

論 文

연쇄 접속된 단
분산특성^c

正會員 張 大 錫

A Study on the Chromatic Dispersion in the
Concatenated Single-Mode Optical Fibers

Dae Seok CHANG*, Sang Seol LEE** *Regular Members*

要 約 단일 모드 광섬유의 색분산은 단일 모드 광전송 시스템의 최대전송속도를 제한한다.

이 연구에서는 개별 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터로부터 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터를 이론적으로 계산하고, 이중 복조법에 의한 측정결과와 비교한다. 계산결과는 측정결과와 거의 일치하며, 영분산 파장의 표준편차는 0.77~1.28, nm 분산경도의 표준편차는 0.56~0.75 PS/km·nm²이며, 영분산 파장의 표준편차는 광섬유의 길이에 반비례함을 확인 하였다.

ABSTRACT Chromatic dispersion of single mode optical fibers limits the maximum bit rate in the single mode optical transmission systems.

In this paper we calculate chromatic dispersion and dispersion parametes(zero dispersion wavelength, dispersion slope) for concatenated single mode optical fibers from the chromatic dispersion and dispersion parameters of individual single mode optical fibers, and compare theoretical values with those measured by double demodulation method. Calculated values are coincident with measured ones reasonably. The standard deviation is 0.77-1.28 nm for zero dispersion wavelength and 0.56-0.75 PS/km·nm² for dispersion slope. The standard deviation of zero dispersion wavelength is inverse proportional to the optical fiber length.

I. 서 론

단일 모드 광섬유에서 전송손실 및 전송대역특성은 매우 중요한 특성들이다. 전송대역은 분산

특성에 의하여 제한을 받는데, 단일 모드 광섬유에서는 다중모드 광섬유에서 나타나는 모드분산이 없기 때문에 단일 모드 광섬유를 이용하여 광역 전송선로를 구성할 수 있다. 즉, 단일 모드 광섬유의 전송대역은 색분산에 의해서만 제한을 받는다.

장거리 광전송 시스템을 구성하기 위하여는 연쇄 접속된 광섬유의 분산특성을 정확히 평가해야 한다. 연쇄 접속된 광전송선로의 분산특성은 현장에서 측정할 수 있으나 시간이 많이

*群山水産專門大學 電子科
Kunsan National Fisheries Junior College

**漢陽大學校 電子通信工學科
Hanyang University

論文番號 : 88-47(接受 1988. 8. 5)

걸리고 비용이 많이 든다⁽¹⁾⁽²⁾. 따라서, 광전송 시스템을 설계할 때 장거리 광섬유의 분산 특성을 예측하는 일이 매우 중요하다.⁽³⁾⁽⁴⁾

광섬유의 분산특성은 광섬유의 비굴절율차 및 차단파장에 따라 변화한다.⁽⁵⁾ 또한 광섬유를 여러 개 연쇄적으로 접속하면 전송선로 전체의 분산특성은 변화하게 된다.

연쇄 접속된 광섬유의 전송대역특성들에 관하여 연구된 바 있다. ⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾ M, Ihashi⁽⁶⁾, T, tanifuji⁽⁷⁾, 및 P, M Rodhe⁽⁸⁾ 등은 다중 모드 광섬유의 전송대역특성을 해석하였고, T, Hoiguchi⁽⁹⁾는 단일 모드 광섬유의 분산특성에 관하여 변조된 레이저 다이오드를 이용한 측정법을 제시하였다.

이 연구에서는 실제의 경우 개별 광섬유의 영분산 파장(λ_{0i}) 및 분산경도(S_{0i})를 쉽게 측정할 수 있으나 연쇄 접속된 광섬유의 전체 영분산 파장(λ_0) 및 분산경도(S_0)는 측정하기 어려운 실정이므로, 개별 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터(영분산 파장 및 분산경도)의 측정결과로부터 장거리 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터를 계산하고, 이중 복조법에 의한 측정결과와 비교한다. 또한 영분산 파장 및 분산경도의 표준편차를 조사한다.

II. 분산특성

광섬유를 통하여 광펄스가 전송될 때 광섬유의 분산특성에 의하여 지연디스토션을 일으키게 된다. 이는 전송대역을 제한하는 요인이 된다.

분산에는 모드분산, 도파로분산, 및 재료분산 등이 있는데, 단일 모드 광섬유에서는 도파로분산 및 재료분산(이를 색분산이라 한다)만이 존재하여 전송대역을 제한한다. 이 색분산은 광원 스펙트럼의 파장에 비례하며, 보통 석영계 광섬유에서는 파장 1.3~1.4 μ m 대역에서 도파로분산과 재료분산의 크기는 거의 같고, 부호는 반대이므로 상쇄되어 색분산이 0으로 된다.⁽¹⁰⁾ 이 색분산이 0이므로 되는 파장(즉, 영분산파장)을 이용하면 고속통신을 할 수 있으므로, 광전송 시스템을 설계할 때 장거리 연쇄 접속된 광섬유의 분산특성을 정확히 평가 할 필요가 있다.

축 방향으로 균일한 구조를 갖는 2개의 단일 모드 광섬유에 대하여 각각의 길이, 단위 길이당의 군지연시간, 및 색분산을 각각 $L_1, L_2, \tau_1, \tau_2, D_1, D_2$ 라 한다. 2개의 광섬유를 접속하였을 때 합성된 군지연시간 및 색분산을 T 및 D라 하면 접속점에서의 광의 산란에 의한 영향이 없는 것으로 가정하여

$$T = L_1 \cdot \tau_1 + L_2 \cdot \tau_2 \quad (2-1)$$

로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

색분산 D는 정의에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = \frac{d}{d\lambda} \{T / (L_1 + L_2)\} \quad (2-2)$$

식(2-1)을 식(2-2)에 대입하면,

$$D = \frac{L_1 \cdot D_1 + L_2 \cdot D_2}{L_1 + L_2} \quad (2-3)$$

을 얻는다.

식(2-3)은 2개의 광섬유를 접속하였을 때의 색분산을 나타내는 식으로서, n개의 광섬유를 접속하면,

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot D_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (2-4)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 L_i 및 D_i 는 i번째 광섬유의 길이 및 색분산이며, D는 연쇄 접속된 광섬유의 유효 정규화 색분산이다.

i번째 광섬유의 파장에 따른 군지연시간 $T_i(\lambda)$ 는 다음과 같이 계산된다.⁽⁴⁾

$$T_i(\lambda) = \left\{ T_{0i} + \frac{S_{0i}}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_{0i}}{\lambda} \right)^2 \right\} \cdot L_i \quad (2-5)$$

여기서 T_{0i} 는 영분산 파장에서의 최소지연시간, S_{0i} 는 영분산 파장에서의 분산경도, λ_{0i} 는 영분산 파장이다.

색분산 D_i 는 파장에 대한 군지연시간의 미분이므로 다음과 같다.

$$D_i = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{S_{0i}}{4} \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_{0i}^4}{\lambda^3} \right) \cdot L_i \quad (2-6)$$

여기서 L은 광섬유 전체의 길이이다.

분산경도는 정의에 의하여 $S = \frac{dD}{d\lambda}$ 이므로, 이를 식(2-6)에 대입하면,

$$S = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n S_{0i} \left(1 + 3 \times \frac{\lambda_{0i}^4 \cdot \lambda^2}{\lambda^6} \right) \cdot L_i \quad (2-7)$$

으로 된다. 따라서 연쇄 접속된 광섬유의 분산경도 S_0 는 다음과 같이 나타낸다.

$$S_0 = \frac{dD}{d\lambda} \Big|_{\lambda=\lambda_{0i}} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot L_{0i} \quad (2-8)$$

또한 연쇄 접속된 광섬유의 영분산 파장 λ_0 는 다음과 같이 유도된다. 식 2-6에서 $D=0$ 이면 $\lambda=\lambda_0$ 이므로,

$$\frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{S_{0i}}{4} \left(\lambda_0 - \frac{\lambda_{0i}^4}{\lambda_0^3} \right) \cdot L_i = 0 \quad (2-9)$$

양변에 4L 및 λ_0^3 을 곱하면,

$$\sum_{i=1}^n S_{0i} (\lambda_0^4 - \lambda_{0i}^4) \cdot L_i = 0 \text{ 이므로}$$

$$\sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot \lambda_0^4 \cdot L_i = \sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot \lambda_{0i}^4 \cdot L_i$$

여기서 λ_0 는 i와 무관하므로,

$$\lambda_0^4 = \frac{\sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot \lambda_{0i}^4 \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot L_i} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{0i} \cdot \lambda_{0i}^4 \cdot L_i}{S_0 \cdot L}$$

따라서,

$$\lambda_0 = \left\{ \frac{1}{S_0 \cdot L} \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}^4 \cdot S_{0i} \cdot L_i \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2-10)$$

로 된다. 여기서 S_0 및 λ_0 는 색분산의 파라미터로서 색분산을 평가하는 주요척도가 된다.

III. 측 정

광섬유의 색분산은 군지연시간의 비분으로 나타내지므로, 파장차 $\Delta\lambda (= \lambda_2 - \lambda_1)$ 에 따른 군지연시간차 $\Delta\tau$ 를 측정함으로써 다음과 같이 구해질 수 있다. (10, 11)

$$D(\lambda) = \frac{d}{d\lambda} \tau(\lambda) \approx \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} \quad (3-1)$$

여기서 $D(\lambda)$ 는 파장 λ 에서의 단위 길이에 대한 색분산, $\tau(\lambda)$ 는 단위 길이에 대한 군지연시간이다.

그림 1은 이 연구에서 사용한 색분산 측정장치 CD3(영국EG&G사)의 계통도이다. (11, 12) 이는 광원 L.E.D, 모노크로매터, 검출기, 위상측정기, 발진기, 컴퓨터등으로 구성된다.

위상측정기는 수신된 고주파 광신호를 복조하고, 지연된 신호를 발생시켜 Lock-In Amp.에 공급한다. 저주파 발진기(434 Hz)는 참조 신호(reference signal)를 발생하여 모노크로매터에 의하여 선택된 파장을 조정하고 Roch In Amp.를 작동시킨다. 그림 2A와 같이 광파의 파장은 수

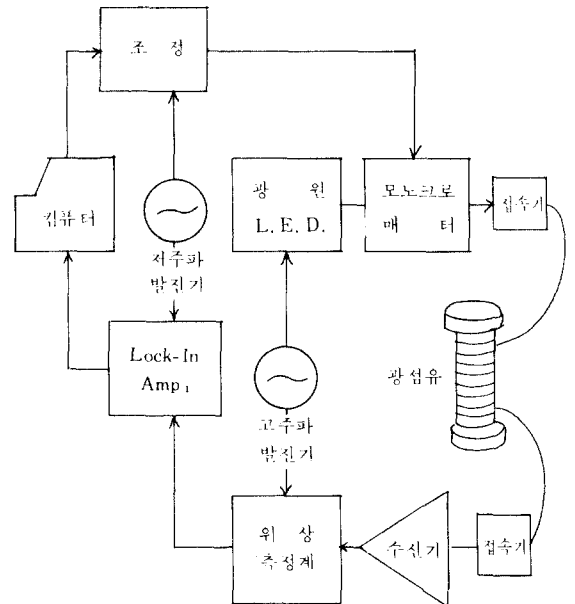


그림 1 색분산 측정장치 계통도
Block diagram of chromatic dispersion

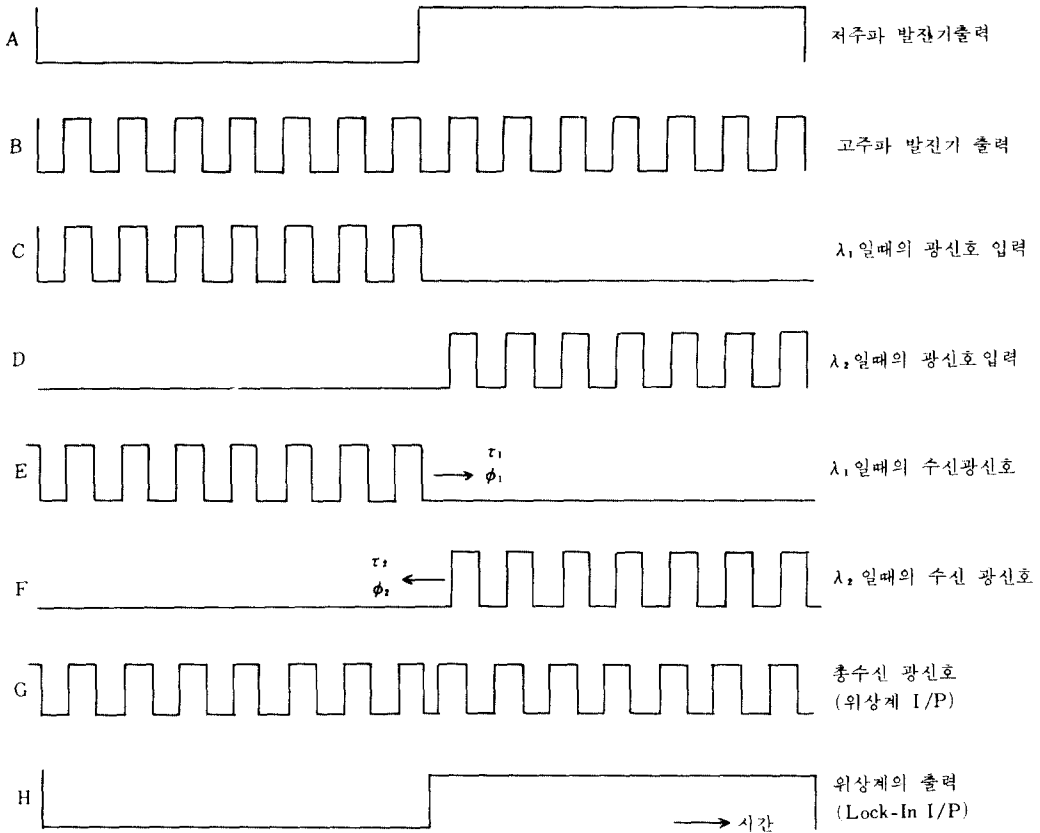


그림 2 이중 복조법의 시간 배분도
Timing diagram for double demodulation method

백 Hz의 낮은 주파수로 파장 λ_1 에서 λ_2 로 교체된다. 그림2에서 모든 파형은 이해하기 쉽게 하기 위하여 구형파로 나타내었다. 고주파 발진기 (50 MHz)는 그림2의 B와 같이. L,E,D의 출력을 진폭 변조한다. 저주파발진기와 동기시킴으로써 모노크로매터를 통하여 파장 λ_1, λ_2 의 광신호가 광섬유속에 들어가도록 선택한다(그림 C또는 D). 각 파장의 광파는 각각 ϕ_1, ϕ_2 의 위상차를 일으키게된다(그림 E,F). 수신기에 들어오는 광파는 이 두 신호의 합성으로된다. 따라서 수신기의 출력은 저주파 신호로 위상변조($\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$)된 고주파 신호로 된다(그림G), 위상 측정기는 각 순간의 위상을 측정하여 두 신호가 합성된 출력을 나타낸다. 그 하나는 참조신호에 대한 광섬유의 평균 위상 지연을 나타내는 직류레

벨이고, 다른 하나는 신호의 크기가 $\Delta T = \tau(\lambda_1) - \tau(\lambda_2)$ 에 비례하는 저주파동기신호이다(그림H) Lock-In Amp는 다시 이 변조된 신호를 검출하여 비례하는 균지연시간차를측정한다. 측정된 결과가 컴퓨터에 입력되어 다음 식에 따라 색분산이 얻어진다.

$$D(\lambda) = \frac{\Delta\phi}{2\pi f \cdot L \cdot \Delta\lambda} \quad (3-2)$$

여기서 f는 변주 주파수, L은 광섬유의 길이이다. 측정시료(단일 모드 광섬유)는 클래드를 순수한 석영으로 하고, 코아에는 GeO_2 를 도핑하고, $1.3\mu\text{m}$ 대역에서 영분산 조건이 만족되도록 M.C.V.D법으로 제조하였다.

그림3은 각 시료에 대한 색분산, 영분산파장 및 분산경도등을 측정한 결과이다.

식(2-4), 식(2-8) 및 식(2-10)의 타당성을 확인하기 위하여, 광섬유를 여러개접속하여 이루어진 연쇄 접속된 단일모드 광섬유들에 대하여 색분산, 영분산파장 및 파장경도등을 측정하였다. 광섬유는 자동 용착접속기(Fusion Splicer)

를 사용하여 접속하였다. 접속 손실은 평균 0.04 dB로서 무시할 수 있다.

그림 4는 길이를 달리하는 여러개의 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 구성표이다.

그림 4에서 보는 바와 같이, 광섬유의 길이는 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50km등의 근사값으로 선택하였다. 이는 평균 중계거리(30km)및 최대 중계거리(45km)를 고려한 것이다.

표 1은 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산, 영분산파장 및 분산경도등의 계산결과와 측정결과를 비교한 것이다. 표 1에서 색분산, 영분산파장 및 분산경도의 측정결과는 계산결과와 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터들을 직접 측정하지 않고 계산에 의하여 예측할 수 있다.

표2는 광섬유의 길이에 따른 영분산 파장 및 분산경도So의 표준치의 수치를 나타내며, 그림 5는 이들에 대한 그림을 나타낸다.

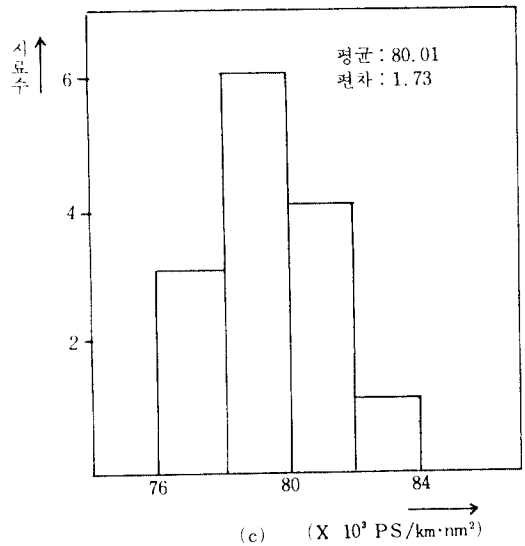
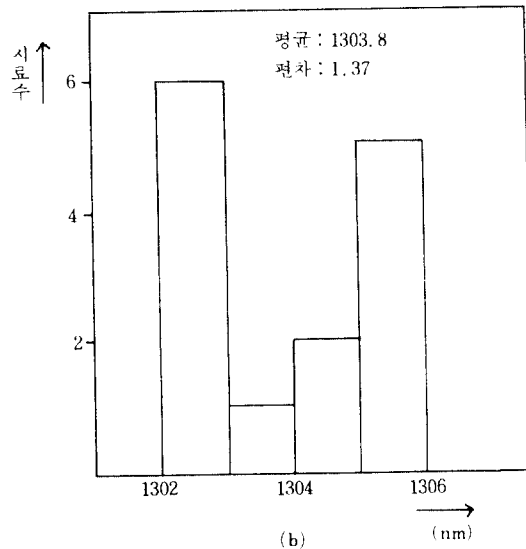
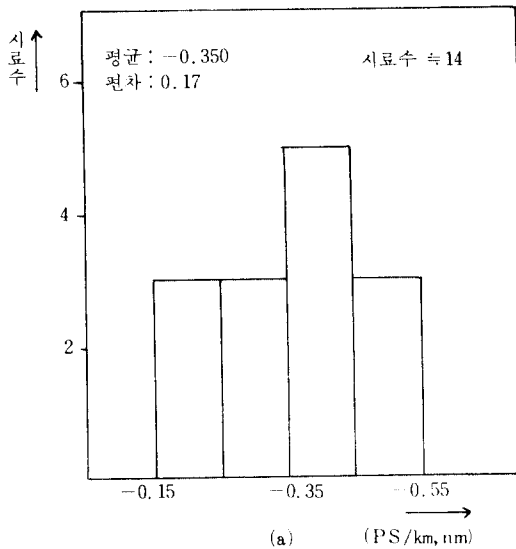


그림 3 Dispersion Measurements (Sample size=14)
 (a) Chromatic dispersion (b) zero dispersion waveleuth (c) dispersion slope

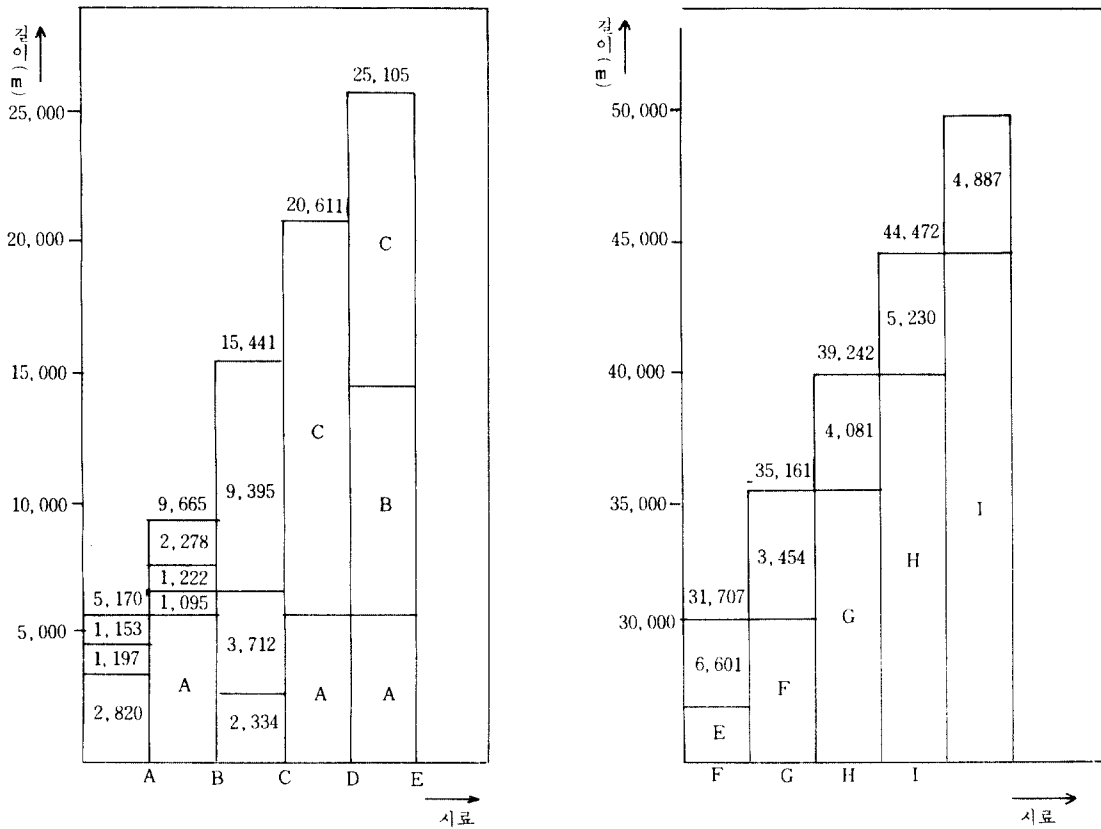


그림 4 연쇄 접속된 시료의 구성
Concatenation of single mode optical fibers

표 1 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 계산 및 측정결과 비교
Comparison of calculated and measured values in concatenated singlemode optical fibers.

시료(m)	D ($\lambda = 1300$) (PS/km·nm)		$S_0 \times 10^3$ (PS/km·nm ²)		λ_0 (nm)	
	계산치	측정치	계산치	측정치	계산치	측정치
5,170	-0.426	-0.475	79.59	79.47	1305.6	1305.4
9,665	-0.375	-0.386	80.31	80.11	1304.8	1304.2
15,441	-0.254	-0.278	80.58	80.71	1302.9	1302.3
20,611	-0.297	-0.329	77.84	77.13	1303.7	1304.0
25,105	-0.300	-0.327	78.25	78.90	1303.7	1303.7
31,707	-0.274	-0.294	79.30	78.36	1303.4	1303.5
35,161	-0.292	-0.308	79.48	78.50	1303.5	1303.6
39,242	-0.310	-0.315	79.46	77.25	1309.6	1304.0
44,472	-0.301	-3.30	79.54	74.30	1308.7	1303.9
49,359	-0.313	-0.378	78.12	75.66	1305.8	1304.7

표 2 λ_0 및 S_0 의 표준편차
Standard deviation of λ_0 and S_0

길이 (m)	δ_{λ_0} (nm)	δ_{s_0} ($\times 10^3$ PS/km nm ²)
15,441	1.28	0.75
31,707	0.92	0.61
49,359	0.77	0.56

參 考 文 獻

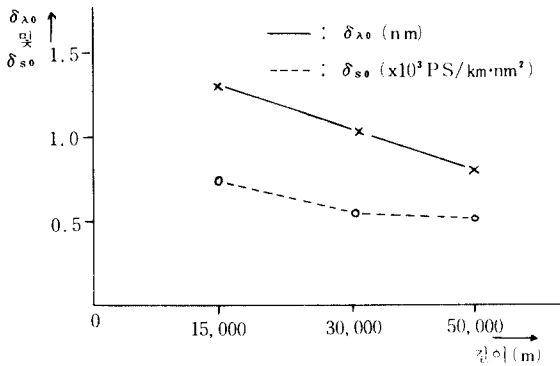


그림 5 광섬유의 길이의 변화에 따른 δ_{λ_0} 및 δ_{s_0}
Standard deviation of λ_0 and S_0 as fiber lengths

1. T. Horiguchi, M. Tokuda and Y. Negishi, "Chromatic Dispersion Measurements over a 50-Km Single-Mode-Fiber" IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LT-3, No.1, pp.51-54, 1985.
2. M. Ohashi, K. Kitayama and Y. Negishi, "Simple Approximations for Chromatic Dispersion in Single-Mode Fibers with Various Index Profiles" IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LT-3, No.1, pp.110-115, 1985.
3. T.C. Olson, F.P. Kapron and T.W. Geyer, "Describing Dispersion in Concatenated Single-Mode Fiber Cables" I.W.C.S., pp.276-281, 1984.
4. R.D.D.L. Iglesia and E.T. Azpitare, "Dispersion Statistics in Concatenated Single-Mode Fiber" IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LT-5, No.12, pp.1768-1772, 1987.
5. N. Imoto, et al, "Dispersion Characteristics of Single-Mode Optical Fibers" E.C.L.T.J., Vol.28, No.6, pp.963-979, 1979. (Japanese)
6. M. Ohashi, et al., "Mode Coupling at Arc-Fusion Splices in Graded Index Fibers" IEEE J. Quantum Electronics, Vol.QE-18, pp.274-279, 1982.
7. T. Tanifuji, "Exact Analysis of Intermodal Dispersion Compensation in Spliced Graded-Index Optical Fibers" IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, pp.844-850, 1982.
8. P.M. Rodhe, "The Bandwidth of a Multimode Fiber Chain" IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LT-3, No.1 pp.145-154, 1985.
9. Olshausky, R. and Keck, D.B., "Pulse Broadening in Graded Index Optical Fibers" Applied Optics, Vol.15, No.2, pp.483-491, 1976.
10. L.G. Cohen, "Comparison of Single-Mode-Fiber Dispersion Measurement Techniques" IEEE J. Lightwave Tech., Vol.LF3, No.5, pp.958-966, 1985.
11. A.J. Barlaw, et al., "Technique for Direct Measurement of Single-Mode Fiber Chromatic Dispersion" IEEE, J. Lightwave Tech., Vol.LT-5, No.9, pp.1207-1213, 1987.
12. EG&G, "CD3 Chromatic Dispersion System", 1987.

IV. 결 론

개별적인 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터의 측정결과로부터 장거리 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터를 계산하였다.

장거리 연쇄 접속된 단일 모드 광섬유의 색분산 및 분산 파라미터를 이중 복조법에 의하여 측정하였다.

위의 계산결과와 측정결과는 거의 일치한다.

영분산 파장의 표준편차는 0.77~1.28nm, 분산경도의 표준편차는 0.56~0.75 PS/km \cdot nm²이며, 영분산 파장의 표준편차는 광섬유의 길이에 반비례함을 확인하였다.

이 연구결과는 광전송 시스템을 설계하는데 유용하게 이용될 것이다.



張大錫(Dae Seok CHANG)正會員

1961年：漢陽大學校 電氣工學科(電子工學專攻)卒業
1983年：漢陽大學校 電子工學科卒業,工學碩士
1987年：漢陽大學校 電子通信工學科 博士課程修了
1961年：逓信部勤務 및 空軍通信將校
1966年：(株)金星社 技士
1971年：日本 日立 研究所 研修
1979年：金星電線研究所 責任研究員
現在：群山水產專門大學 電子科長



李相燾(Sang Seol LEE) 正會員

1937年 5月30日生

1961年：漢陽大學校電氣工學科 卒業
1966年：漢陽大學校大學院 工學碩士
1974年：延世大學校 大學院 工學博士
1976年：프랑스 그르노블大學 工學博士
1975年～現在：漢陽大電子通信科 教授