

ARTICLE

## 주요지진 발생에 따른 건축문화재 지진 방재 연구방향 고찰

이현성\* · 조상순\*\* · 이세현\*\*\* · 김세현\*\*\*\*

# A Study on the Research Direction of Earthquake Disaster Prevention in Architectural Heritage according to Major Earthquake Occurrence

Lee, Hyunsung\* · Jo, Sangsun\*\* · Lee, Seheon\*\*\* · Kim, Sehyun\*\*\*\*

### 요 지

문화재 재난에 대한 연구는 2004년 낙산사 화재를 거쳐, 2008년 승례문 화재를 계기로 본격적으로 전개되었다. 지진에 대한 연구는 경주지역을 중심으로 발생한 9.12지진 이전부터 이루어져 왔지만, 2009년 첫 시행된 지진재해대책법을 계기로 관련 연구가 증가하였으며 9.12지진을 계기로 연구 분야에 큰 변화가 일어나고 있다. 본 논문에서는 주요지진 발생에 의해 변화된 건축문화재 지진 방재분야의 연구흐름과 연구 성과의 분석을 통해, 향후 나아가야 할 연구방향을 제시하였다.

**핵심용어:** 건축문화재, 지진, 방재계획, 재난관리, 연구방향

### Abstract

The research of cultural heritage disasters was carried out in earnest following the fire at *Naksansa* Temple in 2004 and in the wake of the arson at *Sungnyemun* Gate in 2008. Research on earthquakes has been conducted since before the 9.12 earthquake in *Gyeongju*. However, related research has increased in the wake of the Act on the preparation for Earthquake which was first implemented in 2009. And the 9.12 earthquake has caused major changes in the field of research. Through the analysis of the research flow and research results in the field of earthquake prevention of architectural cultural heritage changed by the occurrence of major earthquakes, this paper presented the direction of research to be carried forward in the future.

**Keywords:** Architectural Cultural Heritage, Earthquake, Disaster prevention planning, Disaster management, Research direction

\* 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 실무관(E-mail: leehyunsung@korea.kr)

Member, Researcher, Safety and Disaster Prevention Division, Nat'l Research Institute of Cultural Heritage

\*\* 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 학예연구관(E-mail: ssjo@korea.kr)

Member, Senior Researcher, Safety and Disaster Prevention Division, Nat'l Research Institute of Cultural Heritage

\*\*\* 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 실무관(E-mail: psh3471@korea.kr)

Member, Researcher, Safety and Disaster Prevention Division, Nat'l Research Institute of Cultural Heritage

\*\*\*\* 교신저자, 정회원, 국립문화재연구소 안전방재연구실 학예연구사(E-mail: ksehyun@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher, Safety and Disaster Prevention Division, Nat'l Research Institute of Cultural Heritage

Received | October 12, 2020 Revised | October 22, 2020 Accepted | October 28, 2020



## 1. 서론

정부는 그간 지속적으로 지진관련 법령을 정비하고 지진방재 정책을 수립하여왔다. 2008년 3월 「지진재해대책법」을 제정<sup>1)</sup>하였고, 2016년에는 「지진방재 개선 대책(5.27대책)」을 마련하여 추진해왔다.

건축문화재의 지진 방재에 관한 연구는 2016년 9.12 지진을 계기로 본격화 되었다. 9.12 지진 후 이전의 지진방재 정책의 문제점을 개선하기 위하여 정부는 민간 전문가들과의 협업을 통하여 「지진방재 종합대책」을 마련하여 기존의 정책을 개선하고자 하였다.

2016년 9월 22일 정부는 지진방재종합대책을 수립하기 위하여 다양한 분야의 전문가로 구성된 ‘지진방재 종합개선 기획단’을 출범하였다. 지진방재 종합개선 기획단은 75명의 민간전문가와 22개 관계부처가 참여하였으며, 특히 7개 항목의 TF팀에는 ‘문화재 안전’도 포함되었다. 기획단은 민·관 합동회의 26회, 해외 전문가 초청회의 2회, 국무조정실 국민안전처 주관 관계부처 회의 7회 등 총 35회 회의를 실시하였다. 특히 3차 지진방재 개선대책 민관합동 토론회(2016년 10월 21일)에서는 「문화재 지진안전 대책」이라는 주제로 특별 세션이 개최되었으며, ‘문화재 재난안전관리 현 실태 및 대응체계 고도화 전략’ 및 ‘경주 지역 지진 발생에 따른 중요 석조문화재 피해’ 등의 주제가 발표되었다.

특별 세션에 대한 토론회자 및 전문가 의견을 종합하면, ‘문화재의 원형 유지를 위한 내진 보강 방법 검토’, ‘문화재 특성에 대한 데이터베이스 구축과 보수·보강 및 전문교육 등 추진’, ‘문화재 피해조사 및 복구 시 맞춤형 단가를 산정하여 복구 계획수립지침에 반영’이 제안되었다. 이런 과정을 거쳐 109개의 세부과제로 이루어진 지진방재대책은 2016년 12월에 ‘제11차 국민안전 민관합동회의’에서 최종 확정되었다. 특히 ‘내진대상 확대 및 내진보강 강화’에서 문화재의 유형별 내진성능평가 기준 및 수리·복원 시 내진성능 향상기준을 마련하도록 하였다. 또한 기관별 지진 대응인력 보강을 위해 문화재청 국립문화재연구소에 안전방재연구실이 신설되는 등 지진·재해 대응을 위한 대내외 환경 변화가 있었다. 본 연구에서는 2016년 9.12지진, 2017년 포항지진 등 주요 지진 발생 전후 관련 연구 성과를 검토하고 주요 연구내용을 분석하여 향후 효율적인 건축문화재 지진 방재를 위한 연구방향을 제시하였다.

## 2. 건축문화재 지진대응 기준 연구 분석

### 2.1 연구 경향

문화재 방재연구는 원형보존, 예측 불가능한 재해에 대한 대비, 기후 변화 등 신규 재난에 대한 대비를 기반으로 두고 있다.<sup>2)</sup> 이 원칙을 바탕으로 지금까지의 문화재 지진 방재 연구는 재해위험도 평가(예방), 재해발생 예측(대비), 재해발생 전·후 대응(대응)의 분야<sup>3)</sup> 및 정책적 성격의 연구와 실증적 성격의 연구로 구분<sup>4)</sup>되며 국가기관 뿐만 아니라 민간기관에서도 연구가 이루어지고 있다. 관련 연구 경향은 시기적으로 3단계로 분류(1997년~2007년, 2008년~2015년, 2016년~현재)할 수 있다. 2008년 승례문 화재를 계기로 문화재 재난에 대한 연구가 본격적으로 전개되었으며, 특히 지진재해대책법을 계기로 관련 연구가 증가하였다.

1) 2015년 7월 지진·화산재해대책법으로 법령명 변경됨.

2) 조상순, 「국가주도 문화재 방재분야 연구의 흐름과 방향」, 문화재방재학회 논문집 Vol.4, No.2, 2019. p.104.

3) 국가의 재난대응은 예방(피해 차단), 대비(피해 축소), 대응(추가 피해 방지), 복구(원래의 기능 회복)로 구성되며, 문화재의 재난대응 역시 이 체계를 적용한다.

4) 정책적 성격의 연구로는 법, 제도, 예산, 거버넌스 등 기관간 협조, 대응조직 구성, 시설연구, 방재교육, 매뉴얼 등이 있으며, 실증적 성격의 연구로는 문화재 범위 모니터링, 재해영향 평가, 재난현장 피해조사 분석, 복원기술, 재해 유형별 특성 등이 있다. 조상순, 「국가주도 문화재 방재분야 연구의 흐름과 방향」, 문화재 방재학회 논문집 Vol.4, No.2, 2019. p.104 참조

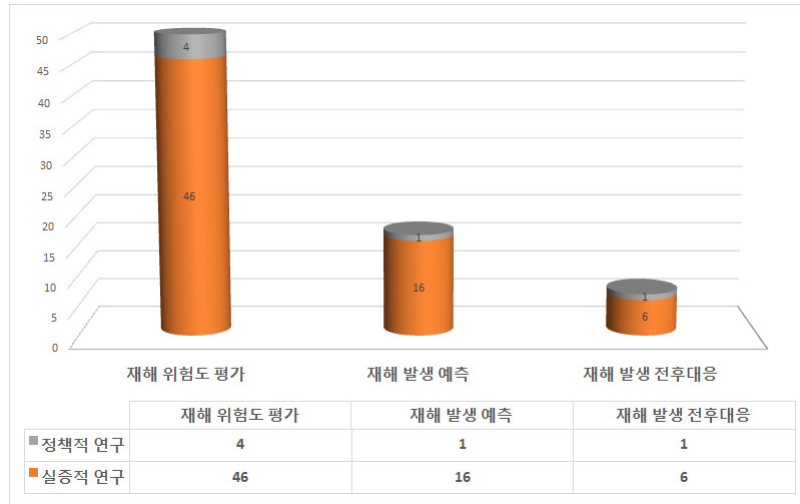


Fig. 1. Characteristics of research on seismic response of architectural heritage by research field

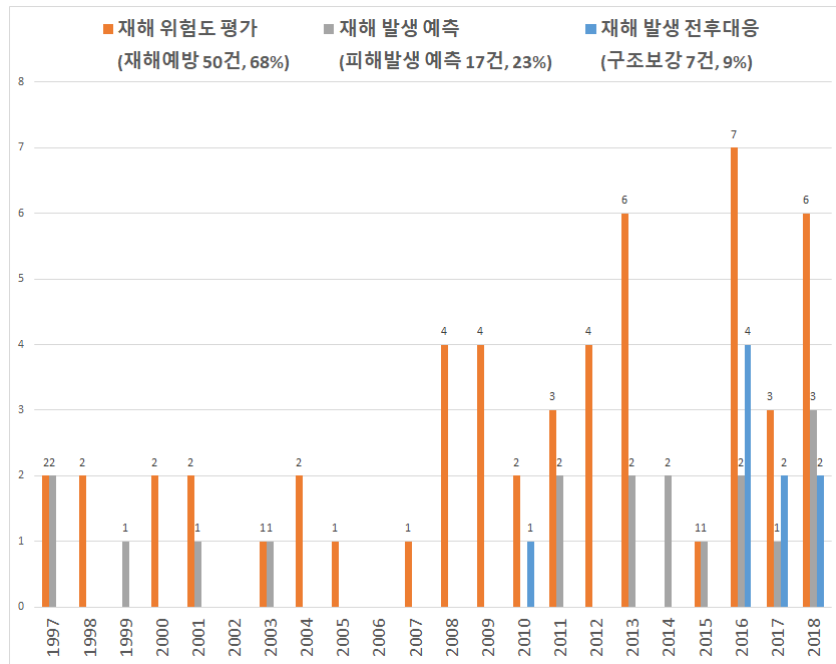


Fig. 2. Current status of research on seismic response of architectural heritage by year

우선 1997년~2007년까지는 재해 발생 전후대응 및 재해 발생 예측보다는 건축문화재의 재해 위험도 평가에 대한 연구가 대다수를 차지하고 있다. 1997년 이후 지진 피해 저감을 위한 건축문화재 관련 연구는 매우 기초적인 단계이며, 특히 초가삼간에 관련된 논문이 다수 존재하는 등 일부분에 집중되어 연구가 이루어졌다.

2008년~2015년까지는 재해대응 발생 전후대응의 연구가 시작되었으며, 특히 2016년(9.12지진) 이후 현재까지는 건축문화재에 대한 재해 발생 전후대응에 관한 연구가 많은 비중을 차지하고 있다. 또한 2015년 범정부 지진방재 R&D 로드맵 수립의 영향으로 인해 연구의 현장 적용 효과를 높이기 위한 계획적 연구가 중요시 되었다.

현재까지의 연구를 살펴보면 건축문화재 지진 대응에 대한 연구 중 대다수는 재해 위험도 평가에 관련되어 있으며, 재해 발생 예측, 재해 발생 전후대응의 순서로 연구가 이루어지고 있다. 또한 연구대상 건축문화재를 성격별로 구분하면 정책적 성격의 연구가 8%, 실증적 성격의 연구가 92%로 실증적 성격의 연구가 대다수를 차지하고 있다.

## 2.2 연구 현황

앞서 살펴본 대로 건축문화재 지진대응 연구는 Table 1과 같이 재해예방 단계의 연구인 재해위험도평가와 재해대비 단계인 재해 발생 예측, 재해대응 단계인 재해 발생 전후대응의 3개로 구분할 수 있다.<sup>5)</sup>

Table 1. Research contents related to seismic response in architectural heritage

주요 연구내용	연구 분야	연구내용(키워드)	연구 성격	
			정책적	실증적
재해 위험도 평가	구조모델링 및 해석	동적특성, 안전진단, 성능평가, 재해위험도, 지반특성, 지진거동 특성	-	22
	모니터링 기술 개발	지진방재대책, 안전진단, 성능평가, 지진 안정성, 지진위험도, 평가기준	3	16
	손상도 분석 평가	보수·보강, 유지관리, 안전진단, 성능평가	-	2
	재료 및 구조체 성능평가	보수·보강, 유지관리, 재해위험도, 안전진단, 성능평가	-	6
	재해관련 DB구축	지진대응	1	-
	소계			4
재해 발생 예측	변형, 파괴, 구조해석 및 실험	보수·보강, 유지관리, 안전진단, 성능평가	-	5
	재해 유형별 평가 기준 마련	방재시스템, 안전진단, 성능평가	1	1
	재해 유형별 피해 시뮬레이션	재해위험도 평가, 지진거동 특성, 구조성능 평가, 안전진단, 성능평가, 동적특성분석, 지진격리장치	-	10
	소계		1	16
재해 발생 전후대응	피해·훼손부위 보수보강	보수·보강, 유지관리, 내진대책	-	2
	성능 저감부위 보수보강	보수·보강, 유지관리	-	2
	2차 피해 예방 및 모니터링	모니터링, 지진방재 대책	-	2
	재해 대응 매뉴얼 마련	재난관리, 정책	1	-
	소계		1	6
합계			6	68
			74	

재해 위험도 평가 연구의 경우 구조모델링 및 해석, 모니터링 기술 개발, 손상도 분석평가, 재료 및 구조체 성능평가, 재해관련 DB구축의 세부 연구로 구성된다. 이 분야의 연구는 건축문화재에 대한 기본적인 특성 및 정보, 현황을 파악하는 연구가 주를 이루고 있다. 이러한 연구는 건축문화재의 경우 개별 사례에 따라 규모, 재료, 형식 등 다양한 특성을 가지고 있지만, 이를 이루고 있는 시공기법과 구조형식 등 특정 요소는 전통적 기법에 따라 유형화되며, 이는 지진으로 나타나는 취약부위 및 파손형태가 비슷하게 나타나는 결과로 나타난다. 따라서 지진으로 인한 건축문화재의 피해양상을 예측할 수 있으며, 그 원인을 찾아 대비단계 연구의 데이터로 활용할 수 있다.<sup>6)</sup>

재해 발생 예측 연구는 변형, 파괴, 구조해석 및 실험분야와 재해 유형별 평가 기준 마련, 재해 유형별 피해 시뮬레이션의 세부 연구로 구성된다. 일반 건축물과는 달리 건축문화재의 경우 규격화 되어 있지 않으며, 지역적 특성과 장인(匠人), 건축 시기 등에 따라 구조방식에 차이가 있다. 사용된 재료의 경우에도 개별 건축물에 따라 성분 및 배합이 다르며, 일정한 저항력을 기대하기 어렵다. 따라서 건축문화재의 구조를 보강하는 것은 상당히 복잡한 문제가 발생하며, 다양한 유형에

5) 재난 및 안전관리 기본법 제3조제1호가목에 따라 지진은 자연재난에 속한다. 또한 이 재난으로 인한 피해는 자연재해대책법 제2조제1호에 따라 “재해”라 규정한다. 이러한 재해를 막는 일을 “방재”라 함에 따라 본 논문에서는 지진 방재의 연구를 국가적 재난대응 체계에 따라 구분하여 재해위험도 평가, 재해 발생 예측, 재해 발생 전후대응으로 구분하였으며, 세부내용에서는 지진에 한정하여 서술하였다.

6) 文化部文化資産局, 「0206地震文化資産建築震害-緊急應變及經驗探討」, 2017, p.266 참조.

따른 지진 작용에 대한 피해를 고찰하기 위해 각 구조와 형식별 문화재의 지진에 대한 거동특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이 연구를 통해 문화재 보존의 목적에 맞는 가장 적절한 공법과 객관적 인정을 받는 내진평가 방법을 도출해야 하며 개별적 사안을 확인해야 하는 연구가 필요하다.<sup>7)</sup>

재해 발생 전후대응 연구는 9.12 지진 이후 본격적인 연구가 시작되었다. 피해·훼손부위 보수보강, 성능 저감부위 보수보강, 2차 피해 예방 및 모니터링, 재해 대응 매뉴얼 마련의 세부 연구로 진행되고 있으며, 연구내용을 보면 이전 단계의 연구보다 국가정책의 흐름에 많은 영향을 보이는 경향이 있다.

### 2.3 연구 분석

문화재 지진 안정성 평가 및 관리 관련 연구과제의 동향을 파악하고, 연구논문의 키워드를 분석하여 문화재 지진 안정성 평가에서 중요하게 다뤄진 요소를 파악해 본 결과 2016년도 이전 문화재 방재 관련 연구가 주를 이루는 것에 비해 9.12 지진 이후 문화재 방재, 재해 대응, 지반 및 지진, 문화재 구조 분야에서 전단파속도, 지반조사, 최대지반가속도, 고유진동수 등의 연구가 수행되고 있음을 확인하였다. 9.12 지진 이전에도 지진에 대한 경각심을 통해 면진 관련 기술적인 연구 수행된 바 있으나 지진예방 및 지진대응이라는 특정 분야에 대한 구체적인 연구는 수행되지 않았으며, 이후 지진피해로 인한 건축문화재 지진방재에 대한 문제점이 확인되며 현장적용이 가능한 연구의 필요성을 인식하여 재해발생 예측과 재해 발생 전후대응 연구 분야의 중요도와 비중이 높아지고 있다.

Table 2. Research shift by 9.12 earthquake

주요 연구 내용	9.12 지진 이전 연구	9.12 지진 이후 연구
재해 위험도 평가	37	13
재해 발생 예측	12	5
재해 발생 전후대응	1	6

9.12 지진 이후의 연구내용을 분석하여 Fig. 3과 같은 키워드를 도출하였다. 각각의 키워드는 개별적인 연구결과이기도 하며 이중 데이터 성격의 키워드와 결과물 성격의 키워드는 향후 상호 보완적 역할을 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 개별 문화재의 지진위험을 예측하고 대응하기 위한 연구에 해당되는 결과물 성격의 문화재 물성분야는 연구결과를 활용하여 추후 지진위험도, 내진성능, 보수시사점의 연구에 활용할 수 있으며, 이 결과물들은 또다시 다른 연구의 데이터로 활용할 수 있는 연결고리를 구성하는 것이 중요하다. 또한 문화재의 경우 문화재 보호법에 의해 일반 연구자들에게 연구에 대한 한계가 분명히 존재하며, 국가기관과 민간부분의 역할에 따라 연구 분야 및 연구방향의 조율이 필요하다. 문화재가 위치한 지반, 시설, 센서 설치 등 문화재 지진 예방 및 대응을 위한 기초연구는 문화재 접근의 권한을 가지고 있는 국가기관에 대한 역할이 중요하며, 이 자료를 활용하여 민간부분에서 기술제안, 내진성능, 구조 안정성 평가 등의 연구를 수행하여 건축문화재 지진 방재 관련 연구로의 확장이 필요하다.

7) 文化部文化資產局, 「0206地震文化資產建築震害-緊急應變及經驗探討」, 2017, pp.378~379 참조.

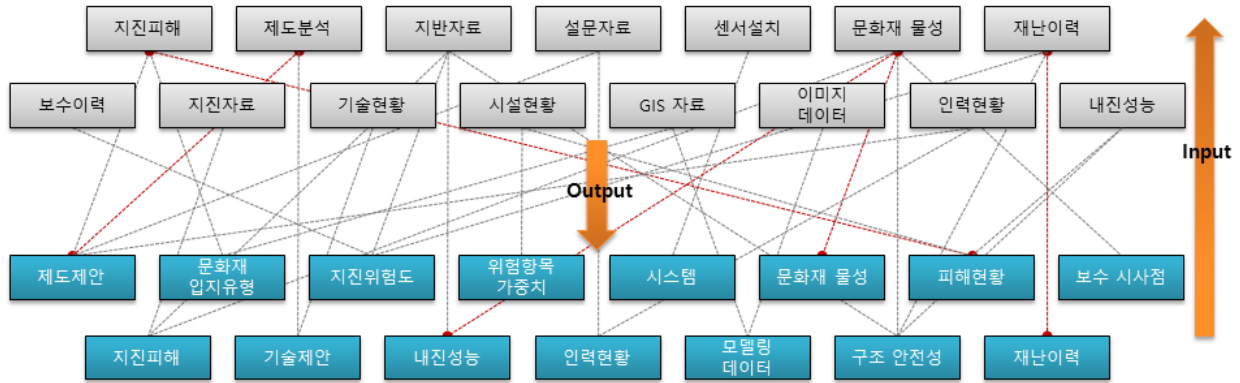


Fig. 3. Input & output schematic diagram of related researches after major earthquake

Reference: NRICH, 'A Basic Study on the Construction of Earthquake Hazard Map for Architectural Heritage in Gyeongju and Pohang Area', 2018.

### 3. 향후 건축문화재 지진 방재 연구방향 제시

#### 3.1 기존 국가 주도 건축문화재 지진 방재 연구 경과

문화재 방재연구는 주요 재난을 기점으로 시작되었거나 연구 경향이 변화되어 왔다. 2008년 승례문 화재 이후에는 다양한 재난에 포괄적으로 대응하기 위한 연구가 시작되었으며 국립문화재연구소에서는 「건축문화재 재해예방 기획연구(2008)」를 실시하여 지진, 풍수해 등 다양한 재해 유형에 대응하기 위한 연구과제 도출과 중장기 연구 계획을 수립하였다.<sup>8)</sup> 이후 국립문화재연구소와 문화재청 등의 국가기관에서는 「건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가연구(2009)」를 시작으로 「건축문화재 지진피해 시뮬레이션 및 보강방안 연구(2018)」까지 문화재 지진 방재와 관련된 14개의 R&D연구과제가 추진되었다.<sup>9)</sup>

지진대응 단계별 분류 중 대비의 주요 연구내용으로는 크게 재해 위험도 평가가 있는데 세부적으로 분류하면 모니터링 기술 개발과 재해관련 DB 구축 등이 있다. 대응의 경우에는 재해 발생 예측이 주를 이루고, 세부 연구 내용으로는 재해 유형별 피해 시뮬레이션이 있다.

재해 위험도 평가와 관련된 연구는 주로 건축문화재의 지진·재해 위험도를 평가하고 구조특성에 따른 지진대응력 평가 방법에 대한 내용으로 수행되었다. 이러한 지진에 대한 위험도 평가는 지진에 대응하기 위한 모니터링 방안 및 모니터링 기술 개발과도 직결된다. 국가기관은 문화재에 미치는 지진재해의 위험도를 평가하고 재해로 인한 피해규모, 유형 등을 예측하여 사전에 대비함이 중요하기 때문이다.

2009년부터 2013년까지 5개년에 걸쳐 수행된 「건축문화재 지진·홍수 재해 위험도 평가 연구」는 경주, 부여, 서울 등 역사도시의 주요 건축문화재를 중심으로 소재 지역의 재해이력, 지반조사, 지반응답해석과 건축문화재 구조안전성 검토 등을 통하여 지진위험도 평가를 시도하였다. 건축문화재에 대한 지진위험도 평가 결과를 바탕으로 GIS 기반의 지진공학 적 지반 정보화 시스템을 구축하고 지진 발생 시 해당 문화재의 피해 규모 등을 예측하여 사전 대비를 하고자 했다.

8) 조상순, 「국가주도 문화재 방재분야 연구의 흐름과 방향」, 문화재방재학회논문집 제4권 2호, 2019.

9) 문화재청과 국립문화재연구소에서 2009년부터 2018년까지 추진한 문화재방재 관련 연구 중 지진과 관련된 R&D연구 중심으로 분석함.

**Table 3.** Current status of R&D researches related to earthquake response of cultural heritage led by national government (2009~2018)

연도	연구명	주요 연구 내용		
		대분류	소분류	대응 단계별 분류
2009	건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2010	부여지역 건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2011	서울지역 건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2011	동적원심모형 시험을 이용한 석조 건축문화재 지진거동 특성 평가	재해 발생 예측	재해 유형별 피해 시뮬레이션	대응
2011	건축문화재 지진재해대응 구조기술연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2012	주요 지역별 건축문화재 지진홍수 재해위험도 평가를 위한 기초연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2012	문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가기준 연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2013	역사도시 건축문화재 지진·홍수 재해위험도 평가 및 관리시스템 구축	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2013	문화재 지진재해 기초평가 연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2017	건축문화재 지진대응 기획연구	재해 위험도 평가	재해관련 DB구축	대비
2017	석조문화재 지진거동 특성 및 보강방안 연구	재해 발생 예측	재해 유형별 피해 시뮬레이션	대응
2017	건조물문화재 내진성능 예비평가 연구	재해 위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2018	경주·포항지역 건축문화재 지진위험지도 제작을 위한 기초연구	재해위험도 평가	모니터링 기술 개발	대비
2018	건축문화재 지진피해 시뮬레이션 및 보강방안 연구	재해 발생 예측	재해 유형별 피해 시뮬레이션	대응

2011년에는 「건축문화재 지진해해 대응 구조기술연구」에서 우리나라 건축문화재 지진대응 실태를 파악하고 지진재해 발생 시 대응과 지침 방향에 대한 포괄적인 연구가 추진되었다. 이후 「문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가기준 연구(2012)」에서 지반특성 등을 고려하여 지진재해도와 지진하중을 산정하고, 건축문화재를 목구조, 석구조 등으로 분류하여 구조형식별 내진성능평가를 실시하였다. 이 연구는 지진하중 등의 지진 특성에 대한 구조 공학적 측면의 접근만으로 지진재해 저감 방법을 제시하는 것이 어려운 것을 인정하고 문화재 고유특성에 따른 지진대응력 평가방법을 제안한데 의의가 있다. 「문화재 지진재해 기초평가 연구(2013)」는 앞선 연구의 결과인 문화재 내진성능 평가지침에 따라 건축문화재의 지진 대응에 대한 기초점검을 수행하여 내진성능 평가를 통해 문화재별 지진 안정성을 검토했다. 건축문화재는 유형에 따라 구조형식에 차이가 있고 문화재가 위치한 지역의 지반상황과 개별 문화재의 보존현황에 따라 지진에 대응할 수 있는 내진성능이 달라진다. 그러므로 건축문화재를 유형별로 나누어 세부적인 지진재해 대응 관련 항목을 평가해 본 것은 지진 방재를 위한 실질적인 연구로 볼 수 있다.

2017년 추진된 「건축문화재 지진대응 기획연구」는 국내외 건축문화재 지진피해 사례 조사와 그동안의 지진대응 연구 성과 및 관련 기술 현황을 검토하고 건축문화재 지진 안전성 확보를 위한 중장기 연구 로드맵과 단계별 연구 과제를 기획했다. 이 연구는 그간의 문화재 지진대응 관련 성과와 현재 상황을 점검하고 효과적으로 건축문화재 지진대응을 위하여 추진되어야 할 과제들을 재검토하는 계기가 되었다. 「건조물문화재 내진성능 예비평가 연구(2017)」는 전문한 「문화재 지진 재해 저감을 위한 안정성 평가기준 연구(2012)」와 「문화재 지진재해 기초평가 연구(2013)」의 후속 연구이다. 앞선 연구로 지진 발생 이후 문화재의 상태에 대한 즉각적인 확인을 할 수 있는 기초 환경은 마련되었으나, 건축문화재의 내진성능 판단을 위해서는 좀 더 세밀한 판단근거가 필요하여 보완하는 연구로 추진되었다. 건축문화재 고유의 내진성능을 판단할 수 있는 성능평가기준을 개발하고 내진성능 예비평가 점검 항목을 개선하는 등 건축문화재의 개별적 성능 판단이 가능

할 수 있도록 했다.<sup>10)</sup> 이 연구에서 건축문화재의 내진성능을 분석하는 부분이 취약하다는 한계를 인식하고 있지만 건축 문화재를 지진으로부터 대응하기 위한 방법으로 기초점검, 구조성능 분석 및 성능평가기준 개발 등 다각도로 시도한 점에 큰 의의가 있다.

이후 수행된 「경주포항지역 건축문화재 지진위험지도 제작을 위한 기초연구(2018)」는 「건축문화재 지진·홍수 재해 위험도 평가 연구(2009-2013)」에 연속되는 연구로 경주, 포항지진으로 인하여 실제 피해가 발생한 건축문화재를 대상으로 지진위험도 평가를 하였다. 이번 연구에서는 지반증폭계수와 최대지반가속도를 사용하여 설계 응답 스펙트럼을 작성하고, 문화재 구조물의 실제 고유진동수를 적용하는 등 건축문화재 지진위험도를 평가하기 위한 방법을 추가, 개선했다. 또한 지진피해 문화재를 대상으로 하여 실제 피해현황과 개선된 지진위험도 평가 결과를 상호 비교, 검토를 했다. 그 결과 2016년 경주지진의 경우 기존 연구 대비 위험도 예측률이 60% 향상되었고, 2017년 포항지진은 기존 대비 43% 향상되었다.<sup>11)</sup> 건축문화재 지진위험도 평가 예측률이 높아짐에 따라 지진을 좀 더 효율적으로 대비하고 사후 대응을 할 수 있게 되었다.

재해 발생 예측과 관련된 연구는 지진에 대한 피해 시뮬레이션에 대한 내용으로 수행되었다. 건축문화재 모형을 제작하여 동적 원심모형시험이나 진동대 실험을 실시하거나 구조해석 시뮬레이션 등을 통하여 지진거동 분석을 하여 지진피해를 예측해보고 그에 따른 대응방안을 제안한다.

「동적원심모형 시험을 이용한 석조 건축문화재 지진거동 특성 평가(2011)」는 부여 정림사지 오층석탑(국보 제9호)을 모형으로 제작하여 동적원심모형 시험<sup>12)</sup>을 수행하여 석탑문화재의 지진거동특성을 평가했다. 「석조문화재 지진거동 특성 및 보강방안 연구(2017)」는 경주지진으로 피해가 발생한 석탑의 피해 양상을 분석하고 석탑문화재에 대한 구조해석을 실시하여 지진거동 특성을 평가하였으며, 지진거동특성을 평가하고 지진대응력 향상을 위한 시공방안까지 제안했다. 「건축문화재 지진피해 시뮬레이션 및 보강방안 연구(2018)」는 경주지진으로 피해가 발생한 경주 남산 천룡사지 삼층석탑(보물 제1188호)을 대상으로 축소모형을 제작하여 진동대 실험과 동적거동 시뮬레이션을 수행하였다. 이전 연구에서는 동적원심모형을 이용한 지진재현 실험이 실시되었으나, 동적원심모형 실험은 실험장비 특성상 작은 규모의 모형을 이용하기 때문에, 축척된 모형으로 인한 오차 발생 가능성이 있었으며, 석재의 크기가 작아짐에 따라 원래 크기의 석재가 갖는 접촉면 특성을 반영하는데 어려움이 따랐다.<sup>13)</sup> 이 연구는 건축문화재 지진 피해 시뮬레이션을 통하여 문화재의 내진성능을 향상하기 위한 기술 제안을 목표로 진동대 실험을 실시했다. 실험 결과 석탑의 실제 지진피해와 일부 유사한 양상이 나타나는 것을 확인할 수 있었고 석탑 부재 구성형식, 적심형식, 접촉면 처리방식과 지진종류 및 수준 등에 따른 다양한 지진 거동 특성을 분석했다. 이를 통하여 건축문화재의 내진성능 향상을 위한 보수·보강 기술을 제시했다.

재해 발생 전후대응에 대한 R&D연구는 수행된 바가 없다. 그러나 2018년 ‘건축문화재 지진재해 대응’이라는 주제로 국제심포지엄을 개최하여 최근 지진피해를 입은 네팔, 중국, 일본 등 국외 여러 나라의 대응 사례 및 방법을 살펴보았으며, 9.12 및 포항지진으로 인한 건축문화재 피해특성과 대응방안, 한국의 문화재 지진대응정책에 대한 발표와 토론이 진행되었다.

현재까지 추진된 R&D연구 14건의 대응 단계별 분류로는 대비, 대응, 복구 중 대비가 79%, 대응이 21%에 해당하며 복구와 관련된 연구과제는 수행되지 않았다. 연구내용은 크게 재해 위험도 평가와 재해 발생 예측으로 나눌 수 있는데 그중 11건(79%)이 재해 위험도 평가에 관련되어 있으며 재해 발생 예측 관련 연구는 3건(21%), 재해 발생 전후대응과 관련된 연구는 0건으로 분석되었다. 재해 위험도 평가와 관련된 연구의 세부 연구 분야는 다시 모니터링 기술 개발과 재해관련

10) 문화재청, 「건축물문화재 내진성능 예비평가 연구」, 2017, p.5, 12, 287 참조.

11) 국립문화재연구소, 「경주·포항지역 건축문화재 지진위험지도 제작을 위한 기초연구」, 2018, p.186.

12) 경주 불국사 삼층석탑(국보 제21호)과 첨성대(국보 제31호) 등도 축소모형에 대한 동적원심모형 시험이 국립문화재연구소의 R&D연구의 세부과업 등으로 수행된 바 있음.

13) 국립문화재연구소, 「건축문화재 지진피해 시뮬레이션 및 보강방안 연구」, 2018, p.8.



DB구축으로 분류할 수 있는데 재해관련 DB구축이 9%로 나타나며 모니터링 기술 개발이 91%로 대다수를 차지하고 있다.

문화재는 문화재보호법에 의해 관리 받으며, 관리 주체는 문화재보호법에 따라 국가 및 지방자치단체가 된다. 따라서 건축문화재의 지진위험도 측면에서 살펴보면 문화재에 지진의 피해가 발생할 개연성이 높으므로 이에 따른 관리 주체인 국가기관의 문화재 지진 방재 연구는 지진피해를 저감시키기 위한 연구에 집중되게 된다. 또한 건축문화재의 지진피해를 저감시키기 위해서는 지진위험도 평가와 지진피해 시뮬레이션 등을 실시하여 지진발생 시 피해규모와 유형 등을 예측하고 그에 따른 대응이 가능하게 되므로 재해 위험도 평가나 재해 발생 예측 등의 연구가 중요하게 추진되었다.

한편 2016년 경주에서 발생한 9.12지진과 2017년 포항지진은 국가기관의 연구에도 영향을 미치게 된다. 2016년, 2017년 연이은 지진으로 인한 문화재 피해로 지진이후 연구내용은 실질적인 대응이 가능한 연구로 변화의 과정을 거친다. 건축문화재의 지진대응을 위한 중장기 연구과제 도출과 중장기 로드맵을 작성한 「건축문화재 지진대응 기획연구(2017)」를 시작으로 문화재 지진 방재 연구를 단계적으로 추진하고 있다. 건축문화재 지진위험도 평가방법과 피해 예측률을 개선하고, 건축문화재 지진진동 실험을 통하여 실제에 근접한 문화재 지진피해 양상을 파악하고 이에 대비하는 연구를 추진하고 있다.

또한 2016년 9.12지진 발생 이후 문화재 방재연구를 전담하는 연구부서가 신설되어 문화재 방재 및 재해대응 연구를 추진하게 되었다. 앞서 문화재 지진대응 관련 R&D연구에서 수행하지 못했던 연구내용인 재해 발생 전후 대응은 안전방재연구실의 자체 연구과제인 ‘문화재 재해대응 기술연구’를 통해서 지진을 포함한 재해 전반에 대한 대응 기술, 재해별 대응 매뉴얼 개발연구 등을 추진 중에 있다.

### 3.2 연구 성과 분석에 따른 연구방향 제시

앞서 기술한 바와 같이 건축문화재 지진 방재와 관련된 연구 방향은 재해 위험도 평가, 재해 발생 예측, 재해 발생 전후 대응으로 구분된다. 다시 연구주체에 따라 분류하면 국가기관(문화재청, 국립문화재연구소)과 민간으로 나눌 수 있다. 국가기관과 민간 모두 재해 위험도 평가에 대한 연구가 주를 이루고 있으며 그 다음으로 재해 발생 예측에 대한 연구가 많은 수를 차지한다. 차이점으로는 국가기관에서 R&D연구로 이루어지지 않은 재해 발생 전후대응과 관련한 연구가 민간에서는 일부 수행되었다.

재해 위험도 평가와 관련한 연구는 구조모델링 및 해석 분야에 많은 연구가 추진되었는데 대부분 석탑문화재에 치중되어 있다. 석탑은 독창적인 구조형식을 가지고 있어 해외에서도 이와 관련한 논문을 찾을 수 없으며 부재 접촉면의 전단진동과 락킹(rocking) 등 지진에 대한 주요 변형성분 등의 연구 요소들이 충족되어 민간을 중심으로 많은 연구가 이루어진 것으로 보인다. 목조문화재의 경우 가구(架構)식 구조의 매우 복잡한 접합부 형식으로 인하여 실제 거동특성을 파악하기가 어려워 관련 연구가 매우 부족한 상황이다.<sup>14)</sup> 이에 따라 다수의 목조문화재를 비롯하여, 성곽, 홍예 등 다양한 석조문화재의 유형별 지진에 대한 거동특성을 연구할 필요가 있다.

다음으로 모니터링 기술 개발 분야에서는 경주, 부여, 서울 지역과 같이 역사도시 지역의 일부 건축문화재 중심으로 지진위험도 평가 관련 연구가 연차별로 수행되었다. 하지만 개별 문화재 및 문화재 유형에 따른 지진 취약성 분석이 미비하며 국외에 비하여 국내의 건축문화재 재해발생에 따른 대응 매뉴얼은 미흡한 상황이다. 건축문화재에 대한 지진·재해 위험도 평가를 위하여 지진발생 위험이 높고 문화재가 많은 역사도시에 대한 지진위험도 평가기술을 지속적으로 추가 확보하는 것이 필요하다. 이러한 지진재해와 관련 DB 구축이 매우 부족한 상황인데, 지진과 관련된 연구 기초자료를 지속적으로 DB화하여 후속 연구의 기반이 될 수 있도록 하여야 한다.

건축문화재 모형실험 등을 이용한 재해 발생 예측 관련 연구는 지진에 의한 피해를 실제에 근접하게 예상해 볼 수 있는

14) 국립문화재연구소, 「건축문화재 지진대응 기획연구」, 2017, p.95참조.

측면에서 효과적인 연구이다. 민간에서 쌍계사 오층석탑(김재관, 2001)과 초가삼간(서정문, 1997)에 대한 진동대 실험을 실시한 적이 있지만 문화재 관점에서의 내진성능을 파악하고 문화재 지진피해를 예측하기 위한 연구는 아니었다. 국립문화재연구소의 「건축문화재 지진피해 시뮬레이션 및 보강방안 연구(2018)」에서 문화재 지진피해를 예측하기 위한 석탑 모형실험이 이루어진 바 있으므로 향후 목조문화재, 석조문화재, 조적조 등 건축문화재의 다양한 유형에 대한 실험연구를 순차적으로 수행할 필요성이 있다. 특히 건축문화재는 구조형식, 재료 등에 따라 내진성능에 차이가 있으므로 건축문화재 유형별 모형실험 연구를 지속적으로 추진 할 필요성이 크다.

재해 발생 전후대응 분야는 주로 민간에서 수행되었다. 2016년 9.12 경주지진을 기점으로 두드러지는 경향을 보이거나 문화재 지진 피해 실태에 대한 내용이 대다수이다. 이는 문화재 지진피해 현황에 대한 내용으로 건축문화재 유형별 피해 상황이나 피해원인에 대한 분석은 미흡하였지만 지진으로 인한 문화재 피해 상황에 대하여 환기가 되는 계기가 되었다. 지진으로 인한 문화재 피해상황에서 효율적인 대응을 위하여 국가기관은 재해 발생 전후대응 연구 분야에서 체계적인 지진·재해 대응 매뉴얼 마련을 위한 연구가 선행되도록 하여야 한다. 민간에서는 이러한 지진·재해 대응 매뉴얼의 적절성과 효용성 등을 국가기관과 함께 교차 검토 될 수 있도록 해야 한다. 또한 지진 대응 매뉴얼 시행을 위한 제도적 개선 연구와 추가적인 2차 피해에 대한 대응이 필요하다.

이처럼 건축문화재 지진 방재 연구의 기존 연구 성과를 크게 대응 단계와 주요 연구내용으로 분석하면 다음과 같다. 대응 단계별 분류로는 주로 대비와 대응에 집중되었고 복구와 관련한 연구는 부족하다. 주요 연구내용은 재해 위험도 평가와 재해 발생 예측에 대한 부분이 많은 수를 차지한다.

국가기관은 3.1에서 전술한 바와 같이 문화재보호법에 따른 문화재 관리의 주체로서 지진피해를 저감하고 대비를 위한 연구와 문화재에 대한 접근이 제한적인 민간에서 수행하기 어려운 연구들을 주로 수행하였다. 또한 역시도시 내 주요 건축문화재의 지진위험도 평가와 같이 지역과 문화재 대상이 많아 연차별로 수행되어야 할 연구와 건축문화재 축소모형을 제작하고 진동대 실험 등이 필요한 연구처럼 예산과 제반 환경이 뒷받침 되어야 할 연구들을 중심으로 추진했다.

이러한 지진 위험도 평가와 재해 발생 예측 등 지진 방재를 위한 연구는 민간에서 일반 연구자들이 건축문화재를 직접 조사하여 해당 문화재의 내진성능 파악이나 향상을 위한 연구가 어려운 점이 있으며 지진의 위험과 직접적으로 관련이 있는 건축문화재가 위치한 지반에 대한 조사 역시 국가기관과 유관기관의 허가를 득해야 진행이 가능하므로 이러한 측면의 연구는 문화재에 대한 접근권(지정문화재에 대한 조사 허가 권한)을 가지고 있는 국가기관이 주도적으로 추진해야 할 필요성이 있다.<sup>15)</sup> 또한 활발한 건축문화재 지진 방재 연구 환경 조성을 위하여 국가기관은 민간에서 접근하기 어려운 문화재 구조물성 및 내진성능, 지반조사와 관련한 1차 자료를 생산하고 민간에 제공하며, 민간은 이에 따른 관련 연구를 지속적으로 추진하여 연구의 선순환이 이루어지도록 해야 한다. 이를 토대로 향후 건축문화재 지진 방재 연구 방향은 Fig. 4와 같이 제시 할 수 있다.

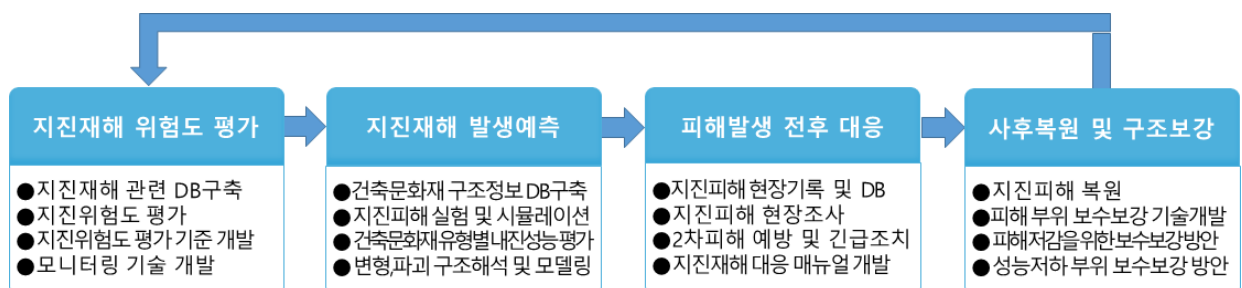


Fig. 4. Suggestion of research directions for earthquake disaster prevention in architectural heritage

15) 국립문화재연구소, 「경주·포항지역 건축문화재 지진위험지도 제작을 위한 기초연구」, 2018, p.176 참조.

주요 연구내용의 방향은 재해 위험도 평가와 재해 발생 예측의 경우 기존의 연구를 세분화하여 추진해야 한다. 지진재해 위험도 평가연구는 지진과 관련한 DB를 지속적으로 구축하고, 지진위험도 평가의 경우 기존 연구에서 포함되지 못했던 역사도시와 주요 건축문화재에 대하여 추가적으로 실시해야 한다. 이를 뒷받침하기 위한 지진위험도 평가 기준과 모니터링 기술 개발에 대한 연구도 함께 추진되어야 한다. 지진재해 발생예측 분야는 기존의 연구결과를 토대로 건축문화재 구조정보 DB를 구축하고, 지진피해 재현실험과 시뮬레이션을 건축문화재 유형별로 실시하며 결과를 다시 DB화할 필요가 있다. 또한 목조, 석조, 조적조 등 건축문화재의 유형별 내진성능 평가 연구를 실시해야 한다.

재해 발생 전후 대응은 국가기관을 중심으로 지진피해 현장기록 및 조사, 2차 피해예방과 지진 대응 매뉴얼 개발 연구 등을 추진하고, 매뉴얼의 경우 제도화하여 지진·재해 발생 전후에 효율적으로 재해 대응이 가능하도록 하여야 한다.

최근 연달아 발생한 지진으로 인하여 문화재 피해가 다수 발생하였고, 우리나라도 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 인식하게 되었다. 추후 다시 발생할 수도 있는 지진으로 인한 건축문화재 피해 복원 방법과 피해 부위에 대한 보수·보강 기술 개발을 검토할 필요가 있다. 건축문화재 유형에 따른 내진성능 평가 결과를 토대로 지진에 취약한 부위를 도출하고 피해 저감을 위한 보강 방안 연구가 필요하다.

## 4. 결론

건축문화재 지진 방재를 위한 기존 연구사례를 분석하고 제시한 향후 연구 방향은 다음과 같다.

기존의 연구는 재해 위험도 평가가 대다수이며 재해 발생 예측, 재해 발생 전후대응의 분야로 주로 연구가 이루어져 왔다. 그러나 9.12 지진 이후 재해 발생 전후대응 분야의 연구가 본격적으로 이루어지고 있으며 이는 국가정책의 흐름에 영향을 받은 것으로 나타났다. 하지만 문화재에 대한 접근권의 한계와 기본연구 부족으로 인하여, 현장에 적용되기까지는 많은 후속연구가 필요하며, 이에 대한 국가기관과 민간부분의 역할에 따라 연구 분야와 방향의 조율이 필요한 시점이다.

문화재청과 국립문화재연구소를 중심으로 한 국가주도의 건축문화재 지진 방재 연구는 2009년부터 이루어져 왔다. 「건축문화재 재해예방 기획연구(2008)」를 통해 지진과 같은 재해에 대응하기 위한 연구 과제를 도출하여 중장기 연구 계획을 수립한 것을 시작으로 현재까지 지진 방재와 관련된 14개의 R&D 연구과제가 추진되었다. 국가기관은 문화재보호법에 따른 문화재 관리의 주체로서 지진피해를 저감시키고 대비할 수 있는 연구에 집중하였다. 또한 지속적으로 예산을 투입하여 추진해야 하는 연차별 연구와 문화재에 대한 접근이 제한적인 민간에서 직접적으로 수행하기 어려운 연구에 중심을 두었다. 이처럼 기존 연구 성과를 분석하여 향후 연구 방향을 제시하면 다음과 같다.

1. 재해 위험도 평가와 재해 발생 예측의 경우 기존 연구 성과를 세분화하여 추진해야 한다. 국가기관은 지진위험도 평가는 기존에 실시되지 않은 역사도시와 주요 건축문화재에 대하여 추가적으로 실시해야 한다. 이를 뒷받침하기 위한 지진 위험도 평가 기준과 모니터링 기술 개발 연구는 민간에서 기존 연구 성과를 바탕으로 개선하여 함께 추진되어야 한다.
2. 재해 발생 예측 분야의 경우 국가기관은 기존 연구결과를 토대로 국가건축문화재 구조정보 DB를 구축하고 관련 예산과 제반환경이 수반되어야 하는 지진피해 재현실험과 시뮬레이션을 건축문화재 유형별로 실시할 필요가 있다. 민간은 이러한 문화재 구조정보 DB를 바탕으로 개별 문화재의 동적특성 및 구조모델링 등의 세부 연구를 수행할 필요가 있다.
3. 재해 발생 전후대응은 국가기관을 중심으로 지진피해 현장기록과 조사, 2차 피해예방 및 대응 매뉴얼 개발연구 등을 추진하여 효율적으로 재해 대응이 가능하도록 하여야 한다.
4. 추후 다시 발생할 수도 있는 지진으로 인한 건축문화재 피해 복원 방법과 원칙, 피해 부위에 대한 보수·보강 기술 개발을 검토할 필요가 있다. 건축문화재 유형에 따른 지진위험도와 내진성능 평가 결과를 토대로 피해 저감을 위한 보강 방안 연구가 필요하다.

지진과 같은 재해로부터 문화재를 지키고 보존원칙에 근거한 진정성을 유지하기 위해서는 건축문화재와 지진 방재와 관련한 연구가 활발하게 이루어 져야 할 것이다. 이러한 연구 환경 조성을 위하여 국가기관은 민간에서 접근하기에 한계가 있는 1차 자료를 생산하고 민간에 제공하며, 민간은 이에 따른 관련 연구를 지속적으로 추진하여 연구의 선순환이 이루어지도록 해야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2020년도 문화재청 국립문화재연구소에서 수행하는 문화재 조사연구(R&D) 문화재 재해대응 기술연구의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

## References

- Cultural Heritage Administration (2017). A Preliminary evaluation research on seismic performance of architectural heritage.
- Jo, S.S. (2019). Trends and Direction of State-run Researches on the Disaster Prevention of Cultural Heritage, *Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention* Vol.4, No.2.
- National Research Institute of Cultural Heritage (2017). A Planning study on earthquake response of architectural heritage.
- National Research Institute of Cultural Heritage (2018). A Study on earthquake damage simulation and reinforcement measures for architectural Heritage.
- National Research Institute of Cultural Heritage (2019). A Basic Study on the Construction of Earthquake Hazard Map for Architectural Heritage in *Gyeongju* and *Pohang* Area.
- 文化部文化資產局 (2017). 0206地震文化資產建築震害-緊急應變及經驗探討.