

경남 고성군 서외지점에서 발견된 제4기 단층의 기하와 운동학적 특성

이윤성¹ · 천영범¹ · 하상민¹ · 강희철¹ · 최정현² · 손 문^{1*}

¹부산대학교 지질환경과학과

²한국기초과학지원연구원 지구환경연구부

요 약

제4기 서외단층 노두는 경남 고성군 고성읍 서외리 도로공사현장 절개사면에서 확인되었으며, 경남 남해권에서 최초로 발견된 제4기 단층이다. 이번 연구에서는 확인된 단층의 기하와 운동학적 특성을 포함하는 제반특성을 제시하고, 운동시기와 단층운동에 수반된 지진규모에 대해 토의하였다. 남-북 방향의 이 단층은 백악기 고성층과 그 상위의 제4기층을 절단하는 역이동성 단층으로 단층활면들에서 확인되는 조선과 단층 상반에서 확인되는 소규모 습곡구조가 모두 일관되게 동-서 방향의 최대수평응력을 지시한다. OSL 연대측정을 통해 얻어진 제4기층 하부의 연대는 제4기층의 상부까지 절단하고 있는 단층의 최후기 단층활동이 적어도 61~60 ka 이후임을 지시한다. 상부로 갈수록 경사각이 알아지는 주 단층면의 아치형 기하, 상반 동향의 충상 기하를 보이는 단층각력대, 단층손상대 내에서 확인되는 고각의 남-북 방향 절리와 엽층이 발달한 층간에서 인지되는 역이동성 운동감각은 이 단층이 제4기의 동-서 압축응력 동안 기존 단층의 재활에 의해 형성되었음을 지시한다. 겹보기 수직변위와 사면 및 단층의 자세를 이용하여 계산된 단층의 실제 최소 수직변위와 실제변위량은 각각 1.61 m와 2.17 m이며, 이 변위를 한 번의 지진활동에 의한 것이라 가정하고 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 적용하면 모멘트 지진규모(M_w)는 6.7 정도로 추정할 수 있다.

주요어: 서외지점, 제4기 단층, 역이동성 단층, 동-서 압축응력, 재활

Yunseong Lee, Youngbeom Cheon, Sangmin Ha, Hee-Cheol Kang, Jeong-Heon Choi and Moon Son, 2017, Geometric and kinematic characteristics of the Quaternary fault at Seoee site, in Goseong-gun, Gyeongsangnam-do. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 53, no. 1, p. 115-127

ABSTRACT: The Quaternary Seoee fault outcrop observed in cut slope of road construction, Seoee-ri, Goseong-gun, Gyeongsangnam-do, is the first discovered Quaternary fault in the southern coastal area of Gyeongnam. This study presents its structural features, such as geometry and kinematics, and discusses the movement timing and associated earthquake magnitude. The N-S striking Quaternary fault shows a top-to-the-east thrust geometry and cuts the Cretaceous Goseong Formation and overlying Quaternary deposits, and its slip senses on the slickensides and minor folds in the hanging wall consistently indicate an E-W compressional stress. Age of the lower part of the Quaternary deposits obtained by OSL dating indicates that the last movement of the fault, which cuts the upper part of the Quaternary deposits, occurred after 61~60 ka. The arcuate geometry of the main fault surface showing a decreasing dip-angle to the top, the reversely offset of the fault breccia zone, and the reverse-sense indicators observed on N-S striking high-angle shear fractures and along laminated siltstone layers in the fault damage zone indicate that the fault was formed by the reactivation of pre-existing fault under E-W compressional stress during the Quaternary. Based on the apparent vertical displacement of fault and the attitudes of cut slope and main fault surface, its minimal vertical and net displacements are calculated as 1.61 m and 2.17 m, respectively. When the values are applied to the empirical equation of maximum displacement - moment earthquake magnitude (M_w), the magnitude is estimated to reach about 6.7, assuming that this displacement was due to one seismic event.

Key words: Seoee Fault outcrop, Quaternary fault, thrust geometry, E-W compressional stress, reactivation

* Corresponding author: +82-51-510-2248, E-mail: moonson@pusan.ac.kr

(Yunseong Lee, Youngbeom Cheon, Sangmin Ha, Hee-Cheol Kang and Moon Son, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Jeong-Heon Choi, Department of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Chungbuk 28119, Republic of Korea)

1. 서 언

다양한 규모의 지진이 빈번하게 발생하고 있는 일본, 뉴질랜드, 북미와 중남미 서부, 터키 등의 지판 경계부와 달리, 우리나라는 지판 내부에 위치하고 있을 뿐만 아니라 오랫동안 큰 지진이 발생하지 않아 상대적으로 지진 안전지대로 인식되어 왔다. 그러나 최근 들어 한반도 일원에서 중규모 지진의 발생빈도가 잦아지고 있으며, 특히 2016년 9월 12일에 경주시 남남서쪽 8~9 km 지점(내남면 덕천리)에서 발생한 규모 5.8의 지진은 전자식 계기지진관측 이래로 가장 규모가 큰 지진으로서 이후 발생한 규모 2.0 이상의 여진은 약 5개월 동안 약 570회에 이른다(KMA, 2017). 기상청 홈페이지를 통해 제공되는 1978년 이후의 계기지진 자료는 한반도 내에 규모 3.0 이상의 지진이 매년 5~15회, 규모 5.0 이상의 지진이 약 10년 주기로 발생함을 보여주고 있으며 (Kim *et al.*, 2016), 역사지진 관련 연구들은 역사시대 동안 간혹 규모 6~7로 추정되는 지진이 발생하여 인명 손실과 구조물 손상을 초래하였음을 보고하고 있다(e.g., Jeong, 1981; Lee, 1998; Lee and Yang, 2006).

화산활동, 산사태 등을 제외하면 대부분의 지진은 지판 경계부 또는 내부에 발달한 단층의 운동에 의한 결과물이다. 지표파열을 동반한 한반도 내 제4기 단층의 존재는 1990년대부터 국내외 연구진에 의해 꾸준히 보고되고 있으며, 대부분의 이들 단층은 양산 단층계, 울산단층, 연일구조선, 오천단층계 등을 따라 한반도 남동부에 집중적으로 분포하고 있다(Okada *et al.*, 1994; Kyung, 1997, 2003; Ryoo *et al.*, 1996, 2001, 2002; Chwae *et al.*, 1998; Kyung *et al.*, 1999a, 1999b; Lee, B.J. *et al.*, 1999; Chang, 2001; Kyung and Chang, 2001; Lee, 2003; Choi, W.-H., 2003; Kim, Y.-S. *et al.*, 2004, 2011; Choi, P., 2005; Kim and Jin, 2006; Kee *et al.*, 2007; Ryoo, 2009; Jin *et al.*, 2013; Lee, J. *et al.*, 2015; Kim, M.-C. *et al.*, 2016). 최근 Kim *et al.* (2016)은 기존에 보고된 제4기 단층의 전반적인 특징을 다음과 같이 제시하였다. 첫째,

대부분 남-북 내지 북북동 주향에 동쪽으로 경사지며, 인접한 주요 단층의 기하와 유사하다. 둘째, 지표에서는 30° 내외의 저경사를 보이지만, 지하로 갈수록 경사각이 깊어지는 동시에 단층비지대의 두께가 증가하는 경향을 보인다. 셋째, 단층면상에서 확인된 조선의 기하와 운동감각은 단층이 상반 서향의 역이동성 감각 또는 횡압축성 주향이동감각으로 운동하였음을 지시한다. 넷째, 단층의 운동학적 자료를 통해 복원된 고응력은 제4기 단층들이 동-서 방향의 최대수평응력(σ_{hmax}) 하에서 운동하였음을 지시한다.

이번 연구에서 새롭게 보고하는 제4기 단층은 경남 고성군 고성읍 서외리의 도로공사 현장 절개사면(그림 1a, 1b; 34° 58' 38.61"N, 128° 19' 07.08"E; 서외지점)에서 발견되었다. 이 단층은 경남 남해권에서 최초로 보고된 제4기 단층으로, 기존에 보고된 대부분의 제4기 단층들이 동부 영남권의 주요 단층계를 따라 집중적으로 발달하는 것과는 달리 대규모 단층에서 벗어나 위치한다(그림 1a). 동-서 방향으로 약 40 m의 연장과 약 3 m 내외의 높이를 보이는 절개사면에는 백악기 경상분지 유천층군에 해당하는 고성층과 이를 부정합으로 피복하는 제4기층이 노출되어 있으며, 남-북 방향의 단층이 이들 지층을 역이동성 감각으로 절단하고 있다(그림 2a, 2b). 이번 연구에서는 이 단층의 기하, 운동학적 특성 그리고 변위량을 기재하고, 단층의 운동을 야기한 고응력 환경을 복원하였다. 그리고 단층에 의해 절단된 제4기층에 광여기 루미네선스 연대측정법(OSL; Optically Stimulated Luminescence dating)을 적용하여 단층의 운동시기를 제한하였다. 이러한 연구결과를 토대로 이 서외지점 제4기 단층의 재할특성, 재할을 야기한 제4기 응력환경 그리고 단층활동에 수반된 추정 지진규모에 대해 토의하였다.

2. 지질학적 배경

제4기 단층이 발견된 경남 고성군 일원은 한반도 지체구조상으로 경상분지에 속한다(그림 1a). 국내 최대 규모의 백악기 퇴적분지인 경상분지는 고태평양판

이 유라시아판 아래로 사교섭입(oblique subduction) 하는 동안 형성된 배호분지(back arc basin)로서(Chough and Sohn, 2010), 분지충전물은 하부로부터 화산물질을 거의 포함하지 않는 신동층군, 화산물질을 일부 포함하는 하양층군, 다량의 화산물질을 포함하는 유천층군 그리고 이들을 관입하는 불국사화강암류로 구분된다(Chang, 1975; Choi, 1986; Chang *et al.*, 2003). 경상분지 남단에 국부적으로 분포하는 고성

층은 하양층군 최상부층인 진동층의 상위에 발달한 지층으로서(그림 1a), Chang *et al.* (1983)은 하위의 진동층과의 관계를 정합으로 해석한 반면, Paik *et al.* (2006)은 경사부정합으로 해석하였다. 고성층 내에는 주로 자색의 응회질 퇴적암, 녹회색 및 암회색의 이암과 사암이 우세하게 분포하며, 응회암과 소량의 역암도 협재되어 있다. 고성층 하부의 데사이트질 응회암에서 추출한 쇠설성 저콘의 SHRIMP U-Pb

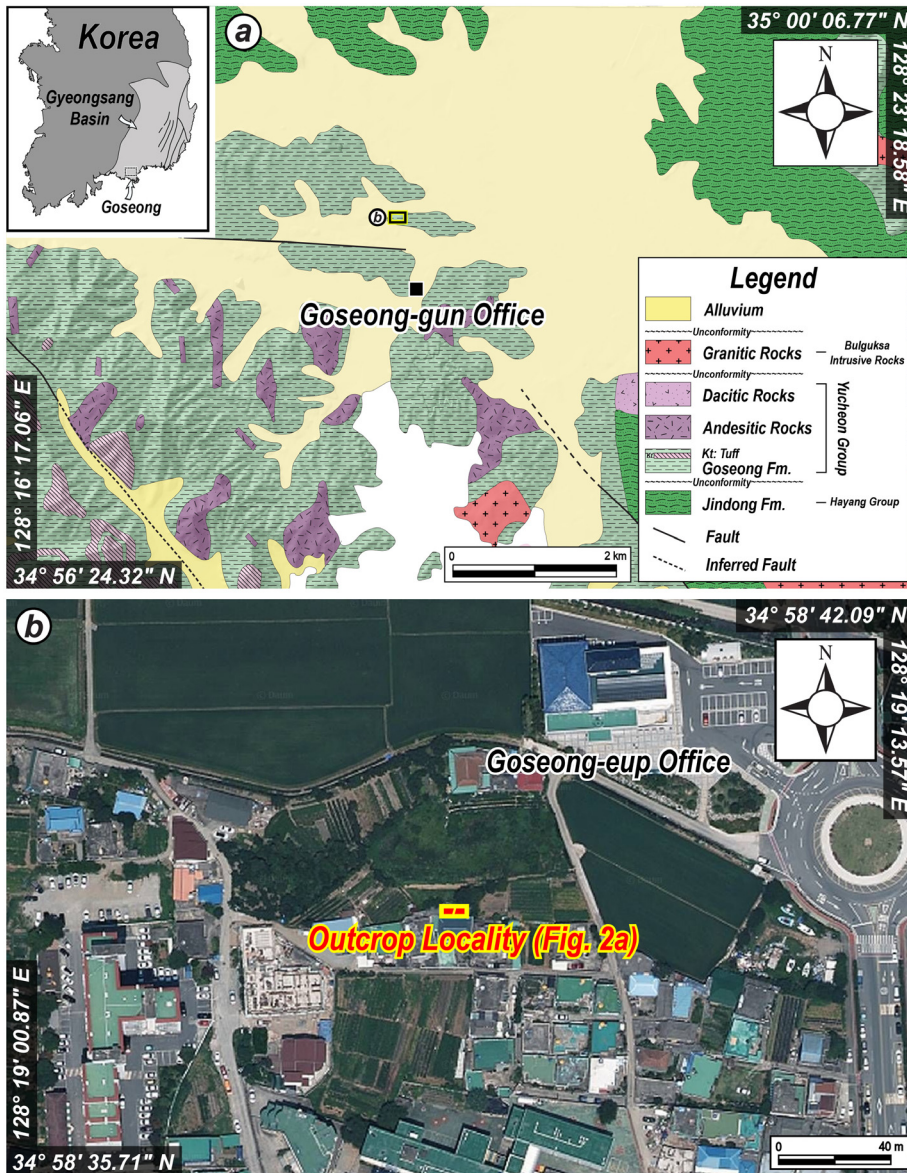


Fig. 1. (a) Detailed geological map of Goseong-gun area (modified from Paik *et al.*, 2006). (b) Aerial map showing the outcrop locality (34° 58' 38.61"N, 128° 19' 07.08"E) at Seo-ri, Goseong-eup, Goseong-gun.

연대(92.1 ± 3.2 Ma; Kim *et al.*, 2011)는 고성층의 퇴적시기가 적어도 투로니안(Turonian) 이후임을 지시한다. Chang *et al.* (1983)은 고성층 일원에 북서 방향의 단층들과 남-북 방향 광맥이 우세하게 발달함을 보고하였으며, 항공사진과 음영기복도 상에서도 북서 내지 북서 방향의 선상구조들이 우세하게 인지된다.

제4기 단층 서외지점의 하반(동편 지괴)은 약 1.4 m 두께로 노출된 고성층의 담갈색 중립질 사암과 상위에 약 1.5 m 두께의 제4기층이 분포하며, 상반(서편 지괴)은 고성층의 담갈색 중립질 사암과 이 사이에 협재된 암회색 실트암이 약 3 m 두께로 노출된다(그림 2a, b). 이들 지층은 풍화 및 변질이 매우 심하게 진행되어 악력으로도 쉽게 부서진다. 단층의 하반에서만 확인되는 제4기층은 역의 함량과 기질부

의 특징에 근거하여 두 퇴적단위(하부로부터 단위 I, II)로 구분 가능하다. 약 30 cm의 두께로 발달하는 단위 I은 적갈색의 역질 사암층으로서, 포함된 역들은 아원형(sub-rounded)에서 원형의 원마도와 불량한 분급도를 보인다. 반면 약 1.2 m 두께의 단위 II는 기질지지성 역암층으로서, 기질부는 적갈색 내지 암갈색의 사질 성분이 주를 이룬다. 역의 장경은 최소 1 cm에서 최대 20 cm로 다양하며, 아원형(sub-rounded)에서 원형의 원마도를 보인다. 전술한 제4기층은 비교적 편평한 저지에 분포하며 역들의 원마도가 양호할 뿐만 아니라 일부 지점에서는 역들이 비늘배열(pebble imbrication)을 보이고 있어, 하성퇴적층으로 판단된다. 그러나 명확한 퇴적기원을 밝히기 위해서는 노두 인근의 지형 및 하천 시스템의 특성과 같은 보다 정밀한 추가조사가 필요하다.

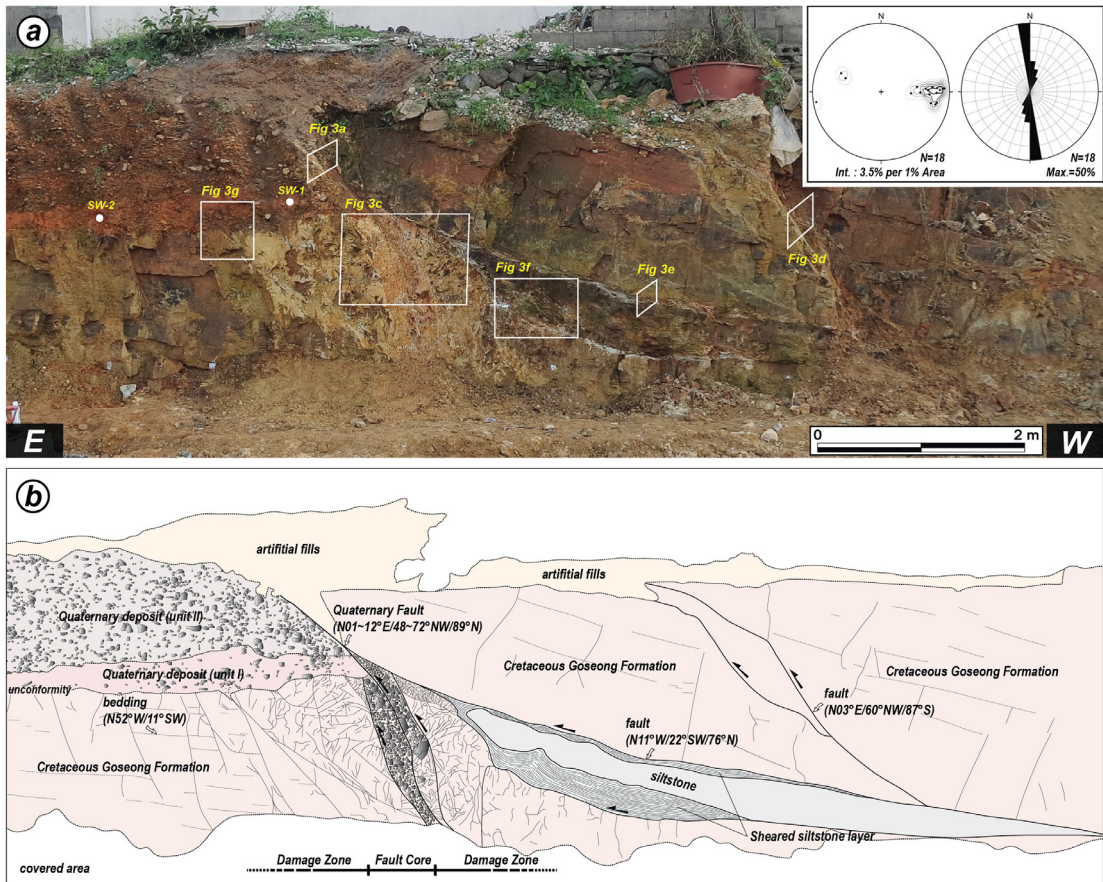


Fig. 2. (a) Outcrop photograph of the Seoee fault zone. White circles indicate the location of the OSL samples. Inset: contour diagram (left) and rose diagram (right) show strikes of fractures observed in the outcrop. (b) Detailed sketch of the Seoee fault.

3. 지질구조요소

3.1 야외지재학적 특성

3.1.1 제4기 단층 서외지점의 기하와 운동학적 특성

제4기 단층 서외지점은 남-북 주향에 서쪽으로 경사진 수매의 단층면으로 구성되는데, 이들은 단면상에서 서로 중지하거나 분기되는 이합형태를 보인다. 주 단층면은 $N01^{\circ}E/12^{\circ}N$ 의 주향을 보이며, 경사는 하부에서 상부로 갈수록 저각($<72^{\circ}NW$ 에서 $45^{\circ}NW$)으로 변화한다(그림 2a, 2b). 저각으로 제4기층을 절단하는 주 단층면의 직하위에는 단층면과 (a)평행한 배열을 보이는 편장형(prolate type) 또는 편평형(oblate type)의 제4기 역들이 다수 확인되고(그림 3a, 3b), 단층활면에서 확인되는 조선의 자세는 $N01^{\circ}E/48^{\circ}NW/89^{\circ}N$ 로 순수한 역이동성 운동감각을 뚜렷이 지시한다(그림 3a). 1 cm 이내의 두께를 가지는 적갈색의 단

층비지는 노출된 주 단층면을 따라 연속성 있게 발달하는 반면, 주 단층면의 상반과 하반이 모두 고성층으로 접하는 노두 하부에서 확인되는 단층핵은 진술한 적갈색의 단층비지대와 20~40 cm 폭의 단층각력대로 구성된다(그림 3c). 단층각력대는 단층의 상반보다 하반에서 3~5 cm 정도 더 두껍게 나타나며, 상반의 단층각력대가 하반의 것을 충상하는 기하를 보인다(그림 2a, 2b). 각력들의 장경은 평균 2 cm, 최대 12 cm이며, 각력대의 기질부와 단층각력 내에 발달하는 단열 내부는 적갈색의 단층비지로 충전된 특징을 보인다(그림 3c). 단층각력대는 주 단층면과 유사한 기하를 보이는 부차 단층들에 의해 각각 상반과 하반의 단층손상대와 구획되며, 각 부차 단층면들도 수 mm 두께의 적갈색 단층비지로 충전되어 있다. 주 단층면을 기준으로 상·하반에서 확인되는 단층손상대는 각각 1.3 m, 1.2 m의 두께를 가지며 불

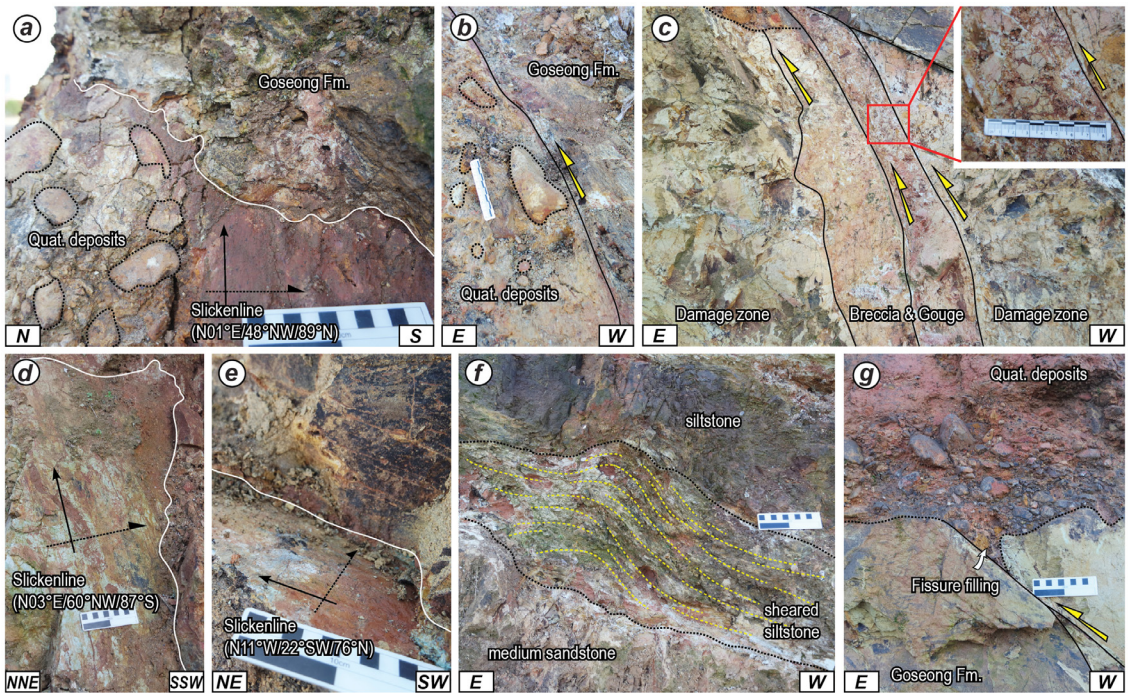


Fig. 3. Outcrop photographs showing the major structural features of the Seoee fault. (a, b) The prolate or oblate pebbles arranged (sub) parallel to the main fault surface, and (a) slickenlines on the main fault surface indicating the reverse movement. (c) Fault core and damage zone observed in the lower part of the outcrop. Fault core of 20~40 cm-width is composed of gouge and breccia. Inset: Close-up view of the fault core. (d, e) Slickenlines on the subsidiary fault surfaces showing reverse slip sense similar to that of the main fault. (f) Flexural folds developed in the siltstone layer of the hanging wall, which are synchronous with reverse movement of the fault. (g) Fissure filling, which is a joint filled with the Quaternary sediments. It is probably related to earthquakes caused by the Quaternary fault activities.

규칙한 방향의 소규모 단열들이 밀집되어 분포하는 경향을 보인다(그림 2a, 2b).

노두에는 전반적으로 남-북 방향의 소규모 단층 또는 절리가 우세하게 발달한다. 소규모 단층면에서 고각의 선주각을 보이는 역이동성 감각의 단층조선이 인지되며, 이는 주 단층면에서 확인되는 조선과 동일한 운동감각을 가진다(그림 2b, 3d). 주 단층면의 상반에 위치하는 고성층의 층리는 단층 인접부에서 단층면과 평행한 남-북 주향에 서쪽으로 경동되고 단층에서 멀어질수록 그 경사각이 얕아지고 있어(그림 2b), 충상단층에서 흔히 관찰되는 편평비탈 기하(flat-ramp geometry)와 유사하다. 중립질 사암 사이에 협재된 실트암 내에는 층간을 따라 발생한 전단작용에 의해 엽리가 형성되고, 특히 사암과의 상-하부 경계에서는 전단이 집중되어 회백색의 단층비지대가 인지된다.

상부에 위치한 2~4 cm 두께의 회백색 단층비지대 내부에는 연장이 불량한 수 mm 두께의 적갈색 단층비지를 포함하기도 하며, 전단면에서 확인된 단층조선은 N04°W/24°SW/76°N의 자세로 역이동성 운동감각을 지시한다(그림 3e). 이러한 단층비지대는 상부로 갈수록 서로 합쳐지고 결국 주 단층면에 병합되는 형태를 보인다. 또한 협재된 실트암 하부의 엽층이 발달하는 부분에는 층간의 역이동성 전

단운동에 의해 형성된 습곡이 인지되기도 한다(그림 2a, 2b, 3f). 주 단층면의 하반에 위치하는 고성층은 전반적으로 N52°W/11°SW의 자세로 상반과 달리 층리의 변화가 인지되지 않고, 상위의 제4기층과는 거의 수평한 부정합 경계로 접한다. 또한 부정합면까지 연장되는 남-북 방향의 절리들 중 일부는 부정합 경계에서 췌기상으로 벌어져 상부의 제4기 퇴적물이 아래로 충전된 양상이 관찰되는데, 이는 제4기 단층활동으로 발생한 지진에 의해 형성된 열극충전(fissure filling; Keller and Pinter, 1996)으로 추정된다(그림 3g).

3.1.2 변위량

단층의 실제변위량(S_n)은 단층 상·하반에 분리되어 대비가 가능한 기준면(또는 층)과 이 기준면을 절단하는 단층면/단층조선의 방향을 이용하여 산정할 수 있다. 서외지점 제4기 단층의 경우, 하반에서는 고성층과 제4기층을 구분하는 부정합면이 기준면이 될 수 있으나, 상반에는 부정합면이 확인되지 않고 고성층 상부에 인위적으로 매립된 토양층이 바로 덮고 있다. 따라서 상반의 고성층 최상부면을 하반의 부정합 경계와 대비되는 면으로 가정하여 단층의 최소변위량을 계산하고자 하였다. 주 단층면의 방향이 남-북이고 노출된 절개사면이 동-서 방향으로 발달

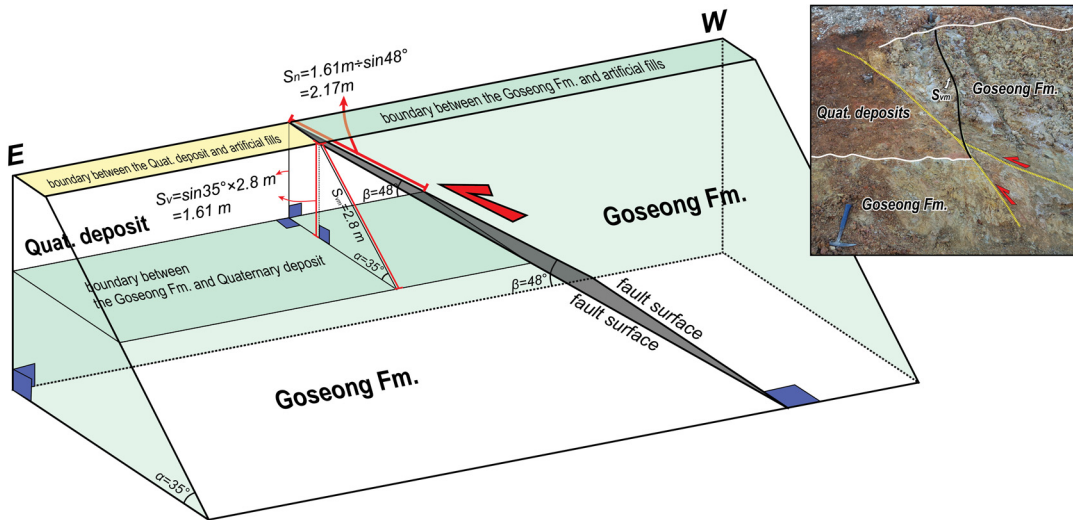


Fig. 4. (a) Schematic diagram showing how to calculate net displacement. α : dip of cut slope, β : dip of fault surface, S_{vm} : apparent vertical displacement, S_v : vertical displacement, S_n : minimum net displacement. Rake of striation is assumed to be vertical, (b) Outcrop photograph showing measured apparent vertical displacement.

하고 있어 비교적 변위량 산정에 용이하지만, 사면 이 지표면과 수직으로 절개되지 않았기 때문에 걸보기 수직변위(S_{vm}), 사면의 경사각(α) 그리고 단층의 경사각(β)을 이용하여 실제변위량(S_n)을 산정하였다(그림 4). 주 단층면의 경사각은 상부로 갈수록 알아 지는 경향을 보이나(그림 2a, 2b), 단층면의 자세는 N5/48°NW로, 단층조선의 선주각은 수직으로 설정하였다.

노두에서 측정된 걸보기 수직변위(S_{vm})는 2.8 m, 사면의 경사각(α)은 35°이며 이를 통해 계산된 수직 변위(S_v)는 1.61 m이다. 그리고 수직변위와 단층의 경사각($\beta=48^\circ$)을 이용하여 산정된 실제변위량(S_n)은 2.17 m이다(그림 4; 식 1과 2).

$$S_{vm} \sin \alpha = S_v, \frac{S_v}{\sin \beta} = S_n \quad (\text{식1})$$

$$S_n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} S_{vm} \quad (\text{식2})$$

3.2 고응력 복원

제4기 단층운동을 발생시킨 고응력을 복원하기 위해 단층과 전단단열들의 기하와 운동학적 자료 그리고 소규모 원통형 습곡(cylindrical fold)의 기하를 이용하였다. 전단단열자료를 이용한 고응력 복원을 위해 노두에서 확인된 총 5개의 단층조선들을 Wintensor S/W (v.5.8.5)로 분석하였으며(Delvaux and Sperner, 2003), 도출된 고응력장은 동-서 방향의 최대수평응력

(σ_{Hmax})을 지시한다(그림 5a; $R'=2.5$; Delvaux *et al.*, 1997). 또한 상반의 실트암 내에서 관찰된 습곡날개의 지층자세를 통해 복원된 π -축(습곡축)의 자세는 8°S/N03°W이며, 이러한 습곡의 기하는 단층조선의 기하와 운동감각을 통해 복원된 고응력과 동일하게 동-서 방향의 최대수평응력을 지시한다(그림 5b). 이상 복원된 고응력은 제4기 단층 서외지점에서 인지된 상반 동향(top-to-the-east)의 역이동성 운동이 동-서 방향의 압축응력 하에서 발생되었음을 지시한다.

4. 제4기층의 OSL 연대측정

제4기 단층의 운동시기를 알아내기 위해 다양한 연대측정 방법[ESR, 방사성탄소법, 고고학적 연대 추정, 나이테연대측정법(dendrochronology) 등]이 제안되고 있지만, 이번 연구에서는 하반에 노출된 제 4기층의 OSL 연대측정법을 이용하여 단층의 운동 시기를 제한하고자 하였다.

OSL 연대측정법은 퇴적층 내에 포함되어 있는 무기결정(석영, 장석)으로부터 방출되는 루미네선스의 양을 측정하여 지층의 퇴적시기를 결정하는 연대측정법으로(Huntley *et al.*, 1985), Murray and Wintle (2000)에 의해 단일시료재현법(Single Aliquot Regenerative Dose Protocol)이 제안된 이후, 연대측정의 정밀도와 신뢰도가 크게 향상되어 현재 고고유물 및 제4기층의 연대측정에 널리 활용되고 있다. 퇴적층 내에

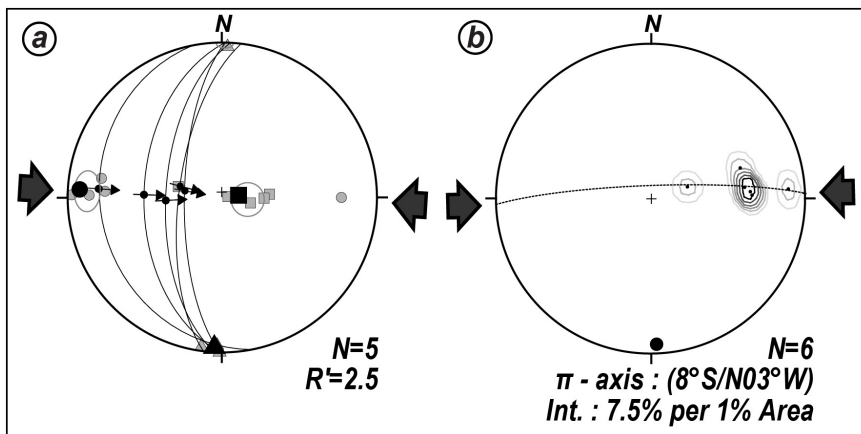


Fig. 5. Slip data (left) in the fault zone (lower-hemisphere, equal-area projection) and fold axis (right) estimated from best-fitting π -circle of various attitudes of fold limbs. Convergent arrow heads represent contraction (σ_{Hmax}) direction. When determined, the principal stress axes σ_1 (circles), σ_2 (triangles), and σ_3 (squares) are also projected. Both of them indicate E-W compression. $R'=2+R$ (σ_3 is vertical) [Delvaux *et al.* (1997).; R : $(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$].

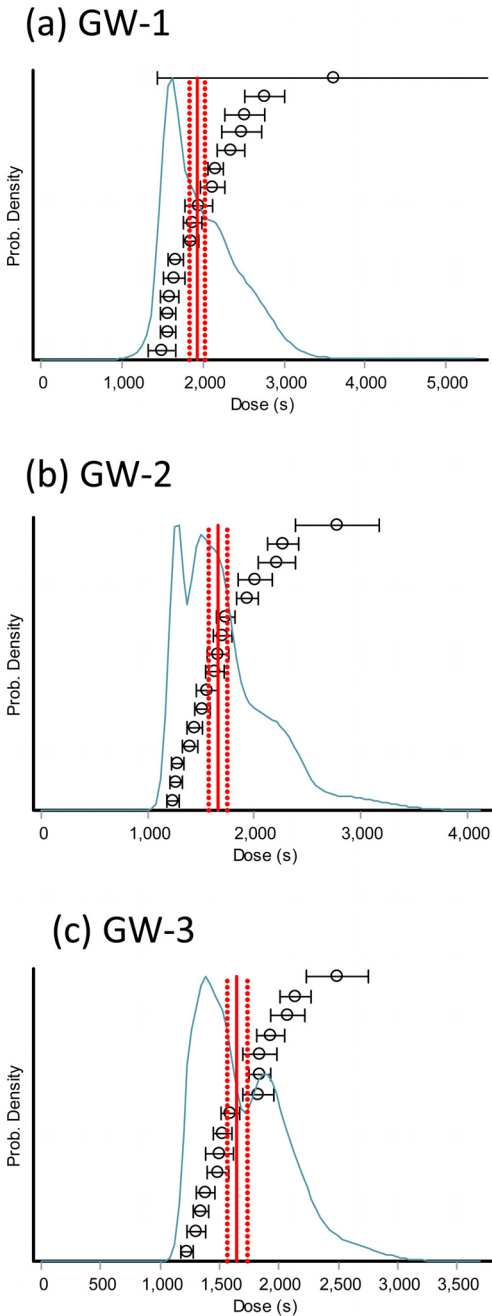


Fig. 6. Probability density plots of the samples (a) GW-1, (b) GW-2, and (c) GW-3. Note that the tick labels in dose-axis are given in time unit (second). The conversion of time to energy (Gy = J/kg, *i.e.* equivalent dose of each aliquot) can be achieved by multiplying the time by the dose rate of the beta source of the OSL reader used in this study, which is 0.087 ± 0.001 Gy/s. Vertical line (in red) indicates the D_e values of the samples derived using central age model.

포함된 석영은 퇴적과정을 거치는 동안 빛에 민감한 루미네선스 신호가 제거되고, 퇴적 이후, 석영입자가 빛과 차단된 시간에 비례하여 루미네선스 신호의 세기가 증가하기 때문에, 석영입자로부터 방출되는 루미네선스의 세기를 측정하여 퇴적층이 형성된 시기를 결정할 수 있다.

시료는 길이 30 cm, 직경 5 cm의 스테인레스-스틸 파이프를 사용하여 제4기층 하부의 적갈색 역질 사암(단위 I)의 세 지점(GW-1, 2, 3)에서 채취되었으며(그림 2a), GW-1은 주 단층면에서 동쪽으로 약 0.5 m, GW-2는 약 2.5 m 그리고 GW-3은 약 30 m 떨어진 지점에서 채취하였다. OSL 연대측정은 한국 기초과학지원연구원 오창센터에 설치된 루미네선스 자동측정장치(Model: Risø TL/OSL-DA-20C/D)를 사용하였다.

OSL 연대측정결과, GW-1 시료는 88 ± 5 ka, GW-2 시료는 60 ± 3 ka, GW-3 시료는 61 ± 3 ka의 연대가 도출되었다(표 1). 하지만, GW-1의 연간선량(dose rate)이 GW-2와 GW-3의 것에 비해 약 15% 낮고, 등가선량(equivalent dose)은 약 23% 높은 경향을 보이는데(그림 6; 표 1), 이는 단층면에 매우 인접한 GW-1 시료가 단층운동에 의해 외부로부터 유입된 상대적으로 오래된 연령의 석영입자들에 영향을 받았을 가능성과 토양의 지구화학적 특성이 GW-2, 3과 다소 차이가 있을 가능성을 지시한다. GW-1이 주 단층면에서 불과 0.5 m 이내에 위치한 지점에서 채취한 시료이고, 실제 노두에서도 주 단층면 주변의 제4기층이 상당히 교란되어 있으며, 일부 구간에는 기존 단층비지들이 주입된 흔적이 인지되는 것을 감안하면, GW-1 시료는 단층운동 동안 기존에 존재 하였던 단층비지 내의 석영입자들이 주입되었을 가능성이 높다. 따라서 제4기층 하부(단위 I)의 OSL 연대는 GW-2와 GW-3이 일관성 있게 지시하는 61~60 ka가 합리적이며, 주 단층의 운동은 이 시기 이후로 판단된다.

5. 토 의

5.1 기존 단층의 재할

대륙지각 천부에 누적된 응력이 해소될 때 단층이 새롭게 생성되기보다 기존에 적절하게 배향된 약대가 다시 활동할 가능성이 높다(e.g., McKenzie, 1972;

Table 1. Equivalent doses, dosimetry and OSL ages of the samples.

Sample Code	Dose Rate (Gy/ka)	Water content (%)	Equivalent Dose (Gy)	Aliquots used (n/N)	OSL age (ka, 1σ SE)
GW-1	1.78 ± 0.06 (1.75 ± 0.06)	35.2 (37.1)	156 ± 6	16/16	88 ± 5 (89 ± 5)
GW-2	2.11 ± 0.06 (2.11 ± 0.06)	37.8 (37.8)	127 ± 6	16/16	60 ± 3 (60 ± 3)
GW-3	2.11 ± 0.06 (2.10 ± 0.06)	32.5 (32.9)	128 ± 6	15/16	61 ± 3 (61 ± 3)

¹Numbers in parentheses are those calculated using saturated water contents

²n/N refers to the ratio of (the number of aliquots used for data analysis)/(total number of aliquots measured)

Sykes, 1978; Ha *et al.*, 2016). 이번 장에서는 서외지점 제4기 단층이 새롭게 형성된 단층이 아니라 재활된 단층임을 보여주는 증거들에 대해 아래와 같이 기술하고자 한다.

첫째, 제4기 단층 서외지점의 주 단층면 경사각은 제4기층과 접하는 노두 상부에서는 저각이지만 하부로 갈수록 깊어지는 편평비탈 기하를 보이는데, 이는 기존에 보고된 제4기 단층들에서도 흔히 인지되는 특징이다. 이러한 경사각의 변화는 주어진 응력이 비교적 강한 물성의 기반암에서는 기존 약대를 따라 해소되는 반면, 물성이 약한 상위의 제4기층에서는 응력 방향에 상응하는 저각의 새로운 단층을 따라 해소된 것으로 추정된다. 둘째, 주 단층면을 충전하는 약 1 cm 두께의 적갈색 단층비지대는 노출된 노두에서 연속성 있게 발달한다. 지표 근처에서는 정암압(lithostatic pressure)이 낮아 미고결의 제4기 퇴적물을 절단하는 전단작용에 의해 단층비지가 형성되기 쉽지 않다. 따라서 제4기 단층 서외지점에서 제4기층과 접하는 적갈색의 단층비지대는 단층이 역이동성 감각으로 재활하는 동안 기존의 단층비지가 주 단층면을 따라 끌려 올라와 형성된 것으로 추정된다. 셋째, 노두 하부에서 20~40 cm 두께를 보이는 단층각력대는 주 단층면을 기준으로 상반에 위치한 단층각력대가 하반의 것을 충상하는 양상을 보인다. 넷째, 절개사면에서는 주 단층의 주향과 유사한 고각의 소규모 단층과 절리들이 우세하게 발달할 뿐만 아니라 층간이나 암상 경계부의 불연속면을 따라서도 전단이 발생하여 형성된 비지대가 인지된다. 이들 전단면에도 주 단층면에서 확인되는 것과 거의 유사하게 동-서 방향의 압축을 지시하는 조선이 확

인된다. 따라서 제4기 응력환경 하에서 기존 약대들의 일부가 동시에 재활되었으며, 이들 중 상대적으로 마찰계수가 낮은 하나의 약대를 따라 변위가 집중되어 제4기 단층이 발달한 것으로 해석된다. 다섯째, 제4기층 하부(단위 I)의 OSL 연대측정 결과, 단층 인접부에 위치한 GW-1 시료는 다른 두 시료(GW-1, GW-2)에 비해 오래된 연대가 도출되었으며, 이는 기존 단층운동으로 형성된 단층비지 내의 석영들이 제4기 단층운동 동안 단층 인접부의 제4기 퇴적물에 혼입된 결과일 가능성을 배제할 수 없다.

5.2 한반도의 제4기 응력장

제4기 단층 서외지점에서 확인된 전단단열들의 기하와 운동학적 자료에 근거하여 도출된 고응력은 동-서 방향의 최대수평응력을 지시하며($R'=2.5$; Delvaux *et al.*, 1997), 실트암 내 소규모 습곡날개의 지층자세 측정을 통해 복원된 습곡축(π -축) 또한 저각으로 침강된 남-북 선주향을 보여 동-서 방향의 최대수평응력을 지시한다. OSL 연대측정을 통해 얻어진 제4기층 하부(단위 I)의 연대는 61~60 ka로 밝혀졌으며, 이는 제4기층 상부까지 절단하고 있는 단층의 최후기 활동이 이보다 후기에 발생하였음을 지시한다. 따라서 연구지역 일원은 61~60 ka 이후에 동-서 방향의 압축응력 환경에 놓여있었음을 알 수 있다.

한반도 내에 발달하는 제4기 단층들은 대체적으로 대규모 지각약대를 따라 집중되어 발달하며, 그 자세에 따라 운동감각이 다소 상이하나 대부분이 동-서 방향의 최대수평응력(σ_{Hmax})을 지시한다(Kim *et al.*, 2016). 이와 함께 Cho *et al.* (2014)은 진티단층, 모화단층, 수성지2단층 그리고 왕산단층의 단층비

지에 대한 자기미세구조 분석을 실시하였으며, 이를 통해 유추된 운동감각으로부터 구해진 고응력이 동북동-서남서 방향임을 보고하였다. 또한 Kim *et al.* (2016)은 한반도와 인근 해역에서 발생한 중·소규모 지진에 대한 발진기구해(focal mechanism) 연구결과와 시추공 내 응력측정 자료를 취합하여, 현재 한반도 지각천부의 평균 최대수평응력이 동북동-서남서 방향의 압축력임을 보고하였으며, 이러한 응력을 형성시킨 지구조적 주요 원인을 태평양판의 서향 저각 섭입과 인도-유라시아판의 충돌로부터 전파된 응력(far-field stress)이 중첩된 결과로 해석하였다. 따라서 제4기 단층 서외지점 역시 이러한 현생 동-서 내지 동북동-서남서 방향의 압축응력환경에서 기존의 단층이 역이동성으로 재활한 것으로 판단된다.

5.3 변위량을 통한 지진규모 산정

지진규모를 산정하기 위해서는 최대변위량(Bonilla *et al.*, 1984; Wells and Coppersmith, 1994), 평균변위량(Kanamori, 1977), 지표파열길이(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Khromovskikh, 1989; Wells and Coppersmith, 1994), 지표파열길이×최대변위(Slemmons, 1982; Bonilla *et al.*, 1984; Mason, 1992), 파열면적(Wells and Coppersmith, 1994) 등을 이용하는 방법이 있다.

Kyung (2010)은 지진의 규모를 평가하는 여러 방법 중, 지표파열길이나 파열면적의 추정에는 많은 불확실성이 내재하기 때문에 우리나라 제4기 단층에 적용할 수 있는 규모산정 방법은 최대변위를 이용하는 방법만이 가능하다고 하였다. 제4기 단층 서외지점에서는 한 번의 제4기 단층운동만 인지되므로 앞서 3.1.3 절에서 계산된 2.17 m를 최대변위량으로 가정하고, Wells and Coppersmith (1994)에 의해 제시된 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식에 적용하였다. Kim and Jin (2006)과 Jin *et al.* (2013)은 이 경험식을 이용하여 각각 국내에서 확인된 제4기 단층인 유계단층과 구산단층의 지진규모를 산정한 바 있다. 제4기 단층 서외지점은 주 단층면에서 관찰된 단층조선이 거의 수직에 가까워 순수 역이동성 감각의 단층이므로 Wells and Coppersmith (1994)가 제시한 여러 경험식 중 역단층에 적용하는 경험식(식 3)을 사용하였으며, 이를 통해 산정된 모멘트 지진규모(M_w)는 약 6.7 정도이다. 지진단층의 변위와 모멘트 지진규모는 대체로 좋은 상관관계를 보이는 것으

로 알려져 있어(Hyndman and Hyndman, 2006), 경험식을 통해 산정된 모멘트 지진규모는 서외지점에서 제4기 단층활동에 의해 유발된 지진규모로서 합리적인 값으로 추정된다.

$$M_w = 6.52 + 0.44 \log D(m) \quad (\text{식3})$$

6. 결론

경남 고성군 고성읍 서외리 도로공사현장 절개사면 노두에서 확인된 제4기 단층의 기하와 운동학적 특성을 상세 기재하고, 변위량과 고응력장 그리고 제4기층의 OSL 연대를 도출하였다. 이를 바탕으로 단층의 재활과 한반도 제4기 응력환경에 대해 토의하고, 단층의 변위량을 통한 지진규모를 산정하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 서외지점은 주 단층면을 기준으로 하반은 고성층의 적갈색 중립질 사암과 그 상위에 제4기층이 분포하며, 상반은 고성층의 적갈색 중립질 사암 및 암회색 실트암이 관찰된다. 이 노두에는 상반 동향의 층상 기하를 보이는 수매의 역이동성 단층이 관찰되고, 주 단층면은 상부로 갈수록 경사각이 작아지는 아치형의 기하를 보인다. 단층핵은 주 단층면을 따라 적갈색의 단층비지대와 노두 하부에서만 확인되는 단층각력대로 구성된다. 단층순상대 내의 남-북 주향의 고각의 절리면은 역이동성 감각의 조선이 확인되며, 상반에 위치한 실트암 내에서도 역이동성 층간 전단에 의한 엽리와 습곡이 인지된다. 이러한 단층의 제반특징들은 서외지점 제4기 단층이 동-서 압축환경에서 기존 단층이 재활되었음을 지시한다.
- 2) 제4기층 하부(단위 I)에서 실시한 OSL 연대측정 결과, GW-1 시료는 88 ± 5 ka, GW-2 시료는 60 ± 3 ka, GW-3 시료는 61 ± 3 ka의 연대가 도출되었으며, 단층인접부에서 채취된 GW-1 시료의 OSL 연대는 제4기 단층운동 동안 기존 단층비지 내에 포함된 석영들이 혼입된 결과로 해석된다. 따라서 제4기층 하부(단위 I)의 연대는 GW-2와 GW-3에서 도출된 61~60 ka가 타당하며 제4기층의 상부(단위 II)까지 절단한 주 단층의 운동시기는 그 이후로 판단된다.

3) N-S/48°NW의 자세를 보이는 주 단층면, 수직의 선주각을 가지는 단층조선, 겹보기 수직변위 (2.8 m) 그리고 동-서 방향으로 노출된 절개사면의 경사각(35°)을 이용하여 변위량을 측정할 결과, 최소 수직변위는 1.61 m 그리고 실제변위량은 2.17 m로 산정되었다. 구해진 변위량을 한번의 단층운동에 의한 최대변위량으로 가정하고 최대변위-모멘트 지진규모의 경험식을 이용하여 얻어진 모멘트 지진규모(M_w)는 약 6.7 정도이다.

사 사

이 논문은 2014년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2014R1A2A1A11053102)의 연구결과이다. 심사과정에서 세심하고 건설적인 조언과 비평을 해주신 최원학 박사님과 익명의 심사위원, 그리고 편집위원이신 김영석 교수님께 감사드린다.

REFERENCES

Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, J.J., 1984, Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 74, 2379-2411.

Chang, K.H., 1975, Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 1-23.

Chang, K.-H., Suzuki, K., Parka, S.-O., Ishida, K. and Uno, K., 2003, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 937-948.

Chang, T.W., 2001, Quaternary tectonic activity at the eastern block of the Ulsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 37, 431-444 (in Korean with English abstract).

Chang, T.W., Hwang, S.K., Lee, D.W., Oh, I.S., Kim, H.C. and Kim, E.-H., 1983, Geological report of the Chungmu sheet 1:50,000 Explanatory Text of the Geological Map of Chungmu Sheet, 1:50,000. Geological Survey of Korea, 47 p.

Cho, H., Kim, M.-C., Kim, H. and Son, M., 2014, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the Quaternary faults, SE Korea: Application to the determination of

fault slip sense and paleo-stress Field. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 75-103 (in Korean with English abstract).

Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korea. *Journal of the Geological Society of London*, 143, 29-40.

Choi, P., 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, W.-H., 2003, Neotectonics of the Gyeongju-Ulsan area in the southeastern part of Korean Peninsula. Thesis of Ph.D., Seoul National University, Korea, 205 p (in Korean with English abstract).

Chough, S.K. and Sohn, Y.K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system in the Korean peninsula: New view. *Earth-Science Reviews*, 101, 225-249.

Chwae, U. and 57 others, 1998, Final report of the re-evaluation to the design base earthquake considering the Yangsan Fault. Technical Note of Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Korea Electric Power Corporation, KR-B-255~7-1998, 1,694 p (in Korean).

Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Live, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V. and San'kov, V., 1997, Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part2. *Cenozoic rifting. Tectonophysics*, 282, 1-38.

Delvaux, D. and Sperner, B., 2003, New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: Nieuwland, D. A. (Editor) *New Insights into Structural Interpretation and Modelling*. Geological Society, London, Special Publications, 212, 75-100.

Ha, S., Cheon, Y., Kang, H.-C., Kim, J.-S., Lee, S.-K. and Son, M., 2016, Geometry and kinematics of the subsidiary faults of the Ilgwang fault, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 31-50 (in Korean with English abstract).

Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments. *Nature*, 313, 105-107.

Hyndman, D. and Hyndman, D., 2006, *Natural Hazards and disasters*. Thomson Brooks/Cole, Belmont, 490 p.

Jeong, B.I., 1981, A study on the historical earthquakes in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 17, 257-268 (in Korean with English abstract).

Jin, K., Kim, Y.-S., Kang, H.C. and Shin, H.C., 2013, Study on developing characteristics of the Quaternary Gusan Fault in Uljin, Gyeongbuk, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 197-207 (in Korean with English abstract).

Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes.

- Journal of Geophysical Research, 82, 2981-2987.
- Kee, W.-S., Kim, B.C., Hwang, J.H., Song, K.-Y. and Kim, 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).
- Keller, E.A. and Pinter, N., 1996, Active tectonics earthquakes, uplift, and landscape. Prentice Hall, New Jersey, 362 p.
- Khromovskikh, V.S., 1989, Determination of magnitudes of ancient earthquakes from dimensions of observed seismodislocations. In: D. Denham (Editor), Quantification of Earthquakes and the Determination of Source Parameters. Tectonophysics, 166, 269-280.
- Kim, J.-S., Cho, H., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Geological age of the Gyeongsang Supergroup. 2011 Fall Joint Annual Conference of The Geological Societies in Korea (Abstract), JeJu, October 26-29, 20 p (in Korean).
- Kim, M.-C., Jung, S., Yoon, S., Jeong, R.-Y., Song, C.W. and Son, M., 2016, Neotectonic crustal deformation and current stress field in the Korean Peninsula and their tectonic implications: A review. Journal of the Petrological Society of Korea, 25, 169-193 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-S., Jin, K., Choi, W.-H. and Kee, W.-S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent researches. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- 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, southeast Korea. The Island Arc, 13, 403-415.
- KMA, 2017, Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/>, (January 24, 2017).
- Kyung, J.B., 1997, Paleoseismological study on the mid-northern part of Ulsan Fault by trench method. The Journal of Engineering Geology, 7, 81-90 (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., 2010, Paleoseismological study and evaluation of maximum earthquake magnitude along the Yangsan and Ulsan Fault Zones in the Southeastern Part of Korea. Geophysics and Geophysical Exploration, 13, 187-197 (in Korean with English abstract).
- 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. and Okada, A., 1999a, A paleoseismological study of the Yangsan fault - analysis of deformed topography and trench survey. Journal of the Korean Geophysical Society, 2, 155-168 (in Korean with English abstract).
- Kyung, J.-B., Lee, K., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K., 1999b, Study of fault characteristics by trench survey in the Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan fault, southeastern Korea. Journal of 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, Kyongju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 1-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J., Rezaei, S., Hong, Y., Choi, J.-H., Choi, J.-H., Choi, W.-H., Rhee, K.-W. and Kim, Y.-S., 2015, Quaternary fault analysis through a trench investigation on the northern extension of the Yangsan fault at Dangu-ri, Gyungju-si, Gyeongsanbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 471-485 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., 1998, Historical earthquake data of Korean. Journal of the Korea Geophysical Society, 1, 3-22 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H. and Yang, W.-S., 2006, Historical seismicity of Korea. Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 846-855.
- Lee, Y.H., 2003, Quaternary faults in the eastern area of the Ulsan fault (Korea). Thesis of Master, Pusan National University, Korea, 74 p (in Korean with English abstract).
- Mason, D.B., 1992, Earthquake magnitude potential of active faults in the Intermountain Seismic Belt from surface parameter scaling. Master Thesis, University of Utah, Salt Lake City, U.S.A..
- McKenzie, D.P., 1972, Active tectonics of the Mediterranean region. Geophysical Journal International, 30, 109-185.
- 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.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C. and Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea. Journal of

- Geography, 103, 111-126 (in Japanese).
- Paik, I.S., Kang, H.C., Huh, M. and Yang, S.-Y., 2006, Goseong Formation (Yucheon Group) in the southern part of the Gyeongsang Basin: Occurrences and stratigraphy, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 42, 483-505 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., 2009, A Report for the Quaternary Gaegok 6 Fault Developed in the Mid-eastern Part of Ulsan Fault Zone, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 42, 635-643 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Chwae, U., Choi, S.-J. and Son, M., 2001, Quaternary faults in Hwalseong-ri, Oedong-up, Gyeongju, Korea. *KIGAM Bulletin*, 5, 24-33 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Lee, B.J., Son, M., Lee, Y.H., Choi, S.-J. and Chwae, U., 2002, Quaternary faults in Gaekok-ri, Oedong-up, Gyeongju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 309-323 (in Korean with English abstract).
- Ryoo, C.-R., Yang, K., Lee, S.-W. and Kim, I.-S., 1996, Quaternary fault in the vicinity of the Ulsan fault. *The Journal, College of Education, Pusan National University, Pusan, Korea*, 33, 311-327 (in Korean with English abstract).
- Slemmons, D.B., 1982, Determination of design earthquake magnitudes for microzonation. In *proceeding International Earthquake Microzonation, Conference, Seattle, WA, Earthquake Engineering Research Institute*, 1, 110-130.
- Sykes, L.R., 1978, Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Reviews of Geophysics*, 16, 621-687.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 84, 974-1002.

Received : February 3, 2017

Revised : February 20, 2017

Accepted : February 28, 2017