

리본광케이블 유니트의 구부림 특성 연구

이병철 · 이영탁 · 김미경

한국통신 선로기술연구소

(1995년 5월 4일 받음)

광대역 종합통신망 구축을 위해서는 저손실 및 넓은 대역폭을 갖는 광섬유의 사용이 필수적이며, 또한 가입자까지 선로를 광케이블화 하기 위해서는 다심광케이블이 필요하다. 다심광케이블의 고밀도 실장 및 일괄접속을 만족하는 케이블 구조로는 리본광섬유를 실장 단위로 하는 리본광케이블구조가 있다. 그러나 리본광케이블은 리본광섬유가 폭을 가지고 있어 리본광케이블의 구부림시 광섬유 각각의 길이차에 의해 손실이 발생할 수 있기 때문에 유니트의 저장 및 제조상 주의가 필요하다. 본 연구에서는 리본광케이블 유니트의 구부림 반경에 따른 광섬유의 스트레인과 구부림반경을 이론적으로 계산하였고, 또한 손실의 원인인 측압을 계산하였다. 그리고 실험적으로 여러 유니트의 구부림반경에 따라 각 광섬유의 손실을 측정한 결과 이론적 분석 결과와 잘 부합됨을 알 수 있었다. 이 결과는 리본광케이블 제작시 리본광케이블 유니트의 보관 및 제조공정중에 사용할 릴의 적정 반경을 결정하는 것의 중요성을 보여 준다.

I. 서 론

과거 통신 선로에 주로 사용되었고, 지금도 사용되고 있는 동선(copper wire)에 비해 광섬유(optical fiber)는 넓은 대역폭(band width)과 저손실의 이점때문에 대용량, 장거리 전송에 유리하므로, 광케이블은 현재 시외망 및 국간에 주로 사용되고 있다. 그러나 광대역 종합정보통신망(B-ISDN) 구축을 위해서는 가입자 선로까지 많은 양의 정보를 전송할 수 있는 광케이블이 설치되어야 한다. 그런데 현재 가입자 구간의 광케이블 포설을 위한 통신관로는 한정적이고, 특히 시내 구간에 있어서는 포화상태에 이른 실정이며, 새로운 통신관로의 신설조차도 여의치 않은 상황이다. 따라서 시내 구간의 관로 폭주 현상에 대비하고 관로사용의 효율화를 위해서는 많은 수의 광섬유를 실장한 다심광케이블이 필요하다.

광케이블이 다심화 되면 케이블의 직경이 커지고, 접속할 광섬유가 많아지는 문제가 있다. 광케이블의 직경이 커지면 케이블의 허용 구부림 반경도 커져 운용상 많은 불편함이 따른다. 따라서 다심광케이블은 고밀도 실장이 가능하고 케이블의 직경이 작은 구조이어야 한다. 또한 접속할 광섬유가 많아지므로 접속시간의 절감을 위해 여러심의 광섬유를 일괄 접속할 수 있는 구조이어야 한다.

위의 요구사항을 만족하는 광케이블 구조는 단일심선

의 광섬유를 실장한 광케이블보다 리본광섬유를 실장한 리본광케이블이 유리하다. 리본광섬유는 단일심선의 광섬유들을 일렬로 배열하여 리본코팅물질로 코팅한 형태이다. 그런데 현재 국내에서 사용하고 있는 단일심선의 광섬유를 실장한 루즈튜브형 광케이블은 개개의 광섬유가 각각 독립적이기 때문에 구부림에 의한 영향이 비교적 크지 않다. 그러나 리본광케이블은 수개의 광섬유가 일렬로 배열되어 있는 리본광섬유를 실장하고 있어 광케이블이 구부림을 받으면 리본광섬유의 개개 광섬유들의 길이와 리본광섬유 중심의 길이 사이에 차이가 발생하는데 이로인해 손실이 발생할 수 있다.

이에 대해 일본에서는 이미 리본광케이블이 구부림을 받을 때, 이론적으로 리본광섬유의 스트레인을 계산하고, 실험적으로 광섬유의 전송손실을 측정한 바 있다.^[1] 그러나 광케이블이 구부림을 받을 때 발생하는 리본광섬유의 스트레인이 어떻게 손실을 일으키는 요인이 되는지에 대해서는 명확히 하고 있지 않다.

본 고에서는 리본광케이블의 기본 구성요소인 유니트가 구부림을 받을 때 리본광섬유의 스트레인과 구부림반경을 이론적으로 계산하였으며, 이 둘의 관계에 의해 리본광섬유에 가해지는 측압도 계산하였다. 이 측압이 광섬유의 손실을 증가시키는 요인이다. 또한 실제로 유니트 구부림반경에 따른 광섬유의 손실을 측정함으로써 그 결과가 본 고의 이론적 분석과 잘 부합됨을 알 수

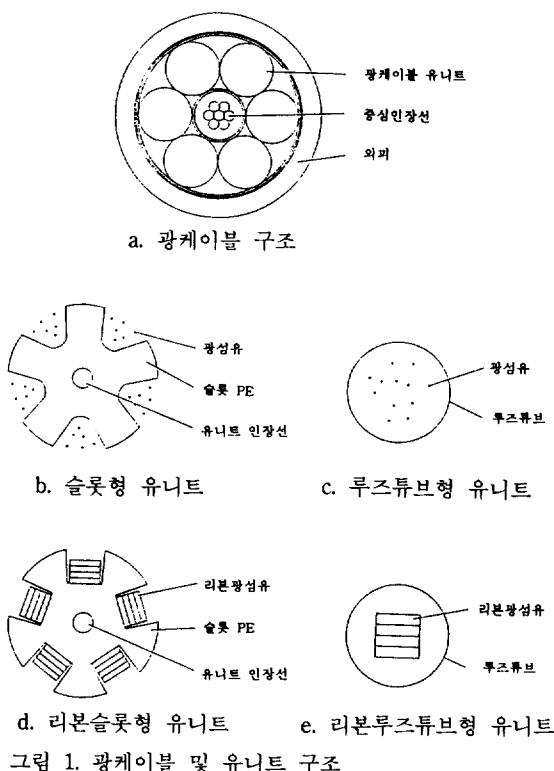


그림 1. 광케이블 및 유니트 구조
있었다. 위의 결과를 이용해 유니트 보관 및 제조 공정상 유니트를 감는 릴의 적정 구부림반경을 결정하는 방법에 대해서도 언급하였다.

II. 리본광케이블 유니트 구조

일반적인 광케이블의 구조는 광섬유를 실장하고 있는 광케이블 유니트가 케이블의 중심인장선 주위에 스트랜딩되어 있는 구조로서 그림 1의 a와 같다. 이때 광케이블 유니트의 구조는 크게 단일심선의 광섬유를 실장하는 구조와 리본광섬유를 실장하는 구조로 나눌 수 있다. 단일심선의 광섬유를 실장하는 구조는 슬롯형과 루즈튜브형이 있고 각각의 구조는 그림 1의 b, c와 같다. 현재 국내에서 주로 사용하는 광케이블 구조는 루즈튜브형으로 적은 심선수에 알맞는 구조이다. 리본광섬유를 실장하는 구조로는 리본슬롯형과 리본루즈튜브형이 있는데 각각의 구조는 그림 1의 d, e와 같다. 세계적으로 주로 사용하고 있는 다심광케이블 구조는 리본슬롯형 구조로서 본 고에서도 리본슬롯형 유니트 구조에 대한 구부림 특성을 연구하였다.

그리고 리본슬롯형 유니트는 한 유니트에 한 개 또는

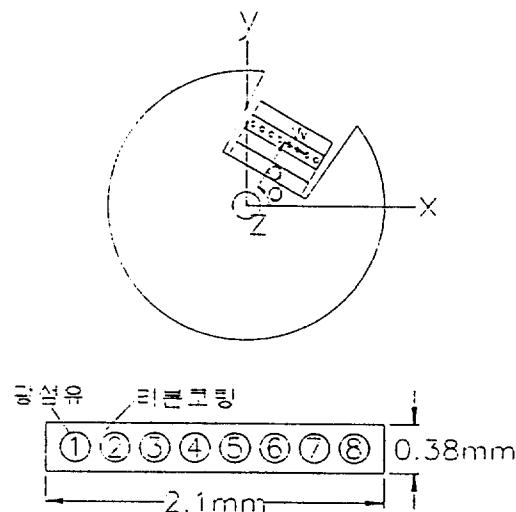


그림 2. 본 연구에서 사용된 리본광케이블 유니트 구조

수 개의 슬롯이 부가될 수 있으나 본 고에서는 이들을 일반화 할 수 있도록 하기 위해 그 슬롯의 수에 무관하게 그림 2와 같이 한 개의 슬롯으로 구성된 유니트에 대해 해석하고자 한다. 단일심선의 광섬유는 일반적으로 사용되고 있는 $250\text{ }\mu\text{m}$ 코팅된 광섬유이고, 이를 일렬로 배열해 코팅한 리본광섬유의 폭은 2.1 mm 이고 두께는 0.38 mm 이며, 심선수는 8심이다. 리본광섬유를 실장하고 있는 유니트의 구조는 리본슬롯형 유니트 구조로 슬롯은 유니트 중심 주위를 스트랜딩하며, 리본광섬유가 4개 실장되어 있다.

III. 이론적 분석

리본광섬유를 실장하고 있는 유니트가 구부림을 받으면 리본광섬유 안에 있는 각각의 광섬유들은 스트레이인을 받으면서 또한 어느 구부림반경을 갖게된다. 이 스트레이인과 구부림반경의 관계에 의해 광섬유들은 측압을 받게되는데, 이 것이 광섬유의 손실을 발생시키는 요인이 된다. 유니트의 구부림반경, 리본광섬유 중심으로부터의 거리, 슬롯의 스트랜딩 팅치, 리본광섬유의 스트랜딩 반경이 광섬유의 스트레이인과 구부림반경에 미치는 영향들을 이론적으로 분석하였다.

1. 리본광섬유의 심선별 스트레이인

그림 2의 리본광케이블 유니트가 직선으로 놓여 있을 때, i 번째 광섬유의 위치는 다음 식과 같다.

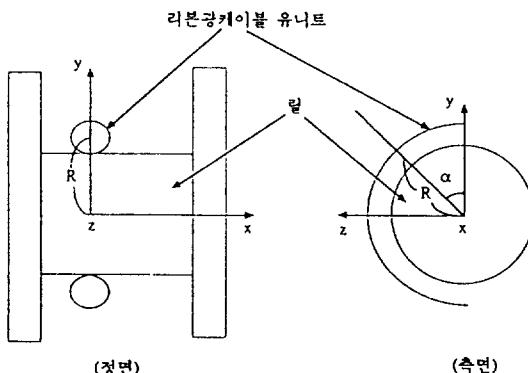


그림 3. 릴에 감긴 리본광케이블 유니트

$$\begin{cases} x_i = (a^2 + w_i^2)^{1/2} \cos(\phi - \delta) \\ y_i = (a^2 + w_i^2)^{1/2} \sin(\phi - \delta) \\ z_i = P\phi/2\pi \end{cases} \quad (1)$$

여기서, a : 리본광섬유의 스트랜딩 반경

w_i : 리본광섬유 중심으로 부터 i 번째 광섬유 까지의 거리

ϕ : 리본광섬유 중심과 원점을 이은 직선이 x 축과 이루는 각

$$\delta = \tan^{-1}(w_i/a)$$

P : 스트랜딩 팰치

이 유니트가 반경이 R 인 릴에 감겨있을 때는 그림 3에서와 같이 좌표를 잡으면 i 번째 광섬유의 위치는 다음 식과 같이 바꿔져 된다.

$$\begin{cases} x = (a^2 + w_i^2)^{1/2} \cos(\phi - \delta) \\ y_i = R \cos \alpha + (a^2 + w_i^2)^{1/2} \sin(\phi - \delta) \cos \alpha \\ z_i = R \sin \alpha + (a^2 + w_i^2)^{1/2} \sin(\phi - \delta) \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = P\phi/2\pi R$

이때 각 위치에 따른 반 팰치 동안의 광섬유의 길이 l_i 를 계산하면 다음과 같다.

$$l_i = \int_0^\pi [(dx_i/d\phi)^2 + (dy_i/d\phi)^2 + (dz_i/d\phi)^2]^{1/2} d\phi \quad (3)$$

식 (3)의 계산 결과 리본광케이블 유니트가 구부림을 받으면 리본광섬유 안에 있는 각각의 광섬유들 사이에는 길이차가 생긴다. 리본광섬유 안에 있는 각각의 광섬유들은 단일심선의 광섬유와는 달리 독립적이지 못하기 때문에 이 길이차는 광섬유의 스트레인을 일으키는 요인이 된다. 이때 각각의 광섬유 스트레인 ϵ_i 는 다음과 같다.

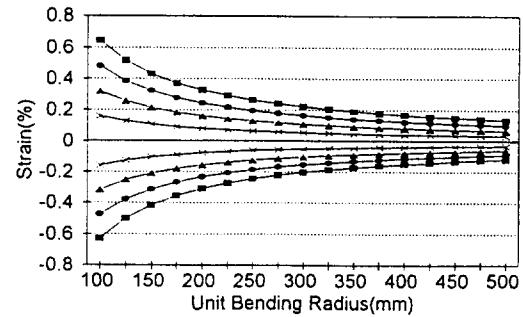


그림 4. 유니트 구부림반경에 따른 광섬유 스트레인

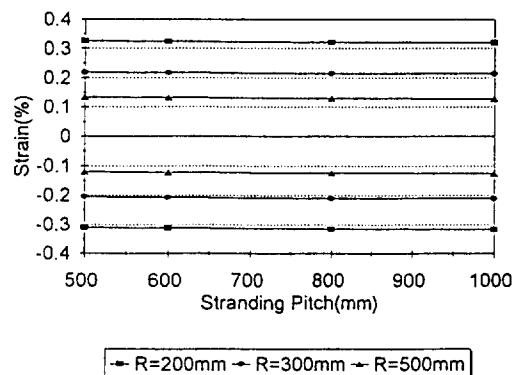


그림 5. 슬롯의 스트랜딩 팰치에 따른 광섬유 스트레인

$$\epsilon_i = (l_i - l_c)/l_c \quad (4)$$

여기서, l_c : 유니트를 구부리기 전 리본광섬유 중심의 길이

식 (4)에 의해 유니트의 구부림반경과 리본광섬유 중심으로부터의 거리에 따른 광섬유의 스트레인을 계산하였다. 이 때 슬롯의 스트랜딩 팰치는 500 mm이며, 리본광섬유의 스트랜딩 반경은 2.56 mm이다.

그림 4는 유니트의 구부림반경에 따른 심선별 광섬유의 스트레인을 계산한 결과이다. 유니트의 구부림반경이 커질 수록 광섬유의 스트레인이 작아지고, 리본광섬유의 중심으로부터 거리가 짧을수록 광섬유의 스트레인이 작아지는 것을 알 수 있다.

그리고 슬롯의 스트랜딩 팰치가 광섬유의 스트레인에 미치는 영향을 알아보기 위해 리본광섬유 중심으로부터의 거리가 1.0 mm이고, 리본광섬유의 스트랜딩 반경이 2.56 mm인 광섬유의 스트레인을 슬롯의 스트랜딩 팰치에 따라 계산하였다. 계산 결과 그림 5에서 보는 바와

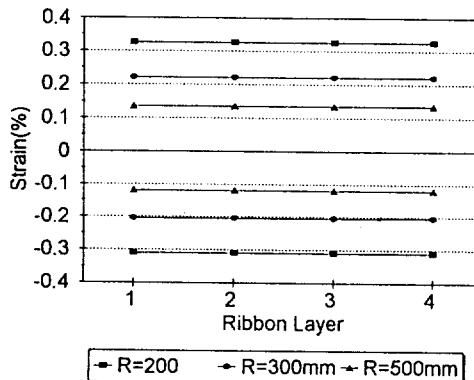


그림 6. 리본광섬유 층수에 따른 광섬유 스트레인

같이 스트랜딩 팰치에 의한 영향은 없었다.

또한 리본광섬유의 층수 즉 스트랜딩 반경이 광섬유의 스트레인에 미치는 영향을 알아보기 위해 리본광섬유로부터의 거리가 1.0 mm이고, 슬롯의 스트랜딩 팰치가 500 mm인 광섬유의 스트레인을 계산하였다. 1층은 제일 밑층의 리본광섬유이고, 4층은 제일 윗층의 리본광섬유이다. 계산결과 리본의 층수 즉 리본광섬유의 스트랜딩 반경과 광섬유의 스트레인은 무관한 것을 알 수 있다.

위의 결과로 볼 때 광섬유의 스트레인은 유니트 구부림 반경과 리본광섬유 중심으로부터의 거리에 큰 영향을 받고, 슬롯의 스트랜딩 팰치와 리본광섬유의 층수에는 영향이 없음을 알 수 있다.

2. 리본광섬유의 구부림 반경

리본광섬이를 유니트가 구부림을 받을 때, 리본광섬유 안에 있는 광섬유의 위치를 나타내는 곡선의 방정식을 β 라 하면 그 광섬유의 커버쳐(curvature) 즉 구부림 반경의 역수는 다음과 같이 구할 수 있다.^[2]

$$\frac{1}{r} = \frac{|\vec{\beta} \times \vec{\beta}'|}{|\vec{\beta}|^3} \quad (5)$$

여기서, $\vec{\beta} = (x_i, y_i, z_i)$

x_i, y_i, z_i : 식 (2) 참조

$\vec{\beta}'$: ϕ 에 대한 1차 미분

$\vec{\beta}''$: ϕ 에 대한 2차 미분

슬롯의 스트랜딩 팰치가 500 mm인 경우에 대해 위의 식을 이용해 계산한 유니트 구부림 반경별 리본광섬유의 구부림반경은 그림 7과 같다. 유니트 구부림반경이 작을수록 리본광섬유의 구부림반경이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 양쪽의 1층 리본광섬유가 바깥쪽의 4층 리

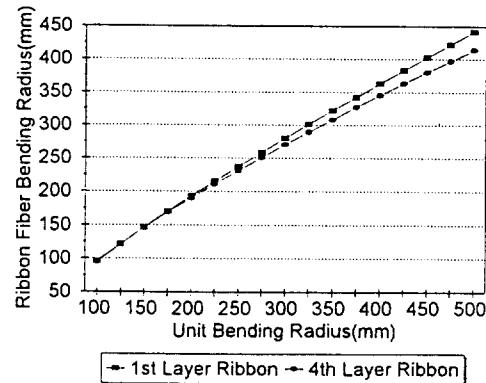


그림 7. 유니트 구부림반경에 따른 리본광섬유 구부림 반경

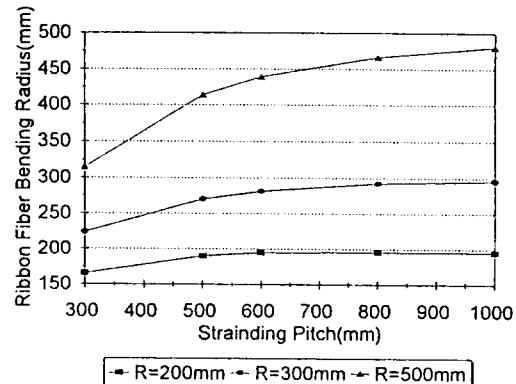


그림 8. 슬롯의 스트랜딩 팰치에 따른 리본광섬유 구부림 반경

본광섬유보다 즉 스트랜딩 팰치가 작을수록 광섬유 구부림 반경이 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 스트랜딩 반경의 차이가 작아 리본광섬유 층에 의한 광섬유 구부림 반경의 차이는 미소하다.

또한 슬롯의 스트랜딩 팰치가 광섬유의 구부림반경에 미치는 영향을 알아보기 위해 스트랜딩 팰치에 따라 광섬유의 구부림반경을 계산하였다. 이때 리본광섬유의 스트랜딩 반경은 2.56 mm이다. 계산결과 그림 8에서 보는 바와같이 스트랜딩 팰치가 커질수록 광섬유의 구부림반경이 커지는 것을 알 수 있다.

위의 결과에서 보는 바와같이 리본광섬유의 구부림반경은 유니트의 구부림반경, 리본광섬유의 스트랜딩 반경, 슬롯의 스트랜딩 팰치에 영향을 받음을 알 수 있다.

3. 유니트 구부림 반경에 따른 심선별 축압

광섬유가 스트레인을 받는다는 것은 그 광섬유가 장

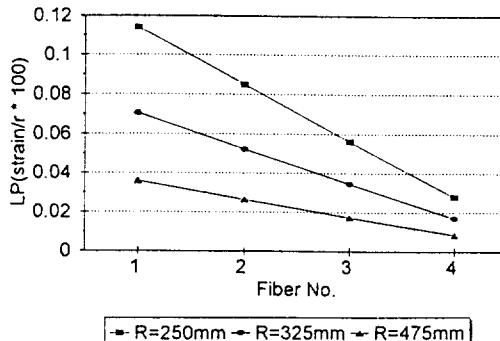


그림 9. 유니트 구부림반경에 따른 심선별 측압

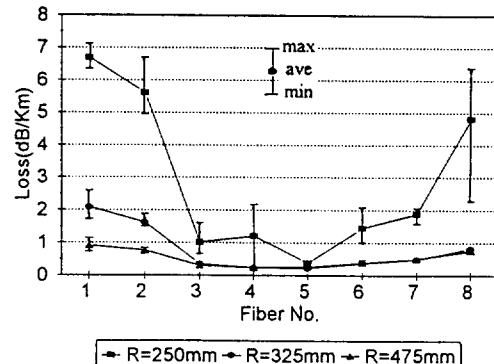


그림 10. 유니트 구부림반경에 따른 손실측정 결과

력을 받는다는 증거이며, 스트레인과 장력은 비례한다. 그런데 광섬유가 어느 구부림 반경을 유지한 상태에서 장력을 받으면 측압을 받게되는데, 이 때의 측압은 다음과 같다.

$$f = T/r \quad (6)$$

여기서, T : 광섬유가 받은 장력

r : 식 (5)에서 구한 광섬유의 구부림 반경

이 측압은 광섬유의 미소구부림 손실을 일으키는 요인이 되며, 손실증가량은 측압에 비례한다.^[3] 따라서 구부림에 의한 광섬유의 손실증가량은 스트레인을 리본광섬유의 구부림 반경으로 나눈 값에 비례할 것이다. 스트레인을 광섬유의 구부림 반경으로 나눈 값에 100을 곱한 값을 LP라 하면, 광섬유에 미치는 측압은 LP값에 비례할 것이고, 따라서 손실증가량도 LP값에 비례할 것이다. 본 시험에서 사용한 유니트의 리본광섬유 스트랜딩 반경은 2.56 mm이고 슬롯 스트랜딩 팽치는 500 mm이다. 이 유니트의 구부림 반경에 따른 심선별 LP값은 그림 9와 같다. 유니트 구부림 반경이 작을수록 LP값이 커지고, 리본광섬유의 심선이 가장자리로 갈수록 LP값이 커지는 것을 알 수 있다.

IV. 실험 결과 및 분석

구부림 반경이 250, 325, 475 mm인 릴에 600 m 길이의 광케이블 유니트를 감았을 때, 리본광섬유 각 심선의 손실을 OTDR로 측정하였으며, 측정파장은 미소구부림 손실에 민감한 1550 nm을 사용하였다. 측정한 결과는 그림 10에서 보는 바와같이 유니트의 구부림 반경이 작을수록, 리본광섬유 중심으로부터 가장자리로 갈수록 손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 III항의

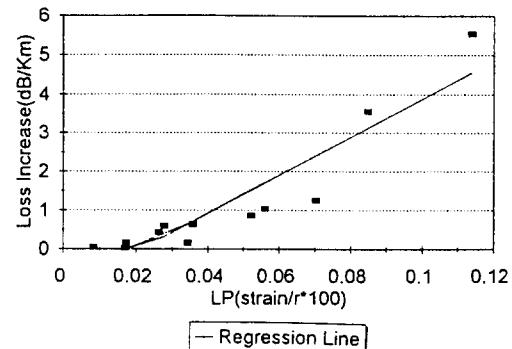


그림 11. 유니트 구부림에 의한 측압(LP)과 손실증가량과의 관계

이론적 분석 결과와 잘 부합되는 것을 알 수 있다.

그림 9에서의 LP값과 손실증가량과의 관계를 그래프로 나타낸 것이 그림 11이다. 이 것을 최소제곱법(Least Square Method)을 이용해 비례관계식을 구한 결과 관계식은 다음과 같았으며, 이때의 상관계수는 0.86이였다.

$$\text{Loss increase} = 49.1786 \times LP - 1.0426$$

$$(\text{Loss increase} \geq 0 \text{ dB/Km}) \quad (7)$$

여기서, $LP = \text{스트레인}/\text{리본광섬유의 구부림반경} * 100$

식 (7)을 이용해 리본광케이블 유니트의 적정 구부림 반경을 결정하는 방법은 그림 12와 같다. 각각 유니트 구조에 해당하는 리본광섬유 중심으로부터의 거리, 리본광섬유의 스트랜딩 반경, 슬롯의 스트랜딩 팽치를 이용해 유니트 구부림반경에 따라 광섬유의 스트레인과 구부림반경을 구할 수 있으며, 스트레인과 구부림반경을 이용해 LP값을 구할 수 있다. 이 LP값을 식 (7)에 대입했을 때, 손실증가량이 제조 공정상 최대 허용 손실

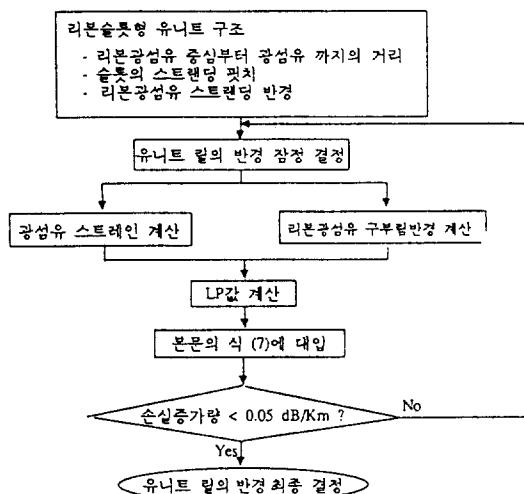


그림 12. 리본광케이블 유니트의 보관 및 작업 릴의 결정 방법

증가량인 0.05 dB/Km 이하가 되는 유니트의 최소 구부림반경을 구할 수 있으며, 유니트를 감은 릴의 반경은 이 유니트의 최소 구부림반경 이상이어야 한다.

V. 결 론

단일심선의 광케이블에 비해 리본광케이블은 여러심의 광섬유가 일렬로 배열되어 있어 취급상 주의가 요구된다. 특히 구부림시 리본광섬유 안에 있는 각각의 광섬유들에 발생하는 스트레이인과 리본광섬유의 구부림반경의 관계에

의한 측압이 미소구부림 손실을 일으킨다. 그 손실증가량은 유니트의 구부림 반경에 반비례하며, 리본광섬유 중심으로 부터 가장자리로 갈수록 커지는 것을 알 수 있었다. 본 고에서는 이 원인을 이론적으로 분석하기 위해 유니트의 구부림반경, 리본광섬유 중심으로 부터 광섬유까지의 거리, 리본광섬유의 스트랜딩 반경, 슬롯의 스트랜딩 빗치에 따른 광섬유의 스트레이인과 구부림반경을 계산하였으며, 계산 결과를 이용해 광섬유에 가해지는 측압과 비례하는 LP값을 계산하였다. 그리고 여러 유니트 구부림반경에 따른 광섬유의 손실증가량을 측정한 결과 이론적인 분석 결과와 잘 부합됨을 알 수 있었다.

위의 결과는 리본광케이블 제작시 유니트의 보관 및 유니트 제조공정중에 사용할 유니트 릴의 반경을 결정해 주는데 활용할 수 있으며, 그 릴의 적정 구부림 반경이 얼마나 중요한지를 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Naoki Okada, Kohichiro Watanabe and Matsuhiro Miyamoto, "Strain Analysis of U-groove Type Cable with Multi Fiber Ribbons", 43th IWCS Proceedings, 211-218 (1994).
- [2] Barrett O'Neill, *Elementary Differential Geometry* (Academic Press, Inc., 1966).
- [3] John Baldauf, Naoki Okada and Matsuhiro Miyamoto, "Relationship of Mechanical Characteristics of Dual Coated Single Mode Optical Fibers and Microbending Loss", IEICE Trans. commun., vol. E76-B, No. 4, 352-357 (1993).

A Study On The Bending Characteristics of Ribbon Cable Unit

Byoungchul Lee, Youngtark Lee, and Migyoung Kim
Outside Plant Technology Lab., Korea Telecom, Taejon 305-348, Korea

(Received: May 4, 1995)

In order to construct B-ISDN, it is inevitable to introduce optical fiber of low loss and wide bandwidth. Coincidentally, high count optical fiber cable is solely important to form optical subscriber network. The best structure of high count optical fiber cable to achieve multi-splicing as well as high density at the same time is the one of taking optical ribbon as a unit of accommodation. However, since optical ribbon has its own width, optical loss due to length difference during the bending of ribbon cable unit occurs in relatively easy way. Therefore, care should be taken during its manufacturing and storage. In this paper, strain, bending radius and lateral pressure of each fiber in ribbon due to the bending of ribbon cable unit are calculated theoretically. Hence, we have measured optical loss of each fiber as function of unit bending radius, when we bent the ribbon cable unit on the various reel. We found that the result accords well with the theoretical analysis. The result shows the importance to determine proper radius of reel used in ribbon cable manufacturing and storage.