공업용 순 티타늄의 피로거동에서 정류균열에 관한 연구

김민건*· 김동열**· 김진학***
(1999년 7월 20일 접수)

A Study on Non-propagating Crack in Fatigue Behavior of Pure Titanium

Mingun Kim, Dongyul Kim and Jinhak Kim

Key Words: Titanium(티타늄), Crack Closure(균열닫힘), Fatigue Limit(피로한도), Fatigue(피로), Non-propagating Crack(정류균열), Coaxing Effect(코크싱 효과)

Abstract

To verify the existing theory, non-propagating crack(NPC) does not exist in Ti which fullfills the good conditions for being of NPC, NPC detection in Ti was tried out. Also, the conception of fatigue limit in Ti and a main cause for NPC being were inquired. NPC was detected in both sharp notch root ($\rho=0.02$㎜) and micro pit (diameter = 0.25㎜) which held fast to the end under stressing of fatigue limit. Therefore, the existing theory was identified as mistake. But, NPC can not be detected in smooth specimen. This fact would be due to the presumption that NPC is very small or crack does not initiate in smooth specimen. Anyway, the fatigue limit of Ti does not correspond to critical stress of crack initiation but correspond to critical stress of NPC growth. Measurement on the COD of NPC in Ti showed that the crack tip was closed even under the peak stress level at fatigue limit. But, after stress relieving annealing crack tip was opened. Consequently, compressive residual stress which is induced around the crack tip is considered to be the factor causing the NPC being.

1. 서 론

티타늄은 내식성이나 비강도 등의 우수한 성질을 갖고 있어서, 그 사용량은 점차 증가하고 있다. 우리 나라에서 티타늄의 수요는 거의가 공업용 순티타늄으로, 주로 화학공업용의 내식재료로 사용되고 있다.

티타늄의 피로거동에 관한 지금까지의 연구 중 가장 이목을 끄는 부분은, 정류균열의 존재 유무와 이에 관련된 피로한도의 정의에 관한 내용이다. 티타늄에서는 타 재료와는 달리 정류균열이 존재하지 않으며, 따라서 피로한도의 정의도 균열발생 한계응력에 대응한다라고 보고되고 있다.[1-4]

Takao는 공업용 순티타늄을 사용한 연구에서, 피로한도의 응력을 충분히 부하한 평활재에서는 물론, 날카로운 노치재(노치곡률반경 0.1mm)에서도 정류균열은 존재하지 않으며, 따라서 티타늄의 노치강도는 같은 정도의 연성을 갖고 있는 타 금속에 비해서 상당히 높다고 보고하고 있다.[1,2] 그런데, 정류균열이 존재하지 않는 원인에 대해서는 티타늄의 결정구조가 h.c.p.라는점, 미시균열의 전파속도가 거시균열의 속도로부터 예상되는 속도보다 꽤 높아서, 이 사실이 정류균열의 비존재와 관계가 있을 것이라는 점 등을 거론하고 있으나, 명확한 원인은 밝히지 못하고 있다.

명확한 피로한도를 나타내는 금속에서, 평활재에서든 노치재에서든 정류균열은 거의 모든 재료에서 관찰되며, 따라서 피로한도의 응력은 발생

* 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : kmg@cc.kangwon.ac.kr
TEL : (0361)250-6313 FAX : (0361)250-6313
** 회원, 삼척대학교 정밀기계공학과
*** 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

한 정류균열의 전파한계응력에 대응한다.[5] 또한 명확한 피로한도 즉, 뚜렷한 니이(knee)의 출현시기와 균열의 정류하는 시기와는 밀접한 관련이 있으며,[6] 피로한도가 존재하는 재료의 특징의 하나인 코크싱 효과(Coaxing effect)도 균열의 정류와 관계가 있다.[6,7]

티타늄은 S-N곡선상에서 뚜렷한 니이가 출현하여 명확한 피로한도를 나타낸다.[1,8] 따라서, 정류균열이 존재할 가능성이 충분하다고 생각된다. 티타늄의 결정구조가 h.c.p.인 것과 균열비정류와의 직접적인 관련성은 찾기가 어렵다. 티타늄의 결정립 속의 슬립계의 수는 f.c.c. 및 b.c.c. 구조를 갖고 있는 다른 재료에 비해 상당히 작다.[1] 그러나, 이것은 균열의 발생과정과는 밀접한 관계가 있지만, 정류균열의 유무와는 관계가 없을 것으로 생각된다. 또한, 일반적으로 균열정류의 원인으로 인정되고 있는 소성, 산화물 및 파면 거칠기유기 균열닫힘의 요인들도 티타늄에 존재할 것이다. 실제로, 티타늄의 피로파면은 요철이 심하여[3] 파면거칠기유기 균열닫힘을 일으키기 쉽고, 다만 티타늄이 내부식성 재료인 점을 감안하면, 산화물의 개입은 철강재에 비해서 미미할 것으로 예상된다.

본 연구에서는, 티타늄에서의 정류균열 발견을 그 목적으로 하였다. 평활재에서는 정류균열의 발견이 일단 어렵다고 보고, 피트(Pit)재 및 예리한 노치재에서 그 발견을 시도하였다. 이러한 관찰 결과에 따라, 지금까지의 티타늄의 피로한도의 개념도 다시 정립될 수 있으리라 생각된다.

2. 시험재료 및 실험방법

사용한 재료는 공업용 티타늄으로, 그 화학성분과 기계적 성질을 Table 1, Table 2에 나타내었다. 시험편은 $\phi 9, R20$의 환봉으로 가공한후, 기계가공에 의한 경화층을 제거하기 위하여 700℃ 1시간의 진공어닐링처리를 하였으며, 에머리페이퍼로 연마한후 전해연마를 실시하였다.

연마된 시험편을 피트재와 노치재로 나누어 준비하였다. 피트재는 시험편 최소직경부에 마이크로 드릴링장치를 사용하여 직경, 깊이 공히 0.25㎜의 미소원공을 가공하였다. 노치재는 시험편 최소직경부에 원주 노치가 아닌 부분 노치를 가공하였으며, 그 깊이는 모두 0.2㎜로 통일하였다.

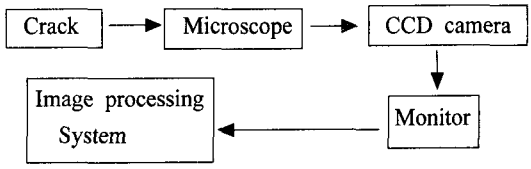

Fig. 1 Automatic COD measuring unit

Table 1 Chemical composition of Ti

(wt%)

H	O	N	Fe	Ti
0.0004	0.11	0.01	0.06	bal.

Table 2 Mechanical properties of Ti

Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Reduction of Area
400 MPa	290 MPa	30%	55%

방전가공기를 사용하여, 다양한 직경의 텅스텐 와이어 전극을 가로로 눕혀서 가공하여 노치의 루트단면이 반원이 되도록 하였다. 단, 곡률반경 $\rho=0.02$㎜의 노치는, 가공할 수 있는 직경의 와이어가 없는 관계로 면도날을 사용하여 가공하였다.

균열열림변위(COD)는 Fig. 1과 같이 구성된 장치를 사용하여 측정하였으며, 사용한 시험기는 회전굽힘피로시험기(3500rpm)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 티타늄의 S-N 특성 및 코크싱 효과

평활재 및 피트재의 S-N곡선을 Fig. 2, 노치재의 S-N곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 모든 S-N관계에서 뚜렷한 니이가 출현하고 있다. 또한 노치재에서는 노치루트의 곡률반경(ρ)이 커질수록 피로한도도 상승하고 있다.

Fig. 4에 평활재 및 피트재의 코크싱부하 결과를 나타내었다. 평활재에서 약 8%, 피트재에서는 미약하지만 코크싱 효과가 나타나고 있다.

서론에서 지적했듯이, 니이의 출현 및 코크싱 효과의 존재는 정류균열의 존재와 밀접한 관계를

가지고 있다. 니이의 위치는 균열의 정류시기와 거의 일치하며, 시효능이 클수록 낮은 사이클 쪽으로 이동한다.[6] 코크싱효과는 미시균열의 선단부의 강화(가공경화 및 거기에 수반되는 변형시효)에 기인하는 현상으로 알려져 있다.[6,7] 따라서, 니이 및 코크싱효과가 존재하는 재료에서는 정류균열이 존재할 가능성이 매우 높다고 볼 수 있다.

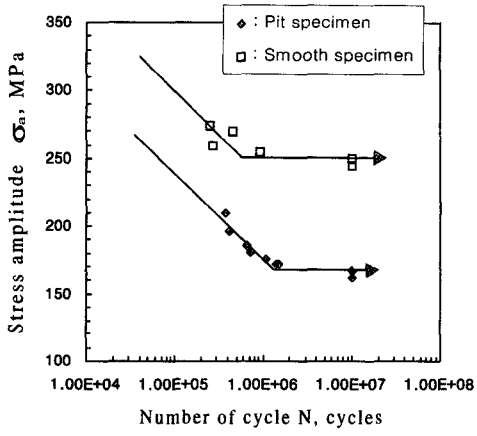

Fig. 2 S-N curves of smooth specimen and pit specimen of Ti

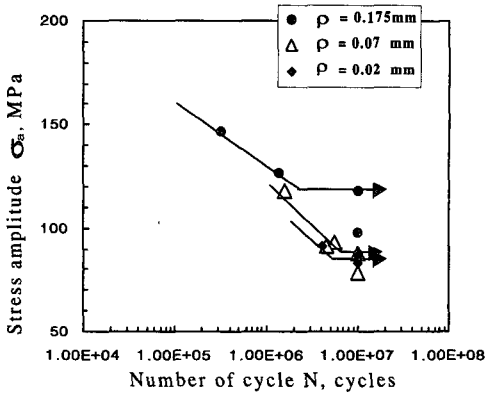

Fig. 3 S-N curves of notched specimen

3.2 티타늄에서의 정류균열의 조사

노치재에 일정응력을 반복부하할 경우, 노치루트에 피로균열이 일단 발생하면 그대로 전파를 계속하여 최종파단에 이르게 될 것으로 생각되나, 실제로는 꼭 그렇지 않다. 노치가 어느정도 이상 예리할 경우에는, 적당한 응력을 부하하면 노치루트에 발생한 균열은 조금 성장한후 전파를 정지한다. 이러한 균열을 정류균열이라고 부르고 있으며, 이 현상은 오래전부터 탄소강에서 밝혀져 있다.[5,9]

Fig. 5는 탄소강에서 회전굽힘피로시험에 의하여 얻어진 피로한도와 응력집중계수와의 일반화된 관계이다. ρ_0보다 예리한 곡률반경을 갖는 노치재에서는, 그림에서 사선으로 표시된 범위내의 응력을 부하하면 노치루트에 정류균열이 발생한다. 여기서, σ_{w1}은 균열발생한계에 대응하는 피로한도이고, σ_{w2}는 정류균열이 존재하는 범위에서의 파단한계에 대응하는 피로한도이다.

티타늄 노치재를 사용하여, Fig. 5와 같은 실험을 수행하여, 티타늄에서도 정류균열이 존재하는 임계곡률반경(ρ_0)이 존재하는지를 조사하여 보았다. 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서도 알 수 있듯이, $\rho=0.02$㎜인 노치재에서 정류균열이 발견되었다. 정류균열의 종단면사진을 Fig. 7에 제시하였다. 발생응력은 86MPa, 균열의 깊이는 약 0.9㎜로, 노치의 응력집중권을 벗어나서 충분히 전파한 후 정류하여, N=10^7회이상의 부하후에도 파단하지 않았다. 또한, 직경이 0.25㎜의 피트재(직경=깊이, 미소원공타입)에서도 피로한도의

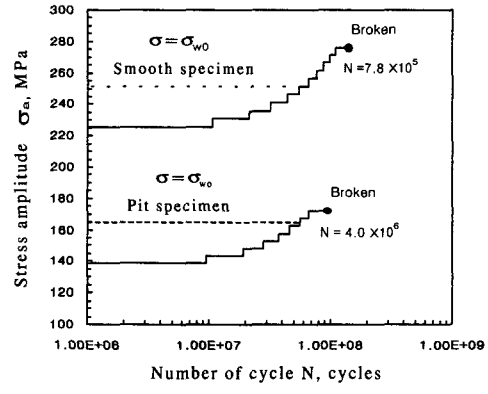

Fig. 4 The coaxing effect of smooth specimen and pit specimen.

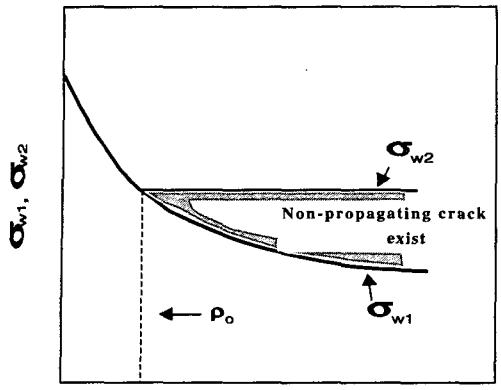

Fig. 5 Stress concentration factor vs. fatigue limit in rotating bending test

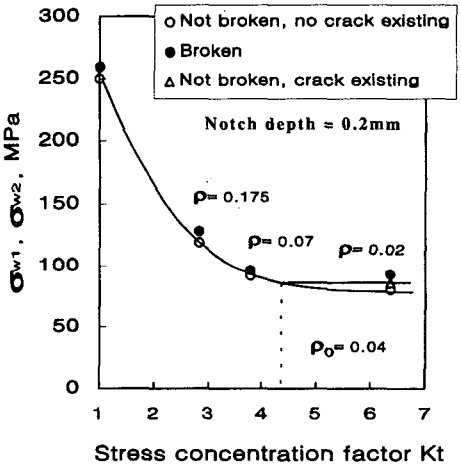

Fig. 6 Stress concentration factor vs. fatigue limit in rotating bending test

응력을 10^7회 이상 견딘 정류균열이 발견되었다. 그 사진을 Fig. 8에 제시하였다. 따라서, 티타늄에서는 정류균열이 존재하지 않는다는 기존의 학설은 잘못된 것이라고 할 수 있다.

Fig. 6으로부터 임계곡률반경은 $\rho_0 \fallingdotseq 0.04$㎜로 추정된다. 이 결과와 타실험의 결과[10]를 Table 3에 정리하였다. 강도가 커지면 일반적으로 ρ_0가 작아지는 경향이 있고, 피로한도(σ_{w0})와도 같은 경향이 인정된다. 그러나, 본 연구의 티타늄의 결과는 이들 일반적인 경향속에 포함시킬 수 없음을 알 수 있다. 즉, 정적 및 동적 강도에 비하여 너무 작은 ρ_0값이 얻어지고 있는데, 여기에 대한 원인은 현재로선 불명이다

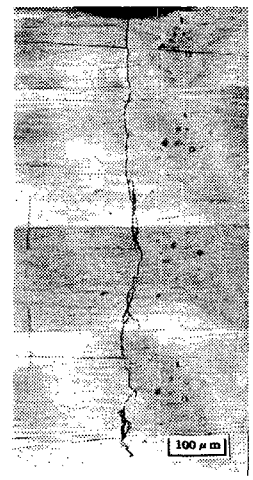

Fig. 7 The photography of NPC initiated at sharp notch root ($\rho = 0.02mm$) ($\sigma = 86MPa$, N=107cycle, crack length at surface = 2.6mm, crack depth = 0.9mm)

Table 3 Values of the critical notch radius at the branch point in various materials

Material	σ_B (MPa)	σ_Y (MPa)	σ_{w0} (MPa)	ρ_0 (mm)
Annealed S10C steel	373	203	181	0.6
Annealed S20C steel	470	279	211	0.5
Annealed S30C steel	537	309	235	0.4
Annealed S50C steel	673	347	265	0.25
Heat-treated S50C steel	1010	858	500	0.1
Ti in this study	400	290	250	0.04

3.3 티타늄에서의 정류균열의 생성요인에 대한 — 考察

Elber[11]가 피로균열에서 균열닫힘(Crack closure) 현상을 발견한 이후로, 균열정류의 원인을 설명할 때에도 균열닫힘기구가 등장한다. 그 주된 기구는 소성유기, 산화물유기 및 표면거칠기유기 균열닫힘이다. 정류균열의 선단부는 표면상에서 보면, 최대응력시에도 거의 열리지 않는다.[12,13]이 때문에 균열선단부에는 변형의 집중이 거의 생기지 않고, 따라서 균열은 정류하는 것으로 생각된다.

서론에서도 지적했듯이, 티타늄은 내식성이 강하므로 균열면에 산화물의 퇴적은 미미할 것으로 생각되며, 파면은 요철이 심하기 때문에 표면거칠기유기 균열닫힘의 기여가 클 것으로 생각된

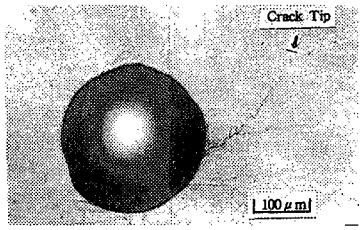

Fig. 8 The photography of NPC initiated at hole-type pit (diameter = depth = 0.25mm, σ= 165*MPa*, N=10^7 cycle, crack length = 0.17㎜)

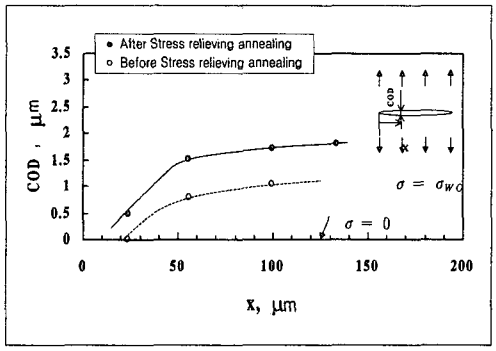

Fig. 9 The crack opening displacement before and after stress relieving annealing

다. 여기서는, 균열선단의 소성변형에 따르는 압축잔류응력에 의한 균열의 열림 및 닫힘 거동을 조사함으로써, 티타늄에서의 정류균열의 생성요인에 대하여 검토하고자 한다.

Fig. 8에 제시한 정류균열을 대상으로 하여, 우선 피로한도의 응력을 부하하여 균열열림변위(COD)를 조사하고, 뒤이어 잔류응력제거어닐링(600℃, 1시간)후의 COD를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림으로부터, 정류균열 상태에서는 균열선단으로부터 X=25㎛의 위치까지 닫혀 있음을 알 수 있고, 잔류응력제거어닐링 후에는 이 위치가 열리며 또한 전체적으로 COD가 어닐링전에 비하여 증가하고 있다. 이사실로부터, 티타늄의 정류균열의 선단부는 최대응력의 부하시에도 열리지 않으며, 균열주위에 유기된 잔류응력을 제거하게 되면 균열 전체길이에 걸쳐서 COD가 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 티타늄에서도 철강재에서와 같이[13] 압축잔류응력에 의한 소성유기 균열닫힘현상이 존재하며, 이것이 균열정류의 한 요인으로 작용하고 있다라고 생각된다.

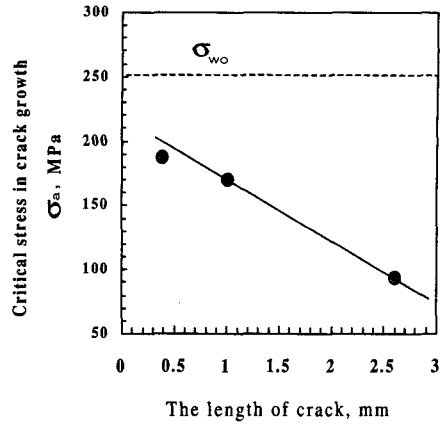

Fig. 10 Relation between stress and the length of crack

3.4 티타늄에서의 피로한도와 정류균열길이와의 관계

티타늄에서 정류균열의 존재가 밝혀진 이상, 티타늄의 피로한도의 정의도 바뀌어야 한다. 즉, 피로한도는 균열발생의 한계응력이 아닌 발생된 정류균열의 전파한계응력인 것이다. 그렇다면, 평활재에서도 피로한도에 대응하는 정류균열이 발생해 있어야 한다. 그러나, 본 연구에서도 평활재에서 정류균열을 관찰 할 수가 없었다. 그래서, 이러한 가정을 해볼 수가 있다. 즉, 평활재의 정류균열이 그 크기가 아주 작다면, 그것은 광학현미경으로는 관찰되지 않을 수도 있다. 따라서, 이러한 사실을 간접적으로 밝히기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다.

노치재 및 피트재에서 찾아낸 정류균열의 길이와 그때의 한계응력을 바탕으로, 균열길이와 그 전파한계응력을 조사하여 이른바 Frost 타입[14]으로 정리한 것이 Fig. 10이다. 그림으로부터, 평활재의 피로한도는 균열길이가 '0'일때의 전파한계응력보다도 높음을 알 수 있다. 그러나, 노치재 및 피트재에서 정류균열의 존재가 분명히 확인되었고, 따라서 평활재에서만 정류균열이 존재하지 않을 이유를 찾기가 어려운 이상, 평활재에서도 정류균열은 존재할 것으로 보이며, 다만 그 크기가 매우 작거나 발생하지 않을 수도 있다라고 생각하는 것이 타당할 것이다.

4. 결 론

S-N곡선상에서 뚜렷한 니이의 출현, 코크싱효과의 존재등 정류균열이 존재할 수 있는 구비조건을 두루 갖춘 티타늄에서, 정류균열이 존재하지 않는다는 기존 학설을 검증하기 위하여, 티타늄에서 정류균열의 발견을 시도하였다. 또한, 정류균열의 존재가 확인되므로써 티타늄의 피로한도의 개념을 재정립하였고, 정류균열의 생성요인에 대해서도 고찰하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 곡률반경이 $0.02mm$인 부분노치재에, 노치재의 피로한도의 응력을 10^7회 이상 부하한 후 관찰한 결과, 노치곡률반경에서 정류균열이 발견되었다. 또한 미소원공타입의 피트재에서도 정류균열의 존재가 확인되었다. 따라서 티타늄에서는 정류균열이 존재하지 않는다는 기존의 학설은 수정되어져야 할 것이다.

(2) 티타늄에서도 철강재에서와 같이, 압축잔류응력에 의한 소성유기 균열닫힘현상이 존재하며, 이것이 균열정류의 한 요인으로 작용하고 있다.

(3) 평활재에서는 정류균열을 발견할 수가 없었으나, 이것은 다만 그 크기가 매우 작거나 발생하지 않을 수도 있다는데 연유하는 것으로 생각된다. 여하튼, 티타늄의 피로한도의 개념은 균열발생의 한계응력이 아니라, 발생된 균열의 전파한계응력이라고 보는 것이 타당하다.

참고문헌

(1) 高尾, 西谷, 1984, "工業用純チタンの疲勞き裂發生過程と切欠き感度," 日本機械學會論文集, 50-453, pp. 1049～1053.

(2) Takao, K., Nishitani, H., 1984, "Notch Sensitivity and Behavior of Small Fatigue Crack of Commercial Purity Titanium," *FATIGUE* 84, Vol. Ⅱ, pp. 827～834.

(3) 高尾, 松本, 西谷, 1985, "工業用純チタンにおける疲勞き裂の開閉口擧動," 日本機械學會論 文集, 51-462, pp. 450～454.

(4) 森田, 清水, 千葉, 1990, 窒化處理を施したTi-6Al-4V合金の疲勞擧動," 日本機械學會論文集, 56-529, pp. 1915～1921.

(5) 石橋 正, 1967, "金屬の疲勞と破壞の防止," 養賢堂.

(6) 西谷, 田中, 戶高, 1980, "S15C低溫燒入れ時效材のコーキシング效果と微視的き裂の關係," 材料, 29-317, pp. 143～149.

(7) 西谷, 田中, 山田, 寺西, 1987, "S10C豫ひずみ材のコーキシング效果と微視的き裂の關係,"日本機械學會論文集, 54-498, pp. 190～195.

(8) 김민건, 지정근, 1998, "유동상로를 이용한 질화처리 티타늄의 피로강도 특성," 대한기 계학회논문집, A권, 22-1, pp. 142～147.

(9) 西谷, 1976, "停留き裂(切欠き)," 材料, 26-282, pp. 98～108.

(10) 北川, 西谷, 松本, 1973, "疲勞き裂成長の下限界應力擴大係數 ΔK_{th}とき裂材・切欠材の疲勞限度との關係について," 日本機械學會論文集, 42-356, pp. 996～1000.

(11) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," ASTM STP 486, pp. 230～242.

(12) 西谷, 高尾, 1974, "1應力サイクル間における停留き裂先端部の擧動," 日本機械學會論文集, 40-338, pp. 2725～2733.

(13) 김민건, 1991, "구조용 강재에 발생하는 미소 피로크랙의 정류요인," 대한기계학회논문집, 15-3, pp. 880～886.

(14) Frost, N.E., 1959, "A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 173-35, pp. 811～827.