

CRACK 開口變位에 기초한 微小疲勞크랙 전파法則의 考察

김민건* · 지정근**

Considerations of the Small-Crack Growth Law Based on COD

Min-Gun Kim * · Jueng-Keun Ji **

ABSTRACT

Bending fatigue tests were carried out on the specimenes with two different strength levels in order to investgate small crack growth rate.

The main results obtained are as follows :

(1) Small crack growth law, $da/dn = C\sigma_a^n a$ is useful several materials, but is not the rule applicable to all cases generally.

(2) When da/dn in several specimens are equal, COD near the crack tip are also nerarly equal.

(3) Crack tip opening displacement (CTOD) is the main factor to control the small crack growth rate, and $da/dn \propto CTOD$ comes into being between the two. Accordingly, $da/dn = c(\sigma_a^2/\sigma_s)^n a^n$ shows the small crack growth rate being reflected crack closure phenomenon.

1. 序 論

피로수명의 대부분은 크랙전파수명이고, 또한 크랙 전파수명중에서도 미소표면크랙

의 전파가 지배적이다. 크랙길이 $1mm$ 까지 성장하는데 전체수명의 약 90% 정도가 소비된다는 보고도 있다.¹⁾ 따라서, 실제의 기계 구조물의 피로수명을 예측할 때에는 이러한 미소표면크랙의 전파거동을 파악하는 것이 중요하다. 그러나, 미소크랙의 전파에 관한 연

* 강원대학교 공과대학 기계공학과 부교수

** 강원대학교 공과대학 기계공학과 박사과정

구는 그 중요성에도 불구하고 거시적 크랙의 경우처럼 많지 않고, 실용에 적합한 전파법칙도 적절히 확립되어 있지 않는 것이 현상이다. 거시적 피로크랙에 대해서는 크랙선단의 소성역의 크기가 크랙길이 및 시험편 치수에 비하여 충분히 작은 소규모 항복조건 하에서 그 전파속도는 다음과 같이 응력확대계수범위 Δk 의 함수로 표현될 수 있음이 실험적으로 확인되어 있다.⁹⁾

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta k)^m$$

그러나 미소크랙의 전파는 거시크랙과 비교하여 특이한 거동을 하는 것으로 알려져 있다. 미소크랙은 거시크랙의 不限界 응력확대계수범위 Δk_{th} 이하에서도 발생 전파하고, 또한 그 전파속도는 동일한 Δk 로 비교할 경우 거시크랙의 그것보다도 높은 것으로 알려져 있다.^{3), 4), 5)} 이러한 미소크랙의 전파특이성의 원인으로서는 주로 미소조직의 영향 및 크랙의 開閉口현상이 중요한 역할을 수행하고 있는 것으로 생각되어지고 있다.^{6), 7)}

미소피로크랙의 전파속도 평가법에 관하여 지금까지 몇몇의 제안이 나와 있다. E1 Haddad⁸⁾ 등은 실제 크랙의 선단에 일정길이의 잠재크랙을 생각하여 그 잠재크랙선단의 응력확대계수범위 Δk 에 의하여 전파속도가 규정된다고 하였다. 또 Nishitani^{9), 10), 11)} 등은 미소피로크랙의 전파속도가 다음식과 같이 표시됨을 주장하였다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \sigma_a^n a \quad *C_1 : 상수$$

또한 크랙전파저항으로서의 C_1 을 정적 기계적성질인 항복응력 σ_s 와 결부시킨 다음식을 제안하였다.¹²⁾

$$\frac{da}{dN} = C_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right)^n a \quad *C_2 : 상수$$

윗식은 이른바 소규모항복조건이 성립하지 않는 高應力下의 미소크랙의 전파속도를

나타내는 식으로 제안된 것이다. 그러나 이들 연구에서는 미소피로크랙 전파거동에 본질적으로 중요한 역할을 수행하고 있는 것으로 믿어지는 크랙閉口(Crack closure)현상을 전혀 고려하지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 Δk 로 평가하기가 곤란한 미소크랙을 대상으로 하여 정적인 항복강도가 서로 다른 시험편과, 크랙전파저항이 다를 것으로 예상되는 異種材料의 시험편을 각각 준비하여, 크랙전파속도에 밀접하게 관계하고 있을 것으로 예상되는 크랙선단開口變位를 정밀하게 측정하여 크랙開口變位에 기초한 미소피로크랙의 전파법칙을 확립하고자 한다.

2. 사용재료. 시험편 및 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에서 사용한 소재는 시판의 SM15C 및 Al-Cu-Mg계 합금인 2024Al이다. 소재는 Fig. 1에 나타난 과정을 거쳐서, 각각 4종류의 시험편을 준비하였다. 각 시험편의 기계적 성질 및 화학성분을 Table. 1, Table. 2에 나타내었으며 시편의 형상은 Fig. 2와 같다.

Table. 1 Mechanical properties of the testing materials.

	$\sigma_{0.2}$	UTS (MPa)	Elongation (%)	Hv (200g)
S-1	279	419	30	158
S-2	458	650	19	205
A-1	128	289	17	78
A-2	194	331	15	125

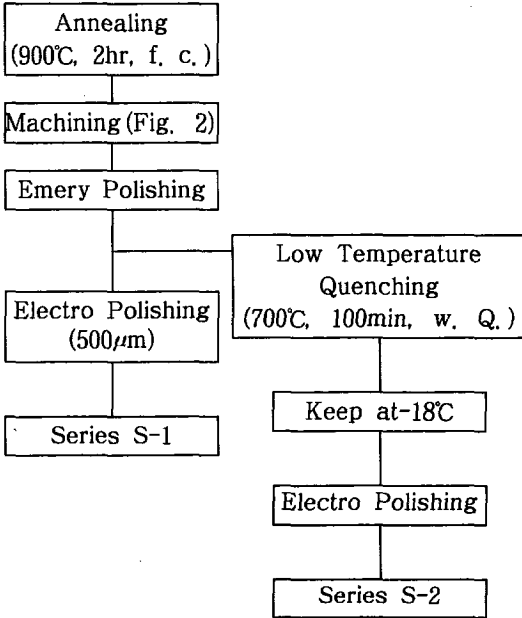
Table. 2 Chemical composition of the testing materials.

(a) SM15C (wt %)

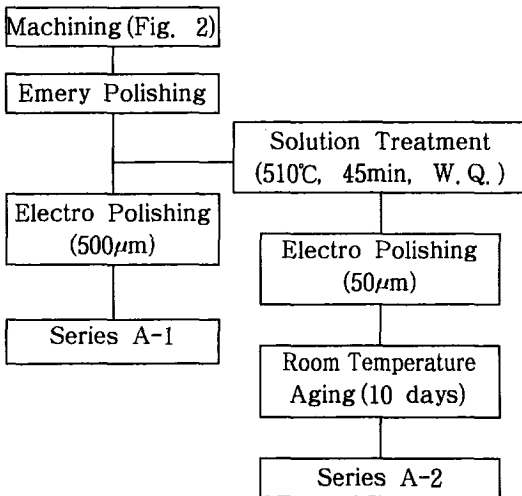
Material	C	Si	Mn	P	S
SM15C	0.17	0.29	0.42	0.09	0.01

(b) 2024Al (wt %)

Material	Al	Cu	Mg	Mn	Pb	Fe	Si
2024Al	Bal	4.15	1.51	0.54	0.27	0.18	0.12



(a) SM15C (φ20, Rolled Bar)



(b) 2024-Al (φ20, Rolled Bar)

Fig. 1. Process of specimens preparation

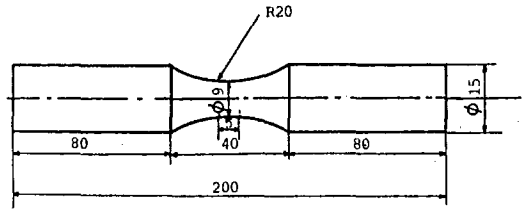


Fig. 2. Geometries of test specimen.

2.2 COD 측정방법

본 실험에서 사용한 크랙개구변위 (COD) 측정장치는 크랙면 임의의 위치에서 COD를 측정하는데 사용되었다. 이 측정법은 Fig. 3과 같이 크랙부근에 압자를 압입한 지점을 현미경과 T. V. camera, Video monitor를 통해 관찰하고 자동측정장치를 통해 COD변위의 차를 측정하는 것이다. 이 미소크랙의 측정장치는 Fig. 4와 같이 구성한다.

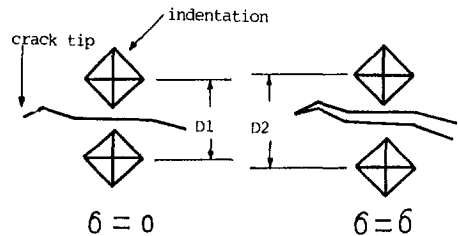


Fig. 3. Location of Vicker's indentation and definition of COD in direct measuring method.

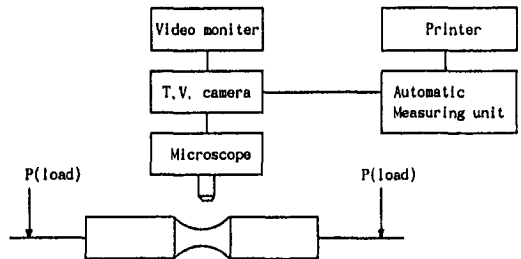


Fig. 4. Automatic COD measuring unit.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크랙전파특성

3.1.1 σ_a^n a에 의한 검토

(1) 크랙전파곡선

Fig. 5에 S-1, S-2材에 있어서의 크랙길이

a와 사이클수 N과의 관계인 a-N선도를 나타내었다. 또한 Fig. 7에 A-1, A-2材에 있어서의 a-N선도를 나타내었다. SM15C, 2024Al材 共히, 부하응력진폭 σ_a 가 상승함에 따라 크랙의 발생시기가 빨라지고 있음을 알 수 있다.

(2) 크랙전파속도와 크랙길이, 응력과의 관계

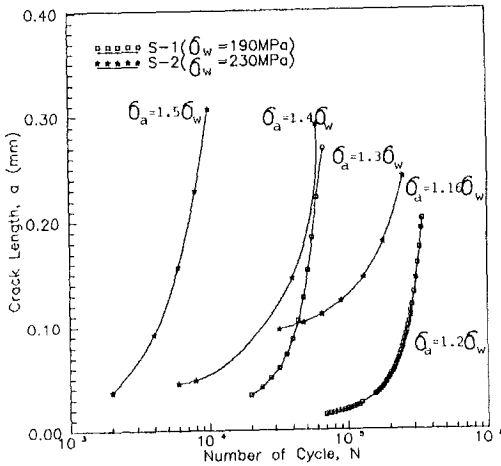


Fig. 5. a - N relation for SM15C.

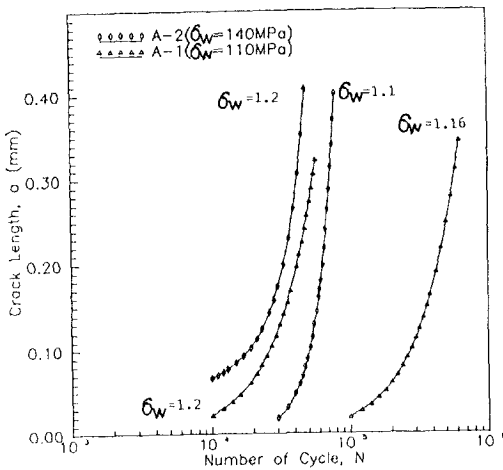


Fig. 6. a - N relation for 2024Al.

Fig. 7과 Fig. 8에 Fig. 5, Fig. 6으로부터 구한, 크랙전파속도 da/dN과 크랙길이 a와의 관계를 나타내었다. Fig. 7에 SM15C의 결과를 Fig. 8에는 2024Al의 결과를 각각

도시하였다.

SM15C의 결과는 S-2材의 高응력(1.5 σ_w) 부하의 경우를 제외하면 da/dN-a 사이에 대략 기울기가 1인 직선관계가 인정된다. 그러나 Al합금의 결과는 기울기가 1보다 작은 경향을 보이고 있다.

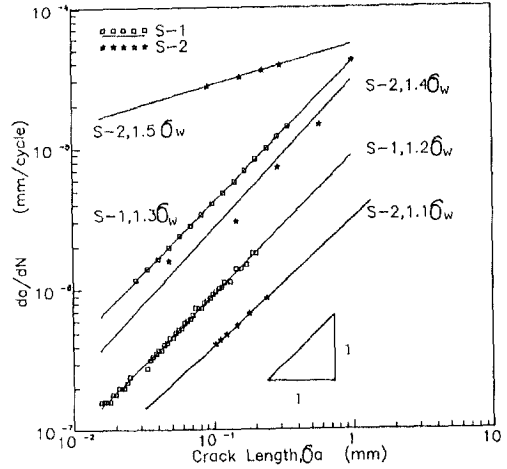


Fig. 7. da/dN- σ_a relation for SM15C.

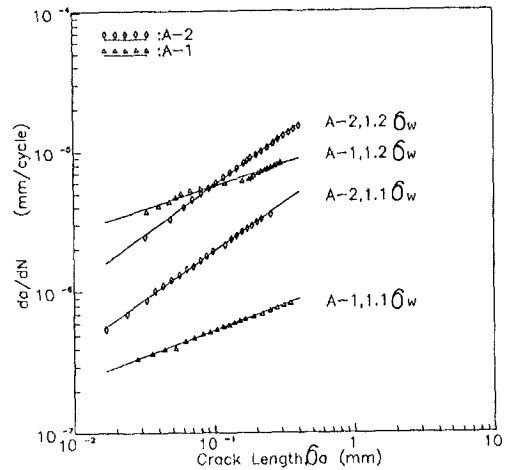


Fig. 8. da/dN- σ_a relation for 2024Al.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 SM15C와 Al합금의 일정 크랙길이 $a=0.2mm$ 에서의 크랙전파속도 da/dN의 응력 의존성을 보인 것이다. Fig. 9, Fig. 10로부터, S-2材, A-2材의 da/dN-a관계는 기울기가 12인데 비하여, S-1

材, A-1材의 경우는 기울기가 17인 직선관계가 성립하고 있다. 즉, 고용화 W. Q. 한 A-2材와 저온 W. Q. 한 S-2材의 기울기가 소둔材인 A-1과 S-1材의 기울기와 차이를 보이고 있다. 이것은 n 값이 재료의 열처리조건의 차에 따르는 재질변화에 기인하고 있는 것으로 생각되어진다. 즉, 저온 담금질 및 고용화처리에 이은 시효처리로 인하여 SM15C 및 Al합금의 강도(항복강도)가 소둔재에 비하여 각각 64%, 52%씩 증가한 결과, 거기에 따르는 크랙전파저항이 증가한 것으로 여겨진다. 어떻든간에 兩者의 직선관계로부터

$$\frac{da}{dN} \propto \sigma_a^n$$

의 관계가 인정된다.

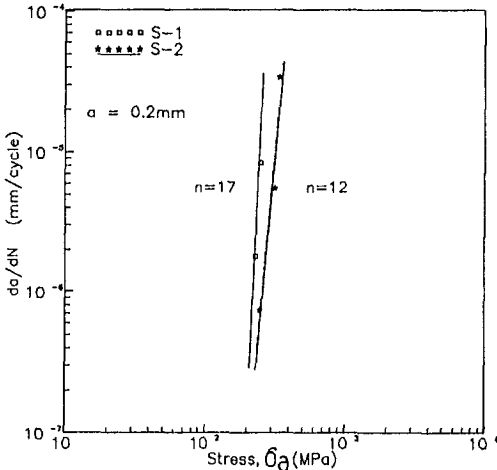


Fig. 9. $da/dN-\sigma_a$ relation for SM15C.

Fig. 11, Fig. 12는 각각 Fig. 7과 Fig. 9을 결합해서 S-1, S-2材의 da/dN 과 $\sigma_a^n a$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 마찬가지로 Fig. 13과 Fig. 14는 각각 Fig. 8과 Fig. 10을 결합해서 A-1, A-2材의 da/dN 과 $\sigma_a^n a$ 와의 관계를 나타낸 것이다.

SM15C의 S-1材, S-2材의 관계는 기울기가 약1의 직선으로 정리되어(단, S-2材의

1.5 σ_w 의 경우는 제외) 다음의 미소크랙전파 법칙이 성립한다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \sigma_a^n a \quad (C_1, n: \text{상수}) \text{---- (1)}$$

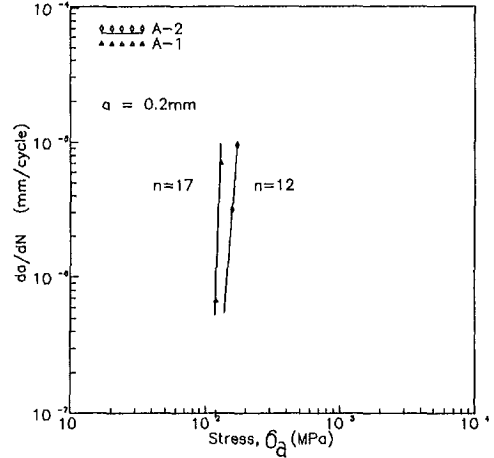


Fig. 10. $da/dN-\sigma_a$ relation for 2024Al.

C_1 은 da/dN 의 재질의존성을 나타내는 파라미터로 이해되고 있다.

그러나, A-1, A-2材의 $da/dN-\sigma_a^n a$ 의 관계는 각 응력레벨에서 서로 달라서, 전체적으로 1개의 직선관계로 정리되지 않는다. 또한, 그 기울기도 1보다 약간 작은 값을 보이고 있다. 따라서 식(1)은 각각의 재료의 미소크랙전파속도를 一義적으로 결정하지만, 각종 재료의 크랙전파거동에 통일적으로 적용시킬 수는 없음을 알 수 있다. 또한 S-2材에 있어서 1.5 σ_w 의 고응력의 결과가 다른 저응력의 결과에서 벗어나는 것으로 보아, 식(1)이 적용될 수 있는 응력범위에 한계가 있음도 아울러 알 수 있다.

한편, S-1材의 n 값은 17이고 S-2材에서는 12로 서로 다르므로, 兩材의 크랙전파저항을 식(1)의 상수 C_1 값으로 비교할 수가 없다. 이것의 원인으로는 앞서 지적했듯이 소둔재와 저온담금질재와 미시조직의 변화에서 오는 강도의 차에 기인하는 것으로 생각되어진다. 따라서 이러한 경우의 평가의 한

수단으로, 정적 기계적성질인 항복응력 σ_s 를 기준으로 하는 다음식이 많이 이용되고 있다.¹³⁾

$$\frac{da}{dN} = C_2 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_s} \right)^n a \quad (C_2 : \text{상수}) \quad (2)$$

이 경우 C_2 는 n 의 영향을 거의 받지 않은 파라미터로서, C_2 를 통해서 강도가 서로 다른 재료사이에서의 크랙전파저항의 비교가 가능해진다. 바꾸어 말하면, C_2 는 1mm의 크랙에 σ_s 를 부하했을 경우의 da/dN 에 해당된다.

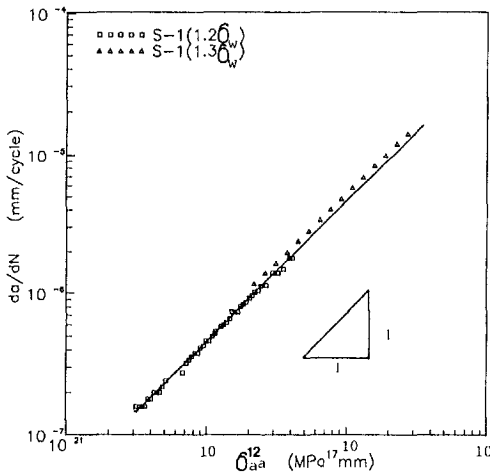


Fig. 11. $da/dN-\sigma_a^n a$ relation for S1.

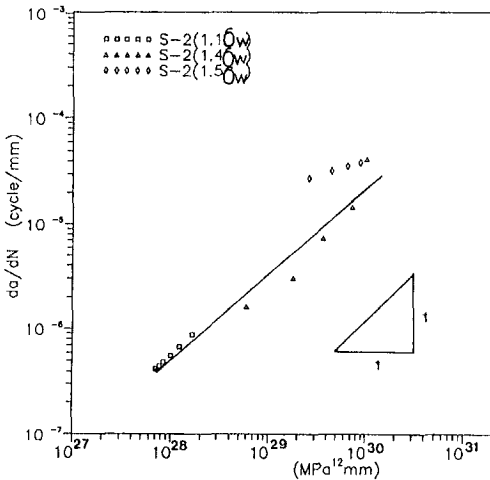


Fig. 12. $da/dN-\sigma_a^n a$ relation for S-2.

Fig. 15은 $da/dN-\sigma_s$ 의 관계를 항복응력 σ_s 의 관점에서 도시한 것이다. 그림으로부터, 항복응력이 증가함에 따라 크랙전파속도가 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이 사실은 식(2)의 결과와 잘 부합하고 있다.

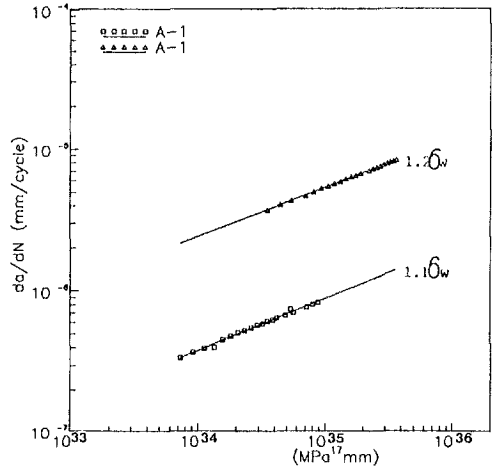


Fig. 13. $da/dN-\sigma_a^n a$ relation for A-1.

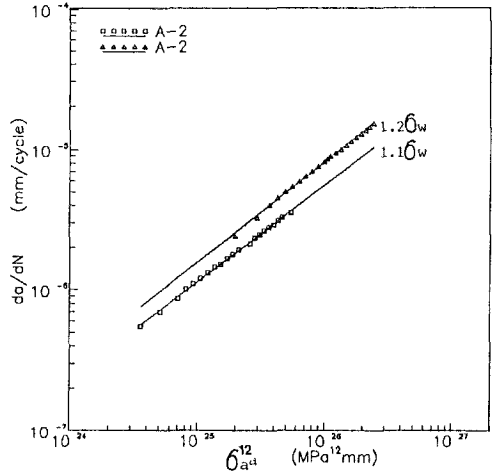


Fig. 14. $da/dN-\sigma_a^n a$ relation for A-2.

3. 1. 2 크랙개구변위에 의한 검토

式(1)은, 미소크랙의 범위에서 크랙개구비 $U (= \Delta k_{eff} / \Delta k)$ 가 일정하고, CTOD(크랙선단에서의 개구변위)가 크랙길이에 비례한다는 가정하에 설명되어진다. 본장에서는 이러한 가정을 검토하여, 식(1)의 전파법칙

이 성립하는 물리적 배경에 대하여 고찰하기로 한다.

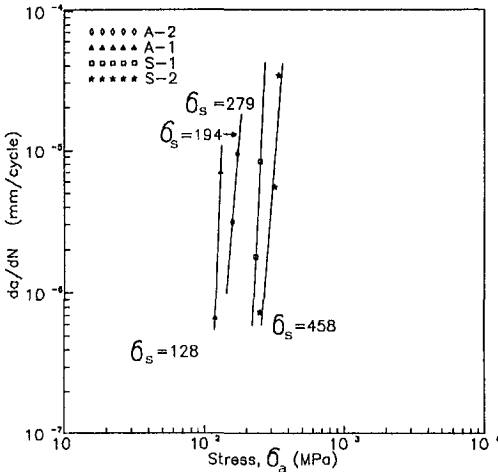


Fig. 15. $da/dN-\sigma_a$ relation for each specimens

미소피로크랙의 CTOD는 아주 작아서, 이것을 精度 높게 측정하는 것은 곤란하기 때문에, 지금까지 특정조건하에서의 관찰에 한정되어 왔다. 여기에, 본 연구실에서는 용이하게 高精度의 크랙개구 변위 측정이 가능한 COD 측정 시스템을 개발하여 사용하게 되었다.

Fig. 16는 S-1, A-1, A-2材의 CTOD-a와의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서의 CTOD는 크랙선단으로부터 $10\mu m$ 후방의 크랙개구 변위를 편리상 CTOD로 간주했다. 엄밀한 의미의 CTOD는 그 정의는 할 수 있어도 측정은 불가능하다. 그러나 CTOD와 COD는 서로 동일한 성질을 갖고 있으면서, 특정조건하에서 일정한 경향으로 변화하므로 $10\mu m$ 후방의 COD를 갖고 CTOD로 대체하여 현상을 논해도 이론상의 문제는 없다.

Fig. 16으로부터 $CTOD \propto a$ 의 관계가 인정되고, 기울기가 대략 1이므로 다음식이 성립된다.

$$CTOD = C_3 a \quad (C_3 : \text{상수}) \text{-----} (3)$$

즉, 式(1)의 CTOD가 크랙길이에 비례한

다는 가정이 실험적으로 입증된 셈이다.

CTOD가 크랙길이에 비례한다는 사실은 다음과 같은 사항으로부터도 명백해진다. 현실의 재료에 있어서는 크랙 Tip에서의 소성변형에 의하여 Slip면 분리가 야기되므로, 크랙 Tip형상의 소성둔화가 일어난다. CTOD는 이 소성둔화에 의한 크랙 Tip의開口量으로 정의되기 때문에, 예를들어 다음 Fig. 17과 같은 단순화한 Model를 생각하면, CTOD는 그림중의 ϕ 로 주어지게 된다.

따라서, CTOD는 크랙 Tip에서의 소성둔화의 정도를 즉, 소성변형의 정도(반복 소성역의 크기: r_p)를 말해주는 파라미터로 간주될 수 있다. 그러므로, 반복소성역의 크기 r_p 는 크랙길이 a 와는 다음과 같은 비례관계가 있으므로¹⁴⁾

$$r_p = \frac{\sigma_a^2 a}{2\sigma_s^2}$$

CTOD $\propto a$ 의 관계가 명백해진다.

또한, Dugdale model로부터도 설명될 수 있다. Dugdale의 방법에 의하여 유도된 式은 다음과 같다.^{15), 16)}

$$CTOD = \frac{8\sigma_s a}{\pi E} \ln \text{Sec} \frac{\pi \sigma_a}{2\sigma_s}$$

즉, σ_s 가 일정하다면 $CTOD \propto a$ 의 관계가 성립하고 있다.

Fig. 18는 Fig. 7, Fig. 8와 Fig. 16을 결합해서 도시한 것이다. 그림으로부터 $da/dN \propto CTOD$ 의 관계가 인정된다. 즉, 미소크랙의 전파속도를 직접 지배하는 것은 CTOD임을 말해주고 있다. 예를들어, A-2材의 기울기를 n 이라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C_4 (CTOD)^n \quad (C_4 : \text{상수}) \text{--} (4)$$

그런데,

$$CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E\sigma_s}$$

이고, $K = \sqrt{\frac{\pi a}{2}}$ 라 하면

$$CTOD = \frac{2\sigma_a^2 a}{E\sigma_s}$$

$$= \beta \frac{\sigma_a^2}{\sigma_s} a \quad (\beta; \text{상수})$$

이므로, 식 (4)는

$$\frac{da}{dN} = C_5 \left(\frac{\sigma_a^2}{\sigma_s} \right)^n a^n \quad (C_5 : \text{상수}) \quad (5)$$

로 된다. 식 (5)는 식 (2)와 부합하면서, 미소 크랙전파에 본질적인 영향을 주는 크랙 closure 현상이 반영된, 미소크랙전파법칙을 나타내는 중요한 식이라 결론지을 수 있다.

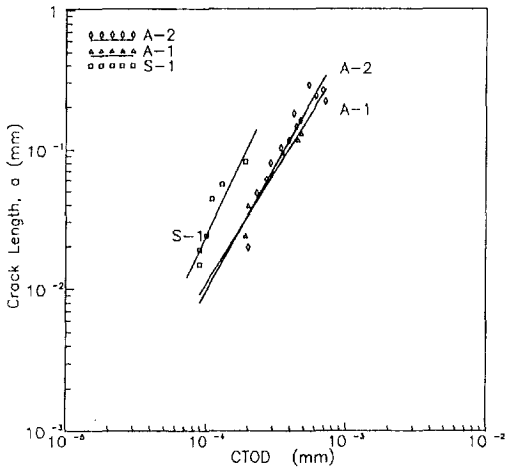


Fig. 16. a-CTOD relation for each specimens.

Fig. 19은 특정 크랙전파속도 $da/dN = 3 \times 10^6 \text{mm/cycle}$ 에서의 크랙길이에 대한 CTOD의 변화를 고찰한 것이다. 그림은 일정 크랙전파속도하에서는 CTOD가 크랙길이 a 에 따라 거의 변하지 않음을 보여주고 있다. 즉, da/dN 이 같다면, 크랙길이가 달라도 크랙 Tip부근의 개구변위는 대체로 같

음을 시사하고 있다. 이 사실도 CTOD가 da/dN 를 지배하는 기본적인 인자임을 나타내 주고 있다.

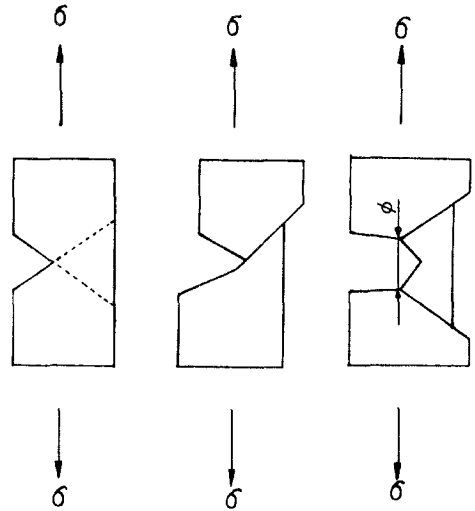


Fig. 17. CTOD model

또한, Dugdale model로부터도 길이가 다른 크랙의 CTOD가 동일한 경우, 크랙 Tip부근의 개구변위가 거의 같다는 사실과도 대응하고 있다.

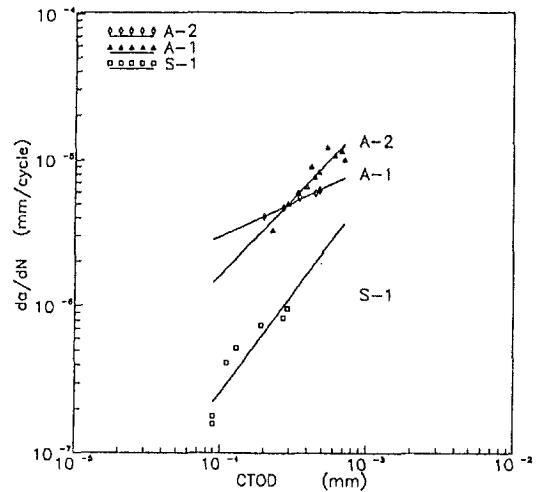


Fig. 18. da/dN -CTOD relation for each specimens.

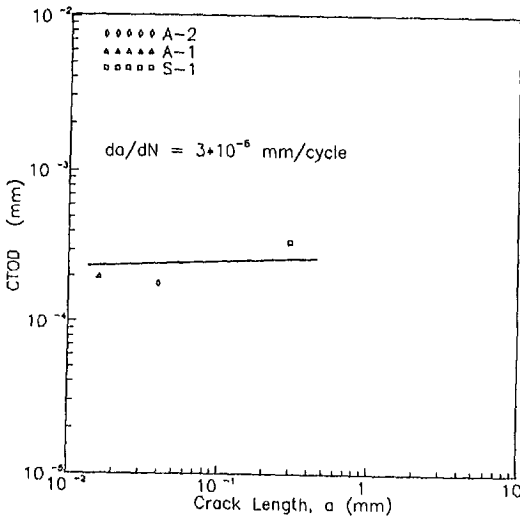


Fig. 19. a-CTOD relation for each specimens.

4. 결 론

미소피로크랙의 전파법칙을 확립하기 위하여, 동일 재료에서 열처리를 달리하여 강도를 서로 다르게 한 시편과, 異種재료 (SM15C와 2024Al)를 준비하여, 특히 크랙 개구변위에 주목하여 미소크랙의 전파거동을 고찰하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) $da/dN = C\sigma_a^n$ 의 전파법칙은 재료의 미소크랙전파속도를 一義적으로 결정하지만, 각종 재료의 크랙전파거동에 통일적으로 적용시킬 수는 없다.
- 2) 길이가 서로 다른 크랙에서 크랙전파속도 da/dN 이 같다면 크랙 Tip부근의 개구변위는 서로 같다.
- 3) 크랙선단개구변위 CTOD는 미소피로크랙의 전파속도를 지배하는 기본적인 인자로서, 兩者 사이에는 $da/dN \propto CTOD$ 인 관계가 인정된다. 따라서 이 관계에서 비롯된 $\frac{da}{dN} = C' \left(\frac{\sigma_a^2}{\sigma_s} \right)^n a^n$ 의 식은 크랙 closure현상이 잘 반영된 미소피로크랙의 전파법칙을 나타내는 식이다.

참 고 문 헌

1. 西谷, 後藤, 日本機械學會논문집 49-443, pp.779(1983)
2. P. C. Paris and F. Erdogan, Trans. ASDME, Vol. D. 85, pp.528(1963)
3. Nakai, Y., Tanaka, K., Proc. 23, Jpn. Cong. Mater. Res., pp.106 (1980)
4. Tanaka, K., Hojo, M. ASTMSTP 811, pp.207(1983)
5. Hudak, S. J., Engna. Mat. Tech., Vol 103, pp.26(1981)
6. Suresh, S. and Ritchie, R. O., Snt, Metal Rev., 29-6, pp.445(1984)
7. Tanaka, K., JSME Int J., 30+259, pp.1(1987)
8. El Haddad, Trans. ASME, J. eng. Mat. Tech., 101, pp.42(1979)
9. 西谷, 森光, 日本機械學會논문집 42-354, pp.325(1979)
10. 西谷의 2명, 日本機械學會논문집 50-449, pp.23(1984)
11. 西谷, 皮籠石, 日本機械學會논문집 50-445, pp.1334(1984)
12. 西谷, 後藤, 日本機械學會논문집 42-354, pp.332(1976)
13. NISITANI, GOTO, 日本機械學會논문집 51-462, pp.332(1985)
14. Tetelman, McEvily, "Fracture of structural Material", pp.153
15. Dugdale, D. S., "Yielding of Steel Sheets Containing Slits", J. Mech. phys. sol., 8, pp.100(1960)
16. G. I. Barenblatt, "The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle solids", Adv. Appl. Mech, 7, pp.55(1962)