

지반침하의 조사 및 평가

윤지선 · 박종만
인하대학교 환경토목공학부

1. 서론

국내 석탄개발은 과거 수십 년 간 국가 에너지 수급정책에 따라 생산에 치중하여 폐광후 발생할 문제에 대한 연구가 부족했다. 최근 과거 생산위주의 채광활동으로 현재 휴폐광된 대부분의 광산에서는 부분적인 붕락이나 지표침하가 발생하고 있다.

폐광지역에서 발생하는 침하는 대부분 가행이 중단된 후 오랜 시간이 지나 발생하는 잔류성 침하로 발생위치와 시기를 정확히 예측하기 어렵다. 폐광은 지표의 불안정성을 유발하는 잠재성을 고려할 때 지표구조물이나 인명에 피해를 미칠 수 있다. 붕괴되지 않은 폐광은 구조물을 위한 기초공사나 지표 건축물로 인한 과도한 하중으로 인해 불안정하게 되고 이로 인해 지표침하가 발생할 수도 있다.

잠재적으로 침하가 발생할 수 있는 지역에서 일차적으로 침하의 성질과 정도를 결정하기 위해서는 해당지역에 대한 철저한 조사를 실시해야 한다. 이를 위해 상반(채굴적과 지표사이의 토양과 암석), pillar(상반을 지보하기 위하여 남겨진 광체)에 대한 상세한 정보를 수집하여야 하며, 다양한 침하 방지 공법들의 적합성을 평가하기 위해 지하공동의 크기, 모양, 그리고 연속성 등을 확인해야 한다.

2. 침하유형과 특성

2.1 침하의 유형

지반침하는 광물이나 석유, 가스 같은 천연자원의 채굴과 연관이 있으며, 채굴방법, 채굴심도, 채굴공동 주위의 지질조건 등에 따라 침하의 형태가 달라지게 된다. 지하채굴에 따른 지반침하는 크게 연속형 침하와 불연속형 침하로 분류할 수 있다.

연속형 침하는 trough형 침하가 대표적인 형태이고, 불연속형 침하는 sink-hole형 침하가 대표적인 형태이다. trough형 침하는 침하량은 적으나 넓은 지역에 걸쳐 연속적으로 완만한 지표침하곡선을 발생시키는 특성을 가지고 있다. sink-hole형 침하는 지표가 함몰하는 형태로 침하가 발생하기 때문에 침하량이 크고 침하의 형태는 급경사를 이루는 원통형 혹은 원추형의 형태로써 침하량이 수m에서 수십m에 달하기도 한다.

국내의 경우에는 대부분 급경사의 불규칙한 탄층을 대상으로 위경사승 붕락법과 중단채굴법 등의 채탄법을 사용함으로써 지표에서의 침하 범위는 비교적 좁은 지역에 국한되는 특성을 보이나 일단 침하가 발생하면 침하량이 매우 크고 침하곡선도 불연속적인 sink-hole형 침하 형태를 보인다. 또한 폐광 지역에서 발생하는 침하현상은 채광이 끝난 후 지지력을 상실했을 때 발생하므로 점진적이고도 복합적인 진행 과정을 거쳐 일어난다 (석탄산업합리화사업단, 1997). 그러므로 발생시간에 따라 분류하면 폐광에서 발생하는 침하는 그 발생 위치와 시기를 예측하기 어려운 잔류성 침하로 분류된다.

[표 2.1] 발생시간에 따른 침하의 분류

	활동성 침하	잔류성침하
발생형태	<ul style="list-style-type: none"> · 채굴작업시 발생 · 비교적 얕은 심도에서 채굴적이 클 때 발생 	<ul style="list-style-type: none"> · 채굴작업이 종료한 후 일정기간이 지나서 발생 · 채광율이 높은 경우에 잔류성 침하의 발전가능성 존재 · 채굴법에 따라 수십년이 걸리는 경우도 있다

[표 2.2] 침하형태에 따른 침하의 분류

	연속형 침하	불연속형 침하 (sink-hole, chimney)
발생형태	<ul style="list-style-type: none"> · 수평층 또는 완만한 경사층에서 발생 · 오랜 시간에 걸쳐 서서히 발생 · 넓은 지역에 걸쳐 발생 · 적은 침하량 · 심도에 크게 영향을 받지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> · 급경사층에서 발생 · 채굴작업 종료 후 갑자기 발생 · 적은 규모에 걸쳐 발생 · 큰 침하량 · 비교적 얕은 심도에서 발생

2.2 침하의 원인

1) 지하공동

지하에 자연적 또는 인공적 공동이 존재하지 않는다면 지표에서 침하는 발생하지 않을 것이므로 지하에 공동의 존재는 침하의 가장 큰 원인이라 할 수 있다. 공동의 규모와 형태에 따라 지표침하의 양상은 달라진다. 일반적으로 큰 공동이 천부에 존재한다면 지표에서 침하가 일어날 가능성은 높다. 또한 채굴공동 상반을 형성하는 암석의 종류도 침하작용에 큰 영향을 미친다.

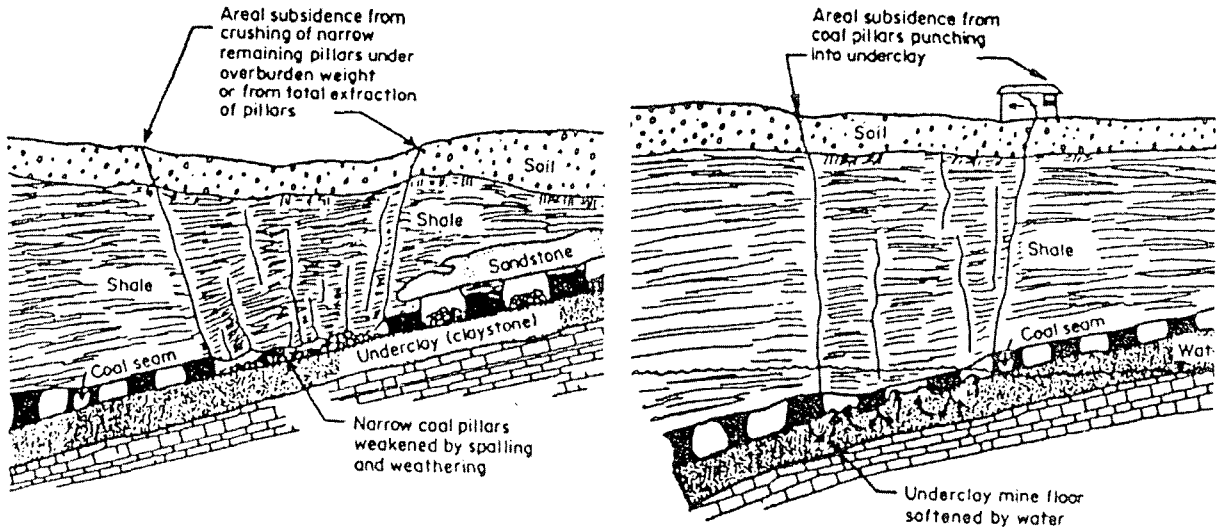
2) pillar의 파괴

시간의 경과에 따라 pillar의 강도가 작아지거나 지표 구조물의 하중이 pillar에 부과되어 pillar의 파괴가 일어난다. pillar의 파괴를 일으키는 원인에 관계없이 하나의 pillar가 붕괴함으로써 주위 pillar에 하중이 집중하게 되고 이로 인해 연속적인 붕괴현상이 생기게 된다. 연속적인 pillar의 붕괴와 응력 재배분 현상은 채굴공동의 상반이 전단파괴나 휨 변형에 의한 붕괴가 발생될 때까지 계속된다. 대규모로 pillar가 붕괴되면 넓은 지역에 걸쳐 침하가 발생할 수 있다.

3) pillar의 punching현상

punching현상이란 채굴적 바닥의 지지력이 상실되어 채굴적 바닥이 pillar의 하부로부터 채굴적 내부로 밀려 올라오는 현상이다. 일반적으로 채굴적 바닥이 점토암이나 이암 등으로 구성되고

pillar의 큰 응력이 바닥에 작용할 때 발생한다. pillar의 punching현상은 pillar의 붕괴로 발생하는 침하 면적에 비해 상당히 넓은 지역에 걸쳐 침하를 발생시키고 바닥의 연약 정도에 따라서 그 범위가 확장된다. [그림 2.1]은 pillar의 파괴에 의한 trough형 침하와 pillar의 punching에 의한 trough형 침하를 나타낸다.



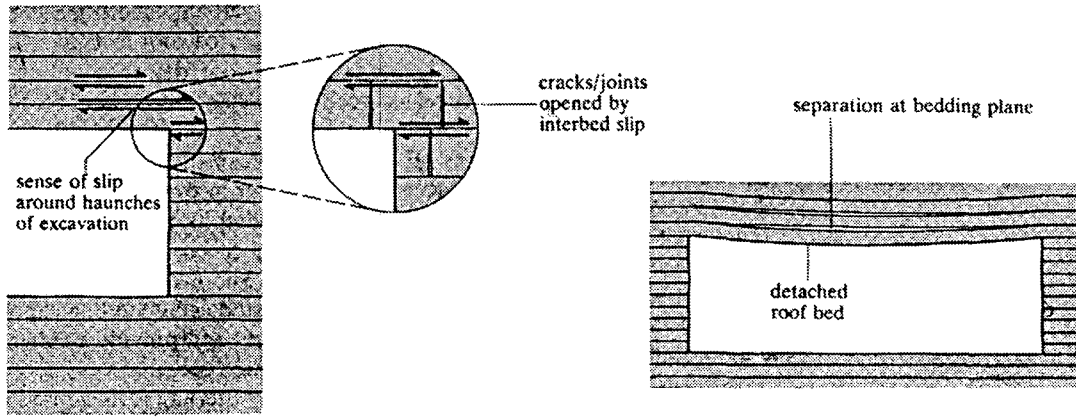
[그림 2.1] pillar의 파괴에 의한 trough형 침하와 pillar의 punching에 의한 trough형 침하

4) 천반의 파괴

pillar의 파괴나 punching현상이 일어나지 않더라도 채굴적의 천반이나 상반이 파괴됨으로써 침하가 발생할 수 있다. 채굴적의 천반이나 상반에서 파파가 발생하면 자체 지지력을 가지는 아치효과가 나타날 때까지 지표면을 향해서 점진적으로 파괴가 진행된다. 또는 파쇄된 암석들이 체적팽창을 일으켜 채굴적을 모두 채워 상부의 암석들을 지지할 때까지 붕괴가 계속된다.

채굴적 상반이 층상암반으로 구성된 경우 휨 변형에 의한 파괴와 전단파괴에 의해 붕괴가 발생한다. 천반이 연속된 빔과 같은 거동을 한다면 휨에 의한 파괴가 발생한다. 휨 변형에 의한 파괴를 일으키는 원인은 다음과 같다. [그림 2.2]는 채굴적 상반의 층분리 현상을 나타낸다.

- ① 수직하중으로 가해지는 하중
- ② 수직응력에 비해 낮은 수평응력의 비
- ③ 층분리 현상
- ④ 휨 변형에 의한 인장응력



[그림 2.2] 채굴적 상반의 층분리현상

5) 지질구조

전단당도가 작은 급경사의 지질 구조면을 따라서 암석의 자중에 의한 파괴가 발생할 수 있으며, 침하가 매우 돌발적으로 발생할 가능성이 크다. 암반의 깨짐이나 체적팽창 없이 강체 거동을 하게되며 붕괴되었을 때 채굴적 주변에서 생긴 수직변위는 지표면에서 비슷한 크기의 수직변위로 나타난다.

6) 지하수의 유입

지하공동에서 습기는 단시간 혹은 장기간에 걸쳐 암석의 강도와 변형특성을 변화시키게 되며, 지질 구조적 취약부인 파쇄대에서의 지하수의 역할은 지반의 강도 저하를 일으키기 쉬운 요인으로 작용한다. 갱도내에서 습기는 지하수로부터 혹은 지표수 침투 작용에 의해 유입되는 것으로 파악되고 있으며, 광산이 가행시에는 배수나 환기에 의해서 어느 정도 통제가 가능하지만 폐광후에는 습도의 증가로 장기적인 지표의 변형으로 유도된다.

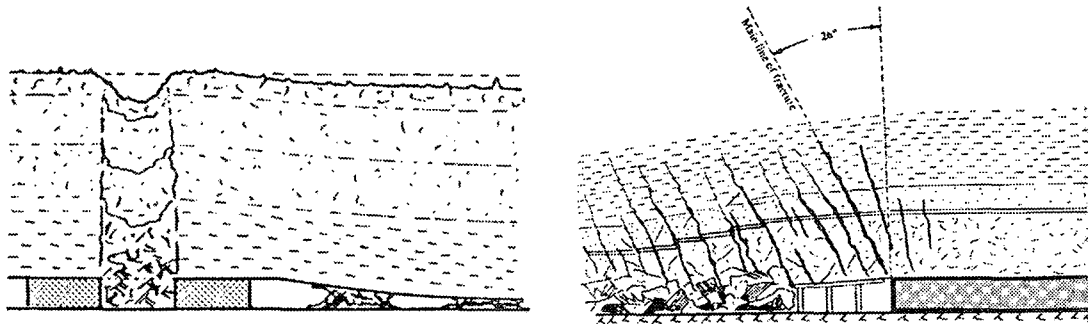
2.3 채굴법에 따른 침하형태

1) 주방식(Room & pillar) 채굴작업과 침하

주방식 채굴의 경우는 방과 방 사이의 십자형 교차점에서 sinkhole형 침하가 발생하기 쉬우며, pillar의 붕괴가 일어날 경우에는 완만한 trough형 침하가 발생하기도 한다.

2) 장벽식 채굴작업과 침하

전 세계적으로 탄층 개발에 가장 많이 적용되는 장벽식 채탄의 경우, 파쇄는 상반의 휨에 의한 균열의 발달에 의한다. 지표에서는 커다란 trough형 침하가 일반적이며, 균일한 침하를 유도할 경우, 지상구조물에 대한 피해를 극소화 할 수 있다.



[그림 2.3] 주방식 채굴에 의한 침하(좌), 장벽식 채굴에 의한 침하(우)

3. 침하 가능성 조사

3.1 육안조사

부지조사의 첫 단계는 지표에 존재하는 조건들을 조사하는 것이다. 육안지표조사에서는 현지의 지반상태, 함몰적, 농지, 택지, 가옥의 피해, 지형특성 등을 조사한다. Sink-hole, 산성 광산수 유출, 흔치 않은 지형들은 침하의 증거가 될 수 있다.

3.2 지표지질조사

지표지질조사는 암석 및 암반의 공학적인 성질과 암반내에 발달하는 불연속면의 특성을 조사하는 것으로 지질도, Geological compass, Geological hammer, Profile gauge, Schmidt hammer등을 이용한다. 지표지질조사의 항목은 [표 3.1]과 같다.

[표 3.1] 지표지질조사 항목

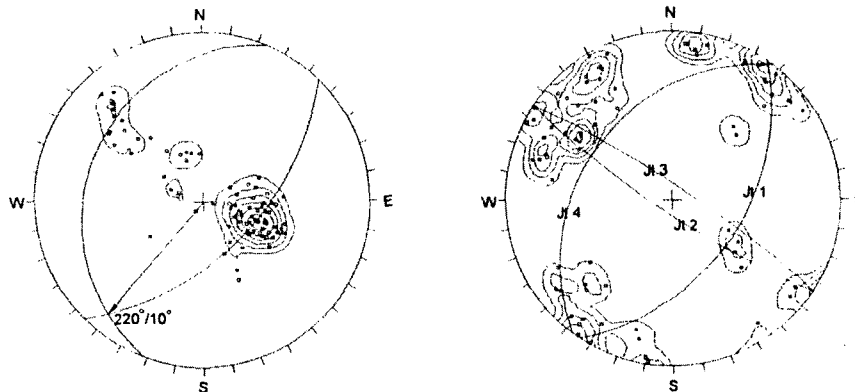
암 석	구 조 선	불 연 속 면
<ul style="list-style-type: none"> · 암석의 종류 · 암맥의 종류 및 관입방향 · 탄층의 발달 특성 · 풍화정도 · 암석의 구조, 색깔, 입자크기 등 	<ul style="list-style-type: none"> · 단층 · 전단대의 방향 · 파쇄대 	<ul style="list-style-type: none"> · 방향 · 간격 · 연속성 · 틈새 · 불연속면의 거칠기 · 충전물질 · 불연속면의 강도 · 누수 · 절리군 수 · 암피의 크기

1) 풍화상태

일반적으로 암석은 지표에 노출되면 물리·화학적 작용으로 풍화를 받는다. 암석은 풍화정도에 따라 구성성분, 결합력, 강도 등에 많은 차이가 발생한다.

2) 불연속면의 발달상태

- 불연속면의 방향 : 불연속면의 방향은 주향(Strike)과 경사(Dip) 또는 경사방향(Dip Direction)과 경사(Dip)로 표시되며, 측정자료를 평사투영하여 해당지역의 대표적인 불연속면의 방향을 검토할 수 있다. [그림 3.1]은 평사투영 해석결과를 표시한 예이다.



[그림 3.1] 불연속면의 평사투영 해석결과

- 불연속면의 간격 : 불연속면 간격은 인접한 불연속면 사이의 수직거리이며, 일반적으로 불연속면의 각 종류에 따라서 각각 평균 수직 간격을 측정한다. 불연속면의 간격은 암반을 구성하고 있는 암괴의 크기를 결정하는 요소이다.
- 불연속면의 연장성 : 불연속면의 연장성은 불연속면의 범위 또는 크기를 나타내며, 노두에 나타나는 trace 길이를 관찰하여 정량화 할 수 있다.
- 불연속면의 틈새 : 틈새는 개방된 불연속면의 인접한 분리된 벽과의 수직거리이며, 그 사이의 공간은 공기나 물 또는 충전물로 채워져있다.
- 불연속면의 거칠기 : 불연속면에 나타나는 거칠기의 정도를 나타내며, 큰 규모의 거칠기(waviness)는 전단변위의 초기 방향에 영향을 주며, 작은 규모의 거칠기(unevenness)는 실험실 시험에서 구하는 전단강도에 영향을 준다.
- 불연속면의 강도 : 벽면을 구성하는 암석의 강도를 나타내며, 절리에서 암석끼리 직접 접촉해서 이루어져 있을 경우 전단강도와 변형도에 매우 중요한 요소가 된다. 불연속면은 암석 내부보다 풍화에 많이 노출되므로 신선한 암석에서 측정된 암석의 강도에 비해 적은 값을 가지게 된다. 벽면의 강도는 schmidt hammer 시험이나 굽기 그리고 Geological hammer 등으로 측정된다.
- 불연속면의 누수 : 각 불연속면이나 전체적인 암반에서 물의 흐름과 수분의 상태, 충전물의

유무를 통해 누수정도를 기록한다.

- 충전물 : 불연속면의 틈새를 충전하고 있는 물질을 의미하며 충전물의 두께, 종류, 점성 및 투수성 등에 대해 기록한다.
- 불연속면군의 수 : 군을 이루는 불연속면 방향의 숫자를 뜻하며, 역학적 거동에서는 불연속면군의 수로 변형의 범위가 결정되어 진다(불연속면군 수의 증가는 변형의 가능성을 증가시킨다).
- 압괴의 크기 : 압괴의 크기는 불연속면의 간격, 불연속면군 수, 불연속면의 방향성에 의해 결정되며, 입방체, 능면체, 사면체, 박판 형태로 근사할 수 있다. 그러나 임의의 절리에서 한 군이 평행을 이루는 경우는 드물기 때문에 보통 기하학적인 모양을 가진 압괴보다는 불규칙한 형태를 가지는 경우가 대부분이다.

3.3 갱내도

채탄작업이 이루어져 왔다는 것이 확인되면, 갱내도를 광업회사 또는 정부 관련기관으로부터 얻어 채굴적의 크기와 분포상태를 파악한다.

3.4 시추조사

지표탐사, 지질학적 자료와 갱내도로부터 얻어진 정보를 보충하기 위하여 시추조사를 실시하게 된다. 지하층의 성질과 두께를 정확히 결정하기 위해서는 연속적인 코어 샘플을 얻는 것이 바람직하며 이를 통해 지하에서 발생된 균열 또는 암석파쇄대를 탐지하는 것이 가능하다. 또한 시추된 시편을 통해 암반의 물성치를 얻을 수 있으며, 시추공을 통해 지하수위측정, 공내재하시험, 수압시험 등의 현장시험을 수행할 수 있다. 시추공 카메라를 이용하는 것은 전반적인 지질상태나 절리 및 파쇄대의 분포상황등을 파악하는데 유용하다.

1) 수압시험

· 용수압 측정 : 용수압 측정은 시추공내에 측정관을 내리고 어느 측정구간부터 측정관에 유입하는 지하수량 또는 유입속도와 최종적으로 도달한 지하수의 안정수위를 측정함으로써 지반의 투수성과 수압을 알고자 하는 것이다. 용수압시험의 대표적인 해석법으로 Hvorshlev의 식이 있다.

- 피압 투수층의 경우

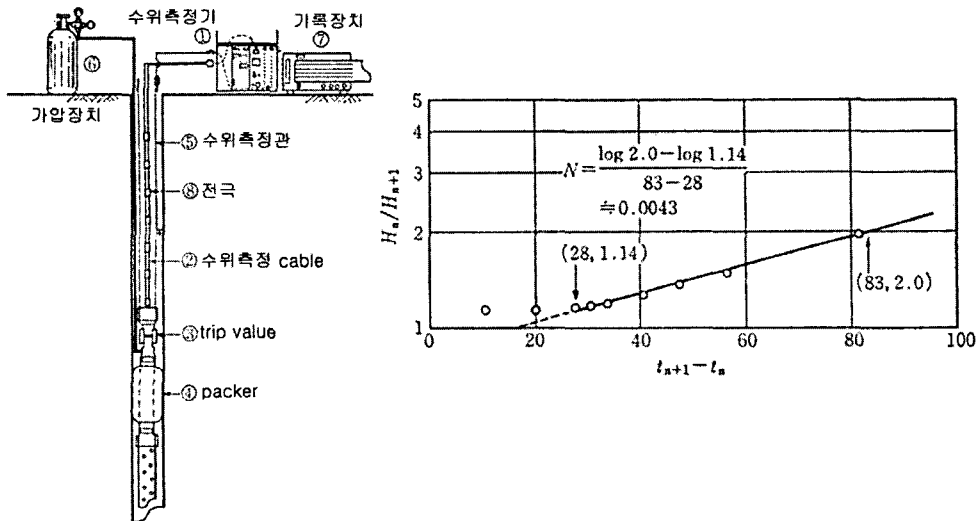
$$k_h = \frac{2.3d^2 \cdot \log\left(\frac{4mL}{D}\right) \cdot \log\left(\frac{H_n}{H_{n+1}}\right)}{8L(t_{n+1} - t_n)} ; \frac{2mL}{D} > 4$$

- 자유면 투수층의 경우

$$k_h = \frac{2.3d^2 \cdot \log\left(\frac{2mL}{D}\right) \cdot \log\left(\frac{H_n}{H_{n+1}}\right)}{8L(t_{n+1} - t_n)} ; \frac{mL}{D} > 4$$

- 여기서, d : rod 내경 (cm)
- D : 시추공 공경 (cm)
- L : 측정 대상구간의 길이 (투수층의 두께) (cm)
- t : 경과시간 (s)
- H_n : $t=t_n$ 에서 압력수두 (cm)
- n : 측정치 중의 n 번째
- m : $\sqrt{k_n/k_v}$ (보통 $m=1$ 로 함)
- k_n : 수평방향의 투수계수 (cm/s)
- k_v : 수직방향의 투수계수 (cm/s)

이론식에서 알 수 있듯이 투수계수는 $\log(H_n/H_{n+1})$ 과 $(t_{n+1}-t_n)$ 의 비율에 비례한다. 따라서 종축에 (H_n/H_{n+1}) 을 대수눈금으로, 횡축에 $(t_{n+1}-t_n)$ 를 산술눈금으로 측정결과를 그림과 같은 $\log(H_n/H_{n+1})-(t_{n+1}-t_n)$ 곡선으로 표시하면 직선관계를 나타낸다. 그 직선부분의 경사를 구하고 투수계수를 구한다. 단, 측정치의 초기 부분에서 직선으로 되지 않는 것은 유입지하수가 난류상태에 있기 때문이며, 해석에 있어서 이 부분의 데이터를 제외하고 생각해야 한다. 이 조사법의 현장측정에 있어서 중요한 것은 확실히 측정구간만의 유입수량을 측정하는 것이며, 그를 위해서는 충분히 packer 효과가 있는 위치를 선택하여 packer를 설치해야 한다. [그림 3.2]은 용수압시험의 모식도와 $\log(H_n/H_{n+1})-(t_{n+1}-t_n)$ 곡선을 나타낸다.



[그림 3.2] 용수압시험의 모식도와 $\log(H_n/H_{n+1})-(t_{n+1}-t_n)$ 곡선

· **Lugeon Test** : Lugeon Test는 틈을 포함한 불균질한 지반의 투수성을 시험하는 방법이다. 원리는 일종의 주입법에 의한 투수시험이며, 공경 46~66mm 정도의 시추공에 압력 10kgf/cm²으로 주수한 경우 주입길이 1m당 주입량을 리터 단위로 나타낸 것을 1Lugeon(Lu)이라고 한다. 시험결과 해석을 위해서는 유효주입압력을 구해야 한다. 이는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

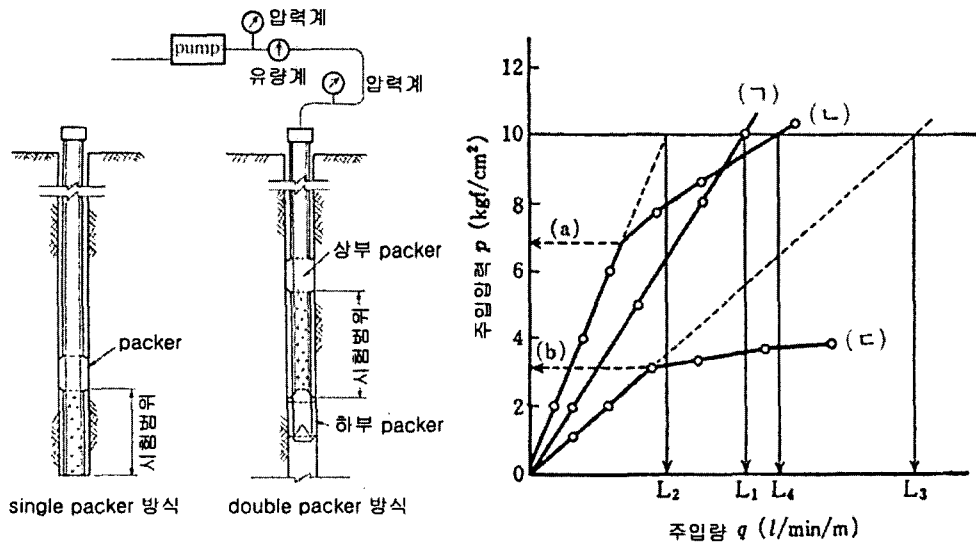
$$p = p_0 + \gamma_w(h_1 - h_2 - h_3)/10$$

- 여기서, p : 유효주입압력 (kgf/cm²)
 p_0 : 입구압력 (kgf/cm²)
 h_1 : 입구압력계부터 시험구간 중앙까지의 표고차 (m)
 h_2 : 지하수위부터 시험구간 중앙까지의 수두 (m)
 (피압수의 경우에는 그에 상당한 수두)
 h_3 : 관내저항에 의한 손실수두 (m)
 γ_w : 물의 단위중량 (kgf/cm³)

유효 주입압력 p (kgf/cm²)을 종축에 주입량 q (l/min/m)을 횡축에 표시하여 주입압력-주입량 곡선(p - q 곡선)을 그린다. 그림에서 (ㄱ)은 p 가 10(kgf/cm²)이상까지 직선관계에 있는 것, (ㄴ)은 6~7(kgf/cm²)까지는 직선관계에 있고 그것을 넘어가면 급격히 주입량이 증가하지만 주입압력이 10(kgf/cm²)이상으로 되는 것, (ㄷ)은 낮은 주입압력 단계에서도 직선관계가 없어지고 주입압력이 10(kgf/cm²)에 도달하지 않은 것 등으로 구분할 수 있다.

주입압력과 주입량이 비례관계에 있어야 하지만, 어느 주입압력 이상으로 되면 주입량이 급격히 증대하는 경우가 있다. 이것은 주입한 압력수에 의하여 지반중의 틈을 충전하고 있는 세립분이 쓸려 내려가거나 틈이 확장되었기 때문에 일어난 현상이며, 그때의 주입압력을 한계압력이라고 한다.

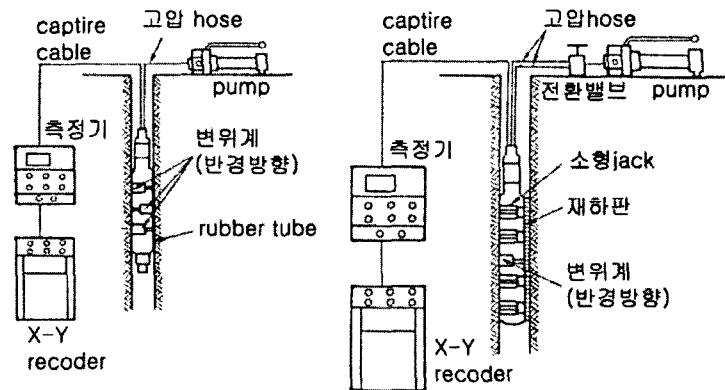
그림에서 p - q 곡선 (ㄴ) 및 (ㄷ) 직선구간의 최대치 a , b 가 각각 한계압력이다. 한계압력이 10(kgf/cm²) 이상의 경우 (ㄱ)은 직선부분을 그대로 연장하여 주입압력 10(kgf/cm²)과 만나는 점의 주입량 L_1 을 Lugeon치로 한다. 한계압력이 10(kgf/cm²)이하의 경우(ㄴ 및 ㄷ)은 직선부분을 연장해서 주입압력 10(kgf/cm²)과 만나는 점의 주입량 L_2 및 L_3 를 환산 Lugeon치로 한다. [그림 3.3]은 Lugeon Test의 모식도와 p - q 곡선을 나타낸다.



[그림 3.3] Lugeon test의 모식도와 p-q곡선

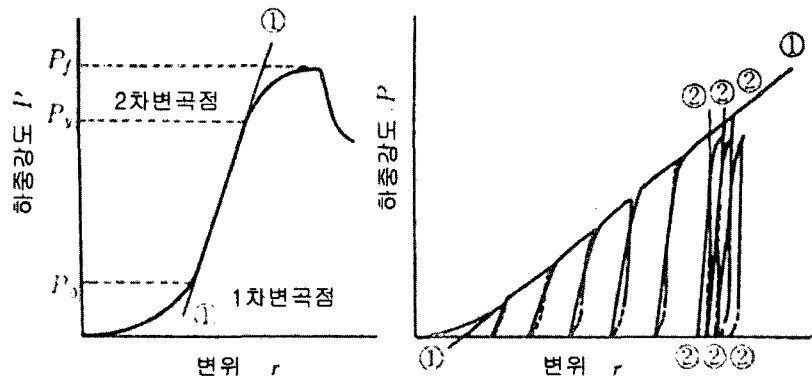
2) 공내재하시험

공내재하시험은 시추공의 공벽면을 가압하고, 그때의 공벽면의 변형량을 측정함으로써 지반 성질(강도, 변형특성)을 조사하는 시험이며, 평판재하시험의 기본원리를 이용하여 시추공에서 시험할 수 있도록 한 것이다. 공내재하시험은 일반적으로 지반의 변형계수를 구하는 목적으로 실시되지만 암반분류의 지표를 얻기 위하여 실시되는 경우도 있다. 또한 지반의 탄성계수나 항복치를 구한다든지 공동 주변의 이완영역 추정 등의 목적으로 사용되기도 한다. [그림 3.4]은 공내재하시험의 모식도이다.



[그림 3.4] 공내재하시험 모식도 (좌 : 등분포재하법, 우 : 등변위재하법)

측정에 의하여 얻은 데이터를 기록하고 기종에 따라 필요한 환산이나 보정을 한 후 하중강도-변위 곡선을 작성한다. 단조재하 경우의 하중강도-변위 곡선은 일반적으로 [그림 3.5]와 같이 되며, 곡선에는 두가지 변곡점이 나타난다. 즉, 하중강도가 작은 단계에서 나타나는 변곡점은 1차변곡점이라 불리며 그 하중강도는 P_0 라고 불린다. 1차변곡점을 넘으면 하중강도와 변위는 직선적으로 변하고 탄성적인 거동을 나타낸다. 더욱 하중을 올리면 직선성을 잃고 변위가 급증하는 점이 있는데 이 점을 2차변곡점이라 하고, 그 하중강도는 P_y (항복압)이라고 불린다. 2차변곡점을 넘어 변위가 급증하는 영역에서는 지반을 탄성상태가 넘어 차차 파괴가 시작된다. 더욱 하중을 증가시키고자 하여도 하중이 증가하지 않게 된다는지 경우에 따라서는 하중이 저하하는 경우가 있으며, 이 때의 최대치를 P_f (극한압)이라고 하는 경우도 있다. [그림 3.5]은 하중강도-변위 곡선의 예이다.



[그림 3.5] 하중강도-변위 곡선의 예(왼쪽은 단조재하의 경우, 오른쪽은 단계재하와 반복재하의 경우)

하중강도-변위 곡선으로부터 변형계수 및 탄성계수를 구하지만 일반적으로 변형계수(D_b)는 하중강도-변위 곡선에 있어서 처녀재하부에 해당하는 직선부(①-①)의 기울기, 탄성계수(E_b)는 반복재하부 접선(②-②)의 기울기로부터 구한다. 변형계수는 절리나 균열에 의한 암반의 느슨함 등의 영향을 포함한 변형특성을 나타낸다.

D_b 및 E_b 를 구하는 방법을 기종별로 제시하면 다음과 같다. 단, 식에서 프아송비(ν)는 지반에 따라 다르지만 일반적으로 경암 지반에서는 0.2, 연암 지반에서는 0.4가 사용되고 있다.

- pressure meter

$$D_b, E_b = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \cdot \frac{1}{\frac{dv}{dp} - a}$$

여기서, ν : 프아송비

V_0 : 측정판 초기용적 (cm^3)

V_m : $P = (P_0 + P_y)/2$ 에 있어서 측정판으로 보낸 물의 용적 (cm^3)

P : 재하중 (kgf/cm^2)

a : 측정계의 압축보정계수 ($\text{cm}^3/\text{kgf}/\text{cm}^2$)

d_v/d_p : 하중증분과 용적증분의 비율 ($\text{cm}^3/\text{kgf}/\text{cm}^2$)

- elasto meter

$$D_b, E_b = (1 + \nu)R_m \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \gamma}$$

여기서, ν : 프아송비

$\Delta P/\Delta \gamma$: 하중강도-변위 곡선의 경사 ($\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{cm}$)

R_m : 경사를 구한 구간 중간의 시험공 반경 (cm)

- KKT (Goodman Jack)

$$D_b, E_b = R_0 \cdot \phi(\nu, \beta) \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \gamma}$$

여기서, R_0 : 초기 시험공의 반경 (cm)

$\phi(\nu, \beta)$: 프아송비와 재하각도의 함수

ν : 프아송비

β : 재하각도

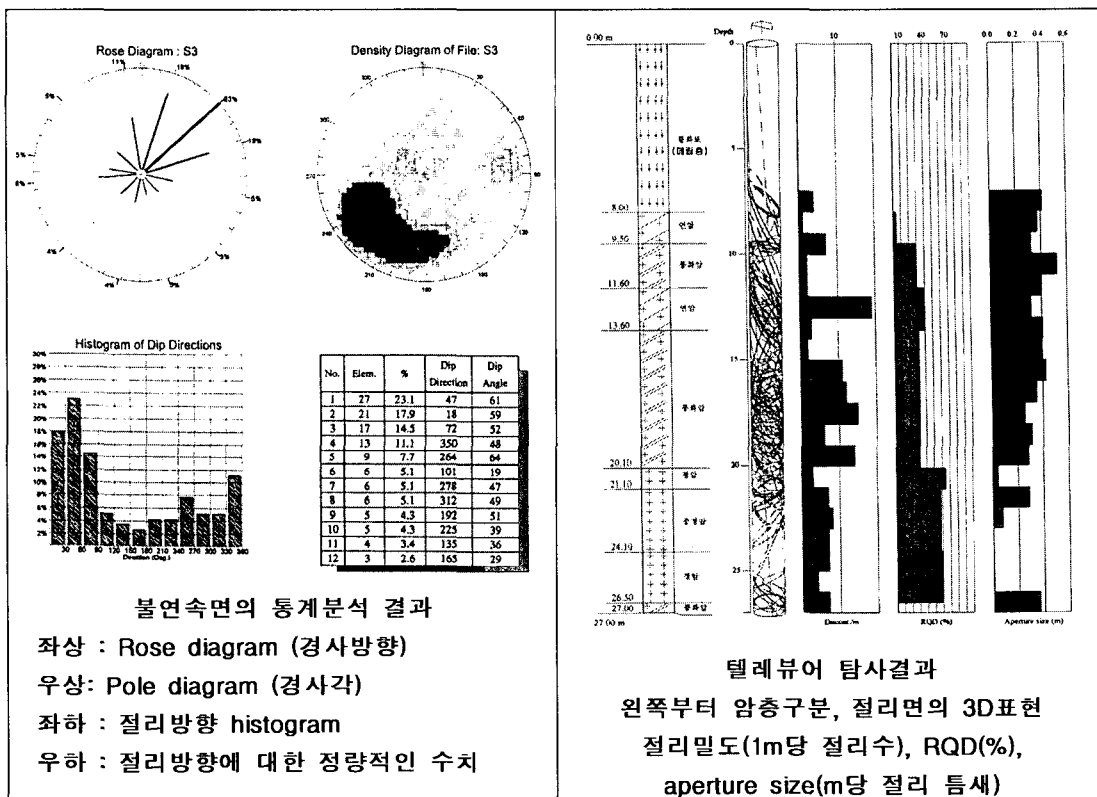
$\Delta P/\Delta \gamma$: 하중강도-변위 곡선의 경사 ($\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{cm}$)

공내재하시험은 재하면적이 작기 때문에 암반중의 국부적인 틈 등에 영향을 직접 받고, 암반의 대표적인 변형특성과 현저히 다른 결과를 얻는 경우가 있기 때문에 시험위치 선정에 신중을 기해야 한다. 또한 측정치의 신뢰성은 공벽 조건에 좌우되기 때문에 공벽은 요철이 없도록 평활하게 해야 한다.

등분포재하시험은 변형량이 작은 경질암반에서는 물의 압축성이나 rubber tube의 두께 변화 등의 보정이 필요하다. 등변위재하시험은 강판 재하를 하기 때문에 재하판과 공벽의 접촉불량이 생겨 변형계수를 과소로 평가할 우려가 있으므로 주의해야 한다.

3) 텔레뷰어

텔레뷰어 혹은 초음파 주사 검층법(Borehole Acoustic scanner(Televiewer)은 초음파(주파수 약 1MHz) 빔을 시추공 내벽에 주사하여 그로부터 얻게 되는 반사파의 진폭 및 주시를 분석함으로써 절리 및 단층의 크기, 방향 및 경사, 암질의 변화 내지 암석의 역학상태를 규명할 수 있는 시추공 물리검층 기술이다. 텔레뷰어 측정시 얻게되는 데이터 내용은 초음파 빔이 공벽에 의해 반사되는 초음파의 진폭 및 주시 즉, 진폭이미지 및 주시이미지가 된다. 여기서 진폭이미지는 절리 및 단층의 발달상태 뿐만 아니라 상대적인 암석의 강도에 대한 정보를 제시하며, 주시이미지는 시추공 단면 중심에서 공벽에 이르는 거리를 구할 수 있는 기본 자료가 되기 때문에 그로부터 시추공의 내부 모양을 표현할 수 있다.



[그림 3.6] 텔레뷰어 결과 표시 예

4) 실내 암석시험

각 시추공에서 암석의 대표성 등을 고려하여 시료를 채취하고 실내 암석시험을 실시한다. 시료를 채취함에 있어서는 시험편의 성형에 유리하도록 비교적 신선한 부분을 선택하고, 채취한 시료에 대해서는 비중, 흡수율, 탄성파속도(P파, S파), 일축압축강도, 인장강도 등을 측정한다. 시험법은 ASTM(American Society for Testing Materials)의 시험법과 ISRM(International Society for Rock Mechanics)의 시험법을 따르는 것이 일반적이다.

3.5 수중 음파탐지기

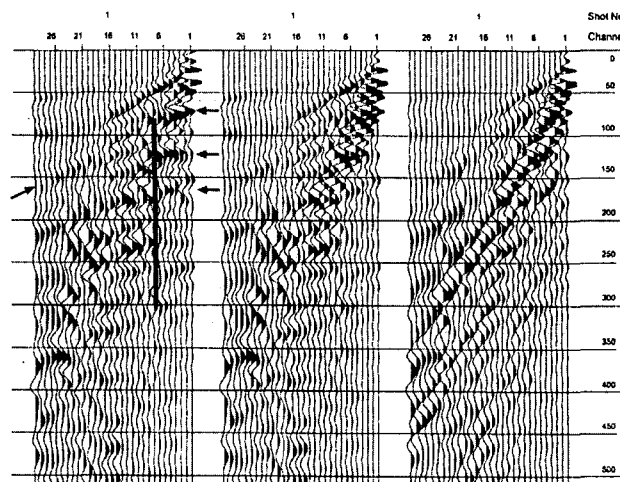
수중 음파탐지기(sonar calipers)는 공동이 지하수로 찬 경우, 지하수의 양과 일반적인 공동의 형상에 대한 정보를 얻기 위해 이용된다. 수중 음파탐지기는 공동안으로 내려져 음파를 발신하며, 반향된 신호를 수신하는데 걸린 시간을 이용하여 갱도벽 또는 장애물까지의 거리를 구한다. 이러한 방법으로 심도에 따라 연속적으로 측정을 수행하면 지하공동의 모형이 구축될 수 있다.

3.6 물리탐사

물리탐사는 시추조사와 더불어 시추공과 시추공사이의 지반상태(채굴적의 형태, 채굴적 상부의 지반상태, 파쇄대의 유무)를 파악하고 암반의 구조를 파악하기 위해 실시한다. 이로부터 지하 채굴적으로 인한 침하 우려지역의 지반안정성 평가를 위한 기본자료를 제공한다. 또한, 시추조사 결과 및 실내암석시험 결과와 상관관계를 분석하여 수치해석시 해석단면의 결정, 지층구분, 강도정수 등 입력 자료로 활용한다.

1) 탄성파 반사법 탐사

탄성파 반사법은 각 지층 경계면으로부터 반사되는 반사파를 취합하여 전산처리 함으로써 지질 구조 단면도를 얻는 탐사기술로 발생원의 종류, 수신기의 수, 수신기의 간격 등이 결정되면 기본 배열을 주어진 축선에 따라 이동하면서 측정을 반복한다. 탄성파 기록은 축선 하부의 지층구조 규명을 위한 기본 데이터로 주어진다. 대체로 각 발생원 기록은 그의 배열구간 하부의 지층경계면에 대한 정보를 담도 있다고 할 수 있다. 따라서 측정 배열이 이동하게 되면 경계면에 대한 수평적인 정보가 중첩되어 얻게 되는 것이다.



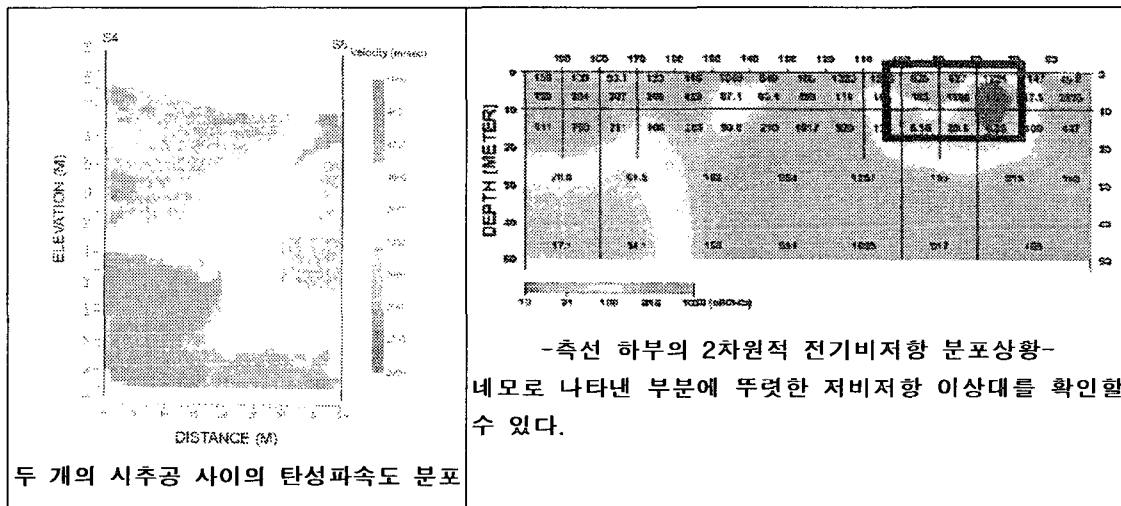
[그림 3.7] 탄성파 반사법의 정규 전산처리 과정 중 F-K filter에 의한 표면파 제거 (오른쪽부터 Raw Data, after F-K filter(fan filter), after F-K filter (fan + polygon)). 표면파 도달이 상당부분 제거되어 유용한 반사파의 도달(화살표로 표시)이 두드러진다.

2) 탄성과 토모그래피 탐사

토모그래피 탐사는 두 개의 시추공에 각각 탄성과 발생원 장치와 수신기 장치를 삽입하여 실시한다. 탄성과 발생원은 시추공 내부에서 그 위치를 이동하면서 탄성파를 생성하고, 각 발생원에서 생성된 탄성파는 지하 사방으로 전달된다. 그 중 일부는 또 다른 시추공에 삽입된 수신기에 도달하게 된다. 수신기에 도달하는 탄성파 기록으로부터 탄성파 속도를 얻을 수 있는데 이를 토모그램 혹은 주시역해 결과라 한다. 즉 토모그램은 시추공 사이 지질단면에 대한 탄성파속도의 분포를 의미하며 그로부터 암층의 분리 및 각 암층의 탄성파속도가 규명되는 것이다.

3) 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 전류전극과 전위전극을 이용하여 지하 매질의 전기비저항 분포를 알아내는 탐사 방법이다. 전류전극을 통해 대지에 공급된 전류와 지하 매질의 전기적 물성차이로 인해 형성된 전위분포를, 공급된 전류의 크기와 발생된 전위의 크기를 측정함으로써 전기비저항치의 변화 양상을 탐지하고 이를 해석하여 지하의 파쇄대, 단층, 층서, 지하공동, 석탄채굴적, 지하수 등을 파악하는 탐사이다.



[그림 3.8] 탄성과 토모그래피(좌), 전기비저항 탐사(우)의 결과표시 예

4) GPR(Ground Penetrating Radar)

GPR이란, 10MHz~1GHz 주파수 대역의 전자파 펄스를 이용하여 천부 지하구조를 파악하는 기법이다. 매질간 유전율 차이에 의한 전자파의 반사와 회절현상 등을 측정하고 이를 해석하여 지질구조를 파악한다. 지하로부터 반사되는 파동을 주요 신호원으로 한다는 점에서 탄성과 반사법 탐사와 유사하지만, 가탐심도가 매우 작기 때문에 전기비저항 탐사에서 이상대가 확인된 지역의 정밀 탐사 또는 전극접지가 어려워 전기비저항 탐사를 수행하기 어려운 지역에서 사용된다. GPR탐사는 사용이 간편하고 분해능이 높으며, 고주파를 사용하기 때문에 전자기적 잡음에도 영향을 받지 않는다. 특히, 빙하지대와 같은 매질의 전기 전도도가 낮은 지역에서 가장 큰 효율을 나타낸다.

3.7 계측

지반침하를 사전에 예측하고 지상에 영향을 미칠 가능성이 있는 침하에 대하여 재해를 예방할 목적으로 계측이 수행되어야 한다. 많은 이론식과 해석방법이 있지만, 해당지역의 지질특성을 정확하게 표현하는 것은 한계가 있기 때문에 계측에 의한 조사는 신뢰도가 높다. 계측 방법에는 시추공 내에 암반변위를 계측할 수 있는 계측센서를 매설하는 방법과 지표에서 직접 침하를 계측하는 방법이 있다.

1) 지표침하 계측

지표침하 계측은 지표면에서 지반의 수직 침하량을 측정하여 지반의 침하량을 산정하는 목적으로 사용된다. 지표침하계는 지표침하판(핀)과 액상침하계가 있다.

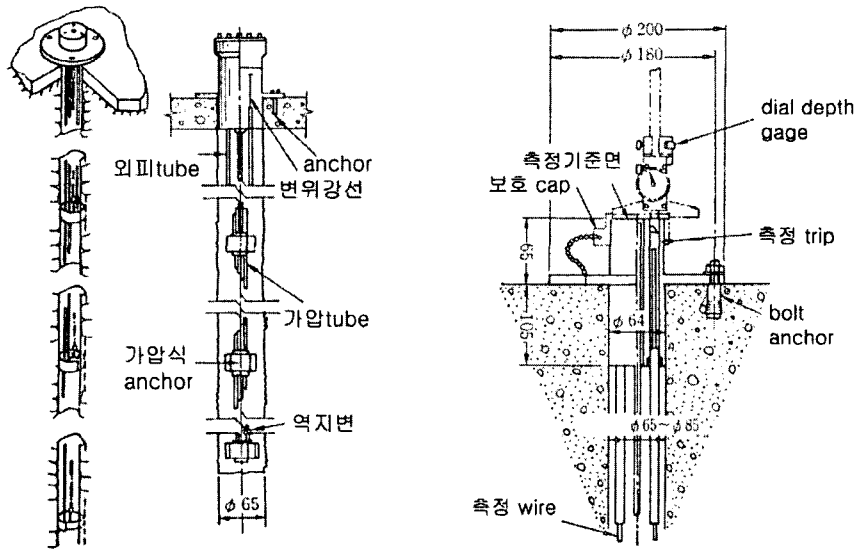
[표 3.2] 지표침하계의 종류 및 특징

구 분	지표침하판(핀)	지중앵커 방식 침하계	액상 침하계
계측원리	· 지반에 고정된 핀을 수 준 측량하여 침하량을 계 측.	· 침하를 일으키지 않는 부등점에 앵커를 장착하 고, 측정 대상면에 침하판 을 설치하여 앵커로드나 튜빙 파이프의 상단과 침 하판의 상대변위를 측정.	· 액체의 수두차를 전기 적 신호로 변환하여 침하 량을 계측
장 점	· 구조가 간단하고 고장 이 없다. · 계측여건이 변화하여도 대응하기 쉽다	· 구조가 간단하고, 측정 이 용이하다.	· 자동화 계측이 용이하 다. · 연속측정이 가능하다.
단 점	· 1회 측정시간이 길다 · 자동계측이 어렵다	· 부등점의 심도가 깊어 지면 사용이 곤란하다.	· 장비가 고가이다 · 온도에 영향을 받는다 · 현장 여건상 부등점이 과업지역과 비교적 멀리 이격되기 때문에 오차가 크게 발생한다.

2) 지중변위 계측

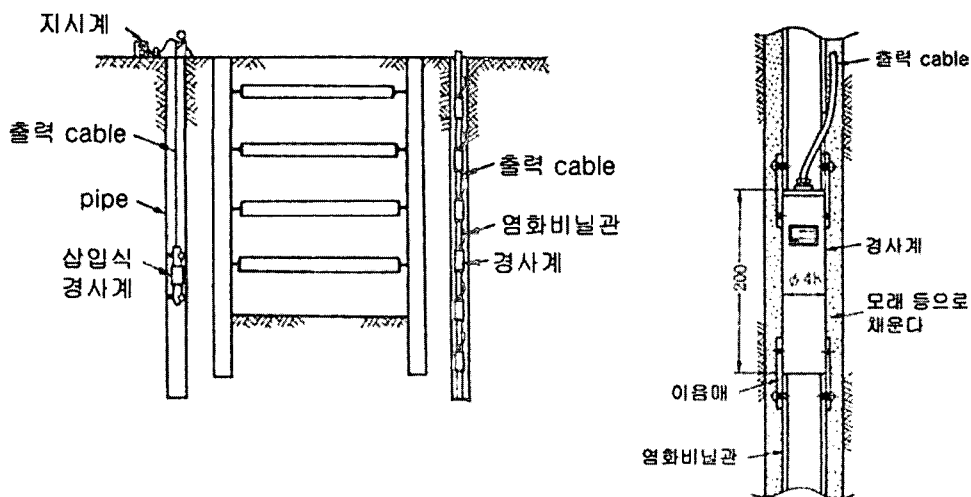
- 지중변위계 : 지중변위계는 지중구조물 벽면이나 지표부터 시추를 실시하고 시추공내에 소정 위치에 지중변위계를 설치해서 벽면 또는 지표면과 측정점 사이의 상대변위를 측정한다. 지중 변위 측정은 하나의 시추공에서 많은 측정점을 취할 수 있는 다단식 지중변위계를 사용하는 방법과 깊이 별로 천공하고 깊이에 따른 길이의 철근봉을 모르타르 등으로 고정하는 방법이 있

다. 지중변위계 설치에서 주의해야 할 것은 설치한 측정 anchor를 지반에 확실하게 고정시키는 것이다. 측정은 일반적으로 수동에 의한 측정이 주로 사용되고 있으며, 지중내의 측정점으로부터 나온 강봉 첨단과 벽면과의 상대변위를 측정하거나 시추공 입구에 casing을 장착하여 측정한다.



[그림 3.9] 다단식 지중변위계와 지중변위 측정상황

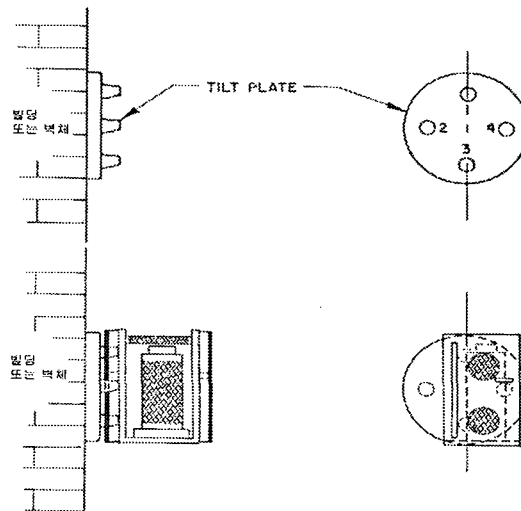
- 경사계 : 경사계는 시추공중에 삽입시켜 시추공 기울기의 경시변화를 측정함으로써 지반의 가로방향의 움직임을 측정한다. 경사계에는 매 측정마다 경사계를 시추공에 삽입해서 측정을 하는 삽입경사계와 지중에 매설하는 고정식 경사계가 있다.



[그림 3.10] 삽입식 경사계와 고정식 경사계, 고정식 경사계 설치도

3) 건물의 기울기 계측

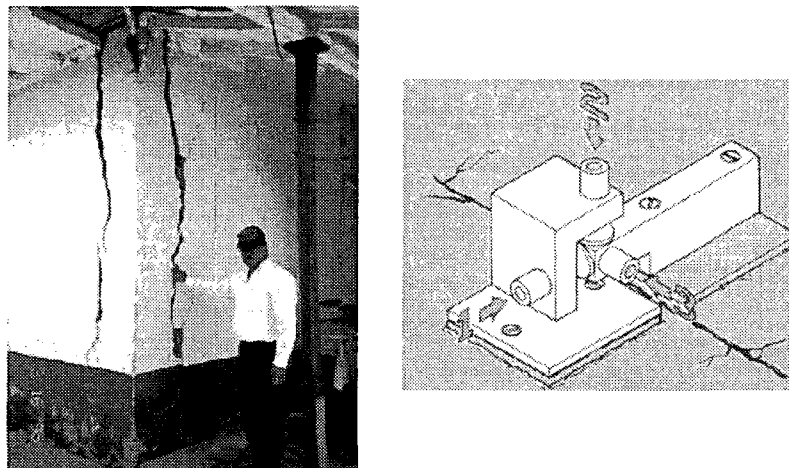
건물의 기울기 계측기는 구조물이나 옹벽 및 지반에 설치하여 측정지점의 경사도를 측정하기 위한 계측기이다. 표면 경사계는 Tube형과 Plate형이 있으며 미세한 지반의 거동까지 측정할 때는 정밀도가 우수한 Plate형을 사용한다.



[그림 3.11] Tiltmeter의 사용 예

4) 건물의 균열 계측

균열측정기는 구조물의 표면 균열이나 팽창지점에 설치하여 그 진행여부를 확인하고 폭을 측정하는 계측기로서 광해로 인해 균열이 발생한 지반보강 구역이나 인접 가옥에 설치하여 지반침하의 영향을 계측한다.



[그림 3.12] 지반침하에 의한 건물의 피해(Antioquia, Colombia)와 크랙게이지

4. 안정성 해석

4.1 침하이론의 종류 및 특징

1) 도식법

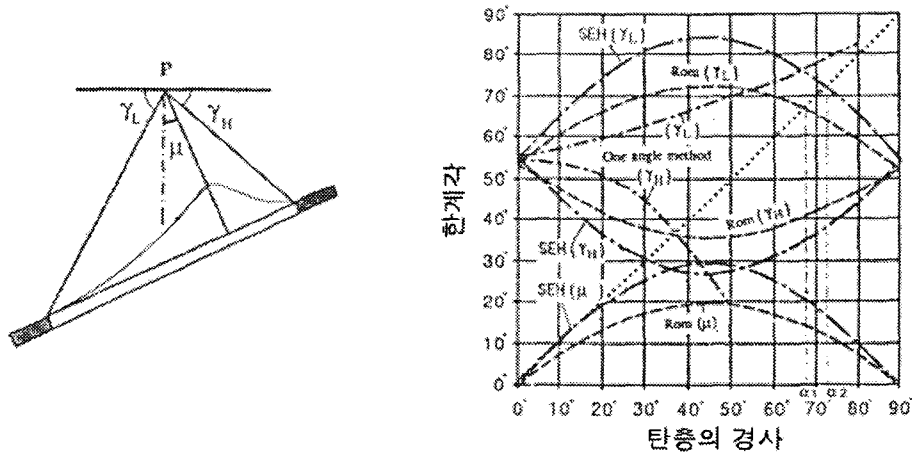
① 제안자 : 영국석탄공사

② 적용성 : 지하채굴에 의한 지표에서의 영향범위를 예측.

지상구조물에 영향을 미치는 채굴적의 범위 예측.

③ 주요인자 : 탄층경사, 한계각

④ 원리 : 경사진 판상의 탄층을 비교적 넓은 범위에 걸쳐 높은 채수율로 채굴한 경우, 채굴적 상부지층에 발생하는 지반거동의 영향범위는 채굴면적보다 더 넓은 범위에 걸쳐서 나타난다. 영향범위는 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 도식적으로 표현하여 예측할 수 있다. (한계각이란, 채굴적 선단과 침하지역 선단을 연결하는 선이 수직면과 이루는 각) 또한, 지표상에 한 지점이 주어질 때, 이 점에 대한 영향범위도 한계각에 의해 도식적으로 표현될 수 있으며, 이 범위내의 채굴적은 이 점에 영향을 미친다. Rom(1964), SEH(1975), Ren, Reddish & Whittaker(1988)은 현장에서 수집한 자료를 근거로 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 아래와 같이 제시하였다.



[그림 4.1] 지표상에 주어진 임의의 지점에 대한 탄층경사와 한계각

2) 응력아치-체적팽창 이론

① 제안자 : Piggott & Eynon(1977)이 Karfakis의 응력아치 이론을 지반침하에 적용.

② 적용 : 채굴적 상부지층이 암반으로 구성되어 있을 때 봉락대의 형상과 암층의 체적팽창률로부터 봉락고를 예측하는 방법.

③ 주요인자 : 체적팽창율, 봉락대의 모양

- ④ 원리 : 지하에 채굴공동이 생기면 채굴적의 상반은 응력해방 상태에 놓이게 되며 지층이 아래로 처지면서 붕괴된다. 붕괴는 자립 가능한 아치가 형성되면서 중지되거나 붕괴된 지층의 암편이 체적팽창을 일으켜 공동을 채울 때까지 상부로 진행된다. 이 과정에서 응력아치의 높이가 상반의 두께를 초과하거나 봉락고가 안정한 응력아치의 높이를 능가한다면 붕괴는 지표까지 진행되어 침하가 발생한다.

체적팽창율로부터 채굴고와 봉락고의 관계를 구하고, 이를 봉락대의 가하학적 형상에 따라 적용하면 봉락고를 예측할 수 있다.

3) 빔-기둥 이론

- ① 제안자 : Tang & Peng(1983)
- ② 적용 : 채굴적의 상반이 다층의 층상암반으로 구성되어 있을 때 각 지층사이의 분리현상에 의해 발생하는 침하 예측
- ③ 주요인자 : 단위중량, 변형계수
- ④ 원리 : 층상의 암반은 층 사이의 약한 결합력으로 자중에 의해서 각각 다른 휨 거동을 보인다. 여기에 빔 이론을 적용하여 휨변형량을 구한다.

4) 한계평형이론

- ① 제안자 : Brady & Brown(1985)이 Atkinson의 한계평형이론을 광산지역의 침하해석에 적용.
- ② 적용 : 지반을 강제 거동하는 블록모델로 사정하여 침하에 대한 안전율을 구하고, 한계심도를 결정하는데 적용.
- ③ 주요인자 : 내부마찰각, 점착력, 단위중량, 축압계수
- ④ 채굴공동 상반블록의 자중에 의한 연직 전단응력이 블록과 인접지반 사이의 경계면에 작용하는 전단강도를 초과하면 블록이 강제운동하여 채굴공동으로 함몰된다. 블록의 자중에 대한 연직 전단응력과 블록 표면에 작용하는 전단 저항력의 크기로 침하에 대한 안전율을 구한다.

5) 확률이론

- ① 제안자 : Goel & Page (1982)
- ② 적용 : 침하 발생 지역의 현장 자료들을 이용하여 유사한 지역에서의 침하 발생 가능성을 평가하는 방법
- ③ 원리 : 채굴적의 높이, 봉락고, 채굴적의 면적과 같은 변수들의 관계를 선형 관계식으로 정의하고 이 식을 이용하여 유사한 지역에서 침하발생 가능성을 분석하는 방법.

6) 침하이론의 한계

- ① 침하이론은 19세기 말부터 유럽등지에서 기본적인 개념정립이 시작되었으며, 연구사례는 지질구조가 단순하고 수평에 가까운 탄층을 장벽식 또는 주방식 채탄법을 적용하여 채굴한 지역에 집중되고 있다.

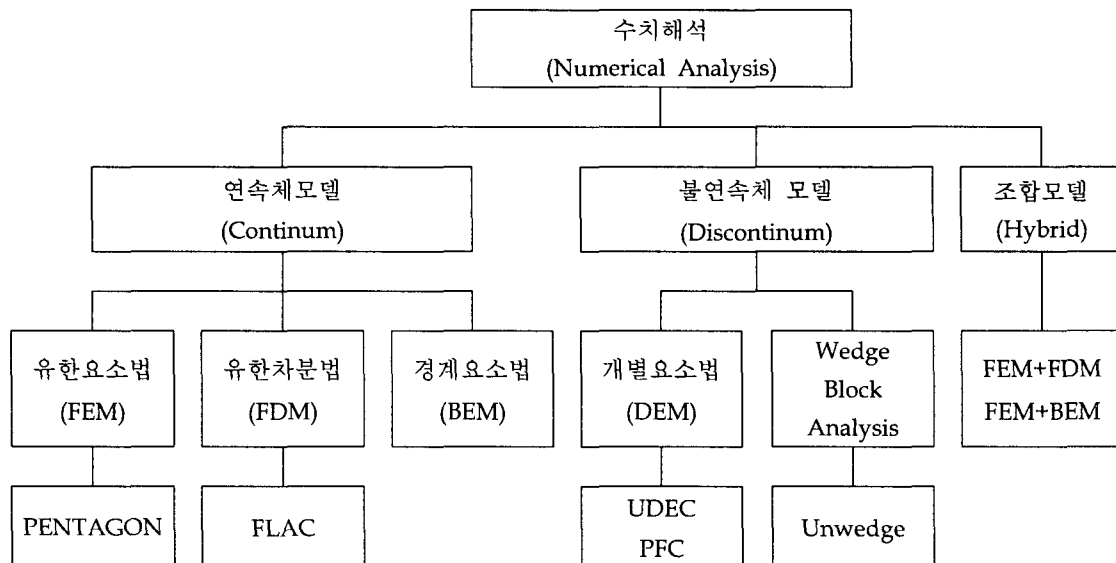
- ② 국내의 경우 탄층의 부존여건 및 채굴법이 외국의 경우와 큰 차이를 보이고 있어 기존의 이론을 그대로 적용하는 것은 한계가 있다.
- ③ 국내에서는 80년대 중반부터 기초적인 연구가 시작되어 현재로서는 국내 여건에 적합한 이론의 정립은 미미한 상태이다.
- ④ 따라서 기존의 이론을 적용할 때에는 신중을 기하여야 하며, 대상지역이 지반조건을 충분히 검토하고 가능한 이들 조건에 가장 근접하는 여러 이론들을 선택하여 적용하고 그 결과들을 비교·분석하는 것이 타당하다.

4.2 전산해석법

지반침하를 다루는 이론식들은 침하의 형식에 관계없이 일정한 규칙성을 전제하고 있기 때문에 불규칙한 채굴공동으로 인한 지표침하를 해석하는데는 한계를 가질 수 밖에 없다. 이러한 한계성을 극복하는데는 채굴 공동의 형상과 중간 지층 그리고 지표의 지형을 사실에 가깝게 제작할 수 있는 수치해석법이 유용한 도구일 수 있다. 수치해석으로 인하여 합리적인 설계자료를 구축하고 암반구조물의 거동을 추정할 수 있게 되었다.

1) 수치해석의 기법과 특징

수치해석 기법은 크게 연속체 모델과 불연속체 모델로 나누어지며 해석기법에 따른 특징은 다음과 같다.



[그림 4.2] 수치해석 방법

[표 4.1] 수치해석의 장점과 단점

구분	내용	장점	단점
유한요소법 (FEM)	· 요소의 기하학적 분할 · 미소변형을 전제로 평형방정식의 해를 구함	· 복잡한 지반 및 공동 특성 해석 가능 · 지반굴착에 따른 시간 영향 고려	· 대용량의 Memory가 필요 · 비선형 반복계산과정 필요
유한차분법 (FDM)	· 요소의 기하학적 분할 · Time step별 파괴모드 파악 · 비선형거동을 쉽게 모델링 가능	· 시간진행거동 해석이 용이 · 동적계산에 효과적 · 컴퓨터의 용량을 적게 차지	· 정적해석시 해석시간이 길다.
개별요소법 (DEM)	· 요소를 개별 Block으로 생성 · 지반거동은 Block 사이의 절리를 따르는 거동에 지배됨	· 절리도가 높은 모델에 효과적 · 컴퓨터 용량이 비교적 적음	· 위치, 방향, 강도특성 등 절리에 관한 입력 자료 입수가 어렵다.
경계요소법 (BEM)	· 굴착경계만으로 해석 영역 생성가능 · 편미분방정식이 적분으로 해석	· 입력과 출력이 간단 · 방정식 생성이 작음	· 시간 의존 특성 고려가 곤란하다.

2) 전산해석의 한계

- ① 전산해석은 채굴적 상황과 해석에 사용한 지반물성치에 따라 큰 차이가 발생할 수 있다.
- ② 지반물성치는 실내 및 현장에서 측정한 암석과 암반의 시험치를 주변지역의 물성치와 비교하여 결정한 값이므로, 특정 지점의 암반에 발달한 절리, 균열 등 불연속면의 영향과 암반의 불균질성, 이방성 등 암반고유의 특성에 기인하는 영향에 대한 검토가 결여될 수 있다.
- ③ 시간 경과에 따른 지반강도의 저하 및 지하수 유동에 따른 부분적인 함몰이나 채굴적 주변의 진행성 파괴를 반영하여 해석하기에는 한계가 있다.

4.3 GIS를 이용하는 방법

지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)이란 컴퓨터를 이용하여 지리자료의 수집, 저장, 분석 그리고 도시를 통하여 정보체계를 구축하는 것을 말한다. GIS의 활용범위는 토지정보체계, 도시 및 지역정보체계, 수치지도제작 및 지도정보체계, 도면자동화 및 시설물관리, 측량정보체계, 교통정보체계, 환경정보체계, 자원정보체계, 재해정보체계 그리고 지하정보체계 등 다양하다. 또한 지반침하, 산사태 등의 지질재해를 분석 및 예측할 수 있다.

GIS에서는 요인에 따라 위험도에 점수를 부여하고 이를 중첩하여 결론을 도출해내는 시스템으로 침하를 예상한다. GIS를 이용한 침하예측은 암질, 불연속면 등의 지질조건과 광산조건 등 여러 요인들을 적용할 수 있어 앞으로 활용 가능성이 크다고 할 수 있다.

4.4 계측자료를 이용한 평가

갑자기 발달하는 Sink-hole형 침하에 비해 trough형 침하는 완만한 지표침하곡선을 그리며 넓은 구역에 장기간에 걸쳐 발달하는 경향이 있다. 이러한 trouh형 침하는 지중변위의 장기적인 계측을 통해 예상이 가능하다. 채굴적의 상부로부터 침하가 시작되어 지표까지 침하가 발달하기 전에 지중변위를 계측하여 침하의 진행상황을 파악할 수 있다.

그러나, 폐광지역의 지중변위 계측은 심도가 깊다는 점, 지하수에 대한 영향 그리고 계측 기간이 매우 길다는 점에서 쉬운 일이 아니며, 이에 대응할 수 있는 계측기의 선정이 매우 중요하게 된다.