

## 결정립 제어소재의 레오로지 유동이 고상입자의 거동에 미치는 영향

정용식\*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 서판기(부산대 대학원 정밀기계공학과),  
강충길(부산대 기계공학부)

The Effect of Rheology flow with Grain Size Controlled Material on Solid Particles Behavior

Y. S. Jung(Precision Mechanical Eng. Dept., PNU), P. K. Seo(Precision Mechanical Eng. Dept., PNU),  
C. G. Kang(Mechanical Eng. Dept., PNU)

### ABSTRACT

The semi-solid processing is now becoming of great interest for the production of various parts by pressure die casting. Also, the rheology casting has been substituted for thixo casting, because the rheology casting can control the solid particles to globular and non-dendritic solid phase. In the rheology casting process, the important thing is to control the solid particles behavior in semi-solid materials. So in this paper, to control solid particles behavior in semi-solid materials, we experimented about the die filling during the semi-solid die casting in 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 solid fraction. The die filling in semi-solid die casting were simulated by MAGMAsoft/thixo module. By the die filling tests and computer simulation, the effect of solid particles behavior in rheology flow had been investigated.

**Key Words** : Solid Fraction(고상율), Grain size Controlled Material(결정립 제어소재), Solid Particles(고상입자)

### 1. 서론

고체와 액체가 공존하는 반응용가공은 고체 상태의 소재를 가열하여 성형하는 텍소 공정과 액체 상태의 소재를 냉각하여 고상율을 제어한 후 성형하는 레오로지 공정으로 분류하고 있다.

텍소 공정은 전자교반에 의하여 제조한 빌렛을 재가열 과정을 거쳐 성형하기 때문에 원소재의 원활한 공급이 가능한 경우에는 대량생산이 가능하다. 또한 재가열 공정에 있어서 불균일한 구상화조적은 불균일한 기계적 성질을 유발하기 때문에 최적 재가열 조건의 선정이 매우 중요하다. 뿐만 아니라, 텍소 공정에 의하여 제조한 부품의 경우 스크랩의 양이 제품중량의 30~40% 정도이기 때문에 조업현장에서 재활용이 불가능하다. 이상에서 언급한 텍소 성형공정의 단점을 보완하기 위하여 국내의 관계 및 산업계에서는 레오로지 성형공정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)-(3)</sup>

레오로지 성형공정은 알루미늄 스크랩을 조업 현장에서 용해와 냉각과정을 거쳐서 고체입자를 구상화 시킨 후 성형할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 텍소 공정에 의하여 성형한 제품의 기계적 성질은 레오로지 성형공정에 의하여 제조된 제품의 기계적 성질보다 우수하다고 알려져 있다. 그러나, 제품의 원가측면에서는 액상율이 50~60% 상태에서 제조하는 레오로지 성형공정이 텍소 성형공정보다 더 우수하다.<sup>(4)-(5)</sup>

따라서, 반응용 및 반응고 성형 공정의 실용화를 위하여 고상율의 변화에 따른 소재의 특성연구가 중요하다. 특히 초기 고상율의 변화에 따른 충전 상태와 성형 완료 후 고상율 분포의 변화 등을 조사하기 위한 성형공정의 실험적 연구는 텍소와 레오로지 성형공정 측면에서 해결되어야 할 분야이다.

현재까지 반응용 및 반응고 공정에 있어서 많은 연구자들이 충전 실험, 공정해석 등을 수행하였으

나, <sup>(4),(6)-(8)</sup> 사출속도와 사출압력을 연계하여 고상율의 변화폭이 0.3~0.6 범위 내에서 다양하게 실험한 결과를 보여주지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 고상율이 55~60%인 상태에서 성형하는 틱소 공정과 액상율이 55~60%인 상태에서 성형하는 레오로지 성형공정에 있어서 소재의 유동거동을 파악하기 위한 기초실험을 수행하였다. 금형의 구조는 두께변화를 고려한 형상을 채택하였으며, 성형실험은 고상율, 사출압력 및 사출속도 등을 변수로 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험방법

고상율이 0.3 에서 0.6 인 범위에서 반응고 성형 실험을 위하여 SAG사에서 구매한 A356 소재를 이용하였다. 실험을 위한 고상율 제어는 지자가 지금까지 연구한 결과를 이용하였다.<sup>(5),(9)</sup>

사출성형 중 충전 현상과 고상입자의 편석현상을 파악하기 위한 시험편의 모양을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 시험편의 최대 및 최소 두께는 현재 알루미늄에 사용되는 자동아아 부품의 최소 및 최대 두께를 기준으로 하였다.

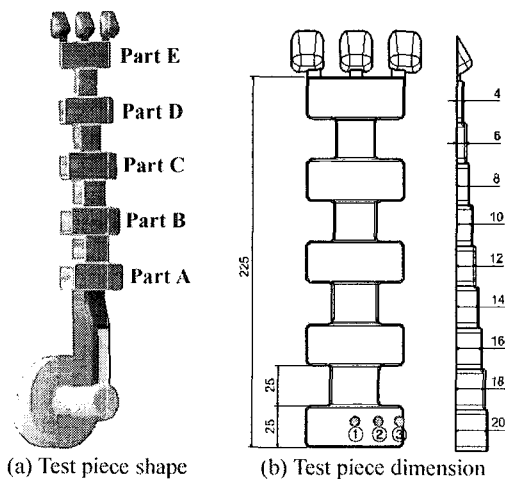


Fig. 1 The shape and dimension of specimen part

고상율과 사출조건 변화가 충전 상태에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최대 길이를 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 225mm로 하였다. Fig. 1(b)에서 보여주는 게이트 입구의 ①, ②, ③의 위치는 사출성형 후 조직사진을 관찰한 위치를 나타낸 것이다.

Table. 1 은 스트로크, 고상율 및 사출압력을 나타낸 것으로 본 연구에서 사용한 실험 조건이다.

Table 1 The table of experimental conditions

No.	Solid Fraction	V <sub>1</sub> (m/s)	V <sub>2</sub> (m/s)	V <sub>3</sub> (m/s)	V <sub>4</sub> (m/s)	Pressure (bar)
1	<b>0.3</b>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
2	<b>0.4</b>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
3	<b>0.5</b>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
4	<b>0.6</b>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
5	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<b>400</b>
6	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<b>600</b>
7	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<b>800</b>
8	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<b>1200</b>

### 2.2 실험결과

Fig. 2 는 고상율의 변화에 따른 충전거동을 나타낸 것이다. 플런저의 행정거리 (d)가 420mm, 430mm 인 경우(Fig. 5 (a), (b))  $f_s=0.6$  일 때  $f_s=0.3$  일 때보다 충전거리가 증가함을 볼 수 있다. 똑같은 플런저의 행정거리에서 고상율이 높은 빌렛이 고상율이 낮은 빌렛보다 충진이 용이하게 이루어짐을 알 수 있다. 위의 원인은 소재의 점도가 높으면 유동성의 증가와 더불어 캐비티 내부에서의 층류유동 때문에 오히려 충전거리가 증가됨을 알 수 있다.

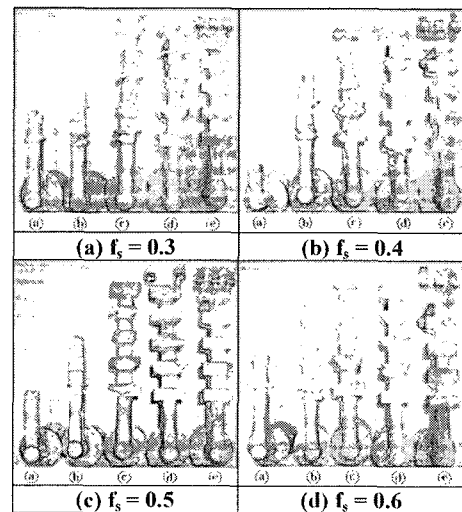


Fig. 2 The photograph of specimen part after filling test in each solid fraction

Fig. 3 은 고상율( $f_s$ )이 0.3, 성형최대압력이 1000bar 일 때 Fig.1 (a), (b)에서 보여주는 시험편의 위치 A-E 에 있어서 중앙부분 ①, 표면부분 ③의 위치에 대한 미세조직을 각각 나타낸 것이다. 시험편의 모든 위치 A-E 에 있어서 중앙부분의 단면①

이 시험편의 표면부분③ 보다 액상편석이 현저하게 증가됨을 알 수 있었다. 또한 중앙부분의 단면①의 위치는 게이트로부터 거리가 증가할수록 액상편석이 증가하나 균형표면부분의 단면③의 위치에서는 게이트로부터의 거리에는 무관함을 알 수 있다.

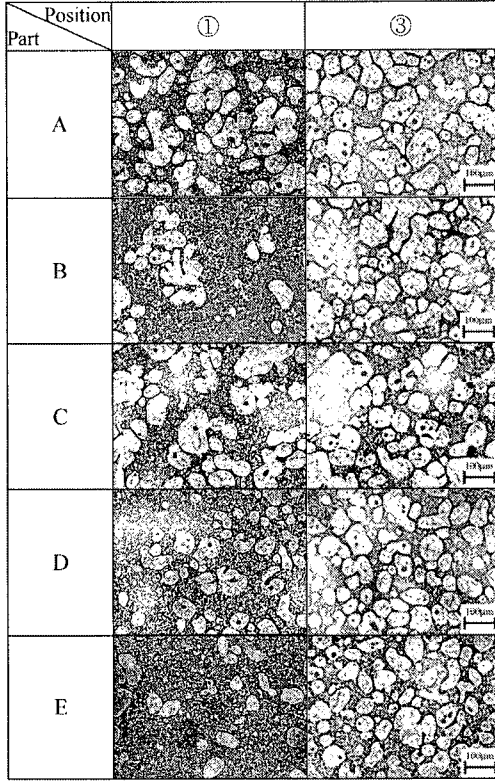


Fig. 3 The microstructure of test piece obtained by semi-solid die casting ( $f_s=0.3$ ,  $P=1000\text{bar}$ )

Fig. 4 은 고상율( $f_s$ )이 0.6 일 때 Fig. 3 에서 보여준 동일한 위치에서의 미세조직을 보여준 것이다. 텍소 성형조건에 가까우면 단면 전체에 걸쳐서 레오로지 성형조건(Fig. 3) 보다 초정  $\alpha$  가 균일한 미세조직을 가지고 있음을 보여주고 있다. 위의 원인은 형상이 복잡한 캐비티 내부에서 고상율이 높을수록 고상과 액상의 분리현상이 억제되어질 수 있고, 또한 층류유동이 가능하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 레오로지 성형조건에서 제조한 시험편의 기계적 성질을 저하시키는 원인이 된다. 이러한 현상을 억제시키기 위해서는 액체 상태에서 냉각속도를 증대시키고 동시에 고상율이 50% 이상이 되도록 제어한 후 성형공정이 이루어져야 한다.

사출압력이 고상입자의 분포와 가공에 미치는 영

향을 조사하기 위하여 400~1200bar 에서 실험을 수행하였다. Fig. 5 의 미세조직의 위치는 시험편에서 압력이 가장 적게 작용할 것으로 예측되는 Fig. 1 (a)의 E 부분의 표면단면 위치 ③의 위치이다. Fig. 5 에서 보여주고 400bar~800bar 의 경우는 기공이 관찰되었으며, 1000bar 이상에서는 기공이 나타나지 않았다.

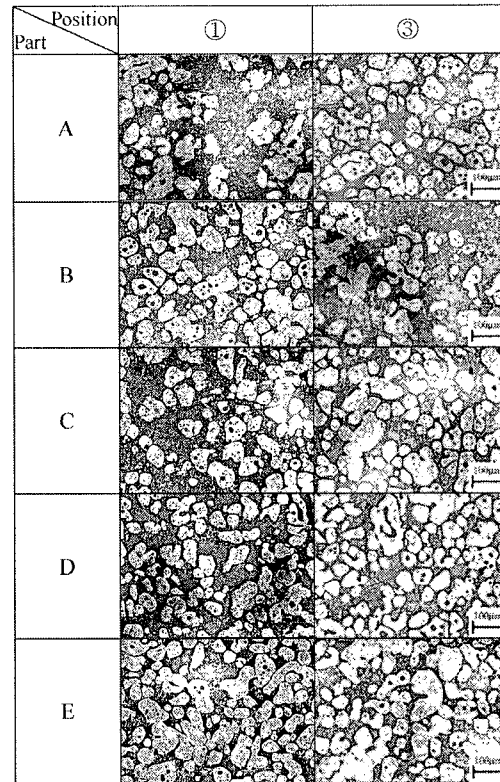


Fig. 4 The microstructure of test piece obtained by semi-solid die casting ( $f_s=0.6$ ,  $P=1000\text{bar}$ )

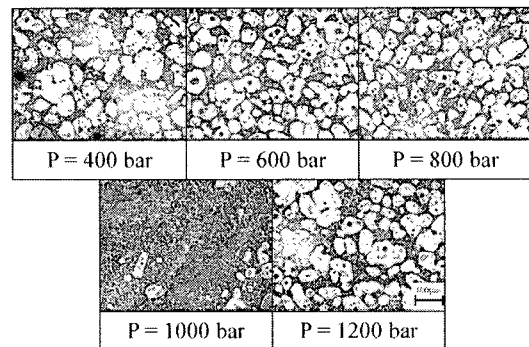


Fig. 5 The microstructure phenomena for variation of each pressure at the final part E of Fig. 1 (a) ( $f_s=0.5$ )

### 3. 시뮬레이션 결과

고상율의 변화에 따라서 캐비티 내부에서의 속도 분포가 소재의 충전 상태와 미세조직에 미치는 영향을 파악하기 위하여 MAGMAsoft의 thixo-module로 수치해석을 하였다. 각각의 고상율은 소재의 초기 온도조건 설정으로 하였다. Fig. 6은 각각의 고상율 조건에서 반응고 소재가 금형의 게이트를 통과하여 캐비티 내로 진입하는 곳인  $V_1$  지점에서의 충전 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보여주는  $V_1$ 의 위치는 Fig. 1(a)에서 보여주는 게이트 입구부분(Fig. 1(a)의 Part A)의 중앙부분(㉠)을 나타낸 것이다. 고상율 0.3, 0.4의 속도분포는 0.5, 0.6의 속도분포에 비하여 변화가 많은 것을 알 수 있다. 이는 고상율의 차이로 인하여 동일한 속도 조건에서 캐비티를 충전하는 순서가 다르기 때문이다.

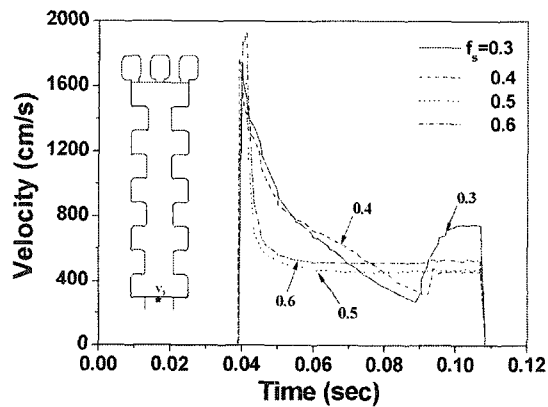


Fig. 6 The velocity of point 1 and 2 in each solid fraction

### 4. 결론

고상율이 0.3~0.6, 사출압력이 400~1200bar 범위 내에서 결정립 제어용 소재를 다이캐스팅한 시험편의 조직 관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고상율의 범위가 (0.5~0.6)인 경우가 고상율이 (0.3~0.4)인 경우보다 전도와 열전달의 영향 때문에 금형 캐비티 내부에서 충전이 용이함을 알 수 있었다.
- (2) 사출공정 중 압력이 낮은 공정은 캐비티 내에서 많은 기공과 같은 결함이 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 고상율이 0.4 이하의 경우는 게이트 입구에서 사출 속도의 변화가 불균일하며, 고상율이 0.5 이상의 경우는 캐비티에서 소재가 일정한 속도로 충전이 진행됨을 알 수 있었다. 이러한 현상은

시험편 단면 내에서 고상율의 분포를 균일하게 하는 원인이 되었다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 지원하의 국가지정연구실 - Thixo · Rheo 성형연구실(NRL) - 사업 과제 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. O. Shinobo, "Research Activities in Rheo-Technology Ltd.", Proc. 3th Conf. On the Processing Semi-Solid Alloys and Composite, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, pp. 7~18, 1994.
2. K. Kitamura, Y. Ando, K. Hironaka, S. Yahata and C. Yoshida, "Die Casting of Aluminum Alloy in Semi-Solid State", Proc. 3th Conf. on the Processing Semi-Solid Alloys and Composite, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, pp. 181~190, 1994.
3. 강충길, "금속레오로지 소재성형의 연구동향 및 대량생산을 위한 해결방안", 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 2 호, pp. 123~131, 2002.
4. 강충길, 임미동, "알루미늄합금의 반응용 단조 및 주조공정에 관한 수치해석", 한국소성가공학회지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 239~249, 1997.
5. 정홍규, 강충길, "반응용 알루미늄 합금의 재가열 및 Thixoforging 부품의 기계적 성질", 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 5 호, pp. 437~448, 1999.
6. 이계철, 석현광, 이호인, "탕구형상과 사출속도가 반응용 Al 합금의 유동거동에 미치는 영향", 대한금속·재료학회지, 제 40 권, 제 2 호 pp. 189~196, 2002.
7. D. H. Lee, P. K. Seo and C. G. Kang, "Die design by filling analysis of semi-solid injection forging process and their experimental investigation", Journal of Materials Processing Technology, Volume 147, Issue 1, pp. 45~50, 2004.
8. M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax, "Computer Based Numerical Analysis of Semi-Solid Metalworking", Processings of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 120~125, 1996.
9. C. G. Kang, Y. J. Jung and S. W. Youn, 2003, "Horizontal reheating of aluminum alloys and semi-solid casting for a near net shape compressor component Journal of Materials Processing Technology", Volume 135, Issues 2-3, pp. 158~171.