

연강의 결정학적 경계가 기계적 성질에 미치는 영향*

The Influence of Crystallographic Boundaries on the Mechanical Properties of Mild Steels

임 병 수* · 이 창 훈**
Byeong Soo Lim · Chang Hoon Lee

Abstract

The experimental investigation has been made to determine the effect of crystallographic boundaries and chemical composition on the strength and hardness using mild steels of SAE 1016 and 1022.

Through heat treatments and quantitative analysis, different microstructures varying in grain size from $4.4\mu\text{m}$ to $23.2\mu\text{m}$ and in Fe_3C particle spacing from $0.56\mu\text{m}$ to $2.46\mu\text{m}$ were obtained.

Mechanical properties of yield strength, tensile strength and micro vickers hardness were measured and the relationship between these properties and microstructures were obtained. Some of the conclusions are as follows; When mild steels are strengthened by both grain size hardening and Fe_3C precipitation hardening mechanisms;

- (1) the yield strength, σ_y , can be expressed in kg/mm^2 as

$$\sigma_y = \sigma_t + 2.35d^{-\frac{1}{2}} + 0.0022\lambda^{-1}$$

where σ_t : constant, d : grain size (mm), λ : Fe_3C particle spacing (mm).

- (2) the micro vickers hardness, MVH, can be expressed as

$$\text{MVH} (P=500\text{g}) = H_0 + 5.29d^{-\frac{1}{2}} + 0.0132\lambda^{-1} (\text{SAE } 1016)$$

$$\text{MVH} (P=500\text{g}) = H_0 + 3.32d^{-\frac{1}{2}} + 0.0111\lambda^{-1} (\text{SAE } 1022)$$

where H_0 is constant.

- (3) the tensile strength, $\sigma_{t,s}$, can be expressed in kg/mm^2 as

$$\sigma_{t,s} = \sigma_0 + 1.72d^{-\frac{1}{2}}$$

where σ_0 is constant.

1. 서 론

재료의 여러가지 기계적 성질은 현미경조직에 의해 변화된다. 특히 금속재료의 강도나 경도를

높히는 것은 작은 기계부품으로부터 거대한 항공기에 이르기까지 제품의 구조적 효율 향상에 매우 중요한 수단이라 하겠으며, 많은 연구를 통하여 그동안 중요한 강화기구들은 대부분 독립

* 1984년도 대한기계학회 추계학술대회('84. 11. 10)에서 발표

* 성균관대학교 기계설계학과 조교수

** 성균관대학교 기계공학과 대학원

적으로 연구되어 왔다.

그러나 대부분의 금속이나 합금재료는 사용조건 또는 제조상의 이유로 인하여 어느 한 가지만의 강화방법으로 강도나 경도를 높이기 보다는 두 가지 이상의 강화방법을 동시에 복합적으로 이용하고 있다. 따라서, 여러가지 강화기구를 통한 현미경조직 변화가 한 재료 내에서 기계적 성질과 어떠한 복합적 관계에 있는가를 밝히는 것은 현재의 재료강화 분야에서 매우 중요한 문제라 하겠으나, 이러한 관계를 나타내 주는 이론식이나 발표된 실험결과는 아직 충분치 못한 것이 실정이다."

그러므로, 본 연구에서는 산업상 중요한 재료인 고용원소의 함량이 다른 두 가지 연강재료를 택하여, 고용강화 효과를 조사하며, 결정립 미세화를 통한 강화, 제 2 상인 Fe_3C 입자 석출을 통한 강화방법으로 결정학적 경계의 형상을 다양하게 변화시킨 후, 기계적 성질, 특히 강도 및 경도를 조사하여 결정립의 크기와 Fe_3C 입자간의 거리가 주어질 때, 항복강도, 인장강도 및 경도를 추정할 수 있는 수식을 실험적으로 밝히는 것을 연구 목적으로 하였다.

2. 시편준비 및 실험절차

2.1 시편준비

본 실험에서 사용한 시편재료는 SAE 1016과 1022 두 종류로서, 포항종합제철 연구소에서 용해후 열간 압연된 것이며, 화학성분은 Table 1에 표시된 바와 같이 Mn과 C를 제외한 기타 원소의 함량은 별다른 차이가 없다.

Table 1 Chemical composition, wt%

	C	Mn	Si	P	S	Cu
SAE 1016	0.14	0.60	0.25	0.13	0.18	0.03
SAE 1022	0.24	1.10	0.23	0.16	0.15	0.05

인장시험용 시편은 KS B 801에 준하여 Fig. 1과 같이 기계가공 하였으며, 경도시험용 시편은 인장시편과 같은 두께로 한 변이 10mm의 정사각형 형태로 가공하였다. 시편의 제작과정에서 발생한 응력이나 현미경조직의 불균일을 제거하기 위하여 모든 시편은 제작후 normalize 시켰다.

2.2 열처리 및 현미경조직 검사

결정립 미세화를 통한 강화와 Fe_3C 석출에 의한 강화효과를 구분해 내기 위하여, 시편의 현미경조직은 결정립의 크기가 다양한 pearlite 조직과, Fe_3C 석출입자간의 거리와 결정립의 크기가 동시에 변하는 spheroidite 조직 두 가지를 택하였으며, 이를 얻기 위한 열처리 조건과 얻어진 현미경조직의 결과를 Table 2와 3에 각각 수록하였다.

사용한 전기로는 Lindberg tube type으로 20cm이상의 균일온도지역을 갖춘 것이었고, 모든 열처리는 시편의 산화와 탈탄 등을 억제하기 위하여 고순도 N_2 gas 분위기에서 실시하였으며, 노내의 온도는 $\pm 1^\circ C$ 의 정확도를 유지하였다.

Fig. 2와 3은 열처리의 결과로 결정립의 크기와 Fe_3C 입자간의 거리가 변한 전형적인 시편의 현미경조직을 보여주고 있다. 결정립의 크기측정은 ASTM E112에 규정된 intercept 방법에 의하였고, spheroidite 조직의 Fe_3C 입자간의 거리, λ

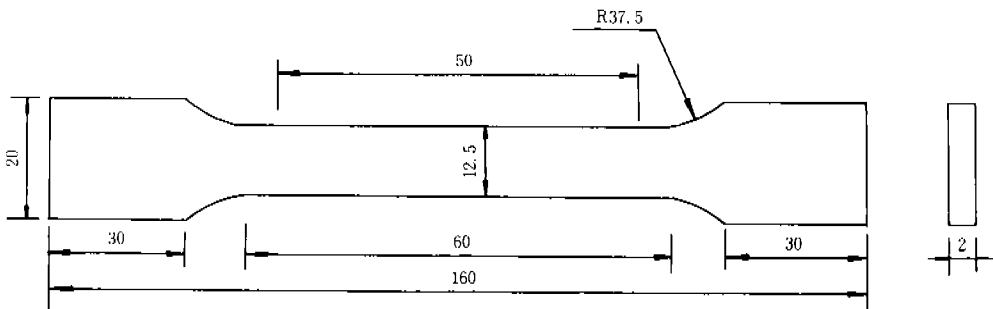


Fig. 1 Tensile test specimen

Table 2 Heat treatment results for grain size control



Material SAE	Heat treatment			Microstructure		
	Austenitizing temp. (°C)	Holding time (min.)	Cooling condition	Grain size (10 ⁻⁴ mm)	ASTM grain size No.	Description
1022 1016	1100	180	Furnace cooling	164 232	9.0 8.0	 Coarse pearlite Fine pearlite
1022 1016	1100 1000	30 30	Furnace cooling	140 140	9.5 9.5	
1022 1016	930	15	Furnace cooling	92 110	10.5 10.0	
1022 1016	900	5	Furnace cooling	88 83	10.5 10.5	
1022 1016	900	120	Air cooling	67 80	11.5 10.5	
1022	1000	30	Air cooling	45	12.5	
1022 1016	930	15	Air cooling	47 66	12.5 11.5	
1022	900	5	Air cooling	44	12.5	

Table 3 Heat treatment results for precipitate particle spacing and grain size control

Material SAE	Tempered martensite		Microstructure		
	Tempering temp. (°C)	Holding time (hr.)	Interparticle spacing (10 ⁻⁵ mm)	Grain size (10 ⁻⁴ mm)	Description
1022	695	60	215	1389	 Coarse spheroidite Fine spheroidite
1022 1016	695	48	246 213	1563 1515	
1022 1016	695	36	223 192	1234 1370	
1022	695	24	111	331	
1022 1016	630	2	65 64	30 37	
1022 1016	630	1	56 60	28 34	

는 Tyson⁽²⁾이 제시한 다음 식으로 구하였다.

$$\lambda = \left(\frac{1}{N_s}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{N_L}{N_s} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 N_s 는 단위면적당 석출입자의 평균갯수이며, N_L 은 임의의 직선에 의하여 교차되는 단위길이당 석출입자수이다.

현미경조직의 해석과 측정에 통제적인 정확성을 유지하기 위하여, 조직이 불균일한 시편은 실험결과 해석에서 제외하였고, 균일한 조직의 경우에도 시편의 여러 부위에서 사진을 촬영하였다. 측정에 사용된 현미경은 Olympus model PME inverted 광학현미경으로서, 3,000배 이상의 경우는 필요에 따라 Joel사의 주사 전자현미경을 이용하였다. 부식액은 필요에 따라 3% Nital과 Picral산을 사용하였다.

2.3 인장시험 및 경도시험

항복강도와 인장강도를 조사하기 위한 인장시험은 실온에서 모두 동일한 조건하에 Shimadzu

model UMH-30 인장시험기를 이용하여 실시하였다.

경도시험은 Type MVH-1의 Torsen Micro Vickers Hardness Tester를 사용하였으며, 하중 조건은 500g이었다. 정확한 경도값을 결정하기 위하여, 시편의 여러 임의의 부위에서 10여차례 이상 경도값을 조사하여 평균하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 항복강도

연강의 항복강도는 여러 인자들의 영향을 받을 수 있으나, 본 실험에서는 앞절에서 서술된 시편의 성분, 결정립의 크기, spheroidite 조직내의 Fe₃C 석출입자간의 거리 등만을 변수로 삼고, 그의 인자의 영향은 없도록 하였으며 이러한 가정하에 실험결과를 조사하였다.

결정립의 크기와 항복강도간의 관계는 Hall⁽³⁾과 Petch⁽⁴⁾에 의하여 처음 다음과 같은 형태로



(a) 1100°C-180min. -Furnace cooling (×600)



(b) 900°C-5min. -Furnace cooling (×1200)

Fig. 2. Optical micrographs of SAE 1016 forgrain size controlled



(a) 695°C-24hr. tempered (×1200)



(b) 695°C-36hr. tempered (×1200)

Fig. 3 Optical micrographs of SAE 1022 for precipitate particle spacing controlled

밝혀진 이래 다른 많은 기계적 성질도 이와 같은 Hall-Petch관계식의 형태로 표시됨이 알려지게 되었다.

$$\sigma_y = \sigma_i + Kd^{-1/2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, σ_y 는 항복강도, σ_i 는 재료의 friction stress, 상수치이며, K는 비례상수, d는 결정립의 크기(직경)이다. 그러나, (2)식의 d의 지수값이 $-\frac{1}{3}$ 과 -1 사이의 다른 값을 갖는 경우⁽⁶⁾의 실험결과도 발표되었고, Bragg⁽⁶⁾의 d^{-1} 의 이론적 모델 제안도 있었으나, 발표된 대부분의 실험결과는 (2)식의 형태를 따르고 있다.

본 실험에서의 결과는, Table 2에 조사된 결정립의 크기만을 변화시킨 경우의 결정립의 크기, d값의 여러 지수에 대하여 σ_y 값을 비교한 결과, $d^{-1/2}$ 의 경우에 가장 적은 표준편차로 최소자승법에 의한 직선을 나타내었다. Fig. 4는 $d^{-1/2}$ 과 σ_y 사이의 관계를 나타내고 있으며, 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_y = 5.5 + 2.33d^{-1/2} \text{ (SAE 1016)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_y = 11.1 + 2.37d^{-1/2} \text{ (SAE 1022)} \dots\dots\dots(4)$$

Fig. 4의 점선으로 표시된 직선은 Cracknell등⁽⁷⁾이 발표한 Swedish Iron (C = 0.02%, Mn = 0.14%, 기타 Ni, Cr 등 약간량)의 경우이며, 관계식은

$$\sigma_y = 4.5 + 2.33d^{-1/2} \dots\dots\dots(5)$$

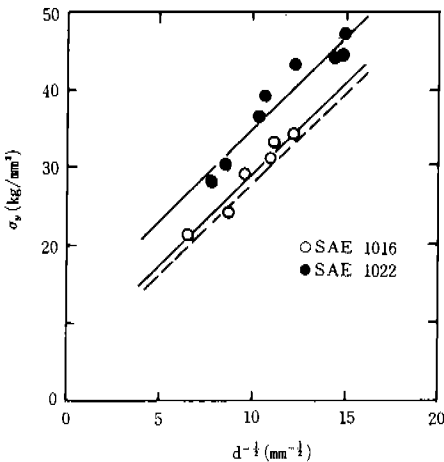


Fig. 4 Relationship between yield strength and grain size for grain size controlled

로 조사되었다.

Fig. 4에 나타나 있듯이, 3직선의 기울기는 거의 같은 값으로 잘 일치하므로, 연강의 경우 (2)식의 기울기 K값은 성분원소의 함유량 변화에 무관하게 일정한 값, 약 2.35(kg/mm^{3/2})를 가짐을 알 수 있으며, 직선의 절편, σ_i , friction stress의 차이는 C와 Mn의 함유량 차이에서 나타난다고 하겠다.

연강에서 C양의 증가는 현미경조직상의 pearlite 분율을 증가시키고, Mn양의 증가는 pearlite 분율 증가와 더불어 고용효과에 의하여 σ_y 값을 증가시키며, 또한 결정립을 미세화 시키는 효과가 있다. SAE 1016과 1022의 화학성분은 C와 Mn을 제외하고는 별 차이가 없으므로 상기한 효과들이 합하여져 (3)식과 (4)식의 절편, σ_i 값의 차이를 나타낸다고 하겠다. Irvine⁽⁸⁾은 normalize된 Nb강에서 σ_y 에 미치는 C와 Mn의 합성효과를 조사한 결과, C이 0.1%, Mn이 0.5% 증가할 때 σ_y 는 약 5 kg/mm²정도 증가함을 밝혔다. Nb의 효과가 있으므로, Irvine의 결과와 본 실험의 결과를 정확히 비교할 수는 없겠으나, 이는 C와 Mn이 동일한 양만큼 증가한 SAE 1016과 1022의 두 시편의 σ_y 증가분 5.6kg/mm²과 비교적 잘 일치한다고 하겠다.

Fig. 5는 Table 3에 나타난 결정립의 크기, d와 Fe₃C 석출입자간 거리, λ 를 동시에 변화시킨 재료의 σ_y 값을 λ 와는 무관하게 d만의 함수로 나타낸 것이며, 최소자승법에 의하여 구하여진 직선의 식은 다음과 같다.

$$\sigma_y = 7.8 + 2.50d^{-1/2} \text{ (SAE 1016)} \dots\dots\dots(6)$$

$$\sigma_y = 11.2 + 2.53d^{-1/2} \text{ (SAE 1022)} \dots\dots\dots(7)$$

Fig. 5의 점선으로 표시된 직선은 석출입자가 존재하지 않는 같은 시편의 σ_y 와 d와의 관계인 Fig. 4의 결과를 나타낸 것으로, 이들의 차이를 빗금친 부분으로 나타내고, $\Delta\sigma_y$ 라 하면, 이는 순전히 석출입자가 존재함으로써 증가된 항복강도를 나타낸다고 하겠다.

결정질 재료의 석출강화는 처음 Orowan⁽⁹⁾에 의하여 (8)식과 같은 형태로 제안되었다.

$$\sigma_y \approx 2(\tau_y) = 2(2\alpha Gb/\lambda + \tau_a) \dots\dots\dots(8)$$

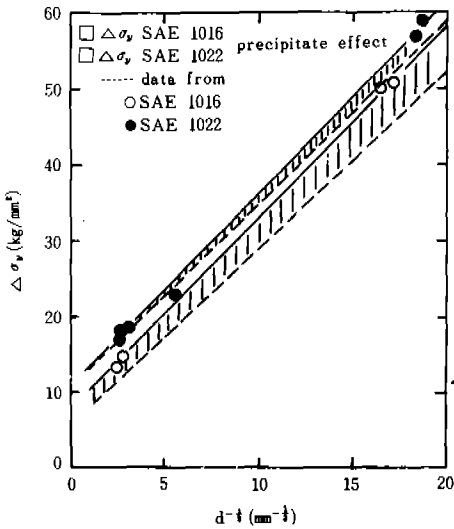


Fig. 5 Relationship between yield strength and grain size for precipitate particle spacing and grain size controlled

여기서 τ_v 는 전위가 석출물 사이를 지나갈 때의 shear stress, τ_a 는 석출물이 없는 경우의 matrix shear stress, α 는 전위의 선장력에 의하여 결정되는 상수로서 보통 0.5정도의 값을 가지며, G 는 재료의 shear modulus, b 는 Burgers vector이다.

Fig. 5의 $\Delta\sigma_y$ 와 Orowan의 이론식 (8)을 비교하기 위하여 $\Delta\sigma_y$ 를 석출물간의 거리의 역수, $1/\lambda$ 에 대하여 plotting한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 최소자승법에 의한 직선의 식은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_y = 1.6 + 0.0024\lambda^{-1} \text{ (SAE 1016)} \dots\dots(9)$$

$$\Delta\sigma_y = -0.3 + 0.0020\lambda^{-1} \text{ (SAE 1022)} \dots\dots(10)$$

(9), (10)식의 기울기의 평균값은 0.0022 (kg/mm) 로서, 두 식의 기울기가 $\pm 10\%$ 이내의 오차로 평균값과 일치하므로, 기울기는 성분원소의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 이론식(8)에서의 기울기 $4\alpha Gb$ 의 값은 약 $2.8 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}$ (연강에서 $\alpha \approx 0.5$, $G \approx 7 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, $b \approx 2 \text{ \AA}$)로서, 본 실험의 결과와 비교적 무리없이 일치한다 하겠다. (9), (10)식의 절편에 해당하는 값은 석출물이 없을 때, 즉 $\lambda = \infty$ 인 경우 전위가 움직이는데 요구되는 stress로서 본질적으로 (2)식의 σ_i 와 같은 것이므로 $\Delta\sigma_y$ 를 구하는 과정에서 없어

져야 할 것이나, 시편의 불균일한 조직, 성분원소의 편석, 실험측정 과정중의 오차 등으로부터 기인된 것으로 고려된다.

이상의 고찰에서, 일반적으로 연강이 결정립 크기, d 와 석출물간의 거리, λ 의 조절에 의해 복합적으로 동시에 강화되는 경우, 항복강도, σ_y 는 대략 다음과 같이 결정됨을 알 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_i + 2.35d^{-\frac{1}{2}} + 0.0022\lambda^{-1} \dots\dots\dots(11)$$

여기서 σ_y , σ_i 는 kg/mm^2 으로, λ 와 d 는 mm 로 계산된다.

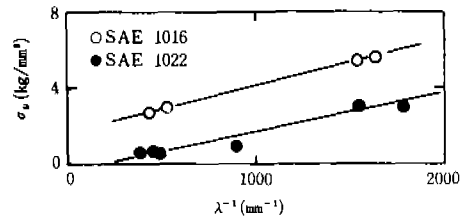


Fig. 6 Relationship between $\Delta\sigma_y$ and the mean shortest distance, λ , of Fe_3C particles

3.2 인장강도

연강의 인장강도는 결정립의 크기, d 나, 석출물간의 거리, λ 의 변화 외에도 재료가 변형(신장)되면서 받게 되는 변형경화의 효과 등이 존재하므로, 결정학적 경계가 인장강도에 미치는 영향만을 정확히 측정하기는 어렵다.

그러나, 연강에 석출물이 존재하지 않고, 결정립의 크기만이 변하는 경우에는 Fig. 7에 나타나 있듯이, 인장강도는 $d^{-\frac{1}{2}}$ 에 잘 비례하는 것으로 생각된다. 최소자승법에 의한 직선의 식은 다음과 같으며 기울기는 성분원소에 무관하게 약 $1.72 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 의 값을 갖는 것으로 나타났다.

$$\sigma_{r.s.} = 22.3 + 1.73d^{-\frac{1}{2}} \text{ (SAE 1016)} \dots\dots(12)$$

$$\sigma_{r.s.} = 33.1 + 1.71d^{-\frac{1}{2}} \text{ (SAE 1022)} \dots\dots(13)$$

3.3 경도

3.1절의 항복강도와 같이, 경도의 측정도 Table 2와 3의 모든 열처리된 시편에 대하여, 결정립의 크기만이 경도에 기여하는 경우와, 결정립의 크기와 Fe_3C 석출입자간의 거리가 동시에 경도에 기여하는 경우로 나누어 조사하였다.

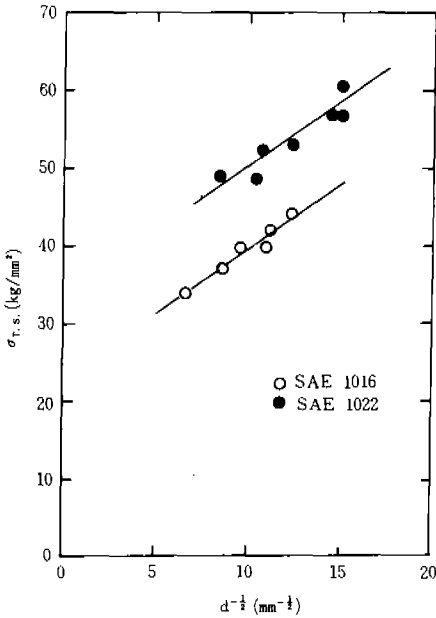


Fig. 7 Relationship between ultimate tensile strength and grain size for grain size controlled

Fig. 8 은 각각의 경우에, MVH (micro vickers hardness; 하중, P=500g)와 결정립의 크기 관계를 나타내고 있으며, 최소자승법에 의한 직선의 식은 다음과 같다.

$$MVH(P=500g) = 45.5 + 6.72d^{-1/2} \text{ (SAE 1016)} \quad (14)$$

$$MVH(P=500g) = 113.3 + 3.94d^{-1/2} \text{ (SAE 1022)} \quad (15)$$

$$MVH(P=500g) = 59.0 + 5.29\lambda^{-1/2} \text{ (SAE 1016)} \quad (16)$$

$$MVH(P=500g) = 112.0 + 3.32\lambda^{-1/2} \text{ (SAE 1022)} \quad (17)$$

(14), (15)식은 d와 λ가 동시에 변화하는 경우이며, (16), (17)식은 d만이 변화하는 경우이다. 따라서, 두 직선간의 경도 차이를 ΔMVH라 하면, 이는 석출강화에 의하여 증가한 경도값을 나타낸다고 생각된다.

Fig. 9는 ΔMVH를 Fe₃C 석출입자간의 거리, λ의 역수에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 9의 두 직선을 연장하면, SAE 1022의 경우, λ가 약 0.002mm, SAE 1016의 경우, 약 0.0013mm에서 λ⁻¹축과 만나게 되며, 이는 λ가 이 값보다 큰 경우에는, 석출강화에 의한 MVH의 증가는 없음을 나타낸다. 이것은 micro hardness 측정시에 발생하는 소성변형이 극히 적은 범위에 국한되기 때

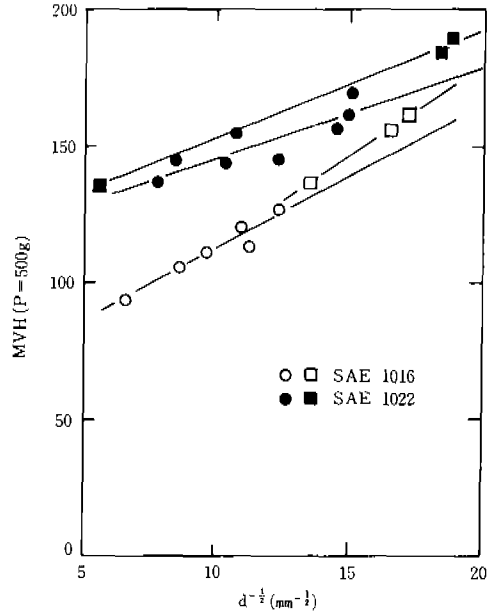


Fig. 8 Relationship between micro vickers hardness and grain size for grain size controlled (○●), for precipitate particle spacing and grain size controlled (□■)

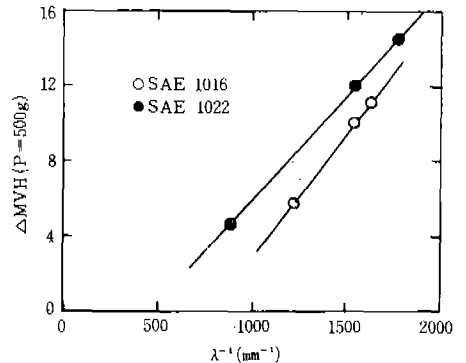


Fig. 9 Relationship between ΔMVH and the mean shortest distance, λ, of Fe₃C particles

문으로 고려된다. Fig. 9의 직선의 기울기는 SAE 1016은 0.0132, SAE 1022는 0.0111으로 평균값 0.012와 ±10% 이내의 범위에서 일치하고 있다.

4. 결론

SAE 1016과 SAE 1022 두 종류의 연강재료를 택하여, 고용원소의 강화효과와, 결정립 미

세화를 통한 강화, 제 2 상인 Fe₃C 입자 석출을 통한 강화방법으로 결정학적 경계가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였으며, 이로부터 얻은 결론을 종합하면 다음과 같다.

- (1) 연강에서 결정립 미세화와 Fe₃C 석출강화가 동시에 이용될때, 항복강도, σ_y (kg/mm²)는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_y = \sigma_t + 2.35 d^{-\frac{1}{2}} + 0.0022 \lambda^{-1}$$

여기서, σ_t ; friction stress, d; 결정립크기(mm), λ ; Fe₃C 석출입자간 거리(mm)

- (2) σ_t , friction stress는 C가 0.1%, Mn이 0.5% 가량 고용범위 내에서 증가할 경우, 약 5.6 kg/mm² 증가한다.
 (3) 연강의 인장강도, $\sigma_{T.S.}$ (kg/mm²)는 결정립의 크기만이 변할 때, 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{T.S.} = \sigma_0 + 1.72 d^{-\frac{1}{2}} \quad \text{단, } \sigma_0 \text{는 상수.}$$

- (4) 연강의 micro vickers 경도, MVH는 다음과 같이 표현된다.

$$MVH (P=500g) = H_0 + 5.29 d^{-\frac{1}{2}} + 0.0132 \lambda^{-1} \quad (\text{SAE 1016})$$

$$MVH (P=500g) = H_0 + 3.32 d^{-\frac{1}{2}} + 0.0111 \lambda^{-1} \quad (\text{SAE 1011})$$

단 H_0 는 상수.

후 기

이 논문은 1983년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 실험에 사용된 시편은 포항종합제철 연구소에서 제공된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. C. Williams et al.; "Metallurgical Treatises," 487, AIME - TMS ('81)
2. W. R. Tyson; Acta Met., Vol. 11, 61 ('63)
3. E. O. Hall; Proc. Phys. Soc. (London), Vol. 64 B, 747 ('51)
4. N. J. Petch; J. I. S. I., Vol. 174, 25 ('53)
5. M. A. Jawson et al.; Appl. Mech. Rev., Vol. 17, 857 ('64)
6. L. Bragg; Nature, Vol. 149, 511 ('42)
7. A. Cracknell; Acta Met., Vol. 3, 86 ('55)
8. K. J. Irvine; J. I. S. I., Vol. 200, 820 ('62)
9. E. Orowan; Discussion in "Symposium on Internal Stress in Metals & Alloys," Inst. of Metals, 451 ('48)