

단층의 지질학적 성인과 구조지질학적 특성

Geological origin and Structural characteristics of Faults

윤운상¹⁾, Woon-Sang Yoon, 임형규²⁾, Hyoung-Gyu Rim, 정의진³⁾, Ui-Jin Jeong

¹⁾ (주) 넥스지오 대표이사, CEO, NEXGEO Inc.

²⁾ 한국철도시설공단 호남고속철도추진팀장 Team manager, Korea Rail Network Authority

³⁾ (주) 넥스지오 이사, Director, NEXGEO Inc.

SYNOPSIS : The 'Fault' has been common interests to the structural geologists, geotechnical engineers and civil engineers. The 'Fault' is very important factor to evaluate to the geotechnical stability. In this paper, geological origin and classification of faults with structural geological features are described. These geological characteristics of faults are useful to understand and detect of faults for engineering practice.

Keywords : fault, structural geology, geotechnical engineering

1. 서론

암반은 지질학적인 여러 과정을 통하여 주변 암석에 비해 극히 낮은 인장 강도와 대단히 높은 투수 계수를 가지는 절리와 단층 등 역학적으로 불연속적인 구조들을 포함하고 있다. Ramsay (1967)는 단열 구조(fracture)를 점착력을 상실한 암반 내의 모든 불연속적인 틈으로 정의하였으며, Brides (1975)는 가시적인 암석 조직(층리 등)과 평행하지 않은 암석내의 불연속적인 틈으로 정의하였다. 단열 구조는 많은 경우에 불연속면(discontinuity)과 혼용되어 사용된다. Priest (1993)는 단열 구조와 동일한 범주로 사용되고 있는 불연속면을 암반 내의 무시할 수 있을 정도의 인장 강도를 가진 단열 또는 틈으로 정의하였다. 대표적인 단열 구조로서 절리(joint)와 단층(fault)을 들 수 있으며, 보통 절리(joint)는 분리된 두 암석의 상대적인 운동이 없거나 거의 인지할 수 없는 틈 또는 단열로 정의되며, 단층(fault)은 그 면을 기준으로 양편에서 이동한 흔적이 관찰되는 단열 구조를 지시한다 (Anderson, 1951; Price, 1966; Goodman, 1976; Ragan, 1985; Ramsay & Huber, 1987). 일반적으로 0.5mm 이상의 변위가 인지되면 단층이라하나, 그 규모에 따라, 그 연장이 수 m이상일 경우를 단층, 수 cm 이하일 경우를 전단 단열(shear fracture), mm 이하일 경우를 미세단층(microfaults)로 불리워 진다.



그림 1. 한반도의 단층

이러한 단층은 모양과 뚜렷이 구분되는 역학적, 수리적 특성을 보여 암반의 주요 이상대를 형성하게 되어, 지반공학 및 지질공학 분야의 중요한 대상이 되고 있다. 국내에는 선캠브리아기로부터 제4기에 이르는 대부분의 지질 시대의 지층이 분포하고 있으며, 서로 지질 시대가 다른 많은 단층이 발달하여 있다 (그림 1). 이들 단층은 터널, 사면 및 기초 등 지반 구조물의 공학적 문제를 발생시키기도 하며, 지진의 주요 요인으로 지목되기도 한다. 이 논문에서는 단층에 대한 이해와 공학적 활용도를 높이는데 이용될 수 있는 단층에 대한 지질학적 성인과 분류 및 그 특성에 대해 기술하고자 한다.

2. 단층의 지질학적 분류

2.1 단층 변위와 분류

단층의 분류에서 가장 일반적인 분류는 단층면을 기준으로 한 변위 특성에 따라 분류하는 방법이다. 단층 변위에 의한 분류는 크게 정단층 (normal fault), 역단층 (reverse fault 또는 thrust fault) 등 경사이동단층 (dip slip fault)과 우수향 (dextral) 또는 좌수향 (sinistral) 주향이동단층 (strike slip fault), 이 두 이동이 혼합된 oblique slip fault 및 회전 단층 (rotational fault)으로 구분된다 (그림 2).

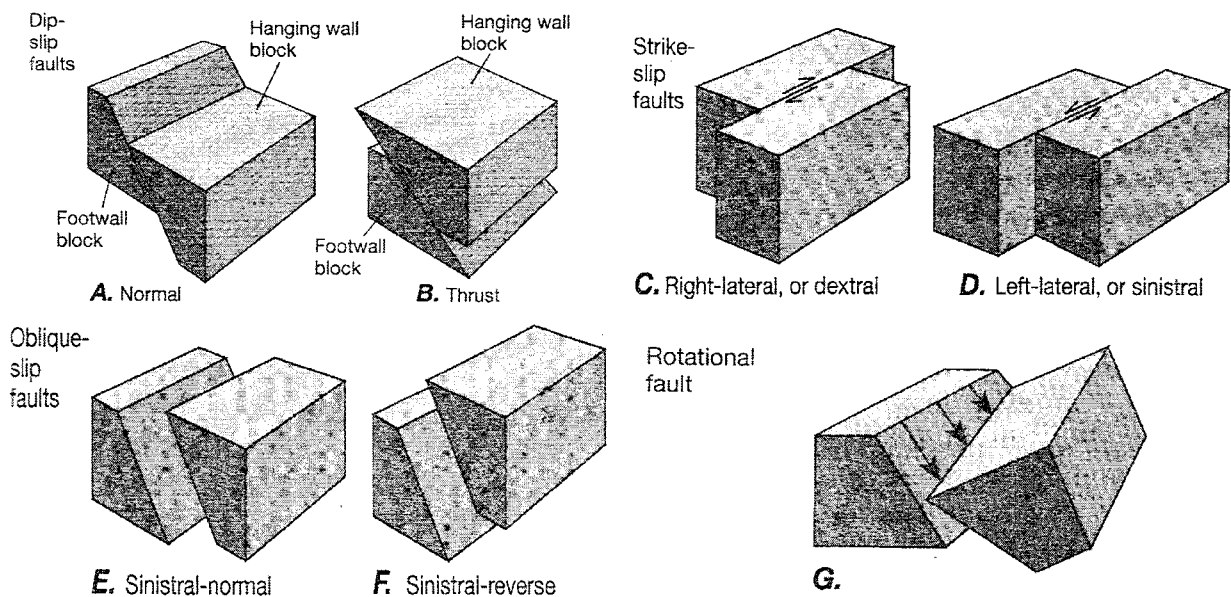


그림 2. 단층의 변위와 분류

단층의 변위는 단층면에 대한 전단에 의해 발생하며, 이 때, 최대주응력은 정단층에서 수직응력, 역단층 및 중상단층에서 단층 경사방향의 수평응력, 주향이동단층에서 단층 주향과 약 30정도 사교하는 수평응력이 된다 (그림 3).

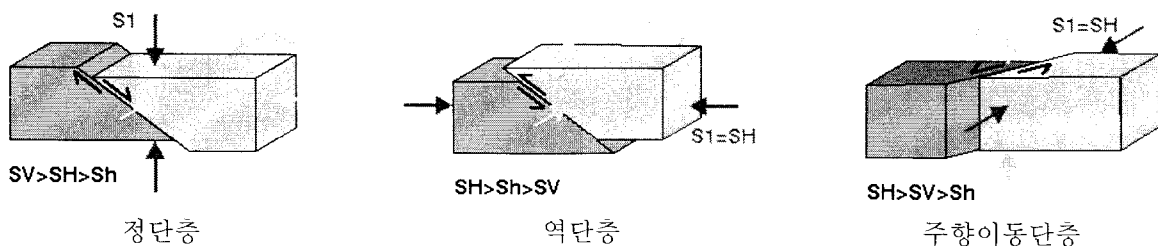


그림 3. 단층 분류와 주응력 방향

2.2 단층 변형과 단층암의 분류

단층면을 따르는 변형 형태에 따라 단층을 다시 취성 (brittle) 파괴에 의해 단층면을 기준으로 불연속적인 변위를 보이는 취성 단층 (fault)과 연성 (ductile) 파괴에 의해 일정한 전단영역 내에서 연속적인 변형을 보이는 전단대 (shear zone)로 구분할 수 있으며, 또한 단층 변위가 하나의 단층면이 아닌 수조의 밀집한 취성 단층면에 의해 연속적인 형태로 발달할 때 이를 단층대 (fault zone)라 한다 (그림 4).

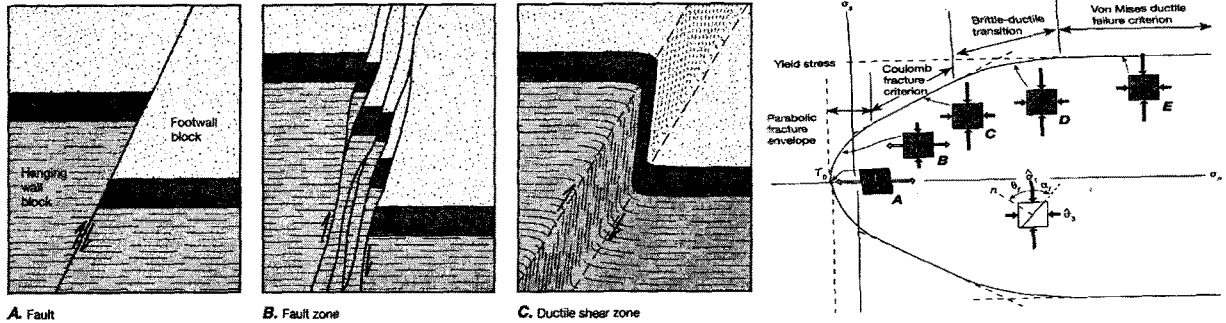


그림 4. 단층 변형의 분류와 응력 조건

이때, 그림 4와 같이 취성 단층과 연성 전단대 사이에는 상이한 응력 조건이 존재하며, 이러한 응력 조건은 단층 생성 심도 즉 생성 당시의 열과 압력에 지배 받는다. 일반적으로 심도 10-15km 하부에서는 250-350도가 넘는 온도에서 연성 변형의 결과로 발생한 압쇄암 (mylonitic rock)이 발달하는 것으로 알려져 있다 (그림 5). 단층대 영향권 내에서 취성변형작용으로 단층 비지, 단층각력암, 단층파쇄암, 단열, 미세단층 및 맥(vein)을 형성된다. 단층암은 단층이나 단층대에서 마찰 움직임이 일어나는 동안 형성되는 암석으로, 성장광물, 상태, 변형기각에 의해 조절되어 발달한다. 또한 단층암은 암석과 광물에 파쇄작용과 분쇄작용이 일어나고 단층이 재발하는 동안 미균열 조직을 따라 재균열 작용, 미끄럼작용, 마찰미끄럼작용을 가져온다. 단층암은 다양한 크기의 암석파편과 암편을 포함한 세립의 기질로 구성되어 있다.

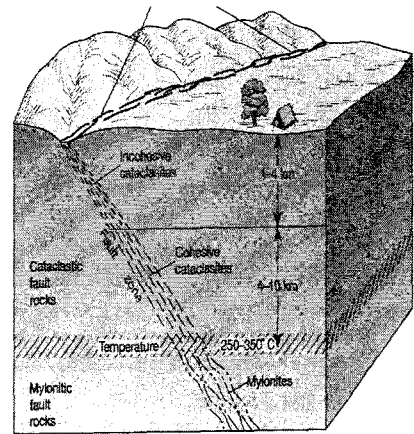


그림 5. 단층 생성 심도와 특성

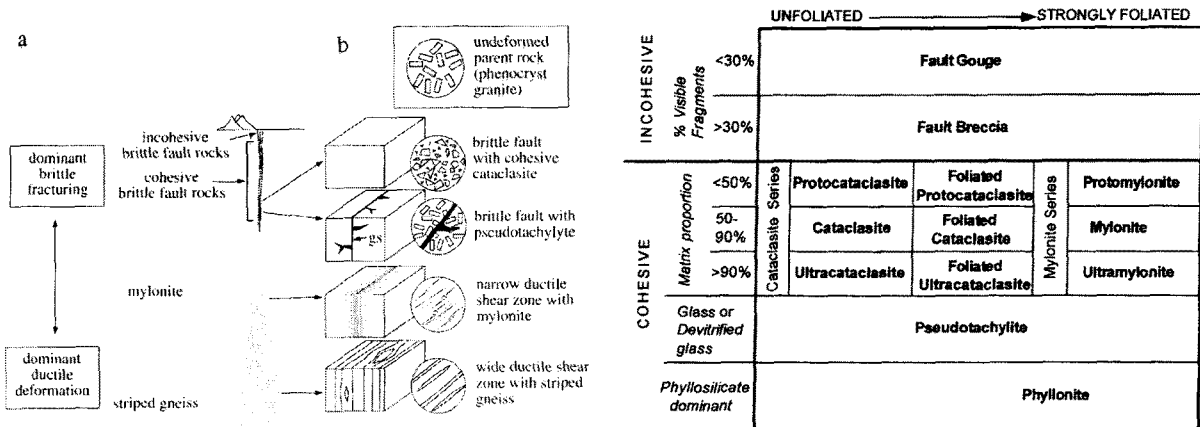


그림 6. 단층암의 분류와 특성

단층암 내에 모암의 잔류흔적이 남지 않을 정도의 변형을 받을 경우에는 약한 엽리, 선구조, 광물의 선택배향 등을 가지기도 한다. 단층암은 기질의 함량, 암편의 고결과 미고결의 정도, 입도와 그 비율 및 세립의 기질부의 엽상구조 등의 유무를 기준으로 하여 그림 6과 같이 분류된다. 단층암은 실제 단층에서 단층의 공학적 특성을 결정하는 주된 물질로서, 대부분의 단층으로 인한 문제는 불량한 단층 물질에 기인한다. 단층 물질의 특징은 단층 생성 당시의 단층 물질 특징과 이후 열수 및 지표수에 의한 단층 물질의 변질 상태에 의해 결정된다.

그림 7은 국내 변성암 지역 단층암의 예로서 주로 엽리가 발달된 파쇄암(Foliated Cataclasite)에 해당되며, 파쇄유동의 정도에 따라 기질 부분이 많은 곳과 반상쇄정 부분이 많은 곳에 의해 성분엽리(Compositional foliation)가 형성되었다. 또한 일부 기질부분에서는 엽상광물인 일라이트가 선택배향을 하여 엽리를 형성하기도 한다. 이 중 일부는 지표환경에서 재활성한 것으로 추정되며 단층비지(Fault gouge)를 포함한 전단띠(Shear band) 및 단층비지가 포함되지 않은 단층활면을 발달시킨다.

그림 7 상단의 단층암의 시추 코어는 기질이 전단띠를 이루어 반상 쇄정과 모암으로 구성된 띠와 교호되어 성분 엽리처럼 보인다. 단층암 내에는 단층영향대의 암석과 비교했을 때 뚜렷이 많은 양의 기질이 함유되어 있음을 관찰 할 수 있다. 반상쇄정은 기질에 의해 둘러싸여져 있으며, 단층의 재활성으로 인한 마모작용에 의해 입자의 구형도와 원마도가 우수하지만 그 크기는 주로 세립의 분포를 보이며 관찰된다. 반상쇄정을 구성하는 광물은 주로 석영 및 장석류이며 일부 광물들은 반상쇄정이 되기 이전 모암에서 관찰된 상태로 남아있기도 한다. 단층암 내에서는 장석류 및 운모류가 단층영향대 및 모암에서 보다 감소하였으며 일라이트 및 녹니석, 흑연은 증가하였다. 앵커라이트(Ca(Fe, Mg, Mn)(CO₃)₂)는 모암에서는 존재하지 않으나 단층암에서 관찰된다. 이와 같은 광물 조성의 변화는 지하수 유입 등 유체에 의한 변질작용 이 심하게 일어났던 것으로 추정된다. 이 예의 단층 물질은 팽윤성 광물에 속하지 않아, 지하수에 의한 팽창압을 유발시키지는 않으나, 지하수 침투에 의해 쉽게 붕괴되고, 이완되는 특성을 가지고 있으며, 그 전단강도가 현저히 저하되는 특성을 가지고 있다. 또한 그림 7 하단은 단층 가우지 시료에 대해 시행된 총 130시간(약 5~6일)간의 슬레이킹 대체시험 결과로서, 시험 전보다 약 50% 정도 중량 감소를 보이고 있다.

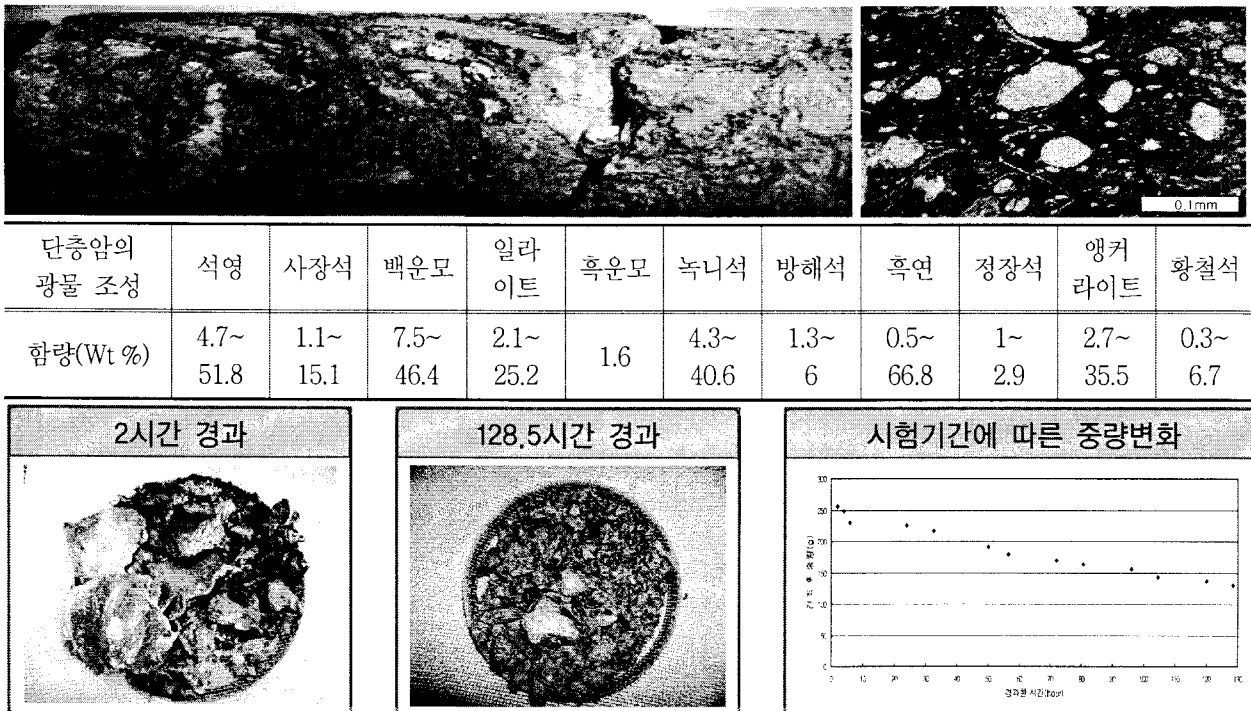


그림 7. 국내 변성암 내 단층암의 특성

2.3 단층 연령과 활성 단층

활성단층은 지질학적으로 제4기에 단층운동이 일어난 단층으로 정의된다. 이러한 정의는 제4기에 일어난 지구조 운동이 현재에도 진행되고 있다는 것을 기초로 한다. 반면에 비활동성 단층이란 지질학적 시간으로 오래 전에 단층 작용이 일어난 것으로 단층 생성 이후 더 이상의 변위가 일어나지 않은 단층을 말한다. 미국, 캐나다, 호주, 영국 및 일본 등에서는 방재 지질학적 측면에서의 단층절대연령측정 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있으며, 국가 규모의 집중적인 투자로 분석 기기, 시료처리 실험실, 전문인력이 확보된 상태에서 최근 10년 동안 비약적인 발전을 하고 있다. 세계 각국은 자기나라의 지질 특성에 따라서 활성단층에 대한 분류기준을 다르게 하고 있으며, 한 나라안에서도 기관별로 그 분류 기준을 달리하기도 한다. (표 1)

표 1. 활성/잠재 단층의 분류 기준

국가/기관	용어	활성/잠재 단층 판별 기준
미국 원자력 규제위원회	잠재단층	① 과거 35,000년 이내에 적어도 한번의 단층운동이 있었거나, 과거 50만년동안 2회 이상의 운동이 있었던 단층.
		② 다른 잠재단층과 구조적 관계를 가지고 있는 경우. ③ 단층을 따라 대규모의 계기지진활동이 있는 경우.
환경보호기구	홀로세단층	신생대 제4기 홀로세 기간에 변위가 있었던 단층
국제원자력기구 (IAEA)	잠재단층	① 신생대 제4기에 이동이 있는 경우.
		② 지표파열이 있는 지형적 모양을 가진 경우.
		③ 단층을 따라 계기지진활동이 있는 경우.
		④ 다른 잠재단층과 연관된 경우.
일본	활성단층	신생대 제4기에 활동한 적이 있는 단층으로
		A급: $1 \leq S$ (평균변위속도 mm/year)
		B급: $0.1 \leq S < 1$ C급: $S < 0.1$ 로 세분함.
독일, 스페인, 이태리, 캐나다, 프랑스	-	특별히 규정하지 않음.

신기활성단층을 정확하게 이해하기 위해서는 제4기 퇴적층에 대한 퇴적환경·층서조사, 신기단층도 작성기술, 단층의 분절(segment)화에 대한 조사기술, 해안단구 조사기술, 신기단층에 대한 고지진학적인 방법을 적용한 해석기술, 고지자기 분석기술, 신기단층의 고응력장 조사기술, 신기단층의 연령측정을 위한 ESR 등 지진화학적 연구/기술 등에 의해서 종합된 정성적·정량적 지질정보자료를 필요로 한다.

단층의 활동성 여부를 판단하는 중요한 기준 중의 하나는 가장 최근의 단층의 활동시기와 그 변형속도를 알아내는 것이다. 단층의 활동 시기는 단층에 의해 생성된 물질을 대상으로 하여 직접적으로 그 활동시기를 확인하는 것이 최선의 방법이지만, 그런 방법을 적용할 수가 없을 경우는 간접적인 방법으로 유추할 수도 있다. 즉, 다른 인접한 단층에 의해서 절단되거나 단층을 덮고 있는 암석의 연대를 측정하여 알아 낼 수도 있다.

신기단층의 연대측정에서 중요한 점은 단층활동과 관련된 적합한 시료물질을 채취하여 가능한한 여러 가지 방법에 의한 연령측정 결과를 확인하고, 그 확인된 연령측정 자료에 대하여 지질학적 관찰내용과 일치성을 면밀하게 평가하는 것이다. 신기단층의 연령측정을 위한 지진화학적 방법은 다양하며, 각각의 방법별로 연령측정에 이용되는 대상 시료물질이 다르며, 또한 각 방법별로 연대측정의 범위가 다르므로 이에 대한 적용성 검토가 필요하다.

3. 단층의 구조 지질학적 특성

3.1 단층의 성장과 단층계 (fault system)

단층은 그 성장과정에서 주변위대 (Principle Displacement Zone: PDZ) 외에 다양한 연관 구조를 발달 시킨다. 이렇게 하나의 단층은 복잡한 형상으로 연결된 단열의 집합체로 인식될 수 있으며, 단층의 성장과 관련되어 동시에 또는 순차적으로 발달한 지질 구조의 체계를 단층계 (fault system)라 한다.

그 단층을 구성하는 주변위대 (PDZ)를 포함하여 이와 연관된 다양한 안행상(en echelon)의 단층 및 습곡 구조 등 2차적인 지질 구조의 발달은 주향 이동 단층계의 가장 대표적인 구조적 특성 중 하나이다. 그림 8은 우수향 주향 이동 단층에서 발달할 수 있는 다양한 지질 구조의 관계를 모사한 것이다 (Harding et al, 1985). 이러한 주향 이동 단층과 연관된 안행상의 단층 및 단열의 배열은 점토 등 다양한 물질을 이용한 모형 시험과 암석 시료를 이용한 실내 시험 및 대규모 지진시에 발생한 지각의 변형 상태 등의 연구를 통하여 그 형성 기작이 알려져 왔으며, 주향 이동 단층 운동과 관련된 1) Synthetic 주향이동 단층 또는 R 전단 (Riedel shear), 2) Antithetic 주향이동단층 또는 R' 전단 (conjugate Riedel shear), 3) 2차 Synthetic fault 또는 P 전단 (P shear), 4) 신장 또는 인장 균열 (tension crack), 5) 주변위대(PDZ)와 평행한 단층 Y 전단 등으로 정의된다.

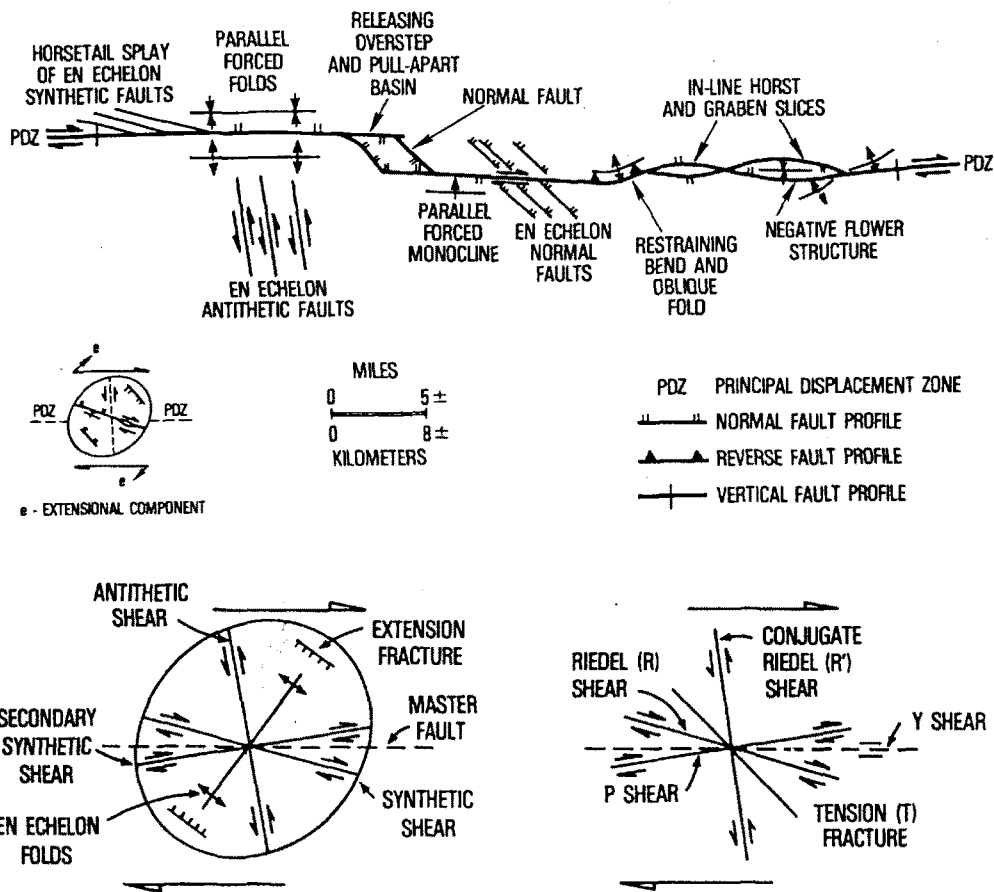


그림 8. 우수향 주향이동단층의 주변위대와 관련 구조

각각의 단열들은 단순 전단 조건의 주어진 응력장에서 일정한 각의 관계를 가진다. 재료의 내부 마찰 각을 ϕ 라 할 때, R 및 P 전단 단열은 PDZ와 각각 $\phi/2$ 의 사잇각을 가지며, 대체로 $10^\circ - 20^\circ$ 의 예각을

가진다. 또한 R 전단 단열과 R' 전단 단열은 최대 주응력 방향을 기준으로 하여 각각 $\pm(45^\circ - \phi/2)$ 의 방향으로 발달하며, 인장 균열은 최대 주응력 방향과 평행하게 발달한다. 이러한 단층 운동과 관련된 단열의 특성은 주단층의 변위 방향 및 응력장을 분석하는 데 효과적으로 사용된다. 그림 9는 국내 우수항 주향이동단층계로써, 지질도 규모, 노두 규모 뿐 아니라, 박편 규모에 이르기 까지, 동일한 형태, 즉 북동동 방향의 주변위대와 북동 방향의 인장 균열 및 R 전단 단열로 구성되어 있는 단층계를 보여준다.

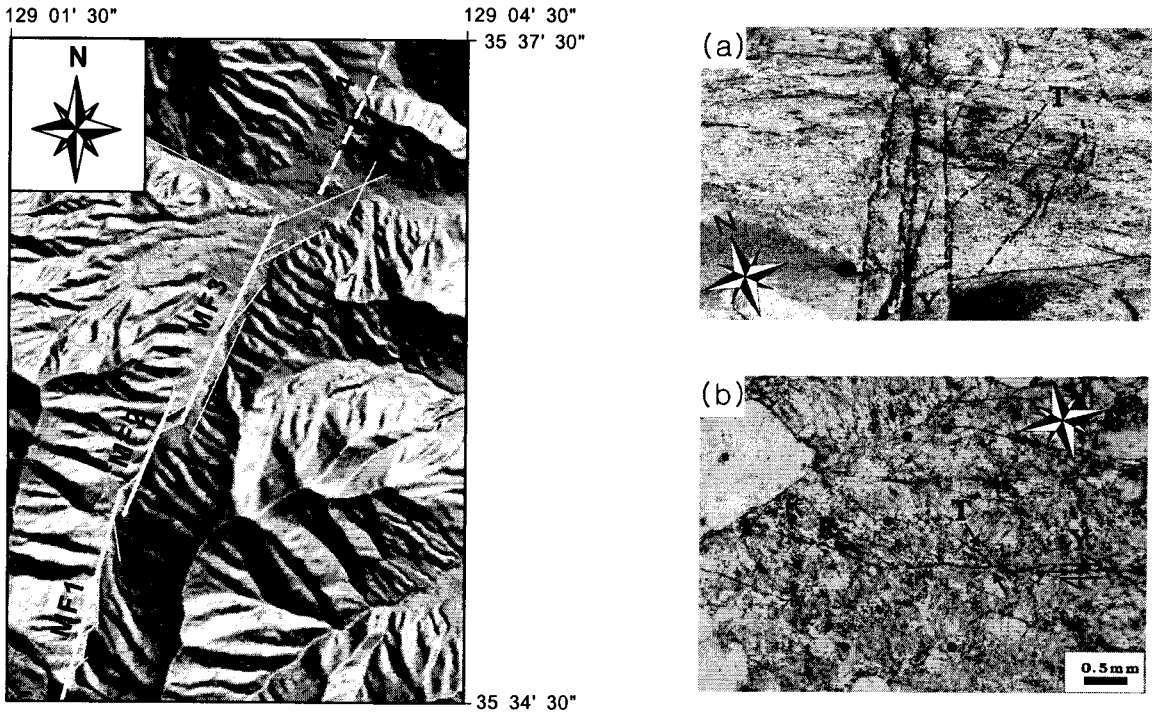


그림 9. 국내 우수항 주향 이동 단층계의 예

각각의 전단 단열이 동일한 응력장에서 단층을 구성하는 또는 단층과 연관된 단열계라 하면, 단층 운동이 진행됨에 따라, 지속적인 압축력 또는 전단응력으로 변형을 가중시키고 단층의 경사면을 중첩시켜 형성된 복잡한 단층 구조를 단층 중첩 구조 또는 듀플렉스 (duplex)라 한다 (그림 10).

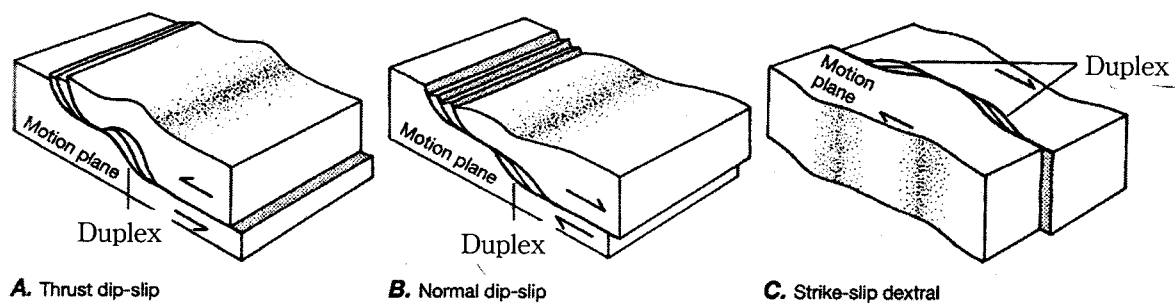


그림 10. 단층 중첩 구조 (Duplex) 모델

이러한 듀플렉스는 결과적으로 특정 위치에서 집중적으로 단층면을 발달시켜, 결과적으로 단층대의 폭을 두껍게 하고, 변형을 집중 시킨다. 특히 조산대에서 강한 압축력에 의해 발달하는 충상 단층의 경우, 이러한 듀플렉스 구조의 형성으로 인해 급격한 압력 변형을 발생시킨다 (그림 11). 국내의 주요 단층대는 많은 경우 주향이동단층계와 충상단층대로 발달하고 있다.

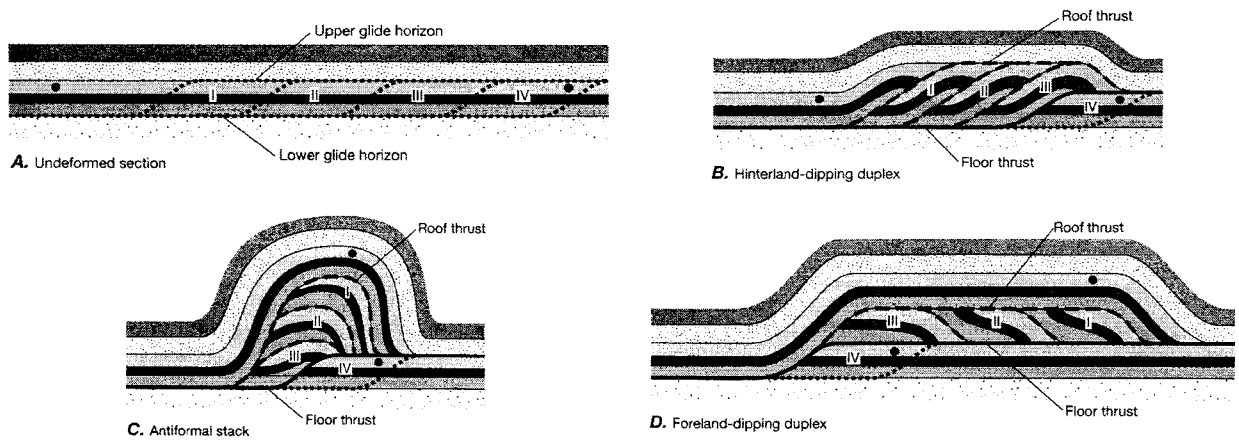


그림 11. 충상단층대의 듀플렉스 모델

그림 12는 국내의 주향이동단층계 및 충상단층대의 예이다. 주향이동단층계 사례의 경우, 특징적인 북북동 방향의 분절된 주 단층과 주향이동단층 작용과 관련된 충상단층 등 수반 단층이 복잡함 형태를 이루어 발달하고 있다. 충상단층대의 사례에서는 동서 방향의 충상단층대 내에 수조의 충상 단층이 고기의 지층을 후기 지층 상위로 충상시키며, 평행한 주향으로 순차적으로 발달하고 있다.

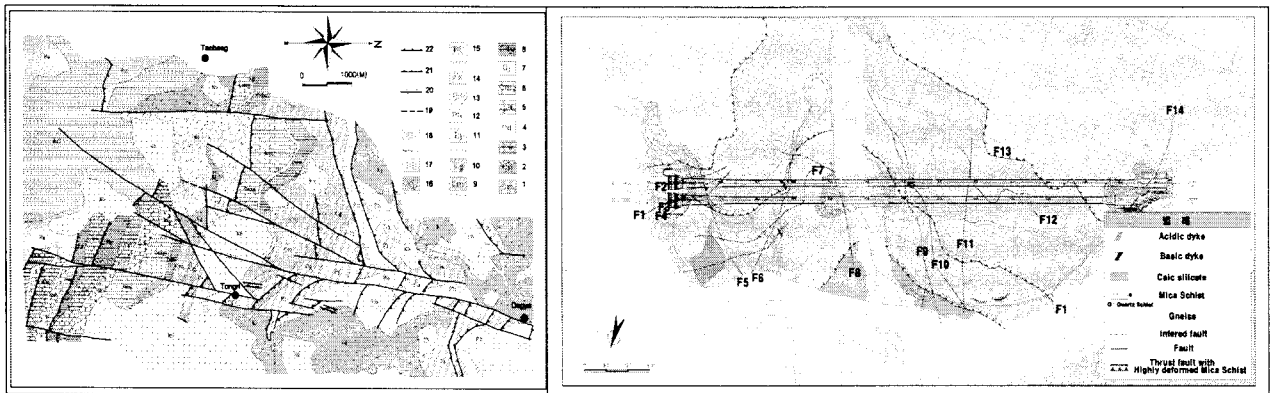


그림 12. 주향이동단층(좌) 및 충상단층대(우)의 국내 사례

3.2 단층을 인지하는 기타 특성

위에서 언급한 단층 변위의 확인과 단층 물질의 존재, 단층활면 또는 단층 관련 단열의 발달 등은 단층을 인지하는 주된 특성이다. 이렇게 직접 단층의 고유 특성의 확인을 통한 방법 이외에도 아래 그림 13, 14 등과 같은 단층 지형적 특징 또는 단층 변위로 인한 층서의 반복 또는 생략등 불연속성 등이 단층 인지에 활용된다.

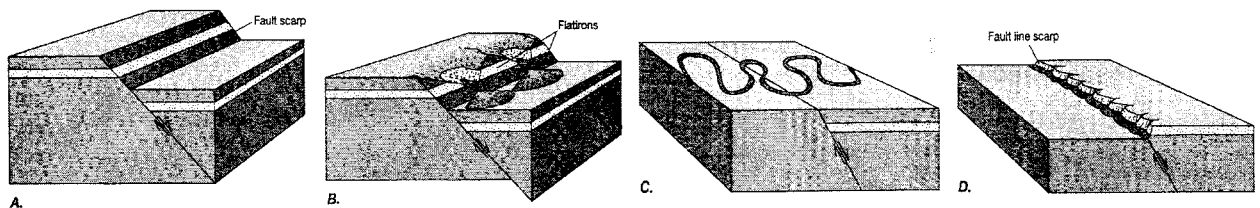
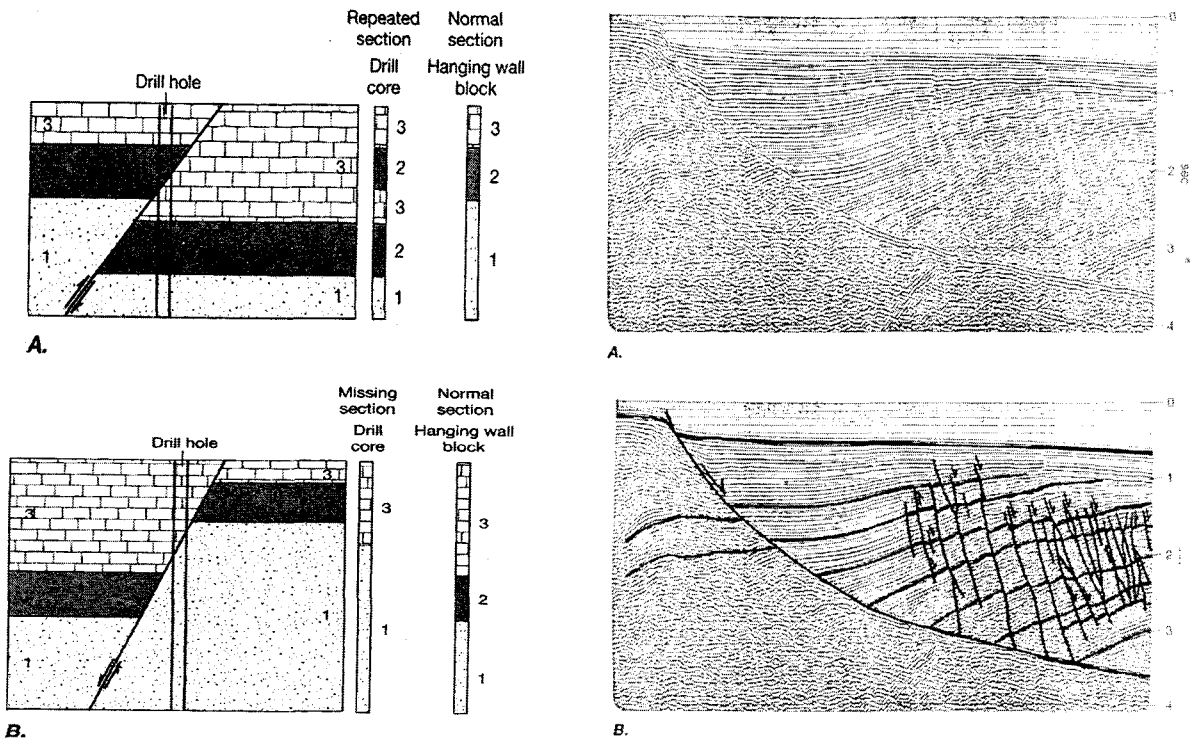


그림 13. 단층 지형의 변화와 인지



시추 지층의 반복(A) 또는 생략(B)

지구 물리 탐사 처리전(A) 처리후 (B)

그림 14. 시추 및 물리 탐사를 이용한 층서 불연속성 인지

4. 결론을 대신하여

단층은 대표적인 지질 구조인 동시에 지반 공학적 문제의 주된 대상 중에 하나이다. 단층의 특성을 단층의 자세, 방향, 규모 등 분포 특성과 강도 및 투수성 등 수리 역학적 특성으로 구분한다면, 이는 단층의 종류 및 단층계 또는 단층대의 형상 그리고 단층 물질의 특성과 밀접한 관계가 있다. 따라서 앞에서 기술한 단층의 제 특성은 단층의 공학적 특성을 이해하고, 단층을 효과적으로 인지할 수 있는 데 기본적인 정보로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Atkinson, B. K., 1987. Fracture Mechanics of Rock. Academic Press, London. 534p.
2. Harding, T. P., Vierbuuchen, R. C. & Christie-Blick, N. 1985. Structural style, plate-tectonic settings, and hydrocarbon traps of divergent (transtensional) wrench faults. Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation, Soc. Economic Paleo. & Mineral. 51-77.
3. Ragan, D. M., 1985. Structural geology. an introduction of geometrical technique, Wiley, Chichester.
4. Ramsay, J. G. & Huber, M. I., 1987. The techniques of modern structural geology. V1. Academic Press. London.
5. Twiss & Moores, 1995, Structural Geology
6. Sibson, R. H., 1977. Fault rocks and fault mechanism. J. Geol. Soc. (Lond.), 133, 191-213.