

편암지역에서의 단층대 특성 조사 및 분석

한병현, 김영근, 이승복, 심재범(삼성건설)
이희권(강원대학교)

1. 서론

암반내 존재하는 단층(fault)은 암반의 거동에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 암반 사면, 터널과 같은 암반구조물의 설계 및 시공에 있어서 단층의 크기나 분포 그리고 공학적 특성에 대한 조사는 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

하지만 단층에 대한 정확한 공학적인 정의가 규정되어 있지 않은 상태이며, 같은 지역에서조차도 다른 지반조사결과를 보여주는 경우(단층의 위치, 규모, 폭, 개수 등)가 경우가 많아 오히려 기술자들에게 혼선을 초래하거나 지질 및 지반조사에 대한 불신을 증가시키는 경우도 나타나고 있다. 따라서 단층에 대한 지질학적 의미와 공학적 의미에 대한 체계적인 검토가 필요하다고 생각된다.

즉 단층의 지질학적 의미와 구조지질적 특성, 단층의 규모, 크기, 폭 등을 조사하기 위한 지반조사방법, 단층암, 단층가우지, 파쇄대에 대한 공학적 성질을 규명하기 위한 제반 시험방법, 다양한 시험결과로부터 지반정수를 산정하여 암반구조물의 안정성을 검토하고 설계하는 방법, 그리고 시공중 예상치 못한 단층대를 조우할 경우에 대한 보강 대책방법 등에 대한 기술적인 분석이 검증이 요구된다 할 수 있다.

본고에서는 편암지역에서의 단층대를 규명하기 위하여 실시된 다양한 지반조사를 바탕으로 단층의 구조지질적 분포 특성 및 단층암의 공학적 특성에 대한 분석결과를 기술하였으며, 이를 바탕으로 암반 구조물에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 합리적인 보강 대책을 수립하고자 하였다.

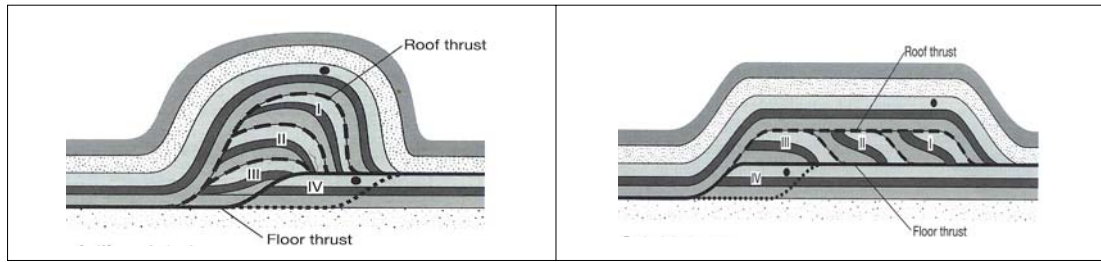
2. 단층의 공학적 특성

2.1 단 층

암반내에는 다양한 종류의 불연속면(discontinuity)이 존재하는데, 불연속면은 인장강도가 없거나 매우 작은 값을 갖는 암반내의 분리면을 말하며, 단층은 대표적인 불연속면의 한 형태로 전단변위의 발생여부로 단층을 정의한다. 단층은 발생형태에 따라 정단층, 역단층 그리고 주향이동단층으로 구분되고(그림 1), 역단층중에서 특히 저각으로

이루어진 경우를 스러스트라고 한다.

스러스트 단층에서 수평하게 가로 놓인 지층이 측방향에서 압축을 받는 경우에 flat 지층과 ramp가 연결되어 계단 상태의 형태를 취하게 되는데, 새로운 스러스트 단층에 따라 상반의 지층이 이동하게 되면 새로운 램프가 형성되면서 지층이 겹쳐 쌓이게 되면 최종적으로 기와를 겹친 것처럼 배열해서 듀플렉스(duplex)를 형성하게 된다.



(a) Antiformal stack (b) Foreland-dipping stack
 그림 1. 스러스트 단층대의 듀플렉스 모델(Twiss and Moores, 1992)

일반적으로 단층대는 대상 구조를 가지며, 가장 중심에 단층 점토대, 이를 에워싸는 좁은 단층 각력대, 최외곽부의 손상대 또는 영향권으로 구성된다. 단층 가우지 또는 단층점토는 극미립자로 구성되며 단층의 중심이라 할 수 있는 부분이고, 단층 각력대는 단층 점토대에 인접하여 원암의 구조를 보이지만 심하게 파괴된 구간을 나타낸다. 영향권은 부수 단층 및 단열이 많이 발달하나, 단층의 영향이 미약한 구간을 나타낸다.

단층의 형태는 일반적으로 위와 같이 정의하나, 실제로 단층 가우지와 단층각력이 혼합되어 나오는 경우가 있고, 단층 가우지대나 단층영향권 없이 단층점토와 모암으로 산출되는 경우도 있다. 일반적으로 단층 가우지와 단층각력대가 대칭형을 이루나 비대칭형을 이루는 경우도 있고, 망상형태로 산출되는 경우도 있다. 이렇듯 단층의 특성이나 형태는 일반적으로 설명되는 것 이외에 여러 가지 형태로 산출된다.

단층면은 자주 단층운동을 했을 때의 마찰에 의해 연마되어 매끈매끈하고 광택을 가진 경면(slickenside)이라고 하는 면을 형성한다. 또한 단층활동에 따라 단층면의 주변에는 이차적인 소구조를 가진 단층암(fault rock)이 형성된다. 이 단층암이 파쇄대(fracture zone) 내지 전단대(shear zone)라고 하는 부분을 구성한다. 단층암중에서 손으로 부술 수 있는 정도의 연약하고 점토상태의 세립한 기질부가 많은 것을 단층점토(fault gouge)라고 한다.

		UNFOLIATED → STRONGLY FOLIATED				
INCOHESIVE	% Visible Fragments <30%	Fault Gouge				
	>30%	Fault Breccia				
COHESIVE	Matrix proportion	<50%	Protocataclasite	Foliated Protocataclasite	Mylonite Series	Protomylonite
		50-90%	Cataclasite	Foliated Cataclasite		Mylonite
		>90%	Ultracataclasite	Foliated Ultracataclasite	Ultramylonite	
	Glass or Devitrified glass	Pseudotachylite				
	Phyllosilicate dominant	Phyllonite				

그림 2. 단층암 분류표(Blenkinsop, 2000)

2.2 충전물과 파쇄대

충전물(filling material)은 불연속면에서 인접한 암석 벽면을 분리시키는 물질로 정의되며, 전형적인 충전물로는 방해석, 녹니석, 실트, 단층 점토, 각력암, 석영, 황철석 등이 있다. 그림 4는 단층 충전물의 다양한 종류를 보여주고 있다. 충전물은 단층의 전단강도에 중요한 영향을 미치게 되는데 단층점토와 같은 충전물로 채워진 불연속면(filled discontinuity)은 충전물이 없거나 닫힌 불연속면에 비하여 보다 낮은 전단강도를 가지게 된다.

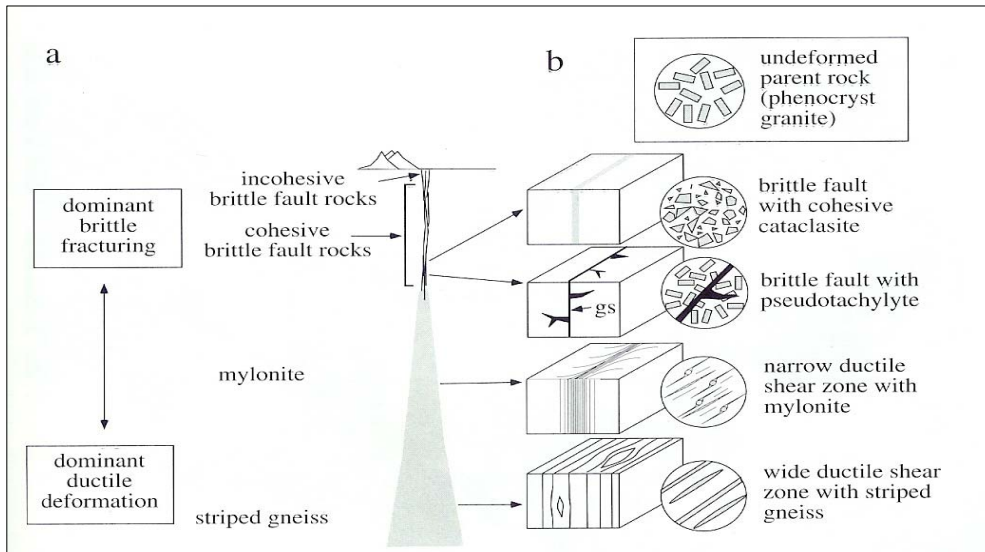


그림 3. 단층암 형성 심도(Passchier, 1996)

단층내 물질은 주변의 암석이 자갈상으로부터 점토에 이르기까지 파쇄된 것과 풍화 변질에 의해 변화되고 이차적으로 생성된 점토광물과 지하 침투수에 의한 유입점토 등이 있다. 그림 5에는 단층면을 따라 열수용액의 흐름에 의한 효과를 보여주고 있다.

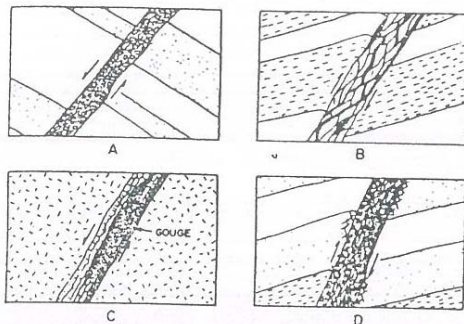


그림 4. 단층 충전물의 다양한 형태

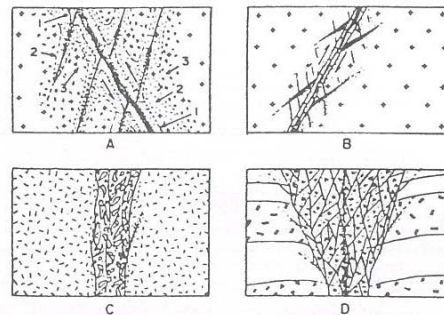


그림 5. 단층면을 따라 발생한 열수변질

단층이 발생하면 그 면을 따라 암석강도가 저하되기 때문에 반복하여 파괴가 발생한다. 그 결과 크기가 다른 여러 가지 규모의 파괴면이 밀집되고, 어느 방향으로 방향성을 가지는 존(zone)이 형성된다. 이들을 단층 파쇄대라고 한다. 단층파쇄대를 구성하는

물질은 전단파괴의 정도에 따라 점토, 각력이 혼합된 점토, 각력이 혼합된 모래, 점토가 얇게 피복된 각력, 비교적 큰 암괴와 각력이 혼합된 층, 균열이 발달한 층, 비교적 균열이 많은 층으로 구분할 수 있다.

단층파쇄대의 역학적 특성과 투수성은 파쇄대내 물질이 점토내지는 각력을 주로 하는가에 따라 크게 달라지는데, 이것들이 조합된 형태들로 분류할 수 있으며, 여러 번의 구조작용에 의해 단층이 계속 파쇄되어 넓은 단층대를 형성하는 경우도 있다.

3. 편암지역의 단층대의 지질 및 암석학적 특성

본 조사지역은 선캠브리아기 경기 편마암 복합체의 호상편마암 및 흑운모 편암 지대에 해당되며, 운모편암 및 석영편암이 층상구조를 보이고 있다. 또한 본 지역에는 북동동 내지 북서서의 주향을 갖고 남동 내지 남서의 경사방향을 가지는 스러스트 단층들이 분포하고 있으며 남북 내지 북서 방향의 주향을 가지는 인열단층(*Tear fault*)들이 발달되어 있다.

3.1 구조지질적 특성

본 조사구간은 트러스트 단층의 듀플렉스 중첩에 의해, 기반암인 운모편암이 심하게 분해, 변질된 구간이다. 또한, 암맥의 관입경계를 따라 연성 전단대 및 층상 단층이 발달하고 있으며, 기반암인 운모편암 불량대와의 공학적 특성차이에 의해 암맥은 매우 심한 풍화와 변질을 받았다(그림 6).

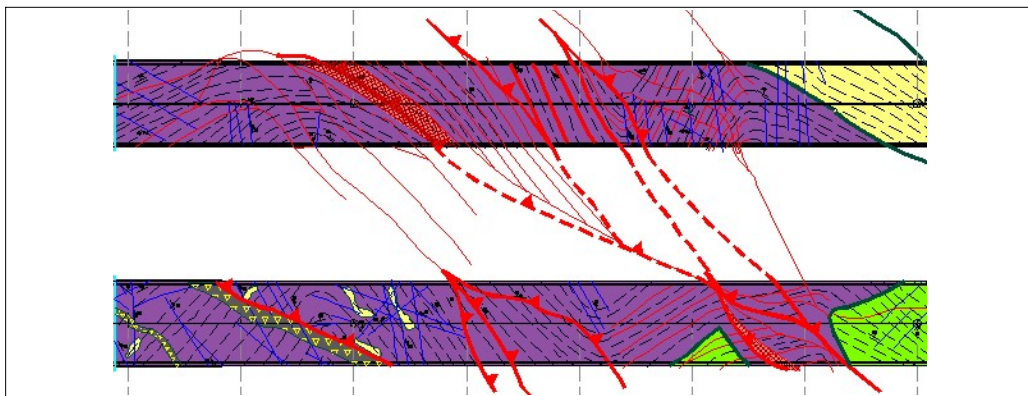


그림 6. 조사구간의 지질평면도

또한, 단층면 및 엽리면에는 흑연 및 녹니석 등 2차 변질광물이 충전되어 있으며, 엽리구조는 본 구간에서 향사와 배사를 반복하는 습곡을 보인다. 이는 향사와 배사축부에 응력집중 현상을 발생시켰을 것으로 사료된다. 전 구간에 걸쳐 duplex 형태의 단층들이 발달하고 있다. 이들 단층은 단층활면을 따라 단층가우지가 충전되어 있다.

한편 엽리 구조가 습곡됨에 따라, 단층 역시 휘어지는 기하학적 특성이 인지되는데, 이와 같은 형태는 단층 발달 이후에 습곡 작용이 발생됨에 따라 형성된 것으로 해석된다. 단층면을 교란시킨 습곡은 터널 전반적으로 인지되는 남북 방향의 open type 습곡에 해당한다.

이 지역의 가장 뚜렷한 지질 구조는 1) 무균 습곡 구조를 동반한 광역 엽리 구조, 2) 남쪽에서 북쪽으로 진행되는 동서 주향, 남경사의 층상 단층과 이에 수반된 고각의 단층과 습곡 구조, 그리고 3) 상기 엽리 구조 및 층상 단층 등 제 구조들을 습곡시키는 남북 방향의 축을 가지는 습곡구조이다. 이들은 각각 순차적으로 발달한 것으로 판단되며, 본 지역의 지질은 그림 7과 같은 진화 과정을 겪었을 것으로 생각된다.

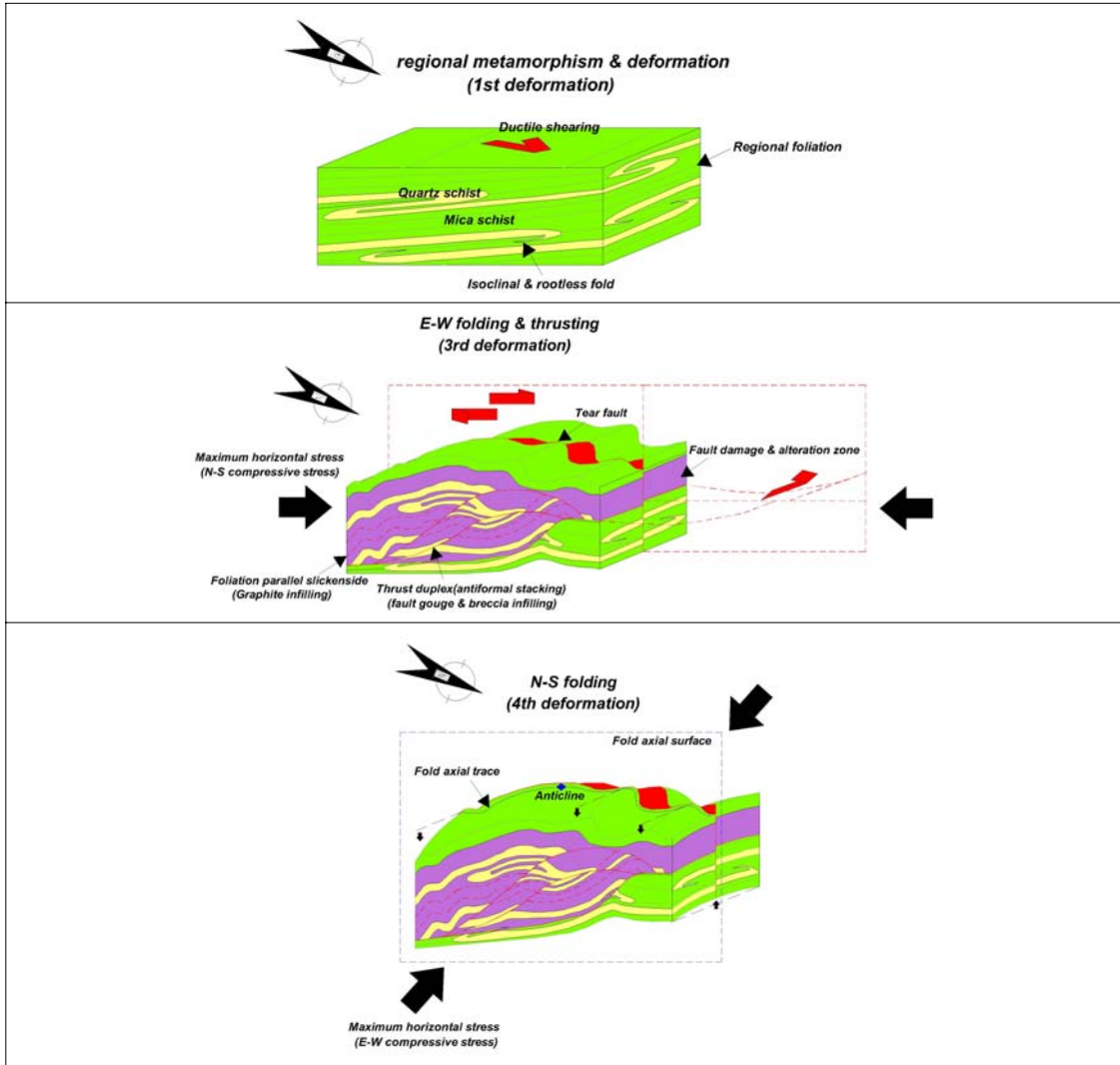


그림 7. 본지역의 지질 형성과정 모식도

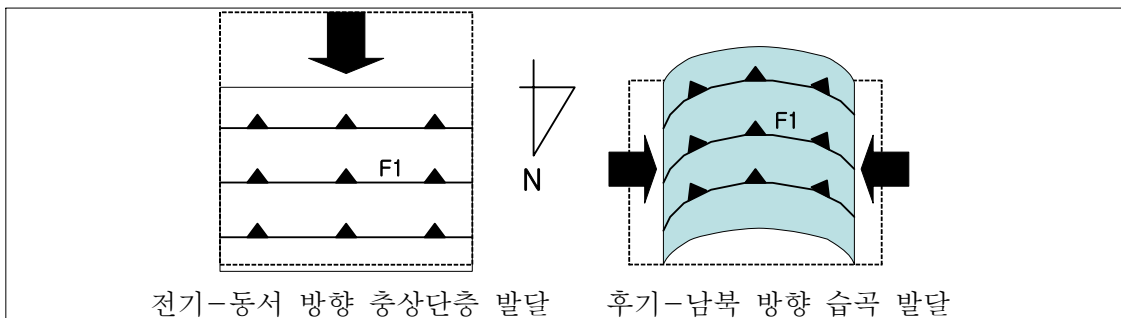


그림 8. 지질 평면상 단순 개념도

3.2 암석학적 특성

(1) 운모 편암

운모편암은 정향배열을 하고 있는 흑운모, 녹니석 및 백운모들이 벽개 영역(*Cleavage domain*)을 형성하고 있으며, 석영 및 장석들이 마이크로리손(*microlithon*)을 이루어 성분엽리를 발달시켰다. 흑운모의 함량은 시추코어의 위치에 따라 변화가 심하다. 시추코어에서 관찰되는 엽리의 방향은 변화가 심한 편이다. 이는 조사지역 내에 습곡 및 단층으로 인해 엽리의 방향이 심하게 교란된 것으로 추정된다.



그림 9. 운모편암의 시추코어 및 박편사진

흑운모, 녹니석 및 백운모로 구성된 벽개영역과 석영 및 장석류가 우세한 마이크로리손에 의해 형성된 성분엽리 구조가 잘 발달되어 있으며 석영은 대체적으로 엽리의 방향과 평행한 방향으로 신장되어 있으며 과동소광을 보인다. 운모편암을 구성하는 운모류의 크기는 세립에서부터 조립에 이르기까지 다양한 분포를 보이나 대체적으로 세립의 입자크기가 우세하게 관찰된다.

모암인 운모편암은 아래 표와 같은 광물 조성을 가진다. 단층암이나 단층영향대 보다 석영과 일라이트 및 녹니석의 함량이 적으며, 운모류와 장석류의 함량이 높다. 또한 다른 암석에 비해 흑연의 높은 함량과 돌로마이트의 존재는 흑운모편암이 퇴적기원의 변성암임을 유추할 수 있게 한다.

광물	석영	사장석	백운모	일라이트	흑운모	녹니석	방해석
함량(wt%)	16.8~47.1	3.8~20	3.1~12	15.3	7.3~19.6	13.1~28.5	10.7
광물	흑연	각섬석	돌로마이트	황철석			
함량(wt%)	11.5	3.9	1.2	0.6			

운모편암의 암석 화학조성은 아래 표와 같다. 단층암이나 단층영향대 보다 Fe_2O_3 와 MnO 의 함량이 높다. 이 외에 다른 암석과 화학조성은 거의 비슷하게 나타난다.

화학성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO
함량(wt%)	49.45~75.16	6.30~18.68	2.24~16.87	0.05~0.46	0.55~0.85	0.67~4.2
화학성분	K_2O	NaO_2	P_2O_5	TiO_2	<i>L.O.I.</i>	
함량(wt%)	3.36~3.79	1.1~2.1	0.06~0.09	0.25~0.74	1.07~3.26	

(2) 석영 편암

석영편암은 코어 상에서 운모편암에 비해 상대적으로 밝은 색으로 관찰되며, 정향배열을 하고 있는 흑운모, 백운모 및 녹니석들이 벽개 영역을 형성하고 있으며, 석영 및 장석들이 마이크로리손을 이루어 성분 엽리를 발달시켰다. 운모류의 함량은 시추코어의 위치에 따라 변화가 심하다.



그림 10. 석영편암의 시추코어 및 박편 사진

석영편암은 운모편암과 유사한 광물 조합과 입자 크기를 보이고 있다. 다만 운모편암에 비해 상대적으로 석영 및 장석류의 함량이 많으며, 운모류의 양이 적다. 운모류의 정향배열에 의해 엽리가 잘 관찰되며 일부 박편에서는 현미경 상에서 확인 할 수 있는 습곡 구조도 관찰된다. 석영 입자는 엽리의 방향과 유사한 방향으로 신장되어 있음을 관찰 할 수 있다.

석영편암의 광물조성은 아래표와 같다. 석영편암 내의 장석류 및 운모류의 함량은 단층암이나 단층영향대의 암석보다 높게 나타난다.

광물	석영	사장석	백운모	일라이트	흑운모	녹니석	
함량(wt%)	36.9~43.2	3.8~19.7	19.5~22.8	4.5	6.6	22.4	

석영편암의 암석 화학조성은 아래 표와 같다. 석영편암 및 운모편암과 단층영향대의 화학조성은 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 유체가 단층영향대로 유입이 비교적 적었기 때문인 것으로 판단된다.

화학성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO
함량(wt%)	65.15~75.18	6.11~17.29	2.28~4.46	0.05~0.07	0.77~0.92	0.75~2.08
화학성분	K_2O	NaO_2	P_2O_5	TiO_2	$L.O.I.$	
함량(wt%)	3.10~3.47	2.4~2.38	0.06~0.07	0.21~0.25	0.31~2.67	

(3) 단층 영향대

시추코어 상에서 석영편암과 구분이 쉽지 않지만 기질이 많은 부분과 반상 쇠정 또는 모암이 많은 부분이 교호되어 엽리구조를 형성하고 있다. 기질이 많은 부분은 어두운 색을 띠며, 반상 쇠정 또는 모암이 많은 부분은 밝은 색을 띤다. 단층암대와는 대체로 점이적인 경계를 갖는다. 여러 번 재활성되어 단층비지를 포함한 전단띠와 단층비지가 없는 단층활면으로 되어 있는 단층면이 발달되어 있기도 한다. 일부 석영, 방해석 및

장석맥 들이 발달되어 있기도 한다.



그림 11. 단층영향대의 시추코어 및 박편 사진

과쇄유동(*Cataclastic flow*)에 의해 생성된 기질이 발견되며 석영 및 장석류로 구성된 반상쇄정이 관찰된다. 기존의 엽리를 절단하고 있는 전단띠의 모습이 잘 관찰된다.

반상쇄정을 구성하고 있는 광물은 주로 석영 및 장석류이며, 입자의 크기는 대체적으로 중립의 크기를 보이고 있다. 이들 반상쇄정의 입자 형태는 과쇄작용(*Cataclasis*)에 의해 아각형의 각진 형태로 관찰되고 있다.

단층영향대 내에는 장석류 및 운모류의 함량이 모암인 편암보다 감소하였으며, 일라이트 및 녹니석은 증가하였다. 이와 같은 광물 조성의 변화는 유체 유입에 의해 변질작용이 일어났던 것으로 추정된다.

광물	석영	사장석	백운모	일라이트	흑운모	녹니석	방해석
함량(wt%)	36.9~71.7	14.8	19~21.2	7.9	6.4~8.5	13.4~28.9	2.4~3.8
광물	흑연	황철석					
함량(wt%)	2.2	1.3					

단층영향대 및 운모편암의 화학조성은 큰 차이는 보이지 않는다. 이는 유체가 단층영향대로 유입이 비교적 적었기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 유체의 유입으로 인한 Fe_2O_3 의 감소량은 보이고 있다. 또한 L.O.I.의 함량도 어느 정도 증가했음을 보인다.

화학성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO
함량(wt%)	58.29~74.65	5.64~16.62	2.31~9.39	0.05~0.16	0.75~2.16	0.73~3.76
화학성분	K_2O	NaO_2	P_2O_5	TiO_2	<i>L.O.I.</i>	
함량(wt%)	3.44~3.98	0.36~2.35	0.04~0.07	0.27~0.55	1.44~5.30	

(4) 단층암(변질)-I

일부는 기질이 불규칙하게 분포하여 단층각력암처럼 보이기도 하며(상), 일부는 기질이 전단띠를 이루어 반상 쇄정과 모암으로 구성된 띠와 교호되어 성분 엽리처럼 보인다(하). 기질의 함량은 시추코어의 위치에 따라 심한 차이를 보인다. 일부는 재활성되어 심하게 변질되어 있으며, 일부는 응집력을 유지하여 비교적 신선한 상태를 유지하고 있다. 이번 조사에서는 변질이 비교적 많이 진행된 구간을 변질우세대로 명명하였다.



그림 12. 단층암(변질) I 의 시추코어 및 박편 사진

변질된 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 녹니석은 증가하였다. 앵커라이트($\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$)는 모암에서는 존재하지 않으나 단층암에서 관찰된다. 이와 같은 광물 조성의 변화는 유체에 의한 변질 작용이 심하게 일어났던 것으로 추정된다.

광물	석영	사장석	백운모	일라이트	흑운모	녹니석	방해석
함량(wt%)	4.7~51.8	1.1~15.1	7.5~46.4	2.1~25.2	1.6	4.3~40.6	1.3~6
광물	흑연	정장석	앵커라이트	황철석			
함량(wt%)	0.5~66.8	1~2.9	2.7~35.5	0.3~6.7			

단층암과 단층영향대 및 운모편암의 화학조성은 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 L.O.I 값이 대체적으로 단층암에서 높아지는 경향이 있다. 이는 유체가 단층암 으로 유입된 것으로 추정된다.

화학생분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	CaO	MgO
함량(wt%)	33.88~78.34	9.25~22.51	3.2~14.31	0.03~0.39	0.13~10.84	0.49~4.78
화학생분	K_2O	NaO_2	P_2O_5	TiO_2	<i>L.O.I.</i>	
함량(wt%)	3.13~10.52	0.40~2.05	0.02~0.13	0.18~0.94	0.88~16.38	

(5) 단층암 (변질)-II

단층암내에 전단면을 포함하고 있으며 심하게 파쇄 되어있다. 기질은 대부분 재활성 되었으며 유체의 유입으로 인해 심하게 변질되어 있다.

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 일부 입자의 구형도와 원마도가 좋아졌다. 기질에 있는 석영 입자의 크기는 0.01mm 보다 작으며 반상쇄정은 0.1mm보다 큰 것도 존재한다. 반상쇄정을 구성하는 광물은 주로 석영이다.



그림 13. 단층암(변질) II 의 시추코어 및 박편 사진

단층암내에서는 운모류가 모암에서 보다 감소하였으며 녹니석은 증가하였다. 모암에는 없던 일라이트가 나타나고, 사장석은 포함되어 있지 않는다. 녹니석은 흑운모의 변질산물이며, 일라이트는 장석류의 변질산물로 추정된다. 모암인 편암류에는 없었던 흑연이 존재하여 일부 코아상에서 검은색을 띠는 경향이 있다.

(5) 단층가우지

본 구간에는 많은 단층들이 발달하고, 색은 회백색에서 녹색 검정색 등 여러 가지 단층 가우지 및 단층암들이 존재하며, 층상단층을 따라서 분포하는 단층 가우지가 비교적 두꺼운 폭의 형태로 산출되고 있으므로 자세한 광물성분 분석을 위해 XRD 분석을 실시하였다. 검은색의 단층가우지는 주로 석영, 사장석, 운모, 녹니석, 방해석으로 구성되며, 일라이트와 녹니석의 함량이 높다.(그림 14)

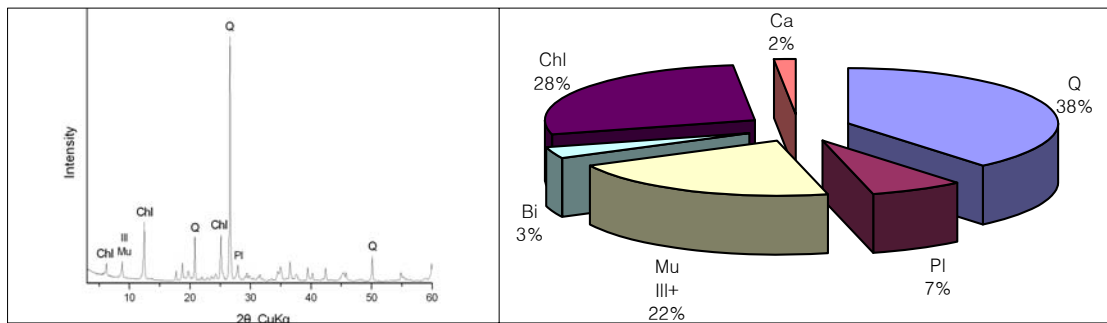


그림 14. 단층가우지 성분 분석 결과

본 구간의 단층가우지는 주로 일라이트(illite)와 녹니석(chlorite)으로 구성되어 있다. 녹니석은 결합력이 강하여 수분함량이 증가하여도 팽창하지 않는다. 일라이트는 흡수성 및 물리적 특성이 카올리나이트(kaolinite)와 몬모릴로나이트의 중간에 해당한다. 몬모릴로나이트는 100g당 최대 700g까지 물을 흡수하고, 카올리나이트의 흡수한계는 100g 당 50~100g 이며, 일라이트는 200g 정도이다. 팽창성은 몬모릴로나이트는 강하나 카올리나이트는 없으며, 일라이트는 거의 없는 것으로 알려져 있다.

4. 편암지역 단층암의 공학적 특성

4.1 운모 편암의 풍화특성

본 연구에서는 주분포 암종인 운모편암의 풍화특성을 파악하기 위해 암석의 광물과 미세균열 틈새 사이로 물이 침투하여 발생하는 암석의 체적 팽창을 측정하기 위한 스웰링 시험, 암석의 시간의존성을 점탄성 거동으로 해석하여 탄성계수, 점성계수를 구하는 Creep 시험, 신선한 운모편암과 풍화가 진행된 운모편암에 대하여 산침수에 의한 동결-융해 실험을 실시한 후의 물성 변화 및 일축압축강도 변화시험, 물에 대한 암석 내구성을 파악하기 위한 Slaking Durability 실험, Slaking Test 전-후 시료의 광물 동적 변화를 파악하기 위한 XRD 분석, 절리면에 대한 전단 특성 평가를 위한 절리면 직접전단 실험 등을 수행하였다.

(1) 스웰링 시험

그림 15에서 보는 바와 같이 스웰링 시험 결과, 흡수팽창률(%)은 최소 0.004에서 최대 0.161값의 범위를 보이며, 작은 값은 팽창성이 미약한 신선한 암석에서의 결과이고, 약 0.1% 내외의 상대적으로 큰 값을 보이는 암석은 암질이 불량한 암석 시료의 결과이다. 큰 범위의 흡수 팽창률은 점토광물에 의한 흡수 팽창이 아닌 암석 내의 균열 빈도 및 균열 틈 등에 의해 반응한 물리적인 흡수의 결과이며, 이를 통해 체적이 다소 팽창될 수 있다.

(2) Creep 시험

그림 16에서 보는 바와 같이 보통 풍화정도의 시료에 대한 Creep 시험 후에 일축압축 실험을 실시한 결과, 암석 내에 발달한 엽리면을 따라 파괴가 발생하였다. 이는 Creep 시험 동안 변형의 대부분은 엽리면에서 발생한 변형임을 의미하며, 탄성계수와 점성계수 값이 비교적 작은 값을 나타내고 있어, creep 변형이 상대적으로 많이 일어남을 보여주고 있다.

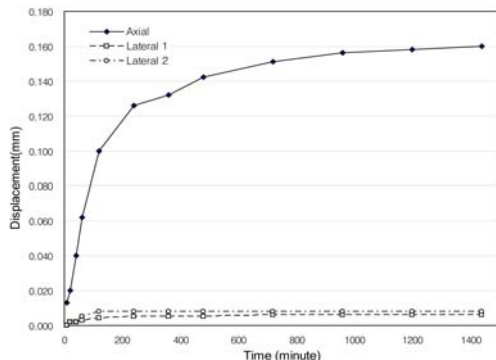


그림 15. 스웰링 시험 결과

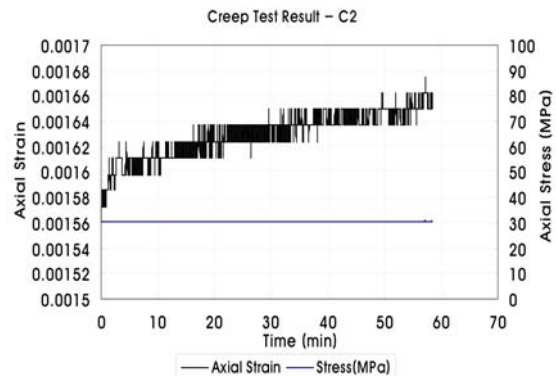


그림 16. Creep 시험 결과

(3) 동결-융해 실험

운모편암의 장기적인 변화중 물리-화학적 풍화작용이 운모편암의 풍화정도에 따라 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위하여 그림 17과 같은 실험을 실시하였다. 산침수에 의한 동결-융해 실험에서는 신선한 공시체는 엽리면의 열개로 인한 강도저하가 40% 정도 발생하였으며, 풍화가 심한 암석에서는 약 20% 정도의 강도저하가 발생하였다.



그림 17. 산 침수에 의한 동결-융해 실험 및 결과

(4) Slaking Durability 실험

암석의 고결력이 저하되는 현상을 측정하기 위한 시험으로 공시체 형성이 가능한 신선한 암석 ~ 심한 풍화까지의 시편에 대하여 슬레이킹 내구성 지수를 산정하였다. 그림 18에서 보는 바와 같이 신선한 암석과 보통 풍화 등급의 암석은 내구성이 높았으며, 단층 부근의 심한 풍화등급의 암석은 중간정도의 내구성을 가지는 것으로 나타났다.

다음은 단층 가우지에 대한 슬레이킹 대체 시험결과로서, 단층가우지는 슬레이킹 시험을 위한 공시체가 형성되지 않고 회전시 시험망에서 쉽게 빠져나갈 수 있으므로, 시험망에 시료를 담고, 단순건습만을 반복하여 중량이 변화되는 비율을 시험하였다.

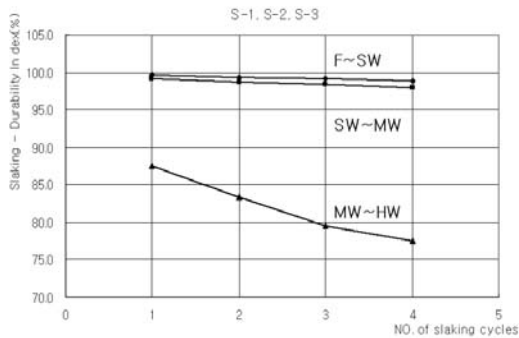


그림 18. Slaking Durability 실험

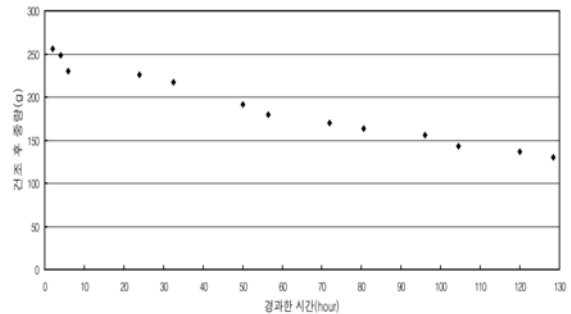


그림 19. 시간변화에 따른 중량변화



그림 20. 시간변화에 따른 중량변화

그림 20에서 보는 바와 같이 단층가우지의 슬레이킹 시험에 따른 시간경과별 변화 사진 및 결과 단층 가우지 시료에 대한 총 130시간(약 5~6일)간의 슬레이킹 대체시험 결과, 중량은 시험 전보다 약 50% 정도 감소하였다.

(5) Slaking Test 전-후 시료의 XRD 분석

Slaking 전-후의 암석에 대한 구성 광물 함유량의 동적 변화를 살펴보면 Slaking에 의하여 leaching 되는 광물의 대부분은 녹니석이 차지하고 있음을 볼 수 있다(그림 21). 상대적으로 화학적 풍화가 이루어지지 않은 석영과 녹니석에 비하여 상대적으로 풍화에 강한 운모류의 함유량은 증가함을 볼 수 있다.

Slaking Test와 XRD 분석에 의하면 물의 건습에 의하여 leaching 되는 광물은 암석의 풍화정도에 상관없이 녹니석 등과 같은 점토광물이 대부분을 차지한다.

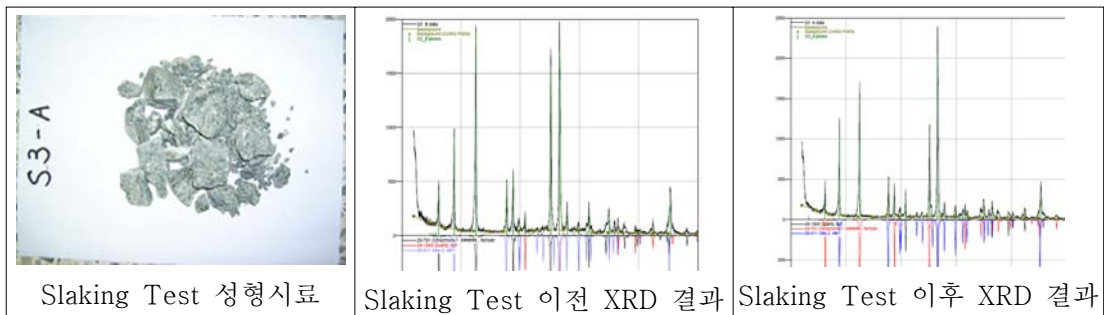


그림 21. Slaking Test 전-후 시료의 XRD 분석 결과

(6) 절리면 전단시험

그림 22에서 보는 바와 같이 절리면 전단시험결과, 풍화 등급별 불연속면 전단강도중 최대마찰각은 풍화정도가 클수록 마찰각의 감소가 크게 나타나지만 잔류마찰각은 절리면의 풍화 상태와 크게 상관없이 20°이하의 작은 값을 보이므로, 최대마찰각과의 큰 차이를 보여주고 있다.

전단강도 저하는 절리면에 분포하고 있는 운모류나 녹니석과 같은 광물들이 절리면의 전단 특성을 저감시키는 주요한 요인으로 작용하고 있다고 판단된다.


절리면 전단시험 전경	절리면 전단시험 결과					
 <p>± SRJ 2</p> <p>SRJ 2</p> <p>→ 상판의 전단방향</p>	절리면 풍화등급	JRC	JCS(MPa)	ϕ_p	ϕ_r	분 석
	SW	3.22	79	45	27	<ul style="list-style-type: none"> · F grade joint : 35°~45° → 18° · MW grade joints : 40° → 15° · HW grade joints : 32°~41° → 22° · clay coating joints : 23° → 10°
	SW	3.88	65	40	19	
	SW	4.45	45	36	16	
	SW	5.28	32	35	18	
	HW	4.68	52	32	21	
	HW	8.55	28	41	23	
	MW	1.91	79	41	16	
	MW(산화)	7.94	33	38	14	
	clay coating	(1.64)	57	23	10	

그림 22. 절리면의 풍화등급별 절리면 전단시험결과

4.2 단층암의 암반분류

본 구간에 대한 암반평가를 위하여 RMR 및 Q-system의 기준을 적용하여 기반암과 단층암에 대한 암반분류를 시행하였다. 암반분류 결과를 암반양호구간(RMR>40, Q>4), 불량구간, 단층대의 3부분으로 나누어 분류하였다.

단층대를 제외한 구간의 암반등급은 전체적으로 불량한 상태로 분류되었으며, 양호한 구간은 일부구간에서 나타났다. RMR과 Q-system에 의한 분류결과를 요약하여 다음 표에 정리하여 나타내었다.

표 1. 암반분류 결과

구 분	RMR				Q-system			
	비율(%)	최소값	최대값	평균값	비율(%)	최소값	최대값	평균값
양호구간	17	41	55	45	13	4.18	52.8	9.49
불량구간	77	8	40	27	81	0.03	3.96	1.16
단층대	5	6	32	8	6	0.02	0.12	0.06

본 구간에서의 RMR분석결과 단층대를 포함한 암반이 불량한곳의 값의 범위는 6~40의 범위로 4~5등급에 해당된다. 전체의 86%에 해당하는 것으로 낙반구간은 대체로 불량한 암반으로 분포되어 있다. 양호한 구간의 RMR 값의 범위는 41~53의 범위로 등급은 3등급에 해당되며, 보통등급에 해당된다. 14%의 해당하는 범위에 분포하고 있다.

암반분류에 대한 상관관계 분석결과 RMR과 Q의 상관성분석 결과 R^2 은 0.77로 높은 상관성을 보이며, RMR과 RQD의 상관성 분석결과 R^2 은 0.87으로 매우 높은 상관도를 보이고 있다.

- $RMR = 7.08 \ln(Q) + 31.55$ ($R^2=0.77$)
- $RMR = 0.36 \times RQD + 12.41$ ($R^2 = 0.87$)

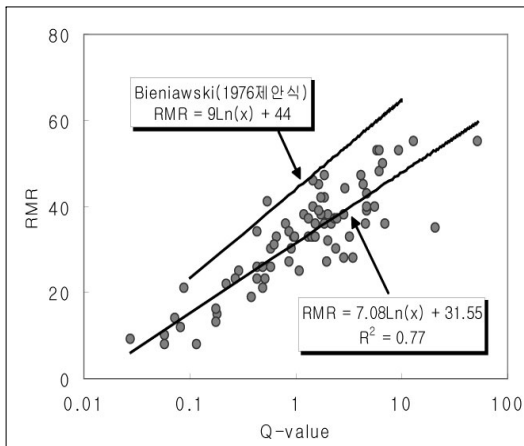


그림 23. RMR-Q 상관관계

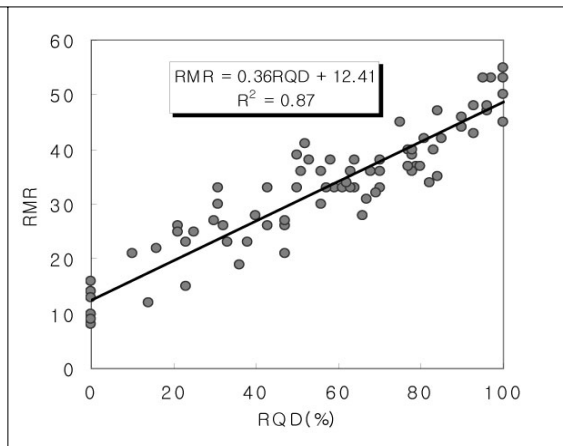


그림 24. RMR-RQD 상관관계

4.3 단층대의 분포 특성

단층대의 주향 방향은 N70°W로 설정하였으며, 터널 지질전개도를 분석하여 결정하였다. 이후의 모든 분석은 이 주향 방향을 기준으로 해석하였다.

단층대의 경사 방향은 남서방향으로 설정하였고, 지질도 및 시추공 자료를 이용하여 결정하였다. 그림 25에서 보는 바와 같이 횡단면도 상에서 시추공 SP-8 쪽에서 SP-1 방향으로 변질영향대(Alteration zone)가 경사져 있으며, SP-3, 6에서는 약 120m 이하에서 변질영향대가 분포하며, SP-4, 5에서는 약 140m 이하에서 변질영향대가 분포한다. N70°W의 주향을 고려하고 위의 자료를 분석한 결과 단층대의 경사가 남서방향임을 판단할 수 있다.

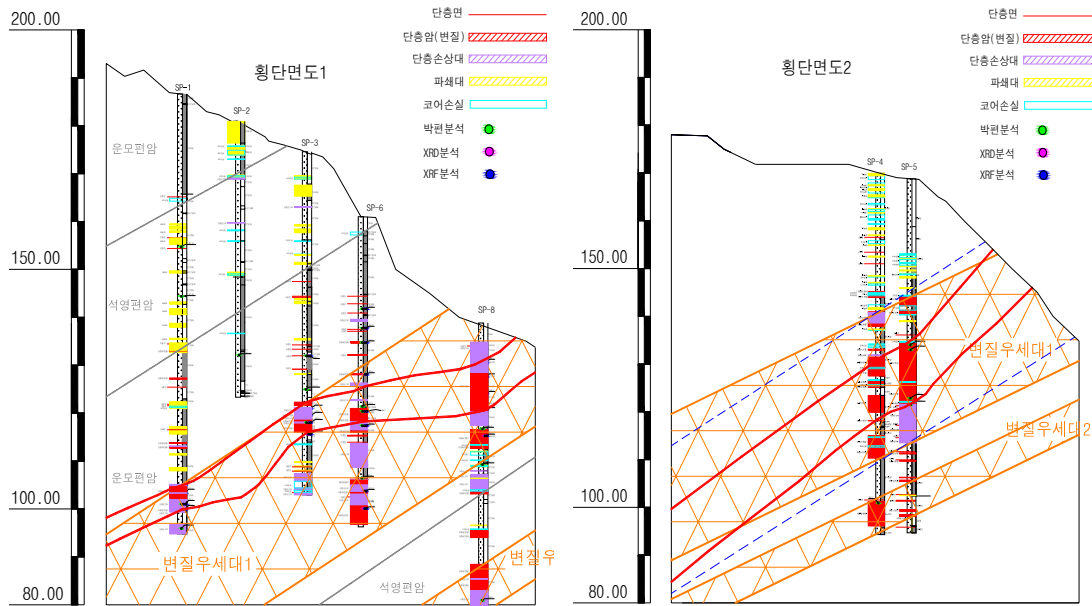


그림 25. 단층대를 포함한 지질단면도

위에서 나타난 횡단면도를 고려했을 때 변질을 받은 단층암대가 여러 매(set) 존재하며 그 두께 및 시추상에서의 위치가 일정하지 않아 각 시추공마다 분포하는 변질된 단층암대를 연결시키기 어렵다. 이는 스러스트 듀플렉스 모델 중 배사형 중합과 유사한 것으로 추정된다. 또한 터널 지질전개도에서 단층들이 습곡되어 있음을 알 수 있다. 이는 조사지역이 배사형 중합 모델과 잘 부합되는 것을 뒷받침 한다.

위와 같은 분석결과로부터 전체적인 상부에는 운모편암과 석영편암이 분포하고 하부에는 일정한 두께의 스러스트단층이 존재하며, 단층운동의 영향으로 인하여 단층 위아래로 변질영향대가 폭넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본고에서는 편암지역에서의 단층대 특성을 규명하기 위하여 실시된 다양한 지반조사를 바탕으로 단층의 성인과 구조지질적 분포특성, 단층암의 암석학적 특성 그리고 단층대의 공학적 특성에 대하여 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 구간의 단층대는 단층암대가 여러 매가 존재하며 그 두께가 일정하지 않은 것으로 보아 스러스트 듀플렉스 모델중 배사형 중합과 유사한 것으로 판단된다.
- 2) 단층대를 단층영향대, 단층암(변질) 등으로 세분하여 특성을 분석하였으며, 시추코어의 육안관찰, 박편관찰, XRD(광물조성) 자료, XRF(화학조성) 자료 등을 분석한 결과 변질영향대는 모암인 운모편암 및 석영편암에 비해 유체가 많이 유입되었던 것으로 판단된다.
- 4) 단층가우지는 구성광물중 일라이트와 녹니석 광물을 많이 포함하고 있어, 쉽게 부서지고 느슨해지는 광물 및 암석학적 특징을 가지는 것으로 분석되었다.
- 5) 기반암인 운모편암은 판상의 엽리구조가 발달되어 있고, 엽리면은 평탄하며 연속성이 좋고 엽리간격은 매우 좁고 엽리면이 농집된 구간은 매끄러운 면으로서 전단력이 약한 특성을 보였다. 또한 풍화정도에 따라 암석강도와 슬레이킹 내구성이 크게 감소되는 특징을 나타내었다.
- 6) 본 지역에서 단층대 조사결과, 상부에는 운모편암과 석영편암이 분포하고 하부에는 일정한 두께의 스러스트 단층이 존재하며, 단층운동의 영향으로 인하여 단층 위아래로 단층 영향대와 단층암 변질대가 분포하고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. 국립지질광물연구소, 1974, 1:50,000 내평도폭
2. C.W. Passchier. R.A. J. Trouw. 1996. *Micro-tectonics*. Berlin: Springer. pp. 97
3. Robert J. Twiss and Eldridge M. Moores. 1992. *STRUCTUREAL GEOLOGY*. New York: W. H. Freeman. pp. 106
4. T. Blenkinsop. 2000. *Deformation Microstructures and Mechanism in Minerals and Rocks*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 66.