

제3기 와읍분지 경계단층을 따라 발달하는 단층비지 내 잔류입자의 프랙탈과 파쇄작용

장태우*

경북대학교 지질학과

Fractals and Fragmentation of Survivor Grains within Gouge Zones along Boundary Faults in the Tertiary Waeup Basin

Tae Woo Chang*

Department of Geology, Kyungpook National University

제3기 분지의 경계단층을 따라 발달하는 단층핵에서 단층비지 시료를 채취하여 현미경하에서 잔류입자들의 미구조 관찰과 잔류입자들을 이용한 프랙탈 차원 분석을 수행하였다. 타원형의 잔류입자들은 기질의 점토엽리(P엽리)에 평행 내지 아평행하게 형태선택배향을 이루는데 이는 풍부한 기질의 미세 입자 속에서 지속적인 단층 슬립 동안 회전에 의해 이루어진 것으로 생각된다. 잔류입자 크기 분포는 2.40-3.02 범위의 프랙탈 차원(D)을 갖는 멱 법칙을 따른다. 여기서 한 개의 시료를 제외한 모든 시료들은 Sammis et al. (1987)의 자기유사 파쇄 과정을 예측한 구속 분쇄 모델의 특정 차원 값 2.58보다 높은 값을 보이며 큰 단층 슬립과 다중단층작용을 지시한다. 아마도 비지대의 높은 차원 값은 구속 분쇄모델의 적용 범주를 지난 후부터는 파쇄 기구가 바뀌어 입자마모와 이에 부수적으로 조립입자의 선택적 파쇄가 일어남에 기인한 단층압의 비 자기유사 진화를 지시한다. 단층핵의 파쇄 진화를 통하여 후기의 입자마모 동안에 입자 파쇄가 부수적으로 일어날 수 있는 것과 마찬가지로 조기의 대량 파쇄 동안에도 부분적으로 입자마모가 수반될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어 : 단층비지, 프랙탈 차원, 파쇄과정, 구속 분쇄모델, 입자마모

Fault gouge samples were collected from the fault cores of the boundary faults between the Cretaceous Basement and the Tertiary Waeup Basin. Fractal dimensions (D) were obtained by using survivor grains which were analysed from six thin sections of the gouges under the optical microscope. The elliptical survivor grains show a shape preferred orientation almost parallel to clay foliation in matrix, suggesting that it was formed by the rotation of the survivor grains in abundant fine-grained matrix during repeated fault slips. The size distributions of the survivor grains follow power-laws with fractal dimensions in the 2.40-3.02 range. D values of all samples but one are higher than a specific D value equal to 2.58 which predicts the self similarity of fragmentation process in constrained comminution model (Sammis et al., 1987), which indicates large fault slip and multiple faulting. Probably the higher D values than 2.58 mean the non-self-similar evolution of cataclastic rocks where fragmentation mechanism changed from constrained comminution to the grain abrasion accompanying selective fracture of larger grains.

Key words : fault gouge, fractal dimension, fragmentation process, constrained comminution model, grain abrasion

서 론

한반도 동남부 제 3기 분지들은 성인적으로 기반암과의 경계가 대부분 단층으로 접경하고 있는 양상을 보여주고

있다. 연구지역인 와읍분지 또한 기반암인 유천층군 및 하양층군과 분지의 내부를 충전하고 있는 범곡리층군이 단층으로 접경하고 있으며(Son et al., 2004; 장태우 외, 2007), 이 분지 경계단층을 따라 단층비지(fault gouge)가

*Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

수반되어 발달하고 있다.

단층비지는 단층대 내 단층 슬립이 최대로 국지화된 지역에서 미세 입자로 분쇄된 기질이 조립의 반상쇄편 즉 잔류입자(survivor grain)를 에워싸고 있는 미고결 단층암이다. 단층대는 손상대와 단층핵으로 이루어지고 단층핵은 다시 각력대와 비지대로 나누어진다(장태우와 추창오, 1998). 반복적인 단열작용에 의해 단층핵을 형성하고 있는 각력대는 단층의 변위가 증가함에 따라 입자 파쇄작용은 감소하고 주로 입자 회전과 입자 연마 및 마모로 비지대가 형성된다(장태우와 장윤득, 2008).

단층비지나 파쇄암(cataclasite) 등 취성 단층암을 구성하는 입자들의 크기 분포는 프랙탈적인 것으로 알려져 있다(Sammis et al., 1987; Awaji et al., 2006). 프랙탈이란 축적의 크기에 관계없이 항상 같은 형태가 반복되는 자기 유사성(self similarity)을 기본 개념으로 한다. 단층암 내의 입자 크기 분포는 대개 멱 법칙 관계(power-law relationship)를 보여 양 대수 그래프 상에서 직선 구간으로 보이게 된다. 이 직선의 기울기가 프랙탈 차원 값(D)으로써 멱 법칙 지수(power-law exponent)이다. 이와 같이 단층암을 대상으로 한 프랙탈 분석의 차원 값은 단층암을 생성시킨 파쇄과정의 진화를 유추할 수 있다(Blenkinsop, 1991).

본 연구에서는 분지 경계단층인 장항리단층 세 곳(J₁, J₂,

J₃)과 신리단층 세 곳(S₁, S₂, S₃)의 여섯 곳의 노두로부터 (Fig. 1) 단층비지의 배향 시료를 채취한 후 단층 슬립에 평행하고 옆리면에 수직으로 즉, XZ단면의 박편을 제작하여 현미경상에서 잔류입자들의 형태 선택배향(shape preferred orientation)을 포함한 미구조 관찰을 수행하고, 나아가서 타원형 잔류입자를 이용한 프랙탈 차원 분석(fractal dimension analysis)을 수행하여 입자크기 분포 양상 및 비지대를 형성시킨 파쇄작용 기구를 고찰한다.

구조적 배경

와읍분지는 경주시 양북면의 범곡리에서 용동리에 이르는 북동 방향의 타원형을 이루고 있으며 분지의 경계는 대부분의 지역에서 기반암과 단층으로 접경하고 있다. 연구 지역의 지질은 와읍분지 내의 제3기 범곡리층군과 분지를 에워싸는 백악기 유천층군 및 하양층군의 기반암 그리고 와읍분지 동쪽에 발달하고 있는 어일분지의 제3기 장기층군으로 구성된다. 와읍분지를 충전하고 있는 미고결 퇴적층인 범곡리층군은 하부로부터 와읍리웅회암, 안동리역암, 용동리웅회암, 호암리화산각력암으로 나누어진다(Fig. 1).

와읍분지를 규제하는 경계단층들은 단층의 위치와 자세를 기준으로 장항리단층, 신리단층 그리고 탑정단층으로 구

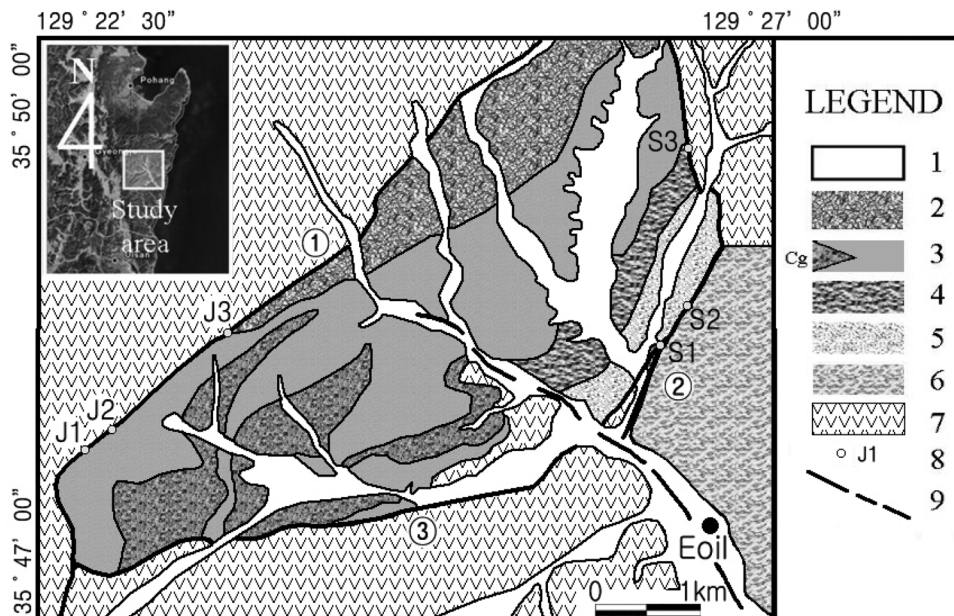


Fig. 1. Geological map of the Waeup Basin (modified from Chang et al., 2007). 1, Alluvium; 2, Hoamni Volcanic Breccia; 3, Yongdongni Tuff (Cg, conglomerate); 4, Andongni Conglomerate; 5, Waeupni Tuff; 6, Eoil Basin; 7, Basement; 8, Sampling locality of fault gouge; 9, fault. ① Janghangni fault, ② Shinni fault, ③ Tapjeong fault.

분할 수 있다. 장항리단층은 북동-남서 주향에 남동쪽으로 50~70°경사하며, 기반암인 백악기 유천층군과 제 3기 범곡리층군을 외읍분지의 서쪽에서 접경시키고 있다. Fig. 1의 J1지점, J2지점 그리고 J3지점에서 장항리단층이 잘 노출된다. 장항리단층을 따라 발달하는 단층핵은 중앙에 비지대를 두고 좌우에 대칭적으로 각력대가 잘 발달한다 (Fig. 2a).

신리단층은 대체로 남북 주향에 50~65° 동쪽 경사를 보이며 북쪽에서는 범곡리층군과 유천층군인 기반암이 단층으로 경계하고 남쪽에서는 외읍분지의 동쪽에 분포하는 또 다른 제 3기 분지인 어일분지의 지층과 접경하고 있다 (Fig. 1). 이 신리단층은 어일분지 형성 시 서쪽 경계의 정단층으로 발달하여 동쪽으로 경사하며, 압축 지구조운동 때 반전(inversion)으로 역이동 활동을 하여 양 분지의 지층을 접경시키고 있는 것으로 보인다(장태우외, 2007). 특징적

으로 신리단층의 S2지점은 다른 지점들과 달리 하반인 외읍리옹회암에서는 비지대, 각력대, 손상대가 순차적으로 잘 발달하는 반면, 상반인 장기층군의 연당현무암류에서는 각력대가 결핍된 상태로 손상대와 비지대가 바로 접함에 따라 비대칭적인 단층핵을 발달시킨다(Fig. 2b).

탐정단층은 외읍분지 서남단에서 동북동쪽을 향하여 달리다가 분지의 남동 경계부에서 북서로 달리는 추정단층과의 교차점 부근에서 신리단층에 의해서 절단된다. 이 단층은 신리단층과는 달리 외읍분지 내를 향하여 즉 북북서로 경사하며 외읍분지의 남쪽 경계를 형성한다.

장항리단층과 신리단층에서 채취한 시료의 현미경 관찰에 의하면 석영, 장석 등의 광물편과 유문암, 석영안산암 등의 암편들이 이원형 타원체의 모양으로 미립자의 점토 기질에 에워싸여 고립된 상태로 반상쇄편의 잔류입자를 형성하고 있다(Fig. 3). 타원형 잔류입자들은 흔히 그 장축이 기질의

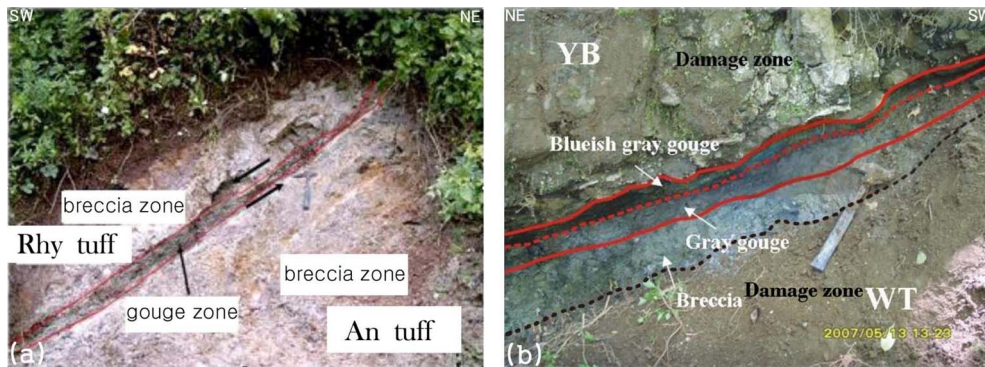


Fig. 2. Photographs of gouge zones. (a) Symmetric fault core of Janghangni fault at J2 site. (b) Asymmetric fault core of Shinni fault at S2 site. An tuff: andesitic tuff of Yucheon Group, Rhy tuff: Yongdongni tuff of Beomgokni Group, YB: Yeondang Basalt of Janggi Group, WT: Wacupni Tuff of Beomgokni Group.

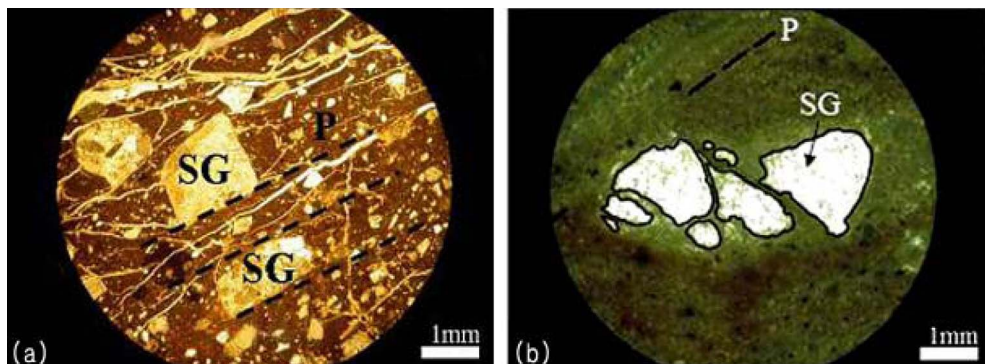


Fig. 3. Photomicrographs of thin sections of fault gouges. (a) Survivor grains(SG) mainly composed of feldspar fragments form porphyroclasts in subrounded shape and clay minerals in matrix develop P foliation(dark dotted lines). (b) A survivor grain is internally fractured into several angular fragments. Note its rounded margin and long axis almost parallel to P foliation after amalgamating fragmented grains.

점토엽리(P엽리)에 평행 내지 아평행하게 배열하는 경향을 보인다. 뿐만 아니라 잔류입자들은 가끔 이차 전단에 의하여 절단되며 내부적으로 여러 개의 각형 세립으로 단열되어 있기도 하다(Fig. 3b). 잔류입자를 에워싸고 있는 기질은 미세한 입자의 점토광물이 매우 풍부하며 서로 평행 배열을 하여 점토엽리를 잘 발달시킨다.

프랙탈 차원 결정

프랙탈 분석을 위해 단층비지의 XZ단면상에 분포하는 잔류 입자들의 크기 측정과 크기 별 개수를 계산하여 각각을 X축과 Y축으로 하는 양 대수 그래프에 표시하였다(Fig. 4). 입자크기 분포를 특성화하기 위한 가장 좋은 방법은 크기별 입자 빈도의 프랙탈 관계를 사용하는 것으로 알려져 있다(Blenkinsop, 1991):

$$N(S) \sim S^{-D} \tag{1}$$

위의 식(1)에서 S는 입자크기이고 N(S)는 입자크기별 누

적 개수이며 D가 프랙탈 차원이다. D값은 log S에 log N(S) 그림에서 최적선의 기울기로 결정된다.

연구지역에서 계산된 프랙탈 차원 값을 단층별로 살펴보면, 장항리단층의 J1지점에서 2.40, J2에서 2.83, J3에서 2.65를, 신리단층에서는 S1지점이 2.97, S2가 2.61, S3가 3.02를 보여주어 전체적으로 2.40~3.02의 넓은 범위의 차원 값을 보여주고 있다.

토 의

단층암의 입자 크기 분포를 특성화하는데 가장 좋은 방법으로서 입자 크기별 빈도의 프랙탈 관계를 흔히 사용하고 있지만, 단층작용으로 생성된 단층암을 대상으로 한 프랙탈 차원 값 (D)이 여러 가지 값을 갖는 것은 여러 가지 파쇄 과정(fragmentation process)에 의한 것으로 주장되고 있다. 특히 3가지 파쇄이론이 Blenkinsop (1991)에 의해 정리된 바가 있다. 즉 이 3가지 이론은 특정한 D값과

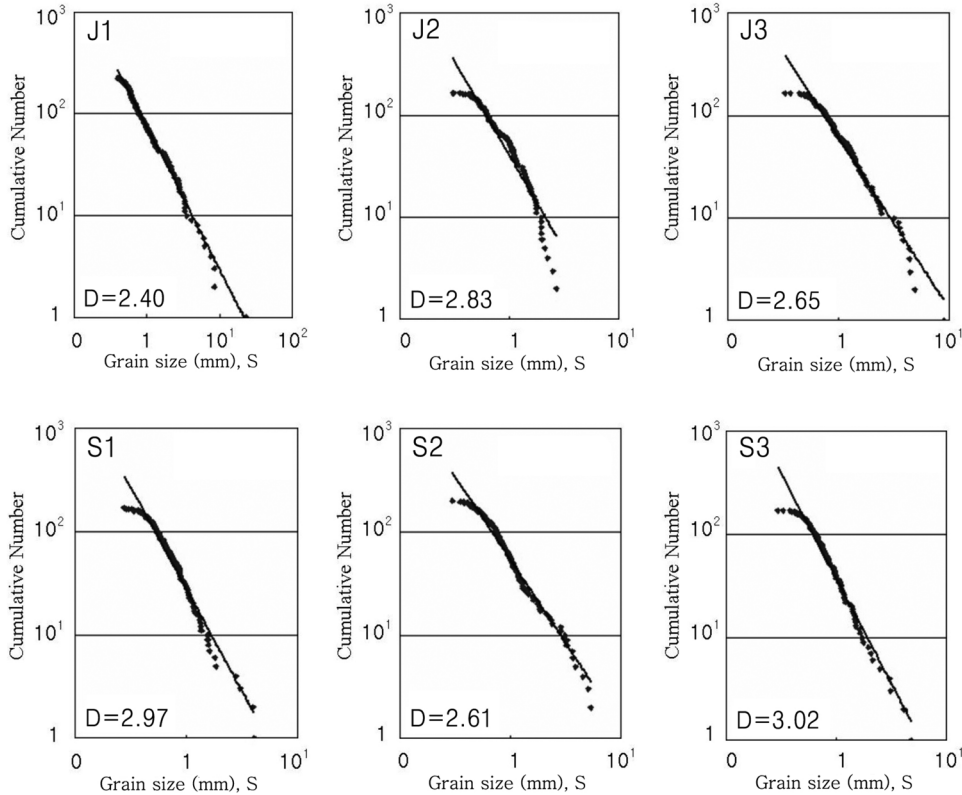


Fig. 4. Log-log graphs showing the relationship between grain size and number of survivor grains in XZ-sections of analyzed fault gouges.

상관되어 (1) ‘강한 주석(柱石)(pillar of strength)’ 모델은 1.97의 D값을, (2) ‘취약면(plane of fragility)’ 모델은 2.84의 D값을, (3) ‘구속 분쇄(constrained comminution)’ 모델은 2.58의 D값을 예측하고 있다. 마지막 모델은 Sammis et al. (1987)이 주장한 것으로 연속적인 자기유사 파쇄 과정을 통해 점진적으로 단층비지 발달로 나아가게 된다는 것으로 자연 비지 연구(Blenkinsop, 1991)와 실험적 연구(Beeler et al., 1996)에 의해 일반적으로 지지를 받고 있는 편이다. 그렇지만 자연 상태의 단층암으로 부터 얻은 자료가 파쇄 과정의 자기유사 진화를 완전히 지지하고 있지는 않다(Storti et al., 2003).

본 연구의 단층비지의 어느 시료이든 잔류입자 크기의 누적빈도 분포는 0.9이상의 높은 상관계수를 보이기 때문에 프랙탈 분포를 시사하고 있다. 또 Fig. 4의 그래프들을 전체적으로 살펴보면 2.40-3.02 범위의 차원 값을 보이고 있다. 각 지점에서 차원 값이 차이를 보이는데, S1지점과 S3지점의 경우 타 지점보다 작은 크기의 잔류입자가 다수 분포하기 때문에 3 내외의 높은 차원 값을 보이고, 이에 반해 J1지점은 타 지점보다 상대적으로 조립인 잔류입자들을 많이 포함하고 있어서 2.40의 가장 낮은 차원 값을 갖게 된 것으로 생각된다. 비지대에서 차원 값의 증가는 입자 크기에 반비례하고 비지대의 두께, 단층슬립(변위) 및 단열작용 사건의 수에 비례하는 것으로 알려져 있다(Blenkinsop, 1991; Billi, 2005). 특히 높은 차원 값은 큰 단층 슬립과 다중 단층작용을 반영한다고 할 수 있을 것이다. 단층대에서 잔류입자가 아닌 단열구조에 의한 프랙탈 해석에 있어서도 단층 슬립이 보다 집중된 단층대의 중심에서 단열밀도의 증가와 더불어 차원 값이 증가하는 것을 볼 수 있다(최한우와 장태우, 1999).

Fig. 4의 J1시료는 입자 크기 분포 커브가 긴 직선으로 프랙탈 범위(직선 구간)가 긴 데 반해 다른 시료들은 프랙탈 범위가 짧으며 특히 그림의 왼쪽 상단부에서 굴곡되어 나타난다. 이것도 입자 크기 차이 및 분포와 상관되어 왼쪽 상단부의 굴곡을 보이는 시료들은 측정하기 힘들만큼 너무 작은 미세 입자들이 많이 분포하여 잔류입자 크기 측정 시 이것들의 대부분이 측정에서 제외되었기 때문으로 볼 수 있다.

한편, 본 연구의 여섯 개의 시료에서 구한 차원 값은 2.40-3.02의 넓은 범위의 프랙탈 차원을 갖는 멱법칙 분포(power law distribution)를 보여준다. Sammis et al. (1987)의 구속 분쇄 모델에서 제시된 2.58의 차원 값보다 J1시료를 제외한 모든 시료에서 높은 값을 나타낸다. Sammis et al. (1987)은 파쇄작용 동안 동일 크기의 가장 인접 입

자의 체계적인 제거로 특정 차원 값 2.58을 갖는 자기유사 입자 크기 분포가 이루어지고, 연속적인 자기유사 파쇄 과정을 통해 점진적으로 단층비지가 발달하게 된다는 것을 예측하지만 본 연구의 넓은 범위의 차원 값은 자기유사 파쇄작용에서 예상되기 어려운 값이다.

Storti et al. (2003)은 자연 상태의 단층암에서 차원 값의 다양성은 입자 파쇄 기구가 시공간적으로 변할 수 있음을 나타낸다고 주장하고 있다. 이렇게 볼 때 단층대를 형성한 파쇄작용의 기구를 특정 이론으로만 설명할 수는 없을 것 같다. 예를 들면 Blenkinsop (1991)은 실험실에서 만든 단층비지나 자연 상태 단층비지에서 구속 분쇄 이론의 차원 값 2.58보다 훨씬 높은 차원 값이 얻어지는 것에 대해 구속 분쇄 이론이 적용될 수 없는 다음 단계의 파쇄작용이 따라와야 하고 이때는 지금까지 파쇄 된 입자 가운데서 보다 큰 입자들이 선택적으로 단열 된다는 것이다. 그러니까 파쇄가 계속적으로 진화하는 동안 구속 분쇄작용이 선행하고 그 후로는 보다 큰 입자의 선택적 단열로 전이되면서 입자크기 감소와 차원 값의 증가를 가져오게 될 것이다.

Storti et al. (2003)과 Billi (2005)도 차원 값이 2.58에 접근하거나 능가함에 따라 미립이 풍부해지는 것은 파쇄작용의 자기유사 진화로 설명할 수 없다고 하였다. 그들은 단층핵 진화 동안 미립의 부화는 두 개의 분쇄 과정을 거쳐 일어난다는 것이다. 초기(早期)에는 같은 크기의 조립 입자가 서로 접촉하고 있는 상태에서 입자들의 대량 파쇄(bulk fragmentation)가 일어나 조립 입자의 수와 크기를 크게 감소시키게 되는데, 이 과정은 각력대에서 활발하고 낮은 차원 값을 갖게 된다. 다음 단계 즉 같은 크기의 입자가 서로 접하지 않고 입자들의 분급이 좋지 않은 상태에서는 입자 마모(grain abrasion)가 일어나 조립 입자 수의 감소는 적은데 반해 미립의 수는 크게 증가하며 차원 값도 증가하게 된다는 것이다. 그러므로 입자 마모는 입자 크기 감소로 입자 강도가 증가하고, 같은 크기의 입자가 서로 접촉하지 않게 되는 비지대에서 우세하게 일어나 잔류입자의 크기, 모양 및 분포를 규제하게 될 것이다.

본 연구의 비지대의 한 개의 시료를 제외한 모든 시료들은 2.58보다 높은 차원 값을 보여주고 기질에 고립되어 분포하는 잔류입자들은 원마도가 좋은 편이다. 이는 앞에서 이야기한 대량 파쇄 후 입자 마모가 입자 크기를 감소시키는 중요한 분쇄 과정이었음을 이야기한다. 즉 비지대의 변형작용은 일단 비지대가 형성되어 잔류입자들이 미립의 기질에 에워싸이게 되면 잔류입자 사이의 풍부한 기질은 쿠션효과를 일으켜 입자 단열작용은 용이하지 않게 되고 다만 잔류입자들은 인접한 기질의 미립에 의해 마모되며

구르기와 미끄럼을 포함하는 입자 미끄럼 유동(particulate flow)으로 일어났을 것이다(Cladouhos, 1999; Twiss and Moores, 2007). 그러나 한편으로는 점토 기질에 에워싸여 고립되어 있는 잔류입자 중에는 R전단에 의해 절단되거나 다수의 미립으로 불규칙하게 파쇄 되어 있는 현상도 어쩌다 보여주는데(Fig. 3b) 이는 Blenkinsop (1991)의 조립 입자의 선택적 단열로 볼 수 있다. 그럼으로 본 연구의 비지대에서 2.58보다 높은 차원 값은 Sammis et al. (1987)의 구속 분쇄이론의 적용 범주를 지난 후부터는 Storti et al. (2003)의 입자 마모와 더불어 부수적으로 Blenkinsop (1991)의 조립 입자의 선택적 단열이 동시에 일어나 입자 크기 감소와 높은 차원 값을 갖게 된 것으로 생각할 수 있다. 이렇게 볼 때 단층핵의 파쇄 진화 동안 후기의 입자 마모가 우세하게 일어날 동안에도 부분적으로 입자 파쇄가 수반될 수 있으며, 조기의 대량 파쇄 동안에도 입자 마모가 부수적으로 일어나게 될 것으로 생각된다.

많은 지질학자들은 취성의 단층암은 엽리를 발달시키지 않는 것으로 생각하였지만 취성의 파쇄암도 3개의 독립적인 열구조 요소들(형태 선택배향, 점토광물 평행정렬, 광물 분결(segregation)띠)에 의해 규정되는 엽리를 갖는 것으로 인식되고 있다(Chester et al, 1985; Cladouhos, 1999). 본 연구의 프랙탈 차원 분석에 사용된 잔류입자들을 현미경하에서 관찰하여 보면 기질의 점토광물들과 더불어 형태 선택배향을 보여주고 있다(Fig. 3). 잔류입자 중에서도 원마모가 좋은 입자일수록 그리고 장축과 단축의 비, 즉 종횡비가 클수록 강한 형태 선택배향을 보여주는 경향이 있다. 대부분의 잔류입자들의 장축이 기질에 관통적으로 발달하고 있는 점토입자의 배열 즉 P엽리에 거의 평행한 것은 대량 파쇄작용 후 잔류입자들이 풍부해진 기질의 미세입자 속에서 회전에 의해 이루어진 것을 지지한다. 그럼으로 잔류입자들의 선택배향에 의한 엽리 발달은 잔류입자를 점성의 기질에 에워싸인 강성 입자로 생각할 때 입자회전에 의한 엽리 발달 기구 중 Jeffery 모델(Twiss and Moores, 2007)을 지지한다고 볼 수 있다.

결 언

한반도 동남부의 제3기 와읍분지는 단층에 의해 백악기 기반암과 접경하고 있다. 이들 경계단층은 어디에서나 단층비지를 포함하는 단층핵을 잘 발달시키고 있다.

현미경 관찰에 의하면 반상쇄편인 잔류입자들은 아원형 타원체의 모양으로 미립자의 기질에 에워싸여 고립된 상태로 분포한다. 잔류입자들은 흔히 그 장축이 서로 평행하게

형태 선택배향을 이루며 점토광물이 풍부한 기질에서 관통적으로 발달하는 점토엽리(P엽리)에 평행 내지 이평행하다. 이와 같은 잔류입자의 형태 선택배향은 풍부한 기질의 미세 입자 속에서 지속적인 단층 슬립 동안 회전에 의해 이루어진 것으로 생각된다.

잔류입자들의 크기와 누적 개수로 계산된 프랙탈 차원 값은 전체적으로 2.40~3.02의 넓은 범위를 나타낸다. 높은 차원 값을 갖는 시료는 모두 작은 크기의 잔류입자를 풍부하게 포함하고 있다. 그러니까 높은 차원 값은 큰 단층 슬립과 다중 단층작용을 반영한다고 볼 수 있다.

본연구의 비지대에서 2.58보다 높은 차원 값은 구속 분쇄 이론의 적용 범주를 지난 후부터는 입자 마모와 더불어 부수적으로 조립 입자의 선택적 단열이 일어나 입자 크기 감소와 높은 차원 값을 갖게 된 것으로 생각된다. 그러니까 단층핵의 파쇄 진화 동안 후기의 입자 마모가 우세하게 일어날 동안에도 부분적으로는 입자 파쇄가 수반될 수 있으며 조기의 대량 파쇄 동안에도 인접 입자 간 입자 마모가 부수적으로 일어났을 것으로 생각할 수 있다.

사 사

본 연구를 수행하는 과정에서 아의 시료 채취와 실내 자료 분석 및 정리를 도와준 경북대 구조지질학 연구실의 김성진석사 및 여러 학생들에게 고마움을 표하고 본 논문의 심사 과정에서 건설적인 조언을 아끼지 않은 이현우박사와 익명의 두 심사위원에게도 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- 장태우, 장윤득, 2008, 단층 비지대의 성장: 경주시 양북면 부근의 사례, 지질공학, 18, 145-152.
 장태우, 정재혁, 장천중, 2007, 한반도 동남부 제3기 어일 및 와읍분지의 지구조 운동, 지질공학, 17, 27-40.
 장태우, 추창오, 1998, 동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar연령. 지질공학, 8, 175-188.
 최한우, 장태우, 1999, 모량단층 주변 절리의 분포 특성과 프랙탈 해석, 지질공학, 9, 119-134.
 Awaji, D., Yamamoto, D. and Takagi, H., 2006, Kinematic history of the Tanakura Shear Zone at brittle regime. Jour. Geol. Soc. Japan, 112, 222-240.
 Beeler, N. M., Tullis, T. E., Blanpied, M. L. and Weeks, J. D., 1996, Frictional behavior of large displacement experimental faults. Jour. Geophys. Res., 101, 8697-8715.
 Billi, A., 2005, Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin(< 1 m) strike-slip fault cores in limestone. Jour. Struct. Geol., 27, 1823-1837.
 Blenkinsop, T.G., 1991, Cataclasis and processes of grain size reduction. Pure Appl. Geophys., 136, 59-86.

- Chester, F. M., Friedman, M. and Logan, J. M., 1985, Foliated cataclasites. *Tectonophysics*, 111, 139-146.
- Cladouhos, T. T., 1999, Shape preferred orientations of survivor grains in fault gouge. *Jour. Struct. Geol.*, 21, 419-436.
- Sammis, C., King, G. and Biegel, R., 1987, The kinematics of gouge deformation. *Pure Appl. Geophys.* 125, 777-812.
- Son, M., Kim, I. S. and Sohn, Y. K., 2004, Evolution of the Miocene Waeup Basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). *Jour. Asian Earth Sci.*, 25, 529-544.
- 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.
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., 2007, *Structural Geology*. Freeman and Company, 736p.

2010년 5월 18일 원고접수, 2010년 6월 18일 게재승인

장태우

경북대학교 지질학과

702-701, 대구시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5361

Fax: 053-950-5362

E-mail: twchang@knu.ac.kr