한국정밀공학회지 제 17 권 제 10 호 (2000 년 10 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 10, October 2000.

# 광섬유 단심 연결소자의 치수정밀도 자동검사

김기홍*, 김승우**, 임쌍근***

# Automatic Inspection of Geometric Accuracy of Optical Fiber Single Ferrules

Gee-Hong Kim*, Seung-Woo Kim**, and Ssang-Gun Lim***

## ABSTRACT

We present an automatic inspection system which has been developed to evaluate the geometric tolerances of the optical fiber connectors with an dimensional accuracy of ±0.1 μm. The main part of the inspection system comprises a series of machine vision and laser scanning probes to measure the internal and external circle diameters along with concentricity by making the most of advanced edge detection algorithms. Actual experimental results obtained through various repeatability tests demonstrate that the system well satisfies the required industrial demands for in-situ inspection of optical fiber connectors in real manufacturing environment.

**Key Words** : Ferrule(페롤), Fiber connector(광 연결소자), Edge detection(에지 검출), Circle fitting(원 맞춤)

## 1. 서론

페롤(ferrule)이라고 불리우는 단심광 연결소자는 통신용 광섬유를 연결하는 부품으로, 현재 통신망의 급격한 증가에 따라 수요가 급증하는 추세이다. 현재 국내시장의 경우에는 년 100 만개, 국제 시장의 경우에는 년 1000 만개 정도가 소요된다.

Fig. 1 은 상용화된 페롤 제품으로 외경(outer diameter)이 2.5mm, 길이 10mm 전후의 원통형 형상을 하며 사진에서 잘 보이지는 않지만 가운데 부분에 광섬유를 삽입하는 125μm 내외의 내경(inner diameter)이 가공되어 있다. 현재 페롤 제품의 소형화 추세에 따라 외경이 1.25mm, 1.4mm 등 다양한 제품이 생산되고 있다.

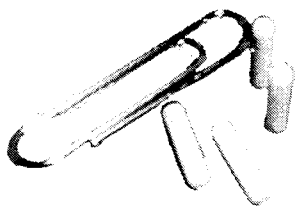

Fig. 1 Photograph of a single ferrule

페롤 제품에 있어서 가장 중요한 것은 내경, 외경, 진원도(Roundness), 동심도(concentricity)등의 형상 정확도로서, 이는 광섬유 접합 시 신호의 손실을 최소화하기 위해서는 1μm 이내의 정렬 오차를 유지해야 하며, 이는 페롤의 형상 정확도로 구

* 한국과학기술원 기계공학과, 대학원
** 한국과학기술원 기계공학과, 정회원
*** ㈜인텍엔지니어링

현되기 때문이다. 이를 위하여 페롤 소재도 내마모성이 강한 지르코니아 계열의 세라믹 소재를 이용하고 있다.

Table 1 Specifications required for the single ferrule measuring system.

| | Spec. | Repeatability |
|---|---|---|
| Inner diameter | 123μm-128μm | ±0.1μm |
| Roundness | | ±0.1μm |
| Concentricity | | ±0.2μm |
| Outer diameter | 2.4999 ±0.0005mm | ±0.1μm |

Table 1 은 페롤 제품의 사양과 측정 시스템이 가져야 하는 측정 반복능 사양을 나타낸다.

이 논문은 Table 1 의 측정 성능을 가지는 페롤 자동 측정 시스템의 개발에 관한 논문으로서, 측정 시스템은 레이저 스캐너를 이용한 외경 측정 시스템과 현미경 프로브를 이용한 측정 시스템 및 페롤을 이송하는 기계 구동 시스템으로 구성되어 있다. 그리고 기존의 여러 측정 알고리즘을 응용하여 Table 1 의 모든 항목을 자동으로 측정할 수 있는 프로세서 개발에 관한 연구이다.

## 2. 자동 측정 알고리즘

### 2.1 측정 순서도

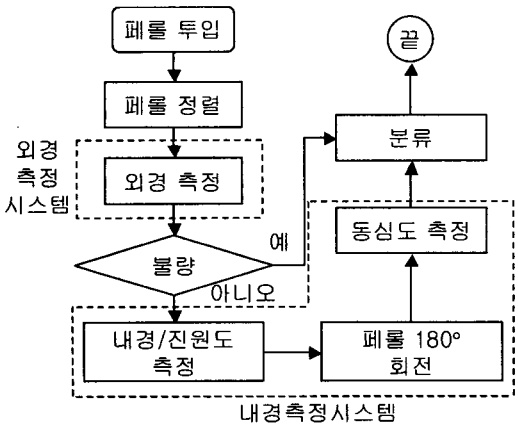


Fig. 2 Automatic measuring flow

상기 Fig. 2 는 페롤 자동 측정을 위하여 개발된 전체 측정 순서도를 보여준다. 측정 시스템으로 자동으로 공급되는 페롤은 먼저 외경을 측정한다. 외경 측정값으로부터 양불을 판정한 후 불량인 페롤은 적절한 분류함으로 투입되고 양품인 페롤만 내경 측정부로 이송된다. 내경 측정부에서는 먼저 내경과 진원도를 측정한 후 페롤을 180° 회전하여 동심도를 측정한다. 측정이 완료된 페롤은 등급을 판정한 후 분류함으로 이송된다. 다음은 각 측정부에 적용한 측정법과 측정 알고리즘에 대한 설명이다.

### 2.2 외경 측정 시스템

외경을 측정하기 위하여 이용한 측정법은 레이저 치수 측정법(laser dimensional gage)[1]으로 이 방법은 레이저와 회전 프리즘을 이용하여 일정 공간을 주사하고, 측정물로 인하여 가려지는 영역의 신호를 획득함으로써 측정물의 형상을 측정하는 방법이다. 이 방법은 분해능과 측정 반복능이 매우 우수하며, 특히 고속으로 측정을 수행할 수 있어 페롤과 같은 원통형 측정물의 외경을 측정하는 데 적합하다.

### 2.3 내경 측정 시스템

내경과 진원도를 측정하기 위하여 도입한 측정법은 현미경 프로브를 이용한 비접촉 측정법으로서, 획득한 내경 영상에 대한 영상 처리 기법을 통하여 측정을 수행한다. 이때 고려되어야 하는 알고리즘은 내경의 정확한 에지(edge)점을 추출하는 에지 검출 알고리즘과, 검출된 에지점으로부터 정확한 원을 측정하는 원 맞춤 알고리즘이다.

#### 2.3.1 에지(edge) 검출 알고리즘

에지 검출 알고리즘은 현미경 프로브를 이용한 모든 형상 측정법의 핵심 알고리즘으로, 에지 검출의 정확도가 측정의 정확도를 결정한다. 기존의 영상 처리 분야에서는 많은 에지 검출 알고리즘이 있지만, 일반적으로 측정에 이용되는 에지 검출 알고리즘은 가우시안 미분 연산자를 이용한 에지 검출법이 널리 이용된다[2].

$$h(x)=\frac{\mu-x}{\sqrt{2\pi\sigma^3}}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

수식(1)은 가우시안 미분 연산자를 수학적으로

표현한 것으로, $x$는 좌표를 나타내고, $\mu,\sigma$는 각각 연산자 $h(x)$의 폭의 크기와 가우시안 미분 연산자의 기울기를 나타낸다. $\mu$의 값이 커지면 외란에 의한 영향을 감소시킬 수 있으며, $\sigma$는 에지점에서의 반응값의 크기를 결정하여 정에지점 검출에 영향을 준다.

에지점에서의 광강도 곡선을 $I(x)$라 하면 에지점의 위치는 아래 수식과 같이 전술한 가우시안 미분 연산자 $h(x)$와 $I(x)$와의 콘볼루션(convolution)된 함수의 최대값으로 결정된다.

$$G(x)=\int_{-W}^{W} I(x-u)h(u)du \tag{2}$$

수식(2)에서 $W$는 가우시안 미분 연산자의 폭을 나타낸다.

Fig. 3은 전술한 가우시안 미분 연산자를 이용한 에지 검출법을 도식적으로 보여준다.

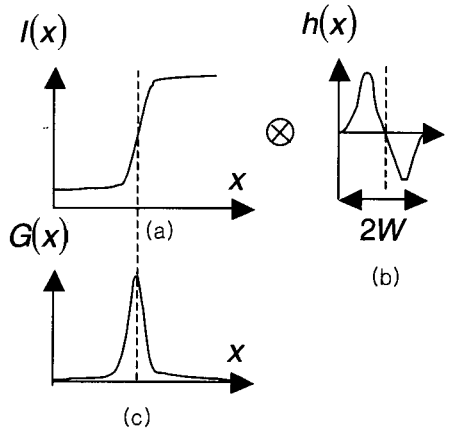


Fig. 3 Edge detecting process using Gaussian derivative operator; (a) Intensity profile of edge (b) Shape of Gaussian derivative operator (c) Result of convolution

Fig. 3 (a)는 에지점 부근에서의 광강도 곡선 $I(x)$를 나타내며, (b)는 가우시안 미분 연산자 $h(x)$를 나타낸다. 이 두 함수의 콘볼루션을 취하면 (c)와 같은 $G(x)$ 곡선을 얻게 된다. 최종적인 에지점의 위치는 $G(x)$에 대하여 4차 곡선 맞춤을 수행하여 최대점의 위치로 결정한다.

### 2.3.2 원 맞춤 알고리즘

전술한 에지 검출법을 이용하여 내경 영상에서 에지점을 검출한 후, 원 맞춤 알고리즘을 이용하여 에지점들로부터 내경과 중심점 그리고 진원도를 계산한다.

일반적으로 추천되는 원 맞춤 알고리즘은 가우스-뉴톤(Gauss-Newton) 알고리즘을 이용하는 방법과 선형 최소 자승법(linear least-squares method)을 이용하는 방법으로 분류된다[3]. 이 두 방법은 검출된 에지점의 분포에 따라 다른 측정 결과를 보여주는데, 검출된 에지점이 원주상에 고르게 분포하지 않고 일부분에 편중되었을 경우에는 선형 최소 자승법이 보다 정확한 측정 결과를 산출할 수 있음이 보고되고 있다[3]. 본 논문에서 측정하고자 하는 페롤의 경우, 마이크로 사이즈의 먼지로 인하여 원주상의 모든 에지점을 측정할 수 없는 경우가 발생하며, 가우스-뉴톤 방법의 경우에는 반복적인 연산을 통하여 내경과 중심의 수렴점을 계산하므로 측정 속도에서 문제점이 발생할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 선형 최소 자승법을 이용한 원 맞춤 알고리즘을 도입하였다.

이 방법은 먼저 다음과 같은 오차 함수를 설정한다.

$$e_i=(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2-r^2 \tag{3}$$

(3)식에서 $(x_i,y_i)$는 에지점의 좌표, $(x_0,y_0,r)$은 계산하고자 하는 내경의 중심점의 좌표와 반경이다. $\rho=x_0^2+y_0^2-r^2$을 도입하여 (3)식을 전개하면, 오차 함수는 $x_0,y_0,\rho$에 대한 선형 방정식으로 표현되며 이로부터 다음과 같은 행렬식을 유도할 수 있다.

$$\mathbf{A}\begin{bmatrix}x_0\\ y_0\\ \rho\end{bmatrix}=\mathbf{b} \tag{4}$$

(4)식에서 $\mathbf{A}$ 행렬의 $i$번째 행은 $(2x_i,2y_i-1)$이며, $\mathbf{b}$ 행렬의 $i$번째 행은 $x_i^2+y_i^2$ 값을 가진다. 그리고 $i$는 측정점의 번호를 나타낸다. (4)식의 행렬식을 계산하면 내경의 중심점 $(x_0,y_0)$와 $\rho$로부터 반경 $r$을 계산할 수 있다.

### 2.4 동심도 측정 알고리즘

동심도는 페롤 측정에서 중요한 측정 항목으로서 외경 중심에 대하여 내경 중심점의 변화량으로 정의된다. 그러므로 가장 이상적인 방법은 외경과 내경을 동시에 측정하여 각각의 중심점을 계산한 후 동심도 값을 산출하여야 한다. 그러나 Fig. 1 의 페롤은 외경의 크기는 2.5mm 인데 비하여 내경의 크기는 125μm 여서 한 개의 광학계를 이용하여 내경과 외경의 영상을 동시에 획득하는 것은 불가능하다.

본 논문에서는 페롤의 동심도를 측정하기 위하여 Fig. 4 와 같이 V 블록을 이용한 동심도 측정법을 이용하였다.

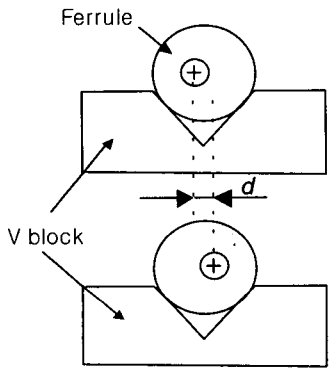


Fig. 4 Schematic diagram of concentricity measurement

Fig. 4 에서 윗부분에 도시된 그림은 페롤이 V 블록 위에 놓인 초기 상태이며, 아래의 그림은 180° 회전한 상태를 도시한 것이다.

동심도 측정 방법은 초기 상태에서 내경의 중심점을 측정한 후, 페롤을 180° 회전한 후 동일한 내경의 중심점을 측정한다. 이 두 측정값의 거리 $d$ 로부터 동심도값은 $d/2$ 로 설정된다.

이 방법은 매우 간편하지만 적용상에 몇 가지 제한점을 가진다.

첫째, 측정되는 페롤을 정확하게 180° 회전하여야만 정확한 동심도를 측정할 수 있다. 이론적으로 회전량이 정확한 180° 회전 위치에서 θ각도 만큼 벗어나 있으면 아래의 수식으로 표현되는 오차량을 가진다.

$$Error(\%) = (1 - \cos\theta) \times 100 \qquad (5)$$

둘째, 이 방법은 V 블록에 놓여지는 페롤의 외경이 진원이어야 정확한 동심도 값을 산출할 수 있다.

그러나 이러한 한계점들은 이송 메커니즘과 가공 공정에서 보완할 수 있으며, 측정 속도 및 정확도에서 페롤의 동심도를 측정할 수 있는 가장 적합한 방법으로 판단된다.

## 3. 측정 시스템

아래의 그림은 페롤 측정 시스템의 전체 모습을 보여준다.

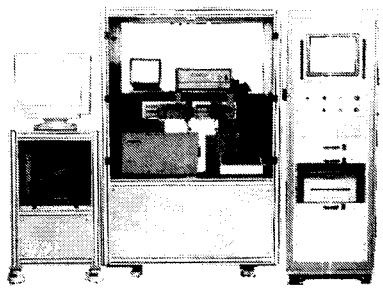

Fig. 5 Photograph of automatic ferrule measuring system

측정 시스템은 Fig. 5 의 우측에서부터 컴퓨터로 구성된 제어부, 측정부 그리고 분류함으로 구성된다. 측정부는 페롤 공급부, 외경 측정부 그리고 내경 및 동심도를 측정하는 내경 측정부로 구분할 수 있으며 공압 엑츄에이터를 이용하여 페롤을 이송 및 분류한다.

외경 측정에 사용되는 측정 장비는 Mitutoyo 사의 LSM-3100 으로서 분해능은 0.02μm, 반복능은 ±0.1μm 이다[4]. 외경부에 놓여진 페롤은 3 부분의 외경을 측정한 후 평균 외경과 외경 편차를 산출한다.

내경 측정부는 현미경 프로브와 V 블록 그리고 페롤 이송 및 180° 회전을 위한 구동 시스템으로 구성되어 있다. 현미경 프로브와 대물렌즈는 Mitutoyo 사의 VMU-1H 경통과 M Plan Apo 20 배 대물렌즈이며, 사용된 CCD 카메라는 PULNiX 사의 TM-7CN 이다. 획득된 영상의 화소(pixel) 분해능은 가로, 세로 방향으로 대략 0.5μm 이다.

개발된 측정 시스템은 시료 투입, 측정, 분류가 자동적으로 이루어지며, 1 개 측정 시간은 대략

적으로 15 초에서 18 초 정도이다.

## 4. 실험결과

### 4.1 배율 보정

비접촉 측정에 이용되는 모든 현미경 프로브는 배율 보정을 수행하여야 한다. 일반적인 배율 보정 방법은 형상값을 정확히 알고있는 원형이나 격자 형태의 보정 시편을 이용한다[2]. 그러나 본 논문에서 개발된 페롤 전용 측정기의 경우에는 이러한 범용적인 보정 방법이 반드시 정확한 보정을 수행한다고 말할 수 없다. 이는 현미경 프로브의 배율 보정에는 보정 시편뿐만 아니라, 측정물의 구조, 조명등의 주변적인 영향도 크기 때문이다. 그러므로 전용 측정기의 경우에는 측정물과 동일한 보정 시편을 이용하는 것이 가장 정확한 보정법이라 말할 수 있다. 본 측정기의 경우에는 여러 페롤 제품 중에서 내경 가공 상태가 가장 좋은 제품을 보정 시편으로 이용하였으며, 이 보정 시편의 내경값은 외경값을 정확히 측정한 여러 종류의 광섬유를 이용하여 보정하였다. 이러한 보정법은 엄밀한 의미의 배율 보정은 수행할 수 없으나, 기준 페롤에 대한 상대적인 형상 정확도를 측정하는 의미에서는 가장 적합한 보정 방법이라 할 수 있다. 이를 이용한 현미경 프로브 보정 방법은 보정 시편의 영상을 획득한 후 내경을 측정한 후 미리 측정된 보정 시편의 내경값으로부터 화소 분해능을 계산하는 방법으로 배율 보정을 수행하였다.

### 4.2 반복능 실험

측정기의 성능은 생산된 임의의 페롤 제품에 대한 반복능 실험으로 평가하였다.

첫번째 실험은 임의의 4 개의 페롤을 선택하여 20 회에 걸쳐 내경, 진원도, 동심도의 측정 반복능을 실험하였으며, 실험 결과는 Fig. 6 과 같다.

Table 2 Repeatability results of various ferrule samples

| Sample No. | Inner diameter (μm) | Roundness (μm) | Concentricity (μm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.03 | 0.07 | 0.17 |
| 2 | 0.03 | 0.1 | 0.16 |
| 3 | 0.01 | 0.01 | 0.22 |
| 4 | 0.02 | 0.08 | 0.33 |

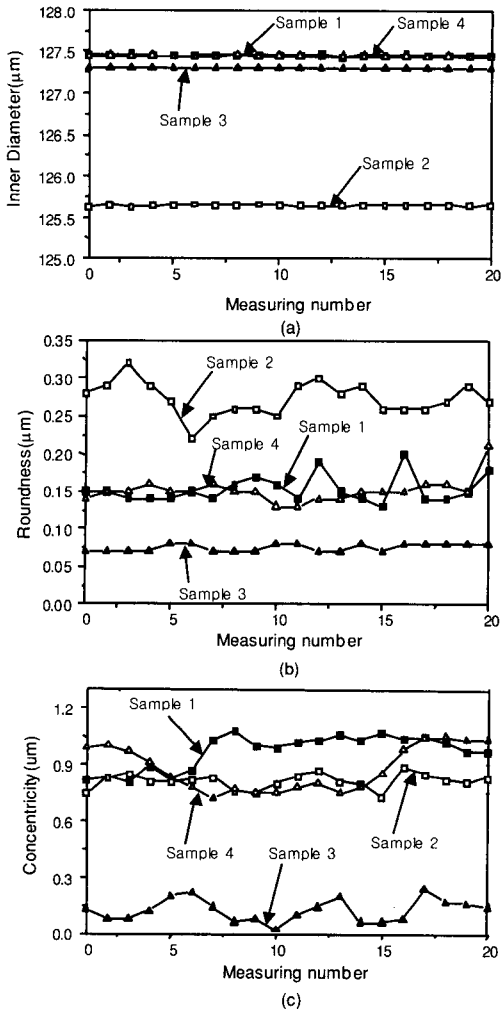


Fig. 6 Repeatability results of various ferrule samples; (a) Inner diameter (b) Roundness (c) Concentricity

Table 2 는 Fig. 6 의 측정 결과에서 최대 최소값 차이를 나타낸 것이다.

두 번째 실험은 임의의 페롤을 외경 측정부에 장착한 후 20 회 반복 측정을 수행한 결과로서, Fig. 7 은 측정 결과를 보여준다. 실험 방법은 앞, 뒤 그리고 가운데 3 곳을 측정한 후 이에 대한 평균 외경값과 3 부분 측정값의 최대 최소값 차이를 측정하는 방법으로 수행하였다. 외경 측정의 경우에는 제공되는 측정기의 사양[4]과 일치하는 측정 결과를 얻을 수 있었다.

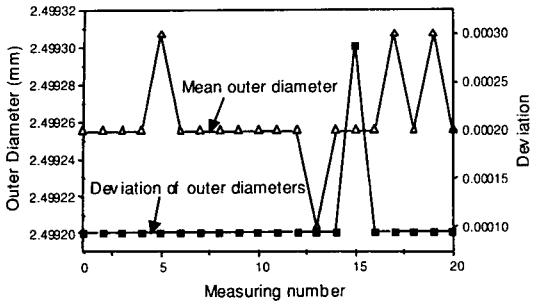


Fig. 7 Repeatability results of outer diameter

세 번째 실험은 실제 측정기가 작동하는 환경에서의 성능을 평가하기 위한 것으로, 전술한 두 실험과 같이 단순히 각 측정부에서의 독립적인 반복능만이 아니라 두 측정부가 연계되었을 때의 반복능을 실험한 것이다. 실제 측정 환경에서는 페롤 공급부나 공압 엑츄에이터를 이용하는 페롤 이송부 그리고 각축 모터의 구동으로 인하여 많은 외부 진동 요인이 있으며, 이러한 요인에 대한 측정 성능을 평가하는 것이 실험의 목적이다. 실험 방법은 임의의 페롤 시료를 시료 공급부에 장착하면, 공압 엑츄에이터에 의하여 외경 이송부로 이동시킨 후 외경을 측정한다. 외경 측정이 완료되면 공압 엑츄에이터에 의하여 내경 측정부로 이송한 후 내경 항목과 동심도를 측정한다. 그리고 외부 진동 요인을 유발하기 위하여 페롤 자동 공급부의 진동 엑츄에이터를 반복능 실험동안 작동 시켰다. 이러한 방법으로 임의의 2 개의 페롤에 대하여 10 회 반복능 실험을 수행하였으며, Table 3 은 실험 결과를 보여준다.

Table 3 Repeatability results under real measuring process

| Sample No. | 1 | 2 |
|---|---|---|
| Inner diameter (μm) | 125.64 (0.02) | 127.45 (0.02) |
| Roundness (μm) | 0.121 (0.08) | 0.143 (0.04) |
| Concentricity (μm) | 0.482 (0.24) | 0.953 (0.17) |
| Outer diameter (μm) | 2.4992 (0.0001) | 2.4991 (0.0) |

Table 3 에서 괄호 밖의 숫자는 10 회 평균값이며, 괄호 안의 숫자는 최대 최소값 차이를 나타낸 것이다. Table 3 은 본 논문을 통하여 개발된 측정 시스템이 실제 측정 환경하에서도 매우 우수한 측정 반복능을 가짐을 보여준다.

## 5. 결론

본 논문은 현재 광통신 산업에서 많이 사용되는 광 연결소자 부품인 페롤의 측정 시스템에 대하여 기술하였다. 측정 시스템은 외경 측정을 위하여 상용화된 레이저 스캐너를 사용하였고, 내경 및 동심도 측정을 위해서는 현미경 프로브를 이용한 비접촉 측정법을 도입하였다. 그리고 각종 반복능 실험을 통하여 측정 성능을 평가하였으며, 이를 통하여 개발된 측정 시스템이 실제 생산 현장에서 요구되는 사양을 충족시키는 적합한 측정 시스템으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Ernest O. Doebelin, *Measurement Systems; Application and design* 4rd ed., McGraw Hill, pp. 270, 1996.
2. 박민철, "고배율 현미경 비젼 시스템을 이용한 길이 측정에서의 에지검출 및 보정," 석사학위 논문, 한국과학기술원, 1996.
3. Alistair B Forbes, "Least-squares best-fit geometrical elements," NPL report DITC 140, pp. 12-13, 1991.
4. User's Manual, "LSM-3100 : LASER SCAN MICROMETER," Manual No. 4807GB, Mitutoyo.