



Al-Si-Mg(A356) 주조합금의 파괴인성 및 피로균열전파에 미치는 응고속도의 영향

金昌周*, 金政根**

The Effect of the cooling Rate on Fracture Toughness and Fatigue Crack Properties of Al-Si-Mg(A356) Alloy Castings

Chang-Joo Kim*, Chung-Keun Kim**

Abstract

Aluminium alloy castings, which can be not only manufactured in large, geometrically complex shapes, but also show good mechanical properties in addition to light weight, have kept their potential use as structures in the field of automotives, industrial machines and aircrafts. The variations of eutectic Si size a great effect on the elongation, impact value, fracture toughness and fatigue crack propagation rate without changes in the tensile strength or yield strength.

The cooling curves with the solidification rate between 1.4°C/min and 19.1°C/min were obtained. With the increase of solidification rate, DAS, eutectic Si size and grain size were all decreased, which enhanced the mechanical properties. The tensile strength and yield strength were the most greatly influenced by DAS, and the elongation and impact value by eutectic Si size.

1. 서론

알루미늄 주조합금의 주류를 이루는 Al-Si-Mg 계 합금은 주조성이 양호하고 기계적 성질이 우수하여 자동차, 산업기계 분야 뿐만 아니라 항공기 산업분야에서도 구조용 주물로서 널리 이용되고 있다.¹⁾

일반적으로 Al-Si-Mg계 합금에서 기계적 성질에 영향을 미치는 금속학적 조직인자로서는 (a) 결정립의 크기, (b) dendrite arm 간격, (c) 제 2상 정출물의 크기, (d) 수축공 및 기공의 양등이 있다.^{2), 3)}

알루미늄 주조합금은 사형으로 부터 고온 및 상온 금형에 이르기까지 매우 넓은 범위의 응고속도에 걸쳐 사용되며, 이에 따른 조직인자의 변화가 심하므로 적절한 응고속도 제어가 필요하다.

그런데, 지금까지 Al-Si-Mg계 주조합금에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으나 기계적 성질에 영향을 미치는 조직인자에 대한 이견이 많았으며, 파괴균열 전파특성에 대한 연구가 미흡한 실정이었다. 따라서 본 연구에서는 응고속도에 따라 기계적 성질 및 파괴인성, 피로균열 전파속도에 미치는 조직인자의 영향을 규명코자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제조

공업용 순 Al(99.8%)과 Al-20%Si 모합금, 2%Mg을 이용하여 Al-7%Si-0.3%Mg 조성의 A356합금을 목표로 Al 기준 300kg 용탕의 도가니로에서 용해 하였다. 용탕의 온도를 720°C까지

* 한국기계연구소(Korea Institute of Machinery & Metals)

** 창원기능대학 금속학과 (Dept. of Metallurgy, changwon Industrial Masters' college)

상승시켜 입자미세화 및 개량처리제로 Al-50% Ti-1%B 합금을 소량투입하여 30분간 유지시킨 후, FOSECO사의 GBF (Gas Bubbling Filtration) 장치를 이용하여 730°C에서 용탕 kg당 0.8ℓ의 Ar 가스를 주입하므로 10분간 탈가스 하였으며 이어 720°C에서 주형에 주조 하였다.

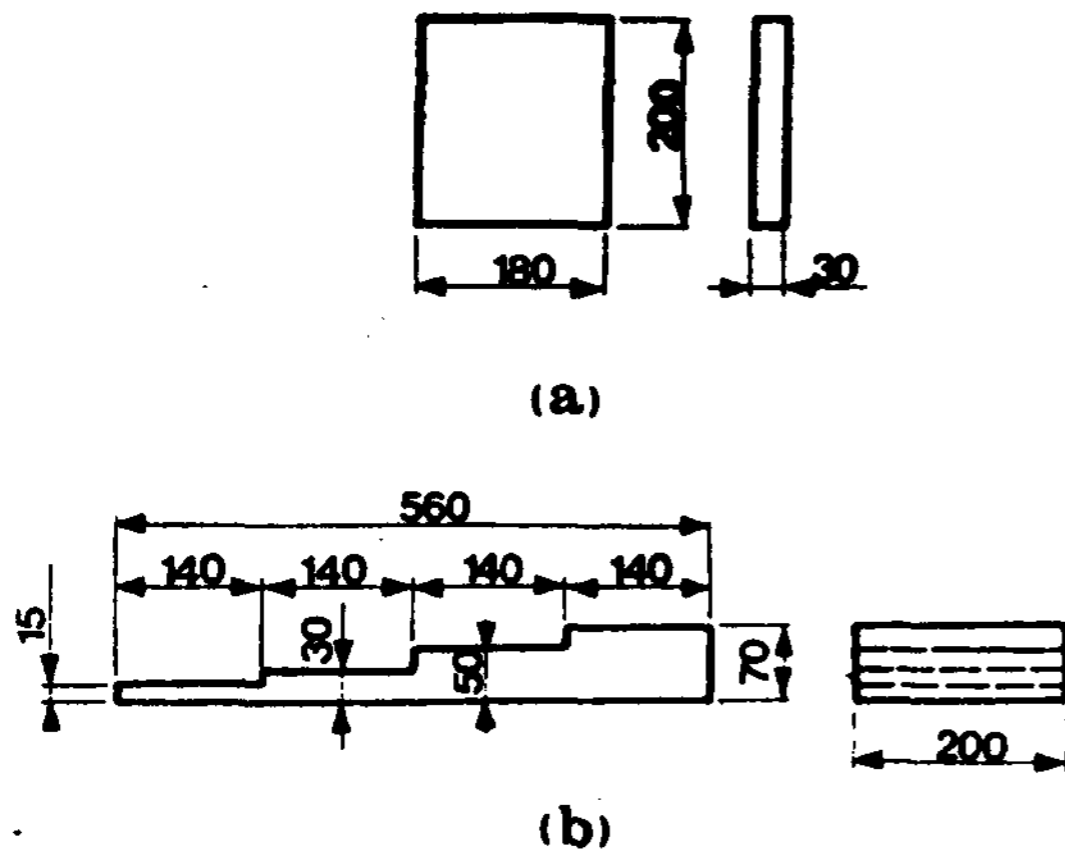


Fig.1 Dimension of casting specimens.
 (a) metal mold
 (b) stepped sand mold

Fig. 1에 나타낸 크기의 주형을 사용하여 A356 합금의 응고속도를 변화시켰으며 용탕 주입시의 주형온도는 금형의 경우 40°C ± 10°C와 250°C ± 10°C, 사형의 경우 40°C ± 10°C로 하였다.

각 시험편의 중심부에 해당하는 주형의 위치에 0.5mm CA 열전대를 설치하여 각각의 냉각곡선을 구하였다.

이들 각 시험편의 열처리를 위해 450°C × 2hr의 용체화처리를 하여 상온의 물에 급냉하였으며 상온에서 8시간동안 방치한 후 155°C × 5hr의 시효처리를 행하였다.

조직관찰

조직관찰을 위한 모든 시험편은 800번 emery paper까지 연마후 diamond paste polishing 하였다. 결정립 크기는 90cc H₂O + 15cc HCl + 10cc HF 용액에서 20-30초간 매크로 부식을 시킨후 ASTM E112-80에 의한 Line intercept method에 의하여 측정하였다. 99.5cc H₂O + 0.5cc HF에 용액으로 부식한 시험편의 40배 및 100배

광학현미경 사진을 이용하여 제 2차 DAS 4) 및 공정 Si의 크기 5)를 각각 측정하였다.

2.3 특성시험

특성시험은 인장, 충격, 파괴인성 및 피로균열 전파속도로 나누어 수행하였으며, 인장시험용 시험편은 V-notch의 4호 시험편으로 하였다. 파괴인성 시험은 ASTM E399에서의 C-T 시험편에 의해 행하였으며 시험편형상은 Fig.2(a)와 같다.

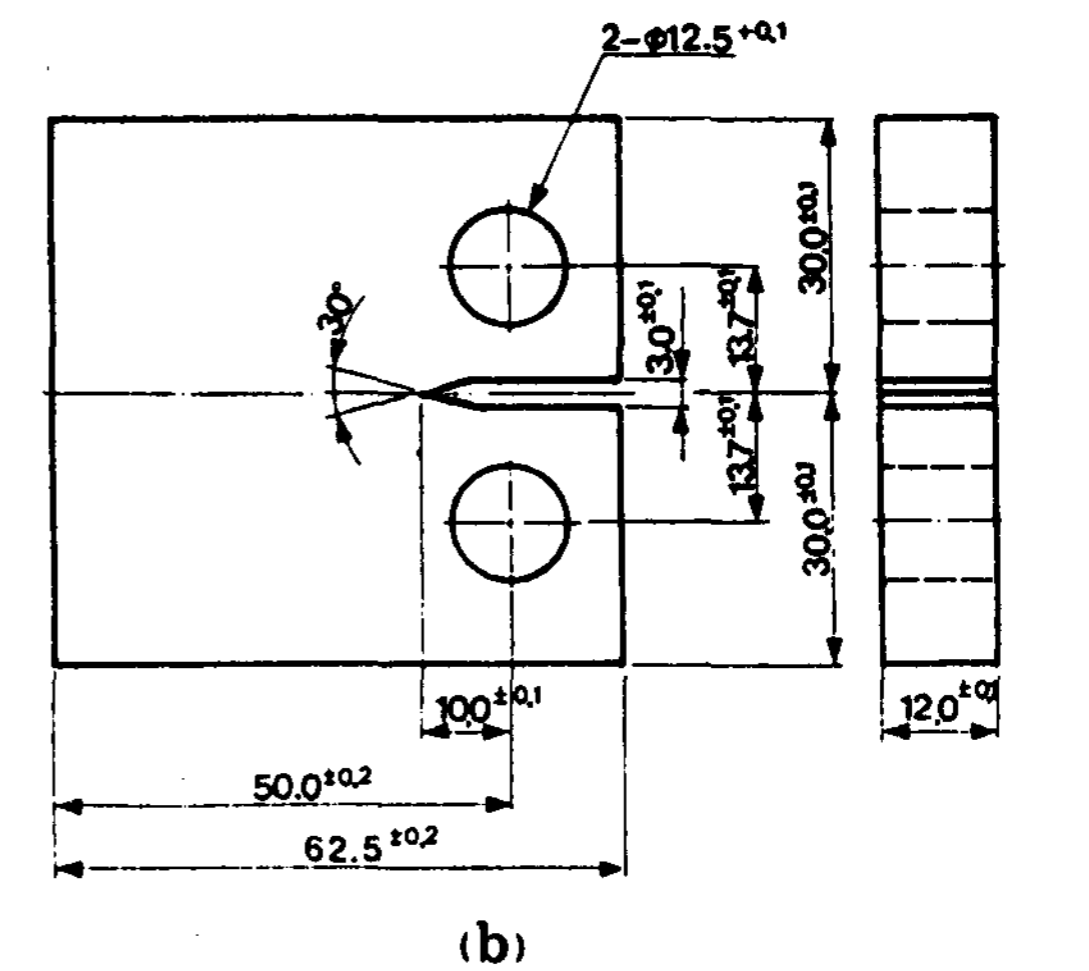
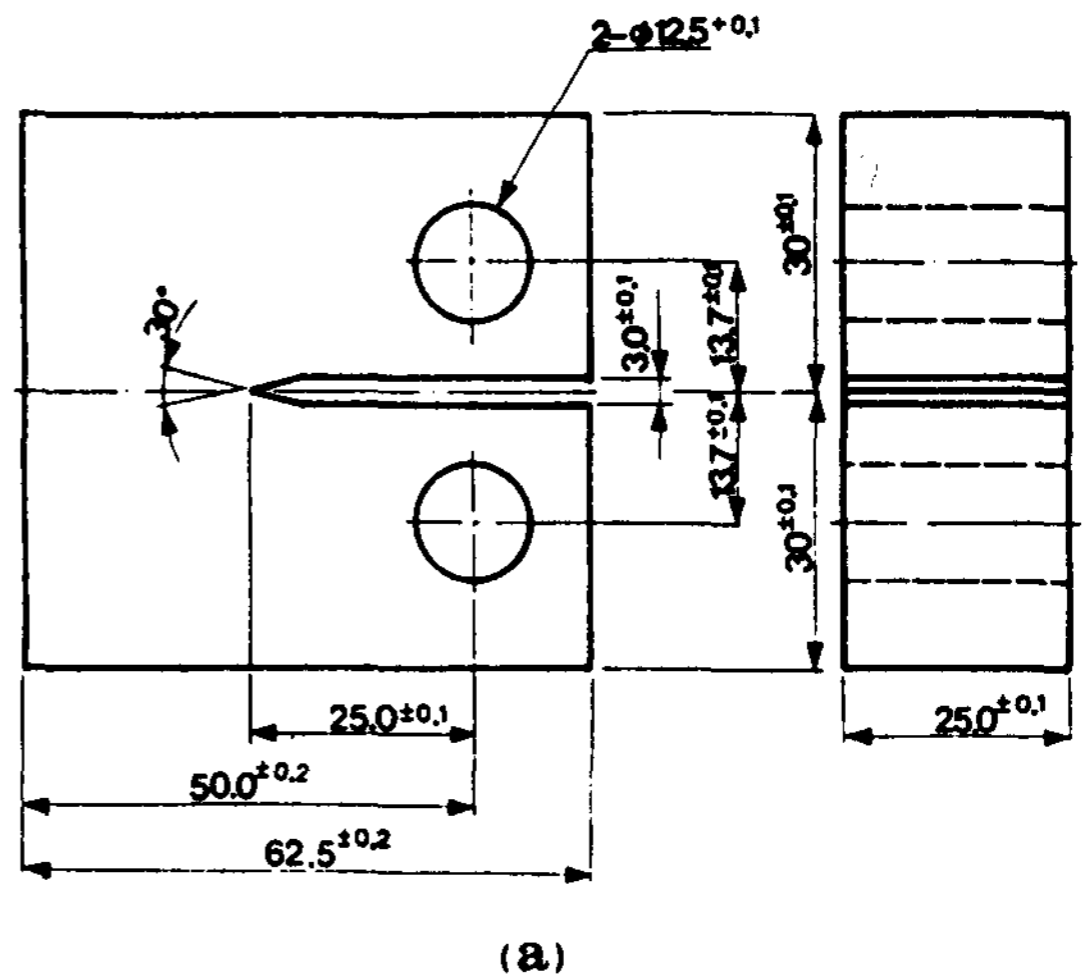


Fig.2 Dimension of test specimens.
 (a) C-T specimen for fracture toughness,
 (b) C-T specimen for fatigue crack propagation

파괴인성치는 $K=(Pq.f(a/w)/(B\sqrt{w}))$ 로 계산하였으며, 여기서 Pq 는 응력-변형 선도에서 결정된 응력, $f(a/w)$ 는 식의 상수, B 는 시험편 두께, w 는 시험편의 폭을 나타낸다. 그리고 피로균열 전파속도 시험은 ASTM E647에 따라 Fig. 2(b)의 C-T의 시험편을 사용하였다. 시험방법은 응력제어 일축 인장-인장으로 하였으며 이때 $R=P_{min}/P_{max}=0.1$, 반복속도 $f=40\text{Hz}$, 파형은 정현파로 하여 부하응력의 5-10% 정도를 증감시키는 점증 및 점감법을 병행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 응고속도 변화

각 주형에 따른 냉각곡선을 Fig.3에 나타내었

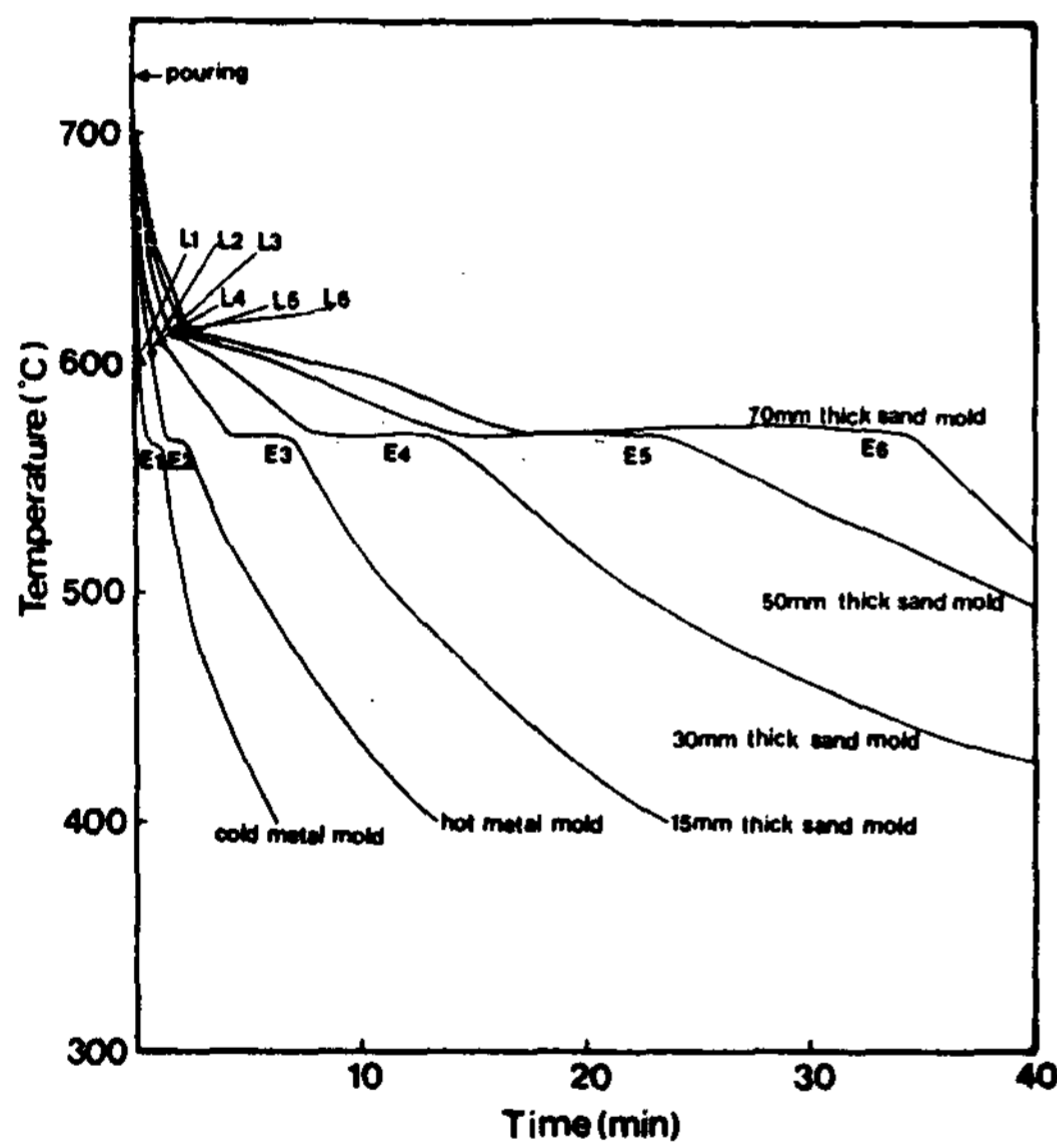


Fig.3 Cooling curves with casting molds.

다. 용탕의 응고시간은 40°C금형, 300°C금형, 15mm 사형, 30mm 사형, 50mm 사형, 70mm 사형의 순으로 길며 응고개시로부터 완료까지의 평균냉각속도, 즉 응고속도는 각각 49.1°C/min, 32°C/min, 6.7°C/min, 3.7°C/min, 2.0°C/min, 1.4°C/min였다. 응고시에 초청의 Al 고용체가 생성되는 액상선 온도는 응고속도가 1.4°C/min로 가장 느린 70mm 사형에서 614°C정도였다.

또한, 공정온도도 70mm 사형에서는 570°C였으며 40°C금형에서는 567°C를 나타내었다. 응고속도가 1.4°C/min으로 가장 느린 70mm 사형이 평형응고에 가깝다고 가정할 때 응고속도가 가장 빠른 40°C 금형의 경우 액상선 및 공정응고에서의 과냉도가 각각 4°C, 3°C정도임을 알 수 있었다.

Fig.4는 계단식 사형 시험편에서 응고개시로부터

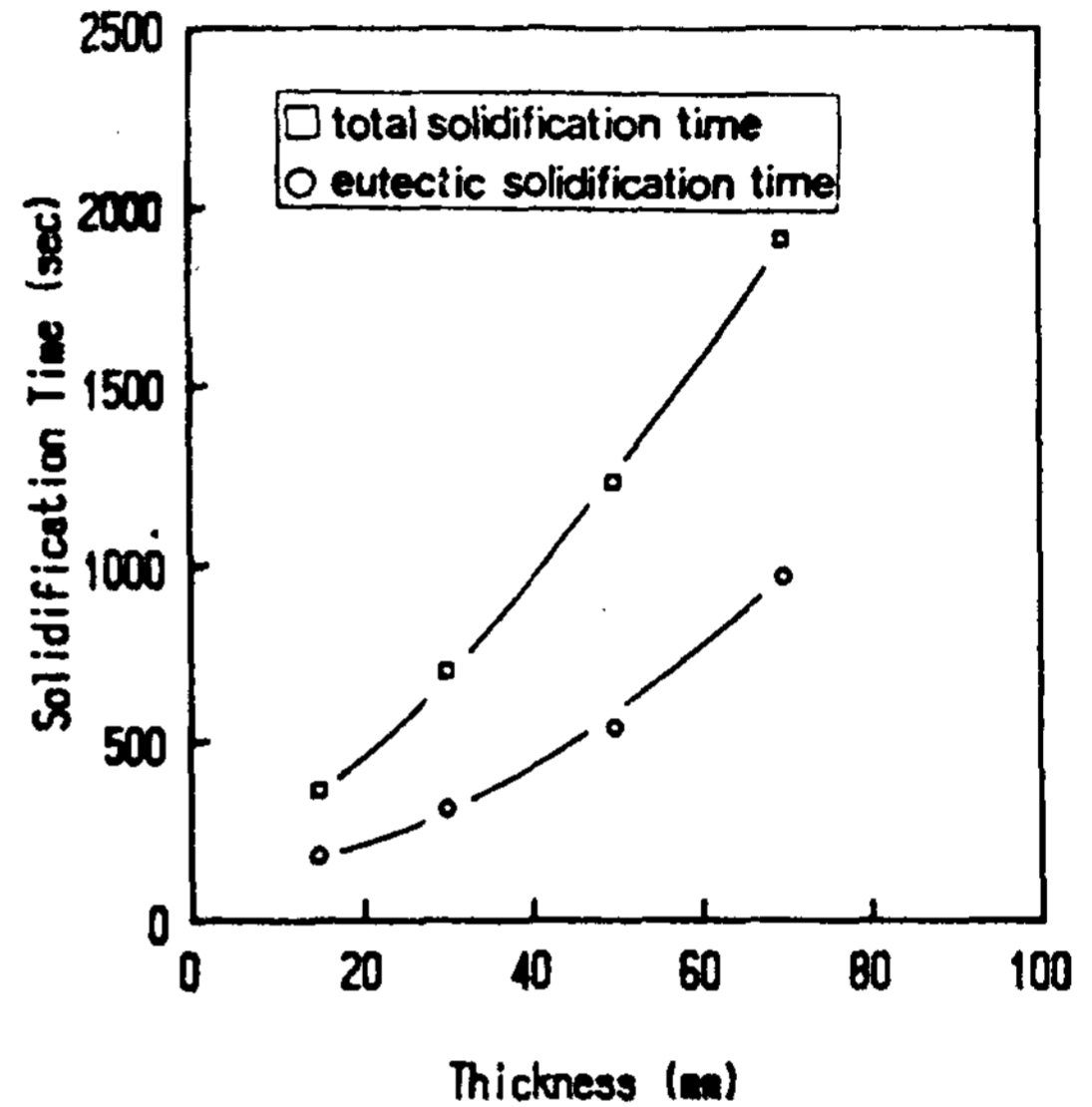


Fig.4 Effect of material thickness on solidification time in sand mold.

터 완료까지의 총응고시간과 공정응고시간을 재료두께에 따라 나타낸 것이다. 재료두께에 따라 총응고시간 뿐만이 아니라 공정응고시간도 거의 직선적으로 증가하였다.

재료두께에 따른 (주물체적/주물표면적)²과 총응고시간의 관계를 Fig.5에 나타내었다. Chvorinov의 법칙에 의하면, 동일 용탕을 동종의 주형에 주입하게 될 때 총 응고시간은 (주물체적/주물표면적)²에 직선적으로 비례하는 관계가 있다. 즉 $t=C \times (V/S)^2$ 이다. 여기서 t : 총응고시간(sec), V : 주물체적(cm^3), S : 주물표면적(cm^2), C : 응고상수이다. Chvorinov 법칙에 의해 계단식 사형 시험편에서 구한 응고상수 C 는 246.6sec/ cm^2 이었다.

공정응고시간도 (체적/표면적)²에 따라 거의 직선적으로 증가하였다. 계단식 사형 시험편에서 두께가 다른 시험편 사이의 계면과, 압탕과 접촉하고 있는 두께 70mm 주물의 상면을 단열부로

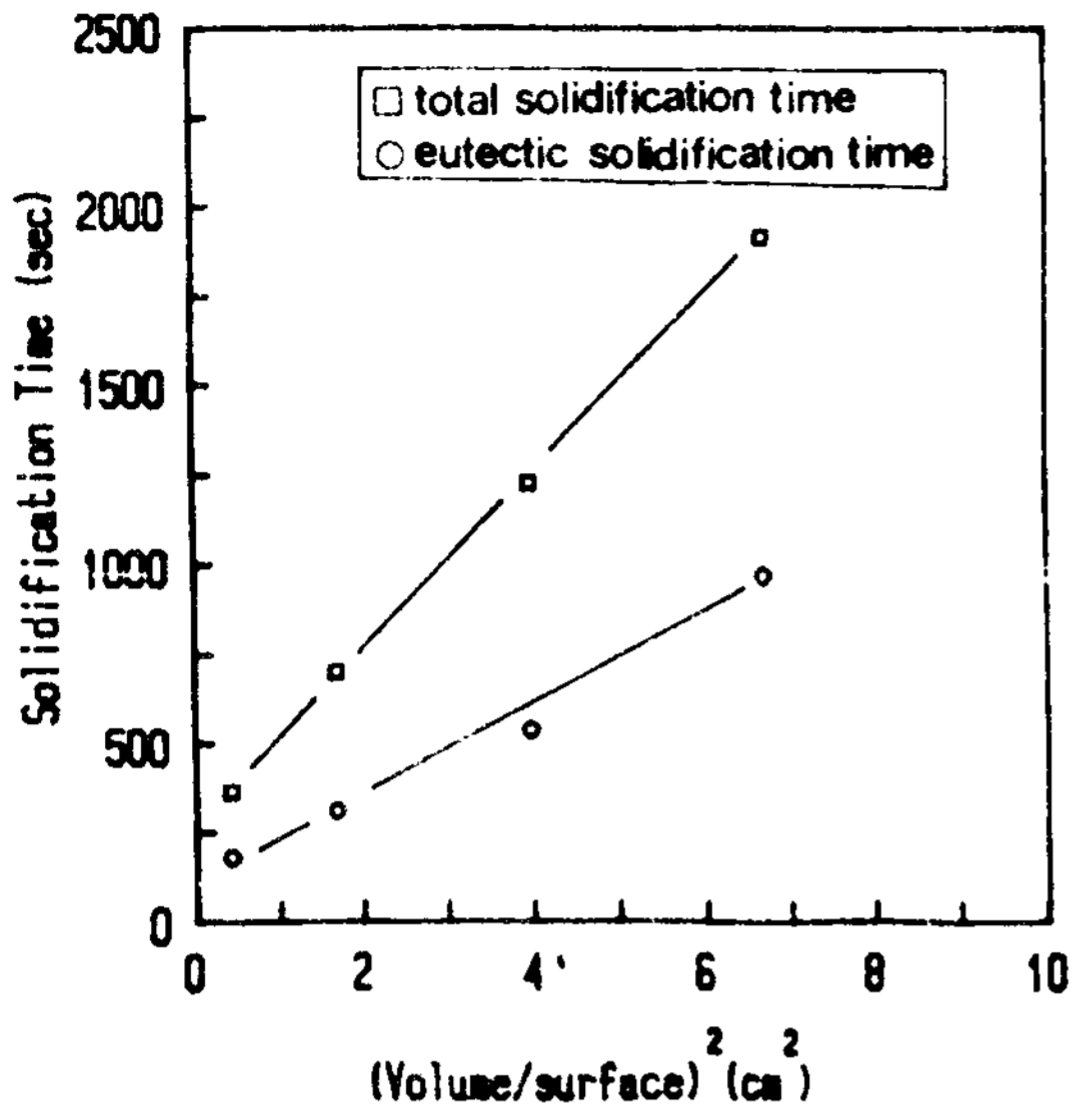
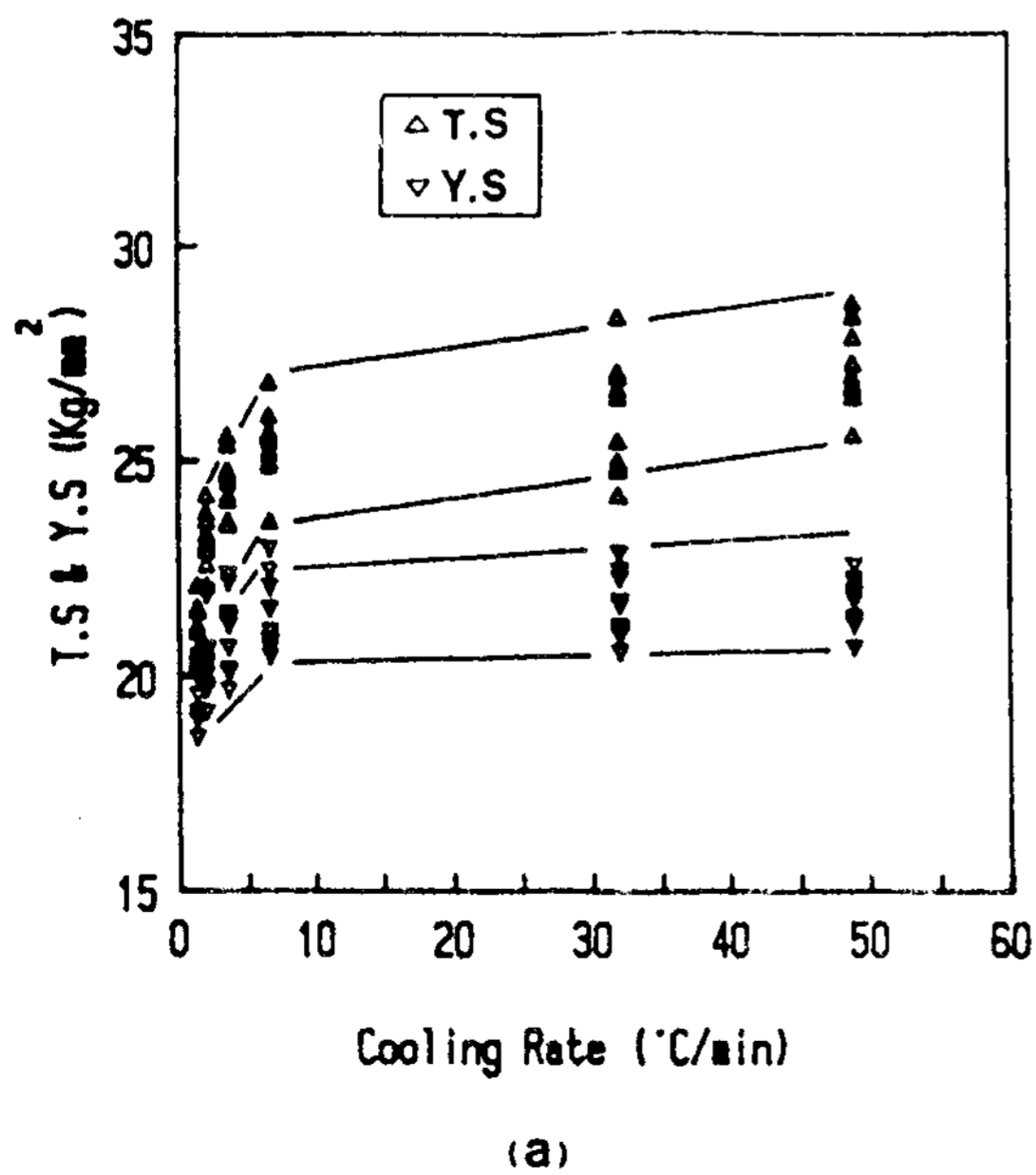


Fig.5 Relationship between solidification time and square of volume and surface area ratio.

가정하여 주물표면적에는 포함시키지 않았다.

Fig.6, Fig.7에 응고속도가 인장 및 충격특성에 미치는 영향을 나타내었다. 응고속도가 1.4°C/min에서 49.1°C/min의 범위에서는 6.7°C/min을 경계로 하여 경향이 달라지고 있다. 6.7°C/min까지는 직선적으로 급격히 증가하지만, 그



(a)

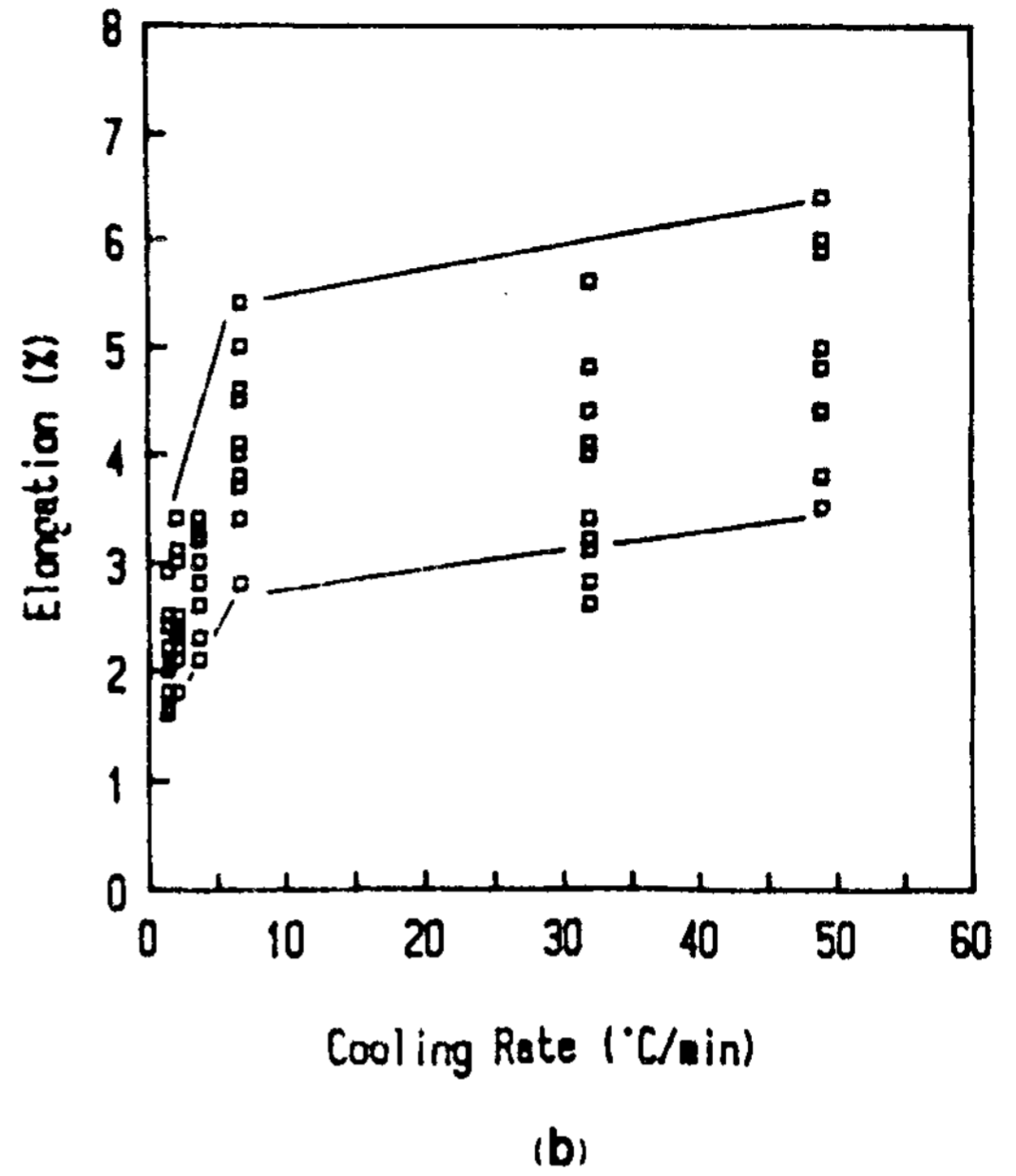


Fig.6 Variation of tensile properties with cooling rate.

- (a) tensile and yield strength,
- (b) elongation.

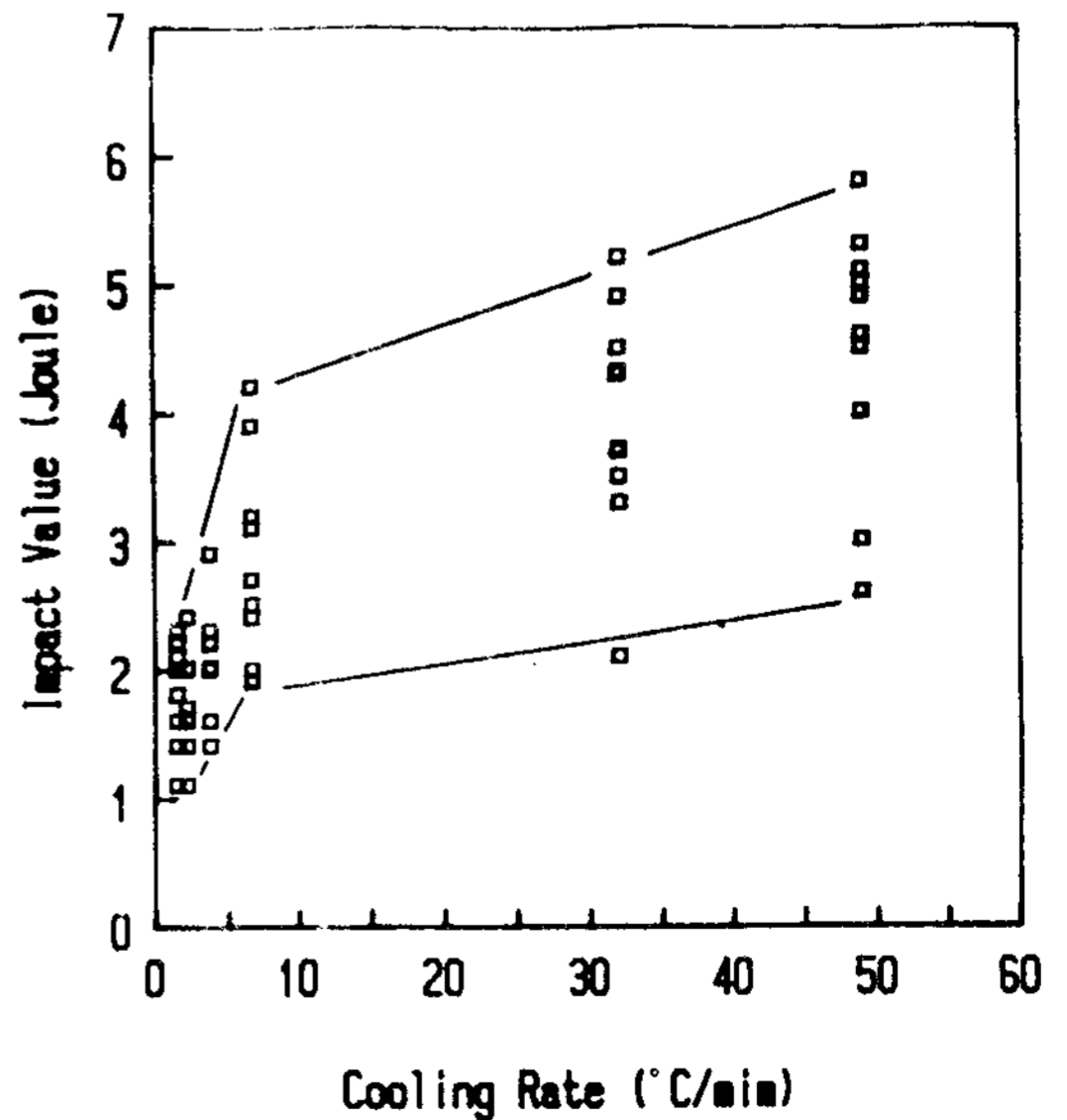


Fig.7 Variation of Charpy V-notch impact value with cooling rate.

이상의 응고속도에서는 직선적으로 완만히 증가하거나 거의 일정한 수준을 유지하고 있다.

응고속도에 따른 조직인자, 즉 DAS(Dendrite Arm Spacing) 및 공정 Si크기, 결정립크기의 변화를 Fig.8에 나타내었다. 응고속도가 증가함에

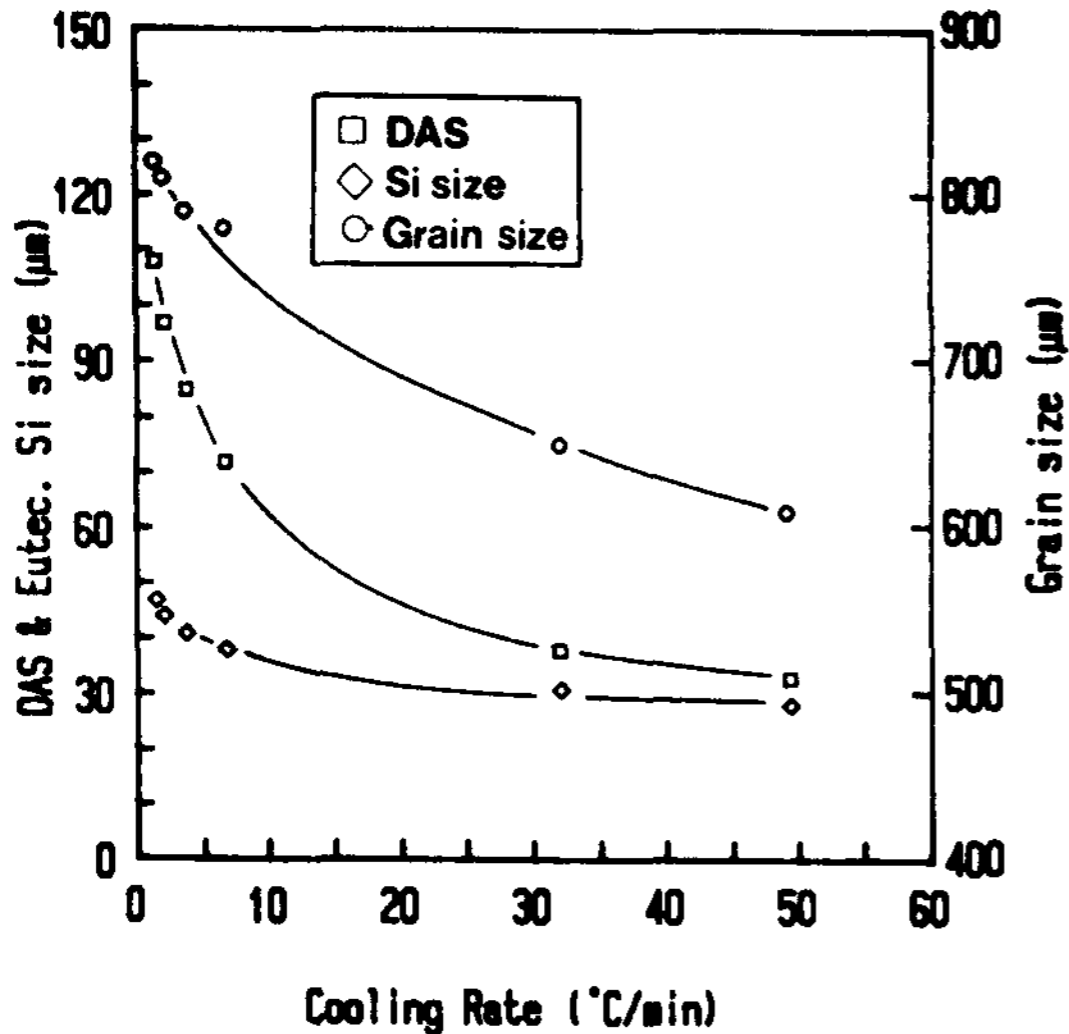


Fig.8 Effect of cooling rate on DAS, eutectic Si size and grain size.

따라 DAS, 공정 Si크기, 결정립크기 모두가 감소하고 있으나 타 조직인자에 비해 DAS의 변화가 급격하였다. Photo.1에 응고속도에 따라 DAS가 변화하는 미세조직을 나타내었다. 응고속도의 변화에 따라 결정립크기와 공정 Si크기는 각각 $610\mu\text{m}-820\mu\text{m}$, $28\mu\text{m}-47\mu\text{m}$ 로 변화하였다.

응고속도가 $1.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 인 시험편과 $49.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 인 시험편의 기계적 성질에 미치는 결정립크기 및 공정 Si크기 변화의 영향을 두 시험편의 기계적 성질 차이에서 배제한 나머지 수치들의 평균을 DAS변화에 의한 영향으로 하였다. 응고속도가 $1.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 에서 $49.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 증가할 때의 기계적 성질 증가량에 미치는 각조직인자의 영향을 백분율로 계산하여 Fig.9에 나타내었다. 인장강도 및 항복강도의 변화에 미치는 영향은 DAS가 각각 87.8%와 75.7%로 결정립크기 및 공정 Si크기에 비해 매우 크게 나타나 인장강도 및 항복강도를 결정짓는 주인자임을 알 수 있었다. Fig.10에 DAS에 따른 인장강도와 항복 강도의 변화를 나타내었다. 응고속도가 느린 $6.7^\circ\text{C}/\text{min}$ 까지는 강도가 DAS의 감소에 따라 거의 직선적으로 증가하나 그 이상의 응고속도에 따른 결정립

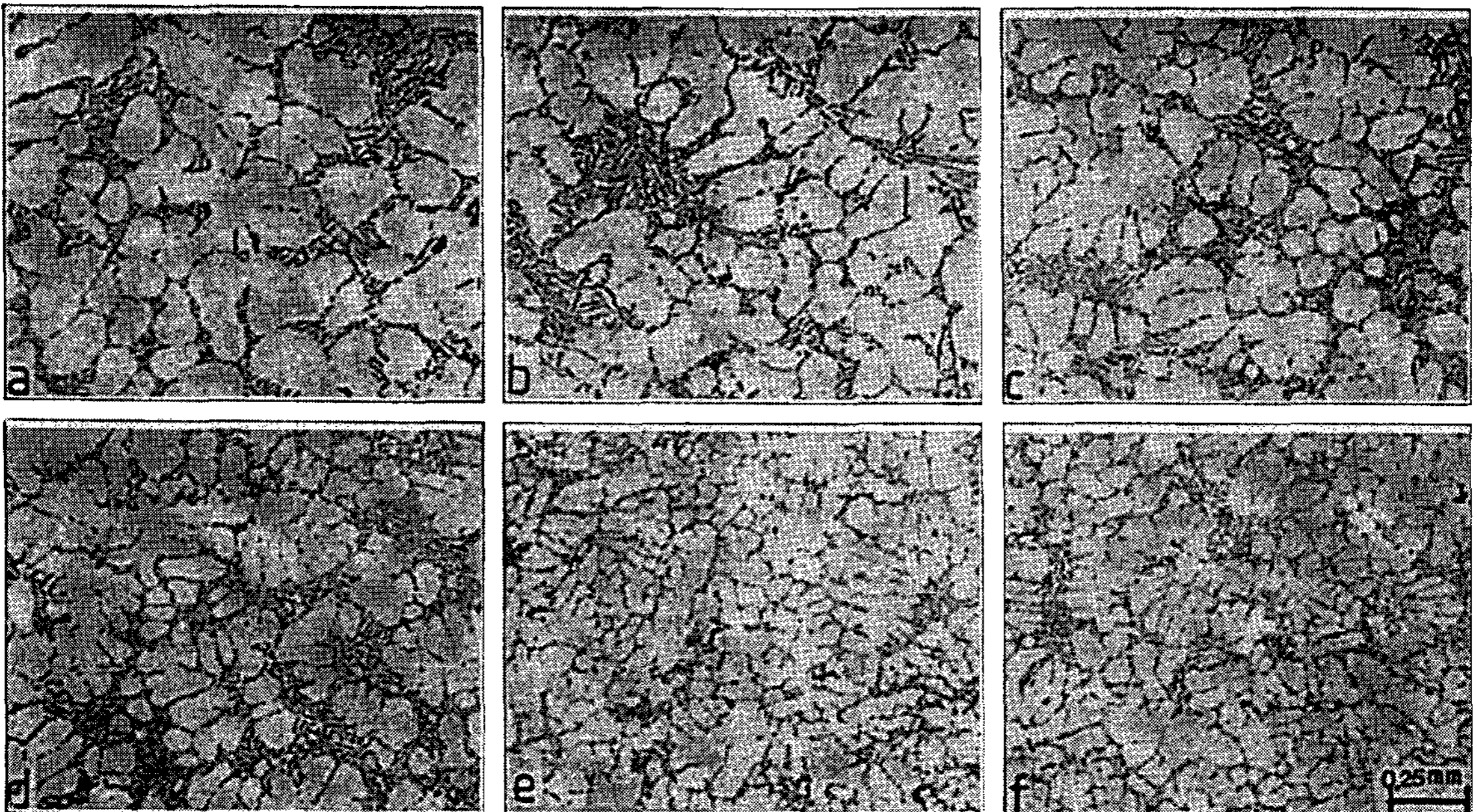


Photo.1 Variation of DAS with cooling rate, optical microscopy.
(a) 1.4 (b) 2.0 (c) 3.7 (d) 6.7 (e) 32.0 (f) 49.1°C/min.

크기 및 공정 Si크기의 감소율이 응고속도가 커짐에 따라 둔화되어 강도의 증가율을 감소시킨 것으로 생각된다.

Fig.6과 Fig.7에서 알 수 있듯이 연신율과 충격

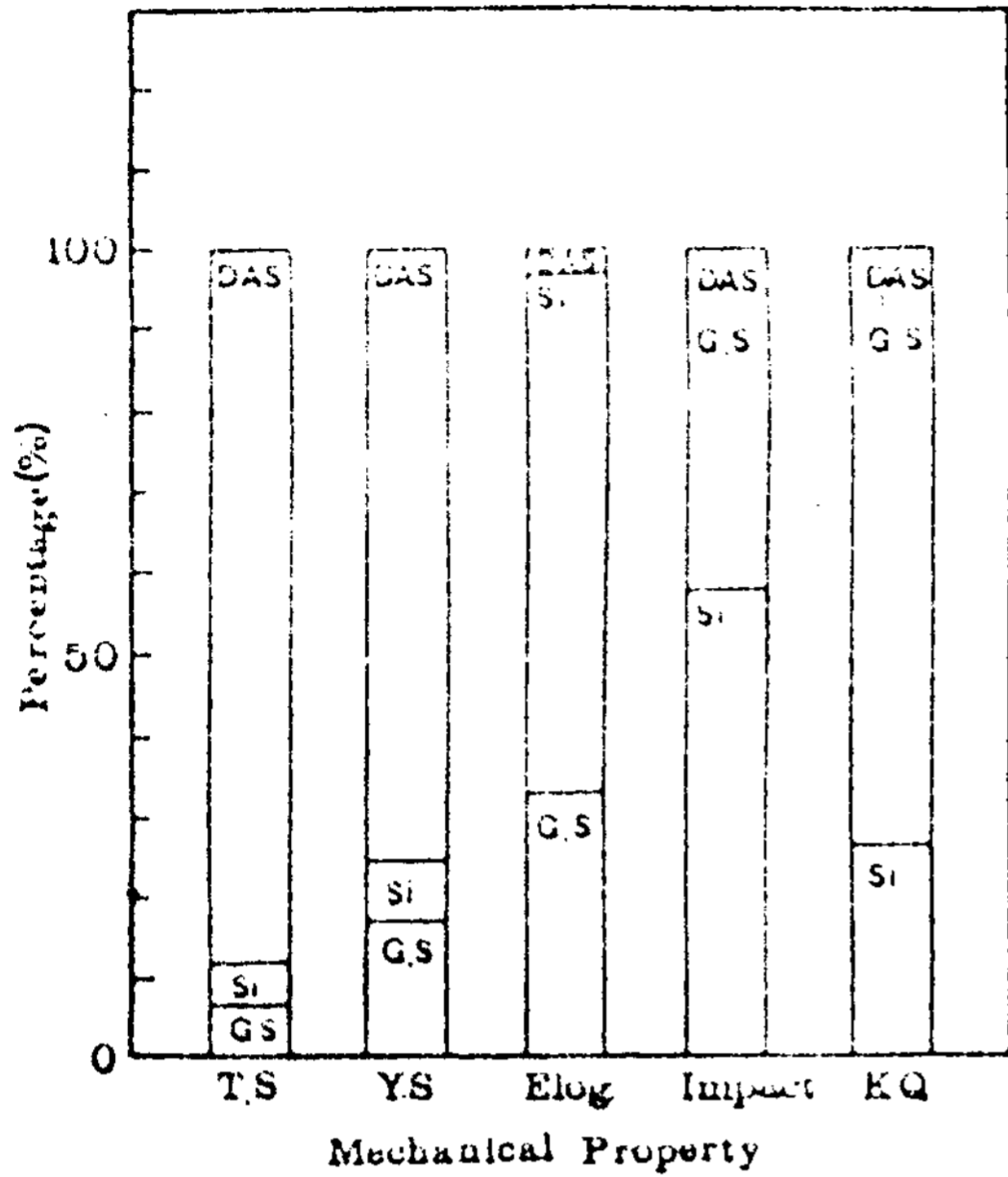


Fig.9 Influence of microstructure on the increase of mechanical properties in cooling rate of 49.1°C/min.
 DAS ; 2nd dendrite arm spacing
 Si ; Eutectic Si size
 G.S ; Grain size

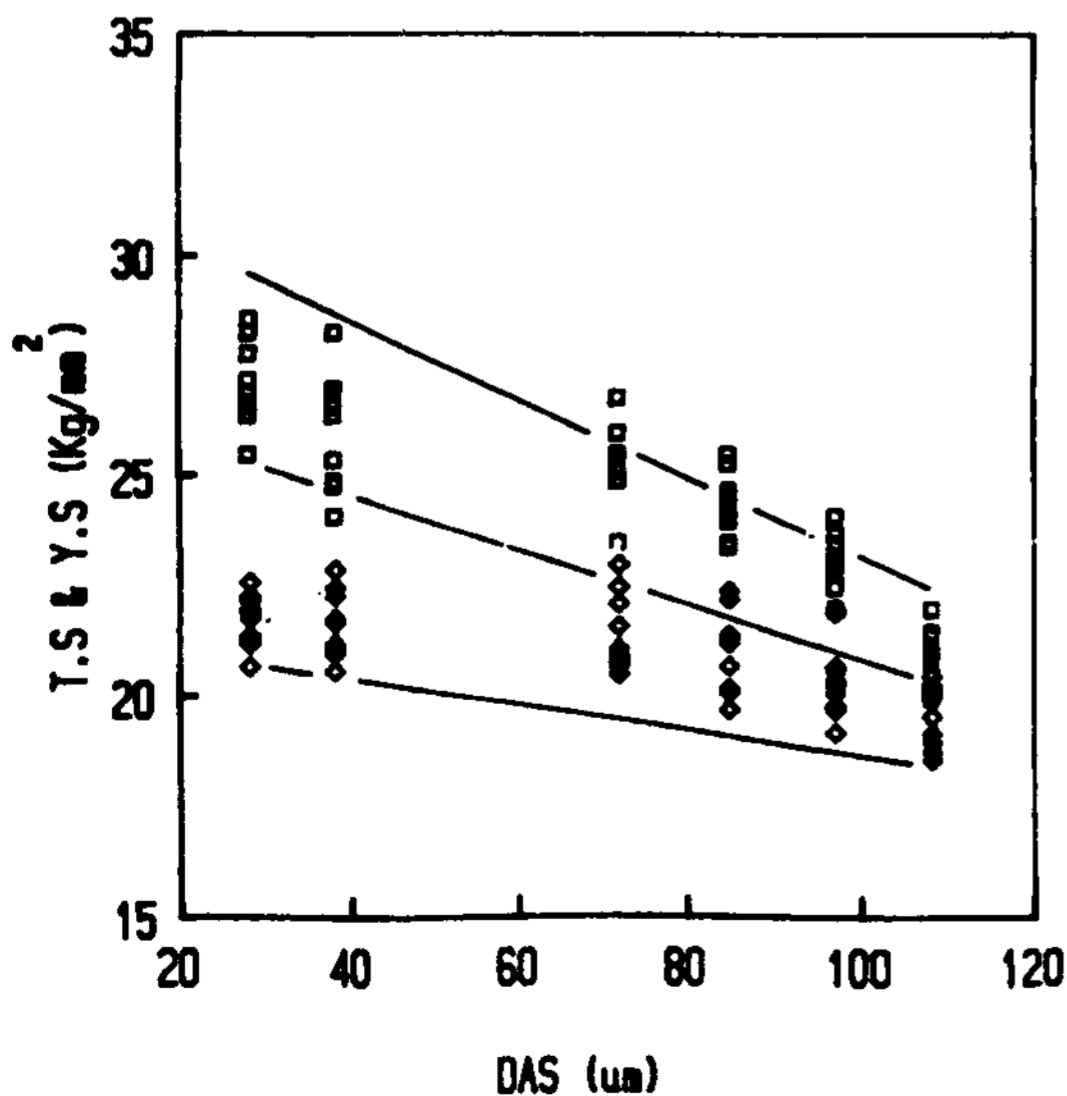


Fig.10 Relationship between strength and DAS.

치도 인장강도 및 항복강도와 마찬가지로 6.7°C/min의 응고속도를 경계로 하여 변화경향이 달라지고 있다. 6.7°C/min까지는 직선적으로 급격히 증가하나 그이상에서는 완만한 증가 경향을 보이고 있다.

Fig.9에서 볼 수 있듯이, 연신율의 경우 DAS에 의한 영향이 3.2%로 매우 작은 반면 결정립크기 및 공정 Si에 의한 영향은 각각 32.9%와 63.9%로 매우 커 응고속도에 따른 연신율의 변화는 공정 Si크기와 결정립크기의 변화에 의해 지배된다고 할 수 있다. 충격치에 미치는 결정립크기의 영향은 알수 없었으나 공정 Si이 57.8%의 영향을 미쳐 충격치를 결정하는 가장 중요한 조직적 인자임을 알 수 있었다.⁷⁾

응고속도에 따른 파괴인성의 변화를 Fig.11에

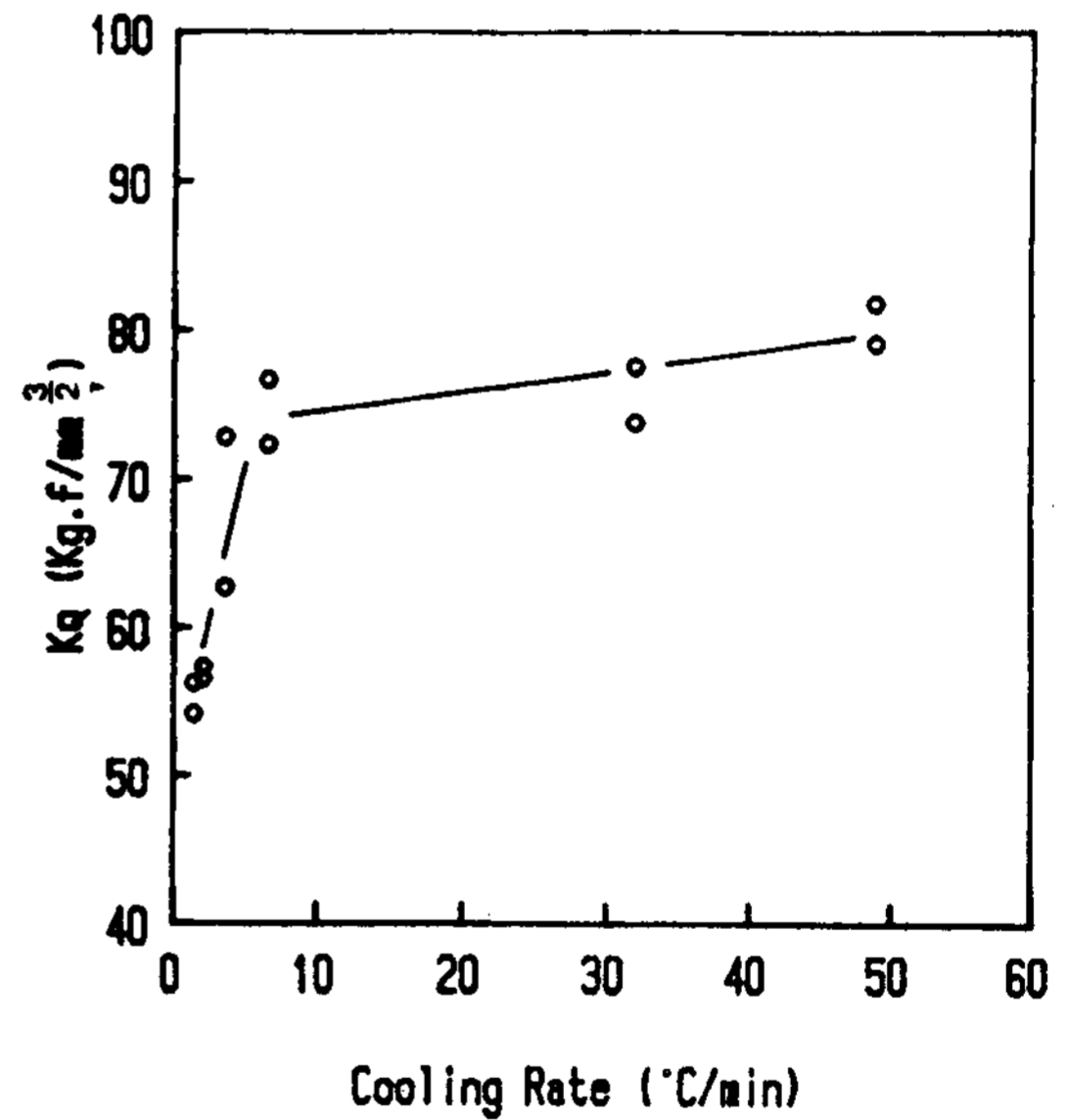


Fig.11 Variation of fracture toughness with cooling rate.

나타내었다. 파괴인성 또한 6.7°C/min의 응고속도를 경계로 응고속도에 따른 파괴인성의 증가율이 크게 변하고 있다. 응고속도 1.4°C/min(70mm사형), 3.7°C/min(15mm사형), 49.1°C/min(40°C금형) 시험편에 대한 피로균열 전파속도를 Fig.12에 나타내었다. 응력확대계수에 따른 피로균열 전파속도 증가율은 전파속도가 느렸다.

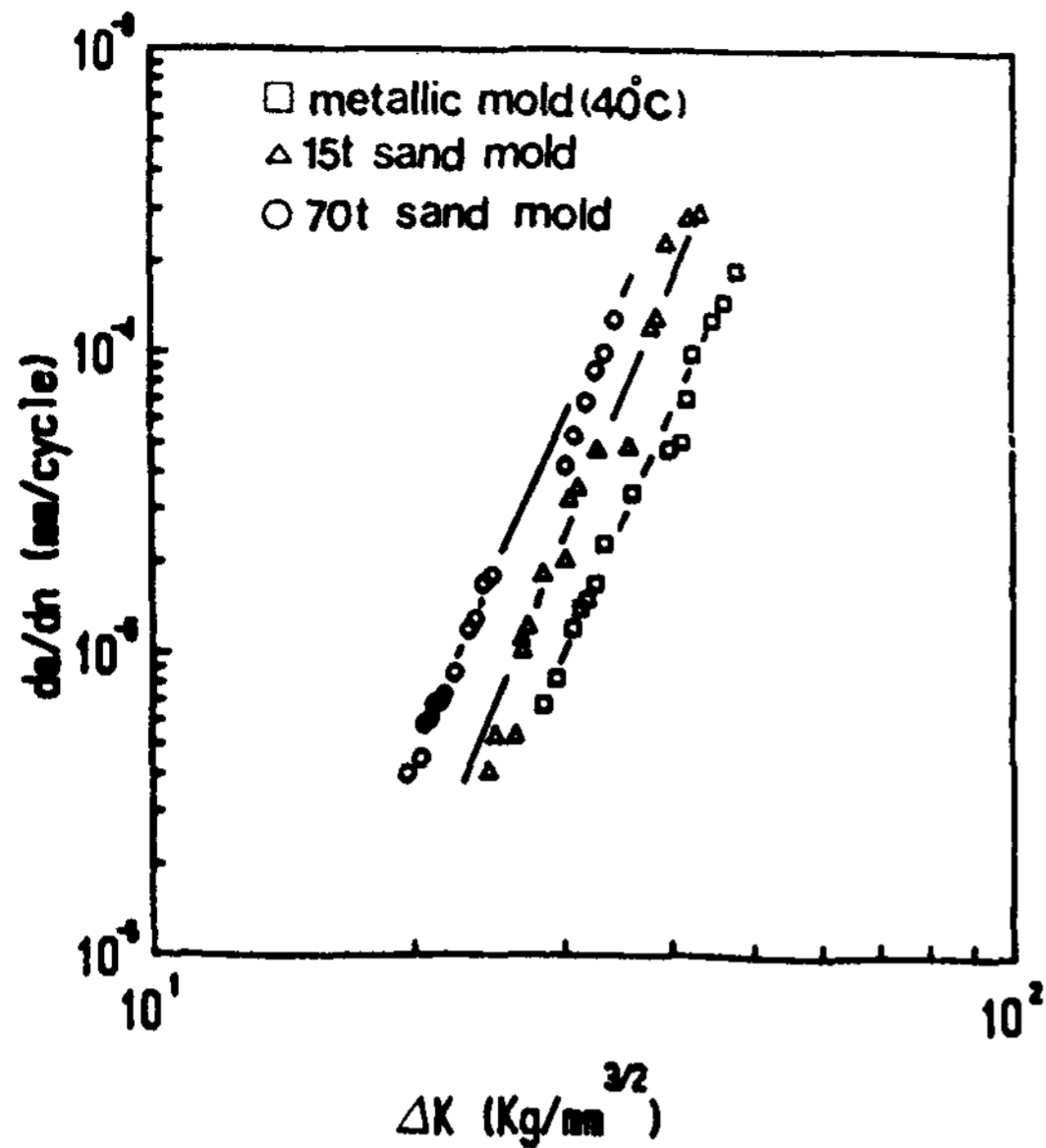


Fig.12 Relationship between fatigue crack propagation rate, da/dN and stress intensity factor, K in various casting molds.

Photo.2는 미세조직에서 피로균열이 전파되는 경로를 나타낸 것이다. 피로균열은 대개 공정 Si입자나 그 근방으로 전파되었으며 기지조직의 중심부를 통과하는 경우가 적었다. 연한 기지조직 중에 경한 제 2상 입자(공정 Si)가 존재하고 있어 응력이 가해지는 경우 기지조직은 연신 되지만 공정 Si에서 균열이 발생하기 쉽다.

더우기 공정 Si이 침상이면 응력이 집중하여 균열발생이 더욱 쉽게 된다. 일단 발생한 균열은 공정 Si을 전파경로로 진행하게 된다.

4. 결론

A356 합금을 대상으로 한 이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 응고속도가 $6.7^\circ\text{C}/\text{min}$ 까지는 인장 및 충격 특성이 직선적으로 급격히 증가하지만, 그 이상의 응고속도에서는 직선적으로 완만히 증가하거나 거의 일정한 수준을 유지하였다.

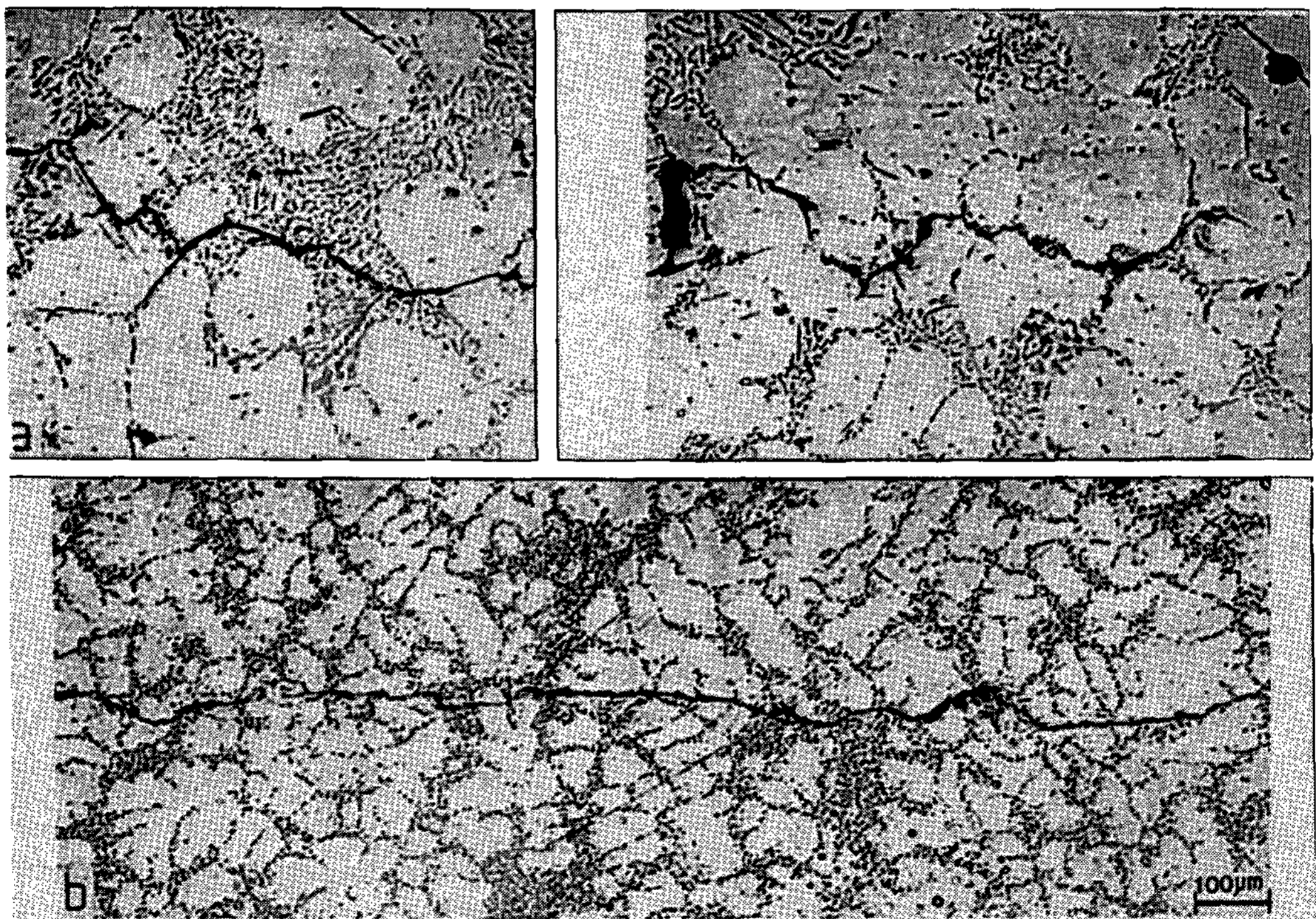


Photo.2. Morphology of fatigue crack propagation, optical microscopy.

- (a) cooling rate $3.7^\circ\text{C}/\text{min}$.
- (b) cooling rate $49.1^\circ\text{C}/\text{min}$.

- (2) 응고속도가 증가함에 따라 DAS, 공정 Si크기, 결정립크기가 모두 감소하였으며 기계적 성질은 향상되었다. 응고속도에 따른 인장강도 및 항복 강도 향상에는 DAS 변화가, 연

신을 및 충격치 향상에는 공정 Si크기 변화가 가장 큰 영향을 미쳤다.

- (3) 응력확대 계수에 따른 피로균열 전파속도 증가는 거의 일정하나 동일 응력확대계수에서는 냉각속도가 빠를수록 피로균열의 전파속도가 느렸다.
- (4) 피로균열은 대개 공정이 Si입자나 그 근방으로 전파되었으며 기지조직의 중심부를 통과하는 경우가 적었다. 또한 연한 기지조직중에 경한 제 2상 입자(공정 Si)가 존재하여 응력이 가해질 경우 기지조직은 연신되지만, 특히 침상의 공정 Si에서는 응력이 집중하여 균열발생은 더욱 쉽게 일어났으며, 일단 발생한 균열은 공정 Si을 전파경로로 진행하였다.

참 고 문 헌

- 1) 安達允 : 輕金屬, 34(1984) 361
- 2) 尹義博, 西成基 : 輕金屬, 29(1979) 157
- 3) 原田雅行, 鈴木敏夫, 福井泉 : 鑄物 : 59(1983) 742
- 4) K.J.Oswalt, M.S.Misra : AFS Transaction, (1980) 845
- 5) 藤井則久, 藤井滿, 森本庄吾 : 鑄物, 56(1984) 387
- 6) 藤井則久, 藤井滿, 森本庄吾, 岡田千里 : 輕金屬, 34(1987) 446
- 7) 鎌土重晴, 佃誠, 徳富一郎, 爪漱喜與 : 輕金屬, 37(1987) 268