論 文

石膏鑄造한 Al-8.6% Si-3.6% Cu 合金의 機械的 性質에 関한 研究

呂仁東,* 金東玉,** 康仁燦***

A Study on the Mechanical Properties of Al-8.6% Si-3.6% Cu Alloy Cast in Plaster Mold

In-Dong YEO,* Dong-OK KIM**, In-Chan KANG

ABSTRACT

This paper is presented for showing the effect of cooling rate on dendrite arm spacing, correlated with the chilling power of molding materials (conventional plaster, foamed plaster, silica sand) and section thickness, and also showing relationship between dendrite arm spacing and mechanical properties for an aluminum – 8.6 percent silicon – 3.6 percent copper alloy.

Local solidification time (t_f) and secondary dendrite arm spacing (d) could be varied widely in accordance with the molding materials and casting thickness, and the following relationship is obtained:

$$d = 9.4\ t_f^{0.31}$$

A good correlation between dendrite arm spacing and mechanical properties such as ultimate tensile strength, yield strength, hardness was found, that is, mechanical properties decreased in a linear manner with increase in log of secondary dendrite arm spacing.

Ultimate tensile strength in conventional plaster mold casting decreased by 15 percent comparing with the sand casting, where as in foamed plaster mold casting, it decreased by 30 percent comparing with the sand casting.

From those results, it has been verified that DAS might be the most representative parameter for predicting mechanical properties varing with the different cooling condition.

1. 序 論

石膏는 오래 前부터 齒科用이나 工藝品, 美術品 等의 鑄造에 利用되어 왔으나 工業製品의 精密鑄造에 石膏鑄型法을 利用하기 始作한 것은 比較的 最近의 일이며, 石膏鑄型法은 非鐵合金의 精密鑄造에 가장 有利한 鑄造法으로 알려져있다.[1)]

石膏鑄型의 冷却能은 상당히 낮은 편이어서 두께가 아주 얇은 製品이나 形狀이 複雜한 鑄物의 鑄造가 可能하다는 利點이 있지만[2)] 鑄型의 冷却能이 낮으면 相對的으로 鑄物의 凝固時間은 길어지고 따라서 結晶組織이 粗大化되기 때문에 機械的 性質은 劣化된다. 機械的 性質에 미치는 凝固條件(Solidification parameter) 의 影響에 대해서는 지금까지 發表된 文獻들이 상당수 있

* 韓國機械研究所 鑄物研究部 研究員
** 韓國機械研究所 鑄物研究部長
*** 仁荷大學校 金屬工學科 敎授

지만 모두 凝固速度가 빠른 砂型이나 金型鑄造, 그리고 冷金(Chill)을 適用하여 實驗[5)~13)] 하였기 때문에 凝固速度가 느린 石膏型鑄造品에 適用하기가 困難하고 石膏型鑄造時의 機械的 性質變化나 凝固速度와의 相關關係를 具體的으로 研究한 事例는 아직 없다.

過去에는 주로 結晶粒의 크기(grain size)로써 組織의 微細化 程度를 判別하였으나 粒子 微細化劑의 使用이 增加하면서 顯微鏡 組織의 微細化 程度를 나타내는 指標로서 結晶粒 크기의 役割은 減少되었으며 最近에 와서 鑄造組織의 解釋에 Dendrite Arm Spacing(以下 DAS로 表記함)을 利用하는 傾向이 두드러지고 있다.[4)]

따라서 本 研究에서는 secondary dendrite arm spacing을 凝固條件에 따른 parameter index로잡고 이에 대한 妥當性을 調査 檢討한 後 機械的 性質에 미치는 DAS의 影響을 定量的으로 究明코자 하였으며 鑄放狀態에서의 機械的 性質이 良好하고 鑄造性이 좋아서 matchplate pattern, 고무成形用 金型, 機械部品 等의 石膏型 鑄物材料로 많이 쓰이는 Al-8.6% Si-3.6% Cu 合金을 非發泡石膏鑄型과 發泡石膏鑄型에 鑄造하여 鑄型材와 試片 두께에 따른 冷却速度와 DAS의 變化를 調査하고 機械的 性質에 미치는 DAS의 影響을 綜合的으로 檢討하였다.

2. 實驗方法

2-1 試 料

試片의 形狀은 Fig.1과 같으며 冷却速度를 달리하기 위하여 階段形態로 試片을 鑄造하였다.

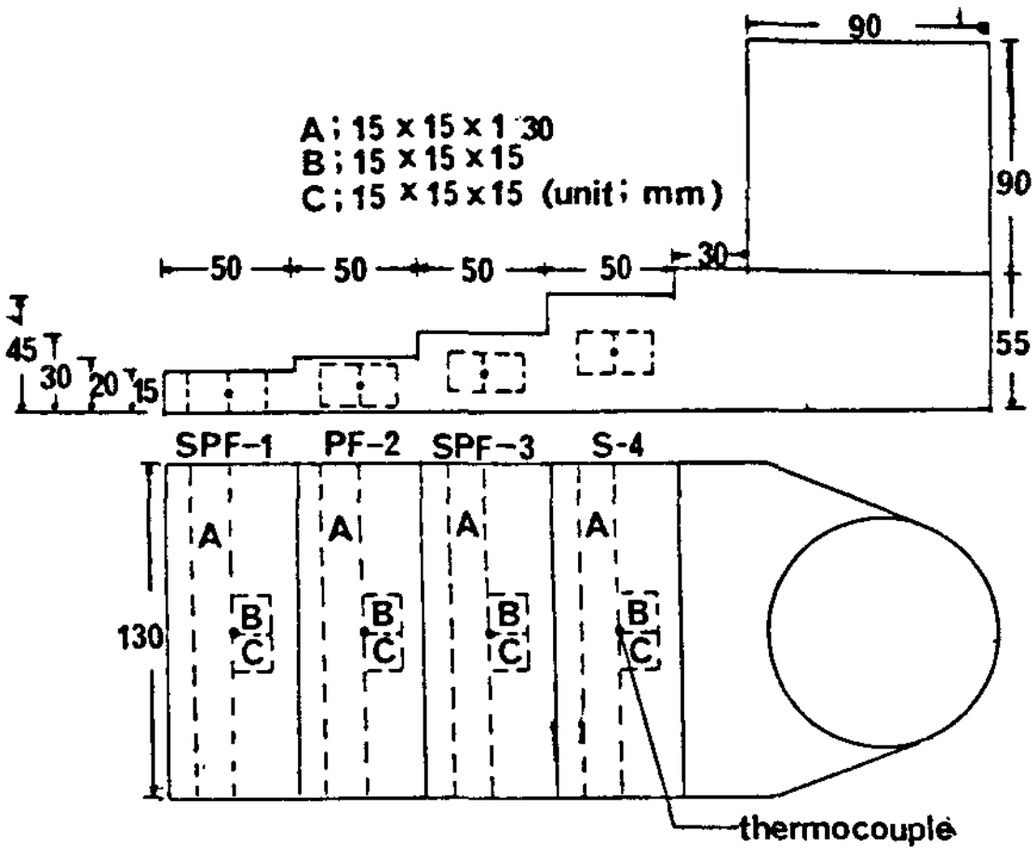


Fig. 1 Demension and shape of casting.
A : Specimen for tensile test.
B : Specimen for microstructure.
C : Specimen for hardness test.

本 實驗에 使用한 Al-Si-Cu系 合金의 熔解는 母合金(99.7%Al, Al-20%Si, Al-30%Cu)을 使用하여 目標造成의 인고트(ingot)를 製造한 다음, 每 熔解時마다 電氣抵抗爐에서 黑鉛도가니(30#)를 使用하여 인고트를 再熔解하였다.

熔釋方法은 1回 熔解時마다 6.5 *kg*의 인고트를 裝入한 後 熔湯溫度 720 ℃에서 C_2Cl_6 錠劑로 脫가스處理하여 熔湯內의 가스含量을 0.03cc/100 *g* 以下로 管理하였으며 680 ℃에서 鑄入하였다.

Table 1에는 本 實驗에 使用한 階段試片의 化學成分을 나타냈다.

Table 1. Chemical composition of specimen (%)

Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Al
8.61	3.58	0.46	0.08	0.02	0.04	remainder

2-2 鑄型製作 및 鑄込方法

本 實驗에 使用한 鑄型材料는 國産耐熱石膏와 美國産發泡石膏를 使用하였으며 比較試驗을 위하여 CO_2 鑄型을 같이 使用하였다. 鑄型상자의 크기는 380×190×145(mm^3)上型과 380×190×60(mm^3) 下型이며 鑄型製作方法 및 鑄造法은 다음과 같다.

非發泡耐熱石膏鑄型의 製作은 石膏(主成分 : $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$)와 물의 比率을 100:40으로 하였으며 攪拌機로 2分間 攪拌하여 슬러리(Slurry)를 만들었다.

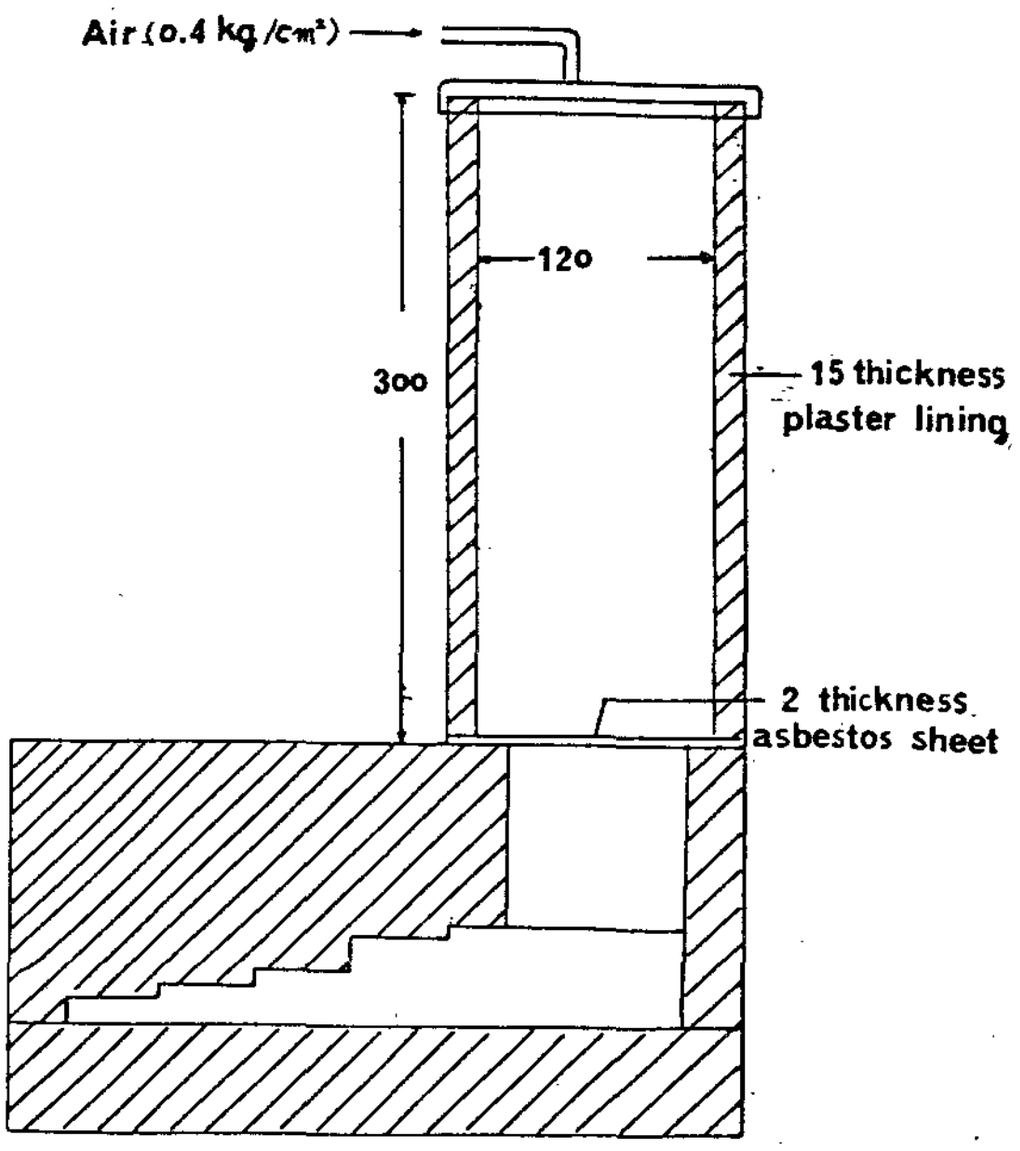


Fig. 2 Cylinder used for pouring a casting with pressure assist.(unit: *mm*)

鑄型의 슬러리가 완전히 硬化된 다음 常溫에서 1時間 放置한 後 換風式 電氣乾燥爐에서 300 ℃로 28時間 乾燥시켰다.

鑄込은 Fig.2와 같은 裝置를 利用하여 실린더 속에 熔湯을 鑄込한 다음 0.4 kg/cm^2의 空氣壓을 加하여 石綿板(asbestos sheet)이 터지면서 熔湯이 鑄込되는 加壓鑄造法을 使用하였다.

非發泡石膏鑄型의 境遇 鑄型의 通氣性이 거의 없으므로 加壓鑄造나 減壓鑄造法을 使用해야 하는데 本 實驗에서는 裝置가 比較的 簡單하고 加壓效果에 의하여 組織이 緻密해진다는 利點을 考慮하여 加壓鑄造法을 택하였다.

加壓時의 空氣壓이 너무세면 鑄型破損이나 Scab缺陷이 誘發되며 空氣壓이 너무 弱하면 石綿板이 터지지 않는다. 本 實驗에 使用한 0.4 kg/cm^2의 壓力은 豫備試驗을 通하여 適正空氣壓으로 確認이 되었다.

發泡石膏鑄型의 製作은 Hydroperm(U.S.Gypsum 제)發泡石膏(主成分 : $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ + 界面活性劑)를 100:80의 比率로 물에 投入한 後 두겹으로 된 고무판을 高速(2,500rpm)으로 回轉시켜 發泡를 시킨 다음 큰 氣泡를 破碎한 後 0.3mm 程度의 微細氣泡를 發生시킨 슬러리를 注入하여 鑄型을 製作하였다. 이때 發泡에 의한 體積 增加에는 70 %로 하였다.

鑄型의 乾燥는 換風式 電氣乾燥爐에서 250 ℃로 24時間 行하였고 680 ℃에서 重力 鑄造하였다.

鑄型의 製作은 6호 인조규사(AFS 粒度指數 72)에 규산소다를 6% 添加하여 CO_2가스로 硬化시켰다. 鑄込은 680 ℃에서 重力鑄造하였다.

2-3 凝固時間과 DAS의 測定

Fig.1의 各 階段의 中心部에 CA熱電對를 꽂아 記錄計(recorder)로 記錄하여 部分凝固時間을 測定하였다. 여기서 部分凝固時間이란 液相線(588 ℃)에서부터 固相線(521 ℃)에 이르는 時間을 말한다.

DAS測定用 試片은 Fig.1의 各 階段의 B部位에서 採取하였으며 硏磨 後 keller agent(100 H_2O, 1.6 HCl, 2.6 HNO_3, 1.0HF)에서 15초간 부식(etcing)시켰다. 試片은 各 階段의 中心分割面 쪽에서 50 倍率로 樹枝狀晶의 寫眞을 찍었으며 硏磨面에 平行하게 나타나는 secondary dendrite arm spacing을 測定하여 全體를 平均하였다.

2-4 機械的 性質 試驗 및 微細化 處理

各 階段의 A部位에서 引張試片을 採取하였으며 직경 7 ϕ의 規格으로 加工하여 Instron 引張試驗機로 引張强度, 0.2 %耐力, 伸率을 測定하였다.

硬度는 各 階段의 C部位에서 採取한 試片으로부터 各 階段의 中心分割面 쪽을 브리넬 硬度計를 使用하여 5/250/10(5mm 볼로 10 秒間 荷重 250 Kg)을 주어 測定하였다.

Table 2. Ti content of specimen recovered by Ti/B addition

Ti/B addition amount (%)	Ti pick up(%)		
	CO_2 mold	conventional plaster mold	foamed plaster mold
0.05	0.029	0.022	0.025
0.10	0.038	0.043	0.045
0.20	0.085	0.091	0.078
0.40	0.184	0.182	0.196

微細化 處理는 720 ℃ 熔湯에서 Ti/B를 熔湯量의 0.05 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.4 %, 添加하여 微細化劑의 添加量에 따른 DAS 및 機械的 性質 變化를 觀察하였다. 회수된 Ti 含量을 Table 2에 나타내었다.

3. 實驗 結果 및 考察

3-1 鑄型材料 및 試片의 두께에 따른 凝固時間의 變化

Fig.3에는 國産非發泡石膏型, 發泡石膏型, CO_2 鑄型에 各各 鑄造한 階段試片의 冷却曲線을 나타내었으며 Table 3에는 部分凝固時間을 나타냈다. 凝固時間은 非發泡石膏型이 砂型에 比하여 3倍 以上 길었고 發泡石膏型의 境遇는 砂型에 比하여 10倍 以上 긴 時間을 要하였다.

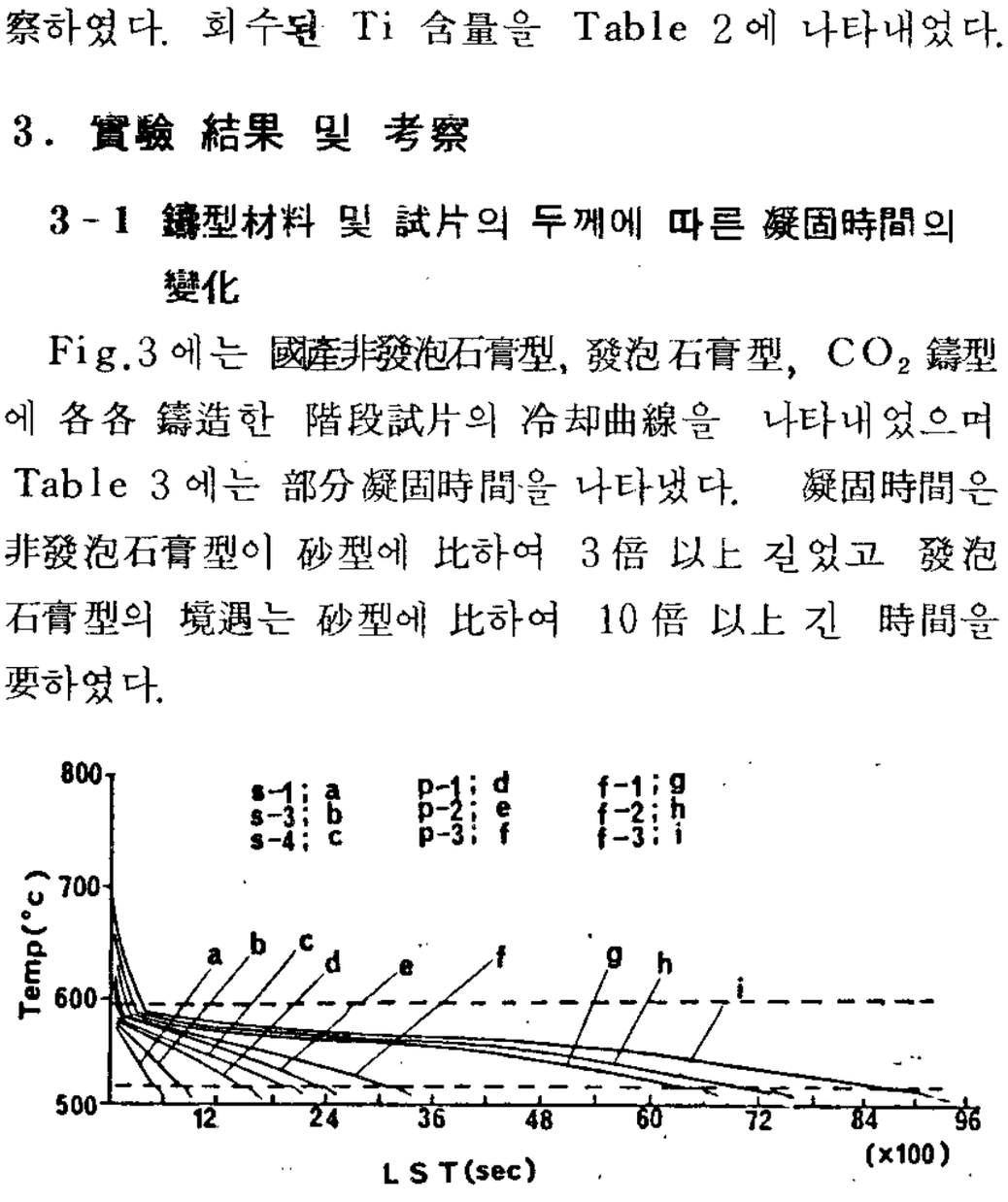


Fig. 3 Cooling curves measured at the center of each step.

熔湯의 凝固時間은 合金의 種類, 鑄型材料, 鑄物의 形狀에 따라서 달라진다.[37] 凝固時間과 合金의 열적 상수와의 關係는 合金의 잠열, 비열, 凝固溫度 및 凝固溫度 範圍 等이 因子로 작용한다. 凝固時間은 金屬의

熱的 性質과 關聯하여 凝固潛熱이 낮고 比熱이 작으며 凝固範圍가 짧을 境遇 그리고 融點이 높고 熱傳導率이 높을 境遇 단축된다. 凝固時間에 미치는 鑄型材料의 影響은 鑄型의 熱傳導度, 鑄型의 密度, 鑄型의 比熱 等이 因子로 作用한다. 鑄型의 形狀과 凝固時間의 關係는 鑄湯 및 鑄型의 熱的 性質이 一定한 境遇 鑄物의 凝固時間은 鑄物의 module ($\frac{체적}{표면적}$) 의 자승에 比例한다.[37] 또한 Fleming은 凝固時間을 다음과 같은 式으로 表示하였다.[34]

$$t_f = \frac{\rho t}{2h(T-T_0)}(\Delta H_f)$$

t =鑄物두께, ρ =合金의 密度, h : 鑄型과 熔湯間의 熱傳導 係數, T : 凝固間의 平均溫度, T_0 : 鑄型 溫度 ΔH_f : 凝固間에 發生한 熱量.

本 實驗에서는 一定한 成分의 熔湯을 一定溫度에서 鑄込하였으며 試片의 形狀이 同一했으므로 Fleming의 式을 本 實驗 結果에 適用했을 때 h만이 變數로 作用하게 된다.

本 實驗 結果에서 石膏鑄型에서의 凝固時間이 砂型에 比하여 큰 差異를 보이는 것은 石膏는 규사에 比하여 熱傳導率(0.00053cal/cm · sec · ℃[18] 와 0.0015 / cm · sec · ℃[36])이 낮을 뿐만 아니라 熱傳達 機構를 考慮할 때 砂型의 熱傳達은 水蒸氣나 점결제의 蒸發이나 휘발에 의한 熱移動(thermal transport), 砂粒子를 통한 전도전열(conduction), 砂粒子 間의 氣孔을 通한 輻射傳熱(directradiation)의 3가지 機構가 함께 이루어지나 非發泡石膏의 境遇 通氣性이 없으므로 石膏粒子間의 熱傳導만이 이루어지며 發泡石膏의 境遇는 石膏粒子間의 熱傳導를 微細氣泡들이 차단하여 단열 效果를 더욱 높여준 것으로 思料된다.

3-2 DAS에 미치는 部分凝固時間 및 凝固速度의 影響

Fig.4에는 部分凝固時間(t_f)과 DAS(d)와의 關係를 log-log scale로 圖示하였다. 凝固時間이 짧을수록 DAS는 直線的으로 작아짐을 알 수 있다.

Primary dendrite arm spacing은 溫度勾配G와 凝固速度R의 지배를 받는다고 알려져 있으며 secondary dendrite arm spacing은 冷却速度에 直接 影響을 받는다고 한다.[35] 여기서 GR=(℃/cm)×(cm/sec)=(℃/sec)가 되어 冷却速度(℃/sec)와 單位가 같다. 따라서 結果를 plot했을 때 다음의 關係와 類似하게 된다.[35]

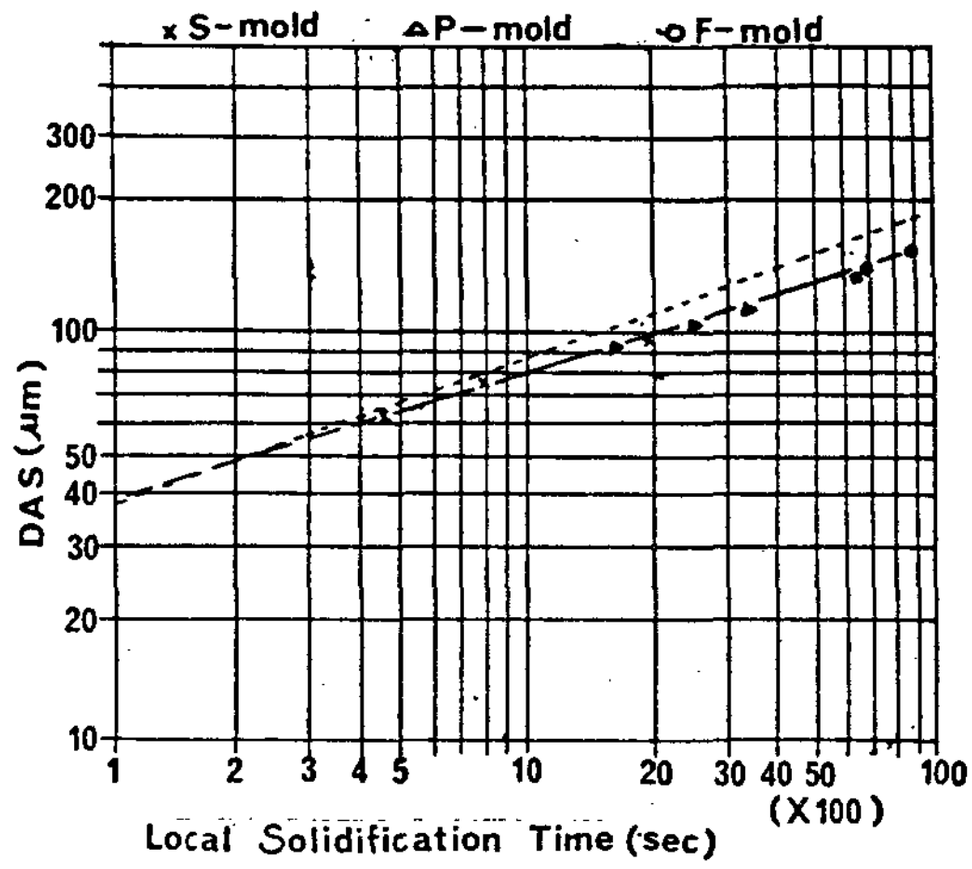


Fig. 4 Relationship between dendrite arm spacing and local solidification time. Dotted line is plotting of empirical formular of Spear.

$$t_f = \frac{\Delta T_s}{GR}$$

여기서 ΔT_s 는 非平衡凝固溫度 範圍를 나타낸다.

DAS와 thermal parameter와의 關係는 다음의 形態로 나타낼 수 있다.

$$d = a(t_f)^n = b(GR)^{-n}$$

여기서 n은 secondary spacing의 境遇 $\frac{1}{2}$에서 $\frac{1}{3}$ 사이의 範圍이며 primary spacing의 境遇 $\frac{1}{2}$에 거의 가까운 값을 가진다.[35] 그리고 a와 b는 熔質含量에 따라 달라지게 된다. Al-Cu系 合金의 境遇 Cu含量에 따라 a의 값은 작아진다고 보고되어 있다.[21]

本 實驗에서는 DAS가 直接的인 影響을 받는 部分凝固時間을 熱電對로 測定하여 secondary arm spacing에 대한 $d = 9.4\, t_f^{0.31}$ 의 關係式을 얻었다. Spear와 Gardner[4] 는 6種類의 알루미늄 合金(43 220, 142, 319, 355, A356)으로 實驗하여 $d = 8.4\, t_f^{0.34}$ 의 關係式을 구하였으며 Fleming과 Kubo[20] 는 各各 Al-4.5%Cu 合金을 使用하여 $d = 7.5 t_f^{0.39}$ 와 $d = 6.6 t_f^{0.39}$ 의 實驗結果를 얻었는데 式은 모두 유사한 形態로 나타낼 수 있었다.

本 實驗(三元系)에서는 n의 값이 0.31로 나타났으나 二元系(Al-Cu合金)에서는 n의 값이 0.37[21] ~0.39[20] 로 나타나있고 二元系와 三元系를 함께 實驗한 Spear의 式은 n의 값이 0.34이다. 따라서 多元系가 될수록 n의 값은 더 작아진다는 것을 알 수 있다.

Fig.5에는 平均冷却速度(℃/sec)와 DAS와의 關

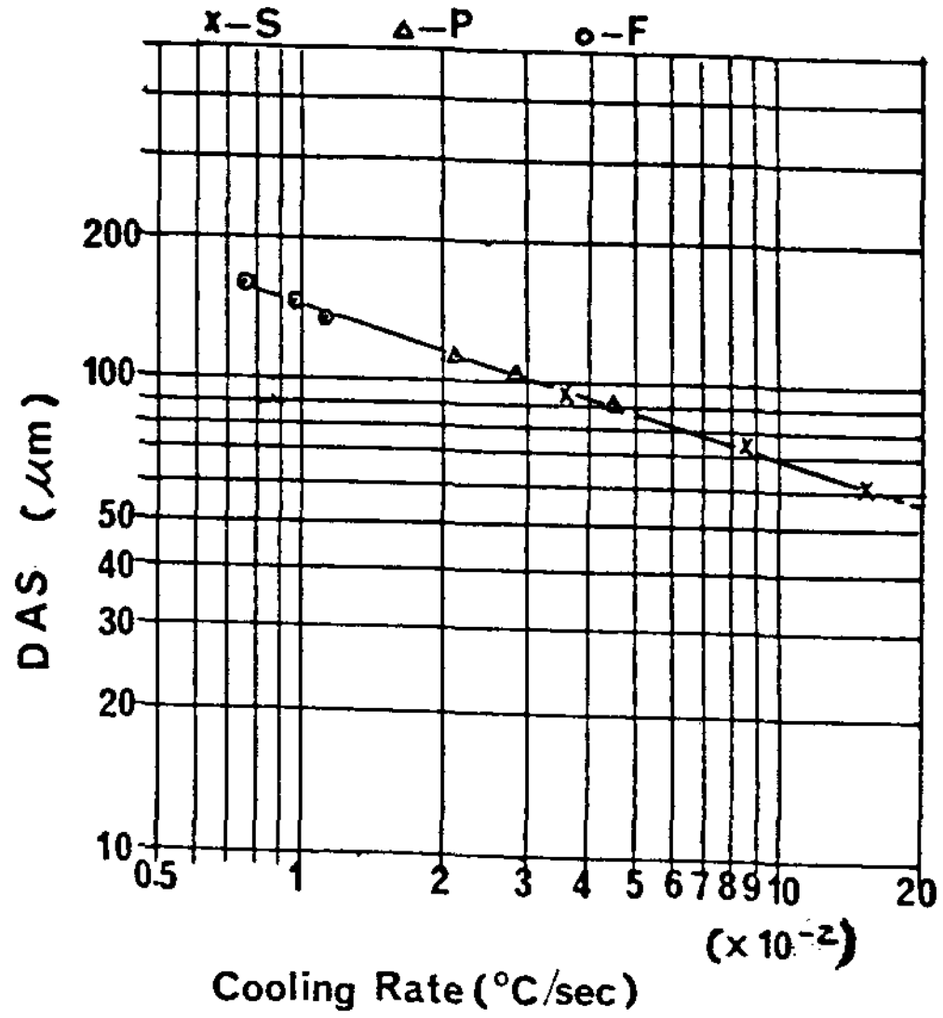


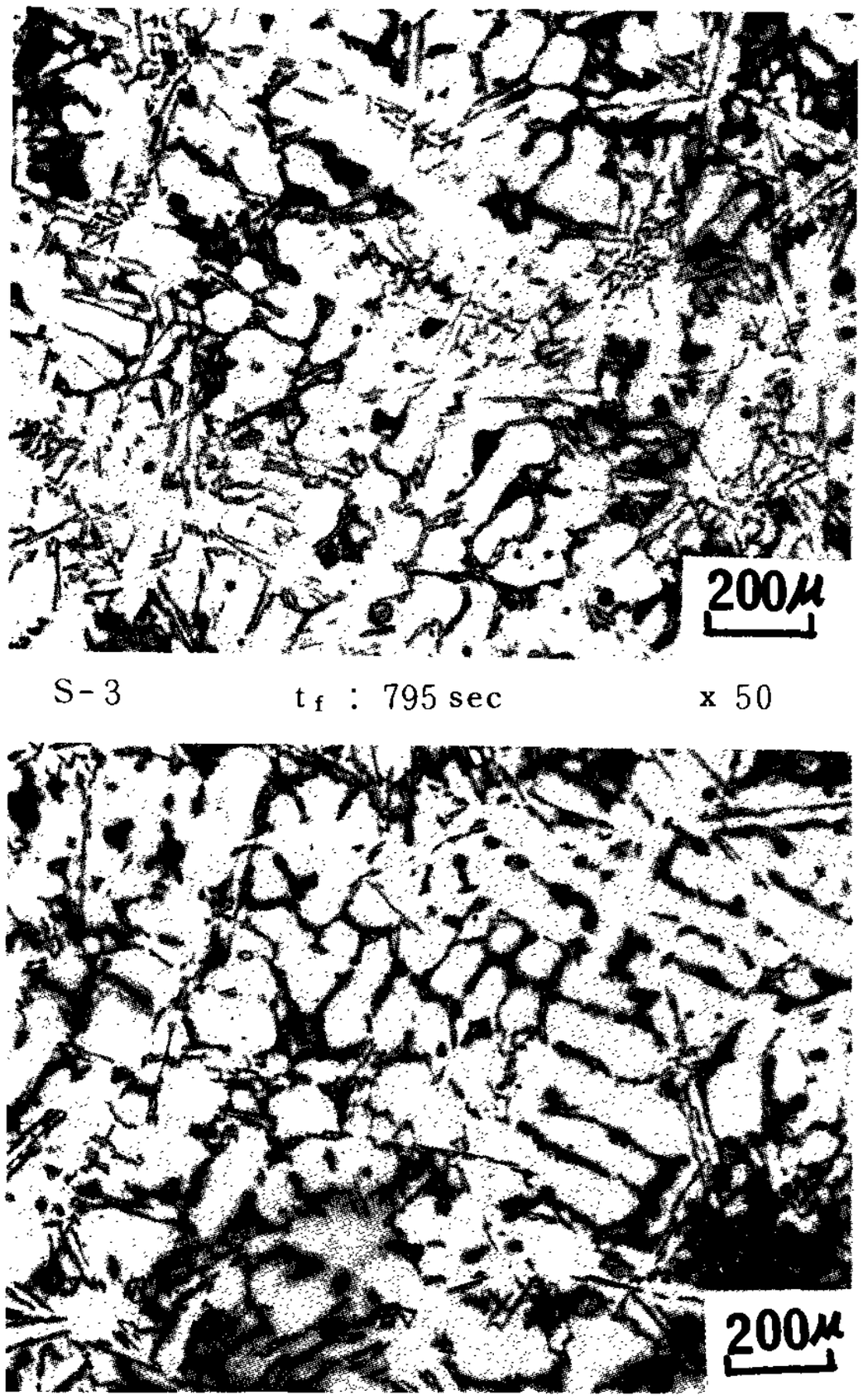
Fig.5 Relationship between cooling rate and DAS.

係를 log-log scale로 圖示하였는데 凝固速度가 빠를수록 DAS는 直線的으로 減少하였다.

photo.1. 2. 3을 보면 冷却速度가 느릴수록 樹枝狀晶은 粗大化되는 것을 볼 수 있다.

3-3 機械的 性質에 미치는 DAS의 影響

Fig.6에는 DAS와 機械的 性質의 關係를 보여주는데 橫軸을 log scale로 圖示하면 DAS가 작아질수록 引張强度, 0.2% 耐力, 硬度가 모두 直線的으로 增加함을 볼 수 있다. 本 實驗에 使用한 알미늄 合金은 원래 伸率이 작은 材料이므로 伸率의 變化는 적었다. 최소자승법을 利用하여 구한 關係式은 다음과 같다(d의 範圍; 62 μ ~ 160 μ).



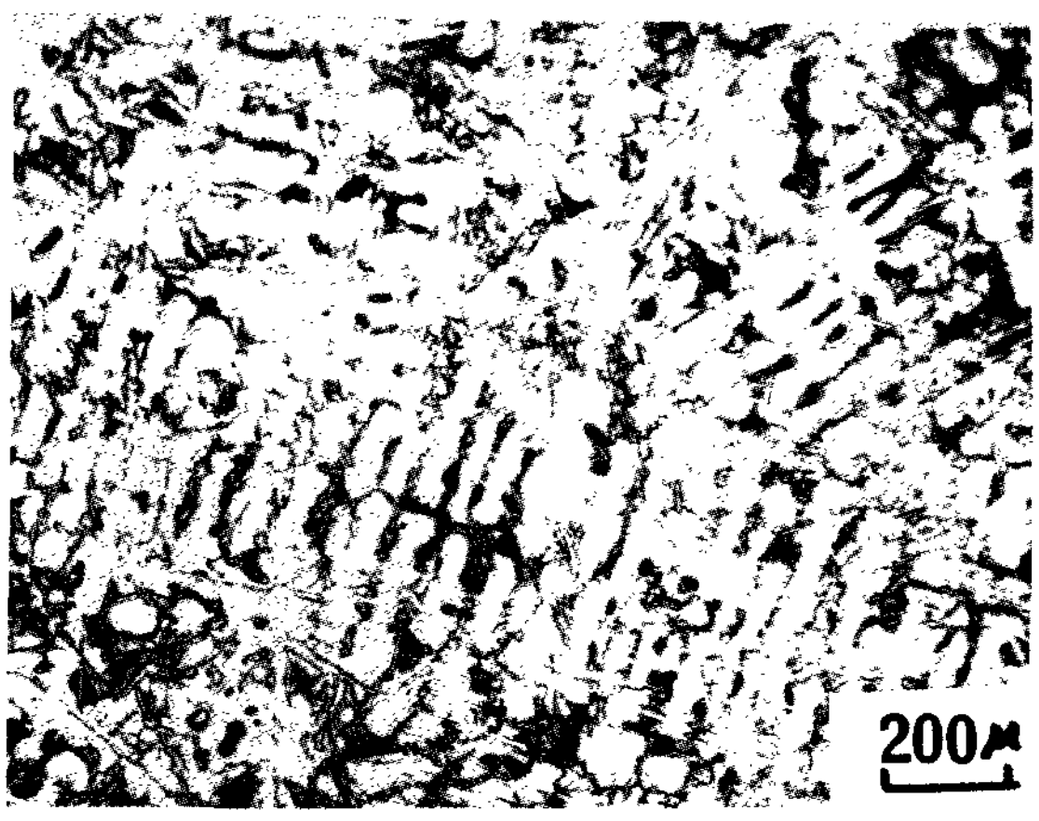
S-3 t_f : 795 sec x 50

S-4 t_f : 1,900 sec x 50

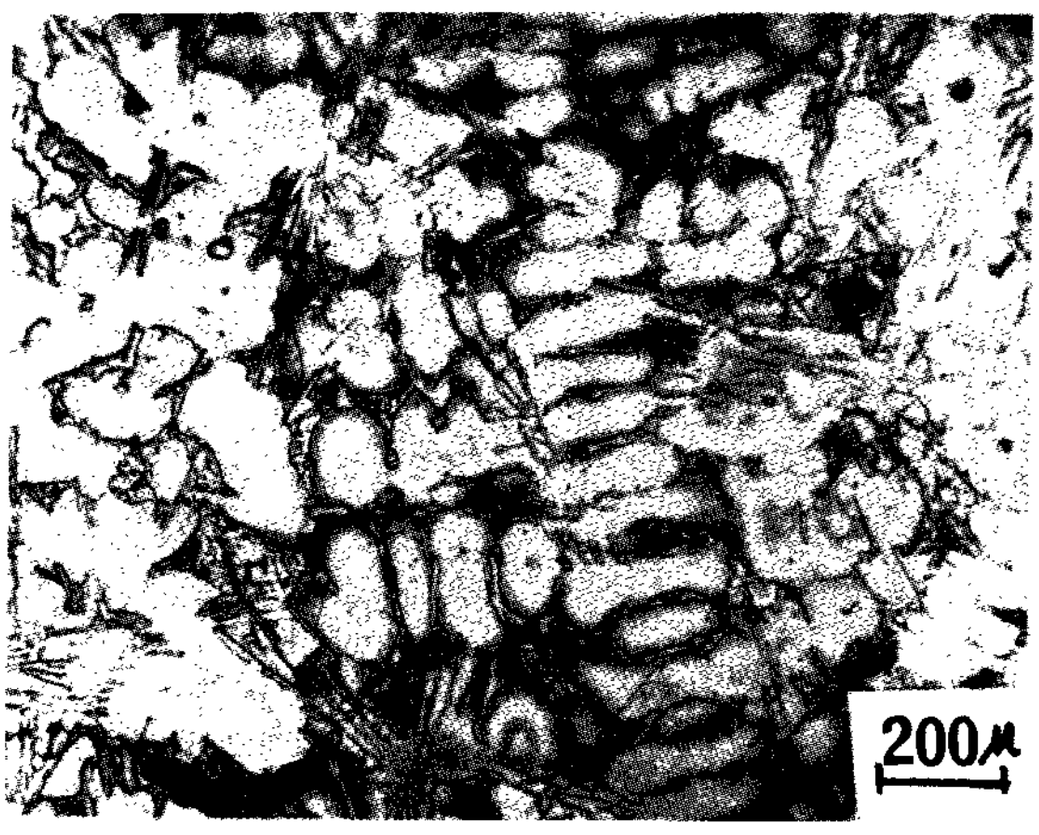
Photo. 1 Dendrite structure of sand mold casting specimen.

引張强度(kg/mm^2) : S = -19.3 log d + 53.3

0.2% 耐力(Kg/mm^2) : Y = -12.1 log d + 35.4

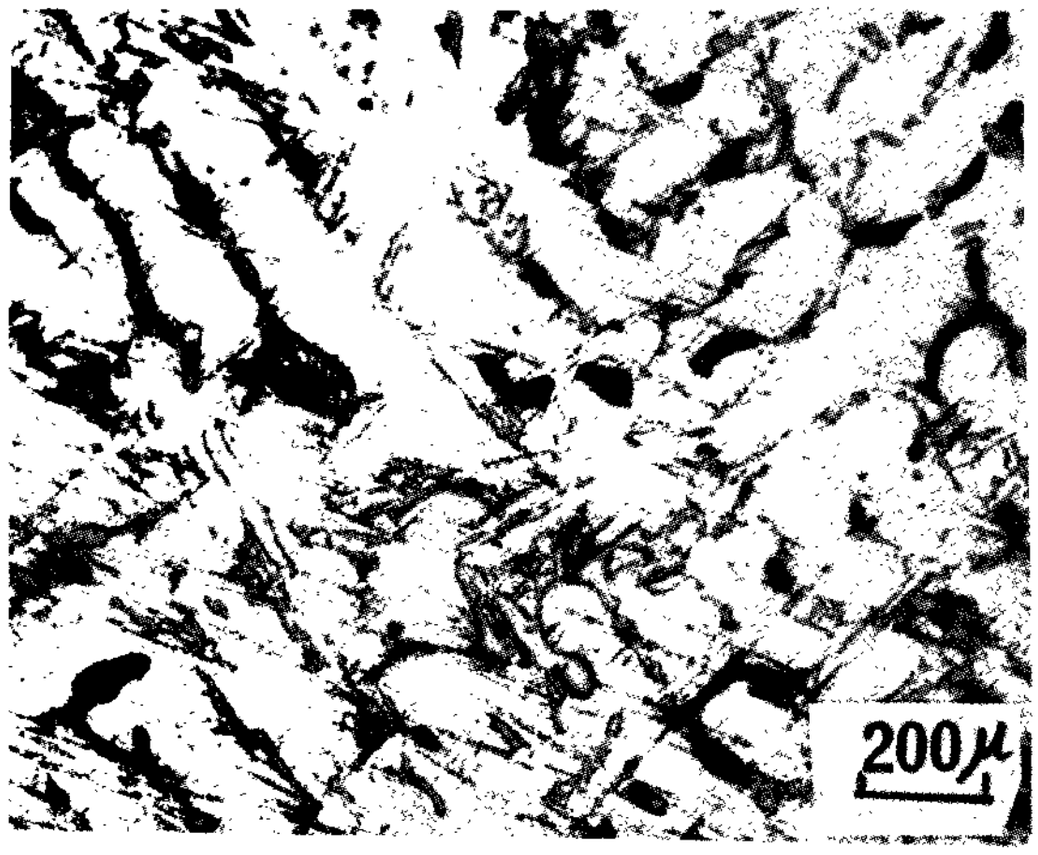


S-1 t_f : 450 sec x 50

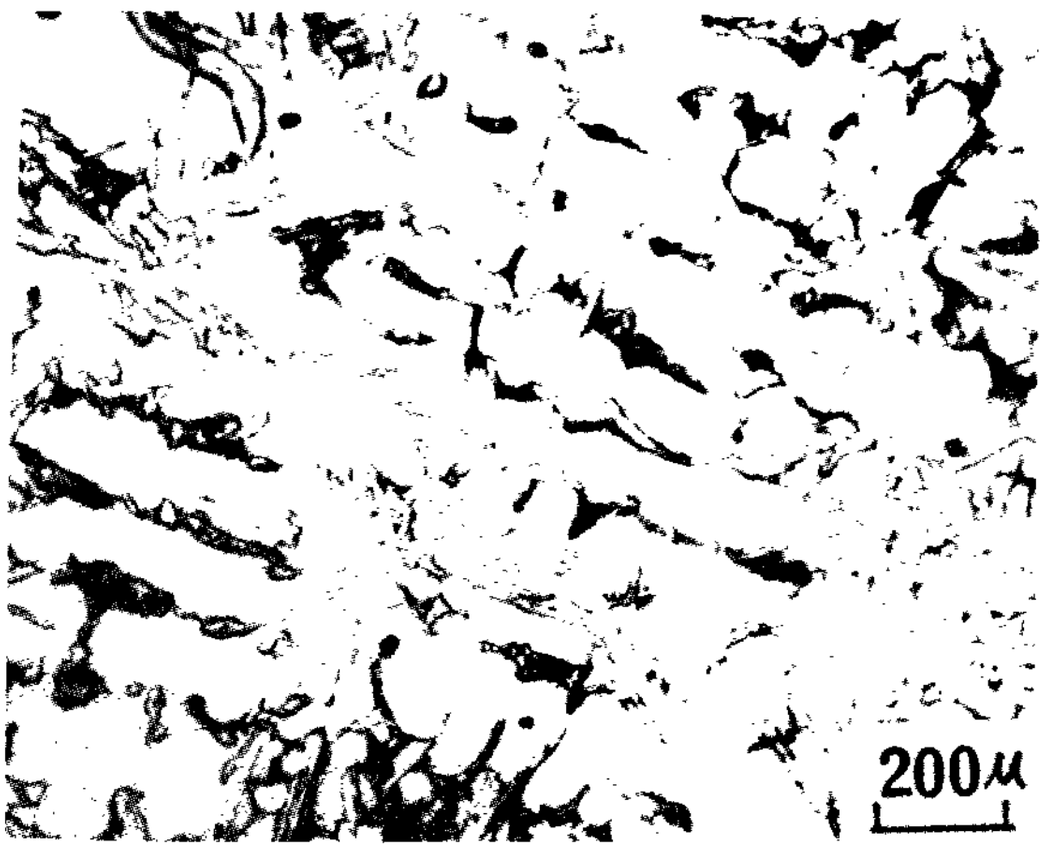


P-1 t_f : 1,580 sec x 50

P-2　　t_f : 2,430 sec　　x 50

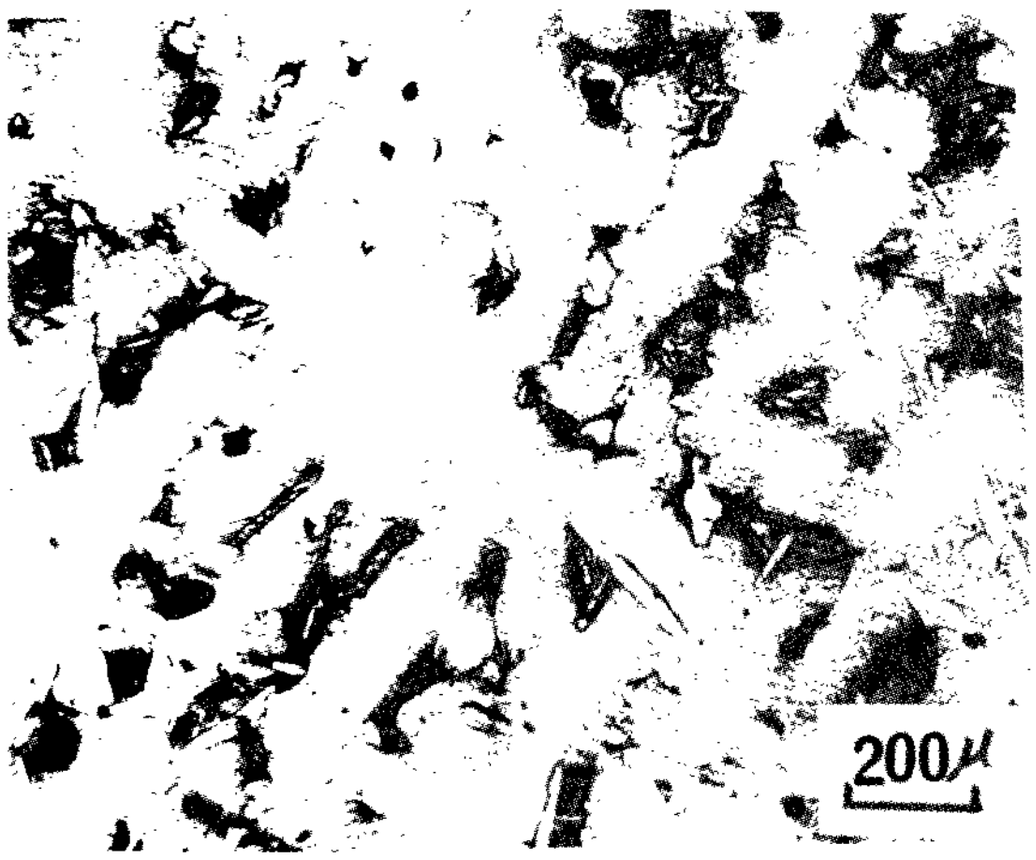


F-2　　t_f : 6,980 sec　　x 50



P-3　　t_f : 3,240 sec　　x 50

Photo. 2 Dendrite structure of conventional plaster mold casting specimen.



F-3　　t_f : 8,880 sec　　x 50

Photo。 3 Dendrite structure of foamed plaster mold casting specimen.

F-1　　t_f : 6,180 sec　　x 50

硬度(H_B) : $H = -28.6 \log d + 130.3$

Mahadevan[5] 等은 Al-4.5Cu 合金에서 冷金에 의한 方向性 凝固를 시켜 凝固勾配(solid%/cm)와 引張强度와의 關係를 誘導하였는데 DAS와 凝固勾配는 서로 逆比例 關係를 가져서 本 研究와 같은 傾向을 나타냈다.

Taylor[7], Wallace[16] 等은 凝固時間과 引張强度와의 關係를 實驗 結果로 나타냈으며 Chamberlain[11]은 冷却速度와 가스 含量에 따른 機械的 性質 變化를 研究 發表하였다. 이것은 앞의 $d = a(t_f)^n = b(GR)^{-n}$으로부터 本 實驗에서와 같은 結果가 됨을 알 수 있다. 따라서 DAS는 이러한 여러가지 thermal parameter를 조합하여 대표할 수 있는 因子임이 밝혀졌으며 또한 凝固條件에 따른 機械的 性質 變化를 豫測할 수있는 가장 正確한 指標임이 確認되었다.

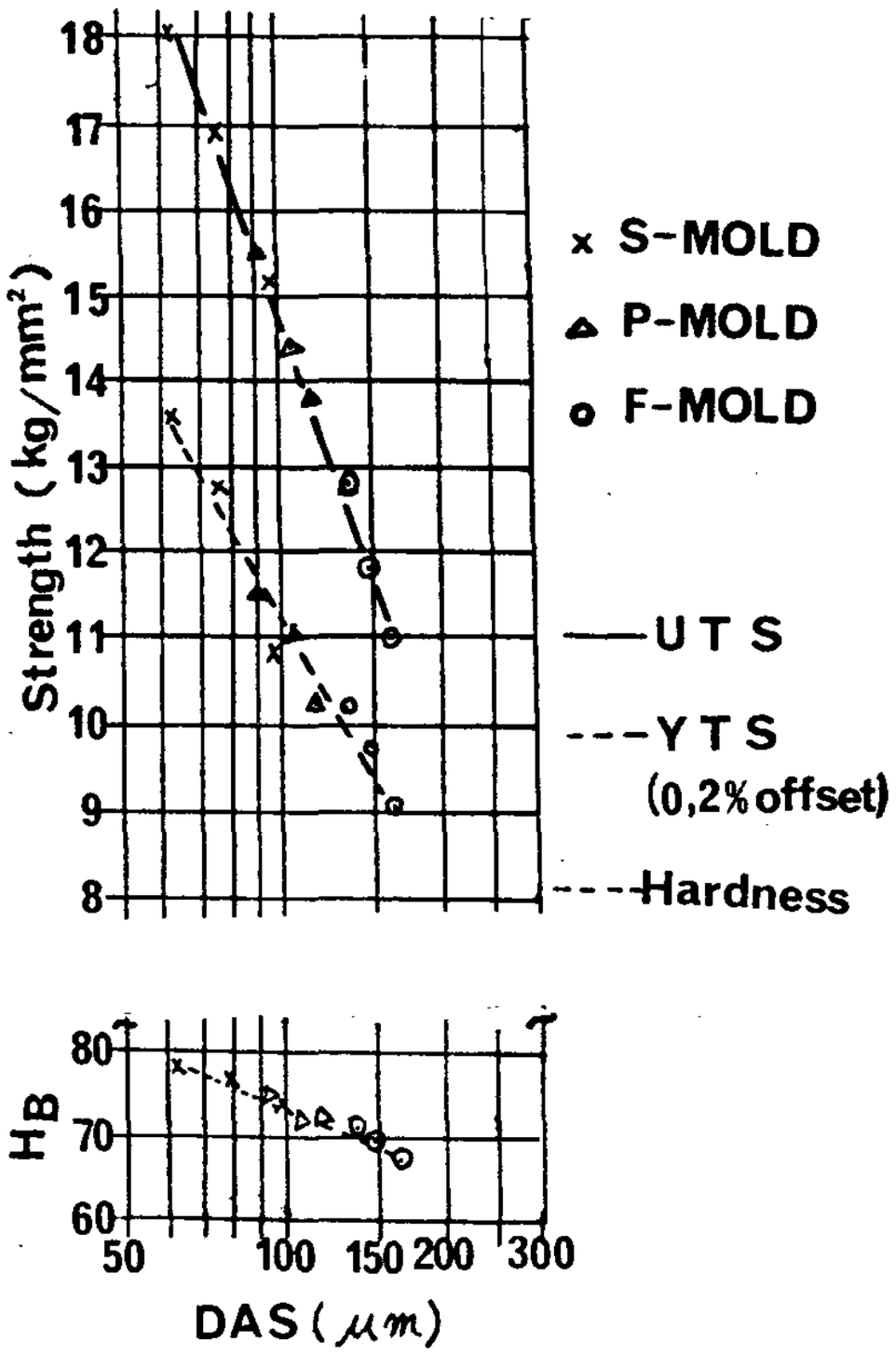


Fig. 6 Relationship between DAS and mechanical properties.

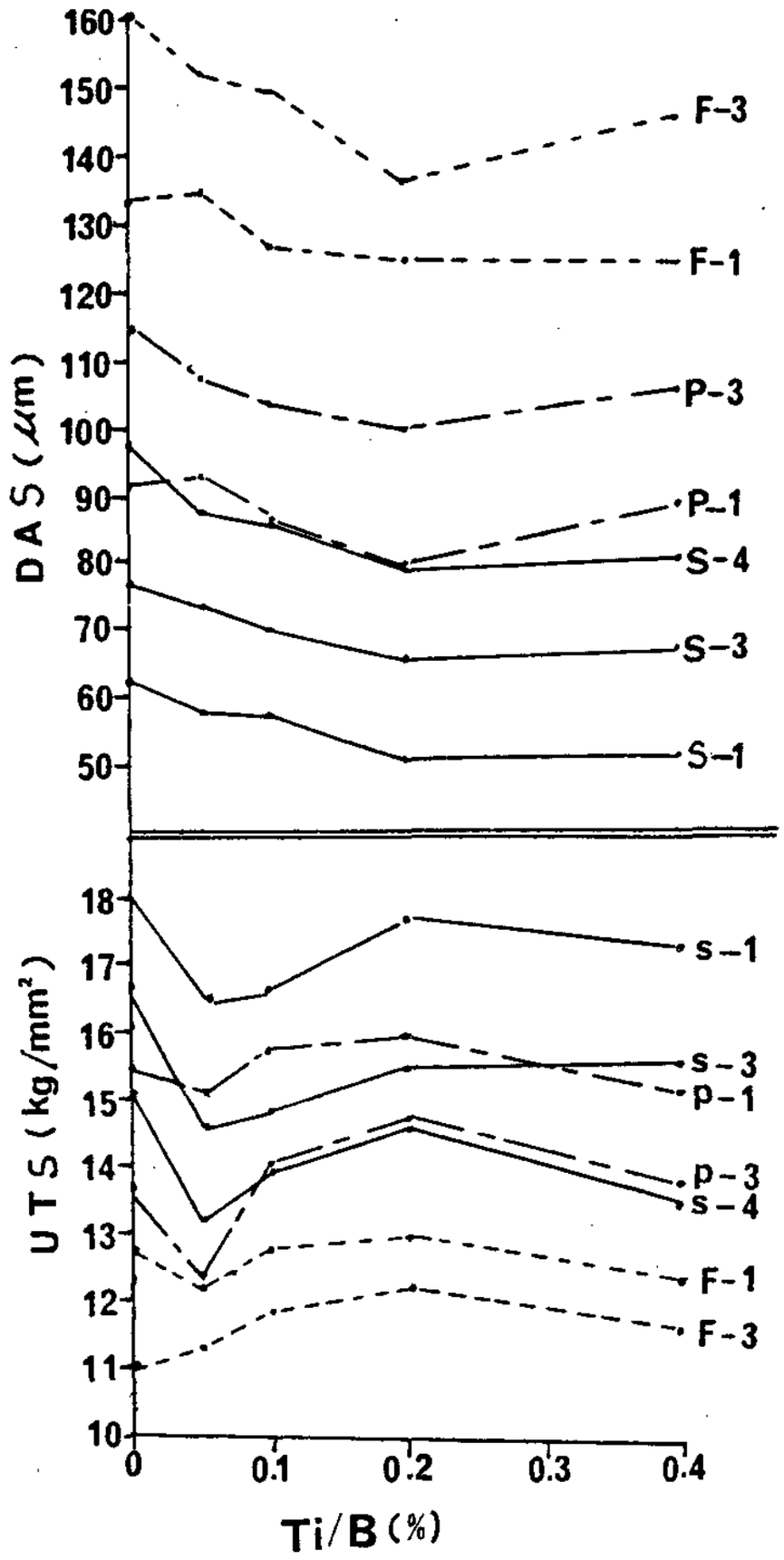


Fig. 7 DAS and UTS varied in accordance with Ti/B addition.

本 實驗 結果에서 引張强度를 基準할 때 耐熱石膏型 鑄造는 砂型에 비하여 約 15 %의 減少를 보였고 發泡石膏型 鑄造는 砂型 鑄造에 비하여 約 30 %의 減少를 보였다. 또 試片의 두께에 따라서도 DAS와 機械的 性質은 상당한 差異가 있었다. 이는 機械的 性質에 影響을 미칠 수 있는 다른 條件 즉, 鑄込溫度 및 熔解溫度, 成分, 가스 含量 等이 一定한 境遇 鑄型의 冷却能과 質量效果(mass effect)에 의한 材料의 機械的 性質 變化는 DAS와 직접적인 關係를 가짐을 알 수 있다.

3-4 微細化 處理에 의한 DAS와 機械的 性質의 變化

粒子 微細化劑인 Ti/B을 熔湯量의 0.05 %, 0.1 % 0.2 %, 0.4 % 添加하여 DAS의 變化와 機械的 性質의 變化를 調査하였다. Fig.7에는 DAS 및 引張强度의 變化를 圖示하였다.

微細化 處理에 의하여 DAS는 減少함을 보였는데 0.2 % 添加時 DAS가 가장 크게 減少하였다. 그리고 引張强度는 砂型 鑄造의 境遇 微細化 處理를 함으로써 오히려 減少하는 傾向이 있었으나 石膏鑄造試片에 있어서는 0.05 % 添加時 減少하였지만 0.1 % 添加時나 0.2 % 添加時에는 上昇하는 傾向이 있었다.

Table 3. Local solidification time varing with molding materials and section thickness of casting

molding materials	step №	local solidification time (sec)
CO_2 mold	S-1	450
	S-3	795
	S-4	1,900
conventional plaster mold	P-1	1,580
	P-2	2,430
	P-3	3,240
foamed plaster mold	F-1	6,180
	F-2	6,980
	F-3	8,880

全試片을 通하여 0.2% Ti/B 添加時(0.085 ~ 0.113 Ti 회수함량)時에 微細化 效果가 가장 좋았으며 石膏鑄造試片의 境遇 引張强度도 가장 높았으나 伸率의 變化는 거의 없었다.

現在까지 發表된 研究 結果는 結晶粒 微細化劑로 Ti/B를 가장 많이 쓰고 效果的으로 微細化를 시켰다고 보고하고 있다. 그러나 機械的 性質은 增加하였다는 보고[13] 도 있지만 별 影響이 없거나[19] 減少하였다[8]는 보고들이 있다.

어떤 研究者는 粒子 微細化 處理에 의한 機械的 性質의 上昇 效果는 粒子 크기의 減少때문이 아니라 微小氣孔 (microporosity)이 더 微細하게 分散되고 金屬間 化合物이 存在하기 때문이라 한다.[13] 그러나 여기에 대하여는 앞으로 좀 더 체계적인 研究가 必要하다고 본다.

本 實驗의 結果를 살살펴 볼 때 TiB_2가 結晶核으로 作用하여 粒子微細化에도 기여하고 機械的 性質의 上昇에도 기여하지만 한편으로는 TiB_2가 粒內破壞의 시발점 (initial point)으로 作用한 것으로 생각된다. 따라서 比較的 冷却速度가 빠른 砂型에서는 粒子微細化에 의한 機械的 性質의 上昇 效果가 적어진 반면 冷却速度가 느린 石膏鑄造에서는 後者의 원인보다 前者의 粒子微細化에 의한 機械的 性質의 上昇效果가 더 크게 作用했다고 思料된다.

4. 結 論

Al-8.6 % Si-3.6 % Cu 合金을 非發泡耐熱石膏型, 發泡石膏型, CO_2 砂型에 各各 鑄造하여 나타난 結果로부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 部分凝固時間은 耐熱石膏型이 砂型의 3倍 以上, 發泡石膏型은 砂型의 10倍 以上 길었다.

2. DAS(d)는 $d = 9.4 t_f^{0.31}$로 나타낼 수 있었다. 但, 여기서 t_f는 部分凝固時間이다.

3. 機械的 性質과 DAS의 關係는 橫軸을 log scale로 圖示하면 DAS가 增加할 수록 引張强度, 耐力, 硬度가 모두 直線的으로 減少하였다.

4. 引張强度를 基準할 때 耐熱石膏型 鑄造는 砂型에 비하여 約 15 %의 減少를 보였고 發泡石膏型 鑄造는 砂型 鑄造에 비하여 約 30 %의 減少를 보였다.

5. Ti/B에 의한 微細化 處理는 DAS가 減少하는 傾向을 보였으나 機械的 性質에는 큰 影響이 없었다.

6. DAS는 凝固時의 thermal parameter의 影響을 代表할 수 있는 因子가 되며 다른 條件이 一定할 때 DAS는 機械的 性質에 直接的인 影響을 미친다.

參 考 文 獻

1. 王崎洋一：石膏う鑄型による 精密鑄造, 中小企業の現場 series №7, 東京都立工業技術Center
2. 三井 清：JACT News 1980. 9 p.4911
3. F.M. John, J.T. Berry : A.F.S Trans. Vol.68(1960)p.645
4. R.E. Spear, G.R.Gardner : A.F.S Trans. Vol. 71(1963) p.209
5. N.S. Mahadevan, K.S. Sreenivasa Murthy.M. M. Seshadri : A.F.S. Trans. Vol. 68(1960) p. 77
6. J.T. Berry : A.F.S Trans. Vol. 78(1970) p. 421
7. W.D. Walter, C.M.Adams, H.F.Taylor : A.F.S Trans. Vol. 62(1954) p. 219
8. Walter Bonsack, O. Tichy : AFS Trans.vol., 57(1949) p. 509
9. K.Radhakrishna, S.Seshan : A.F.S Trans. Vol. 89(1981) p. 437
10. G.W. Form, P. J. Ahearn, J.F.Wallace : Vol. 67(1959) p.65
11. B. Chamberlain, J。Sulzer : A.F.S Trans. Vol. 72(1964) p. 600
12. P.E. Brown, C.M. Adams : A.F.S. Trans. Vol. 69(1961) p. 879
13. M.C. Flemings, S Z.Uram, H.F。Taylor Vol. 68(1960) p. 670
14. A.L.Kearney J. Raffin : A.F.S Trans. Vol. 85(1977) p.559
15. G.W. Form, J.F.Wallace : A.F.S Trans. Vol. 68(1960)
16. E.E. Stonebrook, W.E. Sicha : A.F.S Trans. Vol. 57(1949) p. 489
17. E.M. Passmore, M.C. Flemings, A。F.S. Trans. Vol. 66(1958) p. 96
18. 福迫達一, 久保公雄, 大中逸雄：鑄物, 51(1979) p. 82
19. 遠藤太郎：Jact News, 1983. p. 6747
20. 久保公雄, 福迫逸雄：鑄物 51(1979) p.586
21. 김 명호, 윤 종구, 한 봉희：대한금속학회지 제13권(1975) p. 282

22. 西 成基：대한금속학회지 제 19 권 (1981) p.578
23. 王崎洋一：鑄物 41(1969)p. 336
24. Clyde. M. Adams, H. F. Taylor : A. F. S Trans. Vol. 65 (1957) p. 170
25. AFSTRI : Principle of Gating and Rise-ring, chapter 5
26. 露崎恒雄：JACT NEWS, 1980, p.4851
27. R. F. Dalton : A. F. S Trans. Vol. 62 (1954) p. 210
28. R. F. Dalton : A. F. S Trans. Vol. 60 (1952) p. 351
29. A. S. M : Metals Handbook, 8th, Vol. 5, p. 222
30. 鑄物技術普及協會：鑄型造型法, V - 31
31. 岡野公平：鑄物 34(1962) p. 742
32. W. E. Sicha : A. F. S Trans. Vol. 69 (1961) p. 479
33. 小池進, 佃誠：JACT NEWS 1980 p. 4857
34. 日本鑄造技術講座編集委員會編：非鐵合金鑄物, 日刊工業新聞社 p. 185
35. M. C. Flemings : Solidification Proce-ssing, McGraw-Hill Book Co., p. 146
36. 日本鑄物協會 精密鑄造部會編：精密鑄造法, 日刊工業新聞社, p. 186
37. 日本鑄造 技術講座編集委員編：鑄造技術の 基礎, 日刊工業新聞社, p. 87