

## 반응고교반금속의 유변학적 거동과 유동해석

이 재 철, 홍 기 원\*, 고 영 진, 이 호 인

한국과학기술연구원 금속공정연구센터, 서울 청량사서함 131

\* STI

### 1. 서론

금속재료도 반응고(또는 반응용) 상태로 존재할 경우 고분자 재료가 나타내는 틱소트로피(thixotropy) 및 의가소성(pseudoplasticity)과 같은 유변학적(rheological) 특성을 나타낸다 [1]는 사실이 발견된 이래 이러한 성질을 이용한 새로운 금속성형기술인 반응고/반응용 성형공정(이하 반응고 성형이라 함)의 개발에 산업계의 관심이 집중되고 있다. 반응고 성형은 재료내의 고상율이 70%이상 되는 온도로 가열하여 고상을 구형화시킨 후 사출성형 또는 단조하는 부품성형공정이다. 사출전의 반응고 금속은 구상화된 고상을 약 72%정도 함유하고 있으며, 이 상태에서는 매우 높은 점도를 가지고 있어 자체 모양을 유지할 수 있다. 그러나 반응고 상태의 금속에 높은 전단변형속도(shear rate)를 가하게 되면 재료의 점도는 식용유(1 Poise, P)와 꿀(10 P)사이의 점도로 순간적으로 낮아지게 되는데 이러한 특성을 유변학적 용어로는 의가소성(pseudoplasticity)이라 정의한다. 또한 반응고 상태의 금속에 전단변형을 가할 때 반응고 금속의 점도가 시간에 따라 변화하는 시간 의존적인 거동을 나타내는데 이 특성을 틱소트로피(thixotropy)라고 한다. 반응고 성형은 이러한 틱소트로피와 의가소성을 동시에 나타내는 반응고/반응용 상태의 재료를 이용하여 부품의 최종 치수에 가까운 형상으로 성형하는 실험상 성형(near-net forming)공정으로서, 최근 저공해배출 제조공정 및 에너지절약형 경량부품 제조기술로 부각되고 있다.

기존의 주조법으로 부품을 제조할 때 관심의 대상 중 하나는 「용탕을 비산시키지 않고 충류를 유지시킨 상태로 금형내에 충전시킬 수 있는 방법」에 대한 문제이다. 일반적으로 금형내를 충전하는 유체의 유동 특성은 식(1)과 같이 표현되는 레이놀즈 수로부터 예측될 수 있으며, 경험적으로 2100을 전후하여 층류와 난류로 구분된다[2].

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v$ 는 유체의 평균속도,  $D$ 는 특성길이(예 금형의 게이트 두께) 그리고  $\eta$ 는 유체의 점도이다.

이러한 관점에서 반응고 성형은 그 용어자체가 내포하고 있는 것처럼 비교적 고점도를

가진 반응고 상태의 금속을 사용함으로써 유체의 층류성으로 유동을 제어할 수 있다는 점에서 기존의 주조법과 구별되어진다. 이 반응고 금속의 점도는 슬러리내의 고상률, 냉각속도, 슬러리에 가해지는 전단변형속도에 따라 매우 민감하게 변화한다. 일반적으로 반응고 금속의 점도는 고상률이 낮을수록, 냉각 속도가 느릴수록, 전단변형속도가 빠를수록 낮아진다. 이와 같이 반응고 금속이 나타내는 텍소트로피와 의가소성에 대한 현상학적 연구결과는 그 동안 많은 문헌을 통해 보고되었다[3-12]. 그러나 지금까지 반응고 금속의 유변학적 특성이 유동에 미치는 영향에 대해서는 몇몇 해석적인 연구결과[13-15]가 발표되었을 뿐이며 아직 이에 대한 충분한 실험적 검증이 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구에서는 실제의 반응고 Al합금의 유동거동에 대한 선행연구로서 반응고 상태의 Al합금과 유사한 의가소성을 지니면서도 고려되어야할 유변학적 변수가 비교적 단순한 모델 유체(페인트)를 이용하여 점도와 사출속도가 유동에 미치는 영향에 대하여 분석하고 이를 실험적으로 검증하여, 향후 반응고 금속을 이용한 부품성형에 대한 전산모사의 알고리즘 개발에 기초자료로 이용하고자한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 유체의 유변학적 거동 측정

반응고 금속 및 페인트의 유변학적 거동을 측정하기 위한 장치는 본 연구팀이 설계 제작한 Searle형 고온점도계로서 실험전 실리콘 표준 점도액으로 보정한 후 사용하였으며, 측정 점도값의 오차는 약 2% 이내이다. 유체의 유동거동을 가시화하기 위하여 사용한 재료는 용융된 상태와 반응고 상태의 A357합금이 나타내는 유변학적 특성과 비교적 유사하고 실험하기 용이한 물과 수성페인트를 모델 유체로 사용하였다.

먼저 반응고 상태의 A357합금이 나타내는 의가소성을 측정하기 위하여 용융된 A357합금을 5°C/분의 냉각속도로 연속냉각시킴과 동시에 75~1045/s사이의 속도로 전단변형을 가하면서 점도를 측정하였다. A357합금의 점도이력현상 및 텍소트로피 특성에 대한 실험은 640°C로 용해한 시료를 1°C/분의 냉각속도로 냉각함과 동시에 75/s의 변형속도로 교반하면서 원하는 고상율(0.65)에 해당되는 온도(587°C)까지 냉각하였다. 이러한 상태에서 2시간동안 항온유지하면서 75/s의 변형속도로 교반할 때 측정되는 토오크 값이 정상상태에 도달하면 미리 설정한 전단변형가속도(Tu)를 적용하여 점도의 변화를 측정하였다[16]. 여기서 전단변형가속도는 최고 전단변형속도(1045/s)까지 도달하는데 소요되는 시간(Tu)으로 나눈 값으로 정의되지만 본 논문에서는 단순히 도달소요시간으로 표기하였다. 이 실험에서는 지정된 시간(Tu)에 미리 설정된 전단변형속도(1045/s)에 도달되도록 한 후 즉시 1045→0/s 까지 감속하면서 가속 및 감속과정에서의 토오크 변화를 기록하여 이 결과를 전단응력 및 점도로 환산하였다[17].

유체의 점도특성이 유동에 미치는 영향을 알아보기 위한 방법으로 반응고 상태의 Al 합

금과 유사한 유변학적 특성을 가지는 유체(페인트,  $\rho=1.335$ )와 이러한 특성이 없는 유체(물, 0.01 P,  $\rho=1.0$ )를 수모델 실험 및 해석용 유체로 선정하였다. 페인트의 경우 전단변형속도가 커질수록 이에 따른 점도가 지수적으로 작아지는 대표적인 의가소성 유체로서 실제의 반응고 상태의 AI합금이 나타내는 유변학적 거동과 비슷한 특성을 보이고 있으며, 또한 물의 경우 용융 AI과 유사한 점도(0.01 P)를 나타내고 있어 본 실험의 모델 재료로 채택하였다. 전산모사의 입력자료로 사용되는 페인트가 나타내는 의가소성도 AI합금의 경우와 같은 방법으로 측정하였다.

## 2.2. 수(水)모델을 이용한 유동가시화

그림 1은 유체의 유동현상을 관찰하기 위하여 사용된 금형 형상으로서 (가로x세로x두께)가 (100x180x2mm)인 금형 공간(cavity)내에 두 개의 40mm 직경의 원형 장애물이 위치되어 있다. 유압사출기의 shot sleeve 직경은 35mm이며 금형쪽으로 접근하게 되면 갈때기처럼 점점 가늘어지다가 게이트 부위에서는 두께 2mm로 되도록 설계하였다. 여기서 중력방향은 -Z이며, 유체는 금형의 밑 부분의 있는 (가로x세로x두께)가 20x20x2mm의 게이트로부터 중력의 반대방향으로 주어진 속도로 유입된다.

금형내의 공간에 유체가 충전될 때의 유동 거동을 실시간(real time)으로 관찰하기 위하여 그림 1과 같은 투명 금형을 상용 유압 사출기에 장착하고 shot sleeve에 유체를 채운 후, 미리 설정한 속도(게이트속도)로 사출하였다. 금형내의 공간을 충전하는 유체의 유동거동은 고속카메라를 이용하여 초당 500장의 속도로 기록하였으며, 이때 사용한 노출시간은 0.002초로 고정 시켰다. 두 가지 유체에 대하여 기록된 유체의 유동거동은 전산모사 결과와 비교/분석자료로 이용하였다.

전산모사의 입력자료로 이용되는 유체의 유입속도를 결정하기 위하여 먼저 사출 피스톤의 변위를 측정된 후 이 변위를 시간에 대하여 미분한 값에 슬리브/게이트의 단면비를 곱하여 구하였으며, 그 예를 그림 2에 나타내었다. 사출 피스톤의 속도는 초기속도 0 %로부터 임의로 주어진 속도에 도달될 때까지 가속되기 때문에 측정된 유체의 속도를 전산모사의 입력자료로 사용하기 위해서는 실제 게이트에서 유체의 초기유입속도를 알아야한다. 게이트에서의 유체의 초기유입속도는 게이트에 설치한 센서(photo-coupler)를 이용하여 유체가 게이트를 지나는 시간(time zero)을 컴퓨터에 기록함으로써 알 수 있도록 하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1. 반응고 A357합금의 유변학적 특성

반응고 성형의 경우 원소재의 70~72% 정도가 고상으로 존재하는 상태에서 사출 및 성형이 이루어지기 때문에 응고수축공의 발생을 억제하는데 효과적인 성형공정이다. 또한 사용하는 소재의 점도가 비교적 높기 때문에 적절한 금형설계 및 사출조건이 이루어진다면

유체의 자유계면을 유지시킨 상태로 유체의 충진을 제어할 수 있다. 이러한 유체의 유동에 미치는 반응고 금속의 점도는 반응고 금속내의 고상율뿐만 아니라 반응고 금속에 가해지는 전단변형속도, 즉 사출속도에 매우 민감하게 반응한다.

그림 3은 이에 대한 예로서 반응고 재료의 고상율과 작용되는 전단변형속도가 반응고 상태의 A357합금의 점도에 미치는 영향을 나타낸 실험결과이다. 그림에서와 같이 응고초기인 액상선 바로 아래온도에서 점도값은 0 P에 가까운 값을 나타내지만 어떤 임계 고상율에 도달하면 점도값이 급격하게 증가하는 천이구간이 존재하며, 이러한 임계 고상율은 합금계, 전단변형속도 및 냉각속도에 따라 서로 다른 값을 갖는다[18]. 임계 고상율 값은 전단변형속도와 냉각속도에 따라 변하기 때문에 명확히 정의하기는 힘들지만 5°C/분의 냉각속도의 경우 100/s 이하의 전단변형속도에서는 일반적으로 20-40% 정도임을 알 수 있다. 이후 반응고 상태의 A357합금이 나타내는 점도는 고상율이 증가할수록 급격히 증가하며 또한 같은 고상율에서는 작용되는 전단변형속도가 커질수록 점도가 감소하는 전형적인 텍소트로피를 나타내고 있음을 알 수 있다.

실제의 반응고성형 공정에서 소재내의 고상율은 약 72% 정도로 설정하여 성형이 이루어진다. 이러한 고상율을 가진 반응고 금속은 전단변형이 가해지지 않은 정지상태의 경우 그 점도값이 매우 높지만 그림 3에 나타난 것과 같이 작용되는 전단변형속도가 증가할수록 이에 상응되는 점도가 낮아지며, 1000/s 이상의 속도로 전단변형을 가하게 되면 고상율 70%에서도 10 P 이하의 낮은 점성을 나타내고 있어 사출에 의한 성형이 가능함을 알 수 있다.

그림 4는 고상율 0.65인 반응고 A357소재에 0→1045→0/s의 속도로 전단변형을 가하여 기록한 반응고 금속의 이력곡선(히스테리시스)으로서 항복현상을 가지고 있는 의가소성 유체의 전형적인 유변학적 거동을 나타내고 있다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 동일 고상율에서 최고전단변형속도(1045/s)까지 도달소요시간(Tu)이 짧을수록 히스테리시스 영역은 넓어지고 이와 반대로 Tu시간이 길어질수록 좁아진다. 이러한 이력곡선의 면적은 「교반상태에 있는 단위부피의 반응고 금속이 단위시간 동안 흡수한 에너지」로서 정의할 수 있으며, 반응고 금속내에서 발생하는 고상의 재배열, 응집 및 파괴 등과 같은 조직변화가 점도의 변화로 나타나는 텍소트로피의 척도로 이용될 수 있다[16,19]. 따라서 그림 3과 그림 4의 실험 결과로부터 같은 고상율에서는 전단변형속도 및 전단변형가속도가 클수록 의가소성 및 텍소트로피 특성이 커짐을 알 수 있다.

그림 4에 나타난 것과 같이 반응고 금속의 유동저항(전단변형응력)은 전단변형속도를 증가시키는 과정 중 300-400/s 정도에 도달되었을 때 최대가 되며 그 이후로는 다시 유동저항이 낮아짐을 알 수 있다. 또한 전단변형속도를 감소시키는 과정에서도 유동저항이 더욱 낮아진다는 실험결과는 주목할 만 하다. 즉 전단변형을 가하지 않은 상태에서는 높은 점도(1000 P 이상)를 가진 반응고 슬러리에 전단변형을 가하면 유동저항이 급격히 낮아지게 되고 일단 유동저항이 낮아진 상태의 반응고 금속은 낮은 전단변형속도(사출속도)와 사출력으로도 쉽게

변형될 수 있음을 시사한다.

그림 4의 이력 곡선 중  $T_u=9$ 초와 17초의 전단변형력/전단변형속도의 관계를 점도/전단변형속도의 관계로 환산하여 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이  $T_u=9$ 초의 경우 반응고 금속의 점도는 전단변형속도가 100/s에 도달할 때까지는 급격한 점도 감소현상을 보이다가 이후로는 완만하게 감소하여 700/s 이상에서는 10 P 이하의 점도를 유지하였다. 즉 높은 전단변형속도에서 점도를 상실한 반응고 금속은 전단변형속도가 다시 작아지더라도 즉시 원상태로 회복되지 않았으며 300/s의 변형속도에서도 여전히 10 P 이하의 낮은 점도 값을 유지하였다. 이러한 의가소성/틱소트로피 현상은  $T_u=17$ 초의 경우에서도 유사하게 나타나고 있음을 관찰하였다. 그림 3~그림 5에 나타난 의가소성 및 틱소트로피 특성은 반응고 금속의 사출성형을 가능하게 하는 중요한 유변학적 특성으로서 실제의 반응고 성형용 합금설계 및 반응고 금속의 유동해석을 통한 부품성형 분야에 유용하게 응용할 수 있는 재료의 유변학적 물성임을 알 수 있다.

### 3.2. 의가소성 페인트의 유변학적 특성

그림 6은 일반 수성페인트에  $T_u$ 시간을 달리하면서  $0 \rightarrow 1000 \rightarrow 0$ /s의 속도로 전단변형을 가하여 기록한 점도-전단변형속도의 이력 관계이다. 그림에서 보듯이  $T_u=10$ 초의 경우 전단변형속도가 증가하기 시작하는 교반초기에 점도가 급격히 감소한 후 이후로는 완만하게 감소하여 전단변형속도가 1000/s에 도달하였을 때는 약 2 P 이하의 점도를 유지하였다. 이후 전단변형속도를 감소시키면서 측정할 경우 전단변형속도가 작아짐에 따라 페인트의 점도가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있지만 200/s의 속도에서도 여전히 1.5~2.5 P 정도의 낮은 점도를 유지함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 그림 5와 비교할 때 비록 페인트의 점도값이 반응고 상태의 A356 합금보다 다소 작지만 일반적인 유변학적 특성은 비교적 유사함을 알 수 있다.

### 3.3. 의가소성 페인트의 충전거동

그림 7은 약 5.5 m/s의 게이트 속도로 금형내에 유입되는 저점도 유체(물)의 충전거동을 고속카메라를 이용하여 시간별로 기록한 결과이다. 유체가 금형을 완전히 충전시키는데 소요되는 총시간은 약 0.2초 정도이며, 물의 경우 그림에서 볼 수 있듯이 비교적 저속 충전이 이루어질 때에도 금형 공간내에 위치한 장애물과 충돌하면 비산되는 난류성 유동거동을 관찰할 수 있었다. 이러한 비산을 동반한 충전거동은 사출속도가 증가하면 더욱 심해져 일반 다이캐스팅에 사용하는 게이트 속도(약 20-50 m/s)보다 낮은 속도인 10 m/s에서도 그림 8에서 볼 수 있듯이 유체의 자유표면이 완전히 분리되어 비산하게 된다. 이와 같은 난류성 유동거동은 사출성형시 금형내의 공기 포집을 용이하게 함으로써 성형된 제품의 기계적, 물리적 특성을 저해요인으로 작용되며, 따라서 난류를 동반한 사출성형은 고강도/고인성을 요구하는 구조용 부품을 제조하는데 한계점이 있다.

그림 9는 그림 6과 같은 유변학적 특성을 갖는 페인트를 약 5 %의 게이트속도로 금형 내에 사출했을 때의 유동거동을 고속 카메라를 이용하여 기록한 결과이다. 물의 유동 거동과는 달리 의가소성 페인트의 경우 금형내의 장애물과 충돌하더라도 비산되지 않고 유체의 자유표면을 유지한 상태로 충진이 진행되는 층류성 유동이 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 그러나 비록 점도가 비교적 높은 의가소성 유체도 금형내로 유입되는 유입속도가 빨라질수록 금형내의 장애물과 충돌하게 되면 비산되는 난류성 유동으로 발달되는 과정을 관찰할 수 있었다. 그림 10은 8 %의 유입속도로 유입되는 유체의 충전거동으로서, 그림에서 보는 바와 같이 초기에 빠른 속도로 유입되는 유체는 장애물과 충돌하여 비산된 후 유체의 속도가 낮아진 후에야 층류성으로 충전되었다. 이러한 실험적 결과는 사출성형시 난류성 충진을 억제하기 위해서 사출속도(또는 전단변형속도)를 적절히 제어해야 할 필요가 있음을 시사한다.

## 4. 수치해석 및 고찰

### 4.1. Code의 개요

반응고 성형시의 유체의 유동을 층류성으로 제어하기 위한 공정변수 특히 사출속도의 제어 및 금형설계에 응용하기 위한 방법으로 실제의 반응고 금속이 나타내는 유변학적 특성과 유사한 의가소성 유체가 나타내는 유동거동에 대한 해석을 수행하였다. 유체의 유동현상을 계산하기 위하여 사용한 프로그램은 열.유동.응고 해석용 범용 프로그램인 FLOW-3D로서, 프로그램의 알고리즘은 유한 체적 차분법(FVM, Finite Volume Method)에 기초하였다. 이 프로그램은 유동 및 에너지에 대한 해석을 위하여 연속방정식, Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식을 사용한다는 점에서는 다른 열.유동.응고 해석 프로그램과 큰 차이점은 없으나, 유체의 자유표면운동을 기술하기 위하여 VOF(volume of fluid)방식[20], 사각형격자를 이용하여 임의의 곡선을 기술하는 FAVOR(fractional area volume obstacle representation)방법[21]을 사용한다.

### 4.2. 계산방법

용융된 Al합금과 같이 점성이 낮은 유체의 충전거동을 묘사하기 위한 모델 유체인 물은 작용되는 전단변형속도에 관계없이 일정한 점도를 유지하는 뉴턴형 유체로서 약 0.01 P 정도의 점도를 가지고 있다. 이와 반면 페인트는 그림 6에서 나타낸바와 같이 작용되는 전단 변형속도 및 시간에 따라 그 점도값이 변화되는 전형적인 의가소성 유체이다. 이러한 유체의 경우 전단변형속도가 증가함에 따라 점도가 낮아지지만 전단변형속도가 다시 낮아지더라도 점도의 회복이 즉시 일어나지 않고 낮은 점도값을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 비뉴우톤형 유체의 전단변형속도-점도 거동은 Ostwald 모델[22], Carreau 모델[23] 등으로 표현될 수 있다. 그러나 이 모델들은 전단변형속도가 증가하는 과정에서의

유체의 점도 변화를 예측할 수 있을 뿐 전단변형속도가 다시 감소하는 과정에서의 점도 변화는 고려하지 않고 있어 본 실험의 실제의 상황을 모사하기 위한 입력자료로 사용하기에는 한계가 있다.

따라서 연속적인 전단변형을 가할 때 그림 6과 같은 점도 특성을 가진 유체의 거동을 실제의 사출과정에서 일어나는 현상과 비교하였다. 사출전 정지상태에 있는 페인트는 금형의 게이트를 통과할 때 최대의 전단변형속도가 작용되고, 이 과정에서 페인트의 점도가 낮아지게 된다. 이러한 유체가 금형내의 공간에 유입되는 순간 유체의 속도는 갑자기 낮아지며 이에 따라 유체에 작용되는 전단변형속도도 감소한다. 그러나 그림 6의 실험 결과로부터 알 수 있듯이 페인트에 작용되는 전단변형속도가 낮아지더라도 페인트의 점도는 거의 변화되지 않을 것이라고 추측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는  $Tu=10$ 에서 전단변형속도를 감소시키면서 측정된 점도값에 대하여 식(2)와 같은 Carreau 모델[23]을 적용하여 실제 측정된 점도값에 근접하도록 비선형 회기법을 이용하여 미지수를 결정하는 방법을 채택하여 유동현상을 모사하기 위한 입력 점도값으로 이용하였다.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\left[ a_1 + \left( \frac{1}{2} a_2 \dot{\gamma} \right)^2 \right]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (2)$$

여기서  $\eta$ 는 전단변형속도( $\dot{\gamma}$ )에 따른 점도,  $\eta_0$ 와  $\eta_{\infty}$ 는 전단변형속도가 각각 0과 무한대일 때의 점도로 본 실험에 사용된 페인트의 경우 각각 35 P 및 0.005 P,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $n$ 은 실험 상수로서 각각 1, 1.5, 0.47의 값을 부여하였다. 그림 11은 실험에 사용한 페인트의 측정 점도값과 이 결과를 Carreau 모델을 이용하여 최적화한 점도값을 겹쳐 나타낸 그림으로 전산모사의 입력 점도값으로서 사용하였다.

그림 12는 계산에 사용한 금형의 형상과 계산격자를 서로 겹쳐 나타낸 그림으로 x-, y-, z-방향으로 각각 30, 7, 50개의 격자선을 부여하여 10500개의 계산 격자를 만들었으며, 또한 계산영역(금형공간)의 x-방향의 게이트 부위와 두께 방향인 y-방향의 금형공간 쪽으로 좀 더 조밀한 격자선으로 구성하였다. 유체의 유동거동을 해석하기 위한 알고리즘은  $\kappa$ - $\epsilon$  난류 모델[24]을 이용하였다. 계산시 사용되는 time step은 각각의 계산시 한 개 이상의 계산격자를 지날 수 없도록 프로그램에서 자동으로 조절하지만 일반적으로 약  $3 \times 10^{-5}$ 초마다 계산한다. 전산유체역학 프로그램인 FLOW-3D는 거의 모든 기종의 컴퓨터에서 사용될 수 있지만 본 연구에서는 Silicon Graphics사의 IRIS O<sub>2</sub>-R10000(128MB RAM)기종을 사용하여 계산하였다.

### 4.3. 계산 결과

그림 13은 5.5 %의 속도로 사출된 물의 유동현상을 시간별로 나타낸 해석결과로서 금형에 충전되는 유체가 장애물과 충돌하여 비산되는 난류성 충전거동을 보이고 있으며, 이러한 해석결과는 그림 7에 나타난 실제의 실험으로부터 관찰한 현상과 비교적 유사하였다. 그림 14는 5 %의 속도로 사출된 페인트의 유동현상을 시간별로 나타낸 해석결과이다. 페인트와 같이 점도가 높은 의가소성 유체의 경우 그림에서 보는 바와 같이 게이트를 통과 후 유체의 흐름이 양쪽 옆으로 발달되고, 또한 장애물과 충돌 후에도 비산되지 않고 유체의 자유계면을 유지한 상태로 금형 공간에 충전되었다. 이렇게 의가소성 유체에 대하여 해석한 층류성 유동현상은 이미 그림 9에 나타내었듯이 실제의 금형 충전상황과 비교적 일치하였다. 지금까지의 실험결과 및 이의 해석결과로부터 유체의 유동특성은 유체의 점도에 따라 뚜렷이 변화한다. 특히 의가소성 유체의 경우 유체의 점도가 유체에 작용되는 전단변형속도가 증가함에 따라 급격히 감소하여 이 재료의 사출성형을 가능하게 한다. 그러나 어느 정도의 점성을 가진 의가소성 유체라 하더라도 가해진 전단변형속도가 너무 빠르게 되면 층류성 유동을 유지하기 힘들다. 그림 15는 게이트 유입속도가 8 %인 경우에 대하여 해석한 의가소성 유체의 유동현상으로서 금형내의 장애물과 충돌 후 비산되면서 자유표면이 분리되는 형태의 초기 난류성 충전거동을 보이고 있으며, 이러한 결과는 그림 10에 제시한 실제의 유동현상과 유사하였다.

### 4.4. 고찰

여기서는 본 연구의 모델 유체로 사용한 의가소성 유체가 두께 2mm의 금형내에 충전되는 과정 층류성→난류성 유동으로 천이하는 임계 사출속도(전단변형속도)값의 대략적인 범위를 해석결과를 통하여 알아보고자 한다. 실험에서와 같이 평면변형을 받으며 유동하는 경우 유체에 작용되는 전단변형속도는 식(3)과 같이 표현된다. 유체가 일정한 유속으로 평행한 두 면 사이를 흐를 때 유체에 작용되는 전단변형속도의 크기는 면과 접촉된 부분에서 최대가 되며 두 면의 중심부에서 최소값을 가진다. 본 연구에서는 유속이 가장 빠른(또는 전단변형속도가 가장 작은) 중심부에서의 유체의 속도와 이에 상응하는 전단변형속도를 계산하였다. 층류성→난류성 유동의 임계 사출속도는 실험적으로 관찰한 유동현상과 계산으로부터 얻은 결과에 대한 정성적 비교를 통하여 판단하였다.

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \quad (3)$$

그림 16은 그림 14와 같이 평균 게이트 속도 5 %로 유입되는 의가소성 유체에 작용되는 전단변형속도의 분포를 계산한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 유체가 금형의 게



이트를 지나는 순간 최대의 전단변형(약 400-1000/s)을 받게되고 이 후 게이트를 빠져나와 금형내로 충전될 때에는 약 200-300/s 정도로 낮아지면서 층류성 충진을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이와 반면 평균 게이트 속도 8 %로 유입되는 유체의 경우 게이트 부위에서 약 600-1600/s의 전단변형속도가 유체에 작용되고, 게이트를 벗어나 금형내부에 진입된 상태에서도 그 위치에 따라 다소 차이가 있지만 그림 17(a)와 같이 400-500/s 정도의 속도로 전단변형을 받으며 유체의 비산이 시작되고 있다. 시간이 지남에 따라 유체의 자유계면이 금형 안쪽으로 진전하면 그림17(b)에서 보는 바와 같이 전단변형속도는 350/s 이하로 낮아져 층류성으로 충진이 이루어짐을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에 사용한 의가소성 유체(1.5~2.0 P)가 2mm 두께의 금형에 충전될 때 층류성 유동을 하는 임계 사출속도는 약 5 % 전후로 판단되며 이에 상응되는 전단변형속도는 약 300/s 부근인 것으로 추측된다.

실제 반응고 상태의 금속이 나타내는 점도는 실험에 사용한 의가소성 페인트가 나타내는 점도값보다 최저 4-5배는 높을 것으로 추측되며[18], 이러한 특성으로 인하여 가압 사출에 의한 반응고 성형시 금속 슬러리의 충전 형태를 층류성으로 제어하기가 더욱 용이하리라고 생각된다. 따라서 반응고 성형공정은 기존의 가압사출 성형공정에서 나타나는 재료의 비산을 방지할 수 있을 뿐 아니라 금형내의 공간에 갇혀진 공기의 포집을 최소화하는데 효과적일 수 있다. 또한 반응고 성형의 경우 원소재의 70-72%정도가 이미 응고된 상태에서 부품성형이 이루어지기 때문에 응고수축에 따른 미세 기공형성 역시 최소화할 수 있다는 점에서 기존의 주조공정과 비교된다. 그러나 이러한 추측을 검증하여 반응고 성형공정에 필요한 공정변수로 확립하기 위해서는 실제의 반응고 슬러리가 나타내는 열.유동 특성에 대한 실험 및 이에 대한 이론적 해석이 보완되어야 할 것이다.

## 5. 결론

반응고 성형시 반응고 상태의 Al합금이 2mm 두께의 금형에 충전되는 유동형상을 모사하기 위한 방법으로 Al합금과 유사한 유변학적 특성을 갖고 있는 의가소성 유체(1.5~2.0 P)와 이러한 특성이 없는 저점도 유체(0.01 P)가 나타내는 유동특성을 수모델 및 수치해석을 통하여 비교하고 그 차이점을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저점도의 뉴우튼형 유체(0.01 P)의 경우 비교적 낮은 사출 속도(약 5.5 %)하에서도 금형내의 장애물과 충돌하면 비산되는 난류성 유동거동이 관찰되었다. 이와 반면 동일한 속도로 사출한 의가소성 특성을 가진 고점도 유체(1.5~2.0 P)의 경우 유체의 자유계면을 유지한 상태로 금형내의 공간을 충전하는 층류성 유동거동을 나타내었다.
2. 두 가지 유체에 대하여 관찰한 실험 결과를 해석결과와 비교하였다. 의가소성 유체의 유동해석을 위한 점도 입력값은 전단변형속도를 내리는 과정 측정한 점도값을 Carreau 모델로 최적화 하였으며, 이를 이용한 유동해석 결과는 실험적으로 관찰된

결과와 비교적 잘 일치하였다.

3. 본 연구에서 사용한 2mm 두께의 금형의 경우 금형내부에 유입되는 유체(1.5~2.0 P)에 작용되는 전단변형속도 200-300/s (또는 게이트속도 5 m/s)이하에서는 유체의 비산이 비교적 적은 층류성 유동거동을 나타내었으며, 이 이상의 변형속도에서는 난류성 유동이 시작되고 있음을 관찰할 수 있었다.

## 6. 참고문헌

1. D.B.Spencer, R.Mehrabian, and M.C.Flemings, Metall. Trans. A, 3, (1972) 1925.
2. S.Kou, "Transport Phenomena and Materials Processing" p.5, John Wiley & Sons, INC, 1996 New York.
3. S.A.Metz and M.C.Flemings, Trans. Am. Foundrymen's Soc., 78, (1970) 453.
4. M.C.Flemings, Met. Trans. B, 22, (1991) 269.
5. Ho-In Lee, Ph.D dissertation, Sussex Univ., U.K, 1982.
6. M.C.Flemings, R.G.Riek, and K.P.Young, Mat. Sci. Eng, 25, (1976) 103.
7. M.Hirai, ISIJ Inter., 33 (1993) 251.
8. M.Hirai, K.Takebayashi, Y.Yoshikawa, and R.Yamaguchi, ISIJ Inter., 33, (1993), 405.
9. M.Mada and F.Ajershi, Mat. Sci. Eng. A, 212, (1996) 157.
10. M.Mada and F.Ajershi, Mat. Sci. Eng. A, 212, (1996) 171.
11. L.S.Turng and K.K.Wang, J. Mater. Sci., 26 (1991) 2173,
12. J.I.Lee, J.H.Park, H.I.Lee, M.I.Kim. J. Korean Foundrymen's Soc., 14, (1994) 438.
13. G.R.Burgos and A.N.Alexandrou, The 5th Int. Conf. on the semi-solid alloys and composites, Golden, Colorado, USA, (1998) 217.
14. D.M.Lipinski and E.Flender, The 5th Int. Conf. on the semi-solid alloys and composites, Golden, Colorado, USA, (1998) 273.
15. J.C.Gebelin, D.Favier, and M.Surey, Proceedings for the 5th Inter. Conf. on the semi-solid alloys and composites, Golden, Colorado, USA, (1998) 309.
16. Y.J.Ko, J.C.Lee and H.I.Lee, "Rheological behaviors of the hypoeutectic A357 Al alloy II : Thixotropy", J. Kor. Inst. Met. & Mater., (submitted, 1999)
17. Technical report No.75C015, "Semi-solid processing of Iron and Steel (III)" KIST, (1998).
18. Y.J.Ko, J.C.Lee, Y.P.Yoon and H.I.Lee, "Rheological behaviors of the hypoeutectic A357 Al alloy I : Pseudoplasticity", J. Kor. Inst. Met. & Mater., (submitted, 1999).
19. P.A.Joly and R.Mehrabian, J. Mater. Sci., 11, (1976) 1393.
20. C.W.Hirt and B.D.Nichols, J. Comp. Physics, 39, (1981) 201.
21. C.W.Hirt and J.M.Sicilian, The 4th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Sep.

(1985).

22. J.Ferguson and Z.Kemblowski, "Applied Fluid Rheology", Elsevier Applied Science, U.K., ISBN: 1-85166-588-9, (1991).
23. P.J.Carreau, Ph.D dissertation, Univ. of Wisconsin, USA, 1968.
24. B.E.Lauder and D.B.Spalding, "Lectures in Methematical Modles of Turbulence", Academic Press, London, England, (1972).

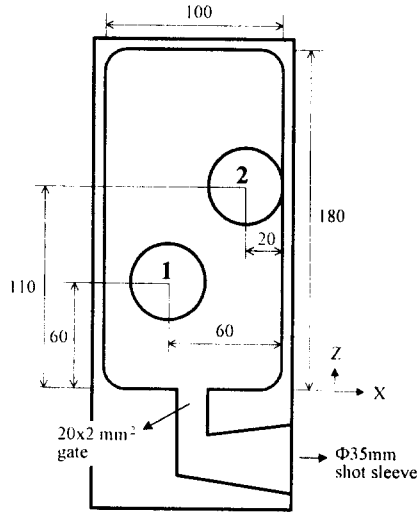


Fig. 1. A schematic drawing of the mold geometry. The circles denoted by '1' and '2' in the drawing designate obstacles.

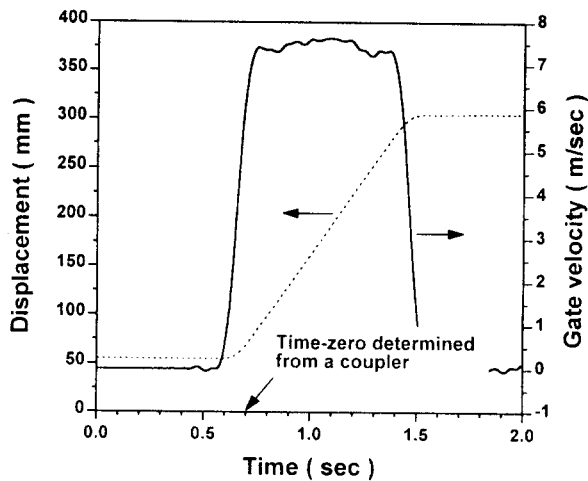


Fig. 2. A plot showing the methodology used to determine the gate velocity

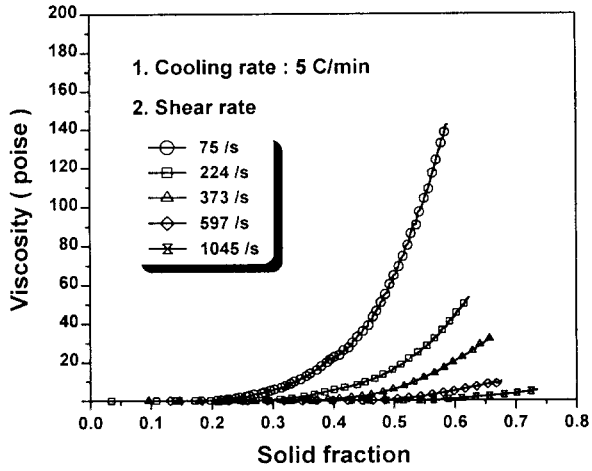


Fig. 3. Effect of the solid fraction and the shear rate on the viscosity of the semi-solid A357 Al alloy.

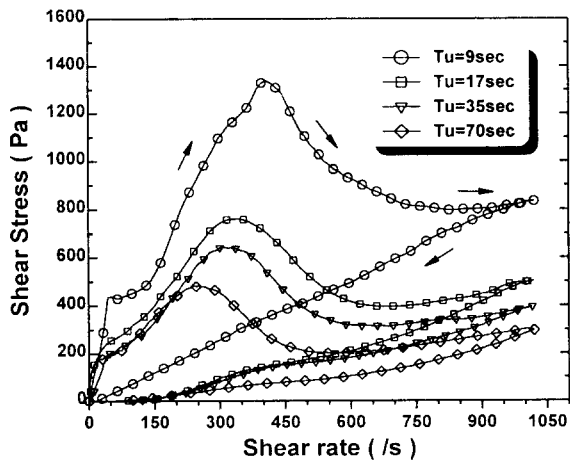


Fig. 4. Effect of the up-time( $T_u$ ) on the shape of the hysteresis curve shown by the semi-solid A357 Al alloy. Arrows denoted in the graph are the direction of shear.

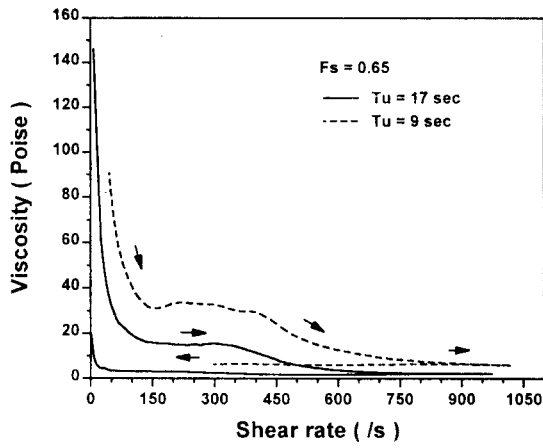


Fig. 5. Plots showing the thixotropic and pseudoplastic nature of the semi-solid A357 Al alloy.

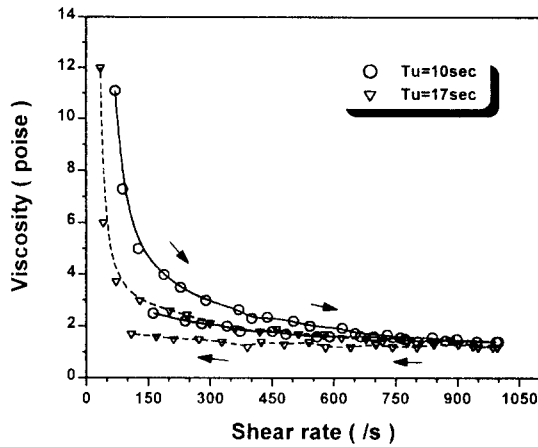


Fig. 6. Effect of the up-time( $T_u$ ) on the shape of the viscosity vs. shear rate curve.

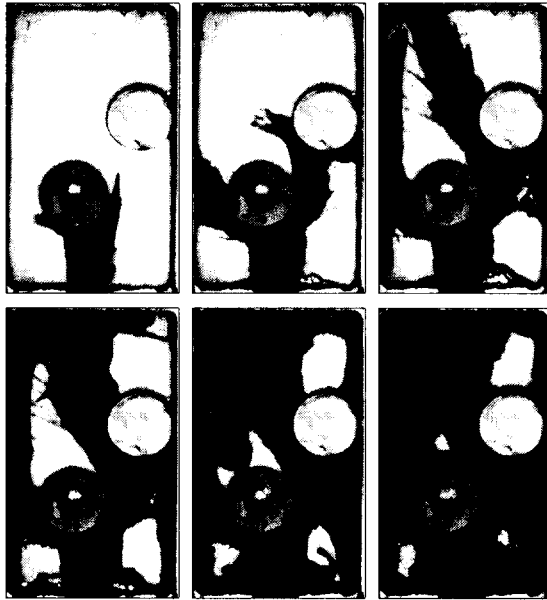


Fig. 7. A series of pictures showing the die filling pattern of the water injected at an approximate gate velocity of 5.5 m/s.

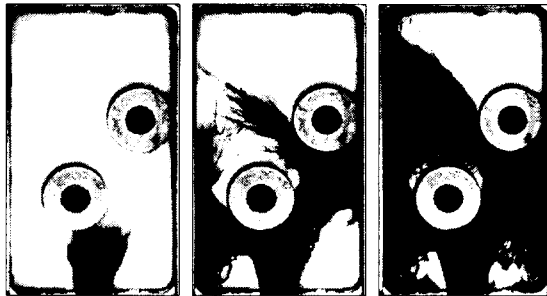


Fig. 8. Die filling pattern of the water injected at the gate speed of 10 m/s, showing the completely shattered liquid front.

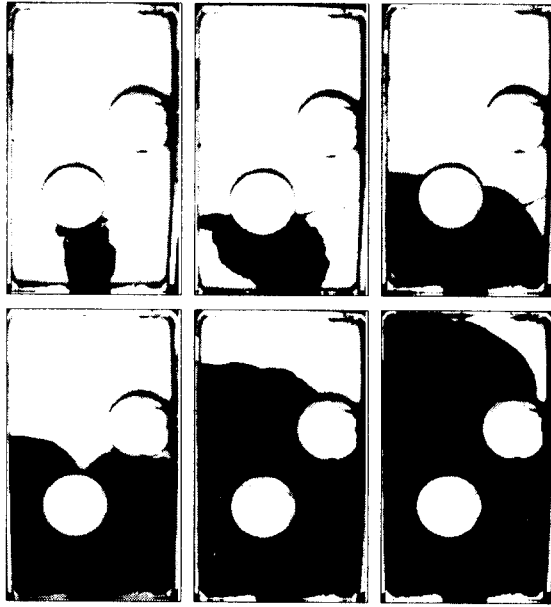


Fig. 9. A series of pictures showing the die filling pattern of the thixotropic paint injected at an average gate velocity of 5 m/s.

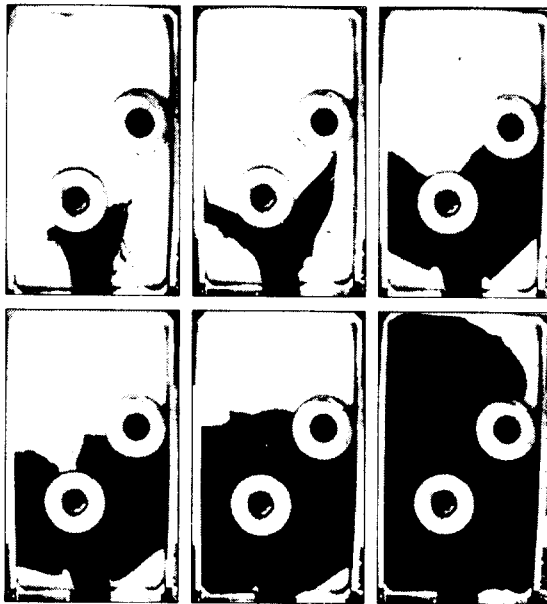


Fig. 10. A series of pictures showing the die filling pattern of the thixotropic paint injected at an average gate velocity of 8 m/s.

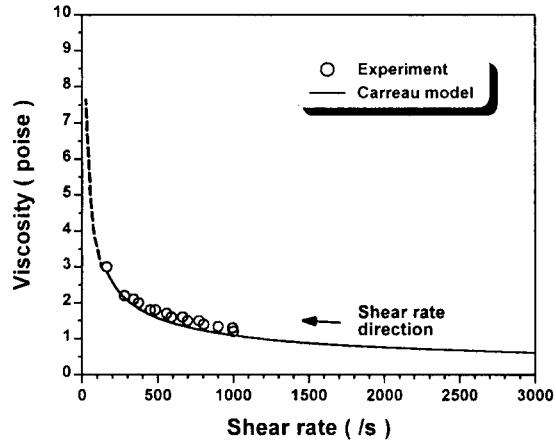


Fig. 11. Variations in the measured viscosity superposed with the best fit curve obtained based on the Carreau model.

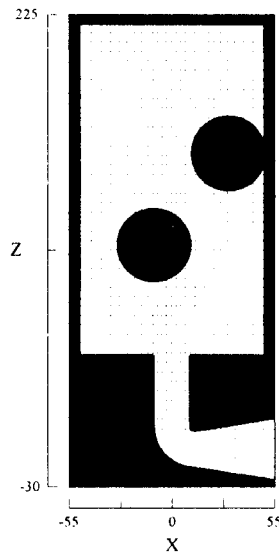


Fig. 12. A plot showing the mold geometry superposed with grids.



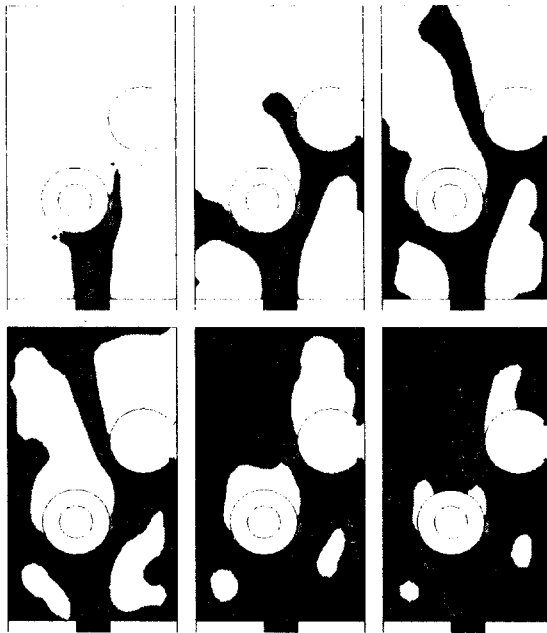


Fig. 13. Simulated die filling pattern of the water injected at the gate speed of 5.5 m/s.

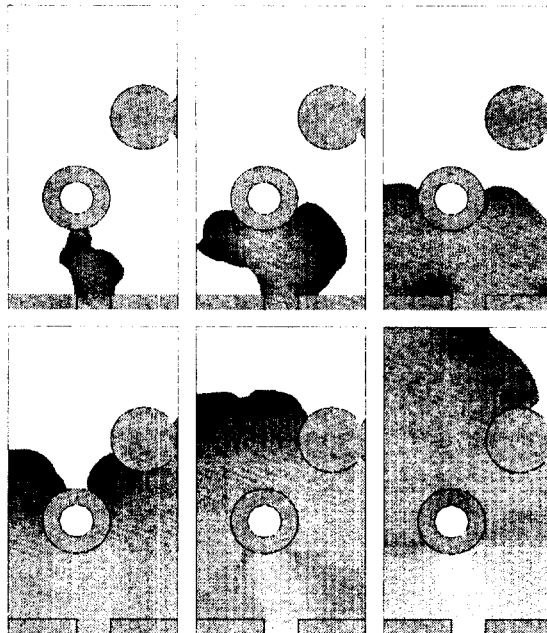


Fig. 14. Simulated die filling pattern of the pseudoplastic paint injected at the gate speed of 5 m/s.

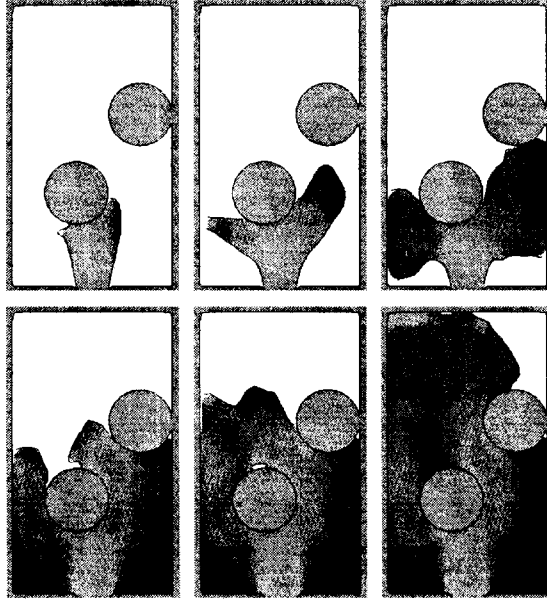


Fig. 15. Simulated die filling pattern of the pseudoplastic paint injected at the gate speed of 8 m/s.

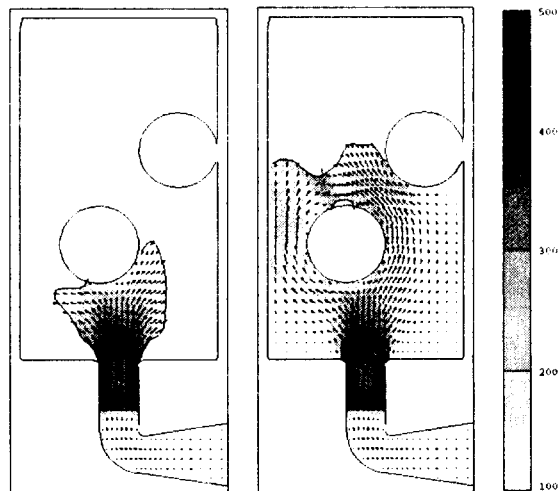


Fig. 16. Shear rate distribution within the pseudoplastic fluid injected at the gate speed of 5 m/s. The shade bar indicates the shear rate. Arrows in the graphs are the velocity vector, showing fluid flow.

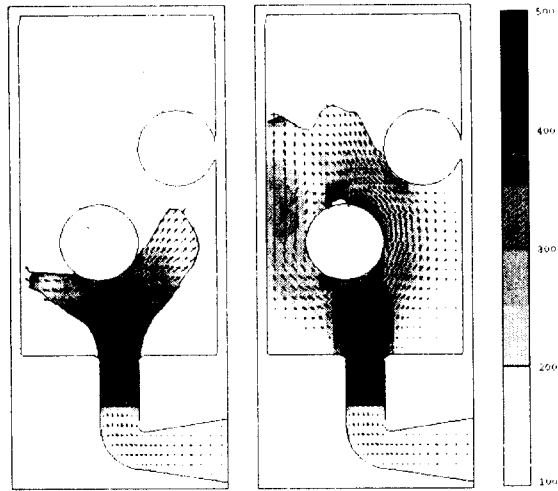


Fig. 17. Shear rate distribution within the pseudoplastic fluid injected at the gate speed of 8 m/s. The shade bar indicates the shear rate. Arrows in the graphs are the velocity vector, showing fluid flow