

재료의 3차원 파괴거동에 대한 연구 (변위일정하의 관통균열인 경우)

박 정 도 · *장 영 석* · 류 흥 열**

Study on 3-Dimensional Fracture Behavior of Material

J. D. Park, Y. S. Jang, and H. L. Lyu

Abstract In this paper, 3-dimensional fracture phenomena in the local area near a through notch tip located between the surface and the canter were investigated by using embedded dyeing grids with the pitch of 50.8 μ m. It was confirmed that displacement V and square root of distance from notch tip $y^{1/2}$ are not proportional in the local area of $\sqrt{|y|} < 0.3\text{mm}^{1/2}$ and the maximum shear strain $\epsilon_{xy\text{max}}$ near a notch tip occurred at the curvature beginning point of the notch curve. It was also noted that the maximum strain ϵ_{max} in the thickness direction occurred at the interior, where the ratio of the distance measured from surface to the half of thickness of specimen is 0.3.

1. 서 론

파괴역학(Fracture Mechanics)의 이론적 체계가 확립되어 감에 따라 각종 균열에 대해 균열선단 근방에서의 파괴거동에 대한 해석이 활발히 행해지고 있으며, 2차원 균열에 대한 강도평가에는 선형파괴역학에 기초를 둔 응력확대계수(Stress Intensity Factor; S. I. F., K)가 유효한 파라메타로써 이용되어 이론·실험 두 방법에 걸쳐 많은 결과가 얻어져 있다.

그러나 실제로 구조물의 부재에 존재하는 결함이

나 균열은 재료내부에 존재하거나 표면균열과 같이 3차원적인 형상을 하고 있으므로 구조물의 결함에 대한 해석이나 강도평가에 2차원적인 접근법으로 얻어진 결과를 그대로 적용하는 것은 적합하지가 않다.

3차원균열이나 표면균열 등에 대해서는 이론·실험에 의해 여러결과가 얻어지고 있다.¹⁻¹³⁾ 그 중, 이론적인 해석은 선형탄성이론에 바탕한 응력확대계수 K 에 의하여 고찰을 하기 때문에 재료의 파괴에 큰 영향을 미치는 균열선단의 소성영역과 같은 국소영역(Local Area)에서의 파괴거동을 해석하는 데는 적

*. 경남전문대학 기계설계과

** 경남전문대학 토목과

접수: 1991년 1월 18일

합하지가 않다.

실험적인 해석도 낮은 실험정도로 인하여 균열선단 국소영역에서의 파괴거동에 대해서는 관찰이 어려운 상태이며 그리고 대부분이 실시간적인 변형측정이나 응력측정을 하기가 곤란하다. 그리고 실험적인 방법은 재료내부에서의 변형거동에 대해서는 그 난점이 많으며, 특히 실험시의 게이지 길이(Gage Length)가 길기 때문에 균열선단에서의 마이크로적인 파괴거동의 관찰에는 부적합하여 지금까지 그 진척이 없는 상태이다.

그래서 재료의 균열선단 국소영역에서의 파괴거동에 대한 역학적인 연구는 아직 미지의 상태로써, 재료의 3차원적이고 미시적인 파괴거동을 파악하기 위한 체계적인 연구가 필요하다.

본 논문은 재료의 3차원 파괴거동에 대한 기초연구의 하나로 관통균열이 존재하는 재료의 균열선단 근방에서의 파괴거동을 규명하기 위하여, 에폭시로 구성된 재료에 대하여 균열선단의 국소영역에서의 파괴거동에 대한 해석에 島田^{14~19)} 등이 제안한 염색격자법을 이용하여, 균열선단 국소영역에서는 선형탄성 파괴역학의 이론이 적용되지 않음을 밝혔으며, 그에 따라 균열선단 근방에서의 파괴거동을 변형률로서 고찰하여, 이를 Sneddon²⁰⁾의 탄성이론 결과와 비교검토하여 균열선단 근방의 국소영역에서의 파괴거동에 대해서는 변형률로서 고찰해야 함을 제안하였으며, 또한 이를 3차원적인 파괴거동현상에 적용하여 재료내부에서 일어나는 균열의 초기발생점에 대한 현상 등을 고찰하였다. 그리고 실험시에 종래의 CT시험에서와 같이 균열선단에서의 하중에 의한 우력영향을 배제하기 위하여 시편이 하중을 받은 후에도 시편의 양측면이 서로 평행하게 유지되게 하중을 가하여(이하 변위방식이라 함) 실험을 하였다.

2. 탄성해석에 의한 τ_{max} 의 방향

인장하중을 받고 있는 균열을 포함한 Fig. 1과 같은 좌표계에서의 응력장은 Sneddon²⁰⁾에 의하여

$$\sigma_x = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left[\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{5}{2} \theta \right]$$

$$\sigma_y = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left[\frac{5}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{5}{2} \theta \right] \quad (1)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3}{2} \theta \right]$$

로 주어진다.

위의 (1)식에서, a는 균열의 길이, r은 균열선단에서의 거리를 나타낸다. (식1)에서 최대전단응력은 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau_{max} &= \left\{ \frac{1}{4} (\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 \right\}^{1/2} \\ &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \frac{\sin \theta}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

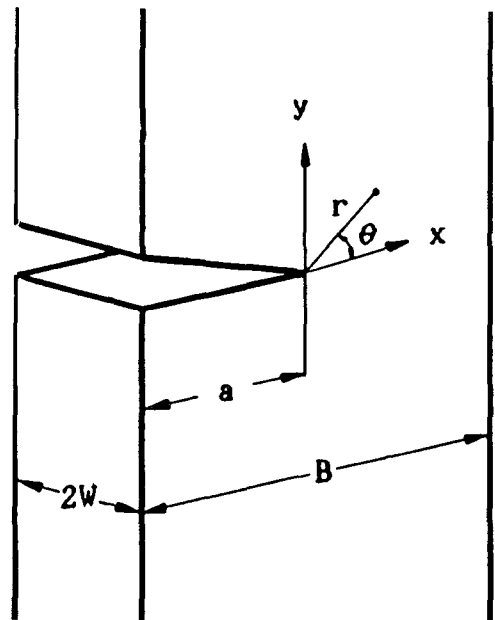


Fig. 1 Coordinate system

본 연구에서는 균열선단에서 $r=0 \sim 25.4 \mu\text{m}$ 인 $x = \text{const.}$ 한 위치에서 하중방향인 y방향에 따른 변형률을 측정하므로 이를 고려하여 $r = x/\cos\theta$ 로 하면

(2) 식은

$$\tau_{max} = \frac{\sigma}{2} \left[\frac{a}{2r} \sin^2\theta \cdot \cos\theta \right]^{1/2} \quad (3)$$

이 된다. 식(3)에서 $r = \text{const.}$ (본 실험의 경우 $x = 0 \sim 25.4\mu\text{m}$)로 하여 τ_{max} 의 분포를 계산하면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 τ_{max} 의 값이 $\theta = 55^\circ$ 에서 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

3. 실험

3-1. 시험편의 제작

균열선단의 국소영역에 피로하중을 받아 소성변형을 일으킨 재료에 대하여 고찰한 연구결과는 있으나,^{14, 21)~23)} 이들은 재료 표면에서의 변형거동에 대한 결과로서 균열선단의 실시간적인 3차원 변형거동을 파악할 수가 없었다.

따라서 재료내부에서의 변형거동을 실시간적으로 관찰하기 위해서는 시험편의 표면과 내부에서의 변형거동을 동시간에 관찰할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 실험에 사용되는 재료의 내부가 쉽게 관찰되는 재료가 좋다.

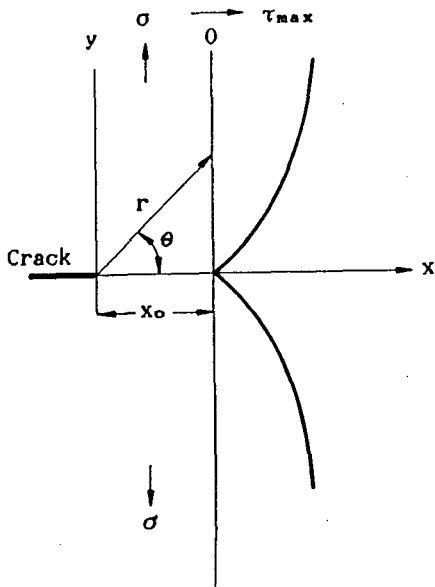


Fig. 2 Distribution of τ_{max} near the crack tip

본 연구에서는 부과용 실험모델용 재료의 대표적 종류인 에폭시(Epoxy)를 실험재료로 선택하였다. 시중에 시판되는 에폭시재료는 여러종류가 있으나 그 중 본 연구에서는 에폭시표면의 염색·탈색 등의 여러 실험조건에 부합되는 재료로서 Table 1.에 제시한 아랄다이트(Araldite CY-230)를 모재로 하고, 이에 연화재인 치오콜(Chiocoal HY-931)과 경화제(Hardner LP-3)를 상온에서 중합하여 사용하였다.

치오콜의 함유량에 따라 시험편의 탄성계수가 변하게 되며, 치오콜의 함유량이 일정량보다 많게 되면 재료가 연성을 띄게 되면서 Fig. 3에 나타낸 제작과정의 (3)공정인 염색공정에서 에폭시판 표면의 염색은 잘 되지만, 제(4)공정의 주물매입 공정이후에 내부격자의 경계가 불확실하게 된다.

한편, 이와 반대로 치오콜의 함유량이 일정량보다 적게 함유되면 에폭시 표면의 염색이 잘 되지 않아 격자형성에 난점이 많이 발생하는 등 어려움이 발생하므로 치오콜의 함유량은 여러 실험결과 $x = 30\text{Wt}\%$ 가 적합한 것을 알았다.

Table 1. Materials for specimen

Araldite CY-230	100Wt%
Chiocoal HY-931	x Wt%
Hardner LP-3	8 Wt%

1		PREPARATION OF EPOXY PLATE
2		DYING
3		REPRODUCTION OF FINE GRIDS WITH PHOTORESIST
4		BLEACHING BY CONC. HNO
5		REMOVING PHOTORESIST
6		EMBEDDING(MOLDING)

Fig. 3 Process for preparation of epoxy plate

Fig. 3은 시편제작과정에서 간략하게 나타낸 것이다. 위의 과정을 통하여 표면을 염색한 뒤, 그 위를 IC회로 제작용 포토레지스트(Photoresist) 감광액으로 10 μ m정도 도포시켜서 건조시킨다. 그리고 그 위에 일정한 피치를 가진 그리드 필름(Grid Film)을 놓고 노광시켜 현상시킨다.

그 다음 단계로 에폭시 판을 농초산액에 담근다. 그러면 포토레지스트가 있는 부분은 포토레지스트 감광액의 내산성 때문에 탈색되지 않고 나머지 부분만 탈색이 된다. 마지막으로 에폭시 판 위에 남아있는 포토레지스트 감광액을 제거하면 에폭시 판 표면에는 일정한 피치를 가진 염색격자가 형성된다. 격자의 형태는 여러가지를 할 수 있다. 예를 들면, 직선격자(Line Grid)로 할 경우는 그 해석에 또 다시 Moire 간섭법을 사용해야 하며 변형률의 정도도 10⁻³로 할 수가 없는 등 여러 문제가 있으므로 본 실험에서는 Fig. 4와 같이 점격자(Dot Grid)를 이용하기로 하였으며 격자간 피치는 50.8 μ m이다.

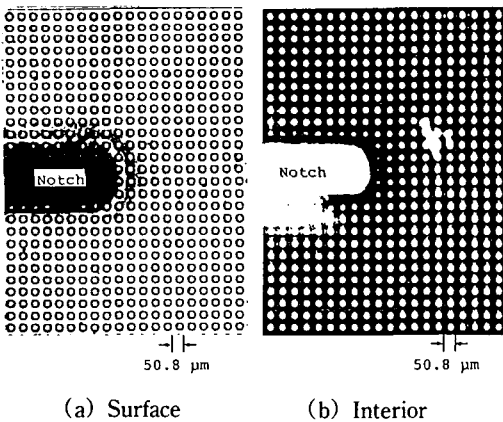


Fig. 4 Photograph of grids

위의 과정을 통하여 얻은 에폭시 판은 그 표면의 염·탈색과정으로 인하여 표면이 불안정하므로 40 $^{\circ}$ C의 온도에서 어닐링시켜 안정화시킨다. 또한 표면에 남아있는 휘발성분을 제거하기 위하여 진공 속에서 일정기간 유지시켜 휘발성분을 제거해야 한다.

재료의 3차원 파괴거동에 대해서는 시편에 매입시키는 염색격자를 시편의 내부중앙에서부터 표면에 이르기 까지 약 1mm의 간격으로 매입시킨 시편을

제작하여 시편의 내부에서 일어나는 균열의 초기발생점이나 변형률의 분포등, 재료의 3차원적인 파괴거동을 관찰하였다. 이 때에도 시편의 표면도 염색격자를 형성시켜 표면과 내부에서의 변형률을 동시에 측정하였다.

Fig. 4는 위의 과정을 통하여 얻은 시편의 표면과 내부에 형성시킨 염색격자의 사진을 나타낸 것이다. 시편에 넣은 예비균열은 t=0.2mm의 다이아몬드 커트를 이용하여 가공하였다.

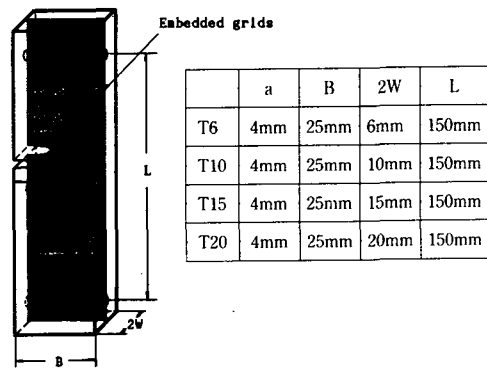


Fig. 5 Shape and dimensions of specimen

Fig. 5는 위의 과정을 통하여 완성된 에폭시 판에서 가공한 시험편의 대표적인 형상과 크기를 나타낸 것으로, 실험도중 시편이 변위일정 상태로 변형시키기 위하여 하중편 구멍을 균열깊이 방향으로 가공하였다.

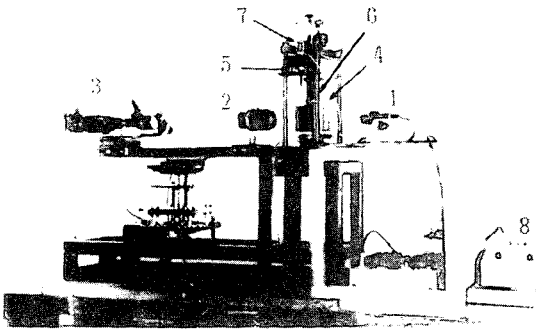
3-2. 실험방법

3-2-1 격자의 촬영

먼저 표면과 내부의 임의위치(예를 들면, 시편 내부중앙)에 염색격자를 형성시킨 시편을 Fig. 6과 같은 하중장치에 장착시킨다. Fig. 6에서, 시편의 표면에도 염색격자가 형성되어 있기 때문에 시편내부가 투과성이 떨어지므로 α -브로모나프탈린과 유동파라핀으로 된 시편과 동일한 굴절률을 가진 침지액이 담긴 탱크 속에 넣어서 하중장치에 장착시켰다.

격자의 촬영은 하중을 가하기 전에 시편의 표면과 내부에 매입된 균열선단 근방의 염색격자를 촬영한 뒤 소정의 하중을 가하여 시편에 변형을 준뒤에 동일장소의 염색격자를 촬영한다.

이 때 시편에 가하는 하중은 시편이 탄성범위 내에서 변형을 하도록 하중을 가한다. 그리고 균열선단으로 부터 원방에서의 변형률을 측정하기 위해서 균열선단으로 부터 약 $y=30\text{mm}$ 떨어진 곳에서의 변형전후의 염색격자도 촬영한다. 변형률 측정은 위의 과정을 통하여 네가티브 필름(Negative Film) 위에 담긴 격자상의 격자간 거리를 측정하여 변형률을 구한다.



- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1. Light source | 5. Loading apparatus |
| 2. High resolution lens | 6. Specimen |
| 3. Microscope | 7. Load cell |
| 4. Immersion fluid tank | 8. Strain meter |

Fig. 6 Arrangement of experimental device

3-2-2 변형률 측정방법

본 실험에서 시험편의 표면과 내부에 형성시킨 염색격자는 격자간 피치가 약 $50.8\mu\text{m}$ 이기 때문에 격자간 거리를 측정할 때에 미세한 오차라 하더라도 변형률 계산에는 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 격자간 거리측정을 육안으로 하게 되면 측정정도도 문제이지만 그에 따른 노력이나 시간이 걸리게 됨으로, 최근 활발히 이용되고 있는 컴퓨터를 이용한 화상처리 시스템을 이용하게 되면 시간의 절약은 물론 측정정도도 매우 높일 수 있게 된다.

그래서, 본 연구에서는 게이지 길이를 $0.025\text{mm} \sim 0.05\text{mm}$ 정도로 하여 10^{-3} 의 측정정도를 가진 변형률 분포를 얻을 수 있는 화상계측 시스템에 의하여 변형률을 측정하였다. Fig. 7은 화상계측 시스템의 구성도를 나타낸 것으로 마이크로 컴퓨터와 확대투영기를 조합하여 제작된 것으로 전 시스템은 모두 마이크로 컴퓨터에 의하여 제어된다.

Fig. 6의 장치에서 촬영된 격자상이 담긴 필름을 투영기의 x-y 스테이지 위에 놓고 스크린 위에 확대 투영한다. 스크린 중앙에는 포토센서(Photo Sensor)가 장착되어 있으며 이 센서가 스크린 위에 투영된 격자상의 광도를 읽는다.

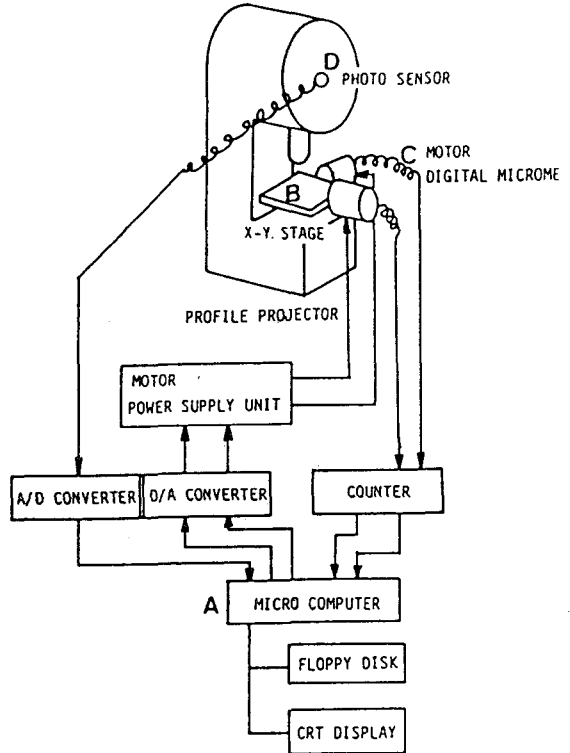


Fig. 7 Schematic diagram of image processing system

예를 들면, Fig. 4와 같은 원형 도트(Dot) 격자에 대하여 격자의 광도분포를 포토센서로 측정하여 Fig. 8과 같은 광도분포도를 얻으며 이 광도분포도에서의 광도를 2차함수로 근사하여 그 그래프의 정점을 격자의 중심점으로 한다. 그 계측은 먼저 수동으로 측정하고자 하는 격자를 컴퓨터에 기억시킨 후 컴퓨터를 자동이송시키면, 기억된 각 격자의 중앙부분이 스크린 중앙에 장착된 포토센서의 중앙에 오게 되어 포토센서가 격자의 광도분포를 측정하여 원형 격자의 중앙위치를 정확히 결정하게 된다. 이 과정을 변형전후의 격자에 대하여 실행을 하여 변형률을 구한다.

변형률을 구하는 방법은, Fig. 9와 같이 측정영역 내에 있는 4개의 격자점으로 구성된 4각형에 대하여, 이를 다시 두 개의 3각형 요소로 분할하여 각각의 3각형 요소의 변형률을 구하여 그 평균을 구하여 4각형 요소의 변형률로 한다.

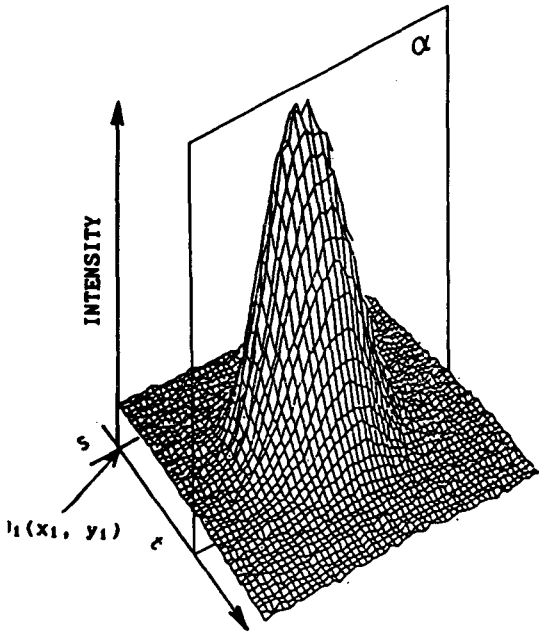


Fig. 8 Light intensity distribution of a grid

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 균열길이 a=4mm인 T20시편에서 균열 선단으로부터 r=0~25μm인 지점에서 하중방향에 따른 시편 표면에서의 변형률 ϵ_x 와 ϵ_y 의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 10에서, 변형률 ϵ_y 의 분포는 노치 선단의 원방에서 노치선단으로 접근할수록 그 값이 증가하다가 노치선단 국소영역(Local Area)에 이르면 그 값이 감소하며, 이 경향은 변형률 ϵ_{xy} 의 경우에도 노치선단 국소영역에서 변형률 ϵ_{xy} 가 감소한다는 것을 알 수 있다.

그리고 이 결과는 지금까지 알려져 온 선형파괴역학에서 고찰되어온 변위 V와 거리 r사이의 관계에

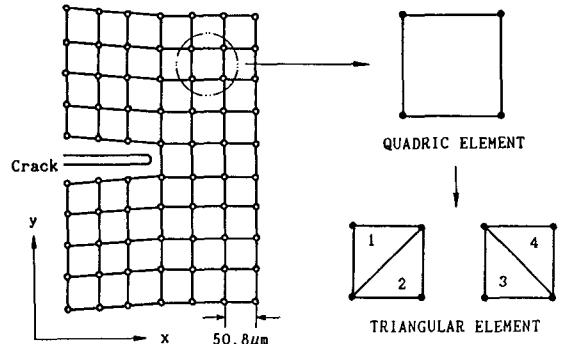


Fig. 9 Example for mesh generation of grids near the crack tip

서 성립하던 $r^{-1/2}$ 의 특이성이 균열선단 국소영역에서는 성립하지 않는다는 것을 의미한다.

Obata등은¹⁹⁾ 본 연구와 동일한 형태의 염색격자를 이용하여 탄성변형하에 있는 재료의 3차원 파괴현상에 대하여 선형파괴역학을 도입하여 변형률 ϵ_y 를 이용하여 응력확대계수 K를 구한 적이 있다. Fig. 11은 본 실험에서 얻은 변위 V와 $y^{1/2}$ 의 관계와 Obata 등의 결과를 비교한 것이다. Obata등은 균열선단에서의 변형률이 균열선단을 중심으로 상하 대칭으로 간주하여 변형률 ϵ_y 를 이용하여 균열선단에서의 응력확대계수 K를 구했다.

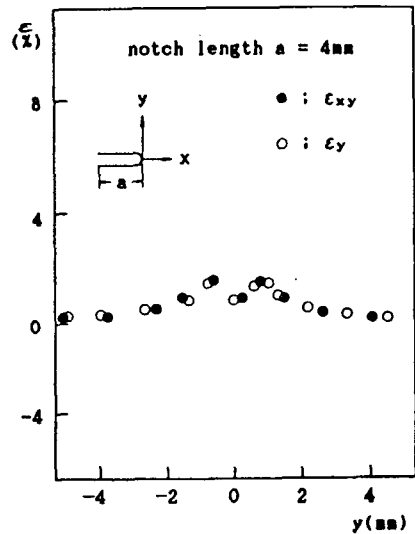


Fig. 10 Strain vs distance y from notch tip

Obata 등의 경우, 측정매체인 염색격자의 형성과정에서 염색격자가 균열선단으로부터 $r=0.1\text{mm}$ 정도 떨어진 곳에 위치해 있었으며, 또한 격자의 측정시에도 육안으로 하는 등 측정방법의 미흡으로 인하여 균열선단의 $|y| \leq 100\mu\text{m}$ 인 국소영역에서의 변형률을 직접 측정할 수가 없었다. 그래서 Obata 등은 균열선단 근방에서의 변형률을 Fig. 11의 실선으로 나타낸 바와 같이 균열선단 상하를 중심으로 해서 대칭이며 연속적인 것으로 가정하여 변형률을 구했으며 변형률 ϵ_y 는 균열선단에서 최대값을 가졌다.

그러나 본 연구결과에서 보면, 변형률 ϵ_y 나 ϵ_{xy} 의 최대값은 균열선단이 아니라 균열선단으로부터 임의의 거리 떨어진 지점에서 발생하며, 균열선단 근방의 국소영역에서는 변형률이 불연속이라는 것을 알 수 있다. 그리고 이 변형률 불연속영역은 균열선단을 중심으로 해서 약 $\sqrt{|y|} \leq 0.3\text{mm}^{1/2}$ 인 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해서 보면 균열선단 국소영역에서의 파괴거동의 미시적인 관찰에 종래의 선형과괴역학을 적용하여 고찰하여 온 응력확대계수(S.I.F.) K를 이용할 수가 없음을 알 수 있다. 그래서, 본 연구에서는 균열선단의 변형률을 이용하여 고찰하기로 하였다. 그리고 식(3)에서 주어진 $\tau_{xy\text{max}}$ 의 값의 변화가 x축과 55° 를 이루고 있는 점에 착안하여 균열선단에서의 변형률 $\epsilon_y, \epsilon_{xy}$ 의 등분포곡선을 구하여 보았다.

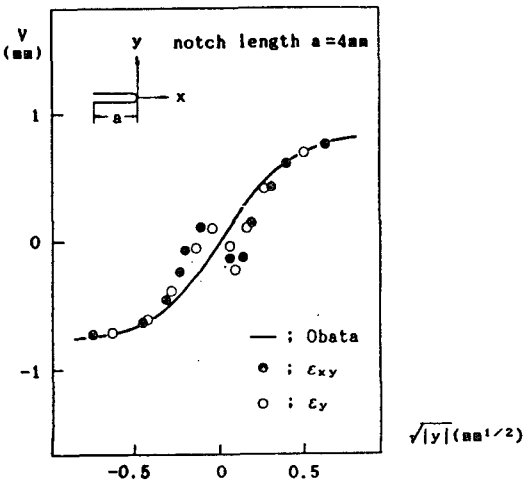


Fig. 11 Variation of V with distance $y^{1/2}$ from notch tip

Fig. 12는 T20시편에서 얻은 시편표면의 균열선단 근방에서의 변형률 $\epsilon_y, \epsilon_{xy}$ 의 등분포곡선을 나타낸 것이다. Fig. 12에 나타낸 바와 같이, 등변형률 분포곡선에서 $\epsilon_{y\text{max}}$ 을 곡선의 미근은 x축과 약 $\theta=70^\circ \sim 75^\circ$ 를 이루고 있지만, ϵ_{xy} 의 경우는 그 최대값이 x축과 $\theta=50^\circ \sim 60^\circ$ 를 이루고 있어 식(3)의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 균열선단 국소영역에서의 파괴거동은 응력확대계수에 의한 고찰보다는 변형률에 의해서 고찰하는 것이 좋으며 그 중에서도 ϵ_{xy} 에 의해서 고찰하여야 함을 의미한다. 그리고 이와 같은 경향은 다른 시편에서도 같은 결과를 얻었다.

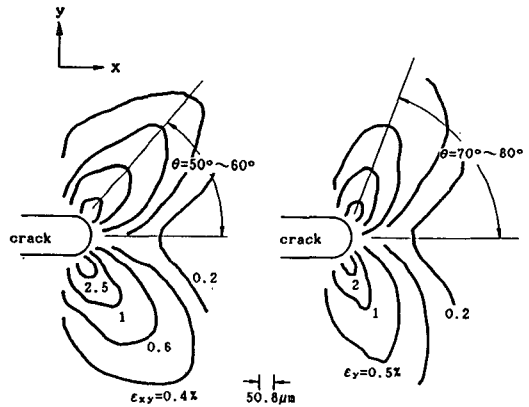


Fig. 12 Isochrometic lines of strain ϵ_y and ϵ_{xy} in the local area near notch tip

Fig. 13은 시편에 가해지는 하중의 크기에 따른 변형률분포의 변화를 나타낸 것으로, 변형이 적을 때는 변형률 ϵ_y 와 ϵ_{xy} 의 등분포곡선에서 그 최대값의 미근방향이 모두 x축과 $\theta=50^\circ \sim 60^\circ$ 를 이루고 있으나, 이는 시편의 변형이 작기 때문에 변형격자를 이용한 변형률의 측정오차에서 야기되는 것으로 생각된다. 그러나 변형이 커지게 되면 ϵ_y 의 등분포곡선에서 $\epsilon_{y\text{max}}$ 의 미근방향은 x축과 $\theta=70^\circ \sim 80^\circ$ 를 이루고 있는데 비하여 ϵ_{xy} 의 등분포곡선에서의 $\epsilon_{xy\text{max}}$ 의 미근방향은 x축과 $\theta=50^\circ \sim 60^\circ$ 를 이루고 있어 ϵ_{max} 의 미근방향은 하중의 크기에 관계없이 x축과 일정한 각도를 이루고 있음을 알 수 있다. 그리고 ϵ_{xy} 나 ϵ_y 모두 그 최대값은 균열선단 전방이 아니라 균열곡선의 곡률시작점 부근인 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 시편 T20의 두께방향에 따른 균열선단 국소영역에서의 등변형률 ϵ_{xy} 의 분포를 나타낸 것이다. 이 때 시편은 내부중양에서 표면으로 1mm 간격으로 염색격자를 형성시킨 시편들을 사용하여 실험을 하였다.

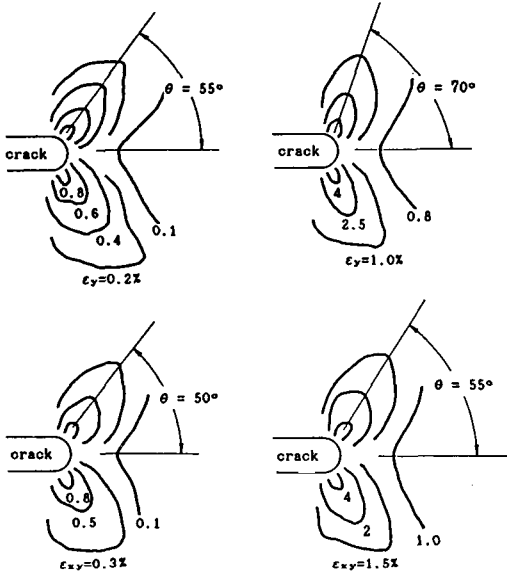


Fig. 13 Variation of isochromatic lines of ϵ_y and ϵ_{xy} according to load

Fig. 14에서, 표면에서는 변형률 ϵ_{xy} 는 양(+)의 값을 가지지만 표면에서 내부로 갈수록 그 값이 작아지다가 $z/W=0.7$ 부근에서는 균열선단이 변형률 $\epsilon_{xy}=0$ 인 중립역(Neutral Area)이 된다. 그리고 그곳에서 시편내부중양까지 균열선단은 음(-)의 변형률상태가 되며 그 값은 내부중심으로 갈수록 커진다. 그 이유는 균열선단이 z방향으로 3차원 변형을 일으키기 때문이다. 이 3차원 변형은 실험시에 Moire무늬나 Michelson간섭계를 이용하여 측정하려고 하였으나 어려웠으며 이는 차후 실험기기의 정도가 향상되면 가능하리라 생각한다.

한편, T10에서도 T20에서와 같이 내부중양에서는 균열선단은 압축상태의 변형률이었으나 이 경우는 T20과는 달리 $\epsilon_{xy}=0$ 인 중립역이 $z/W=0.7$ 이 아니라 내부중양에서 표면으로 $z/W=0.4$ 인 지점에서 발생하였다.

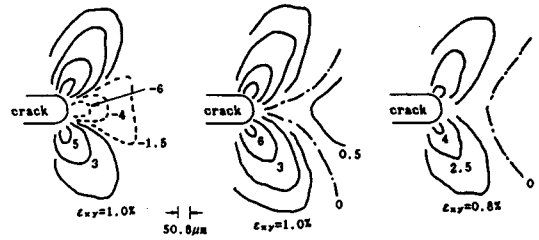


Fig. 14 Isochromatic lines of ϵ_{xy} in the thickness direction

그리고 T6의 경우는 시편의 전두께 방향에서의 변형률이 모두 양(+)의 값을 띄어 균열선단에서의 $\epsilon_{xy}=0$ 인 중립역이 존재하지 않았다.

Fig. 15는 각 시편에서의 두께방향에 따른 균열선단의 최대변형률 $\epsilon_{xy\max}$ 의 값을 나타낸 것이다. Fig. 15에서, T20시편의 경우 두께방향에 따른 $\epsilon_{xy\max}$ 의 분포를 보면, 내부중양에서 표면으로 갈수록 그 값이 증가하다가 $z/W=0.7$ 부근에서 최대가 되었다가 그 이후부터 표면에 이르기까지는 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 그리고 표면에서의 값도 내부중양에서의 값보다 현격히 적다는 것을 알 수 있다. 한편, T10의 경우는 내부중양에서 표면으로 $z/W=0.4$ 까지는 T20의 경우와 같이 $\epsilon_{xy\max}$ 가 증가하다가 그 이후 표면에 이르기까지 급격히 감소한다. 그리고 T6의 경우는 내부중양에서 $\epsilon_{xy\max}$ 이 최대이며 중양에서 표면에 이르기까지 그 값이 심한 감소현상을 보이고 있다.

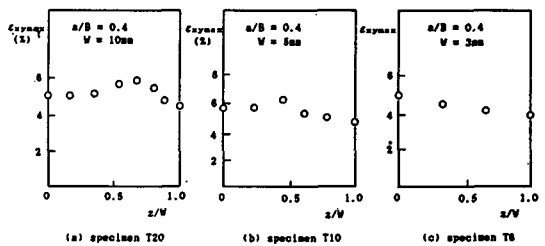


Fig. 15 Distribution of ϵ_{xy} according to various specimen

Fig. 15에서 T20의 결과는 Sumi²⁴⁾ 등의 유한요소 해석결과와 Obata¹⁶⁾의 결과와 유사한 경향을 띄고

있으나 그들의 결과는 응력확대계수(S. I. F.) K_I 과, y 방향에 따른 변형률 ϵ_y 에 의한 고찰결과로서 그 최대값의 위치가 $z/W=0.85\sim 0.9$ 로서 본 실험결과와 다르다. 이는 고찰인자와 하중조건이 상이 때문으로 생각된다.

Fig. 15에 나타낸 바와 같이 재료두께 방향의 변형률 $\epsilon_{xy\max}$ 의 분포는 재료의 두께에 따라 서로 다르게 나타나며 그 최대값의 위치가 시편의 두께가 얇을 경우에는 판의 내부중앙에서 나타나지만 판두께가 두꺼워 질수록 표면쪽으로 이동한다는 것을 알았다.

Fig. 16은 Fig. 15의 결과를 시편의 실측길이에 의한 시편두께 방향에 따른 변형률 $\epsilon_{xy\max}$ 의 분포로 나타낸 것이며 T15는 두께 15mm시편의 결과이다. Fig. 16에서, T15와 T10 그리고 T6의 결과는 T20의 결과와 동일곡선상에 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 후판(본 실험의 경우 두께 20mm)에서의 균열선단에서의 $\epsilon_{xy\max}$ 의 3차원적인 변형률분포를 구하면 그 보다 얇은 두께를 가진 판의 $\epsilon_{xy\max}$ 의 3차원적인 변형률분포를 구할 수 있음을 알 수 있다. 그리

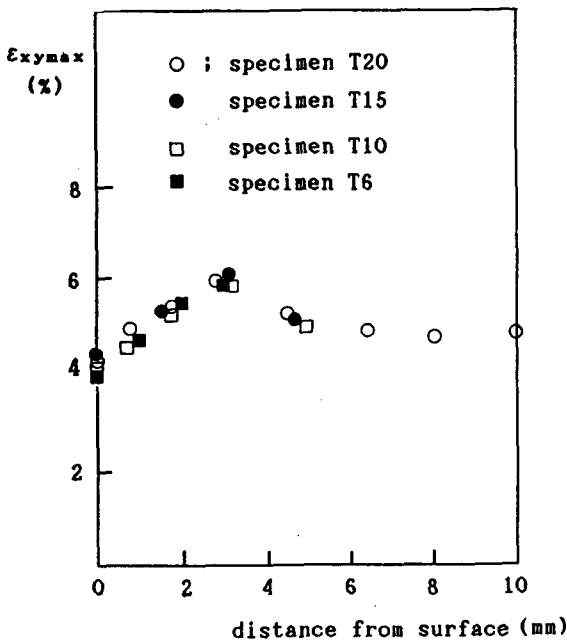


Fig. 16 Variation of $\epsilon_{xy\max}$ in the thickness direction along a notch tip

고 시편의 두께에 관계없이 전 두께방향에서 최대값의 $\epsilon_{xy\max}$ 과 표면에서의 ϵ_{xy} 와의 값이 $\epsilon_{xy\min}/\epsilon_{xy\max} = 0.7$ 로서 $(1-\nu^2) = 0.8$ (본 실험에 사용되는 시편의 $\nu = 0.43$)과 거의 일치하고 있어 표면에서의 변형률을 알면 시편내부에서의 최대변형률을 파악할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

변위일정하에서 균열을 가진 판의 균열선단에서의 파괴거동에 염색격자법(Embedd Fine Grid Method)을 이용하여 균열선단 국소영역에서의 3차원적인 파괴거동을 실시간적이고 마이크로적으로 관찰하였으며 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 균열선단에서 $\sqrt{|y|} < 0.3\text{mm}^{1/2}$ 의 국소영역(local area)에서는 V 와 $\sqrt{|y|}$ 사이에 직선관계가 성립하지 않는다.
2. 균열을 가진 후판에서 두께방향에 따른 균열선단의 변형률을 알면 그보다 얇은 판의 3차원적인 변형률을 파악할 수가 있다.
3. 균열을 가진 판에서 균열선단의 최대변형률은 노치전방이 아니라 노치곡선의 곡률시작점 부근이다.
4. 판의 표면과 내부에서의 균열선단에서 최대변형률의 차는 $1-\nu^2$ 과 일치한다.

후 기

이 논문은 1988년도 학술연구조성비(대학부설연구소)에 의하여 수행되었으며 관계자 제위에게 심심한 사의를 표한다.

References

1. G. R. Irwin, "Crack Extension Force for a Part-Through Crck in a Plate", Journal of Applied Mechanics, Vol. 29-4, 1962, pp. 651~654.
2. F. W. Smith, A. F. Emery and A. S. Kobayashi, "Stress Intensity Factors Semicircular Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 34, No. 4, 19

- 67, pp. 953~959.
3. F. W. Smith and M. J. Alavi, "Stress Intensity Factors for a Penny Shaped Crack in a Half Space", *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 3, 1971, pp. 241~254.
 4. R. C. Shah, A. S. Kobayashi, "Stress Intensity Factors for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Semi-Infinite Solid" *International Journal of Fracture*, Vol. 9, 1973, pp. 133~146.
 5. I. S. Raju and Jr. J. C. Newman, "Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, 1979, pp. 817~829.
 6. 西岡, 矢川, 小倉, "表面半圓形き裂の應力擴大係數の有限要素解釋", *日本機械學會論文集*, Vol. 770, No. 11, 1977, pp. 1~3.
 7. 角, 山本, "貫通き應力擴大係數に及ぼす三次元影響", *日本機械學會論文集*, Vol. 770, No. 1, 1977, pp. 18~25.
 8. 石田, 野口, "體積方法による三次元き裂問題の解釋ついて", *日本機械學會論文集*, Vol. 49, No. 6, 1983, pp. 707~717.
 9. 林, 阿部, "半圓板状及び半橢圓板状表面き裂の應力擴大係數", *日本機械學會講演論文集*, Vol. 790-3, 1979, pp. 137~144.
 10. C. W. Smith, "Use of Three-Dimensional Photoelasticity in Fracture Mechanics", *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 12, 1973, pp. 539~544.
 11. 宮本, 城田, "モアレ法による三次元應力擴大係數の測定", *日本機械學會論文集*, Vol. 760-1, 1976, pp. 179~182.
 12. D. B. Barker and M. E. Fourny, "Three-Dimensional Speckle Interferometric Investigation of Stress Intensity Factor Along a Crack Front", *Experimental Mechanics* Vol. 17, No. 7, 1977, pp. 241~247.
 13. A. J. Durelli and I. M. Daniel, "A Non Destructive Three-Dimensional Strain Analysis Method", *Trans. ASME Series E*, Vol. 83, 1961, pp. 83~86.
 14. 島田, 古屋, "微小格子法による疲労き裂先端の實時間的ひずみ測定", *日本非破壊検査協會論文集*, Vol. 26, No. 7, 1977, pp. 463~466.
 15. 島田, 小幡, 尾谷, "染め入り格子による三次元變形測定法", *日本非破壊検査協會論文集*, Vol. 28, No. 8, 1979, pp. 478~484.
 16. 小幡, 島田, 尾谷, "染め入り格子による貫通片切欠きのK_I値分布の測定", *日本非破壊検査協會論文集*, Vol. 29, No. 8, 1980, pp. 525~531.
 17. 小幡, 島田, 千葉, "染め入り格子による Compact Tension 試験片及び圓弧状表面切欠きの値の測定", *日本非破壊検査協會論文集*, Vol. 30, No. 8, 1981, pp. 559~563.
 18. 小幡, 園田, 池永, "染め入り格子による貫通片切欠きの値分布の測定", *日本非破壊検査協會論文集*, Vol. 32, No. 8, 1983, pp. 608~613.
 19. M. Obata and H. Shimada, "Embedded Fine-Grid Method Applied to 3-Dimensional S.I.F. Analysis", *Experimental mechanics*, Vol. 25, No. 1, 1985, pp. 6~11.
 20. I. N. Sneddon, "The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Crack in an Elastic Solid", *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, Vol. 187, 1946, pp. 229~238.
 21. 北川, "アルミニウムの疲労き裂先端の塑性ひずみ分布", *日本材料學會論文集*, Vol. 23, No. 244, 1974, pp. 64~68.
 22. H. Shimada, Y. Huruya, "Application of Crack-tip-strain Loop to Fatigue-crack Propagation", *Experimental Mechanics*, Vol. 21-11, 1981, pp. 423~428.
 23. 西谷, 高尾, "疲労き裂先端におけるき裂開口状態の連續觀察", *日本材料學會論文集*, Vol. 23, No. 244, 1974, pp. 69~74.
 24. 角, 山本, "貫通き裂の應力擴大係數に及ぼす三次元影響", *日本機械學會講演論文集*, Vol. 770-1, 1977, pp. 18~25.