

## 부분방전 측정을 위한 Diaphragm 센서 개발

강원중\*, 박영인, 장용우, 구지윤  
 한양대학교 전기공학과 (EM&C)

### A Development of Diaphragm Sensor for Detecting Partial Discharge

W.J. Kang\*, Y.I. Park, Y.M. Chang, J.Y. Koo  
 Dept. of Electrical Engineering of Han Yang Univ.

**Abstract** - In this work, a possible new PD detection technique, based on the Michelson Interferometer, has been proposed. Laser beam transmitted by optical fiber is spliced into two-laser beam by 50/50 coupler, one is reflected on diaphragm, which is vibrated by ultrasonic sound, and then modulated. The other one is reference beam. They are collected into 50/50 coupler making interferenced beam which could be detected by photo detector.

#### 1. 서 론

전력설비의 초고압·대용량화는 전력소비증가로 인한 필연적 결과이지만 이에 따라 설비의 대형사고 가능성도 크게 증가될 것으로 충분히 예상된다. 이러한 사고예방이나 운전, 공급신뢰도 등들을 위한 상시적인 설비의 예방진단 시스템의 필요성은 매우 절실하다.

여러 가지의 전력설비 진단방법 중, 설비의 재질이나 형태 등으로 인하여 발생하는 부분방전을 측정하여 수명 예측을 진단하는 기술이 가장 중요한 측정법으로 인정되어 널리 연구, 이용된다.[1] 부분방전 측정기법에는 전기적 진단방법과 초음파 진단방법이 있으며, 전자는 부분방전 전기적 신호를 직접 측정할 수 있으나 부분방전 발생위치의 추정이 불가능하고, 외부 전기적 잡음의 간섭이 심한 반면, 후자는 시스템이 간단하고 초기 고장검출이 용이하며, 초음파를 측정함으로써 전기잡음에 특히 강한 장점이 있어 여러 방법들이 시도되고 있다. 그러나 기존의 초음파 측정은 설비외함에 부착된 초음파 압전소자의 출력신호를 해석하기 때문에 측정감도가 낮고 전기적잡음에도 약한 문제점이 많아 신뢰도 낮은 형편이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 막막 diaphragm과 광파이버 간섭계를 이용하여 초음파 검출을 하면 전기적 잡음에 무관하며, 레이저광의 변조를 이용하기 때문에 신호감도의 향상과 신뢰도향상을 얻을 수 있는 새로운 측정기술을 제안하고자 한다.

본 연구에서는 고전압 기기 내에서 부분방전 발생시 동반되는 초음파 신호를 검출하기 위해 다음과 같은 Michelson 간섭계를 이용한 레이저 도플러 진동계를 구성하였다. He-Ne 레이저에서 나온 빛은 50/50 beam coupler에 의해 reference beam은 거울에 의해 반사되고, 발생된 초음파에 의해 diaphragm은 진동하며 입사된 modulated beam은 반사된다. 따라서 두 개의 레이저 beam 사이에 간섭현상이 발생되고, 그로 인해 레이저 beam intensity의 변화가 발생되어, 이 변화는 photo

diode detector를 이용하여 검출될 수 있다.[2] 특히, 본 연구에서 개발된 diaphragm은 고전계 발생부위에서 발생하는 초음파를 감지하여야 하므로 전기적 절연 성능이 우수하고, 레이저를 반사시키기 위한 충분한 반사율을 가져야 하기 때문에 Si wafer를 이용하여 국내의 최초로 제작하였다.

본 연구에서는 {100} Si-diaphragm 반사경을 설계·제작하고, 이를 이용한 광파이버 Michelson 간섭계를 구성하여 부분방전 초음파 측정으로 부분방전현상을 해석한다.

#### 2. Michelson 간섭계의 구성

##### 2.1 간섭계의 구성

고전압 대전력설비 내부에서 여러 가지 이유로 부분방전이 발생될 때 동반되는 초음파 신호를 검출하기 위하여 Si-반도체 diaphragm을 적용한 Michelson 간섭계를 이용한 광섬유 측정시스템을 국내의 최초로 제안하여 그림 1.과 같이 구성하였다.

그림 1.에서 보는바와 같이 He-Ne 레이저광은 input coupler를 통하여 단일모드-광파이버에 입사되면, 이는 50/50(2×2) beam coupler에 의해 신호(signal) 및 기준(reference) 레이저광으로 각각 나누어진다.[3] Reference arm을 통한 레이저광은 reflector에 의해 반사되어 다시 50/50 coupler에 입사되는 기준 신호광으로 사용된다. Signal arm으로 전파된 레이저광은 부분방전 초음파에 의해 진동되는 diaphragm에 의해 반사되면서 위상변화가 일어나 변조 신호광이 되어 50/50 coupler에 입사된다. Beam coupler에 각각 입사된 기준신호광과 변조신호광의 간섭에 의한 신호는 photo diode detector에 의해 검출되어 oscilloscope로 출력된다.

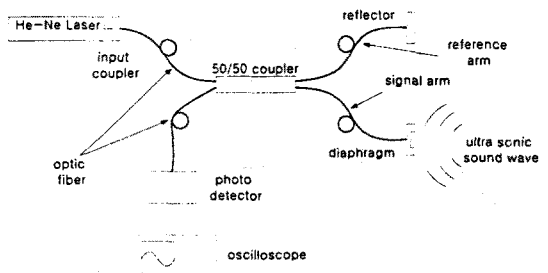


그림 1. 부분방전 초음파 검출을 위한 Michelson 간섭계

## 2.2 초음파 검출을 위한 센서의 구성

본 연구에서는 부분방전 초음파를 검출하는 센서에 사용될 diaphragm은 두께 500 $\mu$ m의 n-type 실리콘 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. 이는 초음파 발생부위가 고전계영역임을 감안할 때 diaphragm 센서가 급속박막보다 비교적 절연성을 가져야 하고, 레이저광을 충분히 반사시킬 수 있는 반사율과 박막으로 제작함에 있어서 가공의 용이성 등을 고려하여 채택하였다.

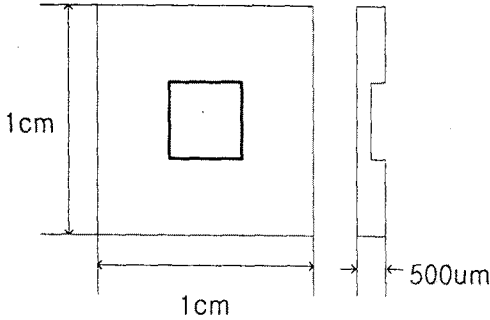


그림 2. 제작된 diaphragm

Diaphragm은 그림 2.와 같이 실리콘 웨이퍼를 정사각형으로 식각하여 1cm $\times$ 1cm의 시편으로 절단, 제작하였다. 식각할 diaphragm의 진동면 크기는 1mm $\times$ 1mm, 2mm $\times$ 2mm, 3mm $\times$ 3mm, 5mm $\times$ 5mm의 정사각형으로 각각 에칭하였다. 식각깊이는 400 $\mu$ m 이상 되게 하여 가능한 얇은 박막이 되도록 설계하여 제작된 박막의 두께는 70 $\mu$ m 정도 식각 되었다.

Signal arm에 접속된 진동센서부는 그림 3.과 같이 구성되고, holder에 여러 종류의 diaphragm을 교환 삽입하여 사용하도록 하였다.

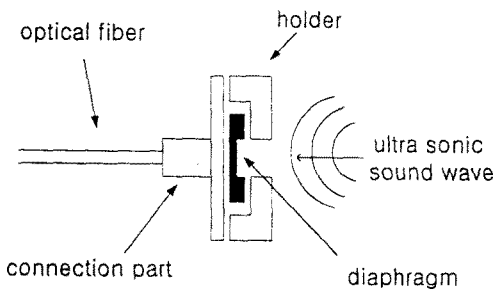


그림 3. Diaphragm을 이용해 구성한 센서

## 2.3 Diaphragm의 식각과정.

Si 단결정은 식각용액에 대하여 비등방성 식각특성을 갖고 있어 식각마스크를 일정한 결정방향에 일치시키면 측면방향의 식각이 매우 작을 뿐 아니라 식각분포를 정확하게 예측할 수 있어 본 연구에서는 마스크모양을 정사각형으로 제작하였다. 활용도가 높은 식각용액은 EPW(Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water)용액, KOH수용액(potassium hydroxide water) 등이 있으

며, 표 1.에서 보여지는 바와 같이 Si 식각율은 EPW용액과 KOH 수용액이 115  $^{\circ}$ C에서 각각 1.25 $\mu$ m/min와 1.4 $\mu$ m/min로 비슷하다. 그러나 제작될 diaphragm 시편이 장시간동안 에칭을 시켜야 하므로 SiO<sub>2</sub> 식각마스크의 식각율이 매우 작은 용액을 사용해야 한다. EPW 용액과 KOH 수용액의 SiO<sub>2</sub> 식각율은 각각 2A/min와 20A/min으로 EPW 용액이 SiO<sub>2</sub> 식각율에서 10배정도 작아 본 시편의 에칭에는 EPW 용액을 사용하였다. 본 연구에 사용할 diaphragm 박막을 제작하기 위한 EPW용액의 혼합율은 E : P : W = 75ml : 12gr : 24ml이며, 그림 4.에 보여진 측정 식각율[4]을 고려하여 stirrer가 설치된 테프론 반응조에서 114  $^{\circ}$ C를 유지하면서 300분에서 360분 동안 에칭하였다.

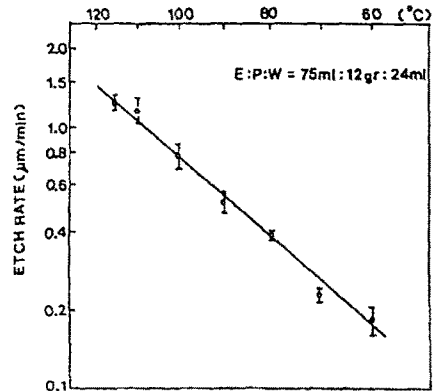


그림 4. EPW 용액의 온도에 따른 식각율.

그러나, KOH 용액을 사용하여 300분 이상의 장시간 에칭을 수행하였을 경우 Si 뿐만 아니라, 식각마스크도 대부분 손상되므로 식각마스크의 역할을 할 수 없게 된다. 본 연구에서 Diaphragm을 제작하면서 SiO<sub>2</sub> 식각마스크의 두께를 8000A 이상으로 충분히 두껍게 하여 장시간 에칭과정에서도 Si 시편에 손상이 전혀 없도록 하였다.

표 1. EPW 용액과 KOH 용액의 웨이퍼와 식각마스크의 온도에 대한 식각율 비교.

식각액	조성비	온도 ( $^{\circ}$ C)	식각율 ( $\mu$ m/min)	식각 마스크 (식각율)
Eth.D. Pyroc. Water	75ml 12gr 24ml	115	1.25	SiO <sub>2</sub> (2A/min)
	107ml 34gr 17ml	115	1.00	
KOH Water	44gr 100ml	85	1.4	SiO <sub>2</sub> (20A/min)

에칭의 공정은 그림 5.에서와 같으며 특히 웨이퍼의 경면의 상태가 손상이 되지 않도록 열적산화 과정에서 충분한 두께의 SiO<sub>2</sub> 막이 형성되도록 주의하였다.[5]

$$\omega_{\max} = \frac{p_0 a^4}{12(1-\nu^2) Et^3} \quad (2)$$

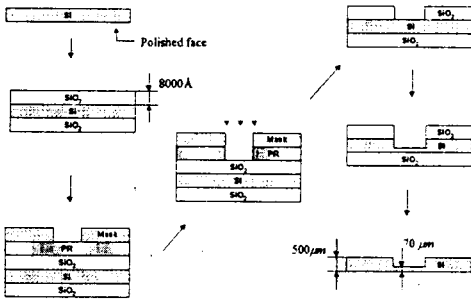


그림 5. Diaphragm 시편의 제작과정

에칭된 시편의 식각표면을 100배 확대한 사진은 그림 6과 같으며, 그림에 보는 바와 같이 에칭 표면에서는 etch-pit 현상과 중앙부가 주위보다 3 $\mu$ m 정도 두꺼운 concave-convex texture 현상이 발견되었다. 이는 식각액의 온도, 농도 및 혼합비의 불완전성에 의한 것으로 사료되며 반복과정을 통해 양호한 상태가 되도록 하였다.

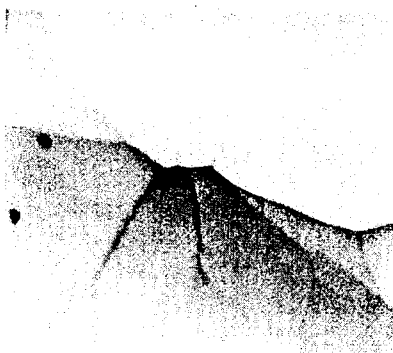


그림 6. Diaphragm 시편의 식각표면( $\times 100$ ).

## 2.4 Diaphragm의 진동 변위

제작된 diaphragm의 초음파 압력에 의한 변위는 에칭된 사각의 변을 고정시키고 에칭면에 분포하중이 가해진 것으로 생각하여 계산하였다.

Si-단결정의 6 $\times$ 6 경도텐서(단위는 [GPa])는 식 (1)로 나타낼 수 있으며, n-type {100} Si의 Young's modulus는 166 [GPa]가 된다.

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 166 & 64 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 166 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 64 & 166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 80 \end{pmatrix} \quad (1)$$

압력에 의한 박막진동의 최대 변위  $\omega_{\max}$ 는 식 (2)로 구할 수 있다. 여기서  $p$ 는 초음파 압력,  $a$ 는 정사각형 진동면 한변의 길이,  $E$ 는 Young's modulus,  $t$ 는 박막의 두께이며  $\nu$ 는 Poisson's ratio이다.

10pC의 부분방전이 발생될 때 10cm의 거리에서 측정된 압력은 6mbar 정도로 보고되고, [6] Poisson's ratio는 0.17로 계산되고[7] 또 제작된 diaphragm의 박막 두께가 70 $\mu$ m이므로 6mbar의 압력을 가정했을 때, 박막의 크기에 따른 최대 진동변위는 계산값은 표 2.와 같이 된다.

표 2. 박막의 크기에 따른 최대변위의 계산치

박막의 크기	최대 변위 (nm)
1mm $\times$ 1mm	0.155
2mm $\times$ 2mm	2.
3mm $\times$ 3mm	12.
4mm $\times$ 4mm	39.
5mm $\times$ 5mm	96.

그러므로, 표 2의 계산 결과에 따르면 박막의 크기가 3mm $\times$ 3mm이상인 경우 진동 변위가 10nm 이상이 됨을 알 수 있으며, 따라서 파장 632.8nm의 He-Ne 레이저광으로 부분방전 초음파에 의한 diaphragm 박막의 변위는 충분히 검출될 수 있다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 고전압 대전력 전력설비 내부에서 발생되는 부분방전에 기인된 초음파를 검출 할 수 있는 Si-diaphragm 박막센서를 국내외 최초로 설계 제작 개발하였다. 개발된 센서와 광파이버 Michelson 간섭계를 이용하여 부분방전에 의한 초음파 검출법을 시도하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] J.P.Steiner, "Commercial PD Testing", IEEE Elec. Insul. Magazine, Vol 7, No 1, pp. 20-33, 1991
- [2] Hecht, "Optics", Addison Wesley, 1987
- [3] A.Zargari and T.R.Blackburn, "Modified Optical Fiber Sensor for PD Detection in High-Voltage Power Equipment", Conf. Rec.1996 IEEE, 1996
- [4] 주병권 외, "실리콘의 비등방성 식각상태의 고찰과 집적 센서용 미세기계 구조 제작에의 응용", 대한전기학회 논문지, vol. 39, No 1, pp. 75-82, 1990
- [5] Robert F.Pierret, "Semiconductor Device Fundamentals", Addison Wesley, 1996
- [6] A.Zargari et al., "An Ultra sonic Optical Fiber Sensor for Partial Discharge Detection", 9th ISH, 5581, 1995
- [7] K.E. Spiering et al., "On chip decoupling zone for package-stress reduction", Sensors and Actuators, Vol.A-39, p.149, 1993