

< 논문 >

변위 측정을 기본으로 한 구멍뚫기방법에 의한 잔류응력 측정 방법

신 등 일* · 주 진 원†
(2005년 7월 21일 접수, 2005년 9월 15일 심사완료)

Determination of Residual Stress by the Hole Drilling Method Based on Displacement Measurement

Dong Il Shin and Jin Won Joo

Key Words: Hole Drilling Method(구멍 뚫기 방법), Residual Stress(잔류응력), Relieved Displacement(이완변위), Relaxation Coefficient(이완상수)

Abstract

This paper presents the numerical procedure for calculating non-uniform residual stresses based on relieved displacements obtained from incremental hole drilling. The relationship between the in-plane displacement produced by introducing a blind hole and the corresponding residual stress is established. Finite element calculations are described to evaluate the relieved coefficients required for the determination of non-uniform residual stresses. Validity of the proposed method has been tested through three axisymmetric test examples and two three-dimensional examples. As a result of simulation on the test examples, it is found that this numerical procedure is well adopted to measuring non-uniform residual stress in the full hole depth range of the hole diameter from the surface. The accuracy of the hole drilling method with displacement measurement is discussed, comparing the method with strain measurement

1. 서 론

잔류응력을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 재료에 작은 원통구멍을 뚫어 응력을 국부적으로 제거시키고 그 과정에서 발생하는 표면의 변형을 변화 값을 이용하여 잔류응력을 결정하는 구멍뚫기방법⁽¹⁾(blind hole drilling method)이 널리 쓰이고 있다. 이 방법은 Mathar⁽²⁾에 의해 처음으로 제안되었으며, Kelsey,⁽³⁾ Rendler와 Vigness⁽⁴⁾ Bathgate⁽⁵⁾ 등에 의하여 실험적인 방법으로 잔류응력과 측정되는

변형률 사이의 관계를 나타내는 이완상수를 결정하는 연구가 발표되었다. 유한요소법의 도입으로 이를 이용하여 잔류응력을 결정한 연구가 최근 들이 Niku-lary,⁽⁶⁾ Flaman과 Manning,⁽⁷⁾ Schajer,⁽⁸⁾ Wern,⁽⁹⁾ Joo와 Park⁽¹⁰⁾ 등에 의해 수행되었다. 이와 같은 구멍 뚫기 방법은 매우 유용하게 사용되고 있지만, 스트레인 게이지를 먼저 부착한 후에 드릴링 작업을 수행하는 과정을 거치므로 몇 가지 측정값의 신뢰도를 떨어뜨리는 요인이 존재한다. 즉, 구멍 주위에서 이완되는 변형률은 구멍에서부터 멀어질수록 급격하게 감소하므로 스트레인 게이지가 위치하는 영역에서는 변형률의 값이 원통 바로 주위보다 상당히 작아지고 변화가 심할 뿐 아니라, 구멍이 스트레인 게이지들의 중심에서 약간이라도 편심되거나 구멍의 크기가 변화했을 때 측정값의 신뢰도가 상당히 떨어질 수 있다.⁽¹¹⁾ 또한, 스트레인 게이지

† 책임저자, 회원, 충북대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441

* 회원, 청주기계공업고등학교

부착 작업에 시간과 노력이 필요하며, 작업 중에 발생할 수 있는 또 다른 잔류응력도 무시할 수 없기 때문에, 비접촉식으로 전체의 영역을 측정할 수 있는 광학적 측정 방법들이 잔류응력 측정에 시도되고 있다.

광학적인 방법을 이용한 잔류응력 측정에서는 원통 바로 주위에서 발생하는 이완 변위를 측정하므로 비교적 큰 측정값을 얻을 수가 있고, 구멍이 뚫어진 상태에서의 변위를 기록하게 되므로 편심에 의한 오차 등의 문제가 없으며, 비접촉으로 전체 영역의 변형 상태를 한 번에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 반면에, 변위를 측정하고 해석하므로 변형률이나 응력을 결정하는 과정에서 오차를 발생시킬 수 있으며, 측정 장치의 구성에 전문적인 기술이 필요하고, 측정값의 처리 방법이 어려우므로 이러한 문제를 해결하기 위한 연구가 선행되어야 한다.

구멍 뚫기 방법에 의한 잔류응력의 측정에 관한 연구로는 이완되는 변위 혹은 변형률의 측정기술 및 그의 정확도 평가에 대한 연구와, 측정된 양과 잔류응력과의 관계 정립 연구가 주로 중요하게 수행되었다. 광학적인 방법을 이용한 잔류응력 측정에서는 평면 내의 변위를 측정하게 되므로 재료에 존재하는 잔류응력과 이완되는 변위가 갖는 정보간의 관계를 정립할 필요가 있다. 용접 등의 열하중에 의한 잔류응력이나 쇼트 피닝이나 표면처리에 의한 잔류응력 등은 그 크기도 클 뿐만 아니라, 표면 근처에서 큰 응력구배를 갖는다.

본 논문에서는 깊이 방향으로 임의의 분포를 갖는 잔류응력을 광학적인 방법으로 결정할 수 있도록 하기 위하여, 기존의 스트레인 게이지를 이용한 이완 변형률을 측정하는 방법 대신에 이완 변위를 측정하여 잔류응력을 결정하는 방법을 유도하고, 유한 요소 해석을 복합적으로 이용하는 수치적인 처리과정을 제시하였다. 이 방법의 신뢰성을 검증하기 위하여, 유한요소 시뮬레이션을 통해 알고 있는 잔류응력장을 발생시키고 본 논문에서 수행한 방법을 적용하여 얻어진 잔류응력과의 결과를 비교하였다.

2. 이론적 배경

구멍 뚫기 방법에 의한 잔류응력의 측정은 다음과 같은 원리에 기초를 두고 있다. 잔류응력이

존재하는 물체에 아주 작은 구멍(보통 직경 1 ~ 2 mm)을 뚫으면 구멍의 벽면은 자유표면이 되어 법선 방향의 수직응력과 표면방향의 전단응력은 0이 되므로 구멍 주위의 응력이 완화된다. 이와 같은 응력 상태의 변화를 측정하기 위하여, 미리 부착된 로켓 형식의 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률을 이용하여 잔류응력을 결정하는 방법이 널리 이용되어왔다. 본 논문에서는 변위를 측정하여 잔류응력을 결정하는 과정을 유도하고 수치적인 적용 방법과 검증을 수행한다.

구멍 뚫기 방법으로 신뢰성 있게 잔류응력을 결정하기 위해서는 완화된 구멍의 깊이에 따라 변화하는 응력 값과 표면에서 측정되는 변위 사이의 관계를 정확하게 정립하는 것이 중요하다. 구멍 뚫기 방법에 의하여 잔류응력을 구하는 식을 유도할 때는 Kirsh's solution을 기본적인 탄성해로 이용한다. 즉, 구멍 뚫기 작업을 수행할 때 발생하는 반경 방향의 변위는 식 (1)과 같이 구멍이 있을 경우의 변위와 구멍이 없는 경우의 변위의 차이라고 할 수 있다.

$$u_r = u_r^b - u_r^c \quad (1)$$

Fig. 1과 같이 구멍이 있는 시편에 균일한 단축 응력 σ_p 가 가해질 때, 점 $P(R, \theta)$ 에서의 응력은 다음의 식 (2)와 같이 알려져 있다.⁽¹⁾

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_p}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_p}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_p}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 r 은 P점의 중심에서의 거리와 구멍반경의 비($r=R/R_0$)이다.

여기에 후크의 법칙을 이용하면 변형률 성분 $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \gamma_{r\theta}$ 를 구할 수 있고, 이로부터 다음과 같은 변형률-변위 관계식을 이용하여 변위 성분을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \epsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

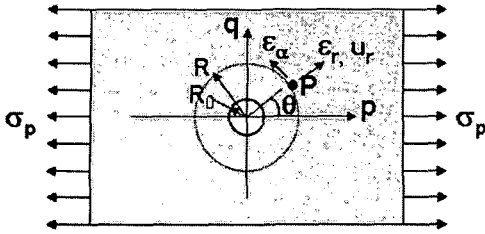


Fig. 1 The plate with a circular hole on the uniaxial stress field

식 (3)의 편미분 방정식을 해석하고, 그 중 조건에 맞는 해를 구하기 위하여 다음과 같은 경계조건을 부가한다. 여기서 u 와 v 는 각각 p 와 q 방향의 변위를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{at } r=0, & u_r = u_\theta = 0 \\
 & \text{at } \theta=0 \text{ or } \pi, & u_\theta = 0 \\
 & \text{at } \theta=\pi/2 \text{ or } 3\pi/2, & u_\theta = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{at } r \rightarrow \infty, \\
 & u_r = u \cos \theta + v \sin \theta = \frac{\sigma_p r R_0}{2E} [(1-\nu) + (1+\nu) \cos 2\theta] \\
 & u_\theta = v \cos \theta - u \sin \theta = \frac{\sigma_p r R_0}{2E} (1+\nu) \sin 2\theta
 \end{aligned}$$

식 (4)의 경계조건을 부가하여 얻어진 구멍 주위의 반경방향 변위는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 u_r^b = \frac{\sigma_p r R_0}{2E} & \left[\left\{ (1-\nu) + (1+\nu) \frac{1}{r^2} \right\} \right. \\
 & \left. + \left\{ (1+\nu) - (1+\nu) \frac{1}{r^4} + \frac{4}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (1)의 두 번째로 구멍이 없는 단순 판에 균일한 단축응력이 가해질 때의 변위는 간단한 좌표변환을 통해서 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 u_r^o &= u^o \cos \theta + v^o \sin \theta \\
 &= \frac{\sigma_p r R_0}{2E} [(1-\nu) + (1+\nu) \cos 2\theta]
 \end{aligned} \tag{6}$$

따라서 구멍 뚫기 작업을 수행할 때 발생하는 반경방향의 변위는 식 (1)과 식 (5) 및 식 (6)으로부터 다음과 같이 구해질 수 있다.

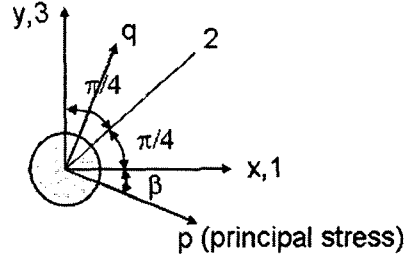


Fig. 2 Coordinates for measuring residual stresses

$$\begin{aligned}
 u_r &= \frac{\sigma_p r R_0}{2E} \left[(1+\nu) \frac{1}{r^2} + \left\{ -(1+\nu) \frac{1}{r^4} + \frac{4}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \\
 &= \sigma_p [A(r, E, \nu) + B(r, E, \nu) \cos 2\theta]
 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)로 표현된 반경방향 변위는 균일한 단축응력이 가해질 때의 변위이다. 일반적인 2축 응력 장에서의 응력을 구하기 위해서 q 방향으로 가해지는 균일한 응력 σ_q 를 식 (7)에 중첩하면 반경방향 변위는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_r &= \sigma_p (A + B \cos 2\theta) + \sigma_q [A + B \cos 2(\theta + \pi/2)] \\
 &= A(\sigma_p + \sigma_q) + B(\sigma_p - \sigma_q) \cos 2\theta
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 σ_p 와 σ_q 는 주응력이고 u_r 은 주응력 σ_p 로부터 θ 만큼 회전한 지점의 반경방향 변위이며, 상수 A, B 는 측정되는 지점의 반경과 재료상수에 의해 결정되는 값으로 잔류응력의 측정에서는 이를 이완상수라고 한다.

구멍을 뚫은 후 그 과정에서 발생한 세 방향에서의 반경방향 변위를 측정 한 후 식 (8)을 이용하면 재료에 존재하였던 잔류응력의 주응력 성분과 주응력 방향을 결정할 수 있다. 즉, Fig. 2와 같이 재료의 직교좌표계를 (x, y) 라 하고 측정되는 변위의 방향을 x 방향으로부터 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 에 일치시키며, 주응력의 방향이 x 축과 $-\beta$ 만큼 회전한 방향에 있다고 하면, 식 (8)에서 θ 는 각각 $\beta, \beta + \pi/4, \beta + \pi/2$ 이 되어 측정되는 반경방향 변위는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= A(\sigma_p + \sigma_q) + B(\sigma_p - \sigma_q) \cos 2\beta \\
 u_2 &= A(\sigma_p + \sigma_q) - B(\sigma_p - \sigma_q) \sin 2\beta \\
 u_3 &= A(\sigma_p + \sigma_q) - B(\sigma_p - \sigma_q) \cos 2\beta
 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서 세 방향의 변위가 측정되면 주응력 σ_p 와 σ_q 및 주응력 방향 β 를 결정할 수 있다. 이를 좌표변환을 통하여 재료 좌표계의 응력 σ_x 와 σ_y 및 τ_{xy} 로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} u_1 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \\ u_2 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + 2B\tau_{xy} \\ u_3 &= A(\sigma_x + \sigma_y) - B(\sigma_x - \sigma_y) \end{aligned} \quad (10)$$

3. 깊이방향으로 변하는 잔류응력 계산방법

3.1 수치적인 처리방법

앞에서 유도된 잔류응력 관계식은 구멍의 깊이 방향으로 일정한 응력상태이고, 구멍은 통과된 구멍이라는 이차원적인 가정 하에 유도되었다. 그러나 실제 잔류응력이 존재하는 재료에는 이와 같은 가정이 만족되는 경우가 드물기 때문에 잔류응력을 결정하는 데에 큰 오차를 나타낼 수 있다. 또한 시편의 형상이나 재료의 종류, 실험과정에 따라 적용에 한계가 따른다는 제약이 있다. 따라서 본 논문에서는 기본적으로는 식 (10)을 이용하고 이완상수 A와 B를 실제조건에 맞도록 수치적으로 유도하여 깊이방향으로 임의로 변하는 잔류응력장에서도 적용할 수 있도록 하였다.

구멍의 깊이가 증가됨에 따라 측정되는 반경방향 변위는 표면에서부터 구멍깊이 h까지 변하는 잔류응력이 완화되면서 증첩되면서 나타나므로, 식 (10)의 첫 번째 식은 다음과 같은 적분형태로 표현할 수 있다.

$$u_1(h) = \int_0^h \{A(h, z)[\sigma_x(z) + \sigma_y(z)] + B(h, z)[\sigma_x(z) - \sigma_y(z)]\} dz \quad (11)$$

여기서, $u_1(h)$ 는 h만큼 구멍을 뚫었을 때 측정되는 변위이고, $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$ 는 깊이 z인 지점의 응력성분이다. A(h,z)와 B(h,z)는 구멍깊이가 h일 z 지점의 응력이 완화되면서 측정되는, 변형률과 잔류응력과의 관계를 나타내는 이완상수이다.

구멍 뚫기 작업을 할 때에는 완화되는 변위는 몇 개의 단계를 나누어서 측정하게 되므로, 단계수를 i 라고 할 때 수치적인 해석을 위하여 식 (11)을 다음과 같은 불연속적 합의 식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^i [A_{ij}(\sigma_{xj} + \sigma_{yj}) - B_{ij}(\sigma_{xj} - \sigma_{yj})] = u_{1i} \quad (12)$$

$$1 \leq j \leq i \leq n$$

식 (12)와 같은 관계식은 $u_2(h)$, $u_3(h)$ 에 대해서도 표현할 수 있으므로 각 단계에서 이완되는 변위들이 측정되면, 구성되는 선형연립방정식을 수치적으로 해석하여 각 단계에서의 잔류응력을 결정할 수 있다. 이와 같이 구성된 계수 행렬은 $3n \times 3n$ 인 행렬이 되고 소거과정(elimination)을 거쳐야 하므로 계산 시간이 많이 걸리고 잔여 오차가 축적되어 해가 정확하지 않을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 계산의 효율을 위하여 참고문헌⁽¹⁰⁾에서와 같은 방법으로 변환 변위와 변환 응력을 사용하여 해석하였다. 이와 같은 선형연립방정식은 3개의 $n \times n$ 삼각 행렬이 되므로 전대입법(forward substitution)만에 의하여 해를 효과적으로 구할 수 있다.

3.2 유한 요소 해석에 의한 이완 상수의 결정

이완 상수들을 구하기 위하여 알고 있는 응력 상태를 가정하고 그 때의 이완 변위를 유한요소 해석에 의하여 계산하였다. 즉, 식 (10)에서 A를 구하기 위하여 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_a$ 와 같은 등축(equal biaxial) 응력 상태를 가정하였고, B를 구하기 위하여 $\sigma_x = -\sigma_y = \sigma_b$, $\tau_{xy} = 0$ 와 같은 순수전단 응력 상태를 가정하였다. 이 때 각각의 조건에서 완화되는 변위로부터 다음 식에 의하여 이완 상수를 구할 수 있다.

$$A = \frac{u_1}{2R_0\sigma_a} \quad \text{or} \quad \frac{u_3}{2R_0\sigma_a}, \quad (13)$$

$$B = -\frac{u_1}{2R_0\sigma_b} \quad \text{or} \quad \frac{u_3}{2R_0\sigma_b}$$

깊이 방향으로 변하는 잔류응력을 계산하기 위해서는 식 (12)에서 A_{ij} 와 B_{ij} 를 각각 구해야 하는데, 이 이완상수는 재료상수 및 구멍의 크기와 측정하려는 위치에 크게 관계한다. 구해진 이완상수를 재료와 구멍의 크기에 관계없이 사용할 수 있도록 하기 위하여 식 (7)에서 나타난 A와 B의 정의에 따라 다음과 같은 무차원 이완상수를 정의하였다.

$$a_{ij} = \frac{2EA_{ij}}{1+\nu}, \quad b_{ij} = 2EB_{ij} \quad (14)$$

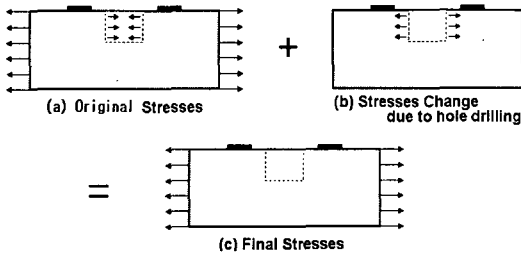


Fig. 3 Superposition of loadings to find the displacement relaxation due to hole drilling

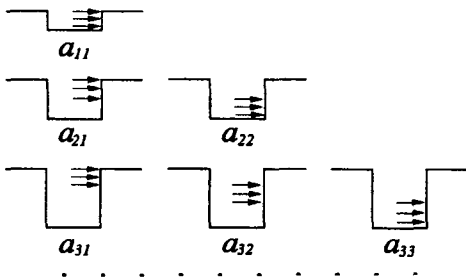


Fig. 4 Stress loadings corresponding to the relaxation coefficient a_{ij}

여기서 a_{ij} 는 구멍의 깊이가 i 일 때, j 지점에 가해지는 응력에 대한 반경방향 변위의 관계를 나타낸다. 이를 위하여 j 지점에서만 응력이 가해지는 상태의 하중조건을 가해야 하나, 이 같은 하중 조건을 재료의 외부에서 가하는 것은 불가능하므로 Fig. 3과 같은 중첩관계를 이용하였다. 구멍 뚫기작업 중 발생하는 변위는 (a)상태에서 (c)상태로 변화한 변위의 차이가 되며, 이는 결국 (b)의 응력상태에 의해서 구멍을 뚫기 전 후의 변위가 발생되었다고 할 수 있다. 따라서 (b)의 응력상태를 유한요소해석한 후, 변위 결과를 식 (13)과 식 (14)에 대입하여 계산하면 무차원 이완상수를 결정할 수 있다.

무차원 이완상수 a_{ij} 와 b_{ij} 를 구하기 위하여 Fig. 4와 같이 단계 당 0.254 mm씩 7 단계 구멍깊이의 각각의 하중 조건에 대하여 Ansys 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 이완 상수 a_{ij} 를 구하기 위한 등2축 응력 상태는 Fig. 5(a)와 같이 구멍의 벽면에 균일한 수직력을 작용시켜 얻어내었으며, 이완 상수 b_{ij} 를 구하기 위한 순수전단 응력 상태는 Fig. 5(b)와 같이 벽면에 수직한 힘과 원주 방향의 힘을 각각 $\cos 2\theta$ 함수와 $\sin 2\theta$ 함수로 작용시켜야 얻어낼 수 있다는 것을 유한요소해석에 의해 검증하였다.

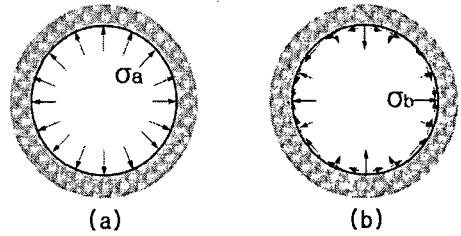


Fig. 5 Loading conditions for equal biaxial stress field(a) and pure shear stress field (b)

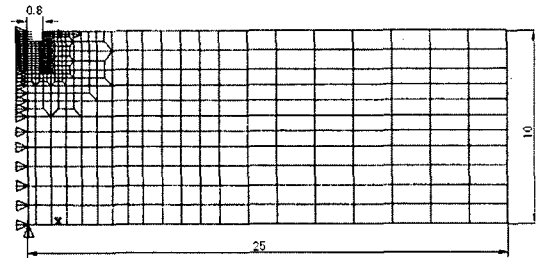


Fig. 6 Finite element mesh used for calculating the relaxation coefficients

따라서 해석에서는 구멍주위가 기하학적으로 축 대칭이므로 Fig. 6과 같은 비축대칭하중에 대한 2차원 4절점 축대칭 요소를 사용하였다. 유한요소 모델에서 구멍의 반경은 0.8 mm, 시편의 두께는 10 mm이고 시편의 바깥 반경은 25 mm로 하였다. 구멍이 없는 부분의 중심축을 따라 반경 방향의 변위와 맨 밑바닥에서 중심점의 수직 방향 변위를 제한하였다. 구멍 주위의 반경 0.8 mm($r=1.0$), 1.0 mm($r=1.25$), 1.2 mm($r=1.5$), 1.6 mm($r=2.0$) 지점에서 각각 이완상수를 구하였다.

구해진 이완 상수들은 재료의 종류와 구멍의 크기에 관계없이 이용할 수 있으나 같은 위치에 만 이용될 수 있는 상수이다. 위치별로 결정된 무차원 이완 상수 a_{ij} 와 b_{ij} 중 $r=1.25$ 와 $r=2$ 인 지점의 값들은 다음과 같다.

$R_0=0.8, r=1.25$

$a_{ij} =$	4292138								
	5460263	1840963							
	5778150	2273800	833388						
	5894700	2400400	1054538	411263					
	5944313	2451125	1119775	539838	206988				
	5967938	2474425	1146650	578288	287150	101050			
	5980275	2486188	1159338	594400	311613	153450	44400		

$\times 10^{-7}$

$b_{ij} =$	6075563	$\times 10^{-7}$
	7754250 3579975	
	8266913 4355663 2237075	
	8474550 4612913 2685375 1525313	
	8570100 4727100 2837625 1813113 1091050	
	8618138 4783538 2907975 1912713 1287563 805563	
	8643600 4813463 2943938 1959750 1356838 945525 609050	
$R_0=0.8, r=2.0$		
$a_{ij} =$	1417133	$\times 10^{-7}$
	1907430 1216346	
	2117220 1528328 842494	
	2213453 1640231 1046981 523583	
	2259416 1689975 1113604 658744 310170	
	2282595 1714073 1142531 701243 400706 177818	
	2295011 1726594 1156601 719513 429004 239539 97926	
$b_{ij} =$	2236723	$\times 10^{-7}$
	2973600 2213111	
	3328238 2750213 1820884	
	3505425 2970450 2202323 1397078	
	3595725 3078338 2346251 1667978 1056878	
	3643500 3134513 2416155 1767045 1252073 803618	
	3669488 3164963 2453036 1815135 1322948 946916 605425	

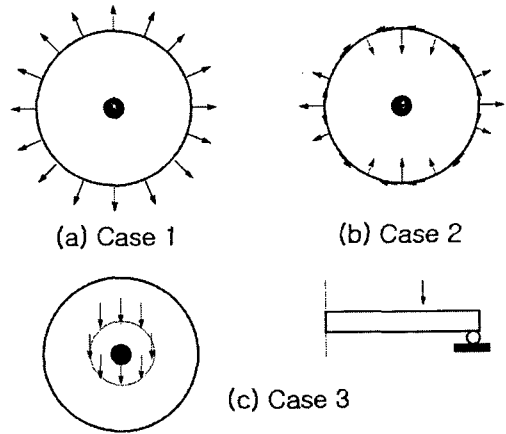


Fig. 7 Loading conditions for simulations

4. 잔류응력 결정방법의 검증

앞에서 설명한 수치적인 잔류응력 결정방법이 신뢰성이 있는가를 판단하기 위하여 몇 가지 알고 있는 응력장에 대한 검증을 유한요소 시뮬레이션에 의하여 수행하였다. 미리 알고 있는 잔류응력장에서 구멍 부위의 유한요소를 제거해 가면서 각 단계별 각 지점에서의 변위를 계산하고 이 변위와 구멍을 뚫기 전에서의 변위와의 차이를 이완 변위로 보았다. Fig. 6과 같은 유한요소 모델을 이용하여 2차원 축 대칭 문제 3가지를 선정하여 잔류응력을 결정하였다. 비교를 위하여 스트레인 게이지가 차지하는 영역의 이완변형률을 이용해 잔류응력을 구한 참고문헌⁽¹⁰⁾의 경우와 같은 문제를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 Case 1은 원판에 균일한 반경 방향의 하중을 가하는 경우로 이론해는 $\sigma_x = \sigma_y = 10, \tau_{xy} = 0$ 인 조건이다. Case 2는 Fig. 7(b)에서와 같이 원판에 반경 방향 하중과 원주 방향 하중을 2θ를 주기로 갖는 삼각함수의 형태로 가하는 경우이며 이론해는 $\alpha_x = -\alpha_y = 10, \tau_{xy} = 0$ 인 조건이다. Case 3은 Fig. 7(c)와 같이 원판의 둘레 밑을 지지하고 중간 부분 원주 둘레에 균일한 수직 하중을 주어 굽힘 변형을 일으키는 경우로 표면에서는 $\sigma_x = \sigma_y = -4, \tau_{xy} = 0$ 이고 중심축까지 선형적으로 응력이 0으로 감소하는 조건이다.

각각의 경우에 이론해⁽¹²⁾와 구멍을 뚫기 전의 유한요소해석에 의한 응력 값을 계산하여 비교하였다. 시뮬레이션에 의하여 이완되는 변위 값을 가지고 3장에서 구해진 이완상수 a_{ij} 및 b_{ij} 를 이용하여 잔류응력을 구하고 그 결과를 이론값 및 변형률 측정을 이용하여 구한 값⁽¹⁰⁾과 비교하였다. Table 1, Table 2, Table 3은 각각 Case 1, Case 2, Case 3에 대한 결과이다. 표에서는 깊이 방향에 따라 이론적인 잔류응력 값과 본 논문에서 구한 잔류응력 값을 이완 변형률을 이용한 참고문헌⁽¹⁰⁾의 결과와 비교하여 나타내었다.

계산 결과를 보면, Case 1, Case 2의 경우에서만만 아니라, 깊이 방향으로 선형적으로 변하는 Case 3의 경우에서도 본 논문에서 계산된 잔류응력 값이 이론값 및 유한요소해석 결과와 아주 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 스트레인 게이지에 의한 이완변형률로 구한 참고문헌⁽¹⁰⁾의 결과에서는, Case 2의 경우 이론값과 시뮬레이션 한 값이 아주 잘 일치하였으나, Case 1과 Case 3의 경우는 5번째 단계까지는 아주 잘 일치하였지만 6번째, 7번째 단계에서는 차이가 대단히 큰 것으로 보고되었다. 이것은 구멍의 깊이가 구멍직경 크기 근처에 도달할 때에는 이완되는 변형이 더 이상 증가하지 않거나 오히려 약간 감소하는 현상 때문에 a_{66}, a_{76}, a_{77} 의 값이 대단히 작거나 부호가 반대로 나타났기 때문이다. 따라서 이 방법은 구멍 직경의 약 0.8배까지는 아주 잘 적용될 수 있으나 그 이상의 잔류응력 값은 의미가 없다고 보고되었다.

Table 1 Comparison of residual stresses in Case 1 calculated by theory and simulations

Depth (mm)	Theory (MPa)	Simulation		Ref.(10)
		r=1.25	r=2.0	
0.127	10.00	10.07	10.04	9.98
0.381	10.00	10.09	10.05	10.07
0.635	10.00	10.09	10.08	10.10
0.889	10.00	10.13	10.07	10.11
1.143	10.00	10.05	10.15	9.95
1.397	10.00	10.02	9.96	19.81
1.651	10.00	10.56	10.10	16.91

Table 2 Comparison of residual stresses in Case 2 calculated by theory and simulations

Depth (mm)	Theory (MPa)	Simulation		Ref.(10)
		r=1.25	r=2.0	
0.127	10.00	10.05	10.03	10.03
0.381	10.00	10.05	10.03	10.03
0.635	10.00	10.03	10.04	10.03
0.889	10.00	10.04	10.02	10.09
1.143	10.00	10.04	10.05	9.92
1.397	10.00	10.01	10.03	10.08
1.651	10.00	10.06	10.24	10.02

Table 3 Comparison of residual stresses in Case 3 calculated by theory and simulations

Depth (mm)	Theory (MPa)	Simulation		Ref.(10)
		r=1.25	r=2.0	
0.127	-3.90	-3.88	-3.86	-3.85
0.381	-3.69	-3.66	-3.66	-3.65
0.635	-3.49	-3.45	-3.45	-3.45
0.889	-3.29	-3.24	-3.24	-3.26
1.143	-3.08	-3.05	-3.05	-3.05
1.397	-2.88	-2.83	-2.82	-1.31
1.651	-2.68	-2.58	-2.63	-3.58

본 논문에서 수행한 방법에서는 변위를 측정하기 때문에 구멍이 깊어질수록 변위가 증가하여서 그와 같은 현상이 발생하지 않았다. 그에 따라 세 경우 모두 구멍바닥 끝까지 이론값과 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 구멍에서 아주 가까운 위치 (r=1.25)와 조금 떨어진 위치 (r=2.0)에서도 구멍의 바닥까지 이론값과 아주 잘 일치하고 있어, 이완 스트레인을 이용하여 잔류응력을 구한 방법보다 이완 변위를 이용한 방법이 좀 더 신뢰성 있게 이용될 수 있음을 알 수 있다.

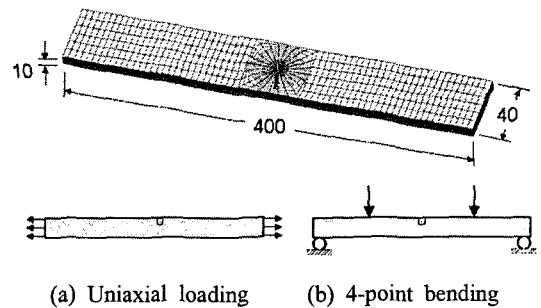


Fig. 8 Finite Element Model and loading conditions for three-dimensional problem

앞에서 사용한 유한요소 모델은 Fig. 6과 같이 이완상수를 구할 때의 모델과 같게 하였으나, 실제 문제와 좀 더 가깝게 하기 위하여 Fig. 8과 같이 3차원 유한요소 모델링을 수행하고, 단순 인장 및 순수 굽힘 상태를 발생시키도록 문제를 정의 하였다. 사용한 유한요소 모델은 길이 400 mm, 폭 40 mm, 두께 10 mm인 평판 모양의 형상을 가지고 있다. 외부에서 하중을 가하여 가상의 잔류응력장을 만들고 구멍부위를 제거해가면서 이완되는 변위를 구하여 잔류응력을 결정하였다. 단순인장 조건에서는 $\sigma_x=10$ MPa, $\sigma_y=\tau_{xy}=0$ 인 응력 상태를 보이도록 평판의 양단에 균일한 인장 하중을 가하였다. 순수 굽힘 조건에서는 4점 굽힘 시험을 시뮬레이션 함으로써 표면에서의 응력상태는 단순인장 조건의 응력상태와 같으나 표면에서 선형적으로 감소하여 중립축에서 응력이 0이 되는 굽힘응력 상태를 보이도록 수직하중을 가하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 단순 인장 상태 및 순수 굽힘 응력상태에서 깊이에 따라 변하는 반경방향 이완 변위를 보여주고 있다. 이완된 변위 값은 구멍의 깊이에 따라 증가하다가 점점 증가량이 감소하여 구멍의 깊이가 구멍 직경 (1.6 mm) 크기 정도 되었을 때, 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 또한 구멍에서 멀어 질수록 이완된 변위의 크기가 작아지는 것으로 나타났다. 깊이 방향의 응력분포 차이로 인하여 단순인장 상태보다 굽힘 응력 상태에서 이완되는 변위가 약간 작게 나타났으며 깊이가 깊어질수록 그 차이가 커졌다.

Fig. 11과 Fig. 12는 두 응력상태에서 이완 변위로부터 결정된 잔류응력 분포를 이론값과 비교하여 보여주고 있다. 본 논문에서 구한 잔류응력은

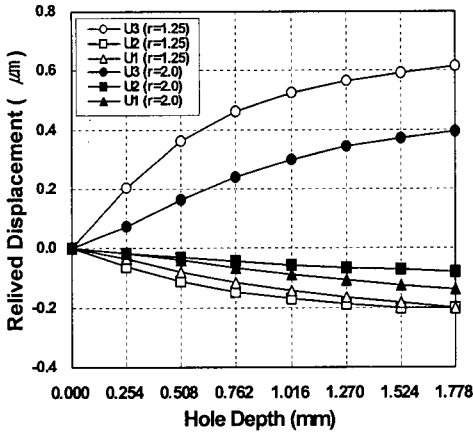


Fig. 9 Relieved displacements versus hole depth calculated by finite element analysis for the simple tension

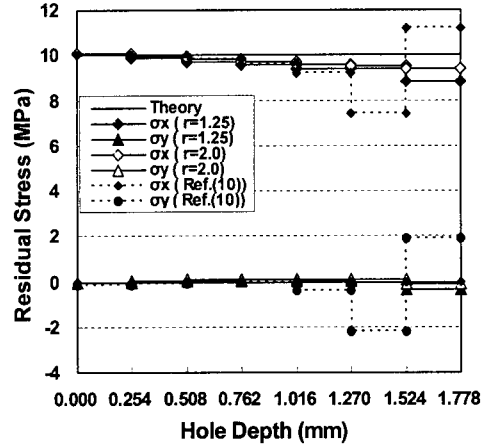


Fig. 11 Residual stress distributions versus hole depth calculated by FEM for the simple tension

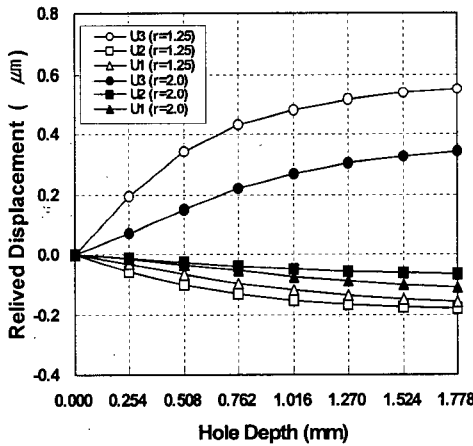


Fig. 10 Relieved displacements versus hole depth calculated by finite element analysis for the four point bending

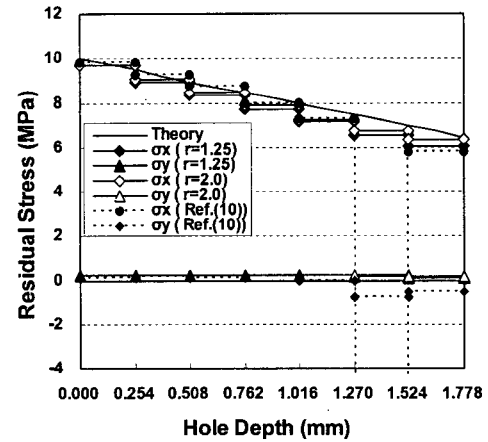


Fig. 12 Residual stress distributions versus hole depth calculated by finite element analysis for the four point bending

어느 일정한 구간에 대한 평균값이므로 계단 모양으로 분포를 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 구해진 잔류응력은 이론값과 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 구멍바닥으로 갈수록 오차가 누적되어 조금씩 차이가 커지지만, 구멍 깊이가 증가함에 따른 잔류응력 측정의 일반적인 오차에 비하면⁽¹⁾ 본 논문에서의 방법이 구멍 깊이가 증가하여도 대단히 신뢰성 있게 잔류응력을 결정할 수 있음을 보여주고 있으며, 스트레

인 게이지에 의한 이완변형률로 구한 참고문헌의 결과⁽¹⁰⁾보다 좀 더 신뢰성 있는 결과를 얻었음을 보이고 있다. 구멍 벽면에 아주 가까운 지점 ($r=1.25$)에서 보다 벽면에서 조금 떨어진 지점 ($r=2.0$)에서의 잔류응력 값이 이론값과 조금 가깝게 계산되었으나, 그 차이는 미미하다. 실제 실험에서는 벽면에서 충분히 떨어진 곳에서는 측정값이 매우 작아서 측정 시 필연적으로 발생할 가능성이 있는 오차에 대한 영향이 커질 수 있다. 따

라서, 광학적인 방법을 이용하여 이완변위를 측정하고 잔류응력을 결정하는 경우에는 이완되는 변위 값이 크면서 잔류응력의 이론값과의 차이가 크지 않는 $r=1.25$ 인 지점을 측정 위치로 하는 것이 적절하다.

5. 결 론

본 논문에서는 구멍뚫기방법을 이용하여 깊이 방향으로 임의의 분포를 갖는 잔류응력을 결정할 수 있도록 하기 위하여, 기존의 스트레인 게이지를 이용한 이완 변형률을 측정하는 방법 대신에 이완 변위를 측정하여 잔류응력을 결정하는 방법을 유도하고, 유한 요소 해석을 복합적으로 이용하는 수치적인 처리과정을 제시하였다. 이를 위하여 재료에 관계없이 사용할 수 있는 무차원 된 변위 이완상수를 구하였다.

본 연구의 방법을 적용하여 몇 가지 알고 있는 잔류응력장을 시뮬레이션 한 결과, 본 논문에서의 수치적인 과정을 거친 잔류응력 값이 이론값 및 유한요소해석 결과와 매우 잘 일치하는 것을 보였다. 특히 구멍의 바닥까지 이론값과 아주 잘 일치하고 있어, 이완 변형률을 이용하여 잔류응력을 구한 방법보다 이완 변위를 이용한 방법이 좀 더 신뢰성 있게 이용될 수 있음을 보였다. 실제적인 3차원 모델에 대한 잔류응력 계산결과, 잔류응력 측정의 일반적인 오차에 비해 본 논문에서의 방법이 대단히 신뢰성 있게 잔류응력을 결정할 수 있음을 보였다. 그러므로 본 논문에서의 방법은 평면 내의 변위를 측정하는 홀로그래픽 간섭법, 모아레 간섭법, 전자스펙클 간섭법(ESPI) 등의 광학적 측정 방법을 이용한 잔류응력의 측정에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Measurement Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," *Measurement Group Tech. Note*, TN-503-1, pp. 1~15.
- (2) Mathar, J., 1934, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes," *Trans. ASME, Iron & Steel*, Vol. 56, pp. 249~254.
- (3) Kelsey, R. H., 1956, "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method," *Proceedings of SESA*, Vol. 14, No. 1, pp. 181~194.
- (4) 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.
- (5) Bathgate, R. G., 1968, "Measurement of Non -Uniform Biaxial Residual Stresses by the Hole Drilling Method," *Strain*, Vol. 4, No. 2, pp. 20~29.
- (6) Niku-Lary, A., Lu, J. and Flavenot, J. F., 1985, "Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-drilling Method," *Experimental Mechanics*, Vol. 25, No. 9, pp. 175~185.
- (7) Flaman, M. T. and Manning, B. H., 1985, "Determination of Residual Stress Variation with Depth by the Hole-Drilling Method," *Experimental Mechanics*, Vol. 25, No. 9, pp. 205~207.
- (8) Schajer, G. S., 1988, "Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole-drilling Method," *Trans. ASME, J. Eng. Mat. and Tech.*, Vol. 110, pp. 338~349.
- (9) Wem, H., 1995, "Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method, a New Integral Formalism," *Strain*, Vol. 32, No. 2, pp. 63~67.
- (10) Joo, J. W. and Park, C. K., 1998, "A study on Residual Stress Analysis by Finite Element Method In Hole-Drilling Method," *Trans. of the KSME A*, Vol. 22, No. 2, pp. 268~277.
- (11) Kim, C., Seok, C. S. and Yang, W. H., 2000, "Influence of the Hole Eccentricity in Residual Stresses Measurement by the Hole-drilling Method," *KSME A*, Vol. 24, No. 8, pp. 2059~2064.
- (12) Young, W. C., 1989, *ROARK'S Formulas for Stress and Strain*, 6th ed., McGraw-Hill, Sigapore, pp. 391~442.

(1) Measurement Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage