

울산단층 동부지역 제4기단층 비지대내 변질광물의 형성

Formation of Alteration Minerals in Gouges of Quaternary Faults at the Eastern Blocks of the Ulsan Fault, Southeastern Korea

장 태 우 (Tae Woo Chang) · 채 연 준 (Yeon Joon Chae) ·
추 창 오 (Chang Oh Choo)*

경북대학교 지질학과

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

요약: 울산단층 동쪽 지괴에 발달한 제4기 단층인 개곡1, 개곡2, 신계, 마동, 원원사, 진현단층을 대상으로 X선회절분석(XRD), 전자현미분석(EPMA), 후방산란전자영상분석(BSE), K-Ar연대측정법을 이용하여 단층비지의 광물조성과 미세조직의 특징을 연구하였다. 단층비지내 변질광물들은 단층운동에 수반된 열수변질작용으로 형성되었다. 28.9 Ma~44.3 Ma 범위의 연대를 나타내는 단층비지는 주로 점토광물, 석영, 장석으로 구성된다. 점토광물은 스멕타이트가 주구성 광물이고 소량으로 녹니석, 일라이트 및 카올리나이트가 산출된다. 접촉부 모암과 단층 비지대에서는 단층작용과 관련된 열수작용에 의해 광물의 변질작용의 흔적이 쉽게 인지되고, 주입비지와 절단된 방해석맥 등과 같이 단층작용이 반복된 증거를 볼 때 단층비지대는 다중변형작용의 산물임을 알 수 있다. 녹색 내지 녹회색 계통인 진현단층의 비지의 경우 적색계통의 다른 단층비지에 비해 Al_2O_3 의 함량이 높고, MgO와 CaO의 함량은 낮다. 스멕타이트의 화학분석 결과, 단층비지의 색은 기질을 구성하는 점토광물의 종류와 화학적 조성과도 밀접한 관계를 가진다.

주요어: 울산단층, 제4기 단층, 단층비지, 스멕타이트, 열수변질작용

ABSTRACT: Some Quaternary faults developed in the eastern block of the Ulsan fault are Gaegok1, Gaegok2, Singye, Madong, Wonwonsa and Jinhyeon faults, which are characterized by thin gouge and narrow cataclastic zones. This study was performed to emphasize the role of mineral alteration and microtexture in response to hydrothermal alteration of fault gouges during fault activity, using XRD, EPMA, BSE (backscattered electron image), and K-Ar age dating methods. Alteration minerals in fault gouges were formed in the age range of 44.3~28.9 Ma by hydrothermal alteration attributed to fault activity. XRD results show that fault gouges consist predominantly of clay minerals, quartz and feldspars. Clay minerals formed in the gouge zones are mainly composed of smectite with trace chlorite, illite and kaolinite. The evidence to support the hydrothermal alteration of preexisting minerals due to fault activity are easily recognized at the host rocks in contact with gouges zones. Injected gouge and calcite veins indicate that they were originated from multiple deformation by repeated fault activity. Gouge with green or greenish grey color, for example Jinhyeon fault, contains higher Al_2O_3

*교신저자: chooco@knu.ac.kr

and lower MgO and CaO compared to those with reddish color. Various colors of fault gouge are intimately related to the chemical compositions of main constituent mineral as well as mineral assemblage.

Key words : quaternary fault, Ulsan fault, gouge, smectite, hydrothermal alteration

서 언

단층대에서 관찰되는 단층비지(gouge)는 구조 지질학적인 의미 외에도 단층활동에 관한 여러 가지 정보를 제공해 준다. 단층비지는 흔히 극미립의 점토질로 구성되는데 K를 함유하는 광물, 예를 들어 일라이트질 운모나 스멕타이트-일라이트 혼합층상광물(I-S, interstratified minerals)이 존재할 경우 이를 이용하여 K-Ar 연대측정을 할 수 있다(Lyons and Snellenburg, 1971; Tanaka *et al.*, 1995; 김진영, 2000; 이석훈 외, 2000; Choo and Chang, 2000; 손승완, 2001). 단층활동 시에는 상당한 압력이 작용할 뿐 아니라 온도상승도 일어나는데 이는 단층활동의 직접적인 결과이거나, 직후에 유체운반을 일으키는 화성활동이 일어나기 때문이다(장태우와 추창오, 1998, 1999; 장태우, 2001). 이와 같이 단층대에서 온도상승이 일어난 경우에는 모암이 압쇄되어 분말화 된 기질물질들은 풍부한 유체와의 활발한 반응을 통하여 다양한 이차광물들을 형성하게 되므로 이들의 광물조성과 화학조성에 상당한 변화를 가져온다. 이와 반대로 단층운동에 의해서도 온도변화를 겪지 않은 모암은 입자가 단순하게 분쇄된 상태에 놓여 있으므로 광물조성 변화가 거의 없으며, 입자의 감소화된 진행된 것에 불과하므로 기질물의 함량만 증가하게 된다. 따라서 단층비지대에서의 광물조성 변화와 새로운 이차광물의 형성특징은 단층활동의 물리화학적 조건이나 환경을 이해하는데 중요하다.

최근 들어 신생대 제4기 퇴적층을 절단하는 제4기단층(Quaternary fault)의 흔적이 양산단층과 울산단층을 따라, 그리고 동해안 지역 여러 곳에서 발견되고 있다. 일반적으로 단층대는 다중변형작용의 산물이며 현재 제4기단층이라 명명된 단층들은 마지막 운동시기가 제4기인 것을 지칭한다. 즉 제4기단층은 이전에 단층운동으로 인해 비지대가 생성되었고 제4기때 단층운동은 이 약대인 비지대를 따라 슬립이 일어난 것으로 볼 수 있다(장태우, 1998, 2001; 장태우와 채연준, 2004).

본 연구에서는 제4기의 미고결 퇴적층을 절단하며 각력대(breccia zone)와 비지대(gouge zone)를 수반하는 울산단층대 동부지역에 위치한 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층, 원원사단층 및 진현단층을 대상으로 각 단층의 모암과 비지대에서의 광물조성, 광물조직의 변화, 그리고 단층비지의 색깔과 점토광물의 화학조성과의 연관성을 검토하고자 한다.

지 질

현재까지 알려진 제4기단층들은 양산단층대에서는 상천, 월평, 연봉, 신화단층, 벽계단층 및 유계단층, 울산단층대에서는 왕산, 오곡지, 마동, 탑골, 진현, 신계, 감산사, 활성리, 말방, 입실, 개곡, 원원사, 이화 단층, 울산-포항간 해안 지역에서는 읍천 및 수렴단층 등이 있다(Okada *et al.*, 1994; 경재복 외, 1995, 1999; 류충렬 외, 1997; 장태우, 2001; 이윤희, 2003). 연구지역 일대에 분포하는 압층은 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이들을 관입하는 불국사 관입암류 및 그 위에 부정합으로 놓이는 소규모의 제3기 지층 그리고 제4기 총적층으로 구성되어 있다. 본 연구지역의 울산단층은 NNW방향으로 발달하고, 연구지역 부근에서는 밀양단층, 양산단층, 동래단층이 NNE방향으로 발달하고 있다. 울산단층 북동부에 분포하고 있는 제3기 지층은 풍화쇄설성 역암 및 사암과 현무암질 화산활동의 산물을 다량 포함하고 있는 장기층군, 주로 유문암질 화산활동의 산물과 풍화쇄설성 퇴적암으로 이루어져 있는 범곡리층군, 이암 및 이회암이 풍부하고 사암과 역암이 협재하는 연일층군으로 이루어져 있다(정재혁과 장태우, 2004).

제4기단층은 대부분 불국사 화강암과 유천층군의 안산암을 절단하여 제4기층과 접촉하고 있다. 하양층군의 퇴적암류는 주로 적색, 녹회색, 암회색 이암과 세일의 호층을 이룬다. 이들은 화강암 주변부에서 접촉 변성작용으로 혼펠스화 되어 있다. 제4기 퇴적층은 비교적 고결도가 있는

하부층과 이를 다시 덮고 있는 상부층으로 구분할 수 있는데, 하부의 퇴적층은 사암과 역암 그리고 이암의 호층으로 구성되며 하상퇴적물과 암설사태에 의해 형성된 퇴적물이고, 상부의 퇴적층은 산록퇴적물로 구성된다. 연구지역에서 산출되는 단층비지는 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층, 원원사단층에서는 대체적으로 밝은 적색에서 적갈색의 적색계통으로 나타나고, 진현단층 비지의 색깔은 녹회색 내지 회색으로 산출된다.

실험방법

제4기 단층비지의 구성광물을 알아보기 위하여 단층비지에 대하여 X선회절분석(XRD)을 실시하였다. 단층비지대는 대부분 극미립질인 점토질로 이루어지며, 국부적으로는 미립 내지 세립질의 분쇄물질이 소량 함유된다. 이들의 감정을 위한 XRD분석은 2 μm 이하의 점토광물을 분리한 후에 정방위시료(preferred oriented specimen)와 부정방위시료(radom oriented specimen)로 구분하여 실시하였다. 정방위 시료의 전처리에는 우선 야외에서 채취한 단층비지 시료로부터 불순물이 섞이지 않도록 주의하여 점토광물을 분리, 회수하였다. 이를 증류수에 넣어 초음파 세척기로써 충분히 분산시킨 후에 혼탁한 부유물을 2리터의 매스실린더에 넣고 상온에서 4시간 이상 중력침전을 시킨다. 그 후 침전물 최상층으로부터 10 cm 수위의 부유물만 채취하여 원심분리기를 이용하여 2 μm 이하의 점토광물을 분리하고 유리슬라이드 위에서 박막으로 건조시켜 정방위 시료로 제작하였다. 부정방위 시료는 야외에서 회수한 단층비지를 상온에서 충분히 건조시켜 분말화시킨 후 XRD분석을 실시하였다. X-선회절 분석은 한국기초과학지원연구원 대구분소의 Philips X' Pert-PRO/MRD X-ray diffractometer를 사용하여 분석하였다. 분석조건은 Ni-필터를 사용한 $\text{CuK}\alpha$ (1.54056 Å)선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 35 kV/25 mA, 측정방법은 연속스텝 스캐닝으로 스텝당 0.5초로 행하였다.

단층비지는 저 점성 에폭시수지를 이용하여 진공에서 고화시킨 다음 연마편으로 제작하여 전자현미분석(EPMA)을 실시하였다. 경북대학교 공동실습관의 Shimazu EPMA-1600의 후방산란전자영상(Back Scattered Electron Image, BSE)을 이용

하여 단층비지의 미세조직 관찰을 실시하고, 주요광물과 기질물에 대하여 에너지분산스펙트럼(EDS)분석을 이용하여 반정량 화학분석을 실시하였다. 단층비지별로 주요 점토광물인 스멕타이트를 분석하여 단층비지의 색과의 관련성을 검토하였다. 단층비지의 연대측정은 한국기초과학지원연구원 소재 Static Vacuum Mass Spectrometer VG5400을 이용하여 K-Ar법으로 측정하였다. 시료는 단층비지를 증류수에 분산시켜 메스실린더에서 중력침전시킨 후 Jackson (1969)의 실험법에 따라 2 μm 이하의 점토광물 입자를 분리하여 회수하였다.

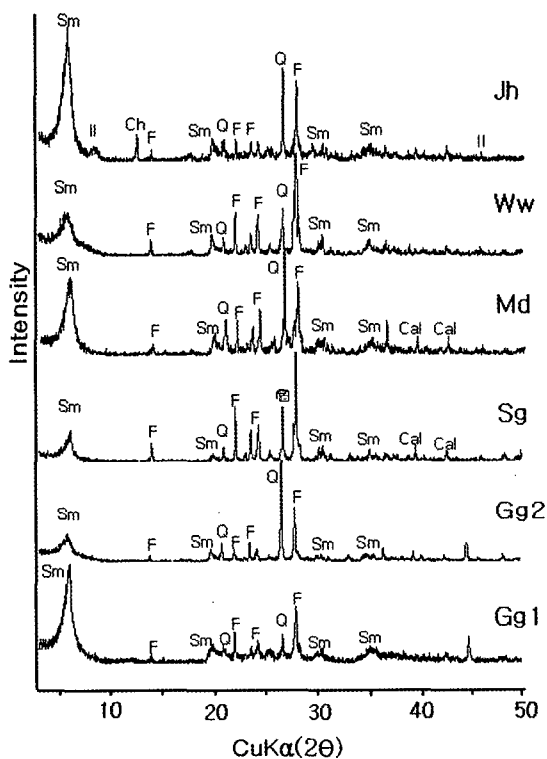
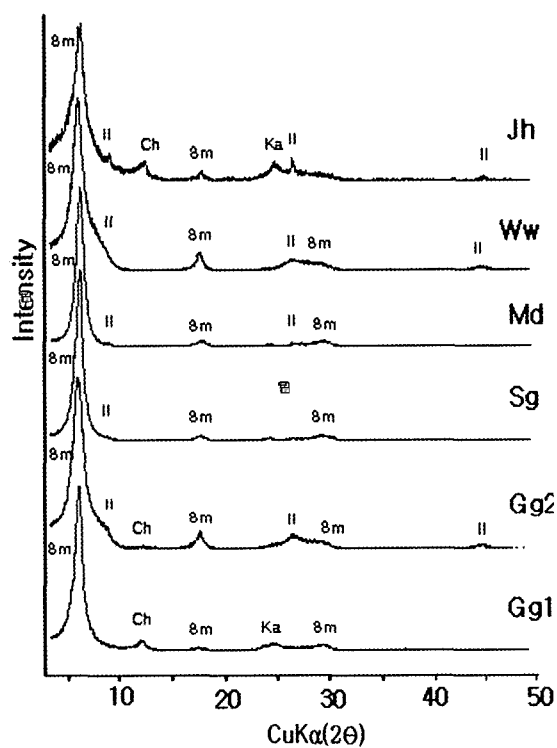
결과 및 토의

XRD에 의한 광물조성

단층비지대의 구성 광물조성 결과는 표 1에 나타난 바와 같다. 부정방위시료와 정방위 시료의 XRD분석 결과를 그림 1, 그림 2에 각각 도시하였다. 단층비지의 부정방위 시료에 대한 XRD 분석결과 모든 단층비지의 구성광물은 주로 스멕타이트(smectite), 석영, 장석으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 주 구성광물인 스멕타이트의 경우 개곡 제1단층 비지에서는 다른 단층비지에서보다 그 함량이 높게 나타난다. 개곡 제2단층 비지에서는 다른 단층비지에서 보다 스멕타이트가 낮게 산출된다. 신계단층과 마동단층 비지에서는 다른 단층과는 달리 소량으로 방해석이 발견된다. 진현단층 비지는 주로 스멕타이트, 석영, 장석으로 구성되고, 소량으로 녹니석(chlorite) 또는 카올리나이트(kaolinite) 및 일라이트(illite)가 나타나며, 기질의 점토광물을 구성하는 스멕타이트 함량은 상대적으로 높다. 그림 1에서처럼 개곡 제1단층과 진현단층에서는 단층비지대 기질 성분인 스멕타이트가 개곡 제2단층, 신계, 마동, 원원사단층보다 높게 산출된다. 이것은 단층비지의 상태에 따라 석영, 장석 외에도 점토광물의 함량에 차이가 있음을 보여준다. 기질을 많이 함유하는 개곡 제1단층과 진현단층의 비지는 석영과 장석의 함량이 다른 단층에 비해 낮고, 점토광물의 함량은 상대적으로 높다. 이와 반대로, 암편들을 많이 함유하는 개곡 제2단층, 신계, 마동, 원원사단층의 비지는 석영과 장석의 함량이 상대적으로 높고 점토광물의 함량은 상대적으로 낮다. 연구

Table 1. Colors and mineral compositions by X-ray diffraction data of fault gouges in the study area. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon faults

faults	host rocks	mineral assemblage in bulk gouges	colors
Gg1	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>feldspar>quartz>smectite> chlorite, kaolinite	scarlet
Gg2	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>quartz> feldspar>illite	reddish brown
Sg	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>feldspar>quartz> illite>calcite	light brown
Md	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>feldspar> quartz>illite>calcite	light brown
Ww	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>feldspar> quartz>illite	reddish brown
Jh	Quaternary gravel/ Bulguksa granite	smectite>quartz>feldspar> chlorite, kaolinite>illite	greenish grey

**Fig. 1.** X-ray diffractograms of fault gouges. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon faults. Q: quartz; F: feldspar; Sm: smectite; Cal: calcite; Ill: illite; Ch: chlorite.**Fig. 2.** X-ray diffractograms of oriented samples in the fault gouges. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon faults. Sm: smectite; Ill: illite; Ch: chlorite; Ka: kaolinite.

지역내 단층 비지대에서의 점토광물은 주로 스�멕 타이트인데, 혼합층상구조의 증거가 뚜렷이 보이지 않으므로 이는 단일광물 구조형이며, (060) 회절선의 값은 평균 1.50 Å로서 이팔면체구조를 가짐을 알 수 있다. 진현단층 비지대에서 소량으로 나타나는 일라이트도 역시 I-S혼합층상광물이 아닌 단일광물 구조형이다.

점토광물의 저면간격(d-spacing)으로 동정된 정방위 시료 XRD 분석결과 연구지역 모든 단층의 점토광물은 주로 스�멕타이트로 구성되는 것으로 나타난다. 단층비지대 기질과 압편의 함량비는 서로 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타난다(Wintsch *et al.*, 1995; Schulz and Evans, 1998).

전자현미분석(EPMA) 및 단층비지의 미세조직

개곡 제1단층의 모암과 접촉부 모암에서는 사장석, 정장석 및 석영이 대부분이고, 흑운모가 드물게 나타난다. 모나자이트, 저어콘, 적철석, 티탄철석이 소량으로 관찰된다. 접촉부 모암내에서는 유체에 의해 흑운모 입자 주변과 벽개면을 따라 변질작용의 조직과 모나자이트의 누더기 조직(patchy texture)이 관찰된다. 비지대에서는 점토광물로 이루어진 기질부와 석영, 사장석 및 정장석 압편들이 관찰된다. EPMA 면분석(mapping analysis)하에서는 적철석의 Fe성분이 입자 가장자리에서부터 기질부의 점토광물로 이동되는 현상을 관찰할 수 있고, 기질부에서는 점토광물의 영향으로 Si와 Al의 함량비가 높다.

개곡 제2단층의 모암에서는 사장석, 석영 및 흑운모가 주로 관찰되며, 접촉부 모암에서는 사장석, 석영이 나타나고 적철석, 저어콘, 스피넬, 알라나이트(allanite)는 소량으로 함유된다. 접촉부 모암에서의 알라나이트는 원래의 자형을 띠지 않으며, 단층작용에 의한 입자내부의 파쇄와 열수 변질작용으로 인해 화학조성의 변화가 나타난다. 비지대의 기질부는 스�멕타이트가 주구성 광물이며, 아각형 내지 아원형의 석영과 사장석 압편들이 많이 포함된다. 그 외에 미량의 저어콘, 적철석, 녹염석 및 제올라이트 광물인 로몬타이트가 관찰된다. 비지대와 모암의 접촉부 경계에서는 단층 비지대의 점토광물이 접촉부 모암의 석영 입자 사이의 틈새를 따라 주입되어 있다. 주입된 비지는 맥상으로 발달하며, 개곡 제2단층에서 다수 관찰된다.

신계단층의 모암에서는 주로 석영, 사장석, 정장석으로 구성되며, 흑운모가 국부적으로 함유되고, 접촉부 모암에서는 사장석, 정장석, 석영 등이 잘 관찰된다. 단층 비지대에서 점토기질은 스�멕 타이트로 구성되며, 각형 내지 아각형의 사장석, 정장석 및 석영으로 구성된 반상쇄편이 관찰된다. 정장석 반상쇄편은 각형 내지 아각형으로 입자가 많이 파쇄되어 발달하며, 입자 주위가 용해되어 반응연(reaction rim)과 같은 열수변질작용의 흔적이 잘 관찰된다. 그 외에 티탄철석, 적철석, 녹염석 그리고 방해석 등이 소량 관찰된다. 이 같은 맥상의 방해석과 녹염석은 열수변질작용에 의해서 생성된 것이다. 특히 이들 방해석과 녹염석은 심하게 파쇄된 조직을 나타내므로 이들이 생성된 이후에도 단층작용이 있었음을 알 수 있다.

신계단층의 비지대와 모암인 화장암과 접촉하는 단층면에서는 단층의 이동 방향과 일치하고 단층면에 약 30° 내외로 발달하는 R 단열과 신장성분을 가지고 단층면에 약 45° 내외로 발달하는 T 단열이 관찰된다(그림 3). T 단열은 단층면 가까이로 이어지다 장석입자의 종단부까지 완전히 절단하지 못하며, R 단열은 점토기질내 반상쇄편을 절단하면서 발달한다. 그리고 후방산란전자영상(BSE)에서 뚜렷한 P 엽리는 관찰되지 않으나, 단층면 하부의 단층비지대에서 반상쇄편 입자의 선택 배향이 P 엽리의 방향과 유사하게 발달하고 있다.

마동단층의 경우 모암과 접촉부암에서는 석영, 사장석, 정장석이 흔히 관찰되고, 흑운모는 소량으로 인지된다. 기타 광물로는 적철석, 티탄철석 및 10 μm 내외의 Cu-Zn광물이 부분적으로 관찰된다. 마동단층의 단층비지대와 접촉부 모암 사이 단층면은 BSE 이미지 관찰시에도 매끄럽게 관찰된다. 단층비지대의 EPMA 분석결과에 따르면 주구성광물은 각형 내지 아각형의 사장석, 정장석, 석영이고, 그 주변을 둘러싸는 기질부는 점토광물로 구성된다. 사장석과 정장석의 압편은 파쇄되어 있으며, 단층비지대내 장석입자의 가장자리는 부분적으로 점토광물로 변질되어 있으며, 정장석은 피사이트 구조를 보여준다. 원원사단층의 신선한 모암에서도 사장석, 정장석, 석영이 주를 이루며, 흑운모는 소량으로 함유되며, 접촉부 모암에서도 사장석, 정장석, 석영 등이 주로 산출된다. 접촉부 모암과 단층비지대 경계에서는 저어콘, 티탄철석, 적철석 그리고 Ti 성분을 많이

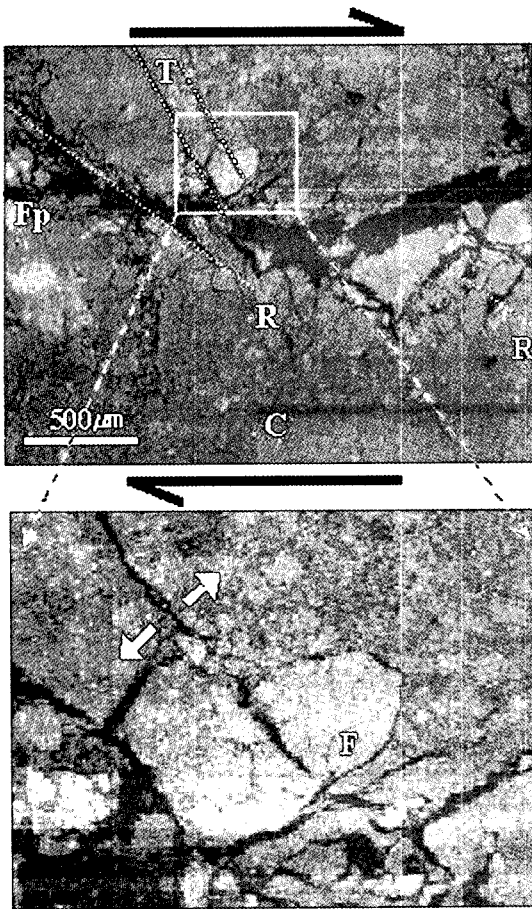


Fig. 3. Backscattered electron image (BSE) showing T-fracture and R-fracture in the Singye fault gouge. Fp: fault plane; F: feldspar; C: clay minerals.

포함(22%)하는 희토류 원소를 포함한 karnasurtite가 소량 관찰된다. 비지대에서 기질부는 주로 스멕타이트로 이루어져 있으며, 각형 내지 아각형의 석영, 사장석 및 정장석 암편들이 많이 포함된다. 그리고 적철석, 인회석, 티탄철석, 5 μm 내외의 Cu-Zn광물, 저어콘이 소량으로 관찰된다(그림 4).

비지대내에서 저어콘과 티탄철석 입자는 자형 내지 반자형을 띠고 있으며, 화강암 모암에서도 저어콘과 티탄철석이 관찰되는 것으로 보아 화강암 기원인 것으로 판단된다. 그러나 저어콘입자 주위로 흔히 반응연이 나타나고 저어콘 입자 내에서도 조성분포가 불균질한 조직이 잘 관찰된다. 티탄철석의 경우 신선한 티탄철석 입자와 더불어 Fe, Ti 성분이 원래상태에 비하여 감소하고,

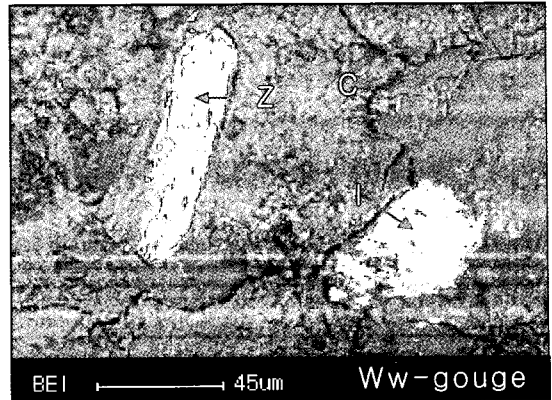


Fig. 4. Backscattered electron image (BSE) shows a texture of hydrothermal alteration and mineral composition of the Wonwonsa fault gouge. Z: zircon; I: ilmenite; C: clay minerals.

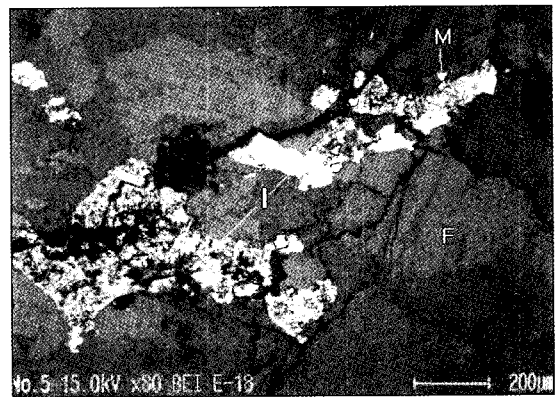


Fig. 5. Backscattered electron image (BSE) shows a texture of hydrothermal alteration and mineral composition of the Jinhyeon contact granite. I: ilmenite; F: feldspar; M: monazite.

불균질한 조성분포를 나타내는 누더기구조와 용해흔적도 있다.

진현단층의 경우 모암과 접촉부에서는 석영, 정장석 및 사장석 암편이 흔하며, 흑운모는 소량으로 관찰된다. 그리고 접촉부 화강암에서 적철석, 티탄철석, 모나자이트가 미량으로 함유된다(그림 5). 진현단층 비지대의 EPMA 분석결과 주구성광물은 석영, 정장석, 사장석의 암편과 소량의 흑운모, 그리고 그 주위를 둘러싸는 점토광물로 된 기질부로 이루어진다. 진현단층 접촉부 화강암에서는 티탄철석이 열수변질작용에 의하여 심하게 변질된 양상이 잘 나타난다. 티탄철석 입

Table 2. Chemical compositions of smectite in fault gouges by EPMA. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon faults

	Gg1	Gg2	Sg	Md	Ww	Jh
SiO ₂	56.95	58.79	60.96	60.63	58.92	59.19
TiO ₂	1.78	0.16	0.50	0.60	0.21	1.21
Al ₂ O ₃	10.55	12.89	10.44	10.17	12.59	14.09
FeO	8.69	5.14	6.21	3.82	3.76	4.35
MgO	2.49	1.43	2.66	2.45	1.46	1.20
CaO	1.47	1.20	1.58	1.86	1.37	1.03
Na ₂ O	0.07	0.06	0.08	-	0.09	0.08
K ₂ O	0.39	3.18	0.85	1.25	3.37	1.24
ZnO	-	-	-	-	0.24	-
P ₂ O ₅	-	-	-	-	0.29	-
H ₂ O	17.59	17.13	16.71	19.22	17.68	17.60
Total (wt.%)	99.98	99.98	99.99	100.00	99.98	99.99

자 주위의 장석 입자들도 특히 내부와 가장자리에서 변질되어 상이한 화학적 조성을 보인다. Cu-Zn광물, 티탄철석, 저어콘, 로몬타이트, 녹염석, 모나자이트는 기질내에서 변질되어 있다. 진현단층 비지대내에서 티탄철석 광물입자의 가장자리는 점토광물로 둘러 싸여진 반응연이 나타나는데, 반응연의 외곽부로 가면서 Fe와 Ti성분이 감소하고 점토광물 성분은 증가하는 경향을 보인다. 즉 입자중앙부에서 FeO, TiO₂ 성분이 각각 48%와 43%이고, 중간부분에서는 각각 15.58%, 11.48%로 감소하며, 가장자리에서는 FeO, TiO₂는 각각 9.39%와 5.29%로 감소한다.

단층비지의 색과 광물조성

개곡단층과 신계단층은 밝은 갈색, 마동단층은 밝은 갈색, 원원사단층은 적갈색, 진현단층은 녹회색을 띤다. 연구지역에서 진현단층만이 유일하게 녹색 내지 녹회색을 띄며, 나머지 단층들은 비교적 적색 내지 적갈색 계통을 보인다(표 1). XRD 분석결과 연구지역내 모든 단층비지는 주로 스멕타이트, 석영, 장석으로 구성되나, 점토광물의 경우 진현단층은 다른 단층에 비해 녹니석과 카올리나이트가 상대적으로 많이 함유된다. 따라서 단층비지대의 색은 암편 보다는 기질을 구성하는 점토광물의 화학적 조성과의 연관이 있을 것으로 추정되므로 입자 크기 2 μm 이하의 점토광물 중 스멕타이트에 대한 정량분석을 수행하였

다(표. 2).

XRD분석과 EPMA를 이용한 스멕타이트의 화학적 성분분석 결과, 단층비지의 색은 기질을 구성하는 점토광물의 화학적 조성과의 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타난다(그림 6). 개곡 제1단층의 스멕타이트의 화학적 분석결과, SiO₂와 K₂O의 함량은 각각 56.95%와 0.39%로 연구지역 단층 중 가장 낮으며, MgO, FeO, TiO₂는 각각 2.49%, 8.69%, 1.78%로 다른 단층들에 비해 상대적으로 높다. 개곡 제2단층의 TiO₂와 Na₂O의 함량은 각각 0.16%와 0.06%로 낮고, K₂O의 함량은 3.18%로 비교적 높게 나타난다. 신계단층의 SiO₂, MgO, FeO의 함량은 각각 60.96%, 2.66%, 6.21%로 다른 단층들에 비해 상대적으로 높지만 K₂O의 함량은 0.85%로 비교적 낮게 나타난다. 마동단층의 SiO₂, CaO, MgO는 각각 60.63%, 1.86%, 2.45%로 상대적으로 높고 Al₂O₃의 함량은 10.17%로서 연구지역 단층 중에서 가장 낮다. 원원사 단층에서는 K₂O의 함량이 3.37%로 상대적으로 높고 FeO의 함량은 3.76%로 비교적 낮으며, 연구지역에서 소량으로 Zn과 P가 유일하게 포함된다. 이는 일라이트, 황화물, 인산염 광물이 스멕타이트 기질물에 소량 함유됨을 의미한다.

진현단층의 Al₂O₃의 함량은 연구지역에서 가장 높고, MgO와 CaO의 함량은 각각 1.20%와 1.03%로 가장 낮다. 본 역 제4기단층에서 분석한 스멕타이트의 전체적인 화학조성은 전형적인 스멕타이트에 비하여 TiO₂, K₂O, FeO의 함량이 다

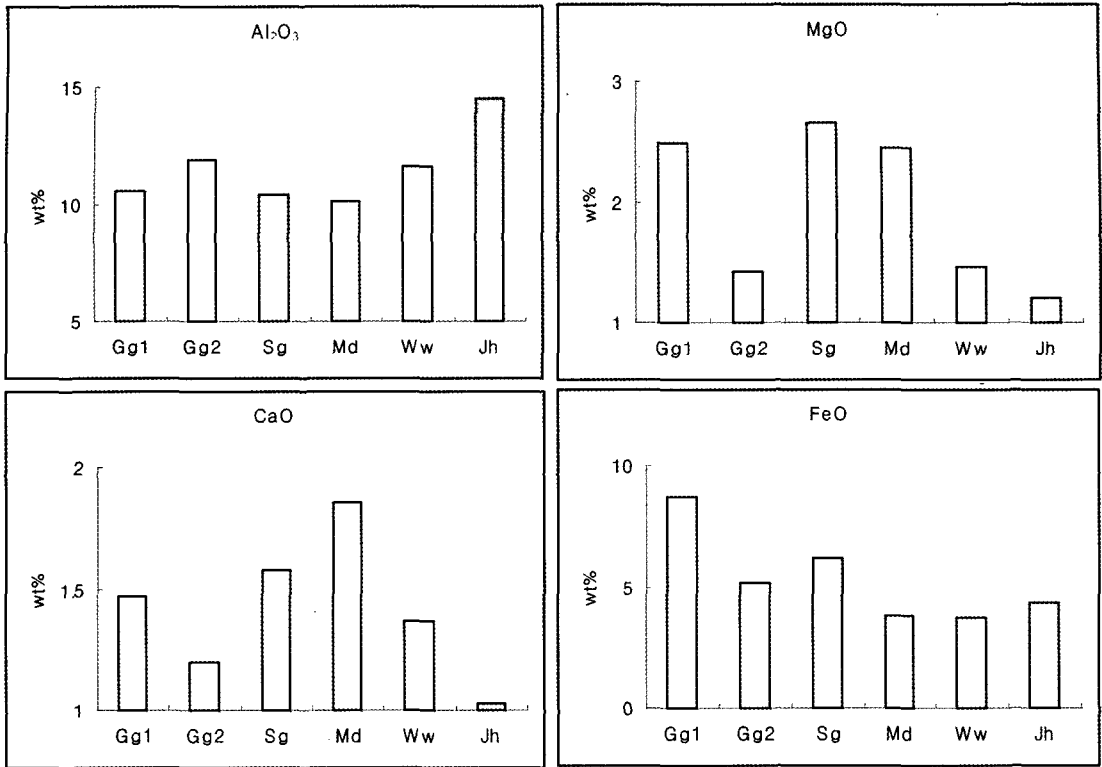


Fig. 6. Histogram of major element contents of the smectite matrix from gouges. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon faults.

소 높고 Al₂O₃와 CaO의 함량은 다소 낮게 나타난다.

원원사단층과 개곡 제2단층의 스멕타이트 분석에서 K₂O 함량이 높은 것은 일라이트가 소량으로 함유되기 때문인데, 이는 X-선 회절분석 결과와도 일치한다. 개곡 제1단층에서 FeO의 함량이 가장 높게 나타나는 것은 EPMA분석과 BSE 관찰시에 기질에서 철산화물(적철석)이 다수 관찰된 것과 관련된다.

연구지역 중 단층비지의 색이 유일하게 녹색 내지 녹회색 계통인 진현단층의 경우 적색 계통의 다른 연구지역 단층에 비해 Al₂O₃의 함량이 14.09%으로 높고, MgO와 CaO의 함량은 각각 1.2%, 1.03%로 낮다. 이것은 다른 단층에 비해 진현단층 비지대의 스멕타이트질 점토에 카올리나이트와 녹니석이 포함되기 때문인 것으로 보인다. 즉 진현단층내 스멕타이트질 점토에 녹니석과 카올리나이트로부터 Al이 더 첨가되었으며 스멕타이트의 Ca성분은 상대적으로 더 낮게 나타난 것이다.

K-Ar연령과 단층비지의 형성환경

불국사 화강암과 제4기 퇴적층과 접하고 있는 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층의 K-Ar 절대 연령은 각각 38.460±1.762 Ma, 44.393±1.547 Ma, 28.955±1.491 Ma, 29.714±1.121 Ma를 나타낸다(표 3). 이는 에오세 중기에서 올리고세 중기에 해당하는데, 단층작용과 더불어 단층대로 주입된 열수변질작용의 연령으로서 단층활동과 밀접한 관계를 가진다. 마동단층과 신계단층의 경우 각각 29 Ma와 28 Ma로서 오차범위 내에 해당하는 것으로 보아, 두 단층의 활동시기가 거의 동시기적이었음을 알 수 있다.

본 연구지역의 단층비지는 대부분 스멕타이트로 구성되며, I-S혼합층상광물은 발견되지 않고, 소량의 일라이트가 일부 산출된다. 전형적인 스멕타이트는 일라이트 보다 낮은 온도, 낮은 압력 조건에서 생성되는데 이편면체형 스멕타이트의 경우 온도가 증가할수록 스멕타이트, random-mixed layer I-S, R1 ordered I-S, R3 ordered I-S,

Table 3. K-Ar age of fault gouges in the study area. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye; Md: Madong faults

faults	K ₂ O (%)	⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	³⁶ Ar (10 ⁻¹⁰ ccSTP/g)	age (Ma)
Gg1	0.448	67.601 ± 2.385	35.359 ± 0.605	38.460 ± 1.762
Gg2	2.206	384.870 ± 7.147	67.024 ± 0.927	44.393 ± 1.547
Sg	0.582	65.944 ± 2.792	69.978 ± 0.207	28.955 ± 1.491
Md	1.447	168.288 ± 3.933	77.966 ± 1.092	29.714 ± 1.121

일라이트 순으로 전이한다(Inoue *et al.*, 1987; Inoue and Utada, 1991). �멕타이트는 일반적으로 200°C 이하의 저온에서 존재하며(Essene and Peacor, 1995), 완전히 일라이트로 전이하는 온도는 산출조건에 따라 약간 상이하나 대부분의 열수 변질 환경에서 일라이트는 150°C에서 300°C 범위까지 존재할 수 있다(Henley and Ellis, 1983). 따라서 점토광물의 조성과 특징을 고려하면 본 역의 단층대 비지를 형성한 열수의 온도는 200°C 이하로 낮았던 것으로 볼 수 있다. 본 연구지역은 모두 제4기단층인데 K-Ar 연령값이 에오세에서 올리고세에 해당하는 44.3 Ma~28.9 Ma로 나타나는 것은 열수를 수반한 이들 단층의 옛 운동과 관련된다. 에오세 중기에서 올리고세 중기 사이에 단층운동이 일어났으며, 단층대를 따라 열수 변질작용을 일어났다. 제4기단층 운동시기에서 기존의 단층이 재활동하였을 때는 열수변질작용을 수반하지 않고 천부지각에서 단층활동이 일어난 것으로 보인다(장태우, 1998, 2001; 장태우와 추창오, 1999; 장태우와 채연준, 2004).

결 론

울산단층대의 단층비지는 광물조성과 미세조직으로 볼 때 단층운동에 수반된 열수변질작용에 의하여 형성되었다. X-선회절 분석 결과 단층비지는 주로 �멕타이트, 장석, 석영으로 구성되는데, 점토광물 가운데서는 �멕타이트가 주구성 광물이고, 소량의 녹니석, 일라이트, 카올리나이트가 산출된다. K-Ar 절대연령은 44.3 Ma~28.9 Ma로서 에오세 중기에서 올리고세 중기의 시기에 해당한다. 접촉부 모암과 단층비지대에서는 단층작용과 관련된 열수변질작용에 의한 광물학적 변화양상과 반복된 단층작용의 증거로 볼 때 단층비지대는 다중변형작용의 산물임을 알 수 있

다. 점토광물의 조성과 특징을 고려하면 본 역의 단층대 비지를 형성한 열수의 온도는 200°C 이하로 낮았던 것으로 볼 수 있다. 녹색 내지 녹회색 계통인 진현단층의 경우 적색 계통의 다른 연구지역 단층에 비해 Al₂O₃의 함량이 높고, MgO와 CaO의 함량은 낮게 나타난다. XRD분석과 EPMA를 이용한 �멕타이트의 화학적 성분분석 결과, 단층비지의 색과 기질을 구성하는 점토광물의 화학적 조성은 밀접한 관계를 가진다.

사 사

이 연구는 2003년 한국지질자원연구원에 의한 위탁과제 수행 중에 이루어졌으며, 이에 사의를 표한다. 연대측정과 EPMA분석은 한국기초과학지원연구원(KBSI)과 경북대학교 공동실험실습관에서 수행되었다.

참 고 문 헌

경재복, 김성균, 조화룡, Okada, A., Watanabe, M., Susuki, Y., Okike, K. (1995) 울산단층 중앙부의 단층노두와 대지진 발생의 지형적 증거. 제50차 대한 지질학회 발표요약집, 99.

경재복, 이기화, Okada A., Watanabe M., Susuki Y., Takemura K. (1999) 양산단층 남부 상천리 일대의 트렌치 조사에 의한 단층특성 규명. 한국지구과학회지, 20, 101-110.

김진영 (2000) 울산단층 북동부 지역 제4기 단층의 비지 미구조와 절대 연령측정. 경북대학교 석사학위논문.

류충렬, 경재복, 김인수 (1997) 울산단층대 동측의 신기 지구조 운동과 지형발달. 자원환경지질학회 제30차 학술발표회 발표논문 요약집, 14.

손승완 (2001) 한반도 동남부 제4기 단층비지대의 미구조 및 지구화학적 특성. 경북대학교 석사학위

- 논문.
- 이석훈, 정창식, 손병국, 임창복 (2000) 울산단층대 신기 단층 비지의 광물학적 특성 및 생성환경. 한국암석학회, 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 46-49.
- 이용희 (2003) 울산단층 동편의 신생대 제4기 단층. 부산대학교 석사학위논문.
- 장태우 (1998) 양산단층대 단층비지의 K-Ar 연령과 단층운동. 대한지질학회 제53차 학술발표회.
- 장태우, 추창오 (1998) 동래단층지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령. 대한지질공학회지, 20, 25-37.
- 장태우, 추창오 (1999) 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령. 한국지구과학회지, 20, 25-37.
- 장태우 (2001) 울산단층 동쪽 지괴의 제4기 지구조 운동. 지질학회지, 37, 431-444.
- 장태우, 채연준 (2004) 울산단층 동부지역 제4기 단층비지대에서 단층작용과 열수활동. 지질학회지, 40, 469-479.
- 정재혁, 장태우 (2004) 한반도 동남부 제3기 어일 및 와읍분지의 지질과 층서. 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 14.
- Choo, C.O. and Chang, T.W. (2000) Characteristics of clay minerals in gouges of the Dongrae Fault, Southeastern Korea, and implications for fault activity. *Clays and Clay Minerals*, 48, 204- 212.
- Essene, E.J. and Peacor, D.R. (1995) Clay mineral thermometry : A critical perspective. *Clays Clay Minerals*, 43, 540-553.
- Henley, R.W. and Ellis, A.J. (1983) Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth Sci. Rev.*, 19, 1-50.
- Inoue, A., Kohyama, N., Kitagawa, R., and Watanabe, T. (1987) Chemical and morphological evidence for the conversion of smectite to illite. *Clays Clay Minerals*, 35, 111-120.
- Inoue, A. and Utada, M. (1991) Hydrothermal alteration in the Kamikita Kuroko mineralization area, northern Honshu, Japan. *Mining Geol. Japan*, 41, 203-218.
- Jackson, M.L. (1969) *Soil Chemical Analysis-Advanced Course*. Madison, Wisconsin, 895p.
- Lyons, J.B and Snellenburg, J. (1971) Dating faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 1749-1752.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K., Jeon, J.S., Choi, H.C., and Oike, K. (1994) Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea. *Jour. Geography. Japan*, 103, 111-126.
- Schulz, S.E. and Evans, J.P. (1998) Spatial variability in microscopic deformation and composition of the Punchbowl fault, Southern California: implications for mechanisms fluid-rock interaction, and fault morphology. *Tectonophysics*, 295, 223-244.
- Tanaka H., Uehara N., and Itaya, T. (1995) Timing of the cataclastic deformation along the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 150-158.
- Wintsch, R.P., Christoffersen, R., and Kronenberg, A. K. (1995) Fluid-rock reaction weakening of fault zones. *Jour. Geophys. Res.*, 100, B7, 13021-13032.

2005년 9월 2일 원고접수, 2005년 9월 16일 게재승인.