

〈論 文〉

## 微小圓形格子變形率 測定法을 利用한 龜裂先端的 局所疲勞變形率分布

朴榮哲\* · 吳世旭\* · 金廣泳\*\*

(1990년 9월 22일 접수)

### The Local Fatigue Strain Distribution Near a Crack Tip by Using Fine Dot Grid Strain Measurement Method

Young Chul Park, Sae-Wook Oh and Kwang Young Kim

**Key Words:** Crack Tip(龜裂先端), Local Area(局所領域), Fatigue Strain Field (疲勞變形率場), Fatigue Strain Intensity Factor(疲勞變形率擴大係數), Fine Dot Grid Strain Measurement Method(微小圓形格子變形率測定法)

#### Abstract

We have carried out a preliminary study to search for the new fracture mechanics parameter which can effectively estimate the fatigue life. In this study, the distribution of local fatigue strains near a fatigue crack tip was detailedly revealed using by fine dot grid strain measurement method. From these results, a single parameter ( $\Delta A$ ), which characterize local fatigue strain field, was nearly proposed by the authors.

#### 1. 序 論

현재 공업의 급속한 발달과 더불어 기계 및 구조물의 대형화, 경량화, 그리고 사용재료의 고급화가 가속화 되어짐에 따라 파괴역학적 수법을 이용한 보다 정확한 피로수명평가법의 확립이 중요한 과제로 되고 있다. 따라서 피로수명의 평가에 적용할 수 있는 파괴역학적 파라미터에 대한 이론적<sup>(1~3)</sup> 및 실험적 연구<sup>(4~7)</sup>가 활발히 행하여지고 있다.

그러나 종래의 파괴역학적 파라미터( $\Delta K$ ,  $\Delta J$ )는 피로수명평가의 適用範圍에 제한이 있으며(大規模降伏條件 또는 小規模降伏條件 등), 실제 정해진 조건내에서도 비선형형상(平均應力, 變動荷重의 영

향) 등이 보여지는 많은 문제점을 내포하고 있으므로 아직 피로를 普遍妥當性 있게 평가할 수 있는 파라미터가 확립되어 있지 않은 실정이라 할 수 있다. 이와같이 종래의 파괴역학적 파라미터( $\Delta K$ ,  $\Delta J$ )로써 피로파괴문제를 정리할 때 많은 문제점을 나타내는 원인은 여러가지를 들 수 있으나, 가장 큰 원인으로서는  $\Delta K$ ,  $\Delta J$ 가 假定을 前提로 하여 유도되어졌다는 것이다.

실제로 피로파괴에 直接寄與하는 龜裂先端的의 局所領域은 파괴과정의 대단히 복잡하므로 假定을 前提로 하는 이론적 해석으로써는 變形率狀態를 명확하게 나타내는 것이 어렵기 때문에 이 영역을  $\Delta K$ ,  $\Delta J$ 에서는 블랙박스(black box)로써 무시하고 있다. 그러나 피로파괴는 극히 局所的인 성격이 강한 동적인 파괴현상이기 때문에 假定이 성립되는 疲勞龜裂 주위의 巨視的인 응력 또는 變形率狀態가 중요한 것이 아니라 결국 실제로 피로파괴가 일어

\*정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*정회원, 한국기계연구소

나는 프로세스 구역에서의 응력 또는 變形率狀態가 중요하다고 할 수 있다.

따라서 이론적 해석에서는 블랙박스의 영역으로 무시되고 있는 실제 피로파괴가 직접 일어나고 있는 龜裂先端的의 局所領域에서의 變形率舉動을 實驗力學的으로 명확하게 밝혀 내는 것이 필요하다. 그 결과, 피로파괴 기구의 해명은 물론 疲勞龜裂 舉動을 보편적이고 일관성 있게 설명할 수 있는 有效力學的의 파라미터를 확립할 수 있을 것으로 생각되어진다.

본 연구에서는 이러한 諸般 문제점들을 보완하여 疲勞龜裂 先端的의 局所領域에서의 變形率狀態를 실시간적으로 정도 높게 측정할 수 있는 새로운 變形率 측정법인 微小圓形格子變形率測定法(fine dot grid strain measurement method)을 이용하였다. 그 결과, 龜裂先端的의 局所領域에서의 疲勞變形率狀態를 명확히 밝혀냄은 물론 이를 기초로 하여 局所 疲勞變形率場을 대표할 수 있는 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 를 提案하였으며 그 유효성에 대하여 명백히 하였다.

2. 實驗方法

2.1 試料 및 實驗方法

본 실험에 사용한 試料는 SNC 631합금강과 Al 2024-T 6합금이다. 그 화학성분은Table 1과 같다. SNC 631합금강은 본 실험의 목적에 따라 Table 2와 같이 2종류 다른 熱處理를 실시하여 試料로 하였다. Table 3은 각 試料의 기계적 성질을 나타낸다.

Fig. 1은 피로시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 疲勞豫龜裂은 피로시험기를 이용하여 노치先端으로부터 약 4 mm도입하여  $a/w$ 가 0.5가 되도록 하였다.

Fig. 2는 微小圓形格子의 사진을 나타내고 있다. 龜裂先端的의 局所領域內에서 疲勞變形率을 보다 정확히 측정하기 위하여 疲勞豫龜裂을 도입한 후 試驗片표면을 鏡面으로 연마하여 寫眞轉寫法 및 電解 研磨法을 이용하여 피치  $2.5\mu\text{m}$  및 지름  $5\mu\text{m}$ 의 圓形格子를 試驗片 표면에 약  $2\sim 3\mu\text{m}$ 의 깊이로 새겨 넣었다.

Table 1 Chemical composition of material(Wt %)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	
Al 2024-T6	0.07	0.14	4.06	6.67	1.27	0.01	0.06	
Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SNC 631	0.29	0.22	0.51	0.02	0.02	0.06	0.59	0.70

Table 2 Heat treatment conditions of SNC 631 alloy steel

No.	Heat treatment condition	
	Quenching	Tempering
SNC 631-A	1050°, 1hr, O.Q	600°C, 1hr, O.C
SNC 631-B	1050°, 1hr, O.Q	200°C, 1hr, A.C

Table 3 Mechanical properties of materials

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation (%)
Al 2024-T6	460.1	500.2	73,300	13.5
SNC 631-A	824.0	915.2	198,000	19.4
SNC 631-B	1400.2	1723.5	201,000	12.6

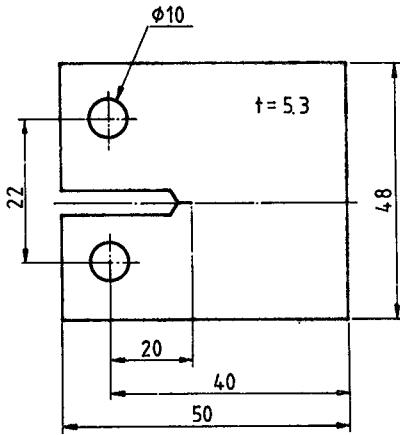


Fig. 1 Specimen geometry and Its dimension (mm)

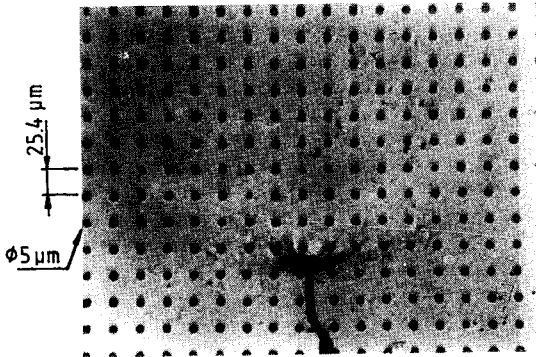
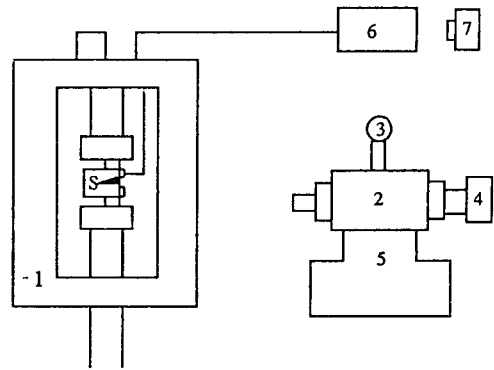


Fig. 2 Photograph of fine dot grid

피로실험은 荷重制御條件에서 應力比 0.1, 周波數 0.05Hz로 하여 상온, 대기중에서 실행하였다.

Fig. 3은 실험장치의 구성도이다. 試驗片表面의 龜裂先端的 局所領域에 변형된 微小圓形格子의 연속적 撮影에는 X-Y-Z축의 이송이 가능한 치구위에 자동노출카메라가 붙은 光學顯微鏡을 組合한 장치를 이용하였다. 精確한 疲勞變形率을 측정할 목적으로 寫眞撮影을 위하여 피로실험을 정지하는 일 없이 실험개시로부터 종료까지 각 사이클마다 1사이클중 최대하중 및 최소하중에서 撮影倍率 50배로 35mm 필름에 실시간적으로 連續撮影하였다. 이와 같이 撮影한 變形微小格子의 네가티브필름을 이용하여 龜裂先端的 局所領域에서의 疲勞變形率場에 대하여 정량적인 해석을 하였으며, 이때 疲勞變形率場 해석에는 微小圓形格子變形 측정법을 이용하였다.



1. Electro-hydraulic fatigue tester(Instron 1331, 10tonf)
2. Optical microscope
3. Light source
4. Camera
5. X-Y-Z Stage
6. Ultrasonic tester
7. Camera
- S. Specimen

Fig. 3 Schematic equipment of experimental system (optical system)

## 2.2 微小圓形格子變形率測定法

Fig. 4는 自動畫像計測시스템의 概略圖를 나타내고 있다. 自動畫像計測시스템은 측정정도를 보다 향상시켜 局所領域의 疲勞變形率場에 적합하도록 하기 위하여 微小圓形格子點의 중심좌표를 사람에 따라서 측정오차가 달라지는 目測에 의하지 않고 측정정도가 크게 개선되고, 再現性이 보장되는 포토센서를 이용하여 계측할 수 있도록 새롭게 개발 제작되어진 시스템이다. 시스템은 크게 3부분으로 구성되어 있다. 즉 A의 퍼스널 컴퓨터와 퍼스널 컴퓨터에 의하여 制御驅動되어지는 B의 펄스모타 그리고 C의 스크린 중앙에 포토센서를 부착한 擴大投影機로 되어 있으며 시스템은 전부 퍼스널 컴퓨터에 의하여 制御驅動 되어지도록 설계하였다.

Fig. 5는 自動畫像計測시스템을 이용하여 微小圓形格子點의 중심좌표를 측정하는 방법에 대한 플로우차트를 나타낸다. 微小圓形格子의 중심좌표의 측정방법은 우선 네가티브 필름상의 임의의 점을 원점으로 하여 주좌표계 (X, Y)를 정하고, 다음에 측정하고자 하는 微小圓形格子點 주변에 측정영역을 설정한 후, 이 영역에 대하여 輝度分布를 측정한다. 이때 輝度分布측정작업은 퍼스널 컴퓨터에 의해 구동되어지는 펄스모타에 의하여 X-Y 단(stage)상에 고정되어진 네가티브필름을 이동시키

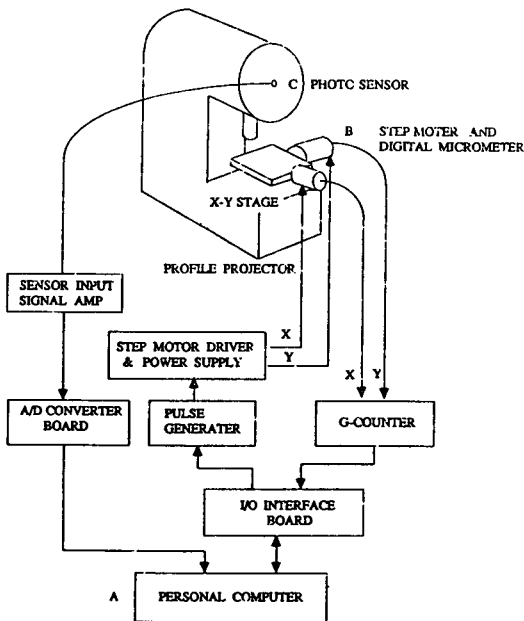


Fig. 4 Schematic diagram of image processing system

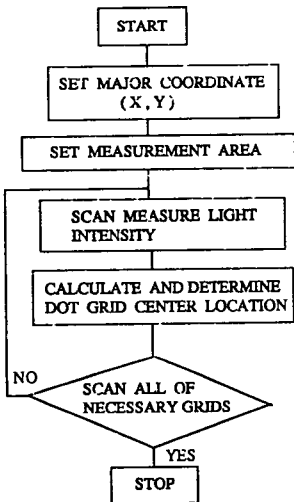


Fig. 5 Flow chart for measuring dots location

으로서 자동적으로 행하여지도록 제작하였다.

이와같이 측정된 格子點 주변의 輝度分布를 해석하여 格子點 중심좌표( $X_i, Y_i$ )를 구하였다. 이때 格子點 중심좌표( $X_i, Y_i$ )를 구하는 방법에는 중심 해석법과 2차 함수근사법등 2가지 방법이 검토되었으나, 측정정도는 거의 비슷한 반면에 측정속도

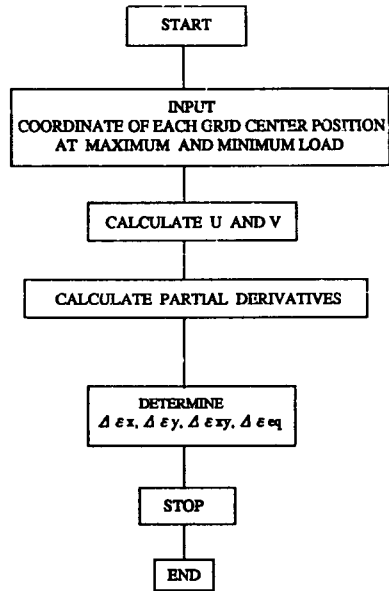


Fig. 6 Flow chart for strain analysis

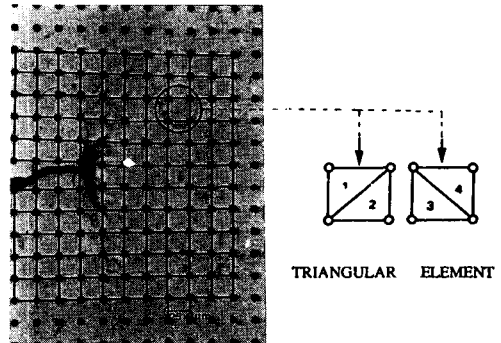


Fig. 7 An example of mesh generation near the crack tip

가 2차함수근사법이 중심해석법에 비하여 약 15배 정도 빠르므로 본 연구에서는 2차함수근사법을 사용하였다.

Fig. 6는 龜裂先端局所領域에서의 피로變形率解析方法에 대한 플로우차트를 나타내고 있다. 龜裂先端的 局所領域에서의 疲勞變形率( $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ )은 우선 각 사이클 중의 최대하중과 최소하중에서의 龜裂先端局所領域에서의 格子點들의 중심좌표를 自動畫像計測시스템을 이용하여 측정한 후 퍼스널컴퓨터에 입력하여 이들 格子點 중심좌표로부터 변위( $U, V$ )를 구한 다음, 疲勞變形率을 계산하였다. 이때 疲勞變形率測定精度를 보다 향상시키기

위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 格子點을 하나의 좌표로 생각하여 4개의 格子點으로써 하나의 四角要素를 구성하였다. 이와같이 구성된 四角要素의 疲勞變形率은 四角要素를 다시 4개의 삼각형 요소로 나누어서 각 삼각형 요소의 疲勞變形率을 평균하여 구하였다. 이상과 같이 구한 疲勞變形率은 종래의 直交格子法<sup>(7)</sup>에 의하여 구한 疲勞變形率의 측정정도가  $10^{-2}$ 인데 반하여 측정정도가  $10^{-3}$ 으로 크게 향상되었다.

이상과 같이 自動畫像計測시스템을 이용하여 微小圓形格子點의 중심좌표를 측정하여 疲勞變形率을 해석하는 방법을 微小圓形格子變形率 測定法이라 한다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 龜裂先端的의 疲勞變形率分布 解析

Fig. 8은 龜裂先端的의 局所領域에서의 疲勞變形率의 분포를 나타내고 있다. 疲勞變形率의 分布形狀은 變形率 성분에 따라서 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉  $\epsilon_y$ 의 분포는 龜裂方向에 대하여  $45^\circ \sim 60^\circ$  방향에서 最大變形率分布를 보인다. 그러나  $\Delta\epsilon_{xy}$ 와  $\Delta\epsilon_{eq}$ 의 분포는  $\Delta\epsilon_y$  분포에 비하여 最大變形率分布를 나타내는 각도가 커져서 龜裂方向에 대하여  $70^\circ \sim 80^\circ$  방향에서 最大變形率分布를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 龜裂先端的의 相當疲勞變形率( $\Delta\epsilon_{eq}$ )의 거리( $r$ )과의 관계를 兩對數紙에 정리한 것이다. 相當疲勞變形率은 피로하중( $\Delta K$ )가 클수록 크다는 것을 알 수 있으며, 또한 相當疲勞變形率分布曲線들은 급격한 기울기를 가지는 영역과 완만한 기울기를 가지는 두 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 즉 相當疲勞變形率分布曲線의 遷移點은 피로하중에 따라 多少 차이가 있으나 대체로  $r \approx 100 \mu\text{m}$ 에 있으며 遷移點 內部領域에서는 하중에 관계없이 각 기울기가 약  $-1$ 로 동일경사를 나타내고 있다. 그러나 外部領域에서는 각 곡선의 기울기가 약  $-1/2$ 로 완만하게 변화하므로 이 영역에서의 相當疲勞變形率의 크기는 內部領域에 비하여 대단히 작음을 알 수 있다.

이와같은 경향은 각도  $\theta = 0^\circ$ ,  $\Delta\epsilon_{eq}$ 에서 뿐만 아니라, 전영역( $\theta = \pm 30^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ$ ) 및 全疲勞變形率成分( $\Delta\epsilon_{eq}, \Delta\epsilon_{xy}, \Delta\epsilon_y$ )에서 같은 결과를 나타내었다. 따라서 큰 疲勞變形率을 나타내고 있는  $r = 100 \mu\text{m}$  遷移點 內部領域을 피로파괴가 직접 일어나는 龜裂先端的의 局所領域으로 規定하고, 종래의 파괴역학의 대표적인 파라미터  $\Delta K$ 로써 정리할 수 없었던 이 영역을 대상으로 하여 疲勞變形率狀態를 나타낼 수 있는 파라미터의 導出을 시도하였다.

일반적으로 線形破壞力學에서 龜裂周圍의 응력장 상태는  $r$ 과  $\theta$ 의 함수를 사용하면 式 (1)과 같이 應力擴對係數  $K$ 로써 나타낼 수 있다고 하였다. 만

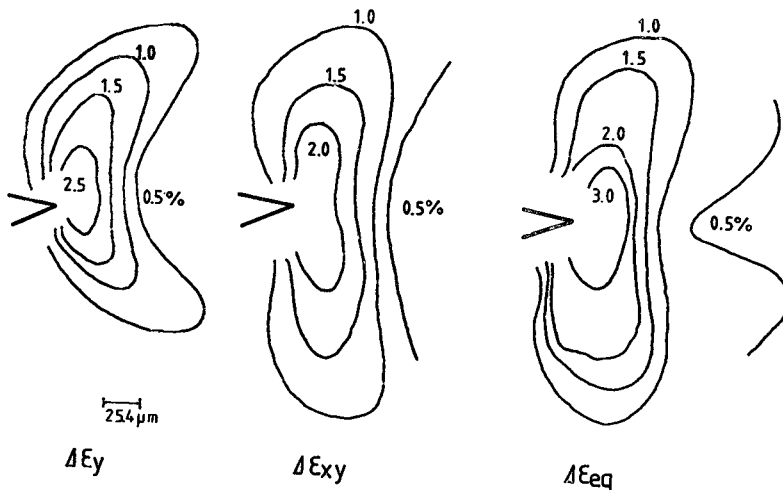


Fig. 8 Fatigue strain distribution near the crack ( $\Delta K = 14.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $N = 30$  cycle)

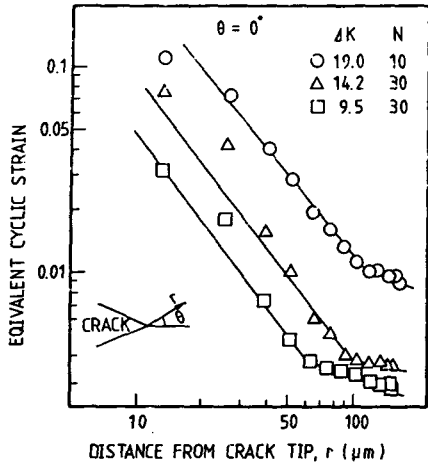


Fig. 9 Relationship between the equivalent fatigue strain and the distance from the crack tip at  $\theta=0^\circ$

약 본 연구에서도 이와같은 개념을 적용하여 龜裂先端의 疲勞變形率場의 상태가 幾何學的의 因子인  $r$  및  $\theta$ 에 대하여 항상 일정한 비례관계를 가짐으로써  $f(r)$ ,  $f(\theta)$ 의 함수로 나타낼 수 있다고 假定하면 式 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

이때  $f(\theta)$ ,  $f(r)$ 은 幾何學的의 結果로 결정되어지는 量이기 때문에 결국 龜裂先端의 疲勞變形率場의 상태는 비례정수인 파라미터  $\Delta A$ 에 따라 一義的으로 나타낼 수 있으므로,  $\Delta A$ 는 疲勞變形率場의 상태를 규정하는 파라미터라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 비례정수  $\Delta A$ 를 疲勞變形率擴大係數 (fatigue strain intensity factor)라 한다. 이상의 관점으로 부터 본 연구에서는 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 의 도출을 위하여 각각의 피로조건하에서 龜裂先端의 疲勞變形率( $\Delta \epsilon$ )과 각도( $\theta$ )와의 관계, 그리고 疲勞變形率( $\Delta \epsilon$ )과 龜裂先端에서부터 거리( $r$ )와의 관계에 대하여 정량적으로 검토하였다.

Fig. 10은 龜裂先端으로부터  $r=50.8\mu\text{m}$ 의 一定距離에 있어서  $\Delta \epsilon_{eq}$ 분포의 각도의존성을 검토한 것이다. 횡축은  $\Delta \epsilon_{eq}$ 의 각도를 나타내며, 종축은 各方向에서의  $\Delta \epsilon_{eq}$ 를  $\theta=0^\circ$ 에서의  $\Delta \epsilon_{eq}$ 으로 무차원화한 값이다. 각각의 데이터는 약간의 편차를 나타내나 좌우 대칭인 하나의 곡선으로 나타낼 수 있으며

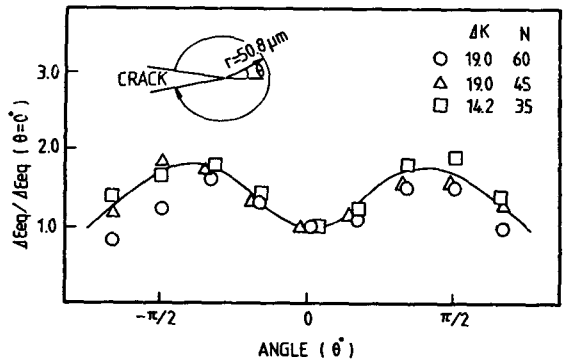


Fig. 10 Angular dependence of the equivalent fatigue strain at  $r=50.8\mu\text{m}$

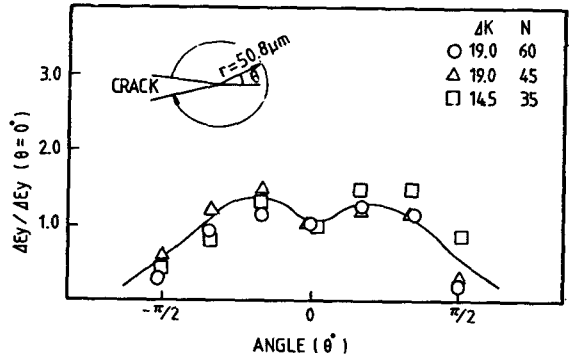


Fig. 11 Angular dependence of  $\Delta \epsilon_y$  at  $r=50.8\mu\text{m}$

따라서  $\Delta \epsilon_{eq}$ 와 각도  $\theta$ 의 사이에는 式 (3)과 같은 실험식을 얻을 수 있었다.

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

이상과 같이  $\Delta \epsilon_{eq}$ 와  $\theta$ 간의 관계를 검토해 본 결과  $\Delta \epsilon_{eq}$ 와  $\theta$ 의 사이에는 피로하중, 사이클數 등 피로조건에 관계없이 항상 式 (3)과 같은 일정한 함수관계를 갖고 있다는 것을 알았다.

Fig. 11은 앞에서와 같은 방법으로  $\epsilon_y$ 의 각도의존성에 대하여 검토한 결과이다.  $\epsilon_y$ 는 앞의  $\epsilon_{eq}$ 에 비하여 편차가 크고 곡선의 형태도 대체로 비대칭형에 가깝다. 그 이유는 피로변형의 경우 除荷過程을 포함하기 때문에  $\Delta \epsilon_{eq}$ 가 龜裂先端의 舉動을 보다 정확하게 표현하고 있다고 생각되어진다.  $\Delta \epsilon_{eq}$ 를 이용하여 疲勞變形率場의 상태를 一義的으로 나타낼 수 있는 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 의 導出에 관한 검토를 하였다.

Fig. 12는 各方向의 龜裂先端의 相當疲勞變形率

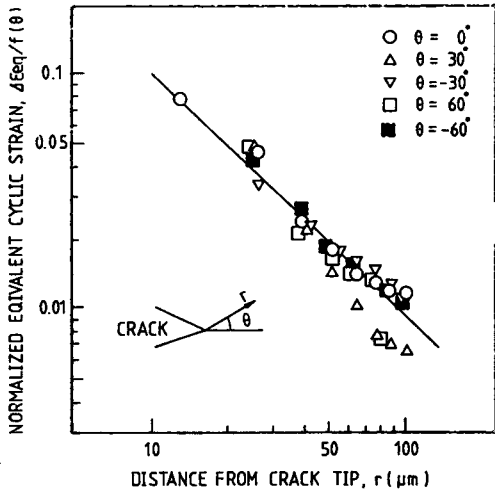


Fig. 12 Relationship between the normalized equivalent fatigue strain and the distance from the crack tip

$\Delta\epsilon_{eq}$ 를 각도함수  $f(\theta)$ 로 나눈  $\Delta\epsilon_{eq}/f(\theta)$ 와 龜裂先端으로부터 거리  $r$ 과의 관계를 兩對數紙에 나타낸 것이다.  $\Delta\epsilon_{eq}/f(\theta)$ 의 분포는 경사가  $-1$ 인 직선으로 나타남을 알 수 있다. 따라서  $\Delta\epsilon_{eq}/f(\theta)$ 와  $r$ 과의 관계는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

식 (5)로부터 우변의  $r^{-1}$ 와  $f(\theta)$ 는 幾何學的으로 결정되어지는 양이기 때문에 결국 龜裂先端的의 局所

領域에서의 疲勞變形率場의 크기는 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 에 의하여 나타낼 수 있게 된다. 식 (5)로부터  $\Delta A$ 는 식 (6)과 같이 정리할 수 있으며, 결국  $\Delta A$ 는  $\Delta\epsilon_{eq}$ 를 측정함으로써 식 (6)으로 간단히 구할 수 있다.

$$\Delta A = r \cdot \Delta\epsilon_{eq}/f(\theta) \quad (6)$$

이상의 검토결과에 따라, 疲勞龜裂先端的의 疲勞變形率場의 상태를 一義的으로 나타낼 수 있는 파라미터 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 를 提案한다.

### 3.2 疲勞變形率擴大係數 $\Delta A$ 의 有效性

식 (5)는  $\Delta K = 19.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $N = 90$  cycle의 피로조건하에서 導出한 것이다. 따라서 이 식의 유효성을 확인하기 위하여서는 여러재료 및 각각의 피로조건하에서 검토할 필요가 있다.

Fig. 13은 사이클數 및 피로하중 등의 피로조건이 疲勞變形率場의 상태에 미치는 영향에 대하여 검토한 것이다. (a), (b)에서와 같이 疲勞變形率場狀態는 동일피로하중조건 ( $\Delta K = 19.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )에서는 사이클數에 관계없이 분포형태는  $r^{-1}$ 로 일정하고 그 크기도  $\Delta A = 0.95 \mu\text{m}$ 로 동일하다. 그러나 피로하중 ( $\Delta K = 19.0, 14.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )이 달라지면 (b), (c)에서와 같이 疲勞變形率場의 분포형태는  $r^{-1}$ 로 일정하나 그 크기  $\Delta A$ 는  $0.95, 0.65 \mu\text{m}$ 로 달라진다.

결국 疲勞變形率場의 상태는 분포형태가 피로조건에 관계없이 일정하므로, 하상 식 (5)로 나타낼 수 있다.

Fig. 14는 疲勞變形率場의 상태에 재료가 미치는

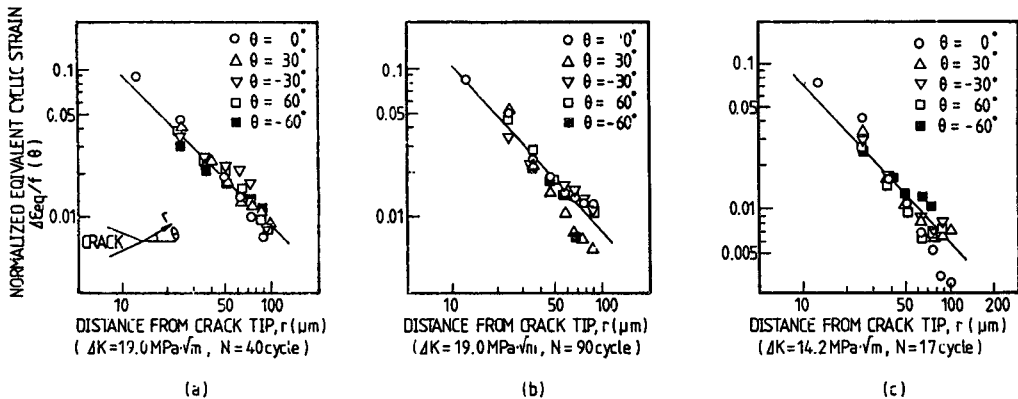


Fig. 13 Fatigue load level and cycle dependence of local cyclic strain distribution

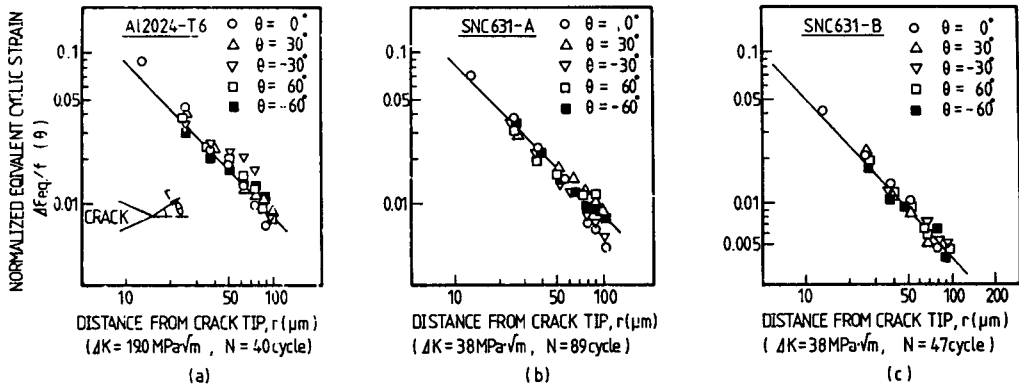


Fig. 14 Material dependence of local cyclic strain distribution

영향에 대하여 검토한 결과이다.

Fig. 14의 (a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 疲勞變形率場의 상태는 모든 재료에서 분포형태가  $r^{-1}$ 로 일정하다는 것을 알 수 있다.

그러나 그 크기  $\Delta A$ 는 재료와 하중에 따라 달라짐을 알 수 있다. 즉 Fig. 14의 (b), (c)에서 보는 바와 같이 같은 하중( $\Delta K=38.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )을 가하여도 재료에 따라  $\Delta A$ 는  $0.95 \mu\text{m}$ ,  $0.45 \mu\text{m}$ 로 달라지며 또한 Fig. 14의 (a), (b)에서 보는 바와 같이 각각 상이한 하중( $\Delta K=19.0, 38.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )을 가하더라도 재료가 달라지면 동일한  $\Delta A$ ( $0.95 \mu\text{m}$ )가 얻어진다는 것을 알 수 있다. 결국 疲勞變形率場의 상태는 분포형태가 본 연구의 범위내에서는 피로조건 및 재료에 관계없이 일정하므로 항상 식 (5)로 나타낼 수 있으며, 그 크기  $\Delta A$ 는 피로하중( $\Delta K$ ) 및 재료에 의존하여 변하는 역학량임을 알 수 있다.

이상과 같이 검토한 결과 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 는 본 연구범위 내에서는 어떤 피로조건과 재료에서도 龜裂先端的 疲勞變形率場을 一義적으로 나타내는 파라미터로써 유효하며 그 크기는 재료와 피로하중에 의존되는 값이라는 것을 알았다.

#### 4. 結 論

본 연구는 疲勞龜裂舉動을 정확히 나타낼 수 있는 새로운 파라미터인 疲勞變形率擴大係數  $\Delta A$ 를 導出할 목적으로 微小圓形格子變形率測定法을 考察하여 龜裂先端的 局所領域에서의 疲勞變形率分布에

대하여 정량적으로 실험검토 한 결과는 다음과 같다.

(1) 微小圓形格子變形率測定法은 龜裂先端 局所領域에서 疲勞變形率分布의 정량적 측정법으로 유용한 방법임을 알았으며, 龜裂先端的 局所領域에서 疲勞變形率 分布狀態를 정량적으로 명확히 밝힐 수 있었다.

(2) 龜裂先端的 疲勞變形率 分布舉動은  $r=100 \mu\text{m}$ 을 遷移點으로 하여 기울기가  $-1$  및  $-1/2$ 인 두 영역으로 나눌 수 있으며, 기울기가  $-1$ 인 遷移點 內部 영역을 피로파괴가 직접 일어나는 龜裂先端的 局所領域으로 정의할 수 있다.

(3) 龜裂先端的 局所領域( $r \leq 100 \mu\text{m}$ )에서의 疲勞變形率場의 상태는 다음과 같이 비례상수  $\Delta A$ 를 포함하는  $r$ 과  $\theta$ 의 함수로서 나타낼 수가 있었다.

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

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

(4) 疲勞龜裂先端的 疲勞變形率場의 상태는 비례상수  $\Delta A$ 를 실험적으로 측정함으로써 정량적으로 나타낼 수 있다. 따라서 疲勞龜裂先端的 疲勞變形率場을 정량적으로 나타낼 수 있는 새로운 파라미터인 疲勞變形率 擴大係數  $\Delta A$ 를 提案한다.

(5) 疲勞變形率 擴大係數  $\Delta A$ 는 피로하중 및 이클레 등 피로조건과 재료에 관계없이 龜裂先端的 疲勞變形率場을 一義적으로 나타낼 수 있는 파라미터로써 유효하여, 그 크기는 재료와 피로하중에 의존한다는 것을 알았다.



후 기

본 연구는 1989년 한국과학재단의 연구비를 지원 받아 수행된 결과입니다. 관계자 및 조언을 해준 분들께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Rice, J.R., 1967, "Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue", ASTM STP-415, pp. 247~311.
- (2) Rice, J.R. and Rosengren, G.F., 1968, "Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material", J. Mech. Phys. Solids, 16, pp. 1~12.
- (3) Hutchinson, J.W., 1968, "Plastic Stress and Strain Fields at a Crack Tip", J. Mech. Phys Solids, 16, pp. 337~347.
- (4) Kang, T.S. and Liu, H.W., 1974, "Fatigue Crack Propagation and Cyclic Deformation at a crack Tip", J. Fracture 10, pp. 201~222.
- (5) Kavison, D.S. and Lankford, J., 1980, "Fatigue Crack Tip Plastic Strain in High Strength Aluminum Alloy", J. Fatigue of Eng. Materials and structure, 3, pp. 289~303.
- (6) Shimada, H. and Furuya, Y., 1981, "Application of Crack-Tip-Strain Loop to Fatigue-Crack Propagation", Exp. Mech., 31 (11), pp. 423~428.
- (7) Furuya, T. and Shimada, H., 1986, "Fatigue Crack Initiation From Notch Root (Local Strain Damage Accumulation Process on Crack Initiation)", Eng. Fracture Mech. 23~6, pp. 983~989.