

## 양산단층대의 고지진학적 연구 - 변위지형 분석 및 트렌치 조사 -

경재복\* · 이기화\*\* · 오까다 아즈마사\*\*\*

\*한국교원대학교 지구과학교육과 · \*\*서울대학교 자연과학대학 지질학과

· \*\*\*일본 경도대학 지구물리학교실

### 요 약

한반도 동남부에 위치한 양산단층대에 대한 고지진학적 연구가 역사지진 자료, 변위지형에 대한 항공사진 판독, 트렌치 굴삭 조사를 통하여 종합적으로 시도되었다. 역사시대에 발생한 피해지진들의 진앙분포는 제4기 후기 이후 활동한 양산단층이나 울산단층이 역사지진의 지진원 단층일 가능성을 나타내 주고 있다. 제4기 단층운동과 연관된 지형적인 증거는 양산단층대 북부에서는 유계리, 토성리-냉수리 일대, 남부에서는 언양-통도사 구간의 단층선을 따라 선명하게 나타난다. 양산 주단층대에는 뚜렷한 단층비지대가 나타나며 단층대 부근에는 NNE-SSW 방향의 선구조선이 우세하게 분포한다. 양산단층대 북부 유계리에서는 약 3 m 두께의 저위단구면이 역단층 운동에 의한 단층변위를 나타낸다. 양산단층대 남부 언양일대에서는 제4기 후기 고위지형면 형성 후 5~12 m 정도 동측상승의 수직변위를 동반하되 주향이동이 우세한 단층운동이 트렌치 굴삭과 지형분석을 통해 나타난다.

**주요어:** 고지진학, 양산단층, 고위단구, 저위단구, 제4기 후기

**Kyung Jai-Bok, Lee Kiehwa, and Atsumasa Okada, 1999, 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.**

**ABSTRACT:** The paleoseismological importance of the Yangsan fault zone was examined by historical earthquake data, aerial photograph, and trench survey of the area. Occurrences of great earthquakes during the historical time indicate that the Yangsan and/or Ulsan fault have been active during the late Quaternary and generated historical events. Geomorphological evidences of the recent fault activity are clearly shown both in the northern segment (Yugye-ri, Tosung-ri and Naengsu-ri areas) and in the southern segment (Eonyang to Tongdosa areas) of the Yangsan fault.

The main Yangsan fault is characterized by fault gouges and NNE-SSW lineaments. The reverse faulting in the Yugye-ri area generated about three-meter displacement of the lower terrace deposits. On the other hand, a major strike-slip movement with a minor component of 5-12 m vertical displacement was identified by the offset of the higher terrace surface in the Eonyang area.

**Key words:** Paleoseismology, Yangsan fault, higher terrace, lower terrace, Late Quaternary

(Kyung, Jai-Bok, Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Kangnae, Chongwon, Chungbuk 363-791, Korea; Lee, Kiehwa, Department of Geological Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea; Atsumasa Okada, Geophysical Institute, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan. email: jbkjung@cc.knue.ac.kr)

## 1. 서 론

고지진학(Paleoseismology)이란 현재와 역사시대를 거슬러 올라가 과거 수십만년 이내에 발생한 지진 특성에 대한 지질학적 연구를 하는 분야이다. 역사지진이나 계기관측 자료만으로는 주어진 단층대의 시간·공간적 활동형태를 밝히는데 충분한 자료를 제공할 수 없기 때문에 최근 지질시대(제4기 후기)에 발생한 지진에 대한 활동시기 및 단층형태 등에 대한 연구자료를 결합하여 활성단층을 평가하게 된다.

이러한 고지진학 연구분야의 개척자로서는 미국 San Andreas 단층에서의 지진의 재래주기를 지질학적인 증거들을 통해 평가한 R. E. Wallace (Wallace, 1946; 1968, 1970)와 San Andreas 단층의 구획화를 시도한 Allen (Allen, 1968)을 들 수 있으며 고지진학적 조사의 기초를 제공하였다.

1970년대에 들어와 현세의 퇴적 층서에서 각각의 고지진들을 인정하는 기법과 Pallet Creek과 Wallace Creek에서 San Andreas 단층상에서의 변위의 역사를 기술하는 기법이 K. E. Sieh (Sieh, 1978, 1981, 1984; Sieh · Jahns, 1984; Sieh *et al.*, 1989) 등에 의해 개발되면서 본격적인 연구가 시작되었다. 또한, 거대 지진에 의한 해안융기나 해안단구 지역의 융기 등도 세계 여러 지역에서 밝혀지게 되었다(예:알래스카만-Plafker · Rubin, 1967; 뉴질랜드-Wellman, 1967; 일본-Matsuda *et al.*, 1978).

1980년대 이후 단층대의 절개, 현세(Holocene)의 융기 및 침강 해안선의 연구, 정성적 및 정량적인 지형 및 단층에 연구, 변위(slip)량의 연구 등이 미국, 일본, 뉴질랜드, 중국 및 이탈리아 등지에서 활발하게 이루어졌다(예: Okada, 1980; 1989; Machette *et al.*, 1991; Schwartz · Coppersmith, 1984). 또한, 제4기 퇴적층에 대하여  $C^{14}$ , 화산회층서, Loess층서 등을 이용한 연대측정기술이 최근 크게 향상되어 역사시대 이전 지진기록의 정확도를 매우 높게 되었다.

지금까지의 연구 결과에 의하면 대규모 지진은 지표면의 층서에 다양한 지질학적인 효과를 나타낸다. 고지진의 증거로서 광범위하게 받아들여지고 있는 것은 퇴적물에 나타나는 여러회의 단층기록, 뒤틀림 혹은 습곡층서(Sieh, 1978; Sieh · Jahns, 1984), 변위층서의 상하관계, 정단층상의 colluvial wedges (Schwartz · Coppersmith, 1984), 액상화 현

상(Obermeier, 1994), 산사태 현상, 해안선의 융기(Lajoie, 1986) 등을 들 수 있다. 슬립율(slip rate)과 재래주기 관계는 일반적으로 판경계 지역과 같이 슬립율이 높은 지역이 재래주기는 더 짧고 슬립율이 낮은 판내부 지역에서는 재래주기도 길게 나타나는 경향이 우세하다.

한반도 남동부에 위치한 양산단층대의 인접지역은 인구밀집 지역들이 많으며 주요 산업시설들이 위치하고 있기 때문에 역사시대 뿐만 아니라 제4기 지형변위를 포함한 양산단층대의 고지진학적 연구의 필요성이 중요하게 제기되고 있다. 역사문헌상 양산단층대가 위치한 경주 일대에는 약 10회의 피해지진이 발생하였다(이기화, 1998). Lee · Na (1983)는 역사지진 및 미소지진을 이용하여 양산단층대가 활성임을 주장하였고 Lee · Jin (1991)은 양산단층을 지진자료에 근거하여 서로 지진활동이 다른 3개의 구역으로 나누었다. 판내부 지역에서 특정단층을 따라 발생하는 피해지진의 재래주기가 1000년-수만년 범위이기 때문에 현재 지진이 발생하지 않기 때문에 안전하다고 판단하는 것은 큰 오류라고 생각한다.

양산단층의 활동시기에 대해서는 여러 의견들이 알려졌으나(Otsuki · Ehiro, 1978; Chang *et al.*, 1990; Yoon · Kim, 1990), Jolivet *et al.* (1991)은 양산 단층의 주 활동시기를 42-14 Ma 임을 제시하였다. 양산단층의 구조운동은 마이오세 후기에 가장 활발하였으며 에오세 이후 최소한 3회의 주향이동단층 운동과 2회의 경사단층 운동을 받았음이 제시되었다(채병곤 · 장태우, 1994; 장천중 · 장태우, 1998). 양산단층은 주로 우수주향이동의 단층 운동을 해왔으며 중부에서는 25 km의 변위(Choi *et al.*, 1980), 북부에서는 35 km의 변위(Chang *et al.*, 1990)가 제시되었다.

양산단층의 대규모적인 단층운동은 제3기까지 활발하였으나 제4기에도 단층운동이 진행되었음이 지형적 변위와 트렌치 조사를 통해 확인되고 있다(Okada *et al.*, 1994; Kyung *et al.*, 1999).

본 연구는 양산단층의 제4기 후기 단층운동의 지진 지질학적 특성을 고지진학적 방법으로 규명하고자 하는 첫 시도로서 양산단층대의 북부와 남부지역의 변위지형을 분석하고 제4기 단구퇴적물이 잘 분포하는 연양-동도사 구간에 대해 트렌치 조사를 실시하여 제4기 단층운동의 특성과 변위량을 추정하고자 하였다.

## 2. 역사 지진활동

과거 약 2000년 동안 한반도에서 가장 파괴적인 지진이 많이 발생한 지역은 경상분지 일대이다. Fig. 1은 경상분지에 분포하는 주요단층의 분포(KIGAM, 1995)와 역사지진의 진앙분포를 나타낸다. 역사지진의 경우 MM진도 VIII 이상에 해당

되는 중규모 이상의 지진만을 표시하였다.

경상분지 내에서 발생한 중규모 이상의 진앙분포를 보면 대부분의 큰 지진이 경상분지 동부에서 발생하였다. 특히, 양산단층이 통과하는 경주일대에는 피해를 동반하는 MM진도 VIII 이상의 지진이 약 10회 발생하였으며 울산단층이 통과하는 울산일대에는 1643년 우리나라 역사지진 중 최대 크

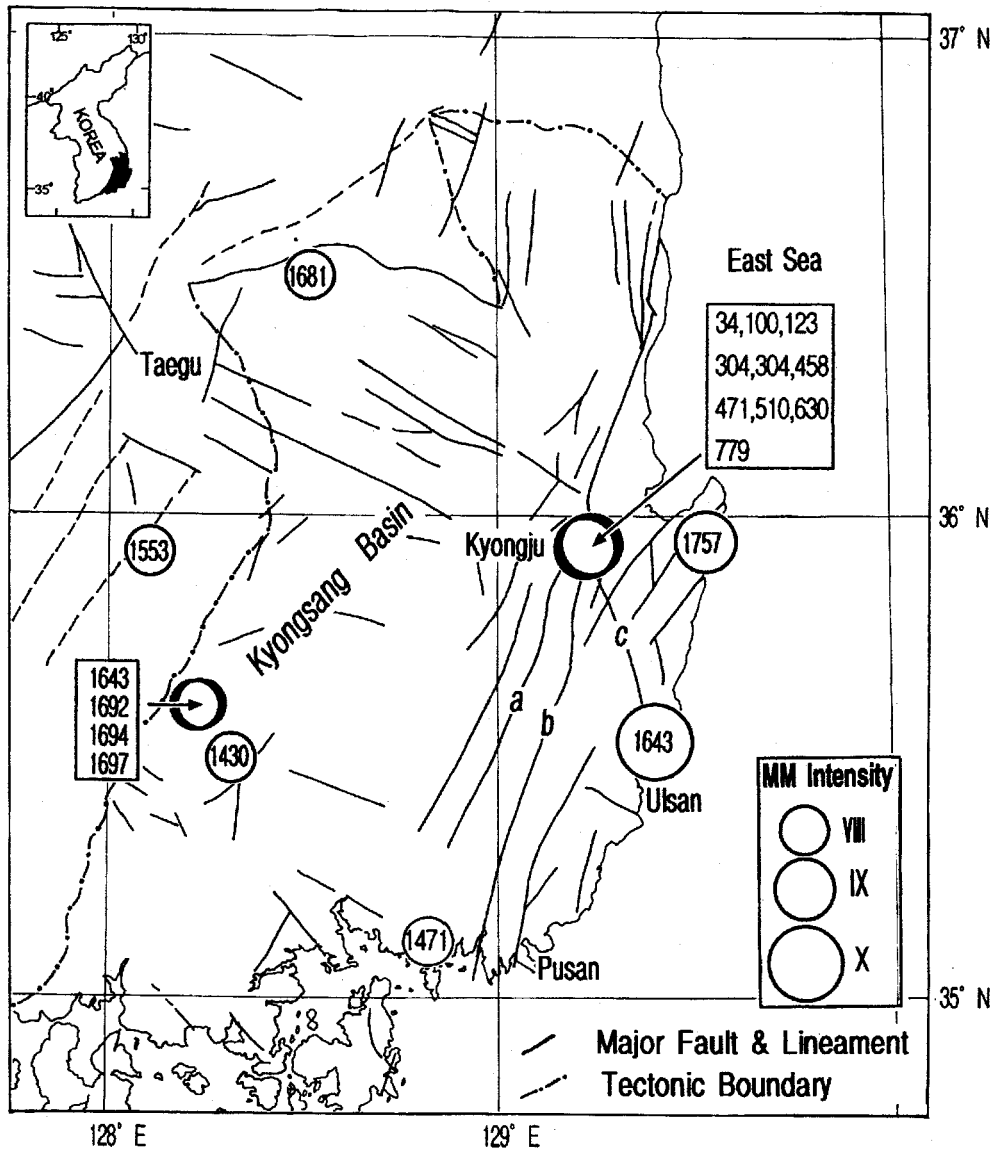


Fig. 1. Epicenters of major historical earthquakes in the Kyongsang basin during A.D. 2-1905; a, b, and c denote the Moryong, the Yangsant, and the Ulsan faults, respectively

기로 사료되는 MM진도 X으로 평가된 지진(이기화, 1998)이 발생하였다. 다만 역사문헌에 나타난 역사지진의 진앙에 대한 기술의 신빙성이 논란이 되기도 하지만 기술자체는 정확하다고 보아지며 어느 도시 부근에서 발생하였을 때 그 도시로 표기하였을 가능성이 크다. 따라서, 위 지진들은 경주 및 울산을 포함한 그 부근에서 발생하였음은 분명하다고 사료된다. 또한, 파괴를 동반한 큰 지진들은 주로 큰 규모의 단층대에서 발생(Allen, 1976)함으로서 양산단층대나 울산단층대가 지진발생의 지진원대로 작용했을 가능성을 시사해 주고 있다. 역사시대에 발생한 지진의 지진단층 규명은 현재로서는 역사문헌상에 지형변위에 대한 부분적인 서술이 있지만 야외에서 지형 및 지질학적인 증거를 아직 발견하지 못하고 있다.

단층활동의 장기적인 특성을 규명하는데는 역사시대 뿐만 아니라 역사시대 이전인 현재 및 제4기 후기에서의 지진활동의 증거를 찾는 것이 매우 중요하다. 양산단층이 지진학적인 관점에서 활성단층임이 학계에서 주장(Lee · Na, 1983)된 이후, 최근 지형적인 변위특성과 트렌치 조사를 통해 양산단층과 울산단층이 활성단층임이 지진지질학적으로 제기되고 있다(Kyung *et al.*, 1997; 1999; 경재복 외, 1999).

### 3. 구조선 및 변위지형 분석

양산단층의 대규모적인 단층운동은 제3기 초까지 활발하게 진행되었다. 그러나, 제4기에도 기존의 단층이 재활성화 되면서 그 규모는 작으나 단

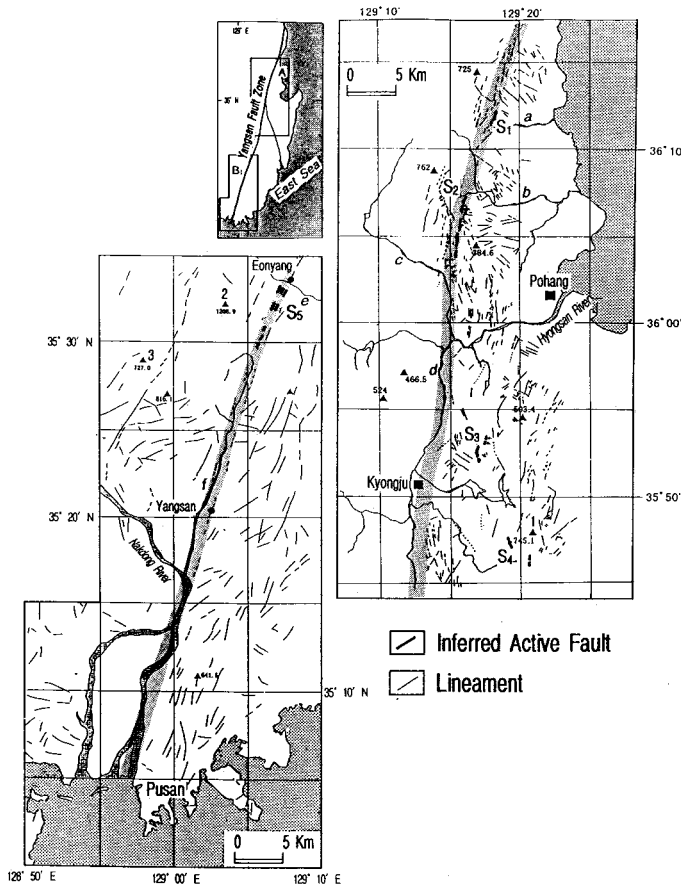


Fig. 2. Lineaments and inferred active faults along the Yangsan fault zone from aerial photograph (1:20,000): 1, Mt. Toham; 2, Mt. Shinbul; 3, Hyangro Peak; S1, Yugye; S2, Shinkwang; S3, Chonbuk; S4, the Pulguksa temple; S5, Sangchon; a, the Seojong stream; b, the Koggang stream; c, the Kigae stream; d, the Hyongsan river; e, the Taehwa river; f, the Yangsan stream.

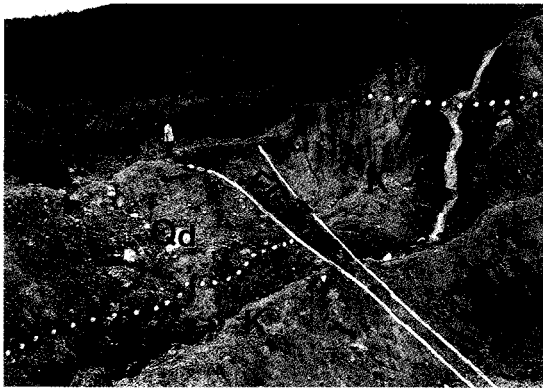


Fig. 3. Outcrop of a reverse fault displacing about 3 m of Quaternary deposits (Qd) at Yugye-ri in the northern part of the Yangsan fault; FGZ denote fault gouge zone and K Cretaceous sedimentary rocks (Hayang group).

층운동이 진행되었음이 지형적 변위나 트렌치 조사를 통해 확인되고 있다(Okada *et al.*, 1994; Kyung *et al.*, 1999). 제4기(약 200만년 전) 이후 활동한 단층에 대해 여러 지질학적인 용어들이 사용되고 있으며, 특히 활성단층(혹은, 활단층)에 대한 정의 및 인정기준도 연구자나 목적(예; 내진공학)에 따라 각각 다르게 사용되고 있다. 본 연구에서는 학술적인 광의의 의미로서의 활성단층을 “제4기 후기(약 50만년) 이후 활동한 단층으로서 장래에도 활동할 가능성이 있는 단층”으로 정의하고자 한다.

### 3.1 양산단층 북부

양산단층대를 따라 활성단층 및 변위지형의 존재와 분포를 파악하기 위해 국립지리원이 발행한 항공사진(1:20,000)을 판독하고 지형도(1:50,000) 분석과 야외 조사를 실시하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

양산단층대의 경주를 포함하는 중북부 지역에서 항공사진 판독에 의한 활성단층 변위지형의 존재와 분포파악은 Fig. 2a에서 보는 바와 같다. 양산단층은 N-S 내지 NNE-SSW 주향을 지니며 양산단층대 주변지역의 선구조선도 이 방향이 우세하다. 서정천 상류 부근에는 다수의 선구조선이 NNE-SSW 방향으로 선명하게 단층대 또는 그 주위에 나타난다. 특히, 송나면 중산리-청하면 유계리 사이에는 양산단층대의 선구조선을 따라 우수주향이동의 하천변위(stream offset)를 나타내 주고

있다. 그 중 확실하게 활성단층 변위지형으로 인정할 수 있는 지역은 유계리 일대에 나타난다.

청하면 유계리 일대(Fig. 2, S1)에는 서에서 동으로 흐르는 서정천에 의해 형성되었다고 사료되는 중위 및 저위 단구면이 발달되어 있다. 현재 농업진흥공사에서 실시하는 배수로 공사에 의해 길이 약 110 m와 폭 약 40 m의 절개면이 나타난다. 단층에 거의 직각방향의 절개면 상에는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 기반암인 퇴적암류(경상누층군의 하양층군)에 발달된 기존의 단층파쇄대가 재형성되면서 폭 약 0.5-1.5 m의 단층 비지대가 나타나며 두께 약 3 m의 저위단구면을 변위시키면서 나타난다. 단층은 N15° - 20° E의 주향과 42° - 45° SE의 경사를 지니며 단층 가우지대 내의 단층조선의 선주향은 거의 E-W인 역단층운동을 나타낸다. 전체적으로 양산단층대 북부 지역에서는 NNE-SSW 주향의 선구조선 이외에 NW-SE 주향의 선구조선도 단층대 동부에 다수 나타난다. 그러나 NNW-SSE 방향의 선구조선은 NNE-SSW 주향의 선구조선에 의해 끊겨 나타나는 경향을 보여 NNE-SSW보다 오래된 지질구조로 사료된다.

신광면 토성리-냉수리 일대(Fig. 2, S2 이남)에는 고위단구면이 서쪽으로 경사져 flexural scarp를 나타낸다. 이 scarp의 기저부에는 직선상의 곡지형이 나타나며 이 부근에 양산단층이 위치한다고 추정된다. 이 지역은 활성단층으로서의 가능성이 있으며 추정단층 양측의 고위면의 높이차가 10 m 이내로서 상하 방향의 누적 변위량은 그렇게 크지 않다. 토성리 일대에서의 간이 트렌치 조사결과 기반암으로 사료되는 사력호층이 서쪽으로 10° 정도 완만하게 경사하고 있음이 밝혀졌다. 그러나 단층면의 확인이 되지 않기 때문에 활성단층의 활동성 평가는 현재로서 어렵다. 이 보다 남쪽으로 수 km에 걸쳐 지형면이 서쪽으로 연속적으로 휘어져 flexural scarp를 나타내 이 지역도 활성단층의 가능성을 지닌 지형으로서 좀 더 상세한 지형 조사가 요구된다.

### 3.2 양산단층대 남부

양산단층 남부의 연양 부근에는 항공사진 판독시 뚜렷한 선구조가 나타난다. 태화강이 서쪽으로부터 동쪽으로 흐르는데 반면 저지(低地)는 북북동-남남서 방향으로 연장되어 있으며 좁고 긴 분지 형태를 나타내고 있다. 이 좁고 긴 분지의 주변에는 직선적인 선구조선이 보이며 분지 내부에

도 중·고위 단구를 절단하는 활성단층 지형이 항공사진 판독에 의해 확인되고 있다. 이러한 활성단층은 서측이 하락한 변위를 하고 있다. 봉화산과 화장산의 서측연변에도 선구조선이 확인되지만 지형면(地形面)의 변위는 확인되지 않고 있다.

언양으로부터 약 10 km 남부에는 연속적으로 북북동-남남서 주향의 곡(谷)을 따라 양산천이 남남서 방향으로 흐르고 있으며 하곡(河谷)과 평행하게 선구조선이 확인되고 있으며 일부는 활성단층의 가능성을 지닌 지형적 형상을 보인다. 이러한 지형적 특징은 삼남면 방기리와 더 남쪽으로 초산리-삼사리-삼갈리에서도 곡(谷)의 동측부와 서측부가 직선적으로 나타나 그 가능성이 크다. 이보다 남쪽의 양산읍 유산리-남부동에 이르러서는 인공적인 지형변위가 뚜렷하여 변위지형의 추출이 어렵다.

양산 동측의 산지 내에는 다수의 선구조선이 확인되고 있다. 그 가운데 비교적 연속성이 양호한 것은 북북동-남남서 주향의 구조선이며 이 외 북부에서는 동-서, 남부에서는 북동-남서 주향의 비교적 짧은 선구조선이 확인되고 있다. 주향이 다른 이러한 선구조선의 상호관계 내지 성인은 현재로서는 알 수 없으며 활성단층으로 판단될 수 있는 지형적 증거는 없다.

언양-양산 구간의 서측 블록의 산지내(山地內)에는 동북동-서남서 방향의 선구조선이 많이 확인된다. 한편 울산시 상북면 이천리-선리 부근부터 연속하여 북북동-남남서 주향의 직선상 굽이 향로봉(727.0 m) 동측 산지를 따라 확인된다. 이 선구조선은 모량단층으로서 양산군 원동면 대리 이북과 이남에서는 패턴이 다르며 이북에서는 아형상 배열을 하는 반면, 이남에서는 직선적으로 나타나고 있다. 이러한 특징적인 차이의 주 이유는 현재로서는 불명확하다. 이남의 부분에서는 곡(谷)에 연하여 소하천이 남쪽으로 흐르며 낙동강에 합류하고, 선구조선은 낙동강의 남쪽까지 나타난다. 선구조선의 직선성은 극히 높고 연속성도 양호하지만 활성단층을 시사하는 지형적 증거는 나타나지 않는다. 그러나, 적어도 산지내에 분포하는 동북동-서남서 방향의 선구조선을 절단하는 형태로 분포하기 때문에 상대적으로 젊은 시대의 구조를 반영하고 있을 가능성이 높다고 사료된다.

양산천이 합류하는 낙동강 보다 동측의 산지와 부산시내에서의 선구조선의 주향은 북북동-남남서의 것이 탁월하다. 그러나 연속성은 좋지 않으며

활구조(활성단층 운동과 관련된 지구조)로 판단되는 변위지형은 나타나지 않는다. 낙동강 하구의 서측 김해일대에는 북북동-남남서 내지 서북서-동남동 주향의 선구조선이 분포한다. 이 가운데 지형구조와 조화적인 것은 북북동-남남서 주향의 것이나 활성단층으로 판단되는 지형적인 증거는 없다.

따라서 양산단층대 남부 일대에서 가장 뚜렷한 선구조선은 북북동-남남서 주향이며, 특히 양산천-언양에 걸쳐 있는 구조선에 활성단층이 존재할 가능성이 높다. 그러나, 활성단층의 존재를 시사하는 확실한 지형적 증거는 언양부터 남쪽으로 길이 약 9 km 범위에 걸쳐 나타난다.

이상에서 보는 바와 같이 지형면을 절단하는 뚜렷한 활성단층으로서의 지형적 특징을 나타내는 지역은 북부와 남부에 부분적으로 나타나 양산단층대를 따른 제4기 후기 단층운동은 현재로서는 비교적 저조했다고 판단되나 앞으로 좀더 많은 조사가 뒷받침되어야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 언양일대의 지형분석

양산단층대를 따라 언양-박지리 약 7 km 구간의 지형도를 나타내면 Fig. 4와 같다. 언양 남쪽으로 약 1 km 폭의 분지상의 곡이 북북동-남남서 방향으로 발달하여 있으며 그 가운데를 양산단층대가 통과하고 있다. 양산단층의 동측은 일반적으로 500 m 이하의 표고를 지닌 구릉성 산지가 분포한다. 이 산지는 주로 백악기 하양층군의 퇴적암(대구층: 이윤종·이인기, 1972)으로 구성되어 있다. 단층의 서측은 500 m 이상의 급사면을 지닌 산지형을 이루며 주로 백악기 유천층군의 안산암을 주로한 화산암류와 불국사화강암류로 구성되어 있다.

양산단층대 구간 중 언양 남부 일대에 분포하는 하성단구면은 지형면의 고도, 연속성, 개석도, 단구역층의 풍화정도, 적색 토양의 층서등을 기초로 고위, 중위, 저위 단구로 구분할 수 있다(Okada *et al.*, 1994; 경재복 외, 1999). 조사지역의 지형면은 항공사진 분석을 통해 고·중·저 및 최저위면으로 분류할 수 있다(Fig. 4).

고위면은 약 100-150 m의 고도에 위치하고 작은 면적을 지니면서 흩어져 나타난다. 고위면의 특징은 지형면이 파랑상의 굴곡을 보이며 하부에는 6-7 m 두께의 풍화도가 높은 단구역층과 상부

에 약 2 m 두께의 적색 토양층(5YR 4/8)이 분포하고 있다. 역층은 풍화를 심하게 받아 최대 직경 40 cm의 아각력(亞角礫) 형태를 나타낸다. 상부

토양층은 적색을 띠며 균질한 층을 나타내지만 토양층 상부는 저밀도의 입자들로서 풍성기원의 입자로 구성되어 있다고 추정된다. 상천리 일대에서

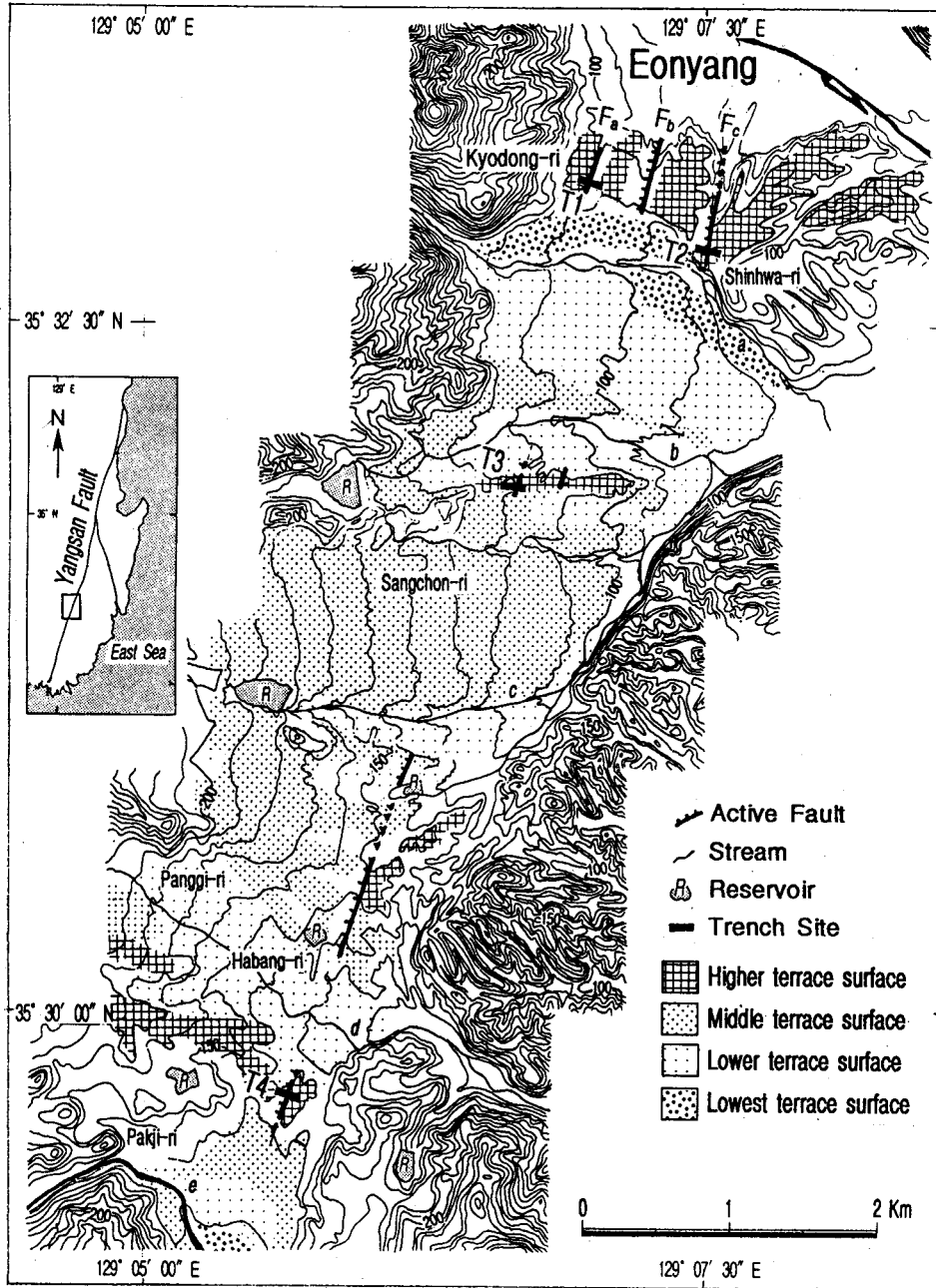


Fig. 4. Topographic map in the southern part of Eonyang area showing active faults and trench sites: *a*, the Chackchon stream; *b*, the Kachon stream; *c*, the Sangchon stream; *d*, the Poemun stream; *e*, the Yangsan stream. Trench *T4* was studied by Okada et al. (1994).

의 고위면은 동서방향으로 매우 좁은 폭의 띠모양으로 나타나고 있다(Fig. 4).

중위면의 역층은 고위면의 역층보다 풍화가 덜 진전되었으며 단구면은 상대적으로 편평함을 유지한다. 따라서 역층은 풍화를 심하게 받은 약 70%의 약한 자갈과 30%의 딱딱한 자갈로 구성되어 있다. 또한 최대 반경 약 25 cm의 아각력의 역으로 구성되어 있다. 적색 토양의 두께는 약 50 cm 정도이다. 중위면은 상천리 남부 지역에 넓게 분포한다. 저위면과 최저위면은 현재의 하상을 따라 분포하며 매우 신선한 역과 풍화를 받지않은 조립질 matrix로 구성되어 있다.

대부분의 하천(태화강, 작전천, 가천천, 상천천, 보은천)들은 서에서 동으로 흐르면서 현 하상을 형성하여 동쪽으로 완만한 경사를 이루고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 단구면상을 끊고 나타나는 여러 개의 저단층애가 직선상으로 나타나며 동측이 융기한 지형적 특징을 나타낸다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 교동리-신화리 지역에는 북북동-남남서 방향의 3개의 저단층애, 상천리 일대에는 2개의 저단층애, 그 이남서는 폭의 중앙부를 따라 직선상의 저단층애가 단속적으로 이어

져 나타난다. 접근가능한 저단층애를 따라 단층면위를 조사하기 위해 트렌치 조사를 실시하였다.

### 5. 트렌치 조사

양산단층대의 제4기 단층운동의 특성을 규명하기 위해 변위지형이 비교적 뚜렷한 언양 남부 일대에서 트렌치 조사를 실시하였다. 트렌치 조사는 삼남면 교동리(언양여자중고 서측 50 m 위치)와 신하리(경부고속도로 동측 약 100 m 위치), 상천리(중남초등 50 m 남쪽)의 3개 지점에서 1997년 4월에 실시하였다. 교동리와 신하리 지역은 언양남부 태화강과 작전천 사이의 고위면상에 해당하는 지역으로서 거의 북북동-남남서 방향으로 연장되는 3개의 저단층애 지형이 확인된다. 이 저단층애 지형을 동서 방향으로 절단하는 형태(Fig. 4, T1-T4)로 굴삭을 실시했다.

#### 5.1 교동리 지역

언양 부근의 고위면상에는 항공사진 판독에 의해 거의 북북동-남남서 방향으로 연장되는 3개의 직선상의 저단층애 지형이 확인되고 있다. 본 트렌치는 그 가운데 가장 서측의 단층 추정선(Fig. 4, Fa)을 대상으로 실시하였다. 단층선의 길이는 약 0.4 km이지만 이것은 고위면에 나타나는 부분만으로서 단층은 실제로 남북 방향으로 더 연장되어 있는 것으로 사료된다. Fig. 5는 트렌치 북측면과 남측면의 개략적인 스케치와 Fa 단층을 가로질러 간 이 측량을 통한 지형면의 형태를 보여주고 있다. 단층선을 따라 애(崖)의 높이는 약 5 m로서 북방으로 점점 증가하는 형태로 나타나는데, 이는 河蝕의 영향을 받았을 가능성이 높다. 그 중 하식의 영향이 적었다고 사료되는 남단부 부근을 트렌치 지점(Fig. 4, T1)으로 선정하여 실시하였다.

트렌치 규모는 길이 약 40 m, 폭 5 m, 깊이 4 m의 비교적 큰 규모로 실시되었으며 바닥면은 계단 형태로 굴삭하여 일정한 깊이의 트렌치가 되도록 하였다. 트렌치 벽면에는 두께 3 m 이상의 고위면 구성 단구력층이 노출하며 풍성퇴적물이 역층을 피복하고 있다. 보다 상부는 경작토와 인공적인 성토(盛土)가 확인되고 있다. 역층은 주로 서측산지 기원의 안산암의 아각력·아원력의 형태를 나타내며 역은 현저하게 풍화되어 거의 풍화력으로 되어 있다. 또한, 역층 최상부와 역층을 피복하는 세립 퇴적물은 적색 풍화를 받아 적색토양층이

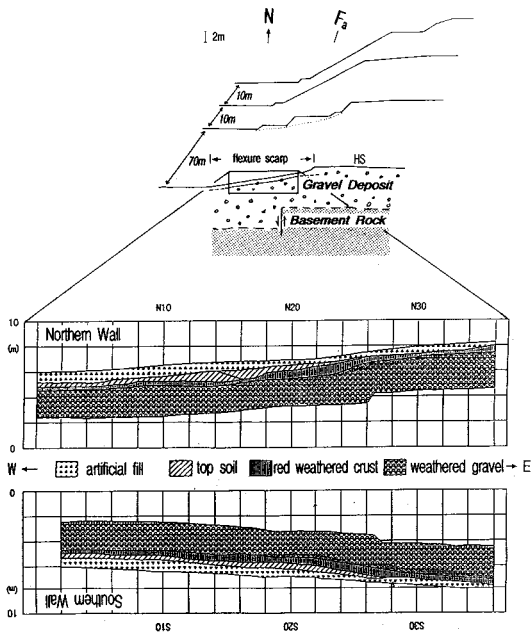


Fig. 5. Sketch of trench T1 and topography across the fault Fa (upper part of Fig. 4) in Kyodong-ri area.



뚜렷하게 발달하여 있다.

본 트렌치에서 단층면은 뚜렷하게 나타나지 않았으나 기반암의 단층운동 시 그 위에 퇴적된 고위면을 구성하는 역층이 flexure scarp를 나타낸다고 볼 수 있다. 트렌치 굴삭 지점 부근에서는 서측으로 완만하게 경사하고 있다. 역층 내지 적색 토양층도 이것과 조화적으로 서측으로 완만하게 경사를 이루고 있다. 즉, 여기에서는 하부에서의 단층운동에 의해 상부에 퇴적된 제4기 역층에 수직적 변위가 일어나 애지형 형성하고 있다는 것을 의미한다. 단구력층의 종류, 역에 나타나는 S40-65° W 방향의 Imbrication으로부터 본 지역의 고위면은 북동류 흐름의 작전천이 형성한 것으로 사료된다. 따라서 이 고위면은 동-북동 방향으로 경사하여야 할 고위면 내지 그 구성역층이 서측으로 역경사하고 있다. 이러한 구조는 양산단층이 고위면 형성후 활동하면서 고위면이 flexural deformation을 받은 결과로 사료된다.

### 5.2 신하리 지역

경부고속도로 서측 약 450 m 지점에 위치한 길이 약 500 m의 단층은 고속도로에 평행하게 통과하고 있다(Fig. 4, Fb). 그러나, 본 단층에 대한 트렌치는 지형 및 도로여건상 실시할 수 없었다. 그러나, 단층 양측의 고위면의 높이차가 약 8 m 정도로 동측이 융기하여 나타나며 항공사진 판독에 의하면 NNE-SSW 방향의 뚜렷한 직선상의 저단층

에 지형을 나타내 이는 단층운동에 의한 수직변위의 결과로 추정된다.

위 단층 보다 동측에 위치한 본 트렌치 지점은 경부고속도로 동측 약 70 m에 위치하는 단층(Fig. 4, Fc)으로서 고위면의 양 지형면은 약 12 m 높이 차이를 보이면서 동측이 융기한 저단층에 지형을 나타내며 단층의 존재는 아래와 같은 트렌치 조사에 의해 확인되고 있다. 고위면에서 확인되는 단층선의 길이는 약 0.6 km이다. 본 지역의 트렌치는 이 단층선의 남단부(Fig. 4, T2)에서 굴삭을 실시했다. 트렌치의 규모는 길이 약 20 m, 폭 약 3 m, 최대심도 약 3 m이다. Fig. 6는 단층 주변 길이 약 10.5 m 부분의 스케치를 나타낸다.

트렌치 벽면에는 기반암과 고위면 구성 역층을 경계로 고각의 단층면을 확인할 수 있다. 기반암은 이암-세일의 아각력-아원력으로 구성되어 있다. 역의 최대 직경은 70 cm 정도(화강암력)이다. 역은 풍화가 진행되어 거의 완전히 풍화역으로 되어 있다. 단구력층은 기반암을 경사 부정합으로 피복하여 부정합면은 파랑상의 기복을 나타낸다. 트렌치 벽면 최상부에는 뚜렷한 적색토양이 형성되어 있다. 트렌치 벽면 동측에는 적색토양이 기반암을 직접 피복하는 듯이 보이나 주변의 노두에는 두께 2 m 정도의 풍화가 진행된 단구력층이 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

벽면에 나타나는 단층면은 고각으로서 트렌치 벽면(N면)의 하부에서 단층면의 주향·경사는 N40° E와 78° NW이다. 트렌치 벽면의 N5-N7와 S6-S7.5 지점이 상대적으로 파쇄가 일어난 부분이다. 두께 3 cm 정도의 미고결 갈색점토가 확인되는 부분도 있으나 뚜렷한 단층점토대는 없다. 역은 이 단층면을 따라 위로 서는 모양을 보이기도 한다(S5 · 1-2 m 부근).

이 단층은 고위면 형성 후(단구력층 퇴적후)에 활동한 것이 확실하지만 최근에 활동한 것을 나타내는 신선 명료한 단층구조는 확인되지 않고 있다. 또한, 단구력층 내지 기반암을 피복하고 있는 적색토양은 단층면을 피복하고 있는 것처럼 보인다. 적색 토양층은 단층활동 후에 이동·퇴적되었을 가능성도 있으므로 제4기 말기에는 활동을 정지했을 가능성이 높다. 본 트렌치 지점에서는 경상층군의 퇴적암(주로 이암)이 파쇄를 받아 폭 1.5m 정도의 파쇄대를 보인다. 본 단층의 단층과 쇄정노나 규모, 변위량 등은 다음에 설명하고자 하는 상천리나 하방리-방기리의 단층에 비해 뚜렷

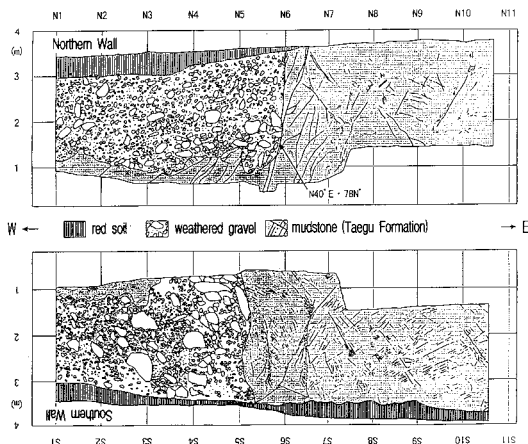


Fig. 6. Sketch of trench T2 across the fault Fc (upper part of Fig. 4) in Shinwa-ri area.

하지 않으며 남쪽으로 부터의 주단층의 연장선상에 있지 않으므로 양산단층대를 이루고 있는 단층 중 부단층인 것으로 사료된다.

### 5.3 상천리 지역

상천리 지역에서 개석 선상지성 고위면은 좁은 폭으로 동서로 분포하며 이는 동쪽으로 흐르는 작전천이 형성한 개석선상지면으로 사료되며 고위면은 동쪽을 향하여 완만한 경사를 나타낸다. 그러나 이러한 고위면에 2개의 단층선을 따라 고위면이 서쪽으로 역경사를 나타내며, 동쪽에 위치한 단층을 따라서는 약 10 m의 수직변위를 보인다(경재복 외, 1999). 서측에 위치한 단층(중남초교 남쪽 30 m 지점)을 확인하기 위해 단층을 따라 트렌치 굴삭(T3)을 실시하였으며, 트렌치 길이는 약 11 m, 폭 약 10 m, 최대 심도 약 4 m 규모로 실시하였다(경재복 외, 1999).

Fig. 7은 트렌치 벽면 중 북측면 및 남측면의 상세한 스케치를 보여주고 있다. 트렌치 벽면에는 고위면 구성 역층과 그 기반암을 구성하는 화강암이 명료한 단층관계로 접하고 있으며 약 20 cm의 단층점토대가 발달하여 있다. 벽면 최상부는 지표면의 지형이 인공적인 개간이나 성토에 의해 원

지형의 형태를 상실하고 인공적인 성토(盛土)와 경작토(耕作土)로 이루어져 있다. 화강암에는 다수의 단층·절리가 발달하여 있으며 풍화도 현저하다.

단구력층은 안산암·화강암 기원의 아각력으로 구성되어 있으며 서측의 역층 기저는 현 트렌치 단면상에서는 모두 역층으로 구성되어 있기 때문에 변위량을 확인하기 어렵다. 트렌치 벽면상에서 단층면은 고각으로서 북측면 상에서는 70° - 85° 정도 경사하고 있으며 남측면에도 80° 전후 동측으로 경사하고 있다. 단층면을 따라 기반의 화강암과 고위면을 구성하는 역층이 단층면 부근에서는 역의 장축이 명료하지는 않으나 수평방향으로 평행한 경향을 나타낸다. 바닥면의 단층점토대에는 우수주향이동을 나타내는 en-echelon 배열의 구조가 확인되고 있다(경재복, 1999). 북측면의 단층점토에는 20° - 30° 북쪽으로 plunge 하는 단층조선이 관찰되었다.

### 5.4 하방리-방기리 지역

본 지역에 대한 트렌치(Fig. 4, T4) 위치는 Okada *et al.* (1994)에 의해 실시되었다. 동측의 기반암(주산 안산암 및 규장질 화성암)과 서측의 고위단구 역층 사이에 거의 수직으로 발달된 약 30 cm 폭의 단층점토대, 주향이동을 암시하는 저각(약 10°)의 단층조선과 단층역층 중 편평력의 장축이 부회분상구조(negative flower structure)를 보인다(Okada *et al.*, 1994). 고위면은 단층부근에서 동측이 상승한 약 12 m의 상하변위를 나타내며 트렌치 조사에 의해 주향이동 성분이 탁월한 단층운동을 나타내었다.

## 6. 종합 및 고찰

양산단층대 북부지역에서는 단층대를 따라 경주이북의 청하면 유계리와 신광면 토성리-냉수리 사이 수 km에 걸쳐 활성단층의 가능성을 지닌 지형적 특성을 나타낸다. 유계리 일대의 제4기 단층운동은 기존의 단층대가 재활성화 하면서 역단층 운동에 의해 약 3 m 두께의 저위단구 역층에 단층변위가 나타난다. 그러나, 전반적으로 양산단층대 북부지역은 남부지역에 비해 뚜렷한 활구조를 나타내지 않고 있다.

양산단층대 남부 지역에서는 활성단층을 시사하는 지형적 증거로서 여러 개의 직선상의 저단층에

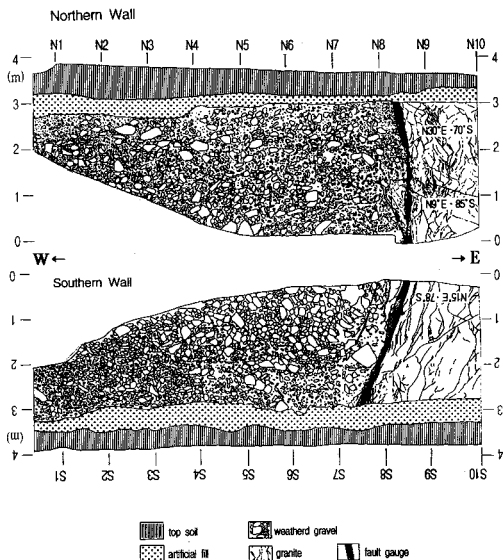


Fig. 7. Sketch of trench T3 (middle part of Fig. 4) in Sangchon-ri area.

가 언양통도사 구간에 나타나며 보다 남쪽으로 양산에 이르기까지 그 직선적인 지형 형태가 연장되어 나타난다. 이들 저단층애를 가로지르는 트렌치(교동리, 신하리, 상천리, 하방리-방기리)를 통해 고위단구면의 변형과 단층을 확인할 수 있다. 양산단층대의 중부 지역인 경주 일대에는 역사시대(신라시대)에 10회의 피해지진이 발생하였으나 그 지형적인 증거나 변위 지형의 증거를 현재로서는 확인할 수 없다. 그러나 양산단층대의 동측 약 5 km 지점의 천북면 갈곡리(Fig. 2, S3)와 약 15 km 지점의 불국사 일대(Fig. 2, S4)에는 제4기 역층을 절단하며 발달된 역단층이 분포한다(경제복 외, 1998). 갈곡리 일대의 트렌치 조사와  $C^{14}$  연대 측정결과(Kyung *et al.*, 1999)는 최후 단층운동의 시기가 2만 5천년 BP 이내로 나타남으로써 앞으로 보다 상세한 조사와 연구가 요구된다.

양산단층대 남부 언양 이남 구간에서 항공사진 판독에 기초한 지형면의 간이 측량 결과 고위면을 구성하는 제4기 역층은 위치에 따라 5~12 m 수직변위를 보인다(교동리, 신하리, 박지리 일대). 이는 제4기 고위면을 구성하는 역층이 퇴적된 후 기존의 단층이 재활성화하면서 단층변위를 나타낸다고 볼 수 있으며 부분적으로 트렌치를 통해 확인되고 있다. 상하변위 성분에 대해서는 동측이 상대적으로 융기하면서 우수주향 성분이 탁월한 단층운동의 반복을 나타내고 있다. 다만 고위면의 형성시기에 대해서는 확실한 연대측정 시료가 발견되지 않았으며 Okada (1994)는 제4기 후기 약 20-30만년 전으로 추정하고 있으며, 조화룡(1997)은 Mindel기 혹은 Mindel/Riss 간빙기에 형성된 것으로 추정하고 있다.

제4기 단층운동의 연대를 추정하기 위해 단층비지물질을 채취하여 ESR (Electron Spin Resonance)과 TL (Thermo Luminescence) 방법에 의한 연대측정이 실시된 바 있다. 상천리 트렌치 지점에서 ESR 연대측정(한국 자원연구소, 1998) 결과는  $411 \pm 43$  ka,  $581 \pm 50$  ka,  $656 \pm 84$  ka,  $767 \pm 93$  ka을 나타내며 TL 연대측정(경제복, 1999)의 예비적 결과는 약 100 ka 이내를 나타내었다. 따라서 단층 가우지의 연대측정 결과는 100-800 ka의 넓은 범위를 나타낸다. 그러나 단층 가우지 물질을 이용한 단층운동의 연대측정은 단층운동 직후 지표면 부근에서 TL이나 ESR강도가 0이 되었음(zeroing)을 확인하기가 쉽지 않기 때문에 연대측정에 오차가 발생할 수 있으며 특히 최후 활동시기를 규명하는데

한계가 있다.

현재로서 양산단층대를 따라 분포하는 고위면을 구성하는 제4기 역층이 단층운동에 의해 flexural deformation을 받거나 선명하게 변위되어 나타나기 때문에 고위면의 형성연대를 아는 것이 무엇보다 중요하다. 특히, 고위면 상부에 적갈색의 고토양이 발달하여 있다. 일본의 경우 최종 간빙기 최성기에 적갈색-갈색의 풍화대가 광범위하게 형성되었다고 지적되고 있다(松井·加藤, 1962; 町田 외, 1987). 또한, 현저한 적색 토양층은 약 50만년 이후의 온난기의 반복에 의해 형성되었다고 사료된다(Sakaguchi·Okumura, 1986).

이러한 지형적 연대에 기초하여 한반도의 제4기 층을 구성하는 고위면의 연대는 약 25~50만년전, 중위면은 십 수 만년 전으로 추정가능하며 저위면은 최종 빙기중(수 만년 전)에 형성되었다고 추정된다. 고위면의 수직변위(약 10 m)와 고위면의 추정연대를 고려할 경우 양산단층대 남부에서의 평균 상하 변위속도는 0.02-0.04 mm/yr이다. 그러나, 실제로 주향이동이 우세하므로 평균 수평변위속도는 이보다 수배 더 크다고 추정할 수 있다. 한국 자원연구소(1998)는 양산단층대에 분포하는 제4기 층 분류에서 고위면에 해당하는 제3단구의 생성시기를 12.5-80만년, 계곡 선상지 퇴적층은 80-250만년으로 대비하였다. 단구면의 생성시기에 대한 보다 신뢰성 있는 결과는 앞으로 고토양의 연구 등을 통하여 뒷받침되어야 할 것이다.

양산단층 남부에서 고위면 보다 더 후기에 형성된 중위면 및 저위면을 변위케 하는 저단층애 지형이 항공사진의 판독에 의해 식별이 가능하지만 야외 노두조사나 트렌치 조사의 불충분으로 단층운동에 의한 중·저위면의 변위를 현단계에서 확신하기 어렵다. 그러나, 양산단층 북부 유계리 일대에서는 저위면이 단층에 의해 확실하게 변위되어 나타나며 단층운동의 패턴 또한 남부와 다른 역단층운동을 나타낸다.

단층운동은 동일한 응력장하에서도 단층의 기하에 따라 서로 다른 단층운동이 가능하다. 한반도에서 발생한 천발지진의 발생기구로부터 구한 최대 주압축력의 방향은 ENE-WSW 로서 압축응력장하에 있다(Xu *et al.*, 1989; Jun, 1991; Xu, 1994). 이러한 주압축 방향하에 NNE-SSW 방향의 주향과 고각의 경사를 지니는 양산단층의 남부 단층은 주향이동이 우세한 단층운동이 용이하게 일어날 수 있다. 거의 N-S 방향의 주향과 저각(약

40° - 45°)의 경사를 지나는 양산 단층대 북부의 단층은 위와 같은 응력장하에 기존의 단층대가 재 활성화 하면서 역단층 운동이 가능하다. 한반도 남부지역은 현재와 같은 응력장이 적어도 제4기 혹은 제4기 후기 이후 지금까지 지속되고 있어 위와 같은 단층운동이 가능한 것으로 생각된다.

앞으로 양산단층의 제4기 단층운동의 특성과 변위량의 정확한 산출, 최신활동시기 등의 규명을 위해서는 저·중·고위면의 연대 뿐만 아니라, 좀 더 정밀한 지형 및 지질조사가 요구된다.

### 7. 결 론

과거 역사지진의 고찰, 변위지형 및 선구조선에 대한 항공사진 판독, 야외조사, 트렌치 굴삭 조사를 통하여 양산단층대에 대한 고지진학적 연구를 종합적으로 시도하였으며 제4기 후기 단층운동에 대한 지금까지의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 과거 약 2000년간의 역사시대 동안 발생한 가장 큰 피해를 동반한 지진들은 경주 및 울산 일대에서 발생하였다. 야외에 역사지진의 지진단층 증거는 아직 발견되지 않고 있으나, 진앙분포는 양산단층이나 울산단층대가 제4기 후기 이후 활동해 오면서 역사지진의 지진원 단층의 역할을 했으리라 추정된다.

2. 활성단층으로 추정되는 변위지형은 양산단층 북부에서는 유계리, 신광면 토성리 일대, 남부에서는 언양-통도사 구간 약 9 km의 단층선을 따라 선명하게 나타난다. 양산 주단층 부근에는 NNE-SSW 방향의 선구조선이 우세하게 분포한다. 이러한 변위지형 및 단층노두는 울산단층대 북부에서는 천북면 갈곡리 일대, 불국사 일대에 나타난다.

3. 양산단층대 북부 유계리 일대에서는 저위단구면(수만년 이내 추정)을 구성하는 약 3m 두께의 역층이 NS-N20° E 주향의 역단층운동에 의한 단층변위를 나타낸다. 이는 양산단층대 북부와 남부의 제4기 단층운동에 차이를 보여주고 있다.

4. 언양남부 지역에 대한 지형 분석 및 트렌치 조사 결과, 제4기 후기 고위면을 구성하는 역층이 단층운동에 의해 지역에 따라 flexure scarp를 형성하거나 5-12 m의 상하변위를 동반하면서 flexure scarp를 형성하고 있다. 본 단층은 NNE-SSW 방향의 고각(70° - 80°)의 경사를 지니며 주향이동이 우세한 단층운동을 나타낸다. 중·저위면의 수직

변위는 항공사진으로 식별이 가능하나 트렌치 조사의 불충분으로 현단계에서 변위를 확신하기 어렵다.

5. 고위면 형성년대를 제4기 후기 25-50만년으로 추정(Okada *et al.* 1994)할 경우, 단층운동에 의한 평균 수직변위속도는 0.02-0.04 mm/yr 로 추정되며 주향이동 단층운동을 고려할 경우 실이동속도는 이 보다 수 배 더 크다고 생각된다.

### 사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구비(96-0703-05-01-3) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 본 논문의 심사에 많은 조언을 해주신 고려대 이진한 교수에게 감사를 드립니다.

### 참고문헌

경제복, 이기화, Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Takemura, K., 1999, 양산단층대 남부 상천리 일대의 트렌치 조사에 의한 단층 특성 규명, 지구 과학회지, 20, 101-110.

이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료, 지구물리, 1, 3-22.

이민성, 강필중, 1964, 한국지질도 (1:50,000), 언양도폭, 국립지질조사소.

이윤중, 이인기, 1972, 한국지질도 (1:50,000), 언양도폭, 국립지질조사소.

장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조 운동사, 지질공학회지, 8, 32~49.

조화룡, 1997, 양산단층 주변의 지형분석, 지리학회지, 32, 1~14.

채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열발달상태, 지질학회지, 30, 379-394.

한국자원연구소, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준 지진의 재평가 최종 보고서. 한국자원연구소, 대전.

松井健, 加藤芳郎, 1962, 日本の赤色土壤の生成時期, 生成環境に關するこ, 三の考察, 第四紀研究, 2, 161-179.

町田洋, 新井房夫, 宮内崇裕, 奥村晃史, 1987, 北日本を廣くおおう 洞爺火山灰, 第四紀研究, 24, 129-145.

Allen, C. R., 1968, The tectonic environments of seismically active and inactive areas along the San Andreas fault system, in Proceeding of Conference on Geologic Problems of San Andreas Fault System, edited by W. R., Dickinson and A. Granwz, Stanford

- University, Geological Science, 11, 70-82.
- Allen, C. R., 1976, Geological criteria for evaluating seismicity, *Seismic Risk and Engineering Decisions*, edited by Lomnitz, C. and Rosenbleuth, E., Elsevier, 31-69.
- Chang, K., Woo, B., Lee, J., Park, S., and Yao, K., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, South Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 471-487.
- Choi, H.I., Oh, J.H., Shin, S.C., and Yang, M.Y., 1980, Geology and geochemistry of the Gyeongsang strata in Ulsan area, *Korea Institute Geology, Mining & Materials Bulletin*, 20, 33.
- Jolivet, L., Huchon, P., Pichon, X., Chamot-Rooke, N., and Thomas, C., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study, *Journal of Geophysical Research*, 96, B3, 4367-4384.
- Jun, M.S., 1991, Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korea Peninsula and Yellow Sea, *Tectonophysics*, 192, 345-357.
- KIGAM, 1995, Geological map of Korea (scale 1:1,000,000).
- Kyung, J.B., Lee, K., Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Naruse, T., 1997, Active fault study in the central part of the Yangsan fault, southeastern part of Korea, *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent, International Symposium of the 50th Anniversary of the Geological Society of Korea, Short papers*, 33-38.
- Kyung, J.B., Lee, K., Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Naruse, T. 1999, Paleoseismological study of Ulsan fault system based on the trenching survey and fault outcrop, *The 1st Korea-Japan Geomorphological Conference, Proceedings*, 86.
- Lajoie, K.R., 1986, Coastal tectonics, in *Active Tectonics*, Nat. Acad. Press. Washington. D.C.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsan Basin, *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 434-449.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of micro-earthquake activity of the Yangsan fault, *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Machette, M.N., Personius, S.F., Nelson, A.R., Schwartz, D.P., and Lund, W.R., 1991, The Wasatch fault zone, Utah-Segmentation and history of Holocene earthquakes, *Journal of Structural Geology*, 13, 137-149.
- Matsuda, T., Ota, Y., Ando, M., and Yonekura, N., 1978, Fault mechanism and recurrence time of major earthquakes in southern Kanto district, Japan, as deduced from coastal terrace data, *Geological Society of America, Bulletin*, 89, 610-1618.
- Obermeier, S.F., 1994, Using liquefaction-induced features for paleoseismic analysis, U.S. Geological Survey, Open File Report, 94-663, 72.
- 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, south Korea, *Journal of Geography (in Japanese)*, 103, 111-126.
- Okada, A., 1980, Quaternary faulting along the Median Tectonic Line of southwest Japan, *Memoire of the Geological Society of Japan*, 18, 79-108.
- Okada, A., 1989, Holocene activity of the Median Tectonic Line of southwest Japan, *Journal of Geological Society of Japan*, 35, 165-170.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M., Jo, W., Kim, S.K., Jeon, J.S., Chi, H.C., Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea, *Journal of Geography (in Japanese)*, 103, 111-126.
- Otsuki, K. and Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea, *Journal of Physics of the Earth*, 26, 537-556.
- Plafker, G. and M. Rubin, 1967, Vertical tectonic displacements in southcentral Alaska during and prior to the great 1964 earthquake, *Journal of Geoscience, Oaka City University*, 10, 53-66.
- Sakaguchi, Y. and Okumura, K., 1986, Interglacial climates and relic red soils in northern Japan based on pollen records of interglacial deposits in eastern Hokkaido, *Bulletin Department Geography, University of Tokyo*, 18, 29-48.
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J., 1984, Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas faults, *Journal Geophysical Research*, 89, 5681-5698.
- Sieh, K.E., 1978, Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallett Creek, California, *Journal Geophysical Research*, 83, 3907-3939.
- Sieh, K.E., 1981, A review of geological evidence for recurrence times of large earthquakes, in *Earthquake Prediction-An International Review*, edited by D. W. Simpson and P. G. Richards, Mautice Ewing Ser., AGU Washington, D.C., 4, 181-194.
- Sieh, K.E., 1984, Lateral offsets and revised dates of large earthquakes at Pallett Creek, California, *Journal of Geophysical Research*, 89, 7641-7670.
- Sieh, K.E. and Jahns, R., 1984, Holocene activity of the San Andreas fault at Wallace Creek, California, *Geological Society of America Bulletin*, 95, 883-896.
- Sieh, K., Stuiver, M., and Brillinger, D., 1989, A more precise chronology of earthquakes produced by the

- San Andreas fault in southern California, *Journal Geophysical Research*, 94, 603-623.
- Wallace, R.E., 1946, A portion of the San Andreas rift in southern California. Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- Wallace, R.E., 1968, Notes on stream channels offset by the San Andreas fault, southern Coast Ranges California, in *Proceedings of Conference on Geologic Problems of the San Andreas Fault System*, edited by W. R. Dickinson and A. Granrz, Stanford Univ. Publ. Geol. Sci., 11, 6-21.
- Wallace, R.E., 1970, Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault, *Geological Society America Bulletin*, 81, 2875-2890.
- Wellman, H.W., 1967, Tilted marine beach ridges at Cape Turakia, New Zealand, *J. Geosci. Osaka City University*, 10, 123-129.
- Xu, J., 1994, Seismogenic stress field and tectonics in East Asia, *The Memoirs of the Faculty of Sciences, Kyoto Univ., Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry*, XXXIX, 49-69.
- Xu, J.R., Zhao, Z.X., Oike, K., and Ishikawa, Y., 1989, Regional characteristics of shallow earthquakes in and around China, *Japan-China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation Kyoto, Japan, Proceedings*, 41-49.
- Yoon, S. and Kim, J.Y., 1990, Tectonic history of the Yangsan Fault, south western part of the Korean Peninsula, in *Pacific Neogene Events, their timing, nature and interrelationship*, edited by R. Tsuchi, University of Tokyo Press, 151-160.
- 

1999년 5월 12일 원고접수

1999년 8월 27일 원고채택