

< 論 說 >

貯水池의 Eutrophication 과 水質統制 “Eutrophication and Water Quality Control in Impoundments”

趙 光 明
Cho, Kwang Myeung

1. 序 論

人間은 生存을 위해서 반드시 물이 必要하며 이 目的을 達成하기 위해서 主로 自然的으로 存在하는 地表水를 利用해 왔었다. 그러나 人口의 급속한 增加와 都市로의 集中, 各種 生産施設의 增大 등 諸원인에 의해서 물의 需要가 急増하게 됨에 따라 水資源의 統制가 必要하게 되었다. 그 方法의 하나가 人工的인 貯水池의 使用이다.

貯水池를 築造하는 目的에는 여러가지가 있었지만 그 中에서 몇가지 重要한 것을 든다면 洪水統制, 給水源, 水力發展, 養魚 그리고 慰樂用等일 것이다. 그러나 위에 열거된 諸目的을 위해서 건설된 貯水池가 無制限의 期間동안 이들 目的을 達成시켜 줄 수 있겠음 性能을 발휘하는 경우는 없으며 沈澱物에 의한 容積의 減少, 汚染에 의한 水質의 惡化 등으로 인해서 그 수년에는 制限이 있다.

따라서 여기에서는 貯水池의 水質惡化가 어떠한 理由에 의해서 생기며, 특히 그 水質惡化가 熱-密度層(thermal-density layer)의 成層현상(stratification)을 수반할 때 이를 防止 乃至 除去할 수 있는 方法을 紹介하고자 한다.

2. 河川水의 汚染과 自淨

貯水池水의 汚染을 論하기 前에 理解를 빠르게 하기 위해서 河川水의 汚染에 關하여 먼저 잠깐 言及하고자

한다.

通常 自然에 存在하는 모든 河川이나 湖水의 물은 어떠한 種類의 廢水이든 간에 상권층이 廢水로 汚染되었을 때 그 廢水內의 汚染物을 除去할 수 있는 自淨(self-purification)能力을 가졌다. 이 自淨能力은 汚染物의 性質과 量에 의해서 물론 아니라 汚染物을 받아 드리는 江이나 河川의 物理的, 化學的, 生物學的 상태 그리고 기타 特性에 의해서 決定된다. 여기까지 그릇된 思考方式이 이 自淨能力, 특히 흐르는 물에 있어서의 曝氣현상에 關하여 인식되어 있었다. 江물은 약 10km 程度 흐르는 동안 깨끗해질터든지 急流나 폭포에서 일어나는 自然曝氣현상은 細菌을 酸化시키거나 죽인다고 하는 생각들이 그 예에 속한다. 그러나 실제에 있어서 距離自體는 물이 흘러내리는데 요구되는 時間概念과 그 結果 일어나는 稀釋概念을 구분하지한 것으로서 물의 自淨에는 何等 關係가 없는 요소이며 重要한 것은 時間인 것이다. 時間外에도 適當한 溫度, 日光, 流速 그리고 기타 物理的, 化學的, 生物學的 特性이 重要視되어야 한다. 물이 貯水池內에 약 한달간 貯藏이 되든지 아니면 河川에서 長距離를 浮遊한 후 내려갈 때의 自淨結果는 淨水場에서의 濾過에 의한 效率과 거의 같은 程度이다.

우리는 外的인 觀察에 의해서 地表水의 汚染程度를 識別할 수도 있다. 예를 들어 廢水가 流入되지 않는 上流에서와 같이 汚染되지 않은 河川의 바닷은 通常 녹색 乃至 갈색의 沈澱物로 덮여 있으며 뿌리가 있는 녹색식물이 成長한다. 그러나 汚染物이 流入되는 地點 바로 아래에서는 즉각적으로 化學的·生物學的 變化가 일어난다. 즉 녹색식물이 漸次로 사라지고 물의 濁度가 增加되는 現象 등을 말한다. 이 地帶을 最近汚染地

帶(zone of recent pollution)라고 부른다.

그리고 能動的 分解地帶(zone of active decomposition)라고 불리는 汚染地帶 바로 下流部分의 河川바닥은 혹색의 汚泥沈澱物로 덮히게 되며 충분한 量의 養分이 存在하지만 不充分한 酸素가 供給되는 곳에서 繁殖할 수 있는 動植物만이 成長할 수 있게 된다. 만약 汚染의 程度가 극심하다면 물속의 溶存酸素(dissolved oxygen)는 完全히 生物에 依해서 소모되어버릴 것이고 그 結果 냄새를 내는 氣體가 發生하며 물의 색 같은 회색 乃至 혹색을 나타내게 된다. 反面 汚染度가 심하지 않으면 물속의 溶存酸素(DO)는 냄새가 發生하지 않을 程度로 充分히 存在하게 된다. 왜냐하면 汚染物의 酸化에 要求되는 酸素의 量보다 大氣로부터 물속으로 曝氣되거나 水中植物의 炭素同化作用(photosynthesis)에 依해서 生기는 酸素의 量이 더 많기 때문이다. 이 境遇 폭포나 急流 등이 存在해서 물이 渦流를 일으키면서 흐르게 되면 空氣로부터 물속으로 溶解되는 酸素의 量은 훨씬 더 많아지게 된다. 왜냐하면 再曝氣率(re-aeration rate)은 물의 攪流시에 增加되기 때문이다. 그러나 丁寧해야 할 것은 要求量 以上으로 供給되는 酸素의 供給은 河川의 自淨率을 增加시키지 않으며 自淨時間을 단축시키지도 않으므로 높은 流速은 自淨이 이루어지기 前에 물이 흘러가는 距離가 길어진 다는 것만을 의미하게 된다는 것이다.

河川물이 下流로 흘러갈 때 부가적으로 汚染物이 流入되지 않는 限 漸次的으로 냄새의 發生은 멎게 되고 河川의 바닥은 腐植土(humus) 같은 物質로 덮히게 된다. 만약 汚染物이 窒素化合物을 含有했다면 水中의 窒酸염(nitrates)濃度는 漸次的로 增加될 것이다. 또한 물속의 DO 濃度는 다시 定期的으로 增加하게 되고 따라서 녹색 水中植物이 자라게 된다. 結果적으로 河川은 汚染되기 前과 같은 깨끗한 상태로 복귀하게 되는데 이 區域을 回復地帶(zone of recovery)라고 부른다. 回復地帶의 길이와 位置는 汚染의 程度와 上記된 諸要素들, 即 溫度, 日光, 流速 그리고 기타·物理的, 化學的 生物學的 要素들에 依해서 決定된다.

3. 湖水와 貯水池의 汚染과 自淨

위에서 說明된 것과 根本的으로 꼭같은 現象이 湖水나 貯水池內에서도 發生한다. 그러나 湖水나 貯水池에서는 一定한 方向을 가진 흐름이 없기 때문에 河川에서와 같은 分明스러운 地帶(zones)는 생기지 않게 된다. 反面 貯水池內에서는 水深에 따른 溫度의 差異때문에 물의 密度가 變化하게 되어 수직方向으로 물의

運動이 生길 수 있으며 이에 따라서 自淨이 生긴다.

貯水池에 汚染物이 流入되었을 때에 汚染物은 水中 微生物에 依해서 섭취分解되거나 기타 作用에 依해서 自淨作用이 일어난다. 이때 수직方向의 물運動이 없다면, 即 다시 말해서 貯水池가 thermocline을 中心으로 上部의 epilimnion, 下部의 hypolimnion으로 分明히 分離될 境遇 水面 가까운 곳에 位置하는 epilimnion층에서는 通常 空氣中の 酸素가 再曝氣되므로 溶存酸素濃度가 높아서 好氣性상태가 되나 反面 thermocline층 下部의 hypolimnion層에서는 溶存酸素가 不足하거나 完全히 없어서 結局 嫌氣性상태가 된다. 이런 境遇 貯水池바닥에 沈澱된 有機物이 嫌氣性 微生物에 依해서 分解되므로서 水質은 크게 惡化된다. 깊은 貯水池에 있어서 epilimnion層과 thermocline層은 各各 약 7m 程度의 水深을 차지하며 그 下部는 hypolimnion層이 된다. 이 現象은 그림 1에 보인 바와 같이 물의 수직運動이 없는 겨울이나 여름에 일어나며 봄과 가을에는

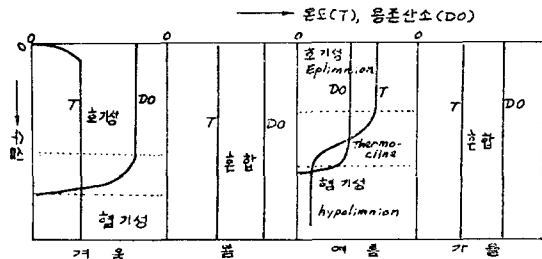


그림 1. 계절적인 저수지 수질의 변화

貯水池물의 垂直混合이 活發히 進行되어 分明한 熱密度層의 區別은 없어지게 된다. 即 겨울에 水面이 얼게 되면 얼음表面과 그 上部의 大氣溫度는 0°C 보다 낮아 저도 얼음밑의 물은 실제로 0°C에 가까우며 더 깊은 곳의 물은 4°C 程度에서 最大密度를 갖게 된다. 이러한 狀態에서 물은 比較的 安定된 平衡狀態에 있고 垂直的인 混合이 없게 된다. 그러나 봄이 되어 얼음이 녹으면 表面부근의 水溫이 높아지기 始作하여 4°C가 되면 密度가 最大가 되므로 밑으로 運動하게 되고 反面 밑부분의 물이 上部로 移動하게 된다. 봄에서 여름이 되면 表面의 물은 漸次的로 따뜻해져서 가벼운 물이 密度가 큰 물위에 놓이게 되며 溫度差가 커져서 순환현상 即 垂直運動은 漸漸 上層部에만 局限된다. 가을이 되어 表面의 水溫이 내려가면 垂直的인 停滯現象은 파괴되고 물은 다시 垂直的인 混合을 이루게 된다. 다시 말해서 겨울과 여름에는 垂直運動이 없어서 停滯現象이 생겨 水深에 따라 溫度와 DO 濃度の 差가 크지만 봄과 가을에는 循環現象이 發生하여 水深에 따른 溫度나 DO 濃度에는 變化가 적다. 겨울과 여름의 停滯

現象中에서 여름의 停滯가 더 뚜렷이 생긴다. 이와같이 貯水池의 물이 水深에 따라 여러개의 層으로 分離되는 現象을 成層現象(stratification)이라고 하며 그 結果 생기는 epilimnion, thermocline 그리고 hypolimnion 層들을 熱-密度層(thermal-density layers) 또는 熱層(thermal layers)이라고 한다.

봄과 가을철의 貯水池물의 垂直運動은 大氣中の 바람에 의해서 더욱 加速되며 이 垂直運動을 轉倒(turn-over)라고 한다. 貯水池의 물이 給水源으로 利用될 境遇 이 轉倒現象은 大端히 不利한 結果를 招來한다. 왜냐하면 嫌氣性狀態에 있는 hypolimnion 層의 물이 轉倒하게 되면 水質이 惡化된 貯水池물이 取水되기 때문이다.

一般的으로 貯水池內에서의 自淨結果는 有機物의 除去로서 그 程度는 稀釋, 再曝氣, 沈澱의 效果, 그리고 生化學的作用을 위하여 可用한 時間간격에 의해서 決定된다. 그러나 下水와 함께 貯水池로 流入된 細菌은 다른 要素들의 統制를 받아 죽게 된다. 즉 水溫, 可用한 영양소, 日光의 殺菌效果, 침전, 그리고 元生動物의 活動 등에 의해서 細菌除去率이 統制를 받으며 그 率은 有機物이 파괴되는 率보다 느리다. 따라서 비록 貯水池물이 汚染되지 않는듯이 깨끗하게 보일지라도 細菌에 의한 汚染은 存在할 수 있다.

4. 貯水池의 eutrophication 과 藻類

우리는 通常 물이 貯水池內에서 오래 머무르면 自淨이 일어나서 水質이 좋아질 것이라고 생각하기 쉬우나 事實은 그렇지도 않다. 汚染物이 계속 貯水池로 流入되어 貯水池의 自淨能力을 초과할 때 貯水池의 水質은 漸次로 惡化되며, 이 現象은 貯水池물의 成層現象에 의해서 더 拍車를 받게 된다. 비록 長期間에 걸친 貯水池 水結果 汚染物로서 流入된 有機物이 分解 除去된다 하더라도 그 反面 水中 微生物의 繁殖에 營養素가 될 無機物은 축적될 수도 있기 때문이다. 그 結果 人體에 질병을 일으키거나 水中에 맛과 냄새를 招來하는 各種 藻類가 繁殖하게 되며 이들 藻類가 죽게 되면 池水池의 바닥에 沈澱되어 他微生物에 의해서 分解되고 分解 結果 생기는 物質은 다시 藻類의 繁殖을 招來할 수 있는 營養素가 된다. 이 循環을 거듭하게 되면 貯水池의 水質은 漸漸 惡化되어 나중에는 쓸모없는 늪으로 변모하게 된다. 이와같은 現象을 eutrophication이라고 한다. 따라서 貯水池에 藻類가 많이 繁殖한다는 것은 그 貯水池가 eutrophication 過程中에 있다는 것을 뜻하게 된다.

Eutrophication은 炭素, 窒素, 磷과 같이 藻類의 繁殖에 養分이 될 物質들이 貯水池에 蓄積될 때 일어나게 된다. 이러한 物質들은 自然의 森林地帶 등에 있는 樹木, 農地에서 使用되는 비료, 牧場地域의 動物의 분뇨, 그리고 요즘 많이 使用되는 合成洗劑에 포함되어 있어 그러한 物質들이 貯水池에 流入될 때 함께 흘러 들어오게 된다. 또한 處理되거나 處理되지 않은 家庭下水나 工場廢水도 이러한 物質을 많이 含有하고 있다는 것을 잊어서는 안된 것이다. 이러한 物質들이 貯水池內로 流入되면 藻類는 이들 營養素를 攝取해서 繁殖하게 되며 그 結果 貯水池의 eutrophication을 촉진시키게 된다. 비록 eutrophication은 自然的인 現象이지만 人間이 放出해내는 各種 汚染物質로 加速을 받게 되므로 우리는 이를 防止하기 위하여 갖가지 努力을 경주하게 되는 것이다. 下水處理 등은 그 한 例이다.

生物의 繁殖은 하나의 重要한 營養素를 統制하므로서 抑制시킬 수 있다. 例를 들어 貯水池內의 窒素나 磷의 濃度を 減少시키면 藻類는 잘 繁殖하지 못하게 된다. 따라서 우리는 藻類의 繁殖을 막기 위하여 磷을 含有하는 合成洗劑를 使用하지 않도록 해야 하며 下水內의 磷이나 窒素를 除去하기 위하여 第三次 下水處理 方法을 강구하게 되는 것이다. 우리나라에서는 아직까지 eutrophication에 의한 부작용이 잘 알려져 있지 않아서 아직도 磷을 含有하는 合成洗劑를 使用하며 下水處理 自體도 初期단계에 있으나 앞으로 차차 시정되어야 할 사항이다.

5. Eutrophic 한 貯水池의 狀態

이미 앞에서 言及된 바와같이 우리는 自然的으로 存在하는 水資源만으로는 만족할 수 없는 狀態이므로 이를 補充하기 위하여 貯水池를 만들기도 하고 좀더 科學的인 水資源確保를 위해서 最近에는 揚水貯水池(pumped storage)를 制用하게 되었다. 이들 人工貯水池의 目的이 뭇이던간에 自然的 또는 人爲的인 汚染에 의한 貯水池의 eutrophication은 結局 水質의 惡化를 招來하게 된다. 卽 eutrophic 한 貯水池는 動物이나 植物들이 大端히 짧은 期間內에 큰 變化를 일으킬 수 있는 生態界(ecosystem)라고 할 수 있으며, 그 變化의 程度는 垂直的 溫度差異, 卽 成層現象에 의한 溫度 혹은 密度差異 등과 같은 物理的 現象에 의해서 크게 영향을 받을 수 있다.

貯水池나 湖水內에서의 物理化學的 그리고 生物學的 狀態는 오랫동안 數많은 學者들에 의해서 研究되어 왔

으며 그들의 研究는 주로 溫度測定이나 DO測定에 의한 成層現象의 糾明에 關한 것이었다. 따라서 이들 研究에 의해서 自然的인 湖水에 關하여 資料가 可用하였지만 最初의 貯水池設計家들은 양호한 물의 순환을 除外하고서는 熱層形成에 關해서는 고려하지 않았다. 따라서 溫和한 氣候下에서는 貯水池의 깊이를 10~15m 程度로 하므로서 貯水池內에서의 成層現象을 防止하고 따라서 貯水池라한 鄰近에서의 酸素消耗現象도 防止할 수 있게 되었다. 또한 이러한 얇은 貯水池에서는 湖의 물의 攪拌할 바람도 熱層의 形成을 防止할 수 있을만큼 물의 垂直方向의 運動을 일으킨다고 보았다. 그러나 이러한 假定이나 設計指針은 가을이 접한 여름과 같이 햇볕이 강하고 河川으로부터 흘러들어오는 流量이 적은 境遇에는 적중하지 않아서 貯水池內에 熱層이 생긴다는 것이 안다졌으며, 여름과 같이 貯水池內에서 土地결약을 고려해야 할 境遇에는 훨씬 더 깊은 貯水池를 건설해야 하므로 貯水池內에서의 成層現象은 長期間 지속한다는 것이 알려졌다.

만약 eutrophic 한 貯水池가 SiO₂, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺ 그리고 HCO₃⁻ 등의 營養素를 적정히 溶解하고 2mg/l의 NO₃-N와 0.2mg/l의 磷(P)을 含有한다면 藻類의 繁殖率은 大端히 높게 된다. 이런 境遇 繁殖에 適當한 物理的 環境이 부여된다면 봄과 가을사이에는 藻類는 5,000~50,000 cells/ml 程度의 濃度로 貯水池內

에서 繁殖하게 된다. 그러나 藻類의 數字보다는 種類가 더 重要한 問題이며, 청록색 藻類가 eutrophication의 마지막 段階에 繁殖된다. 계속적인 藻類의 죽음, 沈澱, 그리고 分解는 貯水池의 hypolimnion 層의 溶存酸素를 減少시키며 그 結果 생기는 嫌氣性層이 上部의 높은 溶存酸素를 가진 층, 即 eplimnion 層으로 分散되지 않는 限 熱層의 強度에 따라서 貯水池의 水質은 漸進 나빠지게 된다. 溫和한 氣候下의 여름철에 생기는 成層期間동안에 eutrophic 한 貯水池內의 物理的, 化學的 및 生物學的 水質은 水深에 따라 표 1에 주어진 바와 같이 될 수 있다⁽¹⁾. 이러한 現象은 貯水池나 湖水에 發生만 생기는 것이 아니라 바다에서도 생길 수 있다.

표 1 온대地方에서의 한여름의 成層시 貯水池의 水質⁽¹⁾

項 目	水面으로부터의 깊이(m)			
	1	8	13	20(바닥)
온도(°C)	25.5	20	10	10
DO(% 포화도)	150	100	25	0*
pH	8.5	8.2	8.0	7.5
SiO ₂ (mg/l)	1	1	6	8
NH ₃ -N(mg/l)	0.05	0.10	0.80	3.00
Phosphorus-P(mg/l)	0.62	0.65	0.20	2.00
藻類(cells/ml)	20,000	5,000	1,000	20,000*(分解中)

※ H₂S의 濃度가 10mg/l 程度될 可能性이 있다.

표 2 Tokyo 만에서의 成層現象(2)

項 目	測定日次	水 深		
		水 面	中間層	바 닥
DO, mg/l(% 포화도)	August 2, 1971	12.464(189)	3.440(48)	0.808(11)
	Sept. 30, 1971	10.736(146)	4.048(56)	0.808(11)
	Nov. 11, 1971	7.968 (98)	6.016(75)	5.216(67)
	April 27, 1972	12.704(155)	4.144(49)	7.680(91)
溫度, °C	August 2, 1971	29.6	22.9	19.5
	Sept. 30, 1971	22.4	22.3	21.7
	Nov. 11, 1971	16.4	16.2	18.1
	April 27, 1972	16.2	14.2	13.8
Salinity, %	August 2, 1971	26.680	32.642	33.335
	Sept. 30, 1971	28.249	31.500	32.842
	Nov. 11, 1971	30.686	32.188	33.226
	April 27, 1972	29.355	31.770	33.457
pH	August 2, 1971	8.50	7.90	7.55
	Sept. 30, 1971	—	—	—
	Nov. 11, 1971	7.6	7.8	7.8
	April 27, 1972	8.2	7.9	7.8
Eh, mV	August 2, 1971	405	365	340
	Sept. 30, 1971	415	300	298
	Nov. 11, 1971	308	363	333
	April 27, 1972	428	318	308

即 Tsuji 等⁽²⁾은 下水로 심하게 汚染된 Tokyo 만에서 plankton 의 심한 繁殖에 의한 red tide 形成後에 소용돌이(gyre)가 存在하는 지점에 비슷한 成層現象이 생긴다는 것을 發見하였다. 표 2에 그들의 研究結果의 一部가 紹介되어 있다.

비록 熱層이 形成된 貯水池의 epilimnion과 hypolimnion간의 물의 密度的 差異는 微少하다고 하더라도 그 差異는 여름철의 잔잔한 바람이 물의 混合을 일으키는 것을 防止하는때는 充分한만큼 크다. 따라서 水面의 藻類는 養分이 稀薄해질 때까지 繁殖하여 同時에 바닥에서는 沈澱된 有機物이 分解되면서 養分이 물속으로 擴散하게 된다. 그 結果 여름철의 過大한 藻類繁殖을 抑制하려면 溶存酸素를 充分히 가진 可用한 물의 量이 制限되어 있기 때문에 特別히 給水施設에서는 困란을 받게 된다. 따라서 充分한 良質의 물을 얻기 위하여 貯水池에다 黃酸銅(CuSO₄)나 活成炭素를 산포하여 藻類의 繁殖을 防止하는 方法이 강구되었고 또한 水質이 나쁜 물을 處理하기 위한 各種 淨水方法이 考案되어 왔었다⁽³⁾. 그러나 最近에는 貯水池內에서의 成層現象을 防止하는 方法을 講究하므로써 水質을 改善시키고자 하는 積極的인 方法이 試圖되고 있다.

6. 貯水池의 熱層除去法

깊은 貯水池의 成層現象은 特別히 夏節에 水質의 惡化를 招來하여 可用한 水量을 減少시키므로 이에 對한 對策이 講究되어야 한다. 지금까지 使用된 方法으로는 모두 貯水池물을 垂直的으로 混合시키는 것으로 크게 두가지로 分類할 수 있다. 하나는 揚水機를 使用하는 方法이며 두번째는 空氣擴散法이다. 이들 두 方法들은 熱層形成을 防止하거나 形成된 熱層을 파괴하는데 大端히 適合한 方法으로 알려져 있다. 이 節에서는 이들 두가지 方法에 對해서 좀더 詳細히 論하고자 한다.

6-1. 揚水法

揚水法의 原理는 간단히 말해서 hypolimnion層의 물을 揚水機로 epilimnion層으로 移動시켜 熱層의 形成을 防止하거나 形成된 熱層은 파괴시키는 것이다. Hooper, Ball 그리고 Tanner⁽⁴⁾는 주로 養魚管理를 目的으로 epilimnion層을 冷却시키고 그 두께를 增加시킨 뿐만 아니라 養分의 供給을 위해서 깊이가 6~14m이고 表面積이 1.46ha인 美國 Michigan州에 있는 West Lost 湖의 hypolimnion層의 물을 水面으로 揚水시켰다. Riddick⁽⁵⁾는 8ha의 水面을 가진 給水用 貯水池에다 水質統制를 目的으로 석회축액을 끌고루 뿌리기가 위

하여 修正된 空氣揚水機(modified air-lift pump)의 一種인 浮遊空氣注入機(floating aerator)를 使用한 結果 最初의 hypolimnion層과 epilimnion層간의 溫度差가 6°C를 七日以內에 除去할 수 있었다. Laurie⁽⁶⁾는 Ireland에 있는 Inniscarra 貯水池(面積=800ha, dam에서의 水深=34m)의 hypolimnion層의 물을 7.57×10⁴m³/day의 率로 epilimnion層으로 揚水한 結果 20~25m 깊이에 位置한 turbine 流出口附近에서의 溶存酸素濃度가 현저히 增加하였고 따라서 貯水池下流에서의 물고기 死亡率을 減少시킬 수 있었다. 美國공중보건 봉사국(USPHS)⁽⁷⁾은 1964年과 1965年에 걸쳐 Ohio州의 Vesuvius 湖(表面積=40ha, dam에서의 깊이=10m)와 Kentucky州의 Boltz 湖(表面積=38ha, 平均水深=10m)에다 gasoline engine에 의하여 稼動되는 30cm 混合流(mixed-flow)揚水機를 浮遊시켜 湖水바닥으로부터 0.3~0.6m 上部에 位置하는 물을 水面으로 揚水시킨 結果 두 湖水에서의 水質을 水深에 관계없이 크게 向上시킬 수 있었다. 위에 열거된 例는 모두 比較的 적은 量의 energy를 투입하여도 貯水池에서의 水質을 充分히 統制할 수 있다는 것을 證明한다.

때로는 江으로부터 물을 揚水하여 貯水池에 貯藏해 두었다가 갈수기에 利用할 수도 있다. 이런 경우 貯水池의 設計者는 浮遊固形物의 沈澱을 增加시키기 위하여 낮은 流速으로 물을 貯水池內에 流入시키게끔 努力하지만 그 程度로서도 貯水池內의 成層現象을 어느程度 防止할 수 있다고 한다. 이에 貯水池內에서의 流入口의 位置와 모양을 精確히 調整하므로써 成層現象을 防止하거나 이미 생긴 熱層을 파괴할 수 있다. 이 方法은 英國에서 많이 利用되고 있다. 例를 들어 Cooley와 Harris⁽⁸⁾는 240~500ha의 表面積과 15~23m의 水深을 가진 貯水池에 噴射流入되도록 流入口를 jet discharge 원리에 의하여 設計하였다. 그들의 實驗에 依하면 한여름철의 熱-密度層은 주로 日光熱에 의해서 結果되니 깊이가 20m이고 容積이 약 1.5×10⁸m³인 貯水池의 境遇 江으로부터 약 3.8×10⁵m³/day의 率로 물을 貯水池內의 傾斜된 噴射流型 流入口로 揚水하므로써 熱層形成은 防止될 수 있었다고 한다.

6-2. 空氣擴散法

위에 說明된 揚水法이 水質統制를 위한 貯水池의 熱層除去에 大端히 效果的이지만 單位容積當 要求되는 energy 量이 理論的인 값보다는 比較的 높으므로 같은 效果를 내면서도 energy 要求量을 減少시킬 수 있는 方法을 研究한 結果 空氣擴散法이 考案되었다. Heath⁽⁹⁾는 DO 濃度가 낮아서 植物이나 물고기가 자랄 수 있는

Sweden에 있는 한 eutrophic한貯水池의 바닥에 壓縮空氣를供給하는方法을 試圖했으며, Ford⁽¹⁰⁾는 California州에 있는 Wohlford湖(表面積=90ha, 最大水深=26m)에 6m³/min의 率로 壓縮空氣를 注入시킴으로서 最初의 溫度差異 4.5°C를 80時間內에 除去할 수 있었다. 美國공중보건봉사국(USPHS)은 1966년에 表面積이 38ha이고 平均水深이 10m인 Kentucky의 Botz湖에 다 壓縮空氣를 3.26m³/sec의 率과 2~3kg/cm²의 壓力으로 약 1m 간격으로 놓여진 16個의 多孔性 사기질(ceramic)擴散器를 통하여 供給한 結果 바닥에서 浮上하는 空氣가 약 13m직경을 가진 원통형을 이루었고 水面에 이르러서는 직경이 약 33m가 되었으며, 이 方法을 봄에 始作하여 여름을 통하여 週期的으로 實施한 結果 貯水池內에서 良好한 水質을 維持할 수 있었다고 한다.

1968년과 1969년에 걸쳐 美國陸軍工兵隊에 의하여 5個의 60Hp 空氣壓縮機를 使用하여 Georgia州에 있는 Allatoona貯水池(容積=4.53×10⁸m³)에서 實施된 實驗에 의하면⁽¹¹⁾ hypolimnion層에서 DO濃도가 현저히 增加되었다고 한다. 한편 美연방水質管理局이 Eufaula貯水池(容積=7.03×10⁸m³)를 利用하여 實驗한 結果 使用된 空氣壓縮機의 能力과 實驗期間이 不充分하여 水深 7m 아래의 8×10⁷m³의 물을 完全히 混合시키는데는 不充分하였지만 空機壓縮機를 댐으로부터 약 250m以內的 距離로 移動시켜 稼動시킨 結果 貯水池 上流의 물에는 거의 영향이 없었지만 발전실에서 放出되는 流出水의 DO를 增加시킬 수가 있었다고 한다.

위에 열거된 예에서 言及되지 않았지만 여름철에 成層이 된 後에 空氣混合을 實施할 수도 있지만 成層이 되기 前의 이른 봄부터 始作하여 계속적이 아니고 週期的으로 混合을 實施하여도 成層을 防止할 수 있고 水質을 向上시킬 수 있었다고 한다.

6-3 使用機械의 性能과 設計의 評價

위에 說明된 바와같이 熟層을 人工的으로 除去하기 위해서는 機械가 要求되므로 가장 效果적인 機械의 設計 및 選擇을 위한 方法이 必要하다. 다음에 說明되는 酸素注入能力(oxygenation capacity), 그리고 成層除去 效率(destratification efficiency)의 계산이 한 方法으로서 추천될 수 있다.

$$\text{酸素注入能力(OC)} = \frac{t_1 \text{과 } t_2 \text{ 間의 酸素平衡의 純 변화}}{t_1 \text{과 } t_2 \text{ 間에 注入된 總 量} \times \text{hypolimnion 層의 부피}} \times \text{energy 量}$$

위 式에서 t_1 은 混合開始時間, t_2 는 混合終了時間을 뜻하며, 酸素平衡은 hypolimnion層을 垂直으로 2~3m

간격으로 分割한 다음 부피를 계산하고 水質의 化學分析을 實施한 다음 各層의 DO, sulfide, 二價狀態의 鐵 및 Mn의 무게를 全部 合算하여 酸素값으로 환산하므로써 구할 수 있다. 따라서 酸素注入能力(OC)의 單位는 예를 들어 Kg DO/kilowatt-hour가 될 것이다.

한편 成層除去效率(DE)은 다음 式을 利用하여 구할 수 있다.

$$\text{成層除去效率(DE)} = \frac{t_1 \text{과 } t_2 \text{ 사이의 安定度の 純 변화}}{t_1 \text{과 } t_2 \text{ 사이의 總 energy 注入量}} \times 100$$

위 式에서 t_1 과 t_2 는 酸素注入能力(OC) 說明시와 같으며 安定도는 貯水池의 물을 混合시키기 위하여 要求되는 最小의 energy量으로서 貯水池의 水深을 垂直으로 2~3m 간격으로 分割한 다음 現存하는 垂直溫度分布를 利用하여 各層의 무게를 계산하므로써 구할 수 있다. 이때 energy의 得失은 各層이 等溫이 된 後 重心이 있는 깊이까지 算術的으로 移動되는 것처럼 假定하고서 決定된다. 이렇게 해서 계산된 energy의 得失은 成層된 狀態에서의 純 energy를 얻기 위하여 代數的으로 합해진다. 꼭같은 계산節次가 貯水池물이 混合後 等溫이라고 假定한 다음 反復된다. 이렇게 計算된 純 等溫 energy는 等溫이 되기 前에 계산된 값보다 적어야 하며, 그 差異가 安定度이다. 따라서 安定도는 貯水池물을 混合시켜서 等溫이 되도록 만들기 위하여 要求되는 最小 energy量을 뜻한다. 그림 2는 空氣注入法을 使用한 Ford⁽¹⁰⁾의 實驗結果로서 空氣注入을 實施하면 貯水池물의 安定도가 減少한다는 것을 보여준다.

7. 貯水池의 成層除去가 水質에 미치는 影響

7-1. 有機物의 生物學的 分解

現在로서는 貯水池나 湖水에서 微生物에 의한 有機物의 分解에 對한 研究資料가 可用하지 않으나 Ford⁽¹⁰⁾는 그림 3에 보인 바와같이 營소要求量을 測定하여 間接的으로 成層除去가 酸化可能한 有機物이나 無機物의 量을 減少시킨다는 것을 證明하였다. 한편 直徑이 0.9m이고 長이가 3.3m인 aluminum管과 有機物로서 合成洗濟 및 除草藥을 使用하여 實驗한 結果 合成有機物의 分解速度는 水溫이 높은 epilimnion層에서 보다 溫度가 낮고 溶存酸素濃도가 낮은 hypolimnion層에서 훨씬 느리다는 것이 알려졌다⁽¹²⁾. 따라서 우리는 貯水池나 自然湖水에 人工的인 成層除去方法을 適用하여 全 水深에 걸쳐 溫度가 높은 好氣性 狀態를 維持시키면 微生物에 의한 有機物의 分解를 촉진시켜 水質을 向上시킬 수 있다고 結論지을 수 있다. 앞으로 이를

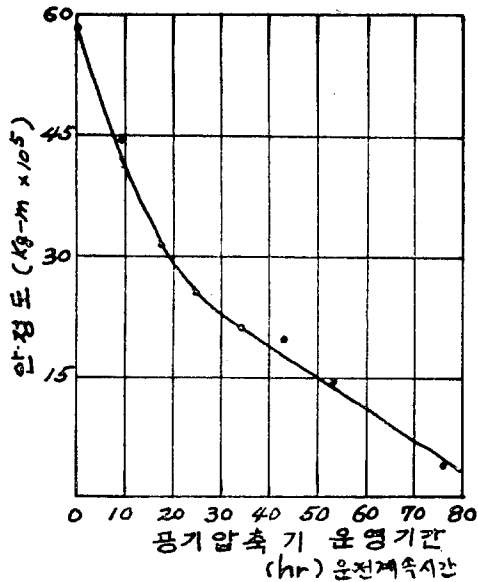


그림 2. 空氣注入後의 貯水池의 安定度변화
A: 공기주입전
B: 공기주입후

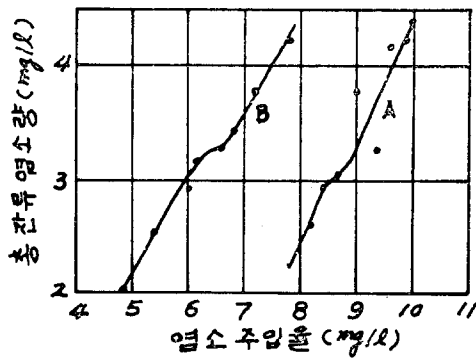


그림 3. 熱層除去가 저수지물의 염소요구량에 미치는 영향

證明하기 위하여 現場에서 많은 研究가 行實되어야 할 것이다.

7-2. 無機物

現場에서 DO를 測定하는 것은 比較的 용이하므로 이에 對한 研究結果는 많이 發表되었으며 그 結果를 要約하면 위에서 說明된 各種 成層除去法이 물 속의 DO濃도를 현저히 增加시킨다는 것이다. 그러나 機械的인 揚水機의 使用보다는 空氣擴散法이 DO濃도를 增加시키는데는 더 効果的일 것 같다. 또한 갑자기 크게 물의 混合을 實施하면 hypolimnion層의 물이 大量

eplimnion으로 移動되어 DO濃도가 낮게 되므로 가끔 적으면 천천히 그리고 계속적으로 混合을 實施하는 것이 더 좋을 것이다.

여름철에 貯水池內에서의 熱層形成이 극심할 때는 바닥 가까이에서의 硫化物(sulfide)의 濃도는 10mg/l 程度の 높은 값을 보일 수도 있겠지만 熱層除去를 위해서 물의 混合을 계속하면 硫化物은 酸化되어 없어지게 되며 간헐적인 混合만으로도 硫化物의 濃도를 充分히 낮은 값으로 維持할 수 있다고 한다. 그림 4는 貯水池물의 混合이 硫化物濃도에 큰 영향을 미친다는 것을 잘 보여준다.

硫化物과 마찬가지로 암모니아性 窒素(NH₃-N)는 嫌氣性 分解에 의해서 생기므로 貯水池內에 熱層이 생기면 그 濃도는 hypolimnion層에서는 높고 eplimnion

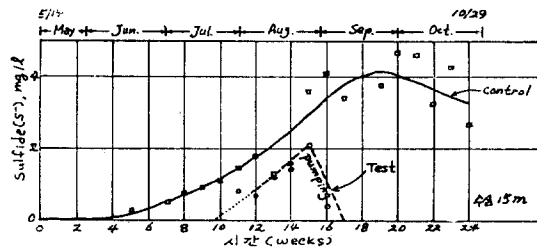


그림 4. 貯水池內에서의 混合作業이 硫化物濃도에 미치는 영향

層의 水面에 가까워질수록 漸漸 減少하게 된다. 이들 還元狀態의 硫化物과 Ammonia性 窒素의 濃도가 높으면 물에 냄새를 낼 뿐만 아니라 水中生物에도 有害하므로 貯水池의 熱層除去作業은 溶存酸素의 供給을 增大시켜 이들을 酸化시키므로써 水質을 向上시키게 된다. 그림 5는 貯水池의 混合이 깊은 水深에서도 Ammonia性 窒素의 濃도를 크게 減少시킨다는 것을 보여준다.

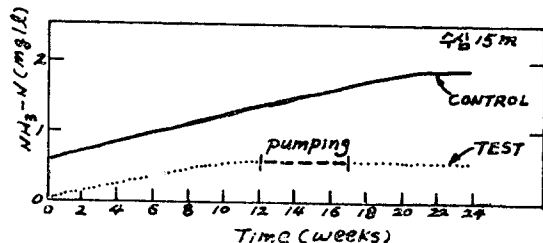


그림 5. 揚水混合시 貯水池內에서의 NH₃-N의 변화

鐵이나 망간(Mn)은 完全히 酸化될 境遇에는 溶解도가 낮아서 水酸化物로 沈澱하지만 嫌氣性狀態에서는 2價로 還元되어 물속에 溶解하므로 水質을 惡化시킨다는 것은 當然한 일이다. 그러나 熱層除去에 의해서

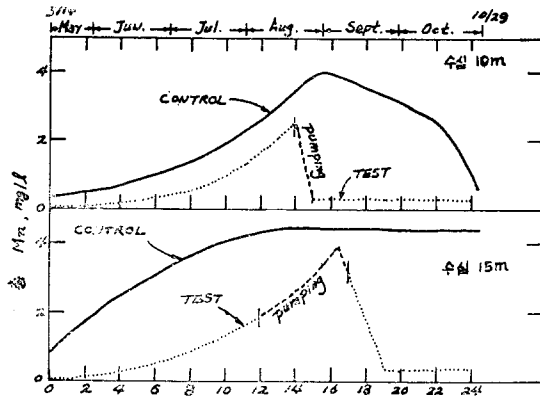


그림 6. 貯水池의 熱層除去가 總 manganese 濃도에 미치는 영향

DO가 供給되면 還元狀態의 硫化物이나 Ammonia性 窒素와 마찬가지로 3價狀態의 鐵이나 4價狀態의 망간으로 酸化되어 물속에 溶解되어 있는 量이 顯著히 減少하게 된다. 그림 6에 混合의 有無가 망간의 濃도에 미치는 影響이 잘 說明되어 있다.

7-3. Plankton 群

위에서 說明된 여러實驗의 結果에 의하면 熱密度層 除去期間中 貯水池內的 plankton 群의 濃度は 減少되었 으며 이 減少現象이 貯水池물의 混合에 의한 單純한 稀釋에 의한 것이 아니었다고 한다. 왜냐하면 水深全體에 걸쳐서 plankton의 數가 減少되었기 때문이다. 그러나 混合이 中斷된 後에는 plankton이 다시 繁殖하기 始作하였다. 또한 熱層除去를 위한 混合期間中 plankton의 種類에 있어서도 큰 變化를 보였다. Eutrophic한 貯水池에서는 봄과 가을사이의 따뜻한 氣候下에서는 動物性 plankton이 繁殖해서 植物性 plankton 即 藻類를 잡아먹는 짧은 期間을 除外하고서는 계속해서 藻類가 繁殖한다. 그러나 熱層이 除去되면 藻類의 濃도가 크게 減少하든지 아니면 最小限度로 원하지 않는 藻類가 사라지게 되므로 水質은 크게 向上되고 따라서 給水施設에서의 淨水能力이 크게 增加될 수 있게 되는 것이다.

그러면 왜 混合이 되면 藻類의 濃도가 減少하든가 아니면 種類에 變化가 생기는가? 이에 對한 解答은 아직 明確히 주어지지 않았지만 여러가지 추측이 만들어진다. 첫째는 貯水池물이 垂直方向으로 運動을 하게 되어 epilimnion層과 hypolimnion層의 區別이 없게 되고 따라서 藻類는 繁殖에 필수불가결한 햇빛을 充分히 받을 수 있을만큼 水面 가까이에 即 photic zone에 充分한 期間을 머물 수 없다는 것이며 이것은 바닥

에서 浮上한 浮遊固形物에 의하여 햇빛의 一部가 吸收되거나 차단되어서 깊은 곳까지 침투 못하는 現象에 의해서도 加重된다는 假定이다.

두번째는 hypolimnion에서 epilimnion으로 浮上한 各種 物質이 藻類의 繁殖을 억제하거나 아니면 그러한 物質이 藻類에게 毒素가 된다는 假定이다. 왜냐하면 藻類는 epilimnion에서 主로 酸化된 狀態의 物質을 相對하게 되지만 混合이 될 境遇 hypolimnion에 存在하던 各種 還元된 物質이 藻類와 接觸하기 때문이다. 通常 水中에서 還元狀態의 物質은, 特別히 濃도가 높을 때 水中微生物에 有害하다는 것이 알려져 있다.

세번째 假定은 貯水池의 물이 完全히 混合되면 藻類의 繁殖에는 不適合한 環境이 되지만 反面 動物性 plankton의 成長에는 適合한 環境이 되어 이미 存在하는 아니면 새로 생기는 植物性 藻類들을 獵食할지도 모른다는 것이다. 비록 위에 일거된 諸假定이 不確實한 것이지만 理論적으로 大端히 妥當性이 있는 것이며, 앞으로 이를 證明하기 위한 研究가 많이 실시되어야 할 것이다.

8. 結 論

自然的으로 存在하는 地表水만으로는 充分한 水資源을 획득할 수 없으므로 人工的으로 貯水池를 만들게 되지만 貯水池는 長期間에 걸친 汚染物의 流入에 의해서 eutrophication이 무르익어 쓸모없게 될지도 모르므로 貯水池의 設計나 管理에 있어서 eutrophication을 防止하도록 努力해야 하며 또한 貯水池內的 水質의 惡化를 防止하기 위한 成層現象의 除去가 要求된다.

Eutrophication은 自然的으로, 아니면 人工적으로 各種 汚染物이 貯水池로 흘러들어가면 貯水池內에서 藻類의 繁殖, 死亡, 沈澱, 그리고 分解가 反復되므로 結果되는 現象으로, 따라서 人工적인 貯水池의 汚染을 豫防하기 위하여 下水를 處理하거나 아니면 우리의 生活습성을 변경시킨 必要性이 있게 된다. 물론 아직 학술적으로 eutrophication이 반드시 發生한다고는 證明되지 않았지만 지금까지의 自然 관찰에 의하면 江, 湖水, 貯水池 등에서 이 現象이 무르익고 있는 것이 발견되었으니 이를 뒷받침할 수 있는 學說이 주장되고 있으므로 이를 무시할 수는 없다고 본다.

貯水池에서의 eutrophication은 여름의 높은 氣溫下에서 成層現象과 병행하여 水質을 크게 惡化시키므로 지금까지는 貯水池의 水質向上을 위한 方法으로 揚水機나 空氣擴散을 利用하여 貯水池물을 混合시켜 熱層을 파괴하는 方法을 채택했다. 勿論 大量의 貯水池물

을 完全混合시키는데는 energy의 要求量이 너무 방대하므로 主로 局地的으로 아니면 週期的으로 混合을 實施하여 要求事項에 알맞게끔 水質을 改良시키는 方法을 택하게 되었다.

이렇게 하므로써 貯水池의 eutrophication 現象을 영구적으로 防止할 수 있을런지는 의문이지만 當面한 水質問題는 解決할 수 있게 되었다. 앞으로 이에 관한 연구가 많이 이루어져서 좀더 경제적인 方法으로 貯水池의 eutrophication 과 成層現象을 막고 水質統制를 할 수 있는 方法이 講究되어야 할 것이다.

參考文獻

1. Mitchell, R., *Water Pollution Microbiology*, Wiley-Interscience, 1972.
2. Tsuji, T., Seki, H. and Hattori, A., "Results of Red Tide Formation in Tokyo Bay," *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 46, No. 1, 1974, pp. 165~172.
3. The American Water Works Association, Inc., *Water Quality and Treatment*, McGraw-Hill Book Co., 1971.
4. Hooper, F.F., Ball, R.C., and Tanner, H.A.,

- Trans. Amer. Fish. Soc.*, Vol. 82, 1952. p. 222.
5. Riddick, T.M., *Water and Sewage Works*, Vol. 104, 1957, p. 231
6. Laurie, A.H., *Water and Waste Treat.* Vol. 8, 1961, p. 363
7. Symons, J.M., *Water Quality Behavior in Reservoirs A Compilation of Published Research Papers*, PHS Publ. 1930, Cincinnati, Ohio, 1969, p. 616
8. Cooley, P. and Harris, S.L., *J. Inst. Water Eng.* Vol. 8, 1954, p. 517
9. Heath, W.A., *Water and Sewage Works*, Vol. 108, 1961, p. 200.
10. Ford, M.E. Jr., "Air Injection for Control of Reservoir. Limnology," *Journal American Water Works Association* Vol. 55, No. 3, 1963, p. 267-274.
11. Posey, F.H. Jr., and Dewitt, J.W., *J. Power Div., Proc. ASCE*, Vol. 96, 1970. p. 173
12. De Marco, J., Symons, J.M., and Robeck, G.G., *J. American Water Works Association*, Vol. 59, 1967. p. 965.

會員移動事項

會員 여러분께서 다음처럼 移動事項이 있을 때에는 本人은 勿論 親知께서 即時 本會 事務局에 連絡하여 주시기 바랍니다.

接受되는데로 會員動靜欄에 紹介하여 드리겠습니다.

1. 宅이 移徙했을 때 : 住所 및 電話番號
2. 職場이 移動되었을 때 : 職場名, 職位, 所在地 및 電話番號
3. 其他 學位를 받은 境遇, 海外旅行을 하는 境遇, 特別한 事業에 參與하는 境遇 等

正會員入會要領

水文 또는 이와 關聯있는 知識이 있거나 또는 識見이 높은 분, 水文을 應用하는 事業에 從事하는 분으로서 本學會 事業趣旨에 贊同하여 入會를 願하시는 분은 既加入한 會員의 推薦을 받아 本學會 所定樣式에 의한 入會願을 提出하여 주시기 바랍니다.

提出處 : 韓國水文學會事務局

電話 (23) 0491~3