

자속경로 단면적 및 공극변화를 이용한 인덕턴스형 초정밀 변위측정 시스템

최동준* · 최인묵** · 김수현†
(2001년 1월 11일 접수, 2001년 11월 24일 심사완료)

A Comparative Study of a Variable Overlap-area Type and Conventional Types in the Inductive Precision Position Measurement System

Dong-June Choi, In-Mook Choi and Soo Hyun Kim

Key Words : Comparison(비교), Analysis(분석), Inductive(인덕턴스형), Precision Position(초정밀 변위), Measurement (측정), Range (측정영역), Nonlinearity (비선형성)

Abstract

A variable air-gap type system is widely used for inductive precision position measurement systems. This type transducer has high sensitivity but lacks a linear measurement range due to structural nonlinearity. Furthermore, as measurement range increases, linearity error is also increased. The alternative is a variable overlap-area type system. The sensitivity of this type is determined by the initial air-gap dimension, keeps the original value and does not deteriorate linearity in spite of the variations of the measuring range.

	기호설명		
μ_0 :	투자율	V_G :	공극 변화형의 전압
μ_r :	상대 투자율	V_L :	면적 변화형의 전압
l_g :	공극 크기		
h :	코어와 자기블록간의 높이		
z_0 :	공극 변화형의 초기공극		
$l_b l_c$:	공극 변화형의 유효길이		
$l_m l_e$:	면적 변화형의 유효길이		
$A_b A_c$:	공극 변화형의 유효면적		
$A_m A_e$:	면적 변화형의 유효면적		
R_G :	공극 변화형의 자기저항		
R_L :	면적 변화형의 자기저항		
N_1 :	구동 코일 감은 수		
N_2 :	위치감지 코일 감은 수		
i_j :	구동 전류		
ϕ_G :	공극 변화형의 자속		
ϕ_L :	면적 변화형의 자속		

1. 서론

초정밀 산업의 발달과 더불어 서브 마이크로 영역의 초미세 변위 측정의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 초정밀 미소 변위의 측정에는 직선 변위용 엔코더, 인덕턴스 (inductive) 방식, 정전 용량형 (capacitive) 방식, 광파이버(optic fiber) 및 레이저를 이용한 방식 등 다양한 방법이 있다. 이 중에서 인덕턴스형의 경우 무엇보다도 저렴한 구성 단가로도 초정밀 측정이 가능하며, 측정영역대 분해능의 비가 우수하다는 특징을 가지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

변위 측정을 위한 인덕턴스형 측정 시스템의 경우 가장 보편화 되어서 사용하는 것이 원통형의 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)이다. LVDT는 20세기 중반이후 일반 산업 현장에 이용되기 시작하여 현재 널리 사용중이다. LVDT는 비교적 넓은 측정 영역에 대해 많이 사용되고 있으며, 그 기본 원리를 이용한 응용 시스템에 관한

* LG 전자기술원 소재재료연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: kimsh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3268 FAX : (042)869-5201

연구가 진행되었다.⁽⁵⁻⁹⁾

상용 제품으로 판매되는 원통형 LVDT 중에서 밀리미터 이하의 좁은 영역의 측정을 위한 제품의 감도는 수백 mV/V/mm 이하이고, 선형성 오차는 ±0.25% 정도이다. 서브 마이크로 영역의 초미세 변위를 측정하는 경우 감도가 부족하여 원출력 신호를 높은 게인으로 신호 증폭을 하여야만 한다.

이러한 낮은 감도를 보상하며 초정밀 미소 변위용으로 적합하도록 더 높은 출력을 발생하는 것으로 공극 변화형 인덕턴스 측정 시스템이 있다.⁽³⁾ 그러나, 공극 변화형 시스템은 구조에서 발생하는 선형성 오차가 높다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 원통형이나 공극 변화형의 구조적인 비선형성을 줄이면서, 높은 감도를 유지할 수 있는 면적 변화를 이용한 인덕턴스형 변위 측정 시스템을 다루고자 한다. 면적 변화형 측정 시스템은 입력 변위량에 따라서 시스템의 두개의 이동자성체 변위가 함께 발생하면 각각이 고정 자성체와 겹쳐지는 면적에 비례하여 유도되는 자속의 차이를 이용한다. 본 연구에서 처음으로 고안된 면적 변화형 측정 시스템은 상용 LVDT 시스템 및 공극 변화형 측정 시스템과 비교 분석되었다.

2. 기존 시스템의 분석

2.1 LVDT 시스템

인덕턴스형 측정 시스템 중에서 상용화 되어서 널리 쓰이고 있는 것으로 LVDT가 있다. 일반적으로 원통형의 형상을 가지고 있으며, 그 단면을 자른 모양이 Fig. 1(a)에 나타나 있다. 내부에는 입력 변위에 따라 움직이는 자성체 코어가 있고, 코어 바깥으로 가운데에는 1차 코일이, 그리고 그 위아래에 2개의 2차 코일이 감겨져 있다. 시스템의 바깥쪽은 차폐 쉴드(shield)로 둘러 쌓여져 있다. 공극은 코어의 외부반경과 차폐 쉴드 사이의 거리가 된다. 단순한 구조로 측정 가능한 최소량대 전체 측정영역의 비가 크며, 생산 단가가 매우 낮다는 장점을 지녔다.

Fig. 1(b)는 상용 소프트웨어인 Maxwell 시뮬레이터를 이용한 모의실험의 결과이다. 실선은 시스템 내에서 생성된 자속의 경로를 나타낸다. 일반적으로 완벽한 자기 차폐가 이루어지지 않아서 위아래로 자속의 누설이 발생하고 있고, 자성체 코어와 차폐 쉴드간의 간격이 넓어서 일정 전원의 입력에 대해서 발생하는 출력, 즉, 측정 감도가 떨어진다라는 단점이 있다.

Table 1에 서브 마이크로 측정에 쓰이고 있는

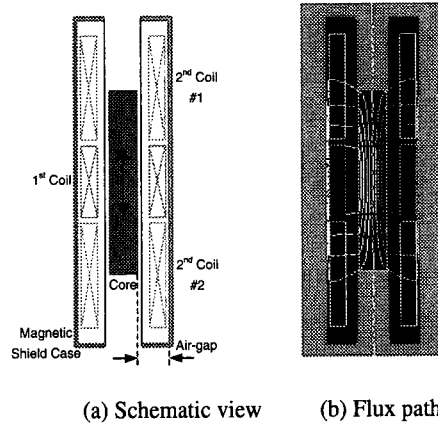


Fig. 1 Conventional LVDT system

Table 1 Specifications of LVDT systems

사양 제조사	Sensitivity (mV/V/mm)	Range (mm)	Linearity Error (%)
Schaevitz	283.5	±0.50	±0.20
Daytronic	78.74	±0.25	±0.50
Sensortec	220.08	±0.50	±0.25
Transtek	157.48	±0.125	±0.25

기존 상용 LVDT의 사양을 정리하였다.

감도는 수십에서 수백 mV/V/mm 이고, 선형성 오차는 ±0.20%에서 ±0.50% 수준이다. 선형성 오차는 입력변위와 출력신호의 1차 비례관계로 부터 벗어난 정도를 나타낸다. 실제 측정시에는 전기적 잡음 등의 존재로 서브 마이크로 영역의 측정 신호를 판별하기가 어렵고, 신호 증폭 앰프 등을 사용하여 원 출력 신호를 크게 증폭하게 된다.

2.2 공극 변화형 측정 시스템

낮은 감도를 보완하고 초정밀 변위 측정에 유리하도록 Fig. 2와 같은 공극(air-gap) 변화형 시스템이 고안되었다.⁽³⁾

공극 변화형 변위측정 시스템은 시스템 내에 자기장을 형성하도록 하는 전류가 흐르는 구동 코일이 코어(3)에 감겨져 있고, 유도전압이 발생하는 위치 탐지 코일은 자성체 블록(1,2)에 감겨져 있다 측정하고자 하는 입력 z가 들어오면 가운데 위치한 코어의 위아래로 초기 설정된 공극 z₀가 각각 z₀+z와 z₀-z로 변하게 된다. 이에 따라 자성체 블록(1,2)를 흐르는 자속의 양의 차가 발생하게 되고, 이 차이를 통해서 입력 변위의 정보를 알아내게 된다.

입력 변위에 대해서 발생하는 출력값을 유도하

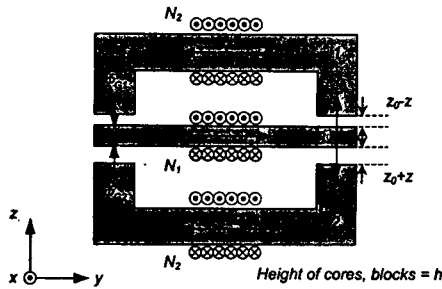


Fig. 2 The variable air-gap type inductive position sensing system: where, 1 and 2: magnetic block, 3: core

고자 자기 회로식을 적용하고, 퍼미언스 (permeance)와 그의 역수인 릴럭턴스 (reluctance)를 이용하였다. 입력 변위 z 에 대해서 시스템의 릴럭턴스는 다음 식과 같은 형태가 된다.

$$\begin{aligned} R_{G1} &= \frac{l_k}{\mu_0 \mu_r A_k} + \frac{2(z_0 - z)}{\mu_0 A_k} \\ R_{G2} &= \frac{l_k}{\mu_0 \mu_r A_k} + \frac{2(z_0 + z)}{\mu_0 A_k} \\ R_{G3} &= \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, R_{G1} 은 자성체 블록 1 의 릴럭턴스와 자성체 블록 1 과 코어 사이에 존재하는 공극에서 정의되는 릴럭턴스의 합이고, R_{G2} 는 자성체 블록 2 의 릴럭턴스와 자성체 블록 2 와 코어 사이에 존재하는 공극에서 정의되는 릴럭턴스의 합이다. R_{G3} 은 자성체 코어의 릴럭턴스이다.

자성체 블록과 코어 재질로 상대 투자율(relative permeability) μ_r 이 충분히 큰 페라이트 (ferrite), μ -메탈, 니켈강 등과 같은 재료를 사용할 경우 식 (1)은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{G1} &= K_{g1} - K_{g2}z \\ R_{G2} &= K_{g1} + K_{g2}z \\ R_{G3} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $K_{g1} = \frac{2z_0}{\mu_0 A_k}$ 이고, $K_{g2} = \frac{2}{\mu_0 A_k}$ 이다.

자기 회로의 관계와 식 (2)에서 정의된 릴럭턴스를 이용하면 각각의 자성체 블록을 지나게 되는 자속은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_{G1} = N_1 i_1 \frac{K_{g1} + K_{g2}z}{K_{g1}^2 - K_{g2}^2 z^2}$$

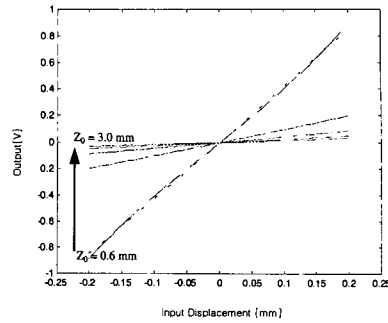


Fig. 3 Output of the variable air-gap type system

$$\phi_{G2} = N_2 i_2 \frac{K_{g1} - K_{g2}z}{K_{g1}^2 - K_{g2}^2 z^2} \quad (3)$$

유도 발생 전압은 페러데이(Faraday)와 렌즈(Lenz)의 법칙으로 구할 수 있다. 자성체 블록 (1,2)에 각각 감겨져 있는 위치 탐지 코일이 차동 전압을 발생하도록 연결되어지는 경우 그 발생 전압은 각각의 유도 발생 전압간의 차가 되며, 다음과 같다.

$$V_G = -N_1 N_2 \frac{2K_{g2}z}{K_{g1}^2 - K_{g2}^2 z^2} \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

만약 구동 전류 i_1 이 $I_1 \sin(2\pi f + \theta_0)$ 로 주어진다면, 시스템 출력은 다음과 같다.

$$|V_G| = -N_1 N_2 \frac{2K_{g2}z}{K_{g1}^2 - K_{g2}^2 z^2} \cdot 2\pi f |I_1| \quad (5)$$

여기서, 절대값 기호는 물리량의 크기 (magnitude) 를 나타낸다.

식 (5)를 살펴보면, 공극 변화형 시스템의 경우 입력변위 z 와 유도 출력 전압 V_G 간에 선형관계를 이루지 못함을 알 수 있고, 이는 시스템의 구조에서 비롯되는 비선형성으로 나타난다.

Fig. 3 에 공극 변화형에서 입력 변위에 따른 유도 출력전압을 도시한 결과가 나타나 있다. 실선은 모의실험을 통해 얻은 결과 곡선이고, 점선은 모의 실험 곡선을 최소자승 맞춤법으로 직선맞춤을 시도한 결과이다. 측정영역 $\pm 0.2\text{mm}$ 에 대해서 초기설정 공극을 0.6, 1.2, 1.8, 2.4 그리고 3.0mm 로 한 경우이다.

Table 2 는 Fig. 3 에 나타난 초기 설정 공극에 따른 선형성 오차를 정리한 표이다. 초기 설정 공극

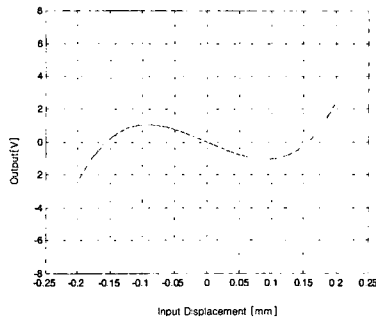


Fig. 4 linearity error of the variable air-gap type system

Table 2 Linearity error of a variable air-gap type system

Air-gap (z_0)	Linearity Error
0.6 mm	$\pm 2.43\%$
1.2 mm	$\pm 0.56\%$
1.8 mm	$\pm 0.25\%$
2.4 mm	$\pm 0.14\%$
3.0 mm	$\pm 0.09\%$

z_0 값이 작을수록 높은 발생 출력, 즉, 감도가 증가하지만 구조에서 비롯되는 비선형성 또한 증가하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 는 초기 설정 공극이 0.6mm 인 경우의 선형성 오차를 도시한 그림이다. 실제 적용 시에는 구조에서 비롯되는 비선형성과 더불어 여러 가지 요소와 사용환경에 따라 선형성은 조금 더 악화될 소지가 있다. 초기 설정 공극값을 증가시키면 구조적 비선형성은 줄어들게 되나 이와 더불어 감도도 떨어지게 된다.

측정 감도를 높게 유지하면서 내재된 비선형성을 해결하기 위한 방법으로는 교정 회로 (calibration circuit)를 이용하여 해결하는 방법이 있으나, 생산 단가의 상승과 함께, 측정 영역이나 공극이 변하는 경우 재 교정을 해야 하는 등의 불편함이 따른다.

3. 면적 변화형 측정 시스템

3.1 개요

측정 감도가 높아질수록 비선형성이 함께 증가하는 공극 변화형 시스템의 문제를 해결하고자 Fig. 5 와 같은 면적 변화형 변위측정 시스템을 고안하였다. 고안된 면적 변화형 시스템은 고정된 자성체 블록(1, 2)의 돌출부에 구동 코일이 감겨있고, 가운데 위치한 2 개의 코어에 각각 위치 탐지

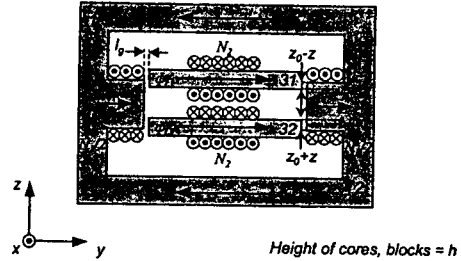


Fig. 5 The variable overlap-area type inductive position sensing system: where, 1 and 2: magnetic block, 31 and 32: core

코일이 감겨져 있다. 측정하고자 하는 입력변위에 대해 가운데에 위치한 2 개의 코어가 동시에 움직이면서 구동코일이 감겨져 있는 자성체 블록과 겹치는 면적 (overlap-area)이 변하는 구조이다.⁽¹⁰⁾

입력 변위 z 가 입력되면 가운데 위치한 2 개의 코어가 움직이며, 초기에 겹쳐졌던 면적, $h z_0$ 가 각각 $h(z_0+z)$ 와 $h(z_0-z)$ 로 변하게 된다. 면적 변화형 시스템의 릴럭턴스 (reluctance)는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{L1} &= \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} \\
 R_{L2} &= \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A_m} \\
 R_{L31} &= \frac{l_e}{\mu_0 \mu_r A_e} + \frac{2l_g}{\mu_0 h(z_0 - z)} \\
 R_{L32} &= \frac{l_e}{\mu_0 \mu_r A_e} + \frac{2l_g}{\mu_0 h(z_0 + z)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, R_{L1} 및 R_{L2} 는 자성체 블록의 릴럭턴스이고, R_{L31} 과 R_{L32} 는 각각 코어 1 과 2 의 릴럭턴스와 그 양단에 존재하는 공극의 릴럭턴스와의 합이다.

코어와 자성체 재료의 상대 투자율이 충분히 큰 경우 식 (6)은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R_{L1} &\approx 0 \\
 R_{L2} &\approx 0 \\
 R_{L31} &= \frac{1}{K_{11} - K_{12}z} \\
 R_{L32} &= \frac{1}{K_{11} + K_{12}z}
 \end{aligned} \tag{7}$$

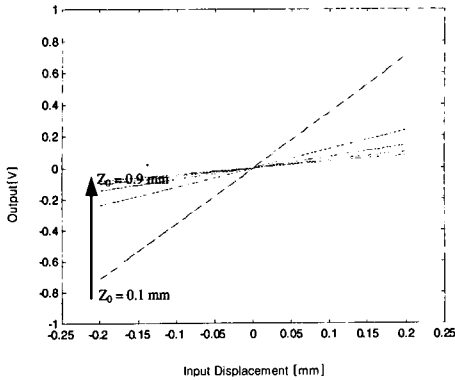


Fig. 6 Gain of the variable overlap-area type system

여기서, $K_{11} = \frac{\mu_0 h z_0}{2l_g}$ 이고 $K_{12} = \frac{\mu_0 h}{2l_g}$ 이다.

각각의 코어를 지나게 되는 자속은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \phi_{L1} &= N_1 i_1 (K_{11} - K_{12} z) \\ \phi_{L2} &= N_1 i_1 (K_{11} + K_{12} z). \end{aligned} \quad (8)$$

위치탐지 코일에서 유도되는 차동전압은 다음과 같다.

$$V_L = -N_1 N_2 \cdot 2K_{12} z \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (9)$$

$$|V_L| = -N_1 N_2 \cdot 2K_{12} z \cdot 2\pi f \cdot |I_1| \quad (10)$$

식 (10)으로부터 면적 변화형 시스템의 경우 입력 z 와 유도 전압 출력 $|V_L|$ 과는 선형 비례 관계임을 알 수 있다. 면적 변화형 시스템에서 감도는 초기 설정된 공극 l_g 에 따라 결정되며, 그 크기에 반비례한다.

공극 변화형 시스템과의 비교를 위해서, 시스템의 출력에 영향을 미치는 인자들의 값을 같게 놓고 모의 실험을 행하였다. 초기 설정 공극을 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 그리고 1.0mm 으로 하여, 앞선 공극 변화형과 서로 비슷한 감도가 발생하도록 하였고, 그 결과가 Fig. 6 에 도시 되어있다.

공극 변화형 수준과 비슷한 크기의 감도를 발생하기 위해선 초기 설정 공극을 상대적으로 더 작게 해야 하는 점은 있지만, 면적 변화형의 경우, 공극의 크기로 감도를 조절할 수 있고, 감도의 상승과 구조적 비선형성은 무관하다는 특징을 지닌다. 설정된 공극은 처음 설정된 대로 유지하면 되고, 또한 공극이 코어 양단에 존재하므로 단지, 코어 양단의 공극의 합을 일정하도록 하면 된다.

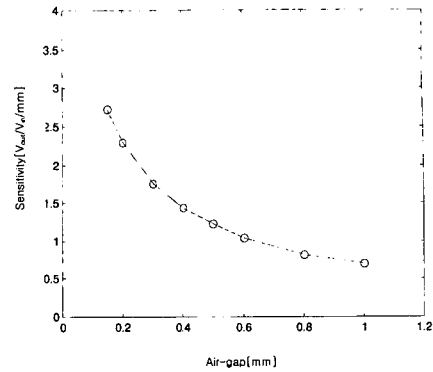


Fig. 7 Sensitivity as function of air-gap

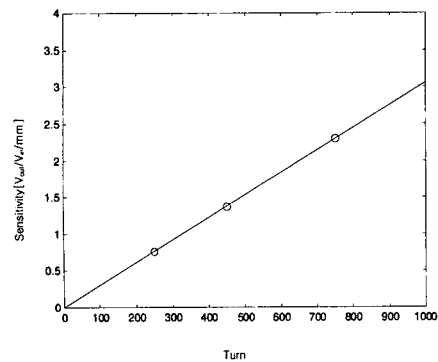


Fig. 8 Sensitivity as function of turns of coil

사용조건 및 모든 사항이 동일한 경우, 구조적인 원인에 기인하는 비선형성의 영향을 더 받게 되는 공극 변화형 시스템이 선형성 면에서 불리하다. 공극 변화형 시스템의 경우 구조적으로 발생하는 비선형성을 제거하기 위해서는 추가 보상 회로 등이 필요하게 된다.

3.2 실험적 분석

Fig. 7 은 면적 변화형 시스템에서 공극의 크기에 따른 감도의 변화이다. 감도와 공극의 크기는 반비례 관계에 있으며, 공극의 크기가 작아질수록 감도의 상승폭이 크다.

Fig. 8 은 코일의 감은수의 비에 따른 감도의 변화이다. 구동코일의 감은수는 고정된 상태에서 위치 탐지코일의 감은수를 증가시켜 턴수비를 바꾼 후의 실험 결과이다. 감은수의 비가 증가할수록 감도가 상승하지만, 증가에 따른 전기적인 성분의 포화 등이 발생하지 않도록 고려해야 한다.

Fig. 9 는 입력 변위에 따른 시스템의 출력을 도시한 결과이다. 2.5kHz 의 구동 주파수에 대한 시스템의 출력 결과와 측정된 결과를 최소 자승맞춤법으로 직선 맞춤한 결과를 도시하였다. 측정영역

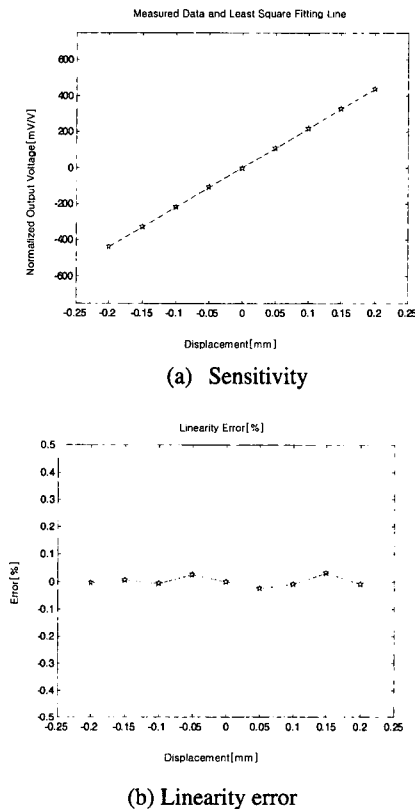


Fig. 9 Output of the variable overlap-area type system according to input displacement

Table 3 Sensitivity and linearity error as variations in the measuring range

Range	Sensitivity	Linearity Error
$\pm 150\mu\text{m}$	2188.78 (mV/V/mm)	$\pm 0.034\%$
$\pm 200\mu\text{m}$	2188.65 (mV/V/mm)	$\pm 0.029\%$
$\pm 250\mu\text{m}$	2188.23 (mV/V/mm)	$\pm 0.030\%$

$\pm 0.2\text{mm}$ 에서, 측정 감도는 2188.65 (mV/V/mm)이고, 선형성 오차는 $\pm 0.029\%$ 이다.

Table 3 에 동일한 시스템을 가지고, $\pm 150\mu\text{m}$, $\pm 200\mu\text{m}$ 그리고 $\pm 250\mu\text{m}$ 의 측정영역에서의 감도와 선형성 오차를 정리하였다. 전체 측정영역의 변화가 크에도 불구하고 감도나 선형성 오차의 변화는 거의 없다. 이로부터 면적 변화형 시스템은 식 (10)에서 유도된 바와 같이 측정영역의 변화에 따른 구조적인 감도나 비선형성의 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

초정밀 미소 변위 측정에 적합한 인덕턴스형

측정 시스템으로 공극 변화형과 면적 변화형이 있다.

공극 변화형 인덕턴스 측정 시스템의 경우 측정영역이 작을수록 초기 설정 공극을 작게 할 수 있고, 이에 따라서 높은 감도를 가질 수 있는 구조이다. 그러나, 감도가 높아질수록 구조에서 발생하는 비선형성이 커진다는 단점이 있었다.

면적 변화형 시스템은 초기 설정 공극의 크기에 따라 측정 감도를 조절할 수 있으며, 그 크기를 작게 유지하여 높은 감도를 발생시킬 수 있었다. 또한, 구조적인 비선형성을 가지고 있지 않아서, 측정영역의 크기가 바뀌어도 시스템의 감도나 선형성 오차의 변화는 매우 작았다.

후 기

본 연구는 두뇌 한국 21 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Garratt, J. D., 1979, "Survey of Displacement Transducers Below 50mm," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 12, pp. 563~573.
- (2) Jones, B. E., 1987, "Sensors in Industrial Metrology," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 20, pp. 1113~1126.
- (3) Boros, A., 1985, Electrical Measurements in Engineering, *ELSEVIER*, Chap. 7-3.
- (4) Doebelin, E. O., 1990, *Measurement System - Application and design*, 4th ed. McGraw-Hill.
- (5) Kano, Y., Hasebe, S., Huang, C. and Yamada, T., 1989, "New Type Linear Variable Differential Transformer Position Transducer," *IEEE Tr. on Instr. and Meas.*, Vol. 38, No. 2, pp. 407~409.
- (6) Saxena, S. C. and Lal Seksen, S. B., 1990, "Inductive Ratio Transducer Instrumentation System for Displacement Measurement," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 1, pp. 475~480.
- (7) Kano, Y., Hasebe, S. and Miyaji, H., 1990, "New Linear Variable Differential Transformer with Square Coils," *IEEE Tr. on Magnetics*, Vol. 25, No. 5, pp. 2020~2022.
- (8) Sydenham, P. H., Taing, V., Mounsey, D. J. and Yu Wen-Xin, 1995, "Low-cost, precision, flat inductive sensor," *Measurement*, Vol. 15, pp. 179~188.
- (9) 박영태, 김한준, 유광민, 이래덕, 1989, "정밀 측정용 LVDT 에 관한 연구," *Korean Applied Physics*, Vol. 2, No. 4, pp. 347~351.
- (10) 최동준, 최인복, 김수현, 2001, "인덕턴스형 미소 변위 측정 시스템과 응답 특성의 분석," *한국정밀공학회지*, 제 18 권, 제 3 호, pp. 189~194.