

장거리 광섬유 센서를 이용한 레이저 온도 측정 장치 개발

Development of long-distance
optical fiber temperature
sensing system

연구기관
(주) 금광 부설 광기술 연구소

과 학 기 술 부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “ 장거리 광섬유 센서를 이용한 레이저 온도 측정 장치 개발에 관한 연구” 과제
의 최종보고서로 제출합니다.

2005. 03 . 09 .

연 구 기 관 명 : (주)금광 부설 광기술 연구소

연 구 책 임 자 : 김 광 석

연 구 원 : 김 광 석
S. Kostritsa
남 기 곤
고 명 석
류 영 화
조 남 희

최종연구보고서 초록

과제관리 번호	M2-0212-00- 0025	해당당계 연구기관	(주)금광 부설 광기술 연구소	단계구분	(2)/(2)
연구사업명	중사업명	원자력 연구개발 중·장기 계획 사업			
	세부사업명	원자력 실용화 연구 사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	장거리 광섬유 센서를 이용한 레이저 온도 측정 장치 개발			
연구기관명 (연구책임자)	(주)금광 부설 광기술연구소 (김 광 석)	해당단계 연구인력	내부 : 0.82M·Y	연구비	정부 : 237,000 천원
			외부 : 1.74M·Y		민간 : 90,000 천원
			계 : 2.6M·Y	계 : 327,000 천원	
위탁연구	연구기관:	연구책임자:			
국제공동연구	상대국명:	상대국연구기관명:		참여기업	
색인어 (각5개이상)	한글 : 광섬유, 나노초 레이저, 분광기, 광 검출기, 스톡 신호				
	영어 : Optical fiber, nano seconds laser, spectrometer, APD, Stoke				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				면수	
<p>1. 연구개발목표 및 내용</p> <p>○고반복 나노초 레이저를 이용한 장거리 광섬유 센서 온도측정장치 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 측정 거리 : 최대 5km ◆ 온도 정밀도 : ±1℃ ◆ 측정 온도 범위 : -50 ~ +150 ℃ ◆ 거리 분해 능 : 2 m ◆ 측정 시간 : 최대 90초 ◆ 센서 광섬유 : 다중 모드 50/125 <p>2. 연구결과</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 측정 거리 : 최대 5km ◆ 온도 정밀도 : ±2℃ ◆ 측정 온도 범위 : -50 ~ +80 ℃ ◆ 거리 분해 능 : 3 m ◆ 측정 시간 : 최대 90초 ◆ 센서 광섬유 : 다중 모드 50/125 <p>3. 기대효과 및 활용방안</p> <p>광섬유 자체가 센서와 전송로의 역할을 하므로 설치가 용이하고 현장 장비가 없으므로 유지 보수가 간단해질 수 있다. 또한 광섬유를 이용하므로 주위의 영향을 받거나 주위에 영향을 주지도 않아 가장 안정적인 계측 방법이며, 중앙에서 모든 포설 구간의 온도 분포를 측정 할 수 있다. 활용 방안은 원자력 발전소 격납 용기 내부의 온도 관측, 전력 케이블 및 pipe line 온도 감시, 액화 gas 누출 감지 및 대형 콘크리트 경화 감시 등등에 활용 할 수가 있다.</p>					

요 약 문

I. 제 목

장거리 광섬유 센서를 이용한 레이저 온도 측정 장치 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

기술적 측면

: 광섬유 센서는 광섬유 자체를 센서로 활용하므로 작은 외경, 가벼운 무게, 방폭성, 전자 잡음으로부터의 안정성이 좋아 측정 신뢰도가 매우 높다. 특히 비접촉식 온도 측정은 기존의 접촉식 측정 장치 이상의 장점을 가지고 있는데 측정 대상이 움직이거나, 매우 뜨거운 경우, 그리고 접촉식 센서가 대상체에 손상을 주게 될 가능성이 있는 경우 매우 유리하다.

경제적 측면

: 광섬유 센서 기술은 원격, 비접촉, 정밀 측정의 특성을 가지고 있으며 측정 대상체 계통에 적합하며, 특히 광통신 선로와 병행되면 우수한 계측 제어 시스템을 구축할 수 있어 다양한 형태로 응용될 수 있다.

사회적 측면

: 레이저를 이용한 광섬유 온도 센서를 활용한 전력선 이상유무 계측으로 송전 안정성에 대한 진단 및 사고 예방 방지 효과가 크며 장거리 광섬유 통신기술 개발에 기여하는 기술적 토대가 될 수 있기 때문에 파급효과도 크다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- ◆장거리 측정을 위한 나노초 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 발생기 개발
- ◆다이오드 레이저 구동장치 개발
- ◆Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계 개발
- ◆광 신호 검출 장치 개발
- ◆저 잡음 광 검출 신호 증폭기 개발
- ◆장거리 광섬유 전송기 개발
- ◆광 수신 신호처리 시스템 개발
- ◆Microprocessor 개발
- ◆Display 소프트웨어 개발
- ◆장치제작 및 운용기술 개발

IV. 연구개발결과

- ◆ 측정 거리 : 최대 5km
- ◆ 온도 정밀도 : $\pm 2^{\circ}\text{C}$
- ◆ 측정 온도 범위 : $-50 \sim +80^{\circ}\text{C}$
- ◆ 거리 분해 능 : 3 m
- ◆ 측정 시간 : 최대 90초
- ◆ 센서 광섬유 : 다중 모드 50/125

V. 연구개발결과의 활용계획

- 기술적 측면

광섬유 센서를 이용한 계측 시스템은 분광측정, 온도측정, 압력측정 등 물리량 측정에서 광범위하게 활용되고 있다. 광섬유 센서는 광섬유자체를 센서로 활용하므로 작은 외경, 가벼운 무게, 방폭성, 전자 잡음으로부터의 안정성이 좋아 측정 신뢰도가 매우 높다. 특히 비접촉식 온도 측정은 기존의 접촉식 측정장치 이상의 장점을 가지고 있는데 측정 대상이 움직이거나, 매우 뜨거운 경우, 그리고 접촉식 센서가 대상체에 손상을 주게 될 가능성이 있는 경우 매우 유리하다. 특히 정밀도 면에서도 레이저 광원을 활용하므로 유리하고 나노초의 레이저 펄스폭에 따른 거리 분해능이 매우 좋은 장점이 있다. 본 사업에서 개발한 온도 측정 장치는 수 내지 수십 km 길이의 광섬유 자체가 센서 역할을 하는 것으로 레이저 빛을 광섬유에 주입한 다음 광섬유 내에서 비선형 효과로 인해 후방 반사하는 빛으로 거리 표준을 잡고 온도에 따라 변화하는 Stokes 및 Anti-stokes 빛의 정보를 분석하여 온도를 계측할 수가 있다.

- 경제적 측면

광섬유 센서 기술은 원격, 비접촉, 정밀 측정의 특성을 가지고 있으며 측정 대상체에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 따라서 국내의 품질관리와 공장 자동화 추세에 맞추어 지속적으로 활용이 증대되고 있다. 특히 on-line으로 사용될 수 있는 광섬유 센서의 활용이 크게 늘고 있다. 특히 원자력 산업과 관련하여 장거리 전력 케이블의 이상 유무를 계측할 수 있으며 발전소 내부의 특정 부위 온도를 감시, 주변 해수 온도를 측정할 수도 있어 원자력 산업 분야의 활용성이 높다.

- 사회적 측면

레이저를 이용한 광섬유 온도 센서를 활용한 전력선 이상유무 계측으로 송전 안정성에 대한 진단 및 사고 예방 방지 효과가 크다. 본 사업에서 개발한 기술은 장거리 광섬유 통신기술 개발에 기여하는 기술적 토대가 될 수 있기 때문에 파급효과도 크다.

S U M M A R Y (영 문 요 약 문)

I. Title

Development of long-distance optical fiber temperature sensing system

II. The purpose and necessity of Research and Development

Side of technology

: Optical fiber sensor has merits with small size diameter, light weight, and safety for the electronic noise and reliance of measurement is very good. Especially, non-contact temperature measurement is more good compared to contact temperature measurement.

If measured object is moving or very hot or it is possible to damage to object, non-contact temperature measurement method is profitable.

Side of economic

: The technology of optical fiber sensor has properties of remote, non-contact, and precision measurement. In special, it can be applied in various form when it does optical communications in measurement control system.

Side of society

: When Optical fiber temperature sensor with laser is made use of unusual measurement power line, it is very efficient preventing for safety of power transmission and it can contribute to development of communication technology of long distance optical fiber

III. The contents and range of Research and Development

- Development of nano-seconds DPSSL for measuring long-distance
- Development of power supply of diode laser
- Development of Stokes, Anti-Stokes wavelength division spectrometer
- Development of light signal detection
- Development of long-distance optical fiber delivery system
- Development of light reception signal process system
- Development of Microprocessor
- Development of display software
- Development of equipment manufacture and application technology

IV. The results

- measurement distance: maximum 5 km
- Accuracy of temperature: +/- 2 °C
- Measurement temperature range: -50 ~ +80 °C
- Distance resolution: 3 m
- Measurement time: maximum 90 seconds
- Sensor optical fiber: Multi mode 50/125

CONTENTS
(영 문 목 차)

Chapter 1 The Outline of Research and Development project.....	7
Paragraph 1 The Principle of Optical Fiber Sensor.....	7
Paragraph 2 The Necessity of Optical Fiber Sensor.....	12
Paragraph 3 Application Range of Optical Fiber Sensor.....	13
Chapter 2 The present condition of technical development in internal and external .	14
Paragraph 1 The present condition in internal and external.....	14
Paragraph 2 The situation for the results of research in internal and external....	15
Chapter 3 The Contents and Results of research development accomplishment	17
Paragraph 1 The access method in theory.....	17
Paragraph 2 The access method in experiment.....	19
Paragraph 3 The research contents.....	21
Paragraph 4 The research results.....	25
Chapter 4 The contribution in related field and goal achievement of R&D.....	50
Paragraph 1 The goal achievement of R&D and the last year research goal.....	50
Chapter 5 The application plan of R&D results.....	53
Paragraph 1 The applications in field of nuclear power.....	53
Paragraph 2 The applications in general industry.....	54
Paragraph 3 The driving strategy of field applications.....	56
Paragraph 4 The reflection and supplementary demand particulars.....	56
Chapter 6 Oversea scientific technology information.....	57

제 1 장 연구개발과제의 개요

1 절 광섬유 센서의 원리

1. 도입

분포형 광섬유 센서는 광섬유의 모든 위치에서 측정을 수행할 수 있으며 광섬유 길이 방향에 대한 위치의 함수로 측정값을 얻을 수 있기 때문에 측정대상 전체에 대한 물리량 분포를 확인할 수 있다. 분포형 광섬유 센서의 측정 길이는 수 km에 이르며 하나의 센서를 이용하여 규모가 큰 구조물의 거동을 감시할 수 있기 때문에 지능형 구조물에 적합한 특성을 가지고 있다.

분포형 광섬유 센서 시스템을 형성하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 고려해야 한다. 먼저 측정하고자 하는 물리량이 전파 광의 경로에 영향을 줄 수 있도록 광섬유를 설계, 제작해야 된다. 두 번째로 측정 물리량에 의해 광섬유에서 발생하는 투과광이나 산란광에서의 변화를 감지할 수 있어야 한다.

세 번째는 측정량의 위치를 알아내기 위해 감지된 투과 혹은 산란광을 거리의 정보로 변환할 수 있어야 한다.

광섬유에서는 일반적으로 탄성 산란인 레일리 산란과 비탄성 산란인 브릴루인, 라만 산란 등이 발생하며 이를 이용하여 변형률, 온도, 화학 성분 등을 측정할 수 있다. 분포형 광섬유 센서 또한 다른 광섬유 센서와 마찬가지로 아직까지는 실제 활용 예가 많지는 않으나 현재 지능형 구조물 적용에 관련된 많은 연구가 보고 되고 있으며 앞으로의 활용에 대한 많은 잠재성을 지니고 있다.

2. 분포형 광섬유 센서의 기본 개념

분포형 광섬유 센서는 연결된 부분이 없는 일정하게 연속된 광섬유에 의해서 구성된다. 광섬유를 따라 빛이 투과 혹은 산란 될 때 발생하는 시간 지연을 이용하여 진행 광에 영향을 주는 측정량의 위치를 결정하게 된다.

광섬유 내에서 진행하는 빛의 시간 지연은 진행 방향의 반대쪽에서 신호를 관찰할 때 가장 크게 나타난다. 이를 이용한 가장 간단한 예가 OTDR(optical time-domain reflectometer)이다.

OTDR에서는 펄스광이 광섬유의 한쪽 끝으로 입사 되어 광섬유의 같은 쪽으로 돌아오는 후방 산란을 이용한다. 관찰되는 신호가 후방산란을 일으키는 위치 z 는 신호가 도달하는 시간 $2t$ 에 대해 다음의 식으로 간단하게 계산된다.

$$Z=tv_g \quad (1)$$

위의 식에서 v_g 는 광섬유 내에서 진행하는 빛의 그룹 속도이다. OTDR 기법은 광섬유

의 한쪽에서 입사광과 출력광을 다루기 때문에 센서 시스템의 구성이 간단해지며 센서 연결부가 단순해진다.

후방산란을 이용하는 OTDR은 그 산란광의 크기가 매우 작다. 하지만 센서 구성에서는 일정한 출력을 내보내는 프로브 광원과 펄스 출력을 내보내는 펌프 광원을 이용하여 보다 큰 측정 신호를 얻을 수 있다. 이러한 구성에서는 두 진행 광이 교차할 때 비선형 상호 작용을 발생시킨다. 광 검출기에서 확인되는 프로브 광원의 신호 변화를 이용하여 광섬유의 길이방향에 대한 위치 정보를 알 수 있게 된다.

이러한 센서 시스템과 같이 전방으로 진행하는 빛의 신호만을 이용하여 위치의 정보를 결정하는 경우 진행 광이 최소 두개의 모드를 갖는 광섬유를 이용해야 한다. 각 모드는 서로 다른 그룹 속도로 진행한다. 그림 3에서와 같이 측정하고자 하는 물리량이 광섬유에 전달되면 모드 간에 에너지 전환이 일어나게 되며 물리량이 전달된 위치 이후의 광섬유에서는 이전과는 다른 모드의 빛이 진행하게 된다. 광 검출기에서는 물리량 전달 위치 이후의 모드 간의 진행 속도 차에 의해 발생하는 진행 지연의 작은 차이를 감지할 수 있어야 한다. 이러한 변화량은 매우 작기 때문에 일반적으로 간섭계 방법을 이용한다.

3. 후방산란 기법

가. 일반적인 OTDR 기법 (레이리 산란)

OTDR은 1976년 처음 보고된 이후 현재 광섬유 시험에 많이 사용되고 있는 기법이다.

OTDR의 주요 응용 대상은 광섬유 통신망에서의 결함을 찾거나 진행광의 감쇄를 감시하는 작업이다. OTDR은 앞에서 언급한 바와 같이 펄스 광원으로부터 광섬유로 입사된 빛의 후방산란을 이용한다. 광섬유를 진행하는 빛은 광섬유 코어의 굴절률 미세한 변동으로 인해 레일리 산란을 일으킨다. 또한 광섬유의 불연속 지점, 연결부, 끊어진 곳 등에서 빛의 반사가 일어난다. 그림 1과 같은 OTDR의 구성에서 후방산란광의 출력 $P(z)$ 는 광섬유에서 산란이 일어난 지점의 위치 z 에 대해서 식(2)와 같이 기술된다.

$$P(z) = \frac{1}{2} S(z) \alpha_s(z) V_g \exp \left[- \int_0^z \{ \alpha_f(\hat{z}) + \alpha_b(\hat{z}) \} d\hat{z} \right] \quad (2)$$

위의 식에서 $S(z)$ 는 산란광 중 후방산란 되는 비율을 의미하며 $\alpha_s(z)$ 는 광섬유의 감쇄 계수이다.

V_g 는 빛의 그룹 속도이며 a_t 와 a_b 는 각각 광섬유의 전후방 방향으로의 감쇄 계수로 일반적으로 같은 값을 갖는다. ($a_f = a_b = a$)앞에서도 언급한 바와 같이 위치 z 는 신호의 도달 시간 $2t$ 에 대해서 식(1)과 같은 관계를 갖는다.

감쇄 계수와 후방산란 비율이 일정할 때 감지되는 후방산란광의 출력은 다음과 같이 시간에 대한 지수함수 형태로 나타난다.

$$P(t) = A_1 \exp(-B_1 t) \quad (3)$$

광섬유의 상태가 일정한 경우 A_1 과 B_1 은 상수 값이다.

OTDR은 산란계수 a_s 와 후방 산란 비율 S 가 일정할 때 감쇄계수 a 의 변화를 감지할 수 있다. 이러한 조건 하에서 감지되는 후방산란광의 출력은 식(4)와 같다.

$$P(z) = A_2 \exp \left[- \int_0^z \alpha(\hat{z}) d\hat{z} \right] \quad (4)$$

위의 식에서 A_2 는 상수이다.

감지신호의 변화율은 감쇄계수에 비례한다. 또는 a 와 S 가 일정할 때 다음 식과 같이 a_s 의 변화를 확인할 수도 있다.

$$P(z) = A_3 \alpha_s(z) \exp(-B_3 z) \quad (5)$$

엄밀하게는 a 값이 일반적으로 a_s 에 대해 변화하는데 식(4)의 지수함수 내부의 적분 값이 작다면 그 오차는 줄어들게 된다.

수 cm 정도의 점진적인 광섬유 굽힘에 의해서는 광 감쇄가 적게 나타나지만 매우 작은 영역에서의 굽힘이나 꺾임과 같은 미소 굽힘에서는 단일모드, 다중모드 광섬유 모두에서 뚜렷한 광 손실이 감지된다.

단일모드 광섬유에서의 미소 굽힘 손실은 주 모드에서 만의 에너지 손실을 계산하면 되므로 이론적인 해석이 가능하다. 따라서 간단히 단일모드 광섬유의 광 감쇄량을 측정하게 되면 굽힘 변형 형상을 정량적으로 알 수 있게 된다. 반면 다중모드 광섬유는 그 굽힘 손실 거동을 알기가 어렵다.

일반적인 문제점은 다중모드 광섬유에서의 에너지는 다중 모드에 분포되어 있기 때문에 굽힘에 의한 광 감쇄량이 복잡한 형태로 나타나게 된다는 것이다. 이러한 이유로 다중모드 광섬유에서의 굽힘 손실을 해석적으로 나타내는 것은 상당히 어려우며 굽힘 손실형 센서로 사용할 때에는 정량적인 측정은 어렵지만 정성적인 측정은 어느 정도 가능하다.

굽힘 손실형 광섬유 센서를 이용한 OTDR 분포형 광섬유 센서 시스템을 구성하기 위해서는 측정량이 광섬유의 굽힘 손실을 발생시킬 수 있는 장치가 필요하게 된다. 광섬유에 압력에 민감한 굽힘을 가하기 위해서 광섬유 케이블이 Harmer에 의해서 개발되어 현재 상용화되고 있다. 이 케이블은 안쪽에 광섬유가 위치해 있으며 광섬유의 바깥쪽에 고분자재료 섬유가 스프링 형태로 감겨져 있다.

이러한 구성의 케이블은 튜브로 감싸져 있어서 외부로부터 광섬유 케이블의 수직 방향으로 압력이 가해졌을 때 고분자 섬유로 인해 내부 광섬유에 주기적인 굽힘이 발생하게 된다. 다중모드 광섬유에서는 굽힘 주기가 광섬유의 최고차 모드에 의한 지그재그 경로의 피치와 일치할 때 상당히 큰 굽힘 손실을 일으킨다.

굽힘에 민감한 광섬유 케이블은 정성적인 측정을 수행하는 분포형 광섬유로 구성될 수 있다. 예를 들어 이러한 케이블을 바닥에 매설하여 발자국의 압력을 감지, 안전 지역에 대한 감시에 이용할 수 있다.

구체적 예로 위험한 설비나 공작 기계와 같은 지역에 사람이 출입할 때 전원을 차단하거나 그림 6과 같이 제한구역에 대한 침입자를 감시하는데 적용이 가능하다. 많은 측정 시스템에서는 단순히 투과되는 광을 이용하기도 하지만 OTDR을 이용하면 거리에 대한 정보를 알 수 있기 때문에 훨씬 유용한 측정을 할 수 있게 된다.

굽힘 민감형 광섬유 센서를 이용하는 분포형 광섬유 센서 시스템은 발자국 압력 감시뿐만 아니라 토목 건축물의 안전성을 감시하는 센서로써 사용할 수도 있다. 굽힘에 민감한 광섬유 케이블과 같이 신뢰도가 높은 형태로 만들어지게 되면 광섬유 센서 시스템은 지능형 구조물의 측정부로서 변형률을 측정할 수 있다.

하지만 내부 광섬유에 굽힘을 전달하는 고분자 섬유가 상온에서 크립(creep)을 일으킬 수 있으며 높은 온도에서는 성능이 저하되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 항공구조물에서 발생할 수 있는 고온에 적합한 케이블이나 기타 굽힘 발생 장치의 개발에 대한 연구가 많이 요구되고 있다.

온도를 측정하는 분포형 광섬유 센서는 Hartog에 의해서 1982년 처음으로 시도되었다.

이 광섬유 센서는 액체로 채워진 섬유를 이용하는데 이는 빛을 전달하는 코어 대신 높은 굴절률과 낮은 흡수 특성을 갖는 액체를 실리카 유리 튜브에 채워서 만들어졌다.

온도 증가에 따른 액체의 분자 운동은 밀도를 변동시키며 액체의 산란계수 α_s 에 영향을 준다. 따라서 산란광과 온도의 관계를 만들어낼 수 있다.

일반 광섬유에서는 밀도변동이 제작될 때 고정되므로 어느 정도의 온도 증가에서는 변하지 않는다. 액체로 채워진 섬유에서의 산란 특성은 OTDR 신호에 의해서 관찰된다. 이러한 광섬유 센서는 처음으로 온도의 분포를 측정해 낼 수 있었지만 액체 섬유를 이용하기 때문에 폭넓은 분야에 대한 적용에 있어서는 실용적이지 못한 단점을 가지고 있다. 그 후 Nd^{3+} , Ho^{3+} 이온이 첨가된 광섬유를 이용한 온도 측정 연구가 수행되어 이러한 단점을 어느 정도 극복할 수 있게 되었다.

나. 비탄성 산란(브릴루인 산란, 라만 산란)

앞에서 언급한 후방산란을 이용하는 기법은 탄성 산란을 이용한 것이다. 탄성산란에서는 산란광의 파장이 입사광의 파장과 동일하게 나타난다.

일반 OTDR에서의 레일리 산란은 탄성산란의 한 예이다. 반면 몇 가지 물리적인 과정에 의해 산란광의 파장이 변화하는 경우가 있다. 양자 이론에 의하면 산란 광자(photon)가 생성될 때 입사 광자에 의해 에너지의 손실이나 증가가 발생하게 된다.

이로 인한 산란광에서의 에너지 변화로 비탄성 특성이 나타나게 된다. 비탄성 과정

의 주파수 특성은 그림 8과 같다. 그림에서의 비탄성 특성을 이용하여 분포형 광섬유를 구성할 수 있다.

브릴루인 산란은 고전적인 모델에 의하면 음파로 굴절률의 변동이 발생하여 빛이 회절하는 현상으로 설명된다. 광섬유를 따라 전파되는 빛에서는 음파 이동의 결과로써의 도플러 편이(Doppler shift)가 발생하게 된다. 도플러 편이는 온도와 압력의 함수인 음파 속도의 특성이다. 더 정확하게는 브릴루인 산란은 양자 모델에 의해 산란 광자의 에너지 변화를 유발하면서 음파 포논(phonon)으로부터 입사 광자가 산란되는 현상으로 설명된다. 이러한 광자에서의 에너지 변화는 도플러 편이에 상응하는 주파수 변화를 의미한다. 브릴루인 산란에서의 주파수 이동은 12GHz 정도로 라만 산란에 비해 매우 작기 때문에 일반적인 광학 필터로는 감지하기가 어렵다. 하지만 브릴루인 산란의 광 강도는 라만 산란에 비해 최소한 수배는 높기 때문에 센서로써의 이용에 충분한 가능성을 가지고 있다.

브릴루인 산란의 감지에는 원래의 레이저 광원으로부터 주파수 이동되는 빛을 산란 신호와 섞는 헤테로다인(heterodyne) 기법이 이용된다.

브릴루인 산란의 센서로써의 유리한 점은 온도나 변형률 변화와 같은 측정량에 대한 반응이 산란광의 주파수 변화로써 나타난다는 것이다. 광학 헤테로다인 기법에 의해 다루기 편한 전자적인 주파수로 변환된다. 브릴루인 산란은 아직까지는 센서로써의 검증 단계의 연구만이 보고 되었을 뿐 실제 사용할 수 있는 센서로는 개발되지 못했다.

하지만 최근 들어 온도와 변형률을 측정하는 센서로써 많은 연구 결과가 나오고 있으며 앞으로 주목 받는 센서가 될 것으로 보인다.

현재 브릴루인 산란을 이용한 분포형 광섬유 센서는 레일리 산란을 이용한 OTDR 기법에 비해 복잡한 구성과 거리분해능에 대한 제한이 가장 큰 문제가 되고 있다. 브릴루인 산란 분포형 광섬유 센서의 거리분해능은 수십m 정도로 규모가 큰 구조물에 사용하여 전체적인 거동을 감시하는 데에는 큰 무리가 없지만 국부적인 손상을 감지하기에는 어려움이 있다. 브릴루인 산란은 주파수 변화가 작아서 일반적인 방법으로는 감지하기 어려운 반면 라만 산란은 주파수 변화가 상대적으로 크게 나타난다. 라만 산란은 광학 필터를 장착한 OTDR 장비를 이용하여 광섬유 통신망에 분포된 온도를 측정하는데 사용된다. 각각 파장 λ_s 와 λ_{a-s} 를 갖는 라만 산란광의 Stokes와 anti-Stokes의 광 강도 비인 R은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$\Delta\nu$ 는 이동된 주파수의 값으로써 Stokes와 anti-Stokes의 파장은 중심 파장으로부터 같은 크기만큼 이동되어 있다.

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{a-s}} \right)^4 \exp\left(-\frac{hc\Delta\nu}{KT} \right) \quad (6)$$

식(6)에서 h 는 Planck 상수이며 c 는 진공에서의 광속, K 는 Boltzmann 상수, T 는 절대 온도이다.

따라서 광강도 비인 R 은 입사광이나 산란광의 강도, 입사조건, 광섬유의 형상과 재질에 상관없이 매질의 절대온도를 나타내게 된다. 라만 산란을 이용한 광섬유 센서는 산란광의 크기가 작은 단점을 가지고 있다.

일반적으로 anti-Stokes 라만 산란은 레일리 산란에 비해 20~30dB 정도 작게 나타난다.

라만 산란을 이용한 분포형 온도 측정은 Dakin에 의해 1985년 처음으로 수행되었는데 시스템의 구성은 그림 10과 같이 Stokes와 anti-Stokes 광을 별도의 검출기로 보내기 위한 파장 선택형 커플러를 이용한 것을 제외하고는 일반 OTDR과 비슷하다.

2 절 광섬유 센서의 필요성

광섬유 센서를 이용한 계측 시스템은 분광측정, 온도측정, 압력측정 등 물리량 측정에서 광범위하게 활용되고 있다.

광섬유 센서는 광섬유 자체를 센서로 활용하므로 작은 외경, 가벼운 무게, 방폭성, 전자 잡음으로부터의 안전성이 좋아 측정 신뢰도가 매우 높다. 특히 비접촉식 온도 측정은 기존의 접촉식 측정 장치 이상의 장점을 가지고 있는데 측정 대상이 움직이거나 매우 뜨거운 경우 그리고 접촉식 센서가 대상체에 손상을 주게 될 가능성이 있는 경우 매우 유리하다.

특히 정밀도 면에서도 레이저 광원을 활용하므로 유리하고 나노초의 레이저 펄스에 따른 거리 분해능이 매우 좋은 장점이 있다.

본 사업에서 개발하려고 하는 온도 측정 장치는 수 내지 십수 km 길이의 광섬유 자체가 센서 역할을 하는 것으로 레이저 빛을 광섬유에 주입한 다음 광섬유 내에서 비선형 효과로 인해 후방 반사하는 빛으로 거리 표준을 잡고 온도에 따라 변화하는 Stokes 및 anti-Stokes 빛의 정보를 분석하여 온도를 계측하는 장거리 온도 측정 분포 시스템이다. 따라서 한 가닥의 광섬유를 포설하여 포설된 주변 온도를 수 천 점으로 측정이 가능한 기술적 장점이 있다.

광섬유 센서 기술은 원격, 비접촉, 정밀 측정의 특성을 가지고 있으며 측정 대상체에 영향을 주지 않는 장점이 있다.

따라서 국내의 품질관리와 공장 자동화 추세에 맞추어 지속적으로 활용이 증대되고 있다. 특히 on-line 사용될 수 있는 광섬유 센서의 활용이 크게 늘고 있다.

특히 원자력 산업과 관련하여 장거리 전력 케이블의 이상 유무를 계측할 수 있으며 발전소 내부의 특정 부위 온도를 감시, 주변 해수 온도를 측정 할 수도 있어 원자력 산업 분야의 활용성도 높다.

레이저를 이용한 광섬유 온도 센서를 활용한 전력선 이상 유무 계측으로 송전 안정성에 대한 진단 및 사고 예방 방지 효과가 크다.

3 절 광섬유 센서의 활용 범위

본 사업에서 개발하려고 하는 분포형 온도 계측 시스템은 광섬유 자체가 센서와 전송로의 역할을 하므로 설치가 용이하고 현장 장비가 없으므로 유지 보수가 간단해지는 장점을 갖고 있다. 또한 광섬유를 이용하므로 주위의 영향을 받거나 주위에 영향을 주지도 않아 가장 안정적인 계측 방법이며, 중앙에서 모든 포설 구간의 온도 분포를 측정할 수 있고 선로의 이상 유무까지도 알 수 있는 차세대 계측 시스템으로, 원자력 분야의 어려운 환경에서 장거리에 걸친 온도 측정에 유용한 측정기기가 될 것으로 기대하고 있다.

활용방안으로는 다음과 같다.

- 원자력 발전소 격납 용기 내부의 온도 관측
- 원자력 발전소 주변 해수의 온도 측정
- 전력 케이블 및 pipe line 온도 감시
- Bus Duct, 건물 내 화재 감시
- 액화 Gas 누출 감지 및 대형 콘크리트 경화 감시
- 도로 결빙 감시

등 다양한 응용 분야를 갖고 있고, 현재 미국, 일본 등의 선진국에서는 10여년 전부터 상용화하여 실제 사용 중에 있으며, 원자력 산업 분야 뿐만 아니라 민수 분야에도 상당한 수요가 전망된다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1 절 국내·외 기술개발 현황

-국내-

본 사업과 관련된 기술은 나노초 고반복 DPSSL (Diode Laser Pump Solid-State Laser) 레이저 기술과 광섬유 센서 개발 기술, 다 파장 신호 처리 기술로 크게 나눌 수 있다.

DPSSL 레이저 기술과 관련하여 국내에서는 유일하게 (주)금광에서 마킹이나 절단용 고출력 산업용 레이저를 개발하여 판매하고 있다. 연구기관으로는 한국원자력연구소에서 원자력 증장기 개발과제의 일환으로 분광용 고출력 DPSSL에 대한 연구를 진행시켜 수백 와트에 달하는 고출력 레이저를 발진시킨 바 있다.

국내의 경우 표준과학연구원에서 100m 이하인 광섬유를 은행이나 귀금속 점포 등의 실내바닥에 설치, 무단 침입자를 탐지할 수 있는 광센서를 개발한 바 있으며 기술적인 내용은 침입자가 실내 바닥에 매설한 광섬유를 밟을 경우 체중으로 인해 발생하는 압력으로 인해 광섬유 내부를 진행하는 빛의 위상 변화를 디지털 신호로 처리하는 방법이다.

국내 산업용 광학계측기/센서기기는 현재 대부분 수입 레이저에 의존하고 있으며, 일부 국내에서 개발되거나 수입된 센서 부품을 이용한 국산품도 있지만 제품의 완성도나 시장 규모 면에서는 아직 미흡하다.

산업용 센서 기기의 성격상 신뢰도가 매우 중요하므로 외국제품을 선호하는 경향이 있어 국내 개발품이 경쟁하기가 어려운 상황이다.

국내에서 광계측 센서 기기의 어려운 점은 제품의 성능 시험 및 성능 승인에 있어 많은 비용과 시간이 소요되어, 국내 중소기업으로서는 외국 제품과 경쟁하는 데 있어 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서 국내의 기술 수준은 선진국 대비 70 ~ 80 % 수준 정도로 파악되고 있다.

-국외-

소형의 나노초 고반복 DPSSL은 일본의 NEC, 미국의 Lightwave Electronics, Coherent 사 등에서 판매하고 있다.

광섬유 센서기술개발은 약 20년 전부터 활발히 연구가 시작되어 온도, 압력, 분광, 전류 등의 계측을 위한 연구가 지속되어 왔다.

일본 도시바는 권선형에 비해 수납치수를 대폭으로 소형화한 송변전기기용의 광섬유형 전류센서 (광변류기=광CT)를 개발했다. 기술적인 내용은 발광부의 반도체 레이저로

부터 편광 필터를 통해 직선편광으로 해, 그것이 광섬유 내를 자계에 비례해 회전하는 각도로 편류치를 측정, 디지털 처리로 광 디지털 출력하는 방법이다.

-앞으로의 전망-

정보화 사회의 발전과 함께 전력 및 주요 설비, 시설에 대한 안정적인 유지, 운영의 중요성이 증대되고 있으나 이러한 시설이 점차 대규모, 광 대역화 됨에 따라 운영의 어려움 역시 증대되고 있다.

정보화 사회의 발전과 함께 전력 및 주요 설비, 시설에 대한 안정적인 유지, 운영의 중요성이 증대되고 있으나 이러한 시설이 점차 대규모, 광 대역화 됨에 따라 운영의 어려움 역시 증대되고 있다.

이러한 문제를 해결하는 방법으로 시설 점검을 위한 각종 물리량을 측정하고 중앙에서 집중 감시하는 것이 가장 유용한 방법으로 인식되고 있다. 그러나 감시 지역이 넓고 감시 양이 증가하게 되며 이러한 감시 장비 역시 대 규모화 되고 복잡해져서 또 다른 유지 및 관리가 필요하게 된다.

이러한 면에서 광섬유를 전송로로 하는 감시 시스템이 점차 증대되고 있으며 최근에는 물리량을 측정하는 센서 자체에도 광 및 광섬유를 이용하는 광센서가 활발히 보급되고 있다.

2 절 연구결과가 국내·외 기술개발 현황에서 차지하는 위치

-고출력 나노초 펄스 레이저의 제작 기술-

12ns, 2kW급의 소형 고체 레이저 제작은 국내 기술로는 아직까지는 힘든 기술이다. 물론 선진국의 몇몇 기업들은 몇 년 전부터 제작할 수 있는 기술을 보유하고 있었지만, 국내에서는 전무하다고 볼 수가 있었다. 하지만 이번 나노 초 고체 레이저 제작을 성공함으로써 우리나라의 레이저 제조 기술이 선진국 기술과 이제는 비교해 봐도 동등하다고 할 수가 있겠다.

-장거리 광섬유 전송기 개발 기술-

나노초 고체 레이저에서 발생된 레이저 빛을 광파이버에 집속시켜서 장거리로 신호를 보내는 기술로 이 기술은 세계 최고의 기술과 동등한 수준이다. 5 km의 길이가 되는 광파이버에 나노초 signal을 입력시키고 반사되어 나오는 signal을 loss가 아주 작게 획득할 수 있는 기술을 확보하게 되었다.

-광 수신 신호처리 시스템 개발-

Avalanche Photo Diode (APD)를 사용하여 광 신호를 수신하고, 이 수신된 광 신호를 디지털 신호로 변환한 뒤 Alter FPGA를 사용하여 디지털 신호 저장과 고속 누산을 수

행하게 된다. 고속 누산된 결과를 RAM을 통해 저장한 후, 신호 처리를 한 후 컴퓨터와 연결되어 결과를 보여주는 시스템이다. 이 시스템은 선진국 기술과 동등한 성능을 보여 주고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1 절 이론적 접근 방법

1. 서론

광섬유를 이용한 센서는 기존 센서에 비해 전자기적 잡음에 대한 면역성과 전기적 절연 및 화학적 불활성, 내 부식성 등의 많은 장점을 가지고 있어서 철강, 석유 화학 등의 대부분의 산업 현장이나 전력 계통에 적합하며, 특히 광통신 선로와 병행되면 우수한 계측 제어 시스템을 구축할 수 있어 다양한 형태로 응용되고 있다. 또한 기존 센서에 비해 감도가 우수하고 현대의 계측 시스템에 여러 개의 센서를 연결하여 다 지점의 변화를 동시에 측정하는 다중 계측은 물론 측정 대상을 연속적으로 계측할 수 있는 분포형 계측이 가능하다.

광섬유를 이용한 센서는 대부분의 물리량을 측정할 수 있고 측정 대상 및 활용 범위에 따라 광의 세기, 위상, 산란, 흡수 등의 빛의 성질을 이용해 외부 변화량을 측정하고 그 국현 방식에 따라 각기 장단점을 가지며, 응용분야에 적합한 가격, 성능 동작 범위 및 기타 조건을 고려해 설계된다.

그 중에서 광섬유 내에서의 Raman 산란을 이용하여 광섬유 주위의 온도를 측정할 수 있는 광섬유 분포형 온도 측정 시스템 (Optical Fiber Distributed Temperature Sensor system)이 주목 받고 있다.

2. 측정 원리

광섬유에 광을 입사 시키면 광섬유 내의 Glass 격자들에 의해 산란, 흡수 등의 현상이 일어나게 된다. 산란광 중에는 입사광과 동일한 파장 성분의 Rayleigh 산란광과 다른 파장 성분의 산란광이 존재하며, 다른 파장의 성분들은 파장 천이에 따라서 명칭이 다른데 그 중에서, 구성물질의 격자 열 진동 중에서 횡파 모드와 상호 작용으로 인한 산란광을 Raman 산란광이라 부르는데 이 Raman 산란광은 석영 분자가 가지는 다양한 진동 상태 사이에 존재하는 Maxwell-Boltzmann 에너지 분배로 인하여 강한 온도 종속성을 보인다. 즉, 온도에 따라 특성이 변하게 되는 것이다.

광섬유 내부에서의 입사광은 석영 분자에 흡수되어 열 진동의 횡파 모드를 여기한 후 (발생 시킨 후), 재발광 (다시 빛을 내어)하여 광 에너지를 잃으면서 입사광보다 장파장(긴 파장을 갖는)의 Stokes 광으로 변환되고, 횡파 모드를 흡수하고 재 발광하여 에너지를 얻은 입사광보다 파장이 짧은 단파장의 Anti-Stokes 광으로 변환된다.

그림1은 입사광이 분자에 의해 산란 되는 예를 보여주며, 일정 거리 x 만큼 떨어진 곳에서 반사되는 Raman 산란광의 위치는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$x = v * t/2$$

v: 광섬유 내에서의 빛의 전송 속도

t: 산란광이 되돌아오는데 걸리는 시간

즉, 광이 입사되고 난 후에 되돌아 오는 시간을 알면 산란광이 반사되어 온 지점을 정확히 알아낼 수가 있다.

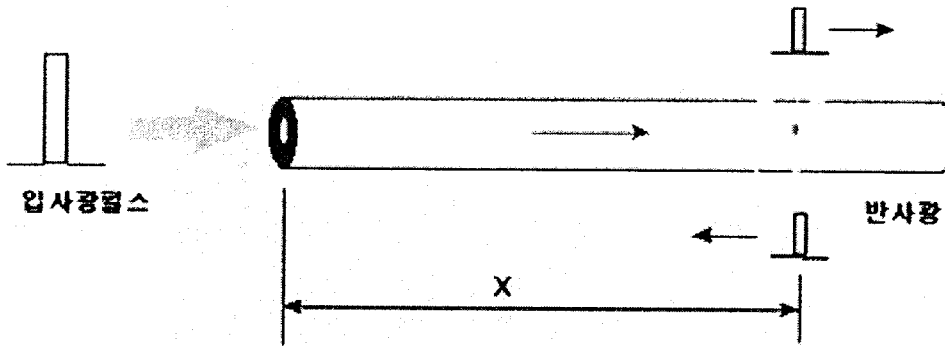


그림1. 광섬유 내에서의 구성 입자에 의한 광의 산란

그림2는 상온에서의 Raman과 Rayleigh 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 그림2에서처럼 Rayleigh 광으로부터 주파수 분리 간격이 같은 Raman 산란광 중에서 Stokes 광과 anti-Stokes 광의 강도 비 R(T)은 다음과 같다.

$$R(T) = (\lambda_s/\lambda_a)^4 \exp(-hcv/kT)$$

h: Planck 상수

k: Boltzmann 상수

c: 진공 중의 광속도

T: 산란광을 수신한 광섬유 구간에서 코어의 절대온도

v: 입사광의 주파수

따라서 광섬유 주위의 온도는 아래와 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$t(i) = K_0 / [(K_0/t_r) + f(r) - f(i)]$$

여기서 $f(j) = K1[j] + \log2[(AS[j] - K2[j])/S[j] - K3[j]]$

t_r = 기준점 (분포 온도 센서 내부에 있는 기준용 광섬유) 절대 온도

r = 기준 광섬유 내에서 기준 위치

AS[j] = Anti-Stokes 광의 가산치
 S[j] = Stokes 광의 가산치
 K1, K2, K3 는 상수 값

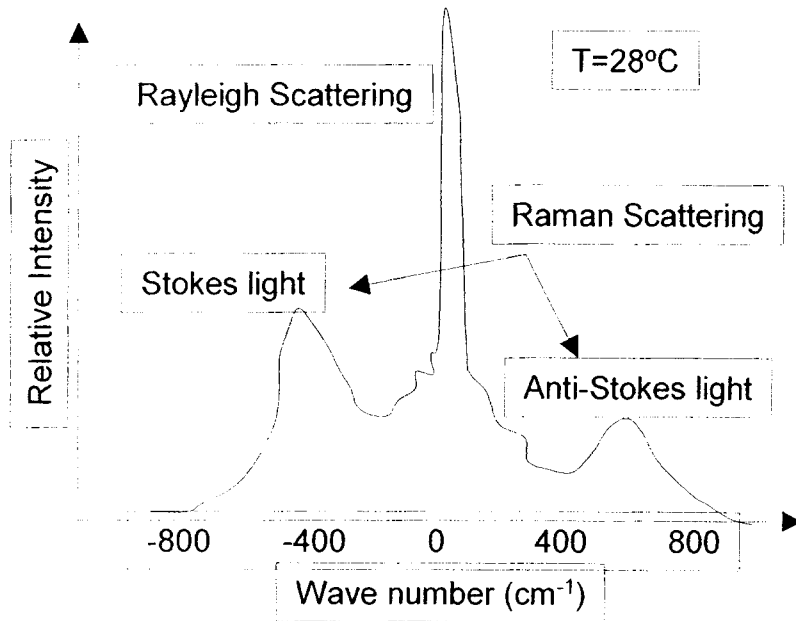


그림2. Rayleigh 산란광과 Raman 산란광의 스펙트럼

광섬유 내의 Stokes 광과 anti-Stokes 광의 역 산란광 비를 측정하면 광 강도나 입사 조건, 광섬유의 구조, 재질의 조성에 상관없이 매체의 절대 온도를 계측 할 수 있다. 단, 실제 시스템에서는 Stokes 와 anti-Stokes 파장 사이의 광섬유 감쇄차가 있고, 파장 차이로 인해 광섬유 내에서의 빛의 진행 속도가 다르므로 약간의 보상이 필요하게 된다.

2 절 실험적 접근 방법

레이저에서 나온 광 펄스는 분광 광학계를 지나서 광섬유로 입사 되고 광섬유 안에서는 여러 요인으로 인해 Raman 역 산란광이 발생하여 입사 단으로 돌아오면 분광 광학계에 의해서 Stokes 광과 anti-Stokes 광으로 분리된 후에 검출 소자 (APD: Avalanche Photo Diode)를 거치면서 전기 신호로 변환된다.

이 신호는 아날로그 앰프에 의해서 증폭된 후 A/D (Analog to Digital) 변환기로 디지털화 되어 한 번 측정 때마다 메모리에 기억되며, SNR(Signal to Noise Ratio) 개선을 위하여 디지털 평균화기에서 평균화 처리된다. 이 과정을 수 만 번 반복하여 전에 측정 데이터를 가산 평균하면 Random Noise는 감소하며 평균화 처리한 데이터는 컴퓨터로 전송하여 최종적으로는 온도 데이터로 환산되게 되는 것이다.

아래와 같은 구성법을 사용하면 원리적으로 각 지점간의 온도차 즉, 상대치는 간단히 측정할 수 있지만 절대치를 측정하기는 어렵기 때문에 센서 내부에 온도 기준용 광섬유를 내장하고 있으며 피 측정 광섬유와 동시에 온도를 계측하고, 내장한 기준 광섬유의 온도는 Thermocouple을 이용해서 측정된 온도와 비교함으로써 피 측정 광섬유 전체 길이의 온도 절대치를 결정하게 된다.

분포형 온도 센서의 특성을 나타내는 파라미터로는 일반적으로 온도 정밀도 및 측정 온도 범위 외에도 거리 분해능, 응답 거리 및 측정 가능 거리 등이 있다. 이와 같은 여러 특성들은 상호 밀접하게 관련되어 있기 때문에 어느 한 가지의 특성을 극단적으로 뛰어나게 하면 다른 특성이 나빠지게 된다.

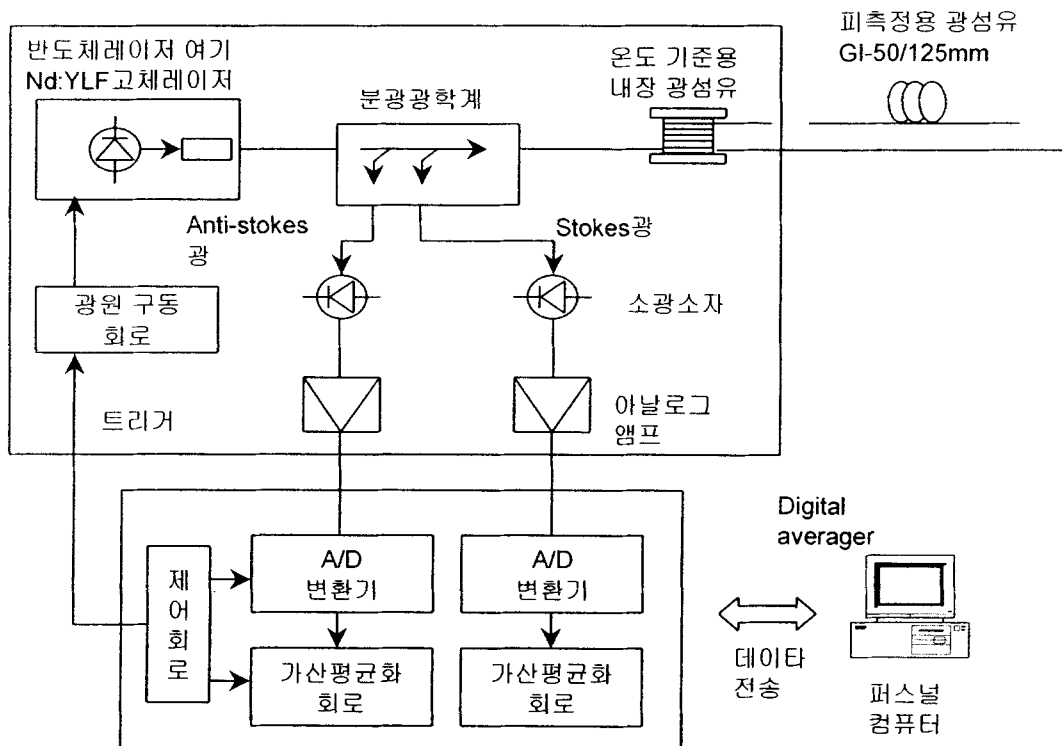


그림3. 광섬유 분포 온도 측정 시스템 구성도

3 절 연구 내용

1. 연구 개발의 최종 목표 및 단계별 목표

최종목표: 고반복 나노초 레이저를 이용한 장거리 광섬유 센서 온도 측정 장치 개발

- ◆ 측정 거리: 최대 5 km
- ◆ 온도 정밀도: +/- 2 °C
- ◆ 측정 온도 범위: - 50 ~ + 150 °C
- ◆ 거리 분해능: 2 m
- ◆ 측정 시간: 최대 90초
- ◆ 센서 광섬유: 다중 모드 50/125

2. 연차별 연구 개발 목표 및 내용

가. 제 1차년도 [2002년도]

- ◆ 장거리 측정을 위한 나노초 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 발생기 개발
 - (1) 다이오드 레이저 시준 광학계 제작
 - (2) 접착식 광학 정렬 치구 제작
 - (3) 다이오드 냉각 구조 설계 및 제작
 - (4) 레이저 펄스 단축 기술 개발
- ◆ 다이오드 레이저 구동장치 개발
 - (1) 열전소자 냉각장치 개발
 - (2) 고 안정 정전류 공급 장치 개발
 - (3) 전류 및 신호 제어 장치 개발
- ◆ Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계 개발
 - (1) 최소대역폭 광 분리 장치 제작
 - (2) 광 분할 필터 및 회절격자 시스템 제작
- ◆ 광 신호 검출 장치 개발
 - (1) 1.3 μm 파장 대역 광 검출기 제작
 - (2) 광 신호 증폭기 개발
- ◆ 저 잡음 광 검출 신호 증폭기 개발
 - (1) 저 잡음 신호 처리 회로 개발

(2) 신호 증폭 기술 개발

나. 제 2차년도 [2003년도]

- ◆ 장거리 광섬유 전송기 개발
 - (1) 광섬유 결합 장치 개발
 - (2) 장거리 광섬유의 레이저 송/수신 성능 향상 기술 개발
- ◆ 광 수신 신호 처리 시스템 개발
 - (1) A/D, D/A converter 기술 개발
 - (2) DSP 장치 개발
- ◆ Microprocessor 개발
 - (1) PC interface 기술 개발
 - (2) 신호처리 및 레이저 구동장치 제어 기술 개발
- ◆ Display 소프트웨어 개발
 - (1) Display 화면 처리 소프트웨어 개발
 - (2) 신호 처리 연산 소프트웨어 개발
- ◆ 장치제작 및 운용기술 개발
 - (1) 장치 제작
 - (2) 장치 운용 DB 구축

3. 추진 전략 및 방법

가. 추진 전략

- 주관연구기관 기술기반 활용 극대화
 - 고반복 나노초 다이오드 레이저 여기 고체 레이저의 소요 핵심기술인 다이오드 여기 장치 개발은 (주) 금광이 보유하고 있는 고효율 DPSSL 기술을 활용.
 - 장거리 광섬유 레이저 전송기술은 (주)금광이 보유하고 있는 광섬유 접속 기술을 활용.
- 위탁연구기관 활용
 - 광 신호 처리 부분과 시스템 소프트웨어 부분에서 경험이 있는 파워컴사에서 위탁 연구를 수행하여 연구를 촉진함.

나. 추진 방법

- 시스템 안정화의 최대 관건인 나노초 레이저의 출력 안정화를 위하여 레이저 광학 부분을 항온 상태로 유지하며 광학 부품 고정을 영구적 고정형으로 하여 안정된 온도 측정 기술개발에 목표를 맞추어 추진.

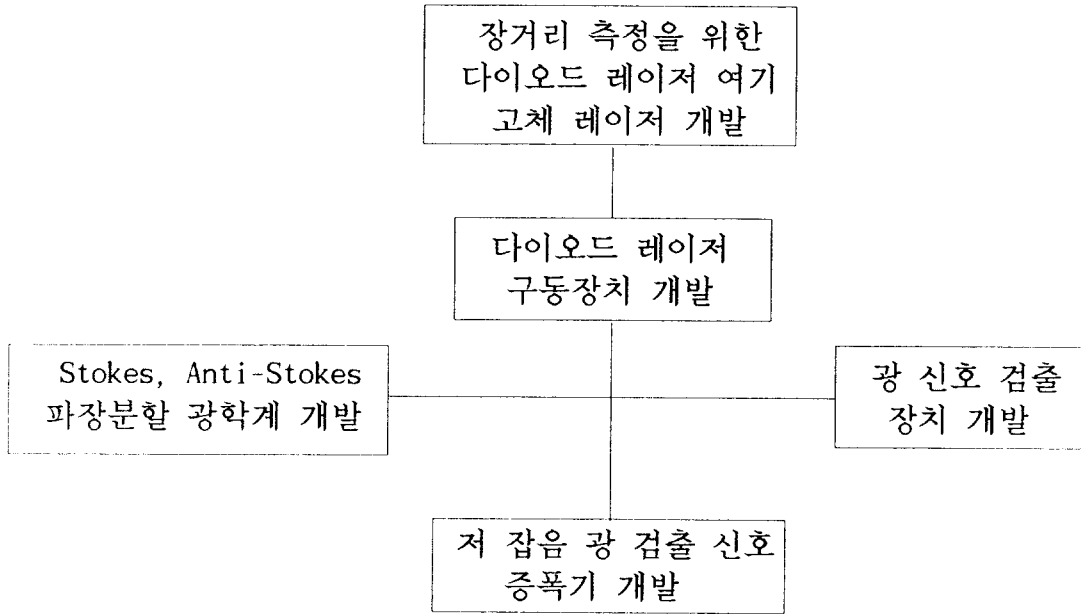
- 광신호 처리 중 Stokes 및 Anti-Stokes 빔의 잡음을 최소화하여 온도 측정의 정밀도를 향상시키는 연구를 추진.

- Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계는 국내의 광학 부품 생산 업체에 개발 의뢰를 하여 국내 광학소재 부품 회사의 기술력 향상을 도모하는 방향으로 추진.

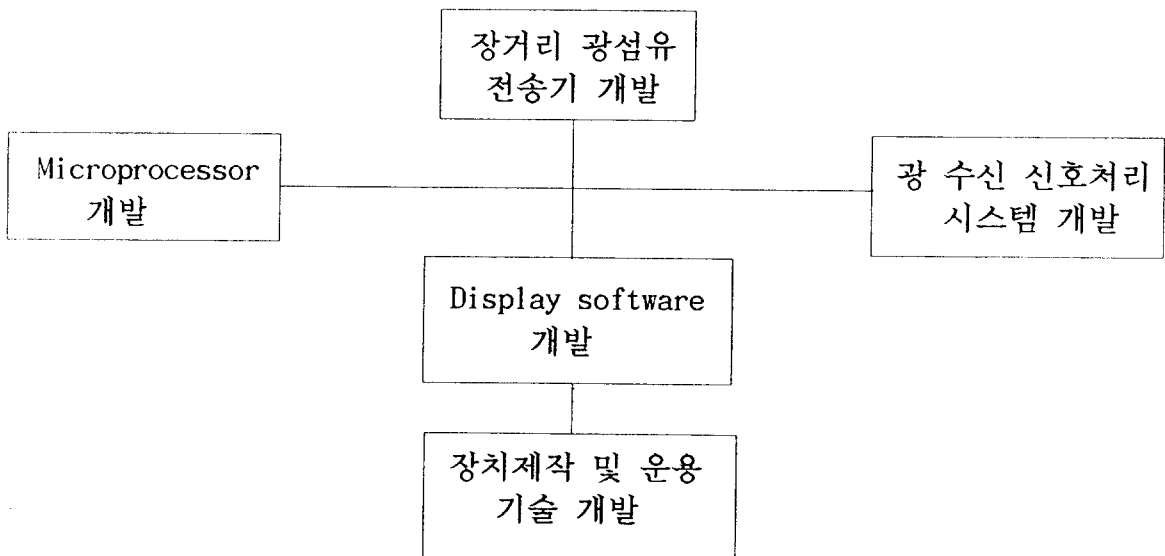
- 실제 원자력 발전소의 원자로 내의 온도측정이나 주변 해수의 온도측정 실험을 수행하여 실제 활용을 목표로 추진.

다. 연구개발 추진체계

1차년도



2차년도



4 절 연구 결과

1. 장거리 측정을 위한 나노초 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 발생기 개발
 - 가. 다이오드 stack array 시준(collimation) 광학계 설계 및 제작
 - (1) 다이오드 레이저의 특성

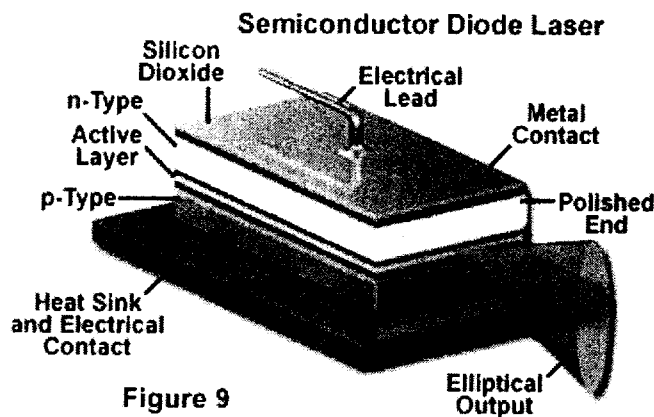


그림1. 다이오드 레이저의 구조

다이오드 레이저는 여러 가지 장점에도 불구하고 발광되는 빔의 단면적이 타원형이며 직교축 방향으로 빔의 퍼짐 각도가 다른 단점이 있다. 이러한 타원형 빔 단면은 그림 2와 같이 발광표면의 크기 dx , dy 가 달라서 일어나며 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\theta = 4\lambda / \pi d$$

따라서 빔을 사용하기에 편리하게 평행광으로 만드는 작업은 단일 렌즈로는 불가능하다. 더구나 이 크기들이 다이오드마다 각각 다르므로 각도 성분도 달라지므로 각각의 경우에 대응해야 한다.

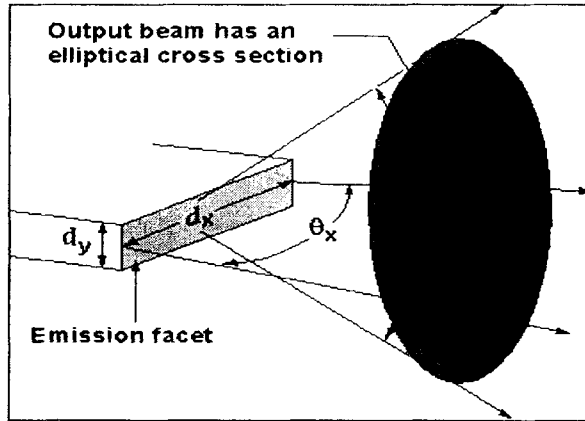


그림2. 다이오드 발광 빔 단면

Astigmatism 역시 발광 면의 크기가 다른 점에서 기인되는 문제이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 다이오드 발광 표면을 통해 밖으로 향하는 레이저 빛은 다이오드 내부의 가상점 P에서 출발 한 것과 같다. 따라서 단일 비구면 렌즈로 빔을 collimation 할때 오직 한 축 방향의 빔만 collimation 할 수 밖에 없는 어려운 점이 있다.

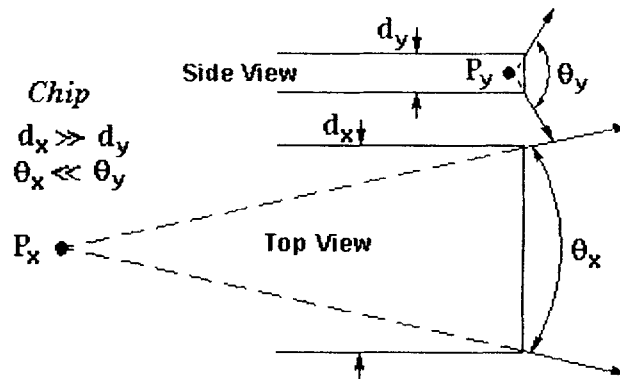


그림 3. 다이오드 빔의 비점수차(Astigmatism)

그림 3에서 발산각도가 큰 θ_y 축을 fast axis 라하며 θ_x 축을 slow axis라 부른다. 한편 다이오드의 출력을 높이기 위하여 단일 발광이 아니라 emitter를 그림 4와 같이 2차원으로 stack 하는 경우 아주 복잡한 광학계를 사용하여 시준을 하게 된다.

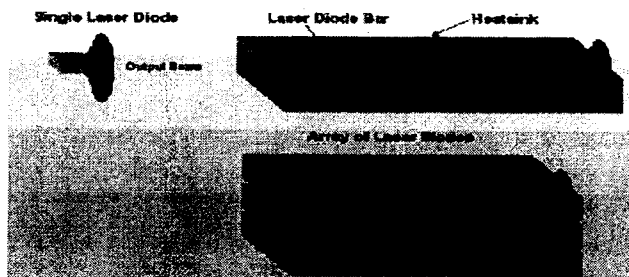


그림 4. 2차원 배열의 다이오드 emitters

나. 시준 (Collimation) 광학계 설계

시준 방법은 각 emitter에 각각의 직교성분의 렌즈를 대응시켜야 한다. 그림 5와 같이 1차원 emitter array의 경우 (a)와 같이 fast axis에는 단일 비구면 렌즈를 사용하고 (b)와 같은 slow axis에는 각각의 emitter에 각각 비구면 렌즈를 대응시켜야 한다.

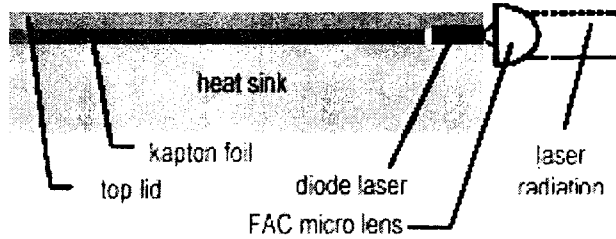


그림 5. (a) Fast axis collimation

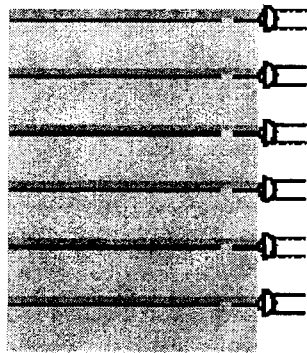


그림 5. (b) Slow axis collimation

다. 원통렌즈를 사용한 collimation 설계 및 분석

본 연구에서는 고출력 Nd:YLF 레이저 발진을 위하여 2차원 배열의 다이오드 array를 사용할 계획이다. 현재 구입된 레이저의 emitter 사이의 pitch 간격이 150 μm 에 불과하므로 slow axis 의 개별 렌즈 대응은 불가능하였다. 따라서 fast axis collimation 을 한 다음 이 빔을 beam guide에 입력시켜 Nd:YLF 레이저 표면에 입사시키는 것으로 하였다.

Fast axis collimation은 400 μm 구경의 원통형 석영 광섬유를 사용하여 설계 제작하였다. 그림 6은 실제 raytracing 한 결과이다.



그림 6 석영 광섬유를 사용한 collimation

다이오드의 fast axis 발산각은 40도(FWHM)이며 다이오드와 광섬유 사이거리는 200 μm , 석영광섬유의 구경은 400 μm 였다. 비구면 렌즈가 아닌 원통 렌즈를 사용하였으므로 chief ray와 marginal ray 가 평행이 아니고 발산 및 수렴을 하는 것을 그림 6에 서 볼 수 있다. 그러나 최대 발산각이 약 11도 (full angle)정도이므로 slow axis 최 대 발산각이 약 20(full angle)도 인 것을 고려하면 beam guide를 사용하는데 충분할 것으로 판단되었다.

2. 다이오드 레이저 beam guide 장치 설계 및 제작

가. 다이오드 레이저 구동 모듈 제작

본 연구에서는 3 bar array 다이오드를 사용하여 collimation을 수행하였다. 다이오드 bar 사이의 거리는 400 μm 이며 pitch는 150 μm 이다. Collimation을 하지 않았을 경우 빔 발산각은 40 x 10 도(Full Width Half Maximum)이다. 다이오드를 동작 시키기 위해서는 정전류가 공급되어야 하며 온도조절 TEC가 다이오드 heat sink에 부착 되고 온도 조절 장치에 의해 적절한 온도로 조절되어야 한다. 사진 1은 다이오드 구동 모듈이다.

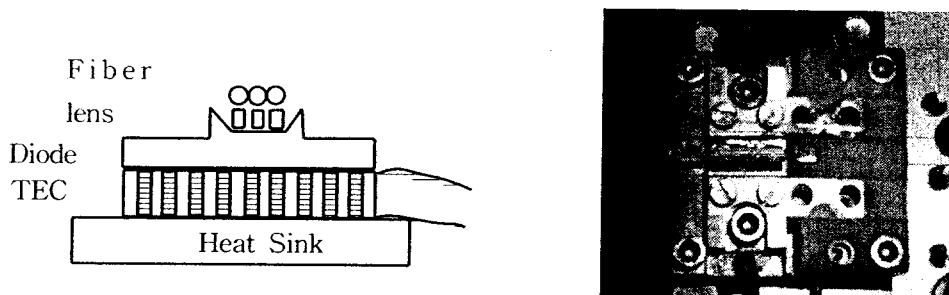


사진 1 다이오드 구동 모듈

나. 시준된 빔의 공간 강도 분포

3 bar 다이오드 레이저에 400 μm 석영 광섬유를 각 bar에 정렬하여 collimation 실험

을 수행하였다. CCD 카메라를 이용하여 사진 2와 같이 원통렌즈에 의해 시준된 다이오드 레이저빔을 측정하였다.



사진 2 CCD camera로 측정한 수준빔의 공간 강도 분포, (a) 평면도, 다. Beam guide raytracing

본 연구에서는 원통렌즈에 의한 fast axis collimation을 수행하였기 때문에 보다 큰 발산각을 갖는 slow axis 에 대한 ray tracing을 실시하였다. 그림 7 (a)는 slow axis 에 대한 lens duct의 ray tracing 결과이다.

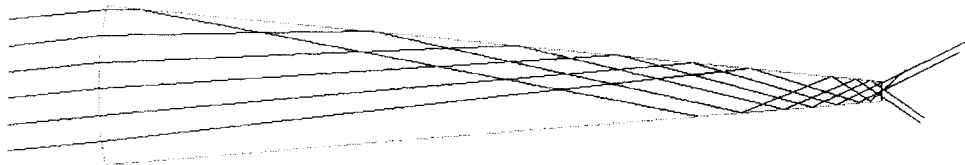


그림 7. (a) Lens duct를 이용한 slow axis beam

빔의 발산각은 7도 정도이며 2-3번의 전반사가 lens duct 내에서 일어남을 볼 수 있다. 렌즈duct는 실리카 재질로 크기는 입구 폭 12mm, 출구 폭 1.5mm 이며 길이는60mm 이다. 이와 같은 결과를 바탕으로 그림 7 (b) 와 같이 실제 Lens duct를 설계하였다.

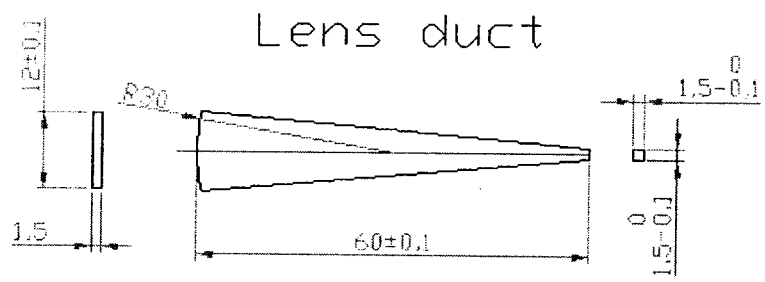


그림 7. (b) Lens duct 크기

3. 레이저 발생장치 제작 및 출력 결과

가. 레이저 제작

레이저는 그림 8과 같이 diode pump 된 AO Q-switch 된 Nd:YLF를 제작 하였다.

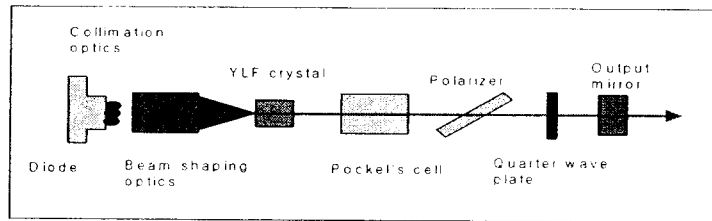


그림 8 Diode pump 된 EO Q-switch 된 Nd:YLF 레이저 구성도

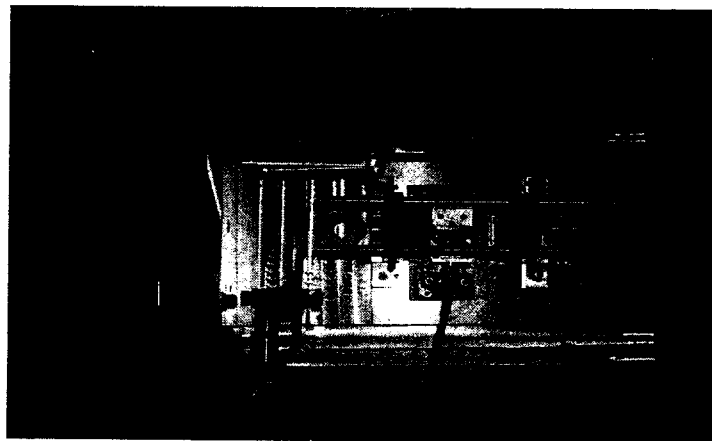


그림 9는 레이저 출력 결과이다.

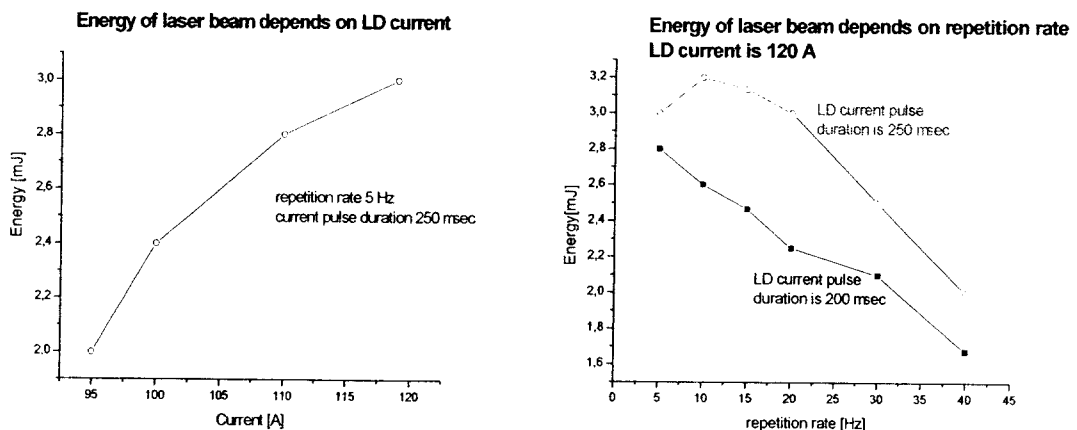


그림 9 전류와 반복률에 따른 Nd:YLF 레이저 출력

레이저 펄스폭은 약 13ns(FWHM) 이었으며 펄스 에너지가 3mJ 정도이므로 레이저 첨두 출력은 0.2 MW 가 되었다. 이 정도의 첨두출력을 200um 광섬유에 입사 할 때 충분한 비

선형 후방 반사파를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 다이오드 레이저 구동장치 개발

다이오드 레이저 구동 장치는 그림 10과 같이 다이오드 레이저 전류 공급장치, 전기 광학 Q-switch (Pockel's cell) 고전압 공급장치, 다이오드의 전자식 온도 제어장치 (TEC temperature controller)로 구성된다.

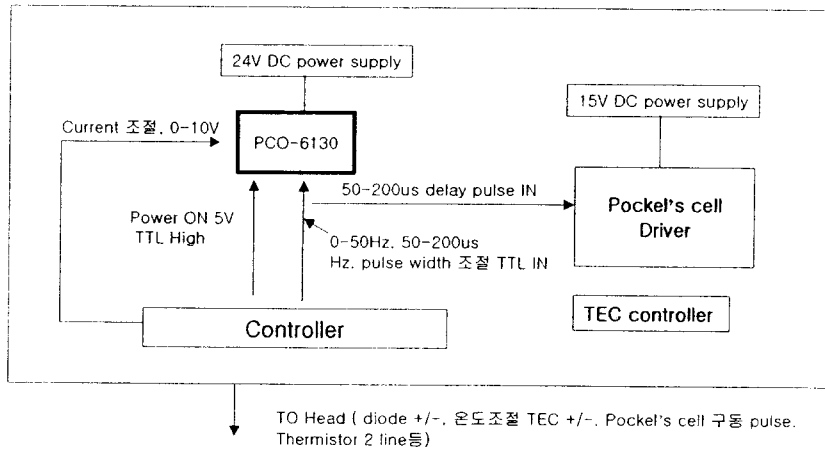


그림 10 다이오드 pump 고체 레이저 구동장치의 구성

전류공급은 최대 120A 까지 가능하며, 펄스폭은 0~250us 까지 가변할 수 있다. Pockel's cell 고전압 공급장치에서는 -3.5kV 의 quarter wave 전압이 공급되며 전자식 온도 제어 +/-0.1 도의 정밀도로 다이오드 온도를 유지시켜 준다. 그림 11은 제작된 구동장치의 사진이다.

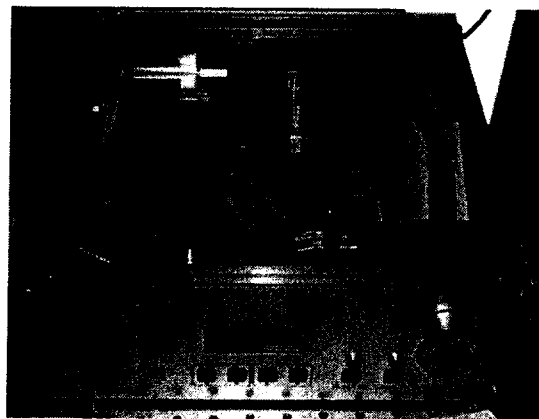


그림 11 다이오드 펌프 레이저 구동 드라이버

5. Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계 및 광 신호 검출 장치 개발

분포형 광섬유 센서는 연결된 부분이 없는 일정하게 연속된 광섬유에 의해서 구성된다. 광섬유를 따라 빛이 투과 혹은 산란 될 때 발생하는 시간지연을 이용하여 진행 광에 영향을 주는 측정량의 위치를 결정하게 된다. 광섬유에 광을 입사시키면 광섬유 내의 석영물질에 의해 산란, 흡수 등의 현상이 일어난다. 산란광 중에는 입사광과 동일한 파장 성분의 Rayleigh 탄성 산란광과 다른 파장 성분(브릴루앙, 라만)의 비탄성 산란광이 존재하며 다른 파장의 성분들은 파장 천이에 따라서 명칭이 다른데 그 중에, 구성물질의 격자 열 진동 중에서 횡파 모드와 상호 작용으로 인한 산란광을 Raman 산란광이라 부르는데 이 Raman 산란광은 석영 분자가 가지는 다양한 진동 상태 사이에 존재하는 Maxwell-Boltzmann 에너지 분배로 인하여 강한 온도 의존성을 보인다. 다시 말해 온도의 변화에 따라 Raman 산란광의 특성이 달라진다. 광섬유 내부에서의 입사광은 석영 분자에 흡수되어 열 진동의 횡파 모드를 여기한 후 재 발광하여 광 에너지를 잃으면서 입사광보다 긴 파장을 갖는 Stokes 광(λ_s)으로 변환되고, 횡파 모드를 흡수하고 재 발광하여 에너지를 얻은 입사광보다 파장이 짧은 단파장의 Anti-Stokes 광(λ_a)으로 변환된다. 그림12는 입사광이 분자에 의해 산란 되는 예를 보여주며, 일정 거리 X 만큼 떨어진 곳에서 반사되는 Raman산란광의 위치는 (1)식으로부터 구할 수 있다.

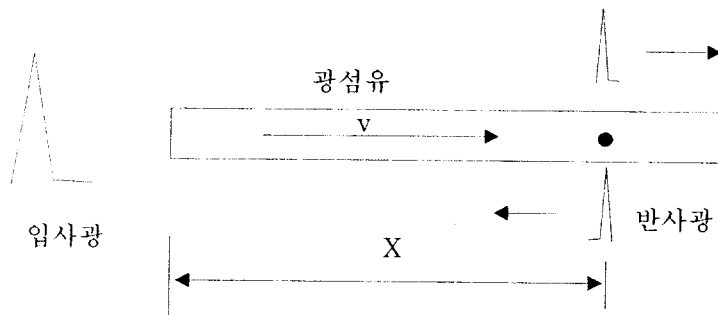


그림12 입사광의 광섬유 전송과 산란

$$X = Vt/2 \quad (1)$$

V = 광섬유 내에서의 빛 속도

t = 입사 후 산란광이 되 돌아오는데 걸리는 시간

즉 광이 입사되고 난 후에 돌아온 시간을 알면 산란광이 반사되어 온 지점을 알아낼 수 있다.

Rayleigh 광으로부터 주파수 분리 간격이 같은 Raman 산란광 중에서 Stokes 광과 anti-Stokes 광의 강도 비는 (2)식과 같다.

$$R(T) = (\lambda_s/\lambda_a)^4 \exp(hc\Delta\nu/KT) \quad (2)$$

여기서 h와 k는 각각 Planck 상수와 Boltzmann 상수이고, c는 진공 중의 광속도, T는 산란광을 수신한 광섬유 구간에서 코어의 절대온도, $\Delta\nu$ 는 이동된 주파수입니다. 따라서 광강도 비인 R은 입사광이나 산란광의 강도, 입사조건, 광섬유의 형상과 재질에 상관없이 매질의 절대온도를 나타내게 된다. 그러나 라만 산란을 이용한 광섬유 센서는 산란광의 크기가 작은 단점을 가지고 있다. 일반적으로 anti-Stokes 라만 산란은 레일리 산란에 비해 20~30dB 정도 작게 나타난다.

본 사업에서는 Stokes 및 anti-Stokes 라만 광 신호 검출을 위해 그림 13 과 같은 실험 장치를 구성하였다.

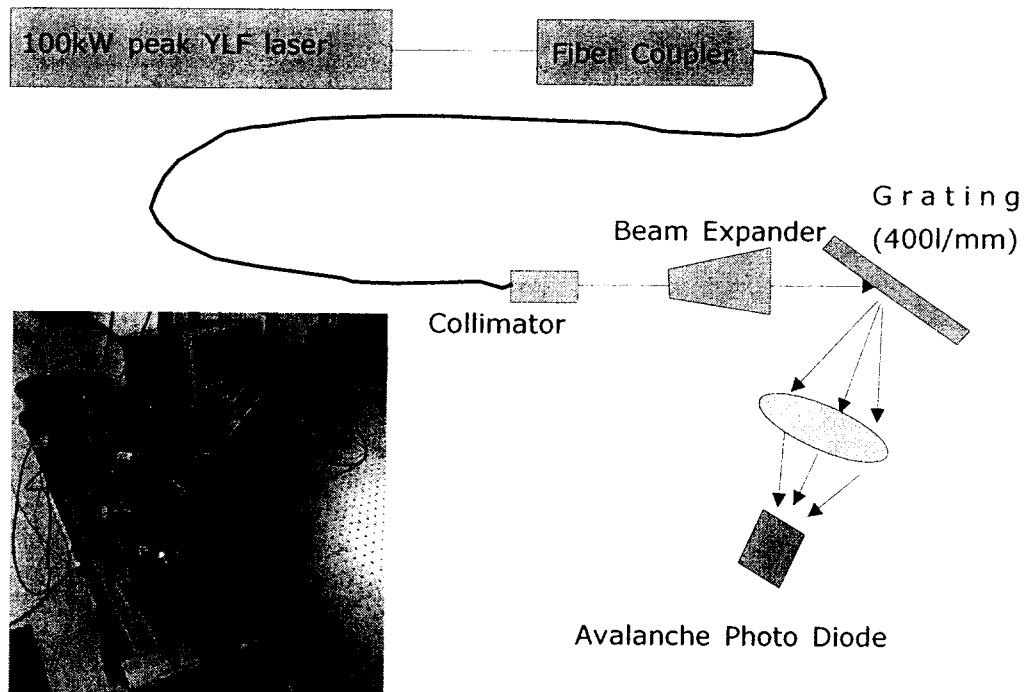


그림 13 광 신호 검출 실험장치 구성도 및 실험장치

실험결과 Raman 산란광을 측정할 수 있었으며 그 결과는 그림 14와 같다

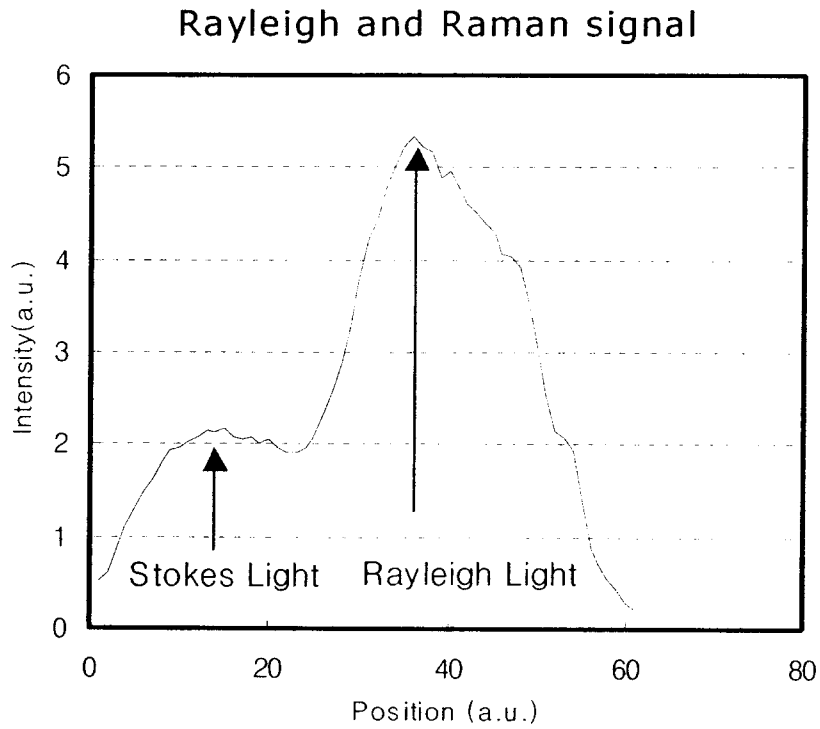


그림 14 회절격자, 렌즈 및 슬릿으로 구성된 장치에서 측정된 Rayleigh 및 Raman 신호

실험에 사용된 APD(Avalanche Photo Diode)의 특성은 표와 같다.

표 1 APD 특성

Wavelength	Frequency	Sensitivity @1.3um	Operating Voltage	TE cooler current	PD capacitance
0.6~1.6um	1000MHz	36~46A/W	30~45V	300mA	0.6~1.0 pF

6. 저 잡음 광 검출 신호 증폭기 개발

가. 저 잡음 광 검출 신호 증폭기 구조

Stokes 및 Anti Stokes 광 검출신호는 무척 미약하므로 그림과 같이 Avalanche Photo Diode로 받은 신호 중에서 이상 신호(Noise)를 제거, 필요로 하는 영역의 신호만을 검출하는 장치가 필요하다.

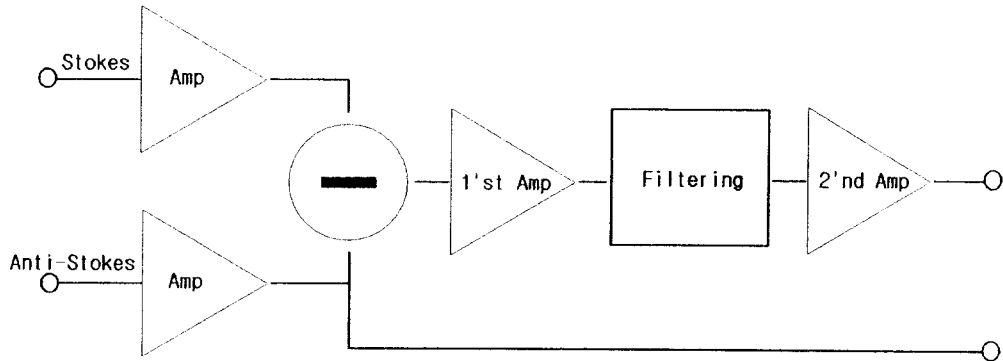


그림15 광검출 신호 증폭기

그림 15 에서 보듯이 두개의 Avalanche Photo Diode로 입력 받은 신호(Stokes, Anti-Stokes)를 같은 비율로 증폭(Amplifier)을 하여 두 신호간의 차를 구한다. 이렇게 구해진 신호는 매우 미세하기 때문에 1차적으로 증폭을 하고, 신호내에 포함되어 있는 잡음을 제거하기 위해서 Filtering을 한다. 이렇게 얻어진 신호를 A/D Board로 입력 받기 위해 알맞은 비율로 다시 2차 증폭을 해서 신호를 얻는다.

나. 증폭기의 잡음지수

증폭기는, 신호 입력측에 있는 저잡음 증폭기(LNA)와, 신호 출력측에 있는 전력 증폭기(PA)로 크게 나눌 수 있다. LNA에서 중요한 특성은 NF(Noise Figure: 잡음지수)이다. 증폭기의 NF는 매우 작은 레벨의 입력 신호를 노이즈에 매도시키지 않고 증폭할 수 있는 정도라고 말할 수 있다. 증폭기의 NF는 주로 dB로 표시가 되는데, 이 값이 작을수록 신호를 증폭 하였을 때 잡음이 적다.

위 회로 구성에 사용될 증폭기는 Analog사에서 생산하는 AD8021로

$2.1nV/\sqrt{Hz}$ Input Voltage Noise

$2.1pA/\sqrt{Hz}$ Input Current Noise

의 매우 작은 노이즈 특성을 보인다. 또한 200MHz의 빠른 신호 증폭이 가능하다.

다. 증폭기(Amplifier)

연산 증폭기를 사용해서 신호를 증폭하는 방법에는 여러 가지가 있다. 신호에 따라서는 반전 증폭 보다 비반전 증폭이 신호 처리에 유리할 수도 있으며, 연산 증폭기를 1개를 써서 증폭 회로를 꾸미는 것보다 여러 개를 사용해서 꾸밀 것이 적합 할 수도 있다. 이는 1개의 연산 증폭기를 이용해서 신호를 증폭하였을 경우 Resistors의 mismatch에 의해 CMRR(Common mode rejection ratio)를 저하 시킬 수가 있으며, 낮은 입력 저항 때문에 신호 입력이 올바르게 올바르지 않을 수도 있다.

본 연구에서는 한 번의 증폭을 위해서 여러 개의 연산 증폭기를 사용하여 산업 현장에 적용, 안정성을 유지할 수 있도록 하였다.

그림16 은 기본 증폭회로를 산업 현장에 맞도록 변경한 증폭 회로이다.

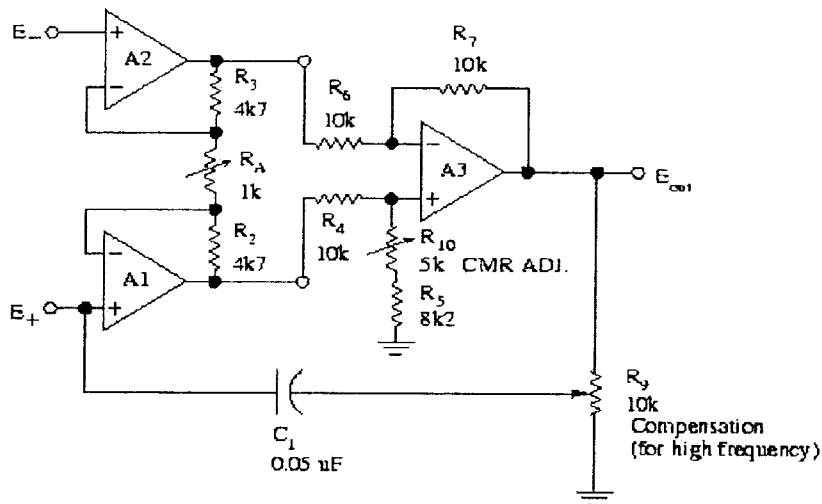


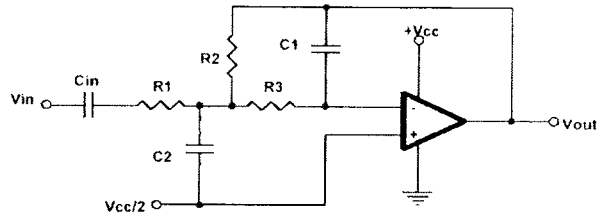
그림16 Instrumentation Amplifier with Common mode

라. Filtering

본 연구에 사용되는 Filtering은 그림 17에서와 같이 3가지로 High Pass, Low Pass, Band Pass Filter 이다. High Pass와 Low Pass는 넓은 영역 대를 제거하는데 사용될 Filtering이고, Band Pass Filter는 필요한 신호만을 검출하기위한 Filtering 이다.

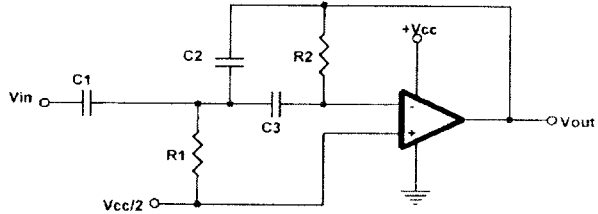
LOW PASS

Unity Gain Butterworth
 $F_o = 1/(2\pi RC)$
 $R1 = R2 = R/\sqrt{2}$
 $R3 = R/(2\sqrt{2})$
 $C1 = C$
 $C2 = 4C$



HIGH PASS

Unity Gain Butterworth
 $F_o = 1/(2\pi RC)$
 $R1 = 0.47R$
 $R2 = 2.1R$
 $C1 = C2 = C3 = C$



BAND PASS

Gain = 2.3 dB
 $F_o = 1/(2.32\pi RC)$
 $R1 = 10R$
 $R2 = 0.001R$
 $R3 = 100R$
 $C1 = 10C$
 $C2 = C$

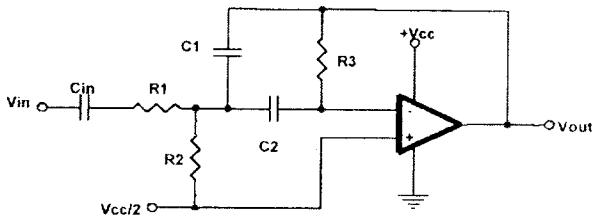


그림 17 Filtering circuit

7. 장거리 광섬유 전송기 개발

Q-switched Nd:YVO₄의 레이저[pulse width: 10 ~ 13 ns, peak power: 2 kW] 빛이 50/125 μm 인 step-index germania-doped silica fiber에 coupling된다. 레이저 빛은 길이가 5 km인 fiber를 따라 전파되어 나아가게 되며, 되돌아오는 Rayleigh, Stokes Raman, anti-stokes Raman, Brillouin Scattering이 발생하게 된다. 이 되돌아오는 signal은 core 크기가 125 μm인 또 다른 fiber에 coupling된다.

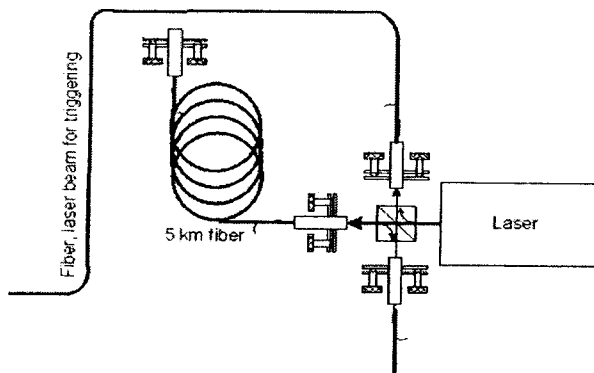


그림 18 장거리 광섬유 전송기 모식도

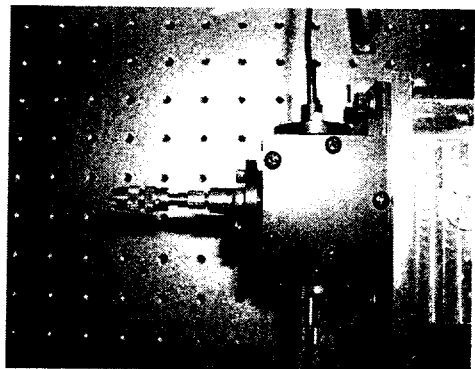


그림 19 광섬유 전송기 결합부 실제사진

8. Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계 개발(Spectrometer)

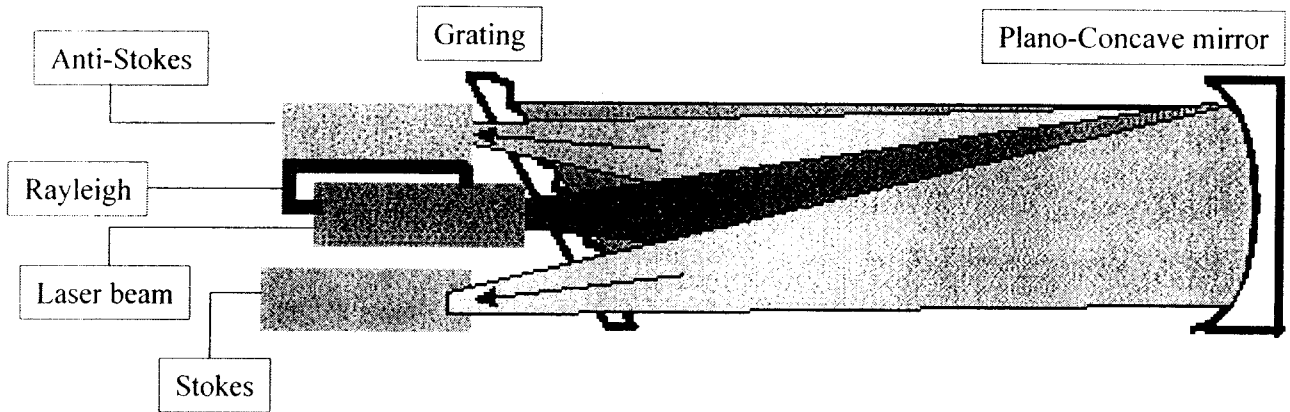


그림 20 Spectrometer

스펙트로미터는 concave mirror, holographic grating 그리고 4개의 파이버로 구성되어 있다. 한 개의 파이버는 스펙트로미터 안으로 들어오는 back scattering photons을 받는 역할을 한다. 나머지 다른 3개의 파이버들은 Rayleigh, Stokes, Anti-Stokes signal을 받는 역할을 한다. Concave mirror의 지름은 200 mm이고 radius of curvature 값은 250 mm 이다. 1200 groove/mm holographic grating은 auto collimation scheme으로 장착되어 있다. 혼합된 back scattering beam은 22도 각도를 가지고 concave mirror쪽으로 들어가게 된다. mirror로부터 반사된 후 빔은 grating 방향으로 평행하게 진행하게 된다. grating으로부터 굴절 된 후 빔은 반대 방향으로 3개로 분리되어 진행하게 된다. mirror로부터 반사된 후 3개의 빔은 3개의 파이버로 들어가게 된다. 스펙트로미터의 linear dispersion은 $50 \text{ \AA}^0/\text{mm}$ 이다. 이 경우 Rayleigh와 Raman stokes signal의 space separation[레이저의 중앙 파장으로 부터 stokes Raman emission의 분리 간격은 490 cm^{-1} 이다.]는 약 10 mm이다. Rayleigh 와 anti-Stokes Raman signal의 간격도 약 10 mm 이다. signal의 core diameter는 200 μm 이다.

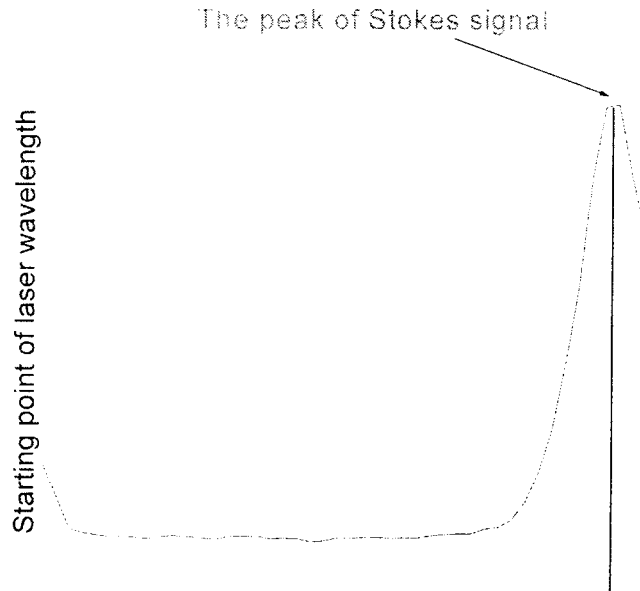


그림 21 The peak of forward direction of amplifier Raman Signal

-Wavelength signal shift: 430 cm^{-1}

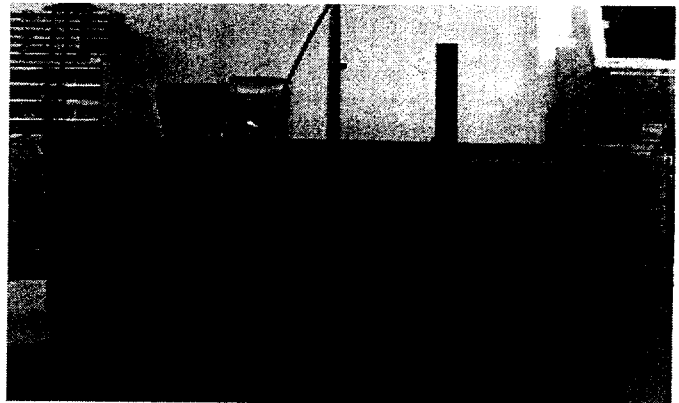
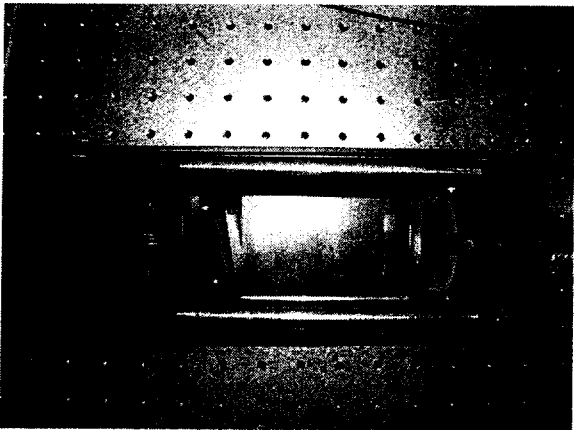
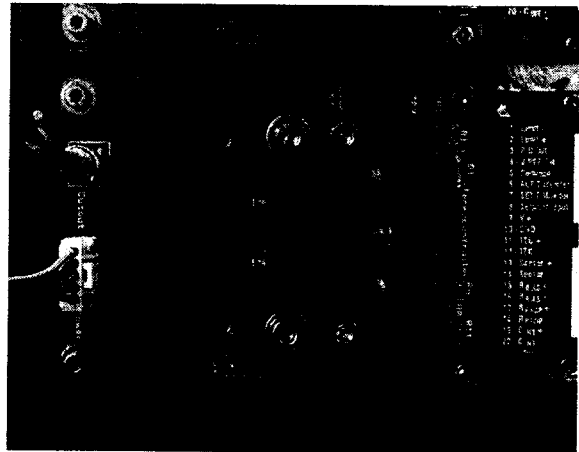
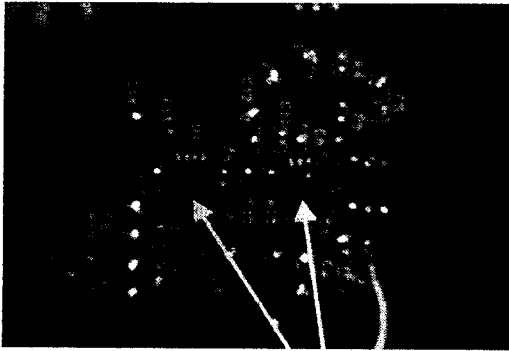


그림 22 Stokes, Anti-Stokes 파장 분할 광학계 사진

-Space separation of Rayleigh and Raman emission: 490 cm^{-1} ($\sim 53 \text{ cm}$)

9. 광 신호 검출 장치(Detector and Amplifier) 개발



2 stage Amplifier (1000 times)

그림 22 Ge APD 와 2 stage amplifier

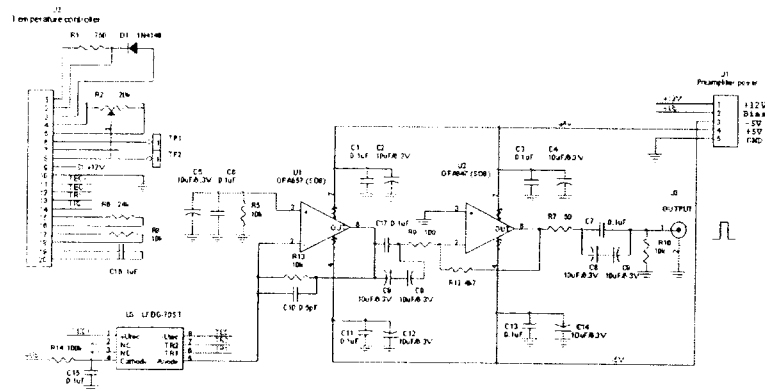


그림 23 광 신호 검출 장치 회로

Avalanche Photo Diode signal은 oscilloscope 와 processing electronics 에 연결된 low-noise amplifier에 의해 검출된다. Ge APD는 그림 22의 오른쪽 사진에 볼 수가 있다. 또한 검출되는 signal을 증폭[약 1000배 정도]하기 위하여 2개의 stage amplifier 가 내장 되어 있는 것을 볼 수가 있다.

10. 저 잡음 광 검출 신호 증폭기 개발

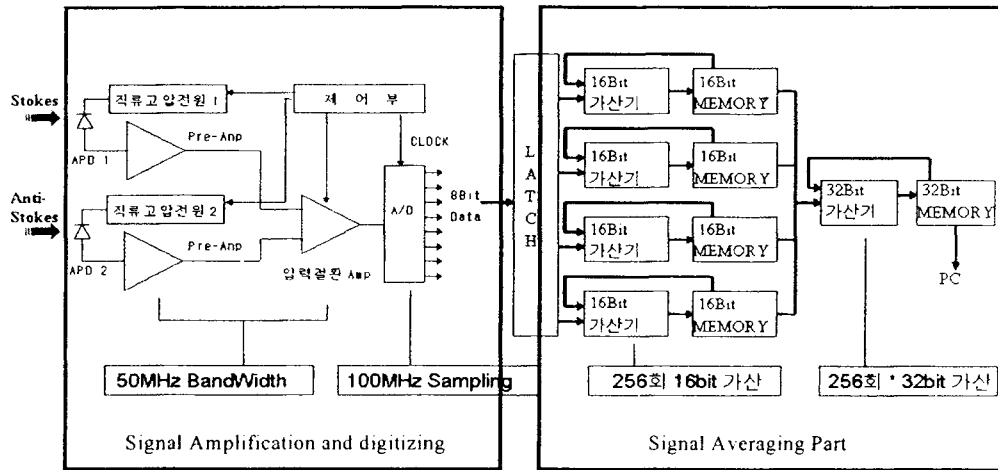


그림 24 저 잡음 광 검출 신호 시스템

파이버에서 검출된 Stokes and Anti-Stokes signal은 그림 24의 왼쪽 그림에서 보듯이 APD1/2에 의해 우선적으로 검출되기 시작한다. APD를 통과 한 signal은 아주 미약하기 때문에 amplifier를 통해 증폭된 후 100 MHz sampling 작업을 하게 된다. 그런 다음 signal을 averaging을 하게 된다.

11. 광 수신 신호 처리 시스템/ Microprocessor 개발

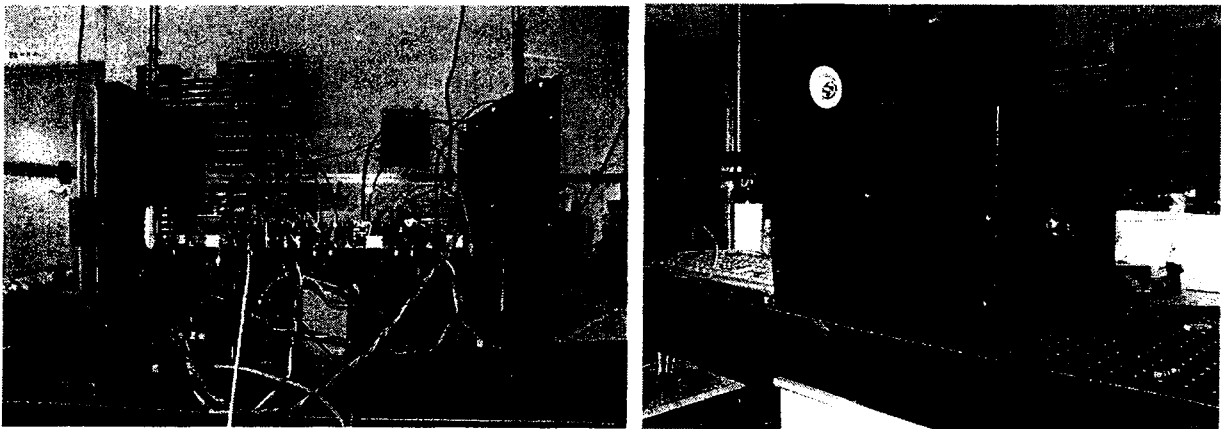


그림 25 광 수신 시스템 전체 사진

Block diagram of signal processor

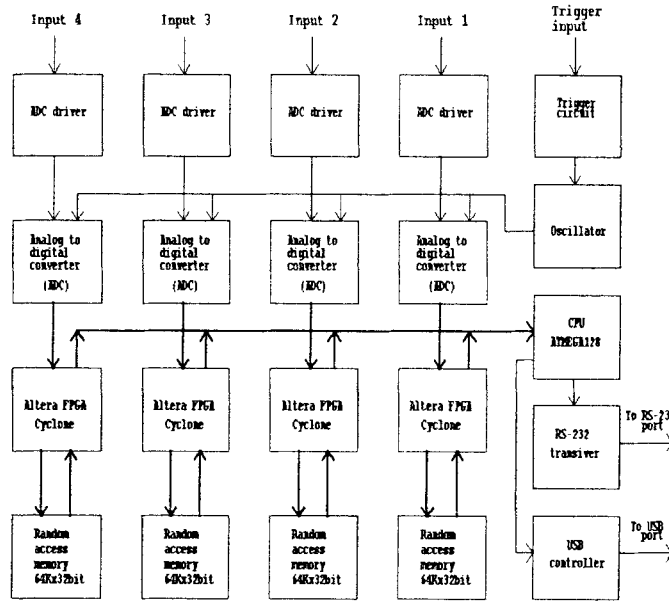


그림 26 Block diagram of signal processor

ADC driver: APD을 통해서 광 신호가 수신된다.

ADC: 수신된 광 신호를 디지털 신호로 변환하게 된다.

Alter FPGA: 디지털 신호 저장과 고속 누산

RAM: 누산된 결과 저장

Trigger circuit: 신호 수신과 누산 과정을 시작하는 트리거 신호를 수신한다

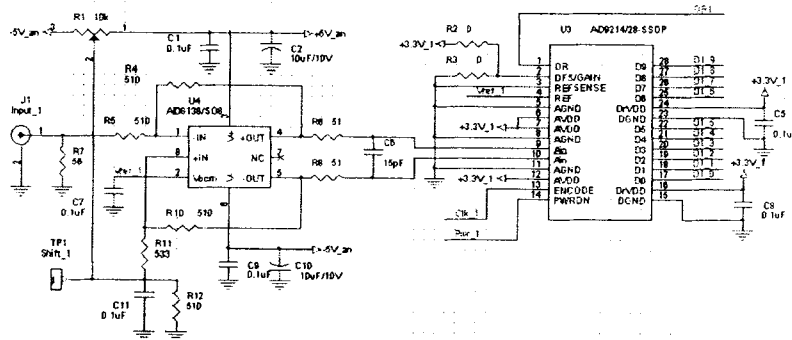
Oscillator: 전체 부품 동작의 동기화 시키는 기준 주파수를 제공한다.

CPU ATMEGA128B: 전체 동작을 제어하고, 컴퓨터와 통신을 제어하는 CPU이다.

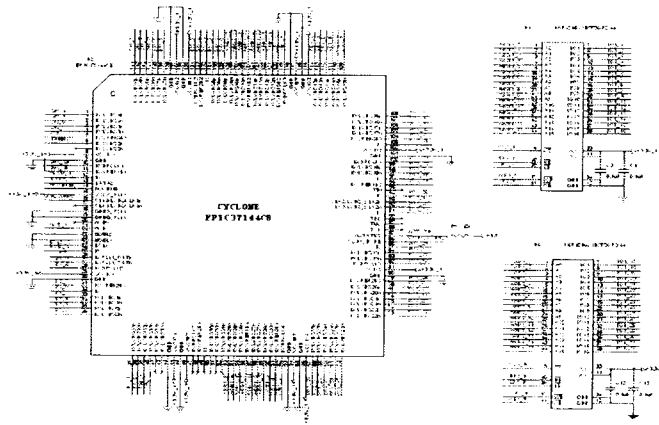
RS-232 transceiver: 컴퓨터와의 RS-232 통신을 담당하게 된다.

USB controller: 컴퓨터와의 USB 통신을 담당하게 된다.

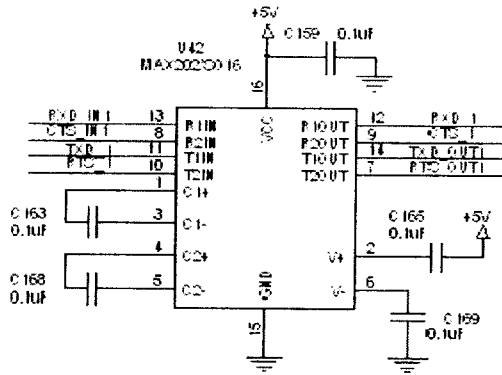
-ADC-



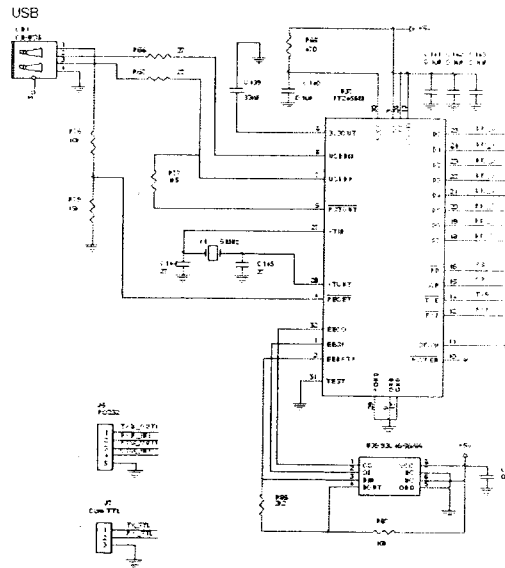
-Averaging-



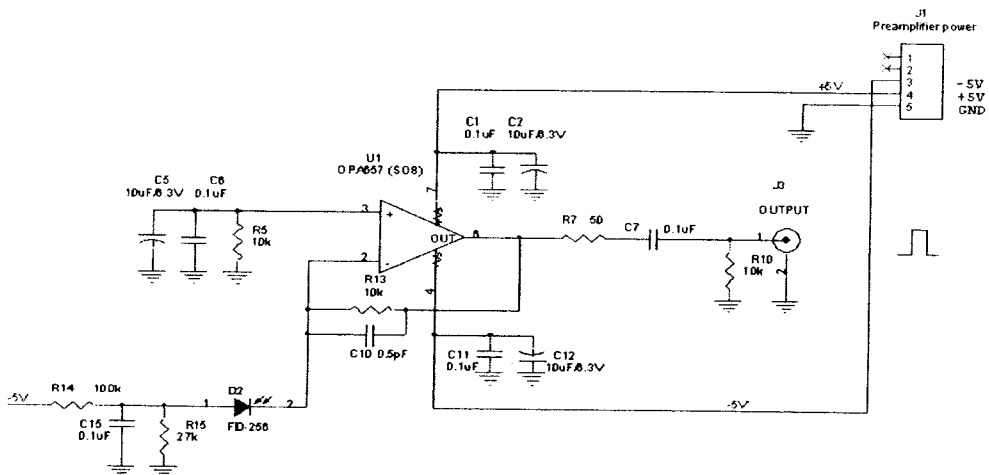
-RS-232-



-USB-



-Trigger Photo-diode amplifier-



12. Display 소프트웨어 개발

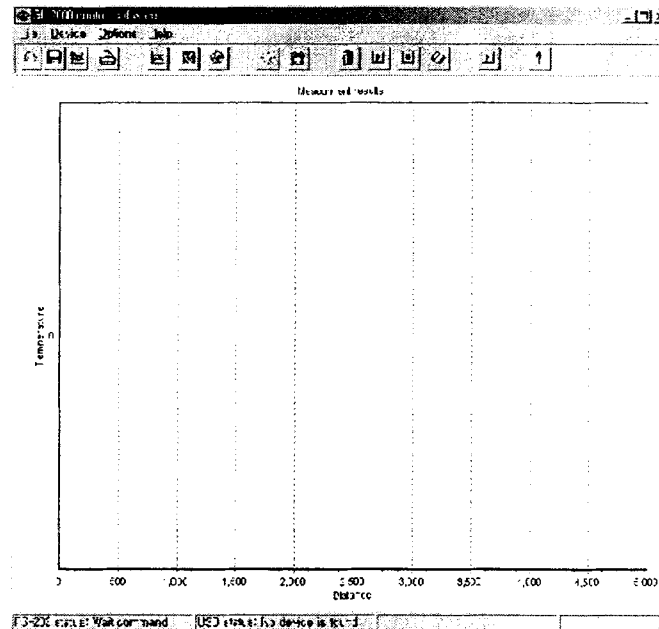









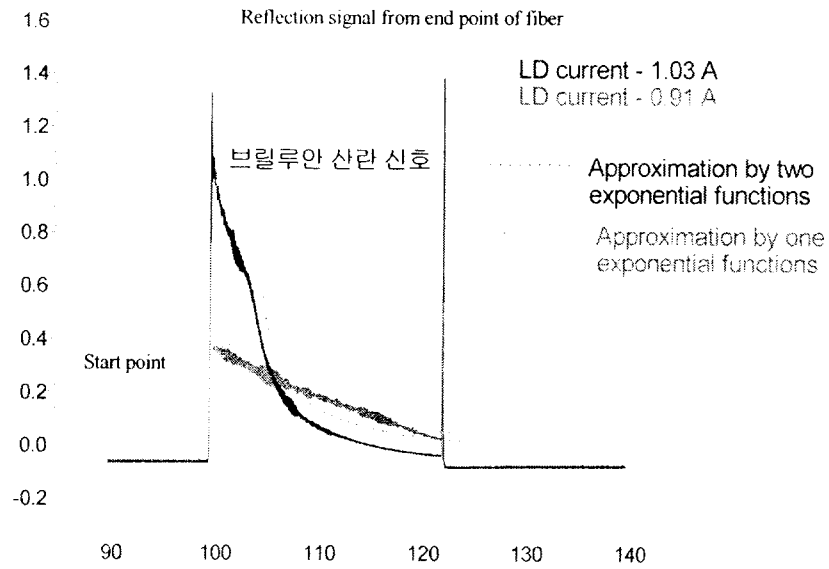
그림 26 Display 소프트웨어 main 화면

-각 icons에 대한 설명-

-  : data collection device 상태를 초기화한다.
-  : data averaging 에 사용할 수 있는 펄스 수 설정한다.
-  : data collection에 사용할 RAM을 초기화한다.
-  : data collection을 시작한다.
-  : 수행중인 data collection을 중지한다.
-  : RAM을 먼저 초기화 하고 data 수집을 시작한다.
-  : 수집된 data를 device로부터 수신해서 온도를 계산한다.

 : 처리 결과를 저장, 인쇄, 화면표시변경을 수행한다

13. 실험 결과



빛이 광섬유를 왕복하는데 걸리는 시간

그림 27 Rayleigh back scattering with two different LD current

위 그림에서 보듯이 LD current가 증가할수록 브릴루안 산란 신호가 커지는 것을 볼 수가 있다. 또한 LD current가 증가하면 2개의 exponential function이 나타나는 것을 보인다. 하나의 함수는 linear absorption 과 Rayleigh scattering에 관한 함수이고 다른 나머지 함수는 stimulated Raman Stokes scattering에 관한 것이다.

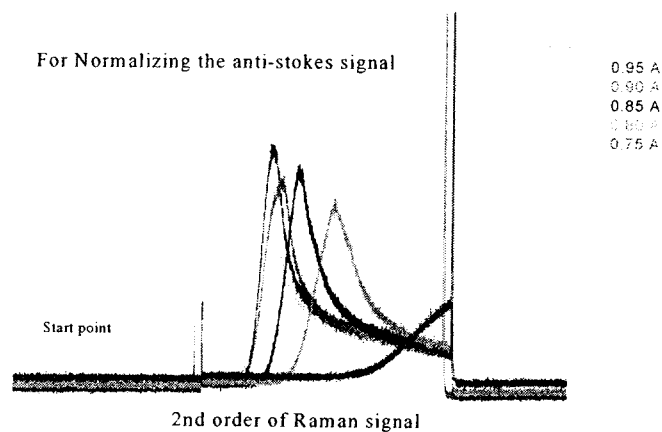


그림 28 Raman Stokes back scattering signal depends on LD current

그림 28에서 보듯이 LD current가 증가할수록 Raman Stokes back scattering signal이 커짐을 볼 수가 있다. 이 결과는 Anti-Stokes signal을 normalizing하기 위함이다.

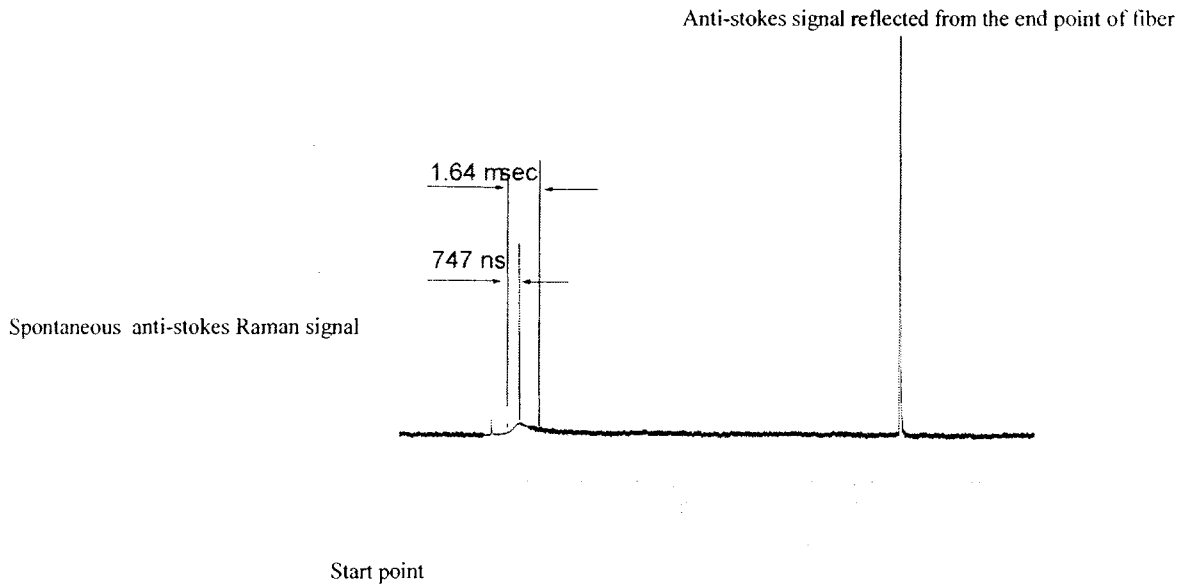


그림 29 Relative value of a forward propagation amplifier Anti-Stokes Raman signal and back-scattering spontaneous anti-stokes Raman signal

위 그림에서 알 수 있듯이 forward propagation amplifier anti-stokes Raman signal 과 back-scattering spontaneous anti-stokes Raman signal의 상대적인 강도 비는 약 30배 정도 차이가 난다.

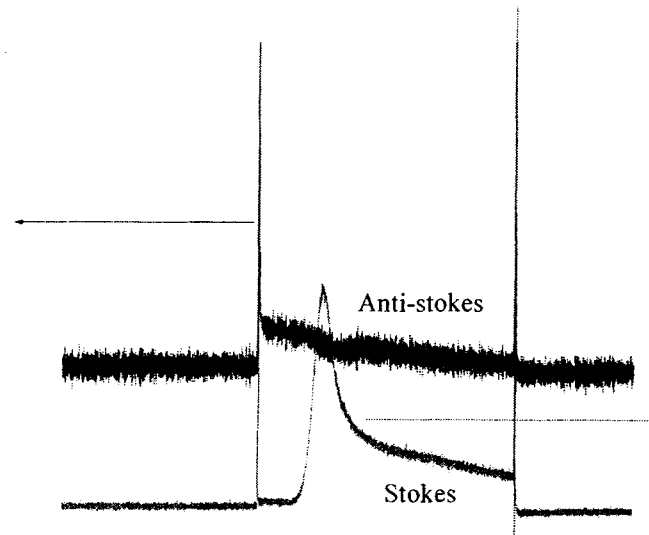


그림 30 Back Scattering anti-Stokes and Stokes without Notch filter

이 때의 LD current는 1.05 A이다. grating은 300 gr/mm이다. 위 그림에서 알 수 있듯이 파이버를 통해 온도를 측정할 수 있는 Stokes and Anti-Stokes signal을 모두 얻을 수가 있었다.

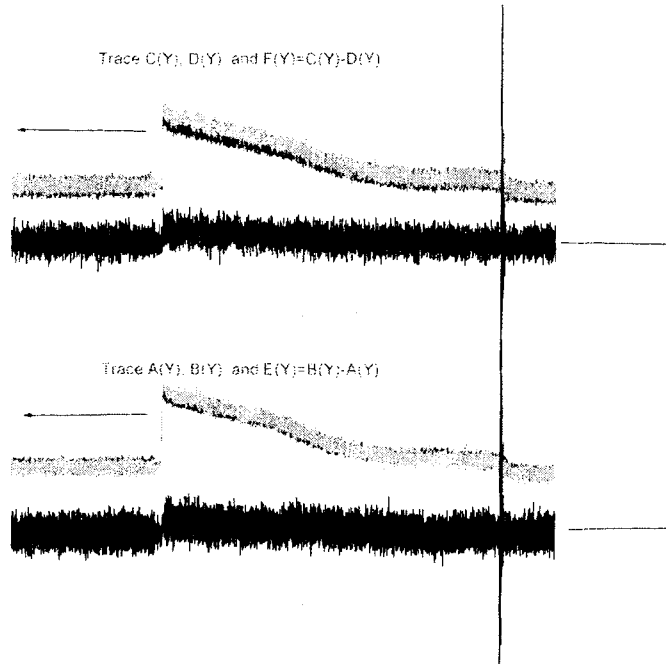


그림 31 Raman Anti-Stokes back scattering signal with heating ($\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 온도가 5도 정도 증가하였을 경우 Raman Anti-Stokes signal의 강도가 더 증가하였다는 것을 알 수가 있다. 즉, 온도 측정이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

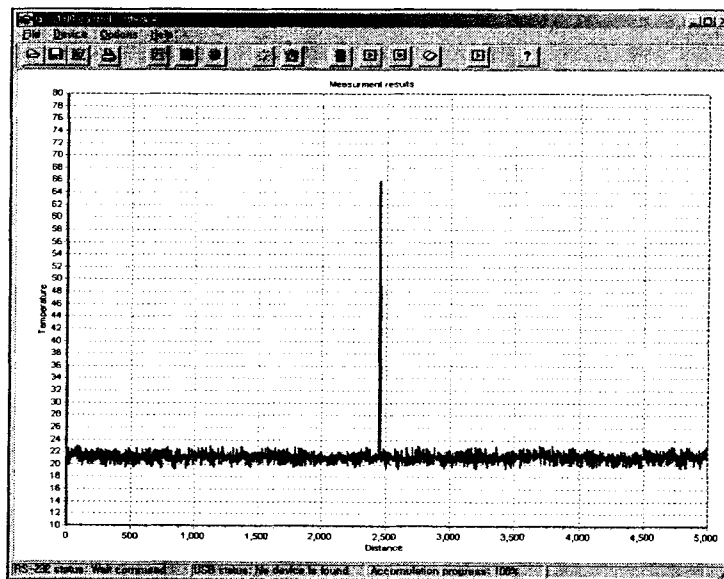


그림 32 실제 온도 측정된 화면
 약 2375 미터에서 온도가 약 65도 정도 되는 것을 보여주고 있다.

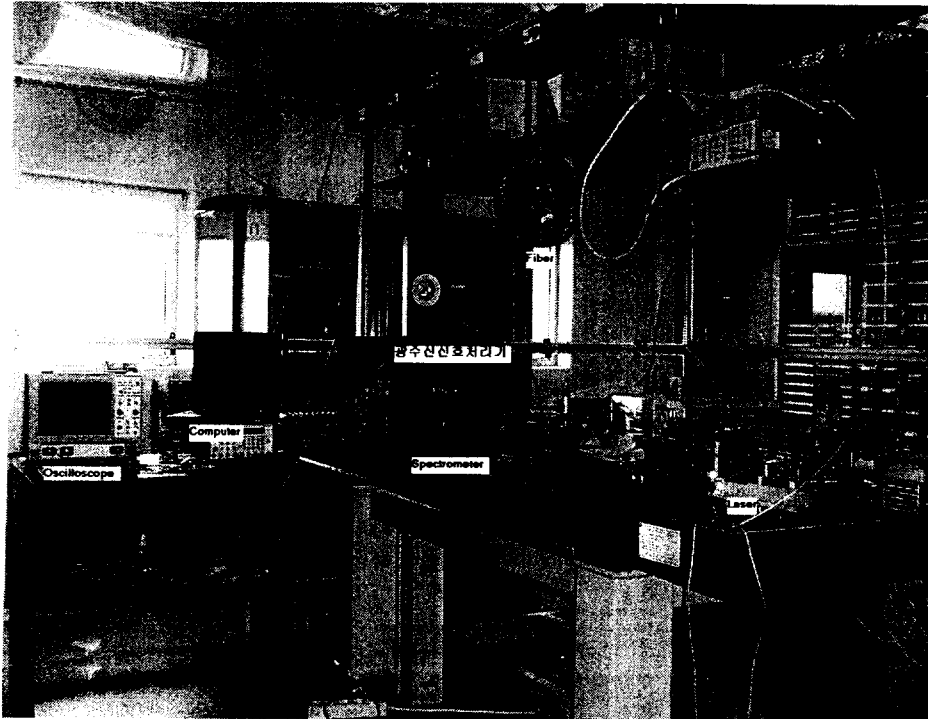


그림 33 온도 측정 시스템

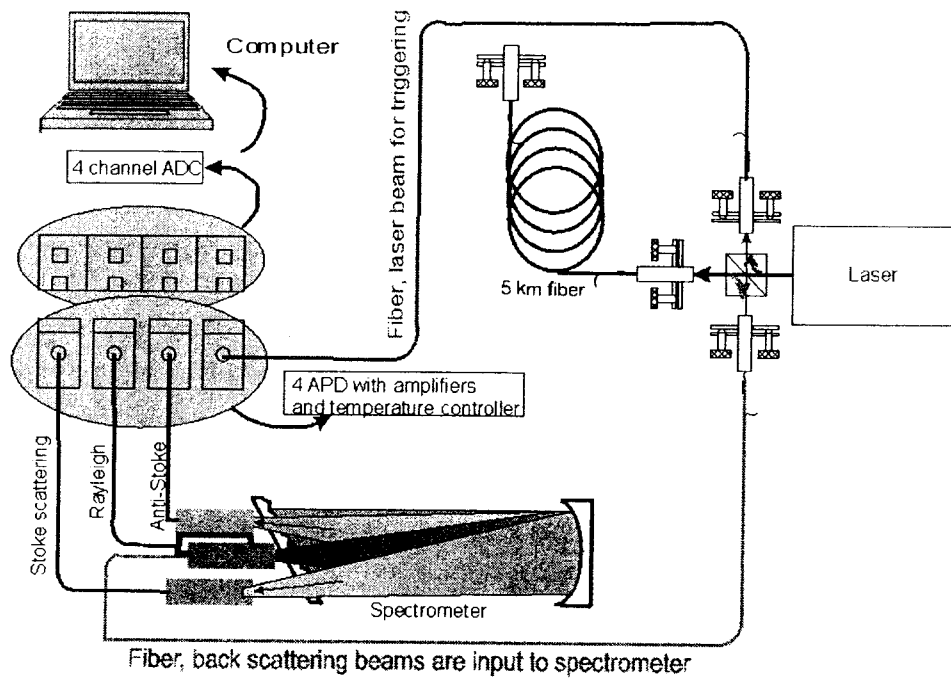


그림 34 장치 제작 및 운용 기술

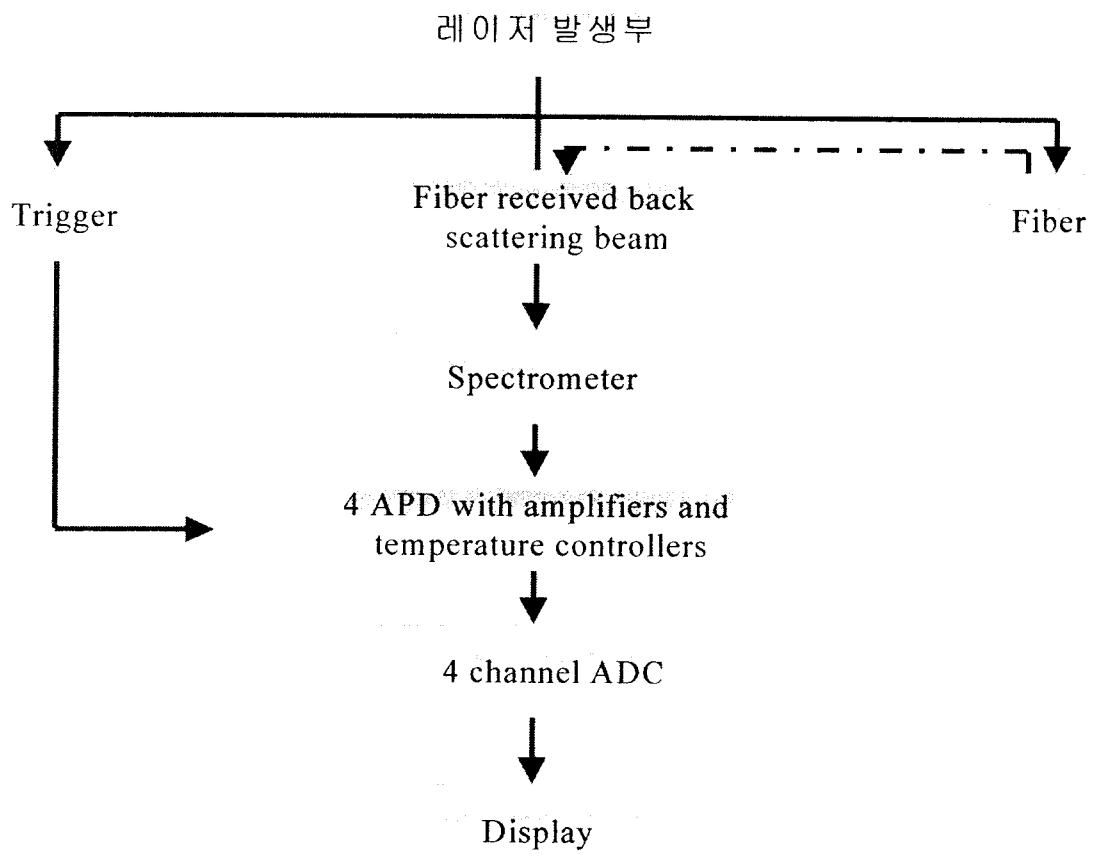


그림 35 온도 측정 시스템 계략도

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련 분야에의 기여도

1 절. 최종년도 연구 목표 및 연구 개발 목표의 달성도

1. 최종 목표

○고반복 나노초 레이저를 이용한 장거리 광섬유 센서 온도 측정 장치 개발

- ◆ 측정 거리 : 최대 5km
- ◆ 온도 정밀도 : $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- ◆ 측정 온도 범위 : $-50 \sim +150^{\circ}\text{C}$
- ◆ 온도 분해 능: 0.2°C
- ◆ 거리 분해 능 : 2 m
- ◆ 측정 시간 : 최대 90초
- ◆ 센서 광섬유 : 다중 모드 50/125

2. 당해 단계목표 및 달성도

세부연구목표	주요 연구개발 실적	가중치 (%)	연구목표 달성도(%)	비고
장거리 광섬유 전송기 개발	1. Step-index germania-doped silica 50/125 μm of 5 km 2. SMA connector and Polarize Cube	20	100	10 ~ 13 ns, 10 kHz, peak power 2 kW인 레이저 빛을 fiber에 coupling
광수신 신호처리 시스템 개발	1. ADC 및 driver 개발 2. DSP 개발	20	95	APD를 통해 정보를 수집 후 100000정도 반복해서 averaging 함
Microprocessor 개발	1. RS-232 transiver, USB controller 2. Altera FPGA, Light Wizard	20	100	컴퓨터와 RS-232 및 USB 통신을 담당함
Display 소프트웨어 개발	1. 신호 수집 장치로부터 각 위치마다의 온도를 측정하는 보여주는 프로그램 개발 2. Stokes/anti-stokes광의 강도비로부터 광섬유 주위 온도 계산 소프트웨어 개발	20	95	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ 온도 정밀도를 가지고 각 위치마다 온도를 보여줌
장치제작 및 운용기술 개발	4개의 채널을 가진 온도 측정 시스템 개발	20	90	측정거리: 최대 5km 온도 정밀도: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 측정 온도 범위: $-50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 거리 분해능: 3 m 측정 시간: 최대 90초 센서 광섬유: 다중 모드 50/125
총계		100		

3. 관련 분야의 기술 발전 기여도

가. 장거리 측정을 위한 나노초 다이오드 레이저 여기 고체 레이저 발생기 개발
12 ns의 펄스폭을 가지고 peak power가 2 kW를 가진 polarized laser는 정밀 레이저 가공 분야 [반도체 메모리, LCD repair]등에 활용할 수 있으며, 소형 고체 레이저 기술을 한 단계 업그레이드 했다.

나. Stokes, Anti-Stokes 파장분할 광학계 개발(Spectrometer)

파장 분해능은 490 cm^{-1} 로써 분석 분야 쪽에서 널리 쓰일 수 있는 장점이 있다

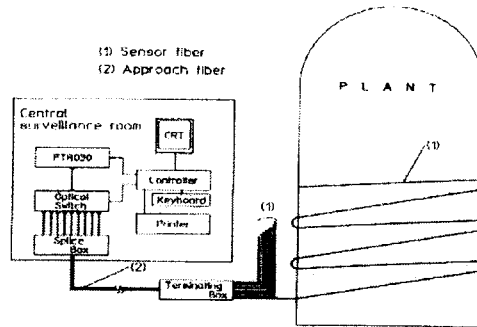
제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 사업에서 개발한 분포형 온도 측정 시스템은 광섬유 자체가 센서와 전송로의 역할을 하므로 설치가 용이하고 현장 장비가 없으므로 유지 보수가 간단해지는 장점을 지녔다.

또한 광섬유를 이용하므로 주위의 영향을 받거나 주위에 영향을 주지도 않아 가장 안정적인 측정 방법이며, 중앙에서 모든 포설 구간의 온도 분포를 측정 할 수 있고 선로의 이상 유무까지도 알 수 있는 차세대 측정 시스템으로 원자력 분야의 어려운 환경에서 장거리에 걸친 온도 측정에 유용한 측정기가 될 것으로 기대하고 있다.

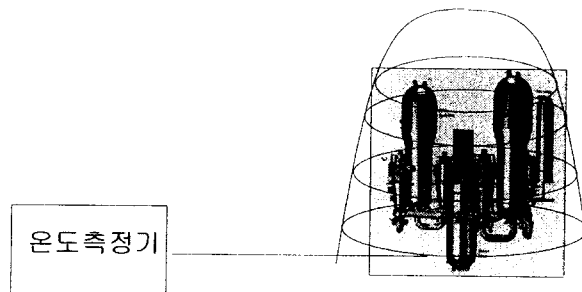
1 절 원자력 분야의 응용

1. 원자로 격납 용기 주변의 온도 관리(내 방사선 광섬유 활용)

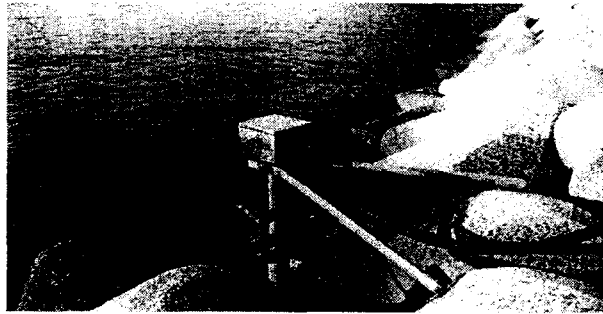


내 방사선 광섬유를 활용하여 원자력 발전소 내의 주요 설비 온도 이상을 감시할 수가 있다.

2. 원자력 발전소 증기 배관, 냉각수용 배관, 온도 감시 시스템

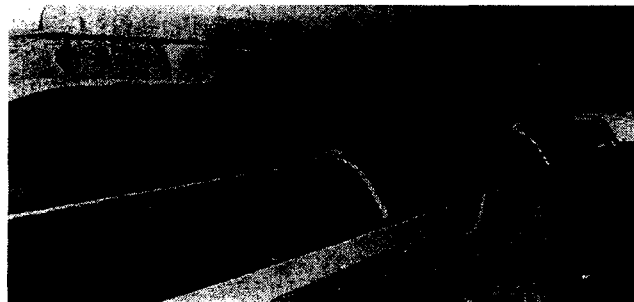


3. 원자로 냉각을 위한 해수 온도 감시



광섬유 센서를 나선형으로 감은 pipe를 해수 취수구, 배수구에 각각 설치하여 온도를 측정 할 수가 있다.

4. 지중 전력 케이블 선로 온도 감시

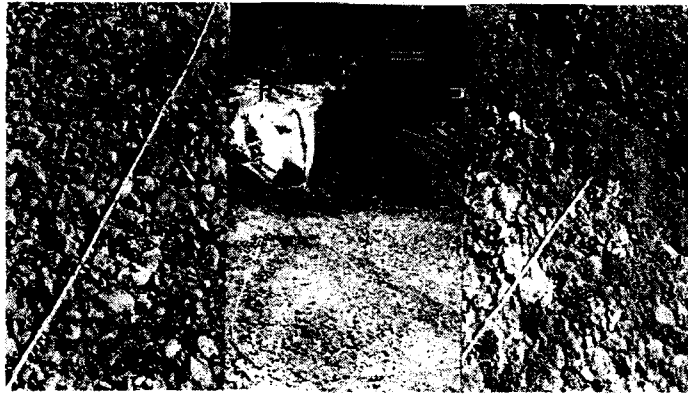


2 절 일반 산업 활용

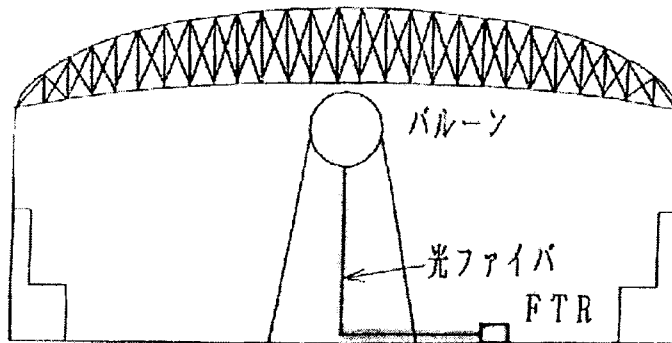
1. 지열 측정 시스템



2. 댐 콘크리트 온도 분포 측정



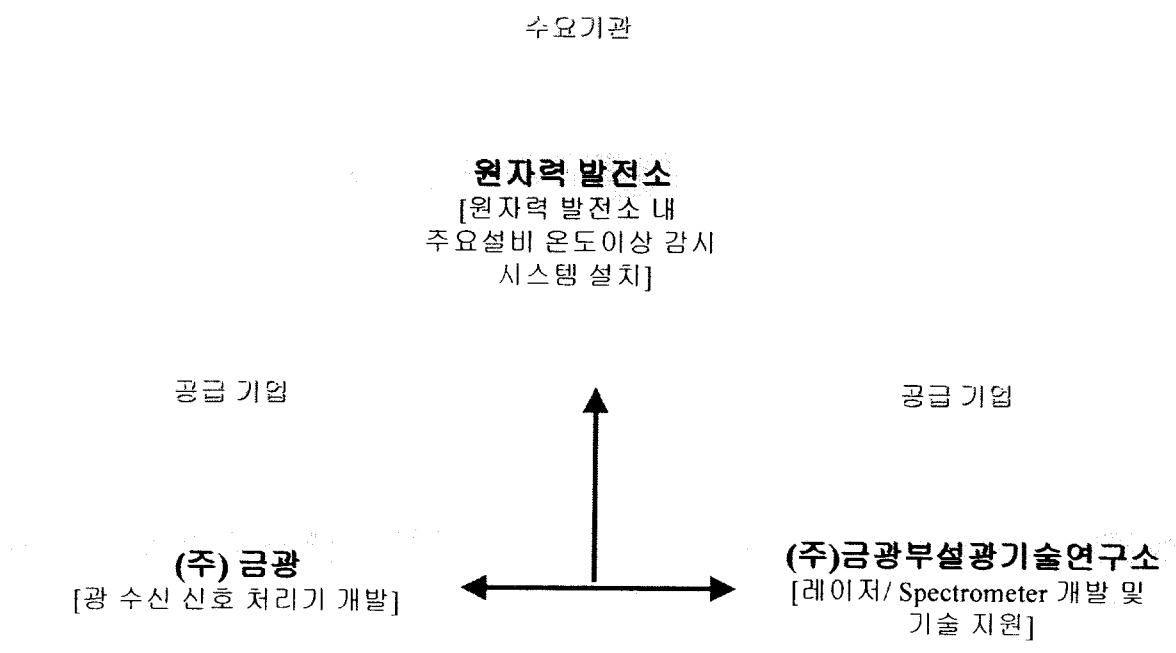
3. 대규모 공간 실내 온도 분포 감시 시스템



4. LNG 누출 검출 시스템



3 절 현장 적용 추진 전략



4 절 반영 및 보완 요구 사항

1. 실용화를 위해 추가적으로 수행해야 할 부분을 수행된 부분과 구별하여 기술할 것.
 - ; 지금 시점은 제품이 proto-type이어서 바로 실용화를 하기에는 무리가 있다. 실용화를 위해 필요한 성능은 개발 완료 하였으나 실제로 원전이나 다른 장소에 설치를 하여 테스트를 아직 수행하지 않았다. 실용화를 위해서는 proto-type 에서 벗어나 시장에 내 놓을 수 있도록 제품으로 만들어야 되겠고 하루 빨리 원전 등에 설치를 하여 성능을 테스트를 수행해야 할 것이다.
2. 실험실 환경이 아닌 실제 필드에서 적용할 때의 문제점 및 대응책도 분석/기술할 것.
 - ; 원전에 적용한다면 방사선이 문제가 될 수 있다. 그래서 광섬유 센서를 내 방사선 센서 개발을 하면 가능하리라 본다.
3. 일부 기술 보완 및 추후 완성도를 높일 수 있는 여지가 남아있는 연구내용에 대한 방향과 대응방안에 대해서도 기술할 것.
 - 광 신호 잡음을 최소화하여 온도 측정 정밀도를 높이는 부분은 앞으로의 대응 방안을 기술하고, 지속적인 개발이 이루어져야 할 것임.
 - ; 광 신호 잡음을 최소화하기 위해서는 광학필터를 사용하면 noise를 줄일 수가 있다. 또한 거리 분해능은 나노초 고출력 레이저 source에 의존한다. 즉, 펄스폭을 지금의 약 13 ns 되는 것을 거리 분해능이 1m 정도 되게 하기 위해서는 5ns 정도로 줄여야 한다. 그러기 위해서는 레이저 공진기 거리를 줄이면 가능하리라 본다. 측정 온도 범위는 지금 현재의 경우 80°C 정도가 되는데 광학 파이버를 내열성이 강한 파이버로 교체를 하면 150°C 이상 가능하다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학기술정보

- [1] D. S. Kupperman and T. N. Claytor, "Current practice and development efforts for leak detection in US reactor primary systems." Continuous Surveillance of Reactor Coolant Circuit Integrity. pp. 157-164, OECD/NEA, Paris, 1986.
- [2] A. Seibold, J. Bartonicek, H. Kockelman, "Operational monitoring in German nuclear power plants," Nuclear Engineering and Design, Vol. 159. pp.1-27, 1995.
- [3] K. Aoki, "Reactor coolant pressure boundary leak detection systems in Japanese PWR plants," Nuclear Engineering and Design, Vol. 128. pp. 35-42, 1991.
- [4] R. Schiffer and M. Miksch, "FAMOS, a thermal fatigue monitoring system for sensitive locations of nuclear power plants," Continuous Surveillance of Reactor Coolant Circuit Integrity, pp. 327-338, OECD/NEA, Paris, 1986.
- [5] D. L. Griscom, "Radiation hardening of pure-silica-core optical fibres by ultra-high-dose γ -ray pre-irradiation," J. Appl. Phys., Vol. 77, pp. 5008-5013, 1995.
- [6] D. L. Griscom, "Nature of defects and defect generation in optical glasses," Radiation Effects in Optical Materials, SPIE, Vol. 541, pp. 38-59, 1985.
- [7] D. L. Griscom, "Effects of gamma and fission-reactor irradiation on the visible-range transparency of aluminium-jacketed, all-silica optical fibres with core materials fabricated by different methods," submitted to J. Appl. Phys., 1996.
- [8] K. Nagazawa, M. Tanabe, K. Yahagi, "Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica core fibres," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 23, pp. 1608-1613, 1984.
- [9] J. Sejvar, "Normal operating radiation level in pressurised water reactor plants," Nuclear Technology, Vol, 36, pp. 48-55, 1977.
- [10] F. Jensen, E. Takada, M. Nakazawa, T. Kakuta and S. Yamomoto, "Distributed Raman temperature measurement system for monitoring of nuclear power plant coolant loops," Proceedings of SPIE [to be published].

- [11] Y. Morita, S. Yamamoto, K. Fukuchi, H. Kawakani, DEI-93-166, 1993 [in Japanese].
- [12] Childers, B. A., Froggatt, M. E., Allison, S. G., Moore, T. C., Hare, D.A., Batten, C. F., and Jegley, D. C., "Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure," Smart Structures and Materials Conference, SPIE Vol. 4332, March 2001.
- [13] Berthold, J. W., "Measurement of Axial and Bending Strain in Pipelines Using Bragg Grating Sensors," Proc. SPIE Environmental and Industrial Sensing Conference, October 9, 2000.
- [14] Theune, N. M. et. al. "Applications of Fiber Optical Sensors in Power Generators: Current and Temperature Sensor," Proc. OPTO 2000 Conference, 22-25 May 2000.
- [15] Childers, Brooks A., Brown, Timothy L., Moore, Jason P., Wood, Jaren H., "Recent developments in the application of optical frequency domain reflectometry to distributed Bragg grating sensing," Proc. SPIE Vol. 4578, pp. 19-31, November 2001.
- [16] Froggart, M, and Moore, J., "Distributed Measurement of Static Strain in an Optical Fiber With Multiple Bragg Gratings at Nominally Equal Wavelengths," Applied Optics, Vol. 37, No. 10, pp. 1741-1746.
- [17] Dowdle, W. L. and Cobb, W. M. (1975). Static Formation Temperature From Well Logs - An Empirical Method. J. Petroleum Technology., SPE5036, pp. 1326-1330.
- [18] Forster, A., Schrotter, J., Merriam, D. F. and Blackwell, D. (1997). Application of optical-fiber temperature logging-An example in a sedimentary environment. Geophysics., Vol.62(4), pp. 1107-1113.
- [19] Grosswig, S., Hurtig, E. and Juhn, K. (1996). Fibre optic temperature sensing: A new tool for temperature measurements in boreholes, Geophysics., Vol. 61(4). pp. 1065-1067.
- [20] Hurtig, E., Grosswig, S., Jobmann, M. and Juhn, K. (1994). Fibre-Optic temperature Measurements in Shallow Boreholes: Experimental Application for Fluid Logging, Geothermics., Vol. 23(4), pp. 355-364.

- [21] Hurtig, E., Grosswig, S. and Juhn, K. (1996). Fibre Optic Temperature Sensing: Application for Subsurface and Ground Temperature Measurements. *Tectonophysics.*, 257 101-109
- [22] Karaman, O. S., Jutlik, R. L., and Kluth, E. L. (1996). A Field Trial to Test Fiber Optic Sensors for Downhole Temperature and Pressure Measurements, West Coalinga Field, California. *J. Petroleum Technology.*, SPE 35685, pp. 351-357.
- [23] Kitakoga I., Oishi, K., Yasuhiro Ogata, Y., Masayoshi, Y., Nishima, H., Wada, O. and Nakura, Y. (1995). Application of the fiber-optic distributed temperature sensor in geothermal wells. *Denkigakkai Electric Power/Energy Chapter.* 2pp.
- [24] Matsushima, N. and Sakaguchi, K. (1996). Temperature Measurement of Geothermal Wells by Optical Fiber Sensor. *Proceedings 95th SEGJ.*, pp. 151-155.
- [25] Meggitt, B. T. (1995). Fiber optic white-light interferometric sensors. In: *Optical Sensor Technology*, Grattan, K.T.V. and Meggitt, B. T. (Ed)., Chapman & Hall, London, pp. 269-310.
- [26] Ohnishi, M., Yoshizawa, N., Juwata, O., Miyajima, Y. and Negishi, Y. (1986). Long-Term Loss Stability for Submarine Optical Fiber Cable. *DenshiTuushinGakkai*, Vol. J69-C(10), pp. 1276-1285.
- [27] Takeuchi A. (1996). Ondokensou ni yoru Chikasui-Ryudousou no Jaaku. In: *Ondosokutei ni yoru Ryudou-chikasui-chousa-hou* (in Japanese). *Kokin-Shoin*, Tokyo. pp. 250-342.
- [28] F. Berghmans, A. Fernandez Fernandez, B. Brichard, F. Vos, M. Decreton, A. Gusarov, O. Deparis, P. Megret, M. Blondel, S. Caron, and A. Morin, "Radiation hardness of fiber optic sensors for monitoring and remote handling applications in nuclear environments," in *Proc. SPIE, Process Monitoring with Optical Fibers and Harsh Environment Sensors*, Boston, MA, 1998, Vol. 3538, pp. 28-39.
- [29] F. Berghmans, F. Vos, and M. Decreton, "Evaluation of three different optical fiber temperature sensor types for application in gamma-radiation environmnet," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 45, pp. 1537-1542, June 1997.
- [30] H. Henschel, "Radiation hardness of present optical fibers," in *Proc.*

SPIE, Optical Fiber Sensing and Systems, in Nuclear Environment, Mol, Belgium, 1994, Vol. 2425, pp. 21-31.

- [31] P. Ferdinand, S. Magne, V. Marty, S. Rougeault, P. Bernage, M. Douay, E. Fertein, F. Lahoreau, P. Niay, J. -F. Bayon, T. Georges et al., "Optical fiber Bragg gratings sensors for structure monitoring within nuclear power plants," in Proc. SPIE, Optical Fiber Sensing and Ssystems in Nuclear Environment, Mol, Belgium, 1994, Vol. 2425, pp. 11-20.
- [32] P. Niay, P. Bernage, M. Douay, E. Fertein, F. L팍더, J. F. Bayon, T. Georges, M. Monerie, P. Ferdinand, S. Rougeault, and P. Cetier, "Behavior of Bragg gratings, written in germanosilicate fibers, against Υ -ray exposure at low dose rate," IEEE Photon, Technol. Lett., Vol. 6, pp. 1350-1352, Nov. 1994.
- [33] S. A. Vasiliev, E. M. Dianov, K. M. Golant, O. I. Medvedkov, A. L. Tomashuk, V. I. Karpov, M. V. Grecov, A. S. Kurkov, B. Leconte, and P. Niay, "Performance of Bragg and long-period gratings written in N- and Ge-doped silica fibers under Υ -radiation," IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 45, pp. 1580-1583, June 1997.
- [34] S. Coenen, J. Vermunt, L. Van den Durpel, M. Decreton, and A. Rahn, "Gamma irradiation facilities for assessment of advanced instrumentation-New reactor design and plant life extension increase their need" in Research Facilities for the Facilities for the Future of Nuclear Energy, ENS Class 1 Topical Meeting, 1996, pp. 382-391.
- [35] V. B. Neustruev, "Point defects in pure and germanium-doped silica glass and radiation resistance of optical fibers," Sov. Lightwave Commun., vol. 1, no. 1, pp. 177-195, 1991.
- [36] T. E. Tsai, G. M. Williams, and E. J. Friebele, "Index structure of fiber Bragg gratings in Ge-SiO₂ fibers," Opt. Lett., Vol. 22, no. 4, pp. 224-226, 1997.
- [37] Y. Miyata, et al., "Development of Road Icing Prediction System" ITS'97.
- [38] M. Nakamura, et al., "Ice-road Detction System Using Optical Fiber Sensor" ITS'95 Vol. 1 468-473.
- [39] N. Imacho, et al., "Development of Road Temperature Sensing System Using Optical Fiber Sensor" ITS2000.