제 8 회 광학 및 양자전자학 워크샵 논문집(1991. 7. 13)

결정형 光전압/전류센서의 高안정성을 위한 고찰

Various Considerations in Designing Stable Electrooptic Voltage and Magnetooptic Current Sensors

이 경식
성균관 대학교 전자공학과

결정형 光 전압/전류 센서에 있어서 내부다중반사 (Multiple Internal Reflection), 복굴절 및 물성의 온도의존성이 어떻게 불안정성 요인으로 작용할 수 있는지를 알아 보았으며, 이들 요인들을 피해서 센서의 안정성 을 높힐 수 있는 방법들을 소개하였다. 구성된 光 전압/전류센서의 간단한 동작도 보았다.

1. 서론

광과 광섬유를 이용하여 전압, 전계, 전류, 자계등을 측정하는 센서를 통 털어서 光 전자기량 센서라 한다. 이 전자기량 센서는 감지부가 결정인 결정형 센서와 광섬유인 광섬유형 센서로 분류할 수 있다. 이 논문에서는 결정형 光 센서, 특히 광전압센서와 광전류센서에 대해서 주로 다룰 것이다.

결정형 광전압 센서는 결정 내에서의 전광효과(Electrooptic effect)를, 광전류 센서는 자광효과(Magnetooptic effect)를 이용하여 만든 센서로써, 지금까지 여러 연구가들에 의해서 연구개발되어 왔다.[1-8] 일반적으로 이들 결정형 광센서의 신뢰성이 광섬유형 광센서에 비해서 높다. 하지만 커다란 외부 환경변화 하에서도 결정형 광센서가 안정된 동작을 할 수 있도록 제작되기 위해서는 무엇보다도 光센서의 불안정성 요인을 이해해야 하겠다. 따라서 본 논문의 주된 목적은 센서의 안정성에 영향을 끼치는 문제점들을 고찰하여 안정된 센서 설계 방향을 제시하는 것이라 하겠다.

여기서는 우선 결정내에서의 전광효과 및 자광효과를 이용하여 어떻게 전압, 전류등을 측정할 수 있는지를 알아보려 한다. 계속해서 광섬유형 센서에 비해 많은 장점을 갖고 있는 결정형 센서의 주된 문제점들을 알아 볼 것이다. 3장에서는 MIR(Mulitiple Internal Reflection), 복굴절(Birefringence), 재질의 온도 의존성등이 어떻게 결정형 센서의 안정성에 영향을 미치는지를 고찰해 볼 것이며, 4장에서는 이들 문제점들을 어떻게 극복하여 센서의 안정성을 높힐 것이냐에 대해서 알아 볼것이다.

끝으로 5장에서는 여러가지를 고려해서 설계한 이들 센서가 어떻게 동작하는지를 보여주려고 한다.

2. 결정형 전압/전류 센서의 원리

(1) 결정형 광 전압센서

광전압 센서는 결정내에 전계를 가할때 생기는 전광효과의 원리에 따라서 동작한다. 크게 두가지 종류의 전광효과, 즉 1차 전광효과(linear electrooptic effect)와 2차 전광효과(Quadratic electrooptic effect)가 존재한다. 굴절률 n_o를 갖고있는 결정에 전계 E가 가해지면 이때의 굴절률 n는 아래와 같이 된다.

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_o^2} + rE + SE^2 + \cdots \qquad (1)$$

여기서 r은 1차 전광계수이고, S는 2차 전광계수이다.

1차 전광효과를 Pockels' effect 라고도 하며, 이 효과에 의해서 결정을 통과하는 광파의 서로 수직인 두 편광 방향사이의 굴절률의 차, 즉 복굴절이 야기된다. 한 예로, Zinc blende류의 결정에 대해서 이 복굴절의 크기는 전계 E에 비례하며, 아래와 같다.

$$\Delta n = a\, n_o^3 r_{41} E \qquad (2)$$

여기서 a는 전계방향과 빛의 진행 방향에 따라 결정되는 상수이다. 표1에 여러 결정에 대한 1차 전광계수의 값이 주어져 있다.

등방성 매질에 전계가 가해지면 전계의 제곱에 비례하는 복굴절이 일어나는데 이것이 Kerr effect라고 하는 2차 전광효과이다. 2차 전광효과는 모든 대칭성을 갖는 결정에 모두 존재한다. 2차 전광효과에 의해서 생기는 복굴절은 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_o^3 (S_{12}-S_{11}) E^2 \qquad (3)$$

여기서 $S_{12}-S_{11}$는 2차 전광계수이며, 등방성결정의 경우 S_{44}와 같다. 몇가지 물질의 2차 전광계수의 값이 표1에 나타나 있다.

재 질	λ(μm)	n	r ($\times 10^{-12}$m/V)	$S_{12}-S_{11}$ ($10^{-21}m^2/V^2$)
Benzene	0.633	1.496		1.556
CS_2	0.633	1.619		9.487
$Bi_{12}GeO_{20}$	0.85		r_{41}=3.1	
ZnSe	0.633	2.6	r_{41}=2.0	
KH_2PO_4(KDP)	0.540	n_o=1.5115 n_e=1.4698	r_{41}=8.77 r_{63}=10.3	2577.3
$Bi_4Ge_3O_{12}$	0.85	2.068	r_{41}=1.11	

표1. 여러가지 재질의 1차 및 2차 전광 계수

전계 E 혹은 전압을 빛의 진행방향과 수직이 되게 결정판(두께,d)에 걸어주면 결정을 통과하는 (서로 수직이 되게 편광된) 두 광파 사이에 위상차(Phase retardation) ϕ가 생긴다. 이 위상차가 전압(V=Ed)에 따라 변화하므로 위상차를 측정함으로써 전압을 잴 수 있다. 일반적으로 위상차는 결정을 (축방향이 서로 직각인) 두 편광자 사이에 놓고, 결정에 들어오는 빛중에서 얼마만한 빛이 출력단 편광자(혹은 검광자)를 통해서 빠져나오는가를 검출함으로써 측정된다.

길이 ℓ인 결정에 입사되는 선형편광(Linearly Polarized)된 빛의 세기를 I_o라 하고 검광자를 통해서 빠져나오는 빛의 세기를 I_t라고 한다면, 전달함수(transfer function)는

$$\frac{I_t}{I_o} = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \qquad (4)$$

와 같으며, $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \ell$ 이고 λ는 파장이다.

(2) 결정형 광 전류센서

결정형 광전류센서는 자광효과를 이용한다. 자광효과에는 크게 파라데이 효과와 Cotton-Mouton 효과가 있다. 파라데이 효과는 자계에 의해서 야기되는 원형 복굴절(Circular Birefringence)을 말하며 Zeeman효과와 밀접한 관계가 있다. 이 파라데이 효과에 의해서 자광물질(Magnetooptic material, 특히 diamagnetic material)이 자계에 노출이 되면, 이 자광 물질을 통과하는 선형편광된 빛의 편광판이 회전하게 된다. 이 때의 회전각 θ는 Verdet상수 V_d에 비례하며 아래와 같이 표시된다.

$$\theta = V_d \int B \, d\ell \qquad (5)$$

여기서 B는 자계벡터이며, $d\ell$은 빛의 전송방향벡터이다.

자광재질 근처에 도선을 놓거나, 자광재질 주의를 코일로 감아서 전류를 흘린다면, 전류의 세기에 비례하는 자계가 도선이나 코일 주위에 야기된다. 따라서 재질을 통과하는 빛의 회전각을 측정한다면 흐르는 전류를 알 수 있다.

Nitrobenzene과 같은 액체는 자계가 있는 곳에서 (전광효과에서의 Kerr effect와 비슷한) Cotton-Mouton effect 라고 하는 강한 자광효과를 나타낸다. 이 효과에 의해서 자계가 있는 곳에서 등방성 물질이 복굴절을 나타내게 되는데, 이 때문에 생기는 위상차는 아래와 같이 자계의 제곱에 비례한다.

$$\phi = 2\pi C B^2 \ell \qquad (6)$$

여기서 C는 Cotton-Mouton effect 상수이다. 이경우도 전류가 자계에 비례하므로, 위상차를 측정하면 (6)식으로부터 전류를 계산할 수 있다. 하지만 결정형 광전류 센서는 주로 前者의 파라데이 효과를 이용한다.

결정형 광전압 센서에서 위상차를 측정하는 방법과 비슷하게, 두개의 편광자 사이에 자광 물질을 놓고 검광자로부터 나오는 빛의 세기를 측정함으로써 전류에 의해 야기되는 회전각(rotation) θ를 계산해 낼 수 있다. 입력단 편광자의 축과 검광자의 축사이에 ±45°의 각을 이루고 있을때 전달함수는 아래와 같다.

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{2}(1 \pm \sin 2\theta) \qquad (7)$$

3. 센서의 안정성에 관계되는 문제점들

광섬유형 센서에 비해서 결정형 센서는 신뢰성이 높다는 점과 감지소자 用으로 재질을 자유자재로 선택할 수 있다는 점등의 잇점이 많이 있다. 하지만 센서의 안정성을 높이기 위해서는 다음 사항들을 특히 유의해서 설계해야 한다.

(1) MIR (Multiple Internal Reflections)

직사각형 모양의 결정에 빛이 결정 앞(뒤)면에 수직이 되게 입사될 때 MIR(내부 다중반사)이 일어난다. 이때 입사하는 빛이 코히어런트 하다면, 결정형 광전압(전계) 센서에서의 전달함수는 아래와 같이 된다.[9]

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1-\sin\phi + R^2(1+\sin\phi) - 2R\cos 2\beta\ell\cos\phi}{1+R^2-4R(1+R^2)\cos 2\beta\ell\cos\phi+2R^2\cos 4\beta\ell+4R^2\cos^2\phi} \times \frac{T_r^2}{2} \qquad (8)$$

여기서 $\beta\ell = 2\pi n\ell/\lambda_o$ $(\beta = \beta_x + \beta_y)/2)$, $\phi = (\beta_x - \beta_y)\ell$ 이며, $\lambda/4$판 이 두개의 편광자와 더불어 사용되었다. β_x와 β_y는 각각 복굴절의 두 축방향 x, y의 전파상수들이며, T_r는 빛의 통과계수, R은 반사계수이다.

결정형 광전류(자계) 센서의 경우도 MIR이 존재할때 식 (8)과 같이 표시된다. 단, 광 전류 센서의 경우 (8)식에 있는 ϕ를 2θ로 대치시켜야 한다. 여기서 θ는 자광재질을 한번 통과할 때 생기는 (편광판의) 회전각을 의미한다.

식(8)은 $2\beta\ell$에 대한 함수이며, $2\beta\ell$은 온도에 의존하므로 전달함수가 온도에 따라서 변화한다는 것을 알 수 있다. 그림 1은 결정형 전압센서의 ϕ에 대한 전달함수와 결정형 전류센서의 2θ에 대한 전달함수를 여러가지 $2\beta\ell$값에 대해서 그린 것이다.

ϕ나 $2\theta = 0$ 근방의 기울기는 센서의 감도를 나타내는데 $2\beta\ell$값의 변화에 따라서 기울기 즉 감도가 변화함을 알 수 있다. 기울기의 최대 변화를 평균치 기울기로 나눈 값을 상대적 정확도라고 할때 정확도는 R의 값에 따라 변화한다. 계산에 의하면 R=0.001 일때 정확도는 ±0.4% 정도이며, ac 센서의 경우 ±0.2% 라는 것을 알 수 있었다. 이것은 antireflection coating을 하여 반사계수를 0.001 이하로 줄여 준다 하여도 코히어런트 광원을 사용한다면 MIR에 의해서 안정성이 크게 떨어진다는 것을 말해 준다.

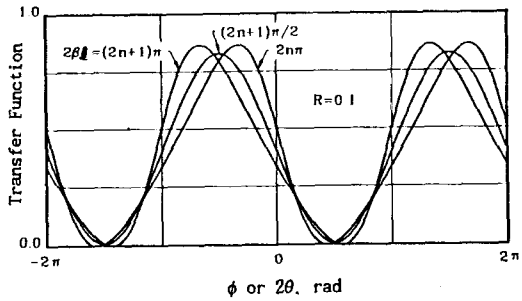

그림1. 광 전압/전류센서의 전달함수(R=0.1)

(2) 복굴절

등방성 결정이나 입방성 결정처럼 natural birefringence를 갖고 있지 않는 결정이라 하더라도, 제품 공정과정등에서 흔히 복굴절이 생기게 된다. 이 복굴절은 전압 혹은 전류에 의해 생기는 (선형 및 원형) 복굴절에 영향을 준다. 이 전달함수로 부터 전압,전류등이 계산되기 때문에 이들 결정에 원하지않는 복굴절이 존재함으로 인해서 절대측정에 오차를 가져오게 된다. 흔히 이 원하지 않는 복굴절은 온도에 강하게 의존하기 때문에 상대 측정이나 ac 측정시 불안정을 초래하게 된다.

결정내에 이러한 복굴절이 N개가 존재한다고 하며, n번째 복굴절의 위상차가 ϕ_n이고 azimuthal angle 이 θ_n 일때 결정형 광전압 센서의 전달함수는 아래와 같다.[6]

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{2}\left[1 \pm \left(\phi_o + \sum_{n=1}^{N}\phi_n \sin(2\alpha_n)\right)\right] \qquad (9)$$

여기서 ϕ_o($<<1$)는 전압 V에 의해서 결정내에 생긴 복굴절에 의한 위상차 (단위:라디안)이며, 결정 43m계에 대해서 $(2\pi/\lambda)n_o^3\, r_{41}(V/d)\ell$ 이다.

ac 전압센서의 전압 $V_m \sin\omega_m t$ 에 대한 출력은 modulation depth(Index) Γ_m에 비례한다. Γ_m 또한 원하지 않는 복굴절에 의해 변형되어 아래식과 같이 된다.[6]

$$\Gamma_m = \frac{\Gamma_{m0}}{1 \pm \sum_{n=1}^{N} \phi_n \sin(2\alpha_n)} \qquad (10)$$

윗 식에서 Γ_{m0}는 복굴절들이 존재하지 않는 경우의 modulation depth이며, $(2\pi/\lambda)n_o^3 r_{41}(V/d)\ell$ 이다. 식 (9),(10)에서의 ± 부호 중 + 부호는 전압센서에서 사용되는 두 편광자의 축이 서로 수직일때이며, - 부호는 서로 평행일때에 해당된다.

결정이 N개의 선형및 M개의 원형 복굴절을 가지고 있을 때, 결정형 광전류센서의 전달함수는 다음과 같다.[6]

$$\frac{I_t}{I_o} = \frac{1}{2}\left[1 \pm \tfrac{1}{2}\left(\sum_{n=1}^{N} \phi_n \cos(2\alpha_n)\right)\left(\sum_{n=1}^{N} \phi_n \sin(2\alpha_n)\right) \mp (2V_d B\ell + 2\sum_{m=1}^{M} \theta_m)\right] \qquad (11)$$

여기서 θ_m은 m번째 원하지 않는 원형 복굴절에 의한 회전각 (단위:라디안)이며, $2\theta_m$ 및 $\sum\theta_m$은 1 보다 훨씬 적은 값이라고 가정하였다. ac 광전류 센서의 출력인 modulaton depth는 아래와 같다.

$$\Gamma_m = \frac{\Gamma_{mo}}{1 \pm \tfrac{1}{2}\left(\sum_{n=1}^{N} \phi_n \cos(2\alpha_n)\right)\left(\sum_{n=1}^{N} \phi_n \sin(2\alpha_n)\right) \mp 2\sum_{m=1}^{M} \theta_m} \qquad (12)$$

여기서 Γ_{mo}는 복굴절이 없을때의 (ac 전류에 비례하여 생기는) 자계 $B_m \sin\omega_m t$에 대한 modulation depth이며 $2V_d B_m \ell$이다. (11),(12)식의 ± 두 부호는 출력단 편광자의 축과 입력단 편광자의 축사이에 이루는 각, ±45°에 대응된다. 식 (9)-(12)는 ac 및 dc 결정형 광센서의 출력이 복굴절에 영향을 받는다는 것을 설명해준다.

(3) 재질의 온도 의존성

결정내 다중반사(MIR)와 복굴절은 결정형 광센서의 안정성에 중대한 영향을 끼친다는 것을 이제까지 알 수 있었다. 결정내에 다중반사의 영향이 없고, 온도에 의존하는 복굴절이 없다 하더라도 결정형 광센서의 안정성을 높이기 위해서는 광센서에 이용될 재질의 온도 의존성 정도를 고려해야 한다. 결정형 광센서에서 전압/전류에 의해서 야기되는 복굴절은 센서의 출력과 직접 관계되기 때문에 이들의 온도 의존성은 센서의 불안정성의 요인이 된다.

物性의 온도의존성이 온도 변화에 따른 ac 및 dc 광전압센서의 출력변동에 어떻게 영향을 미치는지를 알아보기 위해서, 광전압센서의 상대적인 온도 의존성을 분석해 보면 아래와 같다.

$$\frac{1}{\phi}\frac{d\phi}{dT} = \frac{1}{\Gamma_m}\frac{d\Gamma_m}{dT} = \frac{1}{r}\frac{dr}{dT} + 3\frac{1}{n_o}\frac{dn_o}{dT} \qquad (13)$$

재 질	파장(μm)	(dn/dT)/n (×10⁻⁵/K)	(dr/dT)/r (×10⁻⁴/K)	참고문헌
ZnSe	0.65 0.85	3.9 3.1		[10]
ZnS	0.65 0.85	2.3 2.1		
$Bi_4Ge_3O_{12}$	0.633	2.1	2.47	

표2. 굴절률 및 전광계수의 온도의존성

즉, 온도 T에 따른 광전압 센서의 출력 변화는 전광계수 r과 굴절률의 온도 의존도에 관계된다. 일반적으로 $(1/r)(dr/dT)$는 대략 10^{-4}/K 이고 $(1/n_o)(dn_o/dT)$는 주로 양수이며 10^{-5}/K 정도이다. 표2는 몇가지 재질의 전광계수 및 굴절률의 온도 의존도를 보여주고 있다.

결정형 광 전압센서의 경우와 마찬가지로 결정형 광전류센서의 온도 의존성을 분석하여 보자.

$$\frac{1}{\theta}\frac{d\theta}{dT} = \frac{1}{\Gamma_m}\frac{d\Gamma_m}{dT} = \frac{1}{V_d}\frac{dV_d}{dT} + \alpha \qquad (14)$$

윗식으로 부터 광전류센서의 온도에 따른 출력변화가 Verdet상수의 온도의존성과 열팽창계수 α에 기인한다는 것을 알 수 있다. 따라서 전광계수나 굴절률등, 물질의 온도의존성이 광전압 센서의 출력 불안정에 관계되는 것처럼, 광전류 센서의 불안정 요인으로 Verdet상수의 온도의존성과 열팽창계수가 작용하고 있다. 표3에는 여러가지 재질이 갖고있는 이들 계수의 온도의존도 값들이 주어져 있다.

재 질	파장(μm)	(dV/dT)/V (×10⁻⁴/K)	α (×10⁻⁶/K)	참고 문헌
SF-57	0.633	1.26±0.08	9.2	[11]
SiO_2		0.69±0.03	0.55	
BK-7		0.63±0.06	8.3	
ZnSe	0.87	2.5		[12]
$Bi_{12}SiO_{20}$		1.5		

표3. Verdet상수의 온도의존성과 열 팽창계수

4. 문제점들에 대한 해결책들

결정 내부에서의 다중반사(MIR)를 완전히 없애기 위해서는 결정의 (앞,뒤)양면중 적어도 한면을 경사지게 하거나, 직사면체 결정을 광파 진행 방향에 대해서 비스듬하게 놓아야 한다. 또한 결정의 양면에 antireflection coating을 하여(굴절률이 2.1인 경우 반사율 12%에서 대략 0.5%이하로 감소시켜 줌으로써) MIR의 영향을 많이 줄여줄 수 있다. 하지만 MIR의 영향에 따른 출력 불안정을 완전히 없애주기 위해서는 코히어런트 길이가 결정의 길이 보다 훨씬 짧은 LED와 같은 광원을 사용해야 한다.

결정내에 존재하는 원하지 않는 복굴절은 흔히 내부에 존재하는 stress나 strain에 기인한다. 따라서 이들 복굴절은 annealing을 함으로써 감소시킬 수 있다.[7,13] Annealing은 결정을 복굴절이 사라질 정도로 높은 온도로 높힌 다음에 다시 복굴절이 생기지 않도록 서서히 온도를 상온으로 낮추어 주는 공정이다. 이 annealing 방법외에도 복굴절의 영향을 없애기 위해서 보상방법을[6,14] 적용하여 센서의 안정성을 높힐 수 있는 방법이 있다. 이 방법은 annealing 방법에 비해서 시간이 많이 절약될 수 있다는 장점이 있다. 특히, 참고문헌[6]에 보고된 보상방법은 기존의 광 전압/전류 센서에 검광자 대신 Polarizing Beam Splitter(PBS)를 첨가하여 PBS에서 나오는 두 신호를 평균함으로써, 복굴절에 의한 센서의 출력 불안정을 최소화시킬 수 있는 방법이다. 이 보상방법은 결정형 광전압 센서에 적용되었으며 高 안정성을 이루는데 결정적인 역할을 하였다.[8]

MIR이나 복굴절을 없애준다 하더라도 光 전압/전류 센서의 출력에 관계되는 전광계수, 굴절률, Verdet상수등 물성의 온도의존도는 센서의 안정성에 중대한 영향을 끼친다. 따라서 센서의 온도 안정성을 높이기 위해서는 우선 온도의존도가 낮은 물질을 선택하는 것이 중요하다. 또는 부호가 다른 두 재질을 직렬로 결합해서 사용하는 것도 센서의 안정성을 높힐 수 있는 한 방법이 될 것이다.

5. 결정형 光 전압/전류 센서의 동작특성

광 전압/전류센서의 광원으로는 MIR의 영향이 없는 LED를 사용하였고, 전광재질으로는 흔히 온도에 강하게 의존하는 natural birefringence가 없고 물성의 온도 의존도가 양호한 BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$)결정을 선택하였다.

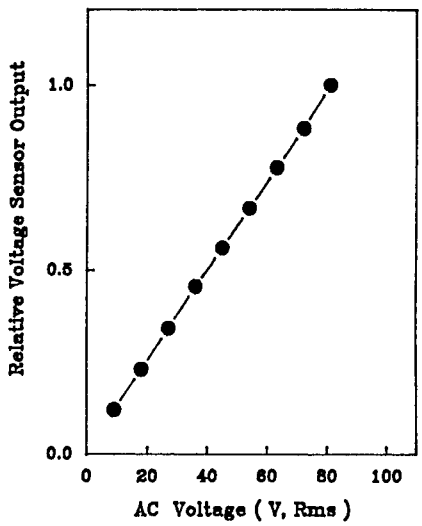

그림2. 광전압 센서의 선형성 (λ=0.85μm)

보상방법[6]을 이 전압센서에 적용하여 크게 안정성을 높힐 수 있었다는 것은 이미 보고 되었다.[8] 그림2는 이 ac 전압센서의 선형성을 보여주고 있다.

광전류센서 또한 같은 보상방법을 적용하여 안정성을 높힐 수 있겠다. 그림3은 BGO결정의 주위에 코일을 감아서 만든 광전류센서의 선형성을 나타내주고 있다. 그림 2와 3으로 부터 광전압/전류센서의 선형성이 훌륭하다는 것을 알 수 있겠다. 결정형 광전류센서의 안정성에 관한 자세한 실험자료들은 차후에 보고될 예정이다.

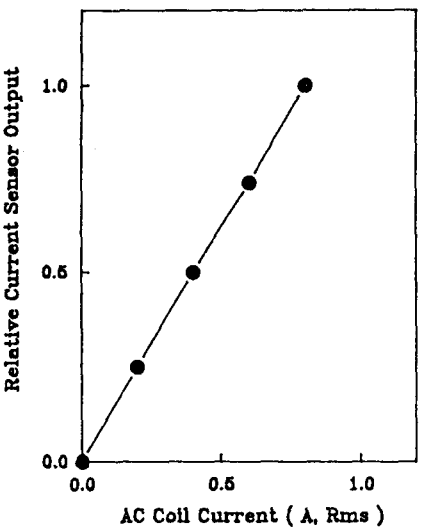

그림3. 광전류 센서의 선형성 (λ=0.85㎛)

6. 결론

지금까지 MIR,복굴절, 물성의 온도의존성이 결정형 광전압/전류센서의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았으며, 아울러 이들의 영향을 제거시켜 센서의 안정성을 높혀줄 수 있는 방법들을 고찰하여 보았다. 또한 이를 바탕으로 광전압/전류센서를 구성하여 보았다. 제작된 광전압센서의 안정성에 관한 실험결과는 앞으로 발표될 예정이다. 여기서는 이들의 간단한 동작만을 보여 주었다.

* 이 연구결과의 일부는 91년도 한국과학재단 연구비 지원(913-0803-009-2)에 의한것임.

[참고 문헌]

[1] K,Kyuma,S.Tai, M.nunoshita, T.Takioka, Y.Ida,"Fiber Optic Measuring System for Electric Current by Using a Magnetooptic Sensor ", IEEE J. Quantum Electron.,QE-18,1619-1623(1982).

[2] Y.Hamasaki, T.Miyamoto, Y.Kuhara, M.Katoh, K.Tada, S.Takeuchi, T.Nakahara, " Optical Fiber Sensor for the Measurement of Electric Field Intensity and Voltage (OPSEF)", J.Opt.Commun.2, 7-10(1981).

[3] K.Kyuma, S.Tai, M.Numoshita, N.Mikami, Y.Ida,"Fiber Optic Current and Voltage Sensors using a $Bi_{12}GeO_{20}$ Single Crystal", J.Lightwave Tech.LT-1,93-97 1983).

[4] T.Yoshino, Y.Ohno, K.Kurosawa, " Design and Application of Fiber-Optic Electric and Magnetic Field Sensors for High Voltage Electric System", OFS'84, 55-58(1984).

[5] Y.Kuroda, Y.Abe, H.Kuwahara, K.Yoshinaga, "Field Test of Fiber-Optic Voltage and Current Sensors Applied to Gas Insulated Substation", SPIE, Vol. 586,30-37(1985).

[6] K.Lee, " New Compensation method for bulk Optical Sensors with multiple birefrigences", Appl.Opt.28, 2001-2011(1989).

[7] K.Lee, "Electrooptic Voltage Sensor: birefringece effects and Compensation methods", Appl.Opt.29, 4453-4461(1990).

[8] 이 경식,"BGO 광전압센서의 안정화 및 동작특성", 전자공학회 논문지,27,103-108 (1990).

[9] K.Lee, G.Day, " Effect of multiple internal reflections on the Stability of electrooptic and magnetooptic sensors ", Appl. Opt. 27,4609-4611 (1988).

[10]H.Li,"Refractive index of Zns,ZnSe,and ZnTe and its wavelength and temperture derivatives",J.Phys. Cham Ref.Data, 1984,Vol.13,P.103-150.

[11]P.Williams,A.Rose,G.Way,T.Milner,M.Deeter, "Temperature dependence of the Verdet Constant in Several diamagnetic glasses", Appl.Opt.30,1176-1178(1991)

[12]T.Mitsui, K.Hosoe, H.Usami,S. Miyamoto, " Development of Fiber-Optic Voltage Sensors and Magnetic Field Sensors ", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Mexico City, Mexico(1986)

[13]G.Morey,The Properties of Glass,Reinhold Publishing Corp, 1954.