

집중하중 가정에 의한 관통구멍뚫기법의 잔류응력 측정연구

이 영 신* · 강 문 중†

(2001년 4월 26일 접수, 2002년 1월 25일 심사완료)

A Study of Determination of Residual Stress of Through-Hole-Drilling Method on Assumption of Concentrated Force

Young-Shin Lee and Moon-Joong Kang

Key Words: Residual Stress(잔류 응력), Through-Hole-Drilling Method(관통구멍뚫기법), Concentrated Force(집중 하중)

Abstract

To determine the residual stress, concentrated forces instead of distributed stresses, are assumed to be released around the hole drilled through. Concentrated forces are consisted with pairs of concentrated forces which have opposite directions and small distances. Residual stress determination on assumption of concentrated forces is compared numerically with normal method based on Kirsch's solution and proved to be available when released strains are measured at a little distance.

기호설명			
a	: 구멍 반경	$\sigma_{xx1}, \sigma_{yy1}, \tau_{xy1}$: T_x 에 의한 응력성분
d	: 집중하중의 작용 간격	$\sigma_{xx2}, \sigma_{yy2}, \tau_{xy2}$: T_y 에 의한 응력성분
h	: 판의 두께	$\sigma_{xx}', \sigma_{yy}', \tau_{xy}'$: x방향 쌍의 집중하중에 의한 응력 성분
P_i	: 내압	$\sigma_{xx}'', \sigma_{yy}'', \tau_{xy}''$: y방향 쌍의 집중하중에 의한 응력 성분
P_{ix}, P_{iy}	: T_x, T_y 에 상당하는 내압	$\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$: σ_{x0} 및 σ_{y0} 에 의한 응력성분
r	: 구멍중심으로부터 반경	$\sigma_{r1}, \sigma_{\theta1}, \tau_{r\theta1}$: σ_{x0} 에 의한 Kirsch 응력성분
T, T_x, T_y	: 집중하중	$\sigma_{r2}, \sigma_{\theta2}, \tau_{r\theta2}$: σ_{y0} 에 의한 Kirsch 응력성분
θ	: 구멍주위의 각도	$\sigma_{rc}, \sigma_{\theta c}, \tau_{r\theta c}$: P_i 에 의한 극좌표 응력성분
ν	: 포아송(Poisson) 비	$\sigma_{rt}, \sigma_{\theta t}, \tau_{r\theta t}$: T 에 의한 극좌표 응력성분
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$: 직교좌표 응력성분		
σ_{x0}, σ_{y0}	: x, y방향 잔류 응력		
$\sigma_{xxt}, \sigma_{yyt}, \tau_{xyt}$: T 에 의한 직교좌표 응력성분		

1. 서론

현재 상용화되어있는 구멍뚫기법의 잔류응력 측정법은 구멍 있는 무한판에 대한 Kirsch 해석에 기초하여, Mathar⁽¹⁾가 1개의 신장계를 활용한 방법을 처음 고안한 이후 Kelsey⁽²⁾가 저항 변형률계

* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

† 책임저자, 회원, 국방과학연구소

E-mail : mnjnk2000@intizen.com

TEL : (042)821-4532 FAX : (042)821-2392

이지를 활용하고, 변형률 이완상수를 도입한 증분법을 제시하였으며, Rendler⁽³⁾는 3축 로켓 변형률계이지를 이용하여 시편 크기와 효과적인 구멍 크기에 대한 검토를 제시하였다. 그런데 응력의 크기가 깊이에 따라 변하지 않는 비교적 얇은 판의 관통 구멍뚫기의 경우 매우 정확한 방법이나, 깊이에 따라 응력이 변하는 경우나 막힌 구멍뚫기의 경우에는 적용할 수가 없으므로, Schajer⁽⁴⁾가 유한요소법에 의한 변형률 이완상수를 도입하였으며, 국내에서도 이택순 등^(5,6)이 유한요소법에 의한 이완상수 도입과 공기연마분사법에 의한 구멍가공법을 제시하였고, 주진원 등⁽⁷⁾이 유한요소법에 의한 수치적 모사를 실시하고 강철봉제에 대한 4점 굽힘시험에서 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정을 실시하였다. 그런데 기존 구멍뚫기법이 구멍이 있는 무한판에서의 2차원 해, 즉 Kirsch의 해를 기초로 하고 있음에 반해, 본 연구에서는 관통 구멍뚫기 측정법에 대해, 내부점에서 집중하중을 받고 있는 무한판의 문제로 가정하여 잔류응력 측정 방법을 제시하였다. 즉 구멍뚫기법에 의해 발생하는 구멍 주위의 이완된 응력은 구멍 표면의 이완된 합응력을 집중하중으로 작용한 것에 기인한다고 가정하여도 제한된 조건에서 타당성을 찾을 수 있었으며, 잔류응력의 측정법으로 활용할 수 있음을 보였다. 따라서 본 연구는 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 측정법에 대한 또 다른 해석적 모델링 방법을 제공하고 있으며, 본 연구를 중첩법으로 활용하여 보다 복잡한 잔류응력 측정을 위한 해석적 모델링 방법으로 원용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 수식화

2.1 집중하중에서의 응력 분포

판 내부의 원점에서 x방향으로 집중하중, T_x 을 받고 있는 무한판에서 응력 분포는 다음과 같다.^(9,10)

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{T_x}{4\pi h} \frac{\cos\theta}{r} \{-(3+\nu)+2(1+\nu)\sin^2\theta\} \\ \sigma_{yy} &= \frac{T_x}{4\pi h} \frac{\cos\theta}{r} \{(1-\nu)-2(1+\nu)\sin^2\theta\} \quad (1) \\ \tau_{xy} &= -\frac{T_x}{4\pi h} \frac{\sin\theta}{r} \{(1-\nu)+2(1+\nu)\cos^2\theta\}\end{aligned}$$

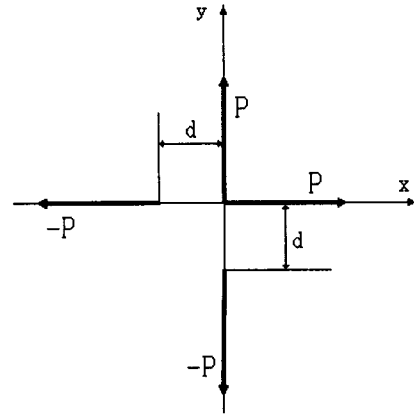


Fig. 1 Pairs of concentrated forces

원점에서 y방향으로 집중하중 T_y 를 가할 때의 응력분포는

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{T_y}{4\pi h} \frac{\sin\theta}{r} \{(1-\nu)-2(1+\nu)\cos^2\theta\} \\ \sigma_{yy} &= \frac{T_y}{4\pi h} \frac{\sin\theta}{r} \{-(3+\nu)+2(1+\nu)\cos^2\theta\} \quad (2) \\ \tau_{xy} &= -\frac{T_y}{4\pi h} \frac{\cos\theta}{r} \{(1-\nu)+2(1+\nu)\sin^2\theta\}\end{aligned}$$

2.2 구멍부 응력에 대한 집중하중 근사

구멍뚫기법에 의해 계측되는 이완 잔류 응력은 구멍부위에서의 응력이 제거됨으로 인하여 발생하므로 구멍뚫기전 구멍부위에서의 응력에 대한 집중하중 근사를 Fig. 1과 같이 하였다.

원래 집중하중, P 가 작용하는 경우 응력이 σ 일 때, x방향으로 d 떨어진 쌍의 집중하중 $+P$, $-P$ 가 작용하는 경우의 응력, σ' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma - \left(\sigma + \frac{\partial\sigma}{\partial x} d \right) \\ &= -d \frac{\partial\sigma}{\partial x} = -d \left(\frac{\partial\sigma}{\partial r} \cos\theta - \frac{\partial\sigma}{\partial\theta} \frac{\sin\theta}{r} \right)\end{aligned}$$

또한 원래 집중하중 P 가 작용하는 경우 응력이 σ 일 때, y방향으로 d 떨어진 쌍의 집중하중 $+P$, $-P$ 가 작용하는 경우의 응력, σ' 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial y} d \right) \\ &= -d \frac{\partial \sigma}{\partial y} = -d \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \frac{\cos \theta}{r} \right) \end{aligned}$$

즉 약간의 거리 d 만큼 떨어진 서로 반대 방향의 집중하중, 즉 x 방향으로는 T_x 와 $-T_x$ 를, y 방향으로는 T_y 와 $-T_y$ 를 가하여 구멍 내부에서의 분포 응력을 근사시켰다.

x 방향의 집중하중들에 의한 응력의 분포는

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}' &= -d \left(\frac{\partial \sigma_{xx1}}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial \sigma_{xx1}}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r} \right) \\ \sigma_{yy}' &= -d \left(\frac{\partial \sigma_{yy1}}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial \sigma_{yy1}}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r} \right) \quad (3) \\ \tau_{xy}' &= -d \left(\frac{\partial \tau_{xy1}}{\partial r} \cos \theta - \frac{\partial \tau_{xy1}}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r} \right) \end{aligned}$$

또한 y 방향의 집중하중들에 의한 응력의 분포는

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}'' &= -d \left(\frac{\partial \sigma_{xx2}}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial \sigma_{xx2}}{\partial \theta} \frac{\cos \theta}{r} \right) \\ \sigma_{yy}'' &= -d \left(\frac{\partial \sigma_{yy2}}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial \sigma_{yy2}}{\partial \theta} \frac{\cos \theta}{r} \right) \quad (4) \\ \tau_{xy}'' &= -d \left(\frac{\partial \tau_{xy2}}{\partial r} \sin \theta + \frac{\partial \tau_{xy2}}{\partial \theta} \frac{\cos \theta}{r} \right) \end{aligned}$$

따라서 집중하중 T_x, T_y 를 동시에 가할 때 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xxt} \\ \sigma_{yyt} \\ \tau_{xyt} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \\ T_{31} & T_{32} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{d}{4\pi hr^2} [- (3 + \nu) \cos^2 \theta + (1 - \nu) \sin^2 \theta \\ &\quad + 8(1 + \nu) \sin^2 \theta \cos^2 \theta] \\ T_{21} &= \frac{d}{4\pi hr^2} [(1 - \nu) \cos^2 \theta + (1 + 3\nu) \sin^2 \theta \\ &\quad - 8(1 + \nu) \sin^2 \theta \cos^2 \theta] \\ T_{31} &= \frac{d}{4\pi hr^2} [- (6 + 2\nu) + 8(1 + \nu) \sin^2 \theta] \sin \theta \cos \theta \\ T_{12} &= \frac{d}{4\pi hr^2} [(1 + 3\nu) \cos^2 \theta + (1 - \nu) \sin^2 \theta \\ &\quad - 8(1 + \nu) \sin^2 \theta \cos^2 \theta] \quad (6) \\ T_{22} &= \frac{d}{4\pi hr^2} [(1 - \nu) \cos^2 \theta - (3 + \nu) \sin^2 \theta \\ &\quad + 8(1 + \nu) \sin^2 \theta \cos^2 \theta] \end{aligned}$$

$$T_{32} = \frac{d}{4\pi hr^2} [- (6 + 2\nu) + 8(1 + \nu) \cos^2 \theta] \sin \theta \cos \theta$$

그런데 $T_x = T_y = T$ 인 경우 응력의 분포는

$$\begin{aligned} \sigma_{xxt} &= -2(1 - \nu) \frac{dT}{4\pi hr^2} (1 - 2 \sin^2 \theta) \\ \sigma_{yyt} &= 2(1 - \nu) \frac{dT}{4\pi hr^2} (1 - 2 \sin^2 \theta) \quad (7) \\ \tau_{xyt} &= -2(1 - \nu) \frac{dT}{4\pi hr^2} \sin 2\theta \\ \text{이므로 극좌표계로 표시하면} \\ \sigma_{rr} &= -2(1 - \nu) \frac{dT}{4\pi hr^2}, \\ \sigma_{\theta\theta} &= 2(1 - \nu) \frac{dT}{4\pi hr^2}, \quad (8) \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned}$$

가 되며, 이는 내경, $2a$ 의 두꺼운 원통에서 내압 P_i 가 걸리는 경우의 다음과 같은 응력 분포와 비슷한 형태를 나타낸다.

$$\sigma_{rc} = -\frac{a^2}{r^2} P_i, \quad \sigma_{\theta c} = \frac{a^2}{r^2} P_i, \quad \tau_{r\theta c} = 0 \quad (9)$$

이 때 내압, P_i 에 의한 x 방향 힘이나 y 방향 힘이 T 와 같으므로

$$2ahP_i = T \quad (10)$$

이 식을 식 (8), (9)들에 적용하고, 비교하면 d 가 다음과 같이 될 때 두 개의 식들은 같게 된다.

$$d = \frac{a\pi}{1 - \nu} \quad (11)$$

이는 이러한 조건을 만족할 때 내압 P_i 를 받는 구멍 주위의 응력의 분포와 식 (5), (11)을 만족하는 집중하중, T 를 받는 주위의 응력의 분포가 동일한 것을 의미한다. 그런데 식 (5)의 집중하중을 가하는 경우에서 식 (10)의 P_i 의 의미는 $T/2ah$ 인 응력에 해당하므로 x 방향이나 y 방향의 이완된 응력과 유사함을 알 수 있다.

따라서 $T_x \neq T_y$ 인 경우에도 식 (11)을 만족하는 $\sigma_{xxt}, \sigma_{yyt}, \tau_{xyt}$ 를 구하고, 식 (10) 대신

$$2ahP_{ix} = T_x \quad 2ahP_{iy} = T_y \quad (12)$$

를 적용하면, P_{ix}, P_{iy} 를 구하여 x, y 방향의 응력을 평가할 수 있을 것이다.

2.3 Kirsch 해에 의한 응력과 비교

x방향으로 σ_{x0} 의 균일 응력을 받고 있는 반경, a 의 구멍이 있는 무한판에서 구멍주위의 응력 분포에 대한 Kirsch 해는 다음과 같다.^(8,11)

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= \frac{\sigma_{x0}}{2} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{\theta 1} &= \frac{\sigma_{x0}}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \quad (13)\end{aligned}$$

$$\tau_{r\theta 1} = -\frac{\sigma_{x0}}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

y방향으로 σ_{y0} 의 균일 응력을 받고 있는 경우는

$$\begin{aligned}\sigma_{r2} &= \frac{\sigma_{y0}}{2} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{\theta 2} &= \frac{\sigma_{y0}}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \quad (14)\end{aligned}$$

$$\tau_{r\theta 2} = \frac{\sigma_{y0}}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

따라서 σ_{x0} , σ_{y0} 가 동시에 받을 경우의 응력은

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \\ \sigma_\theta &= \sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} \quad (15)\end{aligned}$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta 1} + \tau_{r\theta 2}$$

직교좌표계로 표시하면

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= m^2 \sigma_r + n^2 \sigma_\theta - 2mn \tau_{r\theta} \\ \sigma_{yy} &= n^2 \sigma_r + m^2 \sigma_\theta + 2mn \tau_{r\theta} \quad (16) \\ \tau_{xy} &= mn \sigma_r - mn \sigma_\theta + (m^2 - n^2) \tau_{r\theta}\end{aligned}$$

여기서 $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$ 이며, 이 응력은 구멍뚫기에 의해 형성된 응력이다.

구멍뚫기법에서 실제 계측되는 변형률은 구멍뚫기로 이완되는 변형률이다. 따라서 이러한 변형률에 의한 응력은 원래 무한판에서의 응력 σ_{x0} ,

σ_{y0} 에서 구멍뚫기에 의해 형성되는 식 (16)의 응력을 제거한 응력, σ_{xm} , σ_{ym} , τ_{xym} 이므로

$$\begin{aligned}\sigma_{xm} &= \sigma_{x0} - \sigma_{xx} \\ \sigma_{ym} &= \sigma_{y0} - \sigma_{yy} \\ \tau_{xym} &= 0 - \tau_{xy} \quad (17)\end{aligned}$$

집중하중에 의한 잔류응력을 평가하기 위해서 식 (17)의 응력과 식 (5)의 응력이 동일하다고 가

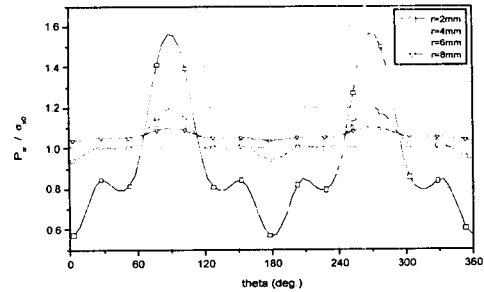


Fig. 2 Behaviors of P_{ix} / σ_{x0}

정하고, T_x , T_y 를 구하여 식 (12)의 P_{ix} , P_{iy} 와 σ_{x0} , σ_{y0} 를 비교 평가한다.

3. 수치 계산 및 결과 검토

3.1 평가 응력 및 위치

구멍의 크기는 금속 구조물의 잔류응력측정 용도의 상용 관통 구멍뚫기 장비 및 과정⁽⁸⁾에서 실제 이루어질 수 있는 수준으로 반경 $a=1\text{mm}$ 로 정하였고, 잔류응력 수준은 강제나 고강도알루미늄합금 구조재의 탄성 범위에서 발생가능한 수준인 $\sigma_{x0}=30\text{kg/mm}^2$, $\sigma_{y0}=-10\text{kg/mm}^2$ 로 가정하였다.

$r=2, 4, 6, 8\text{mm}$ 및 임의의 각도, θ 에서 계측될 것으로 예상되는 이완응력을 Kirsch 해에 의한 식 (14)~(17)에 따라 구하고, 이 응력에 대하여 집중하중 가정에 의한 잔류응력 계산값, P_{ix} , P_{iy} 를 계산하였으며, 원래 가정한 잔류응력, σ_{x0} , σ_{y0} 와 비교 평가하였다. 계산에서 ν 는 강재에서 통상 적용하는 0.29를 적용하였고, d 는 식 (11)에서 주어지며, h 는 내부적으로 소거된다.

3.2 수치계산 결과검토

σ_{x0} , σ_{y0} 는 처음에 특정값으로 가정하였으나, Kirsch해에 의한 이완응력과 관련되므로 Kirsch해, 즉 엄밀해에 의한 잔류응력값을 의미하며, P_{ix} , P_{iy} 는 본 논문에서 제시하는 집중가정에 의한 잔류응력값을 나타내므로 보다 효과적인 비교를 위해 이 응력값들의 비, 즉 P_{ix} / σ_{x0} 와 P_{iy} / σ_{y0}

를 그림으로 Fig. 2와 Fig. 3에서 각기 나타내 보였다.

P_{ix}/σ_{x0} 와 P_{iy}/σ_{y0} 는 전반적으로 r , 즉 구멍 중심으로부터의 거리와 θ , 즉 x 축과의 각도에 따라 상당히 변화하는 거동을 보였다. $r=2\text{mm}$ 일 때 P_{ix}/σ_{x0} 는 0.55~1.55 범위에서, P_{iy}/σ_{y0} 는 -0.1~2.9 범위에서 각기 각도에 따라 변화하는 거동을 보이는데 이는 P_{ix} , P_{iy} 가 엄밀해에 대해 이런 비율로 차이가 남을 의미하며, 잔류응력을 평가하기에는 문제가 있는 수준이지만, r 이 4mm에서 6mm 및 8mm로 감에 따라 엄밀해와의 차이가 급격히 줄어들고 있다. 즉 $r=6\text{mm}$ 인 경우에는 P_{ix}/σ_{x0} 는 1.0~1.12 범위이고, P_{iy}/σ_{y0} 는 약 1.2~1.6 범위이며, $r=8\text{mm}$ 인 경우에는 P_{ix}/σ_{x0} 는 1.02~1.1 범위이고, P_{iy}/σ_{y0} 는 약 1.3~1.5 범위로 두가지 경우 모두 1에 상당히 근접하고 있다. 이러한 현상은 식 (5)에 의한 집중하중 가정에 의한 응력장이 식 (17)에 의한 것과 상이함에 기인된 것으로 판단된다. 즉 r 이 작아지면 구멍 주위는 응력집중효과가 크게 작용하게 되고, Kirsch해를 기초로 하는 식 (17)에서도 이러한 효과가 잘 반영되어 있음에 반해, 집중하중 가정에 의한 식 (5)에서는 응력집중효과가 반영되지 못하였다. 그러므로 r 이 감소함에 따라 엄밀해와 차이가 크게 작용하였으나, r 이 증가하면 이러한 응력집중효과의 영향이 감소하고 Saint Venant's Principle에 의해 엄밀해와의 차이가 감소하였다. 따라서 집중하중 가정에 의하여 $r=6\text{mm}$ 정도, 즉 구멍 반경의 6배 수준에서 P_{iy} 의 경우 σ_{y0} 과의 차이가 다소 크나, 지배적인 응력인 P_{ix} 의 경우는 σ_{x0} 과의 차이가 약 10% 수준을 보이며, r 이 증가하면 오차는 더욱 감소할 것으로 예상된다. 이는 $P_{ix} \approx \sigma_{x0}$, $P_{iy} \approx \sigma_{y0}$ 됨을 의미하므로 r 이 이 정도에 이르면 구멍뚫기에 의해 구멍 주위에서의 이완응력을 집중하중으로 가정한 식 (5), (12)를 통하여 잔류응력을 구할 수 있음을 의미한다.

또한 P_{ix}/σ_{x0} , P_{iy}/σ_{y0} 는 θ , 즉 각도가 90, 180, 270, 360도의 경우에는 1에서 보다 크게 벗어나는 거동을 보이고 있다. 이는 실제 구멍 주

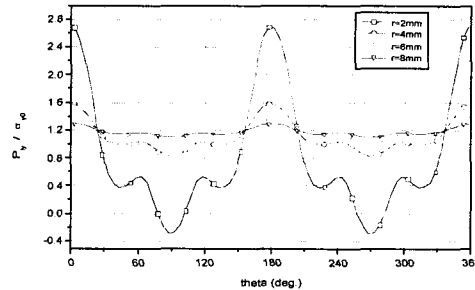


Fig. 3 Behaviors of P_{iy}/σ_{y0}

위에는 응력집중 현상이 발생하며, 엄밀해에서 그 응력분포가 90, 180, 270, 360도 부위에서 가장 큰 응력집중이 발생하는 거동이 반영되어 있는데 반해, 본 논문에서는 식 (12)에 의한 직교하는 2개의 집중하중에 대한 균일 분포 가정으로 인해 응력집중효과가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다.

그리고 어느 정도의 r 증가를 적용할 경우, 집중하중을 활용한 식 (3), (4)가 구멍 주위의 분포하중과 대체할 수 있음을 확인하였으므로 보다 넓은 응용 가능성이 예상된다.

4. 결론

구멍뚫기법 잔류응력 측정을 위해, 내부점에서 집중하중을 받고 있는 무한판의 문제를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구멍에서 거리가 증가함에 따라 이완하중에 대한 집중하중 가정의 유효성이 증가됨을 확인할 수 있었다.

(2) 본 계산의 경우 구멍 반경의 6배에서 계측된 값들에 대한 잔류응력은 약 10%의 오차범위에서 계측이 가능하였다.

(3) 집중하중의 가정은 구멍주위의 응력 집중이 반영되지 않음으로 인하여 0, 90, 180, 270도에서 엄밀해와의 차이가 증가하였다.

(4) 집중하중에 대한 다른 해를 활용하여 보다 다양한 적용이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Mathar, J., 1934, "Determination of Initial

- Stresses by Measurement Deformation around Holes," *Trans. of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 56, pp. 249~254.
- (2) Kelsey, R. H., 1956, "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method," *Strain*, Vol. 14, No. 1, pp. 181~194.
- (3) Rendler, N. J. and Vigness I., 1966, "Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses," *Experimental Mechanics*, Vol. 6, No. 12, pp. 577~586.
- (4) Schajer, G. S., 1981, "Application of Finite Element Calculations of Residual Stress Measurements," *Trans. of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, pp. 157~163.
- (5) 이택순, 전상윤, 최병길, 1990, "표면응력 구배 시의 잔류응력 측정에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제4호, pp. 761~768.
- (6) 이택순, 전상윤, 최병길, 1992, "선형구배 응력장에서 표층의 잔류응력 측정에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 1632~1642.
- (7) 주진원, 박찬기, 1998, "구멍뚫기방법을 이용한 깊이방향으로 변하는 잔류응력 측정방법," 대한기계학회논문집 A, 제22권, 제2호, pp. 268~277.
- (8) Measurements Group, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," Tech Note TN-503-3, Measurements Group, Inc., Raleigh, North Carolina.
- (9) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 129~131.
- (10) Lukasiewicz Stanislaw, 1979, "Local Loads in Plates and Shells," PWN-Polish Scientific Publishers, Warszawa, pp. 232~233.
- (11) Mal, A. K. and Singh, S. J., 1991, *Deformation of Elastic Solids*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 218~220.