

單一 모드 光纖維의 길이에 따른 有效遮斷波長의 特性 測定

全永允 · 朴載東 · 沈昌燮

<Abstract>

The effective cutoff wavelength of LP_{11} mode is measured as a function of fiber length for three types of single-mode optical fiber which have different characteristics in the index profile or the coating structure. The measured cutoff wavelength decreased linearly in a logarithmic scale of fiber length as increasing fiber length, and eventually became constant after 3km for two fiber types. It is found that the length dependence of cutoff wavelength is due to a mode coupling between the LP_{01} and LP_{11} modes.

I. 서 론

광섬유의 저손실, 저분산 특성은 광섬유내에

한 모드만이 도파할 때 고속 및 긴 무중계 거리를 가지는 광통신시스템 운용에 그 특성을 최대한으로 이용할 수 있게 되며, 이때 한 모드만이 도파할 수 있는 조건을 나타내는 광섬유의 차단파장은 손실, 색분산 및 모드 필드 직경과 더불어 단일모드 광섬유의 특성을 규정하는 중요한 변수중의 하나이다. 이러한 단일모드 광전송시스템에서 사용되는 광섬유의 차단파장은 기본모드인 LP_{01} 모드를 제외한 고차모드가 도파할 수 없게 되는 최단 파장으로 정의되고 있다. 제1 고차모드 LP_{11} 모드를 포함한 고차모드들은 광섬유내에서 먼 거리까지 도파할 수 없으나, 이 모드의 존재는 고속 광통신으로 갈수록 분산이나 모달노이즈를 증가시키므로 각 광섬유의 유효차단파장을 정확히 측정하여야 한다. 이러한 차단파장은 광섬유의 제조 설계시 결정되는 이론적인 값과 제조된 광섬유가 갖는 유효차단파장이 서로 다르다. 유효차단파장은 이론치 보

다 작게 나타나는데 이는 광섬유의 구부림, 미분(differential) 모드손실, 유한한 크기를 가지는 클래딩 및 코팅 그리고 외적인 영향 등에 의하여 LP₁₁모드의 차단파장이 작아지기 때문이다. 그러므로 유효차단파장은 광섬유의 길이, 구조, 코팅, 그리고 케이블링 방식에 따라 변하는 정도가 달라진다고 알려져 있다.⁽¹⁻⁴⁾

광섬유의 유효차단파장 측정방법에는 여러가지가 있으며⁽⁵⁻⁷⁾, 알려진 측정방법들중 CCITT⁽⁸⁾에서 제안된 transmitted power 방식의 구부림 손실방법은 길이가 짧은 (2~5m) 샘플의 값으로 광섬유의 차단파장을 규정하고 있으므로 광통신에서 이용하는 긴 광섬유의 차단파장에 대해서는 언급하고 있지 않다. 실제 광섬유는 모두가 수 십 m 이상이고, 긴 광섬유의 차단파장을 기준길이의 값에 대해 선형적으로 적용할 수도 없다. 따라서 광섬유의 길이에 따른 차단파장의 변화로부터 시스템 운용에 허용될 수 있는 기준길이의 최대 차단파장 값을 알아야만 할 것이다. 그러므로 본 논문은 국내에서 제조 및 사용되고 있는 광섬유의 굴절률과 코팅방식이 다른 세 종류의 광섬유에 대한 차단파장의 길이의 의존성을 측정하는 한편, LP₁₁ 모드의 파장별 손실을 구하여 차단파장 측정치의 타당성을 살펴보고, 차단파장 측정방법 및 특성치의 표준화에 기여코자 한다.

II. 차단파장의 분석

1. 정의

차단파장(cutoff wavelength)은 LP₁₁ 모드의 도파가 불가능한 최단파장을 말하므로 차단파장 이상의 파장에서는 광섬유내에서의 기본 모드인 LP₀₁ 모드만이 존재하고 LP₁₁모드 이상의 고차 모드는 도파되지 못하고 사라진다. 계단형 굴절률 분포의 원형 단일모드 광섬유(step index circular single optical fiber)에서 기본모드만 도파 가능한 조건은 다음과 같다.

$$(2\pi a/\lambda) \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)} < 2.405 \dots\dots(1)$$

여기서 a는 코어반경, λ는 광원의 파장, n_{co}는 코어의 굴절률, n_{cl}은 클래딩의 굴절률이다. (1) 식으로부터 차단파장은 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda_c = (2\pi a/2.405) \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)} \dots\dots(2)$$

예를들면 코어반경이 4.5μm이고 굴절률차가 0.3%, 클래딩 굴절률이 1.4573 일때 LP₁₁ 모드의 차단파장은 1,330nm에 해당한다.

2. 유효차단파장

제조된 실제 광섬유나 케이블링된 광섬유의 차단파장을 유효차단파장이라고 하지만 일반적으로 차단파장이라 불리워지고 있다. 이러한 유효차단파장을 이론적인 고찰로부터 유도하기 위해 광섬유에 두 모드인 LP₀₁, LP₁₁ 모드만이 전송된다는 가정하에서 두 모드의 coupled power 방정식을 풀어보자. LP₀₁과 LP₁₁의 평균모드파워(average mode power) P_i(z)(i=1, 2)는 z=0에서 입력파워 P_i(0)(i=1, 2)와 두 모드의 산란행렬(scattering matrix) [s_{ij}](i, j=1, 2)으로 나타 낼 수 있다.⁽¹⁾

$$\begin{pmatrix} P_1(z) \\ P_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1(0) \\ P_2(0) \end{pmatrix} \dots\dots(3)$$

그리고 각 행렬항은 다음과 같이 정의된다.

$$s_{11} = (\cosh\eta z + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2\eta} \sinh\eta z) e^{-[(\alpha_1 + \alpha_2)/2 + h]z} \dots\dots(4)$$

$$s_{22} = (\cosh\eta z - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \sinh\eta z) e^{-[(\alpha_1 + \alpha_2)/2 + h]z} \dots\dots(5)$$

$$s_{12} = s_{21} = \frac{h}{\eta} \sinh\eta z e^{-[(\alpha_1 + \alpha_2)/2 + h]z} \dots\dots(6)$$

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)^2 + h^2} \dots\dots(7)$$

여기서 α_i(i=1, 2)는 두 모드의 각 손실계수에 해당하며, h는 모드결합계수(mode coupling

coefficient)이다.

구부림 방식에 의한 LP₁₁ 모드의 차단파장은 측정 광섬유에 대한 입사 조건을 일정하게 유지 하면서 구부림을 주기 전과 후의 출력 비율 r을 광섬유의 길이 L과 파장 λ의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$r(L, \lambda) = \frac{P_1(z) \exp(-\alpha'_1 L_b) + 2P_2(z) \exp(-\alpha'_2 L_b)}{P_1(z) + 2P_2(z)}$$

$$= \frac{(ks_{11} + s_{12}) \exp(-\alpha'_1 L_b) + 2(ks_{12} + s_{22}) \exp(-\alpha'_2 L_b)}{(ks_{11} + s_{12}) + 2(ks_{12} + s_{22})} \dots\dots(8)$$

여기서 α'_i(i=1, 2)는 두 모드의 구부림 손실계수, L_b는 구부린 부분의 광섬유의 길이, k(=P₁(0)/P₂(0))는 입력단에서 두 모드파워의 비율이다. LP₀₁은 2개의 편극상태로 이루어져 있고, LP₁₁모드에는 두개의 삼각함수꼴과 두개의 편극상태를 가지고 있다. 실제 측정에 있어서 다음 식을 만족할 때의 파장을 차단파장으로 하고 있다.

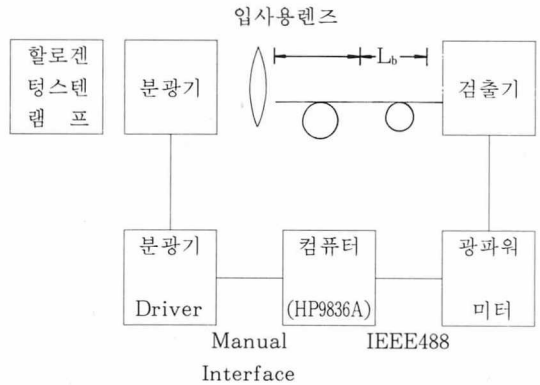
$$-10 \log r(L, \lambda_c) = 0.1\text{dB} \dots\dots(9)$$

III. 측정방법

1. 차단파장 측정방법

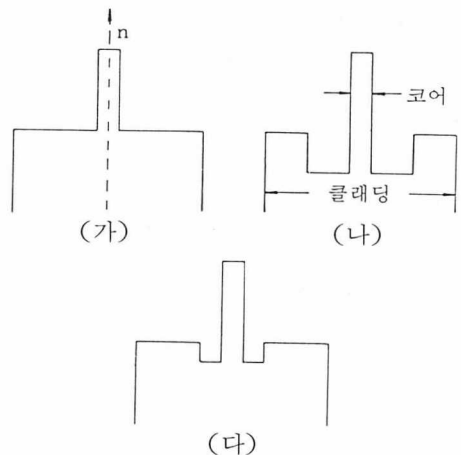
차단파장 측정방법에는 transmitted power 방식의 구부림손실 측정방법과 다중모드-단일모드 접속손실 측정방법 그리고 모드필드직경의 파장별변화 측정방법⁽⁶⁾ 등이 있으나 본 실험에서는 측정장치가 비교적 간편하고, 재현성이 좋은 구부림손실 측정방식을 사용하였다. 측정조건은 CCITT G652⁽⁸⁾ 권고안 및 KTA규격안⁽⁹⁾의 내용과 일치시켰으며, 사용된 측정장치의 개략도를 <그림 1>에 나타내었다. 그림에서 입사 광원은 할로젠-텅스텐 램프에 적외선 필터와 파장 분해능이 약 5nm인 모노크로미터를 지난 빛이었고, 수광각이 0.45인 입사용 렌즈로 광섬

유에 빛을 과도입사(over launching)시켜 광원에 의한 측정오차를 줄였다. 사용된 Ge 광검출기의 수신감도는 -80dBm(1,000nm 이하는 수신감도가 -90dBm인 Si 검출기 사용)으로써 긴 광섬유의 출력을 충분히 측정할 수 있었다.



<그림 1> 차단파장 측정의 개략도

한편 사용된 샘플은 matched 클래딩 굴절률 분포를 가진 2차 비닐 코팅형 '가'형 광섬유와 depressed 클래딩 굴절률분포를 가진 1차 코팅형 광섬유 '나'형과 matched 클래딩에 가까운 '다'형 광섬유였으며, '가', '다'형은 한 preform에서 제조된 광섬유였고, '나'형은 기준 길이 2m의 차단파장의 오차가 ±10nm인 광섬유를 사용하였다. 측정에 사용된 각 광섬유의 굴절률분포를 <그림 2>에 나타내었다.



<그림 2> 사용된 광섬유의 굴절률분포

2. LP₀₁과 LP₁₁모드의 파장별 손실 측정방법

두 모드의 파장별 손실은 두 모드가 존재하는 파장영역에서 구부림을 주었을 때 LP₁₁모드가 완전히 제거된다는 가정으로 측정 가능하다.⁽²⁾ 측정방법은 우선 구부림을 주어 LP₁₁모드를 제거하여 LP₀₁모드의 손실을 측정한다. 다음 두 모드의 전체 손실을 측정한 결과에서 LP₀₁ 모드 손실을 제외시켜 LP₁₁ 모드의 손실을 얻는다. LP₀₁모드의 손실계수 $\alpha_1 = \alpha_a$ 는 <그림 3>의 (a)와 같은 방법을 사용하며, 이때 구부림은 LP₁₁모드가 모두 사라지도록 입사단 근방에서 반경 1~2cm의 구부림을 주고 측정한다.

$$\alpha_a(\lambda) = -\frac{10}{L_1} \log \frac{P'_{10}(\lambda)}{P'_{11}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

두 모드가 결합된 손실 α_b 는 그림 (b)로부터

$$\alpha_b(\lambda) = -\frac{10}{L_2} \log \frac{P_{10}(\lambda) + P_{20}(\lambda)}{P_{11}(\lambda) + P_{21}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(11)$$

가 되며, (c)는 광섬유 끝단에 구부림을 주어 LP₁₁ 모드를 제거하였을 때의 손실로

$$\alpha_c(\lambda) = -\frac{10}{L_2} \log \frac{P_{10}(\lambda)}{P_{11}(\lambda) + P_{21}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

주어진다. 여기서(b), (c)에서는 입사조건이 동일해야 한다. 한편 LP₀₁ 모드의 손실은 P_{1i}과 P₁₀로도 표시할 수 있으므로 (10)식은 다음과 같이 된다.

$$\alpha_a(\lambda) = -\frac{10}{L_2} \log \frac{P_{20}(\lambda)}{P_{21}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(13)$$

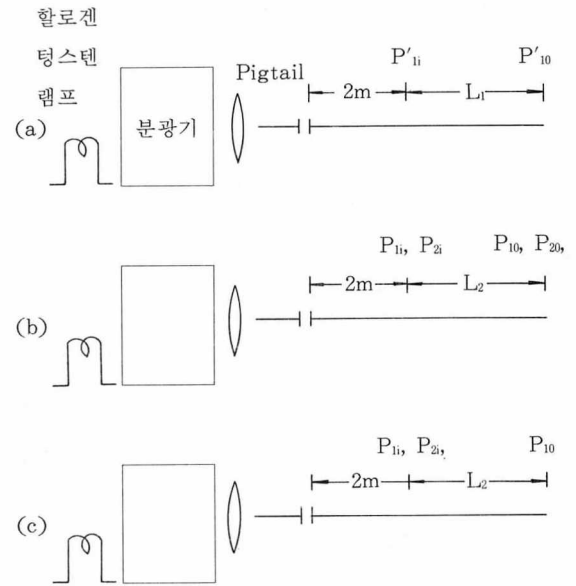
그리고 LP₁₁모드의 손실을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\alpha_2(\lambda) = -\frac{10}{L_2} \log \frac{P_{20}(\lambda)}{P_{21}(\lambda)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

따라서 α_2 는 위식들로부터 다음과 같이 된다.

$$\alpha_2(\lambda) = -\frac{10}{L_2} \log \frac{\frac{\alpha_1 L_2 / 10}{10} - \frac{-\alpha_1 L_2 / 10}{-10}}{\frac{-\alpha_1 L_2 / 10}{10} - \frac{-\alpha_1 L_2 / 10}{-10}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

α_1 과 α_2 는 (14)와 (15)식으로부터 구할 수 있을 것이다.



<그림 3> LP₀₁과 LP₁₁모드의 파장별 손실측정의 개략도

VI. 측정결과 및 검토

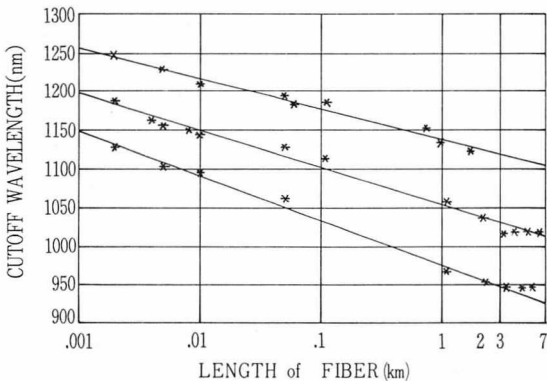
<그림 4>는 각 광섬유의 길이에 따른 차단파장의 변화를 나타내고 있다. '가'형의 샘플 중 4km까지는 접속점을 포함하지 않은 것이었으며, 5km는 4km + 1km, 6km는 4km + 2km를 각각 접속한 것이었다. 그리고 '나'형 광섬유의 3, 4, 5km도 역시 접속한 샘플들이었다. 한편 '다'형은 전체 길이가 2km인 광섬유를 잘라서 측정하였다.

<그림 4>에서의 실선은 다음과 같은 관계식에 최적화한 것이다.

$$\lambda_{ec}(L) = A \log(L) + B \quad \dots\dots\dots(16)$$

‘가’형 광섬유의 A = -48.19, B = 1201 이었고 ‘나’형의 경우는 A = -57.85, B = 1149이었다. 그리고 ‘다’형의 A = -39.91, B = 1257이었다.

CUTOFF WAVELENGTH vs LENGTH of FIBER

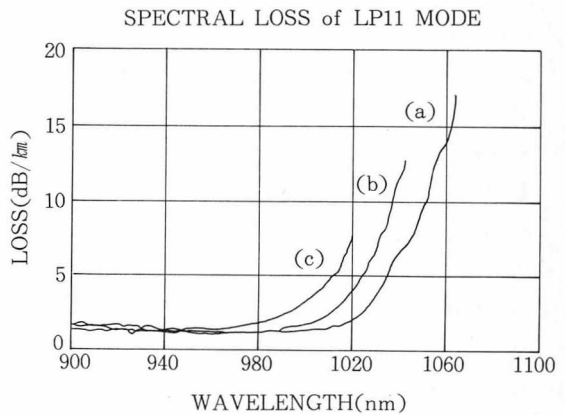


<그림 4> 광섬유의 길이에 따른 차단파장

<그림 4>에서 알 수 있는 바와 같이 광섬유의 구조와 코팅방식에 따라 차단파장 변화 정도가 다르게 나타나고 있다. ‘가’형과 ‘나’형은 각각 기준길이 2m에서 3km까지 약 170nm, 180nm 감소한 후 3km 이후에 일정하게 되었고, 최적화에 따른 ‘다’형은 3km까지 약 130nm 감소하였다. 이러한 현상은 각 광섬유의 코팅에 의한 random 미소구부림과 외적조건에 따라 LP₀₁, LP₁₁ 모드간의 결합으로 인하여 차단파장이 감소함을 보여준다. 즉, 각 광섬유에서 모드간 결합계수가 다르기 때문이다. 한편 ‘가’형은 굴절률분포가 matched형이기 때문에 차단파장의 작은 감소가 예상되나 제2차 비닐코팅의 random 미소구부림에 의해 감소가 크게 나타난 반면, ‘나’형은 depressed 구조로 인하여 ‘다’형 보다 크다고 여겨진다. 따라서 각 광섬유를 케이블링 할 경우 ‘나’형은 부가적인 차단파장의 감소가 발생할 것으로 생각된다. 그리고 ‘가’형은 비닐코팅, ‘나’형은 작은 depressed 때문에 케이블링을 하더라도 차단파장의 부가적인 감소가 매우 작을 것이고, ‘다’형은 두 광섬유에 비하여 모두 결합계수가 작아서 3km 이상까지 모드간 결합현상이

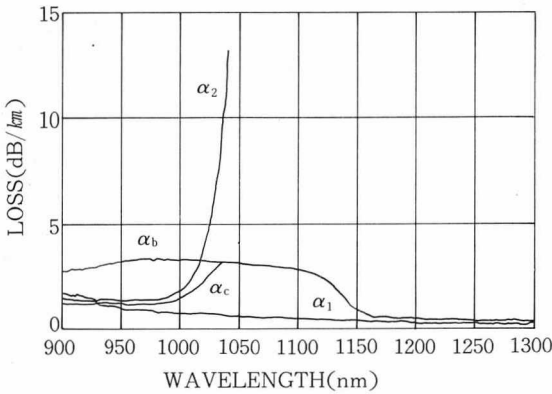
일어날 것이다. 3km 이후에 차단파장이 일정하게 된것은 LP₁₁모드가 도파되지 못함을 나타내며, 차단파장이 접속손실에 무관하였는데 이는 긴 접속 거리를 갖고 있기 때문으로 생각된다. 광케이블보수시 발생할 수 있는 짧은 거리(25m 이하)의 접속점을 포함할 경우는 보수용 광섬유의 차단파장과 접속손실에 따라 모달 잡음이나 색분산 잡음을 증가시키는 요인이 될 수 있으므로 보수용 광섬유를 가능한 기존의 광섬유와 동일한 특성을 가진 것을 사용해야 할 것이다.

III 장의 2절에 제시된 방법을 사용하여, ‘가’형 광섬유의 3 샘플에 대한 LP₁₁모드의 파장별손실을 측정하여 그 결과를 <그림 5>에 나타내었다. 각 샘플의 길이는 (a)가 1km, (b)는 2km 그리고 (c)는 3km였다. LP₁₁모드의 파장별 손실의 최대치들은 길이에 따라 다르게 나타나고 있으며, 이들은 각 샘플의 유효차단파장과 일치하고 있었다. 차단파장 이상에서는 LP₁₁모드의 손실이 무한대로서 LP₁₁모드가 도파할 수 없음을 나타낸다.



<그림 5> ‘가’형 광섬유의 LP₁₁모드의 길이에 따른 파장별손실

한편 <그림 6>은 2km ‘가’형 광섬유에 대한 α_1 , α_b , α_c , α_2 를 나타내고 α_c 의 최대 손실치가 2km 광섬유가 갖는 차단파장과 일치함을 알 수 있으며, 다른 광섬유들도 같은 경향을 보여주고 있었다.



〈그림 6〉 2km ‘가’형 광섬유의 $\alpha_1, \alpha_b, \alpha_c, \alpha_2$ 의 파장별 손실

이상에서 살펴본 바와 같이 광섬유의 구조와 코팅방식 그리고 광섬유의 길이에 따라 유효차단파장이 다르기 때문에 실제 긴 광섬유를 이용할 경우 각 조장에 대한 광섬유의 유효차단파장치 등이 제시되어야 할 것으로 여겨진다.

V. 결 론

단일모드 광섬유의 차단파장은 현재 기준길이 2m의 값으로 규정하고 있으나 실제 운용되고 있는 경우는 수 십 m 이상의 조장이 사용되고 있기 때문에 광섬유의 길이에 따른 차단파장도 중요한 요소가 되고 있다. 현재 국내에서 사용되는 광섬유의 구조 및 특성이 다르기 때문에 포설과 접속 및 보수시 어려움이 예상되므로 광섬유의 길이에 따른 특성에 대한 실제적인 측정값이 필요하게 되었다. 뿐만아니라 수 십 m의 광섬유를 보수하고자 할 때 기존의 광섬유와의 특성차이로 원치않는 신호의 찌그러짐이 나타날 수가 있기 때문에 차단파장의 길이특성을 측정하였다. 측정에 사용된 ‘가’와 ‘나’ 광섬유는 3 km 이후에 일정한 값에 이르고 있었다.

이때 기준길이에 대하여 ‘가’형은 약 170nm, ‘나’형은 약 180nm의 파장이 감소하였다. ‘다’형은 최적화의 결과 약 130nm 감소하였으나 모드결합계수가 두 광섬유에 비하여 작기 때문에 3 km보다 먼거리에서 LP₀₁모드만 도파할 수 있음

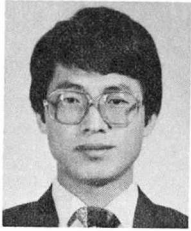
을 알았다. 또한 ‘나’형 광섬유는 depressed형 이기 때문에 ‘가’와 ‘다’형 보다 큰 변화를 보이고 있었는데 이것은 케이블링 후에도 차단파장의 큰 변화가 예상된다.

현재 KTA규격에 의하면 2m 기준길이의 차단파장이 1,100~1,330nm가 허용되고 있는데 길이에 따른 차단파장의 감소로 알 수 있는 바와 같이 1,300nm 광원의 파장보다 큰 1,330nm의 차단파장을 갖는 광섬유를 사용하더라도 수 십 m를 도파하게 되면 차단파장이 1,300nm이하로 감소할 것이므로 단일모드 전송이 가능하게 된다. 뿐만아니라 1,330nm이상의 차단파장을 갖는 광섬유를 이용할 수도 있음을 알 수 있었다. 하지만 광원의 파장 보다 차단파장이 클 경우 고차모드의 도파로 인하여 손실이 증가하고 모드잡음이 발생하여 신호의 찌그러짐이 발생할 수 있기 때문에 KTA규격에서 허용될 수 있는 최대치의 차단파장을 가지는 광섬유를 이용하여 고속광통신 시스템의 전송 특성을 측정해 보아야 할 것으로 여겨지며, 2m 기준길이의 차단파장과 더불어 케이블링된 긴 광섬유의 차단파장 측정결과도 시스템 운영에 필요한 변수가 될 수 있음을 알 수 있었다.

〈參考文獻〉

1. K. Kitayama, et al, "Length Dependence of Effective Cutoff Wavelength in Single Mode Fibers", *J. of Lightw. Tech.* LT-2(5), 1984, p.629.
2. M. Ohashi, et al, "LP₁₁ Mode Loss Measurements in the Two-mode Propagation Region of Optical Fibers", *Optics Lett.*, 9(7), 1984, p.303.
3. W. T. Enderson and T. A. Lenahan, "Length Dependence of the Effective Cutoff Wavelength in Single-mode Fibers", *J. of Lightw. Tech.*, LT-2(3), 1984, p.238.
4. Y. Kato, et al, "Effective Cutoff

- Wavelength of the LP₁₁ Mode in Single-mode Fiber Cables”, J. of Quantum Elec., QE-17(1), 1981, p.35.
5. D. L. Franzen, “Determining the Effective Cutoff Wavelength of Single-mode Fibers ; An Interlaboratory Comparison”, J. of Lightw. Tech., LT-3(1), 1985, p.128.
 6. 안종평, 단일모드 광섬유의 차단파장 측정, ETRI 기술메모, TM86-610-11-TI, 1986.
 7. K. A. H. van Leeuwen and H. T. Nijhuis, “Measurement of Higher-order Mode Attenuation in Single-mode Fibers : Effectivfe Cutoff Wavelength”, Optics Lett., 9(6), 1984, p.252.
 8. CCITT Recommendation G.652, 1984.
 9. 한국전기통신공사, 한국전기통신공사규격 케이블, 광섬유(장파장)규격번호, 통신 6145-3281-약”, 1984.



全永允 (Chun, Young Yun)

1959년 1월 5일생

- 1980.2 : 전남대학교 물리학과 학사
- 1983.2 : 전남대학교 물리학과 석사
- 1983.3~ : 한국전자통신연구소
- 1987.5. 현재 : 광통신시스템연구실, 연구원



朴載東 (Park, Jae Dong)

1959년 1월 12일생

- 1982.2 : 부산대학교 물리학과 학사
- 1985.2 : 한국과학기술원 물리학과 석사
- 1985.3~ : 한국전자통신연구소
- 1987.5. 현재 : 광통신시스템연구실, 연구원

沈昌燮 *23페이지 참조