

# 반사간섭형광변조기를 이용한 저주파 전자계 계측센서

## Low Frequency Electric Field Sensor using a Reflective Interference Type of Optical Modulator

崔 泳 圭<sup>\*</sup> · 金 紀 來<sup>\*</sup>

(Young-Kyu Choi, Girae Kim)

**Abstract** - We proposed an optical modulator of reflective type to compose the electric field sensor, and theoretically analyzed the performance and characteristics. For the high sensitivity of the sensor, a method to improve the modulation index of the modulator was presented. The electric field sensor using Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide was fabricated and qualitatively investigated the characteristics by measuring the low frequency electric field. Even though the sensor showed relatively low modulation index, the electric field strength of 10<sup>2</sup>V/m was measured. The experimental results revealed the utilities of this type electric field sensor.

**Key Words** : optical modulator, electric field sensor, dielectric waveguide

### 1. 서 론

광파를 이용한 계측법은 전기적, 기계적인 다른 방법에 비하여 시간영역, 공간영역, 주파수영역에서 초고속, 초고밀도, 초고분해능 계측이 가능하므로 극한적 계측에 널리 이용되고 있다[1-3]. 측정 대상에 따라 여러 종류의 광 IC를 이용하는 전자계 계측용 센서가 개발되었으나[4-8], 광범위에 분포한 미약한 저주파[9], 또는 초고주파 전계의 정밀한 계측에는[10] 도파로형 광변조기를 센서의 검지부로 이용하는 것이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다.

지금까지 전계 계측용 광센서로는 분기 간섭형 광변조기를 주로 이용하여 왔다. 그러나 이러한 형태의 광센서는 변조기의 양단에 광섬유를 부착하게 되므로 광의 입출력에 따른 파워의 손실이 커져서 고감도화에 한계가 있을 뿐만 아니라 공간적인 기동성에도 많은 제약이 있었다[11, 12].

본 논문에서는 센서 프로브까지의 광 입출력을 단 한 개의 광섬유로 처리하여 광섬유 접속에 의한 광파워 손실을 줄임으로써 센서의 기동성과 감도를 크게 향상시킬 수 있는 반사 간섭형 광변조기를 이용하는 전자계 계측 센서의 개발을 시도하였다. 먼저, 반사 간섭형 광변조기를 설계하여 그 동작원리와 특성을 이론적으로 해석하고 이를 센서의 검지부로 활용하기 위한 고감도화의 방법을 제시하였다. 그리고 광변조기를 제작하여 특성을 평가하고, 이를 이용하여 센서 프로브를 구성한 후 저주파 전계계측을 실시하였다.

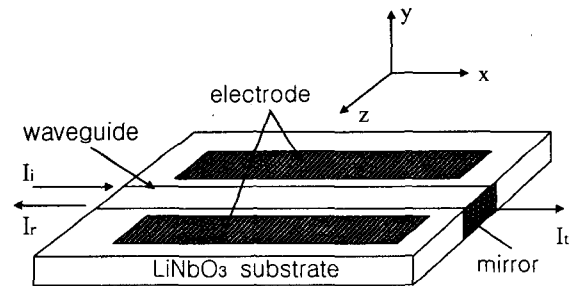


그림 1 반사 간섭형 광변조기의 개형

Fig. 1. Schematic configuration of the reflective interference type of optical modulator.

### 2. 반사 간섭형 광변조기의 센서 구성 원리

그림 1은 반사 간섭형 광변조기의 개형이다. 도파로의 좌측 끝으로 광을 입사하고, 우측 끝에는 밀러를 제작하여 광을 반사시킨다. 단, 밀러의 반사율은 1 보다 작은 것으로 하여 투과광이 발생하는 것으로 가정한다. 반사된 광은 입사단의 광섬유를 통하여 도파로 밖으로 나온 후, 빔 스피리터(splitter) 또는 서큘레이터(circulator)를 이용하여 검출부까지 유도한다. 이 경우 도파로와 광섬유의 접속부에서 굴절률의 차에 의해 광의 다중반사가 발생하여 광도파로는 페브리-페로 공진기(Fabry-Perot resonator)를 구성하게 된다. 따라서 광이 도파로를 진행할 때 위상을 변조시켜 실효 광로장(optical path)을 변화시키면 반사 광강도나 투과 광강도가 변하게 된다. 전자계의 신호 검출에 반사광을 이용하면 광의 입출력이 한 개의 광섬유 접속으로 가능하게 되어 센서 프로

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 新羅大 工大 電子工學科 教授 工博  
E-mail : ykchoi@silla.ac.kr

\* 正會員 : 新羅大 工大 電子工學科 教授 工博  
接受日字 : 2005年 7月 9日  
最終完了 : 2005年 9月 3日

브를 구성하는데 아주 간편한 구조가 된다.

변조기를 구성하는 기판은 Y-cut LiNbO<sub>3</sub>를 이용하여 x 방향으로 도파로를 제작하고, 도파로에 진행하는 광을 TE-like mode로 하면 기판의 가장 큰 전기광학계수 r<sub>33</sub>을 이용할 수 있으므로 고효율의 광변조가 가능하다.

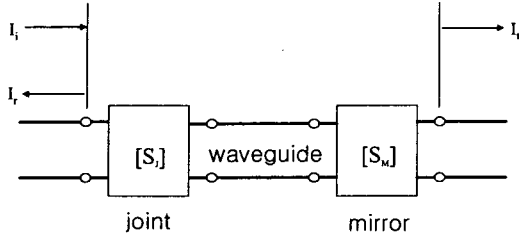


그림 2 반사 간섭형 광변조기의 전송선로 모델  
Fig. 2 Transmission line model of the reflective interference type optical modulator.

### 3. 반사 간섭형 변조기 동작 원리

반사 간섭형 광변조기의 동작원리는 그림 2 처럼 전송선로로 모델링하면 해석이 간편하다. 도파로는 평면파의 전송선로, 입사측 단면 및 밀러측은 4단자 회로망으로 표현할 수 있다. 그림 2처럼 도파로 양단 회로망의 S-파라미터를 각각

$$[S_J] = \begin{bmatrix} r_1 & t \\ t_1 & r \end{bmatrix}, [S_M] = \begin{bmatrix} r_2 & t \\ t_2 & r \end{bmatrix} \quad (1)$$

으로 표현하자. 여기서, r<sub>1</sub>, r<sub>1</sub>'와 t<sub>1</sub>은 각각 광섬유 접속부에서의 반사계수와 투과계수를, r<sub>2</sub>, r<sub>2</sub>'와 t<sub>2</sub>는 각각 밀러부에서의 반사계수와 투과계수를 나타낸다. 이 모델에서 입력광 강도 I<sub>i</sub>에 대한 반사광 강도 I<sub>r</sub> 및 투과광 강도 I<sub>t</sub>는

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{\{r_1 - r_2'(r_1 r_1' - t_1^2)e^{-2\alpha}\}^2 + 4r_1 r_2'(r_1 r_1' - t_1^2)e^{-2\alpha} \sin^2 \phi}{(1 - r_1' r_2' e^{-2\alpha})^2 + 4r_1 r_1' e^{-2\alpha} \sin^2 \phi} \quad (2)$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{|t_1 t_2|^2 e^{-2\alpha}}{(1 - r_1' r_2' e^{-2\alpha})^2 + 4r_1 r_1' e^{-2\alpha} \sin^2 \phi} \quad (3)$$

으로 구해진다.

여기서, α는 도파로의 입사단에서 밀러까지 광이 전파하는 사이에 일어나는 감쇠이며, φ는 그 사이에 진행되는 위상 변화이다. 위상변조가 걸리면 φ가 변하고, 이것에 의해 I<sub>r</sub> 및 I<sub>t</sub>의 강도변조가 일어난다. 전극에 전압 V가 인가되었을 때, φ의 변화량 Δφ는

$$\Delta\phi = \frac{\pi n^3 r_{33} L V}{\lambda d} \quad (4)$$

로 된다. 여기서, L, d는 각각 전극의 길이와 전극간 간격, n은 LiNbO<sub>3</sub>의 이상광 굴절률이다. λ는 광의 파장, Γ는 인가전

계 저감계수로 굴절을 변화에 기여하는 전계의 비율이다. 광강도는 인가전압에 대하여 주기적으로 변하게 되고 최대치에서 최소치까지 변하는데 필요한 전압을 반파장 전압 V<sub>π</sub>라 한다. 이것은 입사측 단면까지 반사된 광의 위상을 π만큼 변화시키는데 필요한 전압으로 식(5)와 같이 주어진다[3].

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{2n^3 r_{33} L \Gamma} \quad (5)$$

식 (5)에 구체적인 값을 대입하면 반사 간섭형 광변조기의 동작특성을 구할 수 있다. 표 1은 계산에 이용한 파라미터의 값들이다. φ는 전압을 인가하지 않았을 때 π의 정수배를 취하는 것으로 한다.

표 1 계산에 이용한 파라미터와 사용값  
Table 1 Modulator parameters and value

파라미터	사용값
전극간격 : d	10 μm
전극길이 : L	5 mm
도파로의 감쇠 : α	1dB
광의 파장 : λ	6328 Å
인가전계감쇠계수 : Γ	0.5

입사측 단면의 S-파라미터는 공기와 LiNbO<sub>3</sub>의 굴절률로만 결정되는 것으로 하여,

$$-r_1 = r_1' = 0.375 \quad (6)$$

$$t_1 = \sqrt{1 - r_1'^2}$$

로 표현된다. 밀러부의 S-파라미터는 밀러의 전력반사계수를 R<sub>2</sub>라 하면,

$$r_2 = r_2' = -\sqrt{R_2} \quad (7)$$

$$t_2 = j\sqrt{1 - R_2}$$

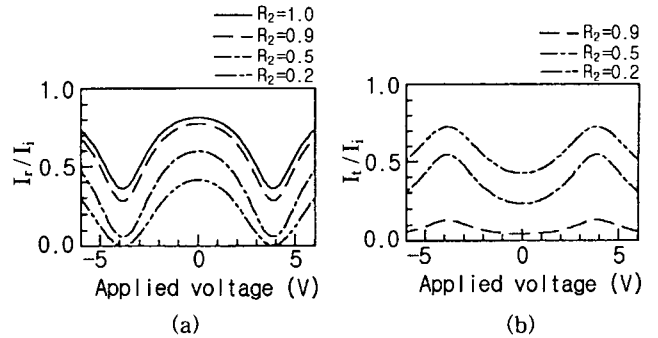


그림 3 광변조기의 (a) 반사, (b) 투과광 강도 특성  
Fig. 3 Reflected and transmitted power characteristics

로 나타낼 수 있다.  $R_2$ 를 파라미터로 취한 광변조기의 특성을 그림 3에 보였다. 이 계산 예에서  $V_x=3.86V$ 이다. 광 강도의 최대치와 최소치의 차를 반사 간섭형 광변조기의 변조도라 정의하면, 반사광 강도의 경우는  $R_2$ 가 어느 일정치 이상의 값이 되면 변조도는 거의 일정하다. 투과광 강도의 경우는  $R_2$ 가 그다지 크지 않을 경우에는 변조도가 어떤 일정한 값을 유지하고 있으나,  $R_2$ 가 1에 가까운 값이 되면 투과하는 광량이 적어지기 때문에 변조도가 작아진다. 반사광과 투과광을 비교하면 도파로의 감쇠 때문에 반사광의 경우가 변조도가 커지게 되므로, 반사광을 이용하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 이러한 경우에 밀러의 반사율은 어느 일정한 값 이상으로 크게 하면 되고 꼭 1이 되도록 할 필요는 없다.

4. 센서 프로브의 고효율화

앞 절에서 검토한 구조에서는 입사단면의 반사가 적으므로 이것에 의해 변조도가 크게 제한되었다. 입사 단면을 하프밀리러로 제작하여 반사율을 크게 하면, 변조효율을 향상시킬 수 있다. 여기서 뜻하는 고효율화는 반파장 전압을 줄이는 것이 아니라, 변조도 (광출력의 최대치와 최소치의 차)를 크게 한다는 것을 의미한다. 입사단면을 하프밀리러로 할 경우, 입사단 하프밀리러의 S-파라미터는 전력반사계수를  $R_1$ 이라 하면

$$r_1=r_1'=-\sqrt{R_1} \tag{8}$$

$$t_1=\sqrt{1-R_1}$$

로 된다. 따라서 식 (2), (3)에 의해 반사광과 투과광 강도는

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{(\sqrt{R_1}-\sqrt{R_2}e^{-2\alpha})^2m+4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi}{(1-\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha})^2+4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi} \tag{9}$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)e^{-2\alpha}}{(1-\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha})^2+4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi} \tag{10}$$

으로 된다. 식 (9), (10)의 값을 앞 절에서 사용한 값으로 설정하고 특성을 계산하였다. 그림 4 (a), (b)는  $R_1=R_2$  일 때 반사광과 투과광 강도의 계산결과 이다.

그림 3과 비교해 보면 변조도가 크게 향상되어 입사측 단면의 하프밀리러 효과가 뚜렷하다. 반사광과 투과광은 둘 다  $R_1=R_2=0.5$ 일 경우에 변조도가 증가하지만, 이 때 반사광의 변조도가 더 크다.  $R_1$ 을 0.5로 하여  $R_2$ 를 변화시켰을 때, 반사광 강도의 계산결과는 그림 4 (c)와 같다.  $R_2$ 가 큰 쪽의 변조도가 크지만, 1에 가까운 범위에서는 그 차이는 무시할 수 있을 정도로 작다.

따라서 입력측 단면을 하프밀리러로 구성하면 변조기의 고효율화가 가능하다.

한편, 밀러의 반사율을 변화시켰을 때의 변조도를 검토하여 보자. 식(9), (10)에 의해 반사광의 변조도  $M_r$ , 투과광의 변조도  $M_t$ 는

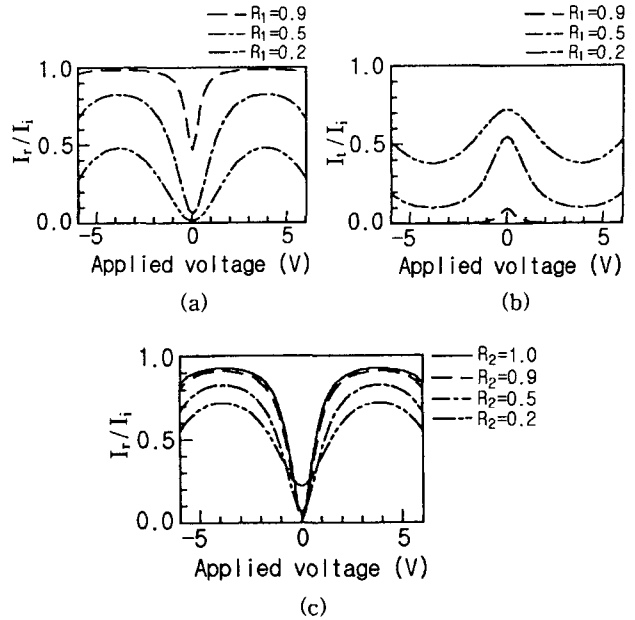


그림 4 (a)  $R_1$ 에 대한 반사 특성, (b)  $R_1$ 에 대한 투과 특성, (c)  $R_2$ 에 대한 반사광 강도의 특성

Fig 4 (a) Reflected characteristics on  $R_1$ , (b) Transmitted characteristics  $R_1$ , (c) Reflected light power characteristics on  $R_2$

$$M_r = \frac{4(1-R_2)(1-R_2e^{-4\alpha})\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}}{(1-R_1R_2e^{-4\alpha})^2} \tag{11}$$

$$M_t = \frac{4(1-R_1)(1-R_2)\sqrt{R_1R_2}e^{-4\alpha}}{(1-R_1R_2e^{-4\alpha})^2} \tag{12}$$

로 된다. 그림 5는 도파로 손실 이외의 값은 표 1과 같게 하고  $M_r$ 을 계산한 결과이다. 그림 5 (a), (b)는 도파로 손실이 일정할 때  $R_2$ 에 대하여  $R_1$ 의 변화에 대한 반사광의 변조도, (c)는  $R_1=0.5$ 에서 투과광의 변조도이다. 그림 6은 그림 5와 같은 조건에서  $M_t$ 을 계산한 결과이다. 그림 5와 그림 6을 비교해 보면 반사광과 투과광은 양상이 달라져 있다. 반사광에서는  $R_2$ 가 큰 쪽이 변조도가 크나, 투과광에서는 역으로 작은 쪽이 크다. 그러나 어느 쪽도 도파로의 손실이 작은 쪽이 변조도가 크다는 것을 알 수 있다. 반사광의 변조도가 크므로 반사광 변조도를 최대로 하는 밀러의 반사율 즉, 도파로 손실 및  $R_2$ 의 값을 정한 후 변조도를 최대로 하는  $R_1$ 의 값을 구한다. 이는 결국  $\partial M_r/\partial R_1=0$ 을 푸는 문제로 귀착되며, 그림 7과 그림 8은 계산의 결과이다. 그림 7의 (a), (b)는 손실을 파라미터로 하여,  $R_2$ 를 변화시켰을 때의  $R_1$ 의 최적치와 그 때의 변조도를 나타낸 것이다. 그림 8의 (a), (b)는  $R_2$ 를 파라미터로 하여 손실을 변화시켰을 때  $R_1$ 의 최적치와 그 때의 변조도를 나타낸 것이다. 도파로의 손실에 관계없이  $R_2=1$ 일 때 최대의 변조도가 얻어졌으나,  $R_2=0.9$  정도로 하여도 그 차이는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서  $R_2$ 가 어느 일정 값 이상으로만 크다면  $R_1$ 을 최적화하여 변조도를 대폭 증가시키는 방법으로 고감도 센서의 구성이 가능하다.

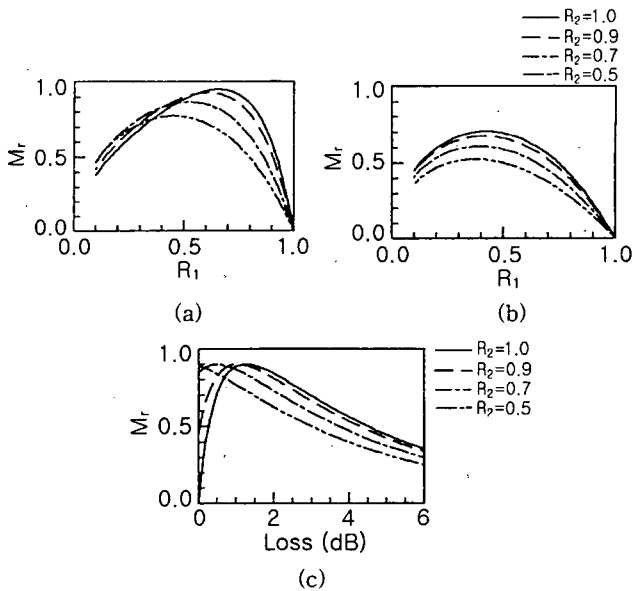


그림 5  $R_1$ 에 대한 반사광 변조도 특성, (a) 도파로 손실 3dB (b) 도파로 손실 1dB, (c)  $M_r$ 의 손실 의존성

Fig. 5 Modulation index characteristics of the reflected light power on  $R_1$ , (a) waveguide loss 3dB, (b) waveguide loss 1dB (c) Loss characteristics of  $M_r$ .

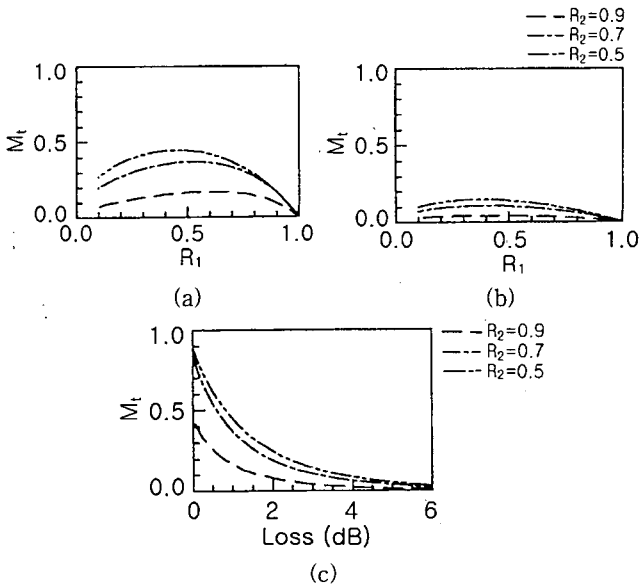


그림 6  $R_1$ 에 대한 투과광 변조도 특성, (a) 도파로 손실 3dB (b) 도파로 손실 1dB, (c)  $M_r$ 의 손실 의존성

Fig. 6 Modulation index characteristics of the transmitted light power on  $R_1$ , (a) waveguide loss 3dB, (b) waveguide loss 1dB (c) Loss characteristics of  $M_r$ .

5. 광변조기의 제작과 그 특성

광변조기의 도파로는 Ti을 열확산하여 제작한 것을 이용하고, 입사측 단면을 하프미러로 하지 않는 구조로 제작하였다. 또, 앞 절에서 나타낸 것처럼 반사광이 변조도가 크므로 반사광을 이용하는 것으로 한다.

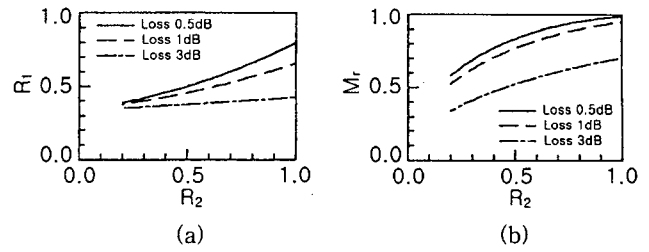


그림 7 반사광 변조도  $M_r$ 를 최대화 하는 밀러의 반사율  $R_1$ 의 최적화 ( $R_2$ 에 대하여) (a) 반사광 변조도를 최대화 하는 밀러의 반사율 (b) 반사광 변조도의 최대치

Fig. 7 Optimization of  $R_1$  for maximization of  $M_r$ , for variation of  $R_2$ , (a)  $R_1$  vs.  $R_2$ , (b)  $M_r$  vs.  $R_2$

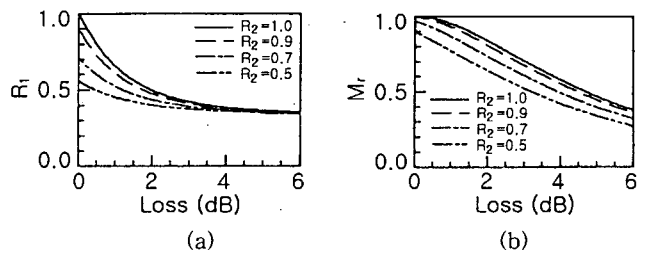


그림 8 반사광 변조도  $M_r$ 를 최대화 하는 밀러의 반사율  $R_1$ 의 최적화 (손실에 대하여) (a) 반사광 변조도를 최대화 하는 밀러의 반사율 (b) 반사광 변조도의 최대치

Fig. 8 Optimization of  $R_1$  for maximization of  $M_r$ , (for variation of loss), (a)  $R_1$  vs.  $R_2$ , (b)  $M_r$  vs.  $R_2$

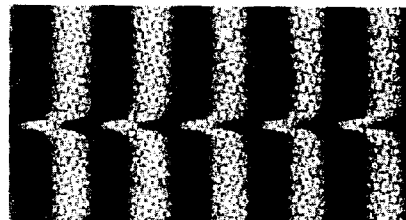


그림 9 시험 제작한 도파로의 간섭현미경 사진  
Fig. 9 Photograph of the fabricated waveguide.

기판은 Y-cut LiNbO<sub>3</sub>를 이용하여 Ti를 27nm 증착하고, 스트립선의 폭이 3.5μm으로 되도록 패턴을 제작하여 산소분위기 중에서 1000℃, 5시간 확산하여 도파로를 제작하였다. 측정결과 그림 9처럼 도파로는 폭 3.0μm 확산깊이 1.6μm로 광원에 대하여 단일모드로 동작할 수 있음이 확인되었다. 전극은 전자빔 열증착 장치로 Al을 약 100nm 증착하여 전극간격 10μm 길이 5mm로, 밀러는 광출력 단의 단면에 200nm의 Al을 증착하여 제작하였다. 변조특성을 알기 위하여 500Hz의 인가전압과 반사광 강도의 관계를 측정하였다. 그림 10에 보인 것처럼 도파로를 설계할 때 의도한 대로 바이어스 전압이 0인 점에서 최대 광강도의 1/2지점에 센서의 동작점을 정할 수 있는 양호한 변조특성이 관측되었다. 반파장 전압은 약 3.7V가 되어 이를 인가전계 저감계수로 환산하면 약 0.52로 되어 표 1의 설계한 값과 거의 일치하였다.

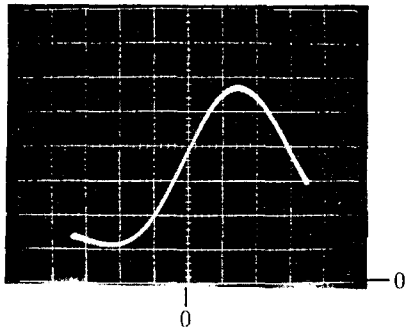


그림 10 변조특성의 측정결과  
Fig. 10 Modulation characteristic of the modulator.

6. 전계 계측 실험 및 고찰

그림 11와 같이 코프레너 전극에 전계를 검출하기 위한 전극(안테나)을 부착하여 센서를 구성하고, 피측정 전계는 간격 25 mm의 평행판 전극으로 발생시켰다. 시험전계의 신호는 60Hz, 500Hz, 100kHz의 비교적 낮은 주파수를 선택하였다. 센서의 프로브 전극은 10mm×10mm의 테프론 판에 고정하였다. 이 정도 크기의 테프론은 비유전상수가 2.05이므로 피측정 전자계의 교란은 없는 것으로 판단할 수 있다. 프로브 전극의 면적에 따른 센서의 감도차를 확인하기 위하여 10mm×10mm(전극A), 10mm×5mm(전극B)의 두 종류 프로브를 제작하여 전계를 측정하였다.

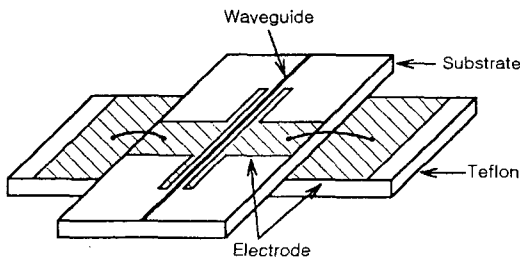


그림 11 전계센서의 구조  
Fig. 11 Schematic structure of the electric field sensor

그림 12는 전극A를, 그림 13은 전극B를 이용한 센서의 측정결과이다. 측정된 주파수의 범위 내에서 시험전계의 크기와 검파된 출력전압은 선형적인 관계를 유지하고, 센서의 감도는 프로브 전극의 면적에 따라 변하는 것이 확인되었다. 예를 들어 0.1V/m, 60Hz의 전계강도에 대하여 전극A의 출력은 10<sup>-2</sup>mV, 전극B의 출력은 4.5×10<sup>-3</sup>mV로, 면적이 2배 커짐에 따라 감도가 약 2배 정도로 증가하였다. 그림 14는 관측된 출력신호의 파형이다. 측정된 파형은 거의 완전한 형태로 변조신호의 파형을 재현하고 있음을 알 수 있다.

반사 간섭형 광변조기를 센서로 이용하는 경우 변조특성이 선형인 곳을 동작점으로 선택하여야 한다. 이것은 식(1)에서  $\phi \neq m\pi + \pi/2$  ( $m$ ; 정수)로 되게 하는 것으로 도파로의 길이를 광의 파장 수준으로 제어하는 것을 의미한다.

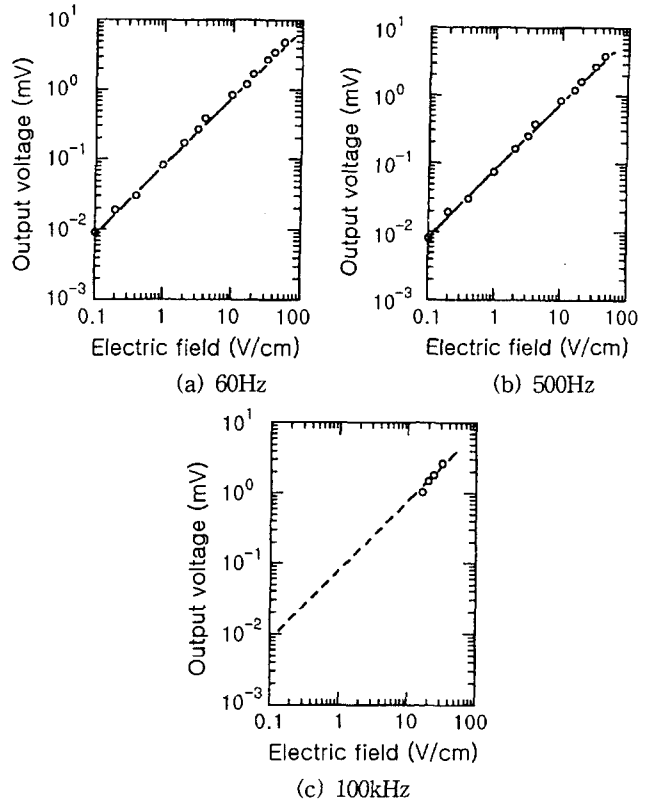


그림 12 전극A(10mm×10mm)의 측정결과  
Fig. 12 Measuring result of electrode A(10mm×10mm)

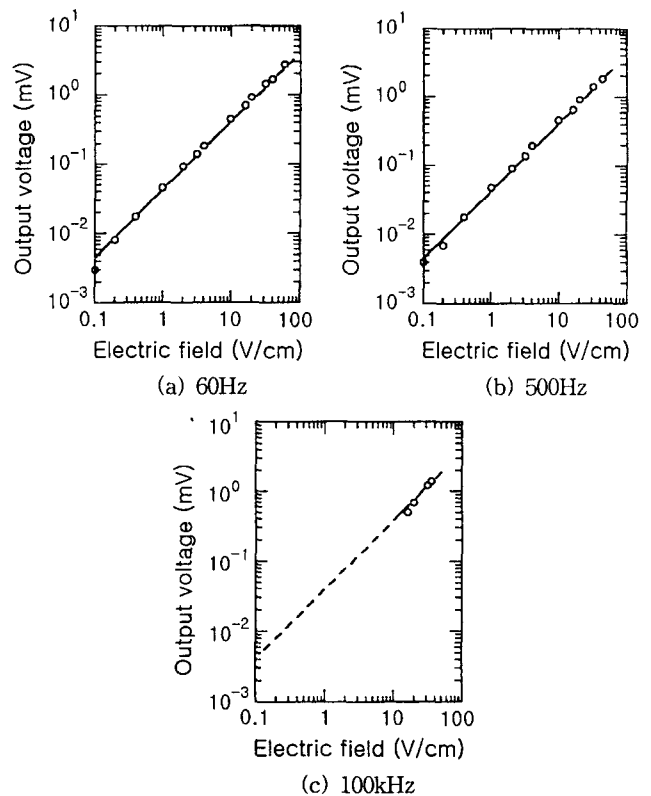


그림 13 전극B(10mm×5mm)의 측정결과  
Fig. 13 Measuring result of electrode B(10mm×5mm)

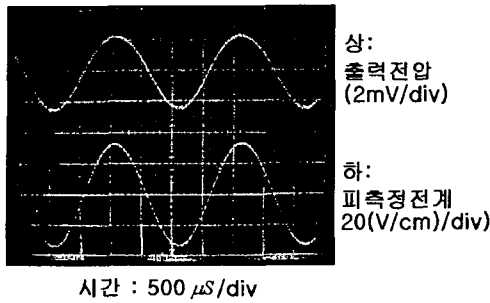


그림 14 관측된 인가전계 파형과 검파된 출력전압파형  
Fig. 14 Measuring result of electrode B(10mm×5mm)

한편, 이러한 조건이 충족되었다 하더라도 주변온도의 변화에 따라서도  $\phi$ 가 변할 수가 있으므로 동작점의 위치를 변조기의 특성 곡선상에서 선형 영역으로만 제한하여 동작점의 위치 변화에 의한 변조특성의 변화를 최소화시킬 필요가 있다.

### 7. 결 론

전계계측 센서의 구성에 편리한 반사 간섭형 광변조기를 제안하고 동작원리를 이론적으로 해석하였다. 도파로 양단에서 발생하는 광의 반사를 이용하게 되므로 광변조기 양단의 반사계수, 도파로의 손실을 파라미터로 특성 계산을 실시한 결과, 반사면 밀러의 반사계수는 1에 가까운 어느 정도 큰 값을 가지면 되고, 입사단의 반사계수는 밀러의 반사계수 값에 따라 최적치가 존재함을 확인하였다.

LiNbO<sub>3</sub> 기관으로 반사 간섭형 광변조기를 설계하고 특성 실험을 한 결과, 변조도가 약 15% 정도로 작기는 하지만 정성적인 변조특성을 확인할 수 있었다. 변조도가 작아진 것은 도파로를 여진하는 입사광의 절대량이 부족한 것으로 판단할 때 이것은 실험의 숙련으로 해결할 수 있는 문제로 생각된다. 60Hz에서 100kHz 범위에 걸친 실험에서 0.1V/cm에서 60V/cm까지의 전계강도를 측정할 수 있었다.

10<sup>-2</sup>V/m 정도의 감도는 한 예로 고압송전선에서 발생하는 ELF(Extremely Low Frequency, f<3kHz)의 측정 등, 공학적 응용에 충분히 활용 가능한 값이라 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

[1] M. Ohkawa, M. Izutsu and T. Sueta, Integrated-optic pressure sensor and accelerometer on silicon substrate, 2nd OEC(OEC'88), 58, 1988.  
[2] M. Ohkawa. M. Izutsu and T. Sueta, Integrated optic accelerometer employing a cantilever on a silicon substrate, Jpn J. Appl. Phys. vol 28, pp. 287, 1989.  
[3] T. Tanaka편저:“광파센싱의 기초와 응용”, Ohm사, 1990.  
[4] E. Udd, Fiber Optic Sensors. New York: Wiley, 1990  
[5] Handbook of optical Fiber Sensing Technology, J. M. Lopez-Higuera Ed., Wiley, Chichester, 2002  
[6] J. Chang, C. N. Vittitoe and B. T. Neyer, An

electro-optical technique for intense microwave measurements, J. Appl. Physics, vol. 57, No. 11, pp. 4843-4848, 1985.

[7] M. Kanda and F. X. Ries, A broad-band isotropic real-time electric-field sensor using resistivity loaded diodes, IEEE Trans., EMC, vol. 23, No. 3, pp. 122-132, 1981.  
[8] P. S. Cross, R. A. Baumgartner, and B. H. Kolner, Microwave integrated optical modulator', Appl. Phys. Lett., vol 44, No. 5, pp. 486-488, 1984.  
[9] H. Ito, T. Ichikawa, S. Kato and N. Takahashi, Measurement of ELF field strength using Ti: LiNbO<sub>3</sub> waveguide modulator, Technical Reports, EMCJ-90-96, IEICE, pp.25-32, 1991.  
[10] N. Kuwabara, K. Tajima and F. Amemiya, Development of wide-band and highly sensitive electric field sensor using LiNbO<sub>3</sub> optical modulator, Technical Reports, EMCJ-91-6, IEICE, pp. 37-42, 1991.  
[11] C. H. Bulmer, Sensitive highly linear lithium niobate interferometers for electromagnetic field sensing, Appl. Phys. Lett., vol. 53, No. 24, pp. 2364-2370, 1988.  
[12] H. Iwakura, H. Yoshikawa and Y. Ohno, Application of optical waveguide voltage sensors", Technical Reports, OQE90-60, IEICE, pp. 11-16, 1990.

## 저 자 소 개



### 최 영 규(崔 泳 圭)

1982년 중앙대학교 전자공학과 학사  
1988년 교토대학(일본)대학원 전자공학과 졸업(석사), 1992년 동 대학원 공학박사, 1992년~1995년 국립 후쿠이대학 (일본) 전자공학과 전임강사, 1998년~현재 신라 대학교 공과대학 전자공학과 교수  
Tel : 051-309-5622  
Email : ykchoi@silla.ac.kr



### 김 기 래(金 紀 來)

1986년 서강대학교 전자공학과 학사  
1988년 동 대학원 전자공학과 석사  
1998년 경남대 대학원 전자공학과 박사  
1988년~1993년 삼성전자(주) 정보통신 연구소 선임연구원, 1999년~현재 신라 대학교 공과대학 전자공학과 교수  
Tel : 051-309-5697  
Email : grkim@silla.ac.kr