

## 경북 경주시 단구리 일대에서의 트렌치 조사를 통한 북부 양산단층의 제4기 단층운동 특성분석

이진현<sup>1</sup> · Sowreh Rezaei<sup>1</sup> · 홍예지<sup>1</sup> · 최진혁<sup>2</sup> · 최정현<sup>3</sup> · 최원학<sup>4</sup> · 이근우<sup>5</sup> · 김영석<sup>1,‡</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>파리 지구물리연구소

<sup>3</sup>한국기초과학지원연구원 오창본원 연대측정연구팀

<sup>4</sup>한국수력원자력(주) 중앙연구원 플랜트건설기술연구소 부지구조그룹

<sup>5</sup>부경대학교 사학과

### 요 약

현재까지 우리나라에서 보고된 제4기 단층지점들의 대부분은 한반도 동남부 지역의 양산단층대와 울산단층대 주변에 분포한다. 이 논문에서는 경북 경주시 단구리 일대에서 단층과 수직인 방향으로 실시된 두 개의 트렌치를 통해 확인된 북부 양산단층의 제4기 단층운동 특성에 대해 보고하고자 한다. 트렌치 단면에 노출된 단층은 수직에 가까운 단층면과 수평에 가까운 단층조선을 보이는 주향이동단층으로 제4기 퇴적층을 절단하며, 색상이 다른 세 조의 단층점토는 최소 세 번의 단층운동을 지시한다. 트렌치 단면에서 관찰되는 제4기 퇴적층은 입자의 크기, 기질, 원마도, 분급도, 색상 등을 기초로 트렌치1 (T1)과 트렌치2 (T2)의 북측단면에서는 Unit A, B, C, D, E, F, G, H로 구분하여 대비하였지만, 트렌치1의 남측단면에서는 그 연장성을 추정하기 어려우므로 따로 분류하였다. 단층의 최후기 운동시기를 추론하기 위해 단층에 의해 절단된 최상부 퇴적층인 Unit C에 대한 OSL 및 방사성탄소 연대측정을 실시하였고, 이 층에서 채취된 도자기 파편을 이용한 고고학적 연대도 추정하였다. 그 결과, OSL 연대는  $7.5 \pm 0.3$  ka,  $7.4 \pm 0.4$  ka, 방사성탄소 연대는  $3,990 \pm 40$  B.P., 마지막으로 고고학적 연대추정은 조선시대 중기(AD 1,550 ~ 1,700)로 서로 약간 상이한 결과를 보였다. 이러한 연대자료들을 종합하여 판단할 때 단구리단층의 마지막 운동시기는 최대  $7.5 \pm 0.3$  ka이며, 도자기 파편을 통한 연대추정에 근거한다면 조선시대 중기에 최후기 단층활동을 했을 가능성도 있다. 이러한 제4기 단층운동 결과는 이전의 응력모델링 연구결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 현재의 응력조건 하에서는 양산단층 북부와 울산단층을 따라 단층의 재활동이 발생할 가능성이 가장 높은 것으로 평가된다.

**주요어:** 양산단층대, 단구리단층, 트렌치, 단층운동 시기

**Jinhyun Lee, Sowreh Rezaei, Yeji Hong, Jin-Hyuck Choi, Jeong-Heon Choi, Weon-Hack Choi, Kun-Woo Rhee and Young-Seog Kim, 2015, Quaternary fault analysis through a trench investigation on the northern extension of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyungju-si, Gyeongsangbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 5, p. 471-485**

**ABSTRACT:** Most Quaternary faults have been reported around the Yangsan and Ulsan Fault system in SE Korea. Dangu Fault in Gyeongju-si, located in northern part of the Yangsan Fault system, is a dextral reverse fault. For this study, we excavated two trenches in Dangu-ri and the trench direction is perpendicular to the fault. The mean orientation of the fault planes and slickenlines are  $N15^{\circ}E/79^{\circ}SE$  and  $015^{\circ}/15^{\circ}$ , respectively. Three types of gouge indicate at least three faulting events. Based on grain size, matrix composition, roundness, degree of sorting, and color, we consistently classified Quaternary sediments in the trench1 and trench2 sections as Unit A, B, C, D, E, F, G, H, although this classification scheme is not valid for the southern section of the trench1. To estimate the timing of fault movement, we carried out the OSL and radiocarbon dating of sediments cut by the fault. Further, for age estimation, we also used ancient porcelain fragments excavated from within the sediments relevant to fault activity. We obtained the OSL and radiocarbon ages of about  $7.5 \pm 0.3$  ka and  $3990 \pm 40$  B.P., respectively. The archaeological interpretation on the porcelain fragments seemed to indicate that the sediments from which the artifacts were excavated are of the age of AD 1550 ~ 1700; this may suggest that the fault has stayed active until quite recently.

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: [ysk7909@pknu.ac.kr](mailto:ysk7909@pknu.ac.kr)

If we trust archeological dating, the latest faulting age is AD1550 ~ 1700. A previous study on Column stress change around this area is well consistent with the occurrence of Quaternary faults in and around the northern Yangsan Fault and the eastern Ulsan Fault. Therefore, this result indicates the high possibility of reactivation along the northern Yangsan Fault.

**Key words:** Yangsan Fault system, Dangu fault, trench, age of fault movement

(Jinhyun Lee, Sowreh Rezaei, Yeji Hong, and Young-Seog Kim, Department of Earth & Environmental Sciences, Environmental and Marine Sciences and Technology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Jin-Hyuck Choi, Institute de Physique de Globe de Paris, 1 Rue Jussieu, 75005 Paris, France; Jeong-Heon Choi, Geochronology Group, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea; Weon-Hack Choi, Central Reseach Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Co., Daejeon 34101, Republic of Korea; Kun-Woo Rhee, Department of History, Humanities and Social Sciences & Business Administration, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

## 1. 서론

최근 쓰촨성 대지진(2008년 5월 12일, Mw 7.8), 동일본 대지진(2011년 3월 11일, Mw 9.0), 네팔 지진(2015년 4월 25일, Mw 7.5) 등 한반도 주변에서 대규모 지진에 의한 심각한 피해가 발생하면서, 우리나라에서의 지진특성 및 지진재해에 대한 국민적 관심이 높아진 상황이다. 지진재해의 경우, 다른 자연재해에 비해 예측하기가 매우 어렵고 지진동에 의한 피해뿐만 아니라 쓰나미, 화재, 홍수 등 다양한 종류의 2차적인 재해가 수반될 수 있으므로 그 피해가 더욱 심각할 수 있다. 특히 일본의 동일본대지진 지진재해 사례와 같이, 원자력발전소와 같은 주요시설물의 지진피해는 매우 장기적으로 국가적 손해, 나아가 전 세계적인 피해를 초래할 수 있다. 따라서 우리나라에서 발생하는 지진에 대한 충분한 이해를 바탕으로 한 국내 지진재해 대비연구가 절실한 실정이다. 이를 위해 대부분의 지진이 발생하는 것으로 알려진 제4기 단층을 중심으로 한 국내 고지진 연구가 요구되며, 특히 국가 주요시설물을 비롯해 대규모 공업단지와 인구밀집지역에서는 보다 면밀한 연구를 통해 지진재해에 대비할 필요성이 있다.

지금까지의 국내 고지진 관련 연구는 지질학적으로 최근까지 활동한 것으로 추정되는 한반도 남동부의 양산단층과 울산단층을 중심으로 진행되어 왔다(Oh, 1977; Lee and Na, 1983; Kyung and Chang, 2001; Kyung and Lee, 2006; Choi *et al.*, 2014). 양산단층은 영덕과 부산을 잇는 북북동-남남서 방향의 우수향 주향이동단층으로 경주를 기점으로 북부와 남부로 나누어지며(Yang, 2006), 에오세 이후 최소 세 번의 주향이동운동과 두 번의 경사이동 운동을

겪었던 것으로 보고되었다(Chae *et al.*, 1994). 울산단층은 북북서 방향의 주향을 가지고 있고, 주로 선형구조로 인지된다(Choi *et al.*, 1980). 울산단층을 따라 현재까지 총 18개 지점에서 제4기 단층운동의 증거가 보고된 바 있으며(Choi *et al.*, 2012; 그림 1), 이들은 주로 역단층 또는 역단층 성분이 우세한 사교이동단층이 우세하다. 우리나라에서 확인된 제4기 단층운동의 대부분은 양산단층과 울산단층을 따라 또는 이들 두 단층의 단층대 내에서 보고되었다(Kee *et al.*, 2009; 그림 1). 이 결과 중에서 한 가지 흥미로운 점은 남부 양산단층에서 확인된 제4기 단층운동의 최후기 운동시기가 상대적으로 북부 양산단층 및 울산단층에 비해 다소 오래되었다는 것이다. 남부 양산단층 주변에서 확인된 제4기 단층운동 시기는 주로 단층점토에 대한 ESR (Electron Spin Resonance) 연대측정법과 Rb-Sr 연대측정법을 통해 대부분 300 ka 보다 오래된 것으로 보고되었다(Kee *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2012; 그림 1). 반면 한반도에서 현재까지 보고된 가장 젊은 단층운동 시기는 북부 양산단층이 관통하는 유계리 일대에서 트렌치 조사를 통해 확인되었는데, 단층에 의해 절단된 트렌치 단면 상부의 부식질 실트층에 대한  $C^{14}$  연대측정 자료에 근거해 볼 때 약 1,314 B.P. 이후로 판단된다(Kyung, 2003).

양산단층과 울산단층이 보이는 기하학적 운동특성과 최후기 운동시기의 다양성 등과 관련된 운동특성은 Han *et al.* (2009)에 의한 응력변화 모델링 연구를 통해 수행된 바 있다. 이들은 두 단층의 진화특성을 고려함에 있어 울산단층이 성장하면서 양산단층에 병합된  $\lambda$  단층으로 해석하였으며(Du and Aydin, 1995), 현재의 주응력장인 동북동-서남서 방향의 최

대주응력이 작용하는 상황에서 북부 양산단층과 울산단층을 경계로 한 동북쪽지구가 가장 큰 압축응력 변형을 겪고 있다고 해석하였다. 이 해석은 울산단층과 북부 양산단층이 상대적으로 젊은 단층의 최후기 활동시기를 보여주는 현상을 잘 설명할 수 있다.

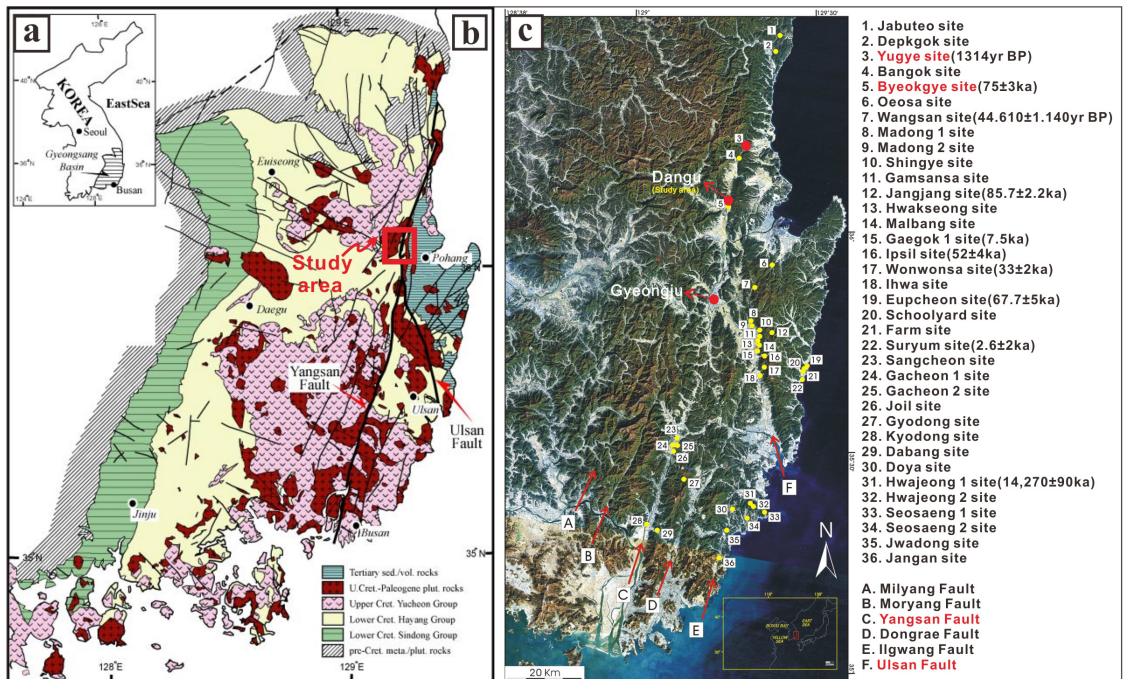
이번 연구에서는 북부 양산단층대 주변에 분포하는 제4기 단층의 운동특성과 시기를 알아보고자 경북 경주시 단구리 일대에서 트렌치 조사를 실시하였다. 트렌치 조사를 통해 확인된 단층은 기존에 보고된 벽계단층(그림 1, 2)에 인접하여 있고, 동일한 연장성을 보임에 따라 동일단층으로 해석되며, 이 논문에서는 ‘단구단층’으로 명명하였다. 단층의 자세와 선형구조 분석을 통해, 단구단층은 양산단층의 북측 가지 중의 하나인 것으로 판단되며, 트렌치 단면에서 다수의 제4기 퇴적층을 절단하고 있기 때문에 북부 양산단층의 단층활동 특성에 대한 많은 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 양산-울산 단층대의 진화특성을 비롯해 한반도 남동부에 분포하는 제4기 단층의 활동성 연구에 크게 기여

할 수 있는 매우 의미 있는 연구일 것으로 판단된다.

최근 우리나라에서는 제4기 단층의 연구를 위하여 다양한 단층연대측정법들이 도입되고 있으나, 이들 사이의 불일치가 심하여 이들 연대의 신뢰도가 의심을 받는 경우가 많이 있다. 따라서 우리는 이번 연구에서 이러한 문제점을 보완하고자 3가지의 서로 다른 방법을 독립적으로 사용하여 연대를 추론하고자 하였으며, 이들의 불일치에 대해 토론하고 앞으로의 연대 측정에서의 문제점에 대해서도 논의하고자 하였다.

## 2. 연구지역

연구지역은 행정구역상 경상북도 경주시 강동면 단구리로, 경상분지에 속하는 백악기 퇴적암을 기반암으로 하고 있으며, 이를 이후의 백악기 화산암류와 화강암이 관입하고 있다(그림 1; Um *et al.*, 1964). 이 지역은 양산단층의 주단층대가 통과하는 위치로 가지단층을 비롯한 2차 변형구조들이 다수 발달하고 있으며, 일부 지점에서는 양산단층의 제4기 단층



**Fig. 1.** (a, b) Regional geological map around the study area (modified from Lee, 2000). (c) Distribution of Quaternary fault sites in the southeastern part of the Korean peninsula. The youngest OSL or C<sup>14</sup> ages of the sediments displaced by the faults at each site (marked with numbers within white boxes) are presented in black boxes. The Yugye and Byeokgye sites, located near the studied site, are marked as the site of No. 3 and 5, respectively (modified, Yang, 2006).



운동이 보고된 바 있다(Choi *et al.*, 2012).

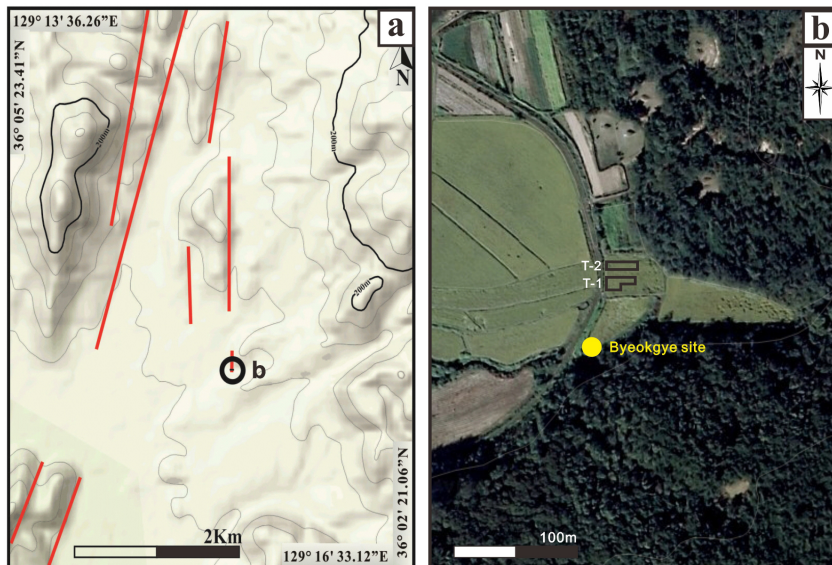
연구지역에서 보고된 가장 대표적인 제4기 단층운동은 벽계지점의 자연노두를 통해 보고된 바 있다(Kee *et al.*, 2009). 벽계단층은 양산단층의 주단층과 평행한 북북동-남남서 방향의 주향과 거의 수직에 가까운 경사를 보이며, 수평에 가까운 단층조선( $011^{\circ}/08^{\circ}$ )이 관찰되는 우수향 주향이동단층이다. 이 단층을 경계로 동측은 세립질 화강암과 안산암이 발달해 있고, 서측은 제4기 퇴적층이 발달하여 서로 단층으로 접촉하고 있다(그림 3; Ryoo *et al.*, 1999). 또한 두 종류의 단층 점토가 발달해 있고, 제4기 퇴적층의 상부는 담갈색의 역층과 사층의 호층으로 구성되며, 하부는 담회색의 이질 사층 및 사층으로 구성된다. 이 층에 대한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정 결과는  $75 \pm 3$  ka를 보이며(Kee *et al.*, 2009), 이는 연구지역 일대에서의 양산단층대가 최소한 이 시기 이후에도 운동하였음을 지시한다.

### 3. 연구방법

최근 고지진 연구를 위해서는 제4기 단층의 운동 시기와 특성 등 변형이력에 대한 많은 정보를 얻을 수 있는 트렌치 조사가 활발히 진행 중에 있다(McCalpin, 1996; Burnank and Anderson, 2001). 국내의 경우,

이미 양산단층과 울산단층을 따라 또는 그 주변에서 많은 트렌치 연구가 수행되었고, 이를 통해 제4기 단층운동의 증거들도 많이 보고되었다(Lee *et al.*, 2003; Kim and Jin, 2006; Kee *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2014). 일반적으로 트렌치 조사는 단층에 수직하게 굴착된 단면을 통해 단층분석을 시도하는 것으로, 여러 상황에 따라 다양한 방법의 트렌치가 수행될 수 있다. 특히 주향이동단층의 연구에서는 주향이동성분의 변위에 대한 정보를 획득하고자 단층면에 수직 및 평행한 방향으로 굴착하는 3차원 트렌치 조사(Rockwell *et al.*, 2000; Marcoa *et al.*, 2005)가 많이 수행되고 있다.

그러나 이번 연구에서는 현장여건 상 3차원 트렌치를 실시하기가 어려워 선형구조를 통해 인지된 추정단층의 방향에 수직한 방향으로 두 차례에 걸쳐 트렌치를 굴착하였다(그림 2). 특히 트렌치 지점을 선정함에 있어, 제4기 퇴적층의 분포 및 연대측정의 시료를 획득하는 것이 중요하기 때문에 하천퇴적물이 존재할 수 있는 지점을 선택하였다. 두 차례 트렌치 모두 단층을 가장 잘 관찰 할 수 있는 동-서 방향으로 굴착을 하였고, 첫 번째 트렌치(T1)는 동-서 방향으로 약 8 m, 남-북 방향으로 약 3 m, 깊이 4 m로 굴착하였다. 두 번째 트렌치(T2)는 동-서 방향으로 10 m, 남-북 방향으로 1 m, 깊이 5 m로 굴착을 하였다. T2는 T1에서 명확하게 확인하지 못한 단층과 제4기

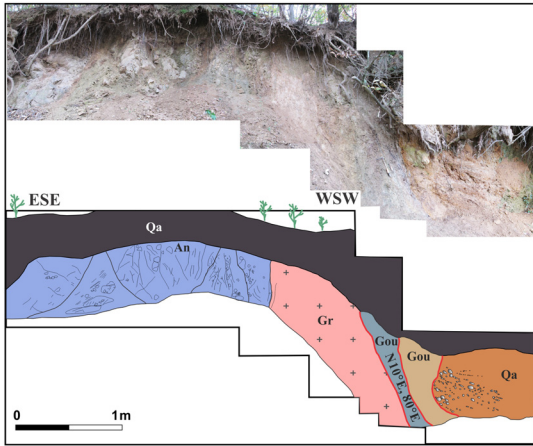


**Fig. 2.** (a) Lineament distribution around the study site (marked in a black circle). Main trend of the lineament is NS~NNE-S~SSW direction. (b) Setellite image of the study area, Byeokgye site and plane view of trenches.



지층과의 절단관계를 보다 면밀히 확인하기 위하여 북쪽으로 2 m 정도 이동하여 실시하였다(그림 4).

트렌치 단면에 대한 자세한 관찰과 기재를 통하여 제4기 퇴적층들을 구분하였고, 단층의 최후기 활동시기 및 운동이력을 분석하기 위해 단층에 의해 변형된 퇴적층에 대한 연대측정을 실시하였다. 특히 서로 다른 방법의 연대측정법 사이의 문제점이나 불일치를 보완하기 위하여 OSL 연대측정법, 방사성탄소 연대측정법, 제4기 퇴적층에서 발견되는 도자기를 이용한 연대추정 등 3가지의 방법을 병행하여 더욱 합리적인 최후기 단층운동의 시기를 추론하고자 하였다.



**Fig. 3.** Outcrop photo and sketch of the fault at Byeokgye site. This right-lateral fault is characterized by a fault contact between Quaternary sediment and andesitic bedrock. Red line : Fault, An : Andesite, Gou : Gouge, Gr : Granite, Qa : Quaternary sediment.

#### 4. 트렌치 조사 결과

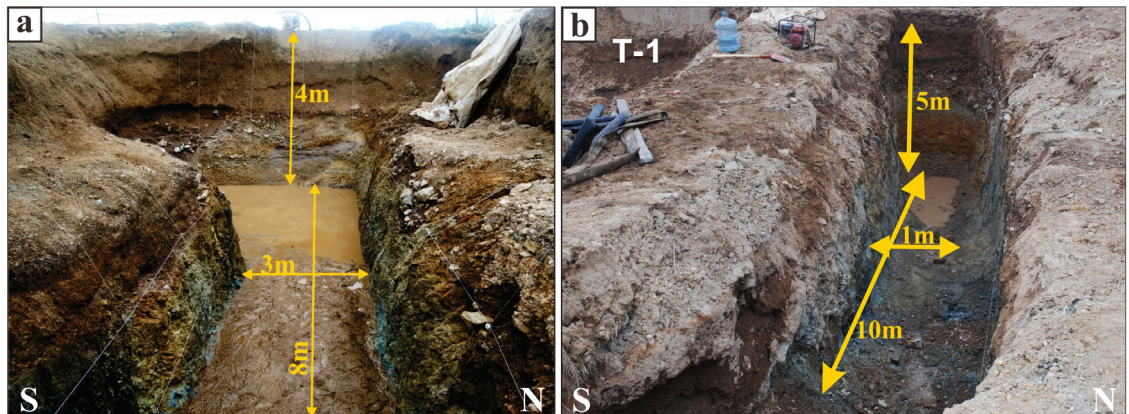
두 번의 트렌치 조사에서 확인된 단구단층은 N10-20°E/75-79°SE의 자세를 보이며, 015°/15°의 단층 조선을 통해 일부 역단층 성분을 가지는 우수향 주향이동으로 해석되며, 벽계단층과 매우 유사한 운동 특징을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다(그림 5, 6).

T1과 T2의 북측 트렌치 단면에서 확인되는 단층 주변의 제4기 퇴적층은 입자의 크기, 기질, 원마도, 분급도, 색상 등을 기초로 상위에서부터 동일하게 Unit A, B, C, D, E, F, G, H로 구분하였다. 그러나 각각의 퇴적층은 T1과 T2에서 모두 동일하게 분포하지 않는데, 이러한 상이한 결과는 침식과 단층운동에 의한 결과로 판단된다. 각 퇴적층의 특성은 트렌치 조사결과를 논할 때 설명하도록 하겠다.

##### 4.1 T1 분석결과

첫 번째 트렌치의 북쪽 단면(T1-N)에서 관찰되는 단층의 상반은 백악기 세립질 화강암이며, 하반은 미고결된 제4기 퇴적층으로 이루어져 있다(그림 5). 화강암 내에는 단열의 밀도가 높고 일부 단열에서는 석영세맥이 관찰되는데, 이는 단층손상대를 따른 유체유입의 결과로 판단된다. T1-N 단면의 동측부에 화강암 내 중성 암맥이 N58°E/80°NW의 자세로 관입하였다.

T1-N 단면에서는 상위에서부터 A, B, D, F, G, H 층이 관찰된다(그림 5). Unit A는 현재 논이 경작되고 있는 인위적인 층으로, 벼의 뿌리와 줄기 등 현생

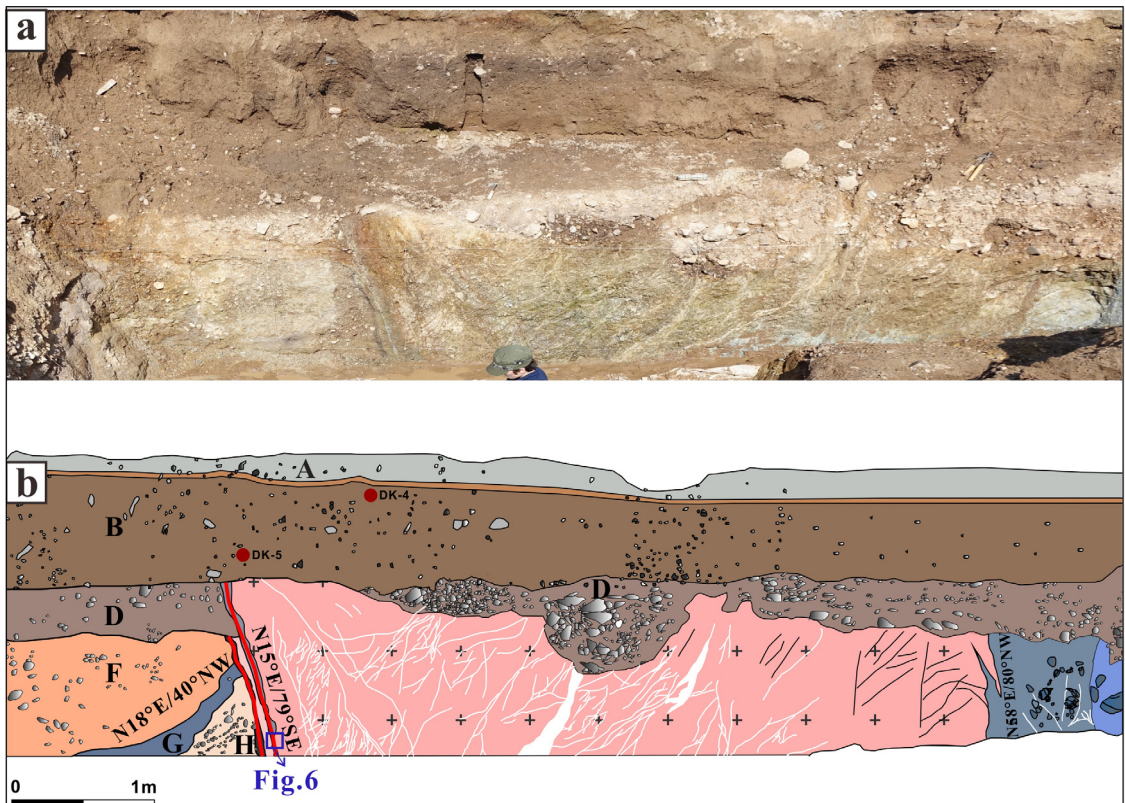


**Fig. 4.** Overviews of the trench site. (a) First trench , (b) Second trench.

생물의 잔류 유기물을 갖고 있으며, 각진 역들을 낮은 비율로 함유하고 있다. Unit B는 입자간의 결합력이 매우 약해 쉽게 부서지는 특징을 보이고, 유기물과 숯이 함유되어 있다. 또한 Unit B의 상부에는 논경작과 지하수의 작용에 의한 용탈작용(leaching)으로 탈색대인 E층이 발달하고 있다(Lutgens and Tarbuck, 2009). Unit D는 각진 역들을 포함하고 기질의 함량이 적은 하천 퇴적층이다. 단층의 상반에는 불규칙적인 부정합면을 기준으로 세립질 화강암 상위에 하천 퇴적층 D가 분포하는데, 세립질 화강암과 Unit F를 침식시키면서 퇴적한 특징을 확인할 수 있다. Unit F는 회색의 아각상 역들을 포함하고, 하부는 세립질의 점토가 주로 발달해 있는 반면 상부는 역들의 분급이 불량하다. Unit F는 H, G에 비해 끌림습곡이 강하게 나타나지 않지만 인지가 가능할 정도이다. Unit G는 어두운 청색으로 입자가 세립

질이고, 입자의 크기 차이에 의해 Unit H와 구분이 명확히 된다. 또한 단층에 의해 끌림습곡이 발달해 있고, 약 40°정도 휘어져 있다. Unit H는 부분적으로 노란색을 띠며 사질과 역질의 모래층이다. 기질의 비율이 역보다 낮으며, 역들은 원마도가 양호한 것과 불량한 것들이 혼합되어 있고, 층의 상부에서 역의 크기가 점이적으로 감소하는 특징이 있다. 단층에 의해 끌림습곡이 발달해 있고, 약 55°정도 기울어져 있다.

단구단층은 제4기 퇴적층들의 끌림습곡과 단층 조선을 통해 운동학적으로 역단층 성분을 갖는 우수향 주향이동단층임을 지시한다. 단층대를 따라서는 색상이 다른 세 조의 단층점토가 발달하는데 검은색의 단층점토는 5-7 cm의 두께를 가지고 있으며, Unit H, G, F를 절단한 것으로 관찰된다. 반면에 청색의 단층점토는 7-10 cm 두께를 가지며, Unit H, G, F를



**Fig. 5.** Trench logs and dated stratigraphy of the trench 1. (a) View of the northern part of the first trench (T1-N), (b) Sketch of the T1-N. Dangu fault (N15°E/79°SE) contact with fine grained granite and Quaternary sediment. Three different fault gouges indicate at least three faulting events. Red line is fault and white line is Quartz vein. Unit A, B, D, F, G, H is Quaternary sediments and Unit G, H is folded by fault.



포함해 D까지 절단한다(그림 5). 짙은 녹색의 단층 점토는 10-14 cm의 두께를 가지고 있으며, 검은색과 청색의 단층점토 사이에 발달한다. 이 단층점토는 Unit H, G, F를 절단 한 것으로 관찰된다. 서로 다른 특성을 보이는 세 조의 단층점토는 이들 퇴적층이 퇴적된 이후 최소 세 번의 단층운동이 있었음을 시사하는 것으로 해석된다(그림 5, 6).

첫 번째 트렌치의 남쪽 단면(T1-S)에서 관찰되는 단층의 자세는 N10°E/60°SE이며, T1-N과 동일하게 단층점토가 세 종류로 발달하지만 그 두께는 더 두꺼운 것을 확인할 수 있다(그림 7). 또한 벽계단층에 발달한 단층점토 또한 두께가 상대적으로 T1-N에서 발달하는 단층점토보다 더 두꺼워 이 지역에서는 남측으로 가면서 단층점토의 두께가 일반적으로 증가하는 현상을 보여준다. 세립질 화강암에서 푸른색 변질대는 주 단층과 준평행하게 발달한 단층과 단열을 따라 들어온 열수에 의한 것으로 추정된다. 또한 주 단층과 준평행한 단층 사이에서는 진한 황토색으로 변질된 것을 발견할 수 있다(그림 7a). 이것은 열수에 의해 암석이 변질된 이후 지하수가 퇴적층과 기반암 사이의 공극을 통해 흐르다가 화강암의 단층을 만나 경사 방향으로 침투하면서 생성된 것으로 추정된다.

트렌치 단면에서 관찰되는 제4기 퇴적층은 상위부터 Unit T1S-A, T1-S-A, T1-S-B1, T1-S-C, T1-S-D

로 분류하였다. T1-S에서 관찰되는 제4기 퇴적층은 T1-N, T2-N에서 관찰되는 퇴적층과 대비가 확실하지 않아 별도의 층명으로 분류하였다. Unit T1S-A는 유기물이 다량 포함되어 있으며, 역의 비율이 낮은 특성을 통해 Unit B와 대비될 수 있다. Unit T1-S-B1은 각진 왕자갈과 자갈을 포함하고 기질의 함량이 적은 층이다. 또한 세립질 화강암을 덮고 있으며, 역의 비율과 크기의 특징을 통해 Unit D와 대비될 수 있다. 반면 Unit T1-S-B2는 왕자갈로 구성된 역들이 밀집되어 있고 이들 사이에 미약한 층의 경계가 존재하여 이들을 세분하였다. Unit T1-S-C는 대부분 자갈로 구성된 퇴적층이며, 기질의 비율이 낮고 좁은 범위에서만 발달한다. T1-S-D는 아각상의 역들을 포함하여, Unit T1-S-C, T1-S-E와 뚜렷하게 구별된다. 기질의 색은 주황색과 회색이 섞여있고, 역의 특성을 통해 Unit F와 대비될 수 있다. Unit T1-S-E는 Unit T1-S-D에 포획되어 있는 형태로 발달하며, 역의 비율이 현저히 낮으며 대부분 점토로 이루어져 있다. 또한 퇴적층의 색, 고립되어 있는 형태를 통해 Unit G와 대비될 수 있다.

#### 4.2 T2 분석결과

두 번째 트렌치 북쪽사면(T2-N)에서 관찰되는 퇴적층의 양상은 T1-N에서와는 대부분 대비가 되지만 몇몇의 층은 대비가 되지 않는다. 트렌치 단면

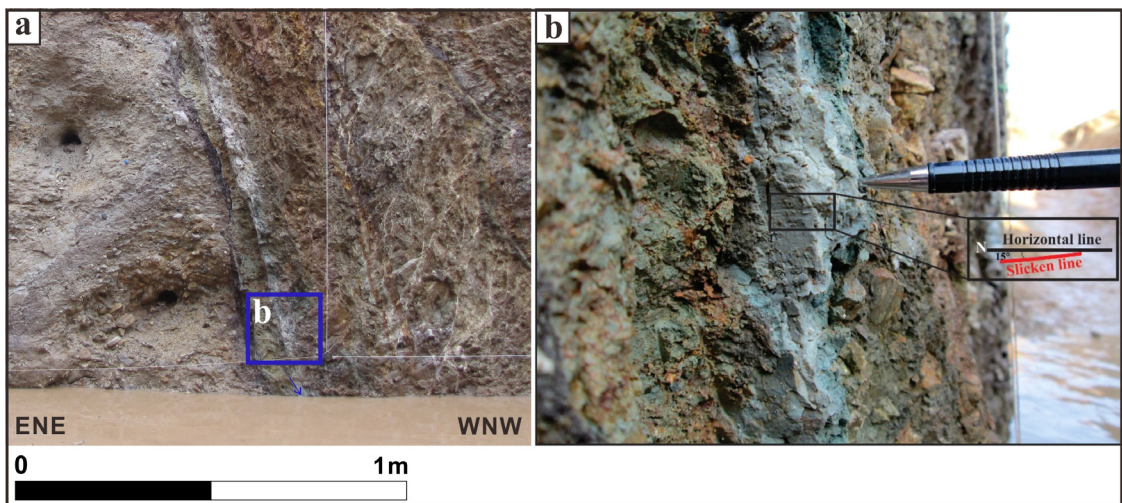


Fig. 6. (a) Close view of T1-N. Black, dark green, green fault gouges are developed along the fault. (b) Slickensite of the Dangu fault (015°/15°) indicates dextral slip.

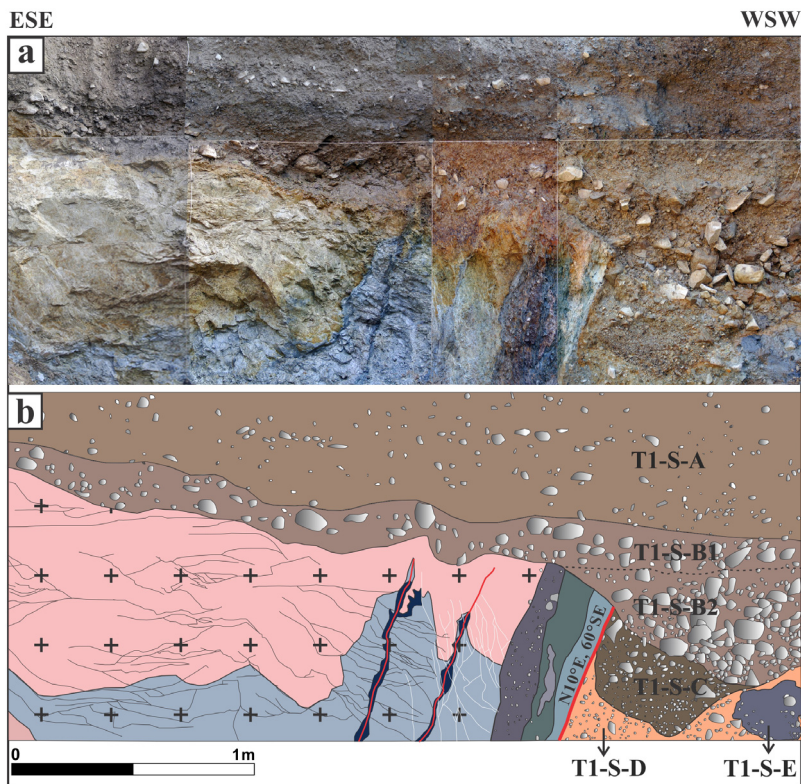


에서 관찰되는 제4기 퇴적층들을 T1-N과 동일하게 상위에서부터 Unit A, B, C, D, E, F, G로 분류하였다. Unit A는 현재 논이 경작되는 층이며, Unit B는 하부에서 단층에 의해 변형된 것으로 추정되는 소규모 변위가 관찰된다. Unit C는 다른 층에 비해 역들의 비율, 역의 크기가 작으며, 단층에 의해 층의 형태가 변형되어 있다. Unit D는 기질 함량이 적고 각진 자갈, 왕자갈들을 포함하고 있다. 또한 Unit D는 단층에 의한 약 67 cm의 변위가 관찰된다. Unit E는 T1-N에서 발달을 하지 않고 T2-N에서만 일부 남아있는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 Unit D가 퇴적될 때 침식에 의한 풍화로 인해 Unit E가 일부 지역에만 남아 있는 것으로 해석된다. Unit E는 분급도가 나쁘고, 원마도가 양호한 거력들과 자갈들이 함께 섞여있고, 단층에 의해 약 66 cm 변위되어 있다. Unit D와 E의 변위량은 비슷한 반면, Unit C

의 변위량이 갑작스럽게 감소하는 것은 누적변위와 상반침식에 의한 차이로 해석된다. Unit G는 T2-N에서는 Unit F에 포획되어 있는 형태로 발달하는데, 이는 Unit G가 단층에 의해 교란된 후 풍화침식에 의해 분리되어 Unit F에 고립된 형태로 존재하는 것으로 해석된다.

## 5. 단층의 활동연대 추정

우리나라 제4기 단층 연구에 있어서 어려운 점 중의 하나는 단층의 활동시기를 정확하게 결정하기 어렵다는 점이다. 물론 이것은 기본적으로 우리나라에서 제4기의 퇴적층이 부족하고 주로 발달하는 제4기 퇴적층은 해안단구 형태로 발달하여 탄소를 이용한 연대측정에 어려움이 많기 때문이기도 하지만, 비록 제4기 퇴적층이 발달할 가능성이 있는 곳에서 제4기



**Fig. 7.** Trench logs and dated stratigraphy of the trench. (a) View of the southern section of the second trench (T1-S), (b) Sketch of the T1-S. Dangu fault (N10°E/60°SE) contact with fine grained granite and Quaternary sediment. The color of the granite is changed along faults and fractures. Fault gouges are divided into three types; Blue green, Dark green, Navy color. Red line is fault, white line is quartz vein, and black line is fracture. T1-S-A, T1-S-B1, T1-S-B2, T1-S-C, T1-S-D are Quaternary sediments.

단층을 찾는다 하더라도 경작이나 도시화로 인하여 퇴적층이 교란되거나 매립물로 채워져 있어 실질적으로 자연적인 퇴적층을 통한 연대측정에 많은 어려움이 있다. 우리나라에서는 최근에 제4기 단층의 연대결정을 위해 상대적으로 신뢰도가 높고 시료의 획득도 상대적으로 용이하며 국내의 기술도 안정화되었다고 생각하는 OSL 연대측정법을 많이 사용하고 있다. 그러나 이 방법도 적절한 퇴적층이 발달하지 않는 경우 어려움이 있다.

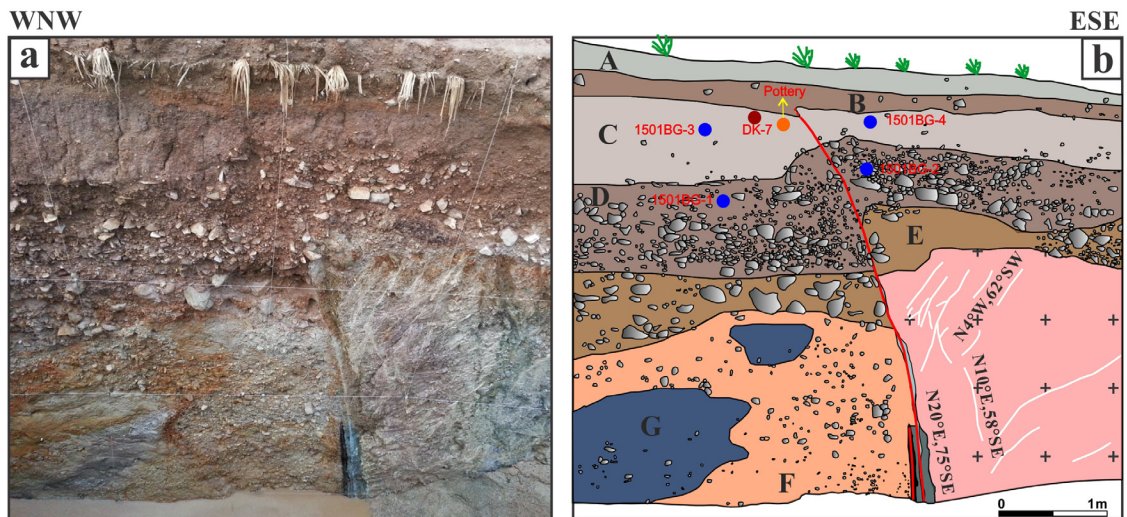
이번 연구에서는 연대측정을 위하여 하천의 퇴적층이 발달하고 있는 지역을 선정하였기 때문에 실질적으로 제4기 단층의 연대측정에 가장 많이 사용하고 있는 OSL 연대측정법과 방사성탄소 연대측정법을 사용하여 수치연대를 획득하고자 시도하였으며, 부수적으로 이 지역에 발달한 퇴적층에서 도자기 파편들이 많이 발견되어 이를 이용한 고고학적 연대추정도 병행하여 시도하였다(그림 9, 10).

**5.1 OSL 연대측정법**

OSL 연대측정법은 Murray and Wintle (2000)의 단일시료재현법(Single Aliquot Regenerative Dose)이 개발된 후 제4기 퇴적층의 연대측정에 전 세계적으로 적용되고 있다. OSL 연대측정은 주로 석영입

자를 이용하여, 퇴적물내의 석영입자가 마지막으로 빛에 노출된 이후 경과한 시간을 측정하는 방법이다 (최근에는 K장석을 이용한 루미네선스 연대측정법도 활발히 적용되고 있다). 석영입자가 이동하는 동안 태양빛에 노출되면 루미네선스 신호가 ‘초기화’된다. 이후, 석영입자가 퇴적되어 햇빛으로부터 차단되면, 주변 광물에 포함된 방사성동위원소로부터 방출되는 이온화방사선(ionizing radiation)에 노출되고, 이로부터 석영입자의 격자결함 내에 루미네선스신호(latent luminescence signal)가 축적된다. 암실에서 석영입자를 분리한 후, 분리된 석영입자를 측정기기에 부착된 청색발광다이오드(Blue-LED)에 노출시키면 OSL 신호가 방출된다. 방출된 루미네선스의 양으로 퇴적층에 포함된 석영입자가 퇴적된 후 얻어진 등가선량(equivalent dose; De)을 계산할 수 있으며 이것을 연간선량(dose rate; Dr)과 함께 사용하여 연대를 계산할 수 있다.

T2-N의 Unit D에서 채취한 시료 2점과 Unit C에서 채취한 시료 2점에 대한 OSL 연대측정 결과는 7.4±0.4 ka (1501BG-1), 10.1±0.5 ka (1501BG-2), 7.7±0.3 ka (1501BG-3), 7.5±0.3 ka (1501BG-4)로 Unit D에서 채취한 시료 1501BG-1과 1501BG-2는 연대가 약 2.7 ka 만큼 차이가 나서, 토론에서 자세히 기술을 하겠다.



**Fig. 8.** Trench logs and dated stratigraphy of the trench. (a) View of the northern section of the second trench (T2-N), (b) Sketch of the T2-N. Dangu fault (N20°E/75°SE) is the contact between fine grained granite and Quaternary sediment. Fault is terminated in the upper part of Unit C. Clearly, Unit D and E are displaced by fault. Unit G is isolated inside Unit F. Blue dots are OSL dating points, orange dot represents porcelain point and reddish brown dot is radiocarbon dating point.



## 5.2 방사성탄소 연대측정법

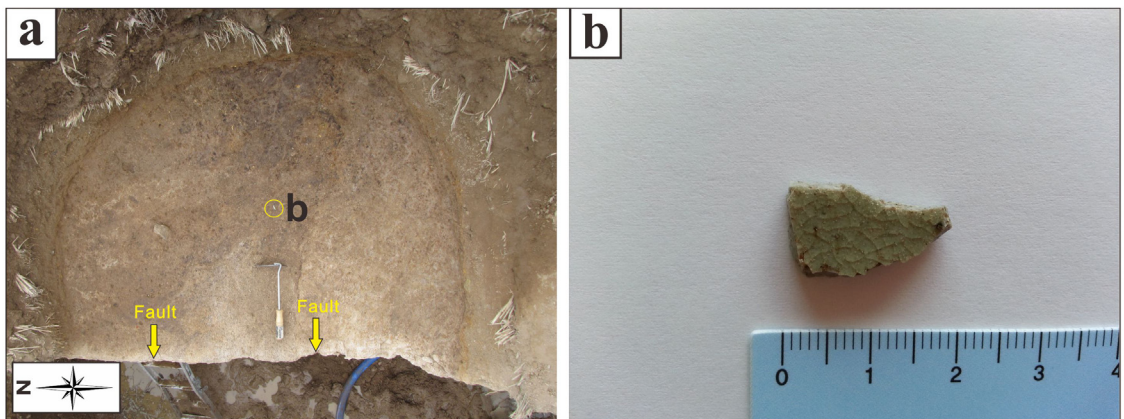
방사성탄소 연대측정법은 유기물 잔해에 존재하는 방사성 동위원소  $C^{14}$ 의 붕괴를 이용하여 연대를 측정하는 방법으로 5만년 이하의 상대적으로 젊은 연대의 측정에 사용된다. 우주선이 지구의 대기권으로 들어오면서  $C^{14}$ 를 만들어 내고, 식물은 이산화탄소를 고정하는 과정에서  $C^{14}$ 를 흡수하게 되고, 식물이 죽으면  $C^{14}$ 의 흡수는 멈추게 된다. 식물체 안에 있던  $C^{14}$ 의 절반이 질소로 바뀌는 데는 5,730년이 걸리며, 이것이  $C^{14}$ 의 반감기이다. 이 연대측정법의 한계는 짧은 반감기 때문에 측정 가능한 연대의 상한을 75,000년 정도로 제한한다. 또한 1950년을 기준으로 거꾸로 올라가는 B.P. (Before Present)라는 단위를 사용하며, 보정을 통해 실제의 날짜와 일치시킨다. 1950년을 기준으로 삼는 것은 핵실험에 의해 대기 중  $C^{14}$ 의 양이 인위적으로 변화한 시점이 1950년이기 때문이다(Bowman, 1990).

T1-N, T2-N의 Unit B, C에서 채취한 시료 DK-4, 5, 7에 대한 방사성탄소연대측정 결과는  $250 \pm 30$  B.P.,  $1000 \pm 40$  B.P.,  $3990 \pm 40$  B.P.이다(그림 8). DK-4, 5의 연대는 Unit B에서 발견되는 도자기 파편과 대비될 수 있으며, DK-7의 결과는 동일한 층서에서 채취된 1501 BG-3의 연대측정에 비해 약 3.7 ka정도 젊은 연대를 지시하고 있어, 토론에서 자세히 기술을 하겠다.

## 5.3 고고학적 연대추정

이번 트렌치 조사에서 드러난 퇴적층에는 비교적

많은 도자기 파편들이 포함되어 있으며, 일부 도자기를 포함하는 지층은 단층에 절단된 양상을 보이고 있어 이 단층이 역사시대에 활동하였을 가능성을 지시하고 있다. 우리나라 도자기의 양식은 시대마다 상당히 다른 양상을 보여주고 있기 때문에 이를 통해 최후기 단층활동의 시기를 추정할 수 있을 것으로 판단하여 다양한 지층들에 포함된 도자기 파편을 수집하여 고고학적 검증을 실시하였다. 도자기 파편은 T1에서 다수 발견 되었지만 대다수가 단층에 의해 절단되지 않은 지층이나 절단여부가 명확하지 않은 단층하반의 일부지층에서 발견되었다. 특히 T1의 B층에서 도자기 파편이 상당수 발견되었으며, 이들의 연대는 조선시대 후기로 추정되어 T1-N의 B층에서 채취한 DK-4 시료의 방사성탄소연대( $250 \pm 30$  B.P.)와 유사함을 보여준다(그림 10). 비록 T2-N에서 다수의 도자기 파편이 절단되지 않은 퇴적층에서 발견되었지만, 절단된 Unit C에서도 일부 도자기 파편이 발견되었다(그림 8, 9). Unit C에서 발견된 도자기 파편은 비록 그 수가 적고 상부의 일부 지층에서만 발견되어 상위에 존재하는 B 지층의 퇴적시기에 하위에 존재하는 C 지층의 상부로 유입되었을 가능성도 배제할 수가 없다. 그러나 이 도자기들이 절단되지 않은 상위 지층에서 발견된 도자기와는 그 양식에서 명확한 차이를 보이고 있어서 절단된 지층에서의 도자기파편으로부터 추정된 연대가 어느 정도 의미를 가질 것으로 판단하였다. 도자기의 양식을 통해 고고학적으로 추정한 절단된 지층에 포함된 이 도자기들의



**Fig. 9.** Surface trace of the fault and ceramic fragment within the displaced layer. (a) Plan view of porcelain and two fault line. Yellow arrows indicate end of fault line, (b) Close view of the porcelain (T2-N). The age of the porcelain is estimated as the middle of the Joseon Dynasty.





Fig. 10. Porcelains found in Unit B. Porcelain age is estimated as the late Joseon Dynasty.

연대는 조선시대 중기(AD 1,550~1,700)로 밝혀졌다. 따라서 도자기 파편으로부터 추정된 단층의 최후기 운동시기는 AD 1,550 이후로 해석될 수 있지만, 많은 양이 발견되지 않았고 상부층에서만 발견이 되어 추후 더 많은 자료의 수집이 필요해 보인다. 또한 이러한 도자기의 양식에 기초한 연대의 추정이 이곳에서 실시한 수치 연대측정법인 OSL 연대측정법이나 방사성탄소 연대측정법에 의한 결과와 상당한 차이를 보인다는 것이 해석에 어려움을 주고 있다.

## 6. 토 론

이번 트렌치는 제4기 퇴적층이 발달하여 연대측정이 가능한 지역을 최우선적으로 선정하였기 때문에 단층운동 특성과 절대연령에 대한 정보를 어느 정도 획득할 수 있어서 이 지역의 신기단층운동에 대한 토론이 가능하다. 그림 11는 트렌치 조사를 통해 관찰된 단층특성을 비롯한 퇴적층의 절단여부와 연대측정 결과를 종합하여 단구단층의 진화특성을 모식도로 나타낸 것이다. Unit H 이전에 퇴적된 퇴적층은 이 단면에서 관찰되지 않으므로 이곳에서는 Unit E~H가 퇴적된 이후의 변형이력에 대해서만 논의하였다(Stage 1). Unit E까지 퇴적된 이후 단층운동에 의해 Unit E까지 절단된다. 단층운동 후 Unit E는 침식에 의해 풍화되어 T2-N에서만 남아있게 된다(Stage 2). Unit D가 E를 침식시키면서 퇴적되고, 이후 Unit C가 퇴적된다(Stage 3). T1-N에서 Unit C가 발달하지 않고 유기물의 함량이 많은 Unit B가 발달해 있는 것으로 보아 Unit B가 퇴적되면서

Unit C를 침식시켰거나 Unit C가 부분적으로 불규칙하게 발달하였을 것으로 추정된다. 상부층이 교란된 경작층으로 파악되어 최후기 단층운동에 의한 절단이 어디까지 이루어졌는지를 명확하게 인지하기 어렵지만 Unit B 하부가 약간 변위되어 있는 것처럼 해석할 수도 있고 Unit C층까지만 변위된 것으로 해석할 수도 있다(그림 8). 따라서, 이러한 관찰결과를 토대로 두 가지의 모델을 제시하였다. 첫 번째는 Stage 3 이후 Unit B의 하부 층이 퇴적되는 동안 소규모 변위를 일으키며 단층활동이 있었을 것으로 가정할 수 있다(Stage 4-1). 또 하나의 가능성은 Unit C까지 퇴적된 후, 단층운동에 의해 Unit C까지 절단되고, 이후 상반의 상부가 침식된다(Stage 4-2). 마지막으로 단층운동 이후 Unit B와 A가 퇴적되어 현재의 상태로 된 것으로 해석할 수 있다(Stage 5).

이번 연구의 가장 큰 목적 중의 하나는 이 단층의 최후기 활동시기를 밝히는 것이다. 제4기 퇴적층의 연대를 알고자 할 때는 주로 OSL 연대측정법이나 방사성탄소 연대측정법이 많이 사용되고 있다(Kyung, 2001; Lee *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2014). 이번 연구에서는 퇴적층에서 가능한 OSL 연대측정, 방사성탄소 연대측정, 고고학적 연대추정을 시도하여 단구단층의 마지막 단층운동 시기를 결정하고자 하였다. 하나의 방법을 이용한 연대결정이 신뢰도에 문제가 있을 수 있다고 판단하여 가능한 많은 방법을 이용하여 연대자료를 획득하고 이들을 종합하여 최후기 연대를 결정하고자 하였다. 그러나 실질적으로 측정 또는 추정된 연대들 사이에 많은 차이가 있어 해석에 어려움이 있었다. 각각의 연대측정은 비교적 잘 보존되어 있는 것으로 해석된 T1-N, T2-N의 Unit B, C, D에서 이루어졌다.

T1-N에서 Unit B 하부와 상부에서 시료 두 개를 채취하여 방사성탄소 연대측정법으로 측정하였다. Unit B 하부에서 채취된 DK-5의 연대는  $1000 \pm 40$  B.P.이고, 상부에서 채취된 DK-4의 연대는  $250 \pm 30$  B.P.으로 나왔다. 이 결과는 Unit B에서 도자기 파편들이 다수 발견되었던 것과 잘 대비가 된다. T2-N에서는 OSL 연대측정법과 방사성탄소 연대측정법, 그리고 고고학적 연대추정이 이루어졌다.

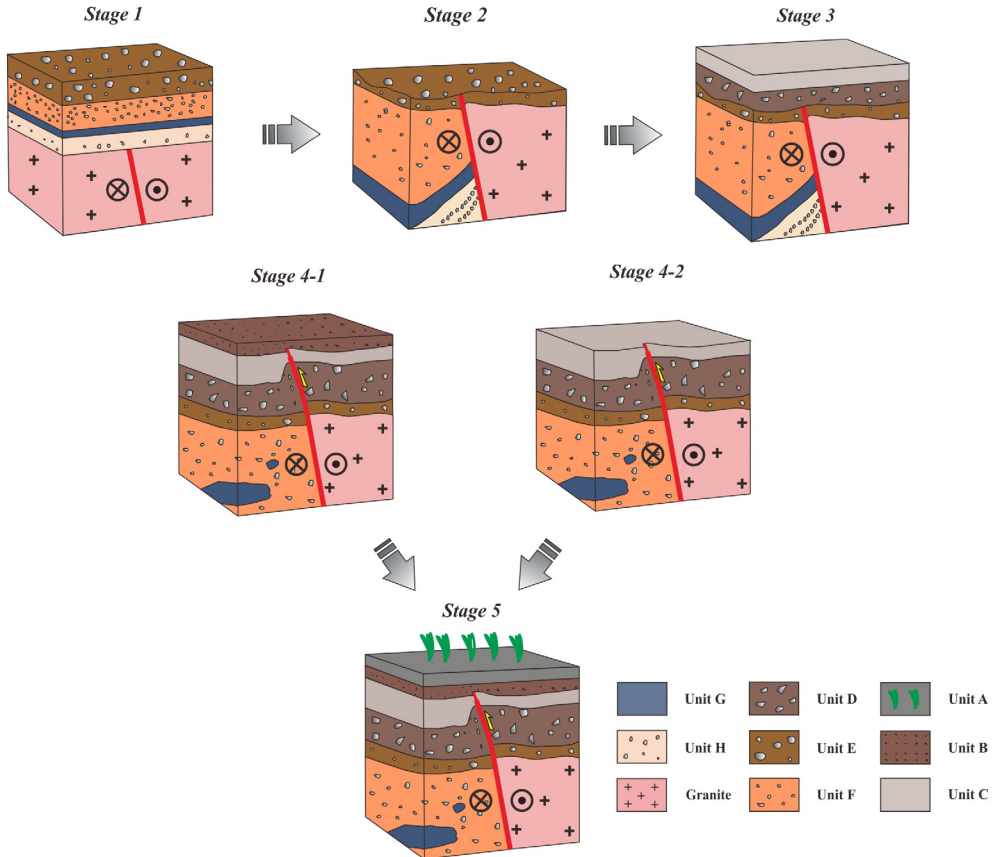
T2-N에서 채취된 시료 1501 BG-1, -3, -4의 OSL 연대는 각각  $7.4 \pm 0.4$  ka,  $7.7 \pm 0.3$  ka,  $7.5 \pm 0.3$  ka이며 1501 BG-2 연대는  $10.1 \pm 0.5$  ka 으로 측정되었다.

시료 1501 BG-2가 다른 시료와 연대 차이가 나는 것은 단층의 역단층 운동에 의해 교란되었을 것으로 추정되지만 정확한 원인은 현재의 연구에서 해석하기 힘들다. 반면 1501 BG-1, -3, -4 연대 사이의 불확실도(uncertainty)는 모두 1σ 표준오차이며, 1σ 오차는 “참값이 오차범위에 속할 확률이 68%” 라는 통계학적 정의를 고려할 때, 이 세 연대는 서로 다르다고 할 수 없다. 즉, 참값이 오차범위에 존재할 확률이 99%가 되는 3σ 오차로 다시 계산하면, 위의 연대는 각각 7.4±1.2 ka, 7.5±0.9 ka, 7.7±0.9 ka가 되어, 오차범위에 겹치고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 시료 1501 BG-1, 3, 4는 7.5 ka 내외의 퇴적연대를 반복적으로 지시하며 서로 다른 지점에서 채취한 시료

에서 동일한 연대가 도출되는 것은 연대측정 신뢰도를 확인할 수 있는 관찰로 해석된다.

Unit C 상부에서 채취된 1501 BG-3과 DK-7의 연대 차이는 약 3.7 ka가 나는 것을 알 수 있다. Unit B 하부가 퇴적되는 중 또는 Unit B 퇴적 전에 최후기 단층활동이 있었을 것으로 생각되어, 최후기 단층운동 때 Unit C는 지표에 노출되어 있었을 확률이 높아 퇴적층의 혼합에 의한 측정결과의 교란과 연대측정법 차이에 기인한 결과의 교란을 생각해볼 수 있으며, 이는 추후 연구를 통해 검토해야 할 것으로 생각된다.

도자기를 통한 고고학적 연대추정 결과는 조선시대 중기가 가장 유력한 것으로 보이지만, 다른 연대



**Fig. 11.** Structural model for the evolution of the Dangu fault. Field evidences show that at least three faulting events are recorded on these trench sections. In the first stage, faulting deformed the older sedimentary layers which were deposited over the granitic host rock. In the second stage, the fault movement caused dragging of Unit E~H. In the third stage, Unit D and C are deposited on the Unit E. In the stage 4-1, as is distinguishable in trench face T2-N, the fault cut units D, C and lower part of Unit B. In the stage 4-2, faulting deformed the Unit D and C. In the last stage, remaining sedimentary layers are deposited on the Unit B or C.

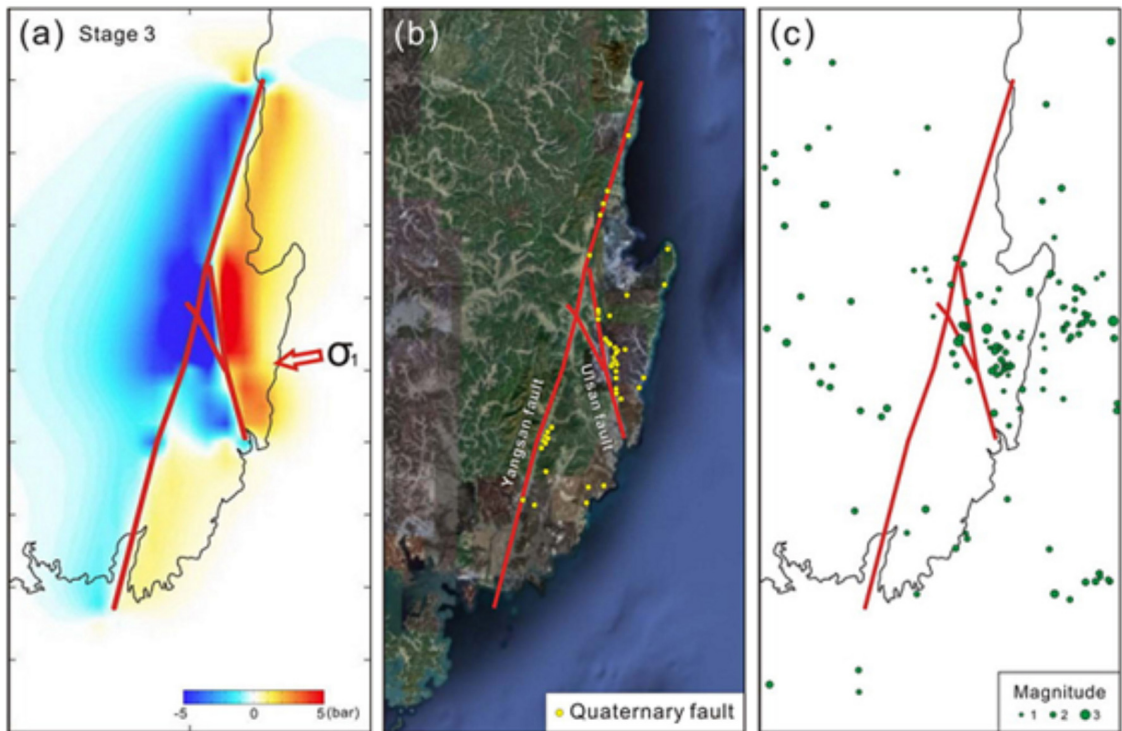
측정 결과와 많은 차이가 나고 있어 추후 더 많은 자료의 수집과 검토가 필요해 보인다. 절단된 지층과 절단되지 않은 지층들에서 출토되는 도자기 파편들의 양식이 다르기 때문에 상당한 신뢰성이 있다고 판단이 되지만 상부층이 퇴적될 때 초기에 일부 오래된 도자기파편들이 하부의 지층에 유입될 가능성도 전혀 배제할 수 없기 때문에 추후 트렌치 작업에서는 더욱 신중하게 자료를 수집해야 할 것으로 판단된다.

연대자료들을 종합하여 판단할 때 단구단층의 마지막 운동시기는 최대  $7.5 \pm 0.3$  ka이며, 도자기 파편을 통한 연대추정을 신뢰한다면 조선시대 중기(AD 1,550 ~ 1,700)에 최후기 단층활동을 했을 가능성도 있다. 이 연대는 유계지점 단층의 최후기 활동시거나 역사지진의 자료들과 비교한다면 해석이 가능한 연대로 판단되어 추후 더 많은 연구의 필요성이 제기되고 있다. 역단층의 운동감각을 보여주는 유계단층의 마지막 단층운동은 방사성탄소 연대측정법에

의해 약 1314 B.P. 이후로 해석된 바 있다(Kyung, 2003). 단구단층의 고고학적 연대추정과 유계단층의 연대는 유사한 것으로 보이지만, 단층운동 특성이 상이하고 아직 판단을 위한 충분한 자료가 축적되었다고 볼 수 없어 추가적인 연구와 신중한 해석이 필요할 것으로 보인다.

벽계단층은 단구단층과 매우 인접한 지역에 있고 동일한 단층선상에 발달하여 기하학적으로 동일단층으로 해석이 되지만, 제4기 퇴적층의 OSL 연대는  $75 \pm 3$  ka 로 측정된 바 있다(Kee *et al.*, 2009). 이 결과는 단구지점이 벽계지점에 비하여 지형적으로 더 낮고 신기퇴적물의 공급이 가능한 곳에 위치하여 상대적으로 더 젊은 제4기 퇴적층이 발달하였기 때문에 더 젊은 단층활동을 기록할 수 있었던 것으로 해석된다. 이는 제4기 단층의 연구에서 트렌치 지점의 선정이 얼마나 중요한 지를 잘 보여준다.

양산단층 북부에는 현재까지 우리나라에서 보고된 가장 젊은 활동시기를 지시하는 유계단층(약 1,314 B.P.)



**Fig. 12.** (a) Coulomb stress changes are concentrated in the eastern and southeastern region of the Yangsan Fault and eastern region of the Ulsan Fault (Han *et al.*, 2009). (b) Locations of Quaternary faults along the Yangsan fault system and Ulsan fault system (modified from Kee *et al.*, 2009). (c) Green circles indicate the epicenters of the recent earthquakes (modified from Jeon, 2009).



이 발달하고 있으며(Kyung, 2003), 이번 연구지역인 단구리 일대 역시 양산단층의 북부에 위치하고 있어 기존에 제시된 울산단층과 양산단층 북부에서의 높은 제4기 단층활동성에 대한 해석(Han *et al.*, 2009)과 잘 일치한다(그림 12). 한반도 동남부 지역에 대한 수치 모델링의 결과는 현재의 응력장 하에서 양산단층 북부와 울산단층 동측 지괴에서 응력변화가 집중되는 것을 지시하고 있으며, 최근 지진의 진앙도 이 부근에서 많이 집중되는 것으로 보고된다(Han *et al.*, 2009; 그림 12). 따라서 양산단층 북부 및 울산단층의 재활성 가능성이 상대적으로 높은 것으로 판단되어 추후 더욱 정밀하고 심도 있는 연구가 이 지역을 대상으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 7. 결론

북부 양산단층대 주변에 분포하는 제4기 단층들의 운동특성과 시기를 알기 위하여 경북 경주시 단구리 일대에서 트렌치 조사를 실시하였다. 단구단층은 역단층 성분을 가지는 우수향 주향이동단층이며 단층점토의 특성과 제4기 퇴적층의 절단관계를 통해 제4기 이후 최소 세 번의 단층운동을 겪은 것으로 해석된다. 이 단층의 마지막 운동시기를 추론하고자 실시한 Unit C 퇴적층에 대한 연대측정결과, OSL 연대는  $7.5 \pm 0.3$  ka, 방사성탄소 연대는  $3,990 \pm 40$  B.P., 도자기 파편을 이용한 고고학적 연대추정 결과는 조선시대 중기(AD 1,550 ~ 1,700)로 추론되었다. 따라서 단구단층의 최후기 활동시기는 최대 7,500년 전에서 최소 300년 전까지의 범위일 것으로 판단되며, 추후 추가적인 자료의 수집을 통해 이러한 연대를 좀 더 명확하게 제한할 필요가 있을 것으로 판단된다.

단구단층의 연대측정 결과와 이전의 응력모델링 연구결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 보아 현재의 응력조건 하에서는 양산단층 북부와 울산단층을 따라 단층의 재활성이 발생할 가능성이 높은 것으로 평가된다.

## 사 사

이 논문은 2014-2015년도 (재)기상기술개발원에서 지원하는 지진기술개발사업 “한반도 동남부 지진특성 분석 및 단층과의 연관성 해석”과제(과제번호 :

CATER 2014-8010)의 일부로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다. 또한 이 논문을 꼼꼼하게 심사하여 건설적인 지적과 조언을 하여 주신 경재복 교수님과 익명의 심사위원님께서도 진심으로 감사를 드리고 연구를 도와주신 부경대학교 지질구조해 연구실 연구원 분들에게 감사드립니다.

## REFERENCES

- Bowman, S., 1990, Radiocarbon Dating, British Museum Press, London, 64 p.
- Burnank, D.W. and Anderson, R.S., 2001, Tectonic Geomorphology, Blackwell Science, Massachusetts, 274 p.
- Chae, B.-G. and Chang, T.-W., 1994, Movement History of Yangsan Fault and its Related Fractures at Chonha-Yongdok Area, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, 30, 379-394 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.-I., Oh, J.-H., Shin, S.-C. and Yang, M.Y., 1980, Geology and geochemistry Gyeongsang Supergroup in Ulsan. KIGAM Bull., 20, 33 p.
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Song, K.-Y., Kim, H.-C., Kim, Y.-H., Choi, P.-Y., Chwae, U.C., Han, J.-G., Ryoo, C.-R., Sun, C.-G., Jeon, M.S., Kim, G.-Y., Kim, Y.-B., Lee, H.-J., Shin, J.S., Lee, Y.-S. and Kee, W.-S., 2012, Active faults and seismic hazard map. NEMA, Seoul, 882 p.
- Choi, S.-J., Jeon, J.-S., Choi, J.-H., Kim, B., Ryoo, C.-R., Hong, D.-G. and Chwae, U., 2014, Estimation of possible maximum earthquake magnitudes of Quaternary faults in the southern Korean Peninsula. Quaternary International, 344, 53-63.
- 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.
- Han, S.-R., Park, J.Y. and Kim, Y.-S., 2009, Evolution modeling of the Yangsan-Ulsan fault system with stress changes. Journal of the Geological Society of Korea, 45, 361-377 (in Korean with English abstract).
- Jeon, J.-S., 2009, Microearthquake monitoring at the whole area of Gyeongsangnambuk-do. The geological society of Korea department of atomic energy committee at spring work shop.
- 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).

- Kee, W.-S., Kim, Y.-H., Lee, H.-J., Choi, D.-L., Kim, B.-C., Song, K.-Y., Koh, H.-J., Lee, S.R., Gwang, Y.Y., Hwang, S.-H., Park, K.-G. and Sung, N.-H., 2009, South eastern fault variable research and DB Construction, KIGAM, Daejeon, 327 p.
- Kim, Y.-S. and Jin, K.M., 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 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B., 2003, Paleoseismology of the Yangsan fault, southeastern part of the Korean peninsula, *Annals of Geophysics*, 46, 983-996.
- Kyung, J.B. and Chang, T.-W., 2001, The Latest Fault Movement on the Northern Yangsan Fault Zone around the Yugye-Ri Area, Southeast. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 563-577 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.B. and Lee, K.H., 2006, Active fault study of the Yangsan fault system and Ulsan fault system, southeastern part of the Korean Peninsula. Special Volume of the *Journal of the Korean Geophysical Society*, 9, 219-230.
- Lee, J.-H., Lee, Y.-J., Ed J. Rhodes., 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. *Journal of the Island Arc*, 12, 1-12.
- Lee, H.-K. and Yang, J.-S., 2003, ESR dating of the Wangsan fault, South Korea, *Quaternary Science Reviews*, 22, 1339-1343.
- Lee, J.I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeonsang Supergroup, Korea. Unpublished Ph.D thesis, Seoul National University, Seoul, 129 p.
- Lee, K.H. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological society of Korea*, 19, 127-135.
- Lutgens and Tarbuck, 2009, *Essentials Of Geology*, Sigma Press, Seoul, 504 p.
- Marcoa, S., Rockwell, T.K., Heimann, A., Frieslander, U. and Agnone, A., 2005, Late Holocene activity of the Dead Sea Transform revealed in 3D palaeoseismic trenches on the Jordan Gorge segment, *Earth and Planetary Science Letters*, 234, 189-205.
- McCalpin, J.P., 1996, *Paleoseismology*, Academic Press, San Diego, 588 p.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Oh, G.H., 1977, The geomorphic history of the south-eastern coast of the Korean Peninsula. *Geographical Review of Japan*, 50, 689-699 (in Japanese).
- Rockwell, T., Lindyall, S., Herzberg, M., Murbach, D., Dawson, T. and Berger, G., 2000, Paleoseismology of the Johnson Valley, Kickapoo, and Homestead Valley Faults: Clustering of Earthquakes in the Eastern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1200-1236.
- Ryoo, C.-R., Lee, B.-J., Cho, D.-L., Chwae, U.-C, Choi, S.-J. and Kim J.-Y., 1999, Quaternary fault of Dangu-ri in Gyeongju Gangdong-myeo : Byeokgye fault. The Korean Society of Economic and Environmental Geology/The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers/Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, spring joint conference-east-north asia ore deposit of cause of formation, (abstract), 334 p.
- Um, S.-H., Lee, D.-H. and Park, B.-S., 1964, Geological report of the Pohang sheet (1:50,000). Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 43 p (in Korean with English abstract).
- Yang, J.S., 2006, Quaternary fault in southeastern peninsula, Ph.D graduation thesis, Gangwon National University, Chuncheon, 378 p.

---

Received : August 24, 2015

Revised : October 26, 2015

Accepted : October 26, 2015