

반응표면법을 이용한 초음파 임프린팅 공정의 최적화

정우신¹ · 조영학¹ · 박근[#]

Optimization of Ultrasonic Imprinting Using the Response Surface Method

W. S. Jung, Y. H. Cho, K. Park

(Received December 18, 2012 / Revised January 8, 2013 / Accepted January 9, 2013)

Abstract

The present study examines the micro-pattern replication on a plastic film using ultrasonic imprinting. Ultrasonic imprinting uses ultrasonic waves to generate repetitive microscale deformation in the polymer film. The resulting deformation heat on the surface of the film causes the surface region to soften sufficiently so that a replication of the micro-pattern can be obtained. To successfully replicate the micro-pattern on a large area of polymer film, a high replication ratio is needed as well as good uniformity over the entire region. In this study, a horn design is investigated by finite element analysis and is optimized through a response surface analysis. In the ultrasonic imprinting experiments, the response surface method was also used to determine the optimal processing conditions for better replication characteristics.

Key Words : Ultrasonic Imprinting, Micro-pattern Replication, Response Surface Method, Finite Element Analysis

1. 서 론

최근 LCD 용 도광판, 광디스크, 반사방지 필름, 소수성 표면 등 플라스틱 기관 혹은 필름상에 마이크로/나노 패턴을 형성하여 기능성 표면을 구현한 제품의 활용도가 높아지고 있다. 상기 제품의 미세패턴 성형을 위해 핫엠보싱(Hot embossing), 사출성형(Injection molding) 등의 공정이 사용되고 있는데[1, 2], 패턴의 크기가 작아질수록 패턴의 전사성을 높이기 위해 높은 금형온도가 요구되고 결과적으로 생산성이 저하되는 문제점이 있다[3]. 최근에는 초음파 진동에너지를 핫엠보싱 공정[4, 5]이나 마이크로 사출성형[6]에 적용하여 미세패턴 전사성을 향상시킨 연구가 진행되었다.

또한 초음파 진동에너지를 에너지원(Energy source)으로 사용하여 고분자표면에 미세패턴을 복

제하는 초음파 임프린팅(Ultrasonic imprinting) 공정에 관한 연구가 진행되었다. 초음파 임프린팅은 초음파 용접(Ultrasonic welding) 기술을 발전시킨 형태로서, 열가소성 플라스틱 제품에 초음파 가동을 부과하여 소재간의 마찰열을 통해 국부적으로 가소화시키는 방법이다[7]. 최근 본 연구자의 선행 연구로서 미세 패턴이 각인된 초음파 공구혼(tool horn)에 부과된 진동에너지를 이용해 공구혼과 고분자 기관 사이에 마찰열을 유도하여 기관 표면을 국부적으로 가소화시킴과 동시에 가압하여 패턴을 직접 성형하는 공법이 제시되었고[8], 초음파 임프린팅시 유동방향 제어에 따른 패턴전사특성의 차이를 고찰하였다[9].

기존의 초음파 임프린팅 연구[7~9]에서는 주로 소형 면적(100mm² 이하)에 대한 미세패턴 복제가 이루어졌는데, 실제 기능성 제품으로의 활용을

1. Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. Sci. Technol.

Corresponding Author: Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. Sci. Technol., E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

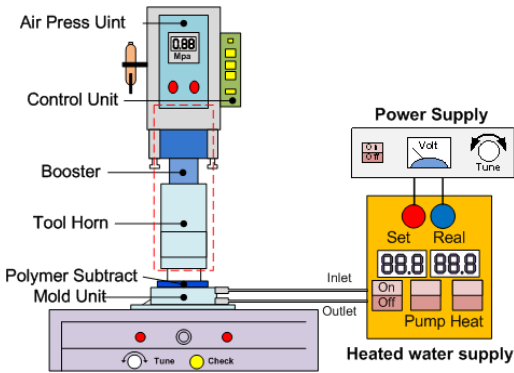


Fig. 1 Configuration of ultrasonic imprinting system

위해서는 패턴 전사면적을 확대해야 한다. 초음파 임프린팅시 전사면적의 확대를 위해서는 패턴전사율과 함께 패턴전사의 균일도를 향상시켜야 한다[10]. 본 연구에서는 1000 mm² 이상의 면적에 미세패턴을 복제하기 위한 연구를 수행하였으며, 공구흔 패턴전사율과 균일도 향상을 위한 초음파 임프린팅 공정의 최적화를 수행하였다. 특히 공구흔 설계변수의 최적화를 위해 유한요소해석(Finite element analysis)과 반응표면 분석(Response surface analysis)을 병행하였고, 제작된 공구흔을 사용한 성형실험에서도 역시 반응표면 분석을 통해 최적의 성형조건을 도출하였다.

2. 초음파 임프린팅 공정의 개요

Fig. 1 에 초음파 임프린팅 시스템의 기본 구성을 도시하였다. 초음파 임프린팅 시스템은 크게 초음파 발진장치, 소형 프레스, 성형시 고분자필름에 적용되는 하중 측정을 위한 계측장치 및 진원공급장치로 구성되어 있다. 여기서 초음파 발진장치는 진동자(converter), 부스터(booster), 공구흔(tool horn)으로 구성된다.

초음파 임프린팅 공정은 진동자에서 부여된 공구흔의 진동을 이용하여 초음파 에너지를 소재에 전달함으로써 소재의 내부발열 및 연화를 유발한다. 이에 따라 소재의 유리전이 온도 또는 용점 이상의 온도에 도달하면 금형표면의 미세패턴이 복제되는 공정이다. 진동은 초음파 발진 장치의 진동자로부터 형성되며, 본 연구에서는 19.8 kHz의 주파수를 갖는 초음파 발진기를 사용하였다. 공구흔은 해당 주파수에서 횡진동을 최소화하며 종진동모드의 공진이 발생하도록 설계하였고, 또

한 성형율을 향상시키기 위해 공구흔 끝단의 변위가 최대가 되도록 설계하였다[8].

설계된 공구흔은 간접성형 방식, 즉 미세패턴이 각인되지 않은 상태에서 초음파 임프린팅에 이용되며, 대신 필름 하단에 미세패턴이 각인된 금형을 장착하여 공구흔을 통해 전달된 고분자필름의 반대쪽 면에 패턴이 복제하는 방식을 적용하였다. 본 연구에서는 높이 170μm의 프리즘 패턴을 금형에 각인하여 사용하였다.

3. 대면적 패턴성형을 위한 공구흔 설계

3.1 공구흔 형상설계 및 진동특성 해석

초음파 성형시 내부의 진동자로부터 형성된 인위적인 진동에너지를 증폭장치, 공구흔을 거쳐 공구흔 끝단의 가공부까지 손실없이 전달시켜야 한다. 이러한 과정에서 공구흔의 설계가 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 공구흔 형상은 진폭 특성이 우수한 양단차형 사각공구흔을 사용하였으며, 단차부에는 곡률을 부여하여 응력집중 현상을 완화시킬 수 있도록 하였다.

Fig. 2 에 본 연구에서 사용한 양단차형 사각공구흔의 기본 형상을 도시하였다. 전체 길이는 118 mm로 설정하였고, 종진동의 균일도 향상을 위해 특정 위치에서 단면적이 감소하다 끝단에서 다시 증가하는 형태로 설계하였다[10]. 입력단 단면은 63×60mm², 출력단 단면은 42×39mm²로 설계하였으며, 이때의 면적감소비는 0.433에 해당한다. 출력단 대비 중앙부 단차의 깊이(h)는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 폭방향(x-direction)과 두께방향(y-direction) 동일한 값으로 설정하였다. 본 연구에서는 단면적 감소위치(l)와 단차깊이(h)를 공구흔 설계변수로 설정하고, 공구흔의 진동특성에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 고찰하였다.

공구흔은 초음파 전달특성이 우수한 A17075-T651을 사용하였으며, 밀도는 2810kg/m³, 탄성계수는 71.7GPa, 푸아송비는 0.34이다. 초기 공구흔의 설계변수는 단면적 감소위치(l) 48mm, 단차깊이(h) 2.0mm로 설정하였다. 초음파 가진에 의한 공구흔의 공진주파수와 변형형상을 파악하기 위해 ANSYSTM를 이용하여 모드해석(Modal analysis)을 수행하였다. Fig. 3 (a)는 공구흔의 종진동 모드에서의 상대변위를 나타내는 해석결과로서, 이때의 고유진동수는 19.898kHz로 예측되었다. 본 연구에서 사용된 초음파 발진기의 기준주파수가

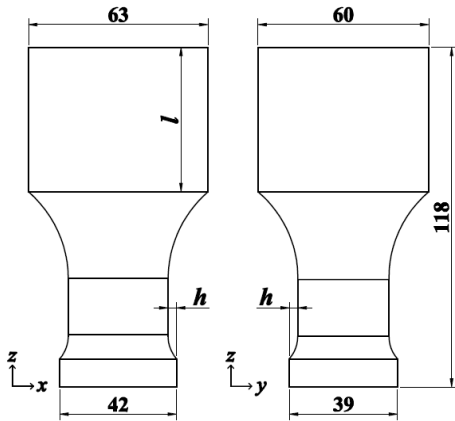
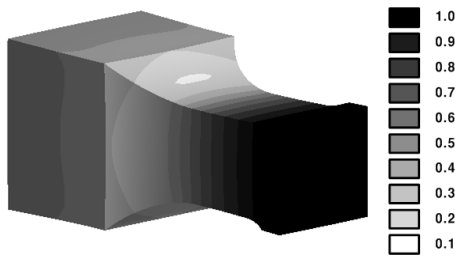
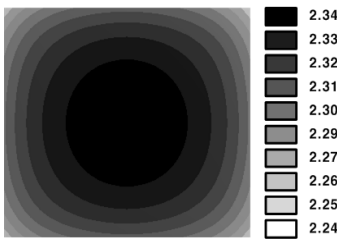


Fig. 2 Configuration of an ultrasonic horn



(a) Normalized displacement of the entire horn



(b) Detailed displacement on the horn tip

Fig. 3 Estimated normalized displacement in the longitudinal vibration mode

19.8±0.5 kHz인 점을 감안하면 해당 주파수에서 종진동 모드로 공진이 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 3 (b)에 공구혼 출력단에서의 상대변위 분포를 도시하였으며, 2.24~2.34 사이의 분포를 보임을 알 수 있다. 변위의 분포를 보면 중앙부가 높고 측면으로 갈수록 낮아짐을 알 수 있는데, 결과적으로 임프린팅 공정시 패턴전사도의 균일도가 저하되는 결과를 야기한다. 상기 불균일도를 정량적으로 수치화하기 위해 식 (1)과 같이 출력면에 대한 균일도 오차(γ)를 정의하였다. 한편 전체적인 진폭의 비교를 위해 공구혼 중앙부를 기준으로

입력단 대비 출력단의 절대 변위비인 진폭비(λ)를 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\gamma = \frac{(u_{out})_{max} - (u_{out})_{min}}{(u_{out})_{max}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{(u_{out})_{max}}{(u_{in})_{max}} \quad (2)$$

Fig. 3의 해석결과를 토대로 계산한 결과 초기 설계에서의 균일도 오차는 4.56%, 진폭비는 2.34로 예측되었으며, 다음 절에서 이를 개선하기 위한 공구혼 최적설계에 대해 논의하도록 하겠다.

3.2 반응표면법을 이용한 공구혼 최적설계

초음파 임프린팅을 위한 공구혼 설계를 위해서는 여러 특성을 고려해야 한다. 우선 초음파 발전기의 가진주파수(19.8 kHz)와 고유진동수가 유사해야 하며, 패턴전사도의 향상을 위해 진폭비가 커야 한다. 또한 패턴 전사면적이 클 경우 전 면적에 걸쳐 균일한 전사를 위해 위치별 진폭의 편차(균일도 오차)가 작아야 한다.

본 연구에서는 상기 설계목표 달성을 위해 공구혼 입력단 길이(l)와 출력단 단차(h)의 2 가지 인자를 변화시켜가며 실험계획을 수립하였다. 실험계획법으로는 중심합성법(Central Composite Design; CCD)을 사용하였으며, Table 1에 중심합성법에 의한 13 회의 실험계획 및 그에 따른 유한요소해석 결과를 비교하였다.

Table 1 CCD design table and the simulation results

l (mm)	h (mm)	f (Hz)	λ	γ (%)
56.0	2.0	20285	2.37	4.68
52.0	3.5	19519	2.70	1.26
56.0	5.0	19013	3.14	6.47
52.0	3.5	19519	2.70	1.26
52.0	3.5	19519	2.70	1.26
57.6	3.5	19792	2.72	1.32
52.0	1.38	20299	2.24	6.34
52.0	3.5	19519	2.70	1.26
52.0	3.5	19519	2.70	1.26
48.0	2.0	19898	2.34	4.56
52.0	5.62	18490	3.31	8.85
48.0	5.0	18620	3.07	6.14
46.3	3.5	19234	2.66	1.22

상기 결과를 토대로 반응표면 분석을 실시한 결과 3 개의 출력인자, 즉 주파수(f), 균일도 오차(γ), 진폭비(λ)에 대하여 식 (3)~(5)와 같이 회귀식을 도출하였다.

$$f = 19519 + 196l - 638h - 2.9l^2 - 62.2h^2 + 1.5lh \quad (3)$$

$$\lambda = 2.697 + 0.022l + 0.367h - 0.005l^2 + 0.039h^2 + 0.012lh \quad (4)$$

$$\gamma = 1.444 + 0.073l + 0.864h + 3.389h^2 \quad (5)$$

위 식을 바탕으로 설계 목표값인 고유진동수 19.8kHz 를 만족시키면서 균일도 오차 3% 이내, 진폭비 2.5 이상을 목표로 반응 최적화를 수행하였다. 그 결과 공구흔의 입력단 길이(l)는 53.6mm, 출력단 단차(h)는 3.0mm 로 형상을 최적화하였다. 상기 반응최적화의 결과를 반영하여 유한요소해석을 추가적으로 수행한 결과 종진동 모드에서의 고유진동수는 19.798kHz 로 목표치와 0.01%의 오차를 보였고, 균일도 오차는 1.45%로 초기설계 공구흔(4.56%)의 1/3 수준으로 감소시킬 수 있었다. 진폭비는 2.58 로 초기공구흔(2.34) 대비 8.6% 향상되어 결과적으로 설계목표를 달성하였음을 알 수 있다.

4. 성형성 향상을 위한 공정조건 최적화

4.1 초음파 임프린팅 성형실험

Fig. 4 에 초음파 임프린팅 실험장치를 도시하였다. 3 장에서 기술된 최적화 과정을 통해 결정된 설계사양으로 공구흔을 제작하였으며, 하단의 금형에 미세패턴을 가공하였다. 패턴은 Fig. 4 에 도시된 바와 같이 하부 금형에 높이 170 μ m, 피치 400 μ m 의 프리즘 패턴으로 35 \times 30mm² 의 면적에 가공하였다. 성형조건으로는 초음파 가진시간(t), 성형압력(p), 금형온도(T)를 설정하였다. 소재는 두께가 0.3mm 인 비결정성 폴리에틸렌 테레프탈레이트(Amorphous polyethylene terephthalate; APET)를 사용하였으며 유리전이온도는 76 $^{\circ}$ C 이다.

1차 성형실험은 성형시간 4초, 성형압력 0.4 MPa, 금형온도 40 $^{\circ}$ C로 설정하여 진행하였다. 전사된 패턴의 높이는 표면조도 측정장비인 Rugosurf 90G[®]를 이용하여 측정하였으며, 성형부 전체에 대한 패턴전사 균일도를 비교하기 위해 Fig. 5에 도시한 바와 같이 성형부위를 9개의 영역으로 구분하여 측정하였다. 성형성을 판단하는 반응값으로

는 전체 패턴 전사율(β)에 대해 식(6)과 같이, 균일도 오차(γ_h)에 관해 식 (7)과 같이 평가하였다.

$$\beta = \left(\sum_{i=1}^9 h_i / 9 p_h \right) \times 100 (\%) \quad (6)$$

$$\gamma_h = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{max}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

여기서 p_h 는 금형의 패턴높이, h_i 는 각 영역의 평균 패턴 높이, h_{max} 와 h_{min} 는 영역중 평균패턴 높이의 최대와 최소값을 의미한다.

Fig. 6 에 영역 1, 2, 4, 5에서의 전사된 패턴의 단면을 도시하였다. 각각의 결과를 비교하면 전반적으로 전사율이 떨어지고 균일하지 않은 성형결과를 보임을 알 수 있다. 정량적으로 살펴보면 전사된 미세패턴의 평균 전사높이는 109.94 μ m 이며 전사율은 64.67%, 균일도 오차는 25.27%로 나타나 패턴전사 상태가 좋지 못한 것으로 판단되며, 따라서 패턴의 전사성과 균일도를 향상시키기 위하여 공정변수를 변화하며 성형실험을 진행하였다.

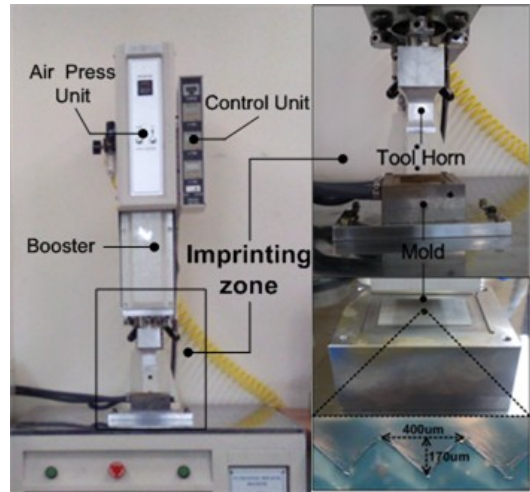


Fig. 4 Experimental setup for ultrasonic imprinting

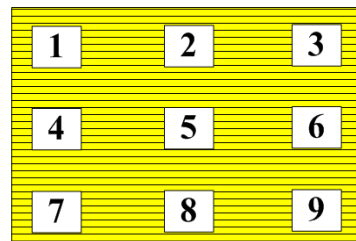


Fig. 5 Measurement locations on the replicated film

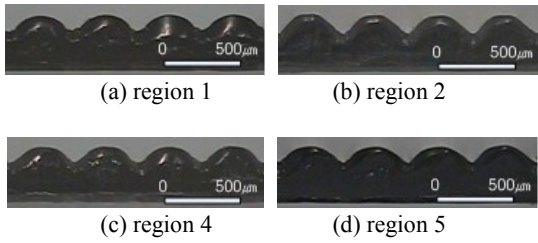


Fig. 6 Sectional views of the replicated micro-patterns at various locations in the initial conditions

4.2 반응표면법을 이용한 성형조건 최적화
 초음파 임프린팅 공정의 최적 성형공정을 찾기
 위해 초음파 가진시간(t), 성형압력(p), 금형온도(T)
 를 변화시켜가며 성형실험을 실시하였다. 인자가
 3 개인 관계로 Box-Behnken(B-B)법을 사용하여 3
 요인 2 수준의 반응표면 분석을 실시하였다. 총
 15 가지의 조합에 대해 실험을 수행하였으며, 조
 건당 3 회씩 반복실험을 실시하였다. 반응값은 역
 시 패턴 전사율(β)과 균일도 오차(γ_h)를 사용하였
 으며, Table 2에 실험계획 직교표 및 그에 따른 실험
 결과를 비교하였다.

Table 2 B-B design table and the experimental results

t (s)	p (MPa)	T (°C)	γ_h (%)	β (%)
2	0.3	70	19.48	65.37
6	0.3	70	14.27	88.20
2	0.5	70	16.76	71.93
6	0.5	70	16.27	75.11
2	0.4	60	15.57	74.09
6	0.4	60	16.05	85.77
2	0.4	80	13.89	77.84
6	0.4	80	13.02	83.84
4	0.3	60	28.76	78.05
4	0.5	60	16.34	86.86
4	0.3	80	17.15	82.20
4	0.5	80	8.66	83.73
4	0.4	70	14.76	86.22
4	0.4	70	12.74	87.12
4	0.4	70	11.24	86.39

상기 결과의 반응표면 분석을 위해 1 차항, 2 차
 항 그리고 교호작용항을 풀링하였다. 2 가지 반응
 값에 대해 금형온도가 포함된 항은 모두 유의하
 지 않기 때문에 제거하였고, 유의한 인자를 바탕
 으로 적합된 반응표면 회귀식은 전사율에 대해

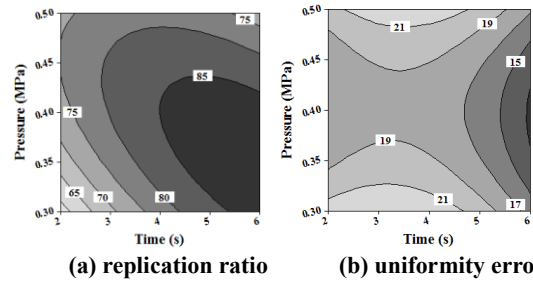


Fig. 7 Response surface contours for the ultrasonic imprinting experiments

Table 3 Optimized parameters and the results

Vibration time (s)	6.0
Pressure (MPa)	0.38
Mold temperature (°C)	80
Replication ratio (%)	88.01
Uniformity error (%)	12.73

식 (8)과 같이, 균일도 오차에 관해 식 (9)와 같이
 표현된다.

$$\beta = 85 + 6.9t + 0.4p - 5.1t^2 - 7.3p^2 - 7.7tp \quad (8)$$

$$\gamma_h = 18.2 - 2.2t - 0.2p - 3.3t^2 + 4.1p^2 + 0.7tp \quad (9)$$

Fig. 7(a)와 (b)에 각각 전사율과 균일도 오차에
 관한 등고선도를 도시하였다. 2 개의 등고선도를
 토대로 전사율을 높이면서 균일도 오차를 줄이기
 위한 범위는 대략적으로 가진시간이 6 초, 성형압
 력이 0.4 MPa 부근임을 알 수 있으며, 이러한 결
 과를 토대로 반응최적화 과정을 거쳐 도출한 최
 적의 공정조건 및 예측된 반응치 결과를 Table 3
 에 요약하였다.

도출된 최적 공정조건을 적용하여 임프린팅 실
 험을 실시하였다. Fig. 8에 영역 1, 2, 4, 5에서의 전
 사된 패턴의 단면을 도시하였으며, Fig. 6에 도시된
 초기 성형결과에 비해 패턴전사율과 균일도가 모
 두 향상된 것을 확인할 수 있다. 정량적으로 비교
 해보면 최적조건 성형시 전사율은 86.72%로 나타
 나 기존 결과 대비 22.05% 상승하였고, 균일도 오
 차는 7.32%로 나타나 기존 결과 대비 17.95% 감
 소하였음을 알 수 있다. 상기 결과로부터 초음파
 임프린팅 공정의 성형조건(가진시간, 성형압력)의
 최적화를 통해 패턴전사율 및 균일도를 향상시킬
 수 있음을 확인하였다.

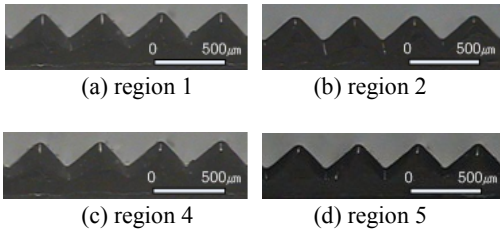


Fig. 8 Sectional views of the replicated micro-patterns at various locations in the optimal conditions

5. 결론

본 연구에서는 초음파 임프린팅을 이용한 대면적 미세패턴 성형공정에서의 성형성과 균일도 향상을 위해 공구흔의 유한요소해석, 성형실험과 반응표면법을 병행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 대면적 미세패턴성형의 전사율 향상과 균일한 패턴성형을 위해 성형품을 제작하는 일련의 과정을 공구흔 설계와 성형조건 설정의 2 단계로 구분하고, 각각에 대해 반응표면법을 적용하여 최적의 공구흔 설계 및 성형조건을 도출하기 위한 연구를 수행하였다.

(2) 공구흔 설계시 유한요소해석과 반응표면분석을 병행하여 공진조건을 위한 고유진동수 조절, 균일도의 향상과 출력단의 진폭비 최대화를 위한 공구흔 설계변수의 최적화를 수행하였다. 최적화 결과 출력면의 균일도 오차는 1.45%, 진폭비는 2.58 로 초기 공구흔 대비 균일도 오차는 1/3 수준으로, 진폭비는 8.6% 개선할 수 있었다.

(3) 제작된 공구흔을 적용한 임프린팅 실험을 수행하고, 성형조건에 따른 성형실험을 반응표면법과 연계하여 수행하였다. 도출된 최적 성형조건을 적용한 결과 86.72%의 전사율과 약 7.32%의 균일도 오차를 얻을 수 있었고, 결과적으로 초기 실험에 비해 전사율은 22.05% 향상시켰으며 균일도 오차는 17.95% 감소하는 효과를 얻었다.

상기 연구결과를 토대로 향후 패턴크기의 초미세화 및 전사면적의 확대를 통한 기능성 표면의 제작에 활용할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2010-0008435)의 지원과 지식경

제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성 사업의 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- [1] J. Becker, U. Heim, 2000, Hot Embossing as a Method for the Fabrication of Polymer High Aspect Ratio Structures, *Sens. Actuators, A*, Vol. 83, No. 1~3, pp. 130~135.
- [2] S. Kim, C. S. Shiao, B. Kim, D. Yao, 2007, Injection Molding Nanoscale Features with the Aid of Induction Heating, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 46, pp. 1031~1037.
- [3] J. H. Kim, Y. S. Kim, 2010, The Review for Various Mold Fabrication Toward Economical Imprint Lithography, *J. Kor. Vac. Soc.*, Vol. 19, No. 2, pp. 96~104.
- [4] S. J. Liu, Y. T. Dung, 2005, Hot Embossing Precise Structure Onto Plastic Plates by Ultrasonic Vibration, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 45, No.7, pp. 1282~1287.
- [5] H. Mekaru, H. Goto, M. Takahashi, 2007, Development of Ultrasonic Micro Hot Embossing Technology, *Microelectron. Eng.*, Vol. 84, No. 5~8, pp. 1282~1287.
- [6] W. Michaeli, A. Spennemann, R. Gartner, 2002, New Plastification Concepts for Micro Injection Molding, *Microsyst. Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 55~57.
- [7] M. Harutaka, N. Toshihiko, G. Hiroshi, T. Masaharu, 2007, Nanoimprint Lithography Combined with Ultrasonic Vibration on Polycarbonate, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 9B, pp. 6335~6362.
- [8] Y. S. Seo, K. Park, 2012, Direct Patterning of Micro-features on a Polymer Substrate using Ultrasonic Vibration, *Microsyst. Technol.*, Vol. 18, No. 12, pp. 2053~2061.
- [9] Y. S. Seo, K. Y. Lee, K. Park, 2012, Effect of Material Flow Direction on the Replication Characteristics of the Ultrasonic Patterning Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 2, pp. 119~125.
- [10] W. Jung, J. Ra, K. Park, 2012, Design Optimization of an Ultrasonic Horn for Micro-pattern Replication, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 12, pp. 2195~2201.