
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 4 號 1998 年 11 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 4, November 1998

노치 선단(균열 주위)의 기하학적 형상이 동적 응력집중계수(동적균열전파)에 미치는 영향

이억섭*, 전현선**, 변귀환

Effect of Notch Geometries on Dynamic Stress Concentration Factor

by

O.S. Lee*, H. S. Jeon** and K. H. Byun

요 약

노치의 기하학적 형상이 동적응력집중계수에 미치는 영향을 동적 광탄성 시험법을 이용하여 규명하였다. 동적 하중 장치로부터 발생하는 탄성파에 의하여 여러 종류의 노치의 기하학적 형상 주위에서 발생하는 동적응력장을 $10^6/\text{sec}$ 의 촬영 속도를 갖는 Cranz-Shardin형 카메라를 사용하여 12장면을 기록하였다. 다양한 노치 선단의 형상에 대한 동적응력특이치수를 간단한 모델링식으로 결정하는 방안을 제시하고, 여러 가지 노치의 기하학적 형상에 대응하여 발생하는 동적응력집중현상을 비교하는데 이용하였다. 동적 광탄성 시험법으로 얻어진 동적응력장을 면밀히 해석하여, 동적응력집중계수가 노치의 형상에 크게 의존함을 규명하였다.

Abstract

In this paper, the effect of notch geometries on dynamic stress concentration was investigated by using the dynamic photoelasticity and the drop weight loading system. Dynamic stress fields arisen by elastic wave through the loading system around various types of notch geometries were captured by using $10^6/\text{sec}$ frame rate Cranz-Shardin camera system with 12 photographic frames. We found that dynamic stress concentrations around the notch tip and corner were highly dependent on the change in notch geometries. The orders of dynamic stress singularity were determined with respect to varying geometries of notches and we explained dynamic stress concentration in terms of the orders of dynamic stress singularity.

접수일자 : 1997년 6월 28일, 재접수일자 : 1998년 5월 22일

*정회원, 인하대학교 기계공학과

**학생회원, 인하대원 기계공학과

1 서론

노치나 구멍 또는 이종 물질이 존재하는 선박 혹은 항공기 구조물이나 부재에 동적하중이 작용할 때, 물체 내부의 응력과 변형은 파형의 형태로 전파된다. 이 파형이 물체내부의 불연속부분을 만나면 파형의 산란 (즉, 반사와 굴절)이 일어나고 이것으로 인해 그 부근에서는 응력의 집중도가 증가하게 된다 [1]. 이러한 동적응력집중 현상은 정적응력집중 현상과는 매우 다르게 나타나며 정적하중에서와는 판이하게 구조물 강도의 약화를 초래하는 경우가 많으므로 세심한 주의를 요한다.

본 연구에서는 노치 형태의 불연속부분을 갖는 구조물이 동적 하중을 받는 경우, 노치 선단의 기하학적 형상이 동적응력집중에 미치는 영향을 정확하게 규명하고자 동적 광탄성 시험법을 이용한 실험적인 연구를 수행하였다. 노치 선단의 응력집중 현상을 정량적으로 비교하기 위하여 간단한 모델링식을 제안하고, 특이응력이 발생하는 노치의 형상에 대해서 동적응력특이치수를 산출하여 정적응력특이치수와 비교하였다.

2. 이 론

동적하중을 받는 노치 부근의 응력집중에 관한 정보들은 동적 광탄성 등색선 프린지 사진으로부터 얻을 수 있으며, 노치 선단의 형상이 동적응력집중도에 미치는 영향은 시간에 따른 동적 등색선 프린지 형태의 변화양상을 면밀히 해석하여 규명할 수 있다. 응력광학법칙에 의하면 등색선 프린지 차수 (N)와 최대전단응력 (τ_m)은 식(2.1)과 같은 직접적인 관계가 있으며 동적 광탄성 실험방법으로 동적응력집중에 관한 정량적인 해석이 가능하다 [2].

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{Nf_\sigma}{2t} \quad \text{--- (2.1)}$$

여기서, N 은 광탄성 등색선 프린지 차수, f_σ 는

광탄성 재료의 프린지 상수, t 는 시편의 두께, σ_1, σ_2 는 평면 주응력이다.

본 연구에서는 노치의 형상이 동적응력집중현상에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위하여 충격 후 동일 시각에서 노치가 있는 시편의 노치 선단이나 노치 코너에서의 프린지 차수 (N_i)와 노치가 없는 시편에서 노치 선단이나 노치 코너에 대응하는 지점에서의 프린지 차수 (N_b)의 비로서 동적응력집중계수 (K_d)를 정의하였다 ($K_d = \frac{N_i}{N_b}$).

이 계수를 사용하면 노치 선단부근의 동적응력집중 양상을 시간의 함수로 나타낼 수 있으며 충격 하중을 받은 후 시간의 변화에 따라서 노치 선단의 형상이 최대전단응력에 미치는 영향을 규명할 수 있는 정보를 제공하게 된다.

노치의 곡률 반경이 점점 작아질 경우에는 노치 선단에서의 응력특이성에 의해 기인하는 등색선 프린지의 밀집성 때문에 정확한 프린지 차수를 읽기가 쉽지 않다. 노치선단의 응력특이성에 관하여는 지난 수십년간 여러 연구자들에 의해 연구되었으며 어떤 물체력도 존재하지 않는 균질 등방성재료에 대한 정적응력성분은 다음과 같은 형태로 표현된다 [3~8].

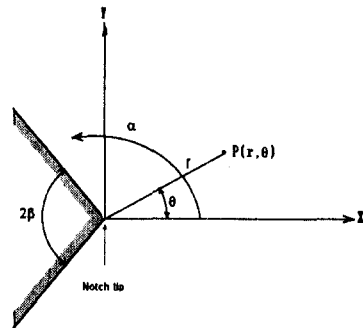


Fig. 1 Notch geometry and coordinate systems

$$\sigma_{ij} = K_I r^{-\lambda_I} a_{ij}(\theta) + K_{II} r^{-\lambda_{II}} b_{ij}(\theta) \quad \text{-- (2.2)}$$

여기에서, K_I 과 K_{II} 는 모드 I, II 하중하에서의 응력확대계수이며, r , θ 는 노치선단에서 세운 극좌표계이다 (Fig. 1 참조).

$a_{ij}(\theta)$, $b_{ij}(\theta)$ 는 θ 에만 의존하는 함수이다. 여기에서 λ_I , λ_{II} 는 노치의 각도에 의존하는, 모드 I, 모드 II 하중하에서의 응력특이치수를 나타내며, 노치가 균열의 형태로 바뀌면 λ_I , λ_{II} 는 0.5로 된다. 식 (2.2)의 동적 하중에 대한 일반적인 적용가능성 여부를 결정하기 위해서는 아직도 많은 연구 결과가 필요하다.

본 연구에서는 동적하중을 받는 노치 선단에서 발생하는 특이응력을 식(2.3)와 같이 가정하여 여러 가지 기하학적 형상을 갖는 노치 선단에서 발생하는 응력집중현상을 비교·분석 하였다.

$$\sigma = A(r/r_0)^\lambda \quad (A \text{는 상수}) \quad \text{--- (2.3)}$$

윗식의 양변에 대수 값을 취하면 $\ln \sigma$ 와 $\ln r/r_0$ 사이에 선형적 관계가 이루어지며 직선의 경사(λ)를 결정하여 노치선단에서 발생하는 특이 응력의 강도(크기)를 해석할 수 있게 된다 [9]. 식 (2.3)에서의 r 은 노치 선단이나 노치 코너에서 측정된 거리이며, 응력특이 현상이 현저하여 광탄성 무늬 해석이 난해하게되는 구역의 크기인 $r_0(=1\text{mm})$ 로 무차원화 시켰다. 또한, $\ln \sigma$ 는 식 (2.1)의 관계에 의하여 $\ln N$ 으로 나타내었으며, A 는 노치의 각도에 의존하는 상수이다.

3. 실험

3.1 시험편

광탄성 시험법을 이용하여 노치 선단에서의 응력집중 현상을 규명하기 위하여 시험재료로 폴리 카보네이트(polycarbonate) 판재를 사용하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2와 같고 노치 선단의 형상을 반원형단(semicircular end), 사각단(square end), V 모양단(V shaped end, V의 각도: 60° , 90° , 120°)으로 변화시켜서 노치 선단의 형상의 변화에 따른 동적응력집중의 변화양상을 규명하였다. 시험편의 순간적인 비틀림을 방지하기 위하여 시

험편의 아래쪽 50mm까지는 고정하였으며, 시험편의 두께는 6mm이다. 폴리 카보네이트 판재의 기계적 및 물리적 재료 특성은 Table. 1과 같다.

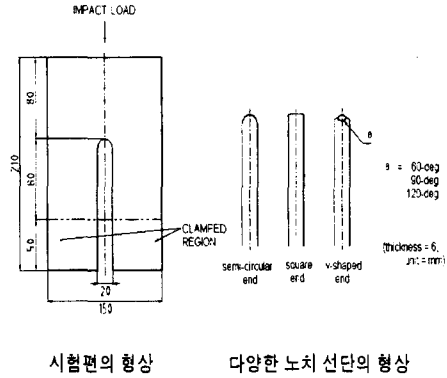


Fig.

Fig. 2 Configuration of test specimen and various types of notch end geometries

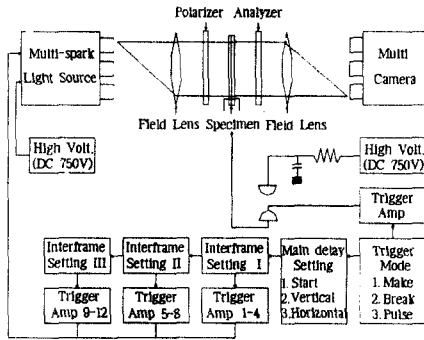
Table 1 Material properties of polycarbonate

Materials	Polycarbonate
Modulus of elasticity (GPa)	2.72
Poisson's ratio	0.38
Shear modulus (GPa)	0.98
Density (g/cm ³)	1.196
Material stress optics fringe value (f_σ , MPa-mm/fr)	7.2
Dilatational wave speed (m/s)	1960
Distortional wave speed (m/s)	910

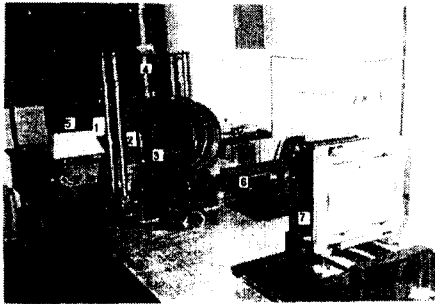
3.2 동적 광탄성 실험장치

실험 장치는 고속 멀티-스파크 카메라 세트 (10^6 frames per second (fps)), 하중 장치, 필드 렌즈, 편광장치, 콘트롤러로 구성되어 있으며 개략도와 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 콘트롤러로 시간대별로 제어된 빛은 고속 멀티-스파크 시스템

에서 발광하여 필드 렌즈를 거쳐 1차 편광판(polarizer)을 거치게 되며 시편을 통과한다. 이후 2차 편광판(analyzer)을 통과하게 되고 2차 필드 렌즈를 통과하여 카메라 스크린에 순차적으로 상을 이루게 된다.



(a)Block diagram



1. polarizer 2. analyzer 3. field lens 4. loading apparatus 5. multi-spark high speed light source 6. trigger controller 7. camera

(b)Photograph of dynamic photoelasticity experimental setup

Fig. 3 Block diagram and photograph of dynamic photoelasticity experimental apparatus

3.3 하중 장치

하중 장치는 무게 44N의 추를 수직으로 자유낙하시켜 시편에 동적 하중이 작용하도록 설계·제작

되었다. 또한 실제로 발생되기 쉬운 편심하중을 제거하기 위하여 유도용 파이프를 2중으로 설치하였다. 동적하중의 시간에 대한 변화양상을 측정하기 위하여 충격장치의 낙하 턱에 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)회로를 구성하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 충격 턱 부근에 두 개의 액티브 게이지(active gauge)를 부착하였고, 두 개의 더미 게이지(dummy gauge)는 액티브 게이지와 직각이 되도록 부착하였다. 충격 턱으로부터 발생하는 신호를 스트레인 증폭기(Measurement group, 2311)로 증폭하여 저장용 오실로스코프에 기록하여 분석하였다.

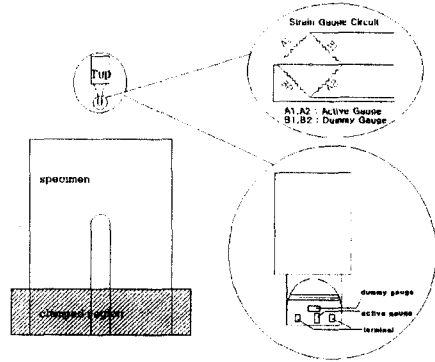


Fig. 4 Configuration of specimen, strain gauge circuit and tup

4. 실험 결과 해석 및 고찰

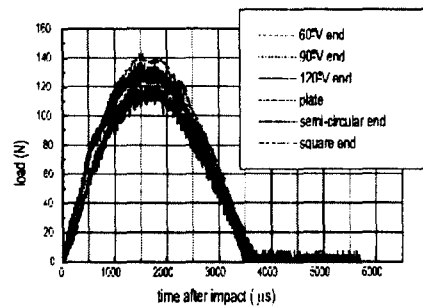


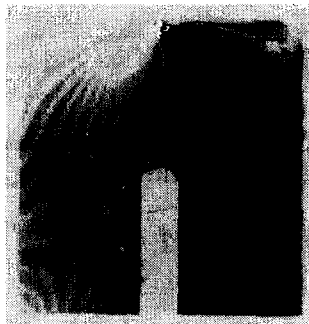
Fig. 5 Impact load history with respect to time

Fig. 5는 여러 가지 실험을 수행할 때 같은 낙하지점에서 자유낙하하는 충격 덩에서 생성된 동적 하중에 관한 신호를 보정을 거쳐 실제 하중으로 환산한 것이며, 예상한 대로 하중의 시간에 대한 변화양상이 거의 비슷하게 나타났으며 재현성 있는 실험을 할 수 있었다.

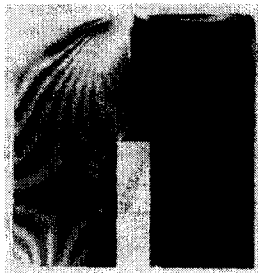
Fig. 6은 충격 후 $1750\mu s$ 에서 여러 가지의 노치 형상에 대응하는 동적응력장의 차이를 동적 광탄성 등색선 프린지 사진을 통하여 나타낸 것이며, 동적응력집중이 노치의 형상에 크게 영향을 받는 사실을 명백하게 알 수 있다.



unnotch



semicircular notch



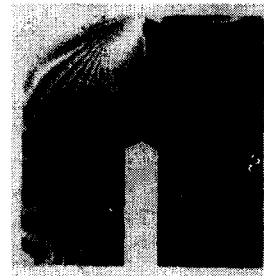
square notch



60° V notch



90° V notch



120° V notch

Fig. 6 Typical dynamic isochromatic fringe patterns around various notches at $1750\mu s$ after impact

Fig. 7은 노치가 없는 시편과 반원형단 노치의 선단 및 코너와 사각단 노치의 선단에서의 프린지 차수 그리고 동적응력집중계수와 시간과의 관계를 나타낸 것이다.

각각의 프린지 차수는 약 $1250\mu s \sim 1750\mu s$ 에서 최대에 이르며 이 시간은 충격 덩에서 생성된 하중이 최대에 이르는 시간과 일치한다. 반원형단 노치의 선단에서는 최고 0.92의 응력집중이 발생했고, 코너에서는 최고 1.89의 응력집중이 발생했으며, 사각단 노치의 선단에서는 최고 0.64의 응력

집중이 발생했다. 즉, 반원형단 노치에서 하중 작용축과 일직선상에 있는 선단에서보다 수직인 지점인 코너에서 더 큰 응력집중이 일어나고 있고, 사각단 노치의 선단에서는 코너에서의 강한 응력 집중 즉, 응력특이 현상에 의해 더 작은 응력집중이 일어난 것으로 사료된다.

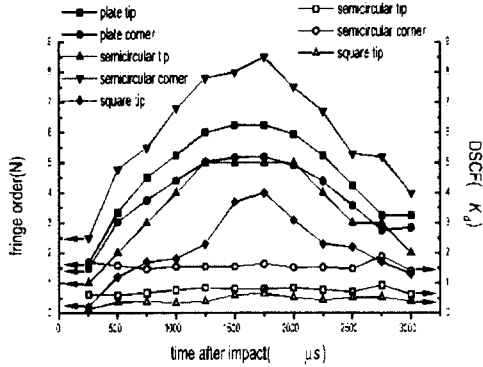


Fig. 7 Change in dynamic isochromatic fringe order and dynamic stress concentration factors(DSCF(K_{σ})) around various notches

Fig. 6에서 보듯이 사각단 노치의 코너와 V 모양단 노치의 선단 및 코너에서는 강한 응력집중으로 인한 응력 특이성에 의해 발생하는 프린지의 밀집성 때문에 노치 선단과 코너에서 프린지 차수를 정확하게 판독하는 것이 어렵다.

본 연구에서는 식 (2.3)을 사용하여 노치 선단과 코너에서 응력특이치수를 외삽법으로 산정하여 응력 특이의 강도를 비교하였다. 일반적으로 노치 부근에서의 응력과 거리의 관계는 매우 작은 r 에 대하여는 비선형이고 특히 노치 선단 가까이 갈수록 비선형의 정도가 클 것이다. 응력 특이성의 지수 λ 값은 광탄성 프린지 사진으로부터 θ 가 같은 선상에 존재하는 광탄성 프린지에 대한 r, N 을 결정하고, 이 값들을 식(2.3)에 곡선 맞춤(curve fitting)시켜서 산출하였다.

Figs. 8~10은 노치 선단의 각이 각각 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 인 시험편의 노치 선단에서의 시간에 따른 $\ln r/r_0$ 과 $\ln N$ 의 변화 양상이다. 시간에 따라서

약간의 변화는 생기지만 대체적으로 선형적인 관계가 유지됨을 알 수 있다.

충격 하중을 받은 후 각각의 노치 선단에서 $1250 \mu s$ 와 $2250 \mu s$ 사이의 동적응력특이치수 λ 를 비교해 보면 선단의 각이 60° 인 노치에서의 동적 응력특이치수는 -0.433 에서 -0.461 사이의 값으로 산정되었으며, 90° 에서는 -0.396 에서 -0.453 사이의 값이 얻어졌고, 120° 에서는 -0.312 에서 -0.376 사이의 값이 얻어졌다. 노치의 각이 증가할수록 특이응력의 강도가 감소함을 확인할 수 있으며, 정적인 경우의 $\lambda(60^\circ : -0.488, 90^\circ : -0.456, 120^\circ : -0.384)$ 와 거의 비슷하게 나타났다 [7].

Fig. 11은 충격 후 $1750 \mu s$ 에서 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ V 노치 선단에서의 N 과 r/r_0 의 관계의 변화양상을 비교한 것이다. 응력 특이의 강도, 즉 그래프의 경사는 예측한 대로 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 의 순으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

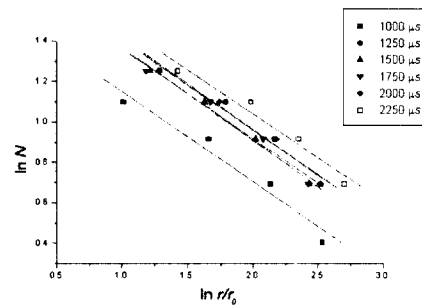


Fig. 8 N vs. r/r_0 around the tip of 60° V notch at various time after impact

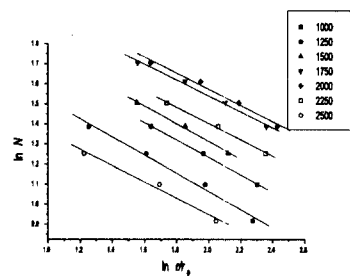


Fig. 9 N vs. r/r_0 around the tip of 90° V notch at various time after impact

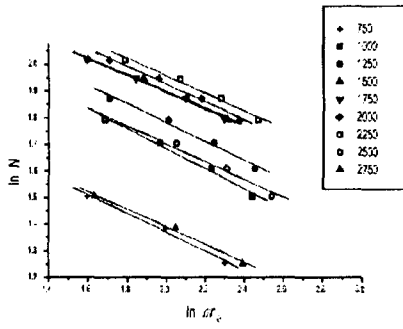


Fig.10 N vs. r/r_0 around the tip of 120° V notch at various time after impact

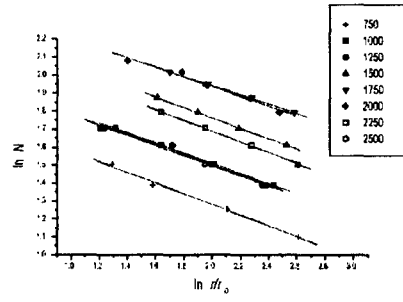


Fig. 13 N vs. r/r_0 around the corner of 90° V notch at various time after impact

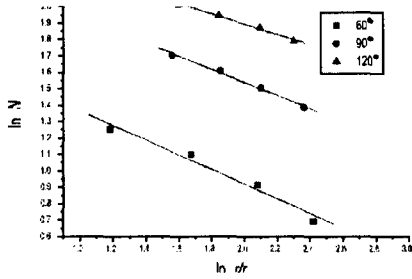


Fig. 11 N vs. r/r_0 around the tip of 60° , 90° , 120° V notch at $1750 \mu s$ after impact

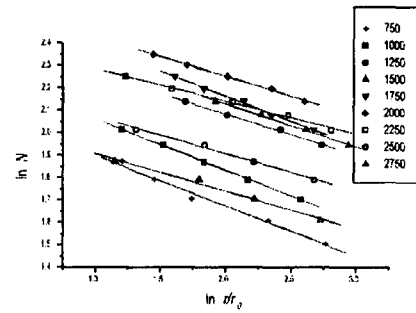


Fig. 14 N vs. r/r_0 around the corner of 120° V notch at various time after impact

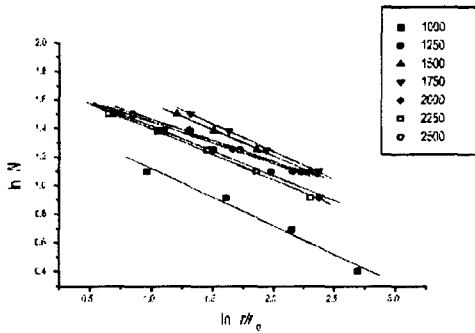


Fig. 12 N vs. r/r_0 around the corner of 60° V shaped notch at various time after impact

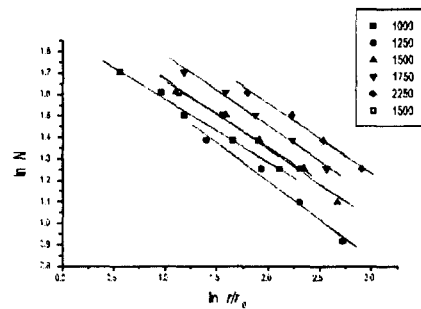


Fig. 15 N vs. r/r_0 around the corner of square end notch at various time after impact

Figs. 12~15는 60°, 90°, 120° V 노치들과 사각단 노치의 코너에서 발생하는 N 과 r/r_0 의 시간에 따른 변화양상을 나타내는 그래프이다. 60° V 노치의 코너에서는 동적응력특이수치의 값이 -0.290에서 -0.399사이의 값으로, 90° V 노치의 코너에서는 -0.250에서 -0.298의 값으로, 120° V 노치의 코너에서는 -0.145에서 -0.230사이의 값으로 나타났다. 사각단 노치의 코너에서는 -0.290에서 -0.356의 값으로 나타났다.

사각단 노치의 코너에서의 응력특이수치는 코너 부근에서 광탄성 무늬의 모양으로 보아 모드 I, 모드 II 하중에 의한 특이응력의 영향이 복합적으로 고려된 응력특이수치를 나타내는 것을 알수 있으며, 나머지 값들은 대부분 모드 I 응력특이수치를 나타낸 값으로서, 코너각에 따라 발생하는 정적 응력 특이수치 (60° :-0.248, 90° :-0.326, 120° :-0.348)에 비해 60° V 노치의 코너에서는 다소 크게 나타났으며, 90° V 노치에서는 거의 비슷한 양상으로 나타났고, 120° V 노치의 코너에서는 다소 작은 값이 발생하였다. 이는 코너각의 크기에 따라 발생하는 특이응력과 노치 선단에서의 특이응력과의 상호 작용에 영향을 받기 때문이라고 생각된다[7].

Table 2에서는 본 연구에서 산정한 노치 선단과 코너에서의 동적응력집중계수와 동적응력특이수치를 종합하여 나타내었다.

5. 결론

노치 선단의 기하학적 형상이 동적응력집중계수의 크기에 미치는 영향을 초당 백만장 속도 (106fps)로 기록할 수 있는 동적 광탄성 실험을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반원형단 노치의 선단에서는 코너보다 약 2배의 응력집중이 발생했으며, 사각단 노치 선단에서는 최고 동적응력집중계수가 0.64이었으며, 코너에서는 특이응력이 분포하는 사실을 실험적으로 규명하였다.

(2) 기하학적 형상이 다른 노치들에 동적하중이 작용하는 경우의 동적응력특이수치는 동적 광탄성법을 사용하여 무차원 프린지 루프 거리 N 과 $\ln r/r_0$ 의 관계식으로 정량적으로 평가할 수 있음을 규명하였다 (여기서, 무차원 프린지 루프 거리 $\ln N$ 은 대수 프린지 차수이고, $\ln r/r_0$ 는 대수 프린지 루프 거리를 나타낸다),

(3) 노치 선단의 각도를 60°, 90°, 120°로 증가시킴에 따라서 동적응력특이수치가 감소하는 양상을 확인하고 그 크기는 정적인 응력특이수치와 비슷하게 나타났다.

Table. 2 Peak dynamic stress concentration factors and orders of stress singularities for various notch geometries

Notch-end geometries	Peak dynamic stress concentration factors(K_d)		Orders of stress singularities(λ)	
	tip	corner	tip	corner
semi-circular	0.92	1.89	-	-
square	0.64	-	-	-0.290 ~ -0.356
60° V	-	-	-0.433 ~ -0.461	-0.290 ~ -0.399
90° V	-	-	-0.396 ~ -0.453	-0.250 ~ -0.298
120° V	-	-	-0.312 ~ -0.376	-0.145 ~ -0.230

(4) 노치 선단부근의 코너에서의 특이응력강도는 응력특이성의 특성이 틀리는 인접한 선단 응력장과의 중첩적인 상호 작용때문에 새로운 양상의 응력 특이성이 발생되므로 좀더 면밀한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부의 기계공학분야 (연구 과제명: 균열 주위의 기하학적 형상이 동적 균열 전파에 미치는 영향) 학술연구조성비로 수행 되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Sih, G. C., 1981, Mechanics of fracture 7, Noordhoff Intenational Publishing Leyden, pp.134~162.
- [2] Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, Experimental Stress Analysis, McGraw Hill, pp. 424~506.
- [3] Barber, J. R., 1991, Elasticity, pp. 125~132.
- [4] Liebowitz, H., 1971, Fracture, volume III, Academic Press, pp. 311~369.
- [5] Andrzej, S. and Janislaw, Z., 1993, Solution for the stress and displacement fields in the vicinity of a V-shaped notch of negative wedge angle in plane problems of elasticity. Eng. Frac. Mech., Vol. 44, No. 2, pp. 275~281.
- [6] Mohammad M. and Lolen Z., 1995, Photoelasticity determination of mixed mode stress intensity factors for sharp reentrant corners., Eng. Frac. Mech., Vol. 52, No. 4, pp. 639~645.
- [7] Williams, M. S., 1971, Stress Singularities from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension, J.Appl. Mech., 19, pp 526.
- [8] Zhao, B. and Lang, F., 1988., Determining K_I of a V-notch from the existing results of a linear crack, Eng. Frac. Mech, Vol 31, No. 6, pp. 923~929.
- [9] 이억섭, 황시원, 1996, 동적 광탄성 실험에 의한 응력이완 노치부근에서의 접촉특이응력 해석, 대한기계학회 논문집, 제20권, 제7호, pp.2097~2107.