

구멍뚫기방법을 이용한 깊이방향으로 변하는 잔류응력 측정방법

주진원* · 박찬기**

(1996년 11월 22일 접수)

Determination of Non-uniform Residual Stress by the Hole Drilling Method

Jin W. Joo and Chan K. Park

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Hole Drilling Method(구멍뚫기방법), Relieved Strain(이완변형률), Relieved Coefficient(이완상수), Rosette Gage(로젯 게이지)

Abstract

The numerical procedure for calculating non-uniform residual stress fields by using relieved strain data from incremental hole drilling method is presented. Finite element calculations are described to evaluate the relieved coefficients required for the determination of residual stresses. From the results of simulations it is found that this numerical method is well adopted to measuring non-uniform residual stress in the hole depth range of 0.8 times of the hole diameter from the surface. In order to examine the practicability of this method, the hole drilling procedure for the four point bending test is performed. This method is applied to the measurement of residual stresses in the cold-rolled steel pipe. It is shown that the magnitude of residual stress in the pipe is not negligible when compared with yield stress and the residual stress should be duly considered in designing structures with this pipes.

1. 서론

기계재료나 구조물에 존재하는 잔류응력은 기계의 신뢰도와 수명에 큰 영향을 미칠 수가 있다. 특히 복합재료와 같이 열간성형을 거친 재료나 용접에 의하여 접합된 구조물의 경우, 내부에 존재하는 잔류응력은 항복응력 수준까지 되는 경우도 있어서 잔류응력이 없다고 가정하여 설계했을 때 안전성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 기계나 구조물을 설계할 때 잔류응력을 고려하여 설계하거나 잔류응력을 최소화할 수 있는 제작조건을 결정하기 위하여는 신뢰성 있는 잔류응력의 측정이 선행되어야 한다.

잔류응력을 측정하는 방법에는 여러가지가 있으나, 그 중에서 아주 작은 원통구멍을 뚫어 잔류응력을 국부적으로 제거시키는 과정에서 측정되는 변형률 값으로부터 역으로 잔류응력을 결정하는 구멍뚫기방법(blind-hole drilling method)이 널리 쓰이고 있다. 구멍뚫기방법에 의하여 정확한 잔류응력을 결정하기 위하여는 정밀한 구멍뚫기 작업과 측정이 선행되어야 할 뿐만 아니라, 재료에 존재하였던 응력값과 측정되는 이완변형률 사이의 관계를 정확하게 정립하는 것이 중요하다. 그러나 완화되는 응력은 구멍의 깊이에 따라 변화하며 변형률은 표면에서의 측정값이기 때문에 이들의 관계를 정확하게 예측하기가 대단히 어려우므로 신뢰성 있는 해석방법이 필요하게 된다.

*회원, 충북대학교 기계공학과

** (주)포스코

구멍뚫기방법은 Mathar⁽¹⁾에 의해 처음으로 제안되었으며, Rendler와 Vigness,⁽²⁾ Jayarama Rao⁽³⁾ 등에 의하여 실험적인 방법으로 잔류응력과 측정되는 변형률 사이의 관계를 나타내는 이완상수를 결정하는 연구가 발표되었다. 그 이후에 많은 연구자들에 의하여 구멍뚫기 작업의 정확도 향상, 구멍의 오차에 대한 정확도 분석, 개선된 이완상수의 결정 방법 등에 대한 연구가 수행되었다. 앞의 연구들은 구멍깊이 방향으로 변하는 잔류응력장에 대한 고려는 이루어 지지 못했으나, Kelsey⁽⁴⁾는 증분적으로 구멍을 뚫고 각 단계마다 이완되는 변형률을 측정하여 이완상수를 각각 구함으로써 깊이방향으로 변하는 잔류응력을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나 각 증분에서 측정된 이완변형률은 각 단계의 잔류응력에만 영향을 받는 것이 아니고 그 전단계까지의 잔류응력에도 영향을 받기 때문에 그의 방법은 실제의 조건을 정확하게 고려하였다고 할 수 없다.

유한요소법의 도입으로 이를 이용하여 잔류응력을 결정한 연구가 최근들어 Schajer,⁽⁵⁾ Niku-lary,⁽⁶⁾ Flamam과 Manning⁽⁷⁾ 등에 의해 수행되었다. 깊이방향으로 변하는 잔류응력을 해석함에 있어 증분 변형률방법,^(4, 8) 평균응력법,⁽⁹⁾ 맥급수법,⁽⁵⁾ 적분법^(10, 11) 등이 적용되었는데, 본 논문에서는 깊이 방향으로 임의로 변하는 잔류응력장에 잘 적용될 수 있는 적분법을 응용하여 잔류응력과 이완변형률 사이의 관계를 정립하였다. 유한요소해석을 이용하여 이완상수를 결정하였고, 이를 이용하여 잔류응력을 결정할 수 있는 수치적인 처리과정을 제시하였다. 이 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 알고 있는 응력장에 대한 유한요소 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 결정된 잔류응력을 주어진 응력과 비교하였다. 또한 본 논문의 방법으로 냉간 가공된 강관의 잔류응력 측정을 수행하였다.

2. 수치적인 처리방법

2.1 잔류응력과 측정변형률 사이의 관계

구멍뚫기방법에 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, 벽면에서의 수직응력성분과 전단응력성분이 0이 되므로 구멍주위의 응력이 완화된다. 이와같은 응력상태의

변화로 인하여 발생하는 변형률의 변화를 구멍주위의 표면에 부착된 Fig. 1과 같은 45° 로켓형식의 스트레인 게이지 3개를 이용하여 측정하게 되고 이를 이용하여 잔류응력을 결정하게 된다.⁽¹²⁾ 변형률의 변화로 잔류응력을 결정하기 위하여는 이들 사이의 관계정립이 필요한데, 지금까지는 다음과 같이 탄성론의 Kirsh's solution을 기본으로 하여 유도된 식을 이용하여 잔류응력을 결정하여 왔다.

$$\epsilon_r = \sigma_x(A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y(A - B \cos 2\alpha) \quad (1)$$

여기서,

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \frac{1}{r^2}$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\frac{3}{r^4} + \frac{4}{1+\nu} \frac{1}{r^2} \right]$$

여기서, σ_x , σ_y 는 주응력이고, ϵ_r 은 Fig. 2에서 표시한 것과 같이 주응력 σ_x 방향으로부터 α 만큼 회전한 지점의 반경방향 변형률이며, 상수 A , B 는 이완상수라고 한다. 구멍을 뚫은 후, 각 스트레인 게이지에서 이완되는 반경방향 변형률 ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 를 측정하고 식 (1)을 이용하면 주응력들과 주응력의 방향을 결정할 수 있다.

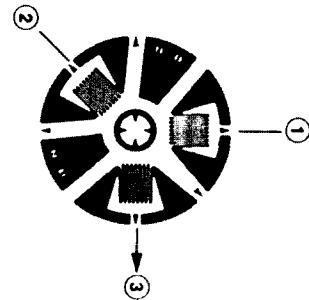


Fig. 1 Strain gage rosette for the hole-drilling method.

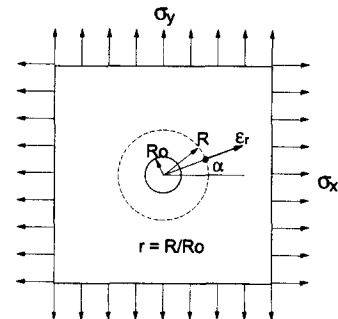


Fig. 2 Principal stresses and relaxed strains.

식 (1)로 표현되는 관계식은 구멍의 깊이방향으로서는 일정한 응력상태이고, 구멍은 통과된 구멍(through hole)이라는 가정하에 유도되었다. 그러나 실제 잔류응력이 존재하는 재료에는 위와 같은 가정이 만족되는 경우가 드물기 때문에 응력상태에 따라서 기존의 관계식은 잔류응력을 결정하는 데에 큰 오차를 나타낼 수 있다. 실제로 실험결과를 보면 깊이방향으로 응력의 변화가 있는 경우 50%까지 큰 오차를 나타내고 있다고 보고되었다.⁽¹²⁾ 또한 시편의 형상이나, 재료의 종류, 실험과정에 따라 적용에 한계가 따른다는 제약이 있다. 따라서 본 논문에서는 기본적으로는 식 (1)을 이용하고 이완상수 A 와 B 를 실제조건에 맞도록 수치적으로 유도하여 깊이 방향으로 임의로 변하는 잔류응력장에서도 적용할 수 있도록 하였다.

식 (1)에 의하면 각 스트레인 게이지 방향에서의 잔류응력과 이완되는 변형률 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= A(\sigma_3 + \sigma_1) - B(\sigma_3 - \sigma_1) \\ \varepsilon_2 &= A(\sigma_3 + \sigma_1) + 2B\tau_{13} \\ \varepsilon_3 &= A(\sigma_3 + \sigma_1) + B(\sigma_3 - \sigma_1)\end{aligned}\quad (2)$$

구멍의 깊이가 증가됨에 따라 측정되는 변형률은 표면에서부터 구멍깊이 h 까지 변하는 잔류응력이 완화되면서 합하여서 나타나므로, 식 (2)의 첫번째 식은 다음과 같은 적분형태로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_1(h) = \int_0^h \{ A(h, z)[\sigma_3(z) + \sigma_1(z)] - B(h, z)[\sigma_3(z) - \sigma_1(z)] \} dz \quad (3)$$

여기서, $\varepsilon_1(h)$ 는 h 만큼 구멍을 뚫었을 때 측정되는 변형률이고, $\sigma_1(z)$, $\sigma_3(z)$ 는 깊이 z 에서의 응력이며, $A(h, z)$ 와 $B(h, z)$ 는 구멍깊이가 h 일 때 z 지점의 응력이 완화되면서 측정되는 변형률과의 관계를 나타내는 이완상수이다.

구멍뚫기작업을 할 때에는 완화된 변형률을 연속적으로 측정할 수 없고 몇개의 단계를 나누어서 측정하게 되므로, 단계 수를 n 이라고 할 때 수치적인 해석을 위하여 식 (3)을 다음과 같은 불연속적 합의 식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^i [A_{ij}(\sigma_{3j} + \sigma_{1j}) - B_{ij}(\sigma_{3j} - \sigma_{1j})] = \varepsilon_{1i} \quad 1 \leq j \leq i \leq n \quad (4)$$

식 (4)와 같은 관계식은 ε_2 , ε_3 에 대해서도 표현

할 수 있으므로, 각 단계에서의 이완변형률들이 측정되면 구성되는 선형연립방정식을 수치적으로 해석하여 각 단계에서의 잔류응력을 결정할 수 있다.

이와 같이 구성된 계수행렬은 $3n \times 3n$ 인 행렬이 되고 소거과정(elimination)을 거쳐야 하므로 계산시간이 많이 걸리고 잔여오차가 축적되어 해가 정확하지 않을 수 있다. 따라서 효율적인 계산을 위하여 식 (5)와 같은 변환변형률과 식 (6)과 같은 변환응력을 정의하였다.

$$\begin{aligned}p(h) &= \frac{1}{2}[\varepsilon_3(h) + \varepsilon_1(h)] \\ q(h) &= \frac{1}{2}[\varepsilon_3(h) - \varepsilon_1(h)] \\ t(h) &= \frac{1}{2}[\varepsilon_3(h) + \varepsilon_1(h) - 2\varepsilon_2(h)]\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}P(z) &= \frac{1}{2}[\sigma_3(z) + \sigma_1(z)] \\ Q(z) &= \frac{1}{2}[\sigma_3(z) - \sigma_1(z)] \\ T(z) &= \tau_{13}(z)\end{aligned}\quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (2) 및 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 적분식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}p(h) &= \int_0^h 2A(h, z)P(z) dz \\ q(h) &= \int_0^h 2B(h, z)Q(z) dz \quad 0 \leq z \leq h \\ t(h) &= \int_0^h -2B(z, h)T(z) dz\end{aligned}\quad (7)$$

이완상수 $A(h, z)$ 와 $B(h, z)$ 는 가해지는 응력의 위치에 따라 달라지지만 식 (1)에서 보는 바와 같이 재료상수, 구멍의 크기와 스트레인 게이지의 위치에도 크게 관계한다. 따라서 각각의 경우에 대하여 이완상수를 다르게 구해야 하나 재료에 관계없이 사용할 수 있도록 하기 위하여 무차원된 이완상수 $a(h, z) = \frac{2EA(h, z)}{1+\nu}$ 및 $b(h, z) = 2EB(h, z)$ 를 정의하여 사용하였다.

수치적인 해석을 위하여 식 (7)을 무차원 이완상수를 사용하여 유한증분 수식화하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^i a_{ij}P_j &= \frac{E}{1+\nu}p_i \\ \sum_{j=1}^i b_{ij}Q_j &= Eq_i \quad 1 \leq j \leq i \leq n \\ \sum_{j=1}^i b_{ij}T_j &= -Et_i\end{aligned}\quad (8)$$

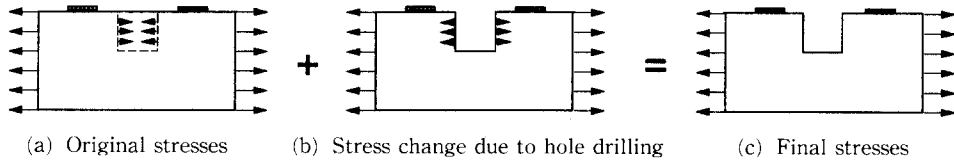


Fig. 3 Superposition of loadings to find the strain relaxation due to hole drilling.

위와 같은 선형연립방정식은 변환응력들이 서로 간에 독립적이기 때문에 계수행렬은 각각 3개의 $n \times n$ 삼각행렬이 된다. 무차원 이완상수 a_{ij} 와 b_{ij} 를 알고 있다면, 각 구멍뚫기단계에서 측정된 이완변형률로부터 계산된 변환변형률들을 대입하여 각 단계에서의 변환응력들을 구할 수 있고, 이로부터 깊이방향으로 분포하는 잔류응력을 구할 수 있다. 이 경우에 선형연립방정식은 전 대입법 (forward substitution)만에 의하여 해를 구할 수 있으므로 계산횟수가 절대적으로 줄어든다.

2.2 유한요소해석에 의한 이완상수의 결정

이완상수들을 구하기 위하여 알고 있는 응력상태를 가정하고 그 때에 이완되는 변형률을 유한요소해석에 의하여 계산하였다. 즉, 식 (2)에서 A를 구하기 위하여 $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_a$, $\tau_{13} = 0$ 와 같은 등축 응력상태를 가정하였고, B를 구하기 위하여 $\sigma_3 = -\sigma_1 = \sigma_b$, $\tau_{13} = 0$ 와 같은 순수전단 응력상태를 가정하였다. 이 때 각각의 조건에서 완화되는 변형률로부터 다음 식에 의하여 이완상수들을 구할 수 있다.

$$A = \frac{\epsilon_1}{2\sigma_a} \text{ or } \frac{\epsilon_3}{2\sigma_a}, \quad B = -\frac{\epsilon_1}{2\sigma_b} \text{ or } \frac{\epsilon_3}{2\sigma_b} \quad (9)$$

깊이방향으로 변하는 잔류응력을 계산하기 위해서는 식 (8)에서 a_{ij} 와 b_{ij} 를 각각 구해야 하는데 a_{ij} 는 구멍의 깊이가 i 일 때, j 지점에서 가해지는 응력에 대한 완화되는 변형률의 관계를 나타낸다. 그러므로 j 위치에서만 응력이 가해지는 상태의 하중조건을 가해야 하나, 이같은 하중조건을 재료의 외부에서 가하는 것은 불가능한 일이므로 Fig. 3과 같은 중첩관계를 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 잔류응력이 존재하는 재료의 응력상태는 (a)와 같이 외부에서 하중이 가해지는 경우로 생각할 수 있으며, 구멍이 뚫어질 벽면의 응력과 평형을 이룬다. 만일 (a)에 (b)와 같은 응력상태를 중첩한다면 (c)와 같은 상태가 되며 이것은 실제로 구멍을 뚫은 후에 완화된 응력상태가 된다. 구멍뚫

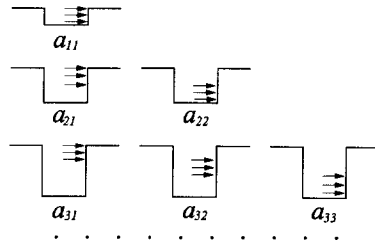


Fig. 4 Stress loadings corresponding to the relaxation coefficient a_{ij} .

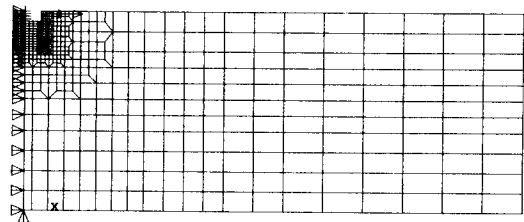


Fig. 5 Finite element mesh used for calculating the relaxation coefficients.

기 작업중 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률은 (a) 상태에서 (c) 상태로 변화한 변형률의 차이가 되며, 결국 (b)의 응력상태에 의하여 구멍을 뚫기 전 후에 측정된 변형률이 발생하였다고 할 수 있다. 따라서 (b)와 같은 응력상태를 가정하고 구멍 깊이의 변화에 따라 각각 유한요소해석한 후, 스트레인 게이지 위치에서의 변형률을 식 (9)에 대입하여 계산하면 무차원 이완상수들을 결정할 수 있다.

이완상수를 구하기 위하여 Fig. 4와 같이 단계당 0.254 mm씩 7단계 구멍깊이의 각각의 하중조건에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서는 구멍주위가 기하학적으로 축대칭이므로 Fig. 5와 같은 2차원 4절점 축대칭요소를 사용하였다. 이완상수 a_{ij} 를 구하기 위한 등축 응력상태는 Fig. 6(a)와 같이 구멍의 벽면에 균일한 수직력을 작용시켜 얻어낼 수 있으나, 이완상수 b_{ij} 를 구하기 위한 순수전단 응력상태는 Fig. 6(b)와 같이 벽면에 수직인 힘과 원주방향의 힘을 각각 $\cos 2\theta$ 함수와 $\sin 2\theta$ 함수로 작용시켜야 얻어낼 수 있다는 것을 유

한요소해석에 의해 검증하였다. 따라서 본 해석에서는 비축대칭 하중에 대한 축대칭 요소를 사용하였다. 유한요소 모델에서 구멍의 깊이는 1.6 mm, 시편의 두께는 10 mm이고, 반경은 25 mm로 하였다. 스트레인 게이지는 Fig. 1과 같은 모델을 사용하였을 때, 반경 1.78 mm에서 반경 3.36 mm에 걸쳐 있으므로 7개의 절점에서의 변형률을 Simpson's 1/3 rule로 적분하여 평균 변형률을 구하였다. 구해진 이완상수들은 재료의 종류에는 관계없이 이용할 수 있으나 같은 구멍의 크기와 같은 스트레인 게이지 위치에만 이용될 수 있는 상수이다. 결정된 무차원 이완상수 a_{ij} 와 b_{ij} 는 다음과 같다.

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} 30976 \\ 41572 & 26408 \\ 46404 & 33261 & 17520 \\ 48536 & 35655 & 21837 & 9348 \\ 48506 & 36651 & 23114 & 11884 & 3593 \\ 49967 & 37082 & 23579 & 12538 & 4941 & 87 \\ 50879 & 37269 & 23761 & 12746 & 5231 & 682 & -1778 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

$$b_{ij} = \begin{bmatrix} 64380 \\ 85683 & 63462 \\ 95923 & 79026 & 51018 \\ 100869 & 85169 & 61742 & 36616 \\ 103163 & 87918 & 65419 & 43630 & 24519 \\ 104205 & 89142 & 66936 & 45811 & 28901 & 15577 \\ 104649 & 89671 & 67584 & 46641 & 30153 & 18178 & 9367 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

3. 잔류응력 결정방법의 검증

3.1 유한요소 시뮬레이션에 의한 잔류응력의 검증

앞에서 설명한 수치적인 잔류응력 결정방법이 신뢰성이 있는가를 판단하기 위하여 몇 가지 알고 있는 응력장에 대한 검증을 유한요소 시뮬레이션에 의하여 수행하였다. 알고 있는 잔류응력장에서 구

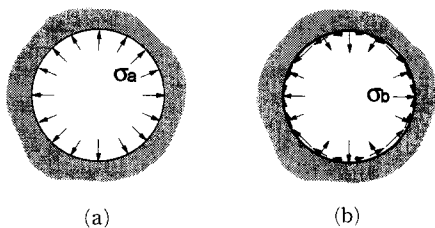


Fig. 6 Loading conditions for equal biaxial stress field(a) and pure shear stress field (b).

멍부위의 요소를 제거해가면서 각 단계에서의 변형률을 계산하고 이 변형률과 구멍을 뚫기 전에서의 변형률 차이를 스트레인 게이지로부터 측정되는 이완 변형률로 보았다.

Fig. 5와 같은 유한요소 모델을 이용하여 2차원 축대칭 문제 3가지를 선정하여 잔류응력을 결정하였다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 Case 1은 원판에 균일한 반경방향의 하중을 가하는 경우로 이론해는 $\sigma_x = \sigma_y = 10$, $\tau_{xy} = 0$ 인 조건이다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 Case 2는 원판에 그림과 같이 반경방향 하중과 원주방향 하중을 2θ 를 주기로 갖는 삼각함수의 형태로 가하는 경우이며, 이론해는 $\sigma_x = -\sigma_y = 10$, $\tau_{xy} = 0$ 인 조건이다. Case 3은 Fig. 7(c)과 같이 원판의 둘레 밑을 지지하고 중간 부분 원주둘레에 균일한 수직하중을 주어 굽힘변형을 일으키는 경우로 표면에서는 $\sigma_x = \sigma_y = 4$, $\tau_{xy} = 0$ 이고 중립축까지 선형적으로 응력이 감소하는 조건이다. 각각의 경우에 이론해⁽¹³⁾와 구멍을 뚫기 전의 유한요소해석에 의한 응력값을 계산하였다. Case 1과 Case 2의 경우는 이론값이 정확하게 일치하였고, Case 3의 경우는 깊이에 따른 응력값을 Table 1에 나타내었다.

각각의 경우에 시뮬레이션에 의하여 이완되는 변형률로 2.1절에서 기술한 방법과 2.2절에서 구해진 이완상수 a_{ij} 및 b_{ij} 를 이용하여 잔류응력을 구하고 그 결과를 이론치와 Table 1에 비교하였다. 시뮬레이션에 의한 응력값을 구멍깊이 중간에 표시한 것은 수치적인 처리를 위하여 각 구멍단계에서 응력은 같은 값으로 분포하여서 평균적인 응력값을

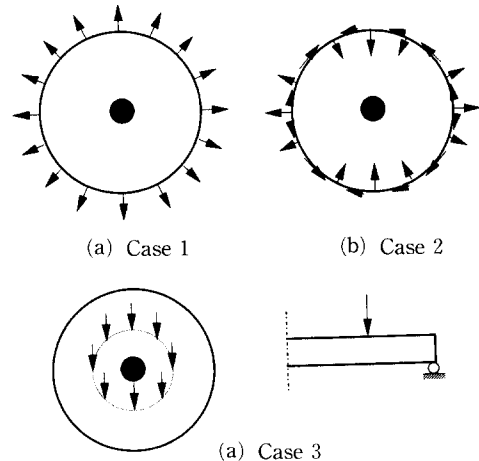


Fig. 7 Loading conditions for simulations.

Table 1 Comparisons of residual stresses calculated by theory and by simulations.

Depth (mm)	Case 1(σ_x)		Case 2(σ_x)		Case 3(σ_x)		
	Theory	Simul.	Theory	Simul.	Theory	FEM	Simul.
0.000	10		10		-4.00	-4.00	
		9.98		10.03	-3.90	-3.87	-3.85
0.254	10		10		-3.79	-3.76	
		10.07		10.03	-3.69	-3.67	-3.65
0.508	10		10		-3.59	-3.65	
		10.10		10.03	-3.49	-3.46	-3.45
0.762	10		10		-3.39	-3.36	
		10.11		10.09	-3.29	-3.25	-3.26
1.016	10		10		-3.18	-3.15	
		9.95		9.92	-3.08	-3.05	-3.05
1.270	10		10		-2.98	-2.95	
		19.81		10.08	-2.88	-2.84	-1.31
1.524	10		10		-2.78	-2.74	
		16.91		10.02	-2.68	-2.64	-3.58
1.778	10		10		-2.58	-2.53	

갔다고 가정하였기 때문이다. 계산결과를 보면 Case 2의 경우는 이론치와 시뮬레이션한 값이 아주 잘 일치하였으나, Case 1과 Case 3의 경우는 5번째 단계까지는 아주 잘 일치하였지만 6번째, 7번째 단계에서는 오차가 대단히 커짐을 알 수 있었다. 이것은 이 경우들이 주로 이완상수 a_{66} 에 영향을 받는데, 앞에서 계산된 이완상수에서 보는 바와 같이 a_{66} 는 대단히 작은 값을 가지고 있으며, 이것은 6번째 잔류응력을 구하는 행렬식의 pivot 요소가 되므로 약간의 차이가 큰 오차를 발생시킬 가능성을 가지고 있기 때문이다. a_{66} , a_{76} , a_{77} 의 값이 대단히 작거나 부호가 반대로 나타난 것은, Fig. 8과 같은 예에서 보는 바와 같이 구멍의 깊이가 구멍직경 크기근처에 도달할 때에는 이완되는 변형률이 더 이상 증가하지 않거나 오히려 약간 감소하는 현상⁽¹²⁾ 때문이다. 따라서 이 방법은 구멍직경의 약 0.8배까지는 아주 잘 적용될 수 있으나 그 이상의 잔류응력 값은 의미가 없음을 알 수 있다.

앞에서 사용한 유한요소 모델은 이완상수를 구할 때의 모델과 같게 하였으나 단순 인장상태와 순수

굽힘상태를 발생시키기 위하여 3차원 유한요소 모델링을 수행하고, 구멍부위를 제거해 가면서 스트레인 게이지 위치에서의 변형률을 계산한 다음 이완되는 변형률을 구하여 잔류응력을 결정하였다. 단순인장 조건은 $\sigma_x=10$, $\sigma_y=\tau_{xy}=0$ 인 응력상태를 보이도록 평판의 양단에서 균일한 하중을 가하고 구멍을 중심으로 0° , 45° , 90° 의 위치에서 발생하는 변형률을 계산하였다. 순수 굽힘조건은 4점 굽힘시험을 시뮬레이션함으로써 구멍주위의 응력이 표면으로부터 중립축의 방향으로 선형적으로 감소하도록 수직하중을 가하고 변형률을 계산하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각의 경우에 계산된 이완변형률을 보여주고 있다. 이완된 변형률은 두 경우 모두 구멍의 깊이에 따라 증가하다가 구멍의 깊이가 구멍직경(1.6 mm) 크기정도 되었을 때, 거의 증가하지 않거나 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 10과 Fig. 11은 이완변형률에 의하여 결정된 잔류응력의 분포를 이론치와 비교하여 보여주고 있다. 결정된 잔류응력은 두 경우 모두 구멍깊이의 약 0.8배까지는 이론치와 아주 잘 일치하였으나, 그

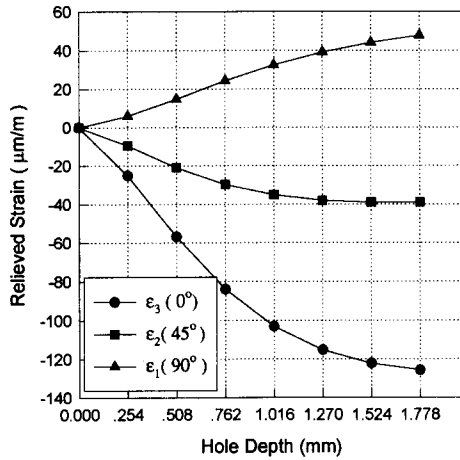


Fig. 8 Relieved strains versus hole depth calculated by finite element analysis for the simple tension.

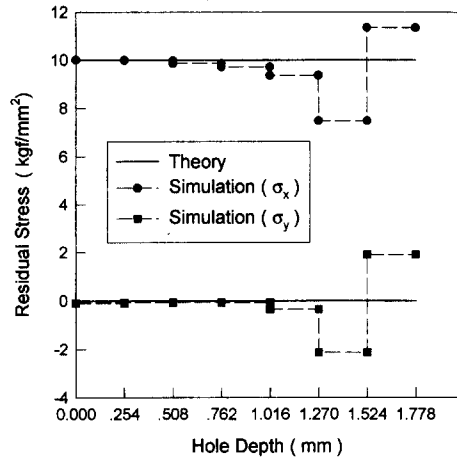


Fig. 10 Residual stress distributions calculated by finite element analysis for the simple tension.

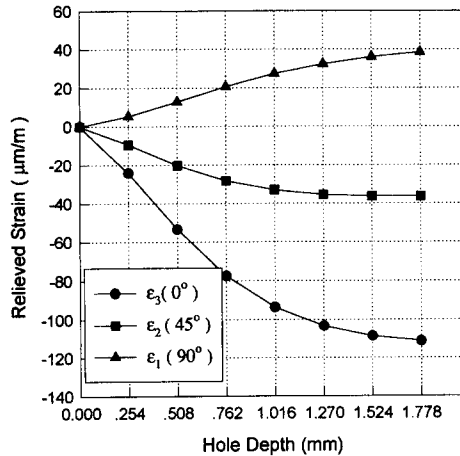


Fig. 9 Relieved strains versus hole depth calculated by finite element analysis for the four point bending.

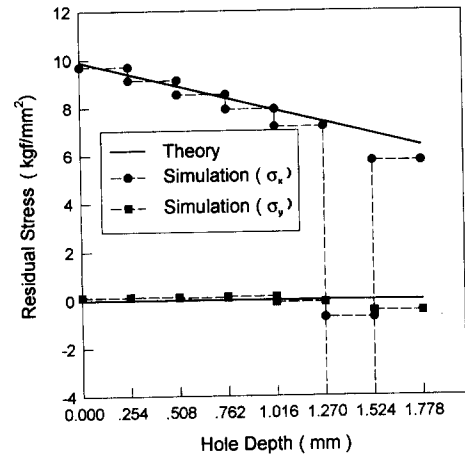


Fig. 11 Residual stress distributions calculated by finite element analysis for the four point bending.

이후에는 큰 오차가 있었다. 그림에는 표시하지 않았지만 두 경우 모두 전단응력은 거의 0의 값을 보였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 본 논문의 방법은 구멍길이 방향으로 선형적으로 변하는 응력분포를 아주 잘 나타내주고 있어서 임의로 변하는 잔류응력을 결정하는데 신뢰성 있게 이용될 수 있음을 보여주고 있다.

3.2 4점 굽힘시험에 의한 잔류응력의 검증

실제 실험을 통하여 앞에서 수행한 방법이 신뢰성을 가지고 실제의 경우에 적용될 수 있는가를 판

단하기 위하여 Fig. 12와 같은 4점 굽힘시험을 수행하였다. 폴림 열처리에 의하여 잔류응력이 가능한한 제거된 시편에 기계적인 하중을 가함으로써 알고 있는 잔류응력장을 발생시킬 수 있다. 4점 굽힘을 받고 있는 시편편은 가운데 지지점 사이에서 균일한 굽힘모멘트를 받고 있으며, 윗면으로부터 두께방향을 통하여 선형적인 응력분포를 가지고 있기 때문에 본 연구에서 제안한 방법의 신뢰성을 검증하기에 적합하다. 미리 하중을 가하고 구멍을 뚫어 가면서 이완되는 변형물을 측정하여 그 값을 앞에서 기술한 방법대로 처리하여 잔류응력을 구하였다.

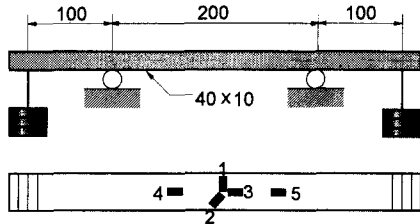


Fig. 12 Schematics of four point bending test.

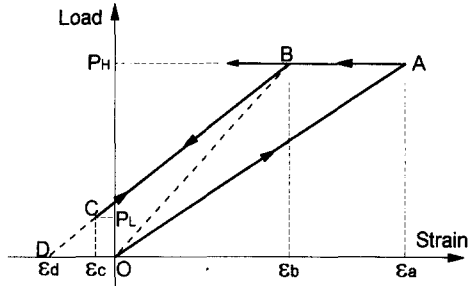


Fig. 13 Process of loading and measurements for removing initial stresses in the specimen.

시편에 풀림 열처리를 함으로써 잔류응력을 가능한 한 제거시켰으나 시편가공 등의 이유로 잔류응력이 남아있을 수 있으므로, 이의 영향을 최소화하기 위하여 각 구멍뚫기단계에서 Fig. 13과 같은 측정 과정을 택하여 수행하였다. 먼저, 시편에 하중을 가하면 OA를 따라서 변형률이 증가하고 이 상태에서 구멍을 뚫으면 변형률은 AB 만큼 감소할 것이다. 다시 하중을 제거시켰을 때 O점으로 돌아오면 $\epsilon_{ba} = \epsilon_b - \epsilon_a$ 가 이완된 변형률이라고 할 수 있다. 그러나 하중을 제거했을 때 D점(ϵ_d)으로 돌아왔다면 재료에 원래 존재하였던 잔류응력으로 인하여 변형률이 더 이완되었음을 의미한다. 따라서 가해진 하중에 의해 순수하게 이완된 변형률은 $\epsilon_{ba} - \epsilon_d$ 라고 할 수 있다. 실제 측정에서는 하중을 완전히 제거해 주면 시편의 정렬상태에 문제가 생길 수 있으므로 가해진 하중의 20%에 도달할 때까지 하중을 제거하고 외삽(extrapolation)하여 ϵ_d 를 예측하였다.

시편은 자유표면의 영향이 없도록⁽¹⁴⁾ 폭이 40 mm, 두께가 10 mm인 일반 구조용 강관을 사용하였다. Fig. 12와 같이 구멍에서 충분히 떨어진 지점에 참고 게이지 4, 5를 부착하여 하중을 가하고 측정할 결과 $296 \mu\text{m/m}$ 로 나타나서 이를 응력으로 계산하면 6.216 kgf/mm^2 이었으며, 이는 계산된 굽힘응력

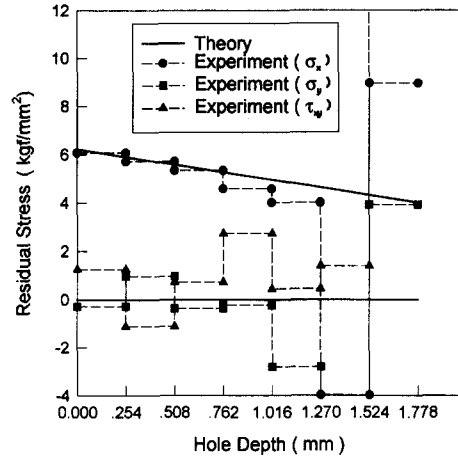


Fig. 14 Residual stress distributions by four point bending test.

6.221 kgf/mm^2 와 아주 일치하였다. 사용한 로켓 게이지는 Micro Measurement사의 잔류응력 측정용 게이지인 EA-06-062RE-120이었다. 스트레인 게이지들의 길이와 위치는 3절에서 기술한 유한요소 모델과 같다. 구멍은 R-200 밀링 가이드를 사용하여 0.254 mm 씩 7층분으로 나누어 뚫고 각 단계에서 이완되는 변형률을 측정하였다.

Fig. 14는 결정된 잔류응력을 이론치와 비교하여 보여주고 있다. 굽힘응력은 구멍직경의 약 0.8배인 1.27 mm 까지는 이론치와 잘 일치하였으나, 이 이후는 시뮬레이션의 결과와 마찬가지로 믿을 수 없는 값을 보였다. 구멍의 깊이가 커질수록 측정된 변형률에 민감하게 반응하는 현상을 볼 수 있었으므로 구멍뚫기 작업에 좀더 신뢰성 있는 방법이 필요함을 알 수 있다. 횡방향의 수직응력과 전단응력은 이론적으로는 0이 되어야 하나 $\pm 2 \text{ kgf/mm}^2$ 정도를 경계로 변동하였다.

4. 강관의 잔류응력 결정에의 응용

냉간가공된 강관은 로울러를 사용하여 강관을 강제적으로 굽힌 다음 용접하여 제작하므로 큰 잔류응력이 존재할 것으로 예상된다. 측정하려는 강관은 국내에서 제작된 것으로 외경 270 mm , 두께 12 mm 이고 폭은 130 mm 정도가 되도록 절단하였다. 측정부위는 용접한 부위(A)와 그곳으로부터 원주방향으로 45° 되는 지점(B)을 선정하였다. 구멍뚫기방법은 4점 굽힘시험의 경우와 같게 하였으

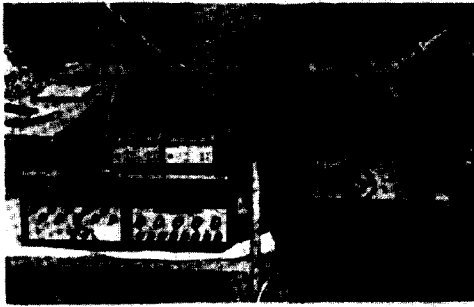


Fig. 15 Experimental equipment for measuring residual stress for the cold-rolled steel pipe.

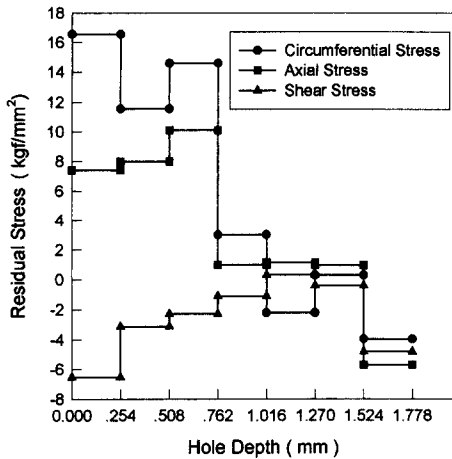


Fig. 16 Residual stress distributions for the cold-rolled steel pipe at position A.

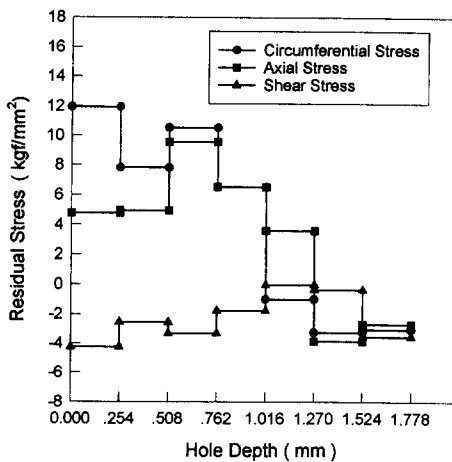


Fig. 17 Residual stress distributions for the cold rolled steel pipe at position B.

며, 구멍을 단계적으로 뚫어가면서 각 단계에서 이

완된 변형률을 측정하였다. Fig. 15는 실험에 사용된 밀링가이드와 측정장치를 보여주고 있다.

Fig. 16과 Fig. 17에서 보는 바와 같이 전체적으로는 원주방향의 응력이 표면에서 큰 것으로 나타났으며 용접부위에서의 잔류응력이 용접부위에서 떨어진 지점보다 크게 발생하였다. 두 부위의 표면에서 원주방향 잔류응력과 축방향 잔류응력은 모두 인장응력이 존재하였던 것으로 측정되었다. 잔류응력의 크기는 용접부위의 표면에서 약 17 kgf/mm²까지도 발생하여서 구조물의 설계시 잔류응력은 중요하게 고려되어야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

구멍뚫기방법에 의하여 깊이방향으로 변하는 응력장에서 잔류응력을 결정하는 방법을 제시하고 수치해석과 실험을 통하여 이 방법을 검증하였다. 잔류응력과 측정되는 이완변형률 간의 관계를 구하기 위하여 이완변형률을 적분형태의 수식으로 표현하였고, 이를 수치해석하기 위한 이완상수를 유한요소해석을 근간으로하여 구하였다.

본 연구의 방법을 적용하여 시뮬레이션한 결과 구멍깊이의 약 0.8배까지는 아주 잘 일치하였고, 그 이후에는 본 방법을 적용하기 어려움을 알 수 있었다. 4점 굽힘시험을 이용한 검증에서는 결정된 잔류응력이 대체로 잘 일치하여서 신뢰성 있게 적용될 수 있음을 보였으나 좀더 정확한 측정을 위해서는 정확한 구멍뚫기 작업에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서의 방법을 냉간가공된 강관의 잔류응력을 결정하는데 적용한 결과, 잔류응력은 17 kgf/mm²까지도 존재하여서 구조물의 설계시 잔류응력은 충분히 고려되어야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-C-19)에 의해 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mathar, J., 1934, "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes," *Trans. ASME, Iron & Steel*, Vol.

- 56, pp. 249~254.
- (2) 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.
 - (3) Jayarama Rao, G., Ravi Sankar, K. and Narayanan, R., 1986, "Determination of Calibration Constants for Hole Drilling Technique Using Special Strain Gage Rosette," *JTEVA*, Vol. 14, No. 4, pp. 207~212.
 - (4) Kelsey, R. H., 1956, "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method," *Proceedings of SESA*, Vol. 14, No. 1, pp. 181~194.
 - (5) Schajer, G. S., 1981, "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurement," *Trans. ASME, H. Eng. Mat. and Tech.*, Vol. 103, No. 2, pp. 157~163.
 - (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) Bathgate, R. G., 1968, "Measurement of Non-Uniform Biaxial Residual Stresses by the Hole Drilling Method," *Strain*, Vol. 4, No. 2, pp. 20~29.
 - (9) Nichola, W. E., 1986, "Practical Subsurface Residual Stress Evaluation by the Hole-Drilling Method," *Proceedings of the Spring Conference on Experimental Mechanics*, pp. 47~58.
 - (10) 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.
 - (11) Wern, 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.
 - (12) Measurement Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," *Measurement Group Tech. Note*, TN-503-1, pp. 1~14.
 - (13) Young, W. C. 1989, *ROARK'S Formulas for Stress and Strain*, 6th ed., McGraw-Hill, Singapore, pp. 391~442.
 - (14) ASTM, 1981, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," *Annual Book of ASTM*, E837-81, pp. 1~6.