

## 초소형 광모듈 제작을 위한 광섬유와 박막형 필터의 능동형 정렬 및 평가 시스템

최두선<sup>#</sup>, 박한수<sup>\*</sup>, 서영호<sup>\*\*</sup>, 제태진<sup>\*\*</sup>, 황경현<sup>\*\*</sup>

### Development and Characterization of Active Alignment System of Optical Fiber and Film Filter for Micro Optical Communication Module

Doo-Sun Choi <sup>#</sup>, Han Soo Park <sup>\*</sup>, Young Ho Seo<sup>\*\*</sup>, Tae-Jin Jae<sup>\*\*</sup>, Kyung-Hyun Whang<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

The automatic assembly system of micro optical filter is a key technology in the development of optical modules with high functionality. In order to develop an automatic assembly system of optical fiber and filter, we have firstly developed the system and program capable of characterization of 30  $\mu\text{m}$ -thick film filters as well as conventional optical filters. Moreover, we have carried out the characterization of optical filter using the developed system and program, and compared experimental results with by conventional handwork. The measurement of optical filters using the present system is faster, more precise and more reliable than those based on the conventional handwork.

**Key Words** : Optical communication component(광통신 부품), Optical filter(광필터), Film filter(박막형 필터), Lensed fiber(렌즈일체형 파이버), Evaluation program(평가 프로그램), Alignment system(정렬시스템)

#### 1. 서론

다가오는 정보화 사회에는 동영상이나 화상과 같은 대량의 정보가 요구되며 각 개인이 요구하는 정보의 양이 비약적으로 증가함에 따라서 기존의 전기적 방법에 의한 정보의 전송이나 분배방식은 한계에 이르게 되었다. 따라서 대량의 정보를 보다 빠르게 통신하고 싶어하는 욕구를 충족하기 위해서는 전기적 방법의 한계를 극복하고 광학적인 방법에 의한 정보의 처리 및 가공기술이 필수적인 요소로 부각되고 있다.<sup>1</sup>

광통신(optical communication)은 전기통신에서 전기적 신호를 정보전달의 수단으로 이용하는 것과는 달리 빛을 이용하여 통신을 가능하게 하는 방식으로 고속·고용량의 데이터를 전송하는 방법이다. 이러한 정보전달의 매개체로 빛을 이용하여 원하는 정보를 제어하기 위해서는 원하는 파장을 투과, 반사, 분리 및 에너지량을 조절하여 통신효율을 높이는 등 다양한 역할을 하는 광필터(optical filter)가 필수적으로 필요하다.<sup>2,3</sup>

이러한 광필터를 이용하여 대량의 정보를

<sup>\*\*\*</sup> 접수일: 2004 년 1 월 8 일; 게재승인일: 2004 년 6 월 11 일

<sup>#</sup> 교신저자: 한국기계연구원

E-mail: choids@kimm.re.kr. Tel. (042) 868-7124.

<sup>\*</sup> 고동기술연구원

<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원

전송하는 방법 중 WDM(wavelength division multiplexing)방식은 획기적인 전송량의 증대와 광네트워크로의 발전 가능성 등 때문에 집중적인 연구개발의 대상이 되고 있다. 특히 point-to-point WDM 전송에서 add-drop 방식의 WDM 네트워크로 발전하면서 OADM(Optical Add/Drop Module)이 핵심부품으로 자리잡고 있다.

Fig. 1 은 광필터를 이용하여 여러 파장의 신호가 전송되어가는 선로상에서 하나 또는 여러 파장의 신호를 뽑아내고 같은 파장의 신호를 다시 올려주는 OADM 의 개략도로써 이 모듈은 두 개의 광콜리메이터와 파장을 선택적으로 통과시켜주는 필터로 구성되어 있다.<sup>4</sup> 이중 광필터는 측정평가방법이 범용적이지 못해 생산 현장에서 많은 시간이 필요한 부분이며, 제품화를 위해 광필터를 패키징하는 경우에는 패키징한 후 그 성능을 평가하기 때문에 제품의 수율을 크게 떨어뜨리는 요인이 된다. 또한 광필터를 이용한 광모듈 생산은 현재 대부분 수작업에 의존하고 있으며, 일부업체에서 수동과 자동이 복합된 반자동 라인화가 추진되고 있는 실정이다. 이러한 시점에서 광모듈의 가격경쟁력과 균일성 확보 및 중국의 값싼 노동력에 대응하기 위해서 광모듈 생산자동화 시스템개발이 가장 필요한 기술로 대두되고 있다.<sup>5,6</sup>

본 연구는 광모듈 접속/조립시스템을 구축하는데 기반이 되는 측정평가 기술을 확보하기 위하여 광모듈을 구성하는 부품인 광통신용 일반 광필터(CWDM, DWDM)뿐만 아니라 광필터 두께가 약 30 μm인 박막형 필터(film filter)를 측정, 평가할 수 있는 광필터 성능평가 시스템을 설계 및 제작하였고 자동 광측정 및 광필터 성능평가 프로그램을 개발하였다. 또한 개발된 시스템과 프로그램의 성능평가를 위해 초소형 콜리메이터(miniature collimator)와 최근 광모듈의 소형화를 위해 많이 연구되고 있는 렌즈일체형 파이버(lensed fiber)를 사용하여 광통신용 일반 광필터 및 박막형 필터의 성능평가를 수행하였다.

## 2. 광필터 성능평가 시스템 구축

### 2.1 광필터 성능평가 시스템 설계 및 제작

광통신용 일반 광필터는 물론 박막형 필터의 성능평가를 위해 성능평가 시스템을 설계 및 제작

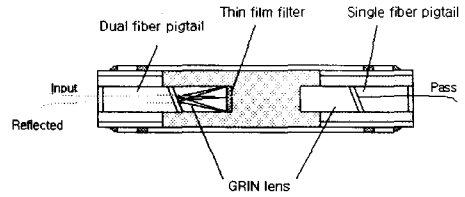


Fig. 1 Schematic diagram of 3-port ADM device

하였다. 레이저 소스의 입력단과 수광부 삽입손실(insertion loss)을 최소화한 후 광통신용 일반 광필터 또는 박막형 광필터를 이동시켜 광특성이 최대가 되도록 초미세 정렬작업(micro alignment)을 수행하고, 최적의 상태에서 자동 측정 및 성능평가 하도록 Fig. 2 와 같이 구축하였다. 주요 구성은 구동 및 장치부, 센서부, 제어부로 구성되어 있으며, 향후 새로운 광모듈 생산 시스템이 갖는 고기능성의 구현에 필요한 성능평가 기술을 갖출 수 있는 시스템이며 Fig. 3 은 마이크로 광필터 성능평가 시스템의 이해를 돕기 위한 개념도를 나타내었다.

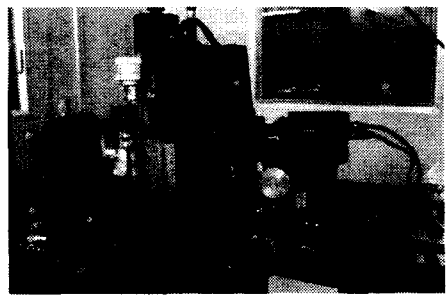


Fig. 2 The performance evaluation system of micro optical filters.

### 2.2 구동 및 장치부

구동 및 장치부에서 상부 광콜리메이터 스테이지(upper optical collimator stage)는 Fig. 4 와 같이 메인 프레임에 고정되어 있으며 측정대상물(CWDM, DWDM, film filter)에 따라 마스터 광콜리메이터를 교체할 수 있다. 또한, 고정구(jig & gripper)가 장착되어 있어 직경 125 μm의 렌즈일체형 파이버(lensed fiber) 나 900 μm의 초소형 광콜리메이터(miniature collimator)를 정밀하게 고정시킬 수 있으며, 광파워미터(PD, power meter)를 연결하여 출력광 에너지를

검출하도록 하였다.

또한 작동거리(working distance: 2~3  $\mu\text{m}$ )에 따른 특성평가를 위해 총 이송거리 20 mm, 분해능 1  $\mu\text{m}$ , 반복정밀도  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 로 정밀 이송을 하도록 설계하였다.

하부 광콜리메이터 스테이지는 상부 광콜리메이터와 초정밀 정렬 기능을 하며 레이저과원(LD, laser diode)이 연결되어 있어 광에너지를 입력하는 기능을 한다. 또한 상부 광콜리메이터와 미세 정렬을 할 수 있도록 6 축 스테이지로  $\theta_x, \theta_y(\text{tilt})$  축을 제어하였다

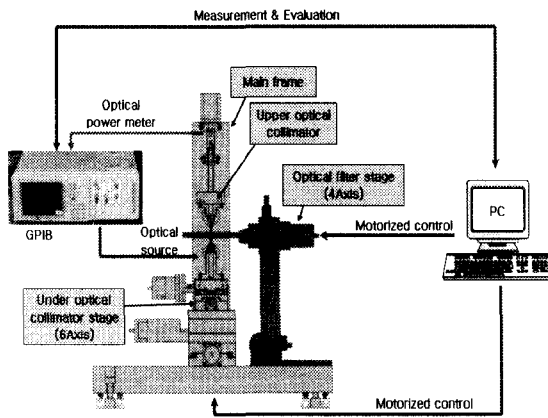


Fig. 3 Schematic diagram of the performance evaluation system of micro optical filters.

Fig. 5 의 광필터 스테이지는 광필터 성능평가 시스템 설계에서 가장 핵심적인 부분으로 상·하부 광콜리메이터 사이에서 측정하고자 하는 대상물인 광필터를 최적의 위치로 정렬하는 기능과 정밀 고정구(jig & gripper)가 장착되어 있어 다양한 광필터류를 측정하는 기능이 있다. 0.0025°/pulse 의 분해능과  $\pm 5^\circ$  의 총 이송각도를 가지는 광필터 스테이지는 4 자유도를 가지고 있으며 마이크로 광필터를 이송시켜 광 특성이 최대가 되도록 초미세 정렬작업을 수행하도록 설계하였다. 최적의 상태에서 자동측정 및 성능평가가 이루어지게 하기 위하여 x 축은 총 이송거리 100 mm, 분해능 0.05  $\mu\text{m}/\text{pulse}$  이며,  $\theta_x, \theta_y(\text{tilt})$ 분해능은 0.0025°/pulse 로 설계하였다.

### 2.3 센서부 및 제어부

센서부는 CCD 카메라와 조명장치(illuminator)로

나눌 수 있다. 광부품자체가 너무 작기 때문에 CCD 카메라를 이용하여 상·하부의 광콜리메이터의 기하 정렬상태와 마이크로 광필터의 장착상태를 PC 모니터상에서 초미세 부품들의 정렬상태를 모니터링한다. CCD 카메라에서 획득한 아날로그 영상신호는 Fig. 6 의 센서부 개략도에 나타나 있듯이 스위칭 보드(switching board)를 통해 각각 2 개의 CCD 카메라를 통해 획득한 영상신호를 PC 모니터에서 선택하여 모니터링 할 수 있다.

제어부는 모터구동 4 축 스테이지(상·하부 광콜리메이터 스테이지)와 광 계측기를 연결 및 제어하는 역할을 하는 GPIB 인터페이스, 마이크로 광필터의 구동 메카니즘 1 축과 상부 광콜리메이터의 모터구동 1 축을 제어하는데 사용되는 구동 제어보드로 구성되어 있다.

## 3. 광필터 성능평가 프로그램

### 3.1 프로그램

기존의 광필터 성능평가방법으로는 TLS (tunable laser source)를 사용하여 OSA(optical spectrum analyzer)에 나타난 스펙트럼 커브(spectrum curve)를 가지고 삽입 손실 값을 측정한다. 이러한 측정방법은 고가의 스펙트럼 분석기를 사용할 뿐만 아니라 측정 시 스펙트럼 커브를 가지고 커서 이동기능으로 측정하기 때문에 측정시간이 오래 걸린다. 또한 측정자가 육안으로 측정하므로 데이터의 정확도가 상당히 낮다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 스위프(sweep)횟수와 간격 조정이 가능하며 측정항목에 따라 측정된 데이터를 자동으로 획득하도록 프로그램을 개발하였다.

또한 자동 광축 정렬을 이용하여 수작업에 의한 광축정렬에 비하여 약 3 배이상 (3 분→ 1 분 이내)의 시간을 단축시킬 수 있다. 측정된 데이터는 저장할 수 있도록 하였으며 측정 이후에도 언제든지 스펙트럼 커브를 확인할 수 있다.

성능평가 소프트웨어의 전체 모듈은 Fig. 7 과 같이 구성되어 있으며, 크게 자동측정과 광축 자동정렬, 측정 파라메타 설정으로 나눌 수 있다. 측정 파라메타 설정에서는 광필터 성능평가를 하기 전 데이터 베이스화된 광필터 모델을 불러들이거나 수정(sweep 간격, 측정 범위) 및

추가 할 수 있다.



Fig. 4 Upper optical collimator stage.



Fig. 5 Optical filter stage.

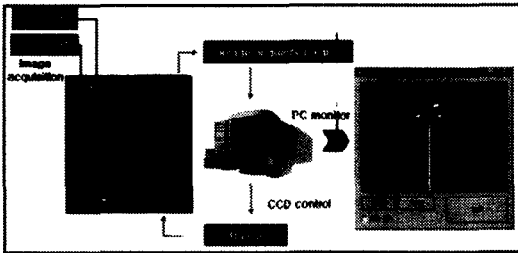


Fig. 6 Schematic diagram of CCD camera for optical component monitoring.

### 3.2 광필터 자동성능평가

성능평가 모듈의 구성은 크게 자동시험과 파형분석, 데이터 뷰로 나뉘어진다. 측정평가에 앞서 초기 프로그램 기준설정(reference setup)으로 기준자료 설정을 한다. 기준자료 설정 시 데이터의 신뢰성을 위해 반복측정을 2~3 회 하며, 데이터 베이스화된 광필터 모델을 선택하여 측정평가를 한다. 또한 데이터베이스화된 광필터 모델을 불러들이거나 수정(sweep 간격, 측정 범위)

및 추가를 할 수 있다. 초기 프로그램 설정이 끝나면 선택된 모델명에 따른 측정항목과 측정횟수에 따라 광필터의 성능평가를 한다. Fig. 8 은 필터를 거쳐 상부 콜리메이터에 입력된 광신호를 자동측정한 광필터 성능평가 프로그램이다. 측정항목으로는 통과대역(pass band), 차단(isolation), 리플(ripple), 투과삽입손실(transmission insertion loss) 등으로서 측정목록은 사용자가 직접입력이나 수정을 통하여 추가할 수 있다.

측정된 데이터는 자동시험 화면에 나타나며 파형분석화면에서 측정된 데이터의 파형의 분석을 정확한 좌표 값을 통해 얻어낼 수 있다. 자동시험에 의해 측정된 스펙트럼 커브로서 x(파장), y(손실값)축으로 각각 두 개의 커서가 있어 원하는 파장에서의 데이터 값을 하단에서 확인할 수 있고, 커서 두개간의 편차도 확인할 수 있도록 구성하였다.

측정된 데이터는 저장이 가능토록 구성되었으며 채널별로 데이터를 저장할 수 있도록 구성하였다. 이때 채널 추가 시에는 계측기의 파워메타를 추가하여야 한다. 스위프 간격은 최대 0.001 nm 까지 가능하며, 스위프 간격에 따라 측정시간은 많은 차이로 달라질 수 있다. 기본적으로 CWDM(course wavelength division multiplexing)의 경우 0.01 nm, DWDM(dense wavelength division multiplexing)의 경우는 0.001 nm 로 스위프 간격을 설정하여 측정한다.

## 4. 광필터 성능평가 시스템의 특징

광필터 성능평가 시스템이 갖는 특징은

- 1) 광필터 성능평가 시간단축
  - 광측정렬공정의 중요 핵심인  $\theta_x, \theta_y$ (tilt)축 4 축 자동정렬(3 분이상 → 1 분이내)
- 2) 고정밀 자동광측정렬기능
  - 분해능: 0.0025° /pulse 자동광측정렬(tilt axis)
- 3) 다양한 광콜리메이터 & 광필터 지원
  - 직경 900  $\mu\text{m}$ 의 초소형 광콜리메이터 지원
  - 125  $\mu\text{m}$ 인 렌즈일체형 파이버(lensed fiber)지원
  - 광통신용 일반 광필터 및 박막형 필터 지원
- 4) 향후 초소형 광모듈 측정, 평가 및 조립가능 등으로 향후 새로운 광모듈 생산 시스템이 갖는 고기능성의 구현에 필요한 성능평가기술을 갖출 수 있는 시스템이다.

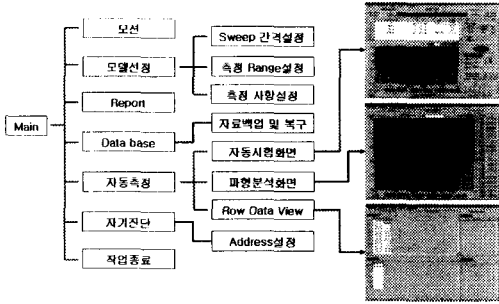


Fig. 7 Hierarchy of evaluation program module

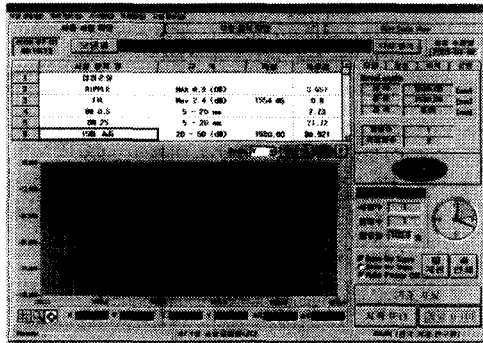


Fig. 8 The performance evaluation program of the optical filter

### 5. 광필터 성능평가 방법 및 평가 항목

Fig. 9 는 마이크로 광필터 성능 평가과정으로서 시스템 정렬을 위한 초기 준비 작업은 수동으로 출력 광원부와 수광부에 광콜리메이터를(Miniature collimator or Lensed fiber) 정밀 고정구를 이용하여 고정한다. 각각의 파이버를 클리버(Cleaver)와 스플라이서(Splicer)를 사용하여 계측기의 출력 광원부와 수광부에 파이버를 연결한다. 결합손실이 최소화되도록 정밀 정렬을 한 상태에서 계측기 및 측정 프로그램을 사용하여 기준설정(Reference setup)을 한다. 그리고 평가 대상물인 일반 광필터 또는 박막형 광필터를 광필터 스테이지에 장착한다. 시스템 정렬을 위한 초기작업으로 CCD 카메라로 모니터링하며 상·하부의 광콜리메이터 및 광필터 스테이지를 수동 정렬한다. 여기서 가장 중요한 광축정렬은 계측기로 연결된 하부 광콜리메이터 스테이지와 광필터 스테이지  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ (Tilt)축의 광축정렬로서 자동 정렬 프로그램을 구동시켜 장착된 광필터의 삽입손실이 -0.3 dB 이하로

측정될 때까지 광축정렬을 진행한다. 이때 소요되는 시간은 약 1분 이내이다.

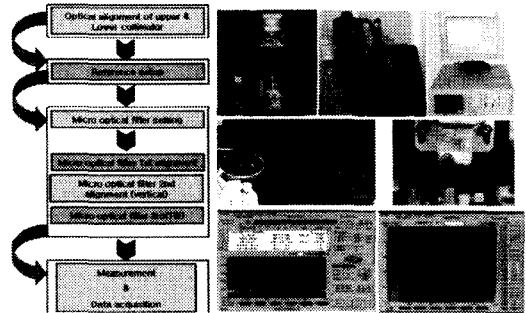


Fig. 9 Main process for estimation of the micro optical filter performance

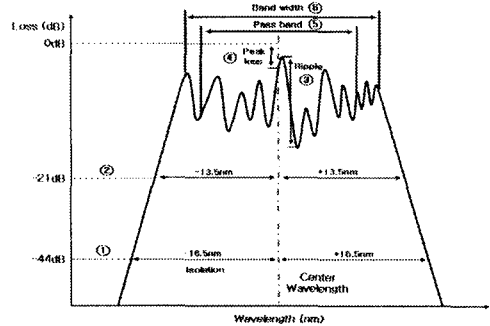


Fig. 10 Evaluation parameters of the optical filter performance

Fig. 10 은 광필터 성능평가 항목인 차단(isolation), 리플(ripple), 투과삽입손실(TIL: transmission insertion loss), 통과파장(pass band)을 나타낸다. 이 중에서 투과삽입손실은 일반적으로 가장 많이 참고하게 되는 광 모듈 또는 광통신 장비의 성능 중 하나로서 어떤 신호가 광통신 장비를 거치면서 발생하는 손실을 측정하는 것을 말한다(Fig. 10 의 ③과 ④항목을 더한 값).

차단은 통신에서 이웃채널에 다른 파장이 미치는 영향(cross talk)을 나타낸 것으로서 삽입손실이 좋아도 이웃채널로부터 cross talk 이 크면 통신효율은 나빠진다. 즉 얼마나 이웃채널과 차단이 잘되어 있는가를 판정하는 기준 값을 말한다(Fig. 10 의 ①항목). 마지막 리플은 가로축을 파장, 세로축을 광파워로 하여 측정하였을 때 이상적인 것은 직사각형모양이나 그것은 실제 제조 불가능하며, 보통 가우시안 형태를 갖는데

이 경우 통과되는 광은 모두 통과하지 못하고 약간의 손실 값을 갖게 된다. 광필터 코팅층의 균일성을 평가하는 기준을 말하며 0.3 dB 이상을 넘으면 안된다. (Fig. 10 의 ③항목으로 pass band 내에서의 손실 값 최대, 최소 편차).

### 6. 광필터 성능평가

성능평가 시스템의 가장 큰 장점 중의 하나는 광필터 성능평가 시 측정 정밀도가 수작업에 비해 월등하여 투과삽입손실 측정평가의 편차가 매우 줄어든다는 것이다. 이러한 시스템의 장점을 확인하기 위하여 자동과 수동으로 광필터 10 개를 각각 측정하였다. Fig. 11 에서 보는 것처럼 자동으로 측정평가 된 광필터는 투과삽입손실이 평균 0.142 dB 를 기준으로 0.002 dB 이내의 편차를 보이는 반면 수동에 의한 것은 그 편차가 평균 0.166 dB 를 기준으로 0.03 dB 로 측정되어 투과삽입손실이 약 1.2 배 큰 것을 확인할 수 있다.

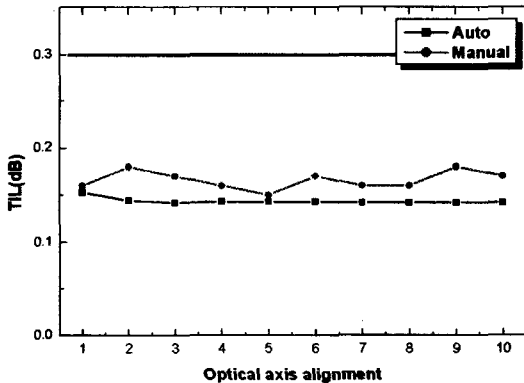


Fig. 11 Comparison of transmission insertion loss: Automatic alignment vs. manual alignment

Fig. 12, 13 은 기존에 상용화되어 있는 중심파장 1510 nm인 CWDM 필터와 1536.61 nm인 DWDM 필터를 개발된 시스템에 의해 측정된 그래프이며, Table 1 와 Table 2 는 기존 측정값과 개발된 시스템에 의해 측정된 측정값들을 비교한 값이다. 차단을 제외한 리플과 투과삽입손실 측정값들은 기존 측정된 광필터의 측정값과 차이가 없고 기준값 0.3 dB 이내 임을 알 수 있었다. 비교 값을 보면 차단 값은 중심파장을 기준으로 CWDM 은  $\pm 16.5$  nm일 때, DWDM 은

$\pm 0.69$  nm일 때의 손실을 의미하는데 보통 25 dB 이상 이여야 한다. Table 1, 2 에 나타난 기준 사양은 제작업체에서 보다 높은 사양을 선택하여 CWDM 을  $\pm 13.5$  nm에서, DWDM 은  $\pm 0.65$  nm에서 차단 값을 측정된 값이다(Fig. 10 의 ①은 측정 기준 값이며 ②는 업체에서 보다 높은 사양을 선택하여 측정된 값이다). 본 실험에서는 기준으로 사용되는  $\pm 16.5$  nm,  $\pm 0.69$  nm를 사용하여 실제 제품의 사양보다 높은 결과를 보인 것이다.

Table 1 Comparison of CWDM specification and automatically measured results

	Isolation	Ripple	TIL	BW (Bandwidth)
CWDM Spec.	21 dB	0.15 dB	0.15 dB	16.23 nm
Measurement data	44 dB	0.14 dB	0.15 dB	16.23 nm

Table 2 Comparison of DWDM specification and automatically measured results

	Isolation	Ripple	TIL	BW (Bandwidth)
DWDM Spec.	27.97 dB	0.15 dB	0.15 dB	16.23 nm
Measurement data	29.24 dB	0.14 dB	0.15 dB	16.23 nm

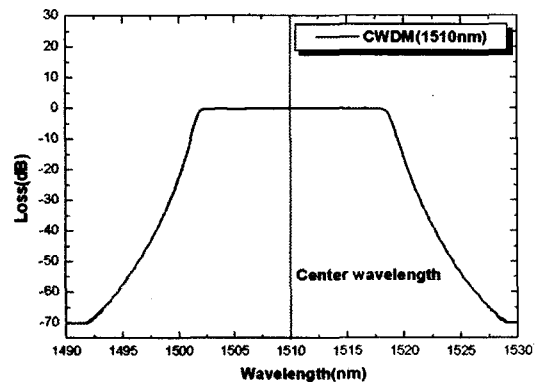


Fig. 12 Automatic measurement of 1510 nm CWDM filter by miniature collimator

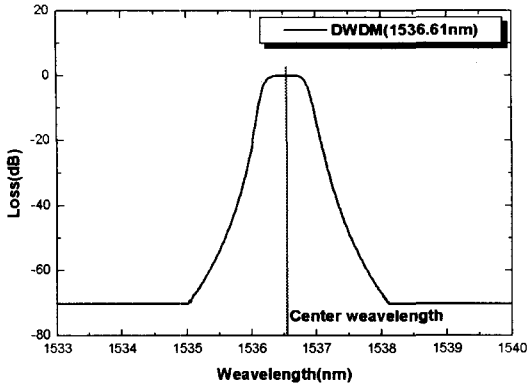


Fig. 13 Automatic measurement of 1536.61 nm DWDM filter by miniature collimator

Fig. 14, 15 는 중심파장 1500 nm인 박막형 필터의 투과/반사 성능평가 결과로서 Fig. 14 는 초소형 콜리메이터(900  $\mu\text{m}$ )를 사용하여 측정 한 것이며 Fig. 15 는 렌즈일체형 파이버(125  $\mu\text{m}$ )를 사용하여 측정 한 결과이다.

측정결과 1500 nm이하의 파장은 반사하고 이상에서는 투과하는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 14 의 초소형 콜리메이터를 사용하여 측정 한 손실 값 그래프를 보면 Fig. 15 의 결과와 달리 손실 값이 0 dB 이상으로 나온 것으로 보아 이것은 측정대상인 박막형 필터의 코팅층이 균일 하지 않아 나타난 결과임을 확인할 수 있었다.

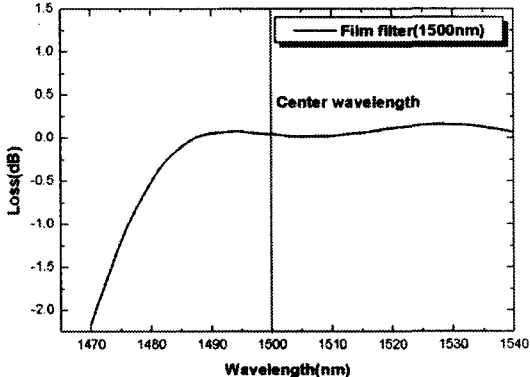


Fig. 14 Automatic measurement of 1500 nm film filter by miniature collimator

본 실험을 통하여 기존 측정방법인 OSA 를

이용한 광필터 성능평가보다 본 연구에서 개발된 성능평가 시스템이 성능평가 소요시간단축 및 측정 정밀도와 신뢰도에서 우수하다는 것을 알 수 있었다. 또한 일반 광필터 뿐만 아니라 박막형 필터의 성능평가도 가능함을 확인할 수 있었다.

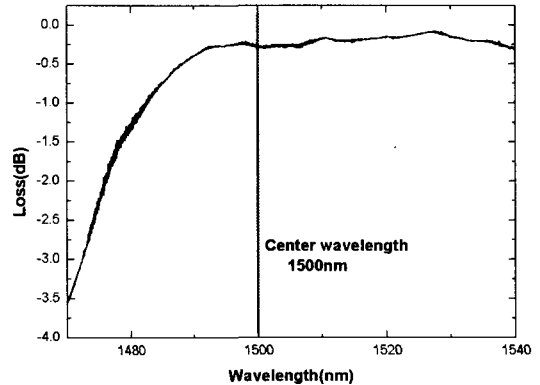


Fig. 15 Automatic measurement of 1500 nm film filter by lensed fiber

## 7. 결론

마이크로 광필터 자동조립 시스템은 고 기능성 광통신 모듈의 개발에 있어 가장 필요한 장비이다. 이러한 광필터 자동조립 시스템을 개발하기 위하여 본 연구에서는 광통신용 일반 광필터 뿐만 아니라 두께가 약 30  $\mu\text{m}$ 인 박막형 광필터를 성능평가 할 수 있는 시스템과 프로그램을 개발하였다. 또한 제작된 성능평가 시스템과 프로그램을 이용하여 광필터 성능평가를 하였으며, 이를 기존 수작업에 의해 측정하던 방법과 비교/분석하였다. 그 결과로 광필터 성능평가 소요기간 및 광축 정렬시간을 수작업에 의한 광축 정렬에 비해 삽입손실이 1/3 감소되었고, 성능평가시간은 1 분 이내로 줄이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발한 성능평가 프로그램과 기존 OSA 를 이용하여 측정 평가하여 기존 상용화되어 있는 광필터의 측정데이터를 비교한 결과 성능평가 프로그램의 반복정밀도 및 신뢰도에서 우수하다는 것을 관찰할 수 있었다.

향후 이러한 광필터 성능평가 기술을 기반으로 고기능성 광통신 부품을 제작 및 성능평가 할 수 있는 자동조립 시스템을 구축하여 광통신 부품의 고성능, 저가격화를 달성 함으로서

국내의 광부품 특히 광전부품, 복합수동 광부품, 광전집적회로 등의 기반기술 구축 및 상품화 기술을 보유하게 될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대신기술 개발 산업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

## 참고문헌

1. Choi, D.-S., Jae, T. J., Lee, E. S., Choi, K. B., Choi, B. S., Park, L. Y. and Sun, H. Y., "Development of System Integration for Micro Optical and Thermofluidic Devices," The 2<sup>nd</sup> Workshop of Development of Micro Optical and Thermofluidic Devices with Functionality, pp. 3-9, 2002.
2. Wu, H. D. and Bames, F. S., "Micro Lenses," IEEE Press, 1991.
3. Yuan, S. and Riza, N. A., "General Formula for Coupling-loss Characterization of Single-mode Fiber Collimators by use of Gradient-index Rod Lenses," Applied Optics, Vol. 38, pp. 3214-3222, 1999.
4. Park, L. Y., Choi, D.-S., Jae, T.-J., Choi, K. B. and Kang, Y. H., "Development of Automatic Manufacturing System for Optical Collimators With High Functionality," Autumn Conference of the KSPE, pp. 119-122, 2002.
5. Li, J., Liu, A.Q., Zhong, W.D., Zhang, Q.X. and Lu, C., "MEMS switch based serial reconfigurable OADM," Optics Communications, Vol. 230, pp. 81-89, 2004.
6. "2000 Photonic Industry Prediction Handbook," Fuji Chimera Research Institute, Inc., Japan.