

석탄 채굴적에 의한 지반침하와 대책

Subsidence due to Coal Mining and Counter Measures

박남서¹⁾, Nam-Seo Park

¹⁾ 대덕공영주식회사 대표이사, President, Daeduk Consulting & Construction Co.

1. 서론

우리나라의 석탄산업은 80년대 중반까지 국민연료로서 중추적 역할을 담당해왔으며 80년대 후반부터 사양화되기 시작하여 현재는 많은 탄광들이 폐광되었다. 우리나라의 석탄개발은 과거 수십년간 국가 에너지 수급정책에 따라 생산에만 몰두하였으며 이 때문에 광산보안조치가 미흡하였고, 폐광 이후 발생할 문제에 대한 연구가 미흡하였다. 게다가 복잡한 지질 구조를 가지는 우리나라에서의 주된 채탄방식은 층진식이 아닌 봉락식 채탄법을 주로 사용하였기 때문에 지반침하 가능성이 높으며 국내 폐광지역에서 발생되고 있는 지반침하는 영국과 미국 지역에서 많이 나타나고 있는 트러프(trough)형 침하뿐만 아니라 함몰형 침하의 특성도 보이고 있어 일부 지역에서는 침하로 인한 피해가 나타나는 등의 지하 채굴공동에 의한 침하문제가 심각한 사회문제로 대두되고 있다.

이에 본 고에서는 석탄 채굴에 의하여 발생하는 일반적인 지반침하 현상에 대한 국내외의 연구동향과 석탄 채굴 방법을 살펴보고, 침하 현상의 발생 원인 및 특성을 고찰하며 또한 각 지반침하 현상에 대한 발생 예측 방법에 대하여 언급하고자 한다. 그리고 현재 국내외에 활용되고 있는 지반침하에 대한 지반조사 방법 및 보강 공법을 포함한 대책 마련에 대한 접근 방법에 대하여 고찰하고 최근 실시된 바 있는 고사리 지역에 대한 지반보강공사 설계 사례를 간단히 소개하며 현재 우리나라에서의 지반침하에 대한 대책 마련에 있어서의 문제점과 앞으로의 개선 방향에 대하여 간단히 기술하고자 한다.

2. 석탄 채굴에 의한 지반침하

일반적으로 지반침하는 지표면 한 지점의 수직 변위의 발생을 의미하나 수직 변위에 의한 인접 지점의 수평 변위까지 포함하기도 한다. 지반침하에는 토양층의 다짐작용에 의한 침하, 지하수위 하강에 의한 침하, 지하 석회공동 등의 용식에 의한 침하, 지진이나 화산 등의 지각 변동에 의한 침하와 터널, 광산, 지하 비축기지 등의 인위적인 지하공동에 의한 침하 등이 있다. 본 고에서는 탄광 개발에 의한 지반침하에 대하여 고찰하여 보기로 한다.

2.1 국내외 연구동향

침하에 대한 연구는 주로 유럽과 미국 등지에서 행하여져 왔는데, 과거의 연구동향은 침하이론을 바탕으로 한 이론적 연구와 이를 응용한 수치해석적 연구, 그리고 지표침하 징후를 측정하여 주로 지하구

조물체의 영향 및 침하한계를 규정하는 것이다. 19세기 말부터 시작된 지반침하 연구는 유럽의 영국, 프랑스, 네덜란드 등지에서 자료수집 및 분석, 그리고 기본적인 측정 등을 통하여 개념의 정립이 이루어지기 시작했다.

영국에서는 NCB(National Coal Board, 현재의 British Coal)를 중심으로 연구가 진행되었다. NCB에서는 지반침하 사례에 대한 자료수집을 바탕으로 기존 침하이론을 수정, 보완하였으며 연구 결과는 1965년에 초판, 그리고 1975년에 2판이 발행된 SEH(Subsidence Engineers' Handbook)에 잘 정리되어있다.

미국의 침하연구는 1977년도에 발표된 "Surface Mining Control and Reclamation Act"에 의하여 한층 활발해졌다. 1982년도에 West Virginia의 Morgan town에서 개최된 침하 workshop에서는 침하예측부문, 침하계측부문, 침하특성을 고려한 계측 및 예측부문, 지반구조물에 미치는 영향평가 및 대책수립부문 등으로 나누어 다각적인 연구결과가 발표되었다.

반면 국내에서는 폐탄광에 의한 지반침하에 대한 체계적인 조사는 없었고 단지 김동기(1966), 김재근 외(1969)에 의하여 지반침하에 대한 연구가 시도되었으며, 그 이후 이희근 외(1983), 권광수 외(1994) 등에 의하여 연구가 진행되어왔으나 특정 사례 중심의 연구에 그쳤다. 그 이후 석탄산업합리화사업단(1995, 1997)에 의하여 지반침하에 대한 체계적인 연구가 이루어진 바 있으며 그 외에 각 침하 우려 지역에 대한 개별적인 연구가 석탄산업합리화사업단에 의하여 진행되어 오고 있다.

2.2 광산채굴법

침하의 발생요인 중 가장 큰 요인으로 작용하는 채굴공동은 그 크기와 모양에 따라 침하에 미치는 영향이 달라지고, 채굴공동 상반의 상태에 따라서도 침하에 미치는 영향이 달라진다. 채굴공동의 크기와 모양은 채탄법과 채굴정도에 따라 달라지며 이들과 채굴적 주위 지질조건과의 상호작용이 침하에 큰 영향을 미치게 된다.

일반적으로 주방식 채탄법과 같이 낮은 채광율의 부분 채탄법을 사용한 경우에는 광주의 파괴나 천반의 붕괴 등 여러 가지 요인에 의하여 침하가 발생되기까지는 오랜 시일이 걸리지만 채광율이 높은 채탄법을 사용할 경우에는 채광율이 낮은 채탄법을 적용한 경우보다 짧은 기간안에 침하가 발생할 가능성이 크다.

각 채탄법의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 장벽식 채탄법(Longwall mining method)

장벽식 채탄법은 비교적 탄층이 크고 평탄하며 두께가 일정한 경우에 적용된다. 장벽식 채탄법이 적용될 수 있는 탄층의 조건은 탄층의 폭이 0.6~2.5m, 경사가 30° 이하의 완경사탄층으로서 채굴심도에는 제한이 없다. 따라서 우리 나라와 같이 탄층의 폭과 연장성이 불규칙하거나 경사가 급한 곳에서는 적용되지 못한다. 이 채탄법의 특징은 작업면이 직선이거나 또는 계단식으로 연속되어 있다는 것과 채굴적의 상반이 균형적으로 고르게 낙하한다는 점이다.

일반적으로 탄층이 지표로부터 적당한 깊이에 있으며 상반이 강하고 강성이 클 때 석탄을 채굴하면 상반이 서서히 균일하게 침하되며 장벽식 채탄법이 적용되는 경우, 침하가 발생할 경우의 규모와 기간 등을 비교적 정확하게 예측할 수 있으므로 방지대책을 수립하여 지상구조물에 대한 피해를 줄일 수 있다. 본 채탄법이 적용되는 경우에는 주로 채굴적 상반의 휨 작용에 의한 인장균열이 발생하며 트리프형 침하가 발생된다(그림 2.1. 참조).

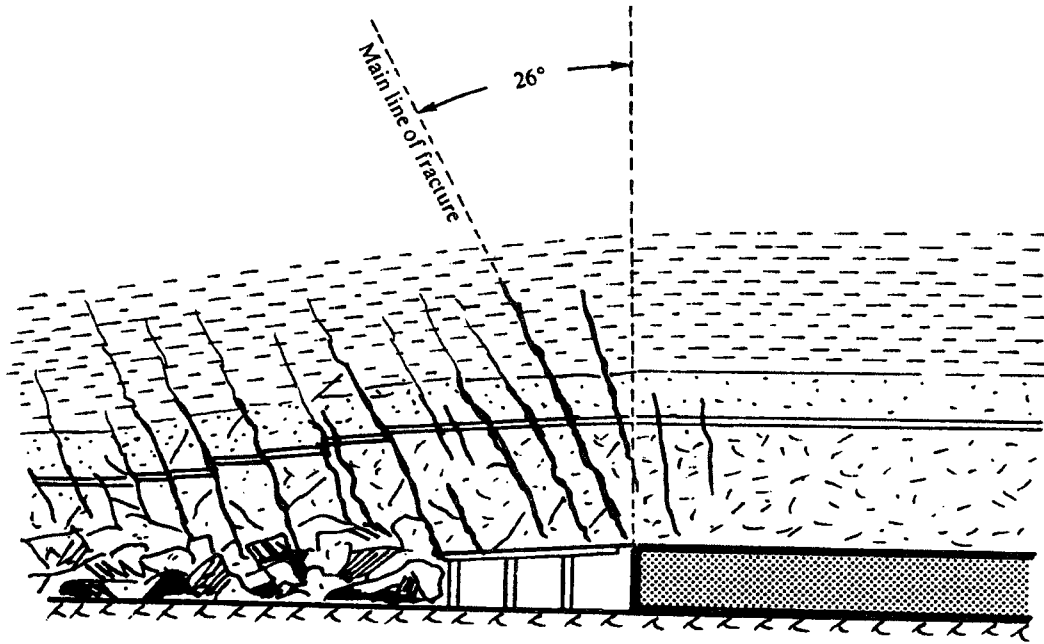


그림 2.1. 장벽식 채탄법 개념도 (Whittaker & Reddish, 1989)

2.2.2 톱슬라이싱 채탄법(Top slicing method)

톱슬라이싱 채탄법은 다양한 형태의 탄층에서 적용이 가능하고 석탄을 효과적으로 채탄할 수 있는 방법이다. 상하부 갱도를 하반 암석층에서 암석승(rock raise)으로 관통하여 3~5개 정도의 중단 cross갱도와 중단 연층갱도를 개발한 후, 탄승을 50m이상 간격으로 굴상 또는 굴하하여 분층 채탄한다(그림 2.2. 참조).

채광이 끝난 후에 발생하는 침하의 형태는 국부적으로 변형이 집중되므로써 상반쪽의 지표에 인장균열이 발생되어 지표에서부터 상반이 점진적으로 함몰이 발생된다. 두꺼운 탄층을 대상으로 채탄이 이루어진 경우, 지표함몰로 생긴 웅덩이가 인공호수를 형성하기도 하고 하부층 개발에 피해를 줄 수 있다.

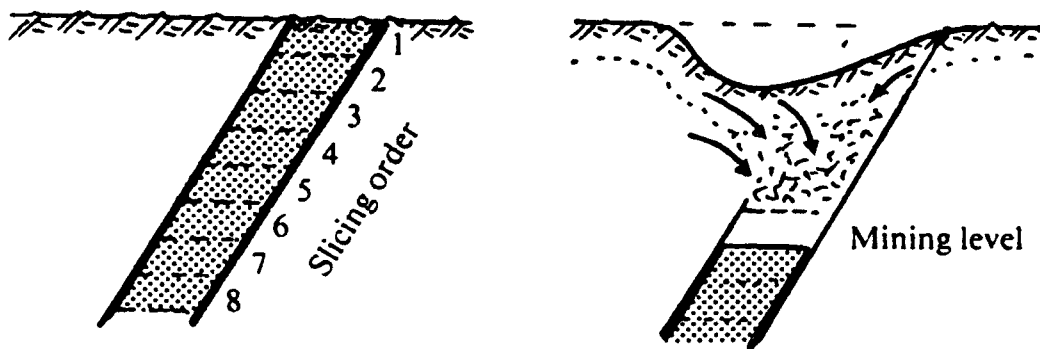


그림 2.2. 톱슬라이싱 채탄법 개념도 (Whittaker & Reddish, 1989)

2.2.3 중단봉락식 채탄법(Sub-level caving method)

중단봉락식 채탄법은 상하부 갱도를 하반 암석중에서 암석층으로 관통하여 3~5개 정도의 중단 cross 갱도와 중단 연층갱도를 개발한 후, 막장에서부터 후퇴하면서 caving하는 방법이다.

붕괴를 유발시켜 채탄하는 채탄법으로 인하여 암반에도 영향을 미치기 때문에 채굴적 상반의 붕괴를 가져오게 된다. 상반의 강도가 클 경우에도 지표에 계단식의 함몰이 발생되며 보안탄주를 남겼다 하더라도 트리프형 침하가 발생되거나 보안탄주의 붕괴나 지하수 및 지표수의 유입으로 인하여 함몰형 침하가 발생할 수 있다(그림 2.3. 참조).

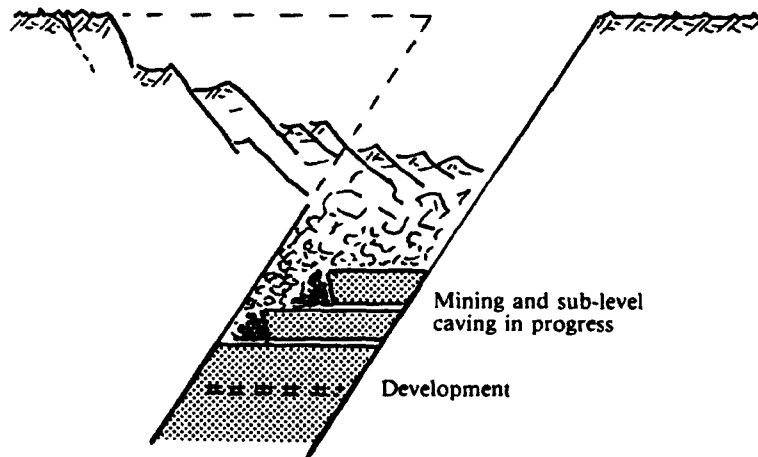


그림 2.3. 중단봉락식 채탄법의 개념도 (Whittaker & Reddish, 1989)

2.2.4 블록케이빙 채탄법(Block caving method)

연약한 광체를 발파와 같은 방식을 통하여 붕락시키는 방법으로 연약 광체가 형성하게 될 블록의 붕락을 조절하므로써 붕락범위를 조절한다. 지표함몰은 광체와 상반의 강도, 단층과 같은 중요한 지질구조에 영향을 받는다. 또한 채광심도와 붕락지역의 채광후 뒷채움 및 지표의 지형에도 영향을 받는다. 블록케이빙 채탄법으로 채탄한 경우 함몰형 침하가 주로 발생된다(그림 2.4. 참조).

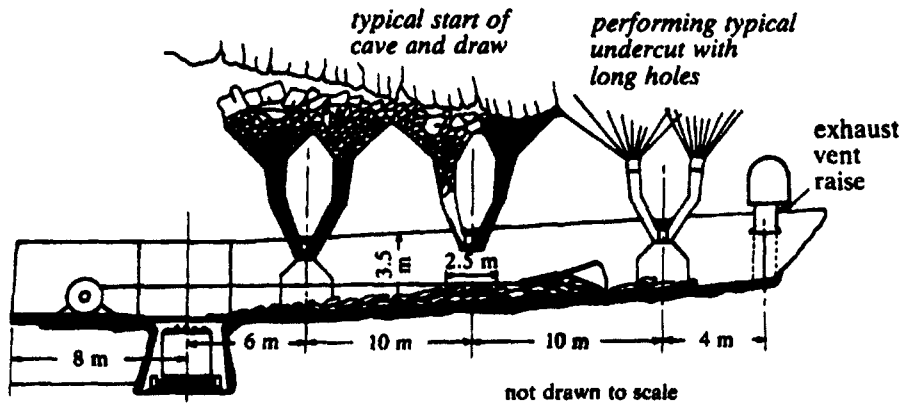


그림 2.4. 블록케이빙 채탄법의 개념도 (Brady & Brown, 1985)

2.2.5 주방식 채탄법(Room and pillar mining method)

가장 오래된 채탄법으로서 국내에서 일부 적용되는 채탄법이다. 주방식 채탄법은 잔주식 채탄법이라고도 하며 탄층의 두께가 1m 이상만 되면 어떠한 탄층에든지 적용할 수 있다. 장벽식 채탄법에 비해 지주재가 많이 필요하고 통기가 불완전하며 일인당 작업량이 적다. 일반적으로 지표침하를 방지하는 경우와 충전물을 구하기 곤란한 경우 주로 적용한다. 주방식 채탄법은 적용범위가 넓어 탄층의 두께나 경사의 완급, 상하반의 형태에 관계없이 적용될 수 있다.

이 채탄법으로 유발되는 침하는 붕괴의 원인에 따라서 트러프형 침하와 함몰형 침하가 나타날 수 있다. 광주가 붕괴되지 않고 방과 방 사이의 십자형 교차지점에서 붕괴가 발생하여 지표에까지 진전되면 함몰형 침하가 발생하고 광주가 약화되어 전부 또는 일부분 파괴가 일어나거나 광주와 직접 접하고 있는 천정부나 바닥부에서 파괴가 발생하면 지표의 넓은 지역에 완만한 형태의 트러프형 침하를 발생시킨다(그림 2.5. 참조).

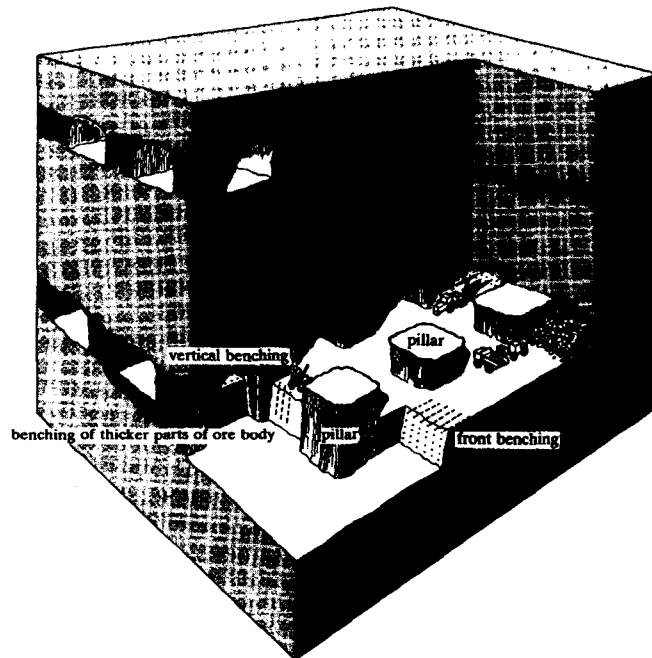


그림 2.5. 주방식 채탄법 개념도 (Brady & Brown, 1985)

2.2.6 위경사승 봉락식 채탄법(Slant chute block caving method)

국내 탄층은 석탄의 부존상태가 매우 불규칙하여 탄전별, 탄광별은 물론 동일 탄광 내에서도 위치에 따라 여러 가지 많은 변화가 있다. 이런 이유로 30여년 이상 블록케이빙법과 유사한 위경사승 봉락식 채탄법이 많은 탄광에 적용되어 왔다(그림 2.6. 참조).

이 채탄법의 장점은 채탄작업장의 개설에 특별한 준비가 소요되지 않고 작업이 용이하며, 막장의 석탄운반이 중력으로 가능하며, 채탄에 필요한 시설장비에 대한 투자비가 거의 없기 때문에 신규개발 탄광에서 유리하게 적용될 수 있다는 점을 들 수 있다.

그러나 본 채탄법이 적용될 경우, 탄승경도의 연장이 길고, 탄층 상·하반의 굴곡, 탄중협석 및 탄폭의 변화로 탄승의 직선화가 곤란하다. 또한 후퇴 caving시 탄의 강도 또는 파쇄된 암석의 영향으로 caving작업을 할 수 없어 탄을 남기게 됨에 따라 채취율이 저하되고 채수율이 현저히 낮은 경우에는 재채굴이 불가피하며 이 또한 비능률의 주요 요인이 되고 있다. 현재 채취율은 약 70% 정도로 보고 있으나, 이는 재채굴이 포함되어 있는 수치이며, 순수한 1차 채굴의 채취율은 40~50% 정도로 추산된다.

채탄으로 인해 생긴 채굴적은 매우 불규칙하고 급경사 탄층의 경우, 보안탄주나 천반 등이 장기간에 걸쳐 풍화 또는 크립 현상(creep) 등에 의해 강도가 저하, 파괴되면서 함몰형 침하가 발생된다.

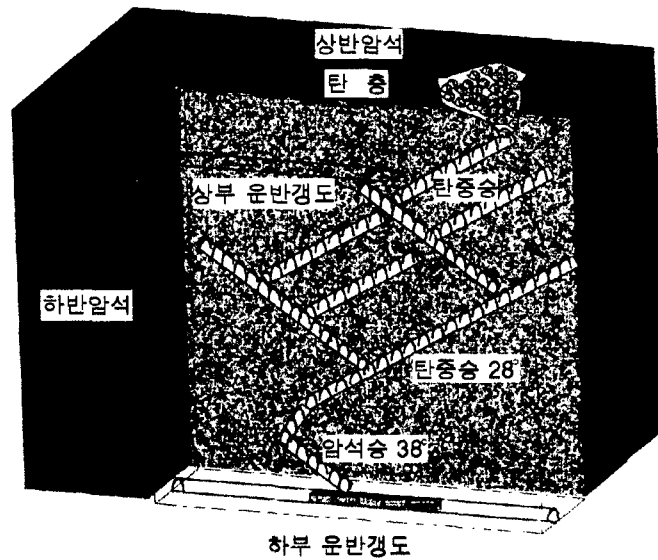


그림 2.6. 위경사송 봉락식 채탄법의 개념도

2.3 지반침하의 유형

지반침하의 분류에는 크게 시간에 따라 활동성 침하 (active subsidence)와 잔류성 침하 (residual subsidence)로 구분할 수 있으며, 형태에 따라서 연속형 침하(continuous subsidence)와 불연속형 침하 (discontinuous subsidence)의 형태로 분류할 수 있다.

표 2.1. 지반침하의 분류

분류방식	침하 유형	침하의 성격	비 고
발생시기에 따른 분류	1) 활동성 침하 (Active subsidence)	• 채굴작업과 거의 동시에 침하현상이 발생하는 유형	• 채수율이 높은 채굴법으로 비교적 얇은 심도에서 채굴시 발생
	2) 잔류성 침하 (Residual subsidence)	• 채굴작업 종료후 일정시간 경과후 침하현상 발생 • 부분적인 채굴에서는 몇 십년이 지연되기도 함	• 이하 본문에서 언급하는 침하란 “잔류성 침하”를 의미함
침하형태에 따른 분류	1) 연속형 침하 (Continuous subsidence, 트러프형 침하)	• 대체로 넓은 지역에 걸쳐 완만한 경사로 지표가 전반적으로 Tilting하거나 타원형으로 침하하는 현상	• 침하과정의 초기 혹은 오랜 시간에 걸쳐 조금씩 잘 인식되어지지 않을 만큼의 침하량을 보이는 경우도 있음
	2) 불연속형 침하 (Discontinuous subsidence, 함몰형 침하)	• 국부적으로 급경사를 이루며, 지표가 함몰하는 형태로 침하가 발생하는 유형	• 인명이나 지표시설물에 심각한 손상을 초래할 수 있고 발생시기에 대한 예측도 어려운 침하의 형태임

국내에서 발생하는 침하는 거의 대부분 잔류성 침하이며 여기에서는 잔류성 침하만을 고려하기로 한다. 다음 표 2.2는 미국 Pittsburg 탄광지역의 침하사례 조사결과를 중심으로 하여 트리프형 침하와 함몰형 침하를 비교 분석한 결과이다.

표 2.2. 침하 유형별 특성 (Bruhn, et al., 1978)

구 분	트리프형 침하	함몰형 침하
경 사	대체로 완만	급 경 사
범위 (규모)	대체로 넓은구역 (최소 10m 이상)	대체로 작은규모 (3m 내외)
침 하 량	최대 침하량 1m 정도	수 m~수 10m
발생속도	서서히 발생	갑자기 발생
형 태	타원형, Tilting, 접시형태	원통형 혹은 원추형
발생시기	얕은 심도, 완전채굴 ⇒ 채굴 초기에 발생 깊은 심도, 불규칙 채굴 ⇒ 장기간에 걸쳐 발생	예측 곤란 (대체로 채굴후 10년 이내~100년 경과후에도 발생)
발생원인	잔주파괴와 잔주편칭 등에 의함	채굴적 천정부의 파괴 (채굴폭, 채굴심도, Bulking과 전이 작용에 의해 발생함)
채굴심도	다양한 심도에서 발생	대체로 50m 미만에서 발생
피해(위험성)	지상구조물에 피해 가능	인명 및 시설물에 심각한 타격을 줌

2.3.1 트리프형 침하

일반적으로 파괴 및 붕괴는 석탄이 채굴된 채굴공동 주위의 응력상태가 공동의 천정, 바닥, 광주나 파쇄대의 강도를 초과하므로써 발생한다. 즉 상부에서 작용하는 응력이 천반 또는 광주(pillar)의 지반강도보다 크지 않을 경우 파괴가 일어나지 않으나 굴착후 시간의 경과에 따라 지반강도 감소, 지반의 creep 변형, 침투수압에 의한 전이, 지하수에 의한 지반강도 감소 등 여러 가지 요인에 의하여 파괴에 이르게 된다.

(1) 광주의 파괴

시간의 경과에 따라 광주의 강도가 작아지거나 지표구조물의 하중이 광주에 부과되어 광주의 파괴가 일어난다. 하나의 광주가 붕괴되면 주위 광주에 하중이 집중하게 되고 이로 인해 연속적인 붕괴현상이 생기게 된다. 연속적인 광주의 붕괴와 응력 재분배 현상은 채굴공동의 상반이 전단파괴나 휨 변형에 의한 붕괴가 발생될 때까지 계속된다. 대규모로 광주가 붕괴되면 넓은 지역에 걸쳐 트리프형 침하가 발생하게 된다. 천부의 폐광에서 장기간 방치된 광주가 붕괴되면서 마치 crown hole 형태와 유사한 지표침하 양상을 보이기도 한다.

광주의 파괴는 광주의 폭과 밀접한 관계가 있다. 폭이 좁은 광주는 응력집중이나 풍화작용으로 인해서 장기간에 걸쳐 쪼개짐이 발생되고 결국 붕괴된다. 풍화작용은 상대습도의 변화, 지하수의 유입과 건조작용 등에 의해 발생이 된다. 지하수위 하부에 위치한 폐광에서는 이와 같은 현상이 더욱 가속화되어 광주의 파괴를 유발시키게 된다.

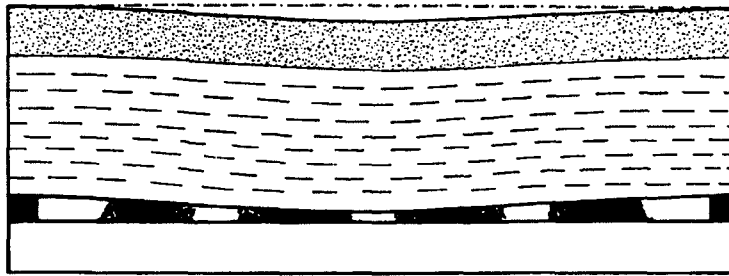


그림 2.7. 광주 파괴 모식도 (Whittaker & Reddish, 1989)

(2) 광주의 편칭현상(pillar punching)

편칭현상이란 채굴적 바닥의 지지력이 상실되어 채굴적 바닥이 광주의 하부로부터 채굴적 내부로 밀려올라오는 현상을 말한다. 일반적으로 바닥이 점토암(claystone)이나 이암(mudstone) 등으로 구성되고 광주의 큰 응력이 바닥에 작용할 때 발생한다. 지하수의 유입은 암반내의 지하수위와 암반내 공극수압을 변화시켜 유효응력의 변화를 가져온다. 이러한 지하수의 유입은 암반의 상대적인 강도를 현저하게 저하시켜 편칭현상의 원인이 되기도 한다. 광주의 편칭현상은 광주의 붕괴로 발생하는 침하면적에 비해 상당히 넓은 지역에 걸쳐 침하를 발생시키고 바닥의 연약 정도에 따라서 그 범위가 확장된다.

지하공동에서의 습기는 단시간 혹은 장기간에 걸쳐 암석의 강도와 변형특성(deformability)을 변화시키게 되며, 지질구조적 취약부인 단층 파쇄대에서의 지하수의 역할은 지반의 강도저하를 일으키기 쉬운 요인으로 작용한다.

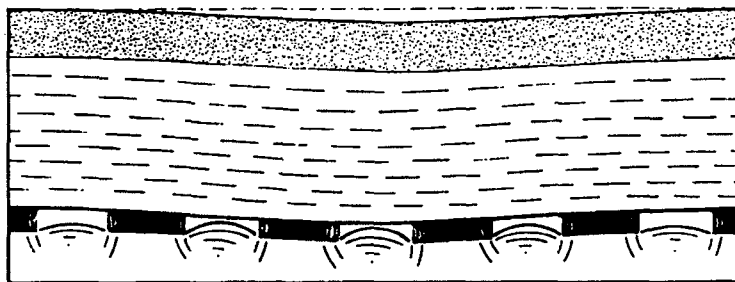


그림 2.8. 광주의 편칭 현상 모식도 (Whittaker & Reddish, 1989)

(3) 천반의 파괴(roof failure)

광주의 파괴나 편칭현상이 일어나지 않더라도 채굴적의 천반이나 상반이 파괴됨으로써 침하가 발생할 수 있다. 채굴적의 천반이나 상반에서 파괴가 발생하면 자체 지지력을 가지는 아치효과가 나타날 때까지 점진적으로 파괴가 진행되거나 파쇄된 암석들이 체적팽창을 일으켜 채굴적을 모두 채워 상부의 암석들을 지지할 때까지 붕괴가 계속된다.

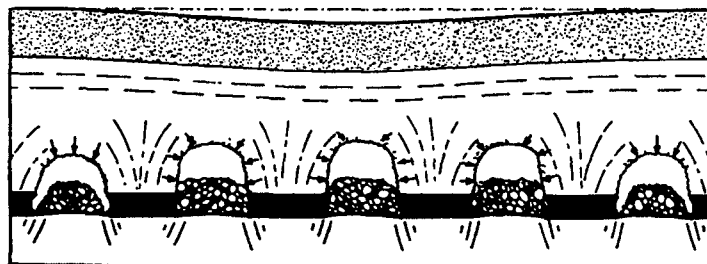


그림 2.9. 천반 파괴의 전이에 의한 지반침하 (Whittaker & Reddish, 1989)

2.3.2 함몰형 침하

좁은 지역에 국한되어 큰 수직 변위가 발생하는 경우이다. 이러한 형태의 침하는 대부분의 채굴법 적용 지역에 발생되며 일반적으로 채굴적 심도 90m 이내에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Karfakis, 1993).

함몰형 침하는 주로 천단부의 안정성에 연관되어 있으며 파괴의 진행과정을 살펴보면 최초의 천정부 파괴가 일어난 후 붕괴는 점점 상부로 진행되다가 자립이 가능한 견고한 지층을 만나 중단될 수 있으며 파쇄된 암편들의 체적팽창에 의해 중단되기도 하나 지하수의 유동 등에 의한 암편의 다짐작용 또는 채굴적이 경사져있는 경우, 경사진 채굴적을 따른 암편의 이동으로 공간이 확대되면 붕괴는 점진적으로 지표로 연결되기도 한다. 아래 그림은 지하채굴적의 상부로의 전이 과정을 보인다.

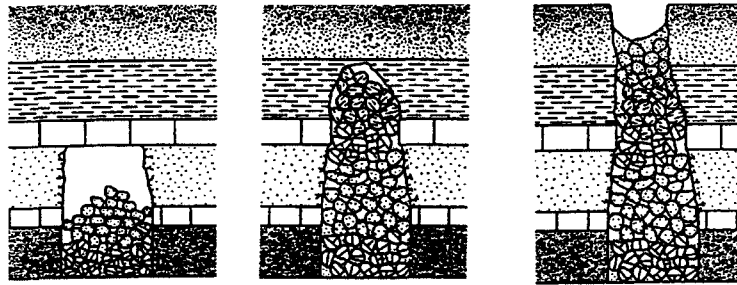


그림 2.10. 함몰형 침하 발생 모식도 (Karfakis, 1993)

(1) 침하의 유형 (Brady & Brown, 1985)

㉠ Crown hole

Crown hole은 얇은 심도(심도 50m 이내)에서 광산의 천반이 붕괴됨으로 발생하는 함몰형 침하의 특별한 경우에 해당하며 일반적으로 채굴적 상반의 두께에 의해서 제한을 받는다. 영국 미들랜드의 석회암 광산에서는 전체 침하발생의 2/3가 30m 내의 심도에서 crown hole형 침하가 발생하였다. 미국에서 15m보다 낮은 심도에서는 대부분 crown hole형 침하가 발생하였다.

㉡ Chimney caving

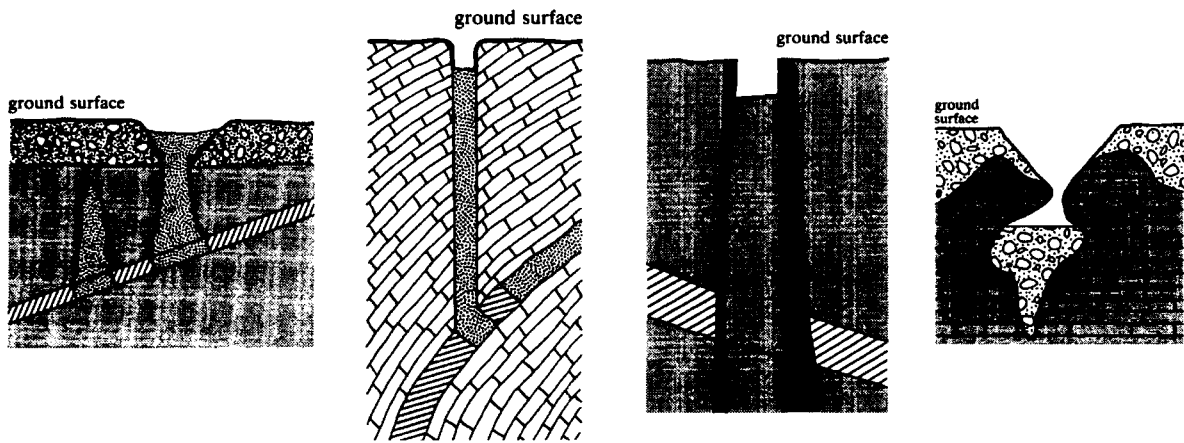
Piping 또는 funnelling이라고 하기도 하며 절리가 발달된 상반 또는 연약한 상반이 점진적으로 이완되면서 형성된 공동이 지표까지 전이되면서 나타나는 침하의 형태로 지표에 발생된 침하의 면적은 매우 작다. 상반이 약하거나 절리가 연속적으로 상부와 연결될 경우 심도가 수백 미터에 이르더라도 전이가 될 수 있다.

㉢ Plug형 침하

암맥(dyke)나 단층(fault)과 같이 거의 수직인 지질구조에 의해 이루어지는 전단강도가 작은 면을 따라 자중의 영향으로 미끄러짐이 발생하는 경우이다. 이러한 경우 지표면에서의 함몰은 매우 갑작스럽게 나타난다. Plug형 침하의 발생 메카니즘은 다른 함몰형 침하의 발생 메카니즘과 다르고 침하에 따른 암석의 체적팽창이 없이 발생되어 붕락고가 매우 크며 채굴적에서의 침하량과 지표에서 침하량은 비슷하고 파단각은 거의 90° 에 이른다. Plug형 침하는 기존에 침하가 발생되어 파괴면이 생긴 지역에서 다시 발생되기도 한다.

㉣ Solution caving

특히 석회암 지대와 같은 지역에서 지하수의 용식 작용에 의하여 공동이 형성되는 경우에 발생한다.



① Crown hole ② Chimney caving ③ Plug형 침하 ④ Solution caving

그림 2.11. 함몰형 침하 모식도 (Brady & Brown, 1985)



그림 2.12. 하부 채굴적에 의한 함몰형 침하가 발생하는 현상 (강원도 삼척 지역)

(2) 발생 경향

함몰형 침하하는 트리프형 침하에 비해 여러 원인이 복합적으로 작용하며 불연속적으로 발생하므로 발생 경향에 대한 명확한 이론적 배경이 정립되지 못한 상황이다. 각국에서 조사한 침하 사례로부터 함몰형 침하의 발생경향을 살펴보면 다음과 같다(석탄산업합리화사업단, 1997).

㉠ 미국 펜실베이니아의 피츠버그 탄층에서 발생한 354건의 함몰형 침하사례

- 함몰형 침하하는 주로 상반의 두께가 50m보다 작은 경우에 발생하였고 15m보다 작은 심도에서 대부분의 함몰형 침하가 발생하였다.
- 함몰형 침하의 대부분은 평균 3m 이내의 지름으로 함몰되었고 몇몇 소수의 경우는 지름이 10m에 이르기도 한다. 함몰의 중심부에서 함몰된 깊이는 일반적으로 6m를 넘지 않는다.
- 함몰형 침하하는 탄층의 노두를 따라 주로 발생하였고 조사된 침하사례의 70% 이상이 노두로부터 150m 이내에서 발생하였다.
- 폐광후 침하의 발생시기를 살펴보면 일부는 가행을 중지한지 10년 이내에 침하가 발생하였고 소수의 경우 100년이 지난 후에도 침하가 발생하였으나 60% 이상은 50년 이내에 발생하였다.

㉡ 일본 九州지역의 함몰형 침하 발생사례

- 침하발생 사례를 월별 발생회수로 정리하면 5~9월 우기에 전체 침하발생사례의 70%가 발생하였다. 강우는 지반의 단위체적중량을 증가시키고 지하수위를 상승시킨다. 또한 간극수압을 발생시키고 지반의 전단저항을 감소시켜 지반의 강도를 저하시키는 기본적인 요인이 된다.
- 함몰형 침하하는 공동의 심도와 관계가 있다. 함몰 사례 중 채굴공동의 심도가 10~15m 사이인 경우가 전체 사례의 반에 이르며 공동심도가 5~20m인 경우는 전체 사례의 약 90%를 차지한다. 함몰형 침하가 발생하는 심도는 채굴적이 위치한 층의 형태와 특징에 따라 달라지게 된다.
- 오랜 시간이 지난후 지보의 풍화와 지하수나 지표수에 의한 지반의 강도저하로 인해 침하가 발생하기도 한다. 폐광후 침하발생시기를 살펴보면 함몰은 50년이 지난 후에도 발생하였으나 발생사례의 약 90%는 50년 이내에 발생하였다. 또한 10년 이내에 절반에 가까운 44%의 침하발생사례가 발생하였다.

㉢ 미국 일리노이 광산에서의 침하 현상

- 조사대상 지역은 비교적 천부광산으로 심도가 30~70m이고 주방식채광법을 사용했고 채굴적의 두께는 2~3m이다. 천장부가 파괴되거나 광주의 파괴 또는 바닥부에서 광주의 편칭현상으로 침하가 일어났다. 바닥이 연약한 지반인 경우에는 주로 광주의 붕괴와 편칭현상이 복합적으로 나타났다.
- 함몰형 침하의 지름은 0.6~10m이고 지표로부터 붕괴된 지표면까지 깊이는 0.6~6m에 이른다.

㉣ 영국 West Midland 석회암 지대에서 함몰형 침하

- 31개 광산 중 18개의 광산에서 침하가 발생하였고 침하면적의 총합은 채굴지역의 5%에 이른다. 1983년 4월까지 석회암 지대에서의 채광에 기인하는 침하가 100여 개 발생하였다. 침하발생 장소는 3군데를 제외한 나머지 전부는 비교적 좁은 범위에서 침하가 발생하는 crown hole형 침하의 형태를 띠었다.
- 폐광된 광산의 채굴적이 클수록 지표침하가 발생하는 횟수가 크다. 폐광된 광산의 단면적과 지표침

하의 횡수 사이에는 일정한 관계를 보이는데 마지막 광산이 폐광된 1935년 이후로는 15년에 한번씩의 비율로 침하가 발생하고 있다.

- Crown hole에 의해 영향받는 면적은 Walsall Borough에서는 10년마다 100m², Dudley에서는 10년마다 400m²에 이른다.
- 폐광 후 30년 이내에 가장 많은 횡수의 침하가 발생하며 일반적으로 폐광한지 50년 이내에 함몰 침하가 발생한다. 그러나 드물지만 100년이 지난 후에도 발생하는 경우도 있다.

㉔ 국내 폐탄광 지역에서의 함몰형 침하

- 강원도 정선군 사북읍 지역 : 평균 탄폭은 약 2m이며, 습곡과 단층에 의한 부광대가 10m정도이고 채탄법은 위경사승 봉락식 채탄법과 중단봉락식 채탄법의 적용되었다. 채탄에 의해서 탄층 상반의 사암 및 함백산층 사암이 부분적으로 봉락되었다(탄층 상부까지 약 50~80m정도에 해당하는 화질령 동부 1200ML 지역).
- 강원도 정선군 두문동 지역 : 평균 탄폭은 2~5m 정도로서 지질구조에 의해 부광대와 빈광대가 반복되고 채탄법은 위경사승 봉락식 채탄법을 사용했다. 1991년 38번 국도 확포장 당시 탄층 노두 연장선에서 4~5m 채굴적에 의한 함몰형 침하가 발생되었다. 도로상의 탄층 노두 연장선상에서 10~20cm 정도의 완만한 침하 굴곡이 2개소 관찰되었다.
- 화순지역 : 주가행 탄층의 탄폭이 3m 이상이고, 경사는 50~60° 정도이며 채탄법은 위경사승 봉락식 채탄법을 사용했다(남강 북동구의 십천지구와 성덕 동부지구). 채탄심도가 십천지구는 5~25m, 성덕 동부지구는 70~75m로 1970년경부터 채굴로 인한 지표균열과 침하현상이 발생됨에 따라 대한석탄공사에서 토지를 모두 매입하여 관리를 하고 있다.
- 강원도 정성군 구질리 지역 : 정확한 채굴적의 규모가 확인되지 않은 가무사갱 부근 지역에서는 직경이 6m, 심도가 2m인 큰 규모의 함몰적이 관찰되었다. 궁대갱 부근 철로변에서 석회암층 공동현상에 의한 소규모 지표함몰 2개소(지름 30cm)가 발생하였고 향후 우기에는 주의를 요한다. 인근의 침하때문에 광업소 사택이 철거되고 폐석으로 충전되었다.
- 충남 보령시 성주 지역 : 지질구조적으로 지층과 탄층의 경사가 70° 이상의 급경사 지역으로 채탄법은 위경사승 봉락식 채탄법을 사용했고 산악지역에 지하 채탄공동으로 생긴 함몰 지역이 3개소 관찰되었다.
- 강원도 삼척시 고사리 지역 : 지질구조적으로 남동방향으로 경사하는 중부배사의 축부를 따라 부광대가 형성되어 있으며 현재 계속적인 트리프형 침하 및 함몰형 침하가 발생하고 있다. 현재 지반보강 공사가 진행중이다.

2.4 지반침하에 의한 피해

일반적으로 트리프형 침하는 넓은 지역에 걸쳐 완만한 경사로 지표가 전반적으로 tilting하거나 타원형으로 침하하므로 전반적으로 완경사를 이루며 함몰하는 형태이다. 침하 영향권의 가장자리에서는 tilting으로 인한 지상 구조물의 피해가 발생할 수 있다. 전반적으로 함몰형 침하에 비하여 비교적 피해가 적다고 볼 수 있다.

이에 반하여 함몰형 침하는 침하 발생에 대한 예측이 어렵고, 그 발생 또한 불규칙할 뿐만 아니라 국부적으로 급경사를 형성하며 폐광 이후 장기간에 걸쳐 발생되기 때문에 트리프형 침하에 비하여 그 피해 정도가 더 크다고 볼 수 있다.

NCB는 지반침하에 의한 피해 정도를 손상등급으로 평가할 수 있도록 연구한 바 있으며 다음 표 2.3은 NCB(1975)에 의한 구조물의 손상등급의 분류를 보인다.

표 2.3. 지반침하에 따른 구조물의 변위와 손상 분류(NCB, 1975)

구조물의 수평 변위량 (linear change, cm)	손상등급	구조물의 손상 상태
< 3	I (Very Slight)	<ul style="list-style-type: none"> · 벽체에 미세균열(hair crack) 발생 · 고립된 실균열(slight fracture) 발생
3~6	II (Slight)	<ul style="list-style-type: none"> · 여러 개의 실균열이 내부에서 관찰됨 · 문 또는 창문이 약간 튀어 나와 있음 · 실내 장식물에 대한 보수가 필요한 정도
6~12	III (Appreciable)	<ul style="list-style-type: none"> · 실균열 또는 주균열(main fracture)이 구조물 외부에서 관찰됨 · 창문등이 튀어나오고 가스, 수도관 등 파열
12~18	IV (Severe)	<ul style="list-style-type: none"> · 파이프류가 교란됨 · 공기가 드나드는 큰 균열(open fracture) 발생 · 창문과 문의 틀이 비틀어짐 · 마루 바닥이 눈에 띄게 경사짐 · 철골 건물의 경우, 들보의 베어링이 빠짐 · 압축에 의한 손상일 경우, 천장 조인트가 서로 겹쳐졌거나 벽돌 구조물에 수평 균열이 생겨 위로 들려짐
> 18	V (Very Severe)	<ul style="list-style-type: none"> · IV와 같거나 더 심각 · 부분적 또는 전반적인 재건축이 필요 · 철골 건물의 천장과 바닥 빔에서 베어링이 없어졌으며, 버팀목 공사가 필요 · 창문이 비틀려서 부서졌음 · 바닥이 심하게 기울어짐 · 압축에 의한 손상일 경우, 천장과 벽이 심각하게 휘어졌거나 또는 불거졌음

2.5 지반침하의 예측

지반침하 예측을 위한 주요 관심사로서 1)언제(발생시기) 2)어디서(발생장소) 3)어느 정도로(발생규모 혹은 발생형태) 발생할 것인가에 대하여 많은 사람들의 의문이 있어 왔다. 이러한 침하예측의 의문을 풀기 위한 연구들은 주로 영국, 미국 등에서 있어왔다. 대개의 경우 예측은 지반침하의 크기보다는 지반침하에 의한 지상 구조물의 피해 유무에 목적이 있다.

그러나 그들은 거의 1)수평에 가까운 탄층의 부존상태를 갖고 있는, 2)지질구조가 매우 단순한 탄전지대에서, 3)대체로 지표 가까운 곳에서, 4)채굴방식으로는 완전채굴에 가까운 장벽식 채굴법에 의한 트러프형 침하에 대한 연구가 대부분이고 주방식 채굴법이나 우리나라의 주된 채굴법의 하나인 위경사승 봉락식 채탄법과 같은 불규칙한 형태의 채탄 방식에서의 침하현상에 대한 연구의 수준은 상대적으로 낮은 편이다.

아래 소개되는 여러 가지 예측 방법은 각각의 장단점이 있으며 하나의 방법만을 사용하기 보다는 여

러 방법을 보완적으로 사용하는 것이 바람직하다.

2.5.1 트러프형 침하의 예측

주로 장벽식 채탄법이 적용되었던 영국에서 개발된 방법으로서 도식법이라고 불리운다. 이 방법은 지하 채굴적에 의한 지표의 영향범위 및 영향심도의 예측이 가능하다. 경사진 판상의 탄층을 비교적 넓은 범위에 걸쳐 높은 채수율로 채굴한 경우, 채굴적 상부지층에 발생하는 지반거동의 영향범위는 채굴면적 보다 더 넓은 범위에 걸쳐 나타남을 알 수 있다. 이때 영향 범위는 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 도식적으로 표현하여 예측할 수 있으며 한계각(limit angle)이란 채굴적 선단과 침하지역 선단을 연결하는 선이 수직면과 이루는 각을 말한다.

이 방법에는 Rom(1964), NCB(1975), Ren *et al.*(1988)이 현장에서 수집한 자료를 근거로 탄층경사와 한계각 사이의 관계를 제시한 바 있다.

㉠ 지표면을 기준으로 한 탄층 경사와 한계각과의 관계

아래 그림은 Rom(1964)과 NCB(1975)의 연구 결과를 동시에 도시한 결과이다. 두 연구 결과는 탄층 경사가 저경사이거나 고경사인 경우에 비교적 일치하는 경향을 보인다.

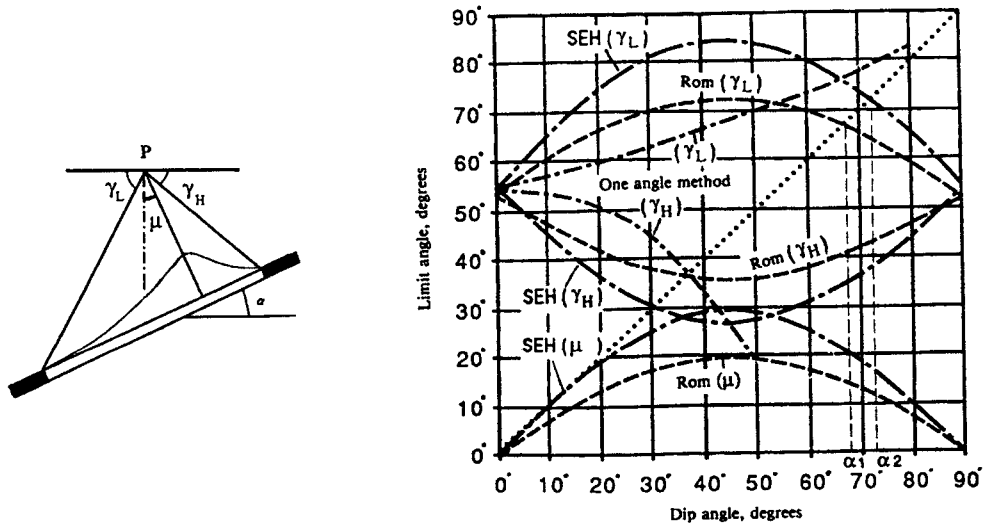


그림 2.12. 지표면을 기준으로 한 탄층 경사와 한계각과의 관계
(Whittaker & Reddish, 1987)

㉡ 지하 채굴적을 기준으로 한 탄층 경사와 한계각과의 관계

아래 그림은 Rom(1964), NCB(1975), Ren, *et al.* (1988)의 연구 결과를 동시에 도시한 결과를 보이고 있다. 그림에서 “o” 표시는 Ren, *et al.* (1988)의 사례연구에서 확인된 실측값을 보인다.

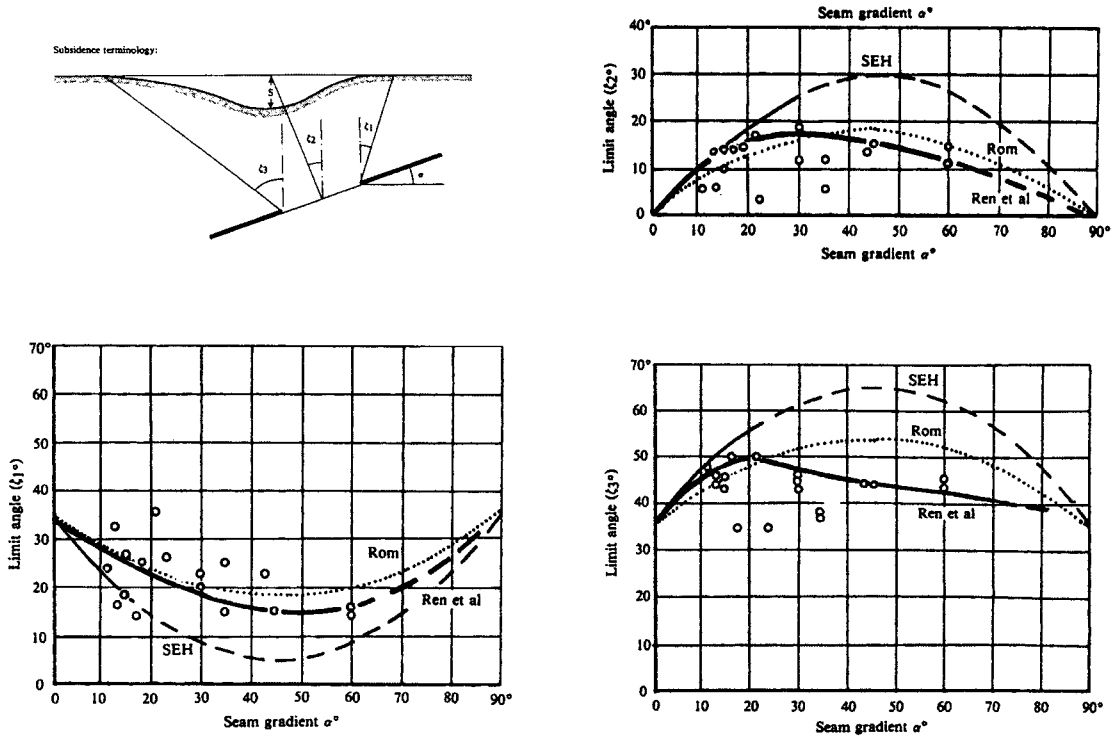


그림 2.13. 지하 채굴적을 기준으로 한 탄층 경사와 한계각과의 관계 (Whittaker & Reddish, 1987)

© 채굴고, 채굴심도와 최대침하량의 관계

정확한 예측은 어려운 상태이나 NCB(1965)에서 아래 그림 2.14와 같이 제시한 바 있다. 이때 막장은 1.4h만큼 진행한 것으로 간주하였다.

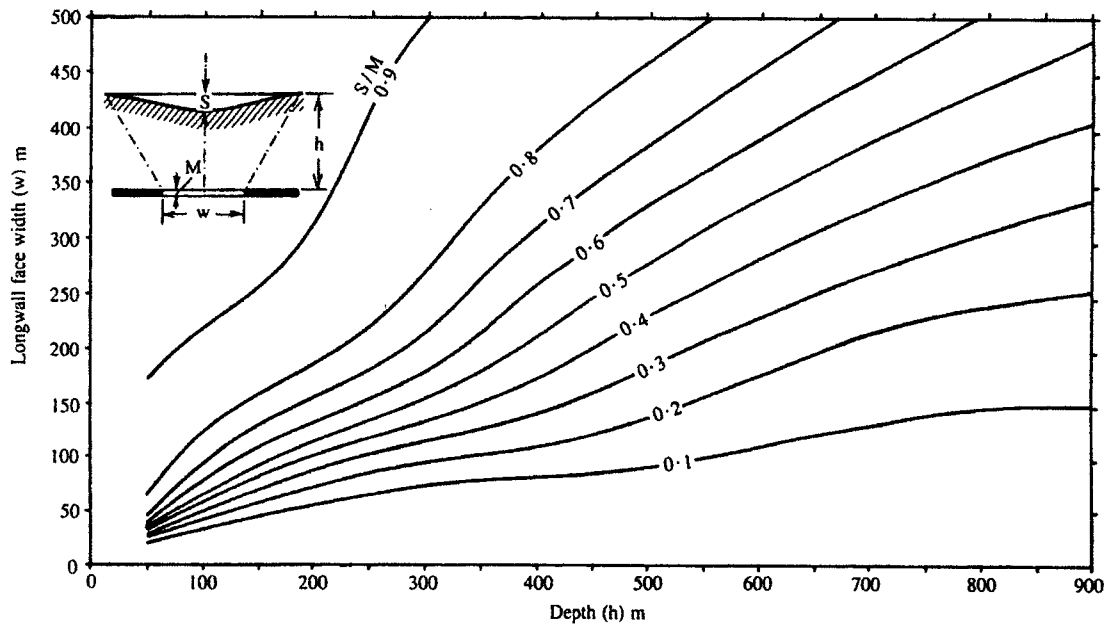


그림 2.14. 채굴고, 채굴심도와 최대침하량의 관계 (NCB, 1965)

2.5.2 함몰형 침하의 예측

함몰형 침하의 예측에 주로 사용되는 이론들을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 응력아치-체적팽창 이론

Piggott & Eynon (1977)이 Karfakis의 응력아치 이론을 지반침하이론에 적용한 방법으로서 채굴적 상반지층이 암반으로 구성되어 있을 때 붕락대의 형상과 암층의 체적팽창률로부터 붕락고를 예측하는데 활용된다.

㉠ 채굴공동 상반의 응력아치 형성

지하에 채굴공동이 생기면 채굴적 상반은 응력해방 상태에 놓이게 되며 지층이 아래로 처지면서 붕괴가 시작되는데 붕괴는 자립가능한 응력아치가 형성되면서 중지되거나, 붕괴된 지층이 암편으로 파쇄되면서 체적팽창을 일으켜 공동을 채울 때까지 상부로 진행된다. 이 과정에서 응력아치의 높이가 상반의 두께를 초과하거나, 붕락고가 안정한 응력아치의 높이를 초과한다면 붕괴는 지표까지 전이되어 침하가 발생하게 된다.

㉡ 경사단층에서의 체적팽창과 붕락고의 관계

암반의 아치 효과를 배제하고 체적팽창에 의해서만 침하를 분석하면 체적팽창률로부터 간단하게 채굴고와 붕락고의 관계를 유도할 수 있다.

$$B = \frac{V_f - V_i}{V_i} = \frac{(V_s + V_v) - V_s}{V_s} = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{4t} (4H \cos \theta - W \sin 2\theta)$$

■ 상기식을 붕락대의 기하학적 형상에 따라 적용하면

- $\frac{H}{t} = \frac{1}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{\sin \theta}{2}$: 직각기둥형
- $\frac{H}{t} = \frac{3}{2B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{3 \sin \theta}{4}$: 타원형
- $\frac{H}{t} = \frac{2}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \sin \theta$: 쐐기형
- $\frac{H}{t} = \frac{3}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{3 \sin \theta}{2}$: 원뿔형

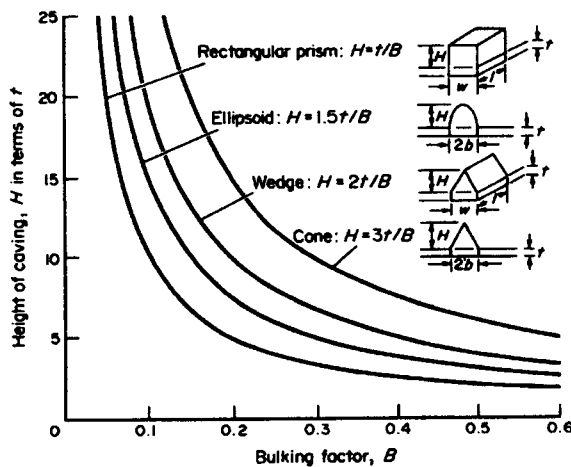


그림 2.15. 암반 파쇄에 의한 최고 높이 (Piggot & Eynon, 1977)

표 2.4. 파쇄 암석의 부피 증가율 (Bulking Factor)

대한석탄공사			건설표준품셈		
암종별	Bulking Factor		암종별	암종별	Bulking Factor
	범위	평균			
사 압	2.0~2.5	2.2	극경암	규암, 각석 등의 석영질 경암	2.0
사질 세일	1.5~2.0	1.7	경 암	화강암, 안산암	1.7
세 일	1.4~1.5	1.4	보통암	석회암, 다공질 안산암	1.6
석탄층	1.4~1.5	1.4	연 암	혈암, 사암	1.4

$$\ast \text{ Bulking Factor} = \frac{\text{파쇄 상태의 암석의 부피 (m}^3\text{)}}{\text{자연 상태의 암석의 부피 (m}^3\text{)}}$$

(2) 한계평형이론

Brady & Brown (1985)이 Atkinson의 한계평형이론을 광산지역의 침하해석에 적용하였으며 지반을 강제거동하는 블록모델로 가정하여 침하에 대한 안전율을 구하고, 한계심도를 결정하는데 적용이 가능하다.

적용시 채굴공동 상반블럭의 자중에 의한 연직전단응력이 블럭과 인접지반 사이의 경계면에 작용하는 전단강도를 초과하면 블럭이 강제운동을 하여 채굴공동으로 함몰되며, 수직유효응력은 심도에 따른 자중 즉, $\sigma_{zz} = \gamma \cdot Z$ 로, 수평응력은 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = k \cdot \gamma \cdot Z$ 로 가정한다. 여기서, k는 측압계수이며 전단강도는 모어-쿨롱의 법칙을 적용하며 각 단계에 대한 안전율은 다음과 같다.

㉠ 지하수위가 채굴공동의 하부에 위치할 경우, ($d \geq h$)

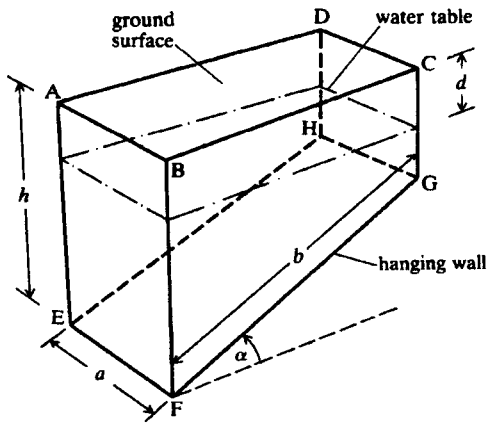
$$F_1 = \frac{2c'(a + b \cos \alpha)}{\gamma a b \cos \alpha} + \frac{k \tan \phi'}{(2h - b \sin \alpha)} \left\{ \frac{h^2 + (h - b \sin \alpha)^2}{b \cos \alpha} + \frac{2}{b} \left[h(h - b \sin \alpha) + \frac{b^2 \sin^2 \alpha}{3} \right] \right\}$$

㉡ 지하수위가 채굴공동에 위치할 경우, ($h > d \geq h - b \sin \alpha$)

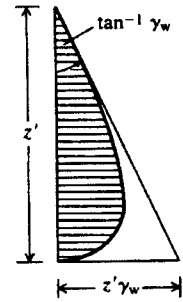
$$F = F_1 - \frac{2\gamma_w(h-d)^2 \tan \phi'}{3\gamma b(2h - b \sin \alpha)} \left[\sec \alpha + \frac{2(h-d)}{3a \sin \alpha} \right]$$

㉢ 지하수위가 채굴공동 상부에 위치할 경우, ($h - b \sin \alpha > d \geq 0$)

$$F = F_1 - \frac{2\gamma_w \tan \phi'}{3\gamma(2h - b \sin \alpha)} \left\{ \frac{h^2 + (h - b \sin \alpha)^2 - 2d(2h - b \sin \alpha - d)}{b \cos \alpha} + \frac{2}{3a} [3h(h - b \sin \alpha) + b^2 \sin^2 \alpha - 3d(2h - b \sin \alpha - d)] \right\}$$



㉑ 사각기둥 모형



㉒ 수압 분포

그림 2.16. 한계평형 적용 개념도 (Brady & Brown, 1985)

(3) 확률에 의한 침하 예측

Karfakis(1993)는 침하의 가능성을 확률적으로 예측하는 방법을 제시하였다. 아래 그림 2.17.은 채탄 심도에 대한 함몰형 침하의 발생 가능성을 경험적으로 구한 그래프이다.

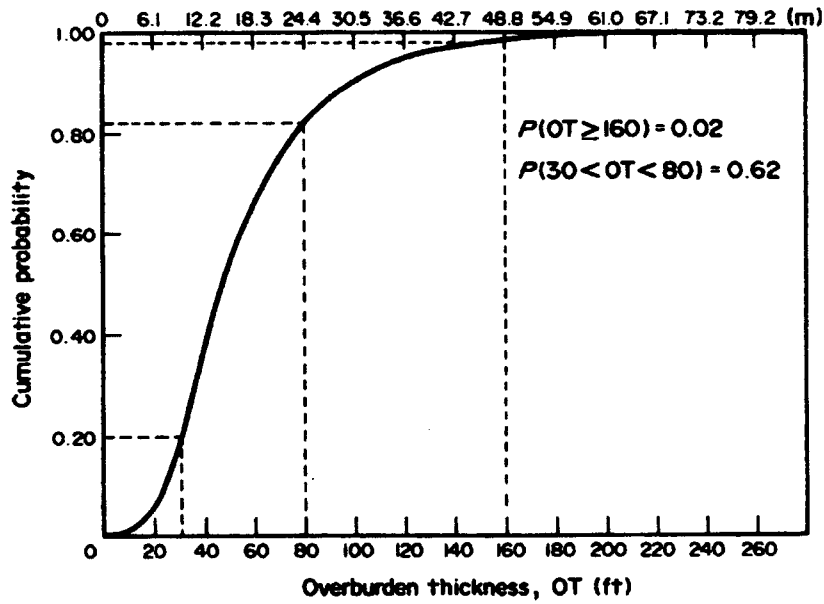


그림 2.17. 채탄심도에 대한 함몰형 침하 발생 가능성의 확률 그래프 (Karfakis, 1993)

3. 지반조사 및 대책 수립

폐탄광에 의한 지반침하에 지상 구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있으나 대책 수립 시 자료 부족에 직면하는 경우가 대부분이다. 자료의 부족한 부분은 여러 가지 지반조사 방법을 동원하여 해결할 수 있으며 지반조사의 결과는 기존 자료를 검증하는데에 활용할 수 있다. 아래 그림 3.1은 폐탄광 지역에서 지반침하에 대한 대책 수립 과정을 보인다.

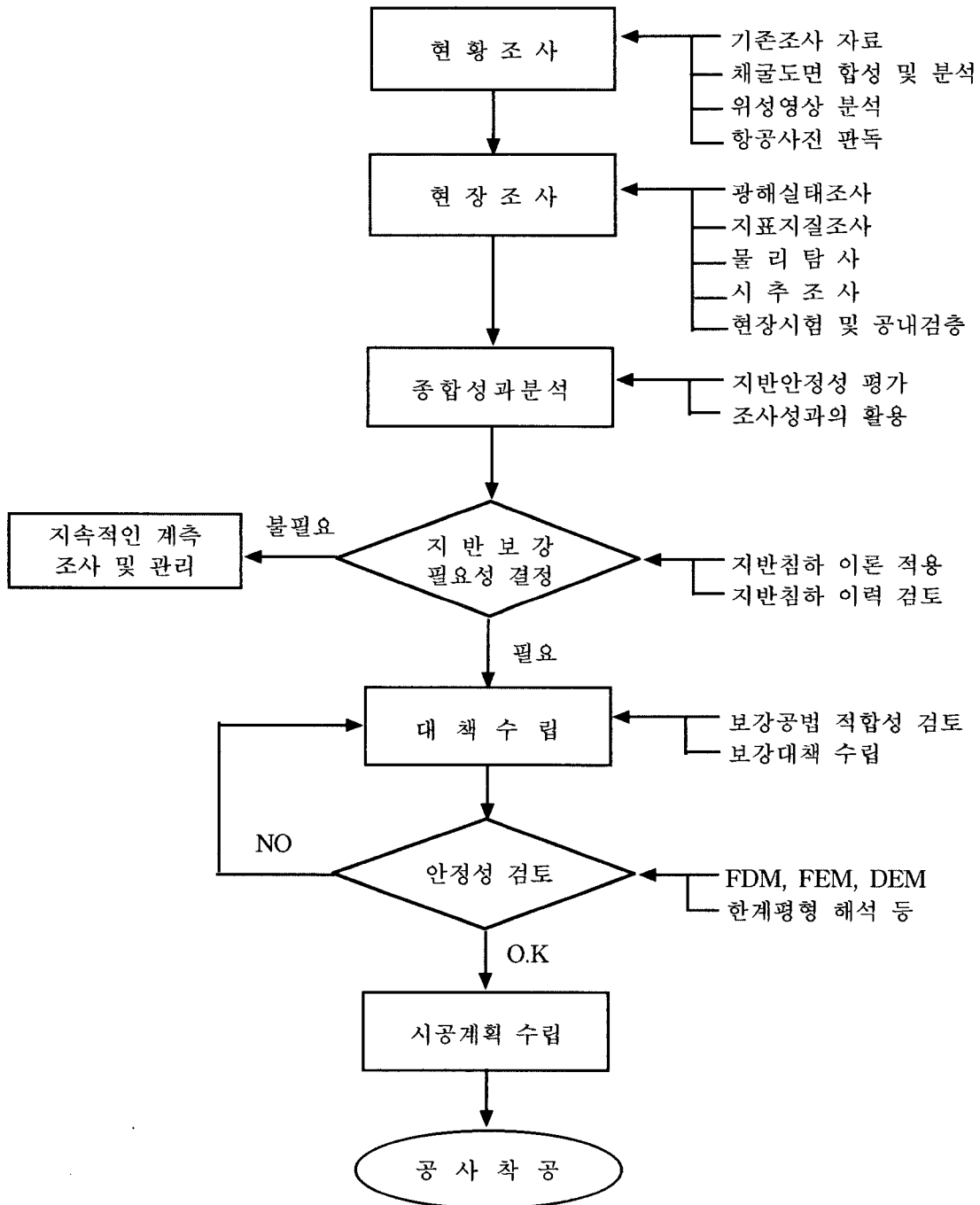


그림 3.1. 보강 대책 수립 흐름도

3.1 현황조사

- 기존 조사자료 분석 : 광해 발생 지역에 대한 기존의 조사 자료를 수집, 분석한다. 여기에는 기존의 계측 자료 및 측량 자료가 있으면 현재까지의 지반 침하량과 앞으로의 잔류 침하량 예측에 유용하다.
- 채굴도면 합성 및 분석 : 기존의 채굴도면을 취합, 종합 및 분석하는 단계로서 지하 지반 상태에 대한 가장 확실한 정보를 제공할 수 있는 자료이므로 가장 큰 비중을 두고 수행되어야 한다. 채굴도면 분석을 통하여 단층의 분포 상태를 비롯한 지하지질 구조와 단층의 가행 여부를 확인할 수 있다.
- 위성영상분석 및 항공사진 판독 : 광해 발생 지역을 포괄하는 광역적인 지질 구조를 파악할 수 있으며 그 결과는 채굴적도 분석 시 지질 구조 파악에 도움을 줄 수 있다. 위성영상 분석과 항공사진 판독은 서로 보완적으로 활용될 수 있으며 특히 항공 사진 판독의 경우 단층이 가행되기 이전의 사진을 확보하여 현재의 것과 비교하는 것도 광해 실태 파악에 도움이 된다.

3.2 현장 조사

- 광해실태 조사 : 지반침하가 발생하고 있는 지역의 현장 상황을 파악한다. 이때 주민들에 대하여 탐문 조사를 병행하여 과거에 있었던 광해 이력을 파악하도록 한다.
- 지표지질 조사 : 채굴적도 분석에서 파악된 지질 구조를 보다 자세히 이해하는데 추가적인 자료로서 활용되며 지하 암반 상태 추정에 활용한다.
- 물리탐사 : 채굴적도 분석 결과 지표침하에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 지하 채굴적도의 분포 위치를 개략적으로 확인하는 데 활용된다. 또한 탐사를 통하여 채굴적도 분석시 확인되지 않은 채굴적을 확인할 수도 있다.
- 시추조사 : 물리탐사 결과로부터 추정되는 지하 채굴적도의 정확한 위치 및 규모를 파악하는데 활용된다. 조사 도중의 이수 상태, 누수 정도 파악은 지하의 채굴 공동 내지 암반 상태 파악에 정성적인 자료를 제공할 수 있다. 또한 시추 코아로부터 지하 암석의 분포상태를 파악하여 지질 구조 해석에 추가적인 정보를 제공할 수도 있다.
- 현장시험 및 공내검층 : 시추공을 이용하여 수압시험, 공내재하시험 등을 시행할 수 있다. 공내검층 으로서는 BIPS (borehole image processing system) 탐사가 유용하며 탐사 결과로부터 지반의 이완 심도를 확인할 수 있다.

3.3 종합성과분석

- 지반 안정성 평가 : 채굴적도 분석 및 시추조사시 확인된 지하 단층 및 채굴 공동의 분포 상태, 공내 검층에서 확인된 암반의 이완 심도 등을 종합 분석하여 지하 채굴적도의 영향 심도 및 범위를 결정한다.
- 조사 성과의 활용 : 위 조사 성과를 종합하여 지질 단면도를 작성하며 대책 수립 시 필요한 제반 정보를 제공한다.

3.4 지반 보강의 필요성 결정

종합분석 결과와 침하 이론의 적용 결과 및 현재까지의 지반침하 이력 등을 종합 검토하여 지반 보강의 필요성 여부를 결정한다. 이때 해당 지역에 대한 계속적인 계측조사가 있었으면 좋은 판단 근거를 제공할 수 있다. 종합검토 결과 지반보강의 필요성이 없는 것으로 판단된다 하더라도 계측조사 등의 지속적인 관리는 필요하다.

3.5 대책 수립

보강공법은 현장여건과 지반 및 채굴적 상태를 종합분석하여 가장 적합한 한가지 또는 여러 가지 공법을 복합적으로 적용하는 것이 바람직하며 보강공법의 선정은 Gray & McLaren (1983)이 제시한 적합성 및 적용성 도표가 대표적으로 사용되고 있다.

3.5.1 적합성 (suitability) 검토

공법적용 목적과 침하지역의 상태에 따라 적합한 보강공법을 선택하는 단계로서 공법적용 목적은 침하방지, 현상태유지, 원상태로의 복구 등으로 구분되며 침하 지역의 상태는 지상구조물 존재여부와 채굴된 단층조건으로 구분한다(표 3.1. 참조).

표 3.1. 적합성 도표

침하방지공법			목적	지상구조물 존재		향후 구조물 존재가능		향후 구조물 존재가능성 없음	
				단층	다층	단층	다층	단층	다층
충전법	수압식 충전법	조 절	침하방지 침하억제 침하복구	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○
		비조절	침하방지 침하억제 침하복구	● ● ○	◎ ◎ ○	● ◎ ○	◎ ◎ ○	● ● ○	◎ ◎ ○
		고압식 공법	침하방지 침하억제 침하복구	● ● ○	● ● ○	● ● ○	◎ ◎ ○	● ● ○	◎ ◎ ○
	공압식 충전법	조 절	침하방지 침하억제 침하복구	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○
		비조절	침하방지 침하억제 침하복구	● ● ○	◎ ◎ ○	● ◎ ○	◎ ◎ ○	● ● ○	◎ ◎ ○
	그라우트 충전		침하방지 침하억제 침하복구	● ● ○	◎ ◎ ○	● ● ○	◎ ◎ ○	● ● ○	◎ ◎ ○
	복개 및 재충전		침하방지 침하억제 침하복구	○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ●	◎ ◎ ◎	● ● ●	◎ ◎ ◎
	동적압밀법		침하방지 침하억제 침하복구	○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ●	○ ○ ○	● ● ●	○ ○ ○
국부 보강법	상부보강법		침하방지 침하억제 침하복구	◎ ◎ ○	◎ ◎ ○	◎ ◎ ○	◎ ◎ ○	● ◎ ○	● ◎ ○
	발 파		침하방지 침하억제 침하복구	○ ○ ○	○ ○ ○	◎ ○ ○	○ ○ ○	● ○ ○	○ ○ ○
	그라우트기둥		침하방지 침하억제 침하복구	◎ ○ ○	◎ ○ ○	● ◎ ○	◎ ○ ○	● ◎ ○	◎ ○ ○
	그라우트케이스		침하방지 침하억제 침하복구	◎ ○ ○	◎ ○ ○	● ◎ ○	○ ○ ○	● ◎ ○	○ ○ ○
	광산 내 피어		침하방지 침하억제 침하복구	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○
	깊은 기초		침하방지 침하억제 침하복구	◎ ○ ○	○ ○ ○	● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○

● 거의 모든 경우에 대하여 적합 ◎ 특별한 경우에 적합 ○ 부적합

3.5.2 적용성 (applicability) 검토

침하방지 공법의 적용 가능성 정도를 아래 표 3.2.에 의거하여 점수를 계산한다. 이 때 “●”는 1점, “○”는 0점이며 “x”가 1개라도 있는 경우에는 원칙적으로 적용이 불가하다.

표 3.2. 적용성 도표

검 토 사 항		충전법									국부보강법				
		수압식 충전			공압식 충전		그라우트 공법	복개 및 재충전	동적 압밀법	상부 보강법	발파	그라우트 기동	그라우트 케이스	광산내 피어	깊은 기초
		조절	비조절	고압식 공법	조절	비조절									
광 산	공동에의 접근성	● ○ x	● ● ●	● ● ●	● ○ x	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ○ x	● ● ●	
	탄층 수	● ●	○ ○	● ●	● ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	○ ○	x	
	공동깊이 (m)	● ● ●	● ● ○	● ● ●	● ● ○	○ ○	○ ○	○ x	○ x	● ● ●	● ● ○	● ● ○	● ● ○	○ ○ x	
	공동높이 (m)	○ ● ●	● ● ●	● ● ●	○ ● ●	○ ● ●	○ ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	○ ● ●	
	붕괴지역	● ● ●	● ● ●	● ● ○	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	
	경 사	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ○	● ● ○	● ● ○	● ● ○	● ● ○	● ● ○	○ ○ ○	
	화 재	x ●	● ●	● ●	x ●	● ●	x ●	● ●	x ●	● ●	x ●	x ●	x ●	x ●	x ●
지 층 상 태	지층구조	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	○ ● ●	○ ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	
	암반의 습윤저항	● ○ x	● ○ x	● x x	● ● ●	● ● ●	● ○ ○	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	
	상하반의 견고성	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ○	○ ○ ○	● ○ ○	
	공동내로 붕괴된 암석의 높이	● x	● x	● x	● x	● x	○ ○	● ●	● ●	● x	● ○	● x	● x	● ●	
지 하 수 상 태	침수여부	침수되었으나 배수가 가능	x	●	●	x	○	●	○	○	○	○	○	x	○
		침수되었고 배수가 불가능	○	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
		침수되지 않았고 공사중 침수가 가능	○	●	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
		침수되지 않았고 공사중 침수불능	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
대상 지역	접 근 성	● ○ ●	● ○ x	● ● ●	● ● ○ x	● ○ x	● ○ x	● ○ x	● ○ x	● ○ ○	● ○ ○	● ○ x	● ● ●	○ ○ x	
부가적 고려사항 key : ■ 관련적음 ◆ 중간 □ 관련없음															
대상지역의 중요한 물리적 방해인자 (천공, 접근도로 등)		■	◆	◆	■	◆	◆	◆	□	□	◆	□	◆	◆	■
대상지역의 성가신 방해인자 (소음, 이물질, 먼지)		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	□	□	◆	□	◆	◆	■
대상지역의 환경적 문제 (배수, 광산폐수 등)		◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	■	◆	◆	■	■	■
시간 및 경비평가로부터의 경제적 문제		□	□	□	□	□	□	□	◆	■	◆	◆	◆	■	■

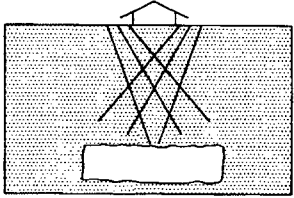
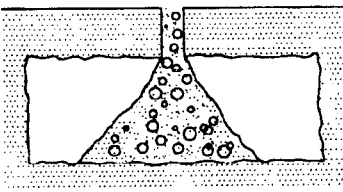
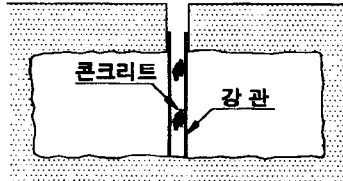
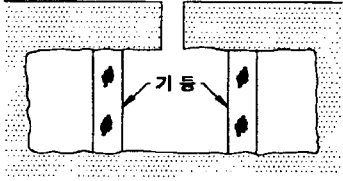
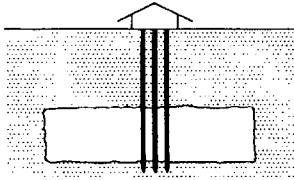
3.5.3 보강 공법 선정

채굴적 주변의 파괴로 유발되는 지반침하 피해를 방지하기 위해 여러 가지 공법에 대하여 위의 적합성 및 적용성 검토를 참고하여 대상 구역의 채굴현황과 지반조건을 고려한 보강공법을 선정한다. 지반침하 피해를 방지하기 위해 적용될 수 있는 공법들에는 다음과 같은 것들이 있다.

㉠ 충전공법

공법	특징	모식도
수압식 충전법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 물을 이용하여 골재, 모래, 광산폐기물, Fly ash 등의 입자형 재료를 Slurry 형태로 이송시켜 공동을 충전시키는 방법으로서 많은 양의 재료를 단기간에 충전가능하나 충전재의 관리가 곤란하고 충전의 정도는 충전물질의 안식각에 좌우되며 탄층의 경사가 심한 곳에서는 충전재의 유출을 방지하기 위해 차단벽이 필요하는 등의 단점이 있다. 	
공압식 충전법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공기압에 의해 충전물을 이송시켜 공동을 충전시키는 방법으로서 충전성이 좋고 배수처리 문제가 없으나 대규모 공동에는 적용이 곤란하고 많은 장비를 필요로 한다. 	
그라우트 충전법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 시멘트를 혼합한 충전재를 Slurry 형태로 이송시켜 공동 및 암석층의 절리를 충전시키는 방법으로서 충전재의 강성이 좋고 충전효과 좋으나 공사비가 고가인 단점이 있다. 	
완전굴착 및 재충전	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공동을 노출시킨 후 다시 재충전시키는 방법으로서 공동의 심도가 얇은 경우 효과적이며 가장 확실한 충전방법이다. 그러나 상부구조물이 있는 경우, 공동심도가 깊은 경우, 지하수위 하부인 경우 등에는 적용이 불가능하다. 	
동적 압밀법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공동상부 지반에 타격을 가하여 지반을 강제 함몰시키고 함몰부는 성토하는 방법이다. 이 방법은 공동의 심도가 얇고 공동 상부지반이 약한 경우 효과적이고 경제적이거나, 지상 및 주변에 진동에 영향을 받는 구조물이 없어야 하며 함몰된 부분에는 추가적인 지반보강이 필요하다. 	

㉞ 국부 보강공법

공 법	특 징	모 식 도
상 부 보강법	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공동 상부지반에 그라우팅 또는 뿌리말뚝(micro pile)을 시공하여 침하 및 과도한 부등침하를 감소시키고, 붕괴의 전파에 의한 함몰을 차단시키는 방법으로서 시공이 간편하고 부분적인 지반보강 시에는 경제성이 좋은 장점이 있으나 침하를 완전히 억제시키기 위해서는 공사비가 다소 고가이다. 	
그라우트 기 등	<ul style="list-style-type: none"> ■ 시추공을 통하여 골재투입 후 그라우트재를 주입하여 공동 내에 기등을 형성시키는 방법으로서 시공이 간편하나 주입재의 주입상황 파악 곤란하고 상반과의 접촉이 불량한 단점이 있다. 	
그라우트 케 이 스	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공동 하부부터 공동상반 일정 부분까지 강관을 설치한 후 콘크리트를 타설하여 기등을 형성시키는 방법으로서 임시적인 방법으로서 활용된다. 	
광산내 피 어	<ul style="list-style-type: none"> ■ 공동 내에 기등을 설치하여 공동 상부 암반을 지지시키는 방법으로서 공동상태를 확인하면서 작업가능하나 일시적인 함몰 방지를 위한 공동 내 작업이므로 작업이 제한적이고 위험하며 상부암반의 자립성이 있어야 하는 단점이 있다. 	
깊은 기초	<ul style="list-style-type: none"> ■ 파일을 공동 하반의 안정층까지 설치하여 상부 구조물을 직접 지지시키는 방법으로서 구조물 지지효과는 확실하나 공동심도가 깊을 경우 비경제적이며 기존 구조물 보강에는 부적절하다. 	

3.6 안정성 검토

위 대책 수립 단계에서의 계획이 필요한 만큼의 지반보강 효과를 가져올 수 있는가를 검증하는 단계이다. 검증을 위해서는 전산해석 기법이 활용되는데 주로 사용되는 해석기법으로는 FDM, FEM, DEM 등의 해석 기법과 한계평형 해석 기법 등이 있다.

3.7 시공계획 수립

공사 착수 전 조사 사항으로는 지반조사 결과 검토, 인접 건물 확인조사, 각종 지하 지장물 현황조사, 교통현황조사, 작업장 진입로 조사, 시공관련 제반 관련법규 조사, 공사용지(사업시행과 관련한 인·허가 포함) 확보사항 등의 시공여건과 관련된 제반 사항 등이 있으며 공사중의 시공계획은 적용되는 지반보강 공법에 적합하도록 수립하여 보강공사가 소정의 기일 내에 경제적이고 안전하게 시공될 수 있도록 계획한다.

4. 국내 보강공사 사례 (강원도 삼척시 고사리 지역 지반보강공사 중심으로)

여기에서는 석탄산업합리화사업단에서 시행한 강원도 삼척시 고사리 일대의 지반 보강공사 설계의 예를 간략히 소개한다. 과업 지역의 위치는 강원도 삼척시 도계읍에 위치하며 보강은 철도 교량 1개소, 도로 교량 2개소 및 철도와 도로의 안정성 확보가 주목적이었다(그림 4.1. 참조).

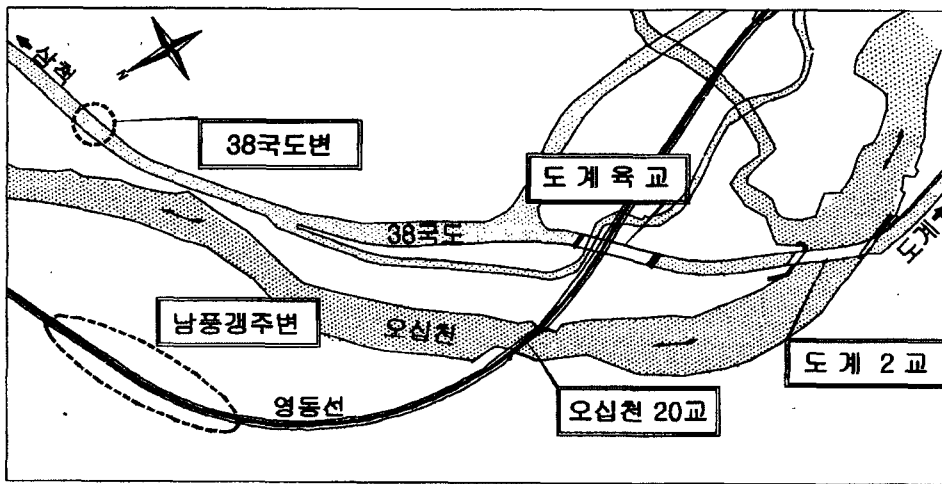


그림 4.1. 고사리 지역 지반보강공사 각 과업구역의 위치

4.1 지반침하 현황

본 과업 지역에서는 1995년 11월부터 현재까지 채굴적에 의한 지반 변위와 주요 구조물의 안정성 분석을 위하여 주요 구조물을 중심으로 지속적인 계측조사가 있어 왔으며 계측조사 결과에 의하면 채굴적의 붕락과 채굴적에 의한 층분리 현상이 이미 발생하고 있고 상부로 전이되는 징후가 뚜렷하여 아래와 같이 구조물 하부 지반의 이완이 관찰되었다.

- 도계2교 : 심도 6.0m 지점에서 최대침하량 10.2mm 발생
- 도계읍교 : 채굴적에 의한 층분리가 심도 23.1m까지 전이됨
- 오십천20교 : 교각의 기울어짐이 진행중임

또한 교량 주변으로 함몰형 침하가 과거부터 지속적으로 발달하여 왔으며 교량 자체의 손상도 심한 편이다.

남풍갱 주변의 경우 함몰형 침하뿐만 아니라 대상구역을 중심으로 반경 80m 가량 트리프형 침하가 발생하였다. 38국도변의 경우 도로 인근에 함몰형 침하가 발생하였다.



㉠ 남풍갱 주변의 트리프형 침하



㉡ 38국도변의 함몰형 침하

그림 4.2. 고사리 지역의 지반침하

4.2 석탄채굴 현황

과업구역 내 관련된 탄광의 갱내 채굴적도를 분석하여 지하 채굴적의 분포 상태를 파악하였다.

갱내도 분석결과 채굴적은 중부배사가 남서 방향으로 경사하는 구조적 특징을 선명하게 보여주고 있음을 알 수 있다(그림 4.3. 참조). 남풍갱 주변 구역을 제외한 전 과업구역과 관련된 탄층 가행은 주로 이 중부배사 부근에 집중되어있다.

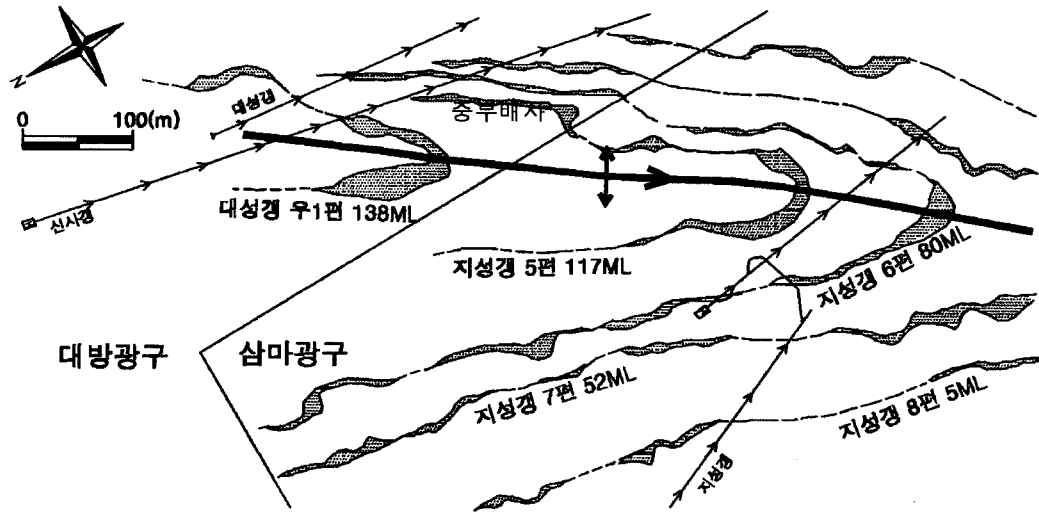


그림 4.3. 고사리 지역 탄층 분포 개념도

4.3 지반조사 결과

각 항목별 지반조사 결과를 간략하게 소개하면 다음과 같다.

- 지표지질조사 : 층리면은 북북동-남남서 방향으로 우세하게 발달되고 과업지역 내의 여러 습곡 구조를 반영하며 절리면은 층리면에 수직 내지 평행한 방향으로 발달하고 있다(그림 4.4. 참조).

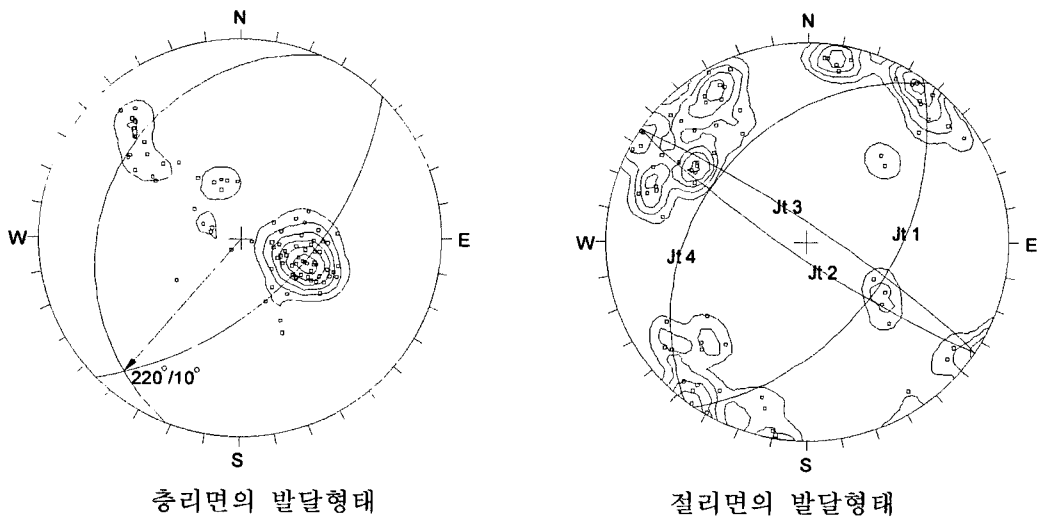


그림 4.4. 불연속면 평사투영 해석 결과

- 전기비저항 탐사 : 채굴적도를 검토하여 전기비저항탐사 위치를 확정하였으며 탐사 결과로부터 지하 채굴 공동의 위치를 추정할 수 있었다 (그림 45. 참조).

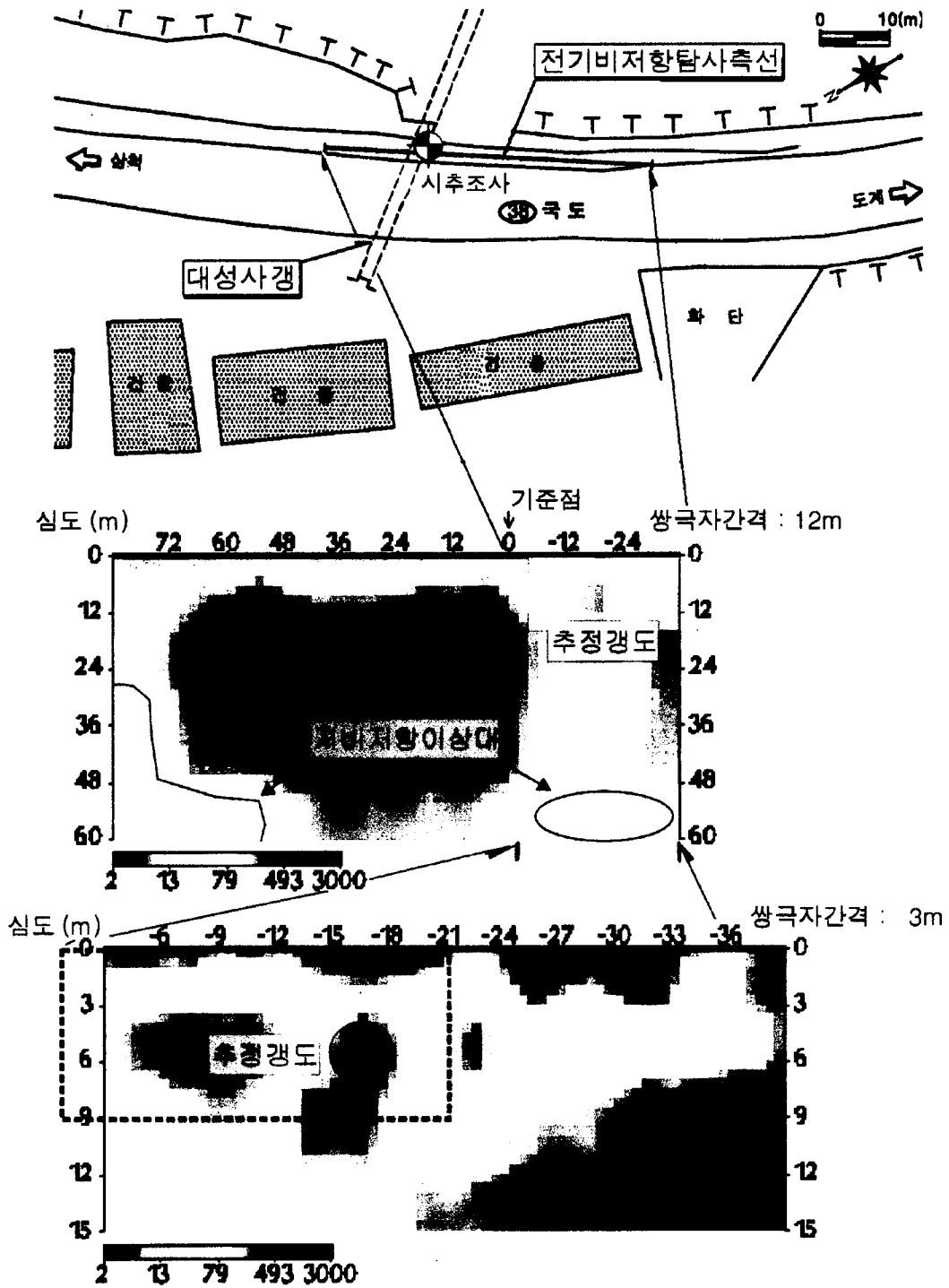


그림 45. 고사리 지역 전기탐사 결과

■ 시추조사 : 위 물리탐사 결과를 근거로 시추조사 위치와 심도를 확정하였으며 조사결과 채탄공동 및 탄층의 위치를 확인하였으며 각 조사결과를 종합하여 각 과업구역의 지질단면도를 작성하였다. 아래 그림 4.6은 38국도변의 지질단면도를 보이고 있다.

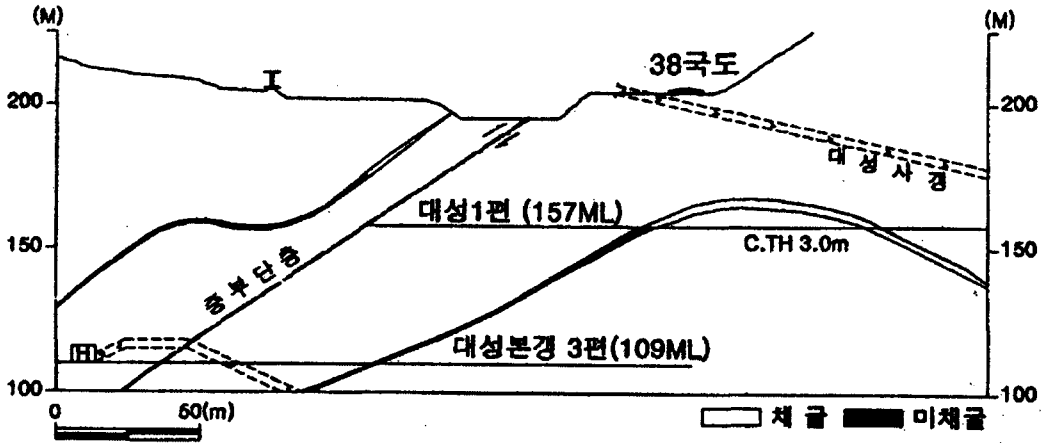


그림 4.6 38국도변 지질 단면도

■ BIPS 탐사결과 : 각 탐사 지점에서의 채굴적 함몰 영향으로 판단되는 층분리 현상의 심도를 확인하여 각 지점의 지반 안정성 평가에 활용하였다(그림 4.7 참조)

■ 38.6~40.2m : 보통암(암회색 중립사암)

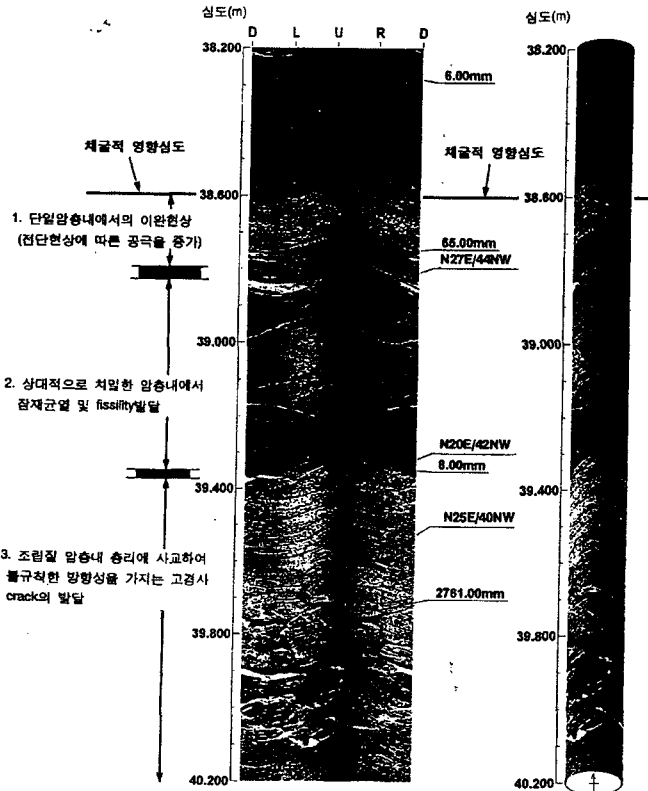


그림 4.7. 고사리 지역의 BIPS 탐사결과(도계육교주변)

4.4 지반안정성 검토

보강공법설계에 대한 기초자료로 활용하기 위하여 각 지반침하 이론을 각 과업구역에 적용하여 침하 영향권과 영향심도를 계산하였으며 그 결과를 지반 조사 결과와 비교, 검토하여 종합하였다.

- 영향권 설정 : 도식법을 적용하였다. 지상의 주요 대상구조물을 기준으로 한계각을 적용하여 영향범위를 설정하고 그 범위 내에 대상구조물의 안정에 영향을 줄 수 있는 채굴적의 존재 유무와 규모를 파악하였다. 이때 적용된 자료는 자료수집 지역이 광범위하고 60° 정도의 고경사 탄층까지 사례를 수집한 Ren, et al.(1988)의 한계각을 적용하였다.
- 영향심도계산 : 응력아치-체적팽창이론을 적용하였다. 채굴적 상부 지반이 붕괴하여 암편으로 분리되면서 발생하는 체적팽창과 채굴적고의 상관관계에서 붕락고를 추정하였으며 체적팽창율은 건설표준품셈을 적용하였다.

4.5 적용공법 선정

각 보강 공법의 적합성 및 적용성을 검토하여 지하 채굴적을 충전하기 위한 충전법으로는 그라우트 충전법을 적용하였으며, 공동 상부 지반을 보강하기 위한 국부 보강법으로는 고압충전 뿌리말뚝을 이용한 상부 보강공법을 채택하여 과도한 부등침하를 억제하고 상부 암반의 일체거동을 꾀하였다.

5. 결 언

현재 우리 나라에는 폐탄광에 의한 지반침하가 발생하고 있으며 이는 심각한 사회 문제를 야기할 수 있는 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 이에 대한 이론적 배경이 아직 정립되어 있지 못한 실정이며, 침하제어 및 방지대책에 대한 연구도 미비한 실정이다.

따라서, 국내 폐탄광지역 지반침하에 대한 체계적인 조사와 침하제어 및 방지대책 효과를 실험적으로 검증하고 이를 전산해석에 이용하는 보강효과에 대한 연구가 필요하다.

지반침하 대책에 관련된 사업을 수행하여 오면서 필자가 느꼈던 문제점과 개선방향 등을 간단히 언급하면 다음과 같다.

첫째로 정확한 채굴관련 자료의 부재이다. 과거에는 채굴 자료에 대한 체계적인 관리가 미흡하였다. 이로 인하여 기존 채굴 자료에는 오기 및 고의적인 누락 등의 가능성이 존재하며 게다가 미인가 채굴 및 도굴까지도 성행하였다. 이러한 문제점은 채굴 자료 분석 결과와 지반 조사 결과의 불일치를 야기하였으며 정확한 지반 상태의 파악 및 대책 수립을 어렵게 하였다.

둘째로 과거의 측량 자료의 미비로 인하여 폐광 이후의 실제 침하량과 잔류 침하량의 산정에 어려움이 있다.

셋째로 위의 문제점들은 결국 지반침하와 관련된 자료의 축적이 이루어지지 않았다는 점에 기인한다고 볼 수 있겠다. 따라서 지금부터라도 data base system 구축 작업을 시작하여 현재 발생하고 있는 지반침하에 대한 자료 축적이 지속적으로 실행되어야 한다.

넷째로 국내 실정에 적용 가능한 침하이론의 부재로 인하여 적절한 대책 수립에 어려움이 있었다. 앞에서 소개한 여러 침하 이론은 외국의 사례를 근거로 확립되었으므로 지질 구조가 복잡한 국내의 경우에 직접적인 적용이 어렵다.

이 외에도 탄광 지역에서의 지반 정수 추정의 문제, 수치 해석 모델 작성의 적정성 여부, 우리 나라 실정에 맞는 적절한 보강 공법의 개발 등이 앞으로 해결해 나가야 할 과제들로 판단된다.

참고문헌

1. 권광수, 박연준, 신희순, 신중호(1994), "지하공동에 의한 지표침하지역의 지반안정성 평가", 터널과 지하공간, 제4권, pp.170~185.
2. 김동기(1966), "영월탄광의 채굴로 인한 지표 함락권의 발달현황", 광산학회지, 제4권, 제3호, pp.170~180.
3. 김재극, 현병구(1969), "채탄으로 인한 지표균열대의 발달에 관한 연구", 광산학회지, 제6권, 제3호, pp.106~122.
4. 석탄산업합리화사업단(1995), "지하채굴에 따른 지반안정성 평가 및 대책연구", 298p.
5. 석탄산업합리화사업단(1995), "철암지역 지반보강공사 실시설계 보고서", 292p.
6. 석탄산업합리화사업단(1997), "폐광지역 지반침하 메카니즘 및 침하방지 공법에 관한 연구", pp.26~61
7. 석탄산업합리화사업단(1999), "고사리지역 지반보강공사 실시설계 지반조사 보고서" 미발행, 대덕공영(주).
8. 석탄산업합리화사업단(1999), "고사리지역 지반보강공사 지반조사 보고서" 미발행, 대덕공영(주).
9. 이회근, 고헌제, 양형식(1983), "지표침하해석에 관한 기초적 연구", 광산학회지, 제20권, 제1호, pp.24~31.
10. Brady, B. H. G. & Brown, E. T.(1985), "Rock Mechanics for Underground Mining", George Allen & Unwin., 527p.
11. Karfakis, M. G.(1993), "Residual Subsidence Over Abandoned Coal Mines", In Comprehensive Rock Engineering, Vol.5-1, pp.451~476.
12. Kratzsch, Helmut (trans. to Eng. by Fleming, R. F. S.)(1983), "Mining Subsidence Engineering", Springer Verlag, New York, 543p.
13. National Coal Board(1965), "Subsidence Engineers' Handbook" 1st ed, London, 111p.
14. National Coal Board(1975), "Subsidence Engineers' Handbook" 2nd ed, London, 111p.
15. Piggott, R. T. & Eynon, P.(1977), "Ground Movements Arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings". In Large Ground Movements & Structures, Pentech, pp.749~780.
16. Ren, G., Reddish, D. J. & Whittaker, B. N. (1987) "Mining subsidence and displacement prediction using influence methods" Mining Science and Technology, 5, pp.89~104.
17. Rom, H.(1964) "A limit angle system", Mitt. Markscheidew., 71, pp.197~199.
18. Waltham, A. C.(1989), Ground Subsidence, Chapman & Hall, New York, 202p.
19. Whittaker, B. N. & Reddish, D. J.(1989), "Subsidence Occurrence, Prediction & Control, Elsevier, 528p.
20. Gray, R. E. & McLaren, R. J.(1981), "Research Needs in Subsidence Abatement over Abandoned Mines", Workshop on surface subsidence due to underground mining, pp.259~267.