論 文

금형주조한 Al-10%Si합금의 응고조직과 기계적 성질에 미치는 금형의 냉각효과에 관한 연구

이동윤*, 천병욱**, 최창옥**

The Effect of the Metallic Mold Cooling System on the Solidification Structures and the Mechanical Properties for Al-10%Si Alloy Castings

Dong-Youn Lee*, Byung-Wook Cheon** and Chang-Ock Choi**

Abstract

This study has been focused on the influence of the metallic mold cooling effects on the solidification structures and the mechanical properties for Al-10%Si alloy castings by the variation of pouring temperatures, metallic mold temperatures and Cooling part of metallic mold. The dendrite arm spacing of Al-10%Si alloy was decreased with increasing cooling rate. In case of bottom cooling of metallic mold, DAS was appeared to be 20-22μm and in the middle cooling, it was increased to 36-40μm. The DAS decreased proportionally with(cooling rate)$^{-3/2}$ at pouring temperatures 680℃ and (cooling rate)$^{-1/2}$ at pouring temperature 760℃, but it was proportionally increased to(local solidification time)$^{1/2/-1/3}$ at pouring temperature 680℃ and 760℃. The maximum tensile strength of Al-10%Si alloy casting was obtained in case of bottom cooling of mold at pouring temperature 680℃ and metallic mold temperature 320℃.

1. 서론

Al-Si계 합금은 주요한 주조용 합금으로서 Si 성분은 응고시에 주괴의 부피를 증가시키기 때문에 Al합금의 응고수축을 감소시킬 뿐만아니라, Si첨가량의 폭이 넓어서 고액 공존 온도범위가 넓은 상태나 좁은 상태를 구분하여 사용할 수가 있어 용융금속의 보급이 양호하여 복잡한 형상의 주물에 적합한 합금으로 알려져 있으며[1], 또한 다른 합금원소의 공존에 의한 문제점이 적어 기계적 성질이 우수하고 주조결함 발생이 적은 합금을 얻을 수 있다.[2] 한편 내마모성 향상과 열팽창 계수를 감소시키므로 피스톤, 실린더 등 내열용에도 이용되고 있어 용도가 증대하고 있다.[3]

Al-Si계 합금의 응고에 있어서 등축정의 생성은 결정이 안정응고각을 생성하기 이전의 단계에서 주형벽면의 용질원소의 작용과 용융금속의 유동으로 주형벽면에서 생성, 유리되어 주괴내부로 이동, 축적하여 등축정대를 형성하는 것[4~7]으로 이는 과냉도가 클수록 핵생성이 보다 많이 일어나서 등축정 면적율의 증가와 결정을 미세화하는 것으로 보고되고 있다.

Al-Si계 합금의 현미경 조직에 있어서 dendrite 형상은 중심의 1차 arm과 직교한 2차 arm의 구성으로 dendrite성장 형태는 거시편석과 기공등의 주조결함 형상과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 많은 연구[8]가 이루어 지고 있다. 市川[9]등은 dendrite arm spacing크기와 기계적 성질과의 관계에서 dendrite arm spacing 크기가 감소함에 따라 기계적 성질이 향상됨을 보고하였다. 최근 응고조직의 변화에 의한 주물의 품질향상에 관한 연구[10]가 수행되고 있으므로 본 연구에서는 Al-10%Si

* 태주실업(주)(Taejoo Ind. Co., Ltd.)
** 동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

합금의 금형주조에 있어서 주조조건에 의한 용융금속 주입, 응고시 금형의 냉각효과에 의한 주괴의 응고조직과 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

전기저항로에 흑연도가니를 사용하여 99.7% 공업용 순Al금속을 용해하면서 Al-20wt.%Si 모합금을 첨가시켜 Al-10wt.%Si 조성이 되도록 용해하였으며, 용해 시에는 탈가스제나 미세화제를 사용하지 않았다. 용해한 용융금속은 일정한 위치와 높이에서 금형에 주입하기 위하여 주입장치[11]를 사용 시편을 제작하였다. 본 실험에 사용된 금형은 Fig.1과 같으며 냉각속도를 측정하기 위하여 C.A. 열전대를 금형 및 주괴내부에 설치하여 주입후 주괴의 응고속도 변화를 측정하였다.

용융금속의 주입온도는 680℃, 720℃ 및 760℃이며 금형의 가열온도는 상온, 250℃ 및 320℃로 하였다. 금형의 냉각은 Fig.1에 표시한 바와 같이 금형의 저면, 하부, 중부 및 상부로 구분 설치하였다. 제작한 주괴의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 또한 현미경조직을 관찰하여 secondary dendrite arm spacing와 dendrite arm length[12] 및 공정Si입경의 크기 [13]를 측정하고 경도 및 인장시험을 하였다.

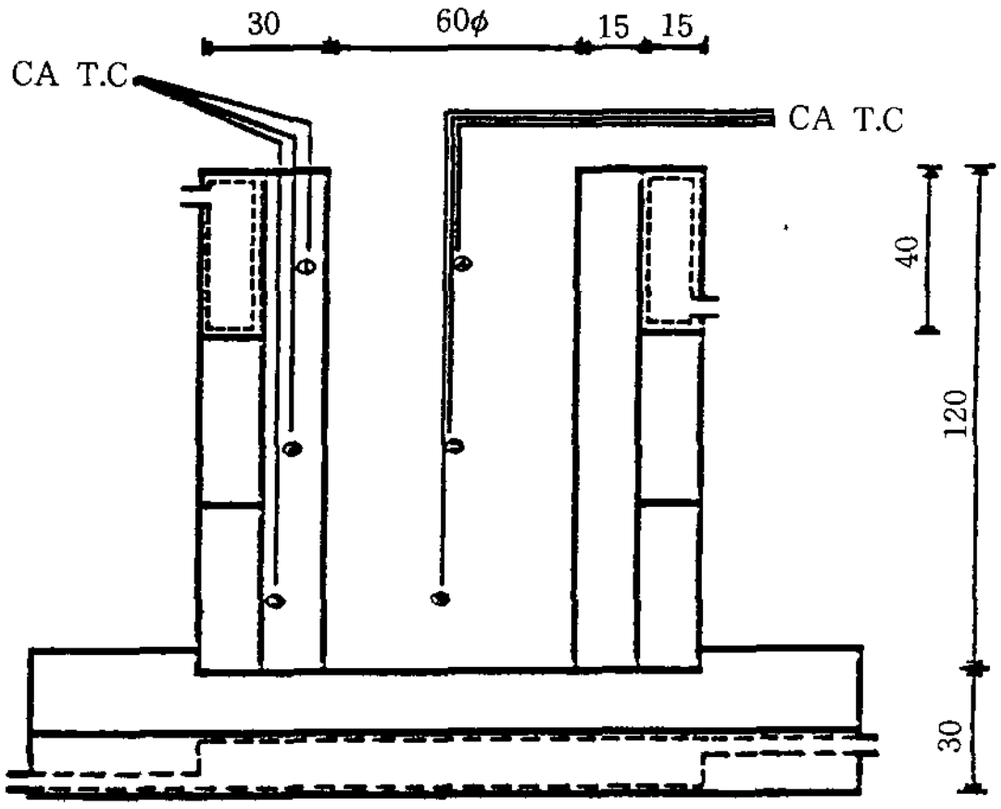

Fig. 1. Cylindrical metallic mold and thermocouple demension.(mm)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주조조건에 의한 조직변화

Photo 1은 주입온도 680℃에서 금형 온도를 250℃와 320℃로 금형의 중부와 저면을 냉각한 경우의 현미경조직을 나타내었다. 또한 Fig. 2는 주조조건에 의한 secondary dendrite arm spacing (DAS)의 크기를 나타낸 것으로 주입온도 680℃에서 금형 온도를 상온과 320℃로 주입하는 경우 금형의 저면 냉각은 DAS 20~22㎛로 가장 짧은 조직을 나타내었으며, 또한 주입온도 760℃에서 금형 온도 320℃로 금형의 중부를 냉각하는 경우

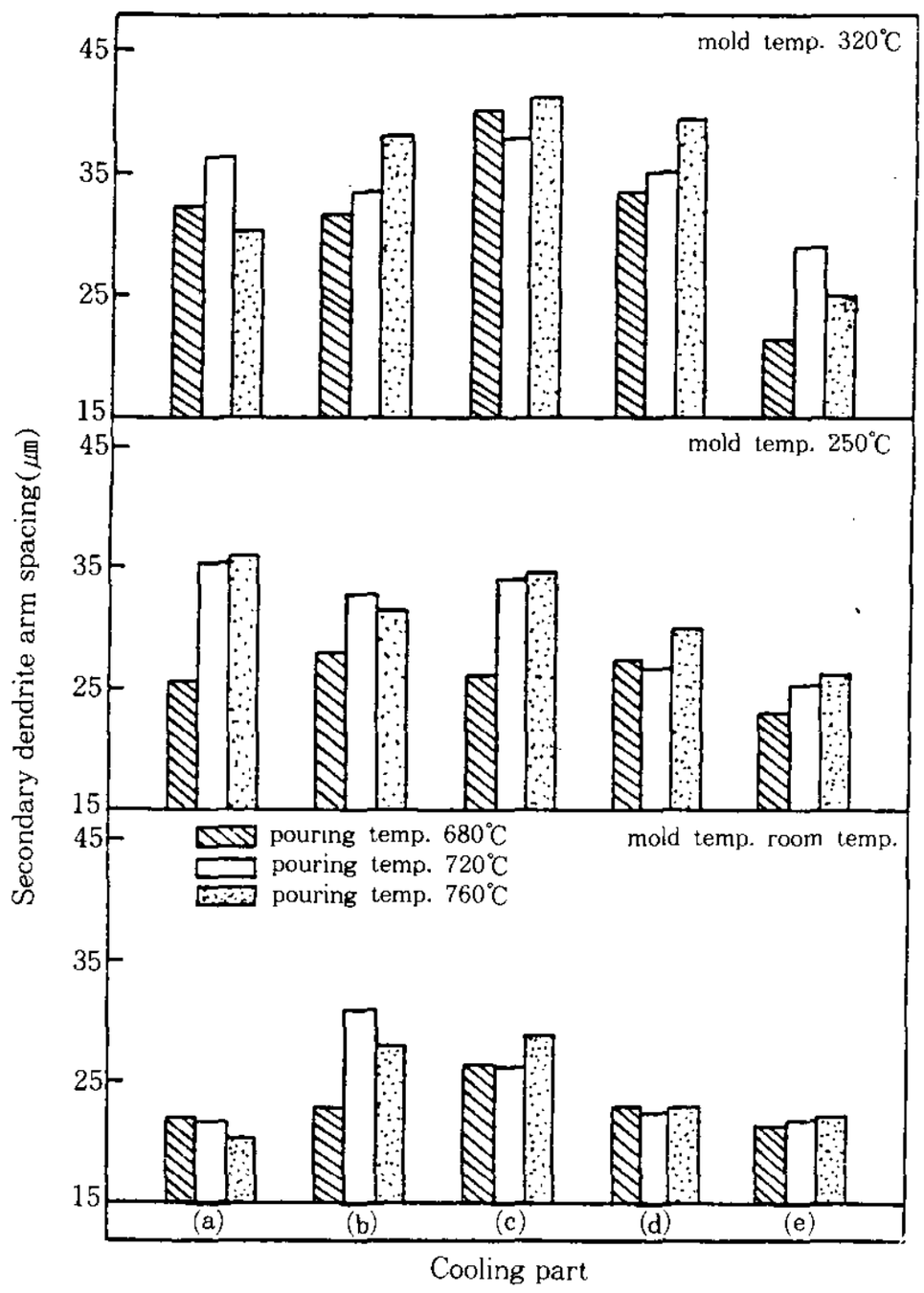

Fig. 2. Variation of secondary dendrite arm spacing for cooling part and mold temperatures of Al-10%Si alloy ingots.
(a) no cooling (b) upper cooling (c) middle cooling
(d) lower cooling (e) bottom cooling

Table 1. Chemical composition of Al-10%Si alloy ingot.

(wt. %)

Composion	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Sn	Al
wt.%	9.89	0.01	0.3	0.001	0.003	0.002	bal.

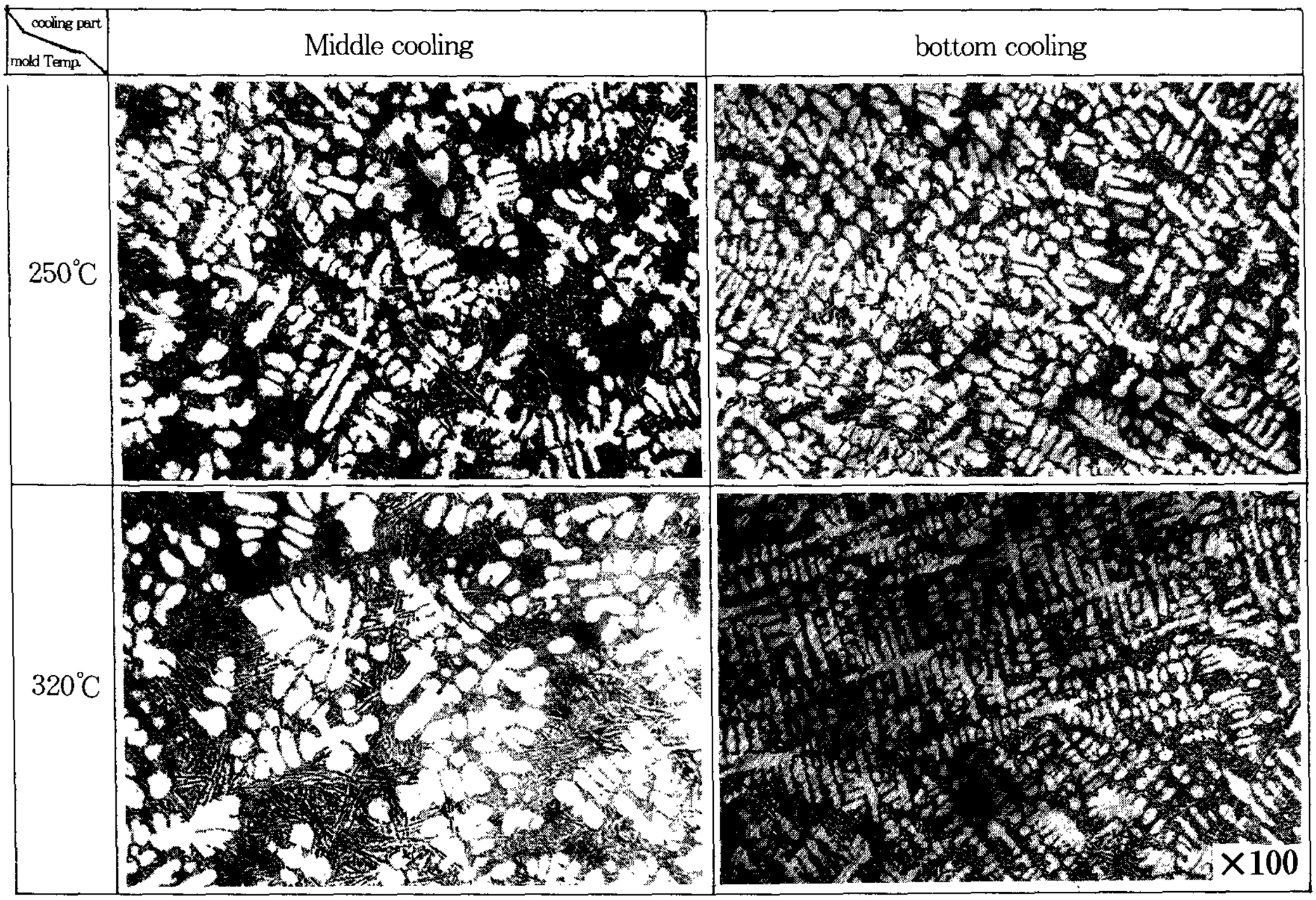

Photo 1. Microstructure of Al-10%Si ingots in various mold temp. and cooling part at pouring temp. 680℃

DAS는 약 40㎛로 가장 조대하게 성장된 조직을 나타내었다. 이는 냉각속도가 증가함에 따라(과냉도가 커짐에 따라) 수지상조직이 치밀하게 형성된다는 Jackson과 Hunt의 연구[14]와 일치하는 결과를 얻었다.

Fig.3은 secondary dendrite arm length(DAL:ℓ)와 dendrite arm spacing(DAS:d)와의 비를 나타내었다. 주입온도 680℃에서 금형 온도를 상온과 320℃로 금형의 저면을 냉각하는 경우 l/d비는 약 5로서 가장 치밀한 조직으로, 각 주입조건에 있어서 금형의 저면을 냉각하는 경우 l/d비는 5~7로 나타내었으나 금형온도를 250℃와 320℃로 하고 금형의 중부를 냉각한 경우 l/d는 2~3.5로서 dendrite arm length는 짧고 dendrite arm spacing이 증가한 조대한 조직을 나타내었다.

3.2 DAS에 미치는 냉각속도의 영향

주입온도 680℃에서 주조조건에 따른 냉각곡선을 Fig.4에 나타낸 것으로서 금형 온도가 상승할수록 응고개시에서 완료까지의 평행부 길이인

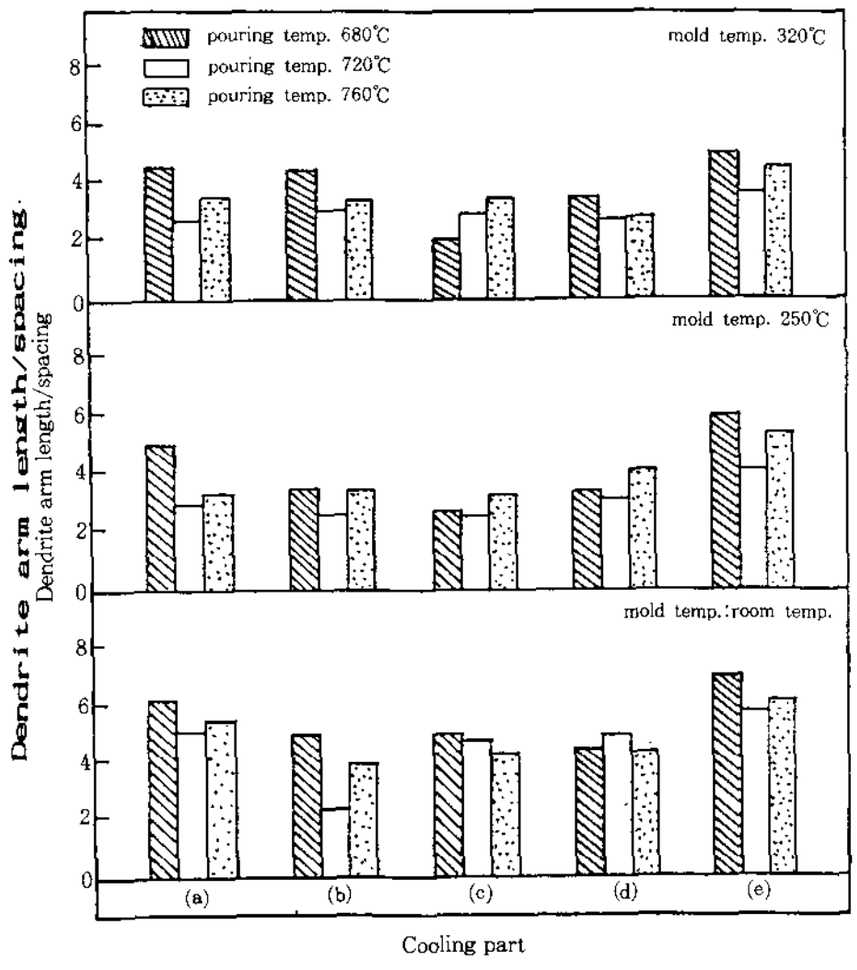

Fig. 3. Ratio of dendrite arm length and arm spacing for cooling parts and mold temperatures of Al-10%Si alloy ingots.
(a) no cooling (b) upper cooling (c) middle cooling
(d) lower cooling (e) bottom cooling

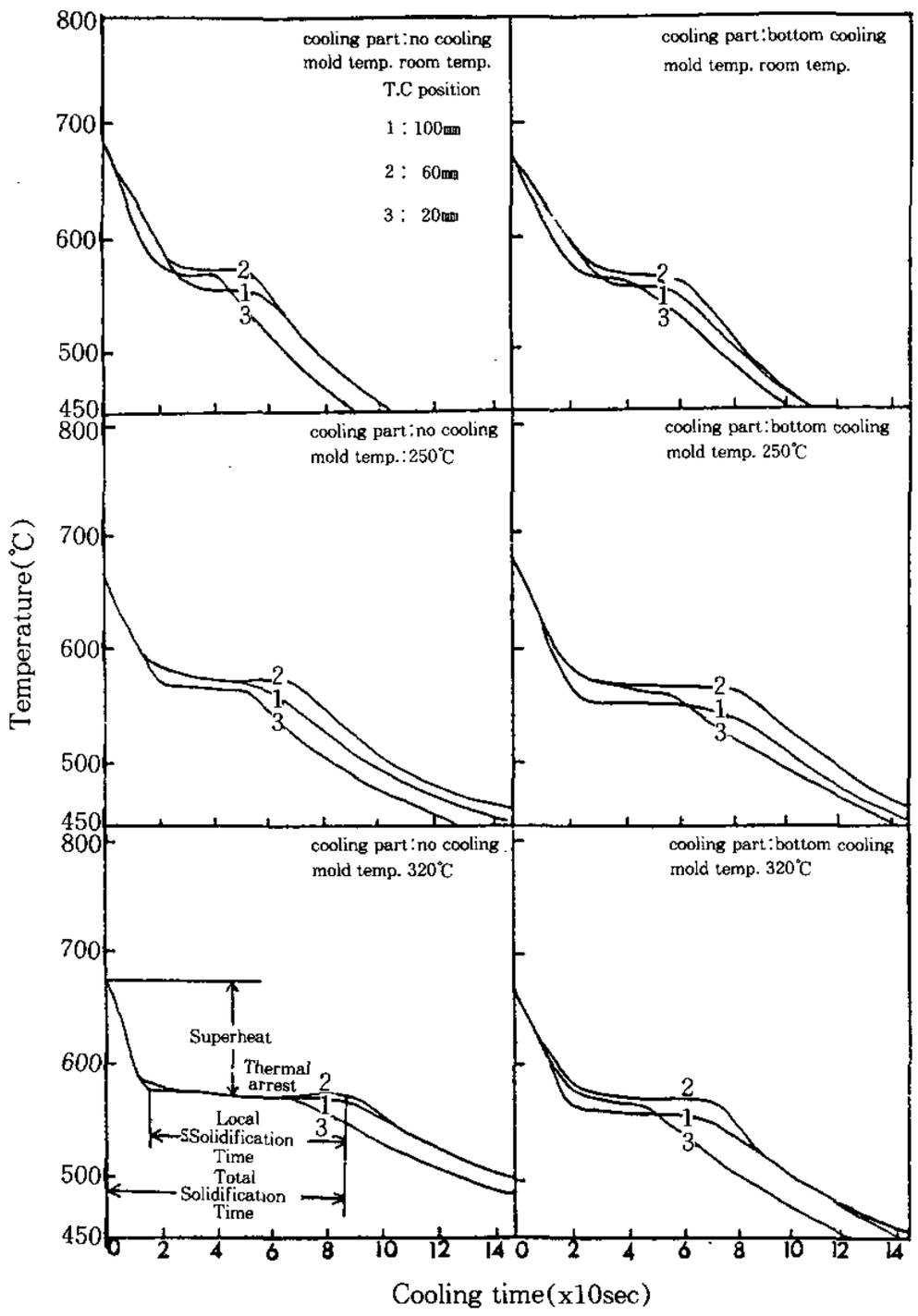

Fig. 4. Typical cooling curve for Al-10%Si alloy ingots at pouring temperature 680℃.

국부응고시간이 길어졌으며, 금형온도 320℃에서 금형을 냉각하는 경우 저면으로부터 20㎜ 위치인 ③번 냉각곡선은 응고시간이 40초로 짧은 반면, 금형온도 320℃에서 금형을 냉각하지 않은 ③번 냉각곡선은 응고시간이 약 1분30초로 금형의 저면을 냉각한 경우보다 응고시간이 3배이상 증가한 것으로 금형의 측정위치와 금형온도에 따라서 응고조직이 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 주입온도 760℃의 냉각곡선은 Fig.5에서 보인 바와 같이 주입온도 680℃의 국부응고시간보다 길어졌지만, 금형의 저면을 냉각하는경우 국부응고시간이 매우 짧은 결과를 나타내었다. 이들 냉각곡선에서 공정온도인 577℃에서 변곡점이 시작되어 곡선이 수평으로 나타나는데, 이는 응고에 따른 잠열의 방출이 chill에 의해 냉각되는 열손실과 균형을 이루는 곳에서 일어나는 것으로 사료되었다. 그리고 응고가 진행됨에 따라 잠열의 방출이 감소하여 곡선의 기울기가 완만해지고 응고가 끝난 chill에 의하여 영향을 받게 된다. 냉각곡선상에서 공정온도 부근에서 응고의 평형부 길이가 나타나는 곡선은 공정등온제어온도의 강화를 초래하게 한다. 등온제어온도와 주입온도와의 차이를 열적인 과냉도[15]라 하며 응고 시 과냉에 기여하는 요인은 용질원자 축적물에 의한 것, 분자운동에 의한 것이 있는데 이중 용질원자의 축적물에 의한 과냉의 기여도가 90%이상 이라고 보고되고 있다.[16]

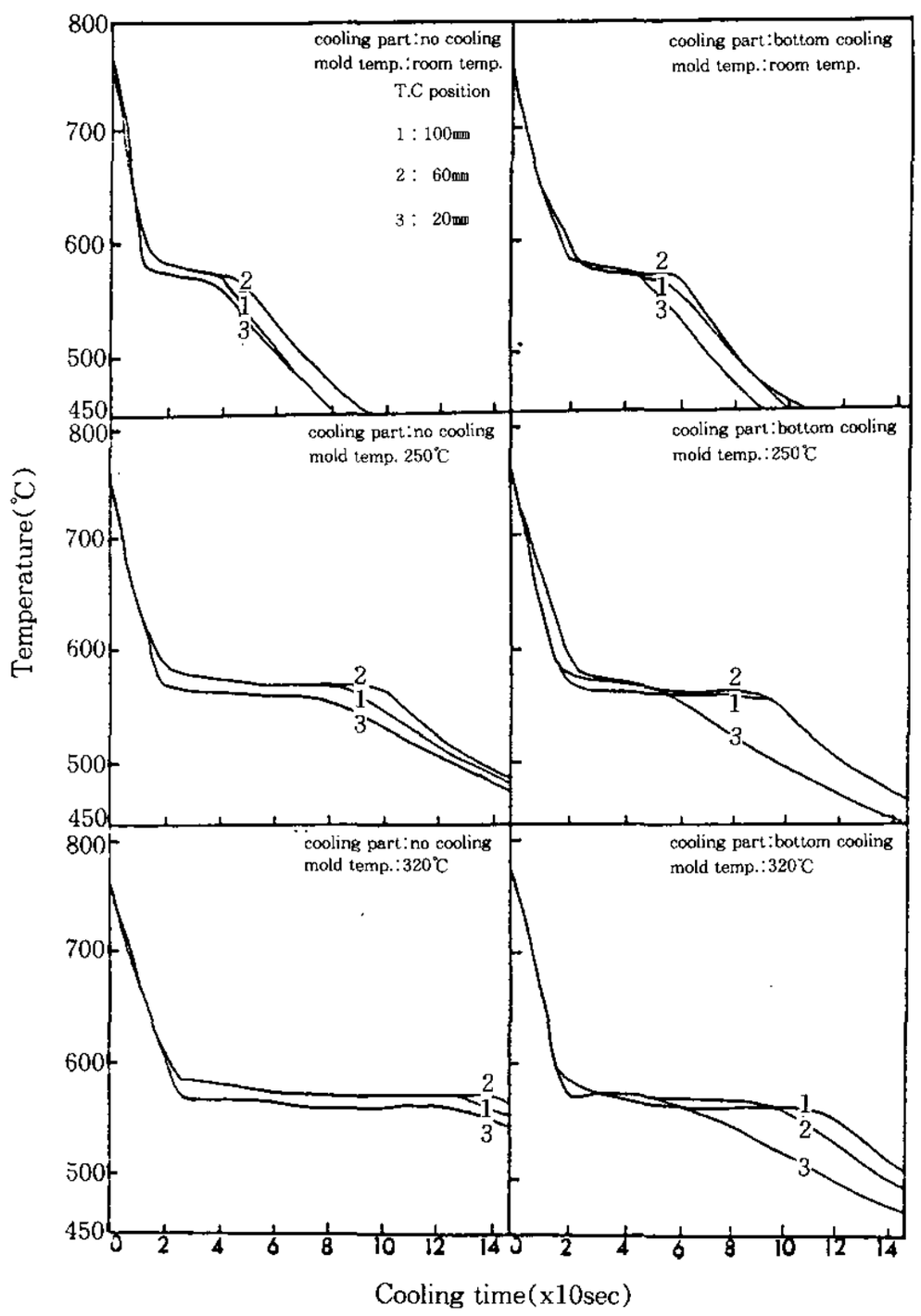

Fig. 5. Typical cooling curve for Al-10%Si alloy ingots at pouring temperature 760℃.

Fig.6은 냉각속도와 DAS와의 관계를 나타낸 것으로 주입온도 680℃에서 냉각속도가 1℃/sec일때 DAS는 약 35㎛이지만, 2℃/sec에서는 약 20㎛로 냉각속도가 증가할수록 DAS는 감소하였으며, 주입온도 760℃에서도 냉각속도가 증가할수록 DAS는 감소하는 결과를 얻었다. 따라서 주입온도 680℃에서 냉각속도 2℃/sec~2.5℃/sec일때 DAS는 20㎛~22㎛로 이는 대부분 금형의 저면냉각과 금형온도 상온에서 가장 치말한 dendrite

조직을 얻을 수 있으며 주입온도 760℃에서는 냉각속도 3℃/sec～4℃/sec일때 DAS은 20㎛～28㎛로 금형의 저면냉각과 일부 하부냉각을 한 경우 미세한 주괴조직을 얻을 수 있었다.

DAS와 냉각속도와의 관계식[17]을 나타내면, 주입온도 680℃에서는

$$d=54.4\,Va^{-1.66} \quad \cdots\cdots(1a)$$

여기서 : d=DAS

Va=냉각속도

로서 DAS은 냉각속도의 약 -3/2제곱에 비례하여 감소하는 반면, 주입온도 760℃에서는

$$d=45Va^{-0.55} \quad \cdots\cdots(1b)$$

의 관계로서 DAS은 냉각속도의 약 -1/2제곱에 비례하여 감소하는 결과로 DAS는 냉각속도의 증가에 따라 치밀하게 됨을 알 수 있었다.

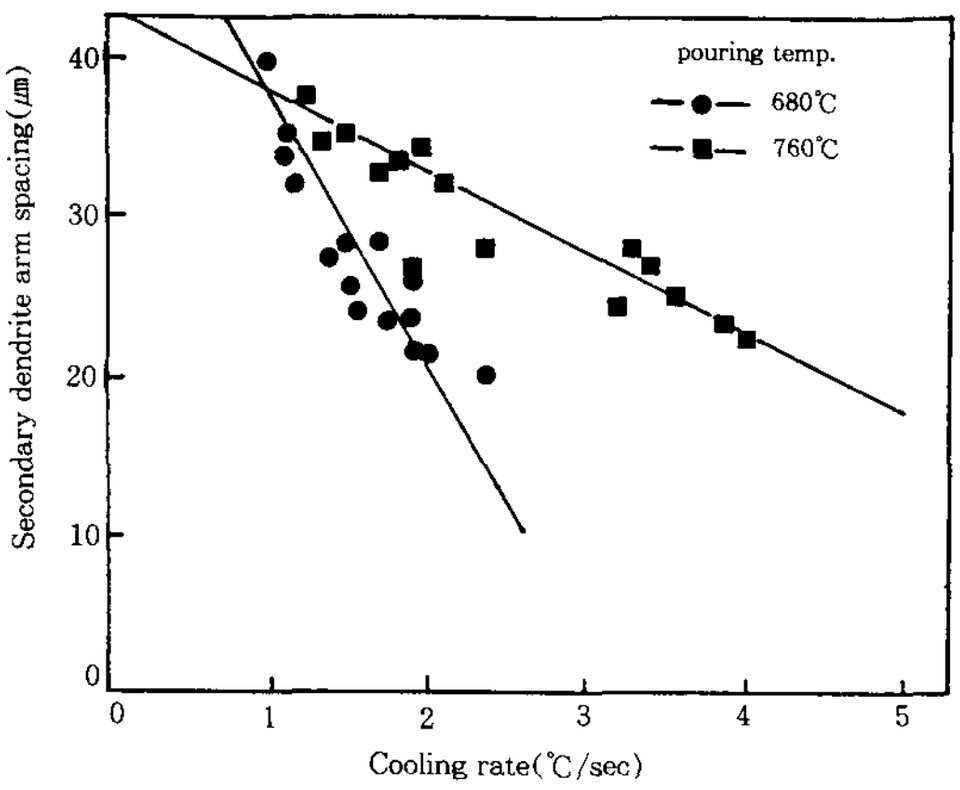

Fig. 6. Relation between secondary dendrite arm spacing and cooling rate at pouring temperatures 680℃ and 760℃.

3.3 DAS와 국부응고시간과의 관계

국부응고시간을 α(Al)상의 응고개시에서 응고완료 직전까지의 시간으로 하고 주조조건과의 관계를 나타내면 금형온도가 높을수록 국부응고시간이 약 30초에서 100초로 길어지는 것은 응고시 잠열의 방출과 chill에서 열손실이 평형을 이루는 시간이 길어지는 것으로 수지상조직이 조대하게 됨을 알 수 있었다. 또한 금형의 냉각위치에 따라 국부응고시간이 변화하는 것으로, 금형의 저면을 냉각한 경우 금형의 다른 냉각위치와 비교하여 국부응고시간의 차이가 약 30초～40초로 냉각속도가 가장 컸음을 알 수 있었다. 따라서 DAS은 국부응고시간이 길어질수록 증가하는 결과를 얻었다.

Flemings에 의한 DAS와 열적변화와의 관계식[17]을 나타내면 식(2)와 같다.

$$d=a\cdot t_f^n=b\cdot(GR)^{-n} \quad \cdots\cdots(2)$$

여기서 : t_f=응고시간

G=온도구배

R=성장속도

a,b=상수

따라서, DAS와 국부응고시간과의 관계를 나타내면, 주입온도 680℃에서

$$d=3.6\theta_f^{0.55} \quad \cdots\cdots(2a)$$

와 같이 된다. 그러므로 DAS은 국부응고시간의 약 1/2제곱에 비례하여 증가하고, 주입온도 760℃에서는

$$d=7.2\theta_f^{0.35} \quad \cdots\cdots(2b)$$

와 같이 되므로 DAS은 국부응고시간의 약1/3제곱에 비례하여 증가하는 결과로 이는 다른 연구자들의 보고[16,17,18]와 거의 일치함을 알 수 있었다. 여기서 국부응고시간이 30～40초일때 DAS는 20～25㎛로 대부분 치밀한 금형의 저면냉각이었으며, 또한 DAS가 약 30㎛일때는 국부응고시간이 60초 정도로 다소 치밀한 금형의 하부와 상부냉각인 경우였다.

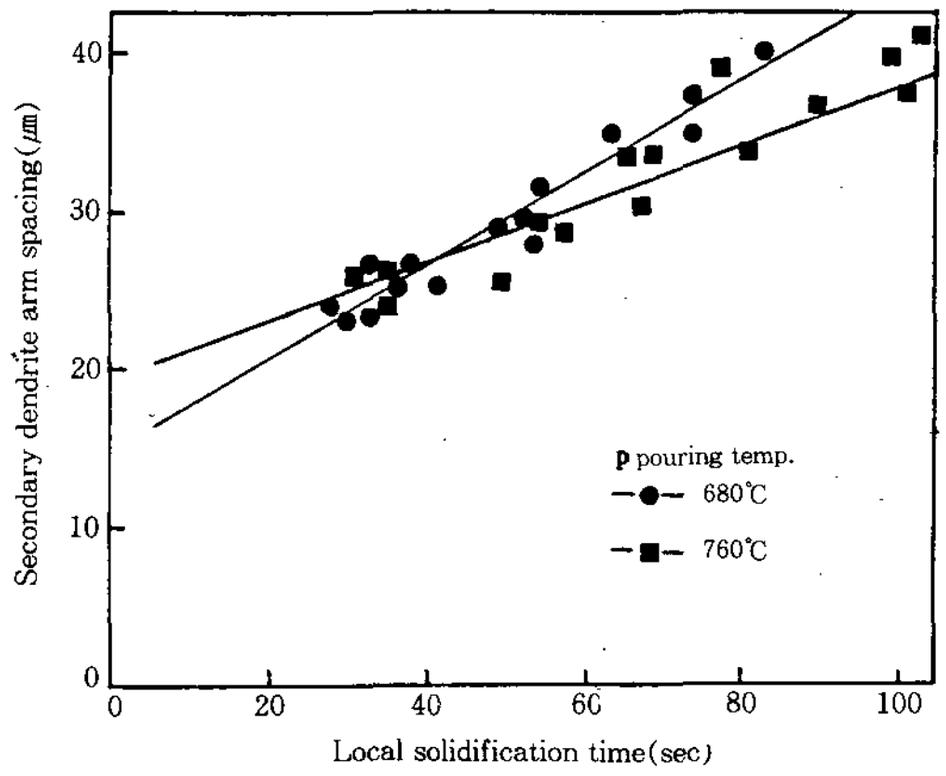

Fig. 7. Relation between secondary dendrite arm spacing and local solidification time at pouring temperatures 680℃ and 760℃.

3.4 응고조직과 기계적 성질과의 관계

주조조건에 의한 경도 측정 결과에 의하면 금형의 저면냉각 또는 금형을 냉각하지 않은 경우 경도값은 HB(15TS) 65정도로 높지만, 금형의 중부를 냉각하는 경우는 약HB(15TS)50으로 낮은 값을 나타내었다. 이는 냉각속도가 느릴수록 DAS값이 증가하여 경도값이 저하하는 것으로 이는 市川의 이론[9]과 일치하였다. 또한 주괴의 표면에서 중심으로 갈수록 응고시간이 길어지기 때문에 수지상조직이 성장하여 기계적 성질에 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

주조조건에 의한 인장강도와 연신율의 관계는 금형온도 상온일 때는 높은 인장강도와 연신율을 나타내었으며, 주입온도 680℃에서 금형온도 320℃로 금형의 저면을 냉각하는 경우 매우 높은 인장강도값을 나타내었다. DAS에 의한 인장강도, 연신율과 경도의 관계를 Fig.8에 나타내었다. DAS가 짧은 20~25㎛는 인장강도와 경도값은 높지만, 연신율도 다소 높은 값을 나타내었다. DAS가 증가할수록 경도와 인장강도값은 거의 직선적으로 감소하나, 연신율도 다소 감소 경향을 나타내었다.

3.5 주조조건에 따른 공정Si입경의 변화

공정Si입경의 형태는 주형재료에 의한 냉각효과 및 주조방법등의 차이에 의해 형태, 크기 및 분포상태 등이 현저하게 다르다. 따라서 기계적 성질과 공정Si관계로 부터 공정Si입경의 측정에 의한 기계적 성질의 예측은 중요한 방법중의 하나이다. 공정Si입경 측정방법은 여러가지방법이 검토되어지고 있으나 본 실험에서는 宮田[13]등이 행한 주철중 흑연의 크기를 정량화한 방법에 의하여 Al중의 공정Si입경의 정량화를 실시하였다.

주조조건에 의한 공정Si입경의 크기를 Fig. 9에

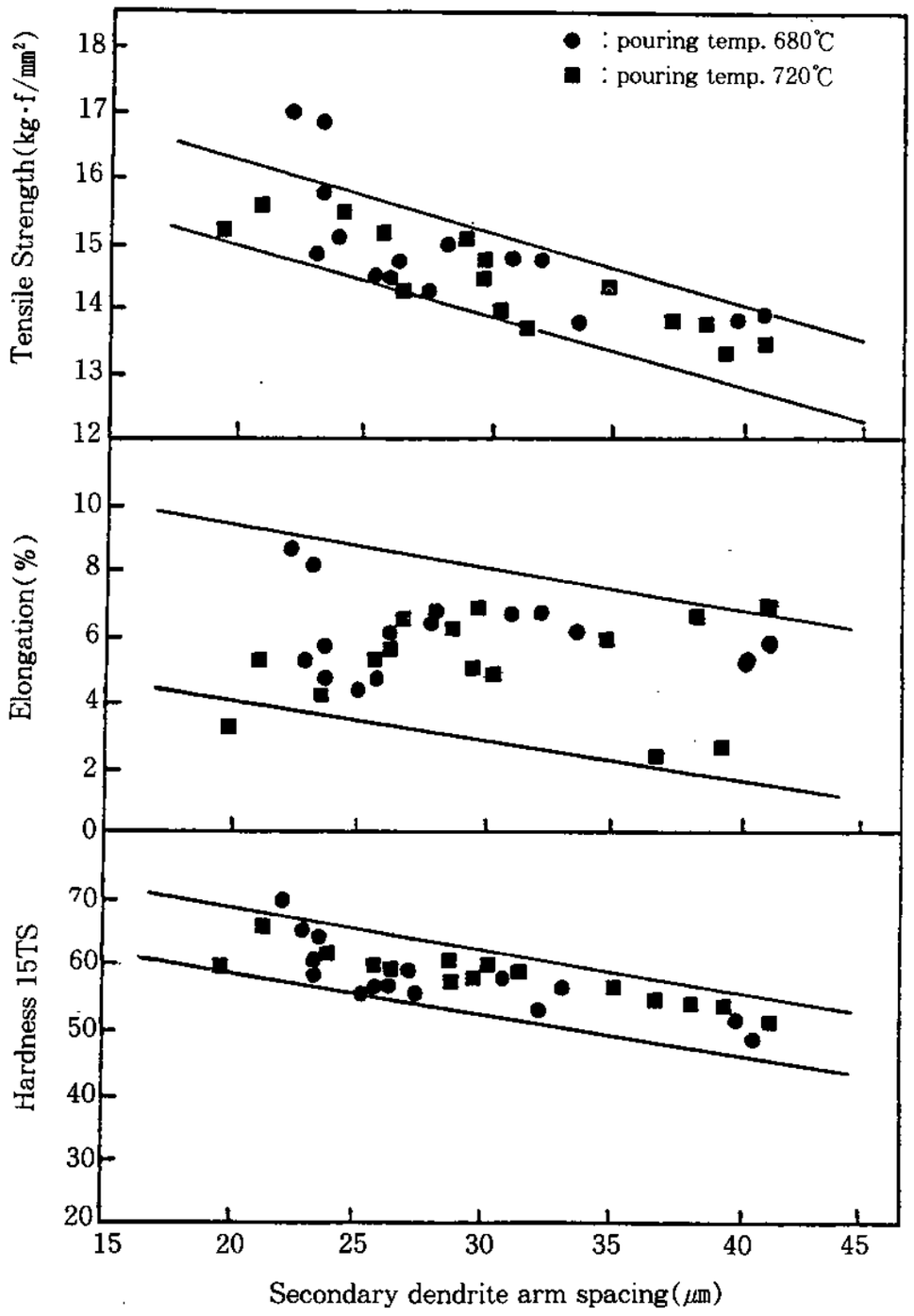

Fig. 8. Relation between secondary dendrite arm spacing, hardness, elongation and tensile strength of Al-10%Si alloy ingots.

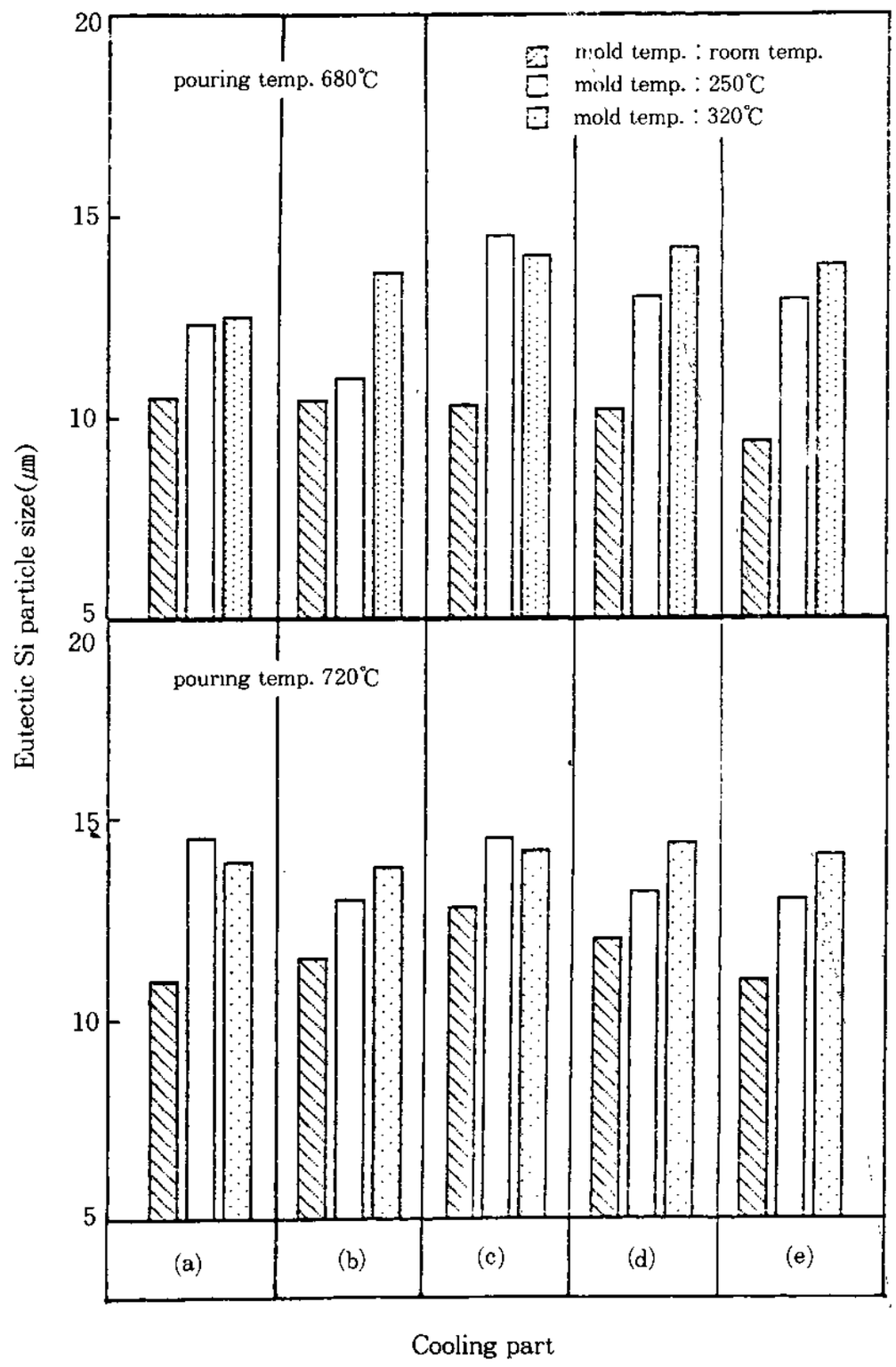

Fig. 9. Variation of eutectic Si particle size for cooling parts and mold temperature of Al-10%Si ingots.
(a) no cooling (b) upper cooling (c) middle cooling
(d) lower cooling (e) bottom cooling

나타낸 것으로 생성된 공정Si입경의 크기는 7~15㎛범위로 나타났으며, 금형온도가 상온일때 7~13㎛ 범위로서 다소 미세한 크기를 나타내었다. 또한 주입온도가 낮을수록 공정Si입경의 크기는 미세해지는 것으로 특히 주입온도 680℃, 금형온도 상온의 경우 가장 미세한 약7㎛의 공정Si입경을 나타내었다. 이는 냉각속도가 빠르면 공정Si입경의 크기는 미세하게 되며 공정응고시간의 차이는 공정Si입경의 크기에 영향을 주는 것[19]으로 사료되었다.

Fig. 10은 주입온도 680℃에서 공정Si입경 크기와 인장강도의 관계를 나타내었다. 금형온도 상온일 때 가장 미세한 공정Si입경을 나타내었으며 또한 인장강도는 가장 높은 값을 나타내었다.

주입온도 680℃일때 공정Si입경 크기와 연신율의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 금형온도 상온일 때 가장 미세한 공정Si입경을 가지므로 연신율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 Al-Si계 합금에서 정출물 즉 Si의 크기가 기계적 성질에 크게 영향을 미치며 특히 공정Si는 취약하고 침상으로 크게 성장하여 응력집중을 수반하기 때문에 조대한 Si입경을 가지는 경우 미세한 Si입경을 가지는 경우보다 기계적 성질이 저하하므로 공정Si형태는 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 기계적 성질에 영향을 주는 인자로서는 공정Si입경 및 DAS이다.

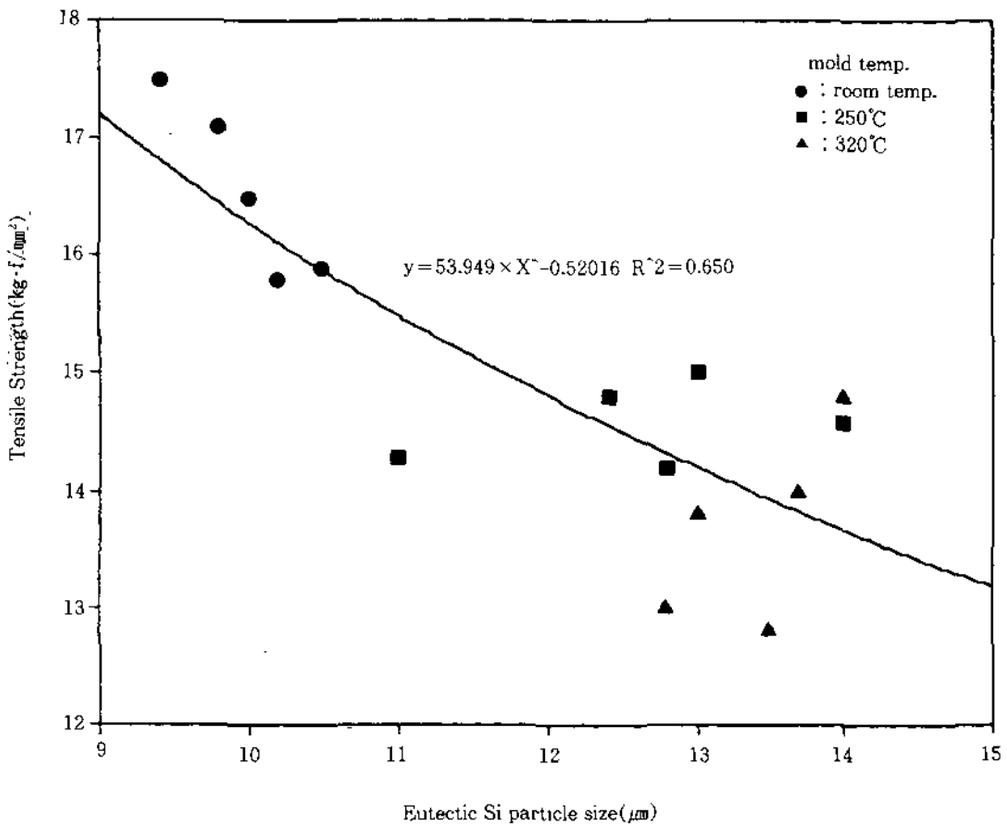

Fig. 10. Relation between eutectic Si particle size and tensile strength of Al-10%Si alloy ingots at pouring temperature 680℃.

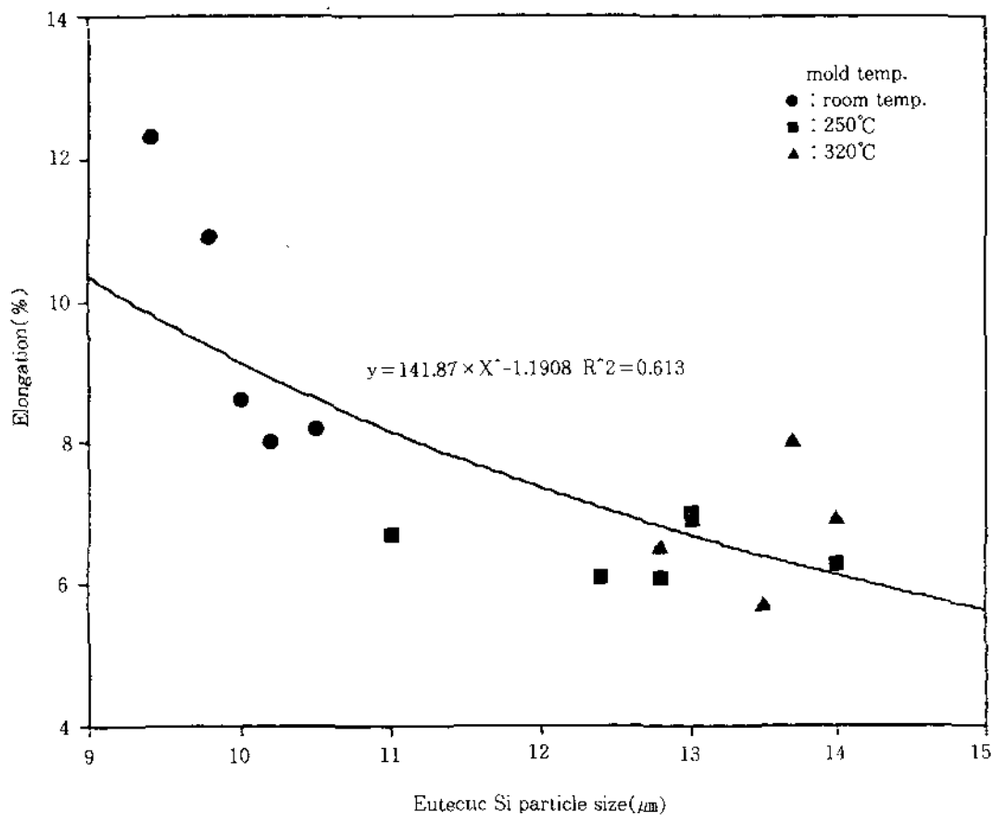

Fig. 11. Relation between eutectic Si particle size and elongation of Al-10%Si alloy ingots at pouring temperature 680℃.

특히 공정Si입경은 15㎛ 이상에서는 기계적 성질에 미치는 영향이 크지만 15㎛이하의 경우에는 영향이 작다[20]. 따라서 냉각속도가 빠른 경우는 공정Si입경 및 DAS가 작고 밀도가 높은 주조조직을 얻기가 유리하기 때문에 이러한 상호효과를 극대화 시킬수 있는 냉각조건을 고려하면 금형의 저면을 냉각하는 경우 가장 우수한 성질을 얻게 될 것이다.

4. 결 론

금형주조한 Al-10%Si 합금의 응고조직과 기계적 성질에 미치는 금형의 냉각효과에 대한 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉각속도가 빠를수록 DAS의 크기는 감소하는 것으로 금형의 저면냉각인 경우 DAS는 20~22㎛로 가장 짧으며 금형의 중부를 냉각한 경우 36~40㎛로 증가하였다.
2. DAS크기는 주입온도 680℃에서 냉각속도의 -3/2제곱에 비례하여 감소하였고, 760℃에서는 -1/2제곱에 비례하여 감소하였으며, 국부응고시간이 길면 DAS크기는 증가하는 것으로 국부응고시간의 1/2~1/3제곱에 비례하여 증가하였다.
3. 기계적 성질은 주입온도, 금형온도 및 금형냉각위치에 따라 변화하는 것으로 주입온도 680

℃, 금형온도 320℃에서 금형의 저면 냉각인 경우 가장 높은 인장강도 값을 나타내었다.

4. 주조조건에 의하여 생성된 공정Si입경의 크기는 7~15㎛의 범위로 주입온도 680℃, 금형온도 320℃에서 금형의 저면을 냉각한 경우 미세한 공정Si입경을 얻었다.

후 기

본 연구는 상공부의 공업기반기술 개발사업(1989.6~1991.11)에 의하여 수행한 연구의 일부로서 연구비를 지원하여 준 상공부와 동화상사(윤희철사장)에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 최수웅, 권혁무, 장춘근 : 대한금속학회지, 11(1973), 335
2. 北岡, 山治, 藤倉, 湖三 : 輕金屬, 38(1988), 7
3. 남태운, 김수영, 이상익 : 대한금속학회지, 11(1973), 361
4. 大野 : 鑄物, 42(1972), 6
5. K, Murakami and T.Okamoto : Metal Science, 18(1984), 2
6. 大野 : 金屬の凝固, 他人書館(1984), 45~64
7. 中谷 : 鑄物, 48(1976), 1, 40
8. 최창옥 : 주조, 5(1985), 1
9. 市川, 池田, 大橋 : 鑄物, 46(1974), 1, 25
10. K.Radhakrishna, S.Seshan, M.R.Seshardi : AFS Trans., 88(1980), 691
11. 최창옥, 이계완 : 대한금속학회지, 8(1990), 727A
12. 輕金屬學會 研究委員會 : AlのDASと冷却速度の測定法
13. 宮田, 菊地 : 鑄物, 56(1984), 7, 563
14. J.D.Hunt and K.A.Jacson : Trans. TMSAIME (1966), 406
15. Donald R. Askeland : The Science and Engineering of Materials(1985), 152
16. 茨木, 岡木, 岸武 : 日本金屬學會誌, 30(1966), 236
17. B.P.Barder and M.C.Flemings : AFS Trans., 74 (1966), 406
18. 尹, 西 : 鑄物, 49(1977), 539
19. 藤井, 森木, 岡田 : 鑄物, 56(1984), 7, 389
20. 藤井 外 : 輕金屬, 33(1983), 7, 392