

◆ 특집 ◆ 대면적 미세가공시스템

대면적 미세 성형공정 원천기술 개발

Development of Key Technologies for Large Area Forming of Micro Pattern

최두선^{1,✉}, 유영은¹, 윤재성¹, 제태진¹, 박시환², 이우일², 김봉기³, 정은정³, 김진상³
 Doo Sun Choi^{1,✉}, Yeong Eun Yoo¹, Jae Sung Yoon¹, Tae Jin Je¹, Si-Hwan Park², Woo Il Lee²,
 Bong-Gi Kim³, Eun Jeong Jeong³ and Jinsang Kim³

¹ 한국기계연구원 나노공정장비연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, KIMM.)

² 서울대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University)

³ 미시간대학교 재료공학과 (Department of Materials Science and Engineering, University of Michigan)

✉ Corresponding author: choids@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7124

Manuscript received: 2011.5.2 / Accepted: 2011.6.8

Micro features on the surface are well-known to have significant effects on optical or mechanical properties such as the optical interference, reflectance at the surface, contact angle, interfacial friction, etc. These surface micro features are increasingly employed to enhance the functionality of the applications in various application areas such as optical components for LCD or solar panel. Diverse surface features have been proposed and some of them are showing excellent efficiency or functionality, especially in optical applications. Most applications employing the micro features need manufacturing process for mass production and the injection molding and roll-to-roll forming, which are typical processes for mass production adopting polymeric materials, may be also preferred for micro patterned plastic product. Since the functionality or efficiency of the surface structures generally depends on the shape and the size of the structure itself or the array of the structures on the surface, it would be very important to replicate the features very precisely as being designed during the molding the micro pattern applications. In this paper, a series of research activities is introduced for roll-to-roll forming of micro patterned film including filling of patterns with UV curable resin, demolding of surface structures from the roll tool, control of surface energy and cure shrinkage of resin and dispose time and intensity of the UV light for curing of UV curable resin.

Key Words: Micro Pattern (마이크로 패턴), Roll-to-roll Forming (연속 성형), Large Area Forming (대면적 성형), High-aspect-ratio Pattern (고형사비패턴), Surface Energy of Resin (수지의 표면에너지)

1. 서론

대면적 미세 성형기술은 넓은 면적의 표면에 미세 패턴이 설계된 박형 또는 필름 형태의 플라스틱 부품이나 제품의 대량 생산을 위한 성형 기술을 의미하고 있다. 성형 제품의 특성에 따라 필

름형 제품 생산을 위한 롤 금형을 이용한 연속 성형 및 기관형 제품 생산을 위한 사출성형, 사출압축성형, 엠보싱 성형과 같은 주기적 성형으로 구분할 수 있다. 최근 미세 패턴이 응용된 다양한 형태의 제품 개발에 대한 관심이 커지고 있어 이에 적절히 대응하기 위한 연속 및 주기적 성형에

의한 미세 패턴 제품 성형기술 개발의 중요성이 증가하고 있다. 현재 대면적 미세성형 기술의 적용이 요구되거나 예상되는 제품 군은 LCD 의 주요 광학부품인 프리즘 필름이나 확산필름과 같은 광학필름, 복합 도광판 및 확산판, 교통 표지판 등의 반사필름, 표면의 친수성 조절 등을 위한 기능성 표면 제품 등 다양한 응용 제품이 있다.^{1,6} 이와 같이 미세패턴 응용 제품이 다양화함에 따라 요구되는 패턴의 형상 및 크기도 다양해지고 있으며, 설계 패턴을 정밀하게 구현하는 성형 기술의 중요성도 제품화의 관점에서 지속적으로 증가하고 있다.

미세패턴 응용제품 성형 기술에서는 미세패턴의 크기 및 형상비, 패턴 전사율, 연속 성형에서의 성형 폭 혹은 주기적 성형에서의 성형 면적 및 성형 제품의 두께, 연속 성형에서의 성형속도 등이 주요 성능지표로 고려될 수 있다. 미세패턴 크기는 미세패턴 응용 제품의 표면에 설계된 패턴의 평면 방향으로의 특성 길이를 나타내며, 형상비는 이러한 평면 방향으로의 특성 길이에 대한 패턴의 높이 혹은 깊이의 비율로 정의될 수 있다. 이러한 미세 패턴의 크기 및 형상비는 성형의 관점에서 볼 때 패턴의 전사 난이도를 판단할 수 있는 주요한 지표 중의 하나로 일반적으로 그 크기가 작을수록 형상비가 클수록 성형 난이도가 높아지게 된다. 특히 최근 고풍상비 표면 구조물의 광학적 특성이나 접촉각 등과 같은 기계적인 표면 특성에서의 우수성이 알려지며 고풍상비 구조물의 응용에 대한 필요성이 커지고 있지만, 형상비가 커질수록 수지의 충전 및 이형에서의 어려움이 배가되는 등 성형공정에서의 어려움으로 응용이 제한되고 있다. 패턴의 크기 및 형상비는 적용되는 응용제품의 성능 향상의 관점에서 결정되나, 최근 적용되는 패턴의 크기가 지속적으로 작아지는 반면 형상비는 커지는 경향을 보이고 있으며, 종종 성형에서의 어려움으로 패턴 크기 및 형상비가 제한되는 경우도 발생하고 있어 보다 유연한 패턴 설계 및 제품 개발을 위해서는 보다 작은 패턴 및 고풍상비 패턴의 성형이 가능한 성형 기술의 개발이 더욱 중요해지고 있다.

연속 성형에서의 성형 폭은 표면에 미세패턴 응용 제품의 크기에 의해 결정되는데, 성형 폭이 증가함에 따라 성형장비의 대형화, 패턴 균일성 저하, 수율 저하 등 다양한 문제가 발생하는 등 기술적 난이도가 크게 증가한다. 최근 활발한 개발이 이루어지는 대형 디스플레이의 경우 미세패

턴 응용 광학부품의 적용을 통한 성능향상이 주요한 연구개발 내용의 하나이나 이는 성형 과정을 통해 제작될 수 있는 광학부품의 크기에 의해 결정되고 있는 실정이다. 따라서 보다 넓은 면적에 미세패턴을 성형할 수 있는 공정기술 및 장비개발이 대형 디스플레이 기기의 성능향상에 핵심적인 역할을 한다.

롤 성형속도는 생산되는 미세패턴 응용필름의 생산성을 결정하는 중요지표로 제품의 생산 원가 결정에 직접적인 영향을 미치며 사업 경쟁력을 결정하는 주요 요소이다. 이러한 성형속도는 성형공정에서의 충전, 경화 및 이형을 포함한 전반적인 공정 기술에 의해 결정되므로 롤 성형 공정기술의 수준을 나타낼 수 있는 주요한 성능 지표로 활용된다.

미세패턴 성형에서 전사율은 설계된 패턴의 형상 및 크기 대비 성형된 패턴의 정밀도를 나타내는 것으로 다양한 방식으로 정의될 수 있으나, 간단하게는 설계 패턴 및 성형 패턴의 높이의 비로 평가할 수 있다. 이러한 전사율은 성형을 통해 제작된 미세패턴 부품이 원래 설계된 성능에 어느 정도 근접한 성능을 구현하느냐에 매우 중요한 의미를 가지게 되며 특히 최근 패턴의 세장비가 커지고 패턴설계가 매우 정밀하게 이루어지는 것을 고려할 때 전사율은 미세패턴 응용 광학 부품의 성능에 직접적으로 영향을 주는 매우 중요한 성능 지표이다. 최근 열가소성 수지의 사출성형을 중심으로 패턴 성형성에 관한 다양한 연구⁷⁻¹¹가 진행된 바 있으나 이형에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 미세패턴 성형 공정기술과 관련하여 연속 성형 공정을 중심으로 주요 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 대면적 미세패턴 연속성형 기술

2.1 대면적 미세패턴 연속성형 시스템

미세패턴 광학 필름 성형을 위해서 연속 성형 장비를 Fig. 1 과 같이 기존 장비를 기반으로 제작하였다. 적용 롤 크기는 최대 유효 성형 폭이 1,600mm 이며 공정속도는 최대 20m/min 로 설계 제작되었으며 미세 패턴 성형을 위한 마스터는 금속 롤 표면에 직접 미세 패턴이 가공된 hard roll master 및 필름에 제작된 패턴을 마스터로 사용하는 soft roll master 두 방식의 적용이 가능하게 제작되었다.

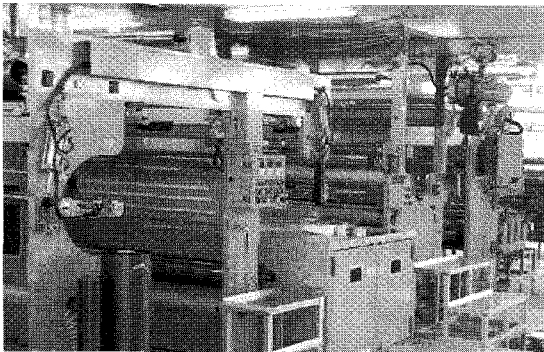


Fig. 1 Forming facilities for micro patterned wide film

2.2 미세패턴 충전 현상 해석 및 분석

미세패턴 필름의 연속 성형 공정에서 수지의 미세 패턴에 대한 충전 및 수지가 필름 위에 코팅되는 과정에서의 기포의 발생 및 유입 현상에 대하여 해석 및 실험을 수행하였다. Fig. 2 에 나타난 바와 같이 패턴 성형 시 패턴 롤과 nip 롤 사이에 수지가 공급되어 필름과 함께 이송될 때 vortex 등이 형성되는 recirculation 영역이 존재하며 두 롤의 접촉이 발생하는 영역에서는 급격한 압력 상승으로 패턴으로의 충전이 발생하는 것으로 분석이 되었다. 있다. 미세 패턴에 대한 국부적인 충전 현상 해석 결과는 Fig. 3 에 나타내었는데, 수지의 압력 변화에 따른 충전 특성을 수지와 패턴 롤 표면 사이의 접촉각을 고려하여 나타내었다. 미세 패턴으로의 수지 충전은 롤 표면의 수지에 대한 젖음 특성이 좋지 않은 경우 충전에 저항을 받다가 패턴 롤과 nip 롤 사이의 간격이 Fig. 1 에서와 같이 작아짐에 따라 수지의 압력이 일정 수준 이상으로 상승된 후 충전이 이루어지는 것으로 분석되었다. 따라서 미세 패턴의 충전 특성은 수지 및 패턴 롤

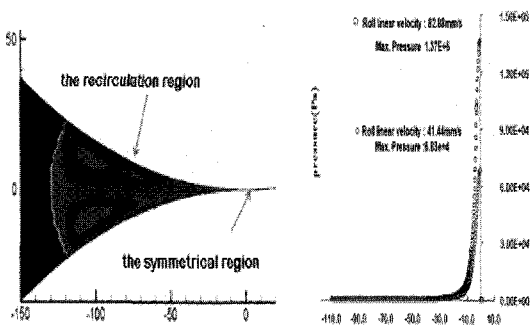


Fig. 2 Analyses of the flow pattern and the pressure distribution in roll-to-roll forming process

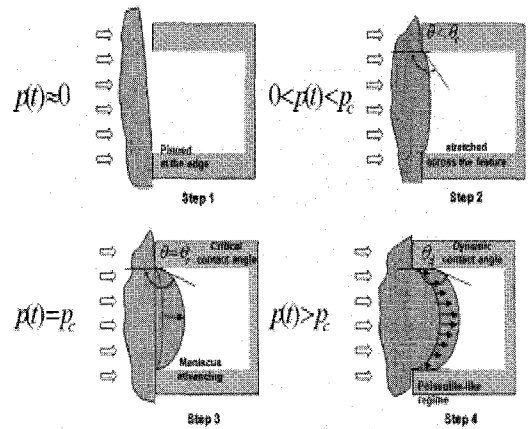


Fig. 3 Flow characteristics in micro patterning region

표면의 표면에너지의 영향을 크게 받을 수 있음을 알 수 있었으며, 이를 제어할 수 있는 공정 및 소재 개발을 수행하였다.

성형 중 기포의 발생 현상 규명을 위해 dip coating 방식을 적용하여 실험적 연구를 진행하였으며, Fig. 4 에서와 같이 점성에 따라 달라지는 sawtooth type 의 wetting line 을 관찰하고, 생성된 기포가 필름의 표면에 고착된 상태에서 움직이는 것을 초고속카메라를 통해서 확인하였다.

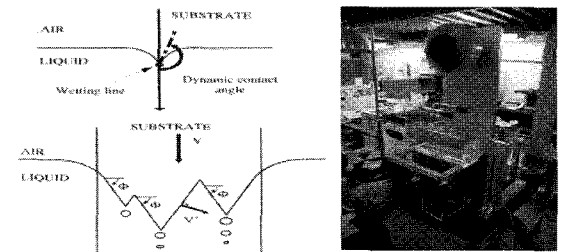


Fig. 4 An experimental facility for bubble generating and dynamic wetting characteristic

2.3 이형성 개선 소재기술 개발

미세 패턴의 성형성은 충전 특성 및 경화 후 이형 특성에 의해 결정 되는데, 우수한 충전 특성을 위해서는 수지의 롤 표면에 대한 젖음 특성이 좋은(접촉각이 낮은) 소재가, 우수한 이형 특성을 위해서는 경화 후 표면에너지 낮은(물에 대한 접촉각이 큰) 소재가 유리한 것으로 판단된다. 또한 이형성의 경우 수지가 경화 과정에서 수축되며 물 급형의 패턴들의 측면과 응력이 급격히 증가하여 이형이 어려워지는 현상(biting)이 발생하여 경화

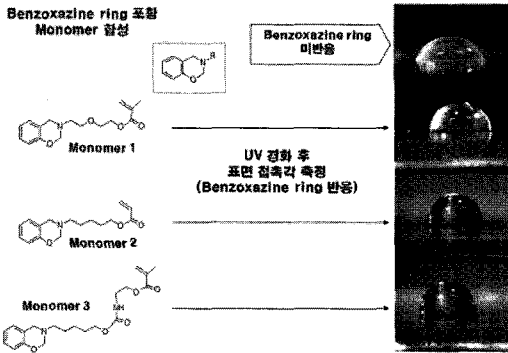


Fig. 5 Molecular structures of low-surface energy resins and measurement results of contact angle

수축율을 감소된 소재의 적용이 이형성 개선에 유리할 것으로 보인다. Fig. 5 에는 기존 소재 대비 표면에너지가 감소된 소재의 분자 구조 및 접촉각 특성을 나타내었다.

Table 1 에는 일반 소재(Resin1,2,3) 및 수축율 감소 소재(Resin4)에 대한 표면 에너지 및 수축율 값을 나타내었으며, 일반 소재에 비해 수축율 감소 소재의 경우 수축율이 약 1/3 까지 감소하였음을 알 수 있다.

Table 1 Contraction ratio and surface energy

samples	before UV cure	after UV cure	specific volume change (ml/g)	contact angle
Resin1	0.762	0.631	17.1%	88.54
Resin2	0.744	0.560	24.8%	110.45
Resin3	0.690	0.514	25.5%	113.60
Resin4	0.676	0.613	9.4%	112.05

2.4 미세패턴 성형 및 이형 실험

앞에서 개발한 저표면에너지 수지 및 수축율 제어 수지를 적용하여 실험을 통한 이형 특성 분석을 수행하였다. 우선 저표면에너지 수지 및 일반 수지(고표면에너지 수지)를 황동 소재의 표면에 코팅한 후 UV 광의 노광 시간 및 강도를 변화시켜 수지와 PET 필름, 수지와 황동 표면과의 접착력 특성을 측정 분석한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 고표면에너지 수지의 경우 노광 강도 및 시간에 관계없이 필름이나 황동 표면에 대해서 모두 높은 수준의 접착 특성을 보이고 있으나, 저표면에너지 수지의 경우 적절한 노광 조건에 대해서는 필름과

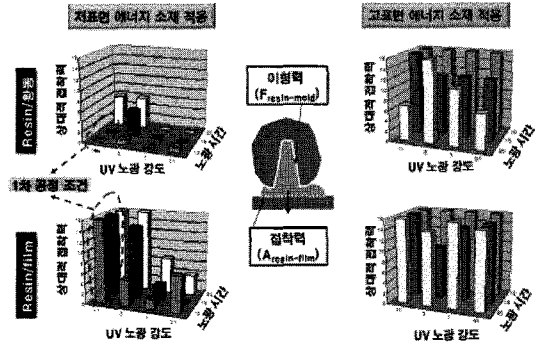


Fig. 6 Variations of adhesive force with the surface energy of resins and processing conditions

의 접착성은 유지되는 반면 황동에 대한 접착성은 크게 낮아져 이형 특성이 크게 향상될 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7 에는 일반수지, 저표면에너지 수지 및 저수축 수지를 적용한 미세패턴 성형 및 이형 과정에서의 이형력 측정 결과를 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 저표면에너지 수지 및 저수축 수지를 적용한 경우 기준소재(일반소재)에 비하여 매우 낮은 이형력을 보여주고 있으며, 실제 공정에서 이형성이 개선됨을 확인하였다.

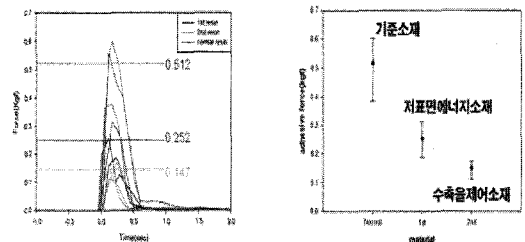


Fig. 7 Measurement results of the anti-adhesive force at demolding of micro pattern with resins

Fig. 8 에는 성형소재 및 금형의 표면에너지에 따른 미세 패턴의 이형 결과를 나타내었으며 소재 및 금형의 표면 에너지가 모두 높은 경우 이형이 불가하였으며, 모두 에너지가 낮은 경우 안정적인 이형 결과를 확인하였다.

앞에서 수행된 소재 개발 및 공정 최적화를 기반으로 다양한 크기 및 형상의 미세 패턴 필름 성형을 수행하였다. Fig. 9 에는 고풍상비 패턴에 대한 성형 결과를 나타내었으며, 최대 형상비 7, 최소 크기 30um 의 패턴에 대하여 양호한 성형 결과를

을 수 있었다. Fig. 10 에는 미세패턴이 적용된 광 폭 필름 성형 결과를 나타내었으며, 성형된 미세 패턴의 크기는 18 μ m, 형상비는 1 이다. 필름의 성형 폭은 1,500mm 이며, 성형 속도는 최대 10m/min 으로 수행하였다. 패턴 층의 두께 균일도는 \pm 1 μ m 범위의 결과를 확보하였다.

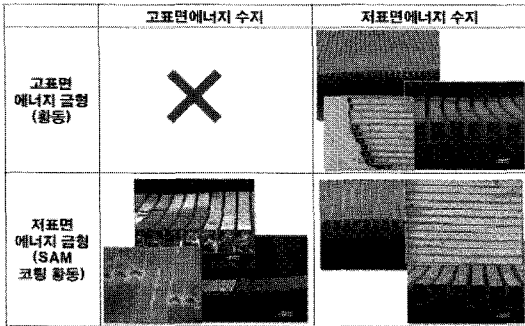


Fig. 8 Comparison of the difference of anti-adhesiveness of micro pattern with resin and surface energy of mold

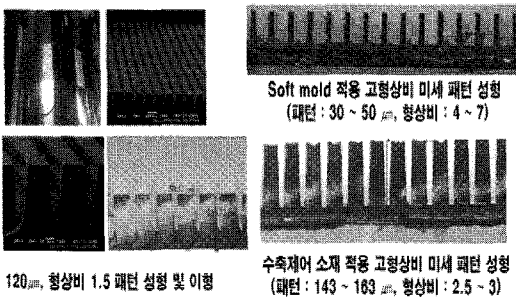


Fig. 9 Forming results of high aspect ratio micro features

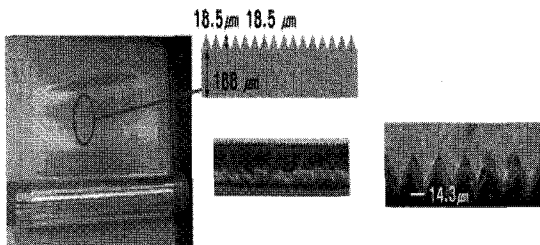


Fig. 10 Forming results of micro patterned wide film

3. 미세패턴 연속성형기술 향후 개발방향

UV 경화형 소재를 이용한 이중 소재의 복층형 광학 필름의 개발과 병행하여 최근 대형 TV 제품

에 대한 측면 광원 방식의 BLU(Back Light Unit) 적용 비율이 증가함에 따라 미세 패턴을 필름이나 도광판에 적용하기 위한 연구 개발이 진행되고 있다. 특히 대형 TV 제품용의 광학 필름은 성능 및 원가절감을 위해 기존의 PET 필름/UV 경화소재 패턴 층의 복층형 구조가 아닌 필름 혹은 시트에 직접적으로 패턴을 성형한 일체형 구조로의 개발을 추진하고 있으나 패턴의 전사성 및 두께 등 해결해야 할 많은 문제가 있어 향후 집중적인 연구가 요구된다.

미세패턴 적용 일체형 필름/시트형 광부품의 생산을 위해서는 Fig. 11 에서와 같이 열가소성 수지를 이용하여 필름을 제작하는 캐스팅공정, 성형된 필름 위에 마이크로 패턴을 전사시키는 성형공정이 필요하며, 제품에서 요구되는 광학적 특성 혹은 광학 설계에 따라 필름에 광학적 이방성 부여를 위한 연신 공정 등의 적용이 요구된다. PET, PC, PMMA 등 열가소성 소재를 이용한 필름 제작을 위한 압축 및 캐스팅 공정과 T-die 등 관련 기술은 고분자 가공 분야에서의 오랜 연구분야로 광범위한 산업분야에 현재 적용이 되고 있다. 그러나 최근 요구되는 광학 부품에서의 요구 특성을 만족하는 정밀 제품 생산을 위한 장비 및 공정기술은 선진 기술과 격차가 있으며, 새로운 개념의 시장 선도적인 제품 개발을 위해서는 공정 기술의 선도 역시 요구되고 있어 관련 시장에서의 경쟁력 확보를 위해서는 이에 대한 연구가 시급하다.

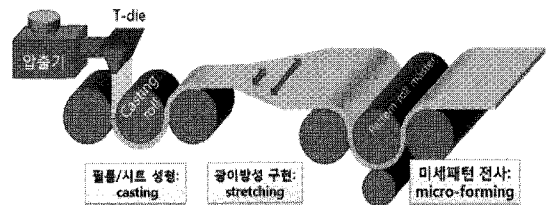


Fig. 11 Outline of direct roll-to-roll forming process

4. 결론

연속성형기술을 이용한 광학부품, 기능성 표면 제품 등에 대한 생산 기술에 대한 필요성은 디스플레이 기기를 비롯한 태양광 발전, 유연 디스플레이 기기제품 등의 성장과 병행하여 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있어 미세 패턴 제품의 롤 성형기술 원천 기술 개발이 더욱 요구되고 있다.

이를 위해서는 연속 성형을 위한 롤 마스터 가공 및 제작 기술, 기반 필름 성형 및 광특성 제어 기술, 롤 성형 시스템 및 공정기술 등의 개발이 필요하며 이를 기반으로 미세 패턴 응용제품의 제품화 기술 및 산업 경쟁력 확보가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “대면적 미세성형 원천기술개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Henoeh, C., Krupenkin, T. N., Kolodner, P., Taylor, J. A., Hodes, M. S., Lyons, A. M., Peguero, C. and Breuer, K., “Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces,” 3rd AIAA Flow Control Conference, Paper No. 2006-3192, 2006.
2. Kintaka, K., Nishii, J., Mizutani, A., Kikuta, H. and Nakano, H., “Antireflection microstructures fabricated upon fluorine-doped SiO₂ films,” Optics Letters, Vol. 26, No. 21, pp. 1642-1644, 2001.
3. Baker, K. M., “Highly corrected close-packed microlens arrays and moth-eye structuring on curved surfaces,” Applied Optics, Vol. 38, No. 2, pp. 352-356, 1999.
4. Funamoto, A. and Aoyama, S., “LED backlight system with double-prism pattern,” J. Soc. Inf. Display, Vol. 14, No. 11, pp. 1045-1051, 2006.
5. Li, C.-J., Fang, Y.-C., Chu, W.-T. and Cheng, M.-C., “Design of a prism light-guide plate for an LCD backlight module,” J. Soc. Inf. Display, Vol. 16, No. 4, pp. 545-550, 2008.
6. Kimmel, J., Levola, T., Saarikko, P. and Bergquist, J., “A novel diffractive backlight concept for mobile displays,” J. Soc. Inf. Display, Vol. 16, No. 2, pp. 351-357, 2008.
7. Kim, J. S., Ko, Y. B., Min, I. K., Yu, J. W., Heo, Y. M., Yoon, K. H. and Hwang, C. J., “A Study on the Fabrication method of Mold for 7 inch LCD-BLU by continuous microlens(200um),” Transactions of Materials Processing, Vol. 16, No. 1, pp. 42-47, 2006.
8. Yoshii, M., Kuramoto, H. and Kato, K., “Experimental study of transcription of minute width grooves in injection molding,” Polym. Eng. Sci., Vol. 34, No. 15, pp. 1211-1218, 1994.
9. Yoshii, M., Kuramoto, H. and Ochiai, Y., “Experimental study of the transcription of minute width grooves by injection molding(II),” Polym. Eng. Sci., Vol. 38, No. 9, pp. 1587-1593, 1998.
10. Yu, I., Lee, L. J. and Koelling, K. W., “Flow and heat transfer simulation of thin-wall injection molding with microstructures,” ANTEC, pp. 602-606, 2003.
11. Gornik, C., “Injection moulding of parts with microstructured surfaces for medical applications,” Macromol. Symp., Vol. 271, No. 1, pp. 365-374, 2004.
12. Han, X. and Yokoi, H., “Visualization analysis of the filling behavior of melt into microscale V-grooves during the filling stage of injection molding,” Polym. Eng. Sci., Vol. 46, No. 11, pp. 1590-1597, 2006.