

## 전통목조의 안정성 평가에 대한 연구

### Study on Safety Evaluation of Traditional Wooden Structure

김 남 희\* · 홍 성 곁\*\* · 배 병 선\*\*\* · 정 성 진\*\*\*\* · 이 영 욱\*\*\*\*\* · 황 종 국\*\*\*\*\*

Kim, Nam-Hee · Hong, Sung-Gul · Bae, Byoung-Sun · Jung, Sung-Jin · Lee, Young-Wook · Hwang, Jong-Kuk

#### ABSTRACT

There are many Korean traditional wooden structures that have resisted successfully over more than several hundred years. However, their structural behavior is not known in engineering context yet. It is then difficult to predict how they behave against various loadings if they face. This paper is to attempt to investigate structural performance of the wooden structures using fuzzy concepts rather than definitely defined engineering formula. The fuzzy synthetic theory to a scoring method enables us to draw a representative and comprehensive value from individual quantity.

**Keywords:** traditional wooden structure, safety evaluation, fuzzy concept.

#### 1. 서 론

우리나라 전통목조건축물은 이미 축조한 후 오랜 시간 사용해 오는 동안 크고 작은 많은 문제점들이 발생했다. 많은 문제점은 근본적으로 재료의 열화에 기인하고 있으나 구조적인 안전성과 연계한 연구는 아직 미흡하다. 따라서 주기적인 문화재 안전점검과정의 연장선상에서 육안이나 간단장비를 이용하여 조사된 외관결함자료를 구조적인 안정성과 연계해서 분석하고, 이러한 연구결과를 목구조의 구조적 안정성 평가에 사용할 수 있는 방법이 거의 없다. 본 논문에서는 전통목조 건축물에 안전성 평가를 위해서 퍼지개념을 도입하여 수행중인 연구내용을 소개하고자 한다. 구조공학에서의 퍼지개념의 이용은 주로 불확실성 및 언어변수에 대한 의존도가 높은 분야인 기존구조물의 상태 평가, 구조물의 최적설계에 대한 의사결정, 구조물의 손상평가 등에서 다양하게 사용되고 있다. 전통목조건축물에 대한 구체적인 평가기준자료가 없으며 또한, 구조물을 평가하는 전문가들의 의견도 불확정적임을 감안할 때 퍼지기반의 평가기법은 매우 고무적이라 기대한다.

#### 2. 전통목조시스템의 특징

우리나라 전통목조시스템은 전당을 중심으로 살펴보면 지붕, 공포와 축부로 구성되어 있으며 평

\* 정회원 · 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 책임연구원 E-mail: namheek@snu.ac.kr

\*\* 정회원 · 서울대학교 건축공학과 부교수 E-mail: sglhong@snu.ac.kr

\*\*\* 일반회원 · 국립문화재연구소 건조물연구실장

\*\*\*\* 정회원 · 한남대학교 건축공학과 부교수

\*\*\*\*\* 정회원 · 군산대학교 건축공학과 부교수

\*\*\*\*\* 정회원 · 전통문화학교 건축과 조교수

면적으로 비교적 대칭적이다. 축부에는 초석위에 그랭이질을 하고 기둥을 세웠으며, 기둥은 창방과 서로 구속력을 가지는 장부맞춤으로 건축되므로 3차원적 거동을 하도록 되어 있다. 상부의 육중한 지붕하중은 간격이 조밀한 서까대를 통해서 등분포로 작용하고 있으며, 이를 지붕규모와 비례적으로 다중을 형성하는 브라켓 시스템인 공포를 통해서 하중이 기둥으로 전달되도록 되어 있다. 접합부는 외적 연결계를 사용하는 대신에 각 부재의 일부분을 따내고 파고들어가서 접합되도록 연결되어 있어 각 접합부에서는 제작상 오차 또는 하중작용하에서 발생하는 작용력으로 발생하는 미끄럼을 충분히 수용해야 된다. 이러한 접합부는 일체화된 철근콘크리트의 강접합과 그리고 회전은 허용하고 변위만을 제어하는 강구조의 단순접합과 그 거동이 차이가 있다. 이렇게 구성된 목조시스템은 연직하중전달체계는 보의 적층 방식(stacking)의 구조적인 장점과, 공포구조의 브라켓 방식의 하중흐름으로 기둥과 기초에 안정적으로 전달되며, 횡하중에 대해서는 전체시스템이 일체화로 거동하여 저항한다. 목조시스템의 안전성의 평가는 이러한 힘의 전달체계가 합리적으로 이루어질 수 있는지의 여부를 조사하는 것이다.

### 3. 목조시스템 조사

#### 3.1. 목조시스템의 구성체계와 하중전달

구조시스템이란 구조물에 제하 되는 여러 가지 하중을 잘 이겨내도록 얹어진 부재들의 결합체를 의미한다. 실제로 모든 부재들이 다양한 하중이 부여될 때마다 저항하기 위해서 크든 작든 어느 정도 분담하고 있지만, 공학적인 접근을 위해서는 보다 중심적인 역할을 하는 부재들만을 고려한 하중저항시스템 또는 구조시스템에 대한 이해가 우선적으로 요구된다. 그림 1은 전통목조시스템의 구성 요소들을 계층구조로 표현한 것이다. 크게 지붕구조, 공포부, 축부와 기단으로 구분할 수 있다.

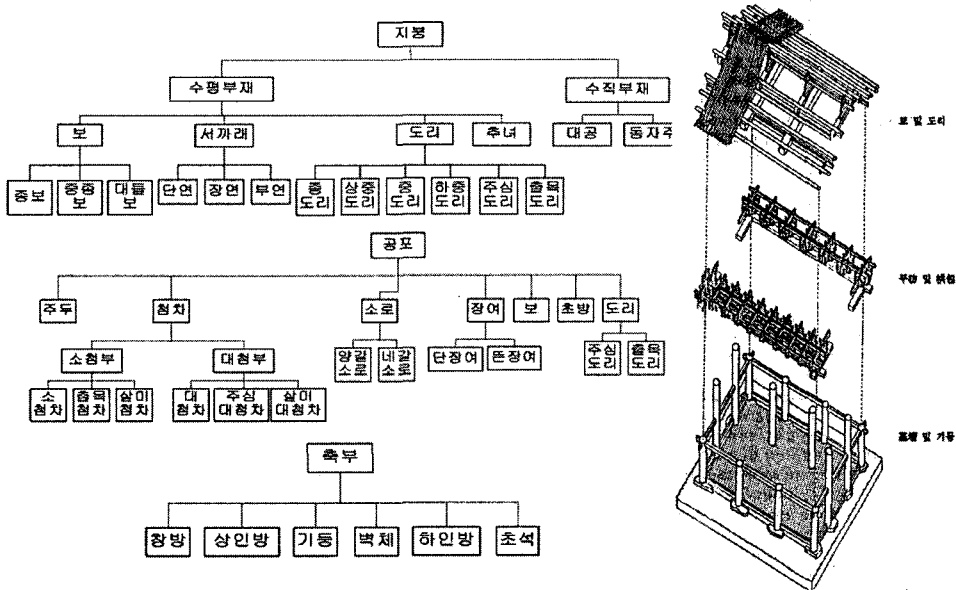


그림 1 목조시스템의 구성요소 체계

3.2. 목조시스템의 조사항목 및 조사방법

구조물의 점검은 최종적으로 구조적 성능에 대한 안전성평가가 그림 2와 같이 시스템, 서브시스템, 부재 차원의 각 단계별로 또는 종합적으로 이루어질 수 있도록 한다. 구조물에 작용하는 하중을 크게 중력방향 하중과 수평하중(횡하중)으로 대별하고, 이에 대응하기 위해서 구조시스템, 서브시스템, 부재의 기능이 적절하게 수행될 수 있는지 살펴본다. 부재 레벨에서는 목재에 생기는 재료적 결함(부식, 썩음, 갈라짐, 벗겨짐)과 구조적 결함(휨, 벌어짐, 부러짐)에 중점을 둔다. 재료적 결함의 정도에 대한 판정은 단면의 결손이 구조적 거동에 영향을 미치는 정도에 근거한다. 기존 전통목구조시스템의 안전진단보고서를 토대로 부위별 조사항목은 표1과 같다.

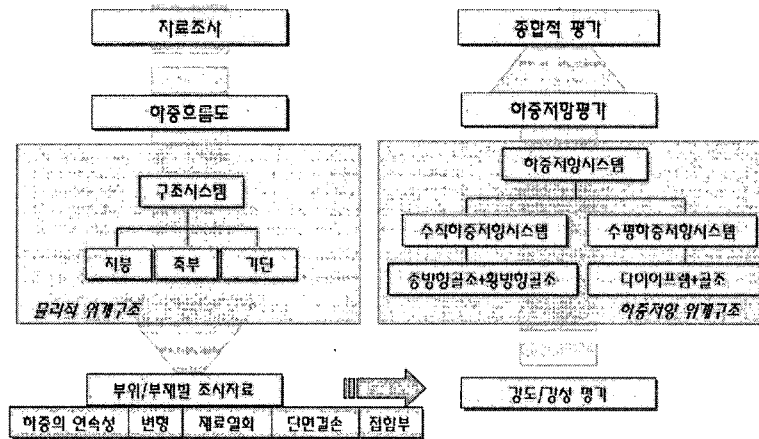


그림 2 목구조의 안전점검과 구조적 성능평가

표 1 재료적 결함 및 성능저하 평가항목

결함형태	맞춤부	기둥	보	서까래	도리창방	공포부	보아지장혀	벽체	기단
갈라짐	●	●	●		●	●	●	●	
부러짐							●		
과단							●		
과손				●			●		●
회전 (부재)	●					●	●		
비틀림 (부재)					●		●		
이격 (집합부)	●				●	●	●		
이동(집합부)	●								
미동(집합부)	●								
거동(집합부)	●								
처짐 (휨재)			●	●	●				
압괴 (압축재)	●	●			●				●
배부름								●	

#### 4. 목조시스템의 퍼지평가

##### 4.1. 목조시스템의 퍼지평가를 위한 자료체계

본 연구에서는 경험적 지식의 이용뿐만 아니라 사용된 정보 및 지식의 부정확성이나 애매함의 문제점에 대한 해결방안으로서 퍼지추론 방식을 이용한 구조적 안전성 평가방식을 제시한다. 퍼지 이론은 평가대상에 대해서 예 또는 아니오 만으로는 평가하기 어려운 애매한 경우에 대한 문제점을 수학적 접근방법으로 해결하고자 한 것이다. 즉 정성적인 퍼지개념과 정량적인 수학과 사이의 연결하는 중간적인 역할을 한다(Kirk and Folger, 1988). 퍼지추론 방식에 의한 구조물 평가를 위해서는 평가항목의 값의 범위와 평가결과 값의 범위들을 퍼지조건명제 (또는 퍼지규칙)로 정의하고, 이들을 퍼지관계로 나타낸 후, 논리적인 근사추론에 의해서 최종결과 값을 구한다. 퍼지추론에 의한 구조적 안전성 평가의 효율성을 위해서 시스템으로 구현할 경우에는 (1) 입력처리 모듈, (2) 경험적 및 이론적 지식에 근거한 규칙들의 지식기반 모듈, (3) 입력에 대해 출력을 만들어내는 추론기관모듈과 (4) 출력모듈이 포함된다.

퍼지평가 시스템의 지식기반 모듈을 구축하기 위해서는 기존의 경험적 및 전문적 지식에 근거하여 이러한 퍼지규칙을 작성해야 한다. 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 기존 안전진단보고서에서 얻은 지식들을 근거로 목조시스템 전체적, 중력하중저항과 횡하중저항 각각의 관점에서 평가가 용이하도록 평가항목들(표2)을 정의하고 퍼지규칙(표3)으로 표현하였다. 퍼지추론이란 퍼지집합으로 정의된 퍼지조건명제 "If (x is A) Then (y is B)"의 조건부와 결론부에 대해서 퍼지관계 R (Relation)을 구하고, 이를 이용해서 새로운 입력에 대한 결과값을 근사추론(approximate reasoning)으로 구하는 것이다. 퍼지관계 R을 구하는 방법은 다양하나, 본 연구에서는 가장 일반화된 추론방식의 하나인 Mamdani 함의 (Mamdani Implication) 방식을 이용하여 퍼지관계 방정식을 풀도록 한다. Mamdani 함의에서는 다음식들에서 설명하는 바와 같이 상관최소방식을 이용하여 퍼지관계 R을 구축한다.

$$A \rightarrow B = A \wedge B \tag{1}$$

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \} \tag{2}$$

$$B = \{ (y, \mu_B(y)) / y \in Y \} \tag{3}$$

$$R(x, y) = \{ (x, \mu_R(x, y)) / (x, y) \in X \times Y \} \tag{4}$$

$$\mu_R(x, y) = \text{Min} [ \mu_A(x), \mu_B(y) ] \tag{5}$$

여기서,  $\mu_A$ 는 퍼지집합 A,  $\mu_B$ 는 퍼지집합 B,  $\mu_R$ 는 퍼지관계 R의 소속함수를 각각 의미한다. 앞에서 설명한 식을 이용해서 정의된 퍼지관계를 이용해서 새로운 조건부 A'에 대해서 식 (6)과 같은 합성연산에 의해서 새로운 결론 B'을 구한다.

$$B' = A' \circ R \tag{6}$$

여기서, 부호  $\circ$ 는 퍼지 최대-최소 합성을 의미하며, 두 관계의 소속함수는 식 (7)와 같다.

$$\mu_{B'}(x, y) = \vee_{y \in Y} (\mu_{A'}(x, y) \wedge \mu_R(x, y)) \tag{7}$$

여기서,  $\mu_{B'}(x, y)$ 는 추론하여 새로이 얻은 퍼지집합 B'의 소속함수를 의미한다.

본 연구에서는 하나의 최종평가에 이르게 되는데 고려해야 될 평가항목이 다양하며, 또한 하나의 평가항목에 대해서도 세부항목 또한 다양하다. 따라서 평가위계구조의 상부 평가항목에 대한 결론을 구하기 위해서 여러 개의 규칙들이 정의되고, 하나의 규칙정의에 대해서도 하나이상의 조건부를 갖게 되는 경우가 있다. 이러한 관계들은 "AND"나 "OR"의 논리 연산자를 사용하여 표현하게 되고, 퍼지연산에 대한 소속함수는 다음식들과 같이 나타난다. 사용된 접속사가 "AND"이면 출력집합의 소속함수는 식 (8)과 같이 표현되고, 접속사가 "OR"이면 식 (9)와 같다.

$$y = (y^1)_{AND} (y^2)_{AND} \dots_{AND} (y^r) \tag{8a}$$

$$\mu_y(y) = \text{Min} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)], \quad y \in Y \tag{8b}$$

$$y = (y^1)_{OR} (y^2)_{OR} \dots_{OR} (y^r) \tag{9a}$$

$$\mu_y(y) = \text{Max} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)], \quad y \in Y \tag{9b}$$

여러 개의 퍼지규칙을 사용하는 경우에는 퍼지관계의 합성방식을 이용해서 퍼지관계를 구하게 된다. 퍼지관계 합성의 방법에도 "Max-Min", "Max-Product" 등 다양하며 나름대로의 의미가 있다. 본 연구에서는 "Max-Min" 방법을 사용하며, 식 (10)과 같이 소속함수를 구할 수 있다.

$$\mu_y(y) = \text{Max}_k \left\{ \text{Max}_{x \in X} \left\{ \text{Min} [\mu_x(x), \mu_{R^k}(x, y)] \right\} \right\} \tag{10}$$

$\mu_y(y)$ 는 퍼지입력  $x$ 에 응답하는 모든 규칙에 대해서 출력을 표현하는 퍼지 소속함수이다.

세부평가항목에 대한 퍼지함수는 각 평가항목의 최고값과 최저값을 근거로 "very poor, poor, good, very good, excellent"의 5 가지 구역을 가우스함수로 표현하도록 하였다. 표 3과 그림3은 입력 및 출력자료에 대해서 사용한 5개의 퍼지클래스의 소개 및 각 퍼지클래스가 의미와 함수를 설명하고 있다. 출력처리모듈에는 주어진 입력 값에 대해서 퍼지추론을 통하여 구해진 결과들을 비퍼지화를 통하여 구조물의 구조적 안전성을 등급화 할 수 있도록 한다. 출력 값은 0~1까지의 정

표 4 입력 및 출력의 퍼지함수

입력퍼지함수		출력퍼지함수	
퍼지클래스	설명	퍼지클래스	설명
VP	Very Poor	VH	Very High
P	Poor	H	High
G	Good	M	Moderate
VG	Very Good	S	Slight
E	Excellent	N	None

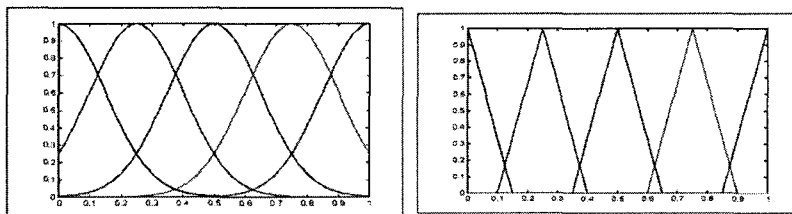


그림 3 입력함수(왼쪽)와 출력함수(오른쪽)

규화한 값들에 근거한 퍼지함수를 이용한다. 소속함수는 예상되는 위험성의 정도를 "very high, high, moderate, slight, none"의 5가지 등급으로 구별하기 위해서 삼각형 형태의 퍼지함수를 이용한 5개의 퍼지클래스를 정의 한다. 퍼지개념을 이용해서 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 이상에서 언급한 일련의 과정들이 그림 4에서와 같이 주어진 입력의 퍼지화, 정의된 퍼지규칙을 이용한 퍼지연산 및 합치, 퍼지합성과 비퍼지화과정을 수행해야 된다.

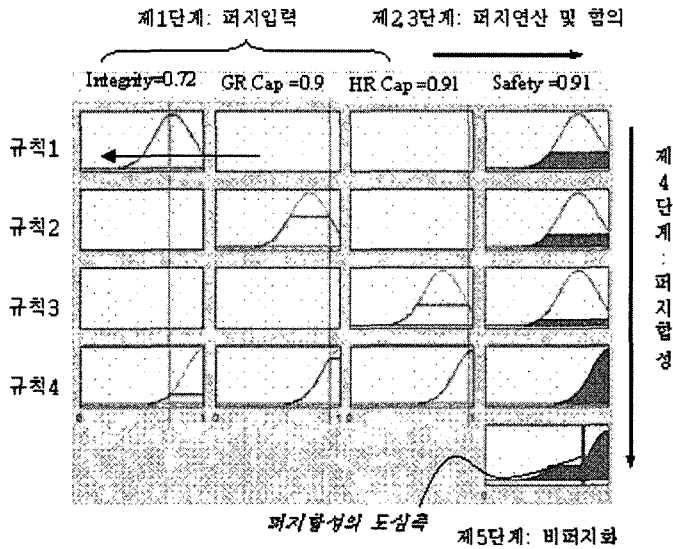


그림 4 퍼지평가의 흐름도

주어진 입력에 대한 퍼지추론결과는 관계된 규칙들을 종합화하여 구조물의 내진성능에 대한 위험도를 결정한다. 이러한 과정을 비퍼지화라고 하며, 비퍼지화 방식에는 무게 중심법, 최대법, 최대평균법등이 있다. 본 연구에서는 무게 중심법을 사용하며 비퍼지화 값  $y$ 를 다음식과 같이 구한다.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i h_i A_i}{\sum_{i=1}^N w_i A_i} \quad (11)$$

여기서,  $w_i$  는  $i$  번째 규칙의 가중치와 입력소속함수에서 발생한 소속정도와와의 곱,  $h_i$  는 출력클래스의 중심,  $A_i$  는 출력 클래스의 합의결과로 얻어진 면적이다. 비퍼지화 값이 구해지면, 이에 따른 평가는 퍼지화 과정에서 명시된 최소값/최대값 범위를 사용하여 원래의 값으로 만들어 준다.

## 5. 결론

전통목조시스템의 구조적 안전성 평가에 관하여 기존의 공학적인 연구가 부족하고 또한 각 전문가의 의견이 특성상 주관적이고 불확실성이 크다는 문제점을 해결하기 위하여 퍼지추론 방법론 및 시스템

구현에 대한 원형을 제시하였다. 안전점검의 자료가 구조적 안전성 평가로 이어질 수 있도록 평가 항목을 선정하고 체계적인 위계구조로 제시하였다. 평가항목의 선정은 기존 구조물의 안전점검 자료를 근거로 대표적인 구조물의 성능 변수들을 상위 레벨에 우선적으로 정의하고, 하위레벨로 내려가면서 각 항목에 대한 구체적인 평가가 이루어지도록 설정하였다. 향후, 실무적용 가능한 평가 시스템으로 발전시키기 위해서는 평가항목에 대한 설정 및 세부평가항목에 대한 통계적인 자료가 더욱 많이 확보되어야 한다. 평가항목의 분류체계는 경제적, 공학적, 그리고 통계적인 근거로 설정하여야 하나 본 연구에서는 구조 공학적인 측면에서 통상적으로 수용하고 있는 분류와 그 위계를 삼는 범주에 따랐다. 이에 대한 분류 및 체계는 많은 해석적 및 실험적 연구와 지속적인 안전점검 자료를 근거로 수정 및 보완되어야 한다.

표 2 목구조의 안전성 평가기준 자료

평가항목	세부항목	평가기준에 대한 자료	
시스템 일체성	평면구성	장방형보다는 정방형에 가까울수록 좋다.	
	기둥간 사이 간격	기둥간 사이 간격이 너무 넓지 않고, 간격들이 일정하면 좋다	
	접합부	지붕에서 공포를 지나 축부와 기둥에 이르기까지 모든 접합부들이 긴결되어 있어야 된다.	
수직하중 저항능력	하중경로	연속성	하중흐름도에서 하중의 흐름이 끊어짐이 없어야 한다.
		잉여도	나란한 부재들(예, 서까래 간격, 기둥간격)의 간격이 적절하게 되어 있어야 한다.
	하중분담	부재배치	하중분담도에서 특별히 하중집중이 발생하는 부재가 발생하지 않아야 한다.
		단면강성분포	같은 하중군에 속한 부재들의 단면크기가 가급적 균등히 배치되어 있으면 좋다.
		공포의 접합부	수직하중 전달체계에서 하중전달역할을 잘 감당할 수 있도록 하중중심축을 따라서 배치되어야 좋다.
	과다변형	부재와 접합부의 변형	휨재의 처짐, 압축재의 기울음, 접합부의 회전 발생하지 않아야 한다.
	초과응력	단면열화	긴조수축, 균열, 파단, 파손에 의한 단면 결손이 최대 15% 이내로 적어야 된다.
수평하중 저항능력	하중경로	다이아프램	횡하중을 잘 전달하기 위해서 지붕틀구조가 변형없이 형상을 잘 유지하고 있어야 한다.
		기둥/창방	수평하중 저항 강성을 잘 발휘하기 위해서는 기둥들이 창방으로 긴결하게 연결되어 있어야 한다.
		잉여도	외진주와 나란하게 내진주가 배치되어 있는 이중골조로 되어 있으면 좋다.
	하중분담	부재배치	같은 하중군에 속한 부재들의 단면크기가 가급적 균등히 배치되어 있으면 좋다.
		단면강성분포	기둥단면의 크기가 시스템의 강성중심과 부재와의 거리에 비례적이면 좋다.
		보강재	보강재, 벽체, 락보가 잘 구성되어 있으면 좋다.
	형변위	접합부	접합부의 미끄럼 마찰력의 수용력이 좋아야 한다.
	초과응력	강심/무게중심	강심과 무게중심이 일치할수록 좋다. 즉 대칭적 평면이 좋다.
		귀주	횡하중의 비틀림 효과를 잘 견디기 위해서는 귀기둥이 건전해야만 된다.

표 3. 목구조의 안전성 평가를 위한 퍼지규칙

평가항목	퍼지규칙
시스템 일체성	R1. (plan regularity==very poor) => (integrity==very poor) (1) R2. (bay distance==very poor) => (integrity==very poor) (1) R3. (connection==very poor) => (integrity==very poor) (1) R4. (plan regularity==poor) & (bay distance==poor) & (connection==poor) => (integrity==very poor) (1)
수직하중 저항능력	R1. (continuity==very poor)   (redundancy==very poor) =>(load path=very poor) (2) R2. (member arrangement==very poor)   (stiffness distribution==very poor)   (bracket connection==very poor) => (load distribution=very poor) (2) R3. (member deformation==very poor) => (member deformability=very poor) (1) R4. (member deterioration==very poor)=>(strength=very poor) R5. (load path==very poor)& (load distribution==very poor)=>(gravity load resisting capacity=very poor) R6. (load path==very poor)& (member deformability==very poor)=>(gravity load resisting capacity=very poor) R7. (member deformability==very poor)   (strength==very poor)=>(gravity load resisting capacity=very poor)
수평하중 저항능력	R1. (diaphragm==very poor)   (column-tier system==very poor) =>(load path=very poor) (2) R2. (column-tier system== poor) & (redundancy==very poor)=>(load path=very poor) R3. (member arrangement==very poor)   (stiffness distribution==very poor) => (load distribution=very poor) R4. (stiffness distribution== poor) & (brace system==very poor) => (load distribution=very poor) (2) R5. (connection friction capacity ==very poor) => (story drift=very poor) (1) R6. (CS-CM==very poor)&(corner column==very poor) =>(strength=very poor) R7. (load path==very poor)& (load distribution==very poor)=>(lateral load resisting capacity=very poor) R8. (load path==very poor)& (member deformability==very poor)=>(lateral load resisting capacity=very poor) R9. (story drift==very poor)   (strength==very poor)=>(lateral load resisting capacity=very poor)

### 감사의 글

본 연구는 2005년 국립문화재연구소의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 연구자들은 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

이상진 (2000) 스위프 기하학적 모델을 사용한 프리즘 셸의 최적화, 한국전산구조공학회 논문집, 13(2), pp.221~230.

Kir, G.J and Folger, T.A (1988)., Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

경북공 근정전 구조안전진단보고서(2001), 한국건설안전기술원, 문화재청 2001.6

봉정사 극락전 정밀안전진단보고서(2003), 한국건설안전기술원, 2003.3

조계사 대웅전 정밀안전진단보고서(2003), 한국건설안전기술원, 2003.3