

금속기 복합재료의 피로강도 평가에 관한 연구

김 윤 해*

A Study on the Fatigue Strength Evaluation of Metal Matrix Composite

Y. H. Kim

Key words : Metal matrix composite(금속기 복합재료), Aluminum(알루미늄), Fatigue strength (피로강도), Non-propagating crack(정류균열), Successive observation(연속관찰), Stress concentration(응력집중), Linear notch mechanics(선형노치역학)

Abstract

In this paper, rotating-bending fatigue tests of the SiC-whisker-reinforced 6061-T6 aluminum alloy and 6061-T6 aluminum alloy made by powder metallurgy were carried out to investigate the fatigue characteristics of plain and notched specimens at room temperature. The fatigue mechanisms in both materials were clarified through successive surface observations using the plastic replica method. In the case of the SiC-whisker-reinforced composites, there are whisker rich and poor zones and the fatigue crack is nucleated from the end of whiskers near the boundary. On the other hand, in the case of the 6061-T6 aluminum alloy, the fatigue crack is nucleated from defects and propagates by shear. Moreover, the results were discussed based on linear notch mechanics.

Nomenclature

t : Notch Depth(mm)
 ρ : Notch Root Radius(mm)
 K_t : Stress Concentration Factor
 σ_{w1} : Limiting Stress for Crack Initiation
 σ_{w2} : Limiting Stress for Fracture in the Range of Non-propagating Crack Existing

σ_{w0} : Fatigue Limit of Plain Specimen
 σ_{max} : Maximum Elastic Stress
 σ_a : Stress Amplitude

1. 서 론

複合材料(Composite materials)라고 하는것은 2種類이상의 基材를 組合하여 원래의 재료에는 없었던 특성을 발휘시킨 재료의 總稱이다. 이러한

* 정회원, 한국해양대학교

복합재료가 新素材로서 浮刻되고, 또한 사용되어 지게 된 최대의 이유는 가볍고도 강하다는 점에 있다. 한편, 機械나 構造物의 破壞는 대부분의 경우 노치부를 起點으로 하여 발생하기 때문에, 複合材料를 노치부재로서 安全하면서도 經濟的으로 사용하기 위해서는 각종 條件下에서 있어서 強度特性的의 評價法을 確立하는 것은 必要不可缺한 것이다.

탄화규소 휘스커纖維強化複合材料는 비탄성율, 비강도가 높고, 내열성, 내마모성 및 내식성등이 우수한 동시에 加工成形이 容易하기 때문에 輕量化 고성능화등의 시대의 要求가 충분히 부응할 수 있는 금속기복합재료로서 가장 실용화가 기대되는 재료중의 하나이다^{1,2)}. 기계적성질, 파괴인성, 피로강도 및 휘스커체적함유율 등의 영향에 대해 연구한 것은 있지만,³⁻¹⁴⁾ 평활재의 미소피로균열의 발생 전과거동을 관찰 검토한 예 및 노치재의 피로강도에 관한 연구는 거의 없다. 피로과정을 통하여 평활재의 피로수명을 파악하는 것은 실구조물의 강도를 예측함에 있어서 아주 중요하다.

한편, 선형노치역학(Linear Notch Mechanics)^{15,16,17)}은 종래의 노치를 갖는 工業用材料의 強度評價, 예를 들면 노치를 갖는 金屬材料의 疲勞強度나 노치를 갖는 플라스틱재료의 脆性破壞 強度등의 평가에 대단히 有效하다는 사실이 報告¹⁸⁾되고 있는데 이것은 노치를 갖는 첨단복합재료의 強度평가에 대해서도 有力한 手段이 되리라는 것이 豫想²¹⁾된다.

본 연구에서는 탄화규소 휘스커섬유강화복합재료의 평활재 및 노치재를 이용하여 회전굽힘피로 시험을 행하고, 시험편 표면의 레프리카에 의한 연속관찰에 의해 피로균열의 발생 및 전과거동에 대해 검토하고, 그 결과를 선형노치역학¹⁷⁾의 개념에 근거하여 정리하였다.

또한 매트릭스인 평활재 및 노치재에 대해서는 동일한 실험을 행하여 비교함으로써 복합화의 효과에 대해서도 검토했다.

2. 선형노치역학(Linear Notch Mechanics)의 概念

Figs. 1, 2에 나타난 것과 같이, 응력집중이 있는 경우에는 최대탄성응력이 일정하다 하더라도 동일현상^{19,20)}이 일어난다고는 할 수 없다. 즉, Figs. 1, 2의 예에서 보듯이 동일현상이 서로 다른 최대탄성응력하에서 일어나고 있다(최대탄성응력 δ_{max} 이 크게 달라도 공칭응력으로 표시한 피로한도는 같으며, 그림에서 보듯이 정류균열(Non-propagating crack)이 발생해 있다. 만약, 시험편과 실물에 있어서 최대탄성응력이 일정한 상태에서 동일현상(Same phenomenon)이 일어난다고 한다면, a) 시험편의 응력, b) 시험편의 거동, c) 실물의 응력으로 실물의 舉動(Behavior)을 예측할 수가 있다. 그러나, 과거의 실험을 통해 얻어진 데이터는 최대탄성응력이 일정하다고 하더라도 일반적으로 동일현상이 생기지 않는다는 것을 나타내고 있다. 그래서, 네번째의 정보로서, d) Severity의 척도를 알아야 할 필요가 있다.

한편, 응력집중원으로서의 균열(Crack)과 노치

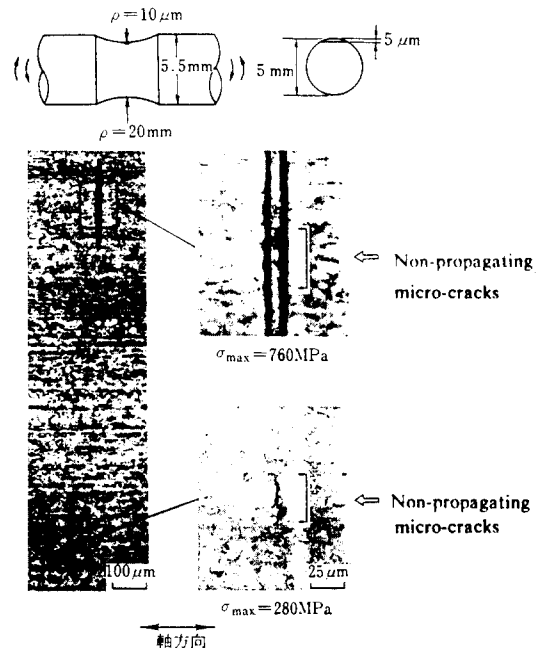


Fig. 1 Non - Propagating Micro - Cracks Observed on Surfaces

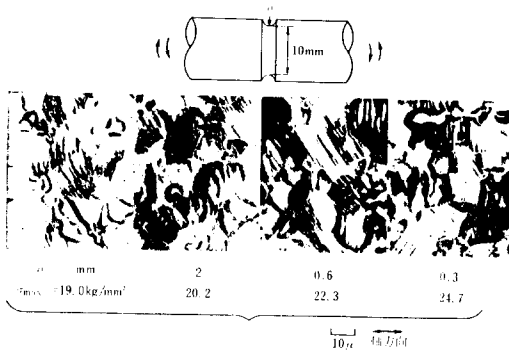
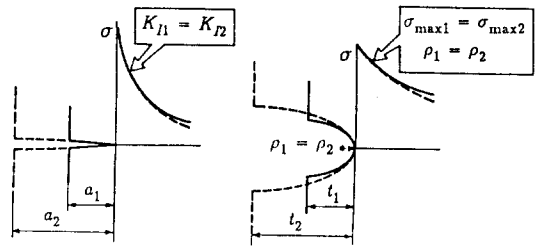


Fig. 2 Change in Surface State

(Notch)가 있다. 균열은 노치에 있어서 노치반경 (Notch root radius)이 0인 경우에 상당하므로 균열을 노치에 포함시키더라도 괜찮을 듯이 보이지만, 균열에서는 최대탄성응력이 무한대로 되기 때문에, 양자는 구별하여 취급하지 않으면 안된다. 그래서, 균열을 갖는 부재의 강도는 Severity의 척도로서 응력확대계수 K 를 이용하는 선형파괴역학 (Linear Fracture Mechanics)의 숫법을 이용하여 예측되며, 노치를 갖는 부재의 강도는 Severity의 척도로서 최대탄성응력 σ_{max} 와 노치반경 ρ 를 이용하는 선형노치역학의 개념을 이용하여 예측된다. 여기서, 예측된다고 하는 것은 시험편의 강도로부터 실물의 강도가 합리적으로 추정된다는 것을 의미하고 있다.

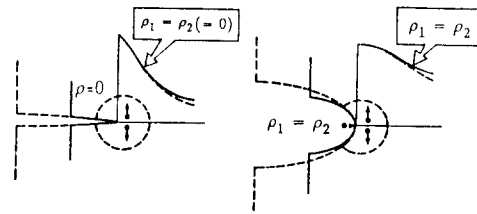
線形破壞力學과 선형노치역학은 모두 破壞나 降伏을 일으키는 原因強度로서 純粹히 彈性計算만에 의해 구해지는 값을 사용한다. 그렇기 때문에 양자가 왜 塑性變形이 일어난 후의 문제에 대해서 有效한가를 檢討해둘 필요가 있다.

Fig. 3에 나타내는 것과 같이 同一彈性應力場 (Same elastic stress field)이 생기기 위해서는 균열의 경우, 노치반경 ρ 는 $0(\rho_1 = \rho_2 = 0)$ 이기 때문에, $K_{I1} = K_{I2}$ 라는 하나의 조건만으로 탄성응력장이 같게 된다. 한편, 노치재의 경우, $\sigma_{max1} = \sigma_{max2}$ 및 $\rho_1 = \rho_2$ 라는 두가지의 조건이 동시에 만족될 때에 비로소 同一彈性應力場이 생기게 된다¹⁷⁾(Fig. 3). 여기서, 첨자 1, 2는 試驗片과 實物을 의미하는 것으로 하며, K 는 應力擴大係數 (Stress intensity factor), σ_{max} 는 最大彈性應力 (Maximum elastic



K_I Controls Elastic Stress σ_{max} and ρ Control Elastic Stress Field.

(a) Condition for the Same Elastic Stress Fields in Two Cracked Bodies or Two Notched Bodies.

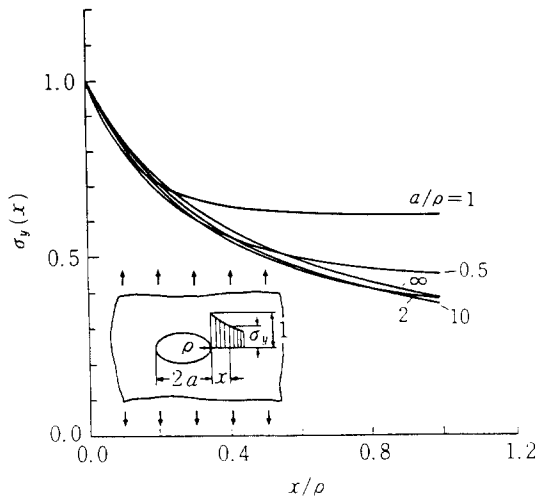


Geometric Condition near Crack Tips Controls Response. Geometric Condition near Notch Roots Controls Response.

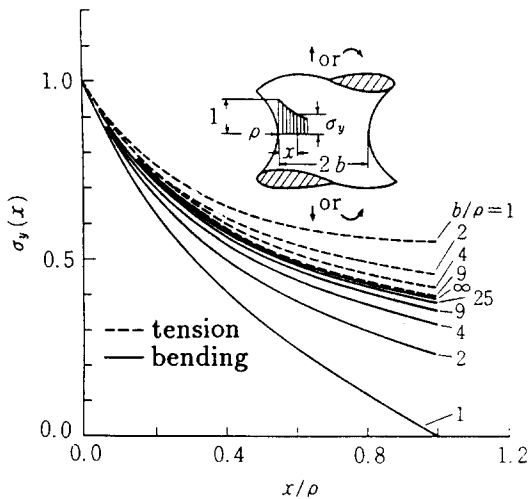
(b) Condition for the Same Responses against Plastic Deformation in Two Cracked Bodies or Two Notched Bodies.

Fig. 3 Same Elastic Stress Fields and Same Responses

stress), ρ 는 노치반경 (Notch root radius)을 의미한다. 그리고, 두개의 균열재 또는 두개의 노치재에 소성변형이 일어났을 때 재분포되는 응력장이 같아지기 위해서는(이하 Response의 等價性이라 함) Fig. 4에 나타낸 것과 같이, 균열끼리는 항상 保證되며($\rho_1 = \rho_2 = 0$ 이기 때문에), 노치끼리는 $\rho_1 = \rho_2$ 이면 Response는 等價로 된다¹⁷⁾. 따라서, 同一彈性應力場이 생기는 경우에는 이와 동시에 Response의 等價性이 保證되기 때문에, 두개의 균열재 또는 두개의 노치재에 있어서 同一彈塑性應力場이 保證되게 되는 것이다. 물론, 塑性變形이 균열선단 또는 노치底로부터 먼곳까지 도달한 경우는 Response의 等價성은 성립하지 않기 때문에 同一彈塑性應力場은 얻어지지 않는다. 동일탄소성응력장은 同一現象이 생기는 것을 保證해 준다. 이러한 상황들을 Fig. 5에 綜合하여 나타낸다.



(a) Elliptic Hole



(b) Hyperboloidal Notch

Fig. 4 Elastic Stress Field near the Notch Root is Mainly Determined by the Values of σ_{max} and ρ alone

板材의 경우에는 $\rho_1 = \rho_2$ 라 하더라도 板두께가 틀리면 Response의 等價性은 보증되지 않는다. 따라서, 판재에서 同一現象이 생기기 위해서는 Fig. 5의 條件외에 板두께가 같다는 것을 附加할 필요가 있다.

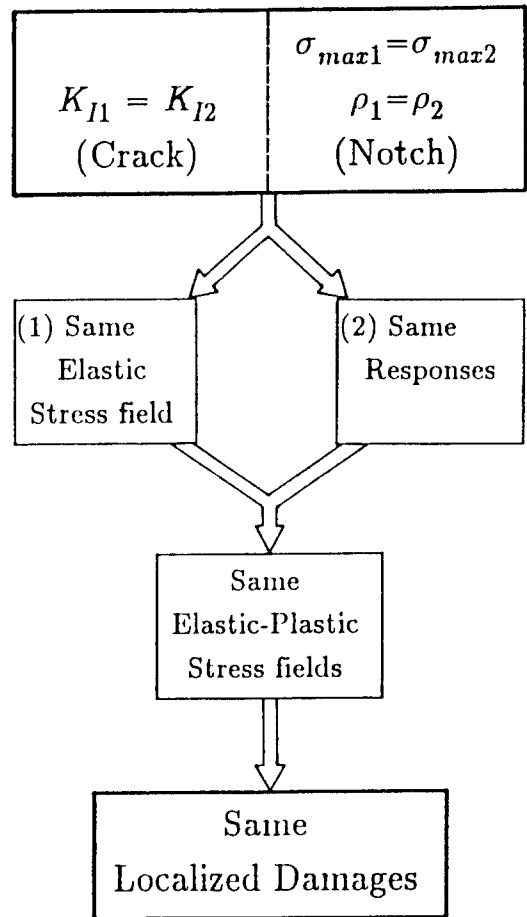


Fig. 5 Condition for Causing the Same Localized Damages in Two Cracked Bodies or Two Notched Bodies

3. 재료 및 실험방법

사용한 소재는 탄화규소 휘스커섬유강화복합재료(SiC/6061-T6) 및 매트릭스인 알루미늄합금(6061-T6)의 분말소결체이다. 어느쪽도 고화성형한 후 압출가공에 의해 직경 13mm의 환봉으로 만들었다. SiC 휘스커섬유는 직경 0.1~1 μ m 길이 5~50 μ m의 단섬유이며, SiC/6061-T6의 휘스커섬유체적율은 약 20%이다.

Fig. 6에 SiC/6061-T6의 조직사진을 나타낸다. 이 그림과 같이, 본 연구에 사용한 금속기 복합재료는, 압출성형에 의해 휘스커섬유가 축방향으



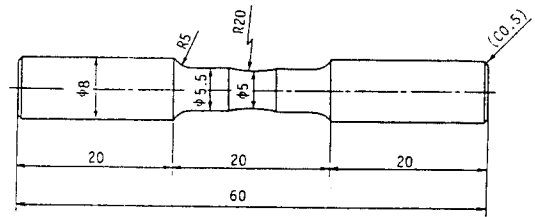
10 μ m

Fig. 6 Microstructure of SiC/6061 - T6

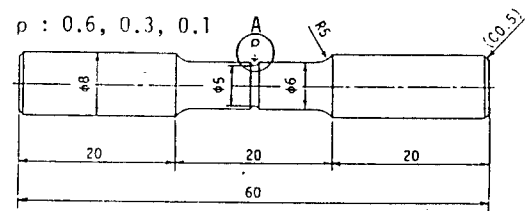
로 배향하는 경향이 있으며, 또한 휘스커섬유가 풍부한 영역과 휘스커섬유가 빈약한 영역이 층상으로 되어 있는 특징이 있다.

Fig. 7에 평활재 및 노치재의 형상 및 치수를 나타낸다. 노치재는 최소단면의 직경($d=5\text{mm}$) 및 노치깊이($t=0.5\text{mm}$)를 일정히 고정시키고, 노치반경 ρ 를 0.1, 0.3, 0.6mm로 변화시켜 실험을 행했다. 평활재 및 노치재는 선반가공후 시험부의 표면을 최대한 제거했다. 그후 6061-T6에 대해서는 전해연마를 행하고 SiC/6061-T6에 대해서는 표면에 존재하는 휘스커섬유를 식별하기 쉽도록 화학연마를 행했다.

피로시험에는 회전굽힘피로시험기(용량15Nm, 회전수 2400rpm)를 이용했다. 응력으로서의 최소단면에 있어서의 공칭굽힘응력을 이용했다. 또한, 시험편 표면상태의 변화는 레프리카법에 의해 관찰했다.



(a) Plain Specimen



Detail of A

(b) Notched Specimen

Fig. 7 Specimen Configurations

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8에 SiC/6061-T6 및 6061-T6의 Stress-strain곡선을 나타낸다. SiC휘스커섬유를 배향함으로써 인장강도, 탄성율은 더불어 상승하지만, 파단신율은 반대로 감소한다. 인장시험으로 부터 얻어진 결과를 Table 1에 나타낸다.

Fig. 9은 SiC/6061-T6 및 6061-T6의 평활재의 S-N곡선을 나타낸 것이다. 양재를 모두 명확한 피로한도가 인정되지 않았기 때문에 10^7 회에 대한 시간강도를 σ_{w0} 로 정의한다. 평활재의 σ_{w0} 는 6061-T6의 경우 약 160MPa, SiC/6061-T6의 경우 약 250MPa이다.

Fig. 10과 11에 SiC/6061-T6 및 6061-T6의 균열발생 및 전파과정을 나타낸다.

Fig. 10(a), (b)중의 화살표는 균열의 길이를 나타내고 있다. Fig. 10로 부터 알수 있듯이, SiC/6061-T6의 피로균열은 휘스커섬유가 풍부한 영역과 휘스커섬유가 빈약한 영역의 경계부근의 휘스커커端(Whisker fiber end)에서 발생하고 있는 것

같다. 이 균열은 시험편을 파단에 이르게 한 균열인데, 이와같은 균열은 마찬가지로의 과정으로 시험편의 여러개소에서 발생했다. 그러나, 휘스커섬유

가 풍부한 영역의 벽을 뚫고 진전하는 균열은 위에서 언급한 주균열뿐이었다. 한편, 6061-T6에 있어서는 Fig. 11로부터 알 수 있듯이 균열은 결합으로부터 발생하여 지그재그로, 즉 전단형으로 전파해 가는 경우가 많다. 또한 분기하는 경우도 관찰되었다. Fig. 12와 13에 SiC/6061-T6 및

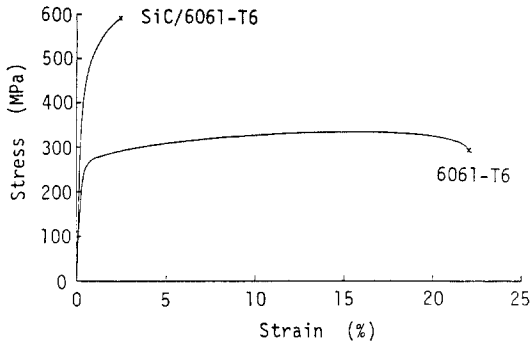


Fig. 8 Stress - Strain Curves

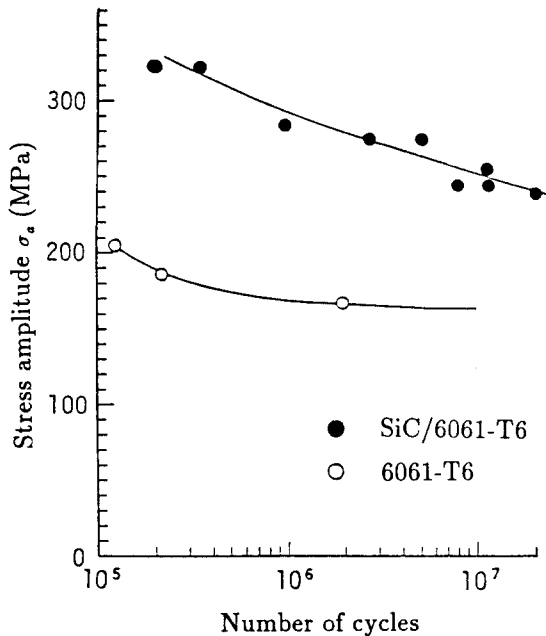


Fig. 9 S - N Curves of Plain Specimens

Table 1 Mechanical Properties

	E(MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	σ_{w0} (MPa)
6061-T6	67900	260	335	160
SiC/6061-T6	114800	467	595	250

E : Young's Modulus

$\sigma_{0.2}$: 0.2% Proof Stress

σ_B : Ultimate Tensile Strength

σ_{w0} : Fatigue Strength at 10^7 for Plain Specimen



N=0

Fig. 10a



$N = 3.9 \times 10^5$



$N = 1 \times 10^6$

Fig. 10a

6061-T6의 균열전파곡선을 나타낸다. Fig. 14에 SiC/6061-T6 및 6061-T6의 주균열길이가 상대반복수와의 관계를 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이, SiC/6061-T6의 경우는 전수명의 대부분이 균열길이가 0.1mm 정도까지 도달하는데 소비되지만, 6061-T6의 경우는 비교적 빠른 시기

에 0.1mm 정도의 균열크기로 성장하며, 전수명의 대부분은 그 이후의 균열전파 수명에 소비된다는 것이 특징이다.

Fig. 15은 SiC/6061-T6와 6061-T6노치재의 S-N곡선을 나타낸 것이다. 10^7 회의 반복에 대해서도 견디어 낸 미파단 시험편의 노치저를 광학

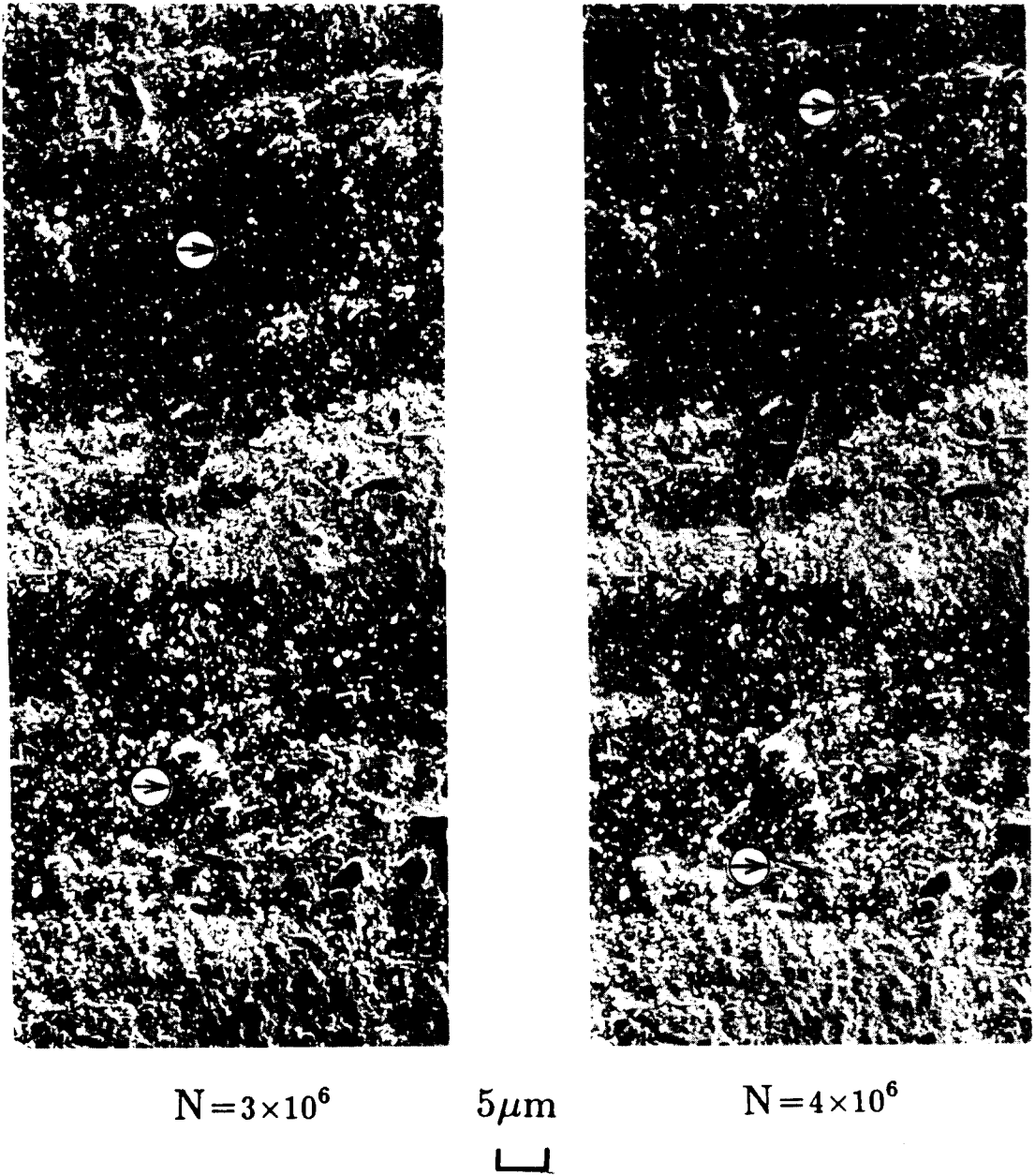


Fig. 10a Crack Initiation and Propagation Processes for the SiC/6061 · T6

현미경으로 관찰한 결과, 6061-T6는 $\rho=0.1$, 0.3mm, SiC/6061-T6는 $\rho=0.1$ mm의 노치재에 있어서 노치저전주에 걸쳐서 정류균열이 인정되었다.

Fig. 16에 균열발생에 대한 한계응력 σ_{w1} 과 정류균열이 존재하는 범위에 있어서 파괴에 대한 한

계응력 σ_{w2} 를, 응력집중계수 K_t 에 대해 정리한 것을 나타낸다.

여기서 σ_{w1} 은 평활재의 피로한도에 인정되는 피로피해와 같은 정도의 피로피해가 10^7 회 반복한 후에 인정되는 응력으로 해야 하지만, 본 금속기복합재료의 경우는 그 확인이 곤란했기 때문에, 여기

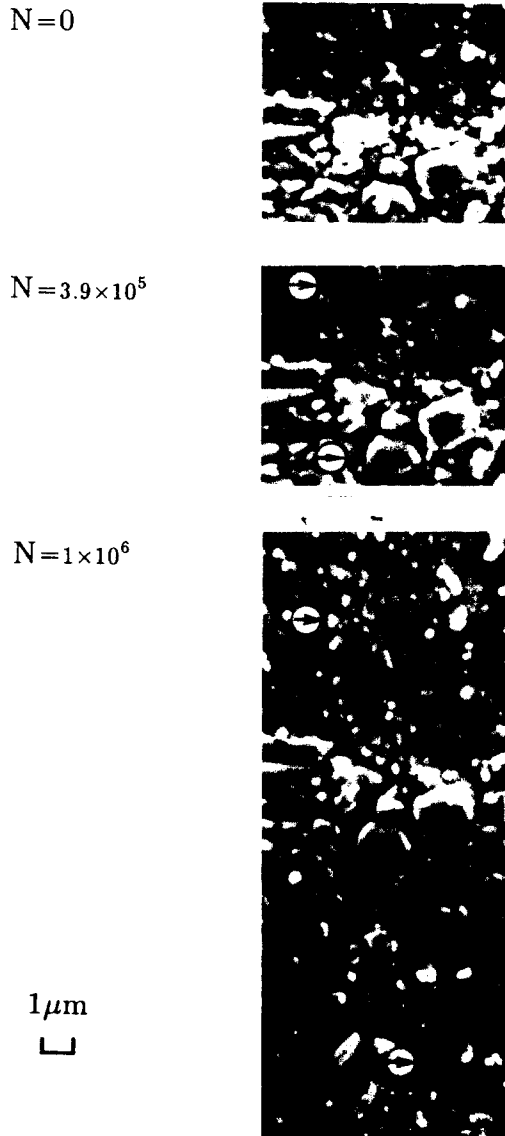


Fig. 10 Enlargement of Part □ in Fig. 10(a)

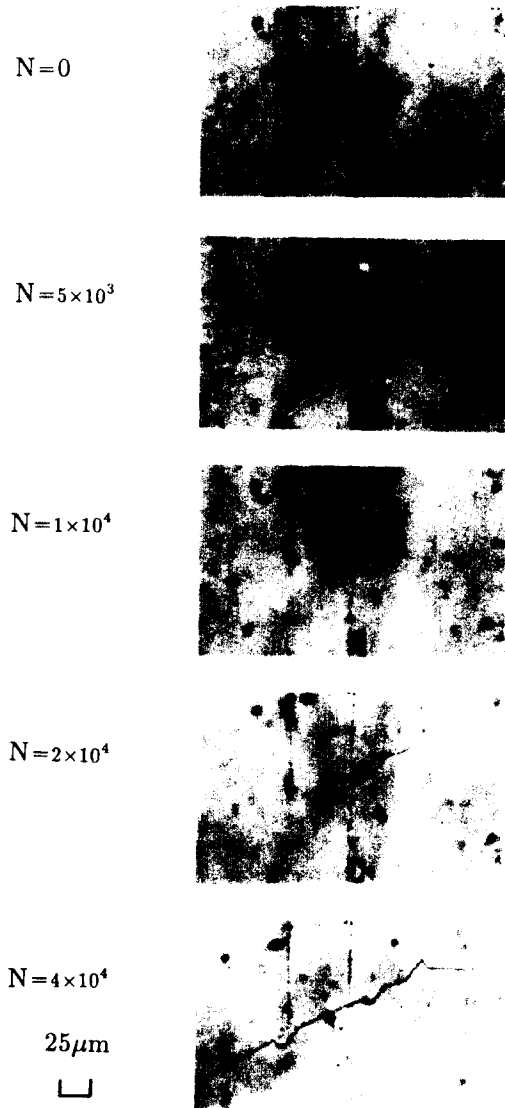


Fig. 11 Crack Initiation and Propagation Processes for the 6061 - T6

Table 2 The Values of Stress Concentration Factors at a Notch Root

Symbols	ρ (mm)	K_t
○ ●	20	1.04
▽ ▼	0.6	1.86
□ ■	0.3	2.39
△ ▲	0.1	3.82

○ △ □ ▼ : 6061 - T6

● ▲ ■ ▼ : SiC/6061 - T6

서는 10⁷회에 0.1mm 정도의 균열이 인정되는 응력을 택했다. σ_{w2} 는 10⁷회 후에 노치저의 거의 전원 주에 균열이 인정되는 동시에 파단하지 않는 최대의 응력으로 정의했다. Fig. 16의 결과를 선형노치 역학의 개념에 근거하여 재정리하면 Fig. 17과 같이 된다. Fig. 17로부터, SiC/6061-T6는 6061-T6에 비해 σ_{w1} 과 σ_{w2} 의 분기점에서의 노치반경 ρ_0 가 작다(SiC/6061-T6의 경우 $\rho_0 \cong 0.2\text{mm}$,

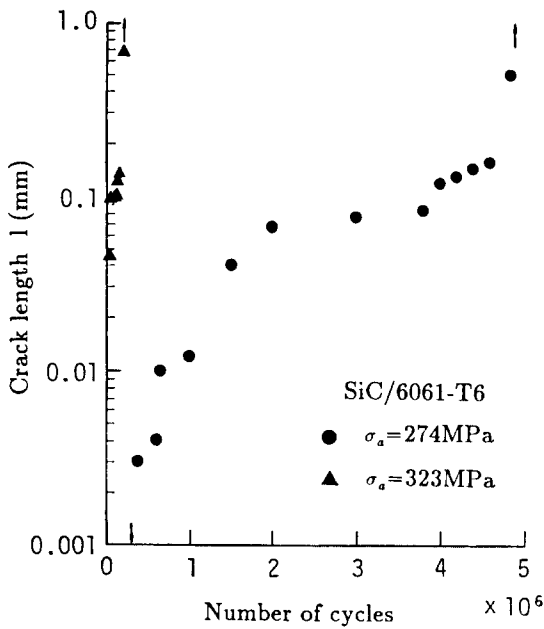


Fig. 12 Fatigue Crack Growth Curves of SiC/6061-T6

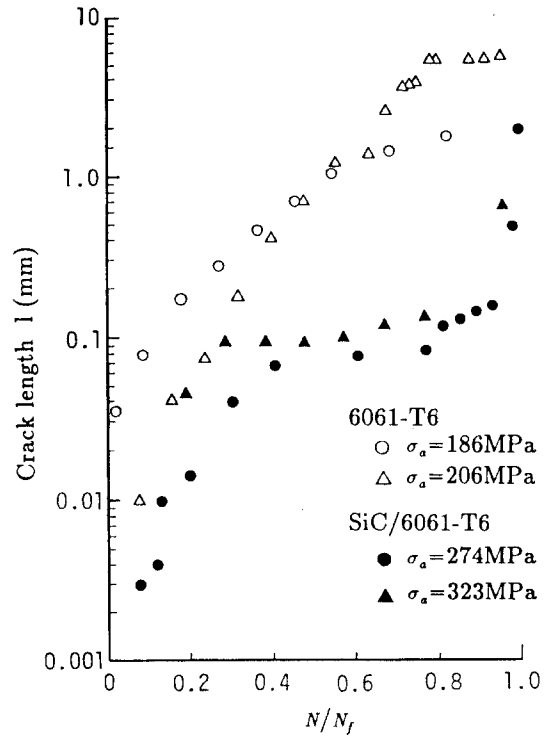


Fig. 14 Relation between Crack Length l and Relative Number of Cycles N/N_f

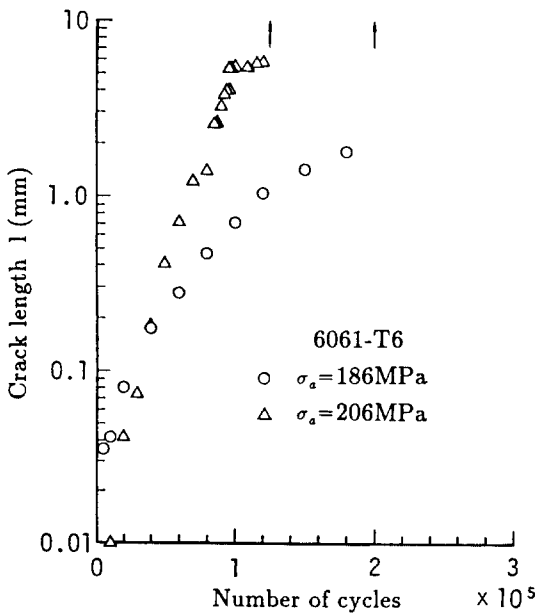


Fig. 13 Fatigue Crack Growth Curves of 6061-T6

6061-T6의 경우 $\rho_0 \cong 0.6\text{mm}$ 는 것을 알 수 있다.

Fig. 18에 SiC/6061-T6 및 6061-T6의 $K_t \sigma_{w1}$ 을 다른 철강재료의 값과 비교하여 나타낸 것이다.

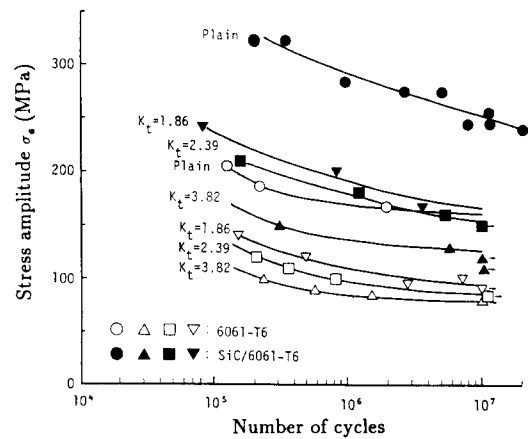


Fig. 15 S-N Curves of the Notched Specimens

σ_{w1} 에 관해서 6061-T6가 노치에 민감하며, SiC/6061-T6가 노치에 둔감한 것 같이 보인다. 그러나, SiC/6061-T6의 경우, 노치반경이 어느정도 이하로 작게 되면, $K_t \sigma_{w1}/\sigma_{w0}$ 가 거의 일정하게 되고 있다. 이것은 이 부분에서는 노치반경의 대소에

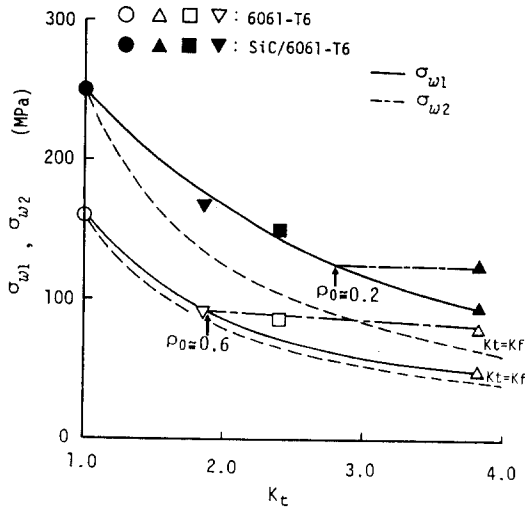


Fig. 16 Relation between σ_{w1} or σ_{w2} and K_t

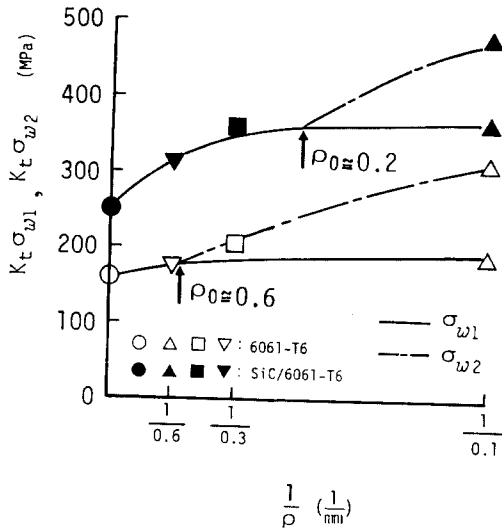


Fig. 17 The Plot of $K_t\sigma_{w1}$ or $K_t\sigma_{w2}$ against $1/\rho$

의존하지 않고 $K_t\sigma_{w1}$ 이 일정하게 되어서 노치반경이 작을때의 응력분포와 노치반경이 클 때의 응력분포가 Fig. 19와 같이 되는 것을 의미한다. 즉 이 부분에서는 균열의 발생이 점발생적(Fig. 10)으로써 최대탄성응력만에 의해 결정되고 있기에 노치에 대해 민감하다는 것을 나타내고 있다. Fig. 10의 결과로부터도 알수 있듯이 SiC/6061-T6의 균열발생은 점발생적으로, 노치에 대해 민감하게 된다고 사료되지만, 본 실험의 결과(Fig. 18)로

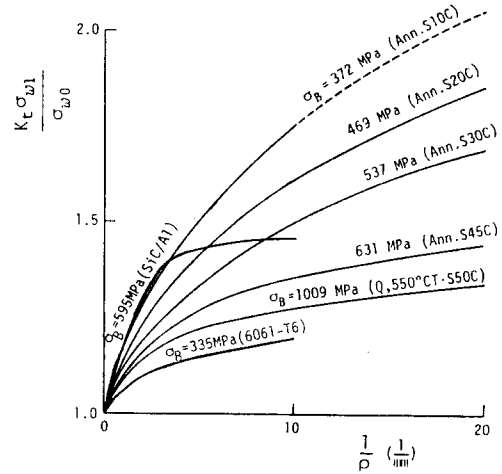


Fig. 18 Relation between $K_t\sigma_{w1}/\sigma_{w0}$ and $1/\rho$

부터 알 수 있듯이, 둔감하게 되고 있는 것은 통계적 인자에 의해 무딘 노치재의 피로한도가 적은 값을 나타내었기 때문이라 사료된다. 따라서, 일반적으로 사용하는 피로강도에 그다지 통계적인자를 포함하지 않는 철강재료에서는 Fig. 18은 마스터커브로서 사용할 수 있지만, 본 금속기복합재료와 같이 통계적인자가 크게 영향을 미치는 재료의 경우는 사용시 주의를 요한다. 이 사실은 본 금속기복합재료의 피로수명의 대부분이 균열길이가 약 100 μ m까지 성장하는 데에 소모되기 때문에, 사용중의 보수관리가 어려우므로 사용상 특히 주의를 해야만 할 것이다.

4. 결 론

탄화규소 휘스커섬유강화복합재료(SiC/6061-T6)의 평활재 및 노치재를 이용하여 회전굽힘피로시험을 행하고 시험편 표면의 레프리카에 의한 연속관찰과 선형노치역학의 개념에 근거한 정리를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 휘스커섬유강화복합재료에는 휘스커섬유가 풍부한 영역과 휘스커섬유가 빈약한 영역이 층상으로 존재하며, 피로균열은 그러한 부분의 경계부의 휘스커端(Whisker fiber end)에서 발생한

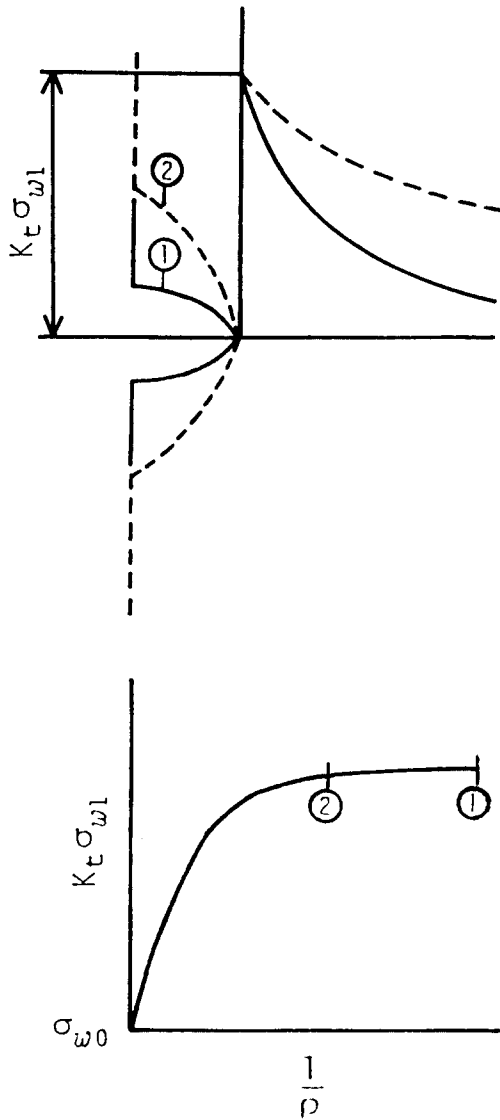


Fig. 19 Explanation Diagram

다. 한편, 매트릭스인 알루미늄합금(6061-T6)에 있어서 균열은 결함으로부터 발생하며 전단형으로 전파하여 간다.

(2) 휘스커섬유강화복합재료의 경우, 균열발생이 점발생적(Point initiation type)이며(Fig. 10), 노치에 대해 민감하다. 그러나 $K_t \sigma_{w1} / \sigma_{w0} - 1/\rho$ 의 관계에서 노치에 대해 둔감한 것으로 나타난 것은 통계적인자에 의해 평활재의 피로한도가 낮게 나타나고 있기 때문이다.

(3) 선형노치역학(Linear Notch Mechanics)의 개념은 노치를 갖는 금속기 복합재료의 피로강도 평가에 대단히 유효했다.

參考文獻

- 1) A. P. Divecha et al., "Silicon Carbide Reinforced Aluminum - A Formable Composite" J. Metals (1981), 12.
- 2) K. Oguchi et al, "Properties of SiC Whisker - reinforced Aluminum Alloy Composites", Kobe Steel Engng, 37 - 3(1987), 31.
- 3) S. V. Nair et al., "SiC - Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites" Metals, 30 - 6(1985), 275.
- 4) H. Fukunaga et al., "Preparation and Mechanical Properties of Whisker Reinforced Aluminum Composites" J. Soc. Mater. Sci., 34 - 376(1985), 64.
- 5) W. A. Logadon and P. K. Liaw, "Tensile, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Properties of Silicon Carbide Whisker and Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites" Eng. Fract. Mech., 24 - 5(1986), 737.
- 6) T. Christman and S. Suresh, "Effects of SiC Reinforcement and Aging Treatment on Fatigue Crack Growth in an Al - SiC Composite" Mater. Sci. and Eng., A 102(1988), 211.
- 7) T. Hattori and M. Sakai, "Mechanical Properties of SiC Whisker Reinforced Aluminum Alloy Matrix Composite" Mitsubishi Juko Giho, 25 - 4 (1988), 357.
- 8) K. Hirano and H. Takizawa, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics of Whisker Reinforced Metals" Trans. Jpn Soc. Mech. Eng., 55 - 511(1989), 373.
- 9) K. Hirano and D. Nakazawa, J. K. Shang et al, "Role of Silicon Carbide Particles in Fatigue Crack Growth in SiC - Particulate - reinforced Aluminum Alloy Composites", Mater. Sci. and Engng, 102(1988), 181. Trans. Jpn Soc. Mech. Eng., 55 - 520(1989), 2427.
- 10) C. Masuda and Y. Tanaka, "Fatigue Fracture Mechanisms for SiC Whiskers and SiC Particulates Reinforced Aluminum Composites" Iron

- and Steel, 75(1989), 1753.
- 11) K. Hirano, "Determination of Fracture Toughness for Whisker - Reinforced Aluminum Alloy Matrix Composite Using Chevron - Notched Specimen" JSME Int. Journal, 34 - 2(1991), 234.
 - 12) C. Masuda et al., "Effect of Volume Fraction on Fatigue Strength of SiC Whisker or SiC Particle Reinforced Aluminum Composites" J. Jpn Soc. Compo. Mater., 17 - 2(1991), 66.
 - 13) S. S. Yau et al, "Fatigue of Metal Matrix Composite Materials", Mater. Sci. and Engng, 82 (1986), 45.
 - 14) F. Ordway et al, "Silicon Carbide Whisker Metal Matrix Composites", AFML - TR - 71 - 252, Wright Paterson Air Force Base, Ohio, March (1972).
 - 15) H. Nisitani and H. Hyakutake, "Condition for Determining the Static Yield and Fracture of a Polycarbonate Plate Specimen with Notches", Eng. Fract. Mech., 22 - 3(1985), 359.
 - 16) H. Nisitani, "Effects of Size on the Fatigue Limit and the Branch Point in Rotary bending Tests of Carbon Steel Specimens" Trans. Jpn Soc. Mech. Eng., 11 - 48(1968), 947
 - 17) H. Nisitani, "Linear Notch Mechanics as an Extension of Linear Fracture Mechanics" Proc. Inter.Conf. on Role of Fract. Mech. in modern Technology, Edited by G. C. Sih and H. Nisitani, Elsevier, Amsterdam, (1987), 23.
 - 18) H. Nisitani (Edited by), Fatigue Strength, (1986), Ohm press.
 - 19) 西谷弘信, 村上敬宜, "電解研磨したSiOC切欠き材のねじり疲労と曲げ疲労", 日本機械學會論文集, 35 - 275(1969), 1389.
 - 20) 西谷弘信, 遠藤正浩, "疲労における切欠き効果の統一的取扱い", 日本機械學會論文集, 51 - 463 (1985), 784.
 - 21) 金 允海, 村上理一, 西谷弘信, "中央切欠きをもつ GFRPの引張りにおける破壊", 日本機械學會論文集, 56 - 523(1990), 582.