

# 전력설비 IT화를 위한 광센서 기술 동향

\* 구자윤 / 한양대학교 전자컴퓨터공학과  
\* 장용무 / 한양대학교 퓨전전기기술응용연구센터

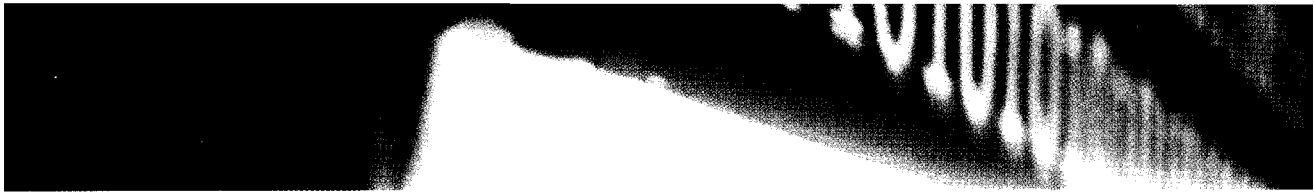
## 서 론

최근 산업 및 가정에서 소비가 급증되고 있는 전력수요를 충족시키고, 또한 전력 계통의 안정적인 운영을 도모하기 위하여 전력 계통 및 전력 설비들의 공급 전압 규모는 초고압화로 승압되고 있으며, 설비의 규모는 대형화로 되는 것이 현재의 추세이다. 이러한 배경으로 인하여, 전력 설비에 대한 전기적인 절연특성을 확보하면서 경제적인 비용 절감이 가능한 설비 외형 규모의 콤팩트화를 위하여 선진외국을 비롯하여 국내에서도 투자를 아끼지 않고 있다. 이상과 같은 요구를 충족시킬 수 있는 여러 가지 장점을 지니고 있는 가스절연 전력기기(GIS)가 현재 적극적으로 확대, 적용되고 있는 실정에서, GIS의 사고예방과 안정된 운영을 위하여 정확하면서도 신뢰성이 확보되는 상시 및 예방진단을 위한 온라인 전압 전류 측정 및 부분방전을 비롯하여 각종 파라미터의 측정 및 진단의 확보가 절대적으로 필요하다. 그리고 최종 수용가에 공급되는 전력의 고품질화를 위하여 배전계통의 선로사고진단 및 원격조정 배전 자동화를 비롯하여 배전반의 콤팩트화 및 전자 디지털화로의 개발 추세를 반영하여 설계 제작된 고압형 배전반을 유지 보수하기 위해서 최우선적으로 전압 전류, 온도, 부분방전 및 기타 등등의 센서기술과 이들 센서의 측정 데이터를 분석할 수 있는 신호처리회로 등에 대한 개발기술의 확립이 필수적인 요소이다.

그러나 현재 운영되고 있는 전력설비의 감시 및 보호를 위하여 설치된 기존의 전압 및 전류측정 장치인 철심형 변성기(iron-core PT 및 CT)는 측정전압, 전류가 증가될수록 전기적 절연설계가 어렵고 외형 부피가 매우 커질 뿐만 아니라, 측정의 정확도, CT 철심의 자속포화로 인한 사고전류측정의 어려움 등과 GIS 등의 전력설비에서 큰 용적을 차지하는 것과 같은 여러 가지 문제점들을 발생시키고 있다. 또한, 측정오차로 인하여 전력품질을 평가하는데도 큰 문제를 발생시킬 수 있고 진단결과의 신뢰성을 낮추는 결과를 초래하여 앞으로 활성화될 전력거래소의 전력시장에서 전력거래에 요구되는 정밀한 주계량설비와 정밀급 비교계량설비의 설치규정을 만족시키는 문제에서도 어려움을 내포하고 있다.

이러한 문제점이나 단점의 해결과 세계적으로 부각되고 있는 전기품질의 중요성으로 감시 보호제어 및 진단 기능을 강화시키기 위하여 새로운 센서기술, 광기술, IT 등의 새로운 디지털기술을 접목시킨 융합형 전력기기 개발을 위하여 선진 외국 및 국내 관련업체의 개발투자를 집중시키고 있다.

최근에 눈부신 발전을 하고 있는 레이저 및 광전자기술을 바탕으로 광전압 센서 및 광전류 센서들이 개발되어 전력 기술분야에 적용하기 위한 연구투자가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 1970년에 코닝에서 개발된 저손실 광섬유의 일반화로 인하여 광통신 및 센서의 발전을 가능케 하여 변압기 온도 측정, 화재감시,



재료의 열화측정 등의 온도감시를 위한 광섬유센서 또는 적외선센서기술도 실용화 개발단계에 있으며, 일부 관련업체에서는 상용 제품을 출시하고 있다. 이외에 발전된 광기술을 바탕으로 여러 분야에서 광응용기술이 개발되고 있다.

이러한 디지털 전력기기분야의 새로운 센서들은 전기 자기적 무유도성 및 전기절연성에서 매우 우수하여 고전압 및 대전력 설비 진단에 적용할 경우, 기존의 철심형 CT 및 PT를 적용한 계측 시스템에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 해결할 뿐 만 아니라, 전자식 계전기 및 전력품질(PQ) 등 새로운 분야로의 확대 적용이 가능한 미래 지향적인 시스템이다. 또한, 이들 센서는 필요에 따른 구조변경이 용이할 뿐 아니라 소형화가 가능하여 제작비용이 절감되며, 설치가 용이하여 전자식 배전반 내부 및 외부에 별도의 유지보수가 필요 없어 반영구적으로 사용이 가능한 장점을 지니고 있다. 아울러, 광섬유 센서는 전자과간섭에 대한 내성, 폭발성이 강한 환경에서 사용 가능한 점, 다중화 및 분포측정 능력이 우수한 장점을 지니고 있다.

본고에서는, 국내 중전기기의 세계적인 기술격차를 극복하기 위한 방안으로서, 선진국도 개발단계에 있는 디지털 IT 전력기기 개발에 핵심적인 새로운 센싱기술에 대하여 소개하고자 한다. 한국이 IT분야에서는 이미 세계적으로 최고의 수준으로 인증 받고 있으므로, 이를 바탕으로 전자식 또는 광섬유 및 광응용 센서를 전력기기에 접목할 수 있는 기술을 선진국에 앞서 개발 및 적용하기 위하여 광기술 및 광섬유가 응용된 각종 센싱기술에 대한 개요 및 선진 외국의 기술동향을 소개함으로써 국내의 연구투자 및 상용적인 활용을 도모하기 위한 기술적인 이해를 돕고자 한다.

## 광전압 및 광전류 센서

레이저응용 진단기술은 전력설비의 신뢰성 확보 차원에서 사고 및 예방을 위한 상시진단 분야에 우수한 장점을 지니고 있어 장래의 계기용 및 보호용 계측장치로 발전이 확실시 된다. 그러나 설비진단용 광CT 및 광PT는 측정된 신호로 다양한 전력설비를 제어 및 운전해야 하

기 때문에 주변 온도 및 진동 등의 외부영향에서도 요구되는 측정 정밀도가 확보되어야 할뿐 아니라, 또한 진단 시스템의 성능을 좌우하는 감도, 동작범위, 고속 응답 등에서 고성능 및 고신뢰도가 요구된다.

레이저 응용계측의 장점은, 첫째: 전기적인 절연 및 전자과장에(EMI)로부터 자유롭고, 둘째: 비접촉식이며 비파괴적인 계측이 가능하고, 셋째: 공간과 시간적인 측정 분해능 및 정밀도가 높으며, 넷째: 소형, 경량의 센서제작과 원격 조정이 가능하여, 마지막으로 잠재적으로 경제성을 확보할 수 있는 기술이다.

다음으로 상용 광 CT 및 광 PT의 특성은 표 1에 나타난 바와 같이 항목별로 설명하면, 확도(accuracy)는 기존의 정밀 계기용 및 보호용의 등급보다 우수하며, 측정 대역은 특정한 정격의 제한 없이 넓은 뿐 아니라 주파수대역도 저주파에서 고주파까지 선형성을 유지할 수 있다. 그리고 기존의 아날로그를 비롯하여 디지털 계전기와의 인터페이스가 용이하고, 현재로서는 송변전급에서 설치 및 유지보수 비용면의 경제성에서 경쟁력을 갖지만, 향후에는 배전급까지 잠재적인 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

영국의 과학자 Roger에 의해 1973년에 자기광학효과(magneto-optic effect)를 응용한 전류(자계)측정방법이 제안된 이후, 전기공학분야에서 새로운 전류측정센서로 응용하기 위한 많은 연구 투자가 이루어지고 있다. 광전류 센서의 원리는 그림 1과 그림2와 같으며, 사용되는 Faraday 소자에 따라 1) Bulk Faraday 결정을 이용한 광

표 1 광 CT 및 광 PT의 특성

High Accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>current: 10 mA to 100 A, exceeds IEC Class 0.2S and IEC Class 0.1</li> <li>for protection exceeds IEC Class 0.5 and IEC Class 1.0</li> <li>voltage: for metering exceeds IEC Class 0.2 and IEC Class 0.1</li> <li>for protection exceeds IEC Class 1.0 and IEC Class 3.0</li> </ul>
Wide Dynamic Range	<ul style="list-style-type: none"> <li>current: from under 1 A<sub>max</sub> to 2000 A<sub>max</sub> for metering up to 70 kV<sub>max</sub> for protection</li> <li>voltage: from 2% to 200% of rated voltage</li> </ul>
High Bandwidth	<ul style="list-style-type: none"> <li>current: 0 Hz to 0.6 kHz for metering</li> <li>voltage: 0 Hz to 0.6 kHz for voltage</li> </ul>
Safe & Environmentally Friendly	<ul style="list-style-type: none"> <li>all the separable, no electric shock (no 50 Hz)</li> <li>no fire, no explosion, no other secondary effects</li> </ul>
Reduced Installation Costs	<ul style="list-style-type: none"> <li>light weight for easy to design &amp; install</li> <li>compact &amp; VDU friendly for better metering &amp; protection</li> </ul>
Field-friendly	<ul style="list-style-type: none"> <li>use of field software interface to powerful sections</li> <li>computer friendly operation of software analog and digital interface</li> <li>communication: ethernet, RS485, or protocols</li> </ul>
Low Maintenance	<ul style="list-style-type: none"> <li>MicroV<sub>2</sub> IC</li> <li>no photo treatment</li> </ul>

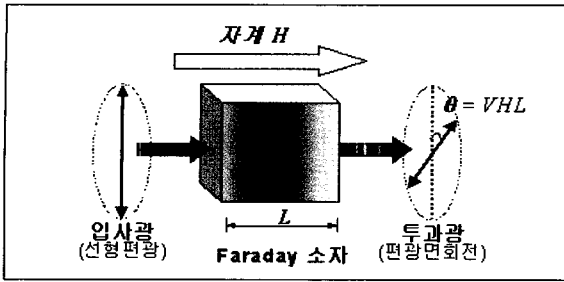


그림 1 Faraday 효과를 이용한 광전류센서 원리

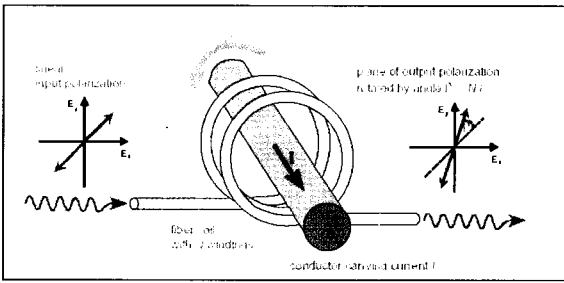


그림 2 광섬유 Faraday 소자를 이용한 광전류센서

전류센서, 2) Bulk 글라스를 이용한 광전류 센서, 3) 광섬유 Faraday 소자를 이용한 광전류 센서, 4) 혼합형 광전류 센서로 분류할 수 있다.

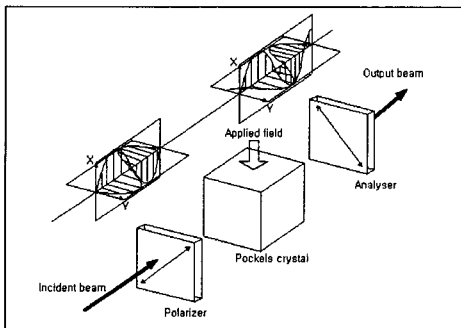
전기광학 효과(Pockels effect)는 비선형 광학 결정에 외부 전계가 인가될 때 결정의 굴절률이 변화되는 현상을 말하며 전기 광학 효과를 가진 비선형 결정의 유전율 인가되는 전계의 세기에 따라 변화하게 되는데 이때 관통하는 레이저 빛이 변화된 유전율에 따라 변조가 일어

나는 원리로, 그림 3과 같이 인가된 전계의 방향과 빛의 진행방향이 수직을 이루는 횡형변조(transverse modulation)는 빛의 진행방향과 전계가 평행한 종형변조(longitudinal modulation)이 소자의 모양이나 크기에 무관하게 반파장 전압(halfwave voltage)값이 고정되는 것에 비하여, 소자의 크기를 변형시켜 반파장 전계값을 조정하여 방전에 의해 변화되는 전계의 측정 범위를 조절할 수 있는 장점이 있다. 측정하고자 하는 전압(전계)이 인가되면, 전계 E와 입사광과 투과광의 비  $I_{out} / I_{in}$  사이에는 그림 3(c)와 같은 선형관계가 성립한다.

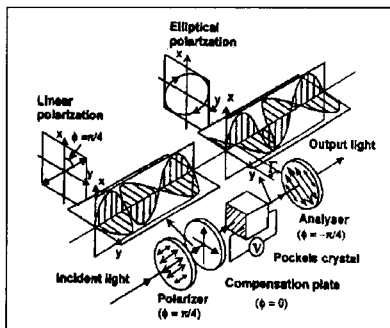
### 광섬유 온도 센서

전력설비를 신뢰성을 갖도록 안정적으로 운용과 사고 예방을 위하여 계측되어 분석해야 할 온도는 중요한 감시 파라미터 중의 하나이다. 그러나 변압기와 같은 설비는 비정상적인 온도가 발생하여도 바로 사고로 이어지지 않기 때문에 온도측정은 사고를 예측하는 데는 어려움이 있으나, 과부하 등으로 인한 기기 내부의 과열을 조기에 발견하기 위한 수단으로 적용되고 있다.

광학적인 방법에 의한 온도측정은 기존의 온도센서에 비하여 여러 면에서 많은 장점을 가지고 있으며, 또한 최근에는 광섬유의 발달로 다양하게 광섬유가 응용된 광온도 센서가 연구 개발되거나 실용화 되어 있다. 광섬유 온도센서는 레이저광 계측방법이 갖는 우수한 대부분의 특성을 가지고 있지만, 가격 경쟁력과 신생기술이라는



(a) 횡형 변조형

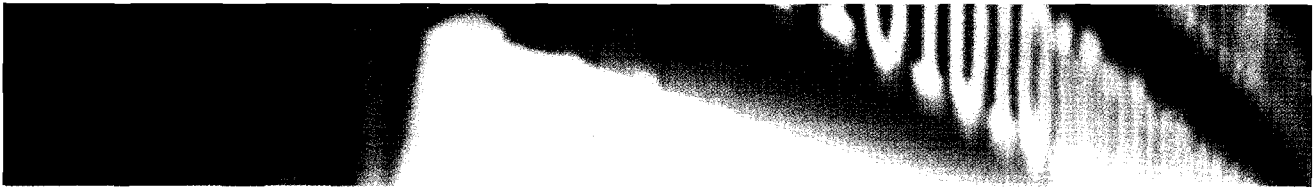


(b) 종형 변조형

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{22} EL\right) \right\}$$

(c) 레이저광의 입출력비

그림 3 Pockels 효과를 이용한 전계 측정 원리



두 가지 단점으로 인하여 아직까지는 보편화되지 않았지만, 기존의 온도센서와 비교되는 장점을 활용하여 응용된다면 가까운 장래에는 전력기기의 온도 센서로 일반화 될 것으로 기대된다.

광섬유 온도센서는 측정 방법에 따라 접촉식과 비접촉식이 있으며, 광섬유 자체의 온도특성을 이용하여 광섬유가 센서가 되는 방법과 별도의 광온도센서와 결합시켜 광섬유는 광을 전송만하는 방법이 있다. 또 다른 구분은 공간적으로 측정하고자하는 범위에 따라 분포형 센서(distributed sensor)와 국부형 센서(point sensor)로 나누어진다. 분포형 센서는 광섬유 자체를 센서로 이용하는 광섬유 기능형 센서에서만 가능한 방법으로 DTS(distributed temperature sensor 또는 FTR: fiber optic temperature laser radar)와 같은 방법이 대표적으로 실용화된 방법이다. 국소형 센서는 반도체의 발광특성, 형광물질의 온도 의존특성, 흑체복사 등을 이용하는 방법들이 보편화 되어 있다.

### 광강도 변조식 광섬유 온도센서

임의의 설정온도에서만 동작하는 광로차 온도센서와 달리 실제의 온도를 측정할 수 있는 광섬유 온도센서로서 광로내에 온도의 변화에 따라 투과율이 연속적으로 변하는 물질을 삽입한 방법이 실용적으로 사용되고 있다. 파장 0.86  $\mu\text{m}$  대의 AlGaAs 계의 LED를 광원으로 사용하고 반도체 결정의 칩을 사용하여 투과광을 변조하는 방식의 온도센서를 그림 4에 나타내었다.

반도체 결정은 그림4에서와 같이 급격한 변화를 나타내는 광학적 기초흡수밴드를 가지고 있어 가지고 있어, 그 흡수밴드보다 장파장 광은 투과시키고 단파장 광은 흡수된다. 이 흡수밴드는 에너지 갭과 관련되어 주변온도가 상승되면 장파장쪽으로 이동하게 된다. 따라서 이 흡수밴드의 온도 특성을 이용하여 특정온도를 측정할 수 있다. 이와 같은 방법은 반도체의 특성이 상실되지 않는 한, 반도체의 용점부근에서 절대온도 근방까지 넓은 온도범위를 측정할 수 있으나, 광원의 특성, 흡수밴드의 기울기 등 센서제작에서의 현실적인 제약으로 통상 -50 ~ 200  $^{\circ}\text{C}$  정도의 범위에서 실용적으로 온도센서가 제작되고 있다.

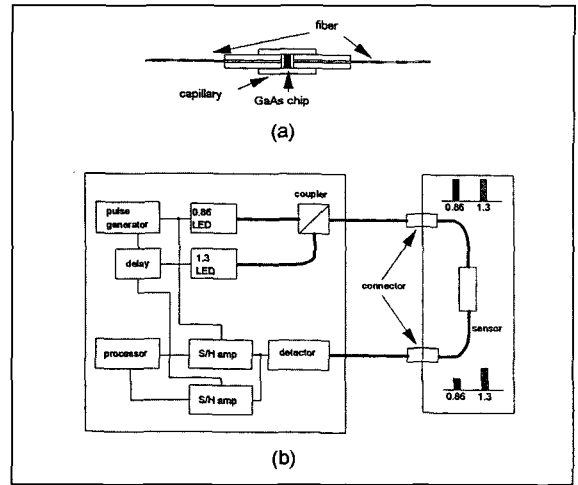


그림 4 반도체 칩 투과광 변조방식의 온도센서 원리

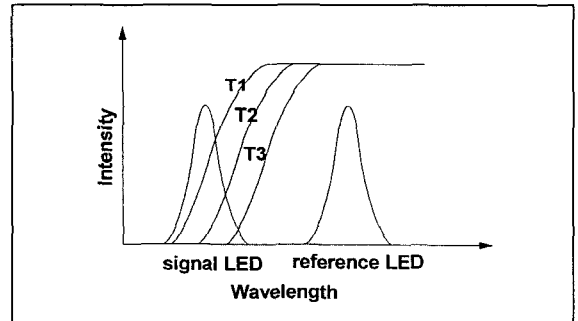


그림 5 온도에 대한 반도체 흡수밴드의 광투과 특성

그림 5의 온도 특성을 가진 반도체 칩을 그림 4(a)에서와 같이 광섬유사이에 설치하여, 흡수밴드 부근의 발광 스펙트럼을 갖는 광원을 입사시키면 센서부에서 투과하는 광량이 온도변화에 따라 변화되는 정도를 검출하여 온도를 측정할 수 있게 된다.

### 형광 및 발광 광섬유 온도센서

GaAs 등의 반도체 박막의 발광(photoluminescence)을 이용하여 온도에 따른 발광강도의 변화를 측정하거나, 파장의 변화를 검출하여 온도를 측정하는 방법이 있다. 그림 6은 발광 효율을 높이기 위하여 특별히 설계된 반도체 칩을 광섬유 끝단에 부착시킨 GaAs-발광 온도센서의 구성도이다. 광섬유를 통하여 LED의 여기광으로 GaAs 칩을 여기 시키면 반도체 칩의 온도에 따라 GaAs

칩에서 발광되는 빛을 광섬유를 통하여 검출하게 된다. 이때, 온도에 따라 발광의 파장은 장파장 쪽으로 이동하고, 발광의 세기는 감소한다. 상용화된 제품은 일반적으로 0~200°C범위에서 0.5~1°C정도의 오차를 나타낸다.

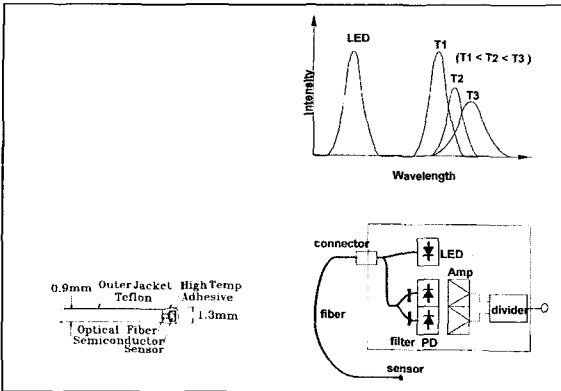


그림 6 GaAs photoluminescence를 이용한 광온도 센서

**광섬유 Bragg 격자 온도센서**

광섬유 브래그격자(fiber Bragg grating)는 그림 7과 같은 구조 및 동작 특성을 가진다. 레이저광이 진행되는 광섬유의 코어내에 주기적인 굴절률 변화가 새겨진 것은 잘 알려진 브래그 회절격자(Bragg grating)의 역할을 하게 되며 그림 7과 같이 광폭 스펙트럼(broadband spectrum)을 광섬유에 입사시킬 경우, 아래 식과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분이 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 그냥 통과한다.

광섬유 격자에 온도를 가할 경우, 가해진 온도는 브래

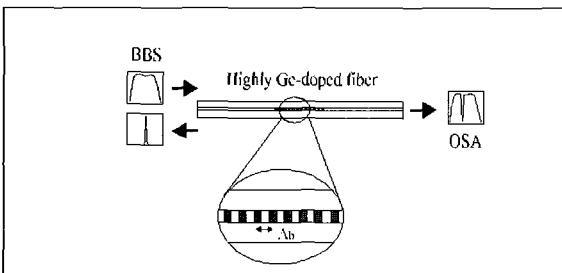


그림 7 광섬유 Bragg 격자의 동작특성

그 파장을 변화시키고, 브래그 파장의 변화는 간접계 출력 신호의 위상 변화로 변환된다. 간섭신호의 출력 위상을 측정하는 것은 브래그 파장의 변화를 분광 분석기 등을 이용하여 직접 측정하는 것에 비하여 훨씬 정밀한 정도의 측정이 가능하며 앞서 언급하였던 분광 분석기의 여러 문제점(속도, 비용, 크기...)등을 해결할 수 있는 방법이다.

**새로운 센서의 상용화 개발 동향**

전력 분야에서 고전압 및 대전류를 효율적으로 측정하기 위한 광센서에 대한 연구는 80년대 초반부터 선진 외국을 중심으로 본격적인 개발 및 연구투자가 이루어지고 있어 현재는 상용화 수준에 있지만 국내에서도 몇몇 기관에서 기초연구 및 일부 현장시험이 실시된바 있으나 실적용은 되지 않고 있다.

**Alstom사(프랑스)**

알스톰사는 공기절연기기용으로 1)CTO, 2)VTO, 3)CMO, 및 4)BMO 등이 상용화 되어 있으나, GIS용은 광

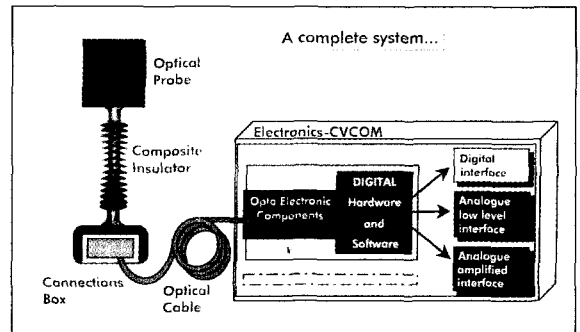


그림 8 Alstom CTO 시스템의 개략도

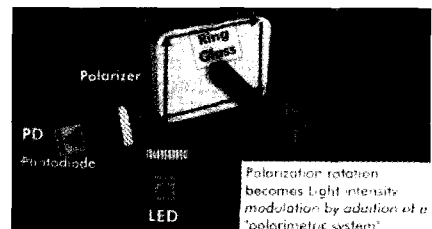


그림 9 Alstom의 Faraday 센서 개략도

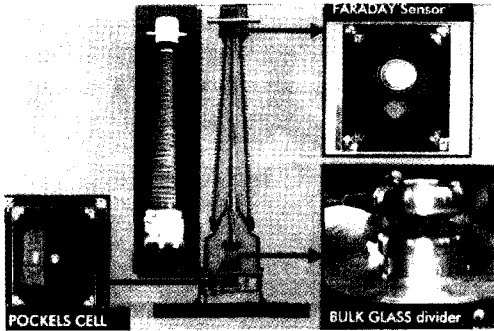
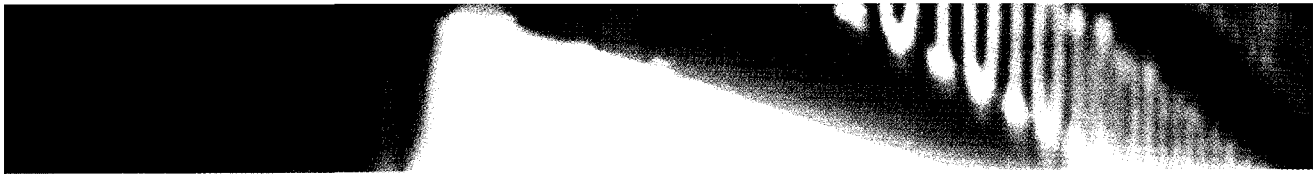


그림 10 Alstom 362kV CMO 계기용 전압·전류 센서



그림 11 상용 운전되고 있는 알스통사의 광 CT 및 광 PT 제품

CT 및 광 PT를 대신하여 아직까지는 Rogowski 및 Capacitive EVT를 채택하고 있다.

전류측정을 위한 CTO의 구조는 그림 8과 같으며, 광전류센서부의 Faraday 소자는 그림 9에 보는 바와 같은 정방형 bulk glass를 사용하였으며, 입력광은 센서소자를 통과하면서 변조되며 추가적인 간섭계로 편광회전에 의한 광강도 변조가 이루어진다.

광전압 센서는 그림 10에 보는 바와 같이 0.1~10kV 측정범위의 Pockels 센서와 Alstom사가 특허를 가진 bulk voltage divider로 구성되어 있다.

#### Hitachi사(일본)

일본의 히타치(Hitachi)사는 80년대 후반부터 GIS용의 광 CT 및 광 PT를 개발하였다. 히타치사에서 개발 완료된 광전류센서는 그림 12와 같이 bulk glass를 이용한 GIS용 광 CT이다.

그림 13은 히타치사가 GIS에 적용시킨 광 PT에 대한



그림 12 Bulk glass를 이용한 광전류센

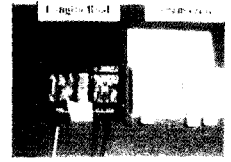


그림 13 GIS용 광 PT

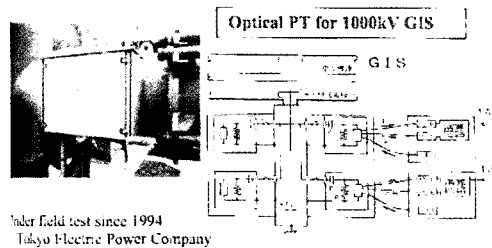


그림 14 1000kV GIS용 광 PT의 현장시험 전경

개략도로써 GIS 도체전압을  $C_1$ 과  $C_2$ 를 이용하여 1차 분압시킨 전압을 Pockels 센서에 인가하면 이를 통과하는 광신호가 변조되어 검출된 신호를 아날로그 및 디지털 신호로 전자식 배전반에 적절하게 변환시키는 구조이다. 그림 14는 히타치사의 개발제품을 장착한 1000kV급 GIS에 대한 현장 검증시험용 제품을 나타내었다.

#### TMT&D Coprp.(Toshiba, 일본)

일본의 TMT&D사는 일본의 Toshiba사와 Mitsubishi사가 공동으로 출자하여 2002년에 설립한 회사로서, Toshiba사에서 90년대초부터 본격적으로 개발하기 시작

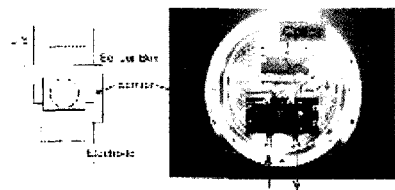
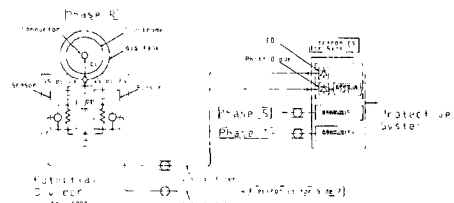


그림 15 Toshiba사 550kV GIS용 광 PT

한 GIS용 광 CT 및 광 PT에 관련된 연구팀이 모두 TMT&D사로 옮겨 계속적으로 연구개발하고 있다. 80년대 말부터 Toshiba사에서는 GIS용의 광 CT 및 광 PT 개발을 시작하여, 90년대부터는 광섬유 전류센서를 개발하여 지금에 이르렀다. 여기서는 광센서 소자의 온도에 대한 영향을 해결하는데 상당한 비중을 두어 연구를 하였다.

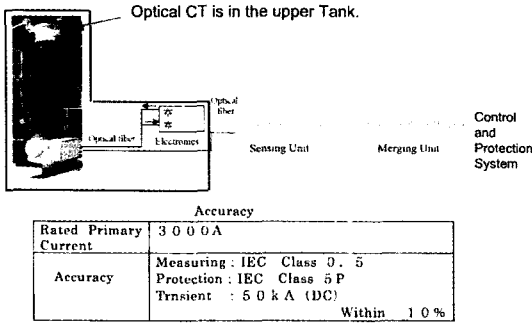


그림 16 TMT&D사 245KV GIS용 광 CT

**NxtPhase사(캐나다)**

NxtPhase사는 캐나다의 BC Hydro와 수년전부터 광센서에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있는데, 이는 500kV CT의 전압위상 측정을 위한 광센서 개발과제의 연장으로 광전압 및 광전류센서 개발 과제로 이어졌다. 개발된 광센서는 2000년 5월에 Ingledow 변전소에 230KV급 복합 광전류 및 광전압 센서를 설치하여 시험 운전하고 있다. 이후, 현장 시험운전에서 성능이 확보된 제품에 대해서는 현재 상용화 제품으로 판매되고 있다.

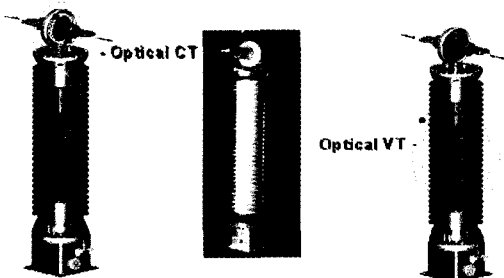


그림 17 NxtPhase사의 공기절연형 광 PT 및 광 CT

**국내 연구동향**

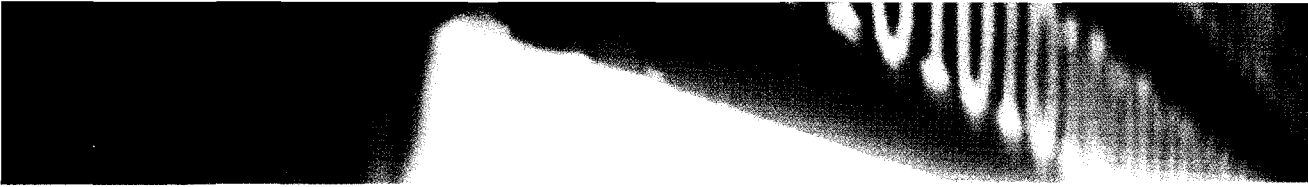
국내의 광전압센서 및 전류센서 분야의 연구는 전기 연구소 및 전력연구원에서 80년대 중반부터 연구가 진행되고 있으며, 대학에서도 80년대 중반부터 연구를 지속하고 있는 한양대학교를 비롯하여, KAIST에서도 연구가 되고 있으며, 90년대 후반에 들어 전북대, 청주대 등 일부 대학에서 광 CT에 대한 연구가 되고 있다.

기업의 경우는 엘지전선에서 90년도 중반에 KAIST와 공동으로 연구된 바가 있고 최근 들어 해도옵틱스라는 벤처회사에서 상품화 개발이 된 것으로 선전되고 있으며, 엘지산전 연구소에서도 내부적으로 기초적인 연구를 진행하고 있다.

전력연구원에서 연구되어 현장 적용시험된, 국내 154 kV급 변전소의 상시 전류를 계측하기 위한 광전류 센서는 파라데이 소자인 ZnSe, BSO를 사용하고 자속을 집속시키기 위한 철심 코어를 채용하여 광전류 센서를 일체화 시켰다. 센서의 특성을 확인하기 위한 온도 의존성 시험에서 비오차가 1% 이내가 됨을 확인할 수 있었다. 그리고 성능을 확인하기 위해서 변전소에 설치하여 1992년 5월부터 1년간 현장시험을 실시한 결과 설계 규격에서 제시한 측정오차 범위인 3% 이내를 만족하기 때문에 현장 적용이 가능하다는 결과를 얻었다.

**결 론**

본고에서는 급증하는 전력소비를 충족시키기 위하여 초고압 대규모로 개발되는 전력설비의 안정적인 운영을 위하여 디지털 IT 전력기기에도 적용될 수 있는 차세대의 신기술 진단 시스템에 적용될 수 있는 새로운 광 CT 및 광 PT를 비롯하여 광섬유 온도센서들을 소개였다. 또한, 선진 외국 및 국내의 제품개발 및 연구동향에 대한 주요 관련기업들의 제품정보를 알려 줌으로써 국내의 연구 및 투자의를 도모하고 가까운 장래에 현실화가 될 디지털 IT 기술이 접목된 새로운 전력기기를 위한 세계시장판도에 빠른 대응을 할 수 있는 원천기술 확보에 도움을 주고자 하였다.



## 참고문헌

1. M.Takahashi, et al., "Optical Current Transformer for Gas Insulated Switchgear Using Silica Optical Fiber," IEEE Trans. on Power Delivery, vol.12, p.1422, 1997.
2. S. Kobayashi et. al., "Development and Field Test Evaluation of Optical Current and Voltage Transformers for Gas Insulated Switchgear," IEEE Trans. on Power Delivery, vol.7, p.815, 1992.
3. E.Harada, et al., "Application of Electronic Secondary Technologies to 1000kV Gas-insulated Switchgear and Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.14, p.509, 1999
4. C.P.Yakymyshyn, et al., "Manufacturing challenges of optical current and voltage sensors for utility applications", SPIE vol.3201, p.2, 1997
5. Development and Application of Optical CT, PT, Final Report KRC-89-J10, 1993
6. A.J.Rogers, "Optical technique for measurement of current at high voltage", Proc. IEE.120, pp261-267, 1973.
7. A.H.Rose, S.M.Etzel,andC.M.Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," J. Lightwave Technol., vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
8. Amnon Yariv, Pochi Yeh, Optical waves in crystals propagation and control of laser radiation, John Wiley & sons, 1984
- 9.ChristopherC.Davis, Lasers and Electro-optics fundamentals and engineering, Cambridge University Press, 1996
10. T.Sawa,et al., "Development of Optical Instrument Transformers," IEEE Trans. on Power Delivery, vol.5, p.884, 1990.
11. W. F. Ray, "Wide bandwidth Rogowski Current Transducers", EPE Journal, vol.3, p.51 1993
12. D.Chatrefou, "Optical Sensors in HV substations, Alstom", private communication, 2003 / <http://www.alstom.com>
13. S.Fukunaga, "Meeting Materials for Optical CT & PT, J-Power Sys. corp.", private communication, 2003
14. Y. Hirata, "Optical Transformers in TMT&D Corporation", private communication, 2003
15. G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fiber by a transverse holographic method," Opt. Lett. 14, 823-825 (1989).
16. D. L. Willeams, S. T. Davey, R. Kashyap, J. R. Armitage, and B. J. Ainslie, "Ultraviolet absorption studies on photosensitive germanosilicate preforms and fibers," Appl. Phys. Lett, 59, 762-764 (1991).
17. A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," Electron. Lett, 28, 236-238 (1992).