

폐석적치장의 산성배수발생 및 수리특성 분석

The Acid Rock Drainage and Hydraulic Characteristics of the Waste Rock Dump

정영욱* · 지상우** · 임길재***

Cheong, Young Wook · Ji, Sang Woo · Yim, Gil Jae

Abstract

This study was carried out to plan the prevention of the generation and discharge of Acid Rock Drainage (ARD). The Acid Base Accounting(ABA) test was performed for geological materials such as pit wall, waste rock and stream sediments near the Imgi abandoned pyrophyllite mine in Busan, Korea. In addition, hydraulic characteristics were tested with the disk tension infiltrometer around the waste rock dump. Maximum Potential Acidity(MPA) of geological materials near the Imgi mine was 246.942kg H₂SO₄/t, and maximum Acid Neutralising Capacity(ANC) was 8.7kg H₂SO₄/t. These results indicate the pit wall and waste rock, except most of stream sediments are acid generating geological materials. These have salt and free hydrogen ion which resulted from oxidation of sulfides. Hence they could be convert rain water to acid rock drainage. Although the waste rock dump of the Imgi mine have very low infiltration rate, slopes of the waste rock dump have many "V" type erosion gullies and multi-layers. These gullies and multi-layers have coarse clastic particle layers which have very large hydraulic conductivity. Through this coarse clastic particle layer a large part of rain flow into ground. And also this layer could function as aeration path which induced oxidation of sulfide minerals and generation of ARD continuously.

Keywords : ARD, ABA test, Pyrophyllite mine, Waste rock dump, Infiltration

요 지

부산광역시 소재 폐납석광산인 임기광산 채굴적 및 폐석적치장 및 하상퇴적물에 대해 산-염기 평가(ABA test)와 폐석적치장 상부에 대해 디스크-장력침투계를 이용하여 수리특성을 분석하였다. 임기광산 폐석적치장 주변에서 최대 산 발생력(MPA)은 246.942kg H₂SO₄/t였고, 산 중화능력(ANC)은 최대 8.7kg H₂SO₄/t로 나타나 노출된 채굴적 암반 및 폐석은 ARD를 발생하는 지질물질로 나타났다. 또한 이들에는 이미 황화광물이 산화되어 암석 표면에 염 및 자유수소 이온을 보유하여 강우와 접촉시 표층수 및 침투수 등을 ARD로 변화시키는 지구화학적 특성을 지닌 상태로 판단된다. 임기광산의 폐석적치장은 비록 매우 낮은 침투율을 갖고 있으나 폐석적치장 법면부에 심한 침식작용으로 V자형 침식골이 노출되어 있고 노출부위에 수리전도도가 큰 쇄설층들이 노출되어 강우의 침투경로 역할을 할 것으로 판단된다. 이러한 굽은 쇄설성 입자층의 노출은 지표에서 생성된 ARD 통과 기능뿐만 아니라 공기의 이동 경로가 되어 폐석내 포함된 황화광물의 지속적인 산화작용을 유발시키는 수리적 특성을 보유한다고 할 수 있다.

주요어 : 산성암석배수, 산-염기 평가, 납석광산, 폐석적치장, 침투율

* 정희원 · 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원

** 비희원 · 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 신진연구연구원

*** 정희원 · 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원

1. 서론

황화광물이 공기 및 물에 노출되면 금속성분을 함유한 산성광산배수(Acid Mine Drainage: AMD) 혹은 산성 암석배수(Acid Rock Drainage: ARD) 등이 유출되어 기술적, 환경적 및 사회적 문제를 유발시키므로 광산현장이나 대규모 암반굴착과 폐석이 발생하는 토목 건설 현장에서 ARD의 사전 예측 및 이의 관리가 중요하다. 임기납석광산에 대한 조사연구로서, 1990년 중반부터 최근까지 여러 연구자들(민정식 등, 2000, 박맹연 등, 2000, 염승준 등, 2002)에 의해 ARD에 의한 수질오염 현황과 침전물 특성, 중화시 용존성분의 거동, 반응경로 모델링 연구 등이 보고된 바 있다. 이러한 선행 연구들은 임기납석광산 폐석적치장에서 기원한 침출수에 의해 인근 하천의 오염 조사 내용들이 대부분이었고 ARD에 의한 폐석장 복원연구 사례는 미흡하다.

ARD 영향을 줄이기 위해 선택할 수 있는 방법으로, 1) 광산폐기물 처리법과 2) 유출되고 있는 ARD 수처리법을 고려할 수 있는데, 1) 방법은 ARD 발생을 근원적으로 줄이고자 하는 개념이고 2) 방법은 1) 방법의 적용이 어려울 때 적용하는 방법으로 지속적인 유지관리가 필요하다는 단점이 있다. 현재 임기광산 ARD 기원은 접근이 불가능한 수몰된 지하 채굴적이 아닌 접근 가능한 장소이므로 1)과 같은 방법이 적용 가능한 곳이다. 따라서 이 지역의 ARD 발생을 저감하기 위해서는 현장조건에 적합한 토양 혹은 차수막에 의한 복토법, 침투류 배제, 염기 시용법 등 Covering 기술이 적용 가능할 것이다.

현재 광산폐기물에 의한 ARD 영향을 방지하기 위해 가장 효과적이고 우선적인 방법으로 폐기물 상부에 Cover를 시공하는 방법이며 Cover system의 목적은 크게 비산 및 침식방지, 산소유입 차단에 의한 산 형성 폐기물의 안정화, 침투류 조절을 통한 오염물질 방류 억제, 그리고 식생토 제공 등을 목적으로 한다. 그러나 이러한 Cover system 중 어떤 system을 선정하기 위해서는 현장 조건(예: 폐기물 특성, 기후, 지형 등)을 평가한 후 이에 부합되는 효과적인 Cover system이 선택되어야 할 것이다.

폐석적치장에 의한 산성광산배수의 형성을 차단하거나 산성광산배수의 유출을 방지하기 위해서는 폐석적치장의 산발생능력 등 폐석 자체의 특성과 함께 폐석적치장의 지하학적 형태 및 수리특성 등을 파악하는 것이 필수적이다.

폐석적치장과 같은 경사면이 있는 지형에 내린 강수의 표면흐름(surface runoff)은 두 가지, 즉 잉여침투 지표유하수(infiltration-excess overland flow : 그림 1의 flow path 1)와 포화 지표유하수(saturation overland flow : 그림 1의 flow path 5)의 형태를 갖는다. 잉여침투 지표유하수는 토양의 침투율(infiltration)보다 많은 양의 강수가 있을 경우에 발생된다. 토양층으로 침투된 강수는 지하수로 충전되거나(그림 1의 flow path 2), 경사면을 따라 얇은 지표하에서 침투류로 흐르며(through flow ; 그림 1의 flow path 3). 경사면 하부바닥 부근에서 침출되기도 한다(그림 1의 flow path 4). 잉여침투 지표유하수와 포화 지표유하수는 해당지역의 수리학적 특성에 의해서 결정되므로 침출수 유출 방지를 위해서 수리수문특성의 평가는 ARD 발생 저감방지를 위해 중요한 요소이다(Guebert and Gardner, 2001).

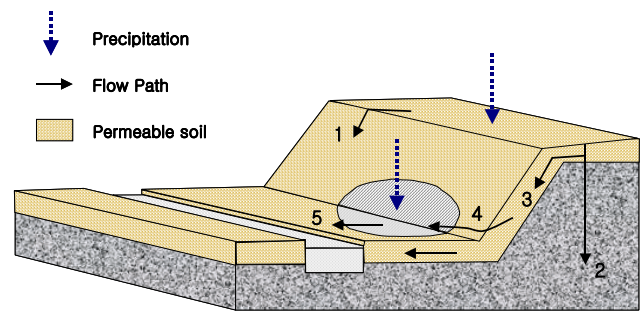


그림 1. Flow paths of precipitation on hillslopes, including (1) infiltration-excess overland flow, (2) ground water recharge, (3) throughflow, (4) return flow (seepage), and (5) saturation overland flow (Guebert and Gardner, 2001).

본 연구는 부산광역시 소재 임기납석광산에 의한 산성광산배수의 피해를 차단하기 위한 연구의 일환으로 임기납석광산 폐석적치장 주변에 대해 채굴적 암석, 폐석장 폐석 및 인근 수계 퇴적물에 대한 산-염기 평가 등을 통해 지구화학적 특성을 평가하고, 디스크-장력침투계(Disk tension infiltrometer)를 이용하여 불포화 수리전도도, 포화 수리전도도, 토양의 미세공극 모세관 길이, 수착도(sorptivity) 등을 구하여 수리특성을 평가하였다. 연구결과로 제시되는 폐석적치장 주변의 지구화학적 및 수리특성은 임기납석광산에 의한 수질 및 토양오염 정화시설 또는 오염방지시설의 적용을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 임기납석광산 일반현황

임기납석광산은 행정구역상 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치하며, 1980년부터 가행되다가 1992년에 폐광되었다(대한광업진흥공사, 1988). 이 지역 지질은 경산 누층군의 하양층군에 속하는 대양동층과 이들 퇴적암층을 피복 또는 관입한 유천층군의 화산암류 및 후기 백악기 불국사 심성관입암이 분포한다(이민성과 강필중, 1964). 납석광화대는 일반적으로 남북방향을 따라 렌즈상으로 발달되어 있으며, 안산암질암이 열수변질작용을 받아 생성된 혼합형 납석광상이다. 광체는 광구 동남부 지역에서 N60°W~EW 주향의 판상광체이나, 부분적으로는 파이프상의 형태로 부존되기도 한다(대한광업진흥공사, 1987). 주구성광물은 석영, 견운모, 납석, kaolinite 및 황철석이며, 광상의 변질특성을 Rose and Burt(1979)가 제시한 주구성광물의 함량에 따라 분류하여 보면 규화작용, 견운모화작용, 납석화작용, 점토화(intermediate argillic) 작용 및 황화물 부화로 요약될 수 있다(전효택 등, 1991). 황화물 부화는 실제로 고품위 광화대 인접부에서 세립질의 황철석(최대 30% 포함)이 산점상 또는 열극 주변에서 농집상으로 분포하는 황화광염대가 발달되어 있다(박맹언, 2000).

임기납석광산의 광산면적은 4ha(40,000m²)로 노천광 형태로 채굴되었다. 생산실적은 1983년부터 1985년까지 65,850톤이다. 산출되는 납석의 형태는 Muscovite(sericite)로 구성된 sericite type의 납석이다. 현재 임기납석광산의 폐석적치장은 크게 두 부분으로 구분된다(그림 2). 폐석적치장 A는 단의 구분이 따로 없이 채광장 직하부 부근에 위치하고 있으며, 풀이 많이 자라고 있었다. 한편 폐석적치장 B는 6개의 소단으로 적치되어 있으며, 중화를 위해 중간중간 석회를 살포하여 백색의 석회분이 육안으로 관찰된다. 폐석적치장 하단에서 각각 침출수가 발생하여 소하천으로 흐르는데 폐석적치장 A에서는 유량이 매우 작고 비온 직후에만 흐르며, 폐석적치장 B에서는 유량의 변화는 있지만 꾸준히 침출수가 흐른다. 또한 광산과 하천의 경계부인 옹벽에서 폐석적치장 A가 끝나는 곳과 폐석적치장 B가 끝나는 곳에서 각각 침출수가 유출되고 있다. 폐석적치장 A의 침출수는 약 2.8m³/day의 유량을 갖고, 폐석적치장 B의 침출수는 약 31m³/day의 유량을 갖는다. 하천의 수질에 크게 영향을 주는 것은 폐석적치장 B의 옹벽에서 유출되는 침출수

로 판단된다. 연구지역이 포함된 1/25,000 수치지형도를 이용하여 구한 폐석적치장 A 및 B의 평면적은 각각 20,000m² 및 33,000m²이었다. 임기납석광산을 포함하는 집수역 수계는 수영강과 합류 후 최종적으로 부산시의 식수원인 회동저수지 상류로 유입되므로 부산시 상수원의 보호차원에서 중요한 집수역에 해당된다.

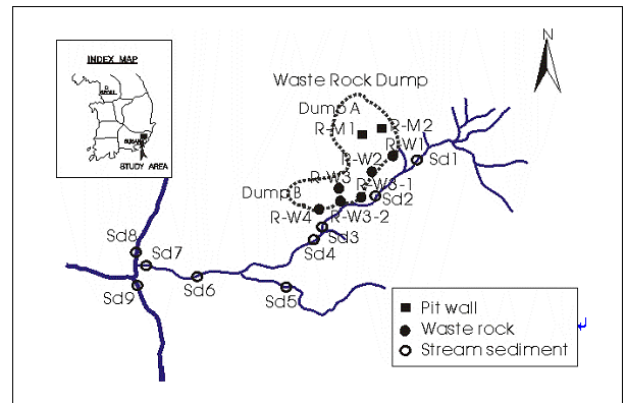


그림 2. Sampling site of waste rocks and stream sediments around the Imgi mine.

3. 연구방법

3.1 침출수 수질 분석

임기납석광산 폐석적치장 침출수의 오염도를 파악하기 위해 폐석적치장 B의 침출수의 수질과 유량을 2004년 5월, 6월, 7월 3회 조사하였다(그림 2의 Sd3와 동일 지점). 침출수 시료는 0.45μm의 Nitro Cellulose Membrane Filter로 부유물질을 제거한 후 양이온 분석용과 음이온 분석용으로 나누어 보관하였다. 양이온 분석용 시료의 경우, 시간이 경과함에 따른 양이온들의 벽면흡착을 방지하기 위해 농질산을 가하여 pH를 2 이하로 만들어 보관하였다. 수소이온농도(pH; Toa pH meter), 산화-환원전위(ORP; Toa Eh meter), 온도, 전기전도도, 총용존고형물량(TDS; 이상 Orion 130 conductivity/TDS meter) 등은 시료 채취시 현장에서 측정하였다. Fe_{total}, Al, Mn, Zn, Cu, Pb 등의 양이온은 한국지질자원연구원의 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrophotometer; Jobin Yvon 38)를 이용하여 분석하였다. 음이온 F와 SO₄²⁻는 역시 한국지질

자원연구원의 IC(Ion Chromatography; Dionex series)를 이용하여 분석하였다. Fe^{2+} 는 측정용 시약에 반응시켜 휴대형 분광광도계(Hach-DR 2010, Hach 사)를 이용하여 분석하였다.

3.2 폐석 및 퇴적물 산 발생능

임기납석광산 주변 폐석 적치장에서 폐석 6개, 인근 수계 퇴적물 9개 그리고 채굴적 암석 2개 등 총 17개 암석 및 퇴적물을 채취하였다(그림 2). 채취된 시료를 이용하여 염과 자유 수소이온의 함량을 평가할 수 있는 $pH_{1:2}$ 및 $EC_{1:2}$ 분석, 산-염기평가(ABA: Acid Base Accounting test), 순 산발생 잠재력(NAPP: Net Acid Producing Potential) 및 순 산발생(NAG: Net Acid Generation) 평가를 수행하였다.

$pH_{1:2}$ 및 $EC_{1:2}$ 는 시료 및 증류수를 1:2(w/w) 비율로 섞어서 12시간 경과후 pH 및 EC meter를 이용하여 측정하였다. ABA test는 시료중에 산을 발생시키는 광물(황화광물)과 산을 중화하는 광물(주로, 탄산염광물) 사이의 균형을 판단하기 위해 수행된다. ABA test 결과로부터 어떤 시료가 산을 발생시키는지 산을 중화시키는지에 대해 구별하는 도구로 사용하였다. 산 발생력을 평가하기 위해 습식법에 의해 총 황(S)함량을 측정하여 식(1)을 이용하여 최대 산 잠재력(MPA: Maximum Potential Acidity; $kg H_2SO_4/t$)을 계산하였다.

$$MPA = \text{total S}(\%) \times 30.6 \quad (1)$$

산 중화능력(ANC: Acid Neutralising Capacity) 시험은 황화광물이 산화작용으로부터 유래된 산을 얼마만큼 중화할 수 있는가에 대한 정도를 평가하는 시험으로 Sobek method(1978)에 의하였다. 총 황 및 ANC 자료를 이용하여 NAPP를 평가하였다.

NAG test는 ABA 방법들과 병용해서 ARD 예측에 활용하는 하나의 도구이다. 본 시험법에는 일정량의 시료에 포함된 황화광물을 과산화수소를 인위적으로 첨가하여 산화시켜 반응용액의 pH를 측정하고(NAG_{pH}), 알카리 첨가를 통해 적정을 하여 이때 발생된 산도를 측정한다($NAG_{pH4.5}$ 및 $NAG_{pH7.0}$). NAG시험은 -200 mesh 시료 2.5g을 취하여 500ml 비이커에 넣고 15% H_2O_2 250ml를 첨가하였

다. 이후 watch glass로 덮고 Hot plate(80~90°C)에서 기포방출이 없어질 때까지 천천히 가열하였다. 이후 실온으로 냉각한 다음 증류수로 최종 부피가 250ml가 되도록 하였다. 이 용액의 pH를 기록하고 NAG_{pH} 로 하였다. 이후 pH 4.5 및 pH 7.0까지 적정하면서 $NAG_{pH4.5}$ 및 $NAG_{pH7.0}$ 을 구하였다. NAG 계산은 식 (2)에 의하였다(Stewart et al, 2003).

$$NAG = (49 \times V \times M) / W \quad (2)$$

여기서, NAG=순 산 발생량($kg H_2SO_4/ton$), V=적정에 사용된 NaOH 소모량(ml), M=NaOH 농도, W=시료무게(g)이다.

폐석과 퇴적물 시료의 광물조성을 살펴보고자 X-ray 회절(XRD: X-ray diffraction)분석을 수행하였다. XRD 분석은 한국지질자원연구원의 Phillips X'pert MPD 모델을 이용하였다.

3.3 디스크-장력 침투계를 이용한 침투 시험

디스크-장력 침투계는 강수에 의해 직접적으로 영향을 받는 지표부근의 불포화대의 수리특성을 추정하기 위해 고안된 것이다(White and Sully, 1987; Hussien and Warric, 1993a, b). 이 시험을 통해 불포화 수리전도도, 포화 수리전도도, 토양의 미세공극 모세관 길이, 수축도(sorptivity)를 구할 수 있다.

먼저 각각의 다른 주어진 장력하에서 시간에 따른 누적 침투량을 측정하는데, 정상상태에서 단위 면적당 침투율(Q)을 다음과 같이 구할 수 있다(Wooding, 1968)

$$Q = K_{wet} \left(1 + \frac{4\lambda}{\pi r}\right) \quad (3)$$

여기서, λ 는 미세공극의 모세관력 범위, r은 침투계의 디스크 반경이며, K_{wet} 는 수리전도도이다. 토양입자의 크기가 균질하고 다져진 상태에서 수리전도도는 지수함수로 나타낼 수 있다고 보면, 다음과 같은 Gardner(1958)식으로 표현할 수 있다.

$$K = K_{sat} e^{\left(\frac{-h}{\lambda}\right)} \quad (4)$$

여기서, K 는 불포화 수리전도도이고 K_{sat} 는 포화 수리전도도이다. 두 번의 다른 장력을 주고 실험을 한다면, 다음과 같은 식으로 λ 를 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{h_2 - h_1}{\ln(Q_2 - Q_1)} \quad (5)$$

여기서, Q_1 과 Q_2 는 압력수두 h_1 과 h_2 에서의 정상류에 도달했을 때의 침투율이다. 식 (4)와 (5)를 결합하여 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = K_{sat} e^{-\frac{h}{\lambda} [1 + \frac{\Delta\lambda}{\pi r}]} \quad (6)$$

이 식을 통해 포화 수리전도도(K_{sat})와 모세관길이(λ)를 구할 수 있다.

임기납석광산 폐석적치장은 공간적으로 두 부분으로 나뉘어 있으며 폐석적치장 A는 복토 및 식재로 조성되어 있고 침출수량이 미미하다. 그러나 폐석적치장 B는 폐석 자체가 그대로 노출되어 산성배수 발생 및 오염부하가 상대적으로 폐석적치장 A에 비해 크다. 따라서 침투시험은 주된 오염원으로 작용하는 폐석적치장 B에서 이루어졌다. 사용된 침투시험기는 미국 SMS사의 Disk type tension infiltrometer로 disk의 크기는 직경 20cm이다(그림 3). 침투시험을 수행한 지점은 4개의 지점으로 폐석적치장 B의 하단을 대표할 수 있는 곳, 폐석적치장 B의 제 1 소단과 제 3 소단, 그리고 오염침출수가 최종으로 하천에 유입되는 경로로 판단되는 침출수 유출지점의 상부에서 수행되었다(그림 4).

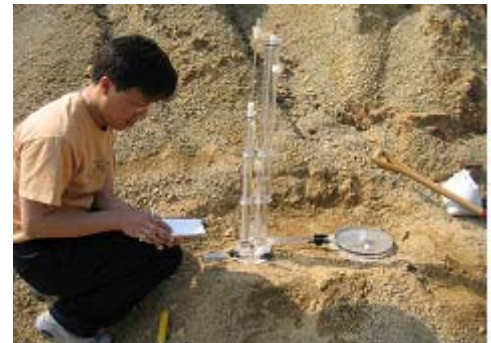
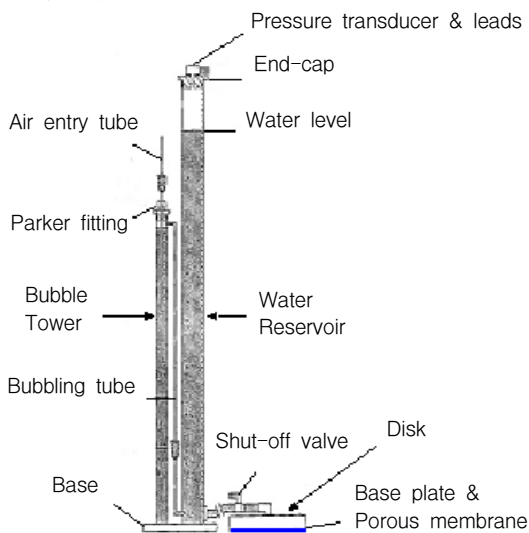


그림 3. View of the disk tension infiltrometer.

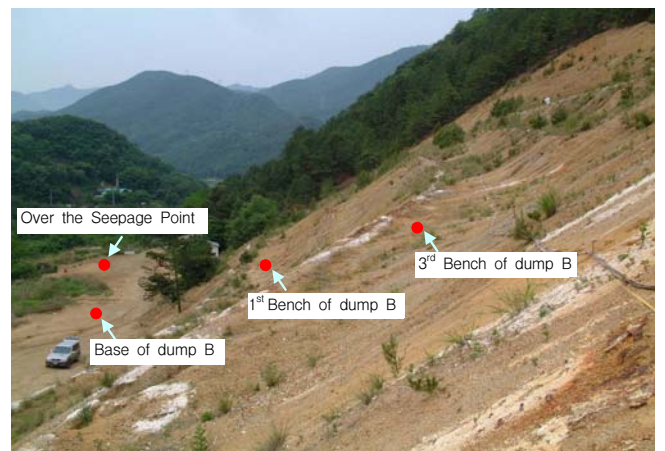


그림 4. Site of the tension infiltration test in the waste rock dump B of the Imgi abandoned pyrophyllite mine.

4. 결과 및 고찰

4.1 침출수 수질

표 1은 임기납석광산 폐석적치장 B 옹벽침출수의 유량과 양이온 및 음이온 농도를 이용하여 침출수를 통해 배출되는 각 성분별 오염부하량을 정리한 것이다. pH는 유량의 변화에 관계없이 거의 일정하게 2.8 정도로 매우 강한

산성을 보인다. Fe, Al, Mn 및 SO₄와 F의 농도가 매우 높아 인근 하천에 대해 심각한 오염원으로 작용하고 있다. 산도는 평균 58.9kg CaCO₃/d 정도로 방류되며 Al의 경우 9.3kg/d 정도로 오염부하가 크다. 이렇게 용벽 침출수로부터 금속성분 등이 방류되는 이유로 임기광산에 내린 강수가 폐석적치장에 침투된 후 혹은 계곡수의 일부가 폐석적치장으로 스며들어 폐석과 반응하여 산성광산배수를 형성한 것으로 판단된다.

표 1. Some elemental fluxes in the seepage of waste rock dump.

Date	Flow rate	Al	Fe ^T	Fe ²⁺	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Aciditycal.*
	(m ³ /d)	(kg/d)			(g/d)				(kg/d)		(kg CaCO ₃ /d)	
May	35	7.6	0.8	0.1	1.2	8.986	4.147	68.08	1.0	68.4	2.0	48.6
Jun	11	3.6	0.4	0.1	0.4	3.931	1.572	33.13	0.4	33.9	0.9	22.3
July	48	16.9	2.8	0.4	1.8	27.086	7.603	153.96	2.4	161.6	3.8	108.3
Avg.	31	9.3	1.2	0.2	1.1	12.129	4.354	84.59	1.2	87.1	2.3	58.9

* Acidity_{cal.}: Calculated acidity (Hedin et al., 1994)

4.2 폐석 및 퇴적물의 지구화학적 특징

시료들에 대한 pH_{1:2} 및 EC_{1:2} 자료는 각각 2.65~6.43 및 31~2,430 μ S/cm의 범위를 나타냈고 전체 자료를 점시하면 pH가 낮을수록 EC_{1:2}는 높았고 pH 4 이상에서는 EC 값이 낮고 일정한 수준을 유지하였다(그림 5). 대체적으로 EC값이 낮고 pH가 중성 부근을 유지한 시료들은 하상퇴적물이었고 EC값이 크고 산성특징을 나타낸 시료는 폐석적치장 폐석과 구 채굴적 암반 시료들이었다(표 2). 폐석 및 채굴적 암반의 pH가 4 이하이고 자유수 소이온을 포함한 염(Acid Producing Salt: APS)이 부착되어 있음을 지시한다. 따라서 폐석에 부착된 APS가 산도 및 염도를 유발하는 원인으로 해석된다.

총 황분석 값으로 계산된 MPA는 총 황함량이 황철석 황으로 존재한다고 가정한 값으로 최소 0.098kg H₂SO₄/t, 최대 246.942kg H₂SO₄/t의 범위로 나타났다. ANC는 황화광물에 의해 발생된 산을 중화할 수 있는 지수로서 최대 8.7kg H₂SO₄/t (R-M1)으로 나타났다. (MPA- ANC)를 NAPP로 정의하면 어떤 시료의 NAPP가 양의 값을 가질 때 산을 발생할 수 있는 시료로 간주할 수 있다(표 2).

표 2. ARD classification table.

Sample No.	pH _{1:2}	EC _{1:2}	Total Sulfur	MPA	ANC	NAPP	NAG pH	NAG	NAG	ANC/MPA	ARD Classif.	Description of samples
			%					pH _{4.5}	pH _{7.0}			
			kg H ₂ SO ₄ /t			kg H ₂ SO ₄ /t						
R-M1	3.14	853	8.07	246.94	8.70	238.24	2.00	112	135	0.035	¹⁾ PAF	Rock mass
R-M2	2.65	2430	4.88	149.33	0.00	149.33	2.34	33	48	0.000	PAF	"
R-W1	3.45	412	1.45	44.37	0.92	43.45	2.30	34	40	0.021	PAF	Waste rock
R-W2	3.83	231	1.58	48.35	1.37	46.97	2.29	37	43	0.028	PAF	"
R-W3	3.16	644	0.95	29.07	-1.37	30.44	2.58	16	19	-0.047	PAF	"
R-W3-1	3.08	647	1.53	46.82	-0.46	47.28	2.36	30	36	-0.010	PAF	"
R-W3-2	3.1	1788	0.57	17.44	1.83	15.61	3.22	7	13	0.105	PAF	"
R-W4	3.44	385	1.66	50.80	0.46	50.34	2.30	41	49	0.009	PAF	"
Sd1	6.38	42.7	0.05	1.53	4.12	-2.59	6.15	0	0	2.694	²⁾ NAF	Stream sediment
Sd2	5.14	51.1	0.43	13.16	4.12	9.04	3.15	6	12	0.313	PAF	"
Sd3	2.25	2340	2.94	89.96	-36.18	126.14	2.59	23	37	-0.402	PAF	"
Sd4	3.24	387	0.72	22.03	-2.29	24.32	2.82	11	16	-0.104	PAF	"
Sd5	5.21	31	0.06	1.84	5.95	-4.12	6.22	0	0	3.243	NAF	"
Sd6	3.8	279	0.91	27.85	0.92	26.93	2.56	18	25	0.033	PAF	"
Sd7	3.96	167.6	0.72	22.02	1.83	20.20	2.64	17	22	0.083	PAF	"
Sd8	6.43	78.6	0.03	0.92	2.75	-1.83	6.52	0	0	2.993	NAF	"
Sd9	5.48	51.8	0.13	3.98	3.21	0.77	5.85	0	0	0.806	NAF	"

¹⁾ PAF = Potentially acid forming, ²⁾ NAF=Non-acid forming

NAG test는 ABA 방법들과 병용해서 ARD 예측에 활용하는 하나의 도구이다. 본 시험법에는 일정량의 시료에 포함된 황화광물을 과산화수소를 인위적으로 첨가하여 산화시켜 반응용액의 pH를 측정하고(NAG_{pH}) 하고 알카리 첨가를 통해 적정을 하여 이때 발생된 산도를 측정한다(NAG_{pH4.5} 및 NAG_{pH7.0}). 그림 6에 NAG_{pH} 및 총 황자료를 점시한 결과, 총 황함량이 높을수록(황철석 황의 함량이 높음을 의미) 낮은 NAG_{pH} 관계가 나타난다. 즉 아래와 같은 반응에 의해 황철석이 산화되면서 수용액으로 수산화이온이 용존되어 pH가 낮아지는 것으로 설명할 수 있다(식 7).

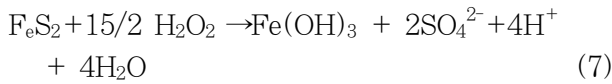


그림 7에 NAG_{pH4.5} 및 NAG_{pH7.0}을 점시한 결과 대부분의 시료들이 NAG_{pH7.0}이 NAG_{pH4.5}보다 커서 금속이온들의 침전 혹은 유기산 등이 존재해서 발생된 결과로 판단된다(Stewart et al, 2003). 그러나 침출수로 부터 Fe, Al, Cu, Zn 등 금속성분들이 고농도로 방류되므로 유기산보다는 금속성분이 NAG test 적정과정에서 pH 4.5에서 pH 7로 중화되면서 수산화물로 침전되어 나타난 현상으로 판단된다.

그림 8에 총 황함량과 ANC 자료를 점시한 결과 대부분의 하상퇴적물을 제외한 폐석적치장 및 채굴적 암반이 +NAPP 영역에 점시되어 산 발생이 가능한 시료로 구분되고 있다. 한편 ANC/MPA비는 ARD를 발생하는지에 대한 안전을 개념으로도 사용할 수 있는데 폐석적치장 폐석 및 채굴적 암반은 안전율 1 이하로 나타나 ARD 발생 우려 시료들로 구분된다.

그림 9에 NAPP와 NAG_{pH} 자료가 점시되어 있다. Sd8, Sd5, Sd1, Sd9의 시료는 산 발생력이 낮은 NAF 시료군으로 기타 폐석적치장 및 채굴적 시료는 산 발생이 가능한 PAF 시료군으로 구분된다. NAG_{pH4.5}는 Fe, Al 및 수산화이온에 기인하는 산도(Acidity)를 의미하며, NAG_{pH7.0}은 pH 7.0까지의 사이에 발생하는 산도로 용해성 금속들에 의해 발생된다. XRD에 의한 광물감정 결과 PAF로 구분된 시료들은 황철석이 확인되는 반면 NAF로 구분되는 시료들은 구성광물 내에 황철석의 확인은 안되고, 규산염 조암광물들만 감정된다. 또한 NAF로 구분된 시료들에서는 황철석의 산화에 의한 2차광물로 추정되는 석고(R-M2, R-W3-2), Jarosite (R-W3, R-3-1) 등이 확인되고 있다(표 3).

이상의 결과를 종합하면 임기광산 폐석적치장 및 채굴적 암반에는 황철석이 함유되어 있고 장기간 물과 공기에 노출된 결과, 산화산물, 즉 자유 수산화이온 및 염들이 암석 표면에 잔류하게 되어 전기전도도 값을 높였고 산성수로 변화시켰다(paste pH, paste EC). 또한 시료 중에는 황화광물이 포함된 반면 이를 중화할 수 있을 정도의 중화광물이 결핍되어 산성배수 발생 암석들로 판별되고 있다. 따라서 임기광산 주변 수계 오염을 방지하기 위해서는 노천 채굴적 암반과 폐석적치장에 대한 산화방지 및 우수배제 조치 등의 조치가 필요한 것으로 나타난다.

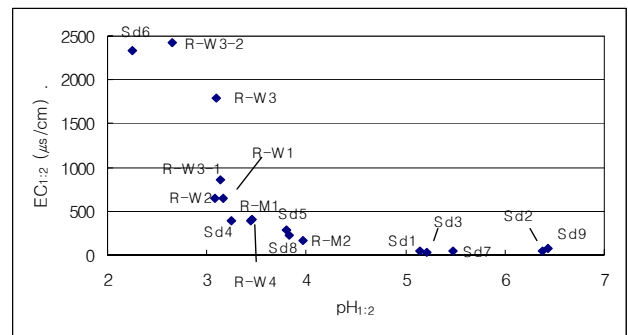


그림 5. Plot of pH1:2 and EC1:2.

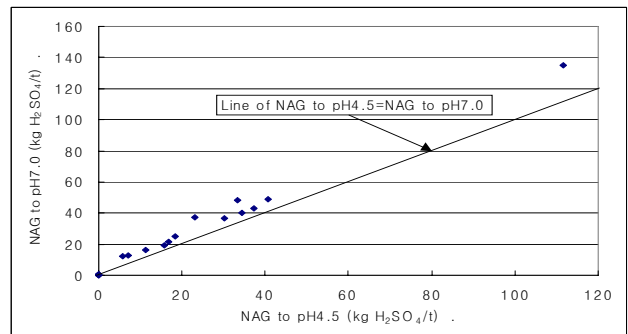


그림 6. NAG to pH 7.0 versus NAG to pH 4.5.

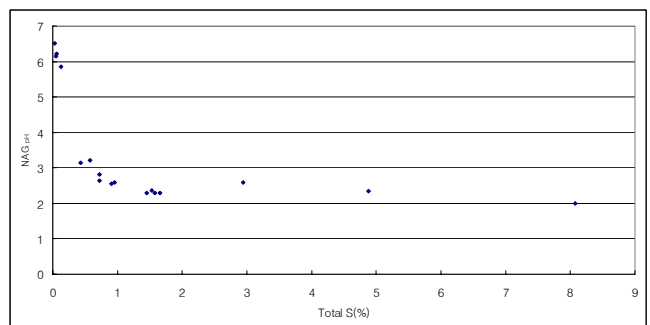


그림 7. NAGpH versus Total S.

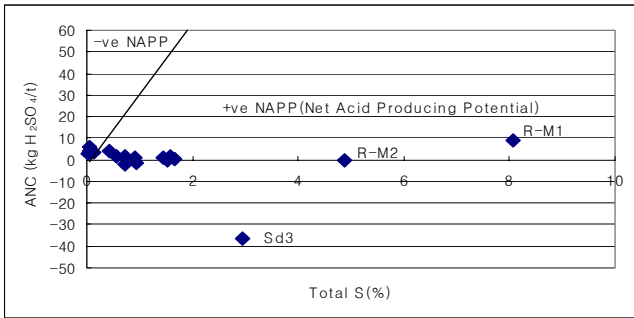


그림 8. Acid-base accounting (ABA) plot.

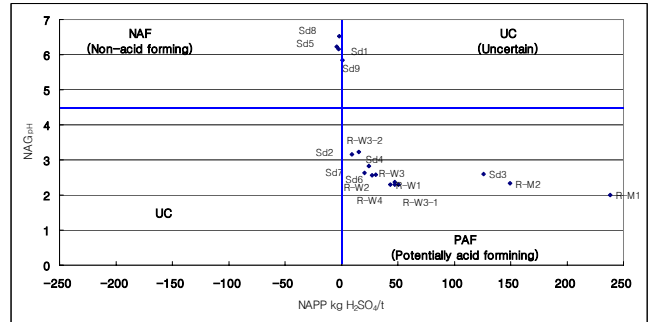


그림 9. ARD classification plot.

표 3. Mineral composition.

Sample No.	Minerals
R-M1	Chlorite, Montmorillonite, Sericite, Quartz, Kaolinite, Pyrite, Andalusite, Microcline
R-M2	Chlorite, Montmorillonite, Sericite, Kaolinite, Quartz, Gypsum, Andalusite, Pyrite, Microcline
R-W1	Montmorillonite, Chlorite, Sericite, Kaolinite, Quartz, Andalusite, Microcline, Pyrite
R-W2	Chlorite, Sericite, Hornblende, Kaolinite, Quartz, Andalusite, Microcline, Pyrite
R-W3	Montmorillonite, Chlorite, Sericite, Kaolinite, Jarosite, Quartz, Andalusite, Microcline, Pyrite
R-W3-1	Montmorillonite, Chlorite, Sericite, Kaolinite, Andalusite, Quartz, Jarosite, Microcline, Pyrite
R-W3-2	Chlorite, Sericite, Gypsum, Andalusite, Quartz, Microcline, Jarosite
R-W4	Chlorite, Muscovite, Kaolinite, Quartz, Andalusite, Microcline, Albite, Pyrite
Sd1	Chlorite, Muscovite, Quartz, Microcline, Albite
Sd2	Montmorillonite, Chlorite, Kaolinite, Muscovite, Quartz, Microcline, Albite, Pyrite
Sd3	Muscovite, Kaolinite, Quartz
Sd4	Chlorite, Muscovite, Kaolinite, Andalusite, Quartz, Microcline, Albite, Pyrite
Sd5	Chlorite, Muscovite, Epidote, Quartz, Microcline, Albite, Kaolinite
Sd6	Chlorite, Muscovite, Kaolinite, Andalusite, Quartz, Microcline, Albite, Pyrite
Sd7	Chlorite, Muscovite, Kaolinite, Andalusite, Quartz, Microcline, Albite, Pyrite
Sd8	Chlorite, Muscovite, Quartz, Microcline, Albite
Sd9	Muscovite, Quartz, Microcline, Albite

4.3. 임기납석광산 폐석적치장 표면 수리 특성

위에서 기술된 것처럼 임기납석광산 폐석은 ARD를 발생시키는 반응성 폐석으로 확인된다. 이와 같은 폐석에 대한 ARD 영향을 피하기 위한 가장 흔한 방법으로 Cover system을 고려할 수 있다. Cover system의 목적은 광산 폐기물 적치장으로부터 기원하는 오염물질이 주변 수계에 방류되지 않도록 제어하고 식재가 성장할 수 있는 토대

를 조성하는 것이다. 전형적인 Cover system에서 폐석적치장 내부로 침투하는 순침투량(net percolation)은 강우 중 표층수량 및 증발산량을 제외한 양이 된다(그림 10). 따라서 반응성 폐석 내부로 순 침투량을 제어하기 위해서는 산소 및 강우가 침투하지 못하도록 적절한 토양복토 등이 필요하다. 현재 임기납석 폐석적치장 B는 Cover material이 전무한 실정으로 강우가 바로 반응성 폐석과 접하고 투수특성에 따라서 일정량이 지하로 침투할 수 있는 조건이 되어 지속적인 ARD가 발생되고 있다. Darcy

법칙에서 유량은 투수계수와 동수구배에 비례하므로 임기 폐석장에서 순 침투량을 추정하고 향후 Cover system을 설계할 때 투수계수 등 수리적 인자는 매우 중요하다.

디스크-장력 침투계로 침투율을 구하는 방법은 두 가지 다른 장력(h)을 이용하여 얻어진 수치를 앞서 제시한 식 (4)와 식 (5)에 대입하여 구하는 방법과 측정된 장력과 침투율(Q)사이의 관계식을 비선형 회귀시켜서 구하는 방법이 있다. 전자의 경우 두 가지 장력만을 걸어주는 시험을 하여 간단하게 구할 수 있다는 장점이 있으나 걸어주는 장력의 범위에 따라 수리특성의 차이가 많이 날 우려가 있다. 후자의 경우는 셋 이상의 장력을 걸어 시험을 해야 하고 회귀식을 구해야 하므로 다소 복잡한 과정이 될 수 있으나 장력에 따른 오차를 줄여줄 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 장력에 따른 오차를 줄이고자 후자의 방법을 이용하였다.

그림 11은 장력에 따른 침투량과 best-fitting curve를 나타낸 것으로 구해진 회귀선을 식 (6)에 대입시키면 포화 수리전도도(K_{sat})와 모세관길이(λ)를 구할 수 있다(표 4).

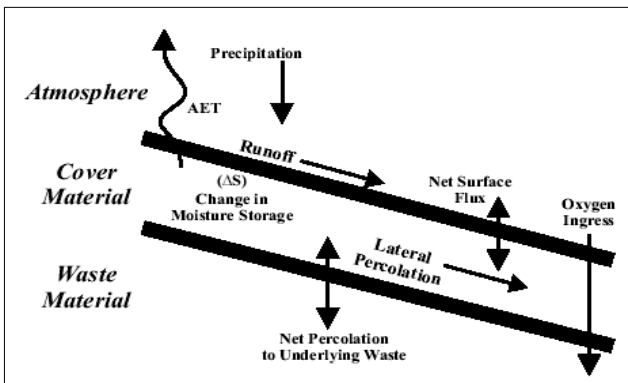
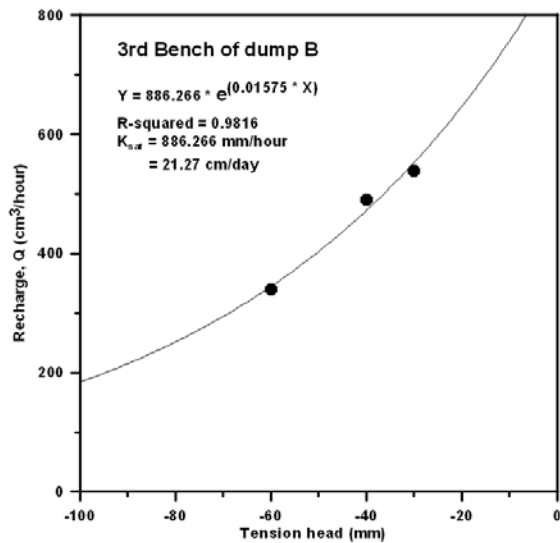
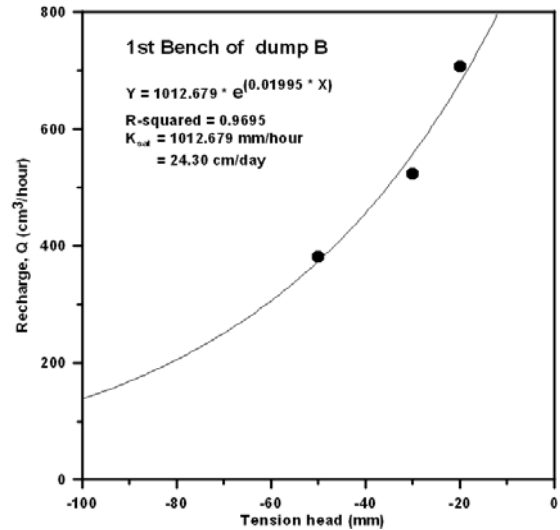
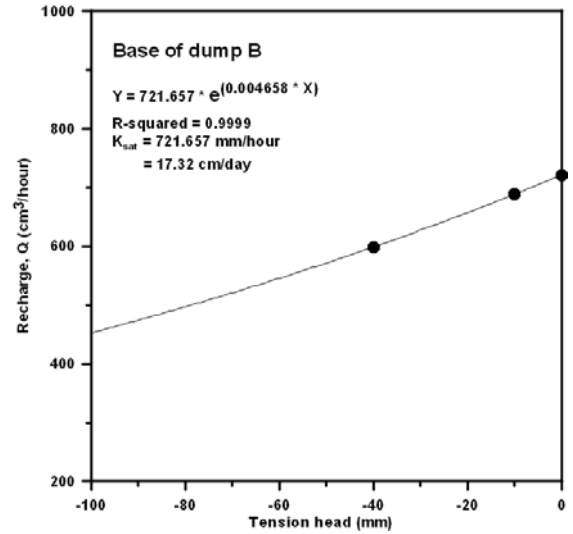


그림 10. Water balance of a typical cover system (O'Kane and Barbour, 2003).

표 4. Hydrological factors obtained from the regression.

	$\lambda_c =$ $\alpha^{-1}(\text{cm})$	K_{sat} (cm/sec)	Infiltration rate (cm/sec) at $h = -10\text{cm}$
Base of dump B	7.88	2.00E-04	5.63E-05
1st Bench of dump B	7.97	2.81E-04	8.03E-05
3rd Bench of dump B	7.95	2.46E-04	7.00E-05
Over the Seepage Point	8.12	7.96E-04	2.32E-04



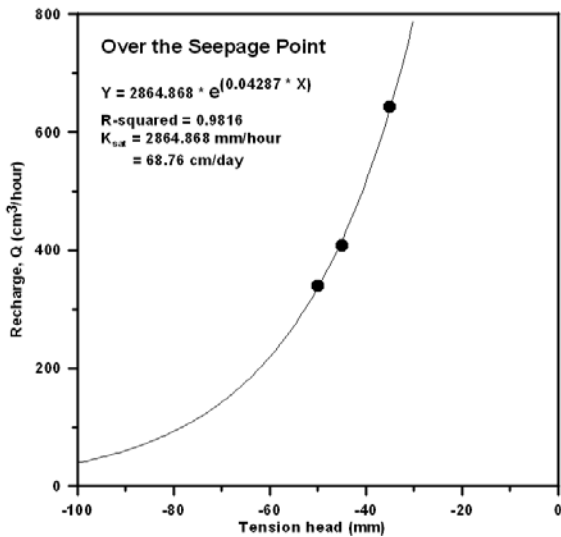


그림 11. Best-fitting curves of tension infiltration for calculation of Ksat.

임기납석광산의 폐석적치장 지반의 포화시 투수계수는 $2.00e-0.4 \sim 2.81e-0.4 \text{ cm/sec}$ 로 silt loam~loam의 특성을, 침출수 유출지점 상부 지반에서의 포화시 투수계수는 $7.96e-04 \text{ cm/sec}$ 로 sandy loam의 특성을 갖는다(표 5). 임기납석광산처럼 광산조업당시 폐석들이 경사지 등에 적치될 경우 바닥 부근은 입도가 큰 폐석이 집중되고 경사면을 따라서 입도가 작아지는 경향이 발생되며 상부 폐석적치장은 차량 등의 왕복 등으로 다짐을 받게 된다. 임기광산의 낮은 투수 특징은 이와 같이 차량 이동 등과 폐석 자체 입도 및 다짐정도 등에 기인한 것으로 판단된다.

표 5. K_{sat} of each soil type at some test site (Brain, 2004).

Soil Type	$K_{sat}(\text{cm/sec})$
Sand	5.56E-03
Loamy Sand	1.39E-03
Sandy Loam	6.94E-04
Loam	3.53E-04
Silt Loam	1.75E-04
Sandy Clay Loam	1.06E-04
Clay Loam and Silty Clay Loam	6.39E-05
Clay	3.61E-05

임기납석광산 폐석적치장 표층의 매우 낮은 투수성은 대부분이 침투류보다는 지표유하수 형태로 경사지 및 평지를 통해 인근 하천으로 유하함을 의미한다. 그러나 폐석적치

장 법면부에 무수히 발달된 V자 형태의 침식골이 형성되어 있고 그 단면부에는 입도차가 뚜렷이 구분되는 폐석들이 다층구조를 형성하고 있다. 이러한 굵은 쇄설성 입자층의 노출들은 강우시 순 침투량을 증가시키는 요소로 작용하고 이러한 다층 구조로 인해서 지역적으로 지하수의 우세한 흐름을 발생한다. 본 구조는 폐석을 적치할 때 중력차 및 시기별로 입도가 다른 폐석들이 겹겹이 적치되어 형성된 것으로, 폐석적치량이 증가하면서 여러 겹의 입도차가 다른 경사진 지층이 중첩되면서 폐석적치장 내부는 수리전도도가 다른 여러겹의 폐석층이 발생하고 입자가 큰 쇄설입자층(C)과 작은 쇄설입자층(F)이 교호하는 형태를 갖고 있다(그림 12). 바닥 부근은 대부분 입도가 가장 큰 폐석들로 구성되어 수리전도도가 큰 경향을 보인다. 즉 폐석적치장 내부는 균일하지 않은 투수층들을 가지게 되어 침투한 지하수가 특정 방향으로 집중되어 흐르고 seepage 형태로 지표로 용출할 수 있다. 현재 임기광산 폐석적치장 하부(저지대)에서 일부 개소에서 침출수가 유출되고 있는데(옹벽부근, $30\text{m}^3/\text{일}$) 이는 폐석적치장 바닥부근은 조립의 폐석들이 존재하고 내부의 불균일한 투수성으로 인해 지하수가 특정방향으로 흐르기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

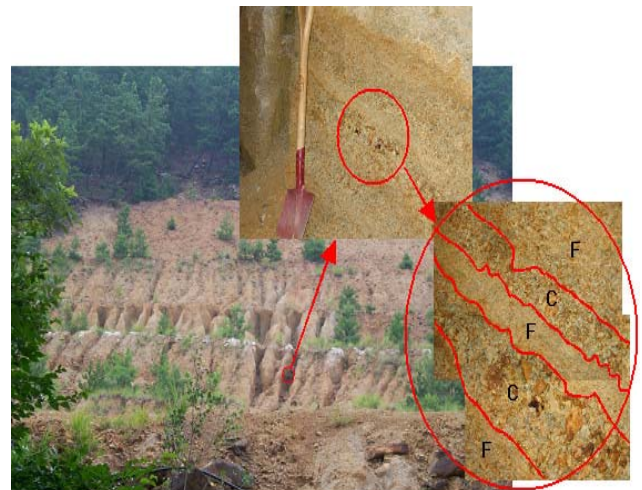


그림 12. "V" type erosion gullies and multi-layers of waste rock dump. "F" means fine grain layer, "C" means coarse grain layer.

5. 결론

본 연구는 부산시 임기납석광산 채굴적 암반, 폐석적치장 폐석 및 인근 수계 하상퇴적물을 대상으로 지구화학적 연구를 수행하였고 디스크-장력침투계를 이용하여 폐석적

치장 상부 지점에 대해 수리특성을 분석하였다.

임기광산에서는 pH가 2.82인 산성광산배수가 폐석적치장 하부로부터 유출되어 인근 수계를 오염시키고 있다. 이 침출수의 산도는 평균 58.9kg CaCO₃/d 정도로 방류되며 Al의 경우 9.3kg/d 정도로 오염부하가 크다. 산-염기시험 결과 임기광산 채굴적 암반의 경우 최대 산 발생력(MPA)은 246.942kg H₂SO₄/t 정도였고, 산 중화능력(ANC)은 최대 8.7kg H₂SO₄/t 로 나타나 임기광산의 노천 채굴적 벽체 및 잔치하고 있는 폐석들은 산성광산배수(ARD)를 발생하는 지질물질로 나타났다. 또한 이들은 이미 황화광물이 산화되어 암석 표면에 Acid Producing Salt(APS)가 형성되어 강우가 유입될 경우 표층수 및 침투수 등을 ARD로 변화시킬 수 있는 상태이다. 임기납석광산의 폐석

들의 산 발생력이 산 중화능력보다 큼으로 해서 폐석적치장에서 유출되는 지하수가 산성광산배수로 오염된 것으로 해석된다.

폐석적치장은 2.00e^{-0.4}~2.81e^{-0.4}cm/sec로 silt loam~loam의 특성을 보이는 매우 낮은 침투율을 갖고 있으나 폐석적치장 사면에 심한 침식작용으로 V자형 침식골이 무수히 발달되어 있고 수리전도도가 큰 쇄설성 입자가 노출되어 있으므로 침식골로 강수가 유입되어 평균 30m³/일의 오염된 침출수를 유출시키고 있다. 따라서 강수에 의한 폐석적치장 내부로 물이 침투되는 경로는 침식지역의 투수특성에 크게 영향을 받으며, 이 경로를 통해서 오염이 발생하는 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2004년 9월 30일)

참 고 문 헌

1. 대한광업진흥공사 (1987), 비금속광물 특성조사 보고서(고령토, 납석편).
2. 대한광업진흥공사 (1988), 한국의 광상 11호.
3. 민정식, 강선덕, 이상권, 정영욱, 이현주, 이진수 (2000), 광산지역 광해조사 및 대책연구, 산업자원부, 1999-R-T108-P-20, 170p.
4. 민정식, 권광수, 조원재, 홍영국, 홍성규, 정영욱 (1995), 폐광에 따른 광산지역 환경개선 연구(폐수, 폐석), 석탄합리화사업단 기술총서 95-02, 268p.
5. 박맹언, 성규열, 고용권 (2000), 비금속광상의 황화광염대에 수반되는 산성광산배수의 형성과 지질환경의 오염: 동래납석광산 산성광산배수의 형성에 관한 반응경로 모델링, Econ. Environ. Geol., Vol. 33, No. 5, pp. 405-415.
6. 염승준, 윤성택, 김주환, 박맹언 (2002), 동래 납석광산 산성 광석배수의 중화실험: 중금속의 거동 특성 규명, 한국지하수토양 환경학회지, Vol. 7, No. 4, pp. 68-76.
7. 이민성, 강필중 (1964), 한국지질도: 양산도폭(1:50,000) 및 설명서, 국립지질조사소.
8. 전효택, 정영욱, 김인준 (1991), 경남 및 전남일대 납석광상의 산소-황 동위원소조성과 광상성인, Jour. Korean Inst. Mining Geol., Vol. 24, No. 2., pp. 97-105.
9. 정명채 (2002), 광산개발에 의한 환경오염 현황, 2002 광해방지 정책 및 기술 심포지움, 한국지질자원연구원, pp. 37-53.
10. 정영욱, Ian Thornton (1994), 강원도 상동지역 옥동천의 광산산성수 및 하상퇴적물의 중금속오염, 자원환경지질, Vol. 27, No. 1, pp. 101-113.
11. 하규철, 전철민, 김재곤 (2004), Tension infiltrometer를 이용한 토양의 침투특성 분석, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회 논문집.
12. Brain, O. (2004), Soils, Infiltration, and On-site Testing, <http://www.webdesignpros.net/consult/>.
13. Gardner, W.R. (1958), Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table, Soil Sci., Vol. 85, pp. 228-232.
14. Guebert, M.D. and Gardner, T.W. (2001), Macropore flow on a reclaimed surface mine: infiltration and hillslope hydrology, Geomorphology, Vol. 39, pp. 151-169.

15. Hedin R.S., Watzlaf G.R. and Nairn R.W. (1994), Passive treatment of acid mine drainage with limestone, *J. Environ. Qual.* Vol. 23, No. 6, pp. 1338-1345.
16. Hussen, A.A and Warric, A.W. (1993a), Algebraic models for disc tension permeameters, *Water Resour. Res.*, Vol. 29, pp. 2779-2785.
17. Hussen, A.A and Warric, A.W. (1993b), Alternative analysis of hydraulic data from disc tension infiltrometers, *Water Resour. Res.*, Vol. 29, pp. 4103-4108.
18. O'Kane M. and Barbour, S. L. (2003), Predicting field performance of lysimeters used to evaluate cover systems for mine waste, in *Proceedings 6th International Conference on Acid Rock Drainage*, Cairns, Au. Vol. 1, pp. 327-381.
19. Orava, D. (1997), In-Pit disposal for ARD control, in *Short course notes on Waste rock and tailings disposal technologies for reactive waste management*, 4th. International conference on acid rock drainage, Vancouver, B.C. Canada.
20. Rose, A.W. and Burt, D.M. (1979), Hydrothermal alteration. In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, H.L.Barnes, 2nd ed.: John Willey and sons, New York, pp. 173-205.
21. Sobek, A. A. et al. (1978), Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils, EPA-600/2-78-054, USEPA.
22. Stewart, W. Miller, S, Thomas J. and Smart R. (2003), Evaluation of the effects of matter on the net acid generation test, in *Proceedings 6th International Conference on Acid Rock Drainage*, Cairns, Au. Vol. 1, pp. 211-222.
23. White, I. and Sully, M.J. (1987), Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration, *Water Resour. Res.*, Vol. 23, pp. 1514-1522.
24. Wooding, R.A., Steady infiltration from a shallow circular pond (1968) *Water Resour. Res.*, Vol. 4, pp. 1259-1273.