

발간등록번호

11-1550000-001460-01

# 국가지정문화재(목조, 석조) 내진점검 및 진단 매뉴얼 (변경안)

2013 문화재 지진재해 기초평가 연구

〈부록〉







# 목 차

1. 일반	1
1.1 지진의 이해	1
1.1.1 지구 구조와 지각	1
1.1.2 지진발생	2
1.1.3 지진파의 종류	3
1.1.4 지진규모	3
1.1.5 지진하중 산정	6
1.2 지진하중	7
1.3 지진위험도	7
1.3.1 지진구역 및 지역계수	7
1.3.2 지진하중	7
1.3.3 평가기준 지진의 스펙트럼 가속도	8
1.3.4 지반의 분류 및 지반증폭계수	8
1.3.5 평가기준 지진의 응답가속도스펙트럼	9
1.4 성능수준	10
1.5 문화재 지반 및 주변환경조사	12
1.6 지반을 고려한 지진하중	12
1.7 평가대상	13
1.8 평가자 자격	13
1.9 평가방법	14
2. 지반 및 환경 진단 매뉴얼	15
2.1 기초점검	15
2.1.1 기초점검 과정	15
2.1.2 기초점검 결과	18
2.2 전문 평가	18
3. 목조문화재의 내진진단 매뉴얼	19
3.1 지진재해 평가의 분류	19

3.1.1 기초점검 .....	20
3.1.2 전문 평가 .....	20
3.2 기초점검 .....	21
3.2.1 기초점검 과정 .....	21
3.2.2 기초점검 결과 .....	30
3.2.3 평가 결과에 따른 조치 .....	33
3.3 전문평가 1차 .....	33
3.3.1 요구스펙트럼의 작성 .....	33
3.3.2 능력스펙트럼의 작성 .....	34
3.3.3 성능점의 산정 .....	38
3.3.4 성능평가 .....	42
3.4 전문평가 2차 .....	42
3.4.1 개요 .....	42
3.4.2 구조해석 모형화 .....	43
3.4.3 해석결과의 검증 .....	43
3.4.4 이중곡선의 작성 .....	44
3.4.5 노후도에 대한 고려방안 .....	45
3.4.6 판정결과에 대한 조치 .....	45
4. 석조문화재의 내진진단 매뉴얼 .....	47
4.1 지진재해 평가의 분류 .....	47
4.1.1 기초점검 .....	47
4.1.2 전문 평가 .....	47
4.2 기초점검 .....	48
4.2.1 기초점검을 위한 주요 용어 .....	51
4.2.2 기초점검 결과 .....	65
4.2.3 추가 고려 사항 .....	65
4.2.4 전문평가와 연계를 통한 내진성능 평가 .....	66
4.3 전문 평가 .....	67
4.3.1 구조안정성 평가 .....	67
4.3.2 구조해석을 이용한 평가 .....	71

## 표 목차

표 1.1	지진규모와 진도세기 .....	4
표 1.2	지진구역 구분 및 지역계수 .....	7
표 1.3	지반의 분류 .....	8
표 1.4	지반증폭계수 $F_a$ .....	9
표 1.5	지반증폭계수 $F_v$ .....	9
표 1.6	건축문화유산의 내진성능목표와 지반운동 수준 .....	11
표 1.7	구조부재의 손상상태에 따른 성능수준 .....	11
표 1.8	성능수준의 정의 .....	11
표 2.1	지반 및 주변환경에 대한 기초자료 점검항목 .....	16
표 2.2	문화재 위치 지반 및 주변환경에 대한 기초점검 .....	17
표 2.3	지반 및 환경에 대한 기초점검 결과 판단 .....	18
표 3.1	국내 목조문화재의 기초점검 항목 .....	24
표 3.2	국내 목조문화재의 기초점검 체크리스트 .....	26
표 3.3	인지적 판단의 정량화 .....	31
표 3.4	무작위 지수 .....	31
표 3.5	국내 목조문화재의 기초점검 결과 판단 .....	33
표 3.6	내진성능목표와 지반운동 수준 .....	34
표 3.7	전통목구조 손상상태 정의 .....	42
표 4.1	석탑문화재의 자료조사-전체시스템 .....	49
표 4.2	석탑문화재의 자료조사-구조요소 .....	50
표 4.3	기초점검 항목의 주요사항 .....	52
표 4.4	석탑문화재의 기초점검 항목 .....	53
표 4.5	석탑문화재의 기초점검 항목의 점검기준 .....	54
표 4.6	석탑문화재의 기초점검 항목 해설 .....	55
표 4.7	전탑문화재의 기초점검 항목 .....	59
표 4.8	전탑문화재의 기초점검 항목의 점검기준 .....	60
표 4.9	전탑문화재의 기초점검 항목 해설 .....	61
표 4.10	석교문화재의 기초점검 항목 .....	62
표 4.11	석교문화재의 기초점검 항목의 점검기준 .....	63
표 4.12	석교문화재의 기초점검 항목 해설 .....	64
표 4.13	석탑문화재의 기초점검 결과 .....	65
표 4.14	전탑 및 석교문화재의 기초점검 결과 .....	65
표 4.15	허용 층간변위 검토 방안 .....	73
표 4.16	석탑 문화재의 내진성능 목표 .....	74
표 4.17	석탑 문화재의 내진성능 목표에 따른 검토 방안 .....	74
표 4.18	석조문화재의 손상상태 정의 .....	75
표 4.19	축조형식에 따른 동적거동 분석 결과 .....	75
표 4.20	석탑문화재의 형상비에 따른 동적거동 분석 결과 .....	76

# 그림목차

그림 1.1 지구의 크기와 내부구조 .....	1
그림 1.2 판구조에 따른 지각의 판 .....	1
그림 1.3 판운동에 따른 경계면에서의 단층 .....	2
그림 1.4 판의 경계면에서의 지진발생 메커니즘 (2008년 중국 쓰촨성 지진) .....	2
그림 1.5 P파와 S파의 진행 .....	3
그림 1.6 구조물 저면 움직임에 따른 저층과 고층 구조물의 변형 .....	6
그림 1.7 설계스펙트럼 가속도(KBC 2009) .....	10
그림 3.1 목조문화재 내진평가 순서도 .....	19
그림 3.2 표준편차 적용 예시 .....	32
그림 3.3 목조건축물 양호도 판단 .....	32
그림 3.4 횡력과 복원력의 개념도 .....	34
그림 3.5 기둥의 복원력 .....	34
그림 3.6 목구조의 내력산정(1차 평가) .....	35
그림 3.7 밀면전단력-변위비의 관계곡선과 가속도-변위의 관계곡선 .....	36
그림 3.8 가속도-변위 반응스펙트럼(ADRS)의 유효 주기와 등가선형 시스템의 감쇠계수 .....	38
그림 3.9 할선 주기 $T_{sec}$ 와 수정 가속도-변위 반응 스펙트럼 (MADRS) .....	39
그림 3.10 직접 반복법 .....	40
그림 3.11 능력 스펙트럼의 이선형 모델 .....	45
그림 4.1 석조문화재(석탑) 내진평가 순서도 .....	48
그림 4.2 석조문화재의 부재 명칭 .....	51
그림 4.3 강체의 미끄러짐 거동 .....	67
그림 4.4 강체의 회전 거동 .....	68
그림 4.5 강체거동 분석도 .....	68
그림 4.6 형상비와 마찰계수를 고려한 강체거동 분석도 .....	69
그림 4.7 형상비와 마찰계수를 고려한 강체거동 분석도 .....	69
그림 4.8 다층으로 구성된 강체거동 분석도 .....	70
그림 4.9 수행 절차 .....	71
그림 4.10 부재의 미끄러짐 검토 방안 .....	73
그림 4.11 석조문화재의 내진성능 .....	74

## 1. 일반

### 1.1 지진의 이해

#### 1.1.1 지구 구조와 지각

지구 내부는 그림 1과 같이 여러 개의 층으로 구분되는데 중심부에는 고체 핵과 그 둘레에 액체 상태의 핵으로 이루어지고 그 둘레는 다시 맨틀구조로 이룬다. 지각은 암석으로 이루어진 지구의 표면을 이루며 평균두께 35 km로 상대적으로 얇은 부분이다. 이 지각이 달걀껍질처럼 균열이 생기고 갈라지면서 현재 대륙을 이루고 있다. 조각난 지각이 계속해서 맨틀 위를 이동하고 있다.

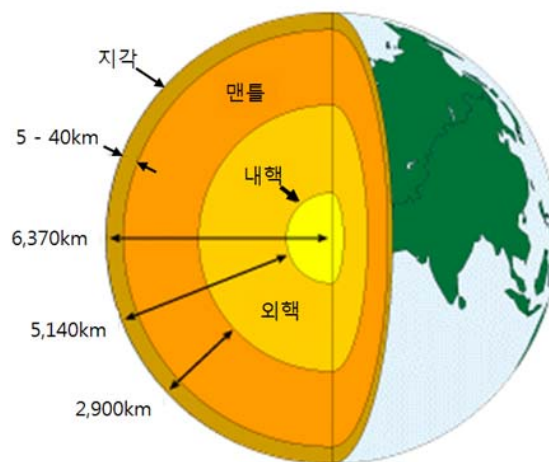


그림 1.1 지구의 크기와 내부구조



그림 1.2 판구조에 따른 지각의 판



### 1.1.2 지진발생

지질학자와 지진학자들에 의하면 조각난 지각들은 맨틀의 대류작용으로 지각의 경계면에서는 떨어지거나 서로 부딪히면서 다양한 판운동을 하고 있다. 특히 지각이 서로 겹쳐지는 경계선에서 지각이 변형을 일으키거나 내부의 응력이 증가한다. 누적된 응력이 어느 순간에 도달하면 갑작스럽게 미끄러짐 현상을 일으키면서 에너지를 방출한다. 이러한 방출에너지가 지각판을 통해 파동으로 변환되면서 지진파를 발생한다.

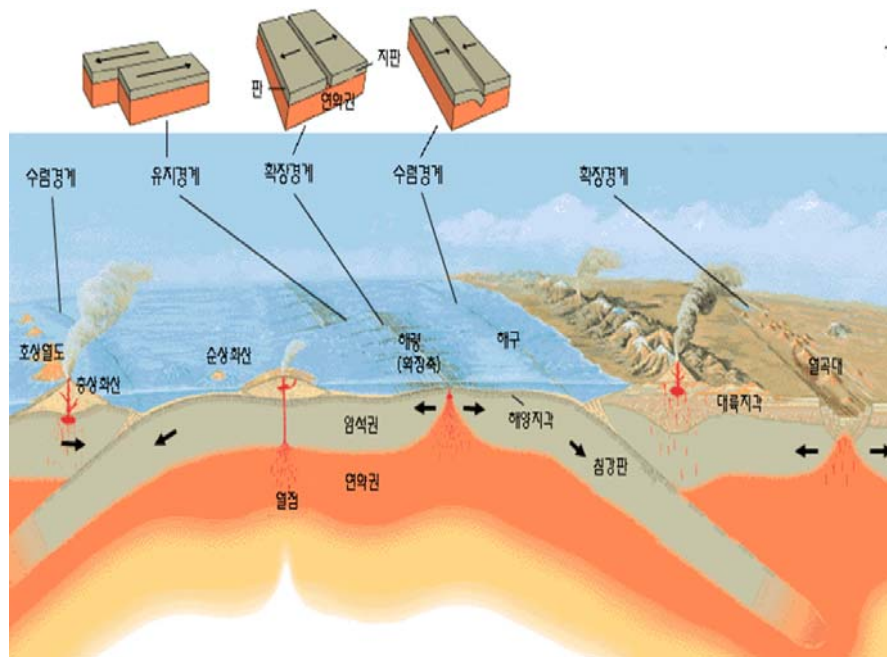


그림 1.3 판운동에 따른 경계면에서의 단층

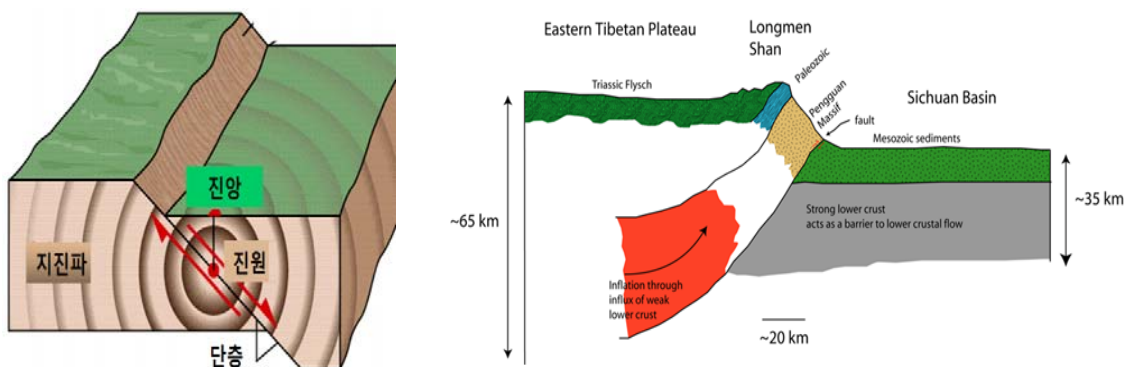


그림 1.4 판의 경계면에서의 지진발생 매커니즘 (2008년 중국 쓰촨성 지진)

### 1.1.3 지진파의 종류

지진이 발생할 때의 지구 내부에서 암석의 급격한 파괴가 발생하는데 이에 탄성체인 지구 내부 또는 표면을 따라 전파되는 탄성파를 지진파라 한다. 지진파는 전파 특성에 따라 실체파와 표면파로 나눌 수 있다. 실체파는 지구 내부 깊숙이 전파되어 지표에 도달하며, P파(Primary wave)와 S파(Secondary wave)가 있다. P파의 전파속도는 5 km/sec~7 km/sec로, 전파 방향으로 입자들 사이의 간격을 탄성적으로 압축과 팽창을 반복하여 부피의 변화를 일으킨다. S파는 P파의 전파속도보다 약 1.7배인 3 km/sec 속도로 낮은 진동수와 높은 진폭으로 P파보다 위험하다.

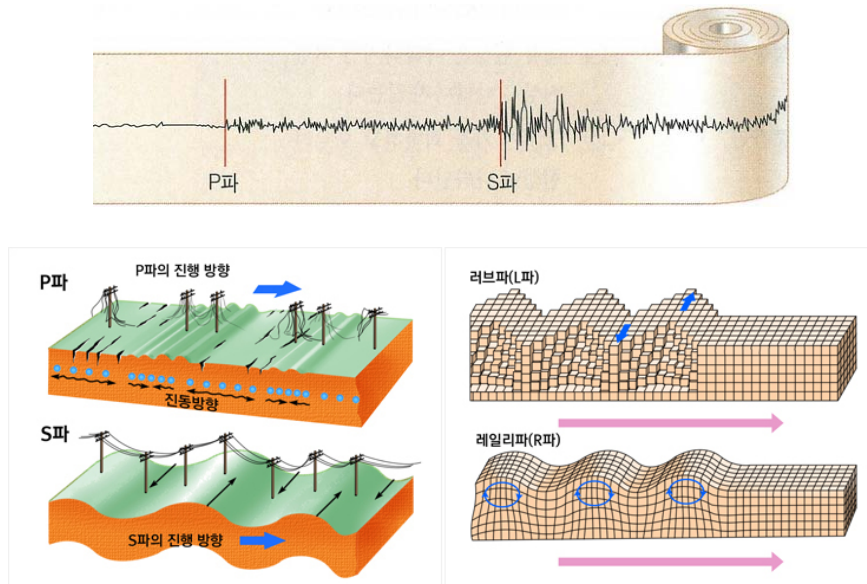


그림 1.5 P파와 S파의 진행

### 1.1.4 지진규모

지진의 크기를 나타내는 척도로서 규모와 진도가 사용된다. 규모는 진원에서 방출된 지진에너지의 양을 나타내며, 지진계에 기록된 지진파의 진폭을 이용하여 계산한 절대적인 척도이다. 반면 진도는 어떤 한 지점에서의 인체 감각, 구조물에 미친 피해정도에 의하여 지진동의 세기를 표시한 것으로 관측자의 위치에 따라 달라지는 상대적인 척도이다.

규모가 큰 지진이라도 아주 멀리서 발생하면 지진에너지가 전파되면서 감쇠하기 때문에 지진동이 약해지며, 반대로 작은 규모의 지진이라도 아주 가까운 거리에서 발생하면 지진에너지의 감쇠가 적어 지진동이 강하게 기록된다. 진도는 지진의 규모와 진앙거리, 진원깊이에 따라 크게 좌우될 뿐만 아니라 그 지역의 지질구조와 구조물의 형태에 따라 달라질 수 있다. 따라서 규모와 진도는 1대1 대응이 성립하지 않으며, 하나의 지진에 대하여 여러 지역에서의 규모는 동일하나 진도는 달라질 수 있다.

지진세기는 그것을 느끼는 반응이나 피해정도에 따라 분류한다. 메르칼리 진도는 10 등급으로 수정 메르켈리 진도는 12 등급으로 나누어 지진세기를 표현하지만 관찰자의 주관에 따라 표현하므로 정확도가 떨어진다. 이를 정확하게 지진계를 이용하여 변위, 속도, 그리고 가속도로 표현하는 것이 공학적으로 의미가 있다. 지진의 방출 에너지에 대한 정량적인 측정에는 리히터 스케일이 일반적으로 많이 쓰인다. 에너지 방출과 규모 사이의 훨씬 복잡한 관계로부터 단위가 1씩 증가되면 근사적으로 지진에너지가 32배 증가된다.

표 1.1 지진규모와 진도세기

지진 규모	진도값과 설명
1.0~ 2.9	I. 특별히 좋은 상태에서 극소수의 사람을 제외하고는 전혀 느낄 수 없다.
3.0~ 3.9	II. 소수의 사람들, 특히 건물의 윗층에 있는 소수의 사람들에 의해서만 느낀다. 섬세하게 매달린 물체가 흔들린다.
	III. 실내에서 현저하게 느끼게 되는데, 특히 건물의 윗층에 있는 사람에게 더욱 그렇다. 그러나 많은 사람들은 그것이 지진이라고 인식하지 못한다. 정지하고 있는 차는 약간 흔들린다. 트럭이 지나가는 것과 같은 진동이 있고 지속 시간이 산출된다.
4.0~ 4.9	IV. 낮에는 실내에 서있는 많은 사람들이 느낄 수 있으나, 옥외에서는 거의 느낄 수 없다. 밤에는 일부 사람들이 잠을 깬다. 그릇, 창문, 문 등이 소란하며 벽이 갈라지는 소리를 낸다. 대형 트럭이 벽을 받는 느낌을 준다. 정지하고 있는 자동차가 뚜렷하게 움직인다.
	V. 거의 모든 사람들이 지진동을 느낀다. 많은 사람들이 잠을 깬다. 약간의 그릇과 창문 등이 깨지고 어떤 곳에서는 회반죽에 금이 간다. 불안정한 물체는 넘어진다. 나무, 전선주 등 높은 물체가 심하게 흔들린다. 추시계가 멈추기도 한다.

지진 규모	진도값과 설명
5.0~ 5.9	<p>VI. 모든 사람들이 느낀다. 많은 사람들이 놀라서 밖으로 뛰어 나간다. 어떤 무거운 가구가 움직이기도 한다. 벽의 석회가 떨어지기도 하며, 피해를 입은 굴뚝도 일부 있다.</p>
	<p>VII. 모든 사람들이 밖으로 뛰어 나온다. 설계 및 건축이 잘 된 건물에서는 피해가 무시할 수 있는 정도이지만, 보통 건축물에서는 약간의 피해가 발생한다. 설계 및 건축이 잘못된 부실건축물에서는 상당한 피해가 발생한다. 굴뚝이 무너지며 운전 중인 사람들도 지진동을 느낄 수 있다.</p>
6.0~ 6.9	<p>VIII. 특별히 잘 설계된 구조물에는 약간의 피해가 있고, 일반 건축물에서는 부분적인 붕괴와 더불어 상당한 피해를 일으키며, 부실 건축물에서는 아주 심하게 피해를 준다. 창틀로부터 창문이 떨어져 나간다. 굴뚝, 공장 물품더미, 기둥, 기념비, 벽들이 무너진다. 무거운 가구가 넘어진다. 모래와 진흙이 약간 분출된다. 우물물의 변화가 있다. 차량을 운행하기가 어렵다.</p>
	<p>IX. 특별히 잘 설계된 구조물에도 상당한 피해를 준다. 잘 설계된 구조물의 골조가 기울어진다. 구조물에 부분적 붕괴와 함께 큰 피해를 준다. 지표면에 선명한 금 자국이 생긴다. 지하 송수관도 파괴된다.</p>
7.0 이상	<p>X. 잘 지어진 목조 구조물이 부서지기도 하며, 대부분의 석조 건물과 그 구조물이 기초와 함께 무너진다. 지표면이 심하게 갈라진다. 기차선로가 휘어진다. 강둑이나 경사면에서 산사태가 발생하며, 모래와 진흙이 이동한다. 물이 튀며, 독을 넘어 흘러내린다.</p>
	<p>XI. 남아 있는 석조 구조물은 거의 없다. 교량이 부서지고 지표면에 심한 균열이 생긴다. 지하 송수관이 완전히 파괴된다. 연약한 지반에서는 땅이 꺼지고 지층이 어긋난다. 기차선로가 심하게 휘어진다.</p>
	<p>XII. 전면적인 피해가 발생한다. 지표면에 파동이 보인다. 시야와 수평면이 뒤틀린다. 물체가 공중으로 튀어나간다.</p>

### 1.1.5 지진하중 산정

목조건조물문화재는 지붕무게 및 자체 무게를 연직방향으로 지탱하고 있다. 또한 석탑도 다층 석재가 연직방향으로 자기 무게를 전달한다. 거기에 지진파가 도달하면 질량과 가속도의 곱으로 횡방향으로 하중이 시간에 따라 변화하는 동적 하중이 작용한다. 구조물의 저면이 순간적으로 움직이면 윗부분의 구조는 관성의 법칙에 따라 원래위치를 유지한다. 저면과 구조물의 중심의 차이는 관성력으로 작용한다. 진앙지 근처에서는 암반 및 지반의 변위, 속도, 가속도가 상하로 발생하지만 대개 진앙지에서 떨어지면 건물을 좌우로 흔들리게 된다. 이러한 좌우 관성력은 구조물의 강하면 많은 하중이 작용하고 유연하면 작은 관성력이 작용한다. 또한 구조물의 무게에 따라 반응정도가 달라진다. 구조물의 강하고 유연정도에 질량은 동적인 특성은 고유주기로 나타난다. 구조물의 고유주기는 지진파가 가지고 있는 고유주기와 밀접한 관계를 가지고 지진하중으로 나타난다.

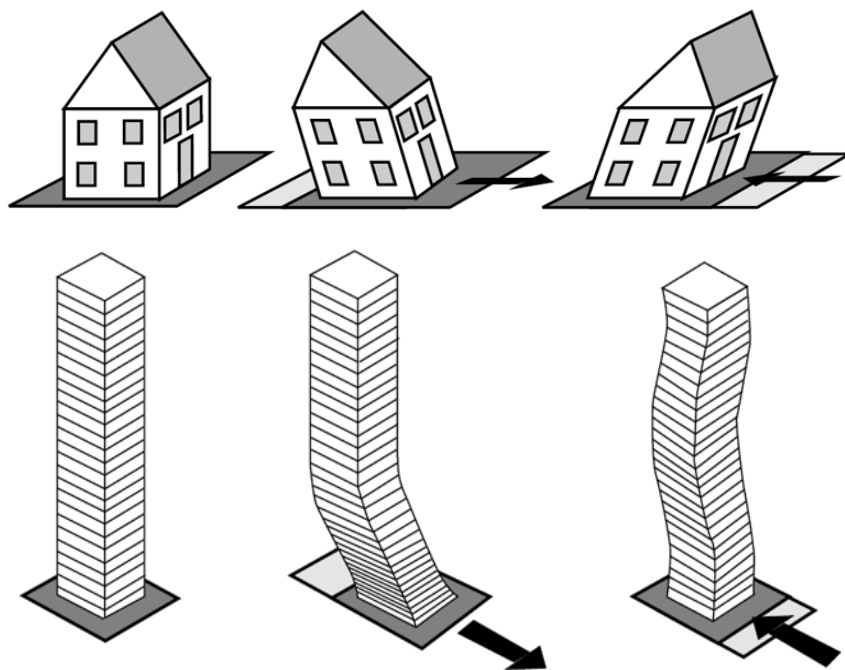


그림 1.6 구조물 저면 움직임에 따른 저층과 고층 구조물의 변형

## 1.2 지진하중

내진성능 평가를 위한 지진하중의 산정은 지진위험도의 유효지반가속도로 표현한다. 이는 2009년 대한건축학회에서 제정한 ‘건축구조기준 및 해설’(이하 KBC2009)의 내용을 따른다. KBC2009에서는 2400년 재현주기의 하중을 예상 가능한 최대하중으로 사용하고 있다. 이에 대한 유효지반가속도를 표 1.1과 같이 설정하며, KBC2009에 따라 재현주기에 따른 문화재의 성능목표를 설정하고, 이 성능을 확보하고 있는지 평가하여야 한다. 이와 같은 지진하중에 대한 구조안정성평가의 체계적인 접근은 기초점검과 전문평가의 2 단계로 접근한다.

## 1.3 지진위험도

### 1.3.1 지진구역 및 지역계수

우리나라의 지진구역 및 이에 따른 유효지반가속도는 표 1.2 와 같이 구분한다.

표 1.2 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역	행정구역	유효지반가속도 S
1	지진구역 2를 제외한 전지역	0.22
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.14

※ 강원도 북부(군,시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시  
전라남도 남서부(군,시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시

### 1.3.2 지진하중

평균재현주기 1000년의 하중은 KBC2009의 설계하중 값의 2/3 수준을, 평균재현주기 500년의 하중은 KBC2009의 설계하중의 1/2 수준을, 그리고 평균재현주기 200년의 하중은 KBC2009의 설계하중의 1/3을 곱한 값을 사용한다. 재현주기의 길어지면 지진크기가 증가한다. 재현주기와 지진규모의 대략적인 관계는 보고서를 참고할 수 있다. 유효지반가속도 S값은 지진재해도(내진설계기준연구 II, 국토해양부, 1997)를 이용하여 구할 수 있으며, 지진 재해도에서 결정한 S값은 표 1.1을 통해 구한 S값의 80% 이상이어야 한다.

### 1.3.3 평가기준 지진의 스펙트럼 가속도

평가기준 지진의 단주기스펙트럼가속도  $S_{DS}$ 와 주기 1초 스펙트럼가속도  $S_{D1}$ 는 각각 식(1.1)과 식 (1.2)로부터 구한다.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S \times 2.5 \times F_a \quad (1.1)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S \times F_v \quad (1.2)$$

여기서, S는 표 1.1에 의해 주어지는 재현주기 2400년 지진의 유효지반가속도 즉, KBC2009의 지역계수)이고,  $F_a$ 와  $F_v$ 는 표 1.4과 표 1.5에 의해 주어진 지반증폭계수이다.

### 1.3.4 지반의 분류 및 지반증폭계수

#### 1.3.4.1 지반분류

국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 표 1.2와 같이 5종으로 분류한다. 지반의 분류를 위한 지반조사방법은 KBC2009의 “0402 지반조사”에 따라 수행한다.

문화재 하부 또는 주변지반 조사는 지구물리학적 비파괴 시험을 권장한다. 지반조사를 통하여 지반의 지층구조, 기반암 깊이, 지하수위, 전단파속도 주상도를 획득한다.

표 1.3 지반의 분류

지반 종류	지반종류의 호 칭	상부 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 $\overline{N}$ (타격횟수/300mm)	비배수전단강도 $\frac{\overline{s}_u}{s_u}$ ( $\times 10^{-3}$ MPa)
$S_A$	경암 지반	1500 초과	-	-
$S_B$	보통암 지반	760에서 1500		
$S_C$	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
$S_D$	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
$S_E$	연약한 토사 지반	180 미만	< 15	< 50

### 1.3.4.2 지반분류의 기준면

일반적으로 지반분류는 지표면을 기준으로 정한다. 다만, 기초저면의 지반종류가  $S_C$  이상의 단단한 지반인 경우에는 기초면을 지반분류의 기준면으로 사용할 수 있다.

### 1.3.4.3 지반증폭계수

지반증폭계수는 지반분류에 따라 표1.4과 표1.5와 같다.

표 1.4 지반증폭계수  $F_a$

지반종류	지진구역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
$S_A$	0.8	0.8	0.8
$S_B$	1.0	1.0	1.0
$S_C$	1.2	1.2	1.1
$S_D$	1.6	1.4	1.2
$S_E$	2.5	1.9	1.3

\* $S_s$ 는 S를 2.5배한 값이다. 위 표에서  $S_s$ 의 중간값에 대하여는 직선 보간한다.

표 1.5 지반증폭계수  $F_v$

지반종류	지진구역		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_A$	0.8	0.8	0.8
$S_B$	1.0	1.0	1.0
$S_C$	1.7	1.6	1.5
$S_D$	2.4	2.0	1.8
$S_E$	3.5	3.2	2.8

\* 중간 값에 대하여는 직선 보간한다.

### 1.3.5 평가기준 지진의 응답가속도스펙트럼

평가기준 지진의 응답가속도스펙트럼은 식 (1.1)에 따른 단주기 스펙트럼 가속도  $S_{DS}$ 와 식 (1.2)에 따른 주기1초 스펙트럼가속도  $S_{D1}$ 으로부터 다음 식에 따라 구한 후 그림 1.2과 같이 작성한다.



- 1)  $T \leq T_0$ 일 때, 스펙트럼가속도  $S_a$ 는 식 (1.3)에 따른다.
- 2)  $T_0 \leq T \leq T_S$ 일 때, 스펙트럼가속도  $S_a$ 는  $S_{DS}$ 와 같다.
- 3)  $T > T_S$ 일 때, 스펙트럼가속도  $S_a$ 는 식 (1.4)에 따른다.

$$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \quad (1.3)$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (1.4)$$

여기서,  $T$  = 주기(초),  $T_0 = 0.2 S_{D1}/S_{DS}$ ,  $T_S = S_{D1}/S_{DS}$  이다.

$T$ (주기)

그림 1.7 설계스펙트럼 가속도(KBC 2009)

## 1.4 성능수준

- 1) 건조물문화재의 내진성능목표는 즉시복구수준과 붕괴방지수준으로 구분한다.
- 2) 건조물문화재는 표 1.6에 규정한 평균재현주기를 갖는 지반운동에 대하여 즉시복구 수준과 붕괴방지 수준을 만족하도록 한다. 단 건물이 소장한 미술품의 가치를 고려한 평가는 유보한다.
- 3) 해체수리 및 개보수 주기를 고려하여 목조와 석조구조물의 평균 재현주기를 다르게 산정한다.

표 1.6 건축문화유산의 내진성능목표와 지반운동 수준

내진성능목표		특등급	1등급
즉시복구		평균재현주기 500년	평균재현주기 200년
붕괴방지	목조	평균재현주기 1000년	평균재현주기 500년
	석조	평균재현주기 2400년	평균재현주기 1000년

표 1.7 구조부재의 손상상태에 따른 성능수준

성능수준	피해
즉시복구	지진 후 구조물의 피해는 경미하며 수직하중저항시스템과 지진력 저항시스템은 지진전의 강성과 강도를 보유한 상태이어야 한다. 구조부재의 손상으로 인명에 피해를 입을 가능성은 매우 낮으며 손상부재에 대한 보수가 필요하지만 사용가능을 위해 반드시 필요하지는 않다.
붕괴방지	구조물이 심각한 피해를 입은 상태로 국부적 혹은 전체적인 붕괴가 임박한 상태이다. 지진력 저항시스템에 상당한 강도 및 강성의 저하가 있으며 횡방향 영구변형이 발생한다. 그러나 중력하중저항시스템은 여전히 하중을 지지할 수 있다. 구조부재의 박락 등으로 인명피해가 생길 수 있으며 일반적인 보수보강 후에도 거주에 안전하지 않을 수 있다. 여진으로 인해 붕괴가 발생할 수 있다.

이 내진평가 요령에 따른 내진성능평가결과는 문화재 전체의 성능수준으로 각 성능수준에 해당하는 구조물의 상태는 표 1.8과 같다.

표 1.8 성능수준의 정의

성능수준	상태
즉시복구	문제점이 없는 최상의 상태. 평가기준 지진 작용시 구조부재의 피해는 무시할만하며 비구조재에 손상이 있으나 거주에 안전하며 보수와 청소를 통해 기능을 수행할 수 있음.
붕괴방지	평가기준 지진 작용시 구조부재에 큰 피해가 예상됨. 대부분의 구조부재에서도 강도와 강성저하가 크게 일어나지만 수직하중저항시스템의 붕괴는 발생하지 않음. 여진에 의해 붕괴가능성이 있으므로 거주에 적합하지 않음. 구조물의 보수에 의한 기능의 복원이 사실상 어려움.
(붕괴)	평가기준 지진 작용시 일부 수직하중저항시스템이 연직하중저항능력을 소실하여 부분적인 붕괴 혹은 전면적인 붕괴가 발생함.

## 1.5 문화재 지반 및 주변 환경 조사

- 1) 문화재 하부 기초 지반 및 주변지반의 종류를 결정한다.
- 2) 지반침하 여부를 파악하고, 부등침하 또는 토양유실 가능성을 평가한다.
- 3) 옹벽, 축대 등의 주변 지반구조물 영향 가능성을 평가한다.
- 4) 건조물문화재 내부의 문화재에 대한 피해 가능성을 평가한다.
- 5) 인접지형의 경사도 및 산사태/토석류 가능성을 평가한다.
- 6) 인접한 도로, 철도, 지하철, 공사현장 등 진동유발요소를 파악한다.
- 7) 활성단층 인접지역 여부, 인접하천 유무와 지하수위, 화재위험 요인, 주변 고목 전도 가능성, 지진으로 인해 유발 가능한 간접피해 또는 2차 피해 가능성 등의 주변 환경조사를 선택적으로 수행한다.

## 1.6 지반을 고려한 지진하중

- 1) 건조물문화재 지표면의 지진응답은 수평지반 지표면에서의 자유장 운동으로 정의하고, 지표면 자유장 최대가속도 값을 이용한다.
- 2) 국지적인 토질조건, 지질조건, 지형조건 등이 지반운동에 미치는 영향을 고려한다.
- 3) 설계 지반운동은 진폭, 주파수 내용 및 지속시간의 세 가지 측면에서 그 특성을 합리적으로 정의한다.
- 4) 지표면의 지진응답을 구하기 위해서는 국내 내진설계기준을 이용하는 방법, 기 수행된 부지고유의 지반응답해석 자료를 이용하는 방법, 부지고유의 지반응답해석을 직접 수행하는 방법 등 세 가지 방법 중 하나를 선택한다.

### (1) 국내내진설계기준 이용

- 건축구조기준 및 해설(KBC2009) 등의 국내내진설계기준을 이용하여 지반을 분류하고 지반증폭계수를 산정한다.
- 건조물문화재 지표면의 지진응답 즉 최대 가속도값은 해당 지역 보통암 암반 노두 최대가속도에 그 지역의 지반증폭계수를 곱하여 결정한다.

## (2) 기존 지반조사 자료 및 지반응답해석 자료 활용

- 주요 건조물문화재 주변 지반에 대한 지반조사 및 부지고유의 지반 응답해석 자료를 활용하여 지표면의 지진응답 정보를 획득한다.
- 경주, 부여, 서울 역사도시 지역의 주요 건조물문화재에 대한 설계 지반운동 및 지반증폭계수는“건조물문화재 지진 홍수 재해 위험도 평가 연구(국립문화재연구소, 2009; 2010; 2011)”의 내용을 준용하여 결정할 수 있다.

## (3) 시나리오 지진에 대한 부지고유의 지반응답해석 수행

- 지반조사 결과를 바탕으로 부지고유의 지반응답해석을 수행하여 해당부지에 적합한 지표면 지진응답 수준을 결정한다.
- 해석 수행을 위한 시나리오 지진파는 그 주파수특성, 진폭, 지속시간을 고려하여 3개 이상의 지진파를 선택한다.
- 지반응답해석은 부지의 지형조건을 고려하여, 1차원 등가선형해석 또는 2차원/3차원 비선형해석을 수행할 수 있다.

## 1.7 평가대상

이 매뉴얼의 적용대상문화재는 국가지정 문화재로 주요 구조재료에 따라 목구조, 석조로 평가절차를 제시하며 구조형식과 부재의 배치 및 기하학적인 특성에 따라 세분할 수 있다.

## 1.8 평가자 자격

합리적인 평가를 위해서 문화재의 내진성능 평가자는 문화재와 지진공학 및 내진설계에 대한 전문적인 지식을 갖는 문화재전문가이어야 한다. 기초점검은 소유자, 관리자, 담당공무원으로 가능하며 전문평가는 지진관련 구조공학 전문가로서 문화재전문가의 지속적인 자문을 통해 수행하여야 한다.

## 1.9 평가방법

이 매뉴얼은 기초점검과 전문평가의 방법을 제시한다. 기초점검은 현장의 육안검사와 비파괴 시험을 통해 도표의 평가점수를 환산하여 이루어진다. 전문평가는 재료특성을 파악하여 전문평가에서 제시한 방법에 따라 성능점 및 구조적 안정성 여부를 판단한다.

## 2. 지반 및 환경 진단 매뉴얼

이 매뉴얼은 건조물문화재를 대상으로 하며 석조문화재가 지녀야 할 고유의 내진성능을 바르게 유지하고 있는지 평가를 수행할 수 있도록 “문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가 기준 마련 연구”를 바탕으로 평가항목과 기준을 작성하였다.

일상점검 또는 기초자료조사 과정에서 내진성능 확보에 영향을 주는 주요 요소들을 우선적으로 살펴볼 수 있는 기초평가와 관련 전문지식을 갖춘 전문가가 내진성능을 평가하는 데 사용할 전문가 평가로 나눌 수 있다.

기초평가는 매뉴얼 상에 제시되어 있는 항목을 바탕으로 문화재 기초지반과 주변 환경에 대한 지진 피해 가능성을 검토하는 방법이다. 이는 일상적인 점검과 기본적인 조사과정에서 수행할 수 있는 방법이다.

전문가평가는 “문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가 기준 마련 연구”에서 수행한 지반조사 및 시나리오 지진에 대한 지반응답해석 결과분석을 바탕으로 문화재 위치 지반의 내진성능을 평가하는 방법이다. 이러한 방법은 지반지진공학을 전공한 전문가가 지진하중의 산정, 지진하중의 적용, 지반응답해석, 결과분석 및 내진성능 평가를 통해 이루어지게 된다. 이를 통해 건조물문화재의 위치 지반을 고려한 부지 고유의 응답특성을 평가할 수 있다.

### 2.1 기초점검

#### 2.1.1 기초점검 과정

기초점검은 문화재가 위치한 하부 기초지반과 주변 환경으로 나누어 점검할 수 있다. 표 2.1과 같이 기초자료 점검항목을 설정한다.

표 2.1 지반 및 주변 환경에 대한 기초자료 점검항목

항목	세부 항목	점검내용
기초지반	기존 지반조사 자료 유무	문화재가 위치한 지반 또는 주변지반에 대한 기존지반조사 자료 존재 여부
	기존 지반응답해석 자료 유무	지반조사 자료를 바탕으로 한 지반응답해석 수행 자료 존재 여부
	기초지반의 종류	지표면의 지반조건 파악 (토사/자갈/암반/기타)
	지반침하 가능성	하부지반 침하 여부 하부지반의 부등침하 가능성 토사 유실 가능성
주변환경	주변 지반구조물	옹벽, 축대 등에 의한 수평토압 작용 가능성과 문화재 하부지반의 부등침하 가능성의 여부를 육안으로 판단한다.
	인접지형의 경사도 (사면안정)	인접 산지의 경사도가 30도 이상인 경우 산사태 또는 토석류 가능성
	진동유발요소	인접지역을 지나는 도로, 철도, 지하철 진동을 유발하는 공사현장, 발파현장
	기타	활성단층 인접지역 여부 화재위험 요인 화재발생시 진압을 위한 시설

이러한 기초자 진단 결과는 문화재가 위치한 지반과 주변에 대한 지진위험요소를 총체적으로 살펴볼 수 있는 기초자료로 사용된다.

표 2.2 문화재 위치 지반 및 주변환경에 대한 기초점검

항목	점검내용	배점	
1. 기존 지반조사 자료 유무	없음	0점	
	있음	1점	
2. 기존 지반응답해석 자료 유무	없음	0점	
	있음	1점	
3. 기초지반의 종류	토사 / 자갈	0점	
	모름	0점	
	암반	1점	
4. 지반침하 가능성	하부지반 침하 발생	0점	
	부등침하 가능성 있음	0점	
	토사유실이 진행되었거나 가능성 있음	0점	
	모름	0점	
	지반침하 가능성 없음	1점	
5. 주변 지반구조물	인근에 옹벽, 축대, 석축 있음	0점	
	모름	0점	
	수평지반	1점	
6. 인접지형의 경사도 (사면안정)	인접지역 20도 이상의 경사 존재	0점	
	모름	0점	
	수평지반	1점	
7. 진동유발요소	인근에 도로, 철도, 지하철, 공사현장 존재	0점	
	없음	1점	
기타	8. 활성단층 인접지역 여부	활성단층 있음	0점
		모름	0점
		활성단층 없음	1점
	9. 화재위험 요인	전기통신, 가스공급, 조명, 인화성 물질 있음	0점
		없음	1점
	10. 화재발생시 진압을 위한 시설	관련시설 없음	0점
		소화시설 존재	1점
		상수도시설, 수로, 자연수리(하천, 우물) 존재	1점



### 2.1.2 기초점검 결과

표 2.1의 기초점검 항목에 따라 표 2.2의 기초점검 체크리스트를 사용하여 점검을 수행한다. 점검 후 획득 점수를 합산하여 다음 표 2.3과 같이 기초점검을 수행한 문화재 위치지반 및 주변환경에 대한 판단을 내릴 수 있다.

표 2.3 지반 및 환경에 대한 기초점검 결과 판단

점수		문화재 위치 지반 및 주변환경에 대한 내진성능 평가 결과	조치
평가 결과	9점 이상	내진성능이 있음	양호
	6~8점	내진성능 적절함	지속관찰
	4~5점	변형 우려는 없으나 주의 단계	문화재위원과 협의 필요
	3점	지반상태 불안하여 전문평가 필요	전문평가를 수행하여 안정성에 대한 정밀검토필요
	2점 이하	지반에 대한 전문가 평가 필요	지반에 대한 면밀한 전문평가 필요

#### ■ 주의 사항

- 점검결과보다는 석조문화재의 내진성능에 대한 정보를 알기 위한 것이 주요 목적이다.
- 기초점검의 경우 평가항목 중에서 잘 모르겠음 항목이 많을 경우 신뢰성이 저하되기 때문에 구조성능 및 평가항목에 따라 석조문화재를 보다 정확히 진단할 수 있도록 전문교육이 필요하다.

## 2.2 전문 평가

건조물문화재의 내진성능평가를 위하여 전문가 평가를 통해 우선적으로 지반을 고려한 지진하중이 문화재가 위치한 지반 지표면 또는 문화재 기단부에 얼마나 작용하는 지를 결정하여야 한다.

이를 위해 비파괴시험기법을 중심으로 한 지반조사와 내진성능수준 결정 및 이를 이용한 지진하중 산정의 단계로 전문가 평가를 실시할 수 있다.

### 3. 목조문화재의 내진진단 매뉴얼

#### 3.1 지진재해 평가의 분류

일상점검 또는 기초자료조사 과정에서 내진성능 확보에 영향을 주는 주요 요소들을 우선적으로 살펴볼 수 있는 기초점검과 문화재의 구조와 내진성능 평가에 대한 전문지식을 갖춘 전문가가 내진성능을 평가하는 데 사용할 전문평가로 대별해서 평가방법을 제시한다.

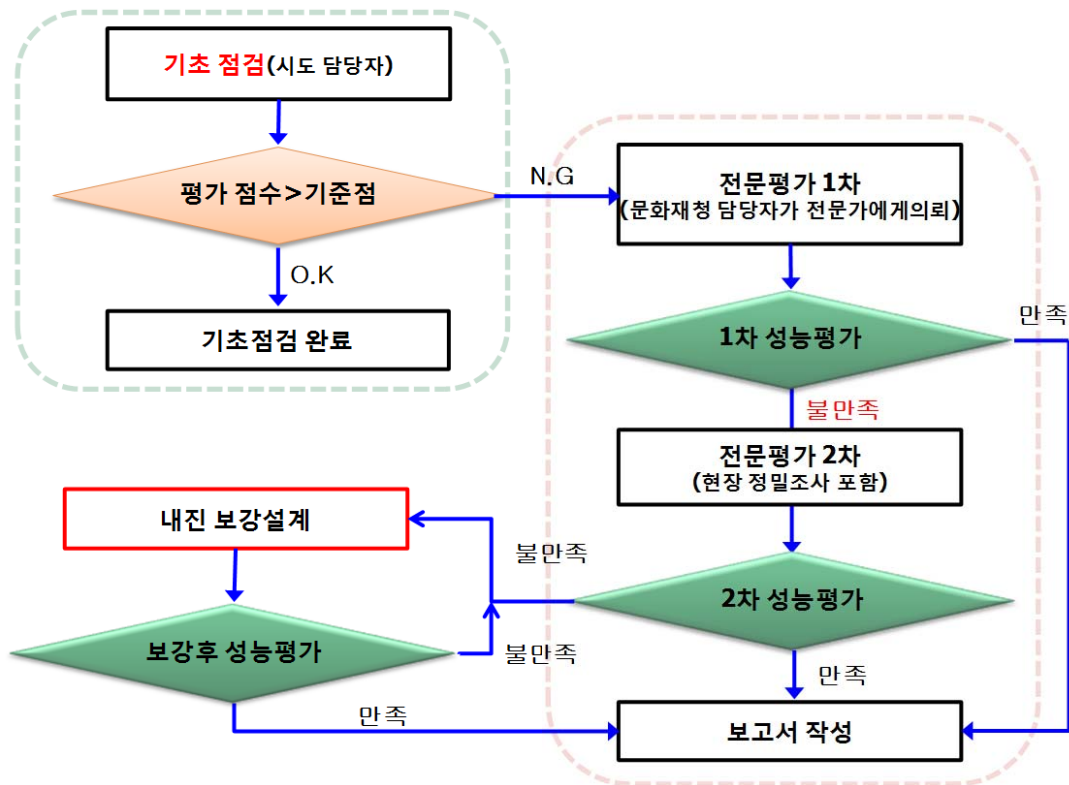


그림 3.1 목조문화재 내진평가 순서도

### 3.1.1 기초점검

기초자료 조사 및 점검은 매뉴얼 상에 제시되어 있는 항목을 바탕으로 목조문화재의 내진성능을 검토하는 방법이다.

기초점검은 육안 관찰과 기록의 내용을 검토함으로써 수행한다. 비록 간단한 방법이지만 목조문화재의 동적 거동 특성을 반영한 항목들로 이루어져 있기 때문에 일상적인 점검과 기본적인 조사과정에서 수행할 수 있는 방법이다.

이러한 기초점검 결과는 목조문화재가 가지고 있는 내진성능 수준과 지진위험 요소를 총체적으로 살펴볼 수 있는 기초자료로 사용된다.

### 3.1.2 전문 평가

전문평가는 “문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가 기준 마련 연구”에서 수행한 결과를 바탕으로 목조문화재의 내진성능을 평가하는 방법이다. 이 방법은 1차 평가와 2차 평가로 구분된다.

1차 평가는 건축 문화재전문가 또는 구조전문가가 구조물의 내력에 대한 약산식을 이용하여 구조물의 내진성능을 평가한다. 이러한 평가는 기초평가 보고서와 해체수리보고서 등의 관련 기록 문헌, 기존 지질조사보고서 등을 바탕으로 요구되는 지진스펙트럼과 건물의 내력을 계산하고 성능점 산정하여 내진성능 평가를 하는 것으로 진행된다.

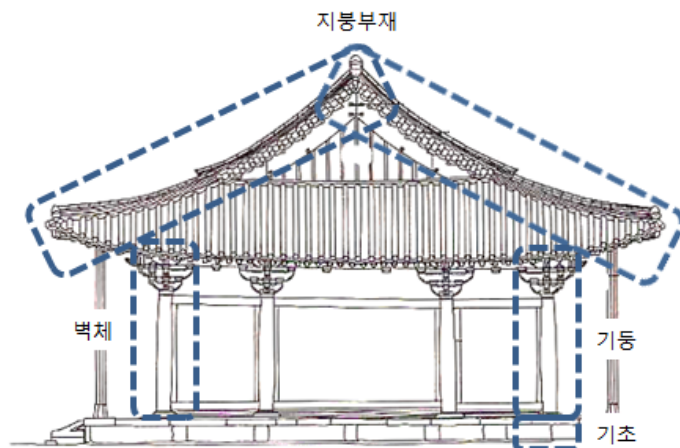
2차 평가는 1차 평가시 내진성능평가에서 성능을 만족시키지 못하는 경우에 수행한다. 2차 평가는 건축 구조전문가가 전통목조건축 전문가의 도움을 받아 수행한다. 이 경우 전체적인 프로세스는 1차 평가와 동일하나, 현장에서의 지질조사와 건물의 기울기와 부식정도 등으로 포함한 현황조사를 수행하고 이를 반영한 Pushover 해석을 이용한다. 또한 해석 결과를 확인하기 위하여 현장 동적특성 계측실험 또는 실험실 모형실험을 수행하여 해석 결과의 신뢰성을 증명함을 원칙으로 한다.

## 3.2 기초점검

### 3.2.1 기초점검 과정

기초점검 방법을 사용하는데 있어 이해를 돕기 위한 부재 명칭에 대한 설명은 다음과 같다.

- 내진성능 : 건축물이 지진 발생에 대비하여 가지고 있는 구조성능을 지칭한다. 통상 “내진성능이 있음” 이란 지진에 대비하여 안전하다는 것을 의미한다.
- 구조성능 : 건축물의 안전과 직결되는 성능으로 구조성능 확보는 전통 목조 건축물이라도 제일 우선시 되어야 한다.
- 지붕부재 : 벽체 상부 구조인 지붕에 관련된 부재는 모두 지붕부재라 지칭한다.
- 구조부재 : 건축물이 안전하게 서있기 위한 중요한 뼈대부재인 기둥, 보, 도리 등을 구조부재라 한다.
- 기 초 : 기둥 또는 벽체를 세우기 위하여 지반위에 돌을 놓거나 흙이나 시멘트로 만든 토대를 지칭한다.
- 벽 체 : 건축물의 공간을 만드는 구조물로 문, 창문과 같은 개구부가 있는 면도 포함한다.
- 하 중 : 전통 목조 건축물의 하중은 지붕에서 결정되기 때문에 보통 전통 건축물에서 하중이라 함은 지붕하중으로 생각할 수 있다.



목조문화재 기초평가는 평가자가 정성적으로 평가하는 것으로서 지진 및 지반상태, 구조형식, 구조부재 상태, 지붕면상태 및 내부상황에 관한 사항을 평가하는 것으로 분류한다.

지반상태에서는 대상 지역에서 지진 구역, 기단부 상태, 주변 배수로 및 축대/담장/수목 등의 위험요소를 관찰자가 정성적으로 평가하는 항목이다. 지진 구역은 목조건축물이 위치하는 해당 지역이 지진구역 II내에 해당한다면 지진 가능성이 낮은 것으로 볼 수 있다. 기단부 훼손에 관한 사항은 매우 양호한지의 여부를 묻는 것으로 일부 훼손이 있을 경우 기단부 상태는 양호하지 않은 것으로 판단할 수 있다. 주변 배수로는 건축물을 둘러싸고 있는 배수로의 상태가 양호할 경우 건축물 내에 습기 유발을 최소화 할 것으로 판단하였으며, 건축물 내에 습기가 스며들 가능성이 있을 때 부적절한 것으로 판단한다. 축대/담장/수목 등의 위험 요소는 건축물 주변에 위험요소가 있을 경우 지진 발생 시 위험 요소들이 건축물에 영향을 미칠 가능성이 있다는 전제하에 판단하며, 명시된 축대/담장/수목이 아니더라도 영향을 미칠 가능성이 있는 위험 요소는 영향이 있을 것으로 판단한다.

구조형식에서는 목조건축물의 외형에 해당하는 초석, 기둥, 층수, 세장비, 활주, 천장 등을 정성적으로 평가하는 항목이다. 건축물을 구성하는 초석 중 우주초석에 문제가 발생할 경우 내진 성능에 부적합하다고 판단할 수 있기에 초석의 특이사항 및 세장비를 판단하여 내진 성능에 적합한 지를 판단한다. 층수는 단층의 경우 유리한 것으로 판단한다. 다층인 경우에는 전문평가를 수행할 권장한다. 활주가 존재하는 경우 지붕 구조 보강의 의미도 있지만, 기본적으로는 지붕가구에 불안정성을 내제하고 있고 이 점은 지진에 약한 면을 갖는다는 점을 고려하여야 한다. 단변부 세장비 및 평면 세장비의 경우 세장비가 클수록 불리한 상황이 발생하기 때문에 세장비가 작은 것을 유리한 것으로 판단하여야 한다. 실제 치수를 측정해서 적용하기 보다는 일정 거리에서 목측에 의한 비례값을 적용한다는 의미를 갖는다. 반자의 경우 반자를 설치하기 위한 장선에 의해 지붕가구의 견고성이 높아질 수 있다는 점을 장점으로 고려할 수 있다. 우주에 동바리 이음이 있을 경우 지진 발생 시 건축물이 전도되는 현상이 발생될 수 있기에 내진 성능에 적합하지 않은 것으로 판단한다. 내진주는 목조건축물을 구성하는 수평부재의 보조 역할을 하는 부재로써 수평부재의 하중을 분산시키는 역할을 하기에 내진주가 있을 경우 내진 성능에 도움이 된다고 판단한다.

구조부재 상태에서는 목조건축물의 부재에 해당하는 기둥, 수평부재, 결구부위 부재, 지점부위 부재, 누수 현황 등을 정성적으로 평가하는 항목이다. 기둥은 목조건축물을 구성하는 최소 프레임의 일부로써 기둥이 직립 상태를 유지하지 못할 경우 목조건축물에 전체적인 문제점이 야기되어져 있다는 반증이기에 기둥의 직립 상태를 판단한다. 수평부재 파손의 경우, 수평부재에 수직 파손이 있을 경우 문제가 큰 것으로 판단하며, 일반적인 목재의 할렬은 온전한 것으로 판단한다. 결구 부위 훼손의 경우는 점검자의 판단으로 결구부위가 너무 벌어져 있거나 결구부위를 구성하는 목부재에 파손이 있는지를 판단한다. 누수 현황은 누수가 있을 경우 지붕부재에 문제가 야기되었을 가능성을 판단하는 문항으로 거주자의 의견을 반영하여 판단한다.

지붕면 상태 및 내부 상황에서는 지붕면 상태, 덧서까래 여부, 기와 탈락의 여부, 건물 내부에 문화재 존재 유무를 주요 점검 항목으로 하고 있다. 지붕면 상태에서는 지붕면에 배부름 등의 굴곡이 존재하는 지를 확인하는 것인데 만약 배부름 현상이 존재하는 경우, 서까래를 포함한 지붕 가구에 힘의 불균형 또는 지붕 가구의 불안정성이 함유되어 있다는 점을 고려한 것이다. 덧서까래 여부는 지붕의 질량을 판단하는 부분으로 덧서까래가 존재할 경우 지붕의 무게를 최소화하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 건물 내부에 국보/보물 문화재 존재 유무는 구조체 자체와는 관련이 없는 사항이지만 건물의 중요도를 고려할 수 있도록 하기 위하여 고려한 부분이다.

위와 같은 기초평가 항목의 경우 전반적으로 주관적 사항이 많기 때문에 서로 다른 점검자에 의해 실시할 필요가 있고, 간략히 정리하면 다음 표와 같다. 표 3.1과 3.2 기초평가항목은 기준 및 참고사항을 토대로 표 3.3 체크리스트에 평가점수를 기입할 수 있다.

표 3.1 국내 목조문화재의 기초점검 항목

점검분류	점검 항목	배점	점검항목에 따른 점수 배점 기준		비 고	
지진 및 지반상태	1. 지진구역 II내에 해당하는가?		그렇다	그렇지 않다	건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 별표10. 참고	
	그렇다	1 점				
	그렇지 않다	0 점				
	2. 기단부의 탈락 또는 멸실 등의 훼손은 없는가?					기단의 훼손정도 (일부 훼손의 경우 불량으로 판정)
	그렇다(산지지반)	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다(저지대)	0점				
	3. 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?					강우에 의한 기단 약화 가능성 (2차적으로 지반침하 현상 발생 가능성 고려)
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
그렇지 않다	0점					
4. 문화재에 영향을 줄 수 있는 축대/담장/수목 등의 위험 요소가 없는가?				축대/담장 등에 의한 건축물 2차 피해 가능성 고려		
그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다			
그렇지 않다	0점					
구조형식	5. 우주초석 주변에 특이한 사항(기울어짐/갈라짐/깨짐 등)은 없는가?				우주 초석 특이사항 발생 시 건물 전도 가능성 고려	
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다	0점				
	6. 우주에 동바리 이음이 없는가?				우주에 동바리이음이 존재할 경우 지진에 불리	
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다	0점				
	7. 단층인가?				단층일 경우 유리한 것으로 판단	
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다	0점				
	8. 내진주가 있는가?				내진주가 있을 경우 유리한 것으로 판단	
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다	0점				
	9. 활주가 없는가?				활주가 있을 경우 지붕가구 불안정성이 있는 것으로 간주함	
	그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다		
	그렇지 않다	0점				
10. 중앙부 종도리 높이 나누기 단변폭이 1.0이하인가?				단변 세장비가 클수록 지진에 대한 대응 불리로 판단. 목측에 의한 측정 가능		
그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다			
그렇지 않다	0점					
11. 목재로 구성된 반자(우물천장/고미반자)가 있는가?				반자설치를 설치하기 위한 장선에 의해 지붕가구조의 보완 가능성 반영		
그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다			
그렇지 않다	0점					
12. 목조건축물 평면의 장변폭 나누기 단변폭이 2.5이하인가?				평면 세장비가 클수록 지진에 대한 대응 불리로 판단.		
그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다			
그렇지 않다	0점					
13. 우주 초석 세장비가 2.0이하인가?				초석 세장비가 클수록 지진에 대한 대응 불리로 판단.		
그렇다	1점	그렇다	그렇지 않다			
그렇지 않다	0점					

표 3.1 (계속)

점검분류	점검 항목	배점	점검항목에 따른 점수 배점 기준	비 고
구조부재상태	14. 기둥이 직립상태를 유지하고 있는가?		 그렇다  그렇지 않다	기둥이 직립상태를 유지하지 못할 경우 내진 성능에 부적절하다고 판단.
	그렇다	1 점		
	그렇지 않다	0 점		
	15. 수평부재(창방/평방/보/도리/추녀)의 중간에 파손이 없는가?		 그렇다  그렇지 않다	점검자 판단에 의한 수평부재 파손 여부 판단.
	그렇다	1 점		
	그렇지 않다	0 점		
	16. 기둥과 수평부재(창방/평방/장혀/도리)가 만나는 결구부위에 벌어진/깨짐 등의 훼손이 없는가?		 그렇다  그렇지 않다	점검자 판단에 의한 결구부위 벌어진/깨짐 요소 반영
	그렇다	1점		
	그렇지 않다	0점		
	17. 중요 구조부재의 중간에(결구부위 제외) 충해는 없는가?		 그렇다  그렇지 않다	기둥에 개미 등에 의한 충해 발생 여부 반영
	그렇다	1점		
	그렇지 않다	0점		
18. 지점부위(초석과 기둥의 접촉면 등)에 부식(부후)는 없는가?		 그렇다  그렇지 않다	초석과 기둥의 접촉면 습기에 의한 부식 여부 반영	
그렇다	1점			
그렇지 않다	0점			
19. 건물 내부에 물 떨어지는 현장을 경험한 적은 없었는가?(거주자 의견 수렴)		 그렇다  그렇지 않다	누수에 의한 지붕 가구 접합부 부식 가능성 고려	
그렇다	1점			
그렇지 않다	0점			
지붕면상태및내부상황	20. 지붕면이 고른 상태를 유지하고 있는가?		 그렇다  그렇지 않다	지붕면의 굴곡 판단(배부름 등이 있을 경우 지붕성함유)
	그렇다	1점		
	그렇지 않다	0점		
	21. 덧서까래를 사용하여 지붕을 구성하였는가?		 그렇다  그렇지 않다	덧서까래를 사용하면 지붕의 질량 감소 가능.
	그렇다	1점		
	그렇지 않다	0점		
22. 건물 내부에 국보/보물 등의 문화재가 없는가?		 그렇다  그렇지 않다	건물의 중요도를 고려한 요소	
그렇다	1점			
그렇지 않다	0점			

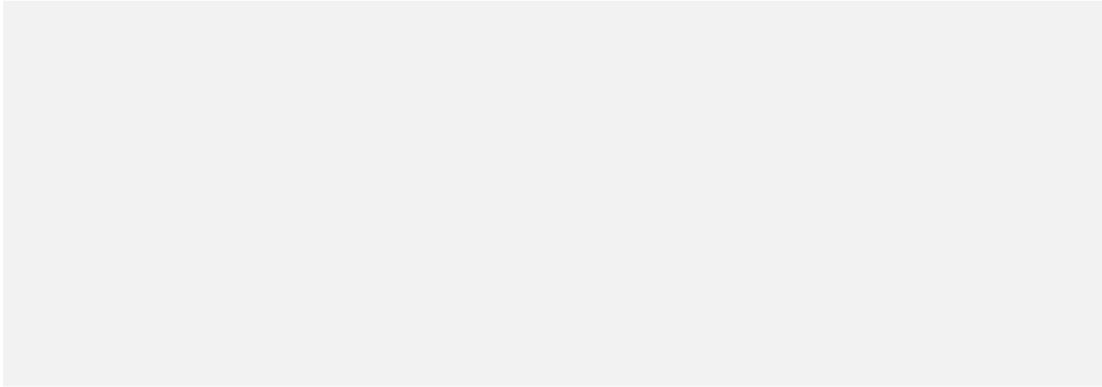


표 3.2 국내 목조문화재의 기초점검 체크리스트

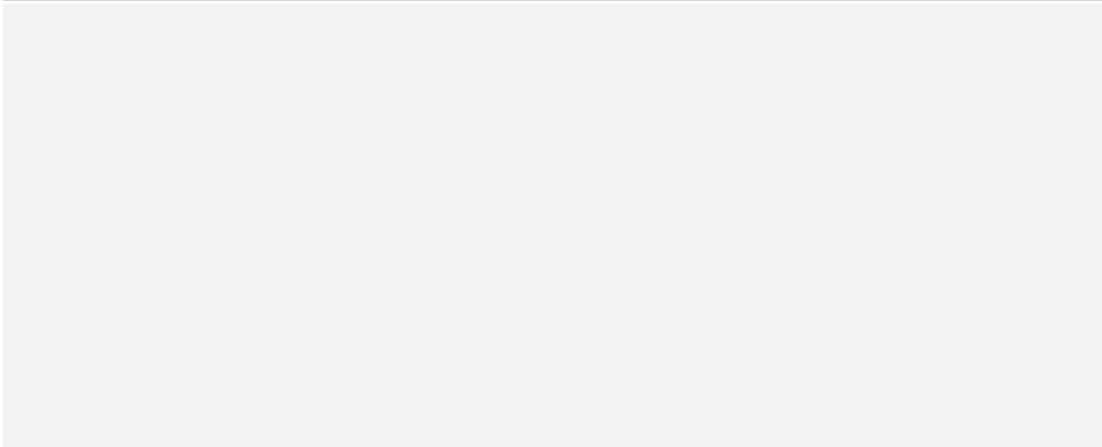
<b>▶ 문화재명 :</b>												
■ 조사번호		■ 조사자										
■ 조사일시		■ 문화재명										
<b>1) 일반사항</b>												
■ 소재지												
■ 지정번호		■ 소재지 지진횟수										
■ 최근 지진이력		■ 최근 수리시기										
<b>2) 주변지형</b>												
■ 조사항목		그렇다	그렇지 않다									
• 지진구역 II 내에 해당하는가?												
• 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?												
• 문화재에 영향을 줄 수 있는 축대/담장/수목 등의 위험요소가 없는가?												
<b>3) 주변 및 문화재 현황사진</b>												
<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> </table>												

표 3.2 (계속)

4-1) 도면 (평면도)



4-2) 도면 (입면도)



4-3) 도면 (단면도)

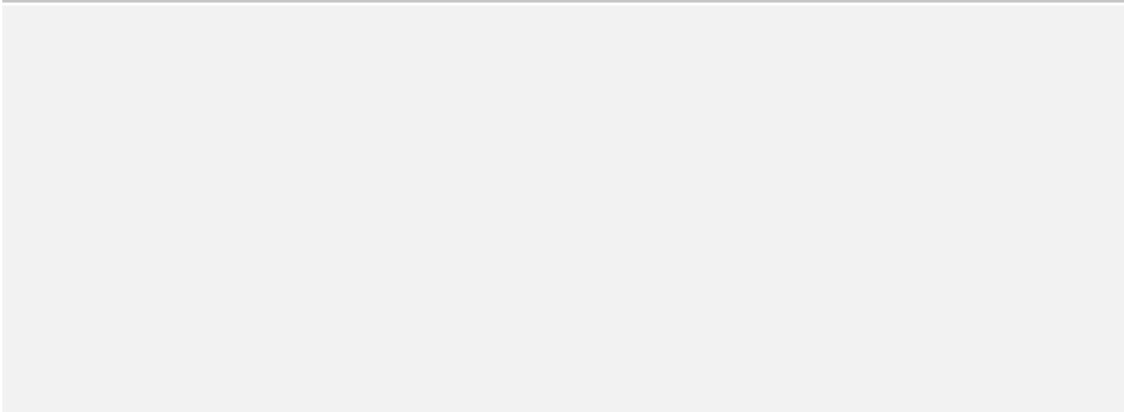


표 3.2 (계속)

5) 조사항목		
<b>■ 지진 및 지반상태</b> • 기단부의 탈락 또는 멸실 등의 훼손은 없는가?	그렇다	그렇지 않다
<b>■ 구조형식</b> • 우주초석 주변에 특이한 사항(기울어짐/갈라짐/꺼짐 등)은 없는가? • 우주에 동바리 이음은 없는가? • 단층인가? • 내진주가 있는가? • 활주가 없는가? • 중앙부 종도리 높이 나누기 단변폭이 1.0 이하인가? • 목재로 구성된 반자(우물천장/고미반자)가 있는가? • 목조건축물 평면의 장변폭 나누기 단변폭이 2.5 이하인가? • 우주 초석 정면의 세장비가 2.0 이하인가?	그렇다	그렇지 않다
<b>■ 구조부 상태</b> • 기둥이 직립상태를 유지하고 있는가? • 수평부재(창방/평방/보/도리/추녀)의 중간에 파손이 없는가? • 기둥과 수평부재(창방/평방/장혀/도리)가 만나는 결구부위에 벌어짐/꺼짐 등의 훼손이 없는가? • 중요 구조부재의 중간에(결구부위 제외) 충해는 없는가? • 지점부위(초석과 기둥의 접촉면 등)에 부식(부후)는 없는가? • 건물 내부에 물 떨어지는 현장을 경험한 적은 없었는가?(거주자 의견 수렴)	그렇다	그렇지 않다
<b>■ 지붕면 상태 및 내부 상황</b> • 지붕면이 고른 상태를 유지하고 있는가? • 덧서까래를 사용하여 지붕을 구성하였는가? • 건물 내부에 국보/보물 등의 문화재가 없는가?	그렇다	그렇지 않다

표 3.2 (계속)

## 6) 조사자 의견

## 7) 조사 항목별 상세 내용

## - 주요문제점

--	--

## - 비례관계

--	--

### 3.2.2 기초점검 결과

표 3.1의 기초점검 항목에 따라 표 3.2의 기초점검 체크리스트를 사용하여 점검을 수행한다.

#### 1) 평가 종합 점수 적정성 검토 진행 방법

점검 후 평가 종합 점수의 적정성 검토를 위하여 통계학에서 사용되는 다기준 의사결정 방법 중 AHP(Analytic Hierarchy Process)을 적용하고 구체적인 진행 방법은 다음과 같다.

- ① 문항의 계층화 작업을 진행한다.
- ② 각 항 및 문항의 중요도 평가 작업을 진행한다. 중요도 평가 진행 시 각 항 및 문항의 특이성을 고려하여 쌍대비교로 진행한다.
- ③ 각 항 및 문항의 중요도 평가 자료를 근거로 각 항 및 문항의 가중치를 설정한다.
- ④ 각 항 및 문항의 가중치를 설정한 후에는 각 항의 가중치에 각 문항의 가중치를 곱하여 적정성 검토에 적용시킬 문항 개별 가중치를 설정한다.
- ⑤ 문항 개별 가중치 데이터를 근거로 목조문화재 내진 평가 적정성 검토 작업을 진행하였으며, 적정성은 표준편차를 적용 정상, 양호, 보통, 경계, 위험 등 총 5단계로 나누어 진행한다.

#### 2) AHP 및 표준편차 적용 방법

##### ① 중요도 평가

AHP 중요도 평가는 각각의 항 또는 문항 사이에 A를 기준으로 보았을 때, 'B가 얼마나 중요한가?', 'B가 얼마나 중요하지 않은가?'를 판단하는 부분으로 정량적이든 정성적이든 모든 평가요소를 인지적 정도로 평가한다.

표 3.3 인지적 판단의 정량화

서술적 평가	정량화
극히 중요하다	9(9:1)
매우 중요하다	7(8:2)
보통 중요하다	5(7:3)
약간 중요하다	3(6:4)
동일하다	1(5:5)

## ② 가중치 설정

AHP적용 가중치 설정 부분에서는 문항별 중요도 평가 작업이 진행된 이후 각 문항의 가중치를 설정하는 부분이다. 가중치의 설정은 쌍대비교로 진행된 각 열의 합을 구하여 각 열과 항의 평가치를 열의 합으로 나누어 주면 산정할 수 있다.

정량화의 수치 및 문항별 중요도는 의사결정자의 주관적 견해에 따라 달라질 수 있다.

## ③ 가중치 일관성 지수 평가

기타 대기준 의사결정 방법들과 다르게 AHP기법은 설정한 가중치의 신뢰도를 평가할 수 있도록 설정한다. 쌍대비교에서 완전한 일관성을 유지했다면 고유치  $\lambda$ 는 평가요인의 수와 같고, 일관성이 떨어질수록 고유치는 큰 값을 갖게 된다. saaty는  $(\lambda - n)/(n - 1)$ 을 일관성 지수(CI:consistency index)로 정의한다.

평가행렬에 가중치 벡터를 곱한 후, 다시 가중치로 나누어 얻은 값의 평균이 고유치이다. 일관성지수는 평가요인의 수가 증가할수록 커지는 경향이 있으므로 이 점을 고려하여 무작위 지수(random index)로 일관성지수를 나누어 일관성비율(CR:consistency ratio)을 정의하였으며, 이렇게 계산한 비율이 0.1보다 크면 일관성에 문제가 있다고 판단한다.

표 3.4 무작위 지수

대안의 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

④ 표준편차 적용 방법

기초점검 후 목조건축물의 적정성을 최종 평가하기 위하여 다음과 같은 과정을 진행한다.

- 각 목조건축물의 값을 근거로 표준편차를 구한다.
- 결과값이 정규분포를 형성한다는 기본 전제를 유지하여 전체 목조건축물의 개체 수 중 ‘보통’의 범위를  $\pm 30\%$ 로 유지하며, ‘양호’와 ‘경계’를 각각  $\pm 45\%$ 로 설정하였다. 기타 해당 범위를 벗어나는 건축물의 경우 +의 경우 ‘정상’ -의 경우 ‘위험’으로 판단한다.
- $X\Sigma$ 의 X값을 설정한다.  $\Sigma$ 값은 표준편차 값이며, X는 해당 범위의 최상위 값과 최하위 값을 포함할 수 있는 값이다.

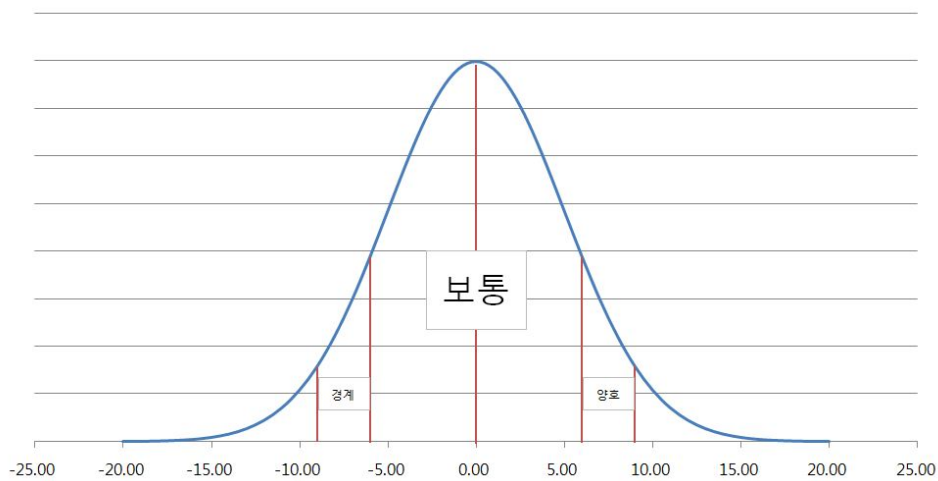


그림 3.2 표준편차 적용 예시

3) 내진 성능 적정성 판단

내진 성능의 적정성 판단은 표 3.5를 기준으로 진행한다. 표 3.5에 제안된 사항은 ‘2013년 문화재 지진재해 기초평가 연구용역’을 통하여 국보로 지정된 사찰 건축 20곳을 기준으로 설정된 수치이다.



그림 3.3 목조건축물 양호도 판단

기준으로 설정된 해당 수치를 국보 사찰 건축 20곳에 적용하였을 경우 구체적인 목조건축물의 양호도를 판단할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 대상 변수를 확장하여 다양한 형태의 국가지정 목조건축물에 적용하였을 경우 표 3.5에 제안된 평가결과는 추후에 변경이 될 것으로 판단되며, 대상 변수의 개체 수가 확장되어 위와 같은 과정으로 연구 진행이 된다면 내진 성능 평가에 적합한 기초점검 결과 판단 값을 산정할 수 있을 것이다.

표 3.5 국내 목조문화재의 기초점검 결과 판단

평가결과	판단	적용 수치	내진성능 평가 결과	조치
	정상	19이상	내진성능 있음	상태양호
	양호	17-18	내진성능 적절함	지속관찰
	보통	14-16	변형의 우려는 없으나 주의 단계	문화재위원과 협의 필요
	경계	12-13	지진에 대한 안정성을 위한 추가 점검필요	1차 전문평가 필요
	위험	11이하	지진재해에 대한 안정성의 확보가 필요함	1차 및 2차 전문평가 필요

### 3.2.3 평가 결과에 따른 조치

- 1) 기초점검 결과 진단이 필요하다고 판정된 경우는 문화재 전문가가 추가적인 기초 진단 및 전문 진단을 수행하도록 조치를 취하여야 한다.
- 2) 그림 1과 같이 전문가 1차 평가를 수행하고 이 경우에도 내진성능이 만족되지 않는다면 2차 평가를 수행하도록 조치를 취하여야 한다.

## 3.3 전문평가 1차

### 3.3.1 요구스펙트럼의 작성

#### 1) 지반운동수준

전통목조건축물의 내진성능목표와 지반운동 수준을 다음 표 3.6과 같이 정의한다.



표 3.6 내진성능목표와 지반운동 수준

내진성능목표	특등급 (국가지정문화재)	1등급 (지방지정문화재)
즉시복구	평균재현주기 500년	평균재현주기 200년
붕괴방지	평균재현주기 1000년	평균재현주기 500년

2) 지진하중의 크기 산정

건축구조설계기준에서는 2400년 재현주기의 하중을 예상 가능한 최대하중으로 가정하여 사용하고 있으므로 이와 상관관계를 다음과 같이 사용한다. 재현주기 500년의 하중은 건축구조기준의 최대하중의 1/2, 재현주기 1000년의 하중은 최대하중의 2/3의 수준이라 할 수 있으며, 다음의 식과 같다.(평가지침 2.2 참조)

$$500년\ 재현주기\quad S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 1/2 \quad (3.1.a)$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 1/2 \quad (3.1.b)$$

$$1000년\ 재현주기\quad S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \quad (3.2.a)$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 \quad (3.2.b)$$

3.3.2 능력스펙트럼의 작성

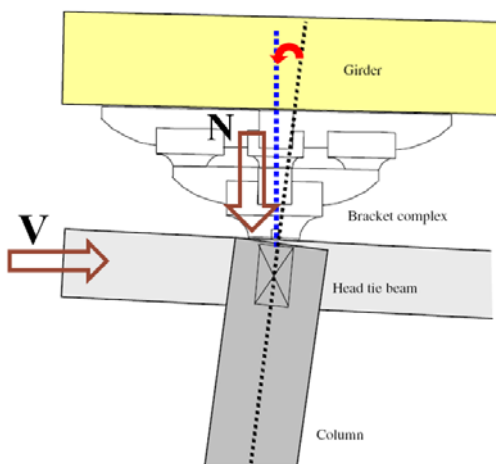


그림 3.4 횡력과 복원력의 개념도

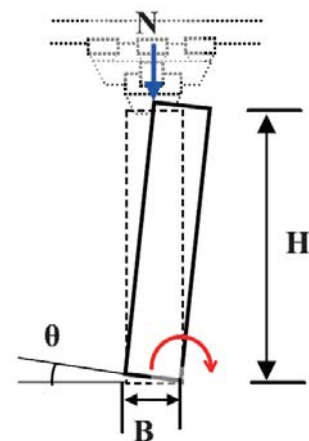


그림 3.5 기둥의 복원력

## 1) 밀면전단력-변위 관계곡선의 작성

전문평가 1차는 전통목구조의 복원력에 근거를 두고 산정한다. 전통목구조의 복원력은 보와 기둥의 결구와 기둥에 작용하는 수직하중의 복원력에 의해서므로 그림 3.3, 3.4와 같이 표현할 수 있다.

1차 평가에서는 전통목조 구조물의 내력 특성을 나타내는 밀면전단력과 변위관계곡선을 그림 3.5와 같이 기둥의 거동만을 고려하여 보수적으로 평가한다.

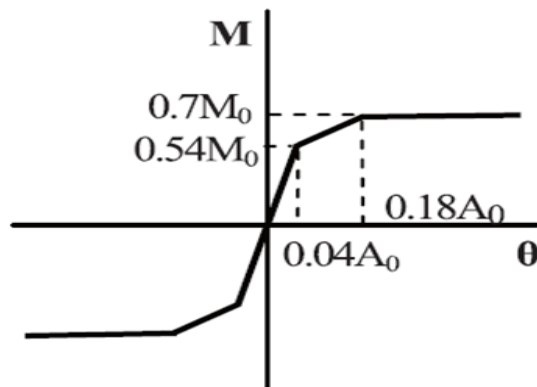


그림 3.6 목구조의 내력산정(1차 평가)

$$\text{항복점 : 변위비 } DR_y = 0.04 A_0, \text{ 밀면전단력 } V_y = 0.54 M_0 / H \quad (3.3)$$

$$\text{극한점 : 변위비 } DR_u = 0.18 A_0, \text{ 밀면전단력 } V_u = 0.70 M_0 / H \quad (3.4)$$

여기서,

$$M_0 = NB$$

$$A_0 = B/H$$

$N$ 는 기둥에 작용하는 축하중

$B$ 는 기둥 상부면의 폭

$H$ 는 기둥의 높이

다음단계로 넘어가기 위하여 식(3.3)과 (3.4)의 횡력-변위비의 결과를 횡력-변위의 관계곡선으로 변환한다. 밀면전단력과 가속도, 변위비와

변위의 관계식은 다음의 식과 같다. 단  $W$ 는 건물의 자중이다.

$$A_y = V_y / W \quad (3.5.a)$$

$$D_y = DR_y \cdot H \quad (3.5.b)$$

$$A_u = V_u / W \quad (3.5.c)$$

$$D_u = DR_u \cdot H \quad (3.5.d)$$

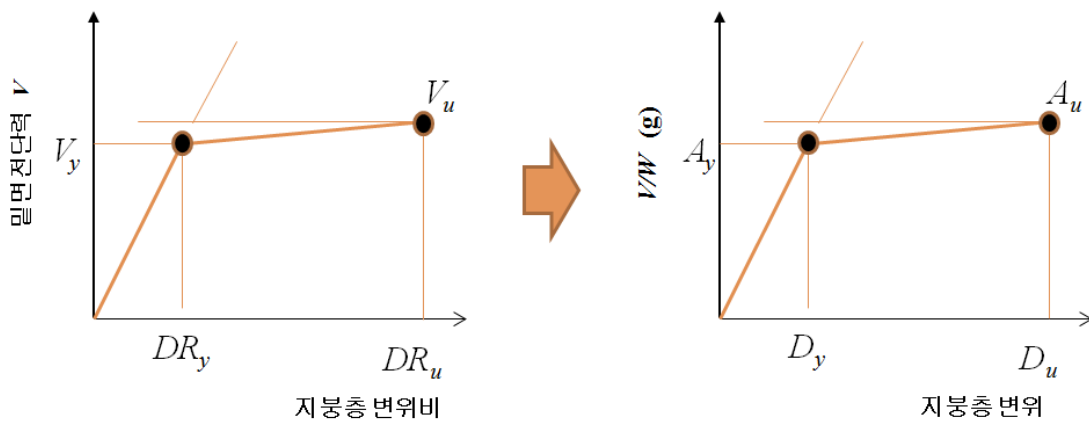


그림 3.7 밀면전단력-변위비의 관계곡선과 가속도-변위의 관계곡선

## 2) 스펙트럴 가속도-변위

능력스펙트럼법을 사용하기 위하여 비선형정적해석으로 구한 밀면전단력( $V$ )과 지붕층 변위( $\Delta_{roof}$ )로 나타내는 능력곡선(pushover curve)을 응답가속도( $S_a$ ) 및 응답변위( $S_d$ ) 관계를 표현하는 가속도-변위 응답스펙트럼 (acceleration-displacement response spectra, ADRS) 형태의 능력 스펙트럼으로 변환한다. 이러한 변환을 위하여 다음과 같은 식을 사용한다. 여기서 밀면전단력( $V$ )은 식 (3.8)을 이용하여, 그리고 지붕층 변위( $\Delta_{roof}$ )는 식 (3.9)를 이용하여 응답가속도 및 응답변위로 변환한다.

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=0}^N (w_i \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=0}^N (w_i \phi_{i1})^2 / g} \right] \quad (3.6)$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=0}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i / g) \right] \left[ \sum_{i=0}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (3.7)$$

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3.8)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} \quad (3.9)$$

여기서,

$PF_1$  = 1차 모드의 모드참여계수(modal participation factor)

$\alpha_1$  = 1차 모드의 모드질량계수(modal mass factor)

$w_i/g$  = 각 층의 질량

$\phi_{i1}$  = 1차 모드에 의한 각 층에서의 변위

$N$  = 건물의 최상층

$V$  = 밀면전단력

$W$  = 구조물의 총 중량

$\Delta_{roof}$  = 지붕층 변위

$S_a$  = 스펙트럼 가속도

$S_d$  = 스펙트럼 변위

가속도-변위 응답스펙트럼 형상의 임의 점에서 주기  $T$ 는 다음의 식 (3.10)를 이용하여 계산한다.

$$T = 2\pi (S_d/S_a)^{1/2} \quad (3.10)$$

응답변위  $S_d$ 는 다음 식(3.11)을 이용하여 계산한다.

$$S_d = S_a T^2 / 4\pi^2 \quad (3.11)$$

### 3.3.3 성능점의 산정

#### 1) 유효감쇠비 결정

단자유도 진동계로 건물의 비탄성을 모델화하는 비선형 정적 절차(NSP; Nonlinear Static Procedure)로서 등가 선형(equivalent linearization)이 사용될 때, 그 목적은 그림 3.7과 같이 유효주기(effective period)  $T_{eff}$ 와 유효감쇠(effective damping)  $\beta_{eff}$ 를 가지고 있는 등가의 선형 시스템을 가지고 비탄성 시스템의 최대 변위 응답을 추정하는 것이다. 등가 선형을 위한 유효감쇠비를 연성도의 함수로 표시하면 다음과 같다.

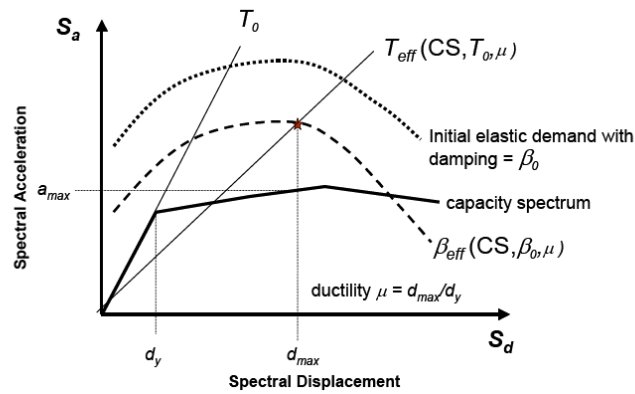


그림 3.8 가속도-변위 반응스펙트럼(ADRS)의 유효 주기와 등가선형 시스템의 감쇠계수

$$1 \leq \mu < 6 \text{의 경우, } \beta_{eff} = 0.008(\mu - 1) + \beta_0 \quad (3.12.a)$$

$$6 \leq \mu \text{의 경우, } \beta_{eff} = 0.04 + \beta_0 \quad (3.12.b)$$

여기서,  $\beta_0$ 는 시스템의 항복전 초기 감쇠계수로서 일반적으로 5%를 사용하고,  $\mu$ 는 연성도로서 최대변위/항복변위로 산정한다. 정밀진단에서 1차 평가에서는  $\beta_{eff} = 0.05$ 로 일정한 값을 사용한다.

#### 2) 유효주기

모든 반복이력 모델에 대한 유효주기의 계산식은 (3.13)과 같다.

$$T_{eff} = [0.28 + 0.13(\mu - 1) + 1] T_0 \quad (3.13)$$

3) 수정계수 M

유효주기와 유효감쇠로부터 얻은 가속도-변위 반응 스펙트럼 (ADRS)의 절점으로부터 그림 3.8과 같이 최대 변위값을 산정할 수 있다. 유효주기  $T_{eff}$ 는 능력곡선으로부터 얻은 활선주기  $T_{sec}$ 보다 일반적으로 작다. 유효가속도  $a_{eff}$ 가 의미 있기 위하여 능력곡선의 수준  $a_{max}$ 로 조정되어야 한다. 유효감쇠계수  $a_{eff}$ 에 따른 요구 ADRS 곡선에 다음의 수정계수 M을 곱하면 수정 가속도-변위 반응 스펙트럼 (MADRS)의 곡선이 형성된다.

$$M = \frac{a_{max}}{a_{eff}} \tag{3.14}$$

$$M = \left( \frac{T_{eff}}{T_{sec}} \right)^2 = \left( \frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 \left( \frac{T_0}{T_{sec}} \right)^2 \tag{3.15}$$

$$\left( \frac{T_0}{T_{sec}} \right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} \tag{3.16}$$

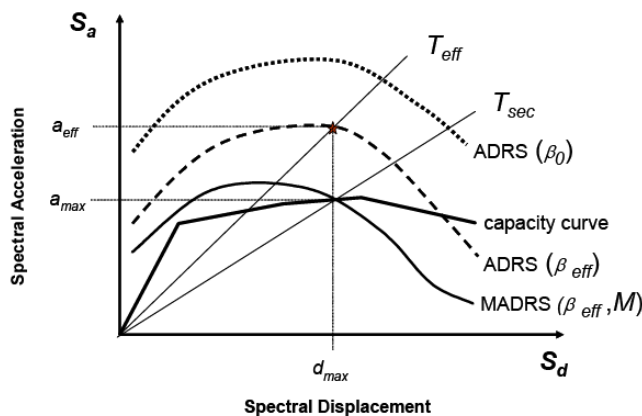


그림 3.9 활선 주기 Tsec와 수정 가속도-변위 반응 스펙트럼 (MADRS)

4) 유효감쇠에 따른 스펙트럼 감소

초기 반응스펙트럼은 유효 감쇠값에 따라 변화하므로 스펙트럼 감소계수 B를 사용한다. 기초가 고정된 초기 반응스펙트럼  $\beta_i$ (일반적으로 5%)는 기초의 감쇠 거동을 고려한 감쇠값  $\beta_0$ 를 사용하는 것이 일반적이다. 감소계수 B는 다음의 식과 같다.

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff}(\text{단위 } \%)} \quad (3.17)$$

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})} \quad (3.18)$$

5) 능력스펙트럼과 요구스펙트럼의 교점

유효주기  $T_{eff}$ 와 유효감쇠  $\beta_{eff}$ 는 연성도의 함수이므로 등간선형을 이용한 최대변위의 계산은 직접적으로 구할 수 없으며 반복적인 연산을 요구하게 된다. 여러 가지의 방법이 가능하나 여기에서는 직접반복법(Direct Iteration)을 소개한다(그림 3.9 참조).

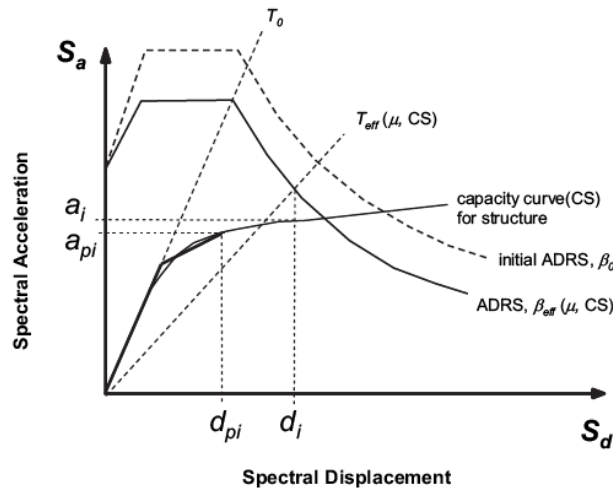


그림 3.10 직접 반복법

- 단계 1 : 초기감쇠  $\beta_i$ (일반적으로 5%)로 설계 대상이 되는 지반의 스펙트럼을 설정한다.
- 단계 2 : 토질과 구조물의 상호작용을 고려하여 감쇠계수를  $\beta_0$ 로 조정한다. 만약 기초의 감쇠를 무시한다면  $\beta_0$ 는  $\beta_i$ 가 된다.
- 단계 3 : 선택한 스펙트럼을 가속도-변위 반응 스펙트럼의 형태로 변환한다. 이것이 초기 ADRS 요구 스펙트럼 곡선이다.
- 단계 4 : 해석할 구조물의 성능곡선을 작성(전과 동일)하고 요구

스펙트럼과 같이 ADRS으로 변환한다.

단계 5 : 그림 3.9와 같이 초기 성능점(최대 가속도  $a_{pi}$ 와 변위  $d_{pi}$ )을 설정한다.

단계 6 : 성능 스펙트럼곡선에서 그림 3.9와 같이 이선형(bilinear)을 생성한다. 이것은 초기주기  $T_0$ 와 항복변위  $d_y$ , 항복가속도  $a_y$ 를 설정한다. 이러한 값  $a_{pi}$ 와  $d_{pi}$ 의 설정에 따라 변화한다.

단계 7 : 단계 6에서 결정된 이선형에서 항복후 강성비  $\alpha$ 와 연성도  $\mu$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha = \frac{\frac{a_{\pi} - a_y}{d_{\pi} - d_y}}{\frac{a_y}{d_y}} \quad (3.19)$$

$$\mu = \frac{d_{\pi}}{d_y} \quad (3.20)$$

단계 8 : 단계 7에서 구한  $\alpha$ 와  $\mu$ 를 이용하여 유효감쇠  $\beta_{eff}$ 와 유효주기  $T_{eff}$ 를 계산한다.

단계 9 : 앞의 단계 9에서 구한 유효감쇠  $\beta_{eff}$ 에 따라 초기 ADRS를 조정한다.

단계 10 : 유효주기  $T_{eff}$ 를 이용하여 ADRS와의 방사선상의 교점을 구한다. 산정된 최대가속도는 성능곡선에서 에 해당하는 점이다.

단계 11 : 산정된 최대변위  $d_i$ 를 초기 가정과 비교한다. 만약 허용오차의 범위 안에 있으며 성능점은  $a_i$ 와  $d_i$ 가 된다. 만약 허용 범위에 있지 않으면  $a_i$ 와  $d_i$ 를 이용하여 단계 5부터 다시 반복한다.



### 3.3.4 성능평가

#### 1) 성능 판정

성능점 산정 후 성능점 변위에서, 구조물 전체, 혹은 각 구조부재의 변형을 결정하는데 이 값들이 고려하는 지진에 대한 요구변위라고 할 수 있다. 이러한 요구변위를 성능기준과 비교하여 만족여부를 판정하여야 한다.

앞의 성능점 산정법에 따라 구한 성능점의 변위비가 표 3.7에서 정의한 최대 변위비를 초과하지 않으면 성능수준을 만족한 것으로 판정한다.

표 3.7 전통목구조 손상상태 정의

성능수준	부재 종류별 손상상태		최대 층간 변위비
	주요부재	하위부재	
즉시복구	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 기둥과 보의 간격이 벌어짐</li> <li>▪ 주초와 기둥의 중심축 변화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 회벽체 균열 발생</li> <li>▪ 기와의 탈락</li> </ul>	0.8%
붕괴방지	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 기둥-보 접합부 손상</li> <li>▪ 산지 맞춤재 손상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 벽체 표토가 탈락함</li> <li>▪ 기울기 정도가 심함</li> <li>▪ 공포의 일부 탈락</li> </ul>	5%와 $0.9\left(\frac{B}{2H}\right)$ 중 작은 값

#### 2) 판정결과에 따른 조치

판정결과 성능을 만족시키지 못하는 경우에는 다음과 같은 조치를 취하여야 한다.

- (1) 즉시복구 수준 또는 붕괴방지 수준을 만족시키지 못하는 경우 전문평가 2차를 수행하여야 한다.

## 3.4 전문평가 2차

### 3.4.1 개요

목조문화재의 정밀해석을 위해서는 지반의 특성, 목재의 물리적 특성과 접촉면의 특성을 고려하여야 한다. 지반의 특성은 지반조사를 수행하여 조사하여야 한다. 또한 목재의 강도, 전단강도, 마찰각, 체적계수의 물리적 특성을 파악하여야 한다. 또한 목재 재료의 현황과 구조물의 기울기와 같은 현황도 해석 모델에 포함하여야 한다.

### 3.4.2 구조해석 모형화

정밀해석을 위한 수치해석 모델링은 다음의 항목을 만족하여야 한다.

- (1) 목재 재료의 이방성 특성을 고려하여야 하며, 결구형식에 따른 마찰과 접촉 특성을 반영하여야 한다.
- (2) 해석은 3차원 해석을 원칙으로 하며, 건물에 비틀림이 발생할 가능성이 없는 경우에는 2차원해석도 가능하다. 평면이 비정형인 경우는 비틀림의 영향을 고려하기 위하여 3차원 해석을 수행하여야 한다.
- (3) 지붕층의 결구상태를 고려하여 강막거동(diaphragm action)을 고려하여야 한다. 만약, 지붕층이 유연하여 수평거동에 대하여 강체거동이 보장되지 않는다면 강막거동을 가정할 수 없다.
- (4) 기둥과 주초가 만나는 부분은 힌지로 하지 않고 접촉 스프링을 이용함을 원칙으로 한다.
- (5) 가급적 창방의 결구 형식은 실제현장 조사 보고서를 통하여 확인된 결구 형식을 사용하여 모델링한다.
- (6) 현장조사에 의한 구조물의 기울기와 목재의 손상도 등을 구조모델에 반영하여야 한다.
- (7) 보관정도가 우수하여 풍화에 의하여 손상을 입지 않은 목재는 재령에 따른 목재의 강도변화를 고려하지 않아도 된다.
- (8) 풍화에 따른 재료의 강성과 강도저감 계수는 비파괴 실험 또는 관련 유사자료를 통하여 사용할 수 있다.

### 3.4.3 해석결과의 검증

해석모델의 간편성을 위하여 지붕의 결구형식 제외하여 외주 기둥을 포함한 프레임에 대하여 모델링을 할 수 있다. 그러나 이 경우 앞의 3번항에서 언급한 지붕층의 강막거동을 적절히 묘사하여야 한다.

Pushover 해석에 의한 초기강성에 따른 고유주기는 상시진동에 의한 현장 측정의 주기보다는 크게 나타나야 한다.

정밀해석을 수행하였더라도 기존의 약산식 또는 축소실험 등을 통하여 해석의 결과를 검증하여야 한다.

### 3.4.4 이중곡선의 작성

#### 1) 작성원칙

능력 스펙트럼의 이선형 모델은 요구스펙트럼의 적절한 감소와 유효 감쇠를 추정하기 위하여 필요하다. 이선형 모델을 만들기 위하여 부재의 강성을 사용하여 건물의 초기 강성( $K_i$ )을 사용하여 원점으로부터 선을 긋고, 예상 성능점  $a_{pi}$ ,  $d_{pi}$ 로부터 두 번째 선을 그린다. 그림 3.10에서 면적  $A_1$ 과  $A_2$ 가 같아지는 점  $a_y$ ,  $d_y$  에서 첫 번째 선과 교차하도록 두 번째 선을 기울여 변화시킨다.

#### 2) 초기강성의 보정

이중곡선에 작성에 따라 구한 주기가 이론식과 계측식과 차이가 있는 경우는 보정을 다음과 같이 하여야 한다. 1차 평가 결과에서 수식 (3.10)에 따라 구한 고유주기를  $T_1$ 이라하고, 계측에 근거하여 제안한 고유주기 식(3.21)을  $T_{me}$ , 2차 평가에서 수식 (3.10)에 따라 구한 고유주기를  $T_2$ 라 하자.  $T_2$ 가  $3 T_{me}$ 을 초과하는 경우에는  $T_2$ 가  $1.2 T_1$ 을 초과할 필요는 없다.

$$\text{x방향 주기 } T_{me} = 0.0931L\sqrt{\frac{A}{C}} + 0.148 \text{ sec} \quad (3.21.a)$$

$$\text{y방향 주기 } T_{me} = 0.0483L\sqrt{\frac{A}{C}} + 0.311 \text{ sec} \quad (3.21.b)$$

단,  $C_A = nD$ 는 접촉면(기둥 상부 직경에서 창방의 접합면)

$A$ 는 지붕투영면적

$L$ 는 기둥의 길이

$T_2$ 는 골조부분의 해석에 근거한 값이므로 벽체의 영향을 고려하지 않은 것이다. 이는 최종 강도는 근사적으로 추정하지만 벽체에 의한 초기 강성과 균열강도를 적절히 예측하지 못한다. 따라서 지나치게  $T_2$ 의 주기가 크게 나타나는 경우에 연성도의 값이 작아지는 경향이 발생하여 성능점의 산정을 지나치게 보수적으로 평가하게 된다. 이러한 것을 방지하기 위하여 골조의 이론식으로부터 추정된 스펙트럴 가속도 -변위의 곡선으로부터 얻은 주기  $T_1$ 보다 1.2배 이상 크게 하는 것을 방지할 수 있다.

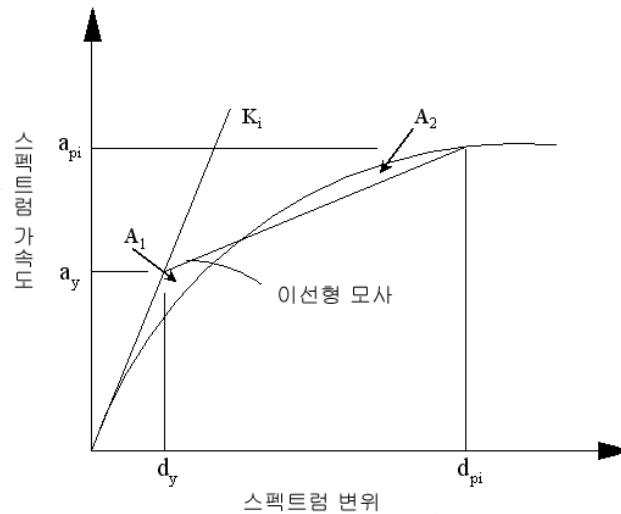


그림 3.11 능력 스펙트럼의 이선형 모델

### 3.4.5 노후도에 대한 고려방안

#### 1) 재령의 영향

정상적인 본관상태에서 재령에 따른 목재의 강도 감소를 고려하지 않아도 된다.

#### 2) 풍화의 영향

풍화는 목재의 열화에 영향을 미칠 수 있다. 특히 기초면에 접하는 기둥부재의 경우는 풍화에 노출되어 있어 강성과 강도의 저하가 예측될 수 있다. 따라서 풍화에 의하여 내력에 영향을 미친다고 판단되는 경우에는 비파괴 검사를 통하여 강도를 측정하고 이를 해석에 반영함을 원칙으로 한다. 그러나 가능한 경우, 구조체와 외관에 영향을 미치지 않는 부위에서 시료를 채취하여 파괴시험을 수행할 수도 있다.

### 3.4.6 판정결과에 대한 조치

판정결과 성능을 만족시키지 못하는 경우에는 다음과 같은 조치를 취하여야 한다.

1) 즉시복구 수준을 만족시키지 못하는 경우

보와 기둥과 같은 주구조체를 제외한 부구조체의 강성을 증가하여 초기의 변형 저항능력을 크게 한다. 다만, 붕괴방지 수준을 만족시키는 경우는 시간을 두고 건물의 이상 유무를 지속적으로 관찰한다.

2) 붕괴방지 수준을 만족시키지 못하는 경우

변형 능력이 부족할 경우에는 성능을 만족하는 수준까지 변형 능력이 확보되도록 보수 또는 보강을 수행한다.

## 4. 석조문화재의 내진진단 매뉴얼

### 4.1 지진재해 평가의 분류

이 매뉴얼은 석조문화재를 대상으로 하며 석조문화재가 지녀야 할 고유의 내진성능을 바르게 유지하고 있는지 평가를 수행할 수 있도록 “문화재 지진재해 저감을 위한 안정성 평가 기준 마련 연구”를 바탕으로 평가항목과 기준을 작성하였다.

일상점검 또는 기초자료조사 과정에서 내진성능 확보에 영향을 주는 주요 요소들을 우선적으로 살펴볼 수 있는 기초점검과, 문화재의 구조와 내진성능 평가에 대한 전문지식을 갖춘 전문가가 내진성능을 평가하는 데 사용할 전문 평가로 대별해서 평가방법을 제시한다. 그림 4.1은 석탑에 대한 내진평가를 중심으로 기초점검과 전문 평가에 대한 순서도를 보여준다.

#### 4.1.1 기초점검

자료조사 및 기초점검은 매뉴얼 상에 제시되어 있는 항목을 바탕으로 석조문화재의 내진성능을 검토하는 방법이다. 이는 비교적 간단한 방법이지만 석조문화재의 동적 거동 특성을 반영한 항목들로 이루어져 있기 때문에 일상적인 점검과 기본적인 조사과정에서 수행할 수 있는 방법이다. 이러한 기초 점검결과는 석조문화재가 가지고 있는 내진성능 수준과 지진 위험요소를 총체적으로 살펴볼 수 있는 기초자료로 사용된다.

#### 4.1.2 전문 평가

전문 평가는 재현주기에 따른 동적해석 및 결과분석을 바탕으로 석조문화재의 내진성능을 평가하는 방법이다. 이러한 방법은 건축구조를 전공한 전문가가 구조모델링, 지진하중의 산정, 지진하중의 적용, 동적해석, 결과분석 및 내진성능 평가를 통해 이루어지게 된다. 이를 통해 석조문화재의 동적거동특성 및 내진성능을 파악할 수 있으며 필요한 경우 내진성능 목표에 따라 석조문화재의 재평가 및 보수보강이 이루어지게 된다.

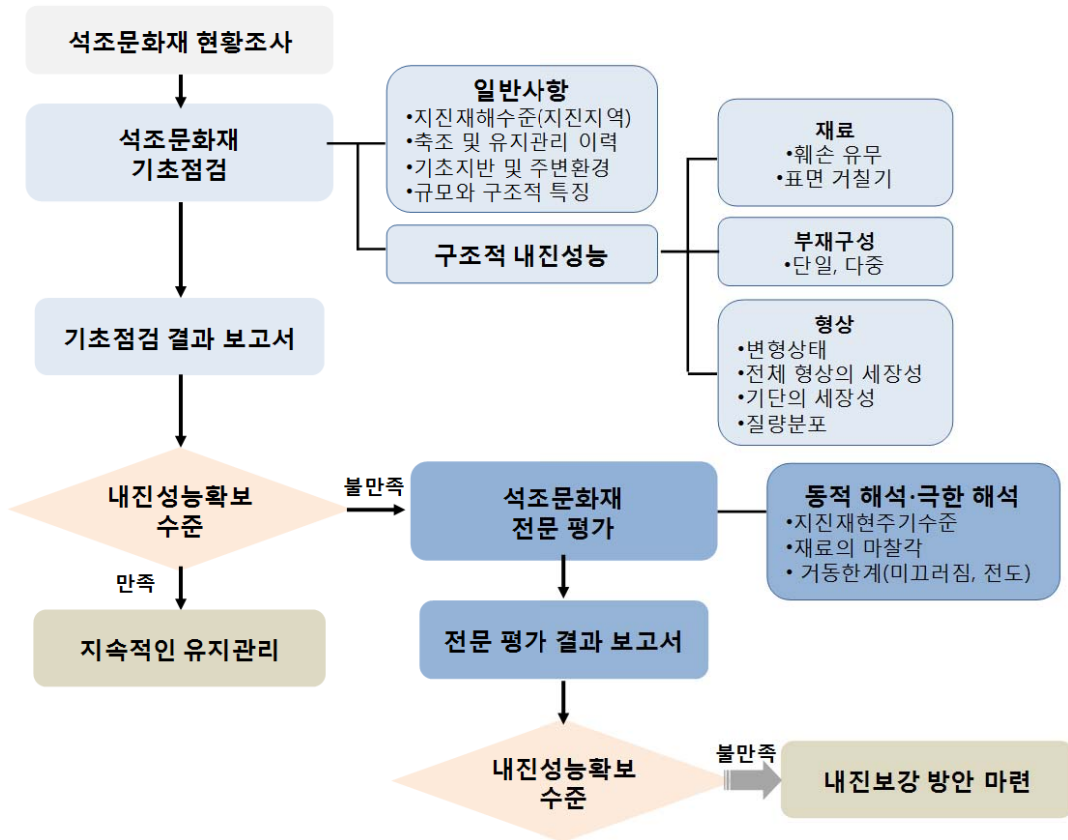


그림 4.1 석조문화재(석탑) 내진평가 순서도

## 4.2 기초점검

기초점검의 점검항목은 석조문화재 현황분석과 구조해석결과 분석을 통해서 내진성능에 영향을 주는 일반적 사항과 구조적 내진성능 사항을 점검항목으로 구성하였다. 기초평가에 앞서서 표 4.1과 표 4.2를 이용해서 석탑구조물의 현황조사를 수행하였다. 또한, 석탑의 기초점검을 위해서 표 4.4와 표 4.5에서 각각 항목설정 및 평가기준을 제시하였으며, 표 4.6에서 석탑평가의 점검항목에 대한 해설을 마련하였다. 일관된 방법으로 표 4.7과 표 4.8은 전탑의 기초평가 항목설정 및 평가기준, 표 4.9는 각 항목에 대한 설명이다. 또한, 석교는 표 4.10과 표 4.11이 항목설정 및 평가기준이고 표 4.12는 개별항목에 대한 설명을 제시한다. 기초점검 결과 내진성능을 어느 정도 확보하고 있는지 판단할 수 있도록 결과 값의 범위를 5단계로 구별하였으며, 내진성능 확보가 불확실한 경우에는 전문가 진단을 수행하도록 한다.

표 4.1 석탑문화재의 자료조사-전체시스템

작성자		작성일시	
문화재 명칭		사용현황	
<b>일반사항</b>			
소재지	문화재 중요도	소재지의 지진지역	최근 수리연도
<b>주변지형</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수평토압의 가능성</li> <li>• 인접지형의 경사도</li> <li>• 인접하천 유무</li> <li>• 인근 옹벽, 축대, 석축 있음</li> <li>• 지진구역</li> </ul>			
<b>지반</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새로 이전한 지역</li> <li>• 지반종류</li> <li>• 지반침하 여부</li> <li>• 토양유실 가능성</li> </ul>			
<b>전체구조시스템의 변형</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기울기 발생</li> <li>• 중심침하</li> <li>• 지대석 변형</li> </ul>			
<b>전체구조시스템 개요 (재료·축조·규모·형상)</b>			
재료	축조법	거칠기(마찰계수)	열화수준
전체높이	지대석 평면	탑신부층수(높이)	전체형상*
1층 기단 평면	2층 기단 평면	1층 탑신 평면	최상위층 탑신 평면
1층 기단 높이	2층 기단 높이	1층 탑신 높이	탑신부 높이
1층 기단 세장비 (높이/폭)	1층 기단 세장비 (높이/폭)	1층 탑신 세장비 (높이/폭)	탑신부 세장비** (높이/폭)
<p>*직사각형, 사다리꼴, 삼각형으로 대별하고 체감율을 고려해서 판단  **탑신부 세장비를 계산할 때 폭은 1층 탑신부 폭을 사용</p>			



표 4.2 석탑문화재의 자료조사-구조요소

문화재 명칭			
	<b>기단</b>		
<b>조사항목</b>	지대석	1층 기단	2층 기단
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일 부재, 다중 부재</li> <li>• 귀주 크기</li> <li>• 귀주 건전성</li> <li>• 기울어짐 발생여부</li> <li>• 통줄눈 발생여부</li> <li>• 갑석 열극</li> <li>• 블록 이탈</li> <li>• 적심석 상태</li> </ul>			
	<b>1층</b>		
	1층 탑신	1층 옥개석	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일 부재, 다중 부재</li> <li>• 받침부재의 안정성</li> <li>• 귀주 크기(탑신)</li> <li>• 귀주 건전성(탑신)</li> <li>• 기울어짐 발생여부</li> <li>• 통줄눈 발생여부</li> <li>• 갑석 열극</li> <li>• 블록 이탈</li> </ul>			
	<b>2층</b>		
	2층 탑신	2층 옥개석	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일 부재, 다중 부재</li> <li>• 받침부재의 안정성</li> <li>• 기울어짐 발생여부</li> <li>• 통줄눈 발생여부</li> <li>• 갑석 열극</li> <li>• 블록 이탈</li> </ul>			
	<b>3층</b>		
	3층 탑신	3층 옥개석	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단일 부재, 다중 부재</li> <li>• 받침부재의 안정성</li> <li>• 기울어짐 발생여부</li> <li>• 통줄눈 발생여부</li> <li>• 갑석 열극</li> <li>• 블록 이탈</li> </ul>			
	<b>상륜부</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모</li> <li>• 정착 정도</li> </ul>			
*3층보다 큰 층수를 가진 석탑문화재의 구조요소 평가 자료는 이 표를 각 층에 대한 자료가 조사될 수 있도록 이 평가표를 확장하여 사용함			

### 4.2.1 기초점검을 위한 주요 용어

기초점검을 수행하는데 있어서 이해를 돕기 위한 부재 명칭에 대한 설명은 그림 4.2와 같다.

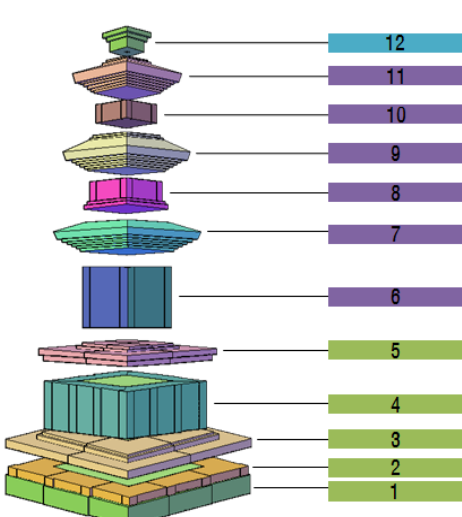
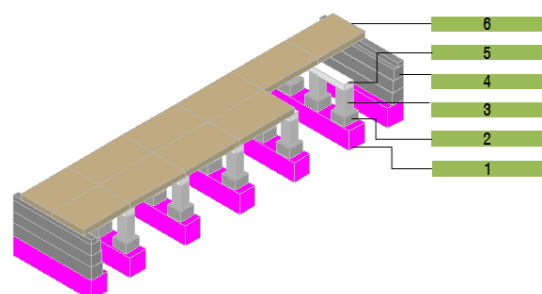
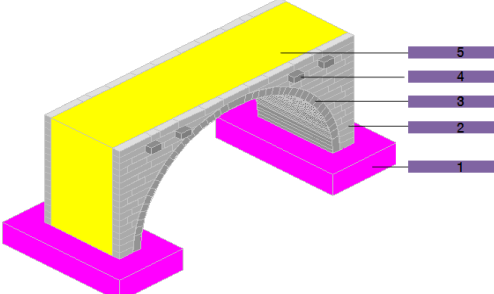
	12	노반
	11	3층옥개석
	10	3층탑신석
	9	2층옥개석
	8	2층탑신석
	7	1층옥개석
	6	1층탑신석
	5	상대갑석
	4	상대중석
	3	하대갑석
	2	하대중석
	1	지대석
	6	상판석
	5	명애석
	4	교대
	3	석주
	2	지대석
	1	기초
	5	채움재
	4	명애석
	3	홍예석
	2	무사석
	1	기초

그림 4.2 석조문화재의 부재 명칭

표 4.3 기초점검 항목의 주요사항

지반			<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지반의 견실함, 주변 지반 현황</li> </ul>
석탑	전체시스템		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전체구조 변형(기울기, 중심침하, 지대석변형)</li> <li>• 전체석재 건전성(부재손상, 접촉상태)</li> <li>• 전체구조 형상비</li> <li>• 전체구조 질량비</li> </ul>
	기단부		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기단변형</li> <li>• 부재구성(단일 부재, 다중 부재)</li> <li>• 부재의 열극과 이탈</li> <li>• 하중전달 경로(통줄눈 발생 유무)</li> <li>• 부재간의 접촉</li> <li>• 개구부</li> </ul>
	탑신부		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 우주석의 기울기</li> <li>• 부재구성(단일 부재, 다중 부재)</li> <li>• 부재의 열극과 이탈</li> <li>• 하중전달 경로(통줄눈 발생 유무)</li> <li>• 부재간의 접촉</li> <li>• 옥개석 배치의 균형</li> <li>• 개구부</li> </ul>
	상륜부		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 규모</li> <li>• 정착</li> </ul>
전탑	기단부		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지대석의 파손</li> <li>• 전탑의 기울어짐</li> <li>• 부재의 열극</li> <li>• 부분 침하</li> </ul>
	탑신부		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부재의 파손</li> <li>• 부재간의 이격</li> <li>• 부재의 이탈</li> </ul>
석교	홍예교	홍예석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부재의 이격 및 접합부 파손</li> </ul>
		선단석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부재의 파손</li> </ul>
		통줄눈	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통줄눈으로 인한 부재의 이격</li> </ul>
	평석교	상판석	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부재의 파손</li> </ul>
		접합부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석주와 멍애의 접합부 파손 및 이격</li> </ul>
		석주	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 석주의 균열</li> </ul>

표 4.4 석탑문화재의 기초점검 항목

	기존 매뉴얼 항목	상관관계 검토 후 변경 문항	변경 매뉴얼 항목
지반 및 주변 현황	- 지진발생 빈도가 낮은 지역인가? - 문화재의 지반은 단단한가?	- 건축구조설계 기준 지진 구역에 따라 구분하는 방법	- 지진구역 2에 해당하는가?
	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?	- 현재의 문항 유지	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?
	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 축대/담장 등의 위험요소가 없는가?	- 두 문항에 대하여 포괄적인 내용으로 병합	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 주변의 위험요소가 없는가?
	- 인접지반(하천, 경사지, 지반)의 유실 및 침하가 없는가?		
전체 시스템 형태 및 구성	- 개구부가 없는가?	- 현재의 문항 유지	- 개구부가 없는가?
	- 석탑문화재 3층을 초과하지 않는가?	- 두 문항에 대해 전체높이에 대한 항목으로 변경	- 3층을 초과하지 않는가?
	- 석탑문화재의 탑신부 높이가 전체 높이의 75%이하인가?		
	- 기단부의 세장비(기단 높이/기단 폭)가 0.5미만인가?	- 현재의 문항 유지	- 기단부의 세장비(기단 높이/기단 폭)가 0.5미만인가?
	- 전체형상의 세장비(높이/폭)가 4.0미만인가?	- 현재의 문항 유지	- 전체형상의 세장비(높이/폭)가 4.0미만인가?
	- 전체형상의 체감율(기단 포함)이 안정적인가?		
	- 전체형상의 질량비(탑신부 질량/기단부 질량)가 1.2미만인가? - 탑신부 질량체감율이 없는가?	- 대부분 형상에 대한 의견이므로 세 항목을 포괄하는 항목으로 병합	- 전체형상의 체감율(기단 포함)이 안정적인가?
부재 구성	- 석재의 마감이 거친다듬이 하인가?	- 석재의 마감에 대한 판단이 어려워 문항 삭제	
	- 기단부 면석이 단일부재에 근접한가?		
	- 기단부의 구조형식 가구식이 아닌가?	- 기단부의 구성부재형식에 대한 내용으로 변경	- 기단부의 구조형식이 단일부재형식인가?
	- 기단부 감석이 단일부재에 근접한가?		
	- 1층 탑신부 탑신석이 단일부재인가?	- 1층의 부재형식에 대한 내용으로 변경	- 탑신부 1층의 구조형식이 단일부재형식인가?
	- 1층 옥개석이 단일부재인가?		
	- 2층 탑신부 탑신석이 단일부재인가? - 2층 옥개석이 단일부재인가?	- 2층 이상의 부재형식에 대한 내용으로 변경	- 탑신부 2층 이상의 구조형식이 단일부재형식인가?
보존 상황	- 구조적으로 보수 및 보강 이력이 있는가?	- 석탑의 부재에 대한 내용으로 변경	- 석재의 열화수준이 양호한가?
	- 석탑문화재가 기능을 유지하고 있는가?		
	- 구조적으로 기울어짐이 발생하지 않았는가?	- 현재의 문항 유지	- 구조적으로 기울어짐이 발생하지 않았는가?
	- 석탑문화재의 훼손이 발생하지 않았는가?		- 기단부 파손 및 변형이 발생하지 않았는가?
	- 지대석 변형이 발생하지 않았는가?	- 전체적인 변형 및 훼손에 대한 내용을 기단부, 탑신부 1층 및 2층 이상으로 세분화하여 변경	- 탑신부 1층의 파손 및 변형이 발생하지 않았는가? - 탑신부 2층 이상의 파손 및 변형이 발생하지 않았는가?

표 4.5 석탑문화재의 기초점검 항목의 점검기준

분류	항목		점검 기준
지반 및 주변현황	1	석탑문화재의 위치 (KBC 기준에 의한 지진구역 2)	해당지역아님 (0점), 해당지역맞음 (1점)
	2	문화재 주변 배수로정비	배수상황불량 (0점), 배수상황양호 (1점)
	3	주변의 위험요소	위험요소 있음 (0점), 위험요소 없음 (1점)
전체시스템 형태 및 구성	4	개구부 여부	개구부 있음 (0점), 개구부 없음 (1점)
	5	석탑문화재의 층수	3층 초과 (0점), 3층 이하 (1점)
	6	기단부의 세장비 (기단 높이/기단 폭)	0.5 초과 (0점), 0.5 이하 (1점)
	7	전체형상의 세장비 (높이/폭)	4.0 이상 (0점), 4.0 미만 (1점)
부재 구성	8	전체형상의 체감율	체감 없음 (0점), 전체체감 안정적 (1점)
	9	기단부 구조형식	다중 부재 (0점), 단일 부재 (1점)
	10	탑신부 1층의 구조형식	다중 부재 (0점), 단일 부재 (1점)
	11	탑신부 2층 이상의 구조형식	다중 부재 (0점), 단일 부재 (1점)
보존 상황	12	구성부재의 열화수준	열화수준불량 (0점), 열화수준양호 (1점)
	13	전체 구조의 기울어짐	기울어짐발생 (0점), 기울어짐없음 (1점)
	14	기단부 부재의 파손 및 변형	있음 (0점), 없음 (1점)
	15	탑신부 1층 부재의 파손 및 변형	있음 (0점), 없음 (1점)
	16	탑신부 2층 이상 부재의 파손 및 변형	있음 (0점), 없음 (1점)

표 4.6 석탑문화재의 기초점검 항목 해설





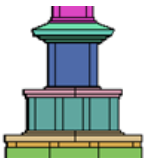

문화재 명칭	축조법	위치 (지진지역 구분)	
규모 및 구조적 특징			
평가 항목	배점	평가항목에 따른 점수 배점 기준	
1. 지진구역 2에 해당하는가?		해당 지역 맞음 	해당 지역 아님 
KBC 기준 지진구역 2의 지역 맞음	1점		
KBC 기준 지진구역 2의 지역 아님	0점		
잘 모르겠음	0점		
지진구역에 따라 석탑문화재에 작용하는 지진위험도가 변화하기 때문에 이에 대한 검토는 중요하다.			
2. 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어 있는가?		양호 	불량 
잘되어 있음	1점		
잘되지 않음	0점		
잘 모르겠음	0점		
문화재 주변 배수는 자연현상 등으로 배수가 잘 되지 않을 경우 석탑뿐만 아니라 하부 지반에도 영향을 미치므로 이에 대한 분석이 필요하다.			
3. 주변의 위험요소가 없는가?		없음 	있음 
없음	1점		
있음	0점		
잘 모르겠음	0점		
지진발생시 석탑문화재의 주변에 위험요소(축대 및 담장, 인접지반의 유실 및 침하, 하천 및 경사지)가 있을 경우 직접적으로 구조물에 영향을 미칠 요소가 있다고 판단되어 이에 대한 검토가 필요하다.			
4. 개구부가 없는가?		없음 	있음 
없음	1점		
있음	0점		
잘 모르겠음	0점		
석탑문화재는 개구부의 유무에 따라 하중의 흐름 및 전달과정의 차이가 발생한다. 개구부가 있는 경우 하중의 전달이 기둥 또는 면석에 집중될 우려가 있으며 불균형적인 거동특성이 발생할 수 있다.			

표 4.6 계속


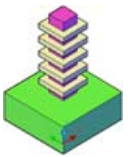
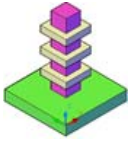
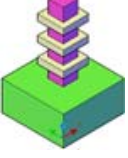




점검 항목	배점	점검 항목에 따른 점수 배점 기준			
5. 3층을 초과하지 않는가?		3층 이하		3층 초과	
3층 이하	1점				
3층 초과	0점				
잘 모르겠음	0점				
층수가 높을수록 지진에 의한 영향이 크게 나타나며, 낮은 층수로 축조된 구조물에 비해 내진성능이 취약하게 된다.					
6. 기단부의 세장비(기단 높이/기단 폭)는?		0.5 이하		0.5 초과	
0.5 이하	1점				
0.5 초과	0점				
잘 모르겠음	0점				
강체의 회전거동은 초기 변형에 대해서 매우 민감하게 반응한다. 기단부위에 놓인 탑신부는 기단부의 변형에 커다란 영향을 받게 된다. 이 경우 기단부의 세장비가 0.5이상 이 되면 기단부에서는 상부 구조에 영향을 미칠 정도의 비교적 큰 변형을 나타낸다.					
7. 전체형상의 세장비(높이/폭)는?		4.0 미만		4.0 이상	
4.0 미만	1점				
4.0 이상	0점				
잘 모르겠음	0점				
세장비가 클수록 지진하중에 대한 전도가능성이 매우 높아진다. 강체거동에 근거해서 회전가능성에 대한 회전 임계각을 고려해서 세장비의 한계를 정의하였다. 석탑의 전체 높이는 기단부에서 탑신 맨 상층까지의 높이이며, 폭은 1층 탑신부의 폭과 맨 위 상부 폭의 평균값을 이용한다.					
8. 전체형상의 체감율(기단 포함)은?		안정적 체감		체감 없음	
안정적 체감 있음	1점				
체감 없음	0점				
잘 모르겠음	0점				
전체형상의 세장비를 근거로 전도가능성에 대한 평가한 결과에 대해서 보다 현실적인 상황을 반영하고자 함이다. 체감이 안정적으로 발생한 경우에는 지진하중에 전도가능성을 줄여준다.					

표 4.6 계속









점검 항목	배점	점검항목에 따른 점수 배점 기준			
9. 기단부의 부재형식은?		단 일 부 재		다 중 부 재	
단일 부재에 근접함	1점				
다중부재	0점				
잘 모르겠음	0점				
지진하중에 대한 동적해석 결과를 토대로 기단부의 부재구성이 다중 부재인 경우가 단일 부재에 비해서 불리하다. 이는 작은 부재가 큰 부재에 비해서 변형이 쉽게 일어나기 때문이다.					
10. 탑신부 1층의 부재구성은?		단 일 부 재		다 중 부 재	
단일 부재에 근접함	1점				
다중부재	0점				
잘 모르겠음	0점				
탑신부 1층은 상부하중을 받아 기단부로 전달하는 역할을 수행하며, 다중 부재로 구성될 경우 부재간의 움직임이 많아 내진성능을 저하시키게 된다. 이와 같이 부재 개수가 증가할수록 내진성능이 더욱 크게 감소한다.					
11. 탑신부 2층 이상의 부재구성은?		단 일 부 재		다 중 부 재	
단일 부재에 근접함	1점				
다중 부재	0점				
잘 모르겠음	0점				
탑신부 2층 이상의 부재가 다중 부재일 경우 단일 부재에 비해 부재간의 움직임이 많아서 구조물 상부의 변형이 발생할 수 있다.					
12. 석재의 열화수준이 양호한가?		그 렇 다		그 렇 지 않 다	
그렇다	1점				
그렇지 않다	0점				
잘 모르겠음	0점				
석탑문화재의 열화상태에 따라 부재와 부재사이의 내진성능이 달라지기 때문에 석재의 열화수준에 대한 평가가 이루어져야 한다.					



표 4.6 계속









점검 항목	배점	점검항목에 따른 점수 배점 기준			
13. 구조적으로 기울어짐이 발생했는가?		변형 없음		기울어짐	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
전체 석탑의 형상에 대해서 기울어짐이 발생한 상태에서 지진이 발생하는 경우에는 조그마한 크기의 지진이 발생해도 전체 석탑구조의 안정성에 문제가 발생할 수 있다.					
14. 기단부의 파손 및 변형이 발생했는가?		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
기단부는 석탑의 최하단부에 위치하여 이러한 부재들에 파손 및 변형이 발생할 경우 전체구조물의 안전성에 문제가 나타날 수 있다.					
15. 탑신부 1층의 파손 및 변형이 발생했는가?		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
탑신부 1층은 상부부재에서 기단부로 하중을 전달하는 역할을 수행하고 있으며, 이러한 부재들에 균열 및 변형이 발생할 경우 하중전달이 원활하게 이루어지지 못하고 응력집중현상이 나타날 수 있기 때문에 지진에 대한 위험성이 증가된다.					
16. 탑신부 2층 이상의 파손 및 변형이 발생했는가?		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
탑신부 2층 이상의 부재에 변형 및 파손이 발생할 경우 상부구조물의 하중전달이 원활하게 이루어지지 않기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.					

표 4.7 전담문화재의 기초점검 항목

	기존 매뉴얼 항목	상관관계 검토 후 변경 문항	변경 매뉴얼 항목
지반 및 주변 현황	- 지진발생 빈도가 낮은 지역인가?	- 건축구조설계 기준 지진 구역에 따라 구분하는 방법	- 지진구역 2에 해당하는가?
	- 문화재의 지반은 단단한가?		
	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?	- 현재의 문항 유지	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?
	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 축대/담장 등의 위험요소가 없는가?	- 세 문항에 대하여 포괄적인 내용으로 병합	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 주변의 위험요소가 없는가?
	- 인접지반(하천, 경사지, 지반)의 유실 및 침하가 없는가?		
- 인접지역에 하전치 없는가?			
전체 시스템 형태 및 부재 상황	- 전돌의 접합에 있어 모르타르를 사용하였는가?	- 현재의 문항 유지	- 전돌의 접합에 있어 모르타르를 사용하였는가?
	- 구성부재가 파손되지 않았는가?	- 두 문항에 대해 파손 및 이탈에 대한 항목으로 변경	- 구성부재의 파손 및 이탈이 되지 않았는가?
	- 구성부재가 이탈되지 않았는가?		
	- 블록의 열극현상이 발생하지 않았는가?	- 현재의 문항 유지	- 블록의 열극현상이 발생하지 않았는가?
	- 개구부가 없는가?	- 현재의 문항 유지	- 개구부가 없는가?
보존 상황	- 보수 및 보강이력이 있는가?	- 두 문항에 대하여 포괄적 내용이 기능을 유지 내용으로 병합	- 기능을 유지하고 있는가?
	- 기능을 유지하고 있는가?		
	- 부분침하가 발생하지 않았는가?	- 현재의 문항 유지	- 부분침하가 발생하지 않았는가?
	- 기울어지지 않았는가?	- 현재의 문항 유지	- 기울어지지 않았는가?

표 4.8 전탑문화재의 기초점검 항목의 점검기준

분류	항목		점검내용
지반 및 주변현황	1	석탑문화재의 위치 (KBC 기준에 의한 지진구역 2)	해당지역아님 (0점), 해당지역맞음 (1점)
	2	문화재주변 배수로정비	배수상황불량 (0점), 배수상황양호 (1점)
	3	주변의 위험요소	위험요소있음 (0점), 위험요소없음 (1점)
전체시스템 형태 및 부재상황	4	모르타르 사용 여부	미사용 (0점), 사용 (1점)
	5	구성부재의 파손 및 이탈	있음 (0점), 없음 (1점)
	6	블록의 열극현상	발생 (0점), 미발생 (1점)
	7	개구부 여부	개구부 있음 (0점), 개구부 없음 (1점)
보존 상황	8	기능유지 상황	유지하지 못함 (0점), 기능유지 (1점)
	9	부분 침하	있음 (0점), 없음 (1점)
	10	전체 구조의 기울어짐	있음 (0점), 없음 (1점)

표 4.9 전탑문화재의 기초점검 항목 해설

점검 항목	배점	점검항목에 따른 점수 배점 기준			
<b>1. 지진구역 2에 해당하는가?</b>		그렇다		그렇지 않다	
그렇다	1점				
그렇지 않다.	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>2. 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?</b>		양호		불량	
그렇다	1점				
그렇지 않다	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>3. 주변의 위험요소가 없는가?</b>		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>4. 모르타르를 사용하였는가?</b>		사용		미사용	
사용	1점				
미사용	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>5. 부재의 파손 및 이탈이 없는가?</b>		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>6. 블록의 열극현상이 발생하였는가?</b>		미발생		발생	
열극현상이 발생하지 않음	1점				
열극현상이 발생	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>7. 개구부가 있는가?</b>		없음		있음	
없음	1점				
있음	0점				
잘 모르겠다	0점				
<b>8. 전탑문화재가 기능을 유지하고 있는가?</b>		유지		미유지	
기능 유지	1점				
기능 유지하지 못함	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>9. 전탑에 부분침하가 발생하였는가?</b>		미발생		발생	
발생하지 않음	1점				
발생	0점				
잘 모르겠음	0점				
<b>10. 전탑의 기울어짐 발생상황은?</b>		미발생		발생	
기울어짐 발생하지 않음	1점				
기울어짐 발생	0점				
잘 모르겠음	0점				





표 4.10 석교문화재의 기초점검 항목

	기존 매뉴얼 항목	상관관계 검토 후 변경 문항	변경 매뉴얼 항목
지반 및 주변 현황	- 지진발생 빈도가 낮은 지역인가?	- 건축구조설계 기준 지진 구역에 따라 구분하는 방법	- 지진구역 2에 해당하는가?
	- 문화재의 지반은 단단한가?		
	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?	- 현재의 문항 유지	- 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?
	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 축대/담장 등의 위험요소가 없는가?	- 두 문항에 대하여 포괄적인 내용으로 병합	- 문화재에 영향을 줄 수 있는 주변의 위험요소가 없는가?
	- 인접지반(하천, 경사지, 지반)의 유실 및 침하가 없는가?		
전체 시스템 형태 및 부재 상황	- 뒤채움 상태는 양호한가?	- 현재의 문항 유지	- 뒤채움 상태는 양호한가?
	- 석재의 마감이 거친다듬 이하 인가?	- 석재의 마감에 대한 판단이 어려워 부재의 변형이 발생하지 않았는가?로 변경	- 구성부재의 파손 및 이격이 발생하지 않았는가?
	- 통줄눈은 없는가?	- 현재의 문항 유지	- 통줄눈은 없는가?
	- 석교의 구성형태는 어떠한가?	- 현재의 문항 유지	- 석교의 구성형태는 어떠한가?
보존 상황	- 보수 및 보강이력이 있는가?	- 현재의 문항 유지	- 보수 및 보강이력이 있는가?
	- 기능을 유지하고 있는가?	- 현재의 문항 유지	- 기능을 유지하고 있는가?
	- 석교문화재가 훼손되지 않았는가?	- 현재의 문항 유지	- 석교문화재가 훼손되지 않았는가?

표 4.11 석조문화재의 기초점검 항목의 점검기준

	항목		점검내용
지반 및 주변현황	1	석탑문화재의 위치 (KBC 기준에 의한 지진구역 2)	해당지역아님 (0점), 해당지역맞음 (1점)
	2	문화재주변 배수로정비	배수상황불량 (0점), 배수상황양호 (1점)
	3	주변의 위험요소	위험요소있음 (0점), 위험요소없음 (1점)
전체시스템 형태 및 부재상황	4	채움재의 상태	유실 (0점), 충만 (1점)
	5	구성부재의 파손 및 이격	있음 (0점), 없음 (1점)
	6	줄눈의 상태	통줄눈이있음 (0점), 통줄눈이없음 (1점)
	7	석교의 구성형태 (평석교, 홍예교)	평석교 2단형 (0점), 장방형 (1점), 마름모형(1점) 홍예교 포물선형 (0점), 타원형 (1점), 반원형(1점)
보존 상황	8	보수 및 보강이력	없음 (0점), 있음 (1점)
	9	기능유지 상황	유지하지 못함(0점), 기능유지 (1점)
	10	훼손 상태	훼손발생(0점), 훼손없음 (1점)

표 4.12 석교문화재의 기초점검 항목 해설

평가 항목	배점	평가항목에 따른 점수 배점 기준					
<b>1. 지진구역 2에 해당하는가?</b>		그렇다		그렇지 않다			
그렇다	1점						
그렇지 않다.	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>2. 문화재 주변 배수로 정비가 잘 되어있는가?</b>		양호		불량			
그렇다	1점						
그렇지 않다	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>3. 주변의 위험요소가 없는가?</b>		없음		있음			
없음	1점						
있음	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>4. 채움재의 상태는?</b>		충만		유실			
충만	1점						
유실	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>5. 부재의 파손 및 이격이 없는가?</b>		없음		있음			
없음	1점						
있음	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>6. 줄눈의 상태는?</b>		없음		있음			
통줄눈이 없음	1점						
통줄눈이 있음	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>7. 석교의 구성형태는?(평석교)</b>		마름모형		장방형		2 단형	
마름모형 석주	1점						
장방형 석주	1점						
2단형 석주	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>석교의 구성형태는?(홍예교)</b>		타원형		반원형		포물선형	
타원형 홍예	1점						
반원형 홍예	1점						
포물선형 홍예	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>8. 보수 및 보강 이력이 있는가?</b>		보강 있음		보강 없음			
있음	1점						
없음	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>9. 석교문화재가 기능을 유지하고 있는가?</b>		유지		미유지			
기능 유지	1점						
기능 유지하지 못함	0점						
잘 모르겠음	0점						
<b>10. 석교문화재의 훼손 상태는?</b>		훼손 없음		훼손 발생			
훼손 발생하지 않음	1점						
훼손 발생	0점						
잘 모르겠음	0점						

### 4.2.2 기초점검 결과

점검항목에 따른 점검결과는 표 4.13 및 표 4.14와 같다.

표 4.13 석탑문화재의 기초점검 결과

점검결과	점수	내진성능 점검 결과	조치
	13점 이상	내진성능이 있음	상태양호
	9점 ~12점	내진성능 적절함	지속관찰
	7점 ~8점	큰 변형의 우려는 없으나 주의단계	문화재위원회와 협의필요
	5점 ~6점	내진성능 취약	전문평가 필요
	4점 이하	내진성능취약 조속한 조치필요	전문평가 후 보강조치

표 4.14 전탑 및 석교문화재의 기초점검 결과

점검결과	점수	내진성능 점검 결과	조치
	8점 이상	내진성능 있음	상태양호
	5점 ~7점	내진성능확보	지속관찰
	4점	큰 변형의 우려는 없으나 주의단계	문화재위원회와 협의필요
	3점	내진성능 취약	전문평가 필요
	2점 이하	내진성능취약 조속한 조치필요	전문평가 후 보강조치

### 4.2.3 추가 고려 사항

기초점검은 신뢰할 수 있는 분석 및 평가를 얻기보다는 석조문화재의 내진성능에 대한 정보를 알기 위한 것이 주요 목적이다. 이에 다음 사항을 따르는 것이 바람직하다.



- 기초점검은 점검항목 중에서 잘 모르겠음 항목이 많을 경우 신뢰성이 저하되기 때문에 구조성능 및 점검항목에 따라 석조문화재를 보다 정확히 진단할 수 있도록 전문교육이 필요함.
- 기초점검은 내진성능평가뿐만 아니라 구조적 안정성 평가에 필요하므로 표 4.1과 표 4.2를 토대로 조사항목을 지속적으로 보완하여 기초 자료를 구축한다.

#### 4.2.4 전문평가와 연계를 통한 내진성능 평가

기초평가결과 전문가 진단이 필요한 경우 다음과 같은 전문평가의 절차를 통한 내진성능평가가 이루어진다.

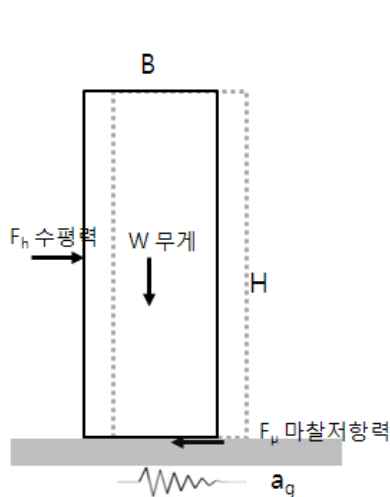
- 석조문화재는 일반구조물과는 달리 불연속체 구조물로서 부재와 부재가 만나는 접촉면의 역학적 거동을 반영하는 것이 중요하기 때문에 블록 및 접촉면 특성, 부재와 부재사이의 변위 및 회전, 부재사이의 경계조건을 고려한 모델링방안이 필요함
- 석조문화재의 동적해석을 위해 석재의 밀도, 전단계수, 접착력, 마찰각, 체적계수, 파괴계수의 물리적 특성이 요구되며, 접촉면의 경우 축강성, 전단강성, 접착력, 내부마찰각의 특성의 파악이 필요함
- 재현주기에 따른 동적해석을 수행하여 석재와 석재사이의 미끄러짐, 큰 변위 및 회전, 부재와 부재사이의 이격, 기존 균열에서의 파괴 전전여부 등 새로운 접촉면의 탐색방안의 모색이 필요함
- KBC 기준의 층간변위 제한조건을 적용하여 지진하중에 따른 횡변위에 대한 석조문화재의 내진성능에 대한 검토가 필요함
- 부재와 부재가 적층되어 형태를 구성하는 방식이기 때문에 석재 사이에 발생할 수 있는 미끄러짐에 대한 검토가 필요함
- 석조문화재의 내진성능 목표를 즉시복구와 붕괴방지로 구분하여 무게중심변화에 따른 전도가능성 확인을 통한 석조문화재의 내진성능의 평가가 필요함

## 4.3 전문 평가

### 4.3.1 구조안정성 평가

석탑구조와 같이 인장에는 약하지만 압축에는 매우 강한 부재들이 외적인 인장재를 사용하지 않고 다층으로 쌓은 구조시스템의 경우 작용하는 하중에 따라서 구조적 거동이 어떻게 변화할 지 분석하는 것이 매우 복잡하다. 특히 이러한 강체들의 구조적 거동은 횡 하중이 커짐에 따라서 소성변형과 연성도를 통해서 어느 정도 점진적 변형을 일으키는 구조시스템과는 달리, 기하학적 임계 세장각에 근접한 지진하중이 작용하는 순간 전체구조물의 도괴로 이어질 수 있다는 문제점을 지니고 있다. 따라서 순차적인 하중증가에 대한 구조적 거동을 살펴보기에 앞서서 강체거동에 대한 구조안정성 평가를 수행하는 것이 중요하다.

구조안정성 평가를 위해서 지진 하중을 받는 석탑구조에서 지배적으로 발생할 미끄러짐과 회전에 대한 거동한계를 중점적으로 평가한다. 그림 4.3은 마찰저항에 대한 강체의 미끄러짐 거동을 설명하고 있다. 수평력을 받고 있는 석탑구조의 경우 접촉면에서 발생하는 마찰 저항력이 작용하는 수평력보다 작을 경우에는 미끄러짐이 발생하게 된다.



$$F_h > F_\mu$$

여기서,  $F_h$ 는 수평력,  $F_\mu$ 는 마찰저항력

$$F_\mu = \mu \cdot W, F_h = M \cdot a$$

마찰저항에 대한 임계식은

$$F_{h,cr} = F_{\mu,cr}$$

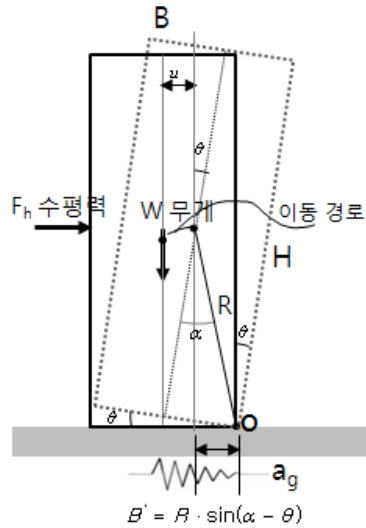
$$M \cdot a_{\mu,cr} = \mu_{cr} \cdot M \cdot g$$

미끄러짐이 발생하지 않기 위한 조건

$$\frac{a_{\mu,cr}}{g} < \mu$$

그림 4.3 강체의 미끄러짐 거동

마찰력에 대해서는 안정적인 석탑구조에 수평력과 자중무게의 합력선이 강체의 경계점을 통과하는 순간 회전하게 되며, 이때 발생한 회전각을 임계회전각  $\alpha$ 이라 한다. 따라서 수평력과 자중무게의 합력선의 기울기와 임계회전각과의 관계를 이용해서 그림 4.4와 같이 회전에 대한 안정성을 평가할 수 있다.

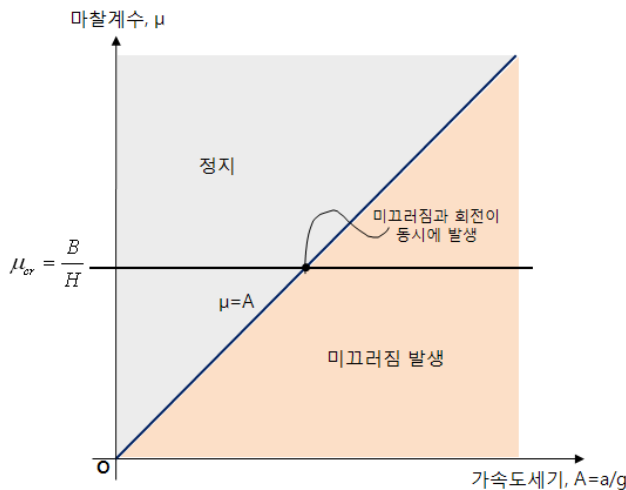


$$\tan \alpha = \frac{B/2}{H/2} = \frac{B}{H}$$

- $\theta < \alpha$       안정 상태
- $\theta = \alpha$       임계 상태
- $\theta > \alpha$       불안정 상태

그림 4.4 강체의 회전 거동

동일한 지진 하중에 대하여 강체에 나타날 미끄러짐 거동과 회전 거동을 상호연계하기 위하여 그림 4.5와 같이 강체거동 분석도를 작성한다.



$$F_{h,\mu} = F_{h,rot}$$

$$a_{\mu,cr} = a_{rot,cr}$$

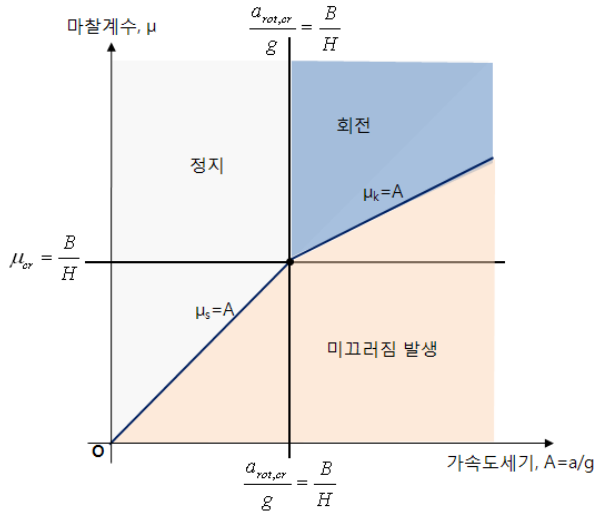
$$\mu_{cr} \cdot g = \frac{B}{H} \cdot g$$

$$\mu_{cr} = \frac{B}{H}$$

$$a_{\mu,cr} = a_{rot,cr} = \mu_{cr} = \frac{B}{H}$$

그림 4.5 강체거동 분석도

실제 특정한 강체구조에 대해서는 형상비 (B/H)가 결정되어 있으므로 강체거동 분석도는 그림 4.6에서와 같이 공통된 좌표계를 이용해서 주어진 강체에 대한 거동한계를 살펴 볼 수 있다.



	$\mu > a_{EQ}$	$\mu \leq a_{EQ}$
$B/H < a_{EQ}$	안정	미끄러짐
$B/H \geq a_{EQ}$	회전	회전 미끄러짐

\* 움직이는 강체의 마찰계수는 정지상태의 마찰계수보다 작아지는 점을 고려한다.

그림 4.6 형상비와 마찰계수를 고려한 강체거동 분석도

그림 4.7은 구조적 안정성을 검토하는 흐름도를 정리한 것이다.

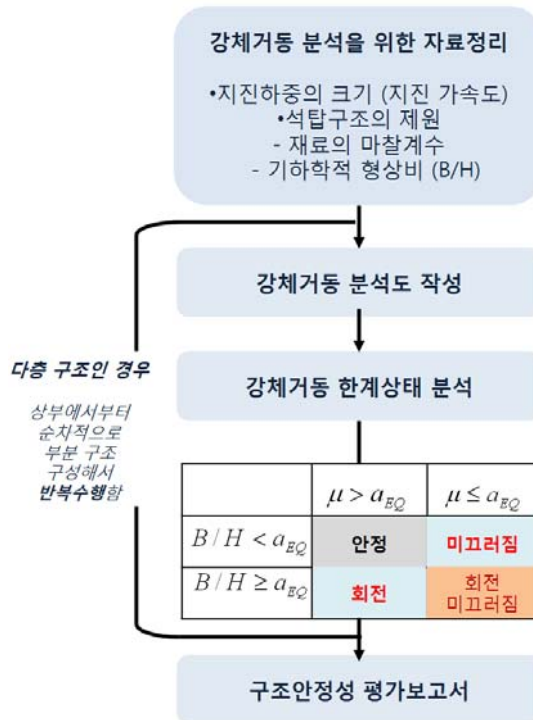
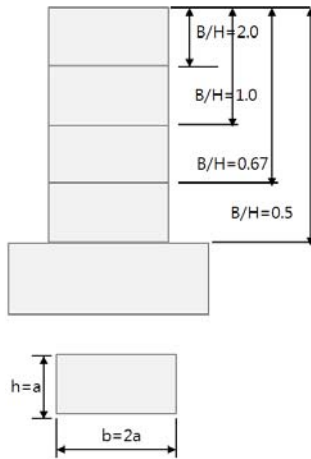
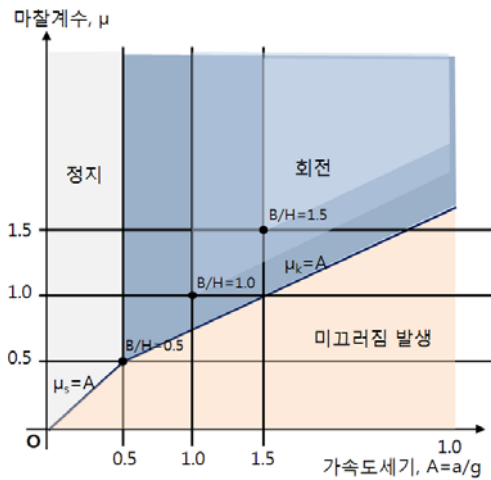


그림 4.7 형상비와 마찰계수를 고려한 강체거동 분석도

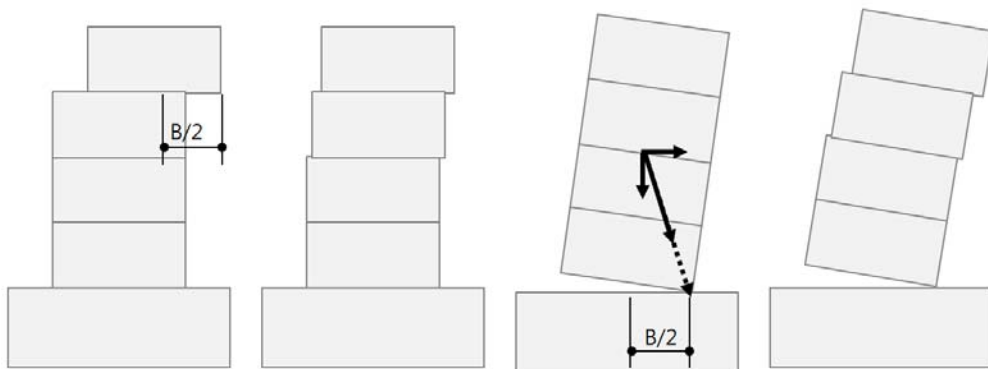
다층으로 구성된 강체구조의 경우에는, 다양한 부분구조 형상을 고려해서 살펴볼 수 있다. 그림 4.8에서 알 수 있듯이 상부에서부터 순차적으로 층 구성을 달리하는 경우에 각 경우마다 기하학적 형상비가 다르게 되고, 이에 강체거동의 한계가 또한 달라진다.



a) 다층 블럭



b) 강체거동 분석도



\*미끄러짐으로 인하여 강체의 무게중심이 균형을 잃거나, 중력과 수평력의 합력의 위치가 회전경계점을 벗어나는 경우에는 구조시스템의 안정성을 잃게 된다.

c) 다층 블록의 거동가능성

그림 4.8 다층으로 구성된 강체거동 분석도

강체거동 분석도를 현실적으로 이용하기 위해서는 석탑구조물의 밑면에 작용한 지진가속도가 분석 대상위치에서 어떻게 증폭하는지와 석재의 정적 및 동적 마찰계수에 대한 정보가 필요하다. 아직은 선행 연구가 부재한 상태이지만, 추후 이러한 정보가 마련된다면 보다 합리적인 구조안정성 평가를 수행할 수 있을 것이다.

### 4.3.2 구조해석을 이용한 평가

#### 1) 수행절차

정밀구조해석을 이용한 전문평가는 기초점검 결과 전문가진단이 필요할 경우 수행되며 재현주기에 따른 동적해석 결과를 바탕으로 내진성능을 평가하는 방법이다. 이는 그림 4.9와 같이 진행되며 석조문화재의 동적거동특성을 확인하고 내진성능을 평가한다. 먼저 구조모델링의 경우 석재 및 접촉면 특성을 고려한 모형화 작업을 수행하고 이후 재현주기에 따른 지진하중을 적용하여 동적해석을 수행한다. 이에 따라 동적해석 결과를 바탕으로 층간변위, 미끄러짐 및 내진성능 목표에 따른 검토를 바탕으로 석조문화재의 내진성능을 평가한다.



그림 4.9 수행 절차

석조문화재의 동적해석 수행을 위한 지진하중을 적용하기 위해서는 지진하중의 재현주기 및 주기특성에 따라 적용하여 동적해석을 수행한다. 이러한 지진하중은 석조문화재가 위치한 지반 조건이 고려되어야 하며 실제 문화재에 영향을 미치는 표면파로 설정하여 동적해석을 수행한다.

## 2) 구조모형화 방안

석조문화재는 일반 구조물과는 달리 불연속체 구조물로서 부재와 부재가 만나는 접촉면의 역학적 거동을 반영하는 것이 중요하다. 따라서 블록특성, 부재와 부재사이의 변위 및 회전, 부재사이의 경계조건을 고려한 모델링방안이 강구되어야 하며 이러한 석조문화재의 역학적 특성을 반영한 구조해석을 수행해야 한다.

## 3) 재료특성 입력 방안

석조문화재의 동적해석을 위해서는 석재의 물리적 특성과 석재와 석재의 접촉면의 특성에 대해 정확히 파악해야 한다. 이는 실험을 통해 석재의 밀도, 전단계수, 점착력, 마찰각, 체적계수의 물리적 특성을 파악하며, 접촉면의 경우 축강성, 전단강성, 점착력, 내부마찰각의 특성을 파악해야 한다.

## 4) 구조해석 방안

석조문화재의 구조해석은 일반 연속체 구조물과는 다른 조적식 구조물만의 독특한 역학적 거동특성을 반영한 결과가 나타나야 한다. 이를 위해 석조문화재는 불연속체 구조물로서 다루어져야 하며, 역학적 거동을 파악하기 위해서는 불연속면에 대한 모델링이 매우 중요하다. 이후 구조해석을 통한 석재와 석재사이의 미끄러짐, 큰 변위 및 회전, 부재와 부재사이의 이격, 기존 균열의 진전여부, 새로운 접촉면의 탐색방안을 모색한다.

## 5) 내진성능 평가 방안

동적해석 결과를 바탕으로 층간변위, 미끄러짐, 내진성능 목표에 따른 검토를 통해 석조문화재의 내진성능을 평가한다.

## (1) 층간변위 검토

석조문화재의 층간 변위 검토를 위해 KBC2009 기준의 등급에 따른 허용 층간변위를 적용하며, 층별 횡변위의 경우 전체 높이에 대한 허용 비율을 적용하여 검토한다.

$$\delta < \delta_a = H/\alpha \quad (4.1)$$

(H : 전체높이,  $\alpha$  : 허용비율)

표 4.15 허용 층간변위 검토 방안

	등급		
	특	I	II
허용층간변위	$0.010h_{sx}$	$0.015h_{sx}$	$0.020h_{sx}$

(2) 미끄러짐 검토

석재에 작용하는 전단변위가 증가함에 따라 전단응력은 최대 강도에 도달할 때까지 계속 증가하며 정점전단응력에 도달하게 된다. 이후 전단변위가 계속 증가하면서 전단응력은 잔류전단강도로 떨어지며 큰 전단변위가 발생할 때까지도 일정한 값을 유지한다. 다양한 수직응력이 작용하는 경우 최대전단강도와 잔류전단강도를 산정한 뒤 직선으로 근사화하여 전단강도 직선을 얻을 수 있다. 따라서 최대전단강도( $\tau_p$ )와 수직응력( $\sigma_n$ )의 관계를 식으로 표현하면 식 (4.2)와 같다.

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi_p \quad (4.2)$$

여기서,  $c$  = 불연속면의 점착강도

$$\phi_p = \text{접촉면의 마찰각}$$

잔류전단강도가 유지되는 경우 점착강도  $c$ 를 0으로 간주할 수 있으므로  $\tau_p$ 와  $\sigma_n$ 의 관계는 식 (4.3)으로 표현되며 이를 바탕으로 석재의 미끄러짐을 검토하여 석조문화재가 갖는 내진성능을 평가한다.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (4.3)$$

여기서,  $\phi_r$  = 잔류마찰각

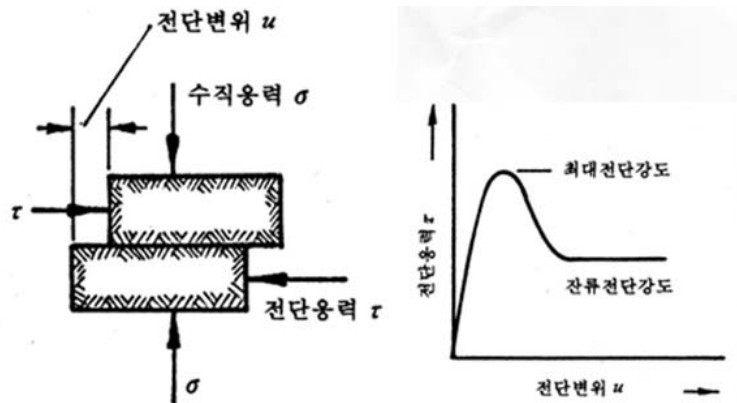


그림 4.10 부재의 미끄러짐 검토 방안



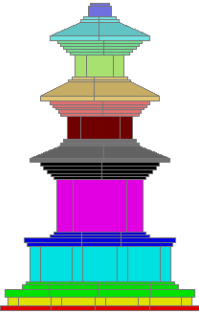
(3) 내진성능 목표에 따른 검토

석탑 문화재의 내진성능 목표를 즉시복구 수준과 붕괴방지 수준으로 분류하며 동적해석 결과를 바탕으로 변위 및 성능수준의 확인을 통해 석탑 문화재의 내진성능을 평가한다.

표 4.16 석탑 문화재의 내진성능 목표

즉시복구	간단한 보수 및 보강을 통해 석탑 문화재의 기능을 유지할 수 있는 상태
붕괴방지	석탑 문화재의 붕괴가 발생하지는 않지만 간단한 보수 및 보강을 통한 유지가 힘든 상태

표 4.17 석탑 문화재의 내진성능 목표에 따른 검토 방안

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 내진성능 평가단계 확인 (탑신석의 개수와 동일한 n번의 평가)</li> <li>- 탑신부 최상층에서부터 변형 체크 (n번째 탑신석과 옥개석의 변위 및 중심의 확인)</li> <li>- 제한조건으로 n + 1번째의 탑신석폭의 B/2초과여부 판별 (개별 부재가 아닌 변형이 일어난 모든 부재의 형태에 따른 검토 및 제한조건내 위치여부 확인)</li> <li>- 석탑 문화재의 성능수준 판정</li> </ul>
--	---

현재 석조문화재의 내진성능을 평가하기 위한 기준이 마련되어 있지 않다. 따라서 본 매뉴얼에서는 석조문화재의 내진성능을 평가하기 위해 구조모델링 및 동적해석을 수행 및 해석결과 분석을 바탕으로 석조문화재의 내진성능을 평가한다.

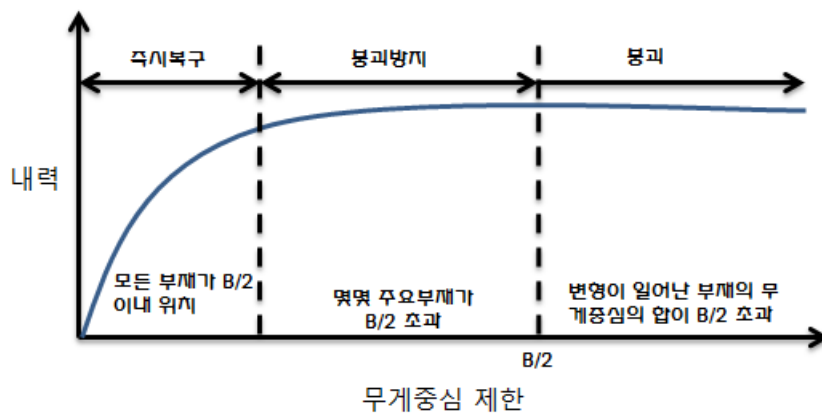


그림 4.11 석조문화재의 내진성능

표 4.18 석조문화재의 손상상태 정의

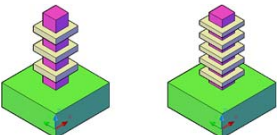
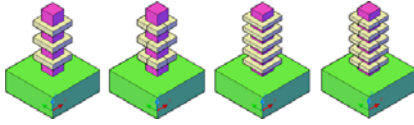
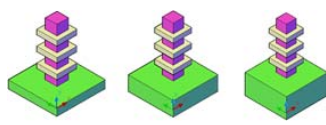
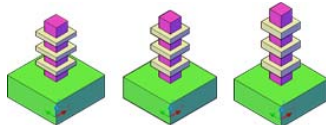

구분	내용
즉시복구 수준	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 부재의 이격 및 변위가 발생했지만 안정적으로 석조문화재가 축조되어 있는 형태</li> <li>- 변형이 일어난 부재의 무게중심이 변형이 일어나지 않은 탑신석 폭의 B/2 범위를 초과하지 않은 상태</li> </ul>
붕괴방지 수준	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 부재의 이격 및 변위가 발생하여 일부 부재가 탈락되거나 붕괴가 발생할 수 있는 상태</li> <li>- 하나 이상의 부재가 변형이 일어나지 않은 탑신석폭의 B/2 제한조건을 초과한 경우</li> </ul>

석탑 문화재의 불국사 3층 석탑, 정림사지 5층 석탑, 고선사지 3층 석탑의 동적해석 결과를 분석하여 표 4.18과 같이 석탑 문화재의 거동 특성을 분석하였다.

표 4.19 축조형식에 따른 동적거동 분석 결과

	불국사 3층 석탑	정림사지 5층 석탑	고선사지 3층 석탑
	단일 거동의 형태	다중 거동의 형태	다중 거동의 형태
부재의 개수 및 크기에 따른 거동특성			
형상비에 따른 특성	형상비가 1.7이며 탑신부 상부에서 최대변위가 발생하고 최대응력이 탑신부 중앙에 집중됨	형상비가 2.2이며 탑신부 상부에서 최대 변위가 발생하고 최대응력이 탑신부 중앙에 집중됨	형상비가 1.3이며 대부분 기단부에서 최대변위가 발생하고 최대응력이 집중됨

표 4.20 석탑문화재의 형상비에 따른 동적거동 분석 결과

분류		분석결과
 <p>층수에 따른 분류</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 동적해석 결과를 통해 동일 높이에서 층수가 증가함에 따라 변위가 증가하는 것으로 나타남</li> </ul>
 <p>부재 분할에 따른 분류</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 석탑의 높이는 고정시키고 하나의 층이 다중 부재로 구성된 경우 단일부재로 구성된 경우보다 큰 변위가 나타남</li> </ul>
부재의 높이 변화	 <p>기단부 높이</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기단부의 크기가 같고 동일한 높이를 갖는 석탑의 경우 층수가 증가할수록 보다 큰 변위가 나타남</li> <li>- 기단부의 높이가 높아질수록 큰 변위가 발생하는 것으로 나타남</li> </ul>
	 <p>탑신부 높이</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기단부 높이를 고정하고 탑신부의 높이변화에 따른 동적해석 수행결과 탑신부의 높이가 높아질수록 큰 변위가 나타남</li> </ul>
 <p>접촉면 거칠기에 따른 분류</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 접촉면의 거칠기 변화에 따라 변위의 차이가 발생하였으며 거칠기가 강할수록 내진성능이 뛰어난 것으로 판단됨</li> </ul>



# 국가지정문화재(목조, 석조) 내진점검 및 진단 매뉴얼 (변경안)

발 행 일 : 2013. 12

연구기관 : 한국지진공학회

기획편집 : 문화재청 안전기준과

발 행 처 : 문화재청

주 소 : (302-701) 대전광역시 서구 청사로 189 정부대전청사

연 락 처 : Tel. 042-481-4820, 4931

Fax. 042-481-4932

(<http://www.cha.go.kr>)

인 쇄 처 : 무지개사(☎ 02-872-8151, 8152)

(151-858) 서울특별시 관악구 대학동 237-26

발간등록번호 11-1550000-001460-01

I S B N 978-89-299-0348-0 93450

---

< 비 매 품 >

※ 이 책에 실린 글과 그림, 사진, 내용을 포함한 제반 사항은  
저작권자와 협의 없이 무단전제 및 복제를 금합니다.

국가지정문화재(목조, 석조)  
내진점검 및 진단 매뉴얼 (변경안)

2013 문화재 지진재해 기초평가 연구

〈 부 록 〉