

측면 연마 광섬유를 이용한 가변 광 감쇠기

구숙영 · 정치섭[†]

청주대학교 정보기술공학부 레이저광정보공학전공
☎360-764 충북 청주시 상당구 내덕동 36번지

(2003년 6월 13일 받음, 2004년 5월 27일 수정본 받음)

측면 연마 광섬유를 이용하여 가변 광 감쇠기를 실험적으로 구현하였다. 오버레이 물질로는 poly(vinylidene fluoride)와 poly(methyl methacrylate) 고분자 혼합체를 사용하였다. 혼합고분자의 온도를 변화시켜 오버레이의 굴절률을 조절하였고, 그로 인한 소산장 결합 정도를 변화시켜 광섬유로부터 추출되는 광량을 조절하였다. 삽입손실은 0.1 dB 이하였으며 30 dB 이상의 감쇠를 실현하였다.

주제어 : VOA(Variable Optical Attenuator), SPF(Side Polished Fiber), thermo-optic effect

I. 서 론

다중 분할 방식(wavelength division multiplexing: WDM)의 통신이 보편화하고, 새로운 통신 대역이 증가됨에 따라, 통신망 구성에 있어 채널별로 광신호세기를 조절하는 기술은 매우 중요하게 여겨지고 있다. WDM 통신에서 광신호의 증폭은, 각 채널별로 들어오는 서로 다른 파장의 광세기를 같게 만들어주고, 다중화 한 후 증폭하고 있다. 이 경우, 각 채널의 광세기는 실시간적인 감쇠를 통해 일정값으로 감쇠되어 평탄화 된다. 가변 광 감쇠기(Variable Optical Attenuator: VOA)는 이러한 채널평탄화의 용도에 사용될 뿐 아니라, 어블 첨가 광섬유증폭기에서의 이득 평탄화, 그리고 광통신 전반에서 광세기 제어 등 다양한 용도에 사용되고 있다.

현재 사용되는 대부분의 VOA는 절단된 광섬유사이에 가변 흡수 필터나 초점위치를 가변 할 수 있는 수렴렌즈 등을 삽입하고, 모터등 기계적 수단을 통해 투과광 세기를 조절하고 있다. 근래에 와서 광도파로를 사용하거나 광 isolator를 사용하는 등, 다양한 방법의 VOA들도 소개되기도 하나, 그래도 대부분의 VOA에서는, 절단된 광섬유 사이에 감쇠 장치를 삽입하여 감쇠를 유도하는 일계를 유지하고 있다. 이런 경우에 광은 절단된 광섬유사이에 존재하는 모든 매질을 통과해야 하므로, 많은 경계면을 가지게 된다. 또한 각 경계면에서는, 굴절률 정합이 되지 않을 경우 투과량의 손실을 피할 수 없게 된다. 통신망 구축에 있어 이러한 삽입손실은 추가적인 증폭을 필요로 하기 때문에 비용의 상승을 야기하기도 한다. 따라서 광통신망 구축에 있어, 이러한 삽입손실을 해결하면서도 감쇠기능을 만족시킬 수 있는 VOA를 개발하는 일은 중요한 과제로 여겨지고 있다.

측면 연마 광섬유(Side Polished Fiber: SPF)는 광섬유의 측

면 클래딩일부를 코어로부터 수 μm 까지 제거한 광섬유이다. 만약 측면 연마 광섬유 위에 광도파로가 형성되게 되면,^[1-4] 이 계는 양자역학적으로 이중 우물 퍼텐셜 계로 볼 수 있게 된다. 이 경우, 두 퍼텐셜 우물 사이에서 확률함수의 흐름은 퍼텐셜 장벽을 형성하는 물리변수들의 함수가 된다. 이 사실은, 역으로 물리변수를 변화 시켜줌으로써 확률흐름을 조절할 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 이러한 확률함수의 흐름은 전자기학적으로 소산장 결합에 의한 도파로 모드와 광섬유 모드사이의 모드결합으로 해석할 수 있다. 이러한 모드결합의 개념을 이용하면 광섬유를 절단하지 않고도 오버레이의 광 특성을 외부에서 조정함으로써, 광섬유를 흐르는 광신호를 조절할 수 있게 된다. 실제로 이 방법을 써서 변조기,^[5,6] 스위치,^[7] 편광기,^[8,9] 굴절률계^[10] 등이 개발되고 있다.

본 연구에서는 이러한 광결합 원리를 이용한 광 감쇠기를 구상하였다. 이 광 감쇠기 역시 광섬유를 절단하지 않고 감쇠를 유도할 수 있으므로 삽입손실 문제를 해결할 수 있는 근본적인 방법이 된다. 다만, 다른 응용에서와 달리 광 감쇠기 경우는 넓은 파장대역(우리 경우 1.3 μm ~ 1.55 μm 의 WDM 대역) 에서도 광결합을 이룰 수 있어야 하므로 오버레이의 두께를 벌크수준으로 충분히 두껍게 하였다. 이 경우, 도파로 모드들은 1.3 μm 부터 1.55 μm WDM 파장대까지 광섬유모드와 결합을 이룰 수 있게 된다. 따라서 이 파장대에서 굴절률 분산이 거의 없는 물질을 오버레이로 사용할 경우, 광결합에 의한 광 감쇠특성은 이 파장영역 전체에 걸쳐 거의 차이를 보이지 않게 된다. 오버레이로 사용된 물질의 굴절률은 가능한 광섬유 굴절률과 가깝게 해야 외부 조정에 의해 쉽게 결합 정도를 조절할 수 있게 된다. 우리는 이러한 이유로 polyvinylidene fluoride(PVDF)_(x), polymethylmethacrylate (PMMA)_(1-x) 혼합고분자를 오버레이 물질로 택하였다. PVDF:PMMA 혼합 고분자는 (1) 낮은 굴절률의 PVDF와 높은 굴절률의 PMMA의 혼합체로 되어 있어 혼합비에 따라 쉽게

[†]E-mail: csjung@chongju.ac.kr

광섬유와 굴절률정합을 시킬 수 있으며, (2) 높은 투명도를 가지고 있어 산란이 적으며 (3) 열광학계수가 커서, 적은 온도변화로도 광 결합 조절이 용이하며, (4) 용매에 녹일 경우, 스피닝, drop casting 등 다양한 방법으로 막 제작이 가능하며, (5) 열적으로 비교적 안정된 고체이므로 실제응용에서도 용이하게 적용할 수 있다는 장점들을 가지고 있다.

본 연구에서는 (1) PVDF:PMMA 혼합고분자를 오버레이로 하고, 이를 SPF 위에 올려 광감쇠를 위한 in-line형 광결합기를 만들고, (2) 오버레이의 열광학특성을 이용하여 광결합 정도를 조절함으로써 감쇠를 가변 할 수 있는 VOA를 구성한 후, (3) 감쇠의 안정성을 기하기 위해 폐회로 조절 시스템(Closed Loop Control System)을 도입함으로써, 안정된 가변감쇠성능을 만족하는 in-line형 열광학 VOA를 구현하고자 하였다.

II. 이 론

그림 1은 본 실험에서 제안된 SPF형 VOA의 단면도이다. 그림처럼 광섬유 코어와 오버레이 도파로 사이의 간격 d_0 가 레이저의 파장 λ 의 수배 이내가 되면 광섬유와 도파로 오버레이 사이에는 소산장(evanescent field) 결합에 의한 에너지 교환이 가능하게 된다. 즉 방향성 결합기의 한 형태로, 광섬유와 오버레이 사이의 굴절률 정합에 의해 코어를 지나는 광 신호가 도파로로 결합되어 빠져나가는 현상을 관측할 수 있게 된다. 도파로 모드와 광섬유 모드간의 결합 정도는 각 모드의 굴절률이 얼마나 정합되는지, 그리고 연마 후 잔여 클래딩의 두께 d_0 가 얼마가 되는지에 따라 결정된다. 이 사실은 역으로 SPF 위에 광섬유보다 높은 굴절률의 매질을 올려 놓아 감쇠 정도를 측정함으로써 잔여 클래딩의 두께를 알아 낼 수 있는 방법이 되기도 한다.^[11-13]

Leminger와 Zengerle는 이 방법으로 감쇠를 dB단위로 다음과 같이 표현^[14] 하였다.

$$\alpha_0 = 10 (\log_{10} e) \sqrt{\pi R a} \frac{4\beta_0}{n_2^2 k_0^2} \left[\frac{u}{a V K_1^{2(w)}} \right]^2$$

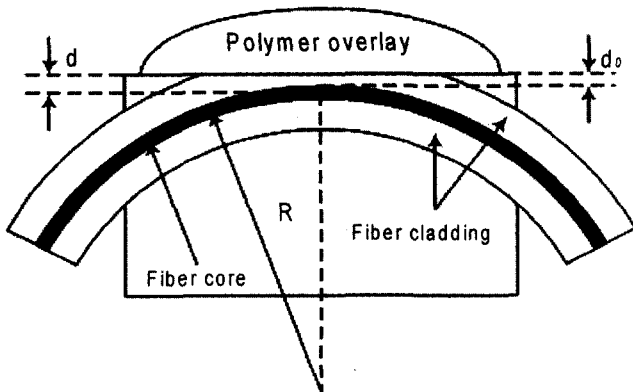


그림 1. side polished fiber를 이용한 가변 광 감쇠기의 단면도

$$\frac{V_{ex}^2 - w^2}{V_{ex}^2} \int_0^1 \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{[(V_{ex}^2 - w^2)\xi^2 + w^2]^{\frac{1}{4}}} \exp\left[-\frac{2d}{a} \sqrt{(V_{ex}^2 - w^2)\xi^2 + w^2}\right] d\xi$$

여기에서 V_{ex} 는

$$u \equiv a \sqrt{k_0^2 n_2^2 - \beta^2}, \quad w \equiv a \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_1^2}$$

$$V_{ex} \equiv \sqrt{u^2 + w^2} = k_0 a \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \approx k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta}$$

이며 여기에서 a 는 코어의 반경, K_1 은 1차 2종 변형 Bessel함수, β_0 는 전파상수, u, w 는 연마되지 않은 광섬유에서 코어와 클래딩의 규격화된 횡 방향 전파상수이다. 그림 2는, 이 식에서 여러 클래딩의 두께에 대해 오버레이의 굴절률에 따른 감쇠를 전산 시뮬한 결과를 보여주고 있다. 이 전산 시뮬에 사용된 상수들은 실제 실험에서 사용된 광섬유와 광원, 그리고 SPF의 규격상수들로, 상온에서 Corning SMF-28의 코어 및 클래딩의 굴절률 $n_{co} : 1.4535, n_{cl} : 1.4483$,과 코어 반경 $a : 4.1 \mu\text{m}$ 와 SPF의 물딩 반경 $R : 250 \text{ mm}$, SPF성능 측정시 사용한 레이저의 파장 $1.3 \mu\text{m}$ 의 값들이 대입 되었다. 그림에서 보듯 광 감쇠는 잔여 클래딩의 두께 d_0 에 따라 아주 민감하게 변하고 있으며, 두께가 감소함에 따라 감쇠의 정도가 급격히 증가하고 있다. 이 그림에서 보면, 클래딩의 두께가 $3.5 \mu\text{m}$ 에서 $2.5 \mu\text{m}$ 로 $1 \mu\text{m}$ 더 감소됨에 따라 최대감쇠는 무려 35 dB가 증가 되는 것을 알 수 있다. 이 사실은 SPF형 VOA에 있어, 잔여 클래딩을 얇게, 그러면서도 균일하게 하는 것이 얼마나 중요한가를 보여주고 있다. 또한 이 그림에서 주목할 점은, 오버레이 굴절률에 따라 세 영역에서 감쇠형태가 확연히 구분된다는 것이다. 그림에서 보듯, 오버레이의 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 작으면 감쇠는 생기지 않는다. 그러나 오버레이 굴절률이 광섬유의 유효굴절률보다 크고 코어의 굴절률보다 작으면 굴절률 증가에 따라 감쇠가 급격하게 증가되어 작은 굴절률 증가에도 쉽게 최대 감쇠 값에 이르게 된다. 오버레이 굴절률이 더 커져, 코어의 굴절률을 넘게 되면 감쇠 생기기 그 크기는 아주 완만하게 줄어들게 된다. 즉 오버레이의 유효굴절률이 광섬유의 유효굴절률 보다 크기만 하면 광 감쇠가 가능하다는 것을 이 그림은 보여 주고 있다. 그러나 실제 VOA에서는 전장이나 열 등 외부 파라미터에 의해 굴절률이 변하므로, 작은 굴절률 변화에서도 감쇠변화가 큰, 영역을 제어 영역으로 선택하는 것이 보다 효율적임을 알 수 있다.

III. 제작 및 실험

가변 광 감쇠기 제작에서 가장 중요한 과정은 그림 2의 결과에서 보듯 잔여클래딩의 두께를 수 μm 이내가 되도록 SPF를 제작하는 과정이다. SPF의 제작과정은 많은 다른 논문^[12,15]에서 언급한 것과 같이 실리콘 기판을 이방성 식각하여 V홈을 만들고, 그 홈에 단일모드 광섬유를 묻고 고정한 후,

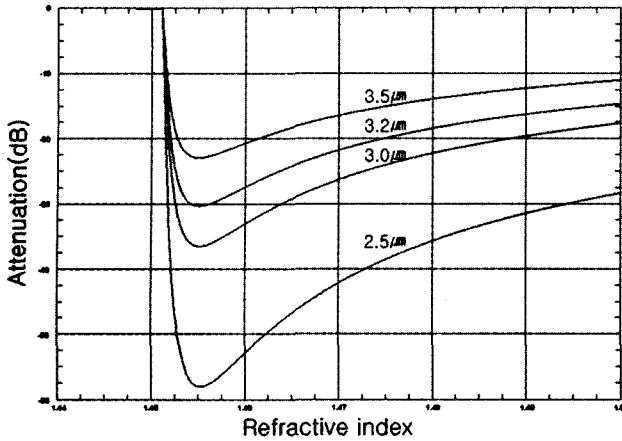


그림 2. side polished fiber에서 overlay 굴절률에 따른 감쇠량을 잔여 cladding 두께에 따라 계산한 전산시뮬레이션 결과

표면 전체를 연마하여 만든다. V홈 제작은 silicon 광학벤치 제작과정과 마찬가지로 SiO₂/Si 기판위에 감광제를 코팅하고, 마스크 패턴을 UV 노광하여 현상한 후, 식각 처리하여 만든다. 우리는 BOE를 이용한 1차식각과 KOH 수용액을 이용한 2차 식각으로 이방성 식각을 하였다. KOH 수용액에 의한 실리콘 기판에서 이방성 식각은 특성상 폭의 넓이에 따라 깊이가 다른 V 홈을 만들게 되므로, 가운데 폭은 좁게, 가장자리 폭은 넓게 제작함으로써 결과적으로 가운데 부분의 식각 깊이와 가장자리의 깊이가 달라지게 하였다. 여기에서 식각된 V 홈의 사이 각은 70.52°이었다. 식각된 Si 웨이퍼의 V 홈에 광섬유가 임의의 곡률로 구부러져 고정될 수 있도록 하였고 여기에 광섬유를 에폭시로 고정시켜, 광섬유가 임의의 반경을 갖는 호의 형태로 구부러지게 하였다. 우리는 이 표면을 연마필름과 연마제를 이용하여 잔여 클래딩의 두께가 목표치에 도달하도록 연마하였다. 연마가 어느 정도 진행되면 SPF에 He-Ne 레이저 빛을 인가하고, SPF의 연마면으로 부터 빛이 새어 나오기 시작하면, 2차 연마를 하였다. 2차 연마도중, 틈틈이 백색광이나, 1.3 μm 차장에서 굴절률정합오일에 대한 감쇠를 Optical Spectrum Analyzer로 측정하였다. 실험에서는 1.3 μm에서 30 dB 이상 감쇠를 보이는 SPF 만 사용하였다. 이 SPF에서의 삽입손실은 표면을 연마하기 이전 이 광섬유로부터 측정된 광 투과량과, 30 dB 이상 감쇠가 확인된후 SPF로부터 굴절률정합오일을 제거하여 측정된 광투과량의 차이를 읽어 구하였다. 오버레이 물질로는 PVDF와 PMMA를 혼합하여 사용하였다. 상온에서 이들의 굴절률은 633 nm 파장에서 각각 1.42와 1.49이다. 따라서 혼합시 굴절률은 각기 함량에 따라 달라진다. 우리는 프리즘 임계각 측정법을 이용하여 PVDF함량에 따른 혼합고분자의 굴절률 선형성을 알아보았다. 측정은 용매인 DMAc에 혼합고분자를 녹이고 이를 슬라이드 기판위에 떨어뜨린 후, VOA 제작시 오버레이가 거치는 열처리과정을 동일하게 거치게 하여 진행하였다.

본 실험에서는, 여러 PVDF 함량에 따라 만들어진 고분자를 SPF 위에 drop casting 방법으로 올리고 열처리를 한 후, SPF를 Thermo-Electric Cooler(TEC) 위에 열 본드로 붙이고 다시 전체를 조그만 박스 내에 넣어 외부와 열적으로 차단하여 감쇠특성을 측정하였다. 광원으로는 1.3 μm의 LD를 사용하였으며, J-type thermo-couple로 온도측정이 지원되는 digital multimeter(DMM)를 사용하여 시료의 온도를 monitoring 하였다. 광감쇠는 Optical Spectrum Analyzer(OSA)를 이용하여 측정 하였다. TEC에 구동에 사용되는 Power supply, DMM, OSA들은 모두 GPIB 인터페이스 통해 컴퓨터로 통제할 수 있도록 하였으며, 모든 구동, 측정, 제어 등은 HP VEE software로 자동 통제될 수 있도록 하였다.

Closed Loop Control System을 구성함으로써 PID 제어를 통한 감쇠의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.

IV. 결 과

4.1. VOA 제작 조건

VOA에 사용되는 SPF와 고분자 오버레이를 제작하기 위해 고려해야할 사항이 무엇인지를 알기위해 다음과 같은 예비실험을 실시하였다.

4.1.1. SPF 제작조건

그림 3은 제작중인 SPF에 백색광을 인가하고, 연마면 위에 굴절률 정합오일을 올린 후 측정된 투과광의 감쇠 스펙트럼들을 보여주고 있다. 이 스펙트럼들은 오일의 분산에 따른 감쇠량을 측정한 결과로, 그림 2에 대한 또 다른 방법의 실험적 구현으로 해석할 수 있다. 여기에서 실선과 점선은 각각 감쇠이전과 감쇠이후의 스펙트럼으로, 특히 그림 3-2에서 점선의 심한 요동은 감쇠가 측정의 한계인 바닥에 도달함을 보여주고 있다.

그림 3에서, 이 감쇠기의 1.3 μm와 1.55 μm대에서의 감쇠 특성은 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이는 이 파장 대역에서 오버레이 고분자의 굴절률 분산이 적어, 굴절률 차이가 거의 나지 않기 때문에 생긴 결과로, 1.3 μm에서 측정되는 VOA의 특성은 1.55 μm대에서도 별 차이 없이 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 3-2는 굴절률이 1.462(n_D)인 정합오일을 오버레이로 사용했을 경우 측정된 SPF의 감쇠 스펙트럼이다. 감쇠는 1.3 μm에서 15 dB 정도 관측되고 있다. 그림 2의 전산시뮬레이션 결과와 비교해 보면, 이 정도 감쇠에 해당하는 잔여 클래딩 두께는 적어도 3.5 μm 이상이다. 그러나 이 두께를 실측하기는 쉽지 않으며, 더욱이 연마 과정에서 이 두께를 monitoring 하는 더욱 곤란하다. 따라서 우리는 SPF를 제작하는 과정에서, 두께를 측정하는 대신 직접 감쇠량을 측정하여 연마 여부를 결정하였고 이러한 과정에서 30 dB 이상 감쇠를 보이는 SPF 만 실험에 사용하였다.

그림 3-1은 오버레이로 굴절률이 1.45(n_D)인 오일을 사용

했을 때 얻은 감쇠 스펙트럼이다. 정합오일의 굴절률 1.45는 589.6 nm에서 측정된 값이므로 그림 3-1의 전파장 영역에 걸쳐 굴절률은 1.45보다 클 수 없다. 그림 2에서 보면 1.45이하의 굴절률 영역에서는 이론적으로 감쇠는 기대할 수 없다. 그러나 실제 실험에서는 그림에서 보듯, 어느 정도의 감쇠가 관측되고 있다. 이러한 불일치는 실제 연마시 생기는 표면의 불균일정도를 계산에서는 고려할 수 없었기 때문이다. 연마시 표면에 생기는 흠이나 슐림에 의해 생기는 잔여 두께의 차이는 거시적으로는 별 문제가 되지 않으나, 2~3 μm급의 두께에서 볼 때는 무시할 수 없어, 국지적 감쇠를 충분히 예상할 수 있다. 따라서 SPF 제작시 두께를 얇게 하는 것도 중요하지만 연마면의 두께를 균일하게 유지하는 것도 이에 못지않게 중요하다고 보인다.

그림 3-2에서 감쇠는 1700 nm로부터 단파장 쪽으로 가면서 커지다가, 1500 nm~1300 nm 부근에서 최대를 보인 후 1300 nm 이하에서는 줄어들고 있다. 이러한 감쇠패턴은 카

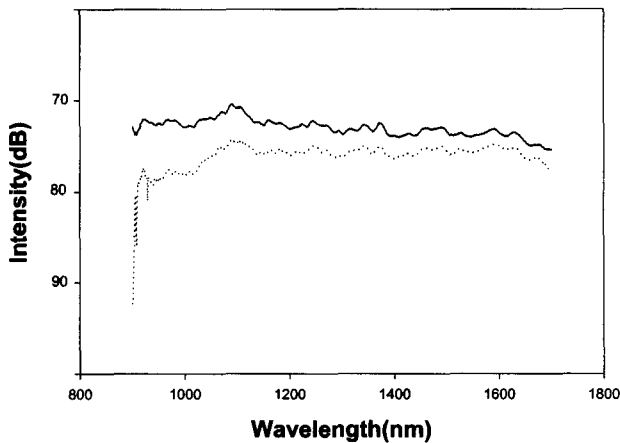


그림 3-1. side polished fiber의 연마면 위에 1.45의 굴절률 정합오일을 올리고 측정한 감쇠스펙트럼

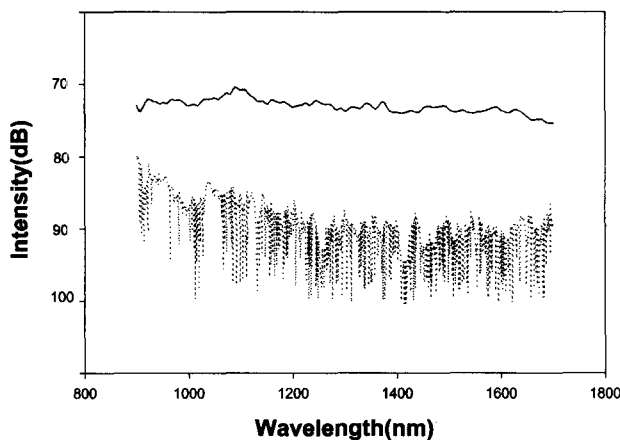


그림 3-2. side polished fiber의 연마면 위에 1.46의 굴절률 정합오일을 올리고 측정한 감쇠스펙트럼(감쇠된 부분은 거의 noise level에 가까워 fluctuation이 관측됨)

길사의 정합오일 분산표를 고려($n_c:1.4597, n_s:1.4680$) 할 때 오버레이의 굴절률의 증가에 따라 감쇠가 커져 1.455 부근에서 최대감쇠를 이루고 그 이후 감쇠가 줄어드는 그림 2의 전산시뮬 결과와 잘 맞고 있다. 최대감쇠 위치 역시 굴절률 0.002차 이내에서 잘 일치하고 있다. 이는 그림 2의 전산시뮬 결과가 실제 실험에서도 신뢰성 있게 적용될 수 있음을 보여주고 있는 것이라 할 수 있다.

4.1.2. PVDF 함량에 따른 굴절률

이미 언급한 바와 같이, VOA에서의 감쇠특성은 구동온도, 정확히 표현하면 구동온도에서의 혼합고분자의 굴절률에 따라 다르다. 그러나 혼합고분자의 굴절률은 PVDF함량에 따라 달라지므로, 구동온도 조건에 따라 VOA에 사용되는 혼합고분자에서의 PVDF함량은 달리 설정되어야 한다.

그림 4는 혼합고분자의 굴절률을 PVDF함량의 함수로 나타낸 그림으로, 상온에서 633 nm의 파장에 대해 프리즘 임계각측정을 통해 구한 결과이다. 그림에서 보듯, 굴절률은 PVDF의 함량이 증가됨에 따라 1.49에서 1.42까지 거의 선형적으로 감소되고 있음을 알 수 있다. 비록 이러한 선형감소 추세가 633 nm에 대한 측정의 결과 이기는 하나, 각 시료마다 분산이 서로 크게 차이가 나지 않는다면 이러한 추세는 1.3 μm 영역에서도 그대로 유지된다고 보아도 큰 무리가 없다. 우리는 이 혼합고분자가 음의 열광학계수를 가지고 있음을 알고 있다. 따라서 우리는 이 측정을 통해 어떤 특정 온도에서 어떤 특정 PVDF함량을 가진 혼합고분자의 굴절률을 알 수 있게 된다.

4.2. VOA의 감쇠특성

본 실험에서는 예비 실험에서 확인된 방법에 따라 제작된 30dB 이상의 SPF와 여러 PVDF 함량의 혼합고분자를 오버레이로 VOA들을 제작하고, TEC를 이용하여 열광학적으로 구동시켜 감쇠특성들을 측정하였다.

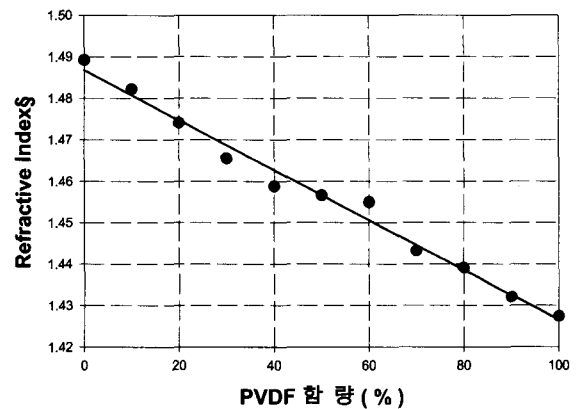


그림 4. PVDF함량에 따른 PMMA와 PVDF 혼합고분자의 굴절률 (@633 nm)

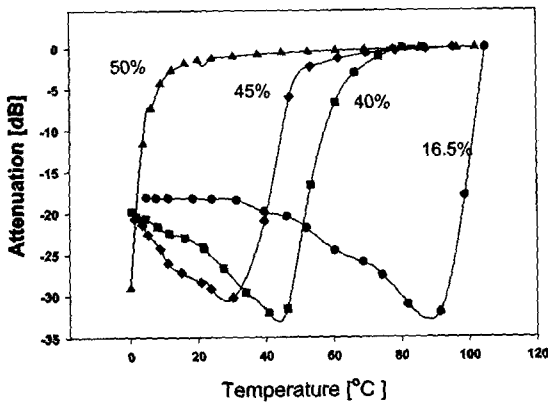


그림 5. PMMA와 PVDF 혼합고분자를 overlay 물질로 사용한 가변 광 감쇠기에서 PVDF함량에 따른 온도 대비 감쇠특성

4.2.1. 크래딩 잔여두께

그림 5는 이 측정결과를 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 VOA에서 최대 감쇠는 잔여 클래딩의 두께에 따라 달라진다. 그림 5에서 보면 PVDF함량에 따라 감쇠곡선은 옆으로 이동하지만 감쇠의 형태는 거의 같으며 최대감쇠도 약 30 dB 정도로 거의 같다. 그림 2를 보면 이 정도의 감쇠에 대응하는 SPF의 잔여 클래딩 두께가 3 μm~3.2 μm 정도임을 알 수 있다.

4.2.2. PVDF 함량에 따른 감쇠특성

그림 5에서, 전체적인 감쇠형태는 PVDF 함량 16.5% 시료로부터 PVDF 함량 50% 시료에 이르기까지 크게 달라지지 않았다. 이는 Liquid drop 곡선에서 열광화 효과에 의한 굴절률을 제외한 다른 물리적 변수들은 온도에 민감하지 않기 때문으로 이해된다. 그러나 최대 감쇠를 보이는 온도는 PVDF 함량에 따라 크게 달라짐을 볼 수 있다. 혼합고분자의 온도 변화에 따른 굴절률 변화 dn/dT는 10⁻⁴/°C ~10⁻³/°C 사이 값을 가지며, 온도가 증가함에 따라 굴절률이 낮아지는 음의 값을 가진다.

그림 4에서 보듯, PVDF 16.5% 시료의 굴절률은 광섬유코어 굴절률보다 훨씬 크다. 따라서 최대의 감쇠가 일어나기 위해서는 시료의 굴절률이 광섬유와의 굴절률 정합이 이룰 때까지 시료의 온도를 높여야 한다. 실제로 그림 5에서 보듯 이 시료는 90도 부근에서 최대의 감쇠를 보였다. 이에 비해 PVDF 40% 시료의 굴절률은 16.5% 함유 시료의 굴절률에 비해 현저히 낮다. 따라서 40%의 시료는 약간의 온도증가만으로도 굴절률 정합을 쉽게 만족시킬 수 있었으며, 실제로 43도에서 최대감쇠를 보였다. 같은 이유로 45%, 50%로 PVDF의 함유량이 증가될수록 최대 감쇠를 보이는 온도는 점점 더 낮아지게 된다. 이 사실은, 이 혼합고분자를 사용하여 VOA를 제작할 때, 실제 VOA가 작동되는 온도환경을 미리 고려하여 PVDF의 함량을 결정해야 한다는 것을 보여주고 있다.

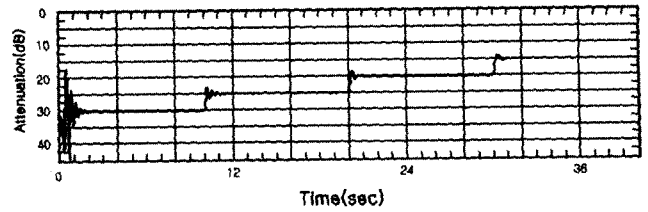


그림 6. PMMA와 PVDF 혼합고분자를 사용한 VOA 감쇠기의 시간적 안정성(30 dB부터 15 dB까지 5 dB 간격으로 각각 10초간 유지)

4.2.3. 감쇠의 안정성

각 시료에서 감쇠 특성곡선을 보면, 최대감쇠를 보이는 온도와 최소감쇠를 보이는 온도 차이는 대략 10도 부근이다. VOA에서 가변감쇠를 위한 온도조절 영역은 바로 이 부분으로, 그림 2의 곡선에서 급격한 기울기를 보이는 굴절률 영역에 해당한다. VOA에서 소모 전력이나, 안정성은 바로 이 기울기 정도에 의해 결정되는데, 기울기가 클수록 가변 감쇠에 필요한 온도변화는 적어지므로 소모 전력을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 약간의 온도변화에도 감쇠의 변화가 크기 때문에 안정성에 문제를 야기할 수도 있다. 그러나 이 경우에도 공학적으로 잘 알려진 폐회로 제어 시스템(Closed Loop Control System)을 도입한다면 되먹임 작용에 의한 시스템의 안정성을 확보할 수 있게 된다. 본 연구에서는 온도 또는 감쇠량 값을 임의로 설정한 후 되먹임과정을 최적화함으로써 안정적이면서도 재현성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

그림 6은 이 VOA 감쇠기의 시간적 안정성을 보여주는 실험적 결과이다. 그림은 30 dB부터 15 dB까지 5 dB 간격으로 각각 10초간 감쇠를 유지한 후 다음 값으로 변화되도록 프로그램한 후 실제로 VOA를 작동시켜 측정한 결과를 보여주고 있다. 감쇠는 폐회로 제어 시스템의 되먹임 작용에 의해 1 sec 이내에서 설정값에 도달하고 있으며, 새로운 설정 이전까지는 그림에서 보듯 안정된 감쇠값을 정확히 유지하고 있다. 이 그림은 반응시간을 그래프 상에 보이기 위해 감쇠지속시간을 10초로 하여 측정한 결과이나, 감쇠지속시간을 하루정도 하여도 설정값은 1% 이내의 오차 범위 내에서 변함 없이 유지하고 있었다. 우리는 그림으로부터 VOA의 반응시간이 약 1 sec 정도 됨을 볼 수 있다. 이런 형태의 VOA에서는 PID 파라미터를 최적화하거나 열전달 구조를 개선함으로써 수십~수백 msec 정도로 반응시간은 줄일 수 있다. 그러나 TEC를 가열소자로 쓰는 한 TEC 자체의 고유한 반응속도 때문에 더 이상 개선은 의미가 없다고 본다.

4.2.4. 제작된 VOA의 광 감쇠 특성

표 1은 제작된 VOA로부터 측정한 1. 삽입손실, 2. 반응시간, 3. 최대 감쇠 폭, 4. 파장의존 손실(Wavelength Dependence Loss: WDL), 5. 편광의존손실(Polarization Dependence Loss: PDL)에 대한 결과를 보여주고 있다.

표 1. 제작된 가변감쇠기의 광학적 제원

Insertion loss	Response time	Attenuation Depth	WDL	PDL
<0.1 dB	1 sec	<30 dB	<0.02 dB	0.9 dB@15 dB

예상했던 대로 삽입손실(insertion loss)은 0.1 dB 이하로 측정되었다. 이 결과는 기존의 대부분 VOA에서 보였던 수dB의 삽입손실에 비해 크게 개선된 결과로, SPF형 VOA가 삽입손실문제를 해결할 수 있는 한 방법임을 보여주는 결과라 보여 진다.

본 연구에서는 TEC를 사용하여 온도를 제어했으므로 반응 시간은 비교적 느려 1 sec 정도로 관측되었다. 그러나 TEC 대신 효율적인 구조의 열 전극을 사용하게 되면 반응시간은 줄일 수 있을 것으로 보며, 열 전극 개발여부에 따라 반응시간은 ms 단위까지 가능할 것으로 본다.

감쇠 정도는 그림 5의 결과에 사용된 VOA 경우 30 dB 정도이나. 언급한 바와 같이 잔여 클래딩의 두께에 따라 이 감쇠는 더욱 커질 수 있다.

WDL은 Anritsu사의 OSA로 측정하였다. 측정 파장 범위는 각각 1.3 μm와 1.55 μm를 기준으로 Δλ=99.653 nm 내에서 0.02 dB 이하로 측정되었다. 제작된 VOA에서는 오버레이가 매우 두꺼워 거의 모든 입력파장에 대한 광 결합이 가능하다. 따라서 기대했던 바대로 감쇠의 파장의존도는 거의 무시 가능할 정도의 수준을 보였다.

PDL은 JDS Uniphase사의 PS3 PDL Multimeter로 측정하였다. VOA에서 감쇠가 없을 때의 PDL은 <0.04 dB로 측정되어 무시 가능했으나, 감쇠가 커질수록 PDL도 커져 15 dB 감쇠에서 0.9 dB, 25 dB 감쇠에서 1.2 dB 등으로 비교적 큰 값을 보였다. SPF는 광섬유의 한 측면만을 연마하여 제작되므로 어느 정도 PDL은 예상되었다. 연마의 정도의 개선이나 전 방향 클래딩 제거 등 여러 방법을 이용하여 PDL을 줄이는 작업이 요구된다.

V. 결 론

측면연마광섬유를 이용한 in-line 형 가변감쇠기를 제작하였다. 오버레이 도파로의 재질은 PVDF:PMMA 혼합 고분자를 사용하였고 혼합고분자의 열광학 효과를 이용함으로써 광섬유와 오버레이 사이의 광 결합 정도를 조절할 수 있었다. 삽입손실은 0.1 dB 이하였으며 30 dB 이상의 감쇠가 가능함을 보였다. 또한 PVDF/PMMA의 혼합 비율에 따라 최대 감쇠가 나타나는 온도가 달라졌으며, 최대감쇠 온도에서로부터 10도 부근의 온도변화로 수십 dB의 가변 감쇠가 가능함을 보였다.

참고 문헌

- [1] M. S. Dinleyici, "Device length requirement in slab/fiber evanescent coupler," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 19, pp. 87-95, 2000.
- [2] D. Marcuse, "Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 122-130, 1989.
- [3] A. K. Das and A. K. Ganguly, "Efficient method of a coupling from a single mode fiber to a thin film waveguide," *Optics Lett.*, vol. 19, no. 24, pp. 2110-2112, 1994.
- [4] K. P. Panajotov and A. T. Andreev, "Distributed coupling between a single mode fiber and a planer waveguide," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, no. 5, pp. 826-834, 1994.
- [5] G. Fawcett, W. Johnstone, I. Andonovic, D. J. Bone, T. G. Harvey, N. Carter, and T. G. Ryan, "In-line fiber-optic intensity modulator using electro-optic polymer," *Electron. Lett.* vol. 28, no. 11, pp. 985, 1992.
- [6] S. A. Hamilton, D. R. Yankelevich, A. Knoesen, R. T. Weverka, R. A. Hill, and G. C. Bjorklund, "Polymer in line fiber modulator for broadband radio-frequency optical link," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 15, no. 2, pp. 740, 1998.
- [7] Shiao-Min Tseng & Chin-Lin Chen, Jpn. "Low voltage optical fiber switch," *J. Appl. Phys.* vol. 37, pp. L42-L45, Part 2, 1998.
- [8] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "Single mode fiber-optic polarizer," *Optics Lett.* vol. 5, no. 11, pp. 479, 1980.
- [9] Kwang Taek Kim, Hyung-Woo Kwon, Jae-won Song, Sangjae Lee, Woong-Gyu Jung, and Shin-Won Kang, "Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side polished fiber and multimode metal clad planer wave guide," *Optics. Comm.* 180, pp. 37, 2000
- [10] Gunjan Raizada and Bishnu P. Pal, "Refractometer and tunable components based on side polished fibers with multimode overlay wave guides: role of the substrate," *Optics Lett.* vol. 21, no. 6, pp. 399, 1996.
- [11] M. J. F. Digonnet, J. R. Feth, L. F. Stokes, and H. J. Shaw, "Measurement of the proximity in polished fiber substrates and coupler," *Optics lett.* vol. 10, no. 9, pp. 463-465, 1985.
- [12] Shiao-Min Tseng & Chin-Lin Chen, X, "Side Polished Fiber," *Appl. Opt.* vol. 31, no. 18, pp. 3438-3447, 1992.
- [13] Ssu-pin Ma & Shiao-Min Tseng, "High Performance Side Polished Fiber and Application as Liquid Crystal Clad Fiber Polarizer," *J. Lightwave Technol.* vol. 15, no. 8, pp. 1554-1558, 1997.
- [14] Ottokar G. Leminger and Remigius Zengerle, "Determination of single-mode fiber coupler design parameters from loss measurements," *J. Lightwave Technol.* LT-3, no. 4, pp. 864-867, 1985.
- [15] 장명희, 이소영, 김광택, 송재원, 김시홍, 강신원, "측면 연마된 광섬유편광기제작," 16th Optics and Quantum Electronics Conference, pp. 110-111, 1999.

Variable Optical Attenuator based on Side Polished Fiber Technique

Koo Suk Yeong and Chi Sup Jung[†]

Division of Information Technology, Chongju University, Chongju, 360-764, Korea

Email: csjung@chongju.ac.kr

(Received June 13, 2003, Revised manuscript May 27, 2004)

The variable optical attenuator based on side polished fiber technique was experimentally demonstrated. Various combination mixtures of poly(vinylidene fluoride) and poly(methyl methacrylate) have been used as the overlay waveguide materials for the variable optical attenuator application. A controllable amount of optical power can be extracted via evanescent coupling by changing the temperature of the polymer mixture, thereby changing its refractive index. The VOA under test provides a maximum attenuation of 30 dB and an insertion loss of 0.1 dB.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2330, 060.1810, 060.2340.