

단층비지대의 성장: 경주시 양북면 부근의 사례

장태우* · 장운득
경북대학교 지질학과

The Widening of Fault Gouge Zone: An Example from Yangbuk-myeon, Gyeongju city, Korea

Tae Woo Chang and Yun Deuk Jang

Department of Geology, Kyungpook National University

단층의 내부 구조가 잘 구분되는 하나의 단층핵이 경주시 양북면 용당리 부근 작은 계곡에 인접하여 노출되어 있다. 단층핵의 중앙에는 약 25 cm 두께의 단층비지대가 놓여 있으며 색깔에 의해 청회색 비지대와 녹황색 비지대로 구분된다. 현미경하에서 비지들은 옛 비지편, 석영, 장석, 철광물 등의 반상쇄편으로 구성되며 기질은 점토광물이 풍부하고 점토광물은 선택정렬하며 P엽리를 잘 발달시킨다. 청회색 비지와 녹황색 비지의 차이점은 녹황색 비지가 청회색 비지에 비해 점토광물이 훨씬 풍부하고, 반상쇄편의 수와 크기가 적으며, 철광물 또한 매우 풍부하고 철광물의 종류는 청회색 비지대에서 대부분 황철석인데 반해 주로 적철석으로 이루어진다. 이 적철석은 청회색 비지 형성 단층작용 시에 유입된 열수가 청회색 비지대에 황철석을 침전시킬 동안 녹황색 비지대에는 기존의 황철석을 변질시켜 적철석을 형성한 것으로 생각된다. 단층핵 내 청회색 비지대와 녹황색 비지대는 점진적인 단층대 발달 단계를 거쳐 형성된 것으로 생각된다. 첫째 단계에서는 이른 단층작용이 시작되고 이에 수반되어 손상대가 생성되었다. 두 번째 단계는 손상대에서 반복적인 단열작용으로 각력대가 형성되었다. 세 번째 단계에서는 입자 마모와 연마작용이 활발하게 일어나며 녹황색 비지대가 발달하였다. 네 번째 단계에서 변형작용은 단층핵의 중심에서 옛 비지대(녹황색 비지대)가 변형경화로 비활동적으로 남을 때 단층핵의 연변을 향하여 새로운 비지대인 청회색 비지대가 생성되어 녹황색 비지대에 인접하여 부가되었으며 이로 인해 단층핵 내 비지대는 더 큰 폭으로 성장하였다. 비지대 내에서 청회색 비지대 생성 후 변형작용은 반상쇄편의 내부 파쇄작용과 혼합면열구조의 발달로 비지대 내 큰 변형이 수용되었다.

주요어 : 단층핵, 비지대, 반상쇄편, P 엽리, 변형경화

A fault gouge zone which is about 25cm thick crops out along a small valley in Yangbuk-myeon, Gyeongju city. It is divided into greenish brown gouge and bluish gray gouge by color. Under the microscope, the gouges have a lot of porphyroclasts composed of old gouge fragments, quartz, feldspar and iron minerals. Clay minerals are abundant in matrix, defining strikingly P foliation by preferred orientation. Microstructural differences between bluish gray gouge and greenish brown gouge are as follows: greenish brown gouge compared to bluish gray gouge is (1) rich in clay minerals, (2) small in size and number of porphyroclasts, and (3) plentiful in iron minerals which are mostly hematites, while chiefly pyrites in bluish gray gouge. Hematites are considered to be altered from pyrites in the early-formed greenish brown gouge under the influence of hydrothermal fluids accompanied during the formation of bluish gray gouge that also precipitated pyrites. It is believed that the fault core including bluish gray gouge zone and greenish brown gouge zone was formed by progressive cataclastic flow. In the first stage the fault core initiates from damage zone of early faulting. In the second stage damage zone actively transforms into breccia zone by repeated fracturing. The third stage includes greenish brown (old) gouge formation in the center of the fault core mainly by particle grinding. In the third stage further deformation leads to the formation of new (bluish gray) gouge zone while old gouge zone undergoes strain hardening. Consequently, the whole gouge zone in the core widens.

Key words : fault core, gouge zone, porphyroclast, P foliation, strain hardening

*Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

서 론

우리는 지각에 발달하는 노두 규모보다 비교적 큰 단층들은 단일 단층의 형태로 발달하기보다는 작은 단층들과 파쇄물질로 구성되는 단층대로 산출되는 것을 흔히 볼 수 있다. 이렇게 성숙된 단층대는 두 개의 구조적 성분층을 갖는 것이 특징인데 단층대의 중앙에 단층핵(fault core)이 있고 이에 인접하여 손상대(damage zone)가 놓인다(Chester *et al.*, 1993; 장태우와 추창오, 1998). 단층핵은 다시 각력대(breccia zone)와 비지대(gouge zone)로 나누어질 수 있으며 비지대의 위치와 형태에 따라 대칭 단층핵, 비대칭 단층핵, 망상 단층핵, 다중 단층핵으로 구분할 수 있다 (장태우와 추창오, 1998). 단층핵은 최초 손상대에서 시작하여 계속적인 단열작용으로 단층핵으로 진화하기도 하고(Billi, *et al.*, 2003), 처음엔 불연속 미끄럼면 단열로 발달하여 점진적인 파쇄작용에 의해 바로 단층핵으로 나아가기도 한다(Gray *et al.*, 2005). 지각에서 단층대 변형작용은 다양한 형태를 취하고 단층작용의 조건과 역사를 지시할 수 있다(Aydin and Johnson, 1983; Means, 1984; Mitra, 1992, Billi *et al.*, 2003a; Storti *et al.*, 2003).

Means(1995)와 Mitra(1992)는 전단대 발달을 시간 개념을 도입하여 단열작용과 변형경화(strain hardening)를 통하여 시간이 지남에 따라 전단대 중심이 비활동적이 되고 연변을 향하여 전단대가 활동적이 되어 성장하는 I형, 변형작용이 변형연화(strain softening)와 더불어 시간이 지남에 따라 활동도가 연변에서 중심을 향해 활발하게 진행되는 II형, 입자 단열작용과 화학적 반응이 전단대에서 함께 활발한 III형으로 나눈 바 있다. 특히 Mitra(1992)는 이 세 유형을 단층이 운동하는 지각의 깊이(온도와 압력)에 의존하여 천처에서는 I형, 약간 깊은 곳에서는 III형, 더욱 깊은 연성변형 영역에서는 II형이 발달하는 것으로 간주하였다.

본 연구는 단층핵 내 색깔이 다른 청회색비지와 녹색비지를 채취하여 실내 연구에 의해 양 비지대의 생성 순서를 밝히고 비지대의 진화와 성장을 해석하고자 한다.

단층비지대의 산출상태

경주시 양북면 용당리 부근 작은 계곡의 농로 주변에 단층의 내부 구조가 잘 구분되는 하나의 단층대가 노출되어 있다(Fig. 1). 단층은 불국사화강암과 하양층군 퇴적암을 접경시키며 발달하고 단층면의 자세는 N70W,

73SW이고 단층면상 미끄럼선은 40/146을 가리키고 단층핵의 두께는 약 1 m 50 cm 정도인데 중앙에 비지대가 놓이고 양 측방에 각력대가 발달하는 대칭형 단층핵의 형태를 나타낸다. 단층핵 상부에는 하양층군 퇴적암에 단열이 풍부한 손상대가 놓이지만 하부에는 화강암 각력대 노두만 관찰 할 수있다. 상부 각력대는 두께가 약 25 cm이고 각력의 크기는 2~3 cm로 매우 작상이다. 하부 각력대는 상부보다 더 두꺼워 1 m 이상에 달하며 각력의 크기도 3~5 cm이고 작상이다. 중앙의 비지대는 색깔의 차이에 의해 두개의 층으로 나누어진다(Fig 2). 상위의 비지대는 청회색을 띠고 약 15 cm의 두께로 곳에 따라 팽축이 심한 편이다. 청회색 비지대 내에는 가끔 모암(화강암)의 잔류체가 타원체로 포함되어 있다. 하위의 녹색비지대는 약 10 cm의 두께로 발달하는데 이 비지대 내에는 점토광물의 선택배향으로 규정되는 P 엽

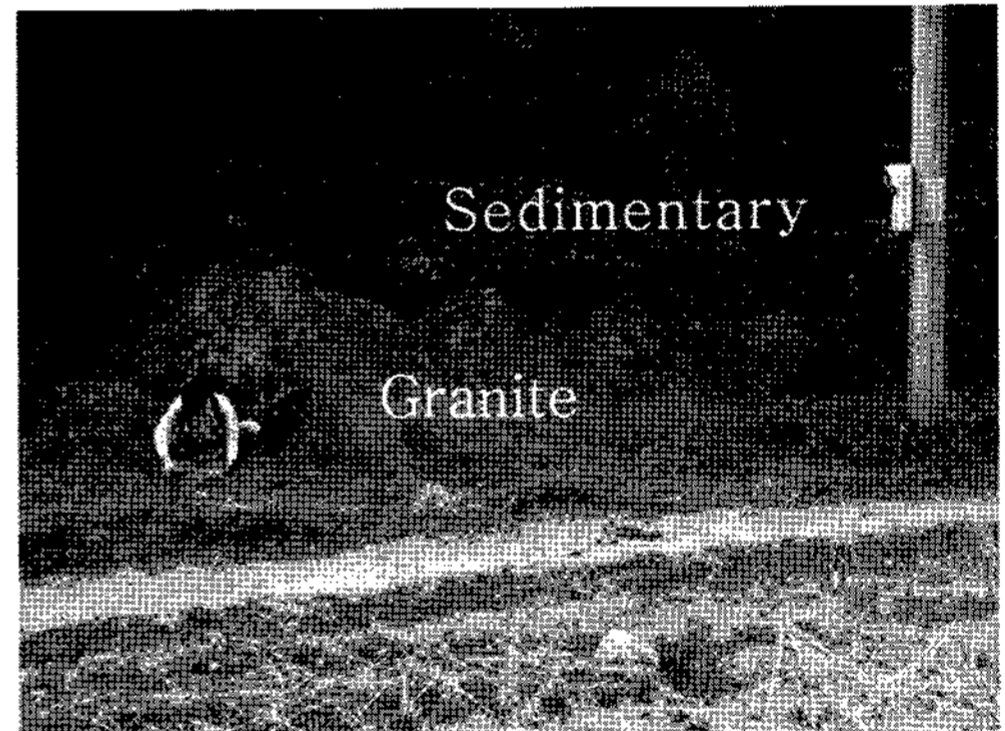


Fig. 1. Photograph of fault outcrop. A fault juxtaposing sedimentary rock and granite runs in horizontal (right-left) direction in the photograph. A gouge sample is taken from central part of the fault.

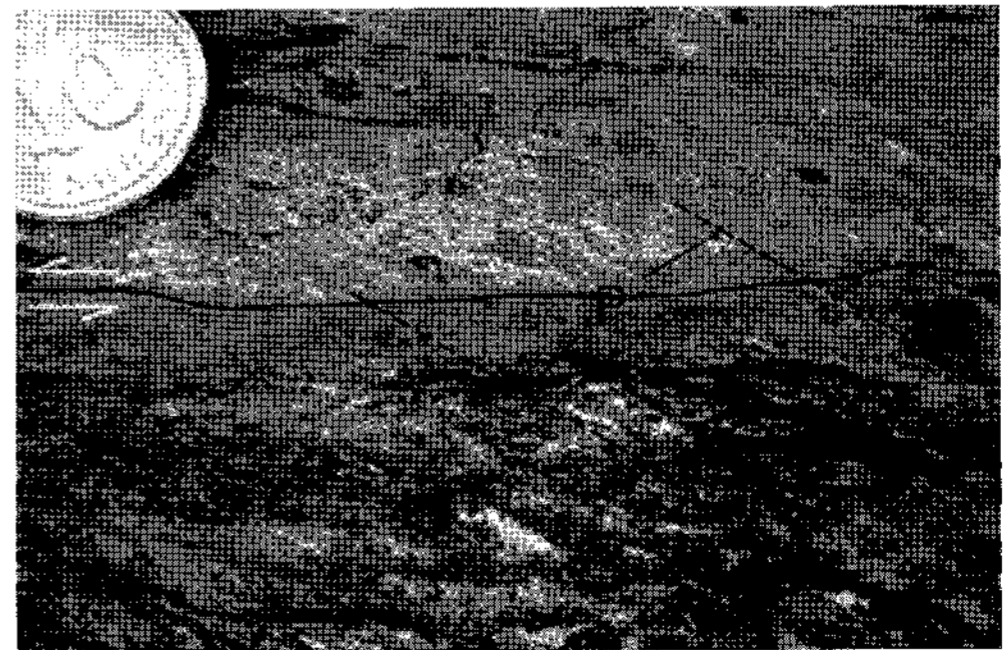


Fig. 2. Photograph of gouge hand specimen. A boundary between bluish gray (upper part) and greenish brown (lower part) gouges is clearly distinguished. P foliation is oblique to the boundary. Arrows represent sense of movement.

리가 잘 발달하며 단층면에 대한 P엽리의 각관계로 단층 운동 감각이 좌수 주향이동임을 나타낸다. 청회색 비지대에서 P엽리는 보다 미약하게 발달한다.

단층비지 미구조

아외에서 채취한 샘플을 건조기에 넣어 탈수시킨 후 저밀도 에폭시를 주입하여 고화 시켜 박편을 제작하였다. 이 때 박편은 미끄럼선에 평행하고 엽리에 수직으로 절단하여 제작하였다. 녹황색 비지대와 청회색 비지대로 경계가 명료하게 구분되어지는 비지대의 미구조를 양 비지대에서 각각 기술한다.

청회색 비지대

반상쇄편(porphyroclast)은 석영, 장석, 황철석, 옛비지편(old gouge fragment) 등으로 이루어진다(Fig. 3a). 석영은 원형 내지 아원형으로 구형도가 좋고, 대부분 파동소광을 하며 단일입자로 분포하지만 복합입자로도 존재하기도 하는데 복합입자는 수는 적지만 큰 것들이 많다. 각 복합입자는 재결정 새입자(new grain)와 아입자(subgrain)로 나타난다. 장석은 미세한 크기로 기질에 산재하며 석영에 비해 드물게 관찰되며 균운모화작용을 받아 칩칙하다. 황철석은 점토광물이 풍부한 기질에 반자형 결정으로 혹은 불규칙 덩어리로 흩어져 있다. 편광현미경하에서 검은 색의 하나의 괴상의 덩어리로 관찰되는 황철석을 EPMA의 후방산란 전자영상(Back Scattered Electron Image)으로 관찰하면 다양한 입자크기와 모난 형태의 무수한 황철석 입자로 구성됨을 보여준다(Fig. 3c).

옛비지편이 박편을 통하여 상당히 풍부하다. 그러니까 이들은 후기 단층작용보다 이전에 일어난 단층작용의 비지가 후기 단층작용 시 쇠퇴화(fragmentation)되어 새로운 비지 기질에 의해 에워 쌓여 있는 옛비지 반상쇄편을 말한다. 이들의 크기는 작은 것에서부터 큰 것에 이르기까지 범위가 넓다. 옛비지편들은 내부엽리(internal foliation)를 발달시키는 것과 내부엽리를 거의 갖지 않는 것으로 나눌 수 있다(Fig. 3a).

내부엽리를 잘 발달시키는 옛비지편의 내부 양상을 보면 석영, 장석, 황철석, 점토광물, 음미정 물질로 구성된다. 옛비지편 내에서 석영은 가장 큰 입자로 나타나며 원형내지 각형을 이루며 단일입자 혹은 복합입자로 존재한다. 대부분의 석영은 파동소광을 하며 소성 변형작용의 조적을 보이기도 한다. 황철석은 자형내지 반자형의 단일입자로 존재하기도 하지만 대개는 불규칙 형태로

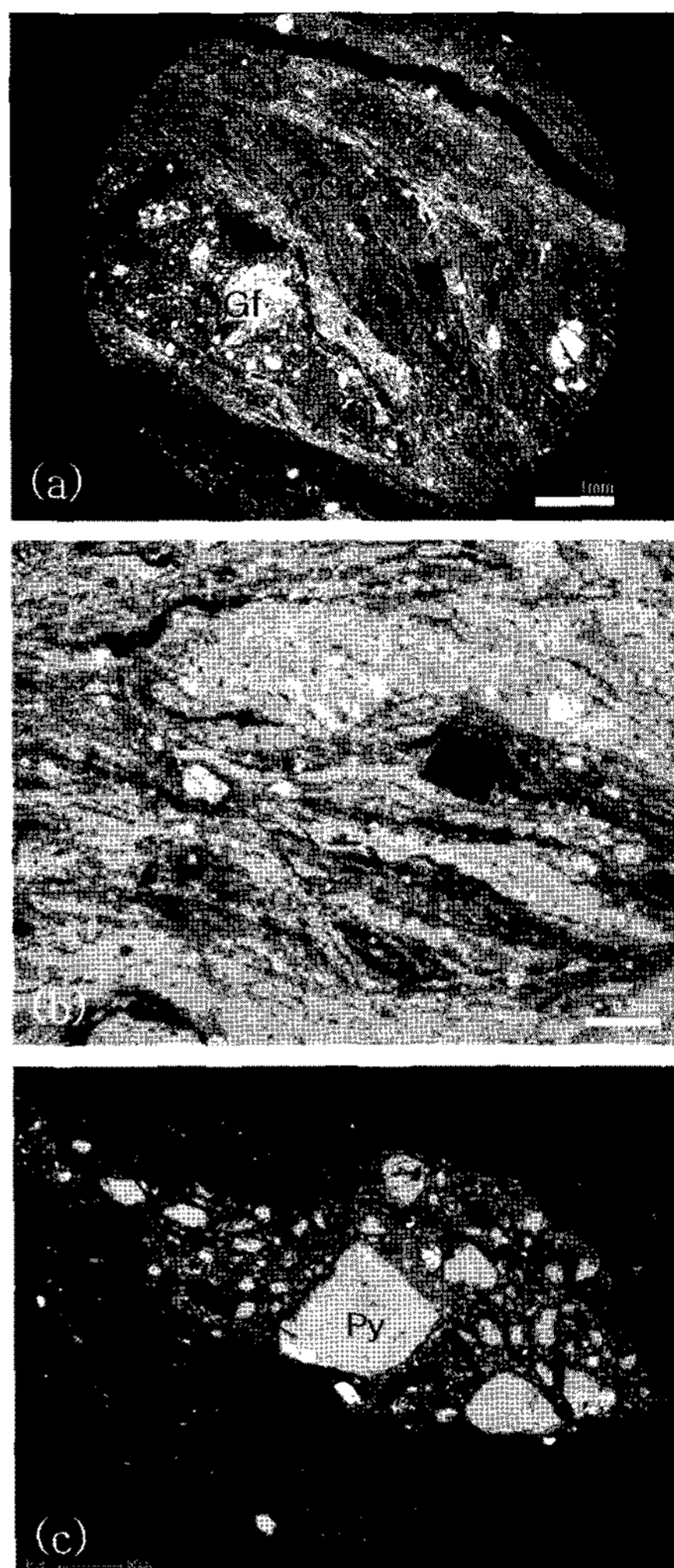


Fig. 3. Microstructures of bluish gray gouge. (a) Optical microscopic image. It contains a lot of old gouge fragments which are elongated and divided into internal foliation-free (OGf) and internal foliation-present (OGp) ones. Internal foliation in the fragments is sometimes curved. P: P foliation, Py: pyrite. F: feldspar. Crossed nicol. (b) Optical microscopic image of pyrite bands, which sometimes surround euhedral to subhedral pyrite grains. Open nicol. (c) Back-scattered electron image of opaque mineral. A single opaque lump under the optical microscope is revealed in an aggregate of pyrite(Fe) under BSE image. A variety of size and shape of pyrite grains is believed to be generated by particle crushing.

덩어리를 이루며 길게 신장된 띠(band) 모양으로(Figs. 3a, 3b) 점토광물 등과 내부엽리를 규정하고 있다. 신장형 덩어리 내에는 가끔 자형 내지 반자형 황철석 입자가 신장형 띠에 의해 둘러싸여 있다. 옛비지편 내 점토

광물은 산재하거나 신장된 집합체로 선택배향하며 황철석 띠와 평행하게 엽리를 규정한다. 이들 외에도 옛비지편 내에는 미세한 석영, 장석과 음미정질 물질들도 함께 하나의 띠를 형성하며 황철석 띠, 점토광물 띠 등과 교호한다. 이 쇄편 내 내부엽리는 쇄편 외부의 기질에 발달하는 외부엽리(external foliation)와는 대개 예각을 이루고, 인접한 쇄편 내 내부엽리 끼리는 어느 정도 평행한 경향을 보이기도 한다.

옛비지편 중 내부엽리를 발달시키지 않는 것들은 내부엽리를 잘 발달시키는 쇄편들에 비해 점토광물이 아주 소량이고 주로 조립의 석영과 장석으로 이루어지고 황철석도 상당한 양이 포함된다(Fig. 3a). 석영과 장석들은 흔히 각형으로 파쇄조직을 보여준다. 이들 옛비지편들 중에는 가장자리가 황철석 띠로 에워 쌓이지만 내부에는 황철석을 전혀 포함하지 않으며, 내부의 석영과 장석은 현저히 각형을 보여주는 쇄편도 상당히 관찰된다. 때때로 옛비지편은 압력그늘 및 비대칭꼬리(asymmetric tail) 조직을 보여주기도 한다.

전체적으로 볼 때 옛비지편은 원형에서 종횡비가 5:1 정도에 이르기까지 다양하며 신장체의 장축은 대체로 기질엽리(P엽리)에 평행하다. 내부엽리를 발달시키지 않는 옛비지편은 내부엽리를 잘 발달시키는 옛비지편에 비해 크기는 크지만 종횡비는 낮다. 즉 신장정도가 낮다. 곳에 따라 긴 신장체의 옛비지편들은 최후기 단층작용 시에 굴곡 되어 전단감각 지시자 역할을 하기도 한다.

청회색 비지대에서 기질(matrix)은 선택 배향하는 점토광물로 구성되며 점토엽리(P 엽리)를 잘 발달시킨다. 점토광물 이외에도 기질에는 미세한 석영과 음미정질 물질이 흩어져 분포하며 황철석은 단일 입자로 혹은 얇은 띠 형태로 포함된다.

녹황색 비지대

반상쇄편은 석영, 장석, 적철석, 옛비지편 등으로 이루어진다. 석영은 주로 단일입자로 존재하며 청회색 비지대에 비해 크기도 작고 함유되는 양도 적다. 가끔 관찰되는 복합입자의 석영은 소성 변형작용의 조직을 보여준다. 대부분 파동소광을 하며 입자 가장자리는 원형내지 아원형의 모습을 보여주고 종횡비 2:1이 넘는 입자는 드물다. 장석은 소량이지만 둥근 형태를 보여주며 내부적으로 건운모화 작용으로 변질되어 있으며 경우에 따라서는 수많은 미세입자로 파쇄 되어 있기도 하다.

옛비지편은 청회색 비지대에 비해서는 적은 양으로 나타난다. 청회색 비지대와 마찬가지로 내부엽리를 발달

시키는 것과 발달시키지 않는 것이 함께 존재한다. 내부엽리를 발달시키는 옛비지편은 내부엽리를 발달시키지 않는 쇄편에 비해 입자크기는 작은 편이지만 종횡비 즉 신장 정도는 더 크다. 내부엽리를 발달시키는 쇄편은 주로 점토광물과 신장형의 철광물로 이루어지고, 내부엽리가 없는 쇄편은 석영, 장석, 음미정질 물질로 구성된다.

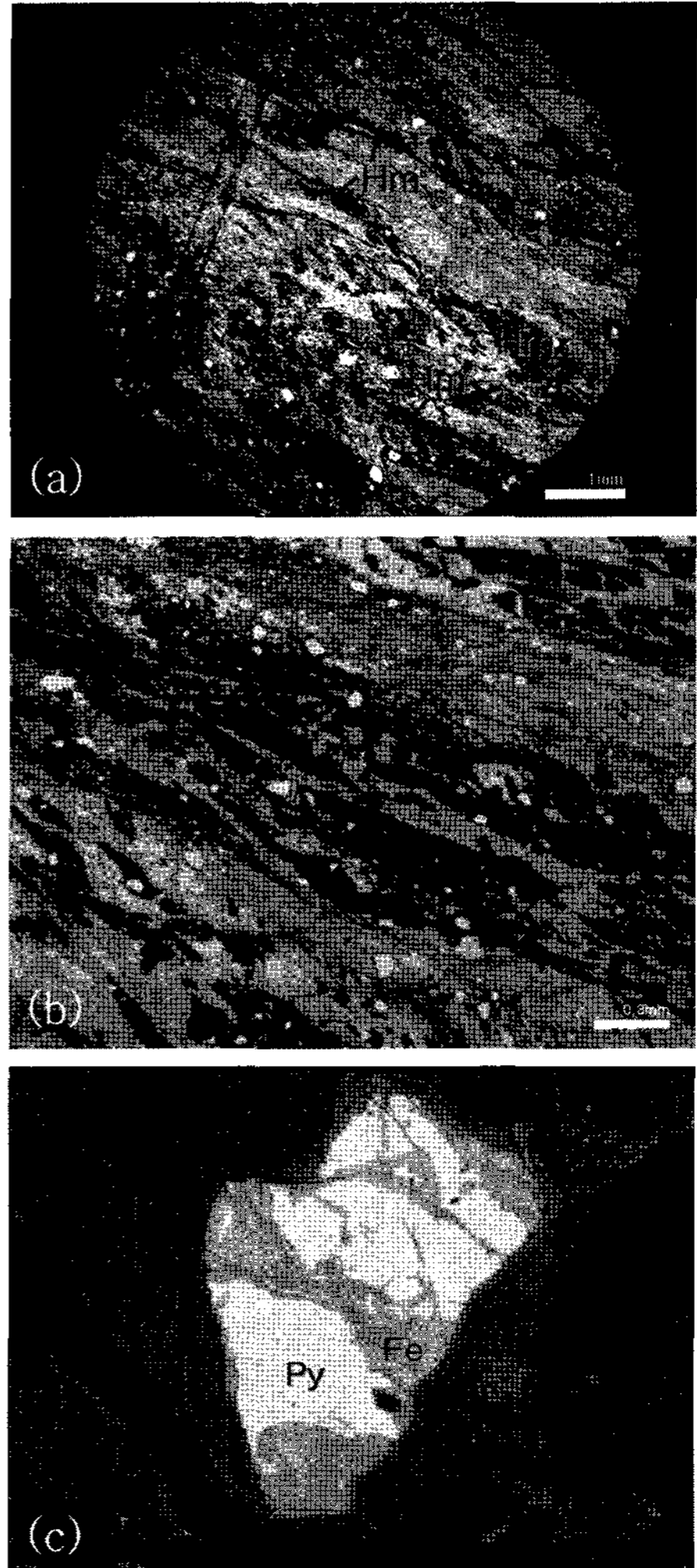


Fig. 4. Microstructures of greenish brown gouge. (a) Optical microscopic image. It has abundant clay minerals and hematite(Hm). P foliations are defined by alignment of clay minerals and hematite bands. Crossed nicol. (b) Optical microscopic image of hematite bands, showing gradational color change from dark brown band (center) to yellowish brown bands (both sides of dark brown band). Open nicol. (c) Back-scattered electron image showing hydrothermal alteration textures along margins and cracks of pyrite (Py). Take note of anhedral-irregular shape of hematite(Fe) and relics of pyrite in hematite.

황철석은 자형으로 옛비지편 내에 혹은 점토광물이 풍부한 기질에 소량 산재 분포하나 적철석은 내부엽리를 갖는 옛비지편 내에 신장형 띠로 풍부히 존재하는 한편 점토 기질에도 엽리에 평행하게 긴 신장형 띠로 침전되어 있다. 청회색 비지대에 비해 철광물은 그 양이 훨씬 풍부하고 주로 적철석으로 산출되며 띠구조는 그 두께가 매우 두꺼우며 인접한 것끼리 망상으로 연결되며 대체로 엽리(Y전단과 P엽리)에 평행하게 침전되어 있다(Figs. 4a, 4b). 그러나 이들 띠구조는 R전단에 의해서는 절단되는 양상이다. 오픈니콜 하에서 철광물 띠의 색은 다양하게 흑적갈색, 흑갈색, 황갈색 등을 띠는데 철광물 띠의 중심에서 흑적갈색과 흑갈색을 보이나 연변으로 가면서 점점 연한 황갈색으로 변한다(Fig. 4b). 편광현미경의 오픈니콜 하에서 흑색의 외관상 반사형 단일입자를 후방산란 전자 영상으로 보면 황철석이 입자 경계를 따라서 혹은 입자 내 균열을 따라 적철석으로 변질됨을 잘 보여준다(Fig. 4c). 특히 적철석과 황철석의 경계는 매우 불규칙하고 적철석 내에는 불규칙한 형태의 황철석 잔류물이 남아 있다.

기질은 풍부한 점토광물로 이루어지고 둥근형태의 미세한 석영과 음미정질 물질이 산재해 있다. 점토광물은 평행정렬을 함으로써 점토엽리(P엽리)를 잘 규정하고 있다. 옛비지편의 장축과 적철석의 다수 띠구조도 이 점토엽리에 평행한 경향이 있다. 기질을 이루는 점토 부분을 EPMA로 분석하여 보면 S_2O_2 등 다른 성분은 청회색 비지와 유사하나 철의 함량 (약 11%)이 청회색 비지(약 3%) 보다 훨씬 풍부하다.

단층이동감각(전단감각)

양 비지대를 통하여 혼합면열구조(composite planar fabrics)가 잘 발달 한다. R전단은 청회색 비지대에서 미세하게 파쇄된 음미정물질과 점토광물로 충전된 좁은 띠로 나타나며 녹황색 비지대에서는 점토광물, 음미정 물질, 연한 황갈색의 철산화물로 이루어진 얇은 띠로 나타난다. Y전단은 청회색 비지대와 녹황색 비지대의 경계에 평행하며 철산화물이 충전되어 있고 R전단 보다 좀 더 큰 띠로 발달한다. P엽리는 기질 점토광물의 평행정렬로 규정되며 반상쇄편을 감싸며 양 비지대를 걸쳐 연속적이고 관통적이다. 이들 이차 구조의 각 관계로 결정한 전단감각은 야외에서 P엽리와 단층면 간의 각 관계로 결정한 좌수주향이동의 전단감각과 일치한다(Figs. 2, 5). 반상쇄편의 비대칭 꼬리 조직이나 Fig. 3a의 옛비지편의 굴곡으로 보여주는 전단감각도 동일한 감각이다.

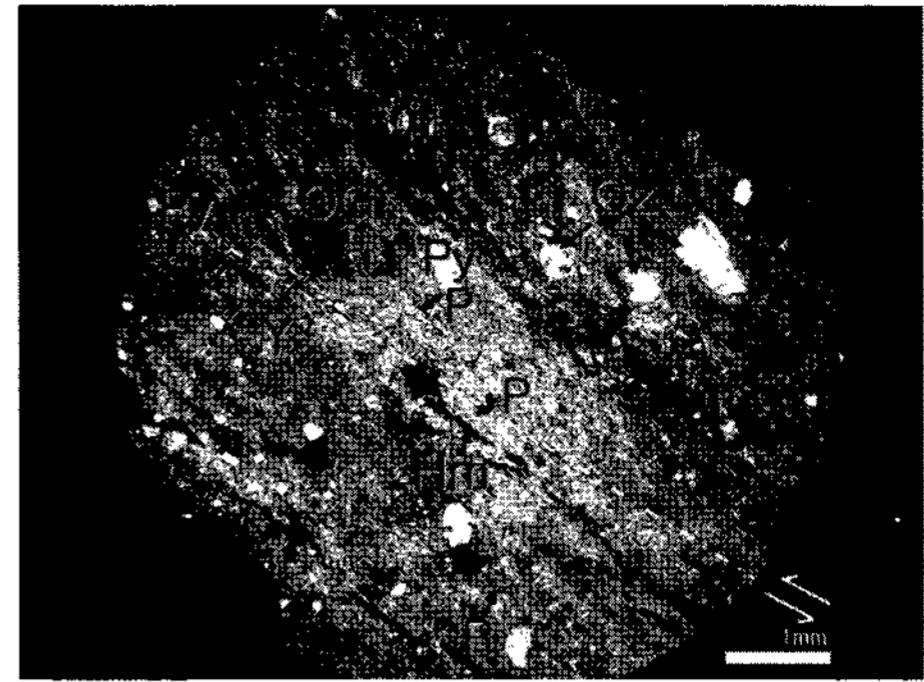


Fig. 5. A boundary between bluish gray gouge on the right-upper side and greenish brown gouge on the left-lower side is clearly recognized. P foliation develops continuously and penetratively through both gouges. Y: Y shear, OG: old gouge fragment, Hm: hematite, Py: pyrite, Qz: quartz. Arrows represent sense of movement.

청회색 비지대와 녹황색 비지대의 경계

현미경하에서 양 비지의 경계는 적철석 띠와 황철석 띠의 분포상태로 구분된다(Fig. 5). 이를 경계로 양측에서 철광물은 청회색 비지대에서 황철석이 분포되고 녹황색 비지대에서는 대부분 적철석으로 이루어진다. 또 청회색 비지대에서 옛비지편이 훨씬 풍부해지고, 녹황색 비지대에서는 점토광물과 철광물의 양이 훨씬 증가한다. P엽리는 이 경계를 관통하며 연속적이고 지속적으로 발달한다(Figs. 2, 5).

토 의

본 연구의 단층비지는 내부엽리를 발달시키는 옛비지편과 내부 엽리가 없는 옛비지편을 갖는데 전자가 후자에 비해 크기는 작고 종횡비는 상대적으로 더 크다. 이는 구성광물의 차이 즉, 내부엽리를 발달시키는 쇄편이 주로 점토광물로 이루어지는데 반해 내부엽리가 없는 쇄편은 점토광물에 비해 물성이 강한 석영과 장석으로 구성되기 때문으로 생각할 수 있다.

미구조 관찰에서 청회색 비지가 녹황색 비지와 다른 점은 녹황색 비지가 청회색 비지에 비해 첫째 점토광물이 더 풍부하고, 둘째 옛비지편을 포함한 반상쇄편의 크기가 작고 반상쇄편의 양도 적다. 셋째 철광물이 훨씬 풍부하고 대부분 적갈색의 적철석과 소량의 황철석으로 이루어지며(청회색 비지에서는 황철석만 분포), 철광물의 띠구조에서도 그 두께가 훨씬 두꺼우며 철광물은 전 박편을 통해 고루 분포한다(Figs. 4a, 4b). 청회색 비지와

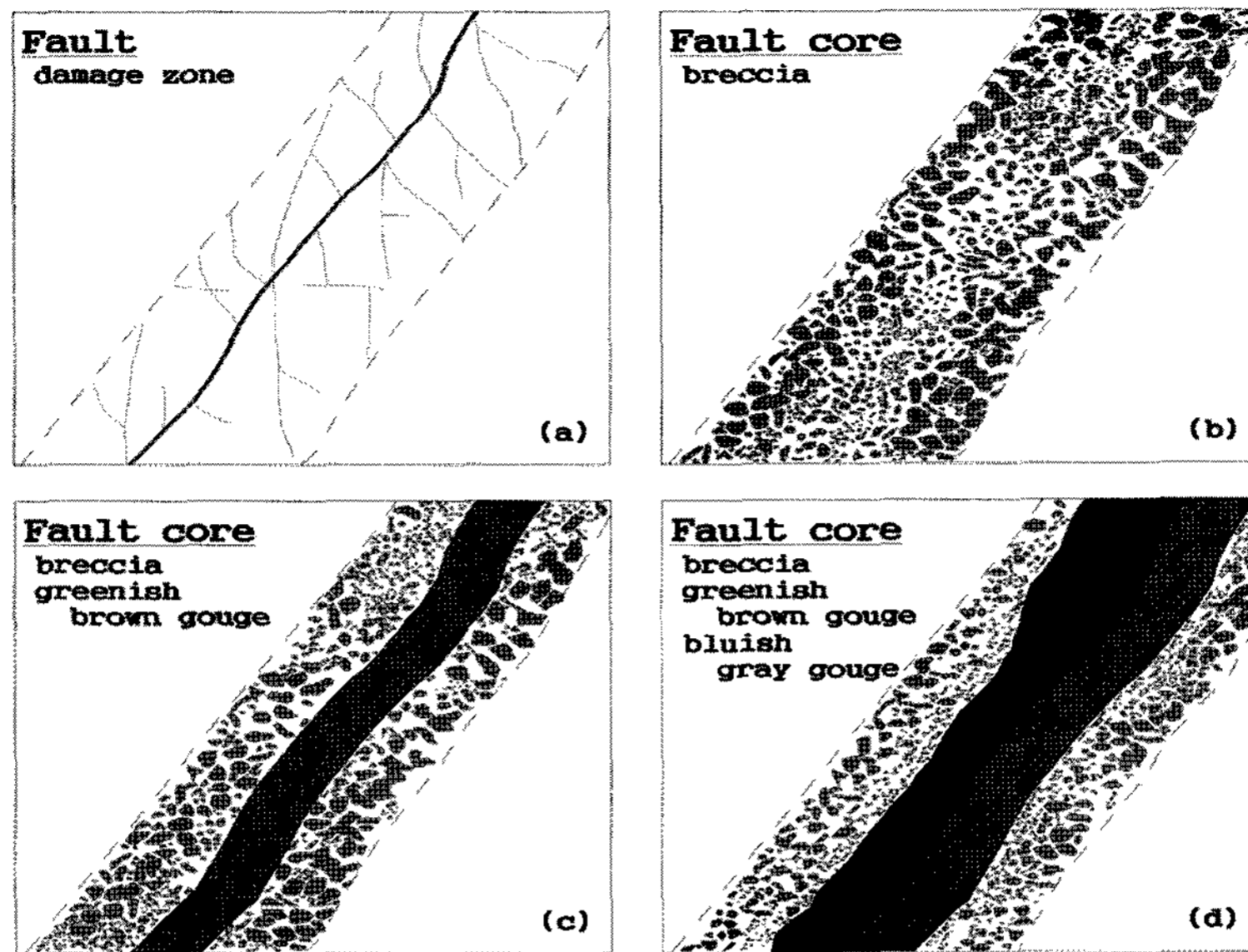


Fig. 6. Conceptual sketch of fault core evolution. (a) Early faulting and formation of damage zone. (b) Formation of breccia zone by repeated fracturing. (c) Formation of old(greenish brown) gouge zone by particle grinding. (d) Widening of gouge zone by the addition of new(bluish gray) gouge zone. The diagram is not to scale.

유사한 점은 첫째 P엽리, R전단, Y전단 등 미구조가 양 비지에서 공히 발달하며 양 비지대를 통해 관통적이고 연속적으로 발달한다. 둘째 철광물 중 자형 내지 반자형의 황철석이 공히 존재한다. 셋째 석영이 소성변형작용의 양상을 보여준다.

청회색 비지에 비해 녹황색 비지에서 점토광물이 더 풍부하고, 옛비지편을 포함하는 반상쇄편들의 양이 적고 크기도 작은 점은 녹황색비지가 청회색 비지에 비해 더 많은 단층작용을 받는데 따른 것으로 유추해볼 수 있다.

녹황색 비지대에서 철광물로 적철석이 풍부하고 청회색 비지대에서 황철석만이 출현하는 것은 청회색 비지대 형성 단층작용 시 단층대로 유입된 열수가 청회색 비지대에 황철석을 침전시킬 때 인접한 녹황색 비지대에는 기존의 황철석을 변질시켜 적철석을 형성시킨 것으로 생각해볼 수 있다(Figs. 4b, 4c). 이는 녹황색 비지대에 관찰되는 적철석 중에서 자형 내지 반자형의 황철석 가상을 흔히 볼 수 있는 점과 Fig. 4c의 열수 변질 조직이 이와 같은 해석을 뒷받침해 준다. 또 철광물 띠의 폭을 보면 녹황색 비지에서 청회색 비지에 비해 상당히 두껍고 퍼져 보이는데(Figs. 3b, 4b) 녹황색 비지대에서 적철석 띠가 두껍고 퍼져 보이는 것은 일차적으로는 녹황색 비지대에 철광물이 두껍게 침전된데 연유할 수 있고 이차적으로는 이전의 철광물(황철석)이 적철석으로 변질 혹은

풍화될 때 미세입자의 상태로 황철석으로부터 떨어져 나와 주변 광물 입자 경계 속으로 흩어져 들어가며 흑갈색 내지 황갈색으로 넓게 채색시킨데 따른 것으로 생각된다. 오픈니콜 하에서 철광물 띠의 중심에서 연변으로 가면서 흑적갈색으로부터 흑갈색, 진한 황갈색, 연한 황갈색으로 색의 변화가 이와 같은 해석을 뒷받침 한다(Fig. 4b). 그러니까 청회색 비지대는 후기 단층작용으로 형성되어 기존의 단층대의 비지대에 추가된 것으로 생각된다.

이 연구의 단층핵 내 녹황색 비지대와 청회색 비지대는 점진적 단층대 발달의 단계를 거쳐 형성된 것으로 판단된다(Fig. 6). 단층대의 진화는 이른 단층작용과 이에 수반된 부수단열의 집적에 의해 먼저 손상대가 생성된 것으로 추정한다. 흔히 이와 같은 부수단열은 주향이동 단층에서 R 단열과 R'단열로(Sylvester, 1988), 정단층에서 공액 정단층 및 그물단열(mesh fractures)로 (Konon, 2004) 잘 수반된다.

두 번째 단계에서 단층핵이 손상대의 암석으로부터 발달하기 시작하는데, 반복적인 단열작용에 의해 장방향 내지 불규칙한 형태의 암괴가 이방성-지배 점진적 단열작용(anisotropy-controlled progressive fracturing) (Billi, et al., 2003)으로 종횡비가 낮은 암편의 각력대가 형성되었다. 각력대의 쇄편은 계속해서 입자 파쇄변형작용을 우세하게 받게 될 것이다(Billi, et al., 2003b).

세 번째 단계는 단층핵의 각력대가 변위가 증가함에 따라 입자 파쇄 변형작용은 감소하고 입자 회전과 입자 연마 및 마모 변형작용이 지배적으로 일어나 녹황색 비지대가 형성되었다. 이로 인해 미세 입자는 증가하고 큰 쇄편의 양은 감소한다.

네 번째 단계에서 단층핵의 변형작용은 Means (1984, 1995)와 Mitra (1992)의 형태 I 전단대와 유사하게 기존 녹황색 비지대에선 변형경화로 상당히 비활동적이 되고 인접한 각력대에서 쇄편들이 파쇄 되고 연마되어 새로운 비지(청회색 비지)를 형성하여 기존 비지대에 나란히 놓이게 된다(Fig. 6). 이와 같은 과정으로 이 연구의 청회색 비지대는 후기에 형성되어 녹황색 비지대에 인접하여 부가됨으로써 단층핵 내 비지대의 폭을 증대시킨 것으로 보아야 할 것이다.

청회색 비지에서 내부엽리 없는 옛비지편 가운데 몇몇 쇄편은 내부에는 황철석이 포함되지 않지만 그 경계는 황철석으로 에워 쌓이는 것을 볼 수 있는데 이는 내부의 각상 석영, 장석편들이 황철석 침전 이후의 단층작용 시 석영과 장석으로 이루어진 조립 암편으로 부터 내부적으로 파쇄된 것으로 볼 수 있다. 또 후방산란 전자 영상에서 청회색 비지 내 황철석의 다양한 입자 크기와 모난 형태를 갖는 집합체 조직도 황철석 생성후의 단열작용 산물임을 이야기한다(Fig. 3c). P 엽리를 포함한 혼합면열구조가 청회색 비지대와 녹황색 비지대에 똑같이 발달하고, 양 비지대를 걸쳐 연속적이고 관통적인 것은 양 비지대가 후기 단층작용 시 함께 변형작용을 받았음을 이야기한다. 그럼으로 이와 같은 현상은 비지대 내에 청회색 비지대를 생성시킨 후 변형작용은 석영, 철광물 등 조립의 반상쇄편을 내부적으로 파쇄시키는 한편, 비지대 내에 혼합면열구조를 발달시킨 것으로 볼 수 있다. 이는 비지대 내 슬립 국지화로 인한 큰 변형이 불연속 구조를 따라 수용됨을 의미할 수 있다(Aydin and Johnson, 1978, 1983).

결 론

경주시 양북면 용당리 부근 작은 계곡의 농로 주변에서 단층핵 내 약 25 cm의 단층비지대가 발달하는데 이 비지대는 색깔에 의해 청회색 비지와 녹황색 비지로 나누어진다. 야외에서 채취한 비지 시료는 미끄럼선에 평행하고 엽리에 수직으로 절단하여 박편을 제작하여 현미

경하에서 특징적인 미구조가 관찰되었다.

단층비지대의 청회색비지와 녹황색비지의 반상쇄편은 석영, 장석, 옛비지편, 철광물로 구성되고, 기질은 선택 배향하는 점토광물로 이루어진다. 또 점토광물의 평행정렬로 점토엽리(P엽리)를 발달시키는데, 신장형 석영 및 장석 집합입자, 신장형 옛비지편과 철광물의 띠 등의 장축도 선택 정렬을 하여 P엽리의 발달 정도를 강화한다.

청회색비지와 녹황색비지의 미구조적 차이점은 청회색 비지에 비해 녹황색 비지가 점토광물이 훨씬 풍부하며, 반상쇄편의 크기는 상대적으로 작고 함량도 적으며, 철광물은 더 풍부하고 철광물의 종류는 청회색 비지가 황철석인데 반해 적철석이 대부분 이다. 녹황색 비지에서 철광물이 대부분 적철석인 것은 청회색 비지 생성 단층작용 시 단층대로 유입된 열수가 청회색 비지대에 황철석을 침전시킬 때 인접한 녹황색 비지대의 기존의 황철석을 변질시켜 적철석을 형성시킨데 따른 것으로 판단된다.

단층핵 내 녹황색 비지대와 청회색 비지대는 점진적 단층대 발달의 단계를 거쳐 형성된 것으로 해석할 수 있다. 첫 번째 단계는 초기 단층작용이 시작되고 이에 수반된 부수단열과 더불어 손상대가 형성되었다. 두 번째 단계는 손상대에서 반복적 단열작용에 의해 각력대가 생성되기 시작하였으며, 각력대에서는 입자 파쇄작용이 입자 마모작용보다 우세하게 일어났다. 세 번째 단계는 입자마모작용이 입자파쇄작용보다 활발하게 일어나면서 녹황색 비지대를 형성하였다. 네 번째 단계에서는 녹황색 비지대가 단층핵의 중심에서 변형경화로 비활동적으로 남고 변형작용은 연변을 향하여 활동적이 될 때 새로운 비지대로서 청회색비지가 생성되어 녹황색 비지대에 인접하여 부가되었으며 이로 인해 단층핵 내 비지대는 더 큰 폭으로 성장하였다.

비지대 내에서 청회색 비지대 생성 후 변형작용은 반상쇄편의 내부 파쇄작용과 혼합면열구조의 발달로 비지대 내 큰 변형이 수용되었다.

사 사

박편 제작 등 실내 실험 및 자료 정리를 도와준 경북대 구조지질연구실 학생들과 연구대상의 단층대 노두를 안내 해 준 현대엔지니어링 김수정 박사께 고마움을 표한다. 그리고 이 논문을 심사해준 익명의 심사위원과 정교철 심사위원장께도 감사를 표한다.

참 고 문 헌

- 장태우, 추창오, 1998, 동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar연령. 대한지질공학회지, 8, 175-188.
- Aydin, A. and Johnson, A. M., 1978, Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone. *Pure Appl. Geophys.*, 156, 931-942.
- Aydin, A. and Johnson, A. M., 1983. Analysis of faulting in porous sandstone. *Journal of Structural Geology*, 5, 19-31.
- Billi, A., Storti, F., Salvini, F., 2003. Particle size distributions of fault rocks and fault transpression : are they related?. *Terra Nova*, 15, 63-66.
- Billi, A., Salvini, F., Storti, F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks : implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology*, 25, 1779-1794.
- Gray, M. B., Stamatakos, J. A., Ferill, D. A. and Evans, M. A., 2005. Fault-zone deformation in welded tuffs at Yucca Mountain, Nevada, USA. *Journal of Structural Geology*, 27, 1873-1891.
- Konon, A., 2004. Successive episodes of normal faulting and fracturing resulting from progressive extension during the uplift of the Holy Cross Mountains, Poland. *Journal of Structural Geology*, 26, 419-433.
- Means, W. D., 1984. Shear zones of Types I and II and their significance for reconstruction of rock history. *Geol. Soc. Am. Abstr. programs*, 16, 50.
- Means, W. D., 1995, Shear zones and rock history. *Tectonophysics*, 247, 157-160.
- Mitra, G., 1992. Deformation of granitic basement rocks along fault zones at shallow to intermediate crustal levels. In: S. Mitra and G. W. Fisher (Editors), *Structural geology of fold and thrust belts*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, 123-144.
- Storti, F., Billi, A., and Salvini, F., 2003. Particle size distributions in natural carbonate fault rocks : insights for non-self-similar cataclasis. *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 173-186.
- Sylvester, A. G., 1988. Strike-slip faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1666-1703.

2008년 4월 20일 원고접수, 2008년 6월 13일 게재승인

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370
Tel: 053-950-5361
Fax: 053-950-5362
E-mail: twchang@knu.ac.kr

장윤득

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370
Tel: 053-950-5358
Fax: 053-950-5362
E-mail: jangyd@knu.ac.kr