

양단 핀접합 강관부재의 손상 평가에 관한 연구

A Study on the Assessment of Damage in Pin-Ended Tubular Members

김 우 범*

Kim, Woo Bum

Abstract

The purpose of this research is to establish the load-shortening relationship for undamaged members and damaged members with pin-ended support. An analytical method based on the numerical integration was proposed to obtain the ascending and descending branch of load-deformation behavior. The analysis was performed by using the momentthrust-curvature relationship including the effect of cross-sectional distortion. A parametric study regarding the the influence of damages on the ultimate strength of tubular members was also performed. Several experiments for the corroded, fabricated tubular members with dent were performed and the results were compared with the proposed method.

요 지

압축력을 받는 손상된 강관부재의 거동 및 국한내력을 양단이 핀접합된 경우에 대하여 고찰하였다. 손상단면의 뒤틀림으로 인한 비선형성을 고려하기 위하여 유한요소 및 회귀분석에 의한 모멘트-곡률 관계식을 도출, 이를 부재해석을 위한 수치적분법에 이용함으로써 해석의 효율 및 실용성을 제고하였다. 제시된 방법의 신뢰도를 확인하기 위하여 실규모 강관에 대한 실험을 수행, 이 결과와 비교하였으며 제작강관, 부식강관에 대하여 초기변형, 편심, 부식도, 등, 강관의 결함요소가 극한강도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

1. 서 론

해양구조물과 같은 강관 부재를 사용한 구조물에 있어서 시공 또는 운전중에 구조재에 손상이 가는 경우가 흔히 발생하며 이는 주로 선박 또는 낙하물의 충격에 의한 것으로 손상 형태는 부재의 직경-두께

비, 세장비, 경계조건 등에 따라 국부손상(local denting), 부재 휨변형(overall bending), 또는 이들의 복합형태로 나타난다. 부재의 손상은 부재내력을 감소, 국부파괴에 이를 수 있으나 구조물의 고차 부정정성에 따른 힘의 재분배로 구조물은 부재의 파괴 후에도 여력을 갖게 되므로 국부손상에 따른 구조물의 안정성, 보수 여부, 보수 방법 등을 결정하기 위하여는 부재의 손상을 고려한 구조물의 비

* 정희원 · 한국전력 기술연구원, 선임연구원, 공학박사

선형 해석을 수행하여야 한다. 트러스 형태의 구조물에 있어서 축력은 가장 중요한 영향요소가 되므로 부재의 국부 손상에 따른 축내력의 감소 및 이의 재분배를 고려기 위하여는 축력-축변형 관계의 극한후(Post-Ultimate)거동에 대한 고찰을 필요로 한다. 최근 수년간에는 손상 부재의 극한강도 및 극한후거동에 대한 실험적 연구가 수행된 바 있으며^(1,2) Ueda는 손상단면에 대한 극한강도의 근사식을 제시하고 ISUM(Idealized Structural Unit Method)에 의한 구조물 해석법을 제안하였는데⁽³⁾ 극한강도는 손상단면의 전소성모멘트에 근거하여 산출되었으며 극한후강도는 고려되지 않았다. Taby는 부재의 극한후거동과 국부좌굴 영향을 고려한 실험식을 제시하였으나^(4,5) 실험데이터의 부족으로 실용해석에의 이용에는 문제를 안고 있다. Ostapenko⁽⁶⁾는 유한요소해석에 의한 축력-축변형 데이터와 실험데이터를 조합한 후 회귀분석을 수행함으로써 해석의 범위를 넓혔으나 국부불안정성(Local Instability)을 보이는 부재에 대하여는 적용의 어려움이 있음을 기술하였다. 본 연구에서는 양단 편집합된 손상 강관기동에 대한 하중-변형 관계를 고찰하기 위하여 문헌⁽⁷⁾에 제시된 손상부위의 모멘트-곡률식을 이용, 수치적분법에 의한 부재해석의 기법을 제안하고 실험결과와의 비교를 통하여 부재의 손상영향도를 평가함으로써 구조물의 비선형해석을 수행하기 위한 기초데이터를 제시하였다.

2. 해석방법

2.1 모멘트-축력-곡률 관계의 유도

손상단면(damaged segment)의 모멘트-곡률 관계는 문헌⁽⁷⁾에 제시된 바와 같이 회귀분석으로부터 구하여진 회귀함수 $M=F(P, \theta, D/t, d/D, \sigma_y)$ 로 구성되며 손상이 없는 완전한 관형단면의 경우에는 단면의 축력 및 모멘트의 평형관계로부터 아래와 같이 구하여진다.

$$P = \int_{elastic} E \epsilon dA + \int_{plastic} \sigma_y dA \quad (1)$$

단면의 응력분포는 탄성, 1차소성(압축항복), 2차소성(인장및압축항복)상태의 3단계로 구분할 수 있으며 평형방정식은 아래와 같다.

a) 탄성상태(Elastic State)

$$p = \bar{\epsilon}_0 \quad (2)$$

$$\bar{m} = \pi \frac{\phi}{4} \quad (3)$$

b) 1차 소성상태(Primary Plastic State)

$$p = 1 - \frac{\psi}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} + \psi_1 \right) \sin \psi_1 + \cos \psi_1 \right] \quad (4)$$

$$\bar{m} = \phi \left[\frac{\pi}{8} + \frac{\psi_1}{4} + \sin \psi_1 \cos \psi_1 \right] \quad (5)$$

$$\psi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1 - \bar{\epsilon}_0}{\phi} \right) \quad (6)$$

c) 2차 소성상태(Secondary Plastic State)

$$p = 2 \frac{\psi_2}{\pi} - [(\psi_1 + \psi_2) \sin \psi_1 + (\cos \psi_1 - \cos \psi_2)] \quad (7)$$

$$\bar{m} = \frac{\phi}{4} (\psi_1 + \psi_2 + \sin \psi_1 \cos \psi_1 + \sin \psi_2 \cos \psi_2) \quad (8)$$

$$\psi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1 - \bar{\epsilon}_0}{\phi} \right) \quad (9)$$

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left(\frac{1 - \bar{\epsilon}_0}{\phi} \right) \quad (10)$$

여기서 축력과 모멘트, 중심축의 변형율은 $p=P/P_y$, $\bar{m}=M/M_y$, $\bar{\epsilon}_0=\epsilon/\epsilon_y$ 로 무차원화 시켰다. 그림 1은 각 단계의 응력분포 상태를 나타낸다.

2.2 수치적분법(Numerical Integration Method)

수치적분의 기본개념은 Numark Integration Method와 유사하나 처짐곡선을 결정함에 있어서 주어진 변위에 대한 축력을 결정하는 변위제어 방식(Displacement Control Scheme)이므로 극한후의 강도 감소를 나타내는 하향곡선(Descending Curve)을 구할 수 있는 장점이 있다. 해석절차는 그림 2와 같으며 간략히 기술하면 아래와 같다.

- 1) 주어진 제 1분절(First segment)의 처짐 y_1 ($y_1 = y_{01} + y_{p1}$)에 대하여 축력 p_1 을 가정하고
- 2) 상기분절의 모멘트 m_1 을 $y_1 p_1$ 으로 산출한 후
- 3) 기 산출된 모멘트-축력-곡률 관계로부터 m_1 ,

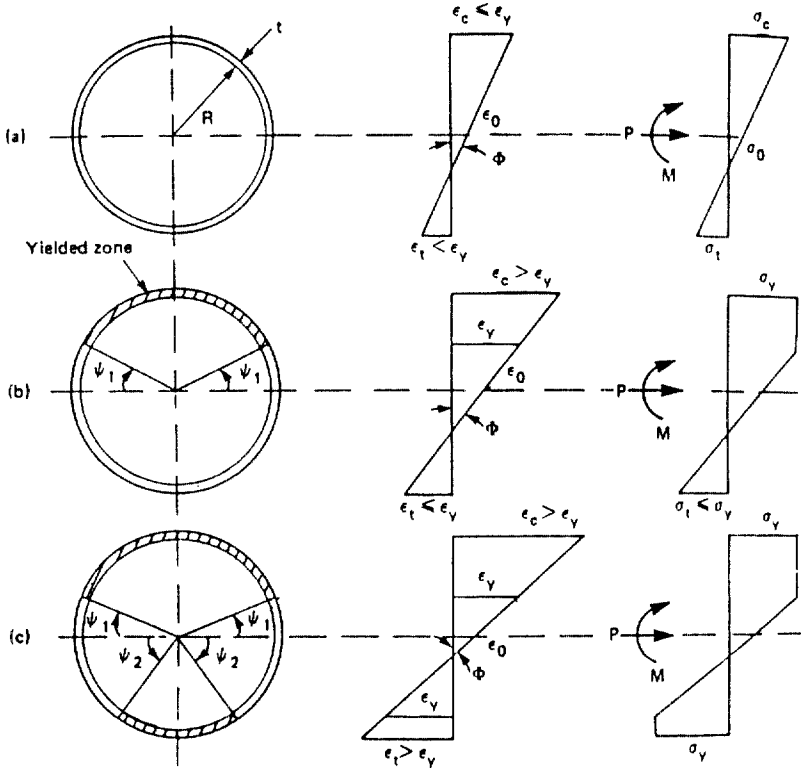


그림 1. 관형단면의 응력분포 상태.

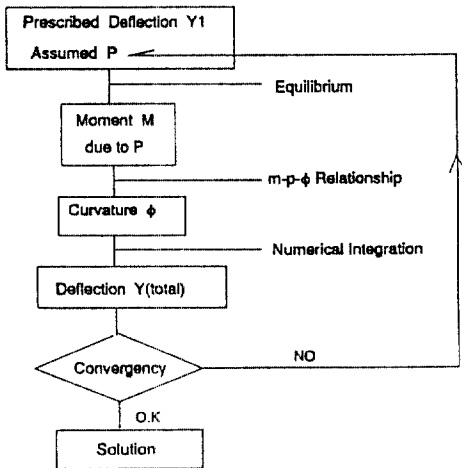
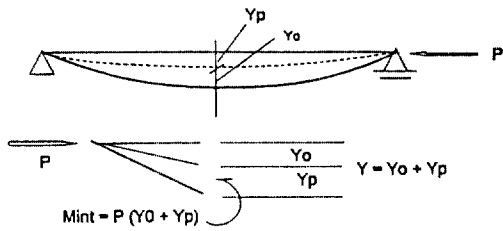


그림 2. 수치적분에 의한 부재해석절차.

y_1 에 상응하는 곡률 1을 구한다.

4) 제 2분절의 처짐은 일정 평균곡률(Constant Average Curvature)의 가정하에서 구하며 일반적으로 제 i분절에 대하여

$$y_i = -\phi_{i-1(ave)} \frac{(dx)^2}{2} + \theta_{i-1} dx + y_{i-1} \quad (11)$$

$$\theta_i = (y_i - y_{i-1}) \frac{2}{dx} - \theta_{i-1} \quad (12)$$

$$\phi_i = f(py) = f(m_i) \quad (13)$$

여기서 y_{01} : 제 1분절의 초기처짐

y_{p1} : 제 1분절의 축력에 의한 처짐

최종 분절인 지지점에 이르러 처짐이 영(zero)이 되지 않을 경우 아래와 같은 축력 p에 대한 보정이 필요하다.

$$p^{(2)} = \left[+ \frac{1}{n} \frac{y_n}{y_1} \right] p^{(1)} \quad (14)$$

여기서 뒤틀림은 시행 반복차수를 나타내며 뒤틀림은 분절을 나타낸다. 본 연구에서 수치적분은 끝점의 처짐이 $y_i/1000$ 이내에 수렴할 때까지 항목 1)~4)의 과정을 반복 수행하였으며 부재는 16개의 분절로 분할하였다. 축력 p 와 횡처짐 y 의 관계가 구하여진 후 이에 상응하는 축변형을 구하였으며 축변형에는 재료의 압축변형과 휨변위에 의한 기하학적 변형으로 구분할 수 있다.

2.2.1 재료의 압축변형

비손상 원형단면의 재료 압축변형은 전절에서 구한 $\bar{\epsilon}_0$ 와 같으며 손상분절(damaged segment)의 경우에는 참조문헌⁽⁷⁾에서 도출된 축변형-축력-곡률의 회귀상수로부터 구하였다. 그러므로 부재의 총 축변형은

$$\Delta_{axial} = \Delta_{undamaged} + \Delta_{damaged}$$

$$= \sum_{i=1}^N \left(\frac{L}{N} \right) \bar{\epsilon}_{0i} + \epsilon_{0(damaged)} L_{damaged} \quad (15)$$

여기서 N 은 분절의 갯수이며 ϵ_0 는 중심축의 축변형율이다.

2.2.2 기하학적 압축변형

재료의 기하학적 압축변형은 부재의 휨에 기인하며 미소장 dx 에 대하여 구하면

$$d\Delta_{bending} = dx(1 - \cos\theta) \quad (16)$$

여기서 θ 는 변형전과 변형후의 각 차이를 나타낸다. $\cos\theta$ 에 대하여 2항만을 확장하면

$$d\Delta_{bending} = \frac{1}{2} \theta^2 dx \quad (17)$$

유한분절에 대한 총 기하학적 압축변형량은

$$\Delta_{bending} = \sum_{i=1}^{N+1} \left[\left(\frac{L}{N} \right) - \sqrt{\left(\frac{L}{N} \right)^2 - (y_i - 1)^2} \right] \quad (18)$$

2.2.3 가정 사항

손상단면 및 비손상단면의 하중-변형 관계를 도출함에 있어 아래와 같은 가정하에 해석을 수행하였다.

1. 비손상단면은 변형후에도 평면을 유지한다.

2. 재료는 Elsto-Plastic 응력-변형 관계를 유지한다.

3. 재료의 변형경화(Strain Hardening)는 고려치 않는다.

4. 비손상단면의 국부좌굴은 무시한다.

5. 일축방향 휨만을 고려한다.

6. 손상은 부재의 중앙부에 발생한 것으로 가정한다.

3. 비손상부재(Undamaged Member)의 거동

보-기둥의 해석에 있어 전 하중이력 구간에 대하여 단면형상의 변형은 고려치 않는 것이 일반적이나, 양단에 축력 및 모멘트를 받는 두께가 얇은 강관단면의 경우 단면의 타원화 현상(Ovalization Effect) 또는 국부좌굴에 의하여 하중 내력이 상당히 감소하게 된다. 국부좌굴은 주로 단면의 직경-두께비에 영향을 받으며 이론적 국부좌굴내력은 Gerald⁽⁸⁾, Schilling⁽⁹⁾, Sherman⁽¹⁰⁾에 의해 조사된 바 있다. Sohal과 Chen^(11,12)은 실험에 근거한 Kinematic Model을 제시하였으며 이로부터 세장비와 직경-두께비의 영향을 고려한 부재의 국부좌굴식을 제안하였다. 본 연구에서는 손상 강관부재의 거동을 파악하기에 앞서 제시된 수치적분법에 의하여 비손상 강관부재를 해석함으로써 축력-축변형 관계의 특성과 영향요소를 파악하고 실험결과와의 비교를 수행하였다.

3.1 축력-축변형 관계

전절에서 기술한 바와 같이 축변형은 재료의 압축변형과 기하학적 압축 변형 두 요소로 구성되어 있다. 재료 압축변형은 축력의 증가와 감소에 비례하나 기하학적 압축 변형은 부재의 세장비, 초기휨 변형(Initial Crookedness)과 하중의 편심(Eccentricity)에 관계한다. 부재의 초기휨변형과 편심이 없는 경우 극한강도에 도달할 때까지의 총 압축변형은 재료 압축 변형으로 결정되며 극한강도 도달 이후에는 하중의 감소로 재료의 압축변형량은 감소하게 되므로 기하학적 압축변형의 크기 여하에 따라 총 압축변형량의 증가, 감소가 좌우되며 이는 세장비에 관계된다. $\lambda = 70(\lambda = L/r)$ 의 경우(그림 3) 극한강도에 도달 이후에도 총 압축변형량이 감소하는 압축역변

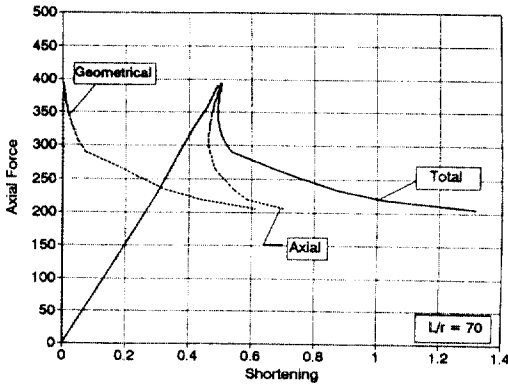


그림 3. 부재의 압축 및 기하학적 변형량($L/r=70$).

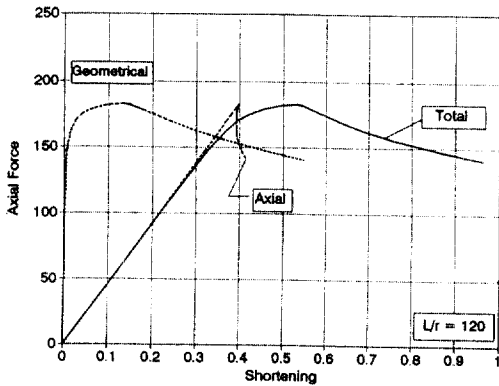


그림 4. 부재의 압축 및 기하학적 변형량($L/r=120$).

형(Axial Strain Reversal)을 보이고 있으며 이것은 전소성모멘트에 이른 단면의 회전변위가 적음에 따라 휨변위가 적게 발생하여 결과적으로 기하학적 압축변형의 증가량이 재료 압축변형의 감소량에 미치지 못함을 뜻한다. $\lambda=120$ (그림 4)의 경우 극한전거동은 유사하나 극한후에는 기하학적 압축변형의 상당한 증가로 총 압축변형의 증가를 나타낸다.

3.2 초기 휨변형의 영향

초기 휨변형이 축력-축변형 관계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 $\delta/L=0.001, 0.05, 0.01$ 의 세 경우에 대하여 조사하였다. 그림 5는 초기 휨변형의 증가가 극한강도 뿐만 아니라 극한전강성(Pre-ultimate Stiffness)도 감소시킴을 나타내고 있다. $\delta/L=0.01$ 의 경우 $\delta/L=0.001$ 의 경우에 비하여 극한강도는 65% 감소를 나타냄에 따라 초기변형은 상당히 신중히

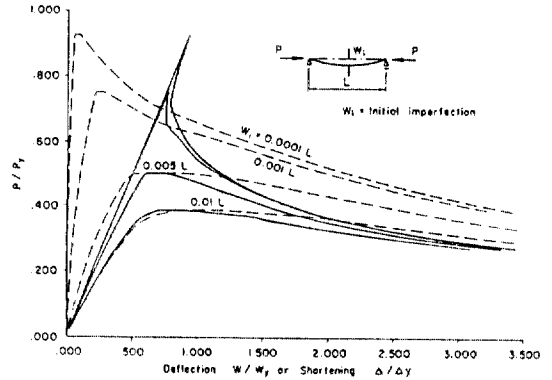


그림 5. 초기 휨 변형의 영향

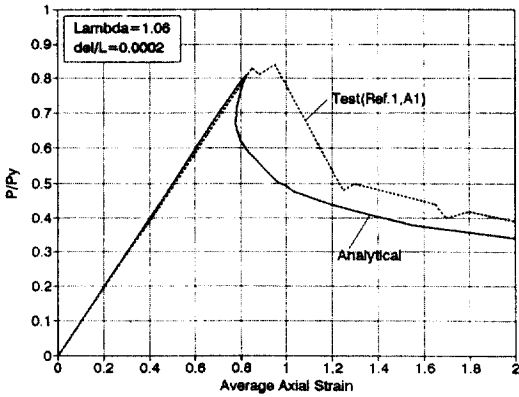
고려되어야 함을 알 수 있다. 또한 초기변형이 적을수록 극한강도점에서 첨예한거동을 나타내며 극한후강도 또한 상당히 급격히 감소함을 나타낸다. 그러나 부재의 축변형이 상당히 진척된 후에는 초기휨변형 값에 관계없이 일정한 값에 접근함을 알 수 있다.

3.3 실험결과와의 비교

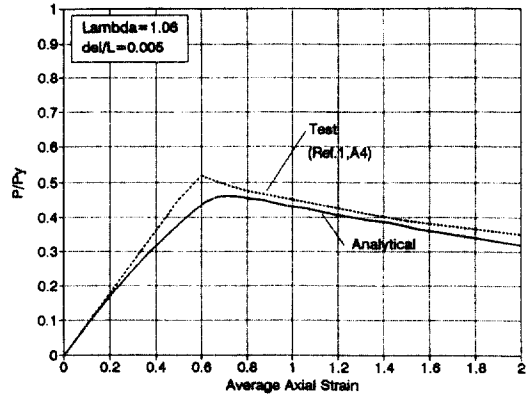
본 연구에서는 손상부재의 거동파악에 주안점을 두었으며 비손상부재의 실험결과와의 비교는 $\lambda=1.06$ 의 경우, $\delta/L=0.0002, 0.005$ 에 국한하여 수행하였다. 그림 6(b)는 초기 휨변형이 큰 부재의 경우 부재의 파괴는 점진적으로 일어나며 극한후강도 또한 상당히 유지되고 있음을 보이고 있다. 이와 반대로 초기 휨변형이 적은 그림 6(a)는 극한강도 이후의 급격한 강도의 감소를 보이고 있다. 여기서 이른 해석에서 나타나는 압축역변형(Axial Strain Reversal)현상은 실험시 구현이 불가능하며 그림 6의 점선과 같이 동적급락(Dynamic Jump)의 거동을 나타낸다. 이론치는 극한후 불안정성거동(Instability Behavior)을 제외하면 실험치와의 좋은 근접성을 보이고 있다.

4. 손상부재(Damaged Member)의 거동

손상부재의 거동을 파악하기 위하여는 수치적분시 손상단면 및 비손상단면의 모멘트-축력-곡률 관계를 필요로 한다. 비손상 단면의 경우에는 주어진 모멘트 및 축력에 대하여 1개의 곡률값이 존재하나 손상



(a)



(b)

그림 6. (a) 실험치와의 비교(비손상부재 $\delta/L=0.0002$)

(b) 실험치와의 비교(비손상부재 $\delta/L=0.005$).

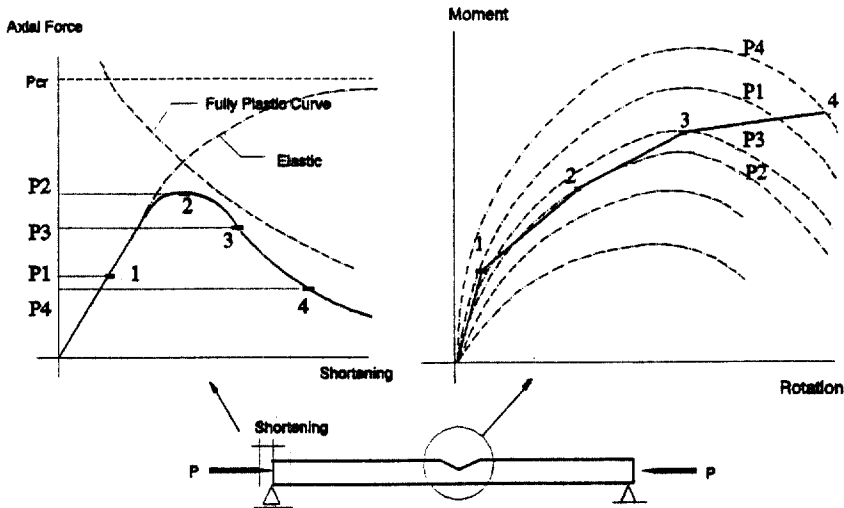


그림 7. 모멘트-축력-곡률 곡선상의 평형경로.

단면의 경우에는 2개의 값이 존재함에 따라 정해 (Correct Root)를 결정하기 위하여는 하중 및 단면의 응력 이력을 필요로하며 그림 7과 같이 모멘트-축력-곡률 곡선상의 평형 경로가 조사되어야 한다.

4.1 모멘트-축력-곡률 곡선의 평형경로

그림 7은 부재의 축력-축변형 곡선상의 각 단계의 점을 손상부위의 모멘트-축력-곡률 곡선상에 상응시킨 것으로 대부분의 경우 손상단면의 전소성화는 부재의 극한강도 도달 이후에 발생한다(그림 7의 3점

참조). 부재의 수치적분을 수행하여 나가는 과정에 있어서 각 분절(Segment)의 모멘트 및 축력이 알려지므로 이에 상응하는 곡률은 수식화된 모멘트-축력-곡률의 관계식으로부터 구해지나 손상부재의 경우에는 주어진 모멘트에 대하여 2개의 곡률값이 존재하므로 이 중 부재의 평형을 만족시키는 값을 선택하여야 한다.

4.2 극한후 거동

부재의 손상이 있거나, 단면의 두께가 직경에 비

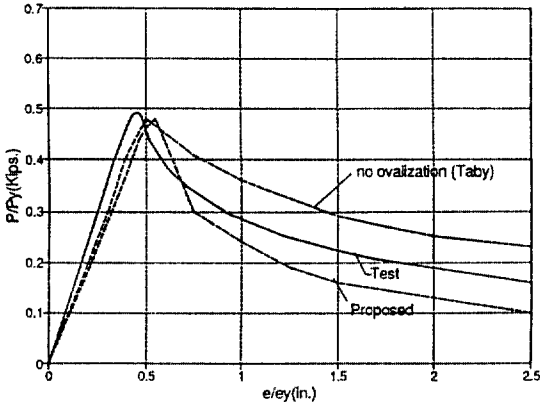


그림 8. Ovalization Effect.

하여 상당히 적을 경우에는 하중의 증가시 손상단면의 뒤틀림에 따라 축내력 및 모멘트 내력을 감소시키는 타원화현상이 발생한다. 그림 8은 본 효과를 고려한 경우와 고려치 않은 경우의 비교를 나타내고 있으며 극한전 탄성영역에서는 거의 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나 극한후 비탄성 영역에서는 50% 이상의 내력의 감소를 보이며 이는 손상 중앙부의 소성힌지(Plastic Hinge)의 형성으로 손상 깊이가 증가됨에 따른 단면의 모멘트 저항계수의 감소에 기인한다.

Taby에 의한 실험⁽⁶⁾에서도 고찰된 바와 같이 손상깊이는 극한강도점에 도달할 때까지는 거의 증가하지 않으며 극한후에서 급격히 증가하는데 D/t 50 이상의 부재에서 두드러진 양상을 나타낸다.

4.3 D/t의 영향

D/t가 손상 장관의 압축력에 미치는 영향을 실용장관의 주 사용범위인 $30 < D/t < 90$ 의 범위에서 고찰하였다. 축내력을 P/P_y 로 무차원화시킨 축력-축변형 곡선을 그림 9에 나타내었다. 탄성영역에서는 D/t에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있으며 극한강도에 도달하기 전의 응력변형률 0.2 이후에서 차이를 보이고 있음은 손상단면의 뒤틀림이 발생하고 있음을 뜻한다. 또한 D/t가 클수록 극한강도는 조기에 도달하며 이는 단면의 두께 감소에 따른 단면의 뒤틀림 변형이 심화됨을 뜻한다. D/t=90의 경우에는 D/t=30의 경우에 비하여 약 20%의 강도저하를 보이며 이것은 문헌⁽⁷⁾에서 보인 손상단면의

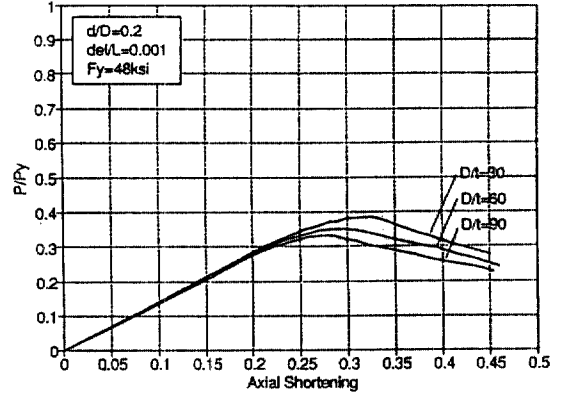


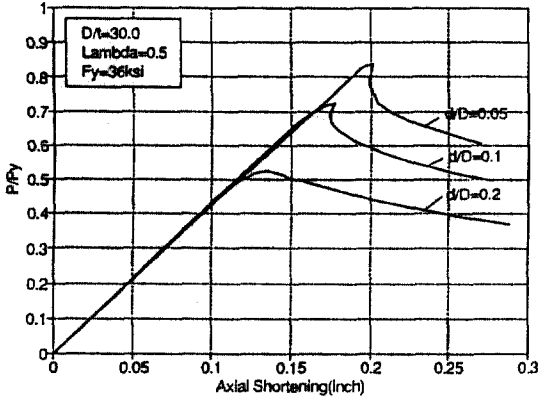
그림 9. D/t의 영향.

모멘트-곡률 곡선의 강도저하의 크기와 유사하였다. 양단 핀 지점으로 세장비가 약 1.2 이상의 경우에는 부재의 강도는 Euler Buckling에 의하여 좌우되므로 D/t의 영향은 없는 것으로 나타났다.

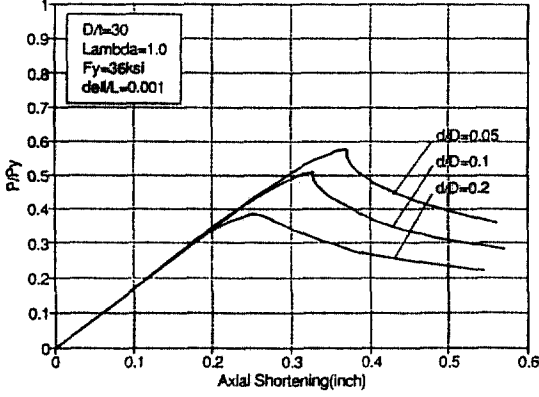
4.4 d/D의 영향

부재 손상은 단면계수의 감소 및 단면의 편심을 유발시킴에 따라 단면의 내력을 저하시키나 손상 깊이가 0.02D 이내의 범위에서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났으며 본 연구에서는 $d/D=0.05-0.2$ 의 손상부재를 대상으로 고찰하였다. 손상은 부재 중앙부에 위치할 때 가장 큰 영향을 미치며 손상형태 보다는 손상깊이가 가장 중요한 영향 요소임이 확인되었다.⁽¹³⁾ 그림 10(a), (b)는 축력-축변형 관계에 있어서 d/D의 영향을 나타낸 것으로 탄성영역에서는 d/D의 영향이 없으며 이는 참고문헌⁽⁷⁾에서 보인 손상단면의 모멘트-곡률 곡선의 경우 d/D의 변화에 따른 탄성영역에서의 강도저하와 대비를 보인다. 즉 부재의 손상은 탄성거동 또는 탄성좌굴에는 직접적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. $d/D=0.2$ 의 경우 $d/D=0.05$ 의 경우에 비하여 극한강도 및 극한후강도는 40~50% 감소됨을 나타내고 있다. 본 예는 세장비 0.5, 1.0인 부재에 대한 것으로 세장비가 증가할수록 부재강도는 탄성좌굴에 지배되므로 손상 깊이에 따른 영향이 감소하게 됨을 알 수 있다.

비손상부재의 경우 압축력변형이 발생하는 세장비의 범위는 0.7~1.0이나 손상부재의 경우에는 0.5~0.7의 범위로 이동하며 이것은 손상으로 인한 횡변



(a)



(b)

그림 10. (a) d/D의 영향 (b) d/D의 영향.

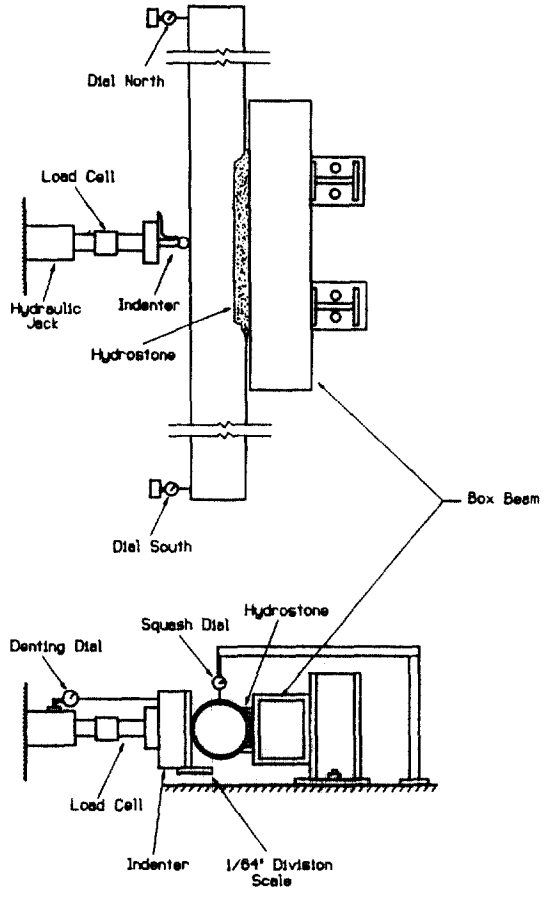


그림 11. 손상 발생 가력장치.

형량의 증가에 기인한다. 또한 d/D가 적을수록 압축역변형 현상과 이에 따른 강도저하가 심화됨을 본 예에서 알 수 있다.

5. 부재 실험

5.1 시험 장치 및 시험체

손상부재의 극한강도 및 거동을 파악하기 위한 시험체로 실제 해양구조물에 사용되었던 부식 강관과 이와 같은 크기의 강관을 제작, 사용하였다. 부재의 손상을 주기 위하여 그림 11과 같은 가력 장치를 이용하였으며 원하는 크기의 손상깊이를 얻기위하여 그림 13과 같이 탄성회복량을 고려하여 가력하였다. 부재의 압축 실험은 미국 Lehigh University의 압축시험기(용량 : 2500 ton)를 사용하여 가압하고 양단부는 Spherical Bearing을 설치하였으며 시험장

치는 그림 13과 같다. 시험체는 부식강관 시험체, 제작강관 시험체로 구분하고 각 시험체에 대하여 손상깊이, 편심, 초기휨변형, 직경-두께비 등을 변수로 선택하였으며 분류 및 재원은 표 1, 2, 3과 같다. 인장시험 시험을 통하여 시험편의 정적 및 동적 항복응력, 탄성계수, 극한강도, 변형경화, 신장률 등을 측정하였으며, 시험편 제작 과정에서 발생한 잔류응력의 영향을 고려한 항복강도 및 탄성계수의 측정의 의하여 Stub-Column Test를 실시하였다.

5.2 실험결과와 분석 및 비교

5.2.1 부식 강관(Salvaged Tube)

부식강관은 표 1과 같이 부식, 휨상태, 편심, 손상의 정도에 따라 분류, 실험을 수행하였으며 결과를 그림 14(a), (b)에 나타내었으며 부재의 세장비 각

표 1. 손상정도에 따른 시험체의 분류

Geometry	Type of Specimens				
	Corrosion Damaged	NOt Damaged (straight)	Crooked (bent)	Dented	
				End Eccentricity	
				e=0.0 D	e=0.250 D
L/r=80 D/t=29	C1	S1		D1	E1
L/r=58 D/t=32	C2	S2			
L/r=70 D/t=32		S3	B3	D3	E3

표 2. 제작강관 시험체의 제원

No.	Specimen	End Cond	L/r	D/t	d/D	$\delta L \times 10^{-3}$	D (in)	t (in)	L (ft)	σ_c (ksi)
1	PIP	Pinned	80	60	0.051	0.7	15	0.25	35.5	36
2	PIP-S	Pinned	80	58.7	0.051	0.7	5.516	0.094	12.0	36
3	PIF	Fixed	80	60	0.051	0.7	15	0.25	35.5	36
4	P2P	Pinned	70	45	0.096	1.9	17	0.375	35.0	50
5	P2P-S	Pinned	70	44	0.096	1.9	5.516	0.125	11.4	50
6	P2F	Fixed	70	45	0.096	1.9	17	0.375	35.0	50
7	P3P-A	Pinned	48	78	0.048	0.7	24.5	0.3125	34.5	50
8	P3P-B	Pinned	48	78	0.15	0.7	24.5	0.3125	34.5	50
9	P4P	Pinned	57	100	0.115	1.0	18.75	0.1875	31.5	50

표 3. 부식강관 시험체의 제원

TEST SPEC. NO.	TEST LENGTH ft	D in	d in	L/r	D/t	DAMAGE	AXIAL LOAD END ECC
S1	24.5	10.75	0.365	80	29	NONE	0.00
D1	24.5	10.75	0.365	80	29	DENT-15	0.00
E1	24.5	10.L75	0.365	80	29	DENT-15	0.25 D
C2	23.2	14	0.437	58	32	CORRODED	0.00
S2	23.2	14	0.437	58	32	NONE	0.00
S3	28.0	14	0.437	70	32	NONE	0.00
B3	28.0	14	0.437	70	32	OOS	0.00
D3	28.0	14	0.437	70	32	DENT-15	0.00
E3	28.0	14	0.437	70	32	DENT-15	0.25 D

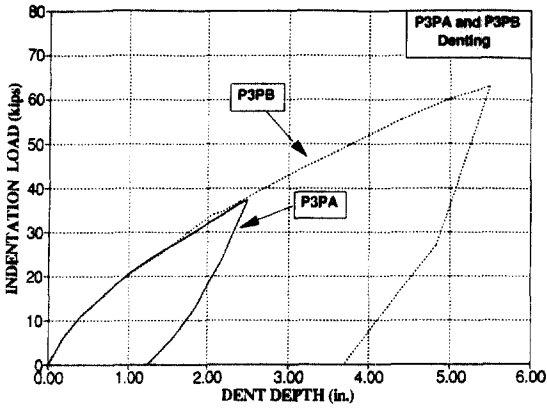
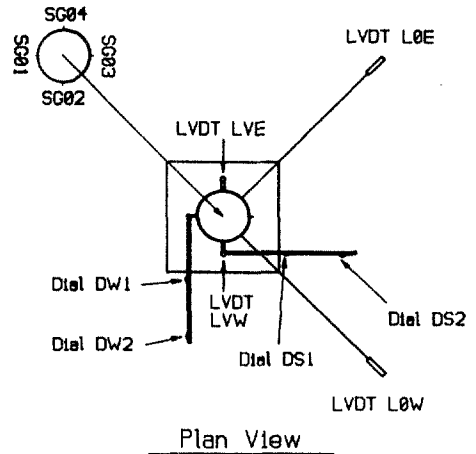
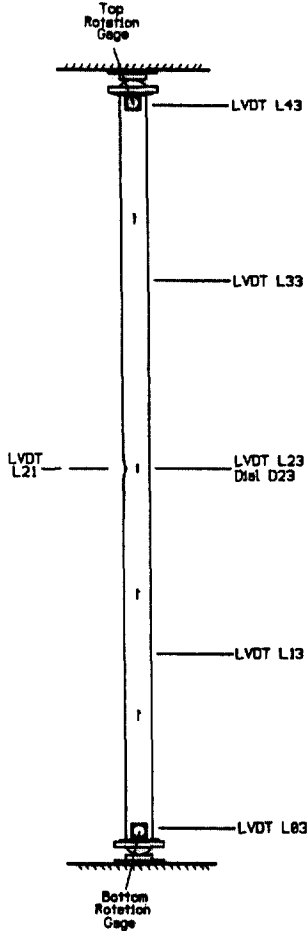
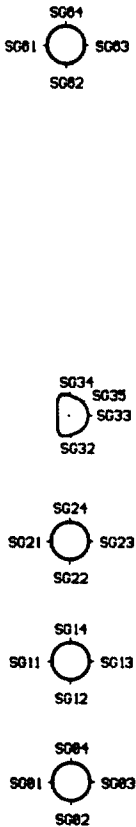


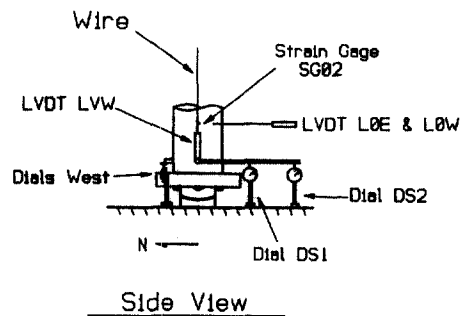
그림 12. 하중-손상깊이의 관계.

70, 80이다. 그림 14(a)에는 부식으로 인하여 50% 이상 강도의 저하되었음을 나타내고 있으며(시편 C 1) 초기 탄성 변형에는 부식에 의한 영향이 없음을 알 수 있다. 또한 부재의 손상깊이가 0.17D인 경우(시편 D1) 강도는 약 60% 감소되었음을 나타낸다. 편심이 있는 경우 오히려 강도가 상승하였음을 보이고 있으나 이는 편심이 손상 부위 반대측으로 작용하였기 때문이다. 전 절에서 기술한 바와 같이 비손상부재의 극한강도는 손상부재에 비하여 상당히 높게 나타나고 있으나 극한후거동에 있어서는 비손상부재의 동적급락에 따른 강도의 저하로 손상부재와의 강도 차이는 감소하고 있음을 보인다. 그림 14

Strain Gages
(View From Above)



Plan View



Side View

그림 13. 압축 시험장치 및 시험편.

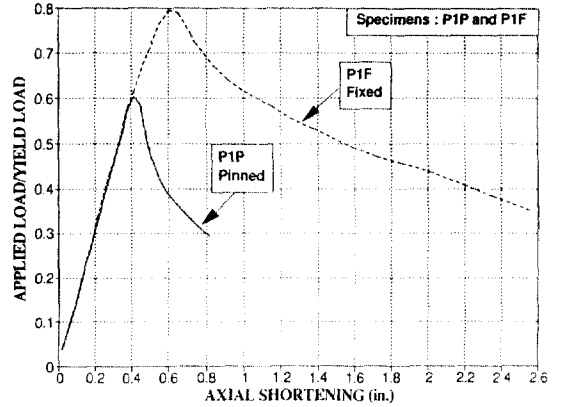
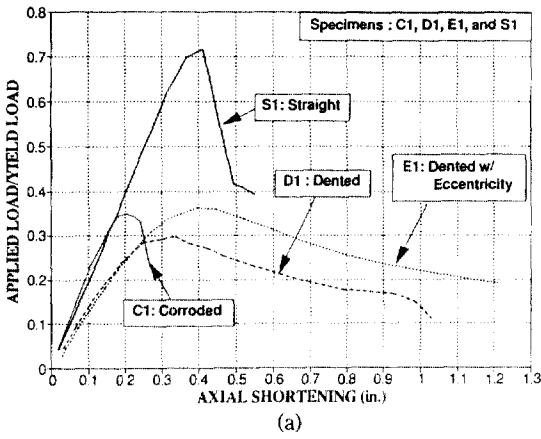


그림 15. 제작강관의 축력-축변형 관계.

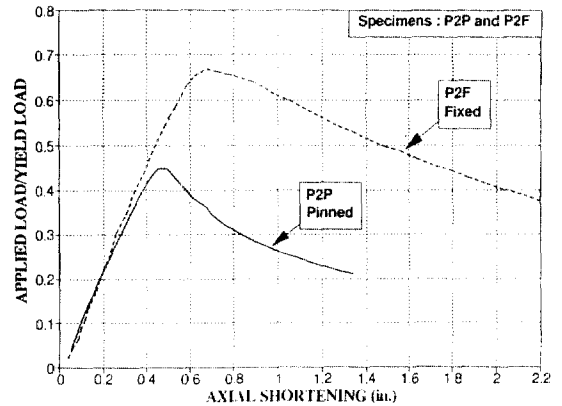
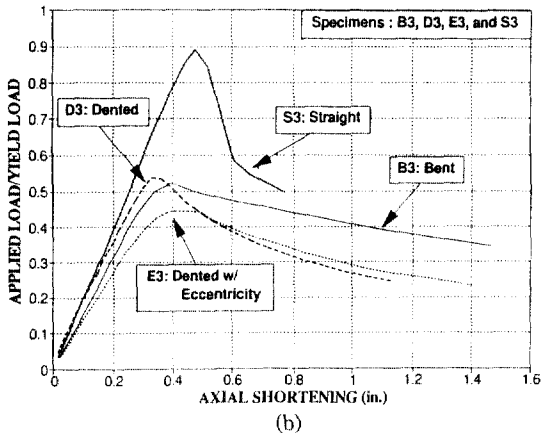


그림 16. 제작강관의 축력-축변형 관계.

그림 14. (a) 부식강관의 축력-축변형 관계($L/r=80$, $D/t=29$).
(b) 부식강관의 축력-축변형 관계($L/r=70$, $D/t=32$).

(b)는 그림 14(a)와 유사한 거동을 나타내며 초기 휨 변형이 있는 B3의 경우(시험체 B3, $\delta=0.012L$) 약 35%의 극한강도 감소를 나타내었다. D1의 초기 강성은 비손상부재와 차이를 보이고 있는 것은 손상에 의한 영향이 아니라 부재의 초기 휨변형($\delta L=0.003$)에 의한 것으로 판단된다. 이것은 손상깊이가 같고 초기휨변형이 적은 D1시험체($\delta L=0.0008$)의 초기강성은 비손상부재와 차이를 나타내고 있지 않음에서 확인할 수 있으며 전 절에서 기술한 수치해석 결과와 일치 된다.

5.2.2 제작강관(Fabricated Tube)

제작강관의 실험은 부재의 세장비, 직경-두께비, 손상깊이, 구속조건등을 변화하여 수행하였으며 기

수행된 축소모형 실험의 결과와 비교하였다. 부재의 손상 및 결함이 가장 적은 P1P 시험편은 예측하였던 대로 극한후 급격한 강도 저하를 보였으며(그림 15) 손상깊이가 0.1D 이상되는 나머지 시험편은 극한후 거동의 완만한 경사를 나타내었다(그림 16, 17, 18). 부재의 양단이 고정(Fixed-Ended)되어 있는 경우의 초기 강성은 양단 핀의 경우에 비하여 차이를 보이지 않으나 극한강도는 손상 깊이에 따라 약 25%~50% 증가되었다. P1P, P1F에 대하여 1/5 축소모형 실험을 수행한 결과 탄성영역에서는 실물모형과 거동의 일치성을 보이고 있으나(그림 18) 극한강도 및 후극한 거동에 있어서 전반적으로 10%~20%의 차이를 보임에 따라 손상부위의 변형에 있어서 Scale Factor가 존재함을 알 수 있으며 손상 부재의 축소 모형 실험시 보정이 필요할 것으로 판단된다.

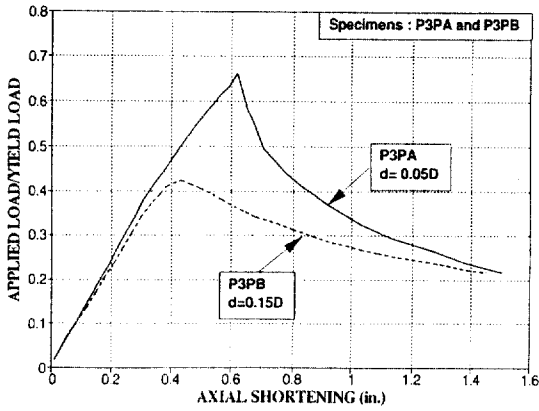


그림 17. 제작강관의 축력-축변형 관계.

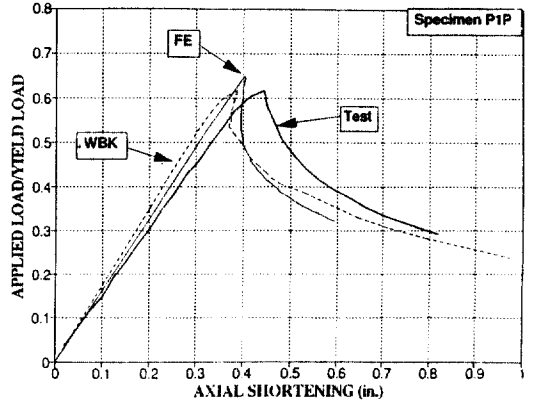


그림 19. 실험치와의 비교(시험체: P1P).

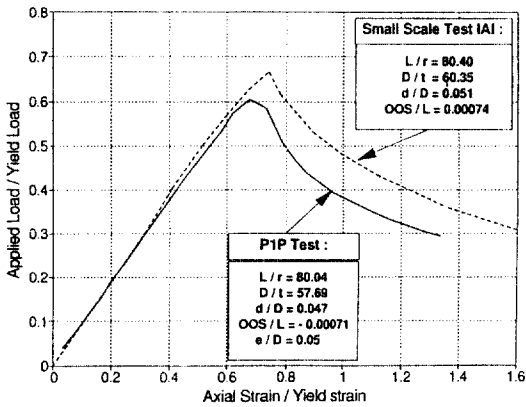


그림 18. 축소모형 실험치와의 비교.

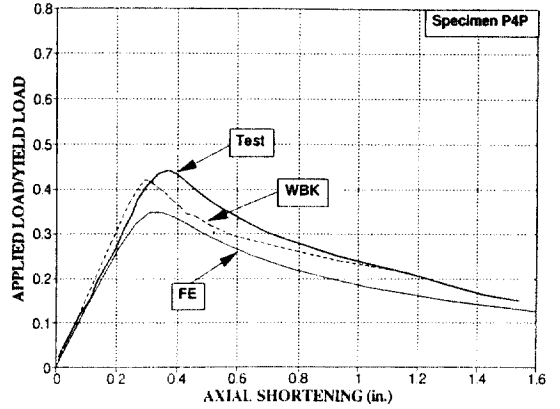


그림 20. 실험치와의 비교(시험체: P4P).

표 4. 손상부재의 극한강도

Specimen	λ	P_y	P_u/P_y (Proposed)	P_u/P_y (Test)	Dev. %
P1P	0.98	513.6	0.627	0.638	-1.8%
P2P	0.99	1121.3	0.434	0.460	-5.9%
P3PA	0.68	1444.2	0.683	0.658	3.6%
P3PB	0.68	1444.2	0.487	0.430	11.7%
P4P	0.79	644.1	0.422	0.439	-4.0%
P4PF	0.79	644.1	0.821	0.809	1.5%
D1	1.12	612.7	0.367	0.310	15.5%
E1	1.11	628.2	0.390	0.381	2.3%
D3	0.88	803.4	0.537	0.552	-2.8%
E3	0.84	734.5	0.529	0.458	13.4%

5.2.3 실험결과와의 비교

본 연구에서 개발된 부재해석 프로그램의 검증을 위하여 제작 강관에 대하여 실험결과와 비교를 하였다. 그림 19, 20은 제작 시험편 P1P, P4P에 대하여 실물실험, 유한요소해석(FE), 본연구제안(WBK)에 의한 해석 결과의 비교를 나타내고 있다. 탄성영역에서 약간의 강성의 차이를 나타내고 있으며 극한 강도는 10% 이내의 결과를 보이고 있다. 후극한 거동에 있어서 실험치가 크게 나타나는 것은 재료의 변형경화에 기인하는 것으로 추측된다. 전 시험편에 대한 시험결과는 표 4에 수록된 바와 같이 오차는 최대 16%, 최소 1.3%, 평균 6.3%의 양호한 결과를 보임에 따라 본 연구의 제안방법에 대한 신뢰성을 보여주고 있다.

5.2.4 사용범위

본 연구에서 제안된 방법은 문헌⁷⁾의 손상단면의 모멘트-곡률 데이터베이스를 기초로 하고 있으므로 아래와 같이 강관의 형상에 따른 사용범위의 한계가 있다.

- D/t : 30~90
- d/D : 0.05~0.2
- σ_y : 36~60 ksi
- P/P_y : 0.0~0.7

6. 결 론

압축력을 받는 양단 편접합된 손상 강관 부재에 대한 거동이 고찰되었다. 단면의 뒤틀림을 고려한 모멘트-축력-곡률 관계식을 이용, 손상된 강관 부재를 해석하기 위한 실용 기법을 제시하였으며 실험 결과와의 비교를 통하여 제시된 기법의 신뢰성을 확인하였다. 제시된 기법으로 부재의 직경-두께비, 손상깊이, 초기휘변형, 구속조건, 항복강도 등을 변화하여 각 요소의 영향을 파악할 수 있었으며 손상깊이 0.02 D의 경우 최대 50%의 강도저하를 나타내었다. 특정 세장비에 있어서 축력-축변형 곡선은 극한강도점 부근에서 강도의 급격한 감소와 압축역 변형 현상이 발생하므로 부재해석시 발산의 우려가 있음에 따라 주의를 필요로 하며 본 연구에서 제시한 기법은 횡변위 제어에 의한 해석이므로 이러한 문제점을 해결할 수 있었다. 손상된 강관 부재의 압축

실험을 위하여 실제 기존의 부식된 강관과 제작 강관을 사용하여 인위적 손상을 가하였으며 부식 강관에 있어서 부식이 심한 강관의 거동은 현저한 극한강도 저하를 나타내며 후극한 거동 또한 급격히 진행됨으로써 부식도와 이에 따른 강도 평가는 차후 연구에 반영이 필요할 것으로 판단된다. 축소 모형 시험의 수행시에는 size effect가 존재함이 확인되었으며 10~20%의 강도상승을 나타내므로 이에 대한 보정을 필요로 한다. 본 제시 기법은 일반적인 실용 강관 부재에 적용 가능하나 $D/t > 90$, $d/D > 0.2$, 항복강도가 60 ksi를 넘는 부재의 강도평가를 위하여는 개발된 모멘트-축력-곡률 데이터베이스의 확장에 의하여 가능하다 할 것이다.

참고문헌

1. Smith, C.S., Kirkwood, W. and Swan, J.W., "Buckling Strength and Post-Collapse Behavior of Tubular Bracing Members Including Damage Effects", *Proceeding of thy Second International Conference on Behavior of Offshore Structures*, BHRA Fluid Engineering, London, England, August, 1979, pp. 303-326.
2. Landet, E. and Lotsberg, I., "Laboratory Testing of Ultimate Capacity of Dented Tubular Members", *Journal of the Structural Engineering*, ASCE Vol. 118, No. 4, April, 1992, pp. 1071-1089.
3. Ueda, Y. and Rashed, S.M.H., "Behavior of Damaged Tubular Structural Members", *Transactions of the ASME*, Vol. 107, September, 1985, pp. 342-349.
4. Taby, J. and Moan, T. "Collapse and Residual Strength of Damaged Tubular Members", *Behavior of Offshore Structures*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1985, pp. 395-408.
5. Taby, J., "Experiments with Damaged Tubulars" Technical Report 6.10, SINTEF, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, October 1986.
6. Padula, J.A. and Ostapenko, A., "Load-Shortening Behavior of Damaged Tubular Columns", In the *Proceeding of the 22nd Offshore Technology Conference*, OTC 6382, Houston, May, 1990, pp. 317-325.
7. 김우범, "뒤틀림 변형을 받는 강관 단면의 거동 및 극한 강도에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*,

제 14권 제 1호, 1994.

8. Gerald, G., "Introduction to Stability Theory", McGraw Hill Book Co., NY, 1962.
9. Schilling, C.G., "Buckling Strength of Circular Tubes", *Journal of the Structural Engineering*, ASCE, Vol. 91, No. ST5, Proc., October, 1965, January, 1983 .
10. Sherman, D.R., Erzurumlu, H., and Mueller, W.H., "Behavioral Study of Circular Tubular Beam-Columns", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 105, No. ST6, Proc., June, 1979, pp. 1055-1067.
11. Sohal, Iqbal S. and Chen, W.F. "Local Buckling and Sectional Behavior of Fabricated Tubes", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 113, No. 3, March, 1987, pp. 519-533.
12. Sohal, Iqbal S. and Chen, W.F. "Local and Post-Buckling Behavior of Tubular Beae-Columns", *Journal of the Structural Division*, Vol. 114, No. 5, May, 1988, pp. 1073-1089.

(接受 : 1993. 11.9)