

동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령 Formation Processes of Fault Gouges and their K-Ar Ages along the Dongnae Fault

장 태 우 (Tae Woo Chang)

경북대학교 지질학과

추 창 오 (Chang Oh Choo)

한국자원연구소

요약 / ABSTRACT

선형계곡을 따라 발달하는 동래 단층대의 단층비지를 조사 연구하였다. 이 단층대는 내적으로 대상구조를 가지며 다중 단층핵의 형태로 산출된다. 단층핵은 비지대와 파쇄대로 구분되며 단층대의 최외곽부인 손상대에 의해 둘러싸인다. 변형작용과 변질작용의 강도는 모암으로부터 손상대→파쇄대→비지대를 향해 증가한다. 비지대를 형성한 변형작용은 초기엔 취성변형작용의 파쇄작용(cataclasis)이 주도적이었고, 단층슬립의 최대의 국지화 지역인 파쇄물질의 고변형지역(비지대)에서는 연속적인 취성단열작용의 파쇄유동으로 나아갔을 것으로 생각된다. 단층비지대의 분쇄물질의 높은 공극 및 투수성은 지하로부터 열수유체의 유입을 가능케하여 활발한 열수 변질작용이 일어남에 따라 변형작용 기구는 취성과파괴로부터 유체도움 유동으로 일대변화를 겪게 되었다. 열수 유체에 의한 일라이트, 스�멕타이트 등의 점토광물 생성과 철광물 및 기타원소의 침전은 단층비지대에 높은 유압을 발생시켜 단열작용과 변질작용을 반복적으로 발생시킬 수 있다. 일라이트의 다형은 대부분 1Md형으로 구성된다. 암석이 분쇄되고 나서 변질작용으로 점토광물이 생성될 때까지의 시간은 매우 짧은 것으로 알려져 있다. K-Ar 연령 측정자료에 의할때 열수변질을 수반한 동래단층의 주요 단층활동 시기는 51.4~57.5Ma와 40.3~43.6Ma의 두 시기로 구분될 수 있으나 시·공간적 단층활동 형태를 구명하기 위해서는 더 많은 자료가 필요하다. 그리고 비지대 점토광물의 생성온도환경으로 판단할 때 고기운동의 열수변질이 신기운동에 비해 보다 고온에서 일어난 것으로 추정된다.

This paper describes the internal structures and K-Ar ages of fault gouges collected from the Dongnae fault zone. This fault zone is internally zoned and occurs in the multiple fault cores. A fault core consists of thin gouge and narrow cataclastic zones that are bounded by a much thicker damage zone. Intensity of deformation and alteration increases from damage zone through cataclastic zone to gouge zone. It is thought that cataclasis of brittle deformation was the dominant strain-accomodation

mechanism in the early stage of deformation to form the gouge zone and that crushed materials in the regions of maximum localization of fault slip subsequently moved by cataclastic flow. Deformation mechanism drastically changed from brittle processes to fluid-assisted flow along the gouge zone as the high porosity and permeability of pulverized materials during faulting facilitated the influx of the hydrothermal fluids. Subsequently, the fluids reacted with gouge materials to form clay minerals. Fracturing and alteration could have repeatedly taken place in the gouge zone by elevated fluid pressures generated from the reduction of pore volume due to the formation of clay minerals and precipitation of other materials. XRD analysis revealed that the most common clay minerals of the gouge zones are illite and smectite with minor zeolite and kaolinite. Most of illites are composed of 1Md polytype, indicating the products of hydrothermal alteration. The major activities of the Dongnae fault can be divided into two periods based upon K-Ar age data of the fault gouges : 51.4~57.5Ma and 40.3~43.6Ma. Judging from the environmental condition of clay mineral formation, it is inferred that the hydrothermal alteration of older period occurred at higher temperature than that of younger period.

서 언

일반적으로 노두크기 이상의 큰 단층들은 무수히 많은 평행하거나 서로 망상으로 연결되는 소단층들로 이루어지는 단층대로 산출되는데, 흔히 그 핵부에는 극단적인 미립자로 구성되고 육안으로는 반상쇄편을 식별하기 어려운 단층 비지대(gouge zone)를 포함한다.

단층 비지의 연구는 1980년대에 들어오면서 활발히 이루어져 비지의 생성과정 및 생성기구(Sibson, 1986; Chester et al., 1993), 비지의 역학적 성질 및 투수성(Morrow et al., 1984; Chester and Logan, 1986; Caine et al., 1996), 비지대에 발달하는 혼합 면 열구조(composite planar fabric)(Rutter et al., 1986; Chester and Logan, 1987; Takagi and Kobayashi, 1996) 등의 측면에서 연구가 이루어져 왔다.

단층의 활동성을 평가하는 기본적인 방법은 지질조사나 지형조사이지만 단층비지중의 점토 광물(주로 일라이트)을 이용하여 K-Ar법 및 Rb-Sr법으로 단층운동시기의 절대연대를 측정하는 연구가, 전자스핀 공명법(ESR법), 열 발광법(TL법), 피션 트랙법(FT법), C¹⁴법, U-Th법, 고지자기법, 유체포유물에 의한 방법등과 더불어 이들을 보충하는 수단으로서 활용되고 있다. 단층비지의 연대 측정은 Lyons and Snellenburg(1971)에 의해서 처음 시도되었는데 단층운동 동안 단층비지중의 열수변질의

산물인 자생 일라이트에 의해 단층의 최후기 활동 연대를 결정할 수 있음을 지적하였다. 그 후 Kralik et al.(1987, 1992)도 동 알프스와 중앙알프스에서 단층비지의 Rb-Sr, K-Ar 연령 측정으로 단층활동의 최근 시기를 추정하였다. 특히 일본에서는 소위 중앙구조선(MTL)에 따라 발달하는 단층비지의 세립부분에 대해 K-Ar 연령측정을 실시하여 MTL의 중요 활동시기를 추정하는 연구가 활발하다(Shibata and Tagaki, 1988; Tagaki et al., 1989; Tagaki et al., 1991; Tanaka et al., 1992; Tanaka et al., 1995). 이들의 연구에 의하면 일라이트는 세립이었다라도 신뢰성이 높은 연대가 얻어질 수 있다는 것이다. 그러니까 일라이트의 폐쇄온도는 260±30°로 볼 수 있어서 이 이상의 온도의 열적 사변을 겪지않는 한 그의 K-Ar 연령은 광물이 생성된 때의 연대를 나타내는 것으로 보여진다는 것이다. 단층의 마지막 운동의 시기를 결정하는데 사용되는 K-Ar 연령은 만년~십억년 이상의 넓은 시간 범위에 적용된다(Murphy et al., 1979).

본 연구는 동래 단층을 따라 발달하는 단층비지의 미구조, 광물학적 특성, K-Ar연대를 검토하고 단층비지의 생성과정과 단층활동의 시기를 고찰한다.

지 질

연구 지역은 경주시 외동읍에서 부산시 명도에

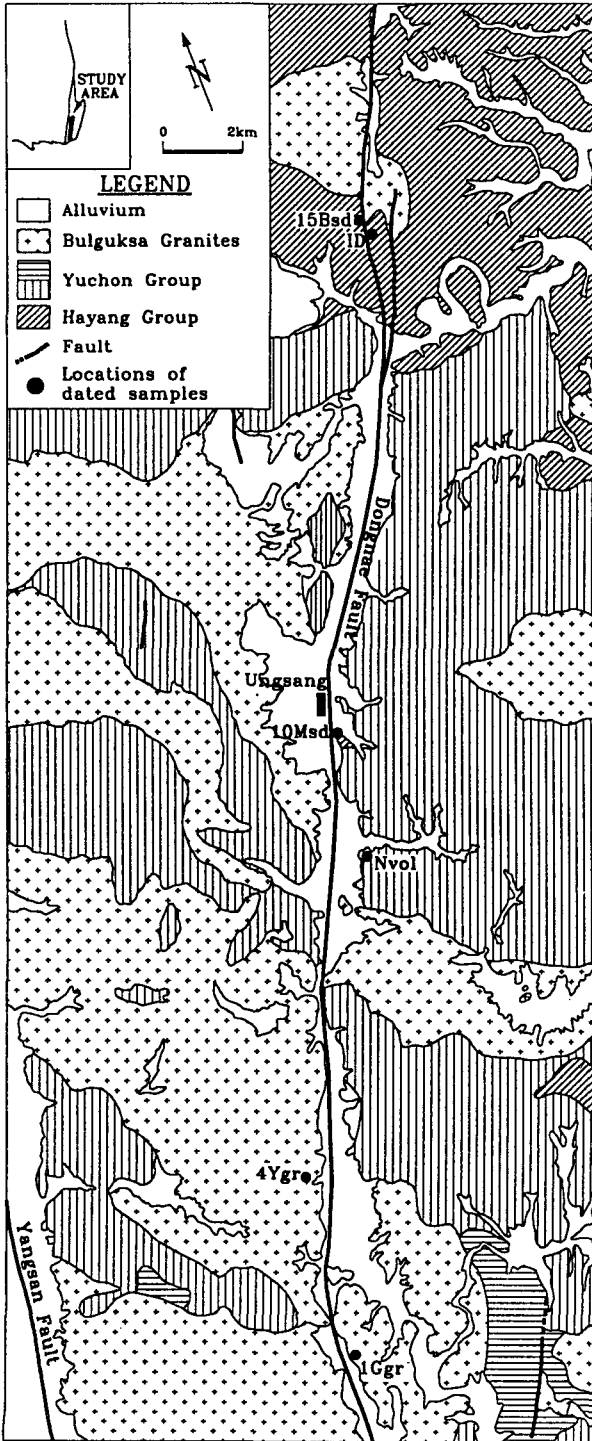


Fig. 1. Geological map around Ungsang-eup, Yangsan city along the Dongnae fault.

이르는 동래단층의 선형 계곡중 양산시 응상읍 일대가 그 중심이다. 이지역의 지질은 백악기 경상누층군의 하양층군과 유천층군 그리고 이들을 관입하는 불국사 화강암류로 구성된다(Fig. 1).

하양층군은 적색 세일 사암, 녹회색 및 암회색 사암 세일로 이루어지고 층리면이 잘 발달되어 있으며 북단부 지역에서는 불국사 화강암류와 접촉부에서 심히 열변질을 받아 호온펠스화 되어있다. 층리면은 대체로 동-서 주향에 10~20°남쪽으로 경사하나 단층 근처에서는 심하게 교란되어 있다.

유천층군은 하위의 안산암질암류와 상위의 유문암질암류로 구분되는데 안산암질암류는 암청록색 및 암회색을 띠는 안산암, 조면 안산암, 휘석 안산암, 라필리 응회암, 화산 각력암의 다양한 암상을 보이고 특히 동래단층 양편에서는 화강암류의 관입의 영향으로 열수 변질작용을 받아 백색내지 담황색을 띠며 황철석의 미립을 함유하거나 납석화된 변질대가 다수 발달한다. 유문암질암류는 연구지역 남쪽에서 구과상 유문암, 유문암질 내지 석영 안산암질 용결응회암, 유문반암의 암상을 가지며 분포한다.

불국사 화강암류는 화강섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 미문상 화강암의 암상으로 구분되며 하양층군과 유천층군을 관입하여 심한 열변질작용을 일으켰으며 그들의 많은 포회체를 포함한다. 특히 미문상 화강암은 화강암류중 가장 마지막 관입물로서 연구지역 남쪽에서 흑운모 화강암을 관입 분포하고 있다.

단층비지의 산출상태

본문에서 사용되는 단층비지라는 용어는 변질정도에 관련되는 점토광물의 함량을 토대로하여 기질에서 이의 함량이 30%이상을 차지하는 극미립의 단층암을 단층비지(fault gouge), 점토 광물의 함량이 기질의 30%이하인 단층암을 파쇄암(cataclastite)으로 정의한, 즉, 성인적인 의미를 강조한 Tanaka et al.(1995)의 기재상의 분류를 따른다.

동래 단층의 주단층대가 달리고 있는 선형계곡은 심한 풍화 침식작용의 영향으로 대부분 지표 피복 물질로 덮여 있기 때문에 단층비지의 분포 및 산출 상태를 파악하는 일은 매우 어렵다. 그러나

계곡을 따른 수로 공사, 건물 건축, 도로 건설시 절취로 인한 단층대의 노출로부터 지역적인 단층비지의 관찰 기제가 가능하다.

울산시 청량면 밤티고개

울산 고속도로 구 요금정수소에서 남쪽으로 죽울산~부산 7번 국도를 따라 약 6.5km 지점인 밤티고개 일대에 7번 국도 확장공사시의 절취사면에 단층비지가 노출되어있다. 단층비지의 원인은 불국사 화강암류중 흑운모 화강암 관입시 열변질 작용을 받은 하양층군의 호온펠스화 담회색 사암과 암회색 실트암이었을 것으로 인접한 손상대(damage zone: 원암 구조가 보존되는 부수단층 및 단열대 지역)의 모양으로부터 판단할 수 있다. 이 지점에서 비지대와 파쇄대(cataclastic zone: 원암의 구조가 완전히 파괴된 파쇄물질로 구성)를 포함하는 단층핵(fault core)은 약 40m이상의 두께를 나타낸다. 비지대와 파쇄대의 경계면은 N15°E의 주향에 85°SE를 나타내지만 미끄럼선(slicken line)의 관찰은 용이하지 않았다. 노두에서 비지대는 약 2m의 간격을 두고 평행하게 두 조가 인지되는데 (풍화물질 및 도로의 인공피복물 지역에서 더 많은 조가 발달되어 있을 것으로 추정됨) 그 폭은 3~6cm 정도이다. 이들은 갈색 및 담회색을 띠며 물을 함유하고 있을때 매우 부드러운 감촉을 갖게하며 그 좌우에는 0.5~1.5cm크기의 아각상 내지 아원상 반상쇄편을 포함하는 파쇄대 물질과 접한다.

울산시 웅촌

울산시 웅촌면 곡천리 마을 뒷편 7번 국도 원편의 작은 계곡에서 N5°E 방향으로 달리는 약 5m의 단층대 내에 비지가 발달되어 있다. 동래 단층의 부수단층으로 생각되는 이 단층은 N10°E주향에 85°NW로 경사하고 단층면상의 미끄럼선은 15, 016를 가리키며 우수향 운동감각을 보인다. 단층의 중앙에 비지대와 파쇄대로 이루어지는 약 1m 두께의 단층핵이 놓이고 그 좌우에 손상대가 대칭적으로 발달한다(Fig. 2). 담회색의 비지대는 1~3cm의 두께로 단층핵 내에서 서로 아평행하거나 망상으로 여러 조가 생성되어 있으며 부드러운 감촉과 소성을 갖는다. 이들은 황회색 각상 반상쇄편과 모래, 점토크기의 기질로 구성되는 파쇄대 물질과 선명하

거나 점이적인 경계를 이루며 에워 쌓인다. 비지의 원인은 주변의 흑운모 화강암에 의해 호온펠스로 변질된 회색, 녹회색, 암회색의 사암과 니암이다.

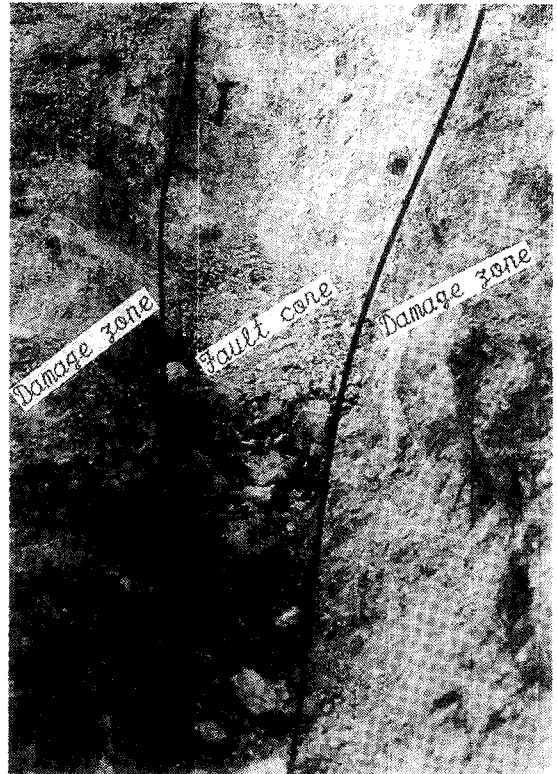


Fig. 2. A fault core bounded by damage zones on both sides.

양산시 웅상을 명곡리

양산시 웅상읍 명곡리 명곡교 아래 즉 회야강 하상에 오수관 배수로 공사로 굴착되어 노출된 동래단층의 단층핵 내에 단층비지가 배태되어 있다. 회색내지 암회색의 소성 비지는 최대 8cm까지의 두께를 가지고 수 m의 간격으로 서로 평행내지 아평행하게 여러 매가 담회색 내지 황회색 파쇄대에 협재된다. 파쇄대는 원암구조가 완전히 파괴된 상태로 나타나며 반상쇄편은 아각상 내지 아원상으로 크기는 3cm 정도가 풍부하다. 이들 비지는 유천 화산암층군 아래에 놓이는 하양층군의 담회색 녹회색 사암, 암회색 이암에서 유래된 것으로 생각된다. 비

지대 내에는 엽리가 약하게 발달하는데 N30°E 주향에 82°NW로 경사한다. 이 엽리는 비지대와 파쇄대의 경계면(N20°E, 84°NW)에 사각으로 놓이며 양자의 관계로 우수향 단층운동을 추정해 볼 수 있다.

양산시 웅상 논공단지

양산시 웅상읍 덕계리 외산 부근 절취사면에 단층비지가 노출되어 있다. 극미세 입자의 점토로 구성되고 점성을 갖는 이 비지대는 약 5cm의 두께로 연한 녹회백색을 띠며 약 20cm의 단층핵 내 중심에서 단일조로 단층벽에 평행하게 층상으로 발달한다. 단층면(단층핵과 손상대의 경계면)의 주향은 N70°W에 54°SW를 가리키나 미끄럼선의 관찰이 쉽지 않았다. 파쇄대는 적갈색을 띠며 풍부한 반상쇄편과 소량의 모래 및 점토 크기 입자의 기질로 구성되며 비지대 좌우에 대칭적으로 발달한다. 파쇄대의 반상쇄편은 아주 각상이며 최고 5cm 크기에 이른다. 반상쇄편의 이와 같은 모양은 비지의 원암(석영 안산암질 용결 응회암)이 주위의 화강섬록암 관입에 의하여 심히 열변질된 영향으로 생각된다.

양산시 동면

양산시 동면 여락리 부근 즉 7번 국도에서 양산 넘어가는 지방도를 따라 약 300m 지점에서 지방도 확장 공사중 사면 절취로 인해 모암 손상대에 아주 소규모의 단층비지가 노출되어 있다. 단층면은 N65°E의 주향에 85°SE로 경사하고 단층면상 미끄럼선은 20, 065를 가리키며 단층운동은 우수향 주향이동인 것으로 판단된다. 소성의 회백색 점토로 이루어지는 비지는 약 1cm의 두께이나 노두 단면에서 볼 때 한쪽은 파쇄대와 접촉하지만 다른 한쪽은 손상대와 바로 접촉하는 특징적인 양상이다. 30cm정도인 단층핵의 또 하나의 성분인 파쇄대는 갈회색을 띠고 2cm 이하의 비교적 둥근 형태의 반상쇄편과 점토로 구성되고 소성도가 비지에 비해 현저히 떨어진다. 단층비지의 원암은 불국사 화강암류중 최후기 관입물인 머문상 화강암이다.

실 험 방 법

앞에서 기술한 각 지점에서 채취한 단층비지를

실내에서 저 밀도 에폭시를 사용하여 고화시켜 박편을 제작하였다. 이때 대부분의 비지 시료가 육안으로 미약하게 관찰되는 편이기는 하지만 엽리를 발달시키고 있기 때문에 이 엽리에 수직되게 그리고 가능한 한 미끄럼선에 평행하게 시료를 절단하여 제작하였다. 현미경 관찰을 통해 단층비지대의 변형작용의 과정과 이의 변질작용에 대한 관계를 구명하는데 주력하였다.

단층비지 세립부분(<2 μ m)에 대해 X선 회절분석을 실시하고 이의 구성광물 특히 점토광물의 특징을 검토하였다. 세립부분은 시료를 증류수와 함께 비이커에 넣고 초음파세척기를 사용하여 충분히 분산시킨 후 메스실린더에 넣어 상온에서 24시간 중력 침전시켜 회수하였고, 그 후 침전물의 최상층으로부터 10cm이상인 수위의 부유물만 채취하여 원심분리기로 2 μ m이하의 점토광물을 분리하였다. 분리된 점토광물의 무정방위(random orientation) 시료를 사용하여 광물감정과 일라이트 다형(polytype)을 분석하였으며, 정방위(preferred orientation) 시료를 제작하여 저면간격(d-spacing) 및 일라이트 결정도지수(IC)를 구하였다.

위의 단층비지 점토광물 연구를 위하여 분리한 2 μ m이하의 세립부분을 각 시료당 2g이상을 채취하여 미국의 Krueger Enterprises사에 의뢰하여 K-Ar 연령 측정을 실시하였다. 이때 2 μ m 이하로 분리한 점토 시료를 XRD로 분석, 감정한 후 일라이트가 포함되어 있는 시료만을 선택하여 의뢰하였다.

단층비지의 미구조

퇴적암비지(10Msd, 15Bsd)

밭티고개(15Bsd)와 명곡리(10Msd) 노두에서 채취된 퇴적암 기원의 단층비지를 박편을 제작하여 현미경 관찰을 하였다. 반상쇄편은 여러가지 크기를 가지며 아각상 내지 아원형이나(Fig. 3) 직경이 0.1mm 이하인 반상쇄편중에는 아주 둥근 형태의 입자들이 풍부하다. 세장하는 반상쇄편들은 대개 기질의 점토 엽리(clay foliation)에 평행 혹은 아평행하게 배열한다. 반상쇄편 주변은 불투명광물로 흔히 에워싸이는데(Fig. 3b) 이는 10Msd 박편에서 더욱 흔하다. 반상쇄편의 원래의 성분은 심한 변질작용의 영향으로 식별하기가 매우 어렵지만, 심히 변질된 퇴적암편과

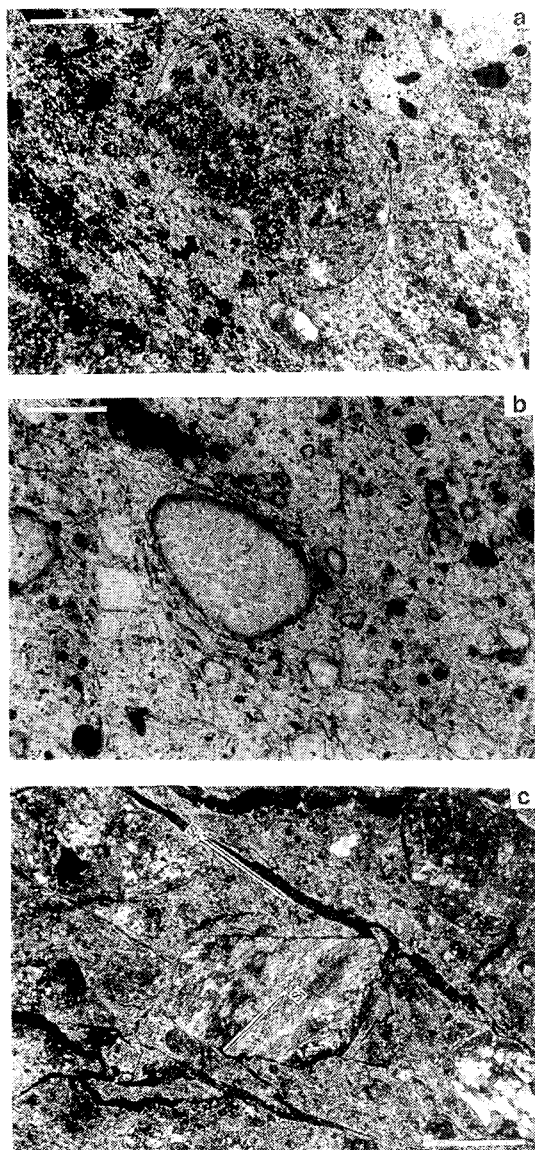


Fig. 3. Photomicrographs of the fault gouge derived from sedimentary rocks of the Hayang Group. (a) Well-developed clay foliation in the matrix of the gouge, defined by parallel alignment of clay flakes and distinguished by uniform extinction. A porphyroblast enclosed by clay minerals in central part shows a weak pressure shadow at the boundaries of low normal stress. Scale bar is 1mm. (b) Subrounded to

rounded porphyroclasts of which boundaries are commonly concentrated with opaque minerals, indicating the fluid dissolution and grain size reduction. Scale bar is 0.2mm. Plane polarized light. (c) Interrelationship between internal clay foliation(Si) in porphyroblast and external clay foliation(Se) in matrix. The Si is discontinuous with Se. Scale bar is 1mm.

소광의 장석편, 석영편 이외에 15Bsd 박편에서는 특징적으로 내부엽리(internal foliation : Si)를 잘 발달시키는 옛비지편을 많이 포함한다. 옛비지 반상쇄편내의 Si도 점토엽리로서 외부의 기질에 발달하는 점토엽리(외부엽리(external foliation) : Se)와는 선명하게 불연속 관계를 보이는 경우가 가끔 관찰된다(Fig. 3c). 인접한 옛비지 반상쇄편내의 내부엽리들은 일반적으로 그 배향이 서로 평행하지 않다. 특히 옛비지 반상쇄편과 기질간의 경계가 매우 점이적일 경우 옛비지 반상쇄편은 Si의 Se에 대한 배향의 불일치로 인지된다. 이때의 점이적인 관계는 후기 점토 변질작용의 강도를 반영하는 것 같다. 10Msd 박편에서는 황철석이 전 박편을 통해 기질에 산재한다.

기질은 거의 대부분 점토 광물로 구성된다. 점토 입자들은 서로 평행하게 정렬함으로써 점토엽리를 강하게 발달시키는데(Fig. 3a), 이때 엽리는 점토입자들이 넓은 범위에서 균일하게 소광을 함으로써 잘 인지된다. 그러나 기질의 점토는 반상쇄편 연변에서는 얇은 폭이기는 하지만 반상쇄편 경계에 평행하게 정렬한다. 반상쇄편 중 작고 세장 형태의 것들은 점토엽리에 평행하게 놓여 엽리 발달을 강화시켜 준다.

화산암 비지(Nvol)

모든 반상쇄편이 거의 동일성분의 미세 점토로 이루어진다(Fig. 4a와 4b). 다양한 크기를 보여주는 반상쇄편들은 곳에 따라 즉 배향하는 기질 점토가 많지 않은 곳에서는 아각상 내지 아원상이나 기질 점토가 많은 곳에서는 아원상 내지 렌즈형을 갖는다. 반상쇄편 내의 약하게 발달하는 점토엽리(Si)는

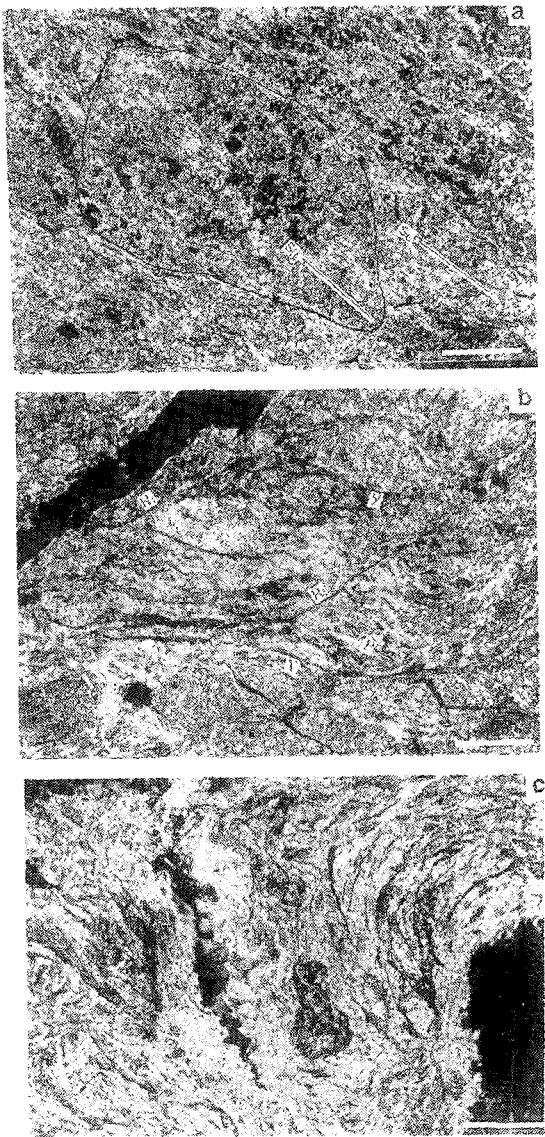


Fig. 4. Photomicrographs of fault gouge of acid volcanic rock. Scale bar is 0.2mm. (a) Internal foliation(Si) in a porphyroblast is continuous with external foliation(Se) in the matrix. (b) Anastomosing network texture of composite planar fabrics formed from the intersections of R1 with Y shears. (c) Chaotic folding due to local disturbance in clay-rich matrix after the formation of composite planar fabrics.

기질의 점토엽리(Se)에 평행하게 발달하기도 하고 (Fig. 4a) 이에 사각으로 교차하기도 한다. 반상쇄편 중에는 Si가 동일 쇄정 내에서 Se와 평행한 것과 평행하지 않은 두 조로 존재하기도 한다. 박편 도처에 갈색의 갈철석의 덩어리가 침전되어 있다.

기질은 대부분 점토와 불투명 광물로 변질되어 있다. 점토엽리는 반상쇄편내에도 약하게 발달하지만 기질에서 훨씬 강하게 발달한다. 렌즈형 반상쇄편도 이 엽리에 평행하게 정렬되어 있다. 곳에 따라 연속엽리인 점토엽리 이외에 불연속 엽리(간격엽리)로써 R1 전단과 Y 전단이 발달한다. 이들은 매우 좁고 긴 고변형 집적대로 점토엽리의 재배향과 더불어 분리성의 면으로 나타난다. R1 전단과 Y 전단은 서로 교차하며 망상 조직을 발달시킨다 (Fig.4b). 곳에 따라 P 엽리(점토엽리), R1 전단, Y 전단의 조직들은 점토가 비교적 많은 부분에서 혼돈스럽게 습곡됨으로서 비지대에서 또 다른 연성 변형작용의 일면을 보여준다(Fig. 4c).

화강암 비지

반상쇄편은 주로 미문상조직의 석영 장석 다광물편과 장석 단광물편으로 이루어지고 다양한 크기의 아원상 내지 아각상 형태를 가진다. 장석 반상쇄편들은 부분적으로 혹은 완전히 점토광물로 변질되며 장석 반상쇄편내의 점토들은 배향상을 거의 보여주지 않는다(Fig. 5a와 5b). 아마도 이들은 기질 변질에 이어 반상쇄편내로 옮겨온 변질작용으로 생성된 것 같다. 한편 반상쇄편들은 입자 통과 단열과 입자내 단열을 풍부히 발달시킨다(Fig. 5c). 이들은 기질로 연장해나가지 않음으로써 기질 변질 이전 발달을 지시하고 그 틀은 변질광물인 점토로 충전된다.

기질은 대부분 점토광물이고 석영을 소량 포함하며 점토광물의 선택배향으로 점토엽리를 발달시킨다. 반상쇄편이 많은 곳에서 점토엽리는 간격벽개의 형태를 나타낸다. 점토광물은 반상쇄편의 경계면 지역에서는 이에 평행하게 정렬하는 경향을 강하게 나타냄으로서, 반상쇄편의 점토광물로의 치환이 상당히 진행된 상태에서 보면 전술한 지속성 있는 점토엽리와 더불어 2조 이상의 엽리가 존재하는 것같은 인상을 주기도 한다(Fig. 5a).

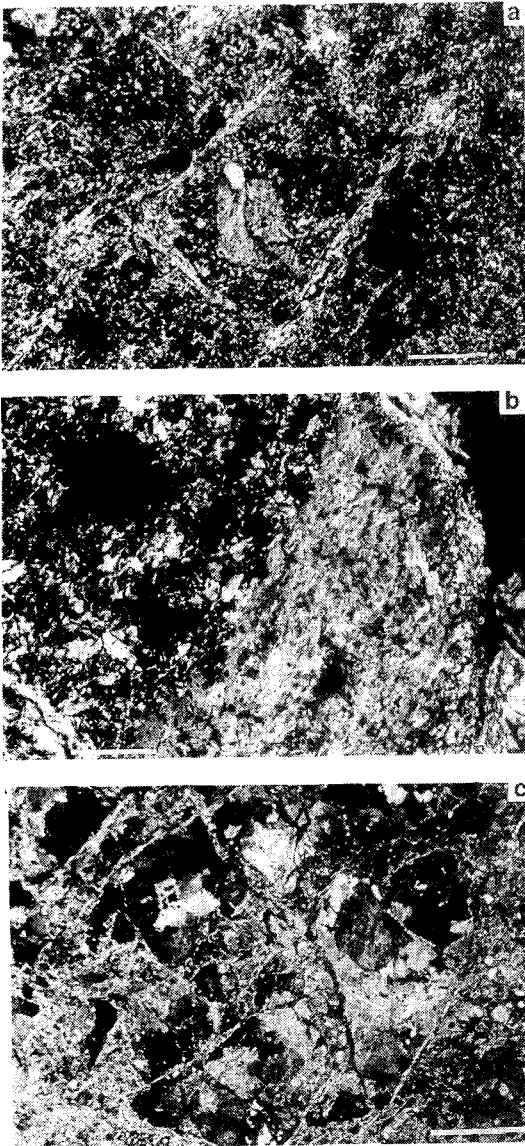


Fig. 5. Photomicrographs of the fault gouge of a micrographic granite of the Bulguksa Granites. (a) The porphyroclasts are partly to completely altered to clay minerals of which original margins are often recognized by thin rectangular enclosure of earlier-formed clay minerals. Scale bar is 0.2mm. (b) Replacement of feldspar by clay minerals. Scale bar is 0.05mm. (c)

Fracturing of pophyroclasts. Transgranular fractures do not extend to matrix, which are filled with clay minerals produced by hydrothermal alteration. Scale bar is 1mm.

단층비지의 변질광물과 그 성질

본 연구를 위하여 채취한 단층비지의 X선 회절 분석 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 대부분의 점토광물들은 일라이트와 스멕타이트로 구성되며 소량의 제올라이트와 카올리나이트가 수반된다. 일라이트는 같은 하양층군 퇴적암 기원이면서도 15Bsd 시료에 비해서 10Msd에서 함량이 매우 높다. 그러나 본 연구대상 전지역에서는 혼합층(mixed-layer) 광물은 거의 포함되지 않는다.

일라이트의 결정도는 일반적으로 생성 조건에 따라서 달라지기 때문에 변성암, 퇴적암 또는 열수 변질대의 생성환경의 해석에 널리 이용되고 있다. 본 연구 지역의 일라이트의 Kübler지수는 0.38에서 0.74범위의 값을 보여주는데, Nvol 시료의 경우의 지수는 0.74로서 이 지역 단층비지 가운데 포함된 일라이트 중에서 결정도가 가장 낮다.

본 연구에서 일라이트의 다형은 Velde와 Hower (1963), Maxwell과 Hower(1967), Tetttenhorst와 Corbato(1993) 등의 방법을 참고로 구별하였다. XRD분석 결과에 따르면 단층비지의 모든 일라이트의 경우 2.80Å의 회절선이 존재하지 않으며, 2.58Å이하의 회절 피크가 넓게 퍼지며 모호해지는 것으로 보아 대부분 1Md형으로 구성되는 것을 알 수 있다.

K-Ar 연령 측정

K-Ar 연령측정 결과는 표 1과 같다. 표 1에서 볼 때 단층비지의 연대는 40.3~57.5Ma의 비교적 넓은 범위에 걸쳐고 있다. 그 중 K₂O의 함량, 일라이트의 결정도 지수, 주 구성 광물등이 서로 비슷한 불국사 화강암류 기원의 두 시료는 각각 51.4Ma와 54.9Ma로 유사한 연대를 기록하고 있다. 그러나 하양층군 퇴적암 기원의 두 비지는 K₂O의

동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령

함량, 주 구성 광물의 종류도 다르고 연대도 40.3Ma와 57.5Ma로 크게 차이를 보이고 있다. K₂O의 함량이 높은 유천층군 기원의 비지는 43.6Ma를

나타내고 있다. 또 15Bsd 채취지점에 가깝고 소단층으로 절단되고 있는 안산암질 암맥은 전암시료의 나이가 45.6Ma를 보여주고 있다.

Table. 1 X-ray diffraction data of fault gouges and their K-Ar ages.

| Sample No. | Host rock | Color | Mineral assemblage | IC | d (Å) | Illite polytype | K ₂ O(%) | Ar ⁴⁰ /Ar ³⁹ tot | Ar ⁴⁰ (ppm) | Age(Ma) |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------|------|-------|-----------------|---------------------|--|------------------------|------------|
| 10Msd | Hayang Group | gray | Il > Q > Pr | 0.48 | 10.09 | 1Md > 95% | 6.820 | 0.758 | 0.02762 | 57.5 ± 1.4 |
| 15Bsd | Hayang Group | yellowish brown | Sm > Ze > Q, Il | 0.38 | 10.02 | 1Md > 95% | 0.903 | 0.195 | 0.002550 | 40.3 ± 1.4 |
| 1Ggr | Bulguksa Granites | dark brown | Sm > Q > Ze > Il | 0.51 | 10.2 | 1Md > 95% | 1.664 | 0.485 | 0.006008 | 51.4 ± 1.3 |
| 4Ygr | Bulguksa Granites | whitish gray | Sm > Il | 0.51 | 10.13 | 1Md > 95% | 1.424 | 0.453 | 0.005498 | 54.9 ± 1.4 |
| Nvol | Yuchon Group | light gray | Q > Il, Ka | 0.74 | 10.0 | 1Md > 95% | 5.646 | 0.803 | 0.01727 | 43.6 ± 1.1 |
| ID | Andesitic dike | deep greenish gray | Pl, Py, Ch | | | | 0.985 | 0.334 | 0.003153 | 45.6 ± 1.5 |

Note : Il:illite, Sm:smectite, Ka:kaolinite, Q:quartz, Ze:zeolite, Pr:pyrite, Pl:plagioclase, Py:pyroxene, Ch:chlorite

토 의

단층대의 대상구조

일반적으로 단층대는 내부적으로 대상구조를 갖는 것으로 알려져 있는데 가장 중심에 층상의 비지대(gouge zone), 그 다음 이를 에워싸는 좁은 파쇄대(cataclastic zone), 최 외각부에 보다 두꺼운 손

상대(damage zone)의 순서로 이루어 질 수 있다 (Chester et al., 1993). 여기서 비지대와 파쇄대를 묶어 단층핵(fault core)이라 불리워 진다. 동래단층을 따른 단층비지 조사에서 얻어진 단층대의 산출 상태에 관한 자료와 기존 문헌(Wallace and Morris, 1986 ; Caine et al., 1996)을 참고로 할 때 단층대 내에서 비지대의 위치 및 형태에 따라 단층핵을 대칭 단층핵, 비대칭 단층핵, 망상 단층핵, 다

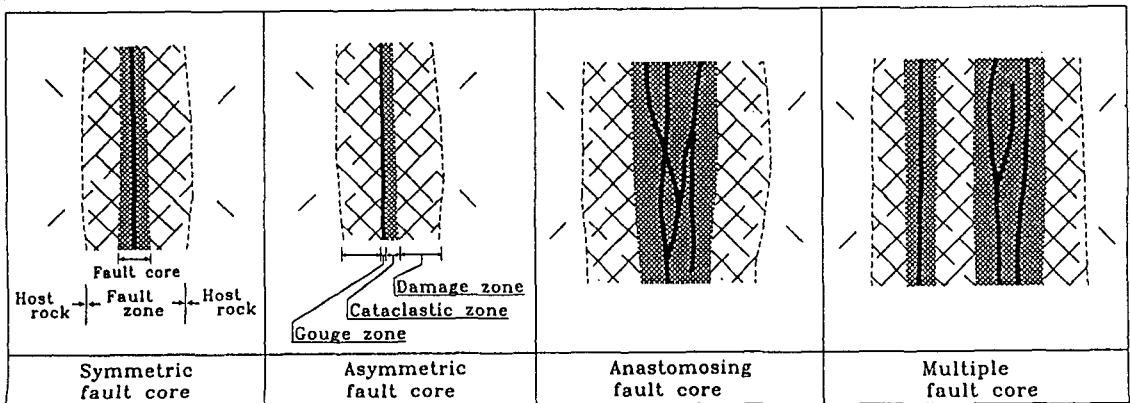


Fig. 6. Schematic sections showing different types of fault cores depending on positions and shapes of gouge within fault zone. The diagram is not to scale.

중 단층핵의 4가지 유형으로 구분할 수 있을 것 같다(Fig. 6). 여기서 단층핵은 육안으로 반상쇄편을 관찰하기가 어려우며 극미립자로 구성되는 단층슬립의 최대의 국지화 지역인 비지대와 원암의 구조를 찾아보기 어려울 정도로 완전히 파괴된 지역인 파쇄대를 포함한다. 손상대는 부수단층 및 단열이 많이 발달되나 단층의 전체 슬립성분은 미약한 지역을 나타낸다. 이들간의 경계 설정은 단층대의 바깥을 향해 즉 비지대와 파쇄대, 파쇄대와 손상대, 손상대와 모암사이에서, 사람에 따라 관찰의 방법 및 규모에 따라 가변성이 있을 수 있다. 단층대내에서 상술한 단층핵 유형들의 산출은 단층대 폭의 규모에 의존하여 소규모에서는 대칭 및 비대칭 단일 단층핵이, 곳에 따라 다르긴 하지만 단층대의 폭이 100m 이상에 달하는 동래단층 및 양산 단층과 같은 규모가 큰 단층에서는 다중 단층핵의 발달을 기대할 수 있을 것이다. 한편 부수단층 및 단열의 밀도와 파쇄물질의 입자크기 감소는 단층대의 안쪽을 향해 점점 증가할 것이다. 이와 더불어 단층대의 투수성은 그 외곽부에서 안쪽을 향해 증가하지만 단층핵에서는 급격히 감소한다(Chester and Logan, 1986). 그렇지만 단층핵 내의 투수성은 중심에서 바깥쪽을 향해 증가할 것이다.

단층비지의 변형작용 양식

단층비지의 미구조 연구로 볼때 비지대 형성 변형작용 기구는 초기에는 미균열의 생성, 확장 및 연결을 포함하는 미단열 작용(microfracturing), 단열과 입자 경계를 따른 마찰 미끄럼(frictional sliding), 입자편의 회전 및 굴음(rolling)등과 같은 취성 변형작용의 파쇄작용(cataclasis)기구가 주도적인 변형 수용 기구였을 것으로 생각할 수 있다. 그리고 나서 파쇄물질의 입자크기의 점진적인 감소와 파쇄물질의 양의 점진적인 증가가 있게 되는(향후 비지대가 정착될) 고변형지역(슬립의 최대 국지화 지역)에서 이 기구들은 취성 단열작용이 연속적으로 진행되는 파쇄 유동(cataclastic flow)으로 나아갔을 것으로 생각된다(참조 : Davis and Reynolds, 1996)

경하 관찰에서 단층비지 물질들은 유체도움 작용(fluid-assisted processes)의 증거들을 풍부히 보여주고 있다. 즉 극미립 분쇄물질의 점토광물로의 열수 변질작용, 그리고 반상쇄편의 등근형태, 반상

쇄편 연변 불용성 물질의 집적, 석영 연변의 만입 조직 등의 입자경계 용해작용 양상들이 그들이다. 그러니까 상기한 취성작용의 기구들이 단층작용 동안 단층핵의 단층비지대에 입자크기 감소와 이로 인한 입자 경계면적의 증가와 더불어 높은 공극 및 투수성을 발생시켰을 것으로 보여지고, 연이어 심부로부터 유입된 열수유체는 단층비지에 존재하는 극단적으로 미분된 물질을 만나 활발한 변질작용과 용해 및 침전을 일으켰을 것으로 생각할 수 있다. 그럼으로 여기서 변형작용 기구는 취성파괴로부터 유체도움 유동으로 일대 변화를 겪었음을 알 수 있다. 일반적으로 단층비지의 초미립 기질 물질은 매우 낮은 투수성을 갖는 물질이긴 하지만 단층작용이 일어나는 동안에는 단층대내 단층핵에 최대 투수성의 장소를 제공하였을 것이다(Chester et al., 1993 ; Caine et al., 1996). 그러나 이 투수성은 비지물질의 점토변질과 균열의 봉합으로 단층작용 후에는 주변암석 보다도 크게 낮아질 것으로 믿어진다.

곳에 따라 단층비지의 박편(15Bsd, Nvol)은 내부 엽리를 잘 발달시키는 옛비지 조각(비지 반상쇄편)을 보여 주는데 이들은 Si를 가지며 외부엽리인 Se와는 가끔 선명하게 불연속적이며 인접 반상쇄편내 Si끼리도 배향이 일정하거나 평행하지 않다. 이는 기질 비지의 생성이 적어도 2회 이상이었음을 이야기하는 것이다. 그럼으로 상술한 바와같은 열수작용 이후 새로운 파쇄작용으로 풍부한 기질 발생과 함께 옛비지의 반상쇄편화를 초래하였으며 이때 마찰 미끄럼과 더불어 반상쇄편의 강성회전 및 굴음의 결과로 해석할 수 있다. 그러니까 전술한 열수 유체에 의해 단층비지에서 점토광물이 풍부히 생성되고 철광물 및 기타 원소가 침전되면 결과적으로 기존 비지의 공극은 급격히 감소하고 상대적으로 단층비지내엔 유체 압력이 상승하여 이와같은 새로운 파쇄작용을 유발시켰을 것으로 생각할 수 있다. 단층비지의 각 박편에서 기질의 점토엽리를 포함하는 현재의 미구조들은 열수변질의 마지막 산물로 봄이 타당할 것이다. 이와같은 파쇄작용과 변질작용의 반복적 순환은 하나의 지구조적 사건의 일환으로 일어난 단층활동이 탈수와 더불어 마감될 때까지 계속될 것으로 여겨진다(Tanaka et al., 1995).

동래단층을 따라 채취한 모든 단층비지의 박편

은 점토입자의 평행 정렬로 인한 점토엽리를 잘 발달시키고 있다. 이의 발달기구는 단층작용 동안 즉 구조동시 변질작용 동안 기질에서 점토의 배향성장으로 설명할 수 있을 것이다. 그러나 반상쇄편이 보다 많은 박편에서는 상당량의 점토들이 반상쇄편의 경계에 평행하게 배열함에 따라 엽리의 발달 강도가 약한 편이나 반상쇄편이 드문 박편에서는 완벽한 선택배향을 보이는 것을 볼 때 변형증가에 따른 점토입자의 강성 회전도 엽리발달 정도를 강화시키는데 기여했을 것으로 판단된다. 그럼으로 단층 비지대에서 완벽한 엽리발달은 높은 전단 변형을 지시할 수 있다. 또 점토엽리의 발달은 앞의 토의를 고려할 때 단층작용동안 반복적으로 생성되고 파괴될 수 있을 것으로 생각된다.

단층비지의 변질과 생성온도환경

일라이트의 결정도 지수(Illite crystallinity ; IC)는 온도에 따른 일라이트 결정구조의 변화에 관한 정보를 제공하기 때문에 변성 정도의 상대적 변화를 지시하는데 널리 사용되어져 왔다. Kübler(1984)에 의한 IC는 속성영역(diagenetic zone)과 양키 변성대(anchi-metamorphic zone)와의 경계값을 0.42, 양키 변성대와 에피 변성대(epi-metamorphic zone)의 경계값을 0.25로 하고 있다. 본 연구에서 얻어진 단층비지 시료중의 일라이트는 15Bsd를 제외하고는 IC가 0.42 이상으로서 속성영역에 해당하는 낮은 결정도를 보여준다(표 1). 따라서 이들 단층비지 중의 일라이트는 다형이 1Md형으로 구성되는 점과 더불어 단층 분쇄물질로부터 열수 변질작용에 의해 새롭게 생성되었을 가능성이 크다. 전자현미경(SEM) 관찰에 의하면 앞에서 언급한 1Md형 일라이트 결정들은 비슷한 크기의 입자와 다각형의 외관을 갖는 반자형 내지 자형으로 산출되는데 이는 일라이트가 열수변질 동안 용해/침전을 통해 형성되었음을 의미한다(Yau et al., 1987 ; Small, et al., 1992 ; Choo, 1996). 또한 단층비지에서 자형의 등립질의 황철석이 일라이트와 수반되며, 산점상이나 맥상으로 산출되는 제올라이트, 그리고 제올라이트 맥의 가장자리에서 성장하는 자형의 K장석, 및 기질내에서 흔히 인회석이 관찰되는 것도 열수 기원에 의함을 지시한다.

일라이트의 화학조성과 온도의 상관관계(Cathe-

lineau, 1988)를 이용하여, 박편상에서 일라이트의 입자가 분명히 감식되는 10Msd와 4Ygr시료를 대상으로 일라이트의 생성온도를 계산해 보면(Choo and Chang, 1997), 10Msd의 경우 270°C를 보이고 4Ygr은 250°C를 보인다. 이는 고온인 10Msd시료가 일라이트로만 구성되며, 저온인 4Ygr의 경우 스멕타이트가 주이며 소량의 일라이트만 나타나는 특징과 일맥상통하는 것이다. 또한 Velde(1965)의 실험 자료를 통하여 생성 압력을 추정해 보면 본 단층점토들은 최대 2kbar이하의 범위에서 생성되었다.

한편 스멕타이트는 일라이트 보다 낮은 온도, 압력 조건에서 생성되는데 원래 초기의 스멕타이트 광물이 이괄면체형인 경우 온도가 증가할수록 스멕타이트→random-mixed layer I/S→R1 ordered I/S→일라이트로 전이한다(Inoue et al., 1988 ; Eberl and Srodon, 1988). 특히 본 단층점토 가운데 15Bsd, 1Ggr, 4Ygr에서 스멕타이트는 모두 이괄면체 구조를 가지며 일라이트를 수반하는데 이같은 광물조합의 특징은 위의 반응경로와 비교적 잘 일치하고 있다. 다만 본 연구지역의 단층점토에서는 혼합층광물이 거의 관찰되지 않는데, 이는 열수변질의 온도변화가 급속히 진행되어, 스멕타이트가 바로 일라이트로 전이된 때문으로 보인다. 스멕타이트가 완전히 일라이트로 전이하는 온도, 즉 비팽창성 점토(일라이트)만 존재하려면 최소 175°C 이상이어야 한다(Henley and Ellis, 1983). 따라서 스멕타이트와 소량의 일라이트, 또는 스멕타이트와 제올라이트가 나타나는 지역의 경우는 일라이트만 나타나는 지역보다는 더 낮은 온도범위일 것으로 생각된다. 이를 종합하면 일라이트만 산출하는 10Msd지점이 가장 온도가 높고, 스멕타이트와 일라이트가 함께 수반되는 1Ggr, 4Ygr지점이 그 다음이며, 스멕타이트와 제올라이트가 함께 나타나는 15Bsd시료와 결정도가 낮은 일라이트 및 카올이나이트로 구성되는 Nvol시료가 가장 온도가 낮은 환경인 것으로 판단된다. 본 연구지역의 단층비지 점토광물들은 전반적으로 광물들의 종류가 단순하고 비교적 등립질이며 조적이 치밀한 것으로 보아 이들은 일정한 물리 화학적 조건들이 어느 정도 일정하게 지속되는 환경하에서 비교적 짧은 기간 동안에 우세하게 생성되었음을 시사한다.

단층비지의 K-Ar 연령의 의미

단층운동에 의해 암석이 파쇄되고 분말화합은 모암의 구성광물이 세립화된 것일 뿐 바로 점토광물이 생성되는 것은 아니다. 그러나 파쇄 및 분말화는 파쇄물질 내 공극 체적을 증가시켜 지하로부터 열수 유체의 유입을 용이하게 하고 뒤이어 이 유체는 분쇄물질과 반응하여 점토광물을 생성하게 된다(Shibata, et al., 1989; Tanaka, et al., 1995). 본 연구에서 취급하는 단층비지의 세립부분도 이와같은 과정을 통해 생성된 점토광물로 생각할 수 있다. 암석이 분쇄되고 나서 변질작용으로 점토광물이 생성될 때까지의 시간은 매우 짧기 때문에 비지의 연대는 단층운동의 연대와 오차 범위에서 일치하는 것으로 생각된다(Takagi and Shibata, 1992). 그러나 단층비지 점토광물을 이용한 동위원소 연대는 어디까지나 열수변질작용의 단계에 관계됨을 고려해야 할 것이다. 나아가서 열수변질을 수반하지 않은 후기의 단층운동도 완전히 배제할 수는 없을 것으로 생각할 수 있다. 그러나 본 연구의 단층비지의 기질에 발달하는 점토염리의 교란 받지않은 미구조를 볼 때 후기 단층작용의 중북 영향은 거의 받지 않았을 것으로 생각된다.

또 단층비지 미구조 연구에서 동일 박편에서 2회이상의 단층운동이 인지됨에 따라 K-Ar연령 측정 시료중에는 2회에 걸쳐 생성된 일라이트가 섞여 있을 가능성이 존재하기 때문에 그 경우 K-Ar 연령은 최후기 단층활동시기보다도 얼마간이던간에 더 오래된 연령일 수가 있다. 그렇지만 단층비지 미구조 연구편에서 토의한 바와 같이 하나의 단층활동 사건에서도 단일작용은 반복해서 일어났을 것으로 판단됨으로 신규 일라이트간 생성시기의 간격은 크지 않을 것으로 생각한다. 나아가서 전기 일라이트는 후기 일라이트 생성 열변질작용으로 그 연대가 다시 시작(reset)되었을 가능성이 매우 높기 때문에 후기 단층작용의 고령화는 중요하게 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다.

K-Ar 연령 측정 자료에 의할 때 본역 단층비지 점토광물의 생성시기 즉 열수 변질을 수반한 주요 단층활동 시기는 10Msd, 1Ggr, 4Ygr의 51.4~57.5 Ma와 15Bsd와 Nvol의 40.3~43.6 Ma의 두 묶음으로 구분될 수 있다. 따라서 동래 단층은 본 연구지역내에서 최소한 두단계에 걸쳐 운동을 했던 것으로

해석된다. 그러나 이와같은 해석은 K-Ar연령 측정 시료수가 6개에 불과하기 때문에 앞으로 동래단층의 시·공간적 단층활동 상태를 구명하기 위해서는 더 많은 자료가 필요하다고 본다. 또 두 시기의 운동 사이에 즉 45.6Ma에 안산암질 암맥이 관입하였다. 이는 야의 노두 관찰에 의할 때 두 시기중 신기 단층운동을 지시하는 15Bsd 노두 근처의 이 안산암 노두와 Nvol 지점 안산암질 암맥은 단층작용으로 많이 단열되어 있지만 고기 단층운동을 지시하는 Ygr 노두 근처에서는 미문상화강암을 관입하는 10조 이상의 서로 평행한 안산암질 암맥들이 거의 단층작용을 받지 않고 있는 사실과 부합됨을 알 수 있다. 그리고 단층비지 점토광물의 생성 온도 환경과 결부할 때 고기운동의 열수변질이 신기운동의 것에 비하여 보다 고온에서 일어난 것으로 추정된다.

결 론

동래단층을 따른 단층비지의 산출은 단층선 계곡을 따라 지표 피복물질로 덮여 있기 때문에 자세한 내용을 파악하기 어렵지만 수로공사, 건물건축, 도로 건설시 절취로 인한 단층대의 노출로부터 관찰 기제가 가능하다. 단층대내에서 비지대의 위치 및 형태에 따라 단층핵을 대형 단층핵, 비대칭 단층핵, 망상 단층핵, 다중 단층핵의 4가지 형태로 구분할 수 있으며 동래단층은 도식단면에서 볼 때 다중 단층핵을 갖는 단층대로 산출된다.

단층비지를 형성시킨 변형작용은 파쇄작용과 파쇄유동으로 인한 파쇄물질의 입자크기의 감소와 그 양이 점진적으로 증가된 고변형지역(비지대)에서 높은 공극체적 및 투수성을 통해 유입된 열수 유체가 활발한 변질작용을 일으킴에 따라 변형작용 기구는 취성파괴로부터 유체도움 유동으로 큰 변화를 겪었다.

곳에따라 단층비지대는 점토광물이 풍부히 생성되고 철광물 및 기타원소가 침전되어 공극이 급격히 감소되고 유체압력이 상승하여 새로운 파쇄작용이 유발되었고 이는 반복적으로 일어날 수가 있다.

본 연구의 모든 단층비지의 박편은 점토입자의 평행정렬로 인한 점토염리를 잘 발달시키고 있다.

이는 단층작용동안 즉 구조동시 변질작용 동안 점토의 배향성장으로 설명할 수 있으며 나아가서 점진적인 변형증가에 따른 점토입자의 강성화전도 열리발달 정도를 강화시키는 데 기여했을 것이다.

X선 회절분석의 결과에 따르면 비지의 점토광물들은 대부분 일라이트와 스멕타이트로 구성되며 소량의 제올라이트와 카올리나이트가 수반된다. 일라이트의 다형은 대부분 1Md형으로 구성된다.

K-Ar 연령 측정 자료에 의한 때 열수변질을 수반한 동래단층의 주요 활동시기는 51.4~57.5 Ma와 40.3~43.6 Ma의 두 단계로 구별된다. 그리고 단층비지 점토광물의 생성온도환경과 결부할 때 고기온동의 열수변질이 신기운동의 것에 비하여 보다 고온에서 일어난 것으로 추정된다.

사 사

이 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(BSRI-96-5421)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Caine, J. S., Evans, J. P. and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
- Cathelineau, M., 1988, Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clay Miner.* 23, 471-485.
- Chester, F. H., Evans, J. P., and Biegel, R. L., 1993, Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault. *J. Geophys. Res.*, 98, 77, 1-786.
- Chester, F. M. and Logan, J. M., 1986., Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pageoph*, 124, 79-106.
- Chester, F. M. and Logan, J. M., 1987, Composite planar fabrics of gouge from the Punchbowl fault, California. *J. Struct. Geol.*, 9, 621-634.
- Choo, C. O., 1996, Mineralogy and genesis of Napseok (sericite, pyrophyllite, dickite) in the Kimhae area, Korea. Seoul National Univ. Ph. D. thesis. 190p.
- Choo, C. O. and Chang, T. W., 1997, Origin of clay minerals and K-Ar ages of fault gouges from the Dongrae Fault, southeastern Korea. *Clays and Clay Miner.* (in preparation).
- Davis, G. H. and Reynolds, S. J., 1996, Structural geology of rocks and regions. John Wiley & Sons, Inc. 776p.
- Eberl, D. D. and Srodon, J., 1988, Ostwald ripening and interparticle-diffraction effects for illite crystals. *Am. Miner.* 73, 1335-1345.
- Henley, R. W. and Ellis, A. J., 1983, Geothermal systems ancient and modern a geochemical review. *Earth. Sci. Rev.* 19, 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. *Am. Miner.* 73, 1325-1334.
- Kralik, M., Clauer, N., Holnsteiner, R., Huemer, H. and Kappel, F., 1992, Recurrent fault activity in the Grimsel test site (GTS, Switzerland) : revealed by Rb-Sr, K-Ar and tritium isotope techniques. *J. Geol. Soc. Lond.*, 149, 293-301.
- Kralik, M., Klima, K. and Riedmüller, G., 1987, Dating fault gouges. *Nature*, 327, 315-317.
- Kübler, B., 1984, Les indicateurs des transformations physiques et chimiques dans la diagenese, temperature et calorimetrie. In : Lagache M(ed) Thermometrie et barometrie geologiques, Soc FrMineral Crystallogr, 2. 489-596.
- Lyons, J. B and Snellenburg, J., 1971, Dating faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 1749-1752.
- Maxwell, D. T. and Hower, J., 1967, High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian Belt Series. *Am. Miner.* 52, 843-857.
- Morrow, C. A., Shi, L. Q. and Byerlee, J. D.,

- 1984, Permeability of fault gouge under confining pressure and shear stress. *J. Geophys. R.*, 89, 3193-3200.
- Murphy, P. J., Briedis, J. and Peck, J. H., 1979, Dating techniques in fault investigations. *Geol. Soc. Amer., Rev. Engin. Geol.*, 4, 153-168.
- Rutter, E. H., Maddock, R. H., Hall, S. H., 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pageoph*, 124, 3-29.
- Shibata, K. and Tagaki, 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*, 94, 35-50.
- Shibata, K., Nakajima, T., Sangawa, A., Uchiumi, S. and Aoyami, H., 1989, K-Ar ages of fault gouges from the Median Tectonic Line in Shikoku. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 40, 661-671.
- Sibson, R. H., 1986, Brecciation processes in fault zones: Inferences from earthquake rupturing. *Pageoph*, 124, 159-175.
- Small, J. S., Hamilton, D. L. and Habesch, S., 1992, Experimental simulation of clay precipitation within reservoir sandstones. 2: Mechanism of illite formation and controls on morphology. *Jour. Sed. Pet.* 62, 520-529.
- Tagaki, H., Shibata, K. and Uchimi, 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*, 97, 377-384.
- Tagaki, H. and Shibata, K., 1992, K-Ar dating of fault gouge-examples along the Median Tectonic Line. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 40, 31-38.
- Tagaki, H. and Kobayashi, K., 1996, Composite planar fabrics of fault gouges and mylonite - comparative petrofabrics. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 102, 170-179.
- Tagaki, H. Shibata, K., Sugiyama, Y, Uchiumi, S. and Matsumoto, A., 1989, Isotopic ages of rocks along the Median Tectonic Line in the Kayumi area, Mie Prefecture. *Jour. Min. Pet. Econ. Geol*, 84, 75-88.
- Tanaka, H., Saka, Y., Abe, T., Kohama, S., Itaya, T., 1992, Fault gouges and their K-Ar ages from the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 98, 39-48.
- Tanaka, H., Uehara, N. and Itaya, T., 1995, Timing of the cataclastic deformation along the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 150-158.
- Tettenhorst, R. T. and Corbato, C. E. 1993, Quantitative analysis of mixtures of 1M and 2M1 dioctahedral micas by X-ray diffraction. *Clays and Clay Miner.* 41, 45-55.
- Velde, B., 1965, Experimental determination of muscovite polymorph stabilities. *Am. Miner.* 50, 436-449.
- Velde, B. and Hower, J., 1963, Petrological significance of illite polymorphism in Paleozoic sedimentary rocks. *Am. Miner.* 48, 1239-1254.
- Wallace, R. E. and Morris, H. T., 1986, Characteristics of faults and shear zones in deep mines. *Pageoph*, 124, 107-125.
- Yau, Y. C., Peacor, D. R., Essene, E. J., 1987, Hydrothermal treatment of smectite, illite, and basalt to 460°C: comparison of natural with hydrothermally formed clay minerals. *Clays and Clay Miner.* 35, 241-250.

장 태 우

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701, 대구광역시 북구 신격동 1370
TEL : (053)950-5361
FAX : (053)950-5362
e-mail : twchang@kyungpook.ac.kr

추 창 오

한국자원연구소 환경지질연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
TEL : (042)868-3066
FAX : (042)861-9719