

<Review>

우리나라 지진지질학 연구에서 고고지진학의 중요성

진광민¹ · 김영석^{2,*}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²부경대학교 지구환경과학과

요 약

최근 우리나라에서 연이어 발생한 2016년 경주지진과 2017년 포항지진으로 한반도의 지진 발생 특성을 이해하기 위해 지진학뿐만 아니라 고지진학 분야에서도 연구가 활발하게 수행되고 있다. 고지진학은 과거 지진들에 대한 규모, 변위, 발생시기와 재발주기 등에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다. 또한 최근에는 이에 더하여 문화재의 파괴양상을 활용하여 계기지진 이전의 역사지진에 대한 발생시기, 규모, 진동의 분포, 진원의 위치에 대한 정보를 얻기 위한 고고지진학적 연구도 활발하게 수행되고 있다. 우리나라에서도 일부 학자들에 의해 역사지진기록을 바탕으로 문화재의 피해나 파괴와 역사지진의 연관성에 대한 연구가 수행되었다. 그러나 우리나라의 지체구조적 위치에 기인한 불규칙적인 지진의 발생, 역사지진기록의 모호성, 문화재와 천연기념물 등에 대한 직접적인 접근의 제한과 복원 등으로 고고지진학 연구에 많은 제한들이 존재한다. 그럼에도 불구하고 고고지진학은 고지진학, 역사지진, 계기지진자료와 함께 적절히 활용된다면 과거 지진에 대한 정보를 풍부하게 할 수 있다. 따라서 문화재의 피해와 역사지진과의 상관성에 대한 더욱 체계적인 분석과 최근 개발된 지진에 의한 환경의 변화에 기초한 진도 산정 방법(ESI scale)을 우리나라의 역사지진 연구에 적절히 적용하여 지속적인 연구를 수행한다면 그 동안 간과하였던 역사지진에 의한 피해들이 고고지진학적 새로운 해석을 통해 우리나라 지진지질학의 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 고고지진학, 지진지질학, 역사지진, 문화재, 고지진학

Kwangmin Jin and Young-Seog Kim, 2020, Importance of the archaeoseismological study for earthquake geology in South Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 2, p. 251-264

ABSTRACT: Recently, various paleoseismological and seismological studies have been conducting for understanding the characteristics of past seismic events after 2016 Gyeongju and 2017 Pohang earthquakes in SE Korea. Paleoseismological studies on past seismic events can provide useful information, such as magnitude, co-seismic displacement, timing and recurrence interval. Furthermore, archaeoseismology, the study of earthquake-related damages in archaeological sites, has recently been used to obtain useful information, such as timing, local intensity, distribution of ground motions, relative location of epicenters, and magnitude for historical earthquakes in many countries. A few researchers have conducted some archaeoseismological studies in Korea to correlate damaged historical heritages with recorded historical earthquakes. However, there are several limitations in archaeoseismological studies in Korea due to irregular occurrences of earthquakes according to the tectonic setting of Korean Peninsula, inaccurate descriptions on historical earthquake records, restriction of direct access to historical heritages and natural monuments, and restoration of cultural properties. Nevertheless, archaeoseismology can improve the knowledge for past earthquakes incorporating with paleoseismology, historical seismology, and instrumental seismology. Therefore, it is possible to obtain useful information on past earthquakes through intensive investigations for comparative study between damaged historical heritages, historical earthquake records and application of ESI scale based on natural environmental effects by earthquakes. Thus, new interpretations of historical earthquake damages based on archaeoseismology could contribute to the study of earthquake geology of Korea.

Key words: archaeoseismology, earthquake geology, historical earthquake, historical heritage, paleoseismology

(Kwangmin Jin, Geology Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Young-Seog Kim, Department of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

1. 서론

전 세계적으로 대규모 지진에 의해 많은 인명과 재산피해가 발생하였으며, 이러한 추세는 인구증가 및 도시화와 함께 지속적으로 증가할 것으로 보인다 (Wisner *et al.*, 2008; Doocy *et al.*, 2013). 2011년 3월 11일에는 동일본 대지진(규모 9.0)에 수반된 지진해일로 인해 후쿠시마 원자력발전소가 파괴되는 2차 피해까지 발생하여 많은 인명과 경제적 손실을 가져왔다(e.g., Yagi and Fukahata, 2011).

우리나라는 유라시아판의 연변부에 위치하여 판의 경계에 위치하는 다른 나라들에 비해 대규모 지진의 발생빈도가 상대적으로 낮아 지진에 대해 안전한 지역으로 여겨져 왔다. 그러나 최근에 보고된 활성단층과 고지진학적 연구들(e.g., Kim *et al.*, 2004, 2011; Kee *et al.*, 2007)에 의하면 우리나라도 주기는 길지만 지표파열을 수반한 대규모 지진들이 제4기 동안에 종종 발생하였음이 밝혀지고 있다. 특히 남한의 지진관측 이래 최대의 지진으로 기록된 2016년 9월 12일 경주지진(규모 5.8)뿐만 아니라 2017년 11월 15일 포항지진(규모 5.4) 등 최근 연속된 중규모 지진들로 인하여 많은 경제적 피해가 발생하였고, 이로 인해 우리나라도 더 이상 지진으로부터 안전지대는 아니라는 인식이 확산되고 있다. 이와 같이 지진에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 지진학, 지체구조학, 그리고 고지진학 분야의 연구들이 다양한 목적을 갖고 활발히 수행되고 있다.

중국의 고대 지진계를 제외하고 근대적인 지진계가 개발된 것은 1887년이며, 우리나라의 경우 1905년 조선총독부 인천관측소에 지진계가 처음으로 설치된 이래로 계기지진기록을 실시한 지 100여년이 지났다(Lee, 1998; Korea Meteorological Administration, 2001). 그러나 우리나라는 대규모 지진의 발생주기가 계기지진 관측기간에 비해 상대적으로 길기 때문에 이러한 짧은 기간의 계기지진 자료만으로 지진발생 특성과 지진재해 특성을 연구하는 데는 다소 어려움이 있다. 이에 우리나라의 지진발생 특성을 제대로 이해하기 위해서는 계기지진자료를 이용한 지진학적 접근뿐만 아니라 역사지진의 연구와 활성단층에 대한 고지진학적 연구방법을 동시에 적용할 필요가 있다. 이를 통해 이전에 발생한 대규모 지진과 관련된 단층의 운동횟수, 발생시기, 재발주기, 지진규모 및

단층규모에 대한 보다 많은 정보를 획득할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 바탕으로 앞으로 발생할 수 있는 대규모 지진에 대한 장기적인 예보가 어느 정도 가능할 수 있을 것이다. 그러나 활성단층에 대한 고지진학 연구에 있어 주요한 부분을 차지하는 연대측정의 오차와 한계에 따른 문제점과 제4기 지층의 부재에 따른 단층의 활성여부 판단에 있어서의 한계, 그리고 고지진학적 연구를 위한 트렌치 위치 확보의 어려움 및 이로 인한 연구자료의 제한 등으로 인해 많은 장애요인들이 존재하고 있다(Kim *et al.*, 2011).

활성단층에서 발생한 대규모 지진의 시기, 규모, 위치는 과거의 명확한 지진기록이 보고된 지역에서는 예측하는 것이 좀 더 수월할 수 있다(Marco *et al.*, 2003). 따라서 최근 지진재해에 대한 연구의 한 방법으로 활성단층 주변의 문화재파괴(e.g., Ambraseys, 1973, 2006; Caputo and Helly, 2005, 2008; Marco *et al.*, 2003; Marco, 2008; Decker *et al.*, 2006)나 중유석 파괴흔적(e.g., Kagan *et al.*, 2005) 등을 이용하여 지진의 특성을 이해하려는 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 고고학적 자료를 이용하여 지진발생 특성을 연구하는 고고지진학(archaeoseismology)은 역사기록과 파괴된 문화재를 지질학적으로 접근하여 역사지진에 대한 유용한 정보를 획득할 수 있다. 과거 지진에 의한 고고지진학적 접근은 지진에 의해 파괴된 문화재가 만들어진 시기를 상대적으로 정확하게 알 수 있기 때문에 역사지진의 발생시기를 더욱 정확하게 제한하고 피해규모에 따른 지역적 진도의 산정과 강진의 공간적 분포 등을 파악할 수 있으며, 이를 이용하여 등진도 구역도(isoseismal map)를 작성할 수 있어 매우 유용하다(e.g., Ambraseys, 1973; Karcz *et al.*, 1977; Karcz and Kafri, 1978). 따라서 고고지진학적 연구는 역사시대 대규모 지진의 발달 특성을 이해하는데 매우 중요한 정보를 제공할 수 있다(Marco, 2008).

우리나라의 경우 판의 경계부분에 위치한 일본이나 대만 등에 비해 지진의 발생빈도가 상대적으로 낮고 재발주기가 상대적으로 길어 1905년 이후 설치된 계기지진의 기록만으로는 우리나라의 지진발생 특성을 이해하기 어려움에도 불구하고, 계기지진의 기록만을 근거로 지진의 안전지대로 인식되어 대규모 지진에 대한 연구와 관심이 상대적으로 빈약한 상태였다. 그러나 최근 경주지진과 포항지진으로 인

해 고지진학에 대한 관심뿐만 아니라 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한 문화재에 대한 관심과 연구는 최근 매우 활발하게 진행되고 있지만 대부분은 문화재의 보존과 파괴에 대한 복원에 관련된 연구만 활발히 진행될 뿐, 고고지진학적 관점에서의 접근을 통한 문화재 피해의 원인을 분석하는 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 이번 연구에서는 우리나라의 기존 고고지진학 연구를 고찰하고, 지진지질학 또는 고지진학의 연구에 있어 고고지진학의 중요성과 기여할 수 있는 역할에 대해 간단히 언급하려고 한다.

2. 우리나라의 고고지진학 연구 사례

지진의 분포특성과 발생특성을 이해하기 위해서는 활성단층 연구를 통한 고지진학적 접근이 매우 중요하다. 그러나 활성단층 연구에는 연대측정의 한계, 제4기 지층의 부재, 트렌치 조사의 제약 등 수행과정에서의 많은 어려움과 문제점을 갖고 있다. 특히 우리나라는 유라시아판의 가장자리에 위치하고 있는 지체구조적 특성 때문에 판경계부에 위치한 대만이나 일본 그리고 미국의 캘리포니아와 같은 지역들에 비해 지진발생의 빈도와 규모가 낮을 뿐만 아니라 시공간적인 지진 발생 특성이 상대적으로 불규칙하여 지진 발생 특성을 이해하는 것이 매우 어렵다(Liu *et al.*, 2011; Landgraf *et al.*, 2017). 또한 계기 지진 기록 이전의 지진활동에 대한 연구는 대부분 역사지진자료에 기반하고 있으나, 역사지진자료의 경우 발생시기, 진앙, 진원깊이, 규모 등에 대한 정보가 매우 빈약하여 진원변수를 결정하는데 어려움이 있다(Lee, 1998; Lee and Yang, 2006). 이러한 문제점을 보완하기 위하여 최근 일부 연구자들이 한반도 역사지진자료의 분석을 시도하고, 문화재에 적용된 내진설계기법, 파괴된 문화재와 역사지진과의 연관성, 동굴생성물의 파괴형태와 고지진과의 연관성을 추정하는 연구들을 일부 수행하였다(Lee, 1998; Lee and Yang, 2006; Jin *et al.*, 2009, 2011; Choi *et al.*, 2012).

Lee (1998)는 우리나라에서 발생한 약 1900회에 달하는 역사지진자료를 수집하고 분석하여 1-14세기에 비해 15-18세기에 상대적으로 더 많은 지진들이 발생하였다고 보고하였다. 이 시기는 중국 북동

부의 지진발생 특성과도 잘 일치하는 것으로 유라시아판과 인도판의 충돌에 의해 발생한 응력에 기인한 것으로 해석하였다. 또한 Hwang (2007)은 경주 지역의 대표적인 문화재인 불국사의 건설에 그랭이법, 목조건축기법, 주두석의 이용과 유공초석 등 내진설계에 적용되는 공법들이 많이 적용된 것과 경주 지역에서 대규모 지진 및 지진피해 기록들이 많이 보고된 것은 경주지역이 지진으로 많은 피해를 겪었다는 것을 방증하는 것으로 보았다.

우리나라에서의 본격적인 고고지진학의 소개와 연구는 2007년 5월 경주 남산 열암곡에서 석불좌상 정비사업 중 고고미술학적 양식으로 8세기 후반에 제작된 것으로 추정되는 마에여래입상(추정 무게: 약 70톤)이 약 40-50°정도 경사진 사면에 불안정한 형태로 넘어져 있는 것이 발견되면서부터 시작되었다(Jin *et al.*, 2009). 이에 Jin *et al.* (2009)은 이 불상의 붕괴를 과거 많은 인명과 재산피해를 야기한 경주지역의 지진과 연관시켜 해석하고자 하였으며, 특히 불상의 상태와 추정 제작 시기에 근거하여 779년 경주지진(진도 9 추정; Lee, 1998)과의 연관성을 조사하였으며, 넘어진 불상과 주변에 발달하는 단열균들의 발달특성을 비교하여 넘어진 불상의 원위치를 복원하는 연구를 수행하였다. 그러나 이 불상의 붕괴와 779년 경주지진과의 직접적인 연관성을 주장할만한 명확한 증거를 발견하지 못하였으며, 마에여래입상의 제작시기와 풍화상태 등을 고려하여 제작된 지 오래되지 않아 갑작스런 힘에 의해 이 불상이 넘어진 것으로만 보고하였다.

이후 Jin *et al.* (2011)은 앞서 보고한 마에여래입상의 붕괴원인을 규명하기 위하여 불상 주변에서 유사한 크기와 붕괴양상을 보이는 암석 아래에 매몰된 모래층에서 OSL 연대측정을 수행하고, 역사기록에서 경주지역에 발생한 대규모 지진들뿐만 아니라 화산폭발 및 사회적 사건 등 불상의 파괴에 영향을 미칠 수 있는 사건들을 비교분석하여 붕괴원인을 추정하는 연구를 수행하였다(그림 1). 이 연구에서는 OSL 연대측정 결과인 A.D. 1130-1370년 내외에서 규모 6 이상의 역사지진을 분석한 결과 1036년에 경주지역에서 발생한 지진($M_L=6.4$)을 불상의 붕괴를 야기한 유력한 지진으로 해석하였다(그림 1). Jin *et al.* (2009)과 Jin *et al.* (2011)의 연구는 고고지진학을 국내에 최초로 소개하였을 뿐만 아니라, 우리나라에서

최초로 문화재 피해와 역사지진과의 연관성을 추정하여 해외에 보고한 고고지진학 연구로 평가된다.

또한 최근 고지진학의 한 분야로 석회동굴 내 동

굴생성물의 파괴특성과 동굴생성물의 연대측정을 통해 지진의 발생시기를 유추하는 연구도 수행되고 있다(e.g., Cadorin *et al.*, 2001; Lacave *et al.*, 2004;

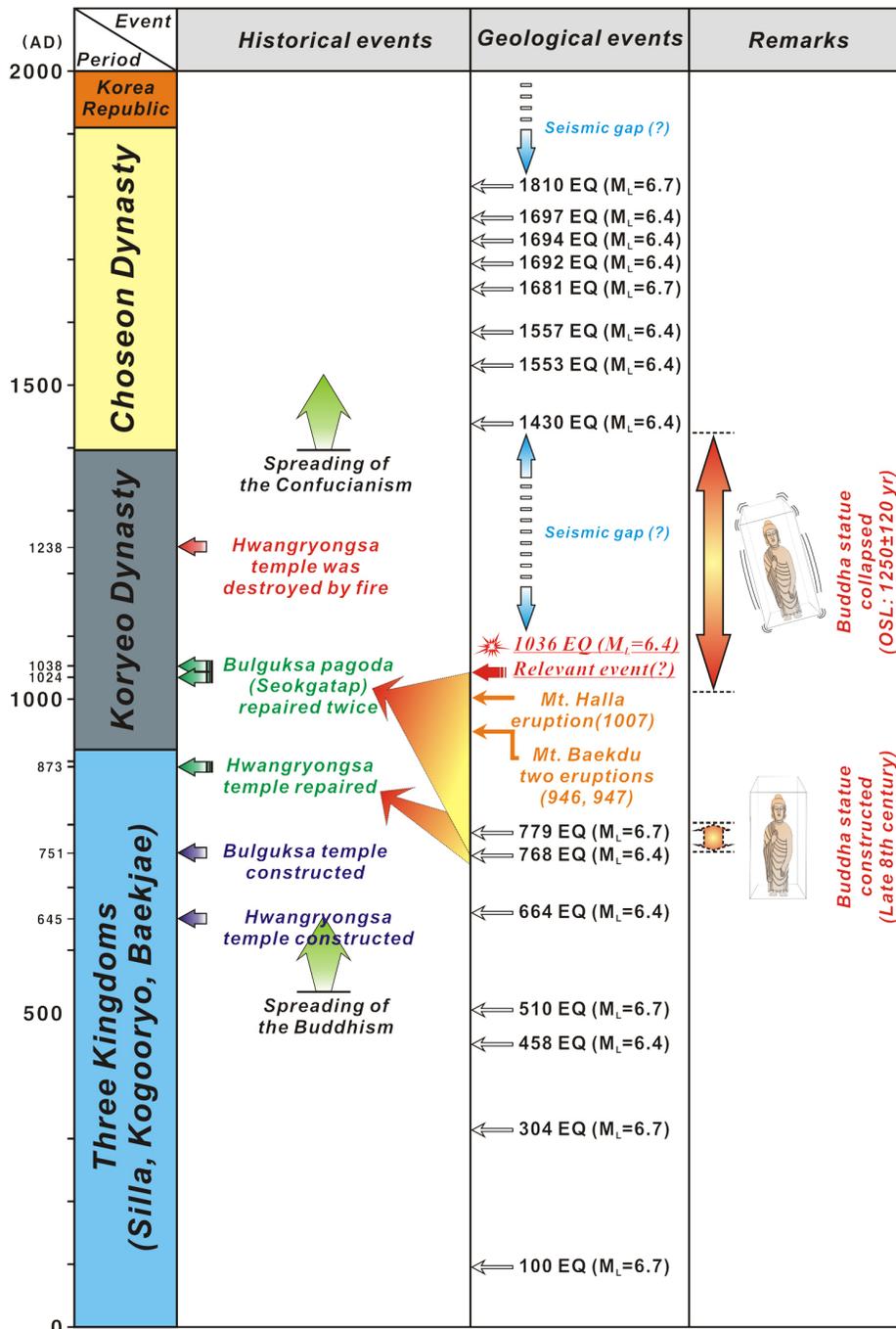


Fig. 1. Summary of geological and social events corresponded with the collapsed Buddha statue and historical heritages in the Gyeongju (from Jin *et al.*, 2011).

Kagan *et al.*, 2005; 그림 2). 동굴생성물의 경우 약 50만년까지 정확한 연대측정이 가능하므로 역사지진과 계기지진으로 확보할 수 없는 넓은 범위의 지진 재발주기에 대한 정보를 얻을 수 있다(Kagan *et al.*, 2005). 최근 Choi *et al.* (2012)은 경북 울진에 위치하는 성류굴 내 파괴된 동굴생성물들의 단층면과 단열 등에 대한 방향성을 분석하여 다양한 동굴생성물에서 나타나는 운동학적 변형 특성이 잘 일치하는 것으로 보고하였다. 또한 성류굴 내 동굴생성물들의 이러한 파괴는 인위적인 힘에 의한 것이 아닌 지진 등의 갑작스런 힘에 의해 형성된 것으로 해석하였다.

3. 우리나라 문화재의 지진피해 형태와 적용 가능성

지진에 의한 피해의 가장 확실한 증거 중 하나는 대규모 지진으로 발생한 지표변형에 의하여 유적이거나 건축물들이 파괴되면서 변위된 것이다(Marco, 2008). 지표변형과 관련된 유적들의 파괴는 이스라엘(Belitzky and Garfinkel, 2005), 요르단(Klinger *et al.*, 2000; Niemi *et al.*, 2001; Haynes *et al.*, 2006), 이란(Ambraseys and Jackson, 1998), 시리아(Meghraoui *et al.*, 2003),

그리스(Monaco and Tortorici, 2004), 터키(Hancock and Altunel, 1997), 중국(Zhang *et al.*, 1986) 등에서 다수 보고되었다. 지진에 의해 파괴되거나 지표파열단층에 의해 변위된 옛 유적들뿐만 아니라, 일부 건축물과 시설물들의 파괴양상을 통하여 역사지진의 발생여부와 규모 등을 유추할 수 있다. 이 단락에서는 우리나라의 유적에서 관찰되는 역사지진의 피해양상과 기존에 보고된 다른 여러 국가에서의 피해양상을 비교하고 그 적용 가능성을 언급하고자 한다.

석재를 이용한 아치 형태의 건축물들은 형태와 미관이 아름답고 안정적인 구조이기 때문에 여러 나라의 많은 옛 건축물들에서 다리, 큰 창, 출입문, 돔과 둥근 천장을 만들 때 많이 사용되었으며, 일반적으로 석재 아치는 시멘트 등의 접착제를 쓰지 않고 석재들을 깎아 맞춰서 만들었다(Marco, 2008). 특히 아치의 최상부 정중앙에는 쐐기형태의 마름모꼴 석재인 홍예중석(keystone)을 사용하였는데, 이 홍예중석은 강한 지진이 발생할 경우 지진동에 의해 건축물들이 좌우로 흔들릴 때 아래쪽으로 하강할 수 있다는 것이 다양한 모델링과 실험 등을 통해 보고되었다(Blasi and Foraboschi, 1994; Sinopoli *et al.*, 1997; Boothby *et al.*, 1998; Bicanic *et al.*, 2003; De

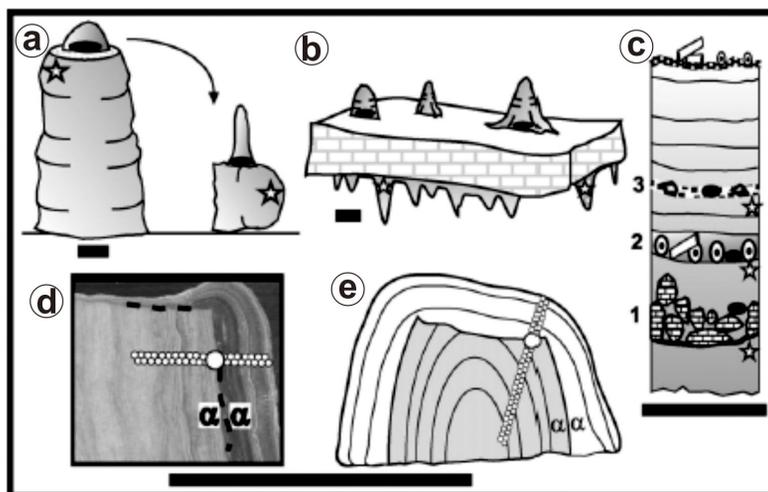


Fig. 2. An example of a paleoseismological study on speleothems of Soreg and Har-Tuv caves, the Dead Sea transform (from Kagan *et al.*, 2005). a) Stalagmite with severed top and postseismic regrowth. b) Collapsed ceiling with pre-seismic stalactites (below) and postseismic stalactites (above). c) Core in flowstone exposing fallen ceiling pieces (1), thin stalactites (2), and detrital layers (3). d) Section of severed stalagmite with postearthquake unconformable regrowth; dashed line is paleoseismic contact. e) Schematic cross section of severed stalagmite with regrowth. U-Th-dated laminae indicated by α . Small circles are schematic representations of stable isotope drilling points. Age of event is defined by datum intersecting contact (large circle). Scale bars=10 cm.

Luca *et al.*, 2004). 또한 홍예종석의 하강은 지진과 지진에 의해 발생한 수평적 움직임에 의한 확실한 변형증거 중 하나로 사용되고 있다(Korjenkov and Mazor, 2003, 2013; Marco, 2008; Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011; Hinzen *et al.*, 2016; Martín-González, 2018).

우리나라의 대표적인 불교양식 건축물인 불국사에도 아치구조를 사용한 백운교와 청운교가 있으며, 이는 다리 밑이 반원형이 되게 쌓아 만든 홍예교(Encyclopedia of Korean Culture © The Academy of Korean Studies)의 형태이다. 특히 백운교 하부에 있는 석재 아치의 경우는 다른 나라의 예에서는 찾아보기 어려운 이중 홍예구조로 속틀 홍예와 겹틀 홍예로 나뉘어지며, 홍예종석의 경우 안쪽의 속틀 홍예종석과 바깥쪽의 겹틀 홍예종석으로 구성된 아주 독특한 구조를 보여 준다. 두 홍예종석은 모두 평행사변형 모양을 갖고 있지만 속틀 홍예종석은 아래가 좁고 위가 넓은 형태이고 겹틀 홍예종석은 위가 좁고 아래가 넓은 형

태로 설계되어 있다(그림 3b). 이는 겹틀 홍예종석이 하중에 의해 빠져 내려가려 하면 속틀 홍예종석을 하중으로 눌러 구조적인 안정성을 확보하는 매우 과학적인 방식으로 해석된다. 그림 3은 1914년 촬영된 불국사의 사진으로 일제 강점기에 복원사업이 진행되기 이전에 촬영된 것이다. 이 사진에서는 불국사 백운교 겹틀 홍예종석이 아래로 미끄러진 것이 관찰되며(그림 3a, 3b), 또한 백운교의 계단이 심하게 뒤틀려진 것이 확인된다(그림 3c, 3d).

비록 숙종 12년(서기 1686년)과 42년(서기 1715년)에 백운교와 청운교를 중수하였다는 기록이 있으나, 불국사에 적용된 내진설계기술의 우수성은 역사기록에서 확인되며, 목조 건축물의 경우 화재 등으로 여러 차례 다시 건축하거나 보수하였다는 기록이 있다(Hwang, 2007). 이는 불국사에 적용된 내진설계기술의 우수성을 지시하는 것일 뿐만 아니라 경주지역에 지진이 상대적으로 빈번하게 발생했다는 것을

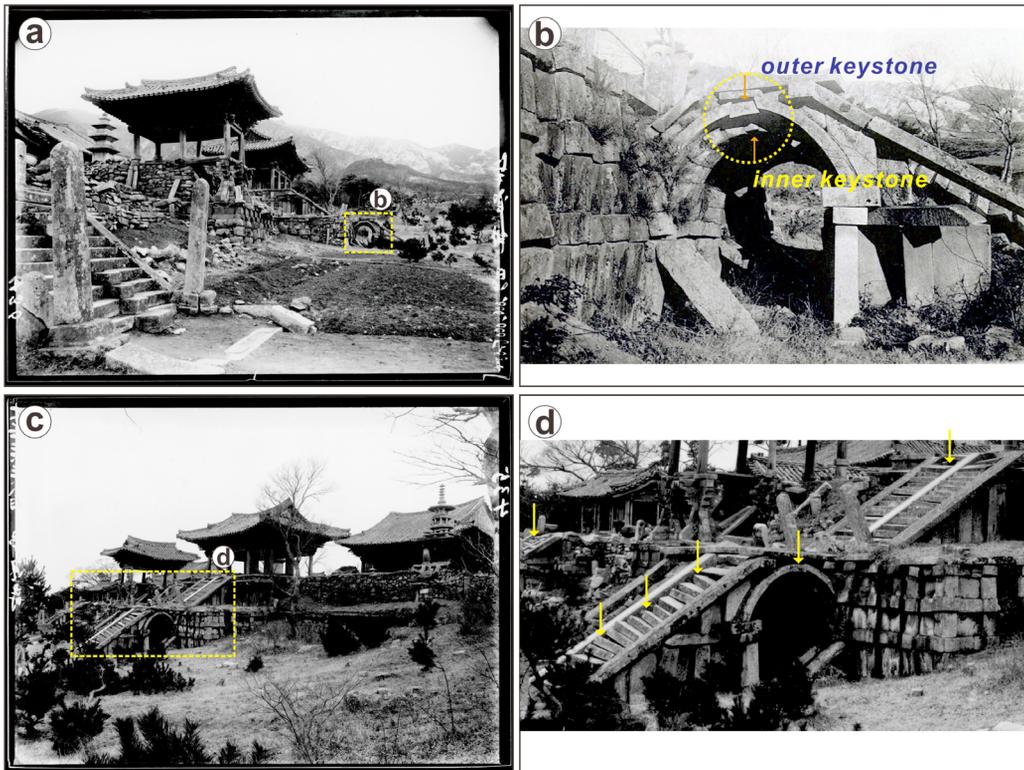


Fig. 3. a), c) Overviews of the Bulguksa temple showing destroyed stone structures, those were taken in 1914 (Photographs from homepage of the National Museum of Korea). b), d) Close-up photographs of the damaged masonry arches and stairs. Note that the keystones were slid downward and deformed stairs, which are common in earthquake-stricken areas.

지시하는 것으로 보인다. 또한 불국사 석조건축물들의 중수기록과 불국사의 파괴된 사진들에서 보여지는 백운교와 청운교 계단의 뒤틀림과 흥예종석의 하강과 같은 파괴는 전쟁과 같은 재난과 방치에 의한 훼손으로 볼 수도 있지만 이 아치구조의 상대적인 안정성을 고려할 때 지진과 같은 갑작스런 자연재해에 의한 것으로 추정된다. 추후 이러한 불국사의 피해양상을 정밀하게 분석하고 수치모델링 등으로 해석할 경우 불국사 석조건축물에 피해를 준 지진의 규모를 대략적으로 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

지상에 존재하는 모든 건축물들에는 중력이 작용하나, 수평으로 움직이는 힘은 매우 드물기 때문에 지진만이 이러한 아주 무거운 석재들 간의 마찰력을 극복할 수 있는 힘을 만들어 낼 수 있다(Marco, 2008; Rajendran *et al.*, 2013). 따라서 큰 가공한 석재들을 쌓아 올려 만든 석조건축물들은 지반침하나 지진에 의해 그 사이가 벌어질 수 있다. 신라시대 대표적인 건축물 중 하나인 첨성대는 이렇게 큰 화강암을 쌓아 올려 만든 건축물이다(그림 4). 첨성대의 경우 현재 일부 석재들 사이가 벌어져 있는데, 이는 지반침하, 식물 뿌리의 영향, 토사 유출 등에 의해 변형되었을 가능성을 무시할 수 없지만 경주 지역의 역사적 기록에서도 보고된 바와 같이 대규모 지진에 의해

변형되었을 가능성도 있다. 또한 많은 안산암질 암석으로 건축된 경주 분황사 모전석탑의 경우도 일부 석재들 사이가 벌어져 있으며, 이 또한 경주 지역에서 발생한 역사지진들에 의해 형성되었을 가능성도 있다.

또한 지진이 발생하게 되면 큰 벽돌이나 석재들이 움직이며 석재들의 모서리 부분이 서로 부딪치게 되어 깨지는 현상이 나타나며, 이러한 현상은 지진과 관련된 대표적인 변형으로 알려져 있다(Marco, 2008). 예를 들면, 13세기의 삼국유사에 의하면 불교가 전래된 이후, 경주에 위치하는 남산은 불교의 성산으로 여겨져 불상과 석탑들이 많이 건립되었다(Gyeongju Namsan Institute, 2010). 경주 남산에는 수백 개의 복원탑, 폐탑, 석조불상 등이 분포하고 있어 석탑들의 시대를 알 수 있다면 모서리 부분을 면밀히 조사 분석하고 인위적 파괴에 의한 피해를 구분하여 지진과의 연관성을 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

이 외에도 지진에 의해 파괴된 피해형태로는 갑작스런 수평운동에 의해 무너진 벽과 담장, 기반암 위에 건축된 벽이나 바다 등의 변형, 완벽하게 파괴되어 버려진 생활공간 등이 있다. 이러한 지진에 의한 피해양상은 전쟁 등에 의해 파괴된 마을과 비슷하지만 화살이나 칼 등 무기들의 부재, 생활공간의 매몰,

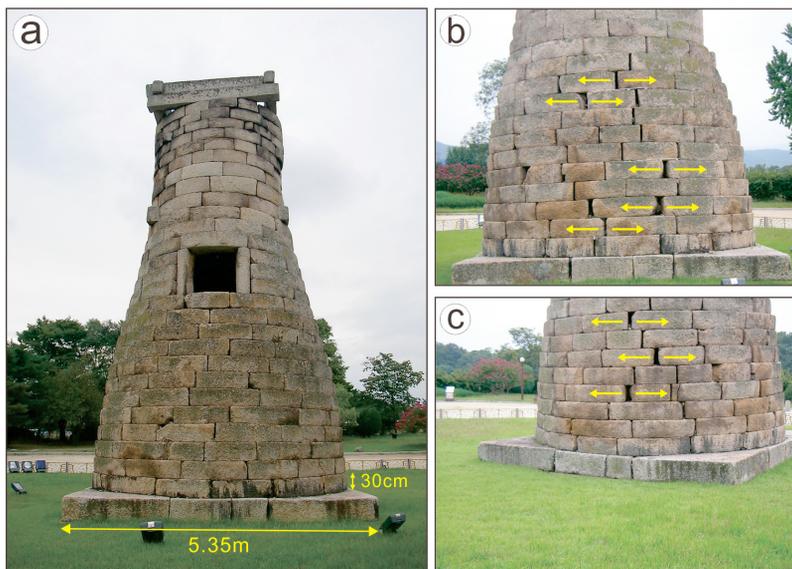


Fig. 4. a) Overview of the Cheomseongdae in Gyeongju. b), c) Close-up photographs of horizontal shifting of large blocks within the Cheomseongdae. Note that earthquakes can displace large heavy stone blocks by horizontal sliding.

지진에 의한 지표면의 침강 등 지진에 의한 피해양상 등을 통해 지진에 의한 파괴를 구분할 수 있다(Marco *et al.*, 2006; Marco, 2008). 따라서 역사기록에 대한 면밀한 분석과 고지진학적 트랜치 조사에 고고지진학적 접근을 병행한다면 고지진에 대한 보다 많은 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 우리나라 고고지진학 연구의 제한성 및 한계성

우리나라의 지진지질학은 활성단층 연구에 집중된 고지진학 연구가 대부분이었다(KIGAM, 1998; KOPEC, 2002; Choi *et al.*, 2003a, 2003b; Ree *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004, 2011). 그러나 최근 경주 남산에서 발견된 마에여래입상에 대한 고고지진학적 연구가 수행되었는데, Jin *et al.* (2011)은 마에여래입상의 원위치 복원뿐만 아니라 붕괴시기를 추정하기 위해 매몰된 퇴적물의 OSL (Optical Stimulated Luminescence) 연대측정을 실시하여 역사지진과의 연관성에 대해 연구하였다. 그러나 이 연구에서 수행된 OSL 연대측정을 위한 시료채취는 문화재보호법 등으로 인해 넘어져 있는 마에여래입상의 직하부에서는 채취하지 못하였고, 같은 시기에 같은 원인으로 붕괴되었을 것으로 추정되는 바로 인근에 위치한 유사한 크기와 자세를 갖는 큰 암석의 직하부에서 채취하였다. 따라서 이 연대측정값은 넘어져 있는 마에여래입상의 붕괴시기를 추정하는데 사용할 수 있지만 직접적인 붕괴시기를 지시한다고 보기는 어렵다.

또한 고지진 및 지진재해 연구에 매우 유용하게 이용될 수 있는 방법 중 하나는 석회동굴 생성물의 파괴와 재성장 사이의 연대를 측정하여 지진발생 특성을 이해하는 방법이다(e.g., Cadorin *et al.*, 2001; Lacave *et al.*, 2004; Kagan *et al.*, 2005; 그림 2). 동굴 내의 생성물에 대한 연대측정은 약 50만년까지 가능하여 적절한 조건에서 잘 활용이 된다면 역사지진 자료를 보완하여 고지진의 특성을 해석하는데 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다. 최근 우리나라에서도 Choi *et al.* (2012)에 의해 경북 울진 성류굴 내 동굴생성물들을 대상으로 생성물들의 파괴특성과 고지진과의 연관성에 대한 연구를 시도하였다. 그러나 이 연구에서는 천연기념물보호법으로 인해 해당

생성물들에 대해 접근과 시료채취가 허가되지 않아 파괴된 생성물과 재성장한 생성물의 연대측정은 실시하지 못하였다.

이와 같이 마에여래입상에 대한 접근 및 퇴적물 시료채취 불허와 성류굴 내 동굴생성물에 대한 접근 및 시료채취 불허 등에 의해 정확한 연대측정과 후속연구에 어려움이 많다. 따라서 외국의 경우와 같이 학술적 목적으로는 매우 제한적이라 하더라도 직접적인 접근과 시료채취 등이 허가되어야 이러한 분야에 대한 연구와 발전이 가능할 것으로 보인다.

역사적 기록에 따르면 많은 문화재들이 지진피해로 인해 지속적으로 중수되거나 보수되었다는 기록들이 존재한다. 예를 들면, 경주 황룡사 9층 목탑의 경우 서기 645년에 건축되었으나, 신라시대 역사기록서인 찰주본기(刹柱本記)에 따르면 이 목탑은 6번에 걸쳐 중수가 이뤄졌으며, 특히 8세기와 9세기에 발생한 지진에 의해 목탑이 뒤틀어지거나 파괴되었다고 기록되어 있다. 또한 751년에 창건된 불국사의 두 대표적인 탑인 석가탑과 다보탑도 유사한 기록을 갖고 있다. 1966년 석가탑을 보수하는 과정에서 발견된 역사기록서인 묵서지편(墨書紙片)에 따르면 경주지역에서 발생한 세 번의 연이은 지진으로 1024년과 1038년에 석가탑에 대한 중수가 이뤄졌다는 기록이 있다. 또한 묵서지편에서는 같은 지진들에 의해 불국사 계단과 암석교각들이 파괴되었다고 기록되어 있다(Seo *et al.*, 2009).

경주 불국사는 20세기 중반까지 방치되어 있었으며, 청와대와 정부의 주도하에 1969년부터 1973년까지 대대적인 복원 공사가 수행되었으며, 이로 인해 복원 전의 불국사 모습은 거의 찾아보기 힘들지만 방치되었던 모습이 일부 사진 속에 남아 있다(그림 3). 이는 복원 전 불국사의 모습들이 인위적인 파괴나 방치로 인한 훼손뿐만 아니라 어떤 갑작스런 충격에 의해 파괴되었을 가능성을 지시하고 있을 뿐, 이 사진들만으로는 그 충격이 지진에 의한 것인지 정확히 추정하기 힘들다. 이와 같이 대대적인 복원공사가 이미 진행된 문화재들의 경우, 그 파괴 원인을 규명하는데 분명한 한계가 존재한다. 따라서 역사기록 자료, 복원 전의 피해 상태 등을 면밀히 분석할 필요가 있으며, 이를 통해 피해 및 파괴 원인에 대한 해석이 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가 고고문화재는 다양한 방면의 연구를 위한 매

우 소중한 자료이기 때문에 많은 전문가들이 적절히 연구에 활용할 수 있도록 제한적으로 허용할 필요가 있으며, 특히 복원은 기존의 많은 증거들을 지워버릴 수 있기 때문에 이를 위해서는 다양한 분야로부터의 매우 신중한 검토가 필요하다. 불가피하게 복원을 선택할 경우에는 후세들의 연구를 위해 다양한 분야의 전문가를 통한 복원 전 자료의 수집과 보존이 기본적으로 수행되어야 할 것이다.

5. 토 론

역사서에 기록된 역사지진으로 발생한 지표균열, 산사태, 쓰나미, 액상화, 나무의 흔들림 등의 자연현상에 대한 분석이 수반될 경우 진도 등에 대한 정보를 유추할 수 있다(Silva *et al.*, 2015). 최근 개발된 환경진도단위(Environmental Seismic Intensity Scale; ESI)는 지진에 의해 발달하는 자연현상들에 기초하여 진도를 산정한다(Audemard *et al.*, 2015). 만약 역사지진기록에서 우물의 넘침, 산사태, 바닥의 갈라짐, 나무의 흔들림, 액상화, 먼지 구름, 낙석, 쓰나미 등에 대한 기재가 되어 있다면, 그 정도를 ESI 단위에 대비하여 비교 분석하면 그 당시 발생한 역사지진의 진도 등에 대한 정보를 얻을 수 있다(그림 5).

이것 뿐만 아니라 지진에 의한 일차 및 이차 지질학적 영향과 건축물이나 시설물의 피해에 따른 고고지진영향(Earthquake Archaeological Effects; EAE)에 대한 분류도 시도되었다(Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011; 그림 6). 또한 Rodríguez-Pascua, *et al.* (2013)은 EAE분류에 유럽형강진단위(European Macroseismic Scale; EMS-98) 분류를 접목하여 시설물들의 피해와 진도를 산정하였다. 우리나라에도 이러한 분류법을 적용해본다면, 예를 들어, 불국사 백운교 홍예종석 하강과 첨성대 석재들의 벌어진 현상을 한 번의 지진에 의해 변형된 것으로 가정하고 적용했을 때, 각각 진도 7이상과 8이상의 지진에 의해 형성되었을 가능성을 지시한다. 그러나 이와 같은 분석과 해석은 지진이 발생할 당시의 문화재 보존상태에 따라 피해정도가 달라질 수도 있기 때문에 면밀하고 세심한 검증과 해석이 필요하다. 그럼에도 불구하고 역사지진기록 뿐만 아니라 유적과 문화재 등에 기록되어 있는 지진 피해의 흔적들을 찾아내고 면밀히 분석하는 것은 고지진학 연구에 많은 보완적 정보를 제공할 수 있으며, 이를 통해 한반도의 지진발생 특성을 이해하는데 많은 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

석조문화재의 경우는 주로 화학적, 물리적, 생물

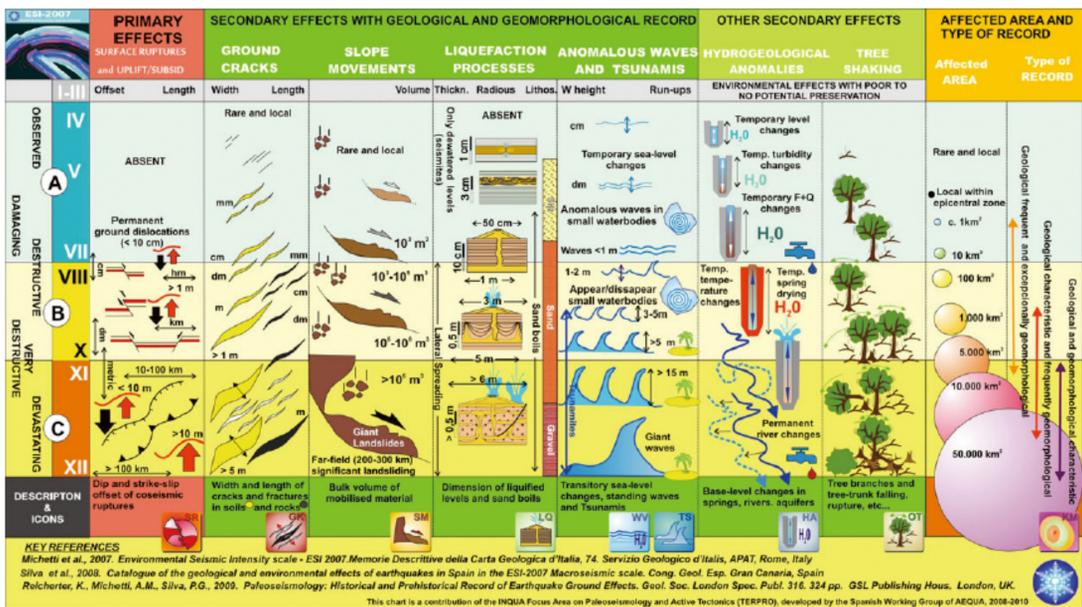


Fig. 5. Graphic description of ESI 2007 illustrating the main features and size parameters of the macroseismic scale for the different intensity degrees (from Silva *et al.*, 2015).

학적 풍화 등에 의해 훼손이 많이 되는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2001). 특히 석탑이나 입상 등의 경우 좁은 면적에 오랜 기간 동안 하중이 집중되기 때문에 기초부분에서 부등침하 등이 발생하여 기울어질 수 있으며, 지진이 발생할 경우에도 흔들림에 의해 부재들 간의 이완을 촉진시켜 붕괴나 손상을 입힐 수 있다(Jeong *et al.*, 2007). 또한 산사태나 홍

수 등의 자연재해가 발생하여 석조문화재 등이 매몰될 경우 토사류의 침입, 물에 의한 침수와 식물들의 성장 등으로 인해 풍화가 촉진되고 부재들 간의 이완을 촉진시킬 수 있어 문화재가 손상될 수 있다(Marco, 2008). 따라서 석조문화재의 손상은 지진과 같은 갑작스런 흔들림뿐만 아니라, 다른 자연적인 재해와 풍화현상들에 의한 피해도 함께 고려하여 해

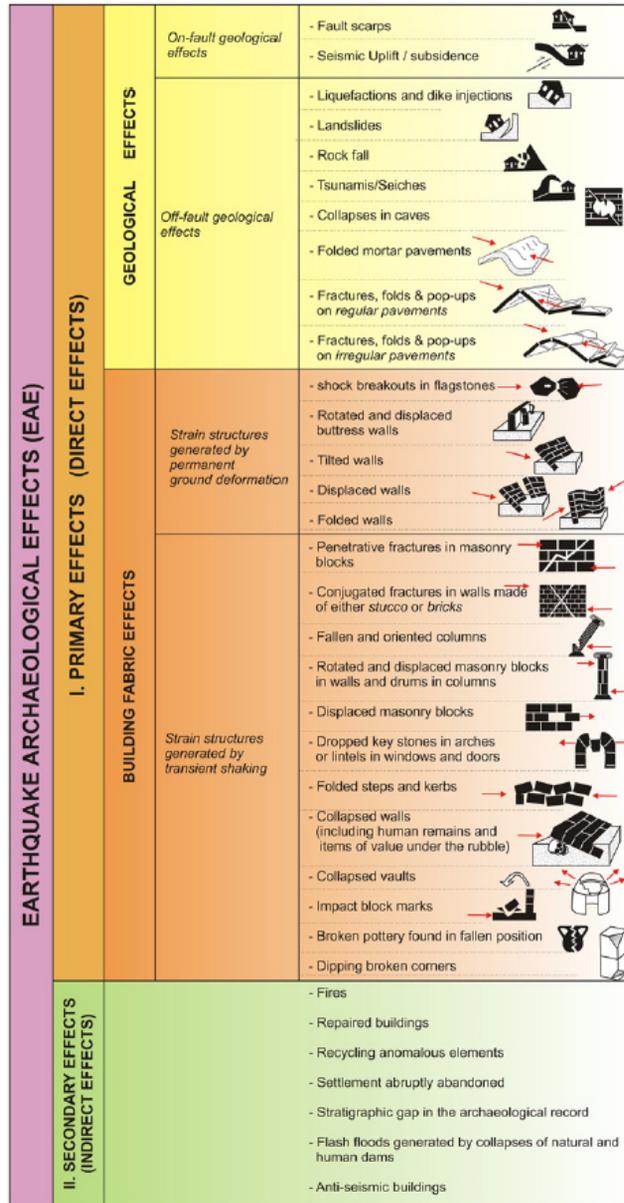


Fig. 6. A classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) based on primary and secondary geological effects of earthquake and building damages (from Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011).

석하는 것이 필요하며, 이러한 현상들에 의한 파괴 양상과 지진에 의한 파괴특성 간의 차이점을 잘 이해한다면 고고지진학을 더욱 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

최근 Martín-González (2018)는 단층과 같은 지표파열이 발달하지 않는 유적지, 역사적 건축물, 역사적 사진에서 관찰되는 지진에 의한 지진피해방향성(earthquake damage orientation)을 분석하여 지진성 단층의 방향을 유추하였다. 이러한 연구는 계기지진자료와 지표파열의 기록이 보고되지 않는 지역에서 지진의 시기, 진도, 위치 등 지진재해특성을 평가하는데 유용한 많은 정보를 제공할 수 있을 것이다. 이는 우리나라에서도 역사지진에 의해 피해를 받은 문화재에 대한 역사적 기록과 복원 이전의 사진 등을 면밀히 분석할 경우 그 당시 지진을 유발한 단층의 방향성 유추와 지진재해특성을 평가하는 데 활용할 수 있음을 시사하는 것으로 보인다.

6. 결론

우리나라에서는 최근 발생한 2016년 경주지진과 2017년 포항지진으로 대규모 지진의 발생주기, 규모, 위치를 알아내기 위해 활성단층의 자취와 특성을 규명하는 고지진학 연구가 많이 수행되고 있다. 또한 최근에는 이러한 고지진학적 연구 이외에도 활

성단층 주변의 문화재파괴와 역사지진기록 등을 분석하여 유적들의 파괴와 역사지진과의 상관성을 연구하는 고고지진학적 연구도 활발히 수행되고 있다.

우리나라에서도 일부 학자들이 역사지진에 대한 고고지진학적 연구를 일부 수행하였지만 지체구조적 환경에 의한 불규칙적인 지진의 발생, 역사지진 기록의 모호함과 불확실성, 문화재와 천연기념물에 대한 직접적인 접근 불가와 국가적 문화재의 복원 우선 정책 등으로 고고지진학 연구에 많은 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 최근의 연구들은 고고지진학이 역사지진과 계기지진, 고지진과 지진지질학 사이의 간극을 채워주는 중요한 역할을 하고 있음을 보여주고 있다(Sintubin, 2011; 그림 7). 따라서 지속적인 문화재의 피해기록 분석과 최근 개발된 지진에 의한 환경 변화를 기반으로 하는 진도산정 방법 등 다양한 방법들을 우리나라에도 적용한다면 문화재의 파괴원인에 대한 재해석과 유익한 정보를 확보할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해 각 연구 분야의 상호이해와 긴밀한 협업이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업(2017-MOIS31-006)의 지원과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지

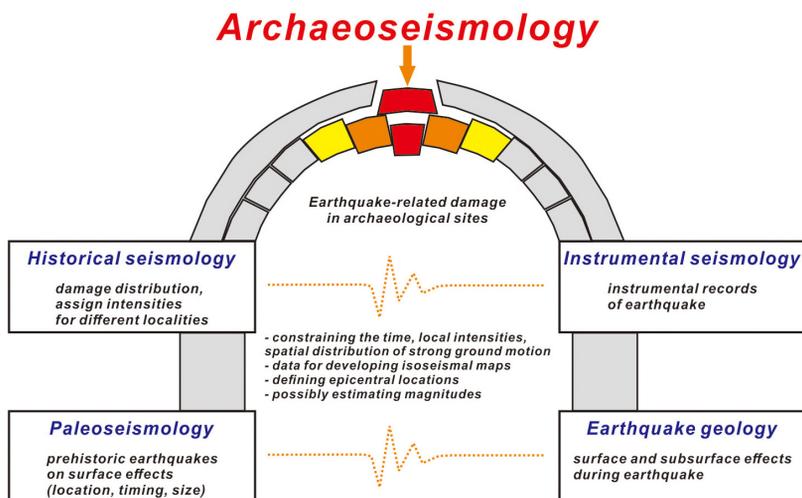


Fig. 7. Schematic diagram of role and importance of the archaeoseismology. Note that archaeoseismology may play an important role to bridge the gap between historical and instrumental seismology on one side and paleoseismology and earthquake geology on the other side.

원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20171510101960).

REFERENCES

- Ambraseys, N.N., 1973, Earth sciences in archaeology and history. *Antiquity*, 47, 229-230.
- Ambraseys, N.N., 2006, Earthquakes and archaeology. *Journal of Archaeological Science*, 33, 1008-1016.
- Ambraseys, N.N. and Jackson, J.A., 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 133, 390-406.
- Audemard, F., Azuma, T., Baiocco, F., Baize, S., Blumetti, A.M., Brustia, E., Clague, J., Comerci, V., Esposito, E., Guerrieri, L., Gurpinar, A., Grützner, C., Jin, K., Kim, Y.-S., Kopsachilis, V., Lucarini, M., McCalpin, J., Michetti, A., Mohammadioun, B., Morner, N.A., Okumura, K., Ota, Y., Papathanassiou, G., Pavlides, S., Perez López, R., Porfido, S., Reicherter, K., Rodríguez Pascua, M.A., Roghazin, E., Scaramella, A., Serva, L., Silva, P.G., Sintubin, M., Tatevossian, R. and Vittori, E., 2015, Earthquake Environmental Effect for seismic hazard assessment: the ESI intensity scale and the EEE Catalogue. 10.13140/RG.2.1.3629.3202.
- Belitzky, S. and Garfinkel, Y., 2005, Late Pleistocene and Holocene tectonic deformation at the Gesher site, Kinnarot Valley, Dead Sea Rift. *Israel Journal of Earth-Sciences*, 54, 133-143.
- Bicanic, N., Stirling, C. and Pearce, C.J., 2003, Discontinuous modelling of masonry bridges. *Computational Mechanics*, 31, 60-68.
- Blasi, C. and Foraboschi, P., 1994, Analytical approach to collapse mechanisms of circular masonry arch. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120, 2288-2309.
- Boothby, T.E., Domalik, D.E. and Dalal, V.A., 1998, Service load response of masonry arch bridges. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 124, 17-23.
- Cardorin, J.F., Jongmans, D., Plumier, A., Camelbeeck, T., Delay, S. and Quinif, Y., 2001, Modelling of speleothems failure in the Hotton cave (Belgium): Is the failure earthquake induced?. *Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw*, 80, 315-321.
- Caputo, R. and Helly, B., 2005, Archaeological evidences of past earthquakes: a contribution to the Sha of Thessaly, central Greece. *Journal of Earthquakes Engineering*, 9, 199-222.
- Caputo, R. and Helly, B., 2008, The use of distinct disciplines to investigate past earthquakes. *Tectonophysics*, 457, 7-19.
- Choi, J.-H., Ko, K., Kim, J.-Y. and Kim, Y.-S., 2012, A paleoseismological study based on the damage characteristics of speleothems in limestone cave: a case study from Seongryu Cave in Uljin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 225-240 (in Korean with English abstract).
- Choi, J.H., Murray, A.S., Cheong, C.S., Hong, D.G. and Chang, H.W., 2003a, The resolution of stratigraphic inconsistency in the luminescence ages of marine terrace sediments from Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1201-1206.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.S. and Chang, H.W., 2003b, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 407-421.
- Decker, K., Gangl, G. and Kandler, M., 2006, The earthquake of *Carnuntum* in the fourth century A.D.-archaeological result, seismologic scenario and seismotectonic implications for the Vienna Basin fault, Austria. *Journal of Seismology*, 10, 479-495.
- De Luca, A., Giordano, A. and Mele, E., 2004, A simplified procedure for assessing the seismic capacity of masonry arches. *Engineering Structures*, 26, 1915-1929.
- Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A. and Kirsch, T.D., 2013, The Human Impact of Earthquakes: a Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review. *PLOS Currents*, 5, ecurrents.dis.67bd14fe457f1db0b5433a8ee20fb833.
- Gyeongju Namsan Institute, 2010, The Distribution Map of the Cultural Remains in the Gyeongju. http://www.kjnamsan.org/V_06/droom/board/01/text/gjmap01.html (in Korean).
- Hancock, P.L. and Altunel, E., 1997, Faulted archaeological relics at Hierapolis (Pamukkale), Turkey. *Journal of Geodynamics*, 24, 21-36.
- Haynes, J.M., Niemi, T.M. and Atallah, M., 2006, Evidence for ground-rupturing earthquakes on the Northern Wadi Araba fault at the archaeological site of Qasr Tilah, Dead Sea transform fault system, Jordan. *Journal of Seismology*, 10, 415-430.
- Hinzen, K.G., Schwellenbach, I., Schweppe, G. and Marco, S., 2016, Quantifying earthquake effects on ancient arches, example, the Kalat nimrod fortress, dead sea fault zone. *Seismol. Res. Lett.*, 87, 751-764.
- Hwang, S.I., 2007, The Geomorphic Characteristics of Bulguksa-region and the Earthquake Resistant Structure of the Bulguksa Temple. *Journal of the Korean Geographical Society*, 42, 315-331 (in Korean with English abstract).
- Jeong, J.H., Jung, M.H., Shon, B.H., 2007, Deterioration and Weathering Characteristics of the Stone Cultural Properties in Gyeongju and Surroundings. *The Journal of the Research Institute for Silla Culture*, 30, 243-272

- (in Korean with English abstract).
- Jin, K., Lee, M. and Kim, Y.-S., 2009, Geological study on the collapse of a carved stone Buddha statue in Yeolam valley of Namsan, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 235-247 (in Korean with English abstract).
- Jin, K., Lee, M., Kim, Y.-S. and Choi, J.-H., 2011, Archaeoseismological studies on historical heritage sites in the Gyeongju area, SE Korea. *Quaternary International*, 242, 158-170.
- Kagan, E.J., Agnon, A., Bar-Matthews, M. and Ayalon, A., 2005, Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits. *Geology*, 33, 261-264.
- Karcz, I., Kafri, U. and Meshel, Z., 1977, archaeological evidence for Subrecent seismic activity along the Dead Sea-Jordan Rift Nature, 269, 234-235.
- Karcz, I. and Kafri, U., 1978, Evaluation of supposed archaeological damage in Israel. *Journal Archaeological Science*, 5, 237-253
- Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-H., 2007, Structural Characteristics of Quaternary reverse faulting on the Eupcheon Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 311-333 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Khim, J.H. and Jin, K., 2011, Interpretation of the rupture history of a low slip-rate active fault by analysis of progressive displacement accumulation: an example from the Quaternary Eupcheon Fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society, London*, 168, 273-288.
- Kim, Y.-S., Park, J.Y., Kim, J.H., Shin, H.C. and Sanderson, D.J., 2004, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, south-east Korea. *The Island Arc*, 13, 403-415.
- Klinger, Y., Avouac, J.P., Dorbath, L., Abou-Karaki, N. and Tisnerat, N., 2000, Seismic behaviour of the Dead Sea Fault along Araba Valley, Jourdan. *Geophysical Journal International*, 142, 769-782.
- Korea Meteorological Administration, 2001, 1978~2000 Earthquake Observation Report, Seoul, Korea. 154 p (in Korean).
- Korea Institute of Geology, Mining & Materials (KIGAM), 1998, An Investigation and Evaluation of Capable Fault: Southeastern Part of the Korean Peninsula. 301 p (in Korean with English abstract).
- Korea Power Engineering Company (KOPEC), 2002, The preliminary site assessment report (PSAR) for the new Weolsung reactors 1 and 2, 251 -281, unpublished report.
- Korjenkov, A.M. and Mazor, E., 2003, Archaeoseismology in Mamshit (Southern Israel): cracking a millennia-old code of earthquakes preserved in ancient ruins. *Archäologischer Anzeiger*, 2, 51-82.
- Korjenkov, A.M. and Mazor, E., 2013, The features of the earthquake damage patterns of ancient city ruins in the Negev Desert, Israel. *Geotectonics*, 47, 52-65.
- Lacave, C., Koller, M.G. and Egozcue, J.J., 2004, What can be concluded about seismic history from broken and unbroken speleothems?. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 431-455.
- Landgraf, A., Kübler, S., Hintersberger, E. and Stein, S. (eds.), 2017, Seismicity, Fault Rupture and Earthquake Hazards in Slowly Deforming Regions. *Geological Society, London, Special Publication*, 432, 1-12.
- Lee, C.H., Choi, S.W., Han, K.S. and Won, K.S., 2001, Approach to Conservation Sciences and Mechanical Deteriorations of the Seoagdong Standing Triple Buddha, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 611-627 (in Korean with English abstract).
- Lee, K., 1998, Historical earthquake data of Korean. *Journal of the Korea Geophysical Society*, 1, 3-22 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. and Yang, W.-S., 2006, Historical seismicity of Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 846-855.
- Liu, M., Stein, S. and Wang, H., 2011, 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differs from those at plate boundaries. *Lithosphere*, 3, 128-132.
- Marco, S., 2008, Recognition of earthquake-related damage in archaeological sites: Examples from the Dead Sea fault zone, *Tectonophysics*, 453, 148-156.
- Marco, S., Hartal, M., Hazan, N., Lev, L. and Stein, M., 2003, Archaeology, history, and geology of the A.D. 749 earthquake, Dead Sea transform. *Geology*, 31, 665-668.
- Marco, S., Agnon, A., Ussishkin, D. and Finkelstein, I., 2006, Megiddo Earthquakes. In: Ussishkin, D., Finkelstein, I. (Eds.), *Megiddo*, vol. IV, 568.
- Martín-González, F., 2018, Earthquake damage orientation to infer seismic parameters in archaeological sites and historical earthquakes. *Tectonophysics*, 724-725, 137-145.
- Meghraoui, M., Gomez, F., Sbeinati, R., derWoerd, J.V., Mouty, M., Darkal, A.N., Radwan, Y., Layyous, I., Najjar, H.A., Darawcheh, R., Hijazi, F., Al-Ghazzi, R. and Barazangi, M., 2003, Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 35-52.
- Monaco, C. and Tortorici, L., 2004, Faulting and effects of earthquakes on Minoan archaeological sites in Crete (Greece). *Tectonophysics*, 382, 103-116.
- Niemi, T.M., Zhang, H., Atallah, M. and Harrison, B.J.,

- 2001, Late Pleistocene and Holocene slip rate of the Northern Wadi Araba fault, Dead Sea Transform, Jourdan. *Journal of Seismology*, 5, 449-474.
- Rajendran, C.P., Rajendran, K., Sanwal, J. and Sandiford, M., 2013, Archaeological and historical database on the medieval earthquakes of the central Himalaya, ambiguities and inferences. *Seism. Res. Lett.*, 84, 1098-1108.
- Ree, J.-H., Lee, Y.-J., Rhodes, Ed J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S. and Lee, B., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: Age constraint by optically stimulated luminescence dating. *The Island Arc*, 12, 1-12.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Giner-Robles, J.L., Silva, P.G., Garduño-Monroy, V.H. and Reicherter, K., 2011, A comprehensive classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in archaeoseismology: Application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. *Quaternary International*, 242, 20-30.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P.G., Pérez-López, R., Giner-Robles, J.L., Martín-González, F. and Perucha, M.A., 2013, Preliminary intensity correlation between macroseismic scale (ESI07 and EMS98) and Earthquake archaeological effects (EAEs). In: *Proceedings of the 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology (PATA)*, October 2013, Archen, Germany, p. 14.
- Seo, J.-M., Choi, I.-K. and Rhee, H.-M., 2009, A study of the historical earthquake catalog and Gutenberg-Richter parameter values of the Korean Peninsula. *Nuclear Engineering and Technology*, 42, 55-64.
- Silva, P.G., Michetti, A. and Guerrieri, L., 2015, Intensity Scale ESI 2007 for assessing Earthquake Intensities. *Springer Encyclopaedia of Earthquake Engineering*, Berlin (Germany), Springer-Verlag, 1-20, 10.1007/978-3-642-35344-4_31.
- Sinopoli, A., Corradi, M. and Foce, F., 1997, Modern formulation for preelastic theories on masonry arches. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*, 123, 204-213.
- Sintubin, M., 2011, Archaeoseismology: Past, present and future. *Quaternary International*, 242, 4-10.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. and Davis, I., 2008, *At Risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters* (2nd Edition). Routledge, New York, 275 p.
- Yagi, Y. and Fukahata, Y., 2011, Rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake and absolute elastic strain release. *Geophysical Research Letters*, 38, L19307.
- Zhang, B.C., Liao, Y.H., Guo, S.M., Wallace, R.E., Buckman, R.C. and Hanks, T.C., 1986, Fault Scarps Related to the 1739 Earthquake and Seismicity of the Yinchuan Graben, Ningxia Huizu Zizhiqu, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76, 1253-1287.

Received : February 24, 2020

Revised : March 27, 2020

Accepted : March 27, 2020