

반용융 알루미늄 합금의 Thixoforming 공정에서 점도의 변화가 유동특성에 미치는 영향

강충길* · 이유철**

(1998년 12월 7일 접수)

Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixoforming Process of Semi-Solid Aluminium Alloys

C. G. Kang and Y. C. Lee

Abstract

Semi-Solid Forming Process(Thixoforming, Rheocasting) is a novel forming process which has some advantages compared with conventional die casting, squeeze casting and hot/cold forging. In this study, Thixoforming process was selected as analysis processing in terms of billet handling and easiness of automation process. The Thixoforming process consists of reheating process of billet, billet handling, filling into the die cavity and solidification of SSM part. In filling process, two rheology models which were Newtonian and Non-Newtonian model(Ostwald-deWaele) were verified with experimental results. The Ostwald-deWaele model shows the good agreement to the real flow and filling phenomena in die cavity. To give a boost the economical efficiency of Thixoforming process and to ensure the good forming result, reheating device coupled die set was proposed and the initial billet temperature for system that was found from experimental results. This study presents an overview of application of numerical analysis for simulation of semi-solid metal forming process to reduce the lead time for development of manufacturing part in industrial field.

Key Words : Viscosity, Semi-Solid, Thixoforming, Reheating Process, Filling Process, Newtonian Rheology Model, Ostwald-deWaele Rheology Model.

1. 서 론

액상과 고성이 공존하는 반용융 성형 공정에서는 고상 입자를 포함하고 있어서 기존의 액상 주조법과 비교하면 자유 표면이 안정된 유동 흐름을 가지고 있으며, 또한 공기의 포함이 작고, 수축 결함이 없는 기계적 성질이 우수

한 제품을 생산할 수 있다. 생산성 측면에서 가압주조 (pressure die casting) 공법과 유사하며 자동화 및 제어가 용이한 효율적인 공정이다. Al357에 대한 주조 공정의 열 용량이 920~1050 [kJ/kg]인데 비하여 반용융 공정의 경우 약 500~800 [kJ/kg]으로 완전 용융 재료와 비교해서 2/3 정도이므로, 열 충격으로 인한 금형의 수명을

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원

연장시킬 수 있다.⁽¹⁾

Kang 등⁽²⁾은 반용융 소재의 다이캐스팅 및 단조공정에 필요한 재가열 시간, 시편의 크기, 가열 온도 및 유도로의 출력 등이 빌렛의 미세조직에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

소재의 충전 및 응고 과정에 관한 연구에서는 고액 공준재료에 대한 모델이 확립되지 않은 상태여서 실제 물리현상을 구현하기 위한 수치 해석적 접근들이 시도되고 있다. Mullins⁽³⁾는 PHOENICS CFD 패키지(package)을 이용하여 레이놀즈 수에 따른 수지상정 조직 주변의 액상과 고상의 상호 간섭에 대한 이론적 계산을 하였다. Barkhudarov 등⁽⁴⁾은 동점성 계수(apparent dynamic viscosity)와 실험에 의해서 구한 고상을 및 전단 변형율의 함수를 사용하여 고상을 60~70% 이하의 소재에 대하여 FLOW-3D 상용 패키지를 이용한 수치 해석을 시도하였다. Paradiese 등⁽⁵⁾은 ProCast 패키지를 이용하여 속도 경계 조건의 계산에서 노슬립(no-slip) 경계 조건이 실험결과와 비교하여 적당하지 않음을 보였다. Kitamura 등⁽⁶⁾은 가압력 100 MPa, 금형온도 200 °C, 고상을 15 % 와 40 %의 반용융 성형실험을 통하여 고상을 높을수록 사출속도의 증대가 필요하다고 보고하고 있다. Chen 등⁽⁷⁾은 반용융 성형 공정을 액상 유동, 고상입자를 포함한 액상유동, 고상입자 사이의 미끄럼, 고상입자의 소성변형등의 4가지 기구로 설명하였다.

반용융재료의 단조 공정에 있어서 소재의 유동현상은 고상과 액상의 분리 현상때문에 기계적 성질에 크게 영향을 미치고 있다.⁽⁸⁾ 반용융 알루미늄 재료의 단조 공정에서 응고 현상을 고려한 충전 거동의 연구와 액상의 유동과 고상의 변형을 고려한 새로운 알고리즘을 제안하였다.^(9~10)

이상의 연구결과에 의하면 알루미늄 합금의 성형공정에 있어서 소재의 점도 특성이 유동현상에 어떤 영향을 미치고 있는가를 파악한 연구결과는 충분하지 않다. 따라서 본 연구에서는 액체 상태와 반용융 상태의 두 모델을 통하여 금형 내부의 유동 흐름의 차이점을 비교검토하여 향후 금형설계 자료로써 활용하고자 한다. 소재 유동의 해석은 상용 MAGMA S/W를 이용하였으며, 해의 타당성을 검정하기 위하여 실험결과와 비교검토하였다.

2. 반용융 성형 실험

2.1 유도가열의 특징

유도가열로는 기존의 전기로에 비해 빌렛을 가열하는

시간이 적어서 산화막과 금형수명 단축을 유발하는 스케일링=scaling이 생성되는 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 기존의 전기로에서 3~4 %에 이르는 스케일링양을 유도가열 방식을 이용함으로써 0.5 %로 줄일 수 있다.⁽¹¹⁾ 유도가열은 표면에서부터 빌렛의 내부로 전도(conduction)에 의한 열전달이 일어나 가열된다. 비철금속은 열전도도가 비교적 크기 때문에 유도가열에 거의 문제가 없지만, 강과 열전도도가 낮은 금속의 경우에는 표면의 과열이 문제가 된다. 그러므로, 유도가열을 이용하여 소재를 가열할 경우 열유동에 대한 연구가 필요하다. 유도 가열의 장점은 주어진 소재, 가열 주기, 정도(accuracy)가 높은 시간 간격(time step) 범위내에서 원하는 온도 분포를 반복하여 얻을 수 있는 재현성 또는 반복성에 있다고 할 수 있다. 이것은 결국 높은 생산율에서 자동 이송(automatic feeding)과 금형으로부터 제품의 추출을 사용할 때 유용하다. 초기 공정온도 즉, 초기 고상을이 반용융 가공 공정의 성패를 좌우하는 만큼 온도제어가 용이한 유도가열 방법이 필수적이다. 주조용 알루미늄 합금인 A356의 경우도 과막 처리된 다양한 권선(turn)수를 가진 가열 코일과 가열 단계를 다변화하여 재가열을 수행하여야 한다.⁽¹²⁾

2.2 실험

유도가열에 의하여 원하는 고상을 상태까지 재가열된 소재를 금형의 캐비티(cavity)까지 이송하는 것은 빌렛의 형상 및 온도손실 방지를 위하여 새로운 이송 방법이 필요하며, 성형공정에서 중요한 공정이다. Fig. 1과 같은 유도가열로와 금형이 분리되어 있는 경우, 소재 이송시 열전달에 의한 온도하강 및 자동화의 어려움 때문에 열손실을 억제할 수 있는 장치를 설계하기가 어렵다.⁽⁸⁾ 또한, 열손실로 인하여 금형 캐비티 내부에 소재를 완전히 충전하기도 어렵다.

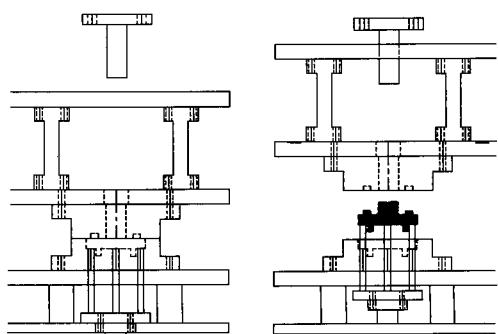


Fig. 1 The remote induction heating and die sets

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 2 와 같이 금형의 주입구 바로 위에 유도가열 장치를 설치하여 소재의 이송시 열 손실을 최소화하여 빌렛의 과열을 줄이고 재가열 후 충전시까지의 시간을 최소화할 수 있으므로, 보다 낮은

고상을 상태에서도 작업을 할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 저자가 지금까지 연구한 장비 시스템을 개선하여 반용융 단조 실험을 수행하였다.

Fig. 2와 같이 유도가열로와 금형이 일체된 금형장치의 A356소재에 대한 공정 변수인 초기 빌렛의 온도를 제안하기 위해 소재의 형상이 급격히 무너지기 시작하는 온도를 공정 임계온도로 설정하는 실험으로 $\phi 39 \times h 85[\text{mm}]$ 의 빌렛에 대하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 금형의 주입구에 빌렛이 존재하므로 편치의 가압에 의하여 금형의 캐비티 내부에 소재를 용이하게 주입하기 위해서는 빌렛의 형상 유지가 필수적이다. 그러므로, 형상이 급격히 변하는 온도를 임계온도로 가정하였다. 변형된 소재의 온도는 전원을 차단한 시점의 온도이므로 실제 약 2~5°C 정도 높은 온도까지 부분적으로 상승했다가 공기에 의하여 냉각된 결과이다. 사용한 코일은 피막 처리된(woven glass sleeving type) 형태로서 권선(turn)수는 16이다. 빌렛의 가장자리와 중심부의 온도 차이는 소재의 평균온도가 584°C인 전, 후에 약 1~5°C 정도로 양호한 온도 구배를 얻었다.

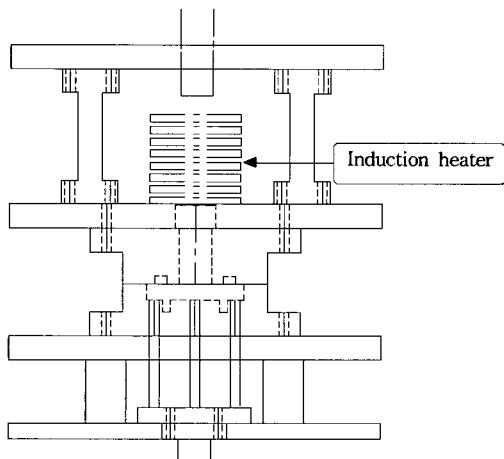


Fig. 2 The coupled induction heating die sets

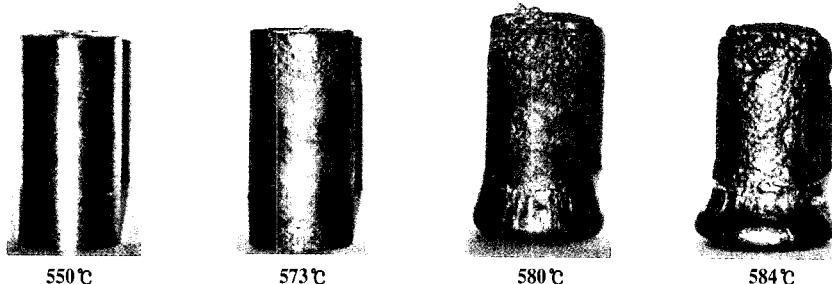


Fig. 3 Deformed billet shapes during induction heating process

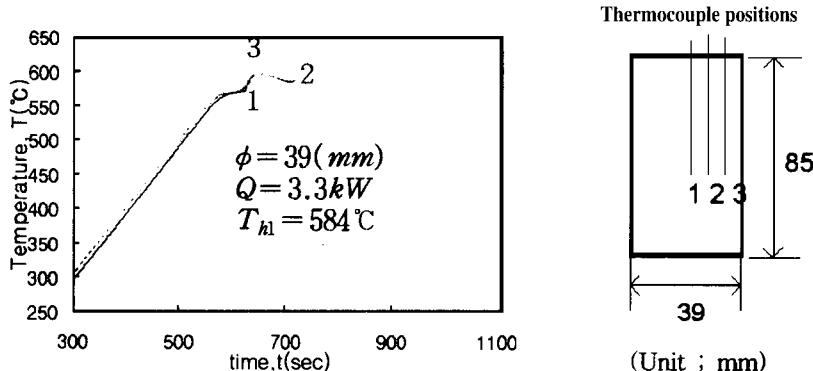


Fig. 4 Experimental reheating curve (Heating time ; 10 Min.) and the positions of thermocouples

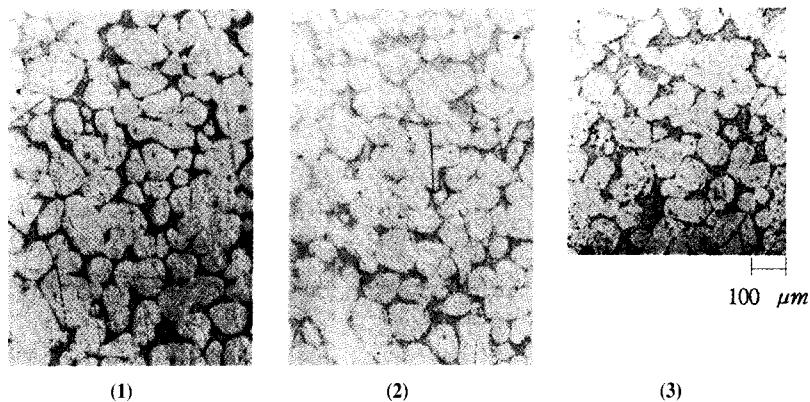


Fig. 5 The microstructure at three points in Fig.4 after 2min. holding at 584°C

Fig. 4와 같은 조건으로 재가열한 경우 구상화가 잘된 양호한 미세 조직을 얻을 수 있었다. Fig. 5는 584°C에서 약 2분간 유지한 경우의 미세조직을 보여 주며 약 100 μm 정도의 균일한 구상화 조직을 나타내고 있다. 본 실험에서 사용한 재가열은 저자의 논문에서 구한 조건을 이용하였다.⁽²⁾

3. 성형 공정 해석

3.1 반용융 소재의 특징

주석합금(Pb-Sn)의 고온 찢어짐(hot tearing)현상을 연구하던 중 우연히 발견된 것으로⁽¹³⁾ 교반시 회전으로 인한 전단응력에 의해 응고도중 성장하는 수지 상정 조직이 억제, 파괴되고 구상화된 입자가 형성되어 성형시 점도가 낮아 유동 특성이 좋다.

반용융 소재는 액체 상태에서 점도가 0.001 Pa · s 정도로 아주 낮고, 시간과 전단에 무관한 뉴우튼니안(Newtonian) 유체의 거동을 갖는다. 그러나, 성형 공정이 이루어지는 액체와 고체의 공존 상태에서는 고상율이 0.3~0.7에서 합금의 점성이 시간과 전단력의 함수로써 0.1 Pa · s에서 1 MPa · s의 범위에 이른다.⁽¹³⁾ 소재가 정적인 상태에 있는 경우는 점도가 아주 크기 때문에 마치 고체처럼 다루어 질 수 있으며, 성형시에는 전단에 의하여 점도가 급격히 변화하기 때문에 충전이 잘 이루어 질 수 있는 점성 유체로 볼 수 있다.

3.2 유동 모델

반용융 소재의 유동 모델을 세우기 위해서는 전단변형률 속도(shear rate)의 변화에 따른 점도의 의존성을 이

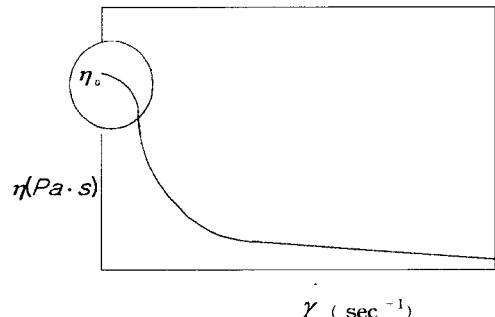


Fig. 6 The diagram of shear rate vs viscosity

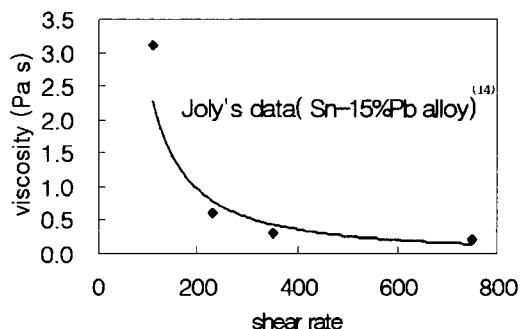


Fig. 7 The plot of Joly's experimental viscosity data with different shear rates

해하여야 한다. 액체 상태의 알루미늄 소재는 전단변형률 속도가 증가함에 따라 점도가 급격히 감소하지만, 아주 작은 전단변형률 속도에서는 점도가 거의 영점 전단 점성 (zero shear viscosity: η_0)으로 불리어지는 일정한 값을 나타낸다.(Fig. 6)

Joly⁽¹⁴⁾의 Sn-15%Pb 합금에 대한 고상을 40%에서 0.33 K/min의 냉각속도로 측정한 자료를 나타내어 보면 Fig. 7과 같다. 이것은 Fig. 6과 비슷한 경향을 나타내며, 전단변형률 속도가 200 s⁻¹ 이상인 경우에는 거의 일정한 0.5 Pa · s의 점성을 가진다.

전단변형률 속도가 어느 정도 높은 부분에서는 전단변형률 속도에 따른 점도를 표현하기 위하여 “승수법(power law)”이라는 경험식이 아래와 같이 제안되었다.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

위 식으로부터 전단응력은 $\tau = k\dot{\gamma}^n$ 로 표현되어지고, $n=1$ 인 경우는 Newtonian 유체가 되어 점도는 k 와 일치하게 된다. 1974년 Joly⁽¹⁵⁾는 무게 고상율(solid-weight fraction) 45~50 %의 Sn-15 %Pb재료를 10~400 s⁻¹ 사이의 영역에서 골보기 점도와의 관계를 승수법을 적용을 통하여 n 값을 0.18~0.70 범위로 제안하였다. Laxmanan 등⁽¹⁶⁾은 같은 재료를 10⁻⁵~10⁻¹ s⁻¹의 범위에서 고상을 30~60%에서 측정한 결과 n 의 범위를 0.14~0.68로 구하였다. Turng⁽¹⁷⁾은 낮은 전단변형률 속도 범위에서 등가 지수로써 0.07을 제안하였으며, McLelland 등^(18~19)은 같은 재료로 고상을 20~50%에서 전단변형률 속도 1~200 s⁻¹에서 -0.2~0.4의 음의 지수(n)값을 구하였다. 반용융 알루미늄과 Al/SiCp 복합재료에 대한 연구를 한 Quaak⁽²⁰⁾등도 음의 n 을 구하였다.

이상과 같이 전단변형률 속도에 대한 점도의 연구 결과가 발표되어 있지만, 동일한 재료에 대해서도 점도 수치는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 가열되어진 빌렛이 금형 내에서 유동할 때 이론적으로 재료의 흐름 특성을 파악하기 위하여 액상 상태의 Newtonian 유동 모델의 경우 n 의 값을 1로 하고, 반용융 상태의 Ostwald-deWaele 유동 모델의 경우 Buehler에서 실험적으로 구한 것으로 전단변형률 속도 3~2500 s⁻¹에서 n 을 -0.48~0.45의 값으로 반용융 온도 구간에 적용하여 해석결과를 비교검토하였다.

3.3 수치해석

금형 내의 소재의 충전 해석에 이용되는 방법에는 SOLA-VOF(solution algorithm-volume of fluid), MAC(macker and cell), SMAC(simplified marker and cell)방법 등이 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법

들은 연산계(calculation domain)가 3차원인 경우에는 6면체(hexahedron)의 작은 사각형으로 나누어진다. 그러므로, 계산영역이 계단식의 지그재그의 모양으로 나타나기 때문에, 상대적으로 체적이 큰 부분에서 유동 양상을 예측하는 데에는 별 문제가 없지만, 주입구가 좁은 부분이나 경사진 부분, 둥근 모서리 부분 등을 지날 때는 문제가 될 수도 있다. 유한 차분법(F.D.M.)의 경우 요소를 더욱 더 세분화하여, 이러한 문제점을 해결할 수 있으나, 모델링이 힘들어지고 계산 시간이 크게 증가하여 경제적 부담이 커진다. 본 연구의 성형 공정 해석에서는 상용 패키지 MAGMAsoft가 채택한 겸사체적을 이용하였다.

3.4 금형 내의 충전 해석

금형 내의 충전 해석의 목적은 응고 해석과 금형 내의 완전한 충전이 가능한 소재의 초기 온도를 예측하고, 현재의 공정 변수로 충전이 되지 않는 부분을 찾아내고, 근사한 유동 형태를 알아내는데 목적이 있다. 본 해석에서 필요로 하는 입력 값은 제품 형상과 소재의 열학적 계수 등이며,⁽²¹⁾ 해석에 사용된 재료의 물성치는 온도의 함수로써 Fig. 8과 같다. 해석결과 온도, 속도, 압력의 분포를 얻어 낼 수 있고, 특정부위의 시간에 따른 온도변화 곡선과 반용융 소재가 금형의 캐비티 내부까지 충전 완료시 까지 걸리는 시간을 계산하였다. 본 충전 해석에서는 Newtonian Rheology 모델과 Ostwald-deWaele Rheology 모델에 따른다고 가정하였으며, 고상화된 입자가 이동되지 않고, 공기의 유입이 유동에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다.

충전 해석의 과정은 안정 조건계산을 통한 시간증분이 계산된 이후에 유체 역학적 변수(hydrodynamic variables)가 계산되어진다. 운동량 방정식을 양적(explicit)해법으로 구한 뒤, 연속 방정식의 압력이 계산된 후 반복계산을 통하여 속도가 수정되어 진다. 에너지방정식의 해를 통하여 변수가 구해진 후, 각각의 겸사 체적내의 물성치는 수정되고 다음 단계로 넘어 가는 과정의 계산 순서도를 Fig. 9와 같이 표현할 수 있다.

충전 해석이 완료된 후 기공 등의 결합과 제품의 냉각에 따르는 온도구배를 통하여 기계적 성질을 예측하기 위하여 응고 해석을 수행한다. 충전 현상을 고려한 온도 분포로부터 응고 해석을 수행하여 국부적 응고 시간, 공급률(feeding rate)등의 응고 해석상의 계수를 구해 낼 수 있다. 이 응고해석에서는 금형과 주물은 변형이 없는

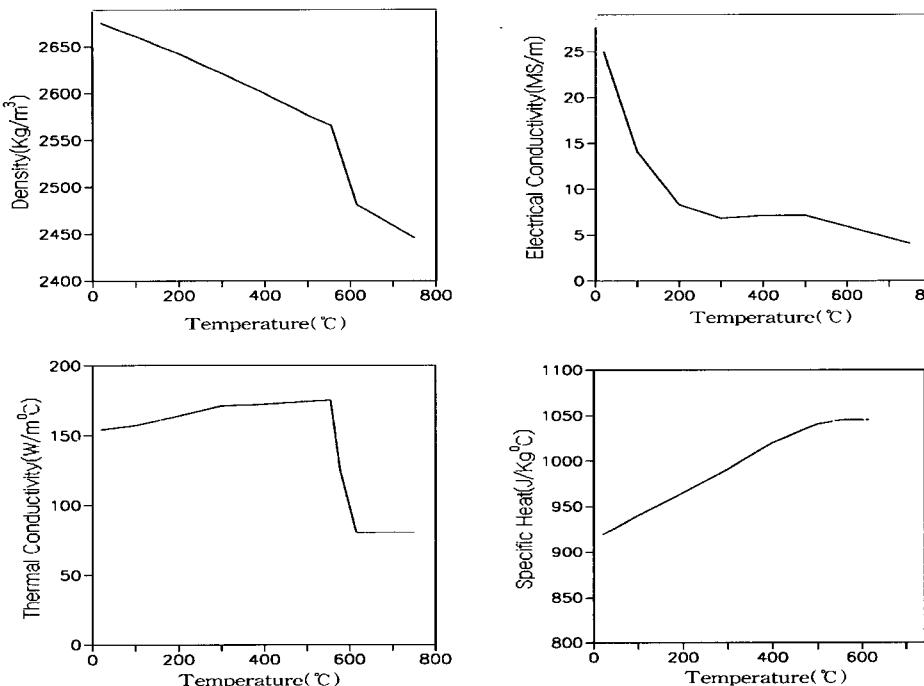


Fig. 8 Thermal mechanical properties of ALTHIX Al alloy expressed as function of temperature

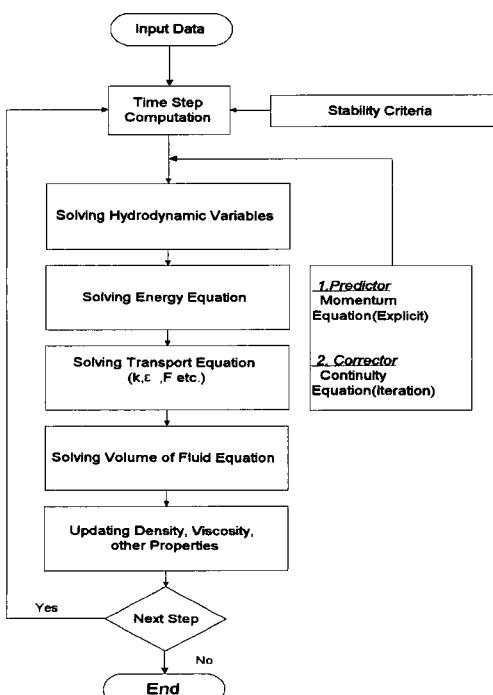


Fig. 9 The schematic diagram of filling simulation procedures

강체이고, 고상률이 수축에 무관한 온도의 함수로 가정하였다.

3.5 수치 해석 결과

금형 내의 유동 형태를 예측하기 위하여 오피스형 주입구 금형을 이용하여 Newtonian과 Ostwald-deWaele의 두 가지 유동 모델의 해석 결과를 실험 결과와 비교를 통하여 반용융 성형공정에 적합한 모델을 검토하였다. 본 연구의 전산해석 결과는 금형의 온도가 250 °C, 초기 벨렛의 온도가 584 °C인 경우, 편치의 초기 속도는 실험결과와 비교하기 위하여 60 mm/s를 적용하였다.

3.5.1 Newtonian rheology model의 유동해석

Kang⁽²²⁾은 A356소재에 대하여 Newtonian 유동으로 가정하여 SMAC (simplified marker and cell)방법을 이용하여 금형내 소재의 유동을 계산하였다. 그러나, 초기 고상을 및 열전달 계수의 변화에도 유동의 양상이 변하지 않는 해석의 한계를 가지고 있다.

A356 소재가 금형내 충전될 때 금형과의 열전달현상을 고려한 온도변화를 해석하기 위하여 점도식이 필요하다.

본 연구에서는 Hirai 등⁽²³⁾이 제안한 실험식을 이용하였다. A356 소재의 주용질 Si의 농도 $x=7.0$ 을 대입하면, 아래와 같은 온도에 따른 재료의 겉보기 점도를 구할 수 있다.

$$\eta_a = \eta_{La} \left\{ 1 + \frac{\alpha \rho_m C^{1/3} \dot{\gamma}^{-4/3}}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{0.72 - \beta C^{1/3} \dot{\gamma}^{-1/3}} \right)} \right\} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (2)$$

$$\alpha = 2.03 \times 10^2 (X/100)^{1/3}, \beta = 19.0 (X/100)^{1/3}$$

X: 합금의 용질농도 (7.0 mass%)

C: 응고 속도 (df_s / dt ; 0.001 s^{-1})

$\dot{\gamma}$: 전단변형률 속도 (60 s^{-1})

$$f_s: 고상율 (f_s = 1 - \left(\frac{T_f - T}{T_f - T_m} \right)^{\frac{1}{k_0-1}})$$

T_f : 순수용융 금속의 액상선 온도 (615°C)

T_m : 2원 합금의 공정 온도 (555°C)

k_0 : 평형 분배계수 (0.11)

ρ_m : 액상선 온도에서의 밀도 (2430 Kgm^{-3})

η_{La} : 용융 금속의 겉보기 점도

식(2)에 의하여 계산한 온도에 따른 점도는 Fig. 10과 같다. 고상을 20~30%까지는 0에 가까운 미소한 점도값이지만, 약 580°C이하의 온도에서 점도값이 급격히 증가한다.

Fig. 11, 12, 13은 Fig. 10의 Newtonian 모델의 점도를 이용한 경우 충전율 40%, 60%, 80% 일 때, 온도 구배를 나타낸 것이다. 상당히 많은 거시적

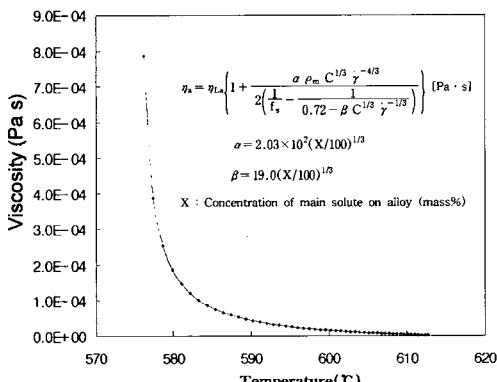


Fig. 10 The temperature dependent viscosity used in Newtonian rheology model

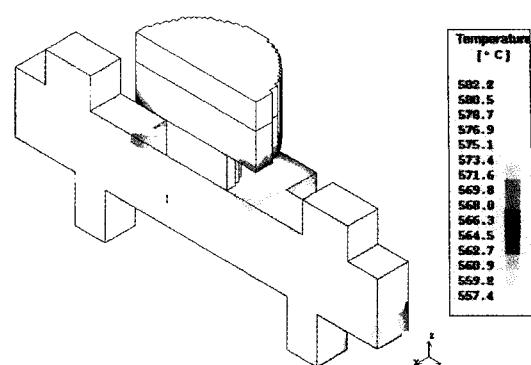


Fig. 11 The temperature contour calculated by Newtonian model (40% filled)

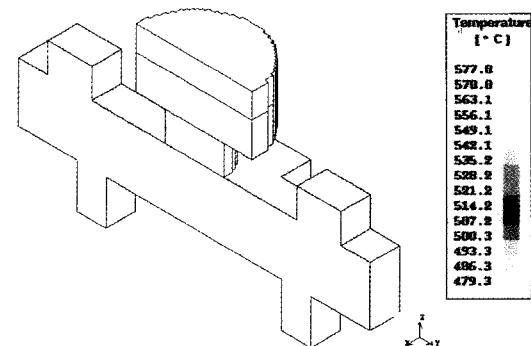


Fig. 12 The temperature contour calculated by Newtonian model (60% filled)

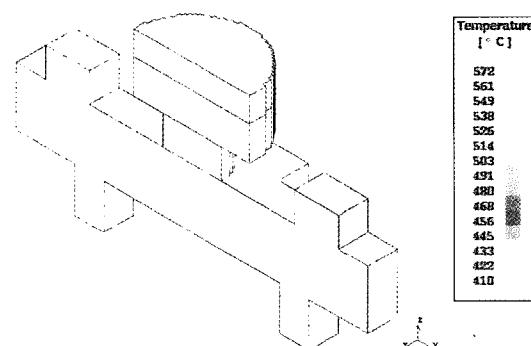


Fig. 13 The temperature contour calculated by Newtonian model (80% filled)

분리현상을 관찰할 수 있으며 중력 주조시의 유동 양상을 보여주고 있으며 80% 충전 실험 결과인 Fig. 14와 비교해 보면 초기 고상을 50%의 결과로는 부적절함을 알 수 있다.

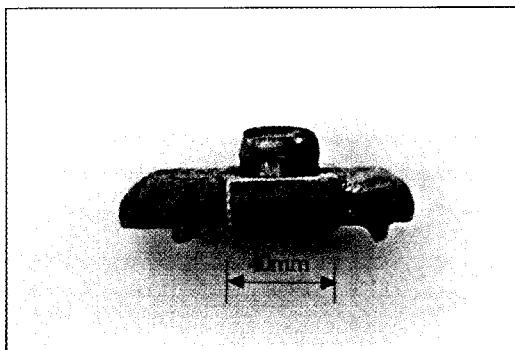


Fig. 14 The picture of incomplete filling result

3.5.2 Ostwald-deWaele rheology model의 유동해석

최소 $3 s^{-1}$, 최대 $2500 s^{-1}$ 의 전단변형률 속도 사이에서 유효한 power-law 지수(n)이 $-0.48 \sim 0.45$ 와 온도에 따른 점성을 이용하여, MAGMAsoft의 Thixo모듈을 이용하여 Newtonian 모델과 동일한 공정 조건을 이용하여 계산하였다. 온도에 따른 지수 n 은 Fig. 15와 같다.⁽²¹⁾ 584°C 부근에서 지수의 부호가 양에서 음으로 변화하고, 565°C 부근에서는 특이점을 제외하고는 지수 값이 급격히 변한다.

충전율 40%, 60%, 80% 일 때, Ostwald-deWaele 모델 (Fig. 16~Fig. 18)은 Newtonian 모델 (Fig. 11~Fig. 13)과 현저한 유동상의 차이가 남을 알 수 있다. 이와 함께 Fig. 19와 Fig. 20에서 거시적인 분리현상은 거의 일어나지 않으며, 속도가 큰 영역에서 온도가 증가하는 반용융 가공의 특징을 볼 수 있다. 소재가 주입구를 통과한 뒤,

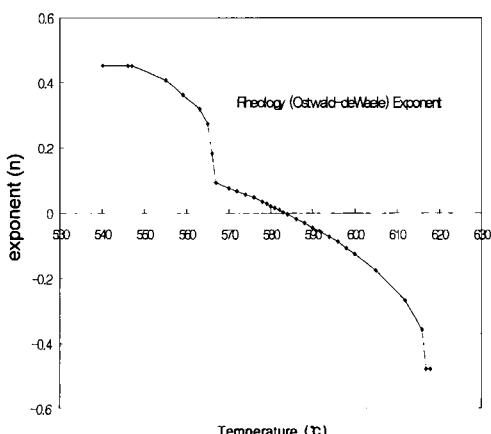


Fig. 15 Relationship between temperature and exponent of Ostwald-deWaele model

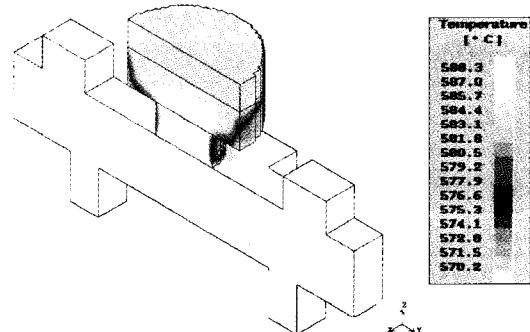


Fig. 16 The temperature contour calculated by Ostwald-deWaele model (40% filled)

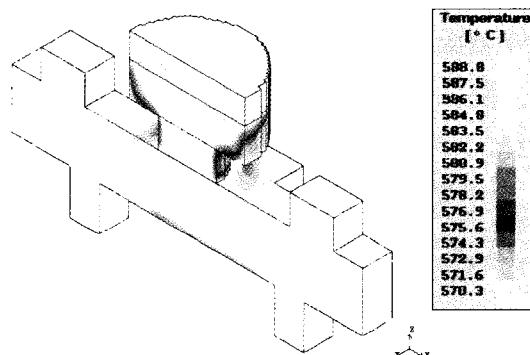


Fig. 17 The temperature contour calculated by Ostwald-deWaele model (60% filled)

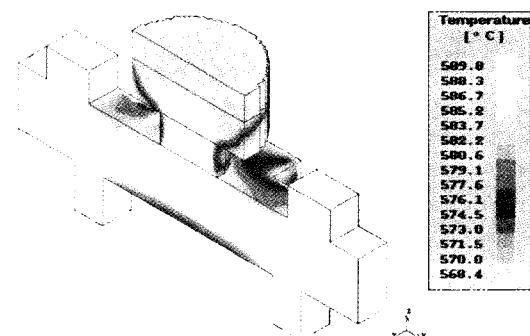


Fig. 18 The temperature contour calculated by Ostwald-deWaele model (80% filled)

하부 금형에 접촉하여 온도가 하강함과 동시에 유동속도는 감소함을 알 수 있다. 금형과 접촉된 부분에서는 속도가 감소하고, 소재의 중심부에서는 부분적으로 온도와 속도가 크게 감소하지 않음을 알 수 있다. Fig. 20에서 보여

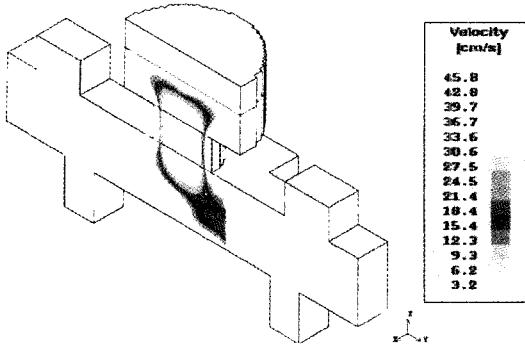


Fig. 19 The velocity contour calculated by Ostwald-deWaele model (40% filled)

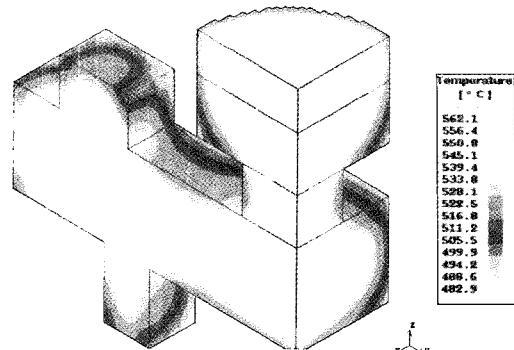


Fig. 22 Temperature contour at 50% solidification state

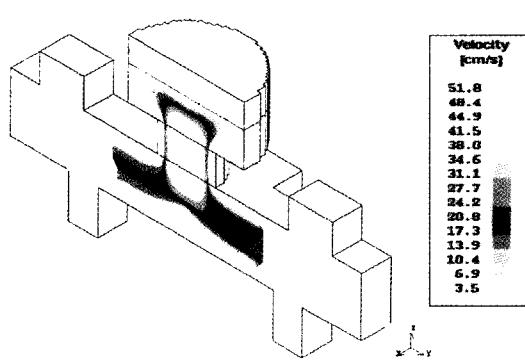


Fig. 20 The velocity contour calculated by Ostwald-deWaele model (60% filled)

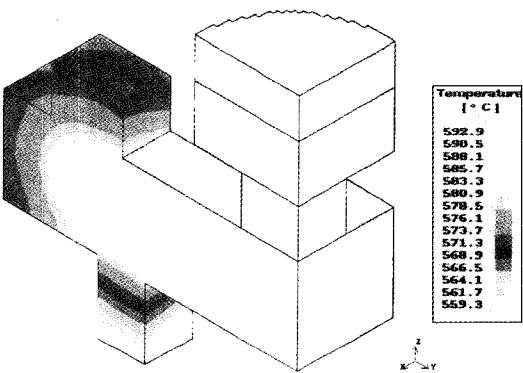


Fig. 23 Temperature contour at 90% solidification state

주는 바와 같이 80% 정도 충전된 자유표면의 양상을 Fig. 14의 실험결과에서 보여주는 충전거동과 거의 일치함을 알 수 있다.

3.5.3 응고 공정의 해석

반용융 공정에 적합한 Ostwald-deWaele 유동 모델로

충전해석을 한 뒤 응고 해석을 수행하였다. Ohnaka⁽²⁴⁾는 금형 표면을 알루미늄 용탕이 흐를 때, 대류 열 전달 계수를 $1260 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 제안하였으나, 본 해석에서 금형 내부와의 열전달 계수는 열전달 효과를 보다 크게 하기 위하여 고상선 아래의 온도에서는 $3000 \text{ W/m}^2\text{K}$, 액상선 온도에서는 $7000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 하고, 반용융 상태에서는 소재의 온도에 따라 선형적으로 변하는 값을 이용하였다.⁽²⁵⁾

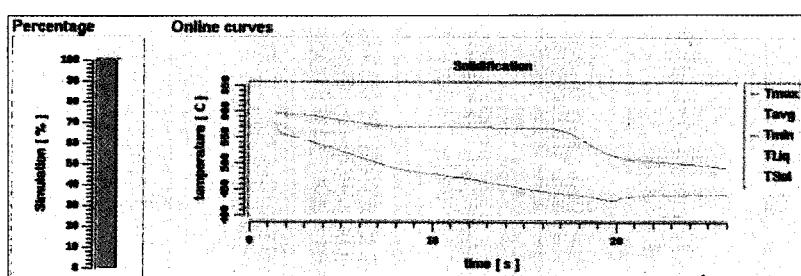


Fig. 21 The history curve of temperature in solidification simulation

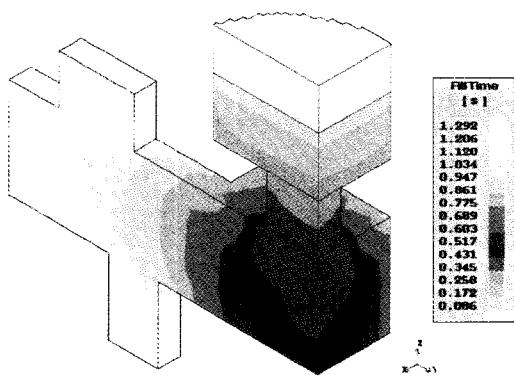


Fig. 24 The contour of fill time criteria

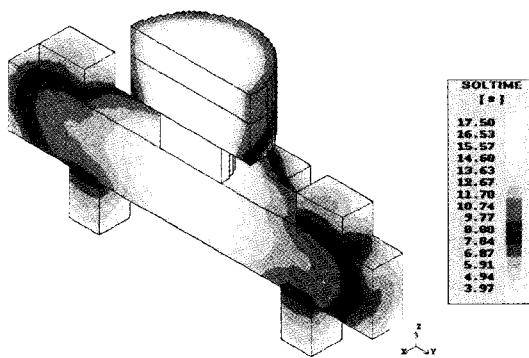


Fig. 25 The contour of solidification time

Fig. 21은 응고공정중의 최대, 최소 및 평균온도를 시간의 변화에 따라서 나타낸것이다. 약 10초 후에 평균온도가 고상선 이하로 떨어지기 시작함을 알 수 있다. Fig. 22와 Fig. 23은 각각 50%, 90% 응고가 이루어진 경우 온도 분포를 나타낸것이며, 각 부분의 충전에 소요되는 시간(Fig. 24)과 응고시간(Fig. 25)의 구배가 거의 비슷한 양상을 보여 준다. 충전 소요 시간은 제품의 끝단이 약 1.3초 정도 소요되었으며, 주입구 부분의 응고 시간은 19초 정도 걸렸다.

4. 결 론

주조용 반용융 알루미늄 소재(A356)의 재가열 공정의 실험, 단조 성형 및 이에 관한 수치해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가열되어진 소재를 금형에 이송할 때 소재의 열이 등을 최소로 하기위하여 재가열 일체형 금형을 제안하였

다. 제안한 일체형 금형의 초기 빌렛 온도를 유도가열 실험을 통하여 584°C로 제안하였다.

(2) 액체 상태의 소재가 금형내부를 유동할 때는 소재가 금형의 하부로부터 충전이 된 후 금형표면과 소재가 불균일하게 접촉을 이루면서 유동을 하는 반면에, 반용융 상태가 금형 내부를 유동할 때는 자유면이 점진적으로 금형 내부를 충전시켜감을 알 수 있었다.

(3) 액체 상태의 모델인 Newtonian과 반용융 상태의 모델인 Ostwald-deWaele의 두 가지 유동모델(rheology model)의 금형내 충전을 해석하여, 점도의 변화에 따른 유동 특성을 파악함으로써 Ostwald-deWaele의 모델이 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센타의 지원에 의한 연구비와 부산대학교 기성회 재원 연구비의 지원으로 이루어 졌음.

참고문헌

- (1) M.P. Kenney, J.A. Courtois, et al., 1998, "Semisolid Metal Casting and Forging", Metal Handbooks, ninth ed. vol 15. Casting, pp.331~336
- (2) S.S. Kang, C.G. Kang and Y.J.Do, 1998, "Effect of Reheating Conditions of Semi-Solid Aluminum Alloy on Globular Microstructure", J. of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 7, No. 3, pp.215~224
- (3) A.M. Mullins and D.J. Walker, 1996, "Modelling Solid/Fluid Interactions in A Dendritic Semisolid", The 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing and Composites, ed. by D.H. Kirkwood and P. Kaprano, 19-21 June, The Univ. of Sheffield, England, pp.104~109
- (4) M.R. Barkhudarov, C.L. Bronisz and C.W. Hirt, 1996, "Three-Dimensional Thixotropic Flow Model", The 4th Int'l Conf. on semisolid processing and composites, ed. by D.H. Kirkwood and P. Kaprano, 19-21 June, The Univ. of Sheffield, England, pp.110~114
- (5) C.J. Paradies, M. Rappaz, T. Imwinkelried and

- J.P. Gabathuler, 1996, "Simulation of the Pressure Die Casting of A Thixotropic Aluminum Alloy", The 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing and Composites, ed. by D.H. Kirkwood and P. Kaprinos, 19-21 June, The Univ. of Sheffield, England, pp.115~119
- (6) K. Kitamura, T. Ando, K. Hironaka, S. Yahata and C. Yoshida, 1996, "Die Casting of Aluminum Alloy in Semi-Solid State", The 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, ed. by M. Kiuchi, 13-15 June, Institute of Industrial Science Univ. of Tokyo, Japan, pp.181~189
- (7) C.P. Chen and C-Ya Tsao, 1996, "Semi-Solid Deformation of A356 Al alloys", The 4th, Int'l Conf. on Semi-Solid Processing and Composites, ed. by D.H. Kirkwood and P. Kaprinos, 19-21 June, The Univ. of Sheffield, England, pp.16~19
- (8) C.G. Kang and J.S. Choi, 1998, "Effect of Gate Shape and Forging Temperature on The Mechanical Properties in The Injection Forging Process of Semi-Solid Aluminum Material", Journal of Materials Processing Technology, 73, pp.251~263
- (9) C.G. Kang, J.S. Choi and D.W. Kang, 1998, "A Filling Analysis of The Forging Process of Semi-Solid Aluminum Materials Considering Solidification Phenomena", Journal of Materials Processing Technology, 73, pp.289~302
- (10) C.G. Kang, B.S. Kang and J.I. Kim, 1998, "An Investigation of The Mushy State Forging Process by The Finite Element Method", Journal of Materials Processing Technology, 80-81, pp.444~449
- (11) E.J. Davies, 1990, "Conduction and Induction Heating", Peter Peregrinus Ltd., p.202, p.100, p.222
- (12) Y.C. Lee and C.G. Kang, 1997, "Automatic Material Transfer Development for Application of Semi-Solid Forging Process", Int'l Conf. on Thermomechanical Processing of Steel & Other Materials, 7-11 July, Univ. of Wollongong Australia
- (13) D.B. Spencer, R. Meherabian and M.C. Flemings, 1972, "Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Range", Metall. Trans., Vol.3, pp.1925~1935
- (14) P.A. Joly and R. Mehrabian, 1976, "The Reheology of a Partially Solid Alloy", Journal of Material Science, Vol. 11, pp.1393~1418
- (15) P.A. Joly, 1974, "Rheological Properties and Structure of A Semi-solid Tin-Lead Alloy", Ph. D Dissertation, MIT, Cambridge, Massachusetts, p.78
- (16) V. Laxmanan and M.C. Flemings, 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15%Pb alloy", Metall. Trans., Vol.11a, pp.1927~1937
- (17) L.S. Turng, 1990, "Rheological Modelling and Numerical Simulation of Semi-solid Sn-15%Pb Alloy for Net-Shape Die-Casting Process", Ph. D Dissertation, Cornell Univ., Ithaca, New York, p.200
- (18) N.G. Henderson, A.R.A. McLellan, H.V. Atkinson and D.H. Kirkwood, 1992, "High Temperature Rheology of Novel Metal Matrix Composites Based Aluminum /High Silicon Alloys", The 2nd Int. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, ed. by S. Brown and M.C. Flemings, 10-12 June, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, pp.349~358
- (19) W.R. Loue, M. Suery and J.L. Querbes, 1992, "Microstructure and Rheology of Partially Remelted AlSi-Alloys", The 2nd Int. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, ed. by S. Brown and M.C. Flemings, 10-12 June, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, pp.266~275
- (20) C.J. Quaak, M.G. Horsten and W.H. Kool, 1994, "Rheological Behavior of Partially Solidified Aluminum Matrix Composites", Mater. Sci. and Eng., Vol. A183, pp.247~256
- (21) MAGMASoft/Standard, On-line Material Library. V3.0
- (22) C.G.Kang and D.W.Kang, 1996, "Forging

Process Analysis of Semi-solid Aluminum Materials", The 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, ed. by D.H. Kirkwood and P. Kaprinos, 19-21 June, The Univ. of Sheffield, England, pp.142~147

- (23) M. Hirai, K. Takabayashi, Y. Yoshikawa and R. Yamaguchi, "Apparent Viscosity of Al-10mass%Cu Semi-solid Alloys", ISIJ, Vol.33, No.3, pp.405~412
- (24) I. Ohnaka, 1985, "Introduction of Compute Heat and Solidification Analysis", MARUZEN, pp.167~208
- (25) Private Communation with D.M Lipinski at MAGMA Gieereitechnologie, 1997