

.....
論 文
.....

AC4C 합금의 기계적 성질에 미치는 주조조건과 열처리의 영향에 관한 연구

강효경, 천병욱, 최창욱

The Effect of Casting Condition and Heat Treatment on the Mechanical Properties of AC4C Alloy Castings

Hyo-Gyoung Kang, Byung-Wook Cheon, Chang-Ock Choi

Abstract

AC4C alloy casts in the metallic mold, zircon sand mold, silica sand mold and shell mold with the pouring temperatures of 680, 710 and 740°C have been investigated. The tensile strength, elongation and hardness of AC4C alloy castings have been influenced by the kind of molds used. The mechanical properties in zircon sand mold castings were greater than those in other sand mold castings, but were inferior to the properties in metallic mold castings. Eutectic Si particle size and DAS were increased in the order of metallic mold, zircon sand mold, silica sand mold and shell mold. Also, they were increased with the increase of pouring temperatures. DAS, eutectic Si particle size and grain size decreased with the increase of mechanical properties as the cooling rate increased. The eutectic Si particle size and DAS of AC4C alloy castings after T6 treatment were decreased in as-cast. The variation of eutectic Si particle size has been effected on the tensile strength, elongation and fractured surface.

(Received September 18, 1993)

1. 서 론

알루미늄합금 중에서 Al-Si계의 합금, 특히 AC4C합금은 주조성과 기계적 성질이 우수하므로 항공기를 비롯한 기계구조용 부품에 널리 사용되고 있다. 근래 각종 제품은 인력 및 에너지 절약을 위하여 소형, 경량화 추세로서 특히 자동차산업에 있어서는 중요한 과제로서 이에 대하여 경합금에 관한 연구개발이 활발히 진행되고 있다¹⁾. 예를 들면 Kamio 등²⁾은 Al합금에서 Ti첨가에 의하여 결정립 미세화가 기계적 성질에 미치는 영향을 연구하였고, Ichikawa 등³⁾은 각종 Al합금을 사용하여 냉각속도의 변화에 따른 합금조성 및 응고조직과의 관계를 조사하였다. Fujih¹⁾

등은 AC4C합금의 공정Si입경의 증가에 따라서 기계적 성질이 저하하는 것을 발표하였고, Honma⁴⁾ 등은 AC4C-T6재의 secondary dendrite arm spacing과 기계적 성질, 피로강도의 관계로서 secondary dendrite arm spacing이 증가하면 기계적 성질이 저하한다고 보고하였다. 또한 Kamato⁵⁾ 등은 AC4C합금의 secondary dendrite arm spacing의 증가에 의하여 인장강도, 연신율 및 충격치는 감소하지만 항복강도와 경도는 증가하고 T6처리한 합금에서는 secondary dendrite arm spacing의 증가에 따라서 기계적 성질이 저하한다고 발표하였다. 이상의 여러 연구자들의 결과로부터 secondary dendrite arm spacing이나 공정Si의 크기를 감소시키면 AC4C합금

동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

의 기계적 성질은 일반적으로 향상된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 AC4C합금의 기계적 성질을 향상시키고자 냉각속도가 다른 여러가지 종류의 주형에 AC4C합금을 용해, 주조한 후 T6처리를 실시하여 기계적 성질에 미치는 주조조건과 열처리의 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

AC4C합금 지금을 전기저항로에서 흑연도가니를 사용하여 용해하였으며 용해시 개량처리나 입자미세화처리는 실시하지 않았다. 용탕은 주입시 일정한 위치와 높이로 하고 주탕시의 난류를 방지하기 위하여 turndish를 사용하였으며⁶⁾ turndish 주입장치 내의 흑연도가니 저부에는 주입공의 크기를 12mm ϕ 로 뚫었다. 주괴의 크기는 60mm ϕ \times 120mm ℓ 로 하고 금형은 주철제로 제작하였으며 지르콘사형과 규사형은 우레탄계 점결제로 하고, 셸형은 resin coated sand를 300 $^{\circ}$ C로 가열하여 제작하였다. 주입시 금형의 가열온도는 320 $^{\circ}$ C로 하고 주입온도는 680 $^{\circ}$ C, 710 $^{\circ}$ C 및 740 $^{\circ}$ C로 하였다. 제작한 주괴의 무게는 약 850g이며 화학조성 분석결과는 Table 1에 나타내었다. T6처리는 시편을 가공한 다음에 전기저항로를 이용하여 512 $^{\circ}$ C에서 8시간 동안 NaNO₃ 염욕에서 유지한 후 수냉하였으며, 시효경화처리는 용체화처리후 180 $^{\circ}$ C에서 10시간 동안 실시하였다.

2.2 실험방법

주괴의 표면으로부터 내부로 15mm와 30mm 부분에 주방상태와 T6처리후의 현미경조직을 관찰하였다. 또한 주괴의 중심을 수직으로 절단하여 절단면의 일부는 10mm 간격으로 로크웰경도기(HR_{15TS})로 경도를 측정하였으며 일부는 인장시편으로 가공하여 인장시험을 하였다.

공정Si입경은 Miyada 등⁷⁾이 주철중의 흑연의 크기를 정량화하는 방법과 Fujh 등¹⁾의 방법을 이용하여 주방상태와 T6처리후의 현미경조직을 이용하여 5가지 시야에서 평균값을 측정값으로 하였다.

Dendrite 성장방향에서 직교한 2차 arm 중심과 중심 사이를 secondary dendrite arm spacing (DAS)으로 하고 그 길이는 secondary dendrite arm length(DAL)로 하였다. DAS 측정법은 조직상에서의 임의 방향으로 직선을 그어 arm 또는 cell 경계를 횡단하는 수와 직선의 길이로서 측정하는 교선법⁸⁾을 이용하였다.

냉각속도는 주괴의 중앙 저면으로부터 20mm, 60mm 및 100mm 위치에 CA 열전대를 설치하여 programmable pen 기록계에 연결시켜 2000mm/h 속도로 주괴의 응고속도 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주조조건에 의한 현미경조직 변화

주형내에서의 액상선 온도로부터 고상선 온도 혹은 공정온도까지의 응고과정은 초정 α dendrite의 생성과 성장으로 진행하며 액상에서 핵생성한 고상은 곧바로 dendrite 골격을 형성한다¹²⁾.

AC4C합금의 현미경조직은 초정 α dendrite의 생성이 급격하게 일어나며 온도가 저하함에 따라서 크게 성장함을 보여준다. 액상선 온도에서의 온도저하에 의하여 α dendrite의 생성수, 고상률 및 dendrite arm의 크기가 변화한다. Dendrite의 생성수는 냉각속도가 빠르면 증가한다. Photo 1은 주입온도 680 $^{\circ}$ C로 주형에 주입한 주괴의 주방상태와 T6처리후의 현미경조직을 나타내었다. 일정한 주입온도로 각종 주형에 주입하는 경우 금형은 공정Si입자가 침상으로 미세하고 균일하게 분포되며 secondary dendrite arm spacing (DAS)도 짧게 나타나고 있으나 다른 주형은 조대한 공정Si입자가 불균일하게 분포되어 있으며 DAS는 지르콘사형, 규사형, 셸형의 순으로 다소 조대하게 나타났다. T6처리후의 현미경조직을 주방상태와 비교하면 공정Si입자가 작아짐과 동시에 형상은 다소 구형으로 변화한 것을 알 수 있었다. 이는 주조상태에서 정출된 침상공정Si는 표면자유에너지가 높아 용체화처리 동안 안정한 구상으로 변화하며 급랭처리를 함으로써 침상공정Si가 미세하고 균일해지고 또한 용체화처리를 하였을 때 Si의 확산속도가 증가하여 공정Si의 성장이 빨라지며 공정Si간의 거리가 멀어지기 때

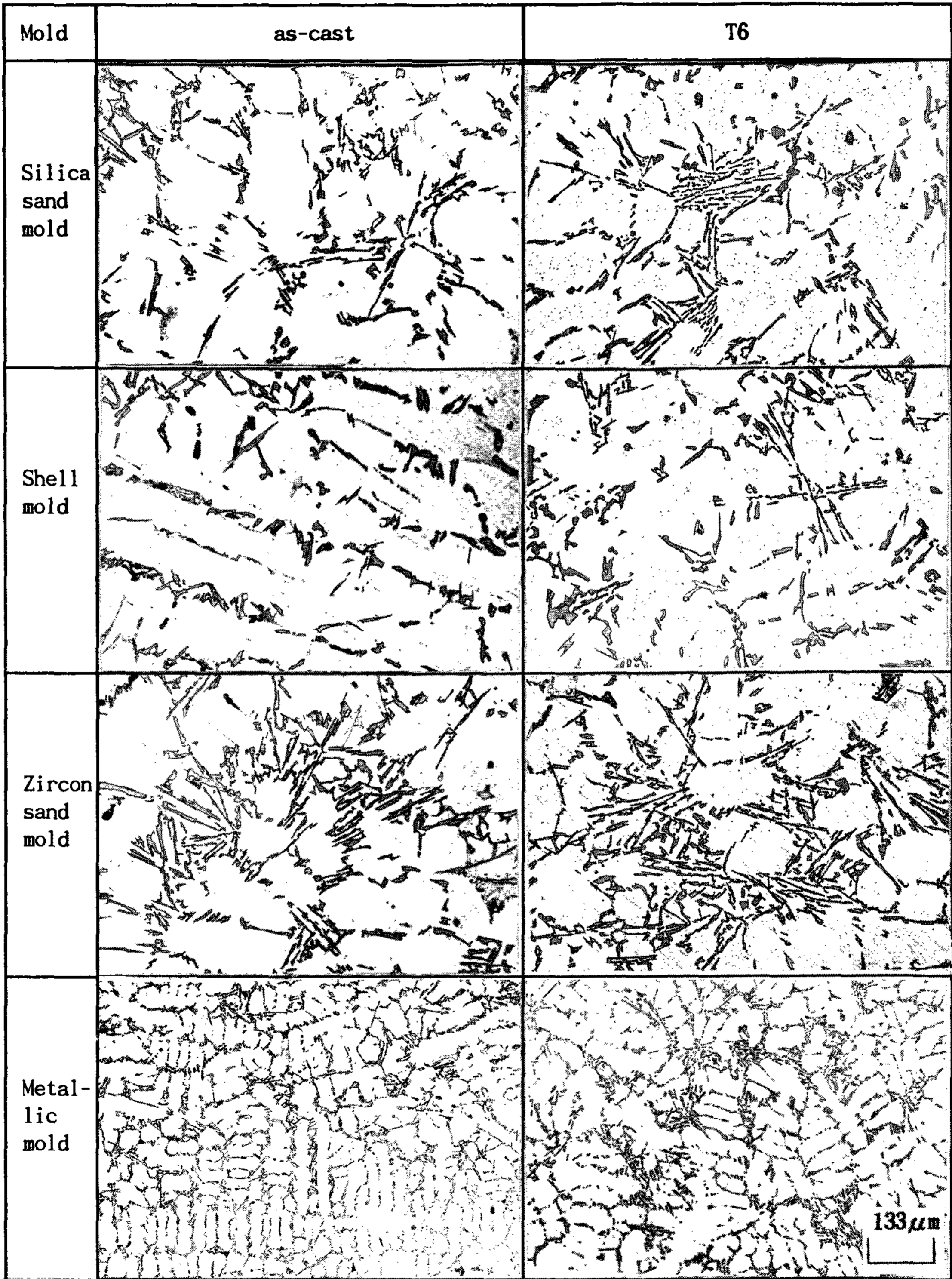


Photo. 1. Microstructures of AC4C alloy castings in the various molds poured at 680°C (15mm from the mold surfaces).

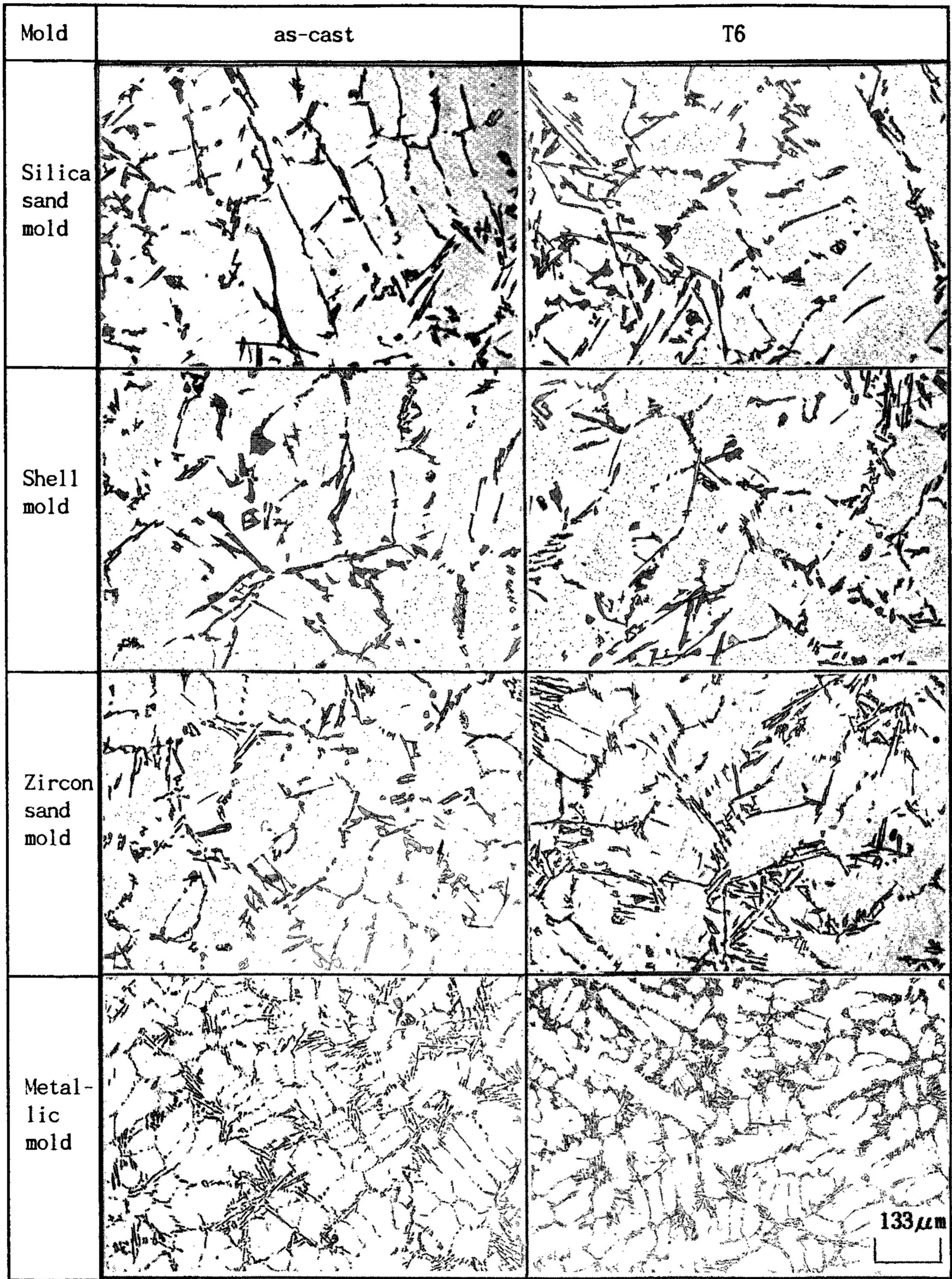


Photo. 2. Microstructures of AC4C alloy castings in the various molds poured at 710°C (15mm from the mold surfaces).

Table 1. Chemical composition of AC4C alloy castings(wt.%).

Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Sn	Zn	Ni	Pb	Cr	Al
7.24	0.4	0.27	0.008	0.001	0.006	0.01	0.009	0.001	0.001	bal.

문으로 사료되었다.

Photo 2는 주입온도 710°C로 주입한 현미경조직을 나타내었다. 주입온도 680°C와 비교하면 주형종류에 따라 비슷한 경향을 나타내고 있으며 다만 주입온도가 높아짐에 따라서 DAS의 간격이 다소 성장하고 또한 공정Si 입경의 크기도 성장한 것으로 나타났다.

3.2 DAS에 미치는 냉각속도의 영향

Fig. 1에 주형종류 및 주입온도에 의한 시편의 주방상태와 T6처리후의 secondary dendrite arm spacing(DAS)의 측정결과를 나타내었다. 주입온도 680°C에서 금형에 주입한 경우 가장 짧은 secondary dendrite arm spacing을 나타내고 있으며 주입온도가 상승하면 DAS는 증가하여 740°C에서 셀형에 주입한 경우 가장 긴 DAS를 나타내었다. 또한 주형종류에 따라서 DAS는 다소

다른 값을 나타내며 주방상태보다는 T6처리를 하면 감소하였다.

DAS와 냉각속도의 관계를 비교하기 위한 냉각속도 측정은 냉각곡선인 온도-시간 곡선 $\Delta T/\Delta t$ (ΔT : 온도차, Δt : 시간변화량)로⁹⁾ 본 실험에서는 주탕개시에서 응고종료까지의 $\Delta T/\Delta t$ 로서 구하였다¹⁰⁾.

Fig. 2는 주입온도 680°C에서 주형종류에 의한 냉각곡선을 나타낸 것으로서 금형은 응고개시에서 응고완료까지의 평형부 길이인 고액공존시간이 가장 짧게 나타났으며 지르콘사형, 규사형, 셀형의 순으로 점차적으로 고액공존시간이 길어짐을 알 수 있었다. 주입온도 710°C 및 740°C에서의 냉각곡선은 680°C의 경우와 마찬가지로 주형종류에 의하여 고액공존시간의 차이를 보이고 있으며 주입온도가 높아질수록 고액공존시간은 점차 길게 나타났다.

DAS의 크기(d)와 냉각속도(c)와의 사이에는

$$d = A \cdot C^n \quad (A : \text{정수}) \quad (3-1)$$

의 관계가 있다. R. E. Spear 등¹¹⁾에 의하면 Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg(A356합금)의 DAS와 냉각속도의 관계식은 식 (3-2)와 같다.

$$d = 62C^{-0.327} \quad (3-2)$$

본 실험에서는 주입온도 680°C, 710°C 및 740°C로 금형에 주입한 경우 냉각속도는 2.73°C/sec, 2.68°C/sec 및 2.49°C/sec로 되며 DAS의 값은 48 μ m, 48.31 μ m 및 49 μ m로 식 (3-1)을 이용하여 나타내면 $d = 67C^{-0.327}$ 로 되며, 지르콘사형은 $d = 47C^{-0.327}$, 규사형은 $d = 46C^{-0.327}$, 셀형은 $d = 48C^{-0.327}$ 로서 DAS는 냉각속도의 약 -1/3승에 비례하여 감소하는 것으로 타 연구자들의 연구결과^{12,13)}와 거의 일치하였다.

DAS의 크기와 냉각속도의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 냉각속도의 증가에 의하여 DAS의 값이 감소함을 알 수 있었다. 이는 냉각속도가 증가하면 dendrite arm이 불안정하게 되어 조성적 과냉을 증가시켜 dendrite arm의 간격이 짧아지는 반면 냉각속도가 감소하면 dendrite arm 중에 비교적

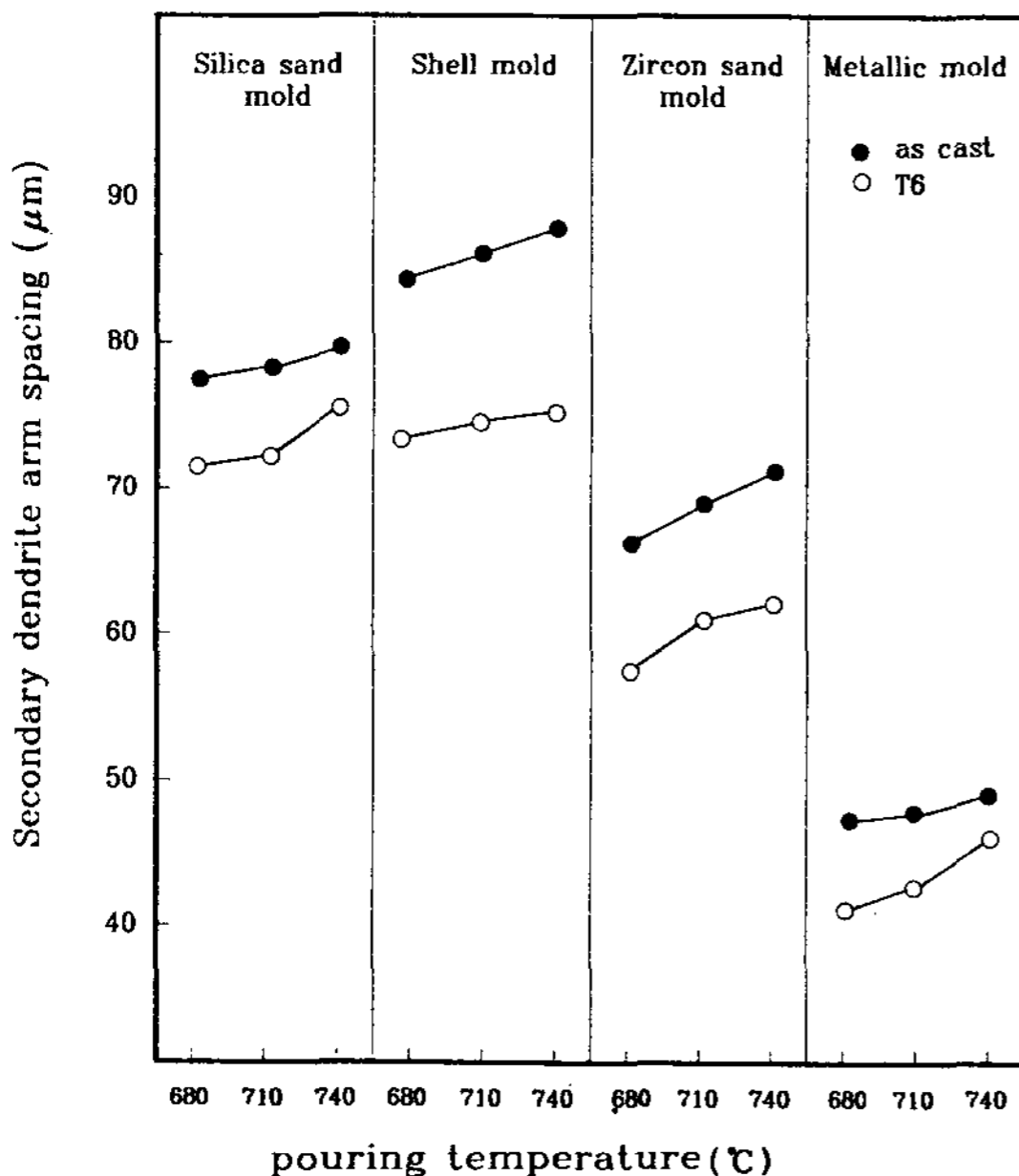


Fig. 1. Effects of molds and pouring temperatures on secondary dendrite arm spacing in AC4C alloy castings.

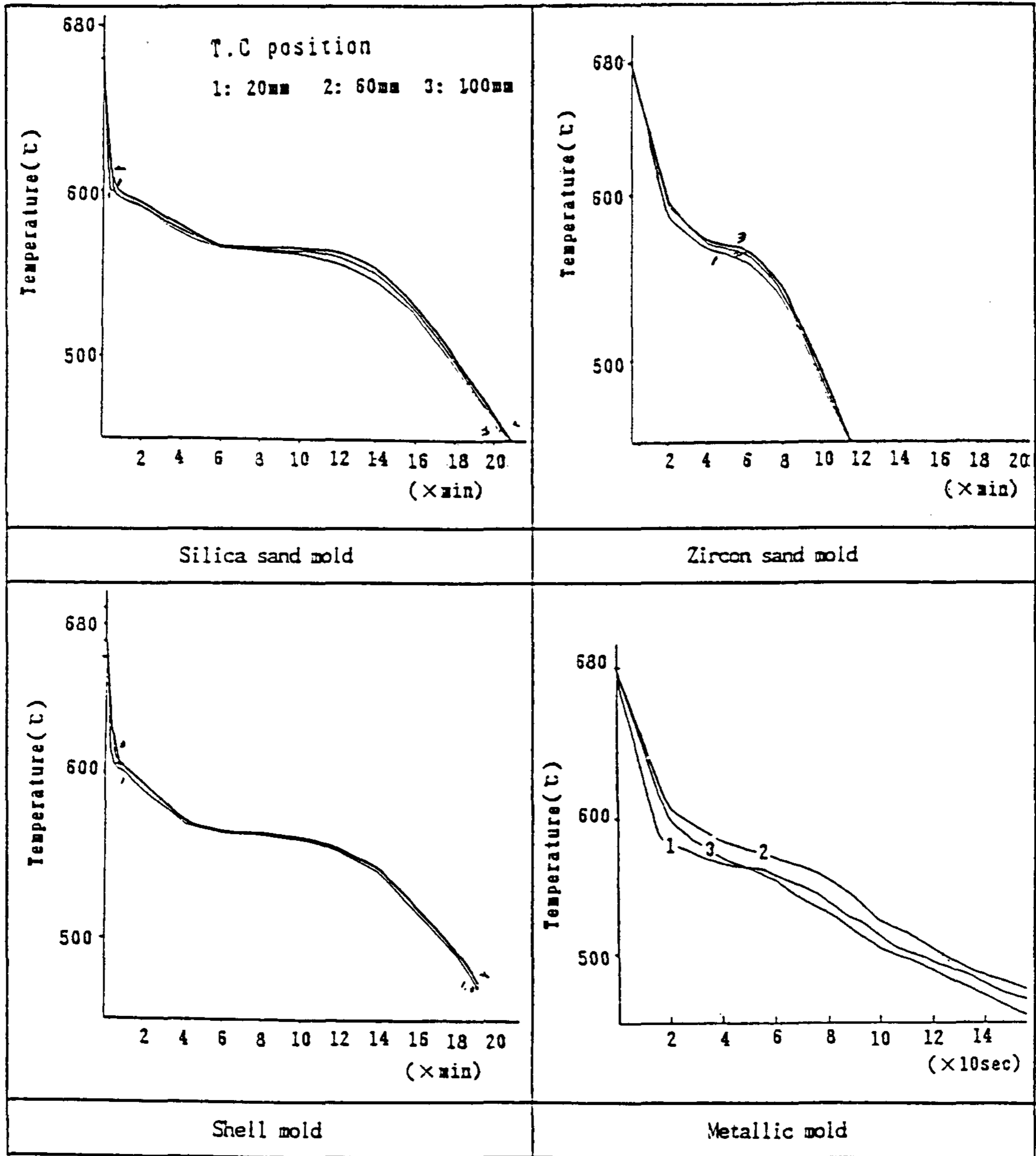


Fig. 2. Typical cooling curves for AC4C alloy castings at the pouring temperature 680°C.

늦게 성장하는 dendrite arm이 성장을 거의 정지하여 그 결과 DAS가 넓어지기 때문에 냉각속도가 느릴 경우 DAS는 증가하는 것으로 사료되었다. 또한 사형에 주입한 경우 냉각속도와 DAS의 크기는 반비례관계를 나타내고 있으며 사형과 금형은 명확하게 구분되었다.

3.3 공정Si입경에 미치는 냉각속도의 영향

주조조건에 의한 시편의 주방상태와 T6처리후 공정Si입경의 크기를 Fig. 4에 나타내었다. 주입 온도 680°C로 금형에 주입하여 T6처리후의 공정Si입경은 3.6 μ m로 가장 작게 나타났으며 주입온도 740°C에서 셀형에 주입한 경우 주방상태의 공정

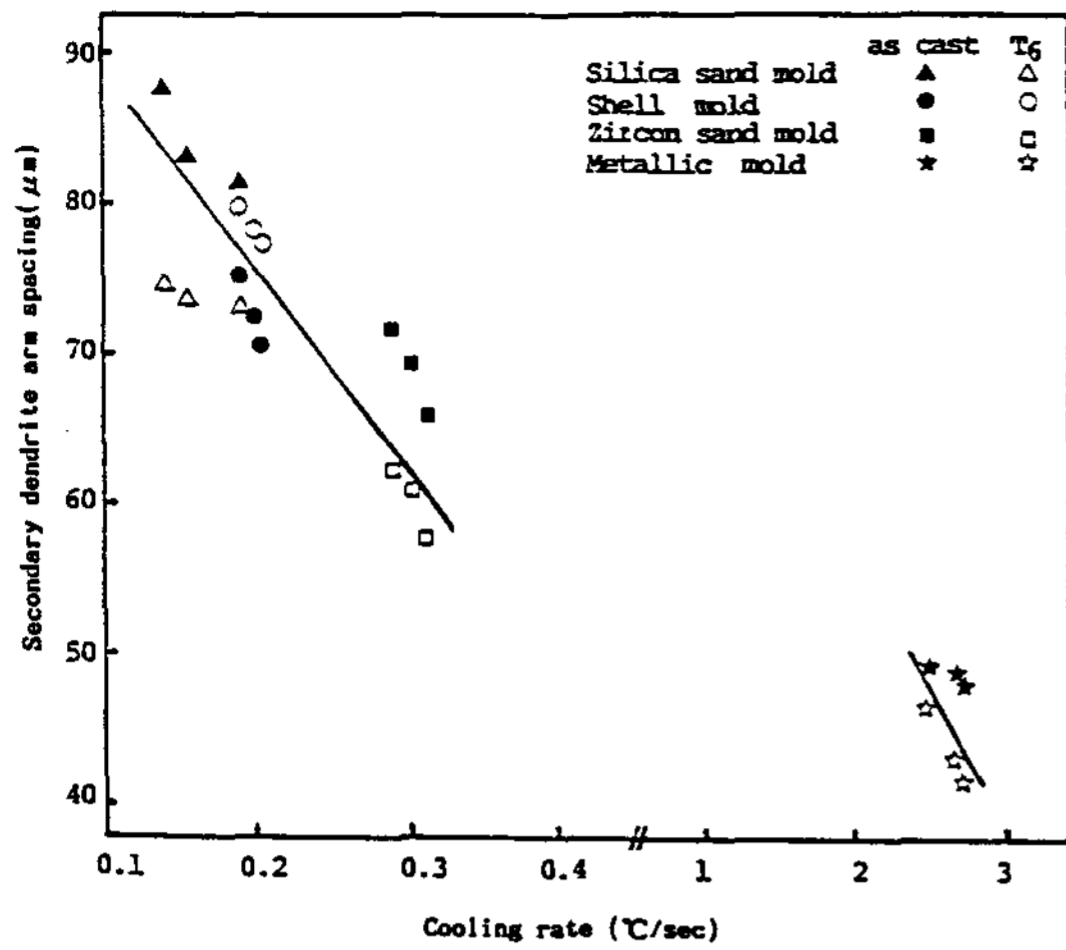


Fig. 3 Relation between secondary dendrite arm spacing and cooling rate in AC4C alloy castings.

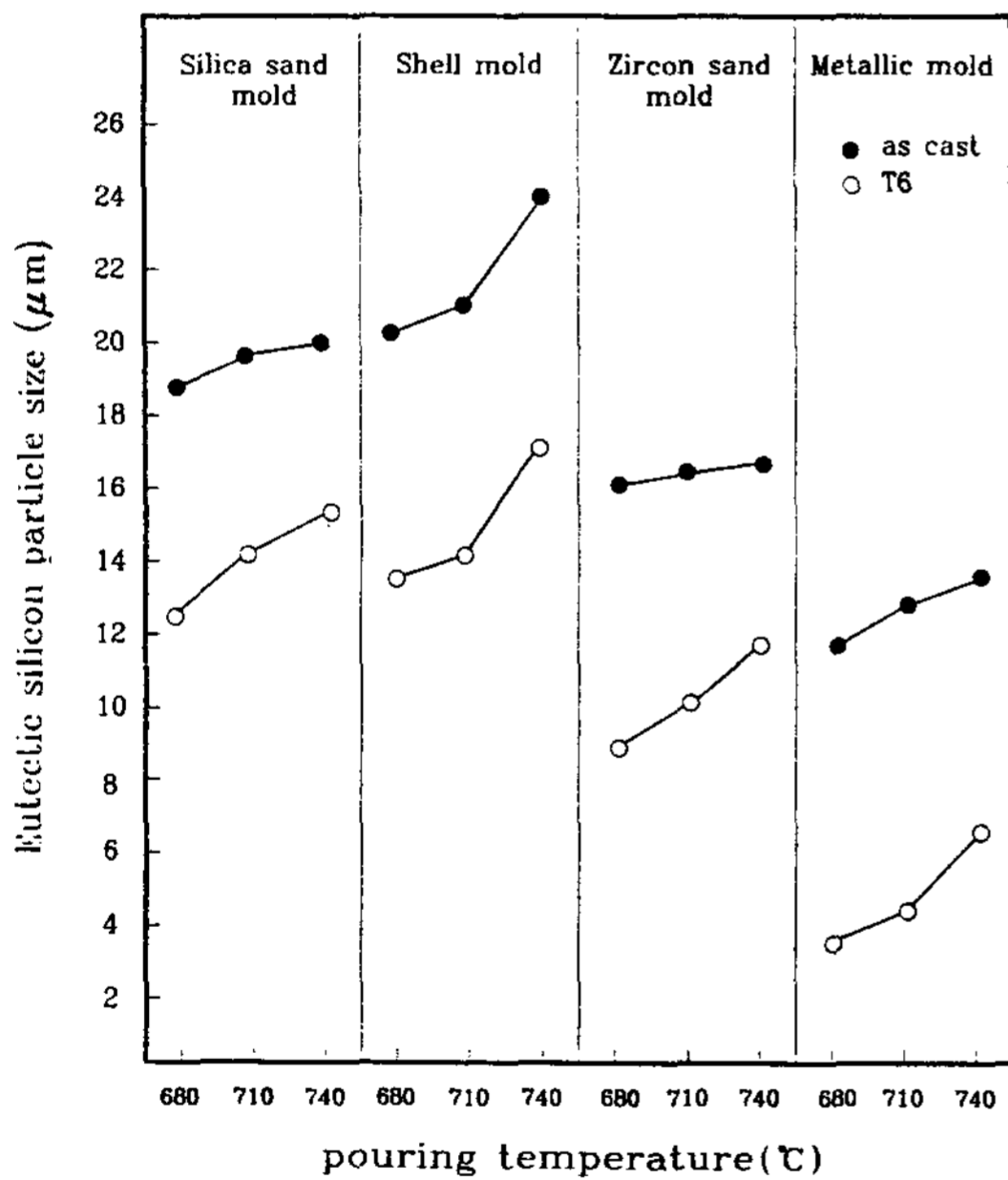


Fig. 4. Effects of molds and pouring temperatures on eutectic silicon particle size in AC4C alloy castings.

Si입경은 24.4 μm 로 가장 크게 나타났다. 따라서 주입온도가 상승하면 주형종류에 관계없이 공정 Si입경은 조대하게 성장되었다. 또한 주형종류로서는 금형인 경우 가장 작고, 지르콘사형, 규사형, 셸형 순으로 공정Si입경이 크게 나타났다.

특히 주방상태보다 T6처리를 한 경우 공정Si입경이 작아지는 것을 알 수 있었다. 공정Si의 형태는 주형재료 및 주조방법 등에 따라서 형상, 크기 및 분포상태가 변화되는 것으로 냉각속도와 응고시간에 의하여 공정Si 크기는 다르게 나타났다. 이를 Fig. 5에 표시하였다. 즉 냉각속도가 느린 셸형과 규사형은 조대한 공정Si가 분포되어 있으며 냉각속도가 빠른 금형과 지르콘사형의 공정Si는 미세하게 분포되어 있었다. 또한 T6처리를 하면 용체화 처리후 급랭으로 인하여 공정Si는 사형 및 금형 모두 작아짐을 알 수 있었다.

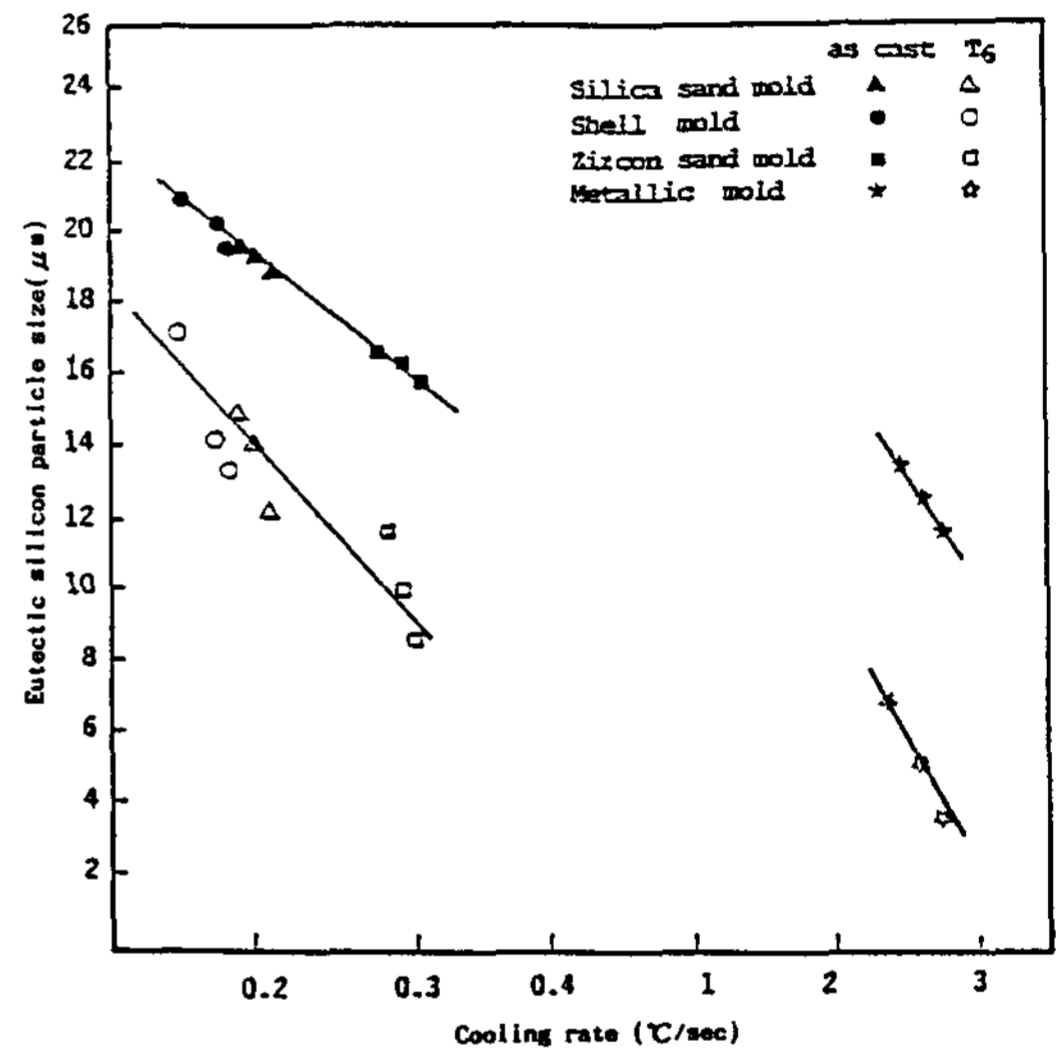


Fig. 5. Relation between eutectic silicon particle size and cooling rate in AC4C alloy castings.

Fig. 6에 DAS와 공정Si입경과의 관계를 나타내었다. DAS의 증가에 따라서 공정Si입경의 크기도 비례적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 주방상태와 T6처리후의 DAS와 공정Si입경의 크기는 모두 일정한 비례관계로서 나타났다.

3.4 기계적 성질에 미치는 주조조건과 열처리의 영향

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 주입온도와 주형종류에 의한 시편의 주방상태와 T6처리후의 인장강도, 연신율 및 경도 측정결과를 나타내었다. 인장강도와 연신율은 금형인 경우 가장 높은 값으로 주형종류에 따라 다소 다른 값을 보이고 있으

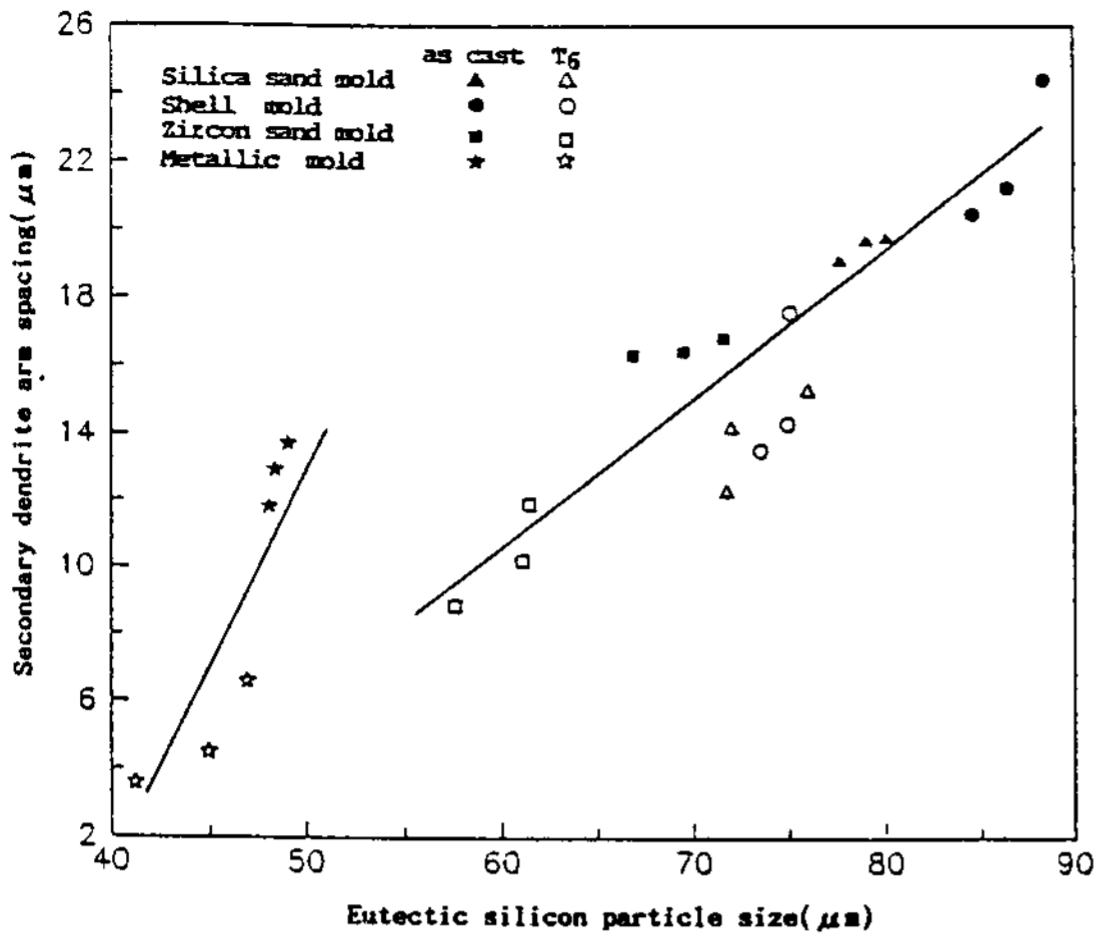


Fig. 6. Relation between secondary dendrite arm spacing and eutectic silicon particle size in AC4C alloy castings.

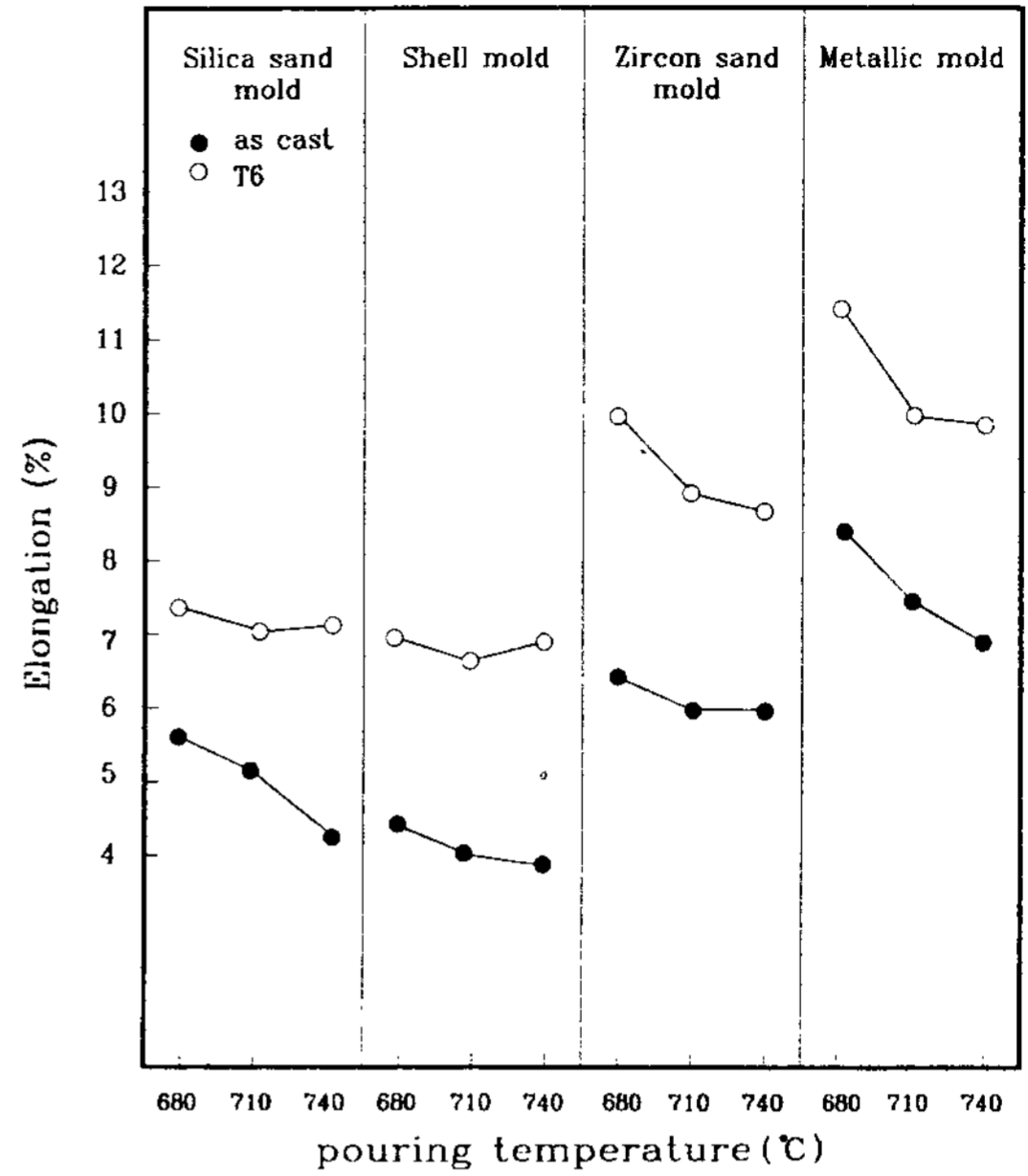


Fig. 8. Effects of molds and pouring temperatures on elongation in AC4C alloy castings.

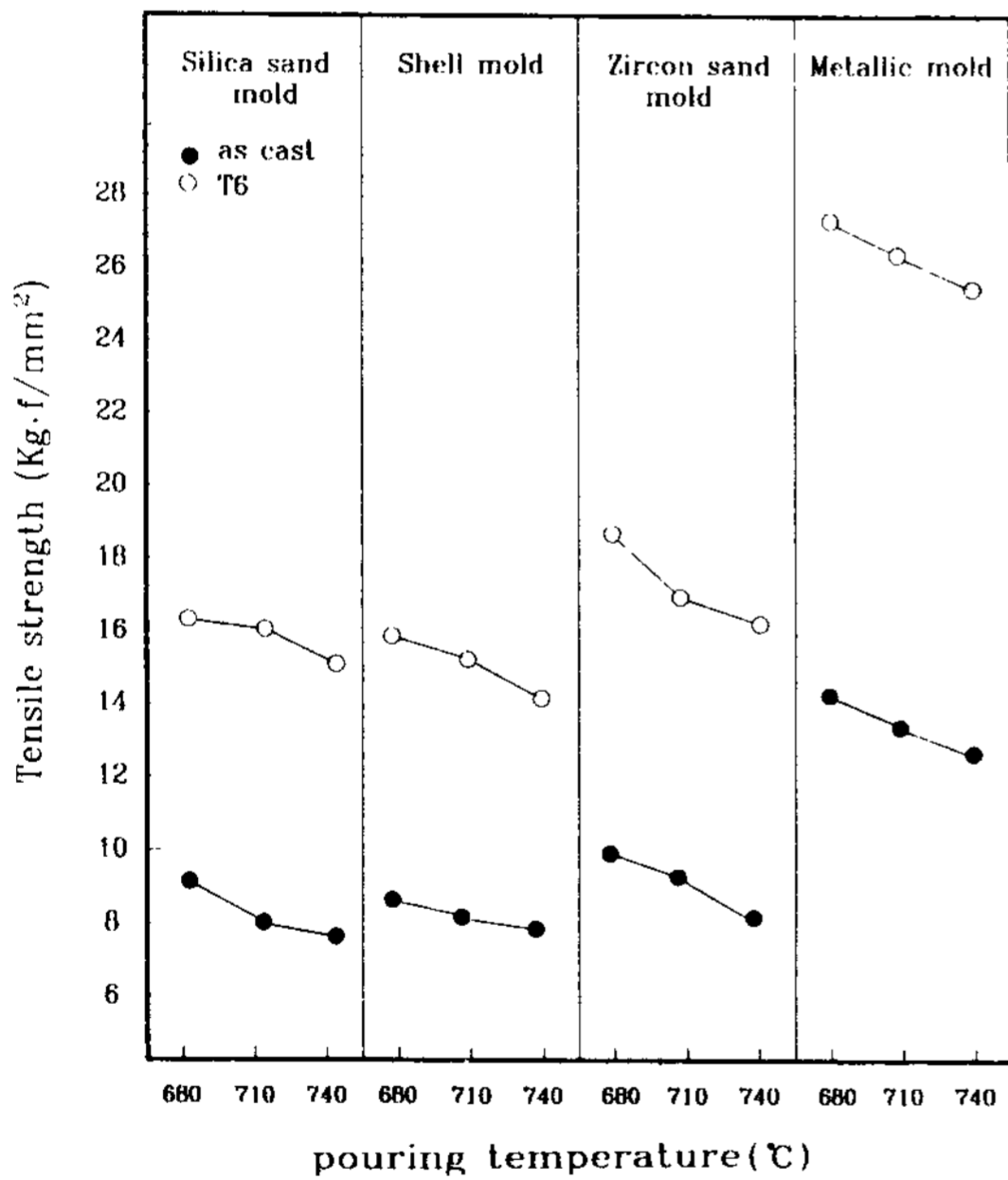


Fig. 7. Effects of molds and pouring temperatures on tensile strength in AC4C alloy castings.

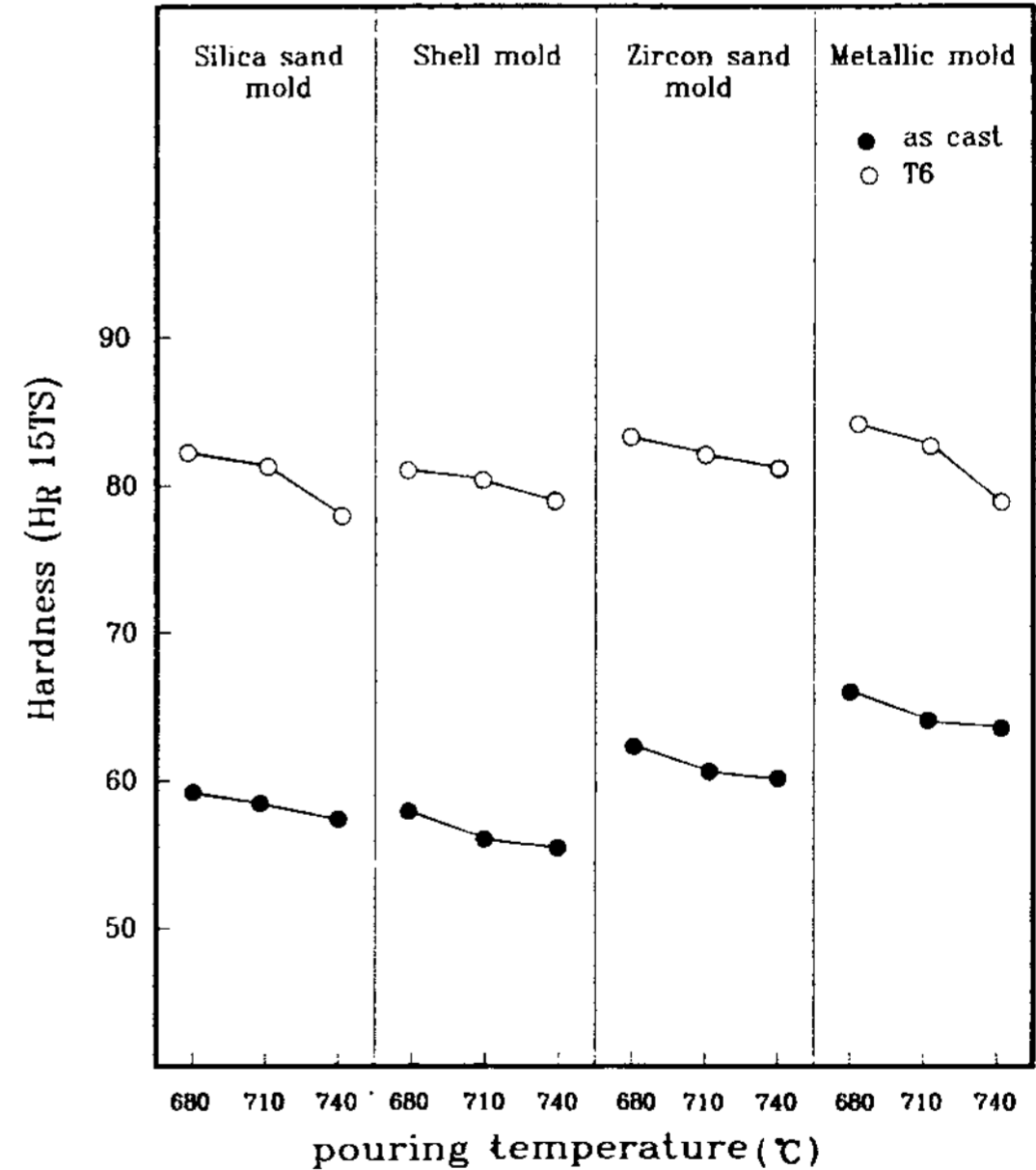


Fig. 9. Effects of molds and pouring temperatures on hardness in AC4C alloy castings.

며 또한 주입온도가 상승함에 따라서 인장강도와 연신율은 저하하였다. 경도는 금형인 경우 가장 높고 지르콘사형, 규사형, 셸형 순으로 감소하였으며 T6처리 후는 주형종류에 따라 다소 다른 경향을 나타내었다. 또한 주입온도가 상승하면 경도는 저하하였다. 이는 냉각속도가 빠른 주형

의 경우 DAS가 작고 공정Si가 균일하고 치밀하게 분포되므로 기계적 성질이 향상되는 것으로 DAS와 기계적 성질의 관계를 Fig. 10에서 Fig.

12까지 나타내었다. T6처리를 실시하면 용체화 처리에 의하여 주방상태의 침상공정Si가 구상화 되어 응력집중의 효과를 감소시키고 Si의 확산속도가 증가하여 공정Si의 성장이 빨라지며 공정Si간의 거리가 멀어져서 연성이 높은 기지조직이 되기 때문에 인장강도와 연신율이 증가하며, 석출상 Mg₂Si의 핵생성속도가 성장속도보다 크기 때문에 미세한 Mg₂Si의 석출에 의해서 경도는 상승되는 것으로 사료되었다.

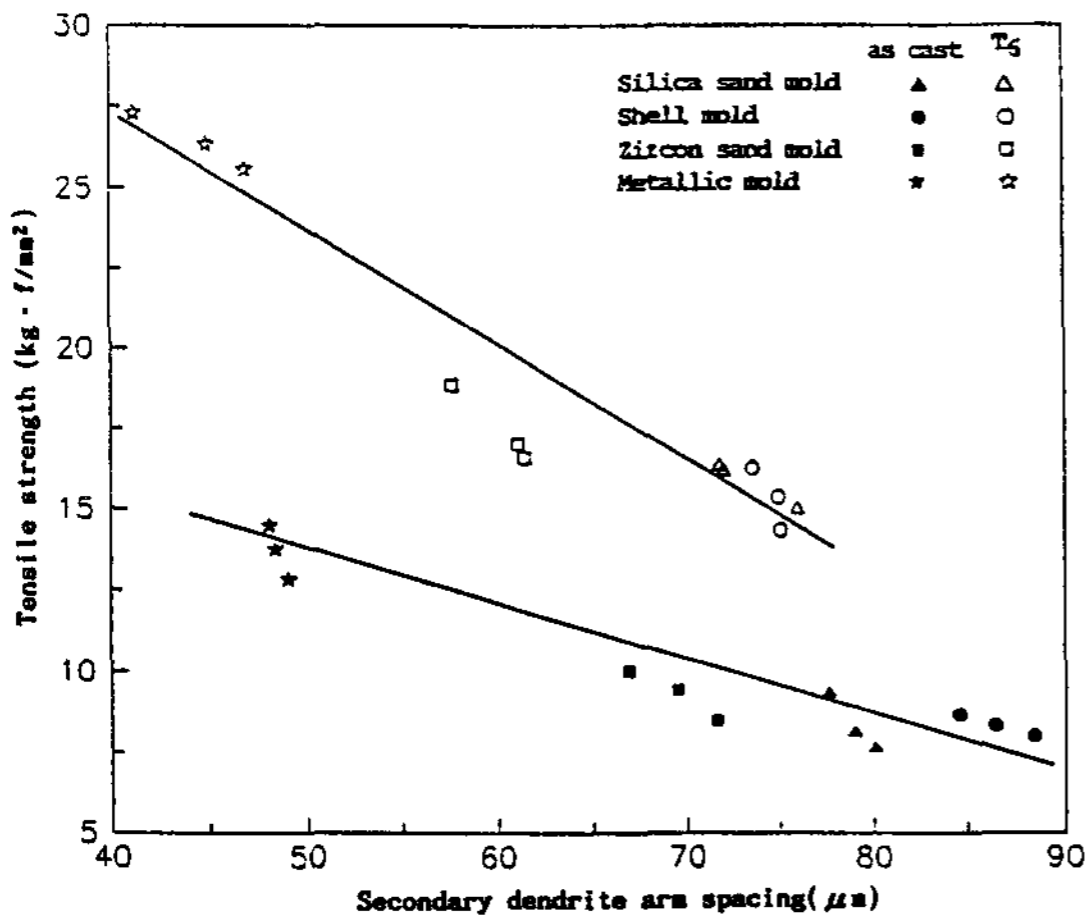


Fig. 10. Relation between secondary dendrite arm spacing and tensile strength in AC4C alloy castings.

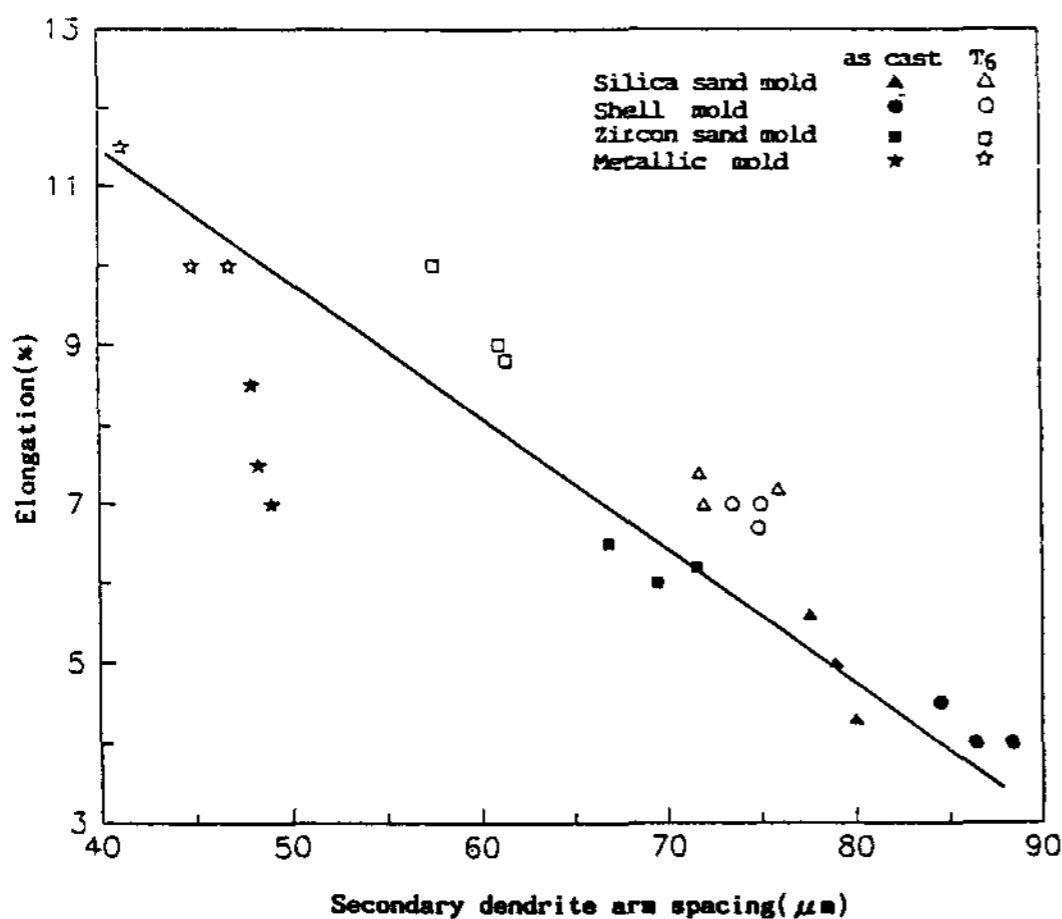


Fig. 11. Relation between elongation and secondary dendrite arm spacing in AC4C alloy castings.

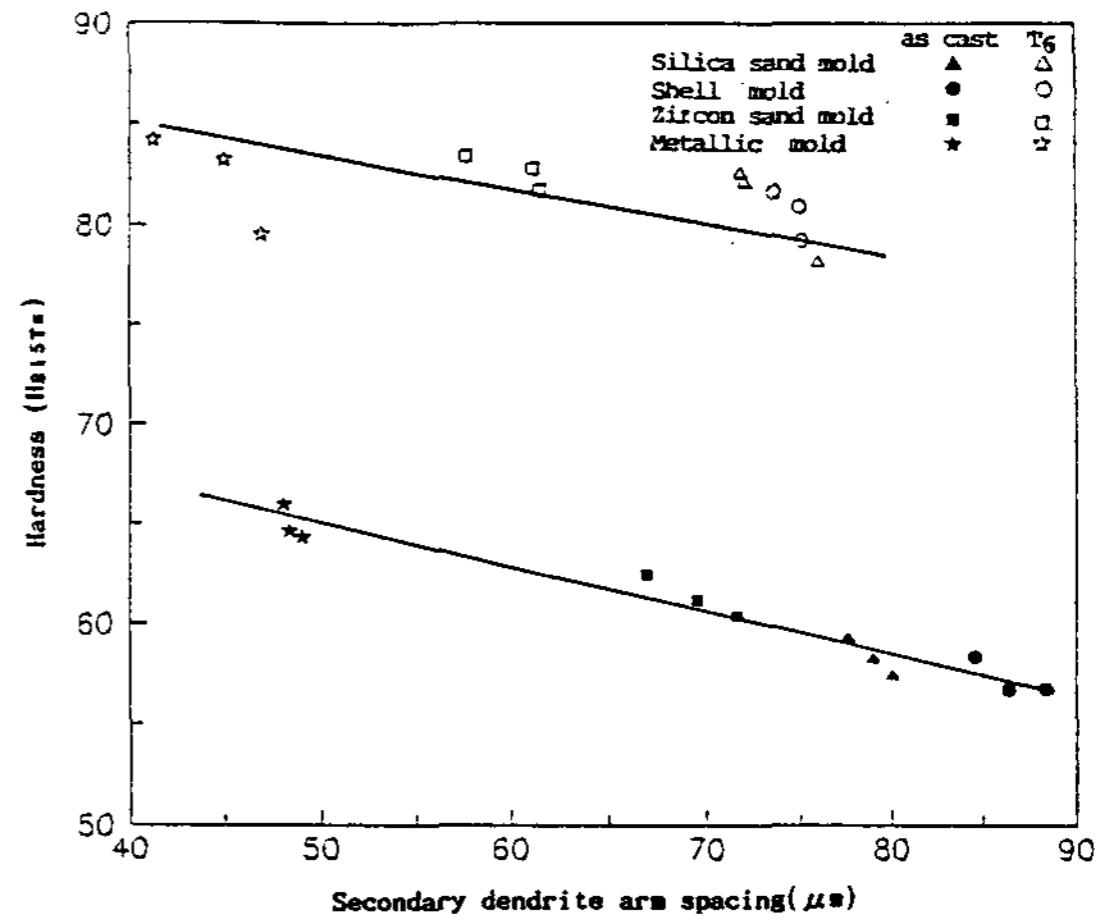


Fig. 12. Relation between hardness and secondary dendrite arm spacing in AC4C alloy castings.

공정Si입경의 크기와 인장강도 및 연신율의 관계를 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다.

주방상태와 T6처리한 시편 모두 공정Si입경이 작아짐에 따라 인장강도와 연신율이 향상되는 것을 알 수 있었다. Fig.15는 공정Si입경과 경도의 관계를 나타낸 것으로 공정Si입경이 작아짐에 따라 경도는 다소 완만하게 증가됨을 알 수 있으며 또한 T6처리후 경도향상 원인의 하나로 공정Si

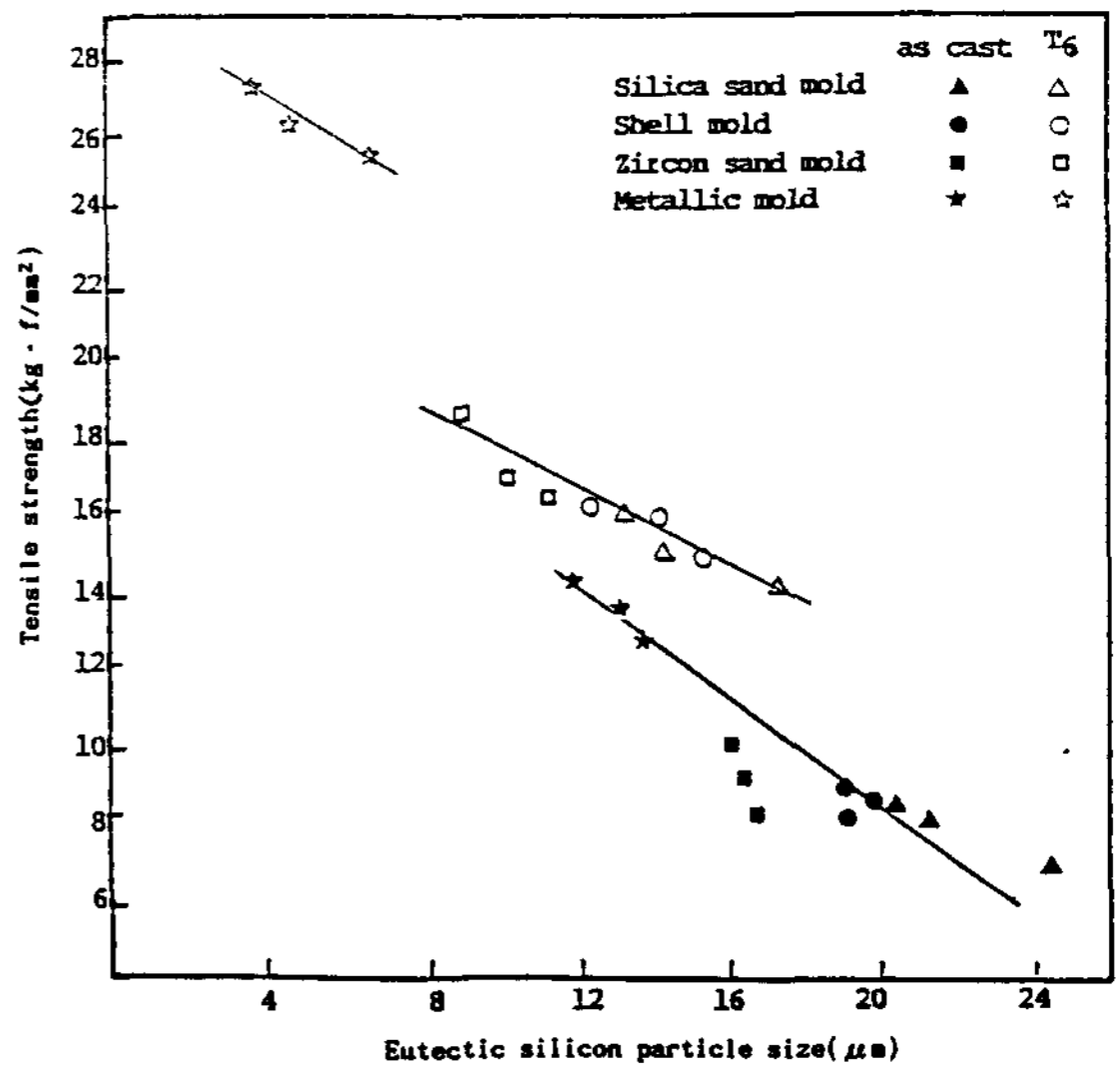


Fig. 13. Relation between tensile strength and eutectic silicon particle size in AC4C alloy castings.

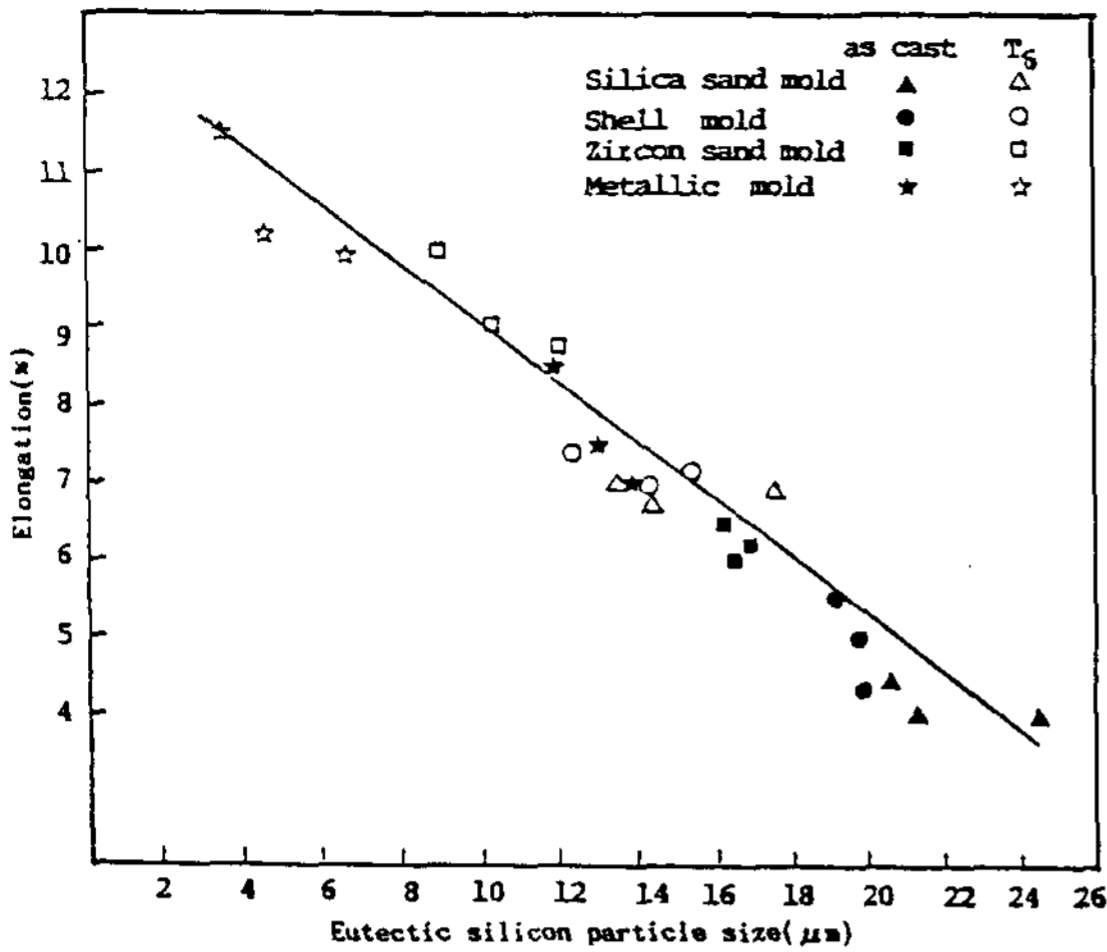


Fig. 14. Relation between elongation and eutectic silicon particle size in AC4C alloy castings.

입경이 관계된다고 사료되었다. 이는 Fujh¹⁾ 등이 실시한 실험결과와 일치됨을 알 수 있었다. 따라서 Al-Si계 합금에 있어서 DAS나 공정Si입경의 측정에 의하여 기계적 성질의 예측이 가능하므로 비파괴적인 성질시험에 이용될 수 있을 것으로 사료되었다.

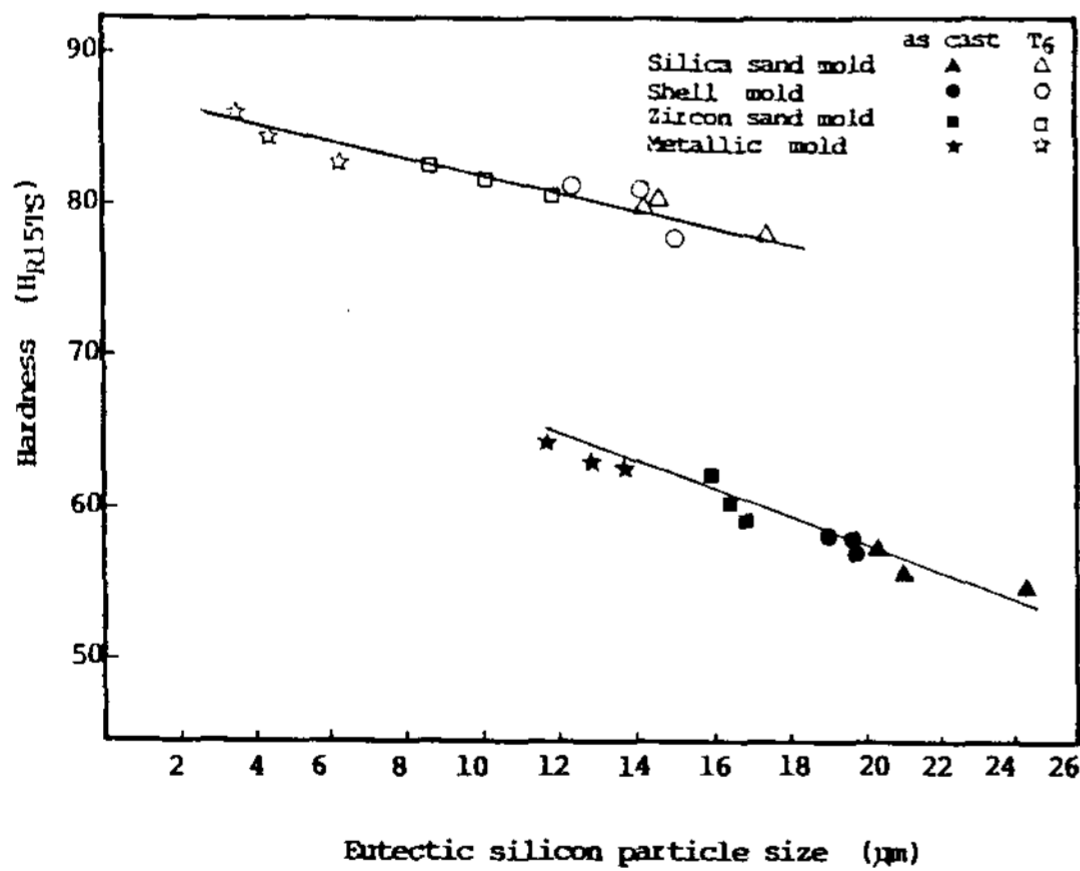


Fig. 15. Relation between hardness and eutectic silicon particle size in AC4C alloy castings.

3.5 파단면의 특성

주방상태와 T6처리한 시편의 인장시험 후 주사전자현미경에 의한 파단면을 Photo 3에 나타내었다. 기계적 성질이 우수한 금형과 지르콘사형 시편의 경우 연성파면의 특징을 갖는 dimple

파단이 주를 이루고 있으며 특히 금형의 경우 dimple은 10 μ m 정도로 다른 파단면에 비해 미세함을 보여주었다. 이러한 dimple은 제2상 입자인 공정Si와 시효석출물의 주위에서 미소공동(micro void)의 발생, 성장 및 합체에 의해 발생되는 것으로 사료되었다¹⁴⁾. 규사형과 셸형시편의 경우 취성파면을 나타내고 있으며 파단면도 금형과 지르콘사형에 비하여 조대하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 주방상태보다 T6처리후 시편의 인장파단면이 미세하게 관찰되었다. 이는 용체화처리후 급랭에 의한 공정Si의 형상과 크기변화에 기인되는 것으로¹⁵⁾ 사료되며 주형종류에 의한 파단면은 냉각속도가 빠른 금형인 경우 dimple의 크기가 작고 균일하며 연성파괴의 특징을 나타내는 반면 냉각속도가 느린 규사형과 셸형인 경우 벽개형태의 파괴를 나타내며 조대한 파단면을 나타내었다.

4. 결 론

AC4C합금을 용해하여 금형, 지르콘사형, 규사형 및 셸형의 주형에 주입한 후 주방상태와 T6처리후의 조직과 기계적 성질에 미치는 주조조건 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AC4C합금의 인장강도, 연신율, 경도값은 금형을 제외한 사형에 있어서 지르콘사형이 가장 높고 셸형이 가장 낮은 경향을 나타내며 주입온도가 상승하면 감소하였다.

2) 공정Si입경과 secondary dendrite arm spacing 크기는 금형, 지르콘사형, 규사형 및 셸형 순으로 증가하며 또한 주입온도가 상승하면 증가하였다.

3) 주괴의 냉각속도가 증가하면 secondary dendrite arm spacing, 공정Si크기 및 결정립의 크기는 감소하였으며 기계적 성질은 향상되었다.

4) T6처리후의 공정Si입경과 secondary dendrite arm spacing의 크기는 주방상태와 비교하여 감소하였으며 주형종류와 주입온도에 의한 영향은 주방상태와 유사하였다.

5) T6처리후 공정Si의 형상은 구형으로 변화하며 기계적 성질은 주방상태보다 현저하게 향상되었으며 주형종류와 주입온도에 의한 기계적 성

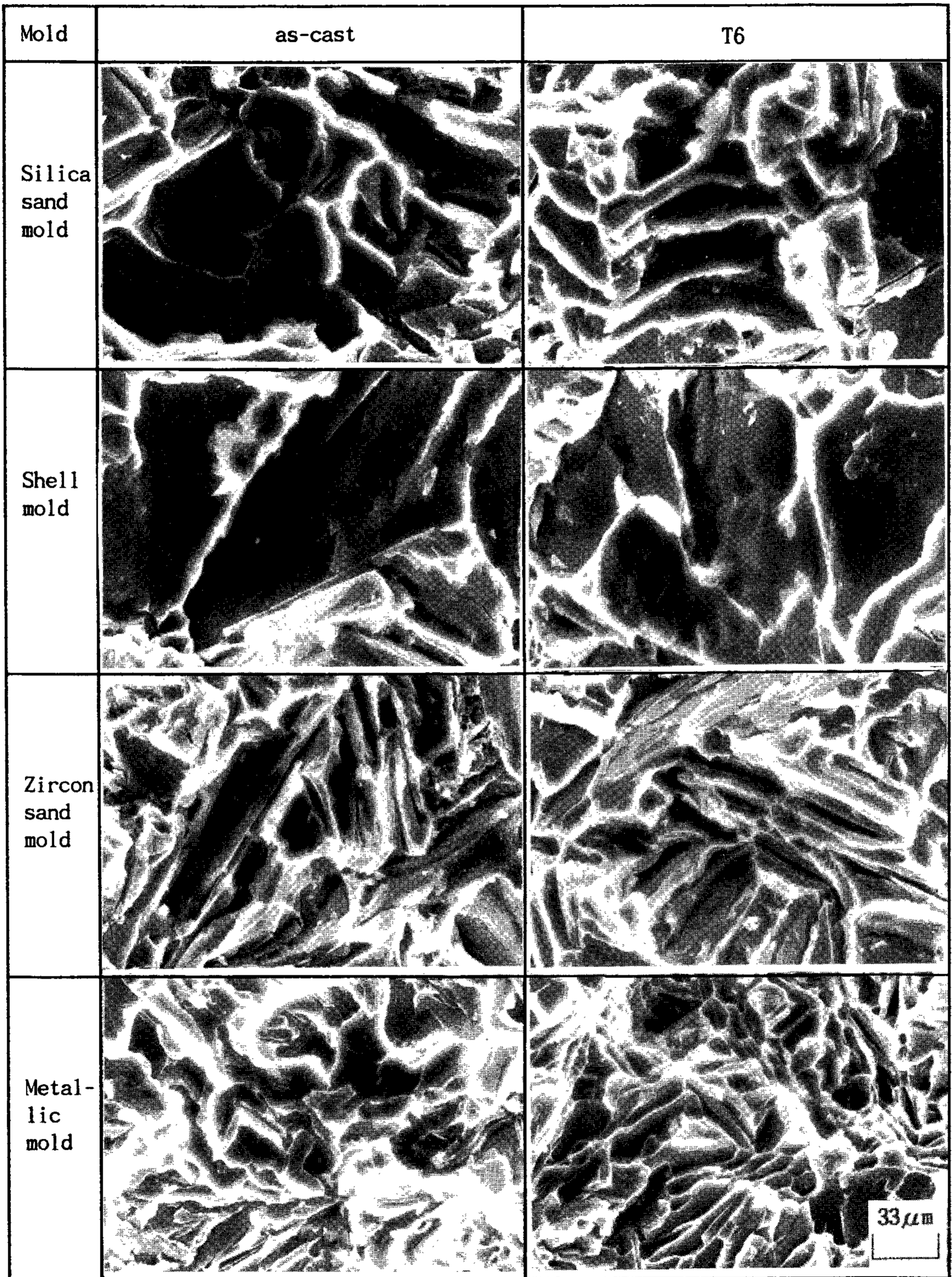


Photo. 3. Scanning electron micrographs showing the fractured surfaces in AC4C alloy in the various molds poured at 680°C.

질은 주방상태와 동일한 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 1991년도 한국주조공학회 학술연구 보조비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 藤井則久, 藤井滿, 森本庄吾, 岡田千理 : 鑄物, 56 (1984) 387
2. 神尾彰彦, 手塚裕康, 熊野政彦 : 鑄物, 51 (1979) 408
3. 市川理衛, 池田徹之, 大橋照男 : 鑄物, 46 (1974) 25
4. 日本鑄物協會 : Al合金鑄物の組織と機械的性質(日本鑄物協會), (1982) 60
5. 鎌土重晴, 佃誠, 徳富 一郎, 廣瀬喜興 : 輕金屬, 37 (1987) 268
6. 최창옥, 이계완 : 주조, 6 (1986) 37
7. 宮田征一郎, 菊地政郎 : 鑄物, 45 (1973) 563
8. 輕金屬學會研究委員會 : Al의DASと冷却速度の測定法, (1988) 13
9. 輕金屬學會研究委員會 : Al의DASと冷却速度の測定法, (1988) 3
10. L. F. Modolfo and J. G. Barlpck : Met. Trans. B, 68 (1957) 565
11. R. E. Spear and G. R. Gardner : Modern Casting, 43 (1963) 209
12. 日刊工業新聞社 : 素形材の組織 (1989) 89
13. B. P. Bardes and M. C. Flcming : AFS Trans., 74 (1996) 406
14. C. D. Beachem : Trans, ASM, 56 (1963) 318
15. H. Fredriksson et al : J. of Inst of Met., 101 (1973) 285