

유사이론을 적용한 리니어 액츄에이터의 계열화 설계기법

趙慶宰, 車仁洙, 李權鉉

Systematization Design Technique for Linear Actuator by using similarity theory

Kyeng-Jai Cho, In-Su Cha, Kwon-Hyun Lee

요 약

기계기구의 설계나 개발시 개발제품의 표준화 및 호환성, 공기의 단축, 가격저하 등의 잇점을 갖는 유사이론을 적용한 계열화 설계기법을 소개하고자 한다. 계열화 설계기법은 대형기기에서부터 초정밀 기기 등에 대한 설계나 개발시 표본 모델을 선정하고 단계적으로 소형화나 대형화 시킬 때 미리 기기의 특성을 유추할 수 있는 설계기법으로서 기기의 특성을 물리적이고 기술적인 부분의 면밀한 분석을 통해서 고유한 특징을 추출하고 이에 대한 유추론적 수학의 해석으로 추구하고자 하는 크기에 대한 특성을 예측할 수 있고 최적 설계상의 데이터를 사전에 검증하므로써 수요자가 요구하는 설계 표본을 이끌어 낼 수 있다.

본 논문에서는 설계자나 개발자가 수요자가 요구하는 제품에 대해서 유사이론을 적용한 설계방법으로 사전에 제품의 특성을 예측하고 수요자와의 의견 조율이 가능한 설계기법을 제시하였으며 리니어 액츄에이터를 모델로 선정하여 유사성 이론에 의한 이론적 특성 데이터와 실험 액츄에이터의 실험을 통하여 예측하였던 특성값을 비교 검토 하므로써 유사이론에 의한 표준화 설계가 가능함을 보여주고 있다.

Abstract

We introduce the systematization design method using similarity theory which is profitable in the compatability and standardization of the developed products and the reduction of construction time and price to develop and design a machine equipment. Systematization design method is to select the standard model for designing and developing from the large machinery to the super precision one and then to induce the characteristic of machines step by step in advance in case of miniaturizing and making large-scale. With this method, we extract the peculiar characteristics through the close analysis on the physical and technical part and predict the characteristic experiment for the magnitude we desire by analogical mathematical analysis. At last, we will get the design sample the users demand with the verification of the data on optimum design previously.

In this paper, we could predict the characteristic of the product the users require in advance with the design method applying similarity theory and suggested the design method which could meet the various requirements the users want. Also, it is shown that the standardization design by the similarity theory is available as comparing the characteristic values expected through the experiment of the actual actuator with the theoretical character data of similarity theory after selecting the linear actuator as a model.

Key Words : Similarity theory, Systematization design, Linear actuator

1. 서 론

국제 무역 정책의 개방으로 국가간의 경쟁이 치열하

게 진행되고 있으며 제품에 대한 고품질화가 요구되고 있다. 제품의 고품위화를 위해서 재료에 대한 문제점, 제작 기술의 향상, 설계기법의 개선 등 여러 방법들이

있겠지만 그중 제품의 설계 방법으로서 개발제품의 표준화 및 호환성, 공기의 단축, 가격저하 등의 잇점을 갖는 유사이론을 적용한 계열화 설계기법을 택할 수 있다. 계열화 설계기법은 대형기에서부터 초정밀 기기 등에 대한 설계나 개발시 표본 모델을 선정하고 단계적으로 소형화나 대형화시킬 때 미리 기기의 특성을 유추할 수 있는 설계기법으로서 기기의 특성을 물리적이고 기술적인 부분의 면밀한 분석을 통해서 고유한 특성을 추출하고 이에 대한 유추론적 수학의 해석으로 추구하고자 하는 크기에 대한 특성 실험을 예측 할 수 있고 최적 설계상의 데이터를 사전에 검증하므로써 수요자가 요구하는 설계 표본을 이끌어 낼 수 있다. 그러나 유추해석을 적용함에 있어서 비 선형적인 요소인 비 선형적인 요소인 간접 매개체에 대한 단일 매개체 별로 유추해석에 의한 특성 해석의 보안이 요구된다.^[11]

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

본 논문에서는 설계자나 개발자가 수요자가 요구하는 제품에 대해서 유사이론을 적용한 설계방법으로 사전에 제품의 특성을 예측하고 수요자와의 의견 조율이 가능한 설계기법을 제시하였으며 리니어 액츄에이터를 모델로 선정하여 유사성 이론에 의한 이론적 특성 데이터와 실험 액츄에이터의 실험을 통하여 예측하였던 특성값을 비교 검토 하므로써 유사이론에 의한 표준화 설계가 가능함을 보여주고 있다.^[13]

2. 계열화 설계 및 유사이론

유추해석에 의한 설계 기법을 위해 주어진 과제로부터 모델이 정해지고, 정해진 모델에 대하여 크기나 물리적이고 기술적인 경계조건 등에 대한 구체적인 분석이 이뤄진다. 이 분석으로부터 계열화 설계를 위한 유추해석의 가능 여부를 분석한 후 기기의 변환시스템을 입·출력으로 나타낼 수 있는 4단자 방식으로 유도하여 유추이론을 적용해서 유사성 척도 I^* 를 산정한다. 산정 결과는 요구조건을 충분히 반영시킬 수 있는가에 따라서 시작품을 제작하는 과정으로 옮기거나 그러지 못할 경우 부분적 유사성을 이용하여 재검토하는 과정을 거치도록 한다.

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

그림 1은 제품설계에 대한 흐름선도를 나타내고 있다.

그림 1의 흐름선도 중 예, 아니오의 선택길에서 아니오 부분에 해당되는 사항이 그림 2에서 나타내는 간접 파라미터(제한요소 및 방해요소)의 요소에 해당된다.

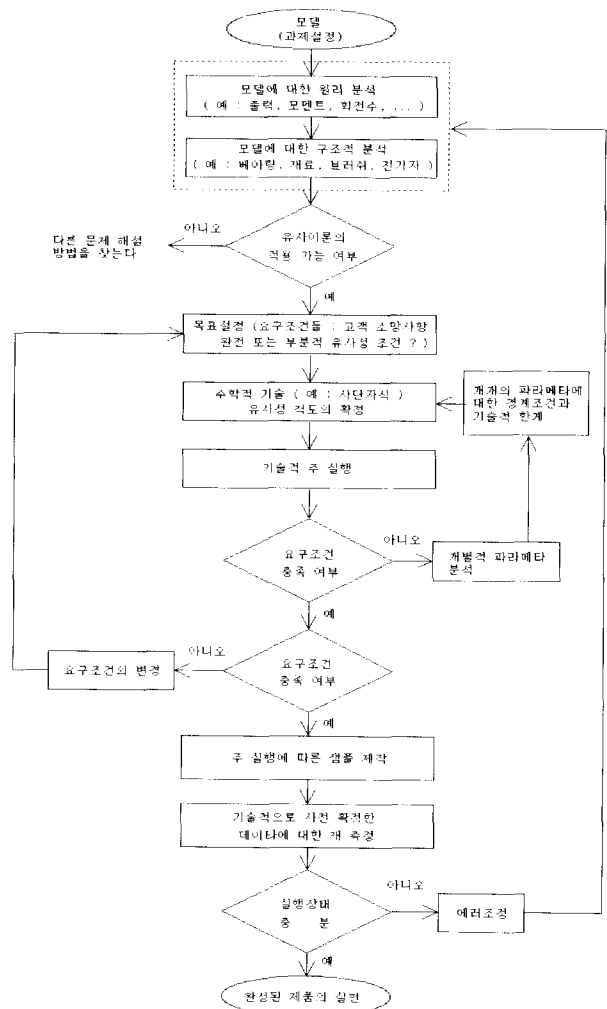


그림 1 제품 설계에 대한 흐름선도

Fig. 1 Flowchart for product design

리니어 액츄에이터의 계열화 설계를 위해선 계열화 인자로서 추력, 속도, 진압, 전류, 저항, 감쇄정수 등에 대하여 분석하게 되는데 이들 인자를 기하학적 크기의 형태로부터 일부가 다른 파라미터로서 나타낼 수 있다. 그러나 동일한 종류이거나 제품 형태로서 공통 선상의 각 매개체는 같은 형태의 처리 과정에서 계산되어지고 설계되어야 한다. 계열화 층에서의 기기 특성을 산정 하고자 한다면 일반적으로 기하학적인 분류급수, 즉 이미 제공된 모델 모터의 고유 특성을 하나의 구성요소로 삼아서 그 관계에 대한 급수를 확정한다.

$$\begin{aligned} \text{급수관계} &= \frac{GM_2}{GM_1} = \frac{GM_1}{GM} = \quad (2) \\ &= \frac{Gm_1}{Gm_2} = \frac{GM}{Gm_1} = \text{const.} \end{aligned}$$

- 여기서 GM_1 : 대형화 시켰을 때 모델과 동일 특성의 계열화 기기 1
- GM_2 : 대형화 시켰을 때 모델과 동일 특성의 계열화 기기 2
- Gm_1 : 소형화 시켰을 때 모델과 동일 특성의 계열화 기기 1
- Gm_2 : 소형화 시켰을 때 모델과 동일 특성의 계열화 기기 2
- GM : 모델

모든 기기나 기구 또는 부품의 기능을 선형적인 수학으로 기술하여 계열화 설계방법으로 적용하는대는 항상 제한 사항이 따르게 된다. 이 때 별도의 유사이론은 수학적 시스템의 기술로부터 도출된 이미 주어진 경계조건으로부터 결과적인 설계 파라메타를 이끌어

내야 한다. 단허진 틀 내에서의 수학적 고찰을 통해 확실하게 접근되어질 수 없는 간접 파라미타(즉, 방해 요소 및 제한요소)는 계열화의 제한적 요소로 작용된다. 그것은 임의의 규정된 크기에서 다른 크기로의 계열화 작업이나 또는 개개의 크기로부터의 운전특성을 전개함에 있어 방해가 되는 것이다.

그림 2는 계열화 설계에 의해 리니어 액츄에이터를 소형화와 대형화 시켰을 때의 입출력 및 간접 매개체에 대한 도시이다.

3. 설계 및 실험적 고찰

3.1 모델 설명

본 논문에서는 리니어 액츄에이터를 모델로 선정하였고, 그 특성 및 구조 등에 대해서 유사 이론을 적용한 설계정수를 확정하고자 한다. 모델 액츄에이터는 영구자석 여자형이며 cup형 코일가동자로서 빈원통형 황동의 환에 실린더형 영구자석이 고정 되어있고 영구자석 내경 안으로 cup형 코일 가동자와 가동자 내에 자로를 형성하도록 순철 실린더로 형성되어 있다.^[4]

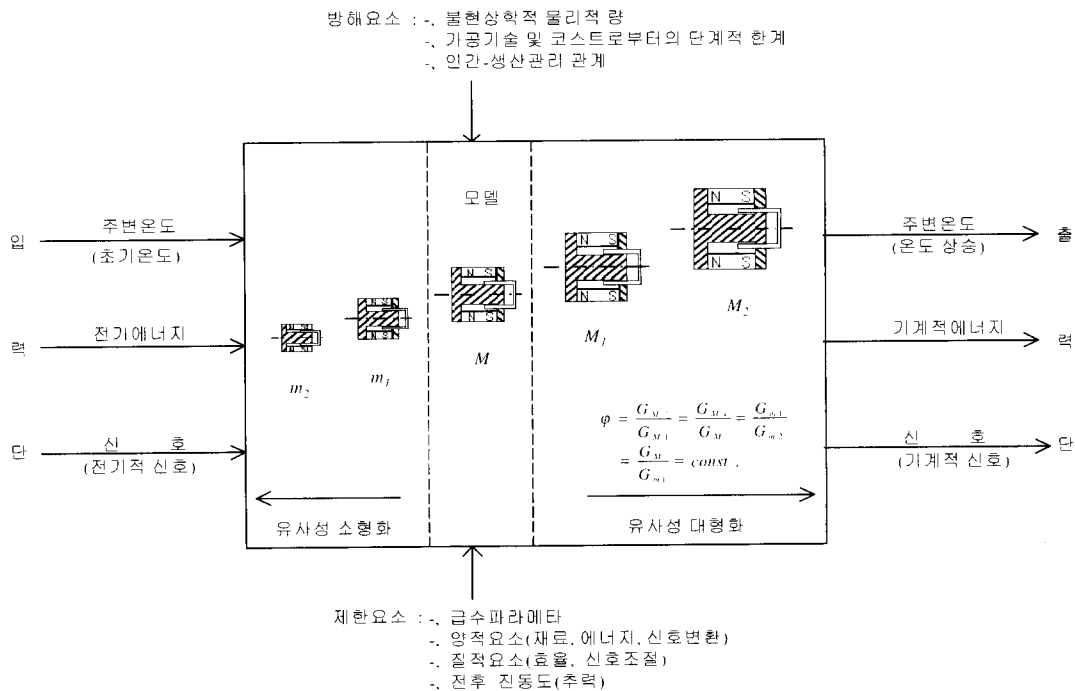
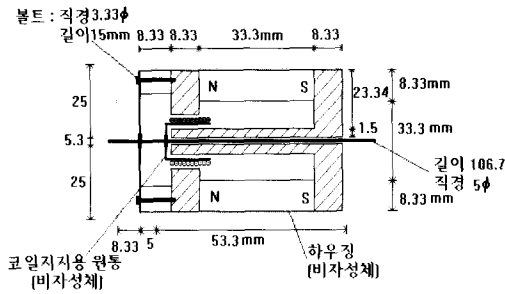
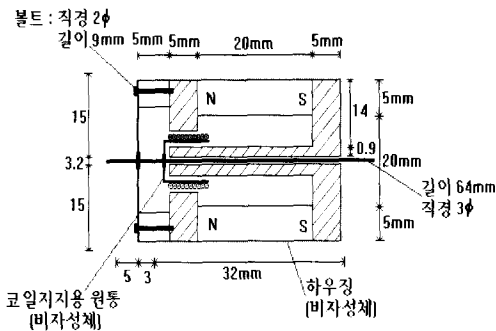


그림 2 계열화 설계를 위한 리니어 액츄에이터의 입출력 및 간접 매개체
 Fig. 2 The input, output and indirect medium of linear actuator for systematization design

그림 3은 본 실험에 이용된 가동 코일형 리니어 모델 액츄에이터의 규격($l^* = 1$)과 실험 액츄에이터의 규격($l^* = 0.6$)을 나타내고 있다.



(a) 모델



(b) 실험

그림 3 가동코일형 리니어 액츄에이터
Fig. 3 Linear actuator of moving coil type

3.2 기능 설명

그림 4는 철심 가동형 액츄에이터의 기능의 과정을 나타내고 있다.

선형 액츄에이터는 전기적, 전기기계적, 기계적 과정으로 연결된 에너지 변환 기기이다. 입력단으로부터 전압 V 는 가동자 권선에 전류를 흐르게 한다. 권선수 N 을 갖는 가동자권선은 저항 R 과 인덕턴스 L 를 통하여 저항손 $P_{cu} = I^2 \cdot R$ 와 정상전류 도달시간(또는 전기적 시정수) $\tau_e = L/R$ 를 이룬다. 자속밀도 B 인 자장내에서 가동자의 움직임이 시작되면 전압을 일정하게 유지하기 위한 역기전력 $kBlv$ 가 가동자 권선에 유도된다. 가동자 권선에 전류 I 가 흐르면 자장내에서는 축에 전달되는 추력 F 와 기계적 손실에 해당되는 양의 에너지 $kBIl$ 가 생산된다. 이 때 발생하는 철손

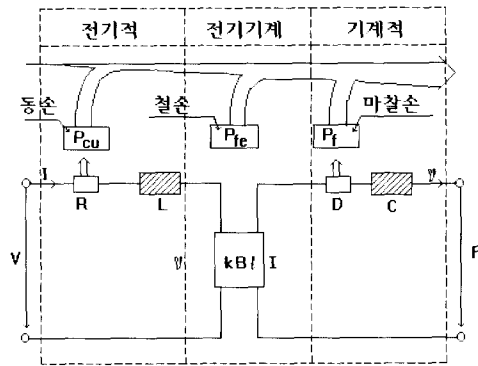


그림 4 철심가동형 액츄에이터의 기능 과정
Fig. 4 Function process of moving core type actuator

P_{fe} 는 가동자가 철 성분을 포함하는 물질로 이루어졌을 때에만 성립된다. 액츄에이터에서는 베어링과 공극내 진동자의 풍손 등이 진동 횟수에 비례하여 기계손으로 작용하게되는데 소형일수록 이의 역할은 중요하게 작용한다.^[5]

소형 리니어 진동 액츄에이터의 전압과 추력에 관한 공식은 다음 식처럼 4단자식으로 기술할 수 있다.

$$V = kBlv + \left(RI + L \frac{dI}{dt} \right) \quad (3)$$

$$F = kBIl - \left(m \frac{dv}{dt} + D \cdot v + c \int v dt \right) \quad (4)$$

윗 식에서 마찰을 통한 제동력 $F_D = D_{(v)} \cdot v$ 의 크기이며 소형의 경우 제동합수 D 는 속도 v 에 비례한다.

3.3 유사론적 특성 고찰

가동자 코일에 전류 I 가 흐름으로서 나타나는 가동자의 진동현상에 대한 유사론적 해석은 식(4)의 각 인자를 속도 v 로 미분하여 변형함으로서 유도된다. 모델과 기하학적 유사성을 갖고 동일재료로 구성된 주실험 액츄에이터에 대한 각종 특성을 찾기 위한 유사성 척도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F^*/v^* = k^*B^*l^*/v^* = m^*/t^* = D^* = c^*t^* \quad (5)$$

표 1은 유사이론을 적용한 운전 조건별(운전 전압, 부하속도, 부하전류)에 따른 액츄에이터의 관계식을 나타내고 있다.

표 1 유사이론을 적용한 운전 조건별에 따른 관계식
Table 1 Relation equation of actuators applied to similarity theory under operation condition

운전데이터	유사성 법칙 ($\rho^*=1$)	소비자의 요구 조건		
		전압 $V^*=1$	무부하속도 $v^*=1$	부하전류 $I^*=1$
운전전압	$V^* = k^* B^* I^* v^*$	1	$I^* [k^* B^*]$	$\frac{1}{I^*} [k^*]$
부하속도	$v^* = \frac{V^*}{k^* B^* I^*}$	$\frac{1}{I^*} [\frac{1}{B^* k^*}]$	1	$\frac{1}{I^{*2}} [\frac{1}{B^*}]$
부하전류	$I^* = \frac{V^*}{R^*} = \frac{V^* I^*}{k^*}$ [$k=N$]	$I^* [\frac{1}{k^*}]$	$I^{*2} [B^*]$	1

액츄에이터의 특성중 추력 F 에 대해 유추해석을 통하여 그 특성을 사전에 예측하는 방법을 살펴 보도록 한다. 여기서 스프링과 진동체 질량은 이들간의 주파수 관계를 결정하며 시간 $t^* = \frac{1}{f^*}$ 의 식으로부터 식 (5)의 변형식 $m^* f^* = c^* / f^*$ 를 유도하고 이로부터 고유주파수 f_0 ;

$$f^{*2} = \frac{c^*}{m^*} = f_0^{*2} \tag{6}$$

감쇄정수 factor δ (식 (5)의 변형식) ;

$$f^* = \frac{D^*}{m^*} = \delta^* \tag{7}$$

여기서 추력 F 는 $m^* f^* = F^* / v^*$ 식과 $v^* = f^* t^*$ 로부터

$$F^* = f^{*2} \cdot m^* \cdot t^* \tag{8}$$

등을 구하게 된다.

식 (8)에서는 추력 $F^* = f^{*2} \cdot m^* \cdot t^*$ 로 가동자의 진동주파수가 일정하게 유지되는 경우였지만 실제로 자기회로상의 자속(또는 자속밀도)은 소형화시 공극내 자속감소율 $\delta^* \ll 1$ 이되므로서 추력에 절대적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 식 (5)의 관계중 $F^* = B^* I^* I^*$ 에 대한 유사성 관계가 정의되어야 한다.

$$\text{즉 } F^* = \frac{\phi^*}{A_M^*} \cdot I^* \cdot I^* \tag{9}$$

로 표기하겠다.

여기서 $A_M^* = l^{*2}$ 이므로 $F^* = \phi^* l^{*-1} I^*$ 가 되며 속도 v 가 일정하도록 운전하고자 한다면 이 때 전류 $I^* = l^{*2} [B^*]$ 값을 적용해야 한다. 자속척도 $\phi = l^{*2}$

의 값을 유지할 수 있다면 이때 $v^* = 1$ 인 경우 추력 $F^* = l^{*3}$ 인 값을 갖게 되고 운전전압 $V^* = 1$ 인 경우 $F^* = l^{*2}$ 에 비례하는 실행값을 갖게 된다. 만약 개발자가 주 실행기기를 초소형화 하고자 한다면 자속 ϕ^* 는 $\phi^* = l^{*3}$ (단 $\zeta^* \ll 1$ 인 경우)을 적용해야 한다. 그러므로 이때의 추력 F^* 는 $F^* = l^{*4}$ 이 되지만 $\zeta^* = 1$ 인 경우 $\phi^* = l^{*2}$ 에 비례하여 변하게 되므로 $F^* = l^{*3}$ 이 되므로써 소형화 할수록 추력 F^* 는 더욱 강한 수직하강 직선으로 되는데 이는 추력 길이척도 l^* 에 비례하여 크게 약화됨을 알 수 있다(그림 5 참조).⁶⁾

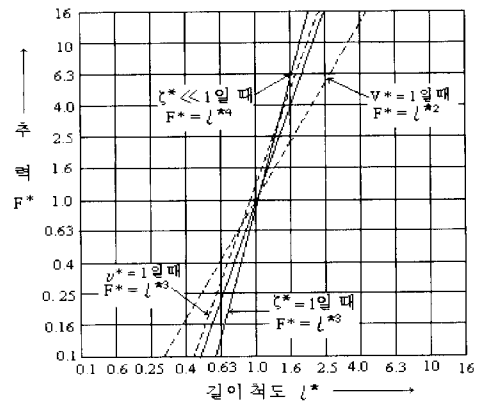


그림 5 액츄에이터의 주실행 길이 척도에 따른 추력의 성장 법칙에 의한 유사성 척도 F^* 값

Fig. 5 The value of similarity measure F^* for growth rule's thrust as main action length measure of actuator

4. 실험고찰 및 분석

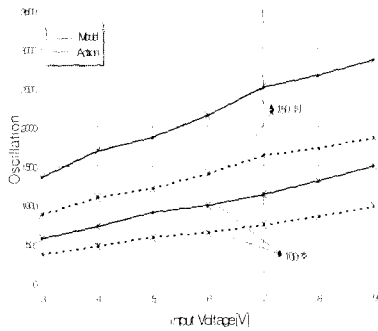
표 2는 모델과 모델을 0.6배로 소형화 시킨 실행 액츄에이터의 코일권수에 따른 인가전압에 대한 진동수의 측정값을 나타내고 있다.

표 2 코일 턴수에 따른 인가 전압과 진동수의 관계
Table 2 According to coil's winding numbers, oscillation frequency

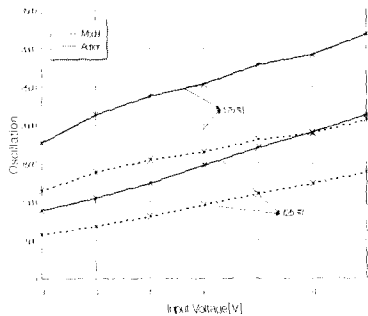
입력전압	100 회		125 회		150 회		175 회	
	모델	실행	모델	실행	모델	실행	모델	실행
3 V	370	569	579	890	881	1356	1150	1771
4 V	469	722	682	1050	1098	1690	1387	2136
5 V	585	898	808	1242	1210	1863	1546	2378
6 V	643	988	957	1475	1394	2147	1648	2534
7 V	732	1125	1105	1701	1627	2504	1909	2765
8 V	841	1295	1235	1900	1724	2655	1893	2916
9 V	968	1487	1383	2130	1853	2853	2068	3186

그림 6은 모델 액츄에이터와 $I^* = 0.6$ 로 소형화 시킨 실험 액츄에이터에 대한 코일턴수에 따른 인가전압과 진동수의 특성곡선이다. 인가전압이 일정 ($V^* = 1$)한 경우 진동수(속도)는 $\frac{1}{I^*} \left[\frac{1}{B^* k^*} \right]$ 에 비례한다.

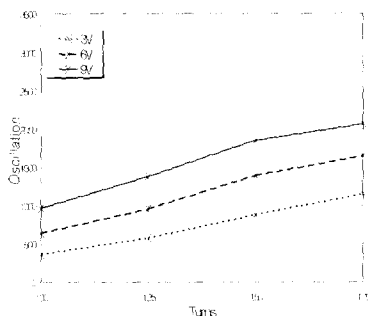
그림의 특성곡선에서는 이론치에 거의 일치된 결과를 나타내고 있으나 약간의 비선형적인 요소와 $\frac{1}{0.65}$ 배에 달하는 속도값을 갖게 되는 것으로 소형화 할수록 진동수가 설계 예상치에 비하여 적게 실현됨을 알 수 있다. 이는 제작상의 기술적 문제점(제한요소)이 포함된 결과로 보아진다.



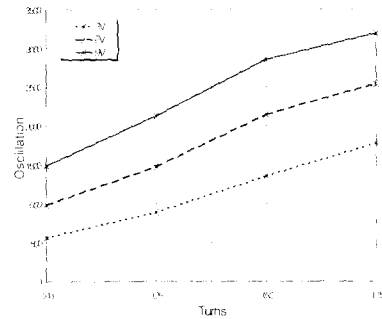
(a) 코일의 턴수 100회와 150회



(b) 코일의 턴수 125회와 175회



(c) 모델 액츄에이터



(d) 실험 액츄에이터

그림 6 코일의 턴수에 따른 인가전압과 진동수의 특성곡선
Fig. 6 Characteristic curve of voltage and oscillation as to coil winding number

그림 7은 액츄에이터의 진동수를 측정하기 위한 실험장치이다.

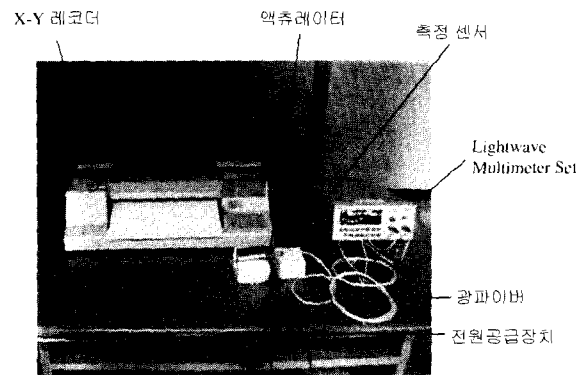


그림 7 액츄에이터의 기동 특성곡선 측정 장치
Fig. 7 Experimental system to measure the characteristic curve of a moving actuator

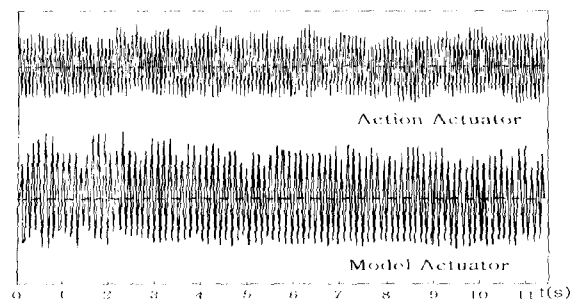


그림 8 모델 및 실험 액츄에이터의 기동 횟수와 왕복 변위
Fig. 8 Oscillation number and alternating displacement of model and action actuator

그림 8은 모델 및 실행 액츄에이터의 기동 횡수와 왕복 변위를 나타내고 있다. 진동수는 거의 일정한 패턴으로 진동하고 있으나 변위는 약간의 불규칙한 변화를 볼 수 있다. 이 문제 또한 제작상의 기술적 문제점이 포함된 결과라 생각되어진다. 또한 이 측정 장치에 이용된 광섬유 센서는 실험실에서 직접 제작한 제품으로 약간의 오차가 발생함을 나타내고 있다.

5. 결 론

이상에서 밝힌 바와 같이 유사이론에 의한 계열화 설계 기법과 실제 액츄에이터를 모델로 선정하여 설계가 가능함을 구현하였고 이의 결과를 토대로 원하는 크기의 실행기기에 대한 예상 특성을 사전에 예측할 수 있었다. 다만 제조기술상의 문제점 등 간접 매개체에 해당되는 설계요소로 인하여 코일의 턴수에 따른 인가전압과 진동수의 변위 특성 곡선과 실행기기를 통한 실측 특성결과에는 약간의 차이가 있었다. 그러나 이들에 대한 사항은 별도의 catalog나 data base화를 통하여 구체적인 프로그램이 주어진다면 더욱 정확한 예측 특성을 발휘할 수 있겠다. 특히 본 연구 결과의 적용은 직접 제품생산 관련 업체에서 생산제품들에 대한 기 수집된 각종 데이터를 이용한 설계작업과 시제품 생산 및 실험을 통해서 더 한층 이론치에 일치하는 결과를 이끌어 낼 수 있으리나 기대된다.

본 연구를 토대로 유사이론이 적용될 수 있는 각종 회로에서 R, L, C와 전류나 전압 등이 길이 척도 l^* 로서 변환이 가능 해지므로서 향후 인버터나 컨버터 설계의 응용이 가능하리라 믿는다(저항 $R = \rho \frac{l}{S}$ 로서 유사성 척도 $R^* = \rho^* \frac{l^*}{S^*}$ 에서 동일 재료인 경우 $\rho^* = 1$ 이므로 $R^* = \frac{l^*}{S^*} = \frac{l^*}{l^* l^*} = l^{*-1}$ 로서 길이 척도로 표현이 가능함). 또한 체계적인 설계로 제품의 표준화와 그로 인한 생산설비비 감축과 기능 인력의 조기 숙련화 등 생산성향상이 이뤄질 수 있겠고 중소기업 등 충분한 기술인력을 확보하지 못했다 하더라도 PC를 이용한 설계기법으로 자사 제품에 대한 임의설계기술을 개발할 수 있겠다.

참 고 문 헌

[1] E. Mayer J.Eckhardt : "Vorgehensweise bei der Einführung

eines CAD systems", Der onstrukteur, pp 6-14, H. 4, 1985

[2] E. Gerhard : "Baureihendenken in der Feinwerktechnik", Feinwerktechnik Messtechnik 88 II. 8, pp 411-413, 1980
 [3] K H, Lee : Grenzen der technischen Miniaturisierung von permanent magnetischen erregten Gleichstromkleinstmotorenmit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie, Universität Duisburg, 1985
 [4] E. A. Mendrela : "Performance of Rotary Linear Induction Motor with Rotating", Electr. Mach, Power Syst. vol.9, PP 171 - 178, 1984
 [5] M. Rudy. : "Force constant linearity optimization technique as applied to a long gap, short coil Linear actuator", IBID, vol. 22, PP 780 - 781, 1979
 [6] 조경재 : CAE에 의한 액츄에이터의 계열화 설계기법 및 개발, 동신대학교, 1997

저 자 소 개



조경재(趙慶宰)

1969년 10월28일생. 1995년 동신대학교 전자공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



차인수(車仁洙)

1959년 8월 6일생. 1982년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1984년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 조선대학교 대학원 전기공학과(제어계측) 졸업(박사). 1990년~현재 동신대학교 전기전자공학과 부교수. 1997년 9월~1997년 11월 독일 Darmstadt 방문 연구교수. 현재 당학회 평의원 및 학술위원.



이권현(李權鉉)

1950년 4월24일생. 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 전자과 교수.