

논문

반고상 성형법에 의한 Mg 합금 박판재의 제조에 관한 연구

김정민† · 박봉구 · 김기태 · 정운재

Study on the Fabrication of Mg Alloy Sheet by a Semi-Solid Forming Process

Jeong-Min Kim†, Bong-Koo Park, Ki-Tae Kim and Woon-Jae Jung

Abstract

Cast AZ91 and extruded AM50 alloys were isothermally heated at solid/liquid coexistent temperatures, and semi-solid formed into sheets. Mold filling ability of semi-solid slurry with different liquid fractions was investigated in relation to process variables such as injection speed and mold temperature. Relatively uniform distribution of solid particle size and liquid fraction were observed throughout the semi-solid formed sheet. AZ91 alloy sheets were also manufactured by conventional die casting and compared with the semi-solid formed. It was found that the surface was more smooth and the dimensional accuracy was higher in case of the semi-solid formed.

(Received July 24, 2002)

Key words : AZ91, AM50, Semi-solid, Mg, Filling

1. 서 론

Mg합금은 개발된 상용합금 중 가장 경량이고 전자 파 차폐성이 우수할 뿐만아니라 재활용이 용이하기 때문에 플라스틱을 대체하며 전자, 정보통신 용 부품의 재료로 점차 그 사용량이 늘고 있다. 현재까지 이러한 Mg부품들의 대부분은 다이캐스팅에 의하여 제조되고 있는데, 많은 부품들이 박판재 형태를 가지기 때문에 다이캐스팅으로는 불량률이 높고 표면상태가 전전하지 못한 경우가 많은 실정이다. 한편, 최근 새로운 제조 공정으로 부각되고 있는 반고상 성형법은 액상과 고상이 공존하는 온도영역에서 금속을 성형하기 때문에 액상 상태에서 제품으로 제조하는 일반적인 주조법에 비하여 기공 등 주조결함의 발생이 적으며, 표면상태 및 치수정밀도가 우수하다고 알려져 있다[1,2]. 특히, 얇은 금형의 공간을 채우는 경우 액상금속을 고속으로 사출하면 난류가 발생하여 표면주조결함이 쉽게 형성되지만, 반고상 슬러리를 사출하면 상대적으로 밀도와 점

도가 높아 층류의 거동을 보이기 때문에 공기의 혼입 등이 적은 장점이 있다.

반고상 슬러리를 제조하는 방법에는 여러 가지가 있으나 간단한 방법으로는 교반없이 금속을 가열하여 일정한 고액 공존영역 온도에서 유지하는 등온가열공정이 있으며, 유지시간이 증가함에 따라 초기조직의 일부가 용융되어 액상율이 증가하고 고상의 형태가 구형으로 변화하여 최종적으로 구형의 고상 입자가 액상 내에 분포한 반고상 슬러리 상태가 된다[3,4]. 등온가열공정을 통해 우수한 반고상 슬러리를 제조하기 위해서는 열처리 변수들을 제어하는 것 뿐만 아니라 합금의 초기 조직 및 상태를 최적화하는 것이 필요하다[5]. 압출재와 같이 매우 미세하고 구형에 가까운 결정립을 갖는 빌렛을 가열하면 고상 입자의 구형화 정도가 우수하고 미세한 슬러리를 얻게 되지만, 주조재를 가열하면 얻어진 고상입자의 크기가 상대적으로 조대하고 균일성이 낮은 경향을 보이게 된다.

마그네슘 상용합금인 AZ91은 주조성과 강도가 우수

한국생산기술연구원(Korea Institute of Industrial Technology)

†E-mail : jmk7475@kitech.re.kr

하여 주조용 합금으로 가장 널리 쓰이고 있으며, AM50은 AZ91에 비하여 인장강도는 약간 작지만 충격흡수성과 특히 연성이 매우 우수하다. 본 연구에서는 AZ91 주조재와 AM50 압출재를 등온가열하여 반고상 슬러리로 제조하였으며, 수평형 성형장치를 사용해서 박판재 형태의 시편을 제조하였다. 합금별로 액상을 및 공정변수에 따른 금형 충전성을 조사하였으며, 완전하게 충전된 성형시편의 부위별 반고상 미세조직을 관찰하였다. 또한 AZ91합금의 경우 다이캐스팅으로 동일형상의 시편을 제조하여 반고상 시편과 표면결합, 표면거칠기 및 치수정밀도 측면에서 비교하였다.

2. 실험방법

AZ91합금은 상용 잉곳을, AM50합금은 순도 99.8% 이상의 순금속 및 Al-20wt.%Mn을 장입재로 사용하여 전기저항로에서 용해를 하였으며, SF₆와 CO₂혼합가스를 사용하여 용탕을 대기로부터 보호하였다. 금속이 완전히 용해된 후 Ar을 용탕 내로 교반하며 주입하여 탈가스 처리를 하였고, 약 150°C로 예열된 금형에 주입하여 잉곳을 제조하였다. 제조한 잉곳의 합금조성 분석결과는 Table 1에 나타내었다. AM50합금의 경우 잉곳의 표면을 절삭한 후 400°C에서 8시간 동안 균질화 처리를 하였으며, 열처리가 끝난 잉곳은 400 ton급 압출기를 사용, 압출속도 10 mm/sec, 빌렛온도 400°C에서 봉재로 압출하였다.

제조된 합금의 고액선, 액상선, 공정점 등을 파악하기 위해 DSC(differential scanning calorimetry) 실험을 하였으며(가열 및 냉각속도 3 K/min.), 결과는 Table 2에 나타내었다. 여기서 평형값은 Mg-Al 2원계 평형상태도에서 구하였으며 공정량은 Scheil 식을 사용하여

Table 1. Chemical compositions of alloys

Alloy	Al	Zn	Mn	Mg
AZ91	9.82	0.65	0.12	balance
AM50	4.68	--	0.13	balance

Table 2. DSC(differential scanning calorimetry) results of Mg alloys

Alloy	DSC(°C)						Amount of eutectic (%) - Scheil eqn.
	Eutectic temp	Melting of α-phase		Eutectic temp	Melting of α-phase		
		Start	End		Start	End	
AZ91	426	452	596	437	465	597	15
AM50	435	575	627	437	560	625	6

계산하였는데, 이때 계산에 사용된 평형분배계수(k)는 0.37이다[3]. 반고상 슬러리를 제조하기 위한 등온가열 공정은 일정한 온도로 맞추어진 가열로 안에 빌렛을 넣고 정해진 시간을 유지하는 방법으로 이루어졌으며, 빌렛이 철제도가니 안에서 슬러리 상태가 되면 즉시 성형장치로 이송, 성형되었다. 성형장치는 도시바에서 제작한 50톤급 cold chamber 다이캐스팅기계를 반고상 성형에 적합하도록 개조한 것을 사용했다.

시편의 미세 조직은 acetic picral(5 ml acetic acid+6 g picric acid+10 ml H₂O+100 ml ethanol(95%))을 사용하여 부식시킨 후 광학현미경으로 관찰하였으며, 화상 분석기를 이용하여 조건별로 액상을 및 고상 입자의 크기를 정량적으로 측정하였다. 주조재의 결정립 크기는 결정립계를 분간하기가 어렵기 때문에 과부식한 후 저배율에서 관찰, 측정하였다.

반고상 성형시편과 다이캐스팅 시편의 특성을 비교하기 위해서 반고상 성형에 사용한 성형장치 및 금형에 AZ91합금 용탕을 장입하여 다이캐스팅 시편을 제조하였다. 시편의 표면 거칠기는 Mitutoyo Surf-test기를 사용하여 Ra, Rz[DIN] 및 Rmax[DIN]을 측정하여 비교하였으며, 치수정밀도를 비교하기 위해서는 다이캐스팅과 반고상 성형법으로 각각 제조한 시편들의 치수를 측정하여 매 사출마다 같은 위치에서 치수가 변화하는 폭을 조사하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 금형 충전성

AZ91 주조재 및 AM50 압출재를 등온가열하여 슬러리를 준비한 후 Fig. 1에 나타낸 형상을 갖는 시편을 금형에 사출하여 제조하였다. 전자, 정보통신용 마그네슘부품의 경우 종종 판재형태를 가지기 때문에 테스트 시편도 약간의 양각과 음각부위를 가진 판재형태로 선택하였으며, 또한 반고상 슬러리의 금형충전성을 조사하기 위하여 판 두께를 일정하게 하지 않고 2.4 mm에서 시작해서 상부로 갈수록 얇아져 1.2 mm가

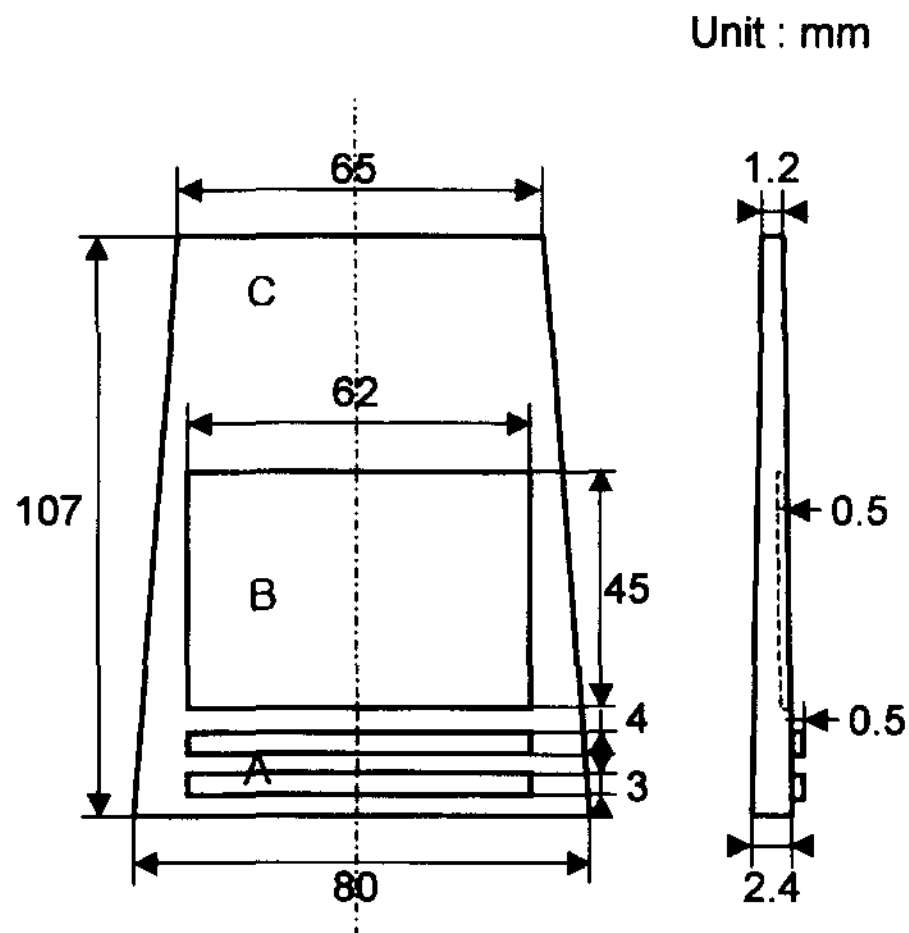


Fig. 1. Schematic illustration of Mg plate specimen.

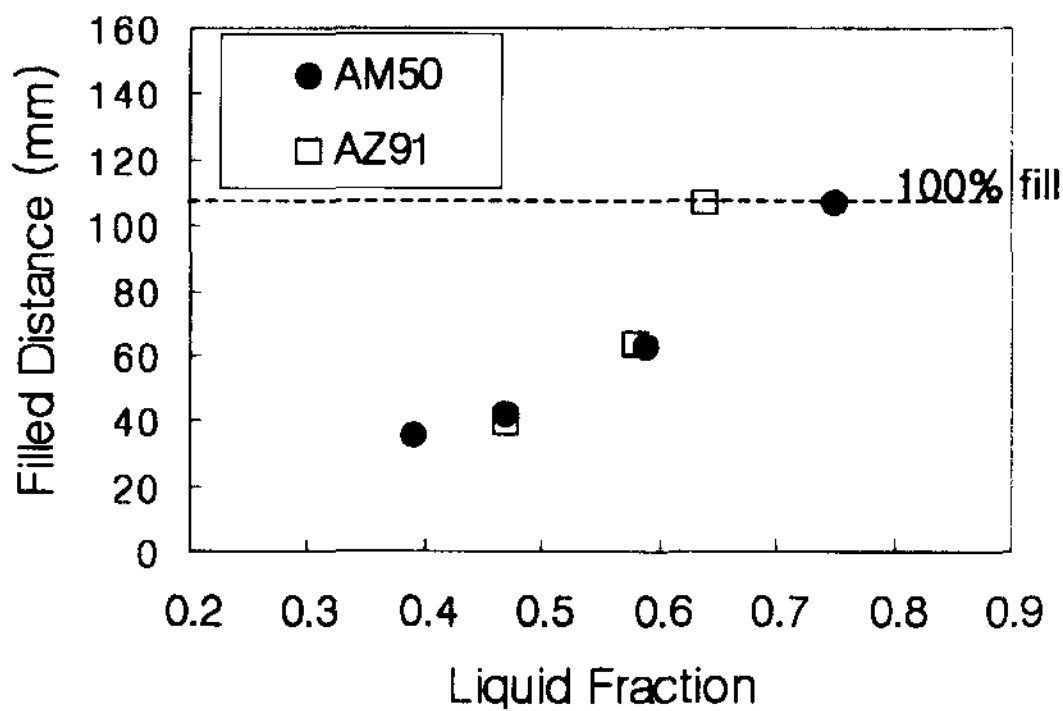


Fig. 2. Effect of liquid fraction on the mold filling (mold at 330°C, ingate speed=1.1 m/s).

되도록 변화를 주었다.

금형충전성은 Fig. 2에서 알 수 있듯이 평형 액상율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 뚜렷이 나타내었으며, AZ91의 경우는 AM50에 비하여 상대적으로 낮은 액상율에서 완전히 충전되는 거동을 보였다. 여기서의 평형 액상율은 Mg-Al 2원계 상태도와 Scheil 식을 사용해서 계산한 것이다[3,6]. AZ91이 동일한 평형 액상율에서 약간 더 우수한 충전성을 보이는 주요 원인은 Table 2에서 보여주듯이 AZ91합금이 더 많은 공정량을 가지기 때문으로 생각된다. 즉, AZ91합금은 등온가열시 저용융온도를 갖는 공정상이 많아 초기에 용융이 많이 일어나기 때문에 AM50보다 낮은 평형액상율에서 실제로는 거의 동일한 액상율을 가질 수 있으며, 또한 금형에서 충전될 때 공정량이 많아 유동도가 우수할 것으로 사료된다.

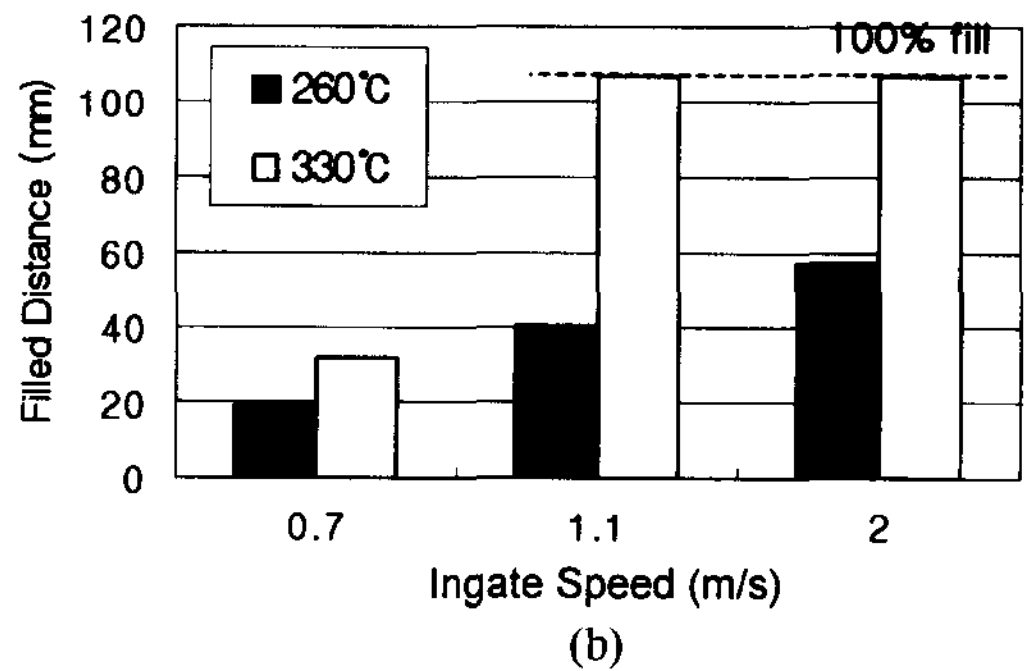
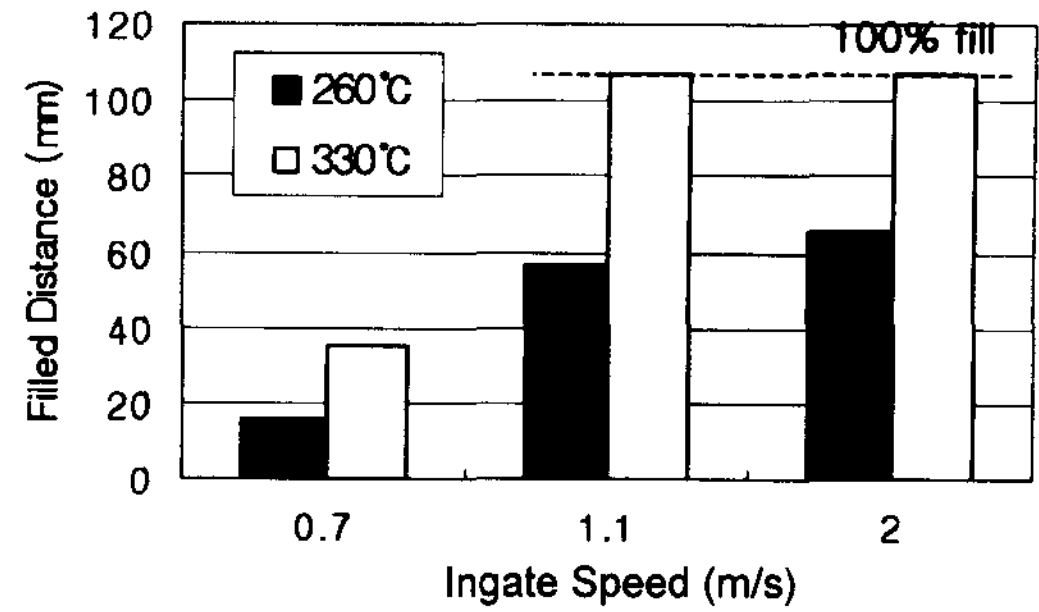


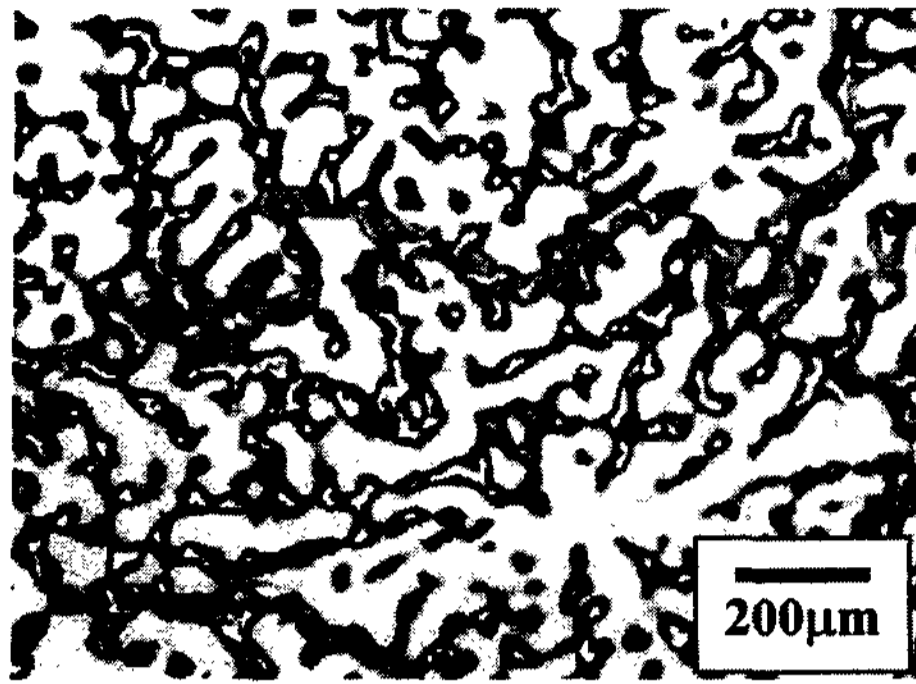
Fig. 3. Effect of process variables on the mold filling: (a) AZ91 (b) AM50

Fig. 3에서는 AZ91 및 AM50합금의 금형 충전성에 미치는 공정변수, 즉 금형온도와 사출속도의 영향을 나타내고 있으며, 평형 액상율이 더 낮음에도 불구하고 AZ91합금 슬러리가 전체적으로 더 우수한 충전성을 보임을 알 수 있다. 본 실험의 경우에는 합금의 종류에 상관없이 사출속도 보다는 금형의 온도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는데, 금형이 260°C로 예열된 경우에는 사출속도를 최대로 하여도 완전한 충전이 이루어지지 않았다.

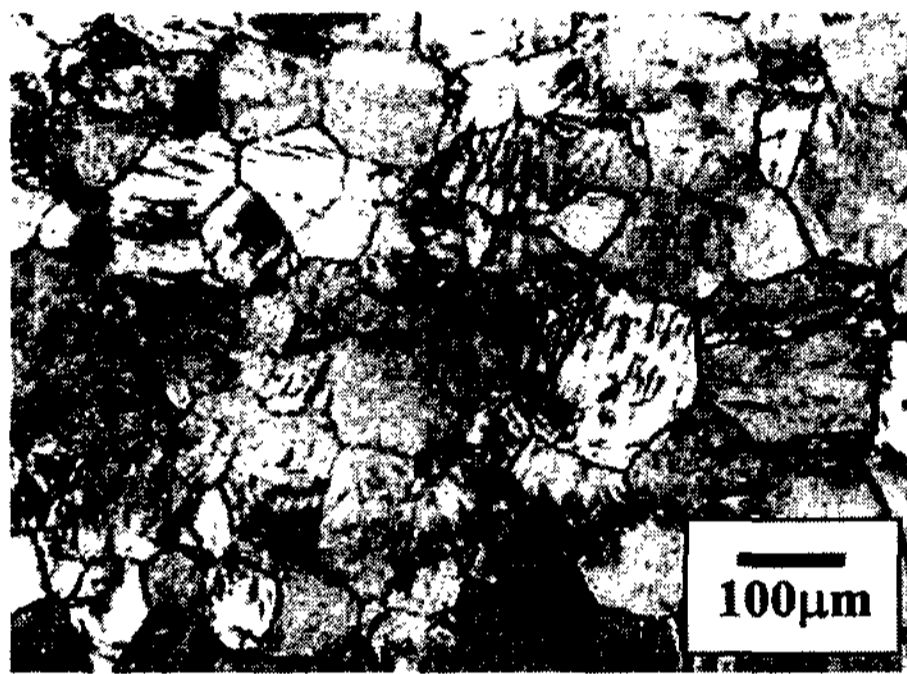
3.2 반고상 미세조직

등온가열공정에 사용된 AZ91 주조재 및 AM50 압출재의 전형적인 미세조직은 Fig. 4에 나타내었다. 비교적 조대한 수지상을 갖는 주조재와는 달리 압출재는 열간 압출공정 중 동적재결정으로 형성된 매우 미세한 결정립을 갖는 것을 알 수 있으며, 교선법에 의하여 측정된 AM50 압출재, AZ91 주조재의 평균 결정립 크기는 42, 430 μm로서 AM50 압출재의 경우가 AZ91 주조재에 비하여 결정립이 약 10배 미세한 것으로 나타났다[5].

Fig. 5와 6에서는 완전하게 충전된 AZ91과 AM50 반고상 합금의 시편 부위별 반고상 미세조직을 각각



(a)

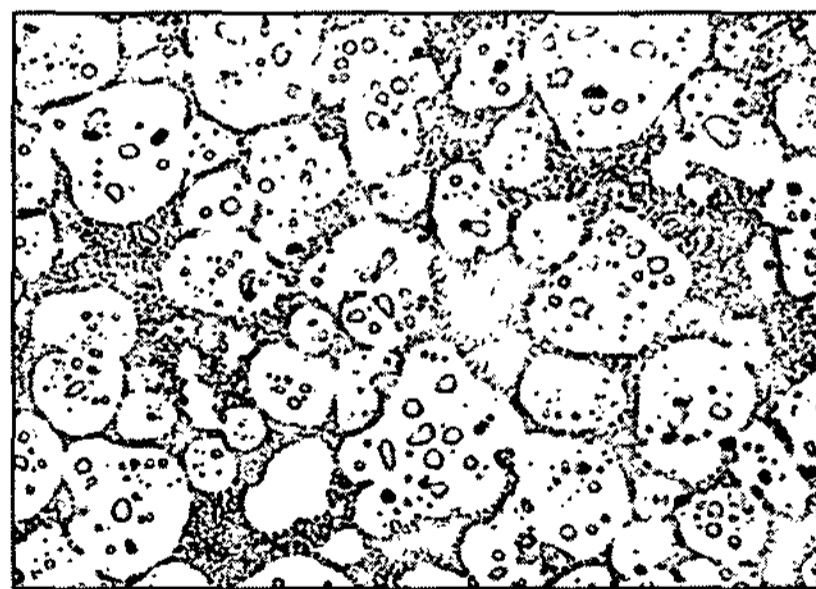


(b)

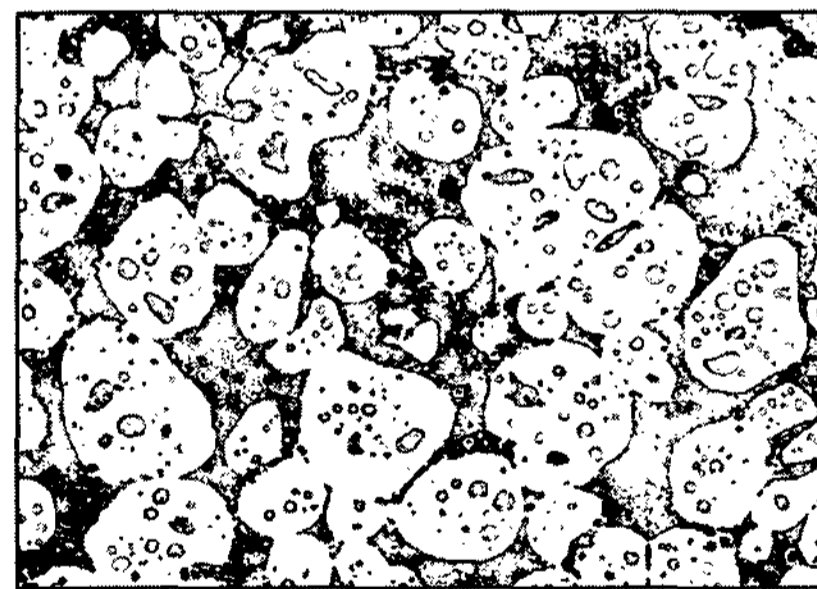
Fig. 4. Microstructure of billets used for semi-solid forming by an isothermal heating process: (a) AZ91 (b) AM50

보여주고 있다. 두 합금 모두 구형에 가까운 고상입자와 액상이 시편의 하부에서 상부 끝까지 비교적 균일하게 분포한 것을 알 수 있으며, Fig. 7에서는 액상을 및 고상입자 크기의 분포를 정량적으로 분석한 결과를 나타내었다. 시편의 위치별 액상률을 자세히 보면 B지역에서 약간 증가하는 것을 발견할 수 있으며, 이것은 시편의 형태상 B지역에서 판재의 두께가 급격히 감소함에 따라 액상이 고상보다 상대적으로 쉽게 통과하였기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 경향은 AM50에서는 매우 작게 나타났는데, AM50합금 고상입자의 평균 크기가 AZ91합금에 비하여 더 미세한 150 μm정도이고 초기 슬러리의 미세조직 균일성도 더 우수하였기 때문인 것으로 생각된다.

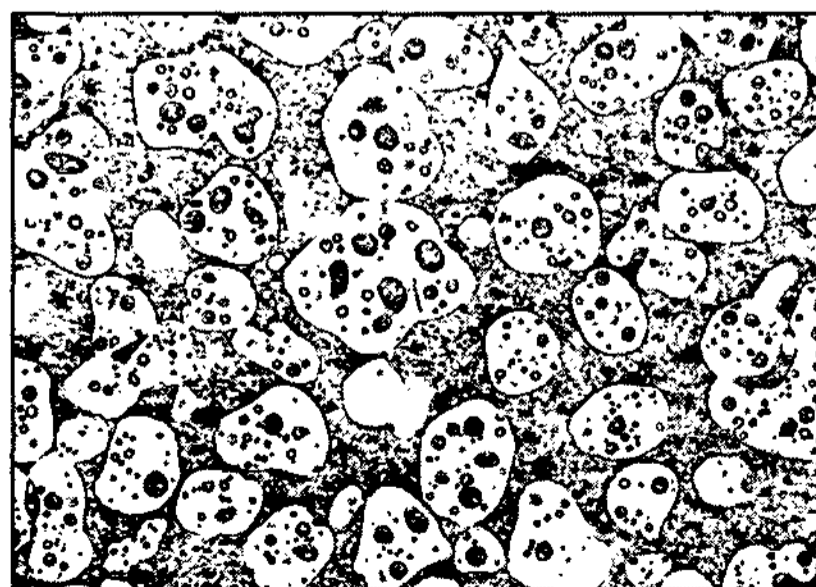
AZ91합금 주조재는 등온가열 중 초기의 수지상 구조가 점차 분해되어 구형으로 변화되기 때문에 위치별로 입자의 구형화 정도나 크기에 차이가 크지만, AM50합금 압출재는 초기 결정립이 이미 구형에 가깝고 비교적 균일하기 때문에 상대적으로 구형화 정도와 크기분포가 더 우수한 것으로 사료된다. 한편, 초기 결정립 크기의 차이가 약 10배인 것을 생각할 때 반고상 입자의 크기 차이는 상대적으로 매우 작은 것을 알 수 있으며, 따라서 등온가열과정 동안에 압출재의 경우가



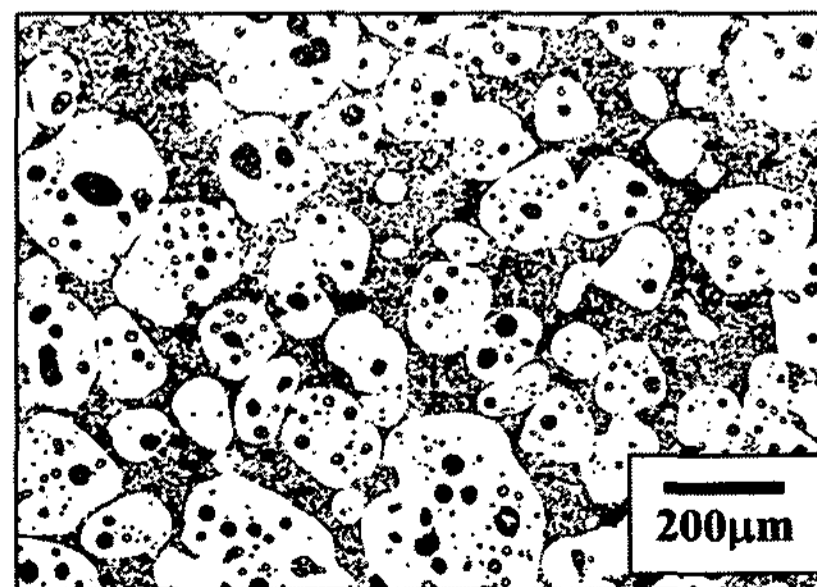
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Microstructure of semi-solid formed AZ91 alloy at different locations (isothermally heated at 580°C for 60 min): (a) ingate (b) location A (c) B (d) C

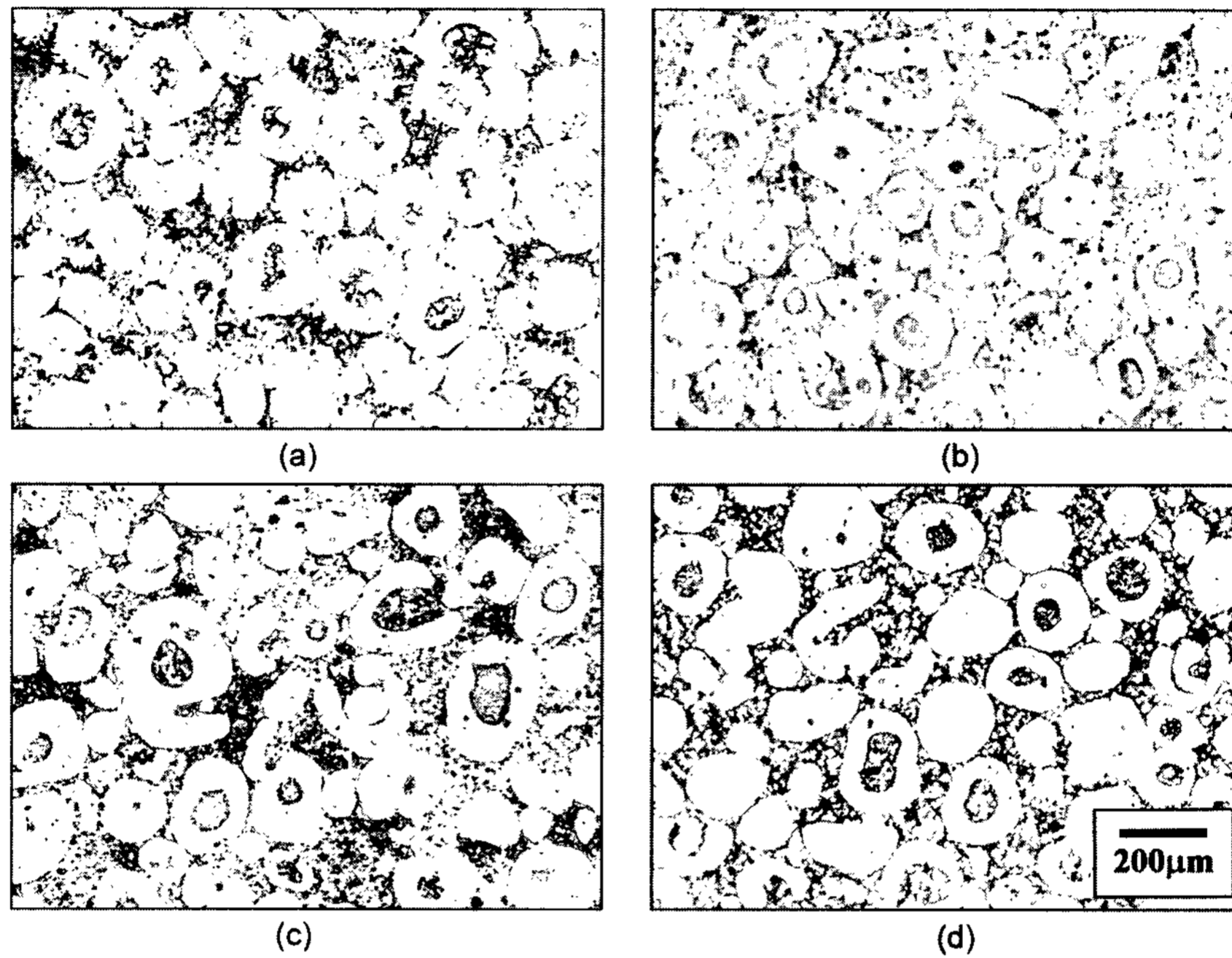


Fig. 6. Microstructure of semi-solid formed AM50 alloy at different locations (isothermally heated at 620°C for 60 min): (a) ingate (b) location A (c) B (d) C

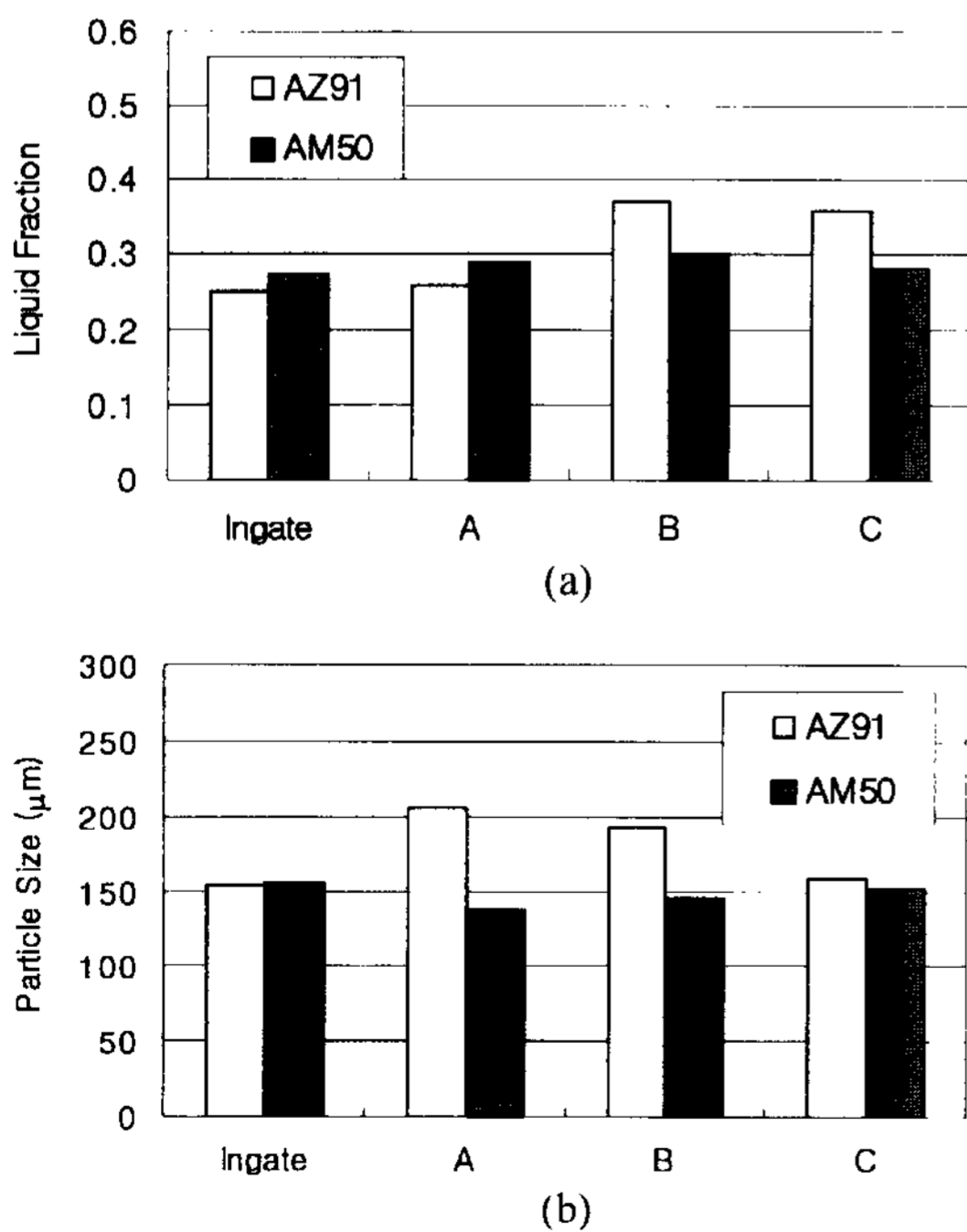


Fig. 7. Quantitative analyses of semi-solid formed microstructure of magnesium alloys at different locations: (a) liquid fraction (b) particle size distribution.

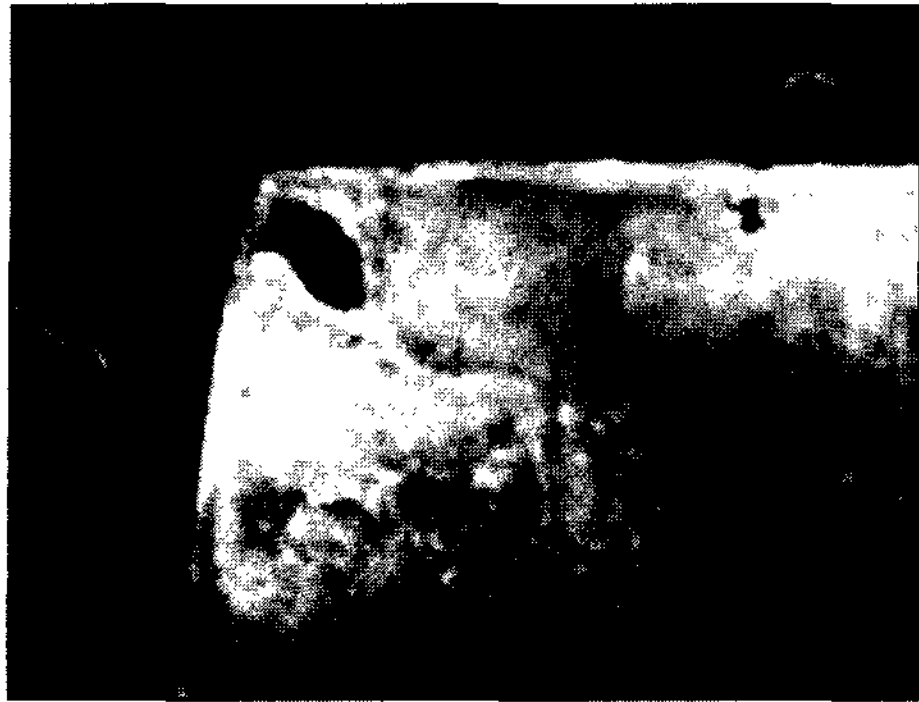
더 많은 조대화가 이루어졌음을 추정할 수 있다. 합금을 반고상 온도에서 장시간 가열하면 고상입자의 크기가 초기에는 급격히 증가하나 그 후에는 비교적 일정하게 유지되며, 특히 평형 액상율이 높은 고온에서 가열하면 액상율이 증가함에 따라 오히려 약간 감소하는 경향을 보이게 된다[3].

3.3 반고상과 다이캐스팅 시편의 특성비교

Fig. 8에서는 본 실험 중 다이캐스팅 공정을 통해 제조한 시편에서 종종 발견된 표면결함을 나타내고 있다. 다이캐스팅에서는 반고상 슬러리에 비하여 점도가 낮은 용탕을 고속으로 사출하기 때문에 금형의 공간을 채우는 과정에서 난류거동을 보이기 쉬우며, 따라서 공기의 혼입 등이 자주 발생하게 된다[7,8]. 원형관을 통해 흐르는 유체의 레이놀즈 수는 식 (1)과 같이 표현되며 경험적으로 2100이상에서 난류, 그 이하에서 층류의 거동을 보인다[9].

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

여기서 ρ , v , D , η 는 각각 유체의 밀도(g/cm^3), 평



(a)



(b)

Fig. 8. Typical surface defects on die-cast specimens: (a) air entrapment (b) surface pore

균속도(m/s), 관의 직경(mm), 유체의 점도(Pa.s)이다. 실제 금형에 사용된 ingate의 경우 원형관 형태가 아닌 직사각형 단면을 가지기 때문에 직경 D를 등가지름으로 식 (2)와 같이 대체하여 계산할 수 있다[8].

$$D_e = \frac{2wt}{w+t} \quad (2)$$

여기서 w, t는 ingate의 폭과 두께로 본 실험에서 사용한 ingate는 폭과 두께가 각각 25, 2.4 mm로서 D_e 는 약 4.38 mm이다. Mg용탕의 경우 밀도를 1.58 g/cm³, 점도를 1.13×10⁻³Pa.s로 가정하여 계산하면, 난류가 일어나지 않는 최대 유체속도는 약 0.34 m/s에 불과하다 [10]. 실제 다이캐스팅기에서 사용되는 피스톤의 속도는 최소한 수 m/s인데다 ingate의 단면적이 피스톤의 단면적에 비하여 작기 때문에 ingate에서의 유속은 수십 m/s에 이르게 된다. 따라서, 다이캐스팅에서는 난류가 거의 언제나 발생한다고 추정할 수 있다. 이와 비

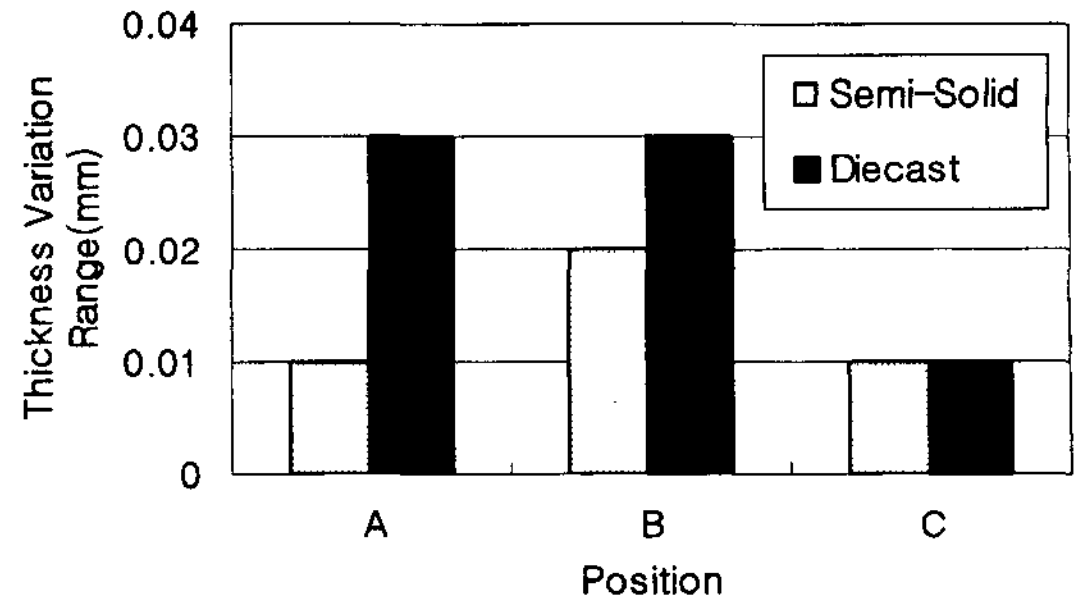


Fig. 9. Dimensional reproducibility of semi-solid formed and die-cast specimens at different locations.

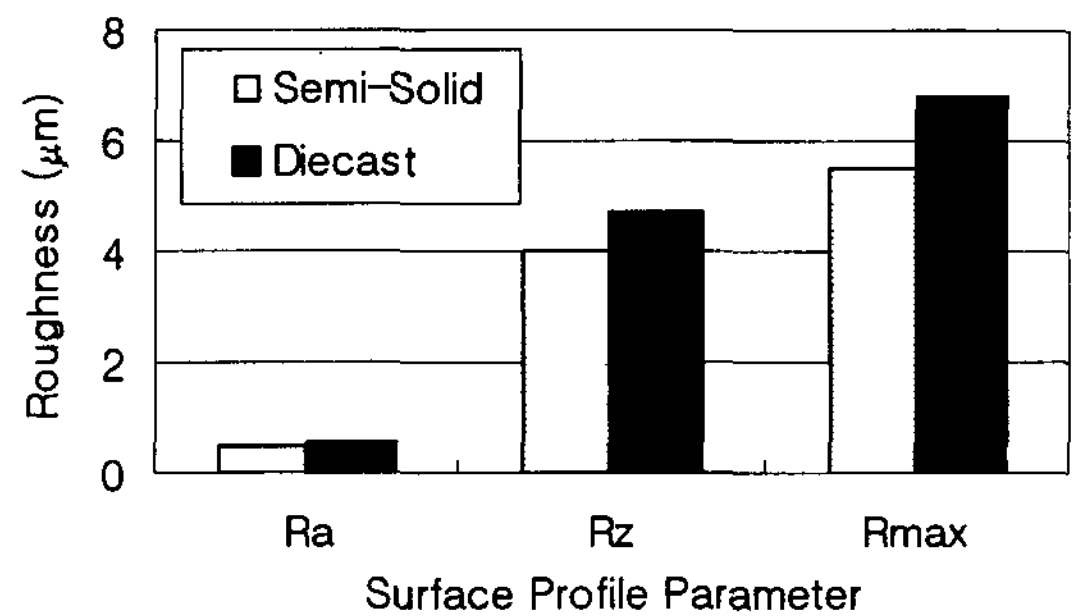


Fig. 10. Surface roughness of semi-solid formed and die-cast specimens.

교해서 반고상 슬러리의 경우 밀도와 점도가 더 높아 각각 1.608 g/cm³, 0.5 Pa.s로 가정하여 계산하면, 난류가 일어나지 않는 최대 유체속도는 약 149 m/s로 매우 높다[10,11]. 즉, 반고상 슬러리는 금형을 충전할 때 대부분 층류거동을 보일 것으로 예상된다.

반고상 성형법은 다이캐스팅에 비하여 결함이 적을 뿐만 아니라 액상과 더불어 고상이 존재하기 때문에 응고수축량이 적어 치수정밀도가 높을 것으로 기대되며, Fig. 9에서는 두 가지 공정을 통해 제조한 시편들의 치수 변화폭을 보여주고 있다. 시편의 상부인 C위치에서는 두 공정 모두 시편들 사이에 두께차이가 거의 없었으나, ingate가 근접한 A위치에서는 상대적으로 다이캐스팅 경우가 더 큰 두께변화를 보였다. Fig. 10에서는 두 공정으로 제조된 시편의 표면 거칠기를 비교한 것으로 반고상 성형법에 의하여 제조된 시편이 약간 더 우수한 표면을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 R_a 는 평균 거칠기, R_z 는 평균 최대 프로파일 높이, 그리고 R_{max} 는 최대 거칠기 깊이를 의미한다.

4. 결 론

AZ91합금 주조재 및 AM50합금 압출재를 등온가열하여 반고상 슬러리를 준비한 후 박판형태의 시편을 제조하였으며, 다음과 같은 분석결과를 얻을 수 있었다.

1) AZ91 및 AM50합금 슬러리의 금형충전성은 액상율의 증가에 따라 현저히 증가하였으며, 동일 액상율에서 AZ91합금의 경우가 약간 더 우수한 것으로 관찰되었다. 또한 두 합금 모두에서 금형충전성에 미치는 영향은 금형온도가 사출속도에 비하여 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다.

2) AZ91 및 AM50합금 반고상 성형시편의 미세조직을 위치별로 관찰한 결과 고상입자의 크기 및 액상의 분포가 대체로 균일하였으며, AM50압출재의 경우가 좀 더 우수하였다. 이것은 압출재의 초기조직이 주조재에 비하여 더 미세하고 균일하기 때문인 것으로 사료된다.

3) 동일한 형상을 갖는 반고상과 다이캐스팅 시편을 비교한 결과 다이캐스팅의 경우에는 많은 표면결함이 관찰되었으며, 치수안정도와 표면 거칠기 모두에서 반고상시편이 더 우수한 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 청정생산기술사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] P. Kapranos, P.J. Ward, H.V. Atkinson, and D.H. Kirkwood:

Materials & Design, "Near net shaping by semi-solid metal processing", 21 (2000) 387-394.

[2] B. L. Mordike and T. Ebert: Mater. Sci. & Eng. A., "Magnesium properties-applications- potential", 302 (2001) 37-45.

[3] W. J. Jung, K. T. Kim, and C. P. Hong: J. of Korean Foundrymen's Society, "Variation of morphology of solid particles and microstructure in Al-Si, Al-Cu, and Mg-Al alloys during isothermal heat-treatment at semi-solid temperatures", 16 (1996) 556-564.

[4] S. K. Kim and Y. J. Kim: J. Kor. Inst. Met. & Mater., "Control of liquid fraction and microstructure of semisolid AZ91D Mg alloy slurry", 38 (2000) 1620-1625.

[5] J. M. Kim, H. S. Hwangbo, K. T. Kim, and W. J. Jung: J. of Korean Foundrymen's Society, "Microstructural evolution during isothermal heating and thixoformability of Mg-5%Al alloy", 21 (2001) 246-252.

[6] M. C. Flemings: Metallurgical Trans. A, "Behavior of metal alloys in the semisolid state", 22 (1991) 957-981.

[7] J. C. Lee, C. D. Yim, H. K. Seok, and H. I. Lee: J. Kor. Inst. Met. & Mater., "Effects of the injection speed and the gate geometry on the flow behaviors of the molten metal", 39 (2001) 844-849.

[8] J. C. Lee, H. K. Seok, and H. I. Lee: J. Kor. Inst. Met. & Mater., "Effect of the gate geometry and the injection speed on the flow behaviors of the semi-solid Al alloy", 40 (2002) 189-196.

[9] G. H. Geiger and D. R. Poipier: 'Transport phenomena in metallurgy', Addison-Wesley Publishing co., London (1972) 89.

[10] Edited by M. M. Avedesian and H. Baker: ASM Specialty Handbook, "Magnesium and magnesium alloys", ASM international, Materials Park, OH (1999) 8-11.

[11] C. D. Yim, H. C. Jung, and K. S. Shin: Solid/Liquid coexistent metal forming technology symposium, Korean Institute of Metals and Mater., "Semi-solid metal forming process of magnesium alloys", Changwon (2001) 13-24.