

라인파이프 강관의 압축-휨 좌굴 성능 평가 기법 개발

Development of an Evaluation Method for the Compressive-Bending Plastic Buckling Capacity of Pipeline Steel Tube

지 광 습* · 이 승 정** · 윤 영 철*** · 황 상 수**** · 조 우 연*****

Zi, Goangseup · Lee, Seung-Jung · Yoon, Young-Cheol · Hwang, Sang-Soo · Cho, Woo-Yeon

요 약

본 논문에서는 라인파이프 강관의 압축-휨 좌굴 성능 평가 기법을 개발하기 위해 비선형 유한요소해석을 사용하였다. 고강도 강재의 연성거동을 모사하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 사용자 재료모델을 사용하여 GTN(Gurson-Tvergaard-Needleman) 모델을 작성하였다. 실험결과와의 비교를 통해 재료모델상수를 결정하였으며 압축-휨 좌굴 실험의 모사에 사용하였다. 압축-휨 좌굴 성능 평가는 비선형 유한요소해석의 결과로부터 얻어진 한계압축변형률과 최대휨모멘트를 기준으로 수행될 수 있다. 개발된 성능 평가 기법은 고강도 강재를 이용한 라인파이프의 설계 시 대변형 거동 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

keywords : 비선형 유한요소해석, GTN 모델, 재료모델 상수, 압축-휨 좌굴 성능, 라인파이프 강관

1. 서 론

현재 전세계에 걸쳐 고강도 강재를 이용한 다양한 대규모의 라인파이프 건설프로젝트가 수행되고 있으며 국내에서도 해양용 고강도 강재를 개발하여 실제 구조물을 제작 및 사용하고 있다. 개발된 고강도 강재를 사용한 라인파이프는 압축-휨 좌굴에 견디는 변형 성능의 확보가 중요하며 현재 많은 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 라인파이프의 GTN 모델을 사용하여 고강도 강재의 연성거동을 모사하고 재료모델상수를 결정하여 비선형 유한요소해석을 수행하는 압축-휨 좌굴 성능의 평가 기법을 개발하였다.

본 연구에서는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS의 User Subroutine의 사용자 재료모델(UMAT)으로 GTN 모델을 작성하여 고강도 강재의 대변형 비선형 거동을 모사하였다. 모사된 재료모델을 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행하여 라인파이프 강관의 압축-휨 좌굴 성능 평가 기법을 개발하였다.

2. 라인파이프 강관의 비선형 해석

2.1. 압축-휨 좌굴 성능 평가 기법

* 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 g-zi@korea.ac.kr

** 학생회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 석·박사통합과정 fincher7vn@korea.ac.kr

*** 정회원 · 명지전문대학 토목과 조교수 ycyoon@mjc.ac.kr

**** 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 sangsu@korea.ac.kr

***** 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원 wycho@rist.re.kr

본 연구에서는 라인파이프 강관의 압축-휨 좌굴 성능을 평가하기 위해서 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 라인파이프의 표면에서 채취된 인장시편을 이용해 인장실험을 실시한 결과를 유한요소 재료모델을 통해 모사하였다. 이 때 사용된 재료모델의 적절한 모사 여부에 따라 압축-휨 좌굴 성능 평가가 크게 좌우된다. 모사된 비선형 유한요소 재료모델은 압축-휨 좌굴 실험을 비선형 유한요소해석에 사용되었으며 해석의 결과 라인파이프 강관의 한계압축변형률과 최대휨모멘트 등을 성능 평가의 기준으로 사용할 수 있었다.

2.2. GTN 모델

라인파이프의 표면에서 채취된 인장시편의 거동을 모사하기 위해서 적절한 재료모델의 선택이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 소성모델 중 손상모델을 포함하여 대변형 문제와 모사에 적합한 GTN 모델을 선택하여 인장실험 결과를 모사하였다. GTN 모델은 Gurson(1977)이 재료의 연성파괴를 재료 내부의 공극(Void)의 생성(Nucleation), 성장(Growth), 합체(Coalescence)로 모사한 모델을 Tvergaard와 Needleman(1984)이 수정하여 발표한 것으로 식 (1)과 같은 항복 조건과 식 (2)와 같은 유효공극체적비율을 제시한다.

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

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

식 (1)에서 σ_y, p, q 는 각각 재료의 항복응력, 정수압 응력, 등가응력을 나타내고, q_1, q_2, q_3 는 재료의 항복을 결정하는 재료상수이다. 식 (2)에서 $f_c, \bar{f}_F, \bar{f}_F$ 는 각각 임계공극체적비율, 과단공극체적비율, 과단 값을 의미한다. 식 (3)은 공극의 생성에 관한 확률적 분포를 나타내며, $\bar{\epsilon}_m^p, \epsilon_N, s_N, f_N$ 은 각각 등가소성변형률, 표준정규분포의 평균, 표준편차, 공극의 생성이 가능한 공극체적비율을 의미한다. 변형경화는 지수함수 관계식을 사용했다.

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

ABAQUS의 User Subroutine의 사용자 재료모델(UMAT)으로 GTN 모델을 작성하여 인장실험 결과와 비교하여 전술한 재료모델 식에서 사용된 상수 $q_1, q_2, q_3, \sigma_y, f_c, \bar{f}_F, \epsilon_N, s_N, f_N$ 와 변형경화지수 N 과 초기 공극체적비율인 f_o 를 결정하였으며 결과는 표 1과 같다.

표 1 최종 재료모델 상수 값

변수	s_N	ϵ_N	f_N	q_1	q_2	q_3	f_o	f_c	\bar{f}_F
도출값	0.1	0.3	0.0008	1.5	1.0	2.25	0.000125	0.015	0.25

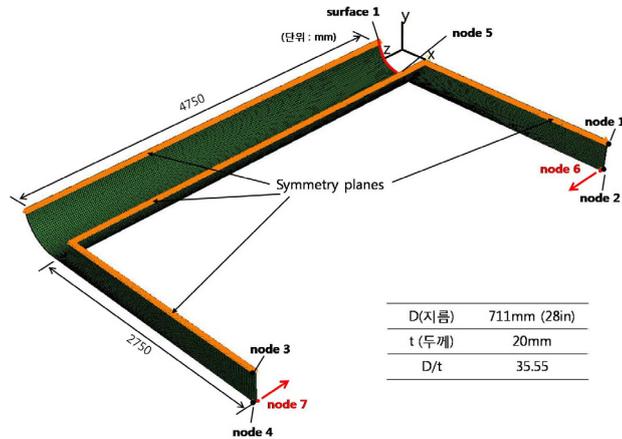
2.3. 압축-휨 좌굴 실험 모사

라인파이프의 압축-휨 좌굴 실험은 그림 1(a)와 같이 수행되었으며 이를 모사하기 위해 그림 1(b)와 같은 유한요소 모델을 사용하였다. node 6과 7을 변위제어로 당겼으며 라인파이프에 부착된 판은 강성을 높혀 좌

이프에 힘을 가하는 역할을 하도록 하였다.



(a) 좌굴 실험 시편



(b) 유한요소 모델

그림 1 좌굴 실험 시편 및 모델

3. 압축-휨 좌굴 성능 평가

3.1. 평가 기준 선정

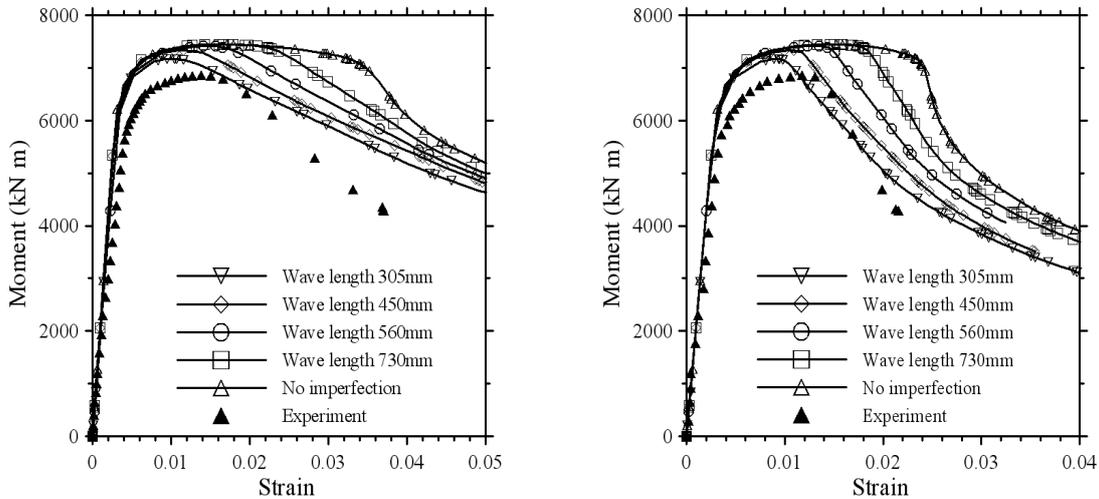
압축-휨 좌굴 성능 평가의 기준을 선정하기 위해 비선형 유한요소해석의 결과를 가공하였다. 실험시 라인 파이프 강관의 외부에 부착된 tiltmeter의 결과를 이용하여 측정된 미세 각도 변위를 식 (4)와 같이 압축변형률의 형태로 치환하였다.

$$\epsilon_c = \frac{\kappa D}{2} \quad (4)$$

여기서 κ 는 tiltmeter의 구간별 각도 변위의 차이를 이용하여 계산된 곡률을 나타내며 l, D 는 각각 tiltmeter 사이의 거리와 파이프의 외경을 의미한다. 또한 그림 1(b)의 node 6과 7에서 얻어진 반력을 판의 길이와 곱해 휨모멘트로 치환하여 휨모멘트-압축변형률 곡선으로 나타내었다. 휨모멘트의 최대값을 최대휨모멘트라 하고 최대휨모멘트에서의 압축변형률 값을 한계압축변형률이라 명명하며 라인파이프의 압축-휨 좌굴 성능 평가의 지표로 사용될 수 있다.

3.2. 압축-휨 좌굴 성능 평가

라인파이프 강관의 제작 시 생기는 제작오차를 고려하기 위해 blister라는 sin함수 형태의 초기부정 조건을 라인파이프 강관의 모델에 대입하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. blister는 파이프의 높이에 따라 파이프의 반경을 변화시켜 모사하였으며 초기 부정 파장에 따른 결과를 그림 2에 도시하였다. 실험결과와 약 10%의 이내의 오차를 보임을 확인할 수 있다. 한계압축변형률과 최대휨모멘트는 표 2에 나타내었다.



(a) 모멘트-압축변형률 곡선 (게이지 길이 D) (b) 모멘트-압축변형률 곡선 (게이지 길이 3D)
그림 2 유한요소해석 결과와 실험결과의 비교

표 2 해석 결과

wave length [mm]	최대휨모멘트[kNm]	한계압축변형률 D	한계압축변형률 3D
실험	6856.11	0.01419	0.01187
No imperfection	7448.40	0.01704	0.01524
305	7169.38	0.01035	0.00930
450	7338.84	0.01158	0.01087
560	7416.48	0.01494	0.01298
730	7448.18	0.01595	0.01453

4. 결론

본 연구에서는 라인파이프 강관의 압축-휨 좌굴 성능을 평가하기 위해서 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 라인파이프의 표면에서 채취된 인장시편을 이용해 인장실험을 실시한 결과를 GTN 모델을 통해 모사하였다. GTN 모델은 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS의 사용자 재료모델을 사용하여 작성되었으며 인장실험 결과를 적절히 모사하는 재료모델상수를 결정하였다. 모사된 GTN 재료모델은 압축-휨 좌굴 실험을 비선형 유한요소해석에 사용되었으며 실험결과와 약 10% 오차 이내의 결과를 도출하였다. 해석의 결과는 라인파이프 강관의 한계압축변형률과 최대휨모멘트 등을 성능 평가의 기준으로 사용할 수 있으며 초기부정에 대한 추가적인 실험을 통해 보다 명확한 결과를 도출할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 포항산업과학연구원 라인파이프의 비선형 해석 및 압축변형률 성능 분석 시스템 구축 사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 포항산업과학연구원의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 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*, 99, pp.2~15.
- Tvergaard, V. and Needleman, A. (1984) Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metall*, 32(1), pp.157~169.