

論 文

Al-Si이원계 합금의 응고현상에 미치는 정수압의 영향(I)*

— 금속 조직적 연구 —

韓堯燮** 金道鄉** 李浩仁**

Effects of Hydrostatic Pressure on Solidification Phenomena of Al-Si binary alloys (I)

- Metallurgical Study -

Y.S.HAN, ** D.H. KIM.** and H.I. LEE.**

ABSTRACT

The effects of pressure during solidification on macro-and micro-structures have been studied in pure aluminium and Al-Si alloys. The application of pressure during solidification accelerated both equiaxed and columnar dendritic growth due to stimulating of equiaxed survival and faster preferential growth of primary dendrites against the parallel direction of heat flow. Burden-Hunt model was modified to express the significant changes of CET behaviours under pressure. A further point to be noted was that greatly fine eutectic silicon flakes (0.5 x 13µm) with the decrease of halo layers (7µm) of aluminium riched phases in the periphery of primary silicon particles were observed when pressure was applied during solidification.

1. 서 론

가압응고 현상에 대한 연구는 1931년 G.welter¹⁾에 의해서 시작된 이래, 고품질의 주물제조라는 공업적 장점에 의하여 주목을 받고 있으며 가압시 응고조직 및 물성변화에 대해 주로 연구되어져 왔다.

Suzuki²⁾ 등은 각종 Al합금에서 가압응고재료의 기계적 성질들을 보고 하였으며, Nisihida³⁾ 등은 계면열저항의 변화를 통하여 가압력의 영향을 조사하였고, Oya⁴⁾ 등은 Al 및 Cu합금들의 가압응고조직의 변화를 고찰한 바 있다. 이들의 보고에 의하면, Oya 등은 가압응고가 Columnar-equiaxed transition (CET, 라 약칭) 현상을 촉진한다고 하였으며, 이에 반해서 Fujii 등은⁵⁾ 가압응고는 CET를 억제하고 주상정성장을 촉진시킨다고 하였다. 이러한 상이한 연구에서 미루어 보아서 가압응고조직 및 현상에 대한 규명이 되지 않고 있다.

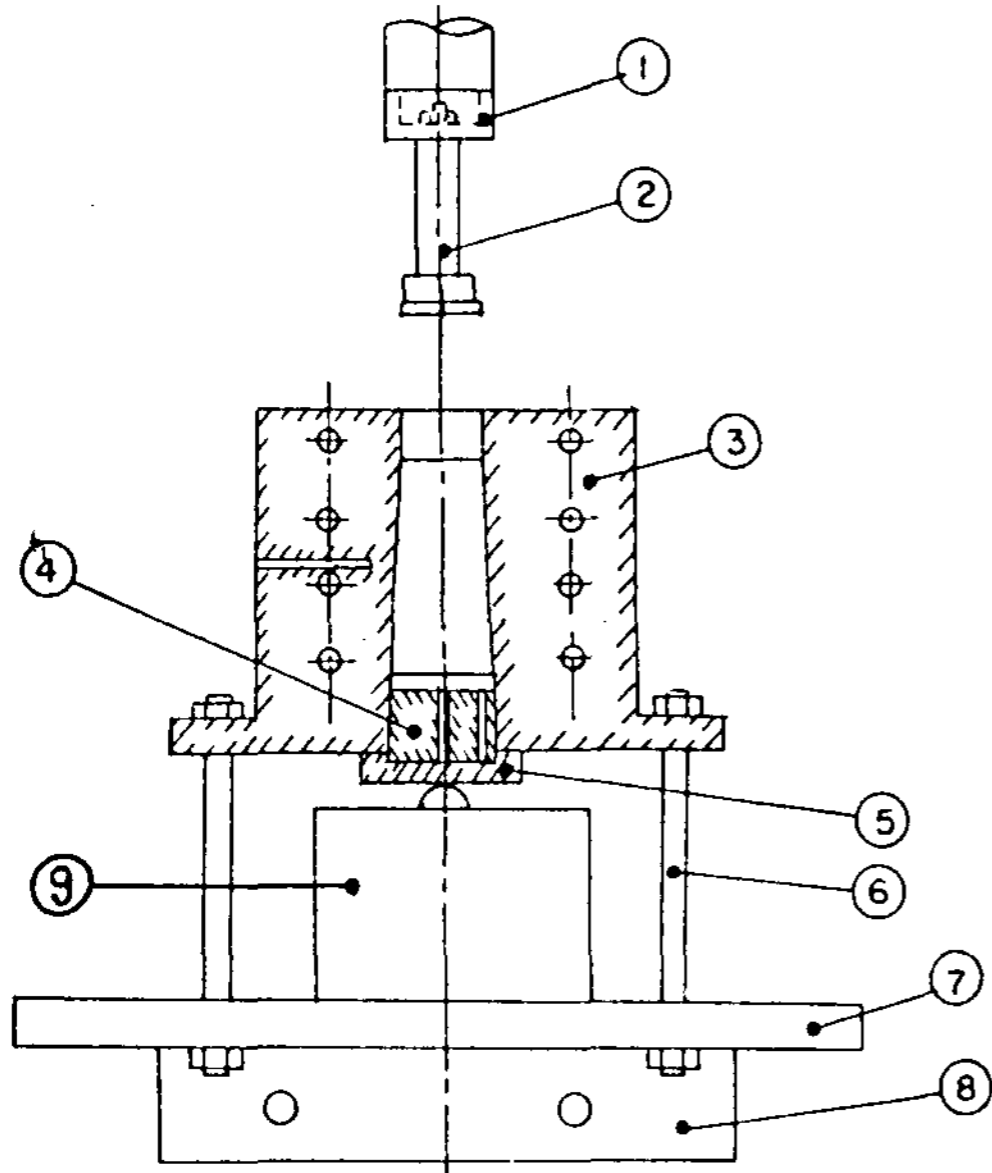
본 연구는 공업적으로도 중요하며 다양한 응고특성을 나타내는 nonfacet-facet 공정계인 Al-Si 이원계합금과 pure Al을 시료로 택하여서 각각 중력주조 및 가압응고를 실험하였으며, 그에 따른 냉각곡선의 변화와 응고조직의 macro 및 micro현미경 관찰을 하여 이들의 응고현상에 미치는 가압의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

Fig.1은 본 실험의 가압응고 장치를 개략적으로 도시한 것이다. 가압은 100ton 유압press에 의하여 제공되었으며, load cell로 가압력을 calibration하였다. 사용된 시료는 99.98% 순알루미늄과 3종류 Al-Si 이원계합금들로서, 순알루미늄과 Si을 흑연도가니에 장입하여 저항로에서 용해, 주조하여 제조하였다. 이 시료들을 습식분석한 결과 아공정 조성의 시료에서는 Al-5.4% Si, 공정조성의 시료에서는 Al-12.9% Si, 과공정조성의 시료에서는 Al-20% Si의

* 1985년 학술대회에 발표된 것임.(1985.11. 9)

** 한국과학기술원 재료공학부.



NO	PART
1	PUNCH HOLDER
2	PUNCH
3	CONTAINER; MOLD
4	PLUG
5	PLUG BASE
6	BOLT
7	BASE PLATE
8	BASE HOLDER
9	LOAD CELL

Fig1. Schematic Sketch of Rectangular dies of squeeze casting

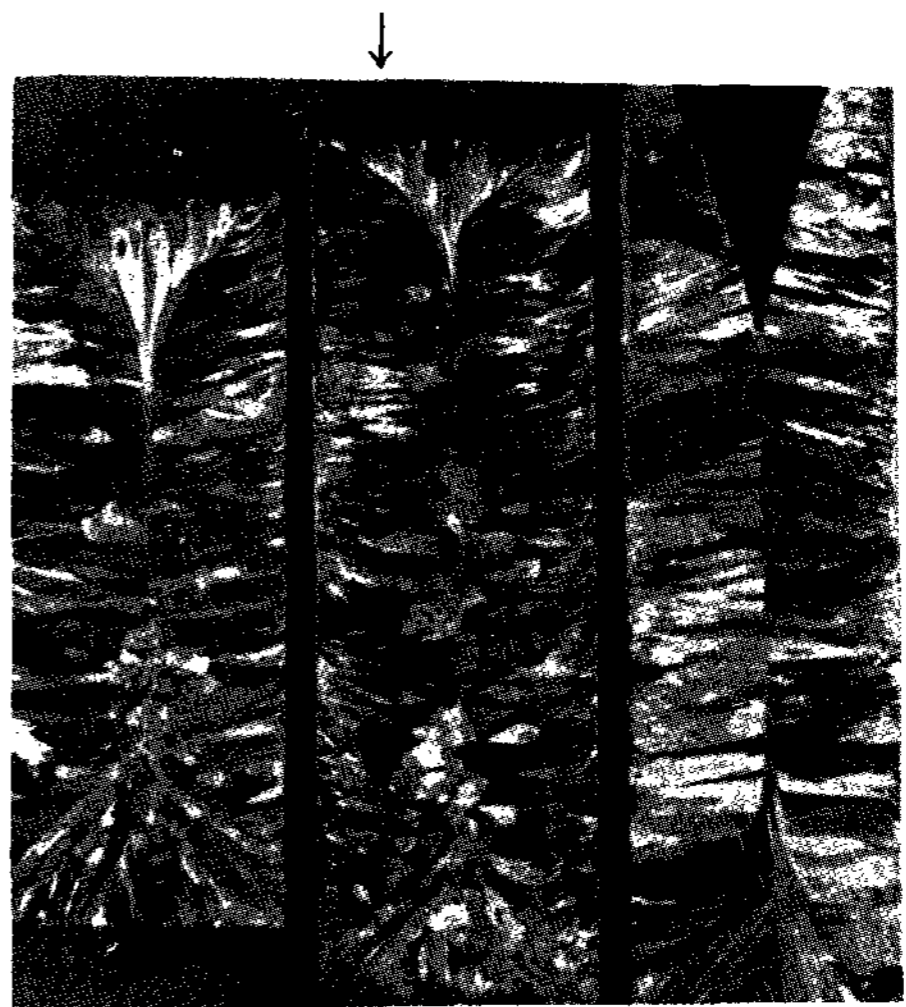
화학적 조성을 가지고 있었다. 이 시료들을 1회 약 500g를 취하여 clay graphite 도가니에 장입하고 전기저항로에서 용해하며, 시료의 조성에 따라 주입온도를 720~840°C로 하여서 탈가스처리나 modification 처리없이 Fig.1의 가압응고 금형안에 주입하였다. 그뒤 곧 유압press를 작동시켜서 가압응고 및 중력금형응고로써 응고를 완료시켰다. 시편의 크기는 60×30×100mm의 직육면체이며, 금형 내면에는 이형재로써 die coat를 피복하였고 금형의 예열은 pipe heater를 그림 1과 같이 금형내부에 설치하여 250°C내외로 유지하였다. 주물과 금형의 온도변화를 조사하기 위해서 $\phi 1mm$ 의 chromel-alumel 열전대를 금형 및 주물내 3군데에 설치하여서 용탕 주입후의 냉각곡선을 각 응고에 대해서 측정하였다. 또한 이들의 응고시료들의 Macro 및 Macro 조직을 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 순 알루미늄의 조직

Fig.2는 중력주조 및 가압주조 한 pure Al의 macro 조직들이다. 중력주조 조직은 전면적으로 주상정이 발달하였으나, 가압응고에 의해서 주물의 하부중심에 등축정조직이 나타났으며 주상정조직은 미세화되었다. 이것은 가압이 주상정의 성장을 촉진시키면서, 등축정의 생성과 성장을 함께 촉진시키는 효과가 있음을 말하고 있다.

Direction of Applied Pressure



a. High Pouring temperature (830°C), 2,000kg/cm²
 b. Low Pouring temperature (740°C) 2,000kg/cm²
 c. High Pouring temperature (840°C), 0kg/cm²

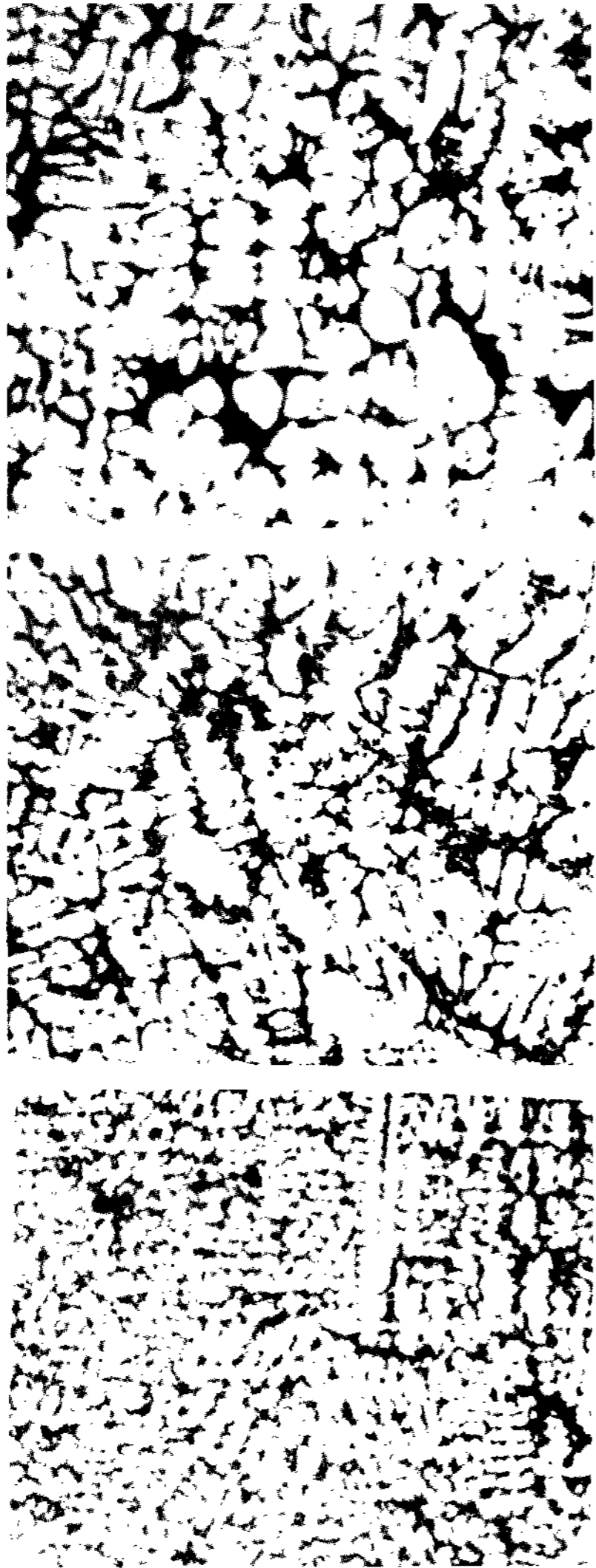
Fig 2. Macrostructures of pure Aluminum ($\times \frac{2}{3}$)

중력주조시 나타나는 주물상부의 큰 수축공은 가압주조에 의해서 제거되었으며 주물표면도 치밀해졌다.

3.2 아공정 Al-Si 합금의 조직

Fig.3은 아공정 조성의 Al-Si 합금의 micro 조직들이다.

여기서 가압력의 증가는 dendrite arm spacing (DAS라 약칭)를 미세화 시켰으며 1차 dendrite Arm의 열방출 방향에 평행한 방향으로 우선 성장을 촉진시켰다. 또한 응고양식은 mushy mode에서 skin formation mode로 진행시켰다. 특이한 사실은 Fig.4에 보는바와 같이, 1,300kg/cm²의 가압력하에서 주물표면에는 약 100 μ m두께의 역편석층이 나타났으며, 이들은 미세한 공정 Si flake로 구성되어져 있는 것이다. 이층은 저융점의 고농도용질 용탕이 가압



(a) Gravity Casting
 (b) Squeeze Casting under $1,000 \text{ kg/cm}^2$
 (c) Squeeze Casting under $2,000 \text{ kg/cm}^2$

Fig.3 Micro structures of Al-12.9% Si alloy solidified at various pressures with Pouring temperature of 780°C and die temperature of 250°C ($\times 40$)

에 의해서 주형벽의 수축공간 (air gob) 으로 강제 이동되어 발생한 역편석층이었다. 이층은 주형벽에서만 존재하였고 주물의 상부와 하부에서는 나타나지 않았다.

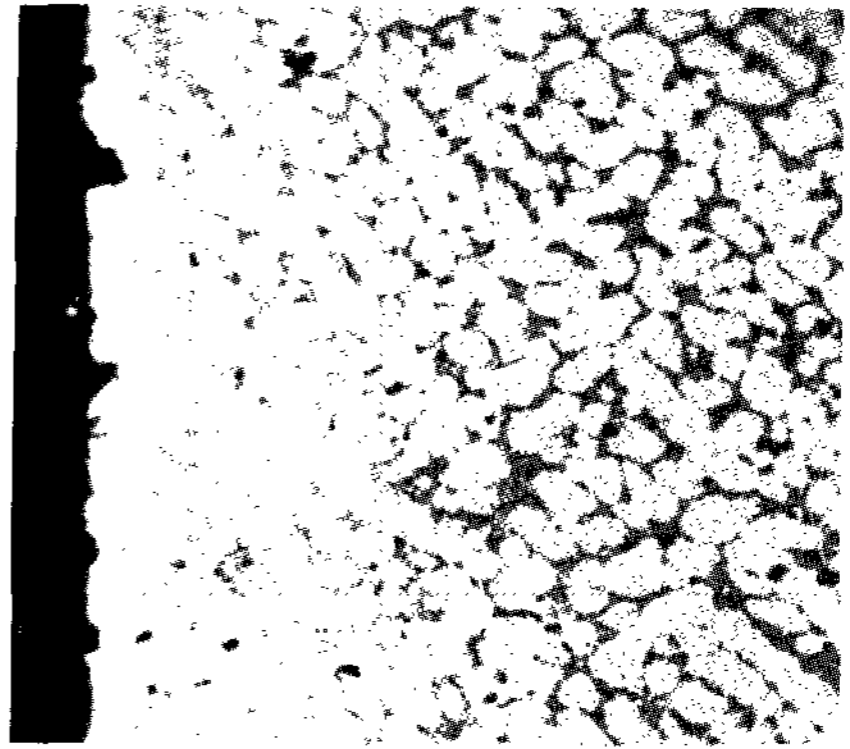
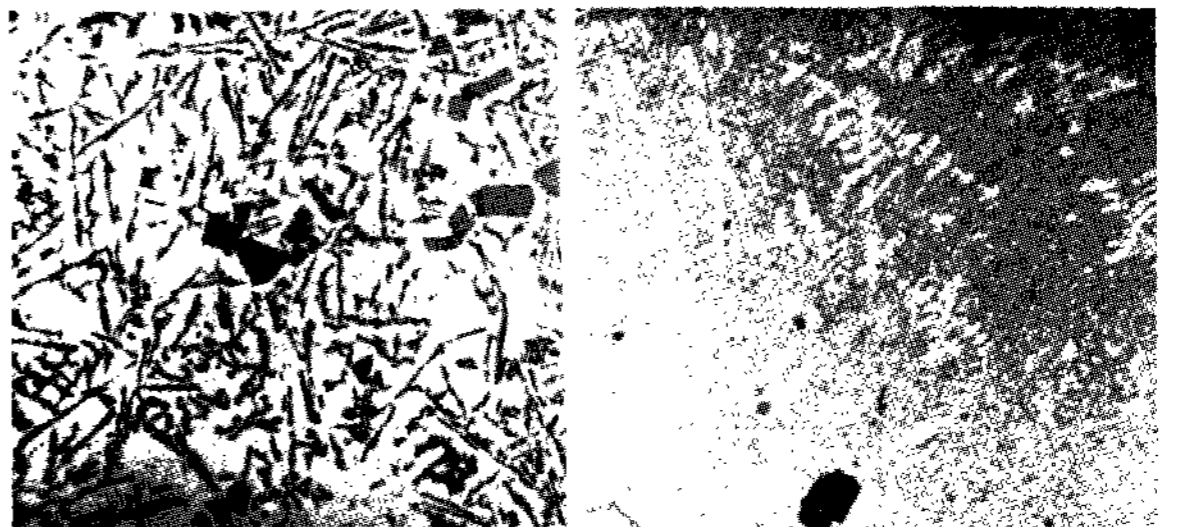


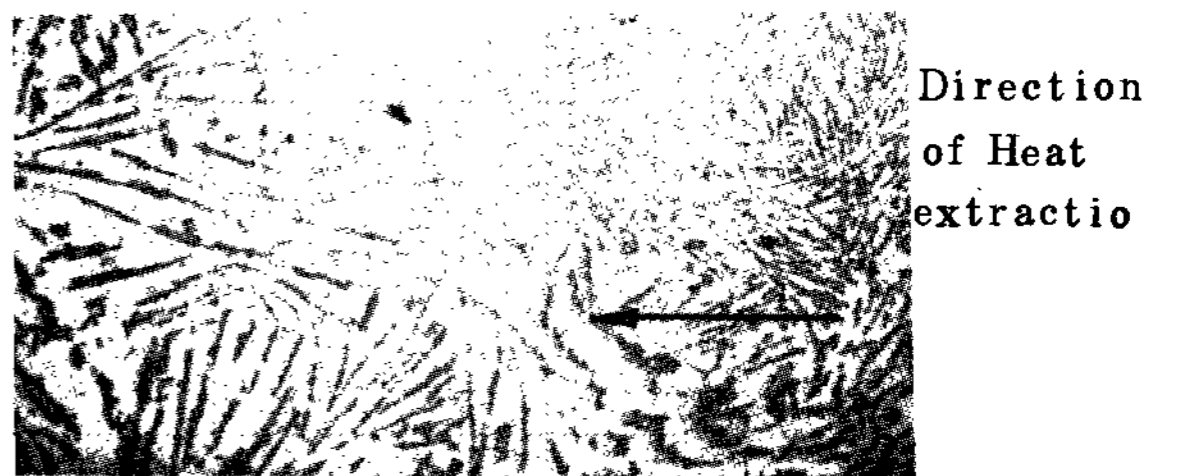
Fig.4. Occurrence of solute riched layer of 0.1mm thickness in a chill surface When $1,300 \text{ kg/cm}^2$ Pressure was applied during solidification in Al-12.9% Si alloy. ($\times 80$)

3.3 공정과 과공정 Al-Si 합금의 조직

Fig.5는 공정 Al-Si 합금의 micro 조직들이다. 여기서 중력주조 조직은 angular 초정 Si들이 가압응고 조직보다 많이 나타나고 있으며, Al-riched α 상



(a) gravity ($\times 80$) (b) $2,000 \text{ kg/cm}^2$ ($\times 80$)



(c) Transition of eutectic Si by applied pressure ($\times 400$)

Fig.5. Microstructures of Neareutectic Al-Si alloy

이 초정 Si 주위에 비교적 두껍게 모여 있는 이른바 Halo 현상이 발달하여 있었다. 이에 반해서 $2,000 \text{ kg}$

/cm의 가압력으로 가압주조한 경우에는 공정조직중의 Si flake들이 평균적으로 $2 \times 40 \mu\text{m}$ 에서 $0.5 \times 13 \mu\text{m}$ 크기로 미세화 하였으며, 공정조직 중의 α -dendrite가 나타났다. 이러한 효과는 과공정 Al-Si 합금에서도 동일한 경향을 보이고 있다. 즉 Fig.6에 나타난 과공정 Al-Si 합금의 Micro 조직들에서 보면, 공정 Si flake의 미세화와 초정 Si의 irregularity가 증가하였다. 특히 Fig.6에서는 초정 Si 주위를 에워싸는 α 상이 중력주조시는 $23 \mu\text{m}$ 에서 가압에 의해 $7 \mu\text{m}$ 으로 감소하여서 halo 현상이 억제 되었고 haloed α 상의 dendritic 성장이 촉진 되었다.



gravity



1,300kg/cm²

Fig.6. Microstructures of Hypereutectic Al-Si alloy (×80)

3.4 냉각곡선의 측정

Fig.7은 측정된 냉각곡선 중에서 대표적으로 Al-Si 과공정합금의 중력주조 및 가압주조시의 주물과 금형의 온도변화를 나타낸 것이다. 이러한 냉각곡선의 결과를 정량적으로 나타낸 것이 Table.1이다.

여기서 주물의 응고속도는 주물의 최종응고부로 고려되는 중심부에서의 응고완료시간에 의해 조사되었다. 이 응고완료시간이 중력주조에서는 Si조성이 증가하

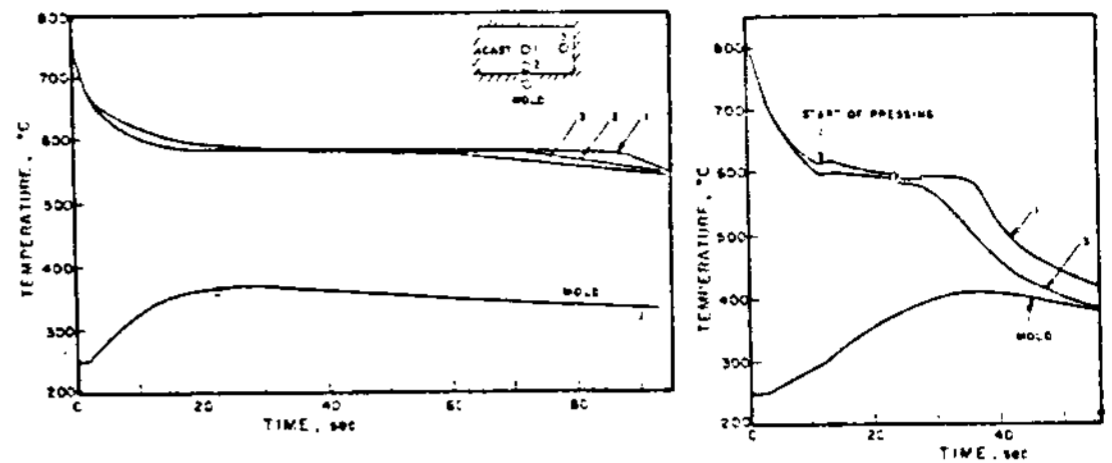


Fig.7 Experimental cooling curves of hyper-eutectic Al-Si Binary alloys

는대로 비례하여 증가하였고, 가압응고에서는 중력주조에 비해서 약 2~3배의 증가가 나타났다. Table 1의 결과들은 mushy zone에서의 Data이며, 평균 냉각속도(V)는 응고완료시간(tf)에서, 응고계면이동속도(R)은 주물내 온도기울기(G)에서 계산되어졌다.

Table 1. Analysis of cooling curves of center(1) in Al-Si binary alloys

System		tf	V	G	R	G/R
HypoE	Gravity	25	1.52	6	0.25	24
	Squeeze	10	3.8	21	0.18	117
Hear E	Gravity	62	0.11	1.5	0.07	21
	Squeeze	21	0.33	4	0.08	50
HyperE	Gravity	82	1.5	3.3	0.45	7
	Squeeze	34	3.6	6.7	0.54	12

tf: Local solidification time of center(1), sec

V : Mean cooling rate of center = $G \cdot R$, C/sec

G : Temperature gradient, C/cm

R : Growth rate, cm/sec

G/R: Paramter of constitutional undercooling

가압응고시 응고 열전달의 특성은 높은 주물내 온도기울기 발생과 그에 따른 큰 냉각속도가 얻어지는 것이다. 또한 높은 온도기울기는 열전달기구중에서 heat conduction에 직접적인 영향을 미쳐서 효과적인 열전달현상이 되게한 것이다.

가압시 금형온도의 변화는 최고온도가 중력주조의 경우와 비교해서 40 C 내외가 높아졌으며, 최고온도에 도달하는 시간도 10 sec 이상 증가하였다.

4. 고 찰

4.1 CET 현상과 그 기구

순 알루미늄과 Al-Si 합금의 가압조건에 의한 macro 조직변화를 CET의 중앙등축정 생성 기원과 그

성장 mechanism의 관점에서 검토하였다. 등축정의 생성기원에 대해서는 여러가지 학설들이 제시되고 있으나, 가압응고에서는 ohno의 주형벽면에서의 결정 유리설⁶⁾과 dendrite arm remelting⁷⁾기구가 효과적이라 보고되고 있다.⁸⁾

한편 CAT발생기구에 대해서는 조성적 과냉설⁹⁾, Witzke model¹⁰⁾ 및 Burden/Hunt 기구¹¹⁾등이 있다. 이 중에서 Burden/hunt 기구는 결정 성장의 구동력인 과냉도(Total undercooling ΔT)를 Zener-Fisher식을 이용하여 조성적 과냉설과 Perturbation 이론을 조합해서 CET를 설명하는 기구로써 본 가압응고 해석에서 검토되었다.

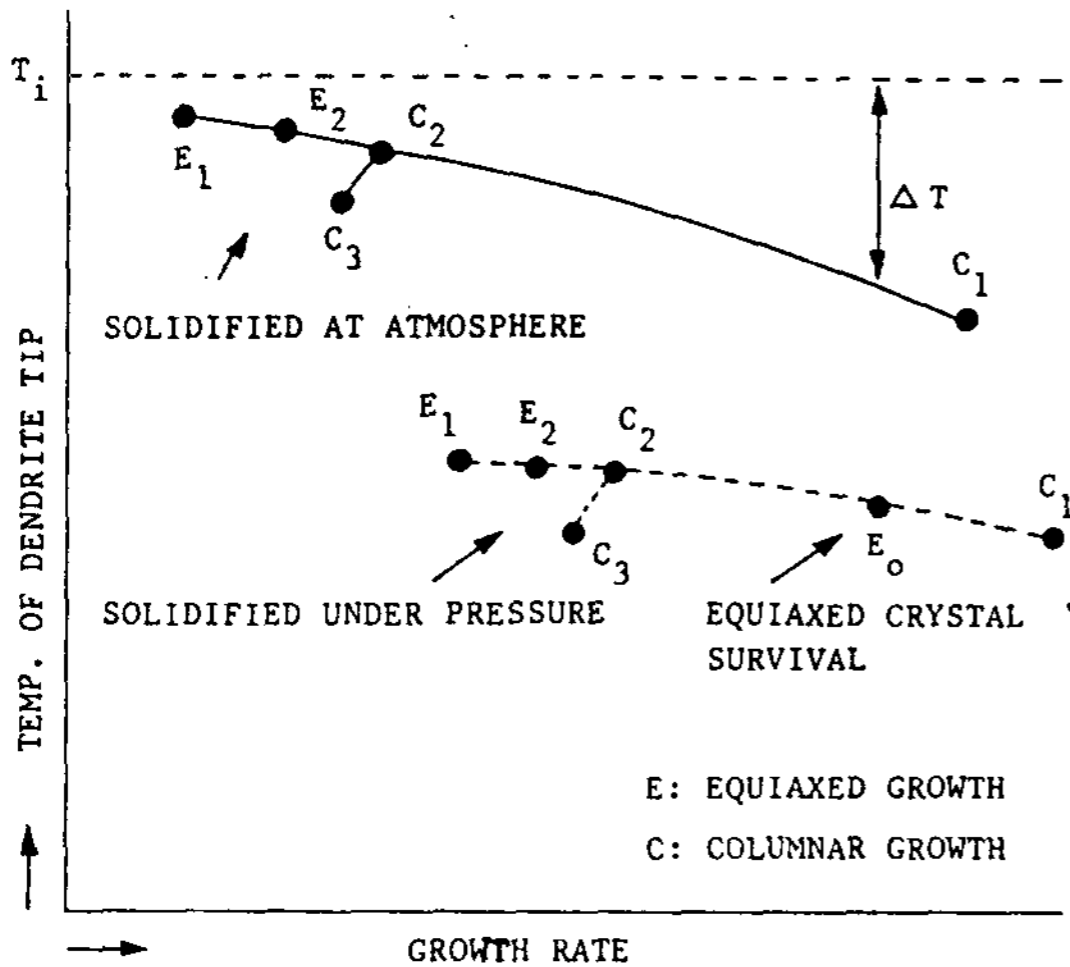


Fig.8 Influences of pressure during solidification on equiaxed and colomnar dendrite growth.

Fig.8은 주상정-등축정 천이과정을 나타낸 것으로서 가압응고와 일반적 응고를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 가압응고는 빠른 냉각속도와 큰 과냉도를 보이고 있어서 등축정의 소멸확율이 일반응고 때보다 매우 적다. 그 결과 중앙등축정의 잔류가능성이 커지며 성장을 촉진시키는 것을 알 수 있다.

이상의 가압응고시의 응고조직 및 Burden/Hunt 기구에 의하여 보면, 가압응고 초기에는 주상정의 성장이 지배적이며 점차 응고가 되면서 등축정의 생성과 성장이 가속되어 신속하게 응고가 완료되고 있다. 합금의 조성에 따라 순 알루미늄에서는 가압응고에 의한 주상정과 등축정의 생성 및 성장이 함께 촉진되는 경향을 Fig.2에서 알 수 있다. 그러나 일반적으로

응고도중에 높은 가압력이 주어지면 그 shock에 의해서 주형벽면 결정들의 분리이탈, 기존 dendrite Arm의 fragmentation 및 용탕대류의 촉진 등^{12,13)}이 복합적으로 작용하게 되어서 정량적인 CET 해석은 어렵다.

4.2 가압응고시 Micro 조직변화

본 가압응고시의 dendrite 특성으로써 1차 arm의 열방출 방향으로 우선 성장 촉진, DAS 미세화, 과공정 Al-Si 합금의 Al riched dendrite 발생이 나타났다. dendrite 성장에는 과냉이 구동력이 되며, 실험적으로 성장속도와 과냉 사이에는 완전한 비례관계가 존재하고 있다고 보고 되었다.¹⁴⁾ 가압응고는 큰 냉각속도와 과냉촉진을 가져오므로 열이동이 일방향으로 중력주조시보다 증가함에 따라 그에 평행하게 1차 dendrite arm의 우선 성장이 촉진되어진 것이다.

DAS 미세화는 큰 냉각속도에 의해서 잘 설명이 되며 과공정에서의 α 상 dendrite 성장촉진도 구동력인 과냉의 촉진에 의해 나타난 것이다. 한편 Si 결정의 성장은 Nonfacet 상인 dendrite와 달리 Facet 상으로써 높은 성장 entropy가 요구되며, 그 결과 성장을 위한 interface kinetic undercooling이 추가적으로 필요하다. Toloui¹⁵⁾ 등은 공정 Al-Si 합금을 일방향 응고 실험한 결과 공정 Si flake의 결정성장속도와 온도기울기의 관계식을 얻었다. 이 식에 의하면 가압응고시의 공정 Si조직 미세화는 큰 냉각속도에 기인되어졌다.

4.3 Halo 현상

본 실험에서 공정, 과공정 합금의 응고조직을 보면 초정 Si 주위에 Al riched α 상이 에워싸고 있는 이른바 halo 현상이 나타나 있다. 이 현상에 대해서 sundquist¹⁶⁾나 R.S.Barclay¹⁷⁾ 등의 연구가 되고 있으나 현상적 연구에 머무르고 있다.

Halo 현상은 아공정 합금에서는 발생하지 않고 과공정 합금에서 나타났다. 가압시의 halo 현상의 억제에는 가압에 의한 상평형의 변화, 높은 온도기울기와 냉각속도 발생, 과냉촉진 및 용탕의 대류촉진 등의 복합적요인이 작용하여 나타난 결과로 고찰되어졌다.

5. 결 론

직사각형의 단면을 가지는 금형에 순 Al과 Al-Si 이원계 합금을 주입하고 그 응고현상에 미치는 가압효

과를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1,000 kg/cm² 이상의 가압에 의해 중력중조에서 나타나는 주조결함들이 대부분 제거되었다.
- 2) 가압시 주상정과 등축정의 생성과 성장이 함께 촉진되었다. 이 현상은 Burden/Hunt의 CET model을 수정하여 정성적으로 설명되었다.
- 3) 2,000 kg/cm²의 가압응고에 의해서 공정 Si flake가 중력주조시의 2 × 40 μm에서 0.5 × 13 μm 크기로 미세화되었으며 이는 가압에 따른 주물의 급냉과 과냉촉진에 기인한다.
- 4) 아공정 Al-Si 합금에서 가압효과는 1차 dten - drite Arm의 열방출방향에 평행한 우선성장의 촉진과 2차 DAS 미세화를 가져왔다. 이는 가압응고에 따른 큰 온도기울기에 영향을 받은 것으로 해석된다.
- 5) 과공정 Al-Si 합금을 가압주조한 경우, 초정 Si의 균일 분포가 이루어졌고 초정 Si 주위에 있는 Al riched soft layer 두께가 23 μm로 감소 하였으며 Halo 현상이 억제되었다.

참 고 문 헌

1. G.Welter: Z. Metallk, 23 (1931), 255
2. S. Suzuki: 일본금속학회 회보, 19(1980), 895
3. Y.Nishida and H.Matsubara: Z. Metallk, 71(1980), 189
4. S.Oya, Y.Matsumula, and T.Takada: 경금속 (일본), 18 (1967), 377
5. H.Fujii, S.Okada, S.Morimoto and M.Fujii: 경금속 (일본), 33(1983) 393
6. A. Ohno: Principles of Solidification (1976)
7. K.A. Jackson, J.D.Hunt, D.R.Uhlmann and T.P.Seward III: Trans. Met, Soc, AIME, 236(1966), 149.
8. 한요섭: 석사학위논문 (1985), KAIST
9. W.A.Tiller: Trans AIME 224 (1962) 448
10. S.Witzke, J.P.Riquet and F.Durand: ACTA Metall. 29 (1981) 365
11. H.Burden and J.D.Hunt: Met, Trans 6A (1975) 2450
12. 이호인: 석사학위논문 (1976), Sussex Univ.
13. H.I.LEE and A.A.Das; 대한금속학회지 15, (1977) 52
14. R.Elliot: Eutectic Solidification Processing, (1983)
15. B.Toloui and A.Hellawell; CATA, Metall, 24 (1976) 565
16. B. E. Sundguist 외: J: Inst, Metals, 91 (1962-63) 204
17. R.S.Barclay 외: J. Crystal, Growth, 20 (1973) 175.