

# 울산단층대 신기 단층 비지의 광물학적 특성 및 생성환경

이석훈<sup>1</sup>, 정창식<sup>1</sup>, 손병국<sup>2</sup>, 임창복<sup>3</sup>

<sup>1</sup>기초과학지원연구소 중앙분석기기부 (shslee@comp.kbsi.re.kr)

<sup>2</sup>한국자원연구소 석유해저자원연구부, <sup>3</sup>한국원자력안전기술원 방사선공학연구실

## 1. 서론

우리나라 남동부 지역에는 월성 및 고리 원자력발전소가 운영되고 있다. 이들 원전부지의 안정성과 관련하여 최근 양산 및 울산단층대를 비롯하여 이들 지역의 단층운동에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내 원자력발전소 부지의 적합성 평가에 준용하고 있는 미국 원자력규제위원회(US NRC) 규정에 따르면 5만년 내에 1번 이상 또는 50만년 내에 2번 이상 지표면 변위를 갖는 단층을 활동성 단층(Capable Fault)으로 정의하고 있어, 이들 지역에서의 단층에 대한 정확한 운동시기를 규명하는 것은 원자력발전소 부지의 안정성 평가에 매우 중요한 연구자료로 활용될 수 있다.

단층의 연대측정은 표준동위원소법으로 방사성탄소법, K-Ar, Ar-Ar, U-series, <sup>210</sup>Pb, U-Pb와 Th-Pb법 등이 있으며, 우주기원원소법 <sup>26</sup>Al, <sup>36</sup>Cl, <sup>3</sup>He, 그리고 <sup>14</sup>C법이 포함된다. 방사기원법으로 휘선티랙법 (fission-track), 형광법 (optically stimulated luminescence: OSL) 및 ESR법 (electron spin resonance) 등이 있고, 시간에 따른 지형적 특징의 단계적 변화를 이용하는 지형학적 방법에는 soil profile development, 암석-광물 풍화작용 등이 포함된다. 이러한 방법들은 단층의 중심부에 발달되어 있는 단층비지 (fault gouge)의 점토광물을 이용하거나, 관련된 퇴적층의 구성광물을 대상으로 하기 때문에 광물에 대한 정확한 이해 및 해석이 선행되어야만 단층운동 시기의 고환경을 유추하고, 연대측정 결과에 대한 정확한 해석이 가능하다. 단층비지의 연대측정의 최근 연구에서 Burley and Flisch (1989), Veld and Renac (1996), Clauer et al. (1997) 등은 점토광물 즉 스�멕타이트와 일라이트를 이용하였으며, 이 광물들에 대한 정확한 이해를 요구하고 있다. Stephen et al. (1991a and 1991b)은 연대측정과 관련하여 온도에 따른 스�멕타이트 및 일라이트의 안정성에 관해 보고한 바 있다.

본 연구의 목적은 울산단층대 및 인근 신기 단층들의 단층비지 및 주변 관입암들의 구성광물 규명과 광물 상호간의 관계 규명, 스�멕타이트, 일라이트 및 I/S 혼합층상광물을 이용하여 단층의 주요 활동기에 지배적이었던 물리화학적인 환경 해석 및 단층운동 측정연대 해석에 광물학적 연구의 의의 제고에 있다.

## 2. 시료채취 및 실험방법

시료채취는 경주시 외동읍 말방단층, 입실단층 및 원원사단층과 양남면 수렴단층에서 실시됐다. 단층비지 중심부에서 외곽 모암쪽으로 가면서 체계적으로 채취하였으며, 단층 주변 암의 파쇄대를 충전하고 있는 암맥들도 함께 채취하였다. 채취한 단층비지의 광물조성, 점토광물들의 특성 및 상호관계를 규명하기 위해 분말시료에 대한 X-선 회절분석, 주사전자현미경관찰 (SEM)을 실시했다. 연마편을 제작하여 후방산란전자영상을 통한 미구조 해석 및 전자현미분석기로 점토광물의 화학분석을 시도하였다. 점토광물에 대한 정확한 감정을 위해 5-2 $\mu$ m, 2-1 $\mu$ m 및 <1 $\mu$ m로 분리하고, 각각에 대하여 가열실험 및 에틸렌글리콜 (ethylene

glycol) 증발흡착실험을 병행하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 또한 TEM을 이용하여 점토광물의 미세구조를 규명하고자 하였다. 입자 크기별로 분리한 시료들에 대하여 K-Ar분석 및 Rb-Sr분석을 통해 연대측정을 실시하였으며, 입자크기에 따른 연대측정결과와의 관계를 해석하였다.

### 3. 결과

단층비지를 구성하는 광물 중 모암의 파쇄물로는 석영, 알바이트, 정장석 및 사장석이 관찰되며, 말방 단층비지에서는 녹염석이 소량 관찰되기도 한다. 점토광물로는 스멕타이트, 일라이트, I/S혼합층 및 캐올리나이트가 확인되었다 (그림1).

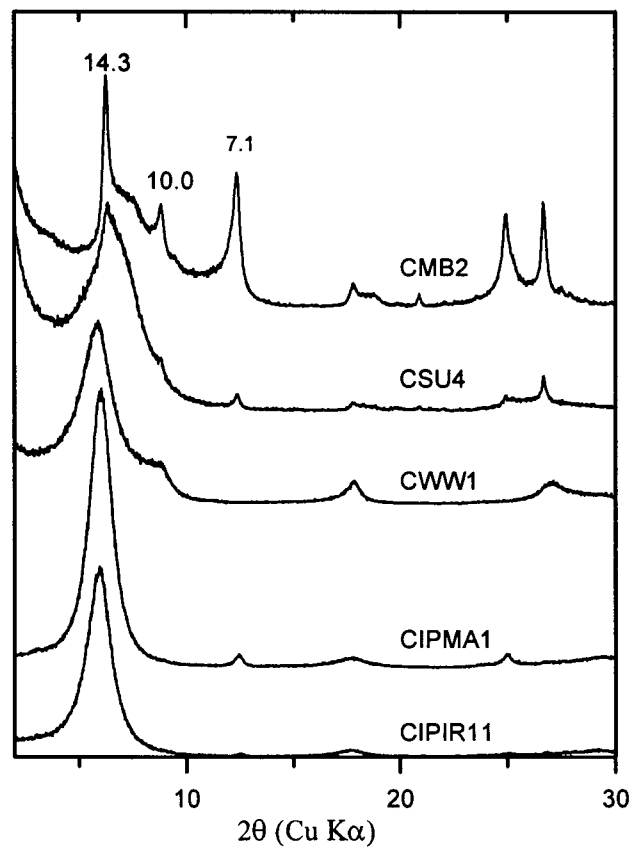


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of  $<1\mu\text{m}$  fractions from fault gouges.

단층 주변암인 안산암에 관입한 암맥들은 백운석, 방해석 등 탄산염광물과 laumontite, heulandite와 같은 불석광물로 주로 Ca을 함유한 광물들이다. 단층비지의 점토광물은 주로 스멕타이트로, 전자현미분석결과 비교적 전하가 큰 몬모릴로나이트임이 확인되었으며, 미량의 일라이트가 혼재되어 있다. 입실 및 원원사 단층비지의 몬모릴로나이트에는 상당량의 Na이 Ca과 함께 들어있으나 말방 및 수렴단층비지에는 Na이 전혀 들어있지 않는 것은 몬모릴로나이트 형성환경에 차이가 있음을 시사하고 있다. 단층비지의 일라이트는 X-선 회절

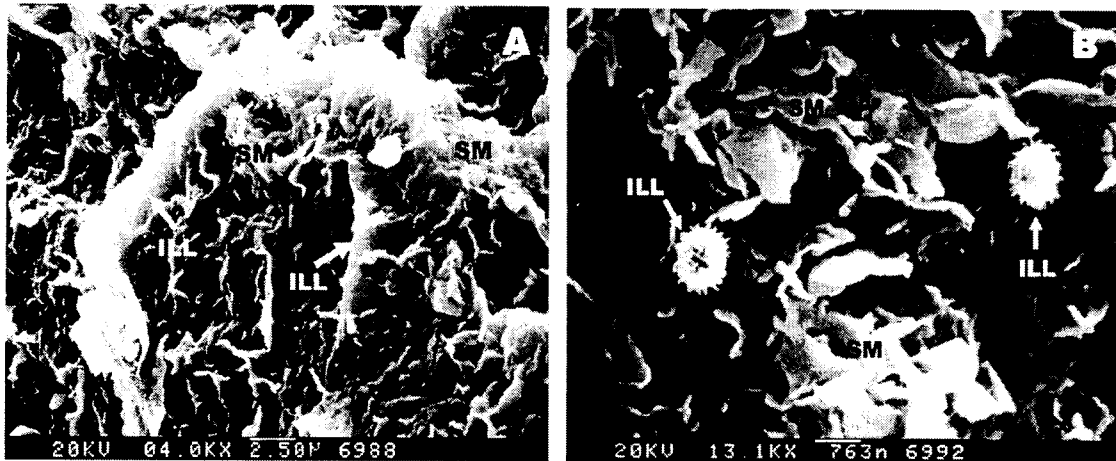


Fig. 2. Scanning electron micrographs of montmorillonite (SM) and illite (ILL) from fault gouges.

분석결과 1Md형으로 확인되었으며, 판상 및 섬유상 (그림2)으로 몬모릴로나이트와 함께 산출되고 있으며, 몬모릴로나이트의 화학분석시 상당량의 K이 인지되고 있어 이들 광물이 성인으로 밀접하게 관련되어 있고, 전이과정에서 I/S혼합층상광물이 생성되어 있음을 시사한다. 소량 산출되는 캐올리나이트는 얇은 판상으로 나타난다. 캐올리나이트의 산출은 단층비지가 지표로 드러나면서 풍화작용이 수반되었음을 시사한다.

모암인 안산암 (48.8Ma: 최위찬 외, 1998) 및 화강암 (50Ma: Kim and Kim, 1997)을 부정합으로 덮고 있는 신기 역암층까지 연장되어 발달한 입실단층 및 원원사 단층비지의 Rb-Sr 및 K-Ar 연대측정결과 30Ma (정창식 외, 2000)로 입자크기와 상관없이 서로 잘 일치하고 있으며, Sr의 동위원소비의 초기치가 주변 경주화강암의 값과 유사한 것으로 보아 모암인 경주화강암이 생성된 이후 단층운동 및 이에 수반되는 열수변질작용이 있었던 것으로 보인다. 모암의 파쇄대를 충진한 불석광물에 대한 K-Ar 연대측정한 결과 1.62-1.83 Ma의 범위로 입실 단층비지들에 대한 ESR연대가 1.13 - 1.72Ma (이희권, 1998)인 것과 일치하고 있어 단층활동이 일어난 후 거의 연속적으로 열수 변질작용이 일어나 이미 형성되어있던 파쇄대를 충진했음을 시사한다. 말방 및 수렴단층 비지의 연대측정결과는 입자의 크기가 커지면서 겉보기 연대가 젊어지는 경향성을 보인다.

#### 4. 토의 및 결론

울산단층대의 단층비지는 단층운동시 수반된 열수변질작용으로 형성되었고, 지표상에 드러나면서 풍화작용을 받은 것으로 보인다. 점토광물의 조성과 특징을 고려해 볼 때 형성온도는 100 - 200°C 범위인 것으로 판단되며, 주변 관입암으로 산출되는 불석광물은 280°C 이하의 열수변질작용을 받은 것으로 판단된다. 이러한 조건은 인근 양산단층대 점토광물 생성 환경에 비해 낮은 온도조건 하에서 형성되었음을 시사한다.

말방 및 수렴단층 비지의 연대측정 결과의 입자크기에 따른 경향성은 입자 크기가 작아지면서 동위원소계의 재평형에 영향을 미칠 수 있는 열적 사건에 더 민감하고 Ar loss도 더

잘 일어나는 일반적인 경향과는 정 반대라는 점에서 K-Ar 및 Rb-Sr 연대측정 결과에 대한 해석을 위해서는 좀더 정확한 광물학적 해석이 있어야 할 것으로 보인다.

## 5. 참고문헌

- 이희권, 1998, 단층 활동시기 결정, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종 보고서, 한국자원연구소, 한국전력공사, 555-671.
- 정창식, 이석훈, 최만식, 이광식, 김정민, 한정희, 신형선, 장병욱, 이희권, 장호완, 권성택, 임소현, 안선영, 2000, 신기단층에 대한 절대연대 측정법 정립, 21-65.
- 최위찬 외 45인, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가 최종 보고서, 한국자원연구소, 한국전력공사, pp 1694.
- Burely, S. D. and Flisch, M. (1989), K-Ar chronology and the origin of illite in the Piper and Tartan Fields. Outer Moray Firth, U. K. North Sea, Clay Miner., 24, 285-315.
- Clauer, N., Srodon, J., Francu, J., and Sucha, V. (1997) K-Ar dating of illite fundamental particles separated from illite-smectite, Clay Miner., 32, 181-196.
- Kim, C. S. and Kim, G. S., 1997, Perogenesis of the early Tertiary A-type Namsan alkaligranite in the Kyongsang Basin, Korea. Geosci. J., 1, 99-107.
- Stephen, U. A., Philip, E. R. and James, A. K., 1991a, Illite equilibria in solutions: I. Phase relationships in the system  $K_2O$ - $MgO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  between 25 and 250°C, Geoch. Cosmo. Acta, 55, 1353-1364.
- Stephen, U. A., Philip, E. R. and James, A. K., 1991a, Illite equilibria in solutions: II. Phase relationships in the system  $K_2O$ - $MgO$ - $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ , Geoch. Cosmo. Acta, 55, 1365-1374.
- Veld, B. and Renac, C., 1996, Smectite to illite conversion and K-Ar ages, Clay Miner., 31, 25-32.