Fiber 광통신 기술의 발전 동향

車 均 鉉 · 朴 鎭 雨
(고려대 전자전산공학과 교수//Virginia Tech. 전기과 Ph. D.)

■ 차 례 ■

1. 서 론
2. 기본이론
가. 광섬유 감쇠
나. 광섬유 분산
다. Bit Rate-Distance(B. L) Produst
3. 실제의 광통신 시스템
가. 제 1 세대 multimode Fiber 시스템
나. 제 2 세대 single-mode Fiber 시스템
4. 미래의 광통신시스템
가. 좁은 Spectral Linewidth(single Frequency) 레이저
나. Disperj ion-controlled Fiber
다. Coherent (Homodyne/Hererodyne) Optical Detection
5. 결 론

1 서 론

광fiber를 이용한 신호 전달의 가능성이 예견된 1966[1] 이후, 새로운 광소재 개발과 광신호처리 기술 등에 많은 연구·발전이 70년대에 이루어져 80년대 초에 세계적으로 실용화가 되었다. 최근 몇 년에 걸쳐 급격히 증가되고 있는 고속·고 정보량 처리 통신의 수요에 가장 적합한 통신 방법으로 인식되어 지고 있고, 광대역 ISDN(종합 정보 통신망)과 영상 신호 전송, 그리고 해저 광 케이블에 의한 대륙 간 장거리 통신이 가까운 장래에 이루어지리라 예상된다.

본론에서는 정보 통신의 주된 방식인 디지탈 통신을 위한 광파 시스템에 촛점을 맞추어, 광전자 소재의 개발에 따른 광시스템 발전 구분 방법에 의해, 실용화되어 있는 제 I 세대 광시스템(850nm 파장에서의 multimode fiber 시스템) 그리고 실용화가 추진되고 있는 제 2 세대 광시스템(1300nm에서의 single mode fiber 시스템)에 대해 간략히 소개하고, 아직은 실험단계에 머물고 있지만 기존 광 통신보다 보다 많은 가능성을 보여 주고 있는 그 다음 세대를 위한 광 통신 기술에 대해 기술한다.

2 기본 이론

가장 기본적인 디지탈 광통신 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 근본적인 변조 방식은 binary intensity 변조로서 on-off keying (OOK) 방식이다.

그림 1에서 보여진 기본적 시스템 link는 Km fiber에 의해 송신기와 수신기가 연결되어 하나의 독자적 광통신 시스템을 이룰 수 있고, 또는 중계기의 사용으로 몇 개의 link가 종속적으로 연결되어 장거리 통신 link 또는 성형(星形) 연

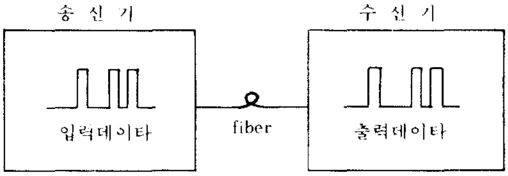

그림 1 기본적인 digital 광통신 link

결을 통해 광통신망을 구성할 수 있다. 디지탈 광시스템의 성능은 그림 1에서 보여진 기본적 link에서의 bit error rate(BER)로써 특징질 수 있으며, 실용적인 시스템에서는 BER ≦ 10^{-9}의 조건이 요구되어 진다.

가. 광섬유 감쇠

광 fiber 안으로 진입된 광신호는 수십 내지 수백 km의 거리를 지나게 되면서 fiber의 산란 및 흡수의 물질적 특성에 의해 신호의 세기가 감쇠된다. 이런 감쇠현상은 광통신의 유효거리 즉 송신기와 수신기간의 거리 또는 중계기간의 거리를 제한하는 가장 중요한 요소이다. 초기단계의 약 5000dB/km fiber 감쇠에서, 현재에는 0.2dB/km의 극히 낮은 fiber의 통신선로손실도를 이룩하여 기존 통신시스템인 동축케이블통신 또는 microwave radio통신에 대비한 우월성을 대표하고 있다.

그림 2에서는 주 응용 주파수 대역인 800~1800mm에서의 fused Silica fiber의 감쇠 특성을 보여주고 있다. 그림에서 곡선의 불연속은 multimode fiber 사용에서 single-mode fiber 사용경향에 따른 fiber감쇠의 차이를 나타낸다. 같은 파장대에서 single-mode fiber의 손실이 multimode fiber의 손실보다 작은이유는, single-mode fiber의 core의 doping density가 비교적 낮아 Rayleigh산란 손실이 줄어들었기 때문이다[2]. fused silica fiber의 감쇠특성에서 특징적인 것은, 1300nm와 1550nm 부근에서 fiber 손실은 기존 광시스템에서 쓰여진 850nm 에서의 손실보다 훨씬 작음을 보여주고 있어 fiber

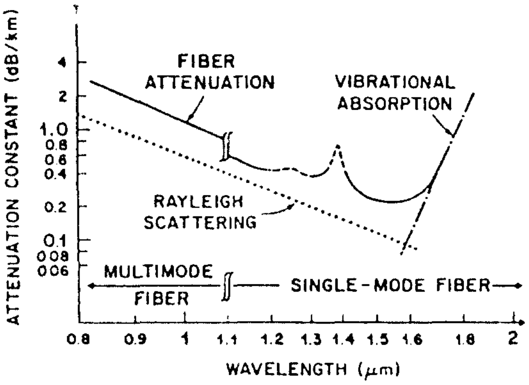

그림 2 주파수에 따른 Silica fiber의 감쇠특성 곡선

광통신 발전경향을 예측할 수 있다.

나. 광섬유 분산

Fiber 안을 진파해가는 펄스신호는 거리의 증가에 따라 펄스가 축방향으로 분산되어 인접한 펄스간에 중첩현상을 일으킨다. 이 현상은 입력 digital data의 bit rate가 증가할수록 BER를 증가시켜 고속통신에 장애가 된다. 이런 현상은 fiber의 low-pass filtering효과로 설명할 수 있고, 종류로는 modal분산, 재료(material) 분산, 그리고 wave guide 분산이 있다. 이런 분산효과는 송신기의 광출력을 증가시킴으로써 상쇄시킬 수 있는데, 이것을 분산 penalty라고 한다. 일반적으로, 분산 penalty가 어느 정도 작은 범위(≦ 1dB)에서 시스템이 작동되도록 설계되어야 되고, 이 범위를 만족시키는 시스템의 fiber의 최대 길이를 dispersion-limited 거리라고 한다.

다. Bit Rate-Distance(B·L) Product

어떤 digital통신 link의 전체적 성능을 특징지울 수 있는 한 가지 방법은 link의 정보 반송용량(information-carrying capacity)이다. 이 능력을 bit rate(B)와 송신기와 수신기간의 거리(L)의 곱으로 주어지고, 이 양은 서로 다른 link를 비교하는데 유용하게 이용된다.

3 실재의 광통신 시스템

가. 제 1 세대 multi mode Fiber시스템

850nm파장에서 multimode fiber를 사용하는, 80년대 초부터 널리 실용화된 광통신 시스템이 제 1 세대 시스템에 속한다. 대표적인 예로는 1983년에 서비스를 시작한 AT & T의 FT 3 C 시스템을 들 수 있다[3]. 이 시스템에서는 wavelength division multiplexing (WDM)방식으로 3개의 90 Mbps의 신호가 하나의 fiber에 의해 전달되며, 한 케이블에 144개의 fiber가 내장되어 있어 64Kbps의 digital channel 24×10^4개를 수용할 수 있다.

제 1 세대 시스템에서 사용되는 multimode fiber는 Core지름이 약 50μm로, 제작시 허용오차가 비교적 크며 fiber의 splicing이 용이하다. AlGaAs레이저나 LED가 850nm의 광원으로 쓰이며, Si p-i-n diode, 또는 Si avalanche photodiode (APD)가 광검출기 (dector) 로 사용된다.

850nm에서 fiber의 전형적인 감쇠는 약 2.5dB/km이다. Si·APD를 광검출기로 사용하는 경우 10^{-9} BER를 위해 300개의 photon이 bit 당 검출되어야 하며, 송신기의 광출력은 1 mW 로 가정한다면 한 bit를 검출하기 위해 필요한 수신기의 광신호 입력은 약 $7\times10^{-14}\cdot$B mW이다. 그러므로, 수신기의 성능에 따라 시스템의 B (bit rate)가 결정되어진다. 제 1 세대 광시스템에서 fiber분산에 의한 정보 반송 용량 한계는, graded index fiber를 사용하는 경우, 4 G bps·km의 B·L product가 이론적으로 가능하고 실재로는 2 G bps·km가 가능하다[4].

나. 제 2 세대 Single-mode Fiber 시스템

새로운 기술의 축적으로 보다 긴 파장, 1300 nm에서의 작은 fiber 감쇠(약 0.6dB/km)와 Single-mode fiber의 사용에 의해 fiber의 model 분산 현상을 제거하여, 제 1 세대이후의 새로운 소자들을 이용한 광시스템이 이루어졌다. 1300nm로 초기의 이전과정에서는 multimode fiber와 LED가 사용되어 장파장에서의 낮은 fiber감쇠특성만을 추구하여 성능면에서 레이저를 사용한 850nm시스템과 거의 동등하였다. 그러나, LED를 사용하므로써 송신기설계가 간단해지고, 낮은 경비로써 높은 시스템 신뢰도를 얻을 수 있었다. 이와같은 과도기적 1300nm multimode fiber 시스템을 거쳐 실제의 제 2 세대 광시스템에서는 single-mode fiber와 레이저를 사용하므로써 커다란 성능상의 발전을 이루게 된다.

Model 분산현상은 single-mode fiber에서 존재치 않으나, fused silica의 index of refraction의 주파수 의존성에 의해 생기는 재료분산현상이 두드러지며, 그 특성이 그림 3에 나타나 있다. 1300nm에서 재료분산이 최소가되지만, 실재의 광원은 중심파장발생에 어느 정도의 허용오차를 갖게 되기 때문에 single-mode fiber 시스템에서도 fiber 분산에 의한 한계를 고려해야만 한다. 전형적인 InGaAsP 레이저는 1300nm중심파장에서 약 10nm를 갖게되어, 그에 따른 시스템의 이론적 B·L product 한계는 약 250Gbps·km이다.

1300nm의 제 2 세대시스템에서는 특히 새로운, 장파장에서 사용이 가능한 광소자 개발이 수행되었다. core크기가 작은 single-mode Fiber를 사용하기 때문에 레이저로부터의 광 co-

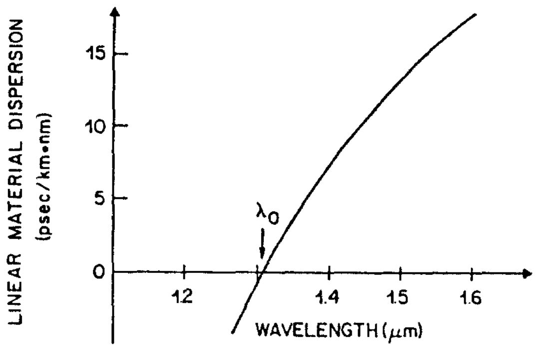

그림 3 Single-mode fiber의 주파수에 따른 재료 분산특성 곡선, 그림에서 λ_0는 1,300nm의 값을 갖는다

upling효율을 높이기 위해 LED보다는 반도체 레이저 사용이 거의 필연적이며, 광원 잡음이 원인이 되는 side transverse mode를 제어하기 위한 buried heterostructure와 channeled substrate 타입의 반도체 레이저가 개발되었다. 또한 1300nm의 장파장에서는 silicon 검출기가 사용될 수 없으므로, InGaAs p-i-n diode 와 Ge APD가 연구·개발되었다. 높은 감도를 가진 Ge APD가 많은 경우에 쓰이고 있으며, heterojunction타입의 InGaAs APD에 대해 연구가 진행되고 있다[5].

1300nm시스템의 실용 예로써는 AT & T의 SL 해저 광통신 케이블 시스템[6]과 NTT의 F-400M 시스템[7]등이 있다.

4 미래의 광통신 시스템

많은 분야에서 다양한 연구가 진행되고 있는 시점에서 현재 광통신 기술 이후의 발전 경향을 예측하기는 매우 어려운 일이나, 그 중 실험단계이지만 실질적으로 가능성이 인정되고 있는 세 가지의 다음 세대 광통신을 위한 연구를 간략히 소개하고자 한다.

첫 두가지는 Silica fiber의 가장 낮은 감쇠를 갖는 1550nm 파장 대에서의 연구이며, 마지막 것은 현대의 발전된 디지탈 통신 기법의 광통신에서의 적용에 대한 연구이다.

보다 긴 파장(≥ 2 μm)에서 새로운 재료의 fiber를 사용함으로써 극히 낮은 fiber 감쇠(약 0.0001dB/km)가 기록되었으나[8], 2 μm 이상의 파장 대에서는 현 광통신 기술의 전반적인 변화를 요구하여 가까운 미래에 실현될 가능성이 낮다는 점에서 이 란에서 제외되었다.

가. 좁은 Speciral Linewidth(Single Fregu Freguency) 레이저

기존의 레이저를 집적 변조시킬때 주파수 chirp에 의하여 Spectral line이 넓어지는 경향이 있고, 또한 기본 longitudinal mode 외에 수개의 single-mode를 발생시킨다. 반도체 레이저에서 하나의 longitudinal mode(또는 하나의 freguency)를 얻는 방법으로, Febry-Perot structure를 사용하여 광 궤환(feedback)의 구성을 통해 특정한 하나의 mode 외의 다른 side-mode를 억제한다. 이제까지의 가장 성공적 예는 distributed feedback(CFB) 레이저이고, 그 외의 cleaved couple-cavity(C^3) 레이저 등이 연구되고 있다[9, 10].

나. Dispersion-Controlled Fiber

기본적인single-mode fiber에서의wave guide 분산효과는 무시할 수 있을 정도로 작지만, 특별히 설계된 fiber에서는 negative sign을 갖는 wave guide분산을 이용하여 positive sign 을 갖는 재료 분산과 상쇄시킬 수 있어 특정한 파장 영역에서 영 분산(zero-dispersion)을 얻을 수 있다[11].

이 상쇄 효과에 의해 multilayer 구조로 fiber를 설계할 경우 넓은 파장 영역에서의 낮은 fiber분산을 얻을 수 있거나, 두 개 이상의 파장 대에서 영(zero)에 가깝게 분산 효과를 줄일 수 있어 WDM 응용에 유용할 것이다.

다. Coherent(Homodyne/Heterodyne) Optical Detection

직접 검출(Direct Detection) 방식에서는 photo detector에서 광 펄스가 단순히 전기적 디지탈 신호로 변환되었으나 coherent detection 방식에서는 coherent 광 carrier의 크기, 주파수 그리고 위상의 변조를 이용하여 광통신 시스템의 성능을 한층 개선시키고 그에 따라 증가된 통신 거리와 정보통신량을 기대할 수 있다. 광 coherent방식은 radio 공학에서의 superheterodyne방식과 유사하다. 즉 carrier wave와 local oscillator wave가 합쳐져 photodiode에서 검출되면, 원래의 신호 정보는 composite wave에 실려져 있어 그것이 전기적 신호로 바뀌게 된다. 이 때 전기 신호는 본래의 빛의 주파수인 10^{14}Hz보다 훨씬 낮은 약 10^{9}Hz에 실려있게 되어, 기존 microwave공학에서 개발된 증폭, filter, 그리고 그 밖의 신호 처리 기술등이 그대로 전입될 수 있는 장점이 있다. 이런

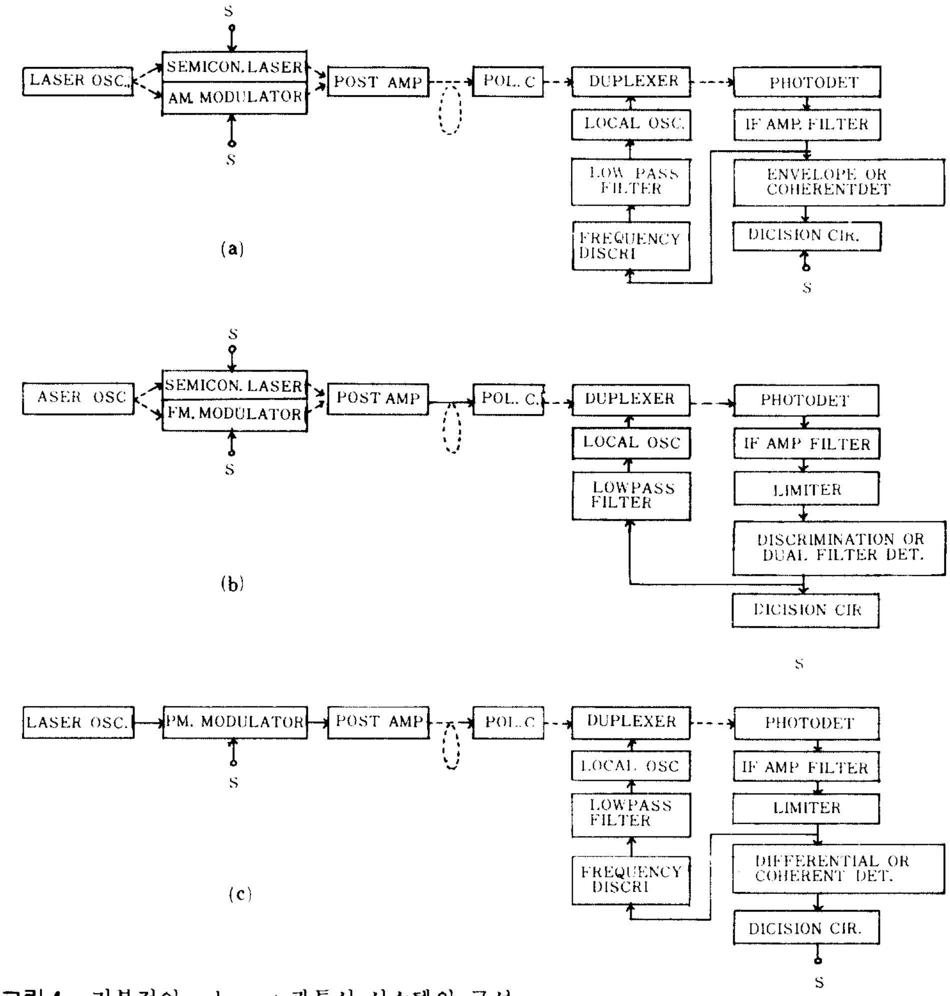

그림 4 기본적인 coherent 광통신 시스템의 구성
(a) ASK coherent 시스템 (b) FSK coherent 시스템 (c) PSK coherent 시스템
그림에서 POL. C는 polarization control 기구를 의미한다

방식에 의해 수신기의 감도와 파장 selection이 월등히 증가된다[12, 13].

Homodyne 수신기는 가장 감도가 높지만 국부 발진기가 광 phased-locked loop(PLL) 에 의하여 제어되어야 하기 때문에 가장 구성하기 어렵다. 반면에 heterodyne 수신기에서는 국부 발진기의 주파수가 입력 신호 주파수와는 의도적으로 달라야 하기 때문에 시스템 설계가 훨씬 용이할 것이다. 따라서 기술 발전의 흐름에 의해 homodyne 수신기보다는 heterdyne 수신기의 실현 가능성이 빠르리라 예상된다.

세가지 변조 방식인 ASK, FSK, PSK에 의한 coherent 시스템이 그림 4에 예시되어 있다. 각 방식의 송신기에서 이루어지는 광반송파의 기본대역 신호 변조는 레이저의 직접 변조에 의하거나 레이저와 분리되어 있는 광변조기에 의하여 이루어진다.

세가지 변조 방법에 따른 coherent 수신기의 감도가 표 I에 분류되어 있다. 유의할 점은 OOK에 의한 직접검출 방식에서 요구되는 10photon per bit는 이론치로서 실재의 시스템에서는 400~1000photon per bit가 실질적인 값으로 인정된다는 점이다. 이 점을 고려하면 coherent 수신기의 감도는 기존의 직접 검출 방식보다

표 1 이진(Binary) 수신기를 가정한, 변조방식에 따른 수신기의 sensitivity(photon per bit)

수신기 / 변조방식	Heterodyne	Homodyne	직접 검출
PSK	18	9	·
FSK	36	·	·
OOK	36	18	10

월등히 우수하며, 높은 bit rate가 요구될수록 coherent 수신기의 우월함이 더욱 뚜렷할 것이다.

coherent 통신 시스템을 실현하기 위해 해결되어야할 기술적인 문제는 레이저 주파수 안정, 단일 주파수 레이저 실현, fiber guide의 polarization-state 안정 또는 정정 가능 방법 등이다.

위에 언급한 기존 fiber 시스템과 예견되는 광시스템의 성능이 그림 5에 요약되어 있고, 동축 케이블 시스템과 비교되어 있다.

5 결　론

근래까지의 fiber광통신의 주된 역할은 장거리 통신망 또는 digital loop-carrier 시스템에 설치되어 있던 금속성 케이블의 우수한 경제적 대치에 그쳤으나 가까운 장래에 예상되는 광통신의 거의 무한한 정보 전달 능력 예측에 따라 새로운 사회 서어비스 분야가 고려되고 있다.

fiber 광통신의 응용은 두 가지 부문, 즉 육상통신과 해저 통신으로 분류할 수 있다. 육상 fiber 광통신에서 근간에 관심을 받는 분야는 ISDN으로서 새로운 정의의 광대역 ISDN를 탄생시키고 business에서 일반 주거 가입자에 고품질 digital 음성, 데이타, 영상 그리고 video 서어비스를 동시에 저렴한 가격으로 직접 공급할 수 있을 것으로 예상된다[14].

해저 fiber광통신은 육상통신과 다른 제약조건을 갖고 있어, 또 다른 분야로의 연구와 개발이 되고 있다. 깊은 해저에 광 케이블이 설치되어야 하기 때문에 수심 온도인 약 3℃에서 약

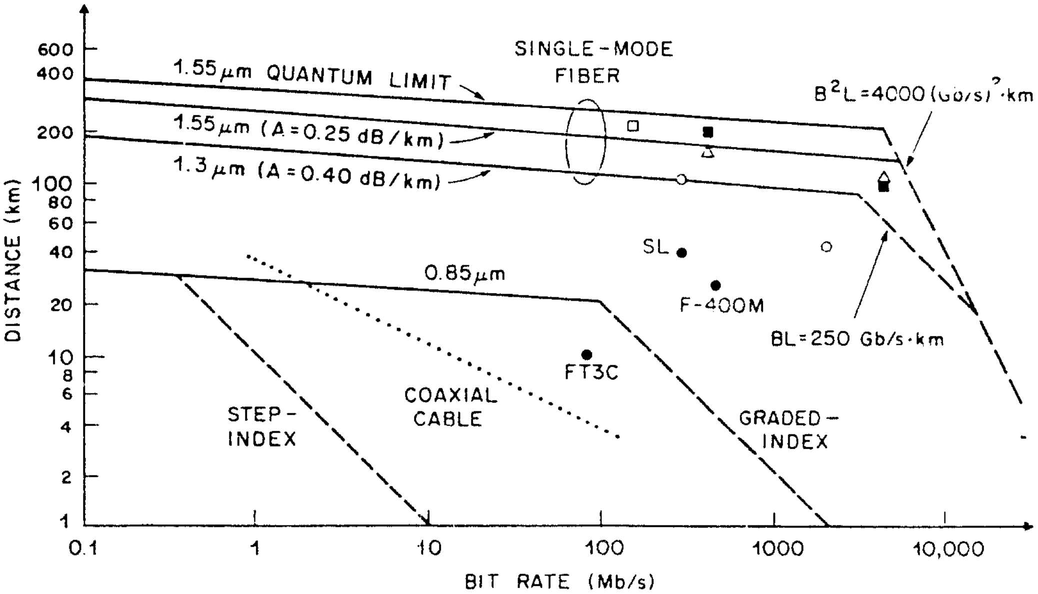

그림 5 여러가지 광기술의 중계기간의 거리와 bit rate에 대한 비교.
●는 실용화된 광시스템을 나타내며, ○는 1300nm의 주파수에서, 그밖에□는 1500nm에서 dispersion-controlled fiber를 사용하는 경우, ■는 1550nm에서 DFB레이저를 사용하는 경우, △는 1550nm에서 C^3레이저를 사용하는 경우의 예상시스템을 나타낸다

200Kpsi의 압력을 견디어야 하며, 높은 설치비와 수리비가 소요되므로 시스템의 긴 수명(약 25년), 신뢰성 그리고 장거리 중계기 간의 거리 실현이 중요한 요구 조건이다.

참 고 문 헌

1. C.K. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies." Proc. Inst. Elec. Eng., Vol.113. pp.1151-1158. 1966.
2. T. Li, "Structures, parameters and transmission properties of optical fibers," Proc. IEEE, Vol.68, pp.1175-1180. Oct. 1980.
3. J.R. Stauffer, "FT3C-A lightwave system for metropolitan and intercity application," IEEE. J. Select. Areas Commun., Vol.SAC-1, pp.413-419, April 1983.
4. L.G. Cohen. I.P. Kaminow, H.W. Astle and L.W. Stalz, "Profile dispersion effects on transmission bandwidth in graded index optical fibers, "IEEE J. Quantum Electron, Vol.QE-14, pp.37-41, Jan. 1978.
5. J.C. Campbell, A.G. Dentai, W.S. Holden, and B.L. Kasper, "High-performance avalanche photodiode with separate absorption (In GaAs), grading (InGaAsP) and multiplication (InP) regions," Electron. Lett.) Vol.19, pp.818-820, Sept. 1983.
6. S.M. Abbott, R.E. Wagner, and P.R. Trischitta, "SL undersea lightwave system experiments," in Conf. IEEE Int. Conf. Commun., Boston, MA, June 1983.
7. E. Iwahashi and H. Fukutomi, "F-400M system overview," Rev. Electron. Commun. Lab. Vol.31, pp.237-243, May 1983.
8. T. Miyashita and T. Manabe, "Infrared optical fibers," IEEE J. Quantum Electron., Vol.QE-18, pp.1432-1449, Oct. 1982.
9. V.J. Mazurak, N.S. Bergano, R.E. Wager, K.L. Walker, N.A. Olsson, L.G. Cohen, R.A. Logan, and J.C. Campbell, "420 Mb/s transmission through 203km using silica-core fiber and DFB laser," in Proc. 10th Eur. Conf. Opt. Commun., Stuttgart, West Germany, Sept., 1984.
10. W.T. Tsang, N.A. Olsson, and R.A. Logan, "High speed direct single-frequence modulation with large tuning rate and frequency excursion in cleaved-coupled-cavity semiconductor laser," Appl. Phys. Lett., Vol.42, pp.650-652, Apr. 1983.
11. T.D. Croft, J.E. Ritter, and V.A. Bhagavatula, "Low-loss dispersion-shifted single-mode fiber commun., San Diego,CA, Feb. 1985.
12. T. Okoshi, "Recent Progress in Heterodyne/Coherent Optical-Fiber Communication," IEEE J. Light Tech., Vol.LT-2, pp.341-346, Aug. 1984.
13. R.A. Linke and P.S. Henry, "Coherent optical detection: a thousand calls on one circuit," IEEE Spectrum, pp.52-57, Feb. 1987.
14. P.E. White, "The Broadband ISDN-The Next Generation Telecommunication Network," Conf. Record, ICC1986, June 1986.

車 均 鉉

朴 鎭 雨

저자약력

- 1939년 3월 26일생
- 1976. : 서울대학교에서 공학박사학위
- 1978~현재 : 고려대학교 전자전산 공학과 교수
- 1981. ~현재 : 공업진흥청표준심의위원

저자약력

- 1955년 7월 5일생.
- 1979. 2 : 고려대 전자공학과 학사
- 1983. 8 : 미국 Clemson University 대학원 전기·전자 공학 석사
- 1987. 11 : 미국 Virginia Polytechnic Institute and State University 대학원 전기·전자 공학 박사

♣ 용 어 해 설 ♣

● **비선형 산란**(nonlinear scattering) : 하나의 광자가 물질의 비선형 특성에 의해 하나 또는 여러 개의 다른 파장을 갖는 광자로 직접 변환하는 산란.

● **비선형 소자**(nonlinear element) 일반적으로 전압-전류 특성이 직선적이 아닌 소자로서 예를 들어 더어미스터, 바리스터, 다이오드, 트랜지스터 등은 비선형 소자라고 할 수 있다.

● **비접속 장치**(nonconnectable system) : 구내 교환기에서 국선과의 접속이 금지된 전용선이나 사설선 등을 수용할 경우 이들 회선과 국선을 접속할 수 없도록 하기 위한 장치.

● **비집중화**(non-centrlizing) 데이터 통신망 구성의 한 방법으로서 어느 한 국에 제어 기능을 독점시키지 않고 모든 국이 동일한 제어 기능을 가지도록 구성한 것.