

층상 암석에서 절리의 특성 연구

장태우*

경북대학교 지질학과

Joint Characteristics in Layered Rocks

Tae Woo Chang*

Department of Geology, Kyungpook National University

절리는 전파할 때 상대적인 이동이 절리 벽에 수직으로 일어난 평탄한 신장 열림 모드 단열이다. 층상 퇴적암에 발달하는 절리는 일반적으로 층리면에 수직이고 인접한 절리와 평행한 배향과 규칙적인 간격을 가지며 절리 조를 이룬다. 본 문은 층상 퇴적암의 절리에 대한 최근 연구 결과들을 토대로 절리 전파의 역학적 규제, 층두께-절리간격의 관계, 절리 간격의 빈도 분포, 절리 포화, 절리 밀도, 교차 절리, 절리 발달 기구 등을 고찰 한다.

주요어 : 열림 모드 단열, 절리 포화, 절리 간격, 교차 절리

Joints are planar tensile opening-mode fractures whose relative motion, as the fracture propagates, is perpendicular to bedding plane and occur in a systematic manner to form a joint set. This paper discusses the mechanical control of joint propagation, the relationship between joint spacing and layer thickness, the joint saturation, the frequency distribution of joint spacing, the joint density, the cross joint, and the development mechanism of joint from a lot of recent joint studies in sedimentary rocks.

Key words : opening-mode fracture, joint saturation, joint spacing, joint density

서 언

단열은 변형작용 동안 그 면을 따라 일어난 상대적인 이동에 의해 신장단열(절리)과 전단단열(단층)로 구분할 수 있다. 신장단열인 절리는 비교적 낮은 차응력 하에서 생성되기 때문에 지각을 구성하는 거의 모든 암석에서 발견되는 가장 흔한 취성 지질구조이며, 면에 평행한 변위가 없는 평탄한 신장 열림 모드 단열이다(Engelder, 1987; Pollard and Aydin, 1988).

절리는 그 면이 평탄하고 인접한 절리 끼리 평행한 배향과 규칙적인 간격을 가질 때 규칙절리(systematic joint)라 하고 절리면이 굴곡 되고 불규칙한 기하를 나타낼 때 불규칙 절리(nonsystematic joint)라 한다(Twiss and Moores, 2007). 야외노두에서 이들은 대개 한 조(set) 이상이 발달하는 것을 볼 수 있으며 주로 상호 접경(abutting)

관계에 의해 조 간의 생성 순서를 판단하기도 한다.

괴상의 석회암이나 사암, 화강암 등에서 절리는 흔히 암체의 수직단면 내의 무작위 지점에서 종지하는 것을 볼 수 있지만, 층상 퇴적암에서는 인접 층과 역학적으로 다른 성질을 갖는 층 경계에서 종지하는 것을 퇴적암의 수직 노두에서 흔히 볼 수 있다. 또 층상 퇴적암의 어떤 층(layer)내에 발달하는 절리의 간격은 층두께에 비례하는 것으로 알려져 있다(Price, 1966; Ladeira and Price, 1981; Narr and Suppe, 1991). 본문에서는 이와 같은 특성을 보여주는 층상 퇴적암의 절리에 대한 최근 연구 결과들을 요약 고찰해 보기로 한다.

절리의 중요성

절리는 최소주응력(σ_3)방향에 수직이고 최대주응력을

*Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

포함하는 면에서 생성되고 진파되며 과거와 현재의 지구구조 응력장 배향의 훌륭한 지시자 역할을 할 수 있다 (Dunne and Hancock, 1994).

층상 암석에서 절리의 높이(길이)에 대한 개구(aperture)의 비 즉 종횡비(aspect ratio)는 평균 변형, 윗짐 응력, 단열 내 유압에 선적으로 관계한다(Bai and Pollard, 2000). 절리의 개구는 지하에서 유체이동의 통로가 됨으로 대수층 및 석유 저장소에서 자연 단열망의 이해는 지하수 유동 및 오염과 석유 이동 및 집적을 예측하기 위한 모델링을 하는데 있어서 중요한 배경이 된다(Taylor et al., 1999). 층상 퇴적암에서 절리는 수직 방향에 비해 수평 방향으로 유체 이동의 보다 긴 통로를 제공하게 된다.

지하에서 광화용액은 절리를 따라 쉽게 이동하기도 하고 급속 및 비급속 광물자원의 침전 장소가 되기도 하기 때문에 절리 자료는 광물자원 탐사 및 개발의 큰 실마리를 제공한다.

절리의 밀도와 길이는 암석의 역학적 성질을 규제하며 산사태나 지반침하를 유발하는 원인이 되기도 하며 나아가서 공학적부지 즉 댐, 터널, 도로, 빌딩, 다리, 발전소 등 중요한 구조물을 설계하고 안전성을 평가하는데 많이 활용된다.

괴상의 화강암, 사암, 석회암 등의 채석장에서 직교하는 규칙절리의 발달은 절리에 규제된 연약면을 이용하여 건축용 블록을 직사각형으로 떼어내는데 중요한 역할을 한다.

지표에서 절리의 연약면은 유수와 바람의 자유 통로가 되기 때문에 절리를 따라 풍화 침식작용이 활발하게 진행되어 수계, 해안선, 선상구조 등의 모양을 규제함으로써 지표 지형에 크게 영향을 끼치고, 나아가서 아름다운 자연 경관을 형성하는 일이 아주 흔하다.

절리 전파의 역학적 규제

퇴적암에서 절리는 일반적으로 층리에 수직이며, 평행한 단열이 조를 이루며 나타나며 층 경계에 의해 길이가 한정되는 경우가 흔하다. 이 층 경계는 단일 층(bed)의 면일 수도 있고 아닐 수도 있지만 절리의 수직 길이(절리의 높이)는 '역학적 층 두께(mechanical layer thickness)'와 동일하다(Bai and Pollard, 2000). 여기서 역학적 층(layer)이란 절리들이 역학적 성질이 유사한 층(layer)에 한정된다는 사실과 이 층은 하나 이상의 층서적 층(bed)을 포함 할 수 있다는 사실을 강조하기 위해 층서적 층(bed)보다 차라리 역학적 층(layer)이라는 용어가 사용되고 있다 (Narr and Suppe, 1991).

나아가서 절리 발달에 있어서 역학적 층은 암질 규제

역학적 층(lithology-controlled mechanical layer)과 절리 규제 역학적 층(joint-controlled mechanical layer)으로 나눌 수 있는데 (Fig. 1), 암질규제 역학적 층은 작용하는 응력에 균질하게 거동하는 암석 단위로서 그 경계는 암질 변화가 역학적 성질의 차이를 나타내는 곳에 놓인다(Gross, 1993). 절리 규제 역학적 층은 기존의 규칙절리에 직교하게 교차절리(cross joint)가 발달하게 될 때 기존의 절리가 역학적 경계가 될 수 있으며 이 경우 기존의 규칙절리 사이의 간격을 절리 규제 역학적 층이라 한다(Ruf et al., 1998).

많은 절리들은 그 연장이 하나의 퇴적층(single bed) 내에 한정되지만 어떤 절리들은 두개의 층 경계 사이에 한정되거나 몇 개의 층을 횡단하며 발달하는 다층층 절리(multilayer joint)로 나타나기도 한다(Bai et al., 2000; Odonne et al., 2007). 전자를 층경계 절리(stratabound joint)라 하고 후자를 비층경계 절리(non-stratabound joint)라 하는데, 비층경계 절리는 연약한 성질의 사잇층(interbed)이 없어서 여러 층을 횡단하며 발달하고, 이 경우는 우세한 절리 크기의 발달을 기대하기 어렵다(Odonne et al., 2007). 층경계 절리는 절리의 개구와 간격이 균질하게 분포하지만 비층경계 절리의 개구는 절리의 길이에 비례하고 간격은 규칙적이지 못하다(Odonne et al., 2007).

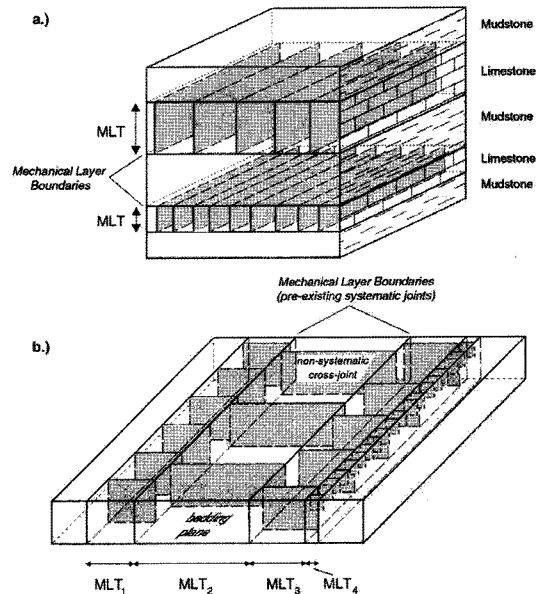


Fig. 1. Illustration of joints confined to mechanical layers. (a) Mechanical layer boundaries defined by lithologic contacts (lithology-controlled); (b) Mechanical layer boundaries defined by pre-existing joints (joint-controlled). Note that joint spacing is proportional to mechanical layer thickness (MLT) in both cases (from Gross, 1993).

층 두께-절리 간격의 관계

층상 암석에서 절리는 주어진 절리조에서 절리 사이의 거리 즉 간격은 단일층 내에서는 규칙성을 보여주고 역학적 층 두께에 비례하며 (Fig. 2), 또한 암석의 종류와 구조적 위치에 영향을 받는다(Price, 1966; Ladeira and Price, 1981; Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993).

이 비례의 메카니즘은 절리에 수직한 인장응력이 감소하거나 절리에 수직한 압축응력의 증가로 새로운 절리의 생성이 중단될 수 있기 때문이다(Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993; Bai and Pollard, 2000a). 층상 퇴적암에서 층 두께에 비례하는 절리간격(절리간격/층두께)의 범위는 0.1이하에서 10이상의 값을 갖는다(Ladeira and Price, 1981; Gross, 1993). 층 두께-절리 간격 간의 관계에 대한 많은 예외도 존재하는데 이는 암질, 절리 조 발달 정도, 지구조 변형의 규모, 층간 슬립 등과 같은 절리 발달에 대한 다른 요인의 영향으로 생길 수 있다(Ji and Saruwatari, 1998; Rives et al., 1992; Becker and Gross, 1996).

절리 간격의 빈도 분포

절리 간격의 빈도 분포는 절리조의 성인과 진화에 관한 정보를 제공하며 퇴적암에서는 흔히 대수-정규 분포를 보여준다(Narr and Suppe, 1991). 엔지니어링 연구에서 절리 사이의 간격을 측선을 따라 측정하여 간격 분포를 검토하기도 하는데, Priest and Hudson(1976)은 불연속

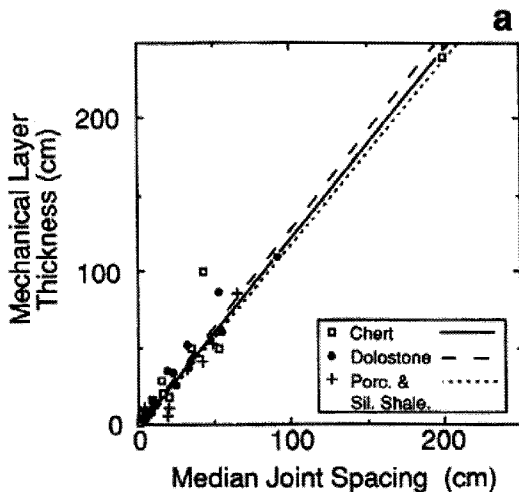


Fig. 2. Median layer thickness and median joint spacing, plotted by lithology (from Narr and Suppe, 1991).

면의 간격 빈도 분포가 음의 지수 분포형태를 따름을 발견하였고 이 결과는 그 후 널리 인용되어 왔다. 그러나 그들의 불연속면은 절리 뿐 만 아니라 단층, 층리면, 균열, 틈, 미단열을 포함하여 성인적으로 다른 단열을 분리하지 않은 채 처리한 결과이다(Narr and Suppe, 1991).

Rives et al.(1992)은 아날로그 모델 연구의 결과로 절리 간격 분포를 변형의 증가와 더불어 절리 발달 단계별로, 초기의 저밀도 상태에서는 음의 지수 분포, 중간 정도의 절리 밀도에서 대수-정규 분포, 최대 밀도에서 정규 분포를 함을 보여주었다 (Fig. 3). 이와 같은 절리 진화 과정 해석을 위한 자료를 야외 노두에서 충분히 얻는 것은 쉬운 일이 아니다. Becker and Gross(1996)는 야외 노두

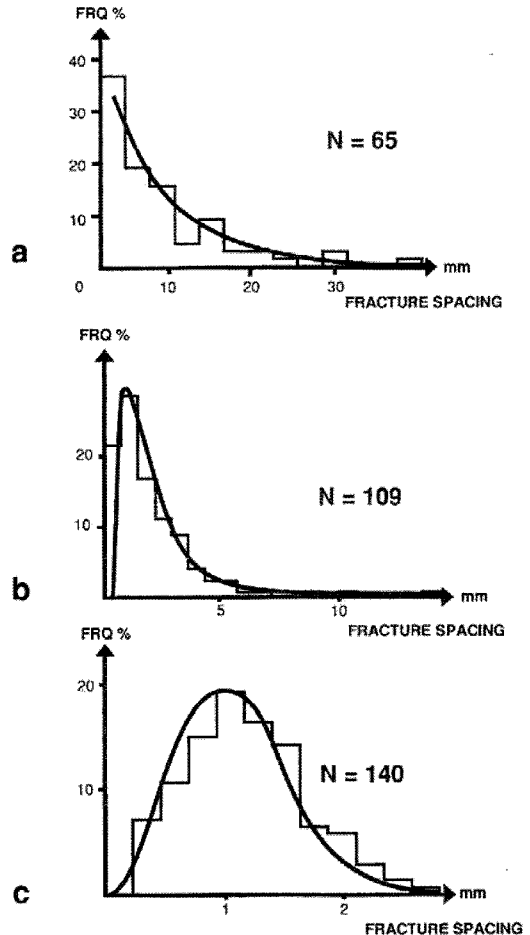


Fig. 3. Histograms and fitted distribution laws of the spacing of the generated fractures in the analogues model. (a) After the few first fractures, (b) intermediate fracture density and (c) high fracture density (from Rives et al., 1992).

자료를 가지고 절리 간격 분포의 진화를 해석하였는데, 이들의 노두는 Rives et al.(1992)의 초기단계의 분포는 나타내지 못하고 중간단계에서 다봉(multimodal)의 대수 정규 분포와 최종단계에서 좁은 단봉(unimodal) 분포를 함을 보여주고 있다.

절리의 포화

어떤 절리조의 간격의 최빈값(mode)평균값(mean)의 비가 1이면 정규분포를 지시하고 1보다 작으면 대수 정규분포, 0에 가까울수록 음의 지수분포를 나타낸다. 또 절리의 수가 증가함에 따라 최빈값/평균값의 비는 절리조의 포화의 정도를 지시할 수 있으며 최빈값/평균값이 0에 가까우면 저밀도의 불포화 상태를, 1에 가까운 높은 값이면 거의 포화상태를 지시한다(Rives, et al., 1992).

Bai and Pollard(2000a)는 상하 연약층(incompetent layer) 사이에 강인층(competent layer)을 내포하는 세 층간 탄성 모델을 사용하여 임계 간격 대 층 두께비(critical spacing to layer thickness ratio; S/T_f)가 있음을 보여주었는데 이 비가 1이상에서 1이하로 바뀔 때 따라 절리면에 수직으로 작용하는 수직응력은 신장상태에서 압축상태로 변하여 '응력 상태 전이(stress state transition)'가 일어나서 더 이상 단열의 충전(infilling)은 일어나지 않는다는 것이다. 이 임계 S/T_f 값 ($0.8 \leq S/T_f \leq 1.2$)은 결합 없는 물질에서 신장으로 발생할 절리의 하한과 절리 포화의 조건을 규정한다. 이 임계 S/T_f 값이 1.2 이상이면 절리는 불포화 상태에 있다고 하겠고 0.8이하이면 절리는 다른 충전 메카니즘이 작용하지 않는 한 더 이상 발달하지 않게 된다.

위에서 이야기한 절리간격의 최빈값/평균값의 비와 S/T_f 의 비 이외에도 절리조의 포화상태를 절리간격에 대한 표준편차의 비인 변동계수(coefficient of variation: C_v)로 나타내기도 한다(Gillespie, 2003). C_v 가 1이하 일 때 보다 규칙적 간격(anticlustered spacing)으로 포화상태를 나타내고, C_v 가 1이상 일 때는 불규칙적으로 밀집된 간격(clustered spacing)의 불포화 상태를 지시한다.

절리포화가 성취되는 메카니즘에 대해서 Narr and Suppe(1991)과 Wu and Pollard(1995)는 변형 수용의 메카니즘으로 층 경계면을 따른 슬립과 기존 절리의 열림(opening)이 새로운 절리의 발달을 대신할 때 포화가 성취될 수 있다고 하였고 Gross(1993)는 변형수용 메카니즘이 바뀔 필요 없이 인접 절리간의 거리가 감소함에 따라 '응력 감소 중복 그늘(overlapping stress reduction

shadow)'이 절리 사이의 유효 절리수직(crack-normal)인장응력을 급격히 감소시킴으로서 일어난다고 하였다.

절리의 밀도

단열의 밀도를 추산하기 위해 Narr and Suppe(1991)는 하나의 지시자로 층 두께에 독립적인 단열간격 지수(Fracture Spacing Index; FSI)를 제안하였다. FSI는 중간 절리 간격(median joint spacing)에 대한 역학적 층 두께의 그림에서 회귀선의 기울기로 규정된다. FSI 값은 절리밀도의 척도로서 전형적인 값은 0.8~1.5의 범위를 갖고 FSI값이 클수록 높은 절리밀도를 지시한다(Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993; Odonne et al., 2007). 단열간격비(Fracture Spacing Ratio; FSR)는 어떤 층에서 역학적 층두께를 절리조의 중간 간격으로 나눈 것이며 FSI 그림 상에서 하나의 자료 점을 나타낸다(Gross, 1993; Ruf et al., 1998). FSR은 광역 응력장의 상대적 크기를 추정하는 도구로서 사용되며(Eyel et al., 2001) FSR이 클수록 절리 밀도가 높다(Odonne et al., 2007). 강인층에서의 절리의 밀도는 연약층의 두께에 상관되어 연약층의 두께가 증가할수록 감소한다(Ladeira and Price, 1981; Ji and Saruwatari, 1998). 나아가서 강인층이 두꺼운 연약층으로 에워싸여 있을 경우 보다 규칙적인 간격과 낮은 밀도를 보여준다(Odonne et al., 2007).

교차절리

충상퇴적암은 가끔 이른(earlier formed) 규칙 절리조 사이의 간격을 횡단하며 발달하는 직교 절리 조를 포함하는데 이를 교차절리(cross joint)라 부른다(Gross, 1993). 이 교차절리는 규칙절리 사이의 간격을 횡단하며 발달하지만 규칙절리를 절단하지는 못한다(Gross, 1993; Ruf et al., 1998). 즉 규칙절리에 거의 수직으로 접경하며 길이는 규칙절리의 간격에 제한된다. 규칙절리에 대한 교차절리의 접경관계는 교차절리가 규칙절리보다 후에 생성된 명백한 증거이며 교차절리는 지표 근처 조건하에서 형성되는 것으로 보인다.

교차절리는 규칙절리의 간격이 넓은 경우보다 좁은 간격의 사이에 전형적으로 발달하며 규칙절리에 직교하는 교차절리는 특징적으로 사다리꼴 모양을 형성하지만 규칙절리의 간격이 넓은 경우는 교차절리와 굴곡하며 접경하기도 한다(Ruf, et al., 1998).

교차절리의 간격은 층서적 층두께(stratigraphic bed

thickness)로 규정되는 역학적 층 두께의 경우보다도 규칙절리 간격(systematic joint spacing)으로 규정되는 역학적 층 두께에 더 잘 상관된다. 즉 교차절리의 간격은 이른 규칙절리의 간격에 의존한다(Ruf et al., 1998; Bai et al., 2002). 나아가서 기존의 연구에 의하면 (Price, 1966; Ladeira and price, 1981; Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993) 층(layer)두께가 규칙절리의 간격을 통제하기 때문에 층 두께는 또한 교차절리 간격도 간접적으로 통제한다고 할 수 있다(Odonne et al., 2007).

교차절리는 이른 규칙절리면에 대한 유효수직응력이 상당히 낮다면, 이른 절리가 전파할 때 층 경계에서 중지할 때처럼, 이른 절리면에서 중지하지만 기존 규칙절리면에 대한 유효수직응력이 크게 압축성이면 이른 절리를 가로 질러 무결합암(intact rock)에서처럼 전파될 수도 있다(Ruf et al., 1998).

절리 발달 기구

사암과 셰일이 교호하는 지층에서 매물 동안 윗짐(overburden)은 최대 압축응력이 된다. 사암이 셰일보다 물성이 강하다는 이야기는 보다 큰 차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)에도 셰일보다 깨어지지 않고 오래 지탱할 수 있음을 말한다. 그럼으로 최소 압축응력(σ_3)인 수평응력은 셰일보다 사암에서 더 적다. 그래서 수압단열작용이 일어날 때 사암은 셰일보다 더 적은 공극유압 상태에서 절리를 발생시킬 수 있게 된다(Twiss and Moores, 2007).

Narr and Suppe(1991)는 층 내 무작위의 약한 지점에서 어느 정도의 절리가 생성된 후 그 다음의 절리는 기존 절리 사이의 중간 지점(인장응력이 높은 지점; 예를 들면, Fig. 4b에서 양쪽 J_0 사이, 4c에서 J_0 와 J_1 사이 등에서 발달한다는 Hobbs의 모델에서, 기존 금(flaw)의 영향이 크게 고려되지 않았음을 지적하고 수정된 Hobbs 모델을 제시하였다(Fig. 4). 그들에 의하면 대개의 새 절리는 기존 절리 사이의 중간 지점에 놓이지 않고 인장강도가 낮고 깊이가 긴 금이 다음 절리로 발달한다는 것이다. 절리가 이렇게 발달한다면 절리간격 분포는 다중 피크를 보여야 하지만, 실제 야외 측정 절리 간격분포는 대부분 단일 피크의 대수-정규분포를 보이는 경우가 많다(Rives et al., 1992 : Becker and Gross, 1996, Odonne et al, 2007). Narr and Suppe(1991)도 이점을 인정하고 최종 절리수가 초기 금의 수보다 훨씬 많다면 대수-정규분포 혹은 정규분포와 유사한 형태를 갖게 될 수 있을 것이라 하였다.

위의 모델은 단일층 내에서 절리 생성에 대한 이야기

이지만, 역학적 성질이 비슷한 두 개 혹은 그 이상의 층을 횡단하며 발달하는 비층경계 절리는 절리가 발달하는 다중층 내에 불연속면으로 작용할 연약한 성질의 사잇층이 없어서 비층경계 절리의 수직 전파를 정지시키기 어렵기 때문에 여러 층을 횡단하며 발달할 수도 있다(Odonne et al, 2007). 한편, 연약한 사잇층을 포함하는 시퀀스(sequence)에서 다중층을 절단하고 발달하는 관통절리(throughgoing joint)는 변형작용의 초기에는 층경계 절리로 발달하지만 궁극적으로 비정상적으로 높은 FSR지대가 형성되면 변형증가와 함께 돌발적으로 층경계를 절단하며 관통절리가 발달할 수가 있다 (Becker and Gross, 1996).

절리 규제 역학적층에 발달하는 교차절리의 생성은 먼저 광역응력 회전기구(regional stress rotation mechanism)로 설명될 수 있다(Fig. 5a). 즉 열림 모드 단열인 절리는

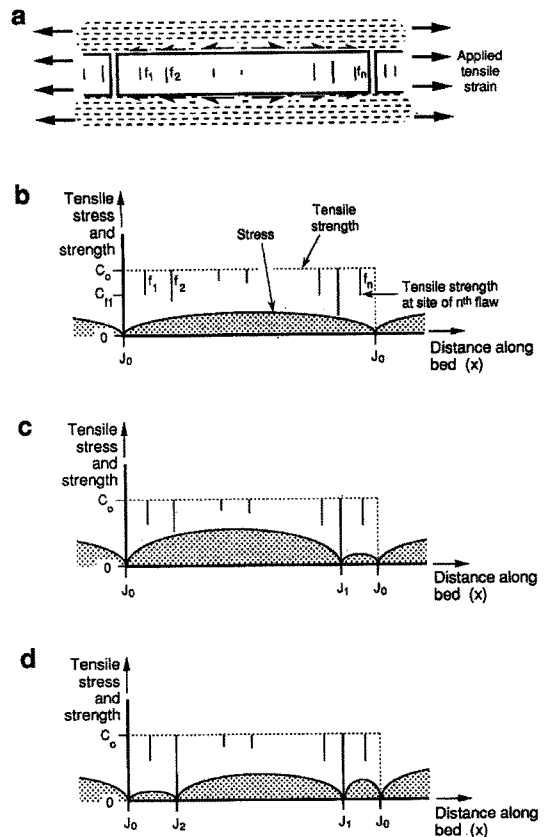


Fig. 4. (a) Modified Hobbs' model of joint formation with flaws randomly located at f_1, f_2, \dots, f_n . (b) Tensile stress vs distance in the jointed layer. The amount that a flaw reduces the tensile strength of the jointed layer is represented by the flaw length, so the strength at flaw f_1 is C_{f1} , etc. Subsequent joints form (c) at J_1 and (d) at J_2 (from Narr and Suppe, 1991).

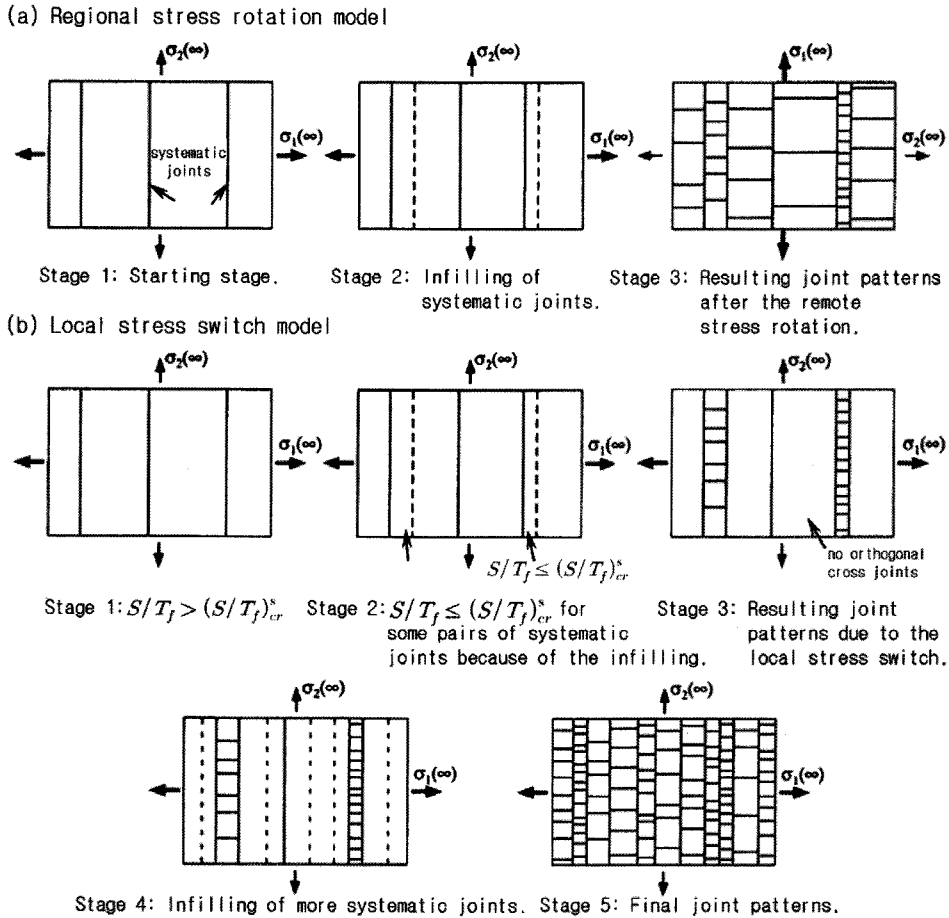


Fig. 5. Schematic representation of two different models that can lead to the development of orthogonal cross joints. (a) Stress rotation model indicating a switch in the orientations of horizontal remote principal stresses through time. Note that in this case orthogonal cross joints will develop between all adjacent systematic joints. (b) Local stress switch model whereby orthogonal cross joints and systematic joints develop within the same stress field. Orthogonal cross joints will be found only between the closely-spaced systematic joints due to the local switch in principal stress axes (Stage 3). However, with further infilling of the systematic joints, orthogonal cross joints may eventually occur between any pair of systematic joints if their spacing to height ratio is less than the critical value, (S/T_f) (modified from Bai et al., 2002).

최대 인장응력($\sigma_{1\infty}$)에 수직인 방향으로 전파되기 때문에 교차절리의 존재는 규칙절리가 생성된 후 광역 주응력이 90° 회전하였음을 의미 한다(Ghosh, 1998; Dunne and North, 1990; Rives et al., 1994). 이에 대해 Bai et al. (2002)은 직교 교차절리 발달에 대한 국지 응력전환 모델 (local stress switch model)을 제시하였다 (Fig. 5b). 규칙절리와 동일한 지구조 응력장에서 즉 동일한 변형작용 환경에서 교차절리는 국지 응력장의 전환으로 발달한다는 것이다. 즉 교차절리는 수평 원격 응력비(horizontal remote stress ratio) $\sigma_{2\infty}/\sigma_{1\infty}$ 가 0.2 이상이고, 규칙절리의 높이

(층두께, T_f)에 대한 간격(S)이 (S/T_f) 가 임계 $S/T_{fc}((S/T_f)$ 대략1.0) 이하일 때 생성된다(Fig. 5b에서 3단계). Fig. 5b의 4단계는 S/T_f 가 $(S/T_f)_c$ 보다 큰 지역에선 여전히 규칙 절리가 발달함을 보여주고 5단계는 모든 규칙절리에서 S/T_f 가 $(S/T_f)_c$ 보다 작아짐에 따라 모든 규칙절리 사이에서 직교 교차절리가 발달하게 된다.

경상누층군 퇴적암에서의 절리

쇄설성 퇴적암으로 구성되는 경상누층군 신동층군과

해양층군은 대체로 사암과 이암이 전형적으로 교호한다. 대구 부근에서 단편적으로 절리를 관찰한 바에 의하면 사암-이암 시퀀스에서 절리는 사암에서 서로 직교하는 두 조의 절리가 규칙적으로 발달한다. 한 조는 남북주향을 가지고 다른 한 조는 거의 동서주향을 가리키는데 경사는 모두 수직에 가깝다. 두 조의 절리들은 서로 절단하는 관계를 보여주는가 하면, 한편 남북조가 동서 조에 접경되거나 그 반대인 경우도 보여준다. 이러한 관계로 볼 때 양자는 단열격자차단(fracture grid-lock) 양상으로 (Dunne and Hancock, 1994) 해석되며 거의 동시에 생성된 직교 절리 조로 간주된다. 또 단열격자차단 양상을 볼 때 이 두 조의 절리 생성시의 고응력은 이축신장(biaxial extension) 환경이었을 것으로 추정된다. σ_1 은 크기와 방향이 모두 고정된 상태이고 σ_2 와 σ_3 는 방향만 고정된 상태에서 그 크기는 서로 빠른 교환을 하면서 남북 조가 생성 시에는 σ_3 이 동서를, 동서 조가 생성 시에는 σ_3 이 남북을 가리켰을 것으로 생각해볼 수 있다.

사암층의 층리에 수직으로 발달하는 절리들은 그 연장이 이암과의 경계에서 중지하고 절리들의 간격은 사암층의 두께에 비례함을 보여준다. 두 우세 절리 조에 대해 절리면에 수직인 방향으로 절리간격을 측정하여 보면 남북조는 약 10~50 cm 간격으로 일정한 편이며 대수-정규 분포 형태를 보인다. 동서 조는 절리간격이 20~70 cm 정도로 남북조에 비해 좀 더 넓고 절리간격의 규칙성은 약하게 나타난다.

향후 경상누층군 퇴적암에서의 절리는 경상분지의 지구조적 진화, 지하수의 개발, 보존, 오염 방지 측면에서, 산사태나 지반침하, 댐, 터널, 도로, 빌딩 등 공학적 부지의 구조물을 설계하고 안전성을 평가하기 위한 기초자료로 활용하기위해 절리의 발달 상태에 대한 많은 조사 연구가 수행되어져야할 것으로 생각된다.

결 언

층상 암석에서 절리의 전파는 층리에 수직인 방향으로 일어나며 층경계에 의해 길이가 한정될 수 있다. 즉 절리들은 역학적 성질이 유사한 층에 규제되어 발달할 수 있다. 절리 발달에 있어서 역학적 층은 암질규제 역학적 층과 절리규제 역학적 층으로 나눌 수 있다. 많은 절리들은 하나의 퇴적층 내에 한정되어 발달하지만 어떤 절리들은 몇 개의 층을 횡단하며 발달하는데 전자를 층경계 절리라 하고 후자를 비층경계 절리라 한다.

층상 암석에서 절리는 주어진 절리 조에서 절리 사이의

거리 즉 간격이 규칙성을 보여주고 역학적 층 두께에 비례한다. 절리간격의 빈도분포는 퇴적암에서는 흔히 대수-정규 분포를 보여주고, 절리조의 성인과 진화에 관한 정보를 제공한다. 아날로그 모델 연구의 결과에 의하면 변형의 증가와 더불어 절리간격 분포는 초기의 저밀도 상태에서 음의 지수분포, 중간 정도의 절리밀도에서 대수-정규분포, 최대 밀도에서 정규분포를 함을 보여준다.

절리의 수가 증가함에 따라 절리 조 간격의 최빈값/평균값의 비는 절리조의 포화 정도를 지시할 수 있으며 그 비의 값이 0에 가까우면 저밀도의 불포화상태를, 1에 가까운 높은 값이면 거의 포화상태를 지시한다. 또 층두께(T_p)에 대한 간격(S)의 임계비가 1.2 이상이면 절리는 불포화상태에 있다고 하였고 0.8 이하이면 다른 충전기구가 작용하지 않는 한 절리는 더 이상 발달하지 않게 된다.

단열 간격지수(FSI)와 단열 간격비(FSR)는 절리의 밀도를 추산하는 지시자로 사용되고 있는데 이들의 값이 클수록 높은 절리밀도를 지시한다.

층상 퇴적암은 가끔 이른 규칙절리 사이의 간격을 횡단하며 교차절리를 발달시키는데 이들은 규칙절리에 거의 수직으로 접경하며 길이는 규칙절리의 간격에 제한된다. 나아가서 층두께가 이른 규칙절리 간격을 통제한다고 볼 때 또한 층두께는 교차절리의 간격도 간접적으로 통제한다고 할 수 있다.

사암-세일 시퀀스에서 규칙절리가 사암에 잘 발달하는 것은 퇴적물이 매몰되고 수압 단열작용이 일어날 때 사암은 세일보다 더 적은 공급유압 상태에서 절리를 발생시킬 수 있기 때문이다.

어떤 층에서 절리가 발달할 때 층 내에 무작위로 존재하는 인장강도가 낮고 길이가 긴 금들이 차례로 다음 절리로 발달하지만, 최종 절리 수가 초기 금의 수보다 4~5 배 이상 많은 경우는 대부분의 절리가 기존 절리 사이의 중간지점(인장응력이 높은 지점에서 새 절리가 차례로 발달하게 된다.

경상누층군의 사암-이암 시퀀스에서 절리는 사암에서 서로 직교하는 두 조의 절리가 규칙적으로 발달하며 절리의 간격은 대수-정규 분포를 보여준다. 이들은 서로 절단하는 관계로 볼 때 단열 격자차단 양상으로서 이축신장 응력 환경에서 응력축의 빠른 교환으로 거의 동시에 생성된 직교 절리조로 간주된다.

참고문헌

Bai, T., Maerten, L., Gross, M. R., and Aydin, A., 2002,

- Orthogonal cross joint ; do they imply a regional stress rotation? *J. Struct. Geol.*, 24, 77-88.
- Bai, T. and Pollard, D. D., 2000a, Fracture spacing in layered rocks ; a new explanation based on the stress transition. *J. Struct. Geol.*, 22, 43-57.
- Bai, T. and Pollard, D. D., 2000b, Closely spaced fractures in layered rocks ; initiation mechanism and propagation kinematics. *J. Struct. Geol.*, 22, 1409-1425.
- Bai, T., Pollard, D. D. and Gross, M. R., 2000, Mechanical Prediction of fracture aperture in layered rocks. *J. Geophys. Res.*, 105, 707-721.
- Becker, A. and Gross, M. R., 1996, Mechanism for joint saturation in mechanically layered rocks ; an example from southern Israel. *Tectonophysics*, 257, 223-237.
- Dunne, W. D. and North, C. P., 1990, Orthogonal fracture systems at the limits of thrusting: an example from southwestern Wales. *J. Struct. Geol.*, 12, 207-215.
- Dunne, W. D. and Hancock, P. L., 1994, Paleostress analysis of small-scale brittle structures. In: *Continental deformation* (edited by Hancock, P. L.) Pergamon Press, pp.101-120.
- Engelder, T., 1987, Joints and shear fractures in rocks. In ; Atkinson, B. K. (Ed.). *Fracture mechanics of rock*. Academic Press, London, pp27-69.
- Eyal, Y., Gross, M. R., Engelder, T., and Becker, A., 2001, Joint development during fluctuation of the regional stress field in southern Israel. *J. Struct. Geol.*, 23, 279-296.
- Gillespie, P., 2003, Comment on "The geometric and statistical evolution of normal fault system : an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws" by R. V. Ackerman, R. W. Schlische and M. O. Withjack. *J. Struct. Geol.*, 25, 819-822.
- Ghosh, S. K., 1998, Theory of chocolate tablet boudinage. *J. Struct. Geol.*, 10, 541-553.
- Gross, M. R. 1993, The origin and spacing of cross joint : examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California. *J. Struct. Geol.*, 15, 737-751.
- Helgeson, D. E. and Aydin, A., 1991, Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks. *J. Struct. Geol.*, 13, 897-911.
- Ji, S. and Saruwatari, K., 1998, A revised model for the relationship between joint spacing and layer thickness. *J. Struct. Geol.*, 20, 1495-1508.
- Ladeira, F. L. and Price, N. J., 1981, Relationship between fracture spacing and bed thickness. *J. Struct. Geol.*, 3, 179-183.
- Narr, W. and Suppe, J., 1991, Joint spacing in sedimentary rocks. *J. Struct. Geol.*, 13, 1037-1048
- Odonne, F., Lezin, C., Massonnat, G., and Escadeillas, G., 2007, The relationship between joint aperture, spacing distribution, vertical dimension and carbonate stratification : An example from the Kimmeridgian limestones of pointe-du-Chay(France). *J. Struct. Geol.*, 29, 746-758.
- Pollard, D. D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1181-1204
- Price, N. J., 1966, *Fault and Joint development in brittle and semi-brittle rock*. Pergamm Press, New York, 568 pp.
- Priest, S. D. and Hudson, J. A., 1976, Discontinuity spacing in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.* 13, 135-148.
- Rives, T., Razack, M., Petit, J. P. and Rawnsley, K. D., 1992, Joint spacing : analogue and numerical simulations. *J. Struct. Geol.*, 14, 925-937.
- Rives, T., Rawnsley, K. D. and Petit, J. P., 1994, Analogue simulation of natural orthogonal joint set formation in brittle varnish. *J. Struct. Geol.*, 16, 419-429.
- Ruf, J. C., Rust, K. A. and Engelder, T., 1998, Investigating the effect of mechanical discontinuities on joint spacing. *Tectonophysics*, 259, 245-257.
- Taylor, W. L., Pollard, D. D. and Aydin, A., 1999, Fluid flow in discrete joint sets : field observations and numerical simulations. *J. Geophys. Res.*, 104, 28,983-29,006
- Twiss, R. L. and Moores, E. M., 2007, *Structural Geology*. Freeman and Company, 736pp
- Wu, H. and Pollard, D. D., 1995, An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. *J. Struct. Geol.*, 17, 887-905.

2009년 4월 11일 원고접수, 2009년 6월 15일 게재승인

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과

702-701, 대구시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5361

Fax: 053-950-5362

E-mail: twchang@knu.ac.kr