

KINS/HR-540

# 단층암에 대한 ESR 연대측정 연구

ESR dating of fault rocks

2003. 2

연구기관

강원대학교



한국원자력안전기술원

# 제 출 문

한국원자력안전기술원장 귀하

본 보고서를 2002년도 원자력연구개발 중장기과제“ 지진안전성 평가기반 기술개발”의 위탁과제보고서(과제명 : 단층암에 대한 ESR 연대측정 연구)로 제출합니다.

2003년 2월

연구기관명 : 강원대학교

연구책임자 : 이 희 권 (지구과학부)

# 요 약 문

## I. 제 목

단층암에 대한 ESR 연대측정 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- ESR 절대연령 측정법을 이용한 단층암의 마지막 활동시기를 결정

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 활성 가능성이 있는 단층확인
- ESR 절대연령 측정에 필요한 단층암 시료 채취
- 단층암의 ESR 절대연령 분석
- ESR 연령의 지질학적 해석

## IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

- 양산단층대의 시·공간적 활동형태 규명

# S U M M A R Y

## I. Project Title

- ESR dating of fault rocks

## II. Objective and Importance of the Project

- Determination of the last activity of fault rocks using ESR dating method

## III. Scope and Contents of the Project

- Recognition of the possibly active faults
- Collecting of samples for ESR dating
- ESR dating of fault rocks
- Geological interpretation of results of ESR dating of fault rocks

## IV. Results and Recommendations for Application

- Evaluation of the space-time pattern of fault activities of the Yangsan fault system

# CONTENTS

SUMMARY IN KOREAN .....	i
SUMMARY IN ENGLISH .....	iii
CONTENTS IN ENGLISH .....	v
CONTENTS IN KOREAN .....	vii
LIST OF FIGURES .....	ix
LIST OF TABLES .....	xi
Chapter 1 Introduction .....	1
Chapter 2 Principles of electron spin resonance dating of fault rocks .....	5
Chapter 3 Method of ESR dating of fault rocks .....	9
Chapter 4 Sample of fault rocks and ESR dating .....	13
Section 1 Seosaeng 1 site .....	13
Section 2 Seosaeng 2 site .....	18
Section 3 Kyodong site .....	21
Section 4 Dabang site .....	27
Chapter 5 Discussion and Conclusion .....	39
References .....	41

# 목 차

요약문 .....	i
SUMMARY .....	iii
영문목차 .....	v
국문목차 .....	vii
그림목차 .....	ix
표 목차 .....	xi
제 1 장 서 언 .....	1
제 2 장 단층암의 전자자기공명(ESR) 연령측정 방법의 원리 및 가정 .....	5
제 3 장 단층암의 전자자기공명(ESR) 연령측정 과정 .....	9
제 4 장 단층암 시료 및 ESR 절대연령 측정 결과 .....	13
제 1 절 서생 1지점 .....	13
제 2 절 서생 2지점 .....	18
제 3 절 교동 지점 .....	21
제 4 절 다방 지점 .....	27
제 5 장 토의 및 결론 .....	39
참고문헌 .....	41

# 그림 목 차

그림 1	ESR 연령/입자크기 그림의 예 .....	7
그림 2	서생 1지점의 노두 사진 및 시료채취 지점 .....	14
그림 3	단층암 시료 서생 1의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선 .....	15
그림 4	단층암 시료 서생 2의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선 .....	16
그림 5	단층암 시료 서생 3의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선 .....	17
그림 6	서생 2지점의 노두 사진 및 시료채취 지점 .....	19
그림 7	단층암 시료 서생 4의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선 .....	20
그림 8	교동 지점의 노두 사진 및 시료채취 지점 .....	22
그림 9	단층암 시료 교동 5의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선 .....	24
그림 10	단층암 시료 교동 6의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선 그리고 ESR 연령과 입자크기와의 관계(c) .....	25
그림 11	단층암 시료 교동 8의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선 그리고 ESR 연령과 입자크기와의 관계(c) .....	26
그림 12	다방 지점의 노두 사진 및 시료채취 지점 .....	28
그림 13	단층암 시료 다방 132의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선 .....	29

# 표 목 차

표 1 단층암에 대한 ESR 연령자료 및 결과 .....	30
---------------------------------	----



## 제 1 장 서 언

단층대의 활성여부는 핵폐기물 처리부지 및 원자력발전소등 원자력 시설물의 안정성을 평가하는데 있어 중요한 자료를 제공한다. 1970년 이전에는 미국이나 소련등 선진국에서 조차도 지진으로 인한 재해를 줄이기 위한 연구에 역사지진 및 계기지진 기록만 이용하였다. 그렇지만 많은 지질학자들은 이러한 역사지진 및 계기지진 기록만 이용하여 활성단층을 평가하는데는 큰 문제점이 있다고 지적하였다. 이와 같은 이유로 근래에는 대부분의 국가에서 광역적이거나 혹은 주요 시설물과 연관되는 단층대에 대한 고지진학적 자료를 수집하여 활성단층에 대한 평가를 시도하고 있다.

고지진학자들은 지질시대 동안에 일어난 지진에 의해 형성된 여러 가지 지질학적 자료 및 증거를 이용하여 단층대의 시간 및 공간적 단층활동 형태를 해석한다. Knipe(1989)는 단층활동을 비롯한 모든 변형작용은 대체로 주기성을 가지고 있으며 단층활동은 비교적 작은 주기를 가지고 있다고 보고하였다. White et al.(1986)과 Blenkinsop et al.(1988)은 단층암의 미구조를 이용하여 단층활동의 주기성을 밝혀내려는 연구를 시도하였다. 또한 Mckee et al.(1984)와 Bell et al.(1990)은 층서학적 및 구조지질학적 자료를 이용하여 단층활동의 주기성에 대해 연구하였다. 일반적으로 지질학자들은 단층에 의해서 교란된 지층에서 절대연령 측정에 쓰일 수 있는 시료를 채집하여 지층의 연령을 측정하여 단층활동의 시기를 유추해 내거나, 단층암 또는 단층면에서 연령측정에 이용 될 수 있는 물질들을 채집하여 연령 측정을 한 후 단층활동과의 연관성을 고려하여 단층활동 시기를 제한한다. 지층이나 층상구조(layer)의 연령을 측정하는데 이용되는 방법은  $C^{14}$ , fission track(FT), thermoluminescence(TL), optical stimulated luminescence(OSL), electron spin resonance(ESR), K-Ar dating 등이 있다. 이 중에서  $C^{14}$  절대연령 측정법이 현세나 제 4기 중에 형성된 퇴적층의 연령을 결정하는데 가장 정확한 방법중 하나이다. Sieh et al.(1989)은  $C^{14}$  절대연령 측정법을 이용하여 미국 캘리포니아의 Pallett 계곡에 있는 퇴적층의 연령을 구하였으며, 이를 이용하여 산안드레아스 단층의 활동시기를 결정하였다. 그들은 그곳에서 약 10번의 단층활동을 인지하였고 그 자료를 이용하여 약 132년의 산안드레아스 단층의 평균 활동주기를 계산하였다. 최근에는 세계 곳곳에서 이 방법을 이용하여 단층의 활동시기 및 활동형태를 밝혀내고 있다(Van Dissen et al., 1992;

Vita-Finzi, 1992; Bartsch-Winkler and Schmoll, 1992; Wills and Borchardt, 1993).

방사성 손상(radiation damage)을 이용하여 퇴적물이나 화산암의 절대연령을 측정하는 방법들이 개발되었다. ESR, TL, OSL 방법은 시료 주변의 자연 방사성 에너지에 의해 원자들로부터 떨어져 나온 전자가 결정 속의 결함에 잡히게 되고 이 결함에 잡힌 전자의 수를 이용하여 절대연령을 측정하는 방법이다. 또 다른 방법은 휘선 트랙법(fission track method)으로 우라늄의 분열로 인한 결함의 수를 이용하여 절대연령을 측정한다. Forman et al.(1989)과 McCalpin et al.(1994)은 미국 유타주의 Wasatch 단층대에서 열 빛내기 절대연령 측정법(thermoluminescence dating method; TL)을 이용하여 고지진의 발생시기를 유추하였다. 열 빛내기 절대연령 측정법을 이용하여 유추한 단층의 활동시기는  $C^{14}$  방법을 이용하여 결정한 단층의 활동연령과 잘 일치하였다. 광학적 빛내기 절대연령 측정법(optically stimulated luminescence; OSL)을 이용하여 퇴적물의 퇴적시기를 결정하는 방법이 Huntley et al. (1985)에 의해서 보고되었다. 이 방법은 퇴적물이 퇴적 될 때 햇빛에 의해 기존에 존재하던 신호를 다 잃는 원리를 이용하며, 석영, 장석, 복합 입자 등을 이용하여 퇴적물의 퇴적시기를 결정하는 것이다(Smith et al., 1986, 1990; Aitken and Smith, 1988; Godfrey-Smith et al., 1988; Rhodes, 1988, 1990; Stokes, 1991, Wintle et al., 1994). Porat et al.(1996, 1997)은 이 방법을 이용하여 이스라엘의 Arava Valley에서 단층활동에 의해 교란된 제 4기 퇴적물의 연령을 측정하여 단층의 마지막 활동시기를 결정하였다. 퇴적층에 동물의 이빨 등 ESR 절대연령 측정법을 이용할 수 있는 물질이 존재한다면 단층활동과 관계 있는 퇴적층의 퇴적시기를 ESR 방법을 이용하여 결정할 수 있다. 퇴적시기를 결정하는데 이용되는 물질들은 화산암(volcanic rocks; Buhay et al., 1992), 또는 플라이스토세 혹은 현세의 퇴적암으로부터 채집된 동물의 이빨이나 뼈 등이 있다(Schwarcz and Grun, 1992). 햇빛에 노출되었을 때 ESR 신호가 줄어들었다가 퇴적암 속에서 ESR 신호가 다시 증가하는 석영이 있다면 퇴적암의 퇴적시기를 결정하는데 이용될 수 있다(Tanaka et al., 1985). 그러나 OSL 방법의 발달로 이 방법은 거의 이용되지 않고 있다.

석영입자, 현무암, 안산암의 표면조직이나 풍화외피(surface textures and weathering rinds)가 상대연령을 측정하는데 이용될 수 있다(Kanaori et al., 1980, 1985; Colman and Pierce, 1981). 이 방법은 풍화외피의 형성 속도에 기초를 두는데, 풍화외피의 두께는 경과한 시간에 비례하여 증가한다. 점토광물

을 많이 포함한 단층비지의 고지자기 분석을 통하여 단층의 마지막 활동 시기를 결정하려는 시도가 있었다. Hailwood(1992)와는 North Wales의 Anglesey에 있는 Porth-y-pistyll 단층에서 채집된 단층비지의 고보자력(high-coercivity)과 역자력(reverse polarity) 성분은 화학적 잔류자기(chemical remanent magnetization)라고 주장하였다. 이 화학적 잔류자기는 단층의 마지막 활동 시기 이후에 단층을 통과하는 유체에 의해 형성되므로 화학적 잔류자기 형성시기는 단층의 활동시기를 지시하게 된다. 하지만 이러한 방법들은 다른 절대연령측정법을 이용하여 보정(calibration)을 해야하는 문제점이 있다.

단층대에서 채집된 물질을 이용하여 지진을 야기 시킨 단층의 활동시기를 결정할 수 있다. K-Ar 이나 Rb-Sr 절대연령측정법을 이용하여 단층활동 이후에 형성된 점토광물의 형성시기를 제한 할 수 있다(Kralik et al., 1987, 1992). Scholz et al.(1979)은 단층활동 중에 마찰열에 의해 모암 속에 있던 Ar 가스가 다 없어졌다는 가정 하에, K-Ar 방법을 이용하여 단층비지에서 분리된 점토광물의 연령을 측정하였다. 핏션트랙 절대연령 측정법(fission track dating method)을 이용하여 단층면을 따라 형성된 epidote의 형성연령을 측정하였다(Bar et al., 1974). Tagami et al.(1988)은 단층활동 중에 마찰열에 의해 apatite에 있는 핏션 트랙이 모두 소멸되었다고 주장하였다. Eyal et al.(1992)은 우라늄 비평형 절대연령 측정법(uranium series dating)을 이용하여 단층면에서 채집된 우라늄을 포함한 carnotite 과 tyuyamunite의 형성시기를 결정하였다. 이 방법은 모입자와 딸핵 간의 방사성 활동성이 광물 형성 당시에는 비평형 상태인데 시간이 지남에 따라 평형상태로 되는 원리를 이용하는 것이다.

단층암의 ESR 절대 연령 측정 방법은 일본의 Ikeya와 공동 연구자들에 의해 1982년에 소개되었으며, 이 연구과제의 연구책임자와 캐나다의 Dr. Schwarcz에 의해 더욱 발달되어 응용단계에 와 있다(Lee and Schwarcz, 1994a, 1994b, 1995, 1996, 2001). ESR 절대 연령 측정 방법은 단층 활동 시기 그 자체를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 단층암으로부터 추출된 석영을 이용하기 때문에 절대연령 측정에 이용할 물질(석영)을 구하기 쉽다.

단층의 활동 시기를 결정하는 방법은 위에 열거한 것처럼 많은 방법이 있으나, 모든 방법이 적당한 시료를 구하기 어렵거나 가능한 연령(예, 탄소동위원소 방법; 약 7만년)등 제한점이 많다. 제 4기 퇴적층에 층리가 잘 발달되고 단층활동에 의해 교란된 지층이 확실하게 구분된다면, 탄소동위원소 방법이나

OSL 절대연령측정 방법으로 각 지층의 연령을 측정하여 단층의 활동시기를 결정할 수 있다. 그러나 현재 우리나라에서 위의 조건을 만족시키는 노두는 많지 않은 편이다. 반면에 제 4기층으로 추정되는 괴상의 역암과 기반암이 경계를 이루는 단층의 노두가 많이 발견되었으며, 이런 단층의 활동시기를 결정하는데 ESR 절대연령 측정방법이 이용될 수 있다. 제 4기 역암의 퇴적시기가 결정되고 단층의 마지막 활동시기가 결정된다 해도, 단층의 활동 주기를 결정하기 위해서는 이전의 단층활동 시기를 결정하여야 한다. 최근에 단층비지대를 재활동 시키지 않고 단층비지대의 한쪽 단층면을 따라 마지막 단층활동이 일어난 단층의 노두가 발견되었다(예, 왕산지점, 수렴지점, 원원사지점, 유계리지점 등). ESR 방법은 단층비지가 형성되거나 재 활동한 시기를 제한하는데 이용될 수 있어 한 지점에서 여러 번의 단층활동 시기를 결정 할 수 있다. 또한 ESR 절대연령방법은 제 4기 퇴적물이 없는 화강암 지대나 변성암 지대에 발달되어 있는 단층비지의 활동연령을 결정하는데 좋은 방법이다.

한반도의 남동부에는 핵발전소를 비롯한 많은 산업시설들이 건설되어 있다. 양산단층계가 한반도의 남동부에 위치하고 있으므로 양산단층계의 시간·공간적 활동형태의 특징은 이 지역의 지각 안정성을 평가하는데 중요한 자료를 제공한다. 단층의 마지막 활동시기를 결정하고 단층대의 기하학적 특징 및 다른 지질구조요소를 종합 분석하여 단층대의 활동 특성을 파악할 수 있다. 이번 연구에서는 제 4기 단층의 절대연령측정법 중에서 ESR 절대 연령 측정방법을 이용하여 양산단층계에서 채집된 단층암 시료의 연령을 측정하는데 그 목적이 있다.

## 제 2 장 단층암의 전자자기공명(ESR) 연령측정 방법의 원리 및 가정

단층활동이 일어나기 전의 기반암 및 단층암 속에 분포하고 있는 석영의 격자홈에 갇힌 전자의 수는 평형상태 또는 포화가 될 때까지 시간이 지남에 따라 점차적으로 증가한다. 격자홈에 갇힌 전자의 수는 ESR 분석기를 이용하여 ESR 신호의 세기로 나타내 진다. 즉 ESR 신호의 세기는 격자홈에 갇힌 전자의 수에 비례한다. 예를 들면, 약 30개의 격자홈의 형태가 석영 결정의 격자구조 안에 발달되어 있다(Weil, 1984). 갇힌 전자의 수는 포화되거나, 평형상태가 될 때까지 점차적으로 증가한다. 지질학적 사건(예, 지진활동, 화산활동 등) 당시에나 시료형성(예, 동물의 이빨, 석순 등) 당시에는 ESR 신호의 세기가 영(zero)이 된다. 시료의 나이를 구하기 위해서는 시료에 대한 ESR 신호의 세기가 영이 된 지질학적 사건 이후에 시료가 받은 방사성 에너지의 양을 나타내는 조사상응량(equivalent dose;  $D_E$ ; 단위, Gy)과 시료 채취 지점에서의 조사률(dose rate; 단위, Gy/year)을 구해야 한다. 시료의 나이는 다음과 같은 방정식의 형태로 결정된다.

$$\text{연령}(t) = \text{조사상응량}(D_E) / \text{조사률}(d)$$

ESR 절대연령 측정법을 이용하여 단층암의 마지막 활동 시기를 결정하기 위해서는 ESR 신호가 단층활동 중에 완전히 영이 되었다는 가정이 필요하다(Fukuchi, 1988; Schwarcz et al., 1998; Lee and Schwarcz, 1994). 특히 Lee and Schwarcz (1994)는 단층활동 중에 입자경계 마찰 미끄러짐(grain boundary frictional sliding)에 의한 격자변형작용(localized lattice deformation) 및 마찰열(local heating)에 의해 입자경계부에 있는 ESR 신호가 영이 된다고 주장하였다. Toyoda and Schwarcz(1996)는 삭박 실험을 통해 석영입자 내에서의 ESR 센터의 분포를 조사하였다. 입자 경계를 삭박한 후 ESR 신호의 세기가 커짐을 발견하고 Lee and Schwarcz (1994)의 주장을 뒷받침하였다. Rink et al.(1999)은 단층비지로 부터 분리한 석영입자를 연구하여 OSL 신호의 방사성 반응력이 입자크기가 작을수록 증가함을 인지하고 Lee and Schwarcz(1994)의 주장이 옳음을 확인하였다. 이번 연구에서는 단층활동 중에 ESR 신호가 완전히 영이 되었음을 확인하는데 필요한 모든 기준

을 이용하였다. ESR 연령은 신뢰도에 따라 세 그룹으로 나뉘어진다 (그림 1).

(가) 다 평탄역 ESR 연령 (*Multiple plateau ESR age*)

이 ESR 연령은 두 가지 이상의 ESR 신호(예, E' 과 AI 신호)를 이용하여 구한 것이며, 특징은 두 가지 이상의 신호에 의한 ESR 연령이 각각 입자크기가 작아질수록 체계적으로 감소하여 임계 입자크기 이하에서 공통의 연령 평탄력을 보인다(그림 1a).

(나) 다 센터 ESR 연령 혹은 평탄역 ESR 연령 (*Multiple ESR age and/or Plateau ESR age*)

(1) 두 가지 이상의 ESR 신호(예, E' 과 AI 신호)를 이용하여 구한 것이며, 두 가지 이상의 신호가 공통의 연령 평탄역은 보이지 않고(한 신호는 연령평탄역을 보일 수 있다), 분석한 가장 작은 입자크기의 두 가지 이상의 신호에 의한 ESR 연령이 같다 (다 센터 ESR연령, 그림 1b).

(2) 적어도 하나의 신호는 연령 평탄력을 보인다 (평탄역 ESR 연령, 그림 1c).

(다) 최대 ESR 연령 (*Maximum ESR age*)

(1) ESR 연령이 입자크기가 감소함에 따라 체계적으로 작아지지 않는다.

(2) ESR 연령은 연령평탄력이 존재하지 않거나 두 가지 이상의 신호를 이용하여 구한 연령이 서로 일치하지 않는다(그림 1d). 이 경우 가장 작은 입자로부터 구한 ESR 연령은 단층활동의 시기 중 최대 시기를 지시한다.

단층활동 중에 ESR 신호가 영이 되는 기작과 ESR 절대연령측정에 필요한 자세한 사항은 Lee and Schwarcz(1994)의 논문에 있다.

주어진 단층대에서 수집한 각 단층암을 이용하여 각각 그 지점의(시료 채집 장소) 마지막 단층암의 활동 시기를 결정할 수 있다. 따라서 주어진 단층대에서 체계적으로 단층암을 채집하여 분석한 단층활동 연령 자료를 이용하여 단층활동의 공간적 활동 형태(space pattern)와 단층의 기하학적 형태(geometry of fault zone) 및 다른 지질구조 요소를 비교분석 할 수 있게 된다. 또한 각각의 단층암의 절대연령 자료를 종합하면 주어진 단층대의 시간적 활동 형태(temporal pattern)를 구하게 되어 활동기간 및 휴지기간의 길이

를 구할 수 있다. 시간 및 공간적 단층 활동 형태와 단층의 기하학적 형태 (fault geometry) 및 지질구조 요소들을 비교 분석함으로써 지진을 일으킬 수 있는 단층의 활동기작(faulting mechanism)의 연구에 크게 도움이 되리라 여겨진다.

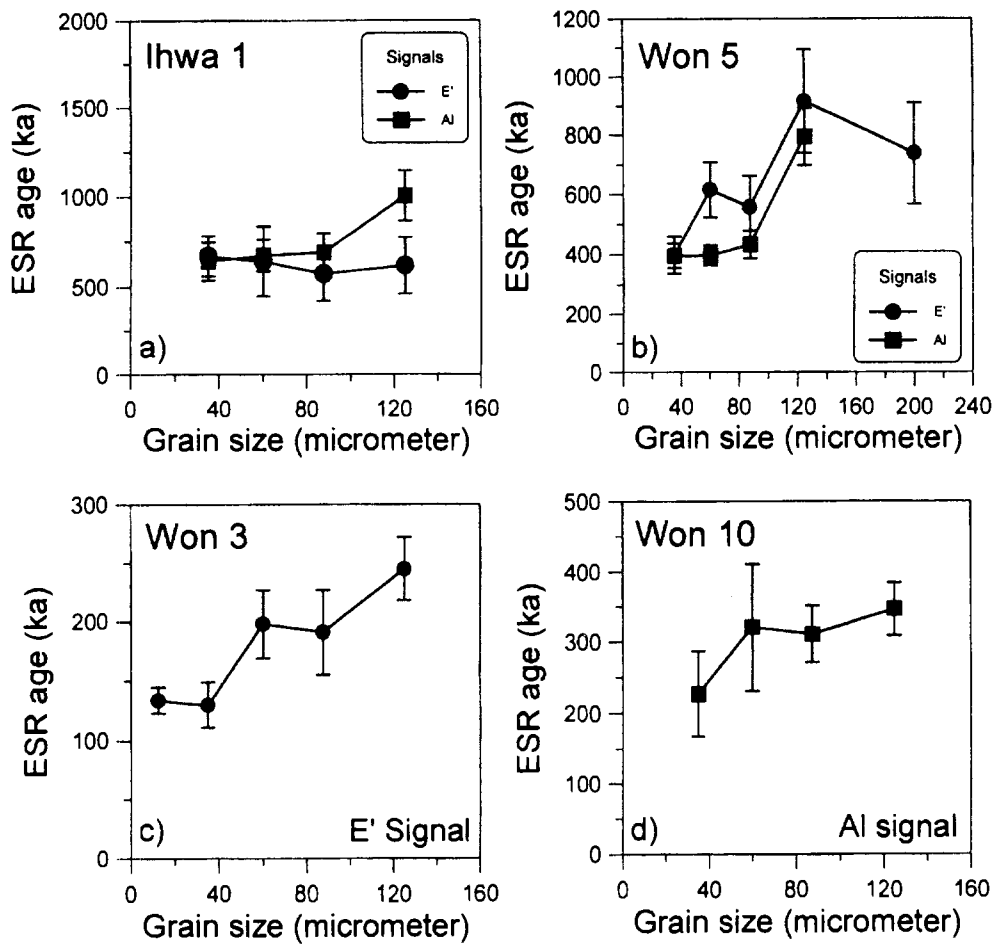


그림 1. ESR 연령/입자크기 그림의 예. (a) 다수평탄 ESR 연령, (b) 다수 ESR 연령 그리고/혹은 평탄 ESR 연령, (c) 평탄 ESR 연령, (d) 최대 ESR 연령(after Lee and Schwarcz, 2001).





### 제 3 장 단층암의 전자자기공명(ESR) 연령 측정 과정

단층암의 ESR 절대연령 측정 과정은 다음과 같다.

- 1) 단층암대에서 필요한 지질구조 요소를 모두 측정한다. 단층의 종류 및 지괴의 이동방향을 결정한다. 노두를 깨끗하게 청소하고 사진촬영을 한다. 단층암대 진화형태(Type I, II, III)를 결정한다. Type I, II(단층암띠가 존재)의 경우에는 각각의 활동시기에 형성된 단층암을 따로따로 채집한다. 샘플채집 시에는 칼이나 수저를 이용하고 비닐백에 담아 수분의 증발을 막아야 한다.
- 2) 실험실에 도착하자마자 단층암에 있는 샘플 속의 수분함량을 결정한다. 샘플의 일부는 방사성 원소의 함량 결정을 위해 잘 보관해 두는데 80g이면 충분하다.
- 3) 나머지 단층암 시료는 가볍게 부순 후 염산(12M)과 질산(12M)을 이용하여 방해석과 유기물 성분을 녹여 없앤다. 염산(12M)과 질산(12M)을 이용하여 녹이는 과정을 각각 일주일 동안 2-3차례 반복한다. 최종적으로 염산과 질산을 1 : 2로 섞은 후 다시 일주일 동안 위의 과정을 반복하여 석영을 제외한 나머지 성분을 제거한다.
- 4) 방해석과 유기물 성분을 제거한 시료를 산(염산, 질산) 성분이 제거될 때까지 물로 깨끗이 세척한다.
- 4) 젖은 상태의 시료를 체를 이용하여 각 입자크기( $25\mu\text{m}$ 이하,  $25-45\mu\text{m}$ ,  $45-75\mu\text{m}$ ,  $75-100\mu\text{m}$ ,  $100-150\mu\text{m}$ ,  $150-250\mu\text{m}$ )별로 석영을 분리한다.
- 5) 분리한 석영을 건조시킨다.
- 6) 건조시킨 석영을 다시 체를 이용하여 4)의 과정을 반복한다.
- 7) 자력선별기(Frantz isodynamic magnetic separator)를 이용하여 자기적 성질이 없는 광물(주로 석영과 정석)들을 추출해 낸다.
- 8) Fluoboric acid( $\text{HBF}_4$ , 1M)를 이용하여 장석과 점토광물 등을 녹여 없앤다. 초음파세척기(ultrasonic cleaner)를 이용하여 석영에 붙어있는 물질들을 제거한다.
- 9) 장석과 점토광물을 녹인 시료는 건조한 후 6)의 과정과 7)의 과정을 반복한다.
- 10) Jeol JES-TE200 ESR spectrometer를 이용하여 각각의 시료에 대한 ESR 신호를 측정한다.
- 11) 깨끗한 석영의 ESR 신호가 측정될 때까지 8), 9), 10)의 과정을 반복한다.

12) 각 입자크기별로 10개의 100mg 썩의 시료를 준비한다. 다시 말하면 25-45 $\mu$ m크기의 시료로부터 10개의 100mg시료를 준비한다. 위의 과정을 반복하여 모든 입자크기로부터 10개의 100mg 썩의 시료를 준비한다.

13) 원자력연구소에서  $^{60}\text{Co}$ 을 이용하여 감마선을 단계별로 쪼인다. 예를 들면 감마 source로 부터의 거리와 조사시간을 조정하여 각 입자크기의 100mg시료에 100Gy의 감마에너지를 준다. 위의 과정을 반복하여 최대 약 4800-6400Gy까지 각 입자크기의 100mg시료에 단계별로 감마에너지를 준다.

14) Jeol JES-TE200 ESR spectrometer를 이용하여 각 100mg(60개의 다른 입자크기와 감마에너지 크기로 결정된 시료)썩의 시료에 대한 ESR 신호를 얻는다. 상온에서는 E'와 OHC 신호를 측정하였으며, Al과 Ti 신호는 액체질소를 이용하여 낮은 온도(77°K)에서 측정하였다.

15) 부가조사법(additive dose method)를 이용하여 ESR 신호가 없는 상태에서부터 시료가 현재 가지고 있는 ESR 신호의 세기로 증가하기 위해 필요한 방사성 에너지(조사상용량;  $D_E$ )를 구하게 된다. 즉 ESR 신호의 세기 그 자체를 이용하여 ESR 연령을 결정하지 못하기 때문에 축적된 에너지의 형태(Unit: Gy)로 전환시켜야만 한다. ESR 신호가 포화되지 않은 석영은 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기는 포화지수함수 곡선(single saturated exponential curve)를 따라 커진다. 반면에 단층암 내의 큰 석영 입자나 모암으로부터 분리해낸 석영을 실험실에서 감마선을 쪼였을 때, ESR 신호의 세기는 조사된 감마에너지가 증가할수록 일정한 ESR 신호의 세기, ESR 신호 세기의 계단상 증가, ESR 신호 세기의 감소, ESR 신호 세기의 오르내리는 변동 등의 양상을 보인다.

16) 조사를 결정을 위해서 보관한 시료를 감마선 스펙트럼 분석기를 이용하여 U, Th, K의 함량을 결정한다. 위에서 얻어진 U, Th, K의 양을 아래 식에 넣어 조사율을 결정하게 된다. 그 외에 수분의 함량,  $\alpha$ -효과, 감소 요소(attenuation factor)등을 결정하여 아래 식에 포함하여야 한다.

$$d = C_u (KW_\alpha G_{u-\alpha} D_\alpha + W_\beta G_{u-\beta} D_\beta + W_\gamma D_\gamma) + C_{Th} (KW_\alpha G_{Th-\alpha} D_\alpha + W_\beta G_{Th-\beta} D_\beta + W_\gamma D_\gamma) + C_k (KW_\alpha G_{k-\alpha} D_\alpha + W_\gamma D_{k-\gamma}) + G_{\cos} D_{\cos}$$

여기서

$C_{U,Th,K}$  = 단층암 속의 방사성 원소의 농도

K =  $\alpha$  - efficiency

- $W_{\alpha, \beta, \gamma}$  = water correction factors  $\alpha, \beta$  and  $\gamma$   
 $G_{\alpha, \beta, \gamma, \text{cos}}$  = attenuation factors for  $\alpha, \beta, \gamma$  and cosmic rays  
 $D_{\alpha, \beta, \gamma}$  = dose rate per unit concentration  
 $D_{\text{cos}}$  = cosmic dose rate

17) 컴퓨터 프로그램(ESR-DATA)을 이용하여 각 입자크기의 ESR 연령을 결정하고 ESR 연령 대 입자크기의 그래프를 그려 연령평탄역의 존재를 확인한다. 연령평탄역 상의 ESR 연령의 평균을 구하면 그 단층암의 마지막 활동시기가 된다. 또한 서로 다른 ESR 신호를 이용하여 구한 ESR 연령이 일치하는지 확인한다.

18) 모든 ESR 연령을 지질도에 표시하고 지질구조 요소와 비교 분석하여 단층활동의 공간적 분포를 조사한다. 또한 시간의 그래프에 모든 ESR 연령을 표시하고 활동기간 및 휴지기간을 결정하고 집중도(clustering)정도를 확인한다.



## 제 4 장 단층암 시료 및 ESR 절대연령 측정 결과

### 제 1 절 서생 1 지점

울산광역시 서생면 대송리를 통과하는 31번 국도의 약간 풍화된 도로 절개면(북위 35° 21' 55.4'', 동경 129° 21' 11.5'')에 약 73 m 폭을 가지는 단층대가 발달되어 있다. 사장석과 석영 및 암편을 포함하는 괴상의 암편응회암에 발달된 약 73 m 폭의 단층대에 18개 이상의 단층이 발달되어 있다. 단층비지대의 폭은 각각 0.1-20 cm 이나 0.1-3 cm 가 우세하다. 단층의 주향은 양산단층대와 거의 평행한 북북동방향이 가장 우세하며, 남북 방향도 우세하다. 단층면의 경사각은 70°-89°로 고각도의 경사를 가진다. 운동감각은 대체로 우수향 주향이동을 보인다. 만약 이들이 비슷한 시기에 우수향 주향 이동 운동에 의해 형성되었다면, 북북동 방향은 Y-전단 방향에 해당되며, 남북 방향은 P-전단으로 여겨진다. 단층암의 ESR 연령 측정을 위해 비교적 단층비지가 두껍게 발달된 3개의 단층을 선택하여 단층암 시료를 채취하였다(그림 2).

서생 1: 단층면의 방향; N19°E/74°SE, 단층비지폭; 1-3 cm

서생 2: 단층면의 방향; N9°W/89°NE, 단층비지폭; 1-10 cm

서생 3: 단층면의 방향; N22°E/80°SE, 단층비지폭; 1-3 cm

서생 1, 2, 3에서 분리한 석영의 모든 입자 크기의 E' 신호는 조사된 감마 에너지의 양이 약 800Gy까지 신호의 세기가 감소한 후, 800Gy 이상에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 증가한다(그림 3a, 4a, 5a). Al 과 Ti 신호는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기의 증감이 불규칙하다(그림 3b, 3c, 4b, 4c, 5b, 5c). 이는 단층활동 후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 포화된 것으로 추정된다.

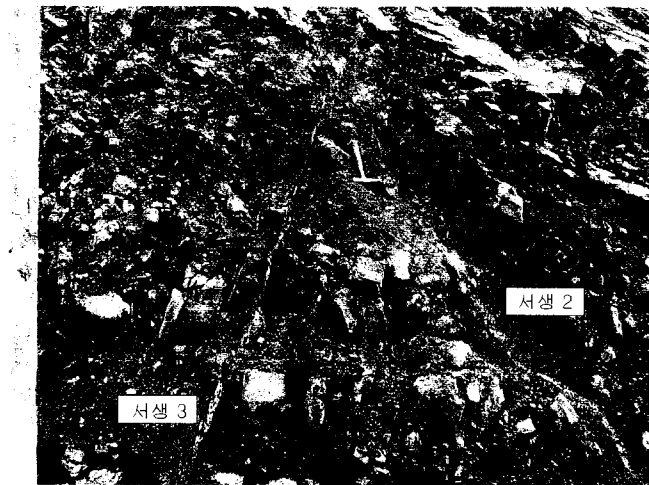


그림 2. 서생 1 지점의 노두사진 및 시료채취 지점.

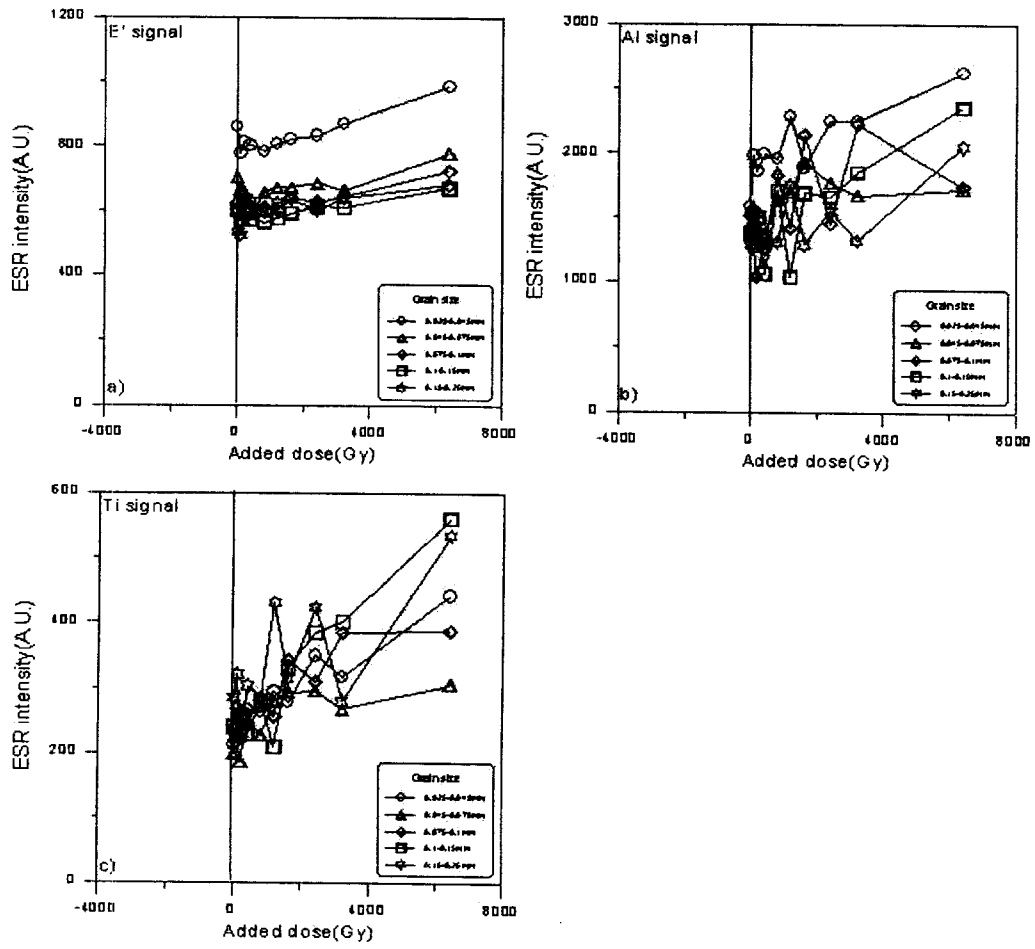


그림 3. 단층암 시료 서생 1의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선.

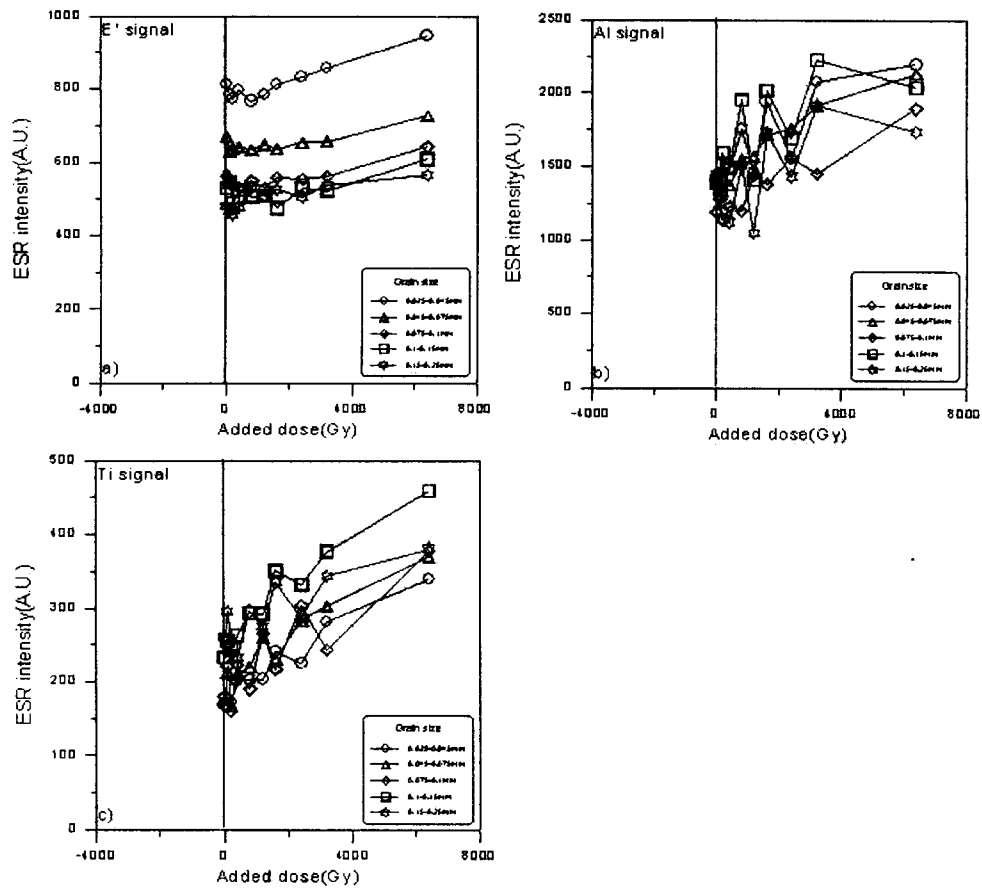


그림 4. 단층암 시료 서생 2의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선.



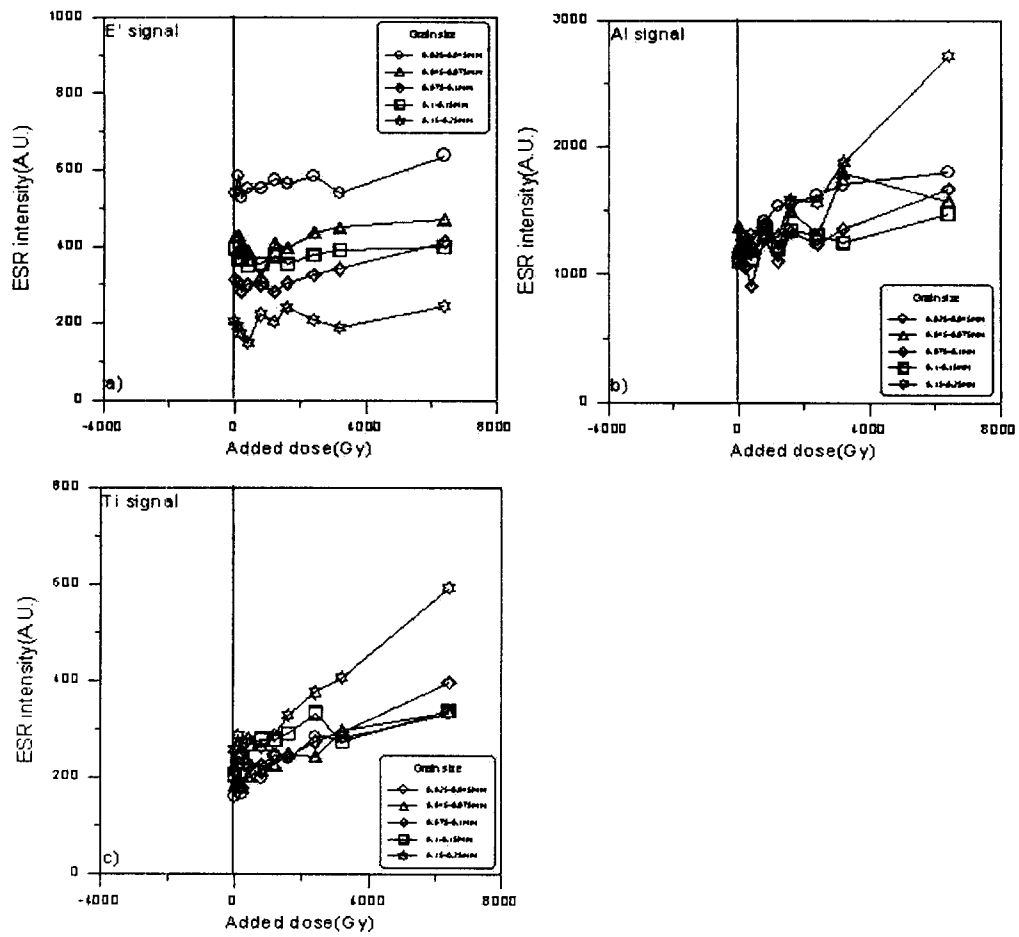


그림 5. 단층암 시료 서생 3의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선.

## 제 2 절 서생 2 지점

울산광역시 서생면 용리 일대 풍화가 심한 산사면 절개지(북위 35° 21' 12.3'', 동경 129° 18' 18.5'')에 폭 40 m의 단층대가 발달되어 있다. 조립집의 화강암에 발달된 폭 40 m의 단층대에 11개 이상의 단층이 발달되어 있으며, 대부분 단층비지대가 아주 얇거나 존재하지 않는다. 그러나 약 10-110 cm의 단층손상대가 발달된 단층이 대부분이다. 단층의 주향은 북북동과 북북서 방향이 우세하며, 75°-88°의 고각도의 경사각을 가진다. 단층 중 비교적 단층비지가 잘 발달된 (비지대; 0.1-3 cm) 곳에서 단층암 시료(서생 4)를 채취하였다(그림 6).

단층암 시료 서생 4에서 분리한 석영의 모든 입자 크기의 E'신호는 조사된 감마에너지의 양이 약 1600Gy까지 신호의 세기가 감소한 후, 1600Gy이상에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 증가한다(그림 7a). Al 과 Ti 신호는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기의 증감이 불규칙하다(그림 7b, 7c). 이는 단층활동 후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 포화된 것으로 추정된다.

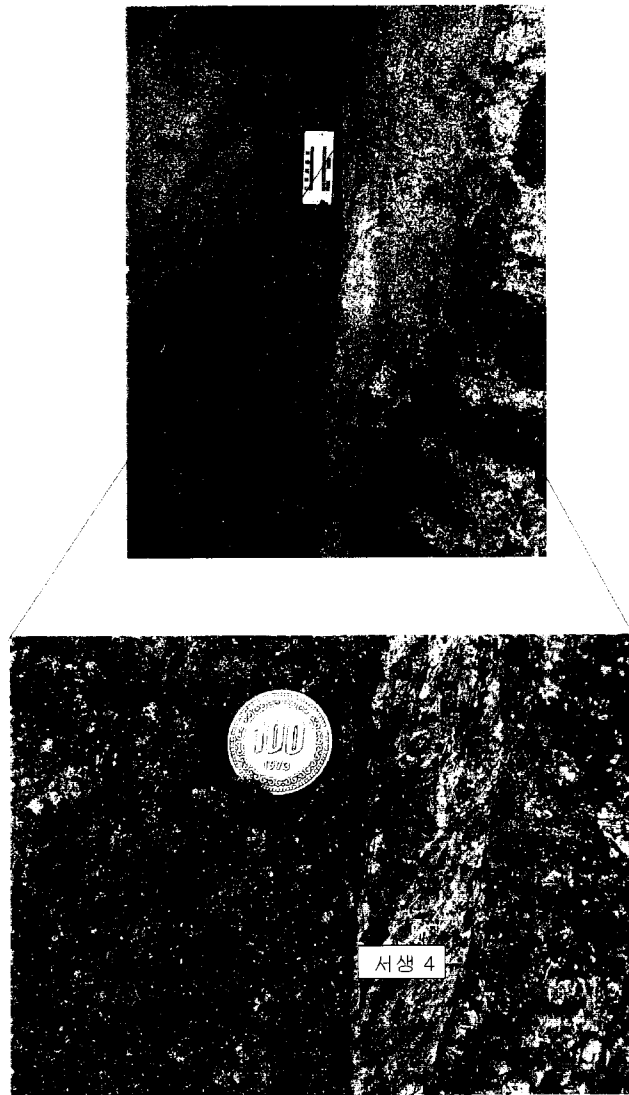


그림 6. 서생 2 지점의 노두사진 및 시료채취 지점.

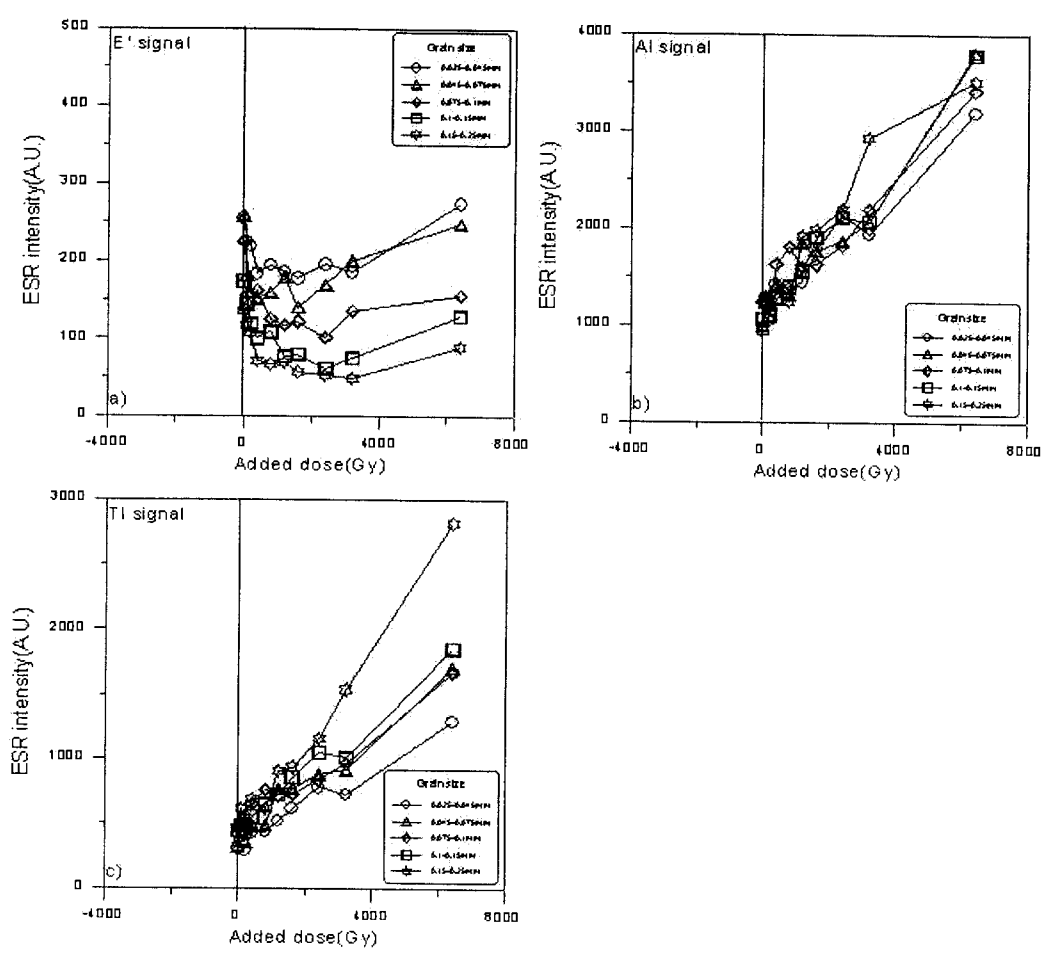


그림 7. 단층암 시료 서생 4의 E'(a), Al(b) 및 Ti(c) 신호의 성장곡선.

### 제 3 절 교동 지점

북서 방향으로 발달한 어영단층대의 노두는 양산시 교동 1022 도로변에서 발견되었다. 유산리층의 이암에 약 10 m 폭의 단층대에 6개의 단층이 N42°W/76°SW, N66°W/79°SW, N58°W/77°SW, N57°W/79°SW, N41°W/65°SW, N42°W/76°SW의 방향으로 발달되어 있다. 단층대 상반의 지층면의 방향은 N63°W/36°NE이고, 하반에 있는 층리면의 방향은 N72°E/36°NW로 단층에 의해 상·하반에 있는 층리면의 방향이 달라졌다. 각각의 단층에는 약 5 mm 내지 20 cm 폭의 단층비지대가 발달되어 있다. 이 단층대의 하반쪽 경계부에 발달한 단층비지대 내부에는 5개의 단층비지띠(서쪽으로부터 약 1.5 cm 폭의 파쇄엽리가 발달된 단층비지띠, 약 1cm 폭의 피상의 단층비지띠, 약 6cm 폭의 Y-전단면과 P-전단면이 발달되어 있는 단층비지띠, P-전단방향으로 발달되어 있는 파쇄엽리를 포함하는 단층비지띠, 약 2-3mm의 폭을 가지는 단층비지띠)가 발달되어 있다. 이는 여러 번에 걸친 재활동의 산물로 여겨지나 정확한 활동시기를 알기 위해서는 각각의 단층압띠에서 채취한 단층암의 절대연령측정이 필요하다. 또한 N50°W/78°SW 방향으로 발달된 단층이 N42°W/76°SW 방향의 단층에 의해 절단되고 있어 여러 번의 단층활동이 일어났음을 시사한다. 운동감각이 좌수향임을 지시해주는 섬유상결정이 발달되어 있어 좌수향 주향이동단층임을 알 수 있다. 이 단층대의 북서쪽 연장에는 산성맥암이 단층대를 따라 5 km 길이를 가지고 관입하였다. 어영단층은 모량단층에 의해 절단되었으며, 약 1.5km의 우수향주향분리를 보인다. 단층암의 ESR 연령측정을 위해 비교적 단층비지대가 두꺼운 단층에서 단층암 시료를 채취하였다(그림 8).

교동 5: 단층면의 방향; N42°W/76°SW, 단층비지대폭: 15-20 cm

교동 6: 단층면의 방향; N66°W/79°SW, 단층비지대폭: 1-5 cm

교동 8: 단층면의 방향; N41°W/65°SW, 단층비지대폭: 1-18 cm



그림 8. 교동 지점의 노두사진 및 시료채취 지점.

단층암 시료 교동 5의 시료에서 분리한 석영 속의 E'과 AI 신호는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기의 증감이 불규칙하다(그림 9a, 9b). 이는 마지막 단층활동 후에 주변 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 센터가 포화(saturation)된 것으로 추정된다.

단층암 시료 교동 6으로부터 분리된 석영 속의 E' 신호는 모든 입자 크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마 에너지의 양이 증가함에 따라 포화지수함수를 따라서 규칙적으로 증가한다(그림 10a). 모든 입자크기들은 단층활동시에 ESR 신호가 완전히 줄어들었다가 단층활동 후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 신호의 세기가 증가했으나 아직 포화상태에 이르지 않은 것으로 추정된다. ESR 연령 대 입자크기 그래프에서 모든 입자크기에 대하여 연령평탄역을 보인다(그림 10c). AI 신호는 입자크기가  $100\mu\text{m}$  보다 큰 경우 ESR 신호의 세기가 이미 포화되어 ESR 연령을 결정할 수 없으나 그 나머지 입자크기의 시료는 조사된 감마 에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가한다(그림 10b). ESR 연령 대 입자크기 그래프에서 입자가 작아질수록 ESR 연령이 감소하여 E'에 의한 연령평탄역에 수렴한다(그림 10c). 따라서 E'과 AI 신호를 이용하여 결정한 다센터 ESR 연령은  $310\pm 20\text{ka}$ 이다.

단층암 시료 교동 8로부터 분리된 석영 속의 E' 신호는 모든 입자 크기에 대하여 ESR 신호의 세기가 조사된 감마 에너지의 양이 증가함에 따라 포화지수함수를 따라서 규칙적으로 증가한다(그림 11a). 모든 입자크기들은 단층활동시에 ESR 신호가 완전히 줄어들었다가 단층활동 후에 주변의 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 신호의 세기가 증가했으나 아직 포화상태에 이르지 않은 것으로 추정된다. AI 신호는 모든 입자 크기로부터 조사된 감마 에너지의 양이 증가함에 따라 불규칙하게 감소 및 증가를 반복하므로 ESR 연령을 결정할 수 없었다(그림 11b). ESR 연령 대 입자크기 그래프에서 입자가 작아질수록 ESR 연령이 감소하나 평탄력을 보이지 않는다(그림 11c). 따라서 E' 신호를 이용하여 결정한 최대 ESR 연령은  $380\pm 60\text{ka}$ 이다.

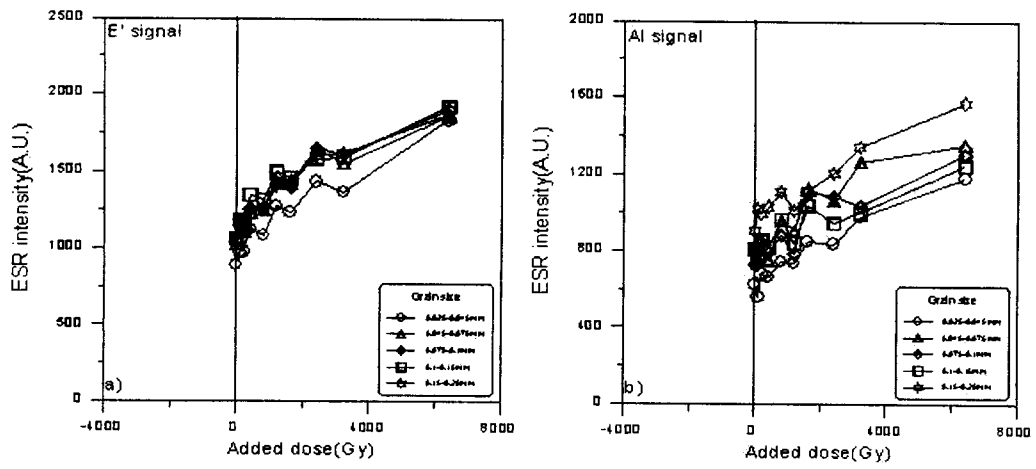


그림 9. 단층암 시료 교동 5의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선.



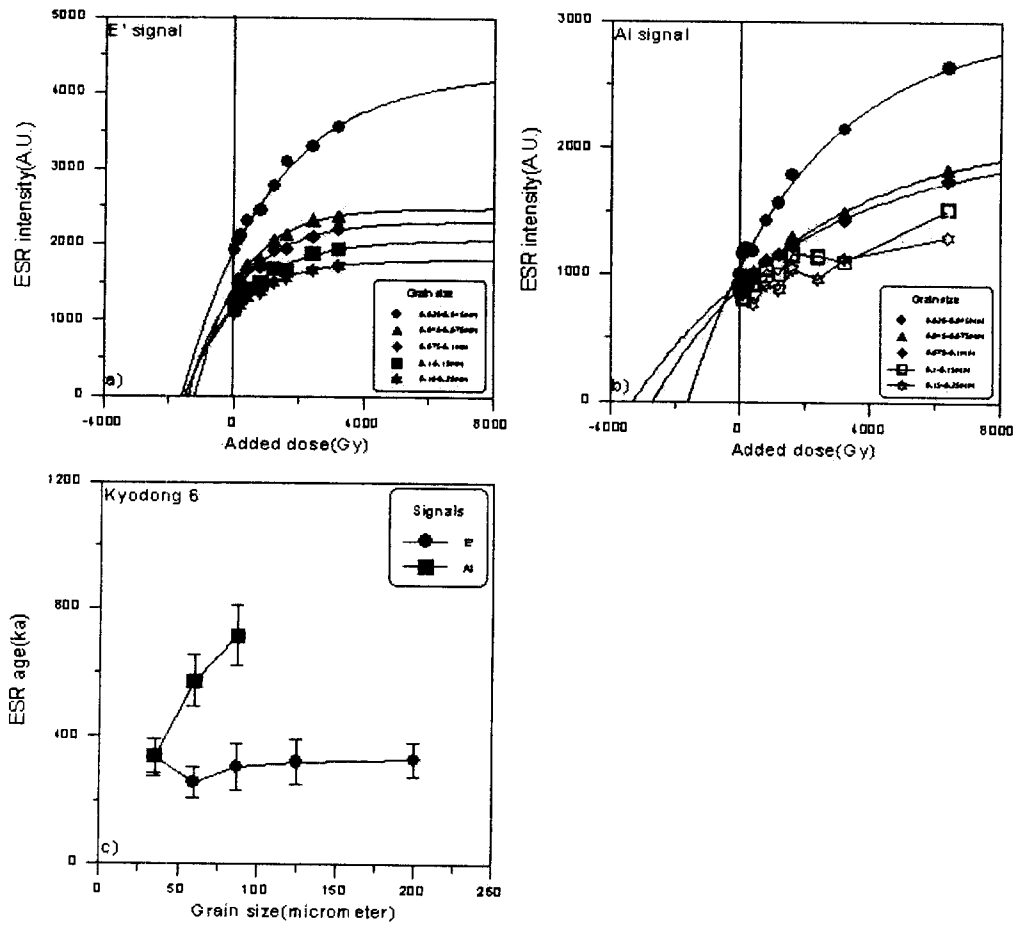


그림 10. 단층암 시료 교동 6의 E'(a)와 Al(b) 신호의 성장곡선 그리고 ESR 연령과 입자크기와의 관계(c).

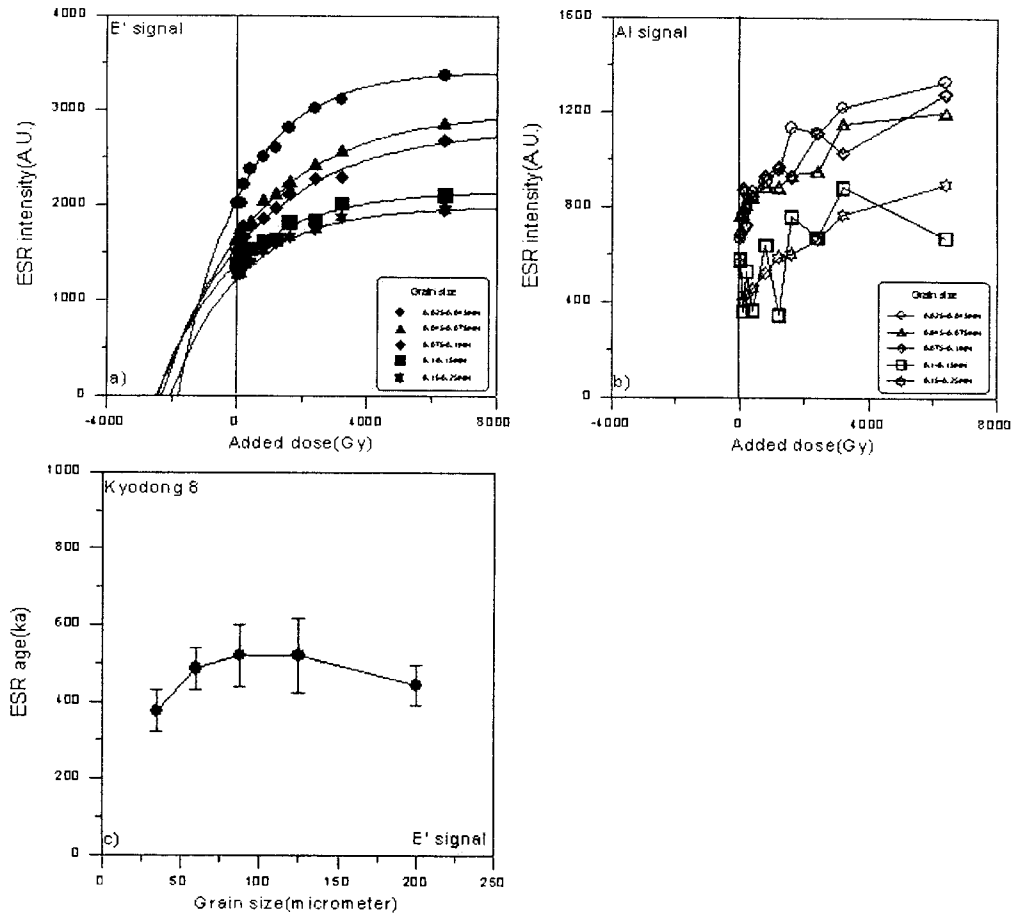


그림 11. 단층암 시료 교동 8의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선 그리고 ESR 연령과 입자크기와의 관계(c).

#### 제 4 절 다방 지점

양산시 동면 다방리 지역을 통과하는 1077 도로의 절개면(북위 35° 19' 35.6'', 동경 129° 03' 22.9'')에는 안산암과 흑운모화강암이 단층 접촉하고 있다. 2-5 cm 두께의 단층비지대 주변에 약 1-5cm 두께의 파쇄암대가 발달되어 있다. 단층파쇄암대에는 파쇄엽리가 발달되어 있으며, 일부는 전단변형을 심하게 받아 초파쇄암(ultracataclasite)으로 바뀌었다. 이는 이 단층이 적어도 두 번 이상 재활동 한 것(파쇄암 형성시기, 단층비지 형성시기)을 지시한다. ESR연령 측정을 위해 단층비지시료(다방132)를 채취하였다(그림 12).

단층암 시료 다방 132로부터 분리된 석영 속의 E'과 AI 신호는 모든 입자 크기에 대하여 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 ESR 신호의 세기의 증감이 불규칙하다(그림 13a, 13b). 이는 마지막 단층활동 후에 주변 방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 센터가 포화(saturation)된 것으로 추정된다.

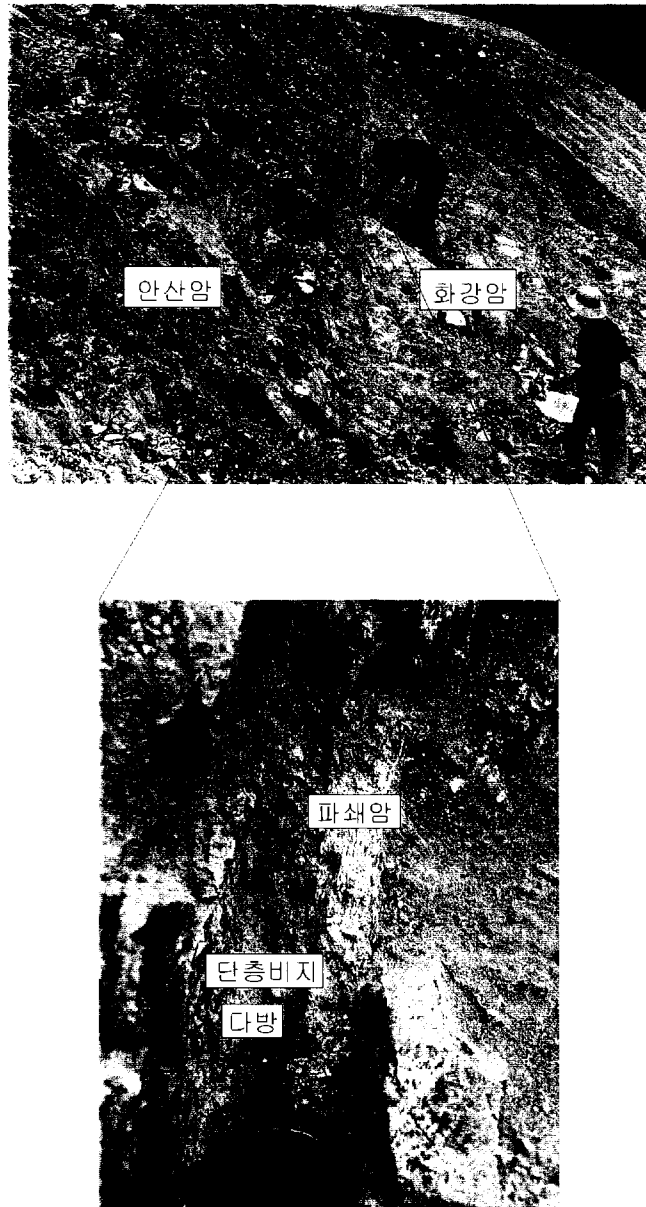


그림 12. 다방 지점의 노두사진 및 시료채취 지점.

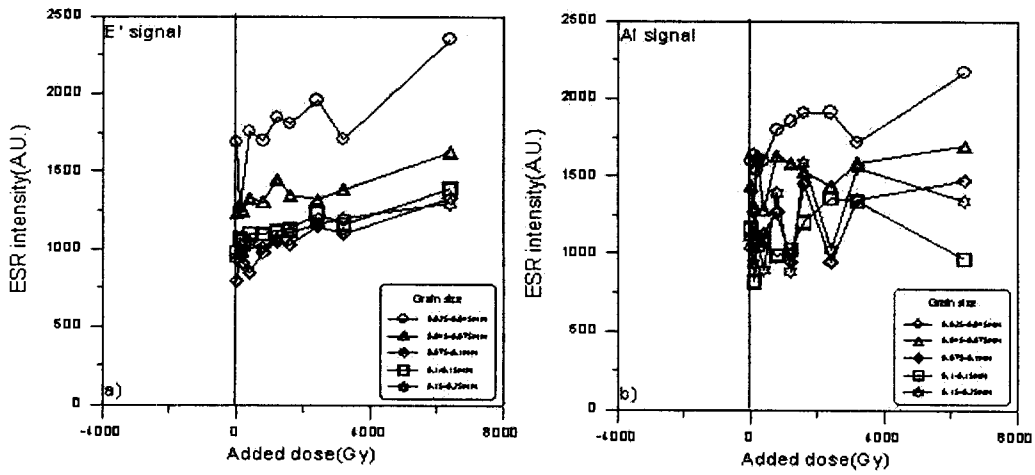


그림 13. 단층암 시료 다방 132의 E'(a)과 Al(b) 신호의 성장곡선.

표 1. 단층암의 ESR 연령자료와 결과.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
교동 5	교동리	$1.91 \pm 0.06$	$6.71 \pm 0.43$	$1.81 \pm 0.04$	$17.26 \pm 8.15$
Grain size	ESR signal	$D_E$ (Gy)	Dose rate ( $\mu$ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 $\mu$ m	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
45-75 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
75-100 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
100-150 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
150-250 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
교동 6	교동리	$3.06 \pm 0.07$	$7.93 \pm 0.47$	$4.30 \pm 0.07$	$17.26 \pm 8.15$
Grain size	ESR signal	$D_E$ (Gy)	Dose rate ( $\mu$ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 $\mu$ m	E'	No analysis			Multiple ESR age 310 $\pm$ 20
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 $\mu$ m	E'	$1573 \pm 244$	$4716 \pm 411$	$334 \pm 59$	
	OHC	No signal			
	Al	$1595 \pm 208$	$4716 \pm 411$	$338 \pm 53$	
	Ti	No signal			
45-75 $\mu$ m	E'	$1201 \pm 192$	$4679 \pm 408$	$257 \pm 47$	
	OHC	No signal			
	Al	$2680 \pm 295$	$4679 \pm 408$	$573 \pm 80$	
	Ti	No signal			
75-100 $\mu$ m	E'	$1409 \pm 316$	$4642 \pm 403$	$304 \pm 73$	
	OHC	No signal			
	Al	$3283 \pm 317$	$4642 \pm 403$	$715 \pm 93$	
	Ti	No signal			
100-150 $\mu$ m	E'	$1481 \pm 293$	$4594 \pm 399$	$322 \pm 70$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
150-250 $\mu$ m	E'	$1490 \pm 199$	$4501 \pm 388$	$331 \pm 53$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
교동 8	교동리	$2.54 \pm 0.07$	$11.33 \pm 0.48$	$4.24 \pm 0.06$	$17.26 \pm 8.15$
Grain size	ESR signal	$D_E$ (Gy)	Dose rate ( $\mu$ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 $\mu$ m	E'	No analysis			Maximum ESR age $380 \pm 60$
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 $\mu$ m	E'	$1790 \pm 211$	$4775 \pm 411$	$375 \pm 55$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
45-75 $\mu$ m	E'	$2300 \pm 166$	$4737 \pm 407$	$485 \pm 54$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
75-100 $\mu$ m	E'	$2440 \pm 316$	$4700 \pm 403$	$519 \pm 81$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
100-150 $\mu$ m	E'	$2414 \pm 400$	$4651 \pm 398$	$519 \pm 97$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
150-250 $\mu$ m	E'	$2013 \pm 166$	$4558 \pm 389$	$442 \pm 52$	
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			



표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
다방 132	다방리	$1.91 \pm 0.06$	$6.71 \pm 0.43$	$1.81 \pm 0.04$	$17.26 \pm 8.15$
Grain size	ESR signal	$D_E$ (Gy)	Dose rate ( $\mu$ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 $\mu$ m	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
45-75 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
75-100 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
100-150 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			
150-250 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	No signal			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
서생 1	서생 1지점	$2.47 \pm 0.05$	$7.97 \pm 0.36$	$1.02 \pm 0.02$	$17.26 \pm 8.15$
Grain size	ESR signal	$D_E$ (Gy)	Dose rate ( $\mu$ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 $\mu$ m	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
45-75 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
75-100 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
100-150 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
150-250 $\mu$ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
서생 2	서생 1지점	2.27±0.07	8.42±0.44	1.38±0.04	17.26±8.15
Grain size	ESR signal	D <sub>E</sub> (Gy)	Dose rate (μGy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 μm	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 μm	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
45-75 μm	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
75-100 μm	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
100-150 μm	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
150-250 μm	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
서생 3	서생 1지점	2.42±0.06	7.49±0.41	1.36±0.03	17.26±8.15
Grain size	ESR signal	D <sub>E</sub> (Gy)	Dose rate (μ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 μ m	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
45-75 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
75-100 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
100-150 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
150-250 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			

표 1. 계속.

Sample	Site	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	Water content(%)
서생 4	서생 2지점	2.80±0.05	10.93±0.40	1.69±0.03	17.26±8.15
Grain size	ESR signal	D <sub>E</sub> (Gy)	Dose rate (μ Gy/year)	ESR age (ka)	Mean ESR age(ka)
<25 μ m	E'	No analysis			Saturated
	OHC	No analysis			
	Al	No analysis			
	Ti	No analysis			
25-45 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
45-75 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
75-100 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
100-150 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			
150-250 μ m	E'	Saturated			
	OHC	No signal			
	Al	Saturated			
	Ti	Saturated			



## 5. 토의 및 결론

이번 보고서에 포함된 단층암 시료들은 제 4기 지층이 발견되지 않은 기반암(응회암, 화강암, 안산암)에서 채취한 시료들이다. 교동지점을 제외하고는 모두 ESR신호가 포화되어 단층암의 마지막 활동시기를 결정할 수 없었다. 서생지점의 단층들은 대부분 양산단층대와 평행하며 고각도의 경사각을 가진 주향이동 단층으로 추정되며 적어도 제 4기 이전에 형성되었거나 재활동 한 것으로 여겨진다. 교동지점의 단층대는 어영단층대의 일부로 추정되며 하반기 경계부의 단층비지대는 제 4기 이전에 마지막 단층운동이 일어났으며, 단층대의 중앙부에 발달하고있는 단층비지대는 약 38만년전에, 그리고 상반쪽 경계부에 있는 단층비지대는 약 31만년전에 재활동 한 것으로 여겨진다. 교동지점에 발달된 단층대에서는 하반기에서 상반쪽으로 단층활동이 이동된 경향을 보인다. 다방지점에 발달된 단층은 안산암과 화강암의 경계를 이루고 있어 비교적 큰 단층으로 여겨지나 제 4기 이전에 마지막 단층활동이 일어난 것으로 추정된다. 이번 연구 결과 기반암에 발달되어 있는 단층비지대는 대부분 제 4기 이전에 마지막 단층운동이 일어난 것으로 추정되며, 단층암의 ESR연령 측정법이 기반암에 발달된 단층비지의 마지막 활동시기를 추정하는데 좋은 방법임이 확인되었다.





## 참고문헌

- Aitken, M.J., and Smith, B.W. (1988). Optical dating: recuperation after bleaching. *Quat. Sci. Rev.*, 7, 387-393.
- Bar, M., Kolodny, Y., and Bentor, U.K. (1974). Dating of faults by fission track dating of epidotes - An attempt. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 22, 157-166.
- Bartsch-Winkler, S., and Schmoll, H.R. (1992). Utility of radiocarbon-dated stratigraphy in determining late Holocene earthquake recurrence intervals, upper Cook Inlet region, Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104, 684-694.
- Bell, J. W., and Katzer, T. (1990). Timing of late Quaternary faulting in the 1954 Dixie Vally earthquake area, central Nevada: *Geology*, 18, 622-625.
- Blenkinsop, T. G., and Drury, M. R. (1988). Stress estimates and fault history from quartz microstructures: *Journal of Structural Geology*, 10, 673-684.
- Boyer, S. E., and Elliott, D. (1982). Thrust systems: *American Association of Petroleum Geologists Bulltim*, 66, 1196-1230.
- Buhay, W.M., Clifford, P.M., and Schwarcz, H.P. (1992). ESR dating of the Rotoiti breccia, New Zealand. *Quat. Sci. Rev.*, 11, 267-271.
- Colman, S.M., and Pierce, K.L. (1981). Weathering rinds on andesitic and basaltic stones as a Quaternary age indicator, western United States. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1210, 56 pp.
- Eyal, Y., Kaufman, A., and Matthews, M.B. (1992). Use of  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  ages of

striated carnotites for dating fault displacements. *Geology*, 20, 829-832.

Forman, S.L., Machette, M.N., Jackson, M.E., and Maat.P.(1989). An evaluation of thermoluminescence dating of paleoearthquakes on the American Fork segment, Wasatch fault zone, Utah. *Journal of Geophysical Research*, 96, 595-605.

Fukuchi, T. (1988). Applicability of ESR dating using multiple centres to fault movement \_ The case of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, a major fault in Japan. *Quat. Sci. Rev.*, 7, 509-514.

Godfrey-Smith, D.I., Huntley, D.J., and Chen, W.H. (1988). Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quat. Sci. Rev.*, 7, 373-380.

Hailwood, E.A., Maddock, R.H., Fung, T., and Rutter, E.H. (1992). Palaeomagnetic analysis of fault gouge and dating fault movement, Anglesey, North Wales. *J. Geol. Soc. London*, 149, 273-284.

Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., and Thewalt, M.L.W. (1985). Optical dating of sediments, *Nature*, 313, 105-107.

Ikeya, M. Miki, T., and Tanaka, K. (1982). Dating of a fault by Electron Spin Resonance on intrafault materials, *Science*, 215, 1392-1393.

Kanaori, Y., Miyakoshi, K., Kakuta, T., and Satake, Y. (1980). Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges. *Eng. Geol.*, 16, 243-262.

Kanaori, Y., Tanaka, K. and Miyakoshi, K. (1985). Further studies on the use of quartz grains from fault gouges to establish the age of faulting. *Eng. geol.*, 21, 175-194.

Knipe, R.J.,(1989). Deformation mechanism-recognition from natural tectonites: *Journal of Structural Geology*, v. 11, 127-146.

Kralik, M., Clauer, N., Holnsteiner, R., Huemer, H., and Kappel, F. (1992). Recurrent fault activity in the Grimsel Test Site (GTS, Switzerland): revealed by Rb-Sr, K-Ar and tritium isotope techniques. *J. Geol. Soc. London*, 149, 293-301.

Kralik, M., Klima, K., and Riedmuller, G. (1987). Dating fault gouges. *Nature*, 327, 315-317.

Lee, H. K. and Schwarcz, H. P. (1994) Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, southern California. *Tectonophysics*, 235, 317-337.

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (1994a). ESR plateau dating of fault gouge. *Quat. Sci. Rev.*, 13, 629-634.

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (1994b). Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, Southern California. *Tectonophysics*, 235, 317-337.

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (1995). A fractal clustering of fault activity in California. *Geology*, 23, 377-380.

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (1996). ESR plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108, 735-746.

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (2001). ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quat. Sci. Rev.*, 20, 999-1003.

McCalpin, J. P., Forman, S.L., and Lowe, M. (1994). Reevaluation of

Holocene faulting at the Kaysville site, Weber segment of the Wasatch fault zone, Utah. *Tectonics*, 13, 1-16.

Mckee, J. W., Jones, N. W., and Long, L. E. (1984). History of recurrent activity along a major fault in northeastern Mexico: *Geology*, 12, 103-107.

Porat, N., Amit, R., Zilberman, E., Enzel, Y. (1997). Luminescence Dating of Fault-Related Alluvial Fan Sediments in the Southern Arava Valley, Israel. *Quat. Sci. Rev.*, 16, 397-402.

Porat, N., Wintle, A. G., Amit, R., Enzel, Y. (1996). Late Quaternary Earthquake Chronology from Luminescence Dating of Colluvial and Alluvial Deposits of the Arava Valley, Israel, *Quaternary Research*, 46, 107-117.

Rhodes, E.J. (1988). Methodological considerations in the optical dating of quartz. *Quat. Sci. Rev.*, 7, 395-400.

Rhodes, E.J. (1990). Optical dating of sediment. Unpublished D. Phil thesis, Oxford University.

Rink, W. J., Toyoda, S., Rees-Jones, J. and Schwarcz, H. P. (1999). Thermal activation of OSL as a geothermometer for quartz grain heating during fault movements, *Radiation Measurements*, 30, 97-105.

Scholtz, C.H., Beavan, J., and Hanks, T.C. (1979). Frictional metamorphism, argondepletion, and tectonic stress on the Alpine fault, New Zealand. *J. Geophy. Res.*, 84, 6770-6782.

Schwarcz, H.P. and Lee, H.K. (1998) Electron spin resonance dating. In: Sowers, J.M., Noller, J.S. and Lettis, W.R. (ed's) *Dating and Earthquakes: Review of Quaternary Geochronology and Its Application to Paleoseismology*. U.S. Nuclear Regulatory Comm., NUREG/CR-5562, 2,

289-304.

Schwarcz, H.P., and Grun, R. (1992). ESR dating and the origin of modern man. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lon., B* 337, 145-148.

Sieh, K.E., Stuiver, M., and Brillinger, D. (1989). A more precise chronology of Earthquakes produced by the San Andreas fault in Southern California. *J. Geophys. Res.*, 94, 603-623.

Smith, B.W., Aitken, M.J., Rhodes, E.J., Robinson, P.D., and Geldard, D.M. (1986). Optical dating: methodological aspects. *Radiation Protection Dosimetry*, 17, 229-233.

Smith, B.W., Rhodes, E.J., Stokes, S., Spooner, N.A., and Aitken, M.J. (1990). Optical dating of sediments: initial quartz results from Oxford. *Archaeometry*, 32, 19-31.

Stokes, S. (1991). Quartz-based optical dating of Weichselian coversands from the eastern Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 70, 327-337.

Tagami, T., Lal, N., Sorkhabi, R.B., and Nishimura, S. (1988). Fission track thermochronologic analysis of the Ryoke belt and the Median Tectonic Line, Southwest Japan. *J. Geophys. Res.*, 93, 13705-13715.

Tanaka, K., and Shidahara, T. (1985). Fracturing, Crushing and grinding effects on ESR signal of quartz. In: Ikeya, M. and Miki, T. (eds), *ESR dating and Dosimetry*, Ionics, Tokyo, 239-247.

Toyoda, S. and Schwarcz, H. P. (1996). The spatial distribution of ESR in fault gouge revealed by abrading technique. *Radiation and Isotopes*, 47, 1409-1413.

Van Dissen, R.J., Berryman, K.R., Pettinga, J.R., and Hill, N.L. (1992).

Paleoseismicity of the Wellington-Hutt Valley Segment of the Wellington Fault, North Island, New Zealand. *J. Geol. Geophys.*, 35, 165-176.

Vita-Finzi, C. (1992). Radiocarbon dating of late Quaternary fault segments and systems. *J. Geol. Soc. London*, 149, 257-260.

Weil, J.A. (1984). A review of Electron Spin Spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz. *Phys. and Chem. Minerals*, 10, 149-165.

White, S. H., Bretan, P. G., and Rutter, E. H. (1986). Fault zone reactivation: kinematics and mechanism. *Royal Society of London Philosophical Transaction*, ser. A. 317, 81-97.

Wills, C.J., and Borchardt, G. (1993). Holocene slip rate and earthquake recurrence on the Honey Lake fault zone, northeastern California. *Geology*, 21, 853-856.

Wintle, A.G., Lancaster, N., and Edwards, S.R. (1994). Infrared stimulated luminescence (IRSL) dating of late-Holocene aeolian sands in the Mojave Desert, California, USA. *The Holocene*, 4, 74-78.

## 서 지 정 보 양 식

주관기관보고서번호	위탁기관보고서번호		
	KINS/HR-540		
제목/부제	지진안정성 평가기반 기술개발 / 단층암에 대한 ESR 연대측정 연구		
위탁연구기관 과제명 및 과제책임자	이희권 (지구과학부)		
연구자 및 부서명			
발행지	춘천	발행기관	강원대학교
페이지	48 p.	도표	유 ( O ), 무 ( )
참고사항	2001년도 원자력연구개발 중장기 과제		
비밀여부	공개( O ), 비공개( )	보고서 종류	연구보고서
연구위탁기관	한국원자력안전기술원	계약 번호	
초록 (200단어 내외)	<p>ESR 절대연령측정법을 이용하여 고지진을 일으킨 단층활동의 시기는 알아낼 수 있다. ESR 신호는 단층활동 중에 각각의 석영입자에 작용하는 지엽적인 격자변형작용이나 마찰열에 의해 그 세기가 줄어든다. 단층활동 이후에 주변의 방사성 원소로부터 에너지를 받아 ESR 신호의 세기는 다시 커진다. 단층암의 마지막 활동시기는 상응조사량을 조사율로 나누어 구하게된다. 단층암 속의 석영입자의 크기가 작을수록 단층활동 중에 지엽적인 격자변형작용이나 마찰열에 의해 ESR 신호가 더욱더 많이 감소하게되며, 임계크기 이하에서는 ESR 신호가 완전히 영이 된다. 따라서 입자크기와 ESR 연령그래프에서 임계크기 이하에서 연령평탄역을 보이게된다.</p> <p>ESR 절대연령측정법을 이용하여 고리 원전 부근에서 채취한 단층암 시료를 분석하였다. 기반암에서 채취한 대부분의 단층암들은 적어도 제 4기 이전에 마지막 활동을 하였으나 어영단층대의 ESR 연령들은 370ka에서 310ka의 범위에 속한다. 이는 고리 원전 부근에 분포하는 어영단층대의 일부가 제 4기의 플라이스토세에서도 계속하여 지진을 일으킨 단층활동을 하였음을 지시한다.</p>		
주제명키워드(10단어 내외)	어영단층대, 단층암, 단층비지, ESR 절대연령 측정		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.			
		KINS/HR-540			
Title/Subtitle		Development of Seismic Safety Evaluation Technology / ESR dating of fault rocks			
Sponsoring Org. Project and Project Manager			Hee-Kwon Lee(Devision of Earth Science)		
Researcher and Dept't.					
Pub. Place	Chunchon	Pub. Org.	Kangwon National Univ.	Pub. Date	March, 2002
Page	48 p.	Il. and Tab.	Yes ( O ), No ( )	Size	21 × 30 cm.
Note					
Classified	Unclassified( O ), Classified( )		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.	Korea Institute od Nuclear Safety (KINS)		Contract No.		
Abstract (About 200 Words)					
<p>Past movement on faults can be dated by measurement of the intensity of ESR signals in quartz. These signals are reset by local lattice deformation and local frictional heating on grain contacts at the time of fault movement. The ESR signals then grow back as a result of bombardment by ionizing radiation from surrounding rocks. The age is obtained from the ratio of the equivalent dose, needed to produce the observed signal, to the dose rate. Fine grains are more completely reset during faulting, and a plot of age vs. grain size shows a plateau for grains below critical size; these grains are presumed to have been completely zeroed by the last fault activity.</p> <p>We carried out ESR dating of fault rocks collected near the Gori nuclear reactor. Most of the ESR signals of fault rocks collected from the basement are saturated. This indicates that the last movement of the faults had occurred before the Quaternary period. However, ESR dates from the Oyong fault zone range from 370 to 310 ka. Results of this research suggest that long-term cyclic fault activity of the Oyong fault zone continued into the Pleistocene.</p>					
Subject Keywords (About 10 Words)					
Oyong fault zone, Fault rocks, Fault gouge, ESR dating					