

게이트 형상이 결정립 제어 소재의 미세조직에 미치는 영향

정용식¹ · 서판기¹ · 강충길[#]

The Effect of the Gate Shape on the Microstructure of the Grain Size Controlled Material

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

(Received October 12, 2004)

Abstract

In the semi-solid die casting process, an important thing is the flow behavior of semi-solid materials. The flow patterns of the semi-solid material can make the defects during die filling. To control the flow patterns is very important and difficult. In this paper, the flow behavior of the semi-solid A356 alloy material during die filling at various die gate shapes has been observed with the grain size controlled material. The effect of the gate shape on the die filling characteristics was investigated. The filling tests in each plunger stroke were experimented, and also simulated on the semi-solid material die casting process by MAGMASoft. According to the filling tests and computer simulation, the effect of the gate shape on liquid segregation has been investigated.

Key Words : Semi-Solid Die Casting, Gate Shape, Flow Behavior, Liquid Segregation, Die Filling Test, Microstructure

1. 서론

반용융 다이캐스팅과 같은 가압 사출방식을 이용한 제품 성형 공정에서 관심의 대상이 되어온 연구 내용은 금형 내에 충전되는 용탕의 유동을 제어하는 것이다. 용탕이 충전되는 경향에 따라 제품 내부에 존재하는 공기의 포집과 같은 결함이 존재하게 된다. 대부분의 다이캐스팅 공정에서 일반적인 사출 속도는 0.3~0.5m/s 의 느린 속도로 제한적으로 적용되고 있다[1~3]. 이런 느린 속도는 사출 중 용탕의 흐름을 층류와 같은 유동으로 제어 가능하지만 충전에 오랜 시간을 필요로 하기 때문에 제품의 생산성을 저하시키는 원인이 된다[4].

반용융 다이캐스팅 공정에 있어서 일정한 사출 속도 하에서 금형을 충전시키는 소재의 유변학적

거동은 소재가 제품부를 충전 후에 생성 될 수 있는 여러 가지 불량 요소에 많은 영향을 미치게 된다. 일정한 제품부의 형상 하에서 반용융 소재가 충전되는 게이트의 형상은 소재의 충전 속도 및 충전 양상에 영향을 미치게 된다. 따라서, 게이트의 형상은 반용융 다이캐스팅 금형 설계에 있어서 아주 중요한 역할을 하게 된다[5~6].

최근 자동차 부품 산업 분야에서 관심이 되고 있는 반용융 다이캐스팅은 위에서 언급한 바와 같은 여러 가지 문제점에도 불구하고 부품성형에 있어서 문제점을 극복할 수 있는 성형 방법으로 평가를 받고 있다. 그러나 반용융 금속의 유변학적 특성에 관한 연구는 활발히 진행되고 있지만, 실험을 통한 검증이 활발히 이루어지지 않고있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 이러한 반용융 금속의 금형

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
교신저자 : 부산대학교 기계공학부
E-mail : cgkang@pusan.ac.kr

에 충전되는 동안 유연학적 거동이 금형의 러너 부분의 형상 변형에 따라 어떻게 영향을 받게 되는지 실험을 통하여 검증하고자 한다. 또한, 반응용 다이캐스팅 금형 설계를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 충전 실험을 통하여 검증하고자 한다. 또한, 게이트의 형상 변화로 인한 반응용 금속의 유동이 액상 편석 발생에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 토대로 향후 반응용 다이캐스팅 금형 설계에 있어서 소재의 유동을 제어하고 이를 통하여 금형 설계에 필요한 방향을 제시하고자 한다.

2 실험

반응용 소재를 이용하여 게이트의 형상에 따른 충전 거동을 파악하기 위한 실험을 하였다. 실험에 사용된 소재는 A356 소재를 사용하였다. 반응용 소재는 저자가 지금까지 연구한 결과를 토대로 고상율이 50±2%인 조건에서 성형 실험을 하였다[7~8].

사출 성형 중 게이트의 형상에 따른 충전 양상을 파악하기 위하여 동일한 금형의 캐비티(cavity) 형상에 게이트의 형상을 변화시킬 수 있는 금형을 제작하였다. 교체 가능한 게이트의 치수 및 형상은 Fig. 1과 같다. Table 1은 제작한 네 개의 게이트

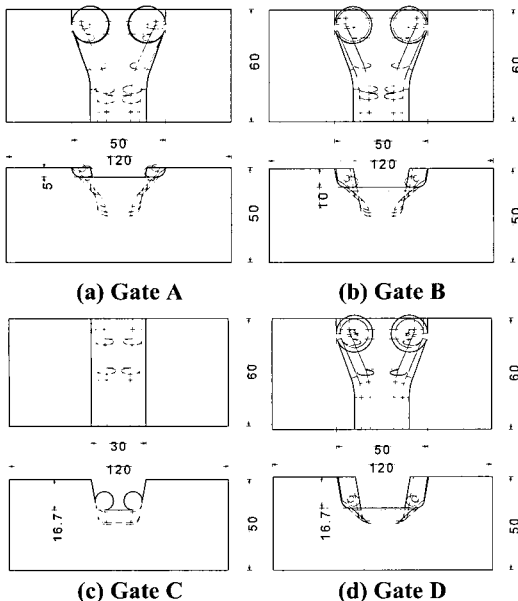


Fig. 1 The dimension of each gate system

치수 및 캐비티에 접하는 게이트의 단면적을 나타낸 것이다. 게이트 A, B, D는 동일한 폭에 두께를 변화시킨 형태로 제작되었다. 게이트 C는 게이트 B와 거의 동일한 단면적을 가지나 게이트의 형상이 다른 형태로 제작되었다. Fig. 2는 Fig. 1과 같이 설계된 게이트가 실제 블록(block) 형태로 제작되어진 형상을 나타내는 것이다. Fig. 2(c)는 제작된 게이트 블록이 금형에 실제 장착된 모습을 나타내고 있다.

Table 1 The dimension of various gating systems

Gate	Width(mm)	Thickness(mm)	Area(mm ²)
A	50	5	250
B	50	10	500
C	30	16.7	501
D	50	16.7	835

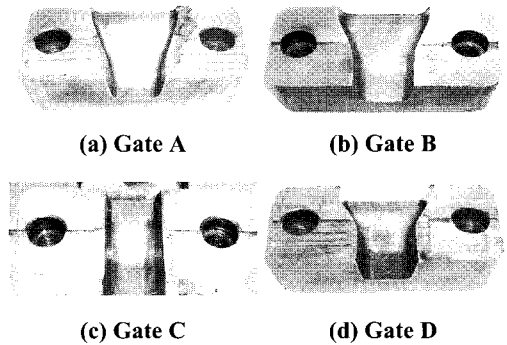


Fig. 2 The photograph of each gate

사출 성형 중 게이트의 형상이 충전 현상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 3(a)와 같은 형태의 시험편을 설계하였다. Fig. 3(b)는 설계 및 제작되어진 시험편의 치수를 나타내고 있다. Fig. 3에서 보여주고 있는 바와 같이 시험편의 두께는 20mm에서 4mm까지 점차적으로 줄어드는 형태를 띠고 있다. 이는 자동차 암(arm) 부품의 최소 및 최대 두께를 고려하여 이와 같은 형태로 설계되었다. 게이트의 형상이 사출 중 충전 상태에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시험편의 최대 길이는 225mm로 하였다. 시험편은 충전이 일어나는 방향으로 게이트에서 멀어지는 방향으로 두께가 감소하는 부위를 각각 Part A ~ Part E라고 하였다. Fig. 3 (b)는 충전 후 각 Part의 미세조직 및 경도의 측정을 위하여 ①, ②, ③ 위치를 설정하였다.

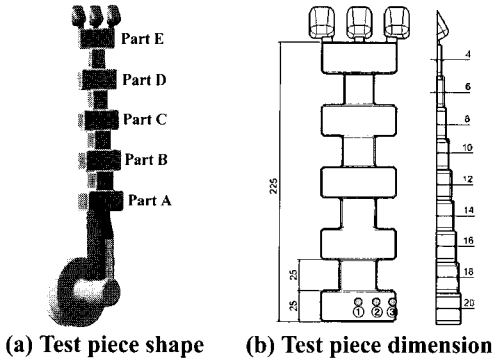


Fig. 3 The shape and dimension of test piece part

Table 2는 반응용 다이캐스팅 실험을 위한 다이캐스팅 기계의 플런저(plunger) 이동 속도 및 충전 후 압력을 각각의 게이트 별로 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보여주는 게이트의 변화에 따른 플런저의 충전 속도는 0.3m/s로 하였다. 또한, 이러한 사출 조건을 플런저의 행정 거리 및 속도와 캐비티 내로 충전되어지는 반응용 소재의 거동을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 반응용 소재가 캐비티에 완전히 충전된 후 플런저가 금형내 소재에 압력을 가하는 과정을 나타낸 것이다. 압력은 충전 후 0.05sec내에 상승하여 1000bar로 압력을 일정하게 하였다.

Table 2 The experimental conditions in gate

Gate	Solid Fraction	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₃ (m/s)	V ₄ (m/s)	Pressure (bar)
A	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
B	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
C	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	1000
D	0.5	0.5	1.2	1.2	0.3	1000

3. 시뮬레이션 및 결과

충진 중 유동 현상의 특성을 파악하기 위하여 MAGMAsoft thixo-module[9]을 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 해석 조건을 Table 3에 나타내었다

Fig. 6은 그림에서 나타낸 바와 같이 충전 시뮬레이션 동안 V1이라는 동일한 지점에서 게이트별 속도 변화를 나타낸 것이다. 게이트의 단면적이

가장 좁은 게이트 A의 경우 속도 충전이 이루어지는 동안 게이트에서의 속도 변화가 급격하게 일어나고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 게이트의 단면적이 동일한 게이트 B와 C의 경우 비슷한

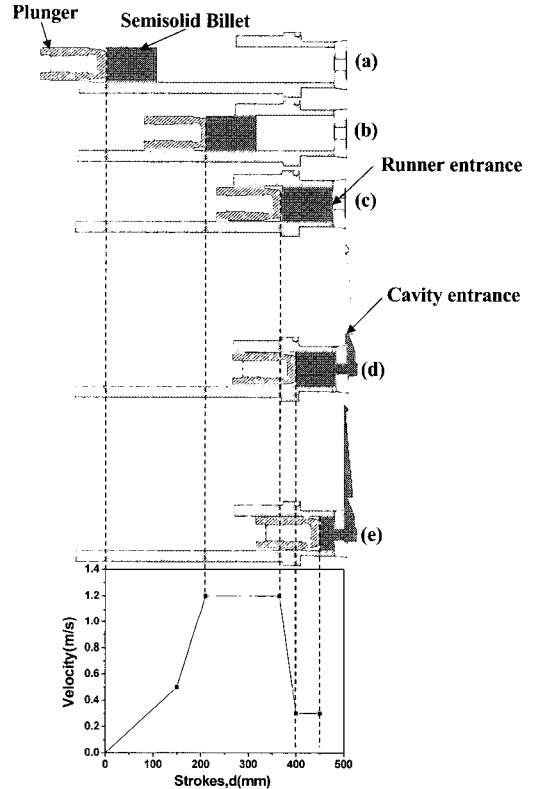


Fig. 4 The change of injection speed according to the plunger of stroke

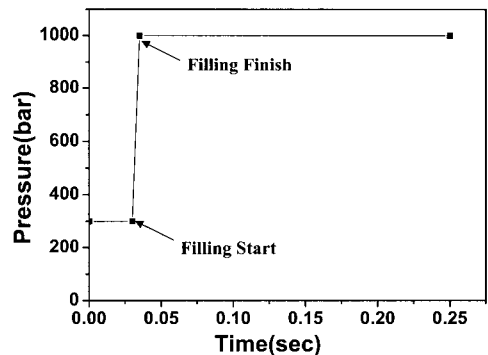


Fig. 5 The change of pressure after final filling at the plunger stroke 450mm

Table 3 Thermal properties used to simulate semi-solid die casting of sample by using A356 alloy

Parameters	Symbol	Unit	Values
Solidus temperature	T_s	°C	547
Liquidus temperature	T_l	°C	617
Latent heat	Q	kJ/kg	430
Initial billet temperature	T_b	°C	583
Initial die temperature	T_d	°C	250
Heat transfer coefficient between die and die	h_d	W/m ² K	1,000
Heat transfer coefficient between material and die	h_m	W/m ² K	Temperature dependant

형태의 속도 분포를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 게이트의 단면적이 가장 넓은 게이트 D의 경우 충전 중 게이트의 속도 변화가 가장 완만하게 변화하고 있다는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같은 Part A 상의 V2, V3와 V4 위치에서 충전 중 일어나는 속도 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 게이트 A의 속도 분포 상에서는 충전 후 0.042sec에서 0.06sec 사이에 데드메탈이 생성되고 있다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 게이트를 고속으로 통과한 반응용 소재가 일정 영역까지 충전이 진행되지만 데드메탈 영역에서는 다른 영역으로 충전이 진행된다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 게이트 B와 C의 속도 변화를 나타내고 있다. 게이트 B의 경우 V2, V3, V4 위치 모두에서 충전이 이루어지나 게이트 C의 경우 V2에서만 충전이 이루어진 후 0.085sec 이후에 V3, V4 지점에서 충전이 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 게이트 D는 V2, V3, V4 위치 모두에서 가장 완만한 속도 분포로 충전이 이루어진다는 것을 알 수 있다.

4. 실험 결과

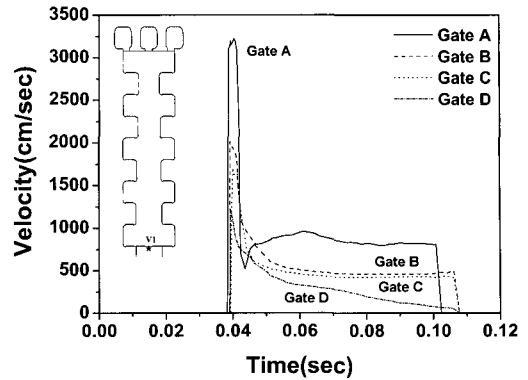


Fig. 6 The velocity of each gate at point V1

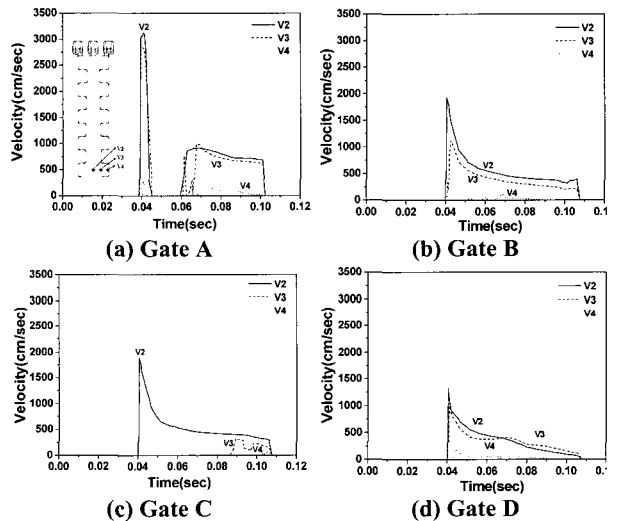


Fig. 7 The velocity of point V2, V3 and V4 in each gate

4.1 충전실험

Fig. 8은 고상율 0.5에서 일정한 사출 조건 하에서 충전 실험을 수행하기 위하여 플런저의 행정거리가 각각 420mm, 430mm, 435mm, 440mm, 450mm일 때 충전 상태를 조사하기 위한 플런저의 행정거리를 나타낸 것이다.

Fig. 9는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 플런저의 행정거리에 따른 충전 실험 결과를 나타낸 사진이다. Fig. 9(a), (b), (d)는 동일한 게이트 폭에서 두께가 증가하는 경우의 충전 거동을 나타내고 있다. 게이트 두께는 각각 5mm, 10mm, 16.7mm이다. 플런저의 행정거리가 420mm ①의 경우 짧은 충전

거리로 인하여 대부분 게이트에서 동일하게 게이트 부위의 충전이 일어난 것을 알 수 있다. 플런저의 행정거리가 430mm인 ⑤이후에서는 게이트 형상의 차이로 다른 충전 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 게이트 A보다 게이트 B의 경우에서 반응용 소재의 순차적 충전이 나타나고 있다는 것을 확인할 수 있다. 두께가 가장 두꺼운 게이트 D에서는 순차적 충전이 더욱 잘 나타나고 있다. 이는 게이트의 두께가 두꺼운 경우 반응용 소재의 충전 속도가 느리기 때문에 캐비티 내에서 순차적으로 충전이 이루어짐을 의미한다.

Fig. 9 (b), (c)는 게이트의 단면적은 동일하지만 형상에 따른 변화를 알아보기 위한 실험 결과이다. 게이트 C는 폭이 30mm, 높이 16.7mm인 크기로 제작하였다. 게이트 B는 폭이 50mm, 높이 10mm이다. 폭이 좁은 게이트 C의 경우는 게이트 B와 비교하여 충전 양상이 다르게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 게이트를 통과한 소재가 캐비티에 진입할 때 게이트의 형상으로 인하여 게이트 B의 경우 Part A를 충전시킨 이후 Part B로 진행하지만, 게이트 C의 경우에는 Part A, B를 완전히 충전시키지 못하기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 7 (b), (c)의 속도 분포 결과에서 볼 수 있듯이 게이트 B의 V3 위치에서는 V2 위치보다 약간 낮은 속도가 존재하지만, 게이트 C의 경우에는 V3 위치에서 속도가 0이다. 따라서, 시뮬레이션 결과와 충전 실험 결과가 유사함을 알 수 있다.

4.2 미세조직관찰 결과

Fig.10은 게이트 형상의 변화에 따라서 충전 실험 후 Fig. 3에 나타난 Part A부의 ①, ②, ③ 위치의 미세조직 사진을 나타낸 것이다. 게이트 A, B, C의 경우 캐비티의 충전이 시작되는 부위인 ①에서 액상 편석이 많이 관찰되었다. 그러나 게이트 D의 경우 다른 게이트 형상과는 달리 액상 편석의 분포가 현저하게 적음을 알 수 있다. 위의 원인은 유동 속도의 감소로 인하여 고상과 액상의 분리 현상이 적게 나타났기 때문이다. 또한, 게이트 A, B 와 C의 경우 시험편의 중앙 부위에서 금형의 표면 부위로 갈수록 액상 편석의 분포가 감소하는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 캐비티의 형상에 따라 게이트를 통과하여 빠른 속도로 충전이 이루어지는 소재와는 달리 금형 표면 부분인 ③의 경우 소재의 유동 속도가 줄어들게 되어

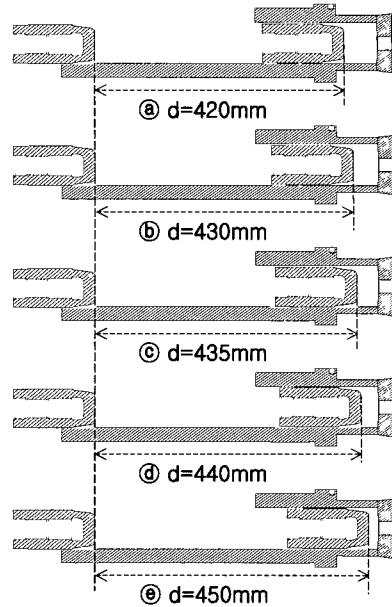


Fig. 8 The plunger stroke for filling test

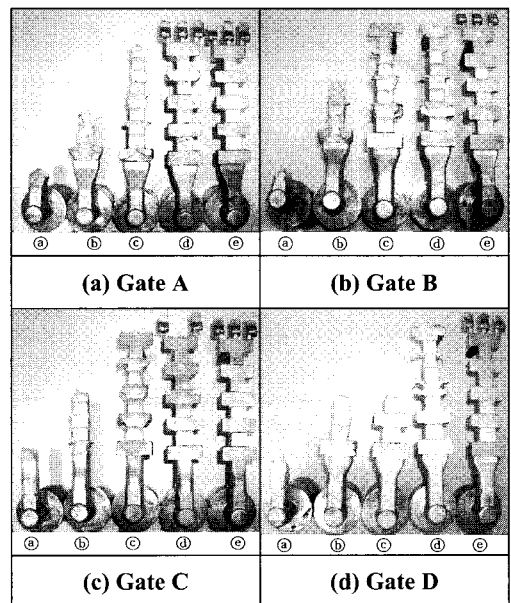


Fig. 9 The photograph of specimen part after filling test in each gate

액상 편석의 발생이 줄어들기 때문이다.

Fig.11은 시험편의 마지막 끝부분에 위치한 Part E 부위의 미세 조직 사진을 나타낸 것이다. Part E

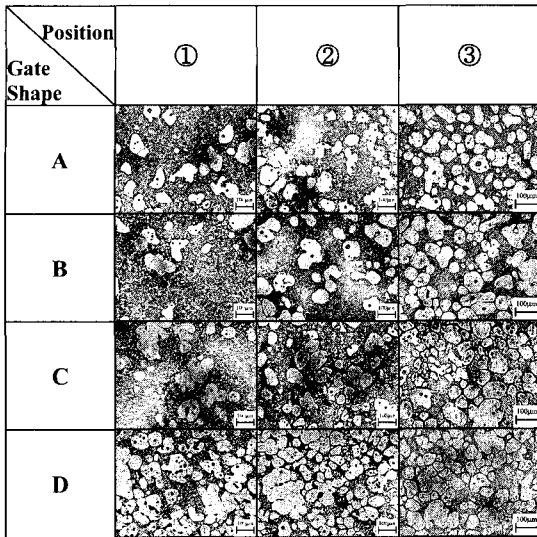


Fig.10 The microstructure phenomena for variation of gate shape at the filling entrance part A of Fig. 3

는 캐비티의 마지막 부위로 충전 중 소재의 유동이 다른 부위에 비하여 늦게 이루어지는 부위이다. 게이트 A, B, D의 경우 액상 편석이 Part A와 마찬가지로 많이 나타나지 않았다. 이에 반해 게이트 C의 경우는 액상 편석이 많이 존재하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, Part E와 같이 두께가 얇은 부위에서는 소재의 충전 속도 영향이 적어 액상 편석이 적게 발생한다는 것을 알 수 있다.

게이트의 단면적이 동일한 게이트 B와 게이트 C의 경우 캐비티의 끝단부에서 나타나는 액상 편석이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 게이트 C의 경우도 Part E까지 소재가 충전될 때 속도 영향이 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

Fig.12는 시험편의 게이트 부위를 절단하여 단면적을 관찰한 미세조직이다. 미세조직 관찰을 위하여 단면절단 후 미세 폴리싱 이후 $FeCl_3$ 35g과 물 200ml에서 에칭 한 후 50% HNO_3 으로 마무리하는 에칭 방법을 사용하였다. 동일한 사출 속도에서도 게이트의 형상 변화에 따라서 액상 편석의 두께가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig.12 (a)에서 보는 바와 같이 사출속도가 가장 빠른 게이트 A의 경우 액상 편석의 두께가 가장 두껍게 나타나고 있다. 이에 반해 사출속도가 가장 저속인 게이트 D는 액상 편석이 분포하고 있

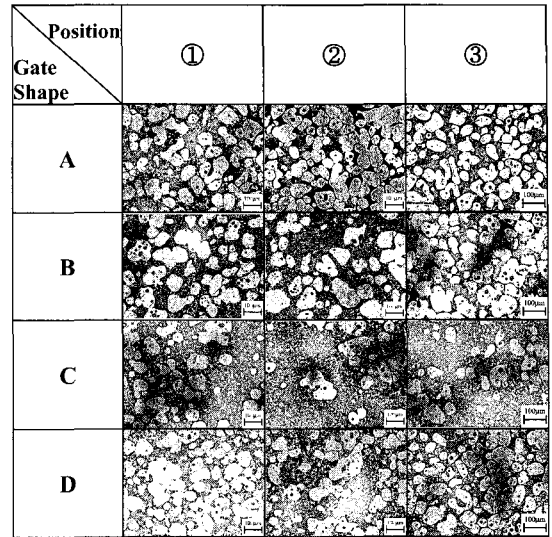


Fig.11 The microstructure phenomena for variation of gate shape at the final part E of Fig. 3

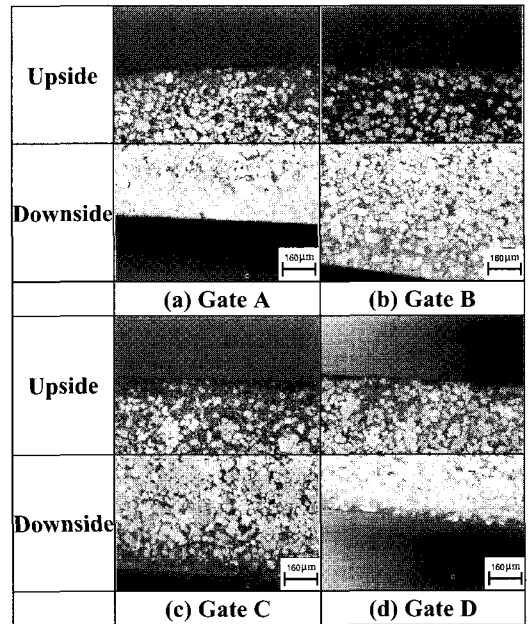


Fig.12 The comparison of microstructure sliced surface in each gate

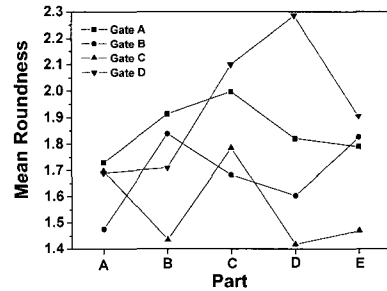
지 않다는 것을 알 수 있다. 단면적이 동일한 게이트 B와 C의 경우 동일한 사출 속도를 나타내고 있지만 액상 편석의 분포 두께는 다르게 나타나고 있다. Fig.12 (b)에 나타난 게이트 B의 액상 편

석이 Fig.12 (c)에 나타난 액상 편석보다 두께가 얇게 분포하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상이 동일한 게이트의 단면적에서도 게이트의 형상이 액상 편석의 분포에 영향을 주는 원인으로 생각된다. 또한 시뮬레이션을 통하여 얻은 속도 분포(Fig. 6) 결과를 통하여 액상 편석의 발생 요소를 확인할 수 있었다. 초기 게이트에서 속도가 빠른 경우 액상 편석이 발생하는 경향이 크게 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

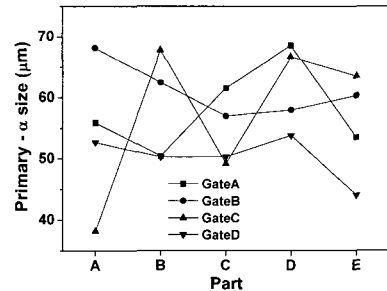
Fig.13은 미세조직 관찰을 통한 상분석을 실시하여 측정된 미세조직의 구상화 정도 및 초정 α 상의 크기를 측정된 것이다. 구상화 정도 및 초정 α 상의 크기는 게이트의 형상에 따른 영향 보다는 제품부의 형상에 따른 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 즉, 모든 게이트 형상에서 두께가 가장 얇은 Part E에서 구상화 정도 및 초정 α 상의 크기가 비교적 고르게 분포하는 것을 알 수 있었다.

4.3 경도측정 결과

Fig.14는 게이트의 형상에 따른 경도값을 나타낸 것이다. Fig.14에 나타난 위치는 Fig. 3 (b)에서 나타난 바와 같은 시험편의 단면의 위치를 각각 나타내는 것이다. Fig.14 (a)는 각각의 게이트 형상에 따른 시험편의 게이트에 가장 가까운 Part A 부위의 경도를 측정된 것이다. 게이트의 형상에 따른 경도에서는 특정한 현상이 발생하지는 않았다. 대부분의 경도는 위치 및 게이트와는 상관 없이 77HV에서 97HV사이에 분포하고 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 Part E의 경우 게이트의 형상에 따른 변화보다는 캐비티 두께 변화가 경도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 14 (b)는 두께가 4mm로 가장 얇은 Part E 위치에서의 경도를 측정된 것이다. 두께가 두꺼운 Part A (20 mm)보다 두께가 얇은 Part E (4mm)에서 경도가 높았다. 따라서, 캐비티 내부에서의 두께 변화는 유동 속도와 냉각 속도의 변화를 가져오게 되며, 두께가 4mm인 위치에서 냉각 속도가 최대임을 예상할 수 있다. 그리고 게이트 C를 제외한 나머지 게이트는 모두 위치가 중앙 부위 ①에서부터 표면 부위 ③으로 갈수록 경도가 증가함을 알 수 있다.

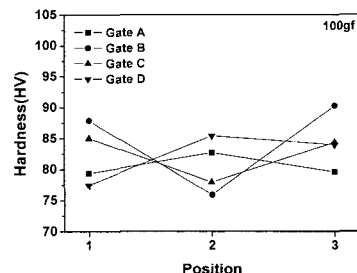


(a) Mean Roundness of each gate

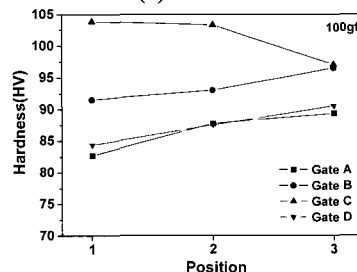


(b) Primary - α phase size of each gate

Fig.13 The comparison of mean roundness and primary - α phase size with each gate at each position



(a) Part A



(b) Part E

Fig.14 The comparison of the hardness with each gate at each position

5. 결 론

참 고 문 헌

본 연구에서는 고상율 50%의 반응용 알루미늄 소재를 이용한 다이캐스팅 공정에서 게이트의 형상이 소재의 충전 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 시뮬레이션, 충전 실험, 미세조직 관찰을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 동일한 단면적의 게이트에서도 게이트의 형상으로 인하여 반응용 소재의 충전 거동이 다르게 나타났다.

(2) 게이트의 형상에 따른 반응용 다이캐스팅 부품 미세조직의 영향은 부품의 두께에 따라 영향이 다르게 나타나고 있다.

(3) 캐비티 내부에서 소재가 충전 속도의 영향을 적게 받는 부위에서 액상 편석의 발생이 감소하였다. 또한, 게이트의 형상에 따른 충전 양상은 반응용 다이캐스팅 부품 내부의 액상 편석 발생에 중요한 영향을 미치고 있다.

(4) 제품부의 위치가 금형에 가까운 부위에서 경도가 높게 나타났다. 또한, 제품의 형상에 따른 냉각 속도의 차이로 인하여 경도의 차이가 나타나고 있다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업(NRL 사업Thixo/Rheo Forming 연구실)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 말씀을 드립니다.

- [1] M.C. Flemings, 1991, Behavior of metal alloys in the semisolid state, Metall. Trans. A, Vol. 22A, pp. 957~980.
- [2] A. C. Street, 1986, The Diecasting Book, 2nd edition, Portcullis Press, Surry, England, pp. 336.
- [3] J. C. Lee, H. K. Seok, H. I. Lee, 2003, Effect of the Gate Geometry and the Injection Speed on the Flow Behaviors of a Semi-Solid A356 Al Alloy, Metals and Materials Inter., Vol. 9, pp. 351~357.
- [4] 강충길, 2002, 금속레오로지 소재성형의 연구 동향 및 대량생산을 위한 해결방안, 한국소성가공학회지, 제 11 권, pp. 123~131.
- [5] M. Itamura, N. Yamamoto, K. Murakami, M. Adachi, M. Kikuchi, Y. Tanaka, E. Kobayashi, 1999, Application of flow simulation to die casting die design, Proc. of Modeling of Casting and Solidification Processes IV, pp. 185~193.
- [6] C. G. Kang, H. K. Jung, 2001, Semisolid forming process-numerical simulation and experimental study, Metallurgical. and Materials. Trans. B, Vol. 32B, pp. 363~371.
- [7] 강충길, 임미동, 1997, 알루미늄합금의 반응용 단조 및 주조공정에 관한 수치해석, 한국소성가공학회지, 제 6 권, pp. 239~249.
- [8] 정홍규, 강충길, 1999, 반응용 알루미늄 합금의 재가열 및 Thixoforging 부품의 기계적 성질, 한국소성가공학회지, 제 8 권, pp. 437~448.
- [9] MAGMAsoft Version 4.1 MAGMAthixo Module, Simulation of Thixocasting Manual.