

論 文

Al-Si合金의 CFR과 MDE에 미치는 冷却速度的 影響

權赫茂*, 金水泳**

The Influence of Cooling Rates on the CFR and the MDE of Al-Si Alloys.

Hyuk - Moo Kwon, Soo - Young Kim

ABSTRACT

In order to clarify the solidification mechanism of Al-Si alloy, Mushy Degree of Eutectic Solidification (MDE) and Centerline Feeding Resistance (CFR) were systematically studied by casting with various compositions of Al-(6~18%) Si alloys into several kinds of molds having different cooling rates.

The results are as follows:

1. CFR% increases slightly as solute concentration increases, but decreases remarkably as the cooling rate of the mold increases, that is, the composition dependence of the alloys has more effect on the change of CFR% than that of the mold cooling rate.
2. The composition dependence of MDE value has the same tendency as that of Degree of Eutectic Solidification (DES). MDE value within the range of hypereutectic composition is larger than that of hypoeutectic and it represents the maximum value at eutectic composition. The higher the cooling rate is, the less the MDE value is.

1. 緒 論

鑄物이鑄型內에서 凝固하는 舉動을 調査하여 이것을 定量的인 값으로 表現하는 것은 鑄造技術의 基礎를 確立하는 데 매우 重要한 일이다. 그러나 鑄型 內部에서 金屬이 凝固하는 狀況을 直接 觀察할 수는 없으므로 透明한 容器內에서 凝固하는 鹽의 水溶液의 舉動을 觀察하여 金屬의 凝固를 推論하거나,¹⁾ 金屬의 凝固時 冷却曲線을 求하여 解析하는 方法이 있다.^{2~15)}

後者の 研究方法中에서도 冷却曲線으로 부터 얻은 값으로 合金의 凝固特性을 定量的으로 表現한 것은 Flinn 等^{2~5)}의 中心線注湯抵抗 (Centerline Feeding Resistance : CFR)에 對한 研究와, 金水泳 等^{6~9)}의 Mushy 凝固度 (Mushy Degree of Eutectic Solidification : MDE)에 對한 研究가 있다.

그러나 몇몇 研究者가 研究 發表하였을 뿐 아직도 이에 對한 研究는 極少하다.

本 研究에서는 Al-Si 合金의 亞共晶組成인 것부터 過共晶組成인 것을 冷却速度가 相異한 各種의 鑄型에 鑄造하여 CFR과 MDE를 調査하였다.

2. 實驗方法

本 實驗에 使用한 原料 및 試料의 化學組成은 Table 1. 과 같다.

純度 99.8%인 알루미늄을 反射爐에서 熔解한後 純度 99.0%인 粒狀의 金屬珪素를 添加하고 1,000℃로 加熱하여 Si의 含有量이 33.25%인 Al-Si 母合金을 製作하였다. 이 母合金과 純 알루미늄을 다시 配合하여 電氣抵抗爐 (Siliconit furnace, Konetsu Kogyo BSH 2040 X)에서 再熔解하여 Si의 目標組成이 各各 6, 9, 12, 15 및 18%인 熔湯을 製造하였다.

위와 같이 熔解한 熔湯을 各 組成別로 Fig.1 과

* 忠南대학교 공과대학교수

** 한양대학교 공과대학교수

Table 1. Chemical composition of materials and samples (wt.%)

Composition Material	Si	Cu	Fe	C	Al
Al- ingot	0.08	0.01	0.07	—	Min. 99.8
metallic silicon	99.0	—	0.35	0.07	—
Al-Si alloy	33.25	0.01	0.17	—	Rem- ainder
Sampe No. 1	5.97	0.01	0.09	—	“
“ 2	9.03	0.01	0.10	—	“
“ 3	11.95	0.01	0.11	—	“
“ 4	15.02	0.01	0.12	—	“
“ 5	18.07	0.01	0.14	—	“

같은 各種의 鑄型에 鑄造하였다. 그림에서 試料의 中心부와 鑄型壁面部에는 熱電對線 (φ 0.65mm chromel - alumel) 을 設置하여 strip chart recorder (type 3056) 에 의해 凝固時의 冷却曲線을 얻었다. 이때 熱電對線의 熱接點으로부터 10mm 거리까지는 磁製保護管으로부터 露出시켜 裸線으로 하여 熱傳導를 容易하게 하였으며, 이 裸線部分은 Al

dimension (mm) No	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	h ₁	h ₂	h ₃
1	55	75	30	50	75	30	10
2	65	85	40	60	100	35	10
3	75	100	55	75	110	40	12
4	87	115	65	90	125	40	13

D	t	h ₁	h ₂
20	10	70	30
30	10	70	30
40	10	70	30

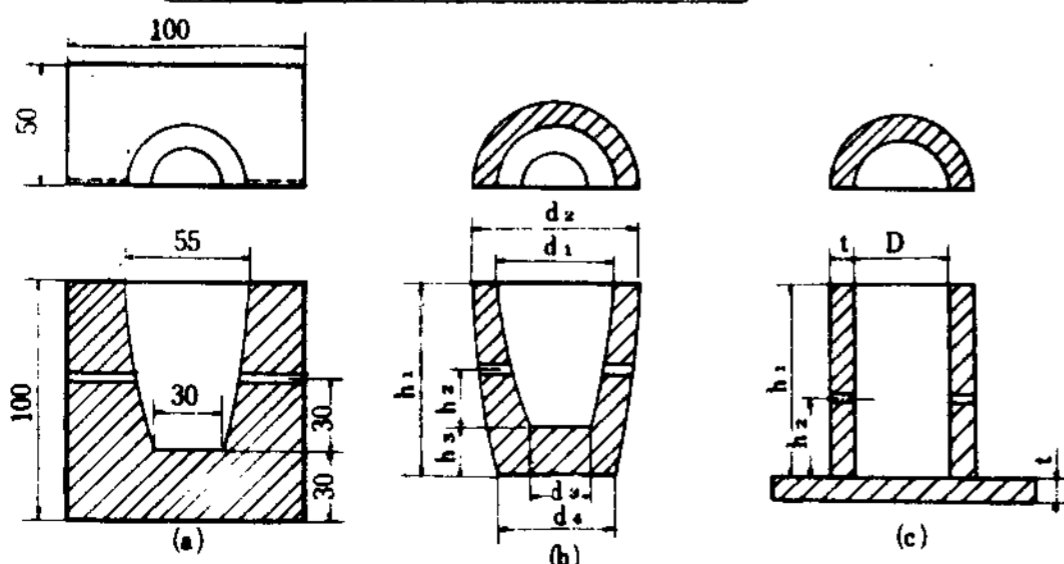


Fig. 1 Dimension of molds (a) castable mold (b) graphite molds (c) metal molds.

熔湯과의 電氣絶緣을 위해서 알루미나粉粒을 5% 물 유리에 타서 약 1mm 두께로 塗布하였다.

鑄型의 材質은 Fig.1 (a) 에서 castable 鑄型의 경우 샤모트質骨材와 알루미나시멘트가 混合되어 있는 castable 을 체로 쳐서 -65 mesh (210μ Under size) 인 것으로 成型하였고, Fig.1(b) 의 黑鉛鑄型은 磷狀黑鉛 75%와 耐火粘土 25%로 되어 있는 鑄物用 黑鉛도가니를 垂直으로 分割하여 만든 것이며, Fig.1(c) 의 金型은 0.3% C-steel 을 機械加工하여 만들었다.

鑄込前의 熔湯의 溫度는 各 試料의 組成에 따라 平衡狀態圖의 液狀線보다 150℃ 높은 溫度에서 30 分間 유지한 후 鑄込하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 組成 및 鑄型의 種類와 CFR

3.1.1 CFR의 定義

鑄型內에서 凝固하는 金屬의 凝固舉動을 調査하는 方法中에서 熱電對를 鑄型空腔에 設置하여 溫度-時間의 冷却曲線을 얻어서 解析하는 方法이 있다.^{2~15)}

이 중에서도 Flinn은 液相에서 樹枝狀晶이 생기는 程度에 미치는 合金의 組成이나 鑄型의 種類의 影響을 檢討하는 變數로써 CFR을 提案하였고,^{2,4)} 그 概念은 다음과 같다.

鑄物이 完全히 凝固하기 直前에 그 鑄物의 中心에서 液相과 固相의 狹少帶가 있으며, 어떤 경우라도 中心線에 固相이 存在하면 押湯으로부터 給湯하는 것이 어려워질 것이므로, 凝固하고 있는 鑄物에서 中心線의 結晶이 鑄物內에 存在하고 있는 時間에 對한 鑄物 全體가 凝固하는 데 要하는 時間의 比率의 百分率을 中心線注湯抵抗 (Centerline Feeding Resistance: CFR) 이라 하였고, 이는 鑄物의 冷却曲線에서 凝固開始와 凝固完了曲線으로부터 다음 式으로 計算할 수 있다.

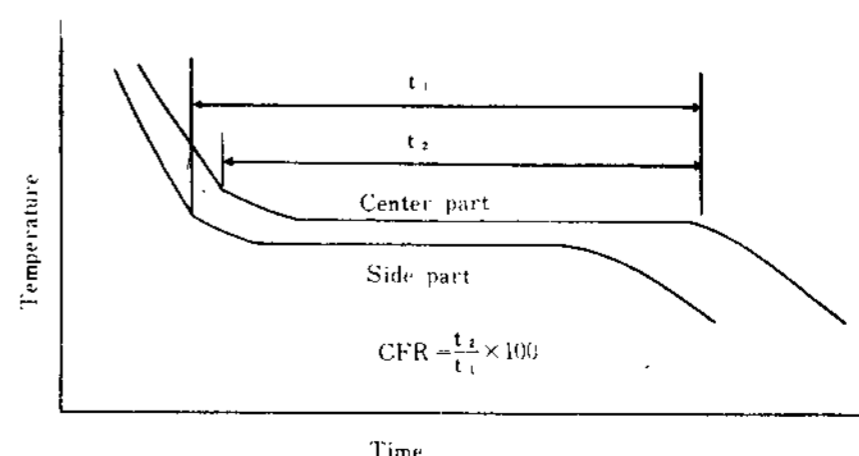


Fig. 2 Definition of CFR.

Fig. 2는 위와 같은 概念을 凝固曲線에 나타낸 것으로 $CFR = t_2/t_1 \times 100(\%)$ 이다.

3.1.2 CFR의 調査結果

Fig. 3 및 Fig. 4는 Al-Si合金의 Si含有量을 6, 9, 12, 15 및 18%로 變化시킨 熔湯을 各種 鑄型에 鑄造한 것에 對한 CFR의 組成依存性을 調査한 結果이다.

Fig. 3은 內徑이 $\phi 55$ mm인 castable鑄型和 內徑이 各各 $\phi 65$ mm, $\phi 75$ mm 및 $\phi 87$ mm인 黑鉛鑄型에 鑄造한 것이고, Fig. 4는 內徑이 $\phi 20$ mm, $\phi 30$ mm 및 $\phi 40$ mm인 金型에 鑄造한 것이다.

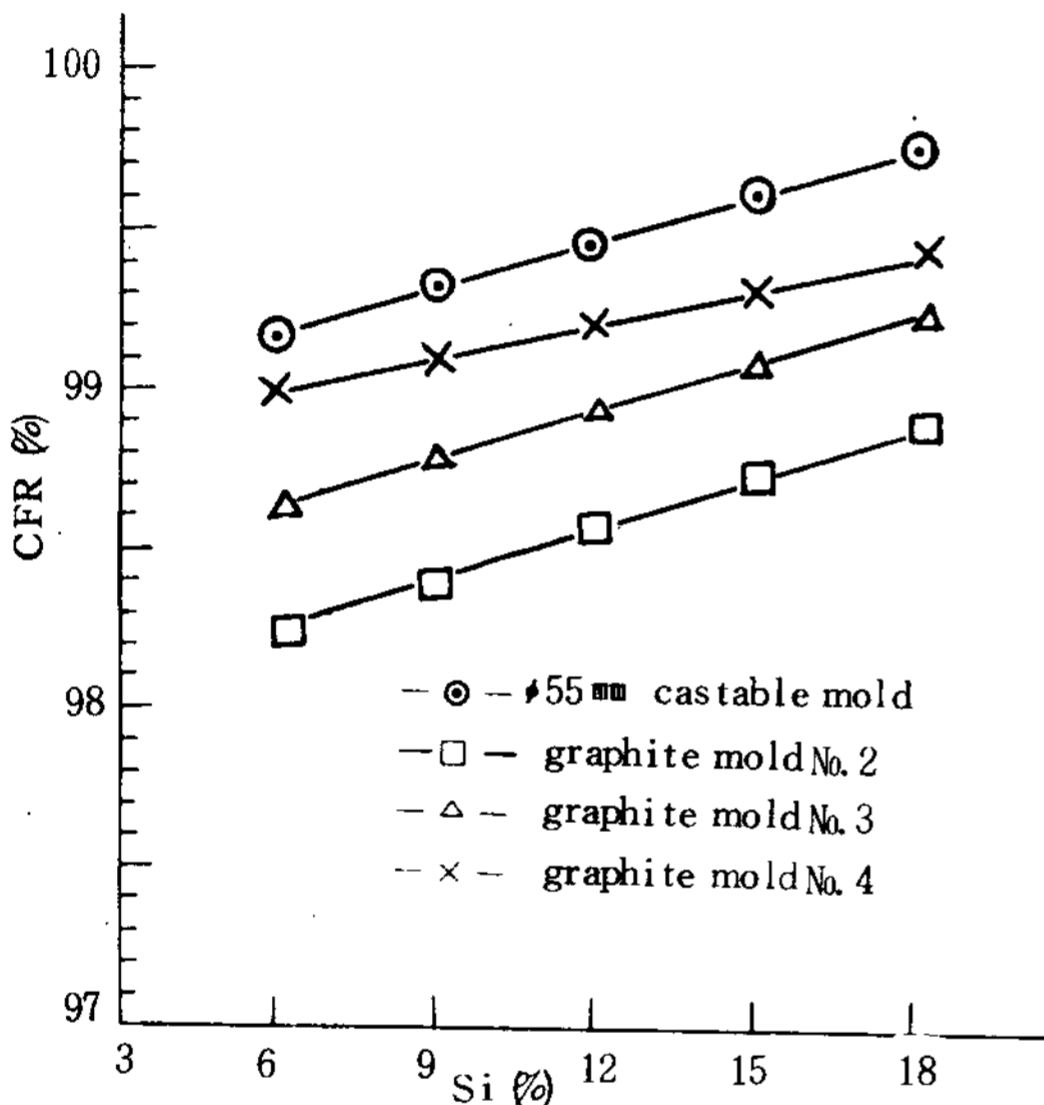


Fig. 3 Relation between CFR and Si contents of Al-Si alloys casted in castable mold and graphite molds.

이들의 CFR %는 Si의 含有量이 增加함에 따라 CFR %는 다소 增加하는 傾向이고, 같은 組成에서는 鑄型の 冷却能力이 큰 것일수록 CFR(%)는 적은 값을 보인다.

그러나 Fig. 3과 Fig. 4에서 CFR(%)의 變化에 미치는 熔湯의 組成依存性和 熔湯이 鑄型內에서의 冷却速度依存性을 比較하면 後者가 前者보다 월등히 큰을 알 수 있다. 即, 鑄型種類의 變化에 따른 CFR(%)의 變化는 12% Si의 경우 92~99.5% 이나, 組成의 變化에 따른 CFR(%)의 變化는 castable鑄型의 경우 99.2~100%로써 增加率이 輕微하였다.

이와 같은 現象은 本 實驗에 使用한 Al-Si合金의 共晶凝固時에 Al과 Si間的 先行相은 Si이며,¹⁶⁾ 또한 亞共晶組成에서의 初晶 Al에 比하여 過共晶組成에서의 初晶 Si의 比重이 熔湯의 比重보다 적기

때문에 鑄型壁面部에서 初晶이 晶出하더라도 熔斷되어 中心部로 이동하여 成長할 수 있으므로 過共晶組成에서는 CFR(%)가 100%에 接近하는 것으로 思

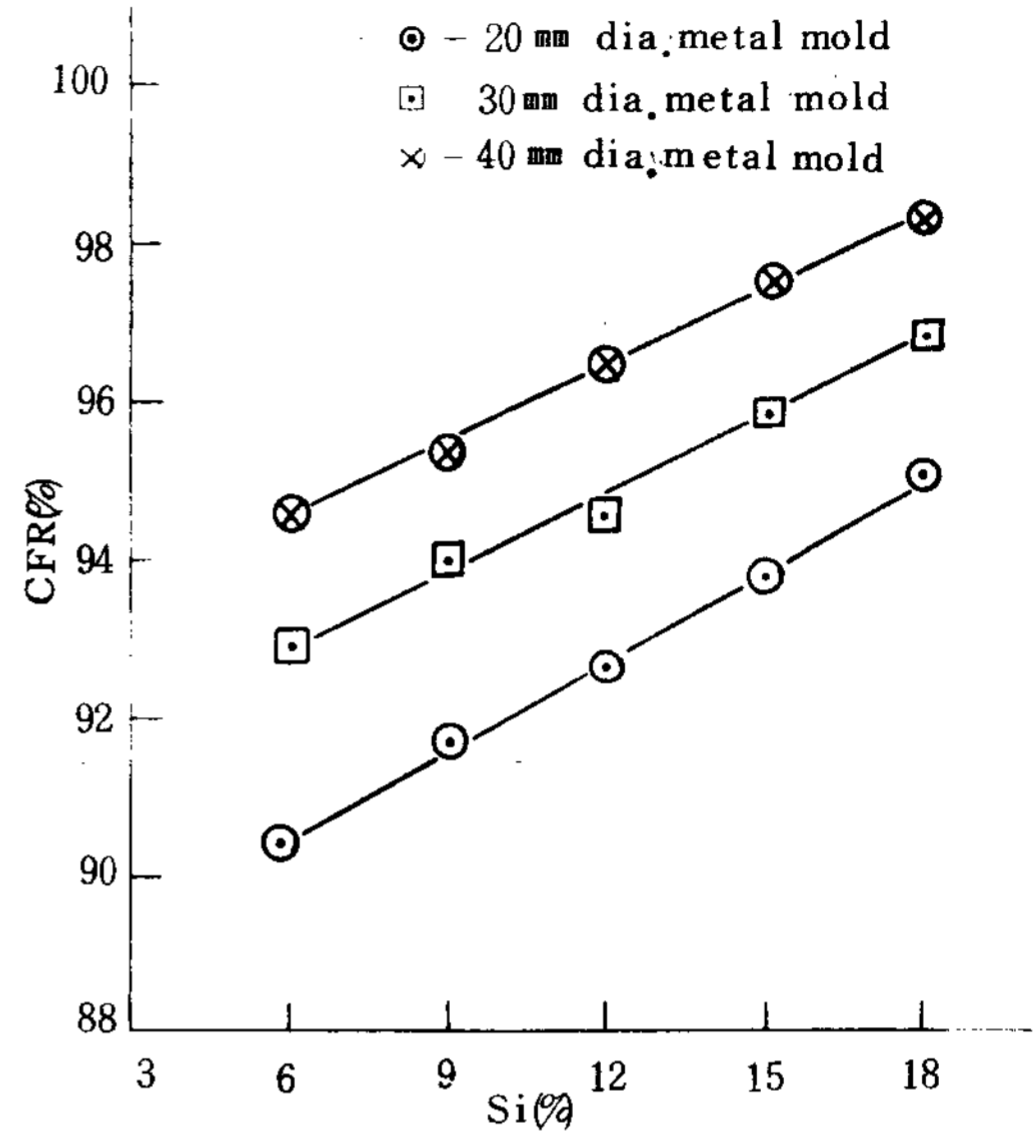


Fig. 4 Relation between CFR and Si contents of Al-Si alloys casted in metal molds.

料된다.

Fig. 5는 위와 같은 假說을 만족시키고 있다.

Fig. 5는 Al-18% Si合金을 $\phi 75$ mm 黑鉛鑄型에 鑄造한 것의 各부의 組織을 拔萃한 것이다.

이 組織寫眞에서 (a)와 (b)는 試料의 上部의 鑄型壁面部와 中心部이며, (a)와 (d)는 試料의 中間部の 鑄型壁面部와 中心部이다.

Fig. 5의 (a)와 (b)에는 A, B, C 및 D와 같은 粗大한 pin hole을 보여주고 있으며, 이들 pin hole을 만든 熔湯內의 殘留가스의 凝集時期는 共晶凝固가 完了되기 直前이었을 것으로 추정할 수 있다.

即, 初晶의 核이 生成되어 成長하고 있을 時期에 凝集한 가스들은 殘留液相으로부터 大氣中으로 放出될 수 있으며, 殘留液相의 流動性이 減少되어 凝集한 가스의 浮上이 抑制되는 時期에 凝集한 가스들이 pin hole로 남을 수 있으므로 Fig. 5에서 pin hole의 分布와 함께 初晶 Si의 分布狀態를 檢討해 보면 前述한 바와 같이 鑄型壁面部에서 初晶이 晶出하더라도 熔斷되어 中心部로 移動하여 成長할 수 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 5의 (c)에서 鑄型壁面部에는 初晶의 晶出이 보이지 않는 것은 過冷이 심한 이 部分에서

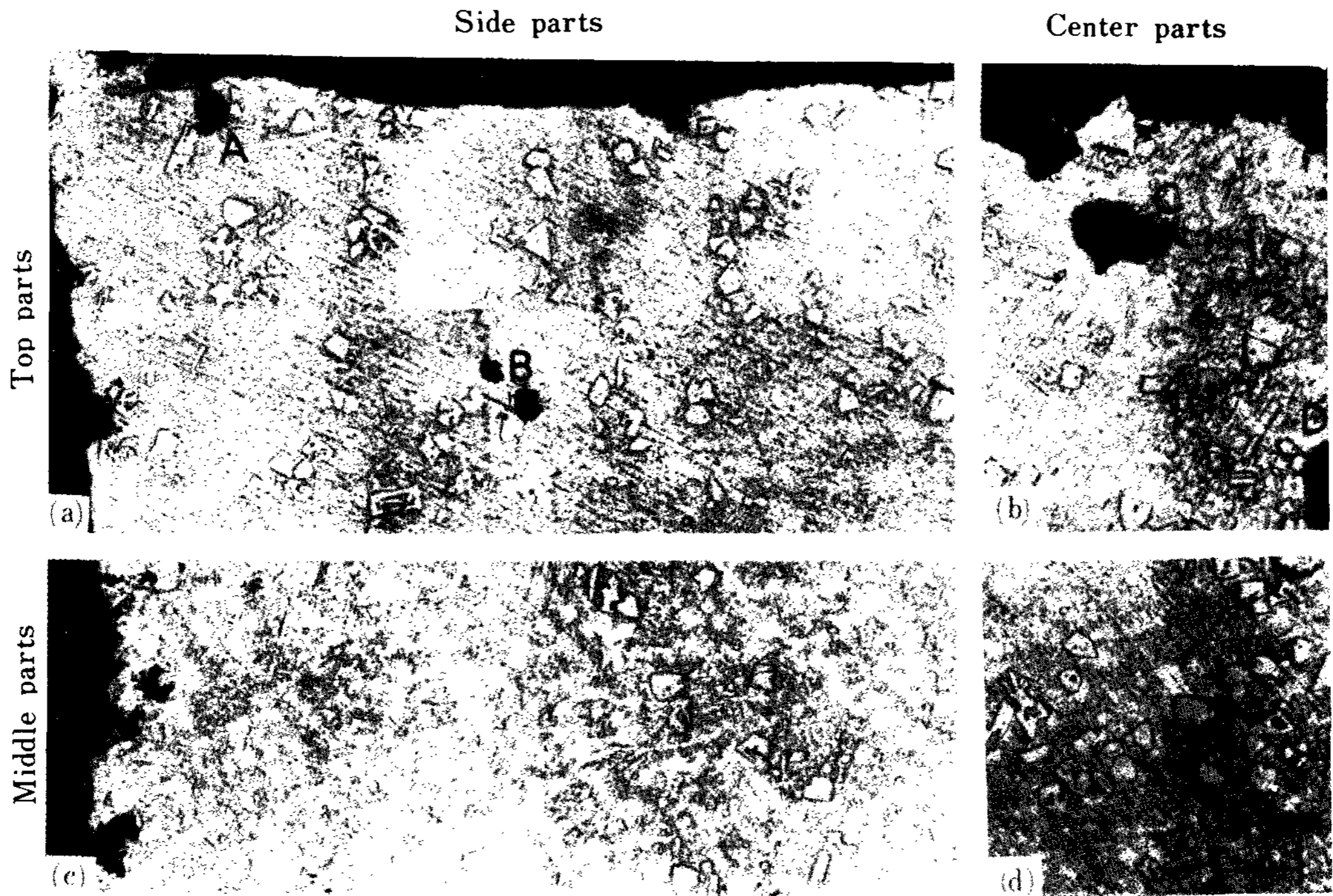


Fig. 5 The microstructures of Al - 18% Si alloy casted in ϕ 75 mm graphite mold.

初晶의 生成과 遊離를 反復하는 동안 그 部分의 熔湯의 濃度가 共晶組成쪽으로 變化하여 初晶이 적게 보이는 것으로 思料되며, 이러한 現象이 綜合적으로 作用하여 Al-Si 合金의 CFR %에 미치는 組成依存性を 적게하는 것으로 思料된다.

3.2 組成 및 鑄型의 種類와 MDE

3.2.1 MDE의 定義

共晶型合金의 凝固時 Mushy 凝固度 (Mushy Degree of Eutectic Solidification : MDE)는 鑄鐵의 凝固形態를 調査하기 위하여 金水泳^{6,7)}에 依하여 提案된 것이다.

MDE는 Fig. 6과 같이 鑄物이 凝固時 冷却曲線을 鑄物의 中心部와 鑄型壁面部에서 取하여 다음과 같이 定義하였다.

$$MDE = \frac{\text{中心部の 共晶凝固開始부터 完了時 까지의 所要時間}}{\text{鑄型壁面部의 共晶凝固開始時間 - 中心部の 共晶凝固開始時間}}$$

Fig. 6의 冷却曲線에서 $MDE = t_2/t_1$ 으로 表示된다.

合金의 凝固時 MDE의 意味는 다음과 같다.

$MDE = t_2/t_1$ 에서 $t_1 \approx 0$ 인 경우는 MDE 값은 無限大이며 完全한 mushy型 凝固를 하는 경우이고,

$t_2 \approx 0$ 인 경우는 MDE 값이 0이 되고 完全한 skin型 凝固를 하는 경우이다.

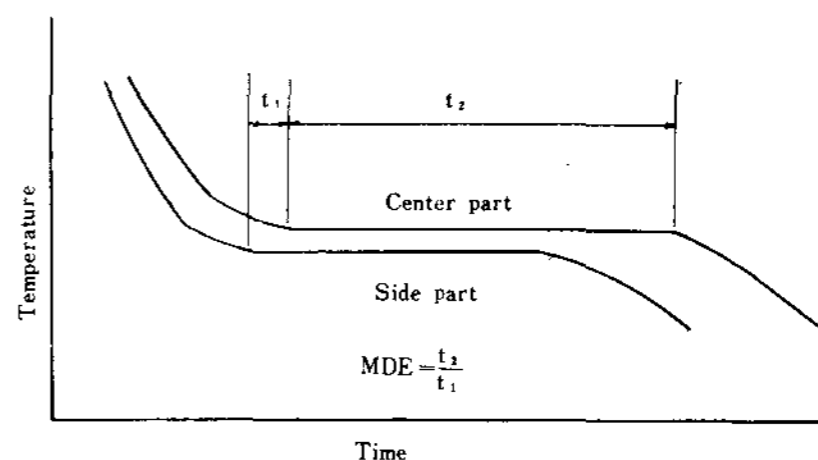


Fig. 6 Definition of MDE

이러한 觀點에서 t_1 區間은 skin型 區間이며, t_2 區間은 mushy型 區間이라 할 수 있으며, $t_1 = t_2$ 인 경우 卽, $MDE = 1$ 이란 意味는 skin型 凝固가 1/2이고 mushy型 凝固가 1/2이므로 MDE 값이 1보다 적은 合金을 skin型 凝固를 하는 合金이라고 하고 1보다 큰 合金을 mushy型 凝固를 하는 合金이라 할 수 있다.

3.2.2 MDE의 調査結果

Fig. 7 및 Fig. 8은 Al-Si 合金의 Si含有量을 6, 9, 12 및 18%로 變化시킨 熔湯을 各種 鑄型에 鑄造한 것의 MDE값을 나타낸 것이다.

卽, Fig. 7은 內徑이 ϕ 55 mm인 castable 鑄型

과 內徑이 各各 $\phi 65\text{ mm}$, $\phi 75\text{ mm}$ 및 $\phi 87\text{ mm}$ 인 黑鉛鑄型에 鑄造한 것이고, Fig. 8은 內徑이 $\phi 20\text{ mm}$, $\phi 30\text{ mm}$ 및 $\phi 40\text{ mm}$ 인 金型에 鑄造한 것이다.

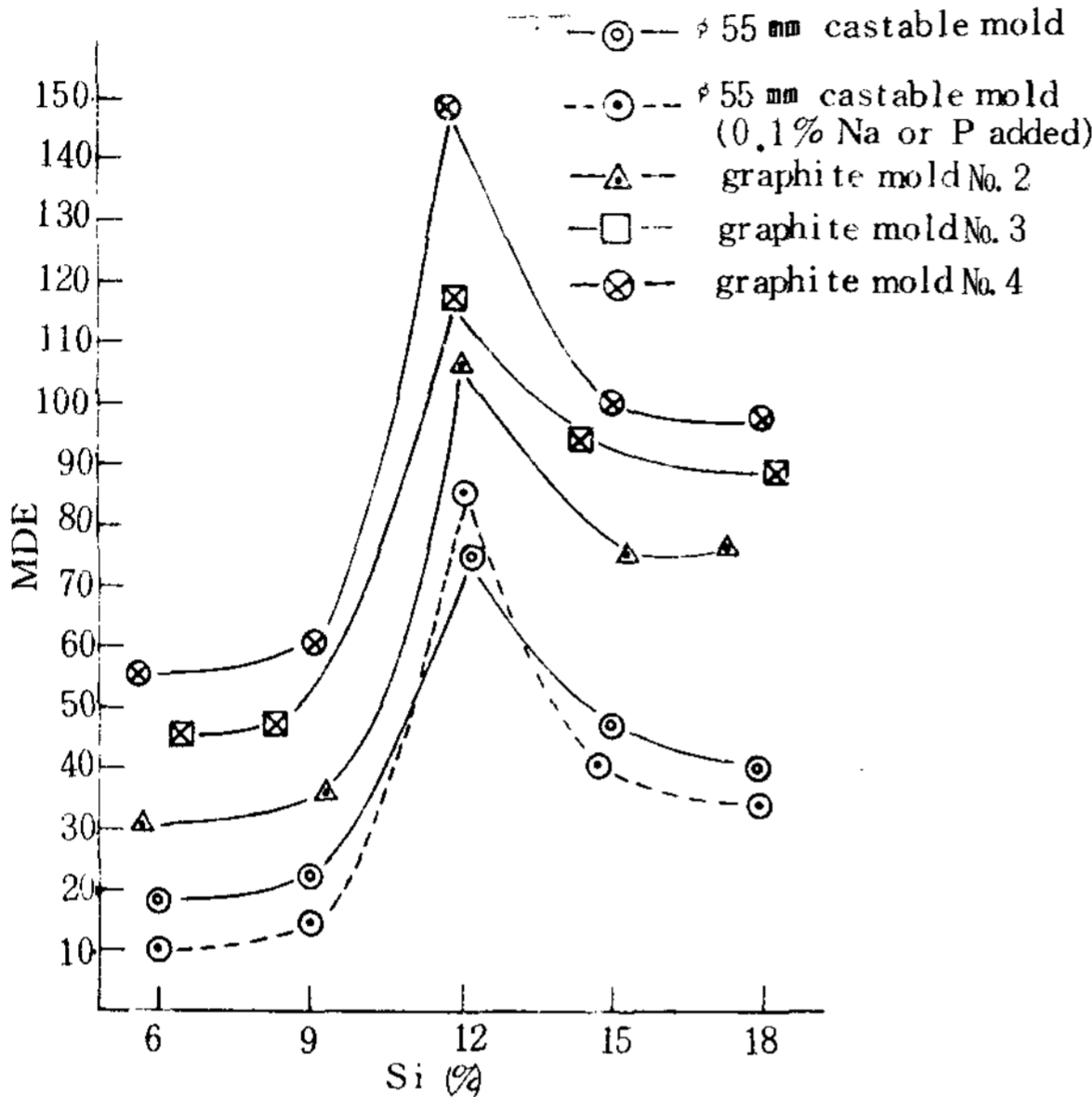


Fig. 7 Relation between MDE and Si contents of Al-Si alloys casted in castable mold and graphite molds.

그림에서 組成의 變化와 MDE값의 關係를 보면 各種 鑄型에 鑄造된 試料가 共通的으로 共晶組成에서 最高의 MDE값을 나타낸다. 또한 亞共晶 組成範圍

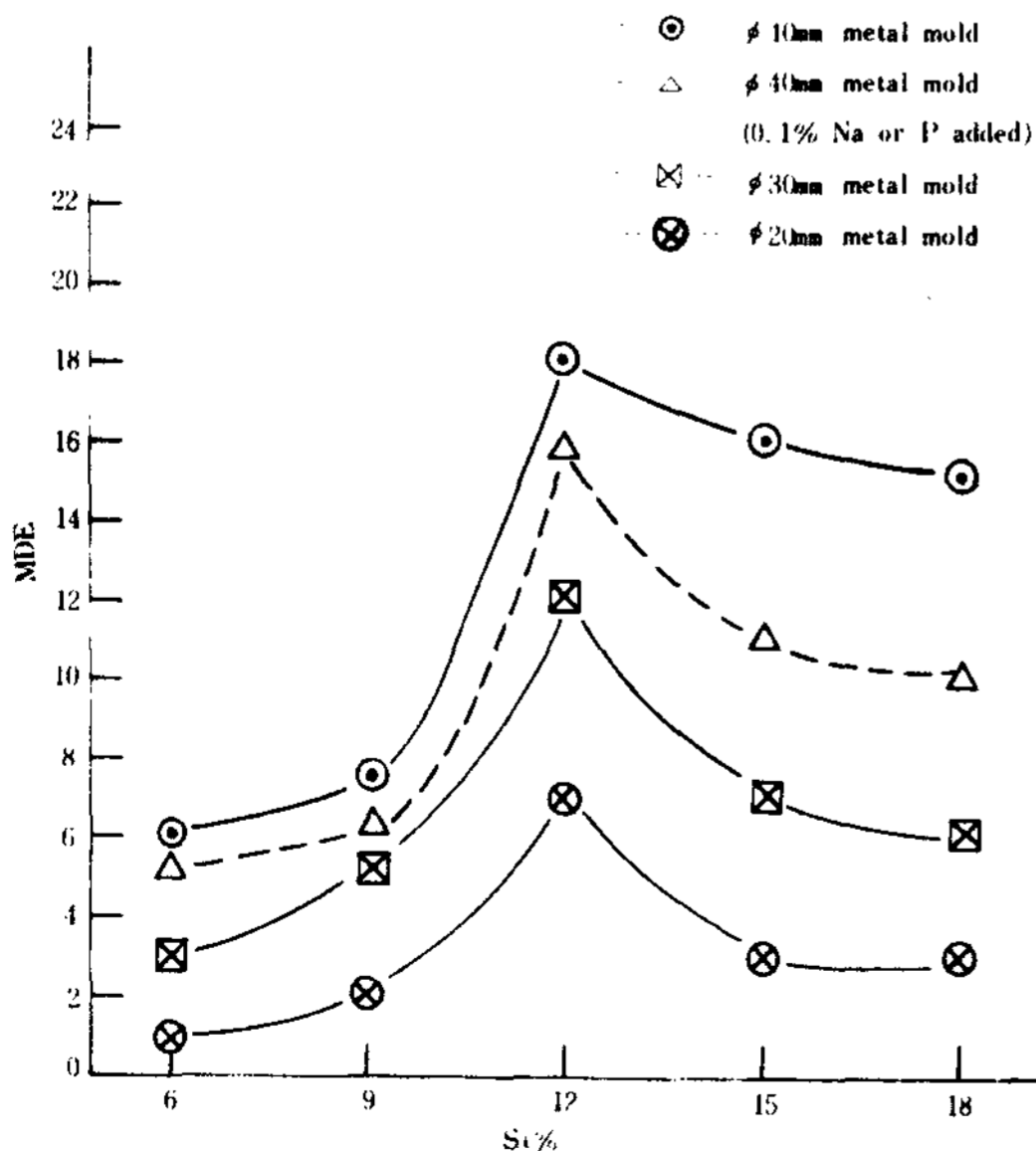


Fig. 8 Relation between MDE and contents of Al-Si alloys casted in metal molds.

에서는 Si의 含有量이 減少할수록 MDE값이 共晶組成인 것보다 低下하였고, 過共晶 組成範圍에서는 Si의 含有量이 增加할수록 MDE값이 減少하나 그 減少率은 亞共晶인 경우보다 적다.

한편 鑄型의 種類 및 크기의 變化와 MDE값의 關係는 熔湯을 急冷시킬 수 있는 鑄型일수록 MDE값이 減少하는 傾向을 보여준다.

또한 MDE값의 組成依存性은 CFR%의 組成依存性에 比하여 뚜렷하게 나타나고 있으나, 凝固時에 冷却速度的 依存性이 더 큰 것을 알 수 있다.

MDE값의 組成依存性을 檢討하기 위하여 Fig. 9에서 DES와 比較하였다. DES란 平衡凝固時의 共晶凝固度 (Degree of Eutectic Solidification)를 各 組成에서의 初晶과 共晶의 百分率로 나타낸 것이다. DES(%)가 적은 組成의 合金은 큰 것에 比하여 共晶凝固 以前에 初晶의 晶出量이 많으며 殘留液相의 量이 작은 狀態에서 共晶凝固를 하게 된다.

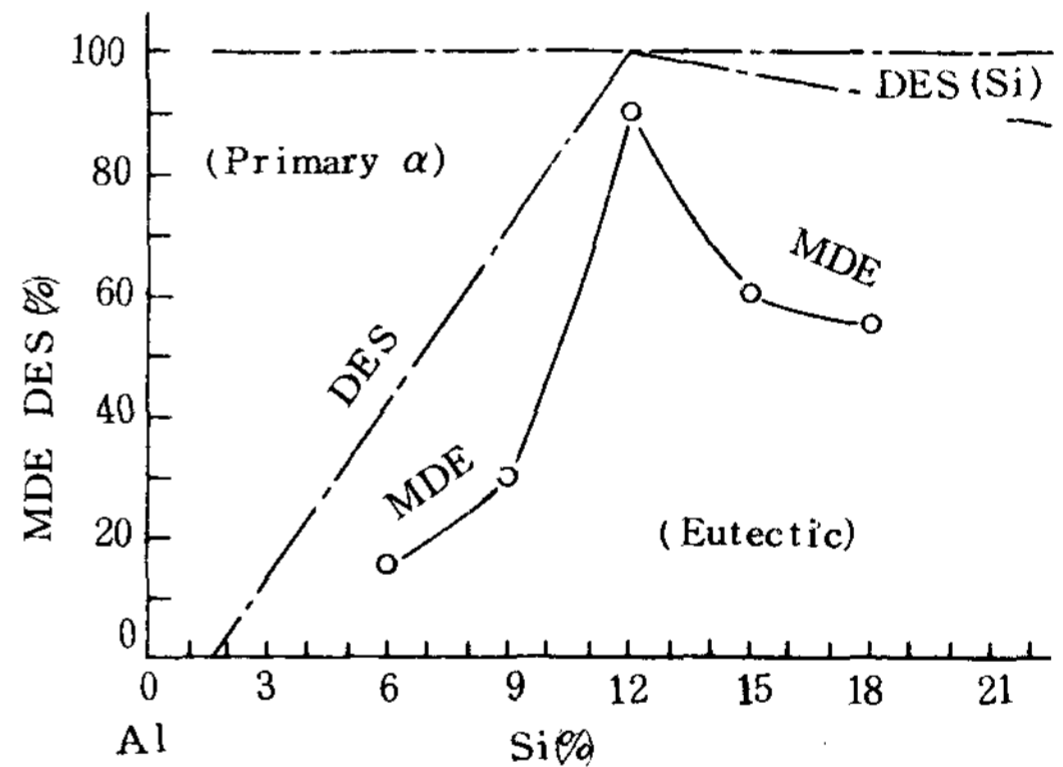


Fig. 9 Relation between MDE, DES (%) and Si contents.

Fig. 9의 MDE값은 內徑 $\phi 55\text{ mm}$ 인 黑鉛鑄型에 鑄造한 試料의 것이며, 이것의 組成依存性은 DES(%)의 勾配에 比例함을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 8에서 改良處理를 한 것은 亞共晶 및 共晶組成의 것은 0.1% Na을 添加한 것이고 過共晶 組成은 0.1% P를 添加한 것이다. 이들의 MDE값은 改良處理를 하지않은 같은 鑄型의 試料에 比하여 全般的으로 적은 값을 보며 주어 冷却速度가 빠른 鑄型에 鑄造한 것과 같은 效果가 있다.

4. 結 論

Al-(6~18%) 合金을 熔湯의 冷却速도를 달리 할 수 있는 各種 鑄型에 鑄造하여 CFR과 MDE를

調査한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) Si 含有量의 變化에 따른 CFR(%)의 變化는 Si 의 含有量이 增加하면 CFR(%)가 多少 增加하는 傾向이다.

2) 冷却速度가 빠른 鑄型에 鑄造한 것은 CFR(%)가 減少하며, 그 減少率은 組成의 變化에 따른 CFR(%)의 變化率보다 顯著하다.

3) 組成變化에 따른 MDE 값의 變化는 共晶組成인 것이 가장 크고 亞共晶組成인 것은 過共晶組成인 것보다 적으며 DES(%)에 比例하는 傾向이다.

4) 冷却速度가 빠른 鑄型에 鑄造한 것은 MDE 값이 減少한다.

參 考 文 獻

- 1) A. Ohno : "The Solidification of Metals" The Iron and Steel Inst. London(1967) 349.
- 2) R. A. Flinn : Trans. AFS, 64 (1965) 665.
- 3) H. F. Bishop, F. A. Brandt, W. S. Pellini : Trans. A. F. S. 59 (1951) 435.
- 4) R. A. Flinn : "Fundamentals of Metal Casting," Addison Wesley Publishing Company, Massachusetts (1963) 29.
- 5) J. L. Walker : "Liquid Metals and Solidification," A. S. M. Cleveland, Ohio (1958)
- 6) 金水泳, 小岩井 克忠, 草川隆次 : 鑄物, 43, 12 (1971) P.P 1036-1044
- 7) T. Kusakawa, Soo Young Kim : Report of the Casting Research Laboratory, Waseda University, 22 (1971) P.P 29-40
- 8) 權赫茂, 李相益, 金水泳 : 大韓金屬學會誌, 20, 3 (1982) 264
- 9) 李炳燁, 權赫茂, 崔洋鎭, 李啓完, 金水泳 : 大韓金屬學會誌, 20, 3 (1982) 268.
- 10) E. F. Ryntz, J. F. Janowak, A. W. Hochstein, C. A. Wargel : A. F. S. Trans., 79 (1971) 141.
- 11) C. R. Loper, W. W. Heine, M. D. Chaudhari : 第2回 鑄鐵金屬學國際シンポジウム(ジエネーフ) (1974) 鑄鐵金屬學, 637
- 12) E. Titze, H. J. Dichtl : Giesserei, 61, 20 (1974) 619
- 13) J. Plessers, F. Lietaert, J. Van Eeghem : Fonderie Belg., 48, 4 (1978) 15
- 14) J. Plessers, F. Lietaert, J. Van Eeghem : Giesserei, 66, 2 (1979) 29
- 15) M. Hecht : Fonderie, 379 (1978) 181
- 16) V. de L. Davies : J. Inst. Metals, 93 (1965) 10

