

철골구조물의 존재응력 추정에 관한 해석적 연구

An Analytical Study to evaluate Existing Stress of Steel Structural Member

김 갑 순¹⁾ · 신 의 균²⁾ · 김 우 범³⁾ · 정 수 영⁴⁾

Kim, Kap Sun · Shin, Eui Gyun · Kim, Woo Bum · Chung, Soo Yong

요 약 : 본 연구의 목적은 소성영역에서의 철골 부재내에 존재하는 존재응력을 추정하는 법을 개발하기 위함이다. 여기에선 선행 실험 연구를 근거로 하여, 응력집중 현상에 기인한 국부 소성화를 고려하여 보정계수법이 제안되었다. 구멍주위의 응력 분포를 파악하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였고, 그 결과를 탄·소성역에서의 구멍내기법에 의한 결과와 비교하였다. 보정계수법을 적용한 결과, 본 연구에서 제안된 방법은 실제 초기 존재응력값과 약 2% 정도의 오차를 가진 매우 좋은 결과치를 나타냈다.

ABSTRACT : The purpose of this study is to develop a method to deduce existing stress of steel member in inelastic range. Based on the previous experimental study, modified factor method considering the local plastification due to stress concentration was proposed. Finite element analysis was performed to investigate the stress distribution around hole and the results of the finite element analysis were compared with those from the Hole Drilling Method in elastic-plastic range. As a result of applying a modified factor method, proposed method shows very good approximation of 2% error for exact value of stress in the plastic range.

핵심용어 : 구조안전진단, 존재응력, 유한요소법, 구멍내기법

KEYWORDS : Assessment of structural safety, Existing stress, FEM
Hole-drilling Method

1) 충남대 대학원 석사과정
2) 충남대 대학원 박사과정
3) 정회원, 한국전력공사 책임연구원, 공학박사
4) 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

국내에는 많은 철골구조물들이 건설되어 사용되고 있으나 그 중에는 건설이 완료된 후 오랜 기간동안 운영되어 노후 되었거나, 부분적인 구조변경, 용도변경 등에 의하여 구조적 특성이 초기설계 당시에 비하여 변화한 구조물들이 많다. 이러한 경우에 최초 설계당시와는 구조적 안전성의 차이가 발생할 가능성이 높다. 그러한 상태의 구조물의 경우에는 현재는 정상가동 중 발생하는 하중에 대하여는 안전한 상태라 하더라도, 설계 지진하중이나 설계 풍하중이 작용하게 되면 예측치 못한 구조적 손상을 받을 우려가 있을 뿐만 아니라 구조물의 일부에 지속적인 진동이 가해질 경우 피로손상으로 인한 파괴가 진행중일 가능성도 있다.

지금까지 철골구조물의 안전진단은 주로 육안 검사, 비파괴 검사 등에 의하여 부재표면의 부식, 용접 이음부의 결함 검색 등에 치중하여 왔으며 방사선 투과시험, 초음파 탐상 시험, 액체 침투 탐상 시험 등 많은 방법이 개발되어 왔다. 그러나 이러한 방법들은 구조부재의 열화상태를 측정하기 위한 방법으로 구조안전진단에서 주요 지표가 되는 부재의 존재응력 상태를 추정할 수 없다. 따라서, 본 연구의 선행연구에서는 실제로 해당부재에 얼마의 하중이 작용하여 존재하는 응력의 크기는 어느 정도이며, 남아 있는 안전율은 어느 정도인지에 대하여 실제적인 값을 알기 위하여 Hole-Drilling Method에 의한 선형탄성 영역에서의 존재응력의 추정에 관한 철골구조물의 안전진단 방법에 대하여 실험적 연구를 수행하였다.

그러나 그러한 Hole-Drilling Method에 의한 방법은 부재가 탄성상태의 하중을 받을 경우에만 가능한 방법이 된다. 하지만 설계하중을 지지하고 있는 실제 구조부재의 경우에는 구멍 내기시에 부재의 일부분은 응력집중으로 이미 소성상태에 이르게 되므로 사실상 그 적용이 어렵게 된다.

따라서, 본 연구에서는 선행 연구결과를 근거로하여 실제 구조부재에 Hole Drilling Method에 의한 철골구조물의 안전진단 방법을 적용 가능토록 하기 위하여 탄성 및 소성 영역에서의 부재내 존재응력의 추정에 관한 해석적 연구를 수행하였다.

2. Hole-Drilling Method에 의한 존재응력의 추정법

이 방법은 응력을 받고 있는 부재에 구멍을 뚫어 그 주변의 strain 변화로부터 부재내에 존재하고 있는 응력을 구하는 방법이다. 예를 들어 응력을 받고 있는 구조물의 일부에 10mm 정도의 작은 구멍을 뚫어 존재응력을 부분적으로 해방하여 구멍 둘레에 미리 접착해 둔 게이지의 구멍내기 전·후의 strain 변화량을 측정한다. 이 strain 변화량으로 구멍내기전의 그 부분에 존재했던 존재응력을 탄성분식으로 구할 수가 있다.

그림 2.1에서 처럼 얇은 플레이트의 국부면에 등분포 일축존재응력 σ_x 가 가해지는 경우, 임의의 점 $P(R, \alpha)$ 에서의 초기응력상태는 극좌표에서 다음 식과 같이 표현된다.

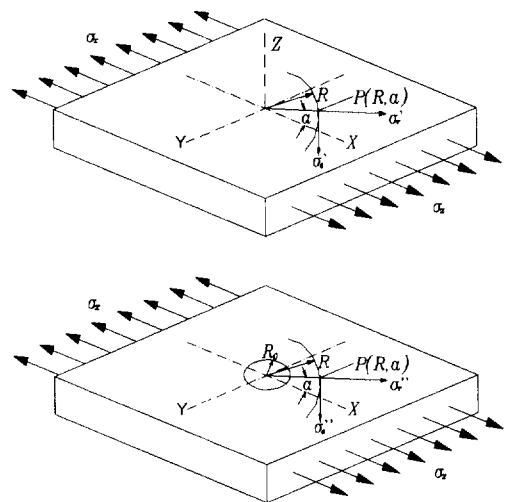


그림 2.1 구멍주위의 응력분포상태

$$\sigma_r' = \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos 2\alpha) \quad (2.1)$$

$$\sigma_\theta' = \frac{\sigma_x}{2}(1 - \cos 2\alpha) \quad (2.2)$$

$$\tau_{r\theta}' = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\alpha \quad (2.3)$$

그림 2.1에서 같은 위치에서 구멍을 뚫은 후의 변화를 보면, 구멍주위의 응력은 매우 다르게 되고 구멍 주위에서 $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ 는 0이 된다. 이런 경우의 해를 보면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_r'' = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \quad (2.4)$$

$$\sigma_\theta'' = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\alpha \quad (2.5)$$

$$\tau_{r\theta}'' = -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \sin 2\alpha \quad (2.6)$$

여기서, $r = R/R_0 (R \geq R_0)$ 이다.

드릴로 천공한 곳의 응력이완과 최종적으로 얻는 응력의 관계는 다음식과 같게된다.

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r' \quad (2.7)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta'' - \sigma_\theta' \quad (2.8)$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}' \quad (2.9)$$

식(2.1)~(2.9)에서 이완된 응력을 구할 수 있다. 만일 플레이트 재료가 같은 종류이고, 등방성이며, 응력-변형관계가 선형 탄성일 때 이 식들은 Hook의 법칙을 이용하여 P점의 이완된 평균변형을 구하기 위해 사용될 수 있다. 이 결과는 다음식으로 표현된다.

$$\epsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (2.10)$$

$$\epsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (2.11)$$

이식을 간단하게 정리하면,

$$\epsilon_r = \sigma_x(A + B\cos 2\alpha) \quad (2.12)$$

$$\epsilon_\theta = \sigma_x(-A + C\cos 2\alpha) \quad (2.13)$$

식 (2.10)~(2.13)에서 계수 A, B, C를 구하면 다음 식(2.14)~(2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (2.14)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \left(\frac{1}{r^2} \right) - \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.15)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \left(\frac{1}{r^2} \right) + \frac{3}{r^4} \right] \quad (2.16)$$

그림2.1의 점 P(R, α)에서 이완되는 방향상의 strain은 X, Y축방향의 일축존재응력을 사용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r^X = \sigma_x(A + B\cos 2\alpha) \quad (2.17)$$

$$\epsilon_r^Y = \sigma_y(A - B\cos 2\alpha) \quad (2.18)$$

X, Y축 방향으로 존재응력이 동시에 존재하는 경우에는 식 (2.17), (2.18)을 중첩의 원리에 의해 대수적으로 더하여 2축 존재응력 상태에서 이완된 존재응력을 표현하면 다음식과 같다.

$$\epsilon_r = \sigma_x(A + B\cos 2\alpha) + \sigma_y(A - B\cos 2\alpha) \quad (2.19)$$

또는

$$\epsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha \quad (2.20)$$

식(2.19), (2.20)은 존재응력 해석의 Hole-Drilling Method의 기초가 되는 기본 관계식이다.

3. 일축 존재응력을 받는

플레이트 요소의 유한요소 해석

일반적인 철골구조물에 적용되어 하중을 지탱하고 있는 구조부재의 경우는 부위에 따라 상당히 복잡한 응력분포 양상을 나타내며, 현재까지는 그러한 구조부재에 발생하는 존재응력을 구해 구조부재의 안전성여부를 정확하게 입증할 수 있는 방법은 없는 실정이다. 따라서 본 연구의 선행연구에서는 Hole Drilling Method에 의한 잔류응력 측정 방법을 탄성상태에 있는 구조부재에 적용하여 부재의 존재응력을 알아내는

방법의 타당성을 이미 입증 하였다.

그러나 이러한 방법은 기존부재에 구멍을 뚫어 응력집중이 발생하였을 때, 부재의 전부분이 탄성 상태로 남아있는 경우에 한하여 적용이 가능하기 때문에 일반적으로 부재의 존재응력이 약 $\sigma_y/3$ 이하일 경우에만 성립된다. 하지만 일반적인 설계하중을 지지하는 구조부재는 대부분 이미 그이상의 응력을 받고 있고, 또한 이미 부재의 일부분이 소성상태에 도달한 경우에는 미흡한 부분이 많이 남게 되는 방법이 된다.

따라서 본 연구에서는 일축존재응력을 받고 있는 플레이트 요소의 존재응력이 소성상태에 도달하는 경우에도 Hole-Drilling Method에 의하여 존재응력을 구할 수 있는 식을 추정하고자 하였다. 여기서 부재응력이 $\sigma_y/3$ 이상인 영역에서는 탄성식을 사용하여 구한 추정응력에 보정계수를 곱하여 실제 부재내의 존재응력을 구할 수 있도록 보정계수식을 제안한다.

본 연구에서는 유한요소해석을 범용프로그램인 ADINA를 사용하여 수행하였으며, 유한요소 모형은 그림3.1에서 보이는 바와 같이 구멍주위의 응력집중이 예상되는 곳은 조밀하게 분할하여, 4-node plane-stress 요소를 사용하여 모델링하였다. 해석에 적용된 시험체의 항복 응력은 $3.3 t/cm^2$ 이며, 탄성계수는 $2.1 \times 10^3 t/cm^2$, 프아송비는 $\nu=0.3$ 으로 적용하였다. 해석 시험체는 Hole의 직경(B/D), 작용하는 하중크기 (σ_x/σ_y), 플레이트 두께(D/T)에 따라 표3.1과 같이 구분하여 Hole-size(B/D)에 대한 영향, 측정거리($r=R/R_0$)값에 대한 영향, 탄성-소성 영역에서의 하중 값의 영향 등을 파악하였다. 또한 유한요소 해석 시 적용되는 재료의 항복이론은 von-mises theory를 따랐다.

표 3.1 해석 시험체 제원

Name	D(cm)	(B/D)	T(cm)	D/T	σ_y	σ_x
H4X2	0.4	25	0.2	2	3.3	(0.1~0.95) σ_y
H4X1	0.4	25	0.1	4	3.3	(0.1~0.95) σ_y
H4X5	0.4	25	0.5	0.8	3.3	(0.1~0.95) σ_y
H2X2	0.2	50	0.2	1	3.3	(0.1~0.95) σ_y
H6X2	0.6	16.7	0.2	3	3.3	(0.1~0.95) σ_y

(D:홀직경, B:시험체폭, T:시험체두께, σ_x :작용 응력)

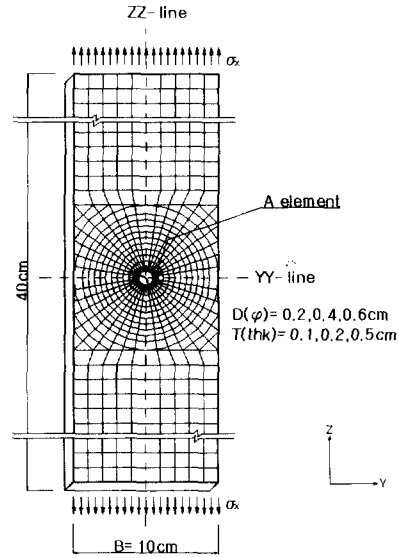


그림 3.1 해석 시험체 형상

4. 해석결과와 분석

4.1 부재의 응력분포 형상

4.1.1 Hole-주위의 응력분포 형상

일축응력을 받는 구멍이 뚫린 플레이트판의 Hole주위의 응력분포 양상을 살펴보면, 그림 3.1의 zz-line의 요소는 부재 항복시까지도 탄성상태로 있지만, yy-line의 요소는 홀 주위의 응력 집중 현상으로 σ_x 의 3배정도의 응력이 발생하기 때문에 $\sigma_y/3$ 이상의 하중에선 국부적인 소성영역이 점진되어 나감을 알 수 있었다.

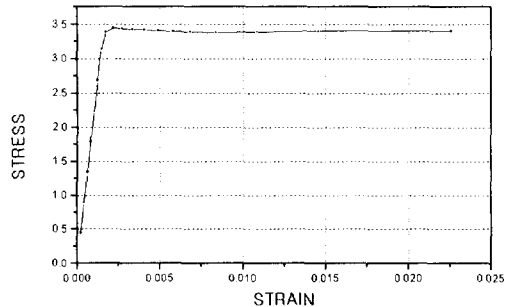


그림 4.1 A-element의 응력-변형도 곡선(yy-line)



그림 4.2 Hole주위의 응력분포 형상

4.1.2 Element의 Stress-Strain Curve

그림 4.1은 하중을 0에서 $0.95\sigma_y$ 까지 증가시켜감에 따라 살펴본 yy-line의 홀 인접요소의 응력-변형도 곡선이다. 그림 4.1~4.2에서 볼 수 있듯이 부재 내 존재응력이 $\sigma_y/3$ 이상인 영역에서는 yy-line의 요소는 응력집중으로 국부적인 소성 거동을 보이지만, 반면 zz-line의 요소는 응력이완으로 탄성적인 거동을 보였다.

4.1.3 게이지 측정부위의 Strain 분포

게이지 측정부위의 $0.3\sigma_y$, $0.9\sigma_y$ 의 응력하에 서의 yy-line, zz-line의 ϵ_r , ϵ_θ 의 분포를 살펴 보면, 그림 4.3~4.4와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 zz-line의 경우는 응력이완 현상으로 r (R/R_0)값이 작은 부위에서는 거의 strain이 발생하지 않다가 r값이 커지면서 평균 strain값에 도달하는 반면, yy-line의 경우는 응력집중 현상으로 r값이 작은 부위에서는 strain이 크게 변하지만 r값이 증가함에 따라 평균strain값에 접근함을 알 수 있다.

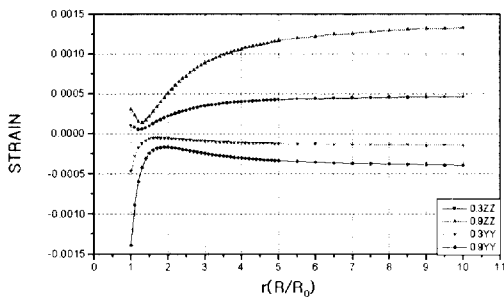


그림 4.3 r값에 따른 zz-line의 strain분포

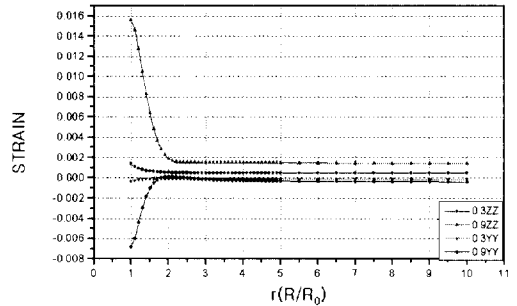


그림 4.4 r값에 따른 yy-line의 strain분포

4.2 $\sigma_x/3$ 이하(전탄성역)에서의 존재응력 추정법 검증

$\sigma_x = 0.3\sigma_y$ 인 시험체에 구멍을 뚫기 전·후의 strain의 이완된 값을 평가하기 위해 해석결과와 Hole-drilling Method에서 사용된 탄성 이론식에 의한 값을 비교한결과, 그림 4.5~4.6과 같이 잘 일치함을 보였다.

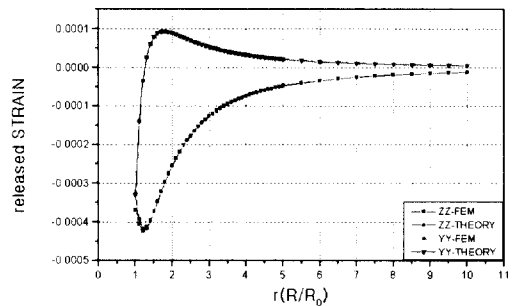


그림 4.5 zz-line의 $\Delta\epsilon_r$, $\Delta\epsilon_\theta$ 분포(이론-해석치)

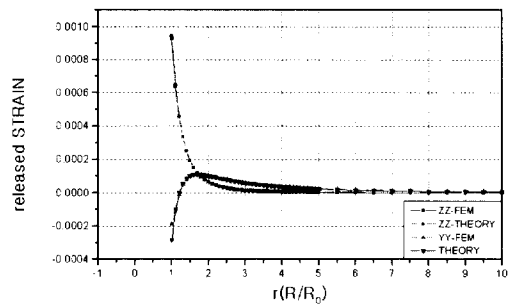


그림 4.6 yy-line의 $\Delta\epsilon_r$, $\Delta\epsilon_\theta$ 분포(이론-해석치)

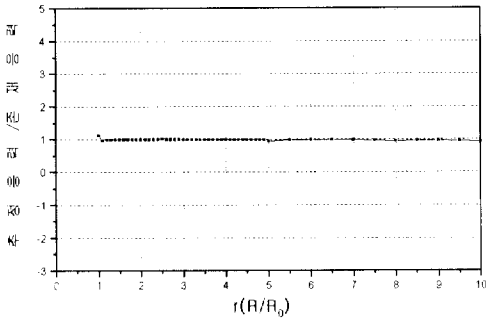


그림 4.7 zz-line의 $\Delta\epsilon_r$ 에 의한 존재응력 추정치

유한요소 해석에 의하여 구해진 일축응력을 받고 있는 플레이트 요소의 구멍을 뚫기 전·후의 이완된 strain 값을 가지고 존재응력 추정법에 적용시켜 초기존재응력과 비교한 결과 그림 4.7과 같이 잘 일치하였다. 그러므로 전탄성역 ($\sigma_y/3$ 이하)에서의 존재응력추정법의 사용은 타당함을 알 수 있었다.

4.3 $\sigma_y/3$ 이상(국부소성역)에서의 존재응력 추정법 검증

존재응력 추정법은 재료의 탄성상태를 가정하여 유도한 식이므로, 부재응력이 $\sigma_y/3$ 이상인 상태에서는 구멍내기시에 부재의 일부는 응력집중으로 소성부위가 발생하므로 탄성식을 근거로한 존재응력 추정식의 사용이 불가능해진다. 따라서 본 연구에서는 $0.9\sigma_y$ 의 하중상태에서의 탄성식에 의한 존재응력 추정법의 오류검증을 수행하였다.

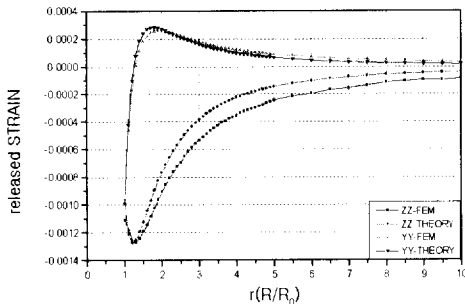


그림 4.8 zz-line의 $\Delta\epsilon_r, \Delta\epsilon_\theta$ 분포(이론-해석치)

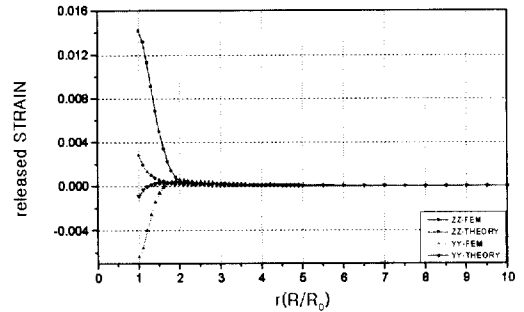


그림 4.9 yy-line의 $\Delta\epsilon_r, \Delta\epsilon_\theta$ 분포(이론-해석치)

4.3.1 이완된 Strain값 비교

부재가 국부적인 소성거동에 진입한 경우에는 탄성식을 근거로한 존재응력 추정법에 의하여 구해진 이론적인 이완된 strain값이 해석치와 비교될 때 그림 4.8~4.9과 같이 서로 일치하지 않았다.

4.3.2 존재응력 추정치 비교

국부적 소성거동을 하고 있는 부재의 구멍내기 전·후의 이완된 strain 값을 가지고 탄성식에 의한 존재응력 추정법에 적용시켜 초기존재응력과 비교한 결과 그림 4.10과 같이 서로 일치하지 않았다. 여기에서 $\sigma_y/3$ 이상의 부재응력 상태에서는, 탄성거동을 하는 ZZ-line에 대해서도 인접 소성영역(YY-line)의 영향으로 탄성식에 의한 존재응력 추정법의 사용이 불합리함을 알 수 있었다.

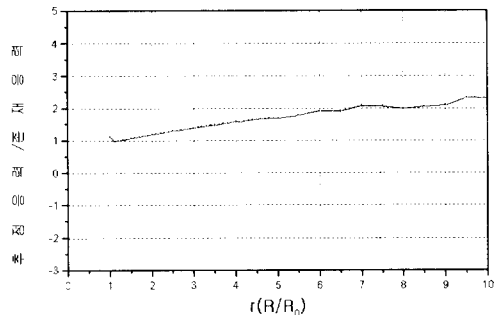


그림 4.10 zz-line의 $\Delta\epsilon_r$ 에 의한 존재응력 추정치

5. $\sigma_y/3$ 이상(국부소성역)에서의 보정 계수를 통한 존재응력 추정법 제안

위 분석내용에서 본 바와 같이 Hole-drilling Method에 의한 존재응력 추정법은 존재응력이 $\sigma_y/3$ 이하인 부분에서는 잘 일치하지만 $\sigma_y/3$ 이상인 부분에서는 잘 일치하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 탄성식에 의해 구한 추정응력에 보정계수를 곱하여 존재응력이 $\sigma_y/3$ 이상인 부분에서의 부재내의 존재응력을 추정하는 방법을 제안하였다.

$$\sigma_{x-P} = \sigma_{x-E} \times M(x) \quad (5.1)$$

$$\text{보정계수 } M(x) = f(\sigma_{x-E} / \sigma_y, r) \quad (5.2)$$

여기서 보정계수는 $\sigma_y/3$ 이상인 영역에서도 존재응력 추정법의 적용이 가능토록 하기 위해, 탄성식에 의해 구한 추정응력과 초기 부재의 실제 존재응력을 비교하여, 역으로 각각의 r값과 탄성추정응력/항복응력에 대한 보정계수를 구해 산정하였다.

5.1 모든 r값에 대한 보정계수 제안식(I)

탄·소성역에서 탄성식에 의해 구한 존재응력 추정값에 모든 r값에 대한 하나의 보정계수식을 적용하여 부재내의 존재응력을 추정하기 위한 방법으로, 보정계수는 그림 5.1과 같이 모든 r값에 대한 보정계수값을 구한 뒤 회귀분석을 통하여 보정계수식을 제안하였다.

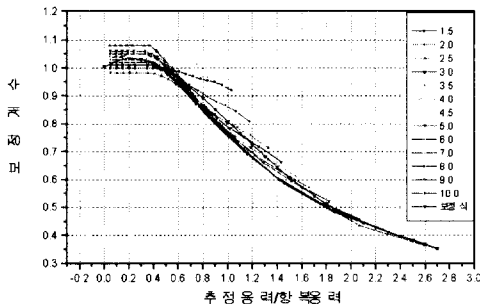


그림 5.1 모든 r값에 대한 보정계수 제안식

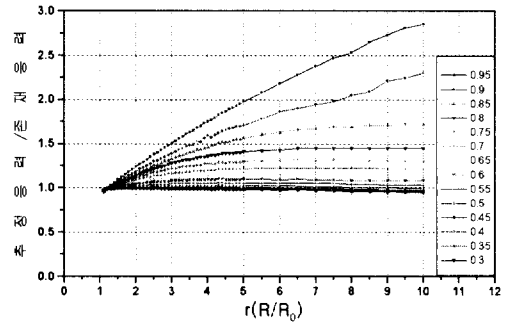


그림 5.2 탄성식에 의한 존재응력 추정치(보정전)

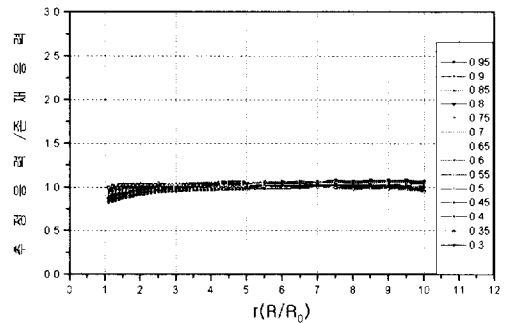


그림 5.3 제안식-I에 의한 존재응력 추정치(보정후)

$$M(x) = -0.0514x^4 + 0.361x^3 - 0.797x^2 + 0.2927x + 1.0052 \quad (5.3)$$

($x = \text{탄성식에 의한 추정응력/항복응력}$)

5.1.1 보정계수 제안식 I에 의한 존재응력 추정
보정계수 제안식 I에 의한 보정계수를 적용하여 $\sigma_y/3$ 이상에서의 존재응력을 추정한 결과, $r=1 \sim 1.5$ 에선 게이지 설치의 어려움으로 사용되지 않는 점을 감안하면 그림 5.2~5.3과 같이 최대 10% 정도의 실제 존재응력과의 오차를 보여 보정하지 않은 탄성식에 비해 비교적 정확한 방법임을 알 수 있었다.

5.2 각각의 r값에 따른 보정계수 제안식(II)

보다 정확한 데이터를 얻기 위하여 게이지가 설치되는 각각의 r값에 대한 보정계수식을 별도로 적용하게 되면 일반적으로 사용되는 r값에 대한 보정계수식은 표 5.1과 같이 나타낼 수 있

으며, 이 방법은 특정 r값의 위치에 게이지를 설치하여 실험을 진행하게 되는 것을 고려하면, 소성역에서의 보다 정확한 존재응력을 구하기 위해서 가능한 방법이다.

표 5.1 각각의 r값에 따른 보정계수 제안식

r	보정계수(M)
2	$M(x) = 0.2107x^4 - 0.3347x^3 - 0.1065x^2 + 0.0942x + 0.9918$
2.5	$M(x) = 0.0535x^4 + 0.1006x^3 - 0.5344x^2 + 0.2208x + 0.9661$
3	$M(x) = -0.0625x^4 + 0.4743x^3 - 0.9454x^2 + 0.3432x + 0.9851$
3.5	$M(x) = -0.0992x^4 + 0.5911x^3 - 1.0811x^2 + 0.389x + 0.9817$
4	$M(x) = -0.1095x^4 + 0.629x^3 - 1.1366x^2 + 0.4103x + 0.98$
4.5	$M(x) = -0.1454x^4 + 0.7489x^3 - 1.2571x^2 + 0.4305x + 0.9896$
5	$M(x) = -0.1774x^4 + 0.8851x^3 - 1.4389x^2 + 0.4785x + 1.0272$
6	$M(x) = -0.1277x^4 + 0.701x^3 - 1.2379x^2 + 0.4352x + 0.9889$
7	$M(x) = -0.1165x^4 + 0.6618x^3 - 1.1927x^2 + 0.4025x + 1.0027$
8	$M(x) = -0.1312x^4 + 0.7389x^3 - 1.3119x^2 + 0.4465x + 1.0195$
9	$M(x) = -0.1206x^4 + 0.7047x^3 - 1.2857x^2 + 0.4478x + 1.0125$
10	$M(x) = -0.0996x^4 + 0.613x^3 - 1.158x^2 + 0.3561x + 1.06$

5.2.1 보정계수제안식 II에 의한 존재응력추정
 보정계수 제안식 II에 의한 보정계수를 적용하여 소성역에서의 존재응력을 추정한 결과, 최대 2%정도의 실제 존재응력과의 오차를 보여 제안된 방법은 소성역에서의 정확한 존재응력을 추정하기 위해 타당한 방법임을 알 수 있었다.

6. 결 론

이상과 같은 철골 구조물의 안전성 진단을 위한 존재응력 추정에 관한 해석적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 부재내 존재응력이 $\sigma_y/3$ 이하인, 전부분이 탄성거동을 할 경우, 기존의 Hole-drilling Method에 의한 존재응력 추정법은 정확한 부재응력을 추정할 수 있는 방법임을 알았다.
- 2) 부재내 존재응력이 $\sigma_y/3$ 이상인 경우엔 부재내에 국부적인 소성 영역이 발생하여 최대 270%정도의 실제응력과의 큰 오차를 보이므로, 기존의 탄성식을 이용한 응력추정이 불가함을 알 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 제안한 제안식-I에 의한 보정계수를 사용한 존재응력 추정법은 최대 10%

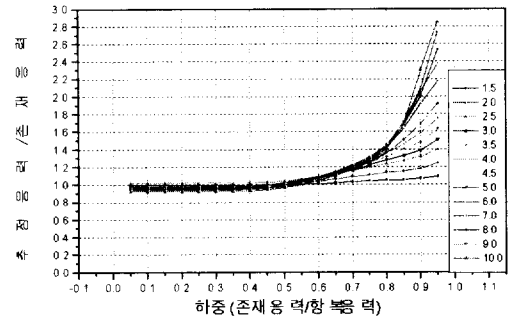


그림 5.4 탄성식에 의한 존재응력 추정치(보정전)

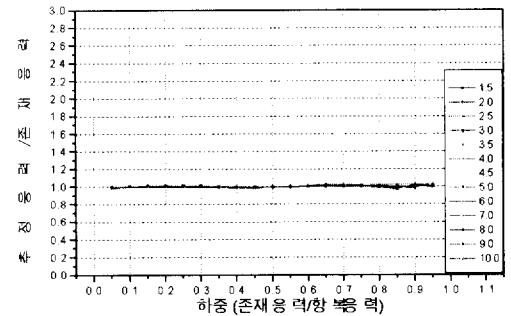


그림 5.5 제안식-II에 의한 존재응력 추정치(보정후)

정도의 실제 응력과의 오차를 보여 비교적 안정된 결과를 나타냈다.

4) 제안식-II에 의한 보정계수를 사용한 존재응력 추정법은 최대 2%정도의 실제 응력과의 오차를 보여, 탄·소성역에서의 정확한 부재응력을 추정하기 위한 타당한 방법임을 알았다.

본 연구는 초대형구조연구센터(ERC)의 지원으로 수행되었기에 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) James W. Dally & William F. Riley, "Experimental Stress Analysis," 2nd Ed. pp.51~81, McGRAW-HILL, 1978.
- (2) ASTM, "Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling-Strain-Gauge Method," E837-89, pp.718, 1989.

- (3) J. Chakrabarty, "Theory of Plasticity", McGraw-Hill Book Company, 2nd Ed, 1988.
- (4) S.P. Timoshenko /J.N. Goodier, "Theory of Elasticity" 3rd Ed.

- (5) 이경진, 박동수, 나환선, 서용표, 김우범, "존재응력 추정에 의한 구조건전성 평가 기법 개발", 대한건축학회 학술발표 논문집, 17권제1호, 1997.

(접수일자 : 1999년 4월 2일)