論 文

$AlSi_7Mg$ 알루미늄 합금의 초정 구형화에 대한 주조조건의 영향

한요섭† · 이호인 · 이재철

Effect of the Casting Conditions on the Globulization of Primary Al of $AlSi_7Mg$ Alloy

Yo-Sub Han†, Ho-In Lee and Jae-Chul Lee

Abstract

Semisolid forming requires alloys with non-dendritic microstructure of the thixotropy. Recently, low pouring temperture method without stirring, i.e. liquidus casting has been found out new fabrication method of the semisolid metals. Effects of melt superheat and mold conditions on the globulization of primary Al of $AlSi_7Mg$ alloy were investigated in gravity casting process without stirring. The microstructures of primary Al as function of melt superheat and mold temperature show globular, rosette and dendritic shapes. The conditions for globular microstructure of primary Al were low melt superheat < 35 K and low mold temperature < 500 K. The thermal conditions for globular microstructure of primary Al were undercooled melt at early solidification stages and slow cooling < 0.6 K/s. It was found that the initial microstructure was maintained throughout the solidification and the globules of primary Al can be obtained by high nucleation of fine and spherical nuclei due to enhanced undercooling of melt.

(Received November 29, 2002)

Key words : Semi-solid forming, Globulization of primary Al, $AlSi_7Mg$ alloy, Casting condition

1. 서 론

전통적으로 금속재료 성형은 고체나 액체 상태에서 이루어져 왔다. 그러나 70년대 초에 MIT에서 용융금속을 고액 공존영역에서 교반시에 초정이 일반적인 수지상정에서 구형화 입자상으로 형상이 변화하였으며, 수지상 응고재에 비하여 점성이 크게 감소하는 현상이 보고[1]되었다. 그 결과 구형화된 반고상 금속에서 나타나는 의가소성 및 틱소트로피(Thixotopy) 특성으로 인하여 일반 용융금속과 같이 고압주조 및 성형이 가능하게 되었다. 반고상 성형을 위한 조직적 요구조건은 초정이 구형화 및 입상정으로 액상기지 중에 균일하게 분산 분포하는 것이다. 이러한 구형화 초정을 가지는 반고상 금속을 제조하는 방법으로서 초기는 기계적 교반에 의하여 용탕에서 직접 제조하는 레오성형법(Rheocasting)이 주로 이용되었고 80년대 이후는 전자기를 이용한 비접촉식 교반(Electro Magnetic Stirring)으로 반고상 성형용 빌렛을 제조하고 이를 재가열하여 구형화된 반고상 금속을 제조하는 틱소법 (Thixocasting)이 주로 사용되어 왔다[2,3].

최근 무교반으로 용융상태에서 직접 구형화 반고상 슬러리(slurry)를 제조하는 방법들이 보고되고 있다. 그 방법으로서 저온주입[4], 경사냉각법[5], 결정립 미세화제 첨가법[6], 초음파 진동법[7] 등이 있다. 그 중에서 UBE의 NRC(New Rheo Casting)법이 대표적이다[8,9]. 이 경우 슬러리 제조용 주형컵에 용융금속을 기울여 주입하고 적절한 냉각과 고액온도구간에서 유지를 통하여 구형화 반고상금속 슬러리를 제조하고 있다. 이러한 무교반식 반고상 슬러리 제조 특히 저온 주입이나 냉각제어를 통한 구형화 조직의 제조에 대하여서 보고되고 있으나 그 조직형성 기구나 조직형성에 대해서 구체적으로 규명되지 않고 있다.

한국과학기술연구원 재료연구부(The Department of Materials, Korea Institue of Science and Technology)
†E-mail : lmhan@kist.re.kr

본 연구에서는 대표적인 반고상 성형소재인 A356 Al 합금을 무교반하에서 용탕을 반고상 성형용 주형에 주조하는 방법으로 용탕과열도를 중심으로 초정 구형화 형성에 대한 주조조건의 영향을 조사하였다. 응고시의 시편의 응고냉각과정을 열분석하였으며 응고 중에 급냉조직을 얻어서 초정의 성장 및 천이과정을 조사하고 그 형성 기구를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 초정 구형화를 위한 응고시료 제조

실험에 사용한 알루미늄 소재는 A356 (Al-7%Si-0.4%Mg) 합금이다. 반응고 금속시료의 제조장치는 그림 1에 나타나 있다. 반응고금속 제조용 컵의 재질은 SKD61 금형강이며 원통형 구조로서 내경 45 mm, 길이 100 mm, 주형 두께는 3 mm이다. 금형 컵에 용융금속을 주입하고 응고시료중심에 CA열전대를 설치하여 응고열분석을 하였다. 주조조건으로서 용탕과열도(melt superheat)를 5~85°C 범위로 변화시켰다. 주형온도는 상온에서 450°C까지 변화시켰다. 응고 냉각시에 자연 공냉과 세라믹단열재로 주형표면을 단열처리하여 서냉 응고의 영향을 살펴보았다.

초정의 구형화 과정을 분석하기 위하여 초정 응고구간 즉 액상선 온도에서 공정온도까지 냉각 중에 응고시료를 내경 6 mm의 동 파이프로 채취하였다. 일부 응고시료들은 응고조직에서 Al-Si 공정상이 조대하여 초정의 구형화도를 조사가 어려워서 전기로에서 584°C로 반고상 상태로 재가열하고 조직을 관찰하였다. 얻어진 시료에서 표면과 중심부의 미세조직 차이는 크지 않았다. 다만 주형(컵)온도가 상온인 경우 표면에서 급냉이 커져서 5 mm 까지는 미세 칠(chilled)조직이 나왔고 그 안에는 중심부와 같은 조직들이 나타났다.

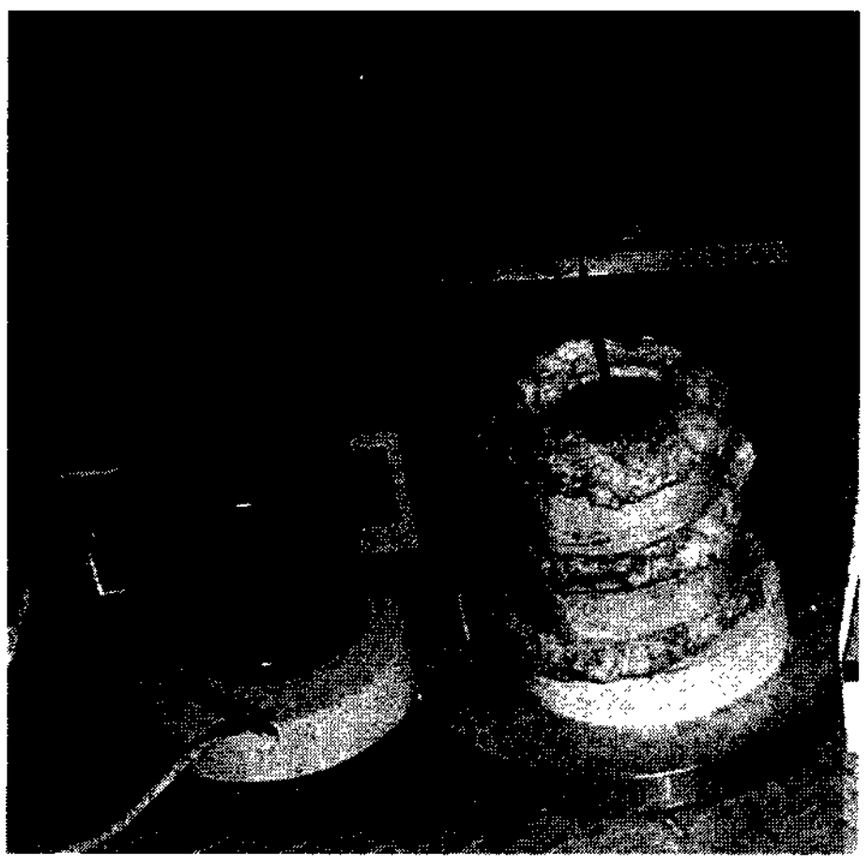

Fig. 1. Experimental apparatus.

2.2. 초정의 구형화 분석방법

각 응고 시편의 중심부의 조직을 현미경으로 관찰하였다. 제조된 반응고 및 재가열 시료들에서 광학현미경으로 초정 조직을 컴퓨터 화상이미지로 얻었고 이것을 정량조직해석 프로그램인 Image-Pro Plus (Image & Graphics, Inc.)에 적용하여 초정의 구형화도(roundness, R)와 초정 입자 평균 크기(D)를 자동 측정 및 분석하였다. 초정의 구형화도는 관찰상의 면적과 외주면에서 추정된 구형화 면적의 비율로 표시되고 평균 입자크기는 측정된 입자의 면적에서 원형으로 환산된 입자 직경으로서 이들의 수식은 다음과 같다. 구형화도는 완전히 원이 되면 1이 되고 형상이 복잡해질수록 1보다 커지게 된다. 여기서 구한 평균 입자크기는 측정된 입자상의 원형으로 환산된 값이기에 일반적으로 수지상 조직의 수지상정간격(Dendrite Arm Spacing, DAS)에 비하여 조대하게 나타난다. 각 시료에서 정량적 조직분석에 통계처리된 입자수는 최소 100에서 최대 250개가 되며 15 μm 이하의 입자는 제외시켰다.

· 구형화도(Roundness) $R = \frac{L^2}{4\pi \cdot A}$ (1)

· 평균입자 직경(Diameter) $D = \sqrt{\frac{(4 \cdot A)}{\pi}}$ (2)

여기서 L 초정 외곽길이, A 초정면적

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 반응고 슬러리의 열분석

응고 냉각시의 온도 변화들은 응고과정에서 발생하는 현상을 규명하고 제어하는데 중요한 요소이다. 그림 2는 주형온도 450°C, 자연 공냉조건에서 용탕과열도(합금소재의 액상선온도로 부터의 과열도)를 75, 35, 15°C한 경우에 측정된 응고 냉각곡선들이다. 용탕과열도가 75°C(용탕온도 690°C) 인 경우, 용탕은 주형 내에 주입직 후 최고온도가 650°C로 액상상태로 나타났다. 이후 냉각이 되고 용탕은 액상선온도에 이르고 냉

각속도가 감소하였다. 이것은 응고가 시작되면서 방출되는 응고잠열로 서냉이 된 것이다. 시료가 공정온도에 도달하여서 등온 냉각이 되었고 응고가 완료된 후에는 냉각속도가 증가하며 고상 냉각이 나타났다. 이러한 응고냉각 거동은 전형적인 주조조건에서 나타나는 열분석 현상이다. 용탕과열도가 35°C(용탕온도 650°C)인 경우, 주형내의 용탕 최고온도는 625°C이었고 액상선 온도를 지나면서 응고가 진행되었다. 이때 앞의 용탕과열도 75°C인 경우에 비교하면 액상구간과 초정 응고구간에서 냉각속도는 감소하였다. 용탕과열도 15°C(용탕온도 630°C)인 경우, 주입직후 주형내 용탕 온도는 액상선 온도보다 낮아져서 과냉상태가 되었고 초정의 냉각속도도 증가하였다.

그림 3은 용탕 과열도 35°C, 자연 공냉하에서 주형의 온도별 응고 냉각곡선의 변화를 측정한 결과이다.

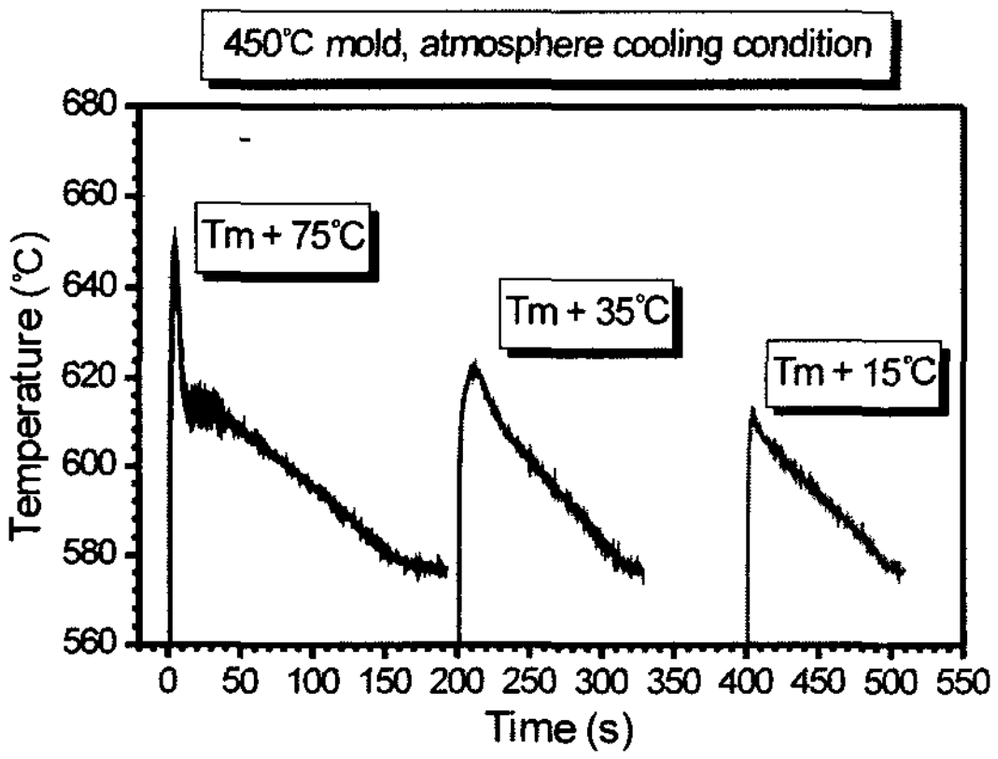

Fig. 2. Effect of melt superheat on cooling curves.

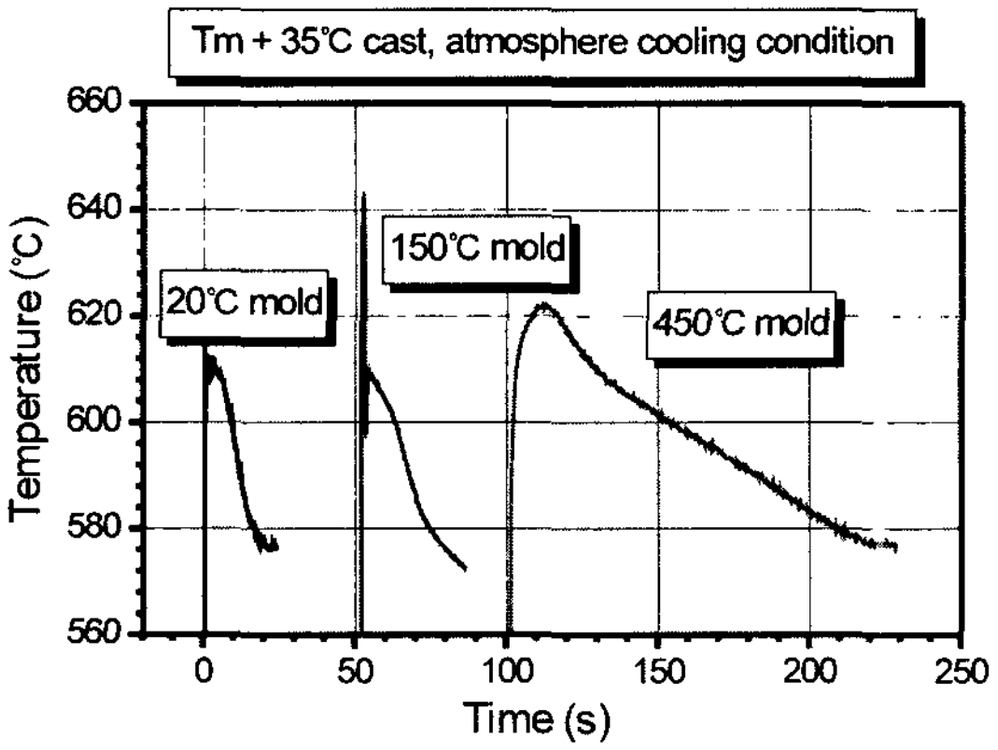

Fig. 3. Effect of mold temperature on cooling curves.

450°C 예열된 주형의 경우, 용탕은 주입직후 20초 이상의 액상상태를 유지하고 액상선온도를 지나면서 초정 응고가 진행되었다. 반면에 25°C 및 150°C 예열된 주형의 경우, 주입직후 용탕의 온도는 액상선온도(615°C) 보다 낮아져서 과냉하에서 응고가 되고 초정의 응고 냉각속도도 크게 나타났다.

그림 2, 3의 응고 냉각곡선들에서 나타난 초정응고의 열적 특성으로서 주조조건 특히 용탕과열도와 주형온도에 따라 주입직후 용탕이 과열(액상선 온도 이상) 또는 과냉(액상선 온도 이하) 상태가 되는 것이다. 그림 4는 주형조건별로 용탕들의 초기온도, 즉 용탕의 최고온도와 액상선온도의 차이에 대한 용탕과열도의 영향을 조사한 것이다. 전반적으로 용탕과열도가 낮을수록 초기 용탕온도는 낮아지고 액상선온도 이하로 내려가서 과냉상태가 되었다. 과냉이 나타나는 조건은 전반적으로 용탕과열도 35°C 이하이며, 주형온도 450°C인 경우는 용탕과열도가 15°C 이하일 때 나타났다.

응고초기는 핵생성이 시작되는 시점이다. 이때 과냉도는 초정 핵생성의 주요 구동력이 되므로 과냉도가 크면 핵생성속도가 커지고 다수의 결정핵들이 생성되어 응고 조직은 전면적인 미세 등축정으로 나타나게 된다. 반면에 용탕이 과열상태를 유지되면 용탕내에 핵생성도 적게 되며 주형벽에서 불균일 핵생성되는 초정들도 고온의 용탕에 의하여 재용해되어 소수의 초정만이 성장하게 되고 조대한 등축정 또는 주상정 조직이 된다. 따라서 과냉이 나타나는 주조조건일 경우, 초기 응고에 미세 등축정의 핵생성이 촉진되므로 초정 구형화 및 입상정조직 형성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

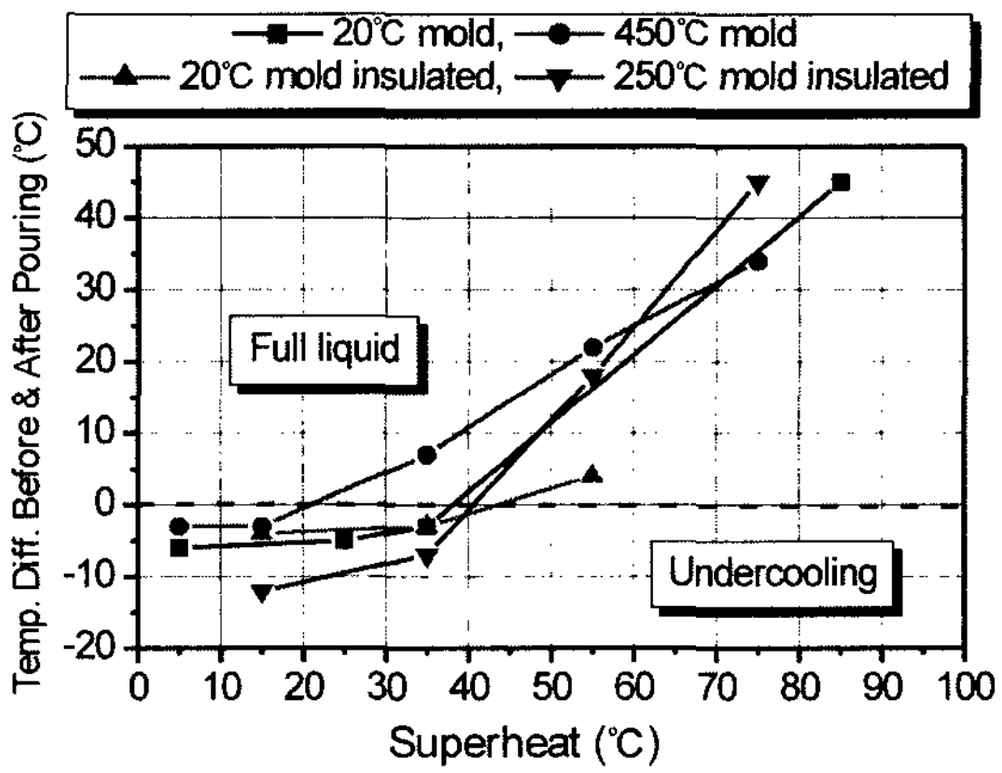

Fig. 4. Initial melt temperatures as a function of the melt superheat and mold conditions.

3.2. 초정 구형화에 대한 주조조건의 영향

상온 및 450°C로 예열된 주형에 주조하고 자연 공냉하는 경우, 초정 응고 조직에 대한 용탕과열도의 영향이 그림 5에 나타나 있다. 상온 주형에서 용탕과열도가 75°C인 경우 초정은 발달된 수지상으로 관찰되었다. 용탕과열도가 35°C로 낮아지면 초정은 수지상에서 구형화가 진행된 입상정(granular)과 장미상정(rosette-like)이 다수 발생하였고 용탕과열도가 5°C로 낮아지면 전면적으로 미세한 구형화 입상정(globular) 조직이 나타났다. 주형온도가 450°C, 용탕과열도가 75°C인 경우, 조대한 수지상정이 관찰되었다. 주형온도 450°C, 용탕과열도 35°C인 경우 등축의 수지상정(equiaxed dendrite)과 장미상정들이 대부분이고 구형화된 입상정은 적었다. 용탕과열도가 5°C인 경우, 구형화 입상정이 나타나기 시작하였고 대부분 장미상정으로 관찰되었다.

상온과 250°C 예열된 주형에 주조하고 단열 냉각하는 경우 초정 조직에 대한 용탕과열도의 영향이 그림 6에 나타나 있다. 690°C 주조 즉 용탕과열도(ΔT)가 75°C인 경우, 상온이나 250°C 예열 주형에서 응고 조직은 앞의 자연 공냉과 같은 수지상정 초정이 관찰되

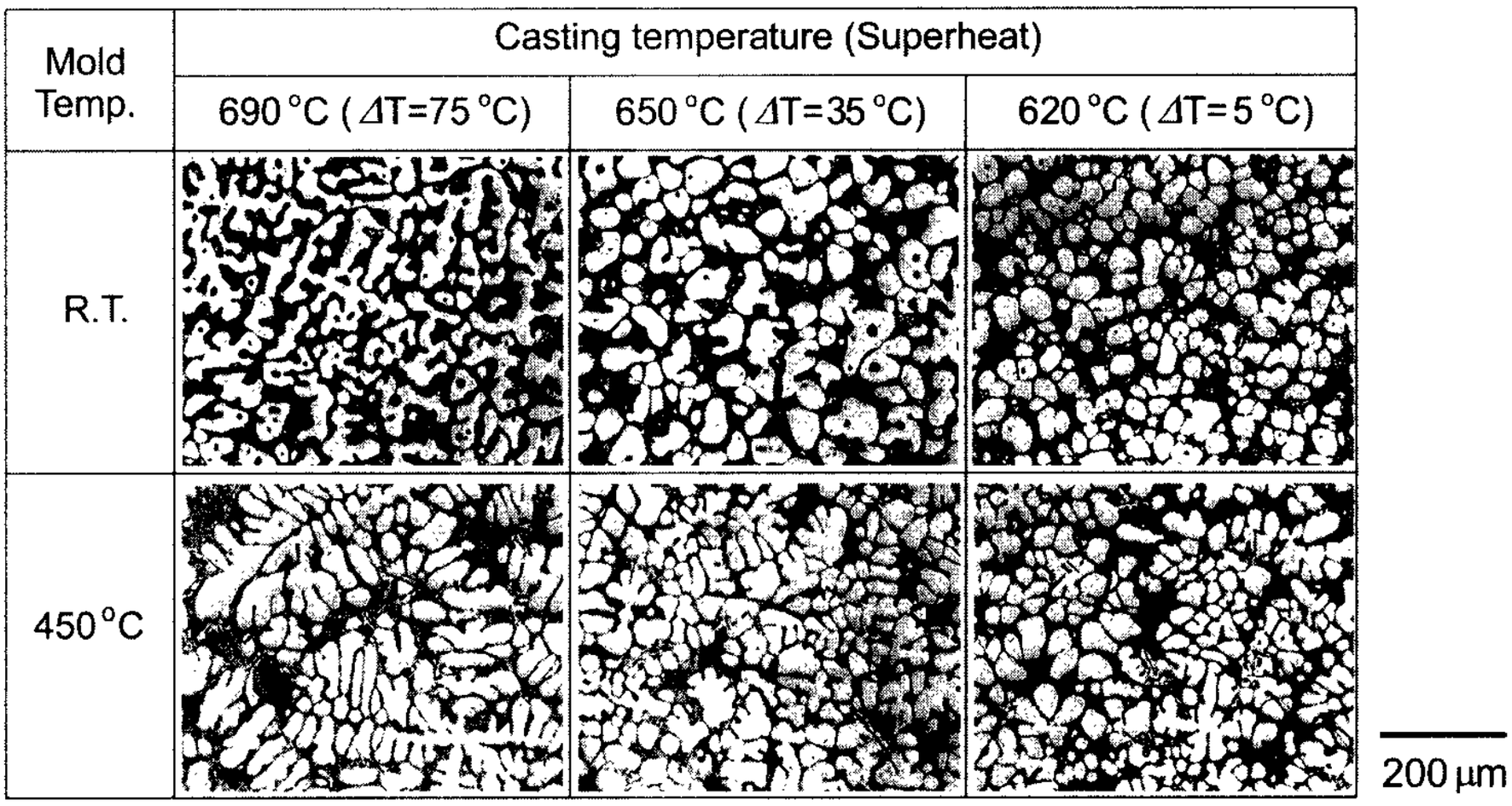

Fig. 5. Microstructures according to the changes of mold temperature and melt superheat.

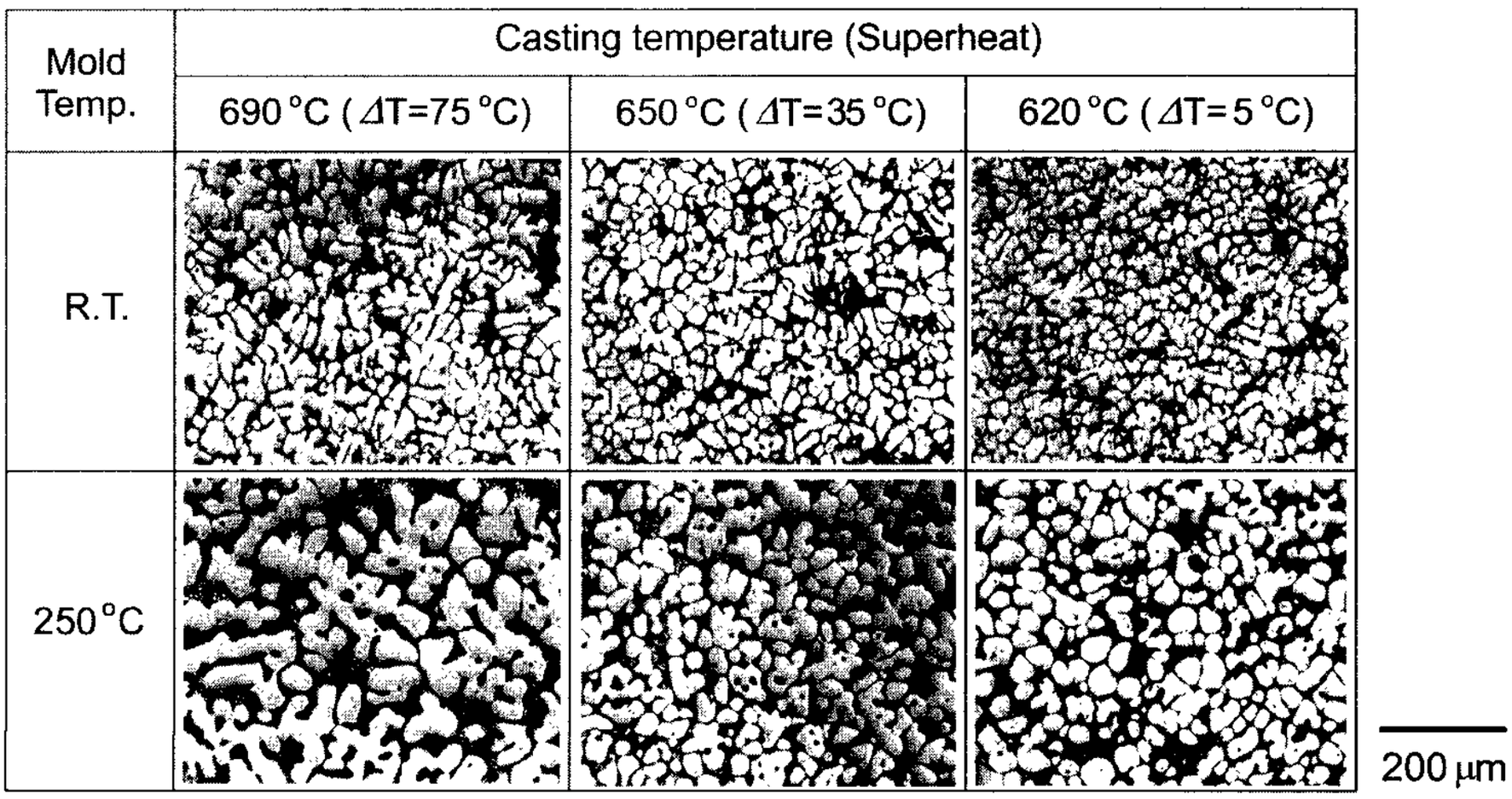

Fig. 6. Microstructures according to the changes of mold temperature and melt superheat in the insulated mold.

었다. 상온보다 250°C 예열시에 조대한 수지상정들이 나타났다. 용탕과열도가 35°C인 경우, 장미상정들이 다수 발생하였고 보다 구형화된 초정 조직들이 나타났다. 용탕과열도가 5°C인 경우, 장미상정과 함께 구형화 입상정들이 관찰되었다. 따라서 구형화 초정의 형성은 앞의 자연 공냉과 같이 용탕과열도를 35°C 이하로 하며, 주형온도는 자연 공냉의 냉각조건인 경우 상온으로 낮게 하는 것이 유리하며, 서냉 냉각의 조건인 경우 250°C로 예열되는 것이 필요하였다.

3.3. 초정의 구형화 형성

초정은 응고조건에 따라 수지상정, 장미상정 및 구형화 입상정 등의 여러 가지 형태로 나타나고 있다. 이중에서 초정 조직의 구형화 형성과정을 조사하고자 응고 구간 중에 시료를 채취하였다. 용탕과열도 35°C, 주형온도 250°C로 예열하여 단열냉각하는 경우, 응고온도별로 급냉한 초정 조직들이 그림 7에 나타나 있다. 이 응고 조직은 구형화가 진행되기 시작하는 경우로서 응고 초기에서부터 말기까지 초정 조직의 변화 보여주고 있다.

응고온도 610°C(고상율 0.33)의 경우 이미 구형화 입상정과 장미상정들이 비슷한 비율로 생성되어 있으며 등축정 응고조직이 나타났다. 보다 냉각이 되어 594°C(고상율 0.57)인 경우, 610°C와 거의 같은 조직적 특성을 보이며 고상율이 증가하여 구형화상과 장미상정의 양이 증가하였고 조대화가 되었다. 583°C(고상율 0.7) 인 경우, 초정 응고가 말기가 되며 조직형상은 보다 구형화가 진행되고 장미상정의 비율이 감소하였다. 응고 완료된 조직은 583°C 조직에 비하여 구형화 입상정과 장미상정이 혼재된 양상이 계속되면서 크기가 조대화 되었다.

따라서 초정의 구형화 형성과정에서 초기 조직이 최종 응고조직을 좌우하고 있다. 즉 구형화 조직 혹은 수지상이 발달한 일반 주조조직의 형성여부는 응고초기의 형성되는 조직 상태가 미세한 등축정 또는 구형화 상들의 안정적인 형성에 의하여 결정이 되었다.

3.4. 초정조직의 구형화 제조조건

그림 8은 용탕과열도 및 주형온도에 따른 구형화 조직 형성영역을 조사한 것이다. 각 주조조건에 따른 응고조직들의 구형화도(R)를 정량적 조직분석으로 측정하였다. 반고상 성형용 구형화도(R)의 기준으로서 틱소성형이 가능한 구형화는 1.7 이하가 적절하다는 보고[10]가 있다. 또한 수지상과 장미상정의 경계는 구형화 2.4 이며 입상정의 반고상 성형조직은 1.6 이하가 적절하다는 보고도 있다[11]. 이러한 구형화도의 기준을 고

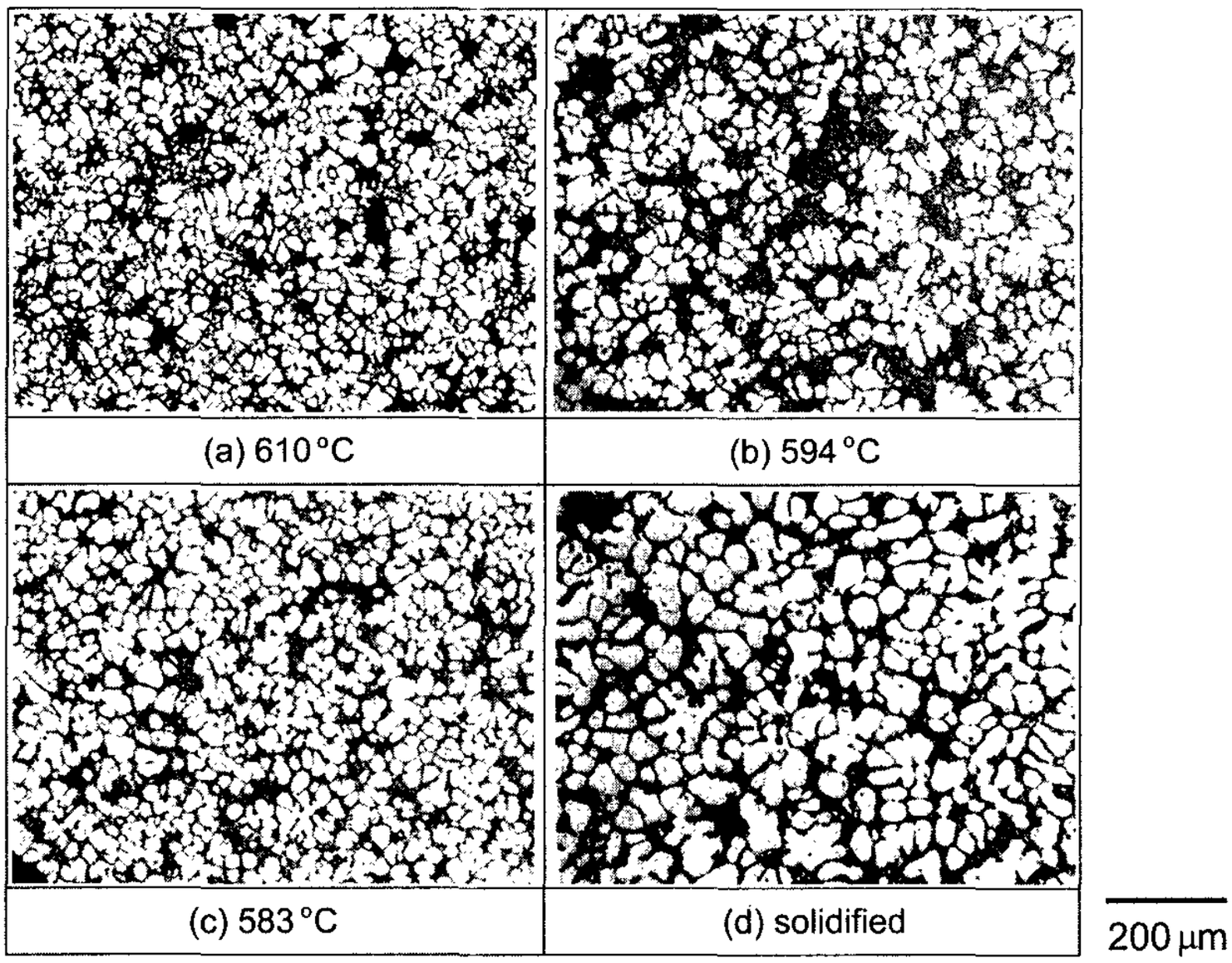

Fig. 7. Microstructure of interrupt quenched A356 Al alloy in insulated mold (superheat : 35°C, mold temperature : 250°C.

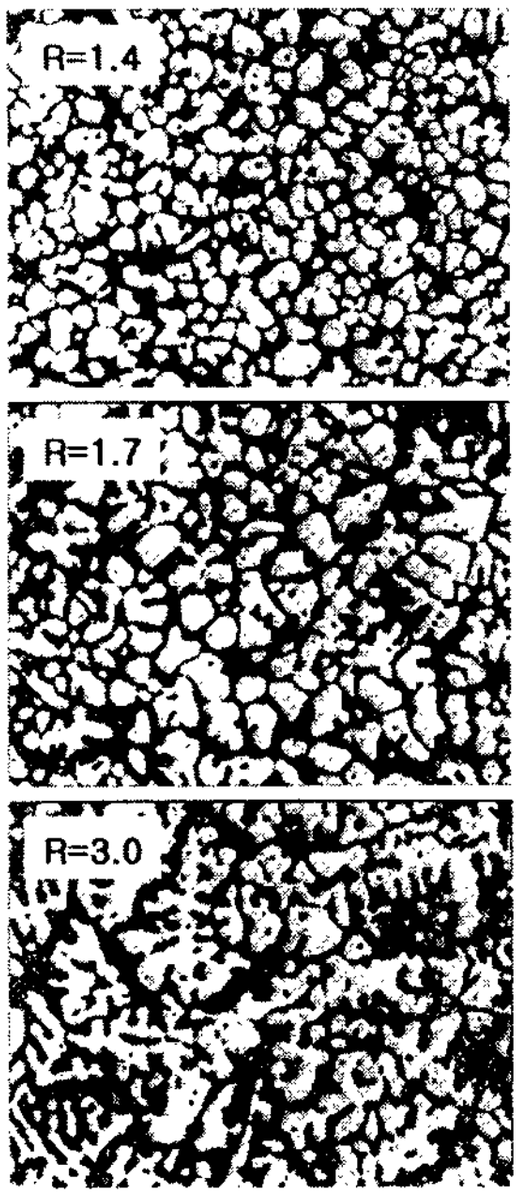

Fig. 8. Microstructures map as a function of melt superheat and crucible temperature.

려하여 보면 본 실험의 조직도 동일한 특성을 나타나고 있었다. 즉 구형화도 2.4 이상의 조직들은 전형적인 수지상정이 발달하였고 반용융으로 재가열하여도 구형화 조직이 되지 않았다. 그리고 구형화도가 1.7 이하에서는 거의 대부분이 구형화가 이루어져 틱소성형 즉 반고상 성형이 가능한 조직으로 나타났으며 구형화도가 1.7-2.4 이내에서는 장미상정이 주가 되었다. 따라서 반고상 성형에 적절하다고 판단되는 구형화 조직의 제조 조건영역은 용탕과열도 35°C 이하, 주형온도 250°C 이하의 모서리 부분이며 여기서 온도가 증가하면 장미상정 조직으로 변화하고 더 증가하면 수지상정 영역이 되었다. 단열 냉각으로 냉각속도를 보다 낮추면 초정 구형화 영역이 보다 넓어져서 반고상슬러리 제조에 유리하게 나타났다.

한편 동일한 주조조건에서도 주조시료의 크기나 형상이 달라지면 응고 특성도 변화한다. 따라서 주조 치수나 형상에 관계없이 응고 조건 즉 초기 용탕온도와의 관계를 살펴 볼 필요가 있다. 그림 9는 구형화도에 대한 초기 용탕온도의 영향을 보여 주고 있다. 주입직후 용탕온도가 과냉이거나 액상선온도 근처일 때에 구형화도 2 이하의 양호한 반고상 조직들이 형성되었고, 용탕이 과열인 경우 대부분 수지상정이 발달한 일반

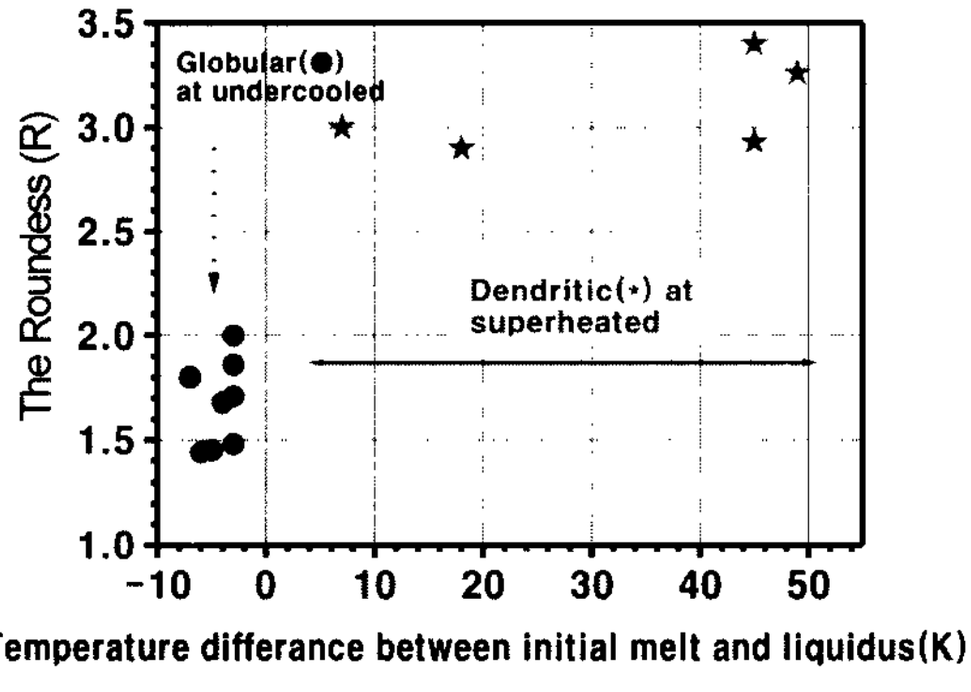

Fig. 9. Effect of initial slurry temperature on roundness.

고조직으로 나타났다. 따라서 구형화 초정조직을 가지는 반고상 성형용 슬러리 및 반고상 금속을 얻기 위해서는 초기 과냉응고가 얻어지는 공정 및 주조조건으로 제어하는 것이 중요하다.

4. 결 론

무교반으로 A356 합금의 반응고 성형용 슬러리 제조를 위해 초정 구형화에 대한 용탕과열도를 비롯한 주형온도, 주형냉각의 영향을 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 용탕 과열도 35°C 이하, 주형온도 250°C 이하로 주조시에 주형내에서 과냉응고가 진행되었고

주형온도가 450°C 경우는 과냉 응고가 나타나는 용탕과열도 한계는 15°C로 감소하였다.

2) 초정 냉각속도는 주형온도가 낮을수록 , 주형냉각이 클수록, 용탕과열도가 적을수록 증가하였다. 단열냉각 주형에서는 용탕과열도에 따른 응고냉각속도는 거의 변화가 없다.

3) 초기 용탕이 과냉응고가 되는 조건에서는 구형화도 1.7 이하의 양호한 구형화 초정 조직이 얻어졌다. 초기 응고온도가 융점이상이 높아져 과열상태가 되면 초정은 장미상정이 되고 높은 과열상태에서는 수지상정이 발달하였다.

4) 구형화 조직의 형성은 응고초기에 과냉에 의한 미세 구형화 상의 핵생성으로 결정되고 응고 성장중에는 그 형상들이 크게 변하지 않았다.

참 고 문 헌

[1] D. B. Spencer, R. Mehrabian, M. C. Flemings : "Rheological Behavior of Sn-15 Pct Pb in the Crystallization Ranges", Metall. Trans. 3(1972), 1925-1932.

[2] M. C. Flemings : "Behavior of metal alloys in the semisolid state", Metall. Trans. A22(1972), 957-981.

[3] W. R. Loue, M. Brimint, C. Pluchon, P. Y. Menet and M. Garat : "Metallurgical Aspects of Thixoforming of A356.0 Alloys", Trans. 18th Int. Die casting Congress & Exposition, (1995), 389-396.

[4] R. Shibata, T. Souda and T. Kanauchi : J. Jpn. Inst. Light Met., 47(1997), 651-652.

[5] T. Motegi, K. Kondou, R. Chi and S. Aotama : 4th Decennial Int. Conf. on Solidification Processing (1997), 14-16.

[6] G. Wan, T. Witulski and G. Hirt, "Thxoforming of Aluminium Alloys Using Modified Chemical Grain Refinement fir Billet production", Metallurgia Italiana, 85(1994), 29-36.

[7] C. Liu, Y. Pan and S. Aoyama : "Microstructure Evolution of Semi-Solid Al-7Si-0.4Mg Alloy by Short Time Supersonic Vibrations", 5th Int. Conf. on the Semi-Solid processing of Alloys and Composites, (1996), 439-447.

[8] M. Adachi ; "Characteristics of UBE Rheocasting Process", Conference Proceedings of Japan Die Casting Association, JD98-19, (1998), 123-128.

[9] H. Kaufmann, H, Wabusseg and P. J. Uggowitzer ; "Metallurgical and Processing Aspects of NRC Semi-Solid Casting Technology", Aluminium, 76 Jg., (2000), 69-75.

[10] T. Witulski, U. Morjan, I. Niedick and G. Hirt, "Thxoformability of Aluminium Alloys", 5th Int. Conf. on the Semi-Solid processing of Alloys and Composites, (1996). 353-360.

[11] K. Xia and G. Tausig , "Liquidus Casting of a Wrought Aluminum Alloy 2618 fir Thixoforming", Materials Science and Eng. A246(1998), 1-10.