

|||||||
 論 文
 |||||

Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 용탕단조시 주조결함의 형성 및 방지

황영하 · 허승호 · 홍준표

Formation and Prevention of Macrodefects in the Squeeze Casting of a Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr Alloy

Young-Ha Hwang, Seung-Ho Huh, and Chun-Pyo Hong

Abstract

The squeeze casting of a Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr alloy was carried out to investigate the conditions for the formation and the prevention of macrodefects, such as macrosegregation and shrinkage defects. The effects of the process parameters, the applied pressure, the die temperature, and the pouring temperature on the formation of macrodefects were investigated in correlation with the evolution of macrostructure. Three types of macrodefects were found; macrosegregation only, shrinkage defects only, both macrosegregation and shrinkage defects. It was found that the pouring temperature, the die temperature, and the applied pressure are closely related to the formation of macrodefects. Sound castings without macrosegregation and shrinkage defects can be obtained under the conditions of $80 \text{ MPa} < P < 110 \text{ MPa}$, $730^\circ\text{C} < T_p < 760^\circ\text{C}$, and $180^\circ\text{C} < T_d < 250^\circ\text{C}$.

(Received April 15, 1998)

1. 서 론

용탕단조법은 금형 내에 주입된 용탕에 직접 압력을 가함으로써 다른 주조에 비해 가스기공, 수축공등 주조결함을 최소화한 고품질의 제품을 양산할 수 있는 주조법[1-3]으로 최근 자동차 산업을 중심으로 하여 다양한 분야에서 실용화에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

그러나 용탕단조의 여러 가지 장점에도 불구하고 주조시 발생하는 거시 편석이 제거된 건전한 주조품을 제조할 수 있는 용탕단조 제조변수에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 지금까지 용탕단조에서 용탕의 주입 온도, 금형 온도, 가압력, 가압지체시간 등의 제조변수를 제어함으로써 거시편석의 형성을 억제할 수 있다는 연구가 일부 수행되었다[4-6]. 최근 Hong[7] 등은 건전한 주조품을 제조할 수 있는 Al-Cu합금의 최적 용탕단조 조건을 확립하여 제시하였으며, 계절과 습도에 의해서도 건전한 제품의 제조영역이 다르게 나타남을 규명하였다. 그러나 Mg합금의 용탕단조에 대한 연구가 일부 수행되긴 했지만[8] 건전한 용탕단조품을 제조할 수

있는 구체적인 제어방안이 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 최근 경량화 소재로써 연구가 활발히 진행되고 있는 마그네슘 합금중 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 용탕단조시 제조변수인 용탕 주입온도, 금형 온도, 가압력을 변화시켜 거시편석 및 수축공의 형성 조건과 주조결함의 형태를 제시하고 건전한 주조품 제조를 위한 용탕단조조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 합금제조

Mg(99.8), Al(99.9)과 Mg-32wt%Zr모합금을 사용하여 Mg-5wt%-0.6wt%Zr합금을 제조하였다. Mg의 강한 산화성을 억제하고 용점차이가 큰 Zr 금속원소의 합금을 제조하기 위해 Mg, Al을 먼저 도가니에 장입하여 아르곤 분위기에서 용해한 후 Mg-32wt%Zr 모합금을 첨가하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 용탕단조기로 plunger type의 30톤 규모 수직가압방식 유압프레스이며, 용탕을 설정된 주입온도가 될 때까지 유지한 후, Fig. 1의 오

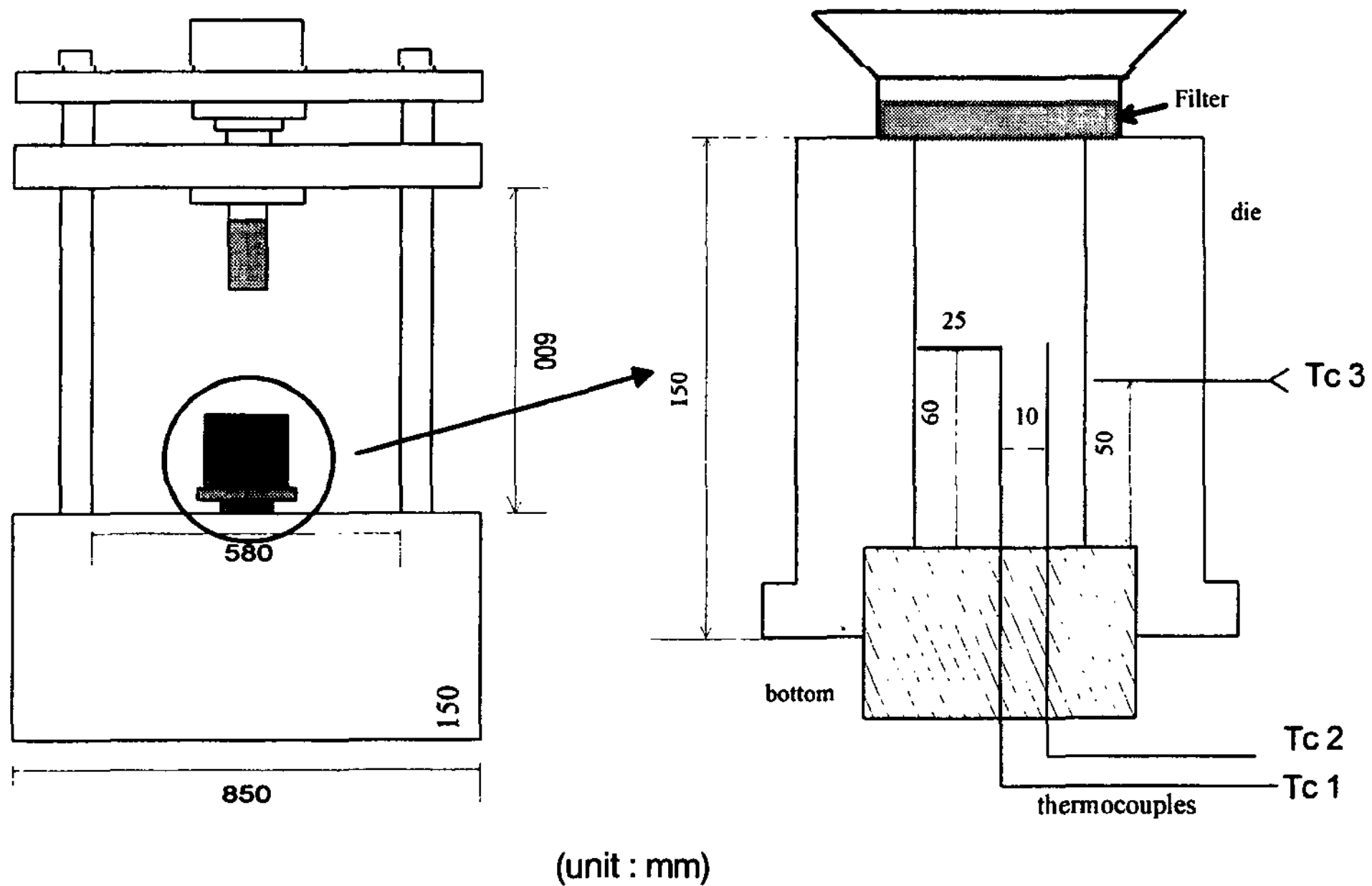


Fig. 1. Schematic diagram of a mold assembly.

른쪽과 같은 형태로 설치된 필터가 장착된 주입 컵을 통하여 높이 120 mm 내경 50 mm 두께 25 mm의 예열된 금형에 주입하여 60초 동안 가압하였다. 주입시 개재물 및 산화물의 혼입을 방지하기 위하여 30 ppi, 두께 20 mm의 알루미나 필터를 사용하였으며, 잉고트는 지름 50 mm×길이 100 mm의 봉상으로 주조하였다.

거시편석 및 수축공의 형성과 건전한 주조품을 제조할 수 있는 용탕단조 조건을 확립하기 위하여 가압력 (P), 용탕주입온도(T_p), 금형예열온도(T_D) 등의 제조 변수를 변화시켜 주조하였다. Stroke의 하강속도는 180 mm/min로 하였으며, 금형 온도는 50~250°C, 가압력은 30~120 MPa으로 하였다. 용탕주입온도는 필터를 사용하여 주입하기 때문에 주입성을 고려하여 최저주입온도를 730°C로 설정하였으며 800°C까지 범위에서 10°C간격으로 실험하였다. 용탕을 주입후 정수압이 최초로 용탕에 전해지는 가압지체시간은 8초 이내로 하였으며, 습도는 평균 40%이하인 맑은 날 실험하였다.

개재물 혼입을 방지하기 위하여 주입컵을 사용하기 때문에 용탕주입 후 금형 내에 유입되는 실제 용탕온도와 가압력이 용탕에 전달되는 시점의 온도를 Pen Recorder(Hr180-24, Konics사)를 이용하여 측정하였다. 열전대는 용탕온도를 측정하기 위하여 잉고트 중앙과 표면으로부터 10 mm 지점 2곳과 바닥으로부터

60 mm에 높이에 위치 각각 시켰으며, 금형 외부로부터 23 mm에 설치하여 금형온도를 측정하였다.

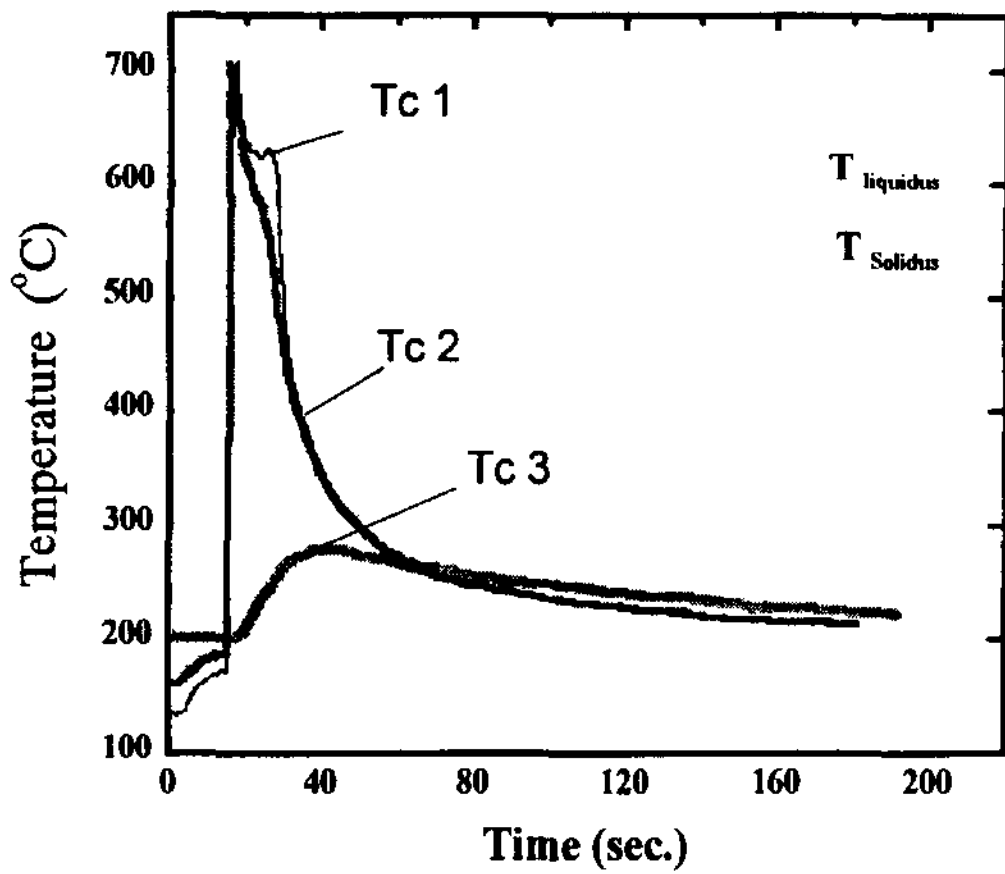
2.2 조직관찰

용탕단조된 봉상의 시편은 거시편석 및 수축공등 주조결합을 관찰하기 위하여 길이방향으로 중심을 절단한 후 1200번까지 표면 연마하여 증류수 75%+25% HNO₃ 용액에서 20~30초간 부식하여 표면을 관찰하였다. 관찰된 주조결합중 편석의 형태와 편석대의 용질 원자 분포를 측정하기 위하여 편석의 유형에 따라 편석대 경계를 중심으로 절단하여 미세연마후 24%증류수+75%Ethylene glycol+1%HNO₃ 용액에서 10~20초간 부식하였다. 부식된 시편은 합금성분 분포를 관찰하기 위하여 SEM-EDS 분석을 하였다.

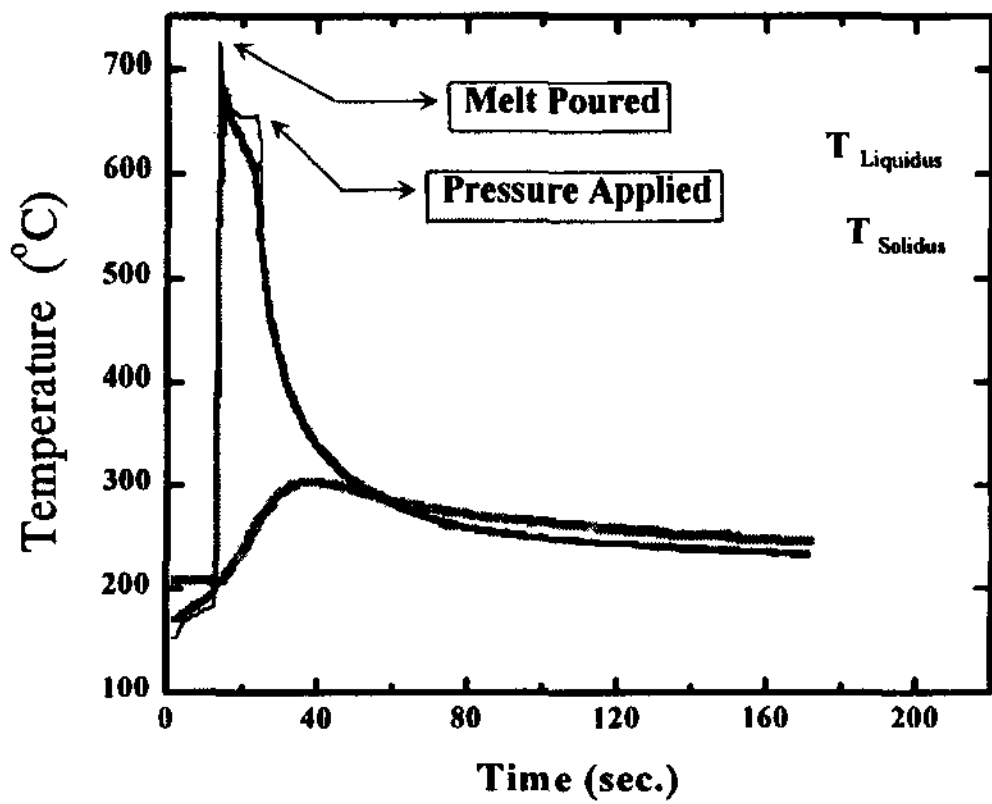
3. 결 과

3.1 냉각곡선

Fig. 2는 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금을 금형 온도 200°C, 가압력 100 MPa에서 용탕주입 온도 (a) 750°C 및 (b) 780°C에서 주입 후 금형 내에 유입되는 용탕의 온도변화를 측정한 것이다. 용탕온도는 750°C에서 715°C로, 780°C에서 740°C로 저하 하였다. 이러한 온



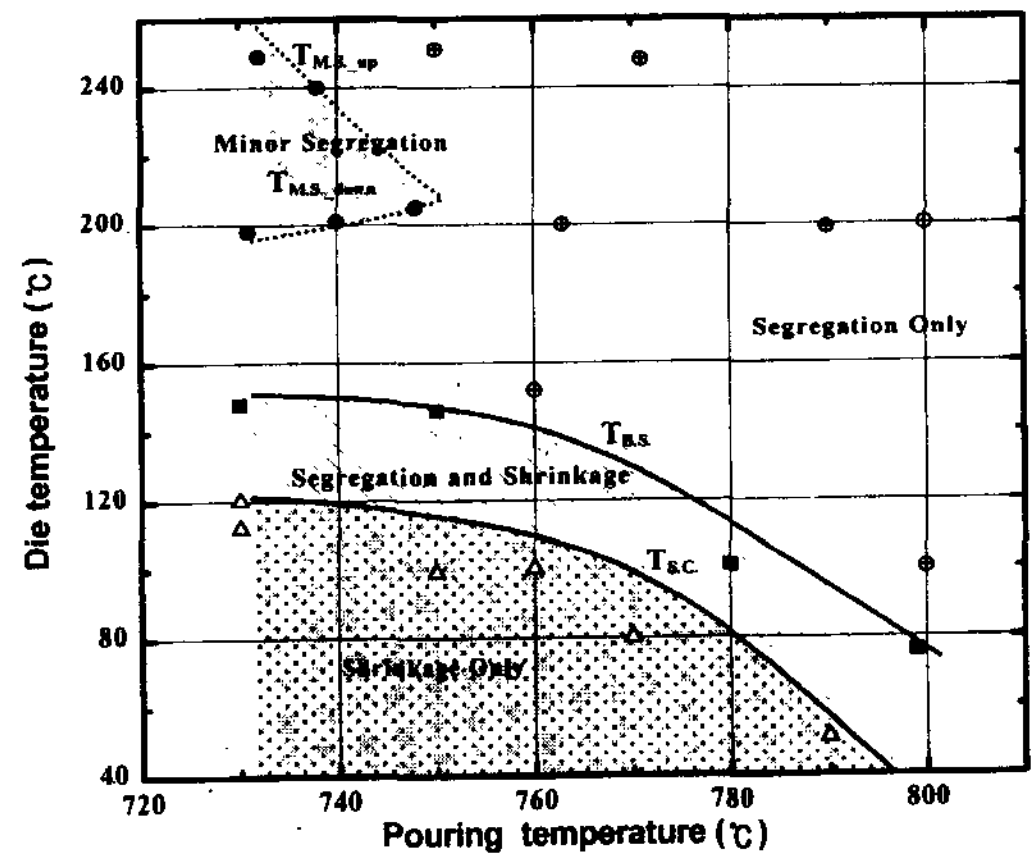
(a)



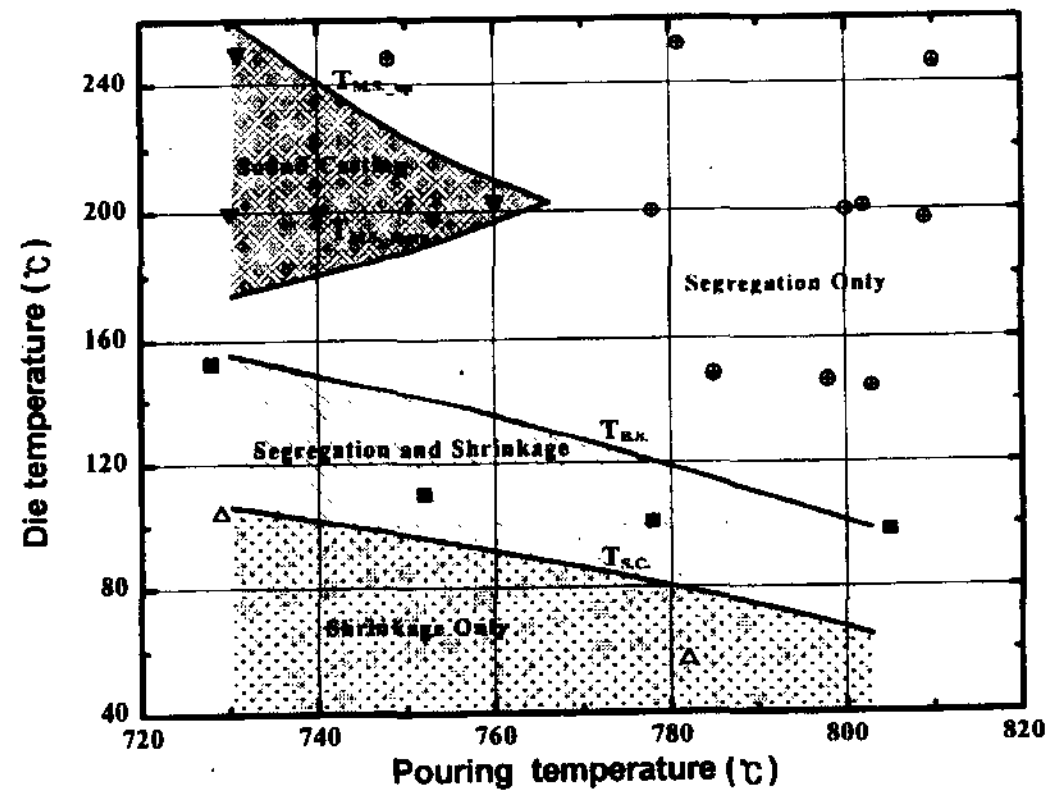
(b)

Fig. 2. Typical cooling curves of the squeeze cast Mg-5wt% Al-0.6wt%Zr alloy at $T_D=200^\circ\text{C}$ and $P=100\text{ MPa}$ with two different pouring temperatures; (a) 750°C and (c) 780°C .

도 저하의 원인은 용탕이 필터가 장착된 주입컵을 통과하며 급격한 열 손실이 일어났기 때문으로 판단된다. 가압이 시작된 후 응고 과정이 거의 수직으로 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 가압에 따른 계면 열전달계수의 증가 때문으로 응고시간이 단축된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에서 용탕주입 후 부터 가압직 전까지 용탕 중심부의 온도 곡선의 기울기는 750°C 인 (a)에 비해 780°C 로 주입한 (b)에서 기울기가 완만함을 알 수 있다. 이 측정결과로 부터 용탕주입온도가 고온인 경우 중심부의 액상상태 온도가 유지되어 용질의 집적을 가져와 편석을 발생시키는 것으로 생각된다. 이는 용탕온도가 증가할 때 거시편석이 증가한다는 Gallerneault등[9]의 연구 결과와도 일치하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. Diagrams describing the conditions for the formation of macrodefects as functions of the die and the pouring temperatures in the squeeze casting of a Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr alloy with two different applied pressures; (a) 80 MPa and (b) 100 MPa.

3.2 용탕 주입온도와 금형 온도의 영향

용탕단조에서 거시편석과 수축공과 같은 주조결함은 응고거동 양상과 밀접한 관계를 가지고 있다. 금형 온도는 용탕단조에서 온도구배와 응고속도를 결정하는 중요한 인자중의 하나이다[9-10].

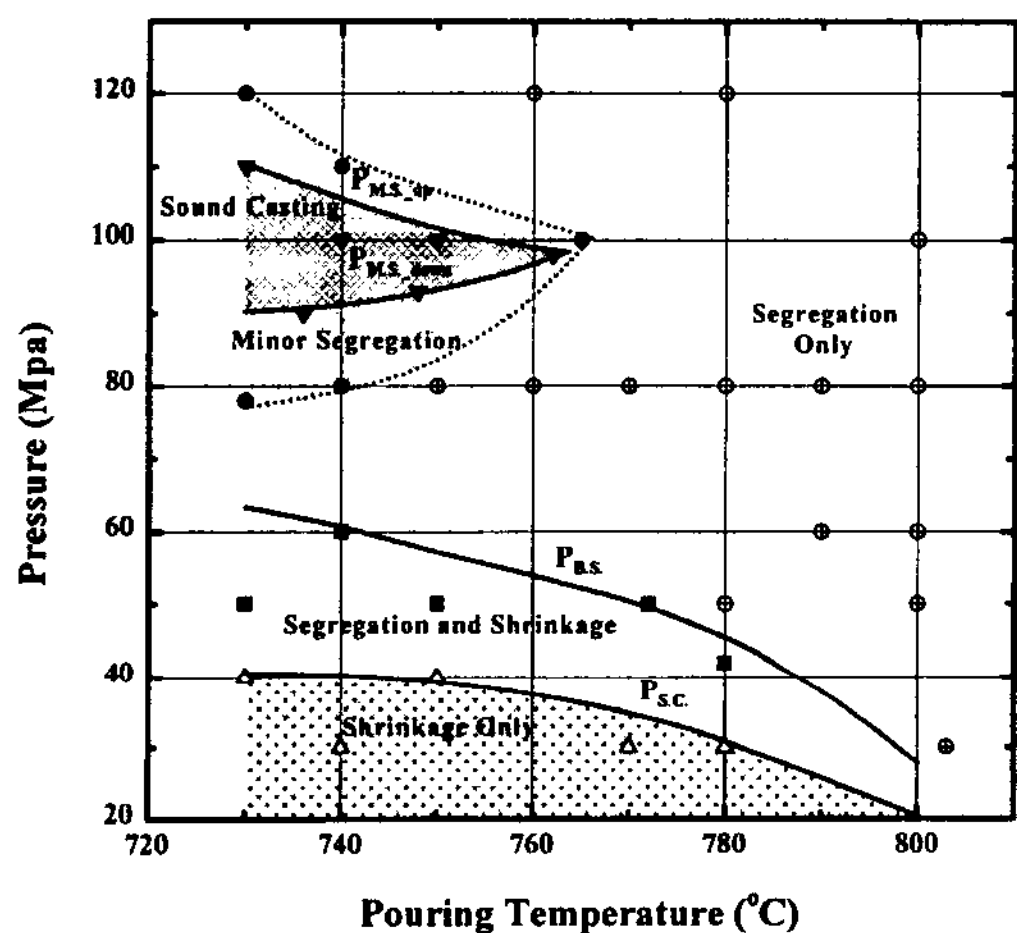
Fig. 3 (a) 및 (b)는 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금을 다양한 용탕 주입온도에 따라 금형 온도를 변화시키면서 용탕단조한 잉고트의 거시조직 관찰 결과를 유형별로 구분하여 나타낸 것이다. (a)는 가압력 80 MPa, (b)는 100 MPa에서 실험하였다. 거시편석이 발생하는 임계금형온도(T_{MS})와 수축공이 나타나는 임계금형온도(T_{SC}), 그리고 편석과 수축공이 함께 나타나는 임계금형온도(T_{BS})로 구분하여 나타내었다. 용탕단조한

Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 거시조직을 분석한 결과로부터 구조결함은 수축공만 존재하는 경우, 수축공과 편석이 공존하는 경우, 그리고 편석만 존재하는 결함 등의 3종류가 나타나고 있음을 알 수 있다. 수축공은 T_{sc} 이하에서 나타났으며 거시편석은 T_{MS} 와 T_{BS} 사이에서 나타났다. 가압력 100 MPa로 용탕단조시 건전한 잉고트는 금형온도 250°C 이상 일 경우에는 용탕주입온도 740°C 이하 영역에서, 금형온도 180~220°C 사이에서는 용탕주입온도 760°C 이하에서 제조할 수 있었다. 각 금형 온도에서 용탕주입온도가 증가하면서 건전한 잉고트 제조 영역이 좁아지는 것은 가압시

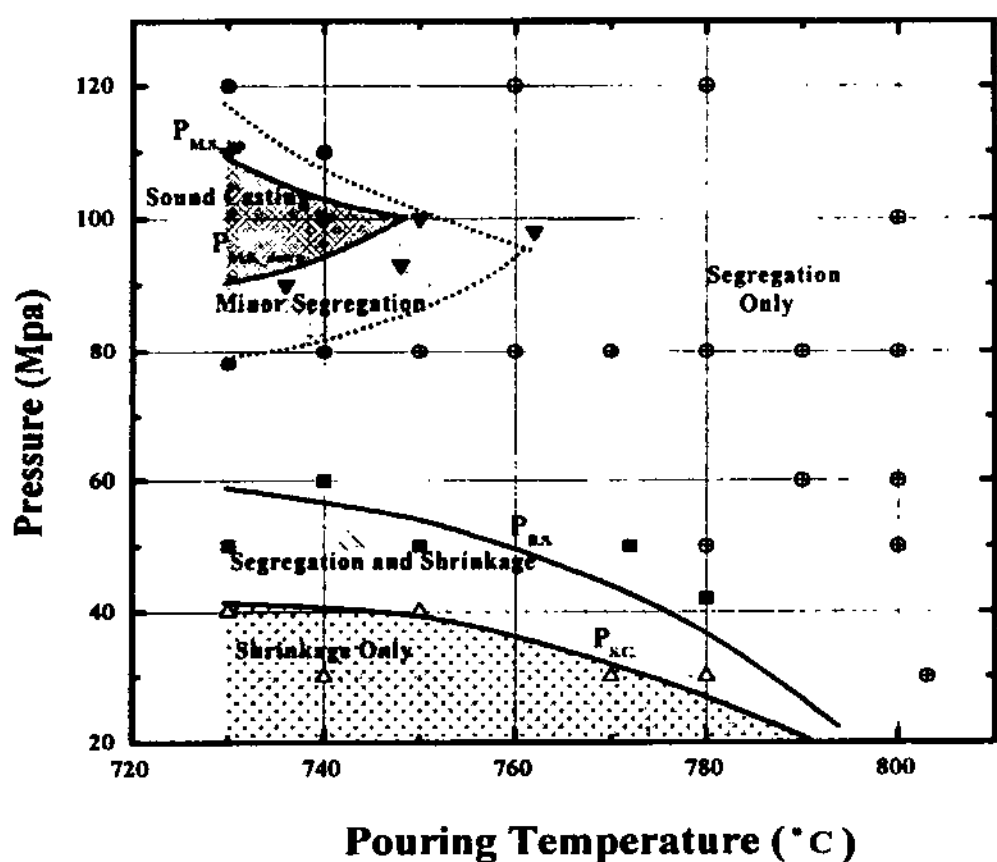
응고점온도의 상승과 단열압축이 발생하는데 금형과 용탕온도가 높을 경우 과냉도가 적어지면서 용질의 집적을 가져와 중심에서 편석이 발생하기 때문으로 사료된다. 하지만 편석의 형성에는 금형 온도 영향보다는 용탕주입온도의 영향이 더 큼을 알 수 있다.

3.3 용탕 주입온도와 가압력의 영향

용탕단조에서 가압력은 금형과 계면사이의 열전달 계수를 증가시켜 응고시간의 단축, 조직미세화 및 냉각속도를 빠르게 하는 효과가 있으며, 가압력에 의해



(a)



(b)

Fig. 4. Diagrams describing the conditions for the formation of macrodefects as functions of the applied pressure and the pouring temperature in the squeeze casting of a Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr alloy with two different die temperatures; (a) 200°C and (b) 250°C.

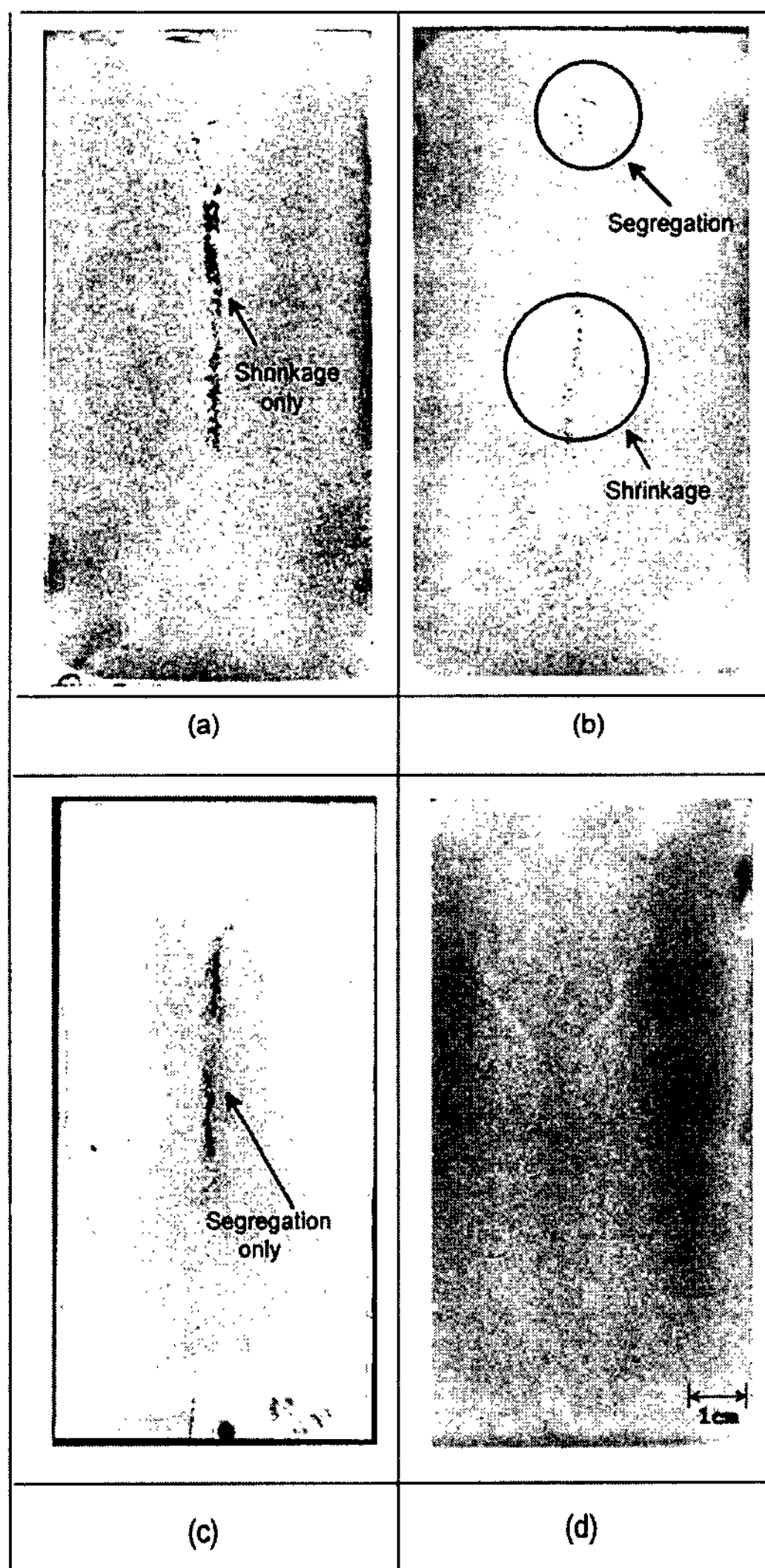


Fig. 5. Typical macrostructures corresponding to the four regions; (a) shrinkage defect only, (b) both macrosegregation and shrinkage defects, (c) macrosegregation only, and (d) sound casting.

기공과 편석이 제거되어 건전한 잉고트를 제조할 수 있다.

Fig. 4 (a) 및 (b)는 금형 온도를 고정한 후 가압력과 용탕주입온도를 변화시키며 용탕단조한 후 거시조직을 관찰한 결과를 나타낸 것으로, (a)는 금형 온도 200°C, (b)는 250°C에서 각각 용탕단조 하였다. 수축공이 생성되는 임계압력 P_{sc} 는 금형온도 200°C인 경우 용탕주입온도 750°C이하, 가압력 40 MPa이하에서 발생하였으나, 용탕주입온도가 높아짐에 따라 800°C에서 P_{sc} 는 20 MPa까지 감소하였다. 금형 온도가 250°C인 경우 약간의 변화는 있으나 용탕주입 온도 780°C까지는 가압력 30 MPa 이하에서 수축공이 생성되었다. 거시편석은 임계거시편석 생성 압력 P_{MS} 와 수축공과 편석이 동시에 나타나는 임계압력 P_{BS} 사이에서 발생되며 용탕주입온도 760°C, 가압력 50 MPa 이상에서는 금형온도에 관계없이 거시편석이 존재하였다. 가압력이 편석을 효과적으로 제거하여 건전한 잉고트를 제조할 수 있는 영역은 금형온도 200°C에서는 110 MPa 이하에서 가능하였으며, 80 MPa 이하에서는 건전한 잉고트를 제조할 수 없었다. 가압력 80 MPa이하에서 금형 온도와 용탕온도에 관계없이 건전한 잉고트를 주조할 수 없는 이유는 낮은 압력에서는 용탕 주입 후 가압력이 전해지기 전에 중심에 형성되는 응고영역 또는 고액공존 구역에서 과용질 액상이

수축공내로 집적되어 응고수축에 기인한 수축공의 형성 때문으로 판단된다. 금형온도가 변함에 따라 건전한 잉고트가 제조되는 임계 용탕주입온도가 변하는데, Fig. 4 (a)와 같이 금형 온도 200°C인 경우 가압력 100 MPa 에서 최대 용탕주입온도는 760°C이지만, 금형온도 250°C인 (b)에서는 가압력 100 MPa에서 740°C로 낮아졌음을 알 수 있다.

금형온도, 용탕주입온도, 그리고 가압력을 변화시키면서 용탕단조한 시편의 거시조직에 대한 실험결과로부터, 각 주조결합 영역의 용탕단조한 시편의 중심부를 관찰한 결과를 Fig. 5 (a), (b), (c) 및 (d)에 나타내었다. (a)는 수축공만 존재하는 경우, (b)는 수축공과 편석이 함께 있는 경우, (c)는 편석만 존재하는 경우, 그리고 (d)는 건전한 시편을 나타낸 것이다. 금형 온도 200°C, 용탕주입온도 750°C이상의 경우 편석이 발생하는 임계 압력과 임계금형 온도에 인접한 영역에서 용탕단조된 시편에서 편석이 현저하게 감소하였으며, 용탕온도가 780°C이상의 영역에서는 대체적으로 편석이 넓게 분포하였다.

4. 고 찰

4.1 거시편석의 형태

용탕단조한 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금에 나타난 주

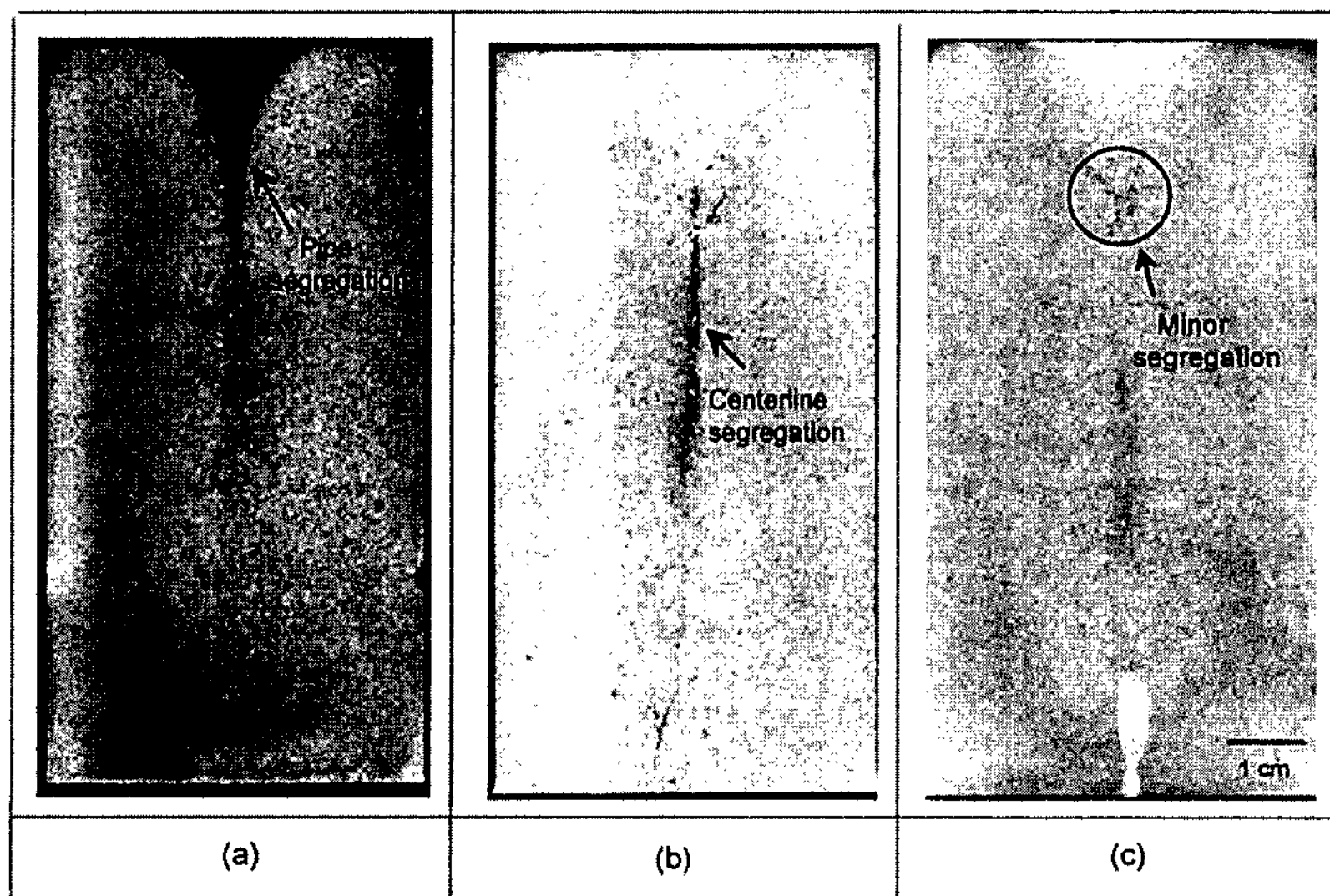


Fig. 6. Typical types of macrosegregation in the squeeze casting of a Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr alloy; (a) pipe segregation, (b) centerline segregation, and (c) minor segregation.

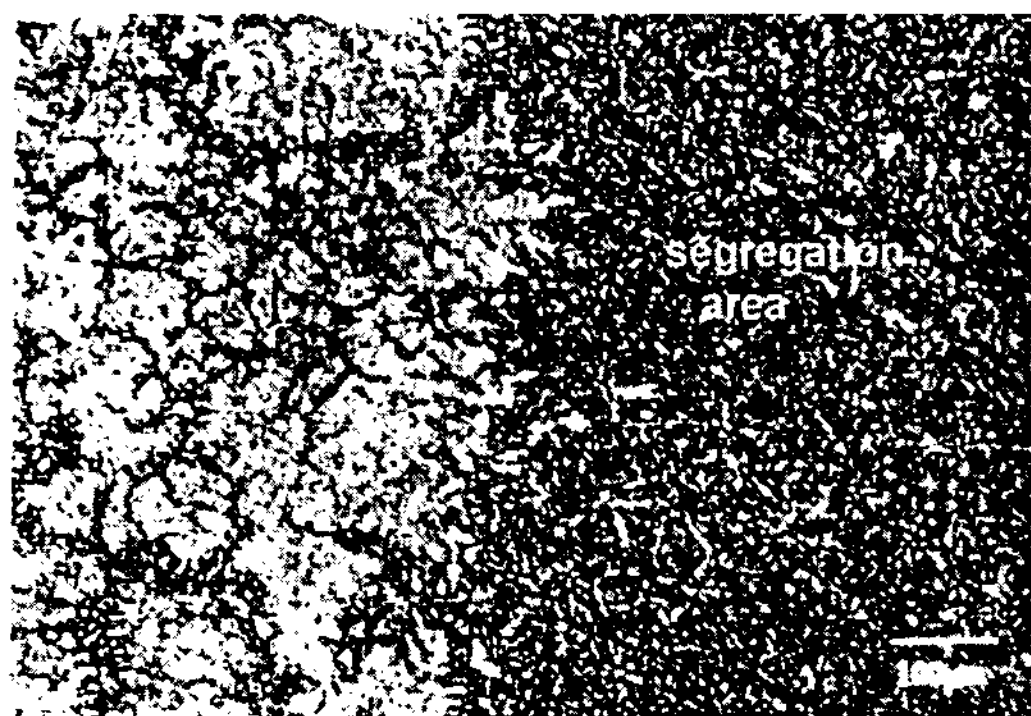
조결함의 형태를 Fig. 5 (a)~(c)에서 살펴 보았다. 용탕 단조한 시편의 수축공은 대체로 상부가 닫힌 상태에서 중심부에 나타나는데, 이는 가압시 상부가 plunger에 의해 먼저 응고되면서 중심부에서 응고수축으로

인하여 형성된 것으로 판단된다. 용탕단조시 편석의 형태는 중력주조에서 나타나는 역편석이 억제되고 정 편석이 나타난다. Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 용탕 단조시 나타나는 편석의 종류는 Fig. 6에 나타난 것처럼 (a) pipe segregation, (b) centerline segregation 및 (c) minor segregation등이 있다. 그러나 Mg 합금에서는 Al 합금에서 나타나는 V-type의 channel segregation은 나타나지 않았다.

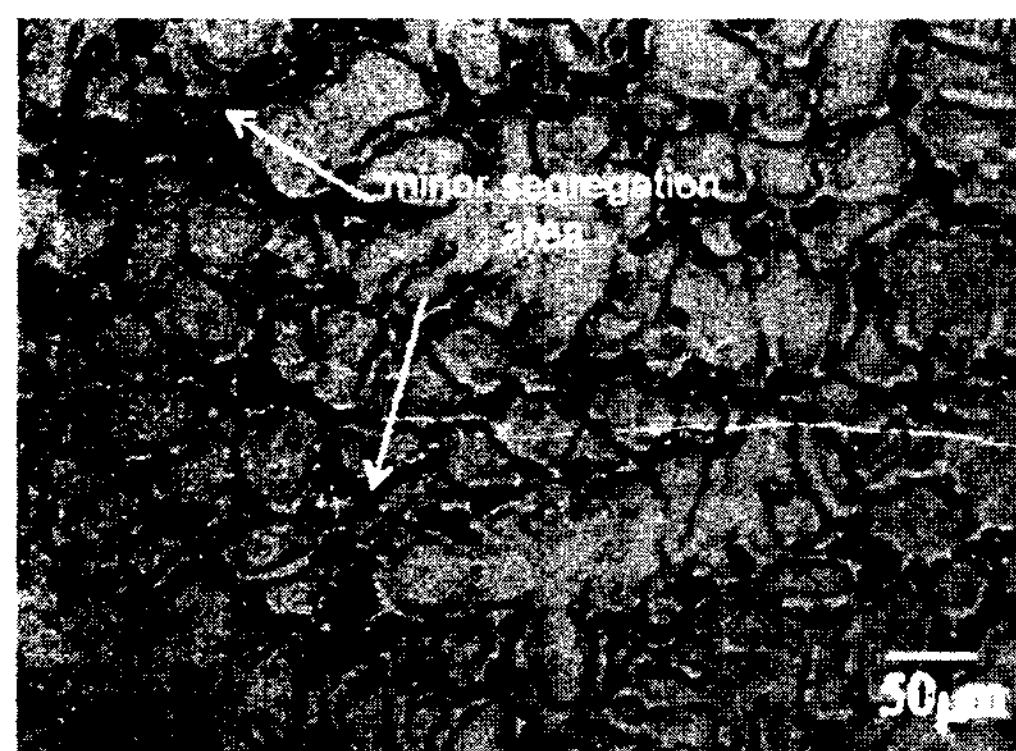
Pipe segregation의 경우 중력주조에서는 보통 잉고트의 상부 수축공의 발생으로 인하여 형성되지 않으나, 용탕단조에서는 압력에 의해 이 수축공 부위에 과용질 액상이 쉽게 충전되면서 Fig. 6(a)와 같은 형태의 편석이 발생한다. 용탕단조에서 pipe segregation은 용탕 주입온도가 액상선에 인접한 온도에서 나타났 다. Centerline segregation은 압력이 가해지기전 열이 금형을 통해 빠져나가면서 중심에 수축공이 형성되는데, 이때 응고중에 압력이 가해지면서 과용질상태의 액상이 중심 수축공에 충전되면서 Fig. 6 (b)와 같은 중심편석이 형성되었다. 이러한 중심편석은 용탕주입



(a)

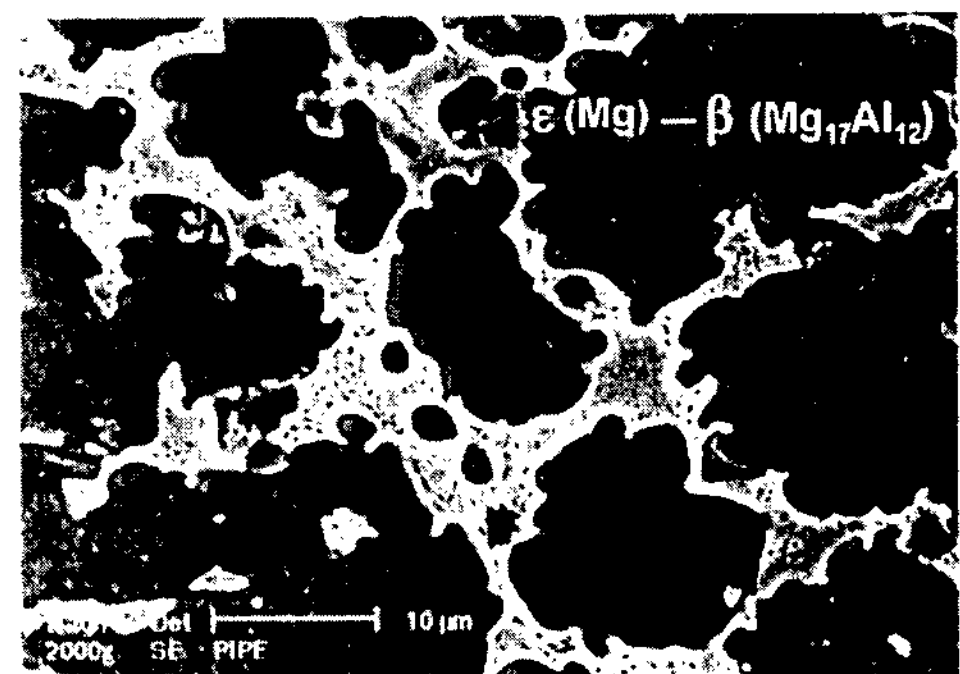


(b)

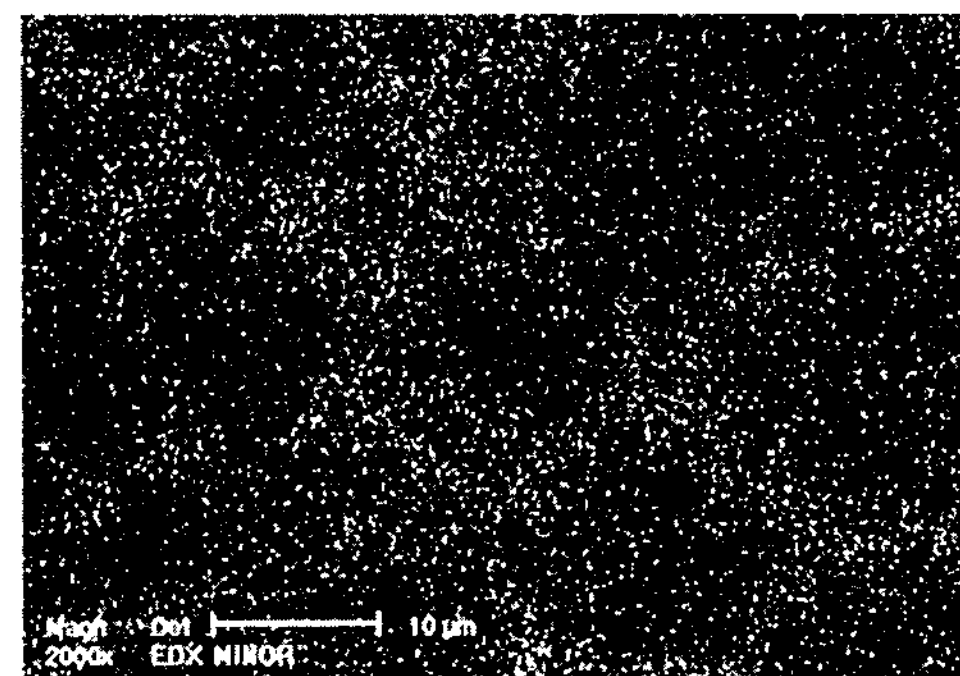


(c)

Fig. 7. Optical microstructures of the typical macrosegregates; (a) eutectic agglomerates including pipe segregation, (b) eutectic agglomerates including centerline segregation, and (c) minor segregation.



(a)

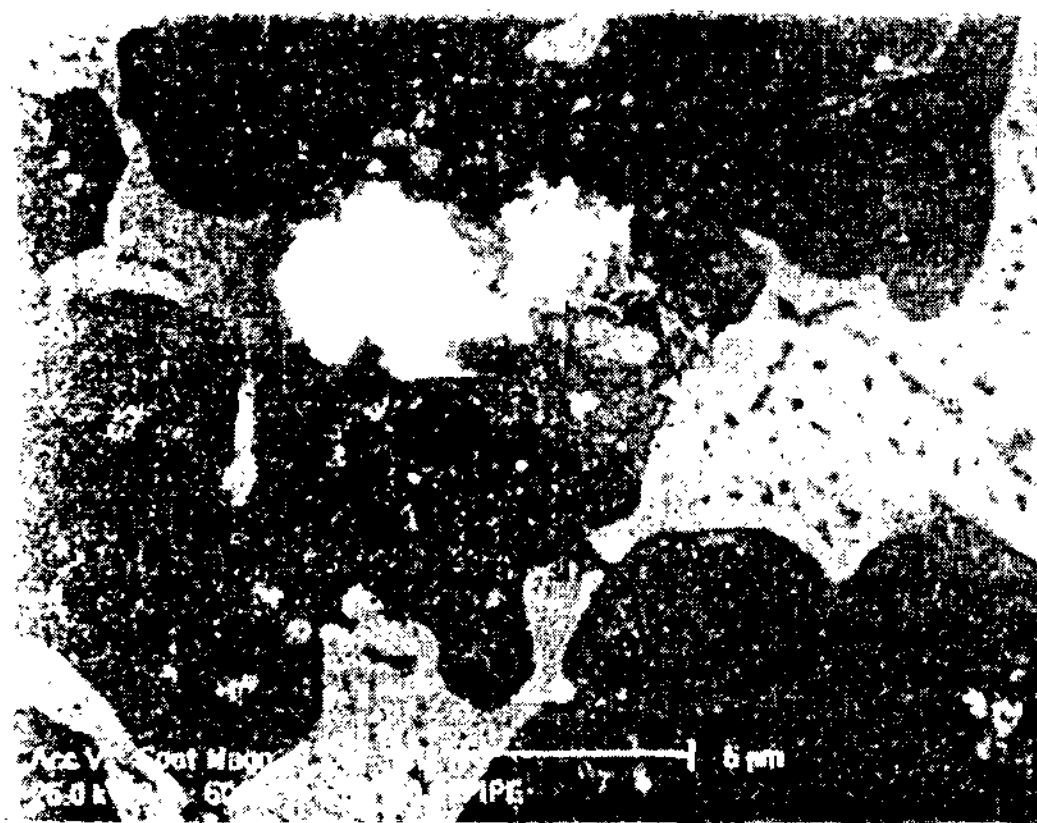


(b)

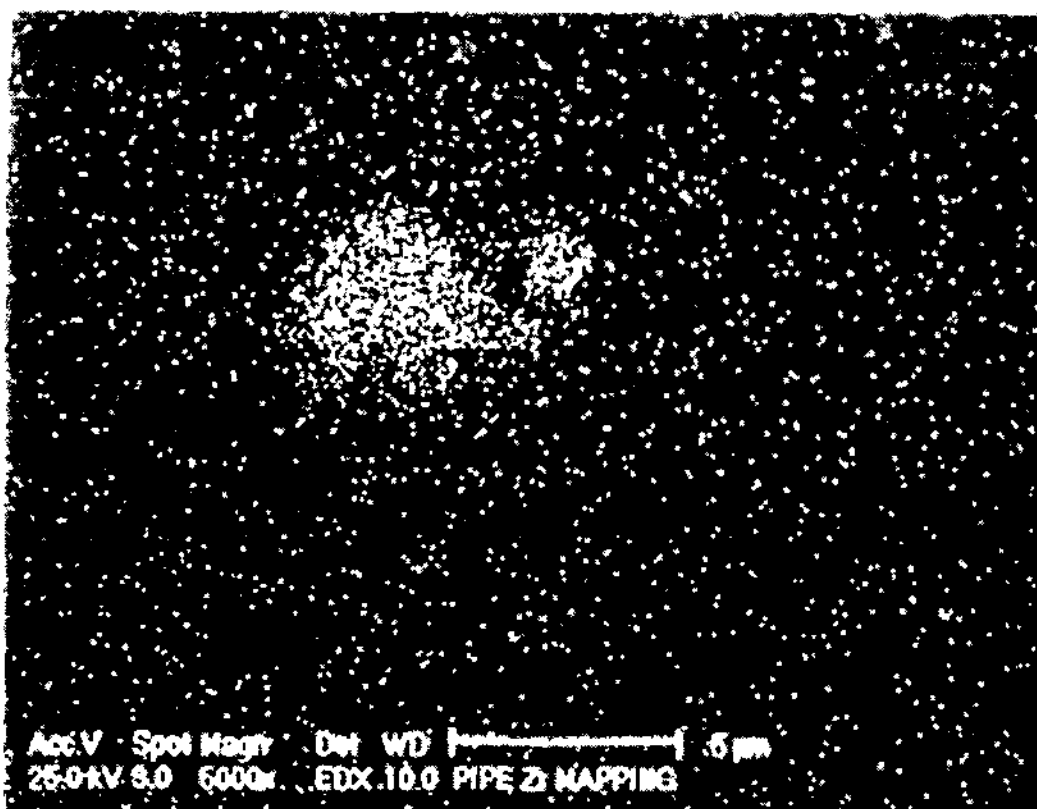
Fig. 8. SEM-EDX analysis of Al : (a) SEM of minor segregation and (b) X-ray mapping of (a).

온도가 높은 경우에 발생하였다. minor segregation은 용탕주입온도 750°C이하에서 건전한 잉고트가 주조되는 상부 T_{M.S.} 및 P_{M.S.} 선과 하부 T_{M.S.} 및 P_{M.S.} 선의 인접한 영역에서 나타났다.

Fig. 7(a), (b), 및 (c)는 Fig. 6(a) pipe segregation, (b) centerline segregation, 및 (c) minor segregation의 편석대에 대한 광학현미경 조직 사진을 나타낸 것으로 어두운 부분이 편석대로써 공정조성을 나타내고 있다. 용탕단조된 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 Al 및 Zr원소의 분포를 알아보기 위해 minor segregation 영역에 대한 SEM 사진과 SEM-EDX mapping한 결과를 Fig. 8 (a) 및 (b) 나타내었다. Fig. 8 (a) SEM 영역에서 Al에 대한 X-ray mapping 결과를 나타낸 (b)에서 편석대는 α(Mg)-β(Mg₁₇Al₁₂) 공정이 존재하고 있으며, Zr에 대한 SEM 관찰결과와 X-ray mapping하여 나타낸



(a)



(b)

Fig. 9. SEM-EDX analysis of Zr : (a) SEM and (b) Zr X-ray mapping.

Fig. 9 (a) 및 (b)를 통해 Zr은 용접차에 의해 완전 고용되지 못하고 미용해되어 존재하는 작은 Zr입자를 제외하고 전반적으로 미세하게 분산되어 존재하고 있음을 알 수 있다.

4.2 주조결함의 방지

용탕단조시 거시편석의 방지에 대해 일부 연구자들이 Al-Cu합금 연구를 통해 몇 가지 방안을 제시하였다[9-11]. Hong[7] 등은 용탕주입온도와 금형온도를 증가시키며, 가압지체시간을 짧게 하고, 가압력을 적게 할 것을 제안하고 있다.

이러한 연구결과를 바탕으로 제조변수를 다양하게 변화시키며 Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr 합금의 용탕단조시 거시편석 발생에 대한 연구를 수행한 결과 주조결함은 용탕주입온도와 금형온도 그리고 가압력들이 서로 밀접한 연관이 되어 형성되며, 이들 용탕단조 변수에 의해 주조결함 양상이 다르게 나타남을 확인하였다. 편석의 유형은 용탕주입온도와 가압력 금형온도의 영향에 의하여 각각 나타나게 되는데 용탕온도가 높아질수록 centerline segregation의 형성 영역이 커짐을 확인하였다. 특히 본 연구에서는 개재물 혼입을 억제하기 위하여 주입캡을 사용하여 주조를 한 결과 용탕주입시 금형내 주입되는 용탕온도가 실제 주입온도에 비해 온도저하가 크게 발생하였으며, 이러한 결과로 인하여 건전한 잉고트 제조 영역이 극히 좁은것으로 나타났다. 이는 냉각곡선 실험에서 나타났듯이 액상선(620°C)과 고상선(560°C)사이에서 중심부와 표면부의 온도차가 큰 경우에 중심편석이 나타났는데, 이러한 온도차는 용탕주입온도가 높을수록, 그리고 가압력이 클수록 크게 된다. 따라서 주조결함이 제거된 건전한 잉고트는 가압후 중심부와 표면 부의 온도차가 최소화되는 액상선 직상에서 80 MPa < P < 110 MPa의 가압력을 받을 수 있는 용탕주입 온도 730°C < T_p < 760°C와 금형 온도 180°C < T_D < 250°C에서 용탕단조 변수들의 적절한 조합에 의하여 제조할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 용탕단조시 용탕주입 온도, 금형온도, 가압력등의 제조변수가 잉고트의 건전성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론

을 얻었다.

1) Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금 용탕단조시 나타나는 편석은 centerline segregation, pipe segregation, 및 minor segregation의 3가지 형태였으며, Al 합금에서 나타나는 V-type channel segregation은 나타나지 않았다.

2) 가압지체시간을 고정하고 용탕단조하여 나타난 수축공과 편석은 용탕주입온도, 가압력, 금형 온도의 복합적 작용에 의하여 형태와 크기가 결정되었으며, 용탕주입온도 780°C 이상 높은 곳에서는 centerline segregation만이 존재하였다.

3) 필터가 장착된 주입컵의 사용으로 금형내 용탕 온도는 용탕주입온도가 낮을수록 온도저하가 크게 나타났으며, 액상선 직상에서 가압을 시작함으로써 건전한 잉고트를 제조할 수 있는 용탕주입온도는 760°C 이하였다.

4) Mg-5wt%Al-0.6wt%Zr합금의 용탕단조시 건전한 잉고트는 제조변수별로 $80 \text{ MPa} < P < 110 \text{ MPa}$, $730^\circ\text{C} < T_p < 760^\circ\text{C}$, $180^\circ\text{C} < T_d < 250^\circ\text{C}$ 에서 제조되었으며, 용탕주입온도가 증가함에 따라 건전한 잉고트 제조 영역이 감소하였다.

본 연구는 과학재단 특정기초연구비(과제번호:96-0300-09-01-3)지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Chadwick : IBF Conf. Paper, November (1986) 446-451.
- [2] Yasuhisa Kaneto, Hideki Murakami, Kunio Kuroda and Shingo Nakazaki : Foundry Trade Journal, Feb. (1980) 397.
- [3] 한요섭, 김도향, 이호인 : 주조 Vol. 6 (1986) 116.
- [4] 藤井 則久, 岡田 千里, 森本 庄吾, 井 満 : 輕金屬, Vol. 33, No. 7, (1983) 392.
- [5] 鈴木 鎮夫, 西田 義則, 自柳 格, 井 況 紀久, 松原 弘美 : 輕金屬, Vol. 31, No. 4 (1981) 72.
- [6] C. P. Hong, I. S. Cho, and H. F. Shen : Proc. 3rd Int. Conf. on Modeling of Casting and Solidification Processes-III, B. Liu *et al.*, eds., Beijing, (1997), 19.
- [7] C. P. Hong, H. F. Shen, I. S. Cho : Metall. Mater. Trans. A, Vol. 29A (1998) 339.
- [8] 한창화, 황영하, 김영우, 김도향, 홍준표 : 주조 Vol. 17, No. 3, (1997) 267.
- [9] M. Gallemeault, G. Durrant, and B. Cantor : Metall. Mater. Trans. A, Vol. 27A, (1996) 4121.
- [10] S. Rajagopal and W. H. Altermatt : AFS Trans., Vol. 85(1985) 145.
- [11] T. Rolland, R. Flatval, and L. Arnberg : Mater. Sci. Eng., Vol. A173 (1993) 267.