경주시 양북면 단층암의 원소거동과 광물조성 특성

송수정¹ · 추창오¹ · 장천중² · 장윤득^{1*}

¹경북대학교 지질학과

²한국수력원자력(주) 중앙연구원 부지구조그룹

Chemical Behaviors of Elements and Mineral Compositions in Fault Rocks from Yangbuk-myeon, Gyeongju City, Korea

Su Jeong Song¹, Chang Oh Choo¹, Chun-Joong Chang², and Yun Deuk Jang^{1*}

¹Department of Geology, Kyungpook National University 80 Daehak-ro Buk-gu Daegu 702-701, Korea

²Site & Structural Research Group, Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD, 70, 1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약: 단층활동 과정에서 암석 내 화학조성과 광물 조성 간의 연관성을 이해하기 위한 목적으로 경주시 양북면 용당리에 발달하는 단층암에 대하여 XRF, ICP, XRD, EPMA/BSE 분석을 시행하여 단층암 내의 광물 조성 및 원소의 거동 경향성을 파악하였다. 단층암의 대표적인 주성분으로서 SiO_2 는 61.6~71.0%의 범위로 가장 높은 함량을 나타내며, Al_2O_3 는 10.8~15.8%이다. Na_2O 는 0.22~4.63%, K_2O 는 2.02~4.89%이고, Fe_2O_3 는 3.80~12.5% 범위로 나타나 단층암 내에서 특히 이들 원소의 편차가 크다. 각력대에서 비지대로 갈수록 감소하는 경향을 나타내는 원소에는 Na_2O , Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 , CaO , Ba , Sr 등이 있고, 증가하는 경향을 나타내는 원소에는 Fe_2O_3 , MgO , MnO , Zr , Hf , Rb 등이 있다. 이러한 화학적 거동은 각력대가 대부분 석영, 장석류와 같은 주요 조암광물로 구성되는 반면, 비지대는 일라이트와 같은 점토광물이 다량 함유되는 것과 밀접한 관련성이 있다. 본 단층대에서는 기존 광물의 변질과 동시에 점토광물이 생성되는 데 있어 단층 활동에 수반된 유체활동이 큰 영향을 끼쳤다. 단층활동 초기에는 파쇄대가 열수의 통로로 작용하는 과정에서, 주원소 및 미량원소, 희토류원소는 기존 광물로부터 용탈되어 높은 원소 이동성을 나타내었으나, 파쇄대 중심부가 비지대로 점차 변화하는 과정에서는 이차적으로 형성된 점토광물로 인해 단층대의 투수성이 감소하고, 점토광물이 풍부해진 비지대 내에 농집되므로 낮은 원소 이동성을 가진 것으로 해석된다.

핵심어: 단층암, 주원소, 미량원소, 비지대, 원소 이동성

Abstract: This study is focused on element behaviors and mineral compositions of the fault rock developed in Yongdang-ri, Yangbuk-myeon, Gyeongju City, Korea, using XRF, ICP, XRD, and EPMA/BSE in order to better understand the chemical variations in fault rocks during the fault activity, with emphasis on dependence of chemical mobility on mineralogy across the fault zone. As one of the main components of the fault rocks, SiO_2 shows the highest content which ranges from 61.6 to 71.0%, and Al_2O_3 is also high as having the 10.8~15.8% range. Alkali elements such as Na_2O and K_2O are in the range of 0.22~4.63% and 2.02~4.89%, respectively, and Fe_2O_3 is 3.80~12.5%, indicating that there are significant variations within the fault rock. Based on the chemical characteristics in the fault rocks, it is evident that the fault gouge zone is depleted in Na_2O , Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 , CaO , Ba and Sr , whereas enriched in Fe_2O_3 , MgO , MnO , Zr , Hf and Rb relative to the fault breccia zone. Such chemical behaviors are closely related to the difference in the mineral compositions between breccia and gouge zones because the breccia zone consists of the rock-forming minerals including quartz and feldspar, whereas the gouge zone consists of abundant clay minerals such as illite and chlorite. The alteration of the primary minerals leading to the formation of the clay minerals in the fault zone was affected by the hydrothermal fluids

*Corresponding author

Tel: 82-53-950-5354

E-mail: jangyd@knu.ac.kr

involved in fault activity. Taking into account the fact that major, trace and rare earth elements were leached out from the precursor minerals, it is assumed that the element mobility was high during the first stage of the fault activity because the fracture zone is interpreted to have acted as a path of hydrothermal fluids. Moving toward the later stage of fault activity, the center of the fracture zone was transformed into the gouge zone during which the permeability in the fault zone gradually decreased with the formation of clay minerals. Consequently, elements were effectively constrained in the gouge zone mostly filled with authigenic minerals including clay minerals, characterized by the low element mobility.

Key word: fault rock, major element, trace element, gouge zone, element mobility

서 론

현재 한반도 남동부에 광범위하게 분포하는 여러 단층대는 여러 단계의 단층활동 과정을 겪은 결과물이다. 그러한 과정에서 응력을 가장 집중적으로 받은 단층 최종심부는 온도나 압력, 유체 등 여러 요인에 의해 규제받는 동시에 가장 현저한 변형을 일으키며, 궁극적으로 여러 번의 변형작용기구에 의해 비지대로 변이한다(Chang and Choo, 1999).

단층암을 구성하는 광물 조성 및 미구조의 변화는 단층활동이 일어나는 일련의 과정을 반영하고 있으며, 결과적으로 단층 비지대를 구성하는 점토광물이 가장 대표적인 증거가 된다. 단층 비지대 형성의 초기 단계에서는 인접한 모암과의 파쇄 및 분쇄와 같은 단순한 기계적인 과정을 인지하기 위하여 광물조직이 연구 대상으로 고려되는 부분이 있으나, 일반적으로 단층대에서 온도상승이 일어나면 모암이 압쇄되어 분말화된 기질 물질들이 풍부한 유체와의 활발한 활동을 통해 다양한 이차광물을 형성하게 되므로 이들의 광물 조성과 화학 조성에 상당한 변화를 가져오게 된다(Chang *et al.* 2005a). 즉, 단층 운동에 의해 모암의 입자가 세립화되는 과정 자체가 점토광물 생성을 촉진한다기보다는, 파쇄 및 분말화되는 동시에 열수 유체와 반응이 일어나 점토광물이 생성되는 과정을 의미한다(Chang and Chae, 2004). 따라서 온도 상승 및 열수에 의한 영향을 받은 단층 비지는 단층대 지역에서 발달하는 단순한 파쇄 결과물인 미립질 물질의 집합체와는 다른 양상을 띠게 된다.

이러한 단층 비지의 구성광물, 지화학, 분석과정, 미세조직, 체적, 강도 등에 관한 이해와 폭넓은 연구의 중요성이 이미 Vrolijk *et al.*(1999)에 의해 강조되었으며, 국내에서도 단층 비지에 관한 지화학적 연구가 일부 수행된 바 있다(Shon *et al.* 2002).

단층비지대에서의 특정 성분의 증가 및 감소는 유체에 의해 용해되어 빠져나가는 원소와 체적감소로

인해 상대적으로 비유동성 원소(immobile element)가 비지대에 집적되는 것에 기인한다(Chang *et al.* 2005b). 따라서 단층암의 지화학적 특성은 단층이 형성되는 전체 기간 중, 단층대 내 특정 구간에서의 단층 형성 과정을 나타내는 결과로서(Schulz and Evans, 1998), 단층암 내의 각각 다른 구조적 단계에서 유체와 암석 사이의 다양한 반응 정도를 파악할 수 있다(Goddard and Evans, 1995).

주원소 뿐만 아니라 미량원소도 과거에 그 자체를 상당한 비유동성 원소로 간주하였으나 지열대(geothermal field) 혹은 금속 농집이 일어나 광상을 형성한 열수변질대의 경우 파쇄대를 따른 열수 순환에 의해 이러한 원소들이 활발하게 이동될 수 있다(Bingui and Hui, 1995; Bierlein *et al.* 1999; Metz and Trefry, 2000; Uysal *et al.* 2003; Bao *et al.* 2008; Parsapoor *et al.* 2009). 원소의 지화학적 거동에서 단층대라는 특수한 환경은 원소의 거동을 일부 제한하거나 혹은 촉진하기도 한다. 단층대에서는 단층 활동이 일어나는 동안 동일한 위치라 하더라도 시간 및 공간에 따라 유체 흐름의 통로(열린계, open system)가 될 수도 있고 방해물(닫힌계, closed system)이 될 수도 있는 특성을 갖기 때문이다(Goddard and Evans, 1995; Chang *et al.* 2005b).

본 연구는 단층암 내에서의 원소 거동특성과 광물 조성 변화특성을 파악하고, 이를 통하여 단층활동에 영향을 미치는 열수유체에서 원소들의 이동성(mobility)을 이해하는 데 그 목적을 두고 있다.

지 질

연구 지역인 경주시 양북면 외동읍 일대는 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이들을 관입하는 불국사 관입암류 및 그 위에 부정합적으로 놓이는 소규모의 제3기 지층과 제4기 미교결층으로 구성되어 있다(Chang and Chae, 2004)(Fig. 1).

Fig. 1. Geological map of the study area in Yangbuk-myeon, Korea

특히, 본 연구 대상인 단층이 분포하는 계곡 일대는(N35°,44.174°/E129°28.327', Fig. 2a) 기본적으로 불국사 화강암과 소규모의 관입암체가 분포하는 것으로 기존에 보고되었으며(Chang and Chae, 2004; Chang *et al.* 2005b), 전반적으로 화강암과 화산암이 혼재되어 다양한 암상으로 산출되는 특징이 있다. 본 단층 또한 N70~83W, 60~70SW의 자세로 화강암질 암석과 유문암질 암석이 경계를 이루는 노두에서 발견된다(Fig. 2b).

단층암은 위치에 따라 다소 차이는 있으나 평균적으로 약 1.5 m 내외의 두께로 산출된다. 그 중 각력대는 비지대와 뚜렷한 경계를 나타내며 약 1.2 m 내외의 폭으로 발달한다(Fig. 2c). 각력대를 구성하는 화강암은 전체적으로 거의 마모되지 않은 각상으로 관찰되는 동시에, 산화철이나 망간이 피복된 상태로 산출되는 경우가 흔하다. 단층의 방향과는 거의 연관성이 없는 여러 방향의 단열이 형성되어 있고, 그 사이에 석영이나 로몬타이트, 방해석이 침전되어 맥상으로 산출된다(Fig. 2d).

비지대는 약 20~30 cm의 좁은 범위에서 녹황색, 청회색, 유백색 등의 다양한 색상으로 산출된다(Fig. 2e). 각각의 비지대 내부에는 맥상 석영이 확인되며 산화망간, 황철석 등이 산점상 혹은 맥상으로 관찰된

다(Fig. 2f).

연구방법

연구지역 단층암 내에서의 암석 화학적 변화와 광물학적 변화를 파악하기 위하여 현미경을 통한 관찰 및 XRD, XRF, ICP, EPMA 분석을 시행하였다. 분석을 위한 시료로는 단층암의 중심부를 이루는 비지대를 기준으로 각력대 시료 2개(Fig. 2c), 단층 비지대 시료 7개(Fig. 2d)를 사용하였다.

단층암의 조직을 파악하기 위한 표준연마박편은 입자끼리 고결되지 못하여 강도가 약한 단층 비지드의 특성상, 시료를 충분히 건조한 후 저밀도 에폭시를 사용하여 기존의 구조를 고정한 후 제작하였다. 그 과정에서 비지대 시료 같은 경우는 점토광물이 다량 함유되어 있어 박편 제작 시 최대한 물의 사용을 배제하였다. 비지대 시료 블록뿐만 아니라 비지 시료를 슬라이드 글라스에 부착한 후에도 저밀도 에폭시를 침투시켜 입자를 고정한 후 공기 중에서 연마하는 과정을 수 회 거쳤으며 비지대 시료를 연마하는 과정에서는 다양한 입도의 사포(300~2000)를 사용하였다. 또한, 시료나 시료의 구성광물에 인위적인 단열의 형성을 줄이기 위하여 다이아몬드 디스크와 같은 기기

Fig. 2. Outcrop of the fault and sampling points (samples 1~9). (a) A satellite picture of the study area, (b) The fault is composed of breccia and gouge zones, (c) Sampling points of the breccia zone (samples 1~2, 1-A30, 2-A100), (d) Laumontite vein in the breccia zone, (e) Gouge zone located in the center of the fault zone. Sampling points in the gouge zone (samples 3~9, 3-B1, 4-B4(2), 5-B5(5), 6-B5(B), 7-B5(G), 8-B6, 9-B7), (f) Manganese oxide developed in the bluish gray gouge zone.

의 사용을 최대한 배제하고 수작업으로 연마작업을 수행하였다. 연마박편을 활용하여 한국 기초과학지원 연구원 전주센터의 전자현미분석기(Electron probe Micro-Analyzer, Shimazu EPMA1600)를 이용한 후방산란전자(Back Scattered Electron, BSE) 영상을 촬영하였다.

광물 조성은 X선 회절 분석기(X-ray Diffractometer,

XRD)를 이용하여 확인하였다. 야외에서 채취한 단층 암 시료들을 상온에서 충분히 건조한 뒤 불순물이 포함되지 않도록 유의하여 분말을 제작한 후 한국 기초과학지원연구원 대구센터의 Philips X' Pert-PRO/MRD모형을 이용하였으며, 측정된 회절 패턴에 대해서는 Rietveld법에 기초한 정량분석 프로그램인 Siroquant v3.0을 사용하였다.

단층암을 구성하는 암석의 화학조성은 한국 기초과학연구원 서울센터의 X선 형광 분석기(X-ray Fluorescence Spectrometer, Shimadzu XRF1700), 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Perkin Elmer Elan 6100), 유도결합 플라즈마 방출분광기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer, ICP-AES)를 통해 분석하였다.

결 과

단층암의 화학조성

단층암을 구성하는 주원소는 SiO_2 가 전체적으로 가장 높은 함량(61.6~71.0%)을 나타내며, 그 밖의 다른 원소들로 구성되어 있다. 그중에서 Al_2O_3 가 상대적으로 다량 함유된 편이고(10.8~15.8%), Na_2O 는 0.22~4.63%, K_2O 는 2.02~4.89%, Fe_2O_3 는 3.80~12.5% 범

Table 1. Major element compositions of the fault rock in the study area (wt%).

Sample	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Total
A100	70.0	0.40	15.60	3.80	0.12	1.37	1.35	4.63	2.84	0.12	1.40	102.00
A30	71.0	0.40	13.70	3.88	0.13	1.22	0.65	4.39	3.27	0.12	1.41	100.00
B1	67.3	0.44	15.80	5.92	0.64	1.68	0.36	1.49	4.89	0.15	2.37	101.00
B4(2)	66.8	0.42	13.70	7.16	0.37	2.11	0.59	0.72	3.44	0.19	5.24	101.00
B5(5)	67.1	0.46	13.40	5.14	0.32	2.14	0.79	1.09	3.19	0.25	4.52	98.50
B5(B)	64.1	0.55	12.00	8.56	0.52	2.37	1.27	0.33	2.42	0.25	6.61	99.10
B5(G)	61.6	0.49	11.80	9.56	0.45	2.31	2.56	0.32	2.02	0.19	7.59	98.90
B6	68.7	0.46	10.80	7.85	0.46	1.71	1.02	0.22	2.27	0.19	6.08	99.70
B7	64.0	0.48	10.80	12.50	0.18	0.92	0.46	0.58	3.08	0.24	7.88	101.00

Fig. 3. Chemical analysis of major elements of the fault rock samples using XRF.

위로서 단층암 내에서 위치에 따른 편차가 크다 (Table 1). Fig. 3은 가장 모암의 성분과 유사한 A100 시료의 화학조성을 기준으로 한 각각의 주원소 함량의 변화 경향을 보여준다.

각력대에서 비지대로 갈수록 감소하는 경향의 원소는 Na_2O , Al_2O_3 , CaO 가 있으며, 원소에 따라 감소 정도와 경향은 차이가 있다. 이 중 가장 감소 경향이 뚜렷한 Na_2O 는, 각력대(A100 시료)에서 비지대로 인접하는 과정(A30 시료)에서 5% 정도, 비지대 내부에서는 67.8~95.2%의 함량 감소가 인지되어, 결과적으로 비지대 내에서는 대부분 소모된 것으로 나타난다. 그밖에 Al_2O_3 는 11.9~30.9%, CaO 는 5.8~72% 범위의 함량 감소를 보이는데, 일부 비지대 시료(B5(G))에서는 CaO 함량이 오히려 기존 모암보다 89.4%가 증가하는 경향이 있다.

각력대에서 비지대로 갈수록 증가하는 원소는 Fe_2O_3 , MgO , MnO , P_2O_5 , TiO_2 가 있으며 각 원소에 따라 증가 정도와 경향에 차이가 있다. Fe_2O_3 의 경우,

각력대 내에서는 함량에 거의 변동이 없으나, 비지대에서 55.6~228.1%의 범위로 현저하게 증가하는 경향을 보인다. 다만 일부 비지대 시료에서는 부분적으로 함량이 감소하는 특성이 있다. MnO 는 Fe_2O_3 와 다른 양상으로 증가한다. 각력대와 비지대 경계에서 최대 4배의 증가율을 나타내나, 비지대 내에서는 특정 경향성이 나타나지 않으며, 위치에 따라 기존 모암보다 11.2~423.8%의 넓은 범위 내에서 함량의 증가가 일어난다. MgO 는 22.2~72.5%, P_2O_5 는 21.2~99.4% 범위의 함량 증가를 나타내며, TiO_2 는 전반적으로 증가 정도가 미미하다.

한편 K_2O 는 B5(B, G), B6 시료를 제외하고는 전체적으로 기존 모암보다 증가한다고도 볼 수 있겠으나 각력대와 접하는 비지대 시료(B1)부터 비지대 중앙으로 갈수록 꾸준히 감소하는 경향을 나타낸다. 그렇지만 각력대와 비지대, 그리고 비지대 내에서도 특정 경향성을 파악하기 어렵다.

Fig. 4는 미량원소와 희토류원소의 분석 값(Table 2

Fig. 4. Chemical analyses of trace and rare earth elements of the fault rock samples using ICP.

Table 2. Trace element analyses of the fault rocks in the study area determined by ICP-AES (Units are in ppm)

Sample	Ba	Cr	Sr	Zn	Sc	V	Zr	Cu	Pb
A100	491	< 1	362	179	6	36	24	5	19
A30	577	< 1	115	135	5	33	39	14	23
B1	628	< 1	36	469	6	45	32	9	65
B4(2)	210	13	26	4757	6	43	50	339	864
B5(5)	234	23	46	6461	6	47	54	267	646
B5(B)	101	39	36	9125	10	83	89	603	2031
B5(G)	73	28	35	8718	9	77	77	562	2761
B6	96	31	34	6214	9	70	82	626	1647
B7	123	41	36	641	8	57	103	33	314

Table 3. Trace element analyses of the fault rocks in the study area determined by ICP-MS (Units are in ppb)

Sample	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
A100	40335	4359	23332	3315	912	3516	505	3014	619	1911	281	1927
A30	42330	4653	24377	3538	971	3793	540	3153	647	1971	293	2008
B1	53517	5433	28973	3642	809	3783	518	2906	592	1810	270	1831
B4(2)	31964	3669	19403	2843	723	3157	448	2610	555	1649	238	1616
B5(5)	44704	4944	26307	3592	941	4017	573	3337	709	2186	300	2022
B5(B)	42835	4867	25754	3530	914	3902	530	3287	687	2091	291	1933
B5(G)	37011	4268	22611	3144	800	3375	454	2556	529	1577	221	1428
B6	36768	4221	22377	3121	743	3329	473	2819	592	1783	256	1698
B7	37234	4260	22350	3148	588	3237	460	2532	517	1550	216	1446
Sample	Be	Co	Ni	Ga	Rb	Y	Nb	Mo	Cd	Sb	Cs	La
A100	1780	61315	4996	30880	85179	16561	5660	603	2115	506	5430	21231
A30	1233	80304	5394	31907	85901	16950	6368	319	442	388	4142	22773
B1	1873	32648	4927	37823	236550	14309	5997	286	1830	1274	10787	28743
B4(2)	4012	23365	7339	22429	203270	14655	3817	1459	5845	1557	111949	16957
B5(5)	3195	14125	11830	22496	173570	19801	5202	3584	51081	1653	56685	23679
B5(B)	3683	85081	23624	18213	149797	19310	4070	21988	26803	4177	51434	23249
B5(G)	2633	69706	21201	16977	119174	15025	3097	16924	28255	3465	32595	19140
B6	3270	45451	20858	16989	137592	15852	4614	14581	26697	4850	38518	18997
B7	2160	69920	24082	15479	183040	13705	7667	50366	2866	4532	19101	19104
Sample	Lu	Hf	Ta	Bi	Th	U						
A100	298	686	871	< 200	8509	1532						
A30	310	1029	928	547	8955	1753						
B1	277	878	856	< 200	10957	2924						
B4(2)	247	956	600	28048	7406	4475						
B5(5)	309	1036	591	13916	7930	5644						
B5(B)	283	1681	424	27877	7879	7565						
B5(G)	209	1130	408	210123	6953	5547						
B6	248	1321	370	45130	6619	6843						
B7	219	1789	758	15905	7023	6847						

& 3)을 spider diagram으로 도시한 것이다. 본 연구 지역 일대 불국사 화강암의 화학 조성(Hong, 1985; Koo, 2003; Lim, 2004)에 관한 평균적인 분석 값

(N=34)을 추출하여 이를 기준으로 본 단층 시료의 데이터를 비교, 표준화하였다.

전체 단층암에서 미량원소와 희토류원소의 함량은

전반적으로 기존 화강암에 비해서 낮다. 미량원소는 Sr, Zr이 상대적으로 기존 화강암과 가장 유사한 함량을 나타내지만, 나머지 원소들은 낮은 값으로 나타난다. 특히 K와 Hf의 함량 감소가 가장 급격하다(Fig. 4a). 희토류원소는 그래프 내에서 전반적으로 유사한 함량을 보인다(Fig. 4b).

Sr, Rb, Ba와 같은 일부 미량원소의 함량 변화는 단층암 내에서 확인하다. 단층암 시료 중 가장 모암의 성분과 유사한 A100 시료의 화학조성을 기준으로 환산한 각 미량원소의 함량 변화 경향은, Zr, Hf, Rb의 경우 각력대에서 비지대로 갈수록 증가하고(Fig. 4c), Ba, Sr, Ta, Nb의 경우 감소한다(Fig. 4d). 이러한 원소를 제외한 대부분 미량원소는 단층암 내부에서 경향성이 나타나지 않는다.

단층암의 광물조성

본 연구지역 단층암에서 산출되는 광물은 크게 주요 조암광물과 점토광물로 구분된다. 각력대 시료는 대부분 석영과 장석류와 같은 조암광물로 구성되는 동시에 소량의 점토 광물이 수반되는 반면 비지대 시료는 상대적으로 점토광물의 함량이 높다(Fig. 5).

각력대에서 석영은 A100 시료에서 20.9%, A30 시료에서 30.2% 함유되어 있고, 장석은 공통으로 대략 60% 내외의 함량을 나타내어 석영보다 상대적으로 다량 산출된다. 장석류 중에서 알바이트(Albite)는 A100 시료에서 52.9%, A30 시료에서는 41.9%로 산출되어 장석의 풍부한 함량에 상당한 영향을 끼친다(Table 4). 각력대에서 산출되는 점토광물은 카올리나이트(Kaolinite), 녹니석(Chlorite), 로몬타이트(Laumontite), 일라이트(Illite)로 1.4~13.6%의 범위에서 소량 나타난다.

비지대는 크게 석영과 장석류, 점토광물로 구성된

Fig. 5. Mineral compositions of the fault rock samples using XRD. Q: Quartz, Ab: Albite, Ill: Illite, Chl: Chlorite.

다. 석영은 26.6~50.2%, 장석류는 알바이트의 경우 0~14.7%, 오르소클래스(Orthoclase)의 경우 0~14.1%의 범위이다. 석영은 각력대에 비해 증가하였으나 장석류는 확연히 감소하였으며, 특히 알바이트가 대다수

Table 4. X-ray diffraction data of the fault rock in study area (Wt%)

Sample	Type	Color	Qz	Ab	Or	Il	Ch	Ka	La	Py
A100	Breccia	-	20.9	52.9	8.8	-	13.6	2.5	1.4	-
A30	Breccia	-	30.2	41.9	14.2	6.2	7.6	-	-	-
B1	Clay	Greenish yellow	26.6	13.8	11.6	21.6	20.8	5.6	-	-
B4(2)	Clay	Greenish yellow	34.9	-	14.1	30.5	14.5	6.0	-	-
B5(5)	Clay	Bluish gray	39.9	14.7	9.9	19.4	16.1	-	-	-
B5(B)	Clay	Bluish gray	39.5	-	8.7	19.0	13.7	6.3	4.5	8.3
B5(G)	Clay	Bluish gray	30.8	-	9.8	17.1	16.8	7.9	9.7	7.9
B6	Clay	Bluish gray	48.9	-	7.4	16.4	16.0	-	4.1	7.1
B7	Clay	Bluish gray	50.2	7.8	-	22.4	9.2	-	-	10.5

의 비지대 시료에서 거의 산출되지 않는다. 모든 비지대에서 공통으로 산출되는 동시에 각력대보다 높은 함량을 갖는 점토광물은 일라이트와 녹니석이며, 카올리나이트와 로몬타이트가 일부 산출되지 않는 시료를 제외하고 최대 10% 이하의 소량으로 함유된다. 비지대는 색상에 따라 녹황색 비지대와 청회색 비지대

로 구분되는데, 점토광물의 함량은 대체로 녹황색 비지대에서 상대적으로 높게 나타난다(Table 4).

단층암의 미구조적 특성

단층암의 미구조적 특성은 크게 각력대와 비지대 사이에서의 차이가 쉽게 확인되며, 또한 비지대 내에

Fig. 6. Photomicrographs of fault rocks. Qtz : Quartz, Ill : Illite, Chl : Chlorite, Py : Pyrite. (a) Sample A100 in the breccia zone, (b) Sample A30 in the breccia zone, (c) Greenish yellow gouge sample. Old gouge fragments composed of clay minerals and fractured quartz formed during the early stage are distinguishable from the matrix, (d) Greenish yellow gouge sample. Iron oxides and rock-forming minerals fractured are arranged and deposited along the clay foliation in the reddish brown matrix coated with iron hydroxide, (e) Bluish gray gouge sample. Quartz and illite adjoin each other in the matrix, (f) Bluish gray gouge sample. The major axis of pyrite, chlorite and fractured quartz particles is more or less parallel.

서도 위치에 따른 크고 작은 차이가 인지된다.

상대적으로 비지대로부터 가장 멀리 떨어진 각력대 A100 시료는 기존 모암의 구조를 잘 보존하는 치밀하고 뚜렷한 조직이 전체적으로 잔존하고 있으며(Fig. 6a), 광물 내부에는 그리 선명하지는 않으나 크고 작은 단열이 존재한다. 석영 입자들은 대부분 각형 내지 아각형을 띠는 동시에 특정한 규칙성은 없는 파동소광을 나타낸다. A100보다 비지대에 인접한 A30은, A100과 구성 광물은 일치하나 석영은 상당히 파쇄가 진행되어 입자 자체의 크기도 감소했을 뿐만 아니라, 형태도 아각형 내지 아원형으로 다양하게 관찰된다(Fig. 6b).

비지대는 대부분 점토광물로 구성되는 기질에 점토엽리와 반상쇄편, 옛비지편과 같은 구조가 혼재되면서 독특한 구조를 형성한다. 색상에 따라 크게 녹황색 비지대와 청회색 비지대로 구분된다.

각력대와 접하는 양상으로 나타나는 녹황색 비지대

에서는 기질의 점토광물이 점토엽리를 형성하는데 이러한 엽리는 옛비지편과 철산화물, 아원형에서 원형까지 마모가 잘 이루어진 미립질 석영이 평행하게 배열되는 것으로 인지되며, 또한 방향성을 가진다. 옛비지편은 여러 가지 형태와 크기로 산출되는데 점토광물로 구성된 기질과 미립질의 석영 입자가 수반되며, 일부 옛비지편에는 철광물이 포함된다(Fig. 6c). 녹황색 비지대에서 특징적으로 산출되는 철산화물은 다양한 두께의 띠 형태로 점토 엽리를 따라 길게 침전되어 연장성이 좋으며 주변의 기질이 적색으로 착색되어 비지대가 녹황색으로 보이는 데 영향을 주고 있다(Fig. 6d).

청회색 비지대는 녹황색 비지대와 구성물은 유사하나 녹황색 비지보다 상대적으로 큰 크기의 석영이나 장석, 옛비지편이 다수 관찰된다. 석영은 아원형 내지 원형으로 관찰되고 일부 입자 표면에 점토광물이 피복되어 있으며(Fig. 6e), 장석은 변질되어 색상이 선

Fig. 7. BSE images of thin sections of gouge zones. Qtz: Quartz, Ksp: K-feldspar, Ill: Illite, Chl: Chlorite, Ca: Calcite, Py: Pyrite.

명하지 못하고 매우 드물게 관찰된다. 상대적으로 다양한 형태와 크기로 관찰되는 옛비지편은 점토엽리와 평행한 방향으로 장축이 신장하여 있다. 옛비지편 내부에 엽리가 발달하는 경우, 옛비지편 내의 입자들은 내부 엽리에 평행한 방향으로 장축이 배열되며, 이러한 내부 엽리는 옛비지편 외부 기질에 발달하는 점토 엽리와는 다른 방향성을 보인다(Fig. 6f).

Fig. 7은 BSE 이미지로서 현미경 상에서 확인하기 어려운 비지대 내의 장석 입자를 보여주고 있다. 경계가 둥글게 마모된 장석 입자는 100 μm 내외의 미립질로 기질 내에 반정으로 분포하는데, 광물 내에 일라이트가 침상으로, 혹은 조금 더 밀집된 형태로 산재한다(Figs. 7a & 7b). 조금 더 큰 크기로 잔류하는 장석은 맥상의 방해석이 입자를 관통함과 동시에 경계부가 수~100 μm 내외의 크기로 파편화되어 있는 현상을 확인할 수 있다(Fig. 7c). 고배율에서도 장석과 석영의 경계는 비교적 명확하게 나타나며, 광물 내부에 녹니석과 황철석과 같은 광물이 포함된다(Fig. 7d).

토 의

대부분의 주원소 및 미량원소는 기존 모암으로부터 유래된다. 그 중 일반적으로 열수변질 작용과 관련된 지구화학적 변화는 상대적으로 높은 유동성을 갖는 알칼리 원소들의 변화 특성을 통해 확인할 수 있다(Kim *et al.* 2011). 본 연구 지역의 단층암에서는, 각력대에서 비지대로 갈수록 Na_2O , Al_2O_3 , K_2O 는 감소하는 경향, Fe_2O_3 , MgO 등은 증가하는 경향을 나타내며 SiO_2 는 비지대로 가면서 어느 정도 감소하지만, 그 정도가 미미하다.

실제 광물 조성에서도, 각력대의 경우 석영과 알칼리장석류(Albite, Orthoclase)와 같은 조암광물이 주요 구성광물로 산출되는 동시에 소량의 점토광물이 수반되는 반면, 비지대의 경우 전체적으로 미립의 석영과 장석류, 상대적으로 다량의 점토광물로 구성된다.

이러한 경향은 실리카의 용해작용이 단층대에서 활발하게 일어나는 동시에, 각력대에서 비지대로 갈수록 심화하는 장석류의 함량 감소가 새롭게 형성되는 점토광물의 증가와 연관성이 있음을 지지하는 근거가 된다(Wibberley, 1999; Shon *et al.* 2002; Chang *et al.* 2005a). 단층대에서 장석류와 관련하여 일어나는 대부분의 반응에서 수소 이온을 소모하고, 그러한 가

수분해 반응들은 Si의 상당량을 용해한다(Goddard and Evans, 1995). 즉, 석영에 비해 높은 용해도를 가진 장석이 열수와 반응하여 용해되면 Si, Na, K, Al과 같은 원소들이 용탈된다. Si는 석영과 장석의 변질로 인해 실리카가 용해되는 과정에서 일부 유래되나, 단층대 곳곳에서 산출되는 맥상 석영과 비지대에 다량 분포하는 점토광물의 형성에 기여하여 전반적인 함량 감소는 낮다. 마찬가지로 K와 Al도 장석의 용해로부터 유래하지만, 점토광물의 형성에 소모되므로 전반적으로 함량 감소가 상대적으로 낮은 비유동성 원소로서 작용한다. 반면 알바이트 장석에 주로 함유된 Na는 비지대에서 급격하게 감소하므로 본 단층대에서 큰 유동성을 갖는 것으로 간주한다(Fig. 8a).

단층암 곳곳에 분포하는 맥상의 광물은 단층과 관련된 변형, 변질 과정을 이해하는데 있어서 중요한 위치를 차지하는데, 이러한 맥의 성분과 유체 포유물은 유체의 근원, 유체의 흐름, 온도 및 압력, 화학적 변화 과정에 대한 정보를 제공한다(Janssen *et al.* 1998). 본 단층의 경우, 맥상의 로몬타이트 형성은 Ca 사장석의 용해와 변질작용에 기인한다. 장석이 열수와 반응하여 일부가 용해된 결과 Ca와 Al이 유체에 풍부해지고, 용탈되어 나온 Ca, Al, Si가 로몬타이트를 형성하게 된다(Choo *et al.* 2012). 또한, 이 산화탄소가 풍부한 유체는 파쇄 단계의 변형에서 처음 단층에 영향을 끼치고, 이산화탄소의 부분 압력의 증가는 방해석의 침전을 일으켜(Fujimoto *et al.* 2002), 결과적으로 유체의 화학 성분의 변화는 맥상으로 분포하는 방해석과 로몬타이트의 형성 및 CaO의 함량 감소를 일으킨다(Fig. 8b).

그 밖의 원소의 경우, MgO는 비지대 내에서 흔히 산출되는 녹니석과의 상관성을 나타내며, Fe_2O_3 는 녹니석의 함량에 일부 영향을 받겠으나 기본적으로 황철석의 함량과 큰 연관성을 가진다(Fig. 8c). 또한, 산화망간은 일부 비지대에 침전된 상태로 산출되는데, 이러한 현상은 일부 단층암에서의 높은 MnO 함량과 관련된다.

미량원소와 희토류원소는 대부분 모암에 작용하는 열수 변질에 의한 영향으로 이동성이 발생하여, 주원소와 마찬가지로 모암으로부터 유래된다(Torres-Alvarad *et al.* 2007). 일반적으로 지질학적인 과정이 일어나는 동안 매우 뛰어난 안정성을 보이므로 속성작용 및 광화작용을 추적하는 데 있어 효과적인 지시자가 될 수 있다(Lixing *et al.* 2009). 열수변질 작용이 일어나는

Fig. 8. Relative variations in mineralogy and chemical compositions in the fault zone.

과정에서 경 회토류 원소의 경우 상당한 유동성을 가지므로 변질된 암석에 부분적으로 더 높게 재농집되며(Iida *et al.* 1998; Torres-Alvarado *et al.* 2007), 중 회토류 원소들은 비유동성의 특징을 가지며 회토류 원소들의 전체적인 함량 자체는 점차 결핍되는 특징을 나타낸다(Kim *et al.* 2011). 본 단층대에서는 전반적으로 회토류 원소들의 함량이 상당히 큰 폭으로 결핍되어 있으나 경 회토류원소와 중 회토류원소 사이에서 확연한 특정 경향이 나타나지 않는 점을 미

루어보아, 기존에 경 회토류원소가 열수변질 과정에서 화학적 침출에 의해 먼저 감소하였다가 높은 열수변질 작용이 단층대 전체에 걸쳐 일어나 시간이 지나면서 다시 일부가 점토광물과 같은 2차 광물 내에 농집되는 과정(Gong *et al.* 2011)을 거친 것으로 판단된다. 회토류는 열수변질 동안 이와 비슷한 거동을 보이는데, 예를 들면 멕시코 로쓰아쑤프레스(Los Azufres)지역 지열대에 위치하는 유문암질 암석의 경우에서, 열수변질 작용이 지속되는 동안 회토류원소

가 농집되는 정도 자체는 미미한데 이는 원소들이 비 유동성으로서 잔류하거나 열수변질이 일어나는 동안 2차 광물 내에 함유되기 때문이다(Pandarinath *et al.* 2008).

미량원소와 희토류원소는 기본적으로 모암과 유체에서 유래되므로, 모암의 광물 조성은 이들 원소의 거동을 제어하는데 중요한 역할을 한다(Tang and Liu, 2002). 따라서 본 단층대 내에서 위치에 따라 큰 차이를 나타내는 일부 미량원소들은 광물 조성 및 주원소의 함량 변화와 다음과 같은 연관성을 나타내는 것으로 생각된다.

각력대보다 비지대에서 높은 함량을 나타내는 Zr, Hf의 경우, 산성 유체 환경에서 실리카와 강한 결합을 이루는 것으로 알려졌다(Terakado and Fujitanil, 1998), Rb는 K_2O 와 함께 아플라리아와 양의 상관관계를 갖는 미량원소로서, K를 치환한다(Ennis *et al.* 2000). Si와 K는 장석류의 변질이 일어나더라도 점토광물을 형성하는 데 사용되므로, 그에 따라 이들 미량 원소의 함량에 변동이 없거나 오히려 증가할 수 있다. 반면 장석류를 구성하는 Ca를 치환하고 있던 Sr은 장석이 변질되면서 Ca가 제거되는 과정 중 함께 제거되어 비지대에서 확연한 감소를 나타내는 것으로 추론된다.

비지대가 생성될 때 유체의 영향을 많이 받은 비지대는 단층작용 분쇄물질과 유체가 반응하여 점토광물을 활발히 생성시켜 기질 물질이 풍부하고, 유체의 영향을 적게 받은 비지대는 단층작용 분쇄물질과 유체의 반응이 상대적으로 적어 점토광물의 생성량이 적고 암편을 많이 함유하게 된다(Chang *et al.* 2005b). 본 연구지역의 경우, 1~2 내외의 상대적으로 낮은 프랙탈 차원값을 가지며 치밀한 광물 조직을 나타내는 각력대와는 달리, 단층 비지대는 3 내외의 높은 프랙탈 차원값을 갖는 미립질의 암편이 반정의 형태로 산재하여 있으며(Song *et al.* 2012), 점토광물로 구성된 기질이 넓게 분포하는 동시에 배향성이 뛰어난 점토 엽리를 흔하게 구성한다. 단층암의 광물 조성 및 프랙탈 차원값을 통해 반영된 입도 분포의 변화는 단층대 내부의 열수 변질 작용이 일반적으로 단층 활동에 수반되는 현상임을 지시한다. 특히 미세하게 파쇄된 장석류는 비표면적이 증가함으로써 유체와의 반응성이 크게 높아지며, 이로 인해 이차광물을 쉽게 형성하기 때문에 단층대에서 원소의 이동성을 규제하는 중요한 역할을 하게 된다.

단층 파쇄대는 일반적으로 단층 형성 초기에 유체 활동의 통로로 작용한 열린계로서, 비지대에 비해 높은 투수성을 가지므로 Sibson *et al.*(1975), Sibson (1987)의 지진펌프(seismic pumping)와 유사한 원리로 이동하는 유체의 유동에 영향을 주어 맥상 광물을 침전시키거나 물-암석반응을 야기한다(Goddard and Evans, 1995). 이 과정에서는 단층대와 외부와의 원소 이동을 반영하는 유체 유동도가 높아지고, 점진적으로 유체-암석비가 큰 비지대가 형성된다. 비지대가 형성된 이후 비지대를 구성하는 점토광물에 의해 단층암의 중심부는 낮은 공극률을 갖게 되고 투수성이 감소하여 광물과 유체 사이의 원소 이동이 제한된다(Marbach *et al.* 2005). 이전 단층 형성 단계에서 용해된 미량원소는 원소 자체가 갖는 이온강도나 주위 pH 환경에 따라 좌우되기는 하나 일부는 점토광물에 흡착된다(Coppin *et al.* 2002). 따라서 유체-암석 반응동안 주원소의 이동이 가장 현저하게 발생하지만, 결과적으로 Na와 같은 일부 원소를 제외하고는 다른 형태의 광물로서 단층 비지대에 잔류한다. 미량원소의 이동성은 주원소의 거동특성과 관련되고 또한 이들 원소를 포함하는 광물들의 안정성과도 밀접한 연관성이 있다.

결 론

Fe_2O_3 , MgO, MnO, Zr, Hf, Rb 등은 전반적으로 각력대에서 비지대로 갈수록 증가하는 경향을 나타내고, Na_2O , Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 , CaO, Ba, Sr, Ta, Nb는 각력대에서 비지대로 갈수록 감소하는 경향을 보인다. 본 단층암에서 산출되는 광물은 크게 주요 조암광물과 점토광물로 구분되며 이 중 각력대에서는 석영과 장석류와 같은 주요 조암광물이 대부분을 차지하는 동시에 점토광물은 극미량 산출되는 반면, 비지대에서는 각력대에 비해 상대적으로 점토광물의 함량이 높다.

단층암 전반에 걸친 이러한 변화는 단층대에서 활발하게 일어난 유체 활동에 따른 기존 모암의 변질이 우세한 현상으로 작용하였을 것으로 판단되며, 단층암의 주원소 변화 중에서는 Na_2O , Al_2O_3 , K_2O , SiO_2 의 증감과 밀접한 연관관계가 있다. 따라서 일반적으로 유동성이 높은 알칼리원소의 경우, 본 단층대에서는 기존 광물에서 침출된 후 2차적으로 형성되는 점토광물의 형성에 기여하여 결과적으로 재농집되어 낮

은 유동성을 가지며, 미량원소 및 희토류원소의 경우에도 마찬가지로 결과적으로 주원소의 함량 및 이러한 원소들을 포함하는 광물의 안정성과 밀접한 상관성을 나타낸다.

단층 파쇄대는 초기에 유체 활동의 통로로 작용하여, 비지대에 비해 높은 투수성을 가지므로 유체의 유동에 영향을 주어 물-암석반응을 야기하여 단층대와 외부와의 원소 유동성이 높다. 파쇄대가 점진적으로 비지대로 발달한 이후에는 맥상 광물의 침전으로 파쇄대가 닫히는 동시에, 비지대를 구성하는 점토광물에 의해 투수성이 감소하여 유체의 유동이 제한받고, 또한 표면 흡착성을 갖는 점토광물의 특성으로 낮은 원소 유동성을 나타내는 것으로 판단된다.

사 사

본 논문을 심사해주신 고정선 박사님과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 방사성폐기물 관리기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(201217102002C).

References

- Bao, S.X., Zhou, H.Y., Peng, X.T., Ji, F.W. and Yao, H.Q., 2008, Geochemistry of REE and yttrium in hydrothermal fluids from the Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge. *Geochemical Journal*, 42, 359-370.
- Bierlein, F.P., Waldron, H.M. and Arne, D.C., 1999, Behaviour of rare earth and high field strength elements during hydrothermal alteration of meta-turbidites associated with mesothermal gold mineralization in central Victoria, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 67, 109-125.
- Bingqui, Z. and Hui, Y., 1995, The use of geochemical indicator elements in the exploration for hot water sources within geothermal fields. *Journal of Geochemical Exploration*, 55, 125-136.
- Chang, T.W. and Chae, Y.J., 2004, Faulting and Hydrothermal Activity in the Gouge Zones of Quaternary Faults at the Eastern Block of the Ulsan Fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 469-479.
- Chang, T.W. and Choo, C.O., 1999, Faulting Process and K-Ar Ages of Fault Gouges in the Yangsan Fault Zone. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 20, 25-37.
- Chang, T.W., Chae, Y.J. and Choo, C.O., 2005a, Formation of Alteration Minerals in Gouges of Quaternary Faults at the Eastern Blocks of the Ulsan Fault, Southeastern Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 18, 205-214.
- Chang, T.W., Chae, Y.J. and Choo, C.O., 2005b, Estimation of Volume Change and Fluid-Rock Ratio of Gouges in Quaternary Faults, the Eastern Blocks of the Ulsan Fault, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 15, 349-363.
- Choo, C.O., Jang, Y.D. and Chang, C.J., 2012, Mineralogical Characteristics of Hydrothermal Laumontite and Adularia in the Breccia Zone of a Fault Yangbuk-myeon, Gyeongju and Implications for Fault Activity. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25, 23-36.
- Coppin, F., Berger, G., Bauer, A., Castet, S. and Loubet, M., 2002, Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology*, 182, 57-68.
- Ennis, D.J., Dunber, N.W., Campbell, A.R. and Chapin, C.E., 2000, The effects of K-metasomatism on the mineralogy and geochemistry of silicic ignimbrites near Socorro, New Mexico. *Chemical Geology*, 167, 285-312.
- 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.
- Gong, Q., Deng, J., Yang, L., Zhang, J., Wang, Q. and Zhang, G., 2011, Behavior of major and trace elements during weathering of sericite-quartz schist. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42, 1-13.
- Hong, Y.K., 1985, Geochemistry of the Cretaceous Eonyang and Yoocheon granites in the Southeastern Korea. *The Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 90-108.
- Iida, Y., Ohnuki, T., Isobe, H., Yanase, N., Sekine, K., Yoshida, H. and Yusa, Y., 1998, Hydrothermal redistribution of rare earth elements in Toki granitic rock, central Japan. *Journal of Contaminant Hydrology*, 35, 191-199.
- Janssen, C., Laube, N., Bau, M. and 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.
- Kim, E.J., Hong, Y.K. and Chi, S.J., 2011, Geochemical Variation of Hwangsan Volcanic Complex by Large Hydrothermal Alteration. *Economic and Environmental Geology*, 44, 95-107.
- Koichiro, F., Tomoyuki, O., Norio, S., Yukari, M., Tomoaki, T., Hidemi, T., Kentaro, O. and Yoji, K., 2002, Water-rock interaction observed in the brittle-plastic transition zone. *Earth Planets Space*, 54, 1127-1132.
- Koo, K.L., 2003, Petrology and Geochemistry of the Eonyang Granites. M.S. dissertation, Seoul National University, 113p.
- Lim, H.S., 2004, Geochemistry of the granitic rocks in Sannae-Eonyang area. M.S. dissertation, Korea National University of Education, 32p.
- Lixing, L., Houmin, L., Denghong, W. and Changqing, Z.,

- 2009, Trace Elements and Rare Earth Elements Geochemistry and Its Metallogenic Significance for Cu-Zn Ore Deposits in Tongbai Area, Henan Province, China. *Earth Science Frontiers*, 16, 325-336.
- Marbach, T., Kober, B., Mangini, A., Warr, L. and Schleicher, A., 2005, Mobility of U-Th radionuclides connected with fault porosity: A case study of the Schauenburg Fault, Rhine Graben Shoulder, Germany. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 1030-1037.
- Metz, S. and Trefry, J.H., 2000, Chemical and mineralogical influences on concentrations of trace metals in hydrothermal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 2267-2279.
- Pandarinath, K., Dulski, P., Torres-Alvarado, I.S. and Verma, S.P., 2008, Element mobility during the hydrothermal alteration of rhyolitic rocks of the Los Azufres geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 37, 53-72.
- Parsapoor, A., Khalili, M. and Mackizadeh, M.A., 2009, The behaviour of trace and rare earth elements(REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (Center Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34, 123-134.
- 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.
- Shon, S.W., Chang, T.W. and Kim, Y.K., 2002, Mineralogy and Geochemistry of Quaternary Fault Gouges in the Southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 15, 85-94.
- Sibson, R.H., 1987, Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal system. *Geology*, 15, 701-704.
- Sibson, R.H., Moore, J.M. and Rankin, A.H., 1975, Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of The Geological Society*, 131, 653-659.
- Song, S.J., Choo, C.O., Chang, C.J., Chang, T.W. and Jang, Y.D., 2012, Mineral Composition and Grain Size Distribution of Fault Rock from Yangbuk-myeon, Gyeongju City, *Economic and Environmental Geology*, 45(5), 487-502.
- Tang, H.F. and Liu, C.Q., 2002, Trace element geochemistry during metamorphic dehydration: A case study from the Xingzi Group of Lushan, southeast China. *Geochemical Journal*, 36, 545-561.
- Terakado, Y. and Fujitani, T., 1998, Behavior of the rare earth elements and other trace elements during interactions between acidic hydrothermal solutions and silicic volcanic rocks, southwestern Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 1903-1917.
- Torres-Alvarado, I.S., Pandarinath, K.S., Verma, P. and Dulski, P., 2007, Mineralogical and geochemical effects due to hydrothermal alteration in the Los Azufres geothermal field, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 24, 15-24.
- Uysal, I.T. and Golding, S.D., 2003, Rare earth element fractionation in authigenic illite-smectite from Late Permian clastic rocks, Bowen Basin, Australia : implications for physico-chemical environments of fluids during illitization. *Chemical Geology*, 193, 167-179.
- Vrolijk, P. and Pluijm, B.A., 1999, Clay gouge. *Journal of Structural Geology*, 21, 1039-1048.
- Wibberley, C., 1999, Are feldspar-to-mica reactions necessarily reaction-softening processes in fault zones? *Journal of Structural Geology*, 21, 1219-1227.

2013년 3월 12일 접수
 2013년 5월 21일 심사개시
 2013년 6월 11일 채택