

# 탄소성 동적 균열전파의 만곡현상

(Dynamic elastic-plastic Crack Curving Phenomenon)

이 역 섭(인하대학교 기계공학과), 장 형 진\*(인하대학교 대학원)

O. S. Lee and H. J. Chang (Inha Univ.)

## ABSTRACTS

The elastic dynamic crack curving could be obtained by controlling the loading rate, the initial crack-tip blunting to store much energy before crack initiation and the magnitude of reflected wave from finite boundaries. However there is no theoretical and experimental elastic-plastic dynamic curving study. This paper proposes a specimen geometry for a study of dynamic elastic-plastic crack curving and presents a preliminary result. The specimen has a blunt physical crack tip on a side, and a round notch tip on the other side. From the experiment using this specimen, it is found that the narrow plastic zone ahead of the round notch tip produces the change of load direction and anti-symmetry of the dynamic isochromatics, and each result causes the crack curving phenomenon. After a certain time, as the elastic-plastic crack gets close to the round notch tip near, the degree of the crack curving get larger. The elastic crack curving propagates more sensitively to the surround of crack tip than the plastic crack curving does. The dynamic elastic-plastic crack curving is found to be proportional to the CTOA(the crack tip opening angle). The dynamic elastic-plastic crack may propagate in the direction perpendicular to the loading. An apparant strip yield zone which is similar to the Dugdale strip yield zone is noted ahead of the physical crack tip.

Keywords : 탄소성 동적 균열(Dynamic Elastic-Plastic Crack), 균열전파의 만곡(Crack Curving), 동적 광탄성(Dynamic Photoelasticity), 소성역(Plastic Zone), 탄소성 동적 등색선(Dynamic Elastic-Plastic Isochromatics)

### 1. 서론

일반적으로 파괴 개시 인성치는 하중률에 따라서 같은 재료라 할지라도 현저한 차이를 보이고 있고, 또 균열이 불안정하게 전파되고 있을 경우에는 소위 동적 파괴인성값( $K_{ID}$ )은 균열의 전파속도에 따라서 변화한다<sup>(1)</sup>. 이러한 동적 탄성 파괴 역학 연구의 필요성과 대형기계, 구조물의 급속한 파괴를 야기하는 동적 파괴의 특수성에 의해 동적 탄성 파괴 역학은 국내외적으로 많은 연구가 수행되어 왔고, 많은 실험 방법과 이론이 개발되어 왔다.

특히 균열 진전 방향에 대한 예측, 안정성, 조정, 만곡현상에 대해서도 많은 연구가 이루어졌다. 그 중에서 동적 탄성 균열의 만곡현상은 하중률, 균열개시 전에 상당량의 에너지를 저

장하는 초기 균열선단의 Blunting, 유한 경계면에서 반사된 반사파형의 크기등을 조절함으로써 얻을 수 있다는 것이 알려졌다<sup>(2)-(6)</sup>. 그리고, 순간적으로 기록된 동적 등색선을 통해 탄성 균열의 만곡 방향을 분석할 수 있는 중요한 변수  $r_c$ 을 발견하게 되었다. 여기서  $r_c$ 은  $r_0$ 의 최소값을 의미한다<sup>(2)</sup>.

$$r_c = \left(\frac{1}{128\pi}\right) \left\{ \left(\frac{K_I}{\sigma_{ox}}\right) V_0(C_1, C_2, C) \right\}^2$$

여기서  $K_I$  : 모드 I 상태에서의 응력집중계수

$\sigma_{ox}$  : 유동 응력항

$V_0(C_1, C_2, C)$  :  $C_1$ (종파속도, dilatational wave velocity),  $C_2$ (횡파속도, distortional wave velocity),  $C$ (균열전파속도, crack velocity)의 함수

이에 비해 탄소성 동적 파괴역학 연구는 균열선단 주위에 생기는 소성영역이 커서 선형 탄성 파괴역학의 개념을 사용할 수 없게 되어 이론적인 모델링이 쉽지 않고, 적절한 실험방법이 개발되지 않는 이유로 크게 진전을 보이지 않고 있다.

최근에 몇몇 연구자(Rosakis, Lee)<sup>(1)</sup>에 의해 탄소성 동적 파괴역학에 관한 실험이 이루어지고 있다.

그러나, 탄소성 동적 균열 전파의 만곡 현상에 대한 이론이나 실험들은 보고되지 않은 상태이다.

이러한 현상은 탄소성 동적 균열전파 현상 문제 자체의 복잡함과 적절한 실험 테크닉의 부족, 그러한 복잡한 현상들을 다루는 이론적인 해석의 미비에 기인한다<sup>(6)</sup>.

본 연구에서는 광탄성 실험방법에 의한 탄소성 동적 균열 만곡 현상을 관찰하기 위한 시편의 형상을 제안하고, 예비 실험을 통해, 탄소성 동적 균열 전파의 만곡현상을 정성적으로 해석하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2-1. 시험편 형상

탄소성 균열이 동적으로 전파하면서 만곡(Curving)하는 현상을 관찰하기 위한 광탄성 시편을 제안하기 위해 두께 1.6mm의 폴리카보네이트 시편을 Fig. 1과 같이 제작하였다.

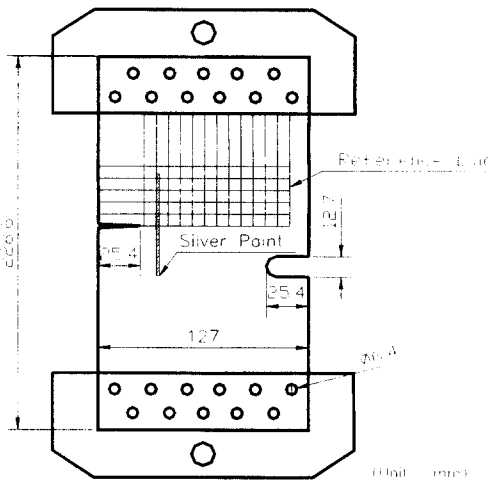


Fig. 1 Specimen geometry for studying dynamic elastic-plastic crack curving

만곡 현상에 영향을 주는 소성 균열을 발생시키기 위해 한 쪽면에 길이 25.4mm, 폭 12.7mm의 원주형 노치를 가공하

고, 다른쪽은 균열선단이 자연균열에 가깝도록 Saw Cutter를 이용하여 두께 0.5mm, 길이 25.4mm로 가공한 후 연도칼로 끝부분을 가공하였다.

시편 상·하 단면에 일정간격으로 홈을 가공하고, 그립(Grip)에 장착함으로써 균열 분포하중이 작용할 수 있도록 하였다.

시편의 표면엔 광탄성 실험장치로 촬영한 후 실제길이를 분석, 확인할 수 있도록 Reference line을 표시하였다.

초기 균열선단부근에 은분페인트(Silver Paint)를 얇게 칠하여 전체 시동 범위를 조절할 수 있도록 하였다.

### 2-2. 동적 광탄성 실험장치

고속 멀티스파크 카메라 세트, 하중장치, 필드렌즈(field lens)와 원형 편광 장치 세트, 컨트롤러로 구성된 동적 광탄성 실험장치를 Fig. 2에 블록 다이어그램으로 나타내었다.

광학적 경로는 고속멀티스파크 시스템에서 나온 빛이 필드렌즈를 거쳐 편광판을 통과하면서 평행광으로 바뀐다. 이 평행광은 시편을 통과하면서 매우 빠른 속도로 진전하는 응력의 흐름을 순간 포착하여 다시 분광판을 지나 필드를 통과하면서 광원에서 나온 빛은 16개의 렌즈가 부착된 카메라 시스템에 순차적으로 각각의 블록렌즈를 통하여 카메라 스크린(film)에 이미지를 보낸다(카메라 속도 20만 fps).

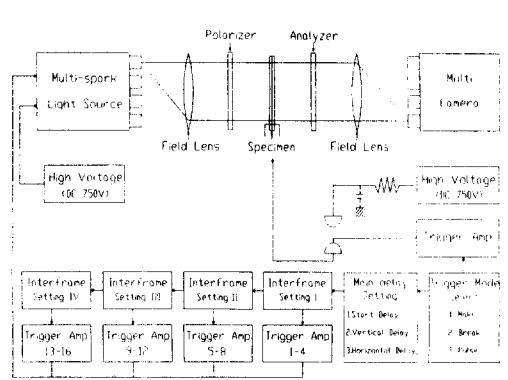


Fig. 2 Block diagram of photoelasticity experimental apparatus

하중장치는 일반 인장 실험 장치로 4003N의 힘을 가하였다. 시간은 등간격이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

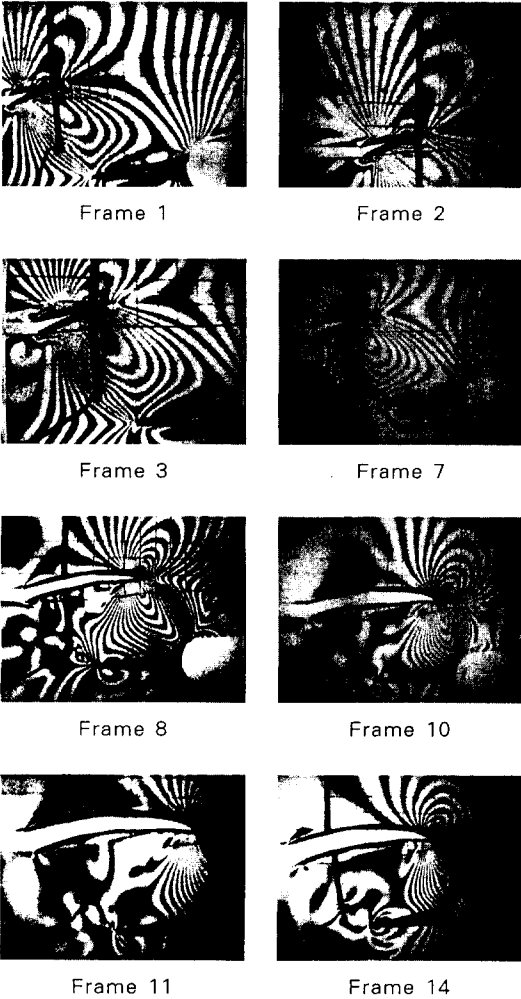


Fig. 3 Dynamic elastic-plastic isochromatic fringe pattern

Fig. 3은 광탄성 실험을 통해 얻어진 사진들을 Frame별로 구분해 놓은 것으로 인장하중 P(4003N)가 작용했을 때, 균열과 라운드된 노치선단앞에 각각의 소성영역이 생기는데, 라운드된 노치선단 앞의 소성영역이 초기 균열 선단 앞의 소성영역보다 넓고, 먼저 생겨남을 알 수 있다.

라운드된 노치선단의 개구(Opening)가 노치선단의 소성영역 앞에서의 인장응력을 감소시켜 소성영역의 폭이 계속해서 좁아지고 마침내 하나의 점으로 집중된다.

Frame 1과 Frame 2에서 날카로운 노우즈 현상(Nose

Type)의 소성영역 선단이 멈춘후에 초기균열선단앞의 소성영역이 불안정하게 되고, 급속도로 성장하기 시작한다.

Frame 1을 보면 균열선단이 성장하면서부터 만곡현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 만곡현상은 Frame 8에서 노치선단 소성영역의 집중점을 중심으로, 균열의 기울기가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이것은 소성영역의 집중점이 균열에 수직으로 작용하는 인장하중의 방향에 영향을 끼쳐 시편의 휘어짐과 동시에 하중방향에 직각인 방향으로 균열이 전파되는 것으로 예측할 수 있으며, 더불어 집중점의 응력장에 대한 간섭의 영향으로 인해 동적 등색선의 비대칭성의 발생과 유도 응력장의 변형에 의해 나타나는 것으로 생각된다. 시편에 작용하는 하중방향의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

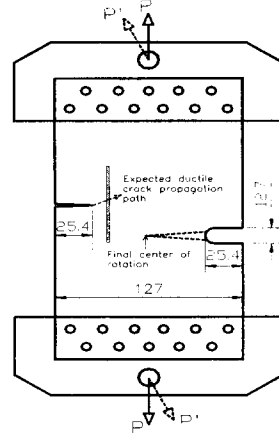


Fig. 4 The change of load direction

Fig. 5는 균열 선단의 위치에 대응되는 소성역의 크기를 비교해 놓은 것이다.

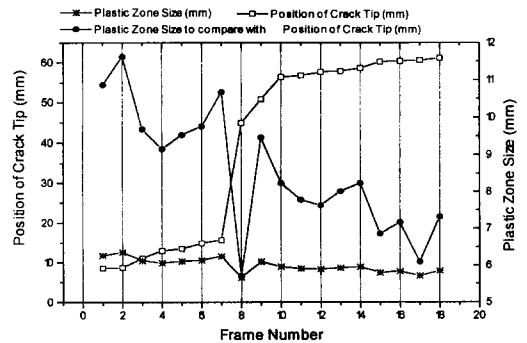


Fig. 5 사진 Frame Number에 대한 균열선단의 위치와 그에 비례하는 소성역의 크기

초기 균열선단의 길이는 소성영역의 크기보다 작다. 균열선단과 균열선단에서의 소성영역도 만곡현상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이때 소성영역이 더욱 크게 나타난 것은 작용하는 하중이 소성일로 변환되어 소성영역을 증가시키는 일로 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

균열이 갑자기 진전하는 Frame 8의 경우 동적 에너지 해방률(energy release rate)이 갑자기 감소하여 소성영역의 크기가 급격히 줄어드는 경향을 관찰할 수 있다. 이 경우 균열의 만곡(Curving)은 휘어져 내려가기 시작한다.

Frame 8부터 균열선단의 경로가 소성역의 경로보다 민감하게 곡선으로 나타남을 알 수 있다. 소성역의 방향이 민감하게 나타나지 않는 것은 소성영역의 관성력과 소성영역의 특성등에 의한 것으로 추측되어지나 많은 연구가 필요하다.

Fig. 6은 균열선단 전파 길이와 소성영역의 변화량을 비교해 놓은 것이다.

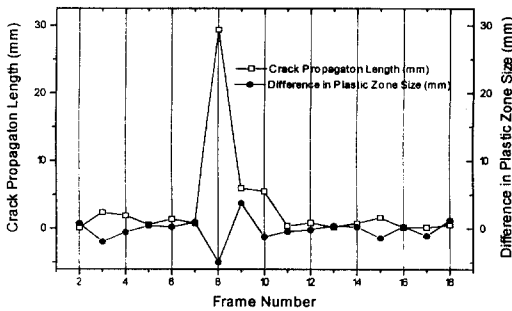


Fig. 6 사진 Frame Number에 대한 균열선단의 전파 길이와 소성영역의 변화량

사진을 통해 균열의 만곡현상은 초반, 중반, 후반에 걸쳐 후반에서 힘이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이때 소성영역과 균열의 크기는 크게 변하지 않는다. 즉 균열의 전파길이가 가장 큰 중반에서는 오히려 만곡현상이 분명하지 않고, 균열의 전파 길이가 크지 않은 후반에서 분명하게 나타난다. 이는 균열의 전파속도와 반대인 양상을 나타내는 것이다. 그리고, 균열이 노치 선단에 가까이 갈수록 힘이 크게 나타났다. 따라서, 노치선단의 응력장에 대한 영향을 신중히 고려해야 할 것이다. 균열이 갑자기 진전된 후에는 감소된 에너지 해방률이 다시 증가되어 그만큼의 소성영역이 다시 증가되는 양상을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 균열선단 개구각과 소성영역 선단각을 나타낸 것이다.

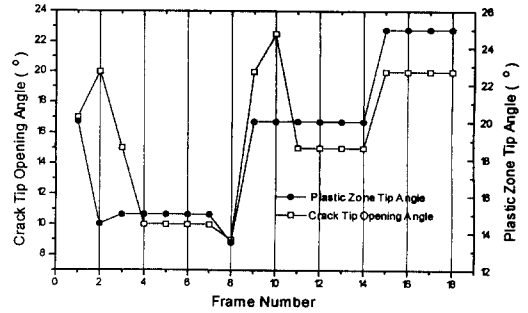


Fig. 7 사진 Frame Number에 대한 균열선단 개구각과 소성영역 선단각의 변화양상

균열전파속도가 안정되면 그에 따라 균열선단개구각 및 소성영역 선단각도 안정되나, 그 크기에 있어서 균열의 만곡의 정도가 클 때 개구각 및 선단각은 더욱 커진다. 즉 주위의 소성영역에 의한 간섭과 저항으로 만곡현상의 정도가 커지고, 균열선단 개구각과 소성영역의 선단각에 미치는 힘에 의해 개구각 및 선단각이 커지는 것으로 추측할 수 있다.

#### 4. 결론

탄소성 동적 균열의 만곡현상을 관찰하기 위한 시편을 제안하고, 예비실험을 통해 만곡현상을 알아보았다. 특별히 균열의 만곡현상에 대해 하중 작용 방향의 변화, 노치선단의 응력장, 소성영역의 관성, 균열의 전파길이, 균열선단 개구각에 대해 검토하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 노치선단에서의 소성영역의 크기와 그 집중점은 시편에서 응력장의 비대칭성과, 하중방향의 변화를 야기시키며, 이러한 요소들이 균열의 만곡현상에 중요한 인자임을 알 수 있다.
2. Frame 8번부터의 만곡현상, 즉 중반이후부터의 만곡현상에서 균열선단이 소성영역보다 민감하게 반응한다. 이러한 것은 소성영역의 관성력과 소성영역의 특성등에 의한 것으로 추측되어지나 많은 연구가 필요하다.
3. 탄소성 동적 균열은 하중방향에 직각으로 전파한다. 본 실험에서는 노치의 소성영역 집중점이 하중방향을 변화시킴으로 균열 방향이 하중방향에 직각인 방향으로 만곡현상을 나타내며 전파한다.
4. 균열선단의 전파 길이가 안정적일 때 균열선단 개구각과 소성영역 선단각은 안정적이다. 그러나, 개구각 및 선단각의

크기가 클 때 만곡현상이 크게 나타나고, 작을 때 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

5. 균열선단 앞에 나타난 항복 영역은 Dugdale 스트립 항복 영역과 비슷한 항복 영역으로 나타난다. 따라서 더욱 많은 연구를 통해 모드 II, 모드 III의 요소와 동적 탄소성 균열 만곡 현상에 따른 파라미터를 포함시켜 이론적 규명을 할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 이 역 섭, "파괴 강도 설계", 인하대학교출판부, 1990

2. M. Ramulu, and A.S. Kobayashi, "Dynamic Crack Curving-A Photoelastic Evaluation," *Experimental Mechanics*, 23 (1), 1-9 (March 1983).

3. Y. Xu and L.M. Keer, "Crack Curving in Anisotropic Elastic Solids," *Engineering Fracture Mechanics* 44 (1) 63-73 (1993)

4. B. Cotterel, "On Fracture Path Stability of Cracks," *Int. J. of Fract. Mech.*, 3, 526-533 (1966).

5. R. Streit, and I. Finnie, "An Experimental Investigation of Crack-path Directional Stability," *Experimental Mechanics*, 20 (1), 17-23 (Jan. 1980)

6. O.S. Lee, "A Specimen for Elastic-Plastic Crack Curving," *Experimental Mechanics*, 9 (5), 28-29 (May. 1985)