

# 분말소결 알루미늄 합금의 반복하중에 의한 미시균열 성장연구

류성원\*    임성우\*\*    Klaus Detert\*\*\*

\* 국방과학연구소  
\*\* 포항제철연구소  
\*\*\* Universität Siegen (독일, 기계공학과 재료연구소 교수)

## 1. 서론

대부분의 구조물은 정하중뿐 아니라 동하중을 받고있으며, 반복되는 동하중에 의해 구조물은 피로를 받게되고 가장 취약한 부위에 작은 미시균열이 발생된다. 미시균열이 성장, 확산되어 기술적으로 인지되는 길이가 0.5 mm 이상이 될때 이를 거시균열이라 하는데, 거시균열의 균열성장은 파괴역학적 해석 방법의 도입으로 많은 공학적 재료들이 광범위하게 연구 되었으며, 거시균열의 확산과 연관되어지는 균열단합과 미시구조의 관계가 연구 되었다. 최근에는 거시균열의 해석과 같이 응력강도가 미시균열에서의 확산거동에 미치는 영향을 설명하는데 더 많은 관심을 가지게 되었다.

미세한 미시균열의 확산거동을 측정, 관찰하기 위해서는 몇가지 특별한 시험방법이 소개되고 있는데, 본 논문에서는 Laser의 간섭무늬를 이용하여 반복하중에 의해 발생하는 미시균열의 확산 거동을 측정하였으며, 미시균열의 확산속도에 대한 균열단합의 영향에 대하여 고찰하였다.

시험용 소재로는 항공기 산업과 자동차 산업에 널리 쓰여지고 있는 합금중의 하나인 분말소결 합금인 AISI12C101 를 사용하였다. 균열성장을 측정하기 위해서 부가적으로 전자현미경과 광학현미경을 사용하여 미시균열의 확산 메카니즘을 관찰 하였다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 미시균열의 정의

미시균열의 정의는 Ritchie 와 Suresh 의 법칙에 의해 다음과 같이 정의되어진다.

- 1) 입계의 크기와 그 길이를 비교할 수 있는 미시구조의 균열.
- 2) 그 길이가 local plastic area 와 비교될수 있는 탄-소성 미시균열.
- 3) 그 길이가 매우작은 ( $\leq 0.5 - 1.0 \text{ mm}$ ) 물리적인 미시균열.

### 2.2 선형 탄성 파괴역학 (LEFM)

LEFM 의 개념은 선형탄성 변형에서 파괴에 이른다는 가정하에서 균열선단의 소성범위 내에서 균열선단에 작용하는 응력에 의해 파괴가 일어나는 것으로 한다.

일반적인 반복하중에 대하여 응력확대계수  $K_I$  은 식 (1)로 표현된다.

$$K_I = \sigma \sqrt{(\pi a)} Y \quad (1)$$

여기에서  $\sigma$  는 균열면에 수직으로 작용하는 일반응력이며,  $a$  는 균열길이,  $Y$  는 차원이 없는 고정계수로서 시편형상과 하중의 배치에 따라

1) 곧바르게 성장된 edged crack 에 대하여,

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

이며,

ii) 원형으로 성장된 내부균열에서는

$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

이 된다.

Dowling (1977) 은 반원형의 표면균열에 대하여 식 (3)에 식 (2) 의 보정계수를 곱한 식 (4)를 구하였다.

$$K_I = 1.12 \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

### 2.3 피로균열확장

반복하중에 의한 응력을 받는 구조물의 피로균열확장은 균열생성, 균열확장 (상태 I, 상태 II), 잔여파괴로 발전한다.

상태 I 에서 균열은 존재하는 피로시편을 따라 입자결정사면 방향으로 성장한다. 여기에서 균열은 상이한 결정위치 때문에 성장방향은 입자에서 입자로 변화되며, 입계에서 균열의 성장은 지연된다. 상태 I 은 대부분 첫번째 입계에 도달되면 끝난다.

반복하중에서 균열전파속도  $da/dN$  은 주기적 응력확대계수  $\Delta K$  의 함수로 된다.

$$da/dN = f(\Delta K) \quad (5)$$

$$K_I = 1.12 \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

상태 II 는 거시적 균열성장으로 제 1의 주 응력방향에 수직하게 놓이며, 입계는 자신의 균열억제 영향을 상실하게 되며 균열은 응력방향으로 성장한다. 일반적으로  $da/dN$  과  $\Delta K$  의 종속관계는 그림 1에 그려진 곡선과 같으며, 이 곡선은 균열전파속도가 느린 제 1영역, 중간인 제 2 영역 그리고 균열전파속도가 빠른 제 3 영역으로 나누어진다. 그림 3의 제 2 영역에서의  $da/dN$  과  $\Delta K$  의 종속관계는 Paris /4/ 의 법칙이 적용된다.

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (7)$$

여기에서  $C$  와  $m$  은 재료상수이다.

### 2.3 균열단합

Elber 에 의하여 처음으로 균열단합의 현상이 소개 되었는데, 여기에서 균열성장은 효율적 응력확대계수  $\Delta K_{eff}$  의 값

을 통하여 획득하게된다. 균열성장 상에서의 균열단합의 영향을 관찰하기 위해서 Elber 는 상이한 응력관계를  $\Delta K$  의 종속 관계로 설명한 식을 내놓았다.

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \quad (8)$$

$$U = \frac{F_{min} - F_{ol}}{F_{max} - F_{min}} = \frac{\Delta F_{eff}}{\Delta F} \quad (9)$$

여기에서 U 는 균열열림 계수이며, 그림 2는 상이한 균열단합 작용을 설명하고 있다.

### 3. 실험원리 및 장치

#### 3.1 실험원리

Laser 의 지원에 의한 ISDG (Interferometric strain displacement gague) System 은 Sharpe 에 의하여 미시균열의 균열확산 측정을 위하여 개발되어졌다. ISDG 의 계측기술은 그림 3에 도식적으로 설명하였는데, 이것은 두개의 광선의 간섭에 의존되어 지는것이다. 그 면의 길이가 약 25  $\mu m$  인 두개의 경도 압축흔적은 시편표면 균열의 상부와 하부에 찍혀지게 된다. 실험장치에 설치된 시편은 Laser 광선을 쏘이게 되는데, 이 광선은 양쪽의 경도 압축흔적을 덮게된다. 경도 압축면으로 부터 반사되는 일부광선은 간섭되어진다. 그로부터 하나의 간섭무늬가 생성된다. 간섭무늬의 최대크기의 위치는 다음과 같이 계산되어진다.

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

여기에서 d 는 경도압축 흔적간의 거리,  $\theta$  는 반사각, m 은 +, - 의 정수,  $\lambda$  는 파장 이다. 또한, 간섭무늬의 최소크기의 위치는 다음과 같다.

$$d \sin \theta = (m + 1/2) \lambda$$

본 실험에서는 5 mW 의 Laser 를 빛의 원천으로 사용하였으며, 파장은 632.8 nm 이다. 경도압축 흔적은 Vickers - Micro 경도 시험기에 의하여 만들어 졌으며, 그로부터 반사각  $\theta = 42^\circ$  를 얻었다. 만약 경도압축 흔적간의 거리를 변경시킨다면 간섭최대 크기의 위치도 변형될것이다. 그러므로  $\Delta d$  는 확산속도 V 에 상응된다.

#### 3.2 시험방법

##### 3.2.1 재료와 시편형상

실험은 은말소결 알루미늄 합금인 AISI12C101 을 사용하였다. 이것은 Krebsöge Ltd. 공장에서 크기가 100  $\mu m$  이하인 본말을 여러 시켜서 지름 65 mm 의 환봉으로 제작되었다. 본 합금의 성분은 12 % 실리콘, 1 % 의 탄소, 1 % 의 산소로 구성되어 있다. 이 합금의 물성치는 아래와 같다.

표 1. AISI12C101 의 물성치

alloy	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	E MPa	입자크기 ( $\mu\text{m}$ )	경도 HB
AISI12C101	191	322	70736	< 10	83 - 85

시편의 절단은 길이방향과 평행하게 이루어졌다. Cylinder 형 시편의 중앙부는 약간의 경사를 주어서 하나의 자연균열이 정해진 자리에 생성 되도록 하였다. 자세한 시편의 형상은 그림 4에 나타나 있다.

또한 시편표면에 균열성장을 더욱 잘 관찰하기위해 시편을 기계적으로 연마 하였으며, 시편 표면의 상태를 검증하기 위해서 표면 거칠기를 측정하였다. 연마전의 표면 거칠기는 1.39  $\mu\text{m}$  이었으며 연마후는 약 0.47  $\mu\text{m}$  로 측정되었다.

### 3.2.2 실험장치 설치

실험장치는 60 KN 의 힘을 갖는 Schenck 사의 유압재어 시험기와 step motor 로 조절되는 두개의 photo diode 그리고 Laser 장치로 구성되어 있다 (그림 5). 그외에 2개의 serial port (com1: 과 com2:), 2개의 parallel port (lpt1: 과 lpt 2:) 와 Fa. Delphin 사의 A/D-Converter 를 연결한 serial port (IB 343) 를 가진 16 bit PC (HP Vectra) 를 사용 하였다. 계산결과를 lpt1 에 연결된 printer (Epson FX-800) 와 com 2 에 연결된 HPGL plotter (KPL 710) 로 출력 하였다.

Servo hydraulic test machine 에는 특별히 제작된 고정물이 장착되었는데, 여기에 Optilas 사의 5 mW He-Ne Laser (Modell 2051) 와 Isert-Electronic 사의 두개의 photo diode 를 장착하였다 (그림 6). Photo diode 는 간섭광선이 이동하는 위치로 움직여진다. Photo diode 와 시편과의 거리는 300 mm 로 하였으며, 틸새가 있는 shutter 를 photo diode 앞에 장착하였다. 간섭무늬는 0.5 mm 너이의 slit 에 의해 얻어진다.

### 3.2.3 균열 성장속도의 계산방법

균열 생성후 간섭 계측장비를 이용하여 hysteresis 곡선을 측정하였다. 여기에서 진전되는 균열의 경로가 비대칭형곡 선임을 정확하게 인식할수 있다. 여기에서 집점은 균열이 닫히고 열린 경로이다. 집점의 아래부분에서는 균열이 닫히며 상부에서는 균열이 열린다. 집점으로 부터  $F_{01}$  이 측정되면  $\Delta K_{eff}$  를 계산하게 된다. 균열길이 a 는 Replica 공정을 이용하여 a/c 의 비를 구하여 결정한다. 균열성장속도 da/dN 의 계산은 ASTM E647-86 의 spline function 을 인용하였다. 계산방법은 그림 7에 도식으로 설명하였다.

### 3.2.4 균열길이 측정

Replica 공정으로 시편표면을 규칙적인 시간을 두고 복제 할수 있기 때문에 균열의 시작과 확산을 측정할수 있다. 복제 재료로는 0.08 mm 두개의 acetate foil 을 사용하였다. 복제하는 동안 시편은 최대 인장력을 받음으로써 Foil 이 acetone 에 적셔져서 열린균열 사이로 침투하여 균어질수 있도록 하였다.

Cylinder 형의 피로시편의 미시균열은 거의 하나의 반원형으로 전파되어 가는데 이것의 a/c 비를 측정하기 위해서 부시법을 사용한다. 부시에 사용되는 용액의 화학적 구성비는 39 g 의 KOH 와 100 ml 의 H<sub>2</sub>O 이다.

그림 8에서 하나의 반원형 균열을 볼수있다. 이것은 균열핵으로부터 성장된 것이다. 만일 a/c 의 비가 시험기간동안 일정하게 유지되었다면, 균열길이의 측정은 표면균열길이 2c 의 측정으로 충분하다. 그림 9는 각기 다른 시편과 시간에서의 시편표면 균열길이를 REM (Raster Electric Microscope) 촬영하여 균열길이를 구한것이다.

### 3.2.5 Interference Method

Interference method 는 두개의 경도 압축흔적의 반사광에 그 기본을 두고있다 (그림 10). 균열이 발생되면 시편에 하중을 제거하고 시험장치로부터 시편을 제거한다. 제거된 시편은 관측되어진 균열의 상부와 하부에  $50 \mu\text{m}$  의 간격으로 경도 압축 흔적을 만든다. 그림 11 은 경도 압축흔적을 보여준다.

균열의 확장을 측정하기 위해 극부적으로 손아지는 빛의강도를 step motor 와 photo diode 를 통하여 제어하게 하였다. 결과치는 빛의 광도값의 평균을 선택하였다. 만약 시편이 팽창되어지면, 두개의 경도압축 흔적은 상대적으로 서로 밀려지고 이것은 간섭산을 밀리게 하는 원인이 된다. 간섭무늬의 밀림은 photo diode 가 step motor 에 의해 응력이 선택되어진 결과치에 도달될때 까지 조정되어진다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 균열 성장

균열성장은 약 1 mm 까지 관찰하였다. 시편표면의 미시균열 성장은 그림 12에 나타나있다. 본 실험은 시험종료까지 다 큰균열과 함께 성장하지 않는 main crack 만을 취급하였다.

첫번째 실험은 20 Hz 의 반복하중으로 실시하였다. 여기에서 strain amplitude  $\sigma_a = 0.9 R_{p0.2}$  였으며, 반복하중수 40,000 에서 많은수의 균열을 생성하였다. 모든 균열의 길이는 대부분  $50 - 70 \mu\text{m}$  였다. 반복하중수 42,000 에 이르러서 시편은 갑자기 파괴되었다. 이유는 균열의 성장속도가 매우 높았기 때문이다.

다음번 실험에서는 strain amplitude  $\sigma_a = 0.7 R_{p0.2}$  로 하였으며, 주파수는 40 Hz 로 하여 실시하였다.

두번째 시편은 반복하중수 21,000 cycle 에서  $108.5 \mu\text{m}$  의 균열길이에 도달 하였으며, 반복하중수 255,000 cycle 에서 균열 길이는  $1299.9 \mu\text{m}$  에 도달하였다.

세번째 시편은 반복하중수 1,300,000 cycle 에서 균열길이  $145.6 \mu\text{m}$  을 기록 하였다. 반복하중수 1,348,000 cycle 에서 균열길이는  $1460 \mu\text{m}$  에 이르렀다.

네번째 시편은 반복하중수 825,000 cycle 에서 균열길이  $99.3 \mu\text{m}$  에 도달하였고 909,000 cycle 에서 균열 길이는  $1015 \mu\text{m}$  에 이르렀다.

다섯번째 시편은 반복하중수 5,000,000 에 도달할때 까지 균열을 발견하지 못했다.

### 4.2 Local Hysteresis 계측

그림 13 은 상이한 상태에서의 균열성장을 hysteresis 곡선으로 나타내었다. 여기에서는 4개의 곡선을 볼수있다.

첫번째 hysteresis 곡선은 균열이 없는 상태이다. 힘에 대한 인장비에서 탄성계수의 값이 구하여진다. 이렇게 구하여진 탄성계수의 값은  $78,927 \text{ MPa}$  에 달하였다.

세번째와 네번째 곡선은 균열단힘의 찍임점을 보여주고 있는데 이것은 두번째 곡선에서 관찰할수 없었던 것이다. 최소 균열 성장기간 동안은 하중제거시 힘-균열확산 곡선은 오른쪽으로 굽혀서 관측된다. 동시에 반복하중간에 소성변형을 증명하는 강한 비대칭, 비선형성을 보여준다.

### 4.3 균열 단힘

균열단힘력  $F_{c1}$  은 하중풀림 선상의 두개의 가지선의 교점으로 결정한다 (그림 13). 균열단힘력의 값은 그림 14의 균열 길이의 함수로 나타내어진다.

$\sigma_{min}$  과  $\sigma_{c1}$  이 함께 떨어지는 균열길이 약  $50 \mu m$  까지는 균열단함을 볼수없다. 그후  $\sigma_{c1}$  은 지속적으로 상승하여 균열 길이  $a = 211 \mu m$  에서 안정화 되며, 이때 약  $-54 MPa$  의 값을 갖는다.

Elber 의 방식에 의하면 이것은 미리 고려되어진 균열열림계수  $U$  로도 표시할수 있는데 그 식은 아래와 같으며, 그림 15에 그 결과를 나타내었다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta \sigma} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{c1}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \quad (10)$$

규정된 응력강도 ( $K_{c1}/K_{max}$ ) 는 응력확대계수  $\Delta K$  의 진동범위의 함수로 그림 16에 그결과를 나타내었다. 균열길이가 커질수록  $\Delta K$ ,  $K_{max}$ ,  $K_{c1}$  은 증가되고  $\Delta K_{eff}$  는 감소된다. 균열길이가 약  $200 \mu m$  보다 클 경우  $K_{c1}/K_{max}$  는 더 이상 균열길이에 종속되지 않는다.

#### 4.4 소성균열 열림

그림 13에서 정의 되어진것과 같이 소성균열열림  $COD_{p1}$  은 Hysteresis 곡선상에서  $F = 0$  일때 구하여진다. 그림 17은  $COD_{p1}$  이 증가하는 균열길이와 함께 증가된다는것을 증명해준다. 반대로 Moris 는 그의 계속에서  $F_{min}$  상태에서 REM-촬영을 통하여 소성균열열림은 균열길이 (약  $160 \mu m$  부터) 에 종속되지 않는다는 것을 발견하였다.

#### 4.5 Compliance Method

Compliance Method 는 균열확산에 의해 변화되는 시편의 flexibility 를 결정하고 균열측정에 사용된다. Compliance curve 를 작성하기 위해서는 정하여진 시편형태와 시편크기로 여러개의 시편을 서로다른 균열길이 에서의 탄성적 부하와 그에 속하는 힘  $F$  와 넓이를 그려야 한다. 미시균열의 Compliance curve 는  $V/F = f(a)$  로 나타낸다. 그림 18은 Compliance 와 균열길이 사이에서 하나의 선형연계를 보여준다. 이 미시균열의 선형연계는 Morris 와 Lee 에 의해 발견되었다.

#### 4.6 균열성장속도

그림 19에 균열성장속도  $da/dN$  과  $\Delta K_{eff}$  에 대한 수치를 기록하였다.

균열성장속도  $da/dN$  의 계산은 ASTM E-647-86 의 Incremental Polynom Methode 에 의하여 이루어졌다. 여기에서  $da/dN = C \Delta K^m$  의 존재에 종속됨을 알수있다. 미시균열의 균열성장 곡선의 상승기  $m$  은 4.76 이다.

### 5. 결 론

금속재료의 균열확산 거동에서의 균열단함 영향을 보다 잘 이해하기 위해서는 균열생성과 확산의 미시 메커니즘을 정확히 고찰하여야 한다.

이 논문은 본말소결 AISI3101 합금의 반복하중에서의 미시균열 성장을 연구한 것이다.

실험은 Laser 의 지원을 받는 계속 System 과 Replica 공정을 사용하여 언제 균열이 닫히고 어떠한 크기로 균열이 성장하는가를 측정, 계속 하였다.

균열길이  $a = 50 \mu m$  까지는 균열의 단함을 볼수 없었는데, 이유는  $\sigma_{c1}$  과  $\sigma_{min}$  이 함께 떨어지기 때문이다. 그후  $\sigma_{c1}$  은 지속적으로 상승되며,  $a = 250 \mu m$  에서 안정화 되었으며 이때의 값은 약  $-45 MPa$  이었다.

균열길이가 커질수록  $\Delta K$ ,  $K_{max}$  는 증가하고  $\Delta K_{eff}$  와  $\Delta K_{c1}$  은 감소 하였다.  $K_{c1}/K_{max}$  는 균열길이가 약  $200 \mu m$  보다 클 경우 균열길이에 종속되지 않는 값을 갖는다.

일반적으로 균열성장 곡선의 성장비  $m$  은 2 - 4 정도로 알려져 왔으나, 본 실험에서는 그 값이 약 4.76 에 달하였다.

## 6. 참고문헌

- /1/ Ritchie, R. O., Suresh, O. "Mechanics and physics of the growth of small cracks" AGARD-CP-328, Paper 1, 1983, p. 1.1-1.14
- /2/ Dowling, N. E. "Crack growth during low-cycle fatigue of small axial specimens" ASTM STP 637, 1977, p. 97/121
- /3/ Schwalbe, K. H. "Bruchmechanik metallischer Werkstoffe" Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1985, p. 128, 362-366, 583-588
- /4/ Paris, P., Erdogan, F. "A critical analysis of crack propagation laws" Transactions of the ASTM 1963, p. 528-534
- /5/ Blumenauer, H., Push, G. "Technische Bruchmechanik" VEB deutscher Verlag, 1982, p. 67
- /6/ Liu, H. W. "Fatigue crack propagation and the stress and strains in the vicinity of a crack" Appl. Mat. Res., 1964, p. 229
- /7/ Elber, W. "Einfluß der plastischen Zone auf die Rißausbreitung unter Schwingbelastung" Materialprüfung, Bd. 12, 1970, p. 189-193
- /8/ R. O. Ritchie, S. Suresh "Some consideration of fatigue crack closure at near-threshold stress intensities due to fracture surface morphology" Met. Trans., Vol. 13A, 1982, p. 356
- /9/ Skellton, R. P., Haigh, J. R. "Fatigue crack growth rates and threshold in steels under oxidising condition" Mat. Sci. and Eng. 36, 1978, p. 17-25
- /10/ Sharpe, W. N. Jr. "Interferometric surface measurement" International Journal of Nondestructive testing, 3 (1971), p. 59-76
- /11/ Heroux, L. G., Sullivan, C. P. "Metallographic replication of curved surfaces" Transaction of the ASM, 456 (1963), p. 861-863
- /12/ Lankford, J. "The growth of small fatigue cracks in 7075-T6 aluminum" Fatigue of engineering materials and structures, 5 (1982), p. 233-248
- /13/ Larson, J. M., Nicholas, T., Thomson, A. W., Williams, J. C. "Small crack growth in titanium-aluminum alloys" Proceedings of the 2. engineering foundation international conference, 1986, p. 499-512
- /14/ Su, X., Sharpe, W. N. Jr. "An experimental study of closure behavior of naturally initiated small cracks" Fatigue 87, The 3rd international conference on fatigue and fatigue thresholds, Charlottesville, Virginia, June 28-July 3 1987 p. 343-350
- /15/ Morris, W.L., James, M.R., Buck, O. "A simple model of intensity range threshold and crack closure stress" Engineering fracture mechanics, 18 (1983), p. 871-877
- /16/ Lee, J.J., Sharpe, W.N.Jr. "Closure measurements on the short fatigue cracks" ASTM STP 982, 1988 p. 270-278

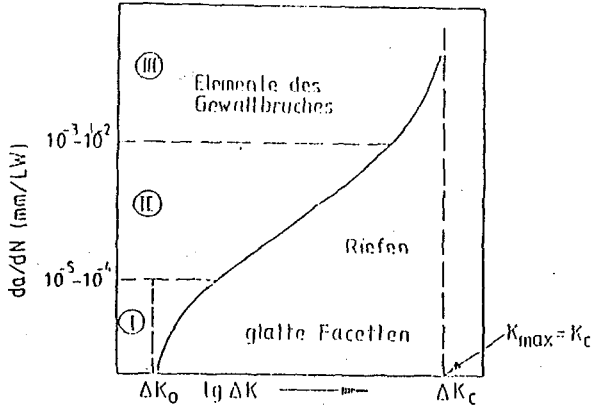


그림 1: 균열진전곡선

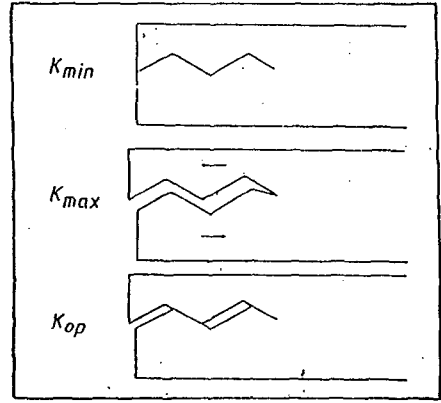


그림 2: 균열 contact 에 의한 균열단임효과

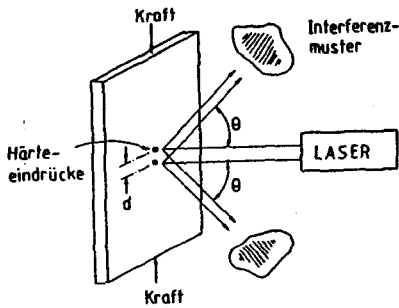


그림 3: Interferometric Strain Displacement Gage 원리

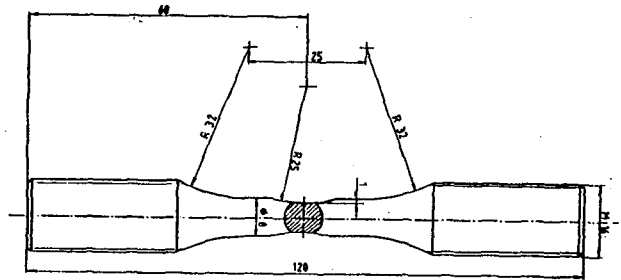


그림 4: Cylinder 형 시험편의 치수

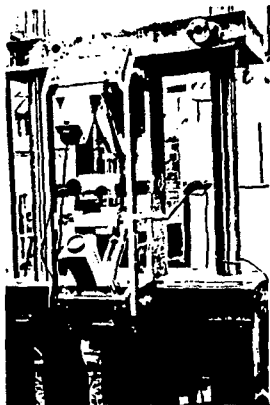


그림 6: Servo Hydraulic Test Machine 에 장착된 Step Motor 와 Laser

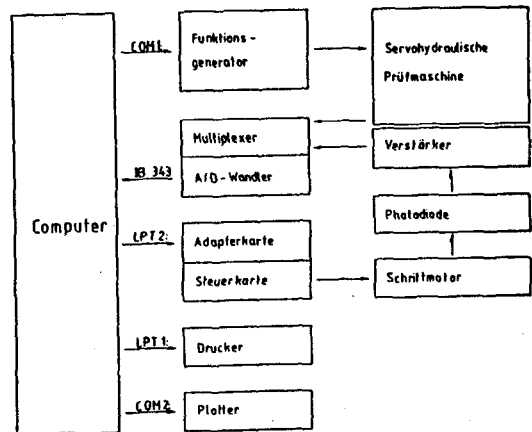


그림 5: 도식화한 시험장치 구조



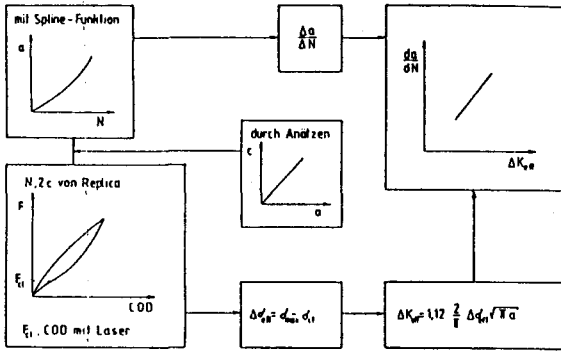


그림 7: 계산방법

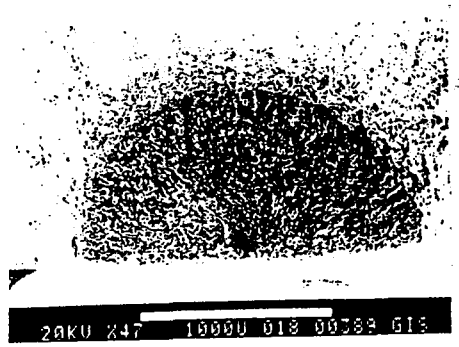


그림 8: AISI12C101 소결합금의 미세균열 부식처리 표면

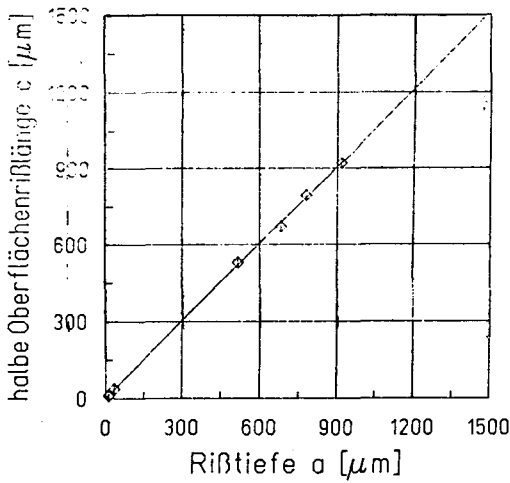


그림 9: AISI12C101 소결합금의 균열깊이와 균열길이 비



그림 11: 균열의 상부와 하부에 찍힌 경도입축흔적

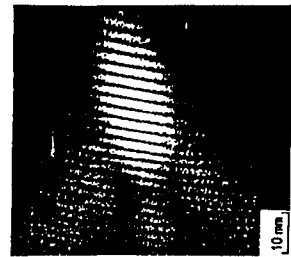


그림 10: 간섭무늬

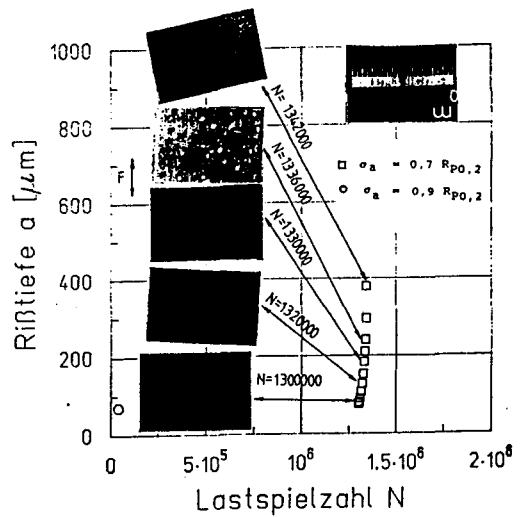


그림 12: Cycle 수에 대한 균열길이 함수관계

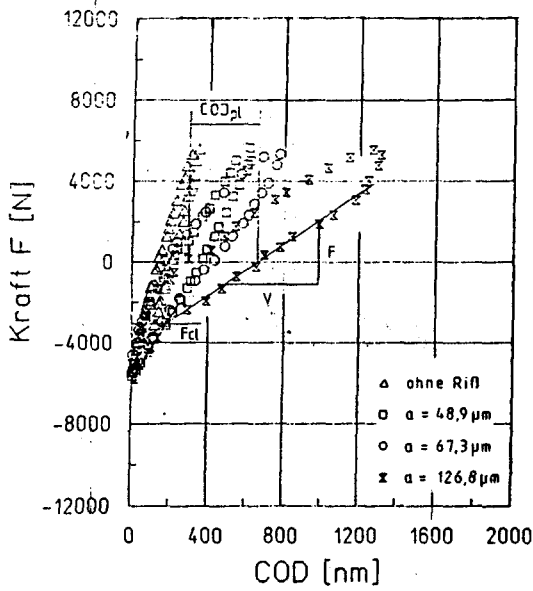


그림 13: 상이한 균열성장에서의 hysteresis 곡선

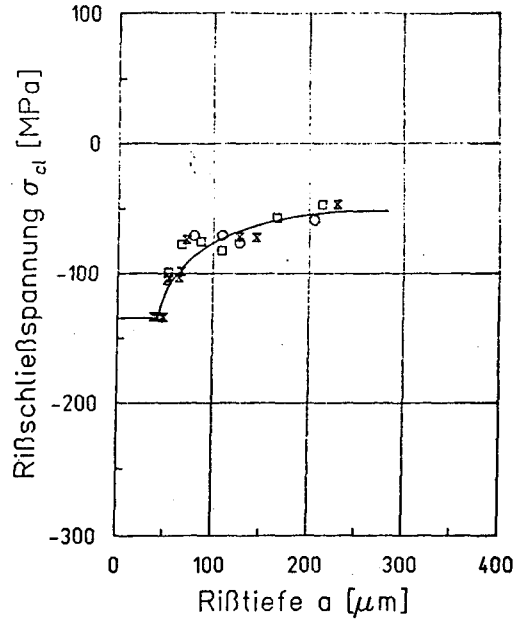


그림 14: 균열길이에 대한 균열닫힘응력

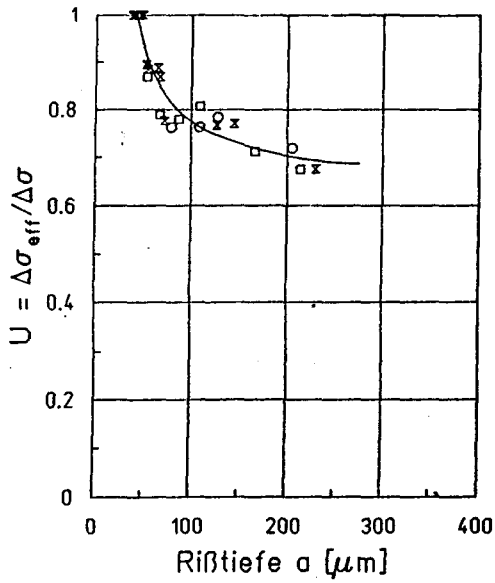


그림 15: Elber 에 의한 균열길이에 대한 균열닫힘계수

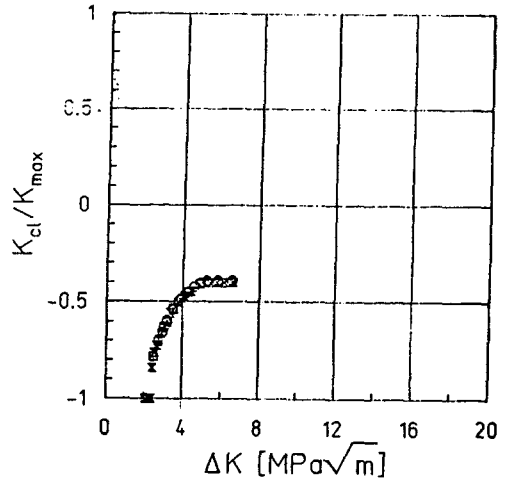


그림 16:  $K_{cl}/K_{max}$  에 대한 응력확장계수의 진동범위

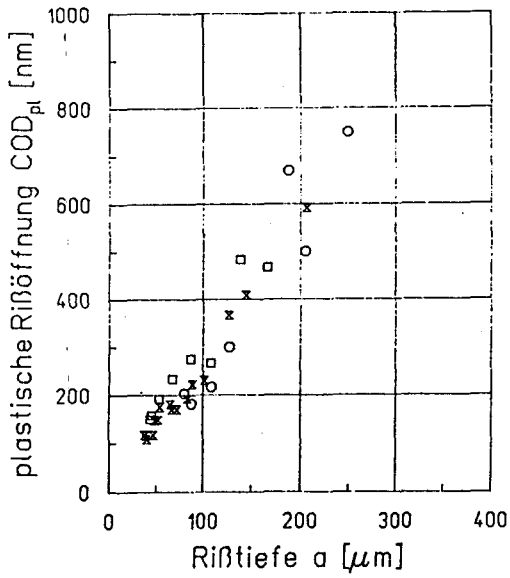


그림 17: 균열길이에 대한 소성균열여린

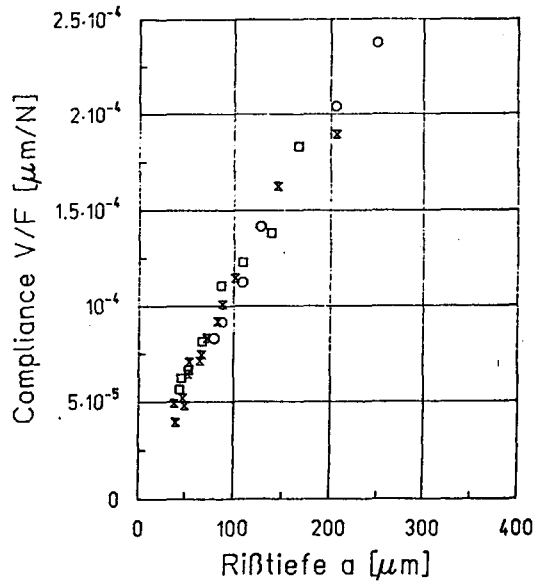


그림 18: 균열길이에 대한 Compliance

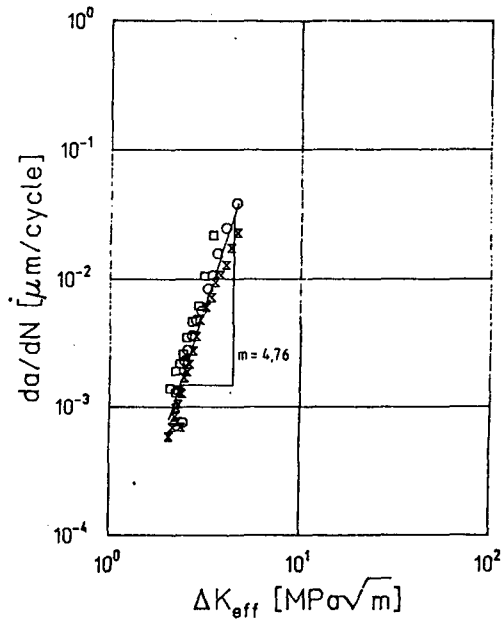


그림 19: 효율적 응력확산계수의 진동범위에 대한 균열성장속도