

한반도 동남부 제4기 단층 비지의 광물학적 및 지구화학적 연구

Mineralogy and Geochemistry of Quaternary Fault Gouges in the Southeastern Korean Peninsula

손승완 (Seung Wan Shon) · 장태우 (Tae Woo Chang) · 김영규 (Yeongkyoo Kim)

경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea, E-mail: geossw@hotmail.com)

요약 : 한반도 동남부 일대에 발견된 제4기 단층인 상천, 입실, 왕산단층 비지대에서 단층운동과 이에 수반된 유체의 영향으로 생긴 미구조 및 광물학적인 변화 양상을 알아보기 위해 단층 비지와 주위 모암의 전암분석과 전자현미분석이 수행되었다. 단층 비지와 주위 모암의 X-선형광분석 결과 유동성이 낮은 원소 즉 TiO_2 , MgO , P_2O_5 , Fe_2O_3 가 신선한 모암에 비해 비지대에 집적되는데 이는 단층운동과 이에 수반된 유체들의 활동이 활발했음을 이야기 해준다. 단층 비지 물질의 X-선회절분석 결과 관찰되는 광물은 석영, 장석, 방해석과 점토광물이고, 점토광물은 대부분 스멕타이트이며 (060) 회절선의 값은 평균 1.50 Å으로써 이판면체 구조를 가진다. 전자현미분석 결과 비지대 및 모암내 다양한 종류의 황화, 탄산염 및 인산염광물들이 관찰된다. 상천단층 회색 비지대의 제노타입, 입실단층 접촉부 안산암과 왕산단층 접촉부 회색 안산암의 황화광물은 제4기 이전의 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 인해 생성된 것으로 추측된다. 입실 접촉부 안산암과 비지대의 맥상의 탄산염광물은 제4기 이전의 단층운동과 관련된 유체에 의해 생성되었고, 이들 탄산염광물이 물리적으로 심하게 파쇄되어 있으며 탄산염광물 가장자리에 반응연이 있는 것으로 보아 탄산염광물이 생성되고 난 후에도 단층운동과 유체의 활동이 활발했음을 알 수 있다. 왕산단층의 맥상의 방해석은 제4기 단층운동과 동시기 또는 후기에 생성된 것으로 볼 수 있다.

주요어 : 제4기 단층, 비지대, 제노타입, 황화광물, 탄산염광물

ABSTRACT : XRF, XRD, EPMA have been used to investigate microstructures and mineralogical changes caused by the faulting and fluids associated with faulting in the Quaternary fault gouge zones at the Sangchon, Ipsil and Wangsan faults located at the southeastern part of the Korean Peninsula. The chemical compositions of faulted rocks and protoliths analyzed by XRF show that the fault gouges are relatively enriched in TiO_2 , P_2O_5 , MgO , and Fe_2O_3 compared with protoliths, indicating that the fluids associated with faulting were highly activated. XRD results show that the fault gouges predominantly consist of quartz, feldspar, calcite and clay minerals. Clay minerals formed in the gouge zones are mainly composed of smectite characterized by a dioctahedral sheet. Based on EPMA analyses various kinds of sulfide, carbonate, phosphate minerals were identified in the gouge zones and protoliths. Xenotime of grey fault gouge of the Sangchon fault and sulfide minerals of contact andesitic rock of Ipsil fault and contact grey andesitic rock of Wangsan fault were probably formed by inflow of hydrothermal solution associated with faulting prior to the Quaternary. Carbonate minerals of contact andesitic rock and gouge zone of the Ipsil fault were formed by inflow of fluid associated with faulting prior to the Quaternary. They are heavily fractured and have reaction rim on their edge, indicating that faultings and inflow of fluids were highly activated after carbonate minerals were formed. Calcites of Wangsan fault seemed to be formed in syntectonic or posttectonic Quaternary faulting.

Key words : Quaternary fault, gouge zone, xenotime, sulfide mineral, carbonate mineral

서 언

한반도 동남부의 양산단층계는 NNE 주향의 밀양단층, 모량단층, 양산단층과 동래단층이 평행하게 발달하고, 울산단층만이 NNW 주향을 가지며 경주지역에서 양산단층과 만나면서 중지된다(Fig. 1). 한반도 동남부에서 발견된 제4기 단층은 양산단층대에 월평 제1단층, 월평 제2단층, 연봉, 상천, 신화단층 및 유계단층 등이, 울산단층대에 말방, 입실, 원원사, 이화, 개곡 및 갈곡단층 등이 분포한다. 그리고 울산-포항간 해안 지역에서는 읍천 및 수렴단층이 발견되었다(경제복 외, 1995; 류충렬 외, 1996, 1997; Kyung & Okada, 1995; Okada *et al.*, 1994). 흔히 단층대는 다중변형작용의 산물이며 현재 제4기 단층이라 명명된 단층들은 마지막 운동시기가 제4기 때인 것을 지칭하며 얇은 단층비지를 포함하는 단층대로 산출된다. 즉 제4기 단층은 이전에 단층운동으로 인해 비지대가 생성되었고 제4기 때 단층운동은 약대인 비지대를 따라 슬립이 일어났다고 할 수 있다.

제4기 단층 비지대의 연대측정과 미구조 관찰은 국내의 많은 학자들에 의해서 연구되었지만(경제복 외, 1999; 장태우와 추창오, 1998, 1999; 김진영, 2000; Choo and Chang, 2000), 이들에 대하여 EPMA를 통한 미시적인 광물화학분석은 거의 이루어진 바가 없다. 일반적으로 단층암의 전암분석과 미구조 관찰은 단층운동과 이와 관련된 유체에 대한 정보를 제공할 수 있는 것으로 알려져 있다(Chester *et al.*, 1993; Evans and Chester, 1995; Goddard and Evans, 1995; O'Hara, 1988; O'Hara and Blackburn, 1989; Schulz and Evans, 1998; Winsch *et al.*, 1995). 본 연구에서는 단층비지대를 포함한 단층대의 노출이 양호한 상천단층, 입실단층, 양산단층을 대상으로 단층암의 전암분석, 미구조 관찰과 미시적인 광물화학분석을 통하여 단층운동과 이와 관련된 유체 유입 영향으로 생긴 미구조적, 광물학적 및 지구화학적 변화 양상을 구명하고자 한다.

지질 및 제4기 단층의 산출상태

본 연구지역 일대에 분포하는 암층은 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이

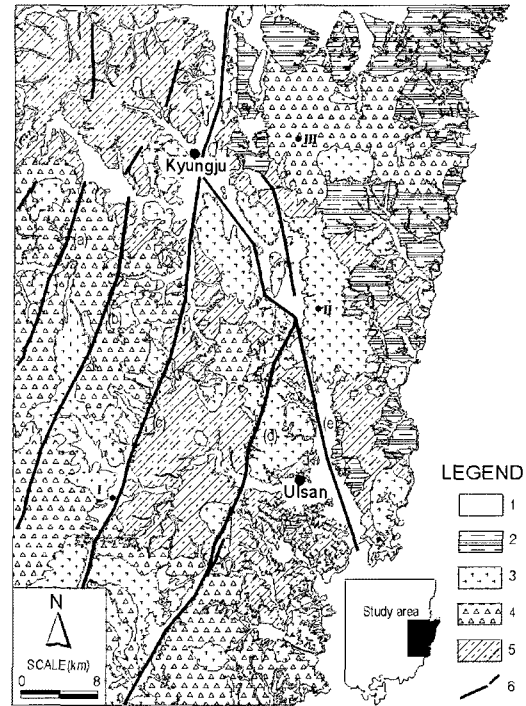


Fig. 1. Geological map of the study area. 1: Alluvium, 2: Tertiary formations, 3: Bulguksa intrusive rocks, 4: Yucheon group, 5: Hayang group, 6: fault. (a): Milyang Fault, (b): Moryang Fault, (c): Yangsan Fault, (d): Dongrae Fault, (e): Ulsan Fault. Small dots represent locations of the Quaternary faults(I: Sangchon fault, II: Ipsil fault, and III: Wangsan fault).

들을 관입하는 불국사 관입암류 및 그 위에 분출 혹은 부정합적으로 놓이는 소규모의 제3기 지층과 제4기 층적층으로 구성되어 있다(Fig. 1). 하양층군의 퇴적암류는 주로 적색, 녹회색, 암회색 이암과 세일의 호층을 이룬다. 이들은 화강암 주변부에서 접촉 변성작용으로 혼펠스화되어 있다. 유천층군은 암청록색 및 암회색을 띠는 안산암, 조면 안산암, 회석 안산암, 화산 각력암 등의 다양한 암상을 보이고 있다. 불국사 관입암류와 각종 맥암류로 구성된 화강암류는 화강 섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 미문상 화강암 등의 암상으로 이루어지고 하양층군과 유천층군을 관입하고 있으며, 지역에 따라 심하게 접촉 변성작용을 일으키기도 하였다. 제3기 지층은 울산단층 북동부에 분포하며, 안산암류와 안산암질 응회암, 역암, 세일로 구성

된다.

제4기 단층은 대부분 불국사 화강암과 유천층군의 안산암을 모암으로 하는 제4기층을 절단하고 있다. 제4기 단층의 산출상태는 다음과 같다.

상천단층은 제4기 역암층과 불국사 화강암이 거의 수직 경계를 이루는 우수주향이동단층이다. 단층 비지대는 주황색(폭 3 cm)과 회색(폭 2.5 cm)의 두 개 비지대로 뚜렷하게 구분된다(Fig. 2a). 제4기층과 접해 있는 주황색 비지대는 주로 제4기층 기원의 조립질 암편으로 구성되어 있고 기질은 소량이다. 불국사 화강암과 접해 있는 회색 비지대는 암편이 거의 없고 세립질의 기질들로만 이루어져 있다.

입실단층은 모암인 화강암과 안산암이 단층 접촉을 하며 화강암 직상부에 부정합적으로 피복되어 있는 제4기 퇴적물을 안산암이 올라타고 있는 역단층이다. 제4기의 미고결 퇴적물이 단층운동으로 약 5 m의 수직분리(vertical separation)를 보인다. 시료는 단층연장선상의 계곡 아래쪽 포켓상으로 존재하는 비지대에서 채취하였다. 비지대의 폭은 28 cm이며, 크게 갈색과 녹회색 비지대가 망상으로 얽혀있다(Fig. 2b).

왕산단층은 회색 안산암질 응회암 직상부에 부정합적으로 피복된 제4기층을 녹색 안산암질 응회암이 올라타고 있는 주향이동성 역단층이며, 최대 20 m의 수직 변위를 보인다. 단층 비지대의 폭은 5 cm이며 갈색을 띤다. 접촉부 하부의 회색 안산암질 응회암은 심하게 파쇄되고 기질을 많이 함유하며 단층각력암화되어 있는 양상을 보이지만 상부의 녹색 안산암질 응회암은 파쇄는 많이 되어 있어도 기질은 거의 없으며 2차단열이 잘 나타나는 것이 특징이다(Fig. 2c).

연구방법

제4기 단층 비지대를 신선함 모암, 접촉부 모암, 비지대로 구분하여 시료를 채취하였고, 단층 비지 시료는 지표의 오염을 최대한 줄이기 위해 지표에서 50 cm 이상 깊이에서 채취하였다. 상천단층은 입실단층, 왕산단층과 달리 양산단층의 중심부에 위치하고 있어 신선한 모암을 채취할 수가 없었다. 제4기 단층 비지대 시료의 주원소와 휘발성분은 경북대학교 지질학

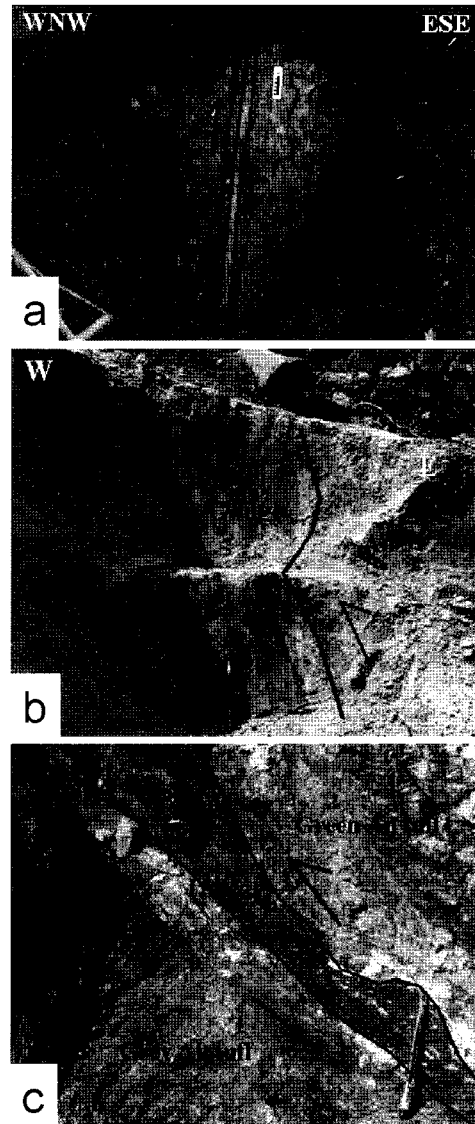


Fig. 2. Outcrop of the Quaternary fault. (a) Sangchon fault consists of two gouge layers. one layer has orange color and another layer grey one. Qd: Quaternary deposits, Gr: granite. (b) Ipsil fault has two gouge layers which are tangled. An: andesitic rock. (c) Wangsan fault.

과의 X선 형광분광분석기(Philips PW 1404/10)와 H₂O와 CO₂ 분석기(CWA5003)를 이용하여 분석하였다. 비지대의 광물 분석을 위해서 단층비지의 시료를 유기물과 주위 모암 성분을 제거한 다음 기초과학지원연구원 대구분소의 PHILIPS X-ray diffractometer를 이용하여 분석

하였다. 분석조건은 Ni-filtered Cu-ka(1.54060 Å) 선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 30 kV/20 mA, 측정방법은 스텝 스캔으로 스텝당 0.5 초로 행하였다. 단층비지 연구를 위한 박편제작은 Takagi and Kobayashi(1996)와 김진영(2000)에 의한 방법으로 제작하였고, 전자현미분석은 경북대학교 공동실험실습관의 Shimadzu EPMA-1600으로 분석을 하였다.

결과 및 토의

단층암과 모암의 화학조성

단층비지와 모암간의 성분변화를 알아보기 위해 XRF분석을 하였다(Table 1). 분석결과를 보면 입실의 접촉부 안산암과 갈색 비지, 왕산의 회색 접촉부 안산암에서 CaO, CO₂의 함량이 높게 나타나는 것이 특징적이다.

상천단층은 신선한 모암의 전암분석을 할 수 없었기 때문에 비지대와 신선한 모암간의 성분 변화는 알 수 없지만 단층 비지대내에서 주황색 비지대와 회색 비지대간 TiO₂, MgO, P₂O₅, Fe₂O₃, CaO의 성분 변화가 뚜렷하게 나타난다. 입실단층에서도 갈색 비지대와 녹회색 비지대간의 CaO와 CO₂의 함량 차이가 뚜렷하고, 모암에 비해 비지대에 TiO₂와 P₂O₅의 함량이 높다. 더 자세히 관찰해보면 갈색 비지대에서 TiO₂, MgO, P₂O₅, Fe₂O₃, MnO 성분이 녹회색 비지대에서보다 높게 나타나는 것은 이들이 원래 화

강암보다 안산암에서 높게 나타나는 성분들임을 고려할 때 갈색 비지대는 주로 안산암에서 유래되었고, 녹회색 비지대는 주로 화강암에서 유래된 것으로 추측된다. 따라서 각각의 비지대와 그 유래된 모암을 보았을 때 TiO₂, P₂O₅ 뿐만 아니라 MgO, Fe₂O₃, MnO도 비지대에 집적되었다고 볼 수 있다. 왕산단층도 TiO₂, MgO, P₂O₅, Fe₂O₃, H₂O가 모암에 비해 비지대에서 높은 함량을 보여주고 있다.

전체적으로 모암과 비지대간 SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O의 성분 변화는 특별한 경향성을 보여주지 않으며, H₂O가 신선한 모암에 비해서 비지대에서 함량이 높은 것은 비지대를 구성하는 점토광물에 포함되어 있는 H₂O에 기인한 것이고, TiO₂, MgO, P₂O₅, Fe₂O₃가 신선한 모암에 비해서 비지대에서 함량이 높은 것은 유체에 의해 용해되어 빠져나가는 원소에 비해 상대적으로 유동성 낮은 원소(immobile elements)가 비지대에 집적되기 때문이다(O'Hara, 1988; O'Hara and Blackburn, 1989; Evans and Chester, 1995; Goddard and Evans, 1995; 손승완, 2001). 특정 부분에서 CaO와 CO₂의 높은 함량과 유동성 낮은 원소의 비지대의 집적은 유체들의 활동이 활발했음을 시사하고 있다.

단층 비지의 광물조성

제4기 단층대의 모암과 비지대에 대한 화학 분석 결과, 모암으로부터 비지대까지의 화학 성

Table 1. Chemical analyses of the fault gouges and protoliths in the study area

	Sangchon fault				Ipsil fault						Wangsan fault				
	Qd	O-gouge	gr-gouge	C-Gr	F-An	C-An	B-gouge	GG-gouge	C-Gr	F-Gr	F-gr-An	C-gr-An	B-gouge	C-gn-An	F-gn-An
SiO ₂	59.33	63.32	58.82	52.53	60.56	52.71	40.75	67.14	76.08	76.97	64.90	22.25	60.20	65.89	63.70
TiO	0.73	0.62	1.65	0.91	0.63	0.52	1.16	0.89	0.14	0.16	0.62	0.17	0.93	0.60	0.57
Al ₂ O ₃	18.98	18.70	17.10	20.95	16.45	13.95	11.14	15.02	12.37	12.30	15.53	5.17	15.38	15.52	15.06
Fe ₂ O ₃	7.37	4.47	8.09	9.41	5.62	5.21	9.46	4.54	1.36	1.09	4.28	1.71	7.08	4.34	4.40
MnO	0.07	0.07	0.12	0.06	0.23	0.26	0.50	0.03	0.02	0.02	0.15	0.78	0.11	0.12	0.10
MgO	0.85	0.48	1.97	1.66	2.24	4.03	3.12	1.45	0.35	0.14	1.29	0.80	2.93	1.76	1.23
CaO	0.22	0.19	1.12	0.88	4.43	7.61	14.62	1.40	0.31	0.26	3.52	36.72	2.41	3.50	2.21
Na ₂ O	0.19	0.28	0.48	1.34	5.40	1.51	0.73	1.73	2.82	3.55	4.02	0.41	1.39	2.98	4.30
K ₂ O	3.46	3.49	1.98	2.09	0.81	1.41	1.22	2.61	4.96	4.89	2.96	1.06	3.46	2.26	3.15
P ₂ O ₅	0.06	0.04	0.39	0.14	0.12	0.13	0.56	0.36	0.02	0.01	0.13	0.05	0.28	0.13	0.15
CO ₂	0.47	0.15	0.01	0.40	0.19	7.06	10.82	0.05	ND	ND	0.06	29.31	0.98	ND	0.22
H ₂ O	8.12	8.07	8.32	9.70	1.20	5.61	5.88	4.67	1.33	0.41	1.26	1.35	4.89	2.76	2.11
total	99.85	99.86	100.06	100.06	97.88	100.01	99.94	99.88	99.74	99.80	98.72	99.78	100.02	99.84	97.19

Qd: Quaternary deposits, O: orange, gr: grey, C: contact, Gr: granite, F: fresh, An: andesitic rock, B: brown, GG: greenish grey, and gn: green.

분 변화가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 화학 성분의 변화는 모암과 비지대의 구성 광물의 차이와 밀접한 관련을 가질 것으로 예상된다. 각 단층 비지대의 구성 광물을 조사하기 위하여 단층 비지 시료에 대하여 XRD분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

단층 비지는 주로 석영, 장석, 방해석 및 �멕타이트와 카올리나이트와 같은 점토광물로 구성되어 있다. 그러나 비지의 입자 크기나 색에 따라 구성광물의 양적인 차이가 나타난다. 상천단층 주황색 비지와 같이 조립 암편들을 많이 함유하고 있는 비지는 석영과 장석의 함량이 높고 점토광물의 함량은 낮으나, 상천단층의 회색 비지, 입실단층과 왕산단층의 비지들과 같이 기질을 많이 함유하고 있는 비지는 석영과 장석의 함량이 낮고 점토광물의 함량이 높다. 주로 관찰되는 점토광물은 �멕타이트이며, (060) 회절선의 값은 평균 1.50 Å로서 이판면체구조를 가짐을 알 수 있다. Fig. 3에서 입실단층 갈색 비지에서 방해석 피크가 높게 나타나는데

이는 XRF 분석 결과 CaO와 CO₂의 함량이 높은 것과 잘 일치한다. 또한 Fig. 3에서 상천단층의 주황색 비지와 다른 비지의 점토광물의 함량차이가 뚜렷하게 나타나는데 이는 XRF 분석 결과 �멕타이트 성분과 관련된 TiO₂, MgO, Fe₂O₃, CaO의 함량이 주황색 비지에서 낮게 나타난 사실과 잘 결부된다. 입실단층과 상천단층은 색깔차이로 인해 두 종류의 비지로 구분되는데 입실단층은 녹회색 비지보다 갈색 비지에서 �멕타이트의 함량이 높고, 장석은 그 반대이다. 상천단층은 주황색 비지보다 회색 비지에서 점토광물의 함량이 높게 나타난다.

단층암의 미구조 관찰 및 미시적인 광물화학분석

상천단층

접촉부 화강암에는 주로 장석과 석영이 분포하고, 미량으로 저어콘, 적철석, 티탄철석, 처털라이트(cheralite, thorium-rich monazite), 자연동 등이 관찰된다. 석영은 입자가 그대로 남아 있으며, 장석은 유체에 의한 변질작용으로 점토광물화 된 것도 있고 일부는 그대로 남아 있는 것도 있다.

회색 비지대는 화강암의 미세한 쇄편내에 적철석과 함께 장석의 피사이트 구조가 관찰된다. 기질은 대부분 �멕타이트로 구성되어 있고, 제노타임(xenotime, YPO₄, 1~5 μm)이 단층면과 평행한 엽리방향으로 대상 분포하며(Fig. 4, Table 2) 처털라이트도 관찰된다.

주황색 비지대는 대부분 암편으로 구성되고, 소량의 점토광물이 기질을 형성한다. 그 외에 적철석, 석영, 처털라이트가 관찰된다. 그림 2a에서 보듯이 주황색 비지대와 회색 비지대가 뚜렷이 구분되고 각각 접하고 있는 모암이 제4기층과 화강암이다. 따라서 주황색 비지대의 암편은 대부분 제4기층에서 유래된 것으로 생각된다.

제4기 자갈층은 주로 암편들로 이루어지고 기질에 미량의 점토광물과 처털라이트(20 μm)가 관찰된다.

전체적으로 상천단층은 비지대와 모암인 화강암 그리고 제4기 자갈층 모두에서 처털라이트가 관찰된다. 제4기 자갈층은 주위 고기 암석들의 암편들로 이루어지며, 상천단층 일대는 화강암이 분포하므로 제4기 자갈층의 처털라이트

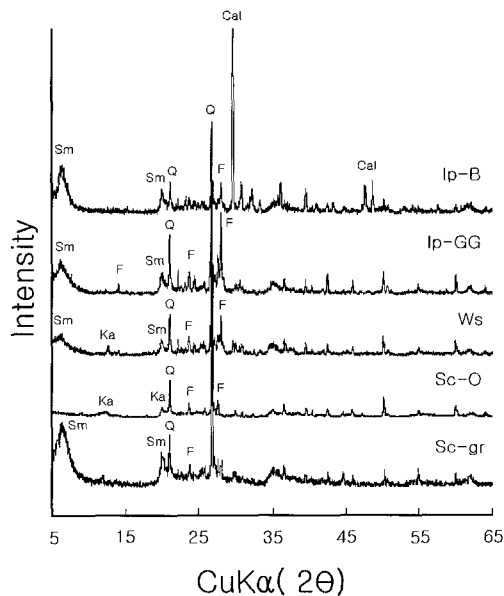


Fig. 3. X-ray diffractograms of minerals in the fault gouges. Q: quartz, F: feldspar, Sm: smectite, Ka: kaolinite, Cal: calcite, Ip-B: the brown gouge of the Ipsil fault, Ip-GG: the greensih grey gouge of the Ipsil fault, Ws: Wangsan fault gouge, Sc-O: the Orange gouge of the Sangchon fault, Sc-gr: the grey gouge of the Sangchon fault.

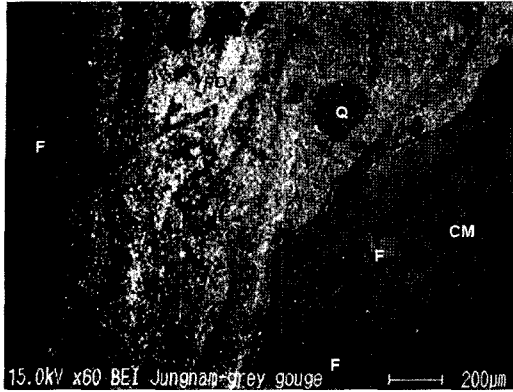


Fig. 4. Back-scattered electron image (BEI) of the Sangchon fault gouge. Q: quartzs, F: feldspars and CM: clay minerals. The zonation of xenotime sub-parallel foliation of the grey gouge.

는 화강암에서 유래된 것으로 볼 수 있다. 비지대는 주위 모암의 분쇄물질이므로 비지대의 처털라이트 또한 화강암에서 유래되었다고 할 수 있다.

상천단층에서 가장 큰 특징은 회색 비지대에서 제노타임이 단층면과 거의 평행한 엽리방향으로 대상분포를 하는 것이다(Fig. 4). 제노타임의 기원에 대해 2가지 가정을 할 수가 있다. 첫째는 제4기 단층운동과 동시기적으로 열수의 유입으로 생성된 것으로 볼 수 있고, 둘째는 모암인 화강암 기원 또는 제4기 이전의 열수변질 기원으로 이들이 제4기 단층운동 때 재배열되었다고 볼 수 있다. 전자의 경우 제4기 단층운동과 동시기적으로 열수의 유입으로 제노타임이 생성되었다고 본다면, 제4기 때 열수의 유입이 있었다는 것을 의미한다. 하지만 연구지역에서 제4기 단층이 지표 지진 단층이었고(장태우, 2001), 제노타임이 제4기 물질과 혼합되어 있는 주황색 비지대에서는 관찰되지 않았으며 나아가서 열수 유입에 의한 제4기층의 변질작용에 대해 지금까지 보고된 바가 없는 점 등으로 보아 전자의 가정은 무리일 것 같다. 후자의 경우는 첫째 가정이 무리라고 볼 때 모암인 화강암 기원 또는 제4기 이전 단층운동과 관련된 열수 기원의 제노타임이 제4기 단층운동 때 엽리방향으로 재배열되었다고 할 수 있다. 그리고 제노타임이 회색 비지대에서만 분포하고 접촉부 화강암에서는 관찰되지 않는 것으로 보아 제노타임은 모암인 화강암에서 유래된 것이라

Table 2. The semi-quantitative analysis using the EPMA of xenotime from the grey gouge of the Sangchon fault

Sangchon grey gouge - Xenotime	
Xide	Wt(%)
Y ₂ O ₃	44.496
P ₂ O ₅	36.426
Dy ₂ O ₃	5.027
Nd ₂ O ₃	4.417
SiO ₂	4.257
CaO	1.742
BrO	1.870
La ₂ O ₃	1.756
Total	99.991

기보다는 제4기 이전에 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 인해 회색 비지대에 생성되었고, 제4기 단층운동 때 재배열된 것으로 생각된다.

입실단층

신선한 안산암에서는 적철석, 티탄철석, 녹염석, 양기석, 사장석의 안테신이 주로 관찰되며, 드물게 인회석, 망간-티탄철석, 스피인이 관찰된다(Fig. 5a).

접촉부 안산암에서는 맥상 탄산염광물, 장석, 기질을 구성하는 스�멕타이트가 주로 관찰되며, 방연석(bismuth-rich galena, Table 3), 황철석, 적철석이 드문드문 관찰된다. 여기서 나타나는 맥상 탄산염광물은 쿠나호라이트(kutnahorite, Ca(Mg, Fe)(CO₃)₂)로 판단되며, 맥상의 쿠나호라이트 가장자리에 반응연이 나타난다. 이 반응연의 광물은 Mg와 Fe가 주성분이고, Ca가 미량성분인 함수 탄산염광물인 파이로오라이트(pyroaurite, Mg₆Fe₂CO₃(OH)₁₆ · 4H₂O)로 생각된다(Fig. 5b).

비지대에서는 주로 방해석과 기질을 구성하는 스�멕타이트로 이루어져 있고, 적철석이 드문드문 관찰된다. 방해석이 단층면과 아평행한 엽리방향으로 맥상 분포하고 있으며, 맥상의 방해석은 물리적인 파쇄작용을 받아 쪼개져 있고, 가장자리에 반응연이 관찰된다(Fig. 5c). 이 반응연의 광물은 Ca와 Mg를 주구성 양이온으로 하는 함수 탄산염광물인 서지바이트(sergeevite, Ca₂Mg₁₁(CO₃)₉(HCO₃)₄(OH)₄ · 6H₂O)로 생각된다. 입실단층 비지대에서는 접촉부 안산암에서 나타나는 황화광물이 나타나지 않는다.

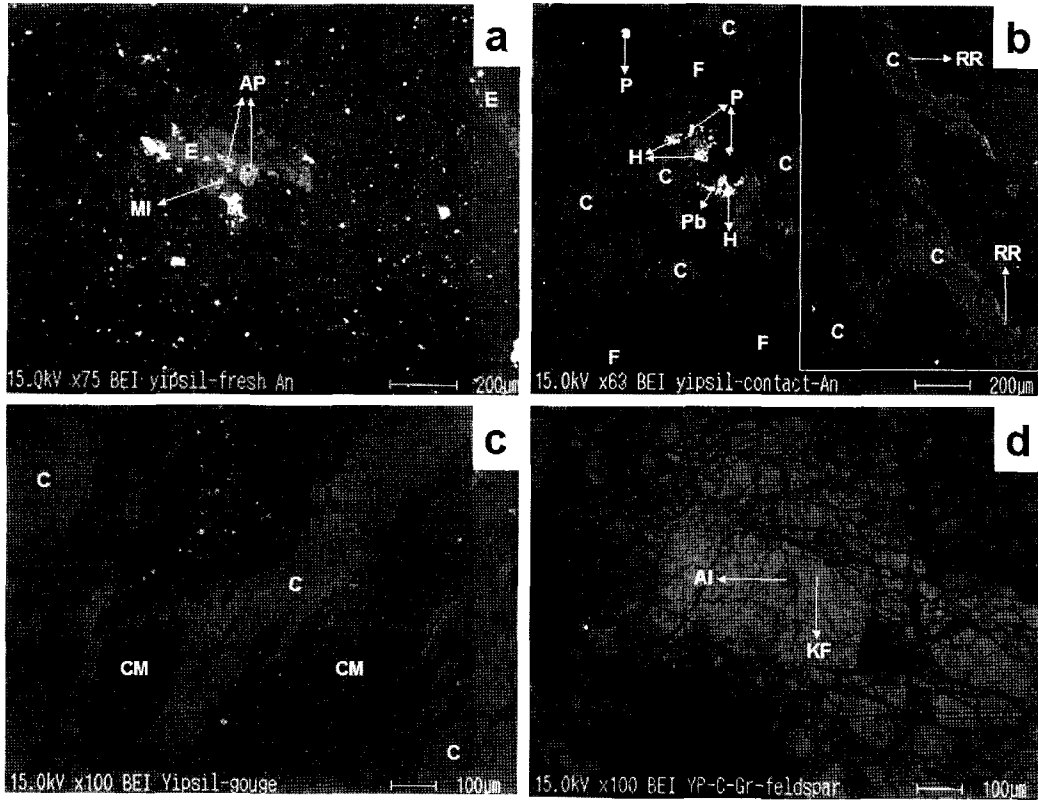


Fig. 5. Back-scattered electron images (BEI) of the Ipsil fault. Ap: apatites, E: epidotes, MI: manganian ilmenites, F: feldspars, C: carbonate minerals, P: pyrites, H: hematites, Pb: bismuth-rich galena, RR: reaction rim CM: clay minerals, Al: albite and KF: K-feldspar. (a) Fresh andesitic rock shows mineral compositions. White parts are hematites or ilmenites and small grey parts are actinolites. Ground mass is composed of andesine. (b) Ipsil contact andesitic rock. Left part is characterized by fractured carbonate minerals and right part is characterized by the reaction rim of carbonate minerals. (c) Ipsil fault gouge. White parts are hematite. (d) Ipsil contact granite shows fractured feldspar with chemical alteration structure(perthite).

Table 3. The semi-quantitative analysis using the EPMA of bismuth-rich galena from the contact andesitic rock of the Ipsil fault

Ipsil contact An - Galena	
Element	Wt(%)
Bi	47.686
Pb	25.242
S	16.809
Cu	7.932
Ag	2.149
Total	99.818

접촉부 화강암에서는 장석, 석영, 운모가 주로 관찰되고, 드물게 적철석, 모나자이트, 자연금, 황동이 관찰된다. 장석은 심하게 파쇄되어 있고

가장자리는 점토광물화 되어 있으며, 퍼싸이트 구조가 관찰된다(Fig. 5d). 그림 5d에서 큰 장석 결정내에 밝은 회색 부분은 알칼리 장석이고 어두운 부분은 알바이트로 구성되어 있다.

신선한 화강암에서는 주로 석영, 장석, 흑운모로 이루어져 있으며, 드물게 적철석, 티탄철석, 모나자이트, 방연석, 증정석, 인회석, 저어콘 등이 관찰된다.

입실단층에서 특징적인 것은 접촉부 화강암에서의 퍼싸이트 구조와 접촉부 안산암과 갈색 비지대에서 단층면과 아평행한 열리방향으로 맥상의 탄산염광물이 나타나는 점이다.

접촉부 화강암에서의 퍼싸이트 구조는 신선한 화강암의 퍼싸이트 구조와는 달리 알칼리

장석의 구조에 규제 받지 않은 듯 불규칙 형태를 보임으로(Fig. 5d) 신선한 화강암에서 유래된 것은 아닌 것으로 생각된다. 아마도 단층운동과 동시기 또는 이후에 단층대를 따라 유입된 유체에 의해서 생성된 교대 퍼싸이트(replacement perthite)일 것이라 추측된다.

접촉부 안산암과 비지대의 맥상 탄산염광물은 서로 성분 차이가 나타나는데 접촉부 안산암의 탄산염광물은 쿠나호라이트이고, 비지대의 탄산염광물은 방해석이다. 이는 Ca를 다량 함유하고 있는 유체가 단층대를 따라 유입되고 녹염석과 양기석을 함유하고 있는 안산암에서는 이 유체와 반응을 하여 쿠나호라이트를 생성시켰고, 비지대에서는 Mg와 Fe를 공급해 줄 수 있는 기원 물질이 없기 때문에 방해석으로만 침전된 것으로 생각된다. 맥상 탄산염광물의 가장자리에는 반응연이 관찰되는데 반응연의 성분은 내부의 탄산염광물과 비슷하지만 H₂O 또는 OH를 많이 함유하고 있는 것이 특징이다. 이는 맥상 탄산염광물이 생성되고 난 후에도 유체의 작용으로 인해 맥상 탄산염광물의 가장자리에 화학적인 변화가 생긴 것으로 생각되며, 이들 맥상 탄산염광물은 단층면과 아평행한 열리방향으로 분포하므로 단층운동과 거의 동시기적으로 생성되었다고 볼 수 있다. 접촉부 안산암에서는 황화광물이 나타나지만 신선한 안산암에서는 황화광물이 나타나지 않으므로 접촉부 안산암의 황화광물은 신선한 안산암에서 유래된 것이 아니고, 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 생성되었다고 볼 수 있다. 즉 접촉부 안산암의 황화광물과 접촉부 안산암 및 비지대의 맥상 탄산염광물의 생성시기에 대한 선후관계는 알 수 없지만 이들 모두 단층운동과 관련하여 생성된 것으로 생각할 수 있다. 그리고 접촉부 안산암과 비지대의 맥상 탄산염광물이 물리적으로 심하게 파쇄되어 있으므로 탄산염광물이 생성된 후에도 단층운동이 있었고, 이 단층운동의 마지막 활동시기가 제4기 때인 것으로 볼 수 있다. 관찰된 결과로 볼 때 입실단층은 다중변형작용의 산물이며, 유체의 활동이 활발했음을 알 수 있다.

왕산단층

신선한 녹색 안산암에서는 망간-티탄철석, 스피넬, 녹염석, 인회석, 장석이 관찰되고, 기질에

화산암의 특징인 유상구조가 관찰된다.

접촉부 녹색 안산암에서는 장석과 녹염석이 주로 관찰되며, 드물게 자연금, 티탄철석, 적철석, 저어콘이 관찰된다.

비지대에서는 스펙타이트와 카올리나이트로 구성된 기질물질, 석영, 장석, 적철석, 인회석, 녹염석이 관찰된다.

접촉부 회색 안산암에서는 점토광물, 장석, 방해석, 황철석(2~50 μm)이 관찰된다. 방해석은 맥상이며 물리적인 파쇄현상은 현저하지 않고, 황철석은 박편 전반적으로 분포되어 있고 방해석 맥 내에서도 관찰되며, 화산암의 특징인 유상구조가 기질에 관찰된다(Fig. 6a). 그림 6a에서 유상구조의 어두운 부분은 주로 알바이트이고, 밝은 부분은 알칼리 장석이다.

신선한 회색 안산암에서는 장석, 녹염석, 양기석이 주로 관찰되고, 미량으로 인회석, 티탄

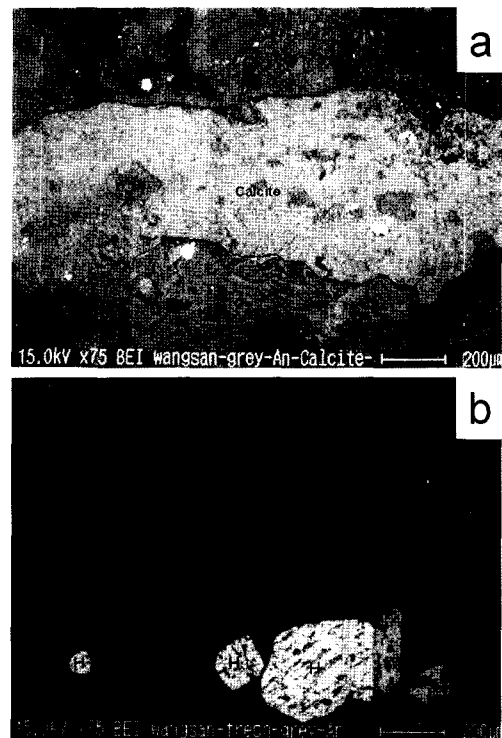


Fig. 6. Back-scattered electron images (BEI) of Wangsan fault. H: hematites, I: ilmenites, Ap: apatites, Ac: actinolites and E: epidotes. (a) Calcite and flow structure from contact grey andesitic rock. White parts are pyrite. (b) Flow structure and mineral compositions of fresh grey andesitic rock.

철석, 적철석이 나타난다. 큰 결정을 이루고 있는 것은 대부분이 휘석류 또는 각섬석류와 불투명 광물이고 기질은 사장석의 안데신(andesine)으로 이루어져있다(Fig. 6b). 그림 6b에서도 기질에 유상구조를 관찰할 수 있는데 유상구조의 밝은 부분은 알칼리 장석이고 어두운 부분은 사장석의 안데신이며, 접촉부 회색 안산암에서 나타나는 유상구조 내에서의 알바이트 성분은 관찰되지 않았다.

왕산단층에서 특징적인 것은 접촉부 회색 안산암과 신선한 회색 안산암간 유상구조의 성분의 차이가 있는 것과 접촉부 회색 안산암에서 맥상의 방해석과 황철석이 많이 관찰된다는 점이다.

접촉부 회색 안산암의 유상구조는 모암인 신선한 회색 안산암에서도 유사하게 관찰되는데 이들 유상구조간의 성분차이가 나는 것은 단층대에 유체의 유입으로 인해 사장석에서 Ca가 빠져나가 안데신이 알바이트화되는데 따른 것으로 추측된다. 그리고 그림 6a에서 보듯이 접촉부 회색 안산암에서는 맥상의 방해석과 다수의 황철석이 관찰되는데, 이는 방해석과 황철석이 신선한 회색 안산암에서 관찰되지 않으므로 회색 안산암이 형성되고 난 이후에 이들 광물이 생성된 것으로 생각할 수 있다. 여기서 방해석과 황철석의 생성시기에 따라 2가지 가정을 할 수 있다. 첫째 황철석과 방해석이 동시기적으로 생성된 것이라고 볼 때 이들은 열수의 유입으로 인해 생성되었다고 볼 수 있고, 방해석의 물리적인 파쇄현상이 현저하게 나타나지 않으므로 이들이 생성되고 난 이후에는 단층운동이 없었다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 왕산단층의 마지막 운동 시기는 제4기이고, 연구지역에서는 제4기 때 열수변질작용을 고려하기가 어려운 상황이기 때문에 방해석과 황철석이 동시기적으로 생성된 것이 아니라고 볼 수 있다. 둘째 황철석과 방해석의 생성시기가 다르다고 본다면, 우선 방해석이 먼저 생성되고 난 후에 황철석이 생성되었다면 첫 번째 가정과 같이 제4기 때 열수변질작용이 있어야 하므로 이 가정도 무리일 것 같다. 그러면 황철석이 생성되고 난 후에 방해석이 생성되었다고 볼 때 황철석은 제4기 이전의 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 인해 생성되었다고 볼 수 있고, 제4기 단층운동과 동시기 또는 이후에 단층대를 따라

들어온 유체 의해 방해석이 침전될 때 황철석이 쇄편으로 포획된 것으로 추측된다. 따라서 맥상의 방해석 내의 황철석과 방해석의 물리적인 파쇄현상이 현저하게 나타나지 않는 것을 잘 설명해준다.

결론

제4기 단층 비지와 주위 모암의 화학분석, 광물 감정과 미구조 관찰 및 미시적인 광물화학 분석 등을 통한 연구 결과는 다음과 같다.

단층 비지와 주위 모암의 화학분석 결과 유동성이 낮은 원소 즉 TiO_2 , MgO , P_2O_5 , Fe_2O_3 가 주위 신선한 모암에 비해 비지대에서 함량이 높다. 입실 접촉부 안산암과 갈색 비지대, 왕산단층의 회색 안산암에서 탄산염광물이 관찰되는 것과 유동성 낮은 원소의 비지대의 집적은 단층운동과 이에 수반된 유체들의 활동이 활발했음을 알 수 있다.

단층비지의 XRD분석 결과 관찰되는 광물은 석영, 장석과 점토광물이다. 주로 산출되는 점토광물은 스멕타이트이며, (060) 회절선의 값은 평균 1.50 Å로서 이팔면체구조를 가짐을 알 수 있다.

단층 비지대와 주위 모암의 EPMA 분석 결과 상천단층은 회색 비지대에 단층면과 거의 평행한 엽리방향으로 대상분포하는 제노타입이 관찰되는데 이는 제4기 이전 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 회색 비지대에 생성되었고, 제4기 단층운동 때 재배열된 것으로 판단된다. 입실단층은 접촉부 안산암과 비지대에서 맥상 탄산염광물인 쿠나호라이트와 방해석이 관찰되고, 이들 가장자리에 파이로오라트와 서지바이트와 같은 함수 탄산염광물이 나타난다. 그리고 이들 맥상 탄산염광물과 열수의 유입으로 생성된 접촉부 안산암에서의 황화광물은 모두 단층운동과 관련하여 생성된 것으로 볼 수 있다. 맥상 탄산염광물이 물리적으로 심하게 파쇄되어 있고, 맥상 탄산염광물의 가장자리에 반응연이 있는 것으로 보아 이들 광물이 생성되고 난 후에도 단층운동과 유체의 활동이 활발했음을 알 수 있다. 왕산단층은 회색 안산암에서만 맥상의 방해석과 다수의 황철석이 관찰된다. 맥상의 방해석은 물리적인 파쇄현상이 현저하게 나타나지 않고 맥상의 방해석 내에 황철석이 존재하

는 것으로 보아 황철석은 제4기 이전의 단층운동과 관련된 열수의 유입으로 인해 생성되었다고 볼 수 있고, 제4기 단층작용과 동시기 또는 이후에 단층대를 따라 들어온 유체에 의해 방해석이 침전될 때 황철석은 쇠퇴적으로 포획된 것으로 추측된다.

사 사

이 연구는 1999년 한국학술진흥재단 기초과학지원사업의 학술연구비(과제번호 1999-015-Di0110)와 2001년 한전전력연구원의 위탁과제의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사사를 드린다.

참 고 문 헌

경재복, 김성균, 조화룡, Okada, A., Watanabe, M., Susuki, Y., and Okike, K. (1995) 울산단층 중앙부의 단층노두와 대지진 발생의 지형적 증거. 대한지질학회 제50차 추계공동학술발표회(초록), 공주대학교 10월27일, 99p.

경재복, 이기화, Okada A., Watanabe M., Susuki Y., and Takemura K. (1999) 양산단층 남부 상천리 일대의 트렌치 조사에 의한 단층특성 규명. 한국지구과학회지, 20(1), 101-110.

김진영 (2000) 울산단층 북동부 지역 제4기 단층 비지의 미구조와 절대 연령 측정. 경북대학교 석사학위 논문.

류충렬, 경재복, 김인수 (1997) 울산단층대 동측의 신기 지구조 운동과 지형발달. 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회(초록), 14p.

류충렬, 양경희, 김인수, 이상원 (1996) 울산단층 주변의 제4기 단층. 부산대학교 사대 논문집, 33, 311-327.

손승완 (2001) 한반도 동남부 제4기 단층 비지대의 미구조 및 지구화학적 특성. 경북대학교 석사학위 논문.

장태우, 추창오 (1998) 동래단층지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령. 지질공학회지, 8, 175-188

장태우, 추창오 (1999) 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령. 한국지구과학회지, 20(1), 25-37.

장태우 (2001) 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동. 지질학회지, 37(3), 431-444.

Chester, F.M., Evans, J.P., and Biegel, R.L. (1993)

Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault. *Jour. Geophys. Res.*, 98(B1), 771-786.

Choo, C.H. and Chang, T.W. (2000) Characteristics of clay minerals in gouges of the Dongrae fault, Southeastern Korea and implications for fault activity. *Clays Clay Miner.*, 48(2), 204-212.

Evans, J.P. and Chester, F.M. (1995) Fluid-rock interaction in faults of San Andreas system: Inferences from San Gabriel fault geochemistry and microstructures. *Jour. Geophys. Res.*, 100(B7), 13007-13020.

Goddard, J.V. and Evans, J.P. (1995) Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A.. *Jour. Struct. Geol.*, 17(4), 533-547.

Kyung, J.B. and Okada, A. (1995) Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquake: some cases in central Japan and Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 31(3), 237-250.

O'Hara, K. (1988) Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U.S.A.. *Tectonophysics* 156, 21-36.

O'Hara, K. and Blackburn, W.H. (1989) Volume loss model for trace-element enrichment in mylonite. *Geology*, 17, 524-527

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. Geogr. 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.

Tagaki, H. and Kobayashi, K. (1996) Composite planar fabrics of fault gouges and mylonites-comparative petrofabrics. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 102(3), 170-179.

Wintsch, R.P., Christoffersen, R., and Kronenberg, A.K. (1995) Fluid-rock reaction weakening of fault zones. *Jour. Geophys. Res.*, 100(B7), 13021-13032.

2001년 8월 13일 원고접수, 2002년 5월 2일 게재승인.