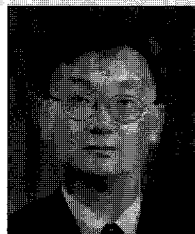
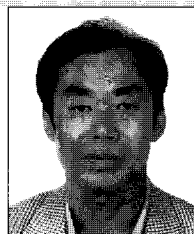


문화재 재해에 대한 지반공학적 접근방법

Geotechnical Approaches on the Disaster of Cultural Heritages



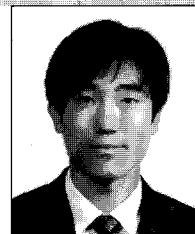
김 동 수*



김 덕 문**



박 헌 준***



김 경 섭****

*KAIST 건설 및 환경공학과 교수
 **국립문화재연구소 건축문화재연구실 연구관
 ***KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정
 ****KAIST 건설 및 환경공학과 석사과정

1. 서 론

문화재는 태풍, 홍수, 지진, 호우 등의 자연재해에 노출되어 있다. 이러한 자연재해는 문화재 구조체 뿐 아니라 하부지반, 주변환경 등에 직·간접적으로 영향을 미치며, 이로 인해 문화재의 소실 및 훼손을 유발한다. 이는 문화유산의 역사적, 국가적 상징성에 대한 가치를 떨어뜨리는 일이며, 후손에 대한 문화유산 전달의 의무를 저버리는 일이다. 따라서 문화재 재해예방 및 보존을 위한 체계적인 안전관리 정책 및 연구가 필요하며, 종합적인 문화유산 보호 방안 마련이 중요하다.

자연재해에 대하여 문화유산을 보호하기 위해서는 역사학, 역사지리학, 정책학 등의 인문사회과학 뿐만 아니라 과학적, 공학적 접근 방법이 필요하며, 본고에서는 자연재해에 따른 문화재 하부 및 주변 지반에 대한 지반공학적 접근 방법에 대해 고찰해 보고자 한다.

태풍 및 집중호우에 의한 문화재 하부 및 주변 지반에 대한 피해사례를 살펴보면 2002년 태풍 루사의 집중호우에 의하여 강릉 경포대 주변지반 일부가 유실되고 석축이 훼손되는 피해가 발생한 바 있으며, 2006년 태풍 에위니아의 집중호우로 곡성 도림사 대웅전, 칠성각 등이 산사태 피해를 입었다.

를 입었다.

또한 지진재해의 의하여, 일본의 경우 1995년 효고현 남부 지진, 2004년 니가타현 주에쓰 지진, 2007년 니가타현 주에쓰 오키 지진 등에 의하여 목조문화재가 피해를 입은



(a) 2002년 태풍 루사에 의한 경포대 피해



(b) 2006년 태풍 에위니아에 의한 도림사 대웅전 피해



(c) 2004년 일본 니가타현 주에쓰 지진 피해



(d) 2007년 니가타현 주에쓰 오키 지진 피해

그림 1 국내외 문화재 재해 피해

사례가 보고되고 있으며, 국내의 경우에도 1936년 쌍계사 지진으로 인하여, 쌍계사석탑 두부가 추락하고 지반 균열이 발생하였다. 국내 역사기록에는 서기 779년 경주 지진으로 100여명이 사망한 기록이 있고, 1518년 지진으로 인하여 종묘의 난간과 담이 무너졌으며, 1681년 강원도 지진으로 인해 신흥사가 붕괴되는 등 지진에 대한 역사도시 및 문화재에 대한 피해 사례도 상당수 기록되어 있다(서울대학교, 2000).

재해에 의한 문화재 피해 사례를 살펴보면, 집중호우에 의한 산사태 및 쇄굴, 지진에 의한 직접적 피해, 그리고 이밖에 문화재 하부지반의 불균질성, 지하수위 변동 또는 쇄굴에 의한 부등침하, 주변의 지반진동에 의한 문화재 피해 등 지반공학적 관점에서 여러 가지 재해의 가능성이 나타나고 있다.

이에 본고에서는 자연재해에 따른 문화재 피해를 줄이기 위한 기존 지반공학적 연구들을 검토하고, 현장조사를 통해 지반재해 저감을 위한 중장기적 연구 과제를 도출해 보고자 한다.

2. 기존연구 분석

본 연구에서는 일차적으로 국내 문화재의 자연재해 피해 저감을 위한 관련 연구를 살펴보았다. 먼저 국립문화재연구소의 ‘석조문화재 재해예방시스템 구축’ 및 ‘석조문화재 재해발생 예측시스템 개발’ (한국지질자원연구원, 2006; 2007) 연구에서는 석조문화재에 피해를 줄 수 있는 자연재해 중 주로 산사태와, 토사유출, 강풍, 침수, 지진 등이 주로 연구되어야 할 대상으로 결론지어진 바 있다. 이 연구에서는 한반도에서의 태풍 특성 및 예측방안에 대한 논의, 계기지진을 이용한 지반운동 및 진도분포 작성 방안 연구, 복합물리탐사를 이용한 지반의 진단 기술 개발, 주변지반 산사태예측 및 평가 등의 기술개발을 통하여 강우위험등급, 지진위험등급, 그리고 산사태 위험등급에 따른 분포도를 작성하였다.

국립문화재연구소의 ‘석조·목조문화재 재해 피해 저감 기술 개발 연구(단국대학교, 2007)’에서도 지반침하, 사면붕괴, 태풍, 화재 등을 문화재에 대한 주요 재해 원인으로 설정하고 웹기반 문화재 재해 경보 및 피해 저감 시스템과 태풍·화재에 대한 재해 예방 시스템을 제안하고, 지반-석조 문화재의 정적해석모델 구축 및 재해저감기술 개발을 위한 연구를 수행하였다.

지진과 관련된 연구로 역사도시 지역의 지반에 대한 지진민감도 분석이 수행된 바 있다. 지진피해 기록이 빈번하고 지진 발생 가능성이 큰 경주지역의 지반에 대한 지진

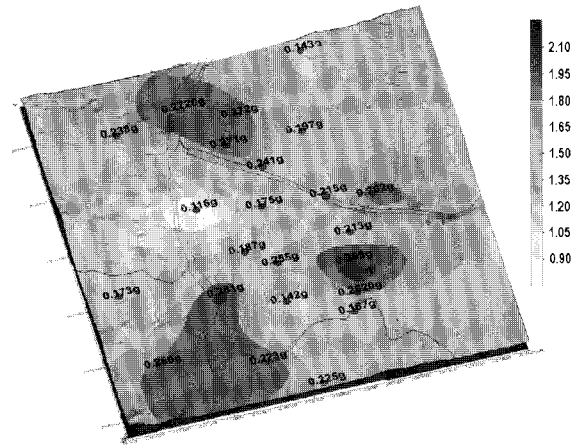


그림 2 경주 지역 지반 증폭 정도(방은석 등, 2001)

민감도 분석을 위하여 현장 지반조사 및 실내시험을 이용한 지반특성 평가와 이를 통한 지반응답해석을 수행하였다(방은석 등, 2001). 또한 지리정보시스템(GIS) 기반의 지진 등 재해대책 시스템도 제안되고 있으며(Sun, 2004) 이는 추후 역사도시, 문화재 시설물 등의 재해예방 연구에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

또한 역사지진 기록을 이용하여 확률론적으로 작성된 지진위험도는 지반 증폭된 역사지진기록을 암반노두에 적용함으로써 지진하중을 과대평가 할 수 있는 개연성이 있으며, 충실한 지질 및 지진분야의 기반자료와 평가기술을 바탕으로 보다 향상된 수준의 국가 지진위험도도 작성의 필요성이 대두되고 있다. 이에 1990년대 중반 이후 수행된 초가집, 기와집, 성첩, 봉화대, 석탑 등에 대한 진동대 실험결과(서정문 등 1997a, 1997b; 김재관 등, 2001)가 발표되고 있다. 추후 국내 대표적인 가옥구조, 주거형태 및 문화재에 대한 진동대 지진 시뮬레이션 결과와 기존 역사기록을 비교함으로써 국내 역사지진 기록에 관한 정확하고 객관적인

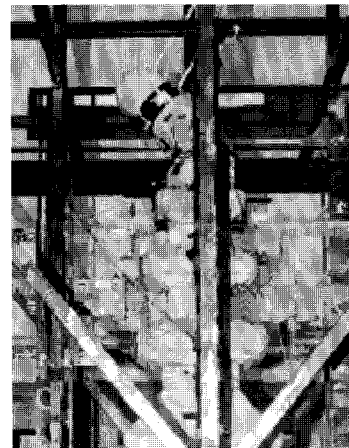


그림 3 쌍계사 오층석탑 실물크기 모델의 지진 실험(김재관 등, 2001)

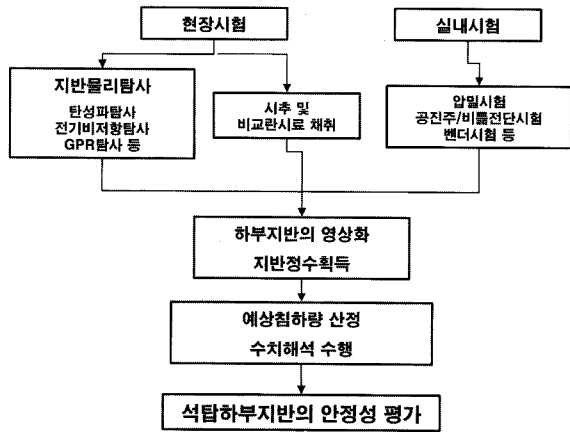


그림 4 석탑 하부지반의 안정성 연구 수행 방법 제안

재평가가 필요하다고 판단된다.

문화재 하부지반의 지반 안정성 평가와 관련된 연구로 미륵사지 석탑 하부지반의 부등침하에 대한 안정성 평가에 관한 연구가 수행되었다(서울대학교, 2008). 이 연구를 통하여 지반공학적 검토를 통하여 석탑붕괴와의 연관성 여부를 판단하고 지반개량 및 보강 여부를 결정하기 위한 기초 자료를 제공하였다. 석탑 하부지반의 안정성 연구를 수행하기 위하여, 제안한 연구 방법은 다음 그림 4와 같다.

이 연구에서는 기존 물리탐사 및 정밀 구조안전진단((재)한국건설안전기술원, 1998), 시추조사(지우엔지니어링, 1999) 등의 기존 자료를 검토하고, 새로운 탄성과 시험기법인 HAWW 기법(박형춘, 김동수, 2004)을 통하여 하부지반의 2차원 영상화를 구현하고, 침하량 산정 및 수치해석을 위한 지반정수를 추정하였다. 이를 통해 3차원 수치해석을 수행하여 석탑 하부지반 침하량 및 그 분포를 예측하였고, 지반의 안정성을 종합적으로 평가하였다.

그 결과 하부지반은 다소 복잡한 횡방향 변이를 가진 강성 분포 가지고 있었으나 전반적으로 부등침하에 영향을 줄 만

한 정도의 변이는 발생하지 않았고, 수치해석 결과 지반조건에 의한 부등침하 가능성은 매우 낮다고 판단되었다.

3. 현장조사를 통한 지반재해 관련 연구 과제 도출

국립문화재연구소에서는 ‘건축문화재 재해 예방 기획 연구(KAIST, 2008)’를 통하여 재해에 대한 피해가 발생하였거나, 피해가능성이 높은 문화재를 대상으로 현장조사를 실시한 바 있으며, 이를 통하여 현안 해결형 과제를 도출하였다. 이 중 지반재해와 관련하여 안동 신세동칠층전탑(국보 제16호), 경주 첨성대(국보 제31호) 및 영주 가흥리 마애삼존불상(보물 제221호)에 대하여 지반공학적 관점에서 문제점 및 해결방안을 살펴보고자 한다.

신세동칠층전탑은 우리나라 전탑 중 가장 규모가 큰 탑이다. 2008년 8월 현재 중심축을 기준으로 남서쪽으로 약간 기울어져 있는 상황이며, 남쪽으로 3m 가량 떨어져서 중앙선 철도가 지나감으로써 열차의 진동에 의해 크게 영향을 받고 있다. 또한 남쪽으로 약 20m 떨어져 낙동강과 면하고 있다.

현장조사 결과 지반의 부등침하 가능성 및 열차진동으로 인한 침하가능성이 있는 것으로 판단되었고, 탑신석 곳곳에 균열이 발견되었으며, 기단 내부의 적심, 즉, 다져진 탑 내부의 흙이 장기간에 걸쳐 유실되면서 내부 공극 및 편심에 의해 적심 파손으로 이어졌을 것으로 사료된다. 현장조사 결과를 바탕으로 지반 및 적심 부분 재해에 대한 연구 과제를 다음 표 1과 같이 도출하였다.

경주 첨성대는 동양에서 현존하는 가장 오래된 천문대로 받침대 역할을 하는 기단부 위에 술병 모양의 원통부가 올려지고 맨 위에 우물정(井)자 형태의 정상부가 얹혀진 모습이다. 2008년 8월 현장조사 결과 전체적으로 북동쪽으로

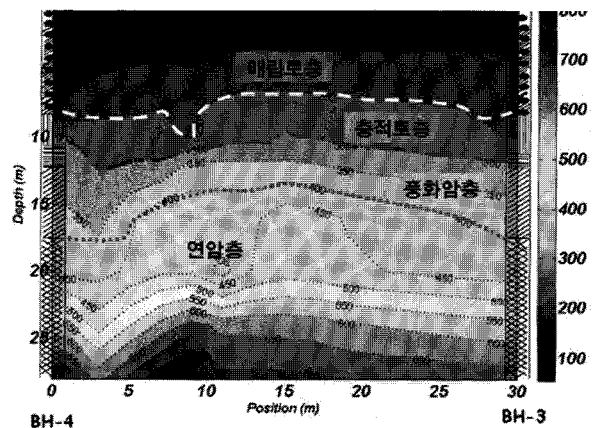
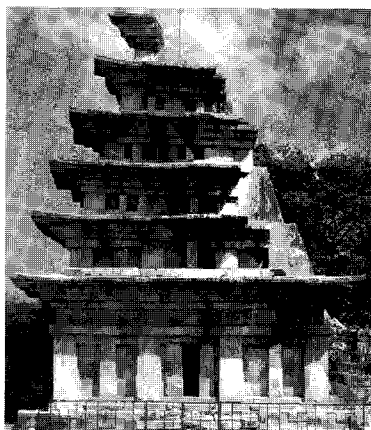


그림 5 미륵사지 석탑 하부지반 강성도 2차원 영상화(서울대학교, 2008)

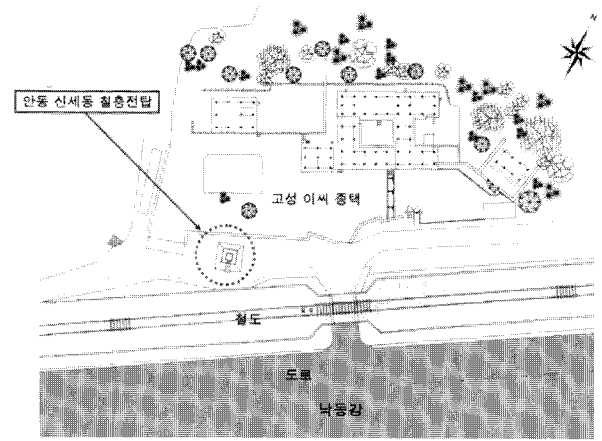


그림 6 안동 신세동칠층전탑 전경 및 현황배치도(2008년 현장조사)

표 1 안동 신세동칠층전탑의 지반안정성평가를 위한 과제 도출

과제	세부과제명
안동 신세동 칠층 전탑의 지반 안정성 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 적심부분의 다짐도 및 상태평가 <ul style="list-style-type: none"> - 채움흙 시료 채취에 의한 분류 및 실내 시험 - 복합물리탐사 기법을 이용한 현장 실험 - 다짐도 및 상태 평가
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지반의 상태 및 지하수위 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 표면과 기법을 통한 지층 구조 파악 및 강성 평가 - 침하계 등을 사용한 지반 침하량 측정 - 부등침하 가능성 검토 - 전기비저항 기법을 이용한 지하수위 변화 모니터링
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주변진동에 의한 영향 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 열차 통행에 따른 지반의 진동 특성 평가 - 고유주기 분석 및 탑에 대한 영향정도 평가

표 2 경주 첨성대의 지반공학적 과제 도출

과제	세부과제명
하부지반 강성구조 평가를 통한 부등침하 원인분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지반하부 강성구조 및 층상구조 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 복합물리탐사 기법 (탄성파, 비저항, 레이다 등) ○ 침하량 산정 및 부등침하 원인분석 <ul style="list-style-type: none"> - 하부지반 침하량 예측 - 부등침하 원인 분석
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 침하량 산정 및 부등침하 원인분석 <ul style="list-style-type: none"> - 하부지반 침하량 예측 - 부등침하 원인 분석
하부지반 보강방안 연구	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지반 개량 기법 연구 ○ 부등침하 상쇄방안 제시

기울어져 있었으며, 지반의 부등침하 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 또한 구조물 하부 석재간 이격이 심하고 정자석의 양단만 걸쳐있는 상태로 지지구조가 불안정하였다. 이를 통하여 다음 표 2와 같이 첨성대의 문제점을 해결하기 위한 지반공학적 과제들을 도출하였다.

영주가흥리 마애삼존불상은 산사태로 인하여 지반 속에

묻혀있던 불상이 드러나 발견됐다. 2008년 8월 현장조사 결과 불상을 지지하는 두 개의 지반이 경사면을 형성하고 있어 위쪽의 지반이 전체적으로 경사면을 따라 흘러내릴 위험이 있으며, 불상 뒷면과 지반의 틈새로 인해 동결융해에 의한 피해를 입을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 현장조사 결과를 토대로 표 3과 같이 마애삼존불상의 문제점을 해결하기 위한 지반공학적 과제들을 도출하였다.



그림 7 경주 첨성대 전경 및 상부 상개 정자석 이격(2008년 현장조사)

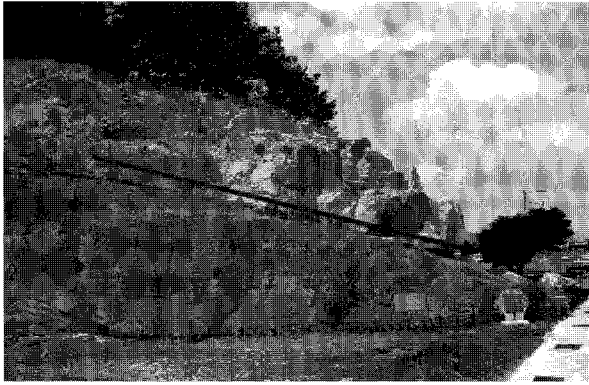


그림 8 영주 가흥리 마애삼존불상 전경 및 상부 이격(2008년 현장조사)

표 3 마애삼존불상의 지반공학적인 과제 도출

과제	세부과제명
지반의 안정성 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 암석 절리 부분 안정성 평가 및 변위 모니터링 ○ 암반 절리 보강 방법 도출

4. 지반공학 분야 중장기 연구과제 도출

건축문화재 재해 예방 기획 연구(KAIST, 2008)'에서는 현장조사를 통한 문화재별 현안해결형 과제를 도출함과 동

시에, 공통적 중장기 과제를 제안·평가하였다. 여기에서는 재해위험도 평가 기술, 안전진단 및 성능평가 기술 및 보수보강 및 유지관리 기술의 세 그룹으로 연구 과제를 도출하였으며, 이 중 지반공학 분야에서는 지진, 산사태, 지반침하, 쇄굴, 지하수위 변동 등의 지반재해에 대하여 연구 과제를 도출하였고 다음 표 4와 같다.

재해위험도 평가기술과 관련하여 역사도시 지역의 지진 위험도를 데이터베이스 구축을 통해 평가하고, 모형실험을

표 4 중장기 과제도출 : 지반공학적인 관점

구분	과제명	세부과제명
재해 위험도 평가 기술	역사도시지역의 지진위험도 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 역사도시 지역 지반조사 D/B 수집 및 현장시험 ○ 역사도시 지역의 지반특성 GIS 기반 Microzonation ○ 지진재현주기에 따른 지반응답해석, 액상화 및 산사태 위험도 평가 ○ 역사도시에 대한 지진재해 위험도 작성 ○ 주요문화재에 대한 site specific 지진영향 평가
	모형시험을 이용한 역사지진 기록 재평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 역사지진에 의한 건축문화재 재해이력의 문헌적 검토 ○ 문헌상 대표적 문화재 및 지진피해에 대한 고증과 모형제작 ○ 진동대 및 원심모형시험을 이용한 역사지진 진도 예측 ○ 역사지진 기록 및 모형시험 결과 분석을 통한 역사지진 진도 재평가
	산사태 위험도 평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 복합물리탐사기법을 이용한 지반정수 도출 및 사면안정 해석 ○ 지진에 의한 산사태 위험도 평가 ○ 집중호우에 의한 산사태 위험도 평가 ○ 인위적 개발에 의한 산사태 위험도 평가 ○ 쇄굴에 의한 산사태 위험도 평가
안전진단 및 성능평가 기술	문화재 하부지반 상태평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하부지반 층상구조 및 강성구조 평가기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 탄성파, 전기비저항, 레이더 탐사 등 복합물리탐사 적용 - 2차원, 3차원 영상화 기법 ○ 지반의 강도와 탄성계수 결정을 위한 실내시험기법 개발 ○ 강우 및 지하수위 변동에 따른 지반물성 변화 연구
	문화재 하부지반 침하예측 및 안정성평가 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 문화재 하부기초형식에 따른 지반공학적인 고찰 ○ 문화재 특성이 고려된 지반모델링 및 수치해석기법 개발 ○ 문화재 특성이 고려된 모형시험기법 개발 ○ 지반재해 유형별 평가기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 지반침하, 사면안정, 쇄굴안정, 지하수위 변동 등 ○ 진동영향 평가 및 저감기술 개발
보수보강 및 유지관리 기술	문화재 하부 지반의 보수보강 기법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기초지반 안정화를 위한 국부적 보강기법 ○ 부등침하 완화기술 ○ 사면안정을 위한 지반보강기술 ○ 지반보강에 따른 문화재 구조안정성 영향평가
	실시간 모니터링 기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사면 붕괴 및 산사태 위험 실시간 모니터링, 경보시스템 구축 ○ 지반침하 및 변형에 따른 상부구조물의 영향평가 기술

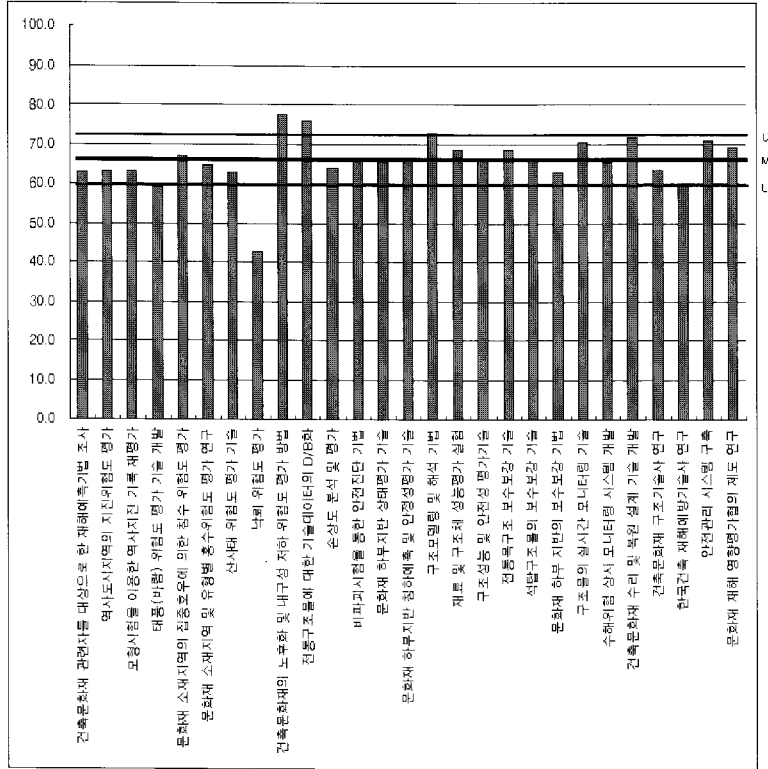


그림 9 건축문화재 재해예방을 위한 중장기 과제 설문평가 결과

이용하여 역사지진 기록을 재평가하는 과제 및 문화재 부지 및 주변의 산사태 위험도를 평가하는 기술관련 과제를 도출하였다. 안전진단 및 성능평가 기술 관련하여서는 물리탐사 기법 등을 통한 문화재 하부지반 상태 평가 기술 및 문화재 특성을 고려한 하부지반 침하예측 및 안정성 평가기술 관련 과제를 도출하였다. 마지막으로 보수보강 및 유지관리 기술 관련하여 문화재 하부 지반의 보수보강 기법 및 실시간 모니터링 기술 관련 과제를 도출하였다.

또한 이 연구에서는 문화재전문가들을 대상으로 표 4에서 도출된 세부연구과제들에 대한 설문평가를 실시한 바가 있다. 평가는 과제별로 연구의 시급성, 중요성, 활용성 및 파급성, 연구기반 구축의 기여도, 홍보 및 교육효과 등 5개의 평가척도를 기준으로 5점 만점으로 평가하도록 하였으며 그 결과는 그림 9와 같다.

평가 결과 표 4의 지반공학적 관점에서 본 7개의 중장기 과제들은 모두 표준편차 범위 내에 위치하였고, 평가자들은 도출된 연구과제들이 모두 중요한 것으로 인식하고 있었다.

5. 결 론

재해에 의한 문화재 하부 및 주변지반의 피해사례를 살

펴보면 집중호우에 의한 산사태 및 쇄굴, 지진에 의한 직접적 피해, 그리고 이밖에 문화재 하부지반의 불균질성, 지하수위 변동 또는 쇄굴에 의한 부등침하, 주변의 지반진동에 의한 문화재 피해 등 지반공학적 관점에서 여러 가지 재해의 가능성이 나타나고 있다.


재해에 대한 피해가 발생하였거나, 피해가능성이 높은 문화재를 대상으로 한 현장조사 통하여 재해예방을 위한 현안해결형 과제를 도출하였다. 이와 동시에, 공통적 중장기 과제를 제안·평가하였다. 여기에서는 재해위험도 평가 기술, 안전진단 및 성능평가 기술 및 보수보강 및 유지관리 기술의 세 그룹으로 지반공학 분야의 연구과제를 도출하였다. 향후에도 이를 바탕으로 문화재 및 지반에 대한 체계적이고 종합적인 재해예방 연구 계획이 필요하며, 그 틀 안에서 세부연구과제를 지속적으로 발굴, 갱신하기 위한 노력이 필요하다.

참 고 문 헌

1. (재)한국건설안전기술원, 1998, 익산 미륵사지 석탑 구조안진진단, 전라북도
2. 김재관, 류혁, 2001, 쌍계사 오층석탑 실물 크기 모델의 동적거동 시험, 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제4호

3. 단국대학교 산학협력단, 2007, 석조·목조문화재 재해 피해 저감기술 개발 -경북지방을 중심으로-, 국립문화재연구소
4. 류제라, 서만철, 2001, 익산미륵사지 지반특성에 대한 지구물리학적 연구, 지구물리학회논문집 제4권 제1호, pp.1~10
5. 박형춘, 김동수, 2004a, HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I) : 분산곡선의 결정, 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp.105~115
6. 박형춘, 김동수, 2004b, HWAW 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(II) : 실험 구성 및 역산과정, 대한토목학회 논문집, Vol. 24, No. 2C, pp.117~124
7. 방은석, 선창국, 김동수, 정충기, 조성호, 2001, 경주 지역의 지반공학적 지진 민감도 분석, 한국지반공학학회논문집 제17권 제1호, pp.57~65
8. 서울대학교, 2000, 지진세기의 정량적 평가 및 단층운동 해석 연구, 한국전력공사 전력연구원
9. 서울대학교, 2008, 미륵사지 석탑 구조 안정성 평가 연구 최종 보고서, 국립문화재연구소
10. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 1997a, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험 - (1)압반지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호
11. 서정문, 최인길, 전영선, 이종립, 신재철, 1997b, 전통 초가삼간 가옥의 내진성능 평가 실험 - (2)연약지반 조건, 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제4호
12. 지우엔지니어링, 1999, 미륵사지석탑 유구조사 및 가설공사 지반조사 보고서
13. 한국지질자원연구원, 2006, 석조문화재 재해예방시스템 구축, 국립문화재연구소
14. 한국지질자원연구원, 2007, 석조문화재 재해발생 예측시스템 개발, 국립문화재연구소
15. KAIST, 2008, 건축문화재 재해예방 기획 연구, 국립문화재연구소
16. Sun, C.G., 2004, "Geotechnical information system and site amplification characteristics for earthquake ground motions at inland areas of the Korean peninsula", Ph.D. Dissertation, Seoul National University

감사의 글

이 기사는 2008년도 국립문화재연구소의 지원에 의해 수행된 ‘건축문화재 재해예방 기획 연구’ 내용의 일부를 발췌한 것이다. 

[담당 : 정성진, 편집위원]