



Al 7075 압연재의 피로균열 성장과정에서의 이방성에 관한 연구

A Study on the Anisotropy of Al 7075 Rolling Material in Fatigue Crack Growth Process

최 병 기*

Byung-Ki Choi

(1999년 1월 25일 접수, 1999년 3월 12일 채택)

ABSTRACT

The research has extracted two kinds of specimen, one is rolling direction material(R-material) and the other rectangular of rolling direction(V-material), from Al alloy 7075 rolled. We have come to a conclusion by measuring crack propagation behavior with movement type microscope and Replica.

- 1) R-material shows 130% higher, approx. 39.2MPa in fatigue strength than V-material, approx. 29.4MPa.
- 2) In crack proportion, contrary to V-material growing directly toward specimen axis, R-material grows neared to shear direction.
- 3) The life proves that R-material is approx. 122% higher than V-material at 43.1MPa and approx. 135% higher at 47MPa.
- 4) The correlation between fatigue crack length and fracture life ratio applied to ' $\log(2a)=A+B(N/N_f)$ ' equation shows inappropriate, because property value of Al alloy is low and the difference of chemical composition is high comparing with steel material.

1. 서 론

최근 공업기술의 발전에 따라 기계류도 대형화 또는 가혹한 환경에서 사용됨으로써 기계부

품 및 구조물의 안전성에 대한 신뢰도 확보와 더불어 경제성을 고려한 재료의 경량화가 동시에 이루어짐에 따라서 Al합금의 사용이 급격히 증가하여 설계시 Al합금의 파괴강도에 대한 정

* 조선대학교 기계공학부

확한 지식이 요구되고 있다. 그러나 피로강도에서 이방성에 대해서는 지금까지 철강재료를 중심으로 많은 연구가 되어 왔고, 이방성은 압연에 의해 생긴 층상조직과 비금속 개재물 등의 결합의 존재와 밀접하게 관계있는 것이 분명해지고 있다^{1~4)}. 그러나 비금속 개재물은 그 크기나 형상이 다양하며 그에 따라 피로파괴에 미치는 영향이 일정하지 않으므로 자연결합을 대상으로 피로특성을 규명하는 것은 어려움이 따르며, 결과에 대한 실험적 재현성이 어렵고 이들의 크기와 형상이 야금학적으로 제어하는 것은 기술상의 한계가 있다. 이러한 이유로 자연결합 대신 인공결합을 이용하여 미소결합체의 피로특성을 규명하는 것이 필요하다.

한편 Al합금의 경우 압연에 의해 현저한 집합조직으로 되어 있기 때문에 피로특성도 채취 방향에 따라 다르다고 생각되어지지만 그에 관한 연구는 아직 미흡하고 충분히 밝혀지지 않고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Al합금의 이방성을 조사하기 위해 시효경화한 Al합금 7075 압연재로부터 압연방향과 그에 직각방향의 2종류의 시험편을 채취하여 균열발생 및 미소균열의 전파거동에서 레프리카법으로 표면을 관찰하고자 하며, 또한 이동식 현미경을 이용하여 크랙 전파 과정에서 파괴역학적 메카니즘에 대하여 검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 기계부품에 사용되는 Al 7075 압연판재를 환봉으로 가공한 것이며, Table 1에 그 화학성분과 Table 2에 기계적 성질을 나타냈다.

소재는 판두께 20mm의 시효경화 Al합금 7075 압연재로서 Fig. 1과 같이 압연방향과 그에 직각 방향의 2종류의 시험편을 채취하였다.

Table 1 Chemical composition of material

Material	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti
Al 7075	1.5	0.26	2.40	5.60	0.02	0.26	0.34	1.17

Table 2 Mechanical properties of material

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
R-material	509.8	595.5	14
V-material	501.2	586.1	13.8

시험편은 CNC 선반으로 중앙에 평활부를 가진 환봉으로 절삭 가공하였으며, 크랙 진전거동을 관찰 조사하기 위해 평활부를 연마지 #2,000까지 연마후 래핑 가공하였다.

여기서는 압연방향으로 채취한 시험편을 R재, 직각방향으로 채취한 시험편을 V재라 부르기로 한다. 또한 시험편 채취에 있어서는 압연재에서 채취위치와 균열위치 및 전파방향과의 관계를 알 수 있도록 특히 주의했다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2에 나타냈다.

Nisitani⁵⁾는 표면에 존재하는 비관통 미소원공결합에 대한 연구에서 시험편의 지름에 대한 치수효과는 지름이 $5 \leq D \leq 10$ mm인 범위에서는 거의 영향이 없다고 하였다. 따라서 본 실험에 사용된 시험편의 지름은 8mm이므로 지름에 대한 치수효과는 없다고 볼 수 있다.

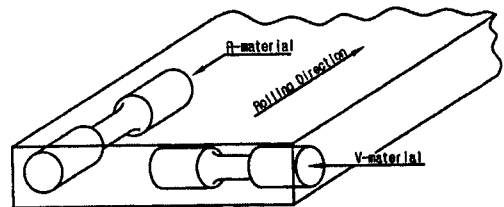


Fig. 1 Extract direction of specimen

2.2 실험방법

본 실험에 사용된 시험기는 오노형 회전굽힘 피로시험기(Ono's type rotary bending fatigue testing machine)로서 표면 크랙길이 측정은 레프리카(replica)법 및 이동식 현미경을 설치한 후 접안이동 측미계(OSM)를 부착하여 일정 사이클마다 시험기를 정지시킨 후 측정 및 관찰하였다. 크랙길이 측정을 위한 시험기 정지는 약 10분 이하인 것이 바람직하고⁶⁾ 피로한도는 하중의 반복속도가 표준시험보다 현저히 낮으면 내려

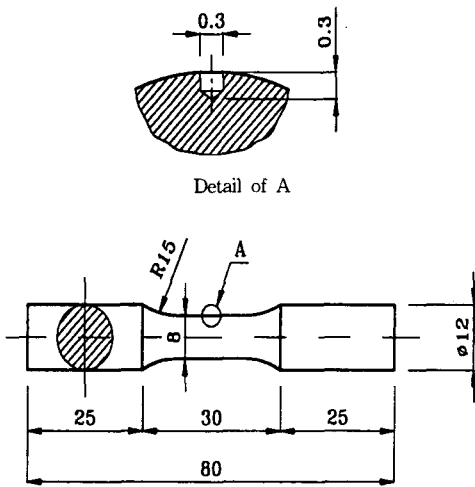
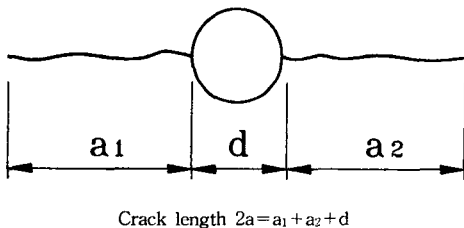


Fig. 2 Geometry of fatigue test specimen

가고 빠르면 올라가지만, 매분 300~5000회 정도의 범위내에서는 거의 변하지 않는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 따라서 본 실험에서 측정시간은 매회 약 1분정도 소요되었고, 회전속도는 3000rpm으로 실험하였으며 시험기 정지시간과 반복속도가 실험에 준 영향은 없었다고 생각된다.

크랙길이는 Fig. 3과 같이 원공노치를 포함한 시험편 표면상의 전 길이를 2a로 하였다. 원공노치부까지를 크랙길이라고 한 이유는 크랙이 노치효과를 무시할 수 있을 정도로 전파한 후에는 노치부도 크랙의 일부로 간주되기 때문이었다. 또한 초기크랙 또는 미소크랙이라 함은 대부분 슬립밴드로부터 미소크랙으로 성장되기까지 약 0.1mm내외가 되므로 이를 미소크랙으로 정의하였다.



$$\text{Crack length } 2a = a_1 + a_2 + d$$

Fig. 3 Definition of crack length measurement

S-N곡선이 수평으로 되는 한계응력을 피로

한도 또는 내구한도라고 하고 이 곡선이 경사선으로부터 수평으로 되기 시작하는 경계의 응력 반복수 10^7 에 있어서의 응력진폭을 정하면 좋다. 그러나 한계반복수가 10^7 이상의 재료에 대해서는 일정한 반복수(보통 10^7 또는 10^8)를 지정하여 그 반복수에 대한 응력진폭을 피로강도 또는 피로한도라고 한다⁸⁾.

실험응력의 결정에 있어서 각각의 결함크기에 대하여 서로 다른 응력을 적용하면 결함간의 절대적인 비교평가를 할 수 없어서 동일한 응력 수준 하에서 피로크랙전파거동을 고찰하기 위해 평활재에 대한 피로한도시험을 먼저 수행하였다.

미소 원공결함이 가공(加工)되어 있는 시험편의 피로시험응력은 평활재에 대해 R재 피로한도의 110%와 120%로 설정하여 동일응력수준 하에서의 이방성의 특성에 대해 조사하였으며, 하중모델은 정현파로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S-N곡선

Fig. 4는 R재 및 V재의 S-N곡선을 나타낸 것으로 실험결과 피로강도는 R재의 경우 약 39.2 MPa, V재는 약 29.4MPa로서 R재가 V재에 비해서 약 130% 정도 높게 나타났는데 이는 압연재의 이방성 때문이라 생각된다. 또한, 노치재의 기울기가 평활재의 피로한도곡선의 기울기와 거의 일치함을 알 수 있었다.

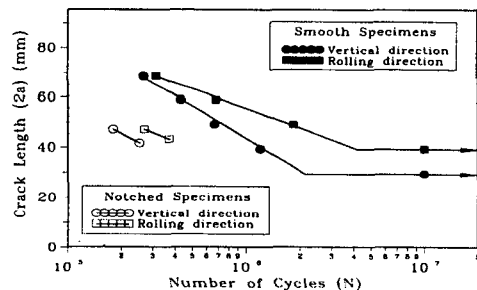


Fig. 4 S-N curve

3.2 피로크랙 발생 및 성장거동

미소크랙 발생으로부터 파단에 이르기까지

피로크랙 전파과정은 미소크랙들이 합체하면서 주크랙을 형성하여 가속적으로 전파된다. 평활재의 미소크랙은 면의 여러 곳에서 발생하므로 주크랙의 위치를 예측하기 어렵다. 따라서 본 실험에서는 시험편에 원공 노치를 가공하여 크랙을 유도하였다. 일반적으로 피로수명의 대부분은 균열의 발생 및 미소균열 전파과정에서 소요된다. Photo 1은 두가지 시험편에 동일한 응력($\sigma_a=47\text{MPa}$)을 부하하여 미소크랙으로부터 주크랙으로 성장하는 과정을 일정 사이클마다 레프리카법으로 사진촬영한 것이다.

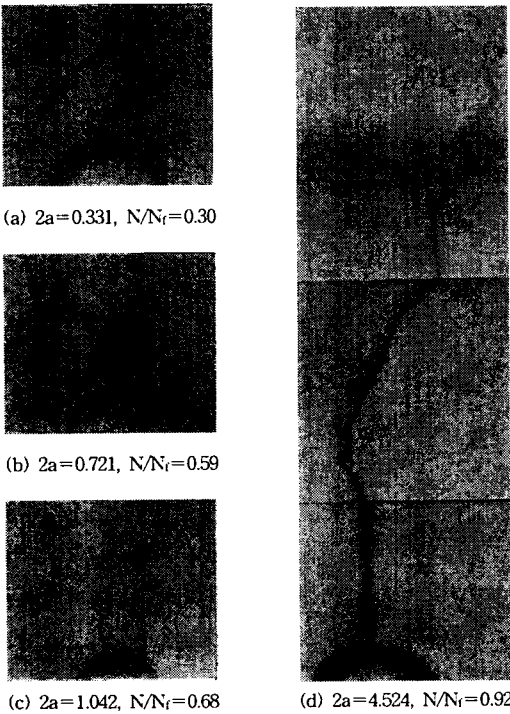


Photo 1 Photographs of fatigue crack propagation (R-material, $\sigma_a=47\text{MPa}$, $\times 100$)

사진에 나타난 바와 같이 응력수준을 동일하게 하였을 때 V재가 R재에 비하여 피로크랙 발생 시기가 빠르고 피로수명이 짧게 나타났다. 또한, V재는 피로크랙의 성장이 거의 직선적으로 발전하는 반면에 R재는 피로크랙의 성장이 초기에는 선형적으로 성장하다가 최대전단응력 방향과 유사한 각도로 성장함을 알 수 있다. 이

것은 피로크랙의 성장거동에서 압연에 따른 결정립의 이방성 때문이라 생각된다.

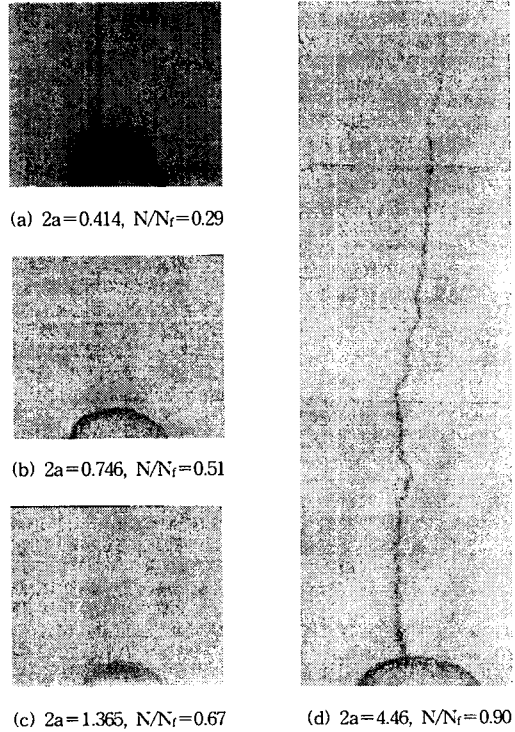


Photo 2 Photographs of fatigue crack propagation (V-material, $\sigma_a=47\text{MPa}$, $\times 100$)

3.3 피로크랙 성장특성

Fig. 5, 6은 원공결함이 있는 시험편의 피로크랙길이 $2a$ 와 반복수 N 의 관계를 나타낸 것이다.

실험결과 피로수명은 43.1MPa 하에서는 R재가 V재에 비해서 122% 정도 높게 나타났으며, 47MPa 하에서는 R재가 V재에 비해서 135% 정도 높게 나타났다. 파단직전에 관찰된 크랙길이는 V재가 R재에 비하여 조금 길게 관찰되었다. 이는 V재가 압연방향을 따라 크랙이 진전하는 반면 R재는 압연방향에 직각으로 크랙이 성장하기 때문으로 고찰된다.

3.4 피로크랙 길이와 파단수명비의 관계

Nisitani등⁹⁾은 피로크랙 길이 $2a$ 와 수명비 $N/$

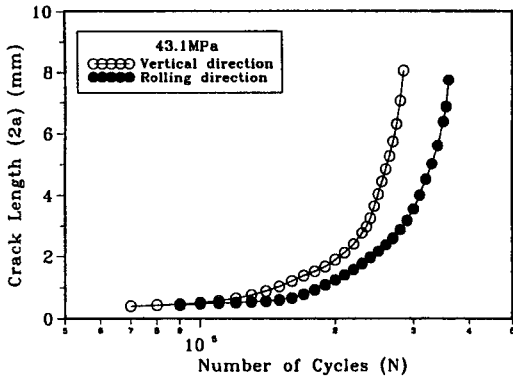


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycles for low stress

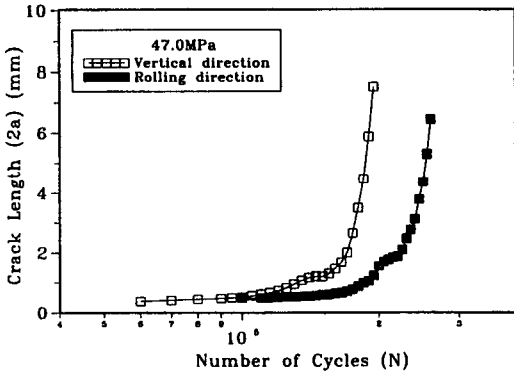


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycles for high stress

N_f 에 대하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\log(2a) = A + B(N/N_f) \dots \dots \dots (1)$$

Nisitani 등⁹⁾은 지름과 깊이가 0.3mm인 미소 원공을 갖는 일반강재 및 황동재에서 응력반복수에 대한 원공결함 유무가 크랙 전파속도에 영향을 미치지 않는, 즉 노치효과가 없어지는 크랙길이 0.5mm 이후에는 비례상수 B가 1.0~1.3의 범위내에 있다고 보고하였다.

Fig. 7, 8은 표면 피로크랙 길이 2a와 파단수명비 N/N_f 와의 관계를 나타낸 것이다.

이 그림에서 나타난 바와 같이 부하응력은 압연방향에 관계없이 피로크랙의 성장특성은 각각의 데이터들이 직선의 기울기로 좁은 범위내에 모여지는 것을 알 수 있다. 그러므로 표면

피로크랙 길이 2a와 파단수명비 N/N_f 사이에는 비례관계가 있음을 알 수 있었으며, 시험으로 얻어진 데이터를 식에 적용해 본 결과 비례상수 B의 값이 1.65~1.85 범위에 있었다. 이와 같이 B의 값이 다소 크게 나타난 원인으로서는 재료가 강재에 비해 물성치가 낮고, 화학적 성분의 차이가 크기 때문이라 생각된다.

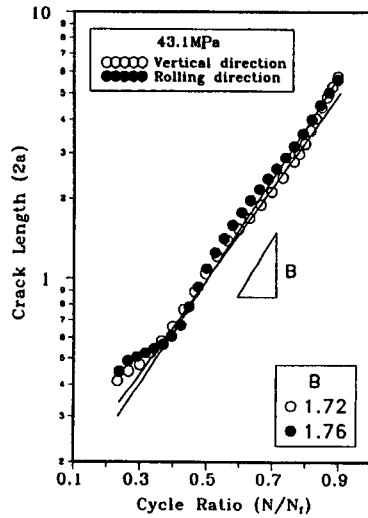


Fig. 7 Relation between crack length and cycle ratio for low stress

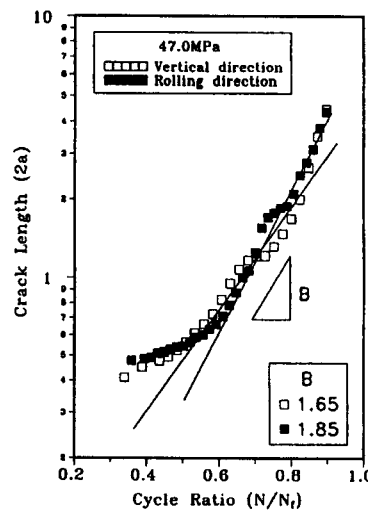


Fig. 8 Relation between crack length and cycle ratio for high stress

Table 3 Experimental coefficients for the equation $\log(2a) = A + B(N/N_f)$

Materials	Applied Stress(MPa)	Material Constants	
		A	B
R	43.1	-0.8468	1.76
	47	-1.1647	1.85
V	43.1	-0.8463	1.72
	47	-1.0472	1.65

Table 3은 본 실험에서 얻어진 데이터를 식 (1)에 적용하여 얻어진 재료상수 A와 B를 나타내고 있다.

3.5 피로크랙 전파속도와 피로크랙 길이와의 관계

노치효과에 대한 연구로서 Ogura등¹⁰⁾은 노치 시험편의 결함선단에서 크랙전파속도가 초기에는 매우 높은 값을 보이며, 그 후 어떤 크랙길이까지 급속히 감소한 후 다시 증가함을 관찰하였다. 또 이들 크랙단힘의 관점에서 해석하였으며, 그 때의 한계 크랙길이는 크랙발생 초기에 크랙선단에서 발생한 소성역의 크기와 일치한다고 하였다.

이러한 크랙발생 초기의 불안정 성장구간을 일으키는 원인으로서는 입자크기, 가공경화의 정도, 개구비, 소성화로 인한 소규모 항복조건과 이탈 등¹¹⁾ 다수가 제시되었다.

Fig. 9, 10은 이러한 불안정 성장구간을 일부 제외한 0.6mm 이상의 크랙길이(2a)와 피로크랙 전파속도(da/dN)와의 관계를 나타낸 선도이다.

이때 피로크랙 전진속도 da/dN은 7점 다항식 근사법(Seven point incremental method)¹²⁾을 사용하였다.

Table 4 Experimental material constants for the equation $d(da/dN) = C(2a)^P$

Materials	Applied Stress(MPa)	Material Constants	
		P	C
R	43.1	1.15	1.13×10^{-6}
	47	1.69	2.09×10^{-6}
V	43.1	1.28	1.27×10^{-6}
	47	1.43	1.74×10^{-6}

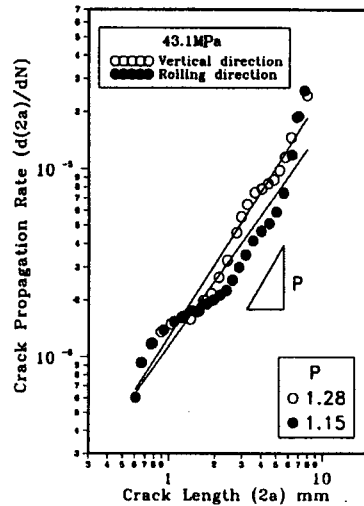


Fig. 9 Relation between crack propagation rate and crack length for low stress

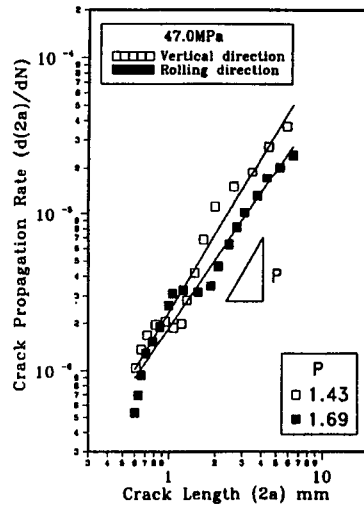


Fig. 10 Relation between crack propagation rate and crack length for high stress

그림에 나타난 바와 같이 불안정 성장구간을 일부 제외한 0.6mm이상의 크랙길이를 도시해본 결과 모든 시험편에서 기울기는 약 1.15~1.69 정도로서 거의 1의 직선으로 근사되었으며, 크랙발생 초기에는 일정 기간동안의 불안정 성장구간을 볼 수 있었다.

Table 4는 피로크랙 전파속도 da/dN과 피로

크랙길이 2a와의 관계를 이용하여 얻어진 재료 상수 P 및 C의 값을 나타낸 것으로서 피로수명 예측식의 중요한 재료상수로 사용될 수 있다.

4. 결 론

시효경화한 Al합금 7075 압연재로부터 채취한 압연방향재(R재)와 직각방향재(V재) 2종류의 시험편으로 회전굽힘 피로시험을 행하여 이로부터 균열의 발생 및 미소균열의 전파거동을 레프리카법 및 이동식 현미경으로 피로파괴 메커니즘을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 피로강도는 R재의 경우 약 39.2 MPa, V재는 약 29.4 MPa로서 R재가 V재에 비해서 약 130% 정도 높게 나타났다.
- 2) 균열전파형태는 V재가 시험편축에 대해 거의 직각방향으로 성장하는 것에 비해 R재는 전단 방향에 가까운 각도로 성장하였다.
- 3) 재료에 2가지의 응력을 동일하게 부과하여 피로수명을 관찰한 결과 43.1MPa에서 R재는 V재에 비해 약 122% 높게 나타났으며, 47 MPa에서 R재는 V재에 비해 약 135% 높게 나타났다.
- 4) 피로크랙길이와 파단수명비의 관계를 Nisitani 식에 적용해 본 결과 적합하지 않음을 알 수 있었다.

이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1) 麗毛, Nisitani, Proceedings of JSME, Vol. 41,

No. 344, p. 1080, 1975.
 2) 大路·ほか3じん, Proceedings of JSME, Vol. 42, No. 355, p. 649, 1976.
 3) Nisitani, 麗毛, 材料, Vol. 29, No. 321, pp. 574, 1980.
 4) Wilson, A.D., Trans. ASME, J. of P.V.T., 459, 1977.
 5) Nisitani, 麗毛, “電解研磨した廣穴材の回傳曲げ”, Proceedings of JSME, Vol. 39, No. 323, pp. 2005~2012, 1966.
 6) Kunio and two others, Fracture Mechanics Experiment Method, 1986.
 7) “金屬材料·疲勞強度の設計資料 I”, JSME, pp. 1~10, 1982.
 8) 金宗河, 金屬材料·疲勞強度の設計資料, Proceedings of JSME, pp. 21~34, 1995.
 9) Nisitani, Moriko, “Evaluation of Crack Propagation Charecteristic by Rotary Bending Test on Small Hole Specimen”, Proceedings of JSME, Vol. 42, No. 354, p. 328, 1976.
 10) Keiju Ogura, Yoshio Miyoshi and Izuru Nichikawa, “Fatigue Crack Growth and Closure of Small Cracks at the Notch Root”, Current Reseach on Fatigue Cracks, pp. 67~91, 1988.
 11) 李相龍, “非貫通 圓孔 缺陷材에 있어서 짧은 龜裂의 非線型 舉動 및 크랙成長에 관한 研究”, 高麗大學校 碩士學位論文, 1992.
 12) Annual Books of ASTM Standards, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”, Vol. 0301, E647-88, p. 328, 1976.