

6 sigma 기반 공차 설계를 이용한 마이크로 광소자 임프린팅 공정 연구 Micro Optical Device Imprinting Process Using Tolerance Design based on Six-sigma Method

*오지인¹, 조천수², 이태호¹, 류진화¹, 이문재¹, #정명영¹
*J.I.Oh¹, C.S.Cho², T.H.Lee¹, J.H.Ryu¹, M.J.Lee¹, #M.Y.Jeong(myjeong@pusan.ac.kr)¹

¹ 부산대학교 인지메카트로닉스공학과, ² 부산대학교 지능기계시스템공학과

Key words : UV embossing, NIL, Optical device, WDM MMI Filter

1. 서론

인터넷 이용 등의 폭발적인 증가에 따른 정보 전송 용량의 수요를 만족시키기 위해서 광통신 기술의 채용이 확대되고 있다. 이러한 광통신 기술발전은 FTTH(Fiber to the Home)의 도입을 촉진시키고 있으며, 이에 따라 저가격, 고효율의 PLC(Planar Lightwave Circuit) 소자 개발이 중요한 요소가 되고 있다.¹ 기존의 PLC 소자는 복잡한 공정의 포토리소그래피와 RIE 기반의 실리카 기판으로 이루어지고 있어 저가격화에 한계를 지닌다. 따라서, 현존하는 실리카 기판의 소자를 대체할 수 있는 고분자 기반의 PLC 소자가 대두되어 이를 제작하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.² 그 중에서 미세 각인된 스탬프를 폴리머 층과 물리적으로 접촉시켜 UV 경화를 통해 미세 패턴을 형성하는 공정인 UV 임프린트 공정 기술은 공정이 단순하여 저가로 대량생산할 수 있어 PLC 소자 제작을 위한 적합한 공정기술로 최근 부각되고 있다. 그러나, UV 임프린트에 의한 PLC 소자의 패턴 성형은 UV조사 시간 및 세기에 따라 성형 정밀도 및 이형 특성이 달라지게 되므로 PLC 소자의 고효율 광학적 특성을 위해서는 수 나노미터 수준의 치수 정밀도가 유지되어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 광소자 중에서 광 네트워크 시대 구현에 있어 핵심 부품인 WDM(Wavelength division Multiplexing) MMI(Multi-Mode Interference) 필터를 6 sigma를 이용하여 최적설계를 단순히 하고 2D-BPM 시뮬레이션 통해 공차해석을 수행하였으며, 이를 기반으로 UV 임프린팅 공정 최적화를 수행하였다.

2. WDM MMI 필터 최적설계 및 공차해석

WDM MMI 필터는 FTTH용 광송수신 소자로서 기존의 필터와 달리 파장 선택 필터가 삽입되지 않는 수동소자이다. FTTH 광통신에 사용되는 광원의 파장은 up-stream, down-stream에서 각각 1310nm와 1550nm 대역을 사용한다. 각각의 파장은 필터 소자내에서 서로 반대방향으로 진행하며 cross talk는 -40dB이하(광송수신 WDM 소자의 국제권고 규격)로 설계되어야 한다. 아래의 Fig. 1은 FTTH용 WDM MMI 필터의 구조를 나타낸 것이다.

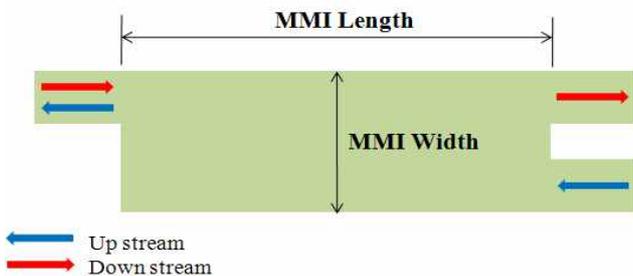
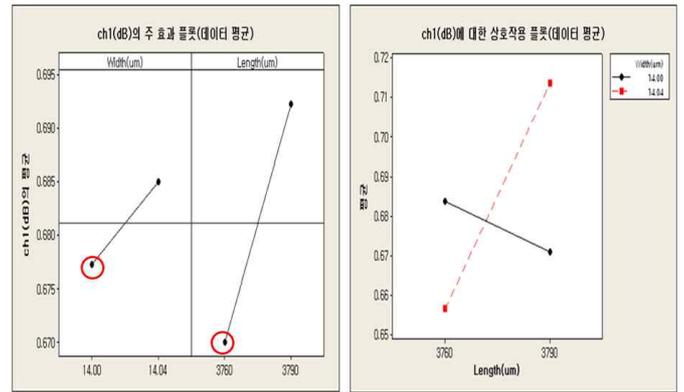


Fig 1. Structure of WDM MMI filter

이러한 광소자의 최적설계 조건을 얻기 위해 6 sigma 기법을 이용하여 1310/1550nm 파장이 최적으로 분리되는 광소자를 설계하기 위한 주요 변수로 멀티모드 구간의 폭과 길이 두 인자를 선정하였다. 각각의 인자에 대한 시뮬레이션 결과값을 입력하여 6 sigma 분석을 한 결과 광소자 최적화 설계에 길이가 폭보다 더 큰 효과를 가지는 인수임을 알 수 있었다. 또한 길이와 폭의 교호효과가 유의함을 확인하였다. Fig 2(a)의 그래프는 주효과 분석을 한 결과로서 기울기가 클수록 광소자의 출력값에 미치는

영향이 크다는 것을 의미하며, 소자의 길이가 폭보다 출력값에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig 2(b)는 상호교호작용 분석의 결과로 두 선이 평행하면 서로에 영향을 미치지 않는다고 예상할 수 있는데, 길이와 폭의 상호교호작용은 두 개의 선이 거의 직각에 가까운 형태를 나타내고 있으므로 상호간 아주 큰 유의차가 있음을 알 수 있다.



(a) Main effect analysis (b) Interaction plot

Fig. 2 6-sigma analysis

이와 같은 분석결과들을 토대로 조건들의 범위를 결정하여 반응표면(Response Surface, RS) 분석으로 최적의 조건을 찾아내어 시뮬레이션 해 보았다. 그 결과 폭은 14μm, 다른 인자 조건인 길이는 3756μm일 때 특성이 최대가 되는 설계 조건임을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 WDM MMI 필터 최적 설계시 특성치에 대한 결과 그래프를 나타낸 것으로 cross talk는 -51dB이하로 나타났다. 그리고 공차 해석을 위해 6 sigma 기반으로 최적 설계한 광소자의 조건을 토대로 하여 광소자 도파로 선포를 10nm씩 변화시키며 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 소자의 특성 목표치 기준(cross talk ≤ -40dB)에 만족하는 설계 가능한 공차부분을 구하여 그 결과를 공차설계 그래프로 나타내었다. 선포가 6μm일 때 cross talk -40dB 이하 기준 내에서 가능한 공차 치수는 ±20nm이며, 공차범위는 0.33%로 선포 5.98~6.02μm의 치수 정밀도가 필요함을 알 수 있었다.

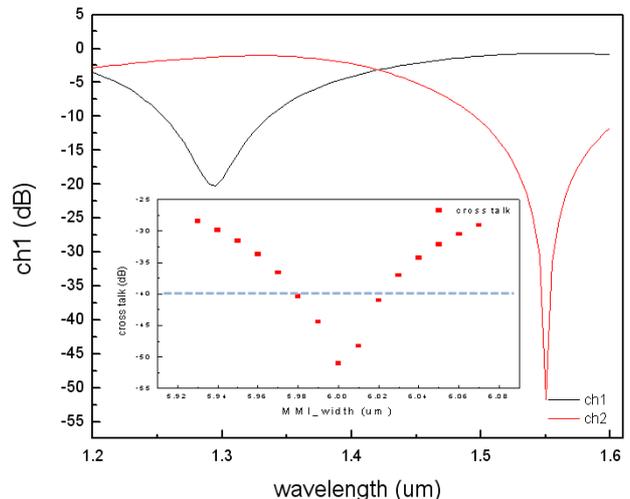


Fig. 3 The graph of Optimization and Tolerance design

3. UV 임프린트 공정 최적화 연구 및 소자제작

최적 설계된 광소자의 UV 임프린트 기반의 고분자 소자를 제작하기 위한 금형은 stepper 방식을 통한 노광을 통해 Fig. 3과 같이 선폭과 높이가 각각 6.03 μm 와 6.01 μm 으로 공차내의 치수정밀도를 가지고 정밀하게 제작하였다. UV 임프린트를 위한 고분자 소재는 광소자의 하부 클래드층으로 사용될 chem opt사의 Exguide™ (WIR 30-480)을 사용하였다. UV 임프린트를 위해 사용된 장비는 성형압력이 0~5bar이고, 성형 온도가 70도까지 조절할 수 있는 장비를 자체 제작하여 사용하였다. UV 임프린트 성형에 앞서 제작된 광소자용 실리콘 금형과 UV 경화성 레진의 들러붙음 현상을 억제하기 위해 이형막을 기상형태로 증착하여 표면에너지를 낮추었으며, 이때의 표면접촉각은 108°로 확인하였다.

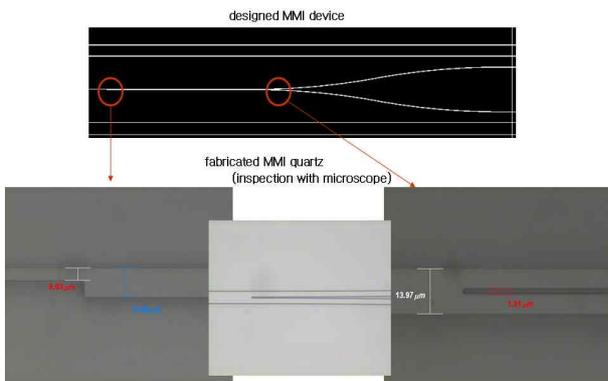


Fig. 4 The SEM image for fabricated Si stamp

표면 처리된 실리콘 스탬프를 이용하여 UV 노광시간 및 노광 세기에 따른 성형 패턴의 치수 변화를 확인하였다. 우선, 임프린트시 UV 노광세기가 10배의 차이가 나는 70mW/cm². sec와 7mW/cm². sec의 UV 램프를 사용하여 노광시간을 1분에서 10분까지 1분 간격으로 경화하여 경화된 패턴의 선폭만을 SEM image를 통해 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

높은 노광 세기인 70 mW/cm²인 경우를 이용한 UV 경화시 짧은 경화시간에도 경화가 이루어졌으며, 선폭이 6 μm 인 원형 실리콘 스탬프와의 치수의 비율이 3% 이상의 차이가 발생하였다. 또한, 6분 이상의 경우에는 높은 노광세기로 인한 열로 인해 하부 기판층으로 사용되는 고분자의 변형을 유발하였다. 그리고, Fig. 5와 같이 UV 임프린트 후 이형시 분기 부위에 sticking에 의한 패턴의 손상이 유발되는 문제가 발생하였다.

반면에 상대적으로 낮은 UV 노광세기인 경우에는 5분이전의 노광 시간까지는 패턴 표면의 미경화 문제가 발생하였으며, 노광 시간에 따라 패턴의 치수변형이 상대적으로 크게 발생하였다.

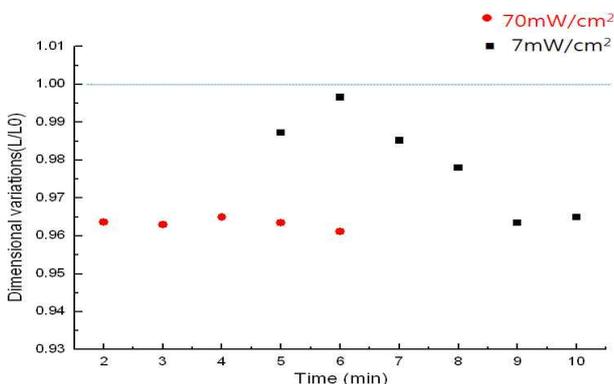
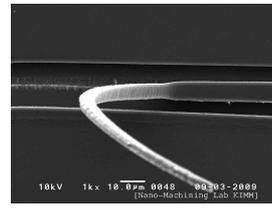
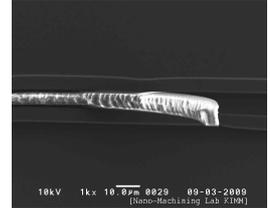


Fig. 4 The dimensional variation of imprinted patterns according to the exposure time and intensity



(a) UV underclad layer



(b) Si stamp

Fig. 5 The demolding problem at the UV high intensity and long exposure time

Fig. 6는 도출된 최적의 UV 임프린트 공정 (7mW/cm². sec, 6min, 2 bar, 50 degree)을 이용하여 기판위의 하부클래드의 SEM 이미지를 나타낸 것으로 선폭이 5.987 μm , 깊이가 6.01 μm 으로 공차 범위인 0.33% 이내의 치수 정밀도로 성형됨을 확인하였다.

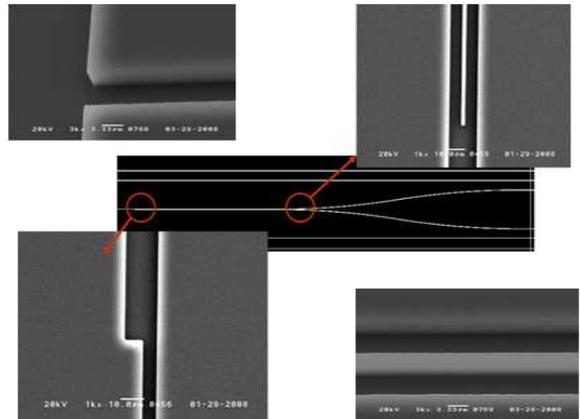


Fig. 6 The imprinted underclad image using optimal UV imprint condition

4. 결론

6 sigma 기법을 이용하여 구한 광소자의 최적 조건은 소자의 폭과 길이가 각각 14 μm , 3756 μm 로 설계되었으며, 그 경우 최대 특성인 cross talk는 -51dB이하의 결과를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 특성 목표 기준(cross talk \leq -40dB)을 만족하는 최대 치수 공차는 약 $\pm 20\text{nm}$ 정도의 오차로 공차범위가 0.33%인데, 일반적인 공차범위에 해당하는 1%에 비해 매우 낮았다. 이와 같이 WDM MMI Filter는 치수에 대한 특성변화가 민감하여 치수정밀도가 아주 중요함을 알 수 있었다. 따라서, 이를 제어하기 위해 UV 임프린트 공정에서 표면 처리된 실리콘 스탬프를 이용하여 최적의 UV 임프린트 공정 (7mW/cm². sec, 6min, 2 bar, 50 degree)으로 선폭이 5.987 μm , 깊이가 6.01 μm 으로 공차 범위인 0.33% 이내의 치수 정밀도로 성형하여 UV 임프린팅 공정 최적화 연구를 수행하였다.

후기

본 연구는 중소기업기술개발지원사업(중소기업 이전기술개발사업)의 일환으로 수행하였음.[S1065242]

참고문헌

- Oh, S.H., Choi, D. S., Kim, C. S. and Jeong, M. Y., "PDMS Stamp Fabrication for Photonic Crystal Waveguide," J. of KSPE, Vol. 24, NO.4, pp. 153-158, 2007.
- Pan, C. T., Lo, S. C., Yang, J. C. and Chen, Y. J., "Fabrication of Optical disk mastering using electron beam and embossing process," Optical and Quantum Electronics, Vol.39, NO. 8, pp.693-705, 2007.