

결정립 제어 소재의 레오로지 유동이 고상입자의 거동에 미치는 영향

정용식¹ · 서판기¹ · 강충길[#]

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

Y. S. Jung, P. K. Seo, C. G. Kang

(Received September, 17, 2004)

Abstract

The semi-solid processing is now becoming of great interest for the production of various parts by pressure die casting. Also, the rheo-casting has been substituted for thixo-casting, because the rheo-casting can control the solid particles to globular and non-dendritic solid phase. In the rheo-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 tests during the semi-solid die casting in 0.3, 0.4, 0.5 and 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, Grain Size Controlled Material, Solid Particles, Filling Tests

1. 서 론

고체와 액체가 공존하는 가공은 고체 상태의 소재를 가열하여 반응고 상태에서 성형하는 틱소 공정과 용융상태의 소재를 냉각하는 과정에서 고상율을 제어한 후 반응고 상태에서 성형하는 레오로지 공정으로 분류하고 있다. 틱소 공정은 전자교반에 의하여 제조한 빌렛을 재가열 과정을 거쳐 성형하기 때문에 원소재의 원활한 공급이 가능한 경우에는 대량생산이 가능하다. 또한 재가열 공정에 있어서 불균일한 구상화 조직은 불균일한 기계적 성질을 유발하기 때문에 최적 재가열 조건의 선정이 매우 중요하다. 뿐만 아니라, 틱소 공정에 의하여 제조한 부품의 경우 스크랩의 양이 제품중량의 30~40% 정도이기 때문에 소

재의 낭비가 크다. 이상에서 언급한 틱소성형 공정의 단점을 보완하기 위하여 국내외 관계 및 산업계에서는 레오로지 성형공정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1~3]. 레오로지 성형공정은 알루미늄 스크랩을 조업 현장에서 용해와 냉각과정을 거쳐서 고체입자를 구상화 시킨 후 성형할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 틱소 공정에 의하여 성형한 제품의 기계적 성질은 레오로지 성형공정에 의하여 제조된 제품의 기계적 성질보다 우수하다고 알려져 있다.

그러나, 제품의 원가 측면에서는 액상율이 50~60% 상태에서 제조하는 레오로지 성형공정이 틱소 성형공정보다 더 우수하다[4~5].

따라서, 반응고 성형 공정의 실용화를 위하여 고상율의 변화에 따른 소재의 특성연구가 중요하다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
교신저자: 부산대학교 기계공학부, cgkang@pusan.ac.kr

특히 초기 고상율의 변화에 따른 충전 상태와 성형 완료 후 고상율 분포의 변화 등을 조사하기 위한 성형공정의 실험적 연구는 틱소와 레오로지 성형공정측면에서 해결 되어야 할 분야이다.

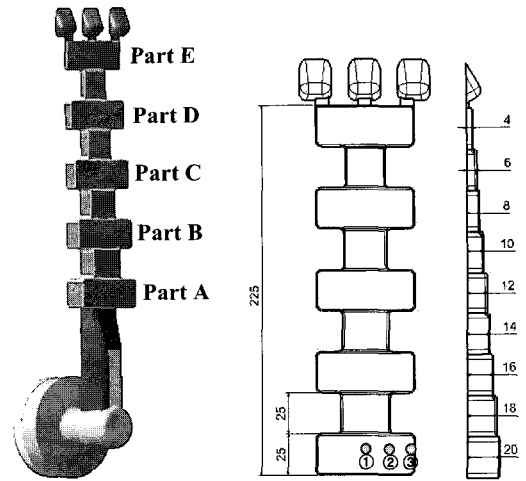
현재까지 반응고 공정에 있어서 많은 연구자들이 충전 실험, 공정해석 등을 수행하였으나[4, 6~8], 사출속도와 사출압력을 연계하여 고상율의 변화폭이 0.3~0.6 범위 내에서 다양하게 실험한 결과를 보여주지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고상율이 55~60%인 상태에서 성형 하는 틱소 공정과 고상율이 40~45%인 상태에서 성형하는 레오로지 성형공정에 있어서 소재의 유동 거동을 파악하기 위한 기초실험을 수행 하였다. 금형의 구조는 두께변화를 고려한 형상을 채택하였으며, 성형 실험은 고상율, 사출압력 및 사출속도 등을 변수로 하였다.

2. 실험

고상율이 0.3 에서 0.6 인 범위에서 반응고 성형 실험을 위하여 SAG사에서 구매한 A356 소재를 이용하였다. 실험을 위한 고상율 제어는 저자가 지금까지 연구한 결과를 이용하였다[5, 9]. 사출성형 중 충전 현상과 고상입자의 편석현상을 파악하기 위한 시험편의 모양을 Fig. 1 에 나타내었다. Fig. 1 에서 보여주고 있는 바와 같이 시험편의 최대 및 최소 두께는 현재 알루미늄에 사용되는 자동차 압 부품의 최소 및 최대 두께를 기준으로 하였다. 고상율과 사출조건이 변화가 충전 상태에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최대 길이를 Fig. 1 에서 보여주고 있는 바와 같이 225mm 로 하였다. Fig. 1 (b)에서 보여주는 게이트(gate) 입구의 ①, ②, ③의 위치는 사출성형 후 조직사진을 관찰한 위치를 나타낸 것이다.

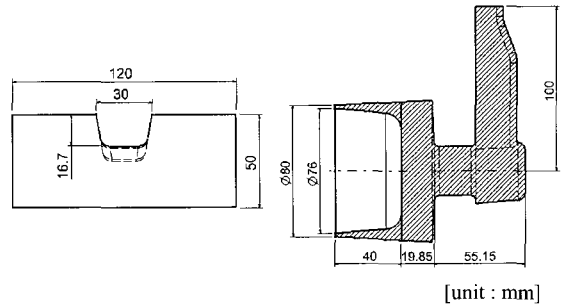
Fig. 2는 Fig. 1에서 보여주는 시험편을 제조하기 위한 런너(runner)의 구조를 나타낸 것이다. 이때 최대 폭× 두께× 길이=30× 16.7× 60mm이며, 런너 단면의 모양은 Fig. 2 (a)에서 보여주는 바와 같다. Fig. 2(b)는 사출성형 후 비스킷트(biscuit) 및 런너의 모양을 나타낸 것으로 런너의 구조로서 산화층이 케비티(cavity) 내부에 유입되지 않도록 설계 되어 있다.

Fig. 3은 고상율이 제어된 소재가 다이캐스팅 슬리브(sleeve) 내부에 주입되었을 때 플런저의 위치와 속도의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 고



(a) Test piece shape (b) Test piece dimension, mm

Fig. 1 The shape and dimension of specimen part



(a) The dimension of gate (b) The dimension of runner system

Fig. 2 The dimension of gate and runner system

상율이 제어된 빌렛의 초기 위치이며, Fig. 3 (b)와 (c)는 빌렛이 금형의 런너 입구까지 이동될 때 사출 플런저의 속도를 1.2m/sec로 설정한 경우이다. 고상율이 제어된 빌렛이 금형 케비티 내부에 주입되기까지 온도 저하를 최소화 하기 위하여 사출속도를 0에서 1.2m/sec로 증가시켰다. Fig. 3 (d)는 재가열 소재가 케비티 입구까지 충전될 때 사출 플런저(plunger)의 속도를 1.2m/sec에서 0.3m/sec로 감소시켰을 때 소재의 충전거동이다. 사출속도를 감소시킨 이유는 단면적이 급격히 감소하는 게이트와 런너 내부에서는 소재의 유동이 급격히 증가하여 고상과 액상의 분리현상이 일어나 액상편석의 원인이 될 수 있기 때문이다. 고상율이 제어된 소재가 케비티 내부에서 완전히 충전될 때까지

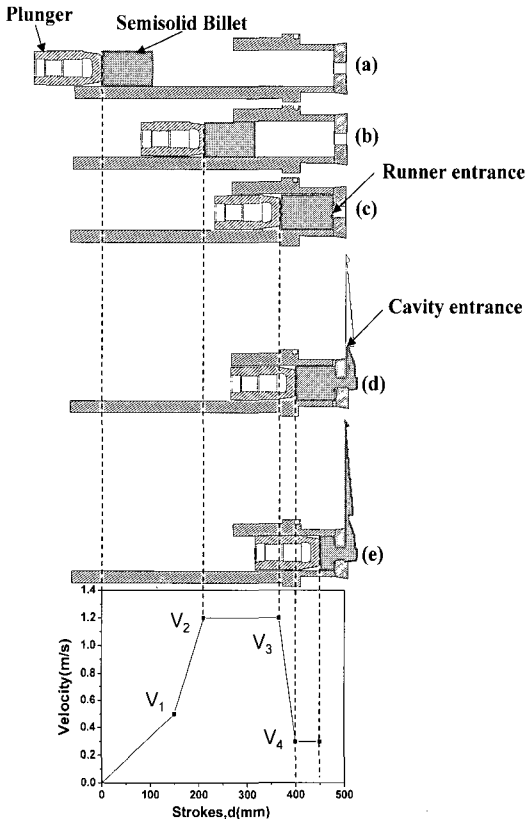


Fig. 3 The change of injection speed according to the stroke of plunger

플런저 속도는 최소 0.3m/sec로 감소시켰다. 금형 캐비티 내부에서 속도를 최소화시킴으로 충류유동을 유발시킬 수 있으며, 또한 고상과 액상편석을 저감시킬 수 있기 때문이다[10~11].

Fig. 4는 고상율이 제어되어진 소재가 금형 캐비티 내부에 완전히 충전되었을 때 플런저 압력을 최대 1200bar에서 최소 400bar까지 변화시켜 반응고 다이캐스팅 실험을 수행하였다. Table 1은 Fig. 3에서 보여주는 사출속도, 스트로크, 고상율 및 사출압력을 나타낸 것으로 본 연구에서 사용한 실험조건이다.

3. 실험 결과

3.1 충전실험

Fig. 5는 고상율(f_s)이 0.3~0.6인 범위에서 충전거동을 조사하기 위하여 플런저의 행정거리가 각각

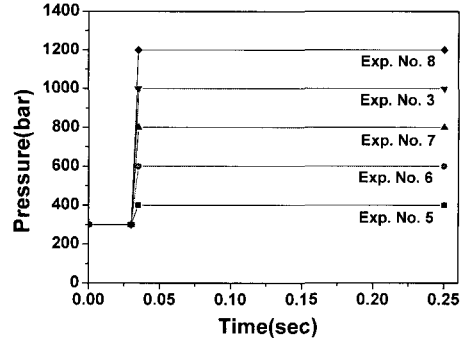


Fig. 4 The change of pressure after final filling

Table 1 The experimental conditions

No.	Solid Fraction	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	V_3 (m/s)	V_4 (m/s)	Pressure (bar)
1	<u>0.3</u>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
2	<u>0.4</u>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
3	<u>0.5</u>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
4	<u>0.6</u>	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
5	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<u>400</u>
6	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<u>600</u>
7	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<u>800</u>
8	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	<u>1200</u>

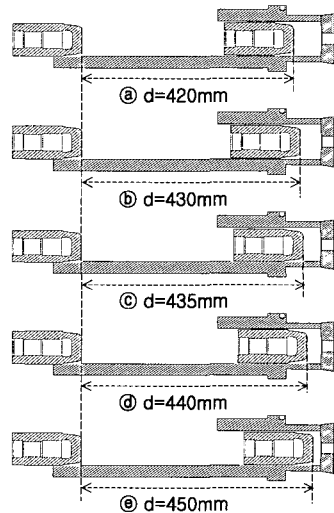


Fig. 5 The plunger stroke for filling test

420mm, 430mm, 435mm, 440mm, 450mm일 때 충전상태를 알아보았다.

Fig. 6은 고상율의 변화에 따른 충전거동을 나타낸 것이다. 플런저의 행정거리(d)가 420mm, 430mm

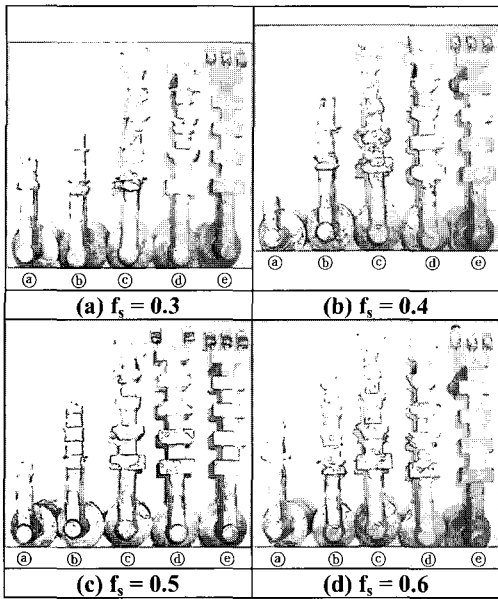


Fig. 6 The photograph of specimen part after filling test in each solid fraction

인 경우(Fig. 5(a), (b)), $f_s=0.6$ 일 때가 $f_s=0.3$ 일 때보다 충전거리가 증가함을 볼 수 있다. 고상율이 낮은 경우 낮은 점성으로 인하여 속도에 의한 관성의 영향을 많이 받으므로 게이트의 형상대로 직진하는 성향이 강하였다. 하지만, 고상율이 높은 경우에는 높은 점성으로 인하여 관성의 영향이 감소하고, 게이트 입구부터 순차적으로 충전되는 양상을 나타내었다.

3.2 고상율이 미세조직에 미치는 영향

Fig. 7은 고상율(f_s)이 0.3, 성형최대압력이 1000bar, 플런저 행정거리 450mm 일 때 Fig.1 (a), (b)에서 보여주는 시험편의 위치 A~E에 있어서 중앙부분 ①, 표면부분 ③의 위치에 대한 미세조직을 각각 나타낸 것이다. 시험편의 모든 위치 A~E에 있어서 중앙부분의 단면①이 시험편의 표면부분③보다 액상편석이 현저하게 증가됨을 알 수 있었다. 또한 중앙부분의 단면①의 위치는 게이트로부터 거리가 증가할수록 액상편석이 증가하나 급형표면부분의 단면③의 위치에서는 게이트로부터의 거리에는 무관함을 알 수 있다.

Fig. 8은 고상율(f_s)이 0.6 일 때 Fig. 7에서 보여준 동일한 위치에서의 미세조직을 보여준 것이다. 텍소 성형조건에 가까우면 단면 전체에 걸쳐서

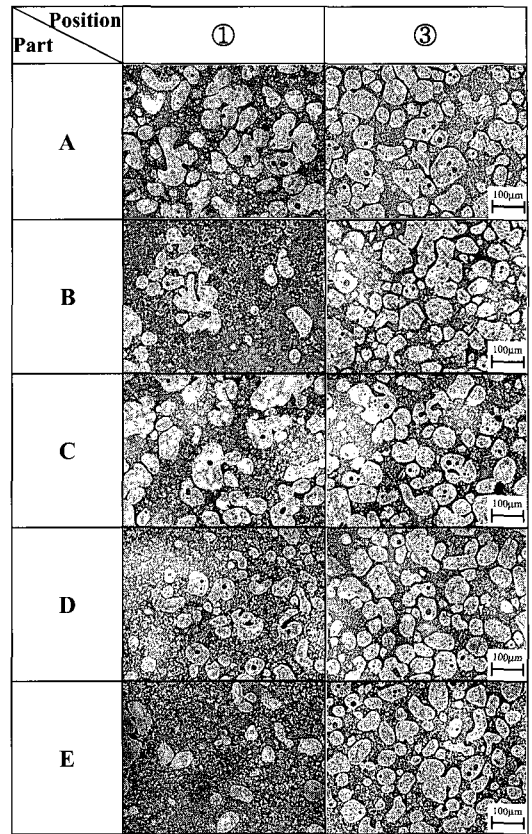


Fig. 7 The microstructure of test piece obtained by semi-solid die casting ($f_s=0.3$ and $P=1000bar$)

레오로지 성형조건(Fig. 7) 보다 조정 a 가 균일한 미세조직을 가지고 있음을 보여주고 있다. 위의 원인은 형상이 복잡한 케비티 내부에서 고상율이 높을수록 고상과 액상의 분리현상이 억제되어질 수 있고, 또한 충류유동이 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%이상 이 되도록 제어한 후 성형공정이 이루어져야 한다.

Fig. 9는 Fig. 1(a)에서 보여준 시험편의 각 위치에서 고상율의 변화에 따른 고상율 분포, 구상화 정도와 등가지름을 나타낸 것이다. Fig.9(a)는 고상율(f_s)이 0.3~0.6 인 경우 시험편의 고상율 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)의 경우 시험편 각 위치(Fig. 1(a))에서의 고상율 변화를 나타낸 것으로

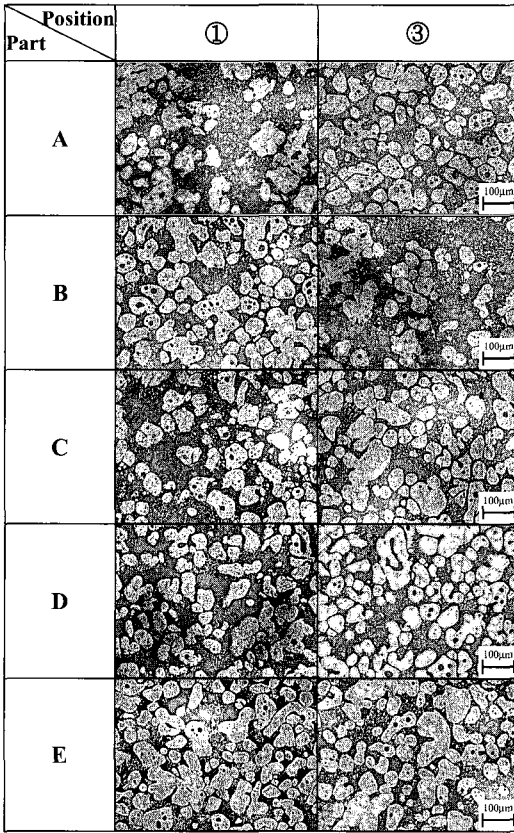
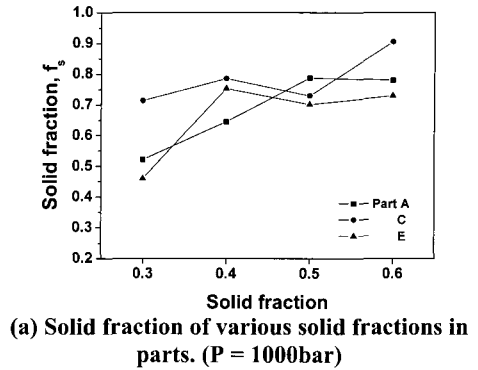


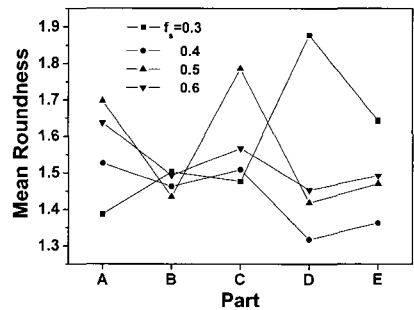
Fig. 8 The microstructure of test piece obtained by semi-solid die casting ($f_s=0.6$, $P=1000\text{bar}$)

최종 충전부위 (E 부분)에서의 액상 편석이 게이트 입구 부분(A 부분)보다 많이 형성되어 있음을 보여주고 있다. 유동거리가 증가함에 따라서 액상 편석이 증가함을 알 수 있다. Fig. 9(b)에서 보여주고 있는 바와 같이 고상율이 적은 $f_s=0.3$ 인 경우는 단면 전체에 걸쳐서 구상화 정도가 $f_s=0.4\sim0.6$ 보다 균일하지 않음을 알 수 있다. 특히 고상율의 변화에도 불구하고 게이트 입구부분(A 부분)과 최종 충전부위(E 부분)에서 구상화 정도와 등가지름의 값이 불균일 함을 알 수 있다. 텍소 성형조건에 가까운 고상율이 0.5~0.6 인 게이트 입구부분(A 부분)에서는 구상화 정도가 1.62~1.7 정도이나, 레오로지 성형조건에 가까운 $f_s=0.3\sim0.4$ 인 경우는 구상화 정도가 1.37~1.52 임을 알 수 있다.

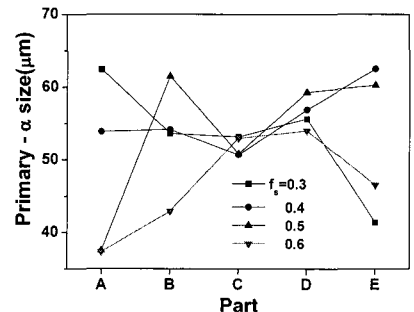
초정 α 의 크기는 게이트 입구(Fig. 1 (a)의 Part A) 부분과 최종 충전 부위(Fig. 1 (a)의 Part E)에서 각각 $(37\sim63)\mu\text{m}$ 와 $(41\sim62)\mu\text{m}$ 임을 Fig. 9 (c)로부터



(a) Solid fraction of various solid fractions in parts. ($P = 1000\text{bar}$)



(b) Mean Roundness of each solid fraction



(c) Primary - α phase size of each solid fraction

Fig. 9 The comparison of solid fraction, mean roundness and primary α phase size in each solid fraction at each position. ($P = 1000\text{bar}$)

알 수 있다. 초정 α 의 크기는 구상화 정도 값의 산포도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 균일한 초정 α 의 크기는 금형 캐비티 내에서 유동성을 균일하게 할 수 있는 조건임을 알 수 있었다.

3.3 압력이 미세조직에 미치는 영향

사출압력이 고상입자의 분포와 가공에 미치는 영향을 조사하기 위하여 400~1200bar에서 실험을 수행하였다. Fig. 10의 미세조직의 위치는 시험편에서 압력이 가장 적게 작용할 것으로 예측되는

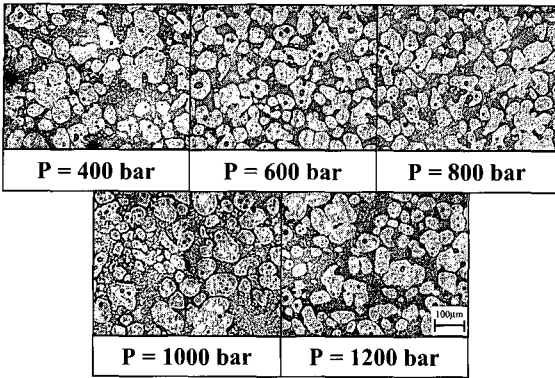


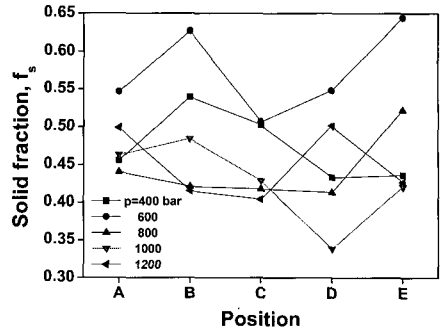
Fig.10 The microstructure phenomena for variation of each pressure at the final part E of Fig. 1 (a) ($f_s=0.5$)

Fig. 1(a)의 E부분의 표면단면 위치 ③의 위치이다. Fig. 10에서 보여주고 있는 바와 같이 400bar~800bar의 경우는 기공이 관찰되었으며, 1000bar 이상에서는 기공이 나타나지 않았다.

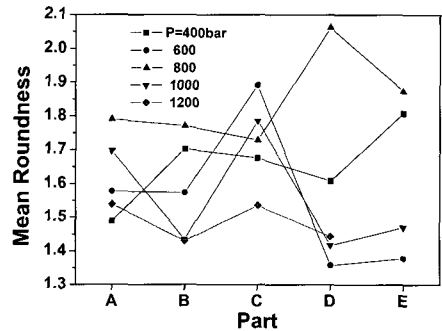
Fig. 11는 사출압력이 미세조직에 미치는 영향을 파악하기 위한 미세조직의 정량적인 분석결과이다. Fig. 11(a)는 초기 고상율이 0.3~0.6일 때 성형 후 고상율의 변화를 나타낸 것이다. 초기 고상율이 0.3에서 0.6일 때 성형 후 최소 고상율과 최대 고상율은 각각 0.45~0.75와 0.7~0.9 임을 알 수 있다. 고상율이 증가할수록 액상 편석이 감소함을 정량적인 데이터로부터 알 수 있다. 따라서 성형 공정에 있어서 충진이 가능한 범위 내에서 고상율을 증가시켜 성형하면 균일한 미세조직을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 11(b)와 (c)에서 보여주는 바와 같이 사출 압력의 변화에 따른 구상화 정도와 초정 α 의 크기는 단면 전체에 걸쳐서 불균일하다. 따라서 단면 전체에 있어서 구상화 정도와 초정 α 의 크기 분포는 성형 압력보다 고상율에 미치는 영향이 크다는 것을 Fig. 9, Fig. 11로부터 알 수 있다.

3.4 경도측정결과

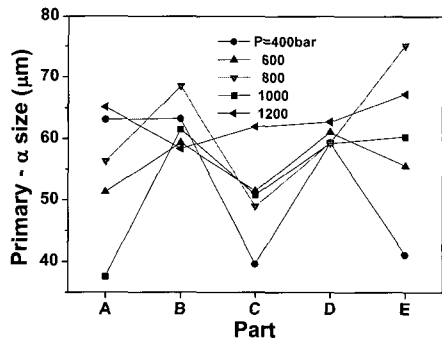
Fig. 12는 고상율과 사출압력의 변화에 따른 경도값을 나타낸 것이다. Fig. 12의 X축에 나타난 위치 1, 2, 3은 Fig. 1(b)에서 보여주는 단면의 위치를 각각 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에서 보여주는 바와 같이 고상율이 증가할수록 경도값이 감소하며, 사출압력이 증가할수록 경도값이 증가함을



(a) Solid fraction of various pressures in parts



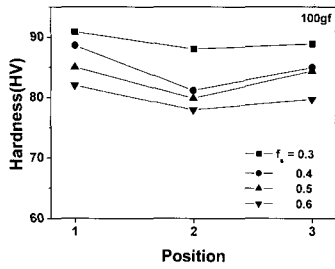
(b) Mean Roundness of each pressure



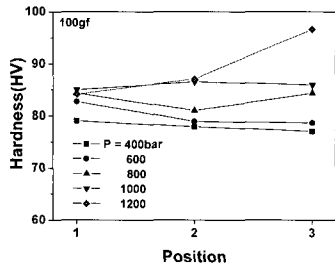
(c) Primary - α phase size of each pressure

Fig.11 The comparison of solid fraction, primary - α phase size and mean roundness in each pressure at each position ($f_s=0.5$)

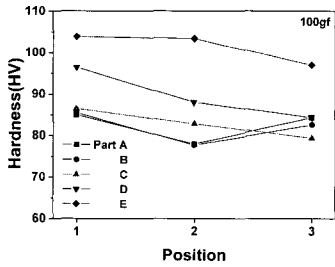
Fig. 12(b)로부터 알 수 있다. Fig. 12(a)에서 보여주는 각 부위별 경도값은 두께가 최소인 4mm 위치에서 최대값을 보여주고 있다. 따라서 캐비티 내부에서의 두께 변화는 유동속도와 냉각속도의 변화를 가져오며, 두께가 4mm 인 위치에서 냉각속도가 최대임을 예측할 수 있다.



(a) Variation of solid fraction in pressure 1000bar



(b) Variation of pressure in solid fraction 0.5



(c) Variation of each part in solid fraction 0.5 and pressure 1000bar

Fig.12 Hardness for variation of solid fraction, pressure and each position

4. 시뮬레이션 결과

고상율의 변화에 따라서 케비티 내부에서의 속도분포가 소재의 충전 상태와 미세조직에 미치는 영향을 파악하기 위하여 MAGMAsoft의 thixo-module로 수치해석을 하였다. 각각의 고상율은 소재의 초기 온도조건 설정으로 하였다. Fig. 13은 각각의 고상율 조건에서 반응고 소재가 금형의 게이트를 통과하여 케비티 내로 진입하는 곳인 V_1 지점에서의 충전 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 13에서 보여주는 V_1 의 위치는 Fig. 1(a)에서 보여주는 게이트 입구부분(Fig. 1(a)의 Part A)의 중앙부분(①)을 나타낸 것이다. 고상율 0.3, 0.4의 속

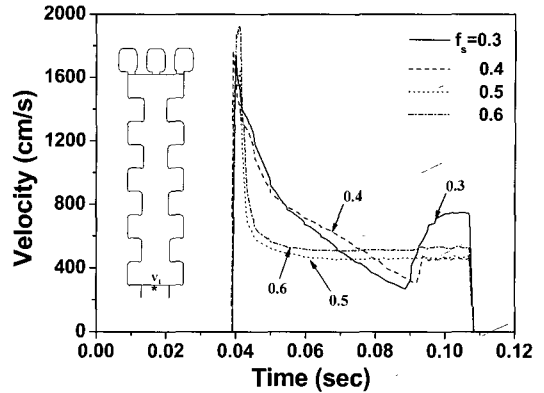


Fig.13 The velocity of point V_1 in each solid fraction

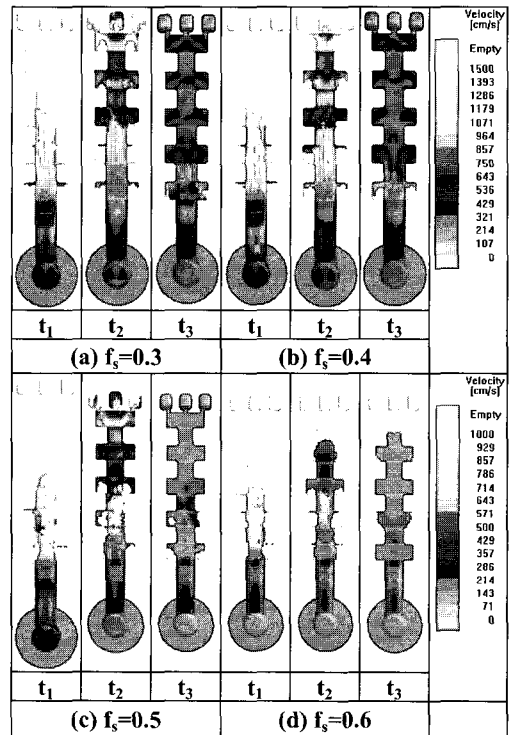


Fig.14 The comparison of filling behavior at same filling time in each solid fraction($t_1=50ms$, $t_2=70ms$ and $t_3=100ms$)

도분포는 0.5, 0.6의 속도 분포에 비하여 변화가 많은 것을 알 수 있다. 이는 고상율의 차이로 인하여 동일한 속도 조건에서 케비티를 충전하는 순서가 다르기 때문이다. 이는 Fig. 14에서 확인할

수 있다.

Fig. 14는 동일한 충전 시간(50ms, 70ms와 100ms)에서의 고상율이 다른 소재의 충전 거동을 속도 분포로 나타낸 것이다. 고상율이 0.3, 0.4인 경우 반응고 소재가 캐비티를 충전 하는 양상은 고상율 0.5, 0.6의 양상과 다른 것을 확인할 수 있다. 낮은 고상율의 소재는 점성의 영향을 적게 받게 때문에 충전 거리가 증가하여 충전이 캐비티 끝단 부위(Part E)부터 충전이 일어 난 후 캐비티 아래 방향으로 충전이 일어난다. 하지만, 높은 고상율의 소재는 점성의 영향을 많이 받기때문에 캐비티의 아래 부위(Part A)부터 충전이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 반응고 소재의 고상율은 반응고 소재가 캐비티를 충전 하는 과정 중 소재의 충전 거동에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

또한, 속도 변화가 크게 일어나는 고상율 0.3의 경우 보다 속도 변화가 완만하게 일어나는 고상율 0.6의 경우 충전 중 반응고 소재의 액상편석 현상 발생이 적을 것으로 예측할 수 있다.

이런 액상편석의 발생은 Fig. 7와 Fig. 8의 미세 조직에 잘 나타나 있다. Fig. 7의 고상율 0.3 소재의 미세조직에서는 액상편석의 분포가 많은 것에 비하여 고상율 0.6의 Fig. 8의 경우 액상편석의 분포가 현저히 적음을 알 수 있다. 이를 통하여 충전 중 속도 변화가 급격히 일어나는 충전 상태에서는 액상편석이 발생한다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

고상율을 0.3~0.6 로 제어한 결정립 소재를 이용하여 사출압력이 400~1200bar 에서 다이캐스팅 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고상율의 범위가 (0.5~0.6)인 경우가 고상율이 (0.3~0.4)인 경우보다 전도와 열전달의 영향 때문에 급형 캐비티 내부에서 충전이 용이함을 알 수 있었다.

(2) 고상율의 범위가 0.3~0.6 인 경우 캐비티 입구 부분과 최종 충전 부위에서 구상화 정도와 초정 α 의 크기 분포는 캐비티 중간 부분보다 균일하였다.

(3) 급형의 캐비티 두께가 두꺼울수록 정도 저하 현상이 관찰되었으며 사출공정 중 압력 감소

가 예상되는 위치일수록 정도가 감소하였다.

(4) 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.

후 기

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

참 고 문 헌

- [1] O. Shinobo, 1994, Research activities in rheotechnology Ltd., Proc. 3rd Conf. On the Processing Semi-Solid Alloys and Composite, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, pp. 7~18.
- [2] K. Kitamura, Y. Ando, K. Hironaka, S. Yahata, C. Yoshida, 1994, Die casting of aluminum alloy in semi-solid state, Proc. 3rd Conf. on the Processing Semi-Solid Alloys and Composite, Institute of Industrial Science University of Tokyo, Japan, pp. 181~190.
- [3] 강충길, 2002, 금속레오로지 소재성형의 연구 동향 및 대량생산을 위한 해결방안, 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 2 호, pp. 123~131.
- [4] 강충길, 임미동, 1997, 알루미늄합금의 반응용 단조 및 주조공정에 관한 수치해석, 한국소성가공학회지, 제 6 권, 제 3 호, pp. 239~249.
- [5] 정홍규, 강충길, 1999, 반응용 알루미늄 합금의 재가열 및 Thixoforging 부품의 기계적 성질, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 5 호, pp. 437~448.
- [6] 이재철, 석현광, 이호인, 2002, 탕구형상과 사출속도가 반응용 Al 합금의 유동거동에 미치는 영향, 대한금속·재료학회지, 제 40 권, 제 2 호 pp. 189~196.
- [7] D. H. Lee, P. K. Seo, C. G. Kang, 2004, Die design by filling analysis of semi-solid injection forging

- process and their experimental investigation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, Issue 1, pp. 45~50.
- [8] M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus, F. R. Dax, 1996, Computer based numerical analysis of semi-solid metal working, Processings of the 4th Int. Conf. on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 120~125.
- [9] C. G. Kang, Y. J. Jung, 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.
- [10] M.C. Flemings, 1991, Behavior of metal alloys in the semisolid state, Metall. Trans. A, Vol. 22A, pp. 957~980.
- [11] A. C. Street, 1986, The Diccasting Book, 2nd edition, Portcullis Press, Surry, England, p. 336.