

탄광산업 폐수처리

〈첫번째〉



신 황 식

〈한국과학기술원·토목공학과(환경분야) 부교수〉

목 차

- I. 머리말
- II. 탄광의 작업 공정
- III. 폐수의 배출원 및 특성
- IV. 처리목표 및 방류수 수질 기준
- V. 폐수의 감량화 기법
- VI. 탄광 폐수의 일반적 처리방법
- VII. 우리나라에서의 탄광폐수 처리를 위한 최적 방안
- VIII. 결론

참고문헌

I. 머리말

국내에서 매년 생산되는 석탄량은 〈표 1〉과 같으며 평균 약 2254만 톤으로 이중 75%인 1700만톤이 강원도, 충청북도의 석탄탄광업체 약 163개소에서 생산되는 것으로 되어 있다. 「4」 이러한 광산지역에서 석탄의 채굴작업시 발생하는 산성광내폐수 및 저탄장으로 부터 배출되는 막대한 양의 석탄폐수는 주변도시의 생활하수와 더불어 하천의 수질을 악화시키고 있다. 따라서 환경오염을 방지하고 자연환경을 보호하기 위해서는 이에 대한 적절한 처리가 요망되고 있다.

pH가 낮고 총고형물 농도가 높은 산성광내폐수의 경우 현재 우리나라의 일부 광산지역에서는 응집제 첨가에 의한 처리법을 사용하고 있으나 영세성 때문에 연속적으로 가동하지 않고 있으며 대부분의 탄광에서는 처리하지 않고 그대로 방류

하고 있다.

따라서 본고에서는 이들 석탄폐수를 효율적으로 관리하여 수질오염을 방지하기 위하여 그 특성과 처리방법등을 고찰하고 국내의 지역적 특성에 맞는 처리공정을 살펴 보고자 한다.

II. 탄광의 작업 공정

II-1 석탄광업시설의 정의

환경보전법 제2조 제12호 시행규칙 제3조 별표 2에 의하면 석탄광업시설로서 생산능력이 월 8000톤 이상인 채탄시설을 배출시설로 규정하고 있으며 무연탄 광업시설, 갈탄 광업시설, 기타 석탄관련 광업시설이 포함된다. 여기서 기타 석탄관련 광업시설이란 무연탄과 갈탄을 제외한 토탄, 이탄, 역청탄, 반역청탄, 석묵, 미분탄등을 채굴 제조하는 시설을 말한다. 「2,17」

II-2 채탄 및 선탄공정

석탄광업시설의 공정은 크게 채탄 및 선탄 과정으로 나뉜다. 「11,12」

1) 채탄공정(Mining Process)

지하에 매장된 석탄을 캐서 지표로 운반하기까지의 과정을 말하는 것으로 채탄방법은 여러가지가 있지만 다음과 같이 크게 두가지 형태로 대별할 수 있다.

○ 노천탄광(Surface or Strip Mining)

- 탄맥이 비교적 넓게 퍼져있고 덮여있는 토양 및 암석층의 두께가 약 3m 이내로 비교적 두껍지 않을 때 사용한다.
- power shovel과 같은 장비를 이용해 채탄작업을 한다.
- 〈그림 1〉은 노천탄광의 채굴과정을 설명해 주고 있다. 「16」

○ 지하탄광(Underground Mining)

- 탄맥을 덮고 있는 암석층의 두께가 매우 두꺼울 때 사용한다.
- 지표로부터 터널과 같은 갱도를 설치하여 탄맥을 따라 채탄작업을 실시한다.
- 국내탄광은 험준한 산악지역에 위치한 까닭에 대부분 지하탄광법을 사용하고 있다.

2) 선탄공정(Coal-Preparation Process)

지표로 운반된 원탄에서 불순물을 제거하고 석탄입자를 크기별로 분리하는 공정으로서 건식법과 습식법이 있으나 원탄자체의 수분때문에 물을 사용하는 습식방법을 사용하고 있다. 이러한 선탄공정도는 crushing, screening, classifying, froth flotation과 같은 일련의 process로 구성되어 있으며 공정도는 〈그림 2〉와 같다. 「4,5」

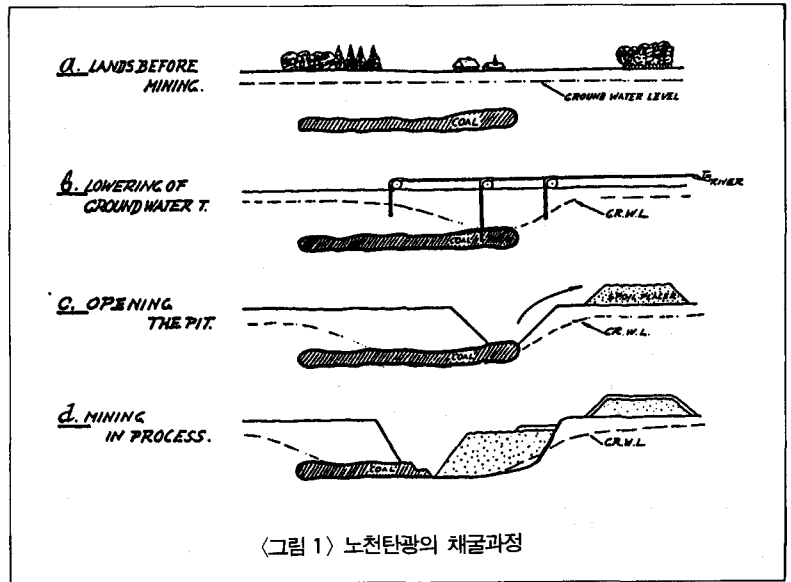
III. 폐수의 배출원 및 특성

탄광에서 발생하는 폐수는 석탄

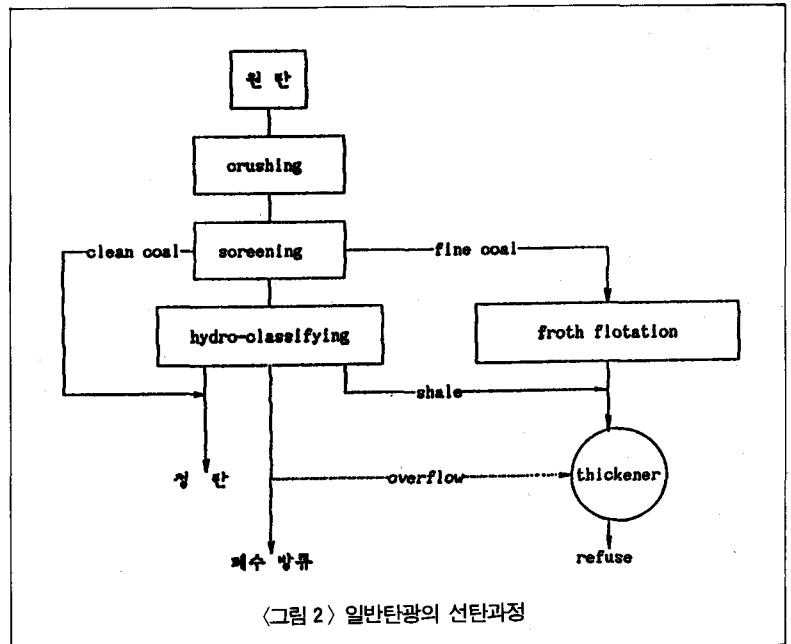
채굴시 발생하는 산성 갱내폐수(Acid Mine-Drainage Wastes)와 선탄 과정에서 발생하는 선탄폐수

〈표 1〉 우리나라의 무연탄 생산량(단위 : 1000톤)

년 도	1980	81	82	83	84	85	86	87	88
생산량	21,338	21,096	20,230	18,945	20,637	21,907	23,211	23,042	22,679



〈그림 1〉 노천탄광의 채굴과정



〈그림 2〉 일반탄광의 선탄과정

〈표 2〉 Pennsylvania 하천수의 분석결과

Mean discharge, ft ³ /sec	Temperature, °F	Color	PH	Aluminum	Iron	Manganese	Calcium	Magnesium	Combined sodium and potassium	Bicarbonate	Sulfate	Dissolved solids	Hardness as CaCO ₃		Total acidity as H ₂ SO ₄
													Total	Noncarbonate	
40		2	3.70	77	0.83	15	139	94	16	0	1170	1750	1200	1200	580
73.2	48	1	3.60							0	798		600	660	322
59.3	58	2	3.30	37	0.57	7.2	117	74	13	0	829	1230	844	844	308
54.2	52	1	3.70							0	980		900	900	384
25.1	66	1	3.30							0	996		716	716	536
29.2	67	1	3.25	37	1.2	7.2	1000	67	3.0	0	744	1120	779	779	312
41.7	67	4	3.20		0.85					0	1140		1010	1010	
32.4	62	2	2.60							0	1300		587	587	690
43.6	62	1	3.50	34	0.85	5.7	144	86	6.6	0	899	1430	931	931	248
30.4	60	7	3.30							0	1090		650	650	496
22.3	68	0	3.15	64	1.6	8.2	167	107	1.2	0	1190	1690	1270	1270	436

* All results are given in parts per million unless otherwise specified.

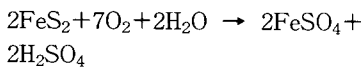
Panther Creek at Tamaqua, pa.

(Coal-Preparation Wastes)로 분리해서 생각할 수 있다. 이들 두 폐수의 특성과 오염효과는 서로 다르지만 석탄생산과 관련된 것이므로 동시에 취급하는 것이 상례이다.

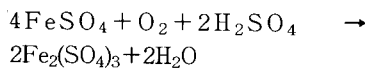
III-1 산성 갱내폐수

1) 배출원

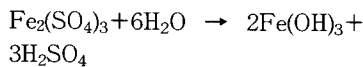
산성화된 갱내폐수는 우수 또는 지하수가 탄광을 통과한 뒤 유출될 때 황철광(Pyrite: FeS₂)등이 공기나 물 또는 미생물에 의해 산화되기 때문에 발생한다. 석탄중에 함유된 황화물(Sulfide)이 공기 및 수분에 의해 황산염과 황산으로 산화되는 과정은 아래와 같다.「7,14」



이때 생성된 황산은 Mn, Al, Ca등의 각종 mineral을 용출시키며 황산염은 황산 및 대기중의 산소와 반응하여 황산제1철에서 황산제2철로 다시 산화하게 된다(Yellow Boy 현상).



황산이 다량의 지하수 또는 하천수에 의해 희석됨에 따라 황산제2철은 다음과 같이 가수분해되어 수산화제2철로 침전된다.



이와같은 화학적 변화 이외에도 Thio-Bacillus나 Thio-Oxidants와 같이 황화물을 산화시키는 미생물에 의해서도 산화작용이 일어날 수 있다. 따라서 지하의 유황화합물은 화학적 및 생물학적인 산화작용에 의해 황산으로 되어 탄광의 갱내수가 산성폐수로 되는 것이다.

2) 특성

〈표 2〉는 산성갱내폐수가 방류되는 미국 Pennsylvania의 하천수를 분

석한 결과인데 pH는 모두 4.0 이하이고 경도 및 Acidity가 높은 것을 알 수 있다.

〈표 3〉 및 〈표 4〉는 각각 우리나라 강릉탄전의 갱내폐수와 삼척 및 태백 지역의 탄광폐수를 분석한 결과이다. 강릉탄전의 갱내폐수는 pH 4.0이하임을 알 수 있고 삼척 및 태백 탄광폐수는 BOD에 비해 COD 값이 매우 높은 것을 보여주고 있는데 이는 탄폐수에 있는 유기물 때문이 아니라 미분탄의 산화에 의해 소비된 산소량 때문인 것으로 사료된다.

그러므로 위의 몇가지 자료 및 문헌에 의하여 갱내폐수의 일반적인 특성을 다음과 같이 기술할 수 있다.「6,11」

○ pH가 낮다.

○ Fe, Al, Mn, Mg 등의 각종 mineral을 함유하고 있으므로 비탄산 경도가 매우 높다.

〈표 3〉 강릉탄전 갱내폐수의 pH

탄광	울곡	영동	영진	동국	홍일	신일	강릉단지		
							1	2	3
pH	2.99	2.50	2.76	4.00	3.87	3.94	3.15	2.98	3.69

○ 무기성 환원 물질을 다량 함유하므로 COD 값이 BOD 값보다 수배-수천배 높게 나타난다.

- 산도(acidity)가 높다.
- 용존 고형물의 농도가 크다.
- 중금속 이온을 수반하므로 독성을 갖고 있다.

이러한 갯내폐수의 양과 질은 수문, 지질, 지형 및 탄광에 따라 매우 다르고 우리나라의 경우 석탄 채굴시 석탄 톤당 2.6-4.0m³의 갯내수가 배출되고 있다.

(표 4) 삼척 및 태백 탄광폐수의 분석결과 unit: mg/l (단 pH 및 color는 제외)

분석항목	삼척			태백				합계	강원
	대방	삼마	경동	장원	어룡	한성	항지		
pH	2.6 6.1	6.5 7.1	7.0 7.1	6.6	6.7	7.4	6.7	7.2	6.0 7.6
SS	167 199	159 155	124 15	1,208	291	179	129	197	328.5
T-COD	95 60	100 26	12 18	648	268	104	26	60	308
S-COD	8.0 2.0	5.0 2.0	4.0 8.0	10	34	34	4	5.0	4.0
T-BOD	2.1	4.6	5.8	3.5	2.7	4.3	3.5	7.1	6.7
S-BOD	0.3	4.1	2.4	1.0	1.0	2.5	1.0	2.5	0.7
Alkalinity	157.5	192.5	112.5	75	87.5	87.5	27.5	-	132.5
Acidity	192.5	42.5	17.5	37.5	2.5	17.5	62.5	-	17.5
Total Iron	12	28	0.2	4	3.4	8	38	-	-
Color	Yellow	black + Yellow	black	black	black	black + Yellow	Yellow	black	black
	Yellow	Yellow	-					black	black

III-2 선탄폐수

선탄공정에서는 1톤의 석탄을 처리하는데 보통 2.5-6.0m³의 용수(갯내수, 하천수등)가 사용되는데 선별시설의 세척 과정에서 대량의

폐수가 방출된다. 이러한 선탄폐수의 특징은 극 미분탄이나 점토 등에 미립 혹은 콜로이드상의 현탁물이 많고 그외 calcite, gypsum, kaolin, pyrite 등의 mineral이 섞여 있다.

III-3 탄광 폐수의 환경 영향

탄광폐수는 광산지역 주변 하천을 흑화 또는 황갈화시켜 미관상 보기 싫게 하며 또한 pH가 낮아 수생동식물을 죽게한다. 뿐만 아니라

(표 5) 하천 및 호소의 수질 기준

區分	等級	利用目的別 適用對象	基準					
			水素이온濃度 (PH)	生物化學的 酸素要求量 (BOD) (mg/l)	化學的 酸素要求量 (COD) (mg/l)	浮遊物質量 (SS) (mg/l)	溶存酸素量 (DO) (mg/l)	大腸菌數 (MPN/100 ml)
生活環境	I	上水源水 1級 自然環境保全	6.5-8.5	1 이하	1 이하	25이하 (1)	7.5이상	50이하
	II	上水源水 2級 水産用水 1級 水泳用水	6.5-8.5	3 이하	3 이하	25이하 (5)	5 이상	1,000이하
	III	上水源水 3級 水産用水 2級 工業用水 1級	6.5-7.5	6 이하	6 이하	25이하 (15)	5 이상	5,000이하
	IV	工業用水 2級 農業用水	6.0-8.5	8 이하	8 이하	100이하 (15)	2 이상	-
	V	工業用水 3級 生活環境保全	6.0-8.5	10 이하	10 이하	쓰레기등이 떠 있지아나할것.	2 이상	-
사람의 건강 보호	전수역	카드뮴(Cd) : 0.01mg/l이하, 비소(As) : 0.05mg/l이하, 시안(CN) : 검출되어서는 안됨 수은(Hg) : 검출되어서는 안됨. 유기인 : 검출되어서는 안됨. 연(Pb) : 0.1mg/l 이하 6가크롬(Cr +6) : 0.05mg/l이하. 폴리크로리네이티드비페닐(PCB) : 검출되어서는 안됨						

- (주) 1. 호소의 경우 생물화학적산소요구량 기준은 적용하지 아니하고, 부유물질량 ()내의 기준을 적용한다.
 2. 수산용수 1급: 빈부수성수역의 수산생물용
 3. 수산용수 2급: 중부수성수역의 수산생물용
 4. 자연환경보전: 자연경관등의 환경보전
 5. 상수원수 1급: 여과등에 의한 간이정수 처리후 사용
 6. 상수원수 2급: 침수여과등에 의한 일반적 정수처리후 사용
 7. 상수원수 3급: 전처리등을 거친 고도의 정수처리후 사용
 8. 공업용수 1급: 침전등에 의한 통상의 정수처리후 사용
 9. 공업용수 2급: 약품처리등 고도의 정수처리후 사용
 10. 공업용수 3급: 특수한 정수처리후 사용
 11. 생활환경보전: 국민의 일상생활에 불편감을 주지 아니할 정도

alkalinity를 감소시키고 경도를 증가시키므로써 탄광폐수가 배출되는 하천수를 가정 및 산업 용수원으로 이용할 경우 처리비용을 증대 시키며 부식작용에 의해 댐 또는 다리와 같은 하천내 구조물과 선박 등의 수명을 단축시키기도 한다. 또한 상기와 같은 원인으로 오염된 하천 및 호소에서는 낚시, 수영 및 뱃놀이등의 레저 활동이 곤란하게 된다.「10,11」

IV. 처리목표 및 방류수 수질기준

환경보존법의 하천수질기준(시행규칙 제7조)및 폐수 배출 기준(시행규칙 제12조)은 <표 5> 및 <표 6>과 같다.「3」

우리나라의 석탄폐수는 <표 3>, <표 4>를 고려할 때 그 처리 대상 오염물을 pH, SS, COD로 압축시킬 수 있으나 환경청에서 제시하고 있

는 검사 항목은 pH 및 SS로 되어 있다.「1」

V. 폐수의 감량화 기법

산성갱내폐수로 인한 환경영향을 최소한으로 하기 위해서는 발생 폐수를 처리하여 방류해야 할 뿐만 아니라 폐수의 발생을 원천적으로 봉쇄하거나 감소시킬 수 있어야 한다. 폐수의 발생량을 줄이는 방법

<표 6> 폐수의 배출 허용기준

項目 地域	水素 이온 濃度	生物 化學 的酸 素要 求量 (m/l)	化學 的酸 素要 求量 (l)	浮遊 物質 量 (mg/ l)	노질 출 含有 鐵油 類 (mg/ l)	推 出 動植 物油 脂類 (mg/ l)	페놀 함유 량(mg /l)	시안 함유 량 (mg/ l)	크롬 함유 량 (mg/ l)	아연 함유 량 (mg/ l)	동합 유량 (mg/ l)	카드 뮴함 유량 (mg/ l)	수은 함유 량 (mg/ l)	유기 인함 유량 (mg/ l)	비소 함유 량 (mg/ l)	연 함유 량 (mg/ l)	6가 크롬 함유 량 (mg/ l)	용해 성망 간함 유량 (mg/ l)	불소 함유 량 (mg/ l)	PCB 함유 량 (mg/ l)	大腸 菌 菌數 (개/ mg)	色度 (°C)	溫度 (°C)
淸淨	5.8 -8.6	50 이하	50 이하	50 이하	1 이하	5 이하	1 이하	0.2 이하	0.5 이하	1 이하	0.5 이하	0.02 이하	불 검출	0.2 이하	0.1 이하	0.2 이하	0.1 이하	2 이하	3 이하	불 검출	100 이하	200 이하	40 이하
가	5.8 -8.6	100 이하	100 이하	100 이하	5 이하	30 이하	5 이하	1 이하	2 이하	5 이하	3 이하	0.1 이하	0.005 이하	1 이하	0.5 이하	1 이하	0.5 이하	10 이하	15 이하	0.003 이하	3,000 이하	300 이하	40 이하
나	5.8 -8.6	150 이하	150 이하	150 이하	5 이하	30 이하	5 이하	1 이하	2 이하	5 이하	3 이하	0.1 이하	0.005 이하	1 이하	0.5 이하	1 이하	0.5 이하	10 이하	15 이하	0.003 이하	3,000 이하	400 이하	40 이하
다	5.8 -8.6	200 이하	200 이하	200 이하	5 이하	30 이하	5 이하	1 이하	2 이하	5 이하	3 이하	0.1 이하	0.005 이하	1 이하	0.5 이하	1 이하	0.5 이하	10 이하	15 이하	0.003 이하	3,000 이하	500 이하	40 이하
特例	5.0 -9.0	300 이하	300 이하	300 이하	10 이하	50 이하	5 이하	1 이하	5 이하	10 이하	5 이하	0.1 이하	0.005 이하	2 이하	1 이하	2 이하	0.5 이하	20 이하	30 이하	0.003 이하	—	600 이하	40 이하

- (주) 1. 배출 허용기준항목중 배출시설별로 전혀 배출되지 아니하거나 항상 기준이내로 배출된다고 인정되는 항목 또는 한 항목에 대한 검사로 다른 항목에 대한 검사치를 예측할 수 있는 경우 그 다른 항목에 대하여는 환경청장이 지정하는 바에 따라 그 항목의 검사를 면제할 수 있다.
 2. 색도항목의 배출 허용기준은 별표 2의 4폐수 배출시설중 (카) 섬유 제조시설에 한하여 적용한다.
 3. 제51조의 규정에 의한 방류수 수질기준을 적용받는 폐수 또는 하수 종말처리장으로 연결되는 처리구역안에서 생물화학적 산소요구량, 화학적 산소요구량 및 부유물질량의 배출허용기준등은 처리장 설치사업 시행자의 요청에 의하여 폐수 또는 하수 종말처리장 설계기준등에 따라 환경청장이 별도로 정한다.
 4. 이 표에서 "청정", "가", "나", "다", "특례" 지역은 각각 다음의 지역을 말한다.

행정지역	수질을 절대적으로 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경청장이 지정하는 지역
가 지역	환경기준(수질) I 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경청장이 지정하는 지역
나 지역	환경기준(수질) II 등급 또는 III 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경청장이 지정하는 지역
다 지역	환경기준(수질) IV 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경청장이 지정하는 지역
특례지역	환경기준(수질) V 등급 정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경청장이 지정하는 지역

은 탄광에 따라 매우 다를 수 있지만 문헌상에 보고된 일반적인 방법은 아래와 같다.「13,14」

1) 물의 갱내 유입 방지

가장 효과적인 방법은 물과 산형성 물질의 접촉을 최소화시키는 것이다. 탄광근처의 지표유출수는 적당한 배수로 또는 방벽등을 이용하여 흐름을 다른 곳으로 유도하고

유입된 물은 즉시 갱외로 방출한다. 또한 지하탄광의 경우 갱의 상부를 덮고 있는 토양 구조의 균열, 틈새기, 구멍등을 밀봉시킴으로써 유입수량을 최소화 할 수 있다.

2) 탄광 폐수의 저류

강우량과 증발량이 대등한 기후 조건에서 사용할 수 있는 방법으로 탄광에서 내보낸 배출수를 하천에 방류하지 않고 연못에 저류하여 증발 시키는 방법을 말한다. 장기간 동안 저류시키면 황산제1철은 산화한 다음 수산화 제2철로 되어 침전된다.

3) 하천 유량에의 비례 방출

균등조를 두어 하천 유량에 비례해서 산성갱내폐수를 방류시키면 하류지역의 영향을 최소화 시킬 수 있다.

4) Coal Washing 과정에서의 재사용

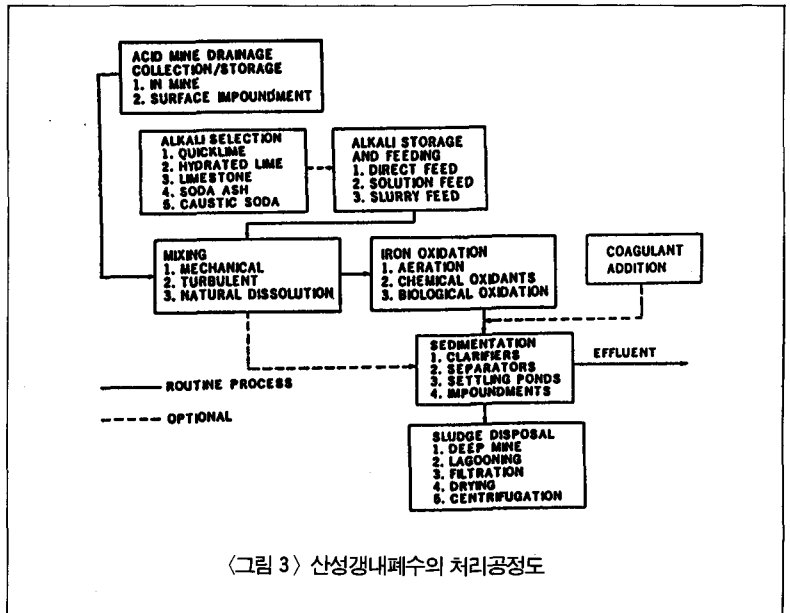
산성 탄광 배수를 선탄공정의 용수로 사용하는 재사용법이다. pH3, Acidity 4,340mg/l as CaCO3 그리고 551 mg/l 의 Fe를 함유한 탄광배수를 선탄공정에 사용해서 pH 6.7-7.1, Fe가 0-1 mg/l 인 유출수를 얻은 경우도 있다.

5) 기타

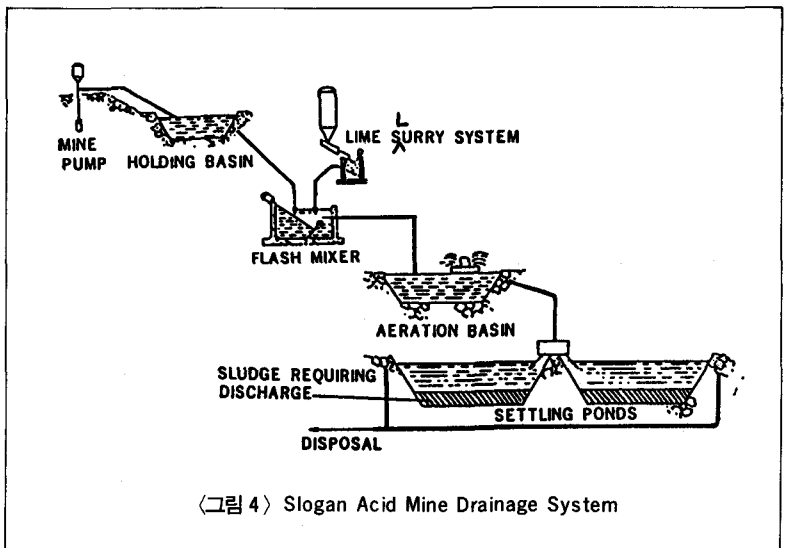
VI. 탄광 폐수의 일반적 처리 방법

VI-1 산성갱내폐수의 처리

산성갱내폐수의 제거 대상 오염물은 주로 산도(acidity) 및 부유물질로서 일반적으로 사용되는 처리 공정 및 대안은 <그림 3>과 같다. 대부분은 Alkali 중화제를 이용한 중화법을 사용하는데 <그림 4>는 미국 Slogan System Engineering社에서 개발하여 주로 이용되는 방법을 보여 주고 있다. 이 방법에서는 석회를 중화제로 사용하고 있다. 「5, 10」

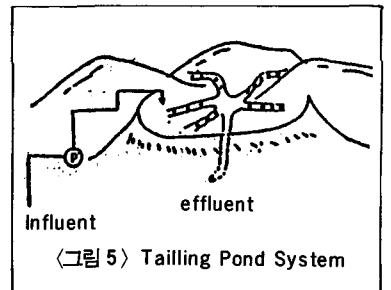


<그림 3> 산성갱내폐수의 처리공정도



<그림 4> Slogan Acid Mine Drainage System

국내 광산과 같이 대체로 산악지대에 위치하고 있는 이유로 일반적인 폐수처리장의 위치 선정이 곤란한 지역에서는 <그림 5>와 같은 Tailing Pond 법이 적합하리라 사료된다. Tailing Pond법은 산성상태의 석탄폐수를 1차 중화하고 계곡을 막은 댐에 폐수를 유입시켜 고액 분리를 한다음 상정수를 방류하는 방법이다.



<그림 5> Tailing Pond System

<다음호에 계속>