

# 초음파 성형시 진동전달 방향에 따른 미세패턴의 전사특성 고찰

## Replication Characteristics of Micro-Patterns according to the Vibration Transmission Direction in the Ultrasonic Imprinting Process

서영수<sup>1</sup>, 이기연<sup>1</sup>, 조영학<sup>2</sup>, 박근<sup>2,✉</sup>  
Young-Soo Seo<sup>1</sup>, Kiyoon Lee<sup>1</sup>, Young-Hak Cho<sup>2</sup>, and Keun Park<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 (Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology)

<sup>2</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology)

✉ Corresponding author: kpark@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6358

Manuscript received: 2012.4.16 / Revised: 2012.7.11 / Accepted: 2012.8.28

*The present study covers the ultrasonic patterning process to replicate micro-patterns on a polymer substrate. The ultrasonic patterning process uses ultrasonic waves to generate frictional heat between an ultrasonic horn and the polymer substrate, from which the surface region of the polymer substrate is softened sufficiently for the replication of micro-patterns. The ultrasonic patterning process can be divided into two categories according to the direction of vibration transmission: direct patterning and indirect patterning. The direct patterning uses a patterned horn, and the ultrasonic vibration is transferred directly from the patterned horn to the substrate. On the contrary, the indirect patterning process uses a plain horn, and the micro-patterns are engraved on a mold that is located below the substrate. Thus, the micro-patterns are replicated as an indirect manner. In this study, these direct and indirect patterning processes are compared in terms of the replication characteristics. Additionally, the possibility of double-side patterning is also discussed in comparison with the conventional single-side patterning process.*

Key Words: Ultrasonic Imprinting (초음파 엠보싱), Direct Patterning (직접패턴 성형), Indirect Patterning (간접패턴 성형)

### 1. 서론

초음파는 의료, 측정, 가공 등 다양한 분야에서 이용되고 있다. 이러한 초음파의 응용은 크게 음파를 이용하는 부분과 진동을 이용하는 분야로 구분되며, 초음파 진동을 이용하는 기술은 진동자를 통해 전기에너지를 운동에너지로 변환하여 사용한다. 초음파 용착(ultrasonic welding) 공정은 공구horn(tool horn)을 통해 전달된 진동에너지로 고분자 소재에 인가함으로써 발생하는 소재간의 마찰열을 이용하여 용접을 수행하는 공정이다.<sup>1,2</sup> 최근 초음

파 진동특성을 이용하여 핫엠보싱(Hot embossing) 공정에서 초음파 진동을 부가적으로 이용하여 성형시간을 단축시키기 위한 연구가 진행되었다.<sup>3,4</sup>

또한 별도의 가열과정 없이 초음파 진동만을 이용하여 고분자소재 표면에 미세패턴을 복제하는 초음파 임프린팅(Ultrasonic imprinting) 공정에 대한 연구가 발표되었다.<sup>5-8</sup> 초음파 임프린팅은 금형이나 공구horn 표면에 미세패턴을 각인하고 초음파 진동에 의한 마찰열을 이용하여 고분자 표면을 가소화시키고 미세구조물을 복제하는 공정으로, 기존의 핫엠보싱이나 사출성형 등의 공정에 비해 성형사이클이

짧아 효과적인 성형과 고생산성이 가능한 장점이 있다. Mekaru 등은 리소그래피 공정과 이온식각(DRIE) 공정을 이용하여 제작된 나노스케일 실리콘 몰드(Mold)를 사용하여 초음파 임프린팅을 적용하였고,<sup>5</sup> Schomburg 등은 금속 몰드상에 미세패턴을 가공하여 초음파 성형공정을 통한 마이크로 디바이스를 제작하였다.<sup>6</sup> Lin 등은 공구흔에 패턴이 각인된 경우에 대해 유한요소해석을 사용한 고분자 유동해석을 실시하였고,<sup>7</sup> Seo 와 Park 은 공구흔에 미세패턴을 각인하여 고분자 표면에 복제하기 위한 실험적인 연구를 수행하였다.<sup>8</sup>

본 연구에서는 초음파 임프린팅 공정에서 공구흔에 패턴이 각인된 경우와 금형(Mold)에 패턴이 각인된 경우에 대한 성형특성을 비교하고자 한다. 이중 공구흔에 패턴이 각인된 경우는 초음파 진동이 공구흔의 패턴을 통해 직접 고분자 소재로 전달되는 직접성형(direct patterning)에 해당되며, 금형에 패턴이 각인된 경우는 공구흔의 진동이 소재를 거쳐 소재 뒷면의 금형으로 전달되는 간접성형(indirect patterning)에 해당된다. 본 연구에서는 상기 직접성형 공정과 간접성형 공정에서 성형조건에 따른 패턴의 전사특성을 고찰하고자 하며, 추가적으로 공구흔과 금형 양측에 패턴이 각인된 양면성형공정의 성형특성을 고찰하고자 한다.

## 2. 초음파 임프린팅을 이요한 미세패턴 성형

### 2.1 초음파 임프린팅 공정의 개요

초음파 임프린팅 공정은 압전세라믹 진동자에 의해 발생된 진동에너지를 이용한다. 진동자에 의해 발생된 진동에너지는 부스터(booster)와 공구흔을 통해 증폭되어 전달되며 공구흔의 끝단에서 발생하는 미세한 진동에 의해 피가공물인 고분자 필름과 공구흔과의 진동마찰열을 발생시키게 된다. 이때 발생한 마찰열로 인해 고분자필름은 유리전이온도 이상까지 가열되게 되며, 가압과정이 동시에 이루어짐으로써 용융된 수지가 공구흔의 패턴 내부로 충전되면서 미세패턴이 전사되게 된다.

Fig. 1 에 초음파 임프린팅을 이용한 미세패턴 성형장치를 도시하였다. 초음파 가진기는 ACE 초음파社의 ACE-3015A 모델을 사용하였으며, 초음파 성형장치는 공압(pneumatic pressure)을 이용하여 상하 이동하게 되며 제어부(controller)에서 가진시간, 가압시간 등 성형조건을 제어하게 된다. 성형이 이루어지는 성형부(forming zone)에서는 패턴전사를

위한 공구흔과 고분자필름을 안착시키기 위한 금형으로 구성되며, 이때 로드셀(load cell)을 설치하여 성형과정중 공구흔과 금형 사이의 가압력을 정량적으로 측정하였다.

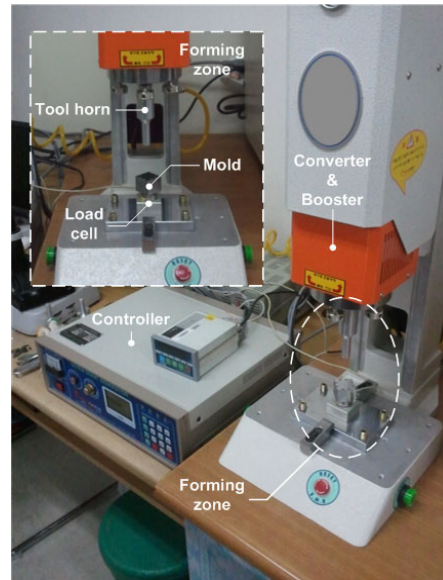


Fig. 1 Configuration of ultrasonic patterning system

### 2.2 미세패턴을 포함한 공구흔 및 금형 제작

진동에너지를 이용하는 초음파 임프린팅공정에서는 미세패턴의 전사특성을 향상시키기 위하여 공구흔을 통한 진동에너지의 효과적인 전달, 증폭 및 특정 주파수에서의 공진을 요구한다. 본 연구팀에서는 이러한 요구를 충족시키기 위하여 이론과 진동해석(modal analysis)을 병행함으로써 공구흔을 설계 및 제작하였다.<sup>9</sup>

공구흔과 금형상에 미세패턴을 가공하기 위하여 초소형 엔드밀 장비를 사용하였으며, 공구흔 및 금형재료는 진동전달 특성이 우수한 Al7075 를 사용하였다. 미세패턴은 공구흔의 출력단과 금형면에 5x5 mm<sup>2</sup>의 정사각형 영역에 위치하며, Fig. 2 의 (a)와 (b)에 각각 공구흔 끝단과 금형표면에 가공된 패턴형상과 치수를 도시하였다. 이때 금형 표면의 미세패턴(Fig. 2 (b))은 영상획득이 용이하지 않은 관계로 비접촉 표면형상 측정장비(A&I 社 Nano-3D)를 사용하여 측정하였다. 가공된 패턴의 폭은 공구흔과 금형 모두 93.4 μm 로 측정되었다. 반면 패턴의 간격은 공구흔 158.2 μm, 금형 163.4 μm 로 측정되어 3.2%의 편차를 보였고, 패턴의 깊이는 공구흔

33.7  $\mu\text{m}$ , 금형 33.3  $\mu\text{m}$  로 측정되어 1.2 %의 편차를 보였다.

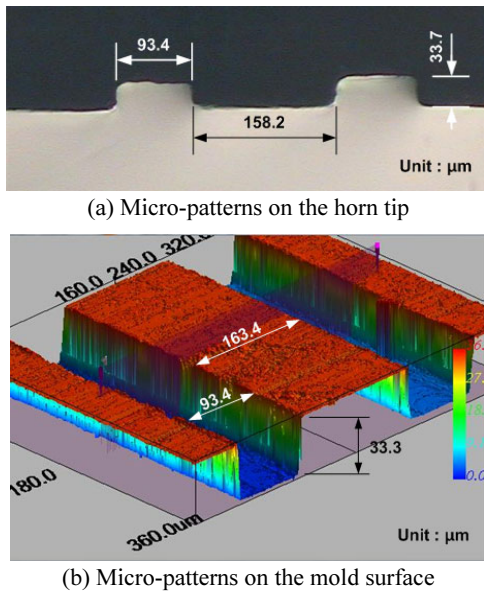


Fig. 2 Dimensions of the micro-patterns on the tool horn and the mold surface

### 2.3 초음파 패턴성형 방식의 분류

초음파 패턴성형의 방식은 초음파 임프린팅 공정의 가소화 영역과 결부하여 구분된다. 초음파 임프린팅 공정은 진동에너지가 인가되는 영역만을 국부적으로 가소화시키게 되며 일부 진동에너지는 질량을 갖는 물체들로 인해 흡수되거나 반사하게 된다. 이러한 진동특성으로 인해 수지의 가소화는 공구흔과 고분자 필름이 맞닿는 면과 금형과 필름이 맞닿는 면에서 발생하게 된다. 이때 공구흔에 각인된 패턴을 고분자필름 위에 전사하는 직접성형 공정과 금형에 각인된 패턴을 고분자필름 위에 전사하는 간접성형 공정으로 구분이 가능하다.

직접성형 공정과 간접성형 공정의 성형특성을 비교하기 위하여 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 패턴의 위치에 따라 직접성형 공정(Type 1), 간접성형 공정(Type 2) 그리고 양면성형 공정(Type 3)으로 실험장치를 구성하였다. 성형하중은 14 kgf, 성형시간은 0.6 s 를 기준으로 하여 직접성형 공정과 간접성형 공정의 특성을 비교하였다. 또한 선행연구를 기초로 하여 성형조건에 따른 패턴성형 공정의 성형특성을 고찰하였다. 이때 성형조건은 압축성형 (compression molding)공정과 초음파 성형공정의 유

사성을 기초로 하여, 성형하중과 성형시간을 성형인자로 설정하였으며,<sup>10</sup> Table 1 과 같이 성형하중과 성형시간의 변화를 고려하여 각각의 성형공정의 효율성과 성형특성을 비교 분석하였다.

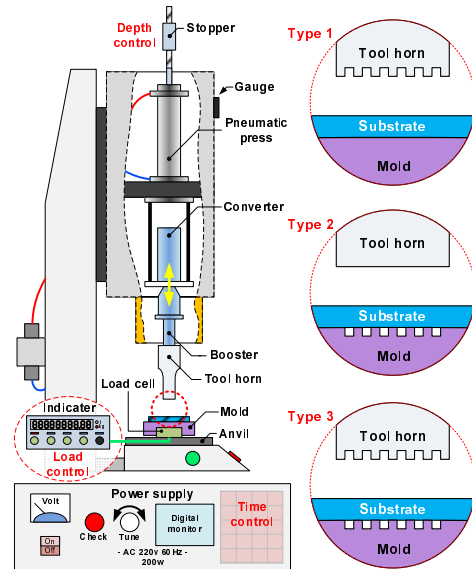


Fig. 3 Configuration of the ultrasonic imprinting system for three different types

Table 1 Experimental conditions for ultrasonic patterning

| Polymer film         | PMMA (thickness: 800 $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|--------------------------------------|
| Embossing load (kgf) | 12 / 14 / 16 (time: 0.6 s)           |
| Embossing time (s)   | 0.5 / 0.6 / 0.7 (load: 14 kgf)       |

### 3. 초음파 전달방향에 따른 전사특성 고찰

#### 3.1 직접성형과 간접성형의 비교

직접성형 공정과 간접성형 공정의 성형특성을 비교하기 위하여 기준 성형하중(14 kgf)과 성형시간(0.6 s)에서 실험을 수행하였다. 소재는 Akema 社의 Altuglas PMMA 필름을 사용하였다. 각각의 경우에 대한 성형특성을 고찰하기 위하여 성형된 패턴을 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하여 비교하였고, 정량적인 비교를 위해 표면조도 측정장비인 Rugosurf 90G<sup>®</sup>를 이용하여 전사된 패턴의 높이를 측정하였다. 또한 성형완료후 공구흔과 금형에 각인된 패턴의 성형잔존물 비교를 위해 광학현미경(Optical microscopy; OM)을 사용하여 관찰

하였다. Fig. 4 에 결과비교를 위한 측정위치를 도시하였는데, 광학현미경 측정부위(OM image region)는 공구흔/금형의 잔존물 발생부위를 의미하며, 주사전자현미경 측정부위(SEM image region)는 성형된 고분자필름 중앙부를 의미한다. 한편 조도측정은 패턴 중앙부를 대상으로 수직(그림 내 화살표 표시방향)으로 이동하며 수행하였다.

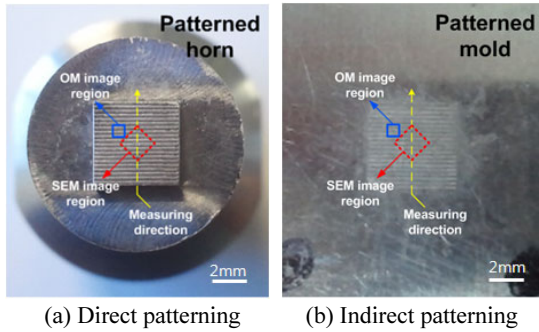


Fig. 4 Descriptions of the measurement locations

Fig. 5 는 직접성형 공정과 간접성형 공정을 통해 성형된 성형품의 중앙부에 대한 주사전자현미경 촬영결과로서, 직접성형 공정이 간접성형 공정에 비해 상대적으로 성형특성이 우수한 것으로 관찰되었다. 표면조도기를 사용한 패턴높이의 측정결과 직접성형 공정은 평균높이가 32.36  $\mu\text{m}$  로 측정되어 96.1 % 성형율을 보인 반면, 간접성형 공정의 경우 24.11  $\mu\text{m}$  의 평균높이를 보여 72.3 %의 성형율을 나타내었다.

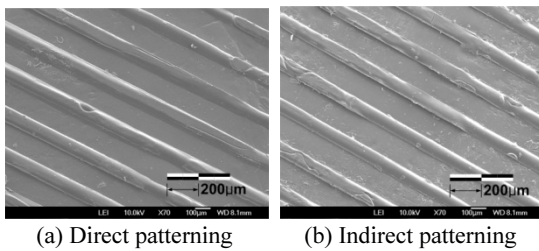


Fig. 5 SEM images of the replicated micro-patterns

성형과정을 반복하다 보면 성형된 고분자필름을 이형하는 과정에서 필름이 완전히 이형되지 못하고 금형의 미세패턴 사이에 잔존물 형태로 존재하는 현상이 관찰되는데, Fig. 6(a)에 간접성형의 경우 금형 미세패턴 사이의 잔존물이 발견된 사진을 도시하였다. 이러한 잔존물은 가압력이 과도하거나

충분한 냉각이 이루어지지 않은 경우 발생할 소지가 있으며, 미세패턴 사이에 잔존물이 존재할 경우 이후 성형공정에서의 전사성에 악영향을 미친다. 반면 공구흔에 미세패턴이 각인된 직접성형의 경우에는 Fig. 6(b)에 도시한 바와 같이 동일위치에서 잔존물이 발견되지 않았는데, 이는 미세진동을 반복하는 소재의 이형특성이 유리하기 때문으로 판단된다.

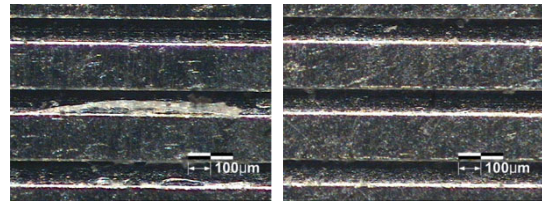


Fig. 6 Photographs of the micro-patterns after replications

3.2 성형하중 변화에 따른 전사특성 비교

앞절에서는 진동의 전달방향에 따라 직접성형 공정과 간접성형 공정으로 구별하여 성형실험을 진행하였다. 본 절에서는 초음파 임프린팅 공정조건 중 성형하중을 증가시켜가며 직접성형 공정과 간접성형 공정에 대해 미세패턴 성형율의 변화를 고찰하였다.

성형조건은 3.1 절에 기술한 바와 같이 성형시간을 0.6 s 로 고정시킨 상태에서 성형하중의 경우 12~16 kgf 까지 2 kgf 씩 증가시켜가며 실험을 수행하였다. Fig. 7 의 (a)~(c)에 각각 성형하중 12, 14, 16 kgf 조건에서의 전사된 패턴의 높이를 직접성형 방식과 간접성형 방식으로 구분하여 도시하였다. 이때 패턴번호(Pattern number)는 성형된 패턴의 위치에 따라 순서대로 나타낸 번호로서, 동일한 실험조건에서 성형된 5 개의 시편에 대한 패턴의 평균높이를 오차막대와 함께 도시하였다.

직접성형 공정의 경우 하중의 증가에 따른 패턴의 평균높이가 각각 31.59, 32.36, 32.64  $\mu\text{m}$  의 값을 보여 하중 증가에 따라 향상되는 경향을 보였으며, 이는 패턴성형율 기준으로 93.7 ~ 96.9%에 해당한다. 또한 패턴간 표준편차도 0.64 ~ 1.35%로 나타나 전체적으로 균일한 패턴성형이 이루어졌음을 알 수 있다. 한편 간접성형 공정의 경우도 하중 증가와 함께 성형성이 증가하는 경향을 보였으며, 12 kgf 일 경우 55.0%, 14 kgf 일 경우 72.4%, 16 kgf 일 경우 94.9%의 성형율을 보였다. 표준편차의 변화

를 살펴보면 12, 14 kgf 일 경우 각각 11.40, 7.12%로 높게 나타난 반면 16 kgf 일 경우 0.83%로 감소하여 패턴성형율이 높아짐에 따라 패턴간의 전사율이 편차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

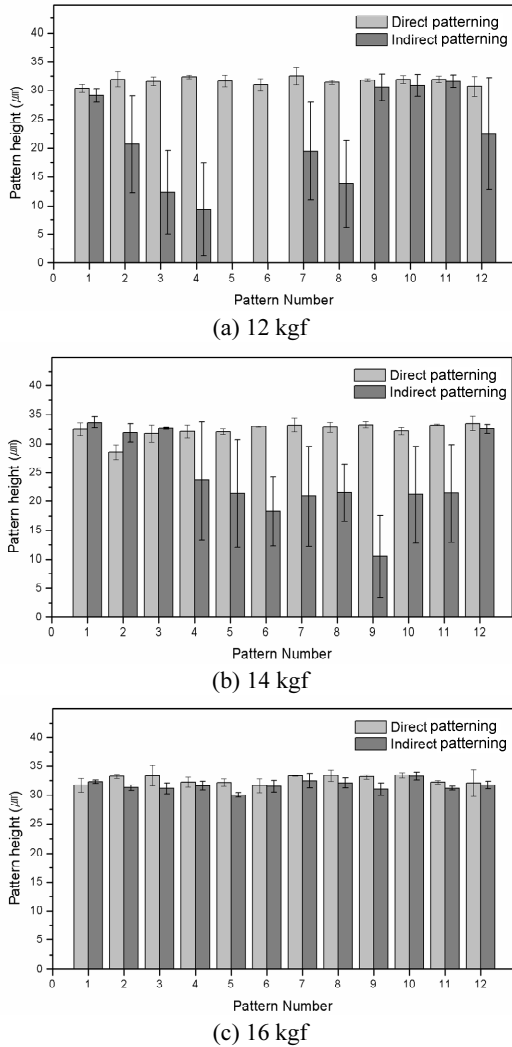


Fig. 7 Average pattern heights for various embossing loads: (a) 12 kgf, (b) 14 kgf, (c) 16 kgf

**3.3 성형시간 변화에 따른 전사특성 비교**

본 절에서는 성형시간의 변화가 미세패턴의 전사특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 성형하중은 14 kgf로 고정된 상태에서 성형시간을 0.5 ~ 0.7 s 까지 0.1 s 간격으로 증가시키며 성형실험을 수행하였다. Fig. 8 의 (a)~(c)에 성형시간별 전사된 패턴의

높이를 직접성형 방식과 간접성형 방식으로 구분하여 비교하였다.

전사된 패턴높이의 평균치를 관찰한 결과 직접성형 공정의 경우는 하중변화시의 결과와 동일하게 평균 95% 이상의 높은 성형특성을 보이며, 성형시간 증가에 따라 평균높이는 32.25, 32.36, 32.28 μm로 측정되었다. 또한 패턴간 표준편차도 0.82~1.35%로 나타나 균일한 패턴성형이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

간접성형 공정의 경우에는 앞절의 결과와 마찬가지로 성형시간의 증가와 함께 패턴의 평균높이

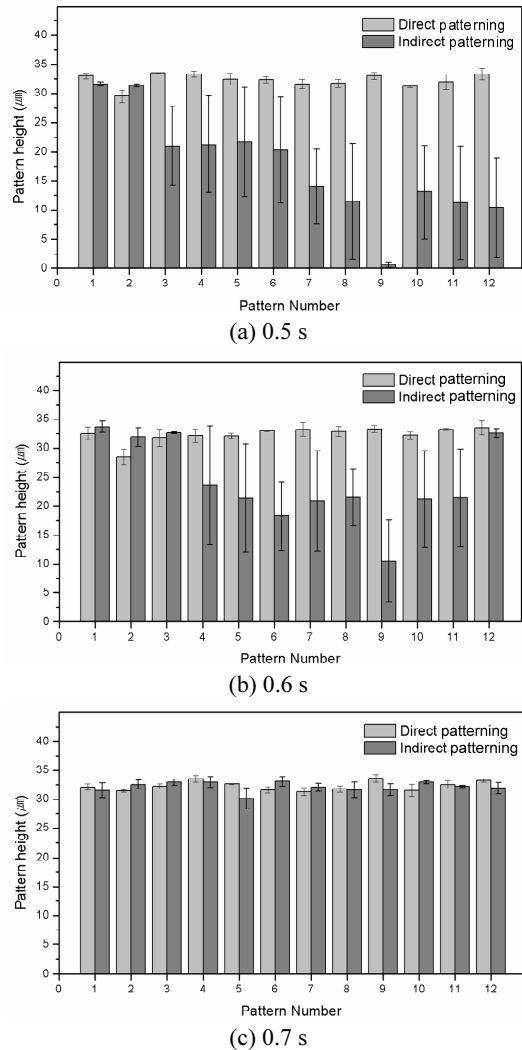


Fig. 8 Average pattern heights for various embossing times: (a) 0.5 s, (b) 0.6 s, (c) 0.7 s

가 17.34  $\mu\text{m}$  (52.1%), 24.11  $\mu\text{m}$  (72.4%), 32.10  $\mu\text{m}$  (96.4%)로 증가함으로써 성형특성이 개선되는 경향을 보였다. 특히 성형시간을 0.7 s 로 설정하였을 때 96.4%의 높은 성형율을 보여 성공적인 패턴복제가 가능함을 확인하였다. 표준편차의 변화를 살펴보면 0.5 s, 0.6 s 일 경우 각각 8.98%와 7.12%로 높게 나타난 반면 0.7 s 일 경우 0.85%로 대폭감소함을 알 수 있다.

### 3.4 성형조건에 따른 전사특성 변화 고찰

성형조건의 변화와 미세패턴 전사특성의 관계를 고찰해본 결과, 직접성형의 경우는 주어진 성형조건 범위 내에서 90% 이상의 패턴 전사성을 보여 미세패턴이 성공적으로 복제됨을 확인하였다. 반면 간접성형의 경우 직접성형에 비해 저조한 성형특성을 보였으나 성형하중과 성형시간의 증가에 따라 성형특성이 개선되는 경향을 확인하였다. 이는 공구흔 패턴의 진동이 직접적으로 전달되어 성형부 표면이 가소화되는 직접성형 방식이 공구흔 표면의 마찰열이 소재 내부로 전달되어 반대쪽의 금형면과 인접한 소재 표면을 가소화시켜야 하는 간접성형 방식에 비해 유리하기 때문으로 분석된다. 또한 간접성형의 경우 성형조건에 따른 패턴전사성의 편차가 크게 나타나(55~95%) 성공적인 패턴성형을 위해서는 성형조건의 면밀한 설정이 요구됨을 알 수 있다.

전술한 결과를 종합할 때 간접성형의 경우 성형하중 증가에 따른 성형율 향상비율(55.0, 72.4, 94.8%)과 성형시간 증가에 따른 향상비율(52.1, 72.4, 96.4%)이 대체적으로 비례하는 것처럼 보일 수 있다. 그러나 Fig. 7 과 8 에서 볼 수 있듯이 해당 성형율이 패턴 전체적으로 고르게 나타나지 않고 패턴위치에 따라 거의 성형이 완료된 부분과 전혀 성형이 이루어지지 않은 부분이 공존하는 형태로 나타남을 알 수 있다(Fig. 7 (a) 및 Fig. 8 (a) 참조). 이러한 경향은 해당 조건에서 초음파 진동에 의한 마찰열로 인해 고분자 소재의 온도가 유리전이온도 이상으로 상승하여 소재가 가소화되어 점도가 저하되고, 이후 주어진 하중에 의해서 금형에 각인된 패턴 내부로 저점도의 소재가 유입되어 성형이 진행되기 때문으로 판단된다.<sup>8</sup>

## 4. 양면패턴 성형공정의 전사특성 고찰

### 4.1 단면패턴과 양면패턴의 전사특성 비교

본 연구에서는 전술한 직접성형과 간접성형의

공정을 복합화하여 공구흔과 금형에 모두 미세패턴이 각인된 상태에서 임프린팅 공정을 수행하여 고분자필름 양면에 패턴을 복제하기 위한 성형실험을 실시하였다. 성형실험은 3.1 절에서 진행한 패턴방향에 따른 성형특성 고찰과 동일한 조건인 성형하중 14 kgf, 성형시간 0.6 s 에서 성형실험을 진행하였다.

Fig. 9 는 양면성형을 실시한 경우의 결과로서 단면성형에 비해 전반적으로 성형특성이 저조한 것으로 나타났다. 고분자필름의 상면(upper side)과 하면(lower side)에 성형된 패턴의 평균높이의 경우 28.84  $\mu\text{m}$ , 14.28  $\mu\text{m}$  로 측정되었는데, 이러한 결과는 3 장에서 기술된 단면성형시 패턴방향에 따른 성형특성과 비교했을 때 상대적으로 전사특성이 저하됨을 알 수 있다. 즉 상면의 경우 동일한 패턴방향인 직접성형 결과(32.36  $\mu\text{m}$ ) 대비 3.52  $\mu\text{m}$  의 높이저하가 발생하였고, 하면의 경우 간접성형 결과(24.11  $\mu\text{m}$ ) 대비 9.83  $\mu\text{m}$  의 높이저하를 보였다. 이러한 결과는 양면성형의 경우 공구흔의 가압과정에서 초음파 진동의 효과와 가압력이 상면과 하면 두 방향으로 분산되기 때문으로 분석된다.

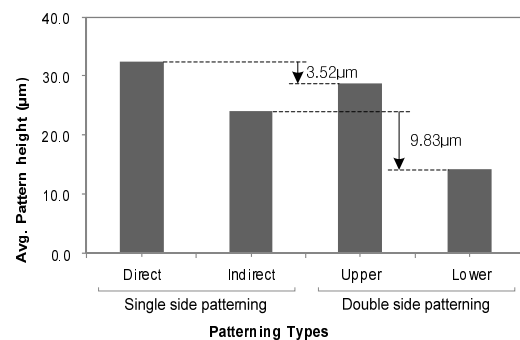


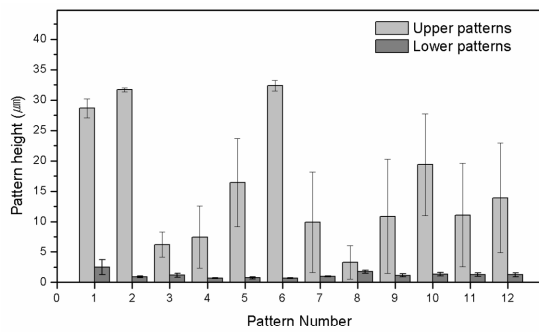
Fig. 9 Average pattern heights for the single-side patterning and the double-side patterning

### 4.2 성형조건에 따른 전사특성 고찰

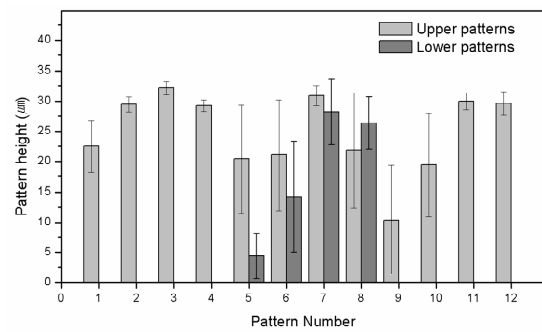
앞절에서 기술한 바와 같이 단면성형에서의 패턴방향에 따른 성형특성과 양면성형 공정에서 상/하면의 성형특성을 비교한 결과 양면성형의 경우가 상대적으로 저조한 성형특성을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 점을 개선하기 위하여 3 장의 접근방법과 유사하게 성형하중과 성형시간의 변화를 통하여 성형성 개선을 시도하였다. 여기서 성형하중과 성형시간의 변화는 Table 1 과 동일하게 설정하였다.

Table 2 Comparison of the measured patterns heights and standard deviations

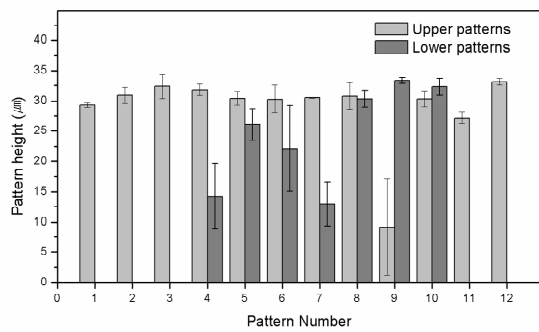
| Patterning types | Avg. Pattern height ( $\mu\text{m}$ ) |        |        |                               |       |       | Standard deviation ( $\mu\text{m}$ ) |        |        |                               |       |       |
|------------------|---------------------------------------|--------|--------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------------------|--------|--------|-------------------------------|-------|-------|
|                  | Embossing load (Time: 0.6 s)          |        |        | Embossing time (Load: 14 kgf) |       |       | Embossing load (Time: 0.6 s)         |        |        | Embossing time (Load: 14 kgf) |       |       |
|                  | 12 kgf                                | 14 kgf | 16 kgf | 0.5 s                         | 0.6 s | 0.7 s | 12 kgf                               | 14 kgf | 16 kgf | 0.5 s                         | 0.6 s | 0.7 s |
| Direct           | 31.59                                 | 32.36  | 32.64  | 32.25                         | 32.36 | 32.28 | 0.64                                 | 1.35   | 0.71   | 1.13                          | 1.35  | 0.82  |
| Indirect         | 18.33                                 | 24.11  | 31.60  | 17.34                         | 24.11 | 32.10 | 11.40                                | 7.12   | 0.83   | 8.98                          | 7.12  | 0.85  |
| Upper            | 15.93                                 | 28.84  | 31.24  | 24.74                         | 28.84 | 31.24 | 10.04                                | 6.39   | 1.05   | 6.52                          | 6.39  | 1.83  |
| Lower            | 1.19                                  | 14.28  | 25.22  | 6.09                          | 14.28 | 31.99 | 0.51                                 | 14.03  | 11.55  | 10.72                         | 14.03 | 0.98  |



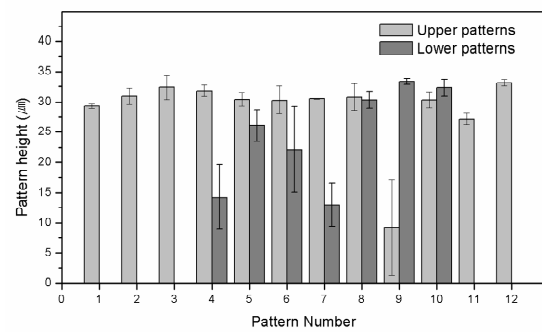
(a) 12 kgf



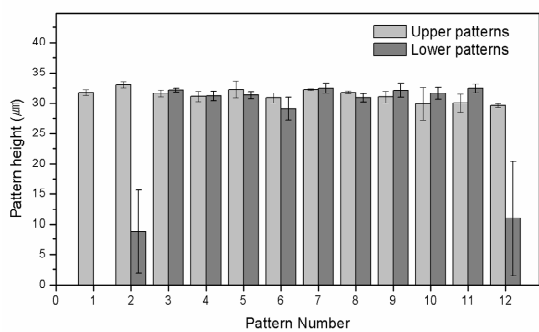
(a) 0.5 s



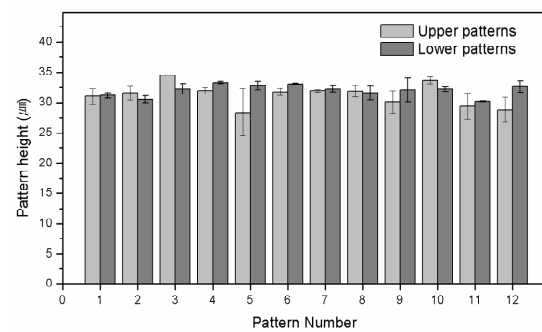
(b) 14 kgf



(b) 0.6 s



(c) 16 kgf



(c) 0.7 s

Fig. 10 Average pattern heights in the double-side patterning for various embossing loads

Fig. 11 Average pattern heights in the double-side patterning for various embossing times

성형조건에 따른 결과를 Table 2 에 비교하였으며, 정성적 비교를 위해 Fig. 10, 11 에 그래프를 추가하였다. Fig. 10 의 (a)~(c)는 각각 성형하중 12 ~ 16 kgf 에서의 성형높이로서 성형하중의 변화에 따라 상면의 패턴은 성형성이 개선되는 경향을 보였다. 반면 하면에서는 성형하중이 12 kgf 인 경우 패턴전사가 거의 이루어지지 않았고, 하중이 16 kgf 로 증가하였을 경우에도 최대 25.22  $\mu\text{m}$  (성형율 75.6%)의 성형높이를 보여 패턴전사가 충분히 이루어지지 않는 것을 확인하였다.

Fig. 11 의 (a)~(c)는 성형시간 0.5 ~ 0.7 s에서의 성형결과로서 성형시간의 변화에 따라 상면과 하면 모두 성형성이 개선되는 경향을 보였다. 이때 성형시간 0.7 s 일 때의 결과를 살펴보면 상면과 하면의 평균 성형높이가 각각 31.24  $\mu\text{m}$ , 31.99  $\mu\text{m}$  로 높은 성형특성을 보였다. 이때 하면에서의 최대 성형율이 95.9%로 나타나 성형하중의 증가시의 결과(하중 16 kgf 인 경우 75.64%)과 비교할 때 양면 성형에서는 성형시간이 성형하중의 변화에 비해 미세패턴의 성형특성에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 초음파 임프린팅을 이용한 미세패턴 성형공정에서 직접성형과 간접성형에 대해 성형하중 및 성형시간의 변화에 따른 미세패턴의 전사특성을 고찰하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 직접성형 공정과 간접성형 공정의 성형특성을 비교한 결과 직접성형 공정의 경우 기준 성형조건(14 kgf, 0.6 s)에서 96.1%의 높은 성형율을 보인 반면 간접성형 공정의 경우 72.3%의 낮은 성형특성을 보였다.

(2) 성형성 개선을 위하여 성형하중과 성형시간을 변화하며 실험을 수행한 결과 직접성형 공정은 최고 96.9%의 패턴 성형율을, 간접성형 공정은 최고 96.3%의 패턴 성형율을 얻을 수 있었다.

(3) 공구흔과 금형에 모두 패턴이 각인된 양면 성형 실험을 수행한 결과 단면성형의 성형특성과 비교할 때 전반적으로 성형특성이 저하되는 경향을 보였으나, 성형시간 증가에 따라 전사성이 향상되어 성형시간 0.7 s 일 경우 양면 모두 90% 이상의 전사특성을 보여 양면성형의 가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Matsuoka, S. I., "Ultrasonic welding of ceramics/metals using inserts," *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 75, No. 1-3, pp. 259-265, 1998.
2. Fernandez, V. I. and Bersee, H. E. N., "Ultrasonic welding of advanced thermoplastic composites: An investigation on energy-directing surfaces," *Adv. Polym. Technol.*, Vol. 29, No. 2, pp. 112-121, 2010.
3. Liu, S. J. and Dung, Y. T., "Hot embossing precise structure onto plastic plates by ultrasonic vibration," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1282-1287, 2005.
4. Mekar, H., Noguchi, T., Goto, H., and Takahashi, M., "Nanoimprint lithography combined with ultrasonic vibration on polycarbonate," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 46, No. 9B, pp. 6355-6362, 2007.
5. Mekar, H. and Takahashi, M., "Ultrasonic nanoimprint on poly(ethylene terephthalate) at room temperature," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 6, pp. 5178-5184, 2008.
6. Schomburg, W. K., Burlage, K., and Gerhardy, C., "Ultrasonic hot embossing," *Micromachines*, Vol. 2, pp. 157-166, 2011.
7. Lin, C. H. and Chen, R., "Effect of mold geometries and imprinted polymer resist thickness on ultrasonic nanoimprint lithography," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, No. 7, pp. 1220-1231, 2007.
8. Seo, Y. S. and Park, K., "Direct patterning of micro-features on a polymer substrate using ultrasonic vibration," *Microsys. Technol.*, DOI: 10.1007/s00542-012-1524-y, 2012.
9. Seo, Y. S. and Park, K., "Finite element analysis of an ultrasonic tool horn for pattern forming," *J. of the KSPE*, Vol. 28, No. 3, pp. 363-369, 2011.
10. Seo, Y. S., Lee, K. Y., and Park, K., "Effect of material flow direction on the replication characteristics of the ultrasonic patterning process," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 2, pp. 119-125, 2012.