

극소형 구조물의 사출성형 기술

- 박 순 섭 | 전자부품연구원 마이크로머신 연구센터, 수석연구원
e-mail : parkss@nuri.keti.re.kr
- 정 석 원 | 전자부품연구원 마이크로머신 연구센터, 선임연구원
e-mail : jungsw@nuri.keti.re.kr
- 조 진 우 | 전자부품연구원 마이크로머신 연구센터, 전임연구원
e-mail : baron@nuri.keti.re.kr
- 제 태 진 | 한국기계연구원 정밀가공 그룹, 선임연구원
e-mail : jtj@kimm.re.kr

이 글에서는 고종횡비(high aspect ratio)를 갖는 수십 마이크로미터 내외 구조물의 사출 성형을 시도하였으며, 이를 통해 아직까지는 생소한 분야인 극소형 구조물의 사출 성형 시 고려해야 할 점을 정리하였다.

성형되는 구조물의 크기가 수 센티미터 이하일 때 미세 성형이라 분류할 수 있다. 최근의 기술동향은 성형물의 응용성을 높이기 위해 미세 성형품 내부에 작게는 수 마이크로에서 크게는 수십 마이크로 크기의 극소형 구조물이 함께 성형되는 추세이며, 이를 마이크로 성형이라 한다. 최근 기술은 마이크로 구조물의 요구형상과 정밀도 수준에 맞게 시스템의 정밀도와 성능, 공정 등을 개선하거나 새로이 제작하여 사용하는 형태로 진행되고 있다. 주요 응용 분야는 회절격자, 렌즈, 도파로, 커넥터 등의 광 부품 분야, 펌프, 반응 용기, 열교환기, 필터 등의 유체 소자 분야 및 기어, 렌

즈 홀더 등의 미소 기계 부품 분야 등을 들 수 있다. 이런 마이크로 형상 부품의 제작상의 난점으로 여겨지는 것이 고종횡비의 다

중 미세 구조물과 복잡 형상의 부품 성형 기술이다. 특히 고종횡비 다중 구조물 금형을 이용한 성형은 표면적의 급격한 증가로 인한

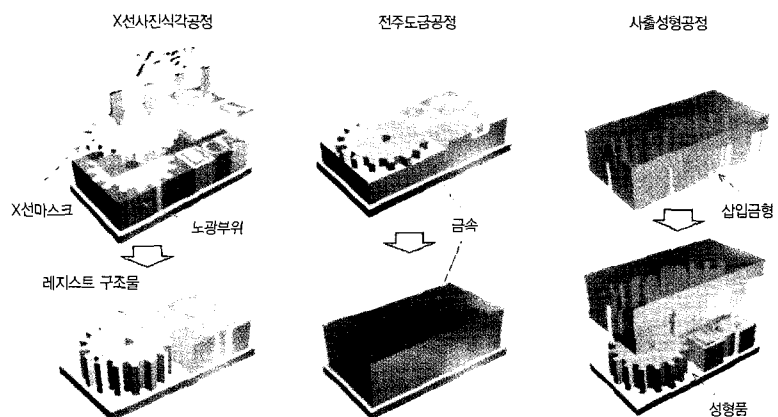


그림 1 리가(LIGA) 공정을 설명하는 개략도

금형 내 수지 냉각 현상, 마찰력 증가로 인한 제품 취출의 어려움, 마이크로 금형 구조물의 손상, 제품의 변형 및 파손 등 여러 가지 문제에 의해 성형이 불가능한 경우도 자주 발생한다.

이 글에서는 실제 경험을 통해 얻은 결과로부터 고종횡비 마이크로 사출 성형 시 발생하는 문제 및 해결 방안에 대해 서술하고자 한다. 금형은 특별히 제작한 고종횡비 마이크로 각주 어레이였으며, 소형 성형 시스템을 구성하여 마이크로 격벽으로 구성된 마이크로 셀 어레이 형상을 사출성형 하였

다. 제작된 마이크로 셀은 유체 분석기 등에 직접 활용이 가능하고 마이크로 세라믹 센서 구조물 제작을 위한 희생 몰드로도 사용할 수 있다. 또한 이 성형 기술을 이용하여 통신 용 커플러, 광도파로 등의 미세 패턴 성형에도 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기

대된다.

마이크로 각주 어레이 금형은 LIGA 공정으로 제작되었다. LIGA 공정은 X-ray를 이용하여 감광성 폴리머에 정밀 틀을 형성시킨 후 틀을 따라 도금을 하는 공정이다. 금형의 외각 치수는 약 $19 \times 83 \text{mm}^2$ 이고, 내부를 구성하고

있는 단위 미세 각주 구조물은 $157 \times 157 \times 500 \mu\text{m}^3$ 이며, 각각의 간격은 $50 \mu\text{m}$ 로서 약 4만 개의 단위 각주로 구성되어 있다. 사출성형으로써 격벽으로 이루어진 마이크로 셀이 제작되며, 이때 격벽 치수는 수지의 수축을 고려하지 않는다면 길이 $157 \mu\text{m}$, 두께 $50 \mu\text{m}$ 에 높이 $500 \sim 900 \mu\text{m}$ 로서 종횡비 1:10 ~ 1:18의 구조물이 된다.

사출성형기는 국내에서 제작된 형체력 10톤, 용량 10cc급의 소형 장비를

이용하였다. 사용된 수지는 가스성 아크릴 계열의 PMMA였다. 고종횡비 미세 구조물의 성형인 점을 고려하여 진공 사출성형 기술을 이용하였고, 예비 실험에 의해 금형 냉각 시간이 중요한 요소임을 확인하고 이를 위한 자동 공기냉각장치를 부착하였다.

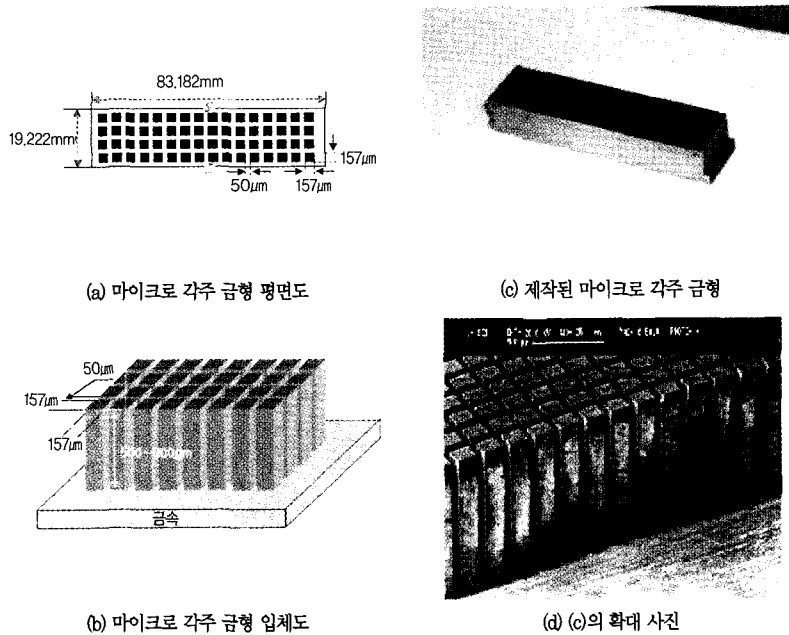


그림 2 마이크로 각주 어레이 금형의 도식도 및 제작 예

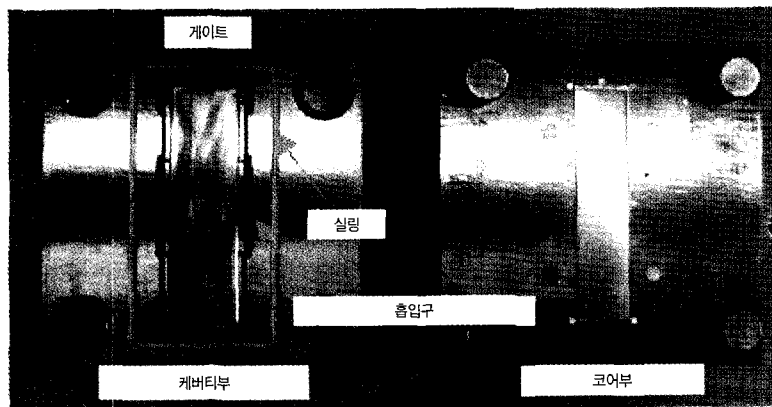


그림 3 마이크로 셀 성형을 위한 금형

표 1 마이크로 셀 성형을 위한 적정 조건

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 공랭 시간(sec)
170/220	230	120	26	53/4	46/16	150	80

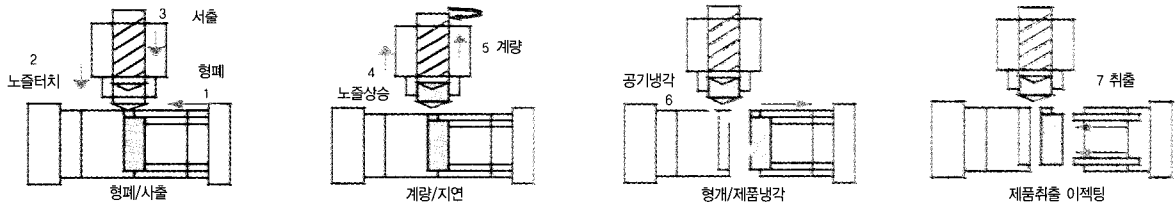


그림 4 사출성형 공정도

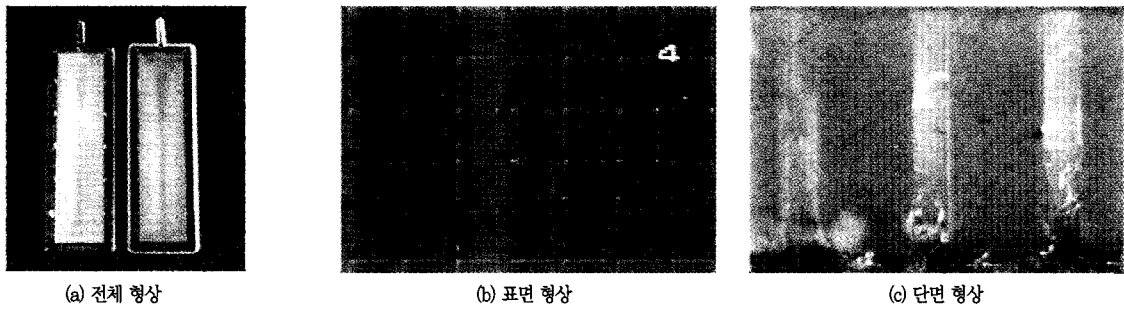


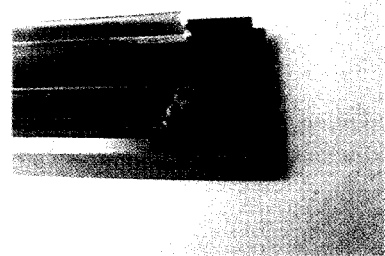
그림 5 사출성형에 의해 제작된 마이크로 셀 성형물

LIGA 공정으로 제작된 삽입 금형을 전체 금형에 체결하였다. 금형은 파팅라인을 통한 수지 주입 방식으로서 고정 금형 측에만 런너와 게이트가 설치되어 있으며, 형내 진공성형을 위하여 금형의 캐비티부는 고온 실리카 고무에 의해 실링되어 있다. 전체공정은 일반 사출성형과 유사하지만 일반 PMMA 사출성형 시보다 금형 온도를 높게 하고 금형 내에서의 제품 고화시간, 형 열림 후 공기에 의한 냉각공정 등은 본 공정에서만 적용되는 특이한 공정이다. 실험결과 사출압력, 사출속도 등의 기본조건과 더불어 고종횡비 마이크로 구조물 성형조건 설

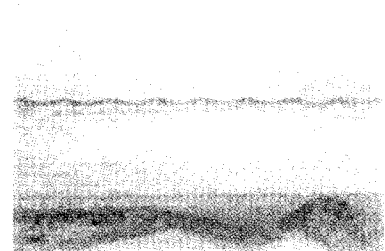
정에서 중요한 요소는 수지 용융 온도, 금형 온도, 냉각시간 및 냉각온도 등의 온도와 관련된 조건임을 확인하였다.

성형품의 경우 이젝팅을 위한 여유 공간을 포함하며, 두께는 구조물부 600 μ m 을 포함하여 1.8mm이다. 단위 셀의 크기는 157 \times 157 \times 600 μ m³이며, 벽의 두께는 50 μ m이다.

표면 및 단면 관찰로부터 종횡비 12의 미세 격벽이 완전히 성형되었음을 알 수 있다. 사출성형에 의해 이와 같은 미세 격벽 형상의 고종횡비를 제작하는 기술은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 일반 부품 성형을 위한



(a) 제품 취출이 안 되는 경우



(b) 미성형 예

그림 6 사출성형 시 문제 점

PMMA 수지의 사출성형 조건은 수지 용융 온도 210°C, 금형온도 60°C, 제품 냉각시간 20초, 사출속도(유량기준)는 60 l/min 정도이다. 이와 같은 일반 조건으로 본 구조물 성형 실험을 수행한 결과 매우 많은 문제점이 발견되었다. 대표적 성형 문제점으로 미세 벽면에 유입된 수지가 냉각되면서 금형구조물을 붙잡아 제품 취출이 안 되는 것과 깊이 방향으로 수지의 흐름이 매우 작다(24~30µm)는 것이다. 이는 고중황비 구조물 성형시 가장 유의해야 할 문제로서 금형과 수지의 접촉 표면적 과대, 사출압력,

생되기 때문이다. 이러한 결과는 마이크로 사출성형에 틈새 유동 증가를 위해 사출압력을 높이는 것은 곤란하며, 대신 수지의 용융 온도와 금형온도를 높이고, 적절한 사출속도를 선정하는 것이 필요함을 나타낸다. 특히 금형온도가 낮으면 수지의 유동성에 방해가 생겨 많은 문제점을 일으키므로 수지 용융온도와 금형 온도를 다소 높이는 것이 중요하다. 결과적으로 일반적인 PMMA 수지 성형조건으로는 고중황비의 미세 구조물 성형은 불가능하였으며, 금형 파손, 미성형, 이젝팅 등의 문제만 발생하게 된다.

고 있으며, 수지 양이 부족하면 미세 구조물의 틈새로 유동이 되지 않아 미성형이 이루어지고 있었다. 적정 속도 이하에서는 제품이 금형 구조물 틈새에 박히는 현상과 웰드라인 형성 등으로 제품 취출이 되지 않는 매우 곤란한 문제가 발생하였다. 이는 사출속도가 부족하면 먼저 충전된 수지가 금형 내의 중간지점에서 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.

미성형된 제품을 대상으로 성형부위를 관찰한 결과, 형내 고화 시간을 길게 한 쪽이 미성형이 적은 것으로 나타났다. 따라서 수지의 완전 충전을 위해서는 적절한 금형 온도 유지와 더불어 수지가 미세 틈새로 밀려들어가는 형내고화 시간이 필요함을 알 수 있다. 게이트에 가까운 지점이 먼저 양호하게 성형되고, 가장자리 부는 미세하게 성형되며, 중앙 하단부는 미성형 부분이 많은 것을 볼 수 있다. 이러한 현상을 통하여 금형 내에서의 수지유동 및 성형과정의 예측도 가능함을 알 수 있다. 성형품 상단 및 하단부 구조물이 중첩되어 격벽이 손상되어 성형된 것을 볼 수 있다. 이는 빈번한 성형과정 중에 금형이 손상된 것으로서 주의가 필요한 부분이다. 일정 시간 동안 금형 내에서 제품을 고화시킨 후 금형을 열고 제품에 대한 공기냉각을 일정시간 실시한 후 이젝팅을 하였

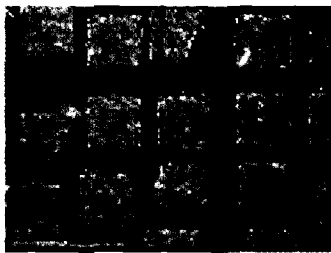
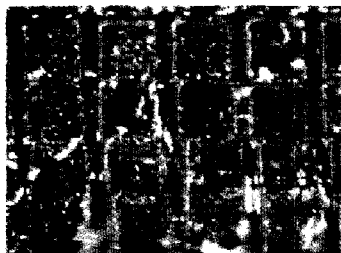


그림 7 과도한 압력으로 인해 금형이 파손된 예

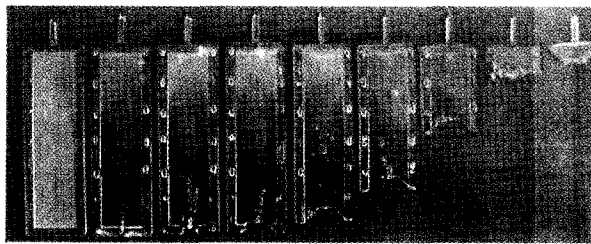
냉각온도 및 시간의 영향이 크다. 미성형을 방지하기 위해 일반적으로 사용하는 사출압력 증가도 매우 제한적으로 이루어져야 하는데 이는 압력이 높을 경우 마이크로 각주 금형의 파손현상이 발

마이크로 각주 금형 내에서의 수지 유동상태 분석을 위하여 수지 주입 양 및 사출속도에 변화를 주었다. 마이크로 각주 구조물이 없어 수지 유동 저항이 작은 가장자리 쪽으로 수지가 먼저 유동되

다. 공기냉각시간에 따라 제품의 이젝팅 여부가 지장을 받는 것을 확인하였다. 즉 냉각시간이 짧으면 제품도 덜 냉각되어 끈끈한 상태로서 이젝팅이 불가능하였고, 냉각시간이 길면 성형품과 금형의 미세 격벽이 서로 딱 붙잡는 현상이 발생하여 역시 이젝팅이 불가능하였다. 따라서 적절한 냉각시간의 선정은 매우 중요한 요소가 됨을 확인하였다. 냉각효과를 정량적으로 알면 냉각수를 이용한 금형의 급속 냉각 및 가열도

가능할 것으로 생각되고, 이에 따른 사이클 타임의 단축도 가능할 것으로 예측된다. 참고적으로 적외선 열 탐상 카메라를 이용하여 성형 사이클 동안 제품 및 금형 표면의 온도변화를 측정해 보았다. 가열된 금형을 연 직후의 온도는 금형 전체 면이 약 100~106° 정도였다. 공기냉각 중에는 제품온도가 약 77~80°로 낮아짐을 알 수 있고, 이젝팅 후의 금형 코어 표면은 약 91~94°로 측정되었다. 결과적으로 원활한

제품 이젝팅을 위해서는 이와 같은 온도 조건이 되어야 함을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 고려할 때 열 카메라에 의한 다소의 오차를 감안하더라도 전체적인 금형온도 120° C에서 약 20° C 정도의 급속 금형 냉각 및 가열이 가능한 장치를 활용할 수 있다면 사이클타임의 단축과 더불어 효과적인 성형을 수행할 수 있을 것으로 예측된다.

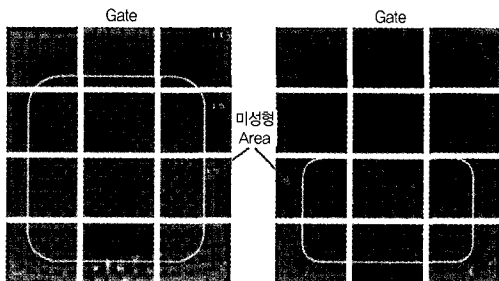


(a) 수지 양에 따른 변화



(b) 사출 속도에 따른 변화

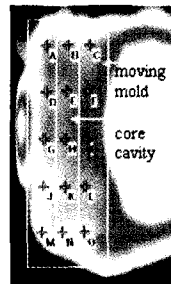
그림 8 수지 양 및 사출 속도에 따른 성형 예



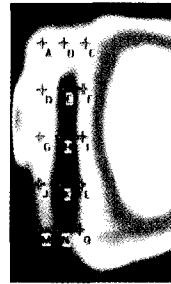
(a) 150 초

(b) 250 초

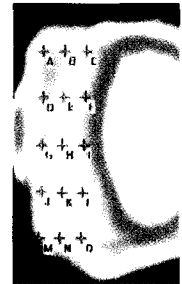
그림 9 형내 고화 시간 변화에 따른 영향



(a) 가열상태



(b) 공기냉각 후



(c) 이젝팅 후

Color		Color1 256	Change	Reverse(N)	
67.3	81.7	96.1° C	110.5	124.8	
POINT (mm)		(a)	(b)	(c) 쉐	
	X	Y	Measur...	Measur...	Measur...
A	1...	106	103.0	96.1	99.3
B	1...	106	102.5	91.9	99.2
C	2...	106	102.4	94.11	99.2
D	1...	165	109.0	96.9	101.0
E	1...	165	104.5	70.2	94.5
F	2...	165	106.6	90.8	99.5
G	1...	227	103.0	94.7	99.3
H	1...	227	105.1	90.5	94.9
I	2...	227	103.5	94.5	94.9
J	1...	268	95.7	90.9	100.4
K	1...	268	100.7	98.1	91.9
L	2...	268	100.9	78.5	90.3

(d) 부위 별 온도 표

그림 10 성형공정 중의 온도 변화