

일본의 활단층과 효고현 남부지진의 지진단층 고찰

경 재복*1

*1 : 한국교원대학교

1. 서론

일본은 Pacific plate, Philippine plate, Eurasian plate 및 American plate 가 서로 접해 있는 판 경계부에 위치하며 내륙에는 많은 활단층(active fault)이 분포하고 있다. 이러한 활단층은 제4기 이후 단층 활동을 반복하면서 엄청난 재해를 동반하는 대지진의 발생과 함께 지표면에 지진 단층(earthquake fault)의 출현을 초래했다. 따라서 활단층 연구는 지진 예지, 지진 위험도 연구에 매우 중요한 분야가 되어왔다. 본문은 판 경계 뿐만 아니라 내륙에서도 많은수의 대지진이 발생하는 일본에서의 활단층 연구 역사와 활단층의 특성을 소개한다. 또한 1995년 1월 17일 5시에 발생한 효고현 남부지진시 나타난 지진 단층과 지진에 의한 액상화 현상(Liquefaction Phenomena)을 소개하고자 한다.

2. 일본의 활단층 연구 역사

일본은 1891년 Nobi 지진 시 지표에 6~8m변위의 지진 단층이 출현한 후 지진과 단층과의 관계는 지진학과 지질학의 중요한 연구 과제가 되었다. 1920-1930년에는 Kita-tango 지진, Kita-Izu 지진 등의 연구를 통해 新期 지질시대에 활동한 단층이 지진으로 재 활동한다는 사실에 기초하여 활단층이라는 명칭을 제창하게 되었다.

1960년대에 이르러 지진 자체가 단층 운동으로부터 발생한다는 것이 지진학적 연구에 의해 밝혀졌지만, 한편 활단층에 관한 지형, 지질학적 연구도 급속히 진전되어 지형 변위가 나타나 있는 신기의 활단층은 第 四紀 동안 활동을 반복해 왔으며 이러한 반복된 단층 운동에 의해 지진과 함께 지표에 지진 단층의 출현을 초래한다는 것이 밝혀지게 되었다. 그 결과, 일본에서는 제 4기 동안 반복하여 활동해 왔으며 장래에도 활동할 가능성이 있다고 추정되는 단층을 “활단층”이라 정의하고 있다. 따라서 활단층 연구는 지진 예지 연구의 매우 중요한 부분이 되었다. 또한 지형 변위를 가져오는 단층이 어디에 분포하는가에 대한 공중 사진에 의한 지형 판독이 활단층 인정 및 확인에 매우 유력한 수단이 되었으며 이를 기초로 변위 지형에 대한 야외 조사가 능률적으로 진행되게 되었다. 더우기 지형이나 제4

기 퇴적층에 대한 여러 가지 연대 측정 방법과 Tephra 연구의 진전으로 단층 운동의 변위 속도도 추정하게 되었다.

1970년대에는 전국에 걸쳐 동일한 기준하에 인정된 개개의 활단층의 세 성질에 대한 상세한 정보를 포함하는 활단층 카달로그가 지진예지연구, 지각변동연구, 지진 위험도 분석 및 제4기 지체 구조 연구에 그 필요성이 절실하게 요구되어 왔다. 그리하여 지진예지연구 계획의 일환으로 동일한 精度로 일본 전국의 활단층을 조사 연구하기 위해 活斷層 研究會가 발족되었다. 발족 이후 약 40인의 공동 연구를 통해 1980년 “日本の 活斷層”(Research Group for Active Fault, 1980)이 간행되었다.

그 후 활단층 연구회의 지속적인 연구와 다른 연구 기관의 연구(예: 일본해상보안청, 국립 지리원, 지질 조사소 등)도 진전되어 1980년대 말까지 많은 양의 새로운 성과가 얻어졌다. 또한 곳곳에서 실시된 활단층의 발굴 조사 결과와 새로운 수법에 의한 해저 활단층 조사 결과를 포함하여 “新編 日本の 活斷層”(Research Group for Active fault, 1991)을 간행하게 되었다. 최근에는 방재 차원에서 대도시 등 인구 밀집 지역에 대해 보다 상세한 활단층 분포도가 요구되어 여러 조사 기관을 통해 1:5만이나 1:1만 축척의 활단층 분포도 작성이 실시되고 있다.

3. 활단층 및 지진 단층의 특성

일반적으로 대지진에 동반되어 지표에 나타나는 단층을 지진단층(earthquake fault)이라 한다. Neodani 단층을 시작으로 일본에는 지금까지 20여개의 지진단층이 출현했다. 이러한 지진단층의 대부분은 제4기 이후 여러회에 걸쳐 운동한 활단층을 따라 나타났다. 따라서 이러한 활단층은 장래에도 재 활동할 가능성을 시사하고 있다. 지진을 일으킨 지하의 진원의 단층은 진원단층(seismogenic fault)이라 부르며 지진단층과 구별한다. 대부분의 경우 지진단층은 지진학적으로 인정될 수 있는 진원단층의 연장이 지표까지 나타난 것이다.

일반적으로 활단층의 분류 기준으로는 최종 활동 시기, 반복성, 평균 변위 속도 등이 사용되고 있다. 일본의 경우 활단층의 活動度를 장기간(대부분의 경우 수만 년간)의 평균 변위 속도에 따라 AA급(10-100 m/1000yr), A급(1-10 m/1000yr), B급(0.1-1 m/1000yr)과 C급(0.01-1 m/1000yr)으로 구분한다(Research Group for Active Fault, 1991). 이러한 활동도는 지진의 발생 간격이나 이후의 지진 활동의 추정에 매우 중요한 지표가 된다.

지진단층의 출현은 지진의 규모나 발생 심도에 따라 좌우된다. $7.5 \leq M$ 지진의 경우 100% 지진단층이 나타나지만, $7.0 \leq M < 7.5$ 의 경우 50%, $6.5 \leq M < 7.0$ 지진인 경우 30%정도 나타나며, M 6.0에서도 지진단층이 나타나는 경우가 있다.

지진단층의 길이(l)와 변위량(d)은 지진의 규모(M)와 밀접한 관련이 있으며 일본의 지

진에 대해 다음과 같은 경험식이 성립한다(松田, 1975).

$$\log l = 0.6M - 2.9 \quad (l:km)$$

$$\log d = 0.6M - 4.0 \quad (d:m)$$

따라서 M=7 지진의 경우 l=20km, d=1.5m, M=8 지진의 경우 l=80km, d=6m 이다. 활단층 으로부터 발생하는 가능한 지진의 최대 규모는 일반적으로 길이가 긴 활단층 일수록 큰 지진을 발생시킨다.

활단층을 따라 나타나는 지진의 平均再來間隔(R:년)은

$$\log R = \log(L/S) + 1.9$$

으로 표현되며, 동일한 단층에서 반복하여 발생하는 지진은 거의 규칙적인 발생 간격을 지닌다는 것이다.

일본 열도 동쪽 판 경계에서 일어나는 대지진의 경우 지진의 재래 주기가 매우 짧으나 (100-150년) 내륙의 활단층에 의해 발생하는 지진의 재래 주기는 일반적으로 1000년 이상 수만 년에 이른다. 따라서 다음 지진의 발생 가능성을 고려할 때 평균 발생 간격 뿐만 아니라 최신의 대지진 발생 년대를 아는 것이 매우 중요하다.

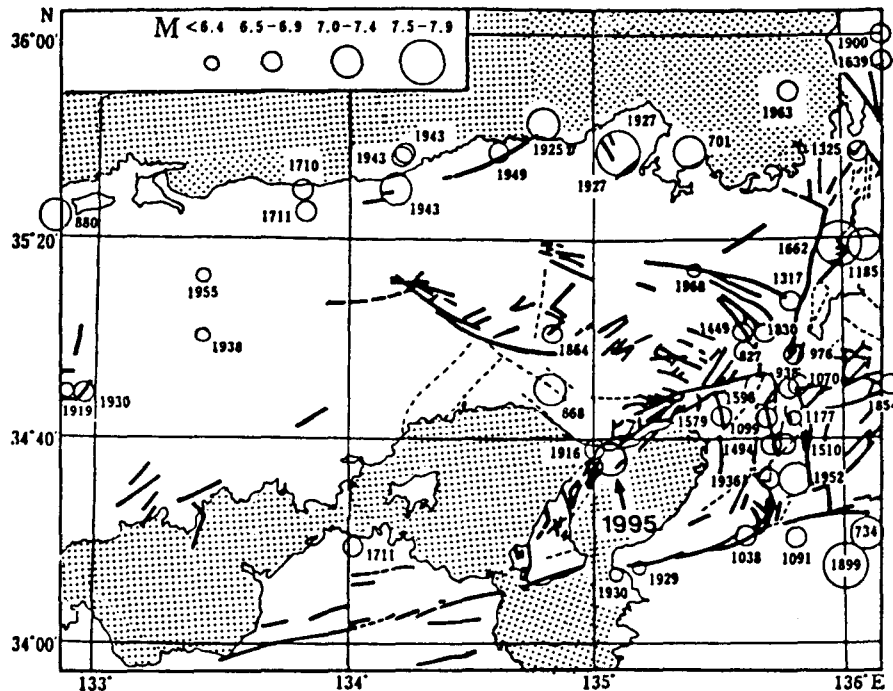


Fig.1 Distribution of earthquakes(M>6.0) and active faults in the inner belt of Southwest Japan based on Usami(1992) and Research Group for Active Fault(1991).

Matsuda(1992)에 의하면 일본의 활단층의 운동은 cycle을 지니고 있으며 활단층의 활동 cycle의 특징은 지진 활동이 극히 저조한 긴 靜穩期(quiet period)(수백년-수만년)를 가

지며 그 이후 수년 동안 상대적으로 높은 지진 활동을 보이는 前驅的活動期(precursory period)와 수주의 前震期(foreshock period)를 지낸다. 과거 약 100년 간 활동한 일본 내륙 활단층의 약반의 경우 전진기 동안 本震 전에 뚜렷한 유감 前震 활동을 보였다. 本震의 발생 후는 余震期(aftershock period)가 뒤따른다.

개개의 단층에서의 변형운동의 방향은 제4기 후기를 통해 일정해 왔으며 변위의 누적 속도는 단층에 따라 크게 차이가 있다. 긴 단층일 수록 짧은 단층보다 큰 지진을 발생시켰으며 개개의 단층은 고유의 규모와 활동 간격을 지니고 규칙적으로 활동한다는 것이다. 또한 단층의 활동에는 공간적, 시간적으로 연속성이 있다는 것이다. 그림1은 일본 서남부 內帶에 발생한 피해 지진의 분포, 효고현 남부지진의 진앙의 위치 및 활단층 분포를 나타내고 있다.

4. 효고현 남부 지진에 의한 지진단층 및 액상화 현상

효고현 남부 지진(규모 7.2, 진원깊이 약 13.3km)은 1월 17일 오전 5시 46분에 발생했으며 진앙은 34.6°N, 동경 136.18°E의 아와지섬 북단부 부근이었다. 이 진원을 기점으로한 단층의 균열은 북동-남서 방향으로 약 40km에 걸쳐 나타났다고 추정된다. 여진은 이 단층을 따라 아와지섬 북부로부터 효고현과 오오사카府의 경계 부근까지 帶狀으로 분포하고 있다. 여진 활동은 점점 약해지고 있으나 1월 말까지 1319회(유감 지진 149회)에 달했다. 일반적으로 일본의 지진은 해구나 trough 부근에서 발생하는 海溝型 지진과 육지 밑의 활단층의 운동에 의해 발생하는 內陸型 지진으로 구분한다. 1923년 관동대지진은 해구형 지진이나 1948년 3000여명의 사상자와 행방 불명자를 가져온 Hukui 지진과 이번에 발생한 지진은 내륙지진이다. 또한 도시 직하의 얇은 깊이에서 일어났다는 의미에서 直下型 지진이라고도 불려진다.

지진단층: 이번에 발생한 지진의 경우 Nozima 단층과 Roko(六甲) 단층대의 일부가 활동했다고 보여지며 전체적으로 수평 방향의 변위가 큰 우주향 이동 단층이었다. 특히, 길이 약 9km의 Nozima 단층의 경우 그 변위가 지표에 뚜렷하게 나타났으며 변위량은 곳에 따라 차이가 있었다. Nozima 단층의 단층 변위의 관찰에 의하면 단층 발단부의 변위량보다 중앙부 변위량이 더 크게 나타났으며 수평 방향의 최대 변위는 약 1.7m, 수직 방향의 최대 변위는 약 1.3m 정도였다.

단층선을 횡단하는 도로의 경우, 곳에 따라 0.5-1.5m의 수평변위가 나타나며 단층선 위의 지표면의 토양층에는 많은 open fissures, Enechelon fissures가 나타났으며 단층면을 따른 지하수의 용출도 관찰되었다(Fig.2 and Fig.3). 그러나 인구가 밀집되어 있는 고오베市나 니시노미야市에서는 지표면이 건물과 도로 등으로 개변되어 있어 정확한 단층 trace

의 확인이 어려운 상태였다. 건물, 가옥의 파괴, 고속 도로 및 신간선의 붕괴 등은 층적층 위에 특히 심했다. 막대한 피해 지역은 고오베市와 니시노미야市에 이르는 해안에 연한 층적층 지역으로서 폭 1km, 연장 약 20km의 동서 방향의 帶狀으로 나타났으며 이 지역을 지진 단층이 통과한다고 추정된다. 일본기상청은 이 지역과 아와지섬의 일부지역에 대해 JMA진도 7을 발표 했다.(2월 7일)

산사태: 아와지섬의 Nozima 단층 동쪽 산사면에는 여러 곳에서 산사태가 발생했다. 또한 고오베市와 니시노미야市의 북쪽에 위치한 Rocko 산맥의 산사면을 따라 수십 개소에 크고 작은 산사태가 발생하였으며 도로의 균열, 붕괴 등이 발생했다.

액상화: 액상화 현상이란 지하수를 포함하는 砂地盤이 지진에 의한 진동으로 액화하여 유동하는 현상으로 간극수압의 증가로 물과 함께 모래가 분출하는 현상이다. 효고현 남부 지진의 경우 고오베市와 니시노미야市의 해안을 따라 지진동 및 액상화 현상으로 부동침하가 일어나 제방의 붕괴, 건물의 倒壞, fissures를 따라 噴砂현상의 출현으로 곳곳에 도로의 파손 등이 일어났다. 또한 고오베市 남쪽에 위치한 매립지인 포토아일랜드, 로코아일랜드등은 액상화 현상으로 건물, 도로 및 제방의 붕괴, 지면의 차별 상승, ground fissures를 따라 噴水, 噴砂, 噴泥 등, 섬 전체에 액상화 현상이 일어났다(Fig.4). 이러한 액상화 현상은 단층으로부터 약 10km 떨어져 있는 오오사카의 Tsubune 지역에도 나타나 제방의 파괴, ground fissures의 출현, 가옥 및 건물의 부분적인 倒壞, 모래를 포함한 지하수의 분출, 도로 파손 등이 관찰되었다.



Fig.2 Displacement of road about 1.5m along the fault in Awazi island.

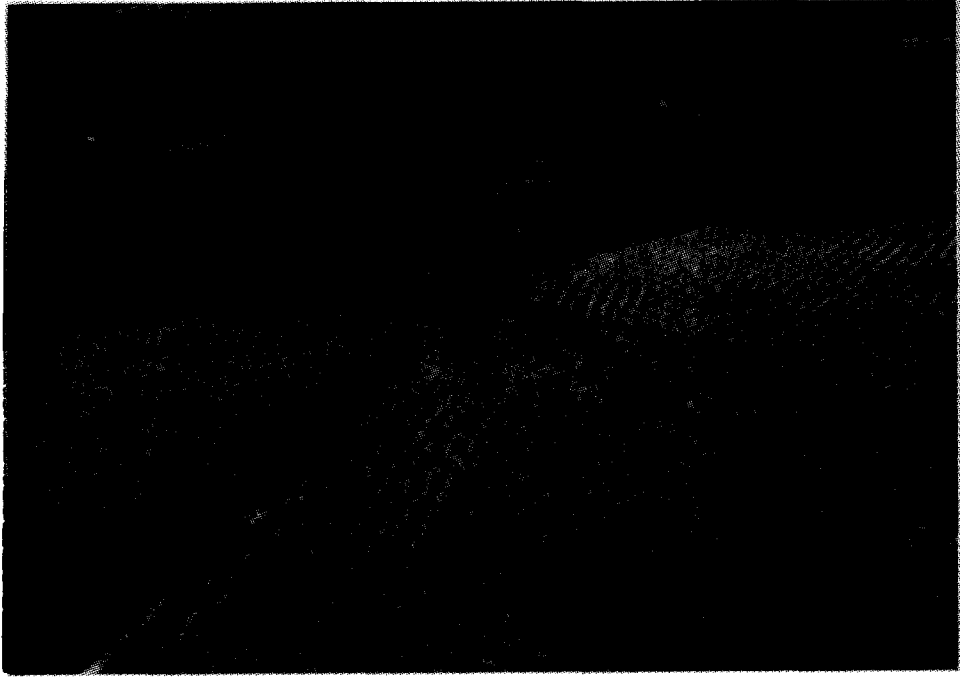


Fig.3 En-echelon fissures in a paddy field in Awazi island.



Fig.4 A zone of mud boils on the ground in Port-island.

4. 고찰

과거 수백년의 역사시대에 단층이 활동한 경우 다음의 대지진이 가까운 장래에 일어날 가능성은 작다. 역으로 역사시대에 활동한 기록이 없는 활단층은 긴 靜穩期가 끝나고 장래에 활동할 가능성이 크다. 따라서 우리나라에서도 활단층의 분포와 활단층의 성격에 대한 상세한 조사와 검토가 장기적인 지진예지 차원에서 절실히 요구되고 있다. 일본 서남부 内帯(近畿, 中國地方)에 발생하는 대지진은 Nankai trough의 판 경계를 따라 나타나는 거대지진 발생전 수십년 동안 활발하게 발생했다는 것이 지적되어 왔다.(예: Hori and Oike, 1993). 이것은 태평양판의 섭입에 의한 동쪽으로 부터의 압축력과 Izu-Tokai지역으로 부터의 필리핀판의 섭입에 의한 압축력의 상충작용에 의해 Nankai Trough에서의 거대지진의 발생직전 판 내부에 응력장이 형성된다고 가정할 수 있으며 이러한 응력장은 한반도의 판 내부 지진 활동과도 연관이 있을 것으로 사료된다(Kyung et al., 1995).

참 고 문 헌

- Hori, T. and Oike, 1993 Increase of Intraplate Seismicity in Southwest Japan before and after Interplate Earthquakes along the Nankai trough, Proc. Int. Conf. Seism. East Asia, 103-106.
- Kyung, J.B., Oike, K., and Hori, T., 1995, Temporal Variation of Seismic and Volcanic Activities and Their Relations to Stress Fields in East Asia (in preparation).
- Matsuda, T., 1992, Estimation of Activity of the Active Fault, Journal of Geography, 101, 442-452.
- Research Group for Active Faults, 1980, Active Faults in Japan: Sheet maps and inventories, Univ. Tokyo Press, 363 p.
- Research Group for Active Faults, 1991, Active Faults in Japan: Sheet maps and Inventories, Univ. Tokyo Press, 437 p.
- Usami, 1992, List of Damaging Earthquakes in Japan, Univ. Tokyo Press, 433 p.
- 松田時彦, 1975, 活斷層から發生する地震の規模と週期について, 地震, 28, 269-283.