

# 석조 홍예아치교의 구조적 안정성 평가시스템 개발

## Development of a Structural Safety Evaluation System for Stone Voussoir Arch Bridges

김 남 희†

고 현 무\*

홍 성 걸\*\*

Kim, Namhee

Koh, Hyun-Moo

Hong, Sung-Gul

(논문접수일 : 2008년 7월 28일 ; 심사종료일 : 2008년 10월 15일)

### 요 지

압축력에 강한 석조 홍예아치교의 경우 재료적 응력한계보다는 구조적 형상의 불안정성에 의해서 구조물이 붕괴된다. 이러한 특성을 고려하면, 석조 홍예아치교의 구조적 안정성 평가에는 구조물의 붕괴기구 형상에 초점을 둔 한계상태 해석법이 보다 적합하다. 이 연구에서는 한계상태 해석법을 이용하여 건식법(dry construction)으로 축조된 우리나라 석조 홍예아치교의 구조적 거동을 살펴보고, 이 결과를 구조적 안정성 평가시스템 개발에 이용하고자 한다. 이 연구결과는 우리나라 석조 홍예아치교의 구조적 거동을 이해하는데 도움이 되며, 향후 문화재 유지관리 측면에서 공학적 판단기준을 주리라 기대한다.

**핵심용어** : 석조 홍예아치교, 한계상태 해석법, 추력선, 붕괴기구, 홍예아치의 안정성, 구조적 안정성 평가시스템

### Abstract

Masonry structures that are very strong in compression fail due to the instability of structural shape of geometry rather than the material stress limit. Considering such structural behavior, the use of the limit theorem that focuses on structural collapse mechanisms is more appropriate for the evaluation of the structural safety of stone voussoir arch bridges. This paper is to investigate structural performance of the stone arch bridges constructed using dry construction method in Korea based on the limit theorem and to exploit the result to develop a system for an structural safety margin. It is expected that this study will help us understand structural behavior of stone voussoir arch bridges in Korea. Also, it will provide a guideline to make engineering decision from the viewpoint of the maintenance of cultural heritages.

**Keywords** : stone voussoir arch bridges, limit theorem, thrust line, collapse mechanism, safety of voussoir arch, structural safety evaluation system

### 1. 서 론

우리나라에서 전통 석조 교량은 크게 두 가지 형식으로 나눌 수 있다. 단순히 하천을 건널 수 있도록 배치한 기본적 슬래브교에서 시작하여, 조금 더 구조적 형식을 갖춘 슬래브 거더교가 첫 번째 형식이며, 다른 하나는 유럽에서 광범위하게 사용하는 홍예아치(또는 '아치'라 부름)교 형식이다. 석조 교량은 목조 교량에 비해서 구조적 재료의 내구성 측면에서 훨씬 뛰어나서 오랜 시간 버텨내어 우리나라의 중요한 문화

재 역할을 하게 되었다. 그러나 문화재 교량의 유지관리 측면에서 옛 구조물에 대한 구조적 거동에 대한 공학적 연구가 거의 이루어지지 않은 까닭에 올바른 복원 또는 보수 보강이 용이하지 않다. 이 연구에서는 국내 옛 교량의 주된 시공방법인 건식 석조 아치교의 구조적 거동에 대한 연구를 수행하고자 한다.

압축력에 강한 석조 아치교의 경우 재료적 한계보다는 구조적 형상에 따라서 구조물의 안정성이 좌우된다(Heyman, 1982). 우리나라의 건식 석조 교량 구조물의 경우에 석재의

† 책임저자, 정회원 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 책임연구원  
Tel: 02-880-9083 ; Fax: 02-884-8339

E-mail: namheek@snu.ac.kr

\* 서울대학교 건설환경공학부 교수

\*\* 서울대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

압축강도와 접촉면에서 발생하는 마찰력에 의해서 힘을 저항하고 있다. 이 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 소성개념에 근거한 한계상태 구조해석법을 토대로 석조 아치교의 구조적 안정성 평가시스템을 개발하고자 한다. 우선적으로 한계상태 개념을 이용하여 아치교의 구조적 거동에 영향을 주는 주요 변수들에 대하여 고찰하고, 이러한 주요 변수들을 변화시켜가면서 구조적 거동을 편리하게 살펴볼 수 있도록 구조적 안정성 평가시스템을 개발한다. 실제로 대상 교량은 우리나라 교량에 가장 많이 볼 수 있는 반원형 아치교 형식으로 정한다. 또한, 아치의 가장 기본적인 구조적 거동을 살펴보기 위해서 자중과 등분포하중을 받고 있는 아치교의 경우로 연구범위를 제한한다. 이 연구의 결과를 통해서 우리나라 문화재 아치교에 대한 구조적 안정성 평가과정에서 벗어지는 문제점을 해결하는데 기초자료로 사용될 것으로 기대한다.

## 2. 우리나라 석조 홍예아치교의 특징

홍예아치의 형식은 교량 구조물뿐만 아니라 성문과 여러 부분에 장식적으로도 널리 사용되고 있다. 그러나 아치의 기하학적 형상, 채움석과 지지점의 조건 등 주변 여건에 따라서 구조적 안전성의 폭은 크게 상이하다.

### 2.1 홍예아치의 구성요소

우리나라 홍예아치교를 이루는 주요 구성요소는 크게 아치, 채움석(fill) 또는 스펀드렐(spandrel), 교대와 기단부로 이루어져 있다. 이러한 주요 요소는 전통 구조물의 시공에서 보다 세분화하여 정의하고 있다(장기인, 1997). 그림 1에서 살펴보면 아치는 교각이나 교대위에 맨 처음 놓이는 아치뿌리(springing), 아치의 한 가운데 중심부분에 놓이는 이맛돌(key stone)과 아치돌(arch stones)로 구별한다. 채움석은 이맛돌 위의 부형무사석과 아치와 아치 사이의 잠자리 무사석과 그 외 채움석으로 구별한다. 교대와 기단부에는 선단석과 교각과 교대가 포함된다. 구조적 거동을 분석하기 위해서는 이러한 구성요소를 토대로 구조시스템을 형성하는 요소와 하중으로 작용하는 요소로 공학적 모델링이 필요하다.

### 2.2 홍예아치의 시공적 특징

우리나라 석조 구조물은 재료의 접근성이 용이한 화강암 석재로 대부분 이루어져 있다. 비피파 검사를 통해서 석재의 재료성분 상태와 압축강도를 얻을 수 있으며, 교량에 사용된 석재의 압축강도 범위는 50MPa에서 100MPa 사이에 분포

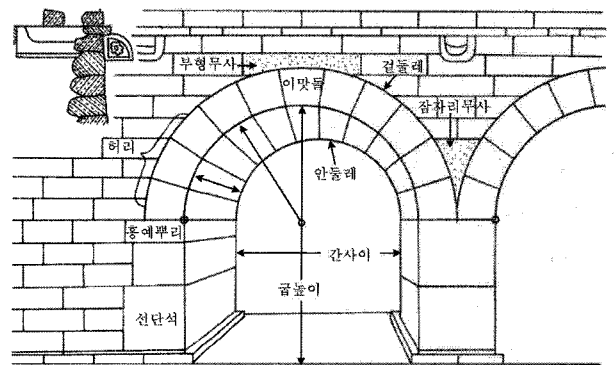
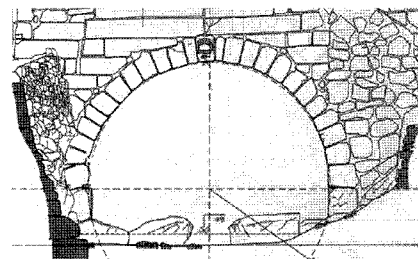
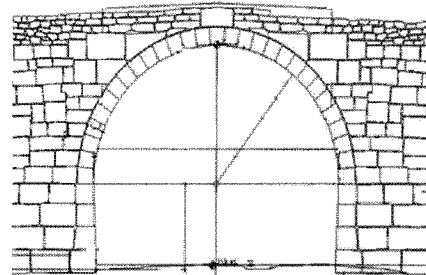


그림 1 홍예아치의 구성요소



a. 낮은 교각 사례(고흥 홍교)



b. 높은 교각 사례(문경새재교)

그림 2 다양한 규모의 아치교

되어 있다(수표교, 2003). 우리나라 전통 교량의 시공방식은 아치형태의 목재 가설구조물을 의지하여 건식으로 완전한 아치모습을 형성한 후에 가설구조물을 제거하는 방식으로 시공하였다. 그런데, 옛날 교량이 위치하는 입지조건이 각 경우마다 달라서 결과적으로 나타난 아치교 형태도 자세히 들여다보면 매우 상이함을 알 수 있다(그림 2). 특히, 교각을 포함한 하부구조의 규모가 다른 경우에는 구조적 안전성에 매우 커다란 영향을 미치며, 구조적 거동을 분석하기 위해서 별도로 다루어야 한다. 이 연구에서는 하부구조가 구조적 안전성에 영향을 주는 부분에 대해서는 논의로 하고, 상부 아치구조의 안정성에 대해서만 살펴본다.

### 2.3 홍예아치의 기하학적 특징

압축력에 강한 석재로 만든 아치교의 구조적 거동은 기하학적 형상과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 아치는 가공

하지 않은 거친 석조, 직사각형이나 정사각형으로 가공된 석조, 아치 리블를 별도로 형성한 경우 다양한 방식으로 사용되었다. 개체의 규모는 두께 400~600mm, 길이 1000mm 정도의 부재가 많이 사용되었다. 표 1은 전통 석조 아치교의 일부 사례를 살펴보면 반원형 아치교 형상이 가장 많이 사용되었음을 알 수 있다(대한토목학회, 2001). 아치스팬/높이(S/H)에 대해서 아치두께와 아치두께/아치반경(t/R)의 그림 3과 같이 도식화해서 살펴보면 이들의 관계가 일정한 규칙을 가지고 있지 않음을 알 수 있다. 즉, 아치의 구조적 거동에 근거해서 단면이 설계된 것이 아니라 입지조건과 재료의 가공 용이성에 따라서 시공되었음이 짐작된다. 따라서 전통 아치교의 보수보강에는 구조적 검토 또한 필요함이 분명하다.

표 1 우리나라 홍예아치교의 사례

교량	스팬 수	S(m)	H(m)	S/H	t(mm)	t/R
고흥홍교 (1445)	1	4.3	2.15	2.0	480	0.22
오작교 (1461)	4	4.0	2.80	1.4	530	0.26
홍국사 홍교 (1631)	1	11.3	5.65	2.0	520	0.10
승선교 (1698)	1	9.1	4.55	2.0	650	0.14
송광사 홍교 (1730)	1	8.0	4.00	2.0	450	0.12
척진교 (1747)	1	9.3	2.80	3.7	400	0.08
화홍교 (1794)	7	2.7	1.35	2.0	670	0.49
만안교 (1795)	7	3.9	1.95	2.0	480	0.24

\* S: 스패, R: 반경, H: 높이, t:: 아치두께

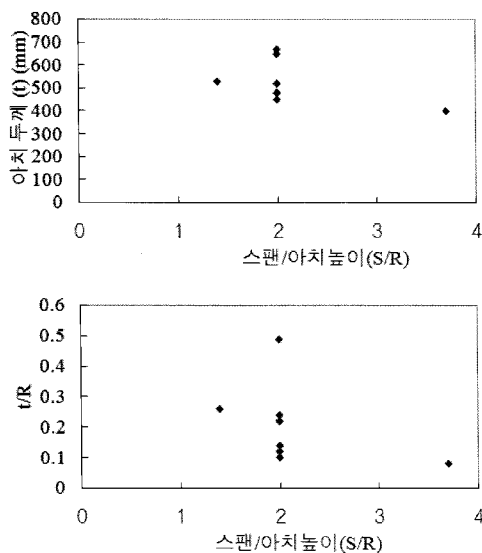


그림 3 우리나라 교량의 기하학적 변수 분포

### 3. 석조 홍예아치교의 구조해석

각각의 개체가 강체이며 전체 구조시스템은 개체간 마찰력에 의지하여 조적 구법으로 만들어진 아치에 대한 구조해석에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 힘의 다각형법을 이용하여 추력선을 구하는 도해법(Block, 2005)은 주어진 하중조건에 대해서 구조물의 응력상태를 쉽게 파악할 수 있다. 그러나 재료 및 기하학적 한계상태를 고려하는 구조적 안정성 평가에 사용하기에는 수많은 반복 작업이 필요하다. 접합부의 마찰상태수를 보다 상세하게 반영하기 위해서 유한요소법(Creazzal 등, 2002)을 이용할 수 있지만, 이 경우에도 구조물의 응력상태는 살펴볼 수 있으나 아치의 두께가 매우 얇아도 재료적 한계에 쉽게 도달하지 않으므로 구조적 안정성 평가에는 적합하지 않다. 반면에, 재료적 한계상태를 이용한 소성해석법(Boothby 등, 1992; Boothby 1994; Molins 등, 1998)의 경우에는 구조물의 붕괴 기구를 가정하고, 이에 대한 소성해석을 통해서 구조적 안정성 평가가 가능하다. 이 연구에서도 이러한 맥락에서 소성해석을 도입하여 아치구조의 안정성 평가시스템을 개발한다.

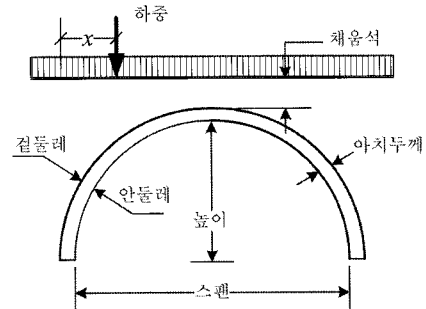
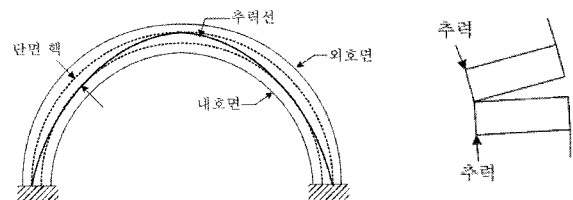


그림 4 아치구조해석에 필요한 주요변수



a. 단면핵 내부에 존재하는 추력선      b. 한계상태에서 벌어짐

그림 5 단면핵과 한계상태에 작용하는 추력선

#### 3.1 구조해석 모델

그림 1에서 설명한 아치의 구성요소 모두 구조적 거동에 영향을 크게 또는 작게 기여할 수 있지만, 합리적인 구조해

석 결과를 얻기 위해서는 구조적 거동에 크게 영향을 주는 주요한 변수만을 간추리는 것이 중요하다. 이 연구에서 살펴보고자 하는 아치의 구조적 거동에 영향을 주는 주요변수를 중심으로 정리하면 그림 4와 같다. 일반적인 아치구조에서와 마찬가지로 아치구조의 기하학적 형상, 아치의 스패에 대한 높이의 비, 아치두께, 그리고 아치에 작용하는 하중으로 나누어서 생각한다. 아치구조이외의 채움석은 아치에 작용하는 하중으로 간주한다. 사실상, 차량이 통과하는 도로교의 경우 집중하중의 위치도 매우 중요하다. 그런데 우리나라 조적석조의 홍예아치교에서는 대부분 보도교에 해당하며 이 경우에는 아치자중과 채움석에 비해서 보행자의 집중하중조건이 상대적으로 적어서 고려하지 않기로 한다.

### 3.2 추력선

아치구조의 힘의 흐름은 추력선으로 표현한다. 도해법이나 유한요소법을 이용해서 구조해석을 수행하는 경우, 아치 구조의 구조적 안정성은 일반적인 압축재의 안전성 평가에서처럼 탄성영역에서 추력선이 단면핵에 존재하는 지 여부에 따라서 안정성을 평가한다. 그림 5는 단면의 1/3을 단면핵으로 가정하여 추력선이 단면핵의 내부에 존재하는 경우를 도식화한 것이다. 만일, 추력선이 단면핵을 벗어나서 내호면 또는 외호면에 인장력이 발생하도록 하중이 가해지는 경우 그림 5b와 같이 아치구조는 벌어지고 구조시스템은 한계상태에 도달하게 된다.

### 3.3 한계상태와 붕괴기구

사실상 아치에 존재하는 추력선은 수 없이 많이 생길 수 있지만, 아치단면을 벗어나서 존재하면 구조적으로 불안정해지므로 안정적인 추력선의 한계는 제한적이다. 이러한 연구는 1800년대 실험에서도 밝혀졌고, Coulomb에 의해서 이론적으로 명확해졌으며, 최근에는 조적조 아치의 구조적 안정성 해석을 위한 한계상태 이론의 근간을 이루게 되었다 (Heyman, 1982). 이와 같이 조적조 아치구조도 한계상태를 예측할 수 있다고 가정하고 강구조의 한계상태 이론 (Horne, 1978)을 접목시켜서 조적조 석조아치구조의 거동에 대한 연구가 많이 이루어져 오고 있다(Boothby, 1992; 1994; Heyman, 1995). 이 연구에서도 한계상태 이론에 의한 구조적 해석을 통하여 아치구조의 안정성을 살펴본다. 이를 위해서 우선적으로 다음과 같은 가정들을 전제로 한다.

- (a) 석재는 인장에 대해서 저항할 수 없다. 석재 개체는

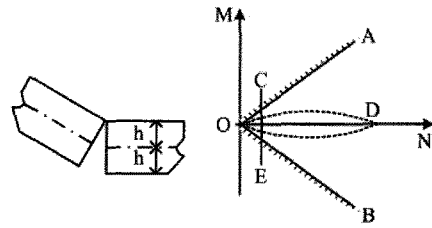


그림 6 조적조 아치의 한계상태

약간의 인장강도를 가지고 있지만 건식법 또는 약한 모르타르 시공 어느 경우나 접합부에서는 인장력을 전달하지는 못한다. 따라서 구조적 안정성 측면에서 인장력만이 발생하는 부분에는 소성힌지(plastic hinge)가 발생한다고 가정하는 것이다.

- (b) 석재의 압축강도는 무한하다. 실제로 하중을 받는 아치에 나타난 압축응력이 매우 낮기 때문에 구조해석이나 설계를 위해서 이러한 가정은 타당하다.
- (c) 석재의 접합부에서 미끄러짐은 발생하지 않는다.
- (d) 구조물에 붕괴기구(collapse mechanism)가 발생할 만한 소성힌지가 형성되면 구조물은 파괴에 이른다.

그림 6은 단면의 두께가  $2h$ 이고 압축력  $N$ 을 받는 순간 소성힌지가 형성된 경우 모멘트와 축력의 상관관계를 표현한 것이다. 이 힌지는 휨모멘트  $M = hN$ 에서 형성된 것이다. 직선 OA와 OB는  $M = \pm hN$ 을 나타내고 열린 삼각형 AOB내부의 어느 위치에서나 안정하며, 아치 내부에 존재하는 추력선은 이에 해당한다. 만일 조건 (b)에서 가정한 무한한 압축강도 대신에 실제로 제한된 압축파괴강도(crushing strength)로 대체하면, 항복면(yield surface)은 삼각형 AOB 대신에 두개의 포물선으로 이루어진 곡면경계 OCDEO가 된다. 사실상 공칭 응력이 압축파괴강도의 10%인 경우 항복면은 곡선으로 이루어진 삼각형 모양의 OCE가 되며, 이는 곡선 OC와 OE는 직선 OA와 OB에서 다소 벗어나 있으므로 덜 안정적인 결과를 가져올 수 있음을 알 수 있지만, 이 연구에서는 고려하지 않는다.

이상의 소성이론에 근거해서 추력선이 재료의 한계상태를 벗어나면 소성영역이 발생하고, 소성힌지의 개수가 증가하면

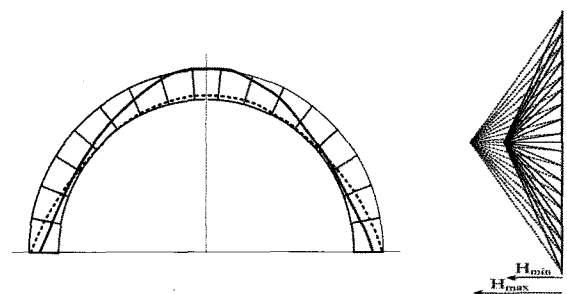


그림 7 외호면 또는 내호면에 접한 추력선과 수평반력

결국 붕괴기구가 형성된다. 이 연구에서는 아치의 수평추력의 한계상태를 이용해서 구조적 안정성평가를 수행하고자 한다. 그림 7은 추력선이 외호면 또는 내호면에 접한 경우를 보여준다. 추력선이 외호면에 접한 경우 도해법으로 부재력과 추력을 살펴보면 지점 부분에는 최소 수평추력이 발생한다. 반면에 추력선이 내호면에 접한 경우에는 최대 수평추력이 발생한다. 어떠한 하중조건에서든지 추력선이 두 한계치 이내에 존재하면 구조적으로 안정하다.

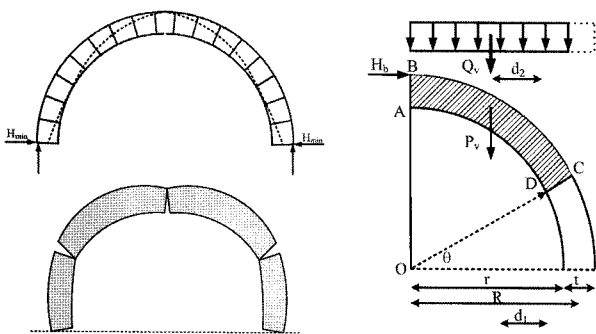
추력선이 아치의 테두리에 접한 경우 소성해석관점에서 항복상태에 이른 것으로 볼 수 있다. 이를 평형조건과 결부시켜서 허용 가능한 변형기구를 구하는 것이 아치구조의 한계상태 해석법이다. 한계상태 해석법에 의한 구조물의 안정성 평가에는 하한경계 이론(lower bound theorem)과 상한경계 이론(upper bound theorem)이 있다(Horne, 1978).

- (a) 하한경계 이론에 의하면 구조물의 모든 부분에서 평형상태와 항복조건을 동시에 만족하면 이 구조물은 안정하다.
- (b) 상한경계 이론에서는 구조물이 허용 가능한 붕괴기구에 대해서 평형조건을 만족하면 구조물이 안정하다.

이 연구에서는 상한경계 이론에 근거해서 지점에서 발생하는 최대 및 최소 수평추력을 발생시키는 추력선에 의해서 허용가능한 붕괴기구가 형성되는 시점을 구조적 안정성을 넘어서는 상태로 정의한다.

3.3.1 최소 수평반력

아치의 추력선이 그림 8에서와 같이 외호면에 접해서 발생하는 경우 지점에서의 수평추력이 최소가 되며, 소성이론에 의해서 D점 위치와 이맞돌의 정점과 홍예받침부에서 소성힌지를 가정 할 수 있다. 좌우 대칭구조이므로 모두 5개의 소성힌지가 발생하면 구조물은 파괴에 이른다. 이때 홍예받침부에서 발생하는 수평추력은 교대로 전달될 힘이다.



a. 붕괴기구  
b. 자유물체도  
그림 8 최소 수평추력에 대한 붕괴기구

D점에서의 힌지에 대한 위치변수를  $\theta$ 로 정하고 D점에 관하여 회전모멘트에 대한 평형방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$H_b \left[ \left( R + \frac{t}{2} \right) - r \sin(\theta) \right] = P_v d_1 + Q_v d_2 \tag{1}$$

여기서,  $P_v$ 는 빗금친 부분(ABCD)의 아치자중이며, 아치 중량  $w$ 과 아치두께  $t$ 의 함수,  $Q_v$ 는 BC부분에 작용하는 분포 하중  $q$ 를 등가집중하중으로 변환한 값이다.  $d_1$ 과  $d_2$ 는 아치의 내호면에서  $P_v$ 와  $Q_v$ 의 각 하중중심점까지의 거리이다.

$P_v$ 와  $Q_v$ 에 대한 식은 다음과 같다.

$$P_v = \frac{\pi}{2} w R t \left( 1 - 2 \frac{\theta}{\pi} \right) \tag{2}$$

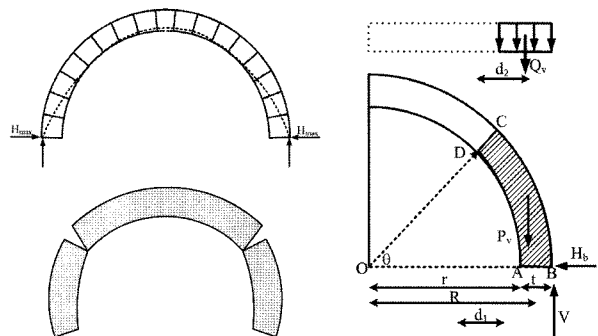
$$Q_v = q \left( \frac{L}{2} + \frac{t}{2} \right) \cos(\theta) \tag{3}$$

D점이 이맞돌 정점에서 발생하는 경우 즉,  $\theta$ 가  $\pi/2 \approx 1.571$ 에는 추력선이 B점과 D점을 수직선으로 통과하는 것을 의미하게 된다. 그런데, 이는 방사방향의 인장응력을 발생하는 경우이므로 소성힌지 형성이 불가능한 경우이다. 실제로 D점에서  $\theta$ 의 범위는  $\theta < \pi/2$ 가 된다.

3.3.2 최대 수평반력

아치의 추력선이 그림 9에서와 같이 내호면(intrados)에 접해서 발생하는 경우 지점에서의 수평추력이 최대가 된다. 앞에서 언급한 소성이론에 의하면 그림 4의 D점 위치와 홍예받침부에서 소성힌지를 가정 할 수 있다. 좌우 대칭구조이므로 모두 4개의 소성힌지가 발생하면 구조물은 파괴에 이른다. 이때 홍예받침부에서 발생하는 수평추력은 교대로 전달될 힘이다.

D점에서의 힌지에 대한 위치변수를  $\theta$ 로 정하고 D점에 관하여 회전모멘트에 대한 평형방정식을 세우면 식 (4)와 같다.



a. 붕괴기구  
b. 자유물체도  
그림 9 최대 수평추력에 대한 붕괴기구

$$H_f r \sin(\theta) = V \left[ \left( R + \frac{t}{2} \right) - r \cos(\theta) \right] - P_v d_1 - Q_v d_2 \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 지점의 수직반력으로 식 (5)와 같으며, 그 외의 변수는 식 (1)에서 사용한 변수와 동일하다.

$$V = P + q \left( \frac{L+t}{2} \right) = \frac{\pi}{2} R t w + q \left( \frac{L+t}{2} \right) \quad (5)$$

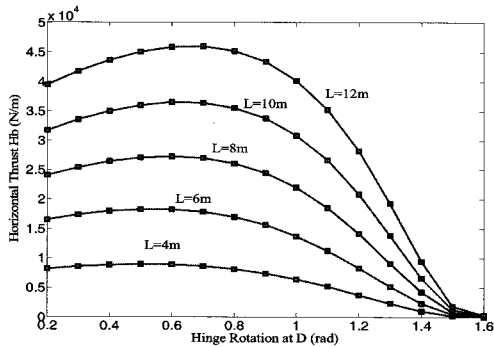
여기서,  $P$ 는 아치절반에 대한 자중으로 다음과 같다

$$P = \frac{\pi}{2} w R t \quad (6)$$

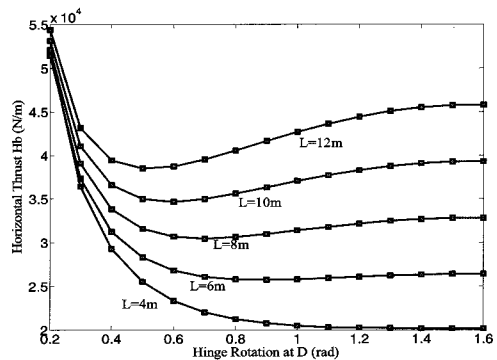
이상에서 구한 최소 및 최대 수평반력에 대한 식들은 4장에서 석조 홍예아치교의 구조적 거동을 살펴보는 데 사용된다. 또한, 여기서 구한 수평추력은 실제 교대가 견디어 내야 될 수평반력이다. 그러나 이 연구에서는 이러한 값들을 교대 설계에 사용하기 위함이라 아니라 아치구조의 안정성평가에 이용할 것이다.

#### 4. 석조 홍예아치교의 구조적 거동

앞서 언급하였듯이 실제로 석조아치교는 재료적 항복과괴

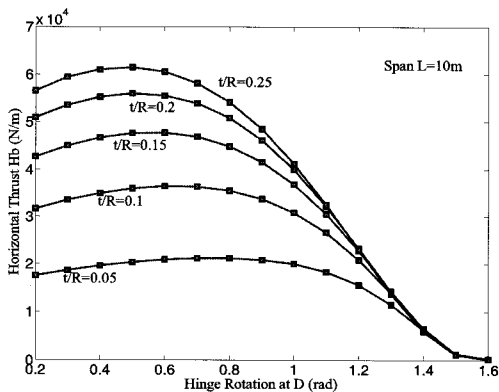


a. 최소 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우

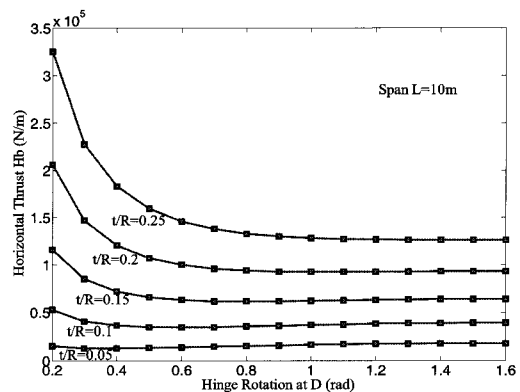


b. 최대 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우

그림 10 스패ん길이 변화와 수평추력의 변화



a. 최소 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우



b. 최대 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우

그림 11. 세장비( $\alpha = t/R$ ) 변화와 수평추력의 변화

라기보다는 기하학적 형상에 의한 불안정적 요소가 붕괴의 원인이 대부분이므로 구조적 안정성은 기하학적 변수에 의존적이다. 이 연구에서는 구조적 안정성에 영향을 주는 변수로 아치의 스패ん길이, 아치두께와 아치의 세장비( $\alpha = t/R$ )와 상재하중의 크기를 변화시켜가면서 수평추력의 변화를 살펴본다.

#### 4.1 스패ん길이와 수평추력의 관계

그림 10은 스패ん길이와 D점 각도를 변화시켜가면서 수평추력을 살펴본다. 스패ん길이 커짐에 따라서 최소 및 최대 수평추력이 증가함을 알 수 있다.

#### 4.2 세장비와 수평추력의 관계

그림 11은 스패ん길이 대신에 아치두께의 세장비로 수평추력의 변화를 살펴본 결과이며, 스패ん길이에 대한 수평추력의 변화보다 훨씬 더 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 상재하중과 수평추력의 관계

그림 12는 상재하중을 변화시켜가면서 어떻게 수평추력에 영향을 주는지 검토한 것이다. 아치자중에 대한 상재하중의 비율을 증가시키에 따라서 수평추력이 당연히 커짐을 알 수 있다. 상재하중의 크기는 수평추력에 그대로 반영되지만 교대가 감당할 수 있는 범위 이내에서 구조적 안정성에 어떠한 영향을 미치는 지가 더욱 중요한 관심거리이다.

### 4.4 최소 및 최대 수평추력과 구조적 안정성

이 연구에서는 동일한 소성힌지가 발생하는 위치에서 최대 수평추력과 최소 수평추력의 크기를 이용해서 구조적 안정성 평가를 수행한다. 아치의 설계 또는 보수보강측면에서 안전율이 적용되어야 하겠지만, 여기서는 논외로 한다. 대신에 구조적 안정성 평가측면에서 안정 또는 불안정 정도만을 다음 식 (7)과 같이 살펴보기로 한다.

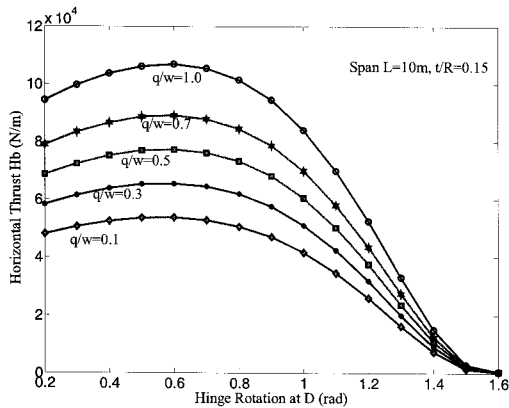
$$H_{b,max} > H_{b,min} \text{ 이면, 안정된 구조} \quad (7a)$$

$$H_{b,max} \leq H_{b,min} \text{ 이면, 불안정한 구조} \quad (7b)$$

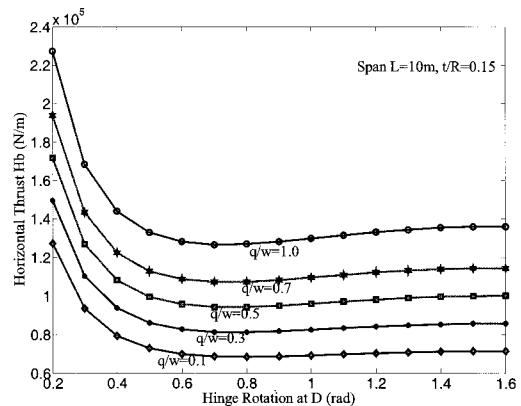
그림 13에서는 동일한 아치 구조에 최대 및 최소 수평추력을 동시에 표현하여 구조적 안정성을 살펴본 결과이다. 그림 13(a)의 경우에는 소성힌지가 발생하는 위치가 어디든지 동일한 소성힌지 위치에서 최대 수평추력이 최소 수평추력보다 크게 나타나므로 구조적으로 안정적으로 판단할 수 있다. 반면에 그림 13(b)의 경우에는 최대 수평추력이 최소 수평추력보다 작게 나타나는 영역이 매우 넓게 분포해 있어서, 불안정한 구조로 판단된다.

## 5. 석조 홍예아치교의 구조적 안정성 평가시스템 개발

제4장에서 살펴보았듯이 아치의 구조적 안정성은 다각적인 측면에서 검토되어야 한다. 더욱이 기존 교량의 구조적 안정성 평가 이후 보강대책을 마련하는 경우라면, 단순히 하나의 변수만을 조절하여 구조적 안정성을 얻는 것은 매우 불

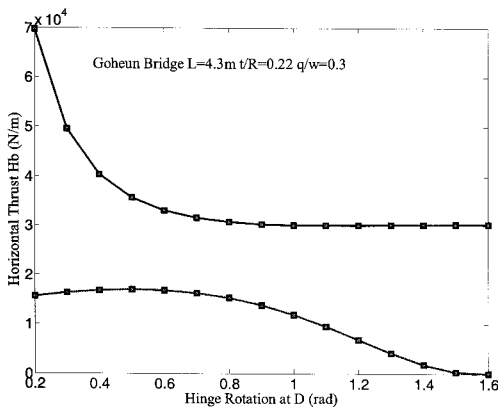


a. 최소 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우

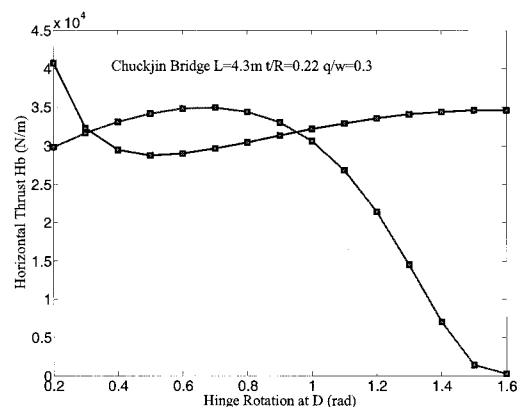


b. 최대 수평추력에 대한 붕괴기구의 경우

그림 12 상재하중 변화와 수평추력의 변화



a. 구조적으로 안정된 홍예교



b. 구조적으로 불안정한 홍예교

그림 13 최소 및 최대 수평추력과 구조적 안정성

합리하다. 이 연구에서는 구조적 안정성 평가와 더불어 보수 보강에 도움을 주는 평가시스템을 개발하고자 다양한 주요변수에 대해서 구조적 안정성 평가가 용이하도록 MATLAB을 이용하여 구조적 안정성 평가시스템을 개발하였다.

### 5.1 사용자 입력화면 구성

3.1절에서 선정한 구조적 거동에 영향을 미치는 주요변수를 입력사항으로 하고, 지점부의 최대 및 최소 수평추력을 쉽게 파악할 뿐만 아니라 구조적 안정성 평가가 동시에 이루어지도록 사용자 화면을 구성하였다. 또한 'Reset'기능을 추가하여 단면의 변화나 상재하중의 변화에 대해서도 쉽게 시뮬레이션이 가능하도록 시스템을 구현하였다. 그림 14는 MATLAB GUI 도구를 이용하여 사용자 화면을 설계한 결과이다. 일반적으로 많이 사용된 값들을 초기치(default value)값으로 설정하여 사용자가 참조할 수 있도록 하였다.

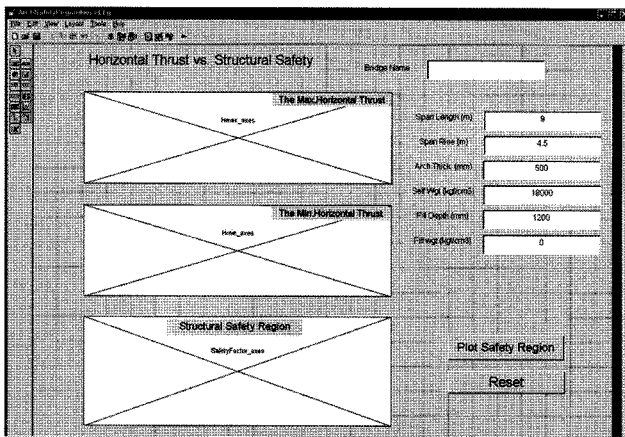


그림 14 홍예아치교의 구조적안정성 평가시스템 GUI

### 5.2 홍예아치교의 구조적 안정성 평가사례

표 1에서 나타난 우리나라 옛 교량의 사례에 대해서 안정성 평가를 수행하였다. 스패ん길이가 9.1m로 비교적 긴 석조 홍예교에 속하는 선암상 승선교에 대해서 평가를 수행해 보았다. 그림 15에서와 같이 소성영역이 어디에서 발생하든지 전 영역에서 최대 수평추력이 최소 수평추력보다 크게 나타나는 안정적 결과를 보여주었다. 다른 하나의 사례로, 승선교와 스패ん길이가 유사하지만 아치높이가 낮아서 스패ん/아치높이의 비가 상대적으로 큰 척진교의 경우를 수행하였다. 평가결과는 그림 16에서와 같이 매우 불안정함을 보여주었다.

불안정한 구조적 거동을 보인 척진교의 경우에 대해서 단면 두께를 승선교와 같이 600mm로 증가시켜서 구조적 안정성평가를 다시 수행하고 결과를 비교해 보았다. 그림 17에서

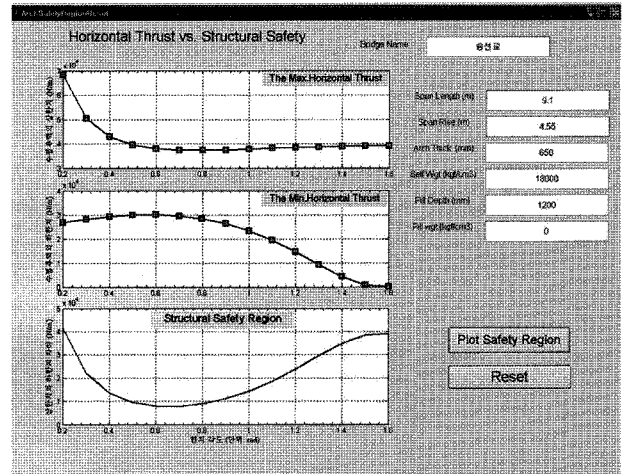


그림 15 구조적안정성 평가사례(승선교)

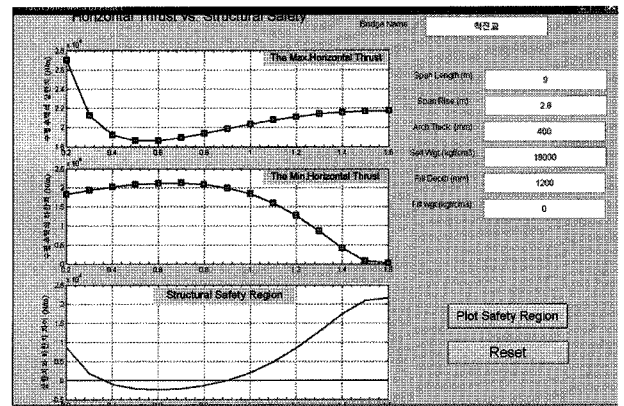


그림 16 구조적안정성 평가사례(척진교)

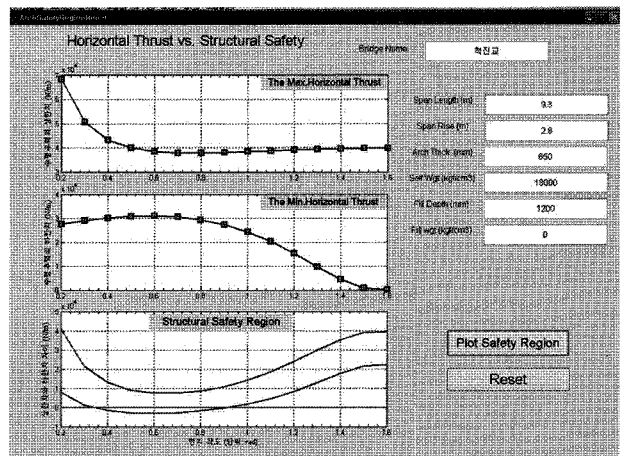


그림 17 불안정한 아치구조에 대해서 단면증가 사례

와 같이 불안정한 구조에서 안정적 구조로 달라짐을 알 수 있다.

## 6. 결론

이 연구에서는 소성개념에 근거한 한계상태법을 이용하여



우리나라 옛 교량의 구조적 안정성을 살펴보았다. 특히, 허용 가능한 붕괴기구와 평형방정식을 이용하여 지점에서 발생하는 최소 및 최대 수평반력을 구한 결과를 구조적 안정성 평가에 이용하였다. 소정힌지가 발생하는 위치가 어디든지 동일한 소정힌지 위치에서 최대 수평추력이 최소 수평추력보다 크게 나타나면 구조적으로 안정하다고 평가하고 그렇지 않은 경우에는 불안정한 것으로 판단하였다. 이러한 개념을 토대로 구조적 안정성 평가에 용이하도록 MATLAB GUI 도구를 이용하여 아치교의 구조적 안정성 평가시스템을 개발하였다. 실제로, 아치교의 구조적 거동에 영향을 미치는 주요 변수가 다양하므로 가급적 초기평가나 설계에 사용가능하도록 주요 변수들을 사용자 입력창에서 조절 가능하도록 구현하였다. 이 연구의 결과를 통해서 우리나라 문화재 아치교에 대한 구조적 안정성 평가에서 빛어지는 문제점을 해결하는데 기초자료로 사용될 것으로 기대한다.

### 감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 국토해양부 건설기술핵심기술연구개발 사업비에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 김남희, 고현무, 홍성걸 (2008) 전통석조아치교량의 구조적 거동에 대한 연구, 한국전산구조공학회 학술발표대회논문집, 1(2), pp.83~90.  
 대한토목학회 (2001) 한국토목사-제4편 교량, 대한토목학회.

- 수표교 (2003) 실측조사 및 안전진단보고서, 서울특별시.  
 장기인 (1997) 한국건축대계 VII - 석조, 보성각.  
 Block, P. (2005) Equilibrium Systems: Studies in Masonry Structure, M.S. thesis Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.  
 Boothby, T.E., Brown, C.B. (1992) Stability of Masonry Piers and Arches, *J. Engrg. Mech, ASCE*, 120(2).  
 Boothby, T.E. (1994) Stability of Masonry Piers and Arches Including Sliding, *J. Engrg. Mech, ASCE*, 120(2).  
 Creazzal, G., Matteazzi, R., Saetta, A., Vitaliani, R. (2002) SAnalysis of Masonry Vaults: A Macro Approach based on Three-Dimensional Damage Model, *J. Structural Engineering, ASCE*, 128(5).  
 Hong, N.K., Koh, H.M., Hong, S.G. (2007) Characteristics of Historical Arch Bridges In Korea, *5th International Conference On Arch Bridges*, Maderia, Portugal.  
 Heyman, J. (1982) *The Masonry Arch*, Chichester, Ellis Horwood.  
 Heyman, J. (1995) *The Stone Skeleton*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.  
 Horne, M.R. (1978) *Plastic Theory of Structures*, Pergamon Press, New York, N.Y.  
 Molins, C., Roca, P. (1998) Capacity of Masonry Arches and Spatial Frames, *J. Struct. Eng.*, 124(6), pp.653~663.  
 The Mathworks Inc. (2001) Introduction to Graphical User Interface(GUI) Matlab 6.5.