

## 붓스트랩 기법을 이용한 다심 광커넥터 손실특성 예측

전오곤

한국전자통신연구원

강기훈

서울대학교

## Bootstrap Simulation for Performance Evaluation of Optical Multifiber Connectors

Oh-Gon Chun

Electronics and Telecommunications Research Institute

Kee-Hoon Kang

Seoul National University

### Abstract

The purpose of the thesis is to develop simulation program for forecasting of optical connector. So we can achieve the time and the money saving for making the optical connector. Optical performance (insertion loss) of optical connector mainly relies on 3 misalignment factors-ferrule factor due to mis-manufacture from design, auto-centering effect that is fiber behavior phenomena between hole and fiber, fiber misalignment factor. Simulation use experimental data with auto-centering effect and fiber factor and use pseudo data with ferrule through random number generation because it is developing stage.

In this study we apply kernel density estimation method with experimental data in order to know whether it belong to or not specific parametric distribution family. And we simulate to forecast insertion loss of optical multifiber connector under specific design model using nonparametric bootstrap resampling data and parametric pseudo samples from uniform distribution. We obtain the tolerance specifications of misalignment factors satisfying not exceed in maximum 1.0dB and choose optimal hole diameter.

## 1. 서론

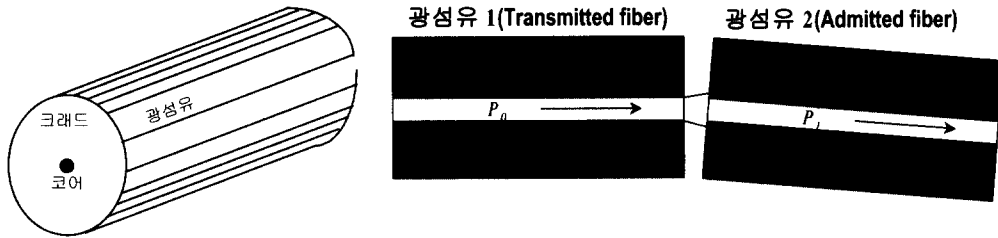
본 고의 이해를 돕기 위해 21세기 정보통신의 큰흐름인 광통신과 이에 필수 요소인 광섬유와 광커넥터의 용도, 필요성 및 특성을 간략하게 기술하였다.

광통신이란 전기통신에서 전기적 신호를 정보전달 수단으로 이용하는 것과는 달리 빛을 이용한 통신방식을 말한다. 즉, 음성 및 각종 정보를 나타내는 전기신호를 빛으로 변환하여 광섬유(Optical Fiber)를 이용하여 멀리 보내고 또한 전달된 빛을 다시 전기신호로 바꾸어 본래의 정보로 재생시키는 통신방식이다. 광섬유는 일반적으로 유리를 가늘게 섬유상으로 방사한 것으로 굴절률이 높은 중심층(코어)과 굴절률이 코어층보다 낮은 외층(클래드)으로 구성되어 있다. 여기서 코어의 굴절률이 클래드의 굴절률보다 조금 높게 설계되어 있는점이 중요한데 이로 인해 광섬유에 입사된 빛은 굴절률 차에 의해 광섬유 밖으로 빠져(손실) 나가지 못하고 코어내에서 전파된다. 전기통신에서는 전선이 전기신호를 전달하는 전송선로 역할을 하였으나 광통신에서는 신호원이 전기가 아닌 빛을 사용함에 따라 빛이 전달될 수 있는 전송매체가 요구되는데 이것이 광섬유이다. 또한 광가입자망 구축 및 광선로 유지 보수비용의 최소화를 위해 광선로의 분기 및 결합용 광수동부품이 필수적으로 요구되는데 광수동부품 중 (다심) 광커넥터는 (복수의)광섬유 또는 광케이블의 불연속 지점에서 정밀하게 가공된 기구물을 이용하여 동시에 제한된 손실 범위 이내로 끊어진 광섬유를 연결시키거나 필요시 단락시키는 광통신망 구현의 기본 부품이다. 특히 장거리 광통신에 이용되는 단일 모드 광섬유(Single Mode Fiber)는 광신호(빛)가 전파되는 부분의 직경이  $8\sim 10\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m}=1\times 10^{-3}\text{mm}$ )에 불과함으로 불연속점에서의 광섬유 연속성 확보는 매우 정밀한 기술이 요구된다.

2절에서는 광커넥터 손실특성(삽입손실: Insertion Loss)과 이에 영향을 미치는 요인(비정렬요인)들에 대해서 기술하고, 3절에서는 자기정렬 효과 및 광섬유 비정렬요인에 대한 통계적 분석을, 4절에서는 국내 특허출원된 정렬구조에서의 손실특성 예측을 위한 비모수적 Bootstrap Simulation Algorithm을 기술코자 한다. 끝으로 5절에서는 시뮬레이션을 활용하여 평균 삽입손실 예측과 정렬요인의 가공공차 도출 및 결론을 기술하였다.

## 2. 광커넥터 손실요인 및 영향

두 개의 동일한 광섬유 사이에 이상적인 접속형태는 광도파 매체의 완전한 연속성을 보장하여 광신호의 손실이 없는 완전한 전달을 의미한다. 그러나 실제 접속에서는 여러 가지 손실요인으로 말미암아 접속부에서 광신호의 감쇠가 야기된다. 아래 <그림 1>에서와 같이 두 광섬유가 접속될 때,



< 그림 1 > 광섬유 구조 및 광섬유 접속에서의 광Power 전송

삽입손실(접속손실)은  $L = -10 \log \frac{P_1}{P_0} (dB)$ 로 정의되며 여기서  $P_0$ 는 접속 전의 광Power,  $P_1$ 은 접속 후의 광Power이다. 따라서 접속손실이 우수한 광커넥터란 접속전의 광파워를 최대한 손실 없이 전달하는 것을 의미하는 것을 알 수 있다. 광커넥터의 손실특성은 주로 3가지 요인- 광커넥터의 기구물 오차(정렬구조의 비정렬요인), 광섬유 동심오차(비정렬요인) 그리고 커넥터와 광섬유간의 자기정렬 효과-에 의해 결정된다. 광커넥터 기구물 오차는 광섬유를 지지해 주는 기구물(플러그)이 설계대로 제작되지 않고 오차를 가질 때 이로 인한 손실을 말하고 광섬유 동심오차는 광섬유가 갖는 고유 비정렬요인(Intrinsic Misalignment)으로

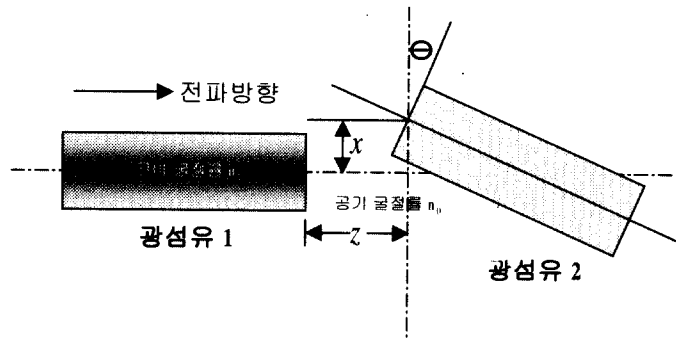
- ① 클래드 직경(Clad Diameter) 변동,
- ② 클래드/코어 중심 불일치(Concentricity Error Between Core & Clad),
- ③ 모드필드 불일치(Mode Field Mismatch)
- ④ Numerical Aperture(NA) 두 광섬유간 불일치 등이 있다.

그리고 자기정렬 효과(3.2절에서 상세 설명)는 커넥터 Hole과 광섬유간 직경 차에서 발생하는 오차를 말한다. 전술한 광커넥터의 기구물 오차와 커넥터와 광섬유간의 자기정렬 효과를 결합되는 두 광섬유만의 정렬상태로 간략화 한다면 <그림 2>의 이차 비정렬요인으로 나타낼 수 있다.

이차 비정렬요인으로는

- ① 간격 비정렬요인(Gap Between the Fiber Ends),
- ② 축 어긋남 비정렬요인(Lateral Displacement of the Core Axes),
- ③ 각 어긋남 비정렬요인(Angular Misalignment of the Fiber Axes)으로 나눌 수 있으며, <그림 2>에서는 이차 비정렬요인을 나타내고 있다.

광커넥터 설계 관점에서 고유 및 이차 비정렬요인 모두 손실에 영향을 미치나 이차 비정렬요인은 광커넥터 설계 측면에서 조절 가능한 요인이고, 고유 비정렬요인은 광섬유 제조시 결정되는 요인으로 제어가 불가능한 요인이다.



< 그림 2 > 이차 비정렬요인의 종류

광섬유는 장거리 통신에 많이 사용되는 단일모드 광섬유와 근거리 데이터 통신에 많이 사용되는 다중모드 광섬유로 대별되고 단일모드 광섬유는 다중모드 광섬유(코어 직경 $\approx 50\mu\text{m}$ )보다 상대적으로 코어직경이 작기 때문에 비정렬요인 요소 변화에 대해 매우 민감한 영향을 받는다. 비정렬요소의 변화에 따른 삽입손실의 영향을 정량적으로 나타낼 수 있는 연구가 많이 이루어졌으며 그 중 Nemoto와 Makimoto(1979)에 의해 발표된 손실식이 가장 많이 이용되고 있다. 아래 식(1)은 <그림 2>의 이차 비정렬요인에 따른 이차 비정렬요인 3가지와 고유 비정렬요인중 모드필드 불일치를 고려한 광커넥터 특성을 나타내고 있으며 이중 축어긋남 요인이 다른 요인에 비해 광커넥터 특성에 매우 민감한 영향을 주고 있다. 식(1)에서 알 수 있듯이 다른 두요인이 발생되지 않는다 하더라도(Gap=0 $\mu\text{m}$ , Angle=0 $^\circ$ ) 삽입손실 1dB(입력대비 20.6%의 광파워 손실)를 만족하기 위한 축어긋남 값의 허용범위는 최대 2.16 $\mu\text{m}$ 이내가 되어야 한다. 따라서 우수한 특성을 갖는 광커넥터를 제작하기 위해서는 축어긋남 요인을 적극적으로 제어하여야 한다. 즉, 광커넥터를 이루는 구성품들의 6가지 정렬오차가 결합되어 2.16 $\mu\text{m}$ 이라는 기준을 만족하여야 하므로 세계적으로 광커넥터를 생산할 수 있는 국가는 불과 수 개국 이내이다. 흥미로운 사실은 광커넥터의 손실특성을 결정하는 요인들은 항상 고정된 값을 갖는 상수가 아니라 변수들이며 이러한 변수들간의 랜덤 조합에 의해 광커넥터 특성이 결정된다는 점이다. 이러한 각 변수들간의 관계와 통계적 시뮬레이션을 통해 광커넥터 특성을 예측코자 한다.

$$Insertion - Loss = -10 \log \left\{ \frac{16n_0^2 n_1^2}{(n_0^2 + n_1^2)^4} \frac{4\sigma}{a} \exp\left(-\frac{\mu}{a}\right) \right\} dB \quad (1)$$

여기서  $\mu = (\sigma + 1)F^2 + 2\sigma FG \sin \theta + \sigma(G^2 + \sigma + 1) \sin^2 \theta$

$S_1 = \text{Mode field radius of fiber 1}$ ,  $S_2 = \text{Mode field radius of fiber 2}$ ,

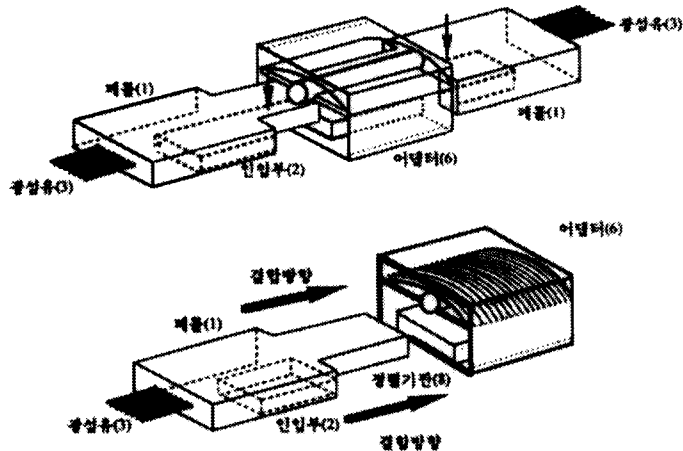
$x = \text{Lateral Displacement}, z = \text{Separation between the Fiber Ends},$

$X = x/S_1, Z = z/S_1, K = 2\pi n_1/\lambda, F = 2X/(KS_1)^2, G = 2Z/(KS_1)^2$

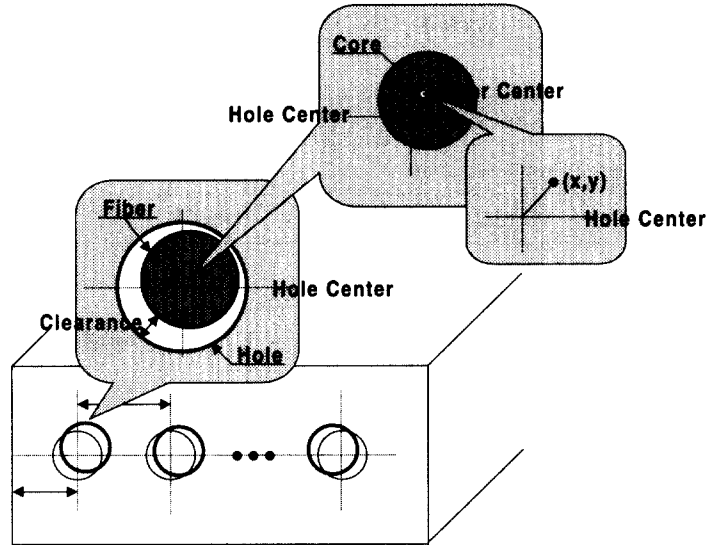
$\sigma = S_2^2/S_1^2, p = (KS_1)^2/2, q = G^2 + (\sigma + 1)^2$

### 3. 정렬구조 특성분석

연구대상인 광커넥터 미세 Hole 정렬구조는 광섬유 정렬을 위해 광섬유 수 만큼 정해진 직경과 중심위치를 갖도록 원통형 홀이 뚫여진 육면체 페를을 이용하는 구조로 광섬유 양단간에 정밀하게 제작된 두개의 페를이 정렬될 때, 그 속에 결합된 광섬유가 정렬되는 구조이다. 본 절에서는 국내 특허출원된 다심 광커넥터 정렬구조 <그림 3> (a)에서 오차요인을 도출하고, 이들 변수들간의 관계를 구하였다. <그림 3> (b)에서는 8개의 광섬유가 정렬될 수 있는 미세 Hole 정렬구조를 간략화한 모델을 나타내고 있다. 상기 정렬구조에서 축어긋남 요인으로 될 수 있는 것으로는 광섬유 비정렬 요인(크래드 직경, 크래드/코어 편심), 페를의 광섬유가 결합되는 Hole비정렬요인(Hole 직경, Hole 중심), Hole내에서의 광섬유 위치(Hole과 광섬유 사이의 자기정렬 효과), 정렬구조의 가로, 세로 제조오차(X, Y변위)를 들 수 있다



(a) 다심 광커넥터 정렬구조(특허출원)



(b) 미세 Hole정렬구조 모델링

&lt; 그림 3 &gt; 다심 광커넥터의 미세 Hole 정렬구조

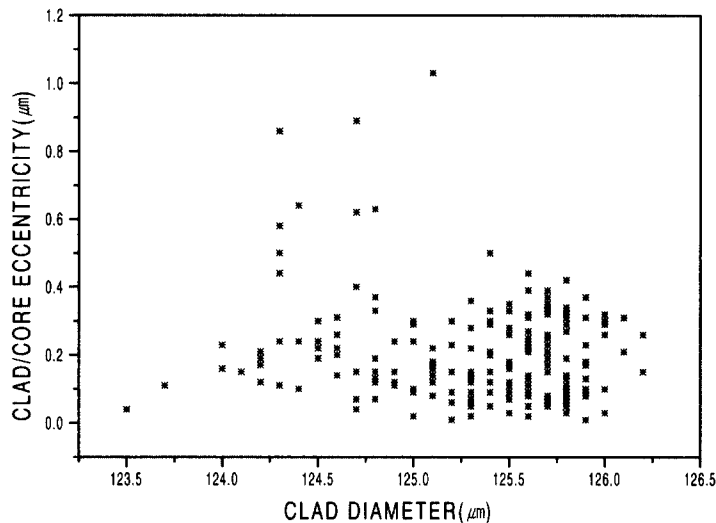
### 3.1 광섬유 비정렬요인 분포함수 추정

광커넥터의 최종 목적은 결합되는 두 광섬유의 코어(빛이 통과하는 부분) 중심 정렬이다(Chun, et al 1993). 그러나 광섬유내 코어 중심은 항상 일정한 위치에 고정되지 않고 광섬유 외경(크래드 경) 중심축에서 벗어난 편심을 갖는데 이것이 크래드/코어 편심 오차이다. 실제 광커넥터 조립시에는 광섬유 코어 정렬(광도 정렬)이 이루어 지지 않고 광섬유 외경을 중심으로 한 기하학적 정렬이 이루어지기 때문에 광섬유 외부의 직경 변화와 내부의 코어 중심축의 차(크래드/코어 편심)는 축어긋남 요인으로 광커넥터의 손실특성에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 광섬유 비정렬요인이 광커넥터 손실특성에 미치는 영향을 파악키 위해 광섬유 직경과 크래드/코어 편심 요인을 확률변수로 정의하고 이들 오차 분포를 추정키 위해 국내 광섬유에 대해 편심량과 크래드 직경을 측정하고 이들 자료를 이용하여 분포 추정을 하였다. 각사별로 측정 결과만 얻게 된다면 생산사 및 측정기간의 변동 요인이 추가될 수 있으므로 시료는 각사별로 임의적으로 50개씩 취하여 총 200개의 시료에 대해 동일 측정기로 하루 동안 랜덤하게 측정하였다. 동일 샘플에서 얻어진 두 변수간의-광섬유 직경과 크래드/코어 편심-상호 관련성을 파악키 위해 산점도를 <그림 4>에 나타내었으며, 두 변수간의 독립성 검정을 실시하였으며 그 결과는 <표 1>과 같다. 그 결과 두변수가 독립이라는 가정을 기각할 충분한 근거가 되지 못하므로 시뮬레이션에서는 각각의 독립변수로 취급하였으며 각 변수별로 분포 형태를 알기 위해 탐사적 방법으로 비모수적 분포함수 추정량을 이용하였다.

&lt; 표 1 &gt; 비모수적 독립성 검정 결과

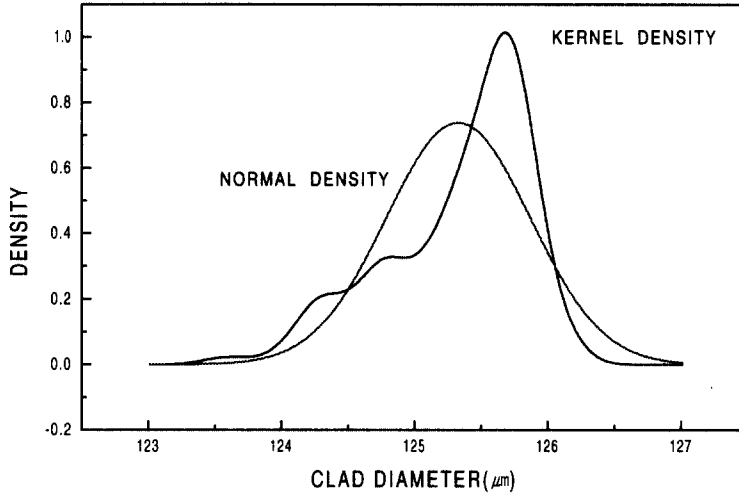
Test Statistics	Value	P-value
Spearman Correlation Coefficient	-0.02534	0.7217
Kendal Tau b Correlation Coefficient	-0.01961	0.6923
Hoeffding Dependence Coefficient	0.00078	0.2514

사용된 밀도함수 추정량은  $\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - X_i)$ 이며 추정량에 사용되는  $h$ 는 Sheather와 Jones(1991)가 제안한 Bandwidth이고 커널함수  $K_h(x)$ 는 표준 정규 분포의 확률밀도함수를 사용하였다. 즉,  $K_h(x) = \frac{1}{h} \phi\left(\frac{x}{h}\right) = \frac{1}{h} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{h}\right)^2}$ 이다.

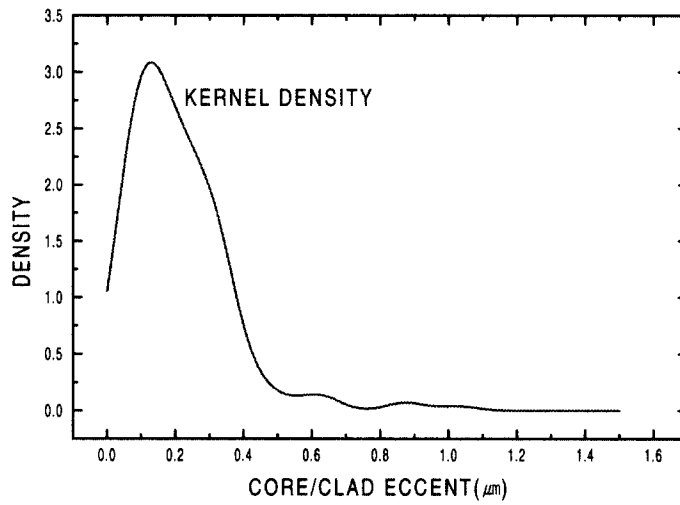


&lt; 그림 4 &gt; 광섬유 비정렬요인간의 산포도

밀도함수 추정량을 이용하여 광섬유 오차분포에 대한 커널 함수 추정치를 얻어 아래 <그림 5>에 나타내었으며 추정치에서 알 수 있듯이 밀도함수 추정치와 유사한 모수 분포함수를 찾기가 곤란하여 시뮬레이션에서는 실제 측정 자료를 Resampling하여 광커넥터 특성을 예측하였다.



(a) 광섬유 직경 비정렬요인 밀도함수 추정



(b) 크래드/코어 비정렬요인 밀도함수 추정

< 그림 5 > 광섬유 비정렬요인 밀도함수 추정



## 3.2 자기정렬 효과 추정

### 3.2.1 자기정렬 효과 정의

Satake, et al(1984)에 의하면 Hole과 광섬유의 직경 차가  $5\mu\text{m}$ 이하인 원통 형상의 Hole에 광섬유를 삽입하여 접촉제로 고정시킬 경우, 액체상태인 접촉제 하에서 광섬유는 자중에 의하여 Hole 아래면으로 하강하려 할 것이나 자중에 의한 하강 현상은 광섬유의 부력과 유극 사이의 전단 흐름에 의해 어느 정도 방지되어 광섬유 중심이 Hole중심으로 모아지게 되는 자기정렬 효과를 발표하였다. 만약 자기정렬 현상이 발생되지 않는다면 접촉시에 광섬유가 중력에만 영향을 받아 Hole내 밑면에 광섬유가 고착될 것이나 실험에서는 중력과는 상관 없는 방향으로 광섬유 중심이 나타났다. 실제 Hole과 광섬유간의 차가 크다면 광섬유는 어느 정도 중력에 영향을 받을 것이나 이를 막기 위해 Hole직경을 작게하면 특성은 향상되나 광섬유를 Hole에 삽입하기가 어려워 작업성이 떨어지게 된다. 반대로 Hole의 직경을 크게 하면 조립 작업성은 용이하게 되나 광커넥터의 특성은 나빠지게 되는 양면성이 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 Hole직경변화에 따른 특성 예측으로 최적의 Hole직경을 구하고자 한다.

### 3.2.2 자기정렬 모델링.

Kashima와 Satake(1987)에 의하면 실린더형 미세 Hole내에서 광섬유 중심(크래드 중심) 위치분포는 2변량 정규분포(Covariance=0, Common Variance= $\sigma^2$ )로 모델링하였으며, 이변량 분포의 평균은 광섬유 정렬 중심을 Hole중심에 맞추려 하기 때문에 Hole 중심좌표(0,0)으로 가정하였다. 광섬유를 Hole중심으로 모으는 조심효과의 정도는 분산의 크기로 나타나게 되는데, 분산이 작을수록 조심효과는 커서 광섬유 중심과 Hole중심간의 차가 작아 광커넥터 특성은 좋아지나 반대로 분산이 증가하면 Hole내에서 광섬유 중심이 넓게 분포하므로 광커넥터 특성은 저하되게 된다. 따라서 광커넥터의 특성을 보다 정확히 예측키 위해 자기정렬 효과( $\sigma^2$ )를 추정할 필요가 있다.

### 3.2.3 자기정렬 효과 측정.

조심효과를 추정키 위해 직경  $127\mu\text{m}$ 의 미세 Hole이 있는 단심 광커넥터용 세라믹 페룰 22개와 국내 생산된 광섬유, Eptek 353ND의 접촉제를 이용하여 샘플을 제작하였다. 실험은 하루동안에 종료될 수 있었으며 접촉제 경화를 위해 항온항습조 속에서  $80^\circ\text{C}$ 상태에서 60분의 경화시간을 유지하였다.

Kashima(1988)의 모델링에 의하면 Hole 중심축을 기준으로 광섬유 중심 좌표의 분포는 아래 식(2)로 표현된다.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$x = e\sin\theta$ ,  $y = e\cos\theta$ ,  $0 \leq e \leq \infty$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 로 두면 변수변환에 따른 편심량  $E$ 와  $\Theta$

의 결합밀도함수  $f(e, \theta)$ 와 편심량  $E$ 의 주변밀도함수  $g(e)$ 는 다음과 같이 얻어지고,

$$f(e, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e \exp\left[-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$g(e) = \int_0^{2\pi} f(e, \theta) d\theta = \frac{e}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right], \quad 0 \leq e \leq \infty$$

표본  $E_1, E_2, \dots, E_{22}$ 에 대해 통계량  $T = \sum_{i=1}^{22} E_i^2$ 를 이용하면 모수  $\sigma^2$ 에 대한 불편추정량을 얻을 수 있다.

$$\therefore \widehat{\sigma^2}^{UMVUE} = \frac{T}{44}$$

22개의 실험 샘플에 대한 전자주사현미경을 통한 편심량을 측정한 결과  $T = 29.317$ ,  $\widehat{\sigma^2}^{UMVUE} = 29.317/44 = 0.67$ 을 얻을 수 있었다. 모수의 추정치는 정렬구조의 시물레이션에서 Hole내의 광섬유 중심좌표의 변동 해석에 사용하였다.

### 3.3 광커넥터 비정렬요인 분석

본 절에서는 다심 광커넥터 광특성에 영향을 미치는 변수를 도출하고 이들 변수들의 변동 범위 및 변동 현상을 분석함으로 다음 절의 시물레이션 알고리즘에 이용하고자 한다. 먼저 광커넥터가 결합될 때 광커넥터 특성에 영향을 미치는 요인을 2차원 결합면을 통해 도출하였다. 2차원으로 해석한 이유는 끊어진 선로를 연결해 주는 소자로의 광커넥터가 결합될 때 광커넥터의 특성은 결합면에서의 광섬유 코어간 거리(distance)로 결정되기 때문이다. 마주 보는 코어간 거리는 광커넥터 비정렬요인들의 랜덤 조합으로 결정된다. 그러한 비정렬요인으로는

- ① 설계위치에서 벗어난 Hole 중심위치 변화
- ② 설계치에서 벗어난 Hole 직경 변화
- ③ Hole과 광섬유 사이의 자기정렬효과
- ④ 설계치에서 벗어난 페룰의 가로, 세로 길이변화
- ⑤ 광섬유 비정렬요인(크래드 경(Outer diameter)의 변화와 코어 편심 오차) 들이다.

상기 비정렬요인들의 확률변수 정의 및 시물레이션 수행 시 분포함수를 다음과 같이 가정하였다.

- ① Hole 중심오차  $\underline{X}_1 = (x_{hole}, y_{hole}) + \underline{\epsilon}(\epsilon_1, \epsilon_2)$

여기서  $(x_{hole}, y_{hole})$ : Hole 설계 중심좌표,  $\underline{\epsilon}(\epsilon_1, \epsilon_2)$ : 제조오차

$$\underline{\epsilon}(\epsilon_1, \epsilon_2) \sim BVN(\text{Bivariate Normal}) [(0, 0), \begin{pmatrix} \sigma_0^2 & 0 \\ 0 & \sigma_0^2 \end{pmatrix}]$$

② Hole Diameter 오차  $X_2 = \phi + \zeta$

여기서  $\phi$ : Hole 직경(설계치 3종 = 126 $\mu$ m, 126.5 $\mu$ m, 127 $\mu$ m),  $\zeta$ : 제조오차

$$\zeta \sim Unif(0, 1)$$

③ Auto-Centering Effect  $\underline{X}_3 \sim BVN[(0, 0), \begin{pmatrix} \hat{\sigma}^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{pmatrix}]$

④ Model 변위오차  $\underline{X}_4 = (x_{model}, y_{model}) + \mathcal{N}(\eta_1, \eta_2)$ ,

여기서  $(x_{model}, y_{model})$ : 설계치,  $\mathcal{N}(\eta_1, \eta_2)$ : 구조설계에서 벗어난 오차

$$\mathcal{N}(\eta_1, \eta_2) \sim Unif[(-0.5, 0.5) \times (-0.5, 0.5)]$$

⑤ 광섬유 비정렬요인  $\underline{X}_5 = [\phi_{clad}, Core Eccen(=0)] + (\delta, \xi)$

여기서  $\phi_{clad}$ : 광섬유 직경의 공칭치(Nominal value),

$\delta$ : 광섬유 직경변화,  $\xi$ : 클래드 중심에서 벗어난 코어의 편심량

실제 광커넥터의 조립상황과 동일한 시뮬레이션 알고리즘을 위해 광커넥터 조립공정을 간략화 하면 페룰의 원통형 Hole속에 광섬유를 삽입하여 접착제로 고정함으로 이루어진다. 조립 시 페룰의 Hole직경( $\underline{X}_2$ )이 광섬유 외경( $\underline{X}_5$ )보다 작거나 같다면 광섬유를 삽입할 수 없으므로 해당 페룰은 불량처리가 되고 만약 Hole직경( $\underline{X}_2$ )이 광섬유 외경( $\underline{X}_5$ )보다 크다면 Hole속에 광섬유가 삽입되어도 광섬유와 Hole간의 차(Clearance)가 나타날 것이다. 차에 따라 조립성과 손실이 결정된다. 광섬유가 Hole내부에서 고정되기 전 광섬유 중심 위치는 자기정렬 효과를 받으면서 변동 범위는 1/2 유극(=CI)의 반경을 갖는 원 내부를 벗어나지 못하는 종속성을 지닌다. 이러한 관련성을 식(3)에 나타내었고 시뮬레이션 수행 시 광섬유 중심 데이터( $\underline{X}_5$ )는 실제 측정자료에서 식(3)을 만족하는 데이터만 Resampling하였다.

$$\{(x_5, y_5): \sqrt{(x_5 - x_{hole})^2 + (y_5 - y_{hole})^2} \leq \frac{CI}{2}\} \quad (3)$$

나머지 변수들 간에는 각기 조건에 따라 결합조건이 달라지게 진다. 즉 페룰의 크기(가로, 세로)가 설계보다 달라지고 또한 당초 설계된 위치가 아닌 위치에 Hole이 생성되었다 하더라도 조립 측면에서는 광섬유를 정렬할 방법이 없이 제작된 Hole위치에 고정할 수 밖에 없게 된다. 실제 조립에서 그런 것처럼 시뮬레이션에서도 페룰 오차, Hole위치 및 직경 데이터가 결정되면 식(3)을 만족하는 광섬유 데이터만 Resampling 되어 광섬유 중심간 거리가 결정된다.

## 4. Simulation Algorithm

광커넥터 손실특성은 오차요인들의 함수  $R$ 로 표현될 수 있는데 변수 중에는 모수 분포를 가정한 변수도 있고 적절한 모수분포 형태를 취할 수 없어 비모수적 Bootstrap Resampling한 변수도 있다.

$$\text{광커넥터 특성} = R(\underline{X}_1, \dots, \underline{X}_5; F_1, \dots, F_5)$$

Nonparametric Bootstrap Simulation Algorithm은 아래와 같으며 광커넥터가 조립 되는 순서대로 시뮬레이션이 수행되도록 하였다.

Step 1. Parametric Random Number Generating

$$X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im} \sim F_i, \quad i=1, \dots, 4,$$

Step 2. Fit the nonparametric MLE of  $F_5$

$$\hat{F}_5: \text{mass } 1/n \text{ at } x_{5j}, j=1, \dots, 200$$

Step 3. Draw a "bootstrap sample" from  $\hat{F}_5$

$$\underline{X}_{51}^*, \dots, \underline{X}_{5m}^* \sim \hat{F}_5 \text{ satisfying } \{(x_{5j}^*, y_{5j}^*): \sqrt{(x_{1j} - x_{5j}^*)^2 + (y_{1j} - y_{5j}^*)^2} \leq Cl/2\}$$

$$\text{and Compute } \text{Dist} = \sqrt{(x_{1j} + x_{4j} + x_{5j}^*)^2 + (y_{1j} + y_{4j} + y_{5j}^*)^2}$$

$$\hat{R}(X_{1j}, \dots, X_{5j}^*) = 4.34 * (\text{Dist}/w)^2 \text{ dB}$$

$$\text{여기서 } w(\text{Mode Field Radius}) = 4.5 \mu\text{m}$$

Step 4. For  $b=1, \dots, B$  Repeat step 3.

$$\widehat{R}^{*1}, \dots, \widehat{R}^{*B}$$

Step 5. Calculation of aspect of  $R$ 's distribution

$$\text{평균 } E_*(R^*) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B R^{*b}$$

$$\text{Prob}_*[R^* \leq 1 \text{ dB}] = \frac{\text{No of } (R^{*b} \leq 1)}{B}$$

Hole 직경의 오차분포를 일양분포  $U(0,1)$ 로 선택한 이유로 <그림 5>에서 알 수 있듯이 광섬유 외경의 분포가 최소  $123.5\mu\text{m}$ , 최대  $126.2\mu\text{m}$ 임을 알수있다. 이러한 직경 범위를 갖는 광섬유를 사용하여 97%이상의 광섬유가 Hole내로 삽입 가능한 Hole 직경이 최소  $126\mu\text{m}$  이상이며 결합특성을 위해 최대  $127\mu\text{m}$ 을 넘어서는 곤란하기 때문이다. 또한 광섬유 비정렬요인(크래드 직경과 크래드/코어 편심)의 경우 3절에서 얻은 분포 함수추정 결과, 모수적으로 근사할 적당한 분포를 찾기가 힘들어 각 샘플이 균등한 Mass를 가지는 비모수적 Bootstrap Sampling 기법을 이용하였다.

## 5. 결론

본 시뮬레이션을 위해 다심 광커넥터 손실특성에 영향을 미치는 3개의 비정렬요인(Hole 중심오차, 정렬모형 변위, 자기정렬 효과)에 대해서는 Parametric Random Number Generation을 이용하여 오차 표본을 얻었고 나머지 비정렬요인(광섬유 크래드 경, 크래드/코어 편심)에 대해서는 Nonparametric Bootstrap Resampling으로 오차 표본을 얻어 광커넥터 삽입손실 예측 시뮬레이션( $B=200$ )을 수행하여 아래<표 2>의 평균 삽입손실을 얻었다. <표 2>에서 알 수 있듯이 손실특성과 조립성을 고려한 최적의 Hole 직경은  $126.0\mu\text{m}$ 으로 결정하였으며 역상으로 표시된 부분은 다심 광커넥터 개발목표를 만족하는 정렬 정밀도 영역이다. 정렬 정밀도를 하나의 값으로 결정하지 않고 범위로 나타낸 이유는 제조자측에서 제조공법이나 제조 Know-how를 최대한 활용할 수 있는 선택 여유를 주기 위함이다.

Hole 중심 정밀도의 분산(정밀도)이 Hole 직경 분산보다 크게 설정하여 시뮬레이션한 이유는 광커넥터 미세 Hole 구조를 성형할 때 Hole 중심보다는 Hole 직경을 정밀하게 제어하기가 용이하기 때문이다.

&lt; 표 2 &gt; 평균 삽입손실 시뮬레이션결과

(단위:dB)

비정렬 요인	Hole Diameter 126.0 $\mu$ m			Hole Diameter 126.5 $\mu$ m			Hole Diameter 127.0 $\mu$ m		
	Hole 직경 정밀도 (분산)			Hole 직경 정밀도 (분산)			Hole 직경 정밀도 (분산)		
분산	0.01	0.04	0.09	0.01	0.04	0.09	0.01	0.04	0.09
0.1	0.153	0.169	0.194	0.298	0.311	0.334	0.491	0.505	0.527
0.2	0.161	0.177	0.202	0.306	0.318	0.342	0.499	0.513	0.535
0.3	0.169	0.185	0.210	0.314	0.323	0.349	0.507	0.521	0.543
0.4	0.177	0.194	0.218	0.322	0.335	0.358	0.515	0.529	0.551
0.5	0.186	0.202	0.227	0.330	0.343	0.366	0.523	0.537	0.559

만약 나머지 오차분포에 대해서도 실제 측정자료가 있다면 보다 정확한 광커넥터 성능예측 결과를 얻을 수 있을것이나 개발 대상에 대한 성능 예측이므로 각 비정렬요인에 대한 실제 확률분포는 모델 가정에 의존할 수 밖에 없었다. 오차분포 모형으로 일양분포를 가정한 정렬모형 성능예측 결과를 <표 3>에 나타내었으나 정규분포와 일양분포를 모두에 대해 시뮬레이션한 결과 정규분포를 적용한 예측결과가 <표 3>이 결과보다는 양호하였으나 공차설정 결과에서는 일양분포만을 적용하였다.

&lt; 표 3 &gt; 비정렬요인 허용공차

정렬 모델 변위공차 [정렬Block 길이 $\pm 0.5\mu$ m] [페룰 접면 길이 $\pm 0.5\mu$ m] 페룰 접면 길이-정렬Block 길이= $1\mu$ m		
FIBER HOLE 중심공차	$\pm 0.3\mu$ m	MEAN <sub>LOSS</sub> =0.18dB,Ratio[ $\text{MAX} \geq 1\text{dB}$ ]=0.03
	$\pm 0.4\mu$ m	MEAN <sub>LOSS</sub> =0.20dB,Ratio[ $\text{MAX} \geq 1\text{dB}$ ]=0.05

## 참고문헌

- [1] N. Kashima(1988), "Centering Effect in Single Mode Multi-Fiber Connectors," *The Transactions of the IEICE*, Vol. E 71, No. 3, pp. 205-207.
- [2] Kashima, D and Satake, T(1987), "Relation Between Connection Loss and Single Mode Optical Fiber Diameter in a Multi-Fiber Connector," *The Transactions of the IEICE*, Vol. E 70, No. 11, pp. 1120-1124.
- [3] Satake, T and Kashima, N and Sankawa, I(1984), "Effects of Resin on Fiber Centering of Ferrule-Type Optical Fiber Connectors," *電子通信學會論文誌*, Vol.

J67-B No. 3, pp. 350-351.

- [4] Nemoto, S and Makimoto, T(1979). "Analysis of Splice Loss in Single-Mode Fiber using a Gaussian Field Approximation," *Optical and Quantum Electronics* 447-457.
- [5] Chun Oh Gon., Ahn S.H, Jeoung M.Y and Choi T.Gl(1993), "A Study on Insertion Loss Improvement for an Optical Connector using the Analysis of Transmitted Optical Intensity," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, And Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 8, pp. 768-777.
- [6] Sheather, S, J. and Johes, M.C.(1991), "A Reliable Data-based Bandwidth Selection Method for Kernel density Estimation," *Journal of Royal Statistical Society, Series B*, 53, pp. 683-690.