

울산단층대의 단층활동에 수반된 열수변질작용 시기

조규환^{1*} · 다카기 히데오² · 이와무라 아키라¹ · 아와지 도타¹ · 장태우³ · 손승완³ · 이타야 테츠마루⁴ · 오카다 도시노리⁵

¹와세다대학 이공학연구과, ²와세다대학 교육학부, ³경북대학교 지질학과,
⁴오카야마이과대학, ⁵히루젠 연대측정 연구소

Timing of the Hydrothermal Alteration Associated with the Fault Activities along the Ulsan Fault Zone, Southeast Korea

Kyu-Hwan Cho^{1*}, Hideo Takagi², Akira Iwamura¹, Dohta Awaji¹, Tae Woo Chang³,
Seung-Wan Shon³, Tetsumaru Itaya⁴ and Toshinori Okada⁵

¹Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8050, Japan

²Department of Earth Sciences, Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8050, Japan

³Department of Geology, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

⁴Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science, Okayama 700-0005, Japan

⁵Hiruzen Institute for Geology & Chronology, Okayama 703-8248, Japan

Clay minerals are common component of fault gouge and have been used to determine the fault activity age using K-Ar dating technique. We carried out XRD and K-Ar analyses of the mica clay minerals from the fault gouge along the Ulsan Fault Zone, southeastern Korea to estimate the timing of the major fault activity. Mica clay minerals for four grain size fractions of 5-2 μm , 2-1 μm , 1-0.35 μm , and 0.35-0.05 μm were separated from the gouge samples in the three locations by the hydraulic elutriation and centrifugal separator. Fault gouges are composed of smectite, mica clay minerals, kaolinite, chlorite, quartz, and feldspar. The illite crystallinity of mica clay minerals is the highest in the finest grained fraction with 1M polytype, indicating that the authigenic mica clay minerals have been concentrated in the fraction. K-Ar ages give some variations from 46 to 35 Ma (330-2), 45 to 39 Ma (16Ww), and 32 to 15 Ma (102Ws) and are the youngest in the finest grained fraction. These results suggest that the hydrothermal alteration associated with the major fault activities along the Ulsan Fault Zone took place twice at 39-35 Ma and 15 Ma.

Key words: hydrothermal alteration, mica clay minerals, K-Ar age, fault activity Ulsan Fault Zone

단층비지의 주성분인 점토광물은 K-Ar 연대측정법으로 단층활동 시기를 구하는데 이용되어 왔다. 이 논문은 울산 단층대의 주요 단층활동에 수반된 열수변질작용 시기를 연구하기 위하여 단층비지 세 시료를 각각 5-2 μm , 2-1 μm , 1-0.35 μm , 0.35-0.05 μm 입자 크기로 분리하여 각각의 시료에 대해 X선 회절분석과 K-Ar 연대측정을 하였다. 연구 결과 단층비지는 석영, 장석류로 구성되며, 점토광물은 스멕타이트, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트가 확인된다. 운모 점토광물의 일라이트 결정도지수는 작은 입자 크기에서 큰 값(0.58-1.08)을 보이고 저온에서 안정한 일라이트(1M)가 우세하게 나타내는 것으로 보아 열수변질작용을 수반한 단층활동 동안에 생성된 운모점토광물이 작은 입자 크기에 농집되었을 가능성이 높음을 시사한다. 각 시료의 K-Ar 연령은 46-35 Ma(330-2), 45-39 Ma(16Ww) 및 32-15 Ma(102Ws)이며, 작은 입자 크기로 갈수록 연대값이 젊어진다. 이 결과는 울산단층대의 주요 단층활동에 수반된 열수 변질작용이 39-35 Ma와 15 Ma에 있었던 것으로 나타난다.

주요어: 열수변질작용, 운모점토광물, 입자 크기, K-Ar 연령, 단층활동 시기, 울산단층대

*Corresponding author: 699g5033@mn.waseda.ac.jp

1. 서 론

울산단층은 김종환 등(1976)의 Landsat-1 영상판독에 의하여 주요 구조선으로 인지된 후, 울산단층이 정식으로 정의, 명명, 보고된 것은 최현일 등(1980)에 의하여 이루어졌으며, 울산단층은 양산단층에 의해 절단되어 있음을 근거로 양산단층보다 전기의 단층이며 단층대 양측의 암상변화가 없는 것으로 보아 단층의 수평이동은 미미한 것으로 생각하였다. 한편 김인수(1992)는 울산단층을 백악기 중엽에 콜라판(Kula plate)의 침강과 그 압축력에 의해 야기된 우수 주향 단층이며, 북북동 방향 단층(양산단층)의 공액단층(conjugate fault)으로 간주하였다.

울산단층의 연장 및 범위에 관한 연구는 지전기와 항공 자력탐사자료등의 물리탐사자료에 바탕을 둔 울산단층 파쇄대(cataclastic zone)의 깊이는 30-100 m 정도(Lee and Um, 1992)이고 최대 깊이는 1 km. 폭 3 km로 해석되고(Baag and Kang, 1994), 또한 전기, 전자탐사에 의한 입실지역의(이 조사시료 330-2 채취지점으로부터 북쪽 단층 연장선) 단층 심부구조는 단층의 깊이가 서측에서는 <200 m이고 단층의 동측으로 갈수록 그 깊이가 약 800 m라고 해석하였다(손호웅 등, 1999). Okada *et al.*(1998, 2001)은 '울산단층계' 또는 '울산활성단층계'라고 하여 이는 NNW-SSE 또는 N-S 주향을 나타내고 저각도의 동쪽 경사를 보이는 길이 약 50 km에 달하는 역단층으로 보고하였다. 또한 최위찬 등(1999)은 울산단층대를 북쪽부터 안강-천북면 갈곡리-불곡사, 불곡사-외동읍 패룡리-말방리-입실리-모화리 원원사-농소면 중산리 이화-울산시 중구 반구동으로 2 대분 하였다.

최근 Chang(2000)은 울산단층 주변의 단열성 선상구조의 해석과 지형학 관점에서 본 결과, 전체적으로 동서압축 응력장으로 인하여 기존의 울산단층이 제4기 동안에는 역단층 운동을 하였음을 시사하였다. Choi *et al.*(2001)에서는 울산단층이 포항-울산블록이 우수향 회전할 때 경계단층임을 제시하기도 하였다. 그 외에 울산단층대의 광물학적 특성 연구(이석훈 등 2000; 손승완과 장태우, 2001) 및 신기 지구조 운동(류충렬 등, 1997)에 관한 연구가 있다. 울산단층대의 단층 비지에 대한 Rb-Sr, K-Ar 연대측정 연구(정창식 등, 1999, 2000), ESR 연대측정(Lee and Schwarcz, 2001)등이 있다.

단층비지(fault gouge)층의 운모점토광물에 대한 K-Ar 연대측정은 Lyons and Snellenburg(1971)에 의해

처음으로 연구되었고, 단층비지에 대한 Rb-Sr 또는 K-Ar 연대 측정법을 이용해 단층 활동시기를 추정한 연구는 알프스(Kralik *et al.* 1987), 일본의 중앙구조선(Shibata and Takagi, 1988; Takagi and Shibata, 1992), 양산단층대(장태우와 추창오, 1999), 동래단층(장태우와 추창오, 1998; Choo and Chang, 2000), 울산단층대(정창식 등, 1999, 2000)등이 있다. 김상경과 이현구(1996)는 변질에 의한 견운모에 대해 K-Ar 연대측정을 통해 단층활동시기를 추정하였다. 이와 같이 단층비지에 대한 연대측정은 많은 학자들에 의해 단층활동시기를 추정하는 연구가 있으며 더 정밀한 단층활동시기를 결정하기 위한 종합적인 연구가 요구된다.

그러나, Takagi(1999)가 단층활동 시기를 정밀측정하기 위한 문제점을 지적한 바와 같이, 좀 더 정확한 단층활동 시기를 결정하기 위한 방법에 대해서는 점점 확립되어 가고 있지만, 아직 원암 중의 운모점토광물의 혼입(contamination)평가에 대한 방법론 재검토가 남아 있다. 즉 단층비지의 연대측정을 할 때 문제점으로 단층운동으로 파쇄된 원암(화강암, 변성암, 화산암)의 운모점토광물의 혼입이다. 일반적으로 수파법(hydraulic elutriation)으로 운모점토광물을 분리(입자 크기: <2 μm)하지만 단층운동에 의해 생성된 자생 운모점토광물만 구별해서 분리하는 것은 불가능하다. 따라서 원암의 연령과 단층활동 연령의 혼합 연령을 얻게 된다. 그래서 가능한 한 순도가 높은 열수성 운모점토광물을 분리, 확인하는 방법이 필요하다.

이 연구는 순도 높은 열수성 운모점토광물을 분리하여 좀 더 정확한 주요 단층활동에 수반된 열수변질(hydrothermal alteration)시기(열수변질작용에 의해 일라이트의 생성 온도조건(약 175°C; Henley and Ellis, 1983) 또는 일라이트의 폐쇄온도(closure temperature)인 260±30°C 이상의 열적 사변을 겪은 시기)를 결정하기 위해서 단층노두가 양호한 울산단층대에 수반되어 발달하는 세 지점의 단층 비지 시료를 채취하였다. 이들의 같은 시료를 네 등급의 입자 크기로 분리하여 모든 입자 크기에 대해 광물학적 특성을 검토하고 K-Ar 연대측정을 하였다. 이 논문은 연령의 결과, 연대측정시료의 입자 크기와 관계, 주요 단층활동시기 추정(초기 또는 옛 단층활동시기)에 대한 고찰을 하였다.

여기서 먼저 본론으로 들어가기 전에 이야기해 들것은 울산단층이 위의 기존 연구와 같이, 울산단층의 용어, 정의, 단층의 정확한 규모나 연속성은 일반적으로 연구자에 따라 다르다. 혼동을 피하기 위해 본문 중에서 주향은 NNW-SSE 또는 N-S를 나타내며, 비교

적 저-중각도의 동경사를 보이며 역단층 운동감각(최후 운동)을 보이는 울산단층대선 또는 그 동쪽 주변에 발달하는 단층(새로운 정리가 요망됨)을 현 단계에서는 '울산단층대'로 사용한다.

2. 지질개요

울산단층대가 발달하는 지역의 지질은 백악계 경상 누층군의 하양층군이 기저를 이루고 있으며 그 상위는 유천층군이 분포하며, 이것을 관입하는 백악기의 불국사화강암류로 구성된다(장기홍, 1975; Fig. 1). 울산단층대의 동부에는 주로 제3기 화산암류와 퇴적암류가 넓게 분포하고 있다. 불국사화강암류는 단층대의 중앙부의 양측에 넓게 분포한다. 시료 채취지역의 유천층군은 주로 화산각력암, 응회암, 반상안산암으로 이루어지며, 단층에서 먼 곳에서 이들 암석은 암산암질 암편을 다량 함유한다. 단층접촉부에서는 심한 변질작용을 받아 유백색내지 담녹색을 띠며, 심하게 각력화되어 있

다. 불국사화강암류는 주로 세립질내지 중립질 혹은 모화강암과 담홍색을 띠는 중립질 화강섬록암으로 구성된다. 울산단층은 위의 각 암상을 자르며 전체적인 주향은 북북서-남남동(또는 남-북)이며 단층대의 북단에서는 양산단층과 만나면서 중지되는 양상을 나타낸다. 본 조사지역의 시료채취지점의 단층면은 약간 불규칙하나, 주향은 N25°E부터 N35°W이고 경사는 10°NE부터 50°SE를 나타낸다.

3. 단층비지의 노두 기재

3.1. 시료-102Ws

소위 '왕산단층'으로 기재된 이 단층노두는 경상북도 경주시 암곡동 왕산, 덕동천 중류(129° 15' 57" E, 35° 50' 30" N)에 위치한 큰 단층노두이다(Fig. 2a). 화산각력암으로 구성되는 유천층군 위에 부정합으로 놓여 있는 제4기의 사력층을 변이시켰으며, 수직분리(vertical separation)는 약 14 m에 달한다. 단층근방의 원암인

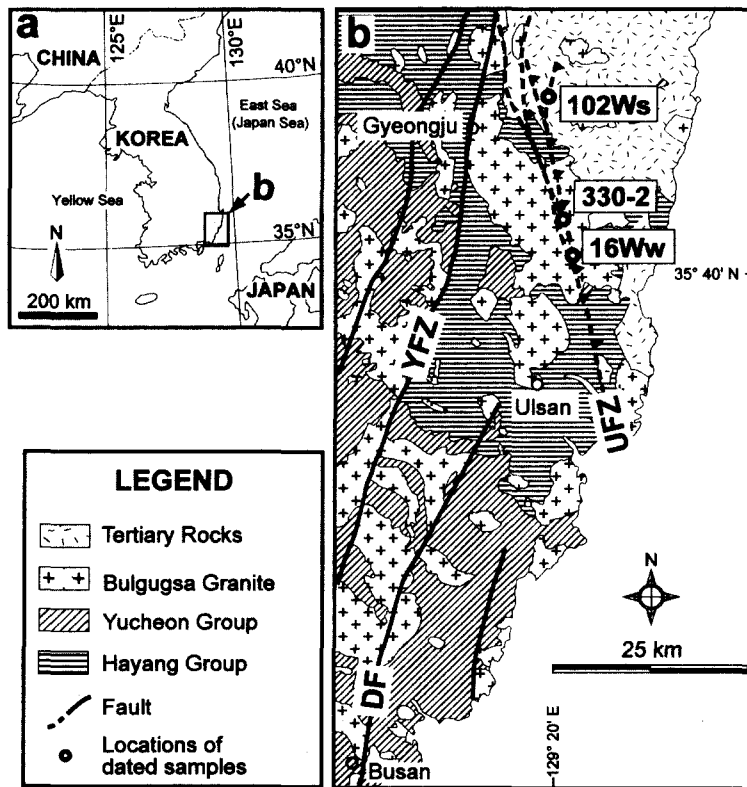


Fig. 1. Index map (a) and geological map (b) of the southeastern part of Korea and the locations of dated samples along the Ulsan Fault Zone (modified from Chwae *et al.*, 1995; Okada *et al.*, 2001). UFZ: Ulsan Fault Zone, YFZ: Yangsan Fault Zone, DF: Dongnae Fault.

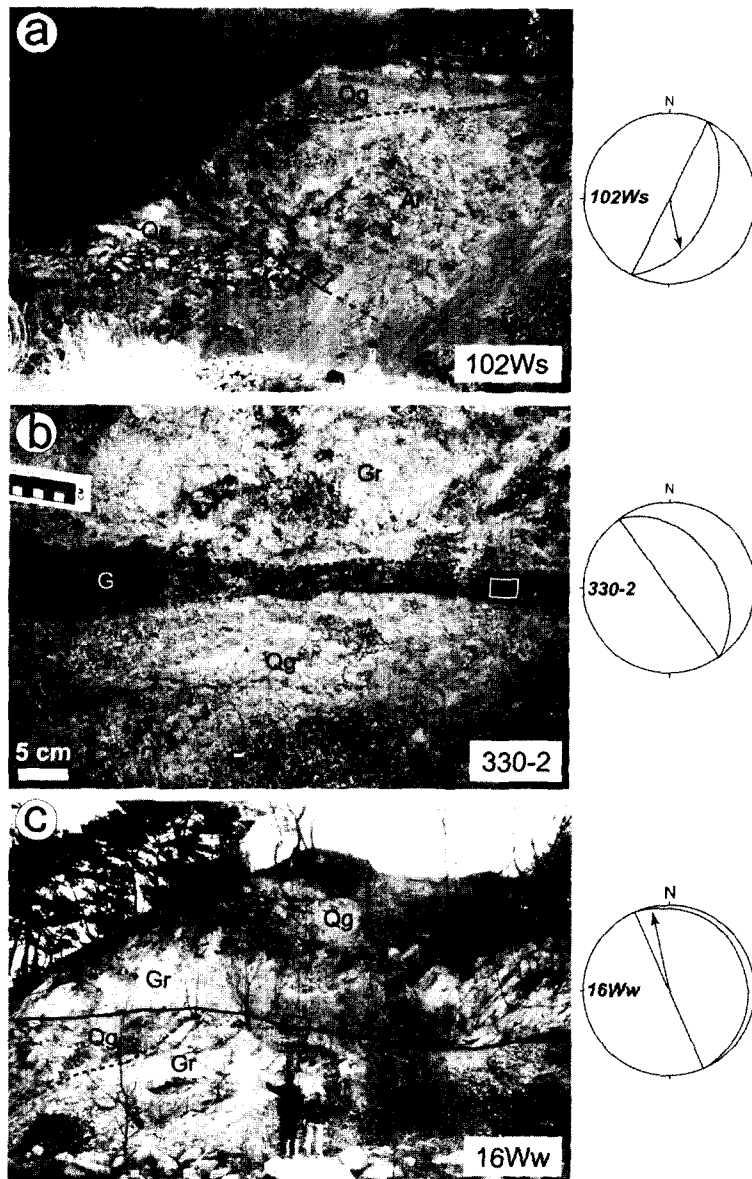


Fig. 2. Photos for three outcrops of the Ulsan Fault Zone. Fault gouge samples ((a) 102Ws, (b) 330-2, and (c) 16Ww) to be dated were collected from the part shown in rectangle with equal area stereograms of fault planes (great circles) and slickenlines with shear direction of hanging wall (arrows). Qg: Quaternary gravel, Ar: andesitic rocks (Yuchon Group), Gr: Bulguksa granites, G: fault gouge.

화산각력암은 심하게 변질·파쇄되어있다. 야외에서 방향성 시료를 채취해 복원한 단층의 주향은 $N26^{\circ}E$ 이고 경사는 $50^{\circ}SE$ 를 가리킨다. 단층면에 발달하는 미끄럼선(slickenline)의 선주향은 168° 이고, 선경사는 38° 를 나타낸다(Fig. 2a). 점토화가 잘 진행된 갈색을 띠는 비지대(gouge zone)의 폭은 약 10 cm이며 연속적

으로 산출된다. 점토화의 진행이 미약하고 화산암편을 수반하는 회색을 띠는 비지대가 거의 평행하게 나타나고 있지만 비지대의 폭은 3-20 cm로 매우 불규칙하다. 연대측정에 사용한 시료는 갈색 비지대에서 원암인 화산암편을 수반하지 않는 전형적인 점토질 비지대에서 채취하여 연대측정을 하였다. 본 단층비지의 Rb-Sr 자료

를 등시선으로 해석할 경우 22 Ma와 12 Ma의 연대 값이 보고되었다(정창식 등, 2000).

3.2. 시료—330-2

소위 '개곡단층'으로 기재된 이 단층노두는 경상북도 경주시 외동읍 개곡리 북동 1.5 km 동천 개곡리 상류(129° 20' 10"E, 35° 40' 50" N)에 위치한다. 이 단층은 제4기 사력층이 원암인 불국사화강암류의 흑운모화강암 위에 놓이는 역단층이다. 노두에서 측정된 단층의 주향은 N35°W이고, 경사는 40°NE를 가리킨다(Fig. 2b). 단층 근방의 원암인 화강암은 심하게 풍화되어 있으며, 단층비지의 분포는 동천 개곡리 상류 근방에서 양측에 잘 발달한다. 동천의 북측 비지대의 폭은 약 35 cm이고, 적갈색을 띠며 비지대에서는 원암으로 주입한 비지 맥(폭 1-3 cm)이 관찰된다. 원암의 암편(장축 5-10 cm)이 비지대 안에 접재하고, 점토질화는 비지대와 원암 접촉부에서는 양호하나 비지대 중심부에서는 발달이 미약하다. 원암은 파쇄 되어 그물망 구조의 균열이 발달한다. 북측과 동일한 주향 경사를 나타내는 남측의 비지대의 폭은 2-5 cm이며, 원암의 암편을 포함하지 않는 순수한 암갈색 점토질 비지대가 잘 발달한다. 연대측정용으로 채취한 시료는 남측의 전형적인 점토질 비지대에서 채취하였다(Fig. 2b). 본 단층비지의 K-Ar 연령은 45 Ma로 보고되었다(정창식 등, 2000).

3.3. 시료—16Ww

소위 '원원사단층'으로 기재된 이 단층노두는 경상북도 경주시 외동읍 모화리 북동 2.7 km 원원사 부근(129°20' 15" E, 35° 40' 15" N)에 위치한다. 이 단층은 원암인 불국사화강암류(담홍색 중립질 흑운모화강암)와 제4기 사력층을 접촉시키고 있으며 저각 역단층 형태를 나타낸다(Fig. 2c). 단층 근방의 원암은 심하게 변질·풍화되어 있다. 단층면의 주향은 불규칙한 편이나 노두에서 측정된 단층의 주향은 N22°W이고, 경사는 10°NE를 가리키지만, 단층면에 발달하는 미끄럼선의 선주향은 348°이고, 선경사는 10°를 나타내며(Fig. 2c) 같은 노두내의 각 측정 지점에서 미끄럼선의 자세는 잘 일치한다. 비지대의 폭은 불규칙하나 약 20-30 cm이고, 적갈색을 띠는 점토화가 잘 진행된 전형적인 비지를 채취하였다. 본 단층비지의 산(acid)추출 Rb-Sr 연령은 30 Ma와 8.3 Ma(정창식 등, 1999), ESR 연령은 130±10 ka 부터 460±50 ka(Lee and Schwarcz, 2001)로 보

고되었다.

4. 연구방법

단층비지에 포함되어 있는 운모점토광물에 대한 좀더 정밀한 생성(또는 재설정(reset)) 시기를 구하기 위해, 이 연구에서는 야외에서 채취한 단층비지 시료 중에 X선 회절분석을 하여 감정하고 운모점토광물을 함유하는 102Ws와 330-2, 16Ww의 세 시료를 (1) 5-2 μm, (2) 2-1 μm, (3) 1-0.35 μm, (4) 0.35-0.05 μm 네 등급의 입자 크기로 분리하였다. 각 시료의 입자 크기는 중력 침전에 의한 수과와 Stokes 법칙에 바탕을 두고 원심분리기를 사용해서 분리하였다. 가장 작은 입자 크기의 분리는 초원심분리기를 사용하여 분리하였다. 각 등급의 입자 크기의 모두 12 시료에 대해 K-Ar 연대측정법으로 연대측정을 하였다. K분석방법과 Ar분석방법, 연대오차 산출은 Nagao *et al.*(1984)와 Itaya *et al.*(1991)이 제시한 방법으로 하였다. K분석의 동위체비 측정은 염광분광분석법(flame spectrometry)을 이용하였다. 시료를 불화수소산(HF(47%))+초산(HNO₃(60%))으로 용해 한 후, Cs 2000 ppm을 함유한 희석염산(HCl) 용액을 분석하였다. 분석장치는 일본 오카야마 이과대학 자연과학연구소의 히타치 180-30 원자흡광염광분광도계이다. 파장은 766.5 nm부근을 사용하였다. 분석은 표준시료와 미지시료에 대해서 2회 실시하여 재현성 여부를 확인한 다음 분석오차가 2%이내일 때 평균치를 연대 계산에 사용하였다. Ar분석은 오카야마 이과대학 자연과학연구소의 질량분석계를 사용해서, ³⁸Ar을 스카이프로 하여 동위체 희석법으로 하였다. 연대값 계산에 사용한 정수는 Steiger and Jäger(1977)의 λ_k=0.581 × 10⁻¹⁰/yr, λ_β=4.962 × 10⁻¹⁰ /yr, ⁴⁰K/K=0.0001167(원자수비)을 사용하였다.

단층비지의 광물조성은 분리된 점토광물의 정방위(preferred orientation)시료를 사용하여 점토광물에 대한 각 반사면 위치를 종합해서 감정하였다. 운모점토광물, 카올리나이트, 스멕타이트, 녹니석을 구별해서, 일라이트-스멕타이트 혼합층광물(I/S)은 에틸렌글리콜(ethyleneglycol)로 처리해 확인하였으며, 일라이트 결정도지수(IC)를 구하였다. IC(Δ°2θ)는 Kübler (1984)의 001회절 피크의 반가폭(full width of 10Å peak at half of its maximum)이다. 무정방위(random orientation)시료를 이용하여 Togashi(1979)의 방법을 사용해 일라이트 다형(polytype)을 결정하였다.

Table 1. X-ray diffraction data and K-Ar age of fault gouges from the Ulsan Fault Zone.

Sample	Host rock	Color	Size fraction	Mineral assemblage	IC	Polytype	Potassium (wt.%)	Rad. ^{40}Ar (10^{-8} ccSTP/g)	Non rad. ^{40}Ar (%)	K-Ar age (Ma)
102Ws	Andesitic rocks	Brown	1	Sm, Chl, Q, Il	-	IM	2.538 ± 0.051	322.9 ± 6.5	44.5	32.5 ± 0.9
			2	Sm, Chl, Q, Il	-	-	2.365 ± 0.047	270.0 ± 7.2	55.0	29.2 ± 1.0
			3	Sm, Chl, Il, Q	0.55	1M>2M ₁	2.040 ± 0.041	223.3 ± 7.2	6.14	28.0 ± 1.1
			4	Sm, Chl, Q, Il	-	IM	1.959 ± 0.039	113.1 ± 9.7	82.7	14.8 ± 1.3
330-2	Granite	Dusky brown	1	Q, Ab, Ka, Il, SM	0.56	IM	3.303 ± 0.066	602.3 ± 6.4	06.0	46.4 ± 1.0
			2	Sm, Ab, Ka, Q, Ab, Il	0.63	IM	3.141 ± 0.063	546.5 ± 6.6	17.5	44.3 ± 1.0
			3	Sm, Ka, Q, Il, Ab	0.48	1M>2M ₁	2.374 ± 0.047	376.7 ± 6.5	36.9	40.4 ± 1.0
			4	Sm, Ka, Chl, Il, Q	0.58	IM	1.459 ± 0.029	199.6 ± 4.8	51.9	34.9 ± 0.9
16Ww	Granite	Dark reddish brown	1	Sm, Ab, Q, Il	0.63	IM	1.610 ± 0.032	287.1 ± 3.3	10.3	45.4 ± 1.0
			2	Sm, Il, Q	0.48	IM	2.462 ± 0.049	410.0 ± 5.1	18.4	42.4 ± 1.0
			3	Sm, Il, Q	0.68	IM	2.561 ± 0.051	412.2 ± 5.5	21.4	41.0 ± 1.1
			4	Sm, Il, Q	1.08	IM	2.648 ± 0.053	399.9 ± 5.4	23.8	38.5 ± 1.1

Grain-size fraction, 1: 5.00~2.00 μm , 2: 2.00~1.00 μm , 3: 1.00~0.35 μm , 4: 0.35~0.05 μm

Sm: smectite, Il: illite, Chl: chlorite, Ka: kaolinite, Q: quartz, Ab: albite

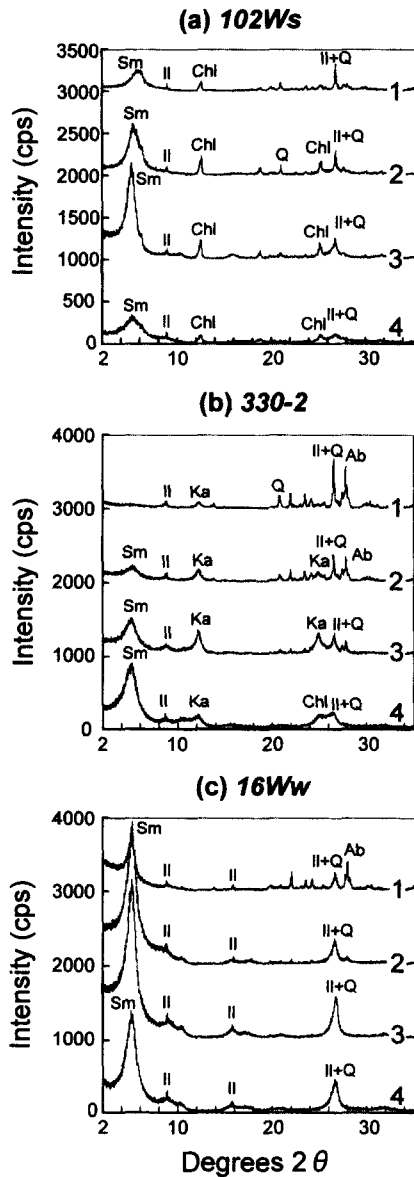


Fig. 3. X-ray powder diffractograms of the four grain-size fraction (1: 5.00-2.00 μm , 2: 2.00-1.00 μm , 3: 1.00-0.35 μm , and 4: 0.35-0.05 μm) from the gouge samples in the Ulsan Fault Zone. In each sample, amounts of albite and quartz decrease toward the finest grain-size fraction (4). Sm: smectite, Il: illite, Chl: chlorite, K: kaolinite, Q: quartz, Ab: albite.

5. 결 과

5.1. K-Ar연대

경주시 동부 및 남동부 지역 울산단층대에 수반하는

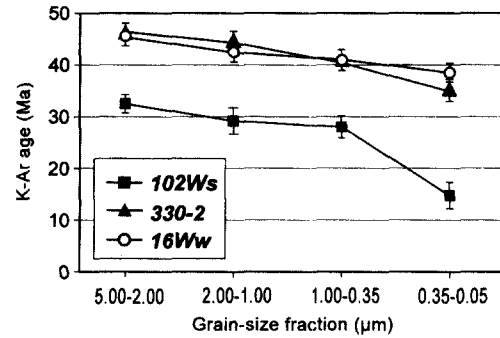


Fig. 4. Diagram of K-Ar age versus grain-size fraction for mica clay minerals from three gouge samples in the Ulsan Fault Zone. On each sample, K-Ar ages become systematically younger with decreasing grain size.

단층비지 세 시료를 입자 크기 별로 K-Ar 연대측정을 한 결과와 단층비지의 성질은 Table 1과 같다. 유천층군의 화산암 기원인 102Ws는 입자가 큰것에서 작은 것으로 갈수록 연령은 32.5 ± 0.9 Ma, 29.2 ± 1.0 Ma, 28.0 ± 1.1 Ma, 14.8 ± 1.3 Ma로 젊어진다. 불국사 화강암류 기원인 시료 330-2는 46.4 ± 1.0 Ma, 44.3 ± 1.0 Ma, 40.4 ± 1.1 Ma, 34.9 ± 1.1 Ma을 보이며, 역시 화강암 기원인 시료 16Ww는 45.4 ± 1.0 Ma, 42.4 ± 1.0 Ma, 41.0 ± 1.0 Ma, 38.5 ± 0.9 Ma의 범위를 보인다. 이 두 시료(16Ww, 330-2)는 각 입자 크기의 연대와 각 입자 크기별 연령의 변화 양상은 유사하다 (Fig. 4).

5.2. X선 회절분석

울산단층대 각 단층비지의 조성광물은 석영, 장석류이며 점토광물은 스멕타이트, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트로 구성된다(Fig. 3). 각 입자 크기의 점토광물과 그 외의 광물 변화는 102Ws의 경우 작은 입자 크기로 갈수록 스멕타이트는 증가하지만, 각 시료의 연령 값에 영향을 미칠 수 있는 K를 함유하는 장석류의 양은 현저하게 감소한다(Fig. 3). 모든 스멕타이트 광물의 경우(060)회절선의 값은 평균 $1.49\text{-}1.50\text{\AA}$ 로서 이팔면체형(dioctahedral type)을 가짐을 알 수 있다. 102Ws의 경우 운모점토광물의 양이 적은 반면 스멕타이트 양이 많아서 IC를 측정할 수 없는 입자 크기도 있지만, 16Ww와 330-2는 0.48에서 1.08을 나타내며, 다형은 1M과 2M1이 공존하는 입자 크기가 있지만 전체적으로 저온에서 안정한 1M이 우세하게 나타난다(Table 1).

6. 토의 및 결론

6.1. 운모점토광물의 생성환경

Kübler 지수에서는 변성도가 증가할수록 IC값이 낮아지며, 변성도가 낮은 영역으로부터 속성영역(diagenetic zone; $0.42 <$), 앙기 변성대(anchimetamorphic zone; $0.25-0.42$), 에피 변성대(epimetamorphic zone; $0.25 >$)로 구분하였다(Kübler, 1968). 이 구분은 변성광물상의 불석상, 포도석(prehnite)—펄라이트상, 펄라이트—양기석상 또는 녹색편암상에 각각 대응된다(Kisch, 1987). 최근 Burkhard and Goy-Eggenberger (2001)는 알프스(Morcles Nappe)에서 속성영역과 앙기 변성대의 IC 경계값이 0.33이며 최대 온도는 200°C 로 보고하였다. 일반적으로 측정값에는 측정 오차와 시료 조정의 오차를 비롯하여 쇄설성 백운모, 일라이트 존재도 등으로 오차가 생긴다고 알려져 있다(Frey, 1987; Robinson *et al.*, 1990). 그렇기 때문에 정밀한 토의를 하기에는 위험하지만, 전체적인 경향을 추정하는 데에는 유효하다(Robinson *et al.*, 1990).

채취한 단층비지중 102Ws의 경우 스�멕타이트의 생성이 현저해서 운모점토광물의 IC 측정은 모든 입자 크기별로는 불가능하지만, 측정 가능한 시료 16Ww는 전체적으로 0.48부터 1.08의 높은 IC를 보이며, 시료 330-2에서도 0.48부터 0.63인 것으로 보아 후기 속성영역(late diagenetic zone; $0.42-0.1$; Merriman and Frey, 1999)에 속한다. 또한 일라이트 다형은 1M과 2M₁이 공존하는 입자 크기도 있지만 전체적으로 저온에서 안정한 1M 형이 우세하게 나타나는 것으로 보아 열수변질을 수반한 단층활동 중에서 생성된 운모점토광물일 가능성이 크다. 또 후기 속성영역은 깊이가 약 4-7 km 이고 온도는 약 $100-200^{\circ}\text{C}$ 로 추정되는 것으로 보아(Merriman and Frey, 1999), 330-2와 16Ww는 깊이 수 km에서 저온의 조건에서 생성되었을 것으로 추정된다.

한편 스�멕타이트는 일라이트보다 낮은 온도, 압력조건에서 생성되는데 원래 초기의 스�멕타이트가 이팔면체 구조인 경우 온도가 증가할수록 스�멕타이트→random mixed layer I/S→R1 ordered I/S→R3 ordered I/S→일라이트(운모점토광물)로 전이한다(Inoue *et al.*, 1988; Eberl and Srodon, 1988). 그러나 이 연구지역의 단층비지 시료에서는 I/S는 관찰되지 않고 다량의 이팔면체 구조를 가지는 스�멕타이트와 소량의 운모점토광물로 구성된다. 스�멕타이트가 운모점토광물로 완전히 전이하는 온도, 즉 비팽장성 점토(운모점토광물)만 존재하려면 최소 175°C 이상이어야 한다(Henley and

Ellis, 1983). 따라서 낮은 온도조건에서 스�멕타이트가 운모점토광물로 전이 또는 새로운 운모점토광물 입자가 생성되었음을 시사한다.

6.2. 쇄설성 운모입자의 혼입과 입도 크기에 따른 연령의 영향 및 주요 단층활동시기

단층비지의 세립질 부분에 존재하는 운모점토광물에 원암의 쇄설물 또는 변성광물로서 백운모, 운모점토광물의 혼입이 있을 경우 연령은 실제 단층활동에 수반되는 열수변질작용의 연령보다 높게 얻어질 가능성이 있다(Takagi and Shibata, 1992). 즉 연령은 오래된 운모점토광물(쇄설물)과 새롭게 생성된(자생)운모점토광물이 단층대에 함께 포함되어 있기 때문에 그 방사연대는 양쪽 광물집단의 혼합물을 반영하는 연령을 나타낸다(van der Pluijm *et al.*, 2001). 그러나 만약 혼입이 있었다 해도 열수변질작용에 의해 광물의 재설정이 충분히 진행된다면 연령은 단층활동의 시기를 나타낼 수 있으나(Takagi and Shibata, 1992), 전 점토광물 특히 운모점토광물의 재설정 진행정도를 구하는 것은 어렵다. 한편 Tanaka *et al.*(1995)는 일본 아카이시 구조선에 대한 더 정확한 단층 활동시기를 얻을 수 있는 방법을 연구했다. 그 방법이란 횡축방향에 IC값을 종축방향에 연대값을 도시한 결과, IC가 높을수록 연대가 젊어지는 감쇠곡선을 그릴 수 있어, 이 곡선이 드러낸 연령이 단층 활동시기라고 해석하였다. 그러나 측정한 시료가 같은 노두에서 다른 비지 부분 또는 다른 노두에서 시료를 채취하였고, 그 시료들이 원래 다른 열수작용시기를 기록하고 있을 가능성이 있기 때문에 문제점으로 남아 있다.

일반적으로 열수유입은 단층활동에 의해 지하의 열수유체를 절단하게 되거나 이동하던 열수가 단층대를 만나게 될 때 일어나게 된다(장태우와 추창오, 1999). 단층작용이 일어나면 단층대 부근의 원암은 심하게 파쇄되어 큰 공극체적을 갖게 되므로 투수성이 현저하게 높아져 열수유체의 유입과 순환이 용이하게 되며, 유입된 열수는 분쇄된 원암과 반응하여 점토광물을 생성시킨다(Tanaka *et al.*, 1995). 이 때 일라이트의 폐쇄 온도인 $260 \pm 30^{\circ}\text{C}$ 또는 스�멕타이트에서 일라이트로 전이하는 온도인 175°C 의 이상의 온도가 유지되면 단층비지에 생성되었던 이전 운모점토광물은 재설정이 되고 동시에 새로운 자생의 운모점토광물이 생성되기 때문에 이 연대는 단층활동의 주요 연대라고 볼 수 있다. 그 주요 연대란 정확히 말하면 단층활동에 수반된 열수변질작용의 연대를 나타내며, 그 후 생성된 운모점

토광물을 교란시킬 수 있는 열수변질작용을 수반한 단층운동이 없었다면 그 연대를 기록하고 있으므로 최후의 주요 단층활동연대로 볼 수 있다. 그러나 이 연대는 어디까지나 열수변질작용의 단계임을 고려해야 할 것이다(장태우와 추창오, 1999). 암석이 분쇄되고 나서 열수변질작용으로 점토광물이 생성될 때까지의 시간은 매우 짧기 때문에 단층비지의 운모점토광물의 연대는 단층운동의 시기와 오차 범위 내에서 일치하는 것으로 생각된다(Takagi and Shibata, 1992).

이 연구 지역에서 채취한 단층비지 세 시료는 각각 같은 시료를 사용해서, 네 등급의 다양한 입자 크기를 사용해서 연대측정을 하였다. 운모점토광물의 입자 크기에 따른 연령변화의 결과는 Fig. 4와 같다. 3시료의 연령은 가장 큰 입자 크기(5-2 μm)부터 가장 작은 입자 크기(0.35-0.05 μm)로 갈수록 연령이 점점 젊어지는 결과가 얻어졌다(Fig. 4, Table 1). 같은 시료에서 가장 큰 입자 크기와 가장 작은 입자 크기의 연령차는 102Ws가 17 Ma이며 113%의 연령차를 나타내며, 330-2시료의 연령차는 11 Ma(31%), 그리고 16Ww시료의 연령차는 6 Ma(15%)라는 범위에서 연령이 젊게 나타난다(Fig. 4). 또 아토츠가와단층대에서 채취한 단층비지 시료도 같은 실험 방법으로 같은 결과가 얻어졌다(Iwamura *et al.*, 2001). 따라서 울산단층의 원암이 백악기 화강암류와 화산암류로 구성되는 것으로 보아 오래된 연령을 나타내고 있는 보다 큰 입자(연령: 46, 45, 32 Ma)일수록 쇄설성 운모 또는 운모점토광물의 혼입량이 많은 것으로 추정된다.

자생 운모점토광물의 평균 입자 크기는 쇄설성 운모·운모점토광물 보다 작아서, 쇄설성 운모입자의 혼입량은 시료의 입자 크기가 작으면 작을수록 적어지므로(Matsuda, 1998), 보다 순도가 높은 열수성 기원의 운모점토광물을 채취할 수 있었던 입자 크기, 즉 보다 작은 입자 크기에 자생 운모점토광물이 농집되었다고 생각된다. 따라서 작은 입자 크기의 시료일수록 원암내의 운모점토광물의 양이 점점 감소하여, 이 작은 입자 크기의 연령(39-35 Ma와 15 Ma)은 열수변질작용을 수반한 자생 운모점토광물의 생성시기에 근접할 수 있다. 결론적으로 울산단층대의 주요 단층활동에 수반된 열수변질작용 시기는 38-35 Ma와 15 Ma이며, 적어도 2 회의 단층활동시기가 있었으며, 그 후 열수변질작용을 수반하는 단층활동은 없었음을 시사한다. 일반적으로 열수변질작용에 의해 생성된 초미립 기질물질의 비지가 단층 파쇄대의 균열을 충전하면 열수 유체의 유입이 용이하지 못하여(투

수성 저하) 이후 단층활동은 적어도 기존의 비지대에 기록되지 않을 것이다. 울산단층대는 제4기(130±10 ka부터 460±50 ka; Lee and Schwarcz, 2001)에 들어와서 열수변질작용(일라이트 생성)을 수반하지 않은 제4기층이 기반암인 화강암류와 화산암류 위에 놓이는 역단층운동이 기존의 단층을 따라 재활동이 있었다.

사 사

이 연구는 일본 혼조 국제 장학재단(Honjo International Scholarship Foundation)의 지원으로 수행되었다. 본 연구에 귀중한 조언과 격려, 연대에 관한 문헌을 보내 주신 충남대학교 이현구 교수님께 감사드린다. 논문 편집과정에서 많은 수고를 아끼지 않으신 편집위원 회에도 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

김상중, 이현구 (1996) 경상분지 북부에 배태된 급속광상 및 화성암체의 K-Ar 연대측정을 통한 NW계 및 NE계 단층운동의 시기추정. 양산단층대 심포지움 및 학술담사(한국자원연구소 대한지질학회 공동주관), p. 88-91.
 김인수 (1992) 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.
 김종환, 강필중, 임정용 (1976) LA DSAT-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구. 지질학회지, 12권, p. 79-89.
 류충렬, 경제복, 김인수 (1997) 울산단층대 동측의 신기구조운동과 지형발달. 대한환경지질학회 제30차 학술발표회 및 제7회 한일광상성인 심포지움 발표논문 요약집, p. 14.
 손승환, 장태우 (2001) 경상분지 동남부 제4기 단층비지의 지구화학적 연구. 2001년도 춘계 공동학술발표회 논문집, p. 214-217.
 손호웅, 윤혜수, 오진용 (1999) 전기, 전자탐사에 의한 경주남부 (입실지역)의 울산단층 심부구조. 자원환경지질, 32권, p. 161-167.
 이석훈, 정창식, 손병국, 임창복 (2000) 울산단층대 신기 단층비지의 광물학적 특성 및 생성환경. 2000년도 한국암석학회, 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, p. 46-49.
 장기흥 (1975) 경상분지 상부 중생대의 층서. 지질학회지, 11권, p. 1-23.
 장태우, 추창오 (1998) 동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령. 한국지질공학회, 8권, p. 175-188.
 장태우, 추창오 (1999) 양산단층대의 단층작용 과정과 단층비지의 K-Ar 연령. 한국지구과학회지, 20권, p. 25-37.
 정창식, 장병욱, 김정민, 이석훈, 이회권, 장호완, 임창복 (1999) 울산단층대 입실, 원원사 단층의 단층비지에 대한 Rb-Sr 연대측정. 대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회 초록집, p. 68

- 정창식, 김정민, 이석훈, 정기영, 장호완, 최정현, 임창복, 장병욱 (2000) 울산단층대 폐동, 마동, 개곡단층과 왕산 단층비지에 대한 Rb-Sr, K-Ar 연대측정. *대한지질학회 2000년도 추계공동학술발표회 초록집*, p. 103.
- 최위찬, 김규봉, 홍승호, 이병주, 황재하, 박기화, 황상기, 최범영, 송교영, 진명식 (1995) *대한지질도 (1:1,000,000)*. 한국자원연구소.
- 최위찬, 이봉주, 최성자, 류충렬, 이영준, 조등룡 (1999) 양산단층계의 제4기 단층 특성. *대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회 초록집*, p. 25
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문렬 (1980) 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적연구. *자원개발연구소, KIGAM B-20*, p. 5-33.
- Baag, C.E. and Kang, D.J. (1994) Geophysical studies on major faults in the Gyongsang Basin: Aeromagnetic and radiometric data interpretation on the Ulsan fault. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 193-205.
- Burkhard, M. and Goy-Eggenberger, D. (2001) Near vertical iso-illite-crystallinity surfaces cross-cut the recumbent fold structure of the Morcles nappe, Swiss Alps. *Clay Min.* v. 36, p. 159-170.
- Chang, T.W. (2000) Crustal uplift due to Quaternary faulting at the northeastern block of the Ulsan fault in the southeastern Korean peninsula. In Okumura, K., Takada, K., and Goto, H. (ed.) *Active Fault Research for the New Millennium*. Hyogo, p. 497-501.
- Choi, P.-Y., Kwon, S.K., Hwang J.-H., Lee, S.R. and An, G.-O. (2001) Paleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: tectonic sequence and timing of block rotation. *Geosciences Jour.*, v. 5, 1-18.
- 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 Clay Min.*, v. 48, p. 204-212.
- Eberl, D.D. and Srodon, J. (1988) Ostwald ripening and interparticle-diffraction effects for illite crystals. *Amer. Min.* v. 73, p. 1335-1345.
- Frey, M. (1987) Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In Frey, M. (ed.) *Low temperature metamorphism*. Chapman and Hall, New York, p. 9-58.
- Henley, R.W. and Ellis, A.J. (1983) Geothermal systems ancient and modern : a geochemical review. *Earth Sci. Rev.*, v. 19, p. 1-50.
- Inoue, A., Velde, B., Meunier, A. and Touchard, G. (1988) Mechanism of illite transformation during smectite-to-illite conversion in a hydrothermal system. *Amer. Min.* v. 73, p. 1325-1334.
- Itaya, T., Nagao, K., Inoue, K., Honjou, Y., Okada, T. and Ogata, A. (1991) Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Min. Jour.*, v. 15, p. 203-221.
- Iwamura, A., Awaji, D., Takagi, H. Cho K.-H. Chang, T.W., Itaya, T. and Okada, T. (2001) K-Ar dating of fault gouges from major active faults from Japan and Korea. In Koh, H.J. and Choi, Y.S. (ed.) *Tectonic Evolution of East Asia*. Daejeon, p. 122-124.
- Kisch, H.J. (1987) Correlation between indicators of very low-grade metamorphism. In Frey, M. (ed.) *Low temperature metamorphism*. Chapman and Hall, New York, p. 227-300.
- Kralik, M., Klima, K. and Riedmüller, G. (1987) Dating fault gouges. *Nature*, v. 327, p. 315-317.
- Kübler, B. (1968) Evaluation quantitative du metamorphism par la cristallinité de l'illite. *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, v. 2, p. 385-397.
- Kübler, B. (1984) Les indicateurs des transformations physiques et chimiques la diagenèse, température et calorimétrie. In Lagache, M. (ed.) *Thermométrie et barométrie géologiques*. Soc. Fr. Min. Crystallogr., v. 2. 489-596.
- Lee, H.-K. and Schwarcz, H.P. (2001) ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. *Quaternary Sic. Rev.*, v. 20, p. 999-1003.
- Lee, K. and Um, C.R. (1992) Geoelectric survey of the Ulsan fault: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin. *Jour. Geol. Soc. Kor.*, v. 28 p. 32-39.
- Lyons, J.B. and Snellenburg, J. (1971) Dating faults. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 82, p. 1749-1752.
- Matsuda, T., Koizumi, M., Sugiyama, Y. and Saka, Y. (1998) Influence of detrital mica grains on measurement of illite crystallinity. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 104, p. 718-721.
- Merriman, R.J. and Frey, M. (1999) Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In Frey, M. and Robinson, D. (ed.) *Low-grade metamorphism*. Blackwell Science, London, p. 61-107.
- Nagao, K., Nishido, H., Itaya, T. and Ogata, K. (1984) An age determination by K-Ar method. *Bull. Hiruzen Res. Inst.*, v. 9, p. 19-38.
- Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Kyung, J.-B. (2001) Trench excavation surveys across the Yangsan and Ulsan active fault systems in the southeastern part of Korean peninsula. *Transaction, Japanese Geomor. Union*, v. 22, p. 287-306.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y. and Kyung, J.-B., Jo, W.-R., Kim, S.-K., Oike, K. and Nkamura, T. (1998) Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan Fault System, southeast Korea. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 107, p. 644-658.
- Robinson, D., Warr, L.N. and Bevins, R.E. (1990) The Illite 'crystallinity' technique: a critical appraisal of its precision. *Jour. Metamor. Geol.*, v. 8, p. 333-344.
- Shibata, K. and Takagi, H. (1988) Isotopic ages of rocks and intrafault materials along the Median Tectonic Line—An example in the Bungui-toge area, Nagano Prefecture—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 94, p. 35-50.
- Steiger, R.H. and Jäyer, E. (1977) Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 36, p. 359-362.
- Takagi, H. and Shibata, K. (1992) K-Ar dating of fault gouge—examples along the Median Tectonic Line. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 40, p. 31-38.
- Takagi, H., Shibata, K. and Uchiumi, S. (1991) K-Ar ages of fault gouges and felsite dykes from the Median Tectonic Line in Chubu Region, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 97, p. 377-384.
- Takagi, H. (1999) Precise dating of fault activity and interpretation of faulting history. *Chikyu Monthly*, v. 21, p. 50-54.
- Tanaka, H. Uehara, N. and Itaya, T. (1995) Timing of the cataclastic deformation along the Akaiishi Tectonic Line, central Japan. *Contrib. Min. Petrol.*, v. 120, p.

- 150-158.
Togashi, Y. (1979) Polytypes and expandability of sericite from the Itaya kaolin clay deposit, northeast Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.*, v. 74, p. 100-113.
- van der Pluijm, B.A. Hall, C.M., Vrolijk, P.J., Pevear, D.R. and Covey, M.C. (2001) The dating of shallow faults in the Earth's crust. *Nature*, v. 412, p. 172-175.
-
- 2001년 10월 5일 원고접수, 2001년 12월 19일 게재승인.