〈논 문〉

동적 광탄성실험에 의한 응력이완 노치부근에서의 접촉특이응력 해석(2)

이억섭* · 황시원** · 나경찬**

(1995년 7월 20일 접수)

Analysis of Contact Singular Stresses with Relief Notch by Using Dynamic Photoelasticity (Ⅱ)

O.S. Lee, S.W. Hwang and K.C. Nah

Key Words: Dynamic Photoelastic Analysis(동적 광탄성해석), Indenter(인덴터), Contact Singular Stresses(접촉특이응력), Fringe Pattern(프린지양상), Stress Relief Notch(응력이완노치), Stress Concentration Factor(SCF : 응력집중계수)

Abstract

The dynamic photoelastic technique had been utilized to investigate the possibility of relieving the large local singular stresses induced at the corner of a right- angle-indenter. The indenter compressed a semi-infinite body dynamically with an impact load applied on the top of the indenter. The effects of the geometric changes of the indenter in terms of the diameter (d) and the location (l) of the stress relieving notch on the behavior of the dynamic contact stresses were investigated. The influence of stress relieving notches positioned along the edge of the semi -infinite body on the dynamic contact stresses were also studied by changing the diameter (D) and the location (L) of the notch. A multi-spark-high speed camera with twelve sparks were used to take photographs of full field dynamic isochromatic fringe patterns. The contact singular stresses were found to be released significantly by the stress relief notches both along the indenter and the edge of the semi-infinite body. The optimal position and geometry of the stress relieving notches were obtained with the aid of limited experimental results.

1. 서 론

압축을 받는 반 무한판을 인덴터로 압축할 때 인덴터의 모서리에서 특이응력(stress singularity)이 발생한다는 것은 접촉문제에서 잘 알려져 있는 사실이다. 특이응력의 양상은 인덴터각도 및 인덴터와 몸체 사이의 마찰현상과 밀접한 관계가 있으며, 이 분야에 대하여는 Bijak-Zochowski 등의 2차원 응력이완 노치의 형상이 응력집중 감소에 미치는 영향에 대한 연구가 있다.[1] 이러한 문제를 실제적인 설계문제에 응용시키기 위해서는 피스톤 핀 위에 열박음하는 엔진의 커넥팅로드 헤드부분과, 터빈축 위에 디스크를 열박음할 때 압축을 받는 디스크와 터빈축 부근의 응력집중현상 들을 규명하기 위한 연구가 체계적으로 수행되었고,[2] 에리한 코너의 응력집중현상은 Miniatt 등에 의하여 연구되었다.[3]

*회원, 인하대학교 기계공학과
**회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

그 외 많은 연구자들은 예리한 모서리 주위에 발생하는 응력을 이완시키기 위한 방안에 대한 연구를 수행하였으며,[4~8] 정적하중을 받는 경우에 대해서는 이론적인 해석도 발표되어있다.[9~10]

본 연구에서는 반 무한판 위에서 접촉하는 인덴터의 가장자리를 따라 여러 가지 형상의 노치를 가공하여 인덴터의 상부에 동적하중이 작용할 때 인덴터의 모서리부분과 가까운 영역에서 발생하는 응력특이현상(stress singularity)에 대한 변화양상을 실험으로 조사하여 응력집중을 경감시킬 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 또한 인덴터 양쪽의 가장자리에 가공한 노치가 인덴터 모서리부분 영역의 응력에 미치는 영향도 체계적으로 조사하였다.

4각형 인덴터에 충격하중이 가해질 때 동적응력이 전파하는 양상을 동적 광탄성실험방법으로 촬영하여 인덴터 모서리에 부근에서 발생하는 응력의 동적인 변화를 실험적으로 해석하였다. 정적 응력집중을 완화하는 장치로서 터빈날개를 터빈축에 열박음 할 때 원주형 노치를 도입하는 방법은 증기터빈 엔진분야 설계에서는 잘 알려진 사실이나,[9] 본 논문에서 제시되는 결과는 동적하중을 받으면서 서로 접촉하는 두 요소의 접촉특이응력의 이완현상에 관한 기술적인 정보를 제공하게되어 신뢰성있는 요소설계를 수행할 수 있는 근거를 마련하게 될 것이다.

2. 이 론

Miniatt 등은 Fig. 1과 같이 반 무한판 B1이 인덴터 B_2에 의하여 정적 압축하중을 받는 경우 인덴터 모서리에 발생하는 응력집중에 대하여 연구하였다.[3] Dundurs 등은 두 접촉면에 마찰이 작용하지 않는 경우에 대한 연구를 수행하였고,[4] 마찰이 있는 경우는 Theocaris와 Gdoutos[11] 에 의해서 연구되었다. Comninou[5]은 더 자세한 해석을 수행하여 이러한 연구의 영역을 확장시켰으며 응력상태는 대수적 특이(logarithmic singularity)를 나타내는 사실을 규명하였다. Comninou의 해석에 의하면 응력장에서 특이는 탄성영역의 Mellin transform과 연관되는 determinant의 실근(real root)과 관계된다.

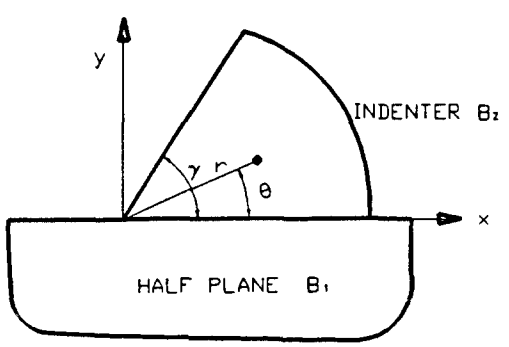


Fig. 1 Details of contact with half plane and indenter

응력특이를 결정하는 함수 p를 결정하기 위하여 인덴터각도, 마찰계수, 재료특성 등을 고려하여 determinant D를 다음과 같이 나타낼 수 있다.[5]

$$D(p;\gamma,\alpha,\beta,\rho) = 8(1+p)\sin(p\pi)\,F(p;\gamma,\alpha,\beta,\rho) \tag{1}$$

여기서,

$$\begin{aligned} F(p;\gamma,\alpha,\beta,\rho) &= (1+\alpha)\cos(p\pi)[\sin^2(p\gamma)-p^2\sin^2\gamma] \\ &\quad +1/2(1-\alpha)\sin(p\pi)(\sin 2p\gamma+p\sin 2\gamma) \\ &\quad +\rho\sin(p\pi)[(1-\alpha)p\sin^2\gamma-2\beta(\sin^2(p\gamma) \\ &\quad -p^2\sin^2\gamma] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, ρ는 인덴터와 반 무한판 사이의 마찰계수이고, γ는 Fig. 1에 나타낸 모서리각도이다. α, β는 두 탄성재료 사이의 상호작용의 특성을 나타내는 파라미터로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\alpha=\frac{\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)(x_1+1)-(x_2+1)}{\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)(x_1+1)+(x_2+1)}$$
$$\beta=\frac{\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)(x_1-1)-(x_2-1)}{\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)(x_1+1)+(x_2+1)} \tag{3}$$

여기서, μ_1, μ_2와 x_1, x_2는 인덴터와 반 무한판의 재료특성을 나타내고, p는 r이 0에 접근할 때 응력특이의 강도와 관련되기 때문에 응력성분들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= O(r^{p-1}),\ (0\le p\le 1\text{인 실수 } p\text{에 대하여}) \\ &= O[r^{\zeta-1}\cos(\eta\log r)]\ or\ [r^{\zeta-1}\sin(\eta\log r)] \\ &\quad (0\le\zeta\le 1\text{인 복소수 } p=\zeta+i\eta\text{에 대하여}) \\ &= O\log r,\ (p=1\text{일때 } \frac{\partial D}{\partial p}=0\text{이고, } p=1\text{인 경우}) \\ &= O(1),\ (p=1\text{일 때 } \frac{\partial D}{\partial p}\neq 0\text{이고,} \\ &\quad 0\le Re(p)\le 1\text{에서 } D\text{에 0이 없는 경우}) \end{aligned} \tag{4}$$

σ_{ij}의 값에 따라 주어진 인덴터각도에 대하여 함수 F의 근은 p 및 인덴터와 반 무한판 사이의 마찰계수와의 관계로 나타낼 수 있다. 같은 방법으로 어느 정도의 마찰이 존재하는 경우에 대하여 함수 F의 근((+) 또는 (−) ; (+)는 Fig. 1에서 표시한 $(+x)$방향으로 반 무한판의 면에서 반 무한판의 미끄럼을 표시)은 p와 γ의 관계를 그래프로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 마찰이 없는 경우($\rho=0$)로 생각하고 p가 실수이며, $0\leq p\leq 1$ 사이에서 정해지는 특이의 지수를 갖는 경우로 해석하였다. 이 경우 응력 σ는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma=Ar^{p-1} \tag{5}$$

여기서, A는 θ의 함수이며, θ는 인덴터 접촉면에서의 모서리각도를 나타낸다. 양변에 대수 값을 취하면 $\ln(\sigma)$와 $\ln(r)$사이에 선형적 관계가 이루어지며 직선의 경사는 응력특이의 강도와 관련된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험편 및 실험장치

동적 광탄성실험을 하기 위하여 재료는 Polycarbonate를 사용하였으며 시험편의 형상과 크기는 Fig. 2에 나타내었다. 인덴터와 접촉하는 반 무한판의 크기는 폭과 길이가 각각 80 mm, 164 mm이며, 두께는 3.0 mm와 12 mm인 두 가지 시험편 재료를 사용하였다. Polycarbonate의 물리적특성은 탄성한도 2550 Mpa, 극한강도 65 Mpa, 푸아송의 비 0.37, 광탄성상수 7.2 Mpa-mm / fringe이다.

인덴터 모서리 부근의 응력이완현상을 체계적으로 규명하기 위하여 인덴터에 지름 12 mm의 원주형 노치를 여러 가지 무차원길이 $\eta(=l/d)$로 가공하였다. 여기서, l은 반 무한판 코너에서 노치 중심까지의 길이이며, d는 노치의 지름을 나타낸다. 인덴터의 무차원량의 범위를 1.04~2.63 (1.04, 1.16, 1.29, 1.67, 2.13, 2.63)까지 6종류로 가공하여 실험하였다.

반 무한판에는 3종류의 노치{지름(D)=12 mm, 15 mm, 20 mm}를 가공하고, 무차원길이 $\xi(=L/D)$의 범위는 0.5~1.0(0.5, 0.67, 0.68, 0.77, 0.88, 0.93 1.0)까지 7단계로 변화시켰다. 인덴터의 폭을 55 mm, 62 mm, 70 mm로 변경시켜 9종류의 시험편에 대하여 동적 광탄성실험을 수행하였다. 본 실험에서는 충격하중을 받고 하중이 전달되는 시간이 2000 μsec 이내이므로 좌굴이 발생되기 전에 사진촬영이 끝나기 때문에 좌굴의 영향은 고려하지 않아도 된다고 판단되며, 혹시 좌굴이 일어날 경우를 대비하여 시편고정시 양쪽에 가이드를 설치하였다.

실험장치는 Fig. 3과 같이 고속 멀티스파크 카메라세트, 하중장치, 필드렌즈(field lens)와 원형 편

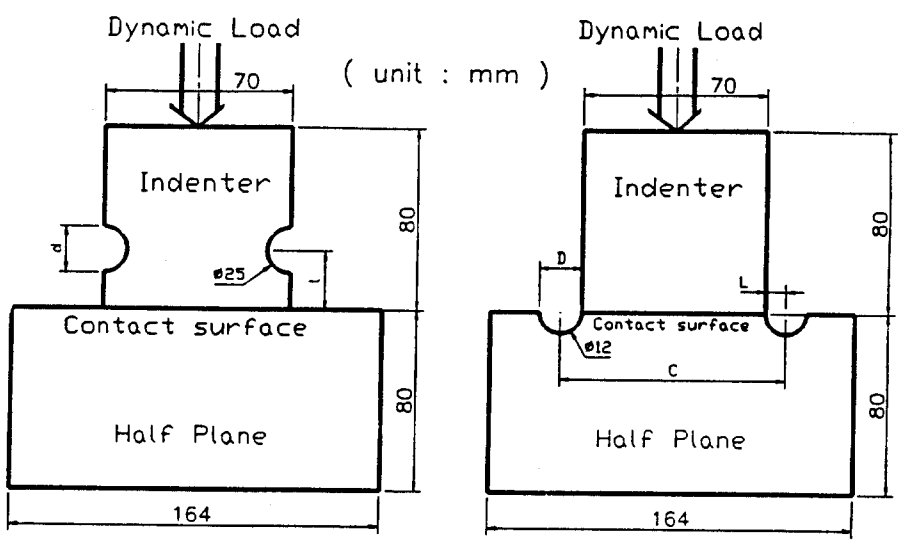
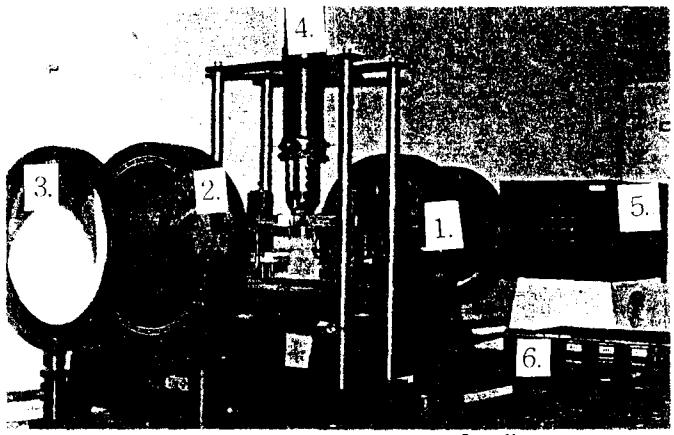


Fig. 2 Geometry of specimen (thickness=3.0 mm, 11 mm)



1. Polarizer 2. Analyser 3. Field lens 4. Loading apparatus
5. Multi spark high speed light source 6. Trigger controller

Fig. 3 General view of experimental apparatus

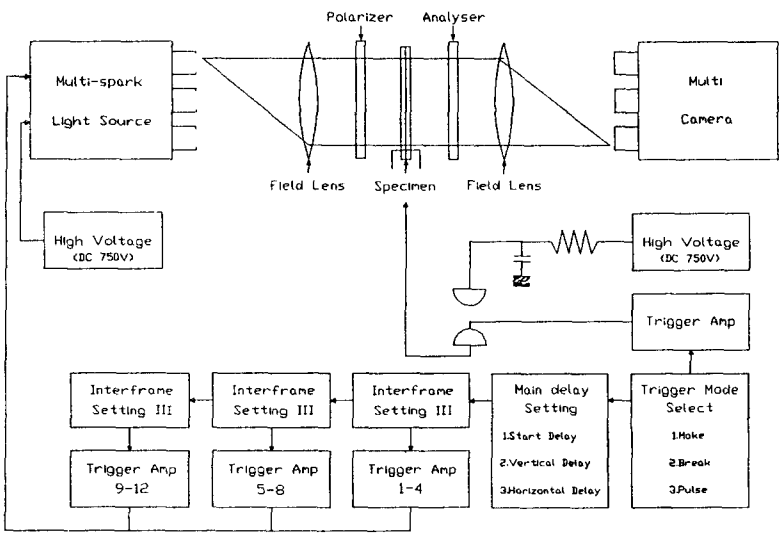


Fig. 4 Block diagram of the multi-spark high speed camera set

광장치, 컨트롤러로 구성되어 있으며, 고속 멀티스파크 카메라는 12개의 라이트가 설치되어 있고 이것들은 세팅된 시간차에 따라 순차적으로 스파크가 발생하도록 되어 있다. 고속 멀티스파크 카메라 세트의 블럭다이어그램을 Fig. 4에 나타내었다.

스파크 시간의 조정은 컨트롤러에서 스타트딜레이(start delay)와 수평·수직 딜레이를 사용하여 1 μsec에서 1 sec의 범위로 할 수 있으며, 본 고속 카메라의 프레임당 시간의 펄스는 옵티컬디텍터를 사용하여 검증하였다. 검증결과 프레임당 오차가 1 μsec 로 나타나서 무시할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 하중 텁이 시험편에 접촉할 때 트리거 시그널이 발생될 수 있도록 딜레이 타임을 고려하여 하중이 최대로 작용하는 시간을 포착하여 800 μsec 로 세팅하고 각 프레임의 지연 시간은 120 μsec 에서 250 μsec 로 세팅하여 동적광탄성 사진을 촬영하였다.

3.2 실험방법

무게 29.4 N의 텁(striker)을 수직 자유낙하시켜 시험편에 동적충격 대칭하중이 작용하도록 하중장치를 설계 제작하였다. 실제로 발생하기 쉬운 편심

하중을 제거하기 위하여 하중 텁 유도용 파이프를 2중으로 설치하여 텁이 일정한 지점에 낙하하도록 세심하게 하중장치를 설계 제작하였다. 또한 시험편의 기하학적 형상이나 크기에 따라 하중을 조정할 수 있도록 설계 제작하였다. 그리고 사용한 시험편에 대응하여 선명한 동적 광탄성프린지를 얻기 위하여 하중 작용점의 최적조건을 시행착오법으로 찾아서 29.4 N의 텁을 50 cm 높이에서 자유낙하를 시켰다.

인덴터와 반 무한판 사이의 접촉면에는 마찰을 감소시키기 위하여 유압 작동유를 얇게 분무하여 응력분포의 변화를 무시할 수 있도록 하였다. 노치를 갖는 인덴터의 접촉면과 반 무한판 접촉면은 정밀밀링작업을 하고, 샌드 페이퍼(#1000)로 연마하였다. 인덴터와 반 무한판의 접촉상태는 접촉면 부근에서 정적 광탄성프린지 패턴을 조사하여 균일한 접촉상태를 확인하였고 인덴터에 작용하는 압력이 일정한 것을 동적 광탄성무늬로 확인하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5에서 $\eta=1.29$인 경우의 각 프레임당 시간주기가 250 μsec인 동적 광탄성무늬를 나타내었다. 두 번째 프레임에서는 고정단에서 반사파가 위쪽으로 전달되기 시작하는 현상이 나타나고, 세 번째 프레임에서는 압축파가 인장파로 바뀌는 현상으로 관찰되었으며, 11번, 12번 프레임에서는 응력파의 흐름이 감소하여 응력이완현상이 시작되는 것이 관찰되었다. 인덴터의 모서리에서 응력이 최대로 나타나는 시간은 1850과 2000 μsec로 산정되었다. 이 값을 기준으로 프레임 간격을 조정하여 최적조건을 찾았다. Fig. 6은 노치가 없는 경우($\eta=\infty$)에 대한 동적 실험결과이며, 29.4N의 동적하중이 작용하였을 때의 프린지패턴을 나타낸 것으로 인덴터 모서리에서 응력특이현상이 나타난다.

Fig. 6(a)는 과도한 충격하중이 작용할 때 접촉부의 프린지양상이고, (b)는 노치가 없는 경우이다. 응력이 전파되는 현상이 프린지차수의 변화로 나타나는 것을 동적 광탄성사진으로 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 지름 12 mm인 노치의 위치를 바꾸어서 제작한 시험편에서의 동적 광탄성 프린지패턴의 양상을 나타낸 것이고, Fig. 8은 트리거 후 1800 μsec에서 촬영한 사진의 모서리 부분을 확대한 사진인데 동적 광탄성무늬는 좌우대칭을 잘 이루고 있음을 확인할 수 있다. 이 경우 $\eta(=l/d)$의 범위는 1.04~2.63(1.04, 1.16, 1.29, 1.67, 2.13, 2.63)로 6종류의 인덴터와 반 무한판이 동적하중을

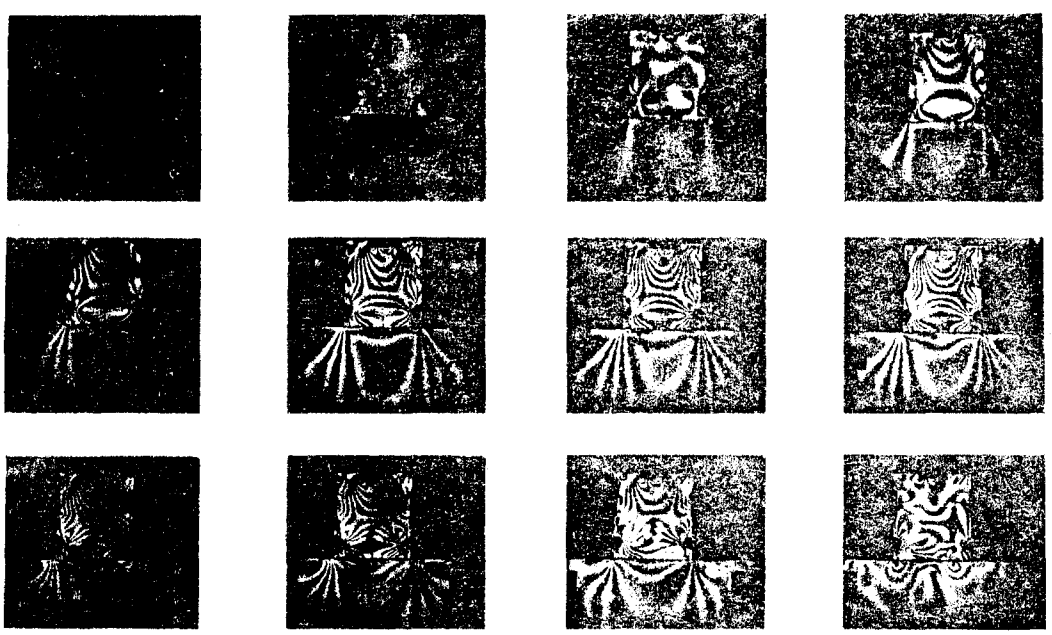
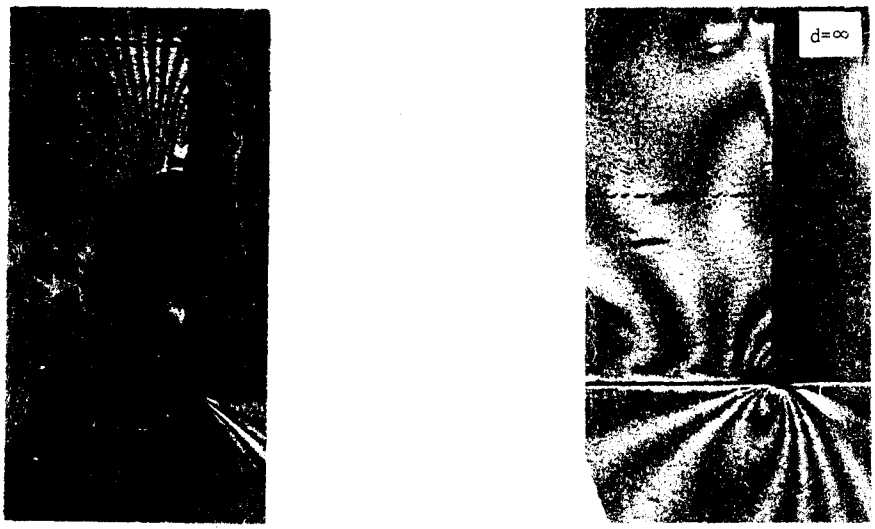


Fig. 5 Dynamic isochromatic fringe pattern for notch diameter(d=12 mm) and η(l/d=1.29)



(a) Overloaded indenter and half plane (b) Unnoched pattern

Fig. 6 Isochromatic static fringe pattern for $\eta=\infty$ under the load of 490 N

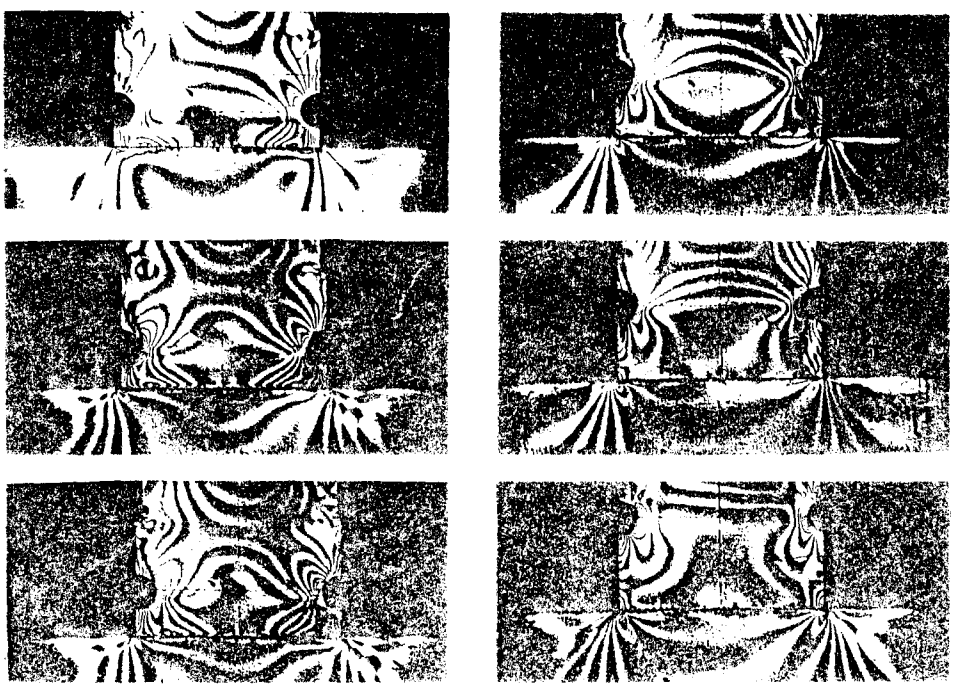


Fig. 7 Varying dynamic isochromatic fringe patterns for different $\eta=1/d$ at 1800 μsec. after impact loading

받을 때 발생되는 동적 응력상태의 변화양상을 규명할 수 있다. 6종류의 시험편 모두에서 인덴터 모서리의 응력집중 보다 노치의 원주에서 응력집중현상이 더 크게 나타나는 것으로 보아 인덴터 코너의 응력집중이 이완되는 현상은 노치의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 전 연구에서는 최대 응력집중 현상이 충격 후 약 1200 μsec 에서 나타났으며,[12] 1100 μsec 에서 응력이 일시적으로 감소하

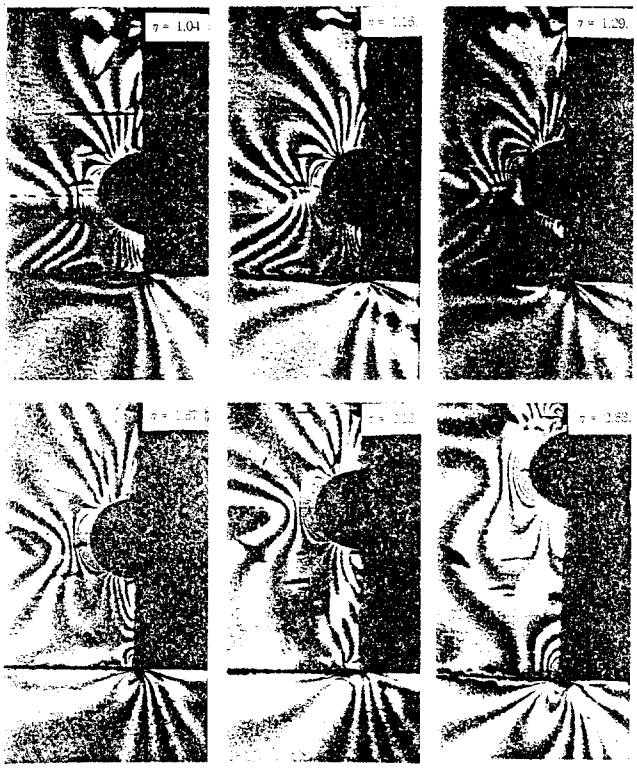


Fig. 8 Enlarged dynamic isochromatic fringe patterns for the different notch locations along the indenter (d=12 mm)

다가 다시 증가하는 현상이 관찰되었는데 이 현상은 반사 응력파의 영향으로 사료된다. 이러한 현상은 다른 시험편에서도 시간의 차이는 있으나 똑같이 확인되었다.

응력집중현상을 체계적으로 관찰하기 위하여 응력을 노치의 형상계수 η값에 따라 대수 프린지차수[ln(N)]와 대수 프린지반지름[ln(r/ro)]으로 표시하여 식 (6)과 같이 나타내었고, 응력특이성은 모든 η에 대해서 직선으로 근사화할 수 있음을 실험적으로 확인하였다).[12]

$$\ln(\sigma)=\ln(N)=\ln(A)+p\ln(r/ro) \quad (6)$$

$$\sigma=A\cdot r^{p} \quad (7)$$

여기서,

σ : 응력(여기서, 광탄성프린지로 나타나는 최대 전단응력이라고 생각한다).

r : 인덴터 모서리에서 프린지의 거리.

p : 실험으로 결정되는 특이응력차수.

ln(r/ro)에서 ro는 무차원수로 사용하기 위한 기준길이이며, 실험적으로 응력특이현상이 확실히 나타나는 범위 ro>1 mm에서 정하였다.

일반적인 경우에서는 응력과 거리의 관계는 매우 작은 r에 대하여는 비선형(nonlinear)이고, 특히

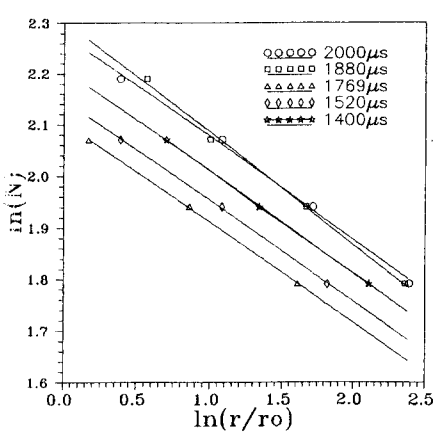


Fig. 9 Variation of ln(N) as a function of ln(r/ro) for the different time.

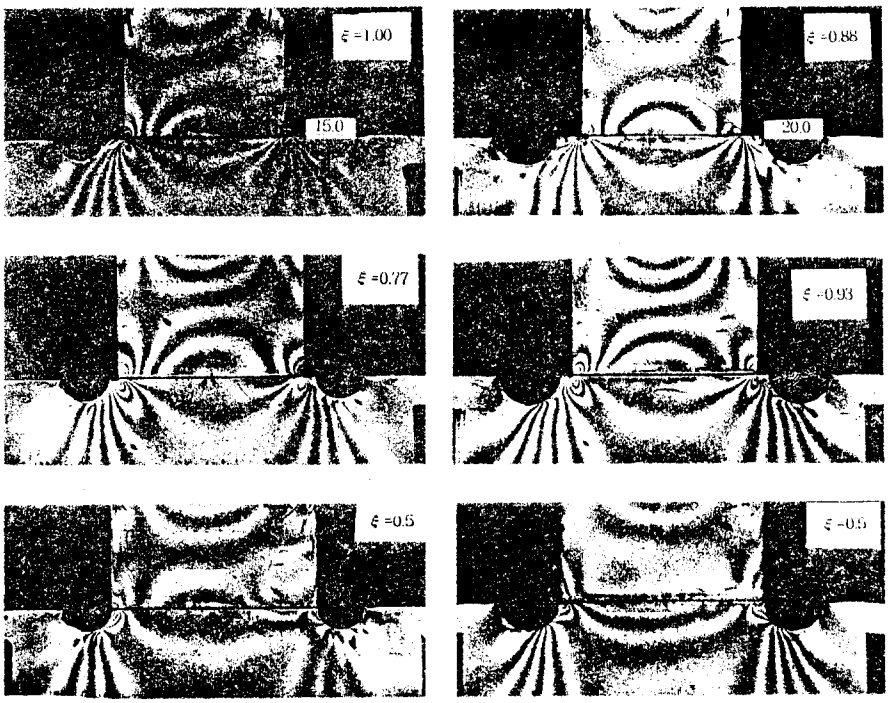


Fig. 10 Dynamic isochromatic fringe patterns for various ξ=L/D at 1800 μsec

코너 정점에 가까이 갈수록, 즉 매우 작은 r에 대하여는 예측한대로 비선형의 정도가 크게 나타났다. 특이성의 지수 p값은 식 (6)에 따라 실험데이터를 curve fitting하여 산정할 수 있으며 전 연구에서는 −0.045와 −0.008 범위의 값을 얻었다. 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 η=1.67일 때 시간에 따른 p의 변화는 −0.003에서 −0.005사이로 나타났다. 여러 가지 노치 양상에 대한 각각의 p값은 η=2.63일 때 −0.007, η=1.67에서는 −0.006, η=2.13일 때는 0.006, $\eta=\infty$일 때는 0.004로 나타났다.

Fig. 10은 반 무한판에 노치가 있는 시험편(ξ=0.5−1)에 대한 인덴터 모서리에서의 응력집중현상을 나타낸 동적 광탄성사진으로 ξ값이 클수록 응력집중현상이 완화됨을 알 수 있다. 반 무한판에 노치를 가공한 경우 노치의 폭이 L과 동일할 때(ξ=1)는 응력집중이 완화되고, 노치의 끝 부분과 인덴터가 같이 접촉하므로 반 무한판과 인덴터 양쪽 모두 응력집중현상이 나타나며, 특히 ξ<1인 경우는 ξ값이 감소할 수록 응력집중현상이 두드러짐을 알 수 있다.

Fig. 11은 반 무한판의 가장자리에 연하여 노치가 있는 경우의 응력특이현상에 대한 프린지차수의 변화양상을 나타낸 것이고, Fig. 12는 ln(N)의 변화양상을 ln(r/ro)의 변화에 따라 η=2.72에 대하

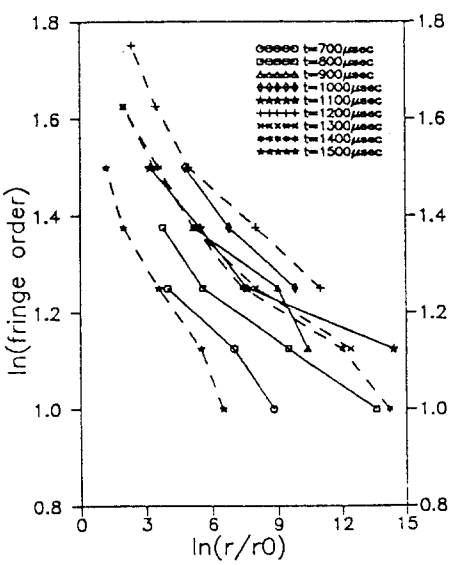


Fig. 11 Variation of ln(N) as a function of ln(r/ro) for the various moments after impact (η=2.72, N=fringe order).

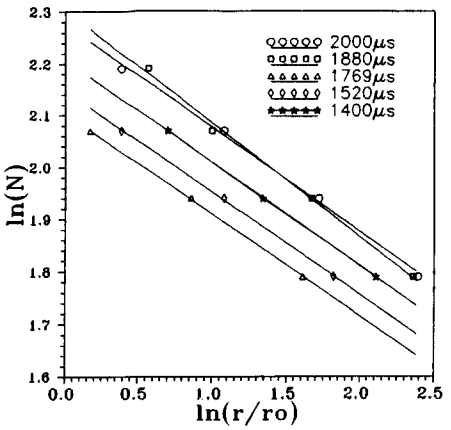


Fig. 12 Variation of ln(N) as a function of ln(r/ro) for various moments after impact (η=2.63)

여 나타낸 것이다.

여기서는 1000~1100μsec에서 ln(N)가 약간 감소하다가 다시 1200 μsec에서 최고 값이 나타나고 있으며, 1/d의 값에 따라 약간의 차이는 있으나 직선적으로 변화하는 경향은 Fig. 9와 유사하였다. η는 노치가 코너 쪽으로 접근할 때는 반드시 선형적이라고 할 수 없으며, 그 원인은 ln(N)와 ln(r)의 사이의 관계가 1보다 작은 r값에 대하여 선형적인 궤도를 벗어나서 특이거동을 나타나기 때문이다.

Fig. 13은 반 무한판에서의 응력의 변화현상을 조사한 것으로 η가 2.19와 1.10일 때의 응력집중현상을 비교한 것이다. η=2.19에서 응력집중이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있으며, 특히 600 μsec에서의 응력감소는 접촉면에서 마찰로 인하여 발생하는 현상으로 사료되고, 1200~1300 μsec에서의 감소는 반사파의 영향으로 사료된다.

Fig. 14는 응력집중계수(SCF)와 η의 관계를 나타낸 것으로 Bijak-Zochowski의 정적 실험결과(*곡선)와 대체로 유사한 변화양상을 나타내고 있으나, 동적인 하중이 작용할 때는 응력집중이 동일한 η값에서도 많은 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. η=1.0~2.0에서 데이터의 산포현상이 나타나는 것은 시간당 변화율을 수직방향으로 연결하였기 때문이며, 시간당 변화율은 η=1.75인 경우 정적 데이터와 잘 일치함을 알 수 있다. η값이 2.19일 때 응력집중이 최대가 되고 η값이 1.1에 근접할수록 응력집중이 감소되는 경향을 나타낸다.

응력의 진전은 η<1.1에서 정지하고, 노치가 코

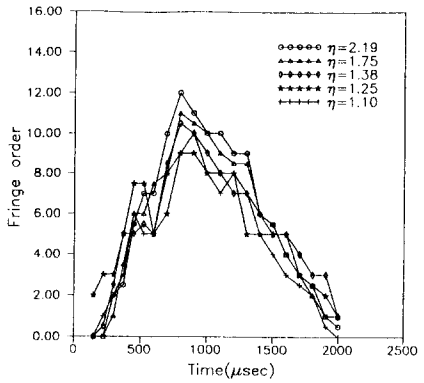


Fig. 13 Variation of fringe order at different moments after impact time for varying η_s

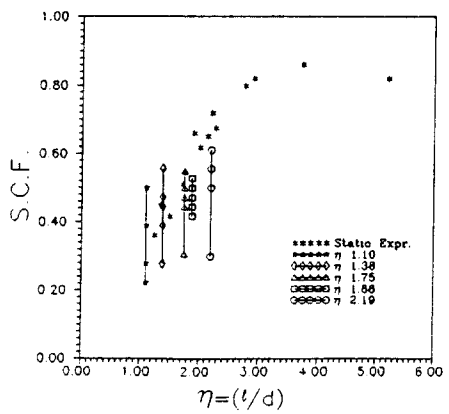


Fig. 14 Dynamic stress concentration factor(S.C.F.) in presence of notch relief on indenter

너에 가까이 갈수록 노치의 끝과 인덴터의 면이 만나는 곳에서 자유응력 구역이 나타나기 시작했다. 노치의 표면이 접촉면에 가까이 갈수록 영향을 많이 받고, 응력집중은 노치 끝 부근에서 발생하였으며, 노치가 접촉면에서 멀어질수록 큰 응력이 발생하므로 바람직한 현상이라고 사료된다.

노치가 반 무한판에 있는 경우의 실험결과들은 노치가 인덴터에 있는 것(Fig. 10)과 같은 방법으로 해석하였고, 매우 작은 반지름에 대하여 어디에서나 선형적으로 나타났으며, 노치가 있는 인덴터와 비교할 때 반 무한판에 노치가 있는 경우보다 영향을 적게 받는 사실이 확인되었다.

Fig. 15는 반 무한판에서의 ξ의 변화에 따른 응력집중현상을 나타낸 것으로 굵은 실선으로 표시된 곡선은 노치가 없는 경우를 나타낸 것이다. 가는실

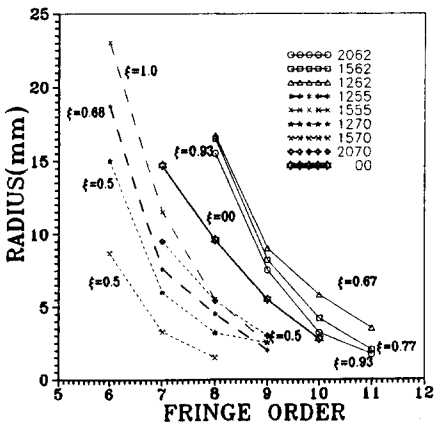


Fig. 15 Relationship between notch radius and fringe order on half plate

선은 인덴터의 폭을 62 mm으로 일정하게 놓고 반지름을 변화시킨 경우로 ξ의 값이 0.93에서 0.67로 감소할 수록 응력집중현상이 증가하고 특히 노치가 없는 경우보다 응력집중현상이 더욱 뚜렷하며 노치 지름이 클수록 더 크게 나타났다.

점선은 $\xi=0.5$로 일정하게 놓고, 인덴터의 폭을 증가시킨 경우로 노치 지름이 15 mm인 경우 응력집중이 최소가 되고, 20 mm일 때 응력집중현상이 증가하였다. 파선은 아주 작은 인덴터의 폭에 대한 응력완화현상을 나타낸 것으로 ξ값이 1보다 작을 때 응력이완현상이 나타났으며, 인덴터의 폭이 작을 때는 ξ값 중에서 L값이 감소할 수록 응력집중이 감소되었다.

따라서 폭이 70 mm이고 노치 지름이 15 mm인 경우에 응력이완현상이 가장 많았으며, 인덴터의 폭이 제일 좁고 노치지름이 15 mm일 때 ξ가 0.5이므로 최적설계 조건으로 사료된다.

5. 결 론

인덴터에 의하여 동적 압축하중을 받는 반 무한판의 직각 코너에서의 응력집중현상을 동적 광탄성 실험으로 규명하였다. 인덴터의 가장자리를 따라 원주형 노치의 위치를 바꾸어서 제작한 시험편으로 얻은 결과는 노치의 기하학적 형상과 위치를 적절히 설계하면 동적 접촉특이응력을 감소시킬 수 있다는 가능성을 확인하였다. 제한된 실험결과로 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 인덴터로 충격압축하중을 받는 반 무한판의 직각 코너에서 발생하는 응력의 특이성은 인덴터의 가장자리를 따라 원주형 노치를 주면 감소시킬 수 있으며, 노치의 위치가 직각 코너에서 멀어질수록 모서리에서의 응력집중현상은 노치가 없는 경우와 유사하다.

(2) $\eta=1.67\sim2.63$ 사이에서 직각 코너의 응력특이는 같은 형상을 보이나 $\eta=1.10$일 때 보다 $\eta=2.63$인 경우 응력집중현상이 두드러짐을 알 수 있다.

(3) 반 무한판에 노치를 가공한 경우는 노치의 지름에 따른 변화보다는 인덴터의 폭의 변화에 더욱 민감하였으며, $\xi<1$인 경우는 ξ값이 감소할 수록 응력집중현상이 현저하였다.

(4) 충격하중 작용 후 600 μsec에서 프린지차수의 감소는 접촉면에서 마찰로 인하여 발생하는 현상으로 사료되며, 1200~1300 μsec에서의 감소는 반사파의 영향으로 간주되는데 더 정밀한 해석이 필요하다고 생각된다.

후 기

본 논문은 인하대학교 1995년 교내 연구비 지원을 받아 연구한 결과입니다.

참고문헌

(1) Bijak-Zochowski, M. and Waas, A. M, 1991, "Reduction of Contact Stress By Use of Relief Notches," *Experimental Mechanics*, pp. 271~275.

(2) Bijak-Zochowski, M., Marek, P. and Tracz, M., 1994, *On Stress Singularities in Some Axisymmetric Problems of Elastic Contact*, Recent Advanced in Experimental Mechanics, pp. 131~136.

(3) Miniatt, E. C., Waas, A. M. and Anderson, W. J., 1990, "An Experimental Study of Stress Singularities at a Sharp Corner in a Contact Problem," *Experimental Mechanics*, 30(3), pp. 281~285.

(4) Dundurs, J. and Lee, M. S., 1972, "Stress Concentration at a Sharp Edge in Contact Problems," *J. Elasticity*, 2, p. 109.

(5) Comninou, M., 1976, "Stress Singularity at a Sharp Edge in Contact Problems with Friction," *J. Appl. Math. and Phys.* (*ZAMP*), 27, p. 493.

(6) Williams, M. S., 1971, "Stress Singularities from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension," *J. Appl. Mech.*, 19, p. 526.

(7) Bogy, D. B., 1971, "Two Edge-bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles Under Surfaces Fractions," *J. Appl. Mech.*, 38, p. 377.

(8) Peterson, R. E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley and Sons.

(9) Van Hulle, D., 1991, "Finite Element Analysis of Planar and Axisymmetric Rod-Pin Contact Problem," Dept. of Aero. Eng. Rep. SM-91.3, Univ. of Michigan.

(10) Miniatt, E. C., 1990, "An Experimental and Numerical Study of Stress Relief at a Sharp Corner in a Contact Problem," Dept. of Aero. Eng. Rep. SM-90-3, Univ. of Michigan.

(11) Gdoutous, E. and Theocaris, P. S., 1975, "Stress Concentration at the Apex of a Plane Indenter Acting on an Elastic Half Plane," *J. Appl. Mech.*, Vol. 36, p. 650.

(12) 이억섭, 황시원, 1995, "동적광탄성 실험에 의한 응력이완 노치부근에서의 접촉특이응력 해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 145~149.