울산광역시 울주군 삼남면 일대에 발달한 양산단층대의 제4기 단층운동

양주석 · 이희권*

강원대학교 지질학과

Quaternary Fault Activity of the Yangsan Fault Zone in the Samnam-myeon, Ulju-gun, Ulsan, Korea

Joo-Seok Yang and Hee-Kwon Lee*

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

We investigated space-time patterns of Quaternary fault activity of the Yangsan fault zone using ESR ages in the Samnam-myeon region, Ulsan, Korea. Some of fault gouge zones consist of well-defined bands which added to the older gouge band, indicative of reactivation. During addition of new bands, the older gouge band was inactive, which represents the type I faulting mode. ESR analyses of each band of the gouge zone allow us to construct history of fault movement. The entire fault gouge zones were reactivated by type III faulting mode giving us ESR ages of the latest reactivation. ESR dates show temporal clustering into active and inactive periods analogous to historic and paleoseismic fault activities. ESR ages and dates of fault movements indicate migration of fault activities along the Yangsan Fault Zone. Segments of the Quaternary faults in the study area are branched in the south of Sangcheon site. The earliest record of activity in segmented faults is recorded from the western segment to the northern segment. Before 750~850 ka ago, the fault gouge zone from the western segment to the northern segment were active. At 750~850 ka ago, the fault gouge zone from the eastern segment to the northern segment were active. During 630~660 ka and 480~540 ka only the northern segment was active. After 340 ka ago, the fault gouge zone from the western segment to the northern segment were active again.

Key words : Yangsan fault zone, fault gouge, ESR dating, quaternary, pattern of fault activity

ESR 연대를 이용하여, 울산광역시 울주군 삼남면 일대에 발달하는 양산단층대의 시간-공간적 활동 형태에 대해 연구하였다. 연구지역에서 일부 단층비지대는 기 형성된 단층비지 옆에 새로운 단층비지가 단층활동 형태 I에 의해 첨가되어 있다. 이럴 경우 각각의 단층비지에서 얻은 ESR 연대로부터 여러 번의 단층활동 시기를 해석하였다. 단층비지대에서 일부분은 단층활동 형태 III에 의해 단층비지대 전체가 재 활동 하였다. 이와 같은 단층비지대는 이전의 활동 정보는 모두 지워지고 마지막 활동 시기만 기록되어 있다. 연구지역에서 양산단층대의 제4기 단층운동은 주기성을 가지며 활동기와 휴식기로 구분된다. ESR 연대 및 트렌치 조사 자료에 의하면, 연구지역에서 양산단층대의 단층활동은 이동하는 경향을 나타낸다. 약 75~85만 년 전을 기준으로 이전에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지, 약 75~85만 년 전에는 동쪽분절로부터 북쪽분절까지 활동하였으며, 약 63~66만 년 전 및 48~54만 년 전에는 북쪽분절만 활동하였으며, 약 34만 년 전 이후에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 다시 활동하였다.

주요어 : 양산단층대, 단층비지, ESR 연대측정, 제4기, 단층활동형태

1. 서 론

양산단층에 대한 초기의 연구는 지질분포의 차이에

의해 단층의 존재를 인식하는 것을 시작으로, 그 이후 연장성, 운동시기, 운동특성, 단층분절화, 단층대 내부 구조 등이 연구되었다(Lee, 1985; Chang *et al.*,

*Corresponding author: heekwon@kangwon.ac.kr

1993; Kim, 1993; Chae and Chang, 1994; Kyung and Chang, 2001; Choi *et al.*, 2009). Choi *et al.*(2009)는 상천리 일대에서 양산단층은 약 20 m 폭의 단층핵과 650 m 이상의 단층손상대로 구성되어 있으며, 우수향 주향이동 운동이 강하나 역단층성 단층 운동이 수반되었다고 해석하였다. 우리나라에서는 1980년대 원자력발전소의 부지 선정과 부지 안정성에 관련하여 활성단층의 중요성을 인식하였다. Lee(1985)는 양산단층이 활성단층이라고 주장하였으며, Okada *et al.*(1994)는 제4기 단층을 보고함으로써 양산단층의 활성여부에 대한 논쟁이 증가되었다. 그 이후 한반도 남동부에 대한 조사가 수행되어 양산단층과 울산단층 부근에서 약 20여개의 제4기 단층이 발견 또는 재확인되었다(Chwae *et al.*, 2000; Kee *et al.*, 2007; Kee *et al.* 2009; Choi, *et al.*, 2009; Kang and Ryoo, 2009; Kim *et al.*, 2011; Choi, *et al.*, 2012). 울산광역시 울주군 삼남면 일대에는 양산단층대를 따라 4개(상천, 가천 1, 가천 2, 조일)의 제4기 단층들이 발견되었다(Fig. 1). 이들은 Chwae *et al.*(2000)에 의해 상천단층, 가천 1단층, 가천 2단층 및 조일단층으로 기재되었으나, Kee *et al.*(2009)은 상천지점, 가천 1지점, 가천 2지점 및 조일지점으로 명명하였다. Yang and Lee(2012)는 가천 1지점에서 약 25 m 정도 연장 발

달하는 단층에서 ESR 연대가 서로 일치하는지를 검증하고, 단층대의 활동 형태에 대해 기술하였다. 그들은 가천 1지점의 단층은 제4기 이전에 활동하였으며, 제4기에 적어도 두 번(130~140만 년 전, 100~120만 년 전) 이상 재 활동한 것으로 해석하였다. 상천리 일대에서 트렌치 조사를 수행하여 Kyung *et al.*(1999a, 1999b)은 제4기 후기(25~50 ka)에 고위지형면이 형성되었으며, 그 이후에 양산단층이 재 활동한 것으로 해석하였다. 또한 제4기 고위면 구성 역층과 화강암이 단층 접촉하는 것을 확인하고, 우수향 주향이동 운동의 증거를 제시하였다. Kyung(2010)은 양산단층의 평균변위율을 0.1~0.04 m/ka로 보고하였다.

대규모 지진은 장주기를 가지고 단층을 따라 발생하기 때문에 고지진학적 연구를 통해 단층의 시간·공간적 활동 형태를 밝힐 필요가 있다. 역사지진의 자료에 의하면 터키의 노스아나톨리아단층은 1939년부터 1967년 사이에 동쪽에서부터 서쪽으로 이동하면서 규모 7 이상의 지진을 발생시켰다. 일부 학자들은 고지진 자료를 이용하여 주향이동단층의 시간·공간적 활동형태를 연구하였으며, 단층운동의 시간적 활동형태(temporal fault activity pattern)는 활성기와 휴식기로 나누어진다고 보고하였다(Yeats *et al.*, 1997, Lee and Schwarcz, 1995). 공간적 활동형태(spatial fault activity pattern)

Fig. 1. Location and geological maps of the study area. (a) Geological map. (b) Location map. Modified after Yang and Lee (2012).

에 대한 연구에 의하면 산안드레아스단층의 남부에서는 1680년 이후에 남서쪽에서 북동쪽으로 단층운동이 주향방향을 따라 이동하였으며(Grant and Sieh, 1994, Salyards *et al.*, 1992), Little Tujunga 지역의 산게브리엘단층에서는 약 35만 년 전에는 북서쪽에서 활동하였으며, 약 23만 년 전에는 남동쪽으로 주향방향을 따라 단층운동이 이동하였다(Lee and schwarcz, 1996).

연구지역에서 제4기에 활동한 양산단층은 상천지점 남쪽에서 두 갈래로 나누어진다. 제4기 단층활동의 공간적 특성을 파악하기 위해 상천지점을 포함한 북쪽분절(segment), 두 단층의 교점 남쪽에서는 가천 1지점을 포함한 서쪽분절 및 가천 2지점 및 조일지점을 포함한 동쪽 분절로 나누어 분석하였다.

이 연구의 목적은 ESR 연대와 단층비지대의 지질구조적 특성의 상호 관계를 밝히고, 단층비지의 ESR 연대 자료 및 트렌치 자료(Kyung *et al.*, 1999a)를 이용하여 울산광역시 울주군 삼남면 일대에 발달된 양산단층대의 제4기 시간·공간적 활동 형태를 파악하는데 있다.

2. ESR 연대측정의 원리 및 방법

2.1. ESR 연대 측정법의 원리

석영과 같은 절연체의 결정이 자연 방사성에 노출되었을 때 이온화된 전자는 결정 안에 분포하는 격자함(lattice defects)에 잡히게 된다. 특징적인 ESR 신호(signal)의 세기는 이와 같이 잡힌 전자(양전자 또는 음전자)의 수에 비례한다. 잡힌 전자의 수는 포화되거나, 평형상태가 될 때까지 점차적으로 증가한다. 지질학적 사건 당시에는 시료형성 당시에는 ESR 신호의 세기가 영이 될 때까지 감소하게 되며, 그 이후에 시간이 지남에 따라 다시 점차적으로 증가한다. 시료의 나이를 구하기 위해서는 시료에 대한 ESR 신호의 세기가 영이 된 지질학적 사건 이후에 시료가 받은 방사성 에너지의 양을 나타내는 상응조사량(equivalent dose, D_E ; 단위: Gy)과 시료 채취 지점에서의 조사율(dose rate, d ; 단위: Gy/year)을 구해야 한다. 시료의 연대는 다음과 같은 방정식의 형태로 결정된다.

$$\text{연령}(t) = \text{상응조사량}(D_E) / \text{조사율}(d)$$

2.2. 단층비지의 ESR 측정법의 가정 및 원리

단층활동 중에 단층비지 속에 분포되어 있는 석영의 ESR 신호의 세기는 입자와 입자가 서로 미끄러지면서 마찰될 때 지엽적인 마찰열과 격자변형 운동에 의해

감소하게 된다. 단층활동 후에 단층비지 내의 방사성에 기인한 이온화작용에 의해 생긴 전자가 단층비지 속의 석영의 격자함에 다시 잡혀 ESR 신호의 세기는 다시 증가하게 된다. 즉 ESR 신호의 세기(I)는 잡힌 음전자 혹은 양전자의 수와 비례하고, 방사성 원소에 의한 조사율과 단층활동 후에 지난 시간에 비례하여 점점 증가하게 된다. 주어진 단층비지의 최후의 활동 시기는 위에서 설명한 연대방정식에 의해서 결정된다.

2.3. 단층비지의 ESR 연대측정 과정

실험실에서 단층비지로부터 분리한 석영은 ^{60}Co 을 이용하여 감마선을 단계별로 쬔인다. ESR 신호의 세기, 그 자체로는 ESR 연대를 결정하지 못하기 때문에, 단층활동 후에 축적된 에너지의 형태로 전환시켜야만 한다. ESR 신호의 세기 대 조사된 감마에너지 양의 그래프를 이용하여 조사된 감마에너지 양에 대한 ESR 신호의 세기의 성장곡선(growth curve)을 이용하여 상응조사량(D_E)을 구한다. 모암과 단층비지 시료 속의 K, Th, U의 양을 구한 후 이 자료를 사용하여 조사율을 결정하게 된다. ESR 연대의 결정은 ESR-DATA라는 프로그램을 사용하여 계산하게 되는데 ESR 연대는 α -효율(eficiency), U, Th 과 K의 붕괴, 그리고 주변의 암석으로부터 감마에너지뿐만 아니라, 석영입자에서의 α -와 β -입자의 감소(attenutation)요소 등을 계산하여 ESR 연대측정을 하게 된다.

단층비지의 ESR 연대 측정에 필요한 가정은 ESR 신호의 세기가 단층활동에 의해서 영이 된다는 것으로, 단층활동 중에 ESR 신호의 세기가 완전하게 영이 되었는지를 결정하기 위해 각각 다른 ESR 신호를 이용하여 결정한 각각의 ESR 연대를 횡축을 입자크기로 하고 종축을 ESR 연대로 하는 그래프에 도식한다. 각각의 ESR 신호에 대해 위의 그래프에서 각각의 연대 평탄역(age plateau)을 구한다. 각각의 ESR 신호에 대한 연대 평탄역이 일치한다면, 단층활동 중에 모든 ESR 신호의 세기가 임계크기보다 작은 입자에 대해 완전히 영이 되었음을 시사하며, 이 ESR 연대는 평탄 ESR 연대(plateau ESR age)로 불리 운다. ESR 연대 대 입자크기 그래프에서 평탄역이 존재하지 않는 시료는 마지막 단층활동 시기를 결정할 수가 없다. 그러나 입자가 작아질수록 ESR 연대가 감소한다면 평탄역이 존재하지 않을지라도 단층활동 시기의 최대연대(maximum ESR age)을 추정할 수 있다. 따라서 ESR 연대는 평탄 ESR 연대, 다 센터 ESR 연대(multiple ESR age) 및 최대 ESR 연대로 구분되며, 평탄 ESR

연대 및 다 센터 ESR 연대는 주어진 단층의 최종 활동시기를 지시하지만 최대 ESR 연대는 그 이후에 단층 활동이 있었음을 암시한다(Lee and Schwarcz, 2001).

3. 단층비지대의 특성 및 ESR 연대

3.1. 상천지점(북쪽분절)

울산광역시 울주군 삼남면 상천리 중남초등학교 근

처의 35번 국도변 노두(북위 35°31'56.44", 동경 129°06'41.22")에는 제4기 선상지 퇴적층과 백악기 불국사화강암이 단층관계로 접촉하고 있다(Fig. 2a). 단층면의 태위는 N23°E/90°이며, 단층비지 주변의 화강암은 강한 파쇄변형 작용을 받아 수많은 전단 띠(shear bands)가 망상으로 형성되었다. 변형작용을 받지 않은 화강암 암편들이 전단 띠 사이에 렌즈상으로 단층비지대와 평행하게 배열되어 있으며, 이들은 단층비지대가

Fig. 2. Outcrop photographs and line drawings showing fault gouge zone at the Sangcheon Stop. (a) Fault gouge zone between sheared granite and Quaternary sediments. (b) Close-up view of the fault gouge zone. (c) Fault gouge zone between sheared granite and Quaternary sediments on the bottom of trench.

형성되기 전 단계에 형성된 것으로 추정된다. 제4기 선상지 퇴적층에는 변형작용의 증거가 발견되지 않았다. 단층비지대는 5개의 단층비지띠로 구성되어 있으며, 각각 단층비지띠는 전단면으로 명확하게 경계되어 있다 (Fig. 2b). 5개의 단층비지띠는 한 번의 단층활동 중에 전단변형의 세기의 차이에 의해 형성된 것이 아니라 여러 번의 단층활동에 의해 단층비지대가 단계적으로 형성된 것으로 판단된다. Kyung *et al.*(1999a)에 의해 시행된 트렌치 바닥에는 단층비지대가 약 3개의 단층비지띠로 구성되어 있다(Fig. 2c).

상천지점의 트렌치와 35번 국도변 노두에서 총 8개의 단층비지 시료를 채취하였으며 각각의 특징과 ESR 연대측정 결과는 다음과 같다(Fig. 2b, c, Table 1).

Sang 1: 트렌치 바닥에서 화강암과의 경계부에 발달된 두께 3-4 cm의 회색 단층비지띠에서 채취하였다. 이 시료에서 분리한 석영 속의 E' 신호는 포화되어 ESR 연대를 구할 수 없다. 단층비지 시료의 마지막 단층활동 시기는 단층비지 시료의 ESR 연대측정 방법의 한계를 넘는 2-3백 만 년 이전으로 추정된다(Fig. 2c).

Sang 2: 트렌치 바닥의 단층비지대 중앙부에 발달된 두께 7 cm의 녹회색 단층비지띠에서 채취한 것이다. 이 시료에서 분리된 0.045-0.075 mm 입자크기의 석영을 이용하여 최대 ESR 연대(850±240 ka)를 구하였다 (Fig. 2c).

Sang 3: 트렌치 바닥에서 제4기 선상지 퇴적층과의 경계부에 발달된 황색 염리가 발달된 단층비지띠에서 시료를 채취하였다. 이 시료에서 분리된 0.045-0.075 mm 입자크기의 석영을 이용하여 최대 ESR 연대(630±150 ka)를 구하였다(Fig. 2c).

Sang 4: 35번 국도변 노두에서 화강암과의 경계부에 분포하는 두께 약 1 cm의 회색 단층비지띠에서 채취하였다. 이 시료에서 분리된 0.075 mm 이하 입자크기의 석영을 이용해 구한 다 센터 ESR 연대는 520±50 ka 이다(Fig. 2b).

Sang 5: 35번 국도변 노두에 발달된 두께 1.5-3.5 cm의 황색 단층비지띠에서 채취하였다. 이 시료에서 분리된 0.075 mm 이하 입자크기의 석영을 이용해 구한 다 센터 ESR 연대는 660±60 ka이다(Fig. 2b).

Sang 6: 35번 국도변 노두에 발달된 두께 1 cm의 담황색을 보이는 단층비지띠에서 채취하였다. 0.045 mm 입자크기 이하의 석영을 이용한 평탄 ESR 연대는 540±60 ka이다(Fig. 2b).

Sang 7: 35번 국도변 노두에서 원마도가 양호한 암편을 포함한 4 cm 두께의 단층비지띠에서 채취하였다. 0.1 mm 입자크기 이하의 석영을 이용한 평탄 ESR 연대는 480±40 ka이다(Fig. 2b).

Sang 8: 제4기 퇴적암과의 경계부에 렌즈상의 염리가 잘 발달된 단층비지띠이다. 두께는 약 1-2 cm이며

Table 1. Recurrence intervals for fault activity of the Yangsan Fault Zone in the study area

Active period	ESR age (ka)	Interval within active period* (ka)	Average interval within active period (ka)	Average ESR age within active period (ka)	Interval** (ka)
A	340			340	
B	480	40	30	510	170
	520	20			
	540				
C	630	30	30	660	150
	660				
D	750	50	33		
	800	30		780	120
	830	20			
	850				
E	1000	10	20	1130	350
	1010	40			
	1150	10			
	1160				
F	1290	110	110	1390	260
	1400				
Average		36			210

*Interval within active period = later ESR date - former ESR date within active period.

**Interval between active period = average ESR age of the next active period - average ESR age of the former active period.

Sang 7과의 경계부에는 수 mm 두께의 밝은 회색의 점토가 발달하고, 제4기 퇴적암 쪽 경계는 명확한 단층면으로 구분되지 않고 퇴적암을 마모시켜 불규칙한 경계를 보인다. 0.075 mm 입자크기 이하의 석영을 이용한 평탄 ESR 연대는 340 ± 30 ka이다(Fig. 2b).

3.2. 가천 1지점(서쪽분절)

Yang and Lee(2012)은 가천 1지점에 발달된 단층의 하천 노두 및 트렌치 1, 2 및 3에서 10개의 단층비지 시료를 채취하여 ESR 연대 측정을 하였다. 그들은 가천 1지점의 단층은 제4기 이전에 형성되었으며, 제4기에 적어도 두 번 이상 재 활동한 것으로 해석하였다(130~140만 년 전, 100~120만 년 전). Kyung(2002)은 연구지역의 하성단구를 고위면, 중위면, 저위면 그리고 최저위면으로 구분하였으며, 가천 1지점에서 양산단층의 최후 운동 시기는 고위 단구역층이 형성된 후 최저위 단구역층이 퇴적되기 이전에 있었던 것으로 추정하였다(25~50만 년 전 이후). Yang and Lee(2012)

은 25~50만 년 전 이후에 단층비지대와 제4기 고위 단구 역층과의 경계부에 발달된 명확한 단층면을 따라서 단층이 재 활동한 가능성이 있을 것으로 해석하였으며, 이 운동 시기는 단층비지의 ESR 연대 측정법으로는 결정하기 어렵다고 해석하였다.

3.3. 가천 2지점(동쪽분절)

가천 1지점에서 시냇가를 따라 동쪽으로 약 500 m 떨어진 노두(북위 $35^{\circ}31'05.71''$, 동경 $129^{\circ}06'32.3''$)에는 우수향 주향이동 단층이 제4기 역암과 이암 사이에 발달되어 있다(Fig. 3a). 단층비지대의 폭은 60-90 cm 정도이며, 단층면의 태위는 $N37^{\circ}E/80^{\circ}NW$ 이다. 단층비지대에는 전단띠와 칼집습곡이 관찰되며, 칼집습곡의 습곡축면의 태위는 $N87^{\circ}W/53^{\circ}NE$ 이며, 습곡축은 $41^{\circ}/056^{\circ}$ 이다. 단층비지대는 2개의 단층비지띠로 구성되며, 제4기 역암 쪽에 발달한 단층비지띠는 암녹회색이며 약 10-20 cm 두께이다. 백악기 이암 쪽에 발달한 단층비지띠는 폭이 5-10 cm 정도이며 녹색회색을 띤다. 파쇄엽

Fig. 3. Outcrop photographs and line drawings showing fault gouge zone. (a) Fault gouge zone between mudstone and Quaternary conglomerate at Kacheon 2 Stop. (b) Fault gouge zone between mudstone and Quaternary conglomerate at Joil Stop.

리가 양쪽 경계부에 잘 발달하며 엽리면의 태위는 $N33^{\circ}E/90^{\circ}$ 이다. Ka 2-1은 역암쪽에 발달한 단층비지띠, Ka 2-2는 이암쪽의 단층비지띠에서 채취하였다. Ka 2-1로부터 분리한 석영의 E' 신호는 0.075 mm 이하 입자크기에서 연대 평탄력을 보이며, ESR 연대는 750 ± 90 ka이다. Ka 2-2 시료에서 분리된 석영 속의 E' 신호는 0.025-0.045 mm 입자크기를 이용하여 최대 ESR 연대를 구하였으며, 이 시료의 최대 ESR 연대는 830 ± 130 ka이다(Fig. 3a).

3.4. 조일지점(동쪽분절)

울산시 울주군 삼동면 조일리 동서기계 주식회사 뒤쪽에 위치한 조일 지점의 노두(북위 $35^{\circ}30'10.3''$, 동경 $129^{\circ}06'7.7''$)는 길이 약 15 m, 높이 3 m이다. 이 노두에는 백악기 이암과 제4기 역암이 단층접촉을 하고 있다(Fig. 3b). 백악기 이암과 제4기 역암 사이 단층비지대의 폭은 20-110 cm 정도이다. 단층비지대는 두 갈래로 갈라져 있으며 두 단층비지대 사이에는 단층상대가 형성되어 있다. 제4기 역암 쪽에 발달한 단층비지띠는 폭이 8 cm이며 갈색을 띤다. 단층면의 태위는 $N32^{\circ}E/80^{\circ}SE$ 이며 단층비지에는 파쇄엽리가 잘 관찰된다. 단층면상에서 단층조선은 저작이며 우수향 주향이동의 운동감각을 나타낸다. 백악기 이암 쪽에 발달한 단층비지띠는 폭이 수 mm~1 cm이며 자주색을 띤다. 단층면의 태위는 $N20^{\circ}E/62^{\circ}SE$ 이며 단층비지띠에는 파쇄엽리가 형성되어 있다. Joil 1은 역암쪽의 단층비지띠에서 채취하였으며, Joil 2는 이암쪽의 단층비지띠에서 채취하였다(Fig. 3b). Joil 1 시료에서 분리된 석영 속의 E' 신호는 0.045 mm 이하 입자크기에서 평탄력을 보이며, Al 신호는 0.025-0.045 mm 입자크기에서 E' 신호와 연대 평탄력을 보인다. E' 과 Al 신호를 이용해 다 센터 ESR 연대를 구하면 800 ± 100 ka이다. Joil 2 시료에서 분리된 석영 속의 E' 신호는 0.045 mm 이하 입자크기를 이용한 평탄 ESR 연대는 830 ± 190 ka이다(Fig. 3b).

4. ESR 연대와 단층비지대의 특성과의 관계

여러 번 재 활동한 단층비지의 경우 ESR 연대측정법을 이용하여 마지막 활동시기만을 제한할 수 있다(Lee and Schwarcz, 1996). Lee and Schwarcz(1996, 2001) 및 Yang and Lee(2012)는 노두규모에서 재 활동한 단층비지띠가 구분될 경우 단층비지대의 활동 형태를 I, II, III 및 IV로 구분하였다. 단층비지대 활동

형태 I의 경우 변형경화작용(strain hardening)에 의해 기존의 단층비지띠에 새로운 단층비지띠가 첨가되어 기존의 단층비지대가 두꺼워 진다(Wojtal and Mitra, 1986, Lee and Schwarcz, 1996, 2001, Yang and Lee, 2012). 이 경우 채취한 단층비지의 ESR 연대는 각각의 다른 활동 시기를 지시하게 된다. 단층비지대 활동 형태 II의 경우 변형연화 작용(strain softening)에 의해 진화하며, 기존의 단층비지대 내에 재 활동한 단층비지띠가 형성된다. 재 활동한 단층비지띠는 기존의 단층비지대 내부에 단일 단층비지띠 혹은 망상 모양으로 여러 단층비지띠가 발달하기도 한다. 이 경우 각각의 단층비지띠에서 채취한 단층비지의 ESR 연대는 각각의 다른 활동 시기를 지시하게 된다(Lee and Schwarcz, 1996, 2001). 그러나 단층비지와 모암 사이에 형성된 단층면이 재 활동한 경우 시료채취가 어려워 ESR 연대측정 방법으로는 마지막 활동시기를 결정할 수 없다. 단층비지대 활동 형태 III의 경우 단층비지대 전체가 재 활동하게 되어 단층비지의 ESR 연대는 마지막 재 활동 시기를 지시하게 된다. 이 경우 과거의 단층비지의 활동시기와 재 활동 회수를 해석할 수 없다. 단층비지대 활동 형태 IV의 경우 변형경화 작용(strain hardening)에 의해 기존의 단층비지띠 주변의 모암에 새로운 단층비지띠가 형성되거나 재 활동하게 된다(Wojtal and Mitra, 1986, Lee and Schwarcz, 1996, 2001). 이 경우 채취한 단층비지의 ESR 연대는 각각의 다른 활동시기를 지시하게 된다.

연구지역에서 발견된 단층 및 단층비지는 적어도 300만 년 전에 이미 형성되어 있었던 것으로 추정되며(Chang and Choo, 1999), 우리가 채취하여 분석한 단층비지 시료들은 여러 번 재 활동 했을 가능성이 높다. 따라서 앞 절에서 기재한 단층비지의 ESR 연대는 채취 지점에서 단층비지의 마지막 활동시기를 지시한다.

상천리 지점의 경우, 각각 색, 고화도, 암편 등 특성이 다른 단층비지띠가 명확하게 구분되며, 각각의 단층비지띠에서 채취한 시료의 ESR 연대는 각각의 단층비지띠의 마지막 활동시기를 지시한다. 상천리 지점의 단층비지대 활동 형태를 추론하면 다음과 같다. 적어도 약 3백만 년 이전에 단층의 활동으로 파쇄엽리가 발달된 단층비지띠가 화강암에 형성되었다. 약 85만 년 전에 단층이 재 활동 했을 때 단층비지대 활동 형태 I에 의해 단층비지띠 서쪽에 화강암에서 유래된 새로운 단층비지띠가 첨가되었다. 약 63~66만 년 전에 단층이 재 활동 했을 때 단층비지대 활동 형태 I에 의해 단층비지띠 서쪽 부분에 화강암에서 유래된 새로운 단

층비지띠가 첨가되었다. 약 48~54만 년 전에 제4기 퇴적층에서 유래된 단층비지띠가 서쪽에 첨가되어 단층비지대의 폭이 증가하였다. 단층비지띠 내에 잔유물로 남아있는 원마도가 양호한 안산암편들이 제4기 퇴적층에서 유래된 단층비지임을 지지한다. 약 34만 년 전에 기존의 단층비지대와 서쪽의 제4기 퇴적층 사이에 암회색의 단층비지띠가 형성되었다. 이와 같이 상천리 지점에서는 약 85만 년 전부터 35만 년 전까지 적어도 4번 이상 단층이 재 활동 하였으며 주로 단층대 활동 형태 I에 의해 새로운 단층비지띠가 기존의 단층비지띠 서쪽 부분에 첨가되어 단층비지대의 두께를 증가시켰다.

Yang and Lee(2012)은 가천 1지점에서 노두 및 2개의 트랜치 관찰로부터 단층비지대는 적어도 4개의 단층비지띠로 구성되었다고 해석하였다. 그들은 주로 고화도 및 색을 기준으로 단층비지띠로 구분하였으며, 각각의 ESR 연대는 단층비지대의 동쪽에서부터 서쪽으로 갈수록 젊어지며, 단층비지 활동 형태 I에 의해 단층비지대가 형성된 것으로 해석하였다. 나머지 한 개의 트랜치에서는 약 30 cm 폭의 균질한 단층비지대가 발달되어 있으며, 단층비지대 활동 형태 III에 의해 진화한 것으로 해석하였다(Yang and Lee, 2012). 가천 2 지점에서는 두 개의 단층비지띠로 색에 의해 구분되나 각각의 ESR 연대는 750 ± 90 ka, 830 ± 130 ka로써 오차를 고려할 때 단층비지대 전체가 마지막으로 재 활동한 단층비지대 활동 형태 III에 의해 진화한 것으로 해석된다.

조일지점에서는 아외 노두에서 주단층(Joil 1)과 부수단층(Joil 2)으로 해석되어 단층비지대 활동 형태 IV에 의해 진화한 것으로 여겨진다. 각각의 ESR 연대는 각각 800 ± 100 ka, 830 ± 190 ka로써 오차를 고려할 때 거의 동시기에 재 활동한 것으로 해석된다.

5. 울산광역시 울주군 삼남면 일대에서의 양산 단층대의 제4기 단층활동 형태

비록 오래된 ESR 연대가 후기에 일어난 단층비지의 재 활동에 의해 지워져 채워한 단층비지의 ESR 연대는 마지막 활동시기만 지시하지만, 앞 절에서 기재한 것처럼 여러 명확한 단층비지띠로 구성된 단층비지대의 경우 각각의 단층비지띠의 마지막 활동시기를 이용하여, 양산단층의 제4기 시간·공간적 단층활동 형태를 규명하는데 유용하다. 연구지역에서 제4기의 시간적인 단층활동 특성을 보면, 활동기와 휴식기가 반복

Fig. 4. The temporal pattern of fault activity of the Yangsan Fault Zone in the Sangcheon area.

되었음을 알 수 있으며, 활동기내에서의 각각의 단층 운동 간격은 약 3만년이다(Fig. 4, Table 1).

연구지역에서 제4기에 활동한 양산단층은 상천지점 남쪽에서 두 갈래로 나누어진다. 제4기 단층활동의 공간적 특성을 파악하기 위해 상천지점을 포함한 북쪽분절(segment), 두 단층의 교점 남쪽에서는 가천 1지점을 포함한 서쪽분절 및 가천 2지점 및 조일지점을 포함한 동쪽 분절로 나누어 분석하였다. 약 75~85만 년 이전에는 주로 가천 1지점을 포함하는 서쪽분절에서 약 25~35만년 주기로 2번 재 활동하였다(1,300~1,400 ka; 1,000~1,200 ka, Yang and Lee, 2012). 이때 상천지점을 포함하는 북쪽분절도 함께 재 활동했을 것으로 추정하나 단층비지에 기록된 ESR 신호가 그 이후에 재 활동할 때 지워져 약 80만 년 이전의 기록들은 지워진 것으로 해석된다. 따라서 약 75~85만 년 이전에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 적어도 2번 이상 재 활동한 것으로 해석된다(Fig. 5a, b). 약 75~85만 년 전에는 동쪽분절의 조일지점 및 가천 2지점으로부터 북쪽분절의 상천지점까지 모두 재 활동한 것으로 해석된다(Fig. 5c). 약 63~66만 년 전, 약 48~54만 년 전에는 상천지점을 통과하는 북쪽분절에서 재 활동하였다(Fig. 5d, e). 약 34만 년 전 이후에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 다시 활동한 것으로 해석된다(Fig. 5f; Kyung *et al.*, 1999a; Kyung, 2002).

위의 분석결과를 종합하면 연구지역에서 약 75~85만 년을 기점으로 그 이전에는 약 26~35만 년 주기로 양산단층이 활동기에 들어갔으나 그 이후에는 약

Fig. 5. Summary of the spatial pattern of fault activity of the Yangsan fault zone in the Sangcheon area.

12~17만 년의 주기로 재 활동하여 활동주기가 짧아졌다(Table 1). 100~120만 년 전 이전에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 주로 활동하였으며, 약 75~85만 년 전에는 동쪽분절로부터 북쪽분절까지 주로 활동하였고, 약 75~85만 년 전 이후에는 북쪽분절만 재 활동 하였으며, 34만 년 전 이후에는 서쪽분절로부터 북

쪽분절까지 다시 활동하였다(Fig. 5).

6. 토 의

위에서 제시한 결과들은 연구지역에 발달된 단층들의 일정한 시간·공간적 단층운동 양상을 다음과 같이

지시한다. 첫째, ESR 연대의 오차가 비교적 큰 경향이 있으나 단층운동이 발생한 활동기와 단층운동이 일어나지 않은 휴식기로 나누어진다(Fig. 4, Table 1). 유사한 단층운동 양상이 캘리포니아의 산안드레아스단층(Sieh *et al.*, 1989), 산게브리엘단층(Lee and Schwarcz, 1996) 및 금왕단층(Hong and Lee, 2012)에서 보고되었다. Sieh *et al.*(1989) 및 Grant and Sieh(1994)는 캘리포니아의 Pallett Creek 및 Wrightwood에서 ^{14}C 연대측정법을 이용하여 산안드레아스단층의 홀로세 단층운동 양상을 연구하였다. 그들에 의하면 제4기층의 ^{14}C 연대는 오차가 서로 겹치는 경향이 있음에도 불구하고 산안드레아스단층의 활동기는 약 150년, 휴식기는 약 200~330년으로 구분하였다. Lee and Schwarcz (1995, 1996)은 캘리포니아의 Little Tujunga 지역에서 ESR 연대측정법을 이용하여 산게브리엘단층의 운동 양상을 연구하였으며, 산게브리엘단층의 활동기는 약 24 ka, 휴식기는 약 64 ka이었다. ESR 연대측정법을 이용한 금왕단층의 활동기는 약 30~100 ka, 휴식기는 50~200 ka이다(Hong and Lee, 2012).

둘째, 거의 평행한 단층이 두 개 이상 있을 경우, 단층운동이 전환하는 경향이 있다. 약 75~85만 년 이전에는 주로 가천 1지점을 포함하는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 적어도 2번 이상 재 활동한 것으로 해석된다. 약 75~85만 년 이후에는 동쪽분절의 조일지점 및 가천 2지점으로부터 북쪽분절의 상천지점까지 모두 재 활동한 것으로 해석된다. 34만 년 전 이후에는 서쪽 분절로부터 북쪽분절까지 다시 활동하였다(Fig. 5). 캘리포니아의 산안드레아스단층계에서도 단층활동 전환이 일어났다. 4~5 Ma 이전에는 산안드레아스단층의 남서쪽에 발달된 산게브리엘단층이 활발하게 활동했으나 그 이후에는 산안드레아스단층에서 단층운동이 활발하게 일어나고 있다(Lee and Schwarcz, 1996).

7. 결 론

첫째, 상천지점의 단층비지대는 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 ESR 연대가 젊어지는 경향이 있으며, 이는 단층이 재 활동할 때마다 새로운 단층비지대가 오래된 단층비지대 옆으로 첨가되어 단층비지대의 폭이 점점 증가하는 단층비지 활동 형태 I에 해당된다.

둘째, 단층운동의 시간적 양상에 의하면, 울산광역시 울주군 삼남면 일대에 발달된 양산단층의 단층운동은 활동기와 휴식기로 구분되는 주기성을 갖고 있으며, 제4기에 적어도 6 번의 활동기를 가졌다.

셋째, 단층운동이 단층의 주향방향이나 분절을 따라 이동하는 경향이 있다. 약 75~85만 년 전을 기준으로 이전에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지, 75-85만 년 전에는 동쪽분절로부터 북쪽분절까지 활동하였다. 63-66만 년 전과 48-54만 년 전에는 북쪽분절이 활동하였으며, 34만 년 전 이후에는 서쪽분절로부터 북쪽분절까지 다시 활동하는 단층운동의 전환이 발생하였다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-8110)의 지원에 의해 이루어졌다. 이 논문의 개선을 위하여 세심하게 검토하고 유익한 조언을 주신 고희재 박사님, 손문 교수님 및 익명의 심사위원께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Chae, B.G. and Chang, T.W. (1994) Movement history of Yangsan fault and it's related fractures at Chongha-Yongdok area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v.30, n.4, p.379-394. (in Korean).
- Chang, T.W., Chang, C.J. and Kim, Y. K. (1993) The geometric analysis of fractures near the Yangsan fault in Eonyang area. Journal of Korean Institute Mining Geology, v.26, n.2, p.227-236. (in Korean).
- Chang, T.W. and Choo, C.O. (1999) Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan Fault Zone. Journal of Korean Earth Science Society, v.20, n.1, p.25-37. (in Korean).
- Choi, J.H., Yang, S.J. and Kim, Y.S. (2009) Fault zone classification and structural characteristics of the southern Yangsan fault in the Sangcheon-ri area, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v.45, n.1, p.9-28. (in Korean).
- Choi, S.J., Jeon, J.S., Song, G.Y., Kim, H.C., Kim, Y.H., Choi, B.Y., Chwae, W.C., Han, J.G., Ryoo, C.R., Seon, C.G., Cho, M.S., Kim, K.Y., Kim, Y.B., Lee, H.J., Shin, J.S., Lee Y.S., Kee, W.S., Lee H.K., Song, Y.G., Kim, Y.S., Kang, T.S., Hong, D.G. and Kim, S.G. (2012) Active fault map and seismic hazard map. NEMA-NATURE-2009-24, National Emergency Management Agency, p.68-77. (in Korean).
- Chwae W.C., Choi, S.J., Lee, B.J., Lee Y.J., Ryoo, C.R. and Song, M.J. (2000) Neotectonics. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. N2-01-02-A-01, Ministry of Science and Technology. (in Korean).
- Grant, L.B. and Sieh, K. (1994) Paleoseismic evidence of clustered earthquakes on the San andreas fault in the Carrizo Plain, California. Journal of Geophysical Research, v.99, p.6819-6841.
- Hong, N.R. and Lee, H.K. (2012) Structural features and ESR dating of the Keumwang fault at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological soci-

- ety od Korea, v.48, n.6, p.473-489. (in Korean).
- Kang, J.H. and Ryoo, C.R. (2009) The movement history of the southern part of the Yangsan fault zone interpreted from the geometric and kinematic characteristics of the Sinheung Fault, Eonyang, Gyeongsang Basin, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, v.18, n.1, p.19-30. (in Korean).
- Kee W.S., Kim, Y.H., Lee, H.J., Cho, D.R., Kim, B.C., Song, G.Y., Koh, H.J., Lee, S.R., Yeon, Y.K., Hwang, S.H., Park, K.G. and Sung, N.H. (2009) Data base and variety of Quaternary fault in southeastern Korean Peninsula. IP2006-047-2009(1), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p.40-45. (in Korean).
- Kee, W.S., Kim, Y.H. and Song, G.Y. (2007) Quaternary tectonics of southeastern Korea. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p.1-32. (in Korean).
- Kim, J.Y. (1993) Fault system and fracture zone of the Yangsan fault. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v.14, n.3, p.281-299. (in Korean).
- Kim, Y.S., Jin, K.M., Choi, W.H. and Kee, W.S. (2011) Understanding of active fault: A review for recent researches. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.47, n.6, p.723-752. (in Korean).
- 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*, v.37, n.4, p.563-577. (in Korean).
- Kyung, J.B. (2010) Paleoseismological study and evaluation of earthquake magnitude along the Yangsan and Ulsan fault zones in the Southeastern part of Korea. *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, v.13, n.3 p.187-197. (in Korean).
- Kyung, J.B., Lee, K.H., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Takemura, K. (1999a) Study of fault characteristics by trench survey in the Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan fault, Southeastern Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v.20, n.1, p.101-110. (in Korean).
- Kyung, J.B., Lee, K.H. and Okada, A. (1999b) A Paleoseismological study of the Yangsan fault -Analysis of deformed topography and trench survey. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v.2, n.3, p.155-168. (in Korean).
- Kyung, J.B. (2002) Trench survey for Neo-fault movement Sangchon-ri area in the southern part of Yangsan fault zone. Annual Conference of Geological Society of Korea, The Korean society of economic and environmental Geology, The Korean Society for Geosystem Engineering and The Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, p.293-297. (in Korean).
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P. (1995) Fractal clustering of fault activity in California. *Journal of Geology*, v.23, n.4, p.377-380.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P. (1996) ESR plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. *Geological Society of American Bulletin*, v.108, p.735-746.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P. (2001) ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quaternary Science Reviews*, v.20, p.999-1003.
- Lee, K.H. (1985) On the seismic activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.21, n.1, p.38-44. (in Korean).
- 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*, v.103, p.111-126. (in Japanese).
- Sieh, K.E., Stuiver, M. and Brillinger, D. (1989) A more precise chronology of Earthquakes produced by the San Andreas fault in Southern California. *Journal of Geophysical Research*, v.94, p.603-623.
- Wojtal, S. and Mitra, G. (1986) Strain hardening and strain softening in fault zones from foreland thrusts. *Geological Society of American Bulletin*, v.97, p.674-687.
- Yang, J.S. (2006) Quaternary fault activity in the southeastern part of the Korean peninsula. Ph.D. thesis, Kangwon National University, chuncheon, p.9-16. (in Korean).
- Yang, J.S. and Lee, H.K. (2012) ESR dating of fault gouge from the Gacheon 1 site on the Yangsan fault zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.48, n.6, p.459-472. (in Korean).
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen C.R. (1997) *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press, p.242.

2013년 12월 20일 원고접수, 2014년 1월 11일 1차수정,
2014년 1월 23일 게재승인