

브레이스트 아치 리브의 면내 좌굴 및 극한강도 평가

Evaluation of In-plane Buckling and Ultimate Strength for Braced Arch Ribs

박 용 명¹⁾ · 허 택 영²⁾ · 이 필 구³⁾ · 노 경 배⁴⁾

Park, Yong Myung Heo, Taek Young Lee, Pil Goo Noh, Kyeong Bae

요 약 : 본 연구에서는 원형 강관을 수직 브레이스로 연결한 아치 리브의 면내 좌굴강도 및 극한강도를 평가하기 위한 매개변수 해석 연구를 수행하였다. 브레이스트 아치 리브의 탄소성 거동은 하중의 재하 상태와 아치 곡률뿐만 아니라 일반 단일 아치 리브와 달리 강관리브와 브레이스 부재의 휨강성비, 브레이스의 배치 간격, 강관 리브의 배치간격 등에 영향을 받게 된다. 이러한 영향을 분석하기 위해 본 해석에서는 라이즈비, 리브와 브레이스의 단면2차모멘트비, 수직브레이스의 간격비, 지간 대비 상·하 리브의 간격비, 초기 제작오차 및 세장비 등을 매개변수로 하고 하중의 재하 상태는 등분포 고정하중에 대한 활하중의 비를 고려하였다. 이러한 매개변수에 대한 해석 결과로부터 브레이스트 아치 리브의 적정 형상을 제안하였다. 또한, 브레이스트 아치 리브의 극한강도 평가를 위한 대형 구조 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 해석에 의한 결과와 비교적 일치하였다.

ABSTRACT : The parametric analysis of vertically braced steel pipe arch ribs was performed to evaluate their in-plane buckling strengths and ultimate load-carrying capacities. The elastic and plastic behavior of braced arch ribs, unlike those of the usual single arch ribs, are affected by such factors as the flexural rigidity of the brace member, brace and pipe ribs spacing, loading situation, and arch curvature. To analyze these effects, several parameters were included, such as the rise-to-span ratio, the second moment of the inertia ratio of the rib to the brace member, the space ratio of the brace, the space ratio of the upper and lower ribs, the initial crookedness, the slenderness ratios of the braced arch ribs, and the loading conditions were considered with live-load-to-dead-load ratios. Based on the results of the parametric analyses, a proper profile of the braced arch rib was proposed. A large-scale structural experiment was also performed to evaluate the ultimate strength of the braced arch rib. The test results were determined to reasonably coincide with the analytical ones.

핵심용어 : 브레이스트 아치 리브, 면내 좌굴강도, 극한강도, 하중비, 라이즈비, 브레이스 부재 휨강성비, 브레이스 간격비, 세장비

KEYWORDS : braced arch rib, in-plane buckling strength, ultimate strength, live load to dead load ratio, rise to span ratio, flexural rigidity ratio of brace member, space ratio of brace, slenderness ratio

1. 서론

아치는 주로 축방향 압축력으로 외력에 저항하도록 하는 평면 곡선부재나 구조물로서 실제의 아치 구조물은 축력과 휨 모멘트가 조합되어 외부 하중에 저항하고, 종국적으로는 과도한 휨 또는 좌굴에 의해 비탄성적으로 파괴된다(Pi 등, 1996 : Yuhshi, 1997). 강재 아치의 탄성 및 비탄성 좌굴은 광범위하게 연구가 되어 왔으며 비탄성 거동에 대한 다양한 연구

결과가 발표되고 있다.

먼저, Timoshenko와 Gere(1961), Austin(1971) 등은 기하학적으로 완전한 아치에 대해 아치의 모든 단면에서 순수 축력에 의한 유발하는 등단면 아치의 좌굴을 고려하였다. 그리고 축방향 압축변형률은 무시하고, 등분포 하중이 작용하는 2힌지, 3힌지 및 고정 아치의 수평반력의 임계값을 제시하였다.

Austin과 Ross(1976)는 2힌지와 고정지지의 포물선 및

1) 정회원, 부산대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
(Tel: 051-510-2350, Fax: 051-513-9596, E-mail: ympk@pusan.ac.kr)
2) 부산대학교 토목공학과 박사수료(ttyheo@yahoo.co.kr)
3) 정회원, RIST 강구조연구소 토목구조연구팀 선임연구원(pg289@rist.re.kr)
4) (주)백송엔지니어링 대표이사

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

원형 아치가 아치 축선을 따라 등분포 연직하중을 받는 경우에 대해 축방향 변형률을 무시하고 탄성좌굴 하중계수를 제시하였다.

Komatsu와 Shinke(1977)는 등분포하중을 받고 있는 양단 힌지 포물선 아치의 비탄성 극한강도를 연구하였으나, 아치의 라이즈비 (f/L)를 0.1에서 0.2로 제한하였다. 그리고 설계식은 지점부에서 축방향 압축력의 함수로 나타내었다.

한편, 비대칭하중이 작용하는 아치의 거동은 Deutsch(1940)가 처음으로 연구하였으며, 그 이후 Harries(1970), Kuranishi와 Lu(1972) 등이 연구를 수행하였고 활하중은 지간의 절반 구간에만 재하한 상태를 고려하였다. Kuranishi와 Lu는 고정하중과 절반 구간 재하 활하중을 합친 총하중 강도에 대한 탄성 좌굴 하중은 등분포하중이 전체 지간에 작용하는 하중에 대한 좌굴하중과 근사적으로 비슷함을 보였다.

Yabuki와 Vinnakota(1984)는 등분포 고정하중과 지간의 절반에만 활하중이 작용하는 등단면 2힌지 포물선 아치의 극한하중 전달능력에 대한 다양한 매개변수의 영향을 연구하였으나, 이 연구에서는 선형이론으로 극한하중을 계산하였다.

Cheng 외(2002)는 장경간의 강재 아치교에 대해 정적 및 극한거동을 연구하였으며 장경간 아치교의 극한하중 전달능력 해석과 안전도 평가는 기하학적 및 재료 비선형 좌굴에 바탕을 두어야 함을 보였다. 그리고 장경간 아치교의 면내 파괴메카니즘을 소성영역의 분포를 추적하여 설명하였다.

Pi와 Bradford(2003)은 아치의 3차원 비선형 탄소성 해석에 대해 합리적인 유한 곡선 요소 모델을 제시하고 중앙부에서 집중하중을 받는 아치의 탄소성 휨-비틀림 좌굴과 후좌굴 거동을 연구하였다.

Cheng 외(2003)는 3차원 유한요소모델을 통해 정적 풍하중이 작용하고 있는 교량의 극한하중 전달능력을 기하학적 및 재료 비선형성 모두 고려하여 연구하였으며 작용하는 풍하중이 증가할 때 극한하중 전달능력은 현저히 감소함을 보였다.

그리고 국내에서도 아치에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 허택영 외(2004)는 탄성 및 비선형 해석으로 브레이스트 리브 아치의 면내 좌굴강도, 응력 및 극한하중 전달능력을 평가하고 적정 단면의 범위를 제시하였다.

김일태 외(2004)는 아치 리브의 경계조건, 재료의 항복응력, 하중조건, 횡지지 및 세장비 등을 고려하여 원형 아치 리브의 극한거동 및 파괴모드에 대해 해석적으로 연구하였다.

임남형 외(2003)은 최소 포텐셜 에너지 방법을 사용하여 등분포 모멘트 또는 등분포 압축을 받는 연속적으로 브레이스트된 이축 대칭 단면 아치의 탄성 좌굴에 관한 연구를 수행하였다.

앞에서 서술한 대부분의 연구는 단일 리브(single rib)로

된 아치에 대해 제한되어 있으며, 이러한 연구 결과를 브레이스트 아치 리브(braced arch rib)에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 즉, 브레이스트 아치 리브는 리브와 리브를 서로 수직 브레이스로 연결하여 구성되는 구조이므로 리브와 브레이스 부재의 휨강성비, 브레이스의 설치 간격, 리브의 설치 간격 등을 포함하여 리브와 브레이스의 상호작용 효과를 고려하여야 한다. 이렇게 다양한 매개변수의 변화에 따라 브레이스트 아치의 좌굴강도 역시 크게 변화하게 되고 극한강도 또한 단일 리브 아치와 다른 특성을 나타내게 된다.

본 연구에서는 원형 강관을 브레이스로 연결한 브레이스트 아치의 탄성 좌굴강도, 응력 변동, 그리고 극한강도를 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 라이즈비, 리브와 브레이스의 휨강성비, 수직브레이스의 간격비, 지간 대비 상·하 리브의 간격비, 초기 제작오차 및 세장비 등을 매개변수로 한 해석을 수행하였다. 한편, 하중은 등분포 고정하중에 대한 활하중의 비를 고려함으로써 편재하 상태를 모사하였다.

매개변수 해석 결과를 토대로 브레이스트 아치의 형상 및 단면 산정에 필요한 매개변수의 범위를 제시하였다. 또한, 브레이스트 아치의 극한강도 평가를 위한 대형 구조 실험을 수행하였으며, 구조 실험 결과는 해석적 결과와 비교적 일치하는 결과를 보였다.

2. 브레이스트 아치의 형상 및 하중조건

2.1 개요

브레이스트 아치는 그림 1 및 그림 2에서와 같이 원형 강관 단면으로 된 리브를 강관 단면의 브레이스로 연결하여 상·하부 리브가 일체로 거동하도록 한 것이다. 이러한 아치는 단면적이 동일한 단일 리브 아치와 비교하면 강성이 매우 크게 되므로 특히 비대칭하중이 작용하는 경우 면내 좌굴 및 극한강도를 증가시킬 수 있다. 반면에, 아치는 상·하부 리브를 연결하는 브레이스로 인해 보통의 단일 리브 아치와 다른 거동 특성을 나타낸다. 이러한 아치의 형상은 그림 1에 도시하였으며, 정점(crown)의 단면은 그림 2와 같고 브레이스트 아치 리브의 도심 축선에 대한 높이 (f)와 지간 (L)은 그림 3과 같다. 지지조건은 양단 고정 지지인 경우로 고려하였다. 또한 면외방향 거동은 완전히 구속되어 있는 것으로 가정하였다.

브레이스트 아치의 선형 탄성 및 비선형 거동을 분석하기 위해 강관의 재료는 STK490으로 선정하였다. 재료의 거동은 탄성-완전소성으로 이상화하고 변형을 강화는 고려하지 않았으며, 탄성계수는 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$, 항복점 응

력 $f_y = 3,200 \text{ kgf/cm}^2$ 로 고려하였다.

아치 리브는 정점에서 단면2차모멘트가 I_c 일 때 임의의 단면 위치에서 단면2차모멘트는 $I = I_c \sec\theta$ 로 변화하는 단면으로 가정하였다. 여기서, θ 는 임의의 단면 위치에서 수평선과 도심 축선의 접선이 이루는 각도이다. 한편, 매개변수로서 라이즈비 (f/L)는 0.1~0.4, 리브와 브레이스의 휨강성비 즉, 단면2차모멘트비 (I_r/I_b)는 1~200, 상·하 리브 간 격비 (H/L)는 0.02~0.06, 브레이스 간격비 (B/H)는 1 및 2를 고려하였으며, 초기 제작오차에 따른 극한강도의 평가를 위해 세장비 (λ)는 50~350의 범위를 고려하였다.

2.2 하중조건

매개변수 해석을 수행하기 위해 사용한 하중은 그림 1과 같으며 고정하중 (w)은 상부 리브의 전체 지간의 수평투영면에 등분포 재하하고 활하중 (p)은 상부 리브의 1/2지간에 등분포하는 것으로 고려하였다. 그리고 고정하중에 대한 활하중의 하중비 (p/w)는 0, 0.15, 0.5, ∞ 를 고려하였으며 하중비가 커질수록 편재하 상태가 된다. 해석시 고정하중과 활하중의 합은 $q = 1$ 로 일정하게 하였다.

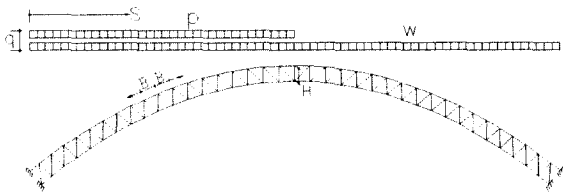


그림 1. 하중조건

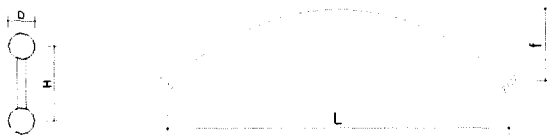


그림 2. 정점의 단면

그림 3. 도심축선에 대한 높이 및 지간

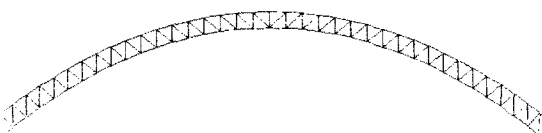


그림 4. 브레이스트 아치 리브의 임계 좌굴 모드

3. 브레이스트 아치의 탄성 좌굴강도

3.1 개요

브레이스트 아치 리브는 그림 4에서와 같이 항상 역대칭 모드로 좌굴을 일으키며 정점은 수평으로 이동하고 변곡점을 가지게 된다. 그리고 매개변수 해석을 위해 ABAQUS 5.8 프로그램을 사용하였으며 리브 및 브레이스의 각 부재는 보요소로 모델링하였다.

3.2 라이즈비(f/L)에 따른 임계 좌굴계수

그림 5는 단일리브 아치에 대한 임계 좌굴계수를 이론적인 값(Timoshenko와 Gere, 1961)과 ABAQUS 해석 결과를 서로 비교한 그림이다. 이 때 아치의 지지조건은 양단고정 및 양단힌지에 대해 고려하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 양단고정 및 양단힌지의 경우에서 라이즈비 (f/L)에 따른 이론치와 해석치는 거의 유사함을 알 수 있다.

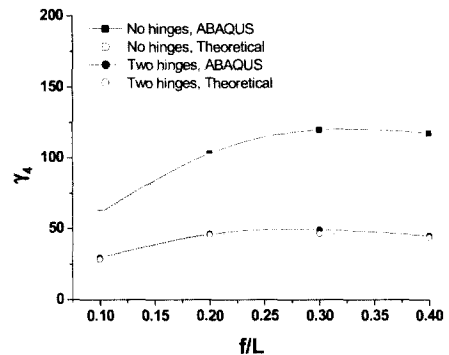


그림 5. f/L 비에 따른 임계 좌굴계수 비교

그림 6은 브레이스트 아치 리브에 등분포 고정하중이 작용할 때, 라이즈비 (f/L)와 브레이스 부재의 단면2차모멘트비의 변화에 따른 임계 좌굴계수를 등단면의 고정 단일 아치와 비교한 것이다.

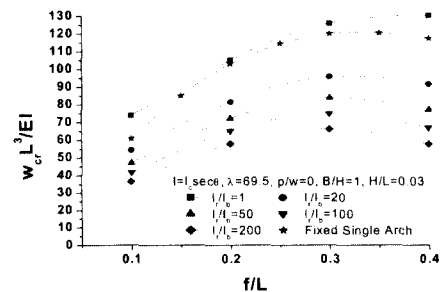


그림 6. f/L 비에 따른 임계 좌굴계수

이 때, 단일 리브 아치의 임계 좌굴계수는 다음과 같다 (Timoshenko와 Gere, 1961).

$$w_{cr} = r_4 \frac{EI}{L^3} \quad (1)$$

여기서, w_{cr} 은 전체 지간에 걸쳐 등분포된 하중이 작용할 때 임계 좌굴하중, r_4 는 임계 좌굴계수, EI 는 아치의 휨강성, 그리고 L 은 아치의 지간을 나타낸다. 그리고 브레이스트 아치 리브의 단면2차모멘트 (I)는 아치의 정점에서의 값이며 다음과 같이 계산한다.

$$I = 2I_o + \frac{A_o}{2} H^2 \quad (2)$$

여기서, I_o 및 A_o 는 아치 리브 한 개의 단면2차모멘트 및 단면적이고 H 는 그림 1에 보인 바와 같이 정점에서의 아치 리브 중심간 간격이다.

그림 6에서 보는 바와 같이 고정하중만 작용하는 경우에 브레이스트 아치 리브와 단일 아치 리브 모두 최대 임계 좌굴계수를 나타내는 라이즈비는 약 0.3정도였다. 그리고 단면 2차모멘트비 (I_r/I_b)에 관계없이 라이즈비에 따른 최대 임계 좌굴계수는 단일 아치와 유사한 경향을 보였으나, I_r/I_b 가 증가할수록, 즉 브레이스 부재의 단면2차모멘트가 작아질수록 최대 임계 좌굴계수는 감소하였다.

3.3 리브 간격비(H/L)에 따른 임계 고유치

그림 7은 리브간격비 (H/L)와 하중비에 따른 임계 고유치의 변화를 구한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중비가 증가하면 H/L 비가 작을수록 유리하고, 하중비가 0.5에서는 H/L 비가 0.03에서, 하중비 0에서는 H/L 비가 0.04에서 임계 고유치가 최대였다.

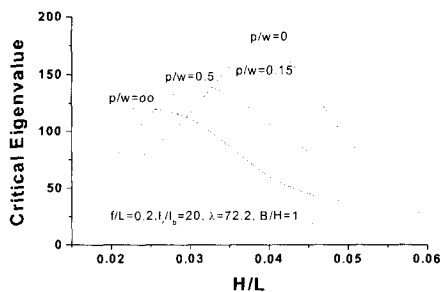


그림 7. H/L비에 따른 임계 고유치

3.4 단면2차모멘트비(I_r/I_b)에 따른 임계 고유치

그림 8은 브레이스 부재에 대한 리브 한 개의 단면2차모멘트비 (I_r/I_b)에 대해 임계 고유치의 변화를 나타낸 것이다. I_r/I_b 는 1, 20, 50, 100, 200을 고려하였으며, 고정하중에 대한 활하중의 비 (p/w)는 0, 0.15, 0.5 및 ∞ 에 대하여 해석하였다.

그림 8로부터 단면2차모멘트비 (I_r/I_b)가 증가함에 따라 임계 고유치는 급격하게 감소하다가 $I_r/I_b = 20$ 이후부터는 완만하게 감소하고 있다. 또한, 하중비 (p/w)가 증가함에 따라 임계 고유치도 증가하는 결과를 보였다.

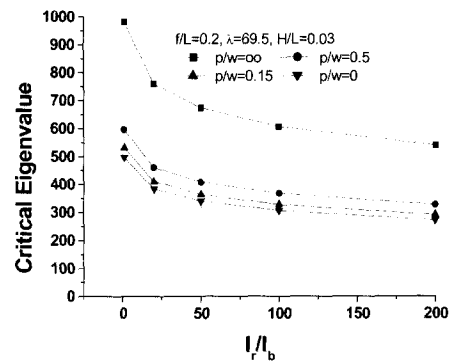


그림 8. I_r/I_b 비에 따른 임계 고유치

3.5 브레이스 간격비(B/H)에 따른 임계 고유치

그림 9는 브레이스 간격비 (B/H)가 1에서 2로 증가할 때 아치의 세장비 (λ) 변화에 대한 임계 고유치를 나타낸 것이다. 여기서 세장비는 다음과 같다.

$$\lambda = L_s/r \quad (3)$$

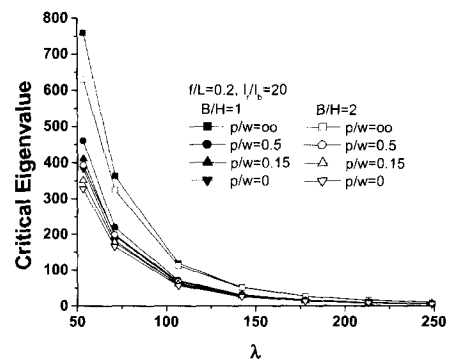


그림 9. B/H비에 따른 임계 고유치

식 (3)에서 L_s 는 아치 리브의 도심 축선에 따른 길이이고, r 은 아치 정점에서의 회전반경이다. 그림 9에서 세장비가 약 53이고 브레이스 간격비가 1에서 2로 증가하면, 하중비가 ∞ 일 때 임계 고유치의 감소량은 약 17%이고 하중비가 0.5, 0.15 및 0일 때 임계 고유치의 감소량은 모두 약 14.5%였다. 그리고 모든 하중상태에서 세장비가 약 110이 후에는 브레이스 간격비가 1에서 2로 증가해도 임계 고유치의 감소량은 약 5% 이내였다.

4. 브레이스트 아치의 탄성 응력

4.1 개요

라이즈비 (f/L), 리브 간격비 (H/L), 단면2차모멘트비 (I_r/I_b) 및 브레이스 간격비 (B/H)의 변화에 대한 브레이스트 아치의 탄성 응력의 변화를 분석하였다.

4.2 라이즈비(f/L)에 따른 탄성 응력

그림 10은 라이즈비 (f/L)의 변화에 대한 탄성 최대 응력의 변화를 나타낸 그림이다. 라이즈비가 증가함에 따라 최대 응력은 급격히 감소하고 라이즈비가 약 0.2 이후에서는 완만해지는 경향을 보였다. 그리고 하중비 (p/w)가 증가함에 따라, 즉 고정하중에 비해 활하중이 증가함에 따라 최대 응력도 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 편재하 효과로 인해 휨모멘트가 증가하기 때문이다.

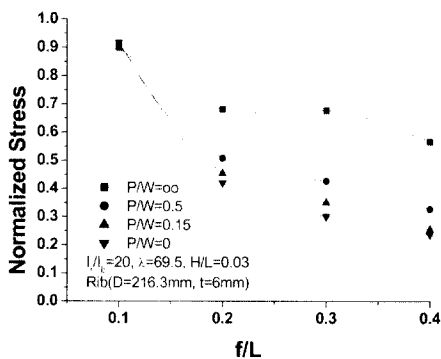


그림 10. f/L 비에 따른 탄성 최대 응력

4.3 리브 간격비(H/L)에 따른 탄성 응력

그림 11은 H/L 비에 따른 최대 응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중비 (p/w) = ∞

인 경우에는 H/L 가 증가할수록 유리한데 이는 고정단의 휨모멘트로 인해 리브 간격이 클수록 단면2차모멘트가 커지기 때문이다. 그러나, 하중비가 0.5 이하인 일반적인 경우는 H/L 비에 따른 응력의 변동은 미소함을 알 수 있다.

4.4 단면2차모멘트비(I_r/I_b)에 따른 탄성 응력

I_r/I_b 비에 따른 브레이스트 아치의 최대 응력의 변동을 분석하기 위해 f/L 비를 0.2로 일정하게 유지하고 I_r/I_b 비를 1에서 200까지 변화하여 해석을 수행한 결과는 그림 12와 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중비가 0인 경우 최대 응력은 I_r/I_b 비의 변화에 거의 무관함을 알 수 있고, 하중비가 ∞ 인 경우에도 $I_r/I_b = 20$ 이후부터는 응력의 큰 변동은 없다.

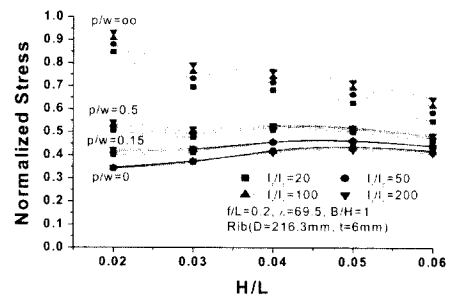


그림 11. H/L 비에 따른 탄성 최대 응력

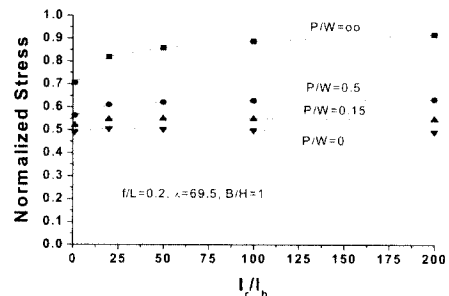


그림 12. I_r/I_b 비에 따른 탄성 최대 응력

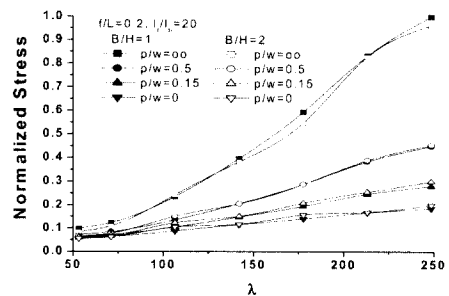


그림 13. B/H 비에 따른 탄성 최대 응력

4.5 브레이스 간격비(B/H)에 따른 탄성 응력

그림 13은 브레이스 간격비 (B/H)가 1에서 2로 증가할 때 최대 탄성 응력을 아치의 세장비 (λ) 및 하중비에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 세장비가 증가하고 하중비가 증가함에 따라, 즉 비대칭하중이 증가함에 따라 최대 응력은 증가하지만, 동일한 하중조건에서는 브레이스 간격비가 1에서 2로 증가해도 최대 응력의 변동은 거의 없다.

5. 브레이스트 아치의 극한강도

5.1 개요

브레이스트 아치는 일반적인 단일 아치 리브와는 달리 하중조건에 관계없이 축방향 압축력과 휨모멘트가 동시에 유발되고 상·하 리브에 발생하는 압축력과 휨모멘트의 크기도 서로 다르다.

브레이스트 아치의 극한강도를 평가하기 위해 강관 재료는 STK490, 항복점 응력은 $f_y = 3,200 \text{ kgf/cm}^2$ 로 하고 재료는 탄성-완전소성으로 이상화하였다. 기하 비선형성을 포함하였으며, 해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였다.

5.2 라이즈비(f/L)에 따른 극한하중 전달능력

브레이스트 아치의 라이즈비 변화에 따른 극한하중 전달능력(ultimate load-carrying capacity)을 분석하기 위해 f/L 비를 0.1에서 0.4의 범위로 설정하였다. 극한하중은 무차원화된 값 $(p+w)_{\max} / w_y$ 로 평가하였다. 단일 리브 아치에 대한 아치 지간의 단위길이당 등분포 극한하중의 크기는 Yabuki와 Vinnakota(1984)가 제안한 다음과 같은 식으로 산정할 수 있다.

$$w_y = \frac{2Af_y}{L\sqrt{\frac{1}{16}(L/f)^2 + 1}} \quad (4)$$

여기서, f_y 는 재료의 항복응력, A 는 아치의 단면적이고, f 와 L 은 아치의 높이와 지간이며, 식 (4)는 지점부에서 아치 단면의 항복 축력에 해당한다.

그림 14는 f/L 비에 따른 극한하중 전달능력을 나타내는 것으로, 대부분의 하중조건에서 f/L 비가 약 0.2에서 다소

유리하게 나타남을 알 수 있다.

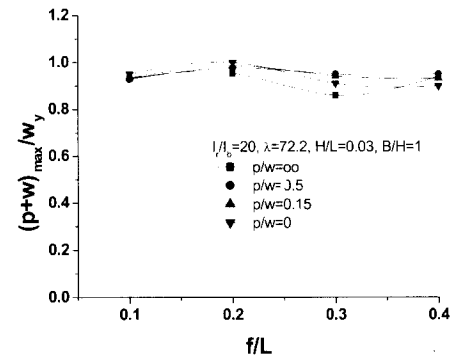


그림 14. f/L 비에 따른 극한하중 전달능력

5.3 리브 간격비(H/L)에 따른 극한하중 전달능력

그림 15는 아치의 지간에 대한 정점에서의 리브 간격비 (H/L)에 대한 극한하중 전달능력을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 고정하중만 작용하는 경우, 즉 하중비 (p/w)가 0인 경우의 극한하중 전달능력은 H/L 비에 무관하게 나타난다. 그러나 고정하중에 대한 활하중의 비가 증가하고 H/L 비가 감소할수록 극한하중 전달능력의 감소량은 증가하게 된다. 일반적으로 고정하중에 대한 활하중의 비가 0.5이하인 것을 감안하면 H/L 비는 0.03~0.04 정도가 적절하고 고정하중에 대한 활하중의 비가 작으면 H/L 비를 감소시켜 사용해도 될 것으로 판단된다.

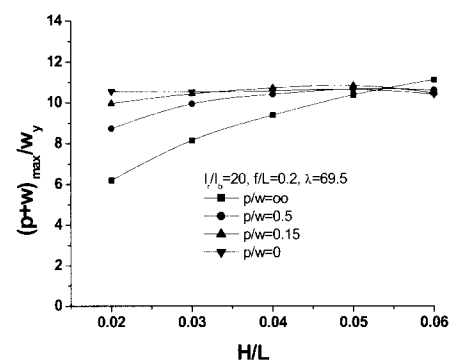


그림 15. H/L 비에 따른 극한하중 전달능력

5.4 단면2차모멘트비(I_y/I_b)에 따른 극한하중 전달능력

브레이스트 아치는 그림 1에서 알 수 있듯이 상·하부 리브와 이 두 리브를 일체로 연결하는 브레이스로 구성된다. 그러므로 브레이스트 리브 아치에서 브레이스의 역할은 아주 중요하다고 할 수 있다. 특히 브레이스의 구조 특성, 즉 연결

위치, 브레이스 부재의 휨강성과 길이 등은 아주 중요한 요소들이다. 이러한 요소 중에서 브레이스 부재의 리브에 대한 단면2차모멘트비(I_r/I_b)는 아주 중요한 요소 중의 하나이다.

따라서 I_r/I_b 비에 따른 브레이스트 리브 아치의 극한하중 전달능력을 알아보기 위해 f/L 비를 0.2로 일정하게 유지하고 I_r/I_b 비를 1에서 200까지 변화하여 비선형해석을 수행하였으며 그 결과는 그림 16과 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중비가 0.5이하에서 극한하중 전달능력은 I_r/I_b 비가 20 이상이면 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

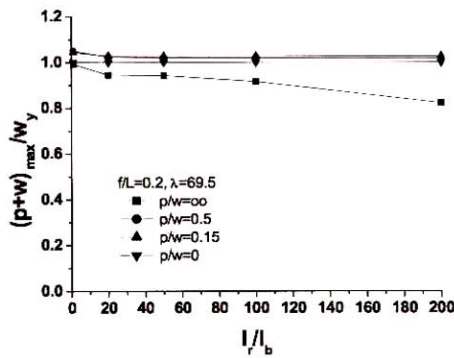


그림 16. I_r/I_b 비에 따른 극한하중 전달능력

5.5 브레이스 간격비(B/H)에 따른 극한하중 전달능력

브레이스 간격비(B/H)에 따른 극한하중 전달능력을 알아보기 위해 하중비(p/w)를 0에서 ∞ 까지 변화시키고 B/H 비는 1과 2인 경우에 대해 해석을 수행하였다. 결과는 그림 17에 나타내었으며, 세장비(λ)에 따른 극한하중 전달능력을 B/H 비 및 p/w 비에 따라 제시하였다.

p/w 비=0, 즉 전체 구간에 등분포하중이 작용하는 경우에는 세장비 250까지 극한하중 전달능력에 변화가 없다가 이후 탄성좌굴이 발생하여 극한내하력이 감소한다. 반면에, p/w 비가 증가함에 따라, 즉 고정하중에 대한 활하중의 비가 증가할수록 극한하중 전달능력은 세장비가 증가함에 따라 급격하게 감소한다.

그러나, 동일한 하중조건 하에서 B/H 비에 따른 극한하중 전달능력의 차이는 그다지 변동이 없다. 즉, 하중비가 0.5이하에서는 세장비가 50일 때 극한하중의 감소량은 약 5%이내이고 세장비가 100보다 큰 경우에는 극한하중의 감소량은 약 2%이내였다.

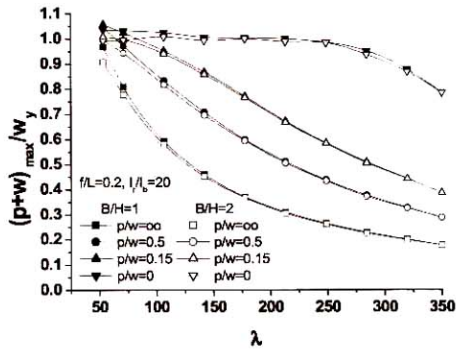


그림 17. B/H비가 1에서 2로 증가할 때 극한하중 전달능력

5.6 초기 제작오차에 따른 극한하중 전달능력

그림 18과 같이 초기 결함(initial crookedness)의 효과를 알아보기 위해 f/L 비는 0.2, I_r/I_b 비는 20, B/H 비는 1로 하고 하중비 p/w 는 0, 0.15 및 0.5인 경우에 대한 해석을 하였다. 초기 변위 v 는 다음과 같이 가정하였다.

$$\frac{v}{e} = \sin \frac{2\pi s}{L_s} \quad (5)$$

여기서, s 는 아치 축선 좌표이고 L_s 는 아치 축선의 길이이며 e 는 $L_s/1,500$ 인 경우를 고려하였다.

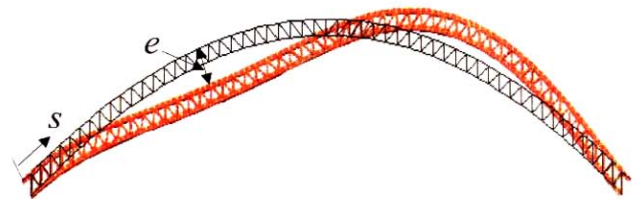


그림 18. 초기 제작오차를 고려한 형상

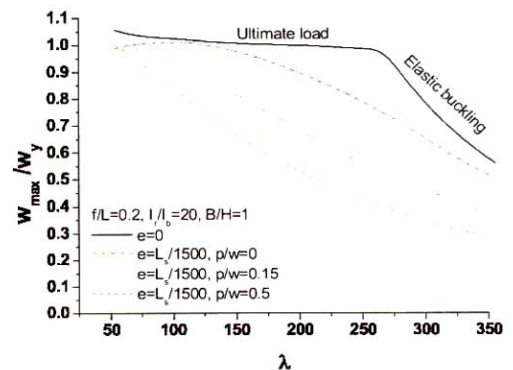


그림 19. 초기 제작오차에 따른 극한하중 전달능력

해석 결과, 세장비 (λ)에 대한 극한하중 전달능력의 변화를 하중비와 초기 변위에 따라 그림 19에 나타내었다. 그림 19는 하중비가 0, 0.15 및 0.5인 경우이며, 그림에서 실선은 하중비가 0이고 초기처짐이 없는 경우이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중비가 증가함에 따라 극한하중 전달능력은 급격히 감소한다. 그리고 하중비가 증가하면 초기변위의 영향도 점점 감소함을 알 수 있다.

6. 브레이스트 아치의 극한강도 실험

6.1 아치 실험체 형상 및 제원

브레이스트 리브 아치의 극한강도를 실험하기 위해 그림 20과 같은 시험체를 제작하였다. 시험체의 높이(f)는 3m, 지간(L)은 15m로서 라이즈비(f/L)는 0.2이다. 그리고 아치 정점(crown)에서 상부 리브와 하부 리브의 단면 도심 거리를 나타내는 리브 간격(H)은 0.6m로서 상·하 리브 간격비(H/L)는 0.04이다. 수직브레이스 간격은 1.2m로서 브레이스 간격비(B/H)는 2이다. 또한 리브의 직경은 216.3mm이고 두께는 6mm이며 이 때 아치 정점에서의 세장비는 약 54이다. 브레이스의 직경은 139.8mm이고 두께는 6mm인 원형단면의 강재를 사용하였으며, 단면2차모멘트비(I_x/I_y)는 4에 해당한다. 강재는 모두 STK490을 사용하였다.

6.2 하중 가력 위치 및 게이지 부착 위치

아치의 극한강도 실험을 위한 하중 가력 위치는 그림 20에 보인 바와 같이 아치 지간의 1/4지점으로서 비대칭 집중하중을 재하하였다. 시험체의 변형률을 측정하기 위한 변형률 게이지는 그림 20에 보인 것처럼 양단 지점부, L/4지점, L/2지점 및 3L/4지점의 리브와 브레이스에 부착하였으며 각 부재 단면의 상하좌우 4면에 부착하였다. 그리고 처짐을 측정하기 위한 변위계(LVDT)는 L/4지점과 3L/4지점에 연직, 수평 및 횡방향 변위를 측정할 수 있도록 설치하고 L/2지점에는 연직 및 횡방향 변위를 측정할 수 있도록 설치하였다. 그림 21은 시험체 설치 전경이다.

6.3 실험 결과 및 분석

그림 22는 실험 및 해석으로부터 구한 하중-변위 선도이며 변위는 L/4지점의 하부 리브에서 측정한 값이다. 그림에서 알

수 있듯이 실험 결과와 해석 결과에서 변형 거동은 항복점 도달시까지 거의 일치하였다. 시험체의 최대 하중은 81.71 tonf였으며, 이 때 그림 23과 같이 하중 가력부의 상부리브에서 강관의 국부좌굴이 발생하고 횡좌굴이 발생하였으며 이후 내하력의 증가가 없었다.

그림 24 및 25는 시험체 및 해석에 의한 하중강도별 처짐 형상을 각각 L/4지점, L/2지점 및 3L/4지점에서 측정하여 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험체와 해석에 의한 결과가 조금 차이가 있으나 대체로 유사한 변형거동을 보였다.

또한, 아치 상·하부 리브에 발생한 응력분포를 분석하기 위해 단부($s=0$), L/4지점($s=L/4$) 및 L/2지점($s=L/2$)에서 측정된 하중-변형률 관계를 그림 26 및 27에 나타내었다. 그림 26에 나타낸 것과 같이 상부 리브의 가력부 부근에서는 큰 압축응력을 받고 있으며 하면보다 상면에서 더 큰 압축응력을 받고 있다. 그리고 단부에서는 상면에서 휨모멘트에 의해 오히려 인장응력이 발생하고 그 외의 위치에서는 압축응력이 발생하는 것으로 측정되었다. 한편, 그림 27로부터 하부 리브는 하중 가력부에서 큰 인장응력을 받고 있으며 단부에서는 하면에서 큰 압축응력이 발생하였음을 알 수 있다.

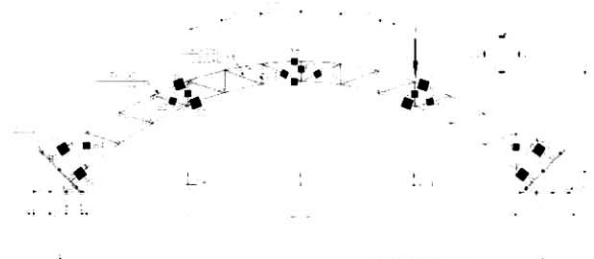


그림 20. 실험체 형상 및 게이지 부착 위치($B/H=2$)



그림 21. 실험체 설치 전경($B/H=2$)

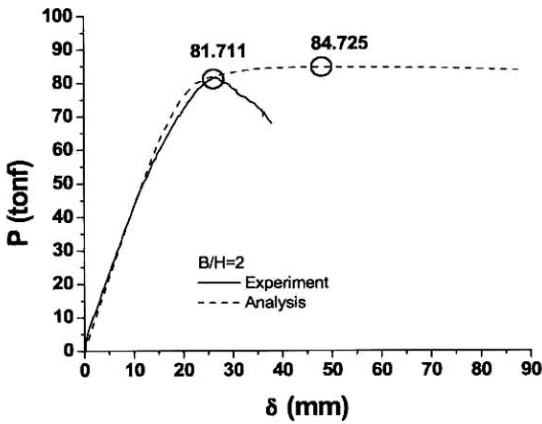


그림 22. 하중-변위 선도(B/H=2)

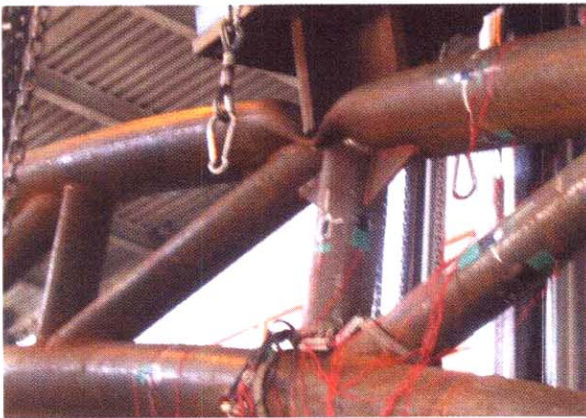


그림 23. 하중 가력부 국부좌굴 발생(B/H=2)

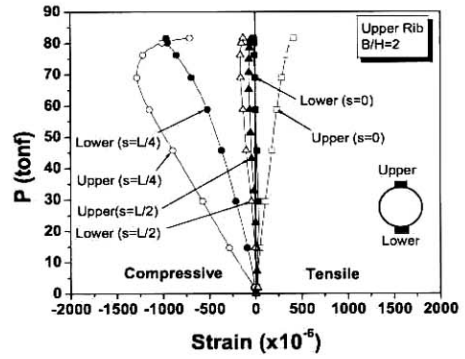


그림 26. 하중-상부리브 변형을 관계(B/H=2)

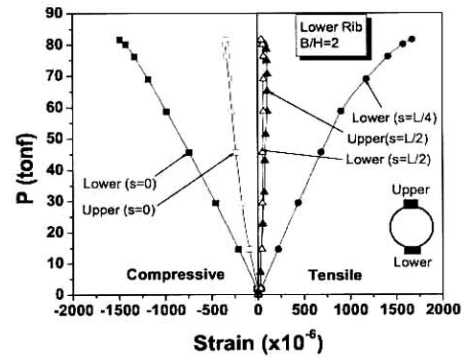


그림 27. 하중-하부리브 변형을 관계(B/H=2)

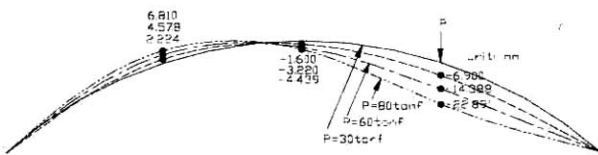


그림 24. 해석에 의한 하중강도별 처짐 형상(B/H=2)



그림 25. 실험체의 하중강도별 처짐 형상(B/H=2)

7. 결 론

본 연구에서는 원형강관들로 이루어진 브레이스트 아치 리브의 면내 좌굴강도, 응력 변동 및 극한강도를 평가하기 위한 매개변수해석을 수행하였다. 이 때 주요한 매개변수로는 고정 하중에 대한 활하중의 하중비, 라이즈비, 리브와 브레이스의 단면2차모멘트비, 리브 간격비, 브레이스 간격비, 초기 제작오차 및 세장비 등을 고려하였다. 또한 브레이스트 아치 리브의 극한강도를 평가하기 위한 대형구조실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 대칭 및 비대칭 분포하중을 받는 브레이스트 아치의 탄성 좌굴강도는 라이즈비 (f/L)가 약 0.3에서 최대가 되고 탄성 응력 및 극한강도 측면에서는 약 0.2가 적절한 것으로 평가되었다.
- (2) 리브에 대한 브레이스 부재의 단면2차모멘트비 (I_r/I_b)의 영향은 아치의 탄성 좌굴강도, 응력 및 극한강도 측면에서 최소 20 정도를 확보하여야 하는 것으로 나타났다.

- 다.
- (3) 리브 간격비 (H/L)의 영향은 탄성 응력 및 극한강도 측면 약 0.03~0.04 범위가 적절한 것으로 평가되었다.
 - (4) 브레이스 간격비 (B/H)는 1에서 2로 증가할 때, 탄성 응력은 거의 변동이 없으나, 극한강도는 세장비 50일때 약 5% 감소하고 세장비가 커짐에 따라 감소량은 줄어들었다.
 - (5) 초기 제작오차로 인한 극한하중 전달능력은 하중비가 증가하고 세장비가 증가함에 따라 급격히 감소하였다. 그리고 하중비가 증가하면 초기 변위의 영향도 점점 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 (재)포항산업과학연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

허택영, 박용명, 이필구 (2004), 브레이스트 리브 아치의 면 내 안정 및 극한강도, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, pp. 517-523.

김일태, 권영봉, 이완수, 이용훈 (2004), 상로 아치교의 강관 아치 리브의 극한 거동에 관한 연구, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, pp. 509-516.

임남형, 박남희, 강영종 (2003), 연속적으로 브레이스된 아치의 탄성 좌굴, 대한토목학회 논문집, Vol. 23 No. 3A, pp. 521-526.

Austin, W. J. (1971), In-plane bending and buckling of arches, *ASCE J. Struct. Div.*, Vol. 97, No. ST5, pp. 1575-1592.

Austin W. J., and Ross, T. J. (1976), Elastic buckling of arches under symmetrical loading, *ASCE J. Struct. Div.*, Vol. 102, No. ST5, pp. 1085-1095

Deutsch, E. (1940), Das Knicken von bogenträgern bei unsymmetrischer belastung, *Bauingenieur*, Dec., pp. 353-360.

Harries, H. (1970), Traglast stahlerner zweigelenkbogen mit ausgebreiteten Fliesszonen, *Stahlbau*, Vol. 6, pp. 170-177; Vol. 8, pp. 248-257.

Komatsu, S., and Shinke, T. (1977), Practical formulation for in-plane load carrying capacity of arches, *Proc., Japan Soc. of Civ. Engrs.*, Tokyo, Japan, No. 267, pp. 39-52.

Pi, Y. L. and Trahair, N. S. (1996), In-plane inelastic buckling and strengths of steel arches, *J. Struc. Eng.*, Vol. 122, No. 7, pp. 734-747.

Theodore V. Galambos. (1998), Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 5th ed., A Wiley.

Timoshenko, S. P., and Gere, J. M. (1961), Theory of elastic stability, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

Yabuki, T., and Vinnakota, S. (1984), Stability of steel arch-bridges, A state-of-the-art report," *Solid Mech. Arch.*, Vol. 9, Issue 2, Noordhoff international Publishers, Leyden, The Netherlands.

Yuhshi Fukumoto. (1997), Structural Stability Design-Steel and Composite Structures, Pergamon

Cheng J., Jiang J. J., Xiao R. C., and Xiang H. F. (2002), Ultimate behavior of long-span steel arch bridges, *Structural Engineering & Mechanics*, Vol. 14 No.3, pp. 331-343.

Cheng J., Jiang J. J., Xiao R. C., and Xiang H. F. (2003), Ultimate load carrying capacity of the Lu Pu steel arch bridge under static wind loads, *Computers and Structures*, Vol. 81, pp. 61-73.

Pi Y. L., and Bradford M. A. (2003), Elasto-plastic buckling and postbuckling of arches subjected to a central load, *Computers & Structures*, Vol. 81, pp. 1881-1825.

(접수일자 : 2004. 6. 22 / 심사일 2004. 7. 23 / 심사완료일 2004. 12. 10)