

폐탄광 복원에 대한 조사, 평가 및 복구 설계

최정찬

부경대학교 환경지질학과

개요(Synopsis) : 국내의 휴·폐탄광 수는 2002년 현재 230여 개에 이르고 있다. 이에 따라 갱도, 폐석적치장 및 광산 시설물들은 방치상태로 남게 되며 광해의 주요인자가 되고 있다. 광해현상은 이들로부터 유출되는 산성광산배수(Acid Mine Drainage : AMD), 폐석 및 오염토양의 유실 및 하류부 퇴적, 채굴적 상부 및 인접지역의 지반침하 등이다. AMD는 pH가 6.0 미만이고 총산도(total acidity)가 총알칼리도(total alkalinity)를 초과하는 물로서 노천광이 가행되었던 지역, 가행중이거나 휴광 또는 폐광된 광산에서 유출된다. 또한 도로사면 절개부나 지하철 터널에서도 황철석(pyrite)이나 백철석(marcasite)등을 함유하는 층이 공기 중에 노출되면 산성수가 침출되어 나오기도 한다. AMD에 의한 하천수의 오염이 매우 극심하여 때로는 미생물마저도 그 속에 살 수 없게 된다. AMD에 의해 오염된 하천수의 오염범위는 산성수의 양, 농도, 하천에 유입되는 산성수의 분포, 상류에서 흘러드는 오염되지 않은 물의 양, 지류에서 유입되는 물의 양에 따라 좌우된다. AMD 오염이 문제시되고 있는 나라는 미국을 포함하여 호주, 일본, 한국, 러시아, 남아연방 등이다. AMD를 처리하기 위해 여러 기술이 도입 적용되었으며 일부 기술들은 현재도 사용되고 있다. 각 기술마다 입장일단이 있으므로 경비의 과다, 유지 및 관리에 대한 지속성 여부, 공간의 확보 여부, 지역적 특수성에 맞춰 가장 적합한 방법을 채택하여야 하며 꾸준히 채택한 기술의 개량 및 새로운 기술의 첨가가 요구되고 있다. 따라서, AMD 오염지대에 대해 확일적으로 같은 처리방법을 채택하여 사용하는 것보다 각 지역 또는 AMD가 유출되어 나오는 광산폐기물의 특성 등을 고려하여 거기에 맞는 기술들을 복합적으로 또는 단독으로 사용하되 처리방법 채택 시 신중을 기할 것이 요망된다. 우리나라에서도 폐탄광을 복원하기 위하여 여러 시도가 있었으나 시간적, 경제적으로 충분히 고려하지 않아 시행착오를 범하고 있다. 따라서, 복원 대상광산에 대한 실제적인 조사, 평가 및 복구설계의 과정을 예로 들어 적절한 처리과정을 토의하고자 한다.

1. 서언

Friar Tuck 광산은 미국 중서부 지역에서 가장 복잡하게 훼손된 폐탄광 중 하나이다. 본 광산은 인디애나주 Sullivan 및 Greene군 경계인 Dugger읍 북동쪽에 위치한다. 광산 지역 규모는 남북, 동-서로 각각 2km 정도이며 이 지역 내에 여러 형태의 광산 폐기물이 분포하고 있다. 본 광산은 1929년 처음으로 개발되어 소유주가 여러 번 바뀌면서 가행되다가 1965년 최종적으로 휴광하였다. 참고로 1943년부터 1952년까지 약 3,500만톤의 유연탄이 생산되었다.

총 4개조의 탄층이 개발되었는데 (탄층경사 1/160) 일부는 노천채굴로 일부는 Room-and-pillar 방식의 갱도채굴로 시행되었다. 따라서 노천채굴에 의해 탄층 상부의 overburden들이 가파른 구릉을 형성하는 spoil들이 광범위하게 분포되고 있다. 또한, 노천채굴된 탄은 wash plant를 거친 후 상품으로 인도되었고 세립질 탄은 광산 내에 직접 화력발전소를 설치하여 전력생산에 소모하였다. 이에 따라 washing plant에서 나온 세립질 폐기물인 광미(tailings)는

범람원, final-cut pit 및 버럭더미(gob)위에 퇴적되어 있다. 갯내에서 나온 버럭들은 4개소의 대규모 적치장 및 수 개소의 소규모 적치장에 야적되어 있다(그림 1 참조, (Choi, 1995)).

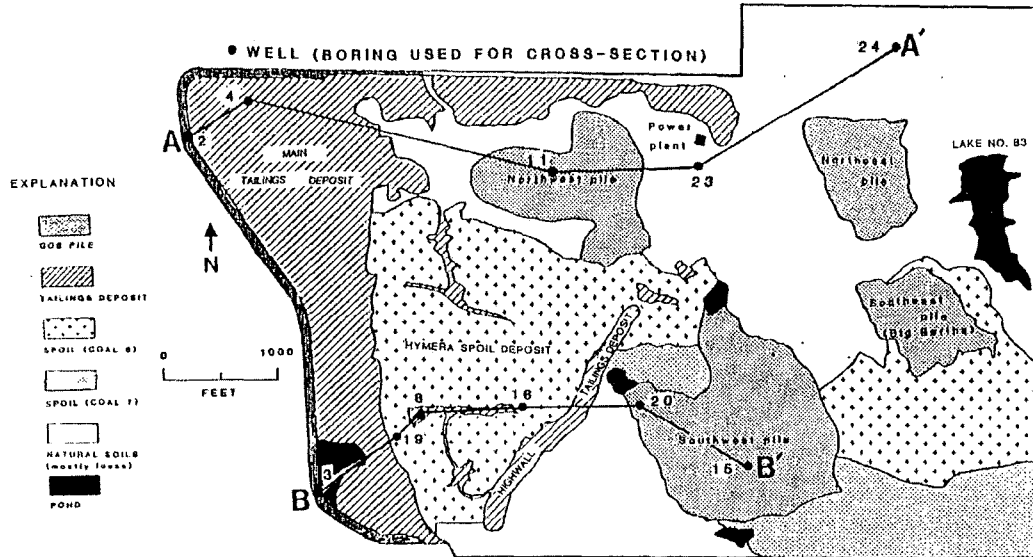


그림 1. Friar Tuck 탄광 광산폐기물 분포도

버럭더미 및 광미는 황철석의 함유량이 매우 높아 황철석 산화에 의해 이곳에서 산성수가 계속적으로 유출되어 버럭더미 및 광미가 분포하는 곳에는 식물이 자랄 수 없는 황무지가 되었다. 1970년대 탄광회사는 버럭더미를 복원하기 위해서 적치사면의 경사를 완화하고 복토 및 식생을 하였으나 복토 흙을 잘못 선정 한 이유로 그 후 복토층 및 그 하부 버럭까지 침식되어 버렸다. 광미장도 또한 침식이 일어나서 오염된 토양이 인근 하천을 통하여 하류로 흘러 내려가 퇴적되었다. 개방되어 있는 갯에서도 지속적으로 산성수가 유출되고 있다. 화력발전소 및 Washing plant 구조물도 방치되어 있고 갯도 및 통기갯도 방치되어 인간이 접근 시 부상을 당할 위험성이 도사리고 있다.

본 광산이 복구되게 된 배경에는 미국 내 제도의 변화 때문이다. 1977년에 노천광산 규제 및 복구법(Surface Mining Control and Reclamation Act : SMCRA)이 미의회에서 통과되었는데, 이 법은 최초로 광산복구에 대한 규정을 마련한 연방법이었다. SMCRA는 1990년 및 1992년에 개정되었다. 이 법에 근거하여 가행중인 모든 탄광중 노천탄광에서는 석탄 1톤당 35센트, 갯채탄광 산에서는 15센트의 복구세를 납부해야만 한다. 이 기금은 다음과 같이 폐탄광 복구에 사용되도록 규정하고 있다.

- 복구세가 징수된 주에서 50%의 복구기금을 사용함
- 연방정부가 나머지 50%를 사용하는 데 이중 20%는 미국농무부가 농촌 소재 폐탄광 복구 프로그램(the Rural Abandoned Mine Program : RAMP)에 사용하도록 할당함.
- 기금 이자는 다른 항목에 사용됨.

2. 현장조사

현장 지표지질조사는 1984년도부터 시작되었으며 광산폐기물의 분포상태, 물리적 특성, 화학적 특성 및 지하수 상태 (수위 및 수질) 등을 파악하기 위해 시행되었다. 지표지질조사 시 다짐시험 및 CBR시험을 수행하기 위해 토질시료가 채취되었다.

1987년 7월 26개소에 대해 총 심도 305m로 Hollow stem auger 장비를 사용하여 시추를 시행하였다. 1.5m 간격으로 표준관입시험을 실시하였고 토양시료를 채취하였다. 이 교란시료들은 연경도시험, 비중시험, 함수비, 입도분석 등에 사용되었다. 불교란 시료는 Thin wall sampler를 이용하여 채취하였으며 일축압축강도 시험 및 변수위 실내투수시험에 사용되었다. 시추공들에는 지하수위 관측공이 설치되었고 폐갱도 내 관측을 위하여 rotary boring 장비를 이용하여 2개소에 암반 지하수 관측공을 설치하였다. 또한 현장들밀도 시험과 Tovane를 이용한 현장 전단시험이 실시되었다(그림 2 참조).

1987년 10월 광미 적치장 내에서 진동식 시추기를 이용하여 천부 광미시료들이 채취되었는데 총 심도는 78m 였다. 1988년 5월 다시 추가 시추를 하여 관측공은 총 35개가 설치되었다. 이와 병행하여 불포화대의 토양수를 채취하기 위하여 심도별로 suction lysimeter를 설치하였다. 관측공은 50mm 구경의 PVC관을 사용하였고 스크린의 길이는 1.5~3.0m 정도이다. 암반 대수층을 제외하고는 스크린 주위에 Ottawa sand를 스크린 상부 1.5m까지 부어 넣은 후 bentonite로 봉한 후 그 상부 구간은 현지의 오염되지 않은 토양으로 채웠다(그림 3). PVC관은 지표 위 0.6m 까지 설치하여 casing관으로 보호하였다. Suction Lysimeter는 다공질 세라믹으로 되어 있으며 polyethylen tube로 지상으로 연결되어 있다. 그 외 지표수의 수위를 측정하기 위하여 weir 및 눈금 막대기가 하천 및 호수에 설치되었다.

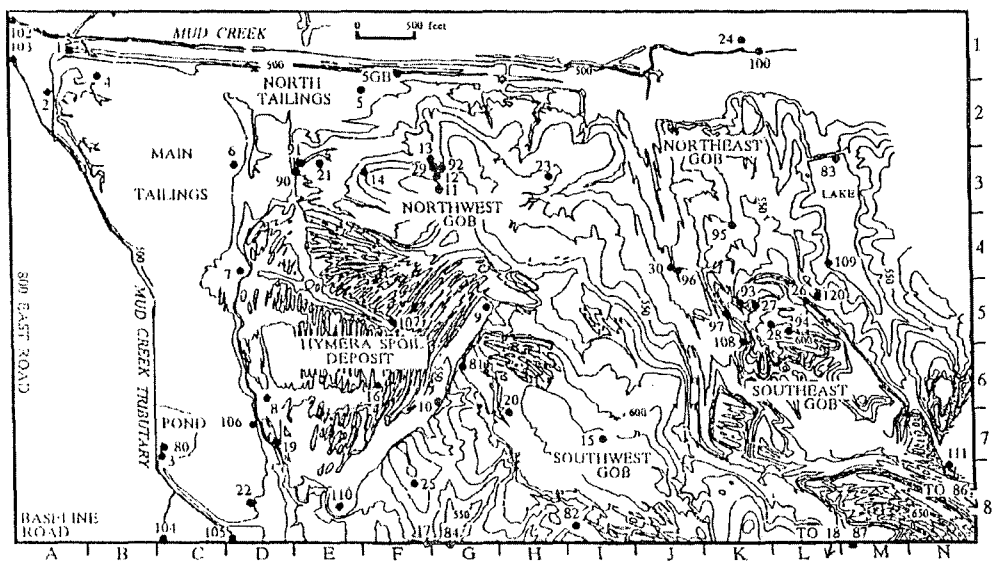


그림 2. 설치된 관측정, suction lysimeter 및 지표수 수위계 설치 위치도

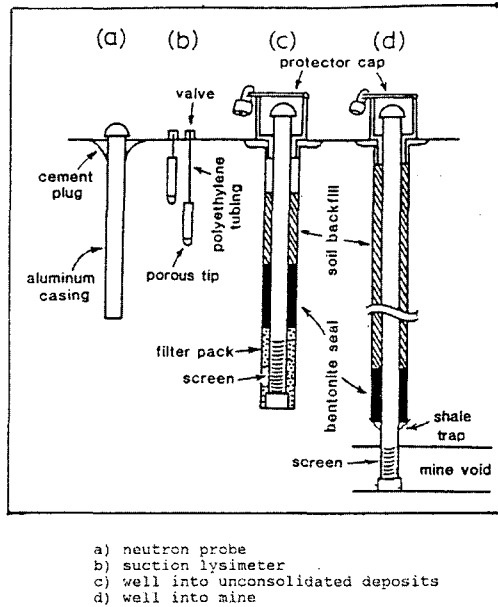
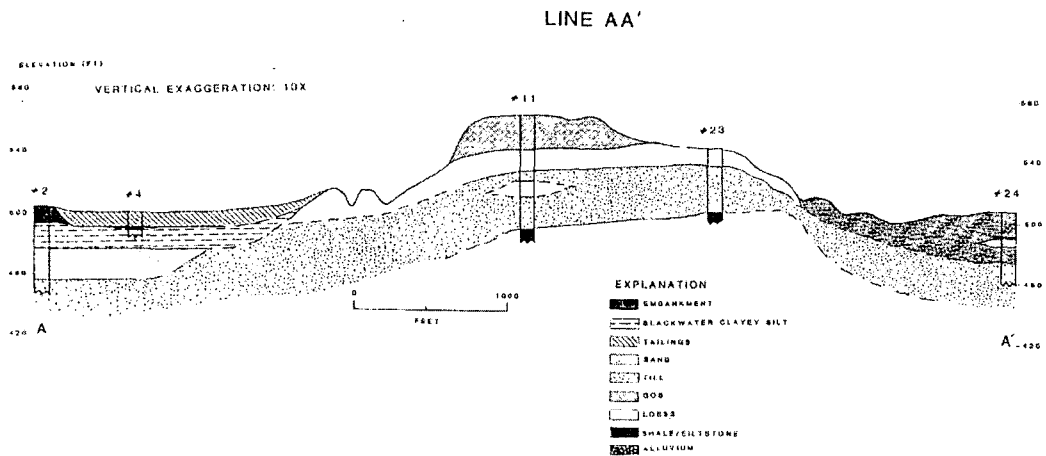


그림 3. 설치된 관측정 및 suction lysimeter 모식도

3. 현장 평가

3.1 토양의 물리적 성질

복토 재료로 사용가능성을 평가하기 위하여 광산 내에 있는 충적층, loess, spoil, till에 대한 실내시험을 실시하였다. 또한, 광산폐기물인 버럭 및 광미의 특성을 알기 위해서 실내시험을 실시하였다. 지표지질 단면도는 그림 4에 나타나 있다.



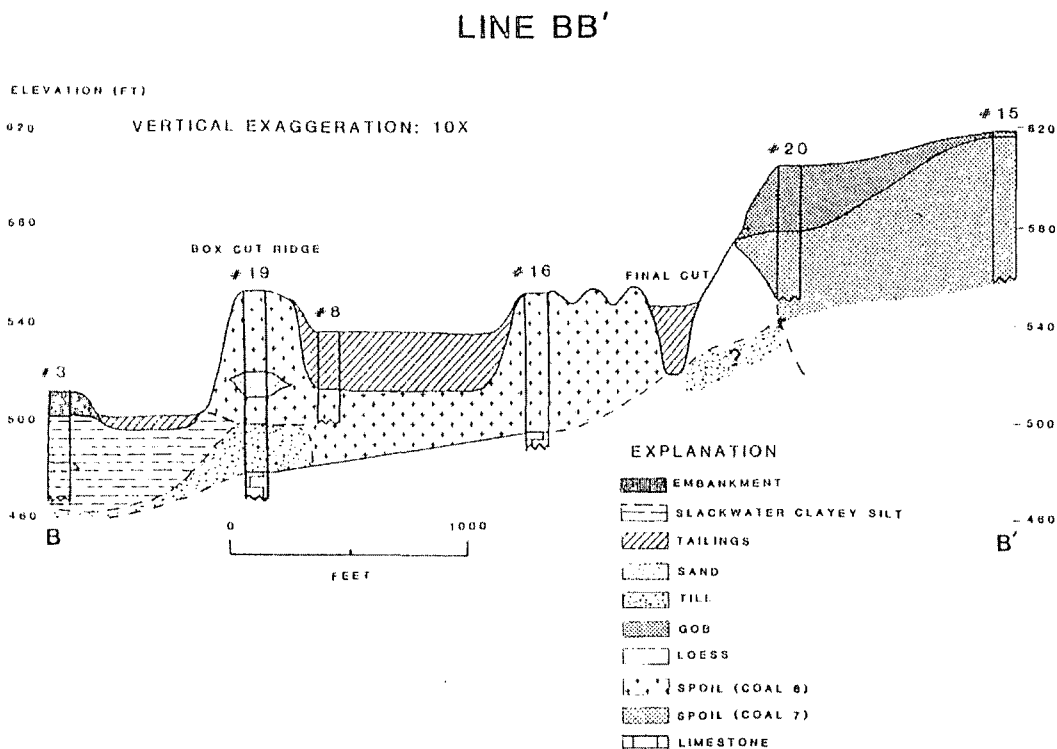


그림 4. Friar Tuck 탄광 지표지질 단면도(평면도는 그림 1 참조)

Spoil은 노천채탄 시 탄층 위에 있던 퇴적층 및 토양이 제거되어 쌓여져 있는 것으로 평행한 층을 형성하고 있다. Spoil은 loess, till, 석회암, 셰일, 사암 및 황철석으로 구성된다. 본 광산의 spoil층은 40여 년 (최대 60년) 전에 형성되어 있어 암편은 풍화작용에 의해 모래, 실트 및 점토로 변해 있다. 본 토양은 자갈질 점토로(GC) 분류되며 물에 의한 침식 저항성이 있어 복토재료로 평가되었다(표 1 참조).

표 1. Spoil 토양의 특성

항 목	결과치
평균함수비 (ω_n)	14.03%
평균 소성지수 (PI)	13.6
평균 액성지수 (LI)	-0.497
평균 건조단위중량 ($\rho_d(\max)$)	1.748 t/m ³
평균 최적함수비 (ω_{opt})	16.6%
다짐 후 투수계수 (k)	10-6 cm/sec
다짐 시 전단강도	5.556~11.10 t/m ²
양 (Quantity)	거의 무제한으로 광산 내에 분포되어 있음
ASTM 분류	GC/SC (세립질은 CL 및 CL-ML)

본 광산에 분포하는 Loess는 풍화되어 점토함량이 기대치 보다 높은 편이다. 풍화되지 않은 loess는 점착력이 거의 없고 공극율이 높으며 투수계수도 높다($k_v > k_h$). 반면에 풍화된 loess는 약간 소성을 보여주고 투수계수도 풍화되지 않을 때 보다 약간 낮게 나타난다. 본 광산의 loess는 실트질 토양이기 때문에 침식에 약하여 복토 재료에서 제외되었다 (표 2 참조).

표 2. Loess 토양의 특성

항 목	결과치
평균함수비 (ω_n)	15.68%
평균 소성지수 (PI)	17.256
평균 액성지수 (LI)	0.033
평균 건조단위중량 ($\rho_d(\max)$)	1.750 t/m ³
평균 최적함수비 (ω_{opt})	16.9%
다짐 후 투수계수 (k)	10-6 cm/sec
다짐 시 전단강도	8.89~11.10 t/m ²
양 (Quantity)	많은 양이 분포되어 있음
ASTM 분류	CL

본 광산 내 분포하는 till은 노천채탄이 된 지역을 제외하고는 약 4.0m의 loess 층 하부에 균질하고 연속적인 층을 형성하고 있다. till은 과압밀된 상태여서 투수성이 낮고 견고하므로 다짐 시 최적함수비를 유지하기 위해서 물을 첨가해야 되므로 채취 및 다짐이 어려워 복토 재료에서 제외되었다. 본 지역의 층적층은 대부분 북쪽 광산경계인 Mud Creek 하천의 flood plain에 퇴적되어 있다. 본 층은 ML로 분류되며 투수계수는 지점에 따라 크게 변하고 동해에 약하고 액상화 가능성도 있어 복토 재료에서 제외 되었다.

광미는 세립질 광산폐기물로 석탄, 황철석 및 셰일로 구성되어 있으며 4.2 ha 크기의 광미장에 적치되어 있다. 평균 함수비는 62.62%이며 평균 건조단위중량은 1.03 t/m³이다. 투수계수는 10-2~10-4 cm/sec인데 심도가 깊어질수록 투수계수는 낮아진다. 버럭(gob)은 갱내채광에 의해 탄을 선별 한 후 남은 조립질 광산 폐기물로 셰일, 석탄, 황철석 및 점토/암편 등으로 구성되어 있다. 광미는 야적되어 있는 데 광산 초기에 야적된 광미더미 내에 20~40%의 석탄이 함유되어 있다. 평균 함수비는 12.37%, 평균 건조단위중량은 1.12 t/m³이다. 버럭 상부의 투수계수는 매우 높으나 하부는 10-6 cm/sec 정도로 낮은 데 이는 하부에 침토가 축적되었기 때문이다. 광미는 철도길, 광산도로, 도로사면에 0.3~2.4m 정도 피복되어 있기도 한다.

3. 2. 토양 오염

광미 및 버럭에 대한 토양시료들이 오염도 측정을 하기 위해서 채취되었다. 대부분의 시료들은 지표 아래 0.0~15.0 cm 구간(천부시료)에서 채취되었지만 일부는 75.0~90cm 구간(심부시료)에서 채취되었다 (그림 5 참조). 측정항목은 pH, pyritic sulfur, sulfate sulfur 그리고 Fe, Ca, Mg, K, Na, Zn, Cu, Mn, B 및 Al 이다. Pyritic sulfur는 식물재배 시의 산성도를 평가하기 위해 측정되었

다. 결론적으로 버력은 비균질하고 분석결과도 불규칙적인 양상을 보인다. 평균 pyritic sulfur 양은 천부시료에서 0.04~0.88%이나 심부 채취시료에서는 0.22~3.47%로 측정되었다. 즉, 수십 년 간 황철석의 풍화 및 산화에 의해 버력의 오염 잠재성은 천부에서 많이 감소했으나 심부에는 아직 신선한 황철석이 많이 남아 있다는 것을 의미한다.

Northwest Gob Pile과 Northeast Gob Pile을 비교해 보면 천부의 pyritic sulfur의 함량이 전자(0.88%)가 후자(0.04%)보다 월등히 높은 데 그 이유는 1970년 대 초기 Northwest Gob Pile이 복구되면서 천부의 버력더미가 제거되어 심부의 버력이 지표부에 위치하게 되었기 때문이다.

2개소의 광미적치장 천부에서 채취한 시료의 평균 pyritic sulfur의 함량은 0.1~0.31%이나 심부에서 채취한 시료는 1.79~2.18%를 보여 천부의 불포화대는 수십 년 간 산화에 의해 황철석이 풍화 되었음을 알 수 있다 (그림 6). 천부에서 채취한 시료의 평균 토양 pH는 1.8~3.0으로 극히 산성이었으며 광미장이 버력더미보다 pH가 높게 나타났다.

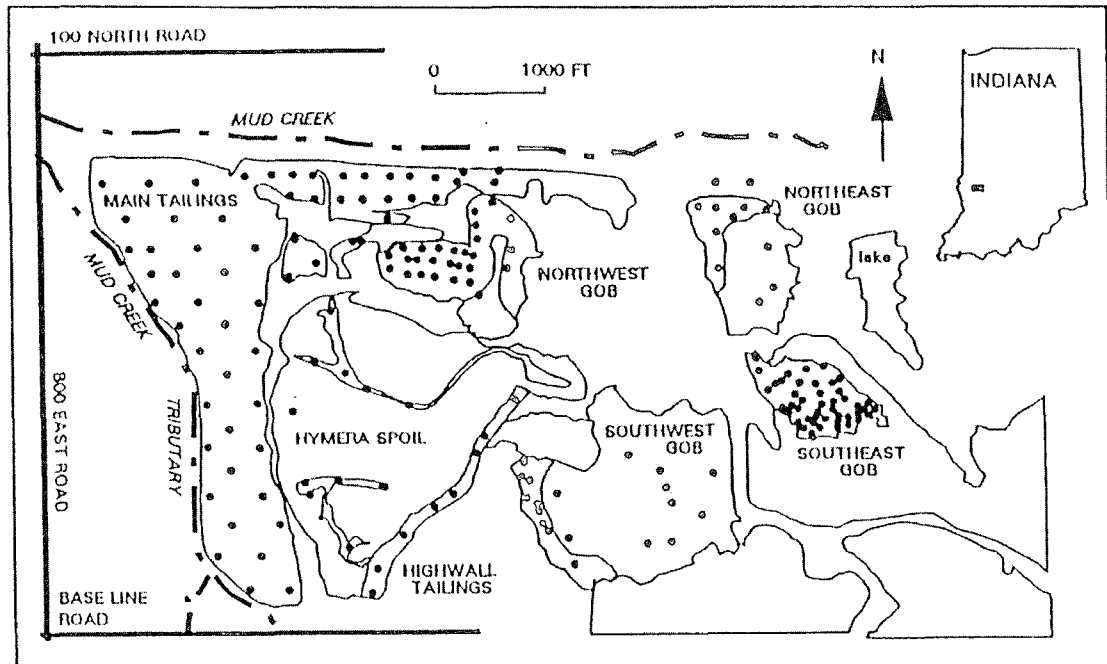


그림 5. 토양시료 채취지점 분포도

3. 3. 수질 오염

석탄광 폐기물에 의해 야기되는 수질 오염은 매우 심각하다. AMD는 보통 고농도의 철, 알루미늄, 망간 이온이 함유되어 있고 부식성이 강하다. AMD가 하천으로 유입되면 수생 환경은 변하게 되고 생물들은 종이 감소하거나 멸종하게 된다. AMD가 지하수계로 유입되면 대수층이 오염되어 식수로 사용할 수 없게 된다.

본 탄광 조사시에는 slug test를 실시하여 수리전도도를 산출하였다. 정수위에서 1.3m 수위를 상승시킨 후 수위회복시간을 계산하였는데 그 결과는 표 3에 나타나 있다. 본 탄광의 천부 지하

수는 spoil, 버럭, 광미 및 교란되지 않은 미고결 퇴적물 내의 자유면 대수층에 함유되어 있다. 미고결 퇴적물은 loess, till 및 하상 퇴적층인데 기반암인 셰일 층 상부에 피복되어 있다.

미고결 대수층은 기반암에 의해 하부층과 연결이 차단되어 있으나 수갱이 있는 지역에서는 천부 지하수 및 심부 지하수가 서로 연결되어 있는 것으로 판명되었다.

지하수위 변동은 대수층의 특성, 기후, 강수량 및 지하수 유출특성 등에 의해서 영향을 받는다. 본 광산에서 가장 표고가 높은 Southwest Gob Pile에서 수위 변화가 가장 심하며 최대수위 및 최소수위의 차는 3.0 m 정도이다. Northwest 및 Southeast Gob Pile에서는 계절적인 지하수위 변동이 나타났다. 여름에 수위가 점진적으로 감소하다 겨울에 급격히 상승하는 데 변화 폭은 Northwest Gob Pile에서 1.2m, Southeast Gob Pile에서 2.0m 정도이다. Highwall Tailing Deposit에서는 지하수위 변동이 거의 없는 반면 Hymera Spoil Deposit에서는 약 1.5m 정도의 계절적인 변동이 나타났다. Main Tailing Deposit, till 및 충적층에서는 1m 내외의 계절적인 지하수위 변화를 보인다. 그러나, 폐갱내에 설치된 관측공에서 지하수위는 계속 상승하고 있다.

수질분석 시료는 1987년 9월부터 1992년 12월까지 5년 동안 채취되었다. 대부분의 관측정에서 시료 채취는 하루 전에 공 내의 지하수를 전부 퍼 낸 뒤 다시 충전 되었을 때 시료를 채취하였으나 구 갱도 내에 설치된 관측공들의 경우에는 시추공 지하수 부피의 3배를 퍼 낸 뒤 시료를 채취하였다. 불포화대의 경우에는 24시간~48시간 전에 lysimeter의 공기를 제거 한 후 모여진 토양수를 채수하였다.

자연수에 함유된 무기물질은 이온의 형태로 들어 있는 데 주 이온들은 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 염소, 탄산염, 중탄산염 및 황산염 등이다. 자연수에서 주요 양이온들을 양이 풍부한 순서로 배열하면 칼슘>마그네슘>나트륨>칼륨이다. 본 광산에서도 이와 유사한 양상을 보여주고 있다.

그림 7은 광미, 버럭 및 spoil의 수질분석 결과를 보여주고 있다. spoil 내의 지하수 오염도는 다른 광산폐기물보다 오염도가 낮은 편이다. spoil은 탄산염 광물(방해석 및 백운석)을 함유하고 있어 산성인 물에서 용해가 잘 되어 물의 알카리도가 증가하게 된다. 산도(acidity)는 Northwest Gob Pile에서는 천부 불포화대가 가장 높았으며 심부로 갈수록 감소한다. Southeast Gob Pile에서는 반대로 심부로 갈수록 산도가 증가하는 경향을 보인다. 포화대의 산도는 두 버럭더미에서 유사하게 나타났다. 이 결과는 토양오염에서 언급한 바와 같이 두 버럭더미의 이력이 다르기 때문이다. Southeast Gob Pile은 1940년 대 이후로 그대로 방치된 채로 있었으므로 심부까지 풍화가 진행되었고 천부의 황철석은 풍화로 인해 분해되어 하부로 유동하였다. 반면에 Northwest Gob Pile은 1970년대 초 복구작업을 하는 과정에서 사면경사를 완화하기 위해 표면의 풍화된 버럭이 제거되어 심부의 버럭이 공기에 노출되어 풍화가 천부에서부터 진행 중에 있다.

지표수의 수질 분석결과는 그림 8에 나타나 있다. 본류는 광산 경계 밖 동쪽 지점에서 오염되지 않은 지표수가 광산 내로 유입되거나 광산지역에서 유입되는 AMD 때문에 광산 서쪽 경계 하류부에서 매우 오염되어 있다. 지류의 경우 남쪽 spoil 능선지역에서는 비교적 오염이 안된 하천수가 유입되거나 광미장에서 유입되는 AMD로 인해 오염되었다가 북쪽 경계 하류부에서는 수질이 향상되는 경향을 보인다. 이로 보아 지류는 서쪽 spoil 능선지역에서 오염되지 않은 하천수가 다량

유입되어 희석되었음을 알 수 있다.

하천수 수질 분석 결과도 지하수 분석결과와 유사하게 나타나는 데, 오염원은 주로 버럭더미 및 광미장이며 spoil은 지표수 오염에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

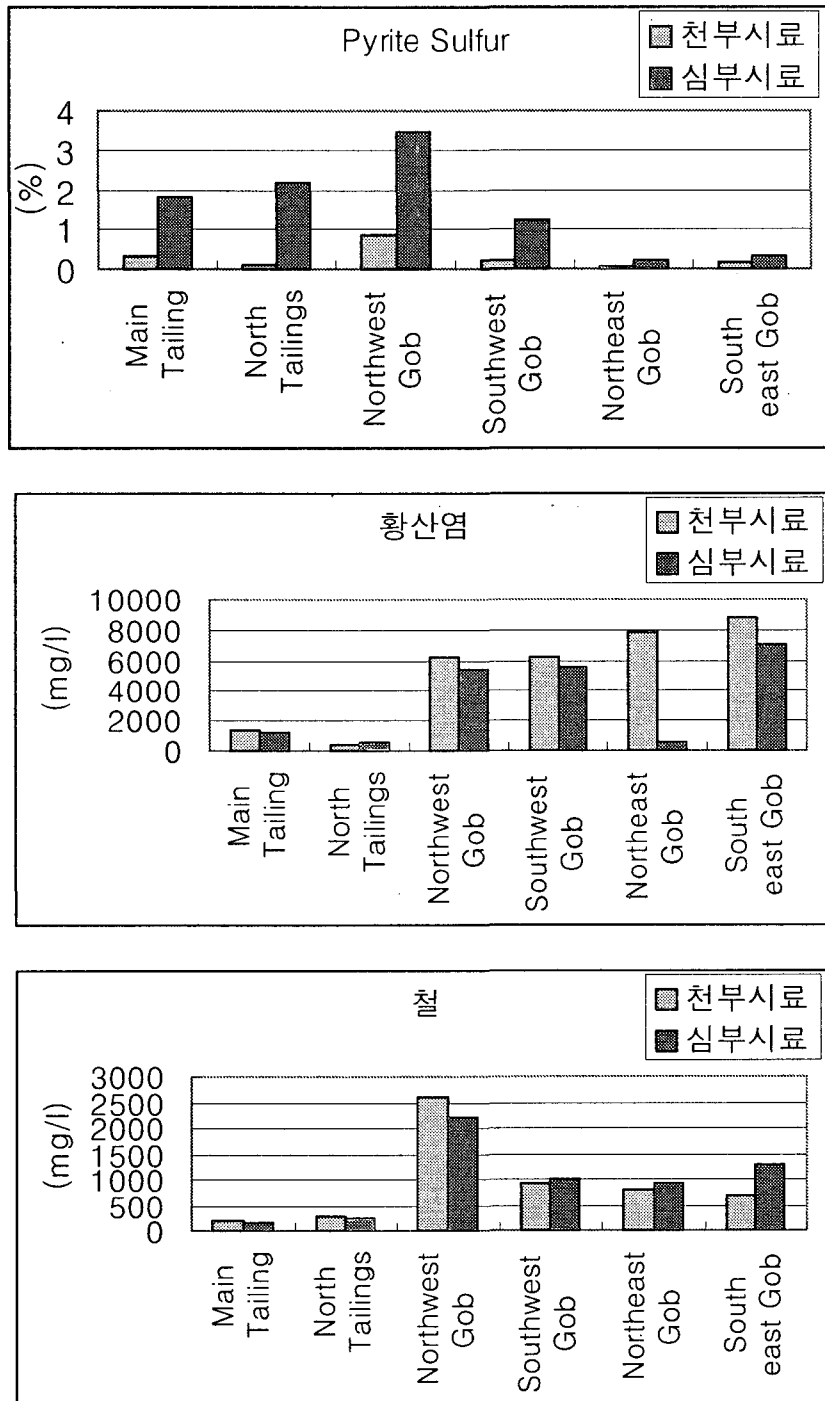


그림 6. 토양시료 분석결과도

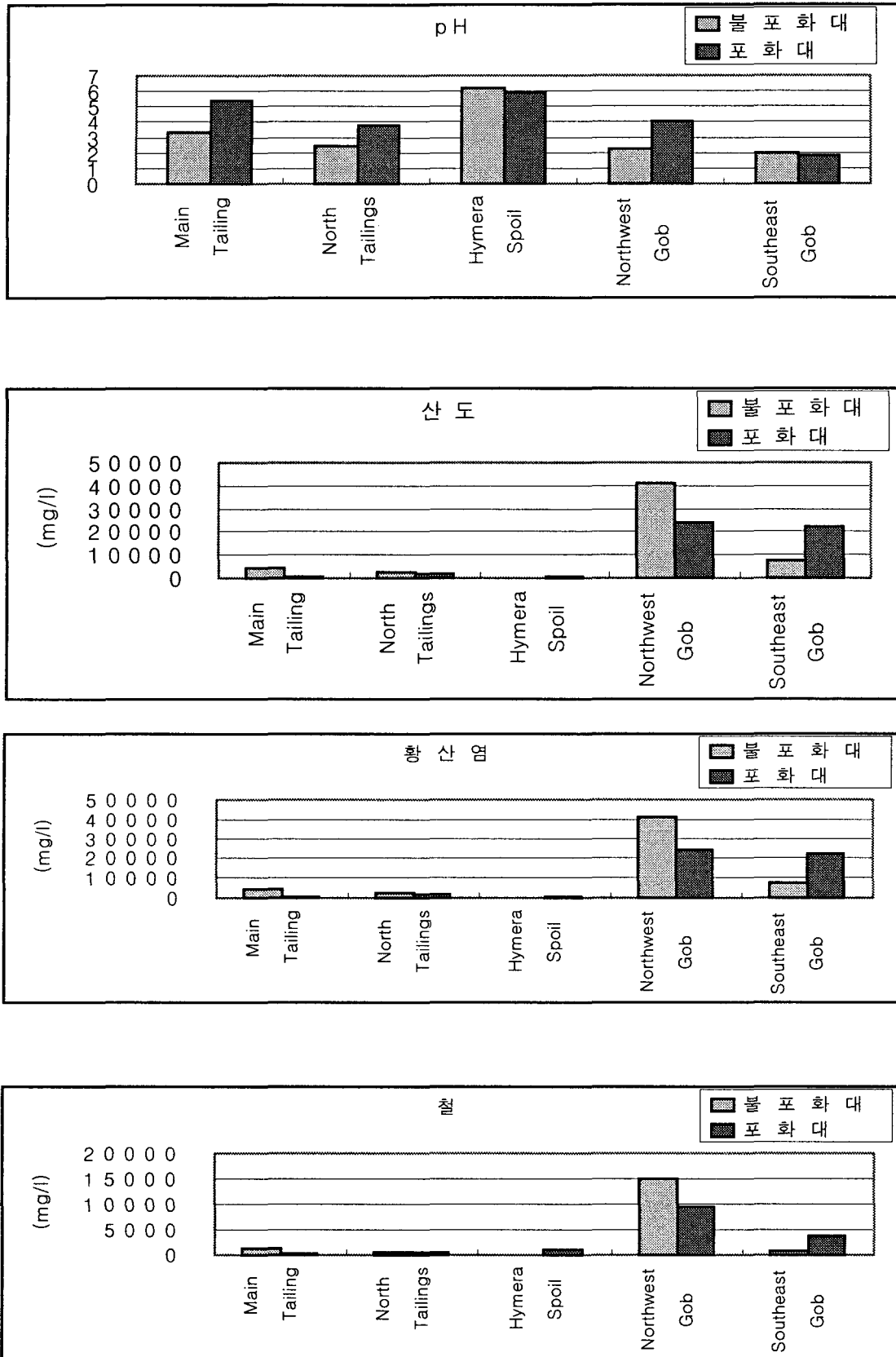


그림 7. 토양수 및 지하수 수질 분석결과도

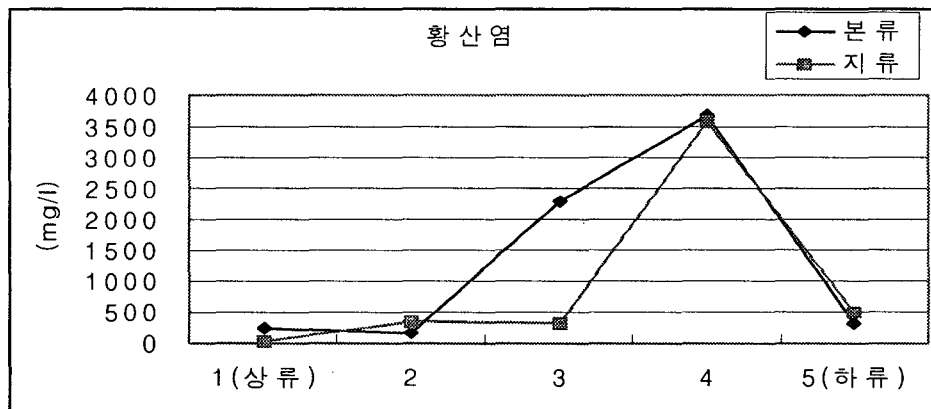
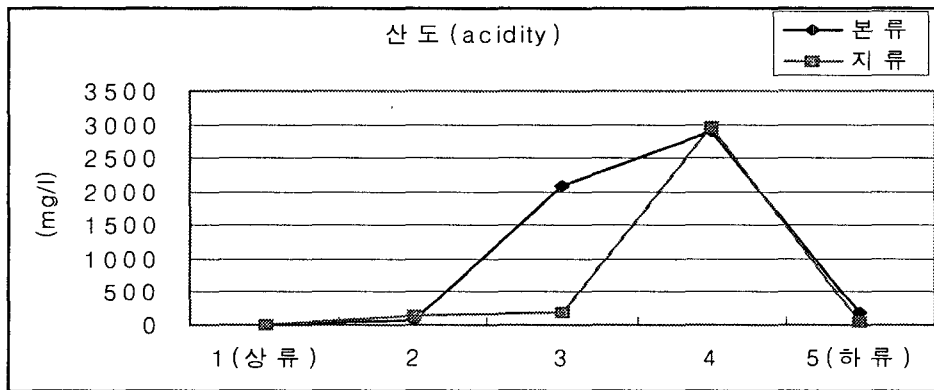
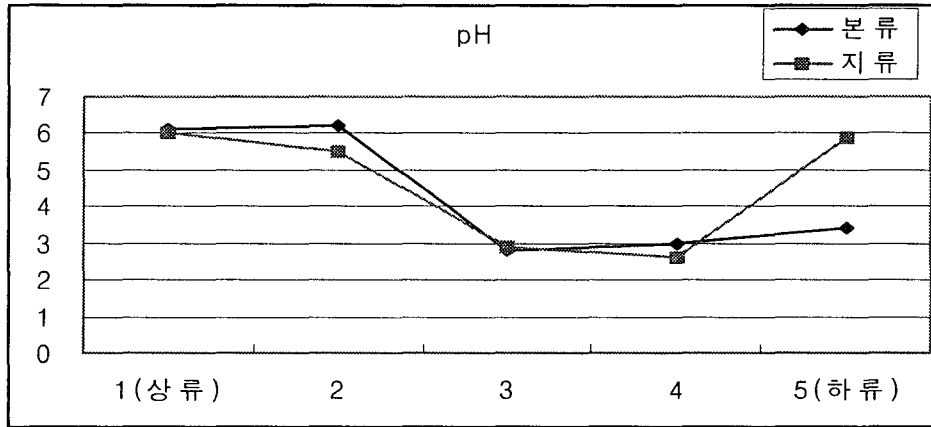


그림 8. 하천수 수질 분석결과도

표 3. 수위회복 시험에 의한 수리전도도

관측정 번호.	대수층 토양	Confined or unconfined	수리전도도 (cm/sec)
1	alluvium	C	3×10^{-4}
2	alluvium	C	7×10^{-4}
3A	alluvium	C	3×10^{-4}
4	tailings	U	1×10^{-5}
8A	spoil	U	3×10^{-4}
10A	tailings	U	1×10^{-4}
11A	gob	U	1×10^{-4}
13A	till	C	1×10^{-4}
13B	till	C	4×10^{-5}
14	gob	C	1×10^{-5}
16A	spoil	C	9×10^{-5}
17B	coal	C	1×10^{-4}
20A	spoil	C	1×10^{-4}
23	till	C	1×10^{-6}
24	till	C	9×10^{-6}

4. 광산 복구 설계

현장조사에 의해 버럭더미 및 광미는 황철석의 함유량이 매우 높아 황철석 산화에 의해 이곳에서 AMD가 계속적으로 유출되어 버럭더미 및 광미가 분포하는 곳에는 식물이 자랄 수 없는 황무지가 되었다. 따라서, 버럭더미 및 광미장은 침식이 일어나서 오염된 토양이 인근 하천을 통하여 하류로 흘러 내려가 퇴적되었다. 개방되어 있는 갭에서도 지속적으로 산성수가 유출되고 있다. 화력발전소 및 washing plant 구조물도 방치되어 있고 갭도 및 통기갭도 방치되어 인간이 접근 시 부상을 당할 위험성이 도사리고 있다. 본 광산은 복구 후의 부지용도가 산림으로 사용될 예정이므로 광해요소 및 향후 용도를 고려해 복구방법을 평가하였다.

기존 탄광 가행 시의 구조물들은 항공사진 판독 및 현장조사에 의해 위치 및 규모를 파악하여 모두 제거하였으며, 접근이 가능한 폐갱도들은 석회석 골재로 입구를 봉쇄하였다. 광산폐기물의 침식을 방지하기 위해서 폐기물의 특성, 조건, 지형 및 양을 고려하여 다음과 같은 방법들이 제시되었다.

- a. 사면경사 완화, 복토 및 식생
- b. spoil 능선 사이에 매립, 복토 및 식생
- c. 복토를 하지 않고 폐기물에 직접 식물 재배

여기서 a 방법은 전통적인 방법으로 주요 버럭더미들의 복구 시 사용되었다. b의 방법은 도로 변에 분포하는 소규모 버럭더미들을 대상으로 고립된 spoil 능선 사이에 매립하였다. c 방법은 광미장들에 사용하였는데 광미적치장의 경우 지형이 비교적 평탄하고 상부에는 풍화작용에 의해 황철석이 고갈된 상태이므로 사용이 가능하였다. 또한, 경사가 가파른 버럭더미의 경우 경사를 완화하는 것이 재정적으로 부담이 많이 되고 천부의 황철석이 풍화되어 고갈된 경우에 실험적으로 사용되었다.

4. 1. 버럭더미 복구

Northwest Gob Pile 및 Southwest Gob Pile은 사면의 경사를 1:3.7로 완화한 후 남아 있는 침식곡은 인근 spoil 능선의 흙을 운반하여 채웠다. 또한, 침식 방지용 terrace를 능선과 평행하게 설치하였으며 terrace에서 유출되는 강수는 우회배수로를 통해 나가도록 설계하였다(그림 9). 우회 배수로에는 부직포를 깔고 약 45cm 심도로 직경 15cm 크기의 집석을 채워 배수로의 침식을 방지하였다(그림 10). 25년 주기의 24시간 강우강도로 배수로를 설계하였으며 유량계산은 Rational법을 이용하였다. Terrace의 구배는 0.5%로 설계하였다. 복토 후 식생 전에 농업용 석회 및 퇴비를 뿌려 식물이 안정되게 자라게 하였다.

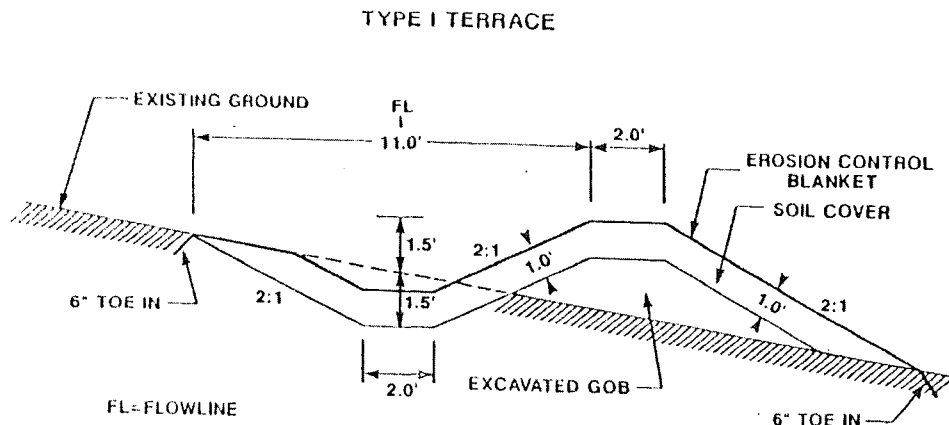


그림 9. 침식방지용 Terrace 모식도

SECTION VIEW OF TYPE III CHANNEL

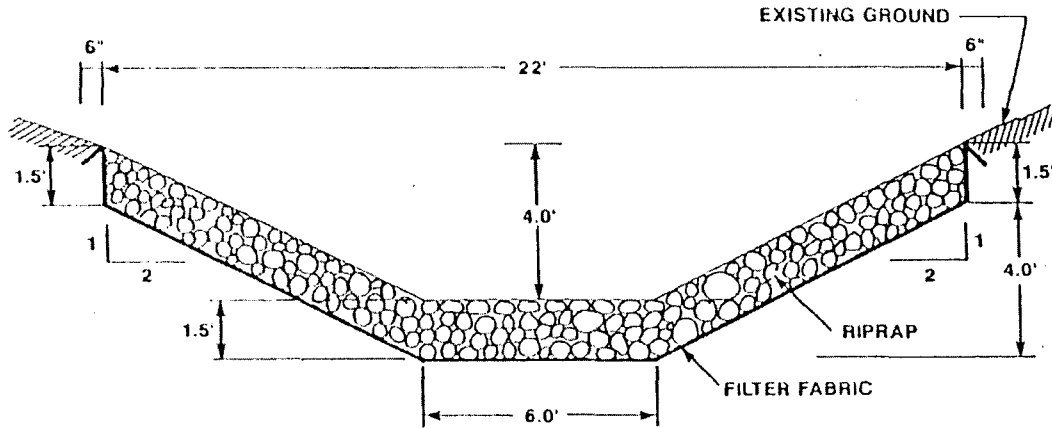


그림 9. 우회 배수로 모식도

Northeast Gob Pile 및 Southeast Gob Pile 경우에는 지형이 가파르고 현장조사 결과 지표부의 황철석은 풍화에 의해 고갈된 상태이므로 직접 재배법을 이용하였다. 즉, 침식방지를 위해 침식곡에 check dam을 설치하여 버력이 하부로 유실되는 것을 방지하고 식물이 성장함에 따라 침식 강도가 완화되어 안정화 상태로 유도하는 것이다. 평탄한 지역에는 농업용 석회를 에이커 당 50톤, 가파른 지역에는 최고 에이커 당 210톤을 살포하였는데 트랙터 및 삽을 이용하여 석회와 지표부 토양이 잘 섞이도록 심도 10cm 정도 혼합하였다. 2년이 경과한 후, check dam 후방에 퇴적되는 침식된 토양의 양은 현저히 줄어들었고 재배된 식물은 잘 성장하고 있었다 (Harper and Olyphant, 1993).

그러나, 사면 경사가 1:1.5이하가 되어야만 식물뿌리가 토양을 유실하지 않고 유지할 수 있다 (EPA, 1976). 본 광산에서도 1:1.5이상의 사면에는 식물재배에 실패하여 황무지로 남아 있다.

4. 2. 소규모 버력더미 복구

도로가에 적치한 소규모 버력더미들은 다짐이 안된 상태로 급경사를 유지하기 때문에 침식작용이 활발하고 따라서 내부의 신선한 황철석이 계속적으로 풍화되어 수질오염을 증대시키고 있다. 이 버력들은 spoil 능선으로 둘러싸인 고립된 지역으로 운반하여 매립한 후 복토 및 식생을 하도록 설계하였다.

4. 3. 광미장 복구

Main Tailing Deposit의 경우 3년동안 첫 해에 45톤/에이커, 2년째 해에 35톤/에이커, 3년째에 25톤/에이커로 총 100톤/에이커의 농업용 석회가 뿌려졌다 (Nawrot, 1988). 풀종자를 살포한 후에는 화학비료 및 퇴비도 첨가되었다. 3년째 해에 야생의 식물들이 급속히 광미장에 자리잡게 되어 자연적인 상태로 환원되고 있다. 농업용 석회에 의해 파생된 알카리도는 상부 45cm의 광미층의 산도를 급격히 감소시켰으나 포화대의 수질의 변화는 거의 없었다.

Highwall tailing Deposit의 경우에는 오염정도에 따라 35~60톤/에이커의 농업용 석회가 뿌려졌다.

5. AMD 처리

본 광산에서 침출되는 AMD에는 3가 철과 알루미늄이 다량 함유되어 있고 (총 Fe 농도 : 4,600-8,900mg/l, Fe³⁺ 농도 : 0-80mg/l, 알루미늄 : 540-3,600mg/l), pH가 낮았는데 (pH 2.1-4.1) 그 이유는 버럭더미 (gob pile)들이 최고 60 여년 동안 방치되어 풍화작용에 의해 버럭더미 내에 막대한 양의 산성침출이 생성되었기 때문이다. 따라서 ALD를 포함한 어느 인공 소택지 방법도 사용할 수 없었다.

인회석 배수로 (apatite drain)는 필자가 처음으로 산성광산폐수에 적용한 기술이다. 광산산성폐수에서 금속을 제거할 수 있는 천연물질의 가능성을 검토하게 되었는데, 조건은 화학반응에 의하여 비용해성 침전물을 생성하고 철수산화물과는 달리 점착성이 없어 인회석 표면을 피복하지 않고, 화학반응 후 pH가 최소한 그대로 유지되거나 높아지게 하는 것이었다. 플로리다에 분포하는 인광석이 이 조건을 만족시켜 주었다.

인회석은 분자식이 Ca₁₀(PO₄)₆X₂ (s)로 X 는 일반적으로 OH⁻ 혹은 F⁻를 대표하며 Ca/P 율은 일반적으로 일정치 않고 결정형태도 불량하다. 천해 (shallow sea)와 같은 인광물이 풍부한 퇴적환경에서는 탄산염 인산 광물이 생성되게 된다 (Stumm and Morgan, 1981). 플로리다 인광석 광산의 인회석은 프랑코라이트 (francolite)로 화학분석에 의한 경험적인 화학식은 다음과 같다 :



1991년 8월 및 9월에 걸쳐 1 개월간 0.95 mm~30 번째 크기의 플로리다 산 인회석을 사용하여 호기성 조건에서 AMD 내의 금속 제거법이 실내에서 실험되었다. 광산산성폐수는 인디애나 남서부에 위치한 Friar Tuck 폐탄광의 버럭더미에서 유출되는 침출수가 사용되었다. 유속을 달리하여 실험한 결과에 의하면 철은 최대 1,200mg/l (유입농도 : 4,600mg/l), 알루미늄 최대 800mg/l (유입농도 : 3,600 mg/l)가 제거되었다. 더욱이, pH는 유입수에서는 2.1이었으나 유출수에서는 3.2까지 높아졌다. 철, 알루미늄, 황산염등의 제거 및 pH의 증가는 유속(1 kg의 인회석을 1.17 X 10⁻⁴ - 1.05 X 10⁻³ l/분으로 통과)에 반비례하였다(Choi and West, 1995).

실내실험 결과에 근거하여, 1994년 9월 30일에 인디애나주 중서부에 위치한 Green Valley 폐탄광에 인회석 배수구가 설치되었다. 이 현장실험의 목적은 실제 폐탄광에서 인회석이 장기적으로 얼마나 금속을 효율적으로 제거하는가를 관찰하는 것이었다. 배수로는 길이 9 m, 폭 3.3 m, 깊이 75 cm이며 광산산성배수는 복구된 버럭더미들에서 침출된다(그림 10 참조). 인회석배수로는 석회석 잡석 (riprap, D₅₀ = 35.6cm)과 filter fabric(투수계수 = 10⁻³cm/sec)으로 피복되어 침식 및 부유성 물질의 퇴적을 방지하였다. 석회석 잡석은 또한 암석여과층으로 사용하기 위해 배수로에서 산성수가 유출되는 말단 부에 설치되었고, 침전못(settling pond)을 형성하기 위해 돌망태(gabion) 구조가 100 m 하류지점에 설치되었다.

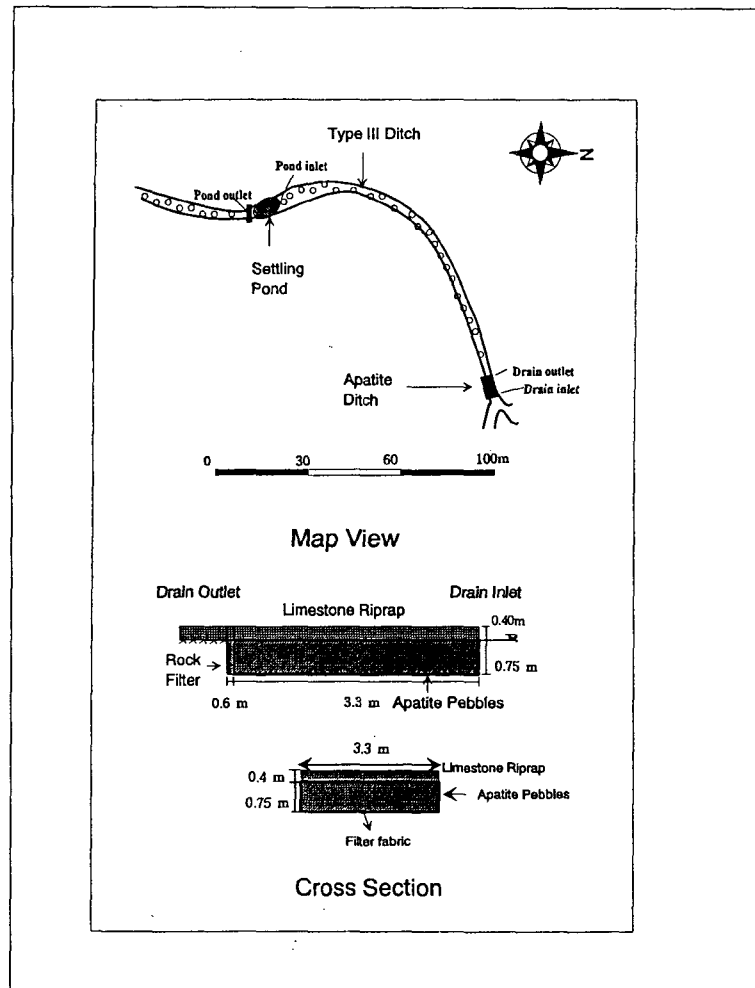


그림 10. 인회석 배수로 모식도

11 개월간의 관측에 의하면 인회석은 철 최대 4,200 mg/l, 알루미늄 최대 830 mg/l, 황산염 최대 13,430 mg/l을 제거하였다. 침전못 출구에서 측정된 유량은 0.05-0.07 l/초 였으나 1995년 1월 11일 폭우가 쏟아졌을 때는 유속이 6 l/초 이상이였으며 수질도 오염되지 않았다. 배수로에 유입되는 산성광산배수와 침전못에서 유출되는 처리된 물의 pH는 3.5-4.1로 거의 일정하였으며 철 및 알루미늄 인산염 침전물 (노란색 및 흰색 부유성 물질)이 침전못에 계속적으로 퇴적되었다(Choi, 1995, 그림 11 참조).

인회석 배수로의 금속제거능력은 pH, 유속, 그리고 인회석 입도에 의해 좌우된다고 사료된다. X선 회절분석에 의하면 침전못에서 채취한 퇴적물 시료에서 단지 석고만이 감지되었다. 즉, 퇴적물들은 비정형의 인산염광물로 사료된다. 그러므로 산성광산폐수와 인회석간의 반응 결과로 생성된 물질들에 대한 조성을 알아보는 작업이 필요하였다. 이 문제를 해결하기 위해 MINTEQA2라는 컴퓨터 프로그램이 사용되었는데, 용해되어 있거나, 흡착되었거나, 고체, 가스상의 물질에 대한 평형을 계산할 수 있는 지화학 평형모델이다. 이 모델은 실내 혹은 자연상태에서 희석된 수용액의 평형조성을 계산하는 데 사용되며 MINTEQA2를 사용하여 광물의 침전, 인회석의 용해도, 인회석의 용해에 따른 pH의 변화, 광물의 침전순서등에 대한 적용 결과는 다음과 같다(Choi et al., 1997).



그림 11. 침전물에 퇴적된 철 및 알루미늄 인산염 침전물

- 수소이온의 경우 처음에는 인산염광물에 의해 중화되는 데, 약간의 인회석을 첨가해도 pH는 급격히 증가한다.
- 인회석의 최대 용해량은 25°C, pH 4.09일 때 0.082 mol/l였으며, 40°C, pH 4.62일 때 0.046 mol/l였다.
- 3가 철은 pH가 낮을 때, 급속히 스트렐렌자이트 (strengite, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)로 침전하였으며 pH가 상승함에 따라 적철석 (hematite, Fe_2O_3) 및 칼슘-논트로나이트 (Ca-nontronite, $\text{Ca}_{0.167}\text{Fe}_2(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)로 변환되었다.
- 산성광산폐수 내의 2가 철은 남철석 (vivianite, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)의 침전에 의해 좌우되며 2가 철이 3가 철로 산화되는 반응은 낮은 pH에서는 거의 발생하지 않았다.
- 알루미늄의 농도는 낮은 pH에서 AlOHSO_4 의 생성에 의해 좌우된다. 다이아스포어 (diaspore, $\text{AlO}(\text{OH})$) 및 명반석 (alunite, $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)도 낮은 pH에서 생성될 가능성이 많은 광물형태이다.
- 망간의 경우 가장 안정된 광물형태인 MnHPO_4 로 침전하여 제거된다.
- 칼슘 및 황산염의 농도는 석고의 침전에 의해 좌우된다. 이상과 같은 지화학모델을 이용한 모의실험결과는 현장실험의 결과를 지지하고 있다. 인회석은 광산산성폐수에서 철, 황산염, 알루미늄을 제거하는 데 효과적이며 pH는 평형점(25°C일 때 pH=4.09)에 도달할 때 까지 유속에 반비례하여 상승한다.

그러나, 정확한 침전과정의 규명 및 이 침전물들의 조성을 알아내기 위해 인회석배수로에 대한

추가연구가 필요하며, 연구결과에 근거하여 인회석배수시스템에 대한 설계를 최적화 하는 것이 필요하다.

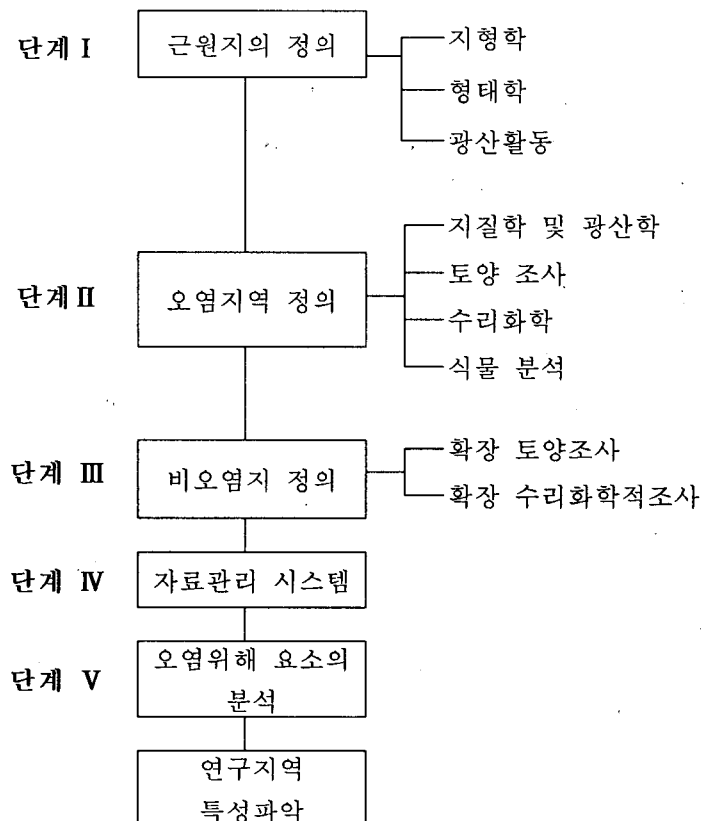
5. 결론 및 제언

산성광산배수는 환원환경에서 생성된 석탄층 및 접촉교대 또는 열수에 의해 생성된 금속광이 공기 및 물에 노출되어 생성되는 자연적인 현상이다. 그러나 국지적인 지역에서 인간이 이 광상들을 환경영향을 고려하지 않고 대규모로 개발할 때 인간 생활에 심각한 영향을 미치는 것이다.

광산산성배수를 처리하기 위해 상기와 같이 여러 기술이 도입 적용되었으며 일부 기술들은 현재도 사용되고 있다. 각 기술마다 입장일단이 있으므로 경비의 과다, 유지 및 관리에 대한 지속성 여부, 공간의 확보 여부, 지역적 특수성에 맞춰 가장 적합한 방법을 채택하여야 하며 꾸준히 채택한 기술의 개량 및 새로운 기술의 첨가가 요구되고 있다.

따라서, AMD 오염지대에 대해 획일적으로 같은 처리방법을 채택하여 사용하는 것보다 각 지역 또는 광산산성배수가 유출되어 나오는 광산폐기물의 특성 등을 고려하여 거기에 맞는 기술들을 복합적으로 또는 단독으로 사용하되 처리방법 채택 시 신중을 기할 것이 요망된다. 이를 위해서는 표 4와 같이 단계적으로 광산폐기물 및 AMD의 특성을 분석, 평가 및 자료관리가 수행되어야 한다.

표 4. AMD 발생 광산에 대한 특성 평가 흐름도(Gray, 1997)



<참고문헌>

- Choi, J.C., 1995, Environmental evaluation, characterization, final reclamation design and acid mine drainage analysis for the Friar Tuck Abandoned Coal Mine site, southwestern Indiana, a Ph.D thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, p. 333.
- Choi, J.C, and T.R. West, 1995, Evaluation of phosphate pebbles as a precipitant for acid mine drainage treatment, Environmental and Engineering Geosciences, Volume 1, No. 2, GSA and AEG, p. 163-171.
- Choi, J. C., T. R. West and Y. K. Seol, 1997, Application of MINTEQA2 to the Evaluation of Apatite as a Precipitant for Acid Mine Drainage Treatment, Environmental and Engineering Geosciences, vol. 3, no. 2, The Association of Engineering Geologists and the Geological Society of America.
- EPA, 1976, Erosion and Sediment Control, EPA-625/3-76-006, Environmental Protection Agency, USA, 136 p.
- Gray, N. F., 1997, Environmental impact remediation of acid mine drainage : a management problem, Research article, Environmental Geology, pp. 62-71.
- Harper, D and G. Olyphant, 1993, Direct revegetation of abandoned coal refuse deposits in Indiana : Its effects on hydrology, chemistry and erosion, Final Report to the Indiana Division of Reclamation concerning research and reclamation feasibility studies at the Friar Tuck site, Sullivan and Greene Counties, Indiana, Indiana Geological Survey, Bloomington, USA, 37 p.
- Nawrot, J. R., 1988, Soil Analyses of main tailings deposit, in research and reclamation feasibility syudies at the Friar Tuck site, Sullivan and Greene Counties, Indiana, First annual report to the Division of Reclamation from Indiana Geological Survey.
- Stumm, W. and J.J. Morgan, 1981, Aquatic Chemistry : An introduction emphasizing equilibria in natural waters, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 780 p.