

인젝션 몰딩 기술을 이용한 마이크로 구조물 성형

제태진*, 신보성*(한국기계연구원), 정석원**, 조진우**, 박순섭**(전자부품연구원)

Micro Structure Fabrication Using Injection Molding Method

T.J. Je, and B.S. Shin (KIMM), S.S. Park, S.W. Chung, J.W. Cho (KETI)

Abstract

Micro cell structures with high aspect ratio were fabricated by injection molding method. The mold inserts had dimension 1.9cm×8.3cm composed of a lot of micro posts and were fabricated by LIGA process. The size of the micro posts was 157 μ m×157 μ m×500 μ m and the gaps between two adjacent posts were 50 μ m. Using polymethylmethacrylate (PMMA) injection molding was performed. The key experimental variables were temperature, pressure, and time. By controlling these, good shaped micro cell structures with 50 μ m in wall thickness and 500 μ m in depth were obtained. In order to understand micro molding mechanism, shape changes of molded PMMA were studied with experimental variables. And the durability of mold insert was investigated, too. The results show that the most important factor in molding processes was the mold temperature that is closely related to the filling of the melt into the micro cavity. And the holding time before cooling showed a great effect on the quality of molded PMMA.

Key Words : Micro structure molding, Micro post array, Injection molding, LIGA mold, High aspect ratio

1. 서론

최근의 마이크로 성형기술은 마이크로 구조물의 요구 형상과 성형정밀도 수준에 맞게 시스템의 정밀도와 성능, 공정 등을 개선하거나 새로이 제작하여 사용하는 형태로 진행되고 있다. 대표적인 성형법으로는 기존의 사출성형방식과 이를 이용한 리액션성형, 사출-압축복합성형 등이 있고, 프레스성형을 기본으로 하는 트랜스퍼 성

형 및 핫 엠보싱, 또 스탬핑 등과 함께 프린트 성형을 기본으로 하는 프린팅, 레프리카 몰딩, 주조방식을 이용한 마이크로캐스팅 등의 성형기술이 있다[1].

이러한 미세 성형기술을 이용한 응용제품 예로는 미세 패턴을 성형하는 것(채널, 도파로), 미소 형상 부품을 성형하는 것(기어, 렌즈), 단일 미소 구조물을 성형하는 것(펌프, 모터), 고세장비의 다중 미세 구조물 어레이를 성형하는 것(PZT센서, 필터 등)등이 대표적이다[2-4].

* 한국기계연구원 정밀가공그룹

** 전자부품연구원 마이크로머신연구센터

마이크로 형상 부품의 제조에서 가장 난점으로 취급 되는 것이 Fig. 1과 같은 고 세장비의 다중 미세 구조물 제품과 복합 형상의 초소형 부품 성형기술이다. 특히 고 세장비 미세 다중구조물 금형을 이용한 미세 구조물 사출성형에서는 수십 μm 이내의 좁은 틈새로 수지를 유동 시키는 문제, 사출압력, 속도, 온도 등에 의한 금형 구조물 손상, 제품의 변형 및 파손 등 여러 가지 문제에 의해 성형이 불가능한 경우도 자주 발생한다.

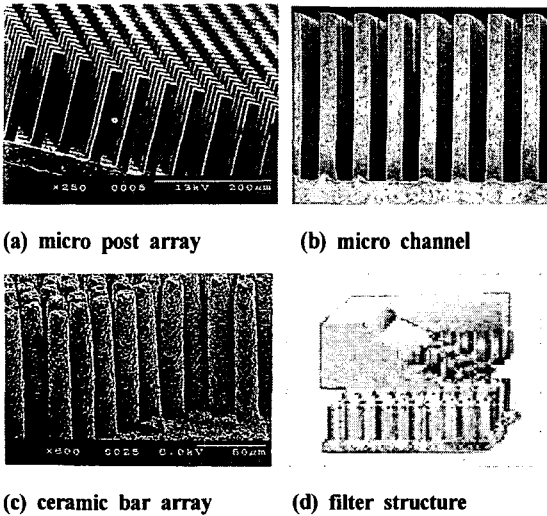


Fig. 1 Micro molding structures with high aspect ratio

본 연구에서는 고 세장비 미세 구조물 사출성형 공정 기술 확립을 목표로 LIGA 공정에 의한 마이크로 사각 각주 구조물 금형을 제작하고, 성형시스템을 구성하여 셀 사이즈 $157 \times 157 \times 500 \mu\text{m}$, 벽두께 $50 \mu\text{m}$ 의 다중 미세 셀 구조물을 성형하고자 하였다.

제작된 마이크로 셀은 마이크로 유체분석기 등에 직접 활용가능하고, 마이크로 세라믹 센서 구조물 제작을 위한 희생 금형으로도 사용할 수 있다. 또한 이의 성형 기술을 응용하여 통신용 커플러, 광 도파로 등의 미세 패턴 성형에도 폭넓게 활용될 수 있다.

2. LIGA 공정에 의한 미세 각주 삽입 금형 제작

미세 구조물 성형을 위한 삽입 금형은 LIGA 공정으로 제작되었다. Fig. 2(a)는 삽입 금형을 위에서 본 개략도로서 전체 외각 치수는 $19.222 \times 83.182 \text{mm}^2$, (약 37,000 각주)이고, 내부를 구성하고

있는 단위 미세 각주 구조물은 Fig. 2(b)와 같은 형상 치수를 가지고 있다.

사출성형으로 제작되는 제품은 Fig. 2의 반대형 상인 미세 셀 형태가 될 것이며 이때 격벽 구조물의 치수는 수지의 수축을 고려하지 않는다면 벽두께 $50 \mu\text{m}$ 에 높이 $500 \mu\text{m}$ 으로서 세장비 1:10의 구조물이 된다.

Fig. 3에는 LIGA 공정을 통하여 제작된 실험용 Ni 삽입 금형의 전체형상(a)과 다중 미세 각주 구조물이 배열된 금형 내부의 형상을 확대(b)하여 나타내었다.

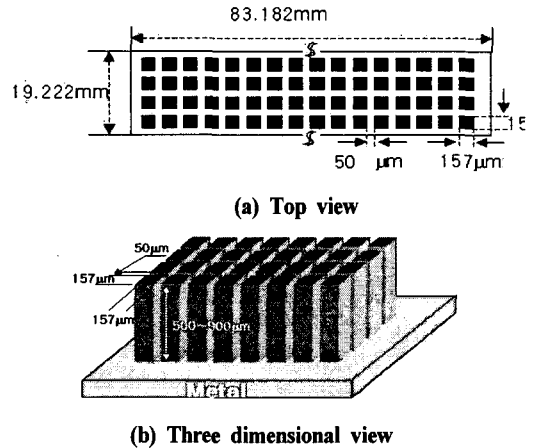
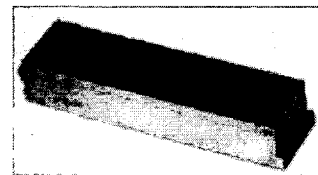
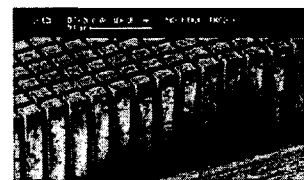


Fig. 2 Dimension of mold insert



(a) Ni mold insert



(b) magnification of (a)

Fig. 3 A mold insert fabricated by LIGA process

3. 실험용 성형장치 및 성형공정

3.1 사출성형 시스템

Fig. 4에 본 실험에 사용된 사출성형장치의 구성 개략도를 나타내었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 구성도에 따라 본 연구에서 사용된 실제 시스템을 보여주고 있다.

Table 1에 시스템의 개략적 특성을 나타내었다. 성형 시스템은 형체력 10톤, 사출용량 10cc급의 초소형 사출성형기로서 사출실린더의 교환에 의해 열 가소성 수지 및 열 경화성 수지를 한 대의 성형 시스템에서 성형할 수 있다. 본 실험에서는 PMMA 수지를 사용하므로 가소성 사출실린더를 사용하였다. 또 본 실험은 고중형비 미세 구조물의 성형인 점을 고려하여 진공 금형 사용을 위한 진공설비를 설치하였고, 예비 실험에 의해 금형 냉각 시간이 중요한 요소임을 확인하고 이를 위한 자동 공기냉각장치를 부착하였다.

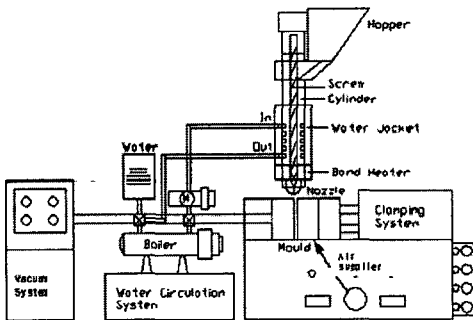


Fig. 4 Schematic of injection molding system

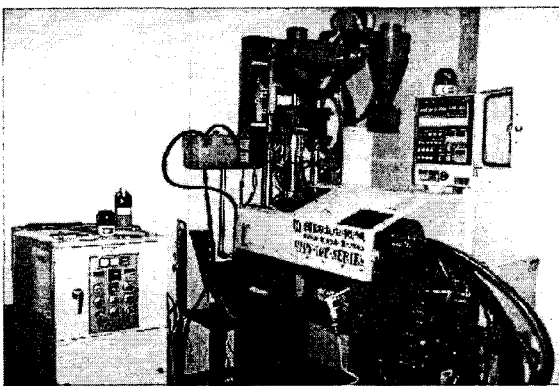


Fig. 5 Small size injection molding system

Table 1. Specifications of injection molding system

-형체결력	: 10 ton
-최대사출용량	: 10 cc
-최대사출압력	: 1800 kgf/cm ² (회로압 140)
-사용금형형식	: 사이드게이트 주입 금형
-금형가열	: 플레이트 히터 사용
-금형냉각	: 자동 에어 공급 방식
-진공시스템	: 760mmHg
-온수/온유 가열장치	: 가소성/경화성전환

3.2 사출성형용 금형

성형 실험을 위해 제작된 전체 금형의 모습은 Fig. 6과 같다. 특징은 금형의 파팅 라인을 통한 수지 주입방식으로서 고정 금형 측에만 런너와 게이트가 설치되어 있다. 형 내 진공 성형을 위하여 금형의 캐비티 부는 고온 실리카 고무에 의해 실링되어 있다.

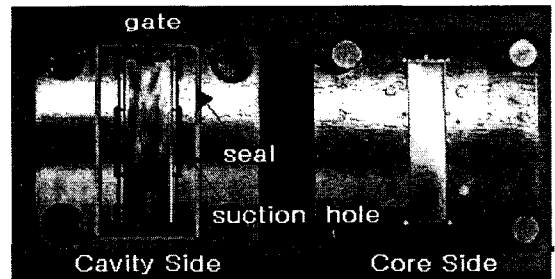


Fig. 6 A disassembled mold base

3.3. 성형공정 확립

Fig. 7에 본 실험에 적용된 성형공정을 공정순서대로 모식도와 실제 실험사진을 통해 나타내었다. 전체공정은 일반 사출성형과 유사하지만 특이한 공정이 다소 있다. 금형을 닫고 진공상태에서 사출하고 충전하여 몇 초간의 보압을 유지하는 공정까지는 일반성형과 유사하다. 그러나 일반 PMMA 사출성형시보다 금형 온도를 높게 하고 금형 내에서의 제품 고화 시간, 형 열림 후 공기에 의한 냉각공정 등은 본 공정에서만 적용되는 특이한 공정이다. 수많은 실험결과 사출압력, 사출속도 등의 기본조건과 더불어 이들 온도조절공정조건이 고 세장비 구조물 성형의 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

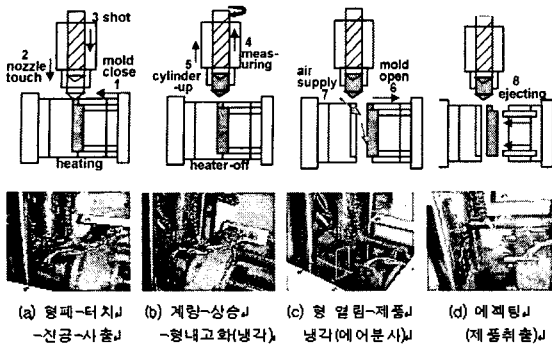


Fig. 7 Injection molding process

4. 사출성형 조건확립 및 시제품 성형결과

Table 2에 본 실험을 통하여 확립된 적정사출성형조건을 나타내었다. 이 성형조건은 다소의 변동폭을 갖기 때문에 적정조건으로 표현하였다. 본 실험을 통하여 고세장비 미세 구조물 성형조건 설정에서 가장 중요한 요소는 수지 용융 온도, 금형 온도, 사출압력, 사출속도, 냉각시간 및 냉각온도 등인 것으로 밝혀졌다.

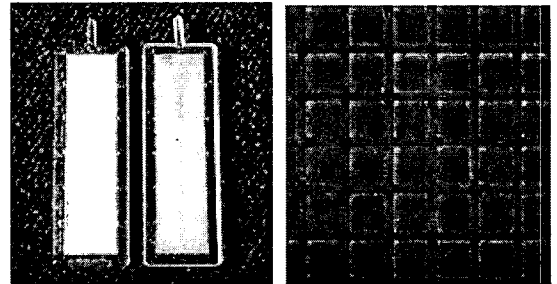
Table 2 Injection molding conditions

실린더 상/하 (°C)	노즐 (°C)	금형 (°C)	사출속도 유량 (ℓ/min)	사출압 (kg/cm ²)/ 사출시간 (sec)	보압 (kg/cm ²)/ 유지시간 (sec)	형내 고화 시간 (sec)	제품 공냉 시간 (sec)
170 /220	230	120	26	53/4	46/16	150	80

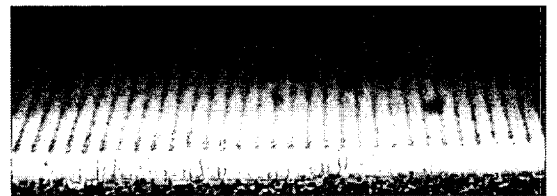
Fig. 8에 미세 각주 구조물 금형(19.222×83.182mm)을 이용하여 제작한 성형품의 형상을 나타내었다. Fig. 8(a)는 성형된 전체 형상을 나타내며, Fig. 8(b)는 뒷면의 확대 형상을, Fig. 8(c) 및 (d)는 단면의 형상 및 이의 확대 사진을 보여주고 있다. 최종 성형품 두께는 마이크로 셀의 깊이 600 μ m을 포함하여 총 1.8mm 이다. 셀의 크기는 가로세로 157×157 μ m, 높이 600 μ m이며, 성형된 벽의 두께는 50 μ m, 총 형성된 셀의 수는 약 37,000여 개다. 성형표면의 고찰에서 세장비 12의 미세 격벽을 타고 들어간 수지가 완전히 삽입 금형 바닥에 도착하여 구조물을 완성하였음을 볼 수 있다.

실제 미소구조물의 사출성형에서 이와 같은 미세 격

벽 형상의 고 세장비를 갖는 사출성형기술은 매우 어려운 것으로 알려져 있다.



(a) molded products (b) surface morphology



(c)cross section



(d) cross section large scale view

Fig. 8 Photographs of molded PMMA

본 실험에서 초기 성형품 들은 Table 2의 성형조건에서 사출속도유량 17.5 ℓ/min, 형내 고화 시간 350sec, 제품 공냉 시간 150sec 정도에서 만들어 졌다. 그러나 이것은 사이클 타임(500초)이 너무 길어 생산성에 문제가 있었다. 이에 따라 부단한 노력 결과 Table 2와 같이 단축된 사이클 타임(230초)으로도 원활한 성형을 하게 되었다.

5. 성형 특성 및 문제점 분석

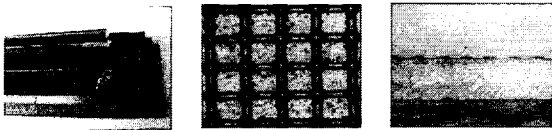
본 성형품은 금형 캐비티 설계 시에 코어부인 미세 구조물 성형부를 기준으로 상하, 좌우에 각각 약 5mm

정도의 여유공간을 두었고, 두께 방향으로 약 1.2mm (총제품 두께 1.8mm)의 여유를 주었다. 따라서 실제 성형품은 이러한 여유공간을 포함하여 성형된다. 이러한 금형 캐비티 내에서의 수지유통, 압력전달, 온도변화 등의 성형현상은 미세 구조물 성형에서 매우 중요한 요소가 되므로 이에 대한 기초 실험적 조사연구를 수행하였다.

5.1 일반적 성형조건 적용시의 문제점

일반적인 PMMA 수지의 사출성형조건은 Table 2의 조건과는 다소 다르다. 수지의 용융 온도는 210°C, 금형 온도는 60°C, 제품 냉각시간 20초, 사출속도(유량기준)는 60 l/min 정도이다. 이와 같은 일반조건으로 본 구조물 성형 실험을 수행한 결과 매우 많은 문제점이 발견되었다.

Fig. 9는 본 실험을 통해 얻은 대표적 성형 문제점의 예를 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 성형품이 금형에 부착된 상태에서 미세 벽면에서 유입된 수지가 냉각되면서 금형 구조물을 붙잡아 제품 취출이 안된 형태이다. 이는 고 중황비 구조물 성형 시 가장 유의해야할 문제로서 금형과 수지의 접촉표면적 과대, 사출압력, 냉각온도 및 시간의 영향이 크다. Fig. 9(b)는 성형품의 윗면을, 9(c)는 성형품의 단면을 나타낸 것이다. 완전성형이 되면 측면에서 본 구조물의 높이가 500 μ m이 되어야 하나 실험결과는 24~30 μ m 정도에 불과하다. 수십 회의 실험에서도 이러한 현상은 계속되었고 금형만 파손되었다.



(a) Adhesion of mold & product (b) Upper view of product (c) Side view of product

Fig. 9 Trouble examples of molding parts

미세 격벽 사이로 강제로 수지를 주입하기 위하여 70kgf/cm² 까지 사출압력을 상승시킨 결과 Fig. 10과 같은 미세 금형 구조물의 파손현상이 발생되었다. 맨 좌측 그림은 금형 표면에 수지가 부착되어 있고 금형 구조물이 밀려 있는 모습이며, 다음은 이것이 진전되어 구조물 금형이 파열되는 모습을 보여 준다. 마지막 그림은 금형 코너로 구조물이 밀려 모인 형상이다. 이러한 결과는 미세 구조물 성형 시 틈새 유통을 위해 사출압력을 높이는

것은 안되며, 수지의 용융 온도와 금형 온도를 높이고, 적절한 사출속도를 선정하는 것이 필요함을 보여주고 있다. 특히 금형 온도가 낮으면 수지의 유동성에 방해가 생겨 많은 문제점을 일으키므로 수지 용융 온도와 금형 온도를 다소 높이는 대책이 필요하였다. 결과적으로 일반적인 PMMA 수지 성형조건으로는 고 세장비의 미세 구조물 성형은 불가능하였으며 금형 파손, 미성형, 에젝팅 등의 문제만 발생하므로 Table 2와 같은 새로운 성형조건 및 공정의 확립이 필요하였다. 이러한 결과는 미세 구조물 성형 시 틈새 유통을 위해 사출압력을 높이는 것은 안되며, 수지의 용융 온도와 금형 온도를 높이고, 적절한 사출속도를 선정하는 것이 필요함을 나타낸다. 특히 금형 온도가 낮으면 수지의 유동성에 방해가 생겨 많은 문제점을 일으키므로 수지 용융 온도와 금형 온도를 다소 높이는 대책이 필요하였다. 결과적으로 일반적인 PMMA 수지 성형조건으로는 고 세장비의 미세 구조물 성형은 불가능하였으며 금형 파손, 미성형, 에젝팅 등의 문제만 발생하므로 Table 2와 같은 새로운 성형조건 및 공정의 확립이 필요하였다.

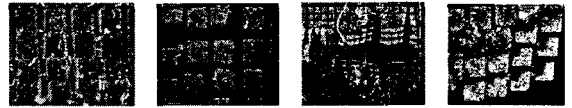


Fig. 10 Examples of damaged mold inserts

5.2 충전량 및 사출속도 영향

캐비티 내에서의 수지 유통상태 분석을 위하여 사출량 변화(Fig. 11) 및 사출속도 변화(Fig. 12)에 의한 short-shot 성형실험을 하였다.

Fig. 11은 기본 성형조건은 Table 2를 적용하고 충전되는 수지의 양만을 총 5.3g에서 약 1g까지 줄여가며 성형한 것이다. 좌측의 완전 충전에서부터 점차적으로 사출량이 줄어드는 것을 볼 수 있고, 구조물이 없는 가장자리 쪽으로 수지가 먼저 유동되는 것을 알 수 있다. 또한 수지 충전량이 부족하면 미세 구조물의 틈새로 수지 유통이 되지 않아 미성형이 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 12는 Table 2의 성형조건에서 사출속도(유량으로 제어)를 17.6 l/min에서 7 l/min까지, 약 2 l/min정도씩 줄여가며 성형한 것이다. Fig. 9와 비교하여 코어부 구조물은 잘 성형되고 있으나, 중간 제품(유량 11 l/min)에서 우측으로 보는 것과 같이 제품이 금형 구조물 틈새에 박히는 현상과 웰드 라인 형성 등으로 제품 취출이 되지 않는 매우 곤란한 문제가 발생하였다. 이는 사출속도가 부족하면 먼저 충전된 수지가 금형 내의 중간지점

에서 냉각 고화되기 때문이며, 성형된 구조물은 후속의 충전에 의해 과도 압력을 받기 때문에 일어난 것으로 보인다. 따라서 원활한 성형을 위해서는 적절한 사출속도의 선정이 매우 중요함을 알 수 있다.

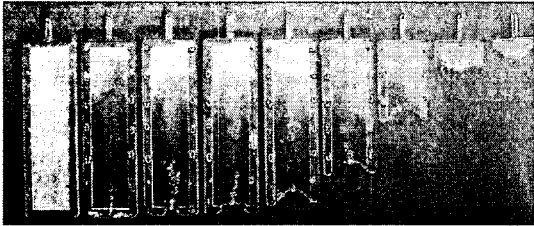


Fig. 11 Products by shot volume change



Fig. 12 Products by shot speed change

5.3 형내 고화시간 영향

Fig.13은 초기 실험에서 형내 고화 시간만을 변화시키며 미 성형된 제품을 대상으로 성형부위를 자세하게 관찰하는 사진이다. 좌측 그림은 성형 후 금형 내 고화 냉각시간을 150sec로 했을 때 성형품이며, 우측 그림은 250sec로 했을 때의 성형결과이다.

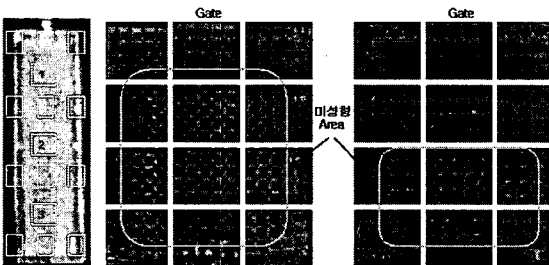


Fig. 13 Variations of unfilled area by mold conditions

실험결과 형내 고화 시간을 길게 한 쪽이 미성형이 적은 것으로 나타났다. 따라서 수지의 완전 충전을 위해서는 적절한 금형 온도 유지와 더불어 수지가 미세 틈새로 밀려들어가는 형내 고화 시간이 필요함을 알 수 있

다. Table 2의 조건에서 실험을 통하여 현재까지 최적조건으로 단축시킨 형내 고화 시간은 150초 정도이다. 한편, Fig. 11~Fig. 13에는 게이트에 가까운 지점이 먼저 양호하게 성형되고 가장자리 부는 미세하게 성형되며 중앙 하단부는 미성형 부분이 많은 것을 볼 수 있다. 이런 현상을 통하여 금형 내에서의 수지유동 및 성형과정의 예측도 가능함을 알 수 있다.

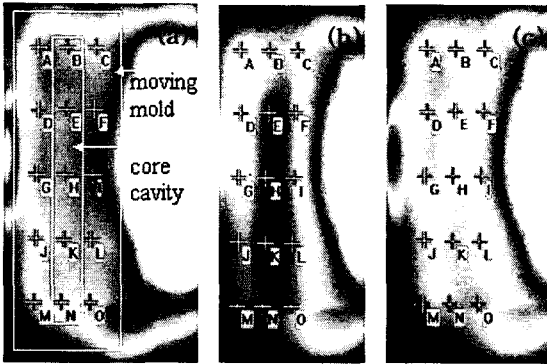
Fig. 13에서는 성형품 상단 및 하단부 구조물이 중첩되어 격벽이 손상되어 성형된 것을 볼 수 있다. 이는 빈번한 성형과정 중에 금형이 손상된 것으로서 주의가 필요한 부분이다.

5.4 제품 냉각시간과 금형 온도 변화

본 실험에서는 약 150초 동안 제품을 금형 내에서 고화시킨 후 금형을 열고 다시 제품에 대한 공기냉각을 약 80초 동안 실시한 후 에젝팅을 한다. 본 실험에서는 공기냉각시간에 따라서 제품의 에젝팅 여부가 지장을 받는 것을 확인하였다. 냉각시간이 짧으면 냉각 상태가 불량하여 끈끈한 상태로서 에젝팅이 불가능하였고, 냉각시간이 길면 성형품과 금형의 미세 격벽 사이의 결합이 강하여 역시 에젝팅이 불가능하였다. 따라서 적절한 냉각시간의 선정은 매우 중요한 요소가 되었고, 본 실험에서는 초기 150초 정도에서 현재는 80초 정도까지 냉각시간을 단축하는 결과를 얻고 있다.

냉각 효과를 정량적으로 알면 냉각수를 이용한 금형의 급속 냉각 및 가열도 가능할 것으로 생각되고, 그 경우에 따라서는 냉각시간 및 사이클 타임의 단축도 가능할 것으로 예측된다.

적외선 열 탐상 카메라를 이용하여 Fig. 14와 같이 제품 및 금형 표면의 온도변화를 측정하였다. Fig. 14에서 E, H, K부가 금형 코어 및 제품이 부착되어 있는 부분이다. Fig. 14(a)는 가열된 금형을 연 직후의 상태로서 제품이 붙어있고 이때의 온도는 금형 전체 면이 약, 100~106℃정도였다. Fig. 14(b)에서 보듯이 공기냉각 중에는 제품온도가 약 77~80℃로 낮아짐을 알 수 있고, (c)의 에젝팅 후의 금형 코어 표면은 약 91~94℃로 나타나고 있다. 결과적으로 원활한 제품 에젝팅을 위해서는 이와 같은 온도 조건이 되어야 함을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 고려할 때 열 카메라에 의한 다소의 오차를 감안하더라도 전체적인 금형 온도 120℃에서 약 20℃ 정도의 급속 금형 냉각 및 가열이 가능한 장치를 활용할 수 있다면 사이클타임의 단축과 더불어 효과적인 성형 실험을 수행할 수 있을 것으로 예측된다.



(3) J.S. Park, J.W. Cho, S.W. Jung, S.S. Park, S.H. Lee, D.H. Kim, and J.H. Han, Proc. Transducer 01, Munich, Germany, 2001, 1026-1029

(4) 박순섭, 제태진 외, "차세대신기술개발사업- 미세사출성형기술개발," 산자부 연구보고서, 2001.

		87.3	81.7	96.1° C	110.5	124.8
Point ID		(a)		(b)	(c)	
	X	Y	Measur...	Measur...	Measur...	
A	1...	106	103.0	96.1	99.8	
B	1...	106	102.5	91.9	98.9	
C	2...	106	102.4	95.0	98.2	
D	1...	165	103.0	96.9	101.0	
E	1...	165	104.5	78.2	94.5	
F	2...	165	106.9	90.8	99.5	
G	1...	227	103.2	95.2	99.8	
H	1...	227	105.1	90.5	94.9	
I	2...	227	106.5	90.9	100.8	
J	1...	288	95.7	90.9	100.8	
K	1...	289	100.7	85.1	91.9	
L	2...	289	102.9	76.5	90.8	

Fig. 14 Temperature distribution of mold ;
(a) after heating, (b) after cooling, (c) after ejecting

6. 결론

LIGA 공정으로 제작된 다중 미세 각주 금형을 이용하여 벽두께 50 μ m, 높이 500 μ m(세장비 10), 셀 수 약 37,000개의 미세 격벽 구조물을 성형하는데 성공하였으며, 이 과정을 통하여 고 세장비, 미세 틈새를 가진 다중 미세 구조물의 성형에 필요한 주요기술을 축적하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 주관의 차세대신기술사업인 Milli-structure 사업의 세부과제로 진행된 미세 사출성형기술개발과제의 일부임을 밝혀드립니다.

참고문헌

- (1) 趙容武, 사출성형이론, 일진사, 1995.
- (2) Fasset J., Plastics Engineering, Dec. 1995, 35-37