

미세구조체의 전사 특성을 향상시키기 위한 UV 성형 공정의 설계

김동묵*, 김석민*, 손소영**, 강신일†

(2002년 9월 2일 접수, 2003년 1월 21일 심사완료)

Design of UV-Molding Process to Maximize the Replication Properties in Microstructures

Dongmook Kim, Seok-min Kim, So Young Sohn and Shinill Kang

Key Words : UV-Molding(UV 성형), Replication Quality(성형 품질), Central Composite Design(중심 합성법), Desirability Function(기대함수)

Abstract

It is important to control the processing conditions to maximize the replication quality of UV-molded microstructure. In the present study, the tip radius and surface roughness of V-groove structure were measured to quantify the replication quality. UV-curing dose and the applied pressure were experimentally selected as the governing processing conditions that affect the replication quality of the UV-molded part. Finally, an experimental optimization technique combining central composite design and desirability function approach was used to maximize the replication quality of UV-molded structure.

1. 서 론

최근 정보통신 분야의 기술이 급속히 발전함에 따라 광통신 부품, 디지털 디스플레이, 고밀도 정보저장 등의 영역에서 사용되는 미소 광부품의 시장이 급격히 팽창하고 있다. 이러한 미소 광부품 및 미소 구조체는 MEMS 공정을 이용한 방법, 일반 기계가공 방법 그리고, 마이크로 몰딩방법으로 제작될 수 있다. 이중 폴리머를 이용한 마이크로 몰딩방법은 높은 정밀도와 우수한 물성치를 가지는 미소 구조물을 저가 양산함에 있어 가장 적합한 기술이다. 마이크로 몰딩방법에는 마이크로 사출성형, 핫 엠보싱(Hot embossing), UV 성형 등의 방법이 있다.⁽¹⁾ 이중 UV 성형은 자외선에 반응하여 경화되는 포토폴리머를 이용하며, 몰드 위에 재료를 코팅하고, 유리등의 투명한 기관으로 덮은

후, 적절한 압력과 자외선을 가하여 재료를 경화시키고, 성형품을 이형 하는 과정으로 진행된다. UV 성형은 상온에서 액상의 형태를 가지는 포토폴리머를 재료로 사용하기 때문에 저압 상온공정이 가능하고, 유동성에 대한 문제가 적어 두께가 얇은 제품, 크기가 작은 미소렌즈 등 대부분의 미소 구조물의 성형에 매우 적합하다. 특히, 광전자 모듈에 광 부품의 집적화 제작이 가능하다. Tanigami 등⁽²⁾은 UV 성형을 통해 높은 열적 안정성과 낮은 수차를 갖는 프레넬 렌즈를 유리기관 위에 성형하였으며, Dannberg 등⁽³⁾은 UV 성형 방법으로 웨이퍼 크기의 하이브리드 미소 광 서브시스템을 제작하였다. 일반적으로 UV 성형은 재료의 유동성이 높기 때문에 특별한 공정조건의 선택 없이 단순 경화만으로도 마이크로 단위에서 충분한 전사성을 얻을 수 있다. 그러나 나노 단위에서 성형품의 전사성을 평가할 경우, 재료의 수축이나 몰드와 재료간의 표면에너지차이에 의한 전사성 저하가 발생한다. Rudschuck 등⁽⁴⁾은 다양한 조성비의 재료를 사용하면서 성형품의 나노단위 전사성을 평가하여 최적의 전사성이 나타나는 재료를

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 컴퓨터산업공학부

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : snlkang@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2829 FAX : (02)362-2736

찾기위한 연구를 진행하였다. 하지만, UV 성형 공정 최적화에 대한 역할과 공정조건에 따른 전사성 변화에 대한 연구는 아직 보고된바 없다. 성형품의 전사성은 공정조건에 민감한 요소이므로, 전사성이 극대화 되는 최적의 공정조건을 찾는 것이 매우 중요하다. 이런 경우에는 최적화된 접근 방법이 필요하다. 최적화에 대한 접근방법으로는, 그라픽 중첩법, Myers 에 의한 1 차와 2 차 함수법,⁽⁵⁾ Kuri 와 Conlon 에 의한 거리 함수 접근법,⁽⁶⁾ Park 과 Kwon 에 의한 P_M 과 P_V 측정법,⁽⁷⁾ 무차원 함수와 가중치를 이용한 다중반응의 최적화 기법,⁽⁸⁾ 그리고 Derringer 와 Suich 에 의한 기대함수를 이용한 방법⁽⁹⁾ 등이 있다.

본 연구에서는 마이크로 구조물을 성형할 수 있는 UV 성형 시스템을 제작하고 V-그루브 구조물을 성형하였으며, 성형품의 전사성을 정량화 하기 위해 V-그루브의 끝단 반지름과 랜드부의 표면 거칠기를 측정하였다. 또한 실험적으로 압력과 광량이 전사성에 영향을 미치는 지배적인 요인임을 확인하고, 압력과 광량을 실험요인으로 하고 끝단 반지름과 표면거칠기를 반응으로 하여, 중심합성법과 기대함수를 이용한 최적화 기법을 통해 최적의 공정조건을 확립하고 이를 실험적으로 검증하였다.

2. UV 성형

2.1 UV 성형 장비 구축

UV 성형 제품의 전사성 등의 물성치는 재료와 공정 조건에 민감한 영향을 받는다. 본 연구에서는 다양한 재료와 공정조건 하에서 UV 성형이 가능한 UV 성형 장비를 Fig. 1 과 같이 제작하고 이

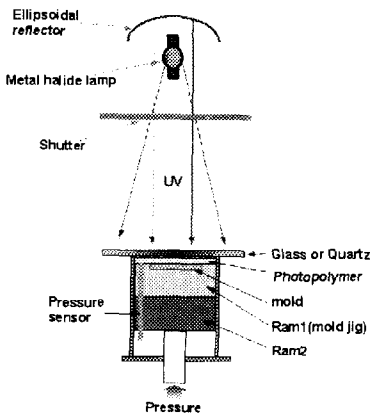


Fig. 1 Schematic of UV-molding system

를 통해 V-그루브 성형품을 제작하였다. 성형품의 크기는 직경 5 인치, 두께 400 μm 로 제작되었다.

2.2 V-그루브 구조물의 성형

본 연구에서는 공정조건과 전사성과의 상관 관계를 평가하고 적절한 공정 조건의 선정을 위해 Pitch 간격 250 μm 인 V-그루브 패턴을 가진 실리콘 몰드를 실리콘 이방성 습식 식각의 방법으로 제작 하였으며 이를 이용하여 UV 성형을 진행하였다. Fig. 2(a)는 20% KOH 용액을 이용하여 80°C에서 (100)실리콘을 식각해 제작된 실리콘 V-그루브 몰드 단면의 SEM 사진이며 Fig. 2(b)는 실리콘 몰드를 이용하여 UV 성형된 성형품의 단면 SEM 사진이다. 실리콘 마스터의 V-그루브의 tip 반지름은 69nm 이고, 표면조도(Ra)는 5.7nm 이다.

3. 공정 최적화

3.1 실험 요인(factor)과 반응(response) 선정

UV 성형 제품의 경화 메커니즘은 광원의 파장, 단량체의 농도, 성형온도, 광량 등에 영향을 받는다. 또한 경화공정에서 발생하는 비중진 및 수축에 의한 전사성 저하는 성형 압력등에 따라 보완될 수 있다. 본 연구에서는 전사성을 정량화 할 수 있는 반응(response)으로 V-그루브 끝단의 반지름과 랜드부의 표면거칠기를 선정하고 측정하였으며, 전사성에 영향을 주는 지배적인 요인(factor)으로는 압력과 광량을 실험적으로 선정하였다. V-그루브 끝단의 반지름은 Fig. 3 과 같이 atomic force microscope 을 이용하여 얻어진 3 자원 위치 데이터에서 단면 데이터를 추출하여 이미지 프로세싱 프로그램을 통해 측정되었으며, 표면거칠기(Ra)는 Mitutoyo 사의 SURFTTEST SV 600 을 사용하여 측정되었다.

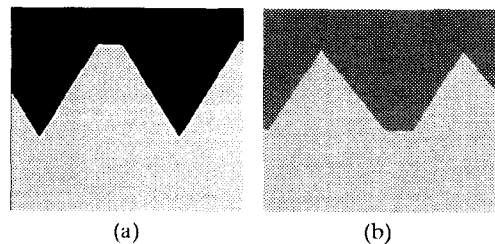


Fig. 2 SEM images of V-groove cross section: (a) silicon master and (b) molded parts; pitch: 250 μm

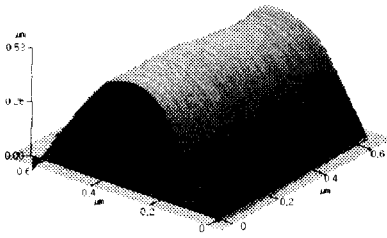


Fig. 3 3D-profile of V-groove tip obtained from AFM data; tip radius: 70nm

Table 1 Experimental data according to CCD

No	x_1	x_2	y_1 (nm, mean)	y_2 (nm, mean)
1	-1	1	124	14.5
2	1	-1	80	7.7
3	-1	-1	152	27.6
4	1	1	70	6.6
5	-1.414	0	148	23.7
6	1.414	0	71	5.8
7	0	-1.414	100	13.5
8	0	1.414	86	7.9
9	0	0	87	9.1

3.2 중심 합성법(CCD)에 의한 실험결과

본 연구에서는 실험요인으로 선정된 압력과 광량을 각각 x_1 과 x_2 로 설정하고, 반응으로 선정된 V-그루브 끝단의 반지름과 랜드부의 표면거칠기를 각각 y_1 과 y_2 로 선정하였다. 반지름의 단위와 표면 거칠기의 단위는 모두 nm 이며, 각각 요인의 범위는 압력 0~90 KPa, 광량이 200~500 mJ/cm² 이다. 실험요인의 코드 값과 실제 값의 관계는 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \sqrt{2} \frac{2P - (P_{\max} + P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} \\
 x_2 &= \sqrt{2} \frac{2L - (L_{\max} + L_{\min})}{L_{\max} - L_{\min}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

이때, P는 압력, L은 UV light dose 이다. 실험은 CCD 에 의한 9 개의 조건에서 실시되었으며, 각각의 실험 조건과 이때의 실험 결과의 평균값이 Table 1 에 나타나 있다.

3.3 유효인자의 검증(ANOVA) 및 회귀함수

실험결과를 통해 먼저 두 가지 제어요소가 각각의 반응에 유효한 인자인지를 분산분석법(ANOVA)를 통해 확인해 보았다. SAS[®] 를 이용한

분산 분석결과 유의수준 1%내에서 압력과 광량 모두 반지름과 표면거칠기에 대해 영향력 있는 인자임을 확인하였다. 다음으로 두가지 반응의 최적공정조건을 찾기 위해 각각의 회귀함수를 도출하였다. 독립적인 변수가 p개 있고, k개의 반응이 있을 때 2차 회귀 함수 모델은 식 (2)와 같이 표현된다. 그리고 Table 1의 실험결과를 토대로 식 (3)과 같은 2차 반응표면 회귀 모델을 반지름과 표면거칠기에 대해 구성하였다.

$$\hat{y}_i = b_0^i x_0 + \sum_{s=1}^p b_s^i x_s + \sum_{s=1}^p \sum_{t=s}^p b_{st}^i x_s x_t \tag{2}$$

($i = 1, 2, \dots, k$)

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_1 &= 87.230049 - 29.300666 \times x_1 - 7.117800 \times x_2 \\
 &\quad + 12.406422 \times x_1^2 + 4.608333 \times x_1 x_2 + 4.220617 \times x_2^2 \\
 \hat{y}_2 &= 9.062491 - 6.632642 \times x_1 - 2.768278 \times x_2 \\
 &\quad + 3.200695 \times x_1^2 + 3.010833 \times x_1 x_2 + 1.145908 \times x_2^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3.4 기대함수를 이용한 최적 공정조건 선정

기대함수는 본 실험과 같이 두 개 이상의 반응을 최적화하는 문제에 적합한 방법이다. 각각의 반응 (y_1, y_2)은 각각의 특성에 맞게 그 수치가 기대값(d_1, d_2)으로 변경된다. 반응 y 가 최적일 때, d 는 1 이고, 반응이 허용범위 밖에 존재하는 값이 되면, d 는 0 이다. 기대함수는 일반적으로 망대, 망소, 망목의 세가지 타입을 가지고 있다. 본 실험의 두 반응은 모두 반응변수가 값이 작을수록 좋은 망소 특성을 가지므로 기대함수를 식 (4)와 같이 선정한다.⁽¹⁰⁾

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < L \\ \left(\frac{U - y_i}{U - L} \right)^p & L \leq y_i \leq U \\ 0 & U < y_i \end{cases} \tag{4}$$

이때, 허용 범위내에서 L 은 y_i 의 최소값, U 는 y_i 의 최대값을 나타내주고, p 는 임의의 값을 가지는 가중치이다. L 부근에서 d_i 가 갑자기 감소하는 것이 적절하다면 p 는 상대적으로 높은 가중치를 갖고, 그렇지 않다면 p 는 작은 값이다. 다중 반응의 최적화를 위해 식 (5)와 같이 각각의 반응에 대한 d_i 를 하나의 D 로 통합한다. 따라서 최적의 공정 조건은 D 값이 최대가 되는 위치의 압력과 광량 값이다. 식 (3)의 회귀함수에서 실험범위 내의 최대값과 최소값은 식 (6)과 같다.

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_k)^{1/k} \tag{5}$$

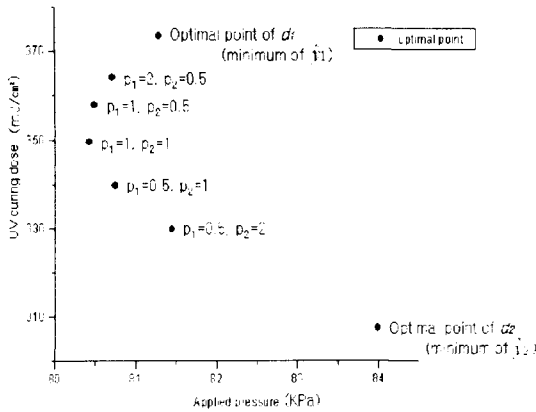


Fig. 4 Optimum processing conditions for various weights ($p_1, p_2=0.5, 1, 2$)

$$69.7 \leq \hat{y}_1 \leq 181.2, \quad 5.7 \leq \hat{y}_2 \leq 37.07 \quad (6)$$

각각의 (x_1, x_2) 값은 \hat{y}_1 가 최대일 때 (-1.4140, -1.4140), 최소일 때 (1.140, 0.221)이고, \hat{y}_2 가 최대일 때 (-1.4140, -1.4140), 최소일 때 (1.225, -0.401)이다. 식 (4)의 가중치 p 에 따라 식 (5)의 D 가 최대가 되는 (x_1, x_2) 가 존재한다. 본 연구에서는 반지름에 대한 가중치를 p_1 , 표면거칠기에 대한 가중치를 p_2 라하고 각각 0.5, 1, 2 로 변화시키면서 최적 공정조건의 위치를 Fig. 4 과 같이 알아보았다. 이러한 결과들은 최적 조건의 변화 경향과 각 가중치의 민감도를 보여준다. 가중치는 각 반응에 대한 기대함수의 특성을 나타내준다. 일반적으로 최적조건은 사용목적에 따라 공학적으로 타당하게 부여된 가중치를 이용하여 결정된다. 기대함수의 값이 0 에 근접할 때보다 1 에 근접한 때 그 중요성이 더 크다면 가중치는 상대적으로 높은 값을 갖는다. 반대로 기대함수가 0 에 근접해 있을 때 그 중요성이 크다면 가중값은 낮은 값을 가진다. 본 연구에서는 나노 단위의 형상 전사성 향상에 그 목적을 두고 있으므로 형상 전사를 대표할 수 있는 끝단 반지름의 가중치를 2 로 선정하고 표면거칠기는 0.5 의 가중치를 선정하였다. 이 가중치를 이용해서 전체적인 기대함수 D 를 구한 것이 Fig. 5 에 나타나 있다.

D 의 최대값은 0.9926 이고 이때 (x_1, x_2) 값은 (1.122, 0.134)이다. 이 코드 값을 실제의 공정 조건 값으로 변환하면 압력이 80.71 kPa 이고 UV dose

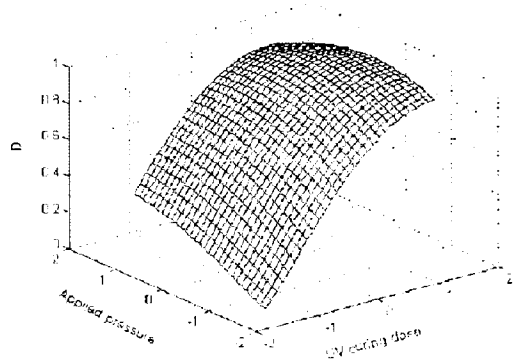


Fig. 5 3D plot of overall desirability function, D ($p_1 = 2$ and $p_2 = 0.5$)

Table 2 Optimal expected value and experimental value of responses at 80.71 kPa, 364.2 mJ/cm² ($p_1 = 2$ and $p_2 = 0.5$)

	Expected value	Experimental value	Error
Radius	69.79	70	0.3%
Surface roughness	5.75	5.8	0.9%

가 364.2 mJ/cm² 이다. 이 경우, d_1 는 0.986 이고, d_2 는 0.999, 그리고, y_1 값은 69.79nm, y_2 값은 5.75nm 이다. 최적 공정조건에서 실험을 통해 제작된 성형품은 끝단 반지름 70nm 표면거칠기 5.8nm 를 가져 본 연구에서 수행한 최적화 방법을 통해 이상적인 전사품을 성형할 수 있음을 실험적으로도 확인하였고, Table 2 에서 결과를 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 UV 성형 공정에서의 전사성을 극대화하는 최적의 공정조건을 선정하기 위해 V-그룹 끝단의 반지름과 랜드부의 표면거칠기를 측정하여 전사성을 정량화하고, 지배적인 요인으로 압력과 광량을 1% 유의수준의 ANOVA 를 통해서 실험적으로 선정하였다. 또한 중심합성법과 기대함수법을 성형공정에 적용하여 최소한의 실험만으로 최적의 공정조건을 선정하는 방법론을 확립하였으며 이는 타 미세 형상 및 재료에 대해서도 유사하게 적용될 수 있다. 광부품에서의 전사성뿐 아니라 광투성까지도 고려한 다중 반응에 대한 최적화 연구가 진행중에 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Moon, S., Kang, S., Yee, Y. and Bu, J.U., 2001, "Fabrication of Micro Lens Array Using Micro-Compression Molding," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 8, pp. 1242~1245.
- (2) Tanigami, N., Ogata, S., Aoyama, S., Yamashita, T. and Imanaka, K., 1989, "Low Wavefront Aberration and High-Temperature Stability Molded Micro Fresnel Lens," *IEEE Photonic. Tech. L.*, Vol. 1, pp. 384~385.
- (3) Dannberg, P., Bierbaum, R., Erdmann, L. and Brauer, A., 1999, "Wafer Scale Integration of Micro-Optic and Optoelectronic Elements by Polymer UV Reaction Molding," *SPIE Conf. Photonics Packaging and Integration*, Vol. 3631, pp. 244~251.
- (4) Rudschuck, St., Hirsch, D., Zimmer, K., Otte, K., Braun A., Mehnert, R. and Bigl, F., 2000, "Replication of 3D-Micro and Nanostructures using Different UV-Curable Polymers," *Microelectron. Eng.*, Vol. 53, pp. 557~560.
- (5) Myers, R.H. and Carter, W.H., 1973, "Response Surface Techniques for Dual Response Systems," *Technometrics*, Vol. 31, pp. 137~157.
- (6) Khuri, A.I. and Conlon, J.A., 1981, "Simultaneous Optimization of Multiple Response Represented by Polynomial Regression Function," *Technometrics*, Vol. 23, pp. 363~375.
- (7) Park, S.H., Kwon, Y.M. and Kim, J.J., 1995, "Simultaneous Optimization of Multiple Responses for Robust Design," *Total Quality Management*, Chapman & Hall, London, pp. 381~390.
- (8) Sung, K., Lee, N., Kang, S., 2002, "An Optimum Design of Replication Process to Improve Birefringence, Radial-Tilt and Land-Groove Structure in DVD-RAM Substrates," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 4, pp. 637~643.
- (9) Derringer, G. and Suich, R., 1980, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables," *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, pp. 214~219.
- (10) Montgomery, D. C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, pp. 451~453.