

## 금속 재료의 피로 균열 전파 속도( $da/dN$ ) 평가를 위한 변형을 확대 계수의 유효성 검토

### Evaluation of Fatigue Strain Intensity Factor on Fatigue Crack Propagation Rate( $da/dN$ )

유재환\*·최재강\*\*·손종동\*\*\*

Jae-Hwan Yoo · Jae-Gang Choi · Jong-Dong Son

#### ABSTRACT

Fatigue fracture is the cyclic fracture phenomena at a very small local area near a crack tip. Therefore, the detailed quantitative experimental analysis about local cyclic strain distribution near a crack tip is prerequisite in order to make an effective parameter able to account for fatigue fracture problems. However, there are few reports on detailed quantitative experimental analysis of a local cyclic strain distribution near a crack tip, because of experimental difficulties.

In this study, the distribution of local fatigue strains near a fatigue crack tip was in detail studied using by fine dot grid strain measurement method.

From these results, a single parameter, which characterizes local fatigue strain field, was proposed. In addition, this parameter was applied to evaluate the fatigue crack propagation rate.

#### 1. 서 론

기계나 구조물의 파괴형태는 돌발적인 취성파괴 및 마모손상 등도 있지만 피로파괴가 파괴형태의 대부분을 차지하고 있다. 따라서, 피로강도를 정확히 추정하는 것은 강도부재의 설계에 대단히 중

요한 문제이다.

또한 공업의 급속한 발달과 더불어 기계 및 구조물의 대형화, 경량화 그리고 사용재료의 고급화와 사용조건이 가속화 등이 요구되어지고 있기 때문에, 이들 기계 및 구조물 등의 안전성의 확보를 위하여 기계공학적인 측면뿐만 아니라 피로강도가

\* 세명대학교 산업안전공학과

\*\* 동명전문대학 기계과

\*\*\* 동명전문대학 산업안전과

큰 재료 개발 및 평가 등 재료공학적인 측면까지도 파괴공학적 수법을 이용한 피로강도 평가가 수행되고 있다. 최근, 피로균열거동에 관한 파괴역학적 파라메타의 다양한 이론적 및 실험적 연구가 활발히 수행되고 있으며 소성변형율의 거동과 피로반복회수에 의한 평가 또는 Manson-Coffin식을 이용한 평가방법이 널리 활용되고 있다.

현재, 피로균열거동에 관해서 사용되고 있는 선형파괴역학 파라메타인  $K$ 는 Paris가 제안한 피로균열 전단속도식을 시작으로 Elber가 제안한 유효응력확대계수  $K_{eff}$  또는  $K_{th}$  이론 등으로 발전해서  $K$ 가 균열거동에 관해서 유효한 역학적 파라메타로서 정착되고 있다.

그러나 변동하중에 의한 전단가속 현상 및 평균응력의 영향, 또는 잔류균열현상 등 피로균열거동에는  $K$ 로써 단순히 설명하기 어려운 부분도 많이 있고 파라메타  $K$ 를 그대로 피로균열거동에 관한 파라메타로서 적용하기는 상당한 문제점이 있다.

이러한 이유 때문에 대규모 응력상태에서는 Rice에 의해서 제안된 탄소성 파괴역학 파라메타  $J$ 적분이 사용되고 있지만, 피로와 같이 재하과정을 포함한 경우에는  $J$ 적분의 정의에 위배되기 때문에  $J$ 적분을 피로거동에 관한 파라메타로서 적용하는 것은 근본적인 문제가 있다. 이와 같이 종래의 파괴역학적 파라메타 ( $K$ ,  $J$ )를 피로균열거동에 관한 문제에 파라메타로서 적용할 때 많은 문제점을 지적할 수 있으나 가장 큰 이유로서는  $K$ ,  $J$ 가 균열선단 국소영역에서의 응력상태를 무시하고 유도된 역학량이라는 점이다.

즉, 실제로 피로파괴에 직접 기여하는 균열선단의 국소영역은 파괴과정이 대단히 복잡하므로 이론적 해석으로는 응력상태를 명확하게 구하는 것이 어렵기 때문에, 이 영역을 Black Box로서 취급하고 무시하였다.

따라서, 피로변형을 거동을 실험역학적방법으로 피로파괴문제를 명확히 해결하기 위하여 가장 선행되어야 할 균열선단 국소영역에서의 응력 또는 변형을 거동을 명확하게 밝혀 내는 것이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구는 島田에 의하여 개발된 피로균열선단의 국소영역에서의 변형을 상태를 실 시각적으로 정도높게 측정할 수 있는 새로운 변형을 측정법(Strain measurement method)을 이용하여,

균열선단의 국소영역에서의 피로변형율상태를 밝혀내고 이를 기초로 하여 변형율장을 대표할 수 있는 피로변형률확대계수  $\Delta A$ 를 이용하여 피로균열 전단속도를 평가하고 피로전과속도 파라메타로서의 유용성을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시료 및 시험편

본 시험에 사용한 시료는 A12024-T3 합금이다. 그 화학적성분은 Table 1과 같으며 Table 2는 시료의 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of material (wt. %)

Element Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Al 2024-T3	0.07	0.14	4.06	6.67	1.27	0.01	0.06

Table 2 Mechanical properties of material

Item Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Elongation (%)
Al 2024-T3	460.1	500.2	73.3	13.5

본 시험에 사용한 피로시험편 형상은 CT형이며, 피로 예균열은 전기유압식 피로시험기를 이용해서 노치선단에서 약 4mm를 도입하였다.

균열선단의 국소영역 내에서 피로변형율을 보다 정확히 측정하기 위하여 피로 예균열을 도입한 후 시험편 표면을 경면으로 연마하여 사진전사법 및 전해연마법을 이용하여 피치 25.4  $\mu\text{m}$ 의 원형격자를 시험편 표면에 약 2~3  $\mu\text{m}$  및 지름 5  $\mu\text{m}$ 의 깊이로 새겨 넣었다.

이 방법에 의하여 시험편 표면에 직접 새겨진 미소원형격자는 균열근처에 있어서는 소성변형이 대단히 큰 영역에서도 격자가 파괴되지 않고 시험편 표면의 동적인 소성변형거동을 충실히 측정할 수 있는 것을 확인했다.

### 2.2 피로시험장치 및 시험조건

피로시험은 전기유압식 피로시험기(용량 10tonf)로 실행했다. 그리고 시험편 표면의 균열선단 근방의 변형격자를 연속적으로 촬영하기 위해

전후좌우, 상하방향으로 이동 가능한 미동테이블에 현미경을 장착하고 그 위에 자동 노출카메라가 부착된 장치를 이용하였다. 또한 피로균열의 개폐 구거동은 탄성 컴플라이언스법에 따라 시험편 표면의 균열진전 예상경로의 직상 약 1mm 위치에 크랙 게이지를 부착시켜 이를 고감도 X-Y 기록계에 연결하여 측정하였다.

피로시험은 하중제어조건에서 상온대기중에서 실시했다. 시험편표면의 균열선단 근방의 변형미소격자의 촬영은 피로시험의 개시부터 피로균열이 약 0.2mm~0.3mm 진전할 때의 각 사이클에서 1 사이클중 최대하중과 최소하중에서 촬영배율 50배, 35mm 네가티브 필름으로 연속촬영하였다. 변형된 미소격자를 직접촬영하기 위해서 주파수를 0.05Hz로 변환시켰다.

촬영한 네가티브 필름을 이용해서 균열선단 국소영역에서의 피로변형장을 미소원형격자 화상처리장치를 이용하여 정량적으로 해석하였다.

### 2.3 미소원형격자 화상처리장치

균열선단의 피로변형률( $\Delta \epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ ) 분포는 각 사이클중의 최대하중과 최소하중에서의 격자점 중심좌표를 측정한 후, 이들 격자점 중심좌표로부터 구한 변위(u, v) 분포로부터 계산하였다. 본 연구에서 직교격자 형태를 사용하지 않고 미소원형격자를 사용한 이유는 피로변형을 측정정도의 개선과 측정시간의 단축에 목적이 있었고, 목적에 의한 좌표측정 방법을 개선하기 위하여 photo sensor를 이용하였다. 미소원형격자 화상처리장치는 personal computer에 의하여 제어구동되는 step motor 및 screen 중앙에 photo sensor가 부착되어 있는 확대투영기로 구성되어 있다.

미소원형의 중앙좌표의 결정방법은 먼저 네가티브 필름상의 임의의 점을 원점으로 하여 주좌표계(X, Y)를 정하고, 다음에 O<sub>1</sub>을 원점으로 하는 국부좌표계(s, t)를 갖는 주사영역을 설정한 후, 원점 O<sub>1</sub>을 주사개시점으로 하여 주사를 실시하여 미소원형격자점 주위의 휘도분포를 측정한다. 이때 O<sub>1</sub>점의 주좌표계의 좌표치(X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>)는 이미 수동으로 측정하여 기억시켜 놓은 상태이므로 personal computer에 의하여 구동되는 step motor를 이용하여 X-Y stage를 이동시켜 O<sub>1</sub>점이 photo sensor의 직하가 되도록 한다. 그리고 설정되어진 휘도측정

간격에 따라 지정된 주사영역을 주사해서 얻어진 격자점 주변의 휘도분포를 해석하여 중심점 G(s<sub>1</sub>, t<sub>1</sub>)을 구한다. 그 후 수동계측에 의하여 기억되어진 주좌표계의 좌표치(X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>)에 G(s<sub>1</sub>, t<sub>1</sub>)를 더한 좌표치(X<sub>1</sub>+s<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>+t<sub>1</sub>)을 구하면 미소격자점의 중심위치좌표를 주 좌표계로 나타낸 값이 된다. 이와 같은 방법으로 구하고자하는 전체격자점의 중심위치좌표를 측정하였으며, 중심좌표 G(s, t)를 구하는 방법은 2차함수 근사법을 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 균열선단의 피로변형장 규정인자 $\Delta A$ 의 제안

피로변형을 분포해석은 미소원형격자 화상처리장치를 이용하였다. 실험결과로 부터 각각의 피로 변형율성분의 분포형상은 다르다는 것을 알 수 있었다. 즉  $\epsilon_y$ 의 분포는 균열방향에 대하여 45°~60° 방향으로 뺏어가고 있음을 알 수 있었고, 분포형상은 균열방향에 대하여 거의 비대칭 형상을 지니고 있었다.

그러나  $\Delta \epsilon_{xy}$ 와  $\Delta \epsilon_{\theta}$ 의 분포는  $\Delta \epsilon_y$  분포에 비하여 균열전방까지 확장되어 균열방향에 대하여 70°~80°방향으로 뺏어나가고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 1은 균열의 진행방향( $\theta=0^\circ$ )에 있어서  $\Delta \epsilon_{\theta}$ 와 균열선단으로 부터의 거리  $r=60\sim 100\mu m$ 을 경계로하여 피로변형을 분포거동이 급격하게 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 즉  $r=60\sim 100\mu m$ 이내 영역에서는 피로변형율이 집중적으로 크나 그 바깥부분에서는 피로변형율이 대단히 작아지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이와같이 피로 변형율이 집중적으로 크게 되는  $r \leq 100\mu m$  내부영역을 균열선단의 피로변형장을 특징지을 수 있는 영역으로 생각하고, 이 영역내부를 주목하여 피로변형상태를 나타낼 수 있는 파라메타의 도출에 대하여 검토하였다.

일반적으로 선형과피역학에서는 균열선단의 응력장의 상태를 식(1)과 같이 응력확대계수 K를 사용하여 나타낼 수 있다. 따라서, 본 연구의 피로의 경우에도 균열선단의 피로변형장의 상태  $\Delta \epsilon(r, \theta)$ 가 기하학적 인자인 r 및  $\theta$ 에 대하여 항상 일

정한 비례관계가 있어  $f(r)$ ,  $f(\theta)$ 의 함수로 나타낼 수 있다고 가정하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma(r, \theta) = K \cdot f(\theta) \cdot r^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta \epsilon(r, \theta) = \Delta A \cdot f(\theta) \cdot f(r) \dots\dots\dots (2)$$

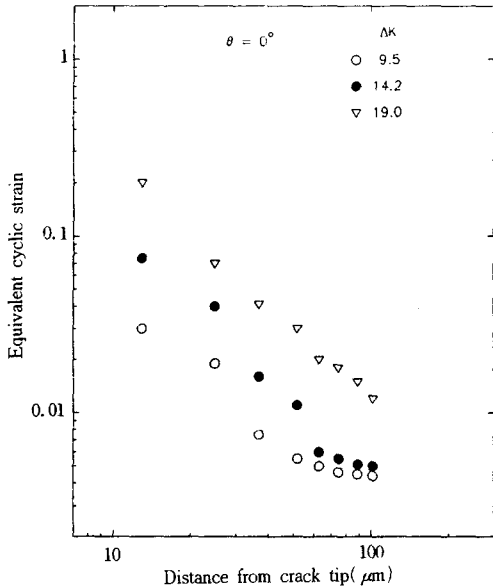


Fig. 1 Relationship between the equivalent cyclic strain and distance from the crack tip at  $\theta = 0^\circ$

여기서  $f(\theta)$ 는,  $f(r)$ 은 기하학적으로 결정되어지는 역학량이기 때문에 결국 균열선단의 피로변형장의 상태는 비례정수인 Parameter  $\Delta A$ 에 따라 일의적으로 나타내어질 수 있을 것으로 생각되어진다. 따라서 본 연구에서는 각각의 피로조건하에서 균열선단의 피로변형률 ( $\Delta \epsilon$ )과 각도  $\theta$ 와의 관계, 그리고 피로변형률 ( $\Delta \epsilon$ )과 균열선단에서부터 거리  $r$ 과의 관계에 대하여 정량적으로 검토하여 균열선단의 피로변형장의 상태를 규정할 수 있는 규정인자  $\Delta A$ 의 도출에 대하여 연구 검토하였다.

Fig. 2는 균열선단으로부터 거리  $r = 50 \mu\text{m}$ 의 일정거리에 있어서  $\Delta \epsilon_{eq}$  분포의 각도 의존성을 검토한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 data는 약간의 편차를 나타내나 피로하중에 관계없이 좌위대칭인 하나의 곡선으로 근사시킬 수 있다는 것을 알 수 있으며 이 근사곡선은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$f(\theta) = \cos(\theta/2) \cdot (1 + 3/2 \sin^2(\theta)) \dots\dots\dots (3)$$

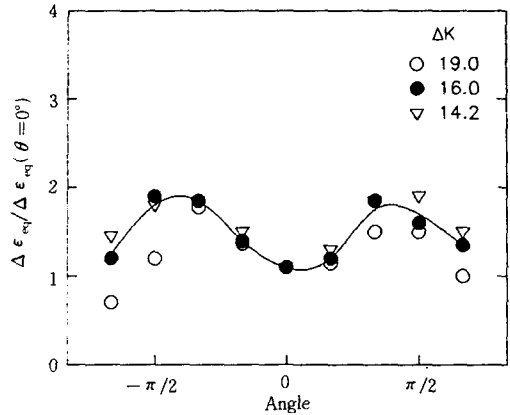


Fig. 2 Angular dependence of the equivalent cyclic strain at  $r = 50.8 \mu\text{m}$

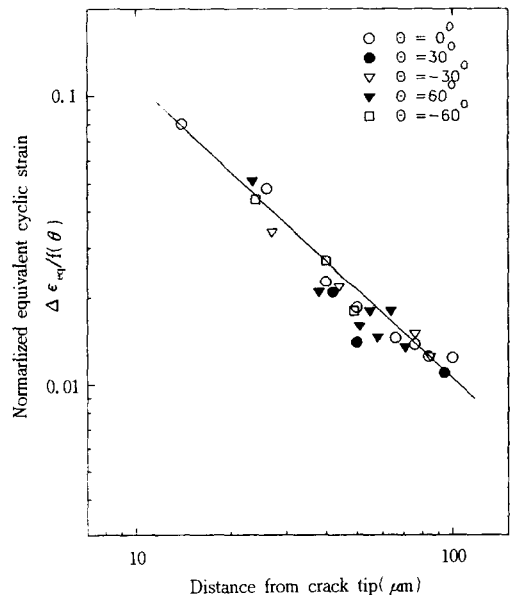


Fig. 3 Relationship between the normalized equivalent cyclic strain and distance from the crack tip

Fig. 3은 각 방향의 균열선단의 피로변형률  $\epsilon_{eq}$ 와 균열선단으로부터 거리  $r$ 과의 관계를 검토한 결과이다. 그림에서와 같이 피로변형률  $\Delta \epsilon_{eq}$ 의 분포는 각도에 관계없이 경사가  $-1$ 인 직선으로 Plot 되어짐을 알 수 있다. 따라서  $\Delta \epsilon_{eq}/f(\theta)$ 와  $r$ 와의 관계는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{eq}/f(\theta) = \Delta A \cdot r^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $\Delta A$ 는 비례정수이다.

식(4)로부터  $\Delta \epsilon_{eq}$ 는 식(5)와 같이 정리할 수 있

다.

$$\Delta \epsilon_{eq}(r, \theta) = \Delta A \cdot f(\theta) \cdot r^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

식(5)로부터 우변의  $r^{-1}$ 과  $f(\theta)$ 는 기하학적으로 결정되어지는 역학량이기 때문에 결국 균열선단의 피로변형을 집중영역내에서의 피로변형장은 비례정수  $\Delta A$ 를 구하는 것에 따라 정해지게 된다.

이상의 검토결과에 따라 균열선단의 피로변형장은 규정인자  $\Delta A$ 에 의하여 일의적으로 규정되어짐을 알았다.

### 3.2 피로변형률확대계수 $\Delta A$ 의 피로균열 전파 속도평가 파라메타로서의 유용성

Fig. 4는 피로균열 전파속도( $da/dN$ )와 응력확대계수  $K$ 의 관계를 각 응력비( $R$ )에 대하여 나타낸 것이다.  $da/dN$ 이  $R$ 에 크게 의존하는 것을 볼 수 있으며,  $R$ 이 증가하면  $da/dN$ 은 같이 증가하고 있다. 각각의  $R$ 에 대하여 Paris식의 형태로 식을 구한 결과를 Table 3에 나타내었다. 결과적으로 Log-Log 좌표상에서 데이터들의 분산이 넓으며, 이 결과로써는 전체  $R$ 에 대하여 하나의 Paris식  $da/dN=C(\Delta K)^n$ 을 이용하기에는 적당하지 않다. 이와 같은  $da/dN$ 에서의 피로균열은 균열이 닫혀 있는 경우에는 전파하지 않고, 균열이 열려 있는 동안에만 전파하기 때문이다. 따라서 이런 피로균열 전파속도 특성을 고려한 유효응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 를 이용하여  $da/dN$ 을 정리하는 것이 타당하다는 주장이 있다. 만약에  $da/dN$ 이  $\Delta K_{eff}$ 에만 의존하는 함수라면 모든  $R$ 에 대한  $da/dN$ 이 동일한 한개의 직선상에 정리될 것이다.

Fig. 5는  $da/dN$ 과  $\Delta K_{eff}$ 의 관계를  $R$ 에 대하여 정리한 것이다. Fig. 4와 비교하여 데이터의 분산이 줄고 분포밴드가 좁아졌지만, 여전히  $R$ 에 따라서 전파속도가 달라지는 현상을 보인다. 그러므로  $da/dN-\Delta K_{eff}$ 의 관계도  $R$ 에 대한  $da/dN$ 의 의존성을 해결하지 못하였으며 Paris식  $da/dN=C(\Delta K_{eff})^n$ 을 적용할 수 없다.  $R$ 에 대한  $da/dN$ 의 의존성을 해결하려는 시도는 많이 진행되고 있지만 여전히 미해결 문제로 남아있다.

Fig. 6의  $da/dN$ 과  $\Delta A$ 의 관계를  $R$ 에 대하여 정리한 것이다.  $da/dN$ 의  $R$ 에 대한 의존성은 없어지고 데이터들이 한개의 직선상에 모이는 것을 볼 수 있다. 이 결과는  $da/dN$ 이  $R$ 에 의존하지 않고  $\Delta A$

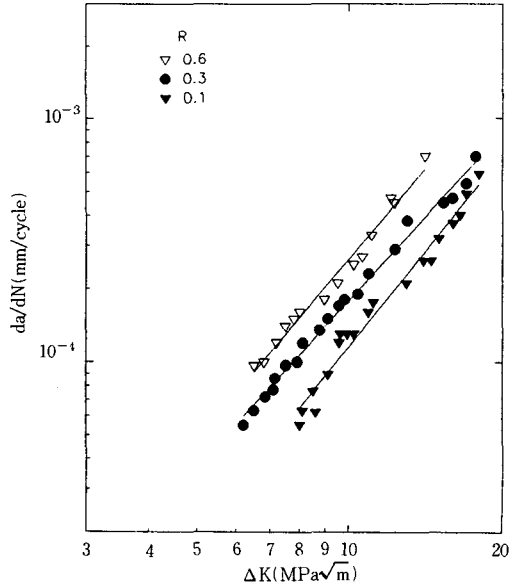


Fig. 4 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta K$  for various  $R$  values

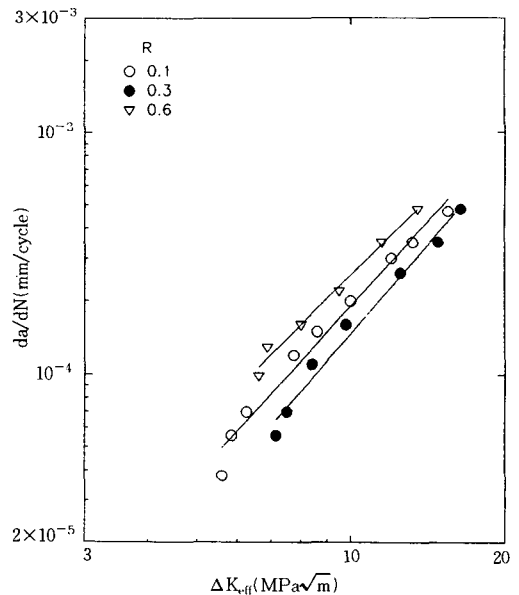


Fig. 5 Relationship between  $da/dN$  and  $K_{eff}$  for various  $R$  values

의 함수로 정리될 수 있으며  $da/dN=C(\Delta A)^n$ 의 식으로 충분히 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

그러므로  $R$ 에 관계없이  $\Delta A$ 만 있으면 위의 식

을 이용하여  $da/dN$ 을 평가할 수 있다. 실험데이터를 최소자승법을 이용하여 Paris식의 형태인  $da/dN=C(\Delta A)^n$ 의 식으로 만들면 다음과 같다.

$$da/dN=3.5 \times 10^{-3} (\Delta A)^{2.4} \dots\dots\dots (6)$$

Table 3 Calculation of  $da/dN$  with various R values

R	$\Delta K$		$\Delta K_{eff}$	
	C	n	C	n
0.1	$2.091 \times 10$	2.6	$2.944 \times 10$	2.6
0.3	$3.866 \times 10$	2.6	$4.792 \times 10$	2.6
0.6	$5.523 \times 10$	2.6	$5.523 \times 10$	2.6

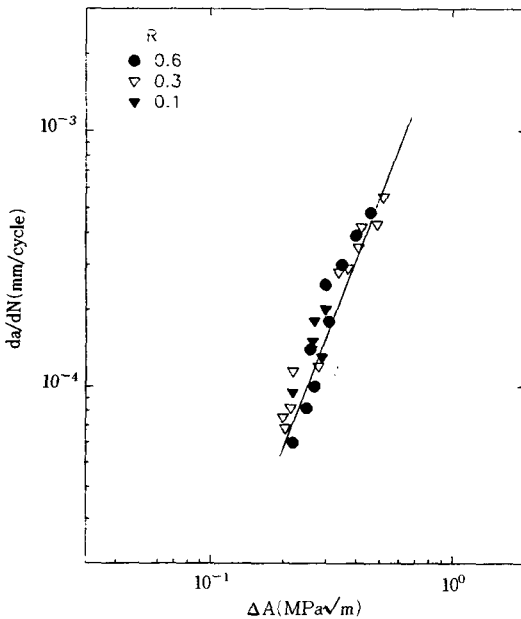


Fig. 6 Relationship between  $da/dN$  and  $\Delta A$  for various R values

#### 4. 결 론

본 연구는 Al 2024-T3에 대하여 피로균열거동을 정확히 나타낼 수 있는 피로변형확대계수  $\Delta A$ 를

도출할 목적으로 미소원형격자 변형율측정법을 고안하여 균열선단의 국소영역에서의 피로변형율분포에 대하여 정량적으로 시험검토하였으며, 또한 피로변형율확대계수  $\Delta A$ 를 피로균열 전파속도평가 파라메타로서 검토하여 본 결과는 다음과 같다.

- 1) 피로변형을 확대계수  $\Delta A$ 는 피로하중에 관계없이 균열선단의 피로변형율장을 일의적으로 나타낼 수 있는 파라메타로서 유효하다.
- 2) 피로균열 전파속도는  $\Delta K$ 나  $\Delta K_{eff}$ 를 이용하여 정리할 경우에는 R에 의존하지만, 새로운 파라메타인 피로변형을 확대계수  $\Delta A$ 를 이용하여 정리할 경우에는 R에 관계없이 한 직선으로 정리될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) J. R. Rice, Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue, ASTM STP 415, pp. 247~311, 1967.
- 2) J. R. Rice and G. F. Rosengren, Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardning material, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16, pp. 1~12, 1968.
- 3) J. W. Hutchinson, Plastic stress and strain fields at a crack tip, J. Mech Phys, Vol. 16, pp. 337~347, 1968.
- 4) T. Furuya and H. Shimada, Fatigue crack initiation from notch root(Local strain damage accumulation process on crack initiation).
- 5) T. S. Kang and H. W. Liu, Fatigue crack propagation and cyclic deformation at a crack tip, J. Fracture, Vol. 10, pp. 201~222, 1974.
- 5) D. L. Davidson and J. Lankford, Fatigue crack tip plastic strain in high strength aluminum alloy J. Fatigue of Eng. Materials and Structure, Vol. 3, pp. 289~303, 1980.