

한반도 광상 성인유형에 따른 환경 특성

최선규^{1*} · 박상준¹ · 이평구² · 김창성¹

¹고려대학교 지구환경과학과, ²한국지질자원연구원

An Overview of Geoenvironmental Implications of Mineral Deposits in Korea

Seon-Gyu Choi^{1*}, Sang Joon Pak¹, Pyeong-Koo Lee² and Chang Seong Kim¹

¹Dept. of Earth and Env. Sci., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource, Daejeon 305-350, Korea

Metallic deposits in Korea have a variety of genetic types such as hydrothermal veins, skarns, hydrothermal replacement and alaskite deposits and so on. Geological, mineralogical and geochemical features including host rock, wall-rock alteration, ore and gangue mineralogy, mineral texture and secondary mineralogy related to weathering process control the environmental signatures of mining areas. The environmental signatures of metallic deposits closed from early 1970s to late 1990s in Korea show complicate geochemistry and mineralogy due to step weathering of primary and secondary minerals such as oxidation-precipitation-remobilization. The potentiality of low pH and high heavy metal Concentrations from acid mine drainage is great in base-metal deposits associated with polymetallic mineralization, breccia-pipe type and Cretaceous hydrothermal Au veins with the amount of pyrite whereas skarn, hydrothermal replacement, hydrothermal Cu and Au-Ag vein deposits are in low contamination possibility. The geoenvironmental models reflecting the various geologic features closely relate to distribution of sulfides and carbonates and their ratios and finally effect on characteristics of environmental signatures such as heavy metal species and their concentrations in acid mine drainage.

Key words : metallic deposit, geoenvironment, acid mine drainage, heavy metals, contamination

국내 금속광상의 성인적 유형은 주로 열수충진형 광상, 스킨형 광상, 열수교대형 광상 및 변성퇴적형 광상으로 배태되고 이외에 일부는 정마그마형 광상, 반암형 광상, 알라스카이트형 광상 등으로 부존되고 있다. 이러한 폐광산으로부터 발생되는 수질 및 토양의 환경문제는 개발규모 및 수반금속, 주변암상과 관련된 부존특성과 함께 열수변질작용과 관련된 광물조합, 광석-맥석 광물의 조직, 유형 및 양적관계, 풍화의 진행단계와 관련된 이차-산차광물의 존재형태 등의 광물-지화학적 특성에 좌우되고 있다. 1970년대 초반부터 1990년대 후반에 걸쳐 광산개발이 종료된 국내금속광상은 폐광 이후의 경과기간에 따라 황화-황염광물과 같은 일차광물로부터 용해되어 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물로 변화하는 과정에서 산화-용출-침전-재용출-이동에 의한 다단계의 복잡한 지화학적 반응관계를 보이고 있다. 금속광상의 산성 배수 및 중금속오염은 다금속 광화작용과 관련된 비철금속 광상과 동시에 맥상광상 및 각력파이프형 광상과 백악기 금광상에서 가장 높은 용출가능성을 보이는 반면, 스킨형 광상, 열수교대형 광상, 정마그마형 광상, 맥상 금-은광상, 맥상 동광상 및 변성퇴적형 광상에서 오염가능성은 매우 낮은 경향을 보이고 있다. 이와 같이 광상 유형과 관련된 지질부존 특성은 폐석 및 광미를 구성하는 황화광물 및 탄산염광물의 유형 및 양비와 밀접한 연관성을 갖고 있으며, 산성 배수에 함유된 금속원소종의 유형 및 용출량과 같은 지화학적 특성에 직접적으로 영향을 미치고 있다.

주요어 : 광상성인, 환경, 산성배수, 중금속, 오염

1. 서 언

국내에서는 최근까지 금속 및 비금속 광물자원을 대

상으로 17,000 여개의 광구가 등록되었으며(신성천 등, 2000), 90년대 초반까지 금, 은, 연, 아연, 중석, 휘수연 석, 동, 철 등 주요 금속광물자원을 대상으로 약 500여

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

개 광산에서 생산실적이 보고된 바 있다. 한반도에서 전국적으로 분포하는 금속광상은 주로 쥐라기 대보 조산 활동에 의한 화강암질 저반과 백악기 불국사 화산암-반심성암 복합체의 주변부를 따라 다양한 유형의 암석에 배태되는 경향을 보이고 있다(김옥준, 1970; Kim, 1986; 오민수, 1998; 최선규 등, 2001). 이러한 금속광상은 주로 열수충진형 광상, 스카른형 광상, 열수교대형 광상 및 변성퇴적형 광상으로 배태되고 있으며, 그 밖에 층적형 사광상, 정마그마형 광상, 반암형 광상, 알라스카이트형 광상 등으로 부존되고 있다. 90년대 후반부터 휴.폐광산의 환경문제가 제기됨에 따라 다양한 광종 및 성인의 광산을 대상으로 산성폐수 및 토양오염에 관한 연구가 활발하게 수행되었다. 특히, 국내 광물자원의 대다수를 점유하고 있는 열수충진형 귀금속광상(구봉·덕음·광양·임천·삼광·공주제일(금성)·모악·나람(우인)·동명·신오·월유·진곡·천보·팔봉광산), 열수충진형 비철금속광상(다덕·삼보·시흥·길곡·장풍·진곡·토현광산)과 함께 열수교대형 광상인 금실·삼곡광산, 스카른형 광상인 거도·연화·상동·신에미·만장광산, 각력파이프형 광상인 일광·달성광산, 알라스카이트형 광상인 금정광산에 대한 환경연구가 보고된 바 있다(Jung and Thornton, 1996; 민정식 등, 1996; 민정식 등, 1997; 전용원, 1997; 김선태 등, 1998; 이기철 등, 1998; 박상준 등, 1999; 이찬희 등, 1999; 이찬희 등, 2000; 정명채 등, 2000; Jung, 2001; 정영욱 등, 2002; 문용희 등, 2003; 정헌복 등, 2003; 이광준 등, 2003).

최근 미국 지질조사소에서 수행된 광산환경 보고서에서는 광상의 성인모델에 따른 광산규모, 주변암상, 변질대의 특징, 광석의 산상, 금속비의 지화학특성, 대상분포(metal zoning), 열수변질대, 광석-맥석 광물의 종류 및 조직, 이차광물 등의 지질-광물학적 부존특성과 함께 지형, 수계, 채굴 및 선평방법을 종합적으로 검토하여, 광물자원의 개발단계부터 종료단계까지 수질 및 토양 오염에 대한 예측을 통하여 효율적인 방제대책을 제시하고 있으나(du Bray, 1995), 국내에서 광상 유형별 부존특성에 따른 지화학적 오염 가능성을 검토한 연구는 일부에 불과하다(Jung *et al.*, 2001; 정영욱 등, 2002). 본 연구에서는 국내 주요 금속광상을 대상으로 개발규모, 유형 및 부존 특성(주변암상, 변질대의 특징, 광석의 산상, 미량성분 특성, 광석-맥석 광물의 종류 및 조직) 등의 광물-지화학적 특성과 함께 현재 풍화단계의 진행과정을 중점적으로 비교 분석하여, 휴.폐 광산의 산성폐수 및 중금속 용출에 의한 오염 가능성을 종합 검토함으로써 광산의 환경문제를 제정

립하고자 한다.

2. 광상부존과 관련된 지질특성

한반도의 지질은 지체구조상 경기 및 소백산 육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류를 기반암으로 하여 옥천 지향사대의 변성암류와 태백산 분지의 고생대 퇴적암류가 분포하며, 쥐라기 초 대보 조산운동에 기인한 대규모 화성암체의 관입 이후, 경상분지를 중심으로 백악기 퇴적암류 및 불국사 화성활동과 관련된 화산-반심성암체로 구성되어 있다. 국내 금속광상은 중생대 화성암체의 외곽 주변부를 따라 밀집 분포하는 경향을 보이고 있으며, 황화광물을 다량 수반하는 비철금속 광상은 불국사 화성암체와 밀접하게 관련되어 있는 반면, 귀금속 광상은 쥐라기 대보 심성암체 및 불국사 화성암체 양자 모두와 밀접한 연관성을 갖고 있다.

한반도 전역에 걸쳐 분포하는 주요 금속광상은 주로 경기 및 소백산 육괴에 속하는 선캠브리아이언 변성암류 및 중생대 화강암류를 모암으로 하여 배태된 경기-충청-전라 지역의 홍천, 천안, 설천, 함천 금-은광화대(김옥준, 1970), 시흥, 가평 지역의 연-아연광화대, 옥천대에 속하는 황강리 및 금산-무주 지역의 형석-연-아연광화대, 경기 육괴의 양양, 홍천, 서산 지역의 철광화대, 태백산지역의 금, 은, 연, 아연, 중석, 휘수연, 등, 철 등 다금속 광화대가 분포하고 있으며(오민수, 1998; Choi, 2002), 그 밖에 경상분지에서는 함안-군북-고성(-창원) 지역 및 의성 지역을 중심으로 백악기의 퇴적암류, 화산암류 및 불국사화강암을 모암으로 하여 다양한 성인의 비철금속 및 귀금속 광상이 다수 분포하고 있다(박희인 등, 1983; 박희인 등, 1985; 지세정 등, 1991; 이상열 등, 2003). 이와 같이 국내 비철금속 광상 중 열수충진형 맥상광상은 지역에 따라 다양한 모암에서 산출되지만, 스카른형 광상 및 열수교대형 광상에서는 주로 탄산염암에 수반되며, 각력파이프형 광상 및 반암형 광상에서는 화강암류 또는 화산-퇴적암에 산출되는 특징을 보이고 있다(Table 1). 그리고 귀금속 광상은 대부분 합금은 석영맥으로 배태되고 있으며, 모암의 유형별 산출비는 화강암에서 38.4%, 선캠브리아이언 변성암류에서 38.4%, 기타 암석에서 23.2%이다(Kim, 1986). 또한, 이러한 광상의 유형은 광화유체의 조성 및 생성환경과 직접 연계된 다양한 침전 메커니즘에 따라 금속 종의 차이뿐만 아니라(최선규 등, 1995; Choi and Choi, 1998), 황화광물-맥석 광물간 상대적 양비와 함께 화학조성에서도 현저한 차

Table 1. Comparative geological, geochemical and mineralogical features of various deposit styles of major metallic deposits.

Mine	Major commodity	Genetic style	Host-rock lithology	Frequency of occurrence sulfide and sulfosalt	(abundance) gangue	Closed year
Yangyang	Fe	BIF	Precambrian metamorphosed rocks	rare (minor)	silicates >> carbonates	1994
Chungju	Fe(-W)	BIF; Skarn	Precambrian metamorphosed rocks	rare (minor)	silicates >> carbonates	1993
Ilgwang	W-Cu	Breccia pipe	Cretaceous granitoids	ubiquitous (variable)	Ca-silicates >> carbonates	1982
Bupyeong	Ag(-Pb)	Disseminated	Cretaceous volcanic rocks	rare (variable)	silicates > carbonates	1988
Janggun	Zn-Pb-Ag-Mn(-Fe)	Replacement, Skarn	Paleozoic carbonate rocks	ubiquitous (abundant)	Mn-carbonates >> silicates	2001
Yeoncheon	Fe-Ti	Orthomagmatic, Skarn	Precambrian metamorphosed rocks	rare (minor)	silicates >> carbonates	operating
Shinyeri	Fe-Zn-Cu(-Mo-Pb)	Skarn, Replacement	Paleozoic carbonate rocks	ubiquitous (variable)	Ca-Mg-silicates > Mg-carbonates	operating
Ulsan	Fe-W	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	rare (minor)	Ca-silicates > carbonates	1993
Pocheon	Fe	Skarn, BIF	Paleozoic carbonate rocks	rare (minor)	Ca-silicates > carbonates	1977
Mulgeum	Fe	Skarn	Cretaceous volcanic rocks	rare (variable)	Ca-silicates > carbonates	1991
Geumseong	Mo	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	rare (minor)	Ca-silicates > carbonates	1987
Ulsan	Cu-Zn-Pb-Ag	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	ubiquitous (abundant)	Ca-silicates > carbonates	1986
Sangdong	W-Mo-Au-Ag-Bi	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	common (minor)	Ca-silicates > carbonates	1992
Yeonwha I	Zn-Pb-Ag-Cu	Skarn, Replacement	Paleozoic carbonate rocks	ubiquitous (abundant)	carbonates > Ca-silicates	1993
Yeonwha II	Zn-Pb-Ag-Cu	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	ubiquitous (abundant)	Ca-silicates > carbonates	1987
Dongseong	Cu	Vein	Cretaceous volcanic and sedimentary rocks	common (minor)	quartz >> carbonates	1977
Gunbuk	Cu(-Au-Ag)	Vein	Cretaceous volcanic and sedimentary rocks	common (minor)	quartz >> carbonates	1975
Gwangyang	Au-Ag-Cu	Vein	Precambrian metamorphosed rocks	ubiquitous (abundant)	quartz >> carbonates	1967, 1990
Geodo	Fe-Cu	Skarn	Paleozoic carbonate rocks	common (minor)	quartz >> carbonates	1987, 2001
Sambo	Zn-Pb-Ag-Ba	Vein	Precambrian metamorphosed rocks	common (minor)	quartz >> carbonates	1991
Daejeong	Zn-Pb-Cu-Ag-Au	Vein	Jurassic granitoids	ubiquitous (abundant)	quartz >> carbonates	1945, 1976

Table 2. Comparative geological, geochemical, mineralogical and alteration features of gold-silver vein deposits in Korea.

Group	Major commodity	Metal association	Associated index metal	Mine	Frequency of occurrence (abundance)		Character of vein morphology	Alteration	Host-rock lithology	Genetic remarks
					Main Fe-S mineral	major gangue mineral				
Jurassic deposits	I	Au	Zn, Pb, Bi, Te	Taechang, Samhwanghwag	po > py	qtz >> cal	massive, simple	very weak	Precambrian metamorphosed rocks and	hypo- to mesothermal
	IIA	Au	Zn, Pb, Ag, Sn, As, Te	Daehung, Sangwang	py > po	qtz >> cal	massive, simple	very weak	Jurassic granitoids with pegmatite	hypo- to mesothermal
Cretaceous deposits	IIIB	Au	Zn, Cu, Pb, Ag, Te	Imcheon, Jeoneui, Hwagsan, Gubong	py >> po	qtz >> cal	complex, multiple	weak	Precambrian metamorphosed rocks and Mesozoic granitoids	mesothermal
	IIIC	Au-Ag	Cu, Zn, Pb, Bi, Sb	Gwangyang	py > po	ubiquitous (abundant)	complex, multiple	moderate	Mesozoic granitoids (variable)	xenothermal (?)
	III	Au-Ag	Zn, Pb,	Yonghwa, Namseong	py	common (variable)	complex, multiple	moderate	Mesozoic granitoids (variable)	meso- to epithermal (metal zoning)
	IV	Au-Ag	Pb, Sb, As, Zn, Cu, Se, Te	Mugeung, Geumwang, Deogyeon, Tongyeong	py	common (variable)	complex, multiple	strong	Volcanic and sedimentary rocks	epithermal (metal zoning)
	V	Ag	Pb, Zn, Au, Sb, As, Ge	Woeryu, Jeonju, Seongju	py	common (minor)	complex, multiple	strong	Volcanic and sedimentary rocks	epithermal
V*	Pb-Zn-Ag	Cu, Sb, As, Au	Shinrim, Gongyong, Daejeong	py > po	ubiquitous (abundant)	complex, multiple	strong	strong	Paleozoic sedimentary rocks and Cretaceous granitoids	meso- to epithermal

Abbreviations; cal=calcite, ce=carbonate minerals, qtz=quartz, po=pyrrhotite, py=pyrite.

이를 보이고 있다(Table 2).

금속광상에서 발생하는 환경 문제는 다음과 같은 주요 지질-광상학적 부존특성과 밀접한 연관성을 갖고 있다. 금속광상은 대부분 대기 중 산소와 접촉 가능성이 희박한 지하의 환원환경에서 황화광물 및 황염광물로 정출되어 광상을 형성하며, 이러한 황화광물이 농집된 광체가 지각의 용기·침식작용에 따라 지표부근에 노출되어 이차 부화작용(supergene enrichment) 또는 광산개발에 기인하여 대기 중 산소 또는 산소를 함유한 지하수와 접촉하게 됨으로써 산화반응이 촉진되어 ARD(acid-rock drainage) 또는 AMD(acid-mine drainage)를 형성하게 된다. 즉, 산성폐수의 발생유무는 일반적으로 지표에 노출된 광미 및 폐석의 화학적 풍화과정시 광석을 구성하는 산-발생 광물(acid-generating mineral, AGM), 산-소모 광물(acid-consuming mineral, ACM), 주변 모암 및 열수변질대의 유형 등과 같은 광물-지화학적 변화요인에 따라 산농도와 함께 금속의 용출량에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Plumlee and Nash, 1995; Plumlee, 1998). ARD는 일반적으로 pH가 5.0미만인 배출수로 정의되며(Jambor and Blowes, 1998), 이러한 pH의 감소는 Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Mo, Co, Al, Sb, As, Se 등과 같은 금속원소의 용해도를 증가시킴으로써 유해원소의 오염 가능성을 보고하고 있다.

3. 광상 유형별 개발규모

국내 금속광상은 성인적 측면에서 중생대 화성활동과 관련된 심부기원 광상과 천부기원 광상으로 양분할 수 있으며, 각 지역에 따라 대보 및 불국사 화성암체의 정치깊이를 반영한 광상생성의 심도변화에 기인하여 심-중열수성 또는 천열수성 광상과 같은 성인적 차이를 보이는 것으로 해석하였다(최선규와 위수민, 1992). 특히, 천부 화성활동과 관련된 금속광화작용은 근원암의 공간적 근접성과 연관된 광화유체의 다양한 물리-화학적 농집-진화단계에 따라 금속원소의 복잡한 침전과정을 보이며, 비철금속 광상으로부터 귀금속 광상까지 다양한 유형의 광상을 형성하고 있다(Corbett and Leach, 1998). 특히, 국내 금속광상에 대한 각 광산별 오염 가능성을 예측하기 위하여 일차적으로 고려할 사항은 지질-광상학적 요인과 함께 개발 광종 및 규모 등을 고려한 기존 생산실적을 정량적으로 검토할 필요가 있다.

국내 광물자원의 광산별 생산실적에 대한 통계자료는 지금까지 보고된 바 없는 형편이다. 본 연구에서는 광산의 개발 규모와 관련된 오염가능성의 정도를 예측하기 위하여 광업요람(1981~2000), 광상시추조사보고(1977~1990), 탐광굴진(1974~1986), 금속광산 조사연구 등의 자료를 근거로 하여 최근 40여 년간의 생

Table 3. Characteristic features of past Cu-Zn-Pb-Fe-W-Mo-Au-Ag production in various deposit styles of major metallic deposits.

Mine	Cumulative production								Closed year
	Cu (25%)	Pb (50%)	Zn (50%)	Fe (56%)	WO ₃ (70%)	MoS ₂ (90%)	Au (99%)	Ag (99%)	
	(MT)								(kg)
Yangyang				7,849,577					1994
Chungju				999,959					1993
Ilgwang	8,267				1,623				1982
Bupyeong		5,624						522,194	1988
Janggun	100	137,731	251,759					133,939	2001
Yeoncheon				1,677,944					operating
Shinyemi	854	86	55,882	2,162,509		795			operating
Ulsan				862,114	642				1993
Pocheon				651,455					1977
Mulgeum				653,680					1991
Geumseong						1,676			1987
Uljin	13,074	41,168	118,159					4,529	1986
Sangdong					59,445	3,244	397	2,817	1992
Yeonwha I	2,016	326,234	879,167					24,526	1993
Yeonwha II	5,384	29,028	620,978					3,997	1987
Dongseong	13,164								1977
Gunbuk	11,270						1,541	5,776	1975
Gwangyang	448						3,175	6,107	1967, 1990
Geodo	2,223			171,537					1987, 2001
Sambo		45,950	113,446					1,251	1991
Dadeog	1,253	4,104	12,420				480	53,000	1945, 1976

Table 4. Characteristic features of past Au-Ag production in various deposit styles of precious-metal deposits.

Tectonic province ¹⁾	Mine	Cumulative production		Type	Tonnage size ²⁾	Genetic style	Group ³⁾	Working period
		Au (kg)	Au (kg)					
GM	Mugeug	18,648	57,324	Au-Ag	A	volcano-plutonic	IV	34~42, 54~70, 81~97
GM	Gubong	13,446	4,578	Au	A	orogenic	IIB	32~70
GM	Bupeong		503,000	Ag	A	volcanogenic	Disseminated	69~88
YM	Geumjeong	7,417	175	Au	A	plutonic	Alaskite	23~43, 80~88
YM	Gwangyang ⁴⁾	3,175	6,107	Au-Ag-Cu	B	volcano-plutonic	IIC	38~42, 52~59, 64~67, 81
OB	Deogeum	2,594	24,992	Au-Ag	B	volcano-plutonic	IV	38~42, 52~88
GM	Samgwang	2,181	0.4	Au	B	orogenic	IIA	38~42, 52~59, 84~96
GM	Jungang	1,179	242	Au	B	orogenic	IIA	25~59
GM	Imcheon	1,033	19	Au	B	plutonic	IIB	38~42, 54~77
OB	Jeonjuil	433	53,526	Ag	B	volcano-plutonic	V	38~42, 79~91
GM	Geumwang	1,000	15,973	Au-Ag	B	volcano-plutonic	IV	82~94
GB	Seongju	249	16,095	Ag	B	volcano-plutonic	V	82~89
OB	Weolyu	106	4,180	Ag	B	volcanogenic	V	60~90
GB	Tongyeong	536	2,946	Au-Ag	B	volcanogenic	IV	16~45, 86~89
GM	Taechang	646	25	Au	C	orogenic	I	36~42, 52~59, 65~86
GM	Samhwanghwag	633	22	Au	C	orogenic	I	32~45, 52~68
YM	Dadeog ⁴⁾	480	6,107	polymetallic	C	volcano-plutonic	V*	41~45, 76
OB	Hwagsan	421	18	Au	C	volcanogenic	IIB	36~42, 59~63, 76~82
TB	Dongweon	399	882	Au-Ag	C	volcano-plutonic	IV	29~46, 84~90
OB	Namseong	27	227	Au-Ag	C	volcano-plutonic	III	62~86

¹⁾GB=Gyeongsang basin, GM=Gyeonggi massif, OB=Ogcheon belt, TB=Taebaeg basin and YM=Yeongnam massif.

²⁾Tonnage size means cumulative productions of individual deposit. A=>10t, B=10-1t and C=<1 t.

³⁾Summary of group is listed in Table 2.

⁴⁾Base-metal and sulfide-rich deposit

산실적 누계자료를 종합적으로 검토하였다. 1960년대 이후 개발된 대표적인 비철금속광상 및 귀금속광상의 생산실적은 Table 3 및 Table 4와 같다. 개별 광상의 생산실적 중 일부 광상에 대한 자료는 특정년도에 편중되어, 실제 생산실적과는 다소 차이가 있을 것으로 사료된다.

금속광상의 개발과 관련된 광미 및 폐석의 규모는 당시 개발여건과 함께 광상 성인 및 수반 금속종의 차이에 따른 개발 광석품위를 계산할 경우, 생산실적에 의해 예상된 광미의 총량은 수반 광종에 따라 일부 차이를 보일 수 있으나 전반적으로 생산실적의 누계치와 비례하고 있다. 금-은광상의 생산품위는 약 5~10g/t Au, 100~200g/t Ag인 반면, 기타 금속광상의 생산품위는 약 5~7% Pb+Zn, 2~5% Cu, 0.5~1.5% WO₃+MoS₂, 30~35% Fe이다. 이러한 개발대상 광종에 따른 광석의 품위자료를 근거로 동일한 생산량을 가정할 경우, 금-은광상에서 발생된 광미의 추정규모는 비철금속광상에 비하여 약 500~5,000배 정도에 해당할 것으로 예측된다.

광산별 과거 총생산실적을 기준으로 검토된 국내 주요 광산은 비철금속 및 중석·황수연 광상 중에서 대규모로 생산실적이 보고된 연화I·연화II·금호(구장군)·상동광산과 중형 규모로 신에미·울진·삼보·금성·옥방·군북광산 등이며, 중·대형 규모의 철광산은 양양·신에

미·연천·충주·울산·물금·포천·거도광산이 있다(Table 3). 귀금속광상에서 대규모로 보고된 A급(>10t)의 광산은 무극·구봉·부평광산이며 B급(10~1t)은 금정·광양·중앙·임천·전주일·금양·성주·월유·다덕·통영광산이 있다(Table 4). 이러한 후·폐광산의 수질 및 토양 오염 가능성에 대한 예측은 생산실적자료에 근거한 추정 광미량의 규모 및 폐광이후 경과기간과 함께 광상유형에 따른 모암 및 광물·지화학적 특성을 우선적으로 고려할 필요가 있다.

4. 광상유형별 광물·지화학적 환경 특성

대보 화성활동과 관련된 조산대형 광상은 열수충진형 맥상광상과 페그마타이트 광상으로 주로 금, 은, 중석, 황수연이 석영과 운모류와 함께 황화광물은 극소량만이 산출되는 반면, 불국사 화성활동과 관련된 천부 관입암체 기원의 금속광상은 근원암과의 공간적 근접정도에 따라 금, 은, 연, 아연, 동, 철, 중석, 황수연 등 원소간의 상이한 분별·농집 양상을 보이고 있으며, 금속원소와 관련된 다양한 황화광물군과 함께 맥석광물인 규산염광물과 탄산염광물간 양적관계의 차이를 보이고 있다(박희인 등, 1985; 오민수, 1998; 최선규 등, 2001; 이상열 등, 2003). 이와 같이 금속 광상은 광상

Table 5. Acid-generating and acid-consuming mineralogical data for the major metallic deposits in Korea.

Ore deposit	Acid-generating mineral (AGM)													Acid-consuming mineral (ACM)													References						
	po	py	mc	sp	cp	gl	ap	mo	sulf	sid	rho	cal	dol	ank	Ca	silicates	bt	ser	mu	qtz	pl	K-fd	tu	mt	hm	il		sch	wf				
Bupyeong	○	⊙	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	Park <i>et al.</i> (1986)			
Chungju	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Kim <i>et al.</i> (1994)		
Ilgwang	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	So and Shelton (1983)		
Dongseong	●	○	○	●	●	●	○	-	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Kim (1972)		
Gunbuk	○	○	-	○	○	-	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Park <i>et al.</i> (1985)		
Geumseong	●	○	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Park (1982)		
Janggun	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Lee <i>et al.</i> (1998)		
Mulgeum	●	○	○	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Woo <i>et al.</i> (1982)		
Pocheon	-	●	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	So (1977)	
Sambo	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Shelton and So (1992)	
Sangdong	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Moon (1984)	
Shinyemi	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Yang (1991)	
Uljin	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Yun and Einaudi (1982)	
Ulsan	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Choi and Youm (2000)	
Geodo	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ko and Kim (1982)	
Yangyang	-	●	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	This study	
Yeoncheon	●	○	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Kim <i>et al.</i> (1994)
Yeonwha I	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Koh <i>et al.</i> (1992)	
Yeonwha II	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Yun and Einaudi (1982)	
Dadeog	⊙	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Park <i>et al.</i> (1988)

*Frequency of occurrence and abundance; ○ > ⊙ > ○ > ● > -

Abbreviations: ank=ankerite, ap=arsenopyrite, bi=biotite, Ca-silicates=calc-silicates (skam minerals), chl=chlorite, cp=chalcopyrite, dol=dolomite, epi=epidote, gl=galena, hm=hematite, il=ilmenite, kao=kaolinite, K-fd=K-feldspar, mc=marcasite, mi=microcline, mo=molybdenite, mt=magnetite, mu=muscovite, po=pyrrhotite, py=pyrite, pl=plagioclase, qtz=quartz, rho=rhodocrosite, sch=scheelite, ser=sericite, sid=siderite, sp=sphalerite, sulf=sulfosalts, tu=tourmaline and wf=wolframite.

유형에 따라 각각 서로 다른 지질환경에서 유도되어 모암, 맥의 산상, 열수변질대의 광물상, 구성광물의 공생관계 등과 같은 광물-지화학적 특징을 달리하는 상이한 유형의 광상이 배대되고 있다. 즉, 비철금속광상 및 중석-취수연광상은 성인에 따라 전반적으로 황화광물-황산염광물-산화광물-규산염광물-탄산염광물 간의 복잡한 광물조합과 함께 Fe, Pb, Zn, Cu, As, Sb, Sn, W, Mo 등 수반 금속의 차이를 보이며 황화-황염광물이 다량 산출되는 반면, 철광상에서는 주로 자철석·적철석의 산화광물과 규산염광물로 구성된 단순 광물군으로 되어 있고 황화광물은 전반적으로 소량 산출되는 경향을 보이고 있다(Table 5). 또한, 석영맥으로 배대되는 귀금속 광상은 광물학적 특성에 따라 자류철석형 금광상(Group I)·황철석형 금광상(Group IIA, IIB, IIC)·휘은석형 금-은광상(Group III)·안티몬형 금-은광상(Group IV)·안티몬형 은광상(Group V)·비철금속형 은광상(Group V*)의 6개 유형으로 세분되며(Choi, 2002), 각 유형은 열수변질대의 광물상, Fe-S계 황화광물의 종류, 황화광물과 맥석광물의 유형 및 양적관계 등 상이한 특징을 보이고 있다(Table 6).

금속광상에 대한 광산별 오염도는 주변 모암 및 열수변질대의 유형 등과 같은 지질-광상학적 요인에 따라 산농도의 변화와 함께 금속의 용출량에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 비철금속 및 귀금속 광상에서는 천부기원의 열수작용에 기인하여 광범위하게 변질대가 분포하는 특징을 보이며, 규산염광물 이외에 황화광물, 황산염광물, 탄산염광물 등 다양한 광물이 수반됨으로써 지표에서 ARD의 발생과 함께 산농도 변화와 금속의 용출에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Plumlee, 1998). 특히, 열수변질작용시 광상 성인유형과 관련된 물리·화학적 환경조건의 변화 및 유체-암석과의 다양한 반응정도에 기인하여 원소의 결핍과 농집에 따른 광물-지화학적 변화를 보인다.

국의 사례에 의하면 열수변질대 중 산-발생은 일반적으로 고유황(acid-sulfate) 점토대, 점토대, 견운모대, 스키른대, 자스퍼 규화대와 같은 변질대에서 비교적 높게 나타나고 있으며, 산-중화력이 높은 변질대는 탄산염대, 프로필리틱대, 체립질 K-변질대의 유형이 보고된 바 있다. 즉, 고유황형 천열수광상과 반암형 광상에서는 고유황형 점토대가 광범위하게 분포하고 있으며 황화광물과 황산염광물의 높은 산출빈도에 기인하여 ARD의 발생 가능성이 현저하게 높은 반면, 스키른형 및 열수교대형 광상에서는 황화광물과 함께 방해석과 백운석이 수반되는 Ca-규산염광물(스카른광물)대 및 탄

산염대가 양호하게 발달하고 있어 ARD 발생가능성은 매우 낮은 양상을 보인다(Table 5). 국내 금속광산의 열수변질대에 대한 ARD 연구는 보고된 바 없으나, 노화, 동래 납석광산과 같은 비금속광산에서 열수변질대와 관련된 ARD발생이 언급된 바 있다(전용원과 차종문, 1996; 박맹언 등, 2000). 이러한 비금속광산에서 나타나는 고령토-엽납석-황철석-견운모±명반석 광물군으로 구성된 고유황형 점토대는 열수변질작용시 산-중화 광물이 거의 소멸된 상태이며, 지표의 풍화과정시 산-중화력이 소진된 광물-지화학 조건에서 황철석의 산화반응에 의한 산성 배수의 발생을 시사하고 있다.

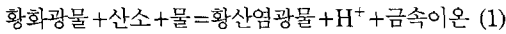
금속광상의 상기 유형 중 산-발생 광물(AGM)에 속하는 황화-황산염 광물의 산출빈도는 백악기 화성암체와 관련된 천부기원의 광상에서 전반적으로 높은 경향을 보이고 있으며(Table 5), 양적 관계는 비철금속광상 > 중석-취수연광상 > 귀금속광상, 철광상의 순서로, 열수교대형 광상-스카른형 광상 > 각력파이프형 광상-열수충진형 맥상광상 > 정마그마형 광상-알라스카이트형 광상-변성퇴적형 광상의 관계를 보인다. 또한, 맥상 귀금속광상의 유형별 AGM의 상대적 양비는 V*, IIC > IIB, IV > III, V > I, IIA 과 같은 관계를 보이고 있다. 그리고 산-소모광물(ACM)에 속하는 대표적 광물인 탄산염광물은 열수교대 및 스키른 광상에서 산출빈도가 가장 높고, 최천부 기원의 저유황형 천열수 광상에서도 산출빈도가 높은 경향을 보이고 있으며, 열수충진형 귀금속광상에서 ACM은 V > IV > IIB, IIC, III, V* > I, IIA 순서의 양적 관계를 보이고 있다. 이러한 광상 유형 및 광종에 따른 광석의 구성광물은 각 광산의 광미 및 폐석에 함유된 AGM과 ACM간의 상대적 양비 및 종류와도 서로 유사한 연관성을 보이고 있으며(du Bray, 1995), 화학적 풍화과정시 발생된 ARD는 배출수의 pH 및 용출된 중금속이온 중에 직접적으로 영향을 주고 있다.

5. 풍화작용과 광물학적 용해 특성

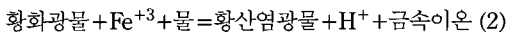
국내 주요 비철금속광산에서 산출된 황화광물은 Pb, Zn, Cu, Fe, As, Sb, Sn, Bi계 황화-황산염 광물조합과 함께 평균적으로 약 10~20 vol. %를 점유하고 있으며, 광상 유형에 따라 맥석광물을 구성하는 탄산염광물과 규산염광물간의 현저한 조성비를 보이고 있다. 반면에 열수충진형 귀금속광상에서는 맥석광물이 >95 vol. % (석영 > 방해석)를 점유하고 있으며, 황화광물은 조립질 입자로 보통 1~3 vol. % 정도 소량만 함유되는 경향을

보이고 있다. 또한, 귀금속광상의 광물학적 특성에 따른 유형은 Fe-S계 광물(자류철석·황철석·백철석)의 종류 뿐만 아니라 섬아연석·방연석·황동석·유비철석 등과 함께 다양한 황화·황염광물의 광물조합 및 조성차이를 보인다(Table 6).

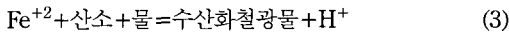
대기 중에서 공급된 산소와 물에 기인한 광미-폐석의 풍화과정은 전반적으로 황화광물과 맥석광물간의 다음과 같은 복잡한 반응단계를 보이고 있다. 배출수의 산농도 및 발생량은 산-발생광물인 함철황화광물의 유형(1),



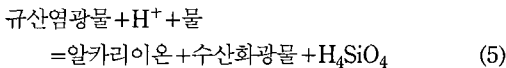
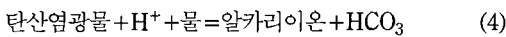
황화광물로부터 생성된 산화제인 Fe⁺³의 함량(2),



수산화광물의 유형(3),



에 따라 다양한 반응과정을 보이며, 광미에 함유된 산-소모 광물의 유형 및 함량에 따라 중화되는 반응양상(4, 5)을 보이고 있다.



또한, 폐석-광미에서 산출되는 산-소모 광물의 반응

속도를 유추하기 위한 25°C, pH=5인 조건하에서 수행된 1mm 크기 결정에 대한 물-광물 반응실험에 의하면, 방해석 0.43년, 규회석 79년, 감람석 2,300년, 기타 규산염광물 10,000년 이상의 반응속도를 보이고 있다(Lasaga and Berner, 1998).

지표 산화단계에서 광미-폐석으로부터 발생하는 배출수의 산농도 변화는 일차적으로 산-발생 광물과 산-소모 광물의 종류 및 상대적 함량비에 따라 좌우된다. AGM의 대표적인 광물종인 황화광물의 풍화반응성(weatherability)은 일반적으로 자류철석>회동석>방연석>섬아연석>황철석>에나자이트>백철석>휘수연석의 순서로 민감하게 반응하는 경향을 보이며(Jambor and Blowes, 1994), Fe-S계 황화광물 또는 금속원자/황원자 비(Metal/S)<1인 황화·황염 광물은 금속원자/황원자 비=1인 광물에 비하여 화학적 분해과정에서 쉽게 반응하여 초기 산성배수를 형성하는 것으로 보고된 바 있다(Plumlee, 1998).

동종의 황화광물일지라도 풍화과정시 입도, 조직 및 미량원소의 조성차이와 같은 광물학적 특징에 따라 서로 다른 반응성을 보이는 것으로 알려져 있다. 금속광상에서 산출되는 황철석의 입도 및 조직은 조산대형광상, 스키르프광상, 중열수 맥상광상 등과 같은 고온성광상

Table 7. The FeS contents of sphalerite from the Korean gold-silver deposits.

Genetic type	Ore deposit (Group*)	N**	Mole % FeS in sphalerite			
			Average	S.D.***	Range	n****
Skarn	Geodo		14.0	1.7	11.2~15.3	7
	Baegjeon		1.7	0.3	1.3~ 2.1	9
Hydrothermal Replacement	Geumsil		6.9	-	3.7~10.1	165
	Taebaeg (Yeonhwa)		16.7	2.3	9.3~23.0	
Disseminated	Bupeong		13.2	2.9	8.4~16.9	17
Breccia Pipe	Nogdong		19.7	0.4	19.1~20.2	7
Hydrothermal Vein	I	10	14.0	1.2	11.9~15.6 2.2~21.8	362
	IIA	13	10.5	3.1	3.6~13.2 0.7~17.4	310
	IIB	17	10.0	4.4	1.3~18.7 0.2~25.4	511
	IIC	6	9.5	8.0	1.3~22.4 0.0~25.2	185
	III	10	3.3	2.5	0.3~ 6.3 0.0~15.7	284
	IV	10	4.4	4.7	1.3~17.4 0.0~21.1	322
	V	18	6.1	5.0	0.4~17.0 0.0~22.2	620
	V*	12	14.3	4.3	6.0~19.8 0.1~22.5	374

*Summary of group is listed in Table 2.

**N=number of mines.

***S.D.=standard deviation.

****n=number of spot analyses by electron microprobe.

과 비교하여 화산성 천열수 광상에서 산출된 황철석이 전반적으로 세립질 입자 또는 콜로이드 조직으로 산출됨으로써 풍화과정시 상대적으로 쉽게 반응하는 반면, 섬아연석의 Fe함량과 황철석의 As, Sb함량이 증가할수

록 빠르게 산화되는 것으로 알려져 있다(Plumlee, 1998). 섬아연석은 모든 유형의 금속광상에서 공통적으로 산출되지만, 철함량은 일반적으로 광상 유형에 따라 현저한 함량변화를 보이고 있다(Table 7). 특히, 스카른

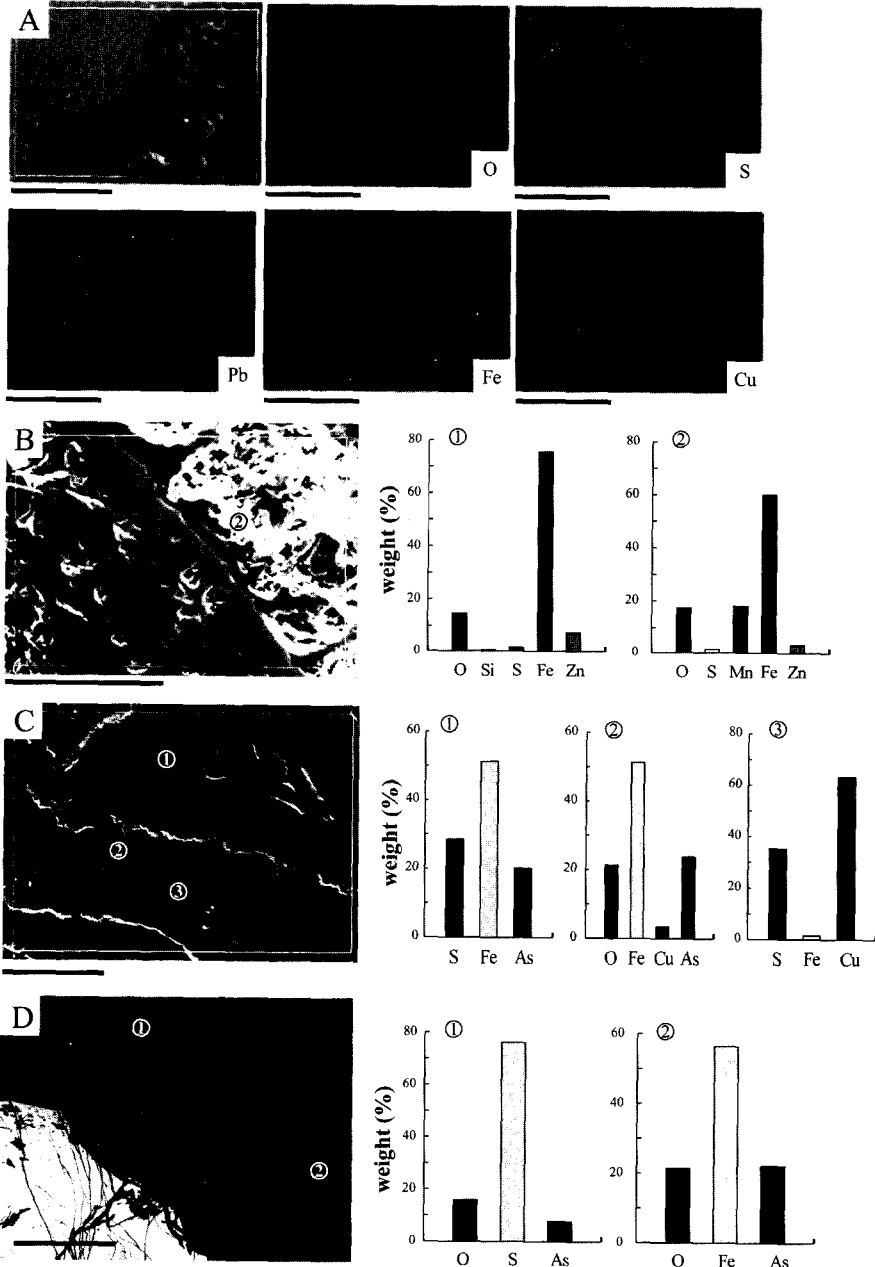


Fig. 1. Back-scattered electron image and reflected light photomicrographs, A. Galena grain and its alteration rim. Corresponding X-ray maps show distribution of O, Fe, S and Pb. Scale bar=30 μ m. B and C. Secondary minerals of altered sphalerite and arsenopyrite, respectively and their energy dispersive spectroscopy spectrum. Scale bar=80 μ m. D. Reflected light photomicrographs and their energy dispersive spectroscopy spectrum of poorly crystallized Fe-hydroxides and the well crystallized Fe-hydroxides in vicinity of altered pyrite.

형, 각력파이프형, 열수교대형 및 열수충진형 다금속 광상 등에서 산출되는 섬아연석은 >10 mole % FeS의 높은 함량을 보이고 있는 반면, 천열수 금-은광상의 섬아연석은 전반적으로 <5.0 mole % FeS이다. 또한, 화산성 천열수 금-은광상의 황철석에는 예외적으로 As함량이 약 4.0 wt. %까지 함유되고 있다(김창성 등, 2002). 이러한 광미부터 섬아연석에 함유된 철은 산화과정시 Fe^{+2} 로 용출되어 산화제로서 Fe^{+3} 산화 반응을 촉진하고 있으므로 다금속 광상에서 산출되는 섬아연석의 화학조성에 따른 반응과정을 검토할 필요가 있다.

산성배수를 생성하는 AGM은 주로 황화광물로 구성되며, 산성배수로부터 침전되는 이차광물 또한 산성배수의 pH를 조절한다(Plumlee, 1998). 이차광물로부터 침전된 이차광물은 산성배수 내의 중금속과 공침하거나, 이차광물로부터 중금속을 재용출시키며 산성배수의 중금속 농도에 영향을 준다. 열수충진형 W-Mo광산인 서보광산과 청양광산에서 산출되는 방연석과 유비철석은 입자표면을 따라 산화작용이 진행되며 이차광물로 앵글레사이트, Cu-S계 광물, 철수산화 광물, 철-수산화 황산염광물 및 철·망간수산화광물 등이 침전한다. 이러한 다양한 이차광물에는 섬아연석과 유비철석으로부터 용해된 Zn과 As가 흡착되어 황화광물로부터 용출되는 주요 중금속의 확산이 공간적으로 매우 제한됨을 알 수 있다(Fig. 1). 또한 지하로 이동하는 산성배수에서 입자 간극을 충전하며 침전되는 이차광물은 광미 입자간 공극률 및 투수율을 감소시킴으로써 지표로부터 산소공급을 차단하는 역할을 한다.

ACM의 풍화반응성(weatherability)은 탄산염광물>화산유리질 준광물>규산염광물의 순서로 민감하게 반응하며, 맥석광물의 대표광물종인 탄산염광물에서는 방해석·아라고나이트·백연석>백운석·능망간석>능철석>매그네사이트의 순서로 민감하게 용해되는 경향을 보이지만, 능철석·능망간석은 산화과정시 Fe과 Mn이 수산화광물로 침전될 경우 산이 발생되는 것으로 알려져 있다(Plumlee, 1998). 또한, 규산염광물의 풍화반응성은 보헨의 마그마 정출순서와 일치하여 초기 고온에서 정출된 광물이 상대적으로 쉽게 분해 되는 경향을 보이며, 규산염광물 중에서는 규회석과 Ca-Mg계 규산염광물 등이 산성용액에 대한 중화능력을 일부 보유하고 있다. 즉, 고생대 태백산 분지 및 옥천대에 속하는 황강리 지역의 비철금속광상(연화I·연화II·장군·금실·신예미) 및 중석·취수연광상(상동·금성)은 주로 탄산염암인 석회암에 수반된 중·대형 규모의 스키르광상 및 열수교대광상으로 배대되며, 다양한 황화광물과 함께 맥

석광물로 Ca-Mg계 규산염광물과 탄산염광물이 다량 수반되고 있다(Table 5). 이러한 유형의 광상은 자류철석·황철석·취동석·방연석·섬아연석·유비철석 등 황화광물이 다량 수반되지만, ACM의 대표광물인 방해석, 백운석과 같은 탄산염광물과 함께 Ca-Mg계 규산염광물이 다량 함유되어 충분한 중화능력을 갖고 있다.

6. 광미-폐석에서의 광물-지화학적 환경 특성

금속 광상의 산성배수는 일차적으로 폐석 및 광미를 구성하는 황화광물 중 자류철석·황철석과 맥석광물 중 방해석·백운석간의 상대적 양비와 밀접한 관계를 보이며, 물리·화학적 풍화요인에 따른 풍화의 진행단계는 다음과 같이 3단계로 구분하고 있다(Morin and Hutt, 1997). 초기 풍화단계는 자류철석의 산화작용에 의한 일차 산성용액의 형성과 황철석과 같은 반응성 황화광물의 분해와 함께 과포화상태에서 이차 광물인 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물의 침전단계이며, 반응성이 양호한 일차광물의 존재는 초기 산성배수단계의 환경 특성을 지시하고 있다. 중간 단계는 반응성이 양호한 이차광물의 분해와 함께 반응성이 느린 일차광물의 분해단계로 반응성이 양호한 일차광물의 부재양상을 근거로 구분하며, 종료 단계에는 반응성이 불량한 일차-이차광물의 분해단계로 반응성이 양호한 이차광물은 소멸된 특징을 보인다.

국내 휴·폐광산의 기존연구는 산성 배수 및 중금속 오염도를 중점적으로 검토하였고, 수질 및 토양 환경 문제를 다양한 관점에서 제기하였다. 이러한 광미-폐석으로부터 용출된 배출수의 pH 및 중금속함량은 광상 유형 및 광종에 따라 다음과 같이 서로 다른 분포 양상을 보이고 있다(Fig. 2). 기보고 된 광산 배출수의 연구결과에 의하면 폐광산의 배출수에 대한 pH는 열수교대형 Pb-Zn광상(상곡·금실)과 열수충진형 Cu-Fe 광상(군북·삼산제일·토현) 및 천열수성 Au-Ag광상(덕음)에서 약 6~8 범위의 전반적으로 높은 경향을 보이는 반면 열수충진형 다금속광상(광양·다덕), 백악기 Au 광상(임천·구봉) 및 각력파이프형 Cu-W광상(일광·달성)에서 약 2~5정도의 낮은 pH를 보이고 있다(Fig. 2). 열수교대형 Pb-Zn광상에 속하는 유형의 광상은 광미 중 황철석·자류철석의 산출빈도가 높지만, 황화광물의 산화과정(1, 2)과 함께 산-소모광물인 탄산염광물이 다량 수반됨으로써 중화반응(4)이 동시에 진행된 것으로 사료된다. 또한, 국내 열수충진형 Cu-Fe광상과 천열수성 Au-Ag광상은 전반적으로 저유황형 광상으로 황

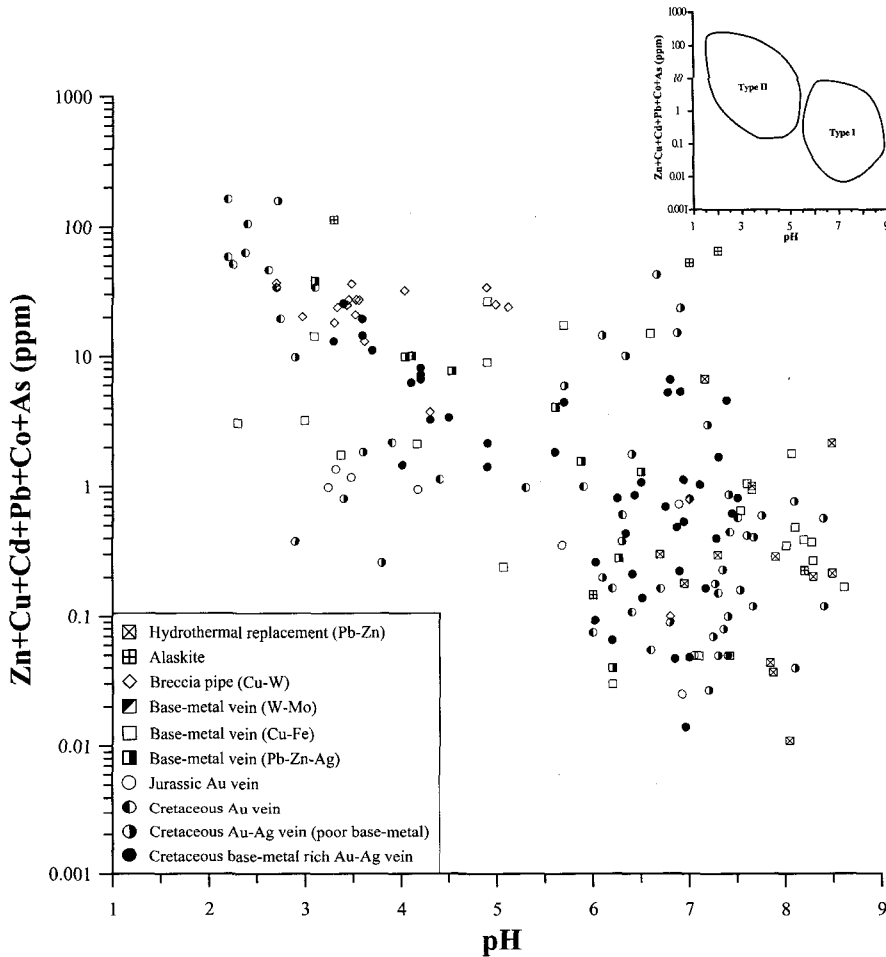


Fig. 2. Variations in aqueous heavy metal concentrations as a function of pH for water draining various types of metallic deposits.

화광물의 산출빈도 및 양적관계가 소량에 불과하여 산발생 가능성은 매우 미약하다(Type I). 이에 반하여 백악기 Au광상 및 각력파이프형 Cu-W광상에서는 공통적으로 황철석-자류철석이 다량 수반되며, 이러한 황화광물의 산화과정에서 발생된 산성배수를 중화할 수 있는 탄산염광물의 산출빈도가 극히 미미하여 산발생 가능성은 매우 높은 경향을 보인다(Type II).

산성배수에 용출된 중금속 총량은 전반적으로 비철금속 및 귀금속 광상에서, 열수충진형 및 각력파이프형 광상의 유형에서 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 폐광산의 배출수에 함유된 중금속(Zn-Cu-Cd-Pb-Co-As)의 총합량은 대부분의 광상에서 전반적으로 100 ppm이하의 용출량을 보이고 있으며, pH가 감소할수록 중금속의 용출량이 증가하는 부의 상관관계를 보이고 있다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 배출수의

pH와 용출된 중금속함량은 광상 유형에 따라 상이한 차이를 보인다. 열수충진형 광상 중 Cu-Fe광상과 쥐라기 Au광상에서 황화광물의 산출빈도가 미약하여 중금속 용출량이 비교적 낮은(0.1~20 ppm) 반면, 비철금속 황화광물을 다량 수반하는 열수충진형 다금속광상(광양), 백악기 Au광상(임천) 및 각력파이프형 Cu-W광상(달성) 광산에서 높은 중금속 용출량을 나타내고 있다(10~200 ppm). 귀금속광상은 선광 과정시 Au-Ag계 광물만이 선택적으로 회수되고 기타 황화광물 대부분이 광미로 폐기된 반면, 비철금속광상에서는 Zn-Cu-Pb-Cd 등의 주요 황화광물이 주로 회수되었다. 이러한 사실은 Table 3과 4에서 제시된 바와 같이 생산량의 통계 자료와도 일치하고 있다. 다금속광화작용과 관련된 Au-Ag 귀금속광상에서는 폐기된 광미 중 비철금속 함량이 현저하게 높고, 산화과정시 산성배수에 용출 가능성이

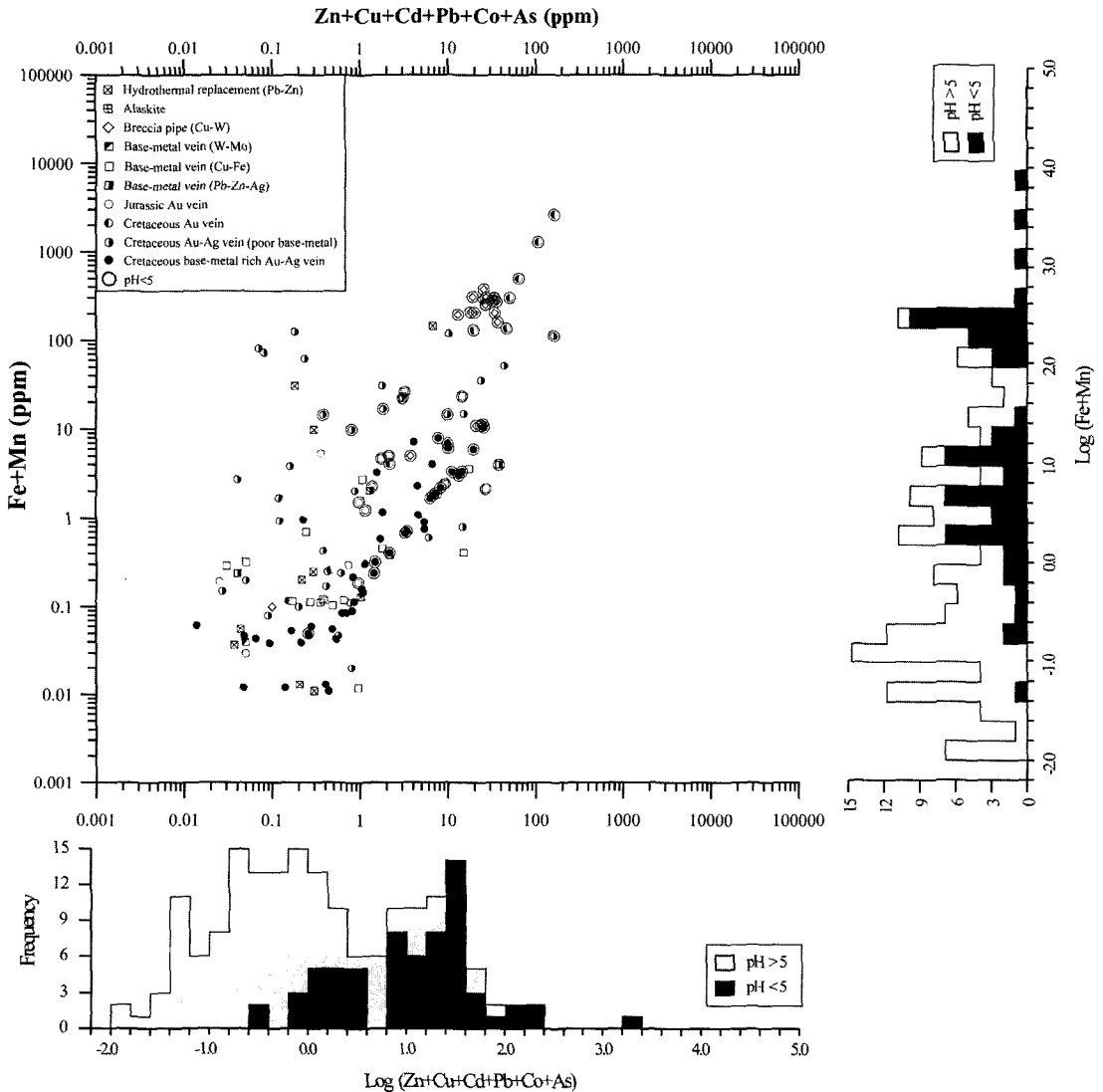


Fig. 3. The concentrations of Fe and Mn as a functions of heavy metal concentrations and histograms for water draining various types of metallic deposits. Large open circles (double symbols) stand for pH<5.

매우 높은 양상을 보인다.

산성배수 중 중금속의 함량과 Fe+Mn의 함량은 정(+)의 상관관계를 보이며, pH에 따라 산성배수 중 총 중금속 함량과 Fe+Mn의 함량은 두 유형으로 구분된다(Fig. 3). pH가 높은(>5) 배출수에서는 총 중금속 함량과 Fe+Mn 함량이 낮은 농도(<0.5 ppm)를 보이나 낮은 pH(<5)의 산성배수 중 용출된 총 중금속 함량과 Fe+Mn 함량은 각각 4 ppm과 2 ppm 이상으로 Fe+Mn 함량은 총 중금속 함량에 비해 1/10배 정도로 낮게 나타나고 있다. 산성배수 중 철과 망간의 산화·환원 조건에 민감한 원소로서 대체로 철·망간산화광물의

용해와 침전에 의해 농도가 조절된다(Stumm and Morgan, 1996). 따라서 산성배수 중 철과 망간의 농도가 총 중금속 함량에 비해 상대적으로 낮은 것은 철·망간산화광물의 침전에 의한 것으로 사료된다. 일부 석회암을 모암으로 하는 열수교대형(상곡) 광산에서 높은 Fe+Mn 함량을 보이는 것은 모암인 석회암에 배태되는 다량의 함Mn 탄산염광물의 용해에 기인하는 것으로 판단된다.

휴·폐광 지역의 오염가능성 평가를 위한 토양환경 보존법상 기준(0.1N HCl 용출법)에 의한 광미의 총 중금속 함량은 폐광산의 산성배수 중 총 중금속 함량

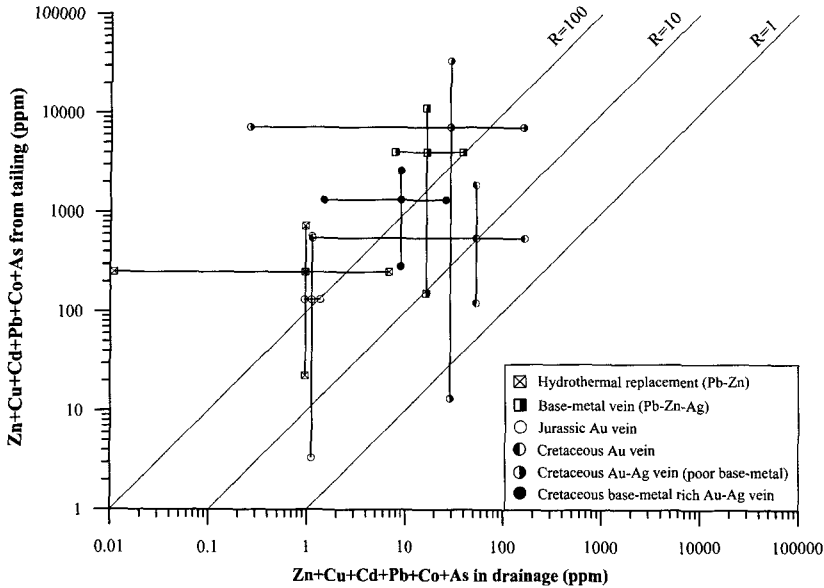


Fig. 4. Heavy metal concentrations from partial extraction of tailing distribution with heavy metal concentrations from mine drainage.

과 비교하여 전반적으로 약10~200배 정도 높게 나타나고 있다(Fig. 4). 용출법에 의한 각 유형별 광산의 광미 중 총금속 함량은 대체로 비철금속광상과 귀금속광상에 비하여 열수교대형 광상에서 상대적으로 낮은 함량을 보인다. 반면 열수교대형 Pb-Zn광상에서는 광미 중 중금속 함량(용출법)/중중금속 함량(산성배수 중)비는 100배 이상 높게 평가되고 있어 오염원으로서의 가능성이 제기되고 있다. 이 유형의 광상들은 광미 중 AGM 산출빈도가 높은 반면, ACM(탄산염광물)이 다량 수반됨으로써 중화반응이 동시에 진행되어 높은 pH와 낮은 중금속함량을 보이는 배출수가 생성된다(Fig. 2). 이는 용출법에 의한 광미분석이 산발생 가능성과 이에 따른 중금속 용출만을 고려한 결과로 해석되며, 장기적인 관점의 오염가능성 평가를 위하여서는 AGM 뿐 아니라 ACM에 대한 정량적인 고려가 필요할 것으로 사료된다.

7. 토 의

휴·폐광상의 광미로부터의 침출수는 황화광물의 산화작용과 관련되며 pH 또는 Eh 변화에 기인하여 지하수면을 경계로 포화대와 비포화대에서 각각 뚜렷한 변화양상을 보이고 있다(Jambor and Blowes, 1994). 국내 비철금속광상에서 지표의 화학적 풍화과정시 지하수면을 경계로 상부의 산화대에서는 황화광물의 용해작용에 의한 금속성분이 용출되며, 지하수면 하부로 이

동될 경우 환원조건에서 탄산염광물과의 반응에 의한 중화작용으로 다양한 이차광물로 침전, 금속농집부를 형성하게 된다. 이러한 금속의 부화과정은 광상유형 중 이차부화(supergene enrichment)광상으로 제시된 바 있다. 이차부화 광상에서 나타나는 다양한 화학반응은 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물과 같은 이차광물상의 침전과 재용출반응이 ARD의 진화단계와 매우 유사한 경향을 보이고 있다(Fig. 5A). 연화광산 광미장의 심도별 변화 양상은 황화광물과 2차 광물에 대한 광물-지구화학 특성에 따라 5개 층으로 구분된다(Fig. 5B). 최상부 층은 폐석 또는 일부 복원된 토양으로 구성된다. 제2층은 광미 내 황화광물이 완전하게 치환되어 붉은 색을 띠고 있는 층으로 부분적인 규산염광물의 용해 흔적이 관찰되며 산화작용이 숙성된 단계에 해당된다. 제3층은 광미의 산화대 중에서 이차 수산화철의 산출빈도가 가장 높은 층(hardpan zone)으로, 산의 중화반응에 의한 침전반응이 활발하게 진행됨으로써 광미 구성입자들이 이차광물에 의하여 피복되는 특징을 보인다. 제4층은 산화대와 환원대가 함께 나타나는 부분으로, 제3층을 통과하면서 상부로부터 유입되는 산소 양의 현저한 감소에 기인한다. 제5층은 풍화가 진행되지 않은 광미들로 구성된다. 이러한 사실은 장기간 산화과정이 진행됨에 따라 표면에 산화철막이 형성되어 산화반응이 차단되는 산화대의 자연안정화 가능성을 예측할 수 있다. 그러므로 광산 성인 및 휴·폐광 이후 경과기간에 따라 존재하는 일차-이차-삼차 광물상의 존재형태는 배출수

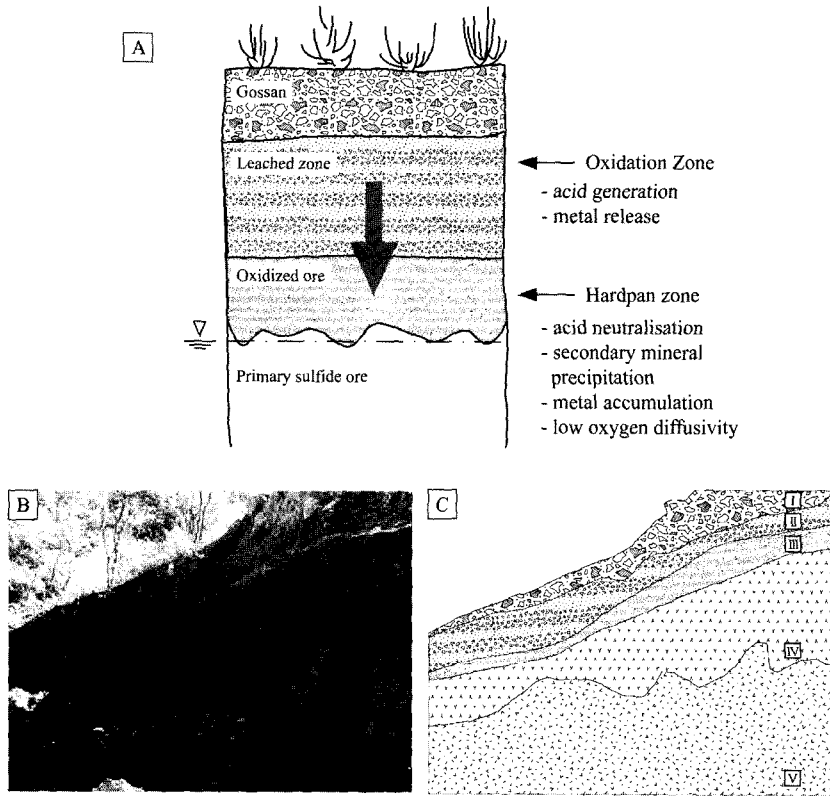


Fig. 5. Comparison supergene enrichment with hardpan layer structure in tailing. A. Generalized section through a sulfide-bearing materials showing supergen enrichment. B. and C. Geochemical blending of tailings to promote chemical precipitation of a low O_2 -diffusivity barrier in Yeonhwa mine. See the text for details of each layer.

의 pH와 용출된 중금속의 함량 등과 같은 지화학적 특성과 함께 산화-용해-침전-재용출-이동-재침전의 단계별 진행과정을 평가할 수 있으며, 광상의 유형에 따라서는 자연저감효과의 가능성 예측과 함께 효율적인 방재 안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

국내 금속광상에 대한 후-폐광산의 환경문제는 기발표된 자료를 종합적으로 검토한 결과, 광상유형별 부존양상에 따른 광물-지화학적특성을 반영하여 오염 가능성을 예측할 수 있다. 폐석-광미를 구성하는 광물은 광상형성당시에 정출된 일차광물인 규산염광물, 황화광물, 탄산염광물과 함께 풍화과정시 용출-재침전된 이차-삼차광물인 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물 등 다양한 광물종의 산출되며, 광상성인에 따라 구성광물의 상대적 양적 관계에서 현저한 차이를 보이고 있다. 그러나 토양환경보존법의 0.1N HCl 용출법에 의한 각 유형별 광산의 광미의 중금속 함량은 산-소모광물(ACM)인 탄산염광물의 완충 역할을 정량적으로 예측할 수 없으며 자연상태에서 광물지화학적 반응에 따른 산성배수의 중

금속 함량을 예측하기 어려운 문제점이 제기될 수 있다. 따라서, 광물자원의 개발단계부터 종료단계까지 수질 및 토양 오염에 대한 예측을 위하여 제시된 방안은 산-염기 측정법(acid-base accounting, ABA)에 의한 평가방법을 적용하여, 광산 또는 광중에 따른 순중화 능력(net neutralization potential, NNP)을 정량적으로 평가하고 있으며(Jambor and Blowes, 1998), 다음과 같이 $NP = NP(\text{acid-neutralizing potential}) - AP(\text{acid-producing potential})$ 로 정의하고 있다.

금속광상의 산성배수는 일차적으로 폐석-광미를 구성하는 황화광물 중 Fe-S계광물의 유형(자류철석-황철석)과 맥석광물 중 방해석-백운석간의 상대적 양비와 밀접한 관계를 보이며, 광미-폐석 중 황화광물의 S 총함량이 0.3 wt.% 이상 함유된 경우, NP/AP비가 1미만에서 ARD의 발생 가능성이 가장 높지만, NP/AP비가 4이상에서는 ARD의 전혀 발생하지 않는 것으로 보고된 바 있다. 국내에서 이러한 사례는 대규모 광산인 연화·상동·장군광산에서 발생한 광미 중 자류철석-황

		Metallic Deposits																										
		BIF		Skarn		Hydrothermal Replacement		Alaskite		Breccia Pipe		Base-metal Vein		Au-Ag Vein														
		Fe		Cu-Fe		Pb-Zn		W-Mo		Au		Cu-W		Cu-Fe		Pb-Zn-Cu		W-Mo		Jurassic Au		Cretaceous Au with pyrite		Cretaceous Au-Ag		Cretaceous Au-Ag (base-metal rich)		
Genetic style	frequency	rare	ubiquitous	ubiquitous	common	ubiquitous	common	common	common	common	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	rate	common	common	common	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	ubiquitous	
	abundance	minor	moderate	abundant	minor	abundant	moderate	moderate	moderate	moderate	abundant	abundant	abundant	moderate	moderate	moderate	moderate	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	abundant	
Sulfides and sulfosalts	frequency	q > c,d	q > c,d	c,d > q	c,d > q	c,d > q	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	
	abundance	q > c,d	q > c,d	c,d > q	c,d > q	c,d > q	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d
Gangue mineral	frequency	q > c,d	q > c,d	c,d > q	c,d > q	c,d > q	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	
	abundance	q > c,d	q > c,d	c,d > q	c,d > q	c,d > q	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d	q > c,d
Mines	pH																											
	Zn+Cu+Cd+Pb+Co+As(ppm)																											
Water	pH																											
	Zn+Cu+Cd+Pb+Co+As(ppm)																											
Tailings and Soil	pH																											
	Zn+Cu+Cd+Pb+Co+As(ppm)																											
NP	frequency	*	***	****	****	****	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	abundance	*	***	****	****	****	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
NNP	frequency	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	abundance	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Fig. 6. Summary of the contamination potentiality in each genetic type. AP=acid-producing potential NNP=net neutralization potential, NP=acid-neutralizing potential. Abbreviation: c=calcite, d=dolomite, q=quartz.

철석과 같은 Fe-S계광물이 다량 포함되어 있으나, ARD의 발생과 함께 중금속의 용출에 따른 환경문제는 보고 된 바 없다. 따라서, 열수교대광상과 스키르광상과 같은 광상 유형에서는 방해석·백운석과 같은 탄산염광물이 다량 수반됨으로써 $NP > AP$ 인 조건의 충분한 중화 능력을 보유한 상태에서 풍화작용이 유지되고 있으며, 이러한 성인의 광상은 연화광산에서 제시된 바와 같이 광미장의 최상부 영역에 Fe수산화광물의 산화대(hardpan zone)가 이미 형성되어(정기영 등, 2000), 공극률 및 투수율을 감소시킴으로써 지표로부터 산소공급을 자연적으로 차단하고 자연저감효과를 보일 수 있다고 추정된다(Fig. 6).

8. 결 언

개발된 광산규모 및 금속비, 주변암상과 관련된 지질특성과 함께 열수변질작용, 광석·맥석 광물의 유형 및 조직, 양적관계 등의 광물-지화학적 부존특성을 종합적으로 검토한 결과, 국내에 부존하는 다양한 성인의 광상유형 중에서 휴·폐 광산으로부터 발생하는 산성배수 및 중금속에 의한 환경문제는 탄산염광물의 산출빈도가 현저하게 낮은 다금속 광화작용과 관련된 비철금속 광상이며 동시에 맥상광상 및 각력파이프형 광상과 백악기 금광상에서 가장 높은 오염가능성을 보이는 반면, 스키르형 광상, 열수교대형 광상, 정마그마형 광상, 맥상 금-은광상, 맥상 동광상 및 변성퇴적형 광상에서 오염도는 극히 낮은 양상을 보이고 있다. 이는 광미와 폐석으로부터 발생하는 산성배수 및 중금속의 오염도가 광상의 성인에 따른 지질부존 특성과 함께 광물-지화학적 특성을 반영한 결과로서 폐석 및 광미를 구성하는 황화광물 중 자류철석·황철석과 탄산염광물 중 방해석·백운석간의 상대적 양비관계와 일치하는 경향을 보이고 있다.

국내 금속광산은 대부분 70년대 초반부터 90년대 후반에 걸쳐서 광산개발이 종료된 상태이며, 일부 광산은 45년 이전에 휴광상태였으나 해방이후 소규모로 재개발된 경우도 있다. 휴·폐광 이후의 경과기간은 광미를 구성하는 황화광물·맥석광물의 유형 및 상대적 양비와 같은 광물학적 요인과 함께 풍화작용의 진행단계에 따라 황화·황염광물과 같은 일차광물로부터 용해되어 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물로 변화하는 과정에서 금속이온의 용출·산화·침전·재용출·이동과정의 복잡한 지화학적 반응관계를 보이고 있다. 이러한 경과기간의 차이는 수산화광물, 황산염광물, 탄산염광물

과 같은 이차광물상의 침전 및 재용출 과정을 보이고 있으므로, 광미의 산화 진행단계에 대한 판단이 필수적이며, 각 단계별 상응하는 방제 대책을 강구할 필요가 있다. 즉 광미의 초기 풍화단계는 황화광물의 산화작용으로부터 산성배수를 발생시키고 있으므로, 일반적으로 산소의 유입을 통제하거나 탄소유기물질을 이용한 환원환경을 유도하여 황화광물의 산화작용을 억제하는 방법을 활용하고 있다. 이러한 산화반응단계의 질정기 이후에는 광미의 수산화광물 및 황산염광물과 같은 이차-삼차광물의 존재형태, 지표수의 이동과 관련된 수계 및 지형 특성을 체계적으로 검토하여 지하로 유출되는 배출수의 유동성을 고려하여 용출된 금속의 침전반응을 유도하는 방제막을 설치하여 제거하고 있다.

사 사

본 연구는 2003년 고려대학교 특별연구비에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 고재동, 김수진 (1982) 거도광산 Fe-Cu 및 Au-Bi-Cu 광산에 관한 광물학적 및 성인적 연구. 광산지질, 15권, p. 189-204.
- 김규한, 이현주, 전효택 (1994) 연천 함티타늪 자철광상의 성인. 자원환경지질, 27권, p. 117-130.
- 김근수, 박맹언, Mamoru Enjoji (1994) 충주지역 호상 및 괴상 철광상의 성인에 관한 연구(I): 지질 및 광석의 산출특성. 자원환경지질, 27권, p. 523-535.
- 김선태, 윤향희, 박제안, 심의섭, 박경수 (1998) 임천광산 광미와 주변 토양 및 지하수의 오염조사. 한국토양환경학회지, 3권, p. 33-44.
- 김옥준 (1970) 남한의 금은광상구. 광산지질, 3권, p. 163-167.
- 김정택 (1972) 동성광산의 지질과 광상, 시추결과를 중심으로. 광산지질, 5권, p. 133-144.
- 문건주 (1984) 상동 중석광상의 주맥석 광물에 대한 지화학. 광산지질, 17권, p. 79-90.
- 문용희, 문희수, 박영석, 문지원, 송윤구, 이종천 (2003) 덕음광산 광미의 산화, 환원 조건에 따른 전이원소의 이동성. 한국자원공학회·대한자원환경지질학회·한국지구물리탐사학회·대한지질학회 2002년도 춘계공동학술발표회 논문집, p. 472-474.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1996) 광산지역 광해조사 및 대책연구. 한국자원연구소, KR-96(C)-41, 374p.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1997) 광산지역 광해조사 및 대책연구. 한국자원연구소, KR-97(C)-32, 479p.
- 박맹언, 성규열, 고용권 (2000) 비금속광상의 황화광염대에 수반되는 산성광산배수의 형성과 지질환경의 오염. 자원환경지질, 33권, p. 405-415.
- 박희인, 최석원, 장호완, 이민성 (1983) 경남고성지역 동광상의 성인에 관한 연구. 광산지질, 16권, p. 135-147.
- 박희인, 최석원, 장호완, 채동현 (1985) 경남 함안-경북지

- 역의 동광화작용에 관한 연구. 광산지질, 18권, p. 107-124.
- 박희인, 박노영, 서규식 (1986) 부평광산의 금광석과 선광 산물. 광산지질, 19권, p. 85-96.
- 박희인, 최석원, 이상선 (1988) 다덕광산 풍정맥의 금은광 화작용. 광산지질, 21권, p. 269-276.
- 박희인, 황정, 허순도 (1992) 입계지역의 금-은 광화작용. 광산지질, 25권, p. 379-395.
- 신성천, 이평구, 박성원, 홍영국, 유장한, 송윤구, 이수재, 문상호 (2000) 환경지화학도 작성. 부록: 국내 폐금속 광산의 오염실태 조사(경기도, 충청남도, 충청북도, 전라남도, 전라북도). 한국자원연구소, N2-03-01-A-04, 339p.
- 양동윤, 지정만 (1986) 덕읍광산 은광물의 분포와 조직. 광산지질, 19권(특별호), p. 227-237.
- 오민수 (1998) 한국의 지질; 광화작용. 대한지질학회, 시그마프레스, p. 523-605.
- 우영균, 이민성, 박희인 (1982) 경남지역의 스키르형 광산의 성인과 스키르광물에 관한 연구. 광산지질, 15권, p. 1-16.
- 유봉철, 최선규, 이현구 (2002) 구봉 금-은광산에서 산출되는 액티브의 산출상태와 화학조성. 자원환경지질, 35권, p. 191-201.
- 이광춘, 김세현, 이승호, 서용찬 (2003) 동명 금-은 광산 주변의 중금속 오염. 자원환경지질, 36권, p. 17-25.
- 이기철, 이승길, 한인호, 최광호, 정덕영 (1998) 금정광산 주변 토양의 중금속 오염현황 및 그 처리 방안. 대한지하수환경학회·한국토양환경학회 공동 심포지엄 및 추계학술대회 논문집, p. 189-194.
- 이상렬, 최선규, 소철섭, 유인창, 위수민, 허철호 (2003) 한국 경상분지 백악기 비철금속 광화작용과 그 성인적 의미: 함안-군북-고성(창원) 및 의성 광상구를 중심으로. 자원환경지질, 36권, p. 257-268.
- 이찬희, 이현구, 조애란 (1999) 공주제일광산 수계에 분포하는 지하수, 지표수, 토양 및 퇴적물의 환경지구화학적 특성과 중금속 오염. 자원환경지질, 32권, p. 611-631.
- 이찬희, 이현구, 이종창 (2000) 남한 중부지역, 일부 광산 배수의 TDS와 pH 변화에 따른 지구화학적 평형모델. 자원환경지질, 36권, p. 217-234.
- 이창신, 김용준, 박천영, 이창주 (1992) 광양-송주지역에 분포하는 화강암류의 암석화학. 광산지질, 25권, p. 51-60.
- 전서령, 정재일, 김대현 (2002) 백운 폐광산의 방치된 폐석으로 인한 주변 수계의 환경적 영향. 자원환경지질, 35권, p. 325-337.
- 전용원, 차종문 (1996) 노화남석광산 일대 자연수의 지구화학과 산성광산폐수의 중화 처리. 한국자원공학회지, 33권, p. 503-511.
- 전용원 (1997) 지구자원과 환경; 환경지구화학. 서울대학교출판부, p. 381-432.
- 정기영, 이병윤, 이석훈 (2000) 다덕광산 폐석내 섬아연석, 능망간석, 함망간 방해석의 화학적 풍화작용과 Zn, Mn, As의 지구화학적 거동. 한국광물학회지, 13권, p. 73-83.
- 정명채, 정영욱, 민정식 (1998) 휴/폐광 광산폐기물의 지구화학적 특성. 대한지하수환경학회·한국토양환경학회 1998년도 공동 심포지엄 및 추계학술발표회 논문집, p. 71-75.
- 정명채, 안주성, 전효택, 정영욱, 민정식 (1999) 광산폐기물의 지구화학적 특성과 유동성 원소의 화학적 형태. 대한지하수환경지질학회·한국자원공학회·한국지구물리탐사학회 1999년 춘계 공동 학술발표회-동북아 광상성인 심포지움 논문집, p. 21-23.
- 정명채, 전효택, 안주성, 정영욱, 민정식 (2000) 국내 38개 금속광산의 광상 형태에 따른 광산폐기물의 중금속오염 연구. 한국자원공학회·대한지하수환경지질학회·한국지구물리탐사학회 2000년 춘계 공동 학술발표회 논문집, p. 61-62.
- 정영욱, 민정식, 이승길, 최광호, 최수일 (1997) 다덕광산 주변 환경오염 조사 사례 연구. 한국토양환경학회 1997년 총회 및 춘계 학술발표회 논문집, p. 65-69.
- 정영욱, 이평구, 박성원, 윤 욱, 이재호, 신성천, 지세정, 이진수, 김학주, 김상연, 이변대, 최병민, 홍영국, 민정식, 조원재, 권광수, 이상권, 강선덕, 강상수, 조영도, 윤치호, 홍성규, 임길재 (2002) 폐금속광산 환경오염 평가 및 정화기술 연구. 한국지질자원연구원, KR-02(연차)-07, 300p.
- 정현복, 윤성택, 김순오, 소철섭, 정명채 (2003) 광양 폐금-은 광산 지역 광산폐수의 중금속 오염과 중금속의 제거에 이어 소택지와 지류 혼합의 역할 평가. 지질공학, 13권, p. 29-50.
- 최선규, 위수민 (1992) 에렉트럼의 화학조성과 관련된 한국 중부지역 금은광산의 성인적 특성. 지질학회지, 28권, p. 196-217.
- 최선규, 박상준, 최상훈, 신흥자 (2001) 한국 중생대 화강암류와 이에 수반된 금-은광화작용. 자원환경지질, 34권, p. 25-38.
- 최우진 (1997) 산성폐수에 의해 오염된 지표수의 오염도 평가에 관한 연구. 한국토양환경학회 1997년 총회 및 춘계 학술발표회 논문집, p. 87-91.
- Cheong, Y.W., Min, J.S. and Kwon, K.S. (1998) Metal removal efficiencies of substrates for treating acid mine drainage of the Dalsung mine, South Korea. Jour. of Geochem. Exploration, v. 64, p. 147-152.
- Choi, S.G. and Choi, S.H. (1995) Contrasting styles of gold and silver mineralization in the central and southeastern Korea. Econ. and Environ. Geol., v. 28, p. 587-597.
- Choi, S.G. and Choi, I.S. (1998) Compositional variations of arsenopyrite from gold-silver deposits in Korea. Econ. and Environ. Geol., v. 31, p. 89-99.
- Choi, S.G. and Youm, S.J. (2000) Compositional variation of arsenopyrite and fluid evolution at the Ulsan deposit, southeastern Korea: A low-sulfidation porphyry system. Canadian Mineralogist, v. 38, p. 567-583.
- Choi, S.G. (2002) The genetic implications of Mesozoic gold-silver mineralization, Korea. In: Jin et al. (eds.), Mesozoic Sedimentation, Igneous Activity and Mineralization in South Korea. KIGAM, Daejeon, Special Pub. no. 1, p. 216-226.
- Corbett, G.J. and Leach, T.M. (1998) Gold-copper systems in porphyry environments. In: Corbett and Leach (eds.), Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Econ. Geol., Special Pub. no. 6, p. 83-100.
- Du Bray, E.A. (1995) Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models. U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-831, p.1-9.
- Jambor, J.L. and Blowes, D.W. eds. (1994) Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-wastes. Mineralogical Association of Canada, Short Course, v. 22, 438p.
- Jambor, J.L. and Blowes, D.W. (1998) Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sul-

- fide-bearing mine wastes. In: Carbri and Vaughan (eds.), Modern approaches to ore and environmental mineralogy. Mineralogical Association of Canada, Short Course, v. 27, p. 367-402.
- Jung, M.C., Ahn, J.-H. and Chon, H.-T. (2001) Environmental Contamination and sequential extraction of trace elements from mine wastes around various metalliferous mines in Korea. *Geosystem Engineering*, v. 4, p. 50-60.
- Jung, M.C. and Thornton, I. (1996) Heavy metal contamination of soil and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. *Applied Geochem.*, v. 11, p. 53-59.
- Jung, M.C. (2001) Heavy metal contamination of soils and water in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Applied Geochem.*, v. 16, p. 1369-1375.
- Kim, W.J. (1986) Metallogeny on gold-silver in south Korea. *Jour. of Korean Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 243-264.
- Koh, Y.K., Choi, S.G., So, C.S., Choi, S.H. and E. Uchida (1992) Application of arsenopyrite geothermometry and sphalerite geobarometry to the Taebaek Pb-Zn (-Ag) deposit at Yeonhwa I mine, Republic of Korea. *Min. Deposita*, v. 27, p. 58-65.
- Lasaga, A.C. and Berner, R.A. (1998) Fundamental aspects of quantitative models for geochemical cycles. *Chemical Geol.* v. 145, p. 161-175.
- Lee, C.H., Lee, H.K. and Kim S.J. (1998) Geochemistry and mineralization age of magnesian skarn-type iron deposits of the Janggum mine, Republic of Korea. *Min. Deposita*, v. 33, p. 379-390.
- Lee, C.G., Chon, H.T. and Jung M.C. (2001) Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea. *Applied Geochem.*, v. 16, p. 1377-1386.
- Morin, K.A. and Hutt, N.M. (1997) Environmental geochemistry of mine site drainage practical theory and case studies; Description and assesment of drainage chemistry. MDAG Publishing, p. 63-138.
- Park N.Y. (1982) Molybdenum mineralization, exploration and exploitation of the ore deposits at the Keumseong mine, Republic of Korea. Ph. D. Thesis, Univ. Waseda. 188p.
- Plumlee, G.S. and Nash, J.T. (1995) Geoenvironmental models of mineral deposits-Fundamentals and applications. In Du Bray, E.A. (eds), Preliminary Compilation of Geoenvironmental Mineral Deposit Models. U.S. Geological Survey, Open-File Report 95-831, p. 1-9.
- Plumlee, G.S. (1998) The environmental geology of mineral deposits. In: Plumlee and Logsdon (eds.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. Reviews in Econ. Geol.*, v. 6A, p. 71-116.
- Shelton, K.L., So, C.S., Haeussler, G.T., Chi, S.J. and Lee, K.Y. (1990) Geochemical studies of the Tongyoung gold-silver deposits, Republic of Korea: Evidence of meteoric water dominance in a Te-bearing Epithermal system. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 1114-1132.
- Shelton, K.L. and So, C.S. (1992) A hydrogen and oxygen isotope study of Sambo Pb-Zn-Barite mine, Republic of Korea. *Mining Geol.*, v. 42, p. 353-359.
- So, C.S. (1977) Origin of the strata-bound magnetite ore from the Pocheon iron mine, Korea. *Jour. of Geol. Soc. of Korea*. v. 13, p. 249-262.
- So, C.S. and Shelton, K.L. (1983). A sulfur isotopic and fluid inclusion study of the Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe, Ilkwang mine, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 78, p. 326-332.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L. (1987) The Jeonui gold-silver mine, Republic of Korea: A geochemical study. *Mining Geol.*, v. 37, p. 313-322.
- So, C.S., Chi, S.J. and Choi, S.H. (1988) Geochemical studies on Au-Ag hydrothermal vein deposits, Republic of Korea : Jinan-Jeongup mineralized area. *Jour. of Min. Petr. and Econ. Geol.*, v. 83 p. 449-471.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1992) Geochemistry of hydrothermal Au-Ag-Pb-Zn deposits in the Hwanggangri mineralized district, Republic of Korea. *Econ. Geol.*, v. 87, p. 2056-2084.
- So, C.S. and Yun, S.T. (1997) Jurassic mesothermal gold mineralization of the Samhwanghak mine, Youngdong area, Republic of Korea: Geochemistry of magmatic-hydrothermal gold deposition. *Econ. Geol.*, v. 92, p. 60-80.
- Yang D.Y. (1991) Mineralogy, petrology and geochemistry of the magnesian skarn-type magnetite deposits at the Shinyemi mine, Republic of Korea. Ph. D. Thesis, Univ. Waseda. p. 323.
- Yun, S. and Einaudi, M.T. (1982) Zinc-lead skarns of the Yeonhwa-Ulchin district, South Korea. *Econ. Geol.*, v. 77, p. 1013-1032.
- Yun, S.T., So, C.S., Choi, S.H. Shelton, K.L. and Koo, J.H. (1993) Genetic environment of germanium-bearing gold-silver vein ores from the Wolyu mine, Republic of Korea. *Min. Deposita*, v. 28, p. 107-121.