

경북 울진군에 발달하는 제4기 구산단층의 발달특성 연구

진광민¹ · 김영석^{2,†} · 강희철² · 신현조³

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부

²부경대학교 지구환경과학과

³한국전력기술(주) 토목건축기술그룹

요 약

최근 울진에서 발견된 구산단층은 선캠브리아시대의 우백질 화강편마암과 이를 피복한 제4기 하성층을 절단하며 발달한다. 단층면에서 관찰되는 단층조선의 특성은 구산단층이 주향이동운동이 우세한 단층임을 지시한다. 구산단층 상부를 피복하고 있는 제4기 하성층에 대한 트렌치 조사에서 제4기 하성층에 포함된 역들이 정향배열을 보이고 있어 구산단층은 제4기 하성층이 퇴적된 이후에도 단층활동을 한 제4기 단층으로 해석된다. 정확한 활동시기를 추정하기 위해 제4기 하성층과 단층비지에 대해 실시한 연대측정 결과 구산단층은 50만년 이내에 2번 이상 활동했던 단층으로 해석되었다. 기존 연구자에 의해 제시된 실제 변위와 겹보기 변위와의 상관관계를 이용한 구산단층의 추정변위는 약 94.63 cm 이다. 그리고 만약 보수적으로 해석하여 이 변위를 한 번의 지진활동에 의한 변위로 가정할 때 구산단층에서의 이 단층운동에 수반된 모멘트 지진규모는 약 6.4-6.9로 추정될 수 있다.

주요어: 제4기 구산단층, 주향이동단층, 지진변위, 모멘트 지진규모

Kwangmin Jin, Young-Seog Kim, Hee Cheol Kang and Hyeon Cho Shin, 2013, Study on developing characteristics of the Quaternary Gusan Fault in Uljin, Gyeongbuk, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 2, p. 197-207

ABSTRACT: The Gusan Fault cuts the Quaternary fluvial deposits as well as Precambrian leucocratic granite gneiss. Slickenlines on the surface of the Gusan Fault indicate dominantly strike-slip movement sense. Age dating results on the Quaternary fluvial deposits and fault gouges of the Gusan Fault demonstrate that the Gusan Fault might be activated at least two times within 500 ka B.P. Based on the trench survey across the fault on the Quaternary fluvial deposits, covering the basement, aligned long axes of pebbles cutting the Quaternary fluvial deposits indicate that the Gusan Fault was activated by strike-slip movement after the development of the Quaternary fluvial deposits. The inferred slip associated with the Quaternary fault movement, based on a suggested relationship between true displacement and apparent displacement, is about 94.63 cm. Based on the inferred true displacement, the inferred moment magnitude (M_w) associated with the slip along the fault is in a range of 6.4-6.9, if it is supposed as one event.

Key words: Quaternary Gusan Fault, strike-slip fault, earthquake slip, moment magnitude

(Kwangmin Jin, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea; Young-Seog Kim and Hee Cheol Kang, Department of Earth Environmental Sciences, Environmental and Marine Sciences and Technology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; Hyeon Cho Shin, Civil & Architecture Engineering Department, KEPCO Engineering & Construction Company, Inc., M-tower 8 Gumiro, Bundang-gu, Sungnam 463-870, Korea)

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

1. 서론

최근 세계적으로 대규모 지진들에 의한 많은 인명과 재산의 피해가 보고되고 있다. 일본 고베 지진(1995년 1월 17일, M=7.2), 대만 치-치 지진(1999년 9월 21일, M=7.6), 인도네시아 수마트라 지진(2004년 12월 26일, M=8.5), 중국 쓰촨성 지진(2008년 5월 12일, M=7.9)과 같은 대규모 지진들은 많은 인명과 재산의 피해를 가져왔다. 특히, 2011년 3월 11일 일본 토호쿠 지방에서 발생한 대규모 지진(규모 9.0)은 지진동에 의한 1차 영향과 지진해일에 의한 2차 영향, 그리고 후쿠시마 원자력발전소의 폭발사고에 의한 3차 영향을 일으켜 인적 및 경제적으로 심각한 피해를 야기하였으며(e.g., Sugawara *et al.*, 2011), 이는 원전의 안전성뿐만 아니라 전세계적으로 활성단층과 지진의 중요성에 대한 인식을 새롭게 하는 계기가 되었다. 이러한 지진피해의 심각성 때문에 지진에 대한 지진학적, 지체구조적, 고지진학적, 고고지진학적 연구들이 최근 매우 활발히 진행 중에 있다(e.g., Ambraseys, 1973, 2006; Steven *et al.*, 1998; Fukushima *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2002, 2003; McGarr and Fletcher, 2002; Caputo and Helly, 2005; Ota *et al.*, 2005).

우리나라는 유라시아판의 연변부에 위치하나 판의 경계부에서 벗어나 있어서 대규모 지진이 상대적으로 자주 발생하지는 않지만 최근의 활성단층(e.g., Chwae *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999; Ree *et al.*, 2003; Jeong and Cheong, 2005)과 고지진학적 연구(e.g., Kyung *et al.*, 1999; Kyung and Chang, 2001; Kim *et al.*, 2004, 2011; Choi, 2005; Kim and Jin, 2006; Kee *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2010)에 의하면 우리나라도 주기는 길지만 지표파열을 수반한 대규모 지진들이 제4기 동안에도 발생하였음이 보고되고 있다.

최근 울진 지역에서는 제4기 하성퇴적층을 절단하며 발달하는 구산단층이 발견되었다. 구산단층은 매화천에서 서편으로 약 2 km 떨어진 지점에 선캠브리아시대 우백질 화강편마암을 기반암으로 하여 그 상부에 퇴적된 제4기 하성층을 절단하며 발달한다. 이 논문에서는 노두 상에서 관찰되는 구산단층의 발달 특성과 상부 제4기 하성층 내에서 실시한 트랜치 조사에서 관찰된 구산단층 상부의 발달 특성에 대한 연구결과를 보고하고자 한다.

2. 연구지역

연구지역은 행정구역상 경상북도 울진군 근남면에 위치하는 지역으로 경상북지의 북쪽과 영남육괴의 북동쪽에 위치하는 지역으로 선캠브리아시대 화강편마암류와 중생대의 흑운모화강암으로 주로 이루어져 있으며, 단속적으로 장군석회암이 분포하는 것으로 보고되었다(그림 1; Yun and Shin, 1963). 그리고 이를 중생대와 신생대의 화성암류들이 관입하며 발달한다.

연구지역 주변에 발달하는 대규모 지질구조로는 연구지역의 남쪽에 위치하는 북북동-남남서 방향의 양산단층으로 이 단층의 북단부가 연구지역의 지질구조 발달에 어느 정도 영향을 미쳤을 것으로 추정되고 있다. 항공사진에서 관찰되는 뚜렷한 선형구조는 비교적 후기의 지구구조적 변형작용에 의해 형성된 지형으로 해석될 수 있다. 특히 항공사진 분석은 정밀하게 연구할 적절한 지점을 사전에 선정하는데 매우 유용하게 활용된다. 구산단층 주변지역에서는 매우 뚜렷한 몇 조의 선형구조들이 발달한다. 그 중 가장 뚜렷한 방향은 남-북 내지 북북동-남남서 방향과 동북동-서남서 방향의 선형구조로서 연구지역에서 우세한 선형구조로 나타나고 있다(그림 2).

흥미로운 점은 이 지역의 대표적인 석회암동굴인 성류굴이 구산단층의 북동쪽 약 3 km 지점에서 구산단층과 유사한 방향인 북북동-남남서 방향으로 발달하고 있다는 것이다(그림 2). 이는 석회암동굴이 석회암지역에 이산화탄소를 함유하는 지하수가 유동하며 석회암을 용식시켜 형성되기 때문에 유체의 유동이 단층의 방향과 밀접하게 연관되어 있음을 지시한다(e.g., Kagan *et al.*, 2005; Kim and Sanderson, 2010).

3. 구산단층의 발달특성

구산단층은 기반암에서 N30°E/55°SE의 태위를 가지며 기반암과 이를 피복하고 있는 제4기 하성층을 절단하며 발달한다(그림 3). 기반암은 주로 조립질의 선캠브리아시대 우백질 화강편마암으로 구성되어 있고, 단층의 동편으로는 중성 암맥이 관입하며 발달하고 있다. 이곳의 선캠브리아시대 우백질 화강편마암은 사행하천의 폐쇄로 인해 존재하는 약

1 m 두께의 제4기 고기하성층에 의해 피복되어 있다. 제4기 하성층 내에는 분급은 불량하나 원마도가 비교적 양호한 화강편마암과 화산암류의 암편들이 주로 분포한다. 역들의 크기는 다양하나 장경이 최대 40-50 cm 이상 되는 역들도 분포하고 있다. 구산단층은 야외노두에서 상위의 모든 지층들을 절단하며 발달한다(그림 3).

구산단층을 피복하고 있는 제4기 하성층 내에는 갈색의 단층비지가 발달하고 있으며, 거의 지표까지 연결되어 있다. 그리고 단층대를 따라 열수변질작용에 의한 것으로 추정되는 갈색물질들이 피복되어 있다. 이는 구산단층의 단층운동 시에 이 단층대를 따른 열수물질의 이동이 있었음을 지시한다(그림 3b). 또한 갈색의 단층비지가 단층대를 따라 발달하고, 주입된 단층비지는 구산단층의 상부에 퇴적된 제4기 하성층 내에서도 관찰된다(그림 3c, d). 이 단층비

지의 두께는 약 1 cm 이하이며, 미약하게 염리가 발달하고 있다(그림 3d). 이는 구산단층이 제4기에 활동한 단층임을 명확하게 지시한다.

단층의 노출단면상에서 관찰되는 수직 낙차는 약 20-25 cm 내외이지만, 단층면에서 관찰되는 단층조선은 좌수향과 우수향 운동감각의 주향이동단층을 지시한다. 그러나 상대적으로 좌수향 운동감각의 단층조선들이 많이 관찰된다. 이는 여러 번의 중복된 단층활동이 있었다는 것을 암시하는 것으로 해석된다. 단층조선의 방향은 대부분 24°→220° 내외로 거의 수평에 가까운 저각으로 발달한다. 또한 기반암에 관입하고 있는 중성 암맥 역시 단면상에서는 역 단층성의 낙차를 보여주며, 단층면이 지표로 갈수록 저각으로 바뀐다(그림 3). 이들은 주향이동단층 운동에 수반된 꽃구조(flower structure) 형태로 형성된 것으로 해석된다.

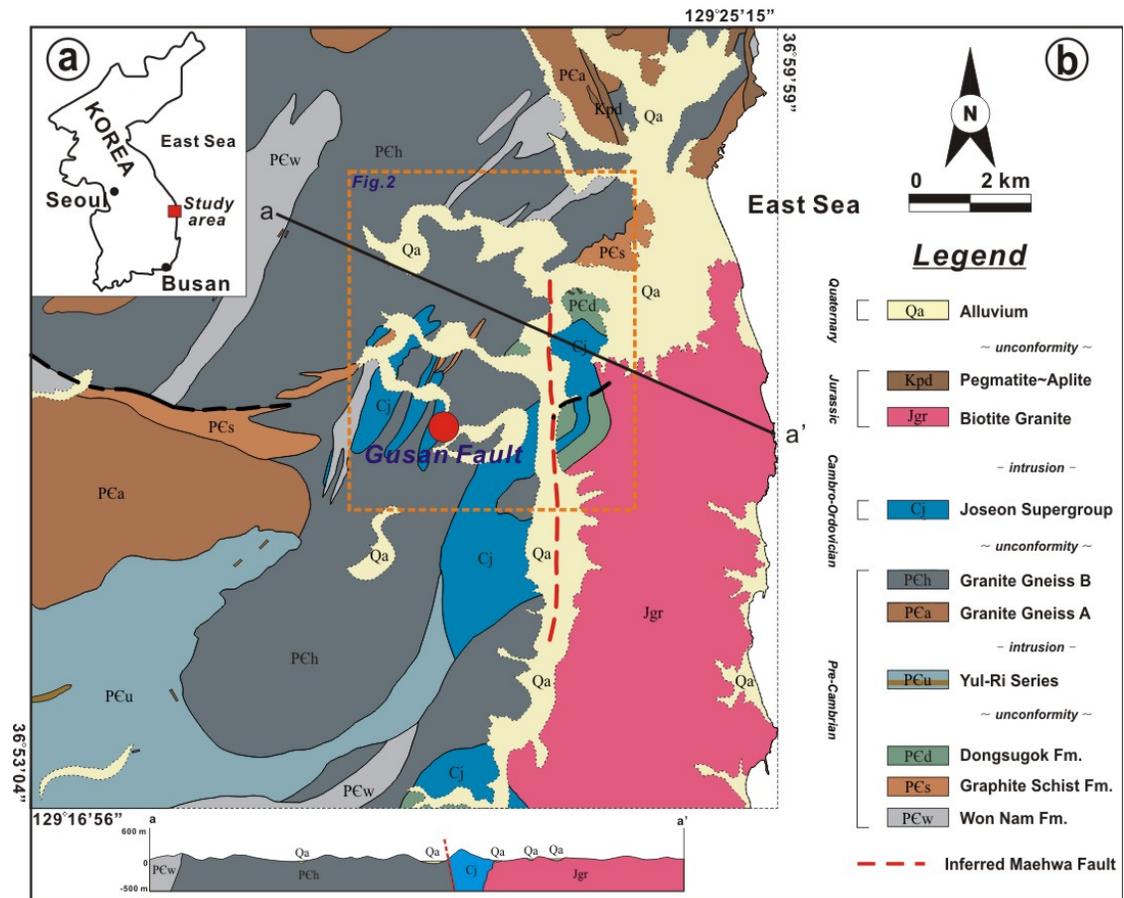


Fig. 1. Location and geological maps around the study area (modified from Yun and Shin, 1963; Choi *et al.*, 2012).

노출된 단면이 역단층의 운동감각을 보이는 것은 이 지역에 작용한 응력이 전달압축력(transpression)

이 우세한 응력이었거나, 사교이동단층의 역이동 성분 또는 주향이동성 운동에서 기반암과 제4기 지층

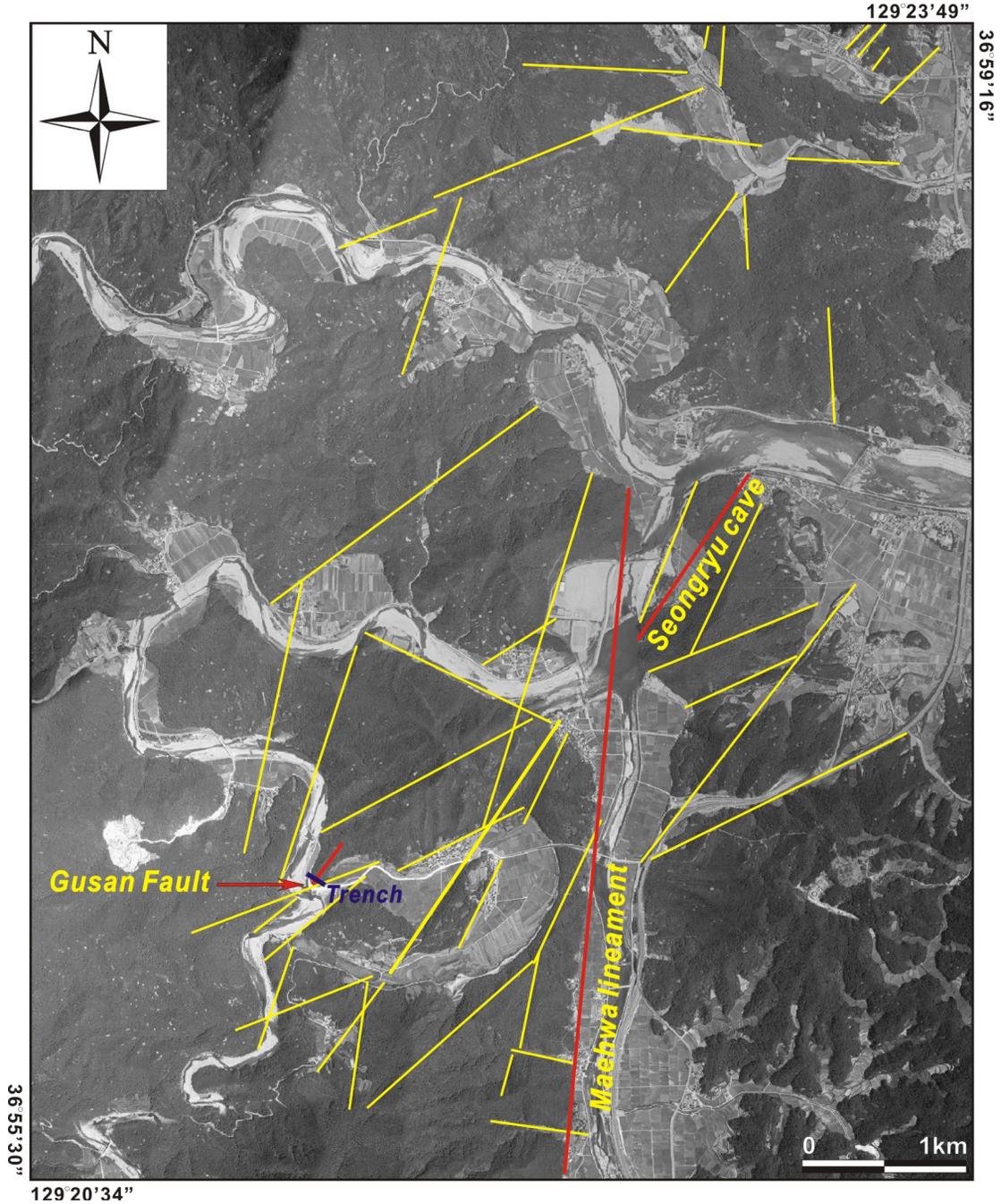


Fig. 2. Aerial photograph and lineament analysis around the Gusan Fault. It shows the N-S, NNE-SSE and ENE-WSW trending lineaments. Red lines show the Seongryu Cave, Gusan and Maehwa faults. Yellow lines indicate dominant lineaments around the study area. The small blue line shows the location and direction of the trench across the Gusan Fault.

사이의 부정합면이 굴곡에 의해 위변위를 나타내는 것일 가능성도 있다.

일반적으로 주향이동단층의 경우 경사각이 거의 수직, 정단층의 경우 약 60°, 역단층의 경우 45°이하가 일반적이다(Twiss and Moores, 2007). 그러나 구산단층 상부에서 단층비지의 경사는 약 42°로 다른 제4기 단층들(e.g., Kee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011)에서 보고되고 있는 바와 같이 기반암에서 관찰되는 단층의 경사에 비해 상대적으로 저각으로 발달하고 있다(그림 3).

최근 구산단층이 절단하고 있는 제4기 하성층에 대한 OSL 연대측정 결과 약 41,000에서 50,000년의 퇴적연대가 보고되었으며, 또한 단층암에 대한 ESR 연대는 약 369,000년, 그리고 ¹⁰Be의 연대는 80,000 내지 88,400년으로 보고되었다(KOPEC, 2008). 이들의 연대를 종합하여 해석하면 구산단층은 50만년

이내에 2회 이상의 단층활동을 한 것으로 해석된다.

4. 제4기 하성층 내에 발달한 구산단층에 대한 트렌치 조사

구산단층의 발달특성을 보다 명확하게 이해하기 위하여 기반암인 선캠브리아시대 우백질 화강편마암을 피복하고 있는 제4기 하성층에 대해 트렌치 조사를 실시하였다(그림 4). 이 트렌치 조사는 한국전력기술(주)에 의해 2008년 10월에 실시되었다. 트렌치 지점은 구산단층이 노출되어 있는 노두의 상부에서 단층이 가장 잘 노출될 수 있는 단층방향에 수직인 방향으로 실시하였다. 구산단층의 주향과 경사는 N30°E/55°SE이므로, 트렌치의 방향은 단층의 주향에 거의 수직인 N46°W 방향으로 실시하였으며, 트렌치의 크기는 폭 1 m, 연장 3.5 m, 깊이 2.3 m로 비

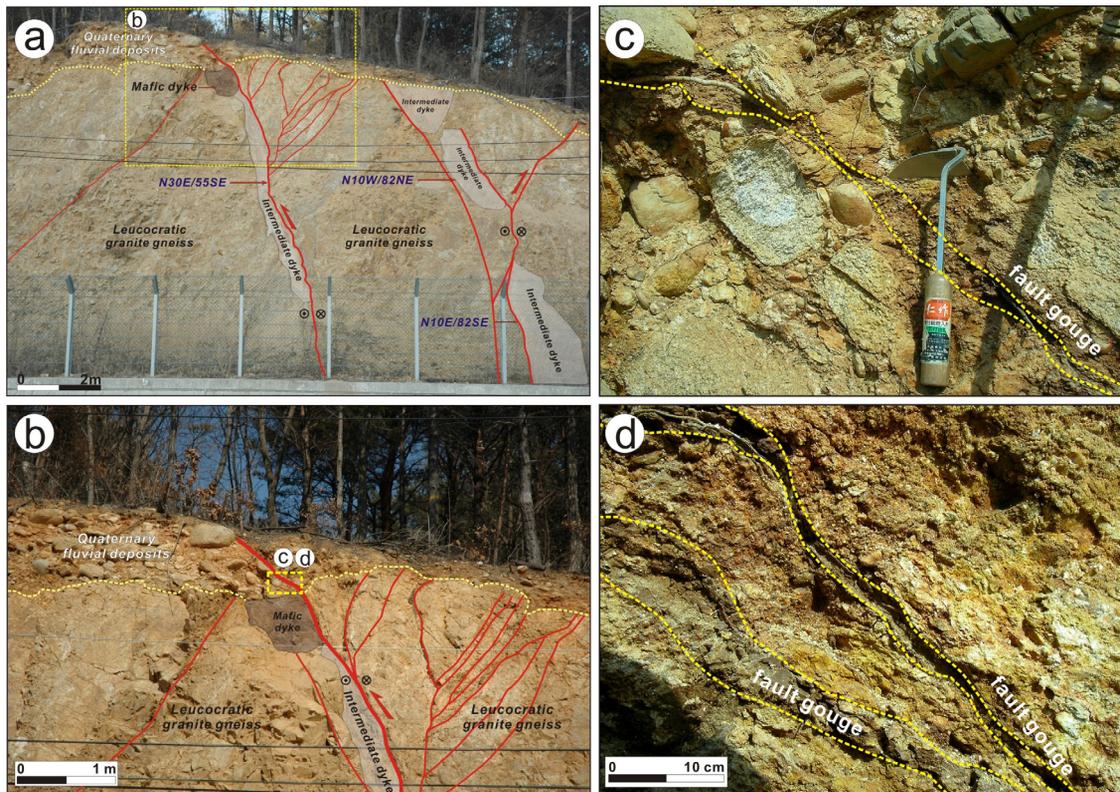


Fig. 3. Photographs of the Gusan Fault. (a) Overview and sketch of the Gusan Fault. (b) Detailed photograph and sketch of the upper part of the fault. The fault cuts the Precambrian leucocratic granite gneiss and Quaternary fluvial deposits. Red color lines show the fault and fractures associated with the Gusan Fault. (c) & (d) Detailed photographs and sketch of the fault gouge in the Quaternary fluvial deposits. The brown color gouge cuts the Quaternary fluvial deposits.

교적 소규모로 실시되었다. 트렌치 단면에서는 트렌치 방향에 대하여 평행한 단면 중 북동쪽 단면에 대해 50 cm×50 cm 단위로 스케치를 위한 격자를 설치하였다. 트렌치 현장에서 스케치 작업을 위한 사진 촬영과 현장 스케치를 실시하였으며, 이를 바탕으로 다시 실내에서 컴퓨터를 이용하여 정밀한 사진합성과 스케치 작업을 실시하였다.

구산단층 상부의 제4기 하성층은 수 cm의 역에서 수십 cm의 거력까지를 포함하는 역질퇴적물로 조립질의 모래들이 기질을 이루고 있으며, 분급은 매우 불량한 상태이다(그림 4). 역들은 주로 우백질 화강편마암의 역들과 안산암 등의 화산암 역들로 구성되어 있다. 두 암석의 역들은 원마도가 양호하며(그림 3, 4), 일부 화강편마암의 역들은 아각형의 형태로 발달하며 큰 거력들의 장경은 약 40-50 cm로 길쭉한 형태를 보인다. 그리고 부분적으로 검은색 물질에 의해 피복된 역들도 관찰된다.

일반적으로 역질 퇴적층에 발달한 단층대에서는

단층면에 인접한 역이나 쇄설편들의 배열(clast fabric)이 후기의 단층운동과 매우 밀접하게 연관되어 있다(e.g., McCalpin, 1996). 이는 단층운동 시에 전 단력에 의해 역이나 쇄설편들이 회전하여 장축이 단층면과 평행하게 발달하기 때문에 형성된다. 구산단층 트렌치의 단면에서는 약 40 cm 두께로 역들의 장축들이 배열하고 있는 단층끌림대가 관찰되며, 특히 아각형으로 편장형을 보이는 화강편마암의 역들이 특징적으로 더 잘 배열되어 있다(그림 4). 이런 역들의 장축 배열로 단층면을 추정한 결과 단층의 경사는 약 39°로 남동쪽으로 경사하고 있음이 확인되었다. 이는 구산단층 노두단면의 상부 하성층 내에 발달하는 갈색의 단층비지의 경사와 유사하다(그림 3).

주향이동단층과 경사이동단층에서 쇄설편들의 장축배열은 각각 경사방향과 주향방향으로 배열하는 것으로 보고되었다(Yount *et al.*, 1987). 구산단층의 경우 상부 트렌치에서 관찰되는 쇄설편들이 풍화가 심해 쉽게 파쇄되어 퇴적층 내 쇄설편들의 배열

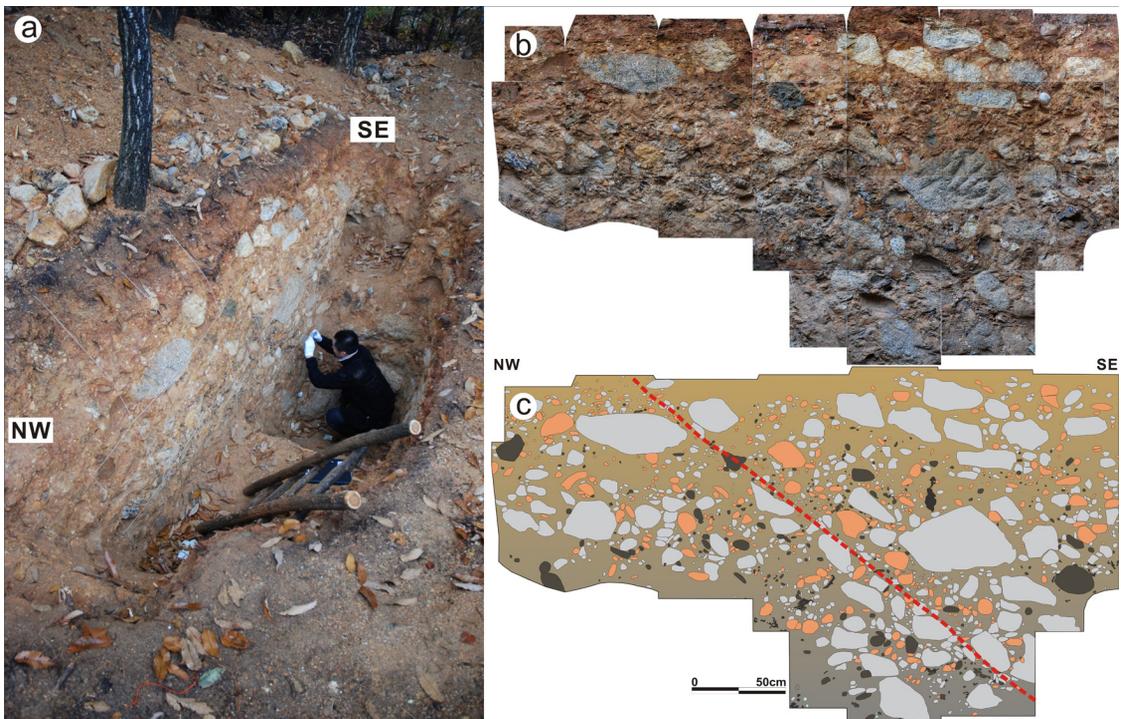


Fig. 4. Photographs of the trench of the Gusan Fault. (a) Overview of the trench across the Gusan Fault developed in the Quaternary fluvial deposits. (b) & (c) Photomosaic and sketch of the northern trench wall of the upper part of the Gusan Fault. The dotted line indicates the inferred fault trace showing clast fabrics. It indicates that the Gusan Fault obviously passes the Quaternary fluvial deposits.

방향을 용이하게 관찰할 수 있었다. 일부 역들에 대해서는 퇴적층으로부터 직접 채취하여 역의 형태를 관찰하였다. 그 결과 구산단층의 상부를 피복하고 있는 퇴적층 내 쇄설편들의 장축은 경사방향에 따라 배열하고 있으며, 이는 구산단층이 주향이동운동이 우세한 단층임을 지지하는 것으로 해석될 수 있다.

이와 같은 단층면에 인접한 역이나 쇄설편들의 정향배열은 국내에서 보고된 수렴단층과 음천단층 주변에서도 관찰된다(그림 5). 이들 단층은 모두 해안단구층을 절단하며 발달하는 역단층으로 단층면을 따른 역들의 일정한 방향성을 보여준다. 이는 단층운동 시 고화가 덜 된 연약한 지층에서 응력이 단층대 주변으로 분산되면서 단층면에 평행한 방향으로 역들이 끌림작용에 의해 재배열되면서 나타나는 현상으로 해석될 수 있다. 이는 단층대에 집중된 역들의 정향배열뿐만 아니라 점토층의 변형으로부터도 추정이 가능하다. 이는 단층작용이 비록 천부의 지표환경에서 발생한다 하더라도 단층이 발달하는 지층의 물성이 연약하면 지진활동을 수반한 매우 빠른 단층운동에서도 연성의 변형작용을 발달시킬 수 있음을 보여준다.

트렌치 단면에서는 구산단층 노두단면의 상부 제4기 하성층에서 관찰되는 단층비지는 관찰되지 않는다. 그러나 트렌치 단면에는 단층대와 주변의 일부 역들을 피복하고 있는 검은색 물질들이 부분적으로 분포하고 있으며, 특히 트렌치단면에서 단층면으로 추정되는 방향을 따라서는 검은색 물질들이 집중

적으로 분포하고 있다(그림 4). 이 물질에 대한 정밀한 분석은 실시하지 않아 정확한 원인은 알 수 없지만 단층운동 시 또는 이후에 유체유동의 통로가 되는 단층면을 따라 지하로부터 상승한 열수에 의한 피복이거나 이후의 지하수 유동에 의한 변질물로 생각된다.

5. 토 론

5.1 구산단층의 제4기 단층변위

단층의 변위는 크게 3가지의 경우에 실제변위를 산정하는데 어려움이 있다(Xu *et al.*, 2009). 1) 노두 상에서 관찰되는 단면이 수직이 아닌 경우, 2) 층리면이 수평이 아닌 경우, 3) 단층이 순수한 경사이동이나 주향이동이 아닌 경우 등이다. 따라서 실제 변위를 산정하기 위해서는 실제 변위와 겉보기 변위(apparent displacement)의 상호 연관성을 구하는 것이 중요하다.

구산단층은 연장을 확인하기가 매우 어렵고 주향이동단층의 특성상 평면에서 변위가 관찰되어야 하지만 상부가 제4기 하성층으로 피복되어 있어 평면에서 단층의 변위를 인지하기가 매우 어렵다. 따라서 우리는 이 단층의 제4기 단층활동에 대한 변위를 추정하고자 최근 Xu *et al.* (2009)에 의해 제시된 겉보기 변위를 이용하여 실제 변위를 구하는 방법을 적용하여 구산단층의 변위를 산정하고자 하였다(그림 6; 식 1). 겉보기 변위를 이용하여 실제 변위를 측

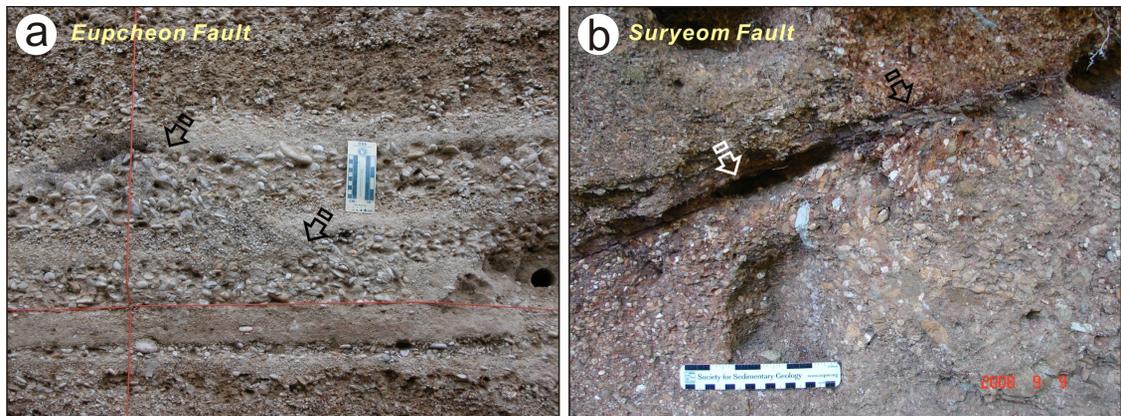


Fig. 5. Photographs of the clast fabrics along the Eupcheon Fault (a) (modified from Kim *et al.*, 2011), and the Suryeom faults (b) in SE Korea. Note that anomalous dragged clast fabrics showing preferred orientation are arranged along the fault planes. Arrows indicate the faults.

정하기 위해서는 겹보기 변위(S_m), 단층조선(slickenside)의 피치값(γ), 대비층 선(marker line)의 피치값(β), 관측선(observation line)의 피치값(ϕ)을 구해야 한다. 이를 위해 구산단층 노두에서 겹보기 변위와 단층조선의 피치값(pitch)을 측정하였고, 관측선은 노출된 노두에서 단층을 따라서 설정하였고, 대비층은 구산단층에 의해 절단된 제4기 층적층과 기반암의 부정합 경계를 수평층으로 가정하였다. 노두에서 이들을 각각 측정한 결과 겹보기 변위(S_m)는 약 40 cm, 대비층 선의 피치값은(β)은 0° , 관측선의 피치값(ϕ)은 90° 로 측정되었다. 그리고 단층조선은 $24^\circ \rightarrow 220^\circ$ 으로 그 피치값은 25° SW로 측정되었다. 위의 값들을 이용하여 Xu *et al.* (2009)에 의해 제시된 식(Eq. 1)에 대입한 결과, 구산단층의 추정변위는 약 94.63 cm로 계산되었다.

$$S_t = S_m \sin(\phi + \beta) / \sin(\gamma + \beta) = S_m / \sin(\gamma) \quad (\text{식 1})$$

5.2 구산단층의 추정변위로부터 산정되는 지진규모

지진계가 개발되기 이전의 지진 중 역사지진의 경우는 역사기록에서 기록된 피해의 정도를 메르칼리진도로 계산하여 그 규모를 환산하여 추정하지만, 이는 지진이 감지되거나 피해가 보고된 지역에서의 진도만을 추정할 수 있다. 따라서 이러한 역사기록도 갖고 있지 않은 지진활동에 대해서는 트렌치 조사를 통하여 얻어진 변위량이나, 확인되거나 추정된

지표파열길이로부터 지진규모를 추정할 수 있다 (e.g., Wells and Coppersmith, 1994; Michetti *et al.*, 2005). 이 연구에서는 앞서 추정한 구산단층의 변위를 이용하여 Wells and Coppersmith (1994)가 제시한 경험적 상관관계에 대입하여 구산단층의 지진활동에 대한 지진규모를 산정하고자 하였다.

모멘트 지진규모(moment magnitude; M_w)는 지진모멘트에 비례하며 파열면적 및 평균지진변위와 관련되어 있다(e.g., Kanemori, 1977; Olson and Allen, 2005). 이는 지진규모와 지진변위 사이에 밀접한 상관관계가 존재함을 의미하며, 따라서 지진규모와 최대지진변위 사이의 경험적 상관관계(e.g., Wells and Coppersmith, 1994)를 이용하여 지진의 규모를 추정할 수 있다. 우리가 고지진의 자료로부터 획득한 지진변위를 지진단층파열을 따라 발생한 최대지진변위로 가정하면, 이들 상관관계로부터 얻은 지진규모 이상의 지진이 발생했음을 의미할 수 있을 것이다.

우리는 앞서 산정된 구산단층의 변위 약 94.63 cm를 1회의 운동에 의한 제4기 지진활동의 최대변위로 가정하였다. 물론 이 변위가 한 번의 지진활동에 의해 변위된 것인가에 대한 검증의 문제를 여전히 남겨두고 있지만, 이 단층활동에 수반될 수 있는 최대지진규모를 가정해볼 수 있다는 점에서 그 가치가 있을 것으로 판단하였다. 따라서 이 산정된 변위를 Wells and Coppersmith (1994)가 제시한 지진변위-모멘트 지진규모의 경험적 관계에 대입한 결과 구산단층의 약 94.63 cm 지진변위를 야기한 지진의 모멘트 규모는 약 6.4-6.9로 산정되었다. 비록 이 모멘트 지진규모는 추정된 변위를 이용하여 경험식으로부터 도출한 값이지만 지진단층의 변위와 모멘트 지진규모 사이에는 상대적으로 좋은 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있기 때문에(Hyndman and Hyndman, 2006), 적어도 구산단층의 최후기 운동 시의 대략적인 지진규모로 가정할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 관계가 경계단층(e.g., Kim and Park, 2006)과 같은 여러 가지 요인에 의해 많은 변화를 보일 수 있기 때문에 이 해석의 타당성을 확보하고 검증하기 위해서는 구산단층에 대해 더 많은 야외조사와 트렌치 조사를 통한 분석과 통계적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

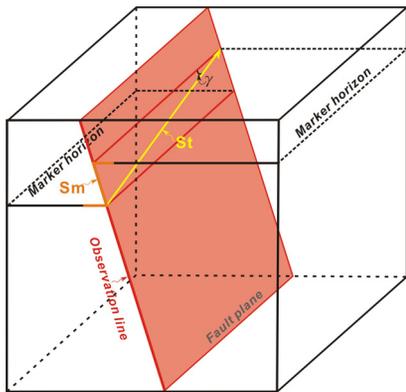


Fig. 6. Schematic diagram showing the pitch of the slickenside line and cutoff of the marker horizon (modified from Xu *et al.*, 2009). S_m : apparent displacement, S_t : true displacement, γ : pitch of the slickenside lineation.

5.3 구산단층과 매화단층 및 성류굴의 연관성

매화단층은 구산단층의 동쪽으로 약 2 km 떨어진

진 지점에서 약 27 km의 연장을 가지며 남-북 내지 북북동-남남서 방향으로 발달하는 단층으로 연구지역 내에서 가장 큰 지질구조이다(Jin *et al.*, 2010). 기존 연구(KOPEC, 2008)에 의하면 이 단층은 비교적 뚜렷한 일직선상의 선형구조로서, 단층대 노두에서 높은 밀도로 관찰되는 남-북 내지 북북동-남남서 방향의 수직 단열군과 지질경계의 변위로부터 좌수향 주향이동단층으로 발달했을 것으로 추정하였다.

동굴생성물의 성장은 동굴 주변지역에 발달하는 단층 및 단층을 따른 유체이동 특성과 밀접하게 연관된다(e.g., Kagan *et al.*, 2005; Kim and Sanderson, 2010). 또한 동굴생성물의 파괴특성은 인접한 단층의 단층운동 및 지진에 대한 발생시기 및 규모 등에 대한 정보를 제공할 수 있다(e.g., Kagan *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2012). 구산단층의 북동쪽 약 3 km 지점에 위치하는 성류굴은 구산단층과 같은 방향인 북북동-남남서 내지 북동-남서 방향을 갖는 석회암 동굴이다. 최근 Choi *et al.* (2012)는 성류굴 내에 발달하는 동굴생성물의 파괴특성 및 재성장 등의 발달특성 연구를 통하여 성류굴이 종류석 생성 이후의 지진활동과 밀접하게 연관된 것으로 해석하였다.

비록 구산단층 주변의 매화단층과 성류굴의 발달이 구산단층의 발달과 어떤 연관성이 있을 것으로 추정되지만, 현재까지의 자료로서는 아직 이 지역의 지체구조 및 지진특성을 명확히 밝히기는 어렵다. 따라서 구산단층, 매화단층, 그리고 성류굴의 상호관련성 및 고지진과의 연관성을 밝히기 위해서는 보다 다양하고 대규모의 조사를 통한 면밀한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

최근 울진지역에서 발견된 제4기 구산단층의 노두 상의 발달특성과 트렌치 조사를 통한 연구를 정리하면 다음과 같다.

1) 구산단층은 기반암에서 N30°E/55°SE의 태위를 가지며 기반암인 선캄브리아시대 우백질 화강편마암과 이를 피복하고 있는 제4기 고기하성층을 절단하고 있는 제4기 단층이다. 단층면에서 관찰되는 선구조와 단층 주변에서 관찰되는 꽃구조의 발달특성을 바탕으로 해석한 구산단층의 운동특성은 주향이동이 우세한 단층인 것으로 해석된다.

2) 구산단층이 절단하고 있는 제4기 하성층, 단층비지 등에 대한 연대측정 결과는 각 연대측정법에 의한 연대들을 독립적으로 인정한다면 50만년 이내에 2회 이상의 단층활동이 있었던 것으로 해석된다.

3) 구산단층의 상부에 분포하는 제4기 하성층에 대한 트렌치 조사 결과 역들의 장축이 단층면의 경사를 따라 정향배열하고 있는 것으로 보아 구산단층은 제4기 하성층이 퇴적된 이후에 주향이동이 우세한 운동을 한 제4기 단층인 것으로 해석된다.

4) 기존 연구자에 의해 제시된 실제 변위를 산정하는 식에 구산단층을 적용한 결과, 추정된 구산단층의 제4기 단층활동에 의한 최대 변위는 약 94.63 cm이며, 이를 한 번의 최후기 지진활동에 의한 변위로 가정하고 지진변위-모멘트 지진규모의 경험식에 대입한 결과 약 6.4-6.9의 모멘트 지진규모가 추정되었다.

5) 현재까지의 조사결과로서는 자세한 구산단층의 활동특성과 활동이력 및 주변 지질구조들과의 연관성을 밝히기에는 자료가 매우 부족하다. 따라서 구산단층 주변에 발달하는 매화단층 및 성류굴과의 상관성, 그리고 고지진의 시기 및 규모 등을 이해하기 위해서는 추가적인 조사와 분석이 필요할 것으로 생각된다.

사 사

이 조사는 한국전력기술(주)에서 수행한 “신울진 1, 2호기 지질지진역학조사”의 일환으로 수행되었으며, 이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행한 연구임(과제명: 연안재해위험요소분석(11-9106)). 이 연구를 위하여 야외조사에 도움을 주신 부경대학교 지질구조재해연구실원들에게 감사를 드린다. 그리고 논문을 꼼꼼히 검토하고 유익한 조언을 해주신 한국지질자원연구원의 최성자 박사님과 익명의 심사자에게도 진심으로 감사를 드린다.

참고문헌

- 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. 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.
- Choi, P.-Y., 2005, Geometric Analysis of the Quaternary Eupchon Fault: an Interpretation of Trench Sections. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 129-140 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-J., Hong, D.-G., Chwae, U., Song, Y.G., Kim, C. and Shim, T., 2010, Retrodeformation analysis of the Quaternary fault in the southeastern Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 17, 116-124.
- Chwae, U., Lee, D.-Y., Lee, B.-J., Ryoo, C.-R., Choi, P.-Y., Choi, S.-J., Cho, D.-R., Kim, J.-Y., Lee, C.-B., Kee, W.-S., Yang, D.-Y., Kim, I.-J., Kim, Y.-S., Yoo, J.-H., Chae, B.-G., Kim, W.-Y., Kang, P.-J., Yoo, I.-H. and Lee, H.-K., 1998, An Investigation and Evaluation of Capable Fault: Southeastern Part of the Korean Peninsula 301 p (in Korean with English abstract).
- Fukushima, Y., Irikura, K., Uetake, T. and 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.
- Hyndman, D. and Hyndman, D., 2006, *Natural Hazards and disasters*. Thomson Brooks/Cole, Belmont, 490 p.
- Jeong, G.Y. and Cheong, C.-S., 2005, Recurrent events on a Quaternary fault recorded in the mineralogy and micromorphology of a weathering profile, Yangsan Fault System, Korea. *Quaternary Research*, 64, 221-233.
- Jin, K., Kim, Y.-S. and Shin, H.C., 2010, Neotectonics of the Uljin area in Gyeongbuk. 2010 Fall Joint Annual Conference of The Geological Societies in Korea (Abstract), Gyeongju, October 27-30, 57 p (in Korean).
- Kagan, E.J., Agnon, A., Bar-Matthews, M. and Ayalon, A., 2005, Dating large infrequent earthquakes by damaged cave deposits. *Geology*, 33, 261-264.
- Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82, 2981-2987.
- Kee, W.-S., Kihm, Y.H., Lee, H., Cho, D.L., Kim, B.C., Song, K.-Y., Koh, H.J., Lee, S.R., Yeon, Y.-K., Hwang, S., Park, K.G. and Seong, N.-H., 2009, Evaluation and database construction of Quaternary faults in SE Korea. *Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, IP2006-047-2009(1)*, 327 p (in Korean).
- Kim, Y.-S. and Jin, K., 2006, Estimated earthquake magnitude from the Yugye Fault displacement on a trench section in Pohang, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 79-94.
- Kim, Y.-S., Kihm, 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. and Park, J.-Y., 2006, Cenozoic deformation history of the area around Yangnam-Yangbuk, SE Korea and its tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 1-20.
- 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 Eupcheon Fault, southeast Korea. *The Island Arc*, 13, 403-415.
- Kim, Y.-S. and Sanderson, D.J., 2010, Inferred fluid flow through fault damage zones based on the observation of stalactites in carbonate caves. *Journal of Structural Geology* 32, 1305-1316.
- Korea Power Engineering Company (KOPEC), 2008, *The Preliminary Site Assessment Report (PSAR) for the new Uljin Reactors 1 and 2*, Unpublished Report. KOPEC, Yongin.
- Kyung, J.-B. and Chang, T.W., 2001, The Latest Fault Movement on the Northern Yangsan Fault Zone around the Yugye-Ri Area, Southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 563-577 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.-B., Lee, K., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K., 1999, Study of Fault Characteristics by Trench Survey in the Sangchon-ri Area in the Southern Part of Yangsan Fault, Southeastern Korea. *Jour. Korean Earth Science Society*, 20, 101-110 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J., Ryoo, C.-R. and Chwae, U., 1999, Quaternary Faults in the Yangnam area, Kyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 35, 1-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.C., Chu, H.-T., Angelier, J., Chan, Y.-C., Hu, J.-C., Lu, C.-Y. and 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, Y.-H., Hsieh, M.-L., Lu, S.-D., Shih, T.-S., Wu, W.-Y., Sugiyama, Y., Azuma, T. and Kariya, Y., 2003, Slip vectors of the surface rupture of the 1999 Chi-Chi earthquake, western Taiwan. *Journal of Structural Geology*, 25, 1917-1931.
- McCalpin, J.P., 1996, *Paleoseismology*. Academic Press, SanDiego, 588 p.
- 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.

- Michetti, A.M., Audemard, F.A. and Marco, S., 2005, Future trends in paleoseismology: Integrated study of the seismic landscape as a vital tool in seismic hazard analyses. *Tectonophysics*, 408, 3-21.
- Olson, E.L. and Allen, R.M., 2005, The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 438, 212-215.
- Ota, Y., Chen, Y.-G. and 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.
- 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. *Island Arc*, 12, 1-12.
- Steven, M.D., Guang, Y. and David, J.W., 1998, Dynamic stress changes during earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88, 512-522.
- Sugawara, D., Goto, K., Chague-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nichimura, Y., Richmond, B., Szczucinski, W., Tappin, D.R., Witter, R. and Ylianto, E., 2011, Initial field survey report of the 2011 East Japan Tsunami in Sendai, Natori and Iwanuma Cities. UNESCO-Ioc International Tsunami Survey Team, 16 p.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 2007, *Structural Geology* (2nd edition). W.H. Freeman and Company, New York, 736 p.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Xu, S., Nieto-Samaniego, A.F. and Alaniz-Álvarez, S.A., 2009, Quantification of true displacement using apparent displacement along an arbitrary line on a fault plane. *Tectonophysics*, 467, 107-118.
- Yount, J.C., Shroba, R.R., McMasters, C.R., Huckins, H.E. and Rodriguez, E.A., 1987, Trench logs from a stand of the Rock Valley fault system, Nevada Test Site, Nye County, Nevada. U. S. Geol. Surv. Misc. Field Stud. Map MF-1824, Scale 1:20.
- Yun, S.K. and Shin, B.W., 1963, Geological report of the Uljin sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 1-23 pp (in Korean with English abstract).

투 고 일 : 2013년 1월 8일

심 사 일 : 2013년 1월 11일

심사완료일 : 2013년 4월 8일