

## 제4기 입실 단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토의 산출상태에 따른 광물조성 연구: 고해상도분말회절 분석을 중심으로

### Studies on Mineral Composition of Fault Clay in Quaternary Ipsil Fault: High Resolution Powder Diffraction Analysis

박성민 (Sung Min Park)<sup>1</sup> · 강 한 (Han Kang)<sup>1</sup> · 장윤득 (Yun Deuk Jang)<sup>2</sup> ·  
임창복 (Chang Bock Im)<sup>3</sup> · 김정진 (Jeong Jin Kim)<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth & Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

<sup>2</sup>경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea)

<sup>3</sup>한국원자력안전기술원

(Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 305-600, Korea)

**요약:** 입실 단층 파쇄대에는 다양한 종류의 단층점토가 산출된다. 이들 단층점토에 대한 X-선회절분석, 고해상도분말회절분석, 전자현미경 관찰 등을 통하여 단층점토의 광물조성에 대한 연구를 하였다. 입실 단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토는 색깔에 따라 광물 조성의 차이가 나타난다. 입실단층에서 나타나는 단층점토의 특징적인 광물은 로몬타이트이며, 주변암석에서 이 광물이 나타나지 않는 것으로 보아 풍화 변질 산물인 것으로 추정된다. 입실 단층의 단층점토의 주 구성광물은 스멕타이트이다.

**주요어 :** 단층, 단층점토, 로몬타이트, 스멕타이트, 파쇄대

**ABSTRACT:** XRD, HRPD and SEM were used for mineralogical characterization of fault clay in fracture zone from Ipsil. Variations of color in fault clay exhibit significant mineral composition difference. Fault clays from Ipsil are composed mainly of smectite, laumontite, and quartz. Laumontite, a distinct fault clay in Ipsil fault, might be resulted from alteration of bed rock in fracture zone based on the result that no laumontite was found near fault rock. Fault clays from Ipsil are composed mainly of smectite.

**Key words :** fault, fault clay, laumontite, smectite, fracture zone

\*교신저자: jjkim@andong.ac.kr

## 서 언

우리나라는 지질학적으로 다양한 종류의 암석이 분포하고 있어 이들 지질특성의 영향으로 원전, 핵폐기물 처리장, 댐, 도로, 철도 건설 및 공업단지 조성 등에서의 인공 및 자연재해의 영향이 중요하게 다루어지고 있다.

양산단층대 인근에는 월성, 고리, 울진 등의 원자력 발전소가 가동중에 있으며, 경주시에 방사성폐기물 처리장 유치가 확정된 상태이다. 양산 단층대 내에서 발견되고 있는 제4기 단층에 대한 활성 여부가 최근에 큰 주목을 받고 있다. 현재까지 알려진 제4기 단층에는 양산단층대의 가천, 상천, 월평, 연봉, 신화, 벽계 및 유계단층과 울산단층대의 왕산, 오곡지, 마동, 탑골, 지현, 신계, 감산사, 활성리, 말방, 입실, 개곡, 원원사, 이화, 읍천 및 수렴단층 등이 있다(Okada *et al.*, 2001; 류충렬 외, 1997; 장태우, 2001, 정창식 외, 2001; 최범영 외, 2002)

이봉주 등(1999)은 울산단층대를 북쪽부터 안강-천북면 갈곡리-불국사 및 불국사-외동읍 쾌릉리-말방리-입실리-모화리 원원사-농소면 중산리 이화-울산시 중구 반구동으로 2대분 하였다. 최근 울산단층대에 대한 연구로는 단열성 선상구조해석, 울산단층대의 광물학적 특성연구, 신기 지구조운동, 단층 비지에 대한 Rb-Sr, K-Ar 연대 측정, ESR 연대측정 등이 있다(정창식 등, 1998; 이석훈 등, 2002; 손승완과 장태우, 2001; 류충렬 등, 1997; 정창식 등, 2001; Lee and Schwarcz, 2001; 이희권과 양주석, 2005). 단층 운동시기와 관련해서 단층점토를 이용한 미구조해석과 구성광물에 대한 연대측정을 통한 단층의 주요 활동시기를 유추하는 연구가 상당히 많이 진행되고 있다(Tanaka *et al.*, 1995; 장태우와 추창오, 1998; 문희수, 2000). 단층면에 존재하는 단층점토로부터 일라이트와 같은 점토광물을 분리하여 K-Ar 연대측정을 하여 단층의 활동시기를 밝힐 수도 있다. 그러나 단층점토가 실제 단층활동시기에 생성되었는지 단층 활동 후 열수변질이나 풍화에 의해 생성되었는지 정확하게 밝혀야만 단층활동시기를 알 수 있다.

단층 활동으로 나타나는 현상들은 단층대 내의 암석에 기록되며 단층대 내부에서의 풍화 특성, 광물의 조성 등과 같은 광물학적 특성이 다르게 나타날 수 있다. 단층대와 그 주변의 암

석과 토양에 대한 풍화작용 및 단층작용과 관련된 부분에 대한 광물학적 특성은 상당한 연구가 진행되었다. 특히 단층 비지나 점토 광물에 대한 특성은 자세하게 연구되었다(장태우 등, 2005; 이석훈 등, 2002; 장태우와 채연준, 2004; 양주석과 이희권, 2001).

현재까지 단층점토에 대한 많은 연구가 진행되었으나 한 지역의 단층파쇄대에서 나타나는 다양한 종류의 단층점토에 대한 광물학적 특성은 많이 연구되지 않은 상태이다. 입실단층 파쇄대에는 색깔과 산출상태가 다양한 단층점토가 나타나며 이들 각각에 대한 광물조성을 정확하게 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 제4기 입실단층의 파쇄대에서 나타나는 단층점토에 대해 고상도분말회절분석(HRPD)과 X-선회절분석(XRD)을 통하여 미량으로 포함된 광물을 정확하게 감정하여 단층점토의 산출상태에 따른 구성광물의 조성을 밝히는 것이다.

## 연구 방법

입실 지역의 단층의 특징과 단층 파쇄대 내에 나타나는 단층점토에 대한 야외조사와 채취한 단층점토에 대한 실내 실험 및 기기분석을 실시하였다. 입실 단층의 단층면이나 파쇄대에 발달한 단층점토의 연장성, 색깔 등에 따라 시료를 채취하였다. 각 시료에 대하여 Rigaku D/Max-2000을 이용한 X-선회절분석(CuK $\alpha$ , 3~70° 2 $\theta$ , 1° 2 $\theta$ /min), 포항가속기연구소(PAL)의 8C2 빔라인 고해상도분말회절분석(scanning time 1sec, 0.05° 2 $\theta$  step, 5~130° 2 $\theta$ ,  $\lambda$  = 1.5502)을 실시하여 구성광물의 조성을 밝혔다. 단층점토에 대한 형태와 미세구조 연구를 위하여 JEOL-JSM-6300 주사전자현미경 관찰을 실시하였다.

## 지질 및 야외 산출상태

제4기 입실단층은 경상북도 경주시 외동읍 입실리(N35°43'09", E129°21'05")에 위치하고 있다. 입실단층의 노두는 강수에 의해 침식되고 있으며 주변 계곡에 댐을 건설하여 저수지를 만들었기 때문에 만수가 되었을 때 단층의 하부가 침수되어 관찰이 불가능하게 된다. 단층으로 인지할 수 있는 부분은 단층의 상부쪽이며, 입실저수지 댐의 남쪽 능선을 절단하고 있다(그

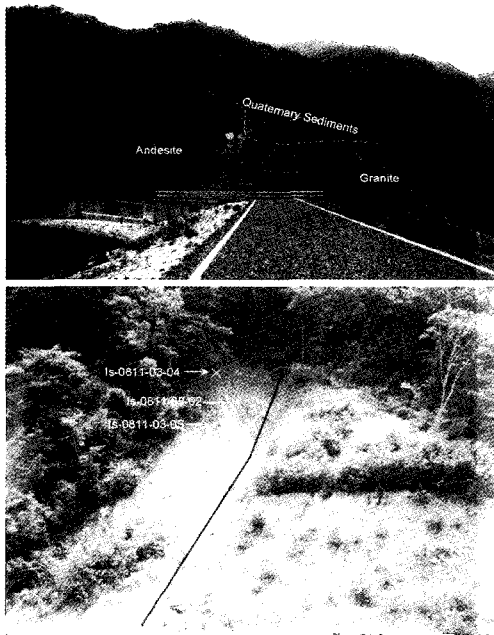


Fig. 1. Geological boundary and sampling points in fracture zone of Ipsil fault.

림 1).

단층면을 경계로 하여 동측은 안산암이, 그리고 서측은 화강암이 분포하며, 이들을 부정합으로 덮는 신기 계곡 퇴적층이 약 7 m의 낙차로 변위되어 있으며, 파쇄대의 주향 방향은 단층점토대와 비슷한 NS이고 경사는 70°E 내지 수직이다. 입실 단층의 화강암 위 부정합면 상위 약 350 cm 지점의 역암층에는 폭 10 cm 정도의 유기물 퇴적층이 연장성있게 발달해 있다. 입실 단층대의 안산암 파쇄대의 틈에는 흰색의 탄산염광물이나 제올라이트가 충전되어 있다.

입실단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토는 푸른색, 연갈색, 녹회색, 적갈색 등 다양한 색깔을 나타낸다. 푸른색의 단층점토는 1~5 cm 정도의 폭을 갖고 연장성은 거의 없지만 연갈색의 단층점토는 기반암과 표토 사이에 발달하고 있으며 연장성도 양호하다. 녹회색의 단층점토는 단층 파쇄대 중심부에 비교적 연장성이 잘 발달해 있으며, 적갈색 단층점토는 저수지 댐 하부의 하천바닥에 나타나며 흰색의 점토광물이 세맥상으로 발달해 있다. 단층점토에 포함된

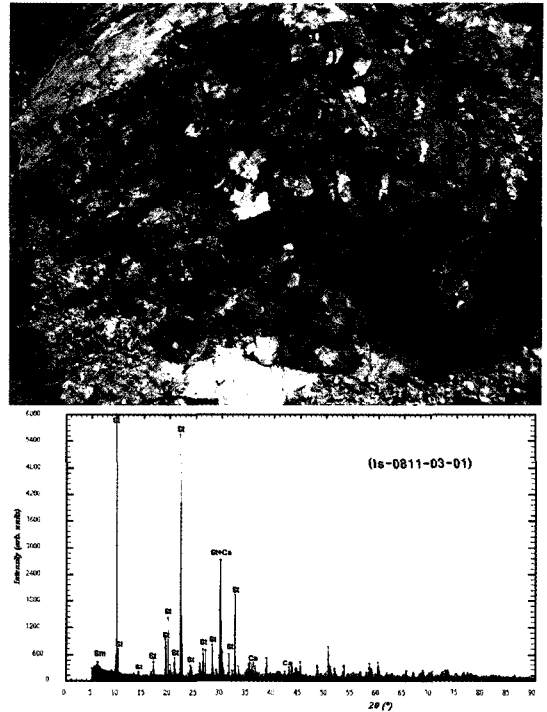


Fig. 2. Photograph of a rock outcrop and HRPD pattern of white precipitates in surface of fracture zone from Ipsil fault. St = stilbite, Sm = smectite, Ca = calcite.

0.5~2 cm 정도 크기의 자갈은 주변 암석과 동일한 암석으로 구성되어 있다.

## 결과 및 토의

### 고해상도 회절분석

#### 흰색 침전물

단층 파쇄대의 절개면에 나타나는 흰색의 물질은 절개지가 만들어지기 전에는 틈을 채우고 있었으나 절개지가 형성되면서 대부분 제거되고 부분적으로 남아있다(그림 2). 단층 파쇄대 절개지면에 나타나는 흰색의 맥상 침전물은 단층점토와 확연히 다른 특성을 나타낸다. 일반적으로 암석의 틈을 따라 침전되는 물질은 순수한 방해석이 대부분이지만 입실 단층에서 나타나는 맥상의 흰색 물질의 주 구성 광물은 미량의 방해석과 스멕타이트를 포함한 순수한 Na-Ca 불석광물인 스틸사이트(Stilbite)이다(그림 2).

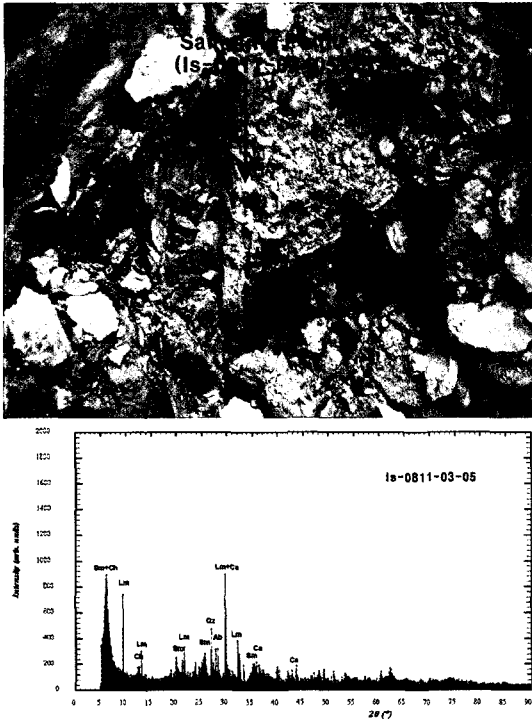


Fig. 3. Photograph of a rock outcrop and HRPD pattern of blue fault clay in fracture zone from Ipsil fault. Sm = smectite, Lm = laumontite, Ch = chlorite, Qz = quartz, Ab = albite, Ca = calcite.

이는 단층대에서 나타나는 단층점토의 생성 과정과 전혀 다른 주변 암석으로부터 유래된 Na-Ca 성분이 틈을 따라 침전된 것으로 추정된다.

#### 푸른색 단층점토

푸른색의 단층점토는 단층면 부근에 나타나며 연장성은 좋지 않다. 다른 지역의 단층점토에서는 거의 나타나지 않는 Ca 불석광물인 로몬타이트가 산출되는 것이 특징이다. 주변의 안산암에서는 로몬타이트가 포함되지 않은 것으로 보아 단층 활동 시 혹은 후기에 변질작용에 의해 생성된 것으로 추정된다. 로몬타이트 외 구성광물은 대부분 스멕타이트이며, 소량의 녹니석과 석영, 사장석 및 방해석을 포함하고 있다(그림 3).

#### 연갈색 단층점토

모암과 상부 토양 사이에 나타나는 연갈색의 단층점토는 스멕타이트와 로몬타이트, 일라이트,

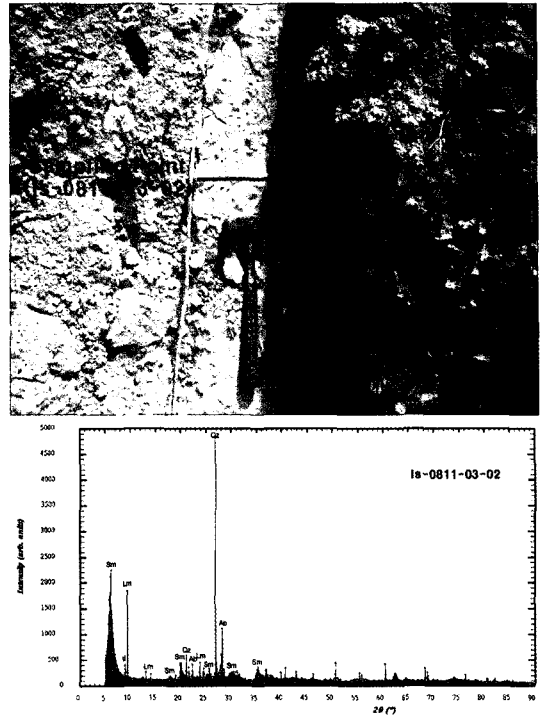


Fig. 4. Photograph of a rock outcrop and HRPD pattern of light brown fault clay in fracture zone from Ipsil fault. Sm = smectite, Il = illite, Lm = laumontite, Qz = quartz, Ab = albite.

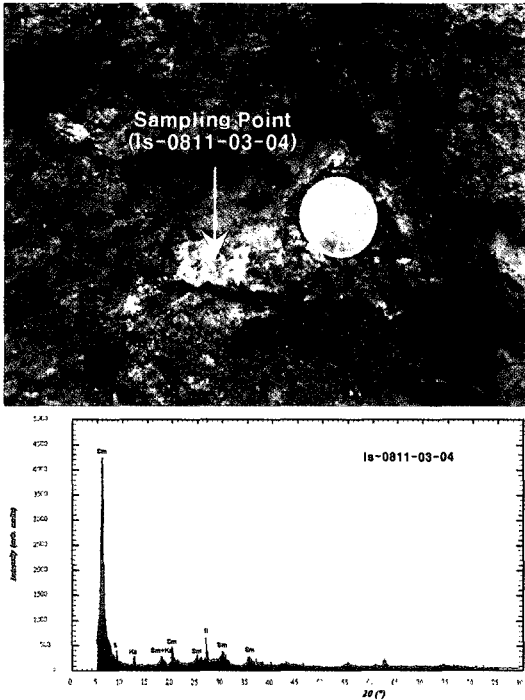
석영 및 사장석으로 구성되어 있다(그림 4). 푸른색 단층점토와 마찬가지로 변질작용에 의해 생성된 것으로 추정된다. 양산이나 울산 단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토는 대부분 스멕타이트와 카올리나이트이며 드물게 일라이트가 나타난다.

#### 녹회색 단층점토

단층 파쇄대의 황색 퇴적층 사이에 연장성 있게 발달하고 있는 녹회색의 단층점토는 대부분 스멕타이트이며 소량의 일라이트와 카올리나이트를 포함하고 있다(그림 5). 다른 색깔의 단층점토는 대부분 로몬타이트를 포함하고 있는 것과 비교했을 때 광물조성상 차이가 나타난다.

#### 적갈색 단층점토

입실담 하류에 나타나는 적갈색의 단층점토는 다량의 로몬타이트를 포함하고 있으며 그

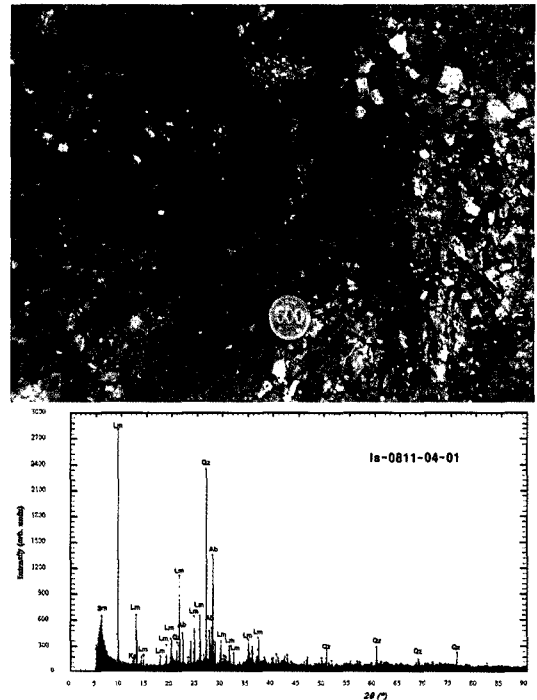


**Fig. 5.** Photograph of a rock outcrop and HRPD pattern of greenish gray fault clay in fracture zone from Ipsil fault. Sm = smectite, Il = illite, Ka = Kaolinite.

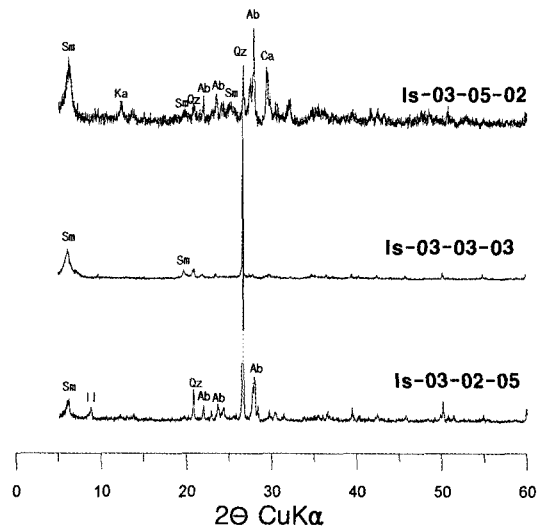
외 스�멕타이트와 소량의 카올리나이트로 구성되어 있다(그림 6). 로몬타이트를 포함하고 있는 푸른색, 연갈색 및 적갈색의 단층점토는 광물 조성상 미약한 차이를 나타내지만, 모두 로몬타이트가 포함된 것으로 보아 변질작용 유사한 과정을 겪었을 가능성이 있다.

#### X-선회절분석

입실단층 파쇄대에서 채취한 점토 시료에 대한 X-선회절 분석결과 스�멕타이트, 일라이트, 카올리나이트 및 방해석으로 구성되어 있다(그림 7). 야외에서 연장성을 갖는 푸른색, 연녹색, 연갈색 및 연황색 단층점토의 구성광물인 스�멕타이트, 로몬타이트, 일라이트, 카올리나이트와 비교했을 때 광물조성에 차이가 나타난다. 특히 단층점토에서 나타나는 로몬타이트는 단층 파쇄대의 점토에는 전혀 나타나지 않는다. 따라서 입실단층 파쇄대에서 나타나는 특징은 단층할



**Fig. 6.** Photograph of a rock outcrop and HRPD pattern of reddish brown fault clay in fracture zone from Ipsil fault. Sm = smectite, Lm = laumontite, Ka = Kaolinite, Qz = quartz, Ab = albite.



**Fig. 7.** XRD patterns of clays in fracture zone of Ipsil fault. Sm = smectite, Il = illite, Ka = kaolinite, Qz = quartz, Ab = albite, Ca = calcite.

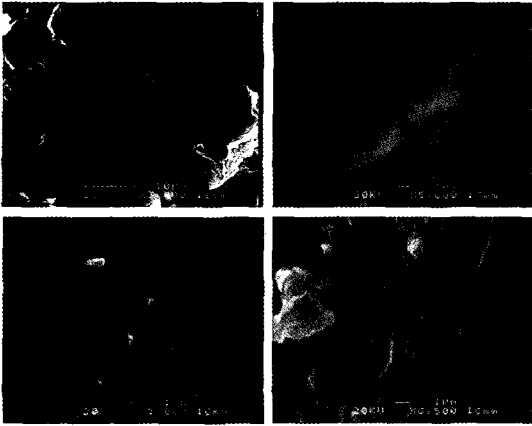


Fig. 8. Microphotographs of fault clay from Ipsil fault. Sm = smectite, Il = illite, Ab = albite.

동에 의해 생성된 단층점토와 단층파쇄대에서 풍화작용에 의해 생성된 점토는 광물조성에 있어 차이를 나타낸다.

#### 주사전자현미경

입실지역 단층파쇄대의 적갈색 단층점토는 5  $\mu\text{m}$  내외의 입자크기를 갖는 스멕타이트로 구성되어 있으며 스멕타이트 표면에 일라이트가 성장하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 사장석의 경우 심하게 풍화되어 대부분 점토 광물화되고 있는 것을 관찰할 수 있다(그림 8).

#### 결 언

고해상도분말회절 분석결과 입실 단층에서 나타나는 단층점토의 특성은 색깔에 따라 구성광물의 종류에 차이가 있으며 특히 다른 지역의 단층에서 나타나지 않는 불석광물이 나타난다.

맥상의 흰색 물질의 주 구성 광물은 소량의 방해석과 스멕타이트를 포함한 순수한 Na-Ca 불석광물인 스틸바이트로 주변 암석으로부터 유래된 Na-Ca 성분이 틈을 따라 침전된 것으로 추정된다.

푸른색, 연갈색 및 적갈색의 단층점토는 후기 변질작용에 의해 생성된 것으로 추정되는 Ca 불석광물인 로몬타이트가 포함되어 있으며, 주변 암석에서 로몬타이트가 나타나지 않는 것으

로 보아 변질작용에 의해 생성된 것으로 추정된다. 녹색의 단층점토는 대부분 스멕타이트이며 약간의 일라이트와 카올리나이트로 구성되어 있으며, 로몬타이트를 포함하고 있지 않아 다른 단층점토와 구분된다. 입실담 남서부의 푸른색, 연갈색 단층점토와 담 하류의 적갈색의 단층점토는 모두 로몬타이트가 포함되어 변질작용시 유사한 과정을 겪었을 가능성이 있다. 단층파쇄대에서 풍화작용에 의해 생성된 점토는 로몬타이트를 포함하고 있지 않아 단층활동에 의해 생성된 단층점토와 상이한 광물조성을 나타낸다.

입실 단층에서 나타나는 단층점토의 특성은 색깔에 따라 구성광물의 종류에 차이가 있으며 특히 다른 지역의 단층에서 나타나지 않는 불석광물이 나타난다. 이는 주변의 암석에서 불석광물이 나타나지 않는 것으로 보아 단층 활동 후 변질작용에 의한 것으로 추정되며 좀 더 세밀한 연구가 필요하다.

#### 사 사

본 연구는 한국원자력안전기술원의 2006년도 원자력연구개발 중장기과제(KINS/HR-792) “지진 안전성 평가 기반 기술개발” 사업의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다. 고해상도분말회절분석 실험에 도움을 준 포항공속기 연구소 신남수 박사와 안도천 연구원, 그리고 논문내용에 대해 세심하게 검토하고 부족한 부분을 지적해 주신 익명의 심사위원께도 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 류충렬, 경재복, 김인수 (1997) 울산단층대 동측의 신기구조운동과 지형발달. 대한자원환경지질학회 제 30차 학술발표회논문집, 14p.
- 문희수 (2000) 단층비지의 점토광물학적 연구와 K-Ar 일라이트 연대측정, 신기지각변형 연구 자문보고서, 214-233.
- 손승완, 장태우 (2001) 경상분지 동남부 제4기 단층비지의 지구화학적 연구. 2001년도 지질학회총계공동학술발표회논문집, 214-217.
- 양주석, 이희권 (2001) 왕산 단층에서 채취한 단층비지의 ESR 절대연령 측정. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 한국석유지질학회, 한국암석학회 제 56차 추계공동학술발표회 초록집, 3p.
- 이봉주, 류충렬, 최위찬 (1999) 경주시 양남면 일대의

제4기 입실 단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토의 산출상태에 따른 광물조성 연구: 고해상도분말회절 분석을 중심으로

- 제4기 단층, 지질학회지, 35, 1-14.
- 이석훈, 정창식, 박찬수, 정기영, 임창복 (2002) 양산 단층대 단층비지의 광물학적 특성연구, 한국암석학회 한국광물학회 2002년도 공동학술발표회 한국암석학회 창립 10주년 기념 국제학술발표회, 86-89.
- 이희권, 양주석 (2005) 일광단층의 ESR 연대측정. 지질학회지, 41, 369-384
- 장태우 (2001) 울산단층 동쪽 지괴의 제4기 지구조운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 장태우, 채연준, 추창오 (2005) 울산단층 동부지역 제4기 단층 비지대 내 변질광물의 형성, 한국광물학회지, 18, 205-214.
- 장태우, 채연준 (2004) 울산단층 동부지역 제4기 단층 비지대에서 단층작용과 열수활동. 지질학회지, 40, 469-479.
- 장태우, 추창오 (1998) 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령. 지구과학회지, 20, 25-37.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱 (1998) 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암 류와의 고찰. 암석학회지, 7, 77-97.
- 정창식, 최만식, 김현철, 임창복 (2001) 다검출기 유도결합플라즈마 질량분석기를 이용한 경주 입실, 장항리 단층 파쇄대 층진 탄산염암 맥의 Th/U 비평형 연대측정. 암석학회지, 10, 148-156.
- 최범영, 이창범, 류충렬, 최영섭, 김주용, 현혜자, 김유성, 김중렬, 최위찬 (2002) 제4기 말방단층의 기하분석: 시추자료 및 지표자료의 해석, 지질학회지, 38, 163-174.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P. (2001) ESR dating of the subsidiary fault in the Yangsan fault system, Korea. Quaternary Sic. Rev., 20, 999-1003.
- Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Kyung, J.B. (2001) Trench excavation surveys across the Yangsan and Ulsan active fault systems in the southeastern part of Korean peninsula. Transaction, Japanese Geomor. Union., 22, 287-306
- Tanaka, H., Uehar, N. and Itaya, T. (1995) Timing of the cataclastic deformation along the Akhasi Tectonic Line, central Japan, contrib. Miner. Petrol. 120, 150-158.

---

2007년 6월 8일 원고접수, 2007년 6월 13일 게재승인.