

논문 2001-10-4-02

**Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기를 이용한 저주파 전기센서의 개발**

최 영 규

**Developments of Low Frequency Electric Field Sensor using Ti:LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator**

Young-Kyu Choi

**요 약**

비대칭 도파로 마흐젠더(Mach-Zehnder)형 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기를 이용하여 아주 낮은 저주파대(ELF:Extremely Low Frequency)의 전기계측을 위한 센서개발을 시도하였다. Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기를 이용하는 전기센서의 감도는 광변조기의 전극구조에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 이의 확인을 위한 실험적 연구로서 플레이트(plate)형 프로브안테나를 부착한 광변조기를 제작하여 저주파 전기계측을 측정하였다. 전기계측의 측정은 주파수범위 60 Hz 에서 100 kHz 까지, 전기계측도 0.1 V/cm 에서 60 V/cm 까지의 범위를 측정하였다. 10 mm×10 mm 프로브안테나의 경우, 60 Hz, 0.1 V/cm 의 피측정전계에서 10<sup>-2</sup> mV 의 감도를 얻을 수 있었다. 저주파 전기계측을 측정하기 위해서는 넓은 유효면적을 갖는 플레이트형 프로브안테나가 일반적인 다이폴 안테나보다 유용하다는 것을 확인하였다. 피측정 전자계의 주파수 범위에 따라 안테나의 유효면적을 적당히 조절한다면 더 좋은 센서의 감도를 얻을 수도 있다.

**Abstract**

The use of an asymmetric Mach-Zehnder interferometric amplitude modulator to measure a relatively low frequency electric field strength is described. The sensitivity of an electric field sensor using a Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator is strongly affected by the shape of a electrode(probe antenna). To measure the low frequency electric field, a probe antenna of wide effective area is more useful than the usual dipole antenna. As a proof of this, the optical modulator was fabricated with a plate-type probe antenna and the usefulness of this antenna tested for measuring low frequency electric field strength. Measurements were performed in the range 0.1 V/cm to 60 V/cm at 60 Hz through 100 kHz. Using a probe antenna of 10 mm×10 mm, the output voltage of 10<sup>-2</sup> mV was measured with respect to the electric field strength of 0.1 V/cm at 60 Hz. By increasing the effective area of the probe antenna, better sensitivity is obtainable over the measured range.

**1. 서 론**

광화이버 시스템은 절연성, 무유도성이므로 전기계측에 광화이버계 센서를 이용하면 피측

정 전자계를 교란시키지 않고 고감도 계측을 실시할 수 있다. 뿐만 아니라, 광변조기를 이용하는 센서 프로브는 광대역의 주파수 범위를 커버하면서도 경량, 초소형으로 제작할 수 있다. 또한, 광파이버의 저손실성은 측정된 신호를 센서의 헤드부에서 비교적 멀리 떨어진 신호처리부까지 손실 없이 효과적으로 전달할 수 있다.

신라대학교 광전자공학과(Department of Optical Engineering, Silla University)

<접수일자 : 2001년 2월 23일>

지금까지 전기센서는 고전력 전계의 계측을 위

해서 벌크형 광변조기를 주로 사용하여 왔다. 그러나, 벌크형 광변조기는 감도가 매우 낮아서 저전력 전계를 측정하는 데는 부적당하므로, 센서의 감도를 올리기 위하여 여러 가지 형태의 광도파로를 이용한 전계센서의 연구가 진행되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 도파로형 광변조기는 전극(프로브안테나)으로 감지되는 아주 낮은 저전력으로도 구동할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

최근, 생활주변에 각종 전자장비가 급속히 보급됨에 따라 EMC(Electromagnetic compatibility)연구에 대한 관심이 높아지고, 저주파, 저전력 전계측에 대한 요구가 날로 증가되고 있다. 그러나, 고주파, 고전력 전계측에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나, ELF( $f < 3$  kHz)에 대한 연구의 결과는 매우 드문 것이 현실이다.

도파로형 광변조기를 이용하는 전계센서는 광변조기가 피측정 전계를 교란시키지 않을 정도로 작게 제작할 수 있기 때문에 원래 고주파 전계측을 위하여 개발되었다. 센서의 감도를 향상시키기 위해서는 프로브안테나의 유효면적을 넓힐 필요가 있으나, 면적을 넓게 할 경우 고주파 전계에서는 피측정 전자계의 교란이 일어나므로 고감도 측정이 불가능하게 된다. 결과적으로, 이러한 고주파 전계센서의 감도는 프로브안테나의 유효면적에 의해서 제한을 받을 수밖에 없게 된다.

그러나, 저주파 전계측에서는 프로브안테나의 크기가 센서의 감도를 제한하는 결정적인 요인이 되지는 못한다. 따라서, Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기를 이용하는 전계센서의 전극구조를 개선하면 고주파 전계측은 물론 매우 낮은 저주파 전계도 효과적으로 측정할 수가 있다.

본 논문에서는 비대칭 광도파로를 이용하는 마하젠더(Mach-Zehnder)간섭형 광강도변조기를 이용하여 저주파 전계를 측정하기 위한 센서개발을 시도하였다. 센서의 감도는 프로브안테나의 형상에 따라 크게 영향을 받는다. 저주파 전계측의 경우에는 일반적인 다이폴 안테나보다도 넓은 유효면적을 가진 플레이트형(plate-type) 프로브안테나가 효과적이다. 이의 확인하기 위하여 광변조기를 제작한 후, 전극에 플레이트형 프로브안테나를 부착하고 60 Hz 에서 100 kHz 에 걸친 비교적 낮은 저주파수 영역의 저전력 전계 측정실험을 실시하였다.

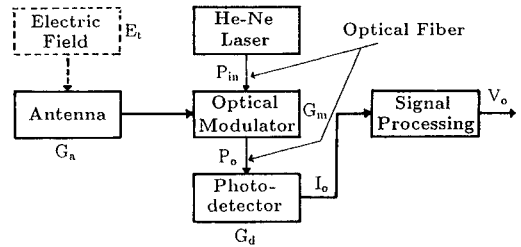


Fig. 1. Block diagram of an electric field sensing system

## 2. 센서시스템의 구성

도파로형 광변조기를 이용하여 전계를 측정할 경우, 변조기의 전극은 전계강도를 검출하기 위한 프로브안테나의 역할을 하게 된다. 이러한 계측 시스템의 이해를 돕기 위하여 그림 1에 그 예를 보였다. 광검파기의 출력전류  $I_o(\omega)$  와 피측정 전계 강도  $E_i(\omega)$  로 정의되는 이러한 시스템의 특성식은

$$I_o(\omega) = G_d G_m P_{in} E_i(\omega) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,  $G_d$  와  $G_m$  은 각각 광검파기와 광변조기의 전달함수,  $P_{in}$  은 입력 광의 평균전력이며,  $\omega$  는 피측정 전계의 각주파수이다. 식(1)에서 광화이버의 손실은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다. 비대칭 마하젠더 간섭형 광변조기의 광바이어스를  $\pi/2$  로 하면<sup>[4]</sup> 광변조기의 출력은

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{in} \left\{ 1 - \sin \left( \pi \frac{V_i}{V_\pi} \right) \right\} \\ &\approx \frac{1}{2} P_{in} + \frac{1}{2} P_{in} \pi \frac{V_i}{V_\pi} \quad (\text{for small } V_i) \end{aligned} \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 여기서  $V_i = G_a E_t$ ,  $G_a$  는 프로브 안테나의 전달함수(광변조기의 전극)이며,  $V_\pi$  는 광변조기의 반파장 전압이다. 식(2)에서 광변조기는 소신호 모델일 경우에는 선형시스템으로 해석이 가능하여 변조기의 전달함수는

$$G_m = \frac{\pi V_i}{2 V_\pi} \quad (3)$$

로 된다. 프로브안테나의 특성은 이러한 계측 시스템의 감도와 대역을 결정하는 데 매우 중요하다. 본 논문에서는 특성의 추정이 용이한 플레이트형 프로브 안테나에 대하여 고찰하기로 한다.

플레이트형 프로브안테나의 전달함수는 Ito 등<sup>[5]</sup>의 논문에 의하면

$$G_a = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} \frac{\epsilon_o S}{C} \quad (4)$$

$$\simeq \frac{\epsilon_o S}{C} \quad (\omega \gg 1/CR)$$

로 표현된다. 여기서, C 와 R 은 광변조기 프로브 안테나의 컨덕턴스와 병렬저항이고,  $\epsilon_o$  는 진공유전률, S 는 플레이트형 프로브안테나의 단면적이다.

만일, APD를 광검파기로 사용하면 광전류<sup>[6]</sup>는

$$I_{ph} = M\eta \frac{e}{h\nu} P_{in} \quad (5)$$

으로 된다. 여기서  $M$ =APD의 증배계수,  $\eta$ =양자계수,  $e$ =전하량,  $h$ =프랑크상수,  $\nu$ =광원의 주파수이다. 식(5)에서 이 시스템의 광검파기의 전달함수는

$$G_d = M\eta \frac{e}{h\nu} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 각 전달함수를 식(1)에 대입하면, 이러한 시스템의 출력전류는

$$I_o(\omega) = M\eta \frac{eP_{in}}{h\nu} \frac{\pi}{2V_\pi} \frac{\epsilon_o S}{C} E_i(\omega) \quad (7)$$

로 표현된다. 식(7)에서 큰 입력 광강도, 낮은 반파장전압, 넓은 면적의 프로브안테나일수록 높은 센서의 감도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 피측정 전자계의 주파수 범위에 따라서 이용할 수 있는 광강도와 프로브 안테나의 면적에는 한계가 존재한다. 너무 큰 광강도는 LiNbO<sub>3</sub> 기판에 광손상을 일으키는 원인이 된다. 광강도를 조절하여 센서의 감도를 향상시키기 위한 연구의 한 예로 25 mW 출력의 Nd:YAG 를 광원으로 사용한 보고<sup>[7]</sup>가 있다.

### 3. 감도의 추정

우선, 광원의 잡음이 무시할 수 있을 정도로 작은 이상적인 시스템이라고 가정하면, 이 시스템의 주 잡음원은 광검파기의 백색잡음과 열잡음이다. 잡음의 총전력은 시간평균의 자승값으로

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_s^2} + \overline{i_t^2} \quad (8)$$

$$= 2\overline{I} M^2 FB + \frac{4kTB}{R}$$

으로 표현된다. 여기서,  $\overline{I}$ =광전류의 시간평균,  $B$ =광검파기의 대역,  $k$ =볼츠만상수,  $T$ =절대 온도,  $F$ =APD의 과잉잡음계수이다.

식(7)과 식(8)에서 이 시스템의 S/N비는

$$\frac{S}{N} = \frac{I_o(\omega)^2}{\overline{i_n^2}} \quad (9)$$

$$= \frac{\left\{ M\eta \frac{eP_{in}}{h\nu} \frac{\pi}{2V_\pi} \frac{\epsilon_o S}{C} E_i(\omega) \right\}^2}{2\overline{I} M^2 FB + 4kTB/R}$$

이다. 여기서,  $S/N=1$  을 이 시스템의 최소 검파가능 전계강도라고 가정하면, 식(9)에서 검파가능 최소전계는

$$E_{t,\min} = \frac{h\nu}{M\eta e} \frac{2V_\pi}{\pi} \frac{C}{\epsilon_o S} \frac{\sqrt{(2e\overline{I}) + 4kT/R}}{P_{in}} \quad (10)$$

이 된다. 단, 여기서는 계산상의 편의를 위하여 대역폭은  $B=1$ , 잡음계수는  $F=1$  로 하였다. 식(10)에 안테나 프로브면적  $S=80 \text{ mm}^2$ , 반파장전압  $V_\pi=7 \text{ V}$  로 하고 각 변수에 대표적인 값을 대입하면 검파 가능한 최소 전계강도는 약  $10^{-2} \text{ V/m}$  가 된다. 이 값은 Ito 등에 의해서 보고된 참고문헌 5와 거의 일치하는 값이다.

### 4. 광변조기의 제작

LiNbO<sub>3</sub> 광다바이스에 장주기 및 단주기 직류

드리프트 현상이 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한, 광변조기가 전계계측 센서로 사용될 경우, 센서의 헤드부는 직류 바이어스전압을 인가하지 않고 구동하는 것이 바람직하며, 센서의 출력은 입력전압에 따라 선형적으로 변해야 한다. 이러한 직류바이어스에 의한 문제는 간섭계 도파로의 길이를 기하학적으로 차이가 나도록 설계하여 광로장을 변경함으로써 해결할 수 있다. 이 방법은 Bulmer<sup>[4]</sup> 등에 의해 제안되어 광학적 바이어스 기술로 잘 알려져 있다.

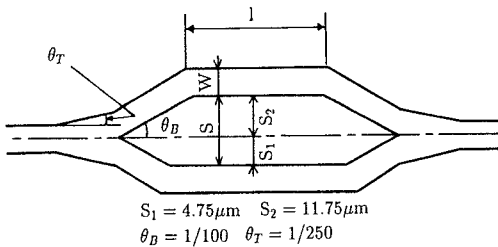
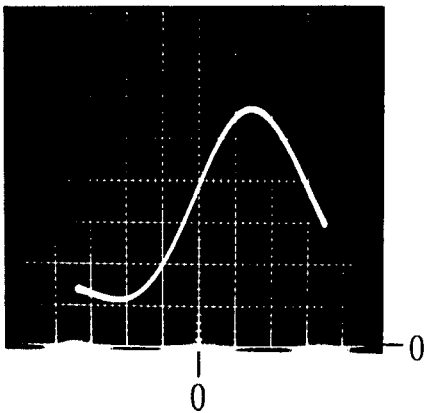


Fig. 2. Design structure and parameters of asymmetric waveguide



horizontal axis : applied voltage 5V/div  
vertical axis : output voltage 5mV/div

Fig. 3. Modulation performance of sensor

광학적 바이어스를  $\pi/2$  로 하기 위해서는 광파장의 1/4의 차이가 나도록 간섭계의 도파로를 설계하여야 한다. 설계구조와 도파로의 파라미터는 그림 2에 보였다. 설계 파라미터는 He-Ne레이저( $0.633\mu\text{m}$ )를 대상으로 하였다. 이러한 조건에서 광도파로는 기본파만 전달되며, Y-분기에서의 손실은 1 dB 이하<sup>[8,9]</sup>로 줄일 수 있다.

Z-cut LiNbO<sub>3</sub> 기판에 30 nm 의 Ti 을 증착하여 비대칭 광도파로를 제작하였다. 포토리소그래피와 화학적 습식 에칭법으로 광도파로의 패턴을 형성하였다. 도파로의 외확산을 줄이기 위하여 순수를 통과시킨 산소 분위기 중에서 1000 °C, 5 시간 동안 열확산시켰다. 스퍼터링법에 의해 두께 150 nm 의 SiO<sub>2</sub> 버퍼층을 형성한 후, 200 nm 두께의 Al 을 전극용 박막으로 증착하였다. 전극은 길이 17.22 mm, 극간 16.5  $\mu\text{m}$ , 폭은 15  $\mu\text{m}$  로 패턴을 형성하였다. 기판의 측면은 편파보존 광화이버를 부착하기 위하여 경면 연마하였다. 마지막으로 동판으로 된 외부 프로브안테나를 기판의 전극에 부착하여 센서를 완성하였다.

### 5. 센서로서의 광변조기 특성

센서의 특성을 측정하기 위하여 변조신호를 직접 전극에 인가하였다. 변조기의 출력특성은 그림 3에 보였다. 도파로의 설계시에 예상한 것처럼 인가 바이어스 전압이 0(zero)인 점에서 최대 광강도의 1/2 지점에 센서의 동작점을 정할 수 있는 좋은 특성이 나타났다. 피측정전계는 면적 10 cm×10 cm 동판을 사용하여 2.5 cm 간격의 평행판 콘덴서를 만들어서 발생시켰다. 시험전계 신호는 60 Hz, 500 Hz, 100 kHz의 세 종류의 낮은 주파수를 선정하였다. 센서의 헤드부는 면적 5 mm×5 mm 길이 2.5 cm의 테프론 봉으로 지지대를 만들어 고정하였다. 테프론은 비유전상수가 2.05이므로 이러한 테프론 지지대가 피측정 전자계의 교란은 유발하지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 전체적으로 제작된 센서의 헤드부에 의한 피측정 전자계의 교란은 무시할 수 있을 정도로 작아서 실험의 결과에는 영향을 미치지 않는 것으로 예상할 수 있다.

그림 4처럼 전계강도를 검출하기 위한 외부 프로브안테나는 플레이트형이다. 프로브 안테나의 모양에 따른 센서의 감도차를 확인하기 위하여, 면적 10 mm × 10 mm(안테나 A)프로브, 면적 10 mm × 10 mm(안테나 B)프로브, 안테나를 부착하지 않은 세 가지의 경우로 나눠서 실험을 실시하였다. 검출된 광신호는 직류성분의 진폭을 측정하기 전에 증폭시켰다. 검파된 광신호가 너무 작을 때는 로크인(lock-in) 앰프를 사용하여 검파된 신호를 증폭하였다.

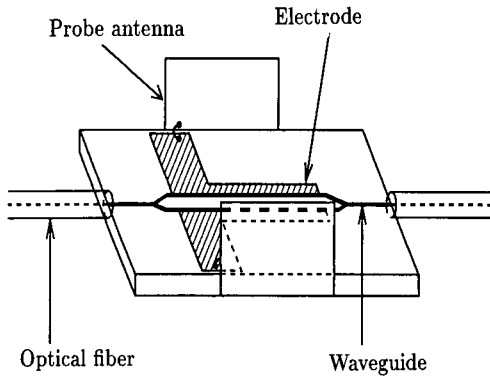
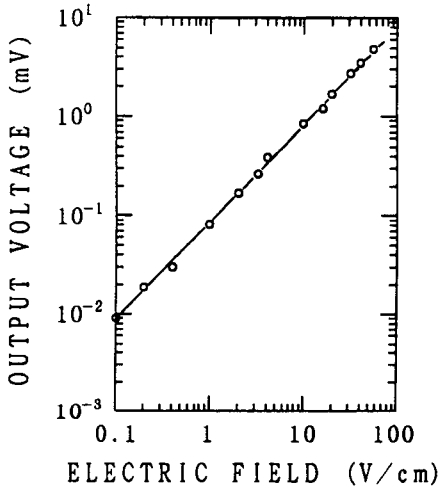
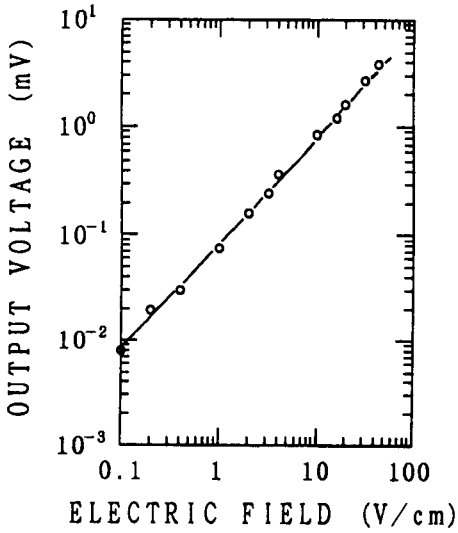


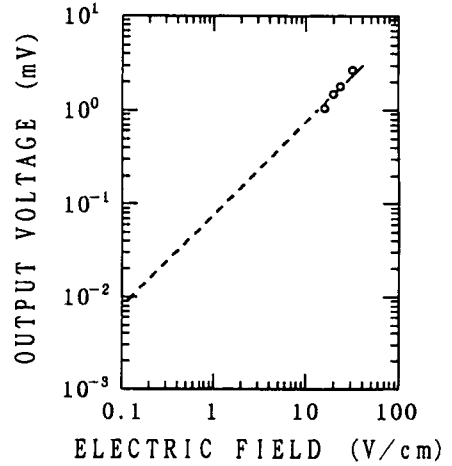
Fig. 4. Configuration of the sensor part



(a) 60Hz

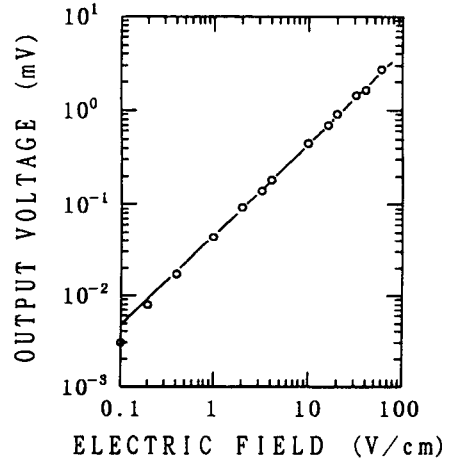


(b) 500Hz

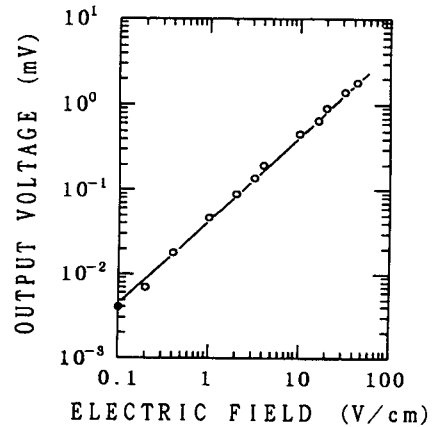


(c) 100kHz

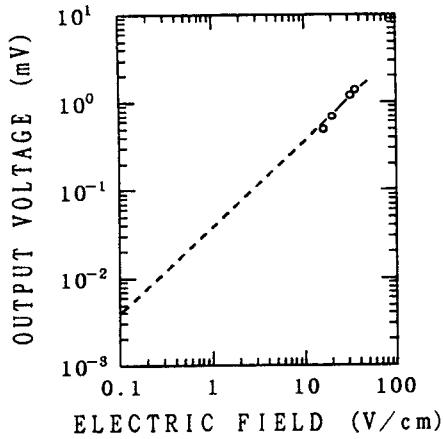
Fig. 5. Results of electric field measurement (External electrodes 10 mm × 10 mm)



(a) 60Hz

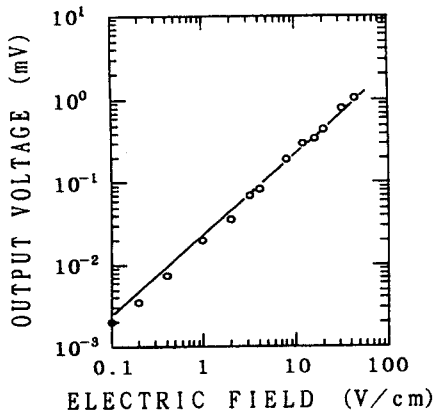


(b) 500Hz

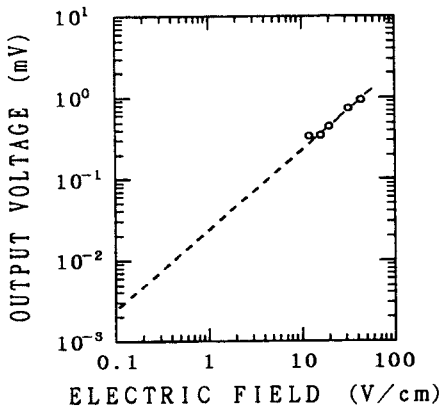


(c) 100kHz

Fig. 6. Results of electric field measurement (External electrodes 10 mm × 5 mm)



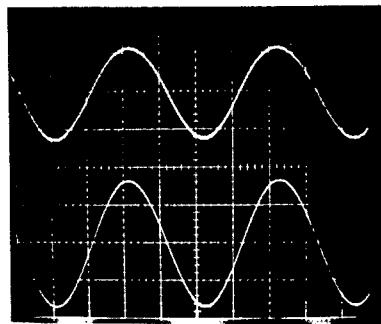
(a) 60Hz



(b) 500Hz

Fig. 7. Results of electric field measurement (Without external electrodes)

그림 5, 6, 7은 시험 직류 전계의 크기와 검파된 직류 출력전압과의 관계이다. 이 그림들은 측정주파수 범위에서 두 양들 사이에 선형적인 관계가 성립한다는 것을 나타내고 있다. 그림 5와 6 처럼 센서의 감도는 프로브안테나의 크기에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 0.1 V/m, 60Hz 의 시험 전계 강도에 대하여 프로브안테나 A의 출력은  $10^{-2}$  mV 였고, 프로브안테나 B의 출력은  $4.5 \times 10^{-3}$  mV 였다. 두 개의 서로 다른 안테나의 감도를 비교해 보면 안테나 A의 감도가 안테나 B의 감도의 약 2 배 정도이다. 프로브안테나를 부착하지 않은 경우에는 본 실험계로는 측정할 수 없는 아주 미약한 광변조 만이 걸렸으며, 주파수에 따른 변화는 거의 없었다. 이 실험의 결과는 식(7)의 결과와 정량적으로 일치한다. 그림 8에는 출력신호의 파형을 보였다. 측정된 신호의 파형은 거의 왜곡이 없음을 알 수 있다.



horizontal axis : time 500 $\mu$ s/div  
vertical axis  
top : output voltage 2mV/div  
bottom :  
measured electric field 20 (V/cm)/div

Fig. 8. Observed electric field waveform

## 6. 결 론

비대칭도파로 간섭형 광변조기를 이용한 저주파 전계계측용 센서의 개발을 고찰하였다. Ti:LiNbO<sub>3</sub> 광변조기로 계측용 센서를 제작하고 60 Hz 에서 100 kHz 범위에 걸친 전계계측 실험을 실시하였다. 0.1 V/cm 에서 60 V/cm 까지의 전계강도를 측정할 수 있었다.  $10^{-2}$  V/m 의 감도는 예를 들어 고압전송선 밑에서 ELF( $f < 3$  kHz)

의 측정 등의 공학적 응용에 실용화 할 수 있는 대단히 유용한 값이다. 센서의 감도는 외부전극(프로브안테나)의 모양에 따라 민감하게 변하는 것이 확인되었다. 유효면적이 넓은 프로브안테나일수록 좋은 감도를 나타냈다. 그러나, 너무 넓은 프로브 안테나는 전계를 교란시킬 염려가 있으므로 측정하고자 하는 주파수 범위에 따라서 유효면적의 최적화가 필요하다. 앞으로도 이러한 전계센서의 감도와 응답속도를 향상시키기 위해서는 지속적인 연구가 필요하다. 고감도 센서를 실현하기 위해서는 광변조기 그 자체뿐만 아니라 광검파기나 광원의 잡음을 최소화할 위한 연구도 병행할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구의 일부는 2000학년도 신라대학교 교내 연구비의 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Chang, C. N. Vittioe, B. T. Neyer, and W. P. Ballard, "An electrooptical technique for intense microwave measurements," *J. Appl. Phys.*, Vol. 57, No. 11 p. 4843-4848, 1985.
- [2] V. B. Baglikov, R. Y. Dolinin, E. M. Zolotov, V. M. Pelekhatyi, and R. F. Tavlykaey, "Investigation of an electric field sensor based on an integrated optical Mach-Zehnder modulator," *Sov. J. Quantum Electron.*, Vol 18, No. 10 p. 1353-1355, 1988.
- [3] C. H. Bulmer, "Sensitive, highly linear lithium niobate interferometers for electromagnetic field sensing," *Appl. Phys. Lett.*, Vol 53, No. 24, p. 2368-2370, 1988.
- [4] C. H. Bulmer, and W. K. Bruns, "Linear interferometric modulators in Ti:LiNbO<sub>3</sub>," *IEEE J. Lightwave Technol.*, LT-2, No. 4 p. 512-521, 1984.
- [5] H. Ito, T. Ichikawa, S. Kato, M. Matsuta, and N. Takahashi, "Measurement of ELF field strength using Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide modulator," *IEICE Technical Report(Japan) EMCJ90-97*, 1992.
- [6] S. M. Sze, 'Physics of semiconductor devices', John Wiley & Sons, 2nd edn. 1981.
- [7] K. Tajima, N. Kuwabara, and F. Amemiya, "Highly sensitive electric field sensor using LiNbO<sub>3</sub> optical modulator," *IEICE Trans.*, E-74, No. 7, p. 1941-1943, 1991.
- [8] P. S. Cross, R. A. Baumgartner, and B. H. Kolner, "Microwave integrated optical modulator," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 44, No. 5, p. 486-488, 1984.
- [9] T. R. Ranganath, and S. Wang, "Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> branched-waveguide modulators: performance and design," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-13, No. 4, p. 290-295, 1977.

---

著 者 紹 介

---

**최 영 규**

1983년 중앙대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)

1988년 교토대학 대학원 전자공학과 석사과정 (공학석사)

1992년 교토대학 대학원 전자공학과 박사과정 (공학박사)

1993년 후쿠이대학(일본) 전자공학과 전임강사  
현재 신라대학교 광전자공학과 교수

주관심분야 : 광도파로소자, 광계측 및 광센서,  
초고속광변복조, 나노포토닉스, 근접장광응용