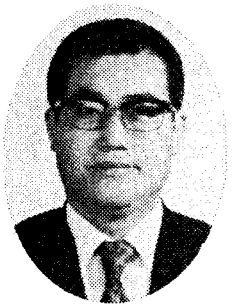
<研究論文>



石炭礦의 酸性坑內排水 處理·利用·制御에 關한 硏究

—韓國型 特殊坑內排水 淨化裝置 試作品 現地適用實驗—

Study on the Treatment, Utilization and Control of the Acid Mine Drainage for Colliery

—An on-site test on the Applicability of a Korean-type Prototype for Mine Drainage Purification—

李 春 澤*
Lee, Choon Taek

Abstract

Mine drainage from coal mines is mostly acidic, polluted and/or contaminated, even if its quantity has increased substantially during recent days. This causes two kinds of problems arising at mining districts; one is the environmental disruption and the other is insuficient water supply for living, employee's bathing and industrial purposes.

In order to mitigate the aforementioned problems, a specific equipment of Korea type for mine drainage purification has been developed and its prototype manufactured, followed by its applicability tests implemented at mine site. The results of the tests indicates that the new equipment developed is much lower than and economical compared to, other existing neutralization facilities at home and abroad in capital investment at installation stage, the consumption of neutralizing chemicals at operation stage and the requirements of installation site.

Whangji area where the prototype water treatment equipment is installed has been sustaining a short supply of usable water, especially in dry seasons and supplementing about $40m^3$ of water brought from a location farther than 4km in distance to meet water requirements. The prototype water treatment equipment is however considered capable of providing compressor cooling water in sufficient amount from winter season in the future.

*鑛業技術士(採鑛), 韓國動力資源硏究所 鑛山保安技術硏究室 責任硏究員

Ⅰ. 序 論

우리 나라 大部分의 石炭礦들이 점점 地下깊이 移行되고 있어, 여러가지 問題點들을 일으키고 있다. 그 中에서도 問題되는 것은, 坑內深部로부터 坑外로 막대한 水量을 排水하게 되는데, 거의가 酸性化된 廢水로서 排出함인 것이다. 이들이 그대로 放流되어 隣近河川의 물을 汚濁 또는 汚染시키는 것은 물론이지만, 地表水의 枯渴때문에 炭礦村에서의 물 事情은, 特히 겨울인 경우에 約 6個月 사이에 물 太不足 事態의 深刻한 程度를 넘어 곧바로 社會的 問題로까지 대두시키고 있는 實情인 것이다. 이와 같이 엄청난 水量을 放流하면서도 물 事情이 나빠서 苦悶한다는 것은 「아이러니」가 아닐 수가 없다. 따라서 酸性化된 廢水는 淨水處理하여 再循環 利用되어야 하며, 잘 制御되어 깨끗한 물로서 放流하여야만 하는 것이다. 그러나 아직껏 이렇다할만한 坑內水의 處理裝置가 없어, 또 있다고 하여도 旣存의 典型的인 中和處理 System만이 있을 뿐이고, 이들은 대개 初期 投資가 크고, 附帶施設의 收用面積을 넓게 차지하고, 管理經費가 많이 들기 때문에, 모든 零細炭礦에서는 處理施設의 設置를 忌避하여 왔던 것도 事實이었다. 韓國動力資源硏究所에서는 이에 着案하여 動力資源部의 硏究支援을 받아, 드디어 韓國型 特殊處理施設을 考案 設計하고, 本 裝置의 System 特許를 획득하는 한편 國內 適用 可能한 排水處理裝置를 開發하는데 成功하였으며, 이의 實驗을 爲해 太白市 黃池地區 裕昌物產(株) 黃池炭礦을 Model로 選定, 本 設計에 依한 試作品을 製作, 設置하여 現地에서 適用實驗한 結果 成功事例를 여기에 도움이 되도록 報告한다.

Ⅱ. 石炭礦의 酸性化 坑內排水

Ⅱ-1. 原 因

硫黃 또는 黃鐵鑛의 空氣中 暴露로 空氣中 酸素 및 물속의 溶存酸素 等의 接觸에 依한 酸化作用

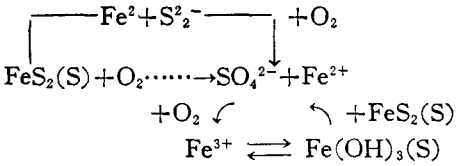


Fig 1. Simple Pyrite oxidation cycle

$2FeS_2+7O_2+2H_2O \rightleftarrows 4H^+ + 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-}$

$2Fe_2^{2+} + 1/2O_2 + 2H^+ \rightleftarrows 2Fe^{3+} + H_2O$

$Fe^{3+} + 3H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_3 + 3H^+$

以外 酸化作用에 있어서 重要한 것은 Bacteria에 依한 Thiobacillus ferro oxidans(硫黃性 細菌에 依한 鐵分의 酸化物質)이다.

I 段 階

1. $FeS_2+7/2O_2+H_2O \rightarrow Fe^{2+}+2SO_4^{2-}+2H^+$ and Direct oxidation of pyrite by T.F.O
2. $Fe^{2+}+5/2H_2O+1/4O_2 \rightarrow Fe(OH)_3(S)+2H^+$ at pH above 4.0

Ⅱ 段 階

1. $FeS_2+7/2O_2+H_2O \rightarrow Fe^{2+}+2SO_4^{2-}+2H^+$ and Direct oxidation of pyrite by T.F.O
2. $Fe^{2+}+5/2H_2O+1/4O_2 \rightarrow Fe(OH)_3(S)+2H^+$ T.F.O at pH 2.5~4.0

Ⅲ 段 階

3. $Fe^{2+}+1/2O_2+H^+ \rightarrow Fe^{3+}+1/2H_2O$ T.F.O
4. $FeS_2+14Fe^{3+}+8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+}+2SO_4^{2-}+16H^+$ Below pH2.5

Ⅱ-Ⅱ. 現 狀

酸性坑內排水의 放流로 河川에서는

1. 赤化 또는 黃褐化現象(Yellowboy化)로 河川바닥이 보기 싫게 되고 水生動植物이 죽게 된다(Fe^{2+}는 河川속의 酸素를 消費하고 F^{3+}과 $Fe(OH)_3(S)$들은 가라 앉거나 Coating 됨).
2. 重金屬이온을 隨伴해서 毒性을 갖게 된다(水生植物의 複合體가 없어지고 물고기가 滅種하고 Algae 만이 生存함).
3. 石炭礦의 汚染狀態

(1) pH, Fe, SO_4 成分으로 본 酸性化 水質分析

Table 1. List of water quality for Colliery's AMD in Coal Field

區分	石炭礦別	pH 値	Fe	SO^4	備考
江陵炭田	율곡	2.99	400	1,875	82.4.7~7.4
	강능3지구	3.69	—	—	수질분석
	영동	2.50	200	1,975	
	영진	2.70	400	1,700	
	동국	4.00	24	325	
	강능2지구	2.98	36	925	
	흥일	3.87	14	425	
	신일	3.94	82	1,300	
	강능1지구	3.15	5.75	575	
	유봉	4.69	—	—	
	안인	5.44	—	—	
	중원	4.80	26	105	
	강능7지구	5.44	—	—	
	강능11지구	4.36	—	—	
旌善丹陽炭田	정동	3.41	100	2,400	83.5.26~9.27
	세원	3.58	10.5	1,050	. . . .
	경일	6.40	0.7	150	
	세방	3.60	45.0	900	
	삼탄	6.33	1.25	250	
	동원	4.08	5.55	288	
	묵산	4.08	40.0	625	
	자미원	5.58	4.25	300	
	함백	6.67	0.43	80	
	한일	6.58	3.25	175	
	옥동	6.76	0.08	140	
	우전	6.95	0.50	225	
	나전	6.86	0.13	85	
	정선	7.08	0.05	105	
	명지	6.56	0.33	175	
	용배	6.58	0.03	50	
	영월	6.68	2.50	650	
	보발	6.95	0.42	175	
	대덕	7.06	9.65	105	
	단양	3.77	8.25	750	
	봉양	3.45	9.57	625	
太白聞慶炭田	어룡	7.04	0.14	75	84.7.2~7.16
	우성	6.51	10.5	650	. . ..
	태영	4.11	17.5	2,000	
	장원	6.18	4.5	1,100	
	한성	6.52	3.0	450	
	황지	5.87	70	1,500	
	동해	2.76	60	1,300	
	함태	6.9	0.4	250	
	강원	7.05	0.08	375	
	장성	7.3	2.5	450	
聞慶炭田	한보	6.64	0.69	—	
	은성	7.05	0.07	550	
	봉명	7.26	—	150	
	삼창	4.3	1.00	300	
	대성	7.45	0.16	125	
	대정	3.15	35	600	

(2) 酸性河川

○江陵炭田：郡仙江(pH 5.75), 正東津河川(pH 3.79)

○旌善·丹陽：세원하천(pH 3.37), 동원하천(pH 4.03)
자미원하천(pH 4.22),
봉양하천(pH 4.68)

○太白·聞慶：어룡하천(pH 3.56), 장원하천 pH 3.85)
황지·한성하천(pH 4.73), 황지문곡하천(pH 4.50)
동해하천(pH 2.34), 함태하천(pH 3.52)
황지전체(pH 3.80), 장성하천(pH 4.70)

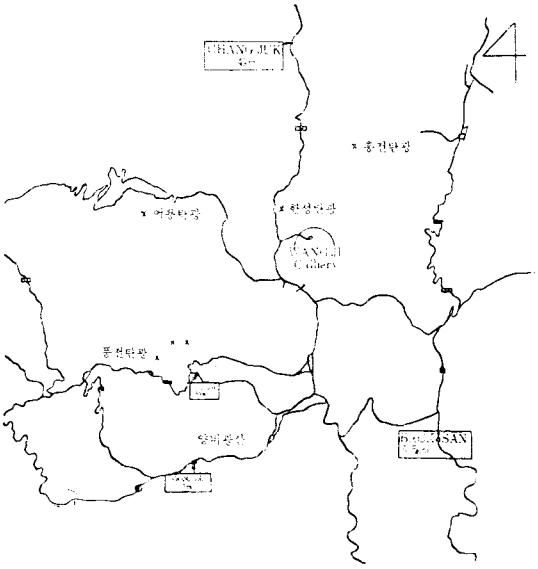


Fig 2. Water transportation route of Hwang Ji Colliery in dry season(Winter)

以上 各炭礦의 경우 山間奧地에 位置하고 대개 南漢江과 洛東江 水系 最上流에 그 發源點을 두고 있기 때문에 겨울철 越多期가 長期化(約 6個月)되면 그나마도 조금씩 졸졸 겨우 흐르고 있던 모든 溪谷의 地表水는 解多할 때까지 凍結한다. 따라서 工業用水 特히 壓縮機의 冷却水, 從業員 沐浴水 및 作業服 等 세탁수의 利用水 太不足 現象을 超來함으로써 이의 緊急 補充水를 爲해 數百里 밖으로부터 不足水를 톤당(m^3당) 約 2,600원이나 負擔하면서 絕對 地上命令으로 運搬해다가 解決하여야 하는 利用水에 對

한 苦衷이 매 겨울마다 反復되고 있어 間接的인 石炭原價의 上昇要因이 되고 있다. 各 炭礦坑內로부터는 엄청난 坑內水를 無制限 河川으로 放流하면서도 汚染된 물이므로 빤히 보고만 있을 뿐 利用을 할 수가 없는 것이다.

Ⅲ. 韓國型 特殊坑內排水의 淨化處理裝置開發

Ⅲ-Ⅰ. 原 理

石炭礦 坑內排水의 酸性은 鐵黃化物(Iron sulfide)인 黃化鐵鑛(Pyrite : FeS_2)이 酸素와 물에 暴露될 때 形成된다는 것은 前述한 바와 같으며 黃化鐵鑛은 묽은 黃酸溶液을 만들기 위해 反復酸化하게 된다. 그리고 黃酸溶液이 黃化鐵鑛 周圍의 여러가지 岩石層을 지날 때 Fe, Al, Mn, Ca, Mg, Na 等과 같은 金屬을 溶解하며 As, Ce, Be, Ni, Zn 및 其他 어떤 少量의 金屬들도 溶解可能하게 한다. 黃化鐵鑛은 石炭脈에 接近해서도 自然히 많이 存在 發生하는 데 石炭의 採掘은 물과 酸素에 對해 廣大한 量의 黃化鐵鑛의 物質을 露出케 하고 漸次的으로 自然的인 酸化作用過程을 加速시키며, 酸性化된 坑內排水의 엄청난 量을 排出하는 結果를 超來한다. 特히 石炭礦에서 放流하는 原水에 Fe, Al, Mn 等은 酸性의 溶解物들인바 이 물이 中和되면 이들 이온들은 沈澱하게 된다. 그러나 말처럼 그렇게 간단한 것은 아니지만 여러 因子들이 그 沈澱을 複雜하게 만드는 理由가 된다. Fe는 AMD 中에서 2가지 形態로 存在하게 된다. 즉 第1鐵(酸化되지 않은 것)과 第2鐵(酸化된 것)인 것이다.

第2鐵의 形態(Fe^{3+})는 第2鐵의 水酸物 혹은 더욱 複雜한 酸—水酸化物로 構成하고 pH4 近處에서 沈澱을 始作하게 된다. 이와 같은 現象이 石炭礦地域에서 河川 밑바닥에 보통 Yellow-boy로 되는 것을 우리들은 흔히 볼 수 있는 現象인 것이다. 第1鐵의 形態(Fe^{2+})는 約 pH 8 近處에서 沈澱을 始作하고 푸른 綠色 水酸化物(Blue-green hydroxide)을 形成한다. 事實上 AMD 中에 있는 重要한 第1鐵의 鐵分 濃度에 對한 쉬운 實驗은 排水中에 Lime을 撒布하는 것이고, 만약 綠色 빛같이 일어나면 물 속에 Lime의 溶解로서 發色케 되는 것이므로 第1鐵의 鐵分이 現存하는 것이 된다. 높은 pH의 값에서 第1鐵의 沈澱을 發生시키는 것 보다 오히려 第2鐵의 狀態에서 第1鐵의 鐵分을 酸化시키는 것이 普通 利益인 것으로 알려져 있다. 이러한 酸化作用은 pH7 以上으로 增加시키므로서 그리고 酸素를 供給하기 爲하여 물에 空氣를 誘算시키므로서 酸化作用이 完成되어 질 수 있다. 第1鐵의 鐵分酸化作用 比率은 强力하게 pH 質에 左右되며 pH 6 以下에서는 極度로 천천히 進行된다.

第2鐵의 鐵分과 Al 等은 양쪽 다 pH5 範圍에서 沈降을 始作한다. 極度로 높은 pH의 값(pH10 以上)일 때 Al은 再次 溶解되는 傾向이 있다. pH8 以上은 規定이 要求하는 放流水 水準에 到達하기 爲한 Mn 沈澱을 爲해 必要하다. 結局 凝集物들은 最終的으로 모두 安定한다. 本裝置의 處理原理는 되도록이면 大氣中 酸素를 많이 利用토록 하고 無動力으로 排水用 Pump의 最終配線 尖端에 이어 裝置하는 水平線上 直

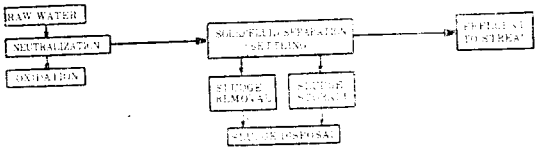


Fig 3. Standard AMD(Acid Mine Drainage) Treatment Process

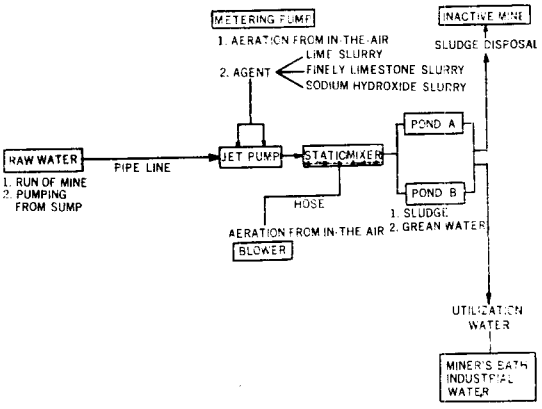


Fig 4. Flowsheet of In-Line System

列式 處理施設이고 少量의 中和試藥을 使用하도록 考案된 것이다.

Ⅲ-Ⅱ. 裝置構成

本 裝置는 Fig 6, 7, 8과 같이 3 個部分으로 構成되는 (1) Jet pump, (2) Static mixer(or Herix chamber), (3) Pound 等이다. Jet pump 構成材質은 鐵製 金型製作으로 값싸게 할 수 있으나 酸性을 考慮 Polyvinyle Chloride(PVC)로 製作使用하면 값은 좀 비싸지만 耐酸性으로서 壽命이 길어진다. Static mixer의 構成材質도

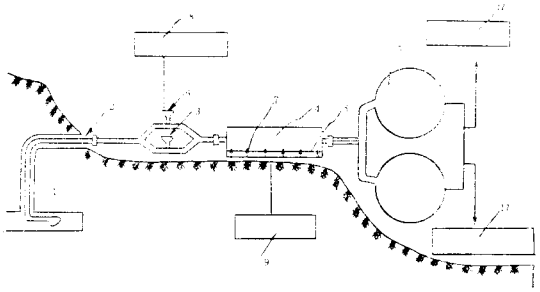


Fig 5. Design of AMD treatment system

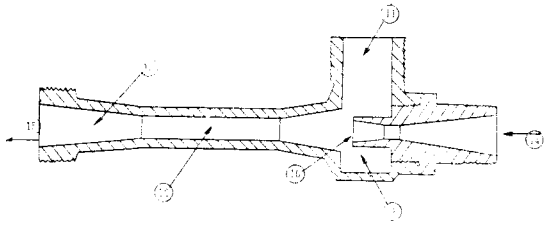


Fig 6. Section of Jet pump

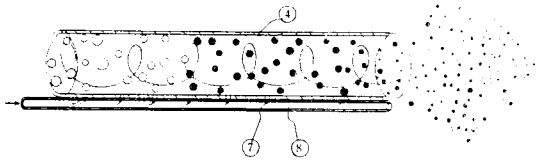


Fig 7. Section of Static Mixer

같은 理由로 Fiberglass로 製作 使用하는 것이 또한 바람직하다. Jet pump에는 Fig 6과 같이 Suction에서 大氣中 酸素를 吸入시켜 Aeration 中和하는 것이 基本裝置로 된 것이다. 本 Suction을 通해 試藥室에서 中和劑 試藥을 少量 添加 吸入토록 하여 中和作用을 加速化시키는 것이 特徵이다.

Static mixer에는 Fig 7과 같이 中央에 Pipe를 連結 Pipe에 氣孔을 만들어 壓縮機室에서 第2段階로 大氣中 酸素를 强制 供給 吸入시키도록 하여 Aeration 中和를 한번 더 시켜 混合作用을 再促進하는 構成이 둘째 特徵인 것이다.

그리고 Pond에는 Fig 8과 같이 過去에 沈澱 Sludge를 Solid fluid state에서 人爲的으로 Sludge를 일일히 걷어내 적당한 場所에 廢棄토록 한 處理方法이었으나 Sand pump로 Slurry의 狀態에서 廢棄坑道에 自動處理토록 한 것이 셋째 特徵으로 각기 構成된다.

Ⅲ-Ⅲ 作 用

石炭礦의 坑內 最終 Sump座의 旣存 排水 Pump 水壓을 利用하는 Pipe line 尖端에 이어 架設되며, 한편 坑內 各 Sump座 中間 水平坑道 中에서도 架設될 수가 있다. 이 水壓에 의거 Jet pump를 通過하는 中에 Venturi action에 따라서 坑內排水가 變速되면서 高速度 加速化되어 眞空狀態가 이루어져 Suction인 空氣吸入口를 通해 大氣中 空氣(酸素)가 吸入되어 Aeration 中和된다. 한편 吸入口를 通해 別途로 裝置되는 試藥室에서 Slurry 狀態로 하여 Metering pump로 Lime, Finely-grounded limestone, Sodium

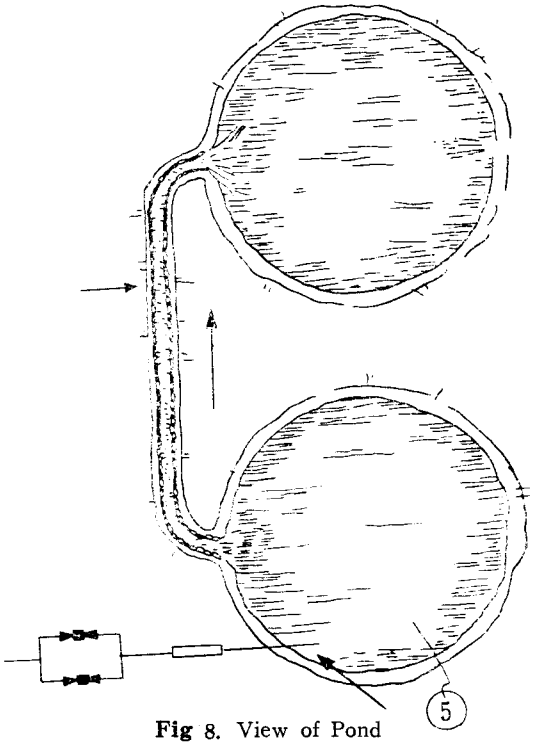


Fig 8. View of Pond

or Potasium hydroxide 等의 中和劑 試藥을 Siphone hose를 通해 投藥함으로써 中和作用을 促進시킬 수가 있다.

이와 같이 Jet pump의 Nozzle을 通過하는 순간 數秒內로 中和된 坑內排水는 擴散噴霧되면서 곧바로 Nozzle 通過 Static mixer로 옮겨 가며 本 Mixer는 內部가 Herix type로 되어 있어 强制로 회오리 攪拌되면서 밀려나가 Pond에 떨어지게 된다. 이때 더욱 Aeration되게 하기 위해서 別途로 裝置되는 壓縮機와 連結된 Hose를 通해 Mixer 內部에 附着시킨 Pipe에 氣孔으로 또다시 空氣를 强制로 불어 넣어 주어 Aeration 中和를 再次 한번 더 促進시킨다.

Pond로 떨어진 坑內排水는 完全히 中和된 狀態가 되며 水酸化物質을 急激히 沈澱시켜서 淸淨水를 上部로 넘치게 하여 放流시키게 되는데 이 물은 모두 利用水로서 再活用할 수가 있게 된다.

Pond의 크기는 旣存 中和施設의 Pond가 尨大한 데 比해 그다지 클 必要가 없으며, 다만 處理水量에 따라 깊게 할 수가 있고, 2個 程度의 Pond로 交代 使用된다. 그리고 24時間 以內로 沈澱時間이 要하는 바 Slurry 狀態에서 別途 附着되는 Sand pump에 의거 廢坑道로 보내 Sludge를 말끔히 淸掃하여 또다시 豫備 Pond로서 交代 使用할 수가 있다.

Ⅳ. 現地適用實驗結果 및 檢討

Ⅳ-1. 太白炭田 및 黃池炭礦 水質現況

(1) 太白炭田의 水質現況

Fig 9와 Table 2는 太白炭田의 調査地點과

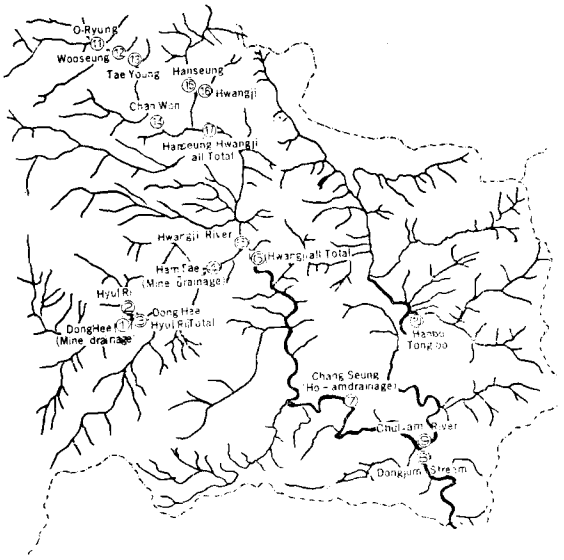


Fig 9. Hydrologic system and location of coal mines and water sampling points in Taebaek coal field

Table 2. A list of water quality for Taebaek Coal field. Unit : mg/*l*

No.	Location	pH	Fe Total	Cu	SO_4^{-2}
1	Dong Hae(Main drainage)	3.16	45	11	800
2	Hyul Ri	5.31	1.0	1.75	162.5
3	Dong Hae Hyul Ri Total	3.45	7.5	2.0	675
4	Ham Tae(Main drainage)	5.05	0.14	0.15	450
5	Hwangji River	6.49	2.75	2.25	550
6	Hwangji all Total	6.46	0.12	0.15	350
7	Chang Seung(Ho-am drainage)	7.09	0.13	0.2	375
8	Dongjum stream	7.14	0.18	0.14	127.5
9	Chulam River	7.32	0.025	0.08	100
10	Hanbo(Tong bo)	5.49	0.03	0.04	3.5
11	O-Ryung	4.19	1.0	0.22	100
12	Wooseung	5.32	6.25	0.6	600
13	Tae Young	6.09	1.25	0.38	75
14	Chang Won	5.82	1.75	0.5	275
15	Hanseung	5.78	28	2.1	575
16	Hwangji	3.90	19	0.9	1750
17	Hanseung, Hwangji all Total	4.92	5	1.0	612.5

水質現況을 나타낸 것이다. 이에 依하면 東海, 黃池炭礦의 坑內水와 東海穴里 支流川만이 pH 4 以下이었고, 降雨量이 많을 때 測定한 關係로 黃池川 全體가 pH 6.4이고 Fe total은 0.12mg/l로 減少하였다. 1984年度의 水質現況으로 檢討한 結果 酸性化河川은 魚龍炭礦쪽 支流川, 우성炭礦쪽 支流川이 모두 合水하는 黃池川 全體와 長省炭礦쪽 모든 支流川 그리고 江原炭礦쪽 支流川이었고, 洛東江上流 本流로서 合水하여 連花鑛山 近處까지 모두 汚濁, 汚染되고 있었다. 또한 黃池川 全體로 볼 때 pH 3.8이었던 値가 pH6.46으로 中和되었으며, Fe Total은 2.5mg/l에서 0.12mg/l로 減少하였고, SO_4^{2-}는 350mg/l에서 200mg/l로 減少 推移를 나타내었다.

(2) 黃池炭礦의 水質現況

黃池炭礦은 太白坑과 裕昌坑으로 排水하고 있으며. 特別한 경우를 除外하고는 主로 裕昌坑으로 放流하고 있다. Fig 10에서와 같이 11片까지 開發하고 있으며, 採炭은 主로 8片에서 稼行하고 있다. 各 片別로 pH値를 測定한 結果 1片이 pH 3.83, 8片이 3.45로 酸度심하고, 그 以外의 Level은 pH 5.31~6.51이었다. Table 3과 4는 水質現況을 나타낸 것으로 太白坑의 1片 Sump는 pH値가 3.4에 SO_4成分이 2,100

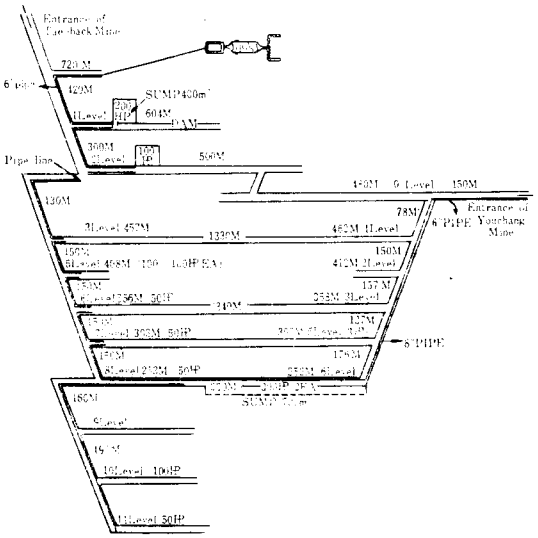


Fig 10. HWANGJI Colliery Diagram

mg/l로 汚染된 물이었으나 水量이 적어서 1片 Dam의 물을 使用하면 pH 6.24로 中和된데다 Fe가 77.0 mg/l로 赤色을 나타내었다. 또한 SO_4 成分도 1,230mg/l이나 되었다. 이와 같이 坑內水中 SO_4 含有量이 매우 高濃度인 것은 炭中硫黃分 含量이 많아 黃酸化 作用이 活潑하여

Table 3. A list of water quality for Hwangji colliery

Unit : mg/l

No.	Location	pH	Fe Total	Cu	SO_4^{-2}
1	Taebak 1 Level Pump out	4.08	70up	10	3,300
2	Taebaek 1 Level Sump	3.40	11	2.5	2,100
3	Taebaek 8 Level Sump	5.89	42.5	9	1,300
4	Taebaek 8 Level siphon	5.78	70up	11.75	1,650
5	Yuchang all Total (Compressor, siphon 300Hp Pump)	5.78	70up	10.25	1,900

Table 4. A list of water quality for Hwangji colliery

No.	Location	pH	Fe	SO_4	Na	Ca	Hardness
1	Water oozed out under cooling tower	2.57	710.0	18,282	5.06	341.5	2,076
2	Storage tank of compressor's cooling water	6.44	0.05	285.6	1.48	3.58	12.1
3	Former pit(upper waste)	2.54	1,110	26,892	5.38	346.3	1,823
4	I Level pump out	4.27	0.93	986.9	6.95	127.4	785.3
5	I Level Sump	3.98	0.40	1,038	7.35	131.4	825.0
6	2 Level→1 Level pump out	5.20	15.8	2,092	5.05	222.9	1,923
7	1 Level dam	6.24	77.0	1,230	3.60	165.6	1,123

모든 坑內水가 黃酸鹽을 엄청나게 含有케 한 것이라 思料되며 Pyrite(FeS_2)의 成分 比率은 Fe가 47% S가 5.3%로 硫黃分이 많으면 鐵分도 많이 存在한다고 볼 수 있다.

Ⅳ-Ⅱ. 試驗結果 및 檢討

(1) 實際投入에 依한 試藥所要量

太白 1片 Sump에서 Pumping하여 上部 本裝置가 設置되어 있는 곳에서 試藥 混合筒에 坑內水 一定量을 받아 坑內內 pH 4인 것에 試藥을 投入하여 pH 11 以上으로 維持하고 試藥室에 連結되는 Pipe로 Ventri port에 一定한 量을 調節하면서 通過시켰다. 이때 4~5kg/cm²의 壓力으로 Air jet로 通過되는 坑內水와 混合시켜 Pond에 떨어지게 된다.

Pond에 排出된 直後의 pH値는 4~5이었고 18時間의 沈澱時間이 지난後 pH値는 6程度이었다.

96.9m³의 Pond에 한 時間 稼動한 71.4m³의 물을 받아 18時間後의 Sludge量은 6.12m³, 즉 8.6%이었다. Pond에 떨어지는 排出流速은 1.2 m³/min이었고, 試藥量 算出은 다음과 같다.

$Ca(OH)_2$: 61.5kg/71.4m³=0.86kg/m³
=1.032kg/min

$CaCO_3$: 90.75kg/71.4m³=1.27kg/m³
=1.524kg/min

NaOH : 22kg/71.4m³=0.31kg/m³
=0.372kg/min

實際 試藥 投入量이 0.86kg $Ca(OH)_2$, 1.27kg $CaCO_3$, 0.31kg NaOH 坑內水가 1m³當 單位所要 試藥量이 過大하게 投入되었으나 繼續 反復實驗으로 試藥量을 減少시켜 나가야 했다.

또한 1m³의 鑛車를 利用한 實驗에서 Air jet 壓力 (P_1)=5kg/cm², Static mixer 壓力 (P_2)=1.4kg/cm²일 때 本裝置를 通過한 坑內水를 鑛車 2個에 各各 試藥을 넣지 않은 경우와 試藥을 NaOH 185g, $Ca(OH)_2$ 665g, $CaCO_3$ 1, 163g을 投入하여 18時間이 지난 後 觀測한 結果 試藥을 넣지 않은 경우는 그대로 混濁한 狀態로 있었고 試藥을 넣은 경우는 淸淨水가 84%로 Sludge와 分離되어 沈澱狀態가 뚜렷하게 나타났다. 本裝置를 利用하는 경우 試藥을 少量넣어야 더 좋은 效果가 있을 것이라 생각된다. 適切한 試藥 所要量을 判斷하기 위해 繼續反復實驗을 하여 經濟的인 側面에서 檢討하였다.

(2) 試驗管을 利用한 試藥所要量

200m*l* 짜리 Mess cylinder와 0.1m³ Acryl管을 製作하여 實驗하였다. 200m*l* Mess cylinder를 利用한 實驗에서 1回 測定結果 上部에 淸淨水로 나타난 경우는 $Ca(OH)_2$ 1g, $Ca(OH)_2$ 0.5g+$CaCO_3$ 0.5g+NaOH 0.1g, $Ca(OH)_2$ 0.5g+NaOH 0.1g, $Ca(OH)_2$ 1g+$CaCO_3$ 1g+NaOH 0.5g, $Ca(OH)_2$ 0.1g, $Ca(OH)_2$ 0.5g이었으나 pH値가 9.11~12.00으로 試藥量이 많은 것으로 생각되어 2回 實驗에서 試藥量을 減少시켜 測定한 結果 0.05g $Ca(OH)_2$를 添加한 後 pH 4.43이었고, 0.05g $CaCO_3$+0.01g NaOH인 경우 pH 5.07로 12時間 後 淸淨水가 95%로 良好하였고, 0.05g $Ca(OH)_2$+0.05g $CaCO_3$+0.01g NaOH인 경우 pH 6.33, 淸淨水가 95%

Table 5. Test of Sedimentation state. Raw water : pH 3.80

No.	reagent	pH	Sinking quan tity 1 hour	Sinking state	Sinking quan tity 12 hours
1	$Ca(OH)_2$ 0.1g+ Na OH 0.05g	7.31	8.5m*l*	Purity Water	10m*l*
2	$Ca(OH)_2$ 0.1g	6.63	9	〃	9.5
3	$CaCO_3$ 0.1g+ NaOH 0.05g	6.61	6.5	Top floating matters being	7.5
4	$CaCO_3$ 0.1g	6.08	2	Top 0.7 Lower part 1.3	2
5	$Ca(OH)_2$ 0.05g+ $CaCO_3$ 0.05g	6.5	9	Purity water a bubble some being	6

이었다.

다음 1,2. 測定結果를 檢討하여 Table 5와 같이 試藥量을 調節한 後 0.1g+$Ca(OH)_2$+0.05g NaOH를 添加한 경우 pH 7.31, 12時間 後 淸淨水 95%로 나타났고, $CaCO_3$ 0.1g+NaOH 0.05g인 경우 pH 6.61, 12時間後 淸淨水 95%로 그리고 $CaCO_3$ 0.1g+NaOH 0.05g인 경우 pH 6.61, $CaCO_3$ 0.1g인 경우 pH 6.08로 12時間後의 침전상태가 良好하였다. 0.1m^3 Acryl 等을 使用한 實驗에서 中和劑를 넣을 때 A의 경우 實際投入量과 같게 NaOH 18.5g, $Ca(OH)_2$ 66.5g, $CaCO_3$ 116.3g을 넣었고, B의 경우 A의 50%, C의 경우 A의 70%를 넣어 沈降狀態를 觀察하였다. A의 경우 18時間後 Sludge量 8.3%로 좋은 反應으로 分離하였고, pH質는 6程度이었다. B의 경우는 繼續 黃土色으로 남아 있었고, C의 경우는 靑綠色이었다가 18時間後에는 黃土色으로 浮遊된 狀態이었다.

A, B와 C의 경우의 水質分析 結果는 Table 6과 같다(Table 6 參照).

Table 6. A list of water quality by addicted reagent

unit : mg/l

addicted ratio / constituent	A	B	C
Fe	0.02	11.85	1.0
Cu	0.05	T_R	T_R
SO_4	1,058	2,097	2,044
all hardness	1,024	2,043	2,038
Ca	352.3	310.5	348.3
Na	43.6	38.0	50.6
Mg	10.9	307.8	283.6
Cl	8.0	110.0	9.0
K	10.4	2.9	10.1

(3) 理論的인 石灰要求量

水酸化 石灰(Hydrated Lime)의 效率이 70%라 假定하고 Table 7과 같이 DR/2 水質分析器에 의해 測定된 순알카리도(Net Alkalinity)는 390mg/l as $CaCO_3$이므로 理論的인 Lime 要求量은

$$390mg/l\ CaCO_3 \times \frac{1mol\ Ca(OH)_2}{1.35mol\ CaCO_3} \times \frac{1}{0.7}$$
$$=413mg/l\ Ca(OH)_2$$

理論的인 日間 Hydrated lime 要求量

$$413mg/l\ Ca(OH)_2 \times \frac{120m^3}{D} \times \frac{1,000l}{M^3} \times \frac{1kg}{10^6mg}$$
$$=49.56kg/D$$

물의 硬度(Hardness)는 원래 비누를 沈澱시키는 能力으로 定義하고, Fe, Al, Mn, Zn, H^+等도 같은 效果를 나타내지만 主된 原因은 Ca와 Mg이다. 兩者의 이온들은 自然水에서 通常的으로 高濃度로 發見되는 것은 아니다. 硬度가 500mg/l 以上일 때 家庭用으로 不適合하며 우리가 마실 수 있는 물은 250mg/l 程度이어야 한다. 여기에서 나타나는 硬度가 1,000mg/l 以上이라는 것은 높게 나타나 결국 마실수는 없고, 再次 軟水化하여야만 하는데 이 方法에는 石灰-소오다灰法(Lime soda ash process)과 이온交換法(Ion-exchange process)이 附設되어야 한다.

Table 7. A list of water quality

unit : mg/l

Location / Constituent	I Level Sump	I Level dam
pH	4.37	6.24
Fe	14	70
SO_4	2,600	1,500
Acidity	152 as $CaCO_3$	352 as $CaCO_3$
Alkalinity	253.5 as $CaCO_3$	390 as $CaCO_3$
Ca	430	491
Hardness	1,240	1,235

또한 試藥要求量을 1m^3度 消費한 것을 보면 實際投入할 때 $Ca(OH)_2$가 0.86kg, 그 外에도

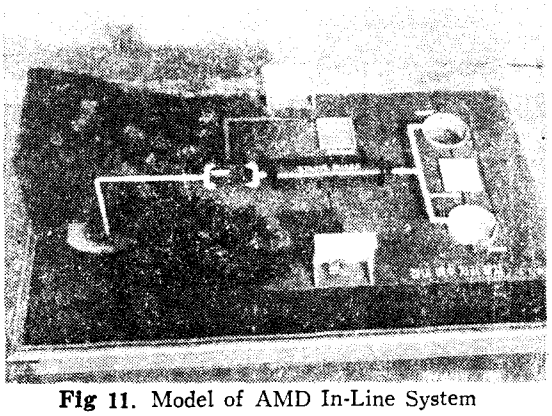


Fig 11. Model of AMD In-Line System

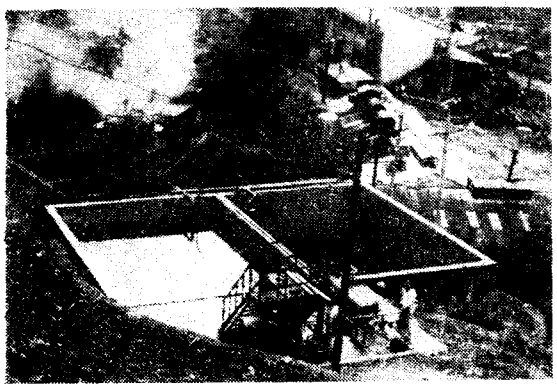


Fig 12. Actual AMD In-Line System in Hwangji

$CaCO_3$와 NaOH가 投入되었고 0.1m³ Acryl 等을 使用한 경우 $CaCO_3$와 NaOH는 물론 $Ca(OH)_2$가 0.665kg으로 多量試藥이 所要되나 理論的인 石灰要求量은 $Ca(OH)_2$만 0.413kg으로 少量 要求되고, Mess cylinder에 의해 이루어진 0.5kg/m³의 試藥所要量과 비슷한 値로 實際投入에 의한 實驗을 反復한 다음에 判斷함이 좋을 것으로 보았다.

Ⅳ-Ⅲ. 經濟性 比較

先進國의 旣存典型的인 酸性坑內排水 中和處理施設(plant)은 Fig 13과 Table 8에서 보는 바와 같이 初期 投資費가 約 8億원 相當이고 広大한 施設面積을 要하는데 反해 新規 韓國型 開發品은 投資費 約 6千萬원 相當밖에 안되는 우리나라 石炭礦 實情에 適合하고 坑外뿐만 아니라 坑內어디에서도 施設이 可能한 坑內排水 處理裝置를 製作하였다. 또한 先進國型 旣存中和處理施設과 新規 開發品인 韓國型 特殊處理設과를 比較하여 보면 다음과 같다.

1. 美國 旣存 中和施設은

가. 広大한 施設 敷地가 要求됨.

나. 施設이 複雜하고 維持管理가 크다. (設藥이 大量所要, 年間 作業費用 約 6千萬원)

다. 別途 所要動力이 必要함.

라. Sludge 處理費用이 莫大함.

마. 初期 投資費가 広大함(約 8億원 所要)

2. 新規開發 本裝置는

가. 酸性 坑內排水가 pH 3.7에서 pH 6~7로 中和됨.

나. 裝置가 單純하고 維持管理가 低廉함. (試藥이 所量所要, 年間 作業費用 約 2百萬원)

다. 別途 所要動力이 必要없다.

라. Sludge 處理가 自動的임(Sand pump 利用, Shiphon 處理)

마. 初期 投資費가 低廉함(約 6千萬원 所要)

바. 試藥 所要量이 坑內水 1m³當 599원이나 Mess Cylinder 試驗에서 100원이었다. '86年度 最終實驗에서는 $Ca(OH)_2$만 使用可能이었으며, 50원 以下까지 低下시켰다.

以上과 같이 新規 開發品인 本裝置는 經濟的으로도 많은 利點이 있고, 現地 適用實驗 鑛山의 경우 당장에 工業用水인 壓縮機 冷却水의 用水難解決과 從業員 沐浴水 및 세탁기 用水 不足分을 充分히 充當할 수가 있게 됐다.

Table 8. Construction cost of typical AMD systems

Cost / 區 分	建 設 費	年間作業費用
AMD 排水量 2m³/min 2,880m³/D (hydrated lime)	$967,375/ ₩773,900,000 (780 : 1)	$77,180/ ₩61,744,000 (780 : 1)
AMD 排水量 8m³/min 11,520m³/D (hydrated lime)	$1,622,521/ ₩1,298,016,800 (780 : 1)	$462,760/ ₩370,209,000 (780 : 1)

註 : Limestoue에 依한 中和施設이면 이보다 約 4倍程度 低廉임.

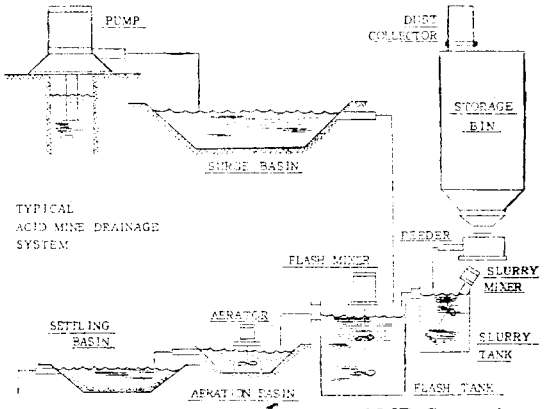


Fig 13. Tydical Neutralization AMD System's Example I.

Ⅴ. 結 論

國內 適用 可能한 韓國型 特殊坑內排水 淨化

裝置를 開發, 本 設計에 따른 試作品을 製作하여 現地 試驗炭礦에서 適用實驗한 結果는 다음과 같다.

1. 新規 開發한 坑內排水 處理裝置는 國內外 既存 中和施設에 比해 初期 投資費가 적고, 試藥所要量이 매우 少量이며, 年間 作業費用이 낮으며, 施設敷地도 좁은 Space에 建設可能하므로 經濟的이다.

2. 第1次 實際 試藥 投入量이 $Ca(OH)_2$ 0.86 kg, $CaCO_3$ 1.27kg, NaOH 0.31kg으로 坑內水 $1m^3$當 處理試藥費가 599.6원에 達해 試藥價格이 高費用인 것으로 나타났으나 Mess cylinder를 利用한 室內 沈澱實驗에서 $Ca(OH)_2$ 0.5kg으로 坑內水 $1m^3$當 100원 以下로 減少시킬 수 있었는 바 '86年度 最終 現地 實驗에서 $Ca(OH)_2$ 0.3kg 만으로도 可能하였는데 $1m^3$當 50원 以下로 나타났다.

3. 黃池炭礦의 경우 겨울과 渴水期에 用水가 不足하여 4km 以上의 遠距離에서 물 車를 동원 日 $40m^3$(or ton) 程度의 물을 $1m^3$當 2,667원 運搬費를 負擔하면서까지 充當하여 왔으나 모두 解決할 수가 있게 되었다.

參考文獻

1. 李春澤外(1985), 石炭礦의 酸性坑內排水 處理·利用·制御에 關한 硏究, 韓國動力資源硏究所, 硏究報告 KR-86-2, p. 97~115.
2. Ann G. Kim et al, Acid Mine Drainage: Control and Abatement Research 1982, Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentalogy and Reclamation p. 1~22.
3. 眞宮三男外(1983), 酸性 鑛山廢水 中和澱物の浮選分離, 日本鑛業會誌/100/155(84-5) p. 423~427.
4. Terry Ackman et al (1985), In-Line Aeration and Treatment of Acid Mine Drainage, Bureau of Mines, U.S. p. 53~61.
5. 李春澤(1985), 石炭礦 酸性坑內排水의 中和處理施設 設計에 關한 硏究, 기술사 Vol. 18 No. 1 MAR. 1985, p. 1~17.
6. EPA-600/2-83-001(1983. 1), "Design Manual, Neutralization of Acid Mine Drainage", U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Industrial Environmental Research Laboratory, p. 1~224.