

# 초음파 패턴성형시 유동방향 구속에 따른 미세패턴의 성형특성 고찰

서영수<sup>1</sup> · 이기연<sup>1</sup> · 박 근<sup>#</sup>

## Effect of Material Flow Direction on the Replication Characteristics of the Ultrasonic Patterning Process

Y. S. Seo, K. Y. Lee, K. Park

(Received November 25, 2011 / Revised December 23, 2011 / Accepted January 6, 2012)

### Abstract

The present study addresses a direct patterning process on a plastic film using ultrasonic vibration energy. In this process, a tool horn containing micro-patterns is attached to an ultrasonic power supply, and is used with ultrasonic vibration to replicate micro-patterns on the surface of a plastic film. To improve the replication characteristics of the micro-patterns, the effect of the die shape of the ultrasonic patterning process was investigated with respect to the flow direction control. Finite element analyses were performed to predict the flow characteristics of the polymer with variations in die design parameters. Experiments were conducted using the optimally-designed die, from which it was possible to attain much improved pattern replication.

**Key Words** : Ultrasonic Vibration, Ultrasonic Patterning, Micro-pattern, Tool Horn, Finite Element Analysis

### 1. 서 론

미세패턴 성형공정은 전자 및 디스플레이 분야의 발전으로 인한 초고정세(Fine-pitch) 및 박판화 경향에 따른 고집적화 및 성형성 향상이 요구되고 있다. 대표적인 미세패턴의 성형방법들로는 고분자재료를 이용한 리소그래피(Lithography), 나노-임프린트(Nano-imprint), 핫엠보싱(Hot embossing) 및 사출성형(Injection molding) 등이 있다[1~3]. 하지만 상기 공정들은 부차적인 공정을 수반하여 공정시간, 생산비용 및 생산성 측면에서 문제점을 초래하고 있다[4,5]. 본 연구에서는 초음파 진동 에너지를 미세패턴 성형공정에 적용하여 기존의 미세패턴 성형 공정에 비해 공정 및 생산효율을 개선할 수 있는 공정을 개발하고자 한다.

최근에는 초음파 진동 에너지를 이용한 성형기술로서 초음파 진동 에너지를 핫엠보싱 공정에 적용하여 미세패턴 전사성을 향상시킨 연구가 진행되었다[6,7]. 이러한 기술은 기존의 초음파 용착(ultrasonic welding) 기술을 발전시킨 형태로서, 플라스틱 제품에 초음파 가동을 부과시 플라스틱 모재간의 마찰열을 통해 국부적으로 가소화시키는 방법이다[8]. 또한 본 연구자의 선행연구로서 미세패턴이 각인된 초음파 공구혼(tool horn)에 부과된 진동 에너지를 이용해 공구혼과 고분자 기판 사이에 마찰열을 유도하여 기판 표면을 국부적으로 가소화 시킴과 동시에 가압하여 패턴을 직접 성형하는 공법이 제시되었고[9], 이때 공구혼의 형상 설계와 공정조건이 미세패턴에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다[10].

1. 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원  
# 교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과  
E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

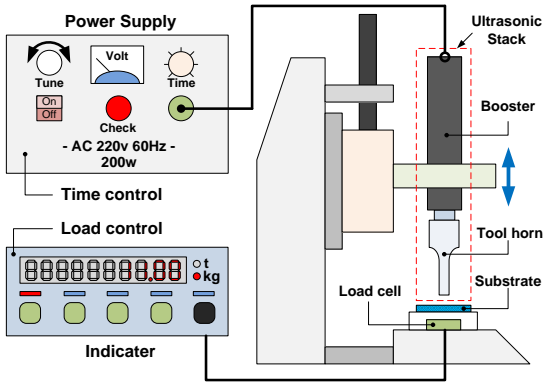


Fig. 1 Configuration of a direct pattern forming apparatus using ultrasonic vibration[9]

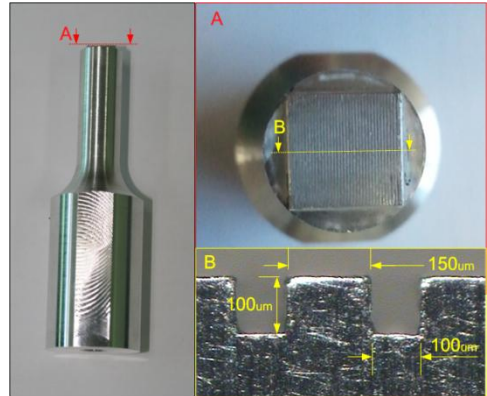


Fig. 2 Detailed view of micro-patterns on the tool horn

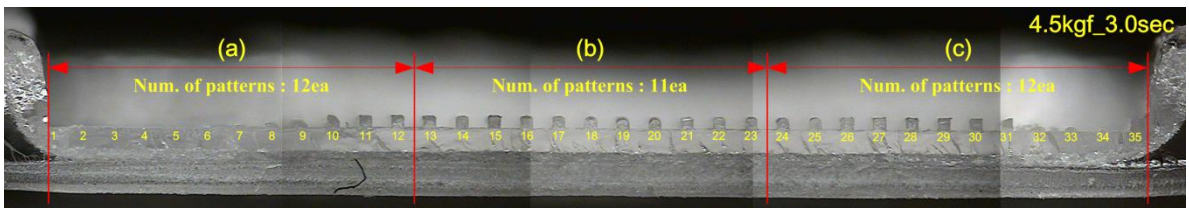


Fig. 3 Sectional view of replicated micro patterns imprinted on the surface of substrate

본 연구의 목적은 기존에 진행된 초음파 패턴 성형공정에서 패턴의 전사성을 향상시키기 위해 유한요소해석을 통한 고찰을 실시하였다. 특히 패턴의 수가 많아질수록 외측부의 성형성이 저하되는 현상을 해석을 통해 고찰하고, 이를 개선하기 위해 측면부 구속이 부과되도록 금형형상을 변경하여 그 효과를 해석적으로 검증하고자 한다.

## 2. 초음파 성형의 개요

### 2.1 초음파 패턴성형 시스템

Fig. 1 에 초음파 진동에너지를 이용한 미세패턴 성형시스템의 구성을 도시하였다. 초음파 미세패턴 성형시스템은 크게 초음파 발진장치, 소형 프레스, 성형시 고분자필름에 적용되는 하중에 대한 정량적 측정을 위한 계측장치(indicator) 및 전원공급장치로 구성되어 있다. 여기서 초음파 발진장치는 진동자(converter), 부스터(booster) 그리고 공구혼(tool horn)으로 구성된다.

초음파 패턴성형은 앞서 소개한 바와 같이 패턴이 가공된 공구혼을 고분자필름에 압착한 상태에서 가진을 부여하여, 필름 표면에서의 국부 가소화를 통한 미세패턴을 성형하는 공정이다. 진동

은 초음파 발진 장치에서의 진동자로부터 형성되며, 본 연구에서는 28kHz 의 주파수를 갖는 초음파 발진기를 사용하였다. 공구혼은 해당 주파수에서 종진동(Longitudinal vibration)모드의 공진이 발생하도록 설계하였다[9]. 공구혼의 성형부에는 Fig. 2 에 도시한 바와 같이 가로, 세로 각각 9.0mm 인 사각돌출부에 폭과 깊이가 각각 100µm 인 사각패턴이 총 35 개 각인되어있다.

### 2.2 공정변수에 따른 성형성 고찰

앞절에서 언급한 초음파 패턴성형시스템을 구축하여 공정변수를 고려한 성형실험을 수행하였다. 최초 성형실험 조건은 성형하중 4.5kgf, 성형시간 3.0s, 성형깊이 350µm 로 설정하여 수행되었으며, 사용된 고분자필름은 투명 PMMA 소재로서 두께는 800µm 이다.

Fig. 3 은 앞서 설정한 성형실험 조건을 통하여 전사되어진 미세패턴의 단면형상을 나타낸다. 성형결과에 대한 성형성을 정량적으로 비교하기 위해 영상현미경을 이용하여 각각의 패턴높이를 측정하였다. 성형성에 대한 비교는 성형부의 단면 폭이 넓은 특성을 고려하여 (a)~(c)의 3 구간으로 분할하여 진행하였다. Fig. 4 에 분할된 각 구간에

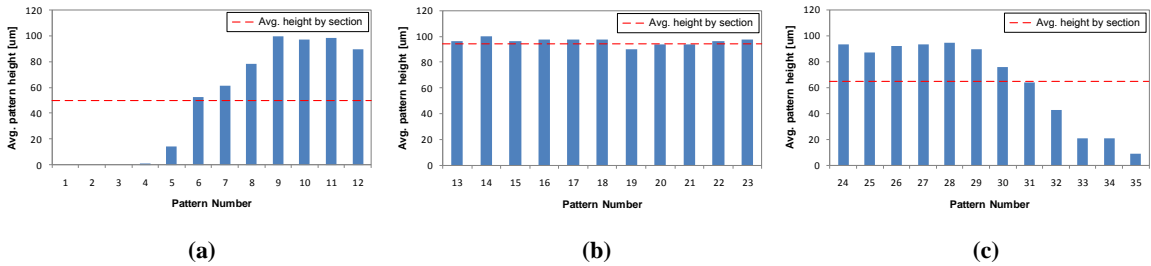


Fig. 4 Average pattern height for (a) left region, (b) middle region, and (c) right region

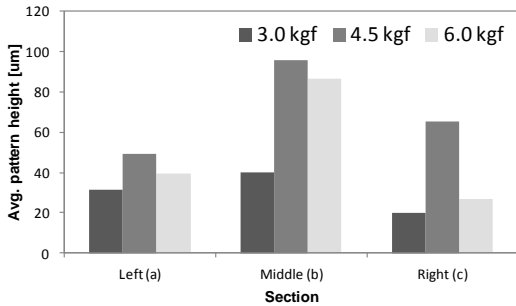


Fig. 5 Configuration of the pattern heights with a variation of the load

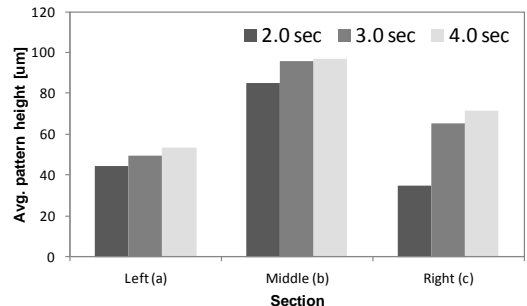


Fig. 6 Configuration of the pattern heights with a variation of the vibration time

Table 1 Comparison of the pattern heights with a variation of the load ( $\mu\text{m}$ )

| Load (kgf) | Left (a) |       | Middle (b) |       | Right (c) |       |
|------------|----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
|            | mean     | std.  | mean       | std.  | mean      | std.  |
| 3.0        | 31.2     | 21.33 | 40.2       | 10.08 | 19.87     | 18.87 |
| 4.5        | 49.46    | 43.48 | 95.92      | 2.74  | 65.28     | 33.17 |
| 6.0        | 39.42    | 30.4  | 86.48      | 10.97 | 27.03     | 19.65 |

Table 2 Comparison of the pattern heights and with a variation of the vibration time ( $\mu\text{m}$ )

| Time (sec) | Left (a) |       | Middle (b) |       | Right (c) |       |
|------------|----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
|            | mean     | std.  | mean       | std.  | mean      | std.  |
| 2.0        | 44.34    | 15.08 | 85.2       | 15.46 | 34.72     | 29.28 |
| 3.0        | 49.46    | 43.48 | 95.92      | 2.74  | 65.28     | 33.17 |
| 4.0        | 53.31    | 39.4  | 96.85      | 1.93  | 71.37     | 28.5  |

대한 각각의 미세패턴의 높이값을 도시하였다. 좌측부 (a), 중앙부 (b), 우측부 (c) 각각의 구간에 대한 패턴의 평균높이는 49.47 $\mu\text{m}$ , 95.92 $\mu\text{m}$ , 65.28 $\mu\text{m}$ 로 나타났으며, (a), (b), (c) 각각의 구간에 대한 패턴의 표준편차는 43.48 $\mu\text{m}$ , 2.74 $\mu\text{m}$ , 33.17 $\mu\text{m}$ 와 같았다. 성형부 중 중앙부 (b)영역이 성형부의 외측부인 (a), (c) 영역 대비 높은 성형성을 보이며 전반적으로 균일하지 않은 성형결과를 초래하는데, 이러한 외측부에서의 미성형과 공정변수와와의 관계를 고찰하기 위하여 공정변수를 변화하며 성형 실험을 진행하였다.

공정변수에 대한 성형조건은 앞에서 제시한 성형하중과 성형시간 변화를 통하여 결정하였다. 하

중변화는 3.0kgf~6.0kgf의 범위 내에서 1.5kgf의 증가폭을 가지며, 성형시간은 3.0s로 고정하였다. 시간변화는 2.0s~4.0s의 범위 내에서 1.0s의 증가폭을 가지며, 성형하중은 4.5kgf로 고정하여 실험을 수행하였다.

Fig. 5에 성형하중 조건에 대하여 전사된 패턴의 평균높이를 비교하였다. 패턴 평균높이 측면에서 가장높은 성형성을 나타내는 하중값은 4.5kgf로 나타났으며, 이를 기준으로 하중의 증가에 따라 패턴의 평균높이가 감소하는 경향을 보였다. Table 1에 성형하중 조건에 따른 평균높이와 표준편차를 정량적으로 비교하였다. 성형하중 증가에 따라 중앙부의 표준편차는 각각 10.08 $\mu\text{m}$ , 2.74 $\mu\text{m}$ ,

10.97 $\mu\text{m}$ 로서 4.5kgf를 기준으로 하중값이 증감할 때 표준편차가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 특정하중을 기준으로 하중값이 증감할 경우 성형성이 저하됨을 확인하였으며, 본 실험에서는 4.5kgf를 적정 하중으로 설정하였다.

Fig. 6에는 성형시간 조건에 대하여 전사된 패턴의 평균높이를 비교하였다. 성형하중 조건과 달리 성형시간의 증가와 함께 평균높이가 증가하는 경향을 보였다. Table 2는 성형시간 조건에 따른 평균높이와 표준편차를 정량적으로 비교한 것으로서 성형시간 증가에 따라 중앙부의 표준편차는 각각 15.46 $\mu\text{m}$ , 2.74 $\mu\text{m}$ , 1.93 $\mu\text{m}$  로서 성형시간의 증가는 패턴성형시 패턴의 균일도 개선에 효과적인 것으로 판단하였다.

성형조건 변화를 통한 성형실험을 통해 성형적정하중을 설정하였으며, 성형시간 증가를 통한 성형성 개선은 외측부와 중앙부 모두에서 관찰가능하였다. 하지만 외측부의 성형성 개선은 미비하여 공정변수의 변화를 통해 외측부에서 나타나는 성형성 저하에 대한 개선은 한계가 있는 것으로 분석되었다.

### 3. 초음파 패턴성형 공정의 개선

#### 3.1 패턴성형 공정의 수치해석적 고찰

2.2 절에서는 실험을 통해 공정변수인 성형하중 및 시간의 변화에 따라 성형성이 향상되는 점을 확인하였다. 하지만 여전히 외측부의 미성형 문제를 근본적으로 해결하지는 못하였으며, 특히 패턴의 증가로 인한 성형부의 확장은 외측부의 성형성 저하를 초래한 것으로 분석된다. 본 연구에서는 이러한 현상을 고찰하기 위해 성형과정에 대한 유한요소해석을 실시하였다.

초음파 성형공정의 유한요소해석은 Polyflow™를 사용하여 진행하였다. 해석 모델은 Fig. 7 과 같이 공구혼과 고분자필름으로 구성되어 있으며 대칭성을 고려하여 형상의 1/2 만 형성하였다. 공구혼의 요소타입은 4 절점 사각형 요소를 사용하였으며, 고분자필름은 대변형에 따른 요소재생성(remeshing)에 유리한 3 절점 삼각형 요소를 사용하여 요소변형에 대해 효과적으로 대응하였다.

유한요소해석조건은 압축성형(compression molding) 기법에서의 압착을 통한 패턴전사 공정과 초음파 성형공정의 유사성을 고려하여 설정하였다. 압축성형 기법의 공정에서의 압축하중과 성형높

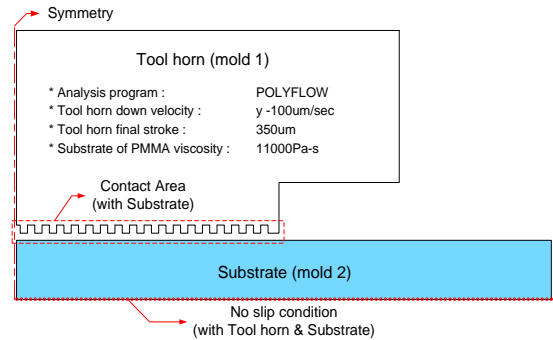


Fig. 7 FE model for the ultrasonic patterning process

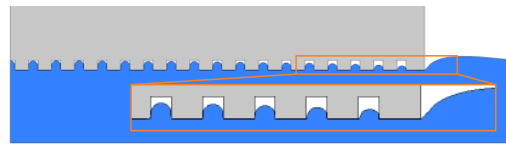


Fig. 8 Simulated pattern forming [fixed 1.5s]

이간의 관계식은 식 (1)과 같이 표현된다[11].

$$F_N = \frac{3\pi\eta}{8h^2} R^4 \left( -\frac{dh}{dt} \right) \quad (1)$$

여기서  $F_N$  은 고분자에 가해진 힘,  $h$  는 고분자의 높이,  $R$  은 패턴의 반지름,  $\eta$  는 고분자의 점도(viscosity)이다. 여기서 고분자의 점도는 온도 및 유동선단에서의 저항력(share rate)의 지배를 받는다. 여기서 본 실험에서 사용된 PMMA 수지에 대한 점도특성그래프를 통해 점도값을 11000Pa-s 로 설정하였다.

구속조건의 경우 공구혼과 고분자필름이 맞닿는 면은 접촉조건을 부과하였다. 공구혼의 총 이송거리는 450 $\mu\text{m}$  로서, 고분자필름의 공구혼 이송을 위한 최소간극과 100 $\mu\text{m}$ , 성형깊이는 350 $\mu\text{m}$  의 합과 같다. 공구혼의 이송속도는 하측 100 $\mu\text{m/s}$  로 설정하고 이송시간은 4.5s 로 설정하여 초음파 성형공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 8 에 상기 해석조건을 토대로 수행한 성형해석결과를 도시하였다. 상기 결과는 성형이 진행된 후 1.5s 경과시의 결과로서 그림의 좌측과 우측은 실제 성형영역의 중심부와 외측부를 나타내며, 성형패턴의 중심부가 외측부보다 먼저 충진이 일어나는 것으로 확인되었다. 또한 외측부 바깥으로 많은 양의 수지가 밀려나가는 현상이 관찰되었다. 이러한 경향은 Fig. 3 (a), (c)에서의 미성형과 연관되어 성형성에 부정적인 영향을 주는 요인으로 판단된다.

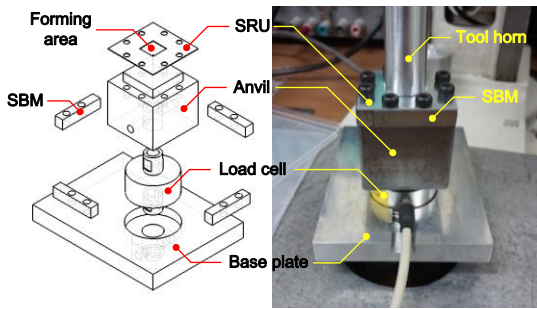


Fig. 9 Configuration of the side restriction unit

### 3.2 성형성 향상을 위한 금형구조 변경

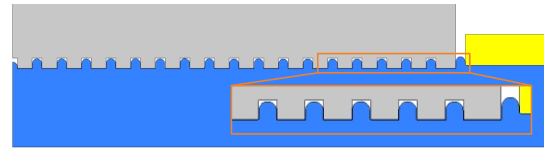
앞절에서 수행한 유한요소해석 결과에서 알 수 있듯이 패턴성형시 수지가의 유동이 공구흔 외부로 발생되어 성형부 내의 충분한 압력공급이 어려워져 성형성이 저하되는 것을 확인하였다. 즉 외측부 패턴을 채워야 할 수지가 상대적으로 유동이 용이한 바깥쪽으로 흘러감에 따라 외측부 패턴의 미성형이 발생하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 금형구조를 변경하여 측부로의 수지흐름을 억제함과 동시에 패턴성형시 공구흔의 중앙부와 외측부사이의 압력 불균일을 최소화하기 위하여 Fig. 9 에 도시한 바와 같이 측부금형을 설계 및 제작 하였다.

측부금형은 수지흐름을 억제하기 위한 측면구속장치(Side restrict unit; SRU)와 고분자 필름의 이동을 구속하기 위한 측부 하단금형(Side bottom mold; SBM)으로 구성된다. 여기서 측면구속장치는 공구흔의 성형돌출부와 일정 간격을 갖으며 외측부에 가해지는 압력조절이 가능하게 설계되었다.

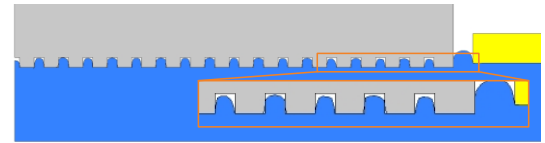
### 3.3 측부금형의 수치해석적 특성 고찰

측부금형을 이용한 성형실험에 앞서 유한요소해석을 통해 측부금형 유무에 따른 성형성을 비교하였다. 유한요소해석은 3.1 절에서 수행한 유한요소해석과 동일한 해석조건을 고려하여 해석을 수행하였다. 또한 측부금형과 공구흔 사이의 간격에 따른 성형성을 비교하기 위하여 측부금형과 공구흔사이의 간격을 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m 로 증가시키며 해석을 수행하였다.

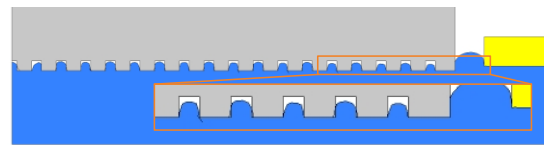
Fig. 10 의 (a) ~ (c)에 측부금형과 공구흔간의 간격에 대하여 해석진행 1.5s 이후의 해석결과를 도시하였다. 가장 우수한 성형성을 나타내는 Fig. 10 (a)는 공구흔과 측부금형 사이의 간격이 100 $\mu$ m 인 경우로서, 중앙부와 외측부에서의 충진이 동시에



(a) 100 $\mu$ m gap



(b) 200 $\mu$ m gap



(c) 300 $\mu$ m gap

Fig.10 Simulated pattern forming process according to the side gap: (a) 100 $\mu$ m, (b) 200 $\mu$ m, and (c) 300 $\mu$ m

진행되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 Fig. 8 에 도시한 측부금형이 고려되지 않은 경우와 비교할 때 성형성에서 큰 차이를 보인다. 또한 공구흔과 측부금형 사이에 간격이 기존에 공구흔에 각인된 패턴의 폭과 같거나 더 작을 때 성형성이 향상될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 상기 유한요소해석 결과를 토대로 100 $\mu$ m를 측부금형과 공구흔과의 적정간격으로 결정하였으며, 간격이 100 $\mu$ m이하로 내려갈 경우 성형시 측부금형과 공구흔과의 간섭이 발생할 우려가 있기 때문에 100 $\mu$ m이하의 간격은 본 연구에서 배제하였다.

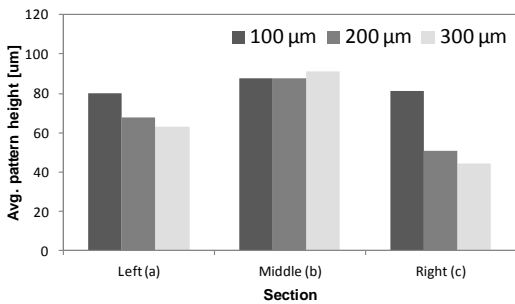
### 3.4 측부금형 간격에 따른 성형성 비교

앞절의 유한요소 해석을 통해 제안된 측부금형을 조음과 성형실험에 적용하였다. 해석과 동일하게 측부금형과 공구흔 사이의 간격을 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m 로 변화시켜 제작하였다. 최초 성형실험은 측부금형을 사용하지 않았을 때의 최적 조건인 성형하중 4.5kgf, 성형시간 4.0s를 기준으로 하여 진행하였다.

Fig. 11은 측부금형과 공구흔간의 간격에 대하여 전사된 패턴의 평균높이를 나타낸다. 간격이 300 $\mu$ m에서 100 $\mu$ m로 축소됨에 따라 외측부 (a), (c) 영역에서의 평균높이는 각각 63.14 $\mu$ m, 44.02 $\mu$ m

**Table 3 Comparison of the pattern heights and Std. deviation with a variation of the forming condition ( $\mu\text{m}$ )**

| Forming condition             |         | Pattern height |            |           | Std. deviation |            |           |
|-------------------------------|---------|----------------|------------|-----------|----------------|------------|-----------|
|                               |         | Left (a)       | Middle (b) | Right (c) | Left (a)       | Middle (b) | Right (c) |
| w/o SRU                       | 4.0 sec | 53.31          | 96.85      | 71.37     | 39.40          | 1.93       | 28.50     |
|                               | 5.0 sec | 54.91          | 96.85      | 59.40     | 12.33          | 3.26       | 20.19     |
| with SRU (0.1 $\mu\text{m}$ ) | 4.0 sec | 79.81          | 87.65      | 81.30     | 11.39          | 5.45       | 9.89      |
|                               | 5.0 sec | 89.42          | 98.14      | 83.87     | 7.28           | 2.25       | 7.56      |



**Fig.11 Configuration of the pattern heights with a variation of the side gap**

에서 79.81 $\mu\text{m}$ , 81.3 $\mu\text{m}$  로의 증가를 보였다. 반면 중앙부 (b)영역에서는 91.26 $\mu\text{m}$  에서 87.65 $\mu\text{m}$  로의 감소를 보였다.

상기 결과를 보면 측부금형과 공구흔 사이의 간격 축소는 외측부에서의 성형성이 개선되는 경향을 보였지만 중심부의 성형성은 오히려 저하되는 경향을 보였다. 이러한 현상을 보완하기 위하여 2.2 절에서 진행한 바와 같이 성형조건의 변화를 통해 성형성 개선을 시도하였다. 성형하중의 경우 하중값 증가시 성형성 저하를 보였기 때문에 성형시간을 제어하여 성형성의 개선을 유도하였다. 성형시간의 경우 측부금형 유무를 기준으로 5.0s 를 추가로 설정하여 실험을 수행하였다.

Table 3은 추가적으로 성형시간의 증가를 고려한 실험에 대한 결과로서, 측부금형 유무에 대하여 패턴의 평균높이와 표준편차를 비교하였다. 최초 측부금형이 적용되지 않은 경우 외측부 (a), (c)에서의 패턴 평균높이는 각각 53.31 $\mu\text{m}$ , 71.37 $\mu\text{m}$ 에서 54.91 $\mu\text{m}$ , 59.4 $\mu\text{m}$ 로의 감소를 보인 반면 표준편차의 경우는 39.4 $\mu\text{m}$ , 28.5 $\mu\text{m}$ 에서 12.33 $\mu\text{m}$ , 20.19 $\mu\text{m}$  로의 감소를 보였다. 따라서 측부금형을 적용하

지 않은 상태에서는 성형 하중 및 시간의 증가는 외측부의 성형성 개선에 유효하지 않는 것으로 판단된다. 반면 측부금형을 적용한 경우는 전체 위치에 대한 패턴 평균높이를 기준으로 82.78 $\mu\text{m}$ 에서 90.25 $\mu\text{m}$ 로의 증가를 보이며, 표준편차의 경우 앞서 진행한 실험결과에서 전체패턴 영역에서 측부금형의 간격축소에 따라 편차가 감소하는 경향을 보인 것과 동일하게 전체패턴을 기준으로 9.69 $\mu\text{m}$ 에서 8.5 $\mu\text{m}$ 로 감소하는 경향을 보였다. 또한 측부금형 미적용시 중앙부(b)에서의 가장 높은 성형성을 보였던 상기 결과(성형하중 4.5kgf, 성형시간 4.0s)로부터 1.29 $\mu\text{m}$ 의 높이 상승을 관찰하였다.

상기 결과로부터 측부금형의 적용은 성형영역의 대면적화를 기대했을 때 반드시 고려되어야 할 설계변수로서, 전사된 패턴의 균일도를 상승시킬 뿐만 아니라 성형성을 개선시키는 효과를 보임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초음파 진동에너지를 이용한 미세패턴 성형 공정에서의 성형성 향상을 위해 성형실험과 유한요소해석을 병행하였으며, 금형설계 및 성형조건의 영향을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 성형실험에서 확인된 고분자필름의 흐름현상을 실험 환경에 대한 문제점으로 제안하고, 이러한 현상에 대한 고찰을 위하여 유한요소 유동해석을 진행하여 측부로 수지의 유동이 발생하여 미성형의 원인으로 작용함을 확인하였다.

(2) 측부금형을 고려한 해석을 진행하여 외측부의 수지흐름의 제한에 따른 성형성 향상을 유도

하였다. 그 결과 공구흔과 측부금형 사이의 거리를 100 $\mu$ m 로 하였을 때 패턴 충진이 고르게 진행되었음을 확인하였다.

(3) 측부금형의 유무에 따라 전체패턴에서의 평균높이와 표준편차는 각각 11.6%의 증가와, 70.6%의 감소를 보였으며, 측부금형과 함께 시간을 5.0s로 증가시킬 경우는 각각 18.9%의 증가와 74.1%의 감소를 관찰하였다.

상기 연구결과를 토대로 향후 다양한 형태의 공구흔 설계를 통한 제품의 대면적화 및 다양한 형상성형에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2010-0008435)의 지원과 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성사업의 지원으로 수행된 결과임.

## 참 고 문 헌

- [1] C. A. Mirkin, J. A. Rogers, 2001, Emerging Methods for Micro-and Nanofabrication, MRS Bull., Vol. 26, No. 7, pp. 506~508.
- [2] 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.
- [3] C. L. Chen, F. Jen, 2004, Fabrication of Polymer Splitter by Micro Hot Embossing Technique, Tamkang J. Sci. Eng., Vol. 7, No. 1, pp. 5~9.
- [4] 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.
- [5] D. H. Sohn, Y. S. Seo, K. Park, 2010, Three-dimensional Finite Element Analysis of the Induction Heating Procedure of an Injection Mold, Trans. Mater. Proc., Vol. 19, No. 3, pp. 152~159.
- [6] 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.
- [7] H. Mekar, H. Goto, M. Takahashi, 2007, Development of Ultrasonic Micro Hot Embossing Technology, Microelectron. Eng., Vol. 84, No.5~8, pp. 1282~1287.
- [8] J. Tsujino, M. Hongoh, R. Tanaka, R. Onoguchi, T. Ueoka, 2002, Ultrasonic Plastic Welding Using Fundamental and Higher Resonance Frequencies, Ultrason., Vol. 40, No. 1~8, pp. 375~378.
- [9] Y. S. Seo, K. Park, 2010, Finite Element Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for Pattern Forming, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 3, pp. 363~369.
- [10] Y. S. Seo, K. Park, 2011, Direct Patterning of Micro-Features on a Polymer Substrate Using Ultrasonic Vibration, Microsys. Technol(accepted for publication).
- [11] R. C. Progelhof, J. L. Throne, 1993, Polymer Engineering Principles: Properties, Processes, Test for Designs, Hanser Gardner Publications, New York.