

한반도 주변 지구조 운동과 단층-지진 관계에 대한
고찰

Tectonic Movement in Korean Peninsula and
Relation between Fault and Earthquake

KAERI

2009. 8

한 국 원 자 력 연 구 원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 “심지층처분환경타당성 평가” 과제와 관련하여 수행된 “한반도 주변 지구조 운동과 단층-지진 관계에 대한 고찰”에 관한 기술보고서로 제출합니다.

2009년 8월

과 제 명 : 심지층처분환경타당성평가

저 자 :

배 대 석, 고 용 권, 김 경 수,

김 건 영, 류 지 훈, 박 경 우,

지 성 훈 (이상 한국원자력연구원)

황 재 하, 기 원 서, 고 희 재,

김 유 홍 (이상 한국지질자원연구원)

감 수 : 한국전력연구원 장 천 중

요 약 문

원자력 전력사업으로 발생하는 고준위폐기물 처분장 부지 선정에서 부지의 안정성을 위하여서는 다양한 학제간의 기술들의 종합적인 검토가 요구된다. 반감기가 긴 방사성물질들의 안전한 처분은 우리 후손들의 안전을 담보하고 있으므로 최선의 지질학적 방법을 구축하기 위하여 모든 지질학적 불확실성을 검토 요건으로 하여야한다.

한반도는 장구한 지질시대에 걸쳐 생성된 다양한 암석으로 구성되어 있으며 긴 구조운동의 역사를 거쳤다. 그러나 한반도의 구조 발달사를 설명하기에는 자료가 너무 제한되어 있으며, 신기 지구구조운동에 관련한 한반도 지각변형사 특성을 이해하기 위해서는 한반도 조구조대(tectonic belts) 형성과정, 조산운동 특성 및 신생대 지각변화 특성등을 파악하여야 한다.

국내 지질학계에서 제시하는 조구조구는 암상 및 암질, 형성과정과 지사의 공통성과 연속성을 중요요소로 구분하였으며, 변형작용과 지질구조 형태는 부차적 요소로 하여 구분하였다. 한편 북한의 지질연구소는 구조구의 형성시기와 original crust의 안정화시기를 위주로 지체구조구를 습곡대(조구조대)의 형성시기에 따라 구분하고 있다. 두 분류체계는 모두 7~8대분이 가능하고, 큰 구조구는 2~4개의 작은 구조로 나누어지며, 습곡대, 분지, 육괴 등으로 구분된다. 한반도의 조구조 해석은 현재 유라시아 대륙의 형성과 관련하여 중요한 의미를 가지나 지금까지 누구나 인정하는 정확한 조구조적 모델이 제시되지 않았다.

중생대의 한반도 조산운동은 지구에서 겪은 지각운동과 함께하고 있으며, 이에 수반된 화성활동은 한반도에 화강암체를 형성하는 특성이 있다. 한반도에 발생한 송림변동은 중국의 Indosinian 지각운동과 대비되며, 일본열도의 Honshu block과 Sinokorea block과 충돌 후에 생겨난 지각운동으로 해석하기도 한다. 한반도에서는 고생대와 중생대의 뚜렷한 구분 없이 진행되었으나 중생대 초기 중 트라이아스 중기에 나타난 송림변동이 지질 시대적 단락을 나타낸다.

한반도에서 백악기 말에서 제 3기초에 걸친 화성활동이 끝난 후 전역에는 퇴적분지가 소멸되고 침식기를 맞이하였다. 제 3기에 들어 한반도 남동부 동해안을 따라 퇴적분지가 형성되면서 화산활동이 수반되었다. 동해의 형성은 마이오세에 들어와 일본열도가 한반도에서 떨어져 나가면서 생겨났으며, 이 때 이곳에서는 격렬한 화산활동이 있었으며 울릉도 화산활동은 동해의 형성과 관계있는 것으로 사료된다.

한반도는 백악기 말 이래 육화되어있어 대부분 침식작용에 의해 현재와 같은 지형발달을 이루어 제 4기 지질을 연구하는데 그 자료가 매우 빈약하다. 제4기의

화산암은 백두산을 비롯하여, 제주도, 울릉도, 추가령 열곡대, 시계리-곡산계곡, 길주-명천 지구대에 분포한다. 이는 제 4기에 확장열곡대를 따라서 대소규모의 알칼리 화산암의 분출작용에 의한 것으로 알려지고 있다. 또한 현재 해안선의 모양은 약 7천 년 전에 고정된 것으로 보고된 바 있다. 한반도가 겪었던 신생대의 지각운동은 신생대 화성활동, 동해확장 및 고응력 변화와 같은 지구조 변화특성으로 설명된다.

신기지체구조운동과 관련되어 조사되는 분야는 최근의 지형변화, 제 4기 단층의 운동특성, 지진발생, 해안의 융기가 주를 이룬다.

그 동안 국내외 전문가들에 의해 진행되었던 단층의 활동시기, 변위량, 구조운동사 등의 연구결과에 의하면 한반도 동남부 지역이 한반도에서 신생대 지구조 운동의 영향을 최근까지 가장 많이 받은 지역으로 보고되어 있다. 지금까지 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- 역사지진 연구를 토대로 과거 약 2000년 동안 지진이 양산단층대와 울산단층대가 통과하는 경주-울산 일대에서 여러 차례 발생
- 양산단층대의 구조운동은 주향이동, 경사이동, 수회에 걸친 중복변형운동의 결과라는 의견들을 제시
- 양산단층의 활동시기에 대해서는 백악기 말에서 제3기초 또는 경상분지 형성 이후의 신제3기에 형성된 단층으로 해석
- 양산단층의 주 활동시기를 42-14 Ma로 제시
- 양산단층은 에오세 이후 최소한 3회의 주향이동단층운동과 2회의 경사이동 단층운동
- 양산단층을 따라 일어난 우수향의 주향이동 단층운동에 의해 중부에서 약 25 km, 북부에서 약 35 km의 변위 발생

제4기 단층의 변위율: 국내에서 연구된 자료들에 의하면 울산단층대를 따라서 지형변화에 근거하여 단층이나 지형의 평균 변위율을 일부 구한 것이 있으나, 단층활동이나 지진사건에 의한 변위는 역사지진이나 트렌치 등을 통해 직접적인 값을 얻지 못하고 있어서 실제적으로 적용하기가 어려운 실정이다. 최근 울산단층대의 제4기 단층들에서 연대측정 결과를 이용하여 단층변위율을 계산하였으며, 그 결과 갈곡리단층은 0.08~0.1 mm/yr, 왕산단층은 0.31~0.62 mm/yr, 말방단층은 0.08~0.1 mm/yr, 그리고 입실단층은 0.10~0.26 mm/yr의 값을 갖는 것으로 밝혀졌다. 제 4기 단층의 변위율을 이용한 재발주기는 대부분 10,000년을 상회하는 것으로 추

정된다. 앞으로 정밀한 지표 단층조사나 트렌치조사를 통하여 단층이나 지진활동에 의한 단위 변위량과 같은 단층운동 특성과 제4기층에 대한 정확한 연대가 보다 자세히 알려진다면, 단층의 변위속도와 재발 주기를 보다 정밀하게 산정할 수 있을 것이다.

제4기 단층과 지진: 제4기 단층들을 포함하고 있는 울산단층대에 대한 지진 원으로서 단층 평가를 한다면, 규모 5이상의 지진과 공간적인 관련성은 역사지진의 규모와 진앙지 결정에 근거하였을 때, 경주지역에 거의 큰 규모의 진앙지가 밀집되어 있고 피해가 일어났지만, 이 지진들의 진앙이 울산단층대와는 직접적인 관련은 없어 보인다. 그 동안에 국내에서 기재된 제4기 단층들 중에서 직접적으로 지진과 관련된 단층의 사례는 아직 보고된 바 없다. 지표 단층이 나타날 수 있는 지진의 규모(M)는 6 이상이 되어야 한다. 역사지진 자료를 이용하여 추정된 지진규모는 이를 넘기도 하지만, 지진과 직접적으로 관련된 단층운동은 기록되지 않았으며, 다만 간접적으로 이를 추정한 예는 있다. 그러나 계기지진의 경우에 비교적 규모가 컸던 지리산 지진(1936), 속리산 지진(1978), 홍성 지진(1978), 영월 지진(1996)과 경주 지진 (1997)의 경우에도 건물의 피해는 있었으나 지진에 의한 지표에서의 단층작용과 관련된 지표의 파열현상은 발견된 바 없다.

한반도의 단층의 분포, 규모, 특성 등에 대한 정보는 국토기본지질도폭조사와 탄전 정밀조사 결과들로부터 얻을 수 있다. 그러나 그간 빈번히 사용되어 왔던 대부분의 단층들이 정확하게 정의되지 않았으며, 특히 단층활동 시기에 관한 자료들이 결여되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 한반도 신기 지체구조 운동에 영향을 미치고 있다고 판단되는 대규모 단층들에 한하여 단층운동의 특징과 시기 및 이와 관련되 지질학적 특성을 규명하였다.

Summary

The objectives of the research are to study geological faults and related geological processes such as tectonic processes and earthquake to select a safe site for the high level radioactive waste disposal consequently. The results from this study show the significance of faults evaluation and develop methods to analyze geological data related to faults such as tectonic processes and earthquake, which are important data for the site selection.

Korean peninsula is consisted of various rocks generated through long geologic time, and have experienced various tectonic movements. To understand the tectonic deformation history in Korean peninsula, there are several aspects to be characterized, such as evolution of massif and tectonic belts, Mesozoic and Cenozoic orogeny in Korean peninsula.

The tectonic province of Korean peninsula can be classified primarily with the rock type, the rock quality, the formation process, and the community and continuity of geologic history. However, the exact tectonic province of Korean peninsula has not determined yet.

The mesozoic orogeny generated the granite body in Korean peninsula. The Songrim disturbance in Korean peninsula contrasts with Indosinian tectonic movement, and is inferred to be originated from the collision of Hoshu block with Sinokorea block. The Songrim disturbance was occurred at the middle of Triassic period (the beginning of Mesozoic era).

After the volcanic activities from the end of Cretaceous period to the beginning of Tertiary period, erosion contributed to change of the topology of Korean peninsula. In Tertiary period sedimentary basins were formed in the southern part of Korean peninsula, volcanic activity at Uleung island caused the formation of East sea in Miocene epoch.

The Quarternary geology of Korean peninsula is difficult to be estimated due to the lack of data by erosion. Quarternary volcanic rocks are located in Baedu-Mt, Jeju island, Uleung island, Chugaryoung rift valley, Sigyeri-Goksan valley and Gilju-Myoungcheon graben, which originated from eruption of alkali volcanic rocks along spreading rift valley.

The neotectonic movements in Korean peninsular include recent geographical

changes, Quarternary faults and earthquakes, and upheaval of coast.

From the research results, it is reported that the southeast of Korean peninsula was affected by neotectonic movement until a recent date. They can be summarized as follows:

- According to historical documents, it is reported that many earthquakes were occurred for the past 2000 years at Kyoungju-Ulsan region where Yangsan fault zone and Ulsan fault zone are located.
- The tectonic movement of Yangsan fault zone was formed from various strike slips, dip slips and repeated deformations.
- The activation period of Yangsan fault is from the end of Cretaceous period to the beginning of Tertiary period or in Neocene after the formation of Kyoungsang basin.
- The main activation period of Yangsan fault zone is 42-14 Ma.
- Three strike slip faults and two dip slip faults at least were occurred at Yangsan fault zone after Eocene epoch.
- Displacements of 25 km in the middle area and 35 km in the north area were originated from right-handed strike slip faults along Yangsan fault zone.

Although the average of displacement rates of faults were estimated based on the change of topography along Ulsan fault zone, the displacement from faults or earthquakes is generally difficult to be found because it should be inferred indirectly using historical earthquake records. Recently, the displacement rates of Quarternary faults in Ulsan fault zone were calculated from age dating: that of Galgokri fault is 0.08~0.1 mm/yr, that of Wangsan fault is 0.31~0.62 mm/yr, that of Malbang fault is 0.08~0.1 mm/yr, and Ipsil fault is 0.1~0.26 mm/yr, which shows the relapse cycle of Quarternary faults would be larger than 10000 years.

Although the epicenters of strong-intense earthquakes are clustered in Kyoungju, there is no evidence that they are related to Ulsan fault zone. When the intensity of earthquake is larger than 6 the fault can be appeared at ground surface, which is not reported in the instrumental data yet.

Contents

| | |
|--|----|
| Summary | i |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| Chapter 2 Tectonic movement in Korean peninsula | 3 |
| Chapter 3 Analysis of relation between fault and earthquake | 12 |
| Chapter 4 Conclusions | 31 |
| Chapter 5 References | 32 |

KAERI

목 차

| | |
|------------------------------|----|
| 요약문 | i |
| 제1장 서 론 | 1 |
| 제2장 한반도 주변 지구조 운동 특성 | 3 |
| 제3장 단층운동과 지진발생과의 관계 평가 | 12 |
| 제4장 결론 | 31 |
| 제5장 참고문헌 | 32 |

KAERI

제1장 서론

한반도 지질은 아시아 대륙 연변부에 위치하여 다양한 암종과 복잡한 지질구조로 구성되어 있으며, 70%가 산악지형을 이룬다. 이는 일본, 타이완과 같은 Active tectonic area의 지질환경이나 스웨덴, 캐나다와 같은 안정된 순상지 지역의 지질환경과는 다른 경우이다. 국내의 고준위방사성폐기물 처분장의 안전성 확보를 위해서는 지질관련 입력자료 및 가정조건은 추적성 (traceability)과 투명성 (transparency)이 요구되며, 지질환경 시나리오에 대한 신뢰성 높은 자료가 요구됨에 따라서 장기적 지질환경 진화과정의 이해도가 증진되어야 한다.

고준위 방사성 폐기물 처분장을 건설하기 위한 첫 번째 단계로 적합한 부지를 선정하기 위하여 지질학적인 측면에서 장기적으로 안정하고, 최근 단층운동이나 융기, 침강 등의 영향을 검토하기 위하여 현재 활용가능한 우리나라의 단층 연구 결과들을 종합하고 분석함이 무엇보다 절실하다. 제4기 단층에 관해서는 지금까지 우리나라에서 연구된 신기단층들의 위치와 특성, 활동연대 등을 분석하여왔다. 제4기 단층 운동 특성은 장래의 지진발생이나 단층운동을 예측할 수 있는 기본적인 자료로서 처분부지의 안정성 확보에 가장 중요한 요소가 될 수 있다. 제4기 단층의 위치와 분포, 단층의 길이나 변위량, 재발주기, 마지막 운동시기, 변위 속도 등의 단층 특성은 부지선정과 시설의 설계, 건설, 운영에 큰 영향을 주는 변수이다.

제4기 이전의 단층분포는 광역지구조운동을 해석하기 위하여 필요하다. 지진의 발생은 광역지구조운동과 많은 관련성을 가지는 경우가 많다. 지질시대별로 검토된 단층운동사는 한반도의 지구조운동과 관련된 응력장의 진화를 규명하고, 나아가 미래의 응력장을 추정할 수 있는 정보를 제공하게 된다. 반감기가 긴 고준위 방사성 폐기물을 저장하기 위한 시설은 상당히 긴 기간동안의 안정성이 요구된다. 따라서 미래의 상당한 기간 동안의 지질환경 변화를 확인하기 위해서 미래의 광역응력장의 변화추이를 예측할 수 있어야 할 것이다. 이러한 점에서 비록 지질시대가 오래된 단층들이라 하더라도 안정지질환경지역을 선정하기 위한 중요한 검토 요소의 하나가 된다.

기반암내에 발달하고 있는 제4기 이전의 단층은 광역적이고 장기적인 지구조운동과 지체구조 진화를 해석하기 위하여 필요하다. 지질시대별로 검토된 단층운동사는 한반도의 지구조운동과 관련된 응력장의 진화를 규명하고, 나아가 미래의 응력장을 추정할 수 있는 정보를 제공하게 된다. 반감기가 긴 고준위 방사성 폐기물을 처분하기 위한 시설이 위치하는 부지는 상당히 긴 기간 동안의 안정성을 필요로 한다. 따라서 미래의 상당한 기간 동안의 지질환경 변화를 예측하기 위해서 광역 응력장의 변화, 단층운동의 진행, 지구조적 진화 등을 이용할 수 있다. 이러한 점에서 비록 지질시대가

오래된 단층들이라 하더라도 안정지질 환경부지를 선정하고, 단층과 같은 단열구조에 따른 지하수 유동 특성 등을 파악하기 위한 중요한 검토 요소이다.

처분장 건설을 위한 여러 가지 기술 가운데 부지선정을 위한 지질학적 안정지질환경지역 요건을 검토하기 위하여 활용할 수 있는 우리나라의 단층들과 지구조 연구 결과들을 종합하여보았다. 단층에 관해서는 지금까지 우리나라에서 연구되어온 신기단층들의 위치와 특성, 활동연대 등에 관하여 종합하였다. 제4기 단층운동은 처분장의 부지안정성 확보에 가장 중요한 요소가 될 수 있다. 단층의 재활주기와 단층의 규모는 처분장 시설의 설계기준에 영향을 주기 때문이다.



제2장 한반도 주변 지구조 운동 특성

1. 한반도 남동부 지구조 체계

한반도 남동부 지구조 체계를 이해는 백악기 말에 시작되어 제3기 초 까지 계속된 경상분지 전반의 지질현상에 영향을 미친 불국사변동을 고려하여야 한다. 불국사변동은 언양부근의 화강암 연대측정 결과(58~63 Ma)와 경주 토함산 및 남산 화강암체에서 K-Ar 연대측정결과(50 Ma)에 의해 입증된다. 불국사변동과 함께 양산단층의 운동은 단층비지로부터 시료를 채취한 연대측정 결과(60 Ma)에 의해 고제3기의 팔레오세부터 단층 운동이 발생했다는 것으로 추정된다.

양산단층을 포함한 경상분지에 대하여 지구조적 관점에서 포괄적인 접근연구가 시작되었다(Nahm, 1970; Park and Kim, 1971; 민경덕 외, 1982). 한편 포항-부산지역 일대를 따라 대만-제주도-경상분지 동부-울릉도를 잇는 거대한 추정단층을 설정하면서 동해가 침강대일 가능성과, 일본열도는 대륙과 분리되면서 동쪽 내지 남동방향으로 표류이동을 주장하였다 (Lee, 1974).

Sillitoe(1977)는 남한과 서남일본에서 북쪽으로 가면서 구리-아연(Cu-Zn), 텅스텐-몰리브덴(W-Mo) 광화대가 판의 침강으로 판경계가 거리가 멀어짐에 따라 순차적인 대상(zone)분포 현상을 나타낸다고 주장 하였다.

민경덕 외(1982)는 판구조론적 견지에서 Uyeda and Miyashiro(1974)모델을 이용, 경상분지 대부분 지질현상을 백악기 이후 태평양판이 아시아 대륙 연변부인 한반도 밑으로 침강사건으로 지질분포의 상대적 위치 변화를 설명하였다. 즉, 부산에서 대구로 가면서 화성암류의 연대가 58 Ma에서 73 Ma로 점차 오래된 시기를 보여, 지질연대가 남동쪽으로 가면서 젊어지는 것으로 해석하였다. 그는 또한 양산 및 동래단층 등 NNE방향의 구조선들은 90 Ma 전 쿨라(Kula)판이 대륙 연변부에서 침강대와 평행한 장력 또는 압력에 의한 구조선으로, WNW방향은 이 때 형성된 전단단열로 각각 해석하였다.

Eguchi(1983)는 유라시아판 동부의 현재 지구조응력장 체계는 인도판의 유라시아판 충돌로 최대 수평지구조 응력축이 티벳 북부와 중국 본토에서는 NE-SW 방향의 응력궤선(stress trajectory line)으로 나타나지만 유라시아판 동쪽 가장자리로 가면서 이 응력축의 방향이 변한다고 하였다.

(1) 동해의 확장과 일본열도의 회전

양산단층 및 한반도 동남부의 지구조 진화 연구의 중심에는 동해의 확장과 일본열도의 회전운동 현상이 있다. 동해의 확장에 대해서는 1960년대 중반부터 많은 연구자들이 의견을 제시해왔는데, 1970년대 초반까지 이들 중 가장 설득력이 있는 가설은 일본열도가 아시아 대륙으로부터 남쪽으로 이동하면서 동해가 확장되었다는 것이다 (Hilde and Wageman, 1975). Uyeda and Miyashiro(1974)는 동해가 쿨라-태평양 해령(Kula-Pacific ridge)의 충돌과 섭입작용의 결과로 백악기에서 올리고세 동안에 형성되었다고 주장하였다. 그 후 육지와 동해 밑바닥의 지질을 고려하여 동해가 고제3기에 형성되었다고 주장하였다. 이와 더불어 1970년대 초부터 고지자기 연구를 통한 일본열도의 회전운동에 대한 이론들이 함께 제시되면서 다양한 모델들이 제시되었다. 동해의 확장에 대해서는 크게 3가지의 모델로 대별된다.

- 호후방확장모델(back-arc spreading): Uyeda and Miyashiro(1974); Kimura and Tamaki(1986); Celaya and McCabe(1987)
 - 인열모델(pull-apart): Lallemant and Jolivet(1986); Jolivet *et al.*(1989); 김인수(1992); Yoon and Chough(1995)
 - 회전 모델(rotation or bar door opening): Otofujii *et al.*(1985a, 1985b)
- 을 들 수 있다.

(가) 호후방 확장 모델(back-arc spreading model)

Uyeda와 Miyashiro (1974)는 고지자기의 자료를 근거로, 동해의 확장과 일본 주변의 지구조적 해석을 시도하였다. 중생대 때는 일본열도가 아시아 대륙 연변부에 위치하였고, 120 Ma 전에는 태평양 북서부에 위치하였던 쿨라판이 아시아 대륙 밑으로 침강하면서 대륙 연변부에 화산활동을 일으켰으며, 90 Ma 전에는 쿨라-태평양판의 해령이 일본에 접근하면서 쿨라판은 완만한 경사로 대륙 밑으로 침강 및 화산작용과 함께 그 열로 상부의 지각이 얇아졌다. 이 후 약 70 Ma 전에는 쿨라-태평양 해령이 대륙 밑에 도달하면서 해령에서의 대류상승의 힘에 의하여 장력으로 얇아진 대륙 연변부는 갈라져 남측부분은 일본열도가 되어 남으로 이동하고 이어서 동해가 벌어지게 되었다고 주장하였다(그림 3-1).

Uyeda and Kanamori(1979)는 호후방 확장 여부에 따라 두 종류의 해구-호 시스템(trench-arc system)으로 구분하였다. 즉, 판구조운동의 압축력에 의해 높은 지진활동을 보이는 칠레(Chile)형과, 인장력에 의해 지진활동을 크게 나타내

지 않는 마리아나(marianas)형 등 두 가지로 분류하고 동해는 마리아나 형으로 분류하였다. 한편 Tamaki(1985)는 호후방 확장 형태를 단일열곡(single rift)과 다중열곡(multiple rift) 등으로 분류하고 동해의 형성은 다중열곡에 해당된다고 하였다.

에오세 말 인도판과 유라시아판의 충돌로 인하여 아무리아(Amuria)판이 북북서 방향으로 이동하면서 호후방 확장으로 야마토(Yamato)분지를 포함한 동해의 확장이 15 Ma ~ 30 Ma에 일어났음을 발표하였다(Kimura and Tamaki, 1986).

Chough and Barg(1987)은 각 시기별로 퇴적층의 두께를 침강속도와 동해의 확장속도로 환산하여 호후방 확장으로 올리고세(약 28 Ma) 때 울릉분지가 형성을 시작하여 매우 빠른 속도로 확장하며 이는 마이오세 중기(약 12 Ma)까지 지속되다가 그 이후 마이오세 말부터 폐쇄기(closing stage)에 접어든다고 하였다.

Celaya and McCabe(1987)은 일본열도의 굴곡과 동해의 형성을 2 단계의 호후방 확장으로 설명하였다. 먼저 에오세 초에 일본열도가 유라시아 대륙의 일부로 있다가 약 43 Ma에 와서는 태평양판이 필리핀판 아래로 침강함에 따라 태평양판의 운동방향이 바뀐다. 이에 따라 일본열도가 회전하게 되면서 동해(일본분지)가 열리기 시작한다. 약 20~17 Ma에 와서는 유라시아판-태평양판-필리핀판의 삼중점합(triple junction)이 남쪽으로 이동하면서 홋카이도 호(Hokkaido arc)에 충돌이 일어나고 이로 인하여 북동 혼슈(Honshu)가 반시계 방향으로 회전하게 된다. 그 이후 삼중점합이 남쪽으로 이동하여 현재 혼슈의 중앙부에 위치하면서 현재에 이른다는 것이다.

(나) 인열 모델(pull-apart basin model)

인열모델은 두개의 주향이동 단층을 경계단층으로 하고 횡장력(transtension)으로 중간에 인장영역이 형성되면서 분지가 확장된다는 개념이다(그림 3-2). Otsuki와 Ehiro(1978)는 쿨라-태평양판 및 테티스 해령(Tethys ridge)의 섭입으로 인하여, 백악기 좌수향 단층인 타나쿠라(Tanakura) 전단대를 동쪽 경계로 하고 그리고 쓰시마(Tsushima) 단층을 서쪽 경계로 하여 고제3기 때 일본열도의 서쪽 부분이 남쪽으로 이동하면서 동해분지가 형성되었다고 설명하였다. 그러나 이 모델은 우수향주향이동 히다카(Hidaka) 전단대와 양산단층과 같은 그 이후 발표된 육지내부의 지질구조적 특성과 고지자기학적 연구결과들을 뒷받침하지 못하고 있다.

동해의 확장과 관련하여 Lallemand and Jolivet(1986)가 새로이 인열모델의 기구를 설명하면서 두개의 거대한 주향이동단층을 경계단층으로 설정하였다. 히다카-타타리(Hidaka-Tertiary) 전단대를 동측 경계단층, 양산단층과 쓰시마 단층과 평행한 동한단층(East Korean fault)를 서측 경계단층으로 설정하고 단계적인 동해의 형성을 설명하였다. 즉, 백악기 말까지 일본열도는 아시아 대륙의 한부분으로 존재하였으며 시코테-알린 중앙(Sikohote-Alin Central) 단층과 타나쿠라 구조선과 같은 NE-SW 주향에 좌수향 단층을 따라 강한 변형작용을 받았다. 에오세 중기부터 서측 경계단층인 양산-쓰시마 단층계와 동측 경계단층인 히다카-타타리 전단대가 우수향이동을 시작하면서 형성이 시작된다. 다음으로 올리고세 말부터 마이오세 초까지 동한단층과 오가-타타리(Oga-Tartary) 단층을 경계로 일본열도가 남하하면서 동해가 열리고 이 때 양산단층은 정지된다. 다음으로 태평양판이 북서방향으로 이동에 따라 두개의 경계단층은 정지되고 21 Ma 이후에는 NW-SE 신장에 의해 호후방 확장으로 야마토 분지가 열리고 이 운동은 12 Ma에 끝난다. 마지막으로 1 Ma 혹은 2 Ma에 동해는 폐쇄기에 접어들었다고 설명하였다.

김인수(1992)는 기존의 부채꼴 확장모델을 재고하면서 새로운 동해의 성인모델을 2단계로 설명하였다. 1단계에서는 약 18 Ma까지 NW-SE 방향으로 확장되면서 일본해분이 형성되고, 2단계로써 18 Ma~16 Ma 사이에 NNW-SSE 방향으로 확장되면서 야마토해분과 울릉해분이 형성되었다. 15 Ma에 와서는 남서일본의 시계방향 회전사건으로 인하여 동해 지역에 큰 변화가 일어나는데 이로 인하여 대마도 부근에 좌향 전단력이 형성되면서 ESE- WNW 방향의 횡압력이 작용한다고 하였다.

(다) 회전 모델(rotation or fan-shape opening model)

회전모델은 남서일본과 북동일본의 고지자기 연구결과 북동일본과 남서일본이 각각 반시계방향과 시계방향으로 부채꼴 모양으로 회전하면서 동해의 확장이 이루어졌다는 사실로부터 제시된 모델이다(그림 3-3). Kawai 등(1961)은 일본열도 전역에 걸쳐 광범위한 고지자기학적 연구결과 제3기에서 제4기 암석들의 잔류자기방향이 현재의 자장방향과 잘 일치하는데 반하여 중생대 이전의 암석에서는 잔류자기의 방향이 북동 일본열도는 시계방향으로 편기되어 있고 남서 일본은 반시계방향으로 편기되었음을 발견하였다. 이 두 지역의 잔류자기 편각방향의 차이는 약 53° 로써 일본열도는 백악기 초(약 120 Ma)에서 제3기 초

사이에 굴곡된 것으로 해석하였다. 이 연구결과는 고지자기 해석을 통한 동해의 형성모델을 해석하는데 매우 중요한 근간이 되어 왔다.

Otofuji and Matsuda(1983)는 남서 일본 중앙부의 백악기에서 마이오세 중기 지층을 대상으로 고지자기 연구를 수행한 결과 남서 일본은 28 Ma 이후에 $58 \pm 14^\circ$ 시계방향으로 회전하여 약 12 Ma에 이 운동이 정지되었고, 92~28 Ma 사이에는 회전운동이 거의 없었다는 결론을 얻었다. 이는 남서일본이 동해 형성과 관련하여 28 Ma~12 Ma사이에 34°N , 129°E 를 중심으로 회전한 것으로 해석하였다.

Yoon and Chough(1995)는 한반도 동부 해양지역의 탄성과 탐사자료를 분석한 결과 양산단층과 후포단층이 거대한 주향이동 단층으로써 서로 우향-계단(right-stepping) 모양을 이루고 있으며 이 두 단층과 연관지어 발견되는 안행상 정단층과 역단층 그리고 습곡구조들을 분석하여 동해의 형성에 대하여 (1) 올리고세 말에서 마이오세 초(23 Ma~18 Ma)까지의 인열 확장, (2) 마이오세 초에서 말(18~12 Ma)까지 회전 확장 단계, 그리고 (3) 마이오세 말(12 Ma) 이래 호후방 폐쇄기로 크게 3단계로 구분하여 설명하였다.

이상의 연구들의 종합과 양산단층대의 단층비지로부터 얻은 단층운동의 시기를 고려하면 양산단층의 운동시기는 약 60 Ma를 전후해서 운동을 시작했음이 분명하다. 이 시기의 사건으로는 경상분지 전반에 나타나는 불국사변동의 사건과 연관지을 수 있을 것이다.

다음으로 일본열도와 한반도의 고지자기학적 연구를 통한 일본열도의 회전에 대한 연구, 주변지역의 구조지질학적 및 퇴적학적 연구결과들을 중심으로 수행된 연구 결과들을 종합하면 태평양판이 필리핀판 아래로 침강함에 따라 태평양판이 당시 북쪽으로 진행하던 운동방향이 북서쪽으로 방향이 바뀌면서(Jolivet *et al.*, 1989), 유라시아판 밑으로 쿨라판과 태평양판의 북서쪽으로 진행하게 되고 이에 따라 NW-SE 방향으로 호후방 확장의 인장력이 발생하여 에오세 말(약 40 Ma)에 유라시아 대륙으로부터 일본열도의 분리가 시작되면서 동해의 형성이 이루어지기 시작한다. 이렇게 남동 방향으로 동해가 확장되면서 마이오세에 이르러 본격적인 확장의 단계로 접어들고 일본해분이 이 시기에 형성되면서 이 시기는 대부분의 동해가 확장되면서 거의 현재의 모습과 같은 면적으로 되는 시기이다(김인수, 1992). 아마도 이 시기는 양산단층의 우수향주향이동을 지배했던 시기이고 가장 큰 변위를 일으킨 시기로 보인다.

이후 약 18 Ma를 기점으로 한 그 후기의 동해의 확장은 ENE-WSW 방향축에 의한 확장으로 그 방향이 NNW-SSE 방향으로 변하게 된다(Otsuki and

Ehiro, 1978). 이와 같은 확장축의 변화의 요인으로 김인수(1992)는 당시까지 지배했던 인도판의 유라시아판 충돌에 의한 장력이 이 시점에 와서 필리핀만의 유라시아판 침강으로 지배하는 호후방 확장의 환경으로 변환되었기 때문이라고 설명하면서 동해의 남단에 위치하고 있는 야마토 해분과 울릉 해분의 형성시기라고 설명하였다.

약 12~15 Ma에 지구조적 큰 변화는 남서일본의 시계방향 회전운동이다. Otofugi *et al.*(1985)는 고지자기학적 연구로부터 14.9 Ma 경 0.6 Ma라는 짧은 기간 동안에 남서 일본열도가 약 47° 시계방향으로 급격한 수평·회전운동의 결론에 도달했다. 이 회전사건과 결부되어 규슈(Kyushu)는 북상·반시계방향의 회전운동을 하고, 대한-쓰시마 해역은 좌향전단력과 WNW-ESE 방향의 횡압력(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992)의 지배하에 들어간다. 이 현상은 대마도와 그 인접해역에서 중기 마이오세 이전 지층의 습곡과 고각도 역단층으로부터 WNW-ESE 방향의 압축력을 고려할 수 있다(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992). 그리고 10 Ma를 전후해서 일본열도의 회전은 정지된다.

마이오세 말 일본열도의 회전 정지 이후, 지구조 체계에 대한 구체적인 정보는 없으며, 그 이후는 현재의 지구조응력장 체계에 대한 간접적인 설명은 있다. 그러나 조화룡 외(1994)와 Okada *et al.*(1998)의 연구에서는 양산단층 및 울산단층대의 제4기 단층에 대한 트렌치조사 결과 양산단층대의 제4기 단층들은 우수향이동을 보이고 울산단층대의 제4기 단층은 역단층 현상을 보인다는 사실로부터 이들 제4기 단층들은 지진진원기구로 밝혀진 현재의 최대압축응력 방향이 ENE-WSW 방향(전명순 외, 1993a, 1993b; 지현철 외, 1996)이라는 사실과 함께 이 최대압축응력 방향은 일본에서 연구결과와 비교하면, 과거 0.5 Ma 이후이며 그 이전에는 남북방향의 수평 주압축 방향이 작용하였다는 사실을 설명하고 있다.

이상 연구들의 종합과 양산단층대의 단층비지로부터 얻은 양산단층은 약 60 Ma를 전후해서 운동을 시작했음이 분명하다. 이 시기의 사건으로는 경상분지 전반에 나타나는 불국사변동의 사건과 연관 지을 수 있다.

또한, 일본열도와 한반도의 고지자기학적 연구를 통한 일본열도의 회전에 대한 결과와 주변지역의 구조지질학적 및 퇴적학적 연구결과들을 중심으로 수행된 연구 결과들을 종합하면, 태평양판이 필리핀판 아래로 섭입 함에 따라 북쪽으로 진행하던 태평양판의 운동은 북서쪽으로 방향이 바뀌면서(Jolivet *et al.*, 1989), 유라시아판 밑으로 쿨라판과 태평양판의 북서쪽으로 진행하게 된다. 이에 따라 NW-SE 방향으로 호후방 확장의 인장력이 발생하여, 에오세 말(약 40

Ma)에 유라시아 대륙으로부터 일본열도의 분리가 시작되면서 동해의 형성이 이루어지기 시작한다. 이렇게 남동 방향으로 동해가 확장되면서 마이오세에 이르러 본격적인 확장의 단계로 접어들고 일본해분이 이 시기에 형성되면서 이 시기에 대부분의 동해가 확장되면서 거의 현재의 모습과 같은 형태를 나타내게 된다(김인수, 1992). 아마도 이 시기는 양산단층의 우수향주향이동을 지배했던 시기이고 가장 큰 변위를 일으킨 시기로 보인다.

이후 약 18 Ma를 기점으로 그 후기의 동해의 확장은 ENE-WSW 방향축에 의한 확장으로 그 방향이 NNW-SSE 방향으로 변하게 된다(Otsuki and Ehira, 1978). 이와 같은 확장축의 변화 요인으로, 김인수(1992)는 당시까지 지배했던 인도판의 유라시아판 충돌에 의한 장력이 이 시점에 와서 필리핀만의 유라시아판 침강으로 지배하는 호후방 확장의 환경으로 변환되었기 때문이라고 설명하면서 동해의 남단에 위치하고 있는 야마토 해분과 울릉 해분의 형성시기라고 설명하였다.

약 12~15 Ma에는 지구조 사건에 큰 변화는, 남서일본의 시계방향 회전운동이다. Otofujii *et al.*(1985)는 남서 일본의 고지자기학적 연구로부터 14.9 Ma를 정점으로 한 0.6 Ma라는 짧은 기간 동안에 남서 일본열도가 약 47° 시계방향으로 급격히 수평회전운동을 했다는 결론을 얻은바 있다. 이러한 회전사건과 결부되어 큐슈(Kyushu)는 북상과 반시계방향으로 회전운동을 하게 되고, 대한-쓰시마 해역은 좌향전단력과 WNW-ESE 방향의 횡압력(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992)의 지배하에 들어가게 된다. 이러한 현상은 대마도와 그 인접해역에서 관찰되는 중기 마이오세 이전 지층의 습곡과 고각도 역단층으로부터 WNW-ESE 방향의 압축력을 고려할 수 있다(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992). 그리고 10 Ma를 전후해서 일본열도의 회전은 정지된다.

대부분의 연구는 마이오세 말 일본열도의 회전 정지 이후에 대한 지구조 체계에 대해서 자세한 언급이 없다. 단지 그 이후는 현재의 지구조응력장 체계가 유지되었을 것으로 간접적으로 설명하고 있다. 그러나 조화룡 외(1994)와 Okada *et al.*(1998)의 연구에서는 양산단층 및 울산단층대의 제4기 단층에 대한 트랜치조사 결과 양산단층대의 제4기 단층들은 우수향이동을 보이고 울산단층대의 제4기 단층은 역단층 현상을 보인다는 사실로부터 이들 제4기 단층들은 지진진원기구로 밝혀진 현재의 응력장의 최대압축응력 방향이 ENE-WSW 방향(전명순 외, 1993a, 1993b; 지현철 외, 1996)이라는 사실과 잘 일치된다는 설명과 함께 이러한 ENE-WSW의 최대압축응력 방향은 일본에서 밝혀진 연구결과를 비교하여 과거 0.5 Ma 이후라고 설명하고 있고, 그 이전에는 수평의 주압

축 방향이 남북으로 작용하였다는 사실을 설명하고 있다.

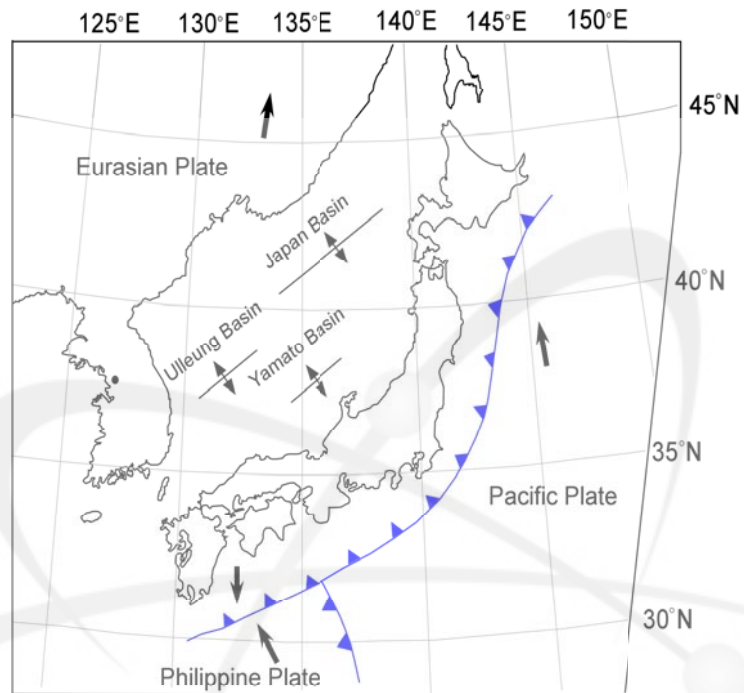


그림 3-1. 호후방 확장모델의 동해의 확장과 지구조 운동 모델(Chough and Barg, 1987)

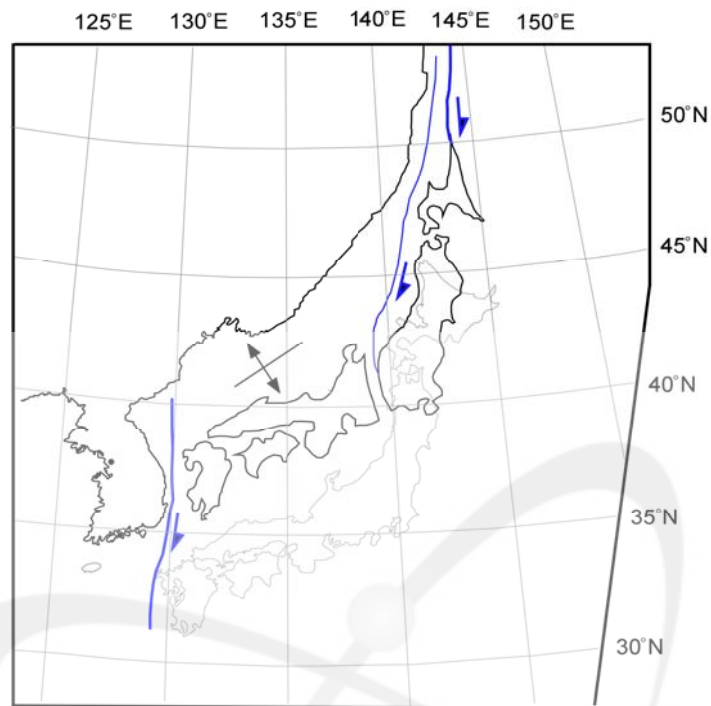


그림 3-2. 인열모델에 의한 동해의 확장과 지구조 운동 모델(Lallemand and Jolivet, 1986)

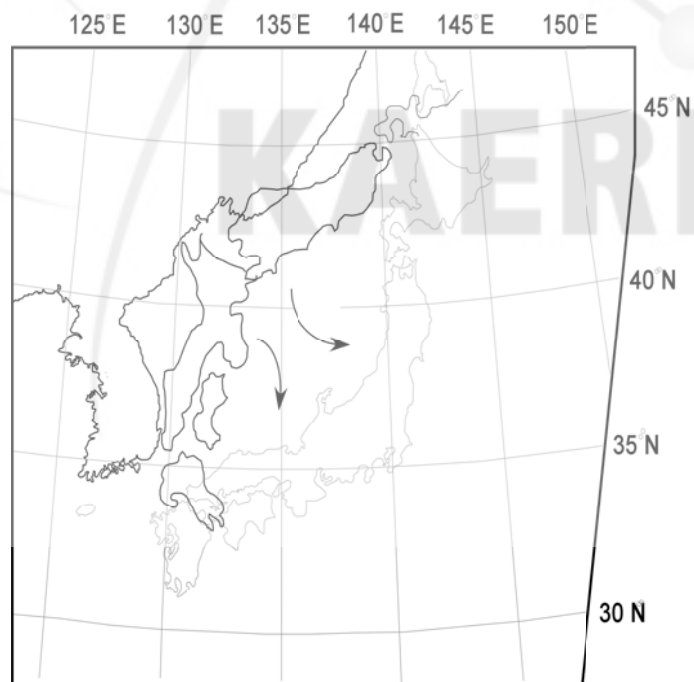


그림 3-3. 회전모델에 의한 동해의 확장과 지구조 운동 모델(Jolivet *et al.*, 1989)

제3장 단층운동과 지진발생과의 관계

1. 지구조 운동과 단층운동과의 관계

단층의 기원이 지구조적(tectonic) 혹은 비지구조적(nontectonic) 인가를 결정하는 것은 잠재 지진원으로서 단층을 평가하는데 매우 중요하다. 그러나 하나의 기준으로 지구조성 혹은 비지구조성의 결정은 거의 불가능하며, 또한 야외 모두규모에서 얻어진 정보를 근거로 단층 기원의 평가 역시 매우 어렵다. 단층이 역사 혹은 계기지진과 연관이 있을 때 잠재적 지진성(중-대규모 지진 발생)으로 평가될 수 있다. 또한 단층이 지하 5~7 km 이상 연장된다면 지구조적 기원일 가능성이 크며 지진유발 잠재성(seismogenic potential)을 평가하여야 한다. 만약 단층의 경사가 완만하고 사면의 기저부에 위치한다면, 비지구조성인 동시에 비지진성(nonseismogenic)으로 평가된다. 이러한 몇 가지 기준 이외에 단층의 모든 변수들 뿐 아니라 단층이 나타난 지질학적 및 지체구조적 환경을 종합적으로 분석하여 단층의 기원에 관한 신뢰성 있는 평가를 수행해야 할 필요가 있다 (표 3-1).

표 3-1. 지진성 단층과 비지진성 단층의 구분 기준

| | Seismogenic | Nonseismogenic |
|-------------|--|---|
| Tectonic | Seismogenic-tectonic faults (Capable of producing $M > 5.0$) Ex : Active normal fault | Nonseismogenic-tectonic faults (Not capable of producing $M > 5.0$) Ex : Secondary tectonic faulting |
| Nontectonic | Seismogenic-nontectonic fault Ex : non identified | Nonseismogenic-nontectonic faults Ex : Gravity glides |

단층의 기원에 관한 평가는 여러 가지 기준의 적용뿐만 아니라 모든 지질학적, 층서학적, 구조적 및 운동학적 자료들을 고려하여 합리적으로 판단하여 내부의 일관된 해석을 도출한다.

단층의 기원에 관한 내부적으로 일관된 모델이란 지질학적 해석을 기반으로 하는 것인데, 예를 들면 용해성 붕괴단층(collapse fault) 및 화산과 관련된 단층 등과 같은 지질학적 사건을 전제로 한 단층의 지질학적 이해는 단층의 기원에 관한 합리적인 이해와 내부적으로 일치되는 모델을 개발하기 위한 근거를 제공한다.

부가적으로 단층의 기원에 관한 해석은 그 단층이 지진성인가 아닌가를 판단하는데 중요한 근거자료로 활용된다. 지질학적 내용과 단층의 규모, 기하, 운동학적

특성으로 설명이 되어지는 내부적으로 일관된 모델(internally consistent model)의 개발은 단층의 기원과 지진잠재성을 평가하는데 중요하다.

활동성 단층을 원자력시설 부지안전성 평가에 적용 시, 활동성 지구조원(capable tectonic source) 여부를 평가하여야 한다. 이를 위하여 관련 규정에서 정의와 기준에 의한 지구조적 단층인가 혹은 큰 규모의 지진($M > 5.0$)을 일으킬 수 없는 비지구조적 단층인가를 구별하는 것이다(그림 3-4). "의심되는 지질구조가 비지구조적 기원이라는 것이 입증되지 않으면 그것은 지구조적 구조로 취급되어야 한다."(US R.G.1.165 App. D)는 원칙에 근거하면 지표변형의 성질과 연장이 지질구조의 형성 기원이 파악될 수 있도록 검토되어야 한다. 단층과 관련된 지표변형에서 그들의 기원을 정확하게 해석 시, 다양한 불완전한 기준들을 근거로 각각 가중치를 참고하여 평가해야 한다. 또한 특정 단층에 대해서 그 특성을 파악하기 힘들거나 불확실성이 있을 때는 그것을 명확히 설명하기 위하여 활용되는 방법이다(그림 3-5).

단층이 지구조적인가 혹은 지진성인가를 판단할 때 활용 가능한 자료를 근거로 기술적 해석, 논리 및 근거와 불확실성이 단층의 기원을 해석함에 있어서 최종 평가를 판단하기 위하여 충분히 자세하게 문서화되어야 한다.

단층으로 인한 잠재적 재해는 그 단층이 지구조적이냐 혹은 지진성이냐에 달려 있다. 대부분의 경우 현재의 지질학적 혹은 지구조적 환경에서 운동한 단층들은 일단 지표파열을 일으킬 수 있으며, 규모 5이상의 지진성 단층은 큰 규모의 지진동을 유발할 가능성 평가가 필요하다.

결론적으로, 알려진 단층의 잠재적 재해평가는, 다양한 자료(지질학적, 지구물리학적, 지진학적 및 측지학적)의 수집과 평가를 수행하는 반복적인 과정이다. 원자력 시설 부지에서 단층의 인지와 특성평가를 수행하는 것이다. 비지구조적/지구조적 단층들을 구별하고, 지구조적-비지진성/지구조적-지진성 단층을 구별하기 위해서는 (1) 단층을 일으킬 수 있는 지구조적 및 비지구조적 형성과정의 종류를 이해하고, (2) 어떤 단층이 나타난 지질학적 및 조구조적 환경을 이해하며, (3) 단층의 규모, 기하, 운동학적 특성과 같은 단층의 특성을 상세하게 특성화해야 한다. 특성평가 단계는 다음과 같다.

Step 1 : 불확실한 기원을 갖는 지표단층/지표변형을 인지한다.

Step 2 : 단층/지표변형을 지구조적/비지구조적 단층들의 특성과 비교한다.

Step 3 : 단층의 기원에 관한 예비평가를 수행하고, 자료의 불확실성을 문서화하고, 활용한 자료들을 해석한다. 이 때, 활용 가능한 자료들을 최적화하고, 운동학적, 역학적 및 구조적으로 다양한 것을 통합 해석해야 하고 가

장 설득력 있는 모델로 해석한다. 단층 기원 평가에서 불확실성을 명확히 해야 한다.

Step 4 : 대안 가설의 평가에 적용 가능한 활동과 진단기준의 평가에서 불확실성을 감소시킬 수 있는 활동에 집중하는 부가적인 특성조사를 실시한다.

Step 5 : Steps 2, 3, 4의 결과를 근거로 단층 혹은 지질구조가 지구조적인가 혹은 비지구조적인가를 평가한다.

Step 6 : Steps 2, 3, 4의 결과를 근거로 단층이 규모 5 이상을 일으킬 수 있는 지진성인가 혹은 비지진성인가를 평가한다.

Step 7 : 단층/지표변형이 비지구조적으로 판명되면, 지표변형 재해에 대한 잠재성(예를 들면 부지지표의 붕괴, 침강, 융기 혹은 차별운동)을 평가한다. 공학적 해법이 제공되거나 그렇지 않으면 그 부지는 부적당한 것으로 간주한다. 만약 공학적 해법이 실용적이라면 단층 혹은 지질구조의 규모, 기하, 지표조건이 설계기준에 반영되어야 한다.

Step 8 : 단층/지표변형이 지구조적으로 판명되면, 단층/지질구조의 장래 미칠 수 있는 영향(capability)이 제시되어야 한다. 단층의 영향평가는 최근 운동 시기, 지질구조의 규모 혹은 지진 잠재성(seismogenic potential)이 필요하다.

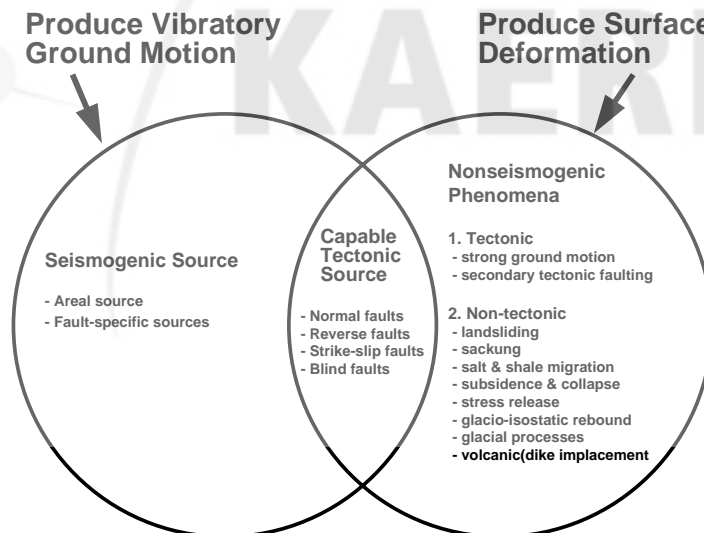


그림 3-4. 단층의 지진성 구조원, 비지진성 구조원 및 활동성 지구조원의 현상들에 대한 구분 모식도(Hanson *et al.*, 1999)

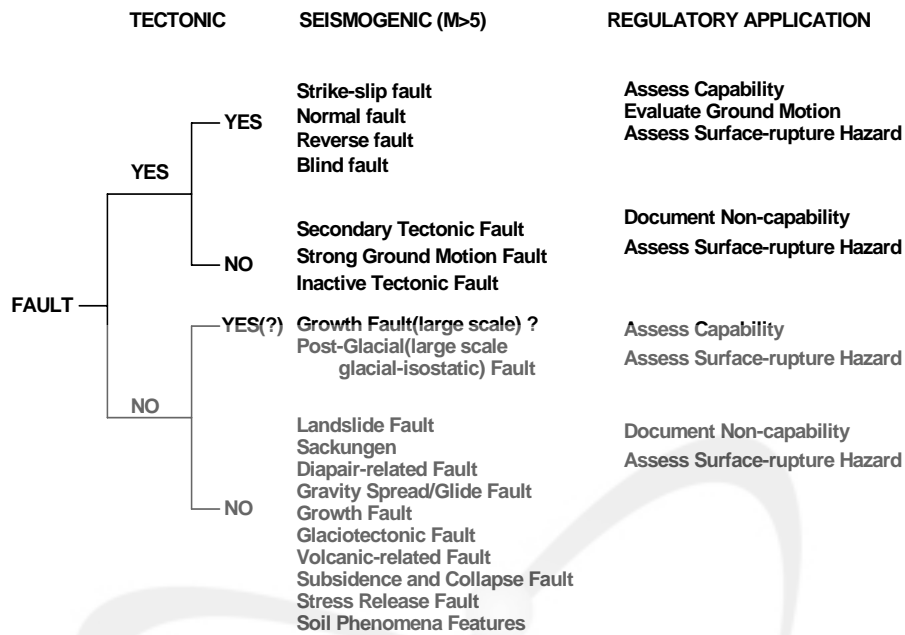


그림 3-5. 단층의 분류와 부지선정과 관련된 규정의 적용을 위한 모식도(Hanson *et al.*, 1999)

2. 단층과 지진의 상호 관련성 평가기준

어떤 단층이 지구조적 기원인가 그리고 이 단층이 지진을 유발할 가능성이 얼마인가를 평가하는 것은 원자력발전소의 부지조사 및 평가에서 가장 중요한 과제 중의 하나이다. 국내 원자력발전소의 설계기준지진(SSE : Safety Shutdown Earthquake)은 관련 규정에 따라 계기지진, 역사지진 및 단층 지진원에 대한 평가와 더불어 지진지체구조구에 따라 지진동 감쇠를 고려하여 원전부지에서의 지진동을 평가하게 된다. 특히 단층 지진원에 대해서는 활동성 여부를 먼저 평가하고 활동성 단층으로 판단될 때 단층요소에 따른 지진규모 평가 경험식에 따라 단층으로부터 야기될 수 있는 지진규모를 평가하게 되는데, 최근 국제적으로 큰 규모의 지진발생과 주요 단층대를 따라 고지진학적 연구가 활발하게 진행되면서 이 분야 연구에 많은 진전을 보게 되었다.

국내에서는 1990년대 초 양산단층을 중심으로 단층 활동성에 관한 연구가 시작되면서 단층과 지진발생과의 관계, 단층대의 지구물리학적 및 고지진학적 연구와 연대측정에 대한 연구가 수행되면서 많은 변화를 가져왔는데, 연구 초기에는 제4기 단층 존재 여부가 중요한 과제였고, 그 후 단층운동의 연대측정, 제4기 단층의 활동성 여부, 단층의 활동이력 등으로 진전하면서 연구가 확대 심화되고 있다.

이러한 연구과정에서 초기에는 제4기 단층의 확인만으로 원전의 위험성을 제기한

학자들도 있었으나, 원전의 설계기준지진 설정 절차에 따르면 제4기 단층이 발견될 경우 단층의 활동성 여부를 먼저 판단하고, 부지로부터 거리에 따른 단층의 길이를 파악하여 일정규모 이상의 단층에 대해서만 평가 대상이 되며, 활동성 단층이 아니거나 혹은 활동성 단층일 경우라도 거리에 따른 일정규모의 길이를 갖지 않을 때는 설계기준지진 평가에서 제외된다.

이와 같이 단층 지진원에 대한 지진재해 평가에서 단층의 활동성 여부 평가가 무엇보다 중요한 과제이나 지금까지는 단지 단층의 운동시기에만 기준을 두어 평가하는 경향이 많았다. 그러나, 단층대 내에서 연대측정을 위한 적절한 시료의 획득이 쉽지 않을 뿐 아니라 측정 결과에도 부분적으로 오차가 있을 수 있고, 또한 단층운동이 지구조적 운동의 결과인가 여부에 따라 해석을 달리 할 수 있기 때문에 많은 문제점으로 남아있었다. 이러한 문제점을 반영하고자 최근 확률론적 지진재해평가 및 단층의 활동도(activity of fault) 평가 방법들이 제시되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 양산단층대를 대상으로 단층의 활동도 평가의 국내 적용성을 검토하고자 하였다.

단층의 지진 유발성(seismogenic) 정도 혹은 단층의 활동도를 평가하는 것은 지진재해 평가에서 매우 중요한 요소로서, 이와 관련하여 우선적으로 평가되어야 하는 것이 지질구조가 지구조적인가 혹은 지진유발 가능한가를 평가하는 것으로, 평가방법은 지진발생과 직접적 혹은 간접적으로 관련되어 있는 파라미터들을 도출하고 각각의 기준에 대한 상대적인 중요도를 설정하여 평가하게 된다.

먼저 단층의 활동도 평가에는 단층의 선형구조와 역사지진 혹은 계기지진의 분포에 따라 지진과 단층과의 공간적 상호관계가 중요한 요소로 판단되며, 그 외에 단층의 지하심도 연장성, 현재 지구조 응력체계와 단층의 운동슬립 관계, 단층의 재활동에 의한 반복적인 사건(multiple episodes) 등이 활용될 수 있을 것이며 이들을 상대적인 중요도를 고려하여 평가하게 된다. 평가요소 및 상대적인 중요도는 1~10 사이에 값을 가지며 본 연구에서는 US NRC(Hanson *et al.*, 1999)에서 제시한 절차가 비교적 적절하다고 판단하여 이를 활용하였다(표 3-2).

지진성 정도를 평가하는 것이 지진재해평가에서 단층을 특성화하는데 있어서 매우 중요한 요소이다. 지진재해평가에서 어떤 지질구조가 지구조적 기원인가 혹은 비지구조적 기원인가 또는 어떤 선형구조가 지진성인가 아닌가를 평가하는데 사용되는 기준과 각 기준들의 상대적인 가중치를 명확히 하는 것이 중요하다. 여기서 상대적인 가중치는 지구조성 구조가 지진성인가를 나타내는 매우 중요한 표현방법이다. 즉, 어떤 구조가 지진성의 특징을 잘 지시하는 지시자이면 높은 상대적인 가중치를 나타낼 것이다. 예를 들면 만약 역사기록에서 규모 5 이상의 지진과 공간적

으로 연관이 있는 지구조성 구조는 지진성이 될 가능성이 매우 높을 것이며 이는 향후에 규모 5 이상의 지진을 일으킬 가능성을 암시한다.

또 다른 경우에는 지구조 특성이 지진성이나 아니냐를 판단하는 기준으로 상대적으로 약한 지시자로서의 역할을 할 수 있다. 이러한 경우의 한 예가 지질시대 동안 재활동(reactivation)의 반복적인 사건을 경험한 기준들이 있을 수 있다. 전세계 안정지괴지역에서 지진발생을 연구한 결과에서는 관찰된 중규모에서 대규모의 지진들이 여러번의 재활동한 구조와 연관이 있음을 제시하였지만, 다른 한편으로는 지진과 큰 연관이 없다는 결론이었으며, 또한 지진성의 기준으로 낮은 평가를 제시한 결과도 있어 이 기준은 상대적으로 낮은 가중치로 평가하였다. 제안된 기준들과 상대적인 중요도를 보면 아래와 같이 나타난다.

표 3-2. 단층의 활동도(지진 잠재성)를 평가하기 위한 제안된 기준과 상대적인 가중치(Hanson *et al.*, 1999)

| Seismogenic Criteria | Relative Weight(W) (1~10) |
|---|------------------------------|
| Spatially associated with large-magnitude($M > 5$) seismicity | 7 |
| Spatially associated with small-magnitude($M < 5$) seismicity | 6 |
| Extends through seismogenic crust(at least 10 km) | 2 |
| Displays evidence for brittle fault slip in present regional stress/tectonic regime | 2 |
| Displays evidence for multiple episodes of reactivation | 2 |
| Sum of Weight | 19 |

이 기준들은 어떤 단층이 장래에 규모 5 이상의 지진을 일으킬 수 있을 것인가를 판단하기 위한 진단적인 정보이다. 이러한 기준들은 지진활동의 증거가 불명확한 잠재적인 지진원의 평가에 유용하다. 그러나 만약 어떤 기준들이 분명하고 잘 문서화되어 있다면 사용할 필요가 없을 것이다. 예를 들면 어떤 단층이 규모가 큰 역사지진과 연관이 있거나 혹은 제4기 후기 반복적인 단층변위의 증거를 분명히 보여준다면(판 경계지역의 활동성 단층과 같이) 그 단층은 지진성의 확률, 단층의 활동도를 100 %로 평가할 수 있을 것이다. 그러나 만약 이러한 아주 뚜렷한 진단기준이 특정한 지체구조성 구조에 나타나지 않는다면 이러한 구조의 지진성 잠재성(seismogenic potential)에는 불확실성이 존재하게 된다. 이러한 불확실성은 1.0 보다 작은 확률로 표현되어진다. 각각의 기준에 할당되는 상대적인 가중치는 지체구조

특성들이 지진성과 얼마나 연관이 되는가를 진단하는데 있어서 정도를 나타낸다. 물론 어떤 주어진 특성들이 어느 정도의 특성을 나타낼 것인가는 이들을 평가하기 위한 자료들의 유용성 여부에 달려있을 것이다. 만약 특별한 기준이 될만한 자료들이 존재하지 않는다면 그 기준은 평가에 사용될 수 없을 것이다. 실제로 특정 지구조 증거들이 직접 혹은 간접적으로 완전히 나타나지 않는 경우는 드물다. 대부분의 경우 어떤 종류의 판단기준들이 비록 높은 불확실성을 가지고 있겠지만 부분적으로 활용할 수 있을 것이다.

3. 단층과 지진발생의 공간적 관계

단층의 활동도를 평가함에 있어서 첫번째 기준은 단층이나 선형구조가 중-대규모 지진과의 공간적 연관성을 가지는 경우이다. 중-대규모의 지진들은 역사시대 혹은 계기지진 관측기간 동안에 나타난 것으로, 여기서 말하는 공간적 관계라는 것은 어떤 지구조적 양상이 지진성을 나타낼 수 있는 성인적 관계를 말하는 것이 아니라 단지 특정 지구조적 양상이 관찰되어지는 지진과의 공간적 분포를 말하는 것이다. 여기서 공간적 관계라는 것은 단층이나 선형구조와 같은 주어진 지체구조적 양상이 그 길이를 따라서 지진발생의 위치 배열이 서로 연관이 있는 가로 정의하고 있다. 이러한 정의를 적용하기 위해서 공간적 관계는 단지 2차원적(map view)으로만 생각하는데, 그 이유는 지진의 심도에 관해서는 그 자료들이 신뢰성 있게 확보하는 것이 용이하지 않기 때문이다. 이러한 기준들과 연관된 불확실성은 특히 낮은 지진 활동 환경에서는 역사지진 기록이 큰 지진의 재발주기보다 훨씬 짧기 때문에 유래한다.

결국 하나의 역사지진 사건의 출현 혹은 많은 관측자료가 없다는 것은 드물지 않다. 부가적으로 진앙지 위치의 불확실성 때문에 특정 지질구조와 오래된 역사지진과 연관시키는 것이 어렵고, 가끔 관측된 계기지진들도 알려진 단층과 연관시키는 것이 쉽지 않다. 이러한 기준들은 활동성 평가에 있어서 비교적 높은 상대적인 비중을 두며(가중치 7), 규모 5 이상의 지진과의 공간적 관계가 성립한다면 그 기준은 향후 규모 5 이상의 지진이 발생할 수 있다는 잠재성을 지시하는 것이다.

만약 진원심도와 지진진원기구와 같은 자료의 활용이 가능하다면 주어진 지질구조의 향후 지진발생 가능성을 확증하는데 활용될 수 있을 것이다. 이러한 자료들은 항상 가능한 것이 아니기 때문에 경우에 따라서 가능한 범위에서 활용될 수 있을 것이다.

두 번째 기준은 작은 규모($2 < M < 5$)의 지진과 지질구조와의 공간적 관계를 말하

는 것인데, 지진성 단층의 경우 미소지진 발생과 연관되어지는 경우가 흔하다. 그러나 이러한 지진과 단층 혹은 선형구조와의 관계는 큰 지진을 발생시키는데 필수적인 것으로 지시하지는 않는다. 이러한 이유 때문에 이 기준은 중간이상의 가중치를 가지지만 중-대규모 지진의 지진과 단층과의 공간적 관계가 지시하는 기준보다는 그 확실도가 작다고 할 수 있을 것이다.

지체구조적 양상과 지진발생의 공간적 관계를 설명하기 위하여 아래 그림과 같이 평가기준을 나타내보았다(그림 3-6). 다음 그림의 C에서처럼 지진발생의 배열이 지체구조적 양상의 길이에 따른 배열이 분명할 때에는 단층의 활동도 즉, 단층의 지진성 확률은 100%를 가지는 지진발생과 공간적 배열로 평가될 수 있을 것이다. 이 경우에 있어서 오래된 역사지진에 있어서 위치의 일치성이 빈약한 면이 있지만 역사지진 및 계기지진 모두가 일관된 모양을 보인다. 그림 A는 하나의 기록된 지진만이 지질구조와 일치성을 보일 뿐 다른 것들은 그 근처에 나타나고 뚜렷한 배열의 일치성을 보이지 않는다. 이 경우 확률을 0.1로 평가하였다. 지진발생과 지질구조의 공간적 관계를 나타내는 또 다른 예는 그림의 B의 경우인데 지진발생이 한쪽 선단에 집중적으로 나타나며 지질구조와 직각으로 혹은 지질구조로부터 멀리 떨어지는 양상을 보이고, 나머지 지진의 분포는 분산되어 있으며, 무작위의 배경지진과 구별하기가 쉽지 않다. 이러한 경우에 0.2의 확률을 가지는 지진발생과 공간적 관계의 확률을 평가하였다. 두개 이상의 지질구조가 인접하고 있거나 혹은 교차한 경우에 근처에 있는 지진들은 어떤 지질구조와 연관이 있을 것이다. 즉, 하나의 지진발생 군집이 3개의 지질구조와 인접하고 있을 경우 각각의 지질구조들의 개별적인 평가에 고려되어진다.

결국, 판 경계지역의 활동성 단층과 같이 어떤 단층이 규모 5 이상의 큰 지진(계기지진 및 역사지진)과 연관성을 보여준다면 혹은 제4기 후기 반복적인 단층변위의 증거를 분명하게 보여준다면 이 단층은 지진 유발 단층이라고 100 % 확신을 가질 수 있을 것이며, 규모 5 이하의 미소지진과 연관성은 큰 규모 지진과의 연관성보다 지진유발 단층을 평가함에 있어서 신뢰성이 보다 작다고 평가할 수 있을 것이다(그림 3-6).

본 연구에서는 단층과 지진발생과의 관계를 살펴보기 위하여 역사지진 169개와 계기지진으로는 기상청(1978~2005) 지진자료 21개와 한국지질자원연구원(1994~2005)의 계기지진 105개를 활용하였다. 역사지진의 경우 먼저 진도를 규모로 환산하였으며, 경상분지에서 기록된 지진에서 환산된 지진규모에 따라 규모 5이상 및 5이하로 구분하고 이들을 도시하였다. 계기지진자료는 국내 지진관측 시스템이 비교적 폭 넓게 설치된 기상청의 1978년 이후 자료들을 활용하였으며, 특히 디지털 관측

장비가 본격적으로 설치되어 신뢰도가 높다고 판단되는 1994년 이후의 한전 전력연구
 구원 및 한국지질자원연구원의 자료들을 근거로 분석하였다. 계기지진자료들은 경
 상분지 내에서는 규모 5이상의 지진이 관측되지 않았고 모두 규모 5이하의 지진이
 다(표 3-3).

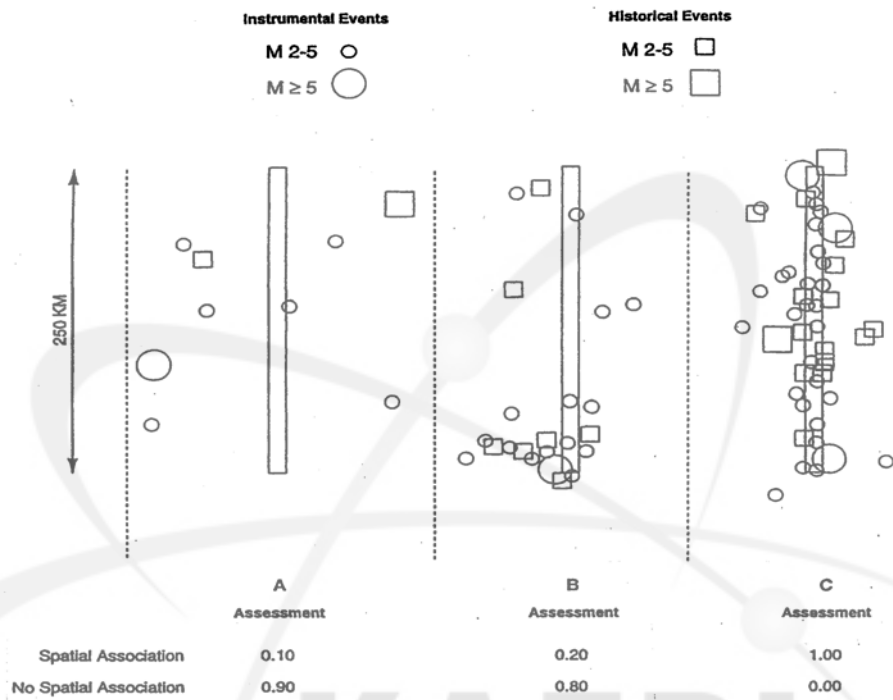


그림 3-6. 단층과 지진 진앙지와의 공간적 상관관계를 평가하기 위한
 평가 기준(Hanson *et al.*, 1999)

표 3-3. 지진자료 분석을 위하여 활용된 역사 및 계기지진 자료

| 구 분 | 자료 목록 및 지진기록 자료수 |
|------|-----------------------------|
| 역사지진 | 이기화(123개) |
| | 기상청(26개) |
| | 경제북(20개) |
| 계기지진 | 기상청(1978~2005 / 21개) |
| | 한국지질자원연구원(1994~2005 / 105개) |

지진발생과 단층과의 상관관계를 통한 단층의 활동도 평가를 위하여 규모 5이상의 지진과 5이하의 지진으로 구분하여 분석하였다. 역사지진에서 보여주는 규모 5이상의 지진과 단층과의 관계에서는 일부 진앙지가 양산단층대에 위치하고 있지만 진앙지와 양산단층대와 직접적으로 연관성을 찾기가 쉽지 않아 그 상관도를 약 0.1로 추정하였다. 규모 1이상 5이하의 지진에 대해서는 역사지진 뿐 아니라 계기지진 자료를 복합적으로 고려하였는데, 울산단층대 북부와 동측부에 집중되는 모습을 보이나 단층과 선형적인 뚜렷한 관계로 판단하기 어려우며 보수적으로 판단하여 단층과의 공간적 관계를 0.2 정도의 상관성으로 평가하였다(그림 3-7, 3-8).

따라서 한반도 동남부에 많은 제4기 단층들이 발견되고 있지만 실질적으로 역사시대 이래 지진발생과의 공간적 관계를 통한 단층의 활동도를 평가할 때 지진발생이 특정 단층과 직접적인 관계를 보여주기 보다는 오히려 배경지진의 특성으로 볼 수 있는 것처럼 분산된 양상을 보인다.



KAERI

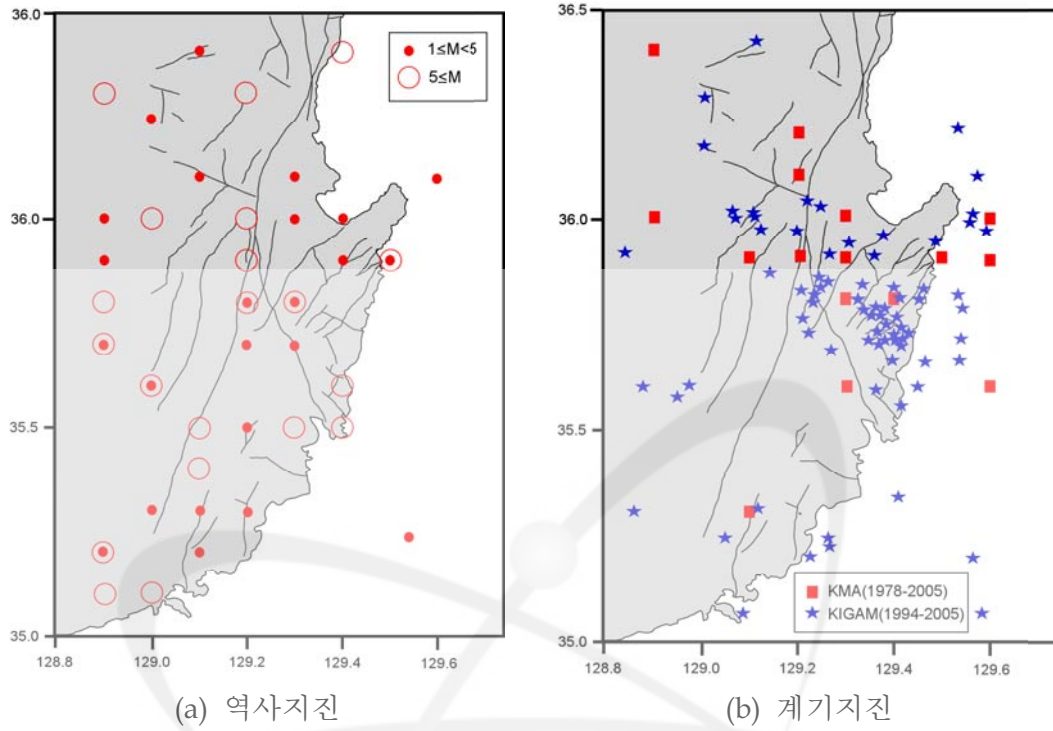
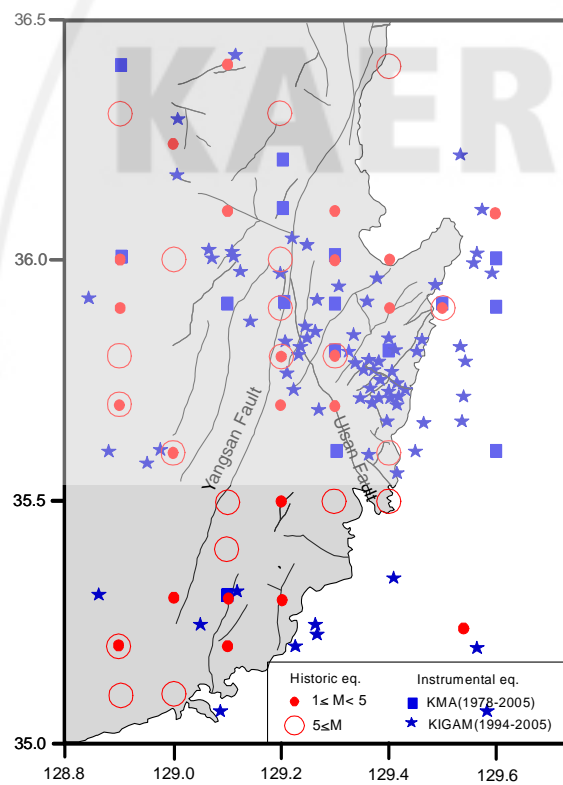


그림 3-7. 경상분지 내에서 발생한 역사지진과 계기지진의 규모 및 진앙지 분포

그림 3-8. 한반도 남동부 주요단층과 역사지진 및 계기지진의 진앙지 분포 관계



4. 지구조 응력장과 단층운동

다음으로 단층의 활동도 평가기준으로는 현재 지체구조 환경의 응력장과 일치되게 보여주는 취성단층의 운동학적 증거이다(그림 3-9). 연성변형과 연관된 단층구조들은 지각의 지진대(seismogenic zone) 보다 깊은 지구조 환경에서 발생하는 변형 사건을 보여주기 때문에 여기서는 취성변형 구조만을 고려하기로 한다. 지진성 단층들은 지진이 지구조 응력의 방출에 의해 나타나는 것이기 때문에 지진성 단층은 현재 지구조 응력장과 일치되는 방향성을 보여준다. 그러나 다른 증거가 없는 경우 단층의 3차원적 기하특성과 주응력장의 방향, 암석의 유동학적 특성에서 그 방향성이 얼마나 일치하는가에 따라 지진성 단층을 평가하는데 활용할 수 있을 것이다. 이 기준만으로 지진성을 평가하는데 있어서 충분하지 않기 때문에 비교적 낮은 가중치를 부여한다(2의 가중치).

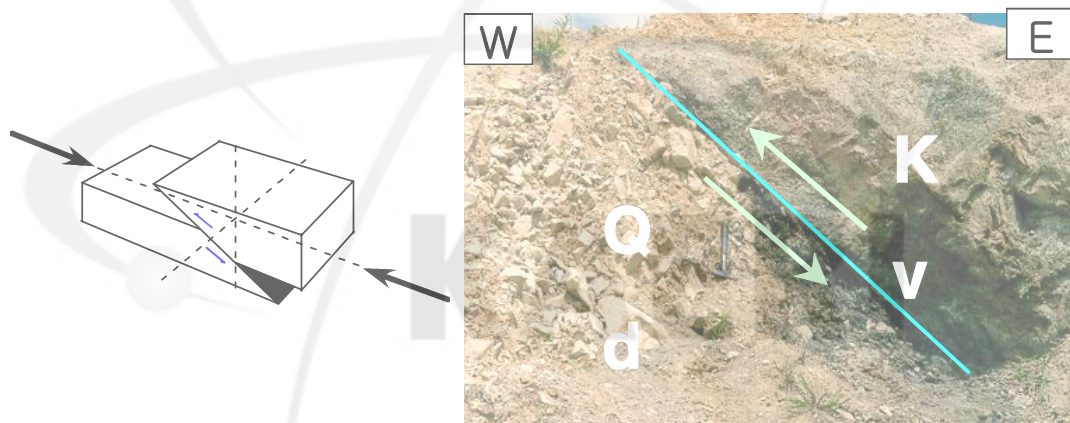


그림 3-9. 단층슬립-응력장의 관계 및 양산단층대 유계리 지역에서 발견된 제4기 단층

먼저 한반도 남동부의 지구조 응력장에 대해서 살펴보기로 한다. 양산단층의 발달과정을 포함한 한반도 남동부의 지구조 응력장을 설명하려면 먼저 백악기 말 불국사변동을 고려하지 않을 수 없으며, 불국사변동과 함께 양산단층의 운동이 고제3기의 팔레오세부터 시작했다고 생각할 수 있다. 이는 양산단층의 단층비지로부터 시료를 채취한 연대측정 결과로부터 짐작할 수 있다. 다음으로 양산단층의 운동을 지배했던 요인들로 동해의 확장과 일본열도의 회전과 같은 주변 지구조 사건의 체계로 설명될 수 있을 것이다(Otsuki and Ehira, 1978; Otofui *et al.*, 1985;

Lallemant and Jolivet, 1986; Celaya and McCabe, 1987, Yoon and Chough, 1995). 이들 결과를 종합하면 에오세 말에 NW-SE 방향으로 일본열도의 분리가 시작되면서 동해의 형성이 이루어지기 시작하였고, 이후 약 18 Ma를 기점으로 한 동해의 확장은 NNW-SSE 방향으로 변하게 되는데(Otsuki and Ehira, 1978) 이 시기에는 동해의 남단에 위치하고 있는 야마토해분과 울릉해분의 형성시기이다. 그후 약 12~15 Ma에 와서는 남서일본의 시계방향 회전사건과 결부되어 대한-쓰시마 해역은 좌향전단력과 WNW-ESE 방향의 횡압력의 지배 하에 들어가게 된다. 그리고 10 Ma 를 전후해서 일본열도의 회전은 정지된다. 대부분의 연구는 마이오세 말 일본열도의 회전 정지 이후에 대한 지구조 체계에 대해서 자세한 언급이 없다. 최근 발견되고 있는 제4기 단층들의 형상과 지진진원기구로 밝혀진 현재의 응력장의 최대 압축응력 방향이 ENE-WSW 방향이라는 사실과 이 응력장은 일본에서 밝혀진 연구결과를 비교하여 과거 0.5 Ma 이후라고 설명하고 있고, 그 이전에는 수평의 주압축방향이 남북으로 작용하였다(Okada *et al.*, 1998).

현재 지구조 응력체계(current stress regime)와 제4기 단층들에서 나타난 단층슬립(fault slip)과의 관계를 살펴봄으로서 단층운동이 현재 지구조 응력체계 하에서 이루어진 것인가를 판단할 수 있는 기본 자료로 활용할 수 있을 것이다. 현재 한반도를 중심으로 지구조 응력체계는 여러 가지 방법으로 알 수 있다. 그 중 가장 흔히 활용되고 있는 것이 계기지진의 P파 초동을 이용한 지진발생기구(focal mechanism)를 들 수 있다. 1936~1996년 사이 발생한 22개의 지진자료를 이용한 지진발생기구에 의한 응력장은 대체로 주향이동성을 갖는 것이 많으며 부분적으로 역단층성 자료를 보여주고 있다. 또한 이들의 최대압축 주응력 방향은 E-W 혹은 ENE-WSW 방향을 보여주고 있으며(그림 3-10), 전세계 응력장 지도에서 보여주는 한반도 주변의 응력장(그림 3-11), 수압파쇄 실험(그림 3-12)에 의한 결과도 유사한 결과를 보여준다.

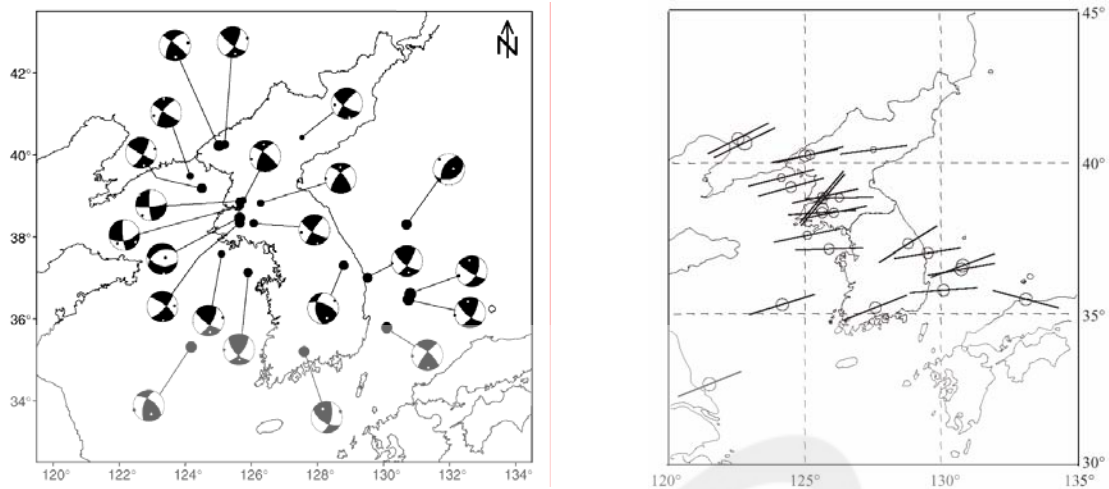


그림 3-10. 지진발생기구에 의한 응력장(왼쪽)과 최대수평압축응력 방향(오른쪽)
1936~1996년, 22개의 계기지진자료(Jun *et al.*, 1999)

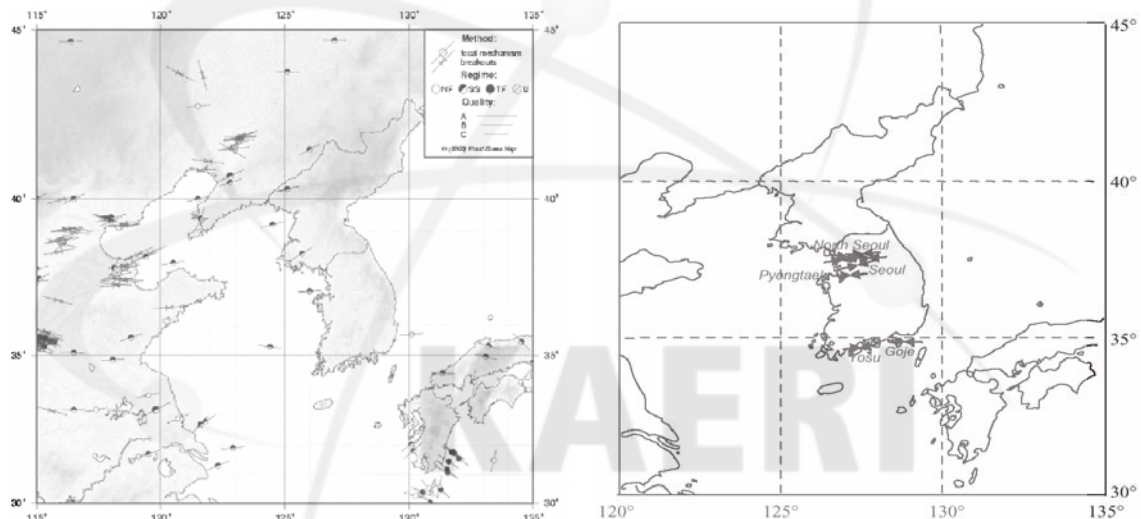


그림 3-11. 전세계 응력장 지도에서 보여주는 최대 수평 압축응력의 방향
(Reinecker *et al.*, 2003)

그림 3-12. 수압과쇄법에 의해 얻어진 최대수평압축응력 방향(Haimson *et al.*, 1999)

이러한 한반도 주변 현재 지구조 응력장의 방향성을 근거로 현재 지구조 응력 체계와 제4기 단층운동과의 관계를 파악하기 위하여 양산단층, 울산단층 및 동해안 지역에서 발견된 제4기 단층 중 단층운동의 슬립을 잘 보여주는 야외 증거들을 가지고 운동성을 평가해보았다. 양산단층을 따라서 유계리, 반곡리, 벽계리, 상천리, 월평리 지역의 제4기 단층에서 관찰되고 있는 단층슬립과, 울산단층 지역을 따라서 왕산, 감산사, 개곡, 입실, 원원사 및 이화에서 발견된 제4기 단층의 단층슬립을 분석하여 단층의 배향과 단층운동의 슬립을 입체투영으로 도시하였다(그림 3-13).

양산단층을 따라서 발견된 제4기 단층들은 유계지역을 제외하고는 모두 고각도

경사를 가지면서 주향이동성을 보여주고 있으며, 울산단층 지역의 경우에는 감산사와 원원사 지역의 경우 저각을 가지고 있으며 역단층성 운동을 보여주고 있다. 지구조 운동체계와 단층운동의 관계를 해석해보면 양산단층을 따라서 나타나는 주향이동성 단층의 경우 앞서 설명한 현재 지구조 응력체계인 ENE-WSW 방향의 최대 주압축응력 방향과 설명이 곤란한 부분도 있으나, 양산단층 지역의 유계리와 같이 남북방향에 동측경사를 하고 있는 역단층의 제4기 단층운동과 울산단층 지역에서 보여주는 남북 방향에 동측경사를 가지는 역단층성 제4기 단층운동은 현재 지구조 응력체계와 잘 부합된다고 할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 관계는 소단층들의 주향에 따라 같은 응력체계 하에서도 다양한 단층 스립을 보일 수 있고, 또한 국지적인 지진자료를 분석하여 단층운동과 직접적인 연관성을 분석해야하기 때문에 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

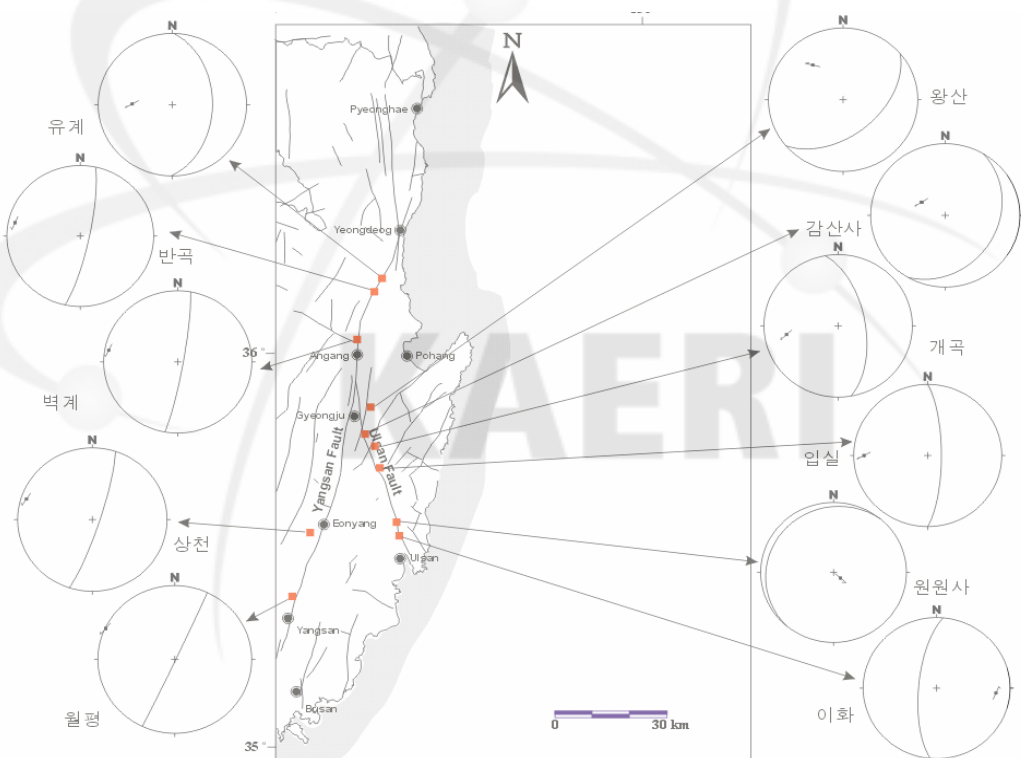


그림 3-13. 양산단층과 울산단층대를 따라 발견된 제4기 단층과 제4기 단층면에서 발견된 단층운동의 슬립을 도시한 입체투영

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 지구조 응력체계와 단층운동이 일치되지 않은 부분도 있지만 지구조 응력장 해석 자체의 불확실성을 감안하고, 또한 전반적인 제4기 단층의 운동이 남북방향에 동측경사를 보여준다는 사실에 근거하여 보수

적으로 평가하여 지구조 응력장과 단층운동과의 상관관계를 80 %로 평가하였다.

5. 단층의 재활동에 의한 다중운동 사건

단층의 활동도 평가를 위한 또 다른 기준 중의 하나는 단층의 재활동에 관한 다중 사건(multiple episodes)의 증거이다. 서로 다른 지질시대 동안 혹은 서로 다른 지구조 단계 동안에 활동한 단층은 지각에서 연장성이 좋은 지구조적 단층과 연관성을 갖기 쉽다. 대규모 단층들은 오랜 지질시대 동안 재활동에 의해 연속성을 가지기도 하며, 우리나라와 같은 비교적 지진활동이 덜 활발한 안정대륙에서 관찰한 결과를 보면 지구조 단층과 지진과의 연관성에 대해서 큰 규모의 지진은 재활동 운동을 경험했던 지질구조와 연관성이 있음을 발견하였다. 물론 이러한 지질구조 중에서도 직접적인 연관성을 보이지 않은 경우도 드물지 않다. 따라서 재활동에 의한 다중운동의 기준은 앞서 설명한 지진규모와 단층과의 관계보다 상대적으로 비중을 낮게 고려하여 평가하였다.

양산단층과 울산단층을 따라 발견되는 단층들에서는 재활동에 의한 증거들을 쉽게 찾을 수 있다(그림 3-14).

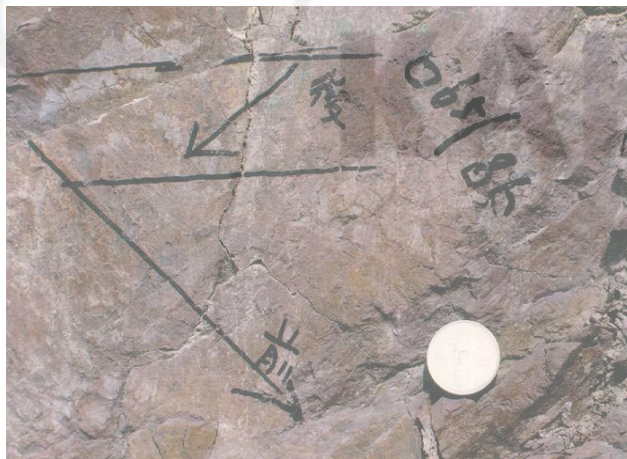


그림 3-14. 양산단층의 다중운동 증거로서 동일한 단층면에서 중복 운동 슬립의 현상

특히 양산단층이 경우 오랜 지질시대 동안 많은 사건을 경험하면서 서로 다른 지구조 환경 하에서 다중변형 작용을 받은 것으로 해석되고 있을 뿐 아니라 최근 지질시대에 와서도 다중 변형을 받은 증거를 잘 보여주고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 재활동에 의한 다중변형 작용에 의한 단층의 지진유발성과의 상호관련성은 충분한 보수성을 감안하여 80 %로 평가하였다.

6. 단층의 지하심부 연장성

단층의 지하심부로의 연장성은 큰 규모의 지진발생과 단층파열을 야기하는 지구 조성 단층들이 지각하부까지 연장되어 타나나는 것이 일반적이다. 이러한 사실 때문에 단층의 지하 지각 연장부에 대한 정보는 단층이 지진 유발성 정도에 대한 정보를 제공할 수 있기 때문에 단층의 지하심부 연장성은 단층의 활동도 평가의 기준이 될 수 있을 것이다. 그러나 단층의 지하심부 연장성 자체로만 어떤 단층이 지진유발 가능성을 평가하는 판단자료로 절대적인 증거가 되지 않을 뿐 아니라 중규모의 지진인 10 km 보다 낮은 천부에서 발생한 경우도 있기 때문에 지하심부 연장성에 대한 요소는 단층의 활동도 평가요소로서 그 비중을 낮게 고려하였다.

한반도 동남부 양산단층대 주변의 제4기 단층에 대해서 정밀한 지구물리 탐사 혹은 지진의 진원심도에 대한 연구결과들이 충분하게 수행되지 않았기 때문에 정확하게 평가할 수 없지만, 일부 관찰된 지진의 진원심도가 12 km 내외로서 이들 지진이 제4기 단층과 부분적으로 연관성을 가지고 있다고 판단되어지고, 또한 기존의 제4기 단층들이 이와 같은 결과를 보여준다고 판단하여 약 80 %로 매우 보수적으로 평가하였다.

7. 확률론적 단층과 지진의 상호 관련성 평가

어떤 단층이 지진성의 정도를 계산하기 위해서는 먼저 특정 지질구조에서 각각의 기준에 따라 지진성의 정도를 확률로서 평가하는데, 예를 들면 여기서 $M > 5$ 이상의 지진과의 공간적 연관성에 대한 확률에 대해서 일정한 값을 주고, 주어진 지질구조가 지진성인가에 대한 확률을 계산하기 위하여 각 기준에 대한 확률값과 상대적인 가중치를 곱하여 계산하고, 이들을 합한 후 전체 기준의 가중치를 나누어 구한다.

양산단층과 울산단층 지역에서 발견되고 있는 제4기 단층을 포함한 주단층들의 활동도를 평가하기 위하여 단층-지진관계에서 규모 5이상의 지진의 경우 단층과 공간적 상관도를 0.1로 평가하였고, 규모 5이하의 지진에 대해서 단층-지진발생과의 관계를 0.2로 평가하였으며, 단층의 심도에 대해서는 보수적으로 평가하여 0.8, 지구조 응력체계와 단층슬립의 관계도 보수적으로 고려하여 0.8로 고려하고, 제4기 단층의 재활동에 의한 다중변형 관계를 0.8로 평가했을 때 양산단층과 울산단층에서 관찰되는 제4기 단층들의 활동도 혹은 지진유발 확률을 종합적으로 살펴볼 때 0.35로

평가되었다(표 3-4).

원자력발전소 부지조사의 제일 중요한 목적은 지진원이 지표변형과 지진을 일으킬 가능성이 있는가를 평가하기 위한 것이다. 이에 따라 단층이 발견되었을 경우 충분한 조사를 통하여 이 단층이 발전소의 안전성을 떨어뜨리지 않고, 원전 시설에 위험을 초래하지 않는다는 것을 입증해야 한다. 이러한 이유로 모든 평가는 명백히 증명될 수 있도록 충분한 자료가 제시되어야 하지만, 지질현상에 대한 장기간의 효과를 공학적으로 항상 만족스럽게 증명하기 쉽지 않으므로, 지표나 지표근처에서의 변형에 대한 잠재성이 있는 부지는 가능하면 피하는 것을 권고하고 있다. 이에 따라 의심할만한 지질구조가 있을 경우, 원전부지 기준에 따르면 이 지질구조가 활동성이 아님을 입증하지 않으면 우선적으로 활동성이라고 가정하고 평가해야하므로 지질학적, 지진학적, 지구물리학적, 지질공학적 및 구조지질학적 조사 등 다양한 방법의 평가결과들이 제시되어야 한다.

이러한 관점에서 본 연구에서 수행한 단층의 활동도 평가는 단지 국내에서 처음 적용한 방법으로서 본 연구에서 평가된 각 파라미터들은 초기연구로서 매우 보수적으로 평가하였으며, 본 연구결과만으로 살펴볼 때 양산단층과 울산단층에서 관찰되는 제4기 단층들의 활동도는 매우 낮다고 할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 결과는 현재까지 야외조사에서 관찰되는 자료들만을 근거로 평가한 것으로 충분한 자료가 제공되지 않았을 뿐 아니라 고액상화(paleo-liquefaction) 등과 같은 다른 평가요소들이 추가로 고려해야 하며, 또한 단층대를 따라 트렌치 조사와 같은 고지진학적 연구와 같은 상세한 야외 지질조사를 바탕으로 정밀한 연구가 후속적으로 추진되어야 정확한 평가가 가능할 것이다.

지진성 단층의 평가를 위한 또 다른 기준으로는 미소지진($M < 2$)의 공간적인

표 3-4. 단층 활동도의 정량적 평가 결과

| Criterion | Weight | Probability | Product |
|--------------------------|--------|-------------|---------|
| Association($M > 5$) | 7.0 | 0.1 | 0.7 |
| Association($M < 5$) | 6.0 | 0.2 | 1.2 |
| Crustal Extent | 2.0 | 0.8 | 1.6 |
| Brittle Slip | 2.0 | 0.8 | 1.6 |
| Multiple Reactivation | 2.0 | 0.8 | 1.6 |
| Sum of Products | | | 6.7 |
| Sum of weights | | | 19.0 |
| Probability(Seismogenic) | | | 0.35 |

분포를 제시하는 국지적인 지진관측망 혹은 지질학적으로 최근 운동한 단층작용의

증거를 이용한다던가 혹은 고액상화 현상과 같은 고지진학적 지진동 증거들을 이용할 수 있을 것이다. 이러한 자료들은 지질구조가 지진성인가를 평가하는데 그 가능성을 제시할 수 있을 것이다.

앞에서 언급한 “지진활동과 공간적 관계”는 지체구조적 단층과 지진활동과의 사이에 2차원적(map view) 관계를 근거로 하고 있다. 어떤 경우에는 진원 심도에 관한 지진자료를 확보할 경우 3차원적인 자료를 제공할 수 있을 것이며 이 경우 지진활동과 단층의 지각 연장성을 연관지을 수 있을 것이며, 단층면과 진원기구에서의 단층면이 일치하는가를 확인하는 지진진원기구(focal mechanism), 관심 있는 단층에서 운동학적 지시자가 일치하는가를 나타내는 응력텐서, 미소지진($M < 2$)의 공간적 분포, 지진동시성 파괴면의 기하특성을 정의하는 여진들의 공간적 분포 등을 이용할 수 있을 것이다.

또한 부가적으로 생각할 수 있는 것이 지질학적으로 제4기 지체구조적 변위 증거를 들 수 있을 것이다. 제4기 지질학적 기록의 시간은 역사기록보다 훨씬 긴 간격을 가지며, 큰 규모의 지진($M > 6$)들이 지표파괴로서 전형적으로 기록된다. 환경계 환경에서 이러한 기준은 특정 단층이 활동성 인가 아닌가를 판단하는 1차적인 도구가 된다. 지체구조적으로 활발하지 않은 지역에서는 이러한 기준을 사용하는 것은 불확실성이 많은데 그것은 변위기 지체구조적인 원인인가 아닌가를 판단하기 어렵고 또한 단층운동의 슬립시기를 특정하기 어렵기 때문이다.

KAERI

제4장 결론

원자력 전력사업으로 발생하는 고준위폐기물의 안전한 처분은 우리 후손들의 안전을 담보하고 있으므로 최선의 지질학적 방법을 구축하기 위하여 모든 지질학적 불확실성을 검토 요건으로 하여야 할 것이다. 이를 위하여 한반도의 단층구조들과 선구조에 관한 연구 자료들을 종합하여 보았으며, 이러한 자료들이 가지는 응용력과 문제점들이 검토되었다. 우리나라 남동부에 밀집된 제4기 단층들에 대한 많은 연구결과들은 한반도 남동부에서 신기 지체구조운동에 대한 여러 가지 정보를 제공하고 있다. 그러나 제4기 단층의 운동특성, 재래주기, 변위율 및 최대지진규모 산정에는 아직도 많은 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 이러한 부분에 대하여 계속적인 연구가 이루어져야 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다고 본다.



KAERI

제5장 참고문헌

- 경재복. 1995. 지진발생과 지진 재해와의 관계-1995년 일본 효고현 남부 지진 (M=7.2)의 재해 유형-. 한국지구과학회지 16, 500-510.
- 경재복. 1999. 양산단층계 및 울산단층계의 지진활동과 구조. 한국과학재단 KOSEF 96-0703-050-01-03, 114-163.
- 경재복, 이기화, A. Okada, Watanabe, Suzuki. Y., Takemura, K. 1999. 양산단층대 남부 상천리 일대의 트랜치 조사에 대한 단층 특성 규명. 한국지구과학회지 20, 101-110.
- 경재복, 이기화. 1987. 한반도의 지진위험도 분석. 지질학회지 23, 229-241.
- 경재복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리 일대의 신기 단층운동. 지질학회지, 37, 563-577.
- 권성택, 이희권, 2001, 수렴단층(I): 운동시기. 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 46.
- 기상청. 1992. 1978-1992 지진관측보고. 기상청, 112p.
- 기상청. 2001. 2001 지진관측연보. 기상청, 53p.
- 김종열, 1998, 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구. 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 97p.
- 김종환, 강필중, 임정웅, 1976, Landsat-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계. 지질학회지, 12, 79-89.
- 류충렬, 경재복, 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.
- 류충렬, 이봉주, 최위찬, 최성자, 손문, 2001, 울산단층대 동변인 경주시 외동읍 개곡리 일원의 제4기단층 논의. 제56차 대한지질학회 학술발표회 요약집,
- 류충렬, 조등룡, 최위찬, 이봉주, 최성자, 이영준, 1999, 양산단층대 북부 청하 일원의 파쇄대 발달 특성. 대한지질공학회 1999년도 학술발표회 논문집, 83-91.
- 박영도, 이영준, 2001, 수렴단층(II): 단층의 변위와 길이의 관계. 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 47.
- 서정문, 최인길. 1998. 지진특성 및 가옥의 노후도를 고려한 역사지진의 지진규모

- 추정. 한국 지진공학회 논문집 2, 1-10.
- 손문, 정혜윤, 김인수. 2002. 한반도 남동부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지 38, 175-197.
- 오건환. 1977. 한반도 남동부 해안의 지형발달. 지리학평론 50, 689-699.
- 윤순옥, 황상일. 1999. 한국 남동부 경주지 불국사단층선 북부의 활단층 지형. 대한지질학회지 34, 231-246.
- 이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료. 지구물리, 1, 3-22.
- 이기화. 1999. 역사지진의 평가 및 목록작성. 한국원자력안전기술원
- 이동영, 김주용. 1990. 포항-연일 일대의 제4기 지질조사연구. 한국동력자원연구소 연구보고서(KR-90-1A-2), 65p.
- 이민성, 강필중, 1964, 양산도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 1-21.
- 이병주, 황재하, 1994, 기계-가음간 경상누층군 내에 발달하는 단층계. 대한지질학회 제49차 학술발표회, 초록집, p.86.
- 이병주, 김주용, 양동윤, 정혜경, 2000, 수렴리 일대에 발달하는 신기단층 및 해안단구의 층서고찰. 지질재해관측 및 방지기술 심포지엄 논문집, 133-149.
- 이봉주, 최위찬, 강필중, 1997, 한반도 동남부지역의 선구조선. 지질학회지, 33, 18-26.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999a, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35, 1-14.
- 이봉주, 최성자, 최위찬, 류충렬, 1999b, 양산 월평지역의 제4기 단층운동의 특성. 지질학회지, 35, 179-188.
- 이윤중, 이인기, 1972, 언양도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 1-22.
- 이진한, 이영준, 2001, 수렴단층(III): 재활성의 증거. 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 48p.
- 이진한, 이영준, 박영도, 1998, 경북 양남면 일대의 제4기 단층작용: 제3기 단층의 재활성. 대한지질학회 제53회 학술발표회 초록집, 49.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사. 지질공학, 8, 1, 35-49.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 조구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 장태우, 백용. 1995. 경주-어일간 제3기 분지의 지구조 운동. 지질학회지 31, 200-214.
- 장태우, 장천중, 김영기. 1993. 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석. 광산지질 26, 227-236.

- 장태우, 추창오, 1998, 동래단층지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령. 지질공학, 8, 175-188.
- 장태우, 추창오, 1999, 양산단층대의 단층작용과 단층비지의 K-Ar 연령. 한국지구과학회지, 20, 1, 25-37.
- 전명순, 정승환, 지현철, 전정수, 신인철, 1993, 지진연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-92-1G-3, 1-53.
- 정봉일. 1981. 한국의 고지진에 관한 연구. 지질학회지 17, 257-268.
- 정창식, 김정민, 이석훈, 정기영, 장호완, 최정현, 임창복, 장병욱. 2000. 울산 단층대 패륜, 마동, 개곡 단층과 왕산 단층비지에 대한 Rb-Sr, K-Ar 연대측정. 제55차 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 103p.
- 조화룡, 1997. 양산단층 주변의 지형분석. 대한지리학회지 32, 1-14.
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕 지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태. 지질학회지, 30, 379-394.
- 최범영, 류충렬, 권석기, 최위찬, 황재하, 이승렬, 이병주. 2002. 포항-울산 지역의 단층구조 분석 : 활구조 운동에 대한 접근. 지질학회지 38, 35-50.
- 최성자, 최위찬, 류충렬, 최범영, 임창복, 정창식. 2002. 울산단층 인접 동쪽의 단층 분절. 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회 2002년도 춘계 공동학술발표회 논문집.
- 최원학, 2003, 경주-울산간 신기 지체구조 운동의 연구. 서울대학교 박사학위논문, 205p.
- 최위찬, 류충렬, 기원서, 이봉주, 이병주, 황재하, 박기화, 최영섭, 최성자, 최범영, 조등룡, 김복철, 송교영, 채병곤, 김원영, 김충렬, 이상규, 조성준, 황세호, 황학수, 김유성, 현혜자, 박인화, 이희일, 이동영, 이창범, 김주용, 양동윤, 박덕원, 신성천, 김유숙, 김인준, 류장한, 진명식, 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 강익범, 신현모, 권무창, 오수정, 김상곤, 임무수, 김순길, 정향영, 1998a, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종보고서. 한국자원연구소, 한국전력공사, 1694 p.
- 최위찬, 이동영, 이봉주, 류충렬, 최범영, 최성자, 조등룡, 김주용, 이창범, 기원서, 양동윤, 김인준, 김유숙, 유장한, 채병곤, 김원영, 강필중, 유일현, 이희권, 1998b, 활성단층 조사평가 연구-한반도 동남부 지역-. 한국자원연구소 연구보고서 KR-98(C)-22. 301 p.
- 최위찬, 최성자, 조등룡, 이영준, 류충렬, 고인세, 신현모, 송미주. 2000. 신기지각변형 연구. 과학기술부, 한국자원연구소, 278p.
- 황재하 외 25인, 2000, 고응력장 변화와 지각변형사 연구, 한국자원연구소, KR-00

- (연차)-01, 220.
- 황재하 외, 2001, 한반도 지체구조도. 한국자원연구원.
- Chang, K., Woo, B., Lee, J., Park, S. and Yao, K., 1990, Cretaceous and Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 471-481.
- Choi, H. I. and Park, K. S., 1985, Cretaceous/Neogene stratigraphic transition and post-Kyongsang tectonic evolution along and off the southeast coast, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 281-296.
- 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 of Energy and Resources, Bulletin*, 20, 33 p.
- Choi, P. Y., Kwon, S. K., Hwang, J. H., Lee, S. R. and An, G. O. 2001. Paleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: tectonic sequence and timing of block rotation. *Geoscience Journal* 5. 1-18.
- Choi, S. G. 2001. Tectonic movement indicated by the Late Pleistocene paleoshorelines in the eastern coast of Korea. *Japanese Geomorphological Union* 22, 265-275.
- de Polo, C. M. and Slemmons, D. B., 1990, Estimation of earthquake size for seismic hazards. in E. L. Krinitzsky and D. B. Slemmons eds, *Neotectonics in earthquake evaluation*. Geological Society of America, *Review in Engineering Geology* 8, pp. 1-28.
- Cressler, C.W., Thurmond, C.J. and Hester, W.G., 1983, *Ground Water in the Greater Atlanta Region, Georgia*. Georgia Geological Survey Information Circular 63. Georgia Geologic Survey, Department of Natural Resources, Environmental Protection Division, Atlanta, Georgia.
- Hoshino, K., 1985, General remarks on tectonic movement of Korean peninsula. *Geology News*, 366, 28-46 (in japanese).
- Inoue, D., Miyakoshi, K., Miyawaki, A. and Mastuura, K., 2002, Active fault study in the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake area. *Chishin* 54, 557-573.
- Jeong, G. Y. 2002. Pedogenic process in the marine terrace deposits at the site of Suryum fault and its implications to the relative age of fault movement. *Annual meeting Proceedings of Geol. Soc. Kor.* 111.
- Jeong, G. Y., Bae. J. H. and Cheong, C. S., 2002, Origin of allophane and

- retardation of pebble weathering in Quaternary marine terrace deposits. *Clay and Clay Minerals*, 50, 145-156.
- Jolivet, L., Huchon, P., Lc 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 on the Korean Peninsula and Yellow Sea. *Tectonophysics* 192. 345-357.
- Hardcastle, K.C., 1995, Photolineament Factor: A New Computer-Aided Method for Remotely Sensing the Degree to which Bedrock is fractured. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 61, 739-747.
- Kang, P. J., 1979, Geological analysis of landsat imagery of South Korea (1). *Journal of the Geological Society of Korea*, 15, 109-126.
- Kyung, J. B. 1989. The characteristics of the seismicity of the Korean Peninsula. Ph. D. Thesis, Seoul National Univ.
- Kyung, J. B., 1997, Paleoseismological study on the Mid-northern part of the Ulsan Fault by trench method. *Jour. Eng. Geology*, 7, 1, 81-90.
- Kyung, J. B., Kim, S. K., Jo, W. R., Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Oike, K., 1997, Fault outcrops and geomorphic criteria of the occurrence of the great earthquake in the central part of the Ulsan Fault (Korea), *Proceedings of 50th Symposium, Geol. Soc. Korea*, 99.
- Mabee, S.B., Hardcastle, K.C. and Wise, D.U., 1990, Correlation of lineaments and bedrock fracture fabric: Implications for regional fractured bedrock aquifer studies, Preliminary results from Georgetown, Maine. *Proc. FOCUS Conf. on Eastern Reg. Groundwater Issues*, 3, 283-297.
- Nahm, G.Y., 1970, The tectonics in Korean Peninsula shown on the 1/250,000 scale relief maps. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 6, 53-60
- Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Chae, Y.H., Taniguchi, K., Ishiyama, T., Kawabata, D., Kaneda, H., and Naruse, T. 1999. Trench excavation survey across the Ulsan (active) fault at Kalgokl-ri, Kyongju City, Southeast of Korea. *Jour. Geography* 108, 276-288(in Japanese).
- 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).
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Jo, W. R., Kim, S. K. and Oike, K. 1995, Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, southeast Korea. *Proceeding of 1995 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting*(abstract).
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Jo, W. R., Kim, S. K., Oike, K. and Makamura, T. 1998, Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, southeast Korea. *Journal of Geography*, 107, 644–658 (in Japanese).
- Otsuki, K. and Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing spreading in the Japan Sea. *Journal of Physics of the Earth*, 26, 537–555.
- Reedman, A. J. and Um, S. H., 1975, *Geology of Korea*. Geological and Mineralogical Institute of Korea, 139 p.
- Sillitoe, R. H., 1977, Metallogeny of Andean-type continental margin in South Korea: Implication for opening of the Japan Sea. In: Talwani, M. and Pitman, W.C (eds.), *Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins*. Maurice Ewing series, 1, American Geophysical Union, 303–310.
- Yeats R. S., Sieh K., and Allen C. R. 1997. *The Geology of Earthquake*. Oxford Universal Press, 568.

| 서 지 정 보 양 식 | | | | | |
|---|-------------------|--|-----------------|---------|-----------|
| 수행기관보고서번호 | | 위탁기관보고서번호 | | 표준보고서번호 | |
| KAERI/TR-3831/2009 | | | | | |
| 제 목 / 부 제 | | 한반도 주변 지구조 운동과 단층-지진 관계에 대한 고찰 | | | |
| 연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자) | | 배 대 석 (방사성폐기물기술개발부) | | | |
| 연구자 및 부서명 | | 고 용 권(방사성폐기물기술개발부), 김 경 수(") 김 건 영("), 류 지 훈(") 박 경 우("), 지 성 훈(") 황 재 하(한국지질자원연구원), 기 원 서(한국지질자원연구원) 고 희 재(한국지질자원연구원), 김 유 홍(한국지질자원연구원) | | | |
| 출 판 지 | 대전 | 발행기관 | 한국원자력연구원 | 발행년 | 2009. 8 |
| 페 이 지 | 37 p. | 도 표 | 있음(○), 없음() | 크 기 | 21×29.7cm |
| 참고사항 | 원자력중장기과제 | | | | |
| 공개여부 | 공개(○), 비공개() | | 보고서종류 | 기술보고서 | |
| 비밀여부 | 대외비(), __ 급비밀 | | | | |
| 연구위탁기관 | | | 계약 번호 | | |
| 초록 (15-20줄내외) | | | | | |
| <p>원자력 전력사업으로 발생하는 고준위폐기물 처분장 부지 선정에서 부지의 안정성을 위하여서는 다양한 학제간의 기술들의 종합적인 검토가 요구된다. 반감기가 긴 방사성물질들의 안전한 처분은 우리 후손들의 안전을 담보하고 있으므로 최선의 지질학적 방법을 구축하기 위하여 모든 지질학적 불확실성을 검토 요건으로 하여야한다.</p> <p>한반도는 장구한 지질시대에 걸쳐 생성된 다양한 암석으로 구성되어 있으며 긴 구조운동의 역사를 거쳤다. 그러나 한반도의 구조 발달사를 설명하기에는 자료가 너무 제한되어 있으며, 신기 지구조운동에 관련한 한반도 지각변형사 특성을 이해하기 위해서는 한반도 조구조대(tectonic belts) 형성과정, 조산운동 특성 및 신생대 지각변화 특성등을 파악하여야 한다.</p> | | | | | |
| 주제명키워드 (10단어내외) | | 단층, 지구조 운동, 단층의 지질학적 특성, 지진 | | | |

| BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET | | | | | |
|---|--|---|--|--|-----------|
| Performing Org. Report No. | | Sponsoring Org. Report No. | | Standard Report No. INIS Subject Code | |
| KAERI/TR-3831/2009 | | | | | |
| Title / Subtitle | | Tectonic Movement in Korean Peninsula and Relation between Fault and Earthquake | | | |
| Project Manager and Department (or Main Author) | | Dae-Seok Bae (HLW Disposal Research Division) | | | |
| Researcher and Department | | Yong-Kwon Koh(KAERI), Kyung-Su Kim(") Geon Young Kim("), Ji-Hun Ryu(") Kyung Woo Park("), Sung-Hoon Ji(") Jae-Ha Hwang(KIGAM), Won-Seo Ki(KIGAM) Hee-Jae Koh(KIGAM), Yu-Hong Kim(KIGAM) | | | |
| Publication Place | | Publisher | Korea Atomic Energy Research Institute | Publication Date | Aug. 2009 |
| Page | 77 p. | Ill. & Tab. | Yes(○), No () | Size | 21×29.7cm |
| Note | Long Term Nuclear R&D Project | | | | |
| Open | Open(○), Restricted(), | | Report Type | Technical Report (TR) | |
| Classified | Restricted (), Class Document | | | | |
| Sponsoring Org. | | Contract No. | | | |
| Abstract (15-20 Lines) | | | | | |
| <p>The objectives of the research are to study geological faults and related geological processes such as tectonic processes and earthquake to select a safe site for the high level radioactive waste disposal consequently. The results from this study show the significance of faults evaluation and develop methods to analyze geological data related to faults such as tectonic processes and earthquake, which are important data for the site selection.</p> | | | | | |
| Subject Keywords (About 10 words) | | geological faults, geological processes related to faults, tectonic processes, earthquake | | | |