

◆ 특집 ◆ 인쇄전자 공정장비기술

RTR 공정에 의한 PLC 광통신 소자 구현 기술

Implementation of PLC Device by Roll to Roll Process

김정훈¹, 김소희¹, 강호주¹, 조상욱¹, 이태호², 정명영^{1,✉}
Jung Hoon Kim¹, So Hee Kim¹, Ho Ju Kang¹, Sang-Uk Cho¹, Tae Ho Lee², and Myung Yung Jeong^{1,✉}

¹ 부산대학교 인지메카트로닉스공학과(Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan Univ.)

² 부산대학교 광메카트로닉스연구소(The Institute of Opto-Mechatronics, Pusan Univ.)

✉ Corresponding author: myjeong@pusan.ac.kr, Tel: +82-55-350-5284

Manuscript received: 2014.4.17 / Revised: 2014.5.20 / Accepted: 2014.5.21

The roll to roll (RTR) imprint process is an integrated imprinting process where steps ranging from assignment of a function to a flexible rolled substrate to rewinding of the same substrate in a roll are performed. RTR imprint is a green, low-cost technology without limitations. In RTR imprint, it is important to manufacture the mold precisely and maintain uniform process condition. To this, process conditions have to include precision tension control, optimization of process parameters. We introduced RTR imprint to fabricate planar lightwave circuit (PLC) device for communication, by new schematic design and process optimization, we fabricated successfully optical device. The fabricated optical device showed the optical performance which was satisfied to meet international standard.

Key Words: Optical device (광소자), Imprint (임프린트), Roll-to-roll imprint (롤투롤임프린트), Optical interconnection (광접속)

1. 서론

1990년대 PLC(Planar lightwave circuit)형 집적 광통신 소자의 상용화가 이루어진 이후, 광분배기 및 파장다중화 소자 등 수동형을 위주로 광통신 네트워크에서의 채용이 급격하게 확대되었으며, 앞으로도 빅데이터 시대를 맞이하여 고속, 대용량의 네트워크 도입이 가속화됨에 따라서 PLC 광통신 소자의 수요는 더욱 증대될 것으로 예상된다.¹

지금까지 PLC 광통신 소자는 실리카(Silica) 광도파로를 기반으로 전세계적으로 우리나라의 시장 지배도가 높았으나, 최근에는 중국을 중심으로 저가형 PLC 광통신 소자가 시장에서 지배력을 높여감에 따라, 이에 대응하는 제품의 출현이 절실한 실정이다.

PLC형 광통신 소자의 저가격화를 위해서는 제조공정의 혁신이 가장 중요한 요소로 간주되고 있다. 기존 실리카 PLC 광통신 소자의 제조는 화학 기상 증착법과 포토리소그래피 및 식각 공정을 기반으로 한 반도체 공정이며, 고분자 도파로도 유사한 반도체 공정으로 제작되고 있다.²⁻⁴ 반도체 공정은 공정수 측면에서 저가격화에 대한 경쟁력이 낮으며, 또한 환경 오염, 에너지 이용 등의 측면에서도 단점을 지니고 있다.

본고에서는 이러한 문제를 해결하고자 임프린트(Imprint) 공정에 의한 광소자의 제작을 소개할 것이며,⁵⁻⁷ 특히 최근에 각광을 받고 있는 롤투롤(RTR: Roll to roll) 공정에 의하여 광소자를 제조하는 방법을 중심으로 기술하고자 한다.

RTR 임프린트 기반 광소자는 반도체 공정에

Table 1 Resin types for RTR imprint

Resin type	Viscosity (mPas)	Photoinitiator (%)	Reflective index
Resin 1	6	< 4	1.4804
Resin 2	7	< 6	
Resin 3	7	< 8	

대비하여 공정수의 절감, 환경 오염 및 에너지 절감 측면에서 매우 유리하며, 이에 더하여 상용화를 위한 핵심인 광소자와 광섬유의 정렬 및 결합문제의 해결을 위한 일체형 구조도 제시하고자 한다.

2. 광소자용 RTR 공정 기술

광통신 소자의 성능은 광이 도파되는 코어(Core)의 치수와 광의 분기 및 결합부의 치수 등 기하학적 치수 정밀도에 의하여 직접적으로 영향을 받으며, 일반적으로 1 μm 이하의 정밀도를 유지할 수 있어야 한다. 따라서 기존의 롤투롤 프린트 공정 기술의 한계를 극복하기 위하여 본 논문에서는 해상도가 높은 임프린트 기반의 RTR 공정기술을 이용한 광소자 제작 공정 기술연구에 대해 기술하고자 한다.

2.1 RTR 공정 변수의 영향

RTR 공정을 통한 광소자 제작시 고려되는 가장 큰 변수는 높이 방향의 성형 특성이다. RTR 공정은 성형시간 및 가압구간이 짧아 광소자 구조물의 선폭 결함 보다 높이 방향의 결함 발생이 높다. 따라서 RTR 공정시 높이 방향의 성형 정밀도에 직접적인 변수인 롤 가압, 장력, 기관 속도, 재료의 물성에 따라 성형 특성을 확인하는 것이 중요하다.

Table 1은 광소자 제작을 위한 자외선 경화 수지로 점도 및 광개시제 함량이 다른 재료를 나타내었다. 재료별 RTR 공정에 따른 특성 연구를 수행하였다. Fig. 1은 RTR 공정에서의 공정 변수에 따른 특성을 보여 준다. 광소자 제작에 필요한 구조물의 높이 방향의 목표 치수는 50 μm 이다. 사용한 자외선 경화 수지의 높은 점도는 RTR공정 변수인 롤 가압, 장력을 증가시키는 특성을 보이며, RTR 임프린트 공정은 성형과 동시에 자외선 경화가 이루어지므로 광개시제의 함량은 짧은 성형 구간에 빠른 경화 작용으로 구조물이 높이 방향의 충진이 완료되기 전 경화가 이루어지는 특성을 보

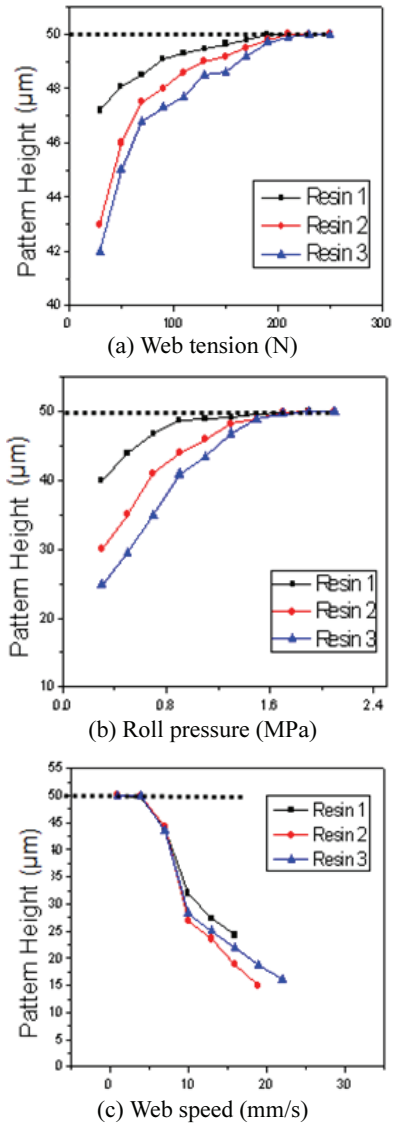


Fig. 1 Fabricated pattern height according to RTR imprint parameters of various resin types

인다. 또한, 높은 기관 속도는 성형 시간에 영향을 주어 광소자 구조물의 성형이 이루어지기 전에 성형구간을 지나 높이 방향의 치수 정밀도가 낮아지는 특성을 알 수 있다.

3. RTR 공정용 PLC 소자 설계

RTR 공정에 의한 고분자 광소자 제작을 위해서는 제작이 용이하면서 고효율 특성을 갖는 설계

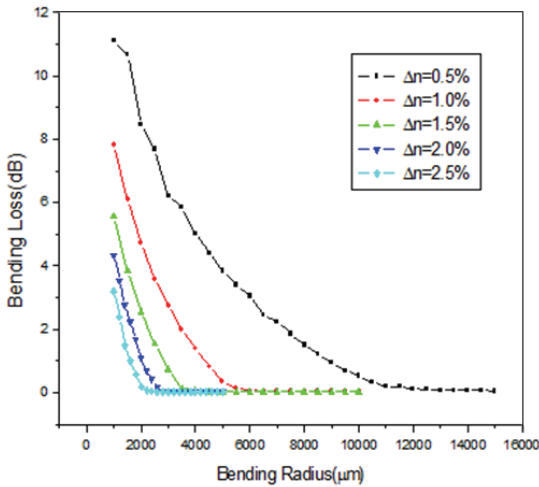
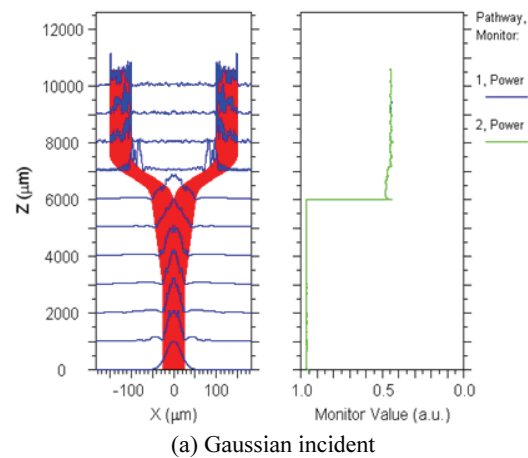
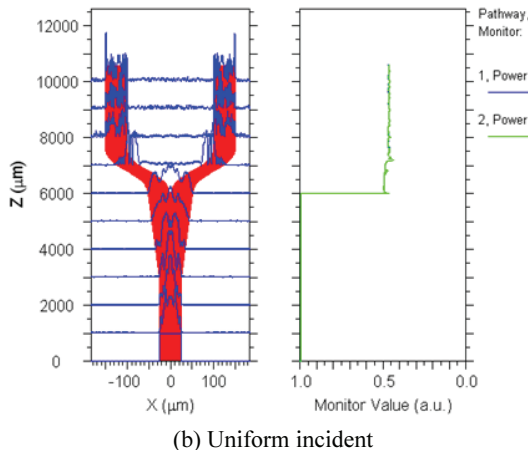


Fig. 2 Simulation of 50µm multimode waveguide bending loss for an optimal bending radius



(a) Gaussian incident



(b) Uniform incident

Fig. 3 Simulation of beam propagation

가 요구된다. 본 논문에서는 구조적 설계를 통하여 RTR 공정이 가능한 고효율의 광소자 설계방법을 제시하고자 한다.

RTR 공정을 위한 고분자 광소자 제작을 위해서는 광소자의 성능에 영향을 미치지 않으면서 제작이 용이한 구조의 설계가 요구되며, 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 RTR공정을 위한 구조를 설계하였다.

설계된 광소자는 50X50µm 크기의 정사각형 코어를 가지는 멀티모드 1X2 분배기이며 균일한 굴곡을 가지는 구조이다. 시뮬레이션은 클래드 굴절률을 고정하고 코어와 클래드의 굴절률차를 0.5%에서 2.5%까지 변화시키며 곡률 반경에 따른 굽힘 손실을 계산하였다. Fig. 2는 굴절률 차이에 따라 특정 곡률반경 이상의 곡률 반경에서는 손실이 발생하지 않음을 보임을 나타내었다. 또한 광소자의 분기부는 매우 높은 중형비를 가지고 있어 패턴 형성에 어려움이 있으므로, RTR 공정을 고려하여 구조물의 중형비를 10:1 수준으로 맞추기 위해 분기부 간격을 4µm로 설계하였다. 멀티모드 광섬유를 통한 입사는 Fig. 3과 같이 가우시안 입사와 균일입사 조건에 대하여 동일한 분기비를 확인하였다. 따라서 설계된 광소자 구조는 고효율의 RTR공정이 가능한 구조이다.

4. PLC 광소자 구현

고분자 광도파로를 이용한 광소자 제작에서 광정렬 및 연결에 어려움이 있다.^{8,9} 본 논문에서는 수동정렬이 가능한 고효율 광소자 구조를 소개한다.

4.1 일체형 PLC 광통신 소자

고분자 광소자 상용화에 따른 문제를 해결하기 위하여 단일 공정을 통한 평면 광소자 패턴과 U-groove 패턴을 동시에 제작하여 광섬유와 광소자의 정렬 및 접속을 동시에 구현하는 기법이 제안되고 있다.¹⁰ Fig. 4는 제안된 평면 광소자와 광섬유의 정렬을 위한 일체형 구조를 나타낸 것이다

광소자와 광섬유의 광정렬 및 연결 구조를 제작하기 위하여 광소자 패턴 및 광섬유를 삼입할 수 있는 U-groove 형태의 광섬유용 채널 패턴을 설계하였다. 설계된 구조의 광소자는 1X2 분배기이며 패턴 크기는 50µm, 광섬유용 채널은 광섬유 지름이 125µm의 크기를 가지는 것으로 설계하였다.

광섬유의 코어와 광소자의 코어를 동일 평면에

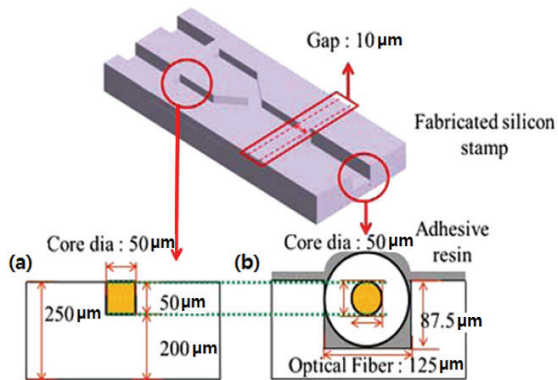


Fig. 4 Schematic design of optical interconnection; (a) optical device, (b) channel for optical fiber

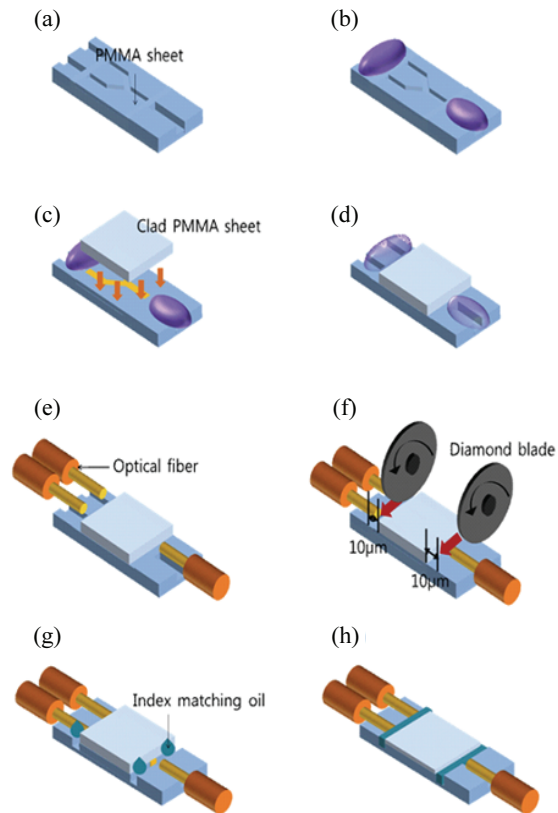


Fig. 5 Schematic view of fabrication process for optically interconnected PLC device; (a) fabricated PMMA sheet, (b) photoresist filling of fiber block and UV curing, (c) clad layer lamination, (d) photoresist removal, (e) fiber insertion, (f) dicing, (g) index matching oil drop, (h) fabricated integrated optical device

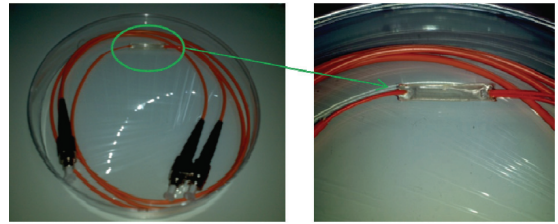
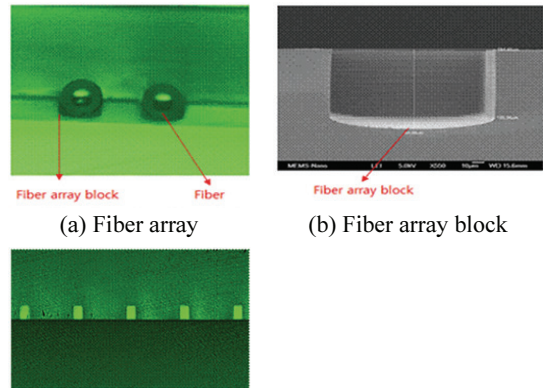


Fig. 6 Optically interconnected PLC device



(a) Fiber array

(b) Fiber array block

(c) Optical device

Fig. 7 Cross-sectional images of PLC device

형성하기 위하여 광섬유를 광소자보다 37.5 μm 깊게 설계하여 기하적으로 광소자의 코어와 광섬유의 코어 중심축이 정렬되도록 하였다.

설계된 일체형 광소자를 제작하기 위한 임프린트 패터닝을 위해 니켈 스탬프를 제작하였으며, Fig. 5의 순서로 일체형 광소자를 제작하였다.

광섬유 연결부에는 포토레지스트를 사용하여 광소자 코어 충전과정에서 코어 물질이 채널부로 흘러 들어가는 것을 방지하였으며, 광소자 코어 충전 공정이 끝난 후 현상액을 통해 광섬유 채널부의 포토레지스트를 제거하였다. 제거된 광섬유 연결부에 광섬유를 삽입하고 다이싱 공정을 통해 광섬유와 광소자 사이에 10 μm 의 간격을 만들고 여기에 굴절률 매칭 오일을 충전하여 광소자를 제작하였다. 다이싱 공정을 통해 광소자와 광섬유 끝단의 표면조도를 개선하였고, 굴절률 매칭오일을 사용하여 광소자와 광섬유의 결합과정에서 발생하는 손실을 최소화하였다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 제작된 일체형 광소자의 단면과 광섬유가 결합된 모습이다. 제작된 광소자의 성능은 Fig. 8과 같이 2개의 출력채널에서 광의 균일성은 0.3dB, 삽입손실은 4.2dB 이하로 제작되었

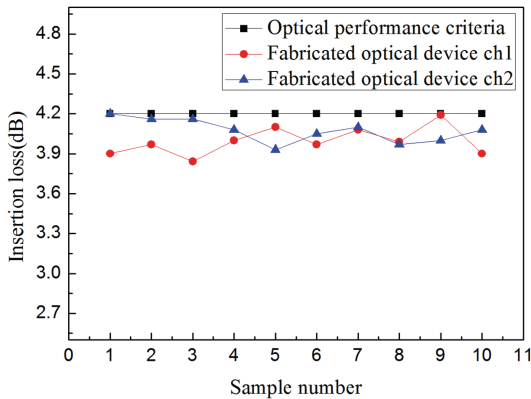


Fig. 8 Optical insertion loss of fabricated multi mode optical device

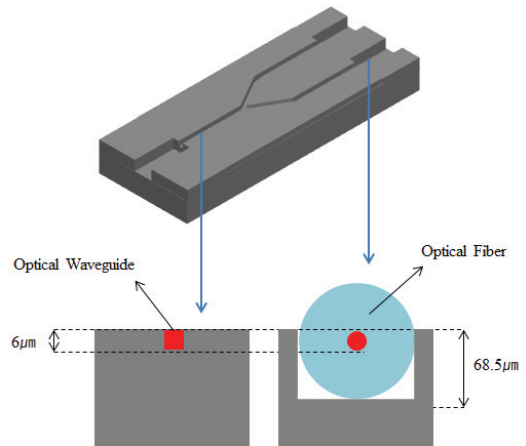


Fig. 9 Schematics of the optical PLC device

다. 광소자의 성능은 Telcordia사의 GR-1209-CORE의 규격인 광균일성 0.6dB, 삽입손실 4.2dB이하로서 국제규격을 만족한다.

4.2 RTR 공정을 의한 PLC 광통신 소자 제작

임프린트 공정을 통한 일체형 광소자 제작에서 발전된 RTR 공정을 이용한 단일모드 일체형 광소자 제작기술을 제시하였다.¹¹ 단일모드 광소자는 다중모드에 비해 코어의 크기가 작아 높은 정밀도를 요구한다. 단일모드 광소자의 설계는 Fig. 9와 같이 1X2 분배기이며 코어 크기는 6µm로 설계하였다. 광섬유용 채널은 광섬유 지름에 맞춰 125µm의 크기로 설계하였으며, 광소자와 광섬유가 동일한 높이에서 결합되게 하기 위해 광섬유 채널의 높이는 68.5µm로 설계하여 니켈스템프를 제작하였다.

제작된 니켈스템프를 연마공정이 완료된 원통형 금형에 부착하여 Fig. 10과 같이 원통형 스탬프를 제작하였다.

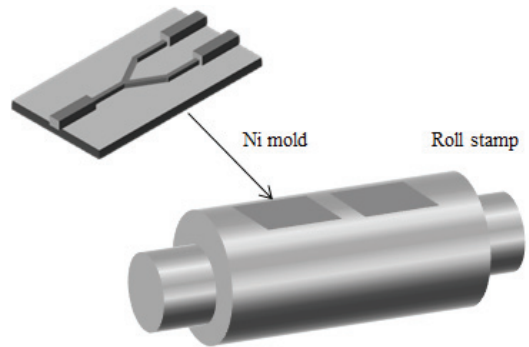


Fig. 10 Schematic view of the roll stamp

RTR 공정은 롤가압, web 속도 등이 주요한 공정 변수로서 그 공정 특성을 확인하기 위해 롤가압을 0.5~1.5MPa까지 변화를 주어 공정을 진행하였으며 1.5MPa에서 6µm 깊이의 패턴이 성형되는 것을 확인하였다. Web 속도는 5mm/s~20mm/s의 조건으로 공정을 진행하였으며 8mm/s에서 원하는 패턴을 성형하였다.

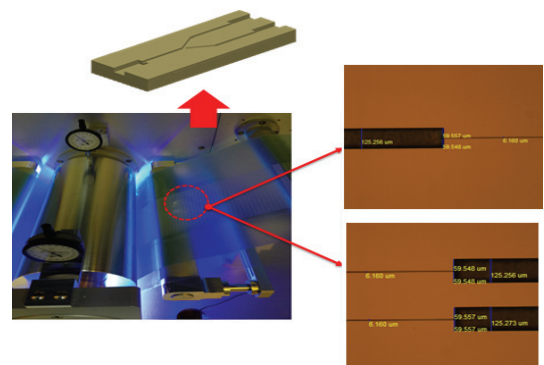


Fig. 11 An integrated optical device using Roll to roll process

RTR공정으로 제작된 광소자는 Fig. 11에서와 같이 정밀하게 제작되었다. Table 2에 제작된 패턴의 정밀도를 나타내었다. 제작된 광소자의 성능 평가를 위하여 삽입손실과 채널간의 균일성을 측정하였다. RTR공정을 통해 제작된 광소자의 삽입

손실과 채널간의 균일도를 측정된 결과 Fig. 12와 같이 삽입손실은 4.2dB 이하이며, 0.2dB의 채널 균일도를 가지고 있어 광학적으로 우수한 특성을 가지는 것을 확인하였다.

Table 2 Precision of Passive alignment PLC device

Measurement location of optical device	Pattern width (μm)	Pattern height (μm)
PLC input 1	6.160	6.081
PLC output 1	6.160	6.121
PLC output 2	6.160	6.094
Fiber block input 1	125.256	68.574
Fiber block output 1	125.273	68.616
Fiber block output 2	125.256	68.581

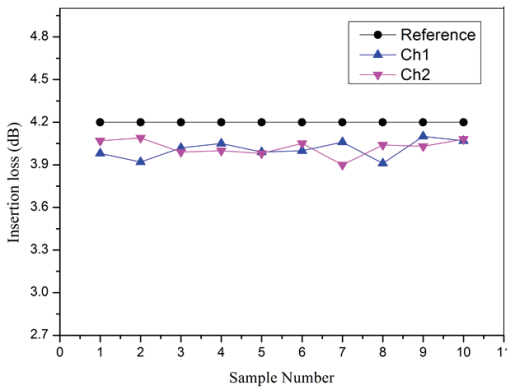


Fig. 12 Optical insertion loss of fabricated single mode optical device

5. 결론

본 논문에서는 기존의 PLC 광통신 소자 제작의 생산성과 저가격화의 한계를 극복할 수 있는 고분자 기반의 광소자 제작을 위한 구조의 설계 및 연속 생산 공정에 대하여 살펴보았다.

RTR공정을 통한 광소자 제작을 위해 다양한 공정변수 및 재료 물성에 따른 성형 특성을 확인하였으며, 고분자 기반의 고효율 광소자 제작을 위해 공정 최적 구조에 관한 설계를 광학시뮬레이션을 통해 수행하였다. 또한 고분자 광소자 구현을 위한 광 정렬 및 연결 문제를 해결하기 위해 광소자 패턴과 U-groove 패턴을 일체형으로 제작하여 광섬유 코어와 광소자 코어의 정렬 및 결합을 동시에 구현하였다.

제안된 일체형 구조로 임프린트 및 RTR공정을 수행하여 광학적 특성을 확인하였다. 제작된 일체형 광소자는 삽입손실이 4.2dB 이하, 출력균일도 0.6dB 이하로 Telcordia사의 GR-1209-CORE의 국제 규격을 만족하므로 RTR를 이용한 PLC광통신 소자 구현 기술이 가능함을 확인하였다.

RTR기반의 일체형 PLC 광통신 소자 구현은 높은 생산성과 가격 경쟁력을 가질 뿐만 아니라 기존의 광통신 및 광PCB, 광네트워크 시스템과의 손쉬운 결합을 가능하게 한다. 따라서 정보통신 분야 및 자동차, 조선, 항공, 의료, 생명공학 등 국가산업 전반에 걸쳐 핵심적인 기술로 발전할 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

REFERENCES

1. Baek, Y. S., "Optical Components for High Speed Optical Communications," Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 24, No. 6, pp. 297-310, 2013.
2. Yasuda, N. and Hosokawa, H., "Replicated Polymer Optical Waveguides," Proc. of SPIE on Active and Passive Optical Components for WDM Communications III, Vol. 5246, pp. 103-111, 2003.
3. Kobayashi, S., Suda, T., Ishiguro, T., Motoyoshi, D., and Yamabayashi, Y., "Polysilane Optical Waveguide Devices using Photo-bleaching Effect," Proc. of SPIE on Optoelectronic Integrated Circuits XI, Vol. 7219, Paper No. 721907, 2009.
4. Dong, Y., Yu, X., Sun, Y., Li, Y., Hou, X., and et al., "Polymer Waveguide Grating Fabricated by Twophoton Initiated Photopolymerization and Its Application as an Input Coupler," Optical Materials, Vol. 30, No. 6, pp. 935-938, 2008.
5. Oh, S. H., Cho, S. U., Kim, C. S., Han, Y. G., Cho, C. S., and et al., "Fabrication of Nickel Stamp with Improved Sidewall Roughness for Optical Devices," Microelectronic Engineering, Vol. 88, No. 9, pp. 2900-2907, 2011.
6. Ryu, J. H., Kim, C. S., and Jeong, M. Y., "Dimensional Stability of an Imprinted Microoptic Waveguide," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 11, pp. 100-106, 2008.
7. He, Y., Zhang, T., Fu, J., and Chen, Z., "Experimental Study on the Fabrication of the Light Guide Plate with Hot Embossing Method," Applied Mechanics and Materials, Vol. 37-38, pp. 448-452, 2010.

8. Maru, K., Fujii, Y., Zhang, S., and Hou, W., "Proposed Design for High Precision Refractive Index Sensor using Integrated Planar Lightwave Circuit," *Physics Procedia*, Vol. 2, No. 1, pp. 39-44, 2009.
9. Duan, J. A. and Zheng, Y., "Experimental Study of the Packaging Failure for Optical Fiber Arrays," *Advanced Materials Research*, Vol. 295-297, pp. 1594-1599, 2011.
10. Kim, Y. S., Cho, S. U., Kang, H. J., and Jeong, M. Y., "A Study on the Imprinting Process for an Optical Interconnection of PLC Device," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 12, pp. 1376-1381, 2012.
11. Cho, S. U., Kang, H. J., and Jeong, M. Y., "The Study of Optical Device embedded Optical Alignment according to Roll to Roll Process," *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, Vol. 20, No. 3, pp. 19-22, 2013.