

## 강관의 변형률 기반 설계 및 API-X80 강의 비선형 해석

Strain-based design of steel pipe and nonlinear behavior of API-X80 steel

이승정\* · 윤영철\*\* · 조우연\*\*\* · 김진균\*\*\*\* · 지광습\*\*\*\*\*

Lee, Seung Jung · Yoon, Young Cheol · Cho, Woo Yeon · Kim, Jin Gyun · Ji, Goangseup

### 1. 서 론

국제유가의 상승세가 장기화되면서 기존의 육상개발 외에 극지방, 심해저와 같은 특수 지역에서 에너지를 채굴하는 작업이 지속적으로 시도되고 있다. 현재 세계적으로 대규모의 파이프라인 건설프로젝트가 다양한 지역에 걸쳐 수행되고 있으며 이러한 장거리 건설에 적합한 고강도 강재의 연구 또한 지속되고 있다. 특수 지역에 사용되는 고강도 강재의 경우 기존의 강재의 건설에서 고려되던 0.2% 변형률을 크게 상회하는 범위의 변형률을 고려해야 되므로 기존의 응력 기반 설계법의 대안으로 변형률 기반 설계법이 개발 및 적용되고 있다. 국내에서도 변형률 기반 설계법의 개발과 그에 상응하는 수치해석기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는 변형률 기반 설계를 기존의 응력 기반 설계와 비교하고 변형률 기반 설계의 측면에서 변형률 저항 성능의 판단 기준이 되는 압축 변형률 성능 평가를 API-X80 강에 대해 수행하였다.

### 2. 변형률 기반 설계

#### 2.1 강관의 주요 설계 조건

극지방이나 심해저와 같은 지역에 설치되는 강관은 다양한 하중을 받게 된다. 사용하중의 측면에서 내압으로 인해 길이방향 및 원주방향의 응력을 받게 되고, 설치 환경에 의해 발생하는 하중 또는 변형으로 압축, 인장, 모멘트, 피로하중을 받게 된다. 또한 심해와 같은 곳에 강관을 건설할 경우 거치게 되는 릴링(reeling)과 같은 작업으로 휨, 압축 및 인장 변형을 받게 된다. 이러한 경우 강관이 탄성 구간을 넘어 소성 변형률의 범위에서 거동하게 된다.

#### 2.2 강재 구조물의 설계법

기존의 강재 설계는 허용응력 설계법과 같은 응력 기반 설계법을 사용하여 수행되었다. 응력 기반 설계법은 항복응력의 일정비율을 허용응력으로 지정하여 강재의 응력을 제한하는 방법으로 기존의 강재의 경우 그림 1과 같이 허용응력 이상의 응력 축의 안전 여유치의 크기가 변형률 축의 안전 여유치의 크기와 유사하기 때문에 강재 구조물의 설계 시 주로 사용되어 왔다. 반면에 고강도 강재의 경우 기존의 강재보다 고연성이기 때문에 그림 2와 같이 응력 축의 안전 여유치에 비해 변형률 축의 안전 여유치가 크다. 또한 일반적으로 매설되는 강관의 대부분의 길이방향 변형은 환경적인 요인에 의한 것으로 하중보다 변형이나 변위에 의해 지배되기 때문에 이러한 변형에 대한 고려가 필요하다(ASME, 1995). 따라서 고강도 강재의 설계 시 변형률 기반 설계를 사용할 경우 고연성의 장점을 활용할 수 있으며 연성 확보 능력이 강화되어 부분적인 소성변형의 고려가 가능하게 된다.

\* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 석·박사통합과정 · E-mail : [fincher7vn@korea.ac.kr](mailto:fincher7vn@korea.ac.kr) - 발표자

\*\* 정회원 · 명지전문대학 토목과 조교수 · 공학박사 · E-mail : [ychoon@mail.mjc.ac.kr](mailto:ychoon@mail.mjc.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원 · 공학박사 E-mail: [wcho@rist.re.kr](mailto:wcho@rist.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 · E-mail : [simpleis@korea.ac.kr](mailto:simpleis@korea.ac.kr)

\*\*\*\*\* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 · 공학박사 E-mail: [g-zi@korea.ac.kr](mailto:g-zi@korea.ac.kr)

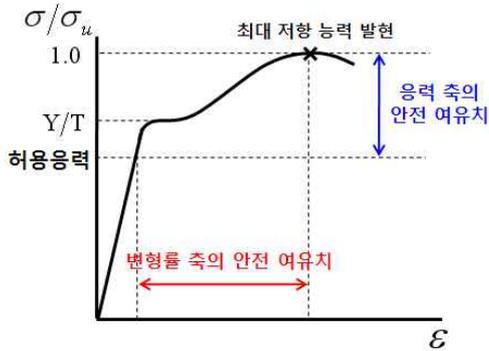


그림 1. 기존 강재의 거동

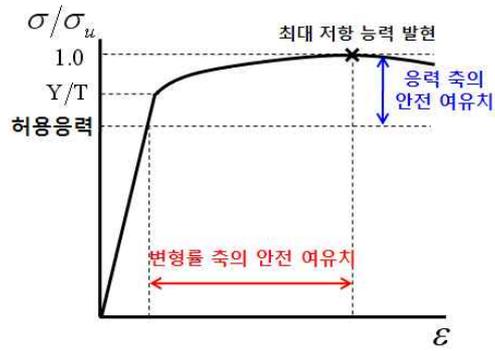


그림 2. 고강도 강재의 거동

### 3. 강재 파이프의 비선형 해석

일종의 한계 상태 설계법으로 볼 수 있는 변형률 기반 설계는 인장과 압축 변형률 저항 성능으로 재료의 성능을 파악한다. 이러한 인장 및 압축 변형률 저항 성능은 강재 파이프의 경우 좌굴 또는 균열 등의 국부손상이 변형 성능에 미치는 영향을 거시적인 관점에서 정의한 측정치를 의미한다. 본 연구에서는 압축 변형률 저항 성능에 영향을 미치는 국부소성 좌굴의 인자와 그에 따른 거동을 해석하였다.

#### 3.1 실험

본 연구에서는 인장과 좌굴실험을 실시하였다. 강재의 비선형 재료모델로 사용되는 GTN모델의 재료모델 상수 결정을 위해 인장실험을 사용하였으며 구현된 재료모델의 검증에 위해 좌굴실험을 사용하였다. 실험은 2007년에 포항산업과학연구원에서 API specification의 규격을 준용해 API X80 강을 대상으로 실시하였다.

#### 3.2 재료모델

강재 파이프의 비선형 해석을 위해 Tvergaard와 Needleman(1984)이 Gurson(1977)의 모델을 수정하여 제시한 GTN 모델을 사용하였다. Gurson(1977)은 연성재료의 제작 초기에 포함된 기체물로 인해 재료 내부에 생긴 공극(Void)의 생성(Nucleation), 성장(Growth), 합체(Coalescence)의 과정을 통해 재료의 연성파괴를 설명했다. Tvergaard와 Needleman은 Gurson이 제시한 공극체적비율(void volume fraction,  $f$ )을 유효 공극체적비율(effective void volume fraction,  $f^*$ )로 수정하여 연성파괴 모사에 사용하였다. 이와 같이 수정된 Gurson 모델을 GTN 모델이라 부르는데, 이 모델은 변형경화와 손상을 포함하고 있어 변형률 기반 설계 시 대변형 문제와 재료의 연성파괴를 모사하는데 있어서 적합한 모델로 인정받고 있다.

$$\Phi = \left(\frac{q}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(-\frac{3}{2} \frac{q_2 p}{\sigma_y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_F - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & f_c < f < f_F \\ f_F & f \geq f_F \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}_m^p - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \quad (3)$$

식 (1)-(3)은 각각 GTN 모델의 항복조건, 유효공극체적비율, 공극의 생성에 관한 확률적 분포를 의미한다. 식 (1)에서  $\sigma_y$ ,  $p$ ,  $q$ 은 재료의 항복응력, 정수압 응력, 등가응력을 의미하며  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ 는 재료의 항복과 관련

된 상수이다. 식 (2)에서  $f_c, f_F, \overline{f_F}$ 는 임계공극체적비율, 파단공극체적비율, 파단 값을 의미하고 (3)에서  $\overline{\epsilon_m^p}, \epsilon_N, s_N, f_N$ 는 각각 등가소성변형률, 표준정규분포의 평균, 표준편차, 공극의 생성이 가능한 공극체적비율을 의미한다. 변형경화는 지수함수 관계식을 사용하였다.

GTN 모델을 이용해 강재의 비선형 거동을 해석하기 위해서는 대상 재료에 적합한 재료모델상수를 결정해야 한다. 본 연구에서 결정한 재료모델상수는 전술한  $q_1, q_2, q_3, \sigma_y, f_c, f_F, \epsilon_N, s_N, f_N$ 과 재료의 변형경화를 모사하기 위한 변형경화지수  $N$ , 초기 공극체적비율  $f_0$ 이다. 재료모델상수들은 범용 프로그램인 ABAQUS의 사용자 정의 재료모델 UMAT으로 작성된 구성방정식을 ABAQUS와 연동해 해석한 결과와 인장실험 결과를 비교하여 결정하였다. 11개의 재료모델상수 중 재료의 변형경화에 관련된  $\sigma_y$ 와  $N$ 은 시편선택 방향, 열처리 여부 등의 변수들이 고려된 각각의 시편에 대한 상수로 결정될 수 있으며 나머지 9개의 재료 상수는 API X80 급 강재 전체에 해당하는 하나의 재료상수 집합으로 설정할 수 있다. 표 1은 도출된 재료모델상수 값을 나타낸 것이며 그림 3은 유한요소해석과 실험 결과를 비교한 것이다.

표 1. 도출된 재료모델상수 값

변수	$s_N$	$\epsilon_N$	$f_N$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$f_0$	$f_c$	$f_F$
도출값	0.1	0.3	0.0008	1.5	1.0	2.25	0.000125	0.015	0.25

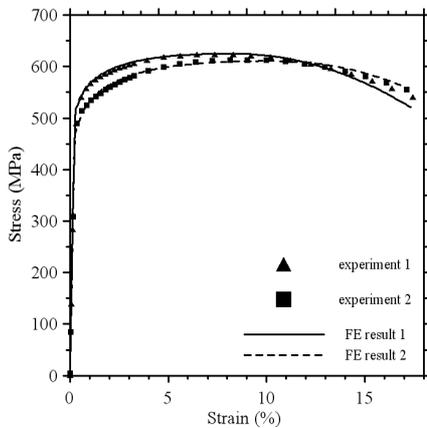


그림 3. GTN 모델을 이용한 해석 결과 비교

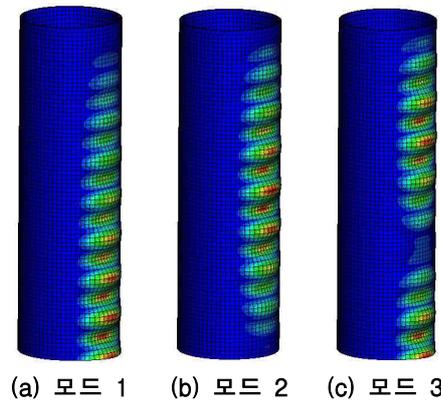


그림 4. 좌굴모드 형상

### 3.3 비선형 해석

변형률 기반 설계에서 강재의 압축 변형률 저항 성능에 영향을 미치는 국부소성 좌굴의 인자와 그에 따른 거동을 확인하기 위해 도출된 재료모델상수를 이용해 좌굴 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 그림 4의 좌굴시편의 상부에 연결된 모멘트 팔을 이용해 휨응력을 가하여 시편이 받는 모멘트와 변형률을 측정된 실험과 유한요소해석을 비교하였다. 유한요소해석 시 파이프의 제작오차를 고려하기 위하여 제작오차를 반영하는 초기결함 값을 좌굴모드해석을 통해 얻고자 하였다. 그림 4는 좌굴모드해석의 결과로부터 얻어진 모드형상을 도시한 것이다. 이러한 모드변형에 최대결함크기를 곱한 값을 파이프 형상의 초기결함으로 대입하는데 이 최대결함 형상과 크기에 따라 파이프의 좌굴거동이 큰 차이를 보일 것으로 예상하여 본 연구에서는 세가지 모드 형상과 최대결함크기 값을 0.5, 1.0, 5.0으로 적용해 결과를 비교하였다.

그림 5는 초기결함 형상에 따른 거동을 비교하여 나타낸 것이며 그림 6은 초기결함의 크기에 따른 거동을 휨모멘트와 압축변형률 곡선으로 비교하여 도시한 것이다. 초기결함의 모양과 크기가 좌굴의 형상을 결정하는 가장 큰 요인임을 그림에서 확인할 수 있다.

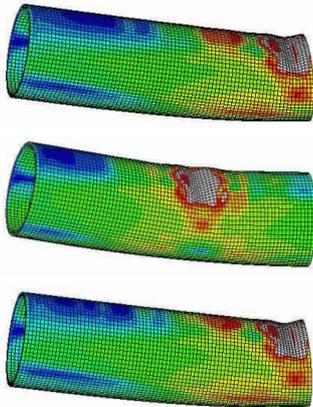


그림 5. 초기결함 형상에 따른 거동 비교

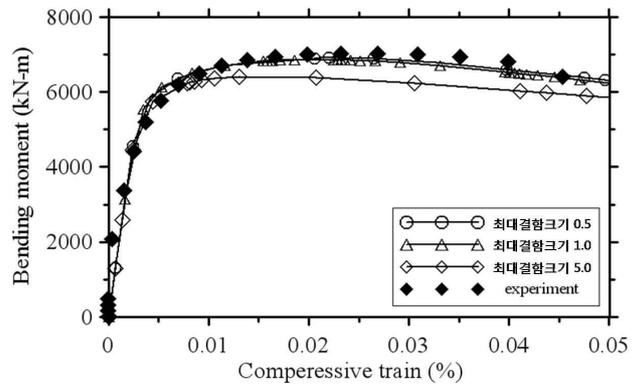


그림 6. 초기결함 크기에 따른 거동 비교

그림 6에서 유한요소해석 시 최대결함크기가 0.5 또는 1.0일 경우 실험결과와 잘 일치하며 최대결함크기가 5.0인 경우, 즉 초기결함을 과다하게 고려한 경우는 실험결과와 큰 차이가 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 강제 가스 파이프가 받는 다양한 하중 조건을 고려한 결과 재료가 탄성 구간을 넘어 소성 변형률의 범위에서 거동하는 것을 확인할 수 있었다. 고강도 강재의 장점을 활용하기 위해서 기존의 응력 기반 설계법을 보완할 수 있는 변형률 기반 설계법이 필요하다.
2. GTN 모델을 적용하여 압축 변형률 저항 성능에 영향을 줄 수 있는 인자인 좌굴 변형에 대한 해석을 수행하였으며 적용된 모델은 변형률 기반 설계의 측면에서 고강도 강재의 대변형 거동 해석에 유용하게 사용될 것으로 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년도 포항산업과학연구원 Strain-Based Design용 라인파이프의 비선형 휨거동 해석 사업과 2008년도 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05 첨단융합 B01) 및 05 기반구축 D04-01의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 포항산업과학연구원과 건설교통부의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ASME B31.8. (1995) Gas transmission and distribution piping systems, *American Society of Mechanical Engineers*.
2. Gurson, A.L. (1977) Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth:Part-1 Yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Engineering Material and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15.
3. Tvergaard, V. and Needleman, A. (1984) Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 157-169.