

## 단층의 암반공학적 특성과 실내 및 현장 시험방법에 관한 고찰 A Review on the Engineering Characteristics and the Investigation /Testing Method for the Fault

허종석<sup>1)</sup>, Jong-Seok Heo, 정재호<sup>2)</sup>, Jae-Ho Jeong, 김학수<sup>3)</sup>, Hak-Su Kim

<sup>1)</sup> (주) 바우컨설턴트 지반터널부 부장, BAU Consultant Co., Ltd

<sup>2)</sup> (주) 바우컨설턴트 지반터널부 과장, BAU Consultant Co., Ltd

<sup>3)</sup> (주) 지오제니컨설턴트 대표이사, GeoGeny Consultants Group Inc.

**요약 :** 단층의 공학적 의미와 분류방법을 살펴보고 토목구조물의 설계 및 시공을 위하여 조사단계에서 단층에 대한 분포 및 공학적 특성을 파악하기 위한 각종 물리탐사, 현장시험, 실내시험 사례를 검토하였다.

단층의 분포특성 조사 사례를 통하여 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사 결과들의 상호 관계를 살펴보고, 단층 및 주변 상태에 따라 적절한 탐사 및 조사 방법을 검토하였다. 그리고 단층의 공학적 특성 평가를 위한 현장 및 실내시험 방법을 고찰하고, 단층의 점착력, 마찰각 등과 같은 물성치의 산정 사례들을 수집하여 분석하였다.

**주요어(Keywords) :** 단층, 분포특성, 공학적 특성, 조사 및 시험

### 1. 서론

댐, 도로, 터널 등의 많은 토목 구조물은 크고 작은 단층을 통과하며, 이러한 단층들은 구조물의 안정성에 심각한 영향을 미치는 경우가 많다. 따라서 토목구조물의 설계 및 시공 시 현장 및 실내 시험을 통하여 통과하는 단층의 규모와 특성을 파악하고, 이들 단층이 토목구조물에 미칠 영향을 분석하여 적절한 대책을 수립하여야 한다.

최근 토목공사의 시공 및 설계를 위한 조사에서 단층대나 파쇄대에 대한 정밀한 조사를 위하여 많은 시도가 있다. 단층의 조사를 위한 새로운 탐사 기술이 도입되고, 단층의 공학적 특성 파악을 위한 많은 시험항목이 추가되고 있다. 또한 조사 및 시험 결과에 대한 분석 방법도 매우 다양하게 수행되고 있다.

본고에서 단층의 지질학적 기원 및 메카니즘에 대한 상세한 고찰보다는, 단층의 공학적 의미를 살펴보고 단층의 특성과 분류방법을 검토할 것이며, 토목구조물의 설계 및 시공을 위하여 조사단계에서 단층에 대한 분포 및 공학적 특성을 파악하기 위한 각종 물리탐사, 현장시험, 실내시험 사례를 분석하고자 한다.

## 2. 단층의 공학적 특성

### 2.1 단층의 공학적 의미

공학적인 관점에서 단층은 암반 불연속면의 한 형태에 불과하다. 그러나 지질학적으로 변위를 일으키는 면을 의미하는 단층은 매끄러운 경면(slickenside), 단층 파쇄대, 단층 점토를 수반함으로써 공학적으로 중요한 의미를 지닌다(그림 1). 즉, 변위 과정에서 발생된 단층면과 단층 충전물, 파쇄대 등은 주변지반보다 점착력, 마찰각 등의 암반강도 강도를 현저히 감소시킬 뿐만 아니라, 대수층을 형성하게 되므로 토목구조물의 안정에 심각한 영향을 미치게 된다.

단층의 공학적 특성은 그림 2와 같은 단층의 이동 메카니즘에 따라 다르게 나타나기도 하는데, 인장에 의해 경사이동성분 만을 지닌 정단층의 경우 경면과 함께 인장 파괴에 의한 개구 균열이 많은 파쇄대가 수반된다. 압축에 의한 경사이동성분 만을 지닌 역단층의 경우 단층 점토를 동반하는 파괴가 심한 파쇄대가 수반되며, 특히 저각의 트러스트(thrust) 단층은 파쇄 영역이 광범위하다. 또한 주향이동성분 만을 가진 주향이동단층 역시 규모가 크고 파쇄 영역이 광범위하게 분포되어 있다.

지질학적 성인에 따른 분류는 단지 단층의 이동 메카니즘을 나타내는 것뿐만 아니라 단층의 공학적 의미를 나타내므로, 단층의 공학적 특성을 파악하기 위해서는 단층의 규모나 크기에 대한 조사뿐만 아니라 단층의 발생 기원을 분석하고 분류하는 것 역시 중요하다.

### 2.2 단층의 공학적 분류

단층의 분류는 앞 절에서 살펴본 바와 같은 단층의 이동 메카니즘에 따른 지질학적 분류 방법 외에도 단층대의 규모나 상태에 따라 분류하는 방법이 제안되었다.

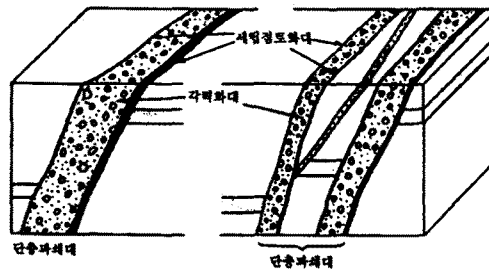


그림 1. 단층의 점토층 및 단층파쇄대

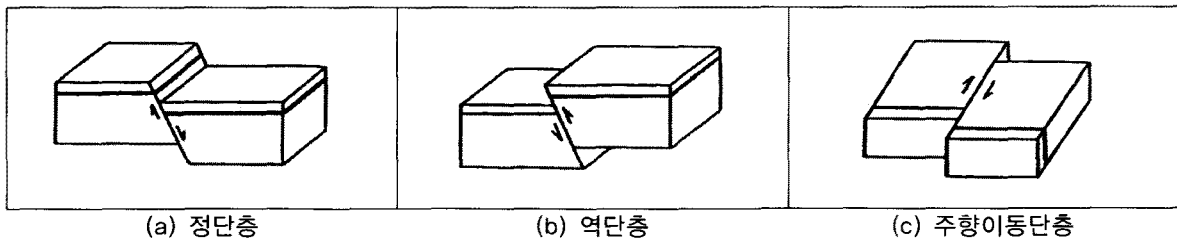


그림 2. 이동방향에 따른 단층의 종류

일반적으로 단층의 분류는 단층의 연장 및 폭, 형성과정, 지하수유동 등의 정량적, 정성적 분류 기준에 따라 4~6등급으로 분류한다. 각 등급에서 단층의 연장과 폭의 수치는 연구자에 따라 다양하게 나타난다.

표 1은 단층등급 분류 예를 나타낸 것으로, 여기에서 표시된 6~7등급은 공학적으로 큰 의미가 없어 생략되기도 한다. 등급 분류의 주요 인자는 단층의 규모에 해당하는 연장과 폭이지만, 등급에 따라 공학적 특성을 구분할 수 있게 한다.

표 1. 단층의 등급분류 기준

구분	정량적분류기준		정성적 분류기준
	Pusch (1994)	배대석 (1996)	Black et al. (1994)
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 광역단열대</li> <li>◦ 간격 : 2~3km</li> <li>연장 : 40~60km</li> <li>폭 : 200~300km</li> <li>◦ 투수계수 : <math>10^{-7} \sim 10^{-5}</math> m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F1 : 광역구조선, 지구조경계등, 대규모 단층대, 연장 수십 km, 폭 수백 m이상, 공동에 위해 요소</li> <li>◦ H1 : <math>K &gt; 10^{-6}</math> m/s, <math>T = 10^{-5} \sim 10^{-2}</math> m<sup>2</sup>/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 시설이 입지하는 암반블록(rock block)의 경계 역할을 하는 주요광역 구조선 (major regional structures)</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 국지 단열대</li> <li>◦ 간격 : 300~500m</li> <li>연장 : 4~6km</li> <li>폭 : 10~100m</li> <li>◦ 1st order와 비슷한 특성이나 폭과 단열빈도가 적음</li> <li>◦ 투수계수 : <math>10^{-8} \sim 10^{-6}</math> m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F3: 연장 수백 m, 폭 수 m의 단층대 및 국지구조선, 공동에 위해 요소</li> <li>◦ H2 : <math>K = 10^{-7}</math> m/s, <math>T = 10^{-7} \sim 10^{-4}</math> m<sup>2</sup>/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 단위 시설 사이를 통과할 수 있는 주요 단열대 (major fracture zones)</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 소규모 국지 단열대</li> <li>◦ 간격 : 30~300m</li> <li>연장 : 100~1000m</li> <li>폭 : 1~20m</li> <li>◦ 단열대 교차정도가 낮음</li> <li>◦ 투수계수 : <math>10^{-9} \sim 10^{-7}</math> m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F4 : 연장 십수 m, 폭 수 m의 단층, 공동에 신중 고려</li> <li>◦ H3 : <math>K = 10^{-8}</math> m/s, <math>T = 10^{-9} \sim 10^{-6}</math> m<sup>2</sup>/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 시설을 통과하는 주요 단열(major fractures) 및 국지단열대 (local fracture zones)</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 암반내 수리학적으로 우세한 분리단열계</li> <li>◦ 간격 : 2~10m(평균 5m)</li> <li>◦ Equidimensional fracture surface</li> <li>◦ 투수계수 : <math>10^{-11} \sim 10^{-9}</math> m/s</li> <li>◦ Interval : 1/25~100m'</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F4 : 연장 십수 m, 폭 1m이하의 전단대 혹은 중규모 단열(대)</li> <li>◦ H4 : <math>K = 10^{-9} \sim 10^{-11}</math> m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 통상 암반에 분포되어 있는 절리 등의 단열계 (background fracture system)</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 1~3 order 단열대 사이의 암반 블록 층눈으로 식별되는 단열계</li> <li>◦ 수리학적으로 기여정도 미미, 암반역학적인 약선으로 작용</li> <li>◦ 간격 : 0.2~1m</li> <li>◦ Healed 또는 filled fractures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F5 : 연장 수 m규모의 단위 암석으로 분리되는 대부분의 절리</li> <li>◦ H5 : <math>K &lt; 10^{-12}</math> m/s</li> </ul>	
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 현미경하에서 특성관찰이 가능한 단열 체계</li> <li>◦ 광물의 orientiaon 또는 zone enrichment</li> <li>◦ 암석구조의 특성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ F6 : 육안 혹은 현미경에서 관찰되는 결정경계, Griffith crack</li> </ul>	
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 광물입자내의 불연속면 (crystal contact, inter-intra crystalline)</li> <li>◦ 암반역학적인 Griffith cracks</li> </ul>		

한편 토목구조물의 설계에 직접 반영할 수 있도록 단층파쇄대의 공학적인 특성을 반영하여 분류한 사례도 있다. 그림 3과 같이 단층 충전물질을 구성하는 점토충진물, 각력 등의 함량과 두께에 따라 전단대(단층)를 구분하였다(대한지질공학회, 2004). 또한 황계돈 등(2005)은 단층대를 단층파쇄대의 상태에 따라 Blocky Fault, Brecciated Fault, Clayey Fault로 구분하고, 각 단층의 공학적 특성에 따라 터널의 보강설계에 적용하였다(표 2).

### 3. 단층 분포 특성 조사

#### 3.1 단층 분포 특성 조사 항목

단층 조사는 그림 4와 같은 절차로 수행되며 조사 항목에 있어 일반적인 지반조사 단계에서 수행하는 여러 조사 및 시험과 크게 다르지 않다. 단층 조사는 단층의 분포특성 및 규모 파악을 위한 조사와 단층의 공학적 특성 파악을 위한 조사 및 시험으로 크게 구분될 수 있다. 즉, 광역조사 및 물리탐사, 시추조사 등을 통해 단층의 규모, 방향 등을 파악하고, 각종 현장 및 실내시험을 통해 단층파쇄대의 공학적 특성을 평가한다.

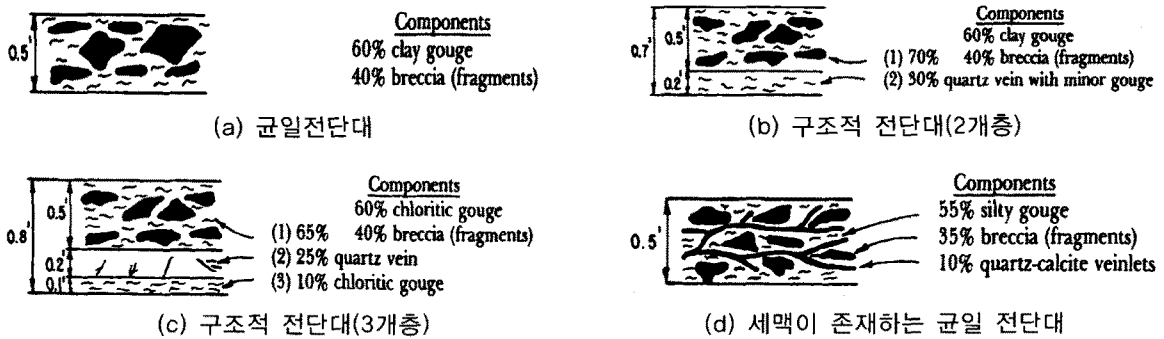


그림 3. 충전물 상태에 따른 전단대(단층)의 분류

표 2. 단층파쇄대 상태에 따른 단층대의 분류 및 특성

Blocky Fault	Brecciated Fault	Clayey Fault
<p>기반암</p> <p>블록암</p>	<p>기반암</p> <p>각력암</p>	<p>기반암</p> <p>점토암</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 불연속면이 매우 많이 교차되어 형성됨</li> <li>◦ 중력에 의한 Block Fall이나 Slide가 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 각진 암편 및 둥근 암편이 느슨하게 내부 결속되거나 심하게 파쇄된 암반</li> <li>◦ 충전물질은 경면을 갖는 각진 각력암으로 구성됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 얇은 판형, 전단파쇄, 경면, 풍화가 매우 심함</li> <li>◦ 불연속면과 중력에 의하여 전단파괴가 발생</li> </ul>

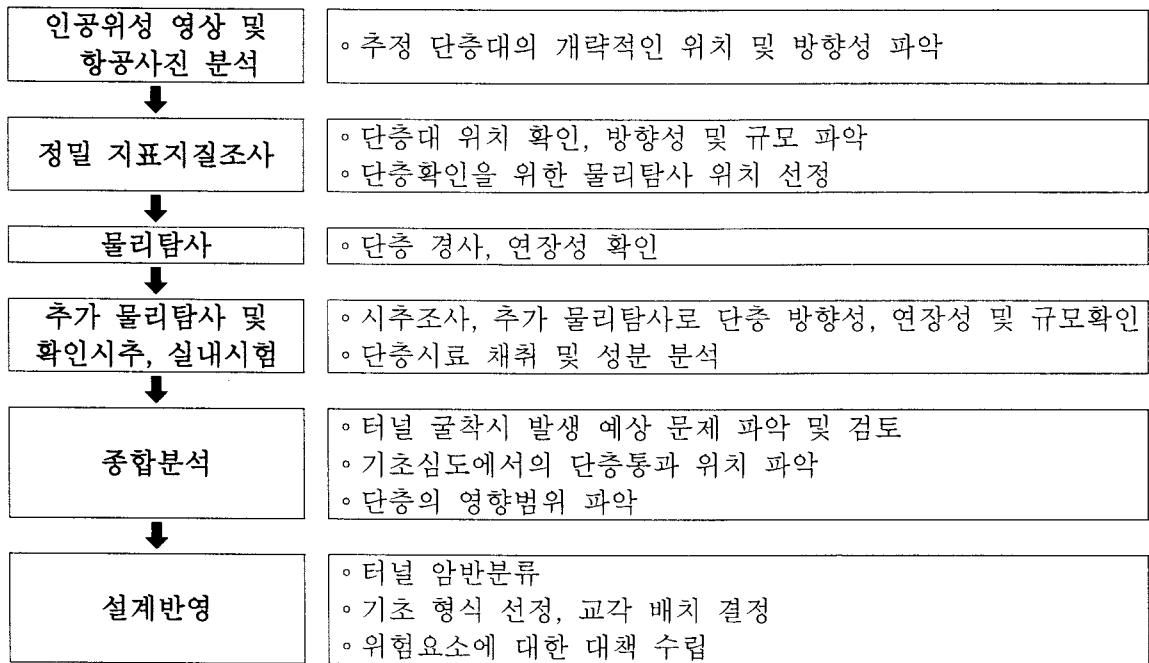


그림 4. 단층 조사 수행 절차

단층 분포 특성을 파악하기 위한 조사로는 광역조사, 물리탐사, 시추조사가 있다. 광역조사는 먼저 지질도를 분석한 후 인공위성 영상, 음영 기록도 및 항공사진 분석을 통하여 광역적인 지형 및 지질현황에 따른 단층대를 파악하고, 선구조 분석으로 단층의 방향 예측 및 지구 구조운동 방향을 분석한다. 또한 선구조 분석 결과에 따라 현장 지표지질조사를 수행한다. 지표지질조사는 단층면 및 단층파쇄대 현장 조사, 활성단층 여부 현장 조사, 단층과 계획노선의 상관관계 조사를 수행하여 구조물별 상세조사 위치 선정에 필요한 단층대의 대략적인 규모 및 방향성을 파악한다.

물리탐사는 전기비저항 탐사, 탄성과 탐사, 탄성과 토모그래피 등 매우 다양한 방법으로 수행될 수 있다. 단층대의 방향성 및 연장, 규모를 파악하기 위하여 입체적인 중횡단 탐사측선을 계획하여 물리탐사를 수행하기도 한다. 물리탐사를 통하여 지표지질조사 결과와 부합하는 단층대 위치, 경사, 폭을 예측하며, 단층대 확인 및 규모 파악을 위한 상세 시추조사 계획에 반영한다.

지표지질조사와 물리검층으로 예측된 단층의 폭, 영향대를 확인하기 위하여 시추조사가 수행된다. 시추조사는 물리탐사 결과를 반영하여 시추위치를 선정하여야 하며, 단층대의 방향 및 경사에 따라 수평 및 경사 시추가 수행되기도 한다.

### 3.1 단층 분포 특성 조사 사례

단층 분포 특성 조사에 대한 사례는 주로 광역조사에서 파악되지 못하거나 불명확한 단층에 대해 물리탐사를 수행하여 단층의 규모와 방향을 파악한 사례들이다.

첫 번째 사례는 단층의 방향과 영향범위를 파악하기 위하여 중측선 탐사에 더해 횡측선 탐사(전기비저항 탐사)를 수행한 경우이다. 광역조사를 통해 터널의 진행방향과 일치하여 모량단층이 지나는 것으로 예상되어, 그림 5와 같이 터널과 직교하는 3개의 횡측선 탐사를 시행하여 단층의 진행방향과 영향범위를 파악하고자 하였다.

세 개의 횡측선에서 각각 단층의 영향범위가 나타났으며, 이를 연결하여 그림 5의 우측 그림에서처럼 단층의 진행방향과 영향폭을 판단하였다. 두 번째 횡측선에서 단층의 중심부와 터널이 정확히 교차하는 것으로 분석되었다. 그림 6은 모든 전기비저항 탐사 결과를 종합하여 터널 심도에

서 전기비저항 값을 도시한 것으로써 단층의 영향으로 인한 저비저항대의 평면적인 영향범위를 잘 볼 수 있다.

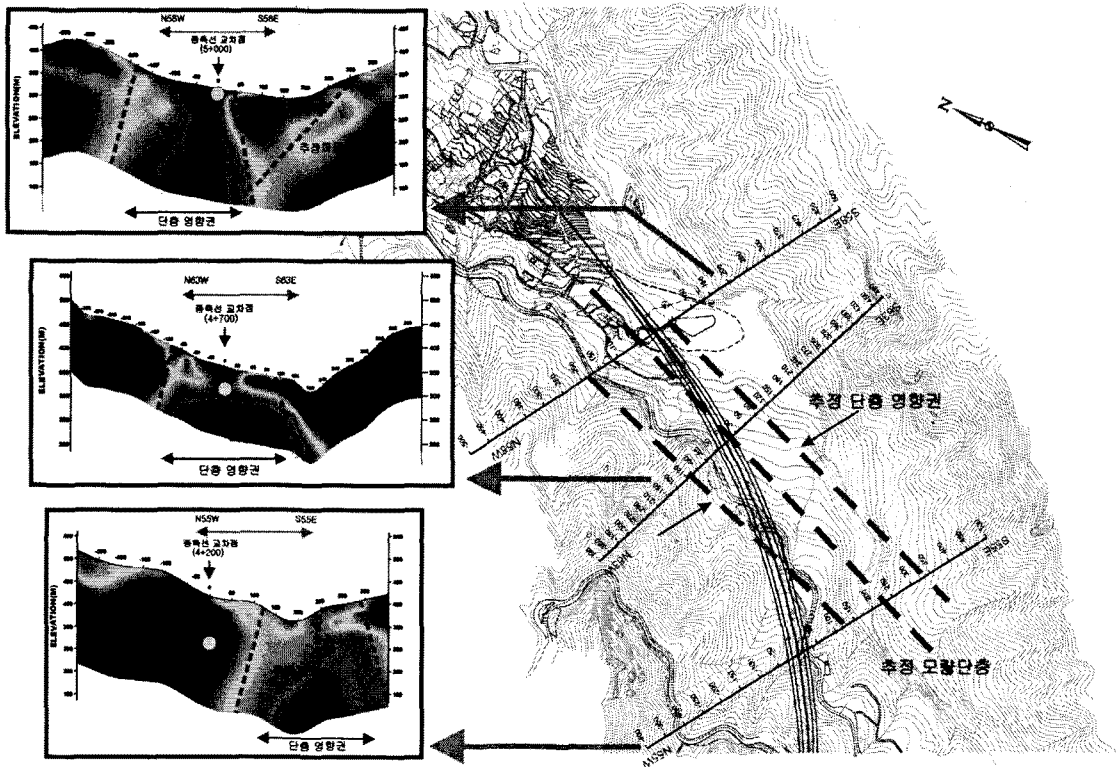


그림 5. 모랑단층 조사를 위한 횡측선 탐사 계획 및 결과

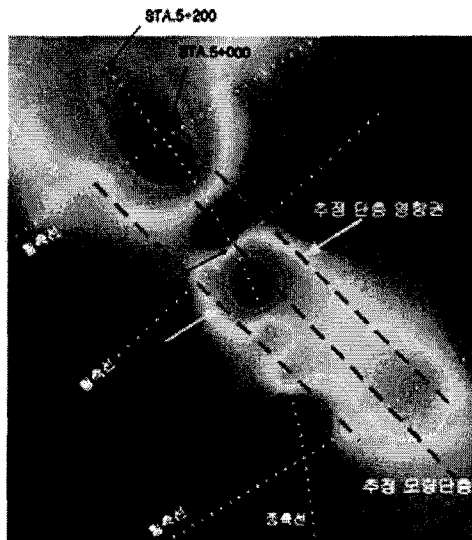


그림 6. 터널 심도에서의 전기비저항치

그림 7의 사례는 과업구간의 양측에 양산단층과 동래단층이 존재하고 지질 도폭에 나타나지는 않으나 과업중양부 터널구간에 거의 남북방향으로 존재하는 제3의 단층대(범기단층)가 예상되어 터널진행방향의 종측선과 횡측선에 대해 전기비저항탐사 및 전자탐사를 수행하였다. 또한 단층의 정확한 위치 파악을 위해 수직시추공을 이용한 VSP(Vertical Seismic Profiling)를 실시하였다.

그림 8은 각 탐사방법에 따른 결과를 비교한 것으로 탐사방법에 관계없이 유사한 결과를 보여 주고 있으며, VSP의 경우 방향성분에 따라 다른 결과를 보여준다. 즉 수직성분은 법기단층(F-12)에 의한 반사파가 주종을 이루며, 수평성분 중 탐사측선에 수직인 성분은 F@계열 파쇄대가, 탐사측선 방향의 성분은 F12와 F@계역이 모두 확인된다.



그림 7. 양산단층, 동래단층, 법기단층의 선구조

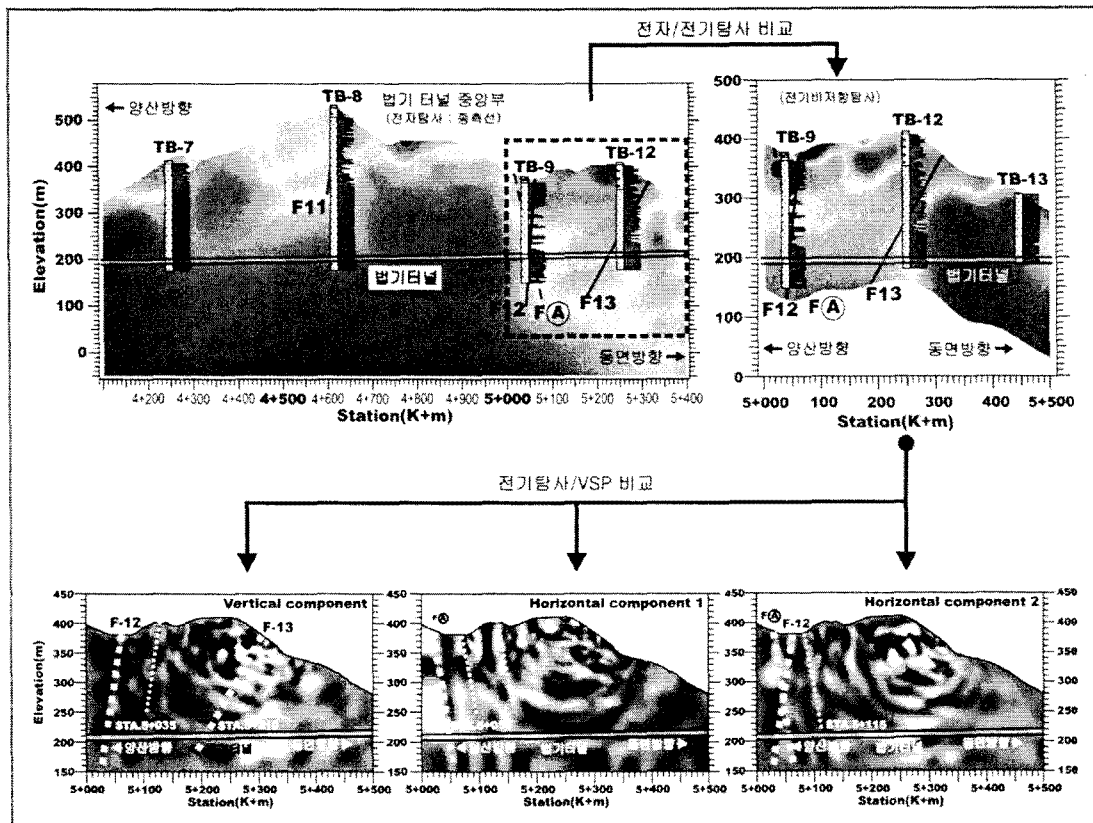


그림 8. 전기, 전자 탐사 및 VSP 결과 비교

다음 사례는 그림 9와 같이 과업구간에 연성 전단대가 분포하는 경우로서 지질도에서는 터널구간의 시점부근에 연성전단대가 있으며, 이 연성전단대와 같은 방향으로 복운모화강암이 있고, 포획암의 형태로 편암류가 분포하고 있다. 연성전단대의 경우 그 폭이 넓고, 경계가 명확하지 않아 규모를 정확히 파악하는 것이 어렵다

그림 10에 나타난 전기비저항 및 전자탐사 결과, 과업구간에 특별한 큰 단층대는 없으나, 매우

넓은 폭의 저비저항대가 나타난다. 지표지질조사와 시추조사 결과 연성전단대는 지질상에 표기된 위치뿐만 아니라 과업구간까지 어느 정도 넓게 나타나고 있었으며, 이 연성전단대를 따라서 저비저항대가 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한 전기비저항탐사에서 중간에 집중적으로 나타나는 낮은 저비저항대는 편암류가 포획암의 형태로 분포하고 있는 형태로써 파쇄가 비교적 심한 편암류가 지하수를 많이 함유하고 있는 것으로 확인되었다.

위의 사례들에서 알 수 있듯이 물리탐사는 지질도, 위성사진, 지표지질조사로 파악하지 못한 단층의 존재를 알아낼 수 있으며, 단층의 방향성과 개략적인 폭을 정량적으로 제시할 수 있게 해준다. 좀 더 정밀한 탐사결과를 얻기 위해서는 조사대상지역의 상황을 고려하여 탐사방법을 선정하고 탐사측선을 계획해야 할 것이다. 그러나 무엇보다 중요한 것은, 물리탐사 결과만을 가지고 모든 것을 판단하기보다는 광역조사 및 지표지질조사 결과를 같이 활용해야 할 것이며, 특히 단층 추정구간에 대한 확인 시추조사를 통해 단층의 방향과 폭을 정해야 한다.

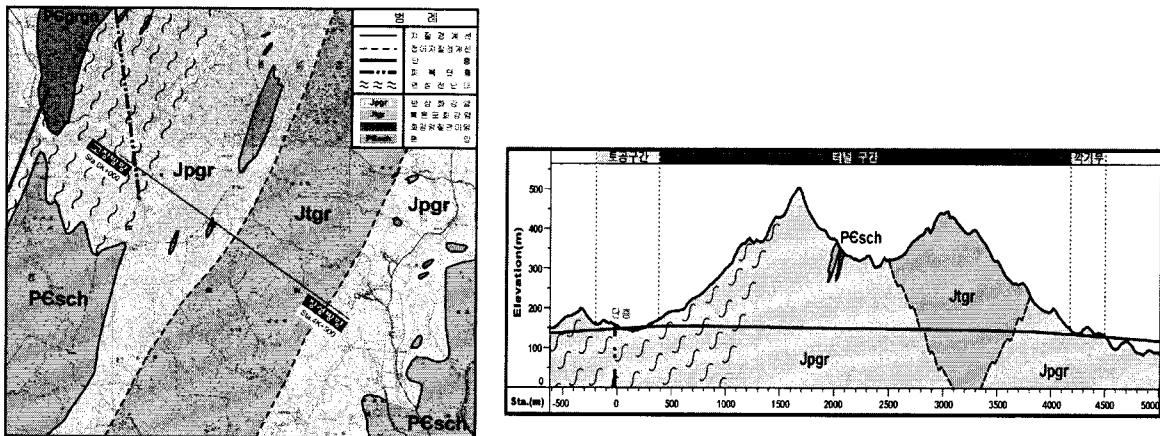


그림 9. 연성전단대가 나타난 지질도

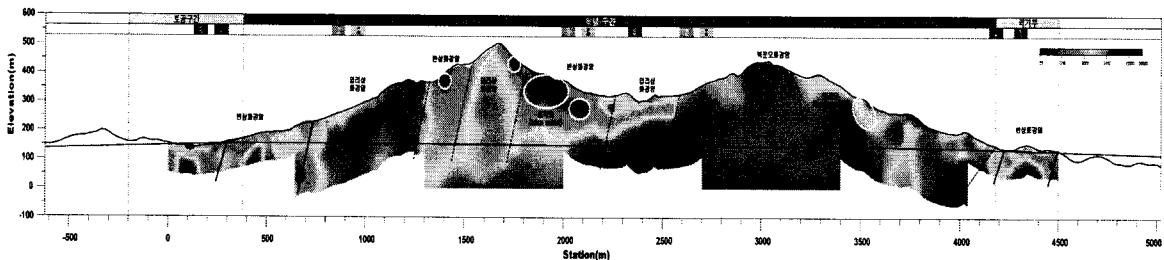


그림 10. 전기비저항탐사 및 전자탐사 결과

#### 4. 단층 및 단층파쇄대의 공학적 특성 평가

##### 4.1 공학적 특성 평가를 위한 현장시험 및 실내시험

전술한 바와 같이 단층 또는 단층파쇄대가 과업노선과 교차하는 경우, 연장성을 조사하여 노선상 구조물에 영향이 있을지 여부를 판단해야 한다. 구조물 거동에 영향을 미칠 것으로 판단되면, 구조물 안정성 검토시 적용할 단층 또는 단층파쇄대의 공학적 특성에 대한 분석을 뒤이어 수행해야 한다.



단층 및 단층파쇄대의 공학적 특성을 분석하기 위해 현장시험 또는 시료채취를 통한 실내시험을 수행하며 시험자료의 신뢰도 확보를 위하여 기존 적용사례 및 연구사례 분석을 병행할 수도 있다.

단층파쇄대의 존재는 선형으로 연속되어 분포하는 토목구조물에 부분적으로 예상치 못한 구조물 거동이 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 이에 설계기술자는 지반의 공학적 특성 변화에 따른 구조물의 안정성 저하를 고려해야 한다. 주요 고려사항으로는 변형특성 저하로 인한 구조물 자체 또는 인접구조물의 과도한 침하, 전단강도 저하로 인한 외부하중 또는 굴착시의 불평형력에 대한 지지력 불량, 투수특성 변화로 인한 과도한 누수나 광역적인 지하수위 저하 또는 침투문제 발생 및 동적특성 변화로 인한 지진시 과도한 상대변위 발생 및 구조물에의 작용하중 증가 등이 있다.

이러한 구조물 거동을 사전에 예측하기 위하여 단층파쇄대의 변형특성, 전단강도 특성, 투수특성 및 동적특성 등과 관련한 현장시험 또는 실내시험을 수행하여야 한다. 또한 단층파쇄대에서는 투수성이 크게 증가하여 암석 또는 단층점토의 성분에 따라 swelling, squeezing 등을 유발할 수 있으므로 점토광물 분석도 수행할 필요가 있다(표 3).

표 3. 공학적 특성 평가를 위한 시험

구분		조사내용	설계활용
구조물별 상세조사	시추조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 예상 단층대의 폭, 영향대 확인 조사</li> <li>· 단층점토 등 실내시험에 필요한 시료채취</li> <li>· 단층대 주변 현장 지반상태 조사</li> </ul>	암선 결정 및 암종 확인, 현장시험 및 실내 시험에 활용
	현장시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공내재하시험 : 파쇄대의 변형특성 평가</li> <li>· 공내전단시험 : 점착력, 내부마찰각 측정</li> <li>· Televiewer/BIPS : 단층대 방향성 통계 처리</li> <li>· 수압시험 : 암반 투수계수 측정</li> <li>· S-PS/MASW : 동적물성치 평가</li> </ul>	설계지반정수 결정 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 변형계수</li> <li>· 전단강도 정수</li> <li>· 투수계수</li> <li>· 동탄성계수 및 동포아송비 등</li> </ul>
	실내시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일축압축시험 : 일축압축강도, 탄성계수 결정</li> <li>· 삼축압축시험 : 점착력, 내부마찰각 측정</li> <li>· 직접전단시험 : 점착력, 내부마찰각 측정</li> <li>· X-Ray 회절분석 : 점토광물 함량 측정</li> <li>· Swelling Test : 팽창량, 팽창압 분석</li> </ul>	

#### 4.2 시험결과 분석을 통한 단층파쇄대의 공학적 특성 평가

단층파쇄대는 공학적 특성에 따라 Blocky Fault, Brecciated Fault 및 Clayey Fault로 구분할 수 있다(Dalgic, 2003). 이와 유사한 개념으로 우리나라에서는 암반이 심하게 파쇄되어 있는 상태의 단층파쇄대, 파쇄암편과 단층토사가 혼재되어 있는 단층각력암 및 파쇄암편이 완전히 풍화된 상태의 단층점토 또는 단층풍화암 등으로 구분하고 있다. 실제로 일정규모 이상의 단층파쇄대에서 단층점토, 단층풍화암, 단층각력암 또는 단층파쇄대가 단독적으로 일정하게 분포하기 보다는 지각 변동이력에 따라 반복적으로 교호하거나 순차적으로 나타나게 되는 경우가 흔하다(그림 11). 따라서 단층 및 단층파쇄대가 구조물의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 예측된 단층대 영역 내에서 암반의 파쇄형태별 공학적 특성을 정량적으로 평가하여야 한다.

일반적으로 단층 및 단층파쇄대에 대한 지반조사를 수행하는 경우, 단층대 분포 파악을 위한

물리탐사 및 시추조사는 그 상관관계로부터 비교적 상세한 결과를 제시할 수 있는 반면, 공학적 특성을 평가하기 위한 현장 및 실내시험은 제한적으로 수행된 결과에 의존하는 경우가 많다. 이는 단층토사와 단층각력이 혼재되어 있는 파쇄대의 특성상 신뢰성 높은 현장시험을 수행할 수 없거나 실내시험을 위한 시료채취가 어려운 경우가 많기 때문인 것으로 판단된다. 본 고에서는 단층대를 거동특성에 따라 단층토사와 단층파쇄대로 구분하고 공학적 특성 중 구조물 안정성 측면에 크게 영향을 미치는 변형특성 및 전단강도 특성 산정을 위한 현장시험과 실내시험 수행 및 평가 방법에 대해서 검토하였다.

물리탐사로부터 단층이 예상되는 위치를 파악하고 나면 추가시추가 가장 우선적으로 수행되어야 한다. 추가시추를 통하여 그림 12와 같이 단층파쇄대를 확인하고 N치, TCR, RQD 등을 측정하여 개략적인 파쇄정도를 파악할 수 있다. 또한 추가시추시에는 트리플 코어배럴 등을 사전에 준비하여 실내시험에 사용할 시료를 가능한 한 채취할 수 있도록 하여야 한다.

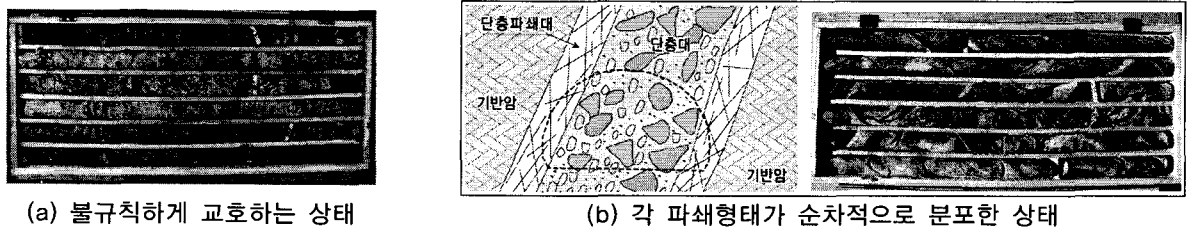


그림 11. 단층대 영역내 파쇄형태

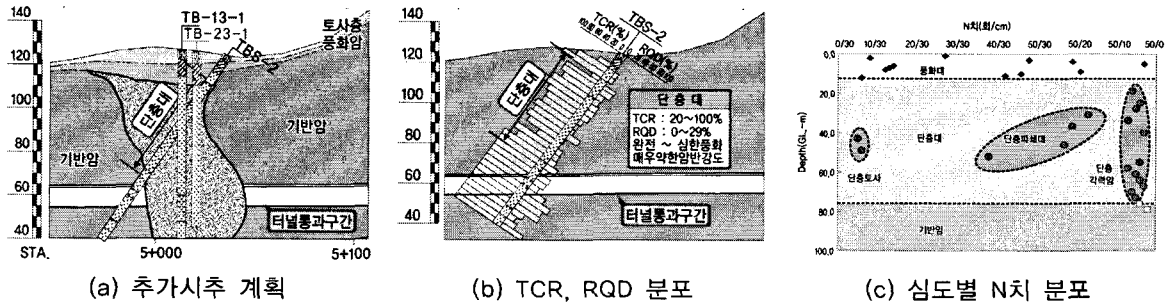


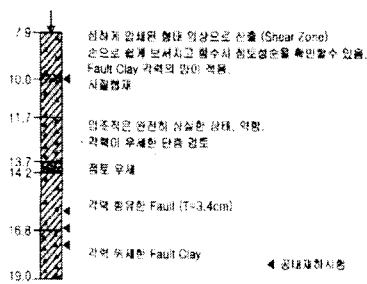
그림 12. 예상 단층대 추가시추 및 개략적 파쇄도 확인

단층파쇄대가 확인된 시추공에서는 현장시험을 수행하게 되는데 단층파쇄대 구간은 단층토사, 단층각력 등이 분포하므로 시추공 굴착후 공벽이완, 시추공 뒤틀림 등의 현상으로 정확한 시험결과를 기대하기 어렵다.

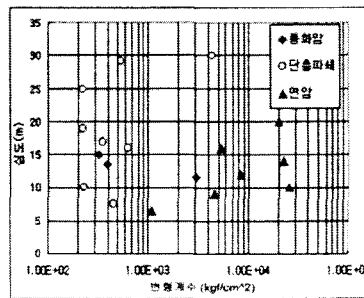
그림 13 및 표 4는 공내재하시험시 불량한 시추공벽의 영향을 최소화하기 위해 시도된 방법들에 관한 내용이다. 시추공 이완을 최소화하기 위해서는 그림 13(c)와 같은 Self-boring Pressuremeter를 적용하는 것도 좋은 방법이다. 이러한 시도가 여의치 않을 경우, 시추공 이완 현상은 시간차를 두고 측정한 결과나 지중다입형 sonde를 설치하여 측정한 시험결과를 비교하여 검증해 볼 수 있다. 또한, 시추공 뒤틀림 현상에 대해서는 동일 시추공에서 체적변화방식과 공경 변화방식의 재하를 수행하여 변형계수를 비교함으로써 시험결과의 신뢰성을 검증할 수 있다. 표 4는 이와같은 방법으로 공내재하시험을 수행한 결과, 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 얻어낸 사례이다.

단층파쇄대의 전단강도 특성은 공내전단시험이나 직접전단시험, 삼축압축시험에 의해서 측정할 수 있다. 공내전단시험은 shear head를 공내에 삽입하여 수평압력을 가한 상태에서 인발할 때 발

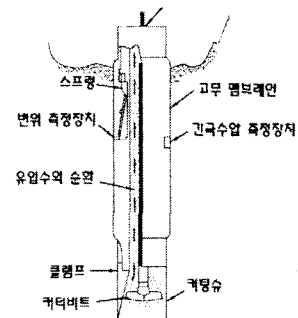
생하는 전단응력을 측정하는 장치이다. 그러므로 공벽의 상태가 시험결과에 미치는 영향이 크다고 할 수 있는데, 단층파쇄대에 천공한 시추공벽은 단층각력의 영향으로 상당히 불규칙하게 형성되므로 그림 14에서와 같이 다소간의 오차가 있는 결과를 측정하게 되는 경우가 많다. 그러나 시료채취의 어려움이 예상되는 구간에서 시험을 통해 전단강도를 측정할 수 있다는 장점 때문에 가장 많이 적용되는 현장시험방법이다. 직접전단시험이나 삼축압축시험은 기술한 바와 같이 파쇄된 시료채취의 어려움 때문에 통제된 시험조건에서 신뢰성 있는 전단강도를 측정할 수 있음에도 불구하고 적용사례가 많지 않다. 특히, 어렵게 채취한 시료의 경우에도 시료성형의 문제로 시험에 실패하거나 재성형 시료로부터 강도를 측정하게 되는 경우도 있다. 그러나, 단층토사의 경우, 비교적 손상되지 않은 시료채취가 가능하므로 실내시험을 통한 전단강도 평가가 많이 시도되는 편이다.



(a) 지층분포상태



(b) 변형계수 분포



(c) Self-boring Pressuremeter

그림 13. 단층파쇄대 공내재하시험

표 4. 다양한 측정방법에 의한 변형계수 검증

구분	조사내용	변형계수(kgf/cm <sup>2</sup> )
시추공 이완	시간대별 측정	0.23 / 0.64 / 0.35
	지중타입형 sonde 이용	0.32
시추공 뒤틀림	체적변화/공경변화 방식 적용 비교	0.22/0.21

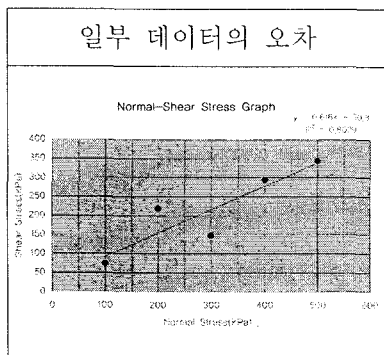


그림 14. 공내전단시험

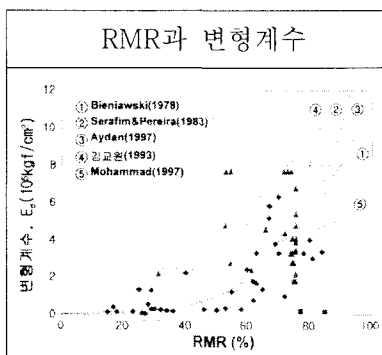


그림 15. 경험적 암반분류법에 의한 강도정수 산정

[변형계수]  
 •RMR  
 - Bieniawski, 김교원, Serafim & Pereira, 등  
 •Q : Barton(1995)  
 •GSI : NGI(1997)  
 [전단강도 정수]  
 •RMR : Bieniawski, Tsuchiya, Trueman 등  
 •GSI : Hoek & Brown

상기한 바와 같은 이유로, 단층파쇄대에서의 현장시험 및 채취된 파쇄 시료에 대한 실내시험 결과로부터 적절히 변형계수와 전단강도 정수를 선정하기 어려운 경우에는 경험적으로 적용되는 물성치 범위를 고려하여 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

경험적으로 변형계수나 전단강도 정수의 적용범위를 결정하는 방법은 기존의 설계자료를 이용하거나, 경험적 암반분류법을 이용하여 간접적으로 산정하는 방법이 있다. 그림 15는 경험적 암반분류방법을 이용하여 간접적으로 변형계수 및 전단강도 정수를 산정한 자료이다. 설계현장의 단층파쇄대와 유사한 지질학적 특성을 가졌으며 현장시공을 통해 적용성이 입증된 기존 자료는 매우 유용하게 적용할 수 있다. 또한 경험적 암반분류법은 이미 적용성이 입증되어 광범위하게 적용되고 있으나 단층토사나 또는 토사에 거의 가까운 정도의 단층각력암에는 적용하기 어려운 한계가 있다. 단층토사는 표 5와 같이 여러 가지 문헌에 제시되어 있는 자료에서 실험결과의 타당한 범위를 판단하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

표 5. 단층토사에 관한 각종 문헌자료

구분	점착력(tf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각	비고
단층점토	0	15~30	지반조사 핸드북(Hunt, 1984)
	0~10	10~15	Hoek & Bray(1981)
	2.5~5	20~35	최신 토목지질학(안종필, 1989)
단층파쇄대	0~1.8	12~18.5	Barton(1974)
	0~10	25~40	Hoek & Bray(1981)

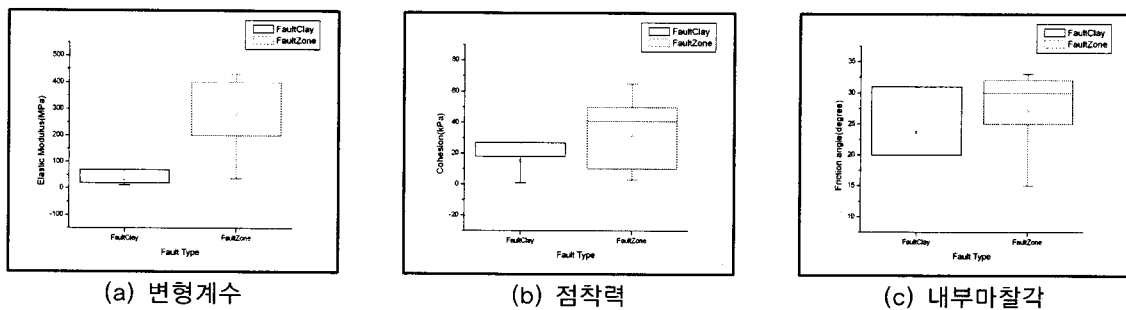


그림 16. 국내의 단층파쇄대 공학적 특성 적용 범위

전술한 바와 같이, 단층파쇄대의 공학적 특성을 평가한 사례를 국내에서 턴키방식으로 발주된 공사의 설계자료로부터 분석하였다. 그 결과, 조사대상 과업의 절반정도가 단층대 분포 및 공학적 특성에 대한 상세조사와 시험을 수행한 것으로 나타났다. 시험자료 및 경험적 자료로부터 선정된 단층토사 및 단층파쇄대의 적용 물성치의 범위는 그림 16과 같다.

단층대 영향을 받는 구조물의 거동을 분석하기 위해서는 파쇄형태별 공학적 특성 뿐만 아니라 각 파쇄형태들의 분포 경계를 객관적으로 규정할 필요가 있다. 최근, 각력과 토사의 분포비율에 따른 강도 및 변형특성을 분석함으로써 토사 또는 풍화암과 각력암의 거동특성을 분류하거나(Lindquist & Goodman, 1994, 이수곤 & 권성주, 2002) 절리 또는 단층면들의 분포 빈도를 분석하여 파쇄암반과 건전한 암반을 구분하려는(T.H. Simmenes & A. Gudmundsson, 2002) 시도가 있어 왔다. 이러한 시도를 설계에 반영하고 해당 현장에서의 적용성을 분석한다면 단층대 분포 및 공학적 특성 평가의 신뢰도가 향상될 것으로 판단된다.

## 5. 결론

단층은 매끄러운 경면(slickenside), 단층 파쇄대, 단층 점토를 수반함으로써 주변지반보다 점착력, 마찰각 등의 암반강도 강도를 현저히 감소시킬 뿐만 아니라, 대수층을 형성하게 되므로 토목 구조물의 안정에 심각한 영향을 미치게 되어, 공학적으로 매우 중요한 의미를 지닌다.

단층의 분포 특성을 파악하기 위해서는 지질도 및 인공위성 영상, 음영 기록도, 지표지질조사 등의 광역조사를 통해 단층대의 대략적인 규모 및 방향성을 파악하고, 물리탐사를 통하여 지표지질조사 결과와 부합하는 단층대 위치, 경사, 폭을 예측하며, 단층대 확인 및 규모 파악을 위해 상세 시추조사를 수행한다. 이 때 각 조사는 단층의 규모 및 방향 등에 따라 적절히 계획되어야 하며, 각 결과들을 상호 비교 검증함으로써 정확성을 높여야 한다.

단층대의 공학적 특성을 평가하기 위해 단층대를 거동특성에 따라 단층토사와 단층파쇄대로 구분하고 현장시험 및 실내시험 결과, 경험적 암반분류법을 이용하여 간접적으로 산정한 결과, 기존 산정 사례 분석 결과들을 종합하여 단층의 공학적 특성을 평가해야 할 것이다.

마지막으로 시공시 단층에 의한 각종 사고 사례를 보면, 많은 경우 시공시 지반 상황에 대한 확인과 대처가 미흡하여 붕락사고 등이 발생하였다. 즉 설계단계에서의 각종 조사 및 시험을 통해 파악한 단층에 대한 분포 및 공학적 특성은 추정치일 뿐이며, 시공단계에서 전문가의 막장조사 및 확인시추 등을 통하여 시공구간의 단층에 대한 정보를 입증해야 한다.

## 참고문헌

- 안종필, 1989, 최신 토목지질학, 구미서관
- 양홍석, 김동은, 이수곤, 2002, 핵석지반에서의 합리적인 지반강도 정수 산정, 한국암반공학회 춘계 학술발표회 pp.97-102
- 윤지선, 2005, 알기쉬운 토목지질학, 미래기술
- 이병주, 2006, 토목구조물에서 단층의 등급분류에 대한 제의, 터널기술, 터널공학회, Vol.8, No.2, pp.68-76
- 황제돈, 문홍년, 박치면, 윤창기, 2005, 단층대의 RMR 평가를 통한 터널보강 사례 연구, 대한토목학회 정기학술대회, pp.3688-3691
- 대한지질공학회, 2004, 암반의 조사와 적용, 혜성문화사
- Lindquist, E.S and Goodman, R.E, 1994, The strength and deformation properties of Melange, Ph.D. thesis, The University of California, Berkeley
- Simmenes, T. H. & Gudmundsson, A., 2002, Fracture frequencies, mechanical properties, stress fields, and fluid transport of large fault zones in West Norway, EGS XXVII General Assembly, Nice, pp.21-26