

Systematization Design of a Differential Transformer by Analogical Analysis

趙慶宰* · 車仁洙** · 李權鉉***
(Kyeng Jai Cho · In Su Cha · Kwon Hyun Lee)

Abstract - We introduce the systematization design method using analogical analysis. The design method can make us predict the characteristic experiment for the magnitude we desire as the expression equation applied continuously. We can induce the design sample the users demand with the verification of the data on optimum design previously. Therefore, in case of designing and developing the products, systematization design method is very useful for the standardization of the developed goods, compatability, the reduction of construction time and price. In this paper, we present the analogical, algorithms of systematization design using similarity theory, design factors and processing method of the restriction factors. Also, we analyze the output voltage in terms of input voltage and displacement as choosing a differential transformer as the model.

Key Words : Dfferential transformer, Similarity theory, Systematization design, Analogical analysis

1. 서 론

국제 무역정책의 개방으로 국가간의 경쟁은 더욱 치열하게 진행되고 있으며 제품의 저가격화, 소형화, 경량화, 고품위화로의 요구가 더욱 강해지고 있다. 설계자나 개발자는 수요자로부터 제품의 기능, 가격, 공작기간 등 다양한 요구 사항에 접하게 된다. 제품의 고품위화를 위해서는 재료에 대한 문제점, 제작기술의 향상, 설계방법 등을 고려하여야 한다. 그 중 제품의 표준화 및 호환성, 공기의 단축, 가격저하의 잇점을 갖는 설계방법으로 유추해석에 의한 계열화 설계기법을 택할 수 있다.

계열화 설계기법은 비행기, 군함, 고속전철과 같은 대형기 기에서부터 전자기기 등 초정밀 기기에 대한 설계나 개발시, 표본 모델을 선정하고 단계적으로 소형화나 대형화 시킬 때 사전에 기기의 특성을 예측할 수 있는 설계기법으로서 기기의 특성을 물리적이고 기술적인 측면에서 면밀한 분석을 통하여 고유한 특징을 추출하고, 이에 대한 유추론적 수학의 해석으로서 추구하고자 하는 크기에 대한 특성 실험을 예측할 수 있고 최적 설계상의 데이터를 사전에 검증하므로써 수요자가 요구하는 설계 표본을 이끌어 낼 수 있다[1-3].

유추해석에 의한 계열화 설계는 연속적으로 반복하여 적용되는 알고리즘의 표현식을 이용하고 있다.

본 논문에서는 설계자나 개발자가 동일한 설계 및 제조기술에 바탕을 둔 제품의 표준화로 국제화 규격에 쉽게 적용할 수 있고, 그로인한 가격 경쟁의 장점을 지닐 수 있는 유추해석에 의한 계열화 설계 방법에 대하여 연구하였다. 그 응용 예로서 차동변압기를 선정하여 모델에 대하여 길이척도 $l^* = 0.6$ 배로 소형화 했을 때 모델과 실행 차동변압기에 대하여 인가전압을 1[V]~7[V]로 증가시키고, 변위를 3mm 씩 증가시켰을 때의 출력전압값을 비교하여 계열화 설계가 가능함을 살펴 보았다.

2. 계열화 설계 및 유사이론

유추해석에 의한 설계 기법은 사전에 주어진 과제로부터 모델을 선정하고, 선정된 모델에 대하여 크기와 물리적이고 기술적인 경계조건 등에 대해 구체적으로 분석한다. 이 분석으로부터 계열화 설계를 위한 유추해석의 가능 여부를 정리한 후, 기기의 변환시스템을 입·출력으로 나타낼 수 있는 4단자 방식으로 유도하여 유사이론을 적용하고 유사성척도 l^* 를 산정한다. 산정 결과는 요구조건을 충분히 반영시킬 수 있는가에 따라서 시작품을 제작하는 과정으로 옮기거나 그러지 못할 경우 부분적 유사성을 이용하여 재검토하는 과정을 거치도록 한다. 계열화 설계를 위한 유사성 척도에 관한 식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$l^* = \frac{\text{개발 모델의 물리적 크기}}{\text{모델의 물리적 크기}} \quad (1)$$

그림 1은 유사이론에 의한 제품 설계에 대한 흐름선도를

* 正 會 員 : 東新大 電氣電子工學科 博士課程 修了
 ** 正 會 員 : 東新大 電氣電子工學部 副教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 潭陽大 電氣電子通信工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2000年 4月 28日
 最終完了 : 2000年 8月 21日

나타내고 있다. 설계자나 개발자가 서로 다른 크기, 주파수, 출력이나 이외의 다른 파라미터를 가지고 차동변압기의 생산을 위해 같은 작업 공정상에서 동일한 물리적 현상으로 설계하기 위한 기술적 시스템은 대부분 설계 요소로서 요약할 수 있다. 유추해석에 의한 계열화 설계 방법을 적용하는 데는 모델에 대한 규격 및 특성에 대하여 아주 정확하고 구체적인 수학적 기술이 가능하여야 한다.

그러나 수학적 기술이 불가능한 설계 파라메타인 간접매개체(제한요소, 방해요소)는 별도의 해설문이나 그래픽 데이터를 참고한 단계적 급수로 부분적 유사이론을 이용하여 최종 프로그램을 실현토록 한다[5,6].

3. 차동변압기의 설계 및 실험적 고찰

3.1 구조

차동변압기는 코일의 상호 유도 작용을 이용하여 가동축의 변위에 비례하여 유도되는 전기량으로 변환하는 장치, 즉 기계적 변위를 전압으로 변환 시키는 장치이다. 본 논문에서는 모델 차동변압기와 모델 차동변압기를 유사성 길이 척도 $l^* = 0.6$ 으로 소형화 한 실험 차동변압기의 출력 전압에 대한 특성을 분석하였다.

그림 2는 본 실험에 이용된 모델 차동변압기의 설계정수를 나타내고 있다.

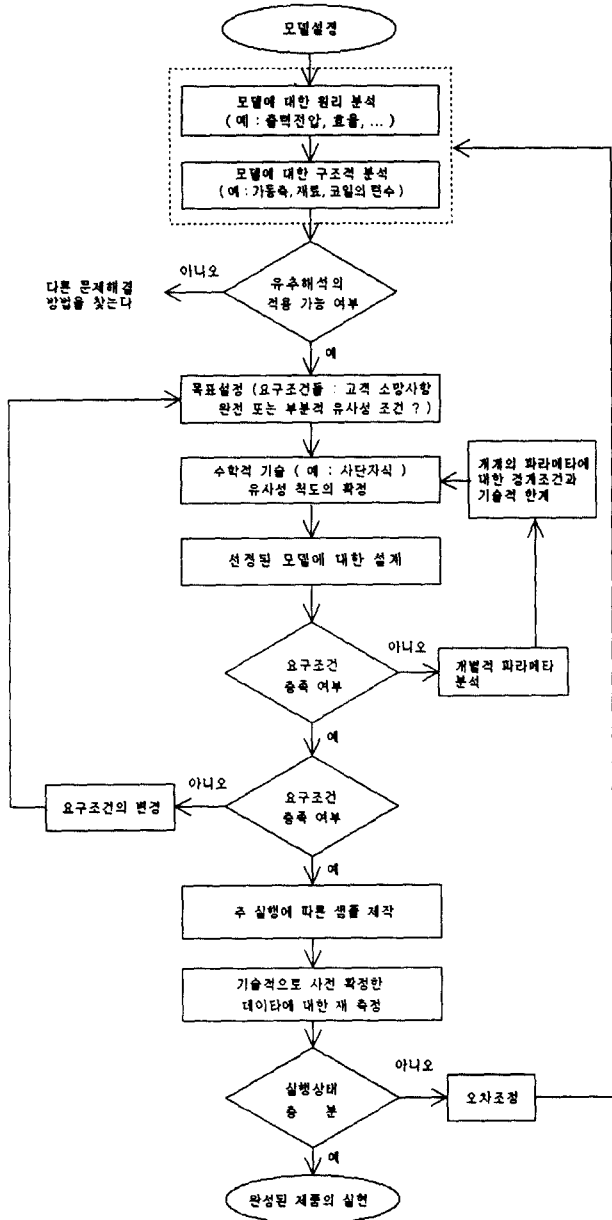
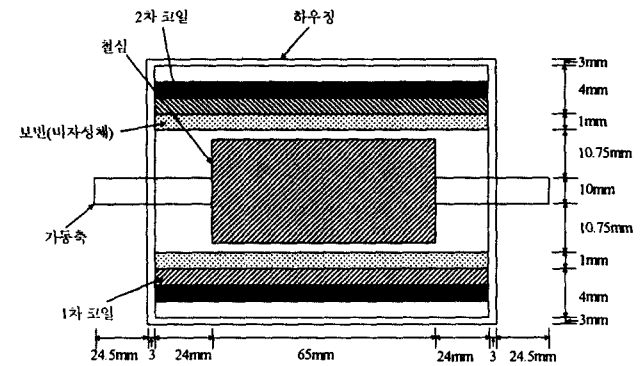
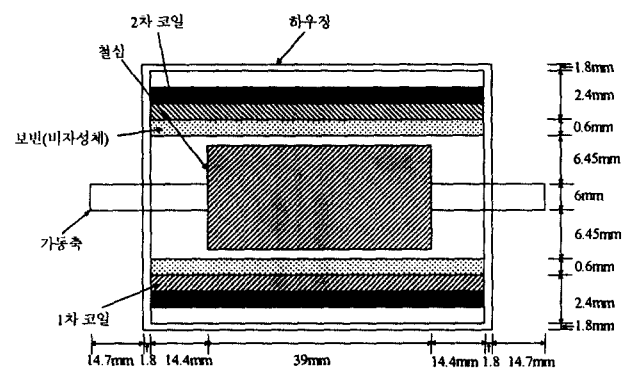


그림 1 제품설계 흐름선도
Fig. 1 Flowchart for product design

계열화 설계는 수학적 기술이 가능한 설계정수와 그 기술이 불가능한 설계 정수로 구분 되어져야 한다. 수학적 기술이 가능한 파라메타는 유사이론 알고리즘을 통해 개개의 현상을 프로그램화 하여 이들 프로그램이 전체적인 시스템에 적용될 수 있도록 제작 되어야 한다.



(a) 모델



(b) 실험

그림 2 차동변압기의 구조

Fig. 2 Structure of the differential transformer

1차코일과 두개의 2차 코일, 비자성체인 보빈 및 가동철심으로 구성되어 있다. 기계적인 변위 ($\pm x$)에 의해 1차 코일과 두 개의 2차 코일 사이의 상호 인덕턴스가 변화하게 된다. 이 상호인덕턴스에 의해서 2차 코일에 유도되는 전압의 차가 발생하는 것을 이용하고 있다.

3.2 원리

그림 3은 차동변압기의 기본 회로를 보여주고 있다.

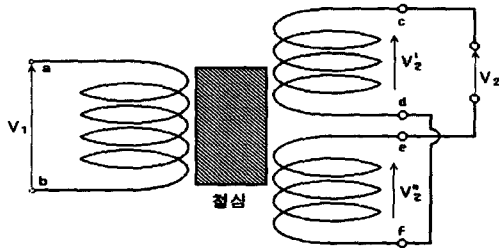


그림 3 차동변압기의 기본원리
Fig. 3 Basic principle of the differential transformer

1차 코일의 단자 ab에 교류전압 V_1 를 인가 했을 때 2차 코일에 전압이 유기 되는데 이는 단자 cd 및 ef간에 2차 전압 V_2' , V_2'' 의 차를 이용하여 전압 V_2 를 유도해 낸다. 여기서 2차 코일의 양쪽 권수를 똑같이 하고, 철심이 중앙에 있을 때는 1차 코일과 두개의 2차 코일 사이에 나타나는 상호 인덕턴스 M_1 , M_2 는 동일하므로 단자 cd, ef에서 유기되는 전압 V_2' , V_2'' 가 같게 되어, 2차 전압은 cd, ef 단자의 유기전압의 차(즉 $V_2 = V_2' - V_2''$)에 의해서 0이 된다. 그렇지만 코어가 cd 단자 쪽으로 변위하면, $M_1 > M_2$ 로 되어 코일 cd 단자 전압 V_2' 가 증가하고 코일 ef 단자 전압 V_2'' 가 감소한다. 그리고 가동코어를 좀 더 움직여서 코어의 위치가 단자cd 중앙위치로 일치 하였을 때, M_1 은 최대, M_2 는 최소가 되어 단자 cd 전압 V_2' 는 최대로 되고 단자 ef 전압 V_2'' 는 최소가 되어 이들 차에 의한 2차전압 V_2 는 최대가 된다.

그림 4는 차동변압기의 특성 해석을 위한 4단자망 회로도이다.

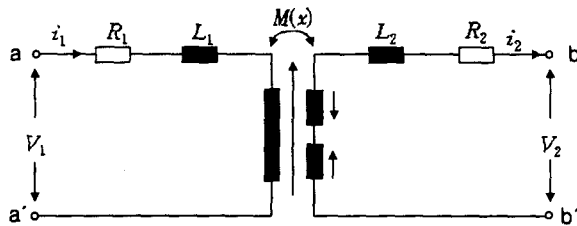


그림 4 차동변압기의 4단자회로
Fig. 4 Four port circuit of the differential transformer

그림 4의 a-a'와 b-b' 단자간으로부터 아래의 4단자망 식으로 표현할 수 있다[7].

$$V_1 = \left(R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \right) - M(x) \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$V_2 = M(x) \frac{di_1}{dt} - \left(R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \quad (3)$$

3.3 유추론적 특성 해석

가동축의 변위에 따른 2차측 코일의 유도 전압 또는 전류를 측정하여 측정 기기 개발에 응용함이 목적인 차동 변압기의 2차측 코일에 계측 장치(예, 오실로 스코프 등)만을 연결하므로 보통 무부하 조건으로 해석한다. 2차측은 무부하가 되므로서 2차 전류에 의한 여자 반응은 생략할 수 있다. 그러므로 2차측 전류 i_2 값은 0이므로 식(2), (3)은 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$V_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

$$V_2 = M(x) \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

1차측 코일의 자기인덕턴스 L_1 은 가동자의 위치 변환 x 에 종속되지 않는다. 만약 주어진 모델 변압기를 아주 소형화 하고자 한다면 가동자의 운동거리 x 역시 소형화 비에 비례하여 미소거리가 된다. 소형화 시 2차측의 전기적 신호량(V_2)이 모델의 2차측 신호량에 예외 없이 비례적으로 변화해야 한다면 실행 차동변압기는 가능한 한 모델과 동일한 재료로 구성되어야 하며 축소 규격 역시 기하학적 단계로 변형되어야 할 것이다. 같은 의미에서 식(4)와 (5)의 1차 및 2차 전압에 대한 유사성 척도는 다음식(6), (7)로 표현된다.

$$V_1^* = R_1^* i_1^* + L_1^* \frac{di_1^*}{dt^*} \quad (6)$$

$$V_2^* = M^*(x^*) \cdot \frac{di_1^*}{dt^*} \quad (7)$$

식(7)은 가동자의 이동으로 인하여 2차측 전압 V_2 와 여자 전류 크기 i_1 과의 관계를 유추해석에 의해 분석할 수 있다.

그림 5는 초소형 차동 변압기의 규격에 따라 상호 인덕턴스 $M(x)$ 및 자기인덕턴스 L_1 을 선정하는 식(8)과 (9)에 대한 설명도이다.

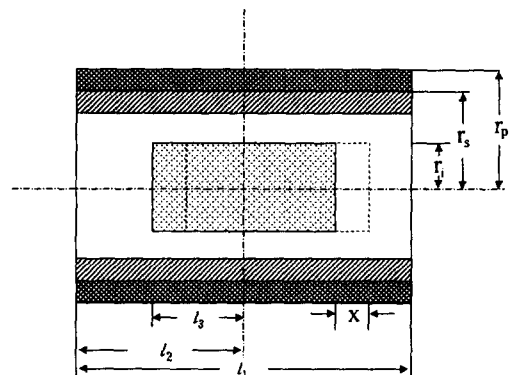


그림 5 차동변압기의 초소형화 규격
Fig. 5 Standard of a subminiature differential transformer

초소형의 차동변압기 코일에 나타나는 상호 인덕턴스 $M(x)$ 와 자기 인덕턴스 L_1 는 식(8), (9)와 같이 기술하고 있다[7].

$$M(x) = \sqrt{k \cdot \frac{4\pi^2 \cdot N_2^2}{l_2^2} \cdot L_1 \cdot \frac{r_1^2(\mu-1)}{\sqrt{l_2 \cdot r_s^2 + l_3 \cdot r_i^2(\mu-1)}} \cdot x} \quad (8)$$

$$L_1 = k_p \left[\frac{4\pi^2 N_1^2}{2l_3} \left(\frac{2l_3}{l_1} \right)^2 \cdot (r_p^2 - r_i^2 + \mu r_i^2) + \frac{4\pi^2 N_1^2}{(l_1 - 2l_3)} \cdot \frac{(l_1 - 2l_3)}{l_1} \cdot r^2 \right] \quad (9)$$

여기서, μ : 가동자의 투자율
 k : Nagaoka 상수
 k_p : 교정 인자(코일길이 : 코일 반경)

식(6)에서 저항의 유사성 척도는 식(10)과 같이 표현된다.

$$R_1^* = \rho_i \frac{N_1 r_p^*}{d_c^2} \quad (10)$$

여기서, ρ_i : 고유저항 값
 N_1 : 권선 수
 d_c : 도체의 직경
 r_p : 철심 코일 반경

식(6)과 (7)에서 $\frac{1}{l^*}$ 의 크기(여자전류 i_1 의 주파수에 대한 유사성 척도)는 식(11)과 같다.

$$\frac{1}{l^*} = \omega_{EL} \quad (11)$$

완전히 기하학적 유사성이 성립되는 조건하에서 인덕턴스 L_1^* 은 식(12)와 같다.

$$L_1^* = k_p^* \cdot N_1^{*2} \cdot l^* = N_1^{*2} \cdot l^* \quad (12)$$

유사성 척도에 의한 여자전류의 주파수 ω_{EL} 은 식(6)으로부터 다음식(13)과 같다.

$$\omega_{EL}^* = \frac{1}{l^*} = \frac{R^*}{L^*} = \frac{N^*}{l^*} \cdot \frac{1}{N^{*2} l^*} = \frac{1}{N^* l^{*2}} \quad (13)$$

여기에서 재질과 코일의 턴수를 일정하게 하였으므로 고

유저항과 턴수는 각각 $\rho_1^* = 1$, $N_1^* = N_2^* = N^*$ 가 되므로 식(8)의 상호 인덕턴스의 M^* 은 식(14)와 같다.

$$M^*(x^*) = N^{*2} \cdot x^* \quad (14)$$

완전 동일 재질로 설계되었다면 $\mu^* = 1$ 이 적용 되므로 가동자의 이동에 의해 유도되는 2차전압 V_2^* 는

$$V_2^* = N^{*2} \cdot x^* \cdot \frac{i_1^*}{l^*} \quad (15)$$

이다. x 는 가동자 이동 거리로서 거리의 유사성 척도 $x^* = l^*$ 가 된다. 소형화 제품도 2차 유기전압이 모델 제품과 일치되는 값을 유지하고자 한다면 $V_2^* = 1$ 이 되어야 한다. 즉,

$$V_2^* = N^{*2} \cdot l^* \cdot \frac{i_1^*}{l^*} = N^{*2} \cdot l^* \cdot i_1^* \cdot \omega_{EL}^* = 1 \quad (16)$$

이로부터 식(16)은 $N^{*2} \cdot l^* \cdot i_1^* \cdot \frac{1}{N^* l^{*2}} = 1$ 과 같으므로 이때 1차 전류에 대한 길이척도 $i_1^* = \frac{l^*}{N^*}$ 에 비례하여 변한다. 식(6)의 입력식은 위의 각 함수에 대한 길이척도 결과치를 대입 하므로써 식(17)과 같이 표현된다.

$$V_1^* = R_1^* \cdot i_1^* = \frac{N^*}{l^*} \cdot \frac{l^*}{N^*} = 1 \quad (17)$$

식(17)은 모든 요소들이 기하학적 단계로 계열화가 이뤄진다면 1차측 주파수는 항상 일정하며 그로 인하여 2차측 주파수 변화에도 일정하게 영향을 미친다. 그러므로 가동자의 이동 변위에 의한 2차측 전압의 민감성 계수 k^* 는 식(18)과 같다.

$$k^* = \frac{\Delta V_2^*}{\Delta x^*} = N^{*2} \cdot \frac{i_1^*}{l^*} = N^{*2} \cdot \frac{l^*}{N^*} \cdot \frac{1}{N^* l^{*2}} = l^{*-1} \quad (18)$$

이상에서의 유사성 이론에 의한 소형화 고찰에서의 각 변환자에 대한 유사성척도를 시각적 표현이 용이하도록 모델에 대한 각 성분의 유사성척도는 그림 6과 같다.

그림 6은 입력전압이 일정하도록 설계했을 때 차동변압기의 전기적인 각 성분에 대한 유사성척도를 나타낸 것이다. 2차측 전압 V_2^* 는 모델을 아무리 소형화, 또는 대형화 하더라도 항상 일정함을 알 수 있으며 가동자의 이동 변화에 의한 2차측 전압의 민감도(예민성)은 l^{*-1} 에 비례하므로 소형화 할수록 위치변화에 대하여 대단히 예민하므로 오차 유발도가 높게 된다.

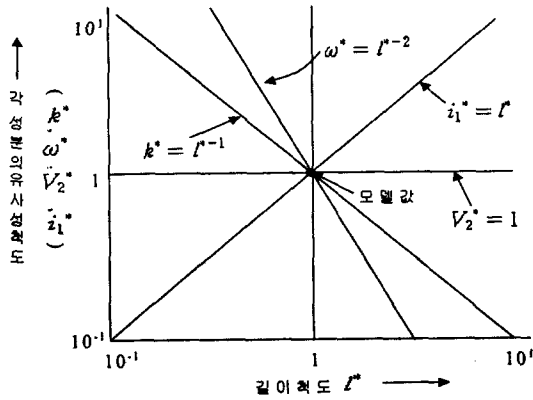


그림 6 $V_1^* = 1$ 일때 모델에 대한 각 성분의 유사성 척도
Fig. 6 Similarity factor of each element for the model as $V_1^* = 1$

그림 7은 본 실험에 이용된 모델 차동변압기와 실험 차동 변압기($l^* = 0.6$)에 대한 그림이다.

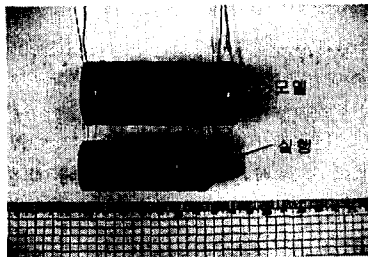


그림 7 모델과 실험 차동변압기
Fig. 7 A model and actual differential transformer

4. 실험고찰 및 분석

그림 8은 차동변압기의 변위에 따른 출력전압의 유도를 위한 실험 장치를 나타내고 있다. 마이크로 미터를 이용하여 $\pm x$ 변위를 3mm씩 변화가 가능하도록 하였으며, 보빈위에 가동철심과 변위쪽에 해당되는 부분에 코일이 감겨져야 하기 때문에 1차 코일의 턴수를 88회, 2차코일의 턴수를 각각 79회로 제작 하였다. 1차 전원의 주파수를 60[Hz]로 고정 하였으며 1[V]부터 7[V]까지 전압을 가변 시키면서 2차 전압을 측정하였다.

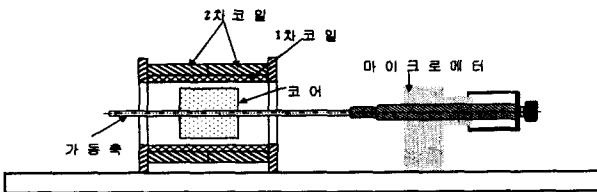
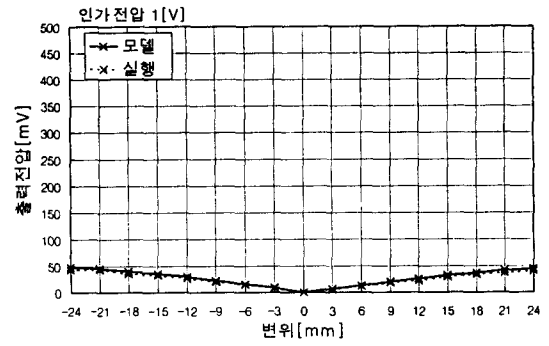


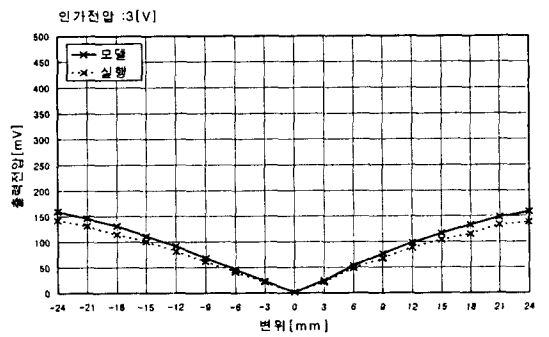
그림 8 차동변압기에 대한 측정장치
Fig. 8 Measuring set for the differential transformer

그림 9는 모델과 실험 차동변압기의 인가 전압과 가동자의 변위를 달리하면서 측정한 출력전압의 파형이다. 실험 제품의 입력전압과 가동축의 변위를 증가시켰을때 출력전압은 증가하였다. 각 전압에 따른 가동 코어가 중앙에 위치했을 때 최소 전압이 나타났으며 변위를 크게 했을 때 전압은 변위에 비례하여 증가함을 알 수 있으며 최대 변위 부근에서는 증가 비율이 약간 감소함을 살펴볼 수 있었다. 이것은 모델을 소형화로 시작품 제작시 각 부품이 정확하게 유사성척도 $l^* = 0.6$ 으로 제작 및 조립이 이뤄지지 못했기 때문으로 생각된다.

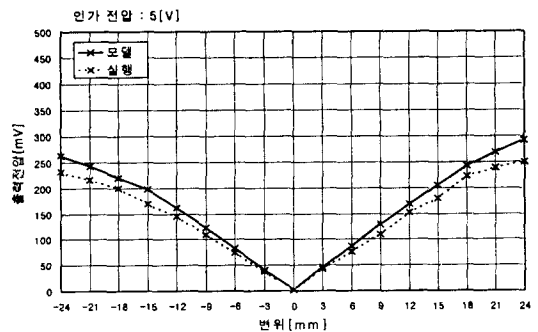
또한, 소형화로 실행시킨 차동변압기의 가동축의 변위와 인가전압에 따라 증가하는 비율은 모델 변압기에 비하여 2차 전압의 증가 비율은 약간씩 감소됨을 알았다. 이는 실험 변압기의 소형화시 1차 및 2차의 코일의 직경 및 소형화 비가 완전하지 못하여 코일의 저항이 증가함에 따라 유도 기전력의 값이 적어졌기 때문이다.



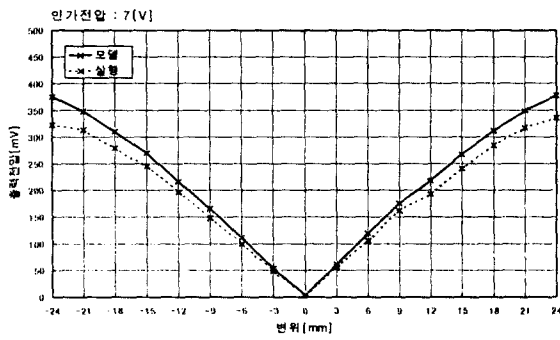
(a) Input voltage 1[V]



(b) Input voltage 3[V]



(c) Input voltage 5[V]



(d) Input voltage 7[V]

그림 9 입력 전압과 변위에 따른 출력 전압

Fig. 9 Output voltage with respect to input voltages and displacements

5. 결 론

본 논문에서는 기기의 설계방법으로 유추해석을 이용한 계열화 설계기법에 대하여 고찰하였고, 실제 차동변압기를 모델로 선정하여 유추해석에 의한 설계 방법을 연구하였다. 모델과 실험 차동변압기의 인가전압과 가동축의 변위에 따라 나타나는 출력전압의 관계에 대하여 분석하였다. 즉, 이론적 분석에 의하면 인가 전압이 동일한 경우 각각 변위에 따라 측정 전압이 일정하게 나타나는 결과였으나 측정결과 약 10% 정도의 오차가 발생하였다. 또한 각 전압에 따른 가동철심이 중앙에 위치했을 때 최소 전압이 나타났으며, 최대 변위 부근에서는 증가 비율이 약간 감소함을 살펴볼 수 있었다. 이것은 모델을 소형화로 제작시 각 부품이 정확하게 유사성 척도에 의해 0.6배로 제작 및 조립이 이루어지지 못하였기 때문이다. 본 연구에서는 모델 차동변압기를 소형화 하여 입력전압과 가동자 변위에 따른 출력전압에 대해서 분석하였는데 향후 모델의 대형화 및 2차 코일의 증가에 따른 출력전압과 그림6에서 보여주듯이 1차 전류와 주파수의 변화에 따른 특성값의 분석을 통하여 전기기기의 계열화 설계시 고려되어야 할 문제점에 대하여 연구하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] E. Mayer, J. Eckhardt, "Vorgehensweise bei der Einführung eines CAD systems", Der konstruktur, pp. 6-14, H. 4, 1985
 [2] E. Gerhard, "Baureihendenken in der Feinwerktechnik", Feinwerktechnik Messtechnik 88 H. 8, pp. 411-413, 1980
 [3] G. Phal, W. Beitz, 'Engineering Design', Springer, 1996
 [4] K-H, Lee, "Grenzen der technischen Miniaturisierung von permanentmagnetischen erregten Gleichstromkleinstmotoren mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie," Universität Duisburg, 1985

[5] 조경재, "CAE에 의한 액츄에이터의 계열화 설계기법 및 개발," 동신대학교, 석사학위논문, 1997
 [6] G.W. Hart, 'Multidimensional Analysis', Springer Verlag, 1995
 [7] R. Feldtkeller, "Theorie der Spulen und Übertrager", S. Heirzel Verlag Stnttgart, 1971

저 자 소 개



조 경 재 (趙慶宰)
 1969년 10월 28일생. 1995년 동신대학교 전자공학과 졸업. 1997년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2000년 8월 동대학원 전기전자공학과 박사
 Tel : 061-330-3209, Fax : 061-330-2909
 E-mail : choecono@hanmail.net



차 인 수 (車仁洙)
 1959년 8월 6일생. 1982년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1984년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 조선대학교 대학원 전기공학과(제어계측) 졸업(박사). 1997년 9월~1997년 11월 독일Darmstadt 방문 연구교수. 2000년 7월 ~2000년 8월 일본동경농공대 중견과학자 방문연구교수. 현재 동신대학교 전기전자공학부 부교수
 Tel : 061-330-3206, Fax : 061-330-2909
 E-mail : ischa@white.dongshinu.ac.kr



이 권 현 (李權鉉)
 1950년 4월 24일생. 1985년 서독 Duisburg 대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1985년~1987년 2월 삼성전자 부품(주) 종합연구소 책임연구원. 1990년 6월~1991년 9월 서독 Aachen대학교 객원교수. 1994년 일본 무사시공대 객원교수. 1987년 3월~1998년 1월 동신대학교 전기전자공학과 교수. 1998년 2월~현재 전남도립담양대학 전기전자통신공학부 교수
 Tel : 061-380-8631, Fax : 061-380-8426
 E-mail : khlee@damyang.damyang.ac.kr