

## 강원도내 갯내 산성폐수의 수질 특성

박영구<sup>†</sup> · 박준석 · 김승호

삼척대학교 환경공학과  
(2004년 7월 20일 접수 ; 2004년 8월 26일 채택)

### Characteristic of Acid Mine Drainage from Abandoned Mines in Kangwon-Do

Young-Goo Park<sup>†</sup> · Joon-Seok Park · Seung-Ho Kim

Department of Env. Eng., Samcheok National University, Samcheok 245-711, Korea  
(Received July 20, 2004 ; Accepted August 26, 2004)

**Abstract** : This study was performed to evaluate characteristic of acid mine drainages (AMD) from abandoned mines in Kangwon-Do. Youngdong abandoned mine, and Soo and Hambaek abandoned mines in Hamtae were selected for this study. Average pHs of the mine drainages were 3-6.5, and those of Youngdong and Hambaek drainages were very acidic as 3-4.  $SO_4^{2-}$  of Youngdong and Hambaek drainages were over 1,600 mg/L, which higher than average value (845 mg/L) of acid mine drainages in nationwide. Cu, Mn, and As concentrations of the drainages were lower than 'Pollutant Discharge Permission'. Fe concentrations of Youngdong and Hambaek drainages were approximately 96 mg/L, which were two times higher than average value in nationwide. From correlation analysis using SPSS, significant correlation was not discovered between 'contaminants' analyzed in three acid mine drainages.

**Keywords** : acid mine drainage,  $SO_4^{2-}$ , Fe, Al, correlation coefficient.

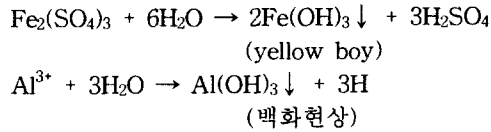
### 1. 서론

1980년대까지 국가 기간산업으로 활발히 진행된 영동지방의 석탄산업은 1980년대 중반부터 석유와 가스의 소비증대로 점차 사양산업으로 전락하였다. 이렇듯 석탄산업은 인건비 증가와 석탄 사용량의 감소로 경제성을 갖춘 다른 연료 산업에 밀리기 시작하면서 대부분의 탄광이 폐광되기 시작하였고, 석탄산업합리화사업의 일환으로 2001년 현재 약 350여개 이상의 광산이 폐광되었다. 현재 가행 탄광도 정부지원금으로 유지되고 있으나 채산성 악화와 석탄의 수요 감소

로 폐광이 진행되고 있는 실정이다[1].

가행 탄광의 갯내폐수는 거의 중성상태로 비교적 안정한 수질을 나타내고 있으나, 휴·폐광된 갯내폐수는 광산 내에 산소와 물의 유입에 의한 광상의 산화로 pH 4 이하인 갯내 산성폐수(acid mine drainage, AMD)가 되고 있으며, 광상에 함유된 철황화물인 pyrite( $FeS_2$ )는 공기 중의 산소에 의하여 산화되어 철( $Fe^{2+}$ )과 황산염( $SO_4^{2-}$ )이온이 된다[2-4]. 휴·폐광의 갯내 산성폐수는 주변의 암석층을 통과하면서 중금속을 용출함과 동시에 황산염과 같은 유해물질을 하천으로 유입시켜서 주변 수계를 황갈색 침전물

로 오염시켜 심미적 불쾌감뿐만 아니라 자연생태계 파괴, 상수원 및 지하수 오염, 지역 주민의 건강을 해치는 등 심각한 환경문제를 야기하고 있다. 전국에 산재한 수많은 휴·폐광지에서 발생된 산성폐수는 주변 하천으로 유입되어 하천 바닥에 적갈색 침전물(yellow boy)과 백화현상을 유발하여 생태계에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 원인은 갯내수에 황산철[Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>]과 알루미늄, 칼슘 이온 등의 농도가 매우 높기 때문이다. pH가 3-6 정도인 갯내수는 하천에 유입되면서 산도가 증가하고 탁도가 발생하여 생태계의 파괴와 동식물의 생육에 큰 영향을 주고 있다. 아래의 두 식은 적갈색 침전물과 백화현상 반응을 나타내고 있다.



pH가 4 이하인 하천에서는 물고기의 서식과 미생물의 생존이 어렵고, 하천에 설치된 콘크리트 구조물을 부식시키는 등 사회간접자본을 잠식하여 시설관리 유지비가 많이 든다. 강산성의 갯내수가 하천에 유입되면 주변 토양을 오염시킬 뿐만 아니라 하천수를 농업 및 공업용수로 활용하기 어렵고, 하천수를 취수원으로 사용하는 정수장에서도 정수처리에 큰 어려움이 발생하게 된다. 또한 자연경관 잠식으로 인해 관광객 유치에도 악영향을 미치게 되므로 휴·폐광지의 갯내 유출수 처리를 위한 기술개발이 시급한 실정이다.

전국에 산재해 있는 약 350 여개의 폐광시설 중 절반가량이 강원도에 존재하고 있다. 특히 강원 영동지역(태백, 삼척, 강릉, 정선 등)은 지역주민 생활지와 인접한 곳에 휴·폐탄광이 위치하고 있으며, 탄광지역의 지형 및 지질이 다르고 폐광 연수 등에 의해 지역적으로 다른 수질을 나타내고 있다. 강원도 강릉시 임곡천과 태백시 소도천, 황지천 수계가 국내에서 가장 대표적인 갯내 산성폐수에 의한 오염하천으로 분류되고 있다.

본 연구는 전국의 폐광 중 약 50%가 산재하고 있는 강원도를 대상으로 3개소의 폐광을 선정하여 갯내에서 배출되는 폐수의 특성을 분석, 평가하여 국가적으로 문제가 되고 있는 폐광산

폐수의 처리를 위한 기초연구로 실시되었다.

## 2. 실험

연구대상 폐광지로는 강원 영동지역의 강릉시 구 영동탄광, 태백시 구 함태탄광의 함백갱과 수갱을 선정하였다. 구 영동탄광의 갯내 산성폐수 유출량은 12,000 m<sup>3</sup>/day이었으며, 구 함태탄광의 함백갱과 수갱의 유출량은 각각 3,000 m<sup>3</sup>/day와 5,000 m<sup>3</sup>/day이었다. 갯내 산성폐수의 배출현황 분석을 위해 구영동탄광의 갯내수는 총 8회에 걸쳐 채수하였으며, 구함태탄광의 함백갱과 수갱의 경우에는 각각 4회에 걸쳐 채수하였다.

갯내 산성폐수의 특성을 파악하기 위하여 pH, 부유물질(SS), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 Fe, Mn, Al 등의 중금속 함량을 분석하였다. pH는 현장에서 이동식 pH meter (DPM-10, 세창인스트루먼트(주), 한국)를 이용하여 측정하였다. 기타 분석항목의 시료는 채수된 시료 1 L당 5N c-HNO<sub>3</sub>를 2 mL 가하여 pH를 2로 조정하여 고정된 상태에서 4℃로 유지 후 이송하였다. Mg과 Ca은 이송 즉시 분석하였으며, Fe, Mn, Al, Cr, Zn, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 등은 4℃로 보관시 7일-1개월의 기간 중에는 분석상의 문제가 발생하지 않으므로 7일 이내에 분석하였다. 모든 분석항목은 수질오염공정시험법(2000)에 따라서 분석하였다[5]. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 IC (DX-500, Dionex, USA)를 이용하였으며, 기타 중금속 함량은 ICP (Ultra Mass-700, Varian, USA)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. pH, SS, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca

갯내수 처리시 pH는 중화제 및 응집보조제 투입량과 밀접한 관계가 있다. 3개 갯내수의 pH를 분석한 결과 평균 pH는 3-6.5 정도를 나타내었다(Fig. 1). 특히 구 영동(Youngdong)탄광에서 발생하는 갯내수는 pH 3의 강산성 폐수이었으며 연간 수질의 pH 변동은 거의 없었다. 태백시 구 함태탄광의 수(Soo)갱에서 배출되는 갯내수는 평균 pH가 6.5로 비교적 양호하였으나, 동일한 탄광의 함백(Hambaek)갱에서 배출되는 갯내수의 평균 pH는 약 4정도로 강산성을

미고 있었다. 이를 전국 59개소에서 조사된 갯내 산성폐수의 평균 pH와 비교하였을 때, 구 영동탄광과 함백갱 광산폐수의 pH는 3-4로 전국 평균 pH 5.1보다 높은 산도를 나타내었다 (Table 1). 문헌조사된 전국 갯내수 pH 자료에 의하면 대부분 pH 5 정도를 나타내었으며 강릉과 봉화의 광산폐수는 pH 4 정도를 나타내었다 [1].

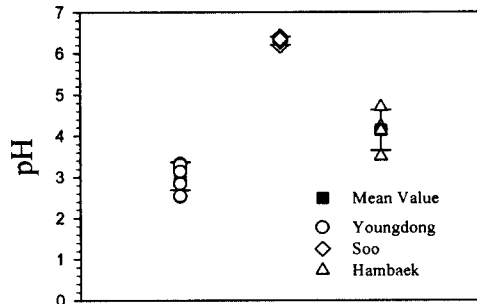


Fig. 1. pH of Youngdong, Soo, and Hambaeck acid mine drainages.

갯내수의 SS(suspended solids, 부유성 고형물)를 측정된 결과 구 영동탄광은 계절에 따라 40-80 mg/L 정도를 나타내었으며, 연평균 SS는 62.1±12.6 mg/L 정도이었다(Fig. 2). 구 함태탄광의 수갱과 함백갱의 평균 SS는 각각 35.9±11.0 mg/L와 11.6±5.5 mg/L를 나타내었다.

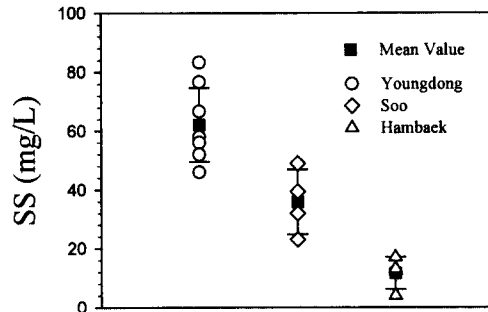


Fig. 2. SS concentration of Youngdong, Soo, and Hambaeck acid mine drainages.

SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> 이온은 물 속에 잔류하여 다른 이온이 함유되어 있지 않을 때 산성폐수에 의한 오염을 일으키고 산도를 증가시킨다. 이러한 이온은 산화된 철이 철수화물로 침전되면서 물에서 빠르게 제거되는 반면에 뚜렷한 침전물을 만들지 못하면서 물에 잔류하여 유로를 따라 끊임없이 이동하기도 한다. 갯내 산성폐수에서는 황산철과 황산알루미늄의 침전물이 검출된다. 구 영동탄광 갯내수의 연간 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>의 농도는 1,200±370 mg/L 정도이었으며, 구 함태탄광의 수갱과 함백갱의 평균 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>의 농도는 각각 520±55 mg/L와 1,550±340 mg/L이었다(Fig. 3). 영동탄광과 함태탄광 수갱의 갯내수는 연중 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>의 농도변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 이와

Table 1. Characteristic of Acid Mine Drainage in Nationwide

Classification	No. of Mines	Flowrate of Drainage (m <sup>3</sup> /day)	Item				
			pH	Fe (mg/L)	Al (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	
Kangwon	Kangreung	8	5,486	4.1	131.3	28.6	695
	Samcheok	5	1,620	5.2	146.1	44.1	1,647
	Taebaek	10	7,178	5.4	95.1	8.8	815
	Pyungchang	3	2,371	6.3	30.9	0.7	277
	Youngwol	8	951	5.0	112.6	17.6	753
	Jeongseon	10	17,233	5.7	21.4	11.7	348
Kyungbuk	Moonkyung	6	2,160	5.6	58.1	8.8	873
	Bonghwa	1	331	4.4	78.0	12.3	950
Chonnam	Hwasoon	3	479	6.3	23.4	7.1	264
Chungcheong	-	5	1,675	5.2	65.5	15.7	602
Sum	59	39,484	5.1	96.0	31.3	845	

는 달리 함백갱의  $SO_4^{2-}$ 의 농도는 4회 분석하였을 때 약 1,200-1,850 mg/L의 변화를 나타내어 계절에 따른 변화를 나타내었다.  $SO_4^{2-}$  이온은 인체에 뚜렷한 해를 주지 않는 것으로 보고되고 있으나, 250 mg/L 이상에서는 보통설사를 일으키므로 가능하면 물에서 제거하도록 권장된다[6]. 전국에서 조사된 59개 폐탄광 갱내수의 평균  $SO_4^{2-}$  농도는 845 mg/L로 영동탄광과 함백갱의 평균 농도는 조사된 전국 평균치보다 훨씬 높은 것으로 나타났다(Table 1 참조).

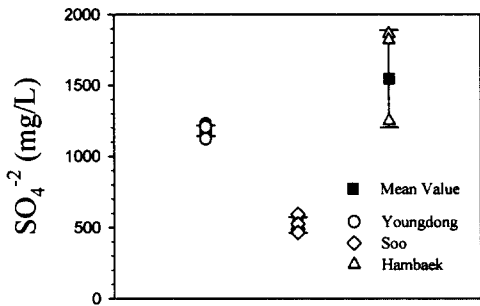


Fig. 3.  $SO_4^{2-}$  concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

갱내 산성폐수 중의  $Ca^{2+}$  이온은 경도를 유발하며 석회석 내 방해석의 용해에 의하여 생성된다[7].  $Ca^{2+}$  이온의 경우에는 구 함태탄광의 수갱과 함백갱에 대하여만 모니터링되었다. 갱내수내  $Ca^{2+}$  이온은 수갱에서는 약 200 mg/L를 나타내었으며, 함백갱에서는 약 100 mg/L를 나타내었다(Fig. 4).  $Ca^{2+}$  이온은 계절에 따른 농도의 변화가 거의 없었다.

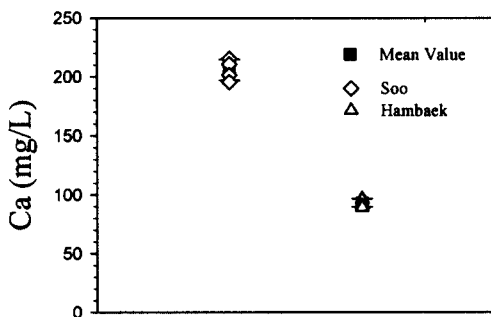


Fig. 4. Ca concentration of Soo and Hambaek acid mine drainages.

### 3.2. 중금속

갱내수내 중금속 함량은 Cu, Mn, Fe, Al, Zn, Ni, 그리고 As에 대하여 측정하였다. 중금속 함량별로 측정한 결과 탄광 갱내수에 따라 다소 서로 상이한 값을 나타내었다. Cu의 경우 구 영동탄광에서 1회 0.5 mg/L가 검출된 것을 제외하고는 측정된 3개 갱내수에서 모두 연평균 0.2 mg/L 이하로 낮게 검출되었으며 평균값은  $0.19 \pm 0.14$  mg/L이었다(Fig. 5). 구 함태탄광의 수갱과 함백갱의 Cu는 0.1 mg/L 이하로 낮게 나타났다. 참고로 오염물질 배출허용기준의 청정지역 기준은 0.5 mg/L 이하이다. Mn의 경우에는 구 영동탄광과 함태탄광의 수갱에서는 연평균 7 mg/L 미만으로 나타났으나 함백갱에서는 이들의 2배 이상인 약 15 mg/L이 검출되었다(Fig. 6). 용해성 망간의 배출허용기준이 청정지역은 2 mg/L이하이며, 가지역은 10 mg/L이다.

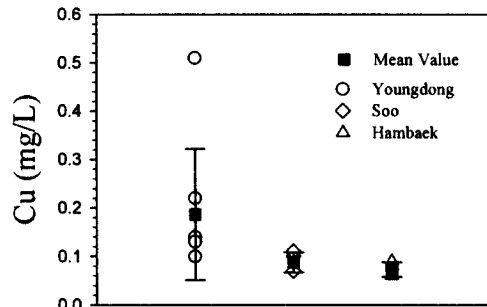


Fig. 5. Cu concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

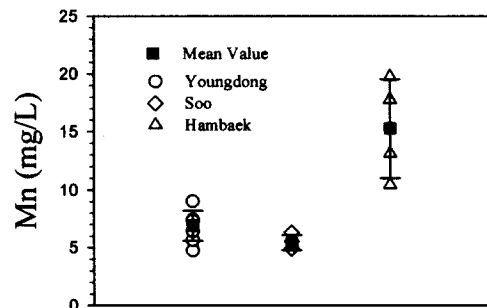


Fig. 6. Mn concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

철이온은 OH<sup>-</sup> 이온과 반응하여 붉은색 침전물(yellow boy)을 형성하여 미관을 손상시키는 성분이다. 구 영동탄광의 연평균 농도는 156.7±21.9 mg/L이었으며 계절에 따른 철이온의 농도변화는 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 7). 함백갱의 철이온 농도는 159.5±49.5 mg/L로 영동탄광의 그것과 유사하였다. 그러나 수갱의 철이온 농도는 약 30 mg/L로 다른 두 갯내수에 비하여 낮은 농도를 나타내었다. 조사된 전국의 평균 자료를 살펴보면 철이온의 경우 삼척이 146.1 mg/L 가장 높았으며, 정선은 21.4 mg/L 가장 낮았다(Table 1 참조). 전체 평균 철이온 농도는 96.0 mg/L로 나타났다.

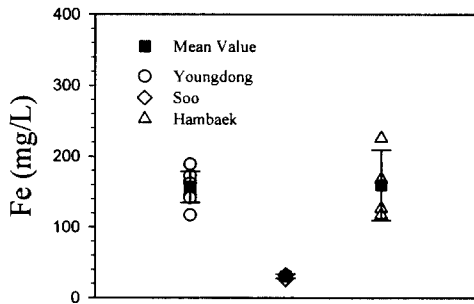


Fig. 7. Fe concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

광산폐수내 알루미늄(Al<sup>3+</sup>) 이온은 OH<sup>-</sup> 이온과 반응하여 Al(OH)<sub>3</sub> 침전을 형성하여 인근 하천 및 토양을 하얗게 만드는 백화현상을 유발시킨다. 영동탄광의 경우 알루미늄 농도는 31.3±1.34 mg/L로 수갱과 함백갱의 평균농도인 0.3 mg/L와 8.5 mg/L에 비하여 높게 검출되었다(Fig. 8). 다른 지역과 비교할 때 알루미늄 농도는 삼척이 44.1 mg/L로 가장 높았으며(Table 1 참조), 조사된 자료의 평균 알루미늄 농도는 31.3 mg/L로 영동탄광의 경우와 동일하였다. 그 밖에 영동탄광은 아연과 니켈은 1.5 mg/L 미만의 낮은 농도를 나타내었으며, 수갱과 함백갱의 비소는 각각 연평균 농도가 0.006 mg/L와 0.004 mg/L 이하로 검출되었다(Fig. 9와 10). 비소의 농도는 '청정지역' 오염물질 배출허용 기준치가 0.1 mg/L 이하인 것을 고려할 때 그리 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

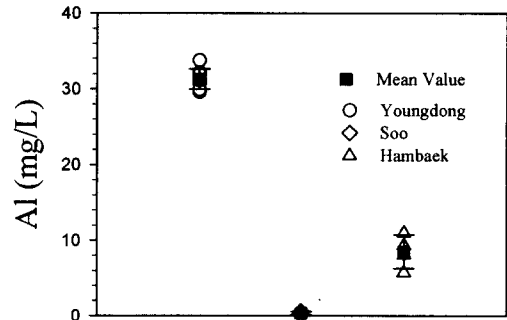


Fig. 8. Al concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

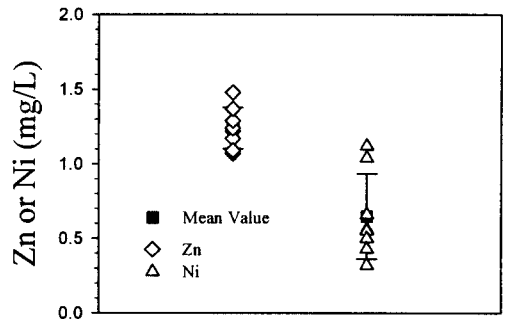


Fig. 9. Zn and Ni concentrations of Youngdong acid mine drainage.

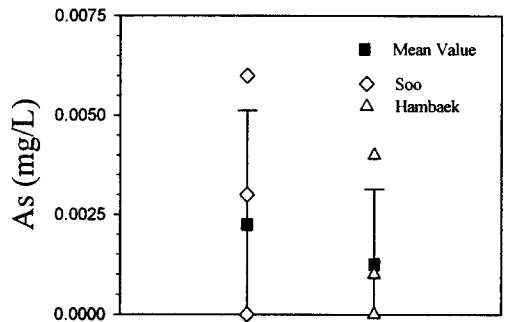


Fig. 10. As concentration of Youngdong, Soo, and Hambaek acid mine drainages.

### 3.3. 상관도 분석

분석된 각각의 실험자료가 서로 어느 정도의 상관도가 있는지를 SPSS 프로그램을 이용하여 살펴보았다. 구 영동탄광의 자료를 분석해보면 pH는 Mn 농도와 음의 상관도가 0.71 (P

Table 2. Significant Correlation between Analytic Items of Youngdong Acid Mine Drainage

Item	pH	SS	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cu	Mn	Fe	Al	Cr	Zn	Ni	Cd
pH	1.000	0.652	0.528	0.428	-0.714*	-0.488	-0.408	0.530	-0.195	0.599	0.421
SS		1.000	0.321	-0.043	-0.681	-0.110	0.115	0.661	-0.402	0.685	0.681
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>			1.000	0.126	-0.663	-0.272	-0.155	0.194	-0.416	0.291	0.278
Cu				1.000	-0.018	-0.451	-0.517	-0.021	0.708*	0.085	-0.089
Mn					1.000	0.597	0.341	-0.786*	0.516	-0.761*	-0.284
Fe						1.000	0.937**	-0.336	-0.070	-0.270	0.454
Al							1.000	-0.040	-0.174	0.028	0.623
Cr								1.000	-0.296	0.954**	0.449
Zn									1.000	-0.169	-0.193
Ni										1.000	0.615
Cd											1.000

\* Significant at 0.01 probability level (P = 0.01)

\*\* Significant at 0.05 probability level (P = 0.05)

Table 3. Significant Correlation between Analytic Items of Soo Acid Mine Drainage

Item	pH	SS	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cu	Mn	Fe	Al	Ca
pH	1.000	-0.154	0.571	0.104	-0.074	-0.146	-0.557	-0.352
SS		1.000	-0.831	-0.922	0.602	-0.905	-0.722	-0.850
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>			1.000	0.623	-0.229	0.726	0.249	0.423
Cu				1.000	-0.863	0.726	0.749	0.879
Mn					1.000	-0.302	-0.564	-0.678
Fe						1.000	0.804	0.849
Al							1.000	0.973*
Ca								1.000

\* Significant at 0.05 probability level (P = 0.05)

Table 4. Significant Correlation between Analytic Items of Hambaek Acid Mine Drainage

Item	pH	SS	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cu	Mn	Fe	Al	Ca
pH	1.000	0.222	0.785	0.631	0.668	0.818	0.541	0.720
SS		1.000	-0.185	-0.492	-0.054	0.252	0.079	-0.130
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>			1.000	0.946	0.957*	0.900	0.858	0.987*
Cu				1.000	0.860	0.712	0.726	0.914
Mn					1.000	0.939	0.970*	0.991**
Fe						1.000	0.919	0.926
Al							1.000	0.929
Ca								1.000

\* Significant at 0.01 probability level (P = 0.01)

\*\* Significant at 0.05 probability level (P = 0.05)

= 0.05)로 다소 높았으며, 다른 중금속 농도의 거동과는 밀접한 관계가 없는 것으로 나타났다 (Table 2). 중금속 항목에서는 Al과 Fe 그리고 Ni과 Cr이 유의수준 0.01에서 0.94 이상의 높은 상관도를 나타내었다. 함태탄광의 수갱 자료에서는 Ca과 Al만이 0.97(P = 0.05)의 높은 상관도를 나타내었다(Table 3). 함태탄광의 함백갱 자료를 살펴보면  $SO_4^{2-}$ 는 Mn 및 Ca과 서로 0.95(P = 0.05) 이상의 높은 상관도를 나타내었고, 중금속에서는 Al과 Mn, 그리고 Ca과 Mn이 각각 0.97과 0.99(P = 0.05)의 높은 상관도를 보였다(Table 4). 조사 평가된 각 항목간의 상관도를 전체적으로 살펴보면 폐광산 지역마다 수질 특성이 서로 다르게 나타났고, 상관성 또한 전체적으로 비교하면 어떠한 공통점을 찾을 수 없었다. 이는 각 폐광산의 관련 광물, 주변 지형, 지질 및 수리학적 특성 등 다양한 현장특성 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 강원도 3개소 폐광의 갯내에서 배출되는 폐수의 특성을 분석, 평가하여 폐광산 폐수의 처리를 위한 기초연구로 실시되었으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 3개소 갯내수의 평균 pH는 3.0-6.5이었으며, 특히 영동탄광과 함백갱 갯내수의 pH는 3-4의 강산성을 나타내었다.
2. 3개소 갯내수의 연평균 SS는 62 mg/L 이하이었으며, 영동탄광과 함백갱 갯내수의  $SO_4^{2-}$ 는 1,600 mg/L 이상으로 전국 59개소의 평균치인 845 mg/L 보다 높았다.
3. 3개소 갯내수의 Cu 농도는 0.2 mg/L로 오염물질배출허용 청정지역 기준을 만족시켰다. 또한 Mn 농도도 오염물질 배출허용기준과 비교할 때 그리 심각한 수준은 아니었으며, 비소는 청정지역 오염물질 배출허용 기준치보다 낮아 문제없는 것으로 나타났다.

4. 영동탄광과 함백갱 갯내수의 철이온 농도는 약 160 mg/L로 전국 59개소의 평균 농도인 96 mg/L 보다 2배 정도 높았다. 영동탄광은 알루미늄 농도가 약 30 mg/L를 나타내어 전국 59개소의 평균치와 유사하였다.
5. 영동탄광과 함태탄광의 함백갱과 수갱 중에서 영동탄광과 수갱의 갯내수가 오염발생 정도가 심하였다. 전체적으로 3개소 폐광산 지역마다 수질 특성이 서로 상이하였으며, 오염물질 항목간의 공통된 상관성은 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 석탄산업합리화사업단, 폐탄광폐수의 자연정화식 처리의 효율증진과 성능향상을 위한 연구 (1997).
2. 과학기술부, Development of Environment Remediation Technology (Reclamation of Land Disturbed by Mining) (1999).
3. 최정찬, 광산 산성수 평가 및 처리기술 분석, 대한지질학회 대한자원환경지질학회 제 12회 공동학술강연회논문집, 26 (1996).
4. 유재영, 광산 배수의 산성화 및 그에 따른 환경 문제, 대한지질학회 대한자원환경지질학회 제 11회 공동학술강연회논문집, 32 (1995).
5. 환경부, "수질오염공정시험방법", 433, 동화기술 (2000).
6. J. D. Powell, Origin and Influence of Coal Mine Drainage on Streams of the United States, *Env. Geol. Water Sci.*, 11(2), 141 (1988).
7. G. R. Watzlaf, "Comparative Test to Remove Manganese from Acid Mine Drainage", Control of Acid Mine Drainage, U.S. Bureau of Mines IC 9027 (1985).