

거룡 폐광산 폐기물 적치장 지하수 및 침출수 수질의 시기별 변화

안주성* · 임길재 · 정영욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Seasonal Variations of Water Quality within the Waste Impoundments of Geopung Mine

Joo Sung Ahn*, Gil-Jae Yim and Young-Wook Cheong

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

In this study, water quality variation in borehole groundwaters and surface leachate waters were investigated on a seasonal sampling and remote monitoring basis within the waste impoundments at the Geopung mine site where previous rehabilitation measures were unsuccessful to prevent acidic drainage. All groundwaters were typical acidic drainage with acidic pH (3.3~4.6) and high TDS (338~3330 mg/L) values during the dry season, but increases in metal contents (TDS 414~4890 mg/L) and decrease of pH (2.7~3.6) were observed during the rainy season. Surface leachate waters showed a similar pattern in water quality variation. Surface runoff waters during rain events had acidic pH (3.0~3.4) through direct reactions with waste rocks. Good correlations were found between major and trace elements measured in water samples, but no significant seasonal variation in chemical compositions was shown except relative changes in contents. It can be suggested that dissolution of soluble secondary salts caused by flushing of weathered waste rocks and tailings directly influenced the water quality within the waste impoundments. Increases in acid and metal concentrations and their loadings from mine wastes are anticipated in the rainy season. More appropriate cover systems on waste rocks and tailings necessitate consideration of more extreme conditions in the study mine.

Key words : acid mine drainage, seasonal variation, mine waste, secondary salts

폐광지역 광산폐기물 적치장에서 발생하는 산성 침출수 및 이의 영향을 직접적으로 받는 하부 지하수의 수질변화 양상을 자동계측자료 및 시기별 시료 분석으로 평가하였다. 연구지역은 충북 옥천군의 폐광산인 거룡광산이며 한차례 복토작업이 이루어졌으나 산성배수 발생은 지속되었다. 건기의 지하수 시료는 강산성(pH 3.3~4.6) 및 높은 총용존고형물질 함량(338~3330 mg/L)으로서 전형적인 산성배수의 특성을 보였으며 우기에 중금속 함량 증가(TDS 414~4890 mg/L)와 pH 2.7~3.6으로 보다 강한 산성을 나타내었다. 지표침출수 시료도 유사한 수질변화양상을 보이며 강우시 지표 유거수는 폐석과의 직접 반응으로 강산성(pH 3.0~3.4)을 나타내었다. 시료내 주성분 및 중금속원소들 간의 상관성이 전반적으로 높게 나타났으며 개별 성분들의 건우기 함량 증감양상 외에 전체 시기별 수질조성의 큰 변화는 보이지 않았다. 연구지역 광산폐기물 표면에는 금속 수화황산염 등의 다양한 2차 염류가 풍부하게 생성되어 있으며 이들이 강우에 용해되어 침출수 및 하부 지하수의 수질에 직접적으로 영향을 주는 것으로 판단한다. 향후 보다 심각한 기후조건에서도 우수한 효율을 나타낼 수 있는 복토 및 처리기법이 요구된다.

주요어 : 산성광산배수, 시기별 변화, 광산폐기물, 2차 염류

1. 서 론

폐광산 지역에서 강우와 폐기물(광미 및 폐석)의 반응에 의해 산성배수가 나타나며 특히 Fe, 황산염이온

및 중금속을 함유하고 있어 주변 수계에 심각한 영향을 주게 된다. 따라서 산성배수의 발생특성 규명은 환경영향 예측, 방지 및 복원을 위해 필수적인 사항이다. 또한 강우와 기온의 변동에 따라 산성배수의 발생량과

*Corresponding author: jsahn@kigam.re.kr

그 수질에도 변화가 나타나며 이러한 양상은 광해 복구방안에 반영되어야 한다.

철황산염 등의 2차 생성물은 폐기물의 강우에 의한 물-암석 반응에 의해 형성된 것으로 산성배수발생과 같은 폐광산 지역의 환경오염 발생과정을 설명해 줄 수 있으며 또한 그 자체로 높은 용해도로 인해 주요한 환경 오염물질로 작용할 수 있으므로 광물학적 및 지구 화학적 연구가 요구된다. 기존연구에서 폐광산 폐기물 내에 가용성 및 불용성의 2차 철-황산염 광물 및 수산화철 광물이 흔히 생성되는 것으로 보고되고 있으며 (Hammarstrom *et al.*, 2005), 중금속에 대한 환경적 이동제어 역할과 용해반응에 의해 산도 및 오염물질의 부가 역할을 동시에 수행할 수 있는 것으로 나타난다 (Jerz and Rimstidt, 2003; Smuda *et al.*, 2007).

폐광지역 산성배수의 계절적 변화에 있어 건기에 pH 감소와 전기전도도 및 중금속 함량의 증가양상과 우기에 희석효과로 인한 수질회복을 나타내는 경우 (Gomes and Favas, 2006)도 있지만, 보다 많은 연구에서 강우에 의한 2차 금속황산염류의 용해로 인한 수질악화 현상(Hammarstrom *et al.*, 2005; Keith *et al.*, 2001; Jambor *et al.*, 2000)을 보고하고 있다. 특히 최근의 기후변화로 인한 장기간의 건기와 일시적 폭우양상에 의해 폐광지역 수계의 급격한 수질악화와 이로 인한 수생태계의 악영향이 더욱 심각해지고 있음이 지적되고 있다(Nordstrom, 2007). 전지구적인 기후 변화 양상은 폐광지역 복구방안 수립에 있어서도 예년의 평균여건보다 심각한 상황을 고려하여 보다 많은 처리용량과 고효율의 기법이 요구되고 있다.

국내 폐광산지역의 산성배수 발생과 관련하여서는 특정한 시기의 수질평가로 이루어지고 장기간에 걸친 오염 부하량의 계절적 변화에 대한 평가는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 폐광산 폐기물 적치장 내 지하수 및 침출수 수질에 대한 시기별 변화양상을 파악하고자 하였으며 특히 2차 금속황산염류의 용해반응에 의한 수질영향에 대해 고찰하였다. 조사지역으로 거풍광산을 선정하였으며 이 지역 지하수 및 침출수 수질에 관하여 Cheong *et al.*(2008) 및 Yim *et al.*(2009)의 연구에서 일부 논의된 바 있으나 본 연구에서는 보다 장기간의 관측자료 및 실내분석 결과를 바탕으로 관련 수질의 계절적 변화에 대해 심도있게 평가하고자 한다.

2. 연구지역

연구가 진행된 거풍광산은 충청북도 옥천군 청성면

에 위치하며 자세한 소개는 이전 연구(Cheong *et al.*, 2008; MIRECO, 2008; Yim *et al.*, 2009)에서 찾을 수 있다. 간략히 정리하면, 주 채광대상 금속은 동, 아연, 납으로 일제강점기, 1960년대 및 70년대에 산발적으로 채굴되었으며 이후 1990년 광업권이 등록되고 1998년 소멸되었다. 과거 정광 생산량으로 구리 195톤, 납 135톤, 아연 189톤 등이며 방치된 광미 및 폐석에 대해 2002~2003년도에 걸쳐 L형 옹벽, 배수관 등의 설치로 광해방지사업이 수행된 바 있지만 침식 등으로 인한 복토층 유실로 이후에도 산성배수의 발생은 여전히 지속되어 나타났다. 광미적치장은 2개소로 별도로 적치되어 있으며 본 연구대상 광미장은 면적 3,410 m², 평균두께 2.4 m이며 광미량은 8,184 m³으로 추정되었다. 복토 두께는 위치에 따라 20 cm에서 최대 190 cm에 이르며 상부 광미층의 고도차로 광미장 위치에 따라 복토 두께가 다르다. 폐석장도 크게 3개소로 구분되며 연구대상 폐석장은 약 2,500 m²의 면적에 분포한다(MIRECO, 2008). 2008년도에 폐석장에 대한 복토 및 유실방지사업이 재수행된 바 있다.

3. 연구방법

폐석 및 광미 적치장의 지하수 수위 및 수질특성을 평가하기 위해 관측공을 설치하였다(Fig. 1). 광미장 1번 관정은 풍화 암반층 이하에만 스크린을 설치하였으며 2번 관정은 동일 광미장에 위치하나 광미층 및 암반층 전구간 스크린을 설치하였다(Fig. 2). 시추지점의 광미층 두께는 약 3 m이었으며 과거 광해방지사업의 복토층은 20 cm에 불과하였다. 광미층 하부 0.8~1 m 구간은 산화가 진행되어 적갈색을 띠며 그 하부는 비산화대 층으로 회색의 신선한 광미로 구분된다(Cheong *et al.*, 2008). 3번 관정은 폐석 적치장에 설치된 것으로 2번 관정과 동일하게 전구간이 스크린 처리되었다. 관정 3 개소에 대하여 CTD 다이버(Van Essen, DI263)를 설치하여 관정 지하수의 수위, 온도, 전기전도도를 2007년 7월부터 2008년 10월까지 계속하였다. 관정 지하수의 수위 변동은 CTD 다이버 설치 심도에 대한 상대적 수위변화를 시간에 따라 기록하였다(Cheong *et al.*, 2008). 강우자료는 현장에 관측시설을 설치하여 획득하였으며 설치이전 및 장비 오작동 기간에 대해서는 인근 옥천 및 보은 관측소의 데이터를 활용하였다.

수질분석을 위해 관정 지하수(GW#1, GW#2, GW#3)와 함께 지표 유출 침출수(SW#1, SW#2)에 대해 2008년 3월부터 10월까지 주기적으로 시료를 채

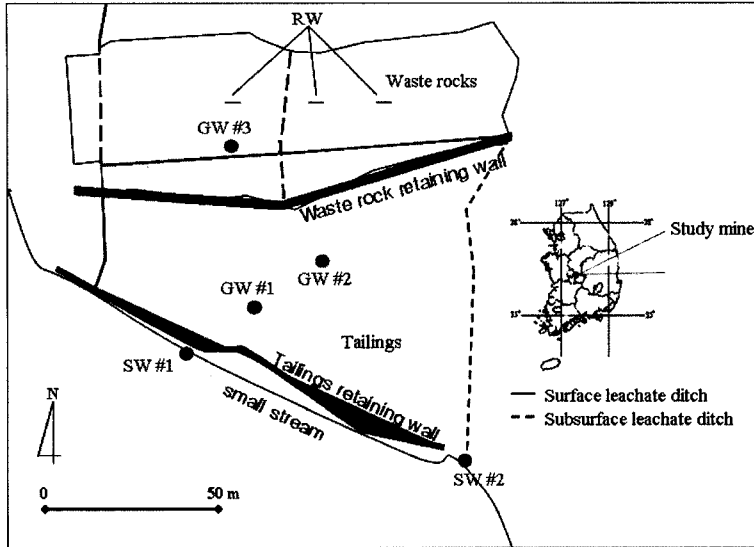


Fig. 1. Plan view of waste impoundments and sampling locations at the study mine.

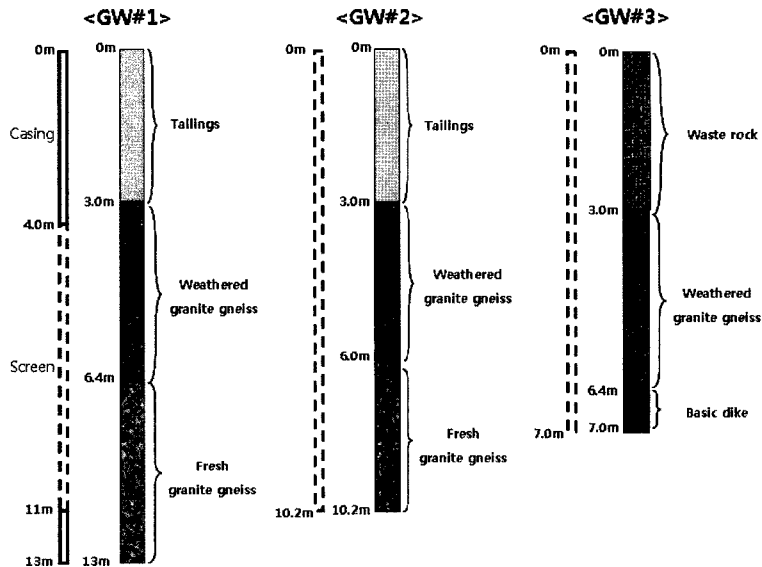


Fig. 2. Borehole logs of groundwater wells in the waste impoundments and well configurations.

취하였다. 지표 침출수 SW#1 지점은 1번 관정 서편에 위치하며 상류의 비오염 지류와 합류하여 보다 하류로 유출되고 있다. SW#2는 연구지역 현장 입구지점으로 광미장 지중 PVC관을 통해 지표로 유출되는 시료이다(Fig. 1). 또한 강우시 폐석장 표면을 흐르는 유거수(RW)를 경사지 표면 직하부에 절개된 PVC 파이프 및 채수병을 설치하고 3지점에 대해 2차례(2008년 7월 및 8월) 집수하였다.

관정 지하수, 침출수, 유거수 시료에 대하여 현장에

서 수소이온농도(Toa pH meter), 전기전도도(Orion 130 conductivity meter), 온도 등을 측정하였다. 실내 분석용 시료는 현장에서 필터링하고 양이온 분석용 시료의 경우, 농질산을 가하여 pH를 2 이하로 만들어 냉장보관하였다. 양이온 주성분 및 중금속원소들은 ICP-AES(Jobin Yvon 38)를 이용하여 분석하였고, 황산염 이온은 IC(Dionex series)를 이용하였다.

폐석장 표면의 다양한 2차 염류에 대해서는 현장관찰 및 실내 SEM-EDS(JSM-6400) 분석을 통해 평가

하였다. 시료 양이 불충분하여 광물감정 등 이외 분석은 실시하지 못하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 지하수 수위변화 및 폐기물 적치장 수질

조사기간 중 연구지역의 일일강우는 최대 92.5 mm (2007년 9월 1일; Fig. 3)을 보였으며 주로 6월 중순부터 8월말까지 집중되어 우리나라의 전형적인 건우기 상황을 나타내었다. 강우에 따른 지하수 관측공의 수위변화(Fig. 3)는 광미장 1번 및 2번 관정의 경우 비교적 완만하게 나타났으며 2번 관정이 상대적으로 민

감하게 변화하여 전구간 스크린 설치로 강우의 영향이 직접적으로 나타남을 보여준다. 폐석장 3번 관정은 우기의 집중 강우에 의해서만 수위가 관측되어 일시적 부유지하수(perched groundwater)의 양상을 보인다. 이는 폐석장의 경우 강우의 유입 및 배수가 자유로운 투수성 환경임을 지시한다(Cheong *et al.*, 2008).

관측공의 전기전도도 변화양상도 광미장 2번공과 폐석장 3번공의 경우 민감하게 변화하여 강우의 영향이 직접적으로 나타남을 보여준다. 폐석장의 경우 강우 직후 급상승하며 1.2 mS/cm 내외의 값을 보이며 역시 우기에만 관측할 수 있었다. 광미장 2번공은 강우 직후에 다소 감소하였다가 일정기간 이후에 뚜렷한 상승

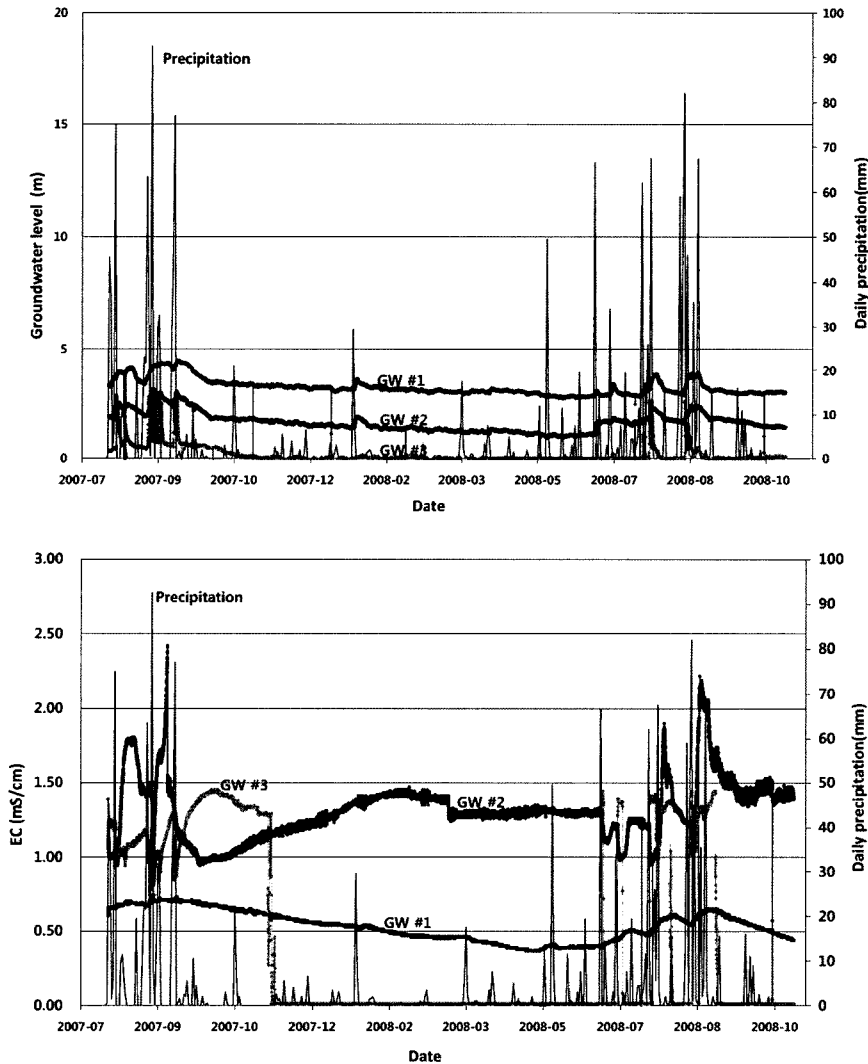


Fig. 3. Effects of daily precipitation to groundwater level and electrical conductivity (EC) of groundwater in the waste impoundments.

을 보여 강우에 의한 일시적 희석과 이후 광미와의 반응에 의한 수질악화 양상으로 추정된다. 여전히 우기에 1.5 mS/cm 내외의 높은 값을 보였으며 건기에 해당하는 2007년 10월초~2008년 5월말 기간에는 완만하게 증가하다가 0.8 mS/cm 내외로 정체된 값을 보인다. 이는 외부 강우유입이 감소하였을 때 관측공의 지하수와 광미의 반응정도에 기인한 것으로 판단한다. 광미장 1번공은 우기에 전기전도도 값이 상승하고 건기에는 대체로 감소하여 상대적으로 완만한 변화양상을 보인다. 폐기물 적치장 관정들의 전기전도도 변화로 볼 때 우기에 최대값 또는 급격한 증가양상으로 나타나 수질이 악화되고 있음을 알 수 있다.

Table 1에 시기별로 채취한 관정 지하수, 지표 침출

수 및 폐석장 우기 유거수의 주요 수질성분의 평균량을 정리하였다. 광미장 2번 관정에서 pH 2.71~3.91, 총용존고형물함량(TDS) 1690~4890 mg/l로서 강산성과 고농도의 전형적인 산성배수의 특성을 보여주었다. 마땅한 비교기준치가 없지만 매립시설 침출수 배출허용기준(폐기물관리법 시행규칙 별표 8)을 적용하면 Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd 등이 가지역 기준치(각각 10, 10, 3, 5, 1, 0.1 mg/L)에 비해 크게 초과하고 있어 이들 원소들이 연구지역의 주요 수질 오염원소로 나타났다. 광미장 1번 및 폐석장 3번 관정도 TDS 함량은 다소 차이가 나지만 역시 강산성으로 나타나며 Mn, Cu, Zn, Cd 등이 여전히 높은 오염수준을 보인다. 지표침출수 중 비오염 지류에 유입되는 SW#1 시료는 pH 5.6

Table 1. Summary of the chemical components (mean and range) of the water samples (unit in mg/L except pH)

	GW#1 (n=6)	GW#2 (n=6)	GW#3 (n=6)	SW#1 (n=5)	SW#2 (n=5)	RW (n=6)
pH	3.84 (3.52-4.42)	3.30 (2.71-3.91)	3.68 (3.03-4.62)	5.56 (4.37-6.91)	4.11 (3.25-5.13)	3.17 (3.02-3.43)
TDS	405 (338-493)	3050 (1690-4890)	1381 (1214-1619)	76.8 (45.4-149)	330 (134-722)	172 (42.2-449)
Si	13.9 (20.3-17.5)	55.0 (41.3-63.6)	33.6 (26.5-43.6)	9.14 (7.17-11.0)	15.2 (10.6-22.9)	4.37 (2.10-6.59)
Na	6.11 (7.95-6.91)	12.3 (9.99-13.5)	11.6 (6.76-14.7)	4.50 (4.17-4.98)	5.28 (4.30-6.90)	1.02 (0.19-1.98)
K	1.65 (2.86-2.21)	3.83 (3.38-4.61)	5.79 (2.99-14.7)	0.62 (0.50-0.95)	1.45 (0.86-2.50)	0.62 (0.21-1.39)
Mg	11.2 (15.8-14.4)	69.5 (45.1-88.4)	55.4 (24.9-79.7)	3.80 (2.90-5.23)	8.84 (4.10-18.3)	3.17 (0.65-8.69)
Ca	44.7 (65.8-53.4)	210 (166-263)	192 (133-254)	10.2 (4.80-19.9)	38.2 (13.1-83.1)	16.0 (3.51-38.0)
Fe	0.30 (0.08-0.58)	148 (4.75-718)	0.60 (0.09-1.83)	0.03 (0.02-0.04)	5.56 (3.31-7.50)	0.30 (0.08-0.54)
Al	6.49 (4.51-0.04)	66.1 (38.4-100)	27.2 (3.97-53.9)	0.48 (0.03-2.24)	6.47 (1.11-17.6)	5.30 (0.91-16.6)
Mn	3.92 (3.12-5.05)	44.4 (21.4-63.2)	7.93 (4.85-11.6)	0.29 (0.03-0.92)	3.82 (1.64-8.26)	1.78 (0.35-3.89)
Cu	5.76 (3.93-8.40)	59.3 (26.4-94.8)	18.2 (3.55-34.8)	0.43 (0.04-1.65)	2.86 (0.47-8.29)	4.73 (1.35-12.6)
Zn	15.1 (11.2-19.8)	282 (97.5-548)	55.9 (46.7-65.1)	1.01 (0.13-3.47)	19.1 (6.85-41.0)	8.77 (1.56-25.6)
Pb	0.05 (0.03-0.10)	0.51 (0.23-1.16)	0.12 (0.06-0.20)	<0.01	0.01 (<0.01-0.05)	0.07 (<0.01-0.10)
Cd	0.25 (0.18-0.38)	10.1 (1.32-29.7)	0.82 (0.70-0.93)	0.01 (<0.01-0.05)	0.18 (0.06-0.37)	0.14 (0.03-0.41)
SO ₄	277 (226-336)	2088 (1180-3120)	967 (838-1130)	44 (23-96)	221 (84-503)	125 (31-334)

내외이며 TDS 함량도 낮지만 광미장에서 직접 유출되는 SW#2 시료는 역시 강산성과 상대적으로 Cu, Zn, Cd 등의 중금속 함량이 높게 나타났다. 연구지역의 생산광종을 고려할 때 중금속 원소 중 Pb의 함량이 상대적으로 낮게 나타나는데 이는 수용액상에서 극히 낮은 pH 조건을 제외하고 흡착 또는 침전 반응으로 제거되는 경향이 Cu, Zn 및 Cd에 비해 훨씬 강하기 때문(Kinniburgh *et al.*, 1976)으로 추정한다. 강우시에

채취된 폐석장 유거수는 pH 3.02~3.43을 보이고 Cu, Zn, Cd 함량이 침출수 배출허용기준을 초과하는 수준으로 나타나 강우에 의해 폐석 표면과의 반응으로 산성수가 곧바로 생성되고 있음을 보여준다.

4.2. 지하수 및 침출수 수질의 시기별 변화

폐기물 적치장 관정 지하수 및 지표 침출수의 pH와 주요 중금속 원소의 함량 변화를 시기별(2008년 3월,

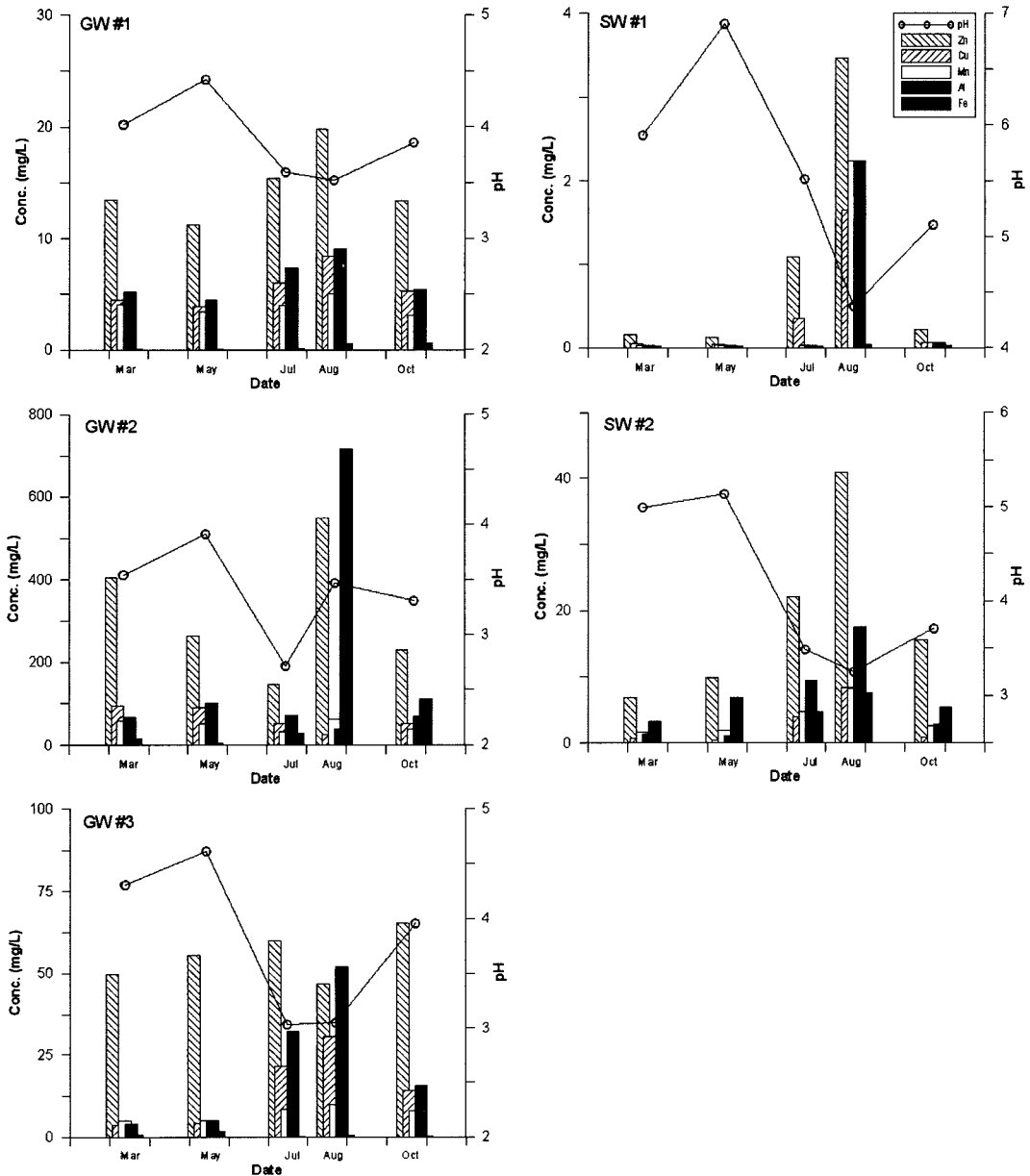


Fig. 4. Seasonal variations in pH and metal concentrations in groundwater and surface leachate waters.

5월, 7월, 8월 및 10월)로 Fig. 4에 나타내었다. 광미장 1번공의 경우 우기인 7, 8월에 pH 약 3.5로 건기인 3월 및 5월의 4.0, 4.4에 비해 보다 산도가 높아지며 Zn, Cu, Mn, Al 등의 함량도 우기에 가장 높아진다. 이는 Fig. 3에서 우기의 전기전도도 증가양상과 일치한다. 2번 관정에서는 중금속 함량이 7월에 많이 감소하였으나 8월 시료에서 특히 Zn와 Fe 함량이 크게 증가하였고 pH는 7월 및 8월 자료가 건기인 3월 및 5월보다 낮게 나타났다. 이는 Fig. 3에서 우기 직후 전기전도도가 다소 감소하였다가 일정기간 이후 다시 크게 증가하는 양상으로 나타난 바와 같이 우기의 수질 변화폭이 크게 나타나며 분석된 중금속 함량도 큰 차이를 나타내는 것으로 판단한다. 이후 10월에 이전 건기에 해당하는 3월 및 5월 수준으로 복구하고 있다. 폐석장 3번 관정은 1번 관정과 유사하게 우기에 pH의 급격한 감소와 중금속 함량의 증가양상을 보이고 있다. 관정 지하수의 수질변화로 볼 때 대체로 우기에 집중강우로 인해 pH 감소와 중금속 함량 증가의 수질악화양상을 보여준다. 지표침출수의 경우에도 동일한 양상으로 나타나며 특히 10월 시료에서도 이전 건기인 3월 및 5월에 비해 낮은 pH를 보여 침출수가 지속적으로 발생하며 악화된 수질이 유지되는 것으로 보인다.

4.3. 수질 변화요인 평가

관정 지하수, 침출수 및 유거수의 주요 수질성분간 상관성을 검토하기 위하여 두 변수 간 선형관계에 대한 측도를 나타내는 피어슨 상관계수(Webster and Oliver, 2001)를 SPSS(Release 10.0.7) 프로그램을 이용하여 계산하였다. 그 결과(Table 2 및 Fig. 5), 모든 성분들

이 TDS와 좋은 상관성을 나타내며 Fe을 제외한 각 성분들의 상호 상관성도 높게 나타나고 있다. 또한 수질조성에 대한 시기별 변화도 평가하였으나 건우기 함량의 상대적 증감 외에 조성의 큰 변화는 나타내지 않았다. 이는 모든 수질성분이 폐기물과의 반응에 의해 전반적으로 용출되어 수질에 영향을 주고 있음을 의미하며 황화광물 및 규산염 혹은 탄산염 광물의 단계적인 용해반응보다는 가용성 2차 염류의 용해반응에 의해 수질이 조절됨을 지시한다. 일반적으로 신선한 광미 및 폐석 등의 폐기물은 물과의 반응에 의해 황화광물의 산화반응, 규산염 및 탄산염 광물의 중화반응과 2차산물의 침전 및 용해반응이 단계적으로 또는 심도별로 발생하여 이 반응정도에 의해 침출수의 pH와 수질성분 함량이 변화하는 경향이 있지만(Jurjovec *et al.*, 2002) 연구지역의 오랜 풍화를 받은 폐기물 적치장은 이러한 양상이 나타나지 않는 것으로 판단한다. 또한 우기의 수질악화 양상은 집중강우에 의해 폐기물과의 반응정도가 전체적으로 강해진다는 의미로서 연구지역 광미 풍화층 및 폐석표면에 생성된 가용성 2차 염류들이 지하수 및 침출수에 직접적으로 산도 및 용존 중금속 성분을 제공(Hammarstrom *et al.*, 2005; Jerz and Rimstidt, 2003)하며 우기에 일시적으로 많은 양이 용해되어 수질악화를 야기하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

폐석장내 방치된 폐석의 표면에 다양하게 나타나는 2차 증발염류(efflorescent salts)에 대해 현상관찰 및 SEM-EDS 분석을 실시하였다. 주로 금속 황산염 형태의 가용성 수화염류들은 불안정한 고체상으로 한시적으로 발생하지만 지표환경에 중요한 영향을 줄 수 있으며

Table 2. Pierson correlation coefficients between chemical components in groundwaters, surface leachate and runoff waters

	Cd	Zn	Pb	Cu	Mn	Fe	Al	Si	Na	K	Mg	Ca	SO ₄
Zn	0.844**												
Pb	0.749**	0.966**											
Cu	0.744**	0.720**	0.627**										
Mn	0.829**	0.966**	0.907**	0.855**									
Fe	0.390*	0.746**	0.834**	0.133**	0.600**								
Al	0.535**	0.654**	0.605**	0.944**	0.802**	0.183							
Si	0.425**	0.626**	0.589**	0.829**	0.747**	0.237	0.920**						
Na	0.395*	0.560**	0.480**	0.566**	0.596**	0.241	0.586**	0.786**					
K	0.209	0.336*	0.319	0.331*	0.325	0.151	0.354*	0.526**	0.739**				
Mg	0.560**	0.720**	0.643**	0.708**	0.751**	0.337*	0.697**	0.800**	0.927**	0.701**			
Ca	0.435**	0.649**	0.615**	0.719**	0.701**	0.310	0.786**	0.878**	0.892**	0.725**	0.941**		
SO ₄	0.711**	0.927**	0.894**	0.822**	0.950**	0.603**	0.833**	0.841**	0.749**	0.511**	0.877**	0.872**	
TDS	0.712**	0.940**	0.914**	0.794**	0.951**	0.647**	0.805**	0.820**	0.737**	0.506**	0.865**	0.856**	0.998**

*significant at the 0.05 level, **significant at the 0.01 level

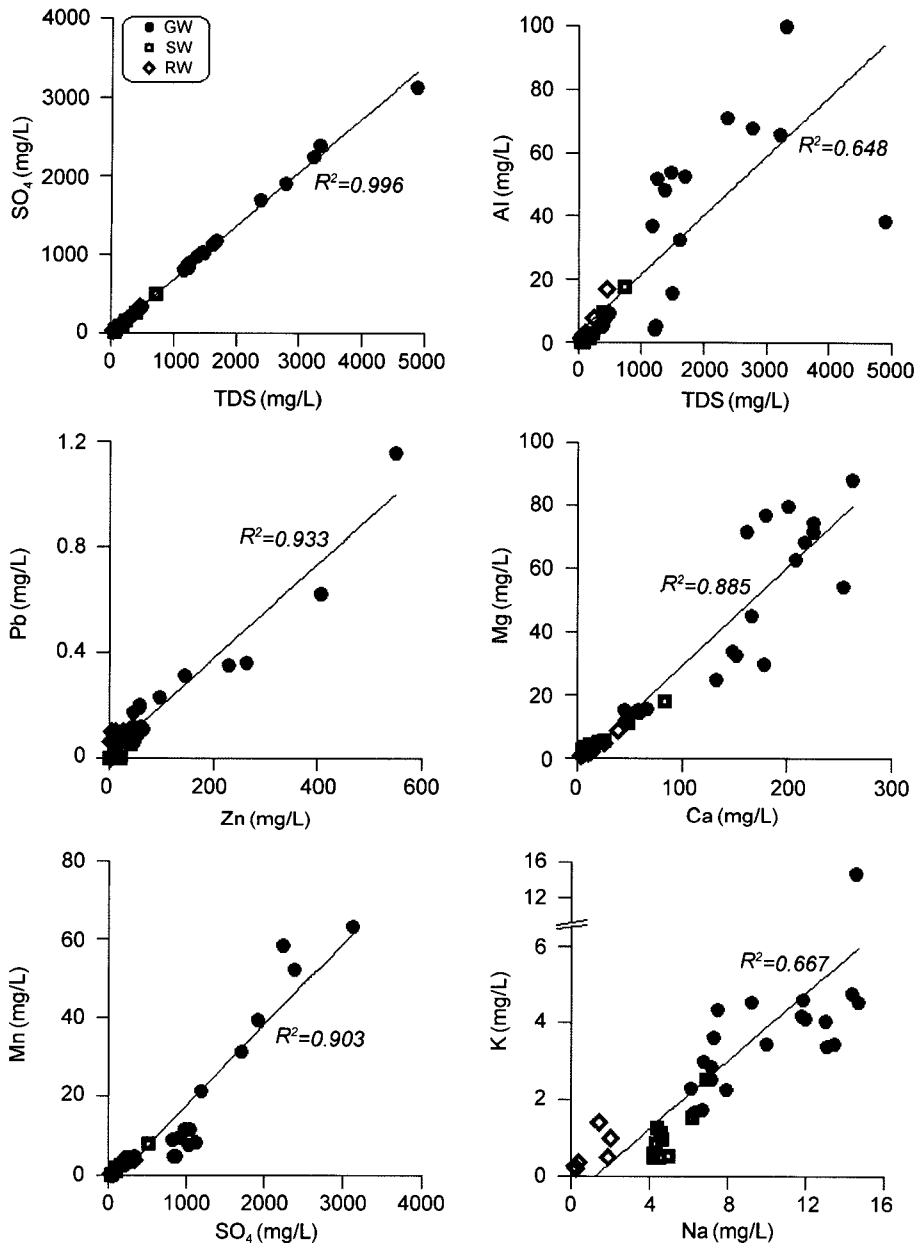


Fig. 5. Relationships between chemical components in groundwaters (GW), surface leachate (SW) and runoff waters (RW).

생성과정의 광물 및 산성수의 조성과 환경조건에 관한 정보를 제공할 수 있다. 이러한 관점에서 3가철산화물과 함께 폐광지역의 주요한 환경광물(environmental minerals)로 다루어지고 있다(Valente and Gomes, 2009). 연구지역에서는 주로 황철석, 방연석, 섬아연석 등으로 추정되는 광석광물을 포함하는 폐석 표면에 백색, 분홍 또는 푸르스름한 색상의 꽃가루군집 형태로 생성되거나 폐석의 간극을 채우는 양상으로 나타났다

(Fig. 6). 다량으로 밀집하여 분포하지는 않으나 폐석장 상부에서 전반적으로 흔히 관찰된다. 현장조사에서 물을 뿌리면 곧 용해되어지므로 강우 및 침출수에 의해 쉽게 제거되고 고온건조한 환경에서 다시 생성되는 것으로 예상된다.

이들 증발염류에 대한 정확한 광물감정은 어려우나 황철석, 자류철석 등 철화광물의 산화에 따라 형성되는 Fe, Al, Ca, Mg 등의 가용성 수산화산염 광물(비

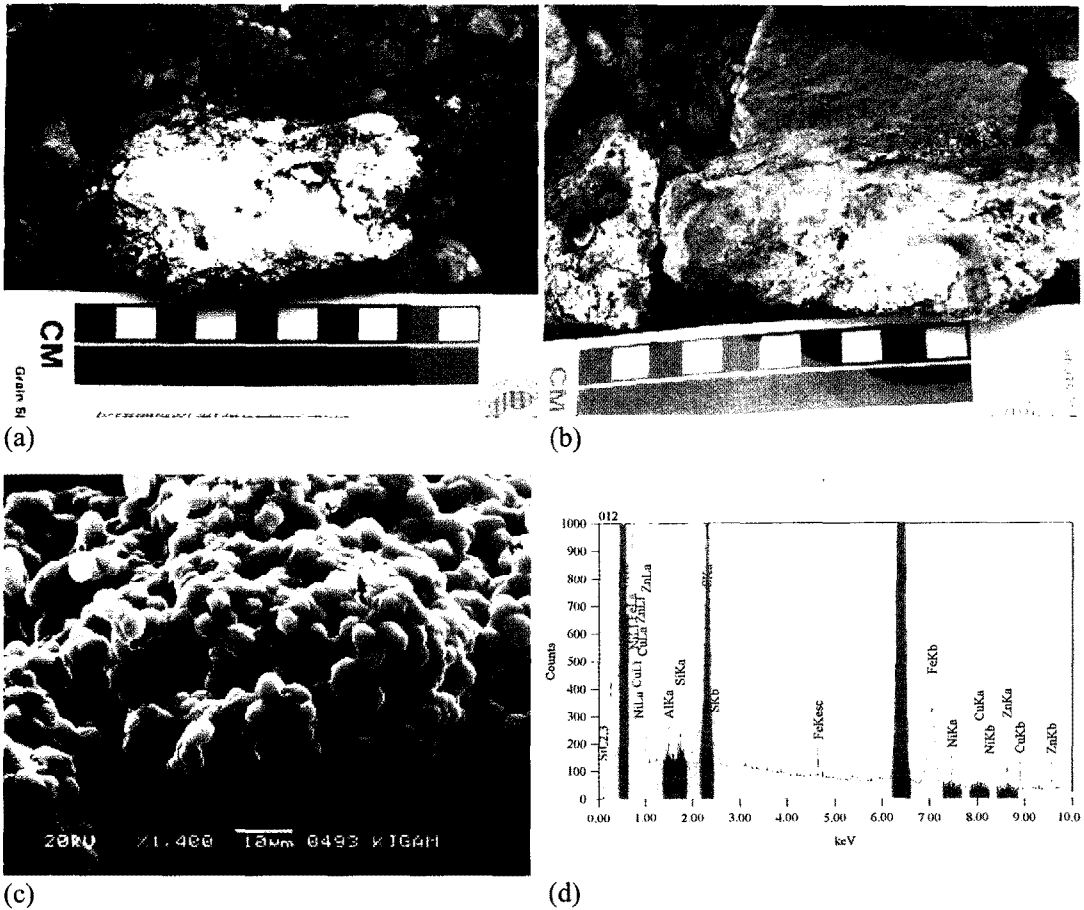
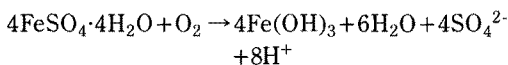


Fig. 6. Field and SEM images of secondary salts on waste rocks. (a) white salts (b) bluish salts (c) SEM image of white salt materials and (d) EDS spectra of white salts in (c).

정질 또는 melanterite, rozenite, alunogen, gypsum 등)로 추정되며 단일 광물종이라기 보다는 다양한 복합체로 구성된다. 이러한 증발염류는 용해과정에서 산도와 함께 Fe, Al, 황산이온 등을 제공할 수 있다(Smuda *et al.*, 2007). 예로서 로제나이트(rozenite)의 용해반응은 다음 식과 같다.



또한 비소 및 중금속 원소들을 흡착 또는 공침전으로 포함하고 있어 역시 용해과정으로 재용출될 수 있다. 본 연구지역의 시료에 대한 EDS 분석결과에서도 Cu, Zn 등의 중금속을 포함하고 있는 것으로 나타나 (Fig. 6) 강우시 폐석장 유출수의 직접적인 강산성과 높은 중금속 함량의 일차적 원인으로 판단한다.

이와 같이 우기에 강우에 의한 폐기물의 2차 염류의

용해로 인해 다량의 산성수 발생과 함께 오염 부하량의 상대적 증가를 예상할 수 있다. 최근의 전지구적인 기후변화 양상의 하나로서 극심한 가뭄과 고온현상이 지속될 경우 보다 많은 양의 염류가 생성될 수 있으며 또한 집중강우 발생시 주변 수계로의 환경적 영향은 더욱 심각해질 수 있다.

5. 결 론

거품광산 폐기물 적치장 지하수 및 침출수는 강산성과 높은 중금속 함량의 전형적인 산성광산배수의 특성을 나타내었다. 또한 우기에 관정 지하수 및 침출수 수질이 더욱 악화되는 양상으로 나타났으며 강우와 폐석의 직접적 반응으로 강산성의 유거수가 발생하였다. 광산폐기물 특히 폐석 표면에서 다양한 성상의 2차 염류들을 관찰할 수 있었으며 이들은 주로 증발반응에

의해 생성되는 Fe, Al, Ca, Mg 등의 가용성 수화황산염 광물로 추정된다. 이러한 증발염류들은 강우시 침출수 및 지하수의 강산성과 높은 중금속 함량의 일차적 원인으로 판단된다. 기후변화 양상의 하나로서 가뭄과 고온현상이 지속될 경우 보다 많은 염류가 생성될 수 있으며 환경적 영향이 더욱 심각해질 수 있다. 광산폐기물 복토처리 설계에 있어 이러한 우기의 수질 악화 현상을 고려하여야 하며 집중강우 등으로 나타나는 기후변화 양상에 대처하여 보다 고효율과 지속적인 안정성을 확보할 수 있는 처리기법이 적용되어야 한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술개발(09-3411)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Cheong, Y.W., Yim, G.J., Ji, S.W., Park, H.Y., Min, D.S. and Park, I.W. (2008) Impact of the rain on the geochemical and hydrological characteristics within a mine waste impoundment at the Geopung mine, Korea. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, v.45, p.495-504.
- Gomes, M.E.P. and Favas, P.J.C. (2006) Mineralogical controls on mine drainage of the abandoned Ervedosa tin mine in north-eastern Portugal. *Applied Geochemistry*, v.21, p.1322-1334.
- Hammarstrom, J.M., Seal II, R.R., Meier, A.L. and Kornfeld, J.M. (2005) Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, v.215, p.407-431.
- Jambor, J.L., Nordstrom, D.K. and Alpers, C.N. (2000). Metal-sulfate salts from sulfide mineral oxidation. In: Alpers, C.N., Jambor, J.L. and Nordstrom, D.K. (Eds.), *Sulfate Minerals-Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance*, Rev. Mineral. Geochem., v.40, p.303-350.
- Jerz J.K. and Rimstidt, J.D. (2003) Efflorescent iron sulfate minerals: paragenesis, relative stability, and environmental impact. *American Mineralogist*, v.88, p.1919-1932.
- Jurjovec, J., Ptacek, C.J. and Blowes, D.W. (2002) Acid neutralization mechanism and metal release in mine tailings: A laboratory column experiment. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, v.66, p.1511-1523.
- Keith, D.C., Runnells, D.D., Esposito, K.J., Chermak, J.A., Levy, D.B., Hannula, S.R., Watts, M. and Hall, L. (2001) Geochemical models of the impact of acidic groundwater and evaporative salts on Boulder Creek at Iron Mountain, California. *Applied Geochemistry*, v.16, p.947-961.
- Kinniburgh, D.G., Jackson, M.L. and Syers, J.K. (1976) Adsorption of alkaline earth, transition and heavy metal cations by hydrous oxide gels of iron and aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.40, p.796-800.
- MIRECO (2008) Detailed survey report on Geopung mine tailings protection project. Mine Reclamation Corporation Technological Report 2008-8, 87p.
- Nordstrom, D.K. (2007) Effects of seasonal and climatic change on water quality from acid rock drainage in the western United States. In: Cidu, R. and Frau, F. (Eds), *IMWA Symposium 2007: Water in Mining Environments*, 27th-31st May 2007, Cagliari, Italy.
- Smuda J., Dold, B., Frise, K., Morgenstern, P. and Glaesser, W. (2007) Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn-Pb-(Ag-Bi-Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru. *Journal of Geochemical Exploration*, v.92, p.97-110.
- Valente, T.M. and Gomes, C.L (2009) Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, v.407, p.1135-1152.
- Webster, R. and Oliver M. (2001) *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 271p.
- Yim, G.J., Ahn, J.S., Cheong, Y.W., Min, D.S. and Baek, H.J. (2009) An evaluation of the infiltration control of a soil cover overlying tailings impoundment. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, v.46, In print.