

## 레오로지 소재의 점도측정에 의한 공정해석 및 실험적 평가

서판기\* · 강충길\*\*

### Process Analysis and Experimental Evaluation by the Viscosity Measurement of Rheological Materials

P.K. Seo and C.G. Kang

#### Abstract

Using a simple compression test, the viscosity measurement experiment is carried out with the grain-refined Al-Si alloy(A356). The measured rheological data are expressed with power-law(Ostwald-de Waele) model and using commercial package, MAGMASoft, coefficients of Ostwald-de Waele model and Carreau-Yasuda model are calculated. To verify the viscosity data, the die is designed to be applicable to the semi-solid die casting of automotive component and filling test is carried out. The filling test and the simulation result are compared and in good agreement. Hereafter, these data are considered to be usefully applied other product in the semi-solid die casting.

**Key Words** : Semi-Solid Die Casting, Apparent Viscosity, Filling Test

#### 1. 서 론

반응용 재료는 고액공존상태로 인하여 고체 혹은 액체의 단일상으로 구성된 경우에 비해 매우 특이한 거동을 나타내게 된다. 저고상율일 경우 고체변형 특성은 존재하지 않고 비뉴토니안(Non-Newtonian) 유체 거동을 나타내지만, 고상율이 증가함에 따라 고체변형과 액상유동의 복합적인 레오로지(rheology)특성이 나타날 뿐만 아니라, 온도나 변형속도 등 동일한 외부조건 하에서도 초기 조직상태에 따라서 상이한 거동 특성을 나타내게 된다<sup>(1)</sup>. 따라서, 반응용 재료의 레오로지 특성을 파악하고

유동변형 양상을 예측함으로써 양질의 부품생산을 위한 최적화된 금형설계를 수행할 수 있다.

반응용재료의 레오로지 특성 파악에 많은 연구가 이루어져 왔으나, 계산식의 복잡함과 여러 인자들을 동시에 고려해야 하는 어려움으로 실제 제품에 적용하여 해석을 수행한 예는 드물며, 이론적인 측면만이 부각되어 부품의 양산과 직결되는 금형설계 및 점도가 유동패턴에 미치는 영향에 대한 연구는 부족하였다. 금형설계에 있어서 레오로지 소재의 물성치가 파악되지 않아 보다 정확한 충전해석을 수행하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 반응용 다이캐스팅공정에 적용

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부

되는 알루미늄재료의 레오로지 거동을 파악하기 위해서 단순압축실험을 이용하여 재료의 점성을 측정하였다. 측정된 점도를 입력데이터로 활용하여 레오로지 성형해석을 수행하고, 충전실험을 통해 해석과 점성식에서 표현한 물성치의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 점도측정실험

### 2.1 실험방법

압축실험은 MTS에 고온전기로를 부착하여 행해졌으며, 열전대를 시편에 삽입하여 온도를 측정하였다. 상·하 펀치와 압축시편에는 압축실험 후 시편의 소착을 방지하기 위하여 이형제(Boron Nitride Spray)를 사용하였다. 열전대의 온도가 실험온도에 도달하도록 재가열시킨 후 약 10분간 유지하고, 열전대 제거 후 압축실험을 하였다. 압축 후 압축속도와 고상율에 따른 반응용 재료의 조직상태를 관찰하기 위해서 수 초 내에 시편을 펀치에서 분리하여 쿼칭(quenching)하였다. 온도(565~585℃)와 압축속도(0.1~1.0m/s)를 변화시키면서 실험을 하였다.

### 2.2 압축속도에 따른 미세조직

Fig. 1(a)~(d)는 580℃에서의 압축속도 변화에 따른 미세조직상태를 나타내고 있다. 압축속도가 증가함에 따라 고상입자의 크기가 미세하며, 중앙부에서 외곽부의 고상과 액상의 분리현상인 액상편석이 감소함을 알 수 있다. 이것은 압축속도가 증가함에 따라 변형률속도가 증가하게 되어 고상입자의 분리(disagglomeration)현상<sup>(2)</sup>이 촉진되고, 성형 시간의 감소로 인하여 고상입자가 조대화될 수 있는 시간이 불충분하기 때문에 입자가 미세하게 되는 것으로 사료된다.

중앙부와 외곽부를 비교했을 때, 외곽부의 고상입자가 보다 미세함을 알 수 있다. 냉각속도의 차이와 분리된 작은 고상입자가 액상과 함께 외곽부의 유동이 용이하기 때문이다. 또한 중앙부에서 외곽부로 갈수록 액상율이 증가함을 볼 수 있다. 하지만 압축속도가 증가함에 따라 액상편석의 양이 감소하며, 고상과 액상이 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이것은 압축속도가 증가함에 따라 입자가 미세하게 되고, 입자가 미세함에 따라 액상과 고상의 상대속도의 차이가 작으므로 액상편석이 작게 발생한다.

### 2.3 점성식

단순 압축실험을 통해 하중, 변위, 시간에 대한 데이터

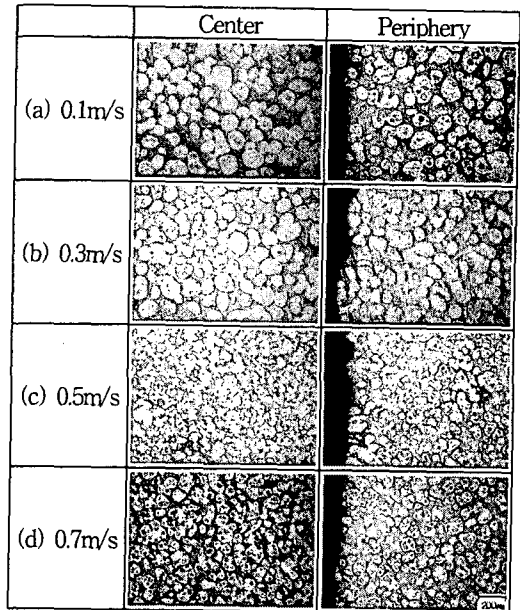


Fig. 1 The microstructures of A356 after simple compression test

를 얻을 수 있으며, 다음의 식을 사용하여 전단변형률속도와 점도의 관계식이 유도될 수 있다<sup>(3,4)</sup>.

- 평균전단변형률속도

$$\dot{\gamma}_{avg} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{V}{\pi h_{\epsilon}^3}} \dot{\epsilon} \quad (1)$$

- 겉보기점도

$$\eta_{app} = \frac{2\pi h_{\epsilon}^4}{3 V^2 \dot{\epsilon}} F_{\epsilon} \quad (2)$$

여기서,  $V$  : 시편의 체적,  $h_{\epsilon}$  : 시편의 높이

$F_{\epsilon}$  : 압축하중

$\dot{\epsilon}$  : 압축변형률속도 ( $\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$ )

Fig. 2(a)와 (b)는 압축속도가 동일할 때, 온도에 따라 전단변형률속도와 점도의 관계를 그래프로 나타내었다. 압축속도에 관계없이 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하였다. 특히, 공정온도를 지난 580℃에서는 크게 감소하였으며, 점도가늘기는 온도가 변하더라도 거의 평행을 유지한다. 하지만, 압축속도가 빠른 1.0m/s에서는 570, 575, 580℃의 점도가 거의 일치함을 알 수 있다.

반응용 재료의 점성거동을 표현하기 위해서는 Navier-Stokes 방정식의 전단응력항에 점성의 영향이 고려되어야 한다. 점성모델로는 반응용재료의 비뉴턴

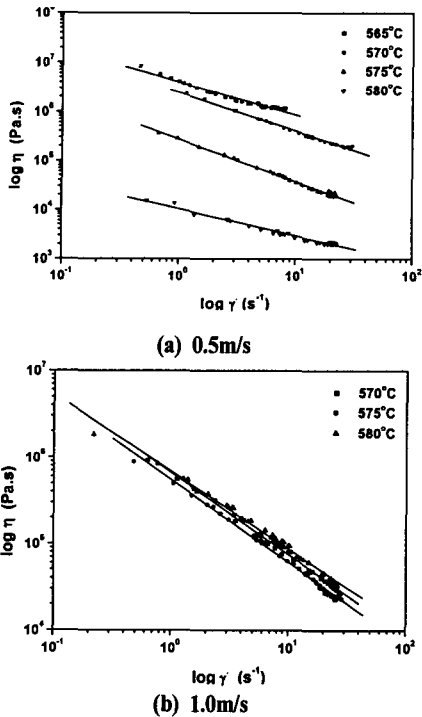


Fig. 2 The variations of apparent viscosity to the shear rate

(Non-Newtonian)양상을 멱법칙(Power-law)으로 표현한 Ostwald-de Waele모델과 전단변형율속도와 점도의 관계를 동시에 5가지 인자를 사용하여 보다 정확히 표현한 Carreau-Yasuda모델이 있다. Ostwald-de Waele모델과 Carreau-Yasuda모델은 다음의 식으로 표현된다.

- Ostwald-de Waele 모델

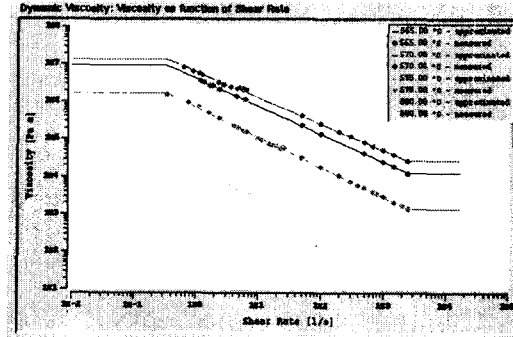
$$\eta = \rho m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

- Carreau-Yasuda 모델

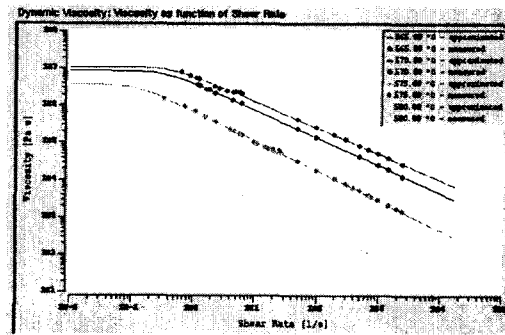
$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\dot{\gamma}\lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (4)$$

식(3)에 사용된 Ostwald-de Waele모델은 의사소성(pseudoplasticity)재료의 레오로지 거동을 표현하는데 주로 사용된다. 계산의 간결함과 시뮬레이션에 용이한 장점이 있으나, 전단변형율의 범위에 제한이 있으며, 재료의 조직상태(고상입자의 질량, 고상입자의 분포상태)와 재료의 완화시간(relaxation time)을 예측할 수 없는 단점이 있다.

식(4)에 사용된 Carreau-Yasuda모델은 매우 낮은 전단 변형율속도( $\dot{\gamma}_L$ )에서의 점도와 매우 높은 전단변형율



(a) Ostwald-de Waele model



(b) Carreau-Yasuda model

Fig. 3 The variations of apparent viscosity to the shear rate in Ostwald-de Waele model and Carreau-Yasuda model

속도에서의 점도( $\dot{\gamma}_H$ )를 고려할 수 있으며, 반응용 재료의 특성인 점도의 시간의존성(thixotropic)을 파악할 수 있는 장점이 있으나, 동시에 5가지 인자를 계산해야 하므로 해석해를 구하기가 상당히 어려운 단점이 있다.

Fig. 3은 단순압축실험에서 계산된 값을 MAGMA soft에 입력하여 Ostwald-de Waele모델과 Carreau-Yasuda모델에 적용하여 얻은 점도 그래프이다. Fig. 3(a) Ostwald-de Waele모델에서는 전단변형율의 상한과 하한이 존재하며, 상한과 하한 이외에서는 일정한 점도를 가지는 것으로 가정된 것이다. 온도의 증가에 따라 점도의 감소폭이 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 3(b)의 Carreau-Yasuda모델에서는 일정점도에서 전단연화로의 천이구간이 존재하고, 천이구간의 폭은 곡률에 따라 변화하며,  $\dot{\gamma}_L$ 과  $\dot{\gamma}_H$  사이의 구간에서는 Ostwald-de Waele모델과 일치함을 알 수 있다.

### 3. 충전실험과 유동해석

단순압축실험으로 측정된 점도가 반응용다이캐스팅 공정의 유동패턴에 미치는 영향을 파악하기 위해서 자동차 부품에 사용되는 로어암(lower arm) 부품을 대상으로 MAGMASoft를 이용하여 해석을 수행하였다.

해석에 적용된 조건은 금형온도 250℃, 초기 재가열 빌렛의 온도 583℃, 히팅라인의 오일의 온도 200℃, 충전 과정 중 재가열 빌렛과 금형과의 열전달계수는 온도의존성계수로 설정하였다. 최종 충전 이후 가압조건은 초기 500bar에서 1100bar로의 이단 가압조건을 부여하였다.

충진실험은 미성형을 방지하기 위하여 빌렛의 길이를 계산하고, 일정한 길이로 자동 절단되어 재가열 장치에 이송된다. 16단계의 재가열 과정을 거친 균일한 온도분포의 재가열 빌렛은 내열 세라믹(ceramic) 그립으로 Buhler 840ton장비에 이송되어 설정된 사출조건과 가압조건에 따라 성형이 이루어졌다. 금형의 열적안정성과 양호한 성형을 위해 금형온도조절장치로 금형을 예열하였다.

	(a) Filling test	(b) Simulation result
45%		
56%		
85%		
96%		

Fig. 4 Comparison of filling test and simulation analysis result by Ostwald-de Waele model at 45, 56, 85, and 96% filled

Fig. 4은 충진을 45, 56, 85, 96%에서 충전실험 결과와 Ostwald-de-Waele 모델을 적용한 경우의 해석결과를 비교한 것이다. 게이트에서 폭의 확장시 속도의 영향보다는 점성의 영향으로 넓게 퍼지면서 유동하며, 게이트에서의 속도가 가장 빠름을 알 수 있다. 또한, 해석결과와 충전실험의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

단순압축실험을 통해 반응용 재료의 조직을 관찰하고, 점도를 계산하였다. 계산된 점도를 Ostwald-de Waele 점성모델에 적용하여 전산해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압축시편의 중앙부에서 외곽부로 갈수록 입자가 미세화되었다. 압축속도가 증가할수록 고상입자의 분리 현상이 촉진되고, 고상입자의 조대화가 방지되어 균일한 분포를 보이며, 액상편석이 감소하였다.

(2) 단순압축실험으로 구해진 점도를 Ostwald-de Waele 점성모델에 적용하여 반응용다이캐스팅의 유동양상을 해석한 결과와 충전실험 결과의 유동양상이 거의 일치하였다.

(3) 전산해석을 통하여 반응용 성형공정의 유동패턴을 파악함으로써 금형설계의 기초자료와 사출조건, 가압조건을 설정할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Suery, M. and Zavaliangos, A., 2000, "Key problems in rheology of semi-solid alloys", The 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 129~135.
- (2) Suery, M., Martin, C. L. and Salvo, L., 1996, "Overview of the rheological behaviour of globular and dendritic slurries", The 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 21~29.
- (3) Laxaman, V. and Flemings, M. C., 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15 Pct Pb Alloy", Metall. Trans. A, Vol. 11, pp. 1927~1937.
- (4) Gebelin, J. C., Suery, M. and Favier, D., 1999, "Characteristic of the rheological behaviour in the semi-solid state of grain-refined AZ91 magnesium alloys", Mater. Sci. and Eng., Vol. A272, pp. 134~144.