

건설현장 절취사면의 산성암반배수 발생특성과 잠재적 산발생능력 평가

이규호 · 김재곤* · 이진수 · 전철민 · 박삼규 · 김탁현 · 고경석 · 김통권

한국지질자원연구원

Generation Characteristics and Prediction of Acid Rock Drainage(ARD) of Cut Slopes

Gyoo Ho Lee, Jae Gon Kim*, Jin-Soo Lee, Chul-Min Chon, Sam-Gyu Park, Tack Hyun Kim, Kyung-Seok Ko and Tong Kwon Kim

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

Acid Rock Drainage(ARD) is the product formed by the atmospheric(i.e. by water, oxygen and carbon dioxide) oxidation of the relatively common iron-sulphur mineral pyrite(FeS_2). ARD causes the acidification and heavy metal contamination of water and soil and the reduction of slope stability. In this paper the generation characteristics and the prediction of ARD of various cut slopes were studied. An attempt to classify the rocks into several groups according to their acid generation potentials was made. Acid Base Accounting(ABA) tests, commonly used as a screening tool in ARD predictions, were performed. Fourteen rock samples were classified into PAF(potentially acid forming) group and four rock samples into NAF(non-acid forming) group. The chemical analysis of water samples strongly suggested that ARD with high content of heavy metals and low pH could pollute the ground water and/or stream water.

Key words : pyrite, oxidation, acidification, contamination, slope stability

건설 현장 절취사면에서 발생하는 산성암반배수(Acid Rock Drainage, ARD)는 암석에 함유된 황화광물의 산화에 의해 발생하며, 주변 환경, 구조물의 안정성과 수명, 경관에 악영향을 주고 있다. 우리나라의 지형은 70% 이상이 산 지이므로 토목공사과정에서 사면절취와 터널공사가 빈번히 이루어지고 있는데, 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 황철석을 함유한 암석들은 전국에 분포한다. 본 연구에서는 다양한 암반을 대상으로 암석유형별 산성배수 발생특성을 파악하고 잠재적인 산발생능력을 규격화된 방법으로 평가하고자 하였다. 산발생능력 평가 결과 NP/MPA 비에 따라서 14개의 시료가 산성배수 발생 가능성이 높은군에, 4개의 시료는 산성배수 발생 가능성이 낮은군에 해당하였으며, 암석의 종류와 산발생능력 평가 결과는 상관관계는 명확하지 않았다. 본 연구에서 대상으로 한 시료만으로 볼 때, 편마암, 화강암의 경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변질을 받은 화산암, 응회암, 탄질셰일, 금속광산 폐석시료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다. 물시료 분석 결과 일부 항목이 지하수의 생활용수 이용시 수질기준을 초과하였다. 이는 주로 황철석의 산화로 인하여 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하기 때문이며, 고농도의 중금속을 함유한 산성배수가 계속 생산, 유입될 경우 연구대상 지역 부근 지하수와 하천수의 수질오염이 우려 된다.

주요어 : 황철석, 산화반응, 환경오염, 사면안정

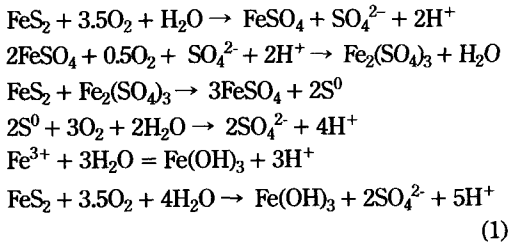
1. 서 언

건설현장 절취사면에서 발생하는 산성배수(Acid

Rock Drainage, ARD)는 암석에 함유된 황화광물의 산화에 의해 발생하며, 주변 환경, 사면구조물의 안정성과 수명, 경관에 악영향을 주고 있다. 대표적인 황화

*Corresponding author: jgkim@kigam.re.kr

광물로는 황철석(pyrite, FeS_2)이 있으며 탄화대, 광화대, 함황철석 안산암, 제3기층의 특이산성토 등 우리나라의 다양한 지질환경에서 흔히 산출된다. 사면의 절취는 지하에서 안정한 상태로 존재하던 황철석을 공기와 강수에 노출시켜 황산과 금속침전물을 생성한다. 황철석의 산화반응과정은 다음의 식(1)과 같다.



산성배수(pH<3)는 부식성이 강해 사면처리에 사용되는 배수파이프, 콘크리트 블록, 숏크리트, 인조섬유, 그라우팅 주입제, 강관 및 철근 말뚝 등을 부식하여 구조물의 안정성을 떨어뜨리고 수명을 단축시킨다. 또한 사면녹화공법에서 사용되는 피복식물의 발아 및 성장을 방해한다(Fig. 1). 우리나라의 산성배수 생성 절취

사면의 사면처리에는 숏크리트공법이 가장 많이 적용되고 있는데 시멘트모르타르의 피복 후에도 암반과 피복물질 사이에 미세공간이 잔류하게 된다. 이 미세공간은 지하수, 강우, 공기의 유입통로가 되어 사면처리 후에도 산성배수가 지속적으로 생산되며, 배수되는 과정에서 시멘트와 반응하여 콘크리트 피막을 부식시킨다. 산성배수에 포함되어 있는 철과 알루미늄은 중화되면서 산화철 및 수산화철과 배사알루미나이트 등이 콘크리트 표면에 붉은색과 흰색의 침전물을 형성하여 경관을 훼손 한다(Fig. 1a). 산성배수는 고농도의 중금속을 함유하고 있어 주변 지역으로 배출될 경우 주변 토양을 오염시키고(Fig. 1b), 지표수나 지하수의 수질을 악화시킴으로서 환경문제를 발생시키기도 한다.

우리나라의 지형은 70% 이상이 산지이므로 토목공사과정에서 사면절취와 터널굴착이 빈번히 이루어지고 있다. 토목공사과정에서 산성배수를 발생시킬 개연성이 있는 황철석을 함유한 암석들은 전국(태백, 영월지역의 평안층군에 배대되어 있는 함탄층 주변지역, 옥천, 영동지역의 옥천층군 함탄층 주변지역, 해남 및 양산 등의 함황철석 안산암 주변지역, 포항지역의 함황철석 퇴



Fig. 1. Acid rock drainage sites. (a)capping of outcrop with shotcrete and secondary Al, Fe precipitation, (b)environmental contamination of residential area, (c)collapse of cut slope, (d) germination and growth diseases of covering plants of the slope planting construction.

적암 주변지역, 대부분의 금속광산 분포지역)에 산재해 있다. 국내에서 산성배수의 발생에 관한 연구는 주로 탄광(유재영, Coleman, 2000; 김정진과 김수진, 2002; 정영욱, 2004), 비금속광산(박맹언 등, 2000; 염승준 등, 2002), 금속광산(최선규 등, 2004, 추창오 등, 2004) 등 광산지역에 집중되어 왔다. 건설활동과 관련된 암반에서의 산성배수 발생에 관한 연구(최석원 등, 2001)는 드문 편이다. 또한 이미 배출되고 있는 산성배수의 지구화학적 특성, 이로 인한 환경오염이 주 연구 내용으로 근본적인 산성배수의 발생 억제를 위한 연구는 미미한 편이다.

본 연구는 한국지질자원연구원에서 수행중인 “산성배수 발생 억제 기술 개발 연구”의 첫 단계로서, 암석 유형별 산성배수 발생특성을 파악하고 잠재적인 산발생능력을 규격화된 방법으로 평가하고자 하는데 목적이 있다. 따라서 다양한 암반을 대상으로 산성배수 발생특성을 파악하고, 산성배수 발생정도와 암석유형과의 상관관계를 밝히고자 한다. 이를 토대로 암석을 산성배수 발생능력에 따라 그룹화 함으로서, 현재 진행 중이거나 향후 착수될 토목공사에서 대상 암반에 따라 산성배수로 인한 피해를 예측할 수 있는 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 시료 및 연구 방법

2.1. 시료

산성배수의 발생을 육안으로 확인할 수 있거나, 암반 내에 황철석이 포함되어 산성배수 발생 개연성이 높은 지역을 중심으로, 전국에 걸쳐 주로 건설현장 질취사면에서 21개의 암석시료를 채취하였다. 지표상에서 황철석의 산화가 이미 진행되어 있는 암석시료와 황철석이 노출되어 있지 않은 비교적 신선한 암반시료를 함께 채취하였다. 시료채취 위치와 암석유형을 Table 1에 기재하였다. 암석시료는 파쇄기(crusher)를 이용하여 수cm이하 크기로 잘게 부수고 고르게 섞은 후, 그중 일부를 취하여 미분기(pulverizer)로 200 mesh 이하 입도까지 분쇄하였다. 분쇄된 시료는 노출된 황철석의 추가적인 산화를 방지하기 위해 실험 전까지 밀폐용기에 보관하였다. 배수의 양이 충분한 지역에서는 물시료를 함께 채취하였다. 물시료는 현장에서 온도, pH, EC를 측정하고 PE(polyethylene) 용기에 저장하였으며, 양이온 분석용 시료는 별도로 농질산을 수 방울 첨가하여 pH를 낮춘 후 분석 전까지 보관하였다.

Table 1. Sample descriptions.

Sample ID	Location		Rock types	Sampling	
	Latitude	Longitude		Rock	Water
KR	35,17,46.2	128,38,21.7	tailings	○	
DE	-	-	tailings	○	
YS	35,24,17.0	129,10,44.0	volcanics	○	○
YW	37,08,53.3	128,32,14.1	coaly shale	○	
TB	37,12,02.1	128,57,00.7	coaly shale	○	
KK	35,57,52.7	129,27,15.5	lignite	○	
YA	35,53,58.6	129,31,44.6	lignite	○	
YJ	35,55,32.9	128,28,58.8	sediments	○	
CHG	36,09,10.6	129,20,52.5	crystalline tuff	○	○
CH	-	-	mudstone	○	
CH3	36,02,26.6	129,18,39.7	mudstone	○	
BS	35,54,03.8	129,28,19.7	black shale	○	
HB	36,29,55.5	127,35,36.4	slate	○	○
KB	36,10,07.2	127,22,54.0	phyllite	○	○
YH	37,11,17.9	128,34,07.1	phyllite	○	
SR	36,28,32.4	127,38,52.6	phyllite	○	○
IW	36,15,34.9	127,37,35.2	phyllite	○	○
HK	36,12,47.2	127,56,39.8	phyllite	○	○
BK	35,26,08.3	128,34,11.8	granite	○	
CP	36,11,47.7	128,00,34.8	granite	○	○
KP	37,34,5.7	126,41,42.1	gneiss	○	○

2.2. 연구 방법

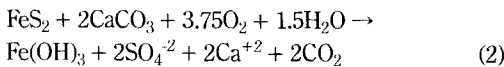
2.2.1. 분석 방법

암석시료의 광물조성을 알아보기 위하여 X'pert MPD(Phillips Co.)모형을 이용하여 X-선 회절분석을 실시하였다. X-선 회절분석용 시료에는 내부표준물질로 5 wt.-%의 강옥(corundum, Al₂O₃)을 첨가한 후 마노막자사발(agate mortar)에 넣어서 균질하게 갈았다. 광물조성의 정량분석에는 Matrix-flushing 방법을 사용하였다(Chung, 1974). 물시료의 음이온은 DX-100(DIONEX Co.)모델 Ion Chromatography로, 중금속을 포함한 양이온은 ICP-AES(JY70PLUS, Jobin Yvon Co.)를 이용하여 분석하였다. 총 황은 LECO사의 Sulfur Determinator(SC-132 모델)로 분석하였다.

2.2.2. 산발생능력 평가(Acid Base Accounting)

산발생능력 평가(Acid Base Accounting, ABA)는 1)최대산발생능력(Maximum Potential Acidity, MPA), 2)산중화능력(Neutralization Potential, NP)을 구한 후, 두 값의 차이인 3)순산발생능력(Net Acid Production Potential, NAPP)을 구하거나(NAPP = MPA - NP), 4) 두 값의 비(NP/MPA ratio)를 계산함으로써 이루어진다(Sobek *et al.*, 1978). 5)순산발생량(Net Acid Generation, NAG)은 H₂O₂를 이용하여 암석내 황철석을 모두 산화시켰을때 발생하는 황산 동량(equivalent kg H₂SO₄/t)을 구한 값이다.

MPA는 암석내의 황화광물이 모두 산화될 때 생성되는 황산의 최대량으로 통상 이를 중화시킬 수 있는 암석 1t당 석회암 동량(equivalent kg CaCO₃/t)으로 표현된다. 본 연구에서는 암석 내 황은 모두 황철석으로 존재한다고 가정하였으며 이는 X-선 회절분석을 통하여 확인하였다. 다음의 식 2에서 1몰의 FeS₂(황 64.13 g)가 2몰의 CaCO₃(200.18 g)에 중화되므로 상수 값은 31.213이 되며, 총 황 값에 상수를 곱하여 MPA를 구하였다(식 3).



$$MPA(kg CaCO_3/t) = total S(\%) \times 31.213 \quad (3)$$

NP는 표준 1N HCl을 이용하여 시료 내에 포함되어 있는 중화물질을 모두 반응시킨 후 소모된 HCl의 양을 표준 0.1N 또는 0.5N NaOH를 이용 역적정(back titration)함으로써 구하였다(Sobek *et al.*, 1978; Lawrence and Wang, 1997a, 1997b).

NAG를 구하기 위하여 시료 2.5 g을 500 ml 플라스

크에 넣고 15% H₂O₂를 조금씩 250 ml까지 첨가하였다. 끓거나 기포발생이 멈출 때까지 기다린 후 시계접시(watch glass)로 덮고 가열장치(hot plate)위에서 온도 약 90°C를 유지하면서 기포방출이 없어질 때까지 천천히 가열하였다. 이후 실온으로 냉각한 다음 증류수로 최종 부피가 250 ml가 되도록 맞춘 후 pH를 기록하고 이 값을 NAGpH로 하였다. 표준 NaOH용액을 이용하여 pH 4.5까지 적정한 후 다음의 식을 이용하여 NAG를 구하였다(Lawrence *et al.*, 1988).

$$NAG(kg H_2SO_4/t) = (49 \times V \times M)/W \quad (4)$$

여기서 V=적정에 사용된 NaOH 소모량(ml), M=NaOH 농도(moles/L), W=시료부게(g)이다.

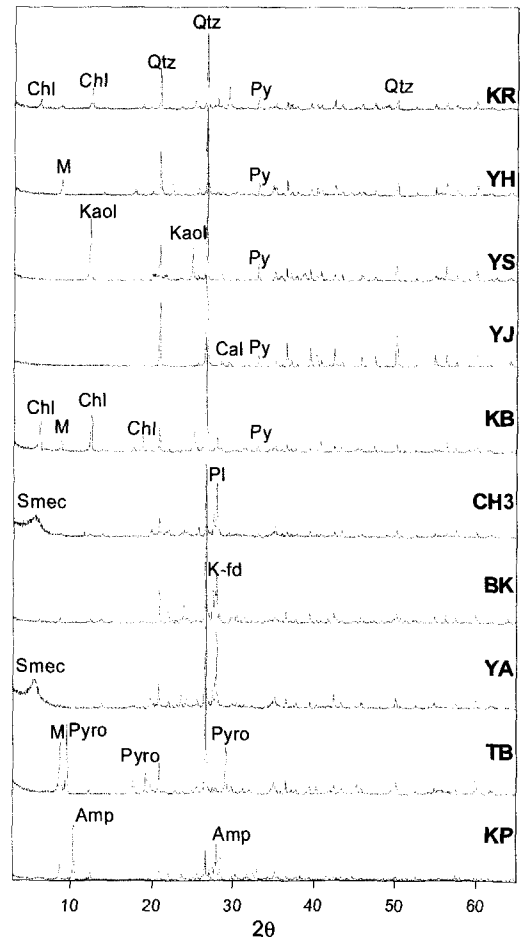


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of representative rock samples. Chl: chlorite, Qtz: quartz, Py: pyrite, M: mica, Kaol: kaolinite, Cal: calcite, Smec: smectite, Pl: plagioclase, K-fd: K-feldspar, Pyro: pyrophyllite, Amp: amphibole.

3. 결과 및 토의

3.1. X-선 회절분석

대표적인 시료들의 X-선 회절분석 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 주 구성광물은 석영, 운모류, 장석류, 황철석 등이며 모암에 따라 스멕타이트, 카올리나이트, 납석, 전기석, 감람석이 포함되어 있다. 일부 시료는 조성광물의 총합이 40 wt.% 이하인데, 이는 흑색셰일(BS), 갈탄(KK), 응회암(CHG) 시료 등으로 X-선 회절로 분석되지 않는 비정질 물질의 함량이 다른 시료에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 14개 시료에서 산성배수 발생의 원인 물질인 황철석이 동정되었으며, Matrix-flushing 방법을 이용한 정량분석 결과 함유량은 0.3-10.0 wt.%로 계산되었다(Table 2). 총 황 분석 결과(Table 4)를 이용하여 추정한 황철석의 함유량은 0.1-21.0 wt.%였는데, 이는 탄질셰일, 갈탄 등의 시료가 X-선 회절로는 분석되지 않는 황을 포함하고 있기 때문이다. X-선 회절결과 황철석이 확인된 14개 시료들을 대상으로 정량분석에 의해 구한 황철석과 총 황 분석에 의해 계산된 황철석의 함량을 대비해 보았다(Fig. 3). KB시료는 탄질셰일로서 총 황 함량 16.6 wt.%중

황철석이 아닌 형태의 황이 탄내에 상대적으로 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. X-선 회절 및 총 황 함량으로 구한 황철석의 함유량은 KB 시료를 제외할 경우 높은 상관관계($R^2=0.9772$)를 보였다. 따라서 각 암석 시료의 산성배수 발생능력에 미치는 조성광물의 영

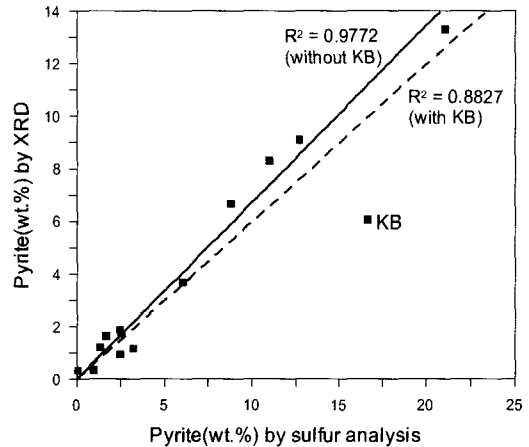


Fig. 3. Pyrite contents calculated by XRD and total sulfur analysis. Note sample KB has 16.6 wt.% of pyrite content obtained by total sulfur analysis but 6.1 wt.% by XRD and matrix-flushing method.

Table 2. Mineralogical compositions of the rock samples calculated quantitatively with matrix-flushing method(Chung, 1974).

Sample	Qtz	Mica	Pl	K-feld	Py	Smec	Ver	Chl	Pyro	Kaol	Tour	Cal	Gyp	Amp
(wt.%)														
KR	63.6	1.4	5.6	2.9	13.3			10.2						
YH	89.0	10.5		2.0	9.1						6.0			
YS	41.1				8.3					40.1				
YJ	92.3				6.7							2.3		
KB	30.6	6.6	6.9		6.1			31.0						
YW	9.1	7.5		2.1	3.7			23.8	19.3					
CH	11.3		3.7	2.4	1.9	31.1				1.3			0.7	
CH3	13.1	1.9	19.9	10.4	1.7	30.5				1.9			2.3	
BS	3.9		5.5		1.6	28.9								
HK	15.9	35.1	5.8		1.2			33.9						
HB	63.6	13.1	6.7		1.2			7.9						
BK	44.0	0.4	14.0	17.8	1.0		4.0			2.8				
KK	12.5		5.0		0.4	12.2				2.0				
CHG	27.7		2.0	3.4	0.3									
DE	83.3	8.2	5.2							6.9				
IW	34.8	21.8	9.0							3.6				
YA	30.7	2.4	33.4			45.5								
SR	53.9	17.5						18.3						
TB	36.6	18.3		3.4					42.5	7.3				
CP	50.7	1.9	21.8	17.0										
KP	12.8	0.9	7.9	6.4				1.4						49.2

Qtz: quartz; Pl: plagioclase; K-feld: K-feldspar; Py: pyrite; Smec: smectite; Ver: vermiculite; Chl: chlorite; Pyro: pyrophyllite; Kaol: kaolinite; Tour: tourmaline; Cal: calcite; Gyp: gypsum; Amp: amphibole

Table 3. Relative reactivities of minerals at pH 5 (after Sverdrup, 1990; Kwong, 1993).

Mineral group	Typical minerals	Relative reactivity at pH 5
Dissolving	Calcite, aragonite, dolomite, magnesite, brucite	1.00
Fast weathering	Anorthite, nepheline, forsterite, olivine, garnet, jadeite, leucite, diopside, wollastonite	0.40
Intermediate weathering	Sorosilicates, pyroxenes, amphiboles, phyllosilicates	0.02
Slow weathering	Plagioclase feldspars	0.01
Very slow weathering	K-feldspars, muscovite	0.01
Inert	Quartz, rutile, zircon	0.004

Table 4. Acid base accounting results.

Sample	Total S(%)	MPA	NP	NAPP	NAG	NP/MPA	
		(kg CaCO ₃ /t)		(kg H ₂ SO ₄ /t)			
YA	0.09	2.69	-14.9	17.54	1.893	-5.53	
CHG	0.03	0.82	-1.7	2.52	0.000	-2.08	
KK	0.50	15.69	-7.2	22.89	16.844	-0.46	
HK	0.71	22.27	-1.6	23.87	10.686	-0.07	
YW	3.23	100.66	-4.8	105.46	62.093	-0.05	
YH	6.80	212.31	-8.9	221.16	107.839	-0.04	
YS	5.88	183.38	-6.4	189.78	142.139	-0.03	
BS	8.89	277.55	4.3	273.25	104.891	0.02	
TB	0.06	1.87	0.4	1.47	0.000	0.21	<1
BK	1.33	41.62	9.2	32.42	13.671	0.22	
KR	11.27	351.77	86.3	265.52	3.348	0.25	
HB	1.73	53.89	13.8	40.09	19.467	0.26	
CH	1.32	41.20	10.9	30.30	12.370	0.26	
DE	0.28	8.66	3.5	5.21	1.068	0.40	
YJ	4.70	146.79	62.1	84.69	75.550	0.42	
CH3	1.36	42.45	29.8	12.65	10.004	0.70	
BS	0.90	28.06	33.4	-5.34	4.000	1.19	1-2
KP	0.31	9.54	26.8	-17.26	0.000	2.81	>2
SR	0.07	2.22	11.2	-8.93	0.000	5.03	
IW	0.08	2.38	24.1	-21.72	0.000	10.14	>4
CP	0.00	0.03	9.2	-9.12	0.000	312.97	

MPA: maximum potential acidity, NP: neutralization potential, NAPP: net acid production potential, NAG: net acid generation

향을 고려하기 위해서는, 정량적인 X-선 회절분석이 매우 유용함을 알 수 있다.

Sverdrup(1990)과 Kwong(1993)은 pH 5.0에서 산에 대한 방해석, 아라코나이트, 돌로마이트 등의 반응 속도를 기준(1.00)으로 기타 광물상들의 상대적인 반응도를 분류하였다(Table 3). 즉, 석영, 루틸, 저어콘 등 상대적으로 풍화에 강한 광물들은 이를 포함하는 암석의 NP에 거의 영향을 주지 않으나, Ca와 Mg를 포함하고 있는 사장석(anorthite), 감람석(amphiboles) 등은 상대적으로 빠르게 풍화되면서 산을 소모하므로 NP값에 대한 기여도가 높아진다. 따라서 산발생능력 평가

와 결과 해석시 광물조성을 고려하여 주의를 기울여야 한다. 산을 중화하는 대표적인 물질은 방해석이나, 본 연구의 대상 시료들 중 한개 시료(YJ)를 제외하고는 방해석이 동정되지 않았다. 따라서 사장석, 감람석, 납석과 스멕타이트 등 충상규산염 광물을 포함하는 시료들의 경우 주로 이 광물들이 산중화물질로서 작용한 것으로 해석된다.

3.2. 산발생능력 평가

산발생능력 평가 결과를 Table 4에 제시하였다. 최대 산발생능력(MPA)은 최소 0.03, 최대 351.77(kg

CaCO₃/t)으로 나타났으며 산중화능력(NP)은 -14.85~86.25(kg CaCO₃/t)범위의 값을 보여 준다. NP가 음(-)의 값을 보이는 경우는 시료가 산중화능력이 전혀 없으며, 산발생능력만을 갖는 경우로 해석되는데 이때 총 황의 함량이 고려되어야 한다. 즉, CHG 시료의 경우 NP가 음의 값(-1.7 kg CaCO₃/t)을 가지더라도, 총 황의 함량이 낮아(0.03%) 순산발생량(NAG)이 0이므로 산성배수 발생의 위험도는 낮다고 볼 수 있다. 반면에 YS 시료처럼 NP가 음의 값(-6.4 kg CaCO₃/t)을 가지면서 총 황이 상대적으로 많이 함유되어 있으면(5.88%) 산성배수 발생 위험도가 제일 높은 경우로, 실제 NAG 값도 최고치를 보인다(142.139kg H₂SO₄/t). 일반적으로 NP/MPA 비에 따라서 산성배수 발생 가능성을 평가하는데, 1) NP/MPA<1 이면 산성배수 발생, 2) 1<NP/MPA<2 범위이면 산성배수 발생 가능, 3)NP/MPA>2 이면 산성배수 발생 가능성 희박, 4)NP/MPA>4 이상이면 염기성배수(alkaline drainage) 발생 가능으로 판단한다 (Price *et al.*, 1997). 총 23개 시료중 18개의 시료가 NP/MPA<1에 해당하여 산성배수 발생 가능성이 높은 위험군에 해당한다. 4개의 시료는 NP/MPA>2에 해당

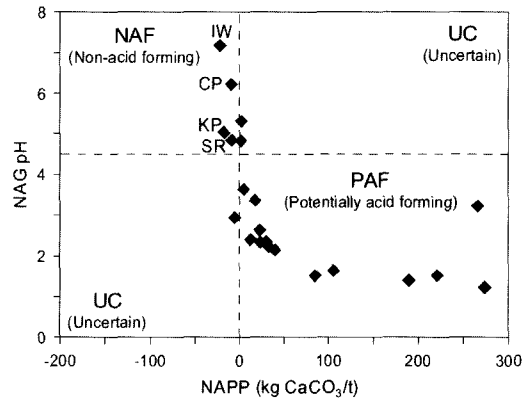


Fig. 4. Acid base accounting result.

하는데 NAG test 결과 모두 0의 값을 보여서 산성배수 발생 가능성이 거의 없는 것으로 확인되었다. 산발생능력 평가 결과와 암석의 종류는 명확한 상관관계를 보여주지 못하므로, 단순히 암석의 종류만으로 잠재적 산발생능력을 분류하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서 조사한 시료만으로 볼 때, 전반적으로 편마암, 화강암의 경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변

Table 5. Chemical compositions of the water samples.

Sample	T. (°C)	pH	EC (µs/cm)	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	K	Mg	Na
				(mg/l)							
SR	15.8	2.83	1618.0	0.802	4.674	3.298	947.26	70.8	2.15	29.20	4.34
CHG	19.1	3.12	2640.0	5.820	12.160	0	2752.88	175.0	18.70	140.00	39.20
YS	10.2	3.21	2040.0	17.268	7.888	2.636	1611.83	129.0	6.92	53.60	12.40
HK	24.7	3.68	161.5	0.093	2.521	2.416	67.46	2.06	0.47	3.71	2.89
KB	24.7	3.73	593.0	1.010	7.948	0.687	384.22	38.7	3.46	20.10	6.84
HB	16.3	5.68	62.9	0.014	4.735	6.354	25.15	3.86	3.40	1.61	2.51
IW	24.5	6.68	699.0	0.189	2.823	0	133.30	12.7	3.89	33.00	6.45
KP	16.9	7.14	984.0	0.528	30.284	1.856	505.08	74.4	2.05	10.30	39.50
CP	24.7	8.98	157.7	0.197	9.173	0.601	1.99	68.6	5.36	9.28	20.50
Std.*		5.8-8.5			250						

Sample	Si (mg/l)	Al	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
	(µg/l)									
SR	26.10	741.0	4.14	567.0	489.00	5710.0	2970.0	1550.0	115.00	1270.0
CHG	44.10	0	0	320.0	10.50	26500.0	7550.0	1260.0	40.80	3450.0
YS	31.50	969.0	14.1	403.0	35.70	48500.0	26200.0	110.0	74.50	1150.0
HK	7.04	1110.0	10.1	35.7	16.20	671.0	36.2	93.3	5.58	30.5
KB	21.40	1620.0	25.0	235.0	66.50	373.0	1310.0	688.0	44.80	956.0
HB	5.23	98.2	26.7	7.9	1.58	18.9	65.3	13.2	1.76	10.7
IW	9.14	4.9	32.0	2.8	2.03	425.0	1450.0	4.6	7.45	7.6
KP	7.86	113.0	40.5	0	0	0.9	361.0	8.8	3.75	1.2
CP	12.30	8.2	53.9	4.1	0.58	18.9	3140.0	1.4	4.83	0.5
Std.*		300				300	300		100	1500

*Std. : Standard for ground water quality(Ministry of Environment, 2003)

료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다.

3.3. 물시료

Table 5는 물시료의 화학분석 결과이다. 총 9개의 시료중 7개가 지하수의 생활용수 이용시 수질기준인 pH 5.8-8.6 범위를 벗어났다. pH가 3.5이하로 가장 낮은 값을 보이는 SR, CHG, YS 시료의 경우 SO_4^{2-} 농도가 947-2753 mg/l, Fe는 5710-48500 $\mu\text{g/l}$ 로 가장 높은 값을 보이는데, 이는 주로 황철석의 산화가 산성배수 발생의 주원인임을 보여준다. Zn의 농도도 가장 높은 값인 1150-3450 $\mu\text{g/l}$ 로 Fe값과 밀접한 상관관계를 보이는데 이는 황철석과 흔히 공존하는 첨아연석(ZnS)의 풍화에 의한 영향으로 생각된다. 그러나 상대적인 함량은 적은 편으로 X선 회절에 의해서는 동정되지 못했다. Al은 최대 1620 $\mu\text{g/l}$ 로 생활용수 수질기준의 5배, Fe는 최대 160배, Mn은 YS시료의 경우 26200 $\mu\text{g/l}$ 로 최대 80배 이상까지 기준치를 초과하기도 한다. 기준치를 초과하는 중금속은 황철석의 풍화로 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하기 때문이다. 따라서 고농도의 중금속을 함유한 산성배수가 계속 생산, 유입될 경우 연구대상 지역 부근 지하수와 하천수의 수질을 오염시킬 가능성이 매우 크다.

4. 결 론

NP/MPA 비에 따라서 산성배수 발생 가능성을 평가한 결과 18개의 시료가 산성배수 발생 가능성이 높은 군에, 4개의 시료는 산성배수 발생 가능성이 낮은 군에 해당하였으며, 암석의 종류와 산발생능력 평가 결과는 상관관계는 뚜렷하지 않았다. 본 연구에서 대상으로 한 시료만으로 볼 때, 편마암, 화강암의 경우 산성배수 발생 가능성이 낮은 군으로, 열수변질을 받은 화산암, 응회암, 탄질셰일, 금속광산 폐석시료는 산성배수 발생 가능성이 높은 군으로 분류되었다. 그러나 시료의 개수가 제한적이기 때문에, 산발생의 위험도를 보다 신빙성 있게 평가하기 위해서는 사면의 정밀한 지질조사를 통해 대표성을 갖는 시료를 채취하여야 한다. 본 연구결과 각 암석별 광물조성의 정량분석 결과는 산발생능력 평가시 고려되어야 할 중요한 요소임을 알 수 있었다. 건설현장에서 암반의 특성이 산성배수 발생 가능성이 높은 지역일 경우 산발생능력 평가와 더불어 정량화된 광물 조성 값을 구하는 정밀조사가 반드시 실시되어야 할 것으로 사료된다.

물시료 분석 결과 일부 항목이 지하수의 생활용수 이용시 수질기준을 초과하였다. 이는 주로 황철석의 산화로 인하여 발생한 산에 의해 배수가 낮은 pH를 유지하면서 중금속들을 용출시켜 지속적으로 배출하기 때문이며, 고농도의 중금속을 함유한 산성배수가 계속 생산, 유입될 경우 연구대상 지역 부근 지하수와 하천수의 수질오염이 우려 된다.

본 연구는 산성배수 발생지감을 위한 기술개발의 첫 단계로서 산성배수의 암석별 발생 특성을 파악하고 평가하는데 주 목적이 있었다. 향후 연구는 황철석을 함유한 암석의 표면을 처리하여 산성배수 발생의 원인인 황철석의 산화를 근본적으로 저감하는 기법을 개발하는데 주력할 예정이다.

사 사

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설핵심기술 연구개발사업(04핵심기술 A 02-04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김정진, 김수진 (2002) 태백 동해광산일대의 물-광물 반응에 의한 산성광산배수의 지구화학적 특성 변화. *자원환경지질*, 35권, p. 55-66.
- 박맹언, 성규열, 고용권 (2000) 비금속광상의 황화광염대에 수반되는 산성광산배수의 형성과 지질환경의 오염: 동래납석광산 산성광산배수의 형성에 관한 반응경로 모델링. *자원환경지질*, 33권, p. 405-415.
- 염승준, 윤성택, 김주환, 박맹언 (2002) 동래 납석광산 산성 광석배수의 중화실험: 중금속 거동 특성 규명. *한국지하수도양환경학회지*, 7권, p. 68-76.
- 유재영, Coleman, M. (2000) 산성 배수 내 용존 황의 동위 원소 조성: 영동 및 강릉 탄광 사례 연구. *지질학회지*, 36권, p. 1-10.
- 정영옥 (2004) 석탄광의 광산배수처리기술 현황 및 전망. *자원환경지질*, 37권, p. 107-111.
- 최석원, 이찬희, 원경식, 김일석 (2001) 청주-상주간 고속도로 예정구간의 회복지역에 대한 지질학적 및 수리지구화학적 특성. *지질학회지*, 37권, p. 83-106.
- 최선규, 박상준, 이평구, 김창성 (2004) 한반도 광상 성인 유형에 따른 환경 특성. *자원환경지질*, 37권, p. 1-19.
- 추창오, 이진국, 조현구 (2004) 산화환경하에서 명반석, 슈베르트마나이트의 형성특징과 환경지구화학적 의미: 달성광산. *한국광물학회지*, 17권, p. 37-47.
- 환경부 (2003) 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙.
- Chung, F.H. (1974) Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis. *J. Appl. Cryst.*, v. 7, p. 519-525.
- Kwong, Y.T.J. (1993) Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective. MEND/NEDEM report 1.32.1, Canadian

- Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa.
- Lawrence, R.W. and Scheske, M. (1997a) A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Env. Geol.*, v. 32, p. 100-106.
- Lawrence, R.W. and Wang, Y. (1997b) Determination of Neutralization Potential in the prediction of Acid Rock Drainage. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, p. 449-464.
- Lawrence, R.W., Jaffe, S. and Broughton, L.M. (1988) In-House Development of the Net Acid Production Test Method, Coastech Research.
- Price, W.A., Morin, K. and Hutt, N. (1997) Guidelines for the Prediction of Acid Rock Drainage and Metal Leaching for Mines in British Columbia: Part II - Recommended Procedures for Static and Kinetic Testing. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC, p. 15-30.
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Feeman, J.R. and Smith, R.M. (1978) Field and laboratory methods applicable to overburden and minesoils. EPA report No. 600/2-78-054, p. 47-50.
- Sverdrup, H.U. (1990) The kinetics of base cation release due to chemical weathering, Lund University Press, Lund.

2005년 1월 5일 원고접수, 2005년 2월 14일 게재승인.