

광섬유 진단을 위한 OTDR 시스템 구현

박해수, 김요희, 오상기, 김인수, 양승국\*, 김영준\*\*  
 (한국전기연구원 정보·광연구그룹, 한국해양대학교 전자통신공학과\*, 동우옵트론(주)\*\*)

A Study on the OTDR System for diagnosis of optical fiber

Park haesoo, Kim yohee, Oh sangki, kim insoo, Yang sungkuk\*, Kim youngjun\*\*  
 (Korea electrotechnology research institute, Korea maritime university\*, Dongwoo optron co. Ltd\*\*)

**Abstract** - 광섬유는 저손실, 광대역의 전송특성을 가지며 세경(細經), 경량등 많은 장점을 가지고 있지만 동케이블과 같이 파단점, 불연속점등의 장애점 탐색에 대한 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)은 고감도, 고정도의 광센싱 기술, 극초단 광펄스 레이다 기술, 광다중화 센서 네트워크 기술, 실시간 광신호처리 기술 등 정밀 광계측 및 신호처리기술을 적용하여 설치된 광섬유의 손실 정도를 측정하는 시스템으로 광섬유에 입사된 광의 산란 가운데 Rayleigh 산란에 의해서 생기는 후방산란광을 관측하여 광파이버의 파단점 탐색 및 손실측정이 가능하다. 최근 대부분의 유선통신망은 광섬유를 이용한 광통신망식으로 이루어지고 있으며 이러한 광섬유의 고장점을 찾기 위한 방법은 OTDR방식이 유일하다고 할 수 있다. 본 논문은 Rayleigh 후방산란에 의한 광학적 특성을 규명하고 이러한 특성을 이용하여 이용한 광섬유 유지보수용 계측시스템을 설계, 제작하고 실험한 결과에 대하여 설명하고 고찰하였다. 측정거리를 40Km까지 측정하도록 하였으며, 모니터상에서의 거리 분해능은 5m정도를 가지며 1310nm의 파장을 사용하였다.

1. 서 론

최근 대부분의 초고속통신망은 광섬유를 이용한 광통신 방식으로 이루어지고 있으며, 기간 통신망에서 사용되는 광통신이 각 가정내까지 연결되는 광통신망으로 발전되고 있으며 선진각국에서는 시범 단지를 운영중이다. 이러한 광통신 증가에 따른 통신망의 전송손실분포, 장애점으로 인한 통신장애의 발생시 이러한 문제 해결이 크게 대두될 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 광계측 시스템 개발이 절실히 요구되고 있으며 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 고장점을 찾기 위한 방법으로 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)방식이 유일하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 광계측기술의 국내 수준은 거의 전무한 상태로 광학소자와 더불어 광학계측기의 국내기술개발은 필수적이다.

OTDR은 단일모드 광섬유와 다중모드 광섬유의 두 종류로 구분되는데 여기서는 일반적인 단일모드 광섬유에 대하여 실험, 제작하였다. 광섬유에 1310nm 파장의 펄스형 광을 입사시키면 산란되어 돌아오는 빛을 검출하고 거리를 계산하면 거리에 따르는 전송손실분포, 장애점의 상태를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 Rayleigh 후방산란에 의한 광학적 특성을 규명하고 그 기술을 이용한 광섬유 유지보수용 OTDR 시스템을 구현하였다.

1. 본 론

2.1 광학부 설계 및 제작

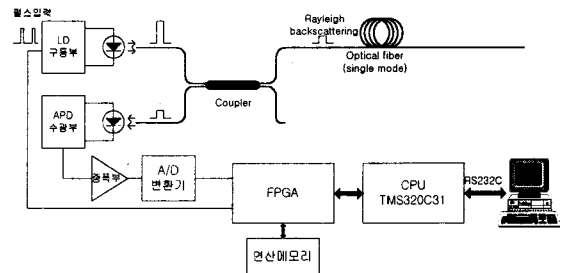
본 연구에서의 광섬유 진단용 시스템은 가장 일반적으로 사용되는 Rayleigh 후방산란광을 이용하여 설계, 시험하였다. 최초의 OTDR은 수년동안 광섬유 표준시험기로 사용되었으며 주된 응용은 광 네트워크에 있어서

고장점 탐색 및 감쇠 측정에 대한 것이다. 광섬유에 펄스폭이 짧은 광을 입사하면 광섬유 전체를 통해 재질이 나 굴절률의 미소 변동으로 인하여 산란이 발생하고, 굴절률 불연속면에서 Fresnel반사가 발생하여 전체적으로 광강도가 감소된 상태로 진행된다. 산란된 광의 대부분은 광섬유 밖으로 방출되지만, 일부는 광섬유내를 역전파하여 입사단으로 되돌아온다. 돌아온 광의 성분중에서 불연속 구간의 반사를 제외한 98%이상이 Rayleigh 산란 광이며 그 파장은 입사광의 파장과 동일하다. 각종 물리량이 광섬유에 가해지거나 혹은 광섬유 자체내의 결함이나 파손점이 있을 때 입사단으로 돌아오는 산란광은 그 산란 지점까지의 왕복 시간 지연을 가지고 있기 때문에 도달시간을 측정하면, 광속을 알고 있으므로 그 산란이 발생한 위치를 알 수 있다는 것이 OTDR의 원리이다. 동작원리로는 광파이버에 펄스광을 입사하여, 광파이버의 내부에서 유발되는 여러 가지 요인들에 의하여 Rayleigh, Raman 산란등이 일어난다. 이러한 산란광 중 에서 입사단으로 되돌아 오는 후방산란광의 세기변화를 입사후의 시간함수로 하여 측정함으로써 광파이버 내부의 전송손실분포, 장애점 등을 측정하는 방법이다. 그러므로 광파이버의 후방산란광계수, 손실 및 전송광의 편광상태등으로 피측정 물리량의 변화를 검출하는 것이 가능하다. 광파이버에 입사된 빛이 거리 l인 지점에서 다시 되돌아오는 시간 t는 다음식(2-1)과 같으며 c는 광속, n은 굴절률, v는 광파이버 내의 광속을 나타낸다.

$$t = \frac{2l}{v} = \frac{2nl}{c} \tag{2-1}$$

2.2 광학부 설계 및 제작

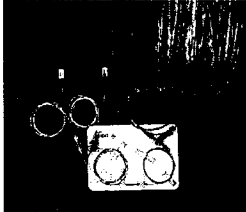
본 연구에서는 단일모드 광섬유를 사용한 OTDR시스템을 <그림2-1>과 같이 구성하여 설계 제작하였다.



<그림2-1> OTDR의 전체 구성도

OTDR시스템을 구성하기 위해서는 광원부와 수광부 그리고 피측정 광섬유와 접속을 위한 광결합부가 필요하다. 본 연구에서 설계 제작한 광원부는 단일모드 광섬유용으로서 파장 1310nm의 LD(laser diode)를 펄스로 구동하는 방법으로 향후 1550nm나 다중모드 광섬유용의

850nm 파장을 사용할 경우에는 광학부의 모듈만 따로 제작하여 사용하면 된다. 광섬유를 진단하기 위해서 LD를 매우 짧은 펄스 주기로 고속의 반복 주파수를 이용하여 구동시키는 것이 필수적이다. 이러한 펄스를 발생시키기 위해 설계 제작된 펄스 공급기는 진류 스위칭 소자로 고속의 SCR을 이용하였으며 출력광 형태는 펄스발생기의 Duty Cycle에 의해 정해진다. 실제 시작품에서 사용한 NEC NDL5672P의 LD출력은 Fiber coupling power가 약 -11.7dBm으로 약 66 $\mu$ W이다. 펄스발생기의 출력으로 펄스폭이 100ns이고 진폭이 5V일 때 광출력은 약 -17dBm(16.2 $\mu$ W)정도가 된다. 광출력의 여러 가지 값을 분석하여 최적의 측정거리별 입력 조건을 선정하였으며 LD의 펄스폭(Pulse width)은 장거리 측정시에는 크게, 단거리 측정시에는 짧게 설정하였다. 본 연구에서는 측정거리별 크게 2, 5, 10, 40km로, 4개의 길이로 분류하고 펄스폭을 이에 상응하도록 설계하여 시험 시스템을 구성하였으며 펄스폭을 1000ns인 경우 최대 200km까지 측정가능하므로 최대 측정 거리를 40km로 설정하였다. OTDR시스템은 일반적으로 사용 파장에 따라 최대 측정거리가 정해지는데 1.3 $\mu$ m대의 파장을 사용할 경우 최대 측정거리가 160km 정도이고 1.55 $\mu$ m에서는 240km이다. 또한 다중모드용인 0.85 $\mu$ m에서는 최대 측정거리가 40km 또는 80km정도이다.

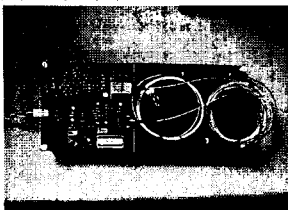


<그림2-2> 제작된 광결합 및 분리부

OTDR에서는 피측정 광섬유에서 되돌아오는 후방산란광(Rayleigh)이 광원부로 역입사되어 시스템의 성능을 저하시킬 우려가 있다. 따라서 이 경우 광원부에 Isolator를 사용하거나 Coupler에서 후방산란광이 광원부로 들어가지 않도록 설계하여야 하므로 본 연구에서는 출사비율이 50:50의 특성을 가지는 Coupler를 사용하였으며 <그림 2-2>은 본 연구에서 제작한 광학부의 사진이다.

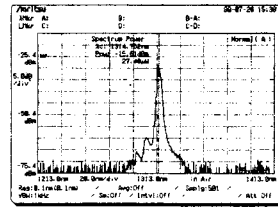
수광소자에는 PIN류와 APD류의 두 종류가 있는데 일반적으로 PIN류에 비해 APD류의 감도가 상대적으로 크고 응답속도가 빨라 수신 신호 검출에는 APD류가 많이 사용된다. APD는 신호 광전류에 대한 증폭작용을 가지고 있기 때문에 미약 광신호를 수신하는 광통신의 수광소자로서 필요한 것이다. 이 증폭작용은 애벌린치 증배 구조로 되어 있으며, 결정 재료로서는 0.8 $\mu$ m 대 및 0.7 $\mu$ m대 파장에는 Si가, 1 $\mu$ m대 파장에는 Ge, InGaAs, InGaAsP 등이 주로 이용된다. 광섬유 진단에 많이 사용되는 파장은 1310nm와 1550nm이다. 따라서 수광소자의 재질이 이 영역에서 동작되는 InGaAs계 APD를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 APD는 양자효율이 높고 응답속도가 빠른 NEC사의 NDL5553P 계열의 싱글모드 광섬유와 FC/PC형 콘넥터가 부착된 것이다.

<그림2-3>은 LD 구동회로와 APD의 수광부를 구성하여 실험용으로 제작한 것이다.

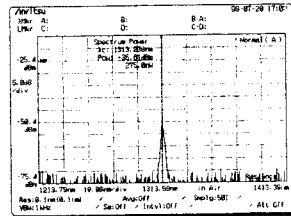


<그림2-3> LD 구동회로

그림<2-4>는 펄스폭이 100ns일 경우의 광출력 스펙트럼을 나타내었으며 후방산란광의 스펙트럼을 나타내었으며, 그림<2-5>는 그림<2-4>의 출력광을 약4.4km의 단일모드 광섬유에서 되돌아오는 후방산란광의 스펙트럼을 나타낸 것이다.



그림<2-3> 광출력스펙트럼(펄스폭 100ns)



그림<2-4> 후방산란광 스펙트럼(펄스폭 100ns)

## 2.2. 광신호처리부 설계 및 제작

단일모드 광섬유에서는 후방 산란광 신호가 매우 미약하기 때문에 SNR을 개선시키기 위해서 평균화(averaging) 기술이 필요하다. 디지털 신호 평균화(Digital Signal Averaging)은 신호를 왜곡시키지 않으면서 잡음으로부터 반복적인 신호를 분리할 수 있는 디지털 기법이다. 평균화법에는 단순평균, 하중평균, 이동평균, 지수평균법이 있다. 본 연구에서는 가장 일반적인 평균화기법인 단순평균법을 이용하여 평균화회로를 설계하고 구성하였다.

역산란된 광신호는 크기가 매우 작기 때문에 광펄스를 반복적으로 광섬유에 입사하고 되돌아오는 역산란광을 수광소자로 검출하고, 증폭한 후 A/D 변환한 후 측정거리, 거리 분해능 등에 관련하여 측정 지점의 전체수에 따라 수천번에서 수십만번 정도 디지털 신호 평균화 처리하여 일정값 이상의 데이터를 만든다. 따라서 평균화 장치는 매우 빠른 속도가 요구되는데 이러한 조건을 만족하기 위해서 회로소자의 수를 최소화하고 회로기판의 패턴 등에 대해서 신중히 고려하여야 한다.

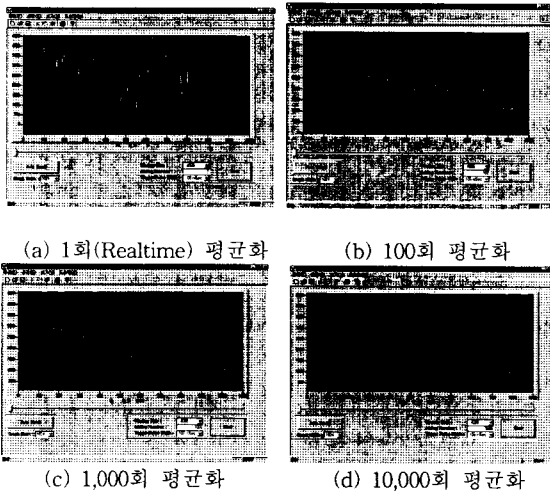
OTDR 측정기는 포실된 광섬유신호의 위치별 광손실을 측정하는 장비로서 광펄스 신호를 광섬유에 발사하여 되돌아온 반사파의 크기를 시간축상에 표시한다. 시간축상에 표시된 반사파의 크기는 결국 선로의 길이에 따른 광손실 분포를 표시하게 된다. 따라서 OTDR은 포실된 광선로상의 단락지점 또는 손상이 가해진 위치를 정확히 파악할 수 있게 한다. 본 시작품에서는 광선로 손실을 보다 정확히 측정하기 위하여 각종 회로상에서 발생하는 불규칙적인 노이즈를 제거하기 위한 방편으로서 반사파 광신호를 샘플링한 다음 최대 1만회까지 평균을 취하여 측정신호의 S/N비를 향상하도록 구성하였다. 보다 빠른 측정과 보다 정확한 측정의 두 가지 목적을 동시에 달성하기 위하여 리얼타임 합산기 및 이를 제어하는 디지털 신호처리용 CPU인 TMS320c31을 이용하여 설계 제작하였다.

퍼스널컴퓨터와 DSP-CPU BOARD 간에는 RS232에 의하여 데이터 통신을 수행한다. 측정을 위한 각종파라미터는 PC에서 DSP-CPU Board로 보내지고 DSP-CPU

Board는 이들 측정조건을 FPGA에 다시 전달하게 된다. FPGA에 명령어 전달된 시점부터 광펄스가 LD에 인가되고 광섬유에 전달된다. 광섬유에서 반사된 광신호는 PD에 의하여 전기적 신호로 변환되고 증폭되어 A/D 변환을 수행한다. 광펄스는 원하는 회수만큼 발생되고 이 숫자만큼 신호의 반사와 신호를 평균화하여 S/N비를 향상시키게 된다. 이들 평균화 작업은 FPGA와 고속메모리에 의하여 자동 수행되며 평균화작업이 수행되는 동안에는 DSP-CPU는 별개의 작업을 독립적으로 수행할 수 있게 된다.

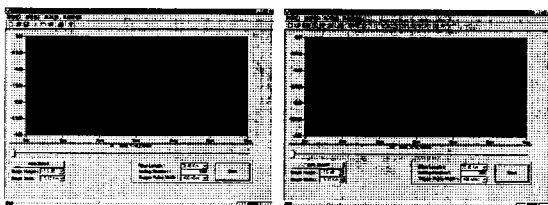
## 2.2. 실험 결과 및 고찰

위에서 설명한 각각 LD 및 APD 모듈과 광신호처리부를 전체적으로 구성하여 실험하고 그 결과를 분석하였다. 먼저 LD를 구동하는 펄스형 신호를 CPU Board에서 발생시키고 S/W에서 측정거리에 따라 펄스폭을 제어할 수 있도록 하였다. 다음 <그림2-5>는 4.3km의 광섬유를 평균화를 1, 100, 1000, 10000에 대한 각각의 출력화면으로 평균화수가 많을수록 특성(S/N)이 좋아짐을 알 수 있다. 일반적으로 OTDR의 평균화 수를 1000회로 하는데 이 경우 그 특성은 시스템으로서 충분한 특성을 보이고 있다.



<그림2-5> 평균화 수에 따른 OTDR 화면

또 <그림2-6>은 광섬유의 km당 손실을 측정한 결과인데 그림(a)는 1km 지점을 커서가 표시한 화면인데 이 때 손실은 약 -0.274dB이고, 그림(b)의 3km 지점 손실은 약 -0.793dB로 이 때의 손실은 0.235dB가 된다. 이러한 현상은 초기치에 대한 설정이 약간 부정확하다고 할 수 있다. 또 사용한 단일모드 광섬유의 특성은 km당 0.195dB (1.51 $\mu$ m에서)로 나타나 있다. 실험 결과는 이 보다 손실이 약간 큰 것으로 나타나는데 향후 S/W적인 보상과 DSP에서의 보상을 거쳐 보다 특성이 우수한 시스템을 구현할 수 있을 것이다.



(a) 1km 지점에서의 손실 (b) 3km 지점에서의 손실  
<그림2-6> km당 손실 측정을 위한 각 지점별 손실

위의 결과는 시스템의 성능을 좀더 보완하여 상품화 연구를 계속하여 OTDR의 국산화뿐만 아니라 다른 광계측 분야에도 다양하게 적용되어 추진한다면 국내 광계측 산업에 크게 기여 할 것으로 기대된다. 특히 광신호가 더 미세하고 측정속도가 더 빠른 것을 요구하는 DTS(Distributed Temperature Sensor) 분야에 보다 적합하게 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 광섬유 진단용 시스템에 널리 사용되고 있는 Rayleigh 후방산란광을 이용하여 고장점 탐지를 위한 광계측시스템을 제작 실험하였다. 광원으로는 현재 통신용으로 널리 사용되고 있는 1310nm파장의 NEC사의 OTDR용 고속 펄스용 레이저 다이오드를 사용하였으며, CPU를 이용하여 펄스를 제어할 수 행하였다. 수광소자로서는 양자효율이 높고 응답속도가 빠른 NEC사의 NDL553P 계열의 FC/PC형 콘넥터가 부착된 APD를 이용하였으며 광섬유와 광원 수광부를 연결하기 위하여 2 $\times$ 2광커플러를 사용하였다. 광신호처리부에서는 후방산란된 광신호를 검출 증폭한 다음 디지털화하여 여러번 가산한 값을 최종적인 신호로 이용하였으며, 본 연구에서는 이러한 광신호처리부를 설계 제작하였다. 고속 신호처리부를 위하여 최근 각광받고 있는 FPGA를 사용하여 신호처리부를 구성하였으며, CPU는 디지털신호처리 전용의 TMS320C31 40MHz CPU를 채택하였고 각종 측정 파라메타의 제어 및 측정신호의 고속연산을 수행한다. 수집된 신호는 여러번의 가산을 거쳐 RS232C 통신을 통하여 PC로 전달되고 이 값을 화면에 표시하도록 하였다. 광계측시스템의 평균화가 1000회일 경우 시스템의 충분한 특성을 구할 수 있었으며 화면에서 설정한 분해능은 5m정도이다. 본 연구에서 광섬유 손실분포 및 장애점 탐지 기술을 이용하여 토목건축물의 안전진단 및 감시와 외부 침입자의 유무를 탐지할 수 있는 보안시스템으로의 응용이 가능하다.

※ 본 연구는 99년 산업자원부에서 시행한 공업기반기술 개발 사업의 연구비 지원으로 연구되었습니다.

## (참 고 문 헌)

1. Eric Udd, "Fiber Optic Sensors", SPIE Press, Vol.CR44, 1992.
2. Dieter Garus, Katerina Krebber, Ralf Hereth, "Distributed fibre optical sensors using Brillouin backscattering", Proc. SPIE, Vol.2510, pp.172-183, Sep. 1995.
3. Koh-ichi Aoyama, Kiyoshi Nakagawa, Takeshi Itoh, "Optical Time Domain Reflectometry in a Single-Mode Fiber", IEEE J. Quan. Elec., Vol.QE-17, No.6, June 1981.
4. R. B. Franks, W. Torruellas, and R. C. Youngquist, "Birefringent stress location sensor", Conf. Fibre Optic Sensors, Cannes, Proc. SPIE, Vol.586, pp.84-89, Nov. 1985.
5. R. I. MacDonald, "Frequency domain optical reflectometry", Appl. Opt. Vol.20, No.10, pp.1840-1844, 1981.
6. A.J. Rogers, "Polarization optical time domain reflectometry", Electron. Lett., Vol.16, No.13, pp.489-490, Jun. 1980.
7. A. J. Rogers, "Point and distributed polarimetric optical fibre sensors", Conf. Fibre Optic and Laser Sensors IV, Cambridge, Proc. SPIE, Vol. 718, pp.28-38, Sep. 1986.
8. J. N. Ross, "Measurement of magnetic field by POTDR", Electron Lett., Vol.17, No.17, pp.596-597. 1981.