

포신 강선의 마모 깊이 측정을 위한 정전용량 방식의 MEMS 간극센서

이석찬[†] · 이승섭^{*} · 이창화^{**}

(2008년 12월 15일 접수, 2009년 7월 31일 수정, 2009년 8월 6일 심사완료)

MEMS Capacitive Gap Sensor for Measuring Abrasion Depth of Gun Barrel Rifling

Lee Seok Chan, Lee Seung Seob and Lee Chang Hwa

Key Words : Gun Barrel Rifling(포신 강선), Abrasion Depth(마모 깊이), MEMS(초소형 기전공학), Capacitance(정전용량), Gap Sensor(간극센서)

Abstract

MEMS capacitive gap sensor is developed for measuring abrasion depth of gun barrel rifling. Measuring abrasion depth of gun barrel rifling is very important because it is related with exactness of firing and life of arms. The method using a gap sensor is not to hurt rifling. And it can measure abrasion depth through minimum shooting, because the developed gap sensor can measure from 1 μm ~ 12 μm using Polydimethylsiloxane(PDMS) material and making a stretchable electrode on PDMS. And it's resolution is 1 μm using capacitive method and MEMS technology.

1. 서론

전장 상황에서 화력은 전쟁의 승패를 좌우하는 중요한 요소이다. 이러한 중요성에 따라 화력 무기는 지속적으로 개발되어 오고 있다. 개발된 화력무기는 시험 평가 과정을 거치게 되는데 그 때 사격 발수에 따른 포신 강선의 마모 깊이를 필수적으로 측정하게 된다. 이 측정이 중요한 이유는 강선 마모 깊이의 변화를 알면 사격의 정확성을 향상 시킬 수 있고 화력 무기의 수명을 예측할 수 있기 때문이다.⁽¹⁾ 기존의 측정 방법 중에는 Pull-over gage 법과 Diamond indenter 법이 널리 사용된다.^(2,3) 그러나 Pull-over gage 법은 25 μm 이상의 마모 깊이만 측정할 수 있기 때문에 마모 깊이를 측정하기 위해서는 많은

발수의 사격을 해야 한다는 단점이 있고 Diamond indenter 법은 최소 사격발수 만으로도 측정이 가능하나 측정 과정 중 강선에 압흔을 남김으로써 강선을 손상시킨다는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 앞서 제시된 두 방법의 단점을 보완하는 새로운 방법을 제안하고 그 방법의 구현을 위한 간극센서를 개발 하고자 한다. 새로운 방법은 간극센서와 지지대가 결합된 형태로서, 간극센서를 통해 마모 깊이를 측정하는 것이며 그 때 요구되는 간극센서의 조건은 다음과 같다. 먼저, 측정 시 강선을 손상시켜서는 안 되며 최소 사격발수로 측정 가능하도록 1 μm ~ 12 μm 의 마모 깊이 변화를 측정할 수 있어야 한다. 또한 1 μm 의 분해능이 요구된다.⁽³⁾ 따라서, 그러한 조건을 충족시키기 위해 본 논문에서 제작된 간극센서는 센서의 구조체가 Polydimethylsiloxane (PDMS)로 제작되었고 정전용량 방식으로 감지한다.⁽⁴⁾ 또한 PDMS 구조체를 가진 정전용량 방식의 센서 구현을 위해 신축적 전극이 제작되었고 정밀한 제작과 대량생산을 위해 MEMS 기술이 이용 되었다.⁽⁵⁾

[†] 책임저자, 회원, 116 학군단, 카이스트 기계공학과
E-mail : cadetch@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-3086 FAX : (042)350-5046

^{*} 회원, 카이스트 기계공학과

^{**} 국방과학연구소

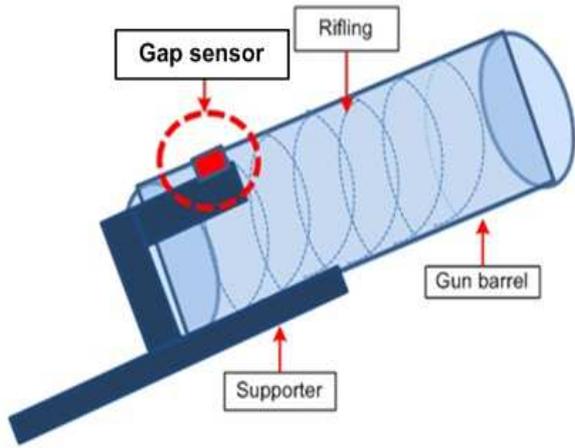


Fig. 1 New method for measuring abrasion depth of rifling in the gun barrel

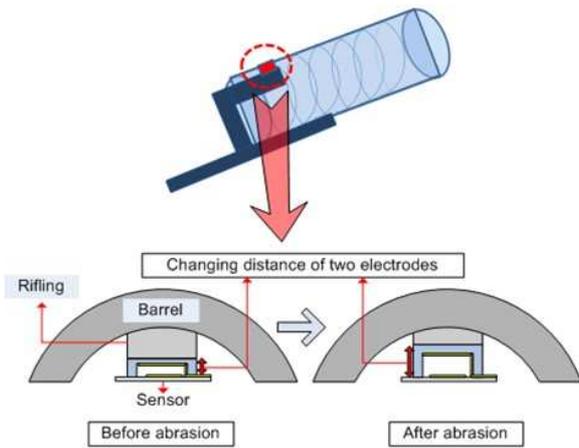


Fig. 2 Sensing concept

2. 새로운 측정방법

강선의 마모 깊이를 측정하는 새로운 방법은 Fig. 1 과 같다. 측정 위치는 강선의 마모가 가장 많이 일어나는 부분으로서 강선이 시작되는 부분의 12시 방향과 6시 방향의 강선이다.

제안하는 새로운 측정방법은 그 강선의 높이 변화를 간극센서를 이용하여 측정한다. 간극센서는 센서의 최초 위치를 고정시켜주는 지지대와 결합된 상태로 사격 전 약실(탄이 장전되는 곳)을 통해 내부로 삽입된다. 삽입된 후 사격 전의 강선 높이를 측정하고 센서를 제거한 후 사격이 실시된다. 사격 후 다시 센서가 삽입되어 사격 후 변화된 강선의 높이를 측정한다.

센서 감지 원리의 개념도는 Fig. 2 와 같다. 센서는 강선과 접촉해 있고 센서는 센서 내부 아래

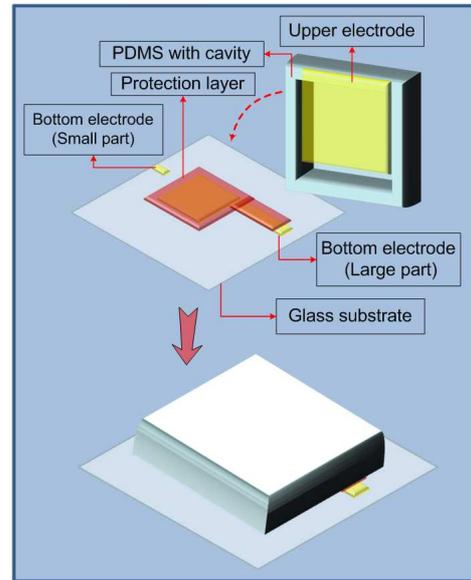


Fig. 3 Schematic view of gap sensor

와 위 부분에 위치한 두 전극으로 정전용량을 형성하고 있다. 사격 후 강선의 높이가 변하게 되면 센서의 높이도 변하게 되고 센서 내부의 전극간의 간격도 변하게 된다. 결국 강선의 높이 변화에 따라 센서의 정전용량이 변화하므로 강선의 높이 변화에 따른 센서 정전용량의 변화를 알고 있다면 사격 후 강선의 높이가 얼마나 변했는지를 정전용량 값의 변화로서 확인할 수 있다. 따라서 제작된 센서가 강선의 높이 변화에 따라 정전용량이 얼마나 변하는지 실험을 통해 확인한 후에 그 센서를 이용하여 실제 포신이 사격 후 마모 깊이가 얼마나 변화했는지를 측정하게 된다.

3. 간극센서 설계

간극센서의 개념도는 Fig. 3 과 같다. 간극 센서는 총 5 부분으로 구성된다. 유리기판, 아랫전극, 보호층, PDMS 구조체, 신축적 전극(윗전극)이다. 유리기판 위에 아랫전극과 보호층이 있고 홈이 파인 PDMS 구조체 안쪽 부분에 신축적 전극(윗전극)이 있다.

3.1 유리 기판

두 전극 간 정전용량을 측정하기 위해서는 두 전극간 정전용량 외의 정전용량이 발생해서는 안 된다. 기존 활용되던 실리콘 기판은 전극과 불필요한 정전용량을 형성하므로 센서의 성능을 떨어뜨린다. 따라서 유리기판을 이용, 두 전극간 정전용량 외의 정전용량을 모두 제거하였다.

3.2 아랫전극

아랫전극은 두 부분으로 구성되어 있다. 아랫전극의 작은 부분은 윗 전극과 접촉되어 윗전극으로 전류를 흘려 보내기 위한 역할을 하며 아랫전극 중 큰 부분은 윗전극과 접촉되어 있지 않으므로 윗전극과 정전용량을 형성하는 역할을 한다. 아랫전극의 작은 부분은 불필요한 정전용량 형성을 최소화하기 위해 1mm x 2mm 로 작게 만들었고 아랫전극의 큰 부분은 포신 강선의 크기를 고려하여 3mm x 3mm 로 설계하였다.

3.3 보호층

정전용량은 두 전극이 맞닿아 전류가 흐르면 형성되지 않으므로 두 전극이 맞닿지 않도록 해주어야 한다. 따라서 보호층은 아랫전극과 윗전극이 맞닿지 않도록 아랫전극을 보호해 주는 역할을 한다. 절연체이면서 쉽게 패턴을 형성시킬 수 있는 감광제를 이용하여 아랫전극 보다 큰 크기로 만들었다.

3.4 PDMS 구조체

센서를 구성하는 구조체는 최소 12 μm 이상의 변위를 표현할 수 있어야 하며 강선의 높이 변화에 대하여 민감하게 반응 할 수 있어야 한다. MEMS 센서 분야에서 12 μm 이상의 변위는 상대적으로 큰 변위이다.⁽⁶⁾ 따라서 12 μm 이상의 변위를 표현하기 위해서 탄성계수(750kpa)가 상대적으로 작은 PDMS 란 물질을 사용하였다. 또한 민감한 반응을 위하여 PDMS 내부에 홈(5mm x 7mm)을 형성하였으며 PDMS 박막(70 μm)을 만들었다. 홈의 깊이는 20 μm 으로 설계하여 두 전극 간격을 가능한 가까이 하였다.

3.5 신축적 전극(윗전극)

신축적 전극(윗전극)은 센서 내부 PDMS 위에 제작되었다. 외부에 드러난 PDMS 위에 제작될 경우 강선과의 접촉에 의해 전극이 손상될 수 있기 때문이다. PDMS 위에 제작된 전극은 PDMS의 변형에 견딜 수 있어야 전극으로 활용할 수 있다. 만약 PDMS의 변형을 견디지 못한다면 전극은 갈라져 버릴 것이다. 그러한 문제의 해결을 위해 윗전극을 신축적 전극으로 제작하였다.⁽⁷⁾ 신축적 전극이란 내부에 주름을 가진 전극으로서 PDMS가 변형을 일으킬 때 전극 내부의 주름이 퍼질 뿐 갈라지지 않으며 늘어났다 줄어들었다 하는 과정이 반복 가능한 전극이다. 이러한 전극의 제작 방법은 쉽고 빠르기 때문에 PDMS를 이용한 센서의 개발에 널리 활용될 수 있다.

4. 간극센서 제작

간극센서의 전체 공정도는 Fig. 4 와 같다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 유리 기판 위에 아랫전극 및 보호층을 제작하는 과정이고 (c) ~ (e)는 PDMS 구조체를 제작하는 과정이다. (f) ~ (g)는 신축적 전극을 PDMS 구조체 내부의 박막 위에 형성하는 과정이며 이 모든 과정에서 완성된 유리 기판 위의 아랫전극 및 보호층과 PDMS 구조체 및 신축적 전극은 마지막 과정인 (h)과정을 거쳐 간극센서로서 완성된다.

4.1 아랫전극 및 보호층 제작

아랫전극은 E-beam evaporator 를 통해 유리 기판위에 Cr/Au 가 증착 됨으로써 제작된다. 이 때 Shadow mask 를 이용하여 증착과 동시에 패턴이 형성되도록 하였다. 보호층은 감광제(AZ 9260)를 유리기판 위에 스핀코팅하고 UV lithography 공정을 수행 하여 원하는 아랫전극을 보호할 수 있는 패턴을 형성하였다.

4.2 PDMS 구조체 제작

PDMS 구조체를 제작하기 위해 최초 감광제(SU-8)를 이용하여 주형을 만든다. 주형은 기판에 SU-8을 스핀코팅하고 UV lithography 공정을 통해 제작된다. 제작된 주형에 PDMS를 스핀코팅하고 경화시킨 후에 주형으로부터 PDMS를 뜯어낸다. 뜯어낸 PDMS는 주형의 패턴이 전사되어 홈이 파인 형태를 보인다.

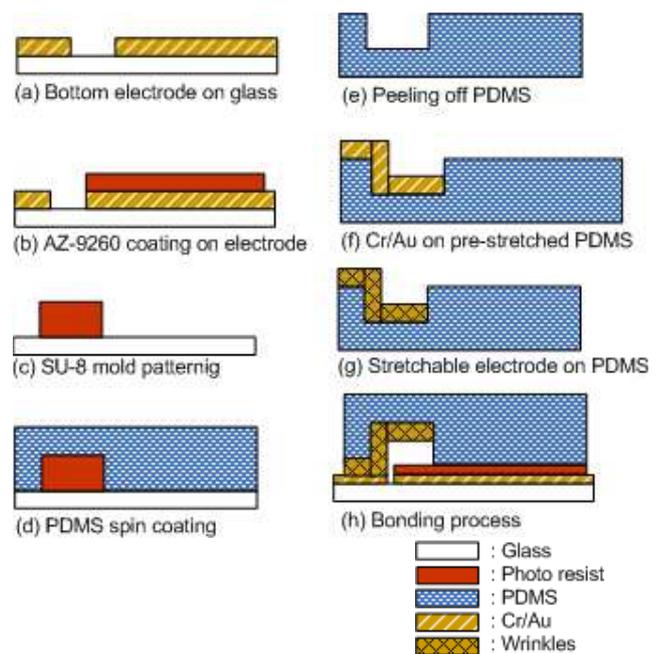


Fig. 4 Fabrication flow chart

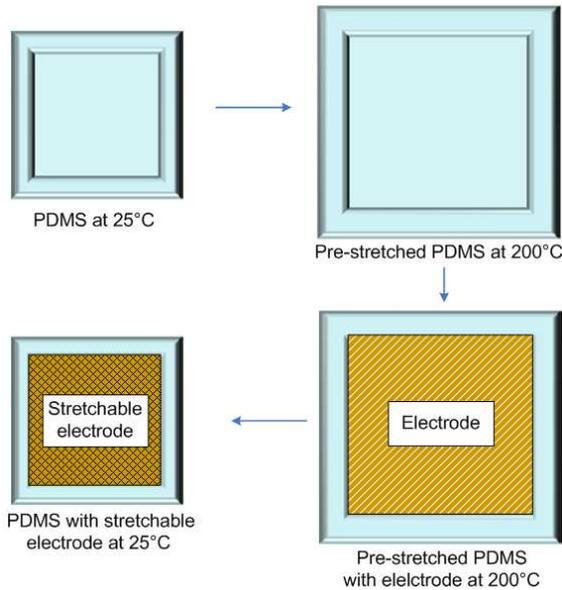
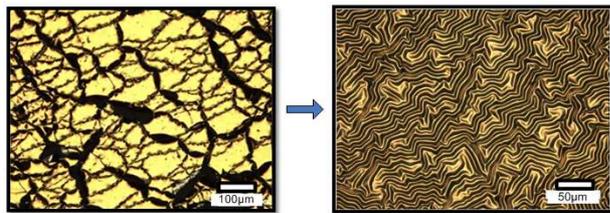


Fig. 5 Fabrication of stretchable electrode



(a) Torn electrode (b) Stretchable electrode with wrinkles

Fig. 6 Stretchable electrode with wrinkles

4.3 신축적 전극의 제작

신축적 전극은 온도에 따른 PDMS의 팽창을 이용한다. 신축적 전극을 제작하는 과정은 Fig. 5와 같다. 최초 25°C에서 있던 PDMS를 E-beam evaporator의 온도 조절기를 이용하여 200°C 환경에 놓아둔다. PDMS는 열로 인하여 팽창하게 되고 팽창된 상태에서 Cr/Au가 증착된다. 전극이 형성된 PDMS를 다시 상온으로 위치시켰을 때 PDMS는 수축하게 되고 전극에 압축응력이 가해져 전극에 주름이 형성된다. 전극에 형성된 주름은 다시 PDMS가 팽창하게 되면 주름이 펴짐으로써 전극이 갈라지지 않고 전극으로 작동할 수 있게 해준다. Fig. 6의 (a)는 신축적 전극을 이용하지 않고 반복실험하였을 때 전극이 갈라진 모습을 보여주고 있으며 Fig. 6의 (b)는 신축적 전극을 이용하여 반복실험하였을 때 전극이 갈라지지 않고 여전히 내부에 주름이 형성되어 있는 모습을 보여주고 있다.

모든 제작 과정을 거쳐 완성된 센서의 모습은 Fig. 7과 같다.

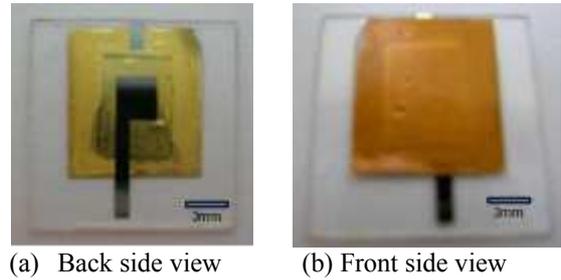


Fig. 7 Completed gap sensor

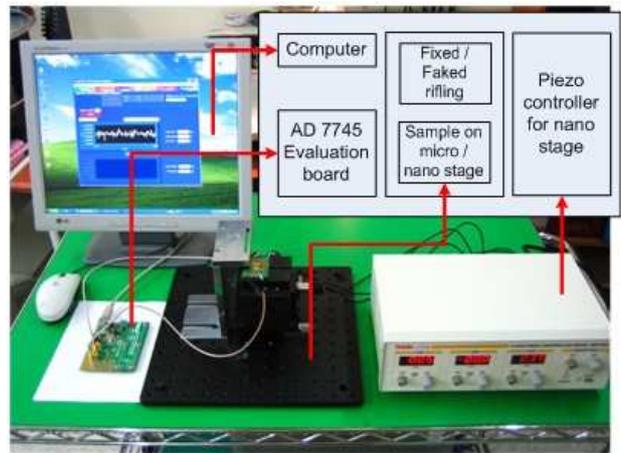


Fig. 8 Experiment set up

5. 실험 / 결과

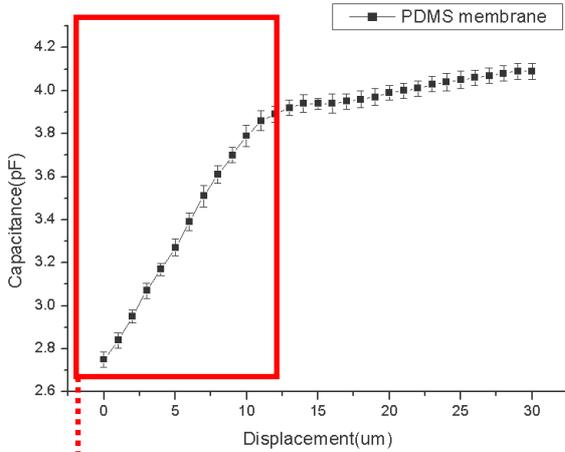
5.1 실험장비 set up

실험장비의 set up은 Fig. 8과 같다. 실제 센서의 적용 환경은 센서의 위치가 고정된 상태에서 강선의 높이가 변화하는 것을 측정하는 것이다. 그러나 실험은 강선의 높이를 고정시키고 센서를 마이크로 및 나노 스테이지 위에 결합시켜 놓은 후 스테이지의 높이를 1 µm 단위로 변화시키면서 측정하였다. 정전용량을 측정하기 위해서 Analog Devices사의 AD7745 Evaluation board를 사용하고 그 결과 값은 컴퓨터 모니터를 통해 확인하였다. 나노 스테이지는 THORLABS사의 MDT693으로 전압을 가해주어 스테이지의 변위를 1 µm 단위로 변화시켜 주었다.

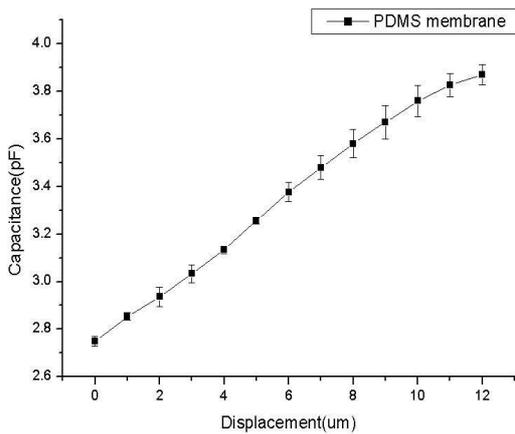
5.2 실험 결과

최초 변위를 주지 않은 상태에서 제작된 센서의 초기 정전용량 값을 측정한 결과는 2.75pF이다.

그 후 실험은 1 µm씩 스테이지를 올려주어 스테이지 위에 결합되어 있는 센서가 고정되어



(a) Capacitance curve as a function of displacement



(b) Range : 0~ 12 μm

Fig. 9 Experiment results

있는 모사된 강선과 접촉하여 늘리도록 하였다. 그 결과 Fig. 9(a)와 같은 결과 그래프를 얻었다. 이 실험을 통해 $1\ \mu\text{m}$ 변위에 대한 정전용량의 변화를 확인할 수 있었으며 분해능이 $1\ \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 측정 가능한 변위의 범위는 $1\ \mu\text{m} \sim 30\ \mu\text{m}$ 까지로서 최초 목표로 선정한 $1\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$ 변위를 포함하고 있었다. 특히 $1\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$ 까지 확대한 그래프는 Fig. 9(b)와 같은데 대체로 선형적인 모습을 보이면서 $1\ \mu\text{m}$ 변위에 대하여 100fF 의 정전용량의 변화량을 보였다. 따라서 실제 강선의 마모 깊이를 측정하기 위해 사용되는 그래프는 Fig. 9(b)가 되겠으며 만약 최초 강선에 맞닿아 위치한 센서가 3.0pF 이었고 사격 후 결과값이 3.2pF 이라면 $2\ \mu\text{m}$ 의 강선 높이 변화가 있었음을 의미한다. Fig. 9(b)의 그래프와 제작된 센서를 이용하여 사격 발수에 따른 강선 마모 깊

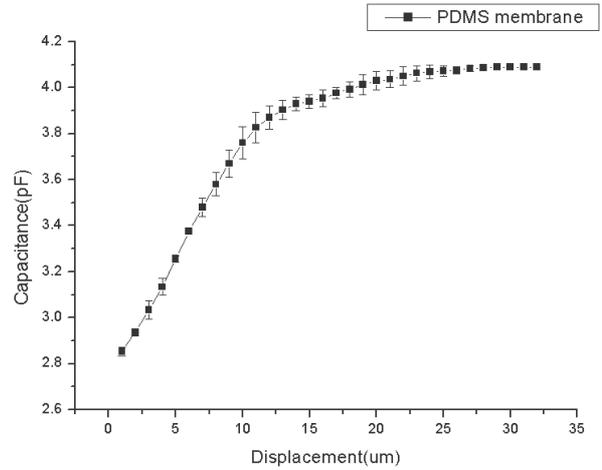


Fig. 10 Repeatability experiment results

이의 변화를 확인할 수 있다. 마지막으로 샘플링 오차와 반복 실험에 대한 오차를 확인하였다. $1\ \mu\text{m}$ 변위를 주었을 때 정전용량 값은 고정되지 않고 연속적으로 변하면서 나타난다. 그 값들 중 100 개를 임의로 샘플링 하여 평균을 내었고 그 평균값과 나머지 값들의 오차를 확인하였다[Fig. 9(a)]. 확인 결과 최대 오차는 35fF 이었으며 변위로는 약 $0.35\ \mu\text{m}$ 의 오차를 보였다. 10 회 반복 실험한 결과 최대 오차는 60fF 으로서 변위로는 약 $0.6\ \mu\text{m}$ 의 오차를 보였다[Fig. 10].

6. 결론

이 논문에서는 포신 강선 마모 깊이 측정을 위해 기존 방법들의 단점들을 보완하는 새로운 방법을 제안하였으며 제안된 방법의 구현을 위해 간극센서를 설계, 제작, 실험하였다. 간극센서는 강선을 손상시키지 않도록 설계 및 제작 되었으며 제작된 센서는 최소 발수의 사격에도 강선의 마모 깊이를 측정할 수 있는 성능을 갖고 있음을 실험을 통해 확인하였다. 제작된 간극 센서는 $1\ \mu\text{m} \sim 12\ \mu\text{m}$ 강선 높이 변화를 측정하기 할 수 있었고 분해능이 $1\ \mu\text{m}$ 였다. 포신 강선 마모를 측정하기 위해 사용되는 그래프는 대체로 선형적인 모습을 보였으며 $1\ \mu\text{m}$ 당 100fF 의 정전용량의 변화를 보였다. 실험에서 오차는 100 개의 샘플에 대해서 최대 $0.35\ \mu\text{m}$, 반복실험에 대하여 최대 $0.6\ \mu\text{m}$ 의 오차를 보였다. 실험을 통해 얻어진 그래프와 제작된 간극센서를 통해 새로운 방법의 포신 강선 마모 깊이 측정이 가능할 것이라고 기대된다.

참고문헌

- (1) Choi, K. C., Chung, H. S., Seo, Y. K., and Han, T. H.,

- 2003, "Evaluation of Gun Barrel," Army Field Manual, 9(1)-1000-202-14, pp.1-1~1-3.
- (2) Yang, S. W., Lee, J. K., and Lee, W. I., 2007, "Basic and Mechanical Maintenance Process of Gun," Army Military Supplies School Teaching Materials, pp.128~132.
- (3) Chung, D. Y., Kong, H. S., and Nam, S. H., 1999, "A Study on the Precision Wear Measurement for a High Friction and High Pressurized Gun Barrel by Using a Diamond Indenter," *Wear*, Vol. 229, pp. 1258~1263.
- (4) Baxter. L. K., 1997, "Capacitive sensors / designs and application," Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp.1~2.
- (5) Madou. M. J., 2002, "Fundamentals of Micro-fabrication / The Science of Miniaturization," CRC PRESS, pp. 21~41.
- (6) Kovacs. Gregory T. A., 1997, "Micromachined Transducers / Sourcebook," WCB/McGraw-Hill, pp. 210~273.
- (7) Lacour, S. P., Wagner, S., Huang, Z., and Suo, Z., 2003, "Stretchable Gold Conductors on Elastomeric Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 15, pp. 2404~2406.