

레이저 절단 판재의 브레이징에 의한 적층 사출금형

조용무\*, 김재도\*\*

Laminated Injection Mold by the Brazing of Laser Cut Sheets

Yong-Moo Cho\*, Jae-Do Kim\*\*

ABSTRACT

Mold-making industries currently demands to reduce the tooling costs and time in mold making and to improve the productivity and quality in injection molding process. These problems can be easily solved by the laminated injection mold which is made by laser cutting metal sheets and bonding them by the brazing. Comparing with the conventional mold making technology which mainly depends on the machining, the new technolgy enables an arbitrary design of cooling circuit without any restrictions of geometry. Therefore, it will offer high production rate of the injection molding processes. This paper evaluates the conventional and laminated injection mold making processes with a simple molding geometry, and also the cooling efficiency of the kinds of mold with the filling and cooling analyses. The results show that the laminated injection mold process takes much shorter time in tooling and cooling, and distributes temperatures more uniformly than the conventional one.

**Key Words** : Laminated injection mold, Brazing, Filler metal, Cooling circuit, Filling time, Cycle time.

기호설명

$\rho$	: Density	$\lambda$	: Thermal conductivity
$g$	: Gravitational constant	$T$	: Temperature
$c_p$	: Specific heat	$\eta$	: Viscosity
$v$	: Velocity or flow velocity	$a_0-a_5$	: Material constants
$\tau$	: Shear stress or stress tensor	$\gamma$	: Shear rate
$(\tau : \nabla V)$	: Tensor notation	$V$	: Volume flow rate
$\sigma$	: Stress tensor	$t$	: Time
$p$	: Pressure		

\* 인하대학교 대학원 기계공학과 (정회원)

\*\* 인하대학교 기계공학과 (정회원)

## 1. 서 론

최근 금형업계는 다품종 소량생산, 복잡한 형상, 높은 치수 정밀도 및 사출성형의 생산성 극대화 등을 추구하고 있다. 이에 따라서 금형설계와 금형가공 시간의 단축, 원가절감 및 짧은 납기등이 요구되고 있다. 사출성형의 생산성을 향상 시키기 위해서는 성형품 설계방법, 금형설계 방법, 냉각시간, 성형수지 및 사출성형기 특성을 고려해야 한다. 성형품 설계, 성형수지 및 사출성형기 특성은 미리 결정되어 있는 경우가 많으며, 금형설계에 있어서 냉각수로의 설계는 사이클 타임에 큰 영향을 주고 있다. 냉각수로는 성형시 수지의 고화시간과 관계가 있으며, 일반적으로 금형설계시 우선적으로 고려해야 한다. 냉각수로의 위치가 이젝터 시스템에 영향을 주기 때문에 냉각수로의 위치를 우선적으로 고려할 수 없는 경우가 상당히 많이 발생한다. 이러한 이유로 냉각시간이 길어지고 균일한 냉각이 이루어지지 않기 때문에 온도차이에 의한 변형이 자주 발생한다(1, 2).

금형제작 시간 단축은 자동차 및 전자제품 모델의 빈번한 교체로 납기 단축을 요구하기 때문에 큰 문제로 대두되고 있다. 현재 복잡한 형상의 캐비티 코어 가공은 방전가공(Die sinking EDM)이나 와이어 방전(Wire EDM)이 주로 사용되고 있다. 이러한 방전가공법은 가공속도가 느리다는 큰 결점을 갖고 있어 절삭속도가 빠른 가공 기계가 요구되고 있는데, 레이저는 이같은 요구 조건을 만족해 주고 있어서 그 가공기술이 계속 연구되고 있다(3).

1977년에 Yokoi(4, 5) 등은 프레스금형에 레이저를 처음으로 이용하였다. 프레스 적층금형은 다품종 소량생산, 시작제품 등에 쉽게 적용할 수 있어 현재 일본에서는 일반화 되어 있다. 그후 Kunieda(6) 등은 플라스틱 사출금형제작에 시도 하였다. 이 방법은 강판을 절단한 후 접합하여 제작한 것이다. 사용된 접합 방법은 soldering과 pressure welding 방법을 이용하였는데, 전자는 사용수지의 용융온도 및 사출압력에 견디지 못해 냉각수로에서 누수가 발생하였고, 후자는 코어에 따른 용접조건을 변경시켜 사용해야 하며 산화 되기 때문에 진공로나 수소 분위기를 사용해야 하는 어려움이 있다.

브레이징에 의한 접합 방법은 모재를 용융시키지 않고 필러메탈(Filler metal)과 열을 이용하여 금속소재를 접합하는 방법을 말하는 것으로 오늘날 금속접합에서

가장 유용한 방법중에 하나이다(7, 8). 브레이징에 관한 연구는 신소재, 브레이징 접합 변수 및 필러메탈 등 주로 금속학 분야에서 많은 연구가 진행되고 있으나, 적층에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 레이저와 브레이징 방법을 이용하여 사출금형 제작 시간과 성형시간을 단축하기 위한 적층 사출금형의 설계 및 제작 방법을 제시하였으며, 사출성형 충전해석 및 냉각해석으로 현재의 금형 제작 방법과 비교 검토하였다.

## 2. 금형설계 및 제작

### 2-1. 금형설계

금형설계의 첫번째 단계는 성형될 성형품의 정확하고 완전한 치수 즉, 성형수지의 종류, 표면 거칠기, 수축율 및 공차등과 같은 것을 알아야 한다. 다음으로 캐비티 수 결정, 파팅 라인의 위치, 게이트의 종류 및 위치, 러너 시스템, 냉각 수로 및 크기 및 위치 결정, 이젝터 시스템의 크기 및 위치, 에어 벤트의 형상 및 위치 결정의 순으로 진행되나, 성형품의 특성, 사용처, 정밀도 냉각 방법에 따라 설계순서를 다르게 할 수 있다(1, 2).

본 연구에서는 성형품을 Fig. 1과 같이 간단한 형상으로 설계 했으며, 사용된 몰드 베이스의 타입은 2단 금형을 사용하였다. 게이트는 성형품 형상을 고려하여

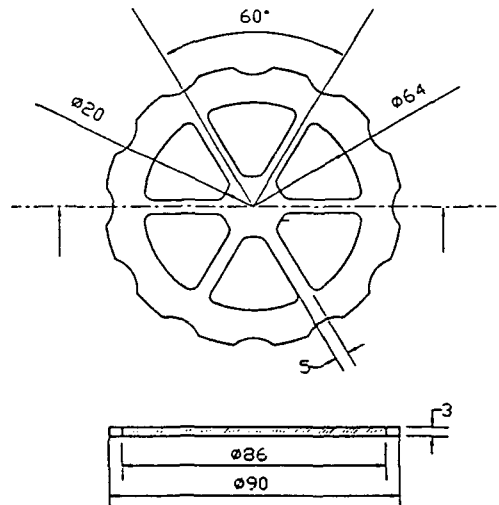


Fig. 1 Cofiguration of mold Parts

직접 게이트(Direct gate)를 선정하였고, 위치는 성형품 중앙에 있도록 설계하였다. 코어 설계는 현재의 방식과 적층방식의 두가지 형태로 설계하였는데, 전자는 상용 모듈드 베이스에 코어를 인서트하는 방식으로 제작하였고, 후자는 레이저를 이용하여 금형재료인 STD11 두께 5mm를 절단한 후 적층하여 브레이징하였다. 이젝터 기구는 성형품 형상과 균형을 고려하여 12개를 설치하였다.

2-2. STD11의 레이저 절단 실험

레이저 절단은 Fig. 2에 도시한 것처럼 가공재료가 고출력에 의한 용융 및 증발을 통하여 절단되며, 양호한 절단 형상을 얻기 위해서는 절단 속도, 협소한 절단폭, 작은 열영향부, 가공후 공작물의 변형이 없고 표면거칠기가 좋아야 한다. 따라서 절단품질을 향상하기 위해서는 이같은 조건에 충족되어야 한다. 절단품질에 영향을 주는 가공변수는 레이저 출력, 레이저 빔직경, 초점거리, 보호 가스 압력 및 종류, 가공재료의 열 전도도 및 용융 온도, 증발 온도 등으로 분류할 수 있다<sup>(9, 10)</sup>. 이러한 가공변수를 최적화 하기 위해서 절단 속도는 경제적인 문제를 고려해서 가능한 빨라야 하며, 고정밀도를 얻기 위해서는 절단폭이 매우 작아야 한다. 또 절단 단면은 작은 열 영향부, 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있어야 한다. 이러한 여러가지의 가공변수로 인하여 정확한 수학적인 모델은 아직까지 존재하지 않고 있으나, 단순화하여 절단 메카니즘을 설명하고 있다<sup>(11, 15)</sup>. 또 지금까지의 실험적 연구는 스테인레스강이나 신소재에 관한 절단 특성에 관한 연구가 주를 이루어지고 있어, 본 연구에 사용된 레이저 절단 전에 예비실험을 한 후 그 결과에 따라 절단하였다.

본 연구에서는 Nippei Toyama에서 제작한 1.2kW CO<sub>2</sub> 레이저(초점거리 127mm, 파장 10.6μm)를 사용하였다. 실험은 레이저 절단가공 가능 변수범위에서 이루어졌다. 레이저 출력은 연속파일 경우 1.2kW로, 펄스파 사용시는 480W(Duty 40%, 750Hz)이며 TEM<sub>01</sub>\* 모드이다. 주사속도는 250mm/min - 750mm/min, 보호가스의 압력을 0.48 - 0.75MPa의 범위에서 변경시켰다. 초점위치를 재료 표면에 일치 시키고 보호가스로 이용하여 폭 30mm의 강판을 15mm 절단하였다. 절단 후 절단폭은 절단 표면에서 표면, 중간 및 하부를 측정하였고, 표면거칠기는 절단면 상부에서 0.5mm, 2.5mm 위치를 측정하였다. 레이저로 두께 5mm의

STD11을 절단하면 절단폭은 주사속도에 따라 차이가 있으며, 같은 속도에서도 보조 가스압력에 따라 다르다. Fig. 3은 속도에 따른 절단폭을 나타낸 것으로 연속파보다 펄스파를 사용했을 때 절단폭이 작음을 알 수 있다. Fig. 4는 펄스파일 때 속도에 따른 절단된 표면의

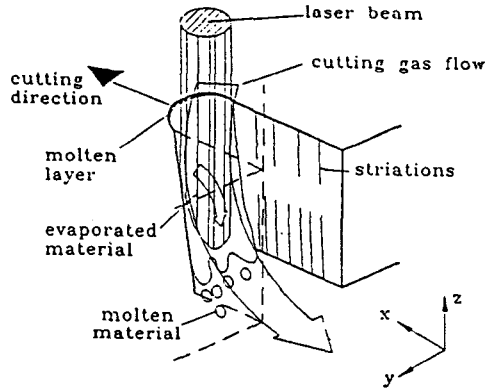
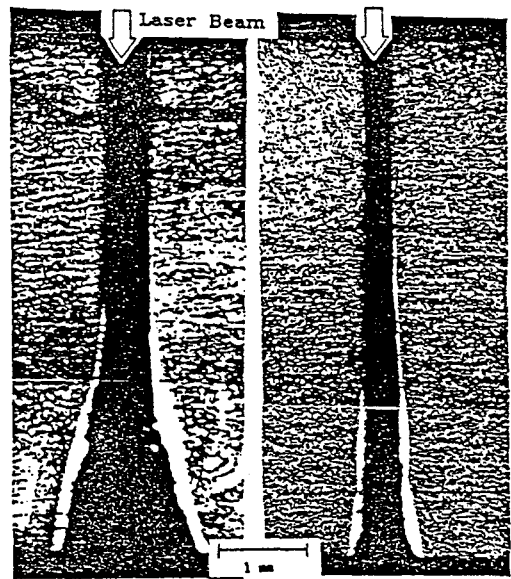


Fig. 2 Mechanism of laser cutting.



(a) Conventional molds (b) Laminated molds

Fig. 3 Cutting sections cutted by CW beam and pulse beam.

(Laser power, 1.2 kW, travel speed, 450 mm/min)

거칠기를 나타낸 것으로 속도가 450mm/min에서 가장 양호한 결과를 얻었다. 종합적으로 최적의 가공변수는 펄스파(750 Hz), 주사속도 450mm/min, 가스 압력 0.57MPa을 사용했을 때 표면에서 절단폭은 0.39mm, 표면 거칠기는 3.43 $\mu$ mRa를 얻을 수 있어 이 조건을 이용하여 절단하였다.

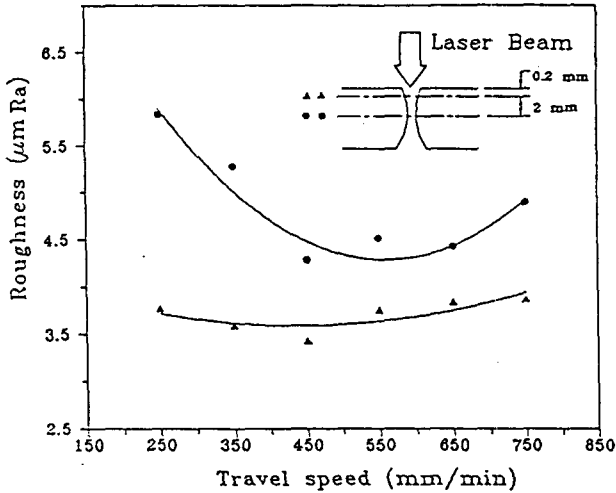


Fig. 4 Variation of roughness in the cut surface with the travel speed.

2-3. 금형제작

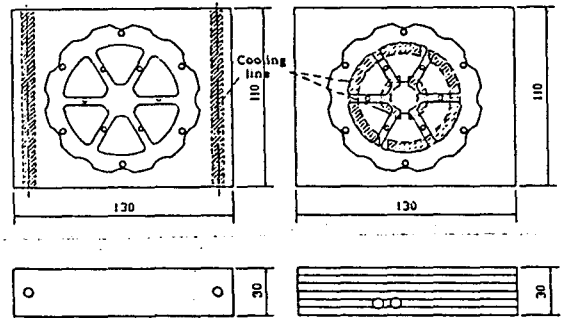
금형제작은 현재 제작하는 방식과 레이저 절단 판재에 의한 적층방식의 두가지로 제작하였다. 전자의 방식은 고정축 형판과 가동축 형판에 코어(core)를 인서트(insert)하여 이젝터(ejector) 구멍을 뚫어 이젝터 핀을 이젝터 판에 고정시키는 방법을 사용하였다. Fig. 5의 (a)는 제작된 코어의 설계도면을 도시한 것으로, 이젝터 핀은 플라스틱 성형품의 이젝팅(ejecting)시 변형을 고려하여 12개를 설치하였다. 냉각수로 코어 측면에 있도록 설계하였다. 후자의 방식은 Fig. 5의 (b)에 나타난 것처럼 레이저를 이용하여 5.1mm의 판재를 절단한 후 각각의 판재를 적층하여 브레이징하였다.

고온 브레이징에서 아주 중요한 것은 브레이징 중에 모재와 필러메탈의 산화를 방지하는 것이다. 표면의 산화는 모재가 필러메탈을 흡수하는 것을 방해한다. 일반적으로 표면의 청결 상태는 필러메탈이 유동을 증가시켜 양호한 접합을 할 수 있다. 반대로 오염이 되어 있으면 용융 필러메탈의 표면장력은 증가하고 모재의

표면장력은 감소되어 용융 필러메탈이 구형으로 된다. Fig. 6은 용융 필러메탈에 작용하는 표면장력을 나타낸 것이다. Wetting은 접촉각  $\theta$ 가 0에서 90° 사이에 있을 때 최대가 된다. 접촉각  $\theta$ 가 90°를 초과하면 wetting은 거의 발생하지 않는다. 사출금형에서는 이젝터 핀이 계속 움직이고, 금형이 열리고 닫힘에 의해 충격과 진동이 발생하므로, 이것에 견딜 수 있는 내충격성을 갖아야 한다. 따라서 본 연구에서는 고온 브레이징 방법을 사용하였다. 또 산화와 부식을 방지하기 위해 수소 분위기를 유지하였으며, 브레이징시 적층된 코어가 브레이징 온도(1020°C)로 유지되기 위해 15m 연속로를 사용하였다. 사용된 필러메탈은 Fig. 5이고, 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical Compositions of BAg 5. (wt. %)

Ag	Cu	Zn
44.0 - 46.0	29.0 - 31.0	23.0 - 27.0



(a) Conventional molds (b) Laminated molds

Fig.5 Comparison of cooling layout between conventional and laminated molds.

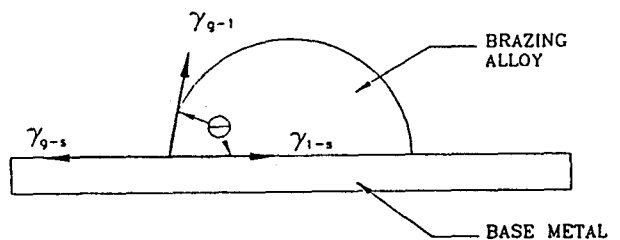


Fig.6 Forces acting on a molten drop of filler metal(7).

### 3. 사출성형 및 해석

#### 3.1 사출성형

제작된 사출금형을 이용하여 사출성형기로 사출성형 하였다. 사용된 사출성형기는 형체결력이 220톤이고, 사출중량(PS기준) 8 OZ인 Engel Co. 제품을 사용하였다. 적층금형의 내구성, 냉각수의 누수 및 충격성을 실험하기 위하여 100회 이상 사출성형을 하였다.

성형 해석결과와 실제 성형과 비교하기 위해 충전시간을 0.5, 0.6, 0.7, 0.76초로 각각 변경하여 사출성형 하였다.

#### 3.2 성형해석

사출성형 공정 사이클은 충전과정, 보압과정, 냉각과정, 금형열림, 이젝팅 및 금형 닫힘의 순서로 진행된다. 이러한 공정 중에서 충전과정은 가소화된 플라스틱 수지가 매우 빠른 속도로 금형 캐비티내로 유입되는 과정이며, 보압과정은 수지의 수축에 따른 체적감소를 보정하기 위하여 일정량의 수지를 더 채우기 위하여 가압하는 과정이고, 냉각과정은 용융된 수지가 고화되는 과정으로 설명할 수 있는데, 성형품의 특성을 결정하는 요인은 이 세가지 과정이 크게 작용한다. 따라서 설계전에 세가지 과정을 미리 예측할 수 있다면 성형후에 발생하는 불량 문제를 해결할 수 있을 것이다(1, 2, 17-21).

본 연구에서는 상업용 S/W인 Moldflow를 이용하여 충전해석과 냉각해석을 하여 기존의 금형제작 방식과 적층금형 방식을 비교하였다. 이 해석에 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식으로 식(1), 식(2), 식(3)과 같으며, 점성방정식은 식(4)와 같다(24-28).

연속 방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) = \rho \vec{g} + [\nabla \cdot \vec{\sigma}] - \nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} \quad (2)$$

에너지 방정식 :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + \rho (\vec{v} \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

점성 방정식 :

$$\ln \eta = a_0 + a_1 \ln \dot{\gamma} + a_2 T + a_3 (\ln \dot{\gamma})^2 + a_4 T \ln \dot{\gamma} + a_5 T^2 \quad (4)$$

지배방정식과 점성방정식을 사용하기 위해서 사출성형수지는 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 충전과정중에는 용융시 비압축성이다.
- 2) 용융시 비뉴턴 유체로 가정한다.
- 3) 열전도도는 일정하다.
- 4) 비열은 일정하다.

이러한 가정하에 지배방정식 식(1), 식(2), 식(3)은 각각 다음과 같다(24-32).

$$(\nabla \cdot \rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot \eta \dot{\gamma} - \rho (\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) \quad (6)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla p \right) + \rho (\vec{v} \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (7)$$

사용된 성형수지는 ASAHI GPPS(General purpose polystyrene)으로 수지의 물성치는 table 2와 같다.

Table 2 Polymer properties of ASAHI GPPS

Thermal Conductivity (J/msec°C)	Melt Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/Kg°C)	No Flow Temperature (°C)	Freeze Temperature (°C)
0.140	893	1700	130	100

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 7은 레이저로 절단하여 브레이징한 후의 코어 사진이다. STD11의 레이저 절단 형상은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것처럼 가공변수에 따라 절단폭과 절단면 표면 조도가 여러가지이며 판재의 두께가 얇을수록 열 영향에 의해 변형이 발생할 수 있다. 변형된 절단 판재는 브레이징할 때 접합되지 않는 경우가 발생된다. 따라서 판재 두께는 열 영향 및 성형품 형상을 고려해서 선정해야 하나 일반적으로 성형품의 두께는 사이클 타임을 고려하여 얇게 한다. 또 브레이징의 온도는 가공재료의 크기, 노의 분위기 및 노의 크기에 따라 변화하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 제작된 적층금형으로 사출 성형을 100회 이상 했을 때 충격과 진동에 의한 냉각수의 누수 및 플래시(flash)와 같은 불량이 발생하지 않았고, 충격강도 및 인장강도는 문헌을 참고하면(7, 8) 아주 우수한 것으로 알려져 있어, 브레이징에 의한 접합은

적층 금형에 유용한 것으로 사료된다.

금형제작 시간은 레이저를 이용하면 가공속도는 현재의 CNC M/C 보다 현격히 빠르다. 다만 브레이징하는 열처리가 필요하다라는 단점이 있다. 금형제작의 마지막 과정중에는 용융수지의 유동성과 성형품의 외관을 고려해서 캐비티 및 코어면을 사상(폴리싱)해야 한다. 사상은 금형제작에서 많은 시간이 소요되는 작업으로 현재는 거의 수작업에 의존하고 있다. 본 연구에 사용된 형상의 사상 작업시간은 12간 이상 소요한데 비하여, 적층 금형은 절단된 판재의 가동측 캐비티 면을 브레이징 하기 전에 연삭함으로써 사상하는 시간을 단축할 수 있으며, 실제로 브레이징 후에 사상 시간은 약 4시간 정도 소요되었다. 그러나 레이저 절단에서 절단면의 표면거칠기는 일반 가공방법 보다 나쁘기 때문에 고 정밀도를 요하는 성형품은 절단 판재를 얇은 것을 사용해야 될 것으로 생각된다.

Fig. 8은 충전해석한 결과를 나타낸 것으로 충전시간을 0.5, 0.6, 0.7, 0.76초로 했을 경우 캐비티 내에 수지가 채워진 양을 나타낸 것이다. Fig. 9는 사출 성형기로 사출한 결과이며, 충전시간에 따른 캐비티에 충전된 양은 해석한 결과와 유사하다.

일반 금형에서는 가공 및 이젝터 위치 문제로 냉각회로를 코어 중심부에 설치할 수 없으나 적층금형은 임의의 위치에 설치할 수 있다. 냉각수로의 형태는 냉각시간을 단축할 수 있어 전체 성형 사이클을 줄일 수 있다. 냉각시간이 전 성형공정의 40~70%이고, 성형품 원가 30%를 점유하고 있으므로 원가절감의 중요한 요인이 된다<sup>(23)</sup>. Fig. 10은 냉각수를 고려해서 14초 이후의 온도분포를 해석한 것으로 일반금형의 온도범위는 9.41℃에서 57.9℃이고, 적층금형은 14.2℃에서 21.2℃이다. Fig. 11은 14초 이후 앞으로 냉각되어야 할 면적을 나타낸 것으로, 적층금형은 남아있는 면적이 없는 반면에 일반금형은 아직도 많이 남아 있음을 알 수 있다. 만약 14초에서 성형품을 이젝팅 한다면 일반금형에서 성형된 제품을 온도차에 의해 응력이 발생되고 변형이 예상된다. 물론 냉각시간을 길게하면 해결할 수 있으나 전체 사이클 타임은 충전시간+냉각시간+이젝팅 및 금형열림 시간이므로 냉각시간을 줄여야만 사이클 타임을 감소시킬 수 있다. 따라서 성형성을 향상 시키려면 냉각시간을 줄여야 하는데, 이것은 결국 냉각수로의 위치를 정확히 선정해야 한다. 또 성형품 부위별 온도차가 심하면 변형이 발생하므로 균일한 온도분포를 유지할 수 있

도록 냉각수로를 고려해야 한다. 이런 의미에서 레이저를 이용하면 금형의 냉각수로를 임의의 위치에 설치할 수 있는 장점을 갖고 있다.

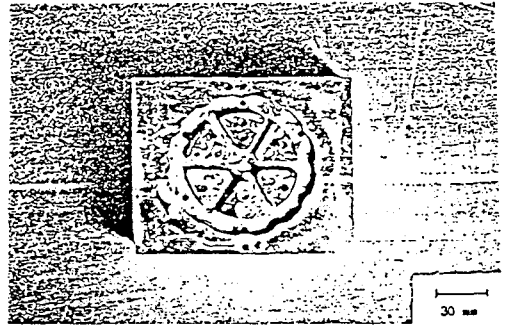


Fig. 7 Photograph of laminated core after brazing.

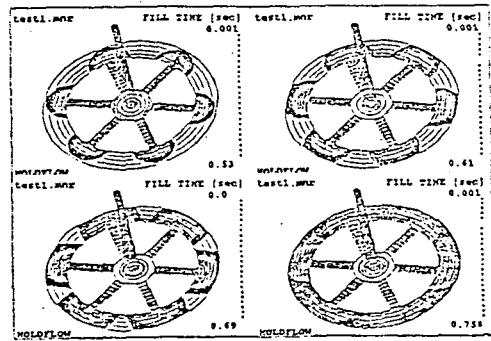


Fig. 8 Filling patterns as filling time.

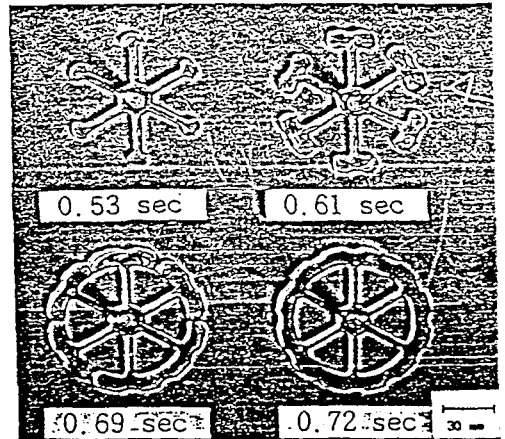
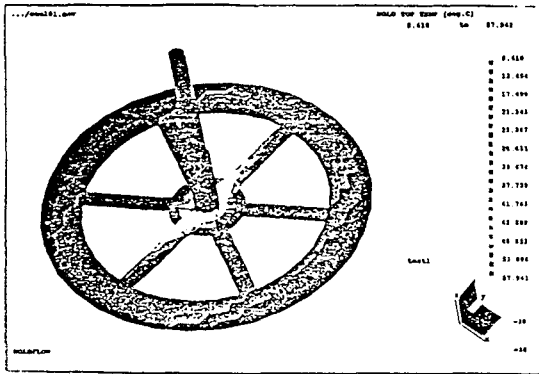
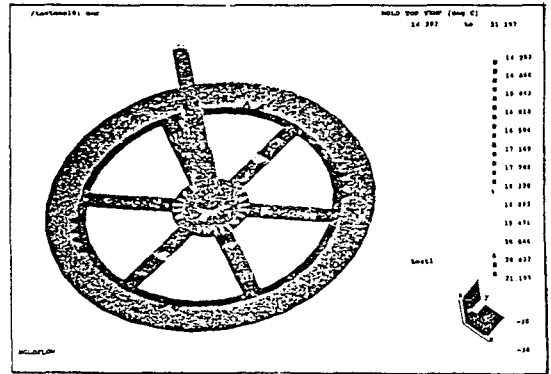


Fig. 9 Photograph of molded parts as filling time.

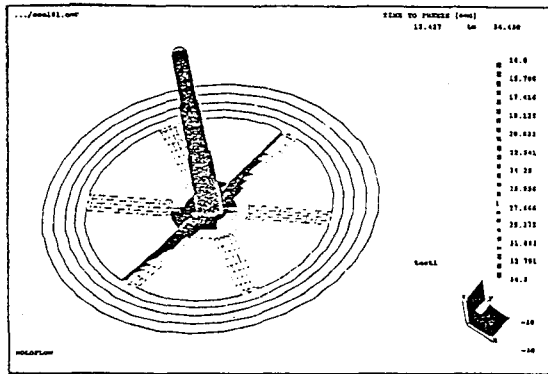


(a) Conventional molds

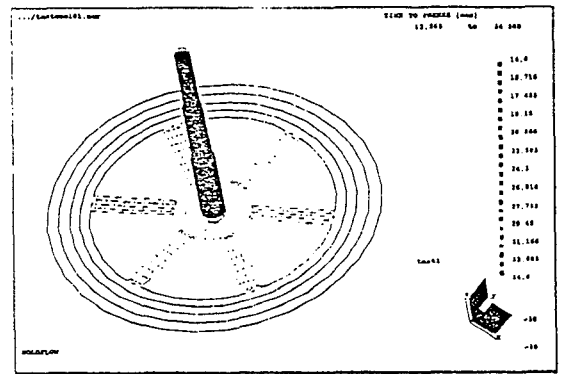


(b) Laminated molds

Fig. 10 Temperature distribution of molds after 14 sec.



(a) Conventional molds



(b) Laminated molds

Fig. 11 Area to be cooled after 14 sec.

## 5. 결 론

본 연구는 레이저를 이용하여 사출금형의 제작시간과 냉각시간을 단축시켜 성형성을 향상 시킬 수 있는 방법으로, 레이저 절단 판재에 의한 적층금형을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 냉각수로의 위치를 임의로 선정하여 제작할 수 있었다.
2. 냉각시간을 줄임으로서 전체 사이클 타임을 줄일 수 있었다.
3. 레이저를 이용한 적층금형 제작은 금형 제작시간을 단축할 수 있었다.
4. 적층금형 접합에 브레이징에 효율적임을 알 수 있으나, 브레이징로의 크기에 제약을 받는 단점이 있다.

## 후 기

“본 연구는 1993년도 인하대학교 연구비 지원에 의하

여 수행되었습니다. 이에 감사를 표합니다”.

## 참고문헌

1. P. Mohren et. a, “How to make injection moulds”, Hanser Publishers, 1991.
2. Irvin I. Rubin, “Injection Molding Theory and Practice”, John Wiley & Sons, 1972.
3. X. R. Zhang et. al, “Machining Three-Dimension Mould with Two Axis Controlled WEDM Machine Tool”, ISEM-9, pp. 84~85, 1989.
4. H. Yokoi et. al, “Manufacturing of blanking Tool and its Die-Set by Laminating Laser-Cut Steel Sheets”, Proc. of the 12th NAMRC, pp. 372~384, 1984.

5. M. Kunieda et. al, "Manufacturing of Laminated Deep Drawing Dies by Laser Beam Cutting", Proc. ICTP, Tokyo, pp.52~525, 1984.
6. M. Kunieda, T. Nakagwa et. al, "Laser Application to Die Making", ISME-9, Nagoya, pp.187~190, 1989.
7. M. Schwartz, "Source Book on Braazing and Brazing Technolgy", ASM, 1980.
8. D. L. Keller et. al, "Wettability of Brazing Filler Metals", Welding Journal, pp.31~34, Oct. 1990.
9. M. Bass, Laser Materials Processing, North-Holland, 1983.
10. J. F. Ready, Industrial Applications of Lasers, Academic Press, 1978.
11. Yoshiaki Arata, H. Maruo, I. Miyamoto, S. Takeuchi, 1979, "Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel", Trans, of JWRI Vol. 812. pp.15~26.
12. I. Decker et. al, "Physical models and Technological Aspects of Laser Gas Cutting", SPIE, 1982, pp.81~85.
13. D. Schuocker et. al, "Dynamic Effects in Laser Cutting and Formation of Periodic Striations", SPIE, 1987, pp.258~264.
14. D. Schuocker et. al, "Material Removal Mechanism of Laser Cutting", Indus. Appl. of Light Power Laser, SPIE, 455, 1984, pp.88~95.
15. M. F. Modest et. al, "Evaporative Cutting of a Semi-infinite Body with a Moving Cw Laser", J. of Heat Transfer, Vol. 108, 1986, pp.602~607.
16. Colin Austin, "Warpage Design Principles", Moldflow Pty Ltd, 1991.
17. G. Willams et. al, "Mold-filling Studies for the Injection Molding of Thermoplastic Materials", Polym. Eng. Sci., Vol. 15, No. 8, pp.553~568, 1975.
18. H. Mavridis et. al, "Finite Element Simulation of Fountain Flow in Injection Molding", Polym. Eng. Sci., Vol. 26, No. 7, pp.449~454, 1986.
19. K. K. Wang, "A System Approach to Injection Molding Process", Polym. Plast. Technol. Eng., 14(1), pp.75~93, 1980.
20. C. Austin, "Flow Algorithms", ANTEC, pp.255~261, 1987.
21. P. Kennedy, "Injection Molding of Polymers", Moldflo Pty. Ltd.
22. F. Filz, "Layout of Injection Mould", SIMCON Seminar, 1990.
23. C. Austin, "MOldfolw Manual", MOldflow Pty, 1992.
24. Colin Austin, "Warpage design principle", Mouldflow Pty. Ltd., pp.1~31, 1991.
25. Itaru Matsuhira et al., "Numerical analysis of polymer injection molding process using finite element method with marker particles", Int. J. NMIE, Vol. 30, pp.1569~1576, 1990.
26. J. A. Brydson, "Flow properties of polymer melts", G. G. L., 1981.
27. Natti S. Rao, "Design formulas for plastics engineers, Hanser Publishers, 1991.
28. Junichi Saeki et al., "Viscosity change of an epoxy compound for low press-urs transfer molding by maeas of rheological data analyzing system", Kobunshi ronbunshu, Vol. 45, pp.691~697, 1990.
29. E. Broyer et al., "Evaluating flows of non-newtonian fluids by the method of equivalent newtonian viscosity", AICHE J., pp.198~200, 1975.
30. M. R. Kamal et al., "Simulation of injection mold filling of viscoelastic polymer with fountain folw", AICHE J., Vol. 34, pp.94~106, 1988.
31. F. Dupret and L. Vanderschuren, "Calculation of the temperature field in injection molding", AICHE J., pp.1959~1972, 1988.
32. I. Isayev, "Volumetric effects in the injection molding of polymers", Polym. Eng. Sci., Vol. 25, pp.271~278, 1985.