

Linear Force Motor를 이용한 설계와 해석 교육매체 개발

A Development of Educational Procedure for Design and Analysis with a Linear Force Motor

박 창 순*

Chang Soon Park*

요 약

전기기기 설계는 전통적이고 고전적인 방식을 이용하여 자기회로를 고려한 기기의 크기를 결정하고 권선방식과 권선을 정하고 해석프로그램을 이용하여 자속밀도와 토크를 계산하는 절차로 진행된다. 그러나 전기기기는 형상이 복잡하여 학생들이 설계하는 절차를 이해하고 해석하는데 많은 어려움을 겪고 있어 교육매체 개발이 매우 필요하다. 본 논문에서는 비교적 형상이 단순하여 자기회로 계산이 복잡하지 않고 전자기적 크기에 의한 추력의 발생과 해석을 쉽게 이해할 수 있는 Linear Force motor를 이용하여 설계절차를 설명하고 각 부위의 자속밀도를 설계 프로그램을 이용하여 도시함으로써 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

Key Words : Linear Actuator, Design, Analysis, Force motor, Simulation

ABSTRACT

For design of a electrical Machine it is used conventional design methode to determine size with considering of magnetical circuit and windings. After this process, Flux density and Torque are calculated with FEM program. But most electrical machines are complicated in their configuration, therefore it is not easy to understand the design process and analyzing methode. We need to develop a educational material. In this paper using Linear force motor, which is relatively not complicated in their configuration and easy to understand the relationship between electro magnetics and force, will be explained the design process and calculating process with Finite element methode. And with FEM program will be calculated and illustrated flux density in each part and Force of the Linear force motor easy to understand.

* 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부

제1저자 (First Author) : 박창순(cspark@kut.ac.kr)

교신저자 : 박창순

접수일자 : 2012년 4월 05일

수정일자 : 2012년 5월 10일

확정일자 : 2012년 5월 30일

1. 서론

보이스 코일형 선형 리니어 포스 모터는 NdFeB 영구자석 계자를 갖는 자기회로와 보빈 및 가동코일로 이루어지며, 짧은 스트로크로 구동되는 리니어 왕복 운동을 위한 추진력 발생장치이다. 추진력의 크기와 방향은 코일에 흐르는 전류의 크기와 방향으로 제어되고 있으며 코일은 공극에 위치하고 철심이 없는 공극권선을 사용하고 있다. 따라서 전기적 시정수가 작고 자력을 이용하는 다른 선형 포스 모터의 플런저보다 관성이 작기 때문에 응답성이 빠르고 높은 주파수를 갖고 있다[1-3].

밸브 구동용 개폐식 액추에이터는 입력으로서 주어진 전기신호를 코일을 통하여 1차적으로 전자기적 에너지로 변환한 다음, 최종적으로 밸브의 유로를 개폐할 수 있는 기계적 운동에너지를 플런저와 고정자가 형성하는 공극을 통하여 출력하는 에너지 변환장치이다[2].

액추에이터 설계를 위한 핵심기술에는 자속밀도 해석기술, 자성재료 해석 및 결정기술, 권선수 계산 기술 등이 있으며 설계오차를 줄이기 위하여 다음과 같은 순서로 설계를 진행하고 있다[3].

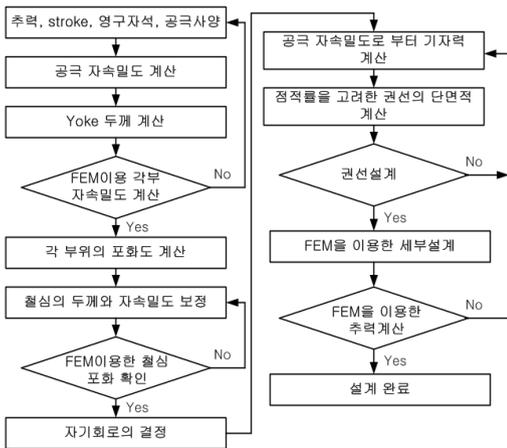


그림 1. 설계 순서
Fig. 1. design procedure

본 연구에서는 보이스 코일 선형 포스모터를 설계하는데 고전적인 방법에 의한 공극의 자속밀도를 계산하고 이를 기초로 하여 포스모터의 크기와 형상 그리고 코일의 턴수를 구체화 한 다음 FEM프로그램을 이용한 해석을 통하여 공극과 요크의 자속 밀도

를 비교하고 전류에 따른 힘의 변화, 공극의 크기에 따른 추진력의 변화를 계산하는 방식을 통하여 설계의 철차를 이해하도록 하며 시작품을 제작하고 측정하여 설계 값의 정확성을 증가시킨다.

II. 보이스 코일 선형 포스모터의 구조

보이스 코일 선형 포스모터는 전자장 형성을 위한 코일과 자력선의 통로인 요크(Yoke), 영구자석, 실질적인 스트로크를 형성하여 기계적 운동을 발생하는 아마추어, 아마추어를 복원시키는 스프링(Centering Spring) 등으로 구성된다. Fig. 2는 보이스 코일 리니어 포스 모터 구조를 나타낸다.

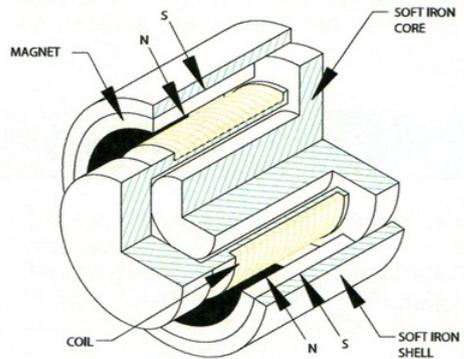


그림. 2 보이스코일 리니어 모터의 구조
Fig. 2 Structure of voice coil linear actuator

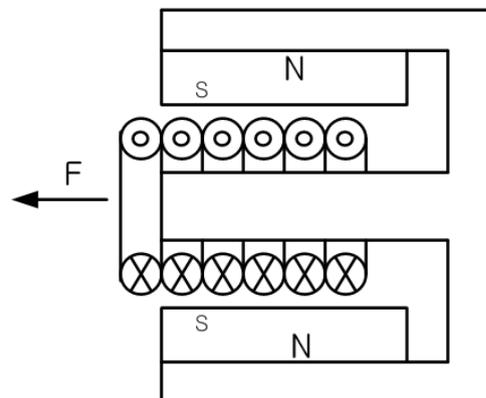


그림. 3 설계를 위한 리니어 포스 모터의 단면도
Fig. 3 Cross sectional View of voice coil linear actuator for Design

III. 보이스 코일 선형 포스모터의 구동원리

보이스 코일 선형 포스 모터는 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자(Armature)로 구성되는데 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 왕복운동을 하게 된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 코일에 작용하는 추력특성 식은(1)과 같다[1,2].

$$F = KB_g l N [N] \quad (1)$$

$$KB_g l N = F/I$$

$$K_F = F/I$$

여기서 l, N 은 각각 공극자계속에 있는 코일의 길이[m]와 유효 권선수를 나타낸다. 또한 Bg 는 영구자석에 의한 공극자속밀도[T], I 는 가동자 코일에 흐르는 전류[A], K_F 는 추력 상수이다.

IV. 보이스 코일 선형 포스모터 설계

1. 공극의 자속밀도 계산

공식 (1)에서 공극 자속밀도는 포스모터의 추력을 결정하는 대단히 중요한 Factor이다. 영구자석에 의한 공극의 자속밀도는 공식(2)를 이용하여 구한다.

$$B_g = k \frac{B_r}{\frac{A_g}{A_M} + \frac{\mu_M \delta}{h_M}} \quad (2)$$

B_r : 잔류자속밀도 [T]

B_g : 공극자속밀도 [T]

A_g : 공극단면적 [mm²]

A_M : 영구자석 단면적 [mm²]

μ_M : 영구자석 투자율

h_M : 영구자석 두께 [mm]

δ : 공극길이 [mm]

공극의 면적과 영구자석의 면적이 같다고 하면 공극의 자속밀도는 영구자석의 잔류자속밀도에 비례하고

영구자석의 높이가 높으면 증가한다.

k는 자기회로 형상에 의한 보정상수로 철심과 공극에서 자기전압강하, 누설자속 등을 고려한 값이다. 측정과 해석을 통하여 k를 결정하면 차후 보이스코일 리니어 포스모터를 설계하는데 많은 시행착오를 줄이고 그림 1에서 여러 단계의 반복계산을 생략할 수 있다. 공식(2)에서 일반적으로 $A_M \approx A_g$ 이다.

공식(2)는 일반적으로 사용하는 공식이며 계산시간을 줄이는데 아주 요긴한 방법이나 자기회로에 의한 보정상수 k가 자기회로의 형상에 따라 달라지기 때문에 해석을 통하여 k 값을 구하고 검증하는 것이 중요하다.

표 1. 리니어 포스모터의 요구 특성
Table 1. Desired Linear Force motor specification

항 목	사 용 값
정격전압	DC 24 [V]
스트로크	±0.6 [mm]
정격전류	3.0 [A]
추력	60.0 [N]
스텝응답	30ms

2. 코일 길이와 권선수

역기전력 공식은

$$E = B_g l v_{\max} \quad (3)$$

공식(3)로부터 코일 길이

$$l = \frac{E}{B_g v_{\max}} \quad (4)$$

코일 1턴의 길이

$$l_T = \pi d_b \quad (5)$$

권선수

$$N = \frac{l}{l_T} = \frac{l}{\pi d_b} \quad (6)$$

코일 직경

$$d_c = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \times 2 \quad (7)$$

코일 단면적

$$A_c = \frac{I_{\max}}{S} \quad (8)$$

A_c : 코일 단면적

S : 전류밀도

3. 요크 두께의 산정

필요한 흡인력을 만들기 위한 공극에서 자속 $\Phi = BA$ 이다. 이 자속이 요크를 통하여 흐르므로 요크가 포화되지 않는 범위에서 최대자속밀도를 정하면 요크의 두께를 정할 수 있다.

공극에서 자속

$$\Phi = B_{gmax} A_p [Wb] \quad (9)$$

요크에서 최대 자속밀도 B_{gmax} 로 하면 요크의 단면적은

$$A_{yoke} = \frac{\Phi}{B_{gmax}} \quad (10)$$

코일 보빈의 외경 즉 요크의 내경(d_{yi})과 요크 외경(d_{yo})으로 부터 요크의 두께는 요크의 단면적으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{yoke} = \pi \left(\frac{d_{yo}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d_{yi}}{2} \right)^2 \quad (11)$$

$$d_{yo} = \sqrt{\frac{A_{yoke}}{\pi} + \left(\frac{d_{yi}}{2} \right)^2} \times 2 \quad (12)$$

요크의 두께

$$h_y \geq (d_{yo} - d_{yi})/2 \quad (13)$$

으로 결정한다.

4. 설계된 Linear Force motor

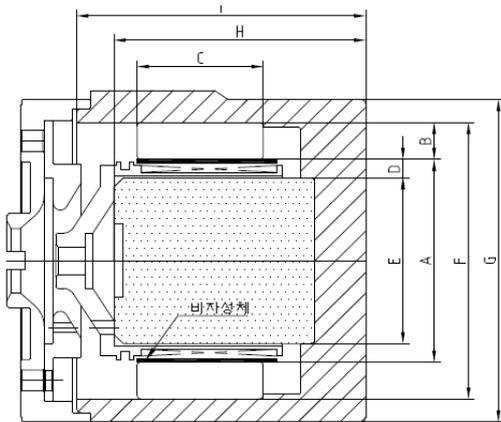


그림 4 보이스코일 리니어 포스모터의 단면도
Fig. 4. Cross sectional view of the designed Linear Force motor

표 2. 설계한 보이스코일 리니어 포스 모터의 제원
Table 2. designed Size of Linear Force motor

표시	항목 명	치수[mm]
A	영구자석 내경	44
B	영구자석 두께	8
C	영구자석 길이	27
D	공극	3.85
E	실린더 외경	36.3
F	영구자석외경	60
G	포스모터 외경	70
H	포스모터 길이	54
I	요크 길이	62

표 3. 설계된 보이스코일 리니어 포스 모터의 권선
Table 3. designed Coil Size of Linear Force motor

항 목	치 수
코일 턴수	330
코일 직경	0.41 [mm]
보빈 직경	37.7 [mm]
보빈 길이	29 [mm]
코일 저항	4.71 [ohm]

그림 4는 앞에서 설명한 공식과 설계절차에 따라 설계된 Linear force motor의 형상이며 표 2는 각 부위의 치수 그리고 표 3은 권선의 턴수와 크기 그리고 저항을 나타내고 있다.

V. 보이스코일 리니어 포스모터 해석

1. 해석 순서

전기기의 해석은 FEM 해석 프로그램을 이용하여 수행한다. 프로그램의 구성은 그림 5와 같다.

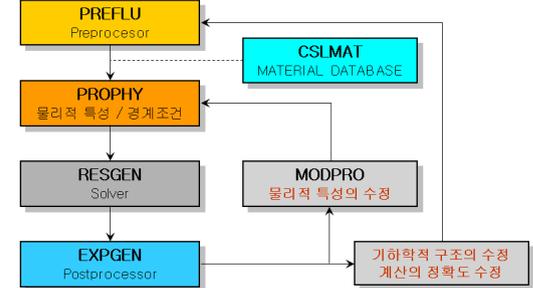


그림 5 해석 흐름도
Fig. 5. Flowchart of Analyzing process

그림 5.의 Preflu에서 리니어 포스 모터의 설계된 제원을 입력하여 형상을 만든다.

Prophy에서는 사용된 자성재료와 도체의 물리적특성과 경계조건을 입력한다. 이때 사용재료에 따라 특성이 달라지므로 정확한 특성입력이 매우 중요하다.

이때 새로운 재료의 특성을 입력하기도 하고 기존의 material database를 이용하기도 한다.

다음으로 solver를 이용하여 특성을 해석한다.

이 과정은 해석하는 기기의 형상과 정확도 그리고 mesh에 의해 시간이 많이 걸리기도 한다.

해석된 기기의 특성을 보는 순서가 EXPGEN으로 여기서 각 부위의 자속밀도, 자속의 흐름, 계산한 추력 등을 볼 수 있는 곳이다. 해석된 값이 설계하고자 하는 기기의 특성과 맞지 않을 경우 기하학적 구조를 수정하거나 사용한 재질을 수정하여 재 해석하는 과정을 거쳐 원하는 기기의 설계를 완성할 수 있다.

2. 형상입력

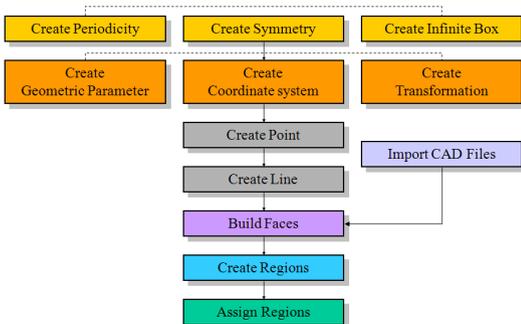


그림 6. 형상 입력순서
Fig. 6. Geometric Construction Sequence

형상입력은 그림 4와 표 2에 의하여 리니어 포스모터의 형상을 프로그램에 입력하는 순서이다.

기기의 크기를 원활하게 변형하기 위하여 geometric parameter를 만들어 입력하며 계산시간을 단축하기 위하여 기기가 대칭되는 부분은 Symmetry로 처리하여 1/2 또는 1/4만 계산하도록 한다.

그리고 형상의 각 부분을 점으로 입력하고 선으로 연결한 다음 면(Face)을 만들고 각 부위에 재질을 입력하기 위하여 영역(Region)을 부여한다.

만약 CAD로 작성된 도면이 있는 경우 CAD file을 Import하여 사용할 수 있다.

해석의 경계를 정하기 위하여 Infinite Box의 크기를 정한다.

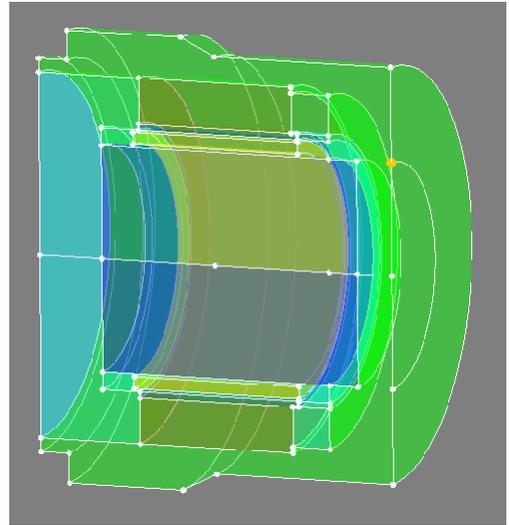


그림 7. 형상 입력이 완료된 리니어 포스 모터
Fig. 7. finished Geometric

3. mesh

mesh는 해석하고자 하는 기기를 요소분할하는 과정이다.

mesh순서로는 먼저 mesh point와 mesh line으로 각 부위의 중요도에 따라 얼마나 세밀하게 요소를 분할할 것인지를 정하여주는 과정이다. mesh quality가 해석의 정확도를 결정짓는 중요한 과정의 때문에 Verifying후 결과가 좋지 않으면 mesh point와 mesh line을 다시 조정한다.

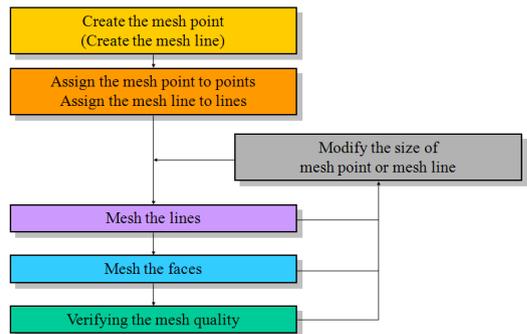


그림 8. mesh 순서
Fig. 8. mesh sequence

그림 9는 그림 8의 mesh순서에 따라 해석대상을 요소 분할한 그림이다. 코일이 위치하는 영구자석 중앙요크 사이의 공극은 요소분할을 세밀하게 하였다.

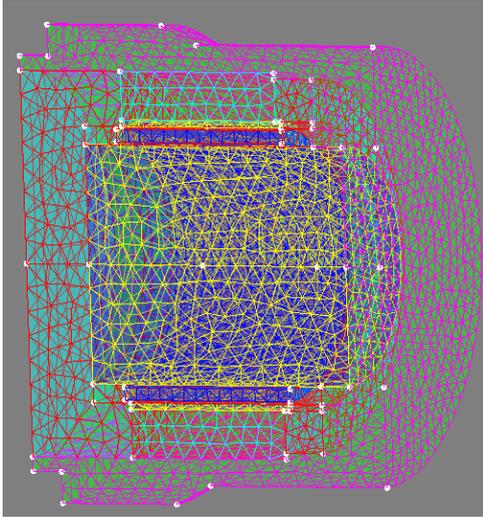


그림 9. 요소 분할된 리니어 포스 모터
Fig. 9. meshed linear force motor

4. 물리적 특성 입력순서

물리적 특성 입력은 사용된 철심의 B-H곡선, 영구 자석의 감자특성 등을 입력하고 전기회로와 연결할 수도 있으며 권선수, 권선의 저항 등 특성계산을 위한 값을 입력한다.

영구자석의 감자곡선을 입력할 때에는 잔류자속밀도 (remanent flux density)와 비투자율(relative permeability)를 입력하여 정의한다. 포화곡선을 정의 하기 위해서는 1개의 analytic 포화곡선에 의해 정의 되는 등방성 재질 또는 3개의 analytic 포화곡선에 의해 정의되는 이방성재질을 구분하여 입력한다. B-H곡선에 대한 정확한 데이터가 있을 경우에는 그림11과 같이 각 점의 B-H값을 정의할 수 있다.

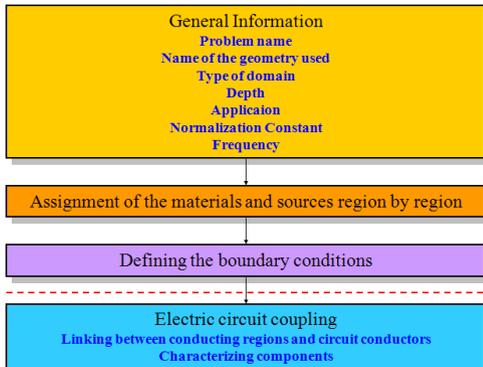


그림 10. 물리적 특성 입력순서
Fig. 10. sequence of physical Property

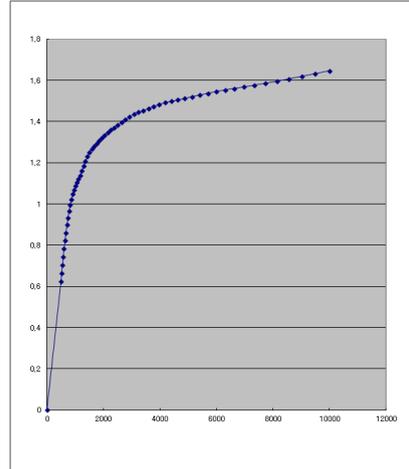


그림 11. S-45의 B-H 특성곡선
Fig. 11. B-H curve of the S-45

물리적 입력이 끝나면 postprocessor를 이용하여 해석하고 결과를 볼 수가 있다.

그림 11은 해석된 자속의 흐름을 볼 수가 있으며 밀도를 색을 통하여 알 수가 있다.

이 그림은 학생들에게 자속이 어떻게 분포되며 자기 회로가 구성되는 것을 설명하기에 아주 좋은 재료가 된다.

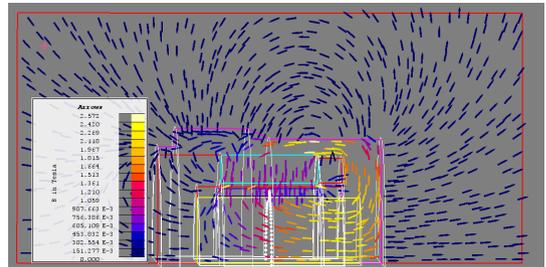


그림 12. 자속의 흐름과 밀도
Fig. 12. Flux density and flow

그림 12에서 노란색 부분이 자속밀도가 높은 곳이며 청색으로 표시된 부분은 밀도가 낮은 곳이다. 자속이 철심으로만 흐르지 않고 공기 중으로 누설되며 그 양은 철심으로 흐르는 자속에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있다.

그림 13은 해석된 자속밀도 분포도이다. 영구자석에 의해 만들어지는 자속이 중앙 요크를 지나 오른쪽으로 흐르기 때문에 오른쪽이 자속밀도가 높다 따라서 이 부분의 자속밀도가 포화되지 않는지를 점검하여야한다. 고전적인 계산에서는 자속밀도의 평균값으로

계산하였으나 FEM프로그램으로 각 부위의 정확한 자속밀도를 알 수가 있고 포화여부를 알아 요크의 두께를 조절할 수가 있다.

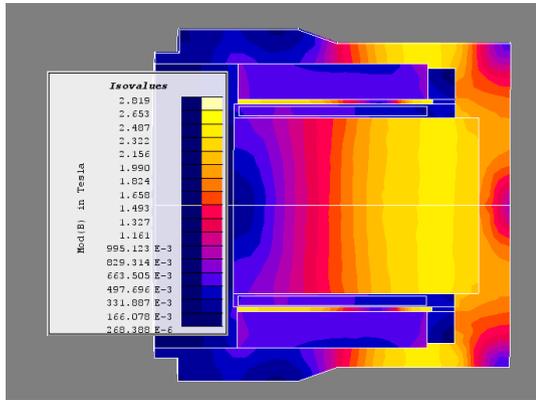


그림 13. flux density

Fig. 13. 자속밀도

다음 그림14는 공식(2)에 의하여 계산된 자속밀도와 공식(3)~(8)에 의하여 결정된 권선수와 길이를 이용하여 공식(1)로 계산한 전류의 크기에 따른 추력과 FEM프로그램을 이용한 추력이다. 두 값은 매우 근사하며 공식(2)의 자기회로 형상에 의한 보정계수 k는 프로그램을 이용한 계산으로부터 얻었다.

향후 이 값을 이용하여 Linear Force motor를 설계하는데 반복적인 설계의 변경이나 계산과정을 크게 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

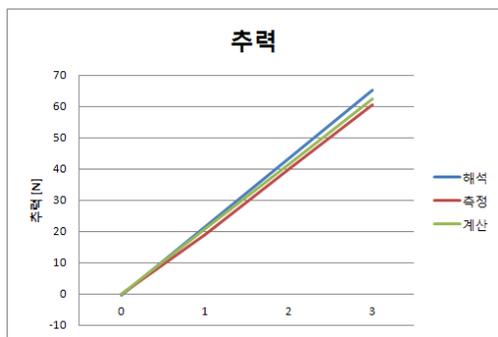


그림 14. 추력

Fig. 14. propulsion force

V. 결론

본 논문에서는 설계와 해석을 교육하는데 필요한

매체를 보이스코일 선형 액추에이터를 이용하여 설명하였다. 추력을 결정하기 위한 함수로 공극자속밀도를 계산하고 자속밀도를 만들기 위한 영구자석의 높이를 결정하였다. 그리고 추력을 만들기 위한 코일 턴수와 전류를 계산하였으며 yoke의 두께를 계산하고 설계된 선형 액추에이터를 3차원 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 해석하는 방법과 순서에 대하여 설명하였다.

측정값과 해석 값으로부터 공극의 자속밀도를 계산하는데 필요한 자기회로 보정상수 k를 구하였으며 이 값으로 향후 보이스코일 포스모터를 설계하는데 시행착오를 줄일 수 있게 되었다.

이 방법이 전기기기 설계를 교육할 때 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

- [1] "Simulationgestuetzter Entwurf elektro-magnetischer Linearaktoren fuer fluidtechnische Ventile." Thesis of RWTH Aachen University 2006.
- [2] "Elektromagnete", Kallenbach, Feindt, Vieweg +Teubner
- [3] "Magnetic Actuators and Sensors.", John R. Brauer, Willy Interscience,
- [4] "Linear electric Motors", Syed A. Nasar, prentice Hall, 1987
- [5] "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 리니어 액추에이터 설계제작 및 제어정수 도출" 전기학회 논문집 48B-5-3, 1988
- [6] "가동코일형 리니어 왕복 액추에이터의 동특성" Trans KIEE 49B-3-8, 2000
- [7] "Elektromechanik", Juergen Meins, B. G. Teubner Stuttgart 1997.
- [8] "Voice coil Actuators an Application Guide" BEI Technologies INC,
- [9] " Flux 2d/3d Users manual" 재우기술

박 창 순 (Chang Soon Park)

정회원



1976년 8월 : 중앙대학교 전기공학
과(공학사)

1986년 4월 : 베를린 공대 전기공
학과(공학석사)

1989년 11월 : 베를린 공대 전기공
학과(공학박사)

1990.3-1992.8 한국전기연구원 전기

기기 연구실 선임연구원

1992.9~현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학
부 교수

<관심분야> 전동기 설계, 액츄에이터 설계, 전기기
기 해석