

# 초음파 패턴성형을 위한 공구혼의 설계 및 유한요소해석

## Finite Element Analysis of an Ultrasonic Tool Horn for Pattern Forming

서영수<sup>1</sup>, 박근<sup>2</sup>✉  
Young-Soo Seo<sup>1</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 기계설계 자동화공학부 (Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology)  
✉ Corresponding author: kpark@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6358

Manuscript received: 2010.10.20 / Accepted: 2010.12.13

*In this study, a direct pattern forming process on a plastic film using ultrasonic vibration energy is investigated. A tool horn containing micro-patterns is attached to an ultrasonic power supply, and is used to press a plastic film with ultrasonic vibration in order to replicate micro-patterns on the surface of the plastic film. To replicate micro-patterns with high accuracy, the tool horn should be designed to allow only the longitudinal vibration, not the transverse vibration. For this purpose, the design of a tool horn is investigated through finite element analysis, from which the resulting natural frequency of the tool horn can be adjusted in the range of the ultrasonic power supply. The analysis result is then reflected on the optimal design and fabrication of the tool horn. The validity of the developed tool horn is discussed through pattern-forming experiments using the ultrasonic vibration of the developed tool horn.*

Key Words: Ultrasonic Vibration (초음파 진동), Pattern Forming (패턴 성형), Tool Horn (공구혼), Finite Element Analysis (유한요소해석), Modal Analysis (모드해석)

### 1. 서론

초음파(Ultrasonic wave)는 인간의 가청주파수(16~20 kHz)를 넘은 음파를 지칭하며, 산업적으로 소음을 발생시키지 않으면서도 인위적인 가진이 필요한 경우에 사용된다. 대표적인 초음파의 산업적 응용분야는 초음파 세척, 비파괴검사, 영상진단 의료기기 등이 있다. 재료가공 및 성형 측면에서의 초음파 가진 응용사례를 살펴보면 세라믹 등의 난삭재 정밀가공, 다이캐스팅, 정밀단조 등 금속제품의 성형성 향상을 위한 가진 부여 등이 시도되고 있다. 플라스틱 제품의 경우 초음파 가진을 통해 부품을 결합하는 초음파 용착(Ultrasonic welding)이 산업적으로 응용되고 있다. 본 연구에서는

기존의 초음파 용착을 발전시켜 플라스틱 모재에 초음파 진동을 부여하여 표면을 국부적으로 가소화시키고 동시에 가압하여 패턴을 성형하는 직접 성형 공법을 개발하고자 한다.

초음파를 사용한 플라스틱 성형 관련 연구동향을 살펴보면 주로 초음파를 사용하여 플라스틱을 가소화함으로써 사출성형에 간접적으로 응용하는 연구결과가 발표되었다. 또한 사출성형 공정에서 금형의 국부인 위치에 초음파 진동을 가함으로써 표면특성을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다. Michaeli 등<sup>1</sup>은 초음파 진동을 이용하여 플라스틱을 가소화(Plasitification)하는 장치를 개발하였고, 이를 초소형 사출성형품의 성형에 적용하기 위한 기초연구를 수행하였다. Lu 등<sup>2</sup>은 사출성형시 발

생되는 웰드라인(Weld line) 발생부의 강도를 증가시키기 위해 금형 내부에 초음파 진동자를 삽입하여 웰드부 표면특성을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. Saito 등<sup>3</sup>은 초음파 진동을 이용하여 플라스틱을 가소화하여 금형 내부로 주입하는 마이크로 성형시스템 개발에 응용하였다. Yu 등<sup>4</sup>은 초음파 진동을 부과하여 플라스틱 기관 표면에 마이크로 패턴을 전사하여 성형하기 위한 기초 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 열가소성 고분자재료의 표면을 가소화시켜 미세패턴을 성형할 수 있는 성형기술을 개발하고자 한다. 즉 초음파 공구혼(Tool horn) 상에 미세패턴을 가공하여 고분자필름을 가압하는 형태로 성형시스템을 구축하고자 한다. 이때 초음파 진동을 이용한 마이크로 단위의 형상의 고정밀도 성형을 위해서는 공구혼의 횡진동(transverse vibration)을 최소화시킨 상태에서 종진동(longitudinal vibration)만을 이용하여 가진해주어야 한다.<sup>5</sup> 이를 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 원하는 고유진동수 및 진동모드를 갖는 초음파 공구혼의 설계변수를 고찰하고, 해석결과를 반영하여 공구혼을 제작함으로써 미세패턴의 성형에 응용하고자 한다.

2. 초음파 공구혼의 설계 및 해석

2.1 파동방정식을 통한 설계변수 고찰

공구혼은 진동자로부터 나온 작은 진폭을 큰 진폭으로 증폭시키는 역할 및 파동을 집중시킴으로써 가공 효율을 증가시키는 역할을 한다. 이러한 특성은 공구혼 형상에 의해 변화되며, 공구혼의 형상은 일반적으로 단차형(Step type), 원추형(Conical type), 지수 함수형태(Exponential type) 등으로 나눌 수 있다. 상기 여러 형태의 공구혼들은 재질내의 파동전파속도 주기의 1/2 지점, 즉 출력단측에 발생하는 최대 진폭을 이용한다. 본 연구에서는 단차 공구혼을 사용하였으며 전체길이는 식 (1)과 같이 표현된다.<sup>6</sup>

$$l = \frac{c}{2f} \tag{1}$$

여기서  $c$  는 파동속도(Wave speed)로서 식 (2)와 같이 밀도(Density)  $\rho$  와 탄성계수(Elastic modulus)  $E$  의 값에 따라 결정된다.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

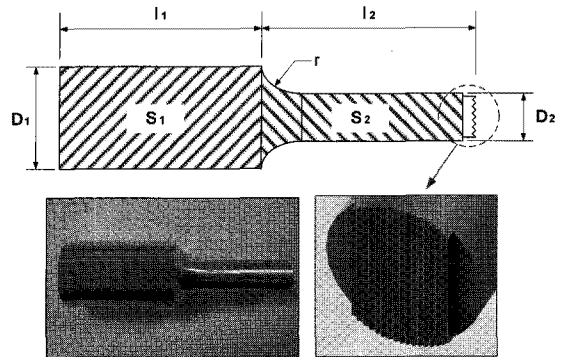


Fig. 1 Configuration of a tool horn with micro-patterns

본 연구에서는 가공의 용이성을 고려하여 단차형 공구혼 끝단에 마이크로패턴을 가공하여 고분자필름 성형용으로 사용하도록 설계하였다. Fig. 1에 단차형 공구혼의 주요 사양을 도시하였다. 단차형 공구혼의 경우 입력단 직경( $D_1$ ), 출력단 직경( $D_2$ ), 입력단 길이( $l_1$ ), 출력단 길이( $l_2$ )의 4 가지 설계변수에 따라 공진특성이 변화된다. 공구혼의 길이 및 직경의 변화, 즉 형상변화에 따른 진동특성의 변화는 다음과 같이 일차원 파동방정식을 통해 표현된다.<sup>7</sup>

$$\rho S(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left( S(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \tag{3}$$

여기서,  $S$  는 공구혼의 단면적,  $u$  는 변위이다. 상기 파동방정식에 식 (2)를 대입하면 식 (4)와 같이 정리된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \tag{4}$$

식 (4) 형태의 방정식 풀이를 위해 변수분리법  $u(x,t) = F(x)G(t)$ 을 적용하였으며, 2 개의 상미분방정식유도를 위해 좌변과 우측을 각각  $x$  와  $t$  에 대한 함수로 식 (5)와 같이 표현하였다.

$$\frac{\ddot{F}_x}{F_x} = \frac{\ddot{G}_t}{c^2 G_t} = -\alpha^2 \tag{5}$$

여기서  $\alpha$ 는 파동상수로 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad (6)$$

단차에서의 곡률을 무시하면 공구흔의 양끝단과 단차면에서의 경계조건은 식 (7)~(10)과 같다.

$$x = 0, \quad \partial u_1 / \partial x = 0 \quad (7)$$

$$x = l_1, \quad u_1 = u_2 \quad (8)$$

$$x = l_1, \quad S_1(\partial u_1 / \partial x) = S_2(\partial u_2 / \partial x) \quad (9)$$

$$x = l, \quad \partial u_2 / \partial x = 0 \quad (10)$$

상기 경계조건을 식 (5)에 적용하면 공구흔의 공진조건은 아래 식과 같이 유도된다.

$$-\frac{\tan \alpha \cdot l_1}{\tan \alpha \cdot l_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (11)$$

여기서 파동상수  $\alpha$ 는 본 연구에서 사용되는 진동자와 공구흔의 재질을 통해 결정된다. 따라서 공구흔의 고유진동수에 영향을 주는 변수를 입력단의 길이( $l_1$ )와 직경( $D_1$ ) 그리고 출력단의 길이( $l_2$ )와 직경( $D_2$ )으로 구분할 수 있다. 즉 식 (1)을 통해 공구흔의 총 길이( $l$ )를 계산하고, 식 (11)을 통해 세부 치수( $l_1, l_2$ )를 결정할 수 있다.

본 실험에 사용되는 공구흔 재질은 초음파 공진특성이 우수한 Al7075-T651 을 사용하였으며, Table 1 에 주요 물성을 도시하였다. 본 연구에서 사용된 초음파 발전기의 기준주파수( $f$ )는 28 kHz 이며, 식 (1)을 통해 공구흔의 총길이는 90.2025 mm 로 계산되었다. 한편 초음파발전기 및 가공물의 치수를 고려하여 입력단의 직경은 28 mm, 출력단

의 직경은 13 mm 로 설정하였으며, 이를 식 (11)에 대입한 결과 입력단 길이는 45.1012 mm 로 계산되었다. 상기 계산결과에 실제 가공상의 편의를 감안하여 총길이는 90.2 mm, 입력단 길이는 45.1 mm 로 설정하였다.

## 2.2 유한요소해석을 통한 고유진동수 확인

앞절에서 이론적인 접근을 통해 얻어진 공구흔 모델의 고유진동수를 판단하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소해석 S/W 인 ANSYS<sup>TM</sup> 을 사용하여 모드해석(Modal analysis)을 수행하였다. Fig. 2 에 모드해석 수행을 위한 단차형 공구흔의 해석모델을 도시하였는데, 단차부에 곡률을 부여하여 응력집중 현상을 완화시킬 수 있도록 하였다. 유한요소 모델은 해석의 신뢰도를 높이기 위해 3 차원 육면체 요소(hexahedral element)를 사용한 정규격자로 구현하였으며, 총 요소 개수는 83,520 개이다. 경계조건은 공구흔은 진동자 및 증폭장치(Booster)와 체결되어 있으나 체결된 부위에서 변위량(진폭)이 동일한 점을 감안하여 Free-Free 형태로 부과하였다.<sup>5</sup> 해석 유효범위는 진동자의 가진주파수를 고려하여 20~35 kHz 로 설정하였다. 모드 추출법은 Block Lanczos 법을 사용하였으며, 모드 차수는 10 개로 충분히 설정하여 범위내에 발생하는 진동모드중 본 실험에 필요한 종진동 모드만을 추출할 수 있도록 하였다.

상기 기술한 모델의 진동해석 결과 Fig. 3 과 같이 4 가지의 진동모드를 추출하였다. 각 진동모드별 특성 및 고유진동수를 Table 2 에 요약하였다. 주요 모드를 살펴보면 횡진동(transverse vibration), 종진동(Longitudinal vibration), 비틀림 모드(twisting mode)의 다양한 모드가 발견되었다. 이중 본 연구에서 필요로 하는 모드형상인 종진동에 해당하는 차수는 3 차 모드로서, 추후 이루어지는 해석에서는 해당 모드를 중점적으로 관찰하였다. 해석결과 종진동일 때의 고유진동수 값은 29.621 kHz 로서 기존 설계 목표인 28 kHz 와는 1.621 kHz 차이를 보인다. 여기서 발생한 고유진동수 값의 오차는 단차부에 형성된 곡률, 진동자와 공구흔 체결을 위한 측면절단부, 가공부에 형성된 미세패턴과 같이 기본 단차형 형상에서 추가된 형상변화 요소로 인하여 발생된 것으로 판단된다.

Table 1 Mechanical property of Al7075-T651

Mechanical property	Value
Material Density (kg/m <sup>3</sup> )	2810
Elastic modulus (GPa)	71.7
Poisson's ratio	0.34
Yield stress (MPa)	503

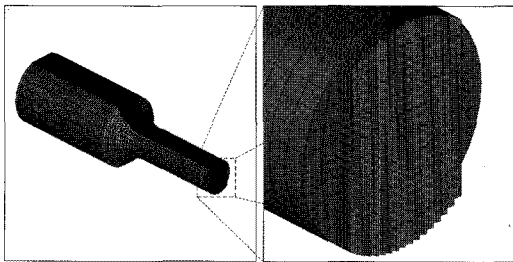


Fig. 2 FE model of a step horn with micro-patterns

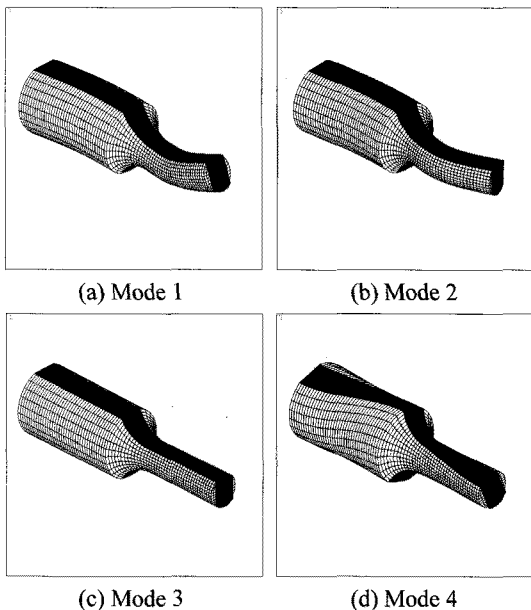


Fig. 3 Vibration mode shapes for the tool horn

Table 2 Results of the modal analysis of the tool horn

Mode	Description	Natural frequency
1	Transverse (vertical)	24.574 kHz
2	Transverse (horizontal)	24.866 kHz
3	Longitudinal	29.621 kHz
4	Twisting	32.742 kHz

### 2.3 고유진동수 오차개선을 위한 설계변경

본 연구에서는 앞절에서 언급한 형상변화에 의한 공진주파수의 오차원인을 분석하고 이를 개선하기 위한 설계변경을 수행하고자 한다. 즉 2.1 절에서 이론적인 접근을 통해 계산한 주요 설계변수는 공구혼의 형상을 이상적인 단차형으로 가정한 상태에서 계산된 것으로 실제 곡률, 측면절단부, 패턴성형부 등의 형상에 의한 고유진동수의 변화를 고려하여 최종 설계를 수행해주어야 한다. 본

연구에서는 이를 위해 입력단 길이를 45.1 mm 로 고정한 상태에서 출력단 길이를 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 전체 길이를 90 mm 에서 95 mm 까지 1 mm 간격으로 변화시켜가며 수행하였다.

Fig. 4 에 전체길이 변화에 따른 고유진동수의 변화를 도시하였는데, 길이 증가에 따라 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 4 의 그래프를 기준으로 선형 회귀식을 계산하면 식 (12)와 같다.

$$f_r = -0.5076l + 75.387 \text{ (kHz)} \quad (12)$$

여기서  $f_r$ 은 종진동 모드(3 차 모드)에 해당하는 공진주파수를 의미하며, 상기 회귀식에서 결정계수 ( $R^2$ )값은 0.9995 로 계산되었다. 식 (12)를 사용하여 공진주파수 28 kHz 를 만족하는 공구혼의 길이는 93.355 mm 로 계산되었다. 상기 치수를 기준으로 가공성을 고려하여 총 길이를 93.4 mm 로 결정하였고, 이때의 고유진동수는 식 (12)를 사용하여 계산하면 27.977 kHz 로 본 연구에서 사용한 초음파 발전기의 공진주파수 범위(27.5~28.2 kHz) 내에 존재함을 확인할 수 있었다. Table 3 에 공구혼의 최종 치수를 요약하였다.

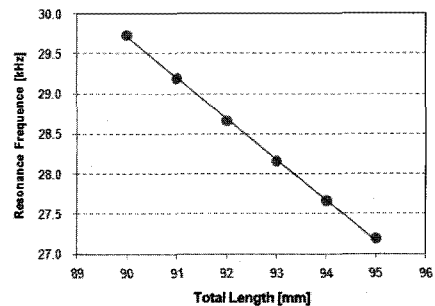


Fig. 4 Change of the natural frequency with an increase of the tool-horn length

Table 3 Specification of the tool horn with micro-patterns

Specification	Value
Total length (mm)	93.4
Shank length (mm)	45.1
Input diameter (mm)	28.0
Output diameter (mm)	13.0
Corner radius (mm)	14.0
Pattern pitch (μm)	500
Pattern depth (μm)	160

### 3. 초음파 공구흔 제작 및 실험

#### 3.1 공구흔 제작 및 고유진동수 측정

앞절에서 계산된 설계사양을 기준으로 공구흔을 제작하여 고유진동수를 측정하였다. 측정은 진동자, 부스터, 공구흔을 모두 체결한 상태에서 진행되었으며, Fig. 5 와 같이 공구흔의 가공부에 부착된 가속도 센서를 통하여 측정된 가속도 데이터를 주파수 측정기 DI-2200(분해능: 0.005 kHz)를 사용하여 측정하였다. 측정된 고유진동수는 27.565 kHz 로 해석값인 27.977 kHz 와는 0.412 kHz 의 오차(상대오차 1.49%)가 발생하는 것을 알 수 있었다. 상기 오차값을 감안하여 해석결과로부터 얻어진 식 (12)의 회귀식을 다음과 같이 보정하였다.

$$\bar{f}_r = -0.5076l + 74.975 \text{ (kHz)} \quad (13)$$

식 (13)을 사용하여 고유진동수 28 kHz 를 얻기 위한 최종 길이는 92.543 mm 로 계산되었다. 가공성을 고려하여 해당 치수를 92.5 mm 로 최종 선정하여 공구흔을 가공하였으며, 가공된 공구흔의 고유진동수를 측정한 결과 27.995 kHz 로 측정되어 원하는 진동특성을 얻을 수 있었다.

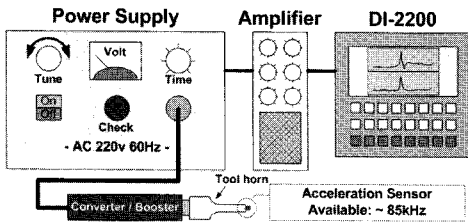


Fig. 5 Configuration of a natural frequency measurement unit for a tool horn

#### 3.2 초음파 공구흔을 이용한 성형성 실험

앞절에서 기술된 설계과정을 거쳐 제작된 공구흔을 사용하여 Fig. 6 과 같이 고분자 필름 표면에 미세패턴을 성형할 수 있는 초음파 간이성형 장비를 구현하였다. 소형 프레스 장비에 초음파 공구흔을 장착하여 고분자 필름과 공구흔의 미세패턴이 압착된 상태에서 초음파 진동을 부과함으로써 미세패턴을 필름표면에 전사시킬 수 있도록 장치를 고안하였다. 소재는 두께 0.5 mm 의 투명 Polycarbonate 필름을 사용하였다.

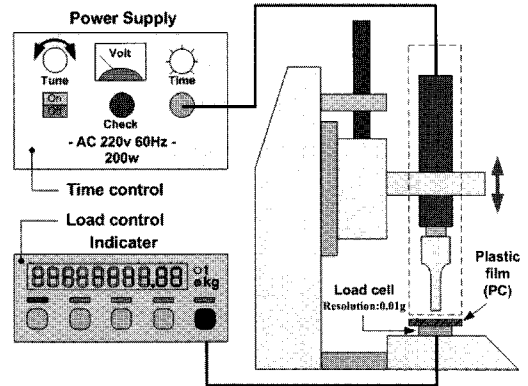


Fig. 6 Configuration of a direct pattern forming apparatus using ultrasonic vibration

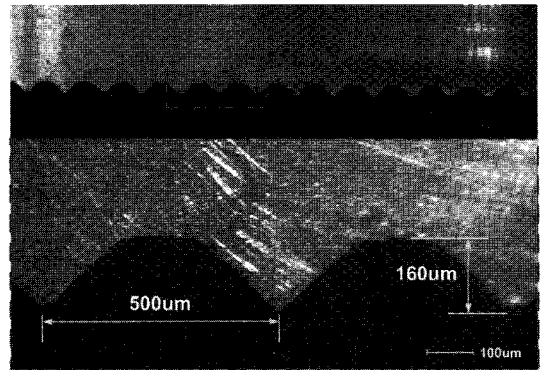
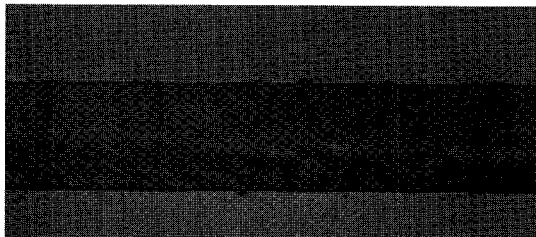


Fig. 7 Detailed view of micro-patterns on the tool horn

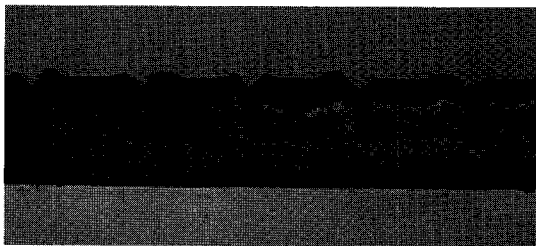
Fig. 7 에 미세패턴이 가공된 공구흔 형상을 도시하였다. 공구흔 표면에 사다리꼴 형태의 미세패턴을 총 16 개 가공하였으며, 패턴의 피치(P)는 500 µm, 깊이(H)는 160 µm 로 가공하였다. 초음파 직접성형 실험은 상온에서 수행하였고, 가압시 하중은 11 kgf 로 설정하였다. 특히 초음파 직접성형 공정이 초음파의 미세진동에 의한 공구흔 표면과 플라스틱 소재와의 경계면에 마찰열을 유발시켜 소재 표면을 국부적으로 연화시킴으로써 특성을 감안하여 가진시간을 변화시켜가며 실험을 수행하여 패턴의 전사성을 비교하였다.

Fig. 8 에 초음파 가진시간에 따른 성형부의 단면을 비교하였다. 초음파 가진을 1 초간 실시한 경우(Fig. 8 (a) 참조) 패턴이 거의 성형되지 않은 점을 확인할 수 있으며, 가진시간의 증가에 따라 미세패턴의 전사성이 점차적으로 향상됨을 알 수 있다. Fig. 8 의 (d)에 도시된 가진시간 2.5 초의 경우 16 개의 미세패턴의 가공높이 평균값이 156.8 µm

로서 공구흔 미세패턴의 깊이 160  $\mu\text{m}$  와 비교했을 때 98% 이상의 패턴전사율을 보임을 확인할 수 있었다. Fig. 9 에 가진시간에 따른 전사성을 그래프로 도시하였다. 상기 결과로부터 본 연구를 통해 제작된 공구흔이 원하는 진동특성을 보여 초음파 직접성형에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.



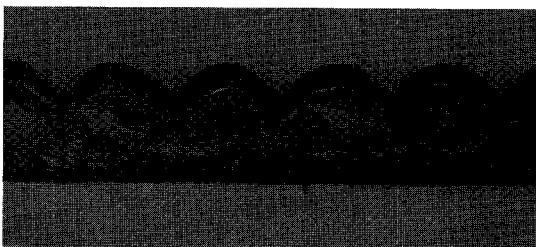
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Sectional views of the replicated micro-patterns with a variation of vibration time: (a) 1.0 s, (b) 1.5 s, (c) 2.0 s, and (d) 2.5 s

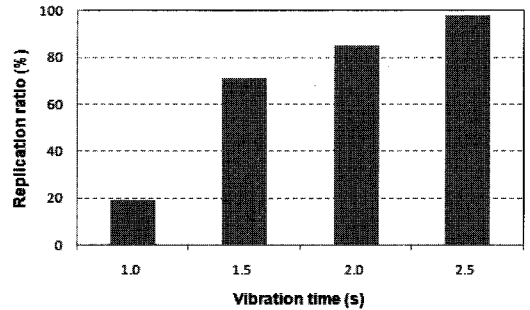


Fig. 9 Configuration of the replication ratio with a variation of vibration time

#### 4. 결론

본 연구에서는 초음파 진동을 이용한 열가소성 고분자재료 표면의 패턴성형기법에 대한 기초연구를 수행하였으며, 특히 원하는 진동특성 구현을 위한 초음파 공구흔의 설계에 관해 연구하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 이론적인 접근방법과 유한요소해석을 병행하여 초음파 가진기의 기준주파수(28 kHz)와 공진을 발생시킬 수 있는 초음파 공구흔의 형상설계에 관한 연구를 수행하였다.

2) 공구흔의 길이변화에 따른 유한요소해석을 실시하였고, 해석 결과의 회귀분석을 통해 공구흔의 길이 1 mm 증가시 고유진동수가 507.6 Hz 만큼 감소하는 것으로 계산되었다. 상기 회귀식을 통해 고유진동수 28 kHz 를 얻기 위한 공구흔의 설계변수(최종길이 93.4 mm)를 결정하였다.

3) 제작된 공구흔의 고유진동수 측정 결과 해석결과와 1.49%의 오차를 보였다. 상기 오차량을 감안하여 회귀식을 수정한 후 재적용하여 공구흔 길이를 92.5 mm 로 수정 제작하였으며, 측정 결과 고유진동수가 27.995 kHz 로 측정되어 원하는 진동특성을 얻을 수 있었다.

4) 제작된 공구흔을 통해 고분자필름 표면에 미세패턴 성형실험을 실시하였다. 성형시 가진시간의 증가에 따라 패턴의 전사성이 향상됨을 알 수 있었고, 가진시간 2.5 초 적용시 98%의 전사율을 보임을 확인할 수 있었다.

상기 연구결과를 토대로 향후 다양한 형태의 제품에 대해 초음파 직접성형 적용을 위한 공구흔

형상설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가서는 성형공정의 최적화를 통해 기존의 사출 성형 등 고분자 성형공정을 대체할 수 있는 패턴 성형 기법으로 발전할 수 있을 것으로 전망된다.

cylinder horn for ultrasonic welding,” J. Kor. Weld. Join. Soc., Vol. 27, No. 4, pp. 404-410, 2009.

## 후 기

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

## 참고문헌

1. Michaeli, W., Spennemann, A. and Gartner, R., “New plastification concepts for micro injection molding,” *Microsys. Technol.*, Vol. 8, No. 1, pp. 55-57, 2002.
2. Lu, C., Yu, X. and Guo, S., “The mechanism of ultrasonic improvement of weld line strength of injection molded polystyrene and polystyrene/polyethylene blend parts,” *J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys.*, Vol. 44, No. 10, pp. 1520-1530, 2006.
3. Saito, T., Kawaguchi, T. and Satoh, I., “Micro molding system for thermoplastic materials using strong ultrasonic wave,” *Proc. Asian Workshop Polym. Process.*, pp. 165-166, 2008.
4. Yu, H. W., Lee, C. H., Ko, J. S., Shin, B. and Rho, C. H., “Polymer replication using ultrasonic vibration,” *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. A*, Vol. 32, No. 5, pp. 419-423, 2008.
5. Seah, K. H. W., Wong, Y. S. and Lee, L. C., “Design of tool holders for ultrasonic machining using FEM,” *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 37, No. 1-4, pp. 801-816, 1993.
6. Amin, S. G., Ahmed, M. H. M. and Youssef, H. A., “Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis,” *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 55, No. 3-4, pp. 254-260, 1995.
7. Park, B. G., Kim, S. C., Moon, H. H., Lee, C. H. and Kang, Y. S., “The polishing characteristics and development of ultrasonic polishing system through horn analysis,” *Trans. Kor. Soc. Mach. Tool Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 53-60, 2004.
8. Kim, S. R., Lee, J. H. and Yoo, C. D., “Design of