

경상누층군 퇴적암의 절리 특성 연구

장태우^{1*} · 손병국²

¹경북대학교 지질학과, ²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

Joint Characteristics in Sedimentary Rocks of Gyeongsang Supergroup

Tae Woo Chang^{1*} and Byeong Kook Son²

¹Department of Geology, Kyungpook National University

²Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

경상분지 내 구미노두와 다사노두 지역에서 신동층군의 사암층을 대상으로 절리 연구가 집중적으로 이루어졌다. 사암-이암 시퀀스의 양 지역 노두에서 똑같이 두 조의 직교 절리가 사암층에 전형적으로 발달하고 있다. 여러 가지 절리 자료들을 양 지역의 동일한 두께의 층에서 비교하여보면 상당히 유사한데 이는 절리 조들이 동일한 응력장에서 신장 변형 작용으로 균질하게 생성되었음을 이야기 한다. 대부분의 절리들은 퇴적물이 매몰되어 고화되는 과정에서 수압단열작용에 의해 생성된 것으로 생각되며, 사암층의 층 경계에 수직이고 층 경계에 이르러 중지한다. 두 조의 직교하는 절리들은 단열 격자차단 양상으로 해석되는 상호 접경하는 관계로 볼 때 σ_1 은 수직으로 고정된 상태에서 σ_2 와 σ_3 의 빠른 교환에 의해 거의 동시에 생성된 것으로 판단된다. 사암층에서의 절리조들은 인접한 절리 간에 평행한 배향을 가지며 규칙적인 간격을 가지고 절리면은 평탄하다. 절리간격은 층 두께에 비례하고 간격분포는 대부분의 층에서 대수-정규분포 내지 정규분포를 나타낸다. 그러나 다중층에서는 간격의 분포범위가 크고 불규칙한 형태를 보여준다. 연구지역에서 두 조의 절리들은 최빈값/평균값의 비가 1 내외로 포화상태를, 또 다른 척도인 변동계수(Cv)도 1이하의 낮은 값으로 포화를 지시한다. 절리의 개수는 모든 사암층의 절리에서 균질하기보다는 절리의 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 갖는다.

주요어 : 절리조, 응력장, 신장변형작용, 수압단열작용, 절리간격

Two orthogonal joint sets develop well only in sandstone beds in the sandstone-mudstone sequences of Gumi and Dasa outcrops within Cretaceous Gyeongsang Basin. And various joint data are similar in the beds of the same thickness in both outcrops, meaning that the joint sets were homogeneously produced by extensional deformation in the same regional stress field. Most of joints in the sandstone beds are orthogonal to, and confined by bed boundaries, which are believed to be formed by hydrofracturing during consolidation after burial. Two orthogonal joint sets are considered to be almost coeval on the basis of mutual abutting relationship which makes up fracture gridlock and a product of rapid switching of σ_2 and σ_3 axes with constant σ_1 direction oriented to vertical. The joint sets in the sandstone beds show planar surfaces, parallel orientations and regular spacing, with joint spacing linearly proportional to bed thickness. The spacing distributions of the joints seem to correspond to log-normal to almost normal distribution in most of the beds. But multilayer joints do not display regular spacing and dominant size. Either joint set in this study is characterized by a high level of joint density and a saturated spacing distribution as indicated by the mode/mean ratio values and the Cv(coefficient of variance) values. Joint aperture tends to increase with the vertical length of the joints controlled by bed thickness.

Key words : joint set, stress field, extensional deformation, hydrofracturing, joint spacing

*Corresponding author: twchang@knu.ac.kr

서 론

절리는 비교적 낮은 차응력 하에서 생성되기 때문에 지각을 구성하는 거의 모든 암석에서 발견되는 가장 흔한 취성구조이며, 면에 평행한 변위가 없는 평탄한 신장 열림 모드 단일이다(Engelder, 1987; Pollard and Aydin, 1988). 절리는 최소주응력(σ_3)방향에 수직이고 최대주응력을 포함하는 면에서 생성되고 전파되며 과거와 현재의 지구구조 응력장 배향의 훌륭한 지시자 역할을 할 수 있다(Dunne and Hancock, 1994).

퇴적암에서 절리는 일반적으로 층리에 수직이며, 평행한 단열이 조(set)를 이루며 나타나며 층 경계에 의해 길이가 한정된다. 흔히 절리들은 그 연장이 하나의 퇴적층(single bed)내에 한정되는데 이 경우를 층경계 절리(stratabound joint)라 하고 경우에 따라 두 개의 층 경계 사이에 한정되거나 몇 개의 층을 횡단하며 발달하는 다층층 절리(multilayer joint)로 나타나면 비층경계 절리(non-stratabound joint)라고도 한다(Bai et al., 2000; Odonne et al., 2007).

주어진 절리 조에서 절리 사이의 거리인 절리간격은 단일 층 내에서는 비교적 일정하며 층 두께에 비례한다(Ladeira and Price, 1981). 절리 간격의 빈도 분포는 절리조의 성인과 진화에 관한 정보를 제공하며, 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.

절리의 밀도를 추산하기 위해 Narr and Suppe(1991)는 하나의 지시자로 층 두께에 독립적인 단열간격 지수(Fracture Spacing Index; FSI)를 제안하였으며, FSI값이 클수록 높은 절리밀도를 지시한다(Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993; Odonne et al., 2007). 또 하나의 절리밀도의 척도인 단열 간격 비(Fracture Spacing Ratio; FSR)는 어떤 층에서 역학적 층 두께를 절리조의 중간 간격으로 나눈 것으로(Gross, 1993; Ruf et al., 1998), FSR이 클수록 절리 밀도가 높다(Odonne et al., 2007).

어떤 절리조의 간격의 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). 한편 절리간격에 대한 표준편차의 비인 변동계수(coefficient of variation: C_v)로도 절리의 포화상태를 나타내기도 한다

(Gillespie, 2003). C_v 가 1이하 일 때 보다 규칙적 간격(antoclustered spacing)으로 포화상태를 나타내고, C_v 가 1이상 일 때는 불규칙적으로 밀집된 간격(clustered spacing)의 불포화 상태를 지시한다.

층상 암석에서 절리의 높이(길이)에 대한 개구(aperture)의 비 즉 종횡비(aspect ratio)는 평균 변형, 윗집 응력, 단열 내 유압 등에 선적으로 관계한다(Bai et al., 2000). 층경계 절리는 절리의 개구와 간격이 균질하게 분포하지만 비 층 경계 절리의 개구는 절리의 길이에 비례하고 간격은 규칙적이지 못하다(Odonne et al., 2007).

절리는 지하에서 유체(지하수, 광화용액, 석유 및 가스 등)이동의 통로가 됨으로, 대수층, 석유저장소, 공학적 부지 등에서 자연 단열망의 이해는 지하수 유동과 석유 이동 및 집적을 예측하기 위한 모델링을 하는데 있어서 중요한 배경이 된다(Taylor et al., 1999). 층상 퇴적암에서 절리는 수직방향에 비해 수평방향으로 유체이동의 보다 긴 통로를 제공한다.

본 연구는 백악기 경상누층군 신동층군 퇴적암에 발달하는 절리의 발달 상태를 구명하고자 신동층군의 최하부 층인 낙동층의 구미노두와 신동층군의 최 상부 층인 진주층의 다사노두에서 절리 자료를 집중적으로 수집하였다(Fig. 1). 대부분의 노두에서 사암과 이암 및 셰일이 교호하고 절리는 사암층에서 층리면에 거의 수직 방향으로 규칙적(systematic)으로 발달하며, 절리의 높이(길이)는 사암층의 경계에 제한된다. 이 절리에 대해 특히 노출 면적이 넓은 수직 단면 노두를 찾아서 절리의 배향, 간격, 개구 등이 측정되었고 이들은 실내에서 절리의 특성을 규명하기 위해 자세히 분석되었다.

지 질

구미 노두 지역

구미 지역 노두 부근의 지질은 선캠브리아기 화강암질 편마암, 경상누층군중 신동층군의 낙동층, 유천층군의 응회암류, 불국사관입암류인 화강섬록암 등으로 구성된다(Fig. 1b) (참조; 김정환과 임주환, 1974).

선캠브리아기 화강암질 편마암은 중립질로써 석영, 장석 및 소량의 흑운모로 구성되며 석영 및 장석 입자들이 세장되어 미약한 엽리를 발달시키기도 한다. 세립질인 부분에서는 흑운모 편암 및 호상편마암의 암상을 띠기도 한다.

낙동층은 역암 및 사암과 소량의 이암으로 구성된다. 역암의 역은 편마암, 규암, 화강암, 산성맥암 등으로 구

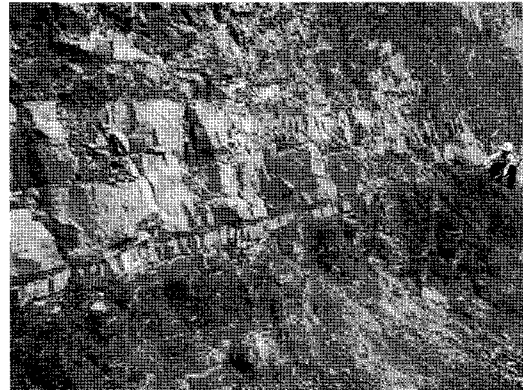
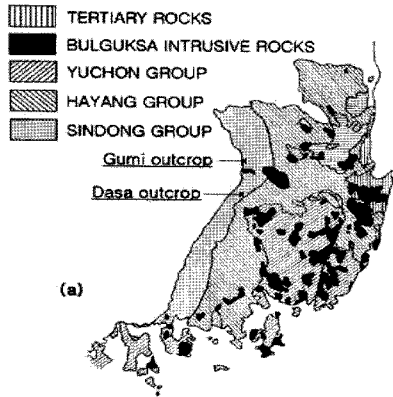


Fig. 2. Sandstone beds interbedded in thick mudstones can be divided into single layer (lower thin bed) and multilayer (upper thick bed).

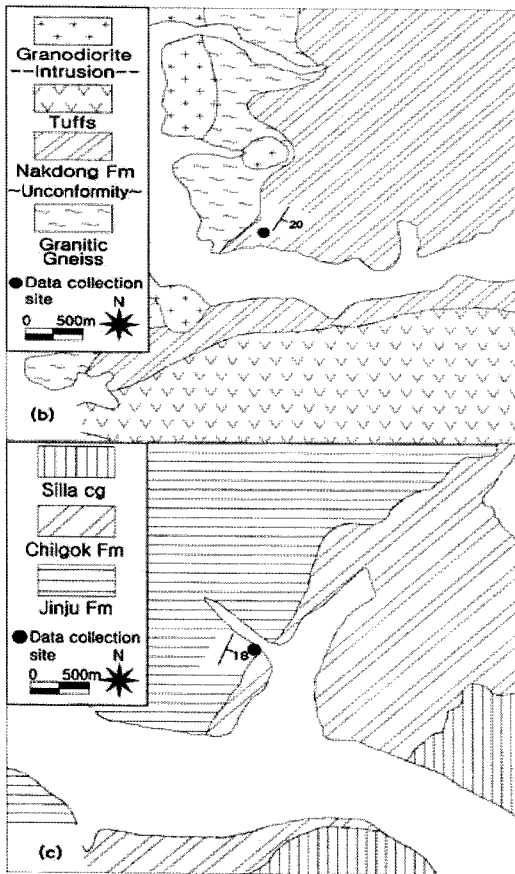


Fig. 1. Geological map of the study area. (a) Geological distribution of the Gyeongsang Basin where two outcrop sites are shown. (b) and (c) Geological maps around Gumi and Dasa outcrops, respectively.

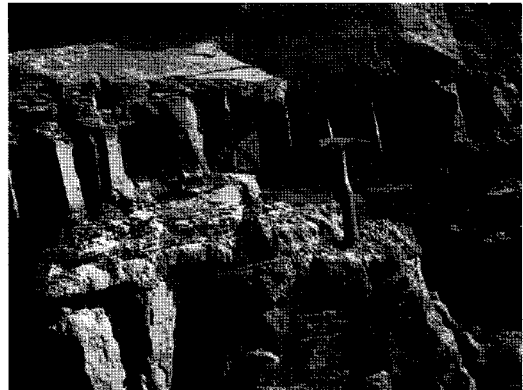


Fig. 3. Two sets of joints almost perpendicular to each other develop in a competent bed (sandstone) interbedded in incompetent beds (mudstone).

성되고 아 원형 내지 원형이다. 판상의 사층리가 흔하며 층리는 30 cm에서 1 m 이상에 이르기까지 두껍게 형성되어 있다. 하부의 기반암과의 부정합면은 매우 불규칙한데, 국

에 따라 하도 역암과 접촉하기도 하고 세립의 점토질 퇴적물 및 박층의 탄층에 의해 피복되기도 한다.

절리 자료 수집 지점에서 낙동층은 최하부에 해당하는 지층으로 회색의 중립 내지 세립사암과 암회색 내지 회색 이암, 흑색의 탄질 세일 및 탄층이 교호하며 상부로 가면서 황갈색의 조립사암과 황회색 세립 사암 및 이암이 교호한다. 규칙절리가 잘 발달하는 사암층은 흔히 다층층(multilayer)으로 산출되기도 하고 단일 층(single layer)으로 산출되기도 한다(Fig. 2). 층리면의 자세는 N30°E주향에 18°SE를 보여준다. 절리는 사암층에서 서로 직교하는 두 조가 잘 발달하며 그 연장은 사암층 경계에 제한되며(Fig. 3) 절리의 개구는 흔히 방해석으로 충전된다. 직교하는 두 조의 절리는 서로 가로지르고 발달하기 때문에 양자 간의 선후관계를 판단하기가 어렵다(Fig. 4).

응회암류는 자료 수집 지점 남쪽에서 동서 방향으로

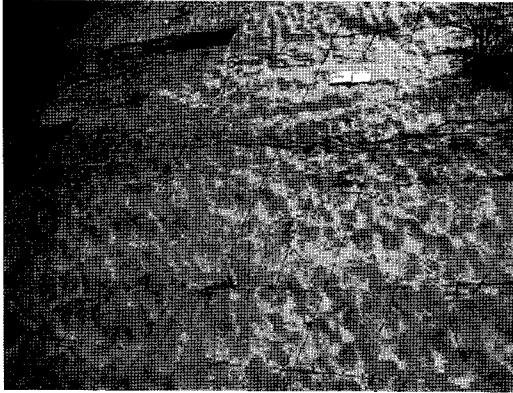


Fig. 4. Mutual cross-cutting relationship between two sets of joints on a bedding plane.

길고 가파른 능선을 따라 분포하며 응회암류의 하부는 안산암질이 우세한데 반해 상부로 갈수록 유문암질이 우세하게 된다.

화강섬록암은 화강암질 편마암과 낙동층을 관입하며 분포한다. 화강섬록암은 세립 내지 중립질로서 대체로 괴상이고 균질한 암상을 보여준다.

다사노두 지역

다사노두 부근의 지질은 경상누층군 신동층군의 진주층, 하양층군의 칠곡층과 신라역암이 분포한다(Fig. 1c) (참조; Tateiwa, 1929). 진주층은 하위의 하산동층 및 상위의 칠곡층과는 달리 적색층을 협재하지 않는 것이 특징인 지층이다. 이 층은 주로 회색 사암, 암회색 이암 및 셰일, 회색 이회암 등으로 구성된다.

절리 자료가 측정된 노두는 진주층 최상부 층준에 해당하며, 여기서 진주층은 녹회색 이암과 회색 내지 녹회색의 중세립 사암이 5~90 cm의 두께로 교호하는데 전체적으로 이암이 우세한 편이다. 두꺼운 사암층은 대개 단일 층이 아니고 다중 층으로 이루어지고 골 모양의 사층리를 발달시킨다. 층리면의 자세는 N22°E, 20°SE를 나타낸다. 절리는 사암층에서 층리면에 거의 수직 방향으로 두 조가 규칙적으로 발달한다. 사암층 중 두께가 얇은 것은 흔히 단일 층이며 상하의 이암과 경계에서 절리가 중지하며 규칙적으로 잘 발달하지만, 80~90 cm 정도로 두꺼운 사암 다중 층에서는 절리가 상하의 이암층 경계까지 지속적으로 발달하기도 하고 다중 층 내 단일 층에서 절리 발달이 중단되기도 한다(Fig. 5).

칠곡층은 적색 및 잡색 이암, 회색 사암, 암록회색 셰일 등으로 구성된다. 특히 적색 및 잡색의 이암과 셰일은

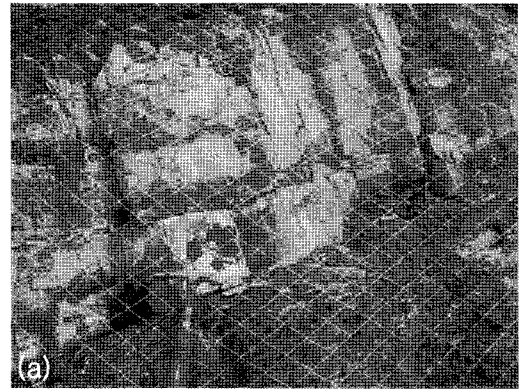


Fig. 5. Multilayer joints in sandstone beds that cross several layers (a) and their sketch (b). Some joints are confined in single beds.

석회질 성분을 포함하는 곳이 많으며 석회질 결핵체를 많이 포함한다. 자료 수집 지점 부근에서 칠곡층은 적색을 띠게 되고 석회질 결핵체를 많이 포함하는 부분부터 진주층과의 경계를 이룬다.

신라역암은 주로 사층리 및 평탄층리로 된 역암 및 역질 사암으로 구성되며 적색이암도 협재 한다. 역들은 화산암 및 비 화산암 기원을 모두 포함한다.

아외측정

아외에서 절리의 측정은 사암과 이암이 교호하는 노두에서 층리에 거의 수직하게 규칙절리가 잘 발달하는 사암층을 대상으로 하였다. 사암층에서 절리는 항상 거의 직교하는 두 조가 산출되며 절리면들은 상당히 평탄하고, 인접한 절리끼리 평행한 배향을 가지며 규칙적인 간격을 갖는다. 노두에서 사암층은 40 cm이하의 두께를 갖는 것들은 흔히 단일 층으로 산출되며 이암과 교호하지만

50 cm 이상의 두꺼운 사암층은 두 개 이상의 단일 층이 누적된 다중 층의 양상을 보여주는데, 이 경우 단일 층과 단일 층 사이엔 이입이나 세일이 거의 협재 되지 않는다(Fig. 5). 측정 대상층을 선택할 때는 가급적 층의 두께를 다양하게 하였다. 구미노두에서는 건축공사로 인하여 넓게 굴착된 노두 중 단일 층 다섯 개, 다중 층 한 개의 사암층에서 절리가 측정되었다. 그리고 다사노두에서 단일 층 여섯 개, 다중 층 한 개에 대해 절리의 배향, 절리 간격, 절리 개수가 측정되었다. 절리 간격은 절리면에 수직되게 측정하였고 절리의 개구는 0.1 mm~1 mm 범위에서 0.1 mm의 두께 차이로 만들어진 열 개의 아이스크림 막대 모양의 얇은 철판(총 두께, 5.5 mm)으로 이루어진 틀 개지를 사용하였다. 다중 층에서 절리는 그 연장이 하나 혹은 두 개의 층 내에 규제되어 발달하기도 하고 여러 층을 관통하여 발달하기도 하기 때문에 절리에 수직한 입

의 축선을 설정하고 축선에 교차하는 절리에 대해 각 조별로 측정이 이루어졌다.

결 과

구미노두 지역

각 층에서 절리의 배향은 조별로 노두 상태에 따라 15개~35개 정도가 측정되었다. 각 사암층에서 규칙 절리는 항상 두 조가 우세하게 발달하는데 이들은 흔히 70°~80°정도로 고각으로 교차한다. 한 조(서북서 조)는 N50°~70°W 주향에 81°~84°NE 경사를 보여주고 다른 한 조(북북동 조)는 N0°~30°E 주향에 75°~85°NW를 나타내며 (Fig. 6) 양자는 거의 수직에 가까운 경사를 갖는다. 다중 층에서 절리의 배향도 단일 층과 거의 비슷하다.

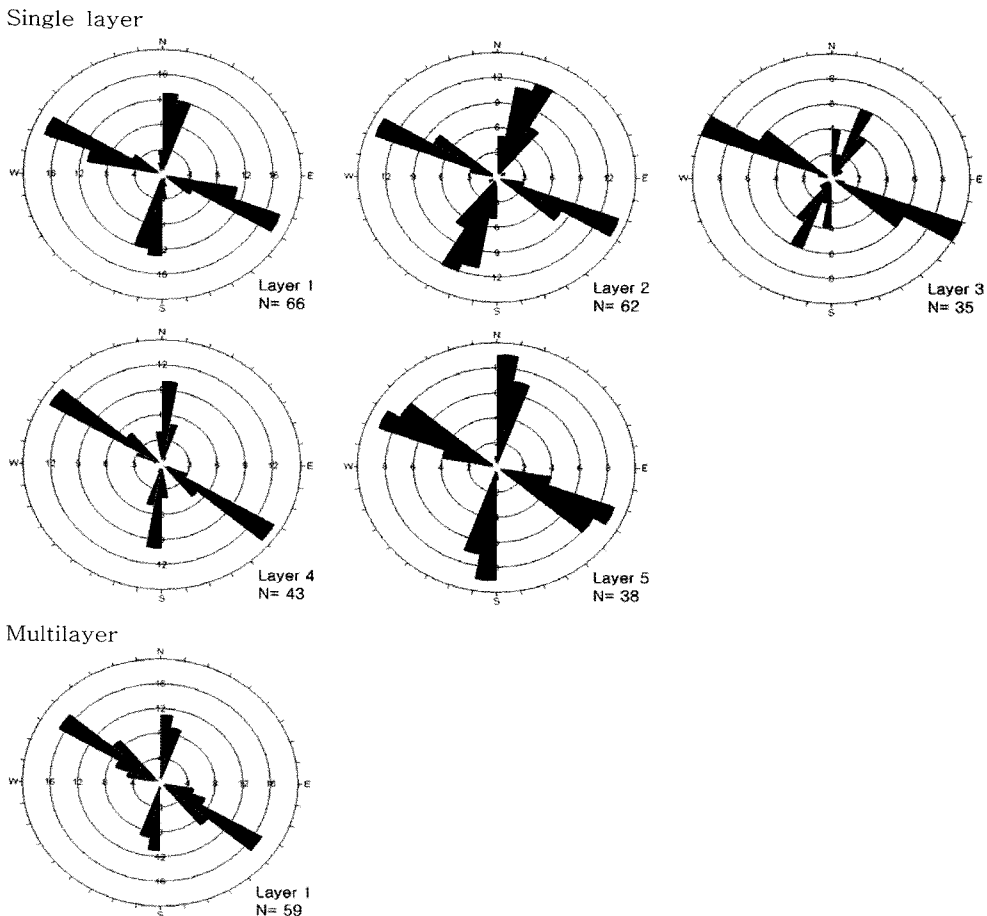


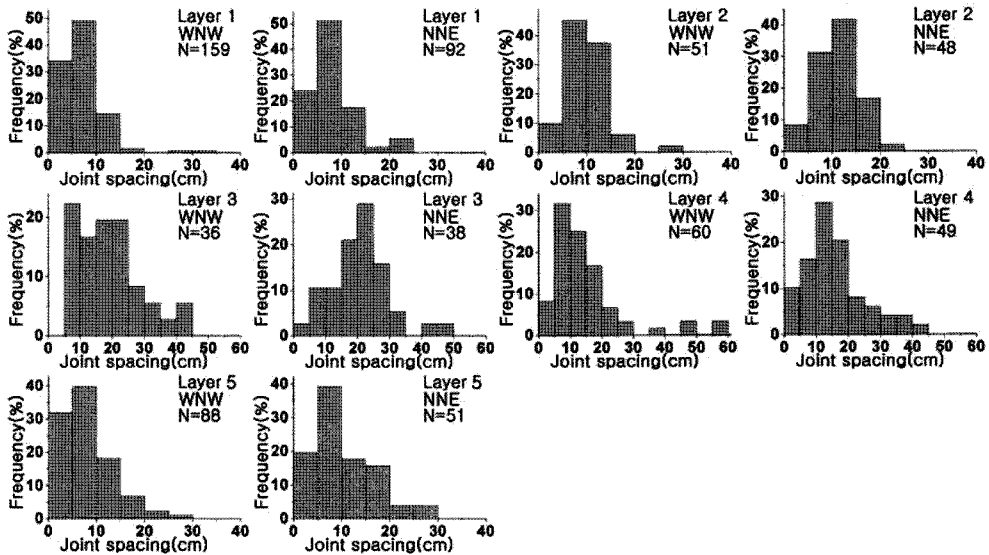
Fig. 6. Orientation of joints in single layers 1 to 5 and a multilayer from Gumi outcrop.

절리간격은 각 사암층에 발달하는 두 조의 절리에 대해 각각 측정이 이루어졌으며 그 분포를 막대그림으로 나타내었다(Fig. 7). 단일 층에서 절리간격 분포는 대수-정규 분포 내지 정규분포에 가까운 모습을 보여준다. 특히 정규분포에 가까운 모습의 2층은 다른 층에 비해 더 두꺼운 연약층으로 에워 싸여있다. 이에 반해 상하에 매우 얇은 연약층을 갖는 3층은 서북서조에서 어느 정도 불규칙한 막대 그림의 형태를 보여주고 있다. 단일간격의 범위는 3층과 4층이 넓으며 표준편차가 크다(Table 1). 평균 절리간격은 1층과 5층 등 층의 두께가 얇은 경우가 절리간격이 작고 층의 두께가 가장 두꺼운 3층이 절리간격도 가장 크다. 다섯 개의 층에서 조별로 절리간격을 비교하여 보면 북북동조가 서북서조에 비해 평균간격과 중간간격이 모두 더 크지만 그 차이는 크지 않다. 절리가 하나 혹은 두 개의 층 사이에 한정되어 발달하기도 하고 여러 개의 층을 관통하며 발달하기도 하는(Fig. 5) 다중 층에서 간격분포는 대체로 음의 지수 분포 내지 대수-정규분포를 하지만 다봉(multimodal) 형태를 보여주며 절리 간격분포

범위가 매우 크며 간격의 표준편차 또한 매우 크다. 다중 층에서 절리는 상당히 불규칙하게 분포함을 알 수 있다.

절리 간격의 최빈값/평균값의 비를 사용하여 포화의 정도를 나타낼 수 있는데 단일 층의 경우, 단일간격의 분포가 불규칙한 편인 3층의 서북서조와 4층의 서북서조를 제외하고는 1에 가까운 값으로 포화의 정도가 높고 각층에서 조별로 유사하다 (Table 1). 다중 층의 경우는 서북서조가 평균값에 대한 최빈값의 비가 낮으며 어느 정도 불포화를 지시한다. 절리간격의 최빈값/평균값의 비 이외에 절리조의 포화상태를 나타내는 변동계수(Cv)에 의하면 각 층의 서북서조와 북북동조가 비슷한 값이고 모두 1 이하로 포화 상태를 지시한다. Cv는 평균절리간격에 대한 표준편차의 비로서 낮은 Cv값은 절리간격이 규칙적이고 포화상태를 가리킨다(Gillespie, 2003). Fig. 8은 단일 층에서 중간절리 간격에 대한 층 두께를 도시한 그림이다. 측정된 층의 수가 적어서 큰 의미를 부여하기는 어려울지라도 층 두께가 증가할수록 절리간격도 증가함을 알 수 있다. 그림에서 회귀선의 기울기 FSI는 절리밀도의 척도로서

Single layer



Multilayer

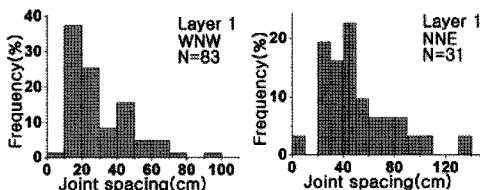


Fig. 7. Spacing distribution of joints in single layers 1 to 5 and a multilayer from Gumi outcrop.

Table 1. Spacings and aperture of joints from Gumi outcrop.

Single layer									
Layer	Layer thickness	Set	FSR	Mean spacing (cm)	Median spacing (cm)	Spacing standard deviation	Cv	Mode/Mean	Mean aperture (mm)
1	9	WNW	1.80	6.52	5	4.03	0.62	1.15	0.18
		NNE	1.29	7.69	7	4.49	0.58	0.98	0.24
2	20	WNW	2.22	9.49	9	4.03	0.43	0.79	0.46
		NNE	1.82	11.00	11	4.51	0.41	1.14	0.46
3	34	WNW	2.06	18.47	16.5	9.68	0.52	0.41	0.91
		NNE	1.66	19.92	20.5	9.34	0.47	1.13	0.86
4	18	WNW	1.64	14.95	11	12.19	0.82	0.50	0.25
		NNE	1.39	15.47	13	9.39	0.61	0.81	0.23
5	8	WNW	1.33	7.73	6	4.89	0.63	0.97	0.22
		NNE	1.00	9.78	8	6.28	0.64	0.77	0.24
Multilayer									
1	90	WNW	4.09	28.00	22.00	16.58	0.59	0.54	1.24
		NNE	2.09	49.71	43.00	27.39	0.55	0.91	1.18

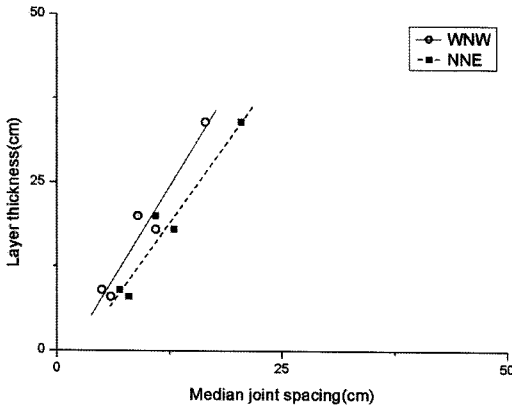


Fig. 8. Layer thickness against median joint spacing of single layers from Gumi outcrop.

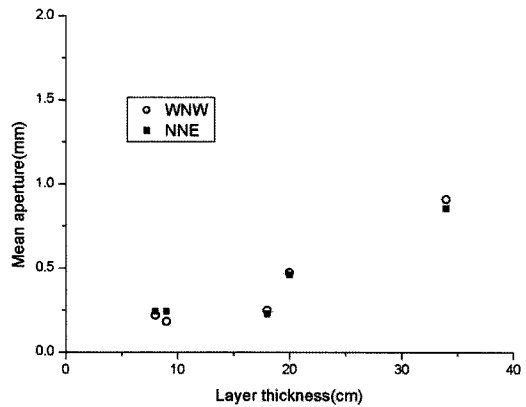


Fig. 9. Joint aperture against layer thickness of single layers from Gumi outcrop.

서북서조가 2.22를, 북북서조가 1.90으로 계산되었으며 높은 값을 나타낸다. 절리밀도를 추정하는데 사용되는 또 다른 척도인 FSR값도 단일 층의 서북서조는 1.33~2.22의 값을, 북북동조는 1.00~1.82로 둘 다 높은 값을 나타낸다. 다중 층의 경우는 서북서조가 4.09를, 북북동조가 2.09로 더욱 높은 FSR값을 갖는다.

다섯 개의 단일 층에서 각 조별로 측정된 절리의 개구를 층 두께(절리의 길이)에 대해 점기 해보았다 (Fig. 9). 측정된 층의 수가 적어서 뚜렷한 경향 파악이 쉽지는 않지만 대체로 층 두께가 증가할수록 즉 절리의 길이가

커질수록 개구도 증가하는 경향을 보여준다고 하겠다. 각 층에서 절리 조별로 평균 개구의 크기를 살펴보면 서북서조와 북북동조의 크기가 거의 유사하다 (Table 1). 그러나 층별로 볼 때 층의 두께가 가장 두꺼운 3층이 5개의 층 가운데 가장 큰 개구를 가짐을 알 수 있다. 또 전체 층에서 비교해 보면 서북서조는 0.18~0.91의 범위로 평균 0.40을 보여주고 북북동조는 0.23~0.86의 범위로 평균 0.41로 서북서조와 거의 동일하다. 다중 층에서 개구는 서북서조가 1.24, 북북동조가 1.18로 단일 층에서의 개구에 비해 큰 값을 보여준다.

다사노두 지역

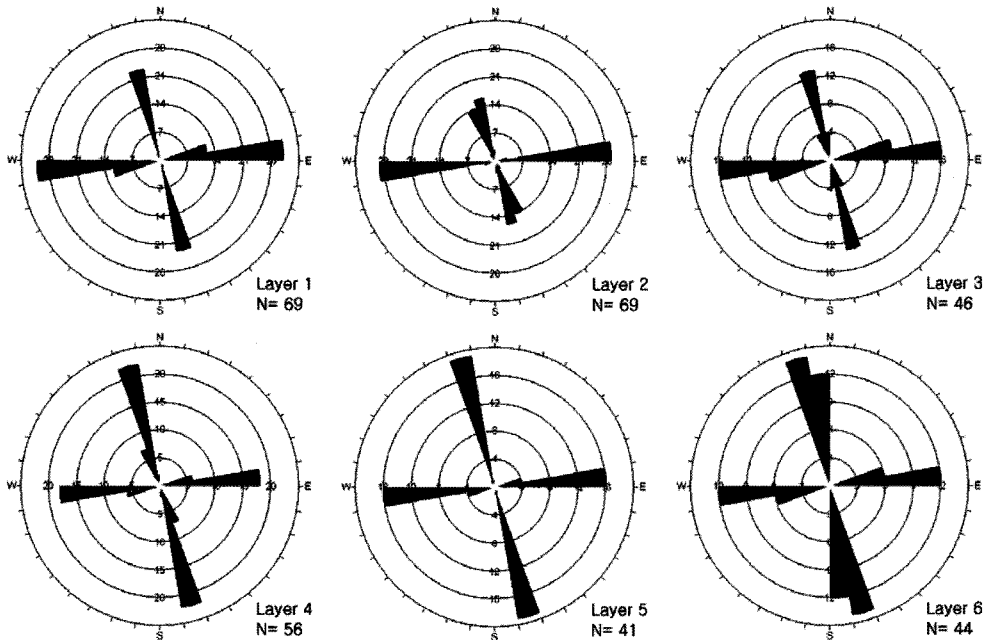
다사노두에서도 배향은 각 층에서 조별로 15개 내지 40개 정도가 측정되었다. 단일 층이든 다중 층이든 간에 두 조의 절리는 아주 현저하게 발달하며 약 80°정도로 아주 고각으로 교차한다. 한 조(동서 조)는 N80°~90°E의 주향에 74°~77°N의 경사를 갖는 자세를 보여주고, 다른 한 조(북북서 조)는 N0°~20°W의 주향에 80°~84°SW로 경사하는 자세를 갖는다(Fig. 10).

절리의 간격은 각 조별로 절리면에 수직인 방향으로 측정하였으며, 절리간격에 대한 빈도의 막대그림으로 나타내었을 때 (Fig. 11) 단일 층의 경우는 대개 대수정규분포 내지 정규분포의 양상을 보여준다. 3층의 동서조와 5층의 동서조 등 불규칙한 형태를 보이는 경우는 측정

자료의 수가 넉넉하지 않고 사암층을 에워싸는 연약층의 두께가 얇은데 따른 것으로 생각된다. 평균절리간격은 층의 두께가 얇은 2층의 경우는 좁은 편이고 층의 두께가 두꺼운 5층과 6층은 각각 두 조 모두 간격이 넓다 (Table 2). 여섯 개의 각 층에서 조별 절리의 평균간격과 중간간격은 유사한 편이지만 북북서조가 동서조보다 조금 큰 값을 갖는 경우가 많다. 다중 층에서 절리간격 분포 형태는 음의 지수 및 대수-정규분포를 보이며 절리간격의 분포 범위가 넓고 절리간격의 표준편차가 크며 불규칙한 절리간격 분포를 보여준다.

절리포화의 수준을 가능히는 최빈값/평균값 의 비는 단일 층의 경우, 대부분 1에 가까운 값으로 포화의 정도가 높다고 하겠다(Table 2). 다중층의 경우는 북북서조가 매우

Single layer



Multilayer

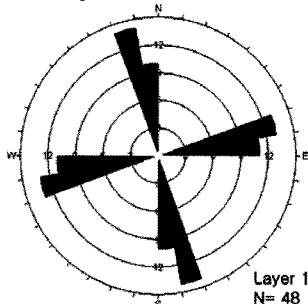
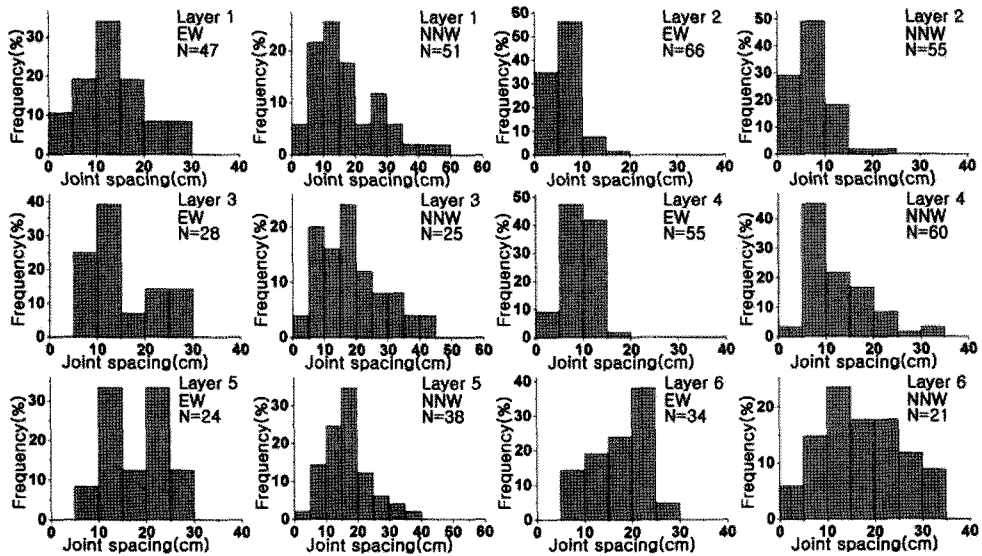


Fig. 10. Orientation of joints in single layers 1 to 6 and a multilayer from Dasa outcrop.

Single layer



Multilayer

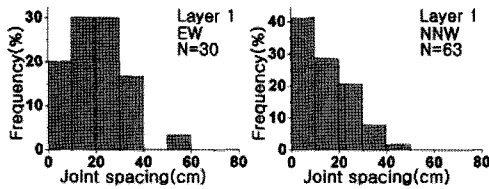


Fig. 11. Spacing distribution of joints in single layers 1 to 6 and a multilayer from Dasa outcrop.

Table 2. Spacings and aperture of joints from Dasa outcrop.

Single layer

Layer	Layer thickness	Set	FSR	Mean spacing (cm)	Median spacing (cm)	Spacing standard deviation	Cv	Mode/Mean	Mean aperture (mm)
1	20	EW	1.74	12.93	11.5	6.03	0.47	0.97	0.90
		NNW	1.43	16.64	14	10.39	0.63	0.75	0.62
2	8	EW	1.33	5.70	6	2.76	0.49	1.32	0.18
		NNW	1.33	6.87	6	3.93	0.57	1.09	0.24
3	25	EW	1.92	14.14	13	6.85	0.48	0.88	0.56
		NNW	1.67	17.92	15	10.09	0.56	0.98	0.63
4	15	EW	1.67	8.47	9	3.18	0.38	0.89	0.45
		NNW	1.50	11.95	10	6.53	0.55	0.63	0.56
5	30	EW	1.88	17.25	16	6.03	0.35	1.01	0.63
		NNW	1.77	16.22	17	7.03	0.43	1.08	0.80
6	34	EW	2.13	16.67	16	5.81	0.35	1.35	1.31
		NNW	2.13	16.85	16	8.06	0.48	0.74	1.17

Multilayer

1	80	EW	4.10	19.50	19.50	10.37	0.53	1.03	1.43
		NNW	6.15	14.74	13.00	9.78	0.66	0.34	1.21

낮은 값을 보여준다. 변동계수 C_v 는 단일 층에서 동서 조는 0.35~0.49를, 북북서조는 0.43~0.63의 값을 가지며 모두 1 이하의 낮은 값으로 절리간격은 규칙적이고 포화된 절리간격 분포를 나타낸다.

각 단일 층에서 중간 절리간격에 대한 층 두께를 도시한 Fig. 12에서 절리간격은 층 두께에 비례하여 증가함을 보여주고, 그림에서 회귀선의 기울기로 절리밀도의 척도인 FSI값은 동서조가 2.42를, 북북서조가 2.17로 구미지역과 마찬가지로 높은 값을 나타낸다. 또 다른 절리밀도 지시자인 FSR값이 각 층의 각 절리조의 중간간격에 대한 층 두께의 비로 계산되었다. 단일 층에서 FSR값은 동서조와 북북서조 공히 1.33에서 2.13의 범위를 가지며 높은 수준의 절리밀도를 지시한다. 다중 층의 경우는 북북서조가 6.15, 동서조가 4.10으로 매우 높은 값을 나타낸다.

여섯 개의 단일 층에서 각 조별로 측정된 개구 자료를 층 두께에 대해 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 층 두께

가 증가함에 따라 절리의 개구도 대체로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 여섯 개의 각 층에서 조별 개구의 크기는 대동소이하며, 동서조는 층의 두께가 얇은 2층의 0.18에서부터 층의 두께가 가장 큰 6층의 1.31까지의 범위를 보이고, 북북서조는 역시 2층의 0.24에서 6층의 1.17까지의 분포를 보여주고 있다(Table 2). 동서조와 북북서조에서 조별 평균 개구는 0.67로서 양조가 동일하다. 다중 층에서 개구의 크기는 동서조가 1.43, 북북서조는 1.21로 단일 층에 비해 큰 값을 나타낸다.

토 의

야외에서 측정된 절리의 주향은 구미노두 지역의 경우 북북동조가 $N0^\circ\sim30^\circ E$, 서북서조가 $N50^\circ\sim70^\circ W$ 를, 다사노두 지역의 경우 북북서조가 $N0^\circ\sim20^\circ W$, 동서조가 $N80^\circ\sim90^\circ E$ 로 양 지역에서 두 조의 절리 간 $20^\circ\sim30^\circ$ 정도의 소규모 주향 차이가 있다. 즉 구미노두의 절리의 두 조의 주향을 각각 $20^\circ\sim30^\circ$ 반시계 방향으로 회전하면 다사노두의 두 조의 주향과 거의 일치한다. 이와 같은 주향 차이는 절리 생성 시 양 지역에 작용한 응력장의 차이에 기인할 수도 있고, 절리 생성 후 지괴의 회전에 기인할 수도 있을 것이다. 양 지역에서 절리를 측정된 지점에서 층리면의 자세는 구미노두 지역이 $N30^\circ E, 18^\circ SE$ 를, 다사노두 지역이 $N22^\circ E, 20^\circ SE$ 로 비슷하다. 이런 점을 감안한다면 양 지역의 주향의 차이는 아마도 절리 생성 시에 작용한 응력장 배향의 국지적인 차이로 보는 것이 타당할 것이다.

구미노두와 다사노두에서 절리 자료를 비교하여 보면 유사한 사암-셰일 시퀀스에서 똑같이 직교하는 두 조의 절리가 잘 발달하고, 동일한 두께를 갖는 층 사이에서는 (예를 들면 구미노두의 5층과 다사노두의 2층, 구미노두의 3층과 다사노두의 6층) 각종 분석 자료들이 상당히 근사하다(Table 1 & 2). 이러한 점으로 미루어 볼 때 양 지역의 절리는 응력장 배향에 있어서 약간의 차이가 있을지라도 동일한 광역 응력장 하에서 일어난 신장 변형 작용의 산물로 간주된다.

연구지역에서 측정된 규칙 절리는 구미노두이든 다사노두이든 항상 두 조가 사암층에서 층리에 수직으로 지배적으로 발달한다(Fig. 3). 사암층에 전형적으로 발달하는 것은 퇴적물이 매몰되어 고화되는 과정에서 윗층 응력(overburden stress)은 최대압축응력(σ_1)이 된다. 사암이 셰일보다 강하다는 것은 보다 큰 차응력($\sigma_1-\sigma_3$)을 지탱할 수 있음을 의미하기 때문에 최소압축응력(σ_3)인 수평응

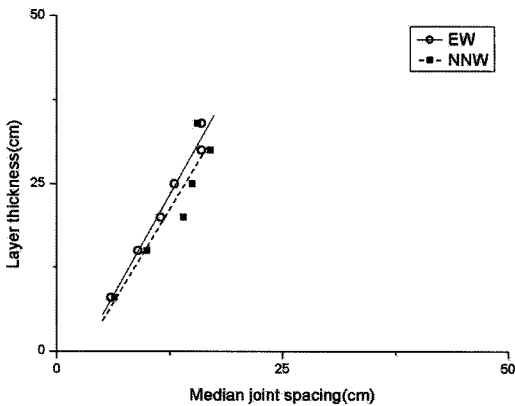


Fig. 12. Layer thickness against joint spacing of single layers from Dasa outcrop.

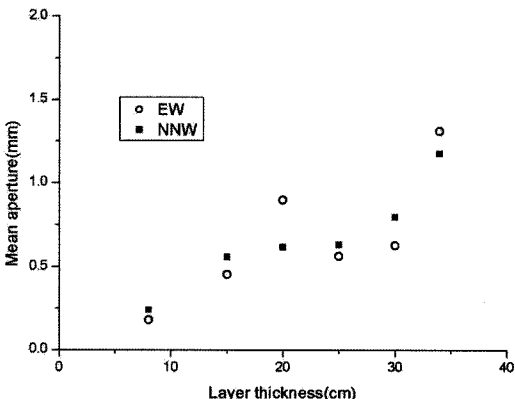


Fig. 13. Joint aperture against layer thickness of single layers from Dasa outcrop.

력은 세일에서보다 사암이 작다. 그럼으로 사암은 세일보다도 작은 공극유압으로 수압단열작용(hydrofracturing)을 일으킬 수 있게 된다(Twiss and Moores, 2007). 그래서 사암층에만 발달하는 절리는 항상 이암과의 경계에서 중지하며 절리의 길이는 역학적 층 두께, 즉 사암층 두께와 동일하다(Bai and Pollard, 2000).

구미노두에서는 다사노두에서든 각 층에서 직교하는 두 조의 절리들은 절리간격 분포 형태, 절리간격의 크기, 포화의 정도, 절리밀도, 개구의 크기 등에서 매우 유사하다. 그리고 두 조의 절리는 대부분 노두에서 고각으로 서로 절단하는 관계를 보여주는 경우가 많으며 서로에 대해 접경(abutting)하는 경우도 나타난다(Fig. 4). 이러한 관계로 볼 때 양자는 단열 격자차단(fracture grid-lock) 양상으로 해석되며 거의 동시에 생성된 직교 절리조(orthogonal joint sets)로 간주 할 수 있다(Dunne and Hancock, 1994). 나아가서 이 두 조의 절리 생성 시의 고응력은, σ_1 은 수직으로 크기와 방향이 고정된 상태에서 σ_2 와 σ_3 는 방향만 고정되고 그 크기는 서로 빠른 교환을 하면서 서로 직교하는 두 조의 절리를 생성시킨 것으로 생각된다(장태우, 2009).

본 연구의 대부분의 사암층에서 절리 간격 분포는 대수-정규 분포 내지 정규 분포를 나타낸다. Rives et al. (1992)은 절리간격 분포를 변형의 증가와 더불어 절리 발달 단계별로 초기의 저밀도 상태에서는 음의 지수 분포, 중간정도의 절리밀도에서 대수-정규분포, 최대 밀도에서 정규분포를 함을 보여주었다. Narr and Suppe(1991)는 층상퇴적암에서 절리간격의 빈도 분포는 절리조의 성인과 진화에 관한 정보를 제공하며 퇴적암에서는 흔히 대수-정규분포를 보여준다고 하였다. 구미노두와 다사노두에서 절리간격은 상당히 규칙적이며 절리밀도도 높는데, 절리 진화과정에서 분다면 중간단계 내지 최대 밀도 단계에 해당한다고 볼 수 있다. 그러나 다중 층에서 절리간격분포는 간격의 분포 범위가 매우 크며 불규칙한 형태를 보여준다(Figs. 7 & 11). 또 노두에서도 어떤 절리들은 하나의 층 경계에 한정되지만 다른 절리들은 두 개 혹은 그 이상의 층을 횡단하며 발달하는 비층경계 절리로 나타난다(Fig. 5). 비층경계 절리는 절리가 발달하는 다중 층 내에 불연속면으로 작용할 연약한 성질의 사잇층(interbed)이 없어서 비층경계 절리의 전파를 정지시키기가 어려울 수도 있기 때문에 여러 층을 횡단하며 발달할 수 있으며, 이 경우는 우세한 크기의 절리 발달을 기대하기 어렵다. 나아가서 다중 층의 비층경계 절리는 높은 밀도는 보일 수 있지만 규칙적인 간격을 갖지 못한다(Odonne et al., 2007).

절리밀도의 지시자로 FSI와 FSR이 사용되고 있다(Narr and Suppe, 1991; Gross, 1993). 중간 절리간격에 대한 역학적 층 두께의 그림에서 회귀선의 기울기로 규정되는 FSI는 본 연구의 구미노두에서 FSI는 서북서조가 2.22, 북북동조가 1.90 그리고 다사노두에서 FSI는 동서조가 2.42, 북북서조가 2.17로서 Narr and Suppe(1991)와 Gross(1993)가 제시한 FSI값 0.8~1.5에 비해 크며 연구 지역에서 절리밀도가 상당히 높음을 알 수 있고, 이는 절리 생성 시에 작용한 높은 응력을 반영한다고 생각된다. 어떤 층에서 역학적 층 두께를 중간 절리 간격으로 나누어 FSR값은 단일 층의 경우, 구미노두에서 1.00~2.22, 다사노두에서 1.33~2.13으로서 Gross(1993)의 0.61~1.38보다 높다. 다중 층의 경우도 구미노두가 2.09~4.09, 다사노두는 4.10~6.15로써 Odonne et al.(2007)의 다중 층의 FSR 값 0.61~3.39보다 높은 값을 보여준다. 이와 같은 비교는 단지 단편적인 자료와의 비교이긴 하지만 어쨌든 이미 보고된 다른 지역의 FSR값 보다 연구지역의 FSI와 더불어 높음을 알 수 있다. 이와 같이 높은 절리 밀도는 절리 발달 시에 작용한 응력의 영향이외에도 측정한 사암층 상하에 놓이는 연약층인 이암층의 두께에도 영향이 있는 것으로 생각해 볼 수 있다. Ladeira and Price (1981)와 Ji and Saruwatari(1998)는 강인층에서의 절리 밀도는 연약층의 두께에 상관되어 연약층의 두께가 증가할수록 감소한다고 하였고 Odonne et al.(2007)도 강인층이 두꺼운 연약층으로 에워싸여 있을 경우 보다 규칙적인 간격과 낮은 밀도를 보여준다고 하였다. 연구 대상의 사암층의 경우는 상하에 놓이는 이암의 두께가 한쪽은 10 cm 이상의 이암으로 접촉한다 해도 다른 쪽은 언제나 5 cm이하의 얇은 이암과 경계함으로써 절리의 밀도가 높게 나타나는 것으로 생각된다. 이암을 협제하지 않는 다중 층의 경우는 특히 절리 밀도가 높다.

절리 간격의 최빈값/평균값의 비가 0에 가까우면 저밀도의 불포화 상태를, 1에 가까운 값이면 포화를 지시하는데(Rives et al., 1992), 연구 대상 사암에서는 특히 단일 층에서는 대부분의 최빈값/평균값의 비가 1내외로 포화상태를 나타낸다. 그러나 다중 층에서는 FSR값 즉 단일밀도는 아주 높는데 반해 다중층 중 구미노두의 서북서조와 다사노두의 북북서조에서 보면 최빈값/평균값의 비가 상당히 낮은 편이다. 다중 층에서 높은 절리 밀도와 불규칙 간격은 사암층 사이에 연약층의 결여와 비층경계 절리의 발달에 기인할 수 있다(Odonne et al., 2007). 절리 포화의 또 다른 척도인 C_v 도 구미노두에서든 다사노두에서든 1이하의 낮은 값으로 포화를 지시한다. 또 구미

노두이든 다사노두이든 절리의 길이(층의 두께)에 비해 조별 절리 간격이 항상 작다. Wu and Pollard(1995)는 포화상태에서 잘 발달한 절리 간격이 절리 길이에 비해 작음을 실험으로 입증한 바 있다.

절리의 개구는 모든 절리에서 균질하게 분포하기 보다는 절리의 길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다(Figs. 9 & 13). 길이가 긴 절리의 개구가 더 큰 것은 절리가 열리어 전파하여 갈 때 절리의 중간 부분이 끝 부분보다 더 많이 열리게 되기 때문에 절리의 길이가 증가함에 따라 개구는 점점 더 커지게 될 수 있을 것이다.

본 연구의 층상 퇴적암에서 투수성은 절리가 사암에 지배적으로 발달하기 때문에 사암의 투수도가 높아서 유체가 인접한 상하의 낮은 투수성의 이암을 통과하고 저 할 때는 큰 난관에 직면하게 될 것으로 생각할 수 있다. 층리면의 경사가 완만한 사암에서의 투수성은 이수평 투수성을 갖는다고 하겠고 이수평 방향으로 유체의 긴 유동 통로를 제공할 수 있을 것이다. 사암에 발달하는 절리는 거의 직교하는 두 조가 규칙적으로 잘 발달하고 절리밀도도 높은 편인데, 한 조만 발달할 경우에 비해 교차하는 두 조의 발달은 엄청나게 큰 투수성을 갖게 한다고 할 수 있다. 특히 두 조의 절리들은 모두 사암층 내에서 인접한 이암 경계까지 연장되며 일정한 간격을 가지며 서로 직각으로 연결되어 있다. 또 절리의 간격은 층 두께에 비례하기 때문에 얇은 층이 두꺼운 층에 비해 절대 밀도가 높으므로 일정한 체적에서 투수도는 얇은 층이 높을 것으로 생각할 수 있다. 그렇지만 절리 개구는 층 두께에 비례하여 증가함으로써 층 두께에 따른 투수성을 논의하는 것은 더 깊은 연구가 수행되어야 할 것으로 본다.

결 론

층상 암석에서 절리의 발달 상태를 구명하고자 경상 분지 내 구미노두 지역과 다사노두 지역에서 경상누층군 신동층군의 사암층을 대상으로 절리 자료 수집이 집중적으로 이루어졌고 이들은 실내에서 자세히 분석되었다.

구미노두 지역과 다사노두 지역에 발달하는 절리는 동일한 광역 응력장 하에서 일어난 신장 변형작용의 산물로 간주된다. 주로 사암과 이암이 교호하는 퇴적암에 발달하는 절리는 사암층에 전형적으로 발달하는데, 이는 퇴적물이 매몰되어 고화되는 과정에서 유압이 증가하면 수압단열작용에 의해 사암에 먼저 단열이 발달하게 되기 때문이다. 이들 절리는 항상 층리면에 거의 수직으로 두 조가 발달하며 응력축의 빠른 교환에 의해 거의 동시에

생성된 직교절리이다.

절리조들은 인접한 절리 간에 평행한 배향을 가지며 규칙적인 간격을 가지고 절리면은 평탄한 편이다. 절리 간격은 층두께에 비례하여 층두께가 증가하면 간격도 증가한다. 절리간격 분포는 대수-정규 분포 내지 정규 분포를 나타낸다. 그러나 비층경계절리가 발달하는 다중층에서는 절리간격의 분포범위가 크며 불규칙한 형태를 보여주는데, 다중층에서는 규칙적인 간격과 미세한 크기의 절리 발달이 어려울 것으로 생각된다.

연구지역에서 절리밀도의 지시자인 FSI 와 FSR값은 상당히 높은 편인데 이는 절리 발달 시에 작용한 응력의 영향 이외에 측정된 사암과 접촉하고 있는 연약층(이암)의 얇은 두께에도 영향이 있는 것으로 생각된다. 연구 대상 사암에서 절리의 포화는 최빈값/평균값의 비가 1 내외로 포화상태를, 또 다른 척도인 변동계수(Cv)도 1이하의 낮은 값으로 포화를 지시한다. 또 조별로 본 절리의 간격은 층의 두께(절리의 길이)에 비해 항상 작다. 절리의 개구는 모든 사암층의 절리에서 균질하기보다는 절리의 길이가 증가함에 따라 증가한다.

층리에 수직하게 발달하는 절리는 거의 직교하는 두 조가 규칙적으로 발달하고 절리밀도도 높다. 또 절리들은 사암층 내에서 모두 인접한 이암 경계까지만 연장되고 일정한 간격을 가지며 서로 연결되어 있다. 이러한 기하를 볼 때 층리면의 경사가 완만한 사암에서의 투수성은 이수평 투수성을 가지고 이수평 방향으로 유체의 긴 유동 통로를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 위탁연구과제인 “자연단열계의 발달 특성 연구” 과제 연구의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드린다. 본 연구 수행 시 야외 자료 수집 및 실내 자료처리를 도와준 경북대 지질학과 구조지질학연구실 대학원생들에게도 고마움을 전한다.

참고문헌

- 김정환, 임주환, 1974, 한국지질도(1: 50,000), 구미도폭 및 설명서. 국립지질광물연구소.
 장태우, 2009, 층상 암석에서 절리의 특성 연구. 지질공학, 19, 145-152.
 Bai, T. and Pollard, D. D., 2000, 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, Mechan-

- ical Prediction of fracture aperture in layered rocks. *J. Geophys. Res.*, 105, 707-721.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Polland, D. D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 100, 1181-1204
- Rives, T., Razack, M., Petit, J. P., and Rawnsley, K. D., 1992, Joint spacing : analogue and numerical simulations. *J. Struct. Geol.*, 14, 925-937.
- Ruf, J. C., Rust, K. A. and Engelder, T., 1998, Investigating the effect of mechanical discontinuities on joint spacing. *Tectonophysics*, 259, 245-257.
- Tateiwa, I., 1929, Geological Atlas of Korea, Waegwan Sheet(1: 50,000). Geological Survey of Korea.
- 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 7월 6일 원고접수, 2009년 9월 17일 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

손병국

한국지질자원연구원 석유해저연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3208
Fax : 042-868-3411
E-mail: sbk@kigam.re.kr