

선형 전기접촉으로 계측해상도가 향상된 저항성 변위센서

김경아 · 최성수 · 차은종[†]

Resistive displacement transducer enhanced measurement resolution by electrical line contact

Kyung-Ah Kim, Seong-Su Choi, and Eun-Jong Cha[†]

Abstract

Although variable resistance displacement transducer is widely applied for its technical simplicity, electrical point contact limits measurement resolution (precision). The present study introduced roller shaped structure for electrical line contact. Proto-type transducer was developed and measurement characteristics were compared with a commercialized product. When the displacement was varied with steps of 5 mm, 1 mm, and down to 0.1 mm, the correlation coefficient between resistance and displacement decreased lower than 0.9 in the commercialized product while the proto-type transducer maintained values higher than 0.99. Therefore, the measurement resolution was enhanced by approximately 10 times. Since manufacturing also seemed easier, the present results would enable more accurate and less expensive manufacturing of variable resistance displacement transducer.

Key Words : variable resistance displacement transducer, electrical line contact, measurement resolution

1. 서 론

변위센서(linear displacement transducer)는 길이변화를 전기변수의 변화로 변환하는 센서로써 광범위하게 활용된다^[1]. 변위변화는 압력이나 부피 등 여러 물리적 변수들이 변화하는 결과로 나타나므로 물리적 변수들의 변화를 측정하는데에는 변위센서가 가장 많이 활용된다^[2]. 변위센서에는 변위의 변화를 전기저항(resistance), 인덕턴스(inductance) 혹은 캐패시턴스(capacitance)의 변화로 변환하는 장치들이 있는데, 이들 중 전기저항으로 변환하는 저항성 변위센서는 신호추출회로가 단순해지는 장점이 있다. 특히 potentiometer 원리를 적용하는 저항성 변위센서는 구조가 단순하고 우수한 선형성도 보장되므로 가공 및 동작기기의 개략적인 위치를 측정하거나 제어하기 위해 널리 활용된다^[3]. 동작 기계 뿐 아니라 의료 분야에서도 활용되는데, 환자의

호식에 따라 이동하는 이동판의 위치를 감지하여 호식 기류를 측정하거나^[4,5] 의료용 자전거(ergometer)의 페달(pedal) 회전수 혹은 회전각을 측정할 때 응용된다^[6]. 변위센서에 관한 연구는 주로 비교적 좁은 범위를 측정하는(<2 mm) 인덕턴스형 변위센서의 해상도 향상에 관해 수행되고 있으며^[7], 넓은 범위(수십 cm)에 걸쳐 변위를 계측하는 저항성 변위센서는 거의 연구되지 않고 있다.

Potentiometer 원리는 그림 1에 보인 것처럼 선형 저항체에 일정한 전압(E)을 인가한 후 선형 저항체 상의 한 점에 전기 접촉점을 형성한다. 이동하는 물체에 이 접촉점을 연결한 후 접촉점에서의 전압(e)을 측정한다.

이 때 선형 저항체의 전체 길이와 전기저항을 각각 D, R 이라 하고 접촉점까지의 길이와 전기저항을 각각 d, r 이라 하면

$$d = \frac{e}{E}D \quad (1)$$

이 되어 e를 측정하면 d를 얻을 수 있다. 이때 전기접촉점이 이동 물체와 연동하여 선형 저항체 상에서 움직이게 되는데 통상 그림 2에 보인 것과 같은 점접촉

충북대학교 의과대학 의공학교실 (Biomedical Engineering Department, School of Medicine, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

[†]Corresponding author: ejcha@chungbuk.ac.kr
(Received : April 4, 2007, Accepted : May 26, 2007)

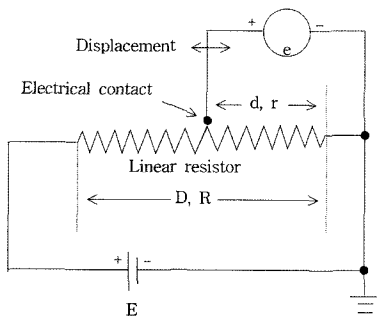


그림 1. Potentiometer 동작원리의 모식도
Fig. 1. Potentiometric principle.

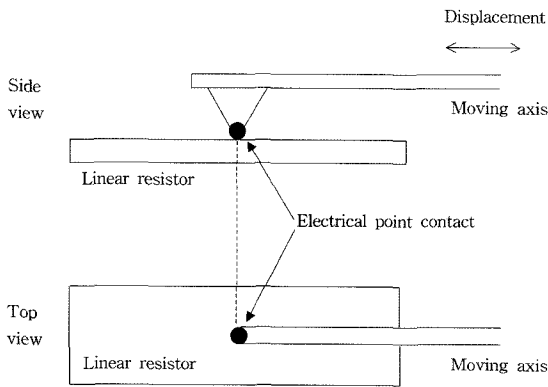


그림 2. 저항성 변위센서에 적용되는 점접촉 구조
Fig. 2. Point contact structure for resistive displacement transducer.

자(electrical point contact)를 채택하고 있다(LTM150, Gefran, Italy).

점접촉자는 탄성 철사를 끝이 뾰족해지게 구부린 형태를 취하는데 전기접촉을 유지하기 위해서는 탄성이 필요하다. 즉, 탄성 점접촉이 이루어지도록 제조되는데 제반 기술적 문제점을 야기시킨다. 우선 탄성력이 클수록 전기접촉이 좋아지지만 점접촉을 이루고 있으므로 접촉압력이 크게 상승하여 마찰력이 커지고 이동력은 떨어진다. 마찰력의 상승은 마모현상을 불러오고 이는 사용 수명을 단축시킨다. 또한 선형 저항체는 일정 넓이의 폭을 가지고 있으며 이동축(moving axis, 그림 2)이 선형 저항체와 완벽하게 평행 이동하는 것은 현실적으로 불가능하므로 점접촉에 의한 변위 측정에 불확실성이 발생한다(뒤에 구체적으로 고찰). 이러한 마찰 증가와 접촉 위치의 불확실성은 측정 잡음을 증가시키고 궁극적으로 측정가능한 최소 변위, 즉 해상도(정밀도)가 저하한다. 이에 본 연구에서는 전기적 접촉자의 구조를 회전롤러형으로 설계함으로써 마찰 현상이 최

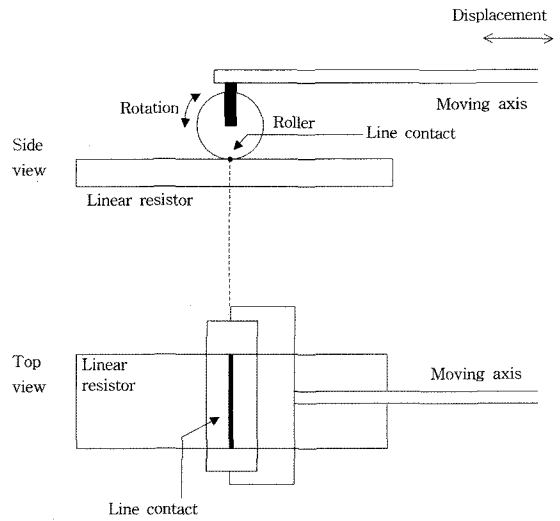


그림 3. 선접촉을 이루는 회전롤러형 접촉자 구조
Fig. 3. Structure of the roller rotating on the linear resistor forming a line contact.

소화되고 선접촉(line contact)을 형성하여 해상도를 대폭 개선한 저항성 변위센서를 개발하였다.

2. 변위센서 제작 및 해상도 측정

2.1. 회전롤러형 접촉자 구조 설계

기존에 사용되던 탄성 점접촉자를 대체하는 새로운 회전 롤러(roller)형 선접촉자(line contact) 구조를 고안하였다. 이는 그림 3에 보인 것과 같이 선형 저항체 상에서 회전하며 전기적 접점을 형성하는 방식으로 동작한다.

그림 3에서 도체인 롤러가 이동축의 선형 이동에 따라 선형 저항체 상에서 회전하며 전기 접점을 이루게 되므로 고정적인 점접촉자에서처럼 이동중의 마찰이 발생하지 않으며 이동축의 이동 또한 매우 유연해질 수 밖에 없다. 회전롤러는 원통형의 구조를 가지므로 일정 폭을 가진 선형 저항체 상에서 이동축의 이동방향과 수직한 선접촉을 이루게 된다. 임의의 두 물체가 서로 접촉하여 전기적 접점을 유지하기 위해서는 적정량의 탄성, 즉 누르는 힘이 필요한데 같은 힘이 가해진 다 하더라도 선접촉의 경우에는 접촉압력이 분산되어 마모현상이 감소한다. 즉, 회전롤러형 접촉자는 이동축이 직선 이동할 때 선형 저항체 상에서 선접촉을 형성하며, 동시에 회전하며 이동하기 때문에 마찰력이 거의 발생하지 않게 된다. 이는 측정잡음의 감소와 해상도의 개선을 가능하게 할 것으로 예상된다.

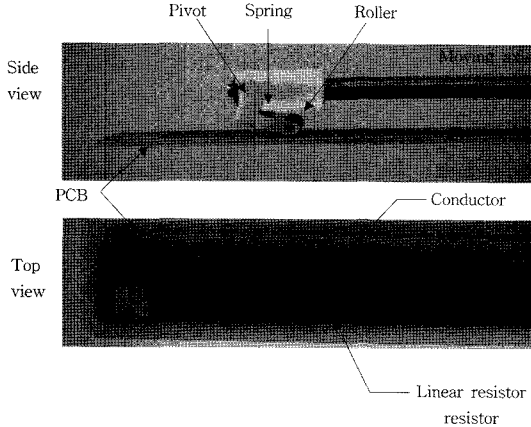


그림 4. 스프링이 탄성력을 제공하는 접촉 구조 실물사진
Fig. 4. Picture of electrical contact with elastic force provided by spring.

2.2. 실험용 변위센서 제작

위에 설명한 회전롤러형 선접촉자로 동작하는 저항성 변위센서를 실험적으로 제작하였다. 직경이 5 mm 이고 길이가 12 mm인 원통형의 접촉자를 전기 전도성이 우수한 구리 재질로 제작하였다. PCB 상에 폭이 8 mm이고 길이가 130 mm인 선형 저항판을 형성하였는데 이는 얇은 박막형태의 PCB 패턴과 유사하다. 총 전기저항은 약 5 kΩ으로 하였고 최대 120 mm 범위의 이동이 가능하게 하였다. 회전롤러형 접촉자와 PCB 간의 탄성 접촉은 이동축과 접촉자 사이에 스프링을 삽입하여 제공하였다. 그림 4에 전기적 접촉 구조의 실물사진을 제시하였다. 그림 4에서 이동축(moving axis)과 회전롤러를 서로 연결시키는 회전형 구조물(pivot)과 이동축 사이의 스프링이 상하 방향으로 압축되며 탄성력의 강도가 조정된다.

편의상 스프링이 최대로 인장된 상태로 그림 4를 촬영하였으나 실제로는 롤러가 이동축에 근접하여 스프링이 어느정도 압축된 상태로 케이스에 조립되어 동작한다. 상술한 회전롤러의 전기 접촉원리를 그림 5에 도시하였다. 그림 5에서 이동축의 선형 변위이동이 롤러의 회전운동으로 변환됨을 쉽게 이해할 수 있다.

도체인 롤러는 회전하며 하부 PCB 상에 형성된 선형저항체 박막과 도체 박막 모두와 선접촉을 형성하므로 이들은 도체인 롤러를 통해 전기적으로 연결된다. 그림 5 하단에 제시한 전기적 등가회로에서 회전 롤러와 도체박막의 전기저항은 0이므로 C, D, E, F는 모두 등전위를 이루게 되고 따라서 A-C 간의 전기저항이 변위에 비례하게 된다. 이와같이 동작하는 실험용 변위센서 시작품을 내부구조물(이동축, 롤러, PCB)들이 원

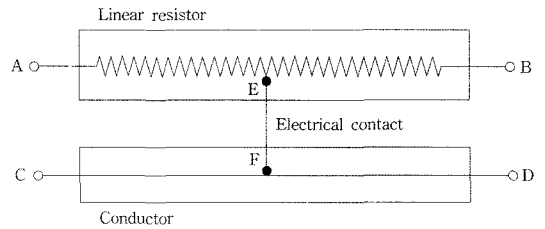
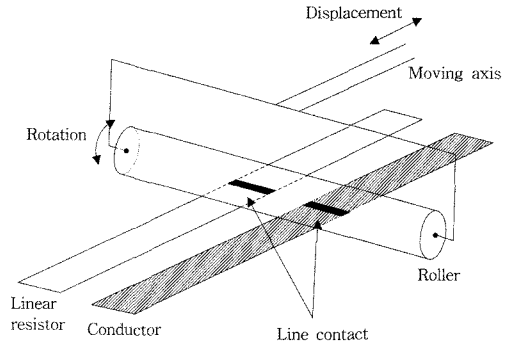


그림 5. 회전롤러의 접촉 동작(상)과 전기적 등가회로(하)
Fig. 5. Contact structure of the roller(upper panel) and its electrical equivalent circuit(lower panel).

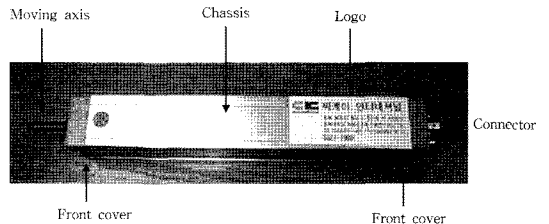


그림 6. 실험용 변위센서 시작품의 실물사진
Fig. 6. Picture of the proto-type displacement transducer.

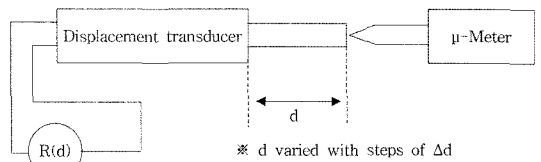


그림 7. 해상도 평가 실험장치의 모식도
Fig. 7. Block diagram of the experimental set-up for evaluation of measurement resolution.

활하게 접촉하며 작동하도록 적절히 설계 제작한 외관 새시(chassis) 내에 조립하여 완성하였다(그림 6, 씨케이인터내셔널, 한국).

2.3. 해상도 측정

그림 7에 보인 것과 같이 변위센서에 마이크로미터

(μ -Meter)를 접촉하여 실험장치를 구성하였다. 광범위하게 상용되고 있는 외국산 제품(LTM150, Gefran, Italy)과 본 실험용 시작품을 대상으로 실험하였다. 변위를 Δd 씩 일정 단계로 이동시키며 μ -Meter 와 전기저

항계(TX3, Tektronix, U.S.A.)를 이용하여 변위 d 와 전기저항 $R(d)$ 를 동시에 측정하였다. $\Delta d=5\text{ mm}$, 1 mm , 0.1 mm 각각에 대해 4회씩 반복실험하였다. 측정된 R 및 d 데이터 간에 선형회귀분석을 시행하여 해상도(정밀도)를 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

외국산 변위센서에 대해 이동단계(step size)를 $\Delta d=5\text{ mm}$, 1 mm , 0.1 mm 로 하고 측정된 대표적인 사례의 결과를 그림 8에 보였다. 그림 8에서 종축은 R 값이고 횡축은 d 를 Δd 의 배수(정수)로 표시하였다. Δd 가 5 mm 일때에는 상관계수가 0.9999 이상으로 거의 이상적인 선형관계를 나타내었고 Δd 가 1 mm 로 감소하면 상관계수가 0.9985 로 약간 감소하였는데 측정자료가 회귀직선으로부터 약간 벗어나는 것을 관찰할 수 있다. $\Delta d=0.1\text{ mm}$ 인 경우에는 상관계수가 0.8596 으로 크게 하락하였고 R 측정값들이 크게 분산된 것을 볼 수 있으며, 따라서 정확한 측정치를 제공할 수 없었다. 즉, 외국산 변위센서 제품의 해상도는 1 mm 라 할 수 있다.

본 시작품에 대해 동일하게 수행한 실험결과 사례를 그림 9에 제시하였다. 선형 저항체의 총 길이를 130 mm 로 하였고 총 저항이 약 $5\text{ k}\Omega$ 이 되도록 설계하였는데 그림 9(상)에 보인 것처럼 $5\text{ mm} \times 19\text{ steps}=95\text{ mm}$ 범위가 약 $3.5\text{ k}\Omega$ 의 저항 범위를 나타내었다. 이를 130 mm 로 환산하면 약 $4.8\text{ k}\Omega$ 이 되므로 설계값 $5\text{ k}\Omega$ 에 근접하였다. 또한 Δd 가 $5 \rightarrow 1 \rightarrow 0.1\text{ mm}$ 로 감소함에 따라 상관계수가 $1 \rightarrow 0.9999 \rightarrow 0.9985$ 로 매우 근소하게 감소하였고 이는 $\Delta d=0.1\text{ mm}$ 일 때에도 매우 정확한 R 측정이 이루어짐을 입증한다. 따라서 본 변위센서 시작품의 해상도는 최소한 0.1 mm 이었다.

반복실험 결과도 모두 상술한 내용과 대등하였으므로 Δd 에 따른 전기저항-변위 간 상관계수들의 평균값을 산출하여 그림 10에 도시하였다. 그림 10에서 $\Delta d=1 \sim 0.1\text{ mm}$ 사이에서 외국산 제품은 상관계수가 급격히 감소하는 반면 본 실험용 시작품은 0.99 이상의 값을 그대로 유지함을 볼 수 있다. 따라서 본 시작품의 해상도는 최소한 0.1 mm 로써 이는 기존의 외국산 제품보다 10 배 이상 향상되었다.

선형 변위센서는 공장 및 가공 기계의 전반적인 변위 이동을 측정하여 제어하는데 널리 사용된다^[1,3]. 선형 변위센서의 일종인 저항성 변위센서는 동작원리가 단순하여(그림 1) 저가 제작이 가능하므로 매우 광범위하게 활용된다^[4,5,6]. 본 연구에서는 기존의 저항성 선형 변위센서의 전기적 접촉방법인 점접촉의 형태를 선접

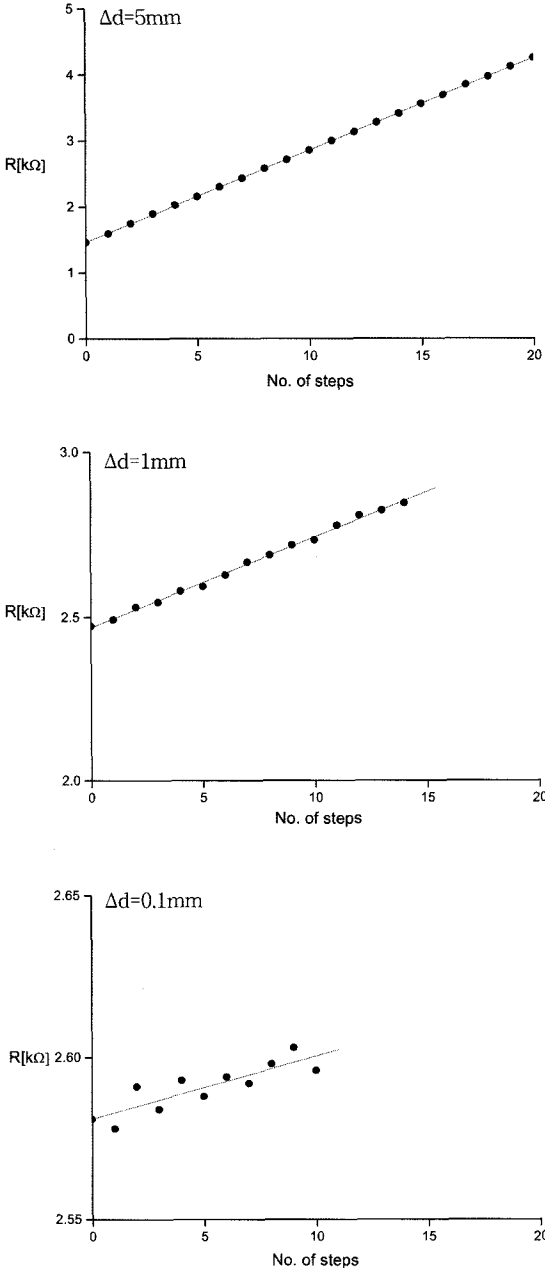


그림 8. 외국산 제품의 변위에 따른 전기저항(R) 측정결과.
 상: 5mm step, 중: 1mm step, 하: 0.1mm step
 Fig. 8. Resistance measurement results with displacement step varied. Upper: 5mm step, Middle: 1mm step, Lower: 0.1mm step.

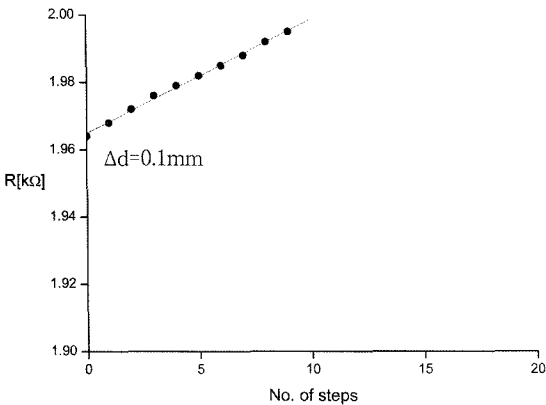
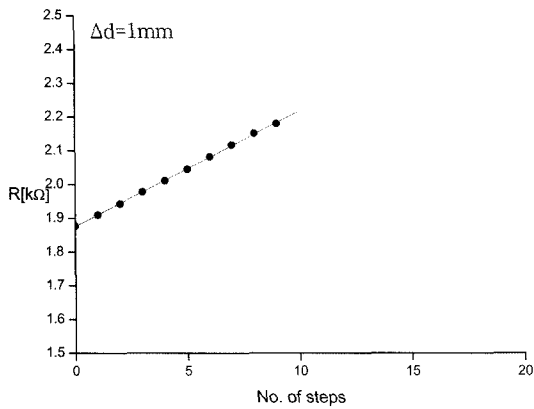
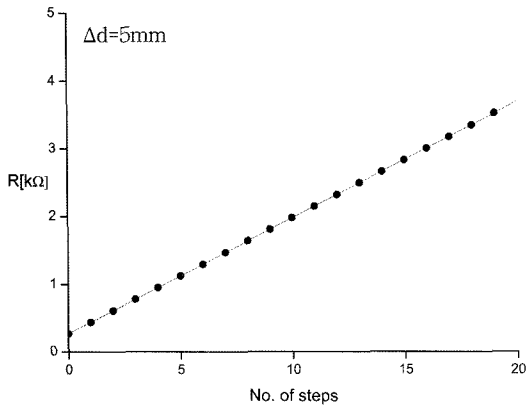


그림 9. 실험용 시작품의 변위에 따른 전기저항(R) 측정결과. 상: 5 mm step, 중: 1 mm step, 하: 0.1 mm step
 Fig. 9. Resistance measurement results with displacement step varied. Upper: 5 mm step, Middle: 1 mm step, Lower: 0.1 mm step.

측으로 변경하고 접촉 방식을 마찰 접촉에서 회전 접촉으로 개선함으로써 변위 계측의 해상도(정밀도)를 대폭 향상시켰다.

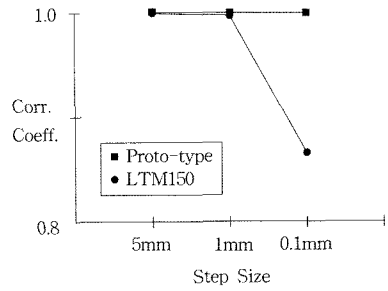


그림 10. 변위 단계(step size)에 따른 전기저항-변위 간 상관계수의 변화. 원: 외국산제품, 사각형: 실험용 시작품

Fig. 10. Correlation coefficient data depicted with displacement steps. Circles: Commercialized transducer, Squares: Proto-type transducer.

기존의 상용 제품들이 채택하고 있는 마찰 접촉 방식의 경우 접촉점의 이동에 따라 마찰잡음과 함께 마모 현상이 유발될 것이라는 것은 자명하다. 마찰잡음을 해소하기 위해서는 상당한 크기의 접촉압력이 필수적이지만 접촉압력이 커짐에 따라 이동축의 이동이 뻑뻑해지고 동시에 마모가 빨리 진전될 것이므로 마모에 강한 재질을 사용해야 하는 등 까다로운 단점들이 상존하여 전망 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한 점접촉 방식은 폭이 유한한 선형 저항체 상의 일 점에서 전기접촉이 이루어지므로 이동축의 이동방향이 저항체와 완벽하게 평행을 이루고 이동해야만 정확한 측정이 이루어진다. 그러나 이는 현실적으로 불가능하다. 따라서 측정 가능한 변위 해상도가 제한되며 세계적으로 광범위하게 활용되는 이탈리아 Gefran 사의 LTM150 모델을 대상으로 실험한 결과 안전한 해상도는 1 mm이었다(그림 8).

본 연구에서는 전기적 접촉자의 구조를 회전롤러로 고안하여 상술한 단점들을 모두 해소하고자 하였다. 우선 전기접촉을 제공하는 도체(구리) 재질의 롤러가 회전하며 선형 저항체와 접촉하므로(그림 3) 마찰현상이 최소화되고 따라서 전기접촉에 필수적인 탄성력이 상대적으로 작아진다. 따라서 이동축의 이동이 원활해짐은 물론 전기접촉자(회전롤러) 및 저항체 등 구조물들의 재질 선정을 특별히 고려할 필요가 없어진다. 실제 본 연구에서 제작한 시작품의 경우 매우 일반적으로 사용되는 구리 재질의 회전롤러와 탄소를 함유한 저항 박막을 채택하였음에도 불구하고 외국산 제품보다 월등한 정밀도를 나타내었고(그림 9) 1,000번 이상 반복한 후에도 계측특성의 변화는 없었다. 따라서 접촉자 구조를 회전롤러로 변경함으로써 접촉 마찰의 문제가 해결됨을 알 수 있다.

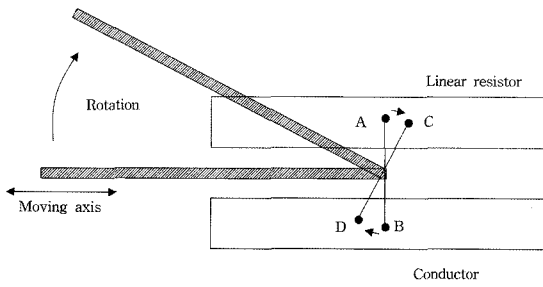


그림 11. 이동축의 회전에 따른 점접촉의 이탈현상을 나타내는 모식도

Fig. 11. Movement of point contact with moving axis rotated.

또한 회전 롤러형 접촉자는 폭이 유한한 선형 저항체 상에서 선접촉을 형성한다(그림 5). 앞서 지적한 대로 기존의 점접촉 방식은 이동축이 이동방향으로부터 이탈하면 계측정밀도가 하락할 수밖에 없다. 이를 구체적으로 이해하기 위해 그림 11을 참조하자.

전기접촉점 A, B가 저항체와 도체 간에 전기적 연결을 제공하는 상태에서 변위의 변화없이 이동축이 이탈하여 시계 방향으로 회전하는 경우를 가정하면 접촉점 A는 C 위치로, 그리고 B는 D위치로 이동한다. 접촉점 B와 D는 도체 상에 있으므로 위치에 무관하지만 접촉점 A와 C는 저항체 상에 있으므로 서로 다른 값이 측정될 것이다. 즉, 변위변화를 전달하는 이동축이 이상적인 선형운동을 하지 않는 한 계측오차가 발생하고 이는 정밀도 하락으로 이어진다. 그림 11의 모식도는 이해의 편의를 위해 다소 과장된 상황을 나타내고 있지만 외국산 제품의 해상도가 1 mm로 제한되는 실험 결과(그림 8)를 상기하면 실제 상황에서도 유사한 상황이 일어날 수 있음을 이해할 수 있다. 이동축의 이탈은 어느 한 방향으로만 일어나지는 않을 것이므로 측정되는 전기저항값들을 일정 기간 동안 평균해야만 정확한 변위를 측정할 수 있다. 반면 본 연구에서와 같이 회전 롤러가 저항체와 맞닿아 선접촉을 이루면 접촉선 상에서 존재하는 저항값들의 평균값이 측정될 것이므로 별도의 신호평균 과정이 없이도 정밀도(혹은 해상도)를 향상시키는 것이 가능해진다. 실험용으로 제작한 변위 센서가 0.1 mm 해상도를 나타낸 실험결과(그림 9)는 이와같은 선접촉의 장점을 잘 입증한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 변위 계측을 위해 광범위하게 응용되

는 기존의 저항성 변위센서의 접촉방식이 점접촉인 관계로 발생하는 해상도 저하를 개선하기 위하여 회전롤러형 접촉자 구조를 고안함으로써 전기적 접촉방식을 점접촉에서 선접촉으로 변경하였다. 롤러 형태의 접촉자가 회전하며 전기적 접촉을 형성하기 때문에 마찰이 발생하지 않아 마찰잡음이 축소되고 수명이 연장되며, 특히 선접촉에 따라 전압이 평균되기 때문에 해상도가 증가한다. 선진국 제품의 해상도가 약 1 mm이었던 데 비해, 시작품을 제작하여 실험한 결과 최소한 0.1 mm를 얻어 해상도를 약 10배 이상 향상시킬 수 있었다. 선진국 제품에 비해 해상도가 뛰어난 반면에 재질 선택 등 제반 제작이 용이하므로 산업 현장에서 유용하게 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 이태수, “기본 센서와 이론”, In: 의용계측공학, 의공학 교육연구회 역편, 여문각, 서울, pp. 61-121, 1993.
- [2] R. S. C. Cobbold, “Displacement, motion, and force transducers”, In: *Transducers for biomedical measurements*, A Wiley-Interscience Series, John Wiley & Sons, New York, pp. 114-189, 1974.
- [3] 이재현, 김경아, 차은종, “정밀기계가공을 위한 미세 변위 계측·분석시스템”, 2002년도 한국센서학회 종합학술대회논문집, 제13권, 제1호, pp. 139-145, 2002.
- [4] 김경아, 이재현, 김군진, 이태수, 차은종, “소형공기 챔버를 센서소자로 사용하는 새로운 호식기류 계측 기술”, *센서학회지*, 제13권, 제2호, pp. 79-84, 2004.
- [5] 차은종, 김경아, 김성식, 강영규, “선형 저항체를 이용하여 연속적인 호식기류를 측정하는 장치”, 대한민국, 발명특허 제10-2005-0087501호, 2005.
- [6] A. B. Ritter, S. Reisman, and B. B. Michniak, “Principles of biomechanics”, In: *Biomedical Engineering Principles*, Taylor & Francis, Boca Raton, pp. 342-358, 2005.
- [7] 김철한, 남기곤, 손정만, 정도운, 김호중, 이현철, 김윤진, 전계록, “이중이차코일을 이용한 LVDT 센서의 구현”, 2004년도 한국센서학회 종합학술대회 논문집, 제15권, 제1호, PF-18, 2004.



김 경 아

- 1991년 충북대학교 자연과학대학 물리학과 학사
- 1993년 충북대학교 자연과학대학 물리학과 석사
- 2001년 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 박사
- 2005년 충북대학교 의과대학 의공학교실 조교수
- 주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐의료기



최 성 수

- 2006년 충북대학교 자연과학대학 물리학과 학사
- 2006년 충북대학교 학과간 협동과정 의용생체공학과 석사 재학
- 2006년 씨케이인터내셔널 근무
- 주관심 분야 : 생체계측, 물리센서



차 은 종

- 1980년 서울대학교 공과대학 전자공학과 학사
- 1987년 미국 남가주대학 의공학 박사, Research Associate
- 1988년 충북대학교 의과대학 의공학교실 교수
- 2001년 씨케이인터내셔널 대표 겸직
- 주관심 분야 : 생체계측, 물리센서, 심폐의료기, 정밀계측