

양산단층계의 활성 여부

최 위 찬 *

Chwae, Uee-Chan

1. 서 론

양산단층에 관한 국내외 학계의 관심은 과거 30여년전부터 시작되었으며, 주요 관심사는 단층이 동거리 및 활동시기였다. 1970년대에는 국내외 지질학자들에 의해 약 30여 km의 우향의 주향이동 단층운동의 가능성이 제시된 바 있다. 이 근거는 경상분지 퇴적암류들을 관입 또는 분출한 화산암류의 경계선이 양산단층선을 경계로 하여 약 30여 km 정도 우향으로 이동되었다는 가설이었다.

1992년 11월에는 양산단층이 통과하는 언양 - 통도사간 박지리에서의 트렌치 결과, 양산단층이 활성임을 보고되었다(전명순 외, 1992; Okada et al., 1994; 조화룡 외, 1994). 이러한 현장조사에 앞서 국내의 일부 지진학자에 의해서 1980년대 초부터 양산단층대를 따른 선상의 지진 발생에 근거하여 양산단층이 지진학적 관점에서 활성단층임이 주장되어(Lee and Na, 1983; Lee et al., 1984, 1985; 이기화, 1985), 논란이 지속되어 왔다. 1993년 10월에는 일본의 태평양 연안 광역지질 조사에 참여한 국내외 학자들에 의해, 양산단층은 활성이라고 발표된 바 있다. 1995년에 들어서서는 국내 학계에서도 양산단층에 관한 연구를 활발히 시작하였으며, 이 결과 양산단층계에서 야의 노두나 트렌치에 의해 총 11개의 제4기단층이 확인되었다(경제복 외, 1995; Ryoo and Yang, 1996; 류충렬 외, 1996a, 1996b, 1997; 송무영과 경제복, 1996; Kyung et al., 1996, 1997; 최위찬 외, 1997a, b, c, 1998; 이동영 외, 1997; Chwae, 1998; Park and Lee, 1998; Lee, 1998; Lee et al., 1998a, b, c; 이봉주 외, 투고중). 이러한 제4기단층의 구체적인 확인 작업을 바탕으로 양산단층계의 기하학적인 양상과 지구조적인 틀이 어느 정도 밝혀지게 되었으며, 제4기단층의 정확한 분포와 위치, 운동시기, 단층의 규모와 변위, 활성단층관련 용어 논의와 한반도의 지질에 맞는 활성단층 규정에 대한 제언 등으로 그 연구 범위와 논의를 확대해 갈 수 있게 기반이 조성되게 되었다.

2. 제4기 단층

한반도 동남부에는 선캠브리아기에 해당하는 영남육괴와 고생대의 조선누층군 및 평안층군이 일부 분포하며 중생대 백악기의 경상누층군의 분포가 대부분을 차지한다. 그의 동해안을 따라 제3기의 퇴적분지와 제4기의 해안단구층이 소규모로 분포한다.

양산단층대 주변의 제4기 지층에 대한 30 여곳의 트렌치 조사결과, 가장 오래된 미고결퇴적층은 통도사와 언양사이에 널리 분포한 계곡 선상지퇴적층으로서 풍화를 많이 받은 지층이다. 이 지층은 제3단구보다도 그 이전에 형성된 것으로 보아 전기 Pleistocene 지층으로 해석된다.

* 한국자원연구소 지질부장

양산단층 주변의 하안단구는 서로 다른 위치에 3개의 단구가 발달하여 있으며 제3단구는 먼저 설명한 단구층서와 비교하여 중기 Pleistocene, 제2단구는 후기 Pleistocene, 그리고 제1단구는 Holocene에 형성된 것으로 대비된다. 따라서 계곡 충전층은 중기 Pleistocene보다는 전기의 시대로 한정할 수 있다. 한편, 현재의 하천주변에 발달한 충전층의 형성시기는 대체로 5,000년전부터 근세까지 형성된 지층으로 대비된다.

양산단층계가 위치하는 한반도 동남부에는 낙동강하구언으로부터 시작하여 언양, 경주를 통과하는 북북동 방향의 양산단층이 발달되어 있으며, 이와 평행하게 서측에는 모량단층, 밀양단층 및 자인단층 그리고 동측에는 동래단층과 일광단층이 발달되어 있다. 그리고 북북서 방향의 울산단층이 경주 부근에서 양산단층과 연결된다.

양산단층계 주변지역의 제4기단층은 양산단층대 5개소, 울산단층대 4개소 그리고 동해안 지역 2개소 등 총 11개소에서 관찰된 바 있다.

양산단층대에서의 제4기단층들은 모두 양산단층대의 중앙부인 언양과 통도사 구간에서 발견된 것으로, 북쪽에서부터 신화(최위찬 외, 1997a, c, 1998; 이동영 외, 1997), 상천(최위찬 외, 1997a, c, 1998; 이동영 외, 1997; Lee, 1998), 연봉(최위찬 외, 1997a, c, 1998; 이동영 외, 1997), 월평(전명순 외, 1992; Okada et al., 1994; 조화룡 외, 1994) 그리고 신평(최위찬 외, 1997a, c; 이동영 외, 1997) 단층이다. 신화단층은 백악기 퇴적암과 제4기 퇴적층이 단층접촉하며, 북동방향으로의 연장성을 보인다. 상천단층은 화강암과 제4기 퇴적층이 단층접촉하며, ESR dating 자료에 의하면, 약 80만년 전부터 40만년 전까지 적어도 4회 이상 재활동한 것으로 밝혀졌다(최위찬 외, 1997a, c, 1998; 이동영 외, 1997; Lee, 1998). 연봉단층은 제4기 퇴적층내에 2조의 단층이 발달하고 있다. 즉 약 15도의 저각도로 북측 경사하는 동서방향의 역단층이 단층면이 거의 수직인 북동방향의 단층을 좌향으로 변위시키는 양상을 보인다. 신평단층은 월평단층의 동측 약 200 m 지점에서 발견된 것으로 역단층성분을 수반한 우수주향이동단층으로 해석된 월평단층과는 달리 동측블럭이 서측블럭을 충상한 역단층이다(최위찬 외, 1998; Chwae, 1998).

울산단층대에서 발견된 제4기단층은 북쪽으로부터 말방(Okada et al., 1995; 경제복 외, 1995; 송무영과 경제복, 1996; Kyung et al., 1996, 1997; 최위찬 외, 1998; Park and Lee, 1998; Lee, 1998), 입실(Ryoo and Yang, 1996; 류충렬 외, 1996a, 1996b, 1997; 최위찬 외, 1997, 1998; Chwae, 1998; Park and Lee, 1998; Lee, 1998), 원원사(류충렬 외, 1997; 최위찬 외, 1998; Chwae, 1998; Park and Lee, 1998; Lee, 1998) 그리고 이화단층(최위찬 외, 1998; Park and Lee, 1998)이다. 이들 단층의 주향은 북-북북동방향이며 동측으로 경사한다. 말방단층과 원원사단층은 저각도의 역단층이나 입실단층과 이화단층은 고각의 단층면 경사를 갖는 주향이동단층이다. ESR dating 자료에 따르면 말방단층은 50만년 이내 2번의 단층운동이 알려져 US NRC 규정상의 활성단층으로 해석되었으며, 현재까지의 야외조사와 물리탐사 결과 단층노두 북측으로 약 200 m 연장됨이 확인된다. 입실단층은 약 7 m의 수직변위를 보이며, 단층조선의 피치 (pitch)를 고려하면 약 20 m의 총변위를 갖는 단층이다.

포항-울산간 동해안지역의 제4기단층은 경주시 양남면 읍천리와 수렴리에서 발견된 역단층(Chwae, 1998; Lee et al., 1998a,b,c; Park and Lee, 1998; 최위찬 외, 1998; 이봉주 외, 투고중)으로 해발고도 약 35 m (읍천단층), 42-55 m (수렴단층)의 표고를 갖는 해안단구층을 절단한다. 상기 해안단구층의 형성시기에 대해 Kim (1973), Jo (1978)와 Oh (1977)는 최후 빙하기로, Lee (1985), Lee et al. (1987, 1989)와 이동영 외 (1989)는 35 m의 표고를 단구에 대해서는 약 25 만

년, 42-55 m 의 단구에 대해서는 약 100 만년으로 해석하여 큰 견해 차이를 보인다. 단구층의 삭박 또는 개석으로 인하여 각 단층의 연장은 확인하기 어려우나, 읍천단층의 경우 백악기 퇴적암과 제3기 퇴적층의 경계를 이루고 있는 경계단층이 재활동한 제4기단층이다.

이들 총 11개소의 제4기 단층들은 단층면을 경계로 동측이 기반암이고, 서측은 제4기 퇴적층인 공통점을 가지며 (연봉단층 제외), 대부분의 단층들은 동측 경사이며, 북-북북동의 방향성을 갖는다. 읍천, 수렴 그리고 원원사단층과 같이 저각의 단층에서는 동서방향의 단층조선이, 이화, 상천, 월평 그리고 입실단층 등의 고각의 단층에서는 수평에 가까운 단층조선들이 발달되어 있어 제4기 구조운동에 의해 생성된 구조의 다양성을 지시한다. 그러나 이들은 대체로 단층면을 경계로 동측의 기반암이 서측의 제4기퇴적층 위로 상승한 역단층성운동을 보인다. 이는 동서방향의 압축응력의 결과로 판단된다. 지진자료에 의한 현재 한반도 일원의 응력장도 이와 유사한 방향인 N70° E 이다.

말방단층의 지하로의 연장성여부 등 심부구조 파악을 위해 말방리 사곡저수지 부근의 5개 지점에서 시험시추 조사결과, 사곡저수지 노두 기재에서 제시한 바와 같이 말방단층은 초기에 소성/연성 변형작용 (plastic/ductile deformation)의 흔적이 두드러지고 뒤의 단층운동은 취성변형작용 (brittle deformation)이 우세하게 나타남이 인지된다. 이러한 특성에서 보듯이 이 지역 퇴적층이 고화되기 이전 다시말하면 퇴적된 직후 단층운동이 있었음을 상정할 수 있으며 어느 정도 고화된 뒤에도 단층운동이 있었음을 상정해야 한다. 이러한 점은 총변위량이 누적 변위량 (cumulative displacement)임을 지시한다. 또한 이 단층 부근의 심부파쇄양상이 시추공에서의 물리검층결과와 텔레뷰어 검층 결과에서도 검토된 바 있다(최위찬 외, 1998).

입실단층의 단층점토의 X-선 회절분석 결과, 이들 점토는 열수변질작용에 의한 것이라기 보다 단층작용에 의한 단층대 형성시의 산물일 것으로 파악되며, 특히 고온에서 형성된 것으로 유추되었다. 입실단층과 단층암의 시대를 규명하기 위해 안산암과 단층 열극을 충전하는 알바이트맥에 대한 K-Ar 연대측정 결과, 안산암의 연대는 48.8 ± 1.6 Ma이며, 단층과 관련된 열극을 충전하는 양상으로 존재하는 알바이트 맥의 K-Ar 연령은 1.0 ± 0.2 Ma이다. 방해석맥 두 시료의 ^{14}C 연령은 각각 35,770년과 36,530년 이상이다. 이들 자료를 종합하며 입실 지역의 단층은 약 백만년전에 활동한 바 있고 36,530년 이전 언제인가에 활동한 것임을 보인다(최위찬 외, 1997).

11개소에서 발견된 제4기단층의 측정 또는 추정 변위량은 아래의 표와 같다.

	수직변위량 (m)	수평변위량 (m)	총 변위량 (m)	비 고
월평단층				트렌치의 한계로 변위지시자 미확인
신평단층	1			화강암과 표토층과의 부정합면 고도와 화강암과 제4기층의 부정합면 고도의 차이를 변위량으로 보았음
연봉단층				트렌치의 한계로 변위지시자 미확인
상천단층	>15			시추조사 결과 밝혀진 제4기층의 층후(15m)에 근거함
신화단층				트렌치의 한계로 변위지시자 미확인
말방단층	40	120	130	단층노두 및 시추조사결과의 도학적 계산에 의함.
입실단층	7	18	20	단층조선의 피치 (20°)와 수직변위(7m)를 이용 삼각함수로 수평 및 총 변위를 산정
원원사 단층				트렌치의 한계로 변위지시자 미확인
이화단층				트렌치의 한계로 변위지시자 미확인
읍천단층	6			단층 상·하반의 제4기 역층과 기반암과의 부정합면 표고차에 근거함
수렴단층	1			단층 상·하반에서 대비되는 제4기 역층의 변위에 의함

3. 지진자료 분석

양산단층 주변 9개소의 미소지진관측망을 통해 관측된 이 일대에서의 지진발생 특성은 다음과 같다.

진앙의 분포는 대체로 북서-남동 방향으로 집중되고 있으며, 이는 기상청에서 관측한 약 20년간의 결과와 일치한다. 양산단층을 따라서 진앙이 집중되는 현상은 보이지 않고, 양산단층 동측에 감포-울산 사이와 동해 앞바다에 집중되어 나타난다.

최근 발생한 지진은 경북 경주군 양남면 석읍리, 석촌리 및 효동리 일대의 반경 약 1-1.5 km 범위내에 주로 분포한다. 이들 지진의 규모(M_L)는 1.8 - 2.7에 해당하고, 진원의 깊이는 10 km 내

의이다. 특히 이들 11개 지진 중 5개 지진은 '96. 1. 25 - '96. 2. 5까지 약 10일에 걸쳐 집중적으로 발생했다. 이 지역은 1:50,000 울산도폭의 북부에 위치한다. 이 지역의 항공방사능/자력탐사 결과는 울산도폭의 서편은 저이상대로, 동편은 고이상대로 구별되며 중앙부에서 북동방향으로 고이상대가 위치한다(구성본 외, 1995). 진앙이 집중되는 지역은 이 북동방향의 고이상대 동측경계 부근에서 측정값이 급속하게 변하는 지역에 해당한다. 1922년 발간된 1:50,000 감포도폭(당시 조양으로 명명)에는 이 일대에 북동 방향의 단층을 표시하고 있으며, 최근에 비교적 자세하게 조사된 1:25,000 어일도폭(최위찬 외, 1988)에서 북동방향으로 넓게 발달하는 파쇄대의 남쪽 연장부에 해당한다. 특이한 현상은 지진이 집중되는 지역의 경우 많은 지진들이 한정된 기간에 지진을 발생하고 그 활동을 멈추는 것이다.

지진 진앙지는 경주 동남부 지역에 집중적으로 분포되어 있으나, 양산단층 선상에는 3 개의 지진만이 발생하였고, 또한 이의 규모가 작다. 따라서 지진자료를 통해 볼 때, 양산단층이 지진단층일 가능성은 다소 낮다고 사료된다.

이 지역에서 발생하는 지진의 복합 단층면 해로부터 구한 메카니즘은 경상분지 일대에서는 역단층운동이 우세하며 약간의 주향이동단층 운동이 수반하는 것으로 나타났다. 또한 단층면 해로부터 구한 주응력의 방향은 거의 수평한 동서방향(P -axis = $N 87^{\circ} E$, $Plunge = 8^{\circ}$)으로 나타났다. 이는 울릉분지 근처에서 비교적 큰 지진들의 메카니즘에 의해 나타난 결과(Jun and Kim, 1990)와 매우 유사하여 이 일대에서 발생하는 지진들은 현재 작용하고 있는 조구조력(Tectonic force)에 의한 영향으로 판단된다.

계기관측 이후 경상분지에서 발생한 최대지진인 경주지진의 지진유발 단층은 동남동 방향의 좌수향 단층으로 사료되며, 이의 연장선상에 있는 효동리 지진의 지진유발 단층 또한 동남동 방향의 좌수향 단층일 것으로 판단된다.

4. 토 의

4-1. 단층분절

활성단층의 평가에서 단층의 길이는 중요한 한 요소이다. 따라서 기존 연구에서 언급된 단층의 분절에 대한 정리하면 다음과 같다.

대규모 지진이 일어날 때 지진단층면은 한번의 균일한 이동이나 균일한 응력의 방출로 전체적으로 활동하는 것은 아니다. 지난 20년간의 지진지구조 연구 결과 대부분의 대단층은 단층 전체가 한번의 지진이나 단층운동에 의해 파쇄되어 생기지는 않고, 각 부분이 각부분의 파쇄시기를 가지며 독자적으로 파쇄되어 형성되었음이 알려지게 되었다(Allen, 1968). 단층 분절의 불연속성을 구분하는 가장 일반적인 방법은 기하학적인 불연속성, 구조적인 불연속성 그리고 운동학적인 불연속성으로 3대분된다(dePolo et al., 1991). 기하학적인 불연속성은 단층 방향성의 변화, 단층의 계단상 연결(step over), 단층대에서의 폭의 변화 등을 포함한다(Crone et al., 1991). 구조적인 불연속성은 단층의 분기, 다른 단층 또는 습곡과의 교차 그리고 끊고 지나가는 구조에 의한 단절 등을 포함한다. 운동학적인 불연속성은 평균 이동을, 지진의 빈도-규모관계의 변화 등을 포함한다.

이에 근거하여 양산단층에 대한 단층분절 개념의 적용여부를 검토해볼 수 있다. 먼저, 단층분절

을 적용하려면 북미의 캘리포니아 지방이나 일본열도에서와 같이 지진단층의 관찰이 가능해야 한다. 둘째, 한반도의 경우, 역사지진 또는 계기지진의 자료로 지진단층의 존재를 추정할 뿐이며, 증거확보가 안되어 있다. 셋째, 양산단층대에서 시간개념 없이 단층분절을 언급하려면, 지구조적 규모 (20-40 km)로부터 정밀지질조사 규모 (수십- 수백 m 이상)까지 다양하므로 기준설정이 모호하다. 넷째, 현재 충분한 자료 축적이 안되어 있으므로 단층분절의 적용은 불가하다. 다섯째, 고지진에 대한 충분한 자료가 확보되어야 한다.

4-2. 활성단층 관련 용어

지질학적 용어는 시대와 상황에 맞게 변천되어온 것은 잘 알려진 사실이다. 활성단층이라는 용어의 사용도 예외는 아니다. 지질학적으로 활성단층이라는 용어는 제4기 이전에 형성된 단층이 제4기에 활동한적이 있거나 제4기에 새로이 생겨난 단층에 사용되어져 왔다. 한편 지진학계에서는 활성단층이라는 용어의 개념을 지진의 발생과 연관하여 어떤 단층을 따라 지진이 자주 발생하는 경우 활성단층이라는 영역에 해당하는 것으로 사용해 오고 있다. 그러나 학술적인 차원을 넘어서 인위적인 구조물 설치와 관련하여 활성단층에 대한 구체적인 정의가 사회의 발전과 함께 요구되게 되었다. 가장 대표적인 경우가 원자력발전소와 관련된 활성단층의 정의이다. 우리나라의 경우 여지껏 적용해 온 원자력발전소와 관련된 활성단층의 기준은 미국의 원자력 규제위원회(US NRC)의 안을 적용하고 있다. 즉, '과거 35,000년 이내에 적어도 한번의 지표 가까이 또는 지표에서 이동이 있거나, 과거 500,000년 이내에 두 번이상의 지표 가까이 또는 지표에서 이동이 있는 경우', '단층과 직접 관련성을 설명할 수 있도록 인지간 기록으로 결정된 계기적인 강지진의 경우' 그리고 '한 단층에 대한 이동이 다른 단층에 의한 이동으로 합리적인 동반을 하는 것으로 기대되는 앞서의 두 경우의 특성에 따라 활동성단층에 지질구조적인 관계'로 규정하고 있다. 현재 우리나라에서 원자력 발전소와 관련하여 적용하는 안과는 달리 다른 나라에서는 또 다른 기준을 사용하고 있다. 일본의 경우 '제4기에 활동한 적이 있는 단층으로 1년동안에 움직인 평균변위량 즉, 평균변위를 (mm/1년)이 1 이상인 경우는 A 급, 0.1 이상, 1 이내인 경우는 B 급, 0.1 이내인 경우는 C 급 활성단층'으로 정하고 있다. 국제원자력기구 (IAEA)는 '지표 가까이 또는 지표에서 상대적인 변위에 중대한 잠재성을 가지는 단층'을 활성단층으로 규정하고 있으며, 독일, 프랑스, 이탈리아, 캐나다, 스위스 등 일부 국가에서도 이러한 규정에 대한 제시가 있으나, 그 규정이 구체적으로 알려진 바는 없다.

일본 규정에 의한 양산단층에 대한 활성여부에 논의에 대한 예로 울산시 삼남면 교동리지역 산록에서 일본연구자들이 산록퇴적층을 가로 지르는 소계곡들을 따라 활성단층이 고속도로 근처와 수남리 입구 및 그 중간에서 발달한다고 보고, 지형고도차이와 표고차를 보이는 산록퇴적층의 추정연대를 이용하여 계산된 평균변위속도 (mm/1년)가 상하이동의 경우 0.02-0.03, 우항이동의 경우 0.05-0.1 이나 그 이상으로 보고, 양산단층을 C 급 활성단층 또는 그 이상으로 추정 보고하였다.

활성단층의 조사와 평가방법은 활성단층의 용어의 정의와 마찬가지로 시대의 발전에 맞게 변천해 왔다. 활성단층이라는 기준을 새로운 시각으로 규정이 요구된다. 다음은 활성단층과 관련된 용어의 정의를 종합한 것이다.

활성 단층 (active faults) : 1981년 미국환경보호국 (U.S. Environment Protection Agency) 정의
: 최근 1만년 (현세/Holocene) 동안 한번이상 운동이 있는 단층 (as having one movement in the last 10,000 years).

활동가능 단층 (capable faults) : 1982년 미국 규정위원회 (U.S. Regulatory Commission) 정의
: 최근 3만 5천년 동안 한번, 50만년 동안 최소한 두번이상 활동한 단층(as having one displacement in the last 35,000 years or at least two in 500,000 years).

잠재 단층 (unproven/potential faults) :
: 현생 지구조체제 (current tectonic regime; CTR)에서 (1)기하학적인 관계로 보아, (2) 다른 구조들로 보아, (3) 지진과의 연관성으로 보아 충분히 운동이 예상되는 단층 (as evaluating its geometry relative to CTR, its relationships with structures and its associations with seismicity).

활동 잠재 단층 (potentially active faults) :
: 현생 지구조체제 (current tectonic regime; CTR)에 비추어 기하학적인 관계로 보아 충분히 운동이 가능하며 선구조 (lineament)로 남아있는 기존의 단층 (pre-existing faults, expressed as lineaments, which are suitably oriented to become activated in the present CTR but which have not yet moved).

우리나라는 활성단층의 연구가 이제 시작단계를 벗어나 체계적인 연구단계로 들어서고 있으며, 현재 적용하고 있는 미국 NRC 규정에 의한 용어사용에 대해 지질시대에 따른 정리가 다음과 같이 요구된다.

활성 단층 (active faults): 최근 1만년 (현세/Holocene) 동안 한번이상의 운동이 확인된단층.

활동가능 단층 (capable faults): 최근 3만 5천년 동안 한번, 50만년 동안 최소한 두번이상 활동한 단층.

잠재적 활성징후 단층 (potentially active faults): 최근 75만년 이내에 움직인 흔적이 확인된 단층.

제4기 단층 (Quaternary faults): 제4기(우리나라는 250 만년) 동안에 움직인 단층에 대한 일괄 명칭.

4-3. 한반도의 지질에 맞는 활성단층 규정에 대한 제언

대륙연변 (continental margin)에 위치한 우리나라는 활동대 (active zone)에 속하는 일본이나 미국 서부 캘리포니아지역과는 판구조적 특성이 다르므로 한반도 지체구조적 위치에 적합한 활성 단층 정의에 대한 자체규정을 제정하는 것이 시급하다.

우리나라에서 현재까지 밝혀진 대부분의 제4기 단층은 플라이스토세 중기 (80만년-12만5천년)에 해당하므로 NRC 규정에 의하면 활성가능단층 (capable fault)에 속한다. 지난 수년간에 걸쳐 조사 연구결과 제4기 지층과 단층운동과의 상관관계가 부분적으로 확인됨에 따라, 한반도 지구조사에 플라이스토세 중기와 말기 사이에 제4기 지각변형의 존재함이 밝혀져, 제4기의 지구조운동에 대한 새로운 인식이 요구된다. 그러므로 우리나라의 경우에 활성가능단층 (capable fault)은 플라이스토세 후기 (12만5천년-1만년)에 움직인 단층으로 규정하는 것이 적절함을 제언한다.

5. 결 론

양산단층 주변에서 발달한 단층의 규모와 활성단층의 흔적을 조사하여 양산단층계의 활성 여부를 규명하기 위해 지질구조 및 선상구조분석, 제4기 지질조사, 물리탐사 및 시추조사, 지진자료해석, 암석 및 단층암 절대연령 측정 등의 연구가 양산단층계의 활성 여부의 종합적인 판단 근거로 활용되었다. 이들 가운데 제4기단층의 분포와 특성 그리고 활동시기를 요약하면 다음과 같다.

양산단층계에서 발견된 제4기 단층은 총 11개이다. 양산단층대에서 월평, 신평, 연봉, 상천 및 신화단층 등 5곳이며, 울산단층대에서 말방, 입실, 원원사 및 이화단층 등 4곳, 그리고 읍천단층과 수렴단층이 동해안 해안단구지역에서 발달한다. 양산단층대의 상천단층에 대한 단층암석의 절대연령 측정결과, 상천단층은 약 80만년에서 40만년 동안에 적어도 4회 이상 재활동한 것으로 밝혀져 원자력 기준의 활성가능단층(capable fault)은 아닌 것으로 해석되었다. 단층암석 절대연령 측정 결과 말방단층은 50만년 이내에 2번의 단층운동을 한 활성가능단층(capable fault)으로 판명되었으나, 물리탐사 결과 약 200 m 연장되는 것으로 해석되었다. 해안단구층을 변위시킨 읍천, 수렴단층은 단구층에 대한 절대연령 측정이 이루어져 있지 않아, 단층운동시기의 정확한 하한을 알 수 없으며, 현재까지 확인된 단층의 연장길이는 각기 수십 m에 이른다. 입실단층은 약 7 m의 수직변위를 보이며, 피치를 고려한 총 변위량은 약 20 m 정도인 제4기 단층이다. 이들 양산단층계의 제4기 단층들은 공통적으로 단층면을 경계로 동측블럭이 상승한 특성을 보이며, 단층면의 경사 또한 대부분 동쪽 경사이다. 즉 동-서 압축응력의 산물로 판단되며, 지진자료에 의한 현재의 한반도 응력장 역시 대략적으로 동-서 압축을 지시한다.

결론적으로, 한반도 지구조사적인 측면에서 볼 때, 여지껏 국내외에서 얻어진 자료에 의하면, 제4기 플라이스토세 중기-말기 동안에 지각변형의 존재가 확인되었다고 볼 수 있다. 지각변형 동안의 단층운동은 1회에 한할수 없으므로, 현재까지 얻어진 양산단층계의 운동시기가 대체로 50만년 이내의 1회운동으로 수렴된다고 해서 비활성으로 결론지을수는 없다고 본다. 아울러 한반도 지구조사에 알맞는 활성단층의 규정이 시급히 요구된다.

참 고 문 헌

- 경제복, 김성균, 조화룡, Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Oike, K., 1995, 울산단층 중앙부의 단층노두와 대지진 발생의 지형적 증거, 제50차 대한지질학회 학술발표회 요약집, 99.
- 구성분, 이태섭, 최종호, 이희일, 김광은, 1995, 의성, 길안, 군위, 화북지역 항공방사능/자력탐사 및 경상분지 자료종합, 한국자원연구소 연구보고서, KR-95(C)-2, 54 p.
- 류충렬, 경제복, 김인수, 1997, 울산단층대 동측의 신기지구조운동과 지형발달. 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 발표논문요약집, 14.
- 류충렬, 양경희, 김인수, 1996a, 울산단층 주변의 제4기단층 : 활성단층인가?. 제51차 대한지질학회 학술발표회 요약집, 79-80.
- 류충렬, 양경희, 김인수, 이상원, 1996b, 울산단층 주변의 제4기단층. 부산대학교 사대논문집, 33, 311-327.
- 송무영, 경제복, 1996, 울산단층 중부일대의 지구물리 탐사 및 단층 특성. 지구과학회지, 17, 2, 205-212.
- 이동영, 김주용, 윤상규, 1989, 포항-울산지역 제4기 지질조사연구, 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-89-1B, 179-224.
- 이동영, 최위찬, 전명순, 이병주, 이창범, 김주용, 양동윤, 진명식, 박기화, 황재하, 지헌철, 조동룡, 송교영, 이봉주, 전정수, 이상규, 최종호, 황세호, 박인화, 신인철, 1997, 한반도 지진활동 및 지각변형 연구(양산단층대지역). 한국자원연구소 KR-97-(B)-1, 과학기술처, 344 p.
- 이기화, 1985, 양산단층의 활성문제에 관하여, 지질학회지, 21, 38-44.
- 이기화, 진영근, 1990, 양산단층내의 구역화, 지질학회지, 26, 6, 595.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1998, 경주시 양남면의 제4기 단층. 지질학회지 투고중.
- 장태우, 장천중, 김영기, 1993, 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석, 광산지질, 26, 227-236.
- 전명순, 정승환, 지헌철, 전정수, 신인철, 1992, 지진연구-92년도 양산단층에서의 지진 연구, 한국자원연구소 연구보고서, KR-92-1G-3, 53 p.
- 조화룡, 1978, 한국포항주변 해안평야의 지형발달, 동북지리, 30, 152-160.
- 曹華龍, 岡田篤正, 全明純, 金成均, 渡邊滿久, 佐藤比呂志, 田正秀, 池憲哲, 尾池和夫, 1994, 양산단층 중앙부의 활단층 지형과 Trench 조사. 한국지형학회지, 1, 2, 67-83.
- 최위찬, 황재하, 윤욱, 김동학, 1988, 1:25,000 지질도폭보고서 (어일), 한국동력자원연구소.
- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최범영, 조동룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김충렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이희일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지헌철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상곤, 임무수, 김순길, 정항영, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서. 한국자원연구소, 한국전력공사, 1694 p.
- 최위찬, 박관순, 이동영, 지헌철, 이봉주, 류충렬, 채병곤, 김원영, 유일현, 최영섭, 전정수, 김유숙, 최범영, 이치원, 한현철, 이사로, 진재화, 이종철, 김경수, 박필호, 이희권, 박수철, 1997a, 활성단층 조사평가 연구. 한국자원연구소 연구보고서 KR-97(C)-5. 287 p.

- 최위찬, 박필호, 이회권, 1997b, 한반도의 활성단층. 대한지질학회·대한자원환경지질학회 제13차 공동학술강연회 발표논문집 '지진! 한반도는 안전한가?' p. 100-131.
- 최위찬, 채병근, 이동영, 이창범, 김주용, 박덕원, 양동윤, 신성천, 김인준, 이병주, 황재하, 박기화, 이봉주, 조동룡, 송교영, 김원영, 조성준, 전명순, 지현철, 강익범, 전정수, 신인철, 1997c, 양산 단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 2차년 중간보고서 - 양산단층 및 울산단층을 중심으로 -. 한국자원연구소, 한국전력공사, 229 p.
- Chwae, U., 1998, The geology of the Yangsan Fault. Proceeding of The Yangsan Fault Int'l Symposium.
- Jo, H. R., 1980, Holocene sea-level changes on the east coast of Korean peninsula. Geogr. Rev. of Japan, 53, 5, 317-328.
- Jun, M. S. and Kim, W. Y., 1990, Source Mechanism of shallow intraplate earthquakes in the western Sea of Japan and their tectonic implication. in Souce parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication, Doctoral thesis of seismological department, Uppsala University.
- Kim, S. W., 1973, A study of the terraces near the southeatern coast (Bangeojin-Pohang) of the Korean Peninsula. Jour. Geol. Soc. Korea, 9, 89-121.
- Kyung, J. B., Lee, K., Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Naruse, T., 1995, Active fault study in the central part of the Yangsan Fault, southeastern part of Korea. In Lee, Y. I. and Kim, J. H., eds., 1997, Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Geol. Soc. Korea 50th Anniv. Int'l Symp., p. 33-38.
- Kyung, J. B., Oh, K. S., Oike, K., 1996, Paleoseismological approach in the southeastern part of the Korean peninsula. Proceedings of 1996 Symposium on seismology in East Asia, 38-47.
- Lee, B. J., Ryoo, C. -R. and Chwae, U., 1998a, Quaternary faults in marine terrace along the southeastern coast of the Korean Peninsula. In Koh, H. J. and Lee, B. -J., eds., Tectonic evolution of East Asia: The First Joint Meeting of Japanese and Korean Structure and Tectonic Research Group, p. 159-164.
- Lee, D. Y. 1985, Quaternary deposits in the coastal fringe of the Korean peninsula. Ph.D. Thesis, Vrije Univ. of Brussels.
- Lee, D. Y. Kim, J. Y. and Yang, D. Y., 1998b, Earthquake activities and crustal deformation in the southeastern Korean Peninsula. Proceeding of The Yangsan Fault Int'l Symposium.
- Lee, D. Y., Kim, J. Y. and Yun, S. K., 1989, Quaternary geology in the southern coast of the Korean Peninsula. Korea Inst. of Energy and Res. Report KR-89-1B, 179-224.
- Lee, D. Y., Yun, S. K., Kim, J. Y., and Kim, Y. J., 1987, Quaternary geology of the Jeju Island. Korea Inst. of Energy and Res. Report KR-87-29, 233-278.
- Lee, H. -K., 1998, On the ESR data of the Yangsan Fault. Proceeding of The Yangsan Fault Int'l Symposium.
- Lee, K. H. and Na, S. H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault, Jour. Geol. Soc. Korea, 19, 127-135

- Lee, K. H., Jeong, B. I., Kim, Y. H., 1985, A geophysical study of the Yangsan fault area (II), Jour. Geol. Soc. Korea, 21, 79-81
- Lee, K. H., Jeong, B. I., Kim, Y. H. and Yang, S. J., 1984, A geophysical study of the Yangsan fault area (I), Jour. Geol. Soc. Korea, 20, 222-240.
- Lee, Y. -J., Ree, J. -H., Park, Y., 1998c, Quaternary faulting in the southeastern Korean Peninsula. Abstract for Poster of 1998 GSA Annual Meeting, Toronto.
- Oh, G. H., 1977. The geomorphic history of the southeastern coast of the Korean peninsula. Geogr. Rev. of Japan, 50-12, 689-699.
- 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, Jour. Geogr. Japan, 103, 111-126.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M. S., Jo, W.R., Kim, S. K., Jeon, J. S., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Jo, H. R., Kim, S. K., and Oike, K., 1995, Active fault topography and fault outcrops in the central part of Ulsan fault system, southeastern Korea. Proceeding of 1995 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting (abstract).
- Ryoo, C. -R. and Yang, G., 1996, Quaternary fault in the vicinity of Kyeongju city, Korea. Program of International Symposium on Natural History and Environments, 67.