

울산단층 동부지역 제4기단층 비지대의 체적변화와 유체-암석비에 대한 고찰

장태우 · 채연준 · 추창오*
경북대학교 지질학과

Estimation of Volume Change and Fluid-Rock Ratio of Gouges in Quaternary Faults, the Eastern Blocks of the Ulsan Fault, Korea

Tae-Woo Chang, Yeon-Zoon Chae, Chang-Oh Choo*
Department of Geology, Kyungpook National University

울산단층 동부 지역에는 제4기로 추정되는 미고결 퇴적층을 절단하며 파쇄대와 단층비지를 수반하는 제4기 단층이 여러 곳에서 발견되고 있다. 본 연구에서는 제4기 단층비지대의 성분변화, 체적변화, 실리카의 손실 그리고 유체-암석비를 XRF, XRD, EPMA를 이용하여 계산하였다. 단층비지의 성분변화는 모암에 비해 단층비지대에서 SiO_2 , K_2O , Na_2O 는 감소하고, Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , LOI는 증가한다. 단층별 체적감소는 개곡 제1단층 56%, 개곡 제2단층 22%, 신계단층 34%, 마동단층 8%, 원원사단층 2%, 진현단층 53% 이다. 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석비가 낮게 나타난 마동단층과 원원사단층 비지대는 유체활동에 대하여 닫힌계이고, 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석비가 높은 개곡 제1단층과 진현단층의 비지대는 유체 활동의 통로로 작용한 열린계였을 것으로 볼 수 있다.

단층의 유체-암석 체적비는 모든 단층에서 $10^2 \sim 10^4$ 로 나타나지만 기질의 함량이 각각 88%와 77%로 높고 체적감소가 큰 개곡 제1단층과 진현단층에서 가장 높게 나타난다. 따라서 이들 단층에서 유체의 활동이 가장 활발하였다.

· **주요어:** 제4기 단층, 울산단층, 단층비지대, 체적변화, 유체암석비

Many Quaternary faults are recognized as thin gouge and narrow cataclastic zone juxtaposing the Bulguksa granite and Quaternary deposit bed in the eastern block of the Ulsan Fault, Korea: Gaegok 1, Gaegok 2, Singye, Madong, Wonwonsa and Jinhyeon faults. This study was performed to calculate chemical change, volume change, silica loss and fluid-rock ratio taken place in gouge zones of these Quaternary faults using XRF, XRD, EPMA. The chemical compositions of fault rocks reveal that the fault gouges are depleted in SiO_2 , Na_2O and K_2O and enriched in Al_2O_3 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , MgO , MnO , CaO and LOI($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) relative to protoliths. The fact that there is enrichment of relatively immobile elements and depletion of the more soluble elements in the fault gouges relative to protoliths can be explained by fluid-assisted volume loss of 56% for Gaegok 1 fault, 22% for Gaegok 2 fault, 34% for Singye fault, 8% for Madong fault, 2% for the Wonwonsa fault and 53% for the Jinhyeon fault. Madong fault and Wonwonsa fault where ratios of the volume change, silica loss and fluid-rock are low might have acted as a closed system for fluid activity, whereas Gaegok 1 fault and Jinhyeon fault with high ratios in those factors be an open system. The volumetric fluid-rock ratios range $10^2 \sim 10^4$ for all faults, being highest in Gaegok 1 fault and Jinhyeon fault whose fluid activity was most significant.

Key Words: Quaternary fault, Ulsan fault, gouge zones, volume change

* Corresponding author: chooco@knu.ac.kr

서 론

최근 들어 신생대 제4기 퇴적층을 절단하는 제4기 단층(Quaternary fault)의 흔적이 양산단층과 울산단층을 따라, 그리고 동해안 지역 여러 곳에서 발견되고 있다. 현재까지 알려진 제4기 단층들은 양산단층대에서는 상천, 월평, 연봉, 신화단층, 벽계단층 및 유계단층 등이며, 울산단층대에서는 왕산, 오곡지, 마동, 탑골, 진현, 신계, 감산사, 활성리, 말방, 입실, 개곡, 원원사, 이화 단층 등이 있으며, 울산-포항간 해안 지역에서는 읍천 및 수렴단층이다(Okada et al, 1994; 경제복외, 1995; 1999; 류충렬 외, 1997; 장태우, 1998; 김진영, 2000; 이윤희, 2003). 이들 제4기 단층들은 울산단층 동쪽에서는 인접한 울산단층과 평행 또는 아평행하고, 주위의 모암들이 미고결의 제4기 층을 올라타고 있는 역단층이 대부분이다(장태우, 2001). 일반적으로 단층대는 다중변형작용의 산물이며 현재 제4기단층이라 명명된 단층들은 마지막 운동시기가 제4기 때인 것을 지칭한다. 즉 제4기 단층은 이전에 단층운동으로 인해 비지대가 생성되었고 제4기 단층운동은 이 약대인 비지대를 따라 슬립이 일어났다고 할 수 있다(장태우, 2001; 장태우와 채연준, 2004). 제4기 단층의 최후기 운동시기의 결정은 이들 단층의 활동성의 평가 뿐만 아니라, 최근 들어 지진강도와 빈도가 증가하고 있는 추세에 있는 한반도의 지진활동성을 예측할 수 있는 중요한 기본자료가 될 수 있다. 특히 제4기단층의 활동성 여부는 대단히 기반산업시설 부지, 원자력 발전소의 안정성 평가, 핵폐기물처분장의 부지선정 등과 밀접한 관련이 있으므로 구조지질학적인 의미뿐만 아니라 지질공학적으로도 그 중요성이 강조되고 있다.

본 연구에서는 제4기로 추정되는 미고결 퇴적층을 절단하며 각력대(breccia zone)와 비지대(gouge zone)를 수반하는 울산단층대 동부 지역에 위치한 개곡 제1 단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층, 원원사단층 및 진현단층을 대상으로 조사하였다. 특히 각 단층의 모암과 비지대에서 단층작용에 따른 단층비지의 체적 변화를 통하여 단층활동에 수반되었던 유체-암석비를 고찰하고자 한다.

지 질

한반도 동남부에 많이 발견되고 있는 제4기 단층은 특히 울산단층 동쪽 지괴의 단층벽에 해당되는 지역

에 가장 집중적으로 분포하고 있다(Fig. 1). 본 연구지역의 울산단층은 NNW방향으로 발달하고 연구지역 부근에서는 밀양단층, 양산단층, 동래단층이 NNE방향으로 발달하고 있다. 지형은 울산단층 동쪽 지괴에서 산지의 해발고도가 전반적으로 높은 편이며 계곡 유역들이 현저히 협소하다. 또 울산단층에 인접한 단층벽 지역을 보면 산지가 높을 뿐만 아니라 불국사 부근 토함산(715.1m)으로부터 삼태봉(629.1m), 동대산(444.0m) 그리고 방어진으로 연결되는 산능선이 거의 직선적이다. 이 능선의 서쪽 사면 즉 울산단층을 향한 산사면이 가파르게 이어지다가 계단상의 단구지형이 나타나는데 지금까지 보고된 대부분의 제4기 단층이 이러한 단구지형에서 발견되었다. 이와 같은 사실들은 동쪽지괴가 서쪽지괴에 비해 지구조 운동의 영향을 상이하게 받았음을 암시하고 동쪽지괴가 서쪽지괴에 대해 상대적으로 크게 융기하였음을 지시한다(장태우, 2001).

연구지역 일대에 분포하는 지질은 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이들을 관입하는 불국사 관입암류 및 그 위에 부정합적으로 놓이는 소규모의 제3기 지층 그리고 제4기 총적층으로 구성된다(Fig. 1). 제4기 단층은 대부분 불국사 화강암과 유천층군의 안산암을 절단하여 제4기 층과 접촉하고 있다. 하양층군의 퇴적암류는 주로 적색, 녹회색, 암회색 이암과 세일의 호층을 이루는데 이들은 화강암 주변부에서 접촉 변성작용으로 혼펠스화되어 있다.

유천층군은 안산암질암류로 구성되는데 암청록색 및 암회색을 띠는 안산암, 조면 안산암, 휘석 안산암, 라필리 응회암, 화산 각력암 등의 다양한 암상을 보이고 있다.

불국사 관입암류는 화강암류와 각종 맥암류로 구성되는데 화강암류는 화강 섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 미문상 화강암 등의 암상으로 이루어지고 하양층군과 유천층군을 이 지역의 곳곳에서 관입하고 있으며, 지역에 따라 심하게 접촉 변성작용을 겪었다.

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). 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 형

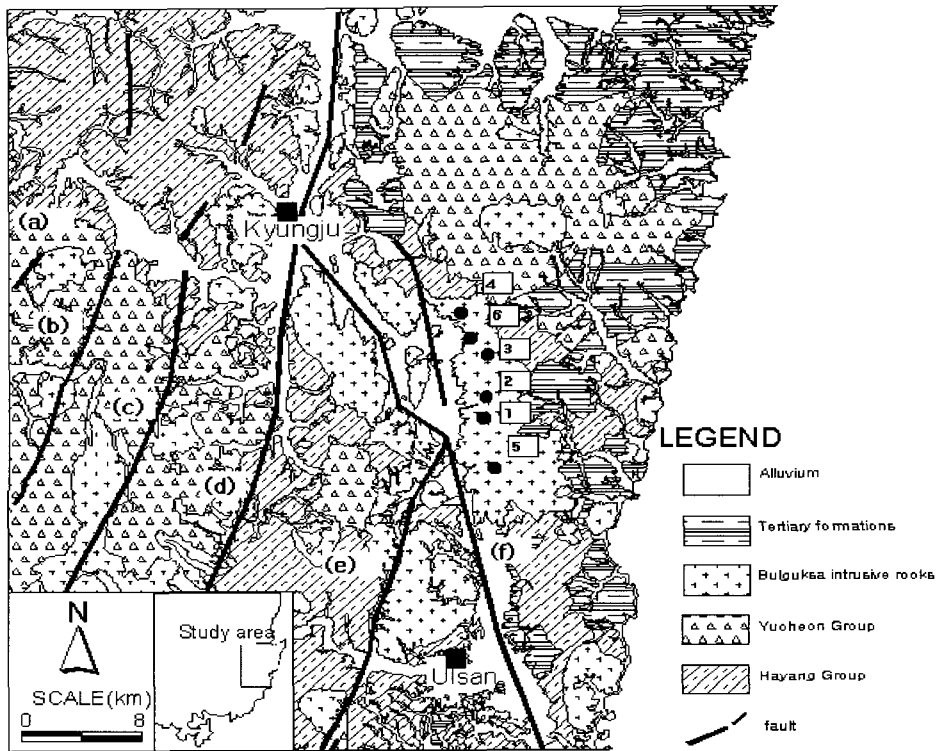


Fig. 1. Geological map around the Ulsan fault(modified from Chang, 2001).

1: Gaegok1 fault; 2: Gaegok2 fault; 3: Singye fault; 4: Madong fault;
5: Wonwonsa fault; 6: Jinhyeon fault. (a): Jain fault; (b): Milyang fault;
(c): Moryang fault; (d): Yangsan fault; (e): Dongnae fault; (f): Ulsan fault.

성된 퇴적물이고 상부의 퇴적층은 산록퇴적물로 구성된다.

실험 방법

제4기 단층비지의 구성광물을 알아보기 위하여 단층비지의 X선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 단층비지대는 대부분 극미립질인 점토질로 이루어지며, 국부적으로는 일부 미립 내지 세립질의 분쇄물질이 소량 함유된다. 이들 점토광물의 감정을 위한 XRD분석은 2 μm 이하의 점토광물을 분리한 후에 정방위시료(oriented specimen)와 부정방위시료(radom oriented specimen)로 구분하여 분석하였다. 정방위 시료의 전처리하는 우선 야외에서 채취한 단층비지 시료로부터 불순물이 섞이지 않도록 주의하여 점토광물을 분리, 회수하였다. 이를 증류수에 넣어 초음파 세척기로써

충분히 분산시킨 후에 혼탁한 부유물을 2리터의 매스 실린더에 넣고 상온에서 4시간 이상 중력침전을 시킨다. 그 후 침전물 최상층으로부터 10cm 수위의 부유물만 채취하여 원심분리기를 이용하여 Jackson(1969)의 실험법에 따라 2 μm 이하의 점토광물을 분리하였다. 부정방위 시료는 야외에서 회수한 단층비지를 상온에서 충분히 건조시켜 분말화시킨 후 XRD분석을 실시하였다.

XRD 분석은 한국기초과학지원연구원 대구분소에서 Philips사의 X' Pert-PRO/MRD 모델을 이용하여 분석하였다. 분석조건은 Ni-filtered Cu-K α (1.54056 Å)선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 35kV/25mA, 측정방법은 연속 스텝 스캐닝으로 스텝당 0.5초로 수행하였다.

제4기단층의 전암과 비지물질의 화학분석은 X선 형광분광분석기(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)로 이루어 졌다. 단층비지물질은 수분을 제거한 후에 백금도가니의 비드 제작로에 넣어 1100°C에서 5

분동안 가열하여 완전히 용융시킨 후, 유리질의 비드를 제작하였다. 이를 한국기초과학지원연구원 서울분소 Philips사 PW 2404/10 모델을 이용하여 주원소를 분석하였다. 한편 H₂O 및 CO₂ 와 같은 휘발성분의 분석은 경북대학교 지질학과의 CWA5003를 이용하여 이루어졌다. 이를 위하여 6곳의 제4기 단층 지역으로부터 신선함 모암, 손상대 모암, 단층각력대, 단층비지대로 구분하여 25개의 시료를 채취하였다.

단층비지의 연대측정은 한국기초과학지원연구원 소재 Static Vacuum Mass Spectrometer VG5400을 이용하여 K-Ar법으로 측정하였다. 시료는 단층비지를 종류수에 분산시켜 메스실린더에서 중력침전시킨 후 2 μ m이하의 점토광물 입자를 분리하여 회수하여 사용하였다.

결 과

단층대의 비지의 광물조성과 K-Ar 연령

야외노두에서 두 번의 제4기 단층작용의 증거가 나타날 뿐 아니라, 광물산출과 조직의 특징을 고려하면 단층활동은 다중 단층작용을 지시한다. 예를 들면 단층비지의 기질 내 석영, 장석, 방해석맥의 다중 변위 양상, 기질을 구성하는 녹니석(001) 벽개의 휨, 비지 반상쇄편이 산출하는 것은 비지대 내에서 다중 단층작용이 있었음을 지시한다. X-선회절 분석을 통해 단층비지는 주로 스�멕타이트, 장석, 석영으로 구성되며, 점토광물은 스�멕타이트가 주구성 광물이고 소량으로 녹니석, 일라이트 및 카올리나이트가 산출된다. 점토광물을 이용한 K-Ar 연령측정에 의하면 비지대에서 열수활동을 수반한 단층작용은 에오세에서 올리고세에 걸쳐 활발하게 일어났다. K-Ar 절대연령은 28.9Ma~44.3Ma로 에오세 중기에서 올리고세 중기에 해당하며, 마동단층과 신계단층은 각각 29.7Ma와 28.9Ma로 두 단층의 활동시기가 거의 동시기적이었음을 보여준다.

화학적 성분 변화

단층비지대, 단층각력대, 손상된 모암과 신선한 모암에 대하여 주성분과 휘발성분을 분석하였다(Table 1). SiO₂는 신선한 모암에서 단층각력대까지는 유사한

패턴을 보이다가 단층비지대에서 감소하는 경향을 보이며, K₂O는 신선한 모암에 비해 단층비지대에서 대체적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 2). Na₂O의 경우, 신계단층과 원원사단층은 신선한 모암에 비해 단층비지대에서 증가하고, 나머지 단층들은 감소한다. TiO₂는 단층비지대를 향해 소량 증가하는 지역도 있으나 대체적으로 모암과 비지대가 유사한 패턴을 보인다. Al₂O₃의 경우, 마동단층에서는 신선한 모암, 손상대, 단층각력대 그리고 단층비지대까지 유사한 패턴을 보이고 나머지 단층들에서는 단층비지대 쪽으로 증가한다(Fig. 3). MgO와 P₂O₅는 신선한 모암에 비해 단층비지대에서 증가하는 경향을 보이며, 개곡 제1단층의 단층비지대에서 MgO성분이 크게 증가한다. CaO는 마동단층과 신계단층에서는 감소하고, 나머지 단층에서는 증가한다(Fig. 4). Fe₂O₃, MnO, LOI(H₂O+CO₂)는 모암에 비해 비지대에서 증가하며, 특히 Fe₂O₃의 경우 연구지역의 모든 단층에서 신선한 모암에서 단층비지대쪽으로 체계적으로 증가하는 경향을 보이는데, 개곡 제1단층에서 증가율이 가장 높다.

단층 비지대의 체적변화

단층비지대에서의 특정 성분의 증가 및 감소는 유체에 의해 용해되어 빠져나가는 원소와 체적감소로 인해 상대적으로 비유동성 원소(immobile element)가 비지대에 집적되는 것에 기인한다. 비지대에 집적된 원소의 함량을 이용하면 비유동성 원소들의 아이소콘의 기울기, 질량변화, 체적변화를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 모암과 비지대간의 체적변화를 구하기 위하여 Gresens 공식(Gresens, 1967)을 적용한 Grant (1986), O'Hara(1988), O'Hara and Blackburn(1989), Evans and Chester (1995), Goddard and Evans(1995)의 방법을 이용하였다. 질량변화 및 체적변화 공식은 다음과 같다.

$$M = [(1/S) - 1] \times 100 \quad (1)$$

M: 질량변화율

S: 비유동성 원소의 아이소콘(immobile isocon) 기울기

$$V = [(1/S)(\rho_{fg}/\rho_{pr}) - 1] \times 100 \quad (2)$$

V: 체적변화율, ρ_{fg}/ρ_{pr} : 암석간 밀도비

Table 1. Chemical analyses of the fault rocks and protoliths in the study area(wt%).

	Gaegok 1 fault				Gaegok 2 fault				
	Protolith	Dz	Bz	Gz	Protolith	Dz	Bz-w	Bz-e	Gz
SiO ₂	74.18	74.90	73.76	56.6	73.99	74.40	75.61	76.09	65.99
TiO ₂	0.15	0.16	0.19	0.37	0.17	0.22	0.18	0.18	0.23
Al ₂ O ₃	12.83	13.09	13.33	16.64	13.16	13.57	12.68	13.38	16.54
Fe ₂ O ₃	0.97	1.19	1.47	9.68	1.38	1.62	1.40	1.21	6.41
MnO	0.03	0.04	0.04	0.1	0.05	0.06	0.06	0.10	0.72
MgO	0.10	0.10	0.23	3.16	0.17	0.16	0.16	0.18	0.91
CaO	0.41	0.31	0.31	1.41	0.54	0.42	0.17	0.25	1.41
Na ₂ O	4.09	3.70	3.89	2.51	4.48	4.28	3.90	7.38	2.62
K ₂ O	5.85	5.09	4.79	1.22	5.46	5.00	4.57	0.43	1.76
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.05
CO ₂	0.24	0.17	0.48	0.20	0.01	0.05	0.39	0.18	0.31
H ₂ O	1.08	1.10	1.56	8.14	0.18	0.23	0.74	0.33	2.98
Total	99.94	99.87	100.06	100.06	99.62	100.03	99.88	99.72	99.93

	Madong fault				Wonwonsa fault			
	Protolith	Dz	Bz	Gz	Protolith	Dz	Bz	Gz
SiO ₂	67.81	66.03	64.95	64.65	76.56	72.89	72.73	60.51
TiO ₂	0.46	0.46	0.55	0.49	0.16	0.16	0.16	0.17
Al ₂ O ₃	15.02	14.74	15.08	15.12	12.75	12.51	12.38	20.01
Fe ₂ O ₃	2.97	3.08	3.50	3.45	1.25	1.16	1.25	2.89
MnO	0.09	0.10	0.12	0.06	0.05	0.05	0.15	0.36
MgO	1.08	1.34	1.14	1.61	0.17	0.15	0.21	1.22
CaO	3.09	1.81	1.90	1.68	0.30	0.22	0.17	1.07
Na ₂ O	4.61	3.42	4.62	3.60	5.17	3.99	3.80	5.54
K ₂ O	2.96	3.13	3.51	2.75	1.95	5.28	4.88	1.78
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.18	0.19	0.02	0.01	0.02	0.19
CO ₂	0.04	0.97	0.59	1.04	0.33	1.29	1.64	0.75
H ₂ O	1.58	4.72	3.75	5.29	0.62	2.32	2.43	5.37
Total	99.85	99.95	99.89	99.93	99.33	100.03	99.82	100.07

	Singye fault				Jinhyeon fault			
	Protolith	Dz	Bz	Gz	Protolith	Dz	Bz	Gz
SiO ₂	72.48	63.99	66.09	60.72	74.63	66.08	65.12	59.92
TiO ₂	0.35	0.51	0.49	0.57	0.19	0.39	0.42	0.43
Al ₂ O ₃	14.05	16.82	16.19	16.58	13.11	15.50	15.10	20.87
Fe ₂ O ₃	2.01	4.30	4.18	7.99	0.67	3.42	4.29	4.11
MnO	0.07	0.13	0.14	0.14	0.03	0.06	0.07	0.05
MgO	0.70	1.37	1.16	1.61	0.13	1.39	1.55	1.11
CaO	1.84	2.99	2.86	1.60	0.70	2.76	2.48	1.49
Na ₂ O	4.37	4.69	4.47	6.63	4.73	3.64	3.04	2.56
K ₂ O	3.39	2.71	2.79	0.91	4.32	2.50	2.31	2.44
P ₂ O ₅	0.10	0.17	0.18	0.22	0.02	0.11	0.13	0.08
CO ₂	0.53	0.15	0.01	0.19	0.67	0.46	0.84	0.66
H ₂ O	0.04	2.15	1.48	2.84	0.79	3.73	4.58	5.97
Total	99.93	99.98	100.04	100.00	99.99	100.04	99.93	99.69

Dz: damage zone; Bz: breccia zone; Cz: gouge zone; e: east; w: west.

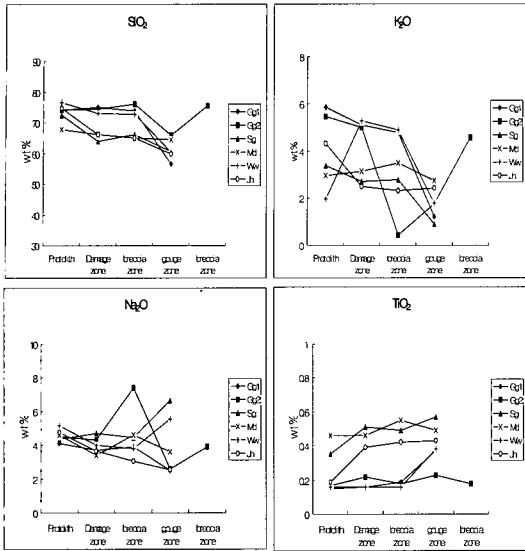


Fig. 2. Variation in SiO₂, K₂O, Na₂O and TiO₂ content of samples taken across faults. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye fault; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon.

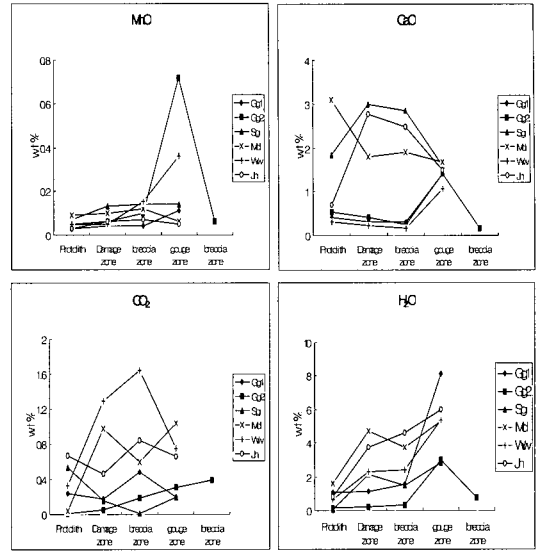


Fig. 4. Variation in MnO, CaO, CO₂ and H₂O content of samples taken across faults. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye fault; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon.

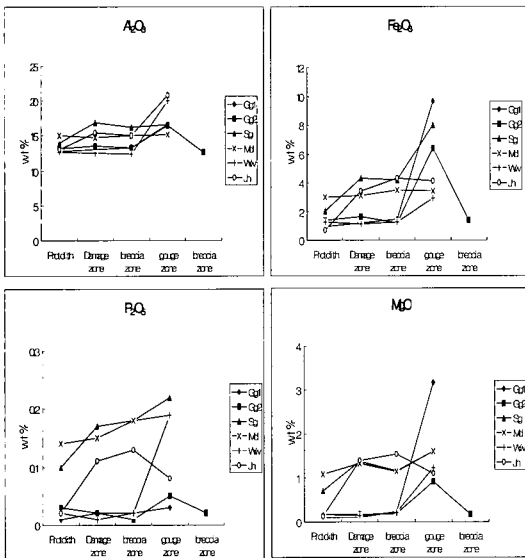


Fig. 3. Variation in Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅ and MgO content of samples taken across faults. Gg1: Gaegok 1; Gg2: Gaegok 2; Sg: Singye fault; Md: Madong; Ww: Wonwonsa; Jh: Jinhyeon.

신선한 모암과 변질된 단층비지대의 지구화학적 함량비와 밀도를 토대로, 단층암석간 질량균형식을 구하기 위하여 Gresens 공식(Gresens, 1967)을 적용한 다음의 식을 이용하였다(Goddard and Evans, 1995).

$$X_n = (Ti_{pr}/Ti_{fg}) \cdot (\rho_{pr}/\rho_{fg}) \cdot C_{fgn} - C_{pm} \quad (3)$$

X_n: n원소의 성분변화량

Ti_{pr}/Ti_{fg}: 단층비지대와 모암간 Ti비

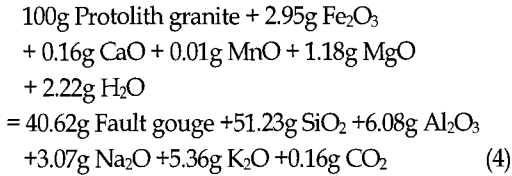
ρ_{pr}/ρ_{fg}: 단층비지대와 모암간 밀도비

C_{fgn}: 단층비지대 n원소함량

C_{pm}: 모암의 n원소함량

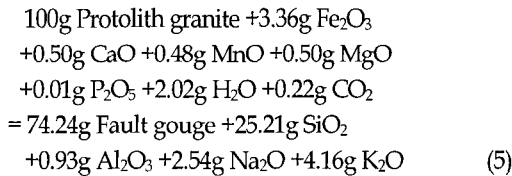
개곡 제1단층의 경우 비유동성 원소의 아이소콘의 기울기는 2.47이며(Fig. 5a), 식(1)와 (2)에 의한 질량감소 및 체적감소는 각각 59%, 56%로 연구지역 중 체적감소율이 가장 높게 나타난다. 비유동성 원소의 아이소콘 위에 도시된 원소들은 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화된 원소이고, 아이소콘 아래에 도시된 원소들은 결핍된 원소이다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이, 개곡 제1단층의 Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, H₂O, Na₂O는 단층비지대에 부화된 원소이고, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, CO₂는 단층비지대에 결핍된 원소이다. 식(3)을

이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.



위의 질량균형식은 100g의 신선한 모암에 대한 각 원소의 증가 및 감소에 대한 상대적인 양을 나타내고 있다. 개곡 제1단층의 질량균형식에서는 Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, H₂O이 각각 2.95g, 0.16g, 0.01g, 1.18g, 2.22g이 100g의 신선한 모암에 비해 단층비지대에서 상대적으로 증가한 상대적인 양을 보여주고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, CO₂는 각각 51.23g, 6.08g, 3.07g, 5.36g, 0.16g이 100g의 신선한 모암에 비해 단층비지대에서 감소한 양을 보여준다. 개곡 제1단층은 56%의 체적감소와 100g의 신선한 모암에 대한 51.23g의 실리카 손실량은 연구지역에서 가장 높다.

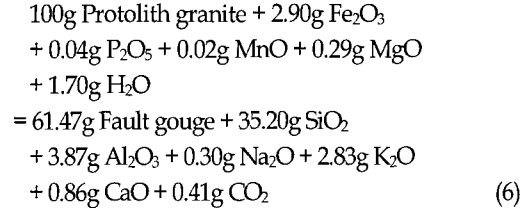
개곡 제2단층의 비유동성 원소의 아이소콘 기울기는 1.35이며(Fig. 5b), 질량감소 및 체적감소는 각각 26%, 22%로 개곡 제1단층보다 낮게 나타난다. 개곡 제2단층에서는 Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, H₂O, P₂O₅, CO₂가 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화되고, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O는 모암에 비해 단층비지대에서 결핍된다. 식(3)을 이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.



식(5)에서는 100g의 신선한 모암에 대해 Fe₂O₃, CaO, MnO, MgO, H₂O, P₂O₅, CO₂가 각각 3.36g, 0.50g, 0.48g, 0.50g, 2.02g, 0.01g, 0.22g이 단층비지대에서 증가하고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O는 각각 25.21g, 0.93g, 2.54g, 4.16g이 단층비지대에서 감소한다. 개곡 제2단층에서, 체적변화 그래프에 도시된 단층비지대에 부화되거나 결핍된 원소는 식(5)에서 신선한 모암에 대해 단층비지대에서 증가하거나 감소한 원소이다.

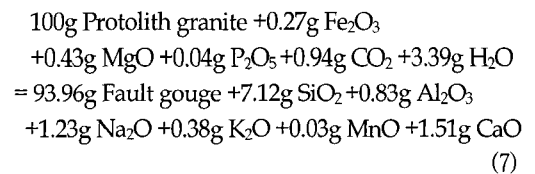
신계 단층의 비유동성 원소의 아이소콘 기울기는 1.63이며(Fig. 5c), 질량감소 및 체적감소는 각각 39%, 34%로 계산된다. 신계단층에서는 Fe₂O₃, MnO, MgO,

H₂O, P₂O₅가 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화되고, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, CO₂는 모암에 비해 단층비지대에서 결핍된다. 식(3)을 이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.



신계단층의 질량균형식에서는 100g의 신선한 모암에 대해 Fe₂O₃, MnO, MgO, H₂O, P₂O₅이 각각 2.90g, 0.02g, 0.29g, 1.70g, 0.04g이 단층비지대에서 증가하고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, CO₂, CaO는 각각 35.20g, 3.87g, 0.30g, 2.83g, 0.41g, 0.86g이 단층비지대에서 감소한다.

마동 단층의 비유동성 원소의 아이소콘 기울기는 1.07이며(Fig. 5d), 질량감소 및 체적감소는 각각 6%, 8%로 연구지역 중 체적감소가 상대적으로 낮게 나타난다. 마동단층에서는 Fe₂O₃, MgO, H₂O, P₂O₅, CO₂가 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화되고, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MnO는 모암에 비해 단층비지대에서 결핍된다. 식(3)을 이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.



마동단층의 질량균형식에서는 100g의 신선한 모암에 대해 Fe₂O₃, MgO, H₂O, CO₂, P₂O₅이 각각 0.27g, 0.43g, 3.39g, 0.94g, 0.04g이 단층비지대에서 증가하고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, MnO, CaO는 각각 7.12g, 0.83g, 1.23g, 0.38g, 0.03g, 1.51g이 단층비지대에서 감소하며 SiO₂ 성분의 감소량이 연구지역에서 가장 낮다.

원원사 단층의 경우 유동성이 낮은 원소의 아이소콘 기울기는 1.06이며(Fig. 5e), 질량감소 및 체적감소는 각각 6%, 2%로 질량변화와 체적변화가 거의 일어나지 않은 것으로 나타난다. 원원사단층에서는 Fe₂O₃, MgO, H₂O, P₂O₅, CO₂, Al₂O₃, Na₂O, CaO, MnO가 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화되고, SiO₂, K₂O는

모암에 비해 단층비지대에서 결핍된다. 식(3)을 이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &100\text{g Protolith granite} + 0.71\text{g CaO} \\
 &+ 0.29\text{g MnO} + 0.98\text{g MgO} + 0.16\text{g P}_2\text{O}_5 \\
 &+ 4.43\text{g H}_2\text{O} + 6.08\text{g Al}_2\text{O}_3 \\
 &+ 1.47\text{g Fe}_2\text{O}_3 + 0.38\text{g CO}_2 + 0.04\text{g Na}_2\text{O} \\
 &= 94.66\text{g Fault gouge} + 19.61\text{g SiO}_2 + 0.27\text{g K}_2\text{O} \quad (8)
 \end{aligned}$$

원위사단층의 질량균형식에서는 100g의 신선한 모암에 대해 Fe₂O₃, MgO, H₂O, CO₂, P₂O₅, Al₂O₃, Na₂O, CaO, MnO이 각각 1.47g, 0.98g, 4.43g, 0.38g, 0.16g, 6.08g, 0.04g, 0.71g, 0.29g이 단층비지대에서 증가하고, SiO₂, K₂O는 각각 19.61g, 0.27g 단층비지대에서 감소한다.

진현 단층의 유동성 낮은 원소의 아이소콘 기울기는 2.26이며(Fig. 5f), 식의한 질량감소 및 체적감소는 각각 56%, 53%로 계산된다. 비유동성 아이소콘 위에 도식된 Fe₂O₃, MgO, H₂O, P₂O₅가 신선한 모암에 비해 단층비지대에 부화되고, SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MnO, CO₂는 모암에 비해 단층비지대에서 결핍된다. 식(3)을 이용한 모암과 단층비지대의 질량균형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &100\text{g Protolith granite} + 1.15\text{g Fe}_2\text{O}_3 \\
 &+ 0.02\text{g P}_2\text{O}_5 + 0.36\text{g MgO} + 1.85\text{g H}_2\text{O} \\
 &= 44.06\text{g Fault gouge} + 48.15\text{g SiO}_2 + 3.89\text{g Al}_2\text{O}_3 \\
 &+ 3.60\text{g Na}_2\text{O} + 0.04\text{g CaO} + 0.01\text{g MnO} \\
 &+ 3.24\text{g K}_2\text{O} + 0.38\text{g CO}_2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

진현단층의 질량균형식에서는 100g의 신선한 모암에 대해 Fe₂O₃, MgO, H₂O, P₂O₅이 각각 1.15g, 0.36g, 1.85g, 0.02g이 단층비지대에서 증가하고, SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, MnO, CaO, CO₂는 각각 48.15g, 3.89g, 3.60g, 3.24g, 0.01g, 0.04g, 0.38g이 단층비지대에서 감소한다.

연구지역내 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층, 원위사단층, 진현단층 기질의 함량은 각각 88%, 70%, 76%, 68%, 65%, 77%로 나타나며, 암편에 비해 기질을 많이 함유하고 있는 개곡 제1단층과 진현단층의 체적감소는 각각 56%와 53%이고 100g의 신선한 모암에 대한 SiO₂의 감소량은 각각 51.23g과 48.15g, 기질이 비교적 적은 마동단층과 원위사단층의 체적감소는 각각 8%와 2% 그리고 질량균형식에 의한 SiO₂의

감소량은 각각 7.12g과 19.61g으로서 암편을 많이 포함한 단층에서 상대적으로 높은 체적감소율과 실리카의 손실을 보인다.

단층작용과 관련한 유체-암석 비

단층작용과 관련한 유체-암석 상호작용으로 발생된 단층대의 성분변화와 단층대의 체적변화 뿐만 아

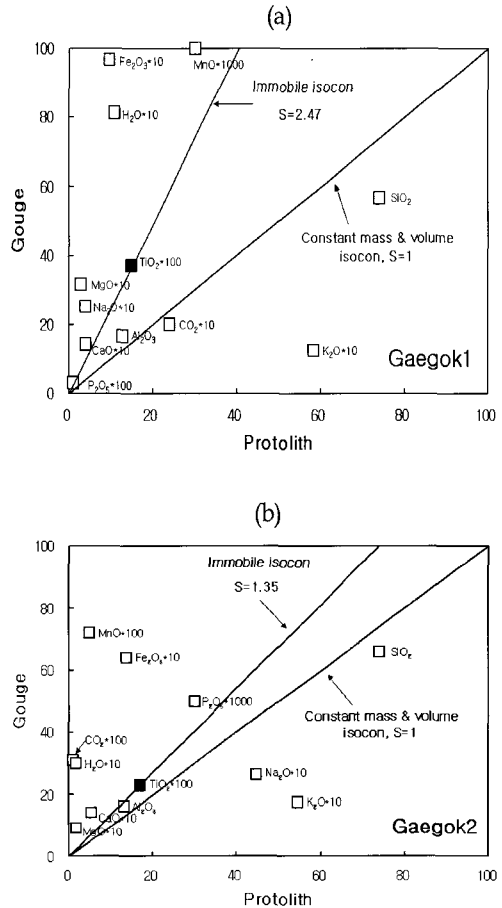


Fig. 5. Calculations of volume loss in the fault gouge using the isocon technique by Grant(1986). Concentrations are expressed in wt(%) scaled to fit the plot. Elements plotted above the constant volume isocon line are enriched in the fault gouge relative to protolith and elements below the line are depleted relative to protolith. (a) Gaegok 1 fault, (b) Gaegok 2 fault, (c) Singye fault, (d) Madong fault, (e) Wonwonsa fault, (f) Jinhyeon fault.

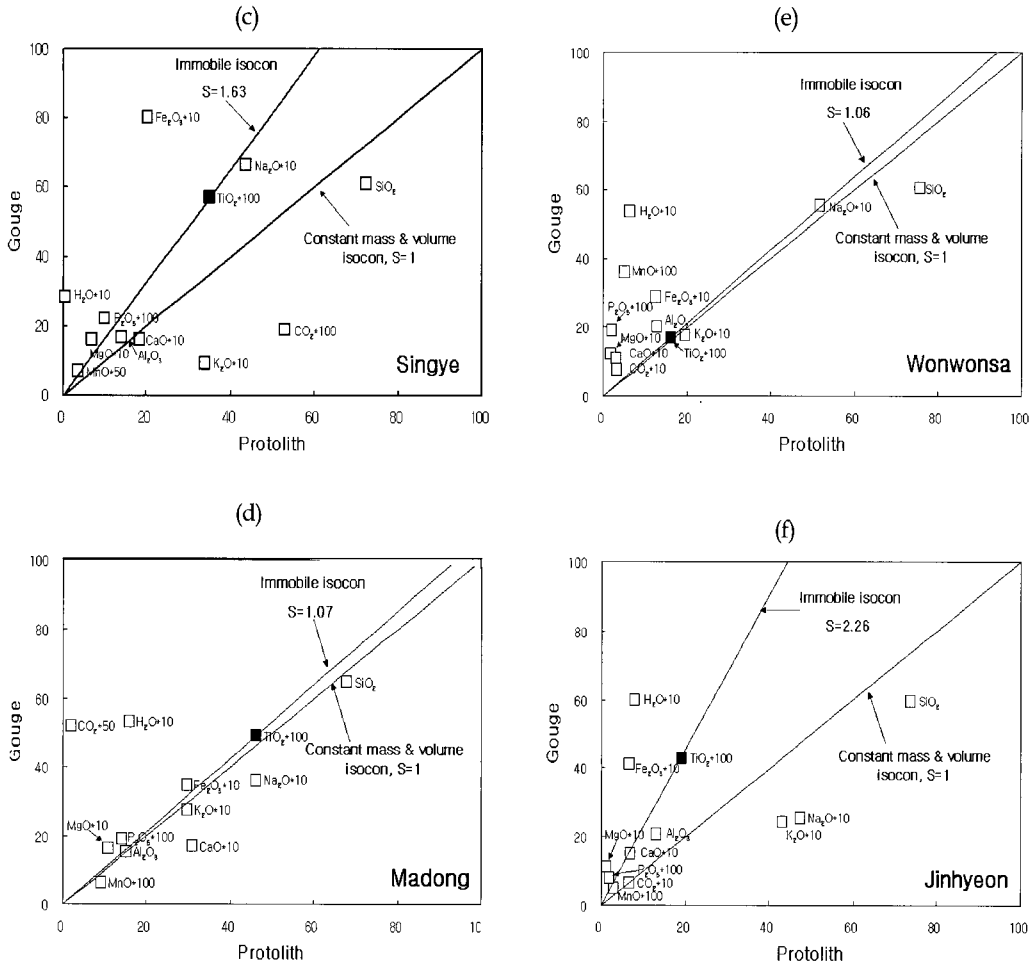


Fig. 5. Continued.

나라 단층암에 활동한 유체의 상대적인 질량비와 체적비를 계산할 수 있다. X-선회절 분석에서 점토광물의 특징을 근거로 유추한 유체의 온도범위(Essene and Peacor, 1995; 장태우와 추창오, 1998; 장태우와 추창오, 1999; Choo and Chang, 2000)를 고려하여 150°C에서 300°C까지의 범위에서 Goddard and Evans(1995) 및 Christoph et al.(1998)의 방법에 따라 단층의 유체-암석 질량비를 계산하였다.

$$N_w = L_{si} / C_{sif}(1-s), N_v = N_w \cdot \rho_{pr} \quad (10)$$

N_w : 유체/암석간 질량비

N_v : 유체/암석간 체적비

L_{si} : 100g의 암석에 대한 실리카의 유실량

C_{sif} : 유체속에 포함된 실리카의 농도

s : 실리카에 대한 유체의 포화도

ρ_{pr} : 원암의 밀도

위 식을 이용하여 유체-암석 질량비와 체적비 계산한 결과를 Table 2에 나타내었고, 이 중 유체-암석 체적비 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 개곡 제1단층의 경우, 단층대 온도가 300°C이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 각각 0%와 90%일때 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 358, 946과 3583, 9458로 실리카의 포화도가

Table 2. Fluid-rock weight and volume ratio as they relate to varying temperatures and silica saturation regimes for the Quaternary faults. Temp. (°C): temperature within fault zone; Sat: saturation of fluid with respect to silica; NW: fluid-rock weight ratio; NV: fluid-rock volume ratio.

		Gaegok 1 fault		Gaegok 2 fault		Singye fault	
		(LSi = 51.23g/100g)		(LSi = 25.21g/100g)		(LSi = 35.2g/100g)	
Temp. (°C)	Sat.	Nw	Nv	Nw	Nv	Nw	Nv
300	0 %	358	946	176	465	246	650
	40 %	597	1576	294	776	410	1083
	70 %	1194	3153	588	1551	821	2166
	90 %	3583	9458	1763	4654	2462	6498
250	0 %	683	1803	336	887	469	1239
	40 %	1138	3005	560	1479	782	2065
	70 %	2277	6011	1120	2958	1564	4130
	90 %	6831	18033	3361	8874	4693	12390
200	0 %	1348	3559	663	1751	926	2445
	40 %	2247	5932	1106	2919	1544	4076
	70 %	4494	11864	2211	5838	3088	8152
	90 %	13482	35591	6634	17514	9263	24455
150	0 %	3415	9016	1681	4437	2347	6195
	40 %	5692	15027	2801	7395	3911	10325
	70 %	11384	30055	5602	14790	7822	20651
	90 %	34153	90165	16807	44370	23467	61952

		Madong fault		Wonwonsa fault		Jinhyeon fault	
		(LSi = 7.12g/100g)		(LSi = 19.61g/100g)		(LSi = 48.15g/100g)	
Temp. (°C)	Sat.	Nw	Nv	Nw	Nv	Nw	Nv
300	0 %	50	131	130	344	330	857
	40 %	83	219	217	573	550	1429
	70 %	166	438	434	1145	1099	2858
	90 %	498	1314	1301	3436	3297	8573
250	0 %	95	251	248	655	629	1635
	40 %	158	418	414	1092	1048	2724
	70 %	316	835	827	2184	2096	5448
	90 %	949	2506	2481	6551	6287	16345
200	0 %	187	495	490	1293	1241	3226
	40 %	312	824	816	2155	2068	5377
	70 %	625	1649	1632	4310	4136	10754
	90 %	1874	4947	4897	12929	12408	32261
150	0 %	475	1253	1241	3275	3143	8173
	40 %	791	2089	2068	5459	5239	13621
	70 %	1582	4177	4136	10918	10478	27242
	90 %	4747	12531	12407	32754	31433	81727

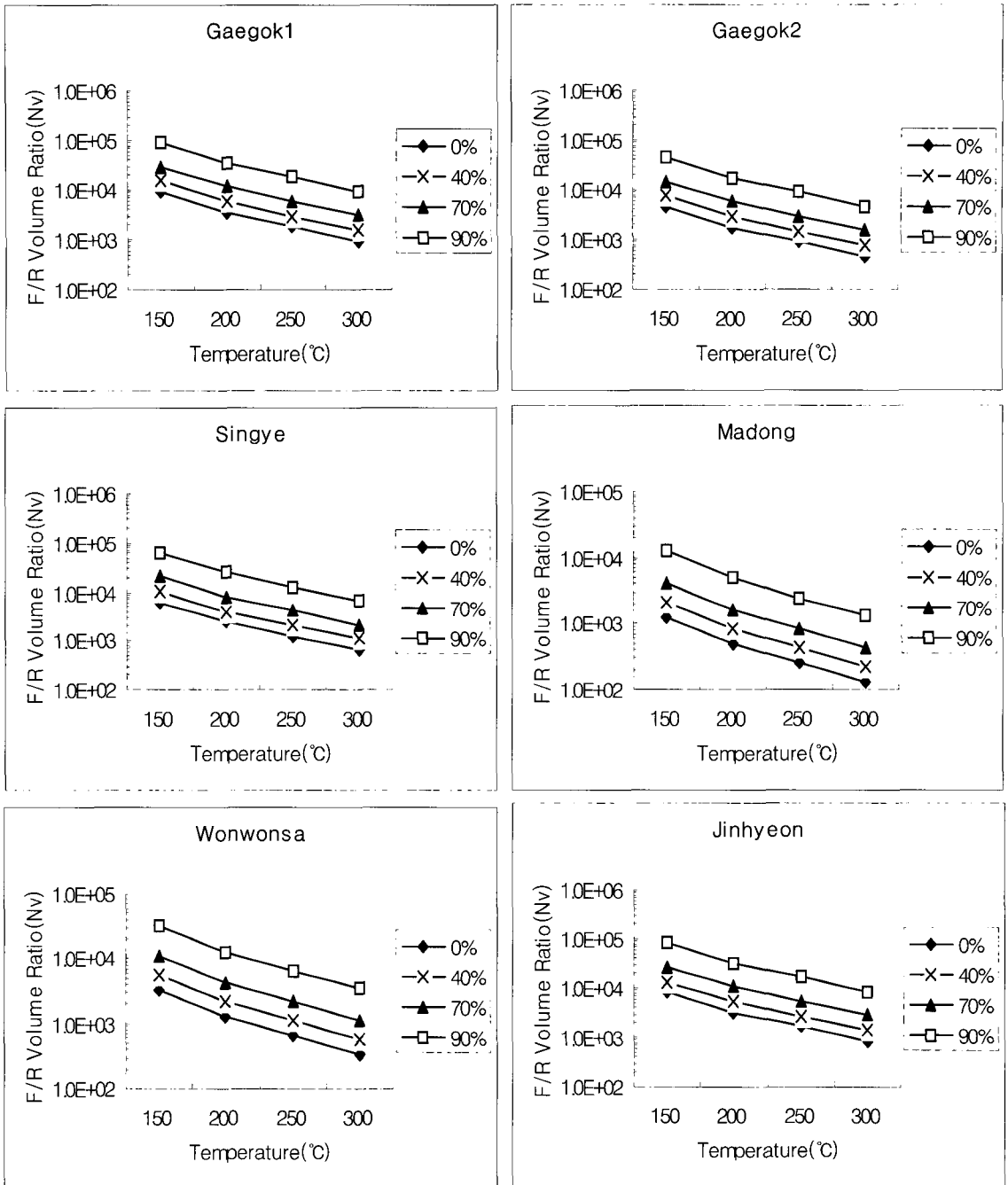


Fig. 6. Inferred fault zone temperature vs. fluid-rock ratio for Gaegok 1 fault, Gaegok 2 fault, Singye fault, Madong fault, Wonwonsa fault, Jinhyeon fault. Ratios for faults range $10^2 \sim 10^4$.

높을 때 그 비가 한 등급 높다. 단층대 온도가 150°C 이고 유체에 포함된 실리카의 농도가 90%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 34153, 90165로 단층대내 온도가 300°C, 실리카의 농도가 90%일 때의 값보다 한 등급 높은 결과를 보여준다. 그리고 개곡 제1단층의 유체-암석 비는 연구지역에서 가장 높은 값을 나타낸다.

개곡 제2단층은 단층대 온도가 300°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 0%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 176, 465으로 가장 낮고, 온도가 150°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 90% 일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 16807, 44370으로 가장 높다.

신계단층은 단층대의 온도가 300°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 0%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 246, 650으로 가장 낮고, 온도가 150°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 90% 일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 23467, 61952로 가장 높다.

마동단층은 단층대내 온도가 300°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 0%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 50, 131로 가장 낮고, 온도가 150°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 90%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 4747, 12531로 가장 높게 나타난다. 특히, 마동단층은 연구지역에서 가장 낮은 유체-암석 비를 보여준다.

원원사단층은 단층대 온도가 300°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 0%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 130, 344로 가장 낮고, 온도가 150°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 90%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 12407, 32754로 가장 높다.

진현단층은 단층대내 온도가 300°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 0%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 330, 857로 가장 낮고, 온도가 150°C 이고 실리카에 대한 유체의 포화도가 90%일 때, 유체-암석 질량비와 체적비는 각각 31433, 81727로 가장 높게 나타난다. 진현단층의 유체-암석 질량비와 체적비는 연구지역에서 개곡 제1단층에 이어 두 번째로 높은 비를 보인다.

연구지역 단층의 유체-암석 질량비는 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 원원사단층, 진현단층에서 $10^2 \sim 10^4$ 의 범위로 나타나며, 유일하게 마동단층에서는 $10^1 \sim 10^3$ 으로 다른 단층들의 유체-암석 질량비 보다 한 등급 낮은 값을 보여준다. 연구지역 단층의 유체-암석 체적비의 경우, 모든 단층에서 $10^2 \sim 10^4$ 범위에 해당하는 결과가 나타나지만, 특히 56%와 53%로 체적감소가 큰 개곡 제1단층과 진현단층의 유체-암석 체적비가 상

대적으로 높게 나타나며, 각각 8%와 2%로 체적감소가 적은 마동단층과 원원사단층의 유체-암석 체적비가 상대적으로 낮다.

토 의

단층비지대에 따라 기질물질과 그 속에 들어있는 암편들의 함량차이가 나는 것은 단층비지가 생성될 당시 혹은 후기의 유체들의 영향을 많이 받은 비지대는 단층작용 분쇄물질과 유체가 반응하여 점토광물을 많이 생성시켜 기질 물질이 많은 반면, 유체들의 영향을 적게 받은 비지대는 단층작용 분쇄물질과 유체의 반응이 상대적으로 적어 점토광물의 생성량이 적고 암편을 많이 함유하는 것과 관련된다. 단층암에 대한 XRF 분석을 통하여 단층대내 모암에서 비지대까지의 주원소의 성분변화를 계산한 결과에 따르면 모암에 비하여 단층비지대에서 SiO_2 , K_2O 및 Na_2O 는 감소하고 TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , P_2O_5 , Fe_2O_3 , MnO 및 LOI는 증가하는 경향을 보여 Evans and Chester(1995)의 연구결과와 유사하다. 모암의 종류, 유체의 종류 및 온도 등 각 단층대의 환경은 다르지만 Si, K, Na 성분은 공통적으로 감소경향을 보이는 것은 유체에 의한 장석류의 변질작용과 실리카의 용해작용이 단층대에서 활발히 일어나기 때문이다(Goddard and Evans, 1995; Christopher, 1999). 이같은 사실은 이 지역 단층들은 열수변질작용을 수반한 다중 활동이 특징적인 현상과 잘 부합된다. 즉 단층비지대에서는 녹염석, 로몬타이트, 방해석, 황동석, Cu-Zn 광물 등이 열수광물로 산출되고, 흑운모(001) 벽계를 따른 변질 흔적, 모나자이트와 티탄철석의 누더기조직, 여러 가지 광물입자 입자가 가장자리가 용해로 헤어져 기질 속으로 흩어지는 양상, 비지의 주입맥, 피사이트조직 등 다양한 열수변질 작용 양상이 관찰된다(장태우와 채연준, 2004)

개곡 제1단층 비지대에서 MgO 와 Fe_2O_3 함량이 다른 단층 비지대에서 보다 상대적으로 높은 것은 야외 조사, 미구조 관찰 그리고 EPMA 분석 결과에 의하면 이 단층은 다른 단층에 비해 기질의 함량이 높으며, Mg와 Fe가 많이 함유된 스�멕타이트로 구성되어 있기 때문이다. H_2O 가 비지대에서 증가하는 것은 비지대를 구성하는 점토광물에 수분이 다수 포함되어 있거나(손승완, 2001), 비지물에 점토광물이 높게 함유되기 때문이다. 개곡 제2단층 비지대에서 MnO의 급격한 증가는 용탈되어 나온 Mn이 비지대 틈을 따라 다량 침전되어 있으므로 전암분석에서도 이것의 함량이 높

게 나타나는 것이다.

단층대의 비유동성 원소(Ti) 아이소콘의 기술기를 이용하여 단층대의 체적변화를 계산한 결과 개곡 제1단층에서 56%로 가장 높게 나타나고, 개곡 제2단층 22%, 신계단층 34%, 마동단층 8%, 원원사단층 2%, 진현단층은 53%의 체적감소를 보인다. 질량균형식을 이용한 단층대의 실리카 손실량은 100g의 신선한 모암에 대해 개곡 제1단층, 개곡 제2단층, 신계단층, 마동단층, 원원사단층, 진현단층이 각각 51.23g, 25.21g, 35.20g, 7.12g, 19.61g, 48.15g으로 계산되며, 현미경 관찰을 통한 기질의 함량은 각각 88%, 70%, 76%, 68%, 65%, 77%로 나타난다. 유체-암석 체적비의 경우, Christoph et al.(1998)의 연구결과에서처럼 모든 단층에서 10²~10⁴의 범위를 나타낸다. 특히 각각 88%와 77%로 기질의 함량이 높고 56%와 53%로 체적감소가 큰 개곡 제1단층과 진현단층의 유체-암석 체적비는 상대적으로 높게 나타난다. 이에 반하여 기질의 함량이 각각 68%와 65%로서 낮고, 체적감소가 8%와 2%로서 낮은 마동단층과 원원사단층의 경우 유체-암석 체적비도 상대적으로 낮다.

제4기 단층비지대의 성분변화, 체적변화, 실리카의 손실 및 유체-암석 비를 고려해 보면, 이들은 단층비지대 내 기질과 암편의 함량비와 밀접한 관계를 가지는 것으로 생각된다(Wintsch et al., 1995; Schulz and Evans, 1998). 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석비가 낮게 계산된 단층은 기질에 비해 암편이 상대적으로 많으므로 유체의 활동도 즉 비지대와 외부와의 원소이동은 상대적으로 작았던 것으로 볼 수 있다. 따라서 마동단층과 원원사단층의 비지대에서 유체는 닫힌계(closed system)에서 작용한 것으로 볼 수 있다. 이와 반대로 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석 비가 높은 개곡 제1단층과 진현단층의 비지대는 Evans and Chester(1995), Christoph et al.(1998)의 연구에서처럼 유체활동의 통로로 작용한 열린계(open system)로 해석된다. 따라서 연구지역 단층들 중에서 유체의 활동은 개곡 제1단층과 진현단층에서 가장 활발하였던 것으로 볼 수 있다.

결 론

울산단층 동부지역 제4기 단층비지대의 성분변화, 체적변화, 실리카의 손실 그리고 유체-암석 비를 계산한 결과 이들은 단층비지대 내 기질과 암편의 함량비와 밀접한 관계를 가지는 것으로 생각된다. 단층비지의 성분변화는 모암에 비해 단층비지대에서 SiO₂, K₂O,

Na₂O는 감소하고, Al₂O₃, MgO, P₂O₅, Fe₂O₃, MnO, CaO, LOI는 증가한다. 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석비가 낮게 나타난 마동단층과 원원사단층과 같이 기질에 비해 암편이 상대적으로 많은 단층들은 단층 운동과 관련해 유체들의 작용은 있었지만 유체들의 활동도 즉 비지대와 외부와의 원소이동이 상대적으로 작았던 것으로 생각된다. 마동단층과 원원사단층 비지대는 유체활동에 대하여 닫힌계(closed system)이었으며, 체적감소, 실리카 손실, 유체-암석 비가 높은 개곡 제1단층과 진현단층의 비지대는 유체 활동의 통로로 작용한 열린계였을 것으로 볼 수 있다. 단층별 체적감소는 개곡 제1단층 56%, 개곡 제2단층 22%, 신계단층 34%, 마동단층 8%, 원원사단층 2%, 진현단층 53%이다. 단층의 유체-암석 체적비는 모든 단층에서 10²~10⁴범위로 나타나지만 기질의 함량이 각각 88%와 77%로 높고 체적감소가 큰 개곡 제1단층과 진현단층에서 가장 높게 나타난다. 따라서 개곡 제1단층과 진현단층에서 유체의 활동이 가장 활발하였던 것으로 볼 수 있다.

사 사

이 연구는 2003년 한국지질자원연구원의 위탁과제 수행동안 이루어졌으며 이에 사의를 표한다. 주요 기기분석은 한국기초과학연구원(KBSI)과 경북대학교 공동실습관에서 수행되었다.

참 고 문 헌

- 경제복, 김성균, 조화룡, Okada, A., Watanabe, M., Susuki, Y., Okike, K., 1995, 울산단층 중앙부의 단층노두와 대지진 발생의 지형적 증거, 제50차 대한지질학회 발표 요약집, p99.
- 경제복, 이기화, Okada, A., Watanabe M., Susuki Y., and 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 절대연령측정, 경북대학교 석사학위논문.
- 류충렬, 경제복, 김인수, 1997, 울산단층대 동측의 신기 지구조 운동과 지형발달, 대한 자원환경지질학회, 제 30차 학술발표회 발표논문 요약집, p14.

- 손승완, 2001, 한반도 동남부 제4기 단층 비지대의 미구조 및 지구화학적 특성, 경북대학교 석사학위논문.
- 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, 지질공학회지, 20, 25-37.
- 장태우, 추창오, 1999, 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령, 한국지구과학회지, 20, 25-37.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽 지괴의 제4기 지구조운동, 지질학회지, 37, 431-444.
- 장태우, 채연준, 2004, 울산단층 동부지역 제4기 단층비지에서 단층작용과 열수활동. 지질학회지, 40, 469-479.
- 정재혁, 장태우, 2004, 한반도 동남부 제3기 어일 및 와음분지의 지질과 층서. 대한지질학회 2004년 추계학술발표회 초록집, p14.
- 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.
- Christoph, J., Norbert, L., Michael, B., Gray, D.R., 1998, Fluid regime in faulting deformation of the Waratah Fault Zone, Australia, as inferred from major and minor element analyses and stable isotopic signatures, *Tectonophysics*, 294, 109-130.
- Christopher, W., 1999, Are feldspar-to-mica reactions necessarily reaction-softening processes in fault zones?, *Journal of Structural Geology*, 21, 1219-1227.
- Essene, E. J. and Peacor, D. R., 1995, Clay mineral thermometry: A critical perspective, *Clays and Clay Minerals*, 43, 540-553.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, 100, 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., *Journal of Structural Geology*, 17, 533-547.
- Grant, J. A. 1986. The isocon diagram—a simple solution to Gresen' equation for metasomatic alteration, *Economic Geology*, 1976-1982.
- Gresens, R. L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 47-65.
- Jackson, M.L. (1969) *Soil Chemical Analysis-Advanced Course*. Madison, Wisconsin, 895p.
- O'Hara, K. 1988. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U.S.A., *Tectono-physics*, 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., Oike, K., 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, Southeast Korea, *Journal of 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.
- Wintsch, R. P., Christoffersen, R., Kronenberg, A. K., 1995, Fluid-rock reaction weakening of fault zones, *Journal of Geophysical Research*, 100, 13021-13032.

투 고 일 2005년 8월 27일

심 사 일 2005년 8월 28일

심사완료일 2005년 9월 20일

장태우

경북대학교 지질학과

702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Tel : 053-950-5361

Fax : 053-950-5362

E mail : twchang@knu.ac.kr

채연준
경북대학교 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370
Tel : 053-950-5354
Fax : 053-950-5362

추창오
안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel : 053-950-5354
Fax : 053-950-5362
E mail : chooco@knu.ac.kr