

SM45C강의 피로 균열 성장에 미치는 미세조직의 영향

Dependence of Fatigue Crack Propagation Behavior on the Microstructure in SM45C Steel

김 현 철*, 임 병 수**
H. C. Kim , B. S. Lim

ABSTRACT

To determine the effects of microstructure on the fatigue crack propagation behavior in SM45C steel, experimental investigations have been carried out with the specimens of different grain sizes and different spacings between the Fe₃C particles. Fatigue and tensile tests were conducted and the quantitative analysis of the relations between the threshold stress intensity range and grain size, interparticle spacing and yield stress were carried out. Some of the conclusions obtained are as follows; (1) ΔK_{th} was observed to increase with grain size and the spacing between the Fe₃C particles. (2) In both pearlite and spheroidite microstructures, ΔK_{th} was increased when yield stress was decreased.

1. 서 론

Fig. 1은 피로 파단된 자동차 engine crank-shaft 파단면의 모습이다.

이와 같은 기계구조물의 가장 큰 파괴원인인 피로는 그 진행과정이 눈에 잘 띄지 않고, 돌발적이어서 기계구조물에서는 이를 미연에 방지하고 피해를 최소화 하는 것이 매우 중요하다. 따라서 피로에 잘 견디는 우수한 재료의 개발과, 안전설계, 정확한 수명예측 등이 요구되는데, 이를 위해서는 재료의 현미경 조직인자와 피로균열진전(FCP: Fatigue Crack Propagation, 이후 FCP라 줄여서 기술함)간

의 정확한 상호관계가 밝혀져야 한다. 근래 철강재의 현미경조직이 피로균열성장거동에 미치는 영향에 관하여 많은 연구결과가 보고 되고 있다.

여러가지 현미경조직인자 중 특히 결정립 크기¹⁻³⁾, 조직의 형태와 분포모양^{4,5)}, 제 2 상의 체적비율⁶⁾, 층상조직의 층간간격⁷⁾등은 낮은 ΔK (응력확대계수범위) 영역에서는 피로 균열 진전특성과 그 하한계치인 ΔK_{th} 등에 중요한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 그러나 흥미롭게도 결정립이 커지면 항복강도, σ_y 는 줄어드는 반면 ΔK_{th} 는 오히려 증가하며, 이러한 결과는 크랙성장율, da/dN 이 항복강도,

* 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 성균관대학교 기계설계학과

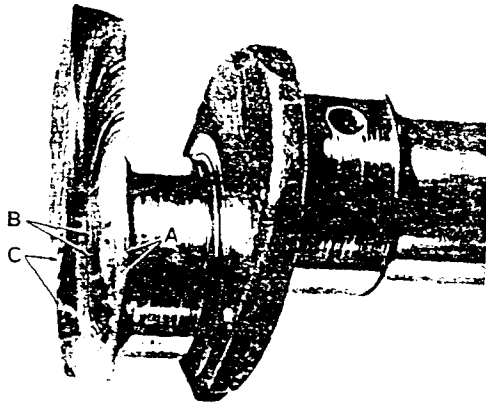


Fig.1 Fatigue failure of automobile crankshaft. A—start of fracture in fillet: B—“beach marks” typical of crack progress under intermittent operation: C—line of final sudden failure. (Courtesy Lessells and Associates, Inc., Waltham, Mass.)

σ_y 에는 거의 의존하지 않으므로 Hall-Petch 관계식과 관련될 수 없다는 보고³⁾와 피로강도와 ΔK_{th} 부근에서의 크랙선단 부근의 소성역은 결정립 크기와 비교할 만한 정도의 크기이며, 이것은 Hall-Petch 관계식을 만족하는 범위에서 잘 적용될 수 있음을 실험적으로 제시하고, ΔK_{th} 는 항복강도, σ_y 에 반비례하며, 결정립크기, d 의 제곱근에 비례한다는 보고²⁾등 여러가지 이론 및 실험결과가 발표되었다. 그러나 결정립크기 이외의 다른 많은 현미경조직인자들이 FCP에 미치는 영향에 대하여는 각 인자들의 복잡성 때문에 그러한 연구의 중요성에도 불구하고 아직 충분한 연구가 실행되지 못하였다. 특히, 중요한 현미경조직인자 중 하나인 제2상간거리가 변화할 때의 FCP 거동에 관한 연구결과는 거의 없는 편이다. 그러므로 이 분야에 대한 확립된 이론 및 실험적 해석의 체계적인 정립이 필요한 실정이다.

2. 실험방법

실험에 사용된 재료는 열간압연된 기계구조

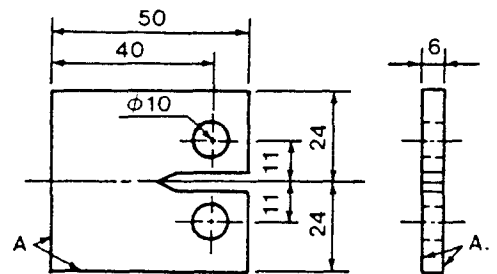
용 탄소강 SM45C이며 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical Composition, wt %

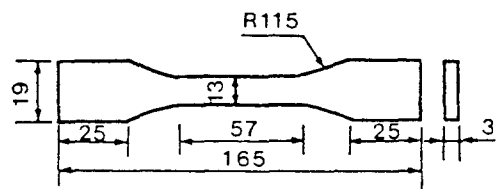
Comp.	C	Si	Mn	P	S	Fe
wt %	0.45	0.26	0.73	0.013	0.005	rem.

시편은 압연방향을 따라 채취하였으며 피로 시험편은 ASTM 647-88에 의해서 CT 시험편으로, 인장시험편은 KS B0801에 의해 Fig. 2와 같이 제작하였다.

미세조직을 변화시키기 위한 시편의 열처리 조건과 기계적 성질, 결정립도, 제 2 상간 거리를 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 열처리 작업은 산화와 탈탄등을 최소화하기 위해 N_2 가스 분위기하에서 실시하였고, 열처리 후에는 약간 여유를 두고 제작한 시편을 다시 연마하여 산화층을 제거시킨 시편의 치수가 Fig. 2와 같이 되도록 하였다.



(a)



(b)

Fig.2 Configuration of test specimens for Fatigue (a) and Tensile Test (b)

Table 2 Heat treatment conditions for grain size control and mechanical properties

Condition Specimen	Heat treatment			Microstructure				Mech. Prop.
	Austeni- tizing Temp.(°C)	Holding Time (min)	Trans- formation Condition	Grain Dia. d (10 ⁻⁴ mm)	d ^{1/2} (mm ^{1/2})	ASTM G. S. Number	Descri- ption	σ_y (kg/mm ²)
A	1100	90	furnace cooling	196	0.14	8.1	↑ coarse pearlite ↓ fine pearlite	30.4
B	1100	90	715 °C isothermal transf.	160	0.13	8.7		32.9
C	As - hot - rolled			69	0.08	11.1		37.6
D	1100	90	air cooling	52	0.07	11.9		40.1

Table 3 Heat treatment conditions for Fe₃C particle spacing control and mechanical properties

Condition Specimen	Heat treatment					Microstructure		Mech. Prop.
	Austeni- tizing Temp.(°C)	Holding Time (min)	Quench- ant	Tempering Temp.(°C)	Holding Time (hr)	Interparti- cle spacing (10 ⁻⁵ mm)	Descri- ption	σ_y (kg/mm ²)
E	900	40	water	700	60	254	↑ coarse sphero- idite ↓ fine sphero- idite	35.9
F	900	40		700	15	213		42.0
G	900	40		700	2	110		53.1
H	800	30		630	1	82		62.8

Table 2, 3에 조사된 결정립의 크기는 ASTM E112⁸⁾에 규정된 Circle Intercept Procedure에 의하여 측정되었고, 제 2상간 거리의 측정에는 Tyson⁹⁾에 의해 제시된 석출입자간의 mean shortest distance를 조사하여 결정하였다.

열처리 후 얻어진 대표적인 현미경조직을 Fig. 3에 나타내었다.

피로시험은 일본 Saginomiya사 제품의 10 ton 용 유압식 피로시험기를 사용하여 하중비 R=0.1에서 하중반복 속도가 20Hz인 sine 파형을 사용하였으며, 하중제어방식으로는 먼

저 ΔK 감소방식¹⁰⁾으로 ΔK_{th} 를 찾은 후, ΔK 증가방식으로 수행하였다. 응력확대 계수 범위, ΔK 의 계산과 피로균열진전속도, da/dN 의 계산은 Seven point 법과 Secant 법으로 수행하였으며, $da/dN-\Delta K$ 의 관계식은 최소자승법으로 구하였다.

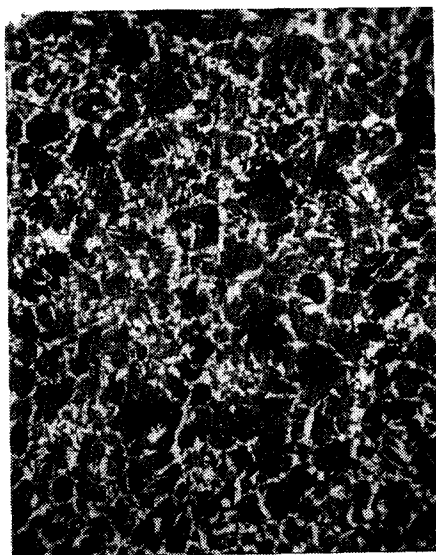
3. 실험결과 및 고찰

3.1 $da/dN-\Delta K$ 관계

Fig. 4와 5는 결정립도별 시편 A~D와 제 2상간 거리별 시편 E~H의 피로균열진전속도



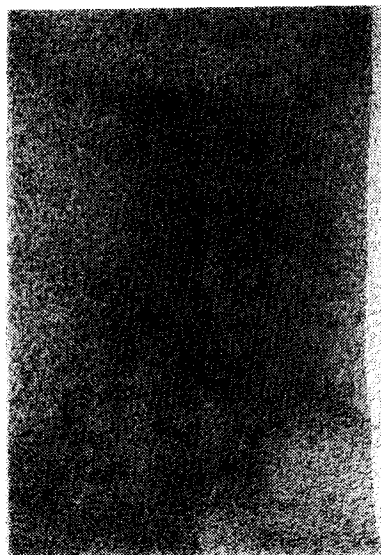
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Microstructure of each specimen obtained after heat treatment

- (1) 1100 °C—90 min.—furnace cooling ($\times 300$)
- (2) 1100 °C—90 min.—air cooling ($\times 300$)
- (3) 700 °C—60 hr.—tempered after quenching ($\times 1000$)
- (4) 630 °C—1 hr.—tempered after quenching ($\times 1000$)

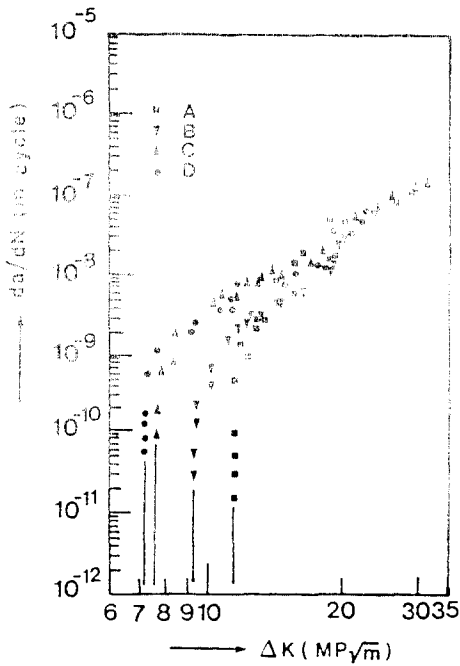


Fig. 4 da/dN vs. ΔK for various grain size specimens A~D

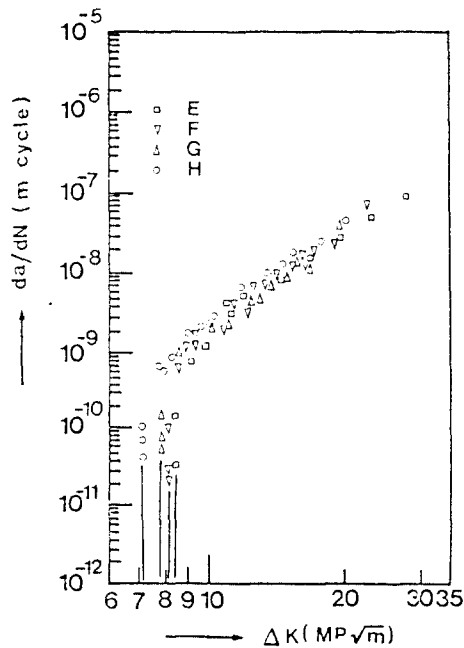


Fig. 5 da/dN vs. ΔK for various interparticle spacing specimens E~H

da/dN 을 ΔK 에 대해 정리한 결과를 효과적으로 비교하기 위해 각각 한 Graph 상에 나타낸 것으로, 임도가 일정수준, 또한 제2상간 거리가 일정수준 ΔK_{th} 값의 증가함을 보여주고 있다.

Table 4에는 저분극일전선과 제2일의에서 정리하는 구일전선속도와 ΔK 의 관계식, $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 재료상수 C 와 m 을 각각 식별법으로 최소자승법으로 구한 결과를 ΔK_{th} 와 함께 나타내었다. 결정립도가 변화되는 시편 A~D의 경우, 재료상수 m 값은 결정립도가 커지면 증가하는 것으로 조사되었다.

Table 4 C , m and ΔK_{th} values of each specimen

Specimen	C	m	ΔK_{th} , MPa \sqrt{m}
A	1.54×10^{-13}	4.306	11.19
B	6.87×10^{-13}	3.305	9.26
C	6.43×10^{-12}	2.850	7.66
D	4.63×10^{-12}	2.779	7.20
E	7.43×10^{-14}	4.402	8.39
F	1.70×10^{-13}	4.129	8.11
G	3.41×10^{-13}	3.782	7.85
H	1.45×10^{-13}	4.253	7.11

3.2 σ_y 와 d 의 관계

항복강도, σ_y 와 결정립크기, d 는 Hall-Petch 관계식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k(1/\sqrt{d}) \quad (1)$$

여기에서, σ_0 : friction stress

k : material constant

Fig. 6에는 결정립도별 A~D 시편의 σ_y 값을 d 에 대하여 정리하여 나타내었다. 그림에서 최소자승법으로 구한 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_y = 1.35(1/\sqrt{d}) + 21.47 \quad (2)$$

여기에서, σ_y 의 단위는 kg/mm² 이고, d 의 단위는 mm 이다.

3.3 ΔK_{th} 와 d 의 관계

Yoder¹¹⁾ 등은 주기소성영역의 크기, r_y^c 값이 결정립의 평균크기와 같아질 때, 제 1영역에서 da/dN 값이 급격히 감소하게 되며, 따라서 이때의 ΔK 값이 ΔK_{th} 값과 거의 같음을 발표하였다. 주기소성영역의 크기, r_y^c 는 Hahn¹²⁾ 등에 의해 $r_y^c = 0.033(\Delta K/\sigma_y)^2$ 이므로, 위에 언급한 threshold 조건이 성립토록 $r_y^c = d$ 라 하고, σ_y 대신 $\sigma_o + k(1/\sqrt{d})$ 을 대입하여 정리하면, ΔK_{th} 와 d 사이에는 결국 $\Delta K_{th} \propto \sqrt{d}$ 형태의 관계식이 성립하게 되는 것이다.

$$\Delta K_{th} = I + J\sqrt{d} \quad (3)$$

여기에서, I, J : material constants

d : grain diameter

Fig.7에는 결정립크기별 A~D 시편의 ΔK_{th} 값을 d 에 대해 정리하여 나타내었다. 그림에서 최소자승법으로 구한 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta K_{th} = 3.3 + 1665\sqrt{d} \quad (4)$$

여기에서, ΔK_{th} 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고, d 의 단위는 m이다.

3.4 σ_y 와 λ 의 관계

Tyson⁹⁾은 석출경화합금에서 항복강도는 석출물들간의 전위가 휘어지는데 요구되는 응력에 의하여 결정되며, 이것은 다음 관계가 성립함을 보고하였다.

$$\sigma_y = \frac{4\alpha Gb}{\lambda} + \sigma_a \quad (5)$$

여기에서,

G : shear modulus of the matrix

b : burgers vector of a glide dislocation

σ_y : yield strength of the matrix without precipitates

σ_a : applied strength

α : parameter

λ : interparticle spacing

Fig. 8에는 제 2 상 (Fe_3C) 간 거리의 역수,

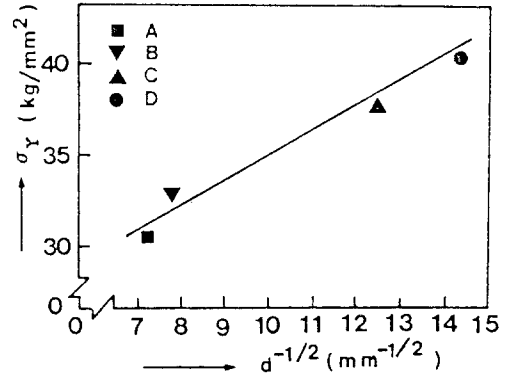


Fig. 6 Relation between $d^{-1/2}$ and σ_y for specimens A~D (pearlite)

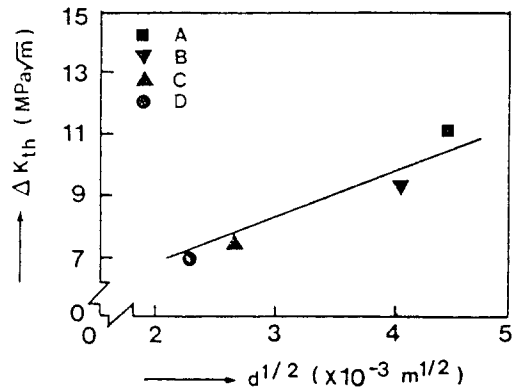


Fig. 7 ΔK_{th} vs. grain size for specimens A~D

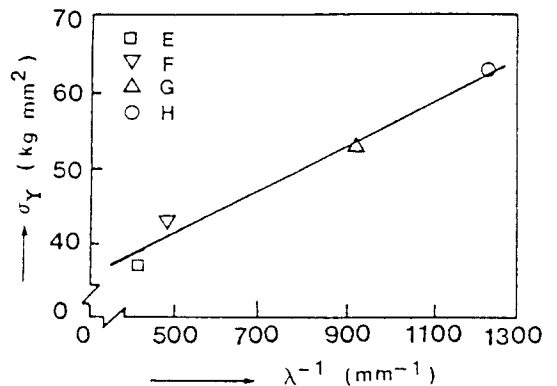


Fig. 8 Relation between λ^{-1} and σ_y for specimens E~H (spheroidite)

λ^{-1} 과 인장시험에 의하여 측정된 σ_y 와의 관계를 보여주고 있다. 이때 σ_y 와 λ^{-1} 사이의 관계는 대략 직선적으로 변함을 확인하였고, 최소자승법으로 구한 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_y = 0.0305 \lambda^{-1} + 25.65 \quad (6)$$

여기에서, σ_y 의 단위는 kg/mm^2 이고, λ 의 단위는 mm 이다.

3.5 ΔK_{th} 와 λ 의 관계

제 2 상 (Fe_3C) 간 거리별 E~H 시편에서 ΔK_{th} 값과 제 2 상간 거리, λ 와의 관계를 살펴보면 λ 값이 커지면서 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 결정립이 커지면서 σ_y 는 감소하나 ΔK_{th} 는 증가하는 것과 같은 경향으로, 일반적으로 $\sigma_y \propto 1/\lambda$ 의 관계가 있고, $\sigma_y \propto 1/\sqrt{d}$ 의 관계가 있으므로, $\Delta K_{th} \propto \sqrt{d}$ 의 관계와 $\Delta K_{th} \propto 1/\sigma_y$ 의 관계를 적용하면, 결국 $\Delta K_{th} \propto \lambda$ 의 형태를 갖게 되는 것이다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta K_{th} = L\lambda + M \quad (7)$$

여기에서, λ : interparticle spacing
 L, M : constants

Fig. 9 에는 제 2 상간 거리별 시편 E~H 의 ΔK_{th} 값을 λ 에 대해 정리하여 나타내었다.

그림에서 최소자승법으로 구한 관계식은 다음과 같다.

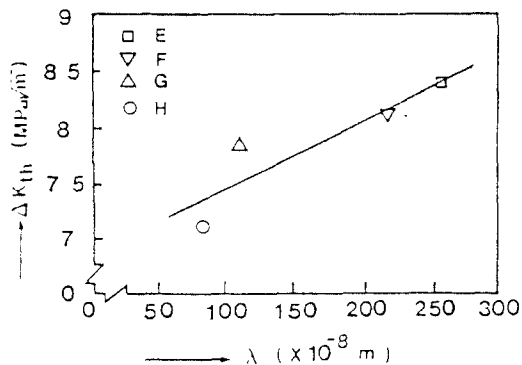


Fig. 9 ΔK_{th} vs. interparticle spacing for specimens E~H

$$\Delta K_{th} = 605670.7 \lambda + 6.9 \quad (8)$$

여기에서, ΔK_{th} 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고, λ 의 단위는 m 이다.

즉, ΔK_{th} 와 λ 와의 관계는 선형적으로 조사되었다.

3.6 σ_y 와 ΔK_{th} 의 관계

결정립도별 A~D 시편의 ΔK_{th} 값과 항복강도, σ_y 와의 관계를 살펴보면, 항복강도가 증가함에 따라 ΔK_{th} 값은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 $\Delta K_{th} = I + J\sqrt{d}$ 의 관계와, $\sigma_y = \sigma_0 + k(1/\sqrt{d})$ 로부터 얻어낸 $\sqrt{d} = k/(\sigma_y - \sigma_0)$ 의 관계를 조합하면 식 (9) 의 형태가 얻어지며, 즉 ΔK_{th} 와 σ_y 는 서로 반비례하는 형태의 관계를 갖고 있는 것이다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같은 형태로 표시될 수 있다.

$$\Delta K_{th} = \frac{Q}{\sigma_y - \sigma_0} + I \quad (9)$$

여기에서, σ_0 : friction stress
 Q, I : constants

또한, 제 2 상간 거리별 E~H 시편의 ΔK_{th} 값과 항복강도, σ_y 와의 관계를 살펴보면, 역시 항복강도가 증가함에 따라 ΔK_{th} 값은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 $\Delta K_{th} = L\lambda + M$ 의 관계와 $\sigma_y = 1/\lambda + S$ 로부터 얻어낸 $\lambda = 1/(\sigma_y - S)$ 의 관계를 조합하면 식 (10) 의 형태가 얻어지며, 즉 ΔK_{th} 와 σ_y 는 역시 반비례 관계가 있다는 것을 알 수 있었다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같은 형태로 표시될 수 있다.

$$\Delta K_{th} = \frac{L}{\sigma_y - S} + M \quad (10)$$

여기에서, σ_y : yield strength
 L, M, S : constants

Fig. 10 에는 A~H 시편의 ΔK_{th} 값을 σ_y 에 대해 정리하여 나타내었으며, 먼저 결정립의 크기를 달리한 A~D 시편의 경우는 다음과 같은 관계식이 구해졌다.

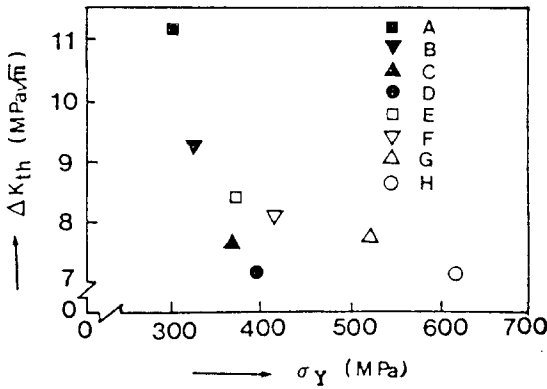


Fig.10 Relation between σ_y and ΔK_{th}

$$\Delta K_{th} = \frac{360.4}{\sigma_y - 241.8} + 4.8 \quad (11)$$

여기에서, ΔK_{th} 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고, σ_y 의 단위는 MPa이다.

그리고 제 2상간 거리를 달리한 E~H 시편의 경우는 다음과 같은 관계식이 구해졌다.

$$\Delta K_{th} = \frac{2410.9}{\sigma_y - 1100.2} + 11.6 \quad (12)$$

여기에서, ΔK_{th} 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고, σ_y 의 단위는 MPa이다.

즉, 항복강도가 감소하면 Pearlite 및 Spheroidite 조직들은 공통적으로 ΔK_{th} 값이 증가함을 알 수 있었다.

4. 결 론

이상의 실험고찰을 통하여 SM45C강의 현미경조직이 변화할 때 피로균열성장 특성과 기계적 성질에 대한 다음 결론을 얻을 수 있었다.

1) 응력확대계수범위의 하한계치, ΔK_{th} 는 결정립크기의 제곱근에 비례한다.

2) Spheroidite 조직에서 제 2상 (Fe_3C) 간의 거리가 증가하면 응력확대계수범위의 하한계치도 증가하는 것으로 나타났다.

3) 항복강도가 감소하면, Pearlite 및 Spheroidite 조직들은 공통적으로 응력확대계수

범위의 하한계치가 증가하는 것으로 나타났다.

4) 본 실험에서 측정된 범위내에서는, 결정립의 크기가 커지면, 피로균열의 안정성장 단계인 da/dN vs. ΔK 선도의 제 2영역에서 기울기 m 값이 증가하는 것으로 나타났다.

5) Pearlite 조직에서는 항복강도와 ferrite 결정립크기 사이에 Hall-Petch 관계식이 성립하며, Spheroidite 조직에서는 항복강도와 제 2상 (Fe_3C) 간 거리 사이에 반비례 관계가 성립한다.

후 기

이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 본 연구에 큰 도움을 주신 실험실의 박용식씨에게도 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. A.W. Thompson and R.J. Bucci, "The Dependence of Fatigue Crack Growth Rate on Grain Size", Metall. Trans. Vol. 4, pp. 1173-1175, 1973.
2. Y.Mutoh and V.M. Radhakrishnan, "Effect of Yield stress and Grain Size on Threshold and Fatigue Limit", Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 108, pp. 174-178, 1986.
3. G.R.Yoder, R.A.Cooley and T.W.Crooker, "50-Fold Difference in Region-II Fatigue Crack Propagation of Titanium Alloys: A Grain-Size Effect", Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 101, pp. 86-90, 1979.
4. D.L.Chen, Z.G.Wang, X.X.Jiang, S.H.Ai and C.H.Shin, "The Dependence of Near-Threshold Fatigue Crack Growth on Microstructure and Environment in Dual-phase Steels", Mater. Sci. Eng. A108,

- pp. 141-151, 1989.
5. H.Suzuki and A.J.McEvily, "Microstructural Effects on Fatigue Crack Growth in a Low Carbon Steel", Metall. Trans. A, Vol. 10A, pp. 475-481, 1979.
 6. K.Minakawa, Y.matsuo and A.J.McEvily, "The Influence of a Duplex Microstructure in Steels on Fatigue Crack Growth in the Near-Threshold Region", Metall. Trans. A, Vol. 13A, pp. 439-445, 1982.
 7. 강계명, 송진태, "TMT(가공열처리)가 국산 레일강의 피로특성에 미치는 효과", 대한금속학회지, Vol. 27, No. 8, pp. 730~738, 1989.
 8. "Standard Method for DETERMINING THE AVERAGE GRAIN SIZE¹", ASTM E112-85, pp. 115-148, 1985.
 9. W.R.Tyson, "Yield strength of spheroidite", Acta Metall., Vol. 11, pp. 61-62, 1963.
 10. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM Standard E647-88, pp. 636-654, 1988.
 11. G.R.Yoder, L.A.Cooley, and T.W.Crooker, Titanium 80, H.Kimura and O.Izumi, Eds., AIME, Warrendale, PA, Vol. 3, pp. 1865, 1980.
 12. G.T.Hahn, R.G.Hoagland, and A.R.Rosenfield, "Local Yielding Attending Fatigue Crack Growth", Metall. Trans. Vol. 3, pp. 1189-1202, 1972.