

자동차용 POF 광커넥터 페룰 단면 연마공정 연구

정명영*(부산대 나노기술학과), 김창석 (부산대 나노기술학과), 이홍한(㈜제씨콤)

Polishing of ferrule endfaces of the plastic optical fiber connector for automobiles

M. Y. Jeong (Department of Nanotech. PNU), C. S. Kim(Department of Nanotech. PNU),
H. H. Lee(JCCom Co.)

ABSTRACT

This paper is to investigate the influence of the endface quality on the loss characteristics of a plastic optical fiber connector for in-car network service. Using the parameters of the surface roughness and applied load, insertion loss of connector is measured. Due to scattering and change of refractive index, an optimal condition for low-loss coupling exists. We present the optimal condition as surface roughness $R_{rms} = 8 \text{ nm}$ and contact load up to 50 N .

Key Words : Plastic optical fiber(POF), optical connector, ferrule, insertion loss, polishing, compression force

1. 서론

자동차 등 수송 시스템에서 고속, 데이터 전송에 대한 요구가 중요한 사항이 되고 있으며, 이러한 고속 데이터 전송 기능의 사용을 보장할 수 있는 새로운 광 멀티미디어 네트워크에 있어서 정밀 생산기술 기반의 광커넥터에 대한 요구가 점차적으로 증가하고 있다. 아울러, 광커넥터를 사용함으로써 각종 멀티미디어 기기 및 전자제어 장치들을 연결시켜주는 수백 개의 전선을 수 개의 광섬유로 대체될 수 있어서 자동차 등 수송 시스템의 설계 및 생산 공정의 단축과 중량 감소로 인한 연비 개선 및 넓은 실내공간 확보 등의 효과도 동시에 기대할 수 있으므로 자동차에서는 광커넥터의 사용에 대한 표준화가 세계적으로 진행되고 있다. 광커넥터는 광통신 네트워크에서 광선로의 접속 및 유지에 사용되는 기본 부품으로서 자동차에서는 플라스틱 광섬유를 이용한 다중 모드 단심 및 다심 광커넥터의 표준화가 이루어지고 있다.¹

플라스틱 광섬유의 광커넥터의 성능은 삽입손실, 반사손실, 환경에 대한 안정성 등으로 평가한다. 삽입손실을 낮추기 위해서 가장 중요한 요소는 결합되는 축간의 어긋남과 단면의 품질을 확보와 프레넬에 의한 반사손실 요인이 적극 제어되어야 한다. 자동차에서는 약 2dB 이하의 수준을 요구한다. 또한, 반사손실은 광신호의 반사량에 대한 척도로서

시스템의 안정성과 간섭으로 인한 신호 품질 저하를 방지하기 위하여 감소되어야 하며, 자동차에서는 40dB 이상의 조건을 요구하고 있다.

본 논문에서는 자동차용 POF 광커넥터의 손실 특성 요구조건을 충족시키기 위해 연마에 따른 손실 특성으로 최적의 연마공정 조건을 설정하는 것이다.^{2,4} 또한, 빈번한 광커넥터 접속시 광커넥터로 인가되는 하중 변화가 손실변화에 어떤 영향을 미치는지 알아보고, 저손실을 갖기 위해 적절한 하중 조건을 실험을 통해 고찰하고자 한다.^{5,6}

2. 이론적 고찰

Plastic Optical Fiber (POF)는 일반적으로 코어 물질로 아크릴계 고분자인 PMMA(Poly Methyl Methacrylate)를 사용하고 클래딩 물질로는 불소계 고분자를 사용한다. 플라스틱 광섬유는 멀티모드 광섬유이며 빛이 진행하는 코어의 단면적이 광섬유의 전체 단면적의 98%이고, 유리 광섬유에 비해 직경이 크다. 본 연구에서 표면특성과 하중특성을 위해서 사용되는 POF 광커넥터를 Fig. 1에 나타내었다.

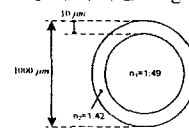


Fig. 1 Cross section of POF

광커넥터는 두 광섬유 혹은 두 그룹의 광섬유들을 연결시키는 단자로서, 연결과 분리가 수시로 가능하다. 동일한 광섬유 사이에 이상적인 접속형태는 광도파 매체의 완전한 연속성으로 보장하여 광신호의 손실이 없는 완전한 전달을 의미한다. 그러나, 실제 접속에서는 여러 가지 손실요인으로 말미암아 접속부에서 광신호의 감쇠가 야기된다. 삽입손실의 정의는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{삽입손실 (dB)} = -10 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (1)$$

식 (1)에서 P_0 는 입사 광 파워이고, P_1 는 출력 광 파워이다. 따라서, 삽입손실이 우수한 광커넥터란 입사 광파워를 최대한 손실 없이 전달하는 커넥터를 의미한다.

2.1 삽입손실과 표면조도

Fig. 2 에는, 광커넥터 접촉면에 표면 불균일함이 존재할 때, 광섬유 코어와 코어의 접촉면을 도시한 것이다.

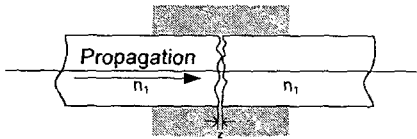


Fig. 2 Schematic of POE core to core contact

Fig. 2 에서 처럼 광커넥터 페룰 표면조도로 인해 산란손실과 미소한 간극이 생기게 된다. 이러한 접촉면에 결함이 있을 때 삽입손실에 대한 정량적인 결과식은 없다. 본 절에는 페룰 표면조도로 인한 산란손실과 미소간극에 따른 손실로 좀 더 최적화된 삽입손실을 표현한다.

거친 광커넥터 접촉 단면에서 전파하는 광파는 표면 불균일함으로 인해 미소한 입자에 부딪치게 된다. 이때 광은 여러 방향으로 산란이 발생하게 되며, 산란에 의한 반사 정도는 식 (2)와 같다.

$$\frac{P_{scat}}{P_{tot}} = 1 - e^{-\left(\frac{4\pi\delta \cos \theta_i}{\lambda}\right)^2} \quad (2)$$

여기서, P_{tot} 는 접촉 단면에서의 총반사이고, P_{scat} 는 접촉 단면에서의 산란에 의한 반사이다. λ , θ_i , δ 는 각각 진행광의 파장과 각도이고, 접촉 단면의 실효 표면조도이다. 산란에 의한 반사로부터 손실은 λ , θ_i , δ 에 의해서 결정된다. 각각의 변수들에 물리적인 의미를 살펴보면, λ 는 광커넥터에 광원 입사시 결정되는 요인이고, θ_i 는 광섬유 구

조적인 파라미터에 결정되는 요인이다. 그러나 δ 는 접촉 단면의 실효 표면조도를 나타내는 변수로서, 외부적으로 제어가 가능한 요인이다. 따라서, 제어가 가능한 실효 표면조도(δ)의 특성을 조절하여 산란 정도를 충분히 낮출 수가 있다.

또한, 광커넥터 접촉면 사이에는 미소한 간극(Gap)이 발생하게 되는데, 이에 대한 간단한 정량화된 근사식을 나타내었다

$$L_{gap}(z) = -20 \log \left(\frac{R}{R + zNA} \right) \quad (3)$$

여기서 R 은 POE 의 반경이고, NA 는 POE 의 개구수, z 는 POE 와 POE 간의 미소한 간극을 나타낸다. 식 (3) 을 이용하여 계산을 통해 광커넥터 특성을 Fig. 3 에 나타내었다.

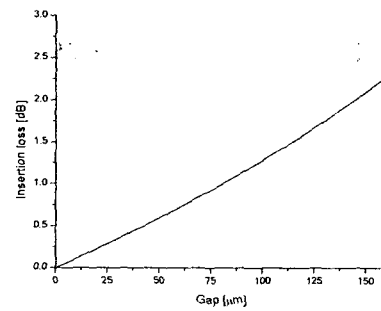


Fig. 3 Coupling loss of POE's as function of the fiber-fiber gap z

페룰의 표면조도에 의해서 발생하는 삽입손실은 산란에 의한 손실과 광섬유 간극에 따른 손실의 합으로 나타낼 수 있을 것이다.

광커넥터의 연결 단면에서 빛이 효율적으로 전달되게 하기 위해서 단면 연마가 필요하며, 자동차용 POE 광커넥터의 경우 역시 삽입손실 및 반사손실 특성 요구 조건을 만족시키기 위해서는 광섬유를 보호하고 정밀 정렬할 수 있도록 하는 광커넥터 페룰의 연마 수준을 향상시켜야 한다.

2.2 삽입손실과 인가 하중

저손실을 갖는 광커넥터의 성능이 새로운 자동차 광 멀티미디어 네트워크 성능에 미치는 영향도 크게 증가한다. 광커넥터의 신뢰도가 높고, 적은 삽입손실, 높은 반사손실을 가지는 광커넥터를 만들기 위해 현재 가장 많이 쓰이는 접촉방법은 물리적 접촉(PC : Physical Contact) 방법으로 접촉면에 결함이 없을 때 우수한 성능을 보인다. PC 연마는 두 개의 광섬유가 물리적으로 접촉하여 공기 층이 사라지므로 삽입손실이 줄어들도록 하는 것이다.

그러나, 이러한 PC 연마 광커넥터는 광섬유간에 하중을 받게 된다. 광커넥터 접촉면에 하중이 인가되면 접촉면 양쪽 단면에서는 굴절을 변화층이 생기게 된다. Fig. 4 에 하중 인가로 인해 광커넥터 단면에서 발생된 굴절률(n_2) 변화층을 나타내었다.

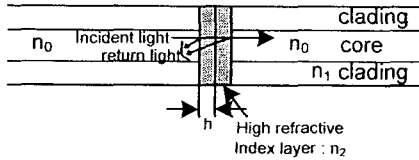


Fig. 4 Model of perpendicular endfaces optical fiber connection

Fig. 4 처럼 굴절률층이 발생하게 되면 진행광은 굴절을 변화층에서 Fresnel 반사로 인해 손실이 발생하게 된다. Fresnel 반사로 인한 손실식을 식 (4)에 나타내었다.

$$\text{반사손실 (dB)} = -10 \log \left[2R_2 \left(1 - \cos \left(\left(\frac{4\pi n_2}{\lambda} \right) \cdot (2h) \right) \right) \right] \quad (4)$$

$$R_2 = \left(\frac{n_0 - n_2}{n_0 + n_2} \right)^2$$

여기서 R_2 는 코어와 굴절을 변화층에서의 반사도이다. n_0 , n_2 , h , λ 는 각각 코어의 굴절률, 굴절을 변화층에서의 굴절률, 굴절을 변화층 두께, 그리고 입사 파장이다.

식 (4)에서 광커넥터 접촉면에 하중이 인가되면 접촉이면 양쪽 단면에서는 굴절을 변화층이 생기게 되고, 이로 인해 반사량이 증가하게 된다. 이는 곧 하중에 의한 삽입손실이 증가하게 됨을 의미한다. 이 삽입손실을 제어하기 위해서는 광커넥터 접속시 적절한 하중 인가 조건이 필요하다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 단면 연마 및 손실 측정

광커넥터 접속시 광을 광섬유에 효율적으로 결합시키기 위해서는 광커넥터를 정교하게 연마해야 한다. 자동차용 POF 광커넥터 연마 특성은 연마 공정 시간, 연마 단면의 압력 및 회전수와 연마 필름의 입도에 의하여 지배를 받는다. 본 실험은 이들 변수를 조절하여 손실 특성의 요구에 부응할 수 있는 표면조도 10 nm이하 수준의 단면 품질을 확보할 수 있도록 공정 조건을 설정하고자 한다.

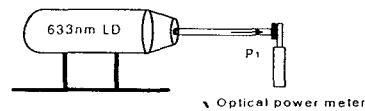
광커넥터의 연마 공정은 Polishig machine(Seiko Instrument 사의 OFL -12)을 사용하였다. 광커넥터를 Ring-type Jig 에 삽입, 고정시키고, 나사를 사용하여 Polishing machine 회전대에 Jig 를 고정시킨 후 연마

를 시작한다. 페룰 연마는 각각의 단계별로 시간과 연마 Film 을 변경해가면서 수행하였으며, 구체적인 광커넥터 연마공정 절차는 Table 1 에 나타내었다.

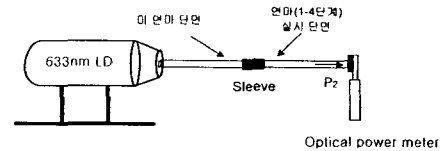
Table 1 The polishing processes of optical fiber connector

Step	Film	Grid Size	Load	Time
Stage 1	DR-5D	9 μm	300 g	20 sec
Stage 2	DR-5D	3 μm	300 g	20 sec
Stage 3	DI-5D	1.5 μm	300 g	20 sec
Stage 4	FOS-01	0.1 μm	300 g	1' 30"

POF 광커넥터의 연마공정은 Table 1 처럼 수행하였으며, 연결 단면에서 빛이 효율적으로 전달되게 하기 위해서, 광커넥터의 단면 처리는 PC 로 처리하였다. 광커넥터 접촉면의 각 단계별로 연마공정을 완료한 후 삽입손실을 측정하였다. 삽입손실 측정하기 위한 측정방법의 개략도를 Fig. 5 에 도시하였다.



(a) Before connecting between optical fiber connectors



(b) After connecting between optical fiber connectors

Fig. 5 Experimental setup for insertion loss

광원은 발진 파장이 633 nm인 레이저 다이오드 (JDS Uniphase 1122p, 4 mW)를 사용하였고, 광 파워 측정기는 Anritsu ML9002A(0.38 μm ~1.15 μm)를 사용하였다. 광원과 Optical powermeter 에 연결될 POF 광커넥터는 어댑터를 제작하여 사용하였다. 광커넥터와 광커넥터 연결은 어긋남이나 구부림 없이 연결될 수 있는 슬리브를 제작하여 접속하였다.

광커넥터 단면연마 절차에 따른 삽입손실 변화 측정을 위한 실험 과정은 다음과 같다. Fig. 5(a)와 같이 먼저 연마공정을 수행하지 않은 광커넥터의 Reference 파워값(P_0)을 측정한다. 이 값은 향후 삽입손실 식에 입력될 기준치로 삼는다. 다음으로 Fig. 5(b)와 같이 측정시료를 연마되지 않은 면은 Optical

powermeter 에 연결하고 연마 공정을 수행한 면은 슬리브를 통해 광커넥터와 광커넥터를 접속한다. 이때의 측정값이 단면 연마에 따른 파워값(P_1)이다.

3.2 하중 인가 및 손실 측정

연마가 완료된 POF 광커넥터의 접촉면에 하중을 인가하고 삽입손실의 변화를 측정하였다. 삽입손실의 변화를 통해 최적의 하중 인가 조건을 결정한다. 실험은 하중 인가가 가능한 Push-pull gage 와 광커넥터를 고정시킬 수 있는 고정대를 사용하였다.

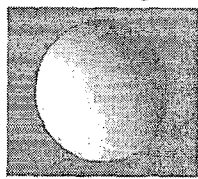
하중 인가에 따른 삽입손실 측정 절차는 다음과 같다. 실험의 측정 구성은 연마단계에 따른 삽입손실 측정 장치와 동일하게 구성한다. 이때 사용되는 측정시료는 연마 4 단계가 완료된 광커넥터를 이용한다. 첫번째로, LD 에 연결되는 광커넥터는 움직이지 않도록 고정대에 고정한 후, 고정된 광커넥터에 슬리브로 측정 시료를 연결한다. Push-pull gage 를 이용하여 LD 방향으로 일정한 힘(10N, 20N, 30N, 40N, 50N, 75N, 100N, 130N)을 작용시켜 가면서 광커넥터의 접촉면에 하중이 인가되도록 한다. 이 때, 측정값이 하중 인가에 의한 파워값(P_1)이다.

표면조도 및 하중 인가 실험에서 측정된 값(P_0 , P_1)은 Optical powermeter 에서 일정한 파워를 나타낼 때 값으로 선택하였다. 또한, 각각 5 회 이상의 실험을 수행하였으며, 측정된 결과값을 평균하였다. 평균 측정값을 토대로 식 (1)을 이용하여 손실 요인에 따른 삽입손실을 결정하였다.

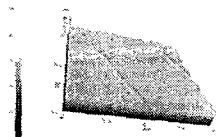
4. 실험결과

4.1 POF 광커넥터 패를 단면 연마 실험결과

Table. 1 의 연마 공정절차를 통해 최종 연마 단계에서의 광커넥터 단면을 Fig. 6 에 도시하였다.



(a) After multi-step polished endface



(b) AFM view showing the surface roughness of ferrule endface

Fig. 6 Cross section of POF

Fig. 6(a)는 최종 연마단계 후의 단면의 상태를

나타내며, Fig. (b)는 이 경우 AFM 을 이용하여 단면 상태를 측정한 것이다. 이때의 표면조도는 $R_{rms} = 8 \text{ nm}$ 의 값을 보이고 있다. 연마 공정 절차에 따른 삽입손실을 측정하였으며, Fig. 7 에 그 결과를 나타내었다.

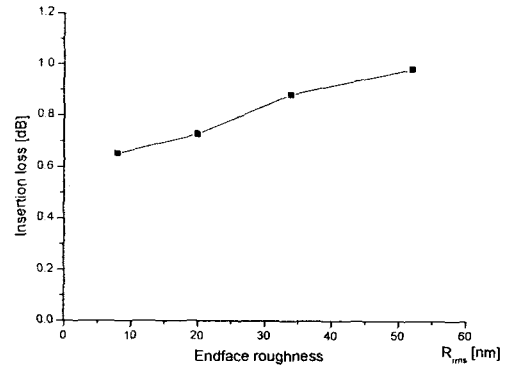


Fig. 7 Results of Insertion loss against polishing processes on surface roughness

위의 Fig. 7 과 같이 연마 공정에 따른 삽입손실의 변화로부터 POF 광커넥터 단면의 표면 조도가 삽입손실에 주요한 요인이 되고 있음을 알 수 있다. 표면조도에 의해서 발생하는 삽입손실은 식 (2)에서 실효 표면조도(δ)와 식 (3)에서 POF 광커넥터 간의 미소간극(z)에서 발생된다. 위 그래프에서 알 수 있듯이 R_{rms} 가 낮아짐으로써 δ 와 z 값이 개선되었다고 판단된다. 여기서, 손실 요인인 δ 와 z 은 둘 다 삽입손실 요인이나, Fig. 3 에서 알 수 있듯이 z 에 의한 손실은 매우 미약하다. 결국, δ 가 삽입손실에 중요한 요인이고 적은 삽입손실을 위해서 제어되어야 할 요인이다.

본 연마 실험 연구를 통하여 광커넥터 연마에서 초기 연마량의 결정이 중요한 요소로 부각되었다. 대부분의 경우, 초기 연마는 거친 연마 필름을 이용하여 단시간 수행하는 바, 이 경우 발생하는 연마후의 흠의 크기의 함수로 최적의 연마 필름을 결정하여야 하며, 만약 완전하게 초기 연마 상태를 파악하지 못하면 후속의 다단 연마 공정에서 우수한 연마 특성을 얻을 수 없었다. 또한 패들의 연마에서 플라스틱 광섬유의 연마 단면의 돌출 현상도 신뢰성 측면에서 제어되어야 한다.

4.2 POF 광커넥터 하중 인가 실험결과

POF 광커넥터 단면에 하중 인가시 삽입손실의 변화 결과값을 Fig. 8 에 나타내었다.

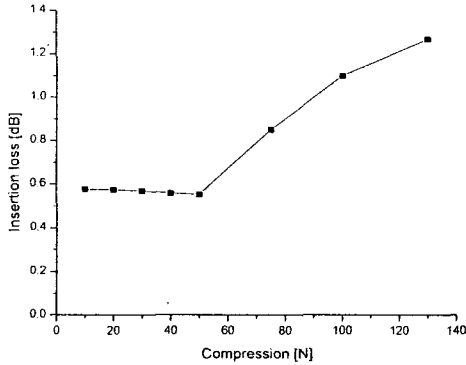


Fig. 8 Results of Insertion loss against compression on surface

위 결과 그래프를 통해서 하중 인가 50N 이하 영역에서는 하중 인가 증가에 따라 손실이 개선됨을 알 수가 있다. 이는 이 영역에서 커넥터의 접촉이 좀더 완벽하게 이루어져 손실이 줄어든 것으로 판단된다. 그러나, 하중 인가 50N 이상의 영역에서는 하중 인가 증가에 따라 손실값이 증가하고 있다. 이는 식 (4)에서 굴절을 변화층 발생으로 말미암아 이 변화층에서 반사량 증가가 주요 요인임을 알 수가 있다

5. 결론

본 논문은 자동차용 POF 광커넥터의 최적 설계를 위하여 손실 요인들 중 단면의 연마조건과 하중 인가에 따른 삽입손실 변화를 실험적으로 고찰 한 것이다.

광커넥터 단면에서의 표면조도는 산란에 의한 손실과 광섬유 간극에 따른 손실을 발생시킨다. 이를 제어하기 위하여 연마시간과 연마필름의 종류를 선택하여 다단계로 연마공정을 수행하였으며, 표면조도 $R_{rms} = 8 \text{ nm}$ 에서 0.6dB의 손실을 나타내었다. 이 값은 자동차용 광커넥터의 삽입손실 요구 조건을 충분히 만족할 수 있는 성능 수준으로서 공정 표준으로 적합하다.

광커넥터 단면에 하중 인가시 삽입손실 변화 결과값을 통해 인가 하중이 50N 이하의 값에서는 단면 접촉이 개선되어 삽입손실이 감소하였으나, 50N 이상에서는 접촉단면 굴절을 변화층이 발생하여 삽입손실이 증가하였다.

후 기

본 연구는 2005년도 부산대학교 동남권 부품소재 산학협력 핵심 사업단의 연구 지원금에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Andreas Neyer., Björn Wittmann., and Matthias jöhneck "Plastic-Optical-Fiber-Based Parallel Optical Interconnects," Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of Vol.5, No. 2, pp:193 – 200, 1999.
2. Zuyuan He, Waqar Mahmood, Erin Sahinci, Nasir Ahmad, Yves Pradieu, "Analysis on the Effects of Fiber End Face Scratches on Return Loss Performance of Optical Fiber Connectors" J. Lightwave Technol., Vol.22, No. 12, pp. 2749-2754, 2004.
3. Ling Yin, H. Huang, W.K. Chen, Z. Xing, Y.C. Liu, P.L. Teo, "Polishing of fiber optic connectors" International Journal of Machine Tools & Manufacture pp.659-668, 2004.
4. H. Huang, W.K. Chen, L. Yin, Z.Xiong, Y.C. Liu, P.L. Teo, "Micro/meso ultra precision grinding of fibre optic connectors" Precision Eng pp.95-105, 2004.
5. Mitsuru Kihara., Shinji Nagasawa., and Tadatoshi Tanifuji., "Return Loss Characteristics of Optical Fiber Connectors," J. Lightwave Technol., Vol.14, No. 2, pp. 1986-1991, 1996.
6. Masaru Kobayashi., Takashi Yoshida., Shuichiro Asakawa., Shin'ichi Iwano., Ryo Nagase., Shin Sumida., and Seiko Mitachi, "Injection Molded Plastic Multifiber Connector Realizing Physical Contact with Fiber Elasticity" Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of Vol.5, No.5, pp:1271 – 1277, 1999.