

## 대형 코어 폴리머 광도파로를 이용한 가변 광감쇠기 설계

조수홍 · 오민철\*

부산대학교 전자공학과 나노바이오광소자연구실  
Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2005년 3월 28일 받음, 2005년 5월 2일 수정본 받음)

높은 재현성과 함께 효율적인 수동 정렬을 위하여 제안된 대형코어 단일모드 폴리머 광도파로를 이용하여 제작 가능한 폴리머 광도파로 소자인 가변 광감쇠기를 제안하고 삼차원 빔전파 방법을 이용하여 소자의 동작 특성을 파악하고 최적 구조를 설계하였다. 소자의 표면에 집적된 박막 전극 히터에서 발생하는 열로 인해 폴리머 광도파로에서 발생하는 굴절률 분포 변화를 수치해석적으로 구하였으며 이 결과를 이용하여 삼차원 빔전파 해석을 수행하였다. 대형코어 광도파로가 가지는 작은 굴절률 대비로 인해 효과적인 광감쇠 현상을 작은 온도 변화로부터 얻을 수 있음을 확인하였다. 일반 광도파로 VOA에서 섭씨 150도 이상의 온도 변화가 필요한 반면 대형 코어 광도파로 VOA는 섭씨 70도 정도의 온도 변화 만으로도 20 dB 이상의 감쇠를 얻을 수 있었다. 대형코어 광도파로가 가지는 장점인 높은 정렬오차 허용범위와 더불어 낮은 구동전압으로 동작하는 장점을 함께 가지는 가변 광감쇠기 설계를 완성하였다.

주제어 : Passive alignment, Large core waveguide, Optical attenuator, Thermo-optic device, TEC fiber, Polymer waveguide.

### I. 서 론

평면위에 그려진 다양한 구조의 광도파로를 이용하여 광신호를 제어하는 방식은 마흐-젠더 간섭계, 방향성 결합기, 광스위치 등의 소자를 이용한 다양한 광신호 처리를 가능하게 한다. 그러나 이러한 다양한 기능을 가진 광도파로 소자는 광섬유 연결 과정에서 필연적으로 발생하는 고가의 패키징 비용으로 인해 유사한 기능을 수행하는 광섬유 소자들에 비하여 가격 경쟁력이 뒤떨어지게 된다. 근본적으로 반도체 제작 공정과 유사한 대량생산 과정을 통하여 핵심 광도파로 칩의 생산이 가능한 점을 생각하면 패키징 공정을 간소화시킬 수만 있다면 광도파로 소자의 가격은 현재의 수준보다 몇 배나 저렴하게 될 수도 있을 것이다. 또한 최근 들어 각광을 받고 있는 광섬유를 이용한 압력, 스트레인, 화학성분 검출 센서를 대신하여 더욱 다양한 광신호 처리가 가능한 광도파로 소자가 이용될 가능성도 매우 높다.

광도파로 소자의 입출력부에 광섬유를 수동적인 방법으로 연결하기 위한 연구는 기판이 되는 실리콘을 정밀하게 식각하여 광섬유를 심을 수 있는 홈을 파는 방법이 주류를 이루고 있다.<sup>[1]</sup> 그러나 이 방법은 미세한 정렬 오차로 인해 큰 접촉 손실이 발생하는데 기판이 되는 실리콘을 에칭하는 정밀도의 한계로 인해 항상 동일한 수준의 광섬유 접촉 손실을 유지하기가 어려운 단점이 있다. 그러므로 실질적인 생산 과정에서 적용시키기에는 아직 미흡한 기술로 사료된다.

정렬 오차에 따른 손실 증가를 줄이기 위한 방법으로서 광섬유의 코어를 열로 확장하여 모드를 확대시키는 방법이 최근에 제안되었다.<sup>[2]</sup> 열확장 코어(Thermally Expanded Core : TEC)

광섬유는 단일 모드 전파 조건을 유지하면서 도파 모드의 크기를 30  $\mu\text{m}$  이상으로 확대시킬 수 있다. 이와 같은 TEC 광섬유를 이용하여 광섬유 정렬의 오차 허용범위가 대폭 증가하는 것을 실험적으로 확인하였다.<sup>[3]</sup> 그러므로 TEC 광섬유와 연결 가능한 대형 코어 단일 모드 광도파로의 제작이 가능하면 광도파로 소자에 광섬유를 연결할 때 정렬 오차에 따른 손실을 줄일 수 있게 된다. 또한 궁극적으로 수동 광섬유 연결 공정을 현실적으로 가능하게 할 수 있는 방법을 제공한다.

대형 코어 광도파로는 최근 들어 대용량 단거리 데이터 전송을 위한 광연결 시스템에서 필요한 다중모드 광도파로 어레이를 만들기 위하여 연구되어 왔다.<sup>[4]</sup> 특히 두꺼운 광도파로 코어를 만들 수 있는 폴리머 재료를 이용한 결과가 많이 발표 되었다.<sup>[5]</sup> 그러나 대형 코어 구조를 가지면서 단일 모드로 동작하는 광도파로 구조는 최근에 이르러 본 연구실에서 최초로 제안된바 있다.<sup>[6]</sup> 이러한 대형코어 광도파로는 TEC 광섬유와 연결이 가능하며 이때 정렬오차로 인한 손실 증가가 기존의 작은 코어 구조의 광도파로에 비하여 현저히 작게 됨을 볼 수 있었다. 그리고 광섬유 연결 부분을 지나서 추가적인 광도파로 소자를 제작하고자 하는 경우에는 일반적인 광도파로 구조와 대형코어 광도파로를 광파워 보존 테이퍼 구조(adiabatic taper structure)를 이용하여 서로 다른 광도파로를 연결하는 것도 가능하다.<sup>[7]</sup>

본 논문에서는 TEC 광섬유와 연결이 가능한 대형코어 단일모드 광도파로 구조를 이용하여 제작 가능한 폴리머 가변 광감쇠기(variable optical attenuator : VOA)를 제안한다. 대형코어 광도파로는 단일 모드 전파를 만족시키기 위하여 광도파로 코어와 클래딩간의 굴절률 차이를 0.001 이하로 만들어야 하는데 이로 인해 광파의 국한도는 현저히 떨어지게 된다. 이점을 이용하면 열광학 효과에 의한 굴절률 변화를 받

\*E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

생시키는 가변 광감쇠기에서는 매우 작은 구동 파워를 이용하여 도파광을 방사시키고 출력광 세기를 감쇠시킬 수 있다. 그러므로 제안된 대형코어 폴리머 광감쇠기는 구동전력이 낮으면서 대량생산을 위한 수동정렬 가능한 소자가 된다. 제안된 소자의 동작 가능성을 검토하고 소자 구조를 최적화시키기 위한 삼차원 시뮬레이션을 수행하였다. 소자의 상단부에 제작된 히터로부터 발생하는 열 분포를 3차원 구조상에서 해석하여 열로 인한 굴절률 분포를 구하고, 이를 토대로 삼차원 빔전파 방법을 수행하였다. 유효굴절률 방법을 이용한 2차원 해석이 아닌 3차원 구조의 직접적인 시뮬레이션을 통하여 실제 소자에서 일어나는 빔전파를 명확하게 규명하여 소자 제작을 위한 최적 구조를 설계하였다.

## II. 대형코어 광감쇠기 동작 원리

대형코어 광도파로를 이용한 폴리머 광도파로 광감쇠기의 개략적인 형태를 그림 1에서 보이고 있다. 실리콘 기판위에 굴절률이 다른 두 종류의 폴리머를 이용하여 광도파로 구조를 형성하고 그 위에 금속 박막을 이용하여 전극 구조를 만들게 된다. 이때 열을 발생시키는 전극은 광도파로와 나란히 정렬되어 제작된다. 이와 같은 구조에서 전극에 전류를 흘리게 되면 저항으로 인한 열이 발생하게 되며 이로 인해 폴리머 광도파로에 특정한 굴절률 분포가 형성된다. 열선에 가까운 부위의 폴리머 굴절률은 기판에 가까운 부위에 비하여 더 낮게 되며 결국 수직 방향으로 굴절률 값이 서서히 커지는 형태의 굴절률 분포가 형성된다. 이러한 굴절률 분포는 광도파로를 따라 진행하는 광파를 기판쪽으로 회절시키는 역할을 하게 되며 결론적으로 광도파로를 통과하여 진행하게 되는 광파의 세기를 감쇠시키는 작용을 한다.

광파를 감쇠시키는 효율은 전극의 구조나 광도파로의 구조에 의해서도 영향을 받게 된다. 특히 전극과 평행하게 진행하는 직선 광도파로를 이용한 VOA는 Gemfire라는 회사에서 최초로 고안하여 특허를 가지고 있다.<sup>[8]</sup> 이러한 직선형 광 감쇠기는 Y-분기형 광도파로나 다중모드 광도파로를 이용한 광감쇠기에 비하여 편광의존성과 파장의존성이 우수한 장점을 가지고 있다.<sup>[9,10]</sup> 그러나 이와 같은 장점에도 불구하고 직선 광도파로 VOA는 광감쇠를 일으키기 위해 필요한 굴절률

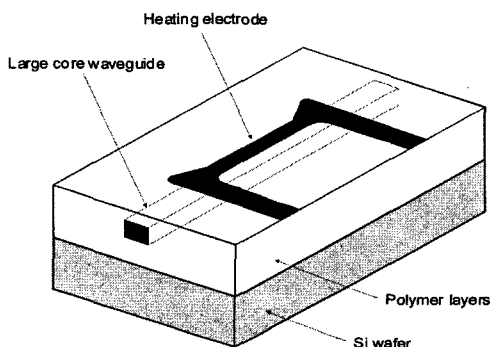


그림 1. 대형코어 광도파로와 박막 히터를 이용한 폴리머 광도파로 VOA의 개략도.

의 변화가 다른 종류의 VOA에 비하여 훨씬 크기 때문에 구동 파워가 커지는 단점을 가지고 있다. 이로 인해 Gemfire 사에서는  $T_g$ 가 상온 보다 낮은 폴리머를 개발하여 열광학 계수를  $4.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  이상으로 끌어 올리게 되었다. 하지만  $T_g$ 가 높고 안정성이 뛰어난 저손실 광폴리머는 열광학 계수가  $1.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  정도에 불과하므로 이를 이용하여 직선 광도파로형 VOA를 제작하게 되면 열선의 온도를  $150^\circ\text{C}$  이상으로 올려야 하며 이로 인해 전극의 수명이 짧아지고 폴리머 박막이 고온에서 지속됨으로 인해 장시간에 걸친 소자의 안정성을 저해시키는 요인이 된다.

대형 코어 광도파로는 도파로 코어의 크기가  $15\sim 25 \mu\text{m}$  정도로서 일반적인 광도파로 코어 크기  $6\sim 8 \mu\text{m}$ 에 비하여 현저히 큰 형태를 가진다. 이와 같은 큰 코어 크기에도 불구하고 단일 모드 전파 조건을 만족시키기 위하여 광도파로 코어와 클래딩 간의 굴절률 차이를 매우 작게 만들어야 한다. 그림 2에서는 유한요소법(finite element method)을 이용하여 광도파로를 디자인한 결과를 나타내고 있다. 코어의 크기가  $25 \mu\text{m}$ 인 구조에서 광도파로의 굴절률 차이에 따른 도파모드의 유효굴절률을 계산해 본 결과 굴절률 차이가  $1.3 \times 10^{-3}$  이하인 경우 하나의 모드만이 광도파로에 존재할 수 있음을 확인하였다.

전극에서 발생하는 열로 인해 발생하는 광도파로 굴절률 분포의 변화를 그림 3에서 개념적으로 나타내고 있다. 그림

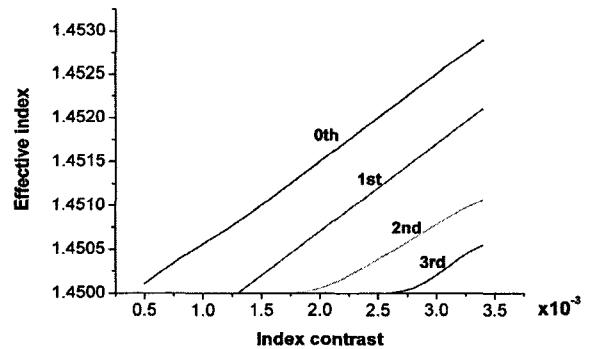


그림 2. FEM을 이용하여 굴절률 차이에 따른 모드 생성 조건을 계산한 결과로서  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  크기의 단일모드 광도파로 제작을 위해서는 굴절률 차이가  $1.3 \times 10^{-3}$  이하가 되어야 함을 보이고 있음.

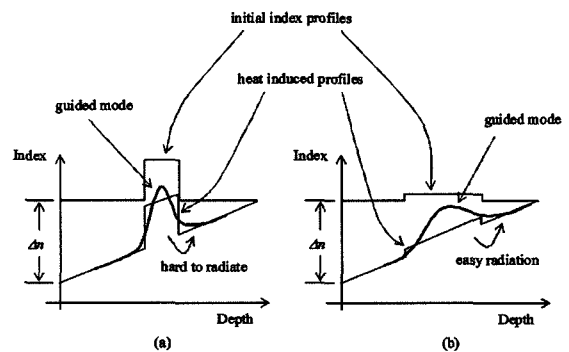


그림 3. 히터에 열을 가하였을 때 발생하는 굴절률 분포 변화와 이로 인한 광파의 방사 현상을 설명하기 위한 개념도.

3(a)에서는 광도파로 굴절률 차이가 크고 코아의 크기가 작은 일반적인 광도파로를 이용한 VOA 소자를 나타내고 있으며 그림 3(b)에서는 굴절률 차이가 작고 코아의 크기가 큰 대형 코아 광도파로 VOA에 관하여 나타내고 있다. 전극에서 발생하는 열로 인해 폴리머 박막의 표면에  $\Delta n$ 만큼의 굴절률 변화가 발생하게 되며 깊이 방향으로 서서히 변화가 줄어들다가 기관이 있는 위치에 와서는 원래의 굴절률 값으로 돌아오게 된다. 이때 대형코아 광도파로의 경우 광도파로 굴절률 차이가 작은 값을 가지므로 열로 인한 굴절률 분포가 발생시 도파광이 기관쪽으로 작은 굴절률 언덕을 넘어서 쉽게 빠져나갈 수 있음을 알 수 있다.

### III. 대형코아 광감쇠기 설계

직선 광도파로 VOA 소자의 동작 특성을 파악하고 소자 제작을 위한 구조 디자인을 하기 위하여 본 논문에서는 히터에서 발생하는 열에 의해서 폴리머 박막에 형성되는 삼차원 열분포를 구하고 이로부터 삼차원 굴절률 분포를 구하였다. 계산된 삼차원 굴절률 분포는 삼차원 빔전파방법을 토대로 한 설계 과정에 이용되었으며 이러한 삼차원 해석을 통하여 전반적인 소자 특성을 직접 해석하여 정확한 소자 구조를 설계하였다. 이러한 과정에 이용된 수치해석 프로그램의 플로우 차트를 그림 4에서 보이고 있다.

#### 3.1. 삼차원 굴절률 분포 계산

삼차원 굴절률 분포를 계산하기 위하여 먼저 박막 히터에서 발생하는 열로 인한 폴리머 광도파로 내부의 열 분포를 계산하였다. 계산을 위해 이용된 소자의 구조는 그림 5에서 보이고 있으며 (a)는 대형 코아 광도파로의 구조이며 (b)는 비교를 위하여 사용된 보통의 광도파로 구조를 나타낸다. 이때 상부 클래딩의 두께는 전극에 의한 광파의 흡수가 일어나지 않을 정도의 두께를 선택하였다. 그리고 하부 클래딩은 열효율을 향상 시키기 위하여 상부 클래딩에 비하여 좀 더 두껍게 선택하였다.

전극에 흐르는 전류로 인하여 열이 발생하여 폴리머 박막

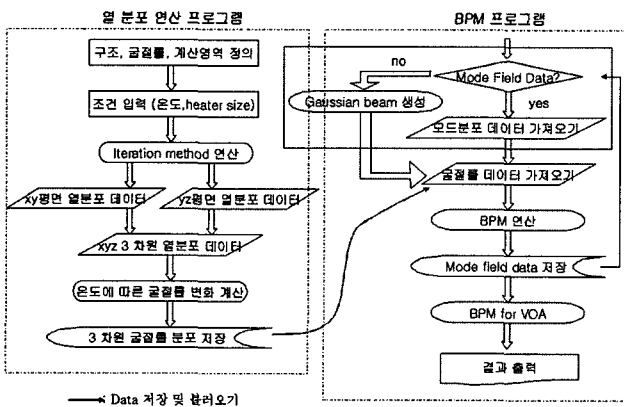
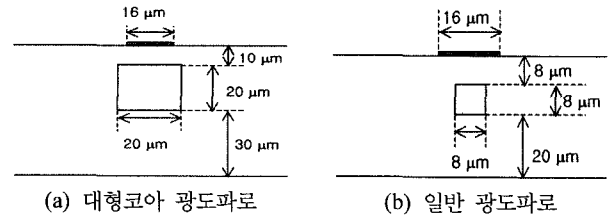


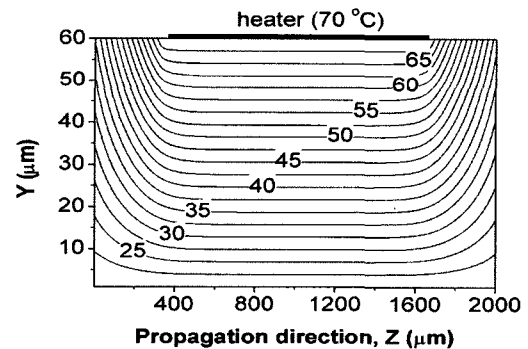
그림 4. 삼차원 열분포 계산과 빔전파 방법을 이용하여 소자 특성을 시뮬레이션 하기 위한 프로그램의 플로우 차트



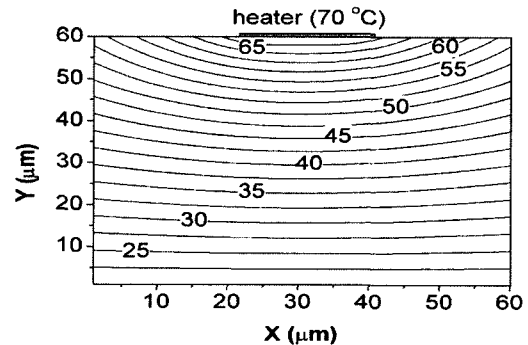
(a) 대형코아 광도파로 (b) 일반 광도파로  
그림 5. 설계를 위하여 사용된 광도파로와 전극의 구조

전반에 걸쳐 열분포가 형성되면 이후 더 이상 시간에 따른 온도 변화가 생기지 않는 평형 상태로 접어든다. 이러한 열적 평형 상태에서의 온도 분포는 Laplace 수식을 반복법 (iteration method)을 이용하여 풀면 구할 수 있다. 열분포 계산을 위한 좌표계는 광도파로 너비 X, 높이 Y, 그리고 진행방향 Z 축으로 정의한다. 계산을 위한 범위는  $X = 60 \mu\text{m}$ ,  $Y = 60 \mu\text{m}$ ,  $Z = 2000 \mu\text{m}$ 로 한정하였다. 열을 발생시키는 히터는  $16 \times 1000 \mu\text{m}^2$ 의 크기를 가지며 소자의 표면상에서 정 중앙부에 위치하고 있다.

반복법 계산 과정에서 boundary 를 포함하는 지점에서의 계산을 위한 경계 조건은 경계 부위를 전후로 하여 온도의 미분값이 일정하다고 정의하는 Neumann boundary condition 을 적용하였다. 삼차원 열분포를 구하기 위한 손쉬운 방법으로 X-Y 평면과 Y-Z 평면을 따로 분리하여 각각 온도 분포를 계산하였으며 그 결과를 그림 6에서 보이고 있다. 히터의 온



(a) Y-Z 단면에 대한 결과



(b) X-Y 단면에 대한 온도 분포

그림 6. 히터의 온도 증가로 인하여 발생하는 폴리머 박막의 온도 변화 분포

도가 섭씨 70도이고 기판의 온도가 섭씨 20도인 경우에 대하여 바닥으로 가면서 서서히 온도가 떨어 지는 형태의 분포를 구할 수 있었다. 이렇게 구해진 X-Y, Y-Z 평면에 대한 온도 분포를 서로 곱하여 주게 되면 X-Y-Z 삼차원 공간에 대한 열분포를 구할 수 있다. 구해진 열분포에 폴리머의 열광학 계수인  $1.5 \times 10^{-4}$ 를 대입하여 계산하면 그림 7에서와 같은 광도파로 단면 굴절률 분포를 얻을 수 있다. 그림 7(a)에서는 온도 변화가 없을 때의 굴절률 분포를 보이고 있으며 그림 7(b)에서는 히터의 온도가 섭씨 70도가 되었을 때 나타나는 굴절률 분포를 보이고 있다. 온도가 섭씨 70도 정도로

올라가면 표면의 굴절률 값이 0.005 이상 차이가 나게 되어 광도파로의 초기 굴절률 차이인 0.001보다 훨씬 큰 굴절률 변화를 보임을 알 수 있다. 이로 인해 광도파로 코어를 통하여 진행하던 광파는 더 높은 굴절률을 보이고 있는 기판 쪽으로 빠져 나가게 된다.

### 3.2. 삼차원 빔전파 방법을 이용한 광감쇠기 설계

삼차원 굴절률 분포를 계산한 결과를 이용하여 대형코어 광도파로를 진행하는 광파의 형태를 살펴보기 위하여 삼차원 빔전파 시뮬레이션을 수행하였다. 계산을 위한 영역은 X, Y 방향

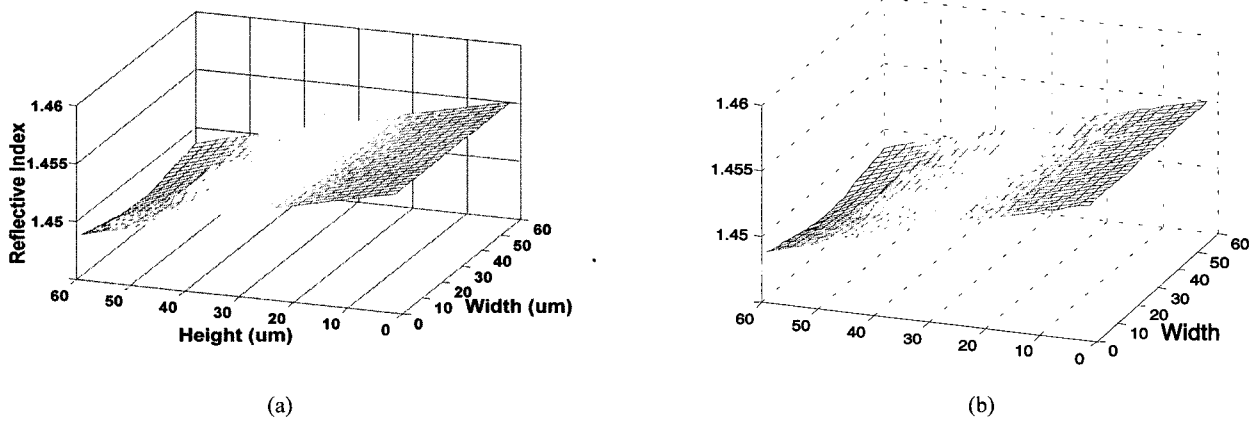


그림 7. (a) 온도 변화가 없을 때 광도파로 단면의 굴절률 분포, (b) 히터 온도가 증가 하였을 때 표면의 온도가 내려가고 수직 방향으로 경사를 가지게 되는 굴절률 분포

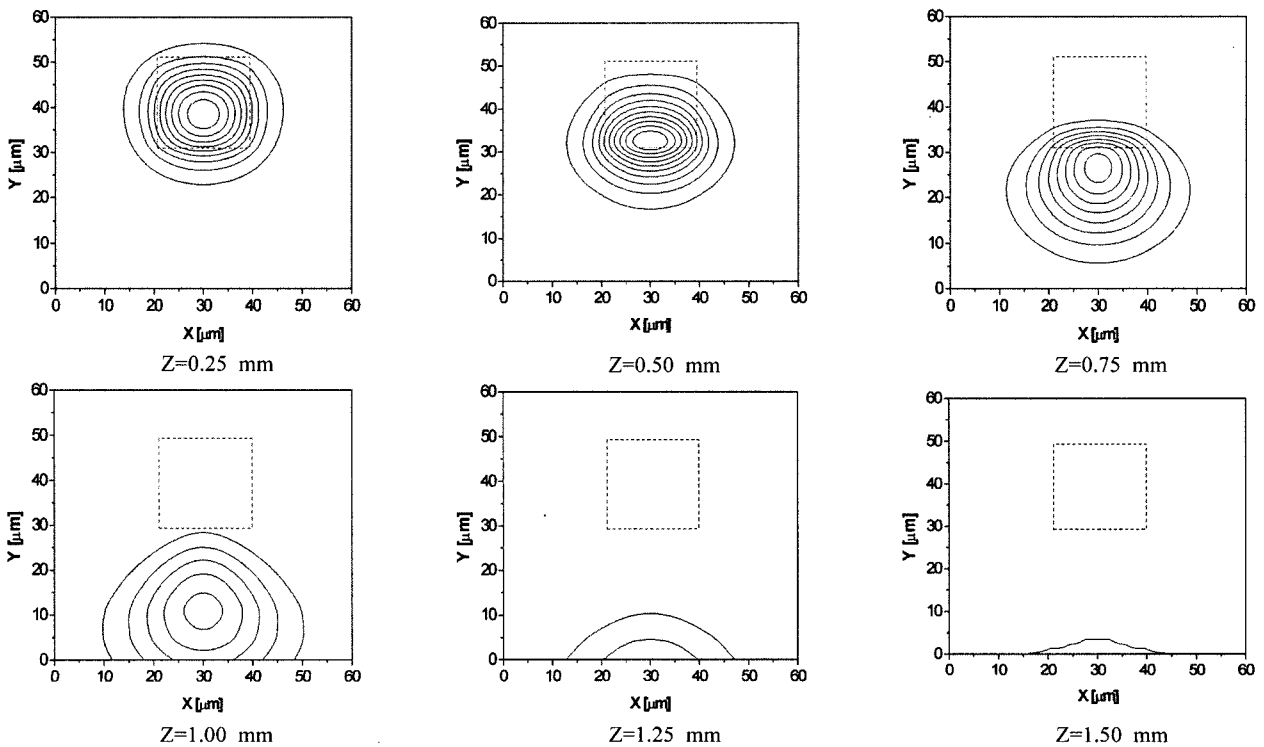


그림 8. 빔전파 해석을 통하여 구한 결과중에서 서로 다른 몇가지 진행 거리에 대한 광파의 분포를 나타냄.

각각 60  $\mu\text{m}$ , 그리고 진행 방향 2 mm에 대하여 빔전파를 계산하였다. 이때 계산을 위한 간격  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ 는 각각 0.5  $\mu\text{m}$ 로 하였으며 진행 방향에 대한  $\Delta z$ 는 계산속도를 고려하여 2  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 그림 8에서는 빔전파 방법으로 구한 광파의 변화 과정을 보이고 있다.  $Z = 0$ 인 입력 지점에서 대형 코아 광도파로의 기본 모드 (fundamental mode)가 입력 되었을 때 온도를 섭씨 70도 만큼 올린 상태에서 빔전파를 수행하였으며 그 결과 중에서  $Z = 0.25 \text{ mm}$ , 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm, 1.25 mm, 1.50 mm 인 지점에서 광파의 파워 분포를 등고선 그림으로 보여주고 있다. 히터가 시작되는 위치인  $Z = 0.50 \text{ mm}$ 인 지점에서부터 광파가 아래쪽으로 밀려나는 현상을 볼 수 있으며 히터가 끝나는 위치인  $Z = 1.50 \text{ mm}$ 인 지점에서 거의 모든 광파위가 BPM boundary 를 지나서 사라지는 것을 볼 수 있다.  $Z = 0.50 \text{ mm}$ 인 히터 시작점으로부터 광파의 변화가 나타나는 것은 온도 분포로부터 알 수 있듯이 히터에서 발생한 열이 주변으로 많이 퍼져있기 때문이다. 본 BPM 프로그램에서 채택한 경계조건은 transparent boundary condition을 이용하였으며 이로 인해 BPM 경계 부분에서 반사가 거의 일어나지 않게 되었다. 이와 같은 모드 분포 변화 관측과 더불어 각 평면에서 나타나는 광파의 분포를 광도파로의 기본 모드와 overlap integral를 하여 모드 성분에 해당하는 파워를 계산하였으며 그 결과를 그림 9에서 보이고 있다. 광파가 진행해 나가면서 파워가 서서히 줄어드는 것을 볼 수 있으며 온도의 증가에 따라 광파위 감쇠가 커지는 것을 확인할 수 있다.

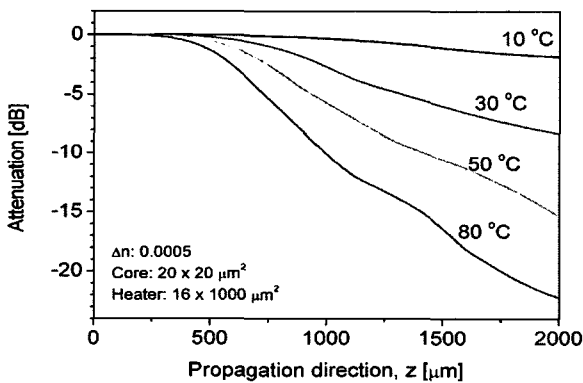


그림 9. 진행 방향에 따라 나타나는 광파위 변화를 여러 가지 다른 온도에 대하여 구한 결과.

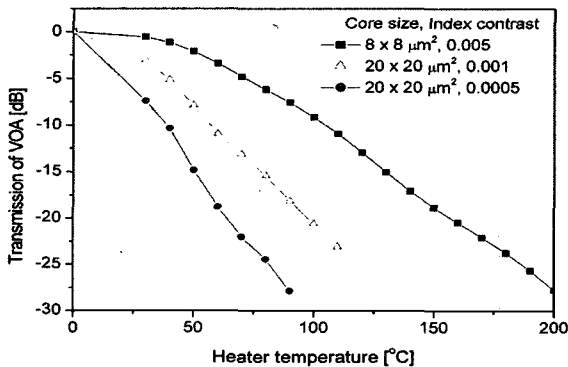


그림 10. 온도 변화로 인해 발생하는 VOA 소자의 최종 출력 광파위 변화를 나타냄.

그림 5에서 보인 대형 코아 VOA와 일반 광도파로 VOA의 경우에 대하여 각각 BPM 을 수행하였으며 VOA를 통과하는 최종 광파위를 계산하여 그림 10에 나타내었다. 코아와 클래딩의 굴절률 차이가 0.005이며 코아의 크기가  $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ 인 광도파로를 이용한 VOA에서는 20 dB 이상의 광파위 감쇠를 얻기 위해서 섭씨 150도 이상의 온도 변화가 필요함을 알 수 있다. 이와 같은 높은 온도 변화는 히터와 폴리머 박막의 안정성을 저해하는 요인이 될 것이다. 반면  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  크기의 대형 코아 광도파로의 경우에는 훨씬 낮은 온도 변화 만으로도 20 dB 이상의 감쇠를 얻을 수 있음을 보이고 있다. 그 중에서도 굴절률 차이가 0.0005인 경우는 섭씨 70도 정도의 온도 변화 만으로 20 dB 이상의 감쇠를 일으킬 수 있게 됨을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 광도파로 소자와 광섬유 간의 수동 정렬을 위하여 개발된 대형코아 광도파로 구조를 이용하여 제작 가능한 가변 광 감쇠기를 제안하였다. 직선형 대형 코아 광도파로 위에 박막 히터를 제작하여 온도를 증가 시키게 되면 표면에서부터 기판으로 향한 굴절률 경사가 발생하게 되며 이로 인해 광파가 상대적으로 높은 굴절률을 유지하고 있는 기판에 가까운 폴리머 클래딩 쪽으로 빠져 나가는 원리를 이용하였다. 이와 같은 기본적인 소자의 동작 원리를 규명하고 제작을 위한 설계를 하기 위하여 열분포 해석을 통한 삼차원 굴절률 분포를 계산하였으며 이를 이용하여 삼차원 빔전파 해석을 하였다. 일반적인 광도파로 구조를 이용한 VOA와 대형 코아 광도파로를 이용한 VOA의 특성을 비교하여 보았으며 대형코아 광도파로의 경우 코아와 클래딩의 굴절률 차이가 0.0005에 불과함으로 인해 훨씬 더 낮은 온도 변화 만으로도 효과적인 광감쇠를 얻을 수 있음을 확인하였다. 20 dB 감쇠를 얻기 위하여 일반 광도파로 VOA의 경우 섭씨 150도 이상의 온도 변화가 필요한 반면 제안된 대형 코아 광도파로를 이용하면 필요한 온도 변화가 섭씨 70도 이하로 줄어 들게 됨을 확인하였다. 이러한 낮은 구동 온도는 소자의 장기적인 신뢰성 확보를 위하여 중요한 의미를 가진다. 대형 코아 광도파로 VOA는 수동정렬이 손쉬운 잇점과 더불어 구동 온도가 낮은 장점을 가지게 되므로 저가형 VOA 대량생산을 가능하게 할 것이다.

#### 감사의 글

소자의 제작과 측정을 위해 도움을 주신 ETRI 광대역 광소자팀 이명현 박사님과 주정진 박사님께 감사드리며 재료를 공급하여 주신 캠옵텍스의 이형중 박사님에게도 감사드립니다. 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 부분적인 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-041-D00503).

참고문헌

- [1] R. Moosburger, R. Hauffe, U. Siebel, D. Arndt, J. Kropp, and K. Petermann, "Passive Alignment of single-mode fibers to integrated polymer waveguide structures utilizing a single-mask process," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 7, pp. 848-850, July 1999.
- [2] M. Kihara, M. Matsumoto, T. Haibara, and S. Tomita, "Characteristics of thermally expanded core fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2209-1696, Oct. 1996.
- [3] Y. Ohtera, O. Hanaizumi, and S. Kawakami, "Numerical analysis of eigenmodes and splice losses of thermally diffused expanded core fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 12, pp. 2675-2682, Dec. 1999.
- [4] B.-T. Lee, M.-S. Kwon, J.-B. Yoon, and S.-Y. Shin, "Fabrication of polymeric large-core waveguides for optical interconnects using a rubber molding process," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 1, pp. 62-64, 2000.
- [5] C.-G. Choi, S.-P. Han, B. C. Kim, S.-H. Ahn, and M.-Y. Jeong, "Fabrication of large-core 1x16 optical power splitters in polymers using hot-embossing process," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 6, pp. 825-827, 2003.
- [6] M.-C. Oh, S.-H. Cho, and H.-J. Lee, "Fabrication of Large-Core Single-Mode Polymer Waveguide Connecting to a Thermally Expanded Core Fiber for Increased Alignment Tolerance," *Optics Communications*, vol. 246, pp. 337-343, 2005.
- [7] M.-C. Oh, C. Zhang, H.-J. Lee, W. H. Steier, and H. R. Fetterman, "Low-loss interconnection between electrooptic and passive polymer waveguides with a vertical taper," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 8, pp. 1121-1123, Aug. 2002.
- [8] T. C. Kowalczyk, I. Finkelshtein, M. Kouchnir, Y. C. Lee, A.-D. Nguyen, D. Vroom, and W. K. Bischel, "Variable optical attenuator with large dynamic range and low drive power," *Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference 2001*, vol. 3, p. WR5-1, 2001
- [9] Y.-O. Noh, C.-H. Lee, J.-M. Kim, W.-Y. Hwang, Y.-H. Won, H.-J. Lee, S.-G. Han, and M.-C. Oh, "Polymer waveguide variable optical attenuator and its reliability," *Optics Comm.*, vol. 242, pp. 533-540, 2004.
- [10] S.-S. Lee, J.-U. Bu, S.-Y. Lee, K.-C. Song, C.-G. Park, and T.-S. Kim, "Low-power consumption polymeric attenuator using a micromachined membrane-type waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 407-409, 2000.

## Design of Variable Optical Attenuators Incorporating Large Core Polymer Waveguides

Su Hong Cho and Min Choel Oh<sup>†</sup>

*Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr*

(Received March 28, 2005, Revised manuscript May 2, 2005)

By incorporating large core polymer waveguides, which have been developed for increased alignment tolerance in passive fiber attachment, highly efficient variable optical attenuators are proposed. In order to find optimum device structures, 3-dimensional beam propagation method (BPM) simulations are performed. Heat distribution over the polymer film is calculated to find the 3-dimensional index profile data for the BPM simulation. Due to the small index contrast between the core and cladding materials in the large core waveguide, heat-induced radiation occurs for small heating power. While the ordinary VOA needs the temperature to change over 150 °C for 20 dB attenuation, the large core VOA requires only 70 °C. In addition to the merit of passive fiber attachment, the proposed VOA has enhanced attenuation efficiency for the lower temperature change.

OCIS Codes : 130.0130, 130.3120, 130.0250.