

## 〈特別寄稿〉

# 光計測 技術動向과 電力會社에서의 應用

李 元 彬

(韓電 서울研修院 教授)

## ■ 차례 ■

- I. 서론
- II. 광전자의 물리적인 현상
- III. 광응용 계측기술

- IV. 전력용 광계측 시스템
- V. 한전의 광응용계측 시스템
- VI. 결론

## 요약

광전자 공학의 발전에 따라 광응용 계측기술이 산업계 각 분야에 활발히 적용되고 있다. 특히 전력계통은 점차 초고압, 대용량화, 복잡화되어 감에 따라 전력용 광계측 기술이 더욱 유용하게 되고 있으므로, 관련기술 동향 및 국내에서 개발 적용되고 있는 시스템에 대하여 고찰해 보고자 한다.

## I. 서 론

1960년 Luby LASER가 발명된 이래 광통신 기술은 급진적으로 발전되어 21세기 고도 정보화 사회에서의 초고속 정보통신망 구축에 핵심적인 역할을 담당하게 될 것이다.

한국전력은 광통신의 무유도 특성 등 많은 장점때문에 전력용 정보통신망으로 적극 도입하기 시작하였고, 실제로 한국과학기술원 연구실에서 제작한 광섬유를 이용하여 1983년 국내 최초의 상용시스템을 개통하게 되었다.

그후 전력회사 특유의 광섬유복합가공지선(OPGW : Composite Overhead Ground Wire with Optical Fiber)을 초고압 송전계통에 시설하여 길이 3,200km에 달하는 전국적인 광통신망을 보유하게 되었다. 한편 광통신 기술을 전력설비용 감시, 제어, 계측시스템에 적용하기 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

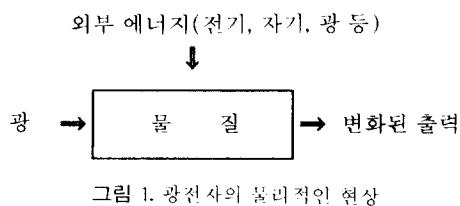
본고에서는 광통신 기술중 광응용 계측기술과 전력용 광계측 시스템의 기술동향을 소개하고, 전력회사에서의 응용실태와 적용방안에 대해서 기술하고자 한다.

## II. 광전자의 물리적인 현상

기체, 액체, 고체 등 어떤 물질에 외부로부터 에너지와 광을 동시에 가하면 이 물질 내부의 전자상태를 변화시켜서 굴절률이 달라지는 등 여러가지의 변화된 신호를 출력할 수 있다. 이와 같은 물리적인 현상에 대해서 알아보면 다음과 같다.

### 1. 전기광학 효과(電氣光學 效果)

전기광학 효과는 물질에 전계를 가하면 굴절률이 변화하는 현상으로서, 굴절률의 변화가 인가한 전계에 비례하는 경우를 1차 전기광학 효과(Pockels 효과)



라고 하며, 인가한 전계의 2승에 비례하는 경우를 2차 전기광학 효과(Kerr 효과)라고 한다.

물질률의 변화는 광의 위상변화로 나타낼 수 있으며 위상차를 검출할 수 있게 되고 또한 진폭의 변화로도 치환할 수 있게 된다. 이 현상을 이용한 것으로는 LiNbO<sub>3</sub> 결정을 이용한 광변조기가 있다.

## 2. 비선형 광학효과(非線形 光學效果)

상당히 높은 광에너지가 어떤 물질에 입사되면 여러가지 비선형적인 광학효과가 나타난다. 물질에 입사된 광이 외에 2개 광의 주파수의 합(合)이나 차(差)로 생기는 새로운 광의 현상은 비선형 광학효과의 대표적인 예이다. 즉, 이 현상은 광의 제2차 고조파 발생이라고 부르고 광파상 변환기 등에 응용된다.

## 3. 자기 광학효과(磁器 光學效果)

광의 진행 방향에 외부로부터 자게를 걸면 그 자게 방향에 대응해서 편광면(偏光面)이 좌우로 회전하는 현상을 말한다. 투과광에 대해서 일어나는 자기광학효과를 파라데이 효과(Faraday Effect)라고 하며, 반사광에 대해서 일어나는 자기광학효과를 자기 키효과(Kerr Effect)라고 한다. 이 현상을 이용한 것으로는 광아이소레이터, 광베모리가 있으며 광CT에 응용할 수 있다.

## 4. 음향 광학효과(音響 光學效果)

음파에 의해 물질의 전자가 진동되고 전자운(電子雲)의 조밀 상태를 유기하기 때문에 일어나는 물질률의 변화를 음향광학효과라고 한다. 음파의 파장에 대응하여 변하는 물질률의 변화는 회전각자로 삽을 수 있다. 즉, 음파의 파장을 변화시키면 광의 회전방향이 변화하게 된다. 이것을 이용한 것이 광편향기(光偏向機)이다. 이외에 분자나 격자의 내부 진동에 의한 분극(分極)효과로 일어나는 라만효과가 있는데 광섬유의 라만 증폭이 대표적인 예이다.

## 5. 광전효과(光電效果)

광전효과란 흡수된 광에너지가 자유전자를 발생시키는 현상으로서 광전효과에는 광을 흡수하는 물질의 외부로 전자를 방출하는 “외부 방전효과”와 물질 내에 電子·正孔의 쌍을 발생시키는 “내부방전효과”가 있다. 외부 방전효과를 이용한 것으로는 光電子增倍管이 있으며 내부방전효과는 광검출기(Pin-PD, APD)와 태양전지, 전자사진 감광체 등으로 이용되고 있다.

## 6. 전광효과(電光效果 : Electro-Luminescence)

물질의 외부에서 전계를 인가하거나 전류를 흐르게 하면 전기에너지가 광에너지로 변환되어 발광하는 것을 전광효과라고 한다. 전광효과에는 다음과 같은 2 가지의 현상으로 분류할 수 있다.

가. 첫번째 현상은 높은 전계에 의한 가속된 전자를 고체나 가스중에 있는 발광중심에 충돌해서 이온을 여기하고, 여기된 이온이 다시 원래의 안정상태로 돌아갈 때 광자를 방출하는 현상으로서 이것을 이용한 것으로는 플라스마 표시장치(PDP : Plasma Display Panel)나 형광표시장 등이 있다.

나. 두번째 현상으로는 특정한 반도체에 전자와 정공을 동시에 주입하면 다시 재결합해서 소멸될 때에 광자를 방출하는 현상으로서, 이 원리를 이용한 것으로서 발광나이오트(LED)와 레이저 다이오드(LD)가 있다. 이것들은 광통신시스템에서 발광소자(광원)로서 널리 이용되고 있다.

## 7. 포토 루미네센스(Photo-Luminescens)

어떤 물질에 광이 흡수되면 내부에 電子·正孔 쌍을 발생시킨다. 이 경우 외부로부터 조사된 광에너지가 충분히 크면 발생한 전자·정공 쌍은 양여의 에너지를 갖는 활성화된 전자·정공쌍으로 되는데 이것이 재결합한 때에는 사용물질 중에서 재결합 확률이 높은 에너지를 방출하면서 소멸된다. 이 현상을 포토 루미네센스라고 한다. 이 경우 입사된 광과 다른 파장의 광을 방출하게 된다. 이것은 광반도체 디바이스에 쓰이는 반도체 재료의 結晶評價에 활용되고 있다. 이상에서 살펴본 각종효과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 광전자에 관한 각종 효과

효과	현상	메커니즘	응용·용도(예)	재료(예)
전기공학효과	전계를 걸면 굴절률이 변화	이온이나 전자의 변위에 의한 電子雲 의 변형	광변조기	$\text{LiNbO}_3$ $\text{KH}_2\text{PO}_4$
비선형광학 효과	2개광의 합이나 차의 주파수를 갖는 광발생	광자신의 전계에 의한 電子雲의 변형	광주파수의 체배	$\text{LiNbO}_3$ $\text{Ba}_2\text{NaNb}_3\text{O}_{13}$
자기광학효과	자계를 걸면 그 방향에 대응해서 편광면이 좌우로 회전	전자의 세차(歲差) 운동에 의한 고유 운동주기의 변화	광아이소레이터 광메모리	$\text{Y}_3\text{Fe}50_{12}$ $\text{GbTbFe}$
음향광학효과	음파를 전파시키고 그진동에 대응해서 굴절률이 변화	원자의 변위에 의한 電子雲의 조밀의 변화	광편향기	$\text{TeO}_3$ $\text{PbMOO}_4$
광전효과	광을 입사하면 자유 전자 발생	속박상태에서 가동 상태로의 전자해방	광전 자동배관 광검출기 태양전지	Si
전광효과	전계를 걸거나 전류를 흘리면 발광	전자충돌에 의한 이온의 여기와 전자·정공의 주입과 발광 재결합	포시	$\text{ZnS : Mn}$
포토루미네센스 (Photo-Luminescence)	광을 입사하면 발광	광흡수에 의한 이온의 여기와 복사천이	발광다이오드 레이저	$\text{GaAs}$ $\text{InP}$
			레이저	루비 $\text{Nd : YAG}$

### III. 광응용 계측기술

광계측 기술이란 이미 살펴본 광전자의 여러가지 물리적인 현상과 효과 등을 이용한 각종 광응용센서(Optical Sensor)와 기존의 광섬유, 광소자 및 각종 광학 디바이스를 이용한 계측기술을 말한다. 광계측 기술은 공장자동화나 로보트 분야를 비롯하여 컴퓨터에 의한 정보처리 기술과 자동제어 기술분야에도 적용되어 크게 발전되고 있다.

광응용 계측에는 레이저광을 응용한 센서 이용분야와 광섬유 센서를 이용하는 분야 등으로 크게 분류되고 있다.

#### 1. 레이저 광응용 계측

레이저 광응용 계측에는 광의 기본기능을 이용하는 것과 광의 파동적 특성을 이용하는 광계측 및 정보처리 기능이 부가되어 별도의 의미가 있는 계측정보,

예를 들면 광절단법에 의한 용접로 보트용 시가센서 등의 광응용 계측시스템은 기계계측, 자동화 기기의 제어 및 로보트 관련이 대부분이며, 이외에도 도로나 하천, 교통기관, 의료 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 광응용 계측시스템의 이용 현황을 정리하면 표 2와 같다.

#### 2. 광섬유 응용계측

현재 개발되고 있는 광섬유 센서는 그림 2와 같이 전송로형 센서, 광학특성소자를 이용하는 센서 및 참조기준광을 사용하는 센서 등 3가지 방식으로 분류되며 이것은 광섬유 자체를 응용하는 것으로 고전압이나 전자파 장해가 심한 환경에서 전기량의 계측이나 전력설비 계측제어에 매우 유리하다. 다음 표 3에는 현재 개발되어 있는 각종 광섬유센서의 종류 및 원리를 정리하였다.

표 2. 광용계측 시스템 이용 현황

구 분	활용특성	계측시스템의 명칭	용 도
기본기능 이용	광의 강도, 강도의 각도분포	조도계, 농도계, 탁도계 표면상태 계측, 기타	환경의 계측제어, 수질계측 물질표면의 품질관리제어 각종 공업시스템
	광의 과장특성	색체의 계측, 분석계, 가스분석계, 적외선방사 온도계	각종 공업시스템, 환경제어, 항공우주 사회공공시스템, 기타 일반적인 용도
	광의 범위 특성	각종 광전릴레이, 기준선계측 (어레이이나 자동레벨링) 위치, 형태의 계측, 극점센싱 초점위치 검출	자동기계제어 토목건설기계제어 3차원 형태 계측시스템
파동적 특성이용	공간적인 간섭성	간섭거리측정기, 홀로그래피 간섭평면형태 계측	광작기계가공조립 등에서 정밀 칫수 계측 기체의 기초특성연구
	시간적인 간섭성	도플러 속도계 도플러 유량계	각종 공업시스템, 기체 또는 액체의 흐름의 기초특성 연구
	전자파로서의 특성	펄스에코 거리측정장치 변조위상차에 의한 거리측정 장치	특수용도, 토목건설, 측량 3차원 프로필계측
스마트 센싱	광절단법	각종 단면 상태, 위치 3차원 상태인식 시스템	로보트(2차원, 3차원시각)
	3각 측량법	3차원 상태, 위치확인시스템	로보트(3차원 시각)
	2차원 광강도분포	일반형식인식, 패턴인식 시각센싱	로보트(일반시각 센싱)
	레이저 광주사, 표면에서의 회절	표면형태 계측, 표면흡집검사 일반형상 및 패턴인식	로보트(시각센싱)

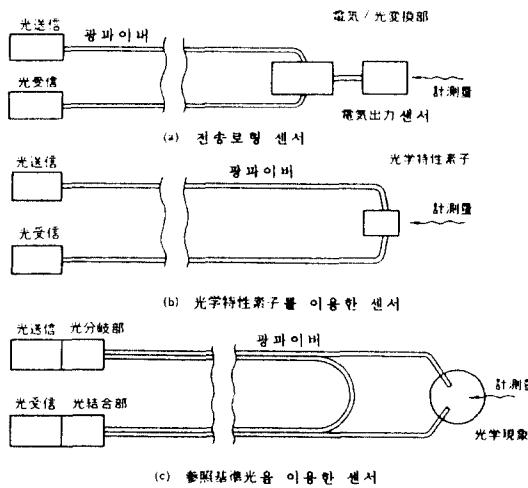


그림 2. 광파이버 센서방식

표 3. 광섬유 응용센서의 원리

계측물리량	광의 변조	광학 현상
전류·자계	편광 위상	파라데이 효과 간섭현상(磁氣歪)
전압·전계	편광	포겔스 효과
	위상	간섭현상(磁氣歪)
온도	광 강도	차폐판에 의한 광로차단 반도체의 투자율 변화, 형광방사
	광 강도·스펙트럼	발열체의 방사
	편광	복굴절 변화
속도·유속	주파수	도플러 효과
진동 가속도 압력	광 강도	마이크로밴딩 손실, 차폐판에 의한 광로차단 다이아후람에 의한 방사강도 변화
	편광	광탄성 효과
	위상	간섭현상(광탄성 효과)
	주파수	도플러 효과

### 가. 전류센서

그림 3과 그림 4는 파라데이 효과를 이용한 광섬유 응용 전류센서의 원리와 구성예를 표시한 것이다. LED로부터 나온 광은 광섬유를 통해서 광센서부에 보내진다. 편광자를 통과한 직선 편광파는 파라데이 소자내를 전파하는 사이에 외부 자계에 그 편파면이 회전되고, 겸광자에 의해서 그 회전각에 대응하는 광강도로 변환된다.

편·겸광자의 편광방향의 상태 각도는 전류에 의한 자계의 검출 감도를 최대로 하고 또한 직선성이 가장 좋게 되도록  $40^{\circ}$ 로 설정된다. 이때 수광소자면에서의 광강도  $P$ 는

$$P = P_0(1 + \sin 2\phi) \quad (1)$$

$$\phi = V, LH \quad (2)$$

로 된다.

여기서  $P_0$ 는 전류가 존재하지 않을 때의 수광강도이고 교류전류의 경우에는 평균 수광강도와 같다. 또  $\phi$ 는 파라데이 회전각,  $V$ 는 파라데이 소자의 베르디 정수,  $L$ 은 파라데이 소자의 광로길이,  $H$ 는 외부자계이다.

파라데이 소자로서는 鉛유리나 YIG 등 파라데이 효과가 큰 재료가 사용된다. 그림 5는 鉛유리를 이용

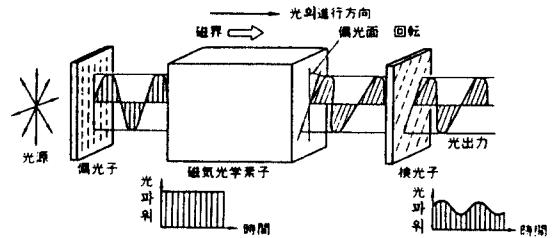


그림 3. 광섬유 응용전류 센서의 원리

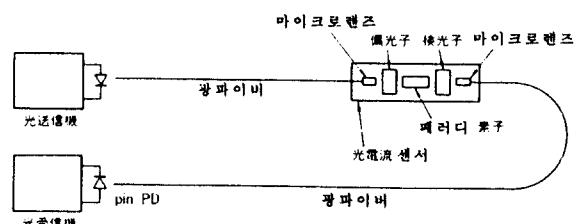


그림 4. 광섬유 응용 전류센서의 구성

했을 경우에 도체를 흐르는 전류와 광수신기 출력 전압의 측정 예를 표시한 것이다.

광수신기 대역을 500Hz로 한 경우 10 0e 이상의 자

계에 대해서 S/N비 40dB 이상이고, 수 Oe로부터 수 KOe 범위의 자계계측이 가능하며, 온도 특성은 오차는  $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 에서  $\pm 0.5\%$  이하이다.

한편 YIG계 박막 등의 강자성체를 쓰는 센서부는 소형으로서 고감도이지만 온도특성이나 강자성체 재료의 포화특성에 따라 비직선성이 문제가 된다.

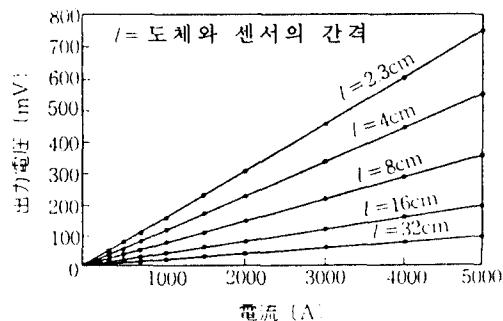


그림 5. 광섬유 응용 전류센서의 특성

#### 나. 전압 센서

그림 6과 그림 7은 포켈스 효과를 이용한 광섬유 응용 전압센서의 원리 및 구조예를 표시한 것이다. 결코 중에는 한개의 광전송 방향에 대해서 2개의 독립적인 직선변광모드가 존재한다. 포켈스 효과란 이들의 직선변광모드의 굴절률이 인가전압에 비례해서 변화하는 현상이다. 그림 2.7은 포켈스 소자로서 等軸性 결코를 쓰고 광의 전송방향으로 전개를 인가하는 縱型 변조방식을 나타내고 있다.

변광소자로부터 나온 직선 변광파의 편광방향이 결코의 주축에 대해서  $45^{\circ}$ 로 되도록 설정하여 놓고, 인가전계에 의한 각 직선 변광모드에 위상속도차가 생겨서 그 결과 포켈스소자 출사단면에는 양직선 변광모드간에 위상차가 생기기 때문에 출사광은 타원형의 편광파로 변환된다. 이 타원 편광파는 광학 바이어스용 1/4파장판을 끼우고 접광자로 광강도를 변화시켜서 광수신기를 보내어진다. 이때 수광소자 면에서의 광강도  $P$ 는

$$P = P_0(1 + \sin \delta) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} V \quad (4)$$

로 된다.

여기에서  $P_0$ 는 평균 수광파워,  $\delta$ 는 양직선 편광모드간에 생기는 위상차,  $n_0$ 는 전계를 인가하지 않을 때의 결코의 굴절률,  $\gamma_{41}$ 은 전기광학 정수이다.

等軸性 결코으로서는 BGO( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) 및 BSO( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) 등의 산화물 단결정과 CdTe, SnS 등의 화합물 반도체 결정이 이용되고 있다. 이러한 등축성의 결코는 원리적으로 자연 복굴절이 없기 때문에 온도 특성이 우수하다. 산화물 결정을 이용한 경우에는 수 ~ 수백V의 범위에서 우수한 직진성이 얻어지고,  $20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 출력 변동은  $\pm 3\%$  이하이다.

한편  $\text{LiNbO}_3$ (나오브산 리치움)이나  $\text{LiTaO}_3$ (나오브산 타이아트) 등이 一軸性 결정을 쓰는 광전압센서는 고감도의 특성을 얻을 수 있으나 자연 복굴절성으로 인한 온도 의존성이 큰 것이 문제가 되어 실용화를 하기 위한 온도 보상방법 등이 연구되고 있다.

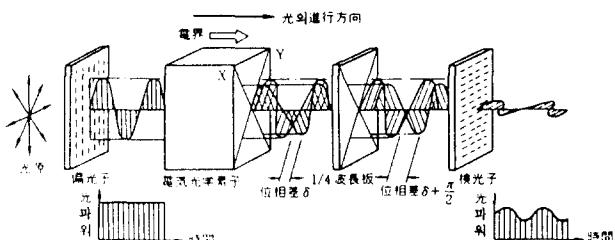


그림 6. 광섬유 응용 전압센서의 원리

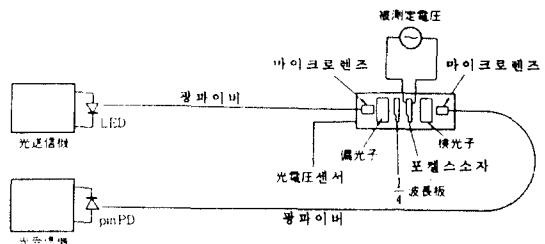


그림 7. 광섬유 응용 전압센서의 구조

#### 다. 온도센서

그림 8은 반도체의 광특성을 이용한 광섬유 응용 온도센서의 원리를 나타낸 것이다.

반도체는 온도로 결정되는 광의 흡수 특성을 가지고 있으며 광학적 기초 흡수단에 상당하는 파장은 온

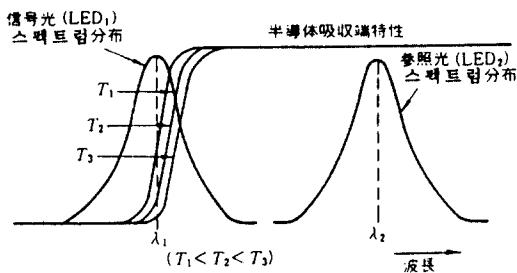


그림 8. 광섬유 응용 온도센서의 원리

도에 따라 변화하기 때문에  $\lambda g(T)$ 로 표시된다.  $\lambda g(T)$ 보다 파장이 짧은 광에 대한 흡수율은 급격히 증가한다. 또한  $\lambda g(T)$ 는 온도 상승과 함께 장파장쪽으로 변화하기 때문에 반도체와 광원의 스펙트럼 조합이 적절하다면 반도체로부터의 투사광 강도는 온도 상승과 함께 감소한다. 이러한 원리를 이용한 것이 그림 9의 온도센서 구성도이다.

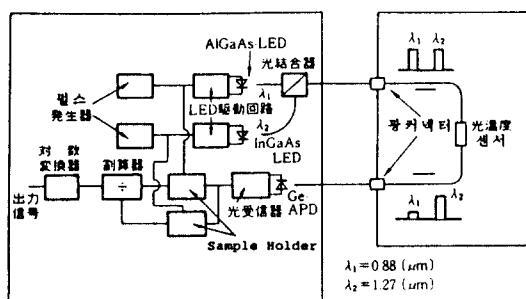


그림 9. 광섬유 응용 온도센서의 구성

온도와 같이 직류에 가까운 신호를 광강도 변조 방식으로 계측하는 경우, 광커팩터나 광섬유의 전송 특성에 따라 광전송 손실의 변화를 일으켜 측정 정도를 저하시키는 요인이 된다. 이 오차요인을 제거하기 위하여 여기에서는 2파장 방식이 채용되고 있다. 즉, 실온에서의  $\lambda g$ 가  $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 인 GaAs이거나 CdTe를 쓴 광온도센서에 LED1(발광파장  $\lambda 1 = 0.87 \mu\text{m}$ 의 AlGaAs 계의 LED)과 LED2(발광 파장  $\lambda 2 = 1.3 \mu\text{m}$ 의 InGaAsP 계의 LED) 2개의 LED로부터 번갈아 펄스구동되는 출사광을 뿜어낸다. LED1의 광온도센서부의 투과 광강도는 온도에 의존하는데 LED2의 광온도에 무관하게 거의 투과한다. 전자를 신호광으로 후자를 참조

광으로 사용해서 신호부에서 이들의 비를 연산하면 온도를 정확하게 측정할 수 있다.

그림 10은 온도와 광수신기 출력 전압과의 관계를 표시한 것으로  $0 \sim +300^\circ\text{C}$  범위내의 온도를  $\pm 1^\circ\text{C}$  이하의 정도로 측정을 할 수가 있다. 또한 이 센서는 응답속도가 2~3초로 빠르고 초소형( $1.5\text{mm}\phi \times 30\text{mm}$ )인 특징도 갖고 있다.

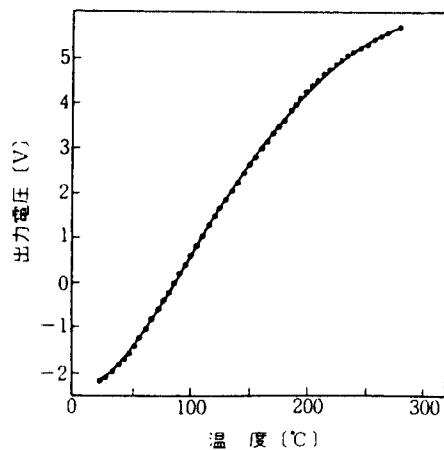


그림 10. 광섬유 응용 온도센서의 특성

#### 라. 레이저 도플러 속도계

레이저광을 이동하는 물체에 비추면 그 산란광의 주파수는 도플러 효과에 따라 원래의 주파수가 변화되는데 그 주파수의 변화량  $f_p$ 는 물체의 속도  $V$ 에 비례한다. 이 원리를 이용한 속도계를 레이저 도플러 속도계(LDV : Laser Doppler Velocity Meter)라고 한다. 그림 11은 광전송로 및 신호검출부에 광섬유를 사용한 광섬유 응용 레이저 도플러 속도계 또는 광섬유 LDV를 표시하고 있다.

이 속도계에 있어서 마이크로 렌즈가 부착된 광섬유 프로브 주 광 프로브로부터 레이저광을 피측정체에 비춰서 도플러 효과를 받는 후방산란광을 같은 광프로브로 수광한다.  $f_0 + f_p$ 로 되는 주파수의 산란광은 광프로브 앞쪽 단면에서 반사된 주파수  $f_0$ 의 참조광과 함께 수광소자인 APD로 들어온다. 주파수가 서로 다른 2종류의 광이 동시에 수광소자에 입사하면 간섭 효과에 의해 그들의 비트신호가 겹쳐된다. 즉 APD에 유기된 광전류의 주파수는  $f_p$ 와 같고 다음식으로 표시된다.

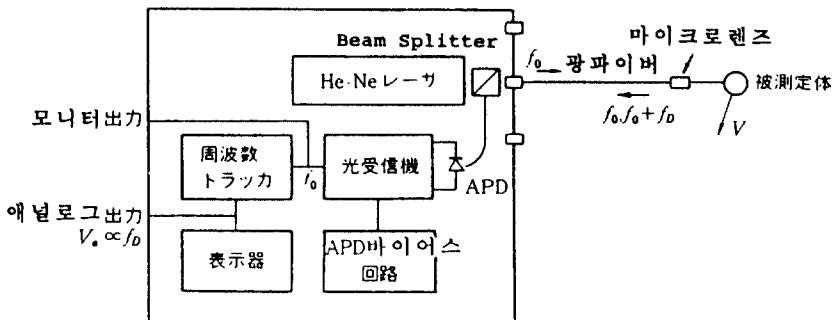


그림 11. 광섬유 응용 레이저 도플러 속도계

$$f_D = \frac{2V}{\lambda} \cos \theta \quad (5)$$

따라서  $f_D$ 를 측정하면 속도  $V$ 를 알 수 있다. 여기서  $\lambda$ 는 레이저광의 파장,  $\theta$ 는 광프로브로부터의 출사광과  $V$ 와 이룬 각도이다. 그림 12는 도플러 주파수  $f_D$ 와 속도  $V$ 와의 관계를 나타낸 것이다.

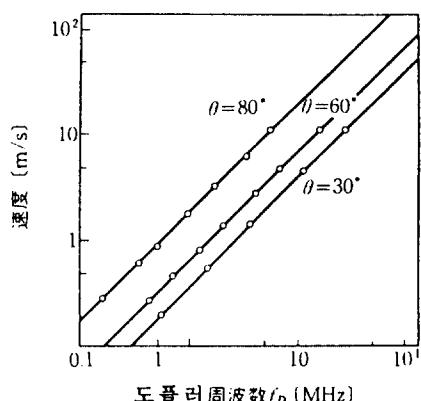


그림 12. 광섬유 응용 레이저 도플러 속도계의 특성

광수신기 및 신호 처리기의 대역을 최대 100MHz 정도로 설계하면 수mm/S~100m/S 범위의 속도를 측정할 수 있다. 본 측정장치의 광프로브와 피측정체와의 허용거리는 약 40cm, 측정 정도는  $\pm 1\%$  이하이다. 또한 본 장치는 공장내에서 제품의 이동속도나 자동화 등의 절대속도 등 물체의 속도뿐만 아니라 액체의 유속, 유량의 계측 및 철강체의 미소진동 계측 등에 많이 이용되고 있다.

#### 마. 放射온도계

방사온도계는 고온 물체로부터 방사되는 적외선 강도를 검출하여 광섬유로 광수신까지 전송한 후 신호처리하면 고온물체의 위치나 온도를 비접촉 방식으로 측정할 수 있다. 현재 500~1,500°C의 온도를  $\pm 0.5\%$ 의 정도로 측정이 가능하다.

## IV. 전력용 광계측 시스템

#### 1. 광응용 계측의 특징

전력계통의 보호, 제어기술은 점점 고도화가 요구되고 있으며, 컴퓨터나 마이크로프로세서등 전자통신기술을 적용하여 전력기기의 감시나 원방제어 및 이상진단을 행하는 시스템이 도입되고 있다. 표 4는 전력회사에서 광응용 센서를 사용했을 때의 잇점을 표시하였다.

표 4. 전력회사에서의 광응용센서의 특징

종래의 센서 사용시의 대책	광섬유응용센서 사용시의 잇점
서지 대책	
전자유도 대책	대책불요
정전자유도 대책	
절연확보책	↓
검출부에 전원 필요	소형 고품질화

전력수요가 증가함에 따라 발변전소는 점점 대용량화, 고전압화가 되고 있기 때문에 종래의 電磁式 전류 전압변성기가 대형화되고 절연설계나 안전보증을 위해 코스트 상승이 불가피한 실정이다. 따라서 소형 경량이면서 절연성과 무유도성이 우수한 광섬유응용

전류·전압센서 즉 광 CT, 광 PT의 개발이 활발하게 되었다. 특히 가동중의 발전기, 변압기, 전동기 등 대형 전력기기 내부의 온도나 진동의 원격측정에는 이들이 각종 광섬유 응용센서의 도입이 가장 적합하고 장차 이 기술은 전력기기의 품질관리, 신뢰성 확보, 이상진단, 설계 최적화 등에 적용될 추세이다.

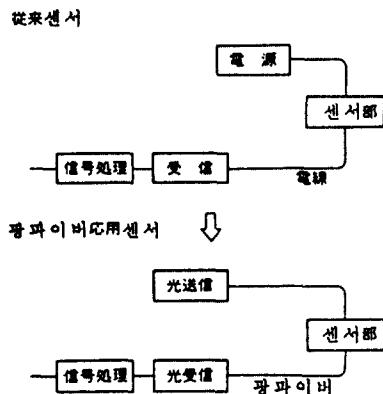


그림 13. 센서구성의 변화

## 2. 광응용 기술개발 현황

전력분야에서 광센서 응용기술을 이용할 경우의 잇점을 정리하면 다음과 같다.

- 광센서 및 광섬유가 고정연성을 갖기 때문에 고전압하에서의 측정이 용이함
- 무유도 측정시스템 구성 가능
- 소형, 경량으로 전력기기 내부 등의 협소한 곳에서도 이용이 가능함
- 레이저, 레이더 등의 리모트센싱 기술을 사용하면廣域데이터를 쉽게 얻을 수 있다.

그러나 전력설비에 이와 같은 새로운 방식을 도입할 경우에는 측정정도와 동시에 전력공급을 위해 장기간에 걸친 신뢰성의 실증이 불가피하게 필요하다. 전력분야에 있어서 광응용 센서 기술개발의 현황을 정리하면 표 5와 같다.

## 3. 광 PT, 광 CT

### ( ). 광섬유응용 전압센서(광 PT)

광 PT는 주로 Pockels 효과를 이용하는 것으로서 고압측에는 Pockels 소자 ADP, 편광자, 복합편광프리즘 등의 광학계를 배치하고, 지상측으로는 광섬유를

표 5. 전력분야에서의 광응용기술 개발현황

원리		측정대상	풍향	풍속	온도	대기환경	뇌검지	뇌파형관측	광CT	광PT	광CPT	OF케이블유량검출기	변압기내부온도측정	발전소보일러감시	전력구내침입감시
광섬유센서	Pockels 효과														
	Kerr 효과							○	△						
	Faraday 효과							△							
	굴절율변화			△				△	△						
	이미지광섬유														
광응용센서	광의차단	◎	◎			◎							◎		
	광의반사	◎								◎				◎	
	광의투과율변화		○									○		◎	
	광의반사율·산란			◎											
장치	Pockels 효과						○	○	△						
	Kerr 효과								△						
	Faraday 효과						○		△						

◎ 실용증

○ 실용화시험증

△ 연구개발증

이용하여 애자 가운데로 연결한다. 또한 전압은 공간 전극으로 대지간의 부유용량에 의한 분압을 이용하고, 온도에 의한 광학소자 특성 변화를 방지하기 위해 내부에 SF<sub>6</sub> 가스를 봉입하여 순환시켜서 40°C ~ 60°C 를 유지하고 있다.

그림 14는 일본에서 개발하고 있는 공간 전극식 광 PT의 외형을 예시하고 있다.

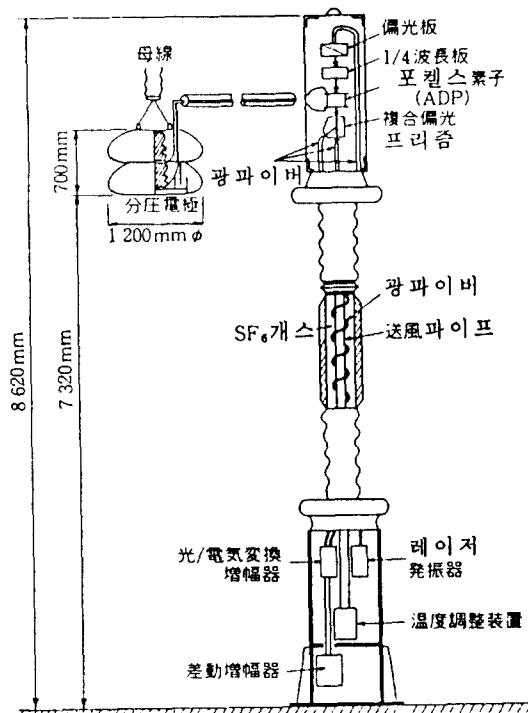


그림 14. 광간전극식 광 PT의 외형

#### 나. 광섬유용용 전류센서(광 CT)

그림 15는 단일모드 광섬유를 전송하는 직선 광파가 외부자체에 의해 파라데이 회전하는 것을 이용한 전류(자계)센서의 구조도를 표시한 것이다. 광섬유의 베로디 정수(파라데이 회전성능 지수)는 광학식 전류센서에 사용되는 鉛유리의 1/8 정도인데 상당히 긴 광섬유를 쓰기 때문에 이 센서는 원리적으로 꽤 높은 감도를 가지고 있다. 그러나 실제로는 광섬유 세조직에 생기는 자연복굴절이나 실장시의 광섬유 구부림 및 용력 혹은 온도 등의 외부요인에 의해 복굴절 때문에 감도가 떨어져 특성이 불안정하게 된다.

다. 이를 문제점을 해결하기 위해 빤파면 보존 광섬유를 채용하거나, 복굴절 보상을 위한 특수 광섬유 실장이 제안되고 있다.

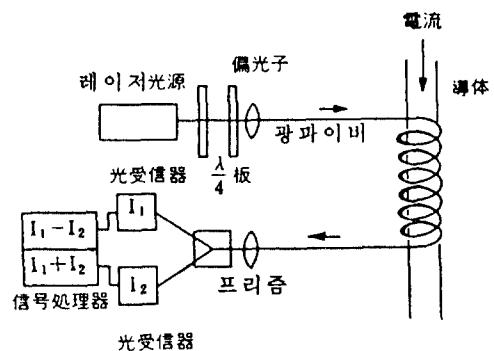


그림 15. 광섬유용용 전류센서의 구조도

현재 복굴절 보상 특수 광섬유를 쓰는 방식의 경우 광섬유 내 광강도 0.2 ~ 0.5mW, 전송대역 130Hz(20 ~ 150Hz)의 조건에서 50 ~ 1200A의 전류가 정도 0.24%에서 측정되고 있고, 또한 전류 200A일 때 -20 ~ +40°C의 온도 범위에서 ±0.7%의 측정 정도가 얻어지고 있다. 그림 16은 이상과 같은 방법의 10kV급 광섬유 CT의 구조도이고, 그림 17은 송전선 개통에 이용하기 위해 개발되고 있는 광 CT 장치를 예시한 것이다.

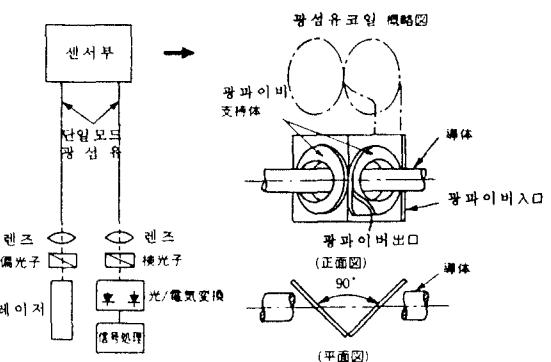


그림 16. 10kV급 광섬유 CT

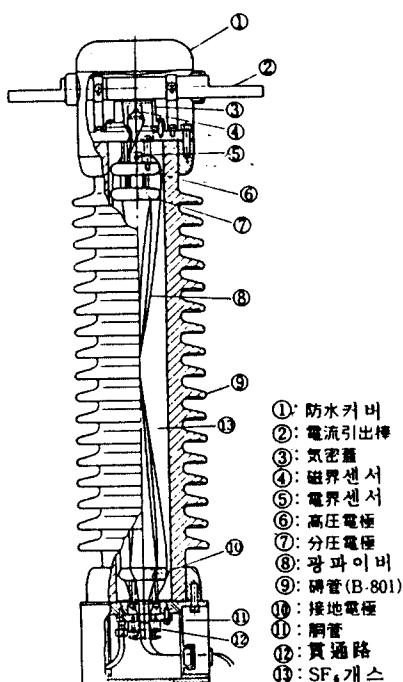


그림 17. 광 CT 장치

#### 다. 광 PCT

광용용 센서를 이용하여 전류전압 동시측정 방식은 다음 2가지 방식이 있다.

##### i. 동일한 레이저빔 중에 파라데이 소자와 포켈스

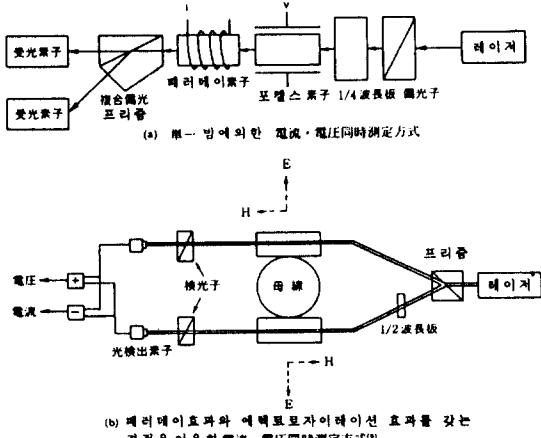


그림 18. 광 PCT의 구성

소자를 두고, 파라데이 효과에 의한 회전각에서 전류를, 포켈스 효과에 의한 타원화에서 전압을 측정하고 양자의 동시효과에 의해서 전력을 측정하는 방법

ii. 동일한 레이저빔 중에 전류에 의한 효과와 전압에 의한 효과를 분리시킬 수 있는 센서를 두고 전류와 전압을 동시에 측정하는 방법

그림 18은 각각의 측정방식을 나타낸 것이다.

## V. 한전의 광용용 계측시스템

한전은 전력용정보통신망으로 궁장 3200km에 달하는 전국적인 광 네트워크를 보유하고 있으며, 광용용계측시스템의 효시라고 할 수 있는 변조소구내의 광 데이터 링트시스템을 1985년에 설치하여 현재까지도 변전소 원방감시제어(SCADA) 시스템에 활용하고 있다.

그후 광용용 기술에 대한 연구개발을 지속적으로 수행하여 왔으며 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 발전소 광계측 제어분야
- 광 CT, PT 개발 및 적용
- 송전계통 감시시스템
- 지중 송전선 사고검출 시스템

#### 1. 발전소 광계측 분야

발전소의 대용량화로 계측제어설비가 복잡하게 되었고, 또한 효율적인 운전을 위하여 각종 감시제어 정보량이 급증하게 되었다. 따라서 고신뢰도의 정보전송과 디지털화의 필요성이 증가하게 되어 무유도, 광대역, 세경, 경량 등의 우수한 상점을 가진 광계측 제어시스템에 대한 연구를 차수하게 되었다.

전체적인 시스템 구성도는 그림 19와 같이 광 LAN 형태의 네트워크를 구성하고 Sub-Loop 계통인 Mill, Fly Ash 계통의 계측제어 시스템과 SLP 계통시스템 및 연소상태 감시용의 칼라 CCTV 시스템 등 3개의 시스템으로 구성하였다. 오퍼레이터 컨솔용으로는 고성능의 산업용 마이크로 컴퓨터와 주변장치로 구성하였으며, 기존 컴퓨터와 케이블 계통을 그대로 활용하여 2종 시스템을 유지하면서 각종 시험측정과 실증적인 연구에 편리하도록 하였다.

또한 발전소 고장발생시 사고 원인 분석에 필수적인 기능의 하나인 AOE(Sequence of Event) 시스템과 중앙화로내 급탄관의 미분탄 온도측정용 광온도 센서 및 신호처리 시스템을 개발하여 기능을 확장하므로

로써 발전소의 종합적인 광계측시스템을 구축하여가고 있다.

## 2. 광CT, PT 개발 및 적용분야

전력계통이 점차 초고압화되고 방대해짐에 따라 전압, 전류를 측정하기 위한 각종 계기용 변성기의 설연장치가 커지게 되어 제작비가 상승하고 성능화보

여 어려움이 예상되고 있다. 특히 GIS의 개발보급이 화산뒤에 따라 옥내에 설치할 수 있는 콤팩트한 광CT, PT의 개발이 필요하게 되었다.

광 CT, PT에 대해서는 이미 약술하였으므로 여기에서는 국내 최초로 시제품을 개발한 배전용 광 CT, PT와 송전용 광 CT에 대한 설계규격만을 소개하고자 한다.

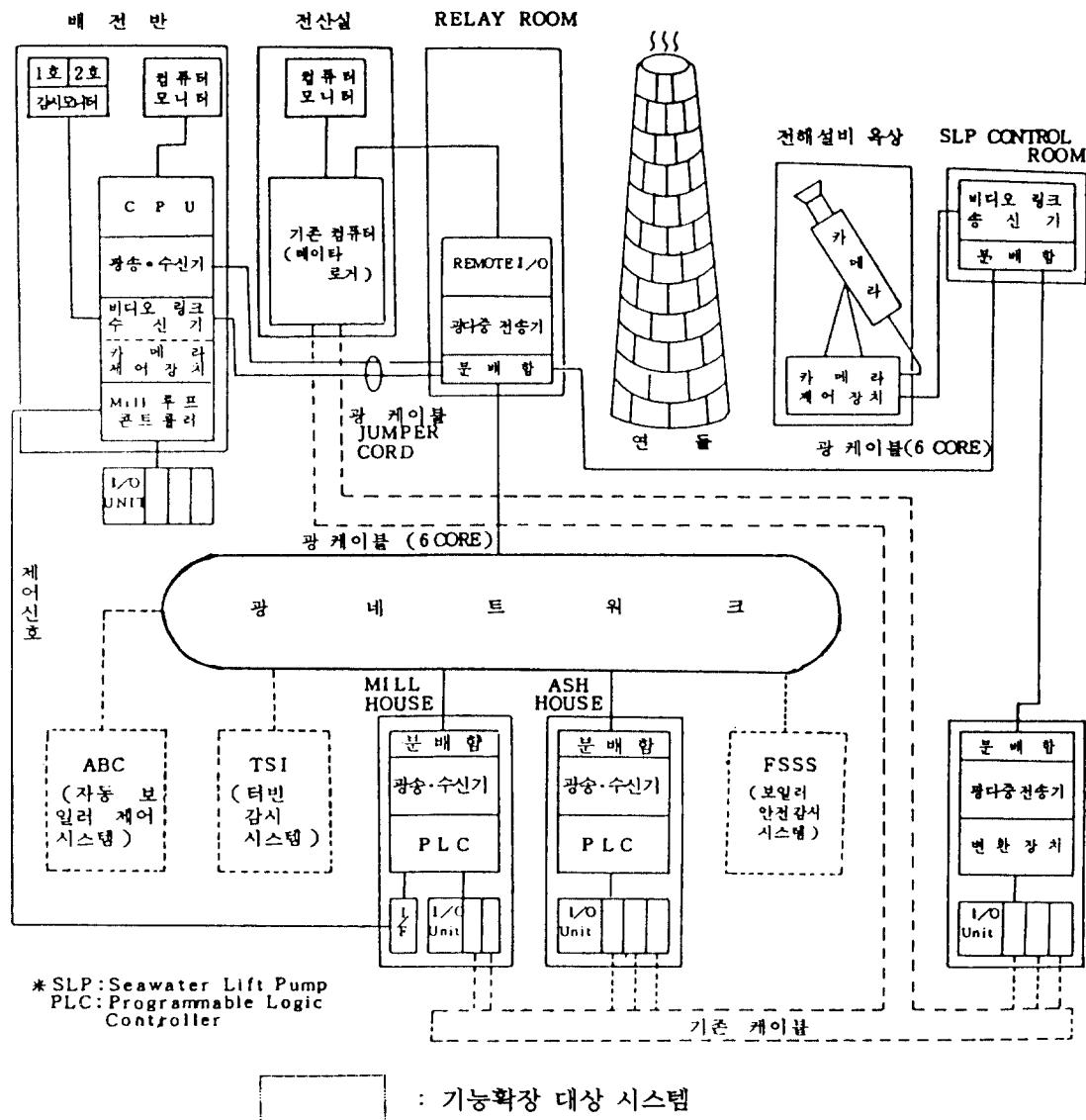


그림 19. 발전소 광계측 시스템 구조도

표 6. 광 CT 설계규격

구 분	22.9kV용 규격(배전용)	154kV용 규격(송전용)	비 고
형태	코어형, 순수철심(99.5%)	좌 동	감도향상률
전류측정 범위	10~2,000 Arms	좌 동	약 2π배
오차 범위	±1~5%	좌 동	
사용센서	BSO 단결정, ZnSe 다결정	좌 동	Faraday
광 디바이스	LED(0.87μm), PIN-PD	좌 동	효과
광전송로	멀티모드 계단형 광섬유 (100/140μm)	좌 동	
주파수 특성	30Hz~3kHz(3dB이내)	좌 동	고압측전원
소요전원	DC ±15V, 120mA	좌 동	불요
절연지지대	30kV용(Ohio Brass제품)	345kV용(Ohio Brass제품)	

### 가. 광 CT

배전용 광 CT를 제작하기 위한 중요한 연구검토 사항은 단결정의 온도 안정성, 반파장 전압 및 내전압 특성, Verdet 상수, 선광성(광활성), 광파이버 및 광디바이스의 선택, 센서의 자계 짐증을 위한 코어재료의 선택, 센서부의 광학계를 보호하기 위한 알루미나 케이스 제작 등이 중요한 내용이다. 22.9kV 및 154kV용 광 CT의 설계규격은 다음표 6과 같다.

### 나. 배전용 광 PT

22.9kV 배전용 광 PT는 BSO 단결정의 전기광학 효과를 응용한 것으로 주요 설계 규격은 다음표7과 같다.

이상과 같은시제품들은 연구실내에서 여러가지 시험과 특성측정을 시행한 후 모의선로에 설치하여 입출력 특성을 측정한 결과 실용화 가능성을 확인하였다.

현재에는 변전소 구내의 실제 계통에 설치하여 신뢰도 및 특성 변화상태 측정 등 실용화를 위한 연구를 계속하고 있다.

표 7. 22.9kV용 광 PT 설계규격

구 分	규 격	비 고
분압방식	콘덴서 분압방식	
측정오차	±3% 이내	
사용센서	BSO 단결정	전기광학 효과
측정원리	Pockels 효과 및 광강도 변조방식	
광디바이스	LED, PIN-PD Module	
광섬유	다중모드 GI형(100/140μm)	
소요전원	DC ±15V, 120mA	고압측 전원 불필요

### 3. 송전계통 감시시스템

송전선 복합가공지선(OPGW)의 광통신망과 각종 광센서를 활용하여, 산악지 등 지형적으로 열악한 환경에 있는 송전계통을 효율적으로 운전하기 위한 원격감시 시스템을 시설하였다.

이 시스템에서 이용된 센서들과 기능을 열거하면 다음과 같다.

표 8. 각종 센서 및 기능

구 分	기 능	비 고
광통향센서	16방위측정, 최소1초마다 순시치 측정	센서인터페이스 장치부가
광통속센서	정밀도 : 0.1M/SEC, 최소1초마다 순시 카운팅	센서인터페이스 장치부가
항공장애 표시등 제어장치	항공장애등 On/Off 상태 상태변화 인지시간 : 1초 이내	센서인터페이스 장치부가
사고전류 검출센서	CT에 신호처리 장치 부가 OPGW 도체부에 유기된 전류검출 전류신호를 디지털신호처리	사고판정 소프트웨어 개발작용

중앙 관제시스템은 개인용 컴퓨터(386급)와 기본적인 주변장치로 구성되어 있으며, 광다중화 전송장치를 별도로 제작하였다.

전원은 태양전지와 축전지를 이용하여 광다중화 전송장치를 비롯하여 각종 센서와 인터페이스 장치 및 항공장애등에 전력을 공급하고 있다.

## V. 결 론

전력설비는 점차 초고압, 대용량화, 복잡하게 되어 갑에 따라 전력계통 운전, 유지보수 업무가 더욱 어려워지고 있는 추세이다. 기존의 계측제어 및 보호설비들을 광섬유 또는 광용용 센서를 이용하면서 소형 경량화는 물론 전자유도를 빙자 않는 고신뢰도의 시스템으로 발전시킬 수 있으므로 각 기술분야에서 광전자 공학(Opto-Electronics)에 대한 발전동향을 주시하면서 이해의 폭을 넓혀나가야 할 것이다.

특히 본 논문에서 소개한 각종 센서와 여러가지 광용용 계측시스템 현황을 정확히 이해하면 많은 분이 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 광 PT, 광 CT의 국내개발 수준은 아직 초보단계이기는 하지만 현장에 실제 적용할 경우에는 송배전 계통 운용에 회기적인 변화를 가져오게 될 것이며 특히 광섬유 온도센서를 이용하면 지중 송전선의 사고예방이나 고장구간 검출 등에 매우 유용한 시스템이 될 것이며 발전소 구내에서도 현재의 Sub-control 계통에서 더욱 확대 적용하는 방안이 계속 연구개발되어야 하겠다. 기존 OPGW를 이용한 송전선의 감시제어시스템도 기능을 더욱 확장하여 주요 계통에 실제 적용되어야 할 것이다.

또 광용용 계측시스템을 어느 한 부분에서 추진하기보다는 산학연 협동체제를 구축하여 국가적인 차원으로 추진하는 것이 더욱 효과적일 것으로 생각된다.

특히 일본 전력회사들의 연구개발 활동을 주시할

필요가 있으며, 광전자 공학에 대한 기초기술과 센서 개발 등 핵심요소 기술에 대한 체계적인 연구가 시급하다 할 것이다.

다가오는 21세기에는 고도 정보화사회로서 정보혁명의 시대이며, 컴퓨터와 코뮤니케이션이 융합된 C&C 응용기술을 더욱 발전시키고 확대 적용하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 과학기술처, 한국전기연구소 “전력용 광계측시스템 개발연구” 1987.5
2. 上之園博, 光ファイバ 通信計測技術, 電氣書院, 1986
3. 佐藤 金九他 “送電線 故障區間 標定 システム 開發” 電氣學會 全國大會 No.1068, 1986
4. OHM '93. 1월호 特輯 pp2~p75
5. 電氣現場技術 '93. 5월호 p49 “直流光電壓 變成器 の 開發”
6. 기술연구원 “광센서를 이용하는 송전설비 감시시스템 개발 적용에 관한 연구” 1993.7
7. 기술연구원 “광 CT, PT 개발 및 적용에 관한 연구” 1993.1
8. 기술연구원 “광 시스템을 發電所 計測制御分野에 적용방안 研究” 1989.9
9. 기술연구원 “광기술을 이용한 지중송전선 사고구간 감출시스템 기술연구” 중간보고서 1993.12
10. 電氣書院編輯部 “ねかみ 光 ファイバ應用技術”
11. 電氣書院編輯部 “エレザのため 光システム プラグティス” 1987. 2月
12. 한국산업기술원 “센서 인터페이스 및 계측제어 기술” 1993.



이 원 빙

- 1965년 : 국립 항공대학 항공통신공학과
- 1968년 : 한국전력공사
- 1985년 : 한전 기술연구원 전자응용연구실 부장

〈주요 연구실적〉

- 배전계통 자동화를 위한 원방감시제어 연구
- 수용가 자동원방검침 및 부하집중제어 시스템 연구
- 광시스템을 발전소 계측제어에 이용방안 연구
- 1992년 ~ 현재 : 한전 서울연수원 전자통신교수실 주임교수

〈관심분야〉

- 광응용계측
- 배전자동화, 자동검침
- 이동통신, CATV