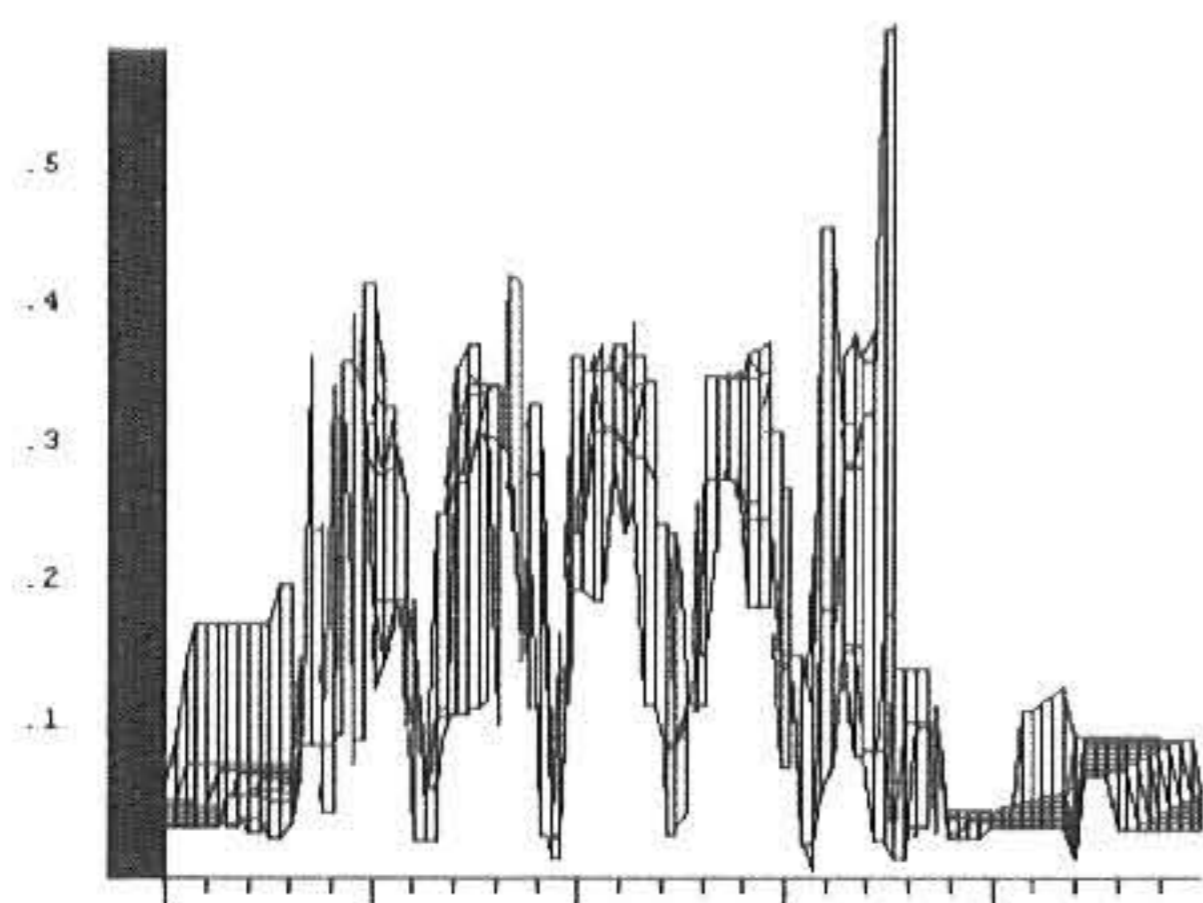


Fig.7 The flux density of CPLSM(PM and each teeth)

Fig.8은 CPLSM의 무여자시 공극에서의 자속 밀도 값을 나타내며, Fig.9는 CPLSM의 최대 추력 발생시 공극에서의 자속밀도 값을 나타낸다. 또한 공극에서의 자속밀도 값을 이용하여 추력계산한 결과, 무여자시 추력은 0.2[N]이며, 1상여자시 최대추력은 6.8[N]이 됨으로서 본 연구에서 제시한 CPLSM 설계방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

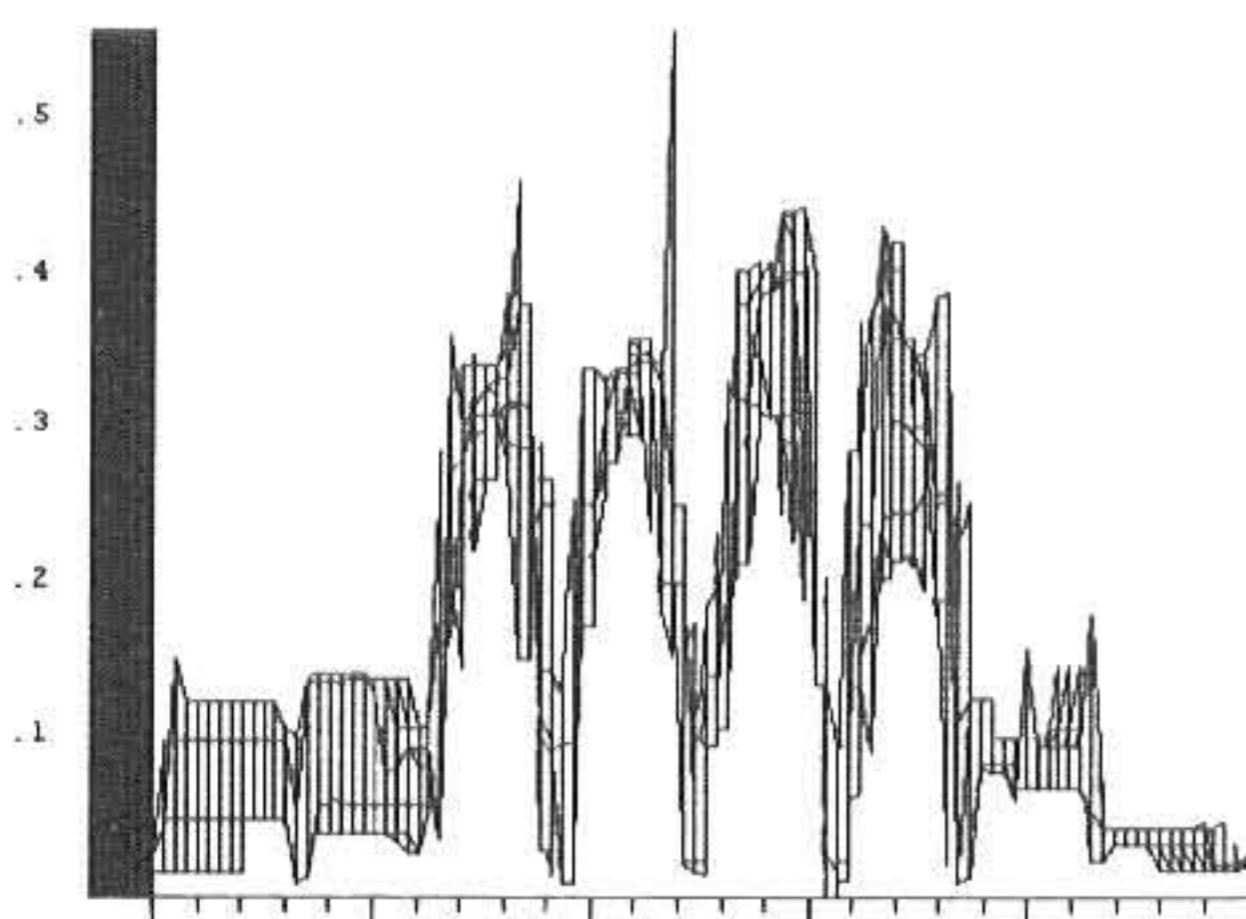


(a)A-phase(non-exciting)

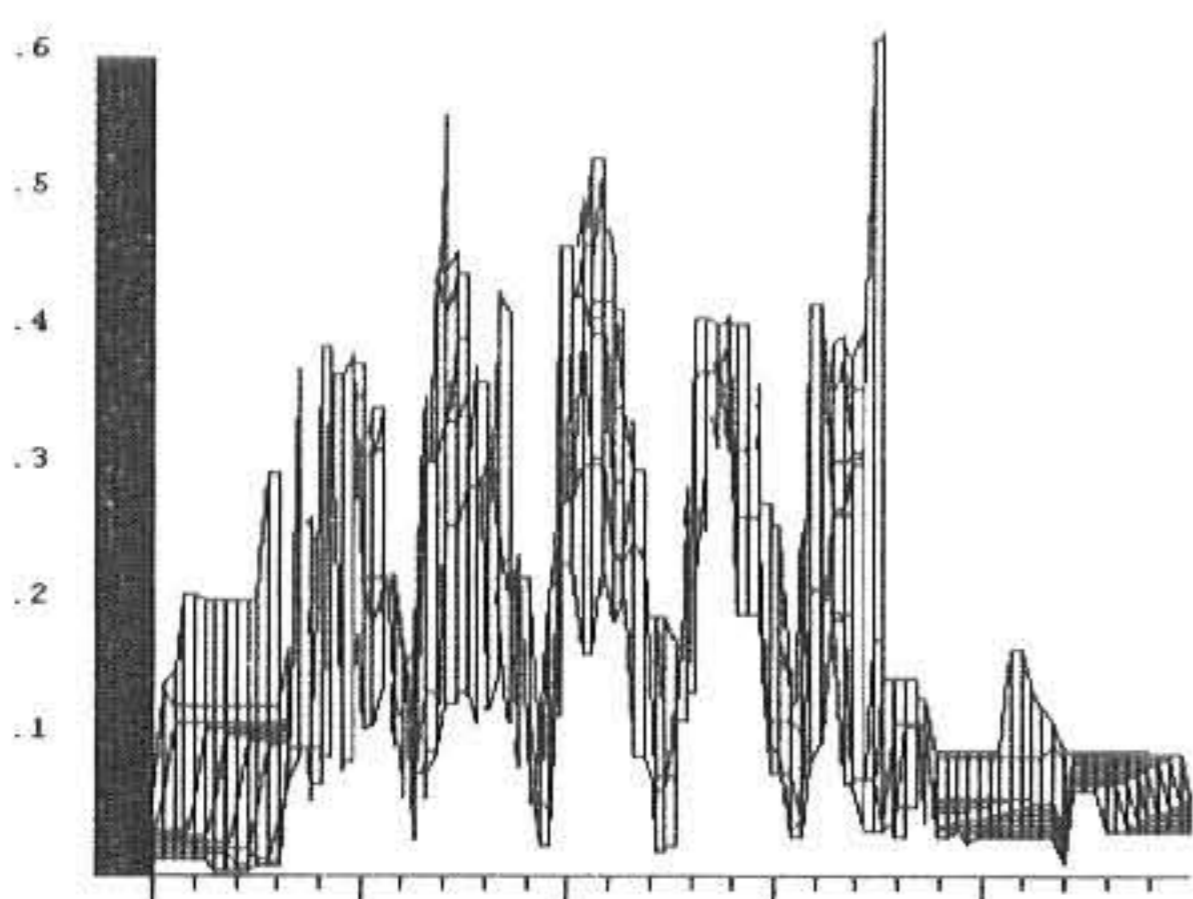


(b)B-phase(non-exciting)

Fig.8 The flux density value in air gap



(a)A-phase(non-exciting)



(b)B-phase(exciting)

Fig.9 The flux density value in air gap (Maximum thrust force)

3. 결론

본 연구에서는 기존 리니어 스텝핑 모터의

구조를 획기적으로 변형한 새로운 클로폴형 리니어 스텝핑 모터(Claw Poles type Linear Stepping Motor)를 제안하였으며, 3차원 자기해석(Flux3d)을 통하여 설계 및 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)상기에서 제안한 CPLSM의 자기회로와 3차원 유한요소해석을 통한 자기회로가 거의 일치하였다. 또한, 가동자의 각 극에 배치된 치와 고정자의 자극 위치에 따라 순서적으로 흡인력과 반발력이 작용함으로써 가동자의 순차적인 이동이 발생되었다.
- (2)CPLSM의 공극에서의 자속밀도 값을 이용하여 추력을 계산한 결과, 무여자시 추력은 0.2[N]이며, 1상여자시 최대추력은 6.8[N]이 됨으로서 본 연구에서 제시한 CPLSM 설계 방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

따라서, 본 연구에서 제안한 CPLSM은 소형화·박형화·경량화가 가능함으로서 각종 정보처리기기를 비롯한 다양한 산업응용에 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) Ding Zhi-Gang : A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor, IEEE Trans on IAS. vol.1, pp.329-336 (1994)
- 2) Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda : Analyses for Sensorless Linear Compressor using Linear Pulse Motor, IEEE Trans on IAS. vol.4, pp.2298-2304 (1999)
- 3) Sang-Ho Lee, Hong-Seok Oh, etc. : NEW MICROSTEPPING DRIVE OF 2-PHASE LINEAR STEPPING MOTOR, PEMC'98 Conference, vol.3, pp.3-189~3-192 (1998)
- 4) 이상호, 신미영, 하장호 : 치형상에 따른 2상 HB형 Linear Stepping Motor의 추력 및 수직력 특성에 관한 연구”, 한국산업응용학회지, 제4권, 제3호, pp.275-279 (2001)
- 5) Hideki Nihei, etc. : Ultra Thin PM Type LPM, T.IEE Japan, vol.114-D, No.1, pp.64-70 (1994)

(2001년 12월 24일 접수, 2002년 4월 20일 채택)