

## 1x2 열광학 폴리머 광스위치의 해석에 관한 연구

### A Study on the Analysis of 1x2 Polymer Waveguide Thermo-optic switch

곽 혁 용 광운대학교 공대 전파공학과  
김 중 현 광운대학교 공대 전파공학과

Huk-Yong Kwak Dept. of Radio Science and Engineering, Kwangwoon Univ.  
Jong-Heon Kim Dept. of Radio Science and Engineering, Kwangwoon Univ.

#### Abstract

This work presents the analysis of 1x2 polymer waveguide thermo-optic switch using asymmetric Y-splitter at the wavelength of 1300nm. Because of the high thermo-optic coefficient of polymeric materials the design of efficient switches were feasible. For the numerical simulation of these switches the finite difference beam propagation method has been employed. Design rules for a 1x2 polymeric switch have been defined by using the numerical techniques.

**key-word(중요용어):** Polymer waveguide (폴리머 도파로), Thermo-optic effect (열광학 효과), Optical switch (광 스위치)

#### 1. 서 론

기존의 광소자 재료인 유리 또는 반도체를 사용하여 제작되는 광스위치 또는 광변조기등은 제작공정이 복잡하고 비용이 고가인 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서 최근에는 재료공급 및 제조 공정이 용이한 폴리머 광소자가 개발되었다.<sup>(1)(2)</sup>

폴리머 공정기술은 대량 복제 기술에 의한 저손실 및 저가격의 집적광 소자 개발에 적합하며 최근 저손실의 폴리머 광도파로의 제작을 위한 injection molding 기술이 보고되었는데 이 기술은 CD 제작을 위해 응용되었던 복제기술에 기초를 두고 있다.<sup>(3)</sup> 이 injection molding 기술을 이용한 폴리머의 기판 재료로는 높은 광학 특성을 갖는 PMMA를 사용하며 이 PMMA 기판에 도파로의 재료로는, PFPMA/TeCEA를 사용한다. 그리고 이러한 재료들

은 열광학적 효과 (Thermo-optic effect)를 갖는 특성을 나타내고 있어서 광스위치의 재료로서 적합한 것으로 보고되고 있다.<sup>(4)(5)</sup>

본 연구에서는 폴리머 재료를 이용한 광가입망 및 광교환용 폴리머 스위치를 해석하였으며 그 결과를 통하여 최적 설계를 하였다. 이때, 폴리머 재료의 열광학 특성을 이용한 광도파로의 구조 및 가열 전극을 최적화 하기 위해서 finite difference beam propagation method (FD-BPM)를 사용하였다. 특히, 1300nm 대역에서의 1x2 열광학 폴리머 광스위치의 경우 비대칭형 Y-분배기를 사용하여 -30dB이하의 cross talk을 갖으면서도 스위치의 길이가 최소화 될 수 있도록 설계하였다.

#### 2. 광 도파로 이론

일반적으로 복제 기술을 이용한 폴리머 도파로는

단면이 정사각형인 구조를 갖게되며 이러한 구조를 갖는 도파로의 정확한 모드 정보를 얻기 위해서 유한차분법 (finite difference method) 을 이용하여 이 구조에서의 준 벡터 파동방정식 (semi-vectorial wave equation) 을 계산한다. 이때, 폴리머 도파로의 전송모드를 계산하기 위하여 전장성분만을 고려한다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + k_0^2 n^2 E_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{E_x}{n(x,y)^2} \frac{\partial n(x,y)}{\partial x} \right) = \beta^2 E_x \quad (1)$$

모드해석을 통해서 단일 모드를 갖는 도파로의 구조가 결정되면 광 스위치를 설계하기 위해서 실험 굴절율을 계산한다. 광도파로를 진행해 나가는 전장의 분포를 계산하기 위하여 2차원 FD-BPM을 사용하였으며, 이 방법은 Helmholtz 방정식

$$[\Delta + k_0^2 n^2(x,y,z)]E = 0 \quad (2)$$

으로부터 방정식의 해를 도파로의 구간마다 반복적으로 계산하는 방법으로 각 구간에서의 전장의 분포는 다음과 같다.<sup>(7)</sup>

$$E(z+\Delta z) = \exp(-j\sqrt{A}\Delta z) \cdot E(z) \quad (3)$$

이때 연산자 A는

$$A = \Delta_r + k_0^2 n^2(x,y,z) \quad (4)$$

이다.

### 3. 광 스위치 설계

본 연구에서는 1x2 광 스위치를 모드 분배 (mode splitting) 역할을 하는 비대칭형 Y-분배기로 설계하였다. 비대칭형 Y-분배기의 기본 구조 및 동작원리는 그림 1과 같다.

이 분배기는 분기점에서 두 개의 폭이 서로 다른 도파로로 구성되어 있으며 기본 모드가 분배기에 입력되면 큰 전파상수를 갖는 폭이 넓은 도파로를 통하여 기본 모드가 진행을 해 나가며 이차 모드가 입력되면 이 모드는 폭이 좁은 도파로를 통하여 진행해 나가게 된다.<sup>(8)</sup>

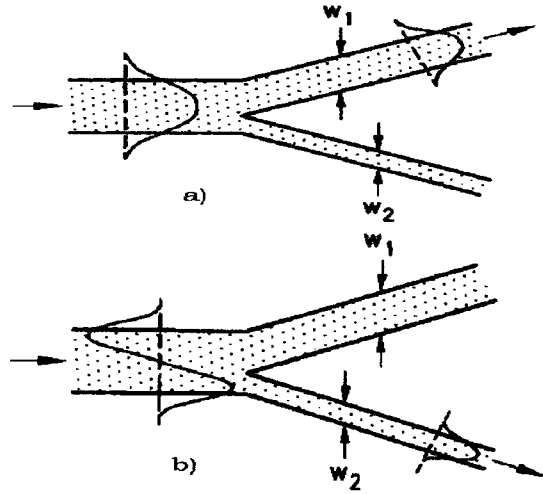


그림 1. 비대칭적 Y-분배기 동작원리 :

a) 기본모드 b) 이차모드  
광 도파로를 이용한 광 스위치를 구현하기 위해서는 도파로의 재료에 따라서 여러 가지 효과를 이용하게 되는데 폴리머 도파로에서는 주로 열광학 효과를 이용한다.

열광학 효과는 외부로부터 가해진 온도에 의하여 폴리머 도파로의 굴절율이 변하게되어 진행하던 광파의 방향이 변하게 되는 현상을 말한다.

이때 도파로 위에 가열이 가능한 전극을 설치하여 전극의 온도를 증가시키면 이때문에 도파로의 굴절률이 부분적으로 변하여 도파로의 전파 상수가 변하게된다.

일반적으로 폴리머의 온도계수는

$$\frac{dn}{dT} = -1.2 \cdot 10^{-4} (1/K) \quad (5)$$

로 다른 재료보다 온도계수가 높은 편이다.

설계상에서 가열 전극의 영향을 일정한 온도를 갖는 열원으로 간주하면 도파로에서의 온도 분포는 근사적으로 다음과 같은 가우스 분포로 설정할 수 있다.

$$T(x) = \Delta T \cdot \exp(-(x - x_{WG} - d)^2 / 4at) \quad (6)$$

이때

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad (7)$$

여기서  $\Delta T$ 는 전극과 기판 사이의 온도차,  $d$ 는 도파로와 전극사이의 거리,  $a$ 는 온도전도계수,  $t$ 는 온도를 증가시킨후로부터의 경과시간,  $K$ 는 PMMA의 열도전율,  $\rho$ 는 PMMA의 밀도,  $C_p$ 는 PMMA의 특수열이다.

본 연구에서는 그림 2에서 처럼 비대칭 Y-분배기에서 온도 변화가 없을 경우 대부분의 광파가 폭이 넓은 도파로를 통하여 진행하고 있음을 볼 수 있으며 인접한 온도로 증가시켰을 때 큰폭을 갖는 도파로의 굴절율이 감소함으로 인하여 좁은 폭의 도파로에 비해 위상상수가 작게 됨으로 큰 폭의 도파로로 진행하던 대부분의 광파가 좁은 폭의 도파로로 진행하게 됨으로 확실한 스위칭 효과가 일어날 수 있도록 설계하였다.

이때, 분배점에서의 사이각은 삽입손실이 최소가 될 수 있는 최대각을 설정한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 사용한 비대칭형 Y-분배기는 입력단 도파로의 폭이  $5\mu\text{m}$ 이고 깊이가  $5\mu\text{m}$ 이며 분배점에서의 각 도파로의 폭은 각각  $6\mu\text{m}$ 와  $4\mu\text{m}$ 이다. 도파로의 굴절율은 1.489이고 기판의 굴절율은 1.481 그리고 도파로의 윗면은 자유공간 상에 노출되어 있는 상태이다. 가열전극은 폭이 넓은 도파로로부터  $5\mu\text{m}$  거리에 설정하였으며 Y-분배기의 사이각은 삽입손실을 최소화하기 위해  $0.12^\circ$  로 고정시켰다.

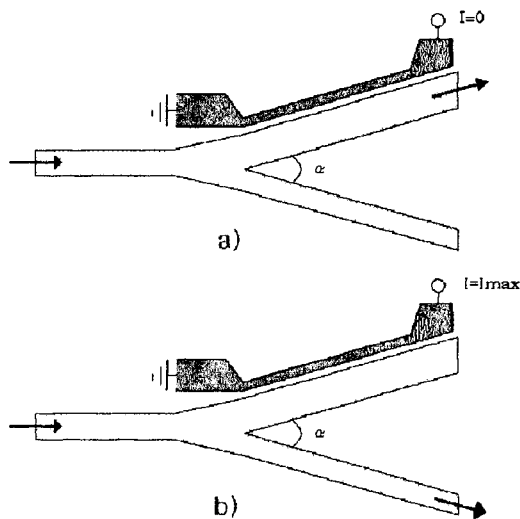


그림 2. 1x2 폴리머 광스위치의 구조 및 동작원리 :  
a)  $\Delta T = 0\text{K}$     b)  $\Delta T = 40\text{K}$

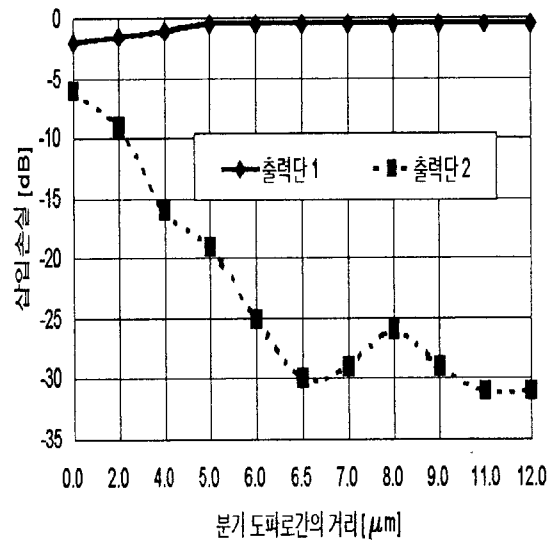


그림 3. 출력단 도파로 사이의 거리에 대한 스위치의 삽입손실

그림 3은 분배기의 끝단에서 각 도파로간의 거리에 따른 분배기의 삽입 손실을 계산한 결과를 나타내었다.  $7\mu\text{m}$ 에서 온도를 가하지 않은 상태에서 대부분의 전계가 폭이 넓은 도파로로 전달됨을 알 수 있다.

이때 보다 분명한 스위칭 현상을 보기위하여 각 끝단에 S-커브 형태의 도파로를 연결하였으며 끝단에서 도파로 사이의 거리는  $120\mu\text{m}$ 로 유지하였다. 이제 큰 폭을 갖는 도파로에 가열전극을 삽입하여 40K로 가열하였을때 전극의 길이를 가변하면서 스위칭 효과를 관찰하였다.

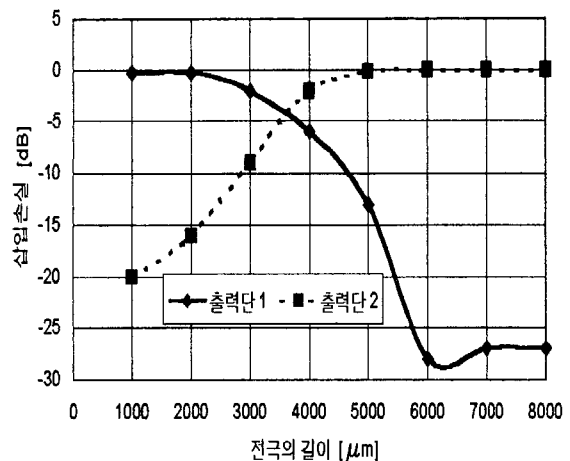


그림 4. 전극의 길이에 대한 스위치의 삽입손실

그림 4에서처럼 가열전극의 길이가  $6000\mu\text{m}$  이후부터 스위칭 현상이 분명하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 가열전극의 길이가 짧을수록 유리하기 때문에 본 연구에서는 전극의 길이를  $6000\mu\text{m}$ 로 고정하였다.

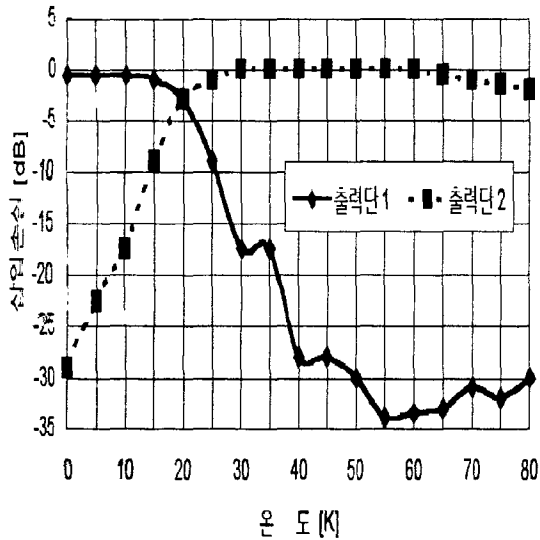


그림 5. 온도에 대한 스위치의 삽입손실

그림 5에서는 온도 변화에 따른 비대칭 Y-분배기의 스위칭 현상을 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이  $40\text{K}$  이상에서  $-30\text{dB}$  이하의 cross talk을 얻을 수 있었다.

그림 6은 BPM을 이용하여  $1\times 2$  폴리머 광도파로를 진행해 나가는 전개분포를 나타내었다.

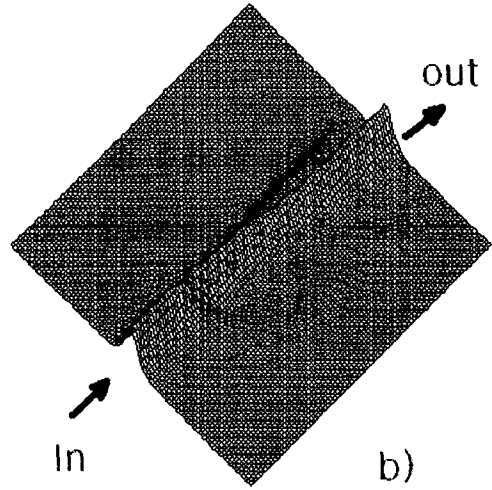
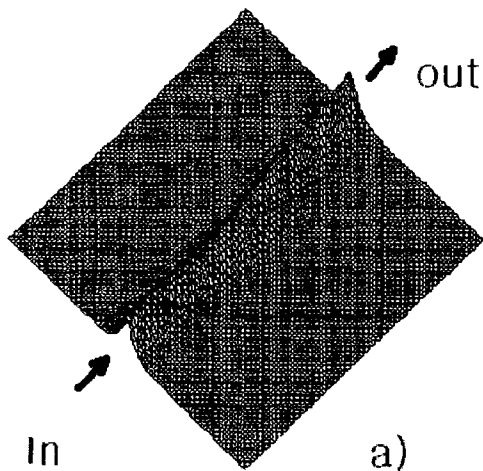


그림 6. 광스위치의 전개분포 :  
a)  $\Delta T=0\text{K}$  b)  $\Delta T=40\text{K}$

## 5. 결 론

본 연구에서는 폴리머 도파로를 이용한  $1\times 2$  광스위치를 설계하였다. 폴리머 광스위치는 비대칭형 Y-분배기로 설계하였으며 이때 도파로의 폭은 각각  $6\mu\text{m}$ 와  $4\mu\text{m}$ 였다. 가열 전극의 길이는  $6\mu\text{m}$ 였고 전극과 도파로의 간격은  $5\mu\text{m}$ 이었다. Y-분배기 출력단수 도파로 사이의 간격은  $7\mu\text{m}$ 였다.

단일모드를 입사했을 때 폴리머 재료가 갖고 있는 열 광학 효과를 이용하여서 온도 변화가 없는 상태에서 한쪽 출력단으로만 진행하던 광파가  $40\text{K}$ 의 온도를 가열 하였을 때 다른쪽 출력단으로 완전히 스위칭 되는것을 보였다. 그리고 스위칭 상태에서 cross talk는  $-30\text{dB}$ 이하로 스위칭이 매우 우수함을 알 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 결과를 기초로  $1\times 4$  또는  $1\times 8$  열광학 폴리머 광스위치의 설계도 가능하리라 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. Kurokawa, N. Takato and Y. Katayama, "Polymer optical circuits for multimode optical fiber systems," *App. Opt.*, vol. 19, no. 18, pp. 3124, 1980.
- [2] B. L. Booth, "Low Loss Channel waveguide in polymers," *J. of Lightwave Technology*," vol. 7, no. 10, pp.1445-1453, 1981.
- [3] A. Neyer, T. Knoche and L. Muller, "Fabrication of low loss polymer waveguide using injection molding technology," *Electron. Lett.*, vol. 29 pp. 399-400, 1993.
- [4] J. M. Carle, J. Dugas, L. Martin and P. Michel, "Refractive index variation with temperature of PMMA and ploy carbonate," *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 3, pp. 334-336, 1986.
- [5] Y. Hide, A. Onose and S. Imamura, "Polymer waveguide thermooptic switch with low electric power consumption at 1.3  $\mu\text{m}$ ," *IEEE Photonics Technology Lett.* vol. 5, pp. 782-784, 1993.
- [6] J. H. Kim and A. Neyer, "Design and simulation of polymeric waveguide device Fabricated by replication Technologies," *Journal of optical communications*, vol. 17, no. 5, pp. 172-178, 1996.
- [7] D. Schulz, C. Glingener and E. Voges, "Novel generalized finite difference beam propagation method," *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 30, no. 4, pp. 1132-1140, 1994.
- [8] Y. Silberberg, P. Perlmutter and J. E. Baran, "Digital optical switch," *Appl. Physics Lett.* vol. 51, no. 16, pp. 1230-1232, 1987.