

# CAE에 의한 Linear Motor의 계열화 설계

○ 조 경 재, \* 오 금 곤, \*\* 이 권 현

\* 동신대학교 전기전자공학과

\*\* 조선대학교 전기공학과

## Systematization Design of Linear Motor by CAE

○ Kyeng-Jai CHO, \* Geum-Kon OH, \*\* Kwon-Hyun LEE

\* Dept. of Electrical & Electronic Eng. Dongshin Univ.

\*\* Dept. of Electrical Eng. Chosun Univ.

### < Abstract >

In this work, we propose the algorithm of similarities and design parameters by which can have a design model employing the analogical inference analogy. The physical characteristics for the instrument model forms the foundation of the proposed method and are brought to researchers and designers which build the systematization design using a computer.

### 1. 서 론

기계 기구의 설계자나 개발자는 수요자로부터 기능, 가격, 제작 기간 등의 다양한 요구 사항에 접하게 된다. 이에 대한 개발이나 설계 방법으로는 여러 방법들이 있었지만 개발 제품의 표준 및 호환성, 공작상 공기의 단축, 가격 저하 등의 잇점을 우선적으로 요구하게 된다면 유사 이론을 적용한 계열화 설계기법 즉, 전산용 설계 시스템(CAE)에 의한 설계기법을 택할 수 있게 된다.

최근 들어서 저렴한 전산 시스템 및 그에 관련된 주변기기의 보급에 힘입어 CAE의 적용은 설계자나 개발자의 관심을 불러일으키고 있다. 특히 비행기, 군함, 고속전철 등 특수 대형 기기에 서부터 초정밀 기기 등에 대한 설계나 개발시 기본 모델을 선정하고 그로부터 분리적이고 기술적인 부분에 변이한 분석을 통해서 고유한 특성을 추출하고 이에 대해 유추론적 수학의 해석으로서, 추구하고자 하는 크기에 대한 특성 실험을 예측 할 수 있고, 최적 설계상의 데이터를 사전에 검증해 봄으로서 수요자가 요구하는 설계표본을 이끌어 낼 수 있다. 물론 유추해석을 적용함에 있어서 비 선형적인 요소인 제한 요소라 불리는 간접 매개체가 적용되고 있으나 이들 간접 매개체에 대해서는 단일 매개체 별로 유추해석에 의한 특성 해석의 보안이 요구된다.

본 연구에서는 설계자가 계산기를 이용한 계열화 설계에 있어서의 유추론적 알고리즘과 설계정수 및 제한 요소들의 처리 방법을 제시하고 각종 임의의 계열화, 개개에 대한 단계별 기능 및 기

술적인 데이터의 유도 과정을 선형 진동기(Linear Motor)를 모델로 선정하여 분석 하고자 한다.

### 2. 유사성 사고

선형 모터의 계열화 설계를 위해선 계열화 인자로서 추력, 속도, 전압, 전류, 저항, 감쇄정수 등에 대하여 분석하게 되는데 이들 인자를 기하학적 크기의 형태로부터 일부가 다른 파라메타로서 나타낼 수 있다.

그러나 동일한 종류이거나 제품 형태로서 공통 신상의 각 매개체는 한 틀 속에 닫혀진 처리 과정에서 계산되어지고 설계되어야 한다. 계열화 층에서의 기기 특성을 선정 하고자 한다면 일반적으로 기하학적인 분류급수, 즉 이미 제공된 모델 모터의 고유 특성을 하나의 구성요소로 삼아서 그 관계에 대한 급수를 확정 지은다.

$$\text{급수관계 } \varphi = \frac{GH_2}{GH_1} = \frac{GH_1}{GM} = \text{const.} \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $GH_1$  : 모델과 동일 특성의 계열화 기기 1

$GH_2$  : 모델과 동일 특성의 계열화 기기 2

$GM$  : 모델

그림 1은 선형 진동기에 대한 계열화 개발의 입·출력 관계 및 간접 매개체(방해요소 및 제한요소)에 대한 도사이다.

입력단의 크기는 전기적 에너지, 전기적 잡음(신호), 초기 운전 조건(주변 온도)으로, 그리고 출력단의 크기는 추력, 감쇄정수 등

에 따른 기계적 잠음, 에너지 손실에 의한 온도상승(따뜻한 공기)으로 나타낼 수 있다. 물론 이 관계가 정확하게 성립하려면 기계적 에너지(추력) 및 손실 에너지가 아주 정확하게 정의되어야 한다. 즉, 전체 Function에 대하여 처음부터 마지막 각 부분까지 유사이론이 보장되어야 한다. 그러기위해선 모델에 대한 4단자식 해석에 의한 선형적인 수학적 기술이 뒷받침 되어야 하며 모델과 개발품에 대한 유사성 과정은 전 항목에 걸쳐서 동일하게 취급되어야 한다. 일반적으로 모델과 모델을 적용한 개발품의 물리적 과정에 대하여 표현한 유사성 척도  $I^*$ 는

$$I^* = \frac{\text{모델을 적용한 개발품의 물리적 양}}{\text{모델의 물리적 양}} \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 임의척도  $I$ 의 계승(\*)으로 표시한다.

반약 모델과 개발품의 모든 파라메타가 동일한 factor 이고 분류급수가 완전한 선형적으로 증감될 수 있다면 개발품에 대한 물리적 현상과 수학적인 계산은 모델에 적용한 factor와 동일하게 기술되어야 한다. 전기적 소자인 저항이나 콘덴서와 기계적 부품(볼트, 너트)과 같은 단일 구조에 가까운 구성 요소를 위한 유사성 수학적 기술은 일반적으로 2단자식으로 정리가 가능 하지만 진동기, 변압기, 발전기 등 에너지 변환 기기와 같이 입력과 출력단의 변환 시스템을 표현 할 때는 4단자망 기술로 표현되어야만 한다. CAE기법에 의한 설계를 위해선 그림 1의 변환 과정에서 보는바와 같이 간접 매개체에 해당되는 재한요소 및 방해요소 등의 매체를 고려한 수학적 기술이 필수적으로 따라 주어야 한다. 물론 간접 매개체에 대한 수학적 기술은 별도의 매체 개체를 유사이론에 의한 척도( $I^*$ )를 산정하여 전동기의 전체적인 에너지 변환 시스템을 4단자망의 수학적 기술에 적용하도록 한다.

이를 위해선 설계정수의 데이터를 카다로그와 주 페키시화 한 후 유추론적 알고리즘을 이용한 프로그램과 연결하여 계열화 설계가 가능토록 한다.

그림2는 계열화 설계를 위한 프로그램 구성에 대한 블록도이다. 여기서 개념화는 모델의 에너지 변환 과정에 대한 수학적 기술을 말하며 다음 단계로 개념에 대한 구체적인 프로그램 작성을 위한 조건들(디멘션, 전류, 전압, 모멘트 등)에 추구하고자 하는 상대적 조건에 따른 값을 충족시켜 나간다. 이러한 과정이 완성되면 모델에 대한 계열화 단계에 맞는 값이 산출되고 이를 토대로 구체적인 데이터 정리와 프로그램의 완성이 실현된다. 이러한 과정을 단계별로 실현하는 과정에서 수학적 기술이 불가능한 경우 그래픽 데이터를 적용한 단계 급수에 따른 부분적 유사 이론을 조성하여 최종 프로그램을 완성토록 한다.

### 3. 선형 전동기의 설계정수 고찰

컴퓨터를 이용한 선형 전동기의 계열화 설계를 위해선 우선적으로 선형 전동기에 대한 구조적 특징 분석과 전기적, 기계적, 열

적 특성분석의 완료와 함께 이들 각 요소에 대한 유사 이론적 기술에 의한 유사성 척도  $I^*$ 를 산정하여 이를 토대로 CAE에 의한 계열화 설계를 완성한다.

#### 3.1 과제 설명

본 연구 과제의 모델로는 가동 코일형 선형모터(리니어 진동 액츄에이터)를 정하고 그 특성 및 구조 등에 대해서 유사 이론을 적용한 설계정수를 확정하고자 한다.

모델 모터는 영구자석 이자형이며 cup형 코일 가동자로서 빈원통형 연철의 함에 실린더형 영구자석이 고정되어 있고 영구자석 내경 안으로 cup형 코일 가동자와 cup형 코일 가동자 내에 자로를 형성하도록 순철 실린더로 형성되어 있다(그림3의 가동 코일형 리니어 액츄에이터 참조). 가동자 코일에 전류를 흐르면 가동자 코일은 프레밍의 원순법칙에서 추력  $F = BII$ 에 의해 이동하게 된다. 반대로 전류 방향을 바꾸어 주면 가동자 이동 방향은 반대로 된다. 이렇게 가동자의 전류 방향을 교대로 바꾸어 주면 가동자는 왕복 운동을 규칙적으로 계속 한다.

그림 4는 모델 모터에 있어서 입력측 2단자인 전압( $V$ ) 및 전류( $I$ )와 출력측의 가동속도( $v$ ) 및 추력( $F$ )의 2단자로 구성되어 4단자형을 이루고 있다.

손실로는 가동자 권선저항손실  $P_{cu}$ 가 발생되고 가동자 권선의 유도성  $L$ 의 크기는 전기적 시정수 ( $\tau_e$ )를 결정한다. 출력측의 마찰손 ( $P_f$ )와 가동자 철심에서 발생하는 철손 ( $P_{Fe}$ )이 발생된다. 이들 손실들은 유사이론을 적용한 4단자식 적용에 있어서 간접 매개체로 작용된다.

그림 5는 본 과제의 모델 모터에 대한 직접 파라미터로 표기된 공식을 전압 및 추력 방정식

$$V = B\ell v - (RI + L \frac{dI}{dt}) \dots\dots\dots (3)$$

$$F = (m \frac{dv}{dt} + D_v + C \int v dt) + BII \dots\dots\dots (4)$$

로 나타내고 있으며 이들 직접 파라미터는 계열화 개발 과정에서 간접 파라미터의 영향을 받아서 실제로는 선형적 변화가 이뤄지지 않는다. 간접 파라메타에 대한 발생 원인과 이를 선형적 함수로 변환시키기 위한 적용 방법을 기술하고 있다.

#### 3.2 유추론적 특성 고찰

가동자 코일에 전류  $I$ 가 흐름으로서 나타나는 가동자의 진동현상에 대한 유추론적 해석은 식(4)로부터 유도된다. 모델과 기하학적 유사성을 갖고 동일 재질로 구성된 새로운 개발 모터에 대한 유사성 척도는 다음식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$F^*/v^* = m^*/T^* = D^* = c^* t^* = B^*/v^* \dots\dots\dots (5)$$

스프링과 진동체 질량은 이질간의 수파수 관계를 결정하며 식 (5)의 변형식  $m^* f^* = c^*/f^*$ 은 유도하고 이로부터 고유주파수  $f_0$

$$f^* = \frac{C^*}{m^*} = f_0^* \dots (6)$$

감쇄정수 factor  $\delta$  (식 (5)의 변형식)

$$f^* = \frac{D^*}{m^*} = \delta^* \dots (7)$$

여기력  $F(m^* f^* = F^*/v^*$  식과  $v^* = f^* l^*$ 로 부터)

$$F^* = f^{*2} \cdot m^* \ell^* \dots (8)$$

등을 구하게 된다.

만약 가동자의 진동 주파수가 일정하도록 설계되어야 한다면  $f^* = 1$ 로 설정되어야 하고 위의 식의 (6), (7), (8)로부터  $f^* = 1$ ,  $D^* = 1$  과  $F^* = m^* l^*$  이 되어야 한다.

즉 이 의미는 모델과 동일한 재료와 디멘존의 비가 기하학적으로 변하게 된다면 이때 발생하는 추력  $F^* = l^{*4}$ 의 유사성 척도량을 갖게 된다. 그러나 식 (6)의 스프링 강직계수  $C^*$ 는 소형화의 경우에는 재료 및 가공상의 한계점에 의해 완전 유사성을 보장하기엔 어려움이 있다. 그러므로  $f^* = 1$  대신

$$f^* = \sqrt{\frac{C^*}{m^*}} = \frac{i}{l^*} \sqrt{\frac{E^*}{\zeta^*}} \text{ 식을 적용하여 구하도록 한다(여기서}$$

$E^*$  = 탄성계수,  $\zeta^*$  = 체적밀도). 또한 감쇄정수  $D^*$ 는 축의 마찰, 철심의 와류손, 가동자의 공기저항 등으로부터 발생하는 함수로서 기계손, 와류손, 저항 등의 factor에 대해 개별적으로 유사성 척도  $l^*$ 를 구한 다음 graphic의 프로그램을 통해 전체 시스템에 적용토록 한다.

정상속도에 이르기까지의 기계적 시정수  $\tau_m$ 은 식(5)로 부터

$$m^* v^* l^{*2} = B^* l^* l^* \dots (9)$$

식 (9)를 만들고 이 식으로부터  $\tau_m = m^* v^* / B^* l^* l^*$ 가 된다.

만약 정상속도  $v^* = 1$  인 경우라면 기계적 시정수

$$\tau_m = \frac{l^{*3}}{B^* l^* l^*} = l^* B^{*-1} l^{*-1} \dots (10)$$

이 된다. 식(10)에서 모델에 사용한 재료와 동일한 재료를 사용한다면  $B^* = 1$  이며  $l^* = V^*/R^* = V^* l^*$  로서 정상속도  $v^*$ 가 일정하려면  $l^* = l^*$  가 된다.

식(10)에  $l^* = l^*$ 를 대입하면 기계적 시정수

$\tau_m = l^{*2} \cdot l^{*-1} = l^*$ 로 모델 모터를 소형화 경우  $l^*$ 에 비례한 짧은 시간내에 정상속도에 도달하고 대형화 할 경우 그에 비례하여 더 많은 시간을 요구하게 된다.

### 3.3 네이더 및 그래픽화

유사이론은 일반적으로 주어진 모델의 소형화나 대형화 하고자 할 때 그들의 특성 및 기술상의 한계점을 규명하는데 접해 이용할 수 있다. 특히 유사성 척도  $l^*$ 를 통해서 데이터로 또는 그래픽으로 판별할 수 있도록 컴퓨터 모니터상에 나타낼 수 있도록 프로그래밍하여 숙련된 개발자가 아니더라도 모니터상의 프로그램을 임의로 수정해 가면서 그 결과를 신속하게 판독하고 처리할 수 있게 된다.

그림 6은 컴퓨터 모니터상의 프로그램 일부를 보여주고 있다.

그림 6의 화면이 모니터상에 사라지고 다시금 다음 그림 7과 같은 데이터가 화면에 나타난다. 유사성 척도를 이용한 성장 법칙에 따라 추력  $F$ 를 그래픽으로 표현하면 그림 8과 같다. 모델 모터의 추력  $F = 2N$  일 때 소형화 및 대형화의 단계별 추력은  $l^{*4}$ 에 비례하는 크기임을 쉽게 알 수 있겠고 이로부터 모터를 구성하는 다른 파라미터에 대한 한계점을 판정할 수 있다.

### 4. 결 론

이성에서 밝힌바 와 같이 컴퓨터 응용의 설계법(CAE)으로 유사해석이 가능함을 구현하고자 하였으며 이의 결과에 의한 예상 크기의 기기에 대한 특성을 예측할 수 있었다.

그러나 항상 문제점으로 지적될 수 있는 간접 매개체에 해당되는 부분에 대하여 좀 더 많은 데이터 확보 및 분석이 요구되며 한 기종에 대한 계속적인 자료 수집과 그들에 대한 별도의 카다로그를 작성하여 Data base화 한다면 다양한 프로그램으로 오차의 범위를 좁힐 수 있다고 본다.

실제로 기기를 제작 실험하지 못하였기에 이론적인 과정만을 밝힌 점이 아쉽지만 추후 계열화 기기 제작으로 실험의 결과를 밝히고자 한다.

이 연구는 동신대학교 1994년도 교내 학술연구조성비 지원에 의한 것임

### <참고문헌>

1. Bridgman, P. W., "Dimensional Analysis," Yale University Press London, 1931.
2. Gerhard, E., Entwickeln und Konstruieren mit Systemwege zur rationellen Lösungsfindung, Expert-verlag Grafenau/Wurt, 1979.
3. Lee, K. H., "Grenzen der technischen Miniaturisierung von Permanentmagnetischen erregten Gleichstromkleinstmotoren mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie," Universität-Duisburg, 1985.

- Klamt, J., *Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen*, Springer-verlag Berlin/Gottingen/Heidelberg, 1962.
- Akuta, T., An application of giant magneto strictive material to high power actuators, *Proceeding of the tenth International Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications( I )*, Kyoto, Jappan, 1989.
- Rummich, E., *Gleichstrom linear motor*, *Elektrie*. Berlin 42 1988. 11.
- Kondou, K., "Development of PM linearmotor for the next generation high speed railways," *Symposium on Speedan* June 1994.

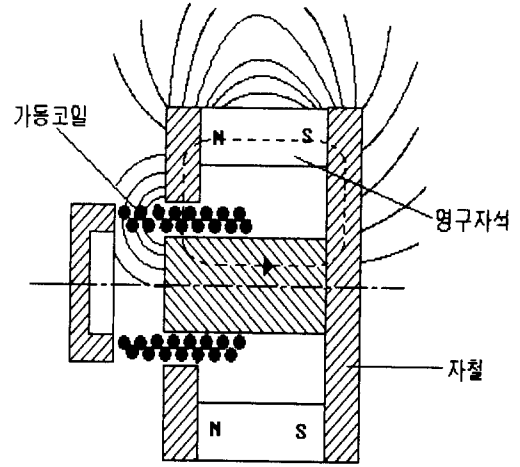


그림3. 가동코일형 리니어 액츄에이터

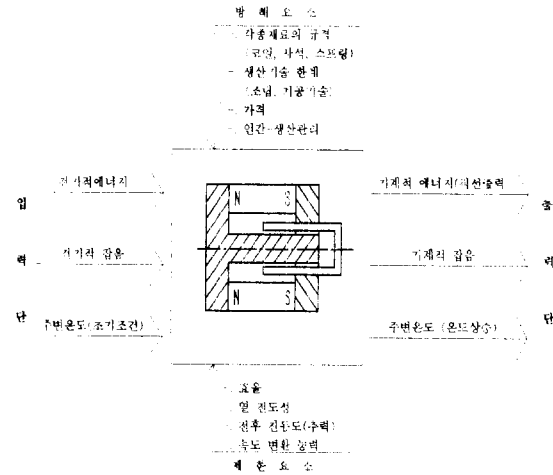


그림1. 선형전동기의 입출력 관계 및 간접 배제

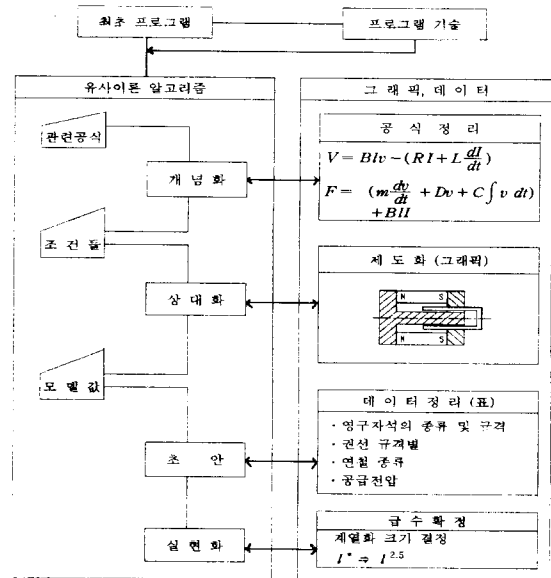


그림2. 개월화 설계 프로그램 구성에 대한 블록도

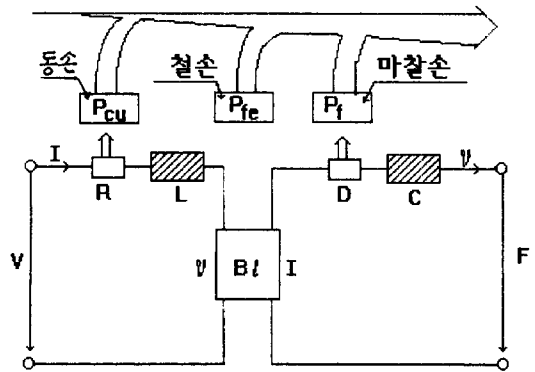


그림4. Linear Motor의 4단자 구성

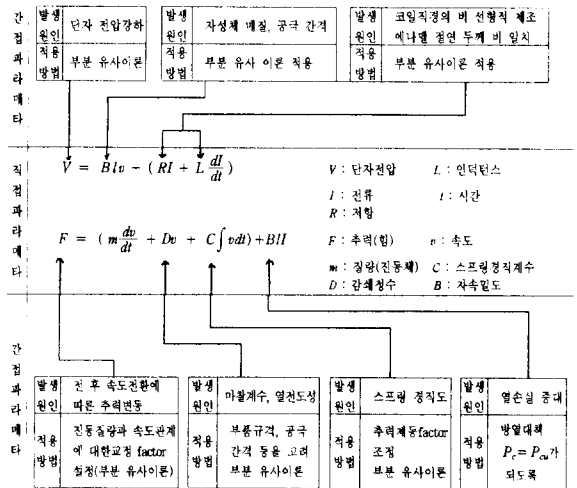


그림5. 간접 파라미터의 발생원인 및 유사이론의 적용 방법

유사이론 범칙중 추력 F :

$$F^* = f^* \cdot m^* \cdot l^*$$

모터 크기에 따른 추력의 데이터를 원하십니까 (y/n)? y  
 위 식중 어느 항목을 일정하도록 하고 싶습니까? 2

1. l
2. f

모델의 추력을 기입하십시오.

모델의 추력 F (숫자만 기입) ? 2

(단위)? N

몇 단계의 크기까지 계산하고 싶나요? 5

그림6. 개발 모터의 추력을 산정 하고자 하는 프로그램

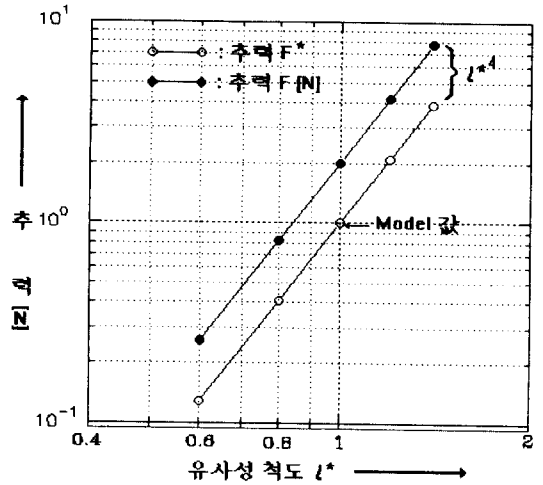


그림8.  $f^* = 1$  일 때 추력(F)에 대한 그래픽 산도

개발 모터 추력에 따른 추력 F

모델의 크기  $F = 2N$

유사성척도  $F^* = l^{*4}$

급수( $\varphi$ )	크기( $l^*$ )	추력( $F^*$ )	추력/(N)
$k_2$	0.6	0.1296	0.2592
$h_1$	0.80	0.4096	0.8192
$M$	1.00	1	2
$H_1$	1.20	2.0736	4.1472
$H_2$	1.40	3.8416	7.6832

그림7. 개발 모터의 5단계 크기에 따른 추력 특성 데이터