

## 반용융 다이캐스팅 공정의 주조 방안 설계에 관한 연구

권택환\*, 문찬경\*, 김영호\*\*, 최재찬\*\*

### A Study on the Design of Gating System for Semi-Solid Diecasting Process

Taek Hwan Kwon\*, Chan Kyoung Moon\*, Young Ho Kim\*\*, Jae Chan Choi\*\*

#### ABSTRACT

Semi-Solid Diecasters usually carry out the Semi-Solid diecasting experiments before producing new casts. At the Semi-Solid diecasting stages, the runner-gate part has been always repeatedly corrected, which leads to a tedious processing time and increased processing cost. A large amount of experience is essential in manual assessment and if the design is defective, much time and a great deal of efforts will be wasted in the modification of the die.

In this study, design system has been developed based on design database. In addition, gate experiment for gating system design has been carried out to append the database. It is possible for engineers to make efficient gating system design of Semi-Solid diecasting and it will result in the reduction of expenses and time to be required. The detailed contents of the research are described in the followings.

**Key Words** : Semi-Solid Diecasting (반용융 다이캐스팅), Gating System (주조 방안), Runner (탕도), Gate (탕구)

#### 1. 서론

최근 전 세계적으로 환경문제와 에너지 문제로 인하여 자동차, 항공기, 선박 등 산업 전반에 있어서 환경 친화적, 고성능 경량 부품의 개발 및 공정단축에 대하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이에 새로운 공정인 반용융 성형(Semi-Solid forming)이 활발히 연구되고 있다. 이런 반용융 성형공정의 특징으로는 일반적으로 주조공정에서 보

여지는 수지상 조직(dendrite structure)과는 달리 구상화(globularized)된 고상이 액상 내부에 미세하고 균일하게 분포되어 있으므로 응고시 발생하는 편석(segregation)과 균열(crack)과 같은 결함을 방지할 수 있다. 또 일반 다이캐스팅과 비교하여 액상의 양이 적기 때문에 수축량(diminished shrinkage)과 비틀림(distortion)을 감소시킬 수 있고, 때문에 성형 후 후가공인 기계가공이 필요 없는 정형(net shape)가공을 할 수 있다. 정형가공에 의한 표면과

\* 2002년 2월 21일 접수

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부 정밀정형 및 금형가공 연구소

치수 정도가 좋아지고, 일관성 있고 좋은 기계적 특성을 가진 부품을 제조할 수 있다. 또 액체 상태를 이용하는 기존의 성형방법에 비하여 높은 점도를 가지는 소재를 이용함에 있어서 다이 캐비티 내부를 난류형 충전이 아닌 층류형상으로 충전이 이루어지므로 공기의 유입을 막을 수 있고, 기존의 주조에 비하여 에너지가 절약되므로 금형의 열 피로가 감소되고 금형 수명이 증가하게 되는 등의 여러 가지의 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들에 의하여 특히 최근 전 세계적으로 자동차 부품 생산 분야에 있어서 상업적으로 급속한 발전을 보여왔다.

S. P. Midson<sup>(1)</sup> 등은 반응용 주조 공정에서 평판형 다이 캐비티 충전 실험을 하여 게이트 속도를 제시하였고, 공정인자들이 성형에 미치는 영향에 대하여 조사를 하였다. C. M. Wang<sup>(2)</sup> 등은 밸브 (valve body) 형태의 반응용 다이캐스팅에 있어서 해석을 통하여 반응용 다이캐스팅 공정에서 필요한 최적의 공정 인자들을 결정하였다. 또한 O. Hervieu<sup>(3)</sup> 등은 반응용 다이캐스팅 공정에서 충전 양상(filling pattern)과 게이트 속도(gate speed)에 대하여 연구하였고, M. Garat<sup>(4)</sup> 등은 반응용 상태 소재의 물리적, 기계적 특성에 대한 연구를 하였다.

그러나 이러한 연구들은 특정 제품 형상에 대한 반응용 다이캐스팅 공정의 연구가 대부분이었다. 즉, 반응용 다이캐스팅 금형 설계를 CAD /CAM 시스템에 적용한 사례는 극히 미비한 실정이다. 따라서 자동차 및 항공기분야에서 부품의 경량화, 고기능화, 고강도의 핵심부품의 제조를 위해 반응용 다이캐스팅 금형 설계를 CAD 시스템에 적용시키는 것이 시급한 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 반응용 다이캐스팅 금형 설계의 핵심부분인 주조 방안에 있어서 보다 합리적이고 효율적으로 설계하기 위하여 경험적 지식들을 데이터 베이스화하고, 반응용 다이캐스팅 주조방안의 설계를 위한 알고리즘과 규칙을 제시함으로써 설계의 표준화를 이루게 하였다. 또한 설계 데이터 베이스의 확보를 위해서 게이트 형상에 따른 유동 양상 실험을 수행하였다. 이러한 데이터 베이스를 기반으로 하여 AutoCAD 환경 하에서 AutoLISP 언어를 사용하여 주조방안 설계 시스템을 구현하였다.

## 2. 게이트 실험

반용용 다이캐스팅 주조방안에서 가장 핵심적인 요소는 게이트의 설계이다. 게이트의 크기가 과대하고 속도가 느리게 되면, 충분한 게이트 속도를 이루어 낼 수 없기 때문에 완전한 충진을 이룰 수 없으며, 게이트의 크기가 작고 속도가 크게 되면 소재의 유동이 층류형이 아니라 난류형으로 발생될 가능성이 크며, 다이 캐비티의 균일한 충전이 아니라 후류에 의한 충진이 발생할 수 있다. 때문에 적합한 게이트의 크기와 충전 속도의 결정은 반응용 다이캐스팅 금형 설계에서 중요한 인자로 작용한다. 이에 본 논문에서는 원형 형태의 게이트를 대상으로 유동 양상 실험을 수행하였다.

구상화된 소재인 A356을 이용하여 성형변수 즉, 펀치 하강 속도, 게이트 단면의 변화가 최종 제품의 미세조직에 어떤 영향을 미치는지를 파악하고, 이를 토대로 반응용 다이캐스팅에 있어서 양호한 미세 조직을 가질 수 있는 성형조건을 파악하고자 하였다. 이러한 실험결과를 통하여 성형특성의 이해와 게이트 설계 데이터를 구축하였다.

### 2.1 소재 및 실험 장치

게이트 실험을 위하여 프랑스 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 만든 구상화 조직의 A356을 사용하였는데, 소재의 치수는  $\phi 80\text{mm} \times H 80\text{mm}$ 이고, 성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of aluminum 356 alloy

	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ni
A356	rem	6.59	0.12	0.005	0.39	0.005	0.01	0.02

그리고, 소재의 가열은 50kw 유도가열로를 사용하였고, 고상률이 0.55가 되도록 계단식 가열(step heating)을 하였다. 상·하 금형과 펀치는 고온 공구강인 SKD61을 HRC55로 열처리하였고, 금형과 펀치를 가열하기 위해 카트리지 히터(cartridge heater)를 사용하였다. 금형의 온도가 상승하는 것을 비교적 정확하게 측정하기 위해 고온용 INCONEL  $\phi 1.6$  K-Type 열전대를 사용하여 상·하부 금형의 온도를 측정하였다. Fig. 1에는 프레스에 금형이 설치된 사진을 나타내고 있다.

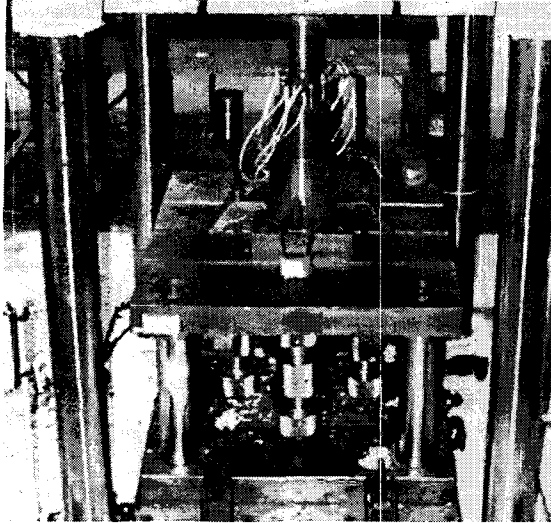
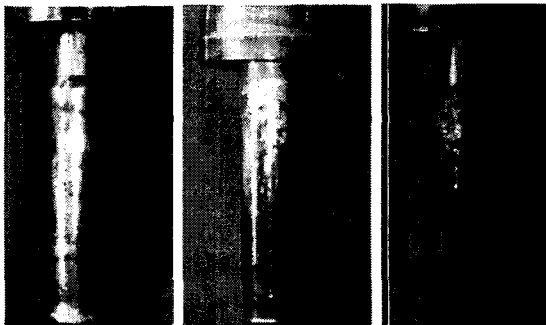


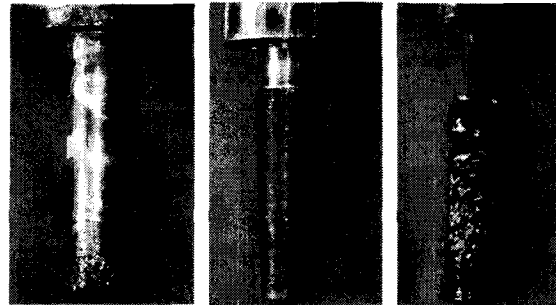
Fig. 1 Photograph of die set for gate experiment

## 2.2 성형 변수 및 실험

게이트 설계의 데이터 베이스를 구축하기 위하여 램 속도, 게이트 단면적을 변수로 설정하였다. 고상률, 금형 온도는 각각 0.55, 250. C로 하고 성형 속도는 50mm/s, 200mm/s로 설정하였고 캐비티의 형상은 단순한 봉재 형태로 하였다. 게이트의 크기는 플런지와 게이트의 단면적 감소율이 76%, 85%, 95%에 해당되는 직경  $\phi 40$ ,  $\phi 31.8$ ,  $\phi 18.3$ 로 하여 실험을 수행하였고, 실험을 통하여 최종 제품은 Fig. 2에 나타내었다. 각각 펀치 하강 속도가 고속, 저속일 경우 각 게이트 크기에 따른 최종 제품을 나타내고 있다. 펀치 하강 속도가 저속일 때가 고속일 때 보다 충진이 좋지 않음을 알 수 있다.



a) Photograph of products at 200mm/s

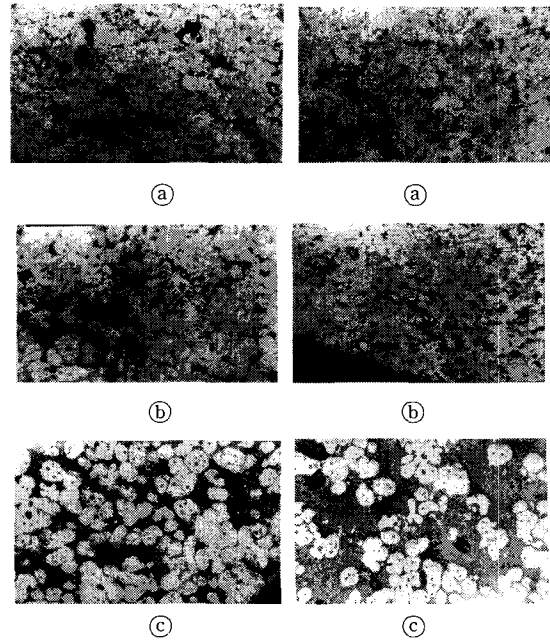


b) Photograph of products at 50mm/s

Fig. 2 Photograph of products

## 2.3 실험 결과

성형된 제품의 미세 조직을 살펴보기 위하여 게이트 부, 제품 중심 부, 제품 끝 부 3군데에서 시편을 채취하였다. 확대 비율을 100배로 하여 성형 변수에 따른 각 부분의 미세 조직을 Fig. 3에서 Fig. 5까지에 나타내었다.



a) 200mm/s

b) 50mm/s

Fig. 3 Microstructure of each part in  $\phi 40$  Gate

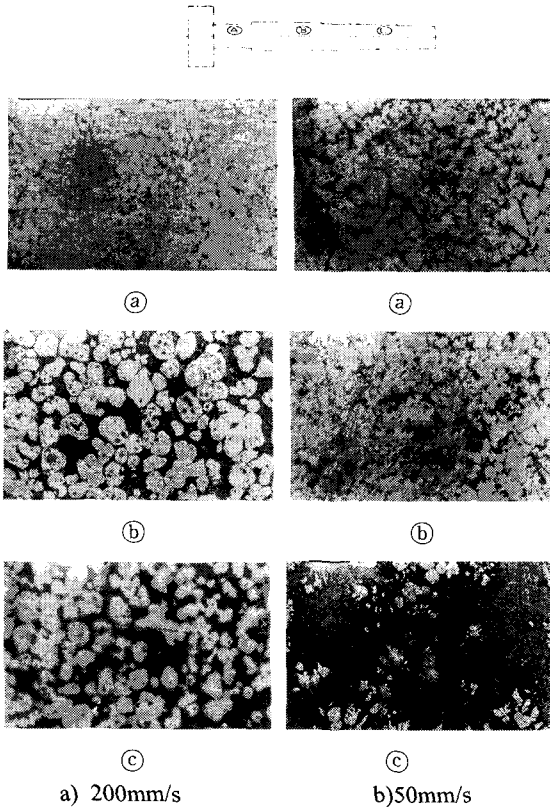


Fig. 4 Microstructure of each part in  $\phi$  31.8 Gate

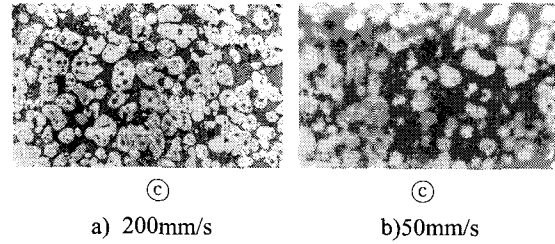
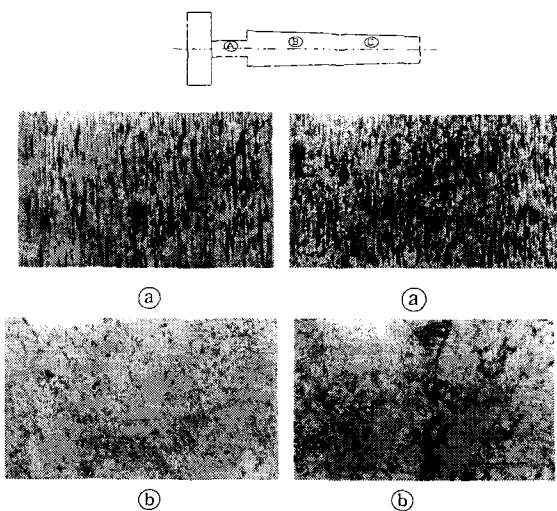


Fig. 5 Microstructure of each part in  $\phi$  18.3 Gate

미세 조직의 공통적인 특징은 게이트 부에서 고상이 많이 분포하고, 성형제품의 끝 부분에서는 액상이 많음을 알 수 있다. 이것은 반응용 성형에서 액상이 먼저 유출되어 생기는 현상으로 설명될 수 있다<sup>(6)</sup>. 이러한 현상은 펀치 하강 속도가 고속일 때보다 저속일 때가 더욱 심하며 고상과 액상의 분리를 가속화시켜 균일하지 못한 제품이 제조된다. 때문에 고속의 성형이 적합한 것을 나타냈다. 게이트의 직경  $\phi 40$ 의 경우 다소 양호한 고상과 액상의 분포를 보이고 있으나,  $\phi 31.8$ 의 경우 제품의 끝 부분에서 액상유출이 과도한 것을 알 수 있다.  $\phi 18.3$ 의 경우는 충진이 불량하고, 게이트 부에서 고상의 압착이 과도하게 나타났다. 이는 제품이 이방성이 될 가능성이 크다는 것을 나타내고 있다. 이와 같이 게이트의 크기와 속도에 따라 최종 제품의 미세 조직에 영향을 주는 것을 알 수 있었고, 게이트가 클수록 성형속도가 빠를수록 미세 조직의 특성이 양호하게 나타나는 사실을 알 수 있었다.

### 3. 데이터베이스

본 논문은 반응용 다이캐스팅을 위한 소재의 특성, 수축률, 게이트 속도 및 크기에 대한 데이터 베이스를 구축하였다.

#### 3.1 소재 DB

반응용 다이캐스팅에 사용이 되는 합금 소재는 합금 제조회사에 따라 합금조성성분들이 조금씩 다르고, 교반(stirring)이나 여타의 성형 공정의 특성에 의하여 합금성분들의 특성이 조금씩 변화할 수 있다. 또한 미숙련자의 경우 반응용 다이캐스팅 합금에 대한 지식의 미비함으로 인하여 합금의 선택에 있어서 어려움이 발생된다. 따라서 반응용 다이캐스팅에 사용이 되어지는 합금들의 성분과 물리적,

기계적 특성을 파악하고, 각 합금들의 온도에 대한 특성들을 결정하는 것은 상당히 중요하고, 이에 본 연구에서는 합금소재에 대한 데이터 베이스를 구축하여 사용자가 요구하는 제품의 특성에 부합하는 반응용 합금의 선택을 용이하게 하였다.

시스템에서 제시하고 있는 반응용 다이캐스팅 합금은 알루미늄 계열 합금이나 마그네슘 계열 합금을 제시하고 있다. 알루미늄 합금 반응용 다이캐스팅에서 가장 보편화되어 사용이 되어지고 있는 A356, A357, A319 등의 합금소재와 ZA12, AZ92D의 마그네슘 합금을 중심으로 데이터 베이스를 구축하였고 합금 재료에 대한 데이터 값들은 반응용 합금 소재를 제조하는 회사로부터 얻어진 자료를 이용하였다.

각 소재의 열처리 전과 열처리 후의 최대인장응력(UTS), 인장응력(TS), 항복응력(YS), 연신율(EL), 경도(HD)와 같은 기계적인 특성과 비중(specific gravity), 밀도(density), 열전도율(thermal conductivity)과 같은 물리적인 특성들을 데이터 베이스화 하였고, 각 소재에 대한 고상 온도(solidus)와 액상 온도(liquidus)를, 또 이 구역내의 온도에 따른 합금소재의 고상률(solid fraction), 비열(specific heat), 평균 열팽창계수 (mean coefficient of thermal expansion) 등의 값들을 데이터 베이스화 하였다. 이렇게 데이터 베이스화 된 반응용 합금소재의 특성 값들에 의하여 사용자가 요구하는 제품특성에 적합한 합금을 선택할 수 있고, 또 각 합금의 온도 조건에 따른 고상률을 파악하여 성형가능성에 대한 타진을 할 수 있으며, 또한 요구하는 고상률에 대한 성형온도를 파악할 수 있다.

### 3.2 수축률 DB

반용용 소재의 충전 후 액상이 수축하게 되며 금형의 다이 캐비티를 가공하기 위한 수축률을 예측할 수 없게 되면, 요구하는 치수의 제품을 얻을 수 없게 된다. 수축률을 너무 작게 예측을 하면, 원하는 제품의 치수를 얻을 수 없으며, 너무 크게 예측을 하게 된다면, 소재의 손실뿐만 아니라 성형 후 후 가공을 많이 하여야 한다는 경제적 시간적 손실을 가져오게 된다. 따라서 성형온도에 따른 수축률의 정확한 예측이 제품의 생산에 중요한 역할을 한다.

$$\Delta L = \frac{\Delta l}{L_0} = \alpha(t_s - 20) - \alpha_f(t_f - 20)$$

$$Factor = 1 + (\Delta L \times S)$$

- $\alpha$  : 합금의 열팽창 계수
- $t_s$  : 합금의 상승한 온도
- $\alpha_f$  : 금형 재료의 열팽창계수
- $t_f$  : 금형의 상승한 온도
- $s$  : 보정 계수

보정계수를 0.5로 지정하여 반응용 다이캐스팅에 대한 수축률을 결정하였다<sup>6)</sup>.

### 3.3 게이트 설계 DB

반용용 다이캐스팅의 금형 설계에 있어서 가장 중요한 부분은 게이트의 설계부분이다. 일반적인 다이캐스팅 금형 설계의 게이트 설계와는 달리 반응용 다이캐스팅의 게이트 설계는 반응용 상태의 소재를 이용하게 되므로 충전 속도, 냉각속도, 게이트 속도의 차이를 가지게 되며, 층류(lamina flow)형상의 충전 양상(filling pattern)을 가져야 하므로 게이트의 설계는 제품의 성형에 결정적인 영향을 미치는 요소이다.

이러한 게이트의 설계는 충전양상과 게이트속도 등에 의하여 크기가 결정이 되며, 본 연구에서는 사각 게이트(square gate)와 원형 게이트(circle gate)의 경우를 고려하였고, 게이트 속도 및 단면적에 대한 성형의 적합성에 대하여 검토를 하였다.

원형 게이트일 경우 램 속도와 원형게이트의 단면적 변화에 따른 성형에 미치는 영향을 알아보기 위한 앞서 실험을 수행하였다.

앞선 실험의 결과를 정리하면 다음과 같다. 게이트의 크기가 주조품의 직경과 같은 크기를 가질 경우 가장 최적의 충전효과를 기대할 수 있으며, 폴딩(folding)과 기공유입의 배제를 피할 수 있을 것이며, 만약 경제적인 이유에 의하여 게이트 크기를 확보할 수 없을 경우 최대한 주조품의 직경에 근접하게 설계가 되어야 한다. 또 직경의 차이가 날 경우 급작스러운 단면의 변화를 피하여, 소재 주입시 주입구 부분의 전체적인 충진을 이루어야 할 것이다. 또 런너와 게이트의 크기비가 크게 되면 충



## 4.2 GATING SYSTEM DESIGN

이 부분은 실제적인 주조 방안 설계부분이다. 사용자가 제품의 특성에 맞는 추천 주조 방안을 제시를 받아서 주조 방안을 설계 할 수 있다. 구체적인 부분은 실제 제품에 적용한 사례에서 나타나있다.

## 5. 시스템 적용

구축되어진 시스템을 이용하여 자동차용 air-compressor mounting bracket 제품에 적용하였다. 이 제품은 130×200×140mm 정도의 전체적인 크기를 가지고 있지만 실제적인 제품의 하부 두께는 10mm 측면 두께는 30mm이다. 인장응력이 대략 250MPa 이상의 성형에 기준을 두었다. 설계의 프로세스는 다음과 같다.

먼저, PRO/ENGINEER를 이용하여 Fig. 9와 같이 제품의 3차원 모델링을 한 이후 시스템에 적용시키기 위하여 Wire frame 형상의 IGES 파일 형태로 모델 파일을 생성한다.

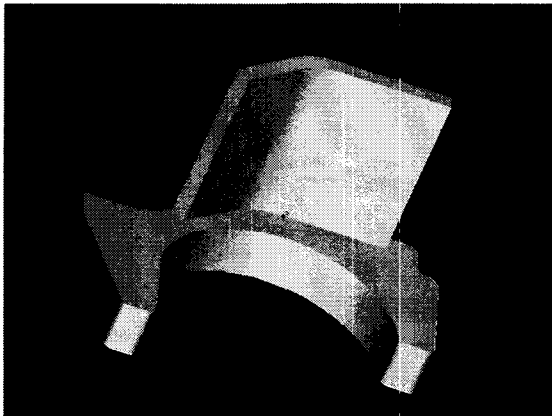


Fig. 9 Modelling of A/C mounting bracket

Fig. 10과 같이 입력한 제품의 형상을 CAST CLASSIFICATION 부분에서 분류한다.

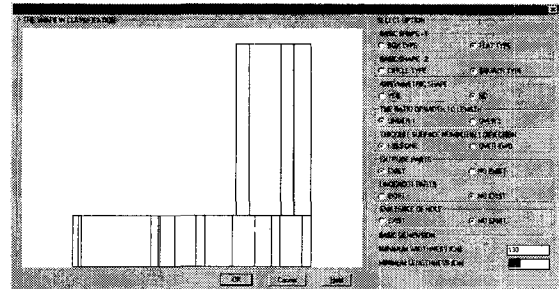


Fig. 10 Window of cast classification

다음은 MATERIAL SELECTION 부분에서 각 소재의 특성을 파악하고, 조건에 맞는 A319 소재를 선택, A319 합금 소재 부분으로 넘어간다. Fig. 11과 같이 고상률을 약 50% 정도의 성형을 위한 조건, 온도 590. C를 선택한다.

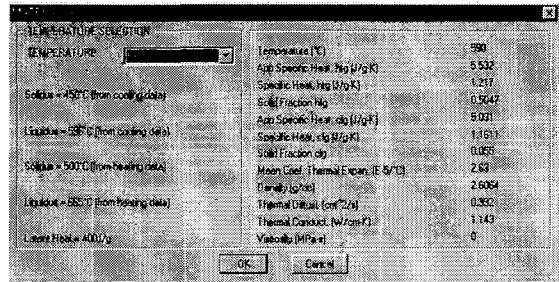


Fig. 11 Window of material selection

APPLY SHRINKAGE 부분에서 Fig. 12와 같이 소재의 온도, 고상률, 열팽창 계수를 확인하고 금형의 열팽창 계수, 온도, 그리고 보정계수를 입력하였다. 일반적인 금형 소재인 고탄소강의 열팽창 계수는 1.05×E6정도이며, 온도는 250. C를 선택하였다. 또 고상률이 50%이고 보정계수는 0.5를 주었다. 입력 후 자동적으로 제품모델의 스케일이 변화하도록 하였다.



Fig. 11 Window of apply shrinkage

Fig. 12와 같이 SAMPLE GATING SYSTEM에서 추천 구조 방안을 제시한다.

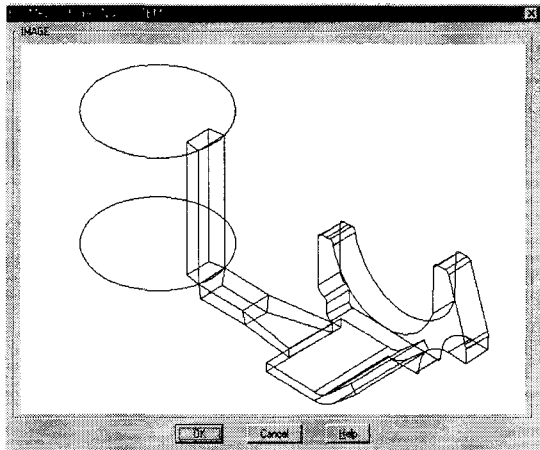


Fig. 12 Window of example gating system

Fig. 13과 같이 GATE DESIGN 부분에서 게이트 속도, 충전시간, 제품의 체적 등의 값들을 입력하게 된다. 사각형 게이트에서의 데이터를 이용하여 게이트 속도는 5m/s, 충전시간은 0.03s로 결정하였다. 게이트와 런너의 관계에서 게이트의 수는 1개, 게이트와 런너의 크기 비는 2, 런너의 세장비 는 2로 결정하였다. 게이트의 크기는 폭 57mm, 두께 10mm로 결정하였다.

Fig. 14에서는 런너를 9가지의 세부적인 부분 즉, Straight type, L-taper, R-taper, Y-junction, R-inbend, R-outbend, L-inbend, R-outbend, Sprue으로

분류하여 설계하고 있다. 이러한 런너 설계를 통하여 런너의 설계를 통해 최종적인 주조 방안이 Fig. 15과 같이 설계되었다.

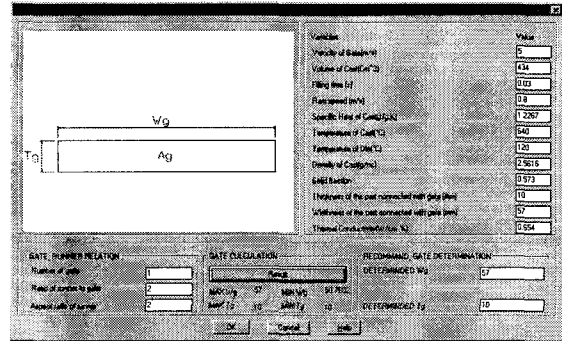


Fig. 13 Window of gate design

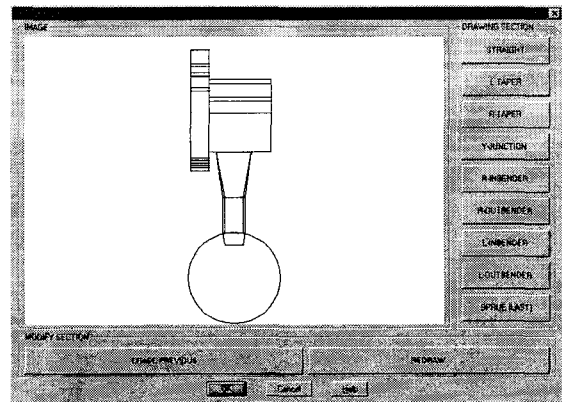
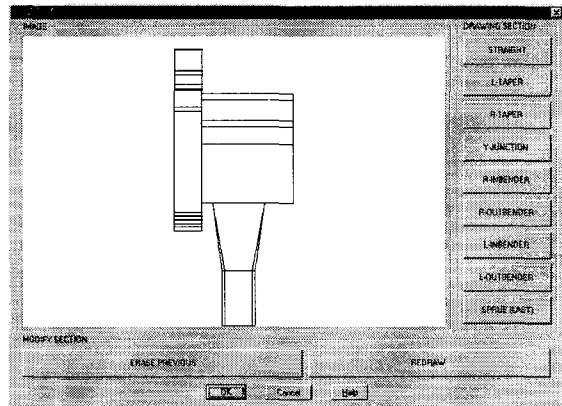


Fig. 14 Window of runner design



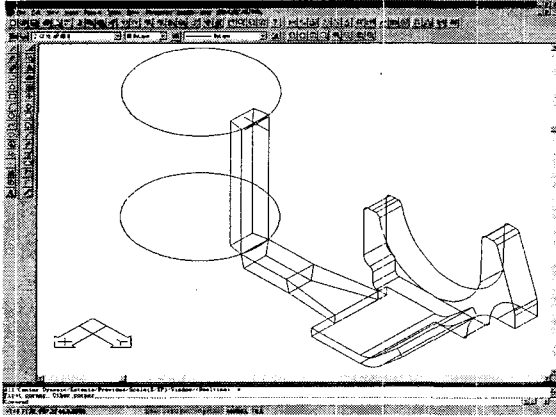


Fig. 15 Window of final gating system design

## 6. 결론

본 연구는 현재 반응용 다이캐스팅 금형 설계에 이용되고 있는 숙련자에 의한 시행착오법(trial and error method)의 문제점을 극복하기 위하여, 경험적인 지식(knowhow)을 데이터 베이스화 하고, 제품의 형상에 따른 적합한 구조방안 설계를 CAD/CAM에 적용하는 금형 설계 시스템의 개발의 연구로써, 구조 방안 설계에 주안점을 두었다. 제품의 형상과 반응용 소재의 선택으로부터 세부적인 구조방안 설계가 가능한 시스템을 구축하였고, 산업현장의 전문적인 지식, 국내외의 여러 관련 자료와 실험을 통하여 관련된 지식정보들을 수집, 분류하여 데이터 베이스화하여 반응용 다이캐스팅 구조방안 설계 시스템을 구축하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 반응용 합금소재에 대한 합금성분과 물리적 기계적 특성, 그리고 각 온도에 대한 소재의 특성에 관한 정보를 수집하고 데이터 베이스화하였다.
- 2) 실험을 통하여 게이트 단면적과 속도가 제품의 성형에 미치는 영향에 대하여 밝힐 수 있었다.
- 3) 반응용 다이캐스팅 게이트 설계에 필요한 설계 지식들을 정보 수집과 실험을 통하여 데이터 베이스화하였다.
- 4) 런너 설계를 위하여 제품 형상에 의한 분류를 수행하고, 결과 값에 의한 추천 게이트 시스템

을 제시하고 이에 의하여 사용자가 세부적으로 런너를 설계할 수 있게 시스템을 구성하였다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. S. P. Midson, L. E. Thornhill, and K. P. Young "Influence of key Process Parameters on the Quality of Semi-Solid Metal Cast Aluminum," Component 5th International Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 181-188, 1998.
2. C. M. Wang, G. H. Nickodemus, T. P. Creeden, "Determining Optimal Semi-Solid forming Process Parameters by Simulation," 5th International Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 327-334, 1998.
3. O. Hervieu and J. Collt, "Die-casting of light metal in the Semi-solid state : Study of the PID process," 4th International Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 283-289, 1996.
4. M. Garat, "Aluminum Semi-Solid Processing : From the Billet to the Finished Part," 5th International Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. xvi-xxxi, 1998.
5. C.P.Chen et al, "Semi-Solid Deformation of Non-dendritic Structure -I. Phenomenological Behavior," Acta mater. Vol. 45, No. 5, pp. 1955-1968, 1997.
6. K. P. Young, Ballwin Mo., "Process for preparing a slurry structured metal composition," United State Patent, No. 4,565,241[5].
7. S. P. Midson, R. B. Minkler, J. G. Brucher "Gating of Semi-Solid Aluminum Castings," 6th International Conf. On Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. pp. 67-72, 2000.
8. S. P. Midson, L. E. Thornhill & K. P. Young, "On

Semi-solid Processing of Alloys & Composites,"  
5th International Conf. Colorado School of Mines,  
pp. 181, 1998.