

## 폴리머 원형 튜브 대상 미세 패턴 정수압 성형

임성한<sup>1,#</sup>

### Micro Pattern Forming on Polymeric Circular Tubes by Hydrostatic Pressing

S. H. Rhim

(Received October 14, 2014 / Revised October 28, 2014 / Accepted October 30, 2014)

#### Abstract

The objective of the current investigation is to establish techniques in micro pattern forming operations of polymeric circular tubes by using hydrostatic pressing. This method was developed and successfully applied to the micro pattern forming on polymeric plates. The key idea of the new technique is to pressurize multiple vacuum-packed substrate-mold stacks above the glass transition temperature of the polymeric substrates. The new process is thought to be a promising micro-pattern fabrication technique for two reasons; first, (hydro-) isostatic pressing ensures a uniform micro-pattern replicating condition regardless of the substrate area and thickness. Second, multiple curved substrates can be patterned at the same time. With the prototype forming machine for the new process, micro prismatic array patterns, 25um in height and 90 degrees in apex angle, were successfully made on the PMMA circular tubes with diameters of 5~40mm. These results show that this process can be also used in the micro pattern forming process on curved plates such as circular tube.

**Key Words** : Micro Pattern Forming, Hydrostatic Pressing, Polymeric Circular Tube

### 1. 서 론

미세 패턴을 고분자 소재 표면에 성형하기 위한 여러 공정 방법 중 핫 엠보싱(hot embossing) 기술은 피성형체인 폴리머를 성형이 가능한 유리전이온도 ( $T_g$ , transition temperature) 이상으로 가열한 상태에서 프레스로 압착하여 패턴을 전사하고 성형압력을 유지한 채 냉각하여 피성형체를 경화시킨 후, 압력을 제거하고 몰드를 분리하여 제품에 성형한다(Fig. 1)[2~4]. 핫엠보싱 기술은 공정 구현이 단순하면서도 뛰어난 패턴 형상 전사성을 보인다. 지금까지 진행되었던 많은 연구에서 수십 마이크로(micron)에서 서브 마이크로(sub-micron) 크기의 형상까지 성공적인 패

턴 전사 결과들이 보고되고 있다[3]. 그러나 대상부품이 대면적화되고, 표면에 전사되는 패턴이 미세·복잡화되면서 핫엠보싱 공정에서 요구되는 프레스 압력 및 온도에 대한 균일도가 증가하여 기술 구현이 어려워지고[4], 공정 비용이 급격히 상승하고 있다. 이를 개선하기 위하여 핫엠보싱이 아닌 UV임프린트 공정인 roll-to-flat 방식이나 roll-to-roll 방식[5]이 제안되어 유용하게 사용되고 있으나, 피성형체가 두꺼울 경우 적용하기 어려운 단점이 있다.

정수압 성형법(Hydrostatic Pressing)[1]은 기존의 핫엠보싱과 같이 높은 전사성을 확보하면서, 이전 공정에서 구현하기 힘들었던 대면적 패턴링을 피성형체의 두께에 관계없이 한 번에 여러 개를 성형할

1. 한국기술교육대학교 기계공학부

# Corresponding Author: School of mechanical engineering, Korea Univ. of Technology and Education, E-mail: shrhim@koreatech.ac.kr

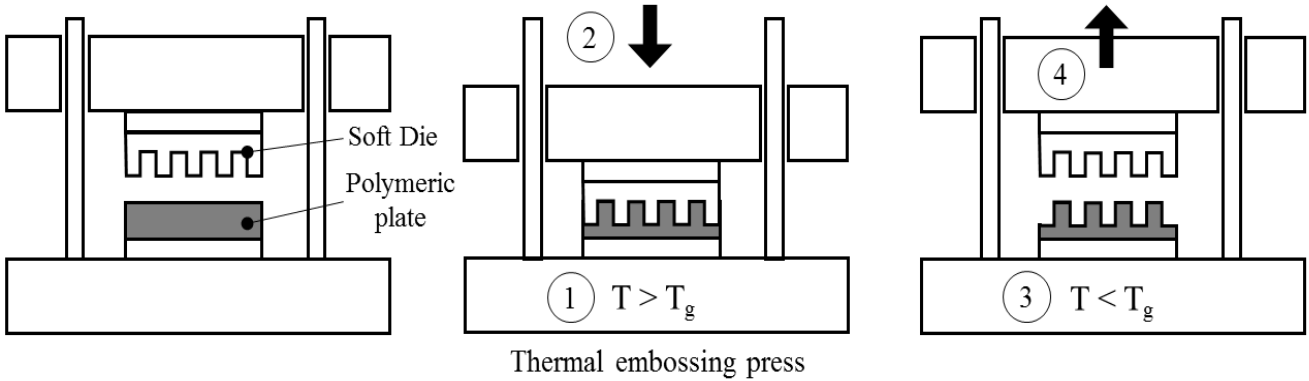


Fig. 1 Schematic of thermal embossing pressing process (Step 1: Heating, Step 2: Embossing, Step 3: Cooling, Step 4: Demolding)

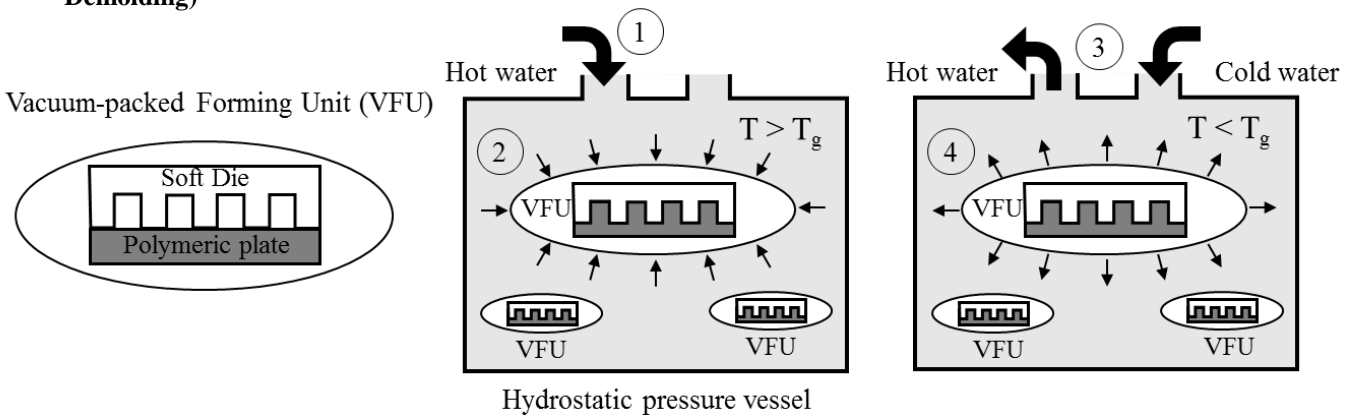


Fig. 2 Schematic of thermal hydrostatic pressing process (Step 1: Heating, Step 2: Hydrostatic Pressing, Step 3: Cooling, Step 4: Depressurizing)

수 있는 공정이다. 정수압 성형법은 몰드와 폴리머 소재의 피성형재를 개별 진공 포장한(Fig.2) 다수의 진공성형팩(VFU, Vacuum-packed Forming Unit)을 압력 용기에 넣고 고온의 유체를 이용하여 용기 내의 온도를 소재의 유리전이온도 이상으로 승온시켜 계획된 성형온도에 도달하면 압력용기 내에 성형압력을 일정시간 동안 유지시켜 소재를 성형하는 기술이다. 성형 후 상온의 유체를 공급하여 압력용기내의 온도를 유리전이온도 이하로 감온하여 소재를 경화시켜 제품을 얻어낸다. 제안된 성형 공정은 핫엠보싱 공정과는 다르게 기계적 프레스로 가압하지 않고 정수압(hydrostatic pressure)을 이용하여 소재를 성형한다. 이는 기존의 핫엠보싱 공정이 공정 사이클 당 단일 기관만을 생산할 수 있다는 점에서 볼 때, 제안된 공정은 한번에 여러 개의 기관을 생산할 수 있는 장점을 갖는다.

기존의 연구[1]에서는 정수압 성형을 위한 테스트용 시스템을 개발하였으며, 이를 활용하여 265×

172×0.7mm 크기의 PMMA평판에 50um 크기의 미세 프리즘 어레이의 패턴을 성공적으로 성형하였다.

본 연구에서는 정수압 성형법을 활용하여, 평판 형태가 아닌 곡면 형태의 폴리머 소재에도 미세 패턴을 전사할 수 있는 연구를 수행하였으며, 그 결과 원형 튜브 폴리머 소재를 대상으로 튜브 한쪽 면과 양쪽 면(안쪽과 바깥쪽)에 패턴을 성형할 수 있는 방법을 제안하게 되었다.

## 2. 미세패턴 정수압 성형

### 2.1 정수압 성형 시스템

정수압 성형 시스템은 1개의 압력탱크(pressure vessel)와 2개의 유체탱크(본 연구에서는 물을 압력 및 온도 제어용 유체로 사용함)로 구성되었다(Fig. 3~4). 압력탱크는 물과 압축공기를 이용하여 승온, 승압되며 압력탱크의 직경은 560mm, 깊이는 530mm로

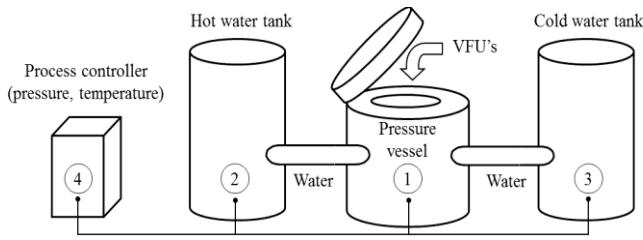


Fig. 3 Hydrostatic pressing system

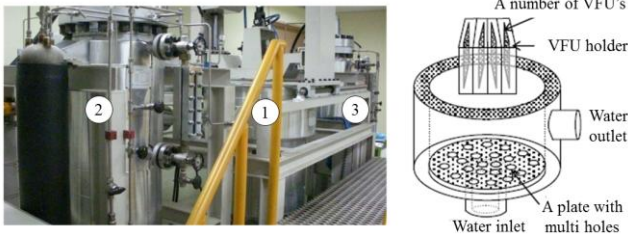


Fig. 4 Picture of system and inside of the pressure vessel

제작되었다. 압력용기 소재는 600MPa급의 ASTM A266 Grade 4 소재가 사용되었으며, 두께는 성형압력을 고려하여 30mm 두께로 제작되었다. 압력 용기는 유체탱크로부터 물을 순환시킬 수 있게 주입구(inlet)와 유출구(outlet)를 통하여 각각의 유체탱크와 연결되어 있다. 압력탱크의 주입구 부에는 여러 개의 홀이 뚫려 있는 타공판을 설치하여 압력탱크 내 유체 대류가 원활하게 이루어져 온도와 압력 등이 균일해지도록 제작하였다.

고온 유체탱크(hot water tank)는 전기열선을 이용하여 최대 200°C까지 유체 온도를 높일 수 있도록 설계되었으며, 순환펌프를 이용하여 고온유체를 압력용기의 유체와 순환시켜 고온 유체탱크-순환펌프-압

력용기의 주입구-압력용기의 유출구-고온 유체탱크의 순으로 이동시키게 된다. 이 때 시간 당 온도 상승비는 2°C/min 정도이다. 고온 유체탱크와 저온 유체탱크의 직경은 330mm, 높이는 1,500mm로 압력용기와 내부부피는 같아지도록 고안되었다. 두 유체탱크의 소재는 515MPa 정도의 인장응력을 가지는 ASTM A53 B를 선택하였고, 두께는 21.4mm로 제작되었다. 성형 이후 압력용기의 냉각 시에는 저온 유체탱크의 저온(상온)유체를 이용하여 승온시와 같은 방법으로 순환펌프를 통해 감온을 시키게 된다. 공정제어기(process controller)는 각각 유체탱크의 압력 및 온도를 조절하며, 각 탱크 내의 열전대와 압력게이지(pressure gauge)를 통해 압력용기의 내압과 온도를 측정하게 된다.

### 2.2 미세 패턴 성형을 위한 진공성형팩

정수압 성형의 특성상, 성형을 위해서 폴리머 피성형재는 몰드와 함께 진공 포장되어야 한다. Fig. 5(a)는 기존 연구[1]와 같이 평판형 소재를 성형하는데 사용되는 진공포장 방법이다. 패턴 성형을 위한 몰드(soft die)와 피성형재가 같이 적층되며, 몰드와 피성형재가 휘지 않도록 유리판을 위와 아래에 같이 쌓게 된다. 원형튜브 표면에 패턴 성형을 하기 위해서는 두 가지 포장 방법이 적용될 수 있다. 튜브 내부나 외부 한 면만을 성형하기 위해서는 Fig. 5(b)와 같이 인서트 다이(insert die)와 몰드(inner soft mold), 피성형재 순으로 포장한 후 진공포장을 한다. 이 때, 인서트 다이는 몰드와 피성형재가 가압 성형 중 변형되지 않도록 하는 역할을 한다. 인서트 다이가 없을 경우, 원형 튜브 자체의 형상 변화를 유발 하고, 이로 인해

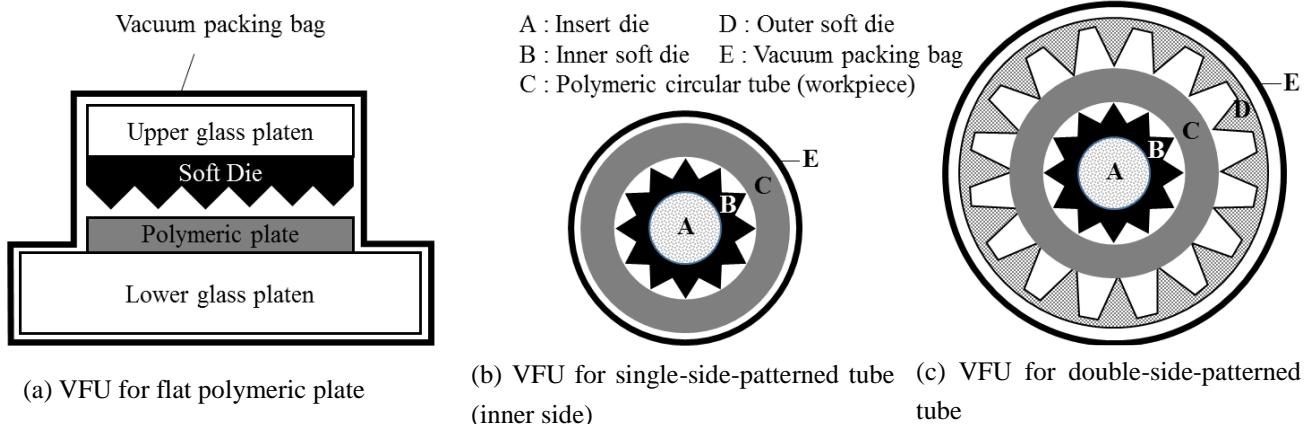


Fig. 5 Types of vacuum-packed forming unit (VFU) for polymeric flat plates and circular tubes

패턴 성형이 제대로 이루어지지 않게 된다.

Fig. 5(c)와 같이 원형튜브 내부와 외부 표면에 패턴을 동시 성형하기 위해서는 Fig. 5(b)와 같은 단일 표면 패턴성형 진공포장 바깥쪽에 패턴을 성형하기 위한 몰드(outer soft die)를 추가한 후 진공상태로 포장하면 된다.

### 3. 원형튜브 표면 대상 미세 패턴 제작

#### 3.1 원형튜브 표면성형을 위한 VFU 설계

성형소재(피성형재)는 PMMA로 압출가공된 직경 40mm, 길이 50mm, 두께 2mm의 원형튜브를 사용하였다. 몰드는 LCD 백라이트에 널리 사용되는 프리즘 시트(BEF, 3M社)를 사용하였다. 프리즘 시트의 피치(pitch) 간격은 50um이고 높이(혹은 깊이)는 25um이다. 진공성형 포장팩은 본 공정에서 계획한 성형온도인 120℃에서 연화가 발생하지 않는 나일론(nylon)소재를 사용하였다. 일반적으로 나일론의 연화온도는 176℃로 알려져 있다.

원형튜브에 미세패턴을 성공적으로 전사하기 위해서는 정수압이 작용하는 진공성형팩(VFU) 바깥쪽에 대응할 수 있는 내부압력 발생이 필요하며, 이를 위해 인서트 다이 소재가 적절하게 선택되어야 한다. 인서트 다이 소재의 탄성계수(Young's modulus)가 성형성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 인서트 다이의 소재를 플라스틱인(plasticine), 고형 실리콘 고무(HCR), SUS(stainless steel)로 달리 적용하여 성형 평가를 수행하였다. 이 때 사용된 소재의 탄성계수는 각각 70MPa, 1.8GPa, 200GPa이다.

성형 평가 결과(Fig. 6), 플라스틱인의 경우 튜브 길이 방향으로 패턴 충전율(filling ratio)이 10% 미만(패턴 높이 기준)으로 전사성이 매우 낮았다. 이 때 충전율은 Fig. 6과 같이  $(W-W_1)/W$ 로 계산되며, W는 성형된 패턴의 아래변 너비(50um)를 W1은 윗변의 너비로 정의되며, 몰드의 패턴이 그대로 전사될 경우 W1은 0이 되어 충전율은 1이 된다. HCR의 경우, 튜브 길이 방향으로 양끝단 0.5mm부위에서만 충전율이 80% 미만이었고, 중간 부분은 100% 충전이 되었다. 이는 정수압 성형 중 HCR이 반경 방향으로는 적게 변형하나 튜브 길이 방향으로는 변형이 발생되었기 때문으로 판단된다. SUS의 경우, 원형튜브 축방향의 최외곽 일부를 제외하고는 패턴 성형이 매우 잘 이루어짐을 Fig. 7에서 확인할 수 있었다.

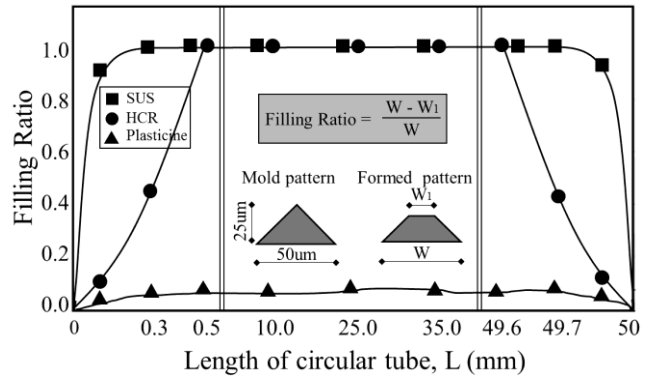


Fig. 6 Filling ratio of formed patterns of workpiece

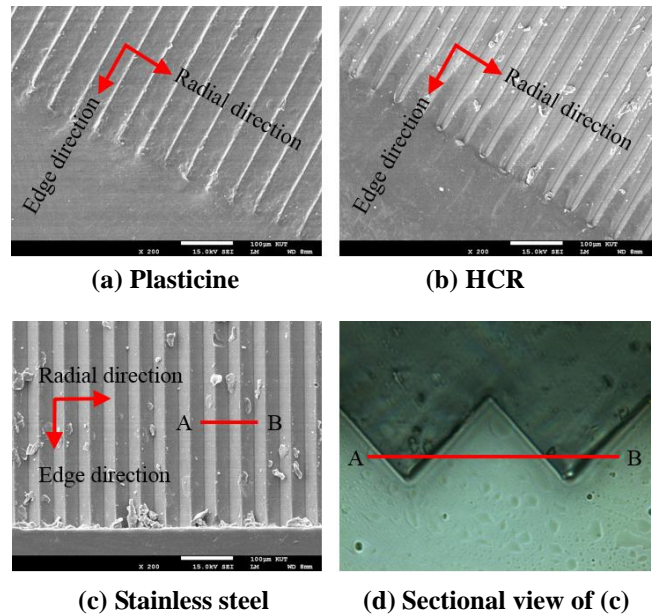


Fig. 7 Formed micro pattern on polymeric circular tube surface with various insert dies

#### 3.2 공정 조건

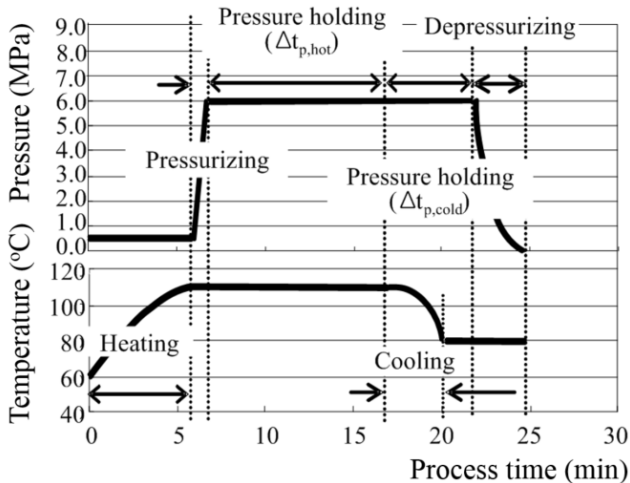
Table 1은 본 공정에서 사용한 성형조건이다. 성형온도는 110℃로 설정하였으며, 성형압력(Pe)은 60bar로 진행하였다. 성형온도(110℃)에서 성형압력(Pe)을 유지하는 시간이 10분이며, 성형압력을 유지하면서 온도를 Tc로 감온하는 시간이 3분 등 전체 제안된 공정의 총 공정시간은 약 25분으로 제어되었다.

Fig. 8은 실험 중 가해진 공정조건(압력, 온도) 프로파일로, 소재물성(Tg)에 따라 온도 변수가 설계되었으며, 압력과 성형시간 변수는 시행착오에 의해 결정되었다.

**Table 1 Hydrostatic process condition**

T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)
160	40	25	110	80

T<sub>1</sub> : initial temperature of water in heating vessel,  
 T<sub>2</sub> : initial temperature of water in main pressure vessel,  
 T<sub>3</sub> : initial temperature of water in cooling vessel,  
 T<sub>e</sub>: hydrostatic pressing temperature,  
 T<sub>c</sub> : cooling temperature,



**Fig. 8 Process (pressure, temperature) condition**

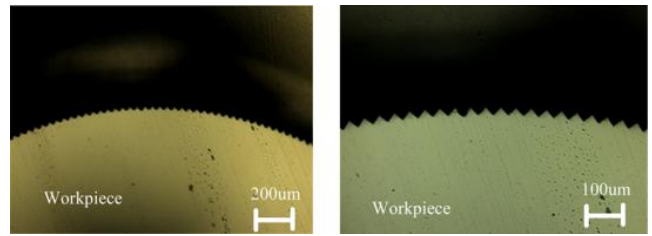
**4. 실험 결과**

원형튜브 표면 상의 미세패턴 정수압 성형 실험 결과, SUS를 인서트 다이로 사용한 경우 Fig. 9와 같이 패턴이 성공적으로 전사되었다.

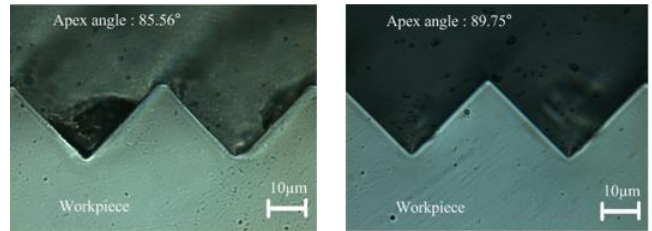
PMMA 원형튜브 표면에 패턴을 성형할 때, 외부 표면 곡률(직경의 역수)에 따라 성형된 패턴 형상이 변함을 확인할 수 있었다.

곡률이 증가함(직경이 감소함)에 따라 정점각(apex angle)이 작아진다. Fig.10과 같이 직경이 5mm일 때 정점각은 85.56°이고 40mm일 때는 89.75°로 몰드 패턴의 정점각 90°에 근접함을 확인할 수 있다 (Fig.11).

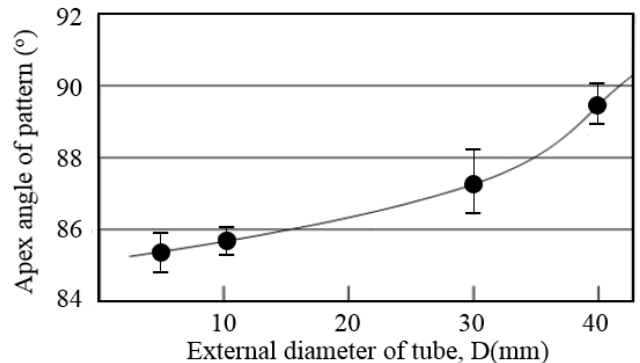
또한, 직경의 증가에 따라 성형된 패턴의 높이도 증가하는 것을 확인하였다(Fig.12). 결과적으로 직경이 증가함에 따라 패턴 전사 특성이 좋아짐을 확인할 수 있다. 이런 현상은 진공성형팩(VFU)에 함께 포장된 몰드가 평평한 형태에 프리즘 패턴이 인가된 형태이어서, 이를 튜브 피성형체에 구부려 포장



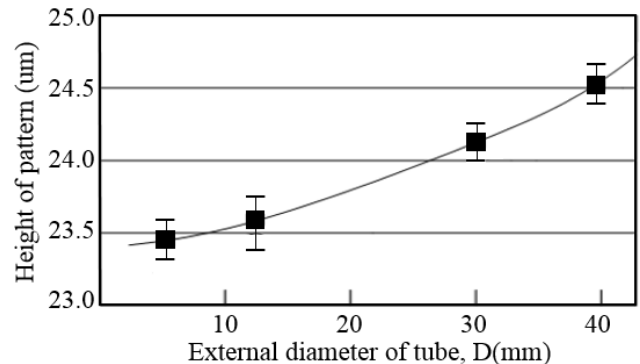
**Fig. 9 Formed patterns of workpiece (circular tube)**



(a) Formed patterns (D=5mm) (b) Formed patterns (40mm)  
**Fig.10 Apex angle of formed patterns on workpiece**



**Fig.11 Apex angle of patterns on workpiece**



**Fig.12 Height of patterns on workpiece**

하면서(Fig.13) 프리즘 패턴이 변화되어 발생한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 패턴 형상(높이 25µm, 밑변 50µm)인 경우, 바깥직경이 40mm 이상일 때 평판 형태의 몰드를 튜브 성형에 사용하여도



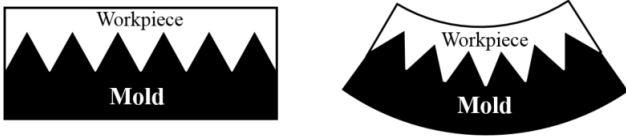


Fig.13 Mechanism of pattern shape change

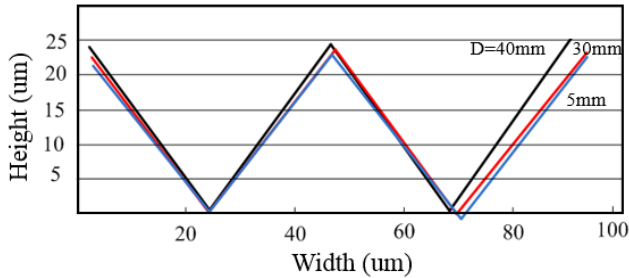


Fig.14 Change of pattern shape after forming process

문제가 없음을 확인할 수 있다(Fig.14).

## 5. 결론

본 논문에서는 정수압 성형법을 활용하여, 기존 평판 형태의 폴리머 소재 대상이 아닌 곡면 형태의 폴리머 소재에 미세 패턴을 전사할 수 있는 연구를 수행하였으며, 그 결과 원형 튜브 폴리머 소재를 대상으로 튜브 한쪽 면과 양쪽 면(안쪽과 바깥쪽)에 패턴을 성형할 수 있는 개념을 제안하였다.

(1) 곡면 형태의 폴리머 소재를 정수압 성형할 수 있는 진공포장팩(VFU)의 개념을 제안하였으며, 이를 활용하여 폴리머 튜브 한쪽 면(외부 표면)에 패턴을 성형할 수 있었다.

(2) 진공포장팩(VFU)에 사용되는 인서트 다이의 소재 물성(탄성계수)에 따른 패턴 성형성을 평가하였고, 탄성계수가 증가함에 따라 패턴 성형성이 향상됨을 확인하였다.

(3) 제작된 피성형재 형상과 치수 및 진공포장팩 구성에 따른 정수압 성형 공정 조건을 도출하였으며, 총 성형시간 25분에 수십 개의 팩을 동시 성형할 수 있었다. 성형시스템의 개선에 따라 수백~수천

개의 제품을 1시간 이내의 공정 시간에 동시 성형할 수 있을 것으로 기대된다.

(4) 다른 직경을 갖는 폴리머 튜브를 대상으로 패턴성형을 수행했으며, 실험 결과 직경이 작을수록 곡률의 증가로 인해 패턴 형상 치수 오차가 커짐을 확인하였다. 그러나, 직경이 40mm인 경우, 정점각은 몰드(90°) 대비 89.75°, 패턴 높이는 몰드(25um) 대비 24.5um로 치수오차는 각각 0.3%와 0.2%가 발생하였다. 이는 5mm 직경일 때의 치수 오차 4.9%와 6.8%에 비해 정밀한 성형 결과였다.

새로 제안된 기술의 적용한계(패턴 형상 등)에 대한 추가 연구와 이를 개선할 수 있는 진공포장팩 기술 및 공정변수 최적화 연구를 통해 튜브형태의 도광판을 제작하여 디스플레이 분야에 적용하거나, 임의 형상을 갖는 곡면 구조체(scaffold) 내부와 외부에 원하는 패턴을 성형할 수 있을 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] B. Y. Joo, S. H. Rhim, S. I. Oh., 2010, Micropattern Forming of Polymeric Plate by Hydrostatic Pressing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 87~92.
- [2] S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, 1995, Imprint of Sub-25nm Vias and Trenches in Polymers, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67, No. 21, pp. 3114~3116.
- [3] S. C. Oh, B. J. Bae, K. Y. Yang, M. H. Kwon, H. Lee, 2011, Fabrication of Aluminum Nano-Scale Structures using Direct-embossing with a Nickel Template, *Met. Mater. Int.*, Vol. 17, No. 5, pp. 771~775.
- [4] J. H. Chang, S. Y. Yang, 2003, Gas Pressurized Hot Embossing for Transcription of Micro-features, *Microsyst. Technol.* Vol. 10, No. 1, pp. 76~80.
- [5] J. J. Lee, H. H. Park, K. B. Choi, G. H. Kim, H. J. Lim, 2014, Fabrication of Hybrid Structures Using UV Roll-typed Liquid Transfer Imprint Lithography for Large Areas, *Micronelec. Eng.*, Vol. 127, pp. 72~76.