

경주 남산 열암곡 마애여래입상 붕괴에 대한 지질학적 접근

진광민 · 이민정 · 김영석[‡]

부경대학교 환경지질과학과 지질구조재해연구실

요 약

연구지역인 경주는 양산단층과 울산단층이 만나는 곳에 위치하고 있으며, 최근 양산단층과 울산단층 주변에서는 20여개의 제4기 단층이 보고되어 이 단층들의 활성도와 고지진과의 연관성이 주목을 받고 있다. 역사적 기록으로 볼 때 경주지역에서는 역사시대에도 많은 인명과 문화재가 대규모 지진에 의해 피해를 받았음을 알 수 있다. 최근(2007년 5월) 경주 남산의 열암곡에서는 석불좌상 정비사업 중 8세기 후반의 것으로 추정되는 마애여래입상(추정 무게 70 t)이 전복된 상태로 발견되었다. 따라서 이번 연구에서는 이 마애여래입상의 붕괴가 779년의 경주지진과 같은 지질재해와 연관될 가능성을 검토하고, 이 불상의 원위치와 방향을 추정하였다. 이를 위하여 조사지역 주변에 발달하는 단열군과 마애여래입상이 새겨진 암반에 존재하는 단열면들을 비교 검토하였다. 그 결과 마애여래입상은 넘어지면서 원래의 위치에서 반시계 방향으로 약 20°정도 회전하여 현재의 자리에 위치하게 된 것으로 해석되었다. 비록 이 불상의 붕괴가 779년의 경주지진과 직접적인 연관이 있는지는 현재로서 단정할 수 없지만 불상의 풍화도, 주위 암석의 분포상태, 그리고 산사면의 형태 등으로부터 이 불상은 제작된 지 오래되지 않아 산사태나 지진 등의 갑작스런 힘에 의해 넘어져 현재에 이른 것으로 판단된다.

주요어: 마애여래입상, 문화재, 고지진학, 고고지진학, 경주, 지진, 단열분석

Kwangmin Jin, Minjung Lee and Young-Seog Kim, 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. v. 45, no. 3, p. 235-247

ABSTRACT: The recent recognition of many Quaternary faults near the Yangsan and Ulsan faults has resulted in several new studies on the paleoseismicities and present activities of these faults. According to historical records, earthquakes in the Gyeongju area(i.e., between the Yangsan and Ulsan faults) have resulted in significant human casualties and extensive damage to properties. While repairing a seated Buddha statue in Yeolam valley, Gyeongju, during May, 2007, a stone Buddha statue with an inferred weight of about 70 tons was discovered in a fallen position. The fallen Buddha statue has an artistic style that is consistent with other statues that were constructed during the late 8th century. The interpreted carving age of this statue coincides with the 779 A.D. earthquake in the Gyeongju area. Hence, this study examines the reason for the falling of the Buddha statue and the original location and facing direction of the statue. For this purpose, fracture patterns were measured around the fallen Buddha statue and compared with fracture patterns in surrounding outcrop. Both fracture pattern sets match if the fallen Buddha statue is rotated 20° clockwise. In other words, the statue fell with a 20° counterclockwise rotation. Although the exact timing relationship between the fallen statue and any specific earthquake is difficult to prove, it is probable that an episodic force, such as a landslide or earthquake, was responsible for the damage to the statue. Supporting evidence for this style of deformation includes the weathering condition of the statue, the distribution of surrounding blocks of rock, and the geomorphologic shape of the slope surrounding the Buddha statue.

Key words: Buddha statue, historical heritage, paleoseismology, archaeoseismology, Gyeongju, earthquake, fracture analysis

(Kwangmin Jin, Minjung Lee and Young-Seog Kim, GSGR, Department of Environmental Geosciences, Environmental and Marine Sciences and Technology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea)

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

1. 서 론

최근 세계적으로 대규모 지진에 의한 많은 피해가 발생하고 있다. 특히 일본 고베 지진(1995년 1월 17일, $M=7.2$), 대만 치치 지진(1999년 9월 21일, $M=7.6$), 인도네시아 수마트라 지진(2004년 12월 26일, $M=8.5$), 일본 니가타현 지진(2007년 7월 16일, $M=6.8$), 중국 쓰촨성 지진(2008년 5월 12일, $M=7.9$)과 같은 대규모 지진은 많은 인명과 재산의 피해를 가져왔다. 이와 같이 대규모 지진에 의해 막대한 규모의 인명과 재산피해가 발생함에 따라 지진에 대한 사회적 관심이 점차 증가하고 있으며, 이에 대한 지진학적, 지체구조적, 고지진학적 연구들이 활발히 진행 중에 있다(e.g. Steven *et al.*, 1998; Fukushima *et al.*, 2000; McGarr and Fletcher, 2002; Lee *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003; Ota *et al.*, 2005).

또한, 최근에는 지진재해에 대한 연구의 한 방법으로 단층 주변의 문화재파괴나(e.g. Ambraseys, 1973, 2006; Caputo and Helly, 2005; Marco, 2008; Decker *et al.*, 2006) 종유석의 파괴 흔적(e.g. Kagan *et al.*, 2005) 등을 이용하여 지진의 특성을 이해하는 연구들도 활발하게 진행하고 있다. 특히 이러한 연구는 고대 유적이 많고, 큰 지진의 기록이 많이 남아 있는 지진활동이 활발한 지역 주변인 그리스(e.g. Koukouvelas *et al.*, 2001; Monaco and Tortorici, 2004; Caputo and Helly, 2005), 이탈리아(e.g. Galadini and Galli, 2001; Guidoboni *et al.*, 2002; Guidoboni, 2003), 터키(e.g. Hancock and Altunel, 1997) 그리고 이스라엘(e.g. Marco, 2008) 등의 지역에서 활발히 수행되고 있다. 이러한 고고지진학(archaeoseismology)은 과거 지진에 의해 피해를 입은 문화재 지역을 연구하는 학문으로 역사기록이나 문화재를 지질학적 접근방법을 이용하여 연구하는 분야이다. 이러한 연구는 문화재가 만들어진 시기를 알 수 있는 경우 이후에 발생한 지진에 의한 피해를 통해 지진재해의 특성과 규모 그리고 시기를 알 수 있어 지진재해예측을 위한 연구에 매우 유용하다(e.g. Ambraseys, 1973; Karcz *et al.*, 1977; Karcz and Kafri, 1978). 따라서 이런 고고지진학적 연구는 역사시대의 대규모 지진과 미래 지진의 특성을 이해하는데 매우 중요한 자료를 제공한다(Marco, 2008).

우리나라는 유라시아판의 연변부에 위치하여 위에 언급한 나라들과는 달리 대규모 지진이 상대적으로 자주 발생하지는 않지만 최근의 활성단층(e.g. 한국자원연구원, 1998)과 고지진학적 연구(e.g. 김영석 외, 2004; 기원서 외, 2007; Kim *et al.*, 2004; Kim *et al.*, in review)에 의하면 우리나라로 주기는 길지만 지표파열을 수반한 대규모 지진들이 제4기 동안에도 발생하였음이 보고되고 있다. 특히 경주지역은 한반도 남동부의 대규모 구조선인 양산단층과 울산단층이 교차하는 곳에 위치하고 있으며(Okada *et al.*, 1994; 류충렬 외, 1996; 이봉주 외, 1999; 경재복과장태우, 2001; 장태우, 2001; 이용휘, 2003; 박준영, 2004), 최근에는 양산단층과 울산단층 주변에서 20여개가 넘는 제4기 단층들이 보고되어 지진에 대해 상대적으로 취약한 지역으로 여겨지고 있다(Lee and Jin, 1991; Kyung and Okada, 1995; 장태우, 2001; 김영석과 진광민, 2006). 그리고 역사기록에도 779년 경주지진(그림 1; $M=6.7$ 추정)으로 인해 약 100여명이 사망(Lee and Na, 1983; Lee and Jin, 1991; 이기화, 1998)한 것으로 기록되어 있으며, 울산지진(1643년 $M=7.0$ 추정)을 비롯한 비교적 큰 지진들이 한반도 남동부를 중심으로 종종 발생하고 있는 것으로 보고되었다(국립방재연구소, 1999). 그러나 우리나라에서는 1905년 이후 설치된 지진계에 의한 계기지진의 기록이 미약하다는 이유로 지진의 안전지대로 인식되어 대규모 지진에 대한 연구와 관심이 상대적으로 부족한 상태이다. 특히 문화재에 대한 접근은 문화재의 보존과 복원에 관련된 연구만 활발히 진행될 뿐, 고고지진학적 관점에서의 접근을 통한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

최근(2007년 5월) 경주 남산 열암곡에서 넘어진 마애여래입상이 발견되었다(2007년 9월 11일자 조선일보 참조). 이 마애여래입상이 발견된 지역은 풍화암반층으로 발견당시 이 불상은 아래쪽으로 약 40-50°정도 경사진 사면에 불안정한 형태를 유지하고 있었다(국립경주문화재연구소, 2007). 마애여래입상의 고고미술학적 양식은 8세기 후반의 양식으로 추정되었으며, 입상의 풍화 상태로 보아 이 불상은 제작 이후 얼마 지나지 않아 넘어져 현재의 상태에 이른 것으로 추정되고 있다. 그런데 공교롭게도 이 불상이 제작된 것으로 추정되는 시기는 779년 경주에 대규모 지진이 발생한 시기와 잘 일치하고 있

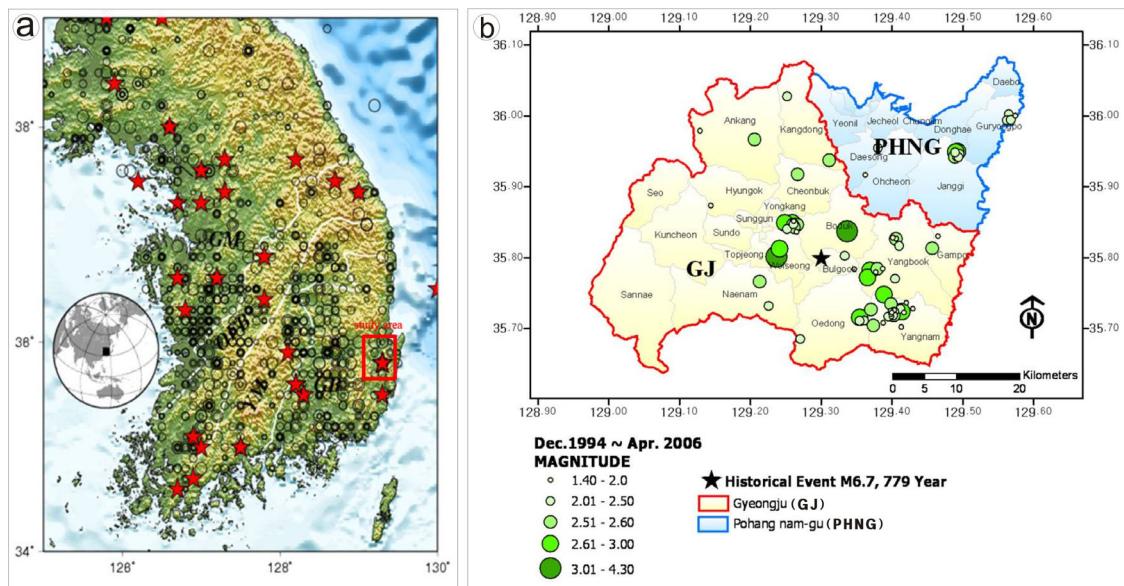


Fig. 1. Distribution map of historical seismicity in Korea and Gyeongju area (modified from Kim *et al.*, 2007).

다. 따라서 이번 연구에서는 한반도 내에서 지진의 발생 빈도가 상대적으로 높고 지진의 역사적 기록이 많은 경주지역에 분포하는 석조문화재를 중심으로 지진으로 인한 문화재 파괴의 가능성은 검토하고, 특히 경주 남산에 위치하는 마애여래입상과 주변의 단열특성을 이용하여 불상의 원위치를 추정하는 연구를 수행하였다.

2. 연구지역

2.1 지질개요

연구지역인 경주는 한반도 남동부 경상분지에 속하는 지역으로 백악기 퇴적암을 기반암으로 이를 관입한 제3기의 관입암류들로 구성되어 있다(김남장 외, 1971; 그림 2). 연구대상인 붕괴된 마애여래입상이 위치하는 경주 남산지역은 각섬석 흑운모 화강암, 흑운모 화강암 그리고 알칼리 화강암으로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 1995). 특히 마애여래입상이 위치하는 지역의 암석은 알칼리 화강암으로 구성되어 있으며, 마애여래입상은 이 알칼리 화강암에 조각된 것으로 판단된다. 알칼리 화강암은 우백질의 조립질 화강암으로 알칼리 장석, 석영, 흑운모, 알칼리 각섬석, 형석 등을 주 구성광물로 포함하며, 저어콘, 인회석, 자철석 등의 부수광물로 구성된다(좌용

주, 2009).

연구지역인 경주 남산은 양산단층과 울산단층이 교차하는 지점의 남동쪽에 위치하고 있다(그림 2, 3). 이 두 단층은 형태적 유사성에 기초하여 λ -단층 (Du and Aydin, 1995)으로 분류되었으며(박준영, 2004), λ -단층은 기존의 단층에 새로운 단층이 사교 하며 성장하여 결합될 때 만들어지는 단층으로 단층의 형태가 λ 형태를 보여서 붙여진 이름으로 야외에서 소규모 단층으로도 보고 된 바 있다(Kim *et al.*, 2000). 그리고 기존 연구자들은 양산단층과 울산단층 주변 지역에서 상대적으로 높은 제4기 단층들의 발달빈도로부터(e.g. 경재복, 1999; 장태우, 2001; 최

Table 1. Numerical comparison of ruined temples, repaired pagodas, ruined pagodas, and stone statues between Gyeongju city and Namsan area. (Gyeongju National Research Institute of Cultural Heritages, 2004)

Cultural properties	Region		(unit: ea.)
	Namsan	Gyeongju (except Namsan)	
Ruined temples	147	67	
Repaired pagodas	15	16	
Ruined pagodas	81	13	
Stone Buddha statues	118	30	

원학, 2003; 김영석과 진광민, 2007, 최위찬과 최성자, 2007) 이 지역이 다른 지역에 비해 상대적으로 활동성이 높은 지역인 것으로 주장하였다(류충렬 외, 1996; 장태우, 2001; Kim *et al.*, 2000).

2.2 경주 남산의 문화재 분포

13세기에 쓰여진 삼국유사에 의하면 불교가 전래된 이후에 경주 남산은 불교의 성산으로 여겨져 왔으며, 불상과 석탑들이 백성들을 지켜준다고 믿어 많은 불상과 석탑들을 건립하였다(경주남산연구소, 2009). 그리고 국립경주문화재연구소에 의하면 2004년 1월 현재 남산에 분포하는 문화재(복원탑, 폐탑, 석조불상, 옛 절터 외)는 729개이며, 그 중 옛 절터가 147곳, 불상이 118점, 석탑(복원, 폐탑 포함)이 96점,

석등이 22점이다(그림 3; 표 1). 특히 남산지역은 경주지역 전체와 비교해도 신라시대의 문화재가 상대적으로 많이 분포하고 있으며, 파괴, 복원된 석조문화재와 옛 절터도 많이 분포하고 있음을 보여 준다(표 1; 경주남산연구소, 1997).

3. 연구내용

3.1 조사지역

열암곡 마애여래입상은 경주 남산국립공원의 남쪽에 위치하는 북동방향의 열암곡 부근 해발고도 약 380 m, GPS 좌표는 북위 $35^{\circ}45'28.9''$, 동경 $129^{\circ}14'22.5''$ 에서 발견되었다(그림 2, 3). 특히 마애여래입상이 위치하는 열암곡 상부는 계곡이 좁으며 상대적으로

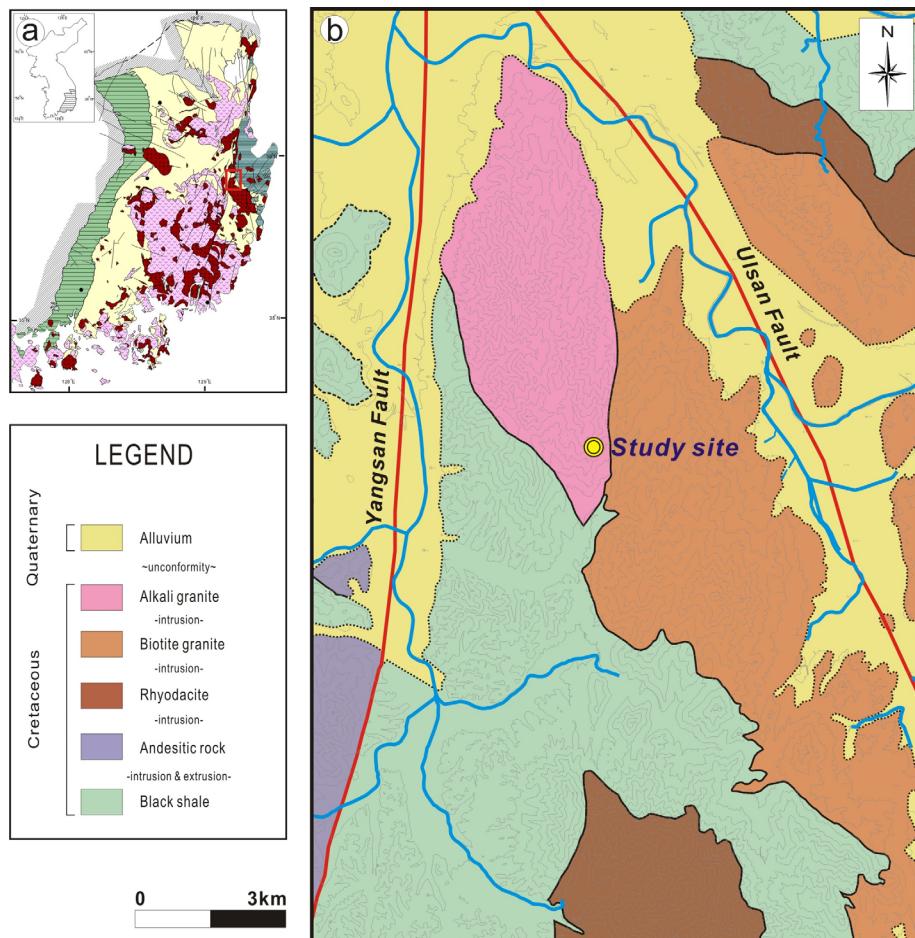


Fig. 2. Location and geological maps of the study area (modified from Kim *et al.*, 1971; Lee, 2000; Jwa, 2009).

비탈진(약 40-50°) 지형을 이루고 있다. 그리고 주변 지역에는 큰 암석들이 사태처럼 흘어져 내려와 있으며, 단열로 인해 암괴 형태로 발달된 암석들이 느슨하고 불안정하게 분포하고 있음을 보여 준다(그림 5a, b). 넘어진 마애여래입상의 크기는 너비 250 cm, 두께 190 cm, 높이 620 cm이며, 추정무게는 약 70톤으로 상당히 큰 불상으로 인위적인 파괴는 불가능한 규모로 판단된다(그림 4). 그리고 이 입상의 북서쪽으로 약 20 m 떨어진 지점에는 또 다른 파괴된 불상인 열암곡석불좌상이 있다(그림 5c, d). 이 석불좌상은 현재는 복원이 이루어졌지만, 불두가 유실된 상

태였으며, 대좌의 하대석은 심하게 훼손되어 있고, 대부분의 부재들이 파손 또는 유실된 상태로 발견되었다(국립경주문화재연구소, 2007). 비교적 큰 규모의 이 두 불상이 인접하여 존재하나 모두 위치가 이동되고 붕괴된 상태로 발견되었다는 것은 매우 흥미로운 점이며 시사하는 바가 있다고 할 수 있다.

3.2 단열패턴 분석

경주 남산 일대는 화강암과 관련된 특징적인 지형인 절리(joint), 토르(tor), 핵석(core-stone), 타포니(tafoni) 등이 관찰되며, 이는 지질학적인 구조운

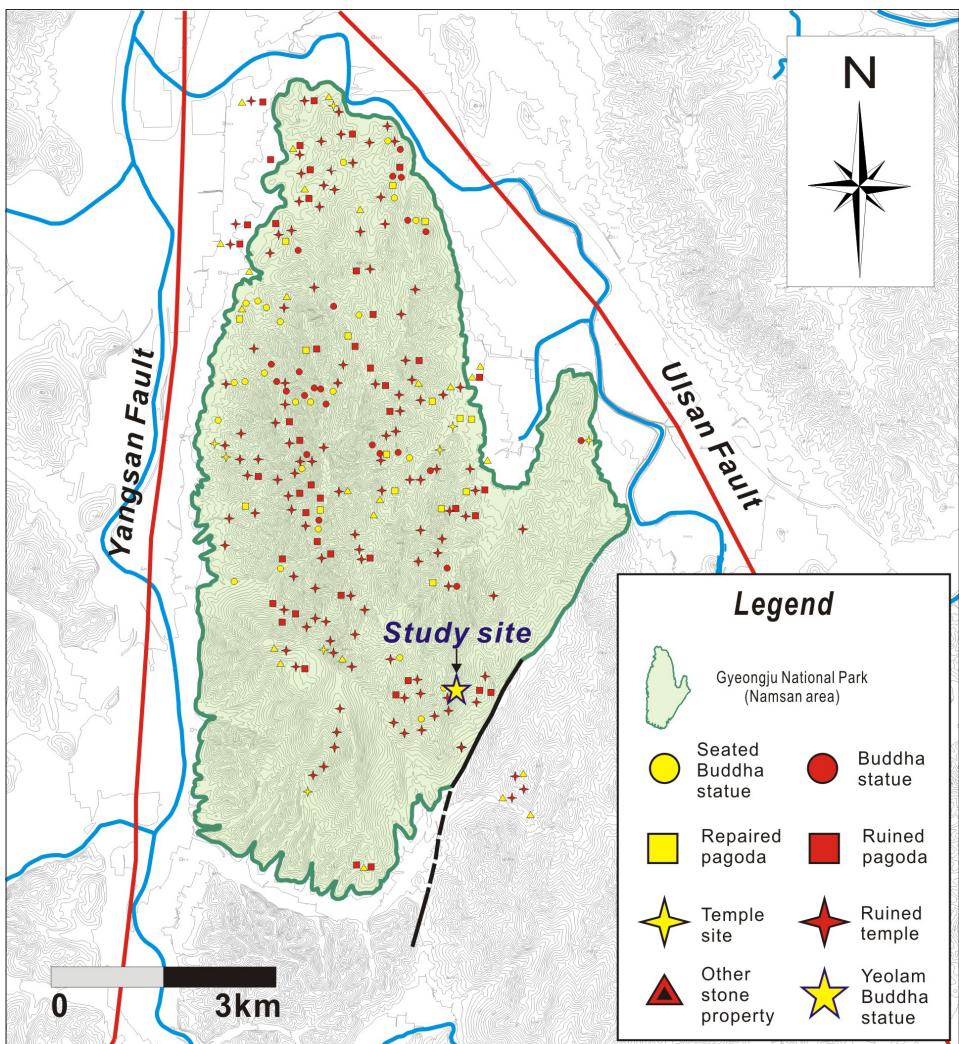


Fig. 3. Distribution map of the cultural stone heritages and ruined temples in Namsan area. Note that yellow star indicates the location of the fallen Buddha statue (modified from Silla Culture Center, 2004).

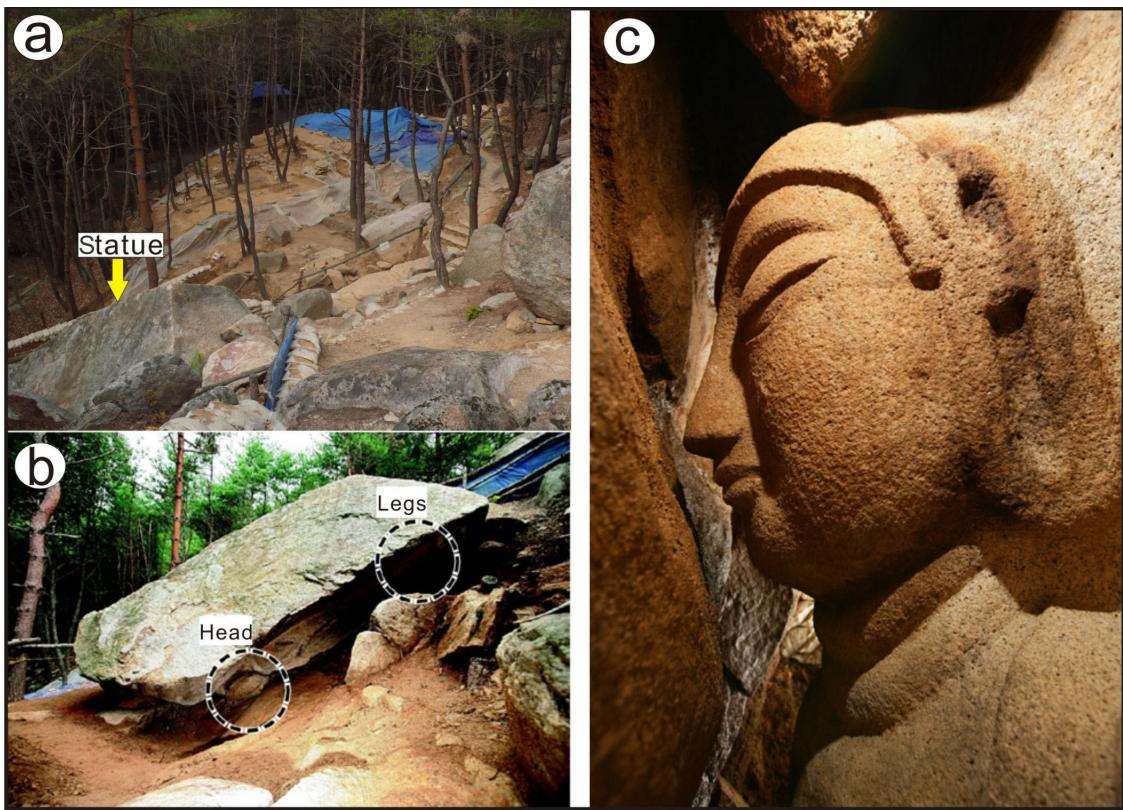


Fig. 4. a) & b) Overview of the study area showing unstable slope and the fallen Buddha statue. c) Close-up photograph of the face of the Buddha statue (from Chosun Daily Newspaper, 2007).

동과 기후환경의 영향으로 형성된 것으로 보고 되었다(조기만과 좌용주, 2004). 좌용주(2009)는 용장사지 석탑과 선각육존불, 석조여래좌상 등의 석불들을 화강암으로 된 암벽, 토르, 또는 핵석들에 깨거나 새겨서 만든 것으로 해석하였다.

남산 열암곡마애여래입상이 새겨진 암석과 주변의 암석은 동일한 알칼리 화강암(좌용주, 2009)이며, 마애여래입상의 크기와 위치로 볼 때 이 불상은 조사지역 주변에 잘 노출된 자연암반에 새겨 만들어진 것으로 판단된다. 따라서 이 불상의 원래 위치와 방향을 알아보기 위하여 넘어진 마애여래입상 주변 지역의 단열패턴과 불상을 새긴 암반 내의 단열패턴을 비교하는 작업을 실시하였다(그림 6). 이 불상이 발견된 주변 지역에서는 매우 규칙적인 단열의 패턴이 발달하고 있어서 이 불상 발견위치에서 약 20 m 상부에 위치하고 단열의 발달이 명확한 대표적인 노두를 선정하여, 1 m × 1 m 단위로 격자를 설정하여 단열분석을 실시하였다(그림 7). 이를 위해 야외에서

의 스케치 작업과 실내에서의 사진합성 및 컴퓨터 스케치 작업을 통하여 단열군들의 발달형태를 해석하였다. 그리고 이를 넘어진 마애여래입상 내에 발달하는 단열들과 비교 분석하였다.

마애여래입상 주변의 노두에서 총 81개의 단열들을 측정하였고, 이 단열들을 크게 다섯 개의 단열군으로 분류하였다(그림 6, 7). 이 단열군들은 EW/65°N (A), N12°E/79°SE (B), N63°W/55°NE (C), NS/82°W (D)와 거의 수평에 가까운 판상절리 N13°W/8°SW (E) 등이다. 이 단열군들 중에서 우세하게 나타나는 5개의 단열군에 대해 임의로 A, B, C, D, E 단열로 각각 명명하였다. 특히 판상절리의 방향성을 유추하기 위해 주변의 노두에서 32개의 단열들을 측정하였으며, 그 평균값은 N13°W/8°SW로 나타났다. 또한 N63°W/55°NE 방향의 단열은 2차적인 단열들의 발달형태로 볼 때 좌수향의 운동감각을 지시하고 있다(그림 7). 이렇게 측정된 단열군들의 분포특성을 알아보기 위하여 등면적투영망에 투영하고, 블록다



Fig. 5. a) & b) Overviews of the fallen rocks and outcrops around the fallen Buddha statue. c) & d) Another destroyed seated Buddha statue near the fallen Buddha statue.

이아그램으로 모식화 하였다(그림 7, 8). 이렇게 모식화된 그림에서 보여주는 바와 같이 이러한 단열면의 결합에 의해 이 마애여래입상 주변의 암석들이 특징적인 암괴 형태로 발달한 것으로 해석 된다(그림 8). 따라서 이러한 암괴화로 인해 노출된 수직의 암면은 이러한 불상을 조각하기에 적절한 조건을 제공하였던 것으로 판단된다.

3.3 마애여래입상의 불연속면 복원

넘어진 마애여래입상을 둘러싸고 있는 단열면들은 전체적으로 비교적 매끈하고 평평한 면이며, 이런 평평한 면들에는 정이나 망치를 이용하여 인위적으로 가공한 흔적이 관찰되지 않는다(그림 4a, b). 이는 마애여래입상이 자연적으로 노출된 암반에 조각된 것을 지시하는 것으로 해석된다. 그리고 마애여래입상의 크기(너비 250 cm, 두께 190 cm, 높이 620

cm)와 무게(추정무게 약 70 t)로 볼 때 다른 지역에서 제작되어 이동되어 왔을 가능성은 매우 희박한 것으로 판단된다. 따라서 이 불상을 이 지역의 자연 암반에 조각하였다고 가정하고, 그 정확한 원인은 아직 알 수 없지만 자연적인 어떤 힘에 의해 이 불상이 붕괴되었다고 가정하여, 이 불상의 원래 위치와 방향을 복원하기 위하여 이 마애여래입상 내에 발달하는 단열과 이 불상 주위에 존재하는 암석에 발달하는 단열패턴을 비교하는 작업을 수행하였다. 이는 이 불상을 새긴 암석이 멀리서 이동된 암석이 아니기 때문에 불상을 새긴 암석 내에 발달된 단열의 패턴이 주위에 존재하는 암석에서의 단열패턴과 유사할 것이라는 기본적인 가정 하에서 실시되었다. 이를 위해 이 불상을 둘러싸고 있는 불연속면과 불상 내에 발달하는 단열(절리, 소단층, 세맥)의 주향과 경사를 측정하여 주위 암석에 발달하는 단열의 패턴

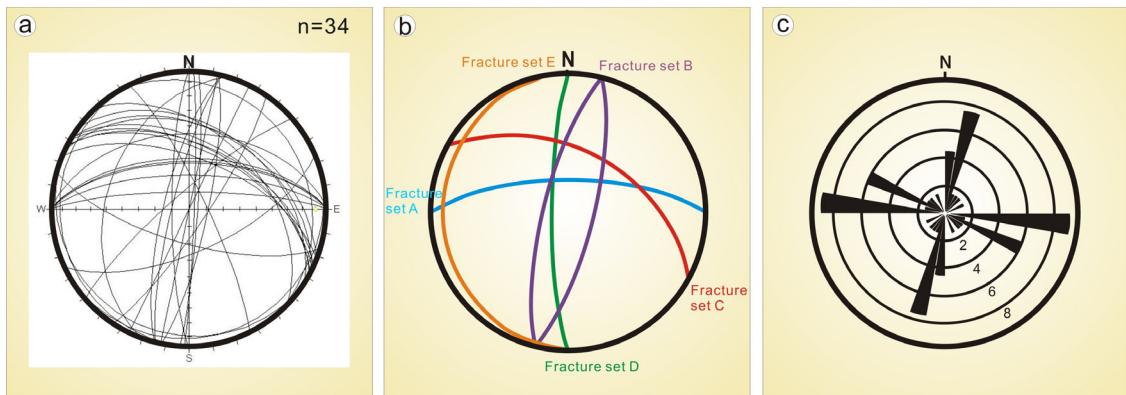


Fig. 6. Equal-area stereographic projections of the fractures developed in outcrops around the fallen Buddha statue. a) Distribution of all measured fractures. b) Major fracture sets developed in outcrops around the statue. c) Rose diagram for all fractures shows predominant orientations of the fractures.

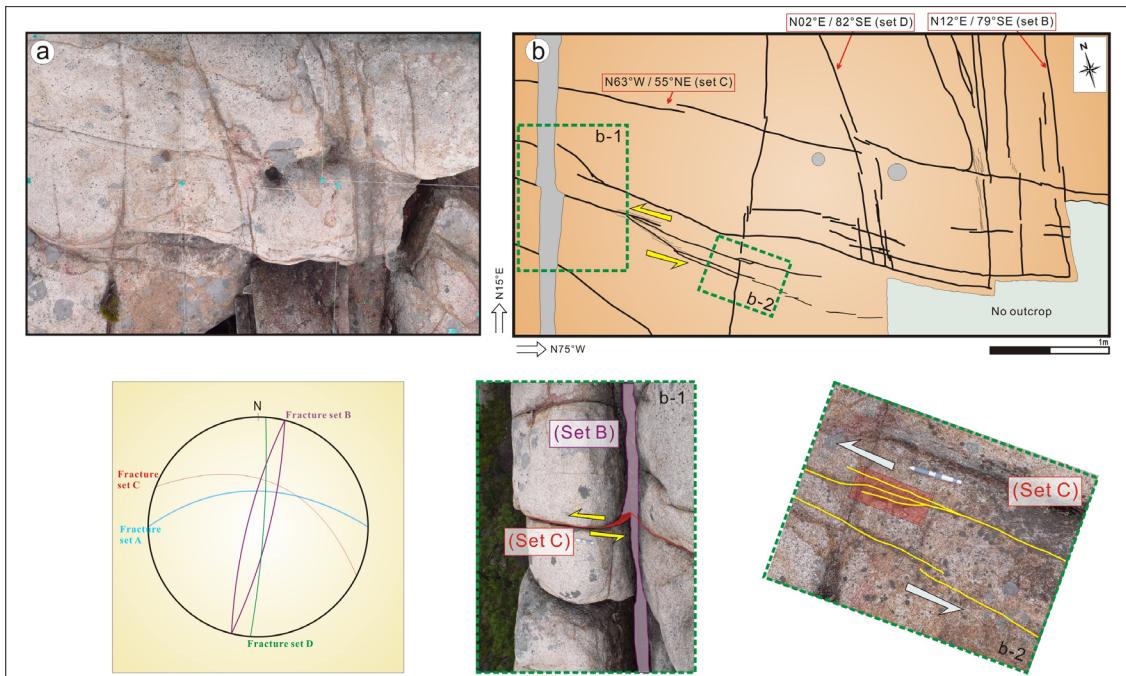


Fig. 7. Detailed grid map on the horizontal plane of an outcrop around the fallen Buddha statue. a) Photo mosaic of the horizontal plane. b) Sketch map of the structural elements and locations of sense indicators of the horizontal section. Note that the equal-area stereographic projection shows fracture sets developed in the horizontal plane. b-1 & b-2; slip sense indicators on the horizontal plane. Set C cross-cuts set B indicating left-lateral slip.

과 비교하고자 하였다. 마애여래입상은 입상이 조각된 면을 포함하여 총 6개의 면으로 구성되어 있다. 현재 상태에서 바닥면의 주향과 경사는 $N36^{\circ}W/60^{\circ}NE$, 뒷면은 $N24^{\circ}E/36^{\circ}NW$, 남측면은 $N77^{\circ}W/58^{\circ}SW$, 북측면은 $EW/68^{\circ}N$ 이다(그림 9). 그러나

마애여래입상이 조각된 면은 문화재 보호를 위해 보호자로 막아두었기 때문에 측정할 수 없었다. 마애여래입상이 앞으로 넘어진 상태이기 때문에 이렇게 측정된 자료를 바탕으로 바닥면을 판상절리의 우세한 방향인 $N13^{\circ}W/8^{\circ}SW$ 에 일치시키고, 마애여래

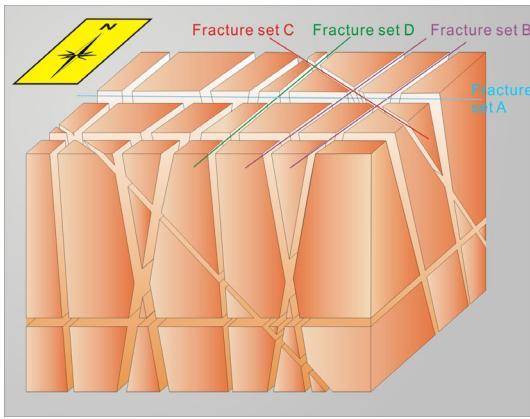


Fig. 8. Schematic block diagram of the fracture patterns developed around the fallen Buddha statue.

입상이 조각된 면이 정면을 향하도록 하여 입상을 세운다고 가정하여 마애여래입상의 원래 방향을 복원하는 작업을 실시하였다(그림 9). 마애여래입상의 수평 단열면과 불상의 바닥면을 일치 시켰을 때 복

원된 단열의 방향성은 불상의 뒷면은 $N72^{\circ}\text{E}/80^{\circ}\text{NW}$, 남측면은 $N24^{\circ}\text{W}/74^{\circ}\text{SW}$ 와 북측면은 $N80^{\circ}\text{W}/70^{\circ}\text{NE}$ 로 복원되었다(그림 9). 이들을 등면적투영망에 도시하여 주변 암석에 발달하는 단열군들의 방향들과 비교한 결과 마애여래입상을 둘러싸고 있는 단열들을 시계방향으로 약 20° 회전 시켰을 경우, 주변암석에 발달한 단열군들의 방향과 비교적 잘 일치함을 보여주었다(그림 9). 따라서 이는 마애여래입상이 넘어질 때 원래의 방향에서 반시계 방향으로 약 20° 정도 회전하면서 넘어져 현재의 위치에 남아 있게 된 것으로 해석할 수 있다(그림 9). 따라서 원래의 불상은 현재의 불상을 바로 세웠을 경우보다 약 20° 정도 시계 방향으로 회전된 방향에서 북서쪽 방향을 바라보고 있었던 것으로 해석된다.

이 마애여래입상의 붕괴원인은 이 불상의 크기와 무게로 미루어볼 때 인위적인 파괴나 이동에 의해 붕괴될 가능성은 희박해 보이며, 특히 이 불상의 얼굴부분이 전혀 손상을 입지 않고 온전하게 보존되어

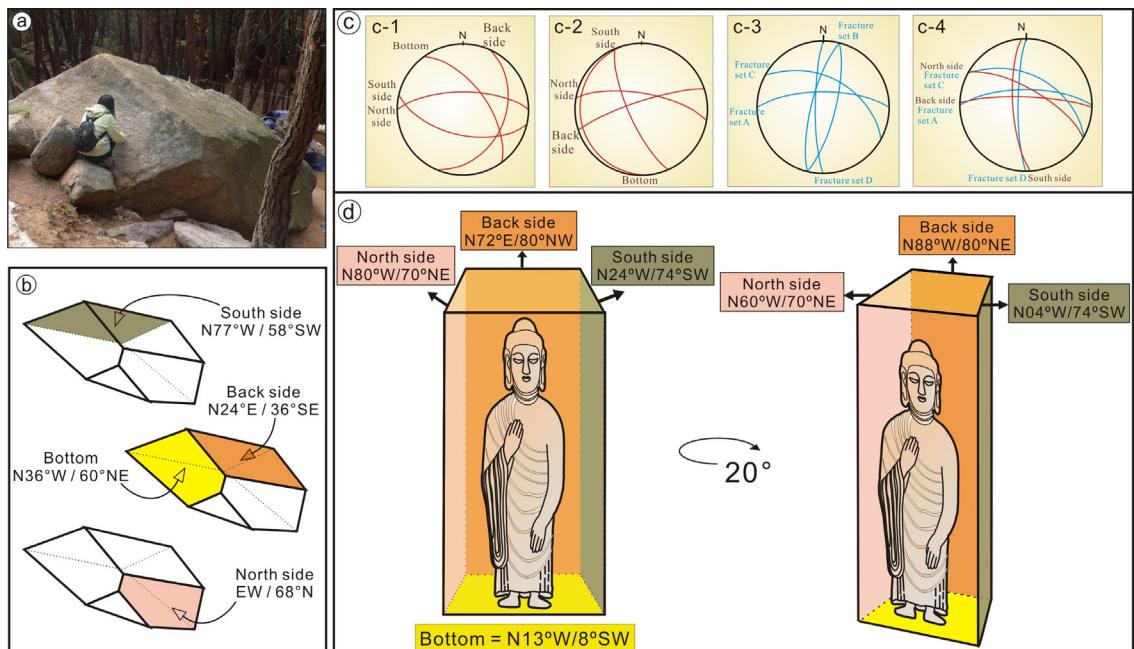


Fig. 9. a) Photograph shows the resting position of the fallen Buddha statue. A geologist is measuring the fractures on the rock block of the statue. b) Measured fracture surfaces surrounding the fallen Buddha statue. c-1) Equal-area stereographic projection for the present-state surrounding surfaces of the fallen statue. c-2) Restored stereographic projection of the surrounding surfaces by matching the sheeting joint with the bottom surface of the statue. c-3) Major fracture sets within *in situ* granite. c-4) The major fracture sets in the statue are rotated 20° clockwise to match with the major fracture sets within *in situ* granite. d) Block diagrams showing upright position in present state (left) and restored position with 20° clockwise rotation (right) based on fracture analysis.

있는 것으로 미루어 인위적 파괴보다는 갑작스런 지진이나 홍수와 같은 큰 자연적인 재해에 수반된 진동이나 산사태 등에 의해 붕괴된 것으로 추정할 수 있다. 또한 현장에서 이 마애여래입상이 발견된 지역 주변의 지형과 암반상태 등을 분석하고, 불상이 새겨진 암반의 규모를 고려하여 이 불상의 원래 위치를 추정한 결과 이 불상은 현재 위치에서 반경 약 12 m 이내의 사면 상부에 존재하는 자연암반에 조각되었던 것으로 판단되었다(그림 5a, b). 만약 이 마애여래입상의 원위치가 현 위치로부터 최대 약 12 m 반경의 상부에 위치하는 노두 부분이라고 가정할 때, 이 마애여래입상의 규모로 보아 인위적인 힘에 의해 이러한 거리를 이동하였을 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다. 즉, 지진이나 집중호우로 인한 산사태와 같은 큰 자연적인 힘에 의해서만 약 70톤 규모의 이러한 마애여래입상이 12 m 정도를 이동할 수 있었을 것으로 판단된다.

4. 토 론

일반적으로 낙석을 유발하는 요인은 크게 인위적 요인과 자연적 요인으로 분류된다. 인위적 요인은 사면질취를 위한 발파 및 진동으로 인한 암석의 균열과 공극 확장 등이 있으며, 이로 인한 낙석은 소규모로 국지적으로 발생한다. 그러나 자연적 요인은 갑작스런 힘에 의한 지진, 간극수압의 증가를 유발 시킬 수 있는 집중호우 그리고 암반에 피로파괴를 발생하는 동결융해 등이 있다. 또한 오랜 시간동안의 암석의 풍화, 응력이완과 식생의 영향 등이 있으며, 위와 같은 자연적 요인에 의해 발생하는 낙석의 규모는 산사태의 범위까지 발생할 수 있다(이종윤과 박형동, 2004). 이 마애여래입상의 경우 불상의 규모가 크고, 채석의 흔적 등이 관찰되지 않으며, 불두의 형상이 거의 완벽하게 원형대로 깨끗하게 보존되어 있는 것으로 볼 때 인위적인 요인에 의해 붕괴되거나 파괴되었다고 해석하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

산사태는 자연사면에서 발생하는 것으로 토층이나 풍화대 또는 토층과 풍화 암면이 집적된 봉적층 등의 미고결 물질들이 집중강우나 지진 등에 의해 전단력이 약화되면서 파괴가 일어나는 현상이다(채병곤 외, 2006). 특히 우리나라의 경우 하절기에 장

마나 태풍을 동반한 집중호우가 많은 기후이기 때문에 산사태로 인한 피해가 많이 발생한다. 넘어진 마애여래입상이 위치하는 열암곡은 사면의 형태가 산사태를 겪은 지형을 보여주고 있고(그림 5a), 산사면이 약 40-50°로 비교적 가파르고, 풍화에 의한 블록화가 많이 진행되어 있기 때문에 지진에 의한 진동 이외에 홍수나 지진에 수반된 산사태에 의해 붕괴되었을 가능성도 있는 것으로 판단된다.

우리나라의 석조문화재는 주로 물리적, 화학적, 생물학적 풍화 등에 의해 훼손되는 것으로 알려져 있다(이찬희 외, 2001). 특히 마애여래입상 주변의 암체들은 절리, 토르, 핵석, 타포니 등의 형태로 발달하고 있어 물리적, 화학적 풍화에 의해 어느 정도 영향을 받은 것으로 생각된다. 그리고 석탑이나 입상 등의 경우 좁은 면적에 하중이 집중되어 오랜 세월 동안 탑의 기초가 부등 침하되어 불안정하게 될 수 있으며, 지진과 같은 갑작스런 흔들림이 발생하면 석재의 풍화나 훼손된 부재들 간의 이완을 촉진시켜 붕괴나 손상을 입을 수 있다(정종현 외, 2005). 이 불상의 얼굴이 거의 풍화가 되지 않고 조각된 상태로 매우 완벽하게 보존하고 있다는 것은 이 불상이 조각된(8세기 후기로 추정) 후 오래되지 않아 이 불상이 붕괴된 것으로 해석할 수 있으며, 이는 이 불상의 붕괴가 779년의 지진이나 그 이후의 큰 지진 또는 집중호우에 수반된 산사태 등의 자연재해와 연관되었을 가능성을 지시하는 것으로 판단된다.

경주지역은 B.C. 57년부터 A.D. 935년까지 약 1,000년 동안 신라의 수도였던 지역으로 신라시대의 많은 문화재를 보존하고 있는 우리나라의 대표적인 고도이다. 역사적 기록에 따르면 경주지역의 주요 문화재들은 지진에 의한 피해로 수리되거나 파괴된 기록들을 많이 갖고 있다. 645년에 완공된 황룡사 9층 목탑은 신라시대와 고려시대를 걸쳐 593년 동안 여섯 차례 중수를 거쳤고, 특히 872년 탑의 재건 당시 보관하였던 칠주본기(872)에 따르면 높은 높이(총 80 m) 때문에 여러 차례 벼락을 맞거나 지진 등에 의해 기울어져 수리하거나 재건하였다는 기록이 남아 있다(문화재연구소, 1982). 불국사 대웅전 앞뜰에 동서로 세워진 두 탑 중 서쪽에 위치하는 석가탑은 751년(경덕왕 10년)에 건립된 통일신라시대의 대표적인 석탑이다. 1966년 석가탑의 해체 및 수리 중 무구정광대다라니경과 함께 발견된 목서지편에 따

르면 이 탑은 1024년과 1038년 경주에서 발생한 지진으로 인해 두 차례나 붕괴되었으며, 또한 지진으로 인해 석가탑뿐만 아니라 불국사 경내의 계단이나 다리가 붕괴되었다는 내용이 기록되어 있다(국립중앙박물관, 1997). 따라서 열암곡마애여래입상도 779년의 지진을 비롯한 이후의 큰 지진에 의한 진동이나 산사태와 관련하여 붕괴되었을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

그러나 우리나라에서는 역사지진자료와 지진과의 연관성에 대한 연구(e.g. 경재복과 이희욱, 1998)가 빈약하며, 특히 고고지진학적 연구방법을 통한 지진에 대한 연구는 시작단계이다. 따라서 경주와 같은 고고학적 유적이 많은 고도에서의 역사적 기록과 문화재에 기록된 지진 피해의 흔적들을 통한 고지진학적 및 고고지진학적 연구는 한반도에서 발생하는 대규모 지진의 특성을 이해하고 미래의 지진재해에 대비하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

연구지역인 경주는 양산단층과 울산단층이 만나는 곳에 위치하며 한반도에서 상대적으로 많은 지진 피해가 역사문화에 기록되어 있으며, 상대적으로 많은 제4기 단층들이 보고된 지역이다. 최근 경주 남산 열암곡에서 마애여래입상이 붕괴된 상태로 발견되었는데, 불상의 조각양식으로 볼 때 제작 시기는 약 8세기 후반인 것으로 추정되었다.

이번 연구에서는 이 불상의 원래 위치와 방향을 추정하기 위하여 조사지역 주변에 발달하는 단열군과 마애여래입상을 둘러싸고 있는 단열면들을 비교 분석하여 입상의 원위치를 복원하는 작업을 수행하였다. 그 결과 마애여래입상은 원래의 위치에서 반시계방향으로 약 20°정도 회전하면서 넘어져 현재의 자리에 위치한 것으로 해석되었다. 비록 입상의 붕괴가 어떤 특정 지진과 직접적인 연관이 있는지를 밝힐 수는 없었지만 불상의 보존상태와 풍화도, 주위 암석의 분포상태 그리고 산사면의 형태 등으로부터 이 입상은 제작된 지 오래되지 않아 산사태나 지진 등의 갑작스런 자연적인 재해와 수반된 힘에 의해 넘어져 현재에 이른 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-5502)의 지원으로 수행되었다. 이 연구를 위하여 야외조사와 실내작업에 많은 도움을 주신 부경대학교 지질구조재해연구실의 최진혁군과 이민주양에게 감사하며, 현장조사 시 많은 도움을 주신 국립경주문화재연구소의 권택장 선생님과 최무희 선생님께도 감사를 드린다. 또한 논문을 꼼꼼히 검토하고 유익한 조언을 해주신 공주대학교의 이찬희 교수님, 전력연구원의 최원학 박사님 그리고 고희재 편집위원님께도 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 국립경주문화재연구소, 2007, 경주 남산 열암곡 석불좌상 유적 현장설명회 자료.
- 국립방재연구소, 1999. 한반도의 지진재해도 작성을 위한 역사피해지진의 평가 및 종합정리.
- 국립중앙박물관, 1997, 새소식.
- 경재복, 1999, 양산단층계 및 울산단층계의 지질활동과 구조. 한국과학재단 KOSEF, 96-0703-05-01-3, 114-163.
- 경재복, 이희욱, 1998, 1997년 6월 26일 경주지진의 진도분석 및 지진 지질학적 의의. 대한지질공학회지, 8, 13-24.
- 경재복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리 일대의 신기단층운동. 지질학회지, 37, 563-578.
- 경주남산연구소, 1997, 경주남산소개.
- 기원서, 김복철, 황재하, 송교영, 김유흥, 2007. 읍천단층의 제4기 역단층운동 특성, 대한지질학회지 43, 311-333.
- 김남장, 권영일, 진명식, 1971, 모량도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소.
- 김상현, 2007, 민족문화유산의 수난과 보존의 역사. 한국문화학회, 27, 1071-1088.
- 김영석, 김현철, 강태섭, 김중휘, 최세운, 박승익, 임병렬, 박천득, 진광민, 2004, 읍천단층 정밀지질조사 최종보고서. KOPEC, 204 p.
- 김영석, 진광민, 2006, 트렌치 단면의 단층변위 자료를 이용해 산정한 유계단층의 지진규모. 지질학회지, 42, 79-94.
- 김영석, 진광민, 2007, 한반도 남동부 제4기 단층들의 단층변위자료를 이용한 지진규모 예측. 한국지질자원연구원, 한국의 지질 논문집 제3호 '한반도 동남부의 제4기 지구조운동', 57-78.
- 류충렬, 양경희, 김인수, 1996, 울산단층 주변의 제4기 단층: 활성단층인가?. 제51차 대한지질학회 추계공동학술발표회초록집, 79-80.
- 문화재연구소, 1982, 황룡사 유적발굴조사보고서I. 문화재관리국, 380 p.
- 박준영, 2004, 경주일대 제3기분지의 구조적 특성 연구. 서

- 울대학교 석사학위논문, 126 p.
- 신라문화원, 2004, 경주 남산 지도.
- 이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료. 지구물리, 1, 3-22.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35, 1-14.
- 이용희, 2003, 울산단층 동편의 신생대 제4기 단층. (미발간) 부산대학교 석사학위논문, 74 p.
- 이종윤, 박형동, 2004, 경주 남산 냉골 상선암 마애여래대좌 상부 암반사면 낙석의 위험성 분석. 한국지구시스템공학회지, 41, 26-38.
- 이찬희, 최석원, 한경순, 원경식, 2001, 경주 서악동 삼존불 입상의 기계적 훼손과 보존과학적 접근. 지질학회지, 37, 611-627.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 조구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 정종현, 정민호, 손병현, 2005, 경주지역 석조문화재 풍화·훼손 특성. 신라문화, 30, 243-272.
- 조기만, 좌용주, 2004, 회강암 지형과 석조문화재에 사용된 석재의 공급지에 관한 연구- 경주지역을 사례로. 한국암석학회, 한국광물학회 2004년도 공동학술발표회 논문집, 102-103.
- 좌용주, 2009, 경주 남산의 지형, 지질 그리고 역사. 제5회 한국암석학회 심포지엄 논문집, 23-29.
- 최위찬, 최성자, 2007, 국내 활성단층 연구: 과거, 현재 그리고 미래. 한국지질자원연구원. 한국의 지질 논문집 제3호 '한반도 동남부의 제4기 지구조운동', 1-32.
- 최원학, 2003, 경주-울산간 신기 지체구조 운동의 연구. (미발간) 서울대학교 이학박사 학위논문, 205 p.
- 채병곤, 김원영, 조용찬, 김경수, 이춘오, 송영석, 2006, 산사태 현장조사 및 예측기법. 대한지질공학회지, 149-184.
- 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.
- Caputo, R., Helly, B., 2005, Archaeological evidences of past earthquakes: a contribution to the Sha of Thessaly, central Greece. *Journal of Earthquakes Engineering*, 9, 199-222.
- Decker, K., Gangl, G., 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.
- Du, Y. and Aydin, A., 1995, Shear fracture patterns and connectivity at geometric complexities along strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 100, 18093-18102.
- Fukushima, Y., Irikura, K., Uetake, T., Matsumoto, H., 2000, Characteristics of observed peak amplitude for strong ground motion from the 1995 Hyogoken nanbu (Kobe) earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 545-565.
- Galadini F., Galli, P., 2001. Archaeoseismology in Italy: case studies and implications on long-term seismicity. *Journal of Earthquake Engineering*, 5, 35-68
- Guidoboni, E., 2003, Comments on "Archaeoseismology in Italy: case studies and implications on long-term seismicity" [J. Earthq. Engrg. 5(1) [2001], pp.35-68]. *Journal of Earthquake Engineering*, 7, 329-335.
- Guidoboni, E., Muggia, A., Mrconi, C., Boschi, E., 2002, A case study in Archaeoseismology. The collapses of the Selinunte temples (Southwestern Sicily): two earthquakes identified. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2961-2982.
- Hancock, P. L., Altunel, E., 1997, Faulted archaeological relics at Hierapolis(Pamukkale), Turkey. *Journal of Geodynamics*, 24, 21-36.
- Kagan, E. J., Agnon, A., Bar-Matthews, M., Ayalon, A., 2005, Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits. *Geology*, 33, 261-264.
- Karcz, I., Kafri, U., Meshel, Z., 1977, archaeological evidence for Subrecent seismic activity along the Dead Sea-Jordan Rift, *Nature*, 269, 234-235.
- Karcz, I., Kafri, U., 1978, Evaluation of supposed archaeoseismic damage in Israel. *Journal Archaeological Science*, 5, 237-253.
- Kim, K. H., Kang, S. Y., Yoo, H. S., Suk, B. C., 2007, A Preliminary Application of Hazus for Loss Estimation in the Korean Peninsula. The 6th Asian Regional Conference on Geohazards in Engineering Geology (Abstracts), 137.
- Kim, Y. -S., Andrews, J. R., Sanderson, D. J., 2000, Damage zones around strike-slip fault systems and strike-slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England. *Geoscience Journal*, 4, 53-72.
- Kim, Y.-S., Jin, K., Khim, J. H., in review. Interpretation of faulting events and accumulated displacement history upon the Quaternary Eupchon Fault, Korea. *Tectonophysics*.
- Kim, Y. -S., Park, J. Y., Kim, J. H., Shin, H. C., Sanderson, D. J., 2004. Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, southeast Korea, *The Island Arc* 13, 403-415.
- Koukouvelas, I. K., Stamatopoulos, L., Katsonopoulou, D., Pavlides, S., 2001, A palaeoseismological and geoarchaeological investigation of the Eliki fault, Gulf of Corinth, Greece, *Journal of Structural Geology*, 23, 531-543.
- Kyung, J. B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquakes; some cases in central Japan and Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 237-250.

- Lee, J. C., Chu, H. -T., Angelier, J., Chan, Y. -C., Hu, J. -C., Lu, C. -Y., Rau, R. -J., 2002, Geometry and structure of northern surface ruptures of the 1999 Mw=7.6 Chi-Chi Taiwan earthquake: influence from inherited fold belt structures, *Journal of Structural Geology* 24, 173-192.
- Lee, J. I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea. Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, 129 p.
- Lee, K. and Na, S. H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Lee, K. and Jin, Y. G., 1991, Segmentation of the Yangsanfault system: geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
- Lee, M. J., Lee, J. I. and Lee, M. S., 1995, Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju Area, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 31, 583-607.
- Lee, Y. -H., Hsieh, M. -L., Lu, S. -D., Shih, T. -S., Wu, W. -Y., Sugiyama, Y., Azuma, T., Kariya, Y., 2003, Slip vectors of the surface rupture of the 1999 Chi-Chi earthquake, western Taiwan, *Journal of Structural Geology* 25, 1917-1931.
- Marco, S., 2008, Recognition of earthquake-related damage in archaeological sites: Examples from the Dead Sea fault zone, *Tectonophysics*, 453, 148-156.
- McGarr, A. and Fletcher, J. B., 2002, Mapping apparent stress and energy radiation over fault zones of major earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 1633-1646.
- Monaco, C., Tortorici, L., 2004, Faulting and effects of earthquakes on Minoan archaeological sites in Crete (Greece). *Tectonophysics*, 382, 103-116.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M. S., Jo, W. R., Kim, S. K., Jeon, J. S., Chi, H. C., Okie, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea. *Jour. Geography* 103, 111-126.
- Ota, Y., Chen, Y. -G., Chen, W. -S., 2005, Review of paleoseismological and active fault studies in Taiwan in the light of the Chichi earthquake of September 21, 1999, *Tectonophysics* 208, 63-77.
- Steven, M. D., Guang, Y., David, J. W., 1998, Dynamic stress changes during earthquake rupture, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 512-522.

투 고 일 : 2009년 3월 30일

심 사 일 : 2009년 3월 31일

심사완료일 : 2009년 6월 15일