

보와 아치의 좌굴강도에 관한 연구의 필요성

The Need for Research about Buckling Strength of Arch and Beam

임 남 형* · 이 진 옥** · 류 효 진*** · 이 우 철**** · 구 소 연*****
Lim, Nam-Hyoungh · Lee, Chin-Ok · Ryu, Hyo-Jin · Lee, Woo-Chul · Koo, So-Yeun

ABSTRACT

In current specification, modification factor(B) for web-tapered beam is used to account for the stress gradient and the restraining effect for adjacent spans. However, because these effects are considered together in modification factor, this paper reevaluate the accuracy of the modification factor used in current specification. Also this paper investigate the flexural torsional buckling strength of laterally fixed thin-walled arch with doubly symmetric section using the analytical and numerical method. From this investigate the concept of effective length to consider the out-of-plane boundary condition for straight column or beam is not applicate for the flexural-torsional buckling of laterally fixed arches.

Keywords: buckling strength, tapered-beam, arch

1. 서 론

강재를 사용한 구조물의 설계에 있어서 각 부재들의 좌굴검토는 매우 중요한 설계 검토 인자이다. 본 연구에서는 국내 강구조물 설계 규준의 선진화 작업에 발맞추어 강구조물의 설계와 관련된 각종 설계 규준에서 검토되는 부재중 경제성과 고강도 강 등의 등장으로 인해 장스팬 거더교량과 강팔조 구조물에 사용이 증가하고 있는 변단면보의 현 시방규정의 문제점을 파악하여 향후 연구 방향을 제안하고자 한다. 또한 직선보에 비해 상당히 복잡한 구조적 거동 특성으로 아직까지 설계치침이 미흡한 아치 구조물에 대해 다양한 경계조건에 따라 정확하게 좌굴강도를 평가할 수 있는 연구 방법을 제안해 구조물의 안전성 평가에 기여하고자 한다.

2. 변단면보의 탄성좌굴강도

현재 AISC-LRFD 시방서(1994) 규정에는 단면의 깊이가 변하는 웹 변단면 보의 좌굴강도를 단

* 정회원 · 충남대학교 토목공학과 조교수 Email: nhrim@cnu.ac.kr
** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 Email: colee@cnu.ac.kr
*** 충남대학교 토목공학과 박사과정 Email: zino98@hanmail.net
**** 충남대학교 토목공학과 박사과정 Email: woochul@cnu.ac.kr
***** 충남대학교 토목공학과 박사과정 Email: kitigu@cnu.ac.kr

면의 깊이가 작은 단면을 기준으로 보의 비지지 길이를 수정한 등단면 보로 환산하여 식(1)을 사용하여 좌굴강도를 평가하고 있다. G.C. Lee(1972)등의 연구 결과를 사용하고 있는 현 AISC-LRFD 시방서의 변단면 보의 휨-비틀림 좌굴강도 평가식에서 사용되는 식(2)의 수정계수 B는 모멘트에 의한 휨 응력구배 영향과 인접한 보의 구속효과가 동시에 고려되고 있다.

$$M_n = \left(\frac{5}{3}\right) S_x' F_{br} \quad (1)$$

$$F_{br} = B \sqrt{F_{gy}^2 + F_{wy}^2} \quad \text{for } F_{br} \leq F_y/3 \quad (2)$$

등단면 보의 경우에는 모멘트 구배효과와 경계조건의 효과가 복잡하게 좌굴강도에 영향을 미치고 있으므로 현 시방규정과 같이 이 두가지 효과가 하나의 수정계수 "B"에 동시에 고려되는 것은 합리적이지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 범용유한요소 프로그램(ABAQUS 6.5, S8R5의 쉘 요소 사용)을 사용하여 현 시방규정의 좌굴강도를 비교 분석하였다.

그림 1과 같이 현재 AISC-LRFD 시방서 규정의 4가지 경우에 대한 좌굴강도와 유한요소 해석 결과를 통해 얻은 좌굴강도를 비교하면 그림 2에서 보는 바와 같이 case 1인 경우 11%, case 2인 경우 14%, case 3인 경우 47%, case 4인 경우 5% 발생하였다. 따라서 변단면보의 정확한 좌굴강도 평가를 위해 현 시방규정을 재평가할 필요가 있음을 확인하였다.

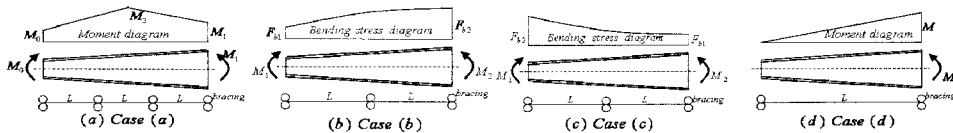


그림 1 AISC-LRFD 시방서의 4가지 CASE

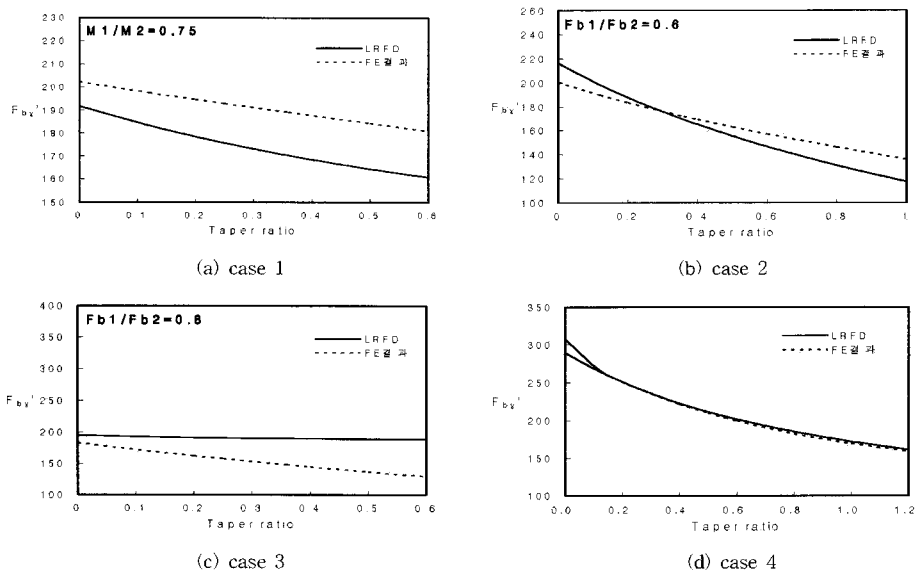


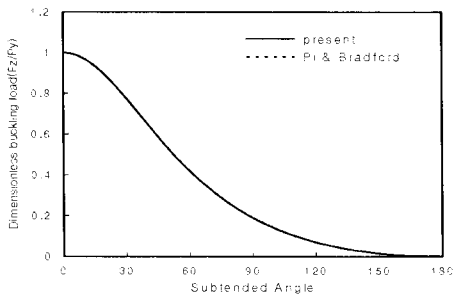
그림 2 한계좌굴강도 비교

3. 아치의 좌굴강도

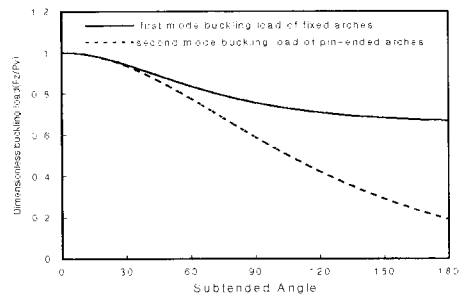
본 연구에서는 면의 경계조건의 변화에 따라 직선부재의 좌굴하중을 결정하는데 유용하게 사용되는 유효 좌굴길이의 개념을 아치 구조물에 적용하기 위해 고려되어야 할 문제점을 제시하고자 한다.

여러 가지 경계조건을 가진 직선부재에 대한 좌굴하중은 'effective length'의 개념을 도입함으로써 단순 지지된 직선부재의 좌굴하중과 관련시킬 수 있다. 이 개념은 양단이 단순 지지된 직선부재의 좌굴하중 R_{pin} 이 기준이 되며 이것은 부재 길이 L_{pin} 의 함수이다. 양단이 고정된 직선부재의 좌굴하중 R_{res} 를 구하기 위해서는 R_{pin} 을 구할 때 사용된 같은 식을 사용하지만 이때에는 유효길이 $L_{eff}(=K_{eff}L_{pin})$ 를 사용하며 이때 K_{eff} 는 유효길이계수이다. 알려진 바와 같이 양단이 단순 지지된 경우 K_{eff} 는 1을 사용하고 양단이 고정된 경우 K_{eff} 는 0.5를 사용한다. 따라서 균일 압축하중을 받는 양단의 면외 방향 휨이 구속된 직선부재의 1차 모드에 대한 좌굴하중은 양단이 단순 지지된 직선부재의 2차 모드에 대한 좌굴하중과 같다.

이와 같은 방법으로 직선부재의 'effective length'의 개념을 도입하여 균일 압축하중을 받는 아치의 탄성 휨-비틀림 좌굴하중을 구해 보았다. 먼저 아치의 양단이 횡으로 단순 지지된 경우 좌굴변위를 sine 함수로 가정하여 본 연구에서 제안된 안정방정식을 이용한 좌굴하중과 Y-L Pi and M.A. Bradford(2004)의 좌굴하중을 비교하여 그림3(a)에 나타내었다. 아치의 양단이 면외 방향 휨이 구속된 경우에는 좌굴변위를 cosine 함수로 가정하여 좌굴하중을 구하였다. 이때 'effective length'의 개념을 아치에 적용할 수 있는지를 파악하기 위해 단순 지지된 아치의 2차 모드에 대한 좌굴하중과 면외 방향 휨이 구속된 아치의 1차 모드에 대한 좌굴하중을 비교하여 그림 3(b)에 나타내었다. 그 결과 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 'effective length'의 개념을 그대로 적용하는 것은 적합하지 않음을 확인하였다. 그 이유로는 균일 압축하중을 받는 아치의 면외 좌굴은 휨과 비틀림이 연계된 좌굴현상을 나타내는데 그림 4와 같이 비틀림 모드가 아치의 내부 중심각에 따라 복잡한 형상으로 나타내고 있기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 양단이 횡으로 단순 지지된 경우



(b) 양단의 면외 방향 휨이 구속된 경우

그림 3 경계조건에 따른 좌굴하중

그림 4에서 보는 바와 같이 본 연구진이 개발한 유한요소 프로그램을 사용하여 양단의 면외 방향 휨이 구속된 아치의 수치해석 결과 비틀림 회전변위는 아치의 곡률이 커질수록 즉, 내각이 커질수록 3차 모드의 영향이 커지는 것으로 나타나 아치의 좌굴변위 함수로 직선부재에서 사용하는 cosine 함수를 그대로 사용하는 것은 오류가 있음을 확인하였다.

따라서 단순한 해석적인 방법으로 아치의 다양한 경계조건을 고려한 좌굴하중 산정에는 한계가 있으므로

모드의 기여도에 따른 보다 정확한 좌굴하중을 산출하기 위해서는 수치해석적인 방법으로 접근하여 합리적으로 아치의 좌굴강도를 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.

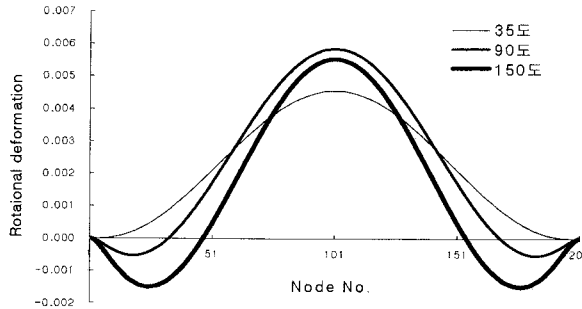


그림 4 양단이 횡으로 고정된 아치의 비틀림 회전변위

4. 결론

본 연구에서는 변단면보의 정확한 좌굴강도 평가를 위해 현 시방규정을 재검토 해야 할 필요성과 다양한 경계조건에 따른 아치의 좌굴강도를 단순히 해석적인 방법으로 접근하기에는 한계가 있음을 확인하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 변단면보의 휨 응력구배 영향과 인접한 보의 구속효과뿐만 아니라 브레이싱의 위치 효과와 하중고의 영향을 고려하고 비탄성 영역으로까지 확장하여 보다 정확한 좌굴강도를 평가할 수 있도록 해야 하며, 곡선보에 대한 정확한 이론을 바탕으로 아치의 다양한 경계조건에 따른 거동을 효율적으로 나타내기 위해 수치해석적인 방법으로 접근할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- AISC (1994) *Manual of Steel Construction, LRFD*, 2nd Edition.
- G.C.Lee, M.L.Morrell, and R.L. Ketter. (1972) Design of Tapered Members, *WRC Bull.* No. 173
- Dimos Polyzois & Ioannis G.Raftoyiannis. (1998) Lateral-Torsional Stability of Steel Web-Tapered I-Beams, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 124(10), pp.1208-1216
- Papangelis, J.P. , and Trahair, N.S. (1987) Flexural-Torsional Buckling of Arches, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 113(4), pp.889-906
- Kang, Y.J. , and Yoo, C.H. (1994) Thin-Walled Curved Beams. I: Formulation of Nonlinear Equations, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(10), pp.2072-2101
- Yong-Lin Pi and Mark Andrew Bradford (2004) Elastic Flexural-Torsional Buckling of Fixed Arches, *Oxford University Press*, pp.551-569