

# Computer Simulation에 의한 Semi-Solid 단조금형의 설계 및 실험적 검증

서판기\* · 이동훈\* · 강충길\*\*

## Die Design of Semi-Solid Forging by Computer Simulation and their Experimental Investigation

P. K. Seo, D. H. Lee, and C. G. Kang

### Abstract

Die design by computer simulation has some advantages compared with the conventional method which has performed by designer's experiences and trials and errors. The die filling and solidification process of thixoforming process were simulated by MAGMAsoft/thixo module. First of all, thixoforming die design was applied to previously geometry shape. The value of pressure distribution shows high and uniform as the gate diameter is 18mm. Designed gating system considering the deformation of die and product was suggested by the filling simulation. Gate velocity[7.25m/s] of designed gating system shows that propriety to semi-solid metal working process and CAE results were in good agreement with experimental results.

**Key Words** : Thixocasting, Thixoforging, Thixotropic, Solidification

### 1. 서론

최근에, 반응용 주조(thixocasting), 단조(thixoforging)와 같은 성형 공정은 기존의 전통적인 주·단조를 대체하는 공정으로 급속도로 발전하고 있다. 알루미늄과 같은 경량 소재를 주로 이용하는 반응용 주·단조 공정들은 고강도의 복잡한 부품을 많이 차지하는 자동차 산업을 중심으로 하여 연구, 개발이 진행중이다. 이러한 새로

운 공정은 기존의 성형 공정과는 달리 광범위하고도 경험적인 데이터베이스의 지원이 효과적이지 못하므로 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)의 역할이 주목을 이루고 있다.<sup>(1)</sup>

지금까지 반응용 성형 공정에 관한 충전 및 응고 해석 사례는 거의 찾아볼 수가 없었고, 실제 반응용 성형 공정으로 제조되어지고 있는 제품을 가지고 충전 실험을 수행한 예도 없었다. 따라서, 본 연구에서는 주조 전용

\* 부산대학교 기계공학부 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

상용 code를 이용하여 가전용 compressor 부품을 전산 해석에 의한 충전 및 응고 해석을 수행하여 금형 설계에 적용을 하였으며, 반응용 단조 프레스를 이용하여 충전 실험(filling test)을 수행하여 시뮬레이션의 타당성을 검토하였다.

## 2. 반응용 성형공정의 금형 설계

### 2.1 유동 모델

반응용 소재의 유동 모델을 세우기 위해서는 전단변형을 속도(shear rate)의 변화에 따른 점도의 의존성을 이해하여야만 한다. 액체상태의 알루미늄 소재는 전단변형을 속도가 증가함에 따라 급격히 점도가 감소한다. Non-Newtonian 소재의 유동은 기본적인 전단 선도로서 설명할 수 있는데 전단 변형률 속도만 가지고는 thixotropic 유동을 정확하게 이해하기는 힘들다<sup>(2)</sup>.

본 연구에 이용된 상용 code인 MAGMAsoft는 다양한 단계의 알고리즘의 물리학적 구현이 용이하며, 물리적 성질의 보전, 전형적인 FDM, FEM 보다 정확한 수렴성, 연산시간의 감소 등의 특징을 지니고 있다. 검사체적 연산 방법인 CVFDM(control volume finite difference method)방법을 이용한 MAGMAsoft의 기본 지배방정식은 액상인 용융 가공의 경우와 동일한 연속방정식, Navier-stokes 방정식, 에너지 방정식, VOF(volume of fluid)법 등이다.

여기서 Ostwald-de Waele 지수가 1이면  $m = \mu$  가 되는 Newtonian 유동 모델식이 된다. Kang<sup>(3)</sup>는 유동모델을 Newtonian과 Ostwald-de Waele의 두 가지를 이용하여 MAGMAsoft를 이용하여 주형 내의 충전 및 응고 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였을 때 Ostwald-de Waele 유동모델이 반응용 성형 공정의 해석에 더 적합하다는 결론을 얻었다. 따라서 본 연구에 이용한 유동 모델식은 Ostwald-de Waele 유동 모델식을 이용하여 전산 해석을 수행하였다.

### 2.2 형상 모델링 및 해석조건을 입력

비교적 새로운 공정인 반응용 성형 공정으로 성형이 가능한 제품은 air conditioning, braking, fuel delivery와 suspension, frame류 등의 부품으로서 그 응용 범위는 한정적이다.

본 연구에서는 주조 전용 상용 code인 MAGMAsoft를 이용하여 가전용 compressor 부품인 frame의 반응용 성형 공정의 충전 및 응고 해석을 수행하여 금형 설계에

적용하였다.

Fig. 1에는 기존의 다이캐스팅과 동일한 형상의 제품을 반응용 성형에 적용한 금형 설계의 개략도로서 주입 구의 직경을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 또한 CATIA 상에서 3차원으로 구현한 것과 파일 변환을 위한 STL(streolithography)파일을 함께 나타내었다.

소재는 주조용 알루미늄 합금인 A356을 이용하여 해석을 수행하였다. 각각의 모델링된 부위에 대한 체적과 질량은 Table 1과 같다.

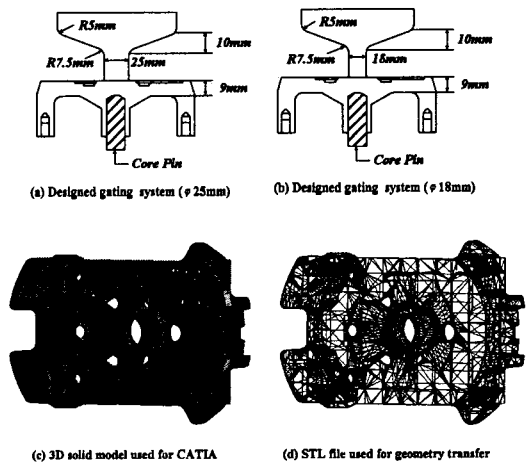


Fig. 1 The geometry modelling of designed gating system for Al frame

사용 소재는 A356이며 금형 온도는 250℃, 소재의 초기 온도는 고상율(solid fraction)이 50%인 583℃, 펀치의 속도를 200mm/s로 설정하였으며, 금형과 금형, 주형과 금형 사이의 열 전달 계수는 각각 500, 1000W/m<sup>2</sup>K로 하였다. 가압 유지시간은 반응용 단조 프레스의 사양과 동일하게 38Ton을 19초 동안 유지하는 것으로 설정하였으며, 자동요소 분할에 의하여 생성된 총 요소 수는 740,784개이고 주물에 해당하는 metal cell의 수는 58,260개이다.

Table 1 Volume and mass of each modelled part

Material	Properties	
	Volume(l)	Mass(Kg)
Cast alloy	0.08917	0.238
Permanent Mold(1)	3.39782	26.589
Permanent Mold(2)	0.01785	0.140
Inlet	0.01637	0.044
Gating(runner)	0.04963	0.132
Ingate	0.01067	0.028

주입구의 직경  $\phi$ 가 25mm, 18mm일 때의 두 가지 경우를 적용하여 충전해석을 수행한 결과를 Fig. 2~Fig. 3에 나타나 있다. 주형 내의 온도분포는 590℃ 전후로 나타났으며, 압력의 분포는 1000mbar에서 3000mbar까지 광범위하게 분포하였지만 주입구의 직경이 작은 경우(18mm)가 좁은 압력 범위 내에서 균일한 압력 분포를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 주입구의 직경이 25mm와 18mm인 경우 충전양상은 유사하게 나타났고 70%와 90% 충전되었을 경우의 온도 분포도 거의 유사하였지만 주입구가 작은 18mm쪽이 연속의 법칙에 의하여 속도가 더 큰 값을 가지므로 큰 쪽에 비하여 충전시간은 다소 작은 값을 나타내었으며 충전 양상도 좀 더 안정적으로 나타냈다.

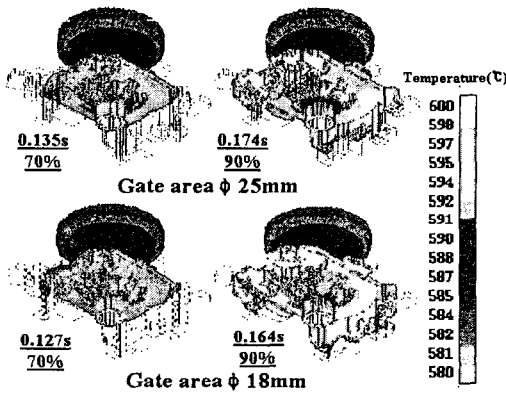


Fig. 2 The pressure distribution at 70, 100% filled state with 25mm, 18mm gate area

충전 중의 압력의 분포를 나타낸 Fig. 3에서 보면 충전 완료 후의 압력은 직경이 작은 쪽이 분포도 균일하면서 더 큰 값을 가짐을 알 수 있었다.

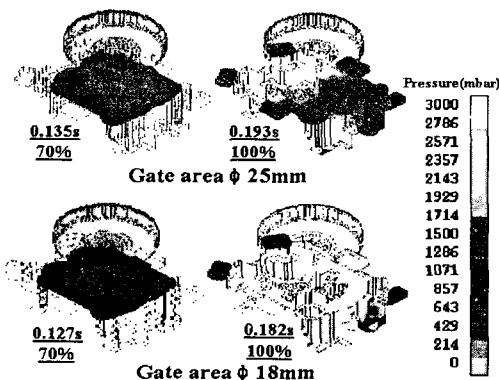


Fig. 3 The pressure distribution at 70, 100% filled state with 25mm, 18mm gate area

충전 완료 후의 주형 내의 압력의 수치가 높으므로 그 효과에 의하여 압력이 작은 큰 직경의 경우보다는 미충전 부의 발생 가능성도 적으면서 충전이 양호할 것으로 판단되었다.

수정된 형상의 개략도와 CATIA를 이용하여 생성한 3차원 모델 파일, 형상인식을 위한 STL 파일을 Fig. 4에 나타내었다.

제품 구조상 성형 후 제품의 취출시 슬리브 부가 뜯어져나가므로 제품과 금형에 변형이 발생할 가능성이 있으므로 Fig. 5에 나타난 형상과 같이 슬리브 부를 수정하여 성형을 한 후 취출할 때 금형이나 제품에 변형을 최소화할 수 방안으로 금형을 수정하였다.

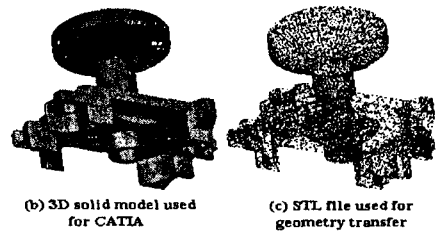


Fig. 4 The geometry modelling of modified gating system for Al frame

수정된 형상은 기존의 방안에 비하여 슬리브의 체적이 증가하였으며 캐비티의 형상도 주물과 동일한 형상으로 변경되었다. 변경된 형상에 대한 각 부의 체적과 질량을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Volume and mass of each modelled part (modified model)

Material	Properties	
	Volume(l)	Mass(Kg)
Cast alloy	0.10771	0.287
Permanent Mold(1)	3.36836	26.359
Permanent Mold(2)	0.01005	0.079
Inlet	0.04441	0.118
Gating(runner)	0.05879	0.157
Ingate	0.00166	0.004

해석 조건으로서서는 실제 성형 실험과 동일하게 적용하였다. 주입 속도에 대한 고려는 반응용 성형 시의 사출 속도인 370mm/sec에 대해서 단위 초당 주입량(pouring rate)을 계산하여 1,678.5cm/s로 하였다. 금형의 온도는 예열을 고려하여 250℃, 소재의 초기온도는 577℃(solid fraction, fs=55%)로 실제 성형 시에는 재가열된 빌렛의

이송 도중 온도 손실 등이 발생하나 전산 해석상에서 정량적인 온도 손실을 입력하기 곤란하므로 빌렛의 온도는 전제가 일정하다고 가정하였다.

Midson<sup>(4)</sup> 등은 실험을 통하여 반응용 성형에 적합한 성형 조건으로서 게이트 통과 속도는 5m/s 이상이고 빌렛의 초기온도는 573℃ 이상이 적합하다고 제안하였다. 이에 근거하여 초기 형상과 수정된 형상에 대하여 각각의 게이트 통과 속도를 계산해 보았다. Table 1와 2의 초기 형상과 수정된 형상의 질량에서 금형(permanent mold)을 제외한 나머지 부분의 체적은 각각 0.149 ℓ와 0.168 ℓ로서 149cm<sup>3</sup>와 168cm<sup>3</sup>에 해당한다.

초기방안 형상으로 계산되어진 결과에서 주입구 직경이 25mm와 18mm일 경우의 충전 완료시간은 각각 0.193s와 0.182s이다. 이에 근거하여 수정된 형상의 충전 완료시간은 사출 속도도 370mm/s로 증가하였으므로 약 0.14s 정도가 될 것으로 예상하여 게이트 통과 속도를 각각 계산하였다.

### 2.3 해석결과 및 고찰

설계된 형상을 이용하여 금형 내의 충전 및 응고 현상을 살펴보았다. MAGMAsoft의 전 처리기에서 형상인식을 위한 STL 파일로부터 cavity, gating, inlet 등의 해석상의 재료 그룹을 지정하였고 자체 모델기능을 이용하여 간단한 형상인 금형 등을 생성하였다.

직교 좌표 분할에 의하여 생성된 직사각형 요소의 수는 591,668개이고, 주물의 cavity에 해당하는 metal cell의 수는 63,751개이다. 전산해석에 이용된 워크스테이션의 사양은 Indigo2의 R10000 CPU, 512M 메모리의 비교적 우수한 워크스테이션을 이용하여 전산해석을 수행하였음에도 불구하고 MAGMathixo 모듈을 이용하였을 경우 연산시간은 약 10일 정도가 소요되었다.

大中<sup>(5)</sup>은 금형 표면에 알루미늄 용탕이 흐를 때, 대류 열 전달 계수를 1,260W/m<sup>2</sup>K로 제안하였으나, 본 해석에서는 반응용 빌렛과 금형과의 열 전달 계수를 1,000W/m<sup>2</sup>K로 하였고, 상형과 하형 및 코어와의 열 전달 계수는 500W/m<sup>2</sup>K로 하여 해석을 수행하였다. 유동 모델로는 Ostwald-de Waele 유동 모델을 이용하였으며 충전 완료 후의 가압유지 시간은 19초 동안 38Ton(약 82MPa)의 하중을 가하는 것으로 설정하여 해석을 수행하였다. Fig. 5는 60%와 70% 충전 시의 온도, 압력 및 속도 분포로서 주입구 통과 직후 횡 방향으로 충전이 시작되면서 자유표면의 온도가 평균 2~3℃ 증가하는 현상을 발견할 수 있었다.

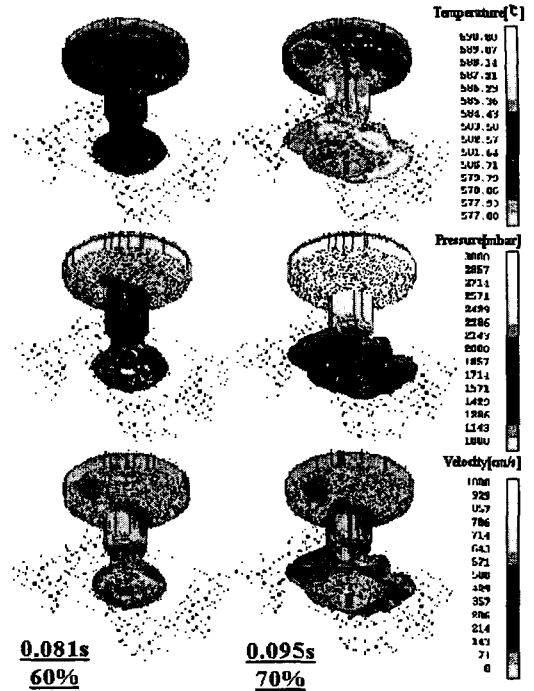


Fig. 5 The temperature, pressure and velocity distribution at 60, 70% filled state with designed gating system

반응용 빌렛이 주입구 통과 직후부터 온도가 상승함으로서 실제 초기 빌렛의 고상율은 55%이지만 이와 같이 온도 상승으로 인하여 좀더 양호한 충전이 가능할 것으로 사료된다. 압력의 분포는 슬리브 부의 저항으로 인하여 이 부위에서 큰 값을 가지며 자유 표면에서는 슬리브 부에 비하여 낮은 값을 나타내었으며, 충전이 진행되면서 슬리브 부의 압력은 점점 더 증가하고 있다. 속도는 비교적 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 6에 75%, 80%, 85%, 100% 충전 시의 온도, 압력 및 속도의 분포를 나타내었다. 충전 해석 결과에서 알 수 있듯이 용탕의 경우와 같은 충전 중의 cavity 내의 난류로 인한 공기의 포집 등의 충전 결함이 거의 발생하지 않는 반응용 유동 특성을 잘 나타내는 순차적으로 충전이 이루어지고 있다. 주입구 통과 후에 상승된 온도가 더 이상 증가하지 않으면서 80%에 해당하는 0.109초까지 충전이 진행되었으나, 아래쪽으로 충전이 진행되기 시작하면서 기하학적 형상의 구속으로 인하여 자유표면에서의 온도의 상승이 일어나기 시작하였다. 충전 완료 후 590℃(고상율 45%)에 이르는 높은 온도 상승은 cavity 내의 형상의 원인뿐만 아니라 충전 완료 후의 가

압의 효과에 의한 상승 요인이 더 클 것으로 사료된다.

빌렛의 초기 온도보다 10~13°C에 이르는 온도 상승 결과의 원인은 속도의 구배에 의한 역학적 에너지의 열에너지로의 변환이며 온도의 상승량은 반응용 상태의 점도와 속도 구배량에 의존한다고 설명할 수 있다.

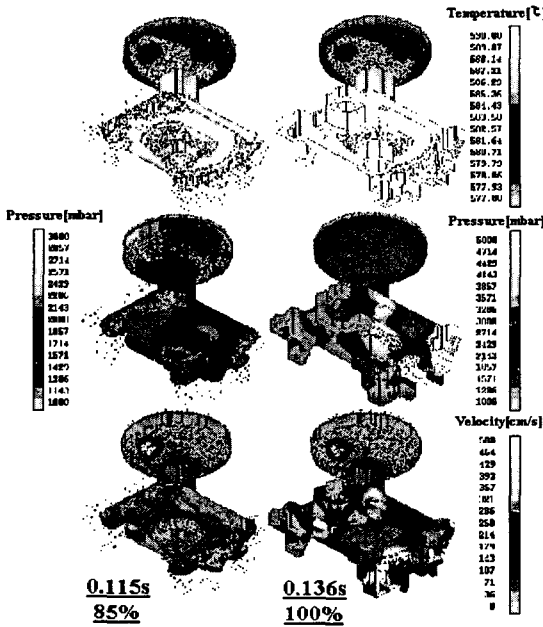


Fig. 6 The temperature, pressure and velocity distribution at 85, 100% filled state with designed gating system

압력은 80% 충전 시 충전이 완료된 측면 부위에서 상당한 압력을 받는 것으로 나타났다. 충전 완료 시에는 가압의 효과에 의하여 충전 진행 중의 압력에 비하여 거의 2배에 해당하는 5,000mbar까지 나타났으며 자유표면의 압력은 충전 진행 중에는 1,500mbar 전후로 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 균일한 압력의 분포로 인하여 금형 수명의 측면에서 양호할 것으로 예상된다. 속도의 분포도 압력의 분포와 마찬가지로 충전 중에는 전체적으로 균일한 값을 나타내었으나 충전 완료후의 불안정한 속도 구배는 압력 분포의 원인과 동일한 것으로 판단되었다.

Fig. 7은 70%와 90% 충전 시 단면의 온도분포로서 충전 중의 제품 내부의 온도분포를 나타내며, 단면을 기준으로 좌우에서 약간의 온도구배의 차이를 나타내고 있다. 온도구배에 차이가 발생하는 원인으로는 요소 생성 시 직교좌표로 분할하므로 인하여 FEM(finite element

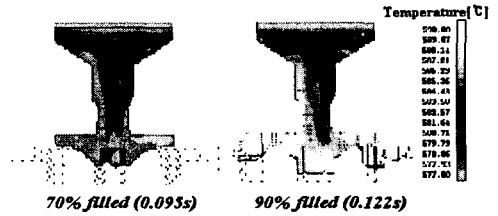


Fig. 7 The temperature distribution at 70%, 90% filled state. (section view)

method)과 같이 완벽한 형상의 인식이 불가능하기에 발생한 것으로 사료된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 아주 작은 요소로 분할할 경우에는 연산시간의 엄청난 증가로 인하여 실제의 적용에는 문제가 있을 것으로 판단되므로 연산시간과 형상 인식의 정확도를 고려하여 요소 분할 정도의 취사선택이 필요함을 알 수 있었다.

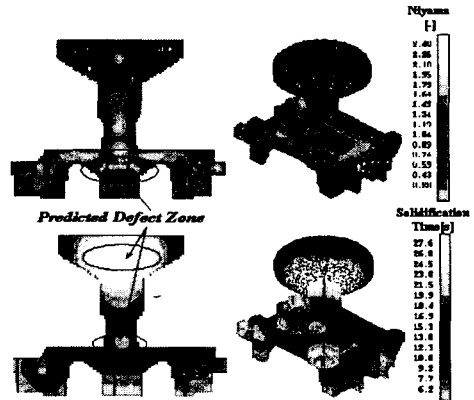


Fig. 8 The contour of NIYAMA criteria and solidification time

Fig. 8에는 응고 수축 결함을 판단하는 기준인 응고시간과 Niyama 값 등을 나타내었다. 온도 구배( $G_s$ )를 냉각속도(cooling rate :  $\dot{T}_s$ )의 제곱근으로 나눈 값으로 정의되는 Niyama criteria의 분포를 나타내었다. 제품 중심부의 응고 수축 결함을 예측하기 위해 사용하는 Niyama criteria의 분포 결과 core부와 접촉하는 부위에서 다소 높은 값을 나타내었으나, 대체적으로 금형과 접촉하는 부위에서 제품 내부로 단계적으로 나타나므로 공급률과 가공의 분포를 종합적으로 고찰해 볼 때, 응고에 의한 수축 결함은 거의 나타나지 않았다. 응고시간 분포에서도 주입구의 응고가 충전 완료 후 약 17초를 전후로 하여 나타났으므로 가압의 효과를 19초 동안 유지하는

것은 타당한 것으로 판단되었다. 또한, 응고 수축 결함의 발생 가능성이 높은 최종 응고부가 슬리브 부 및 후 가공 부위에서 발생하므로 응고 수축 결함은 발생하지 않을 것이다.

### 3. 충전 실험

전산 해석의 결과와 충전 실험의 결과를 각각 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 70%, 80%와 92% 충전 결과와 충전 실험에 의한 결과를 비교해 보면 해석결과와 실험결과가 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다. cavity 선단 부등에서의 약간의 차이가 발생하는 원인으로 해석결과는 충전이 100% 진행 될 때의 중단단계에서의 충전 양상이며 실험은 스트로크를 조절하여 강제적으로 중단 시켰기 때문에 발생한 차이인 것으로 사료된다. 스트로크와 속도의 다단 제어가 용이한 우수한 장비를 사용하여 실험을 수행할 경우에는 이와 같은 차이점 없이 잘 일치할 것을 판단된다.

본 연구의 결과로 반응용 성형 공정에 있어서의 전산해석에 의한 유동 및 응고 해석의 결과를 실제 금형 설계에 적용함으로써 신제품 개발에 소요되는 제품개발 시간을 획기적으로 단축할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 반응용 소재는 온도에 아주 민감한 재료이므로 성형 공정 중 소재의 온도를 측정하여 반응용 소재의 온도에 대한 민감도를 파악하는 새로운 연구가 필요하다고 생각된다.

### 4. 결론

전산해석을 이용한 반응용 성형 공정의 금형 설계에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전산 해석을 통하여 반응용 성형 공정의 유동 상태를 쉽게 파악 할 수 있는 전산 해석의 기법을 확립하였으며, 해석의 결과를 실제 성형 공정에 적용하였다.

(2) 펀치 속도 및 금형의 예열 온도보다는 주입구의 형상이 반응용 소재의 유동 패턴에 가장 큰 영향을 주며, 게이트 통과 속도 및 금형과 제품의 변형을 고려한 금형설계방안을 제안하였다.

(3) 충전 실험(filling test)을 수행하여 해석 결과의 적용 가능성을 파악한 결과 실험과 전산 해석결과가 상당히 잘 일치하였으며, Ostwald-de Waele 유동 모델이 전산 해석을 이용한 반응용 성형 공정의 금형 설계에 적합함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) E.Flender, D.M.Lipinski and E.Hepp, 1998, "New Developments for Processes Modeling of Thixotropic Forming Processes", Advances in Aluminum Casting Technology (Conference Proceedings from Materials Solutions'98), pp.33~38.
- (2) Laxmanan V and Flemings MC, 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15%Pb alloy", Met. Trans, Vol,11a, pp.1927~1937.
- (3) C.G.Kang and Y.C.Lee, 1999, "Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixofforming Process of Semi-Solid Aluminium Alloys", Transactions of Materials Processing Vol.8, No.2, pp.188~199.
- (4) S.P.Midson, L.E.Thornhill and K.P.Young, 1998, "Influence of Key Process Parameters on the Quality of Semi-Solid Metal Cast Aluminum Components", 5th Int' l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp.181~188.
- (5) 大中逸雄, コンピュータ傳熱・凝固解析入門, 丸善株式会社, 1985, pp.167~208.

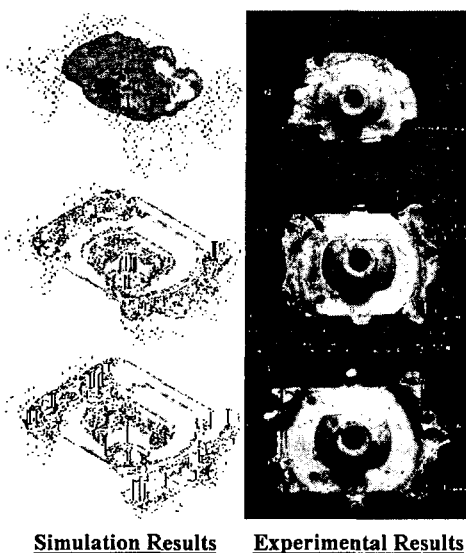


Fig. 9 The comparison of computational analysis and experimental result by filling test