

〈特輯 貯水池〉

選擇引出

尹 泰 勳*

1. 머릿말

대규모 댐의 축조로 형성되는 저수지는 그 규모가 커서 上流河川으로 부터의 流入量과 댐으로 부터의 放流量은 저수지의 貯溜容量에 비하여 매우 작다. 이와 같은 流入量과 放流量에 의하여 유발되는 저수지 내의 흐름은 미미하고 극부적이다. 따라서 저수지의 물은 거의 停滯상태에 있다. 또한 水深이 매우 크므로 수심에 따라 水溫이 변하는 溫度層의 형성으로 저수지는 成層 상태가 된다. 이와같이 成層 상태의 물은 酸素不足, 水溫低下로 저수지와 下流河川의 生態系과 水質에 악영향을 초래한다. 따라서 下流의 水質조건을 만족하기 위해서는 저수지의 非成層化와 요구되는 水質의 물이 존재하는 수심에서 물을 放流하는 것이 필요하다.

2. 貯水池의 成層

湖水나 저수지에서 密度層(density stratification)은 주로 수심에 대한 온도변화에 의하여 형성되나 溶解物質 또는 浮遊상태의 물질에 의해서도 형성된다. 특히 온도에 의한 밀도층인 溫度層(thermal stratification)의 형성은 태양열, 蒸發과 傳導에 의한 수면에서의 熱損失, 流入과 流出에 의한 熱移送를 포함하는 熱均衡에 의한 다. 저수지에서의 흐름과 循環은 주로 密度 변화에 의한 溫度層에 좌우된다.

하계에는 태양열이 수면층에 저장되어 수면층의 온도가 상승하고 바람에 의한 亂流로 인하여

下向混合을 유발하여 온도가 거의 균일한 층을 형성한다. 이와 같이 상대적으로 온도가 높은 水面層을 表水層(epilimnion)이라 하며 태양열에 의한 수면온도의 영향을 받지 않고 온도기울기(dT/dz)가 무시할 정도로 작은 저수지의 低部の 온도가 낮은 층을 深水層(hypolimnion)이라 한다.

이러한 두 온도층 사이에 존재하는 층은 온도기울기(dT/dz)가 매우 큰 水溫躍層領域(thermocline region 또는 metalimnion)이고, 水溫躍層(thermocline)은 $\partial^2 T/\partial z^2=0$ 으로 정의되는 층이다.

가을과 겨울 동안에는 수면의 온도가 강하하여 저수지의 低部溫度보다 낮아져 不安定(instability) 상태가 형성된다. 상부층이 더 차가우므로 陰浮力의 형성으로 침강과 對流轉到(convective overturn)이 계속 일어나 거의 완전한 混合

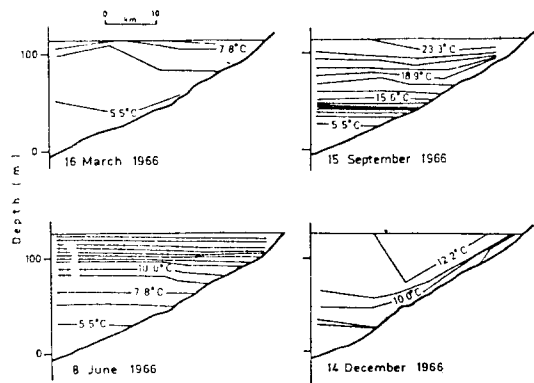


그림 1 季節에 따른 溫度層 형성(美 Fontana 貯水池)

* 漢陽大學校 土木工學科 教授

이 이루어져 等溫狀態(isothermal)가 된다. 봄에는 점차적으로 밀도층이 다시 형성된다(그림 1).

人工貯水池에서는 流入과 流出이 熱과 質量均衡에 크게 기여한다. 그러나 큰 저수지에서는 이들이 온도구조, 즉 水質媒介變數에 주는 영향은 매우 작다. 이들에 의한 흐름 또한 작아서 混合을 유발한 剪斷은 영으로 취급된다.

3. 水 質

저수지에서 溫度層의 형성은 化學的 成層으로 나타난다. 그 한 예로 溫度層貯水池에서는 酸素成層이 되어 바람과 對流에 의한 혼합으로 산소가 풍부한 表水層과 有機物質의 산소요구량이 수면층에서 전달되는 산소량을 초과하여 산소가 부족한 深水層을 이룬다(그림 2). 水深에 따라 溶存酸素(dissolved oxygen, DO)의 함유량이 감소하고 저수지의 深水層에서는 非暴氣現象이 일어난다. 다른 화학적 변화는 산소감소현상으로 유기물의 蛋白質의 박테리아分解로 암모니아의 발생, 磷과 硅酸의 溶解化, 黃化水素, 메탄, 二酸化炭素의 生成, 鐵分과 망간 등의 발생 등을 들 수 있다. 안정된 密度層의 존재가 대규모의

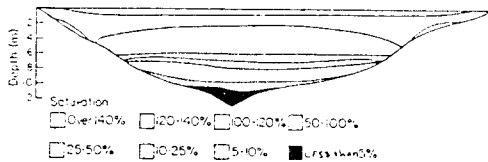


그림 2 貯水池의 溶存酸素의 分布(英, Chew Valley 湖)

亂流混合을 억제하여 결과적으로 공기-물의 境界面에 존재하는 산소의 下向移動에 의한 低部 물의 自然暴氣率을 크게 감소시키고 저수지 저부의 유기물은 계속 산소를 소모하므로 溶存酸素의 감소가 일어난다.

저수지의 DO 구조는 저수지나 하류 하천의 生態學的 均衡이 DO의 함유 정도에 따라 매우 민감하므로 수질문제에서 가장 중요하게 된다. 저수지의 DO 均衡은 저수지 내의 흐름에 의한 移送, 수면에서 再暴氣, 식물의 성장과 연관된 光

合成酸素源, 上流 河川流入의 산소요구량, 低部 推積, 呼吸, 水生有機物의 分解 등 수많은 물리적 생물학적인 요인에 지배된다. 따라서 저수지의 수질관리는 주로 저수지에 있는 물을 어느 정도로 순환시켜 溫度層을 파괴하는 가에 달려 있다. 온도층을 피하는 방법으로 水溫이 다른 상이한 수심에 放流管을 설치하여 하류에 요구되는 수질의 물을 선택하여 引出하는 것이다.

4. 選擇引出의 必要性

댐을 통하여 저수지의 물을 放流함에 있어서 放流口의 위치는 다음과 같은 사항들에 의하여 결정된다. 관개, 급수 및 다른 보존목적으로 물을 저류하는 댐은 할당된 貯水空間의 바닥에 있는 물까지 引出할 수 있도록 낮아야 한다. 더우기 댐의 검사나 보수를 위하여 저수지를 비우는데 放流口가 이용된다면 방류구는 가장 낮게 위치해야 한다. 그러나 粘土堆積, 魚族, 野生生物의 보존 및 위락 등을 위해서는 非有效貯溜容量을 확보할 수 있는 위치라야 한다.

저수지는 溫度層을 형성하여 맛과 냄새가 수심에 따라 다르므로 上水道用水로 방류되는 경우에는 급수로 적당한 수질을 갖는 水深에서 물을 引出해야 한다. 鑛物質의 濃度和 水溫 등을 工業用水에 중요한 수질조건이므로 적정수질의 물을 引出할 수 있는 수위라야 한다. 대댐의 深水層의 水溫은 매우 낮으므로 심수층의 물을 관개용수로 방류할 경우 비농사에 冷害를 주제로 관개용수에 적정 수온의 물을 引出해야 한다. 또한 어족의 각 종류는 그 생존에 最適溫度範圍를 갖으므로 어족과 야생생물에 최적 수온이 물이 저수지로부터 放流되어야 한다. 成層貯水池에서 表水層은 溶存酸素가 풍부하고 深水層은 수온이 낮고 산소가 부족하고 영양이 풍부하므로 下流에서 요구되는 수질의 물을 引出하기 위해서는 선택된 수위에서 放流되어야 한다. 또한 下流의 물요구는 年中을 통하여 변하고 저수지의 수온과 수질의 成層도 변동한다. 따라서 저수지로부터 물을 인출하는 水位도 변한다. 이와 같이 下流에서 요구되는 水溫과 水質의 물을 引出하기 위해서는 選擇引出이 필요하고 저수지의

수질을 개선하기 위해서는 非成層化가 필요하게 된다.

5. 放流力學

表水層에서의 활발한 혼합은 적절한 물의 暴氣를 가능하게 하나 深水層의 물은 산소의 결핍 상태에 있게 된다. 그러므로 방류되는 물이 저수지의 어느 부분에서 오는지를 아는 것은 매우 중요하다. 동계에는 저수지의 물이 대개의 경우 성층화되지 않으므로 저수지로부터引出은 고전적인 포텐셜이론으로 기술될 수 있다. 그러나 년중 대부분의 기간에는 저수지가 成層 상태에 있게 된다. 성층화는 水溫躍層에서 현저하나 일반적으로 방류구가 위치하는 深水層에도 온도기울기가 존재한다. 이와 같은 방류구로부터 인출되는 유량이 작으면 鉛眞密度기울기는 연직운동을 막을 만큼 충분히 강한 浮力을 형성하여 인출되는 물을 取水口水位에 있는 얇은 水平層으로부터 온다(그림 3a). 그러나 유량이 증가하면 引出層은 수온약층을 교차하고(그림 3b), 보다 큰 유량에서는 부력이 압도되어 흐름은 포텐셜 흐름이 된다(그림 3c).

非成層貯水池에서는 인출수위의 상하대칭 有 限幅으로부터 인출된다. 그러나 成層貯水池에서는 取水口가 위치한 수심 부근의 제한된 층인

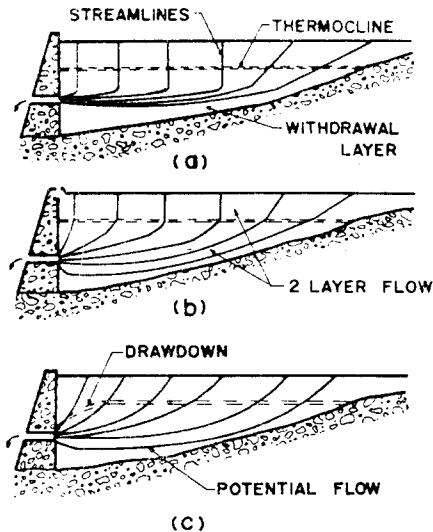


그림 3 引出흐름양상

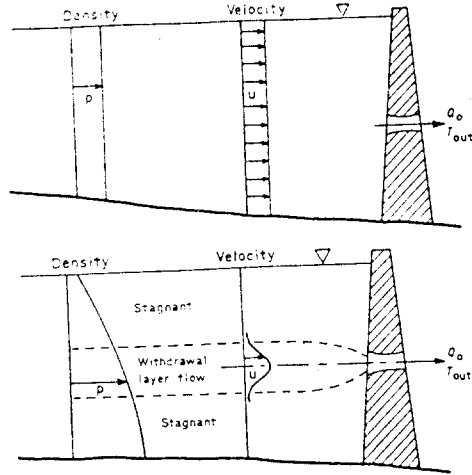


그림 4 選擇引出時 流速分布 (a) 非成層 (b) 成層貯水池

引出層(withdrawal layer)에 집중된 인출흐름을 형성하고 물이 빠져나오는 수심은 성층의 안정성에 의하여 국한되기 쉽다(그림 4). 인출에서 문제가 되는 것은 유량과 수심을 예측하는 것으로 이는 引出層의 두께와 유속분포를 필요로 한다. 引出水의 온도는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$T = \frac{1}{Q_0(t)} \int_{z_b}^{z_s} B(z)u(z,t) T(z,t) dz \quad (1)$$

여기서 Q_0 는 放流流量, B 는 저수지폭, z_s 는 수면표고, z_b 는 바닥표고이다.

5.1 非粘性解

粘性과 擴散을 무시하고 관성만을 고려한 非粘性 流體로 가정할 때 수로의 바닥에 위치한 line sink의 유량 q' 는

$$q' = ud_1 \quad (2)$$

여기서 u 는 일정한 값을 갖고, d_1 은 밀도후르드수 F_D 에 관계된다.

$$F_D = \frac{u}{d_1 \sqrt{g\epsilon}} \quad (3)$$

여기서 F_D 는 값은 0.345⁽¹⁵⁾, 0.3⁽³⁾로 상수의

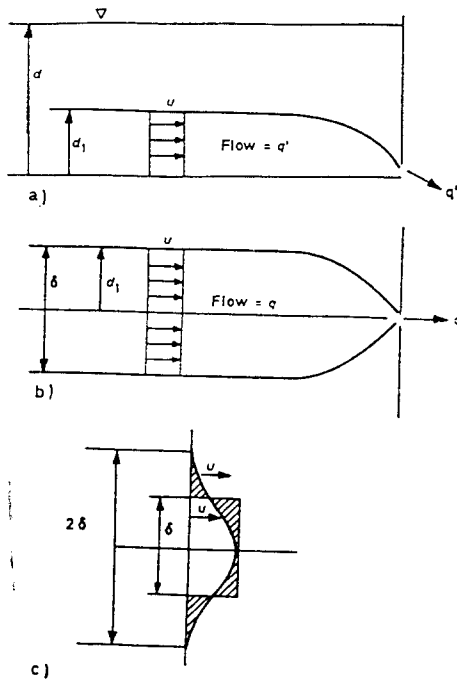


그림 5 成層흐름의 流速分布

값을 갖는 것으로 밝혀졌다. 이를 그림 5b에 적용하면

$$F_D = 0.345 = \frac{q}{(2d_1)^2 \sqrt{g\epsilon}} \quad (4)$$

$\delta = 2d_1$ 을 고려하여 δ 에 관하여 정리하면

$$\delta = 2.4 \left(\frac{q^2}{g\epsilon} \right)^{1/4} \quad (5)$$

이상의 결과는 유속분포에 관한 정보를 제공하지 않으므로 그림 5c와 같은 정규분포가 제안되었다. 이 경우 인출층의 두께는 2배가 된다. 따라서

$$\delta = 4.8 \left(\frac{q^2}{g\epsilon} \right)^{1/4} \quad (6)$$

정규분포를 가정한 유속은 다음과 같다.

$$u = u_{\max} e^{-\frac{(z-z_{out})^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

u_{\max} 은 연속조건으로부터 구해진다.

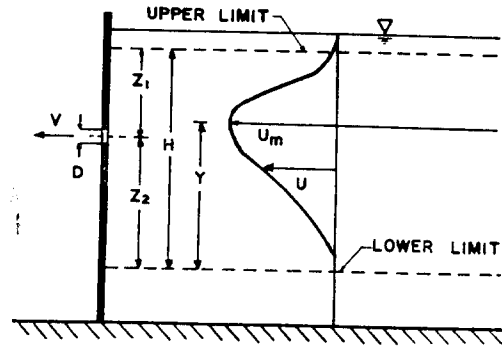


그림 6

$$Q_0(t) = \int_{z_b}^{z_s} B(z) u_{\max} e^{-\left[\frac{(z-z_{out})^2}{2\sigma^2} \right]} dz \quad (8)$$

표준편차 σ 는 δ 에 관계된다. 즉, $z_{out} \pm \frac{\delta}{2}$ 에서 95%의 물이 인출된다면

$$\sigma = \frac{\delta/2}{1.96} \quad (9)$$

그러나 많은 경우 流速分布가 引出水位를 중심으로 대칭인 경우는 드물다. 따라서 그림 6과 같이 포물선으로 가정할 때 유속은 다음과 같다.⁽²⁾

$$u = u_{\max} \left[1 - \frac{y \Delta \rho}{Y \Delta \rho_m} \right]^2 \quad (10)$$

여기서 Y 는 下部限界에서 최대유속의 수위까지의 거리, y 는 유속을 구하는 높이에서 밀도 차이가 $\Delta \rho$ 인 최대유속의 수위까지의 거리, $\Delta \rho_m$ 은 Y 에 대한 密度差異이다.

$$Y = \delta \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{z_1}{H} \right) \quad (12)$$

여기서 z_1 는 $u_p - \frac{z^2}{A_p} \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \Delta z = 0$ 을 풀므로서 구해지고 u_p 는 평균유속, A_p 는 放流口面積, $\Delta \rho$ 는 방류구와 인출층의 上限界 또는 下限界 사이의 밀도차이다.

5.2 粘性—擴散解

粘性和 擴散을 고려한 경우 line sink 를 가정

한 引出層의 두께는⁽¹⁶⁾

$$\delta = \frac{7.14x^{1/3}}{\alpha_0} \quad (12)$$

여기서 x 는 sink, 즉 引出口로부터의 거리이고, α_0 는

$$\alpha_0 = \left(\frac{\varepsilon g}{\alpha \nu} \right)^{1/6} \quad (13)$$

여기서 $\varepsilon = -(1/\rho)d\rho/dx$, α 는 分子擴散係數, ν 는 動粘性 係數이다. 擴散을 고려하지 않은 경우 δ 와 중심선의 속도 v 는 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\delta = 6.84 \left(\frac{g x \nu}{g - \frac{\Delta \rho}{\rho}} \right)^{1/4} \quad (14)$$

$$v = -0.408 \left(\frac{q^3 g \frac{\Delta \rho}{\rho}}{4 x \nu} \right)^{1/4} \quad (15)$$

6. 引出方法

下流에서 요구되는 수질과 적정水溫의 물은 저수지로 引出하는 방법에는 非成層化, 選擇引出 및 調整池 등이 있다.

6.1 非成層化

산소결핍, 低溫, 高營養濃度 등은 成層貯水池의 深水層에서 온도성층을 파괴하기 위한 수단으로는 다음과 같은 방법들이 채택된다. 저수지의 수면에서 바닥으로 바닥에서 수면으로 물의 이동을 발생시켜 인공적으로 물을 혼합시켜 수질을 개선하는 水理學的 非成層化, 주로 深水層에서 공기를 上向放流시키므로서 산소가 부족한 深水層에 공기(산소)를 공급함과 동시에 循環을 유발하여 非成層化를 꾀한다.

6.2 選擇引出

선택인출에는 저수지의 중앙에 위치하는 取水塔, 多重引出口構造, 開閉引出構造方法 등이 있다. 多重引出口는 그림 7과 같이 引出口를 상이한 水深에 설치하여 下流에서 요구되는 水溫을 갖는 水位에 있는 물은 引出하도록 한다. 開

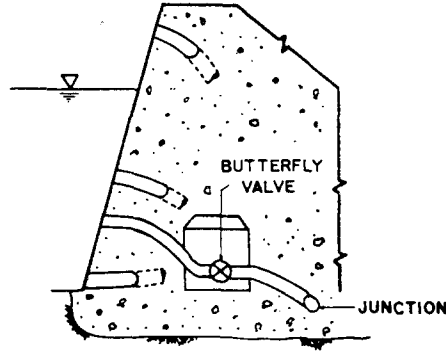


그림 7 選擇引出의 多重引出構造

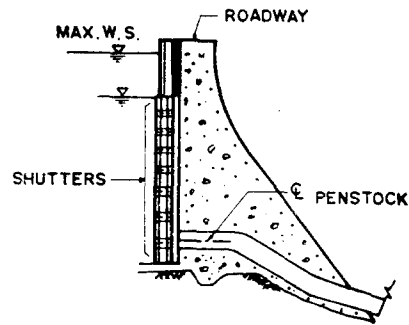


그림 8 選擇引出의 開閉引出構造

閉引出은 그림 8과 같이 상당한 水位에 이르는 引出構造를 설치하고 開 shutter를 이용하여 요구되는 水溫을 갖는 水位部만을 개방하고 나머지 부분을 차단하므로서 적정水溫의 물을 引出한다. 적정 DO의 물을 얻기 위하여 산소가 부족한 深水層의 물과 산소가 풍부한 表水層의 물을 攪拌하여 혼합토록 한다.

6.3 調整池

댐 下流에 적정규모의 調整池를 건설하여 댐에서 방류되는 低溫의 물이 조정지에 滯留하는 동안 수온을 상승시키는 방법으로 우리 나라의 모든 대 댐에는 이 방법이 채택되어 왔다. 總貯溜容量이 $2.87 \times 10^9 \text{ m}^3$, 높이가 123 m인 昭陽江댐의 경우 調整池의 규모는 $514 \text{ m} \times 267 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 로 수심 1.15 m에서 $113,800 \text{ m}^3$ 의 용량을 갖으나 그 효과는 아직 구체적으로 조사되지 않은 것으로 사료된다.

參考文獻

- 1) Bohan, J.P. and Grace, J.L., 1970, Mechanics of stratified flows through orifices, Proc. ASCE., J. Hyd. Div., 96(HY12), 2401~2416.
- 2) Bohan, J.P. and Grace J.L., 1973, Selective withdrawal from manmade lakes, Technical report H-73-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Mississippi.
- 3) Brooks, N.H. and R.C.Y. Koh, 1969 Selective Withdrawal from Density Stratified Reservoirs, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.95, No. HY4, July, 1369~1400.
- 4) Bryan, J.G., 1964, Physical control of water quality, Br. Water works Assoc. J., 46, 546~564.
- 5) Dortch, M.S., 1979, Artificial destratification of reservoirs, Tech. Rept. E-79-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 59p.
- 6) Dortch, M.S., Loftis, B., Fontane, D.G. and Wilhelm, S.C., 1976, Dickey-Lincoln School Lakes Hydrothermal Model Study, Tech. Rept. H-76-22, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- 7) Elder, R.A. and Wunderlich, W.O., 1968, Evaluation of Fontana Reservoir field measurements, ASCE Specialty Conference on Current Research into the Effects of Reservoirs on Water Quality, Portland, Oregon, January 1968.
- 8) Elder, R.A. and Wunderlich, W.O., 1969, The prediction of withdrawal layer thickness in density stratified reservoirs, TVA Division of Water Control Planning, Engineers Laboratory Report No. O-6781, March 1969.
- 9) Gelhar, L.W. and Mascolo, D.M., 1966, Non-diffusive characteristics of slow viscous flow towards a line sink, Hydrodynamics Lab., Report No.88, MIT.
- 10) Hooper, F.F., Ball, R.C. and Tanner, H.A., 1953, An experiment in the artificial circulation of a small Michigan lake, Trans. Am. Fish Soc., 82, 222~241.
- 11) Huber, W.C. and Harleman, D.R.F., 1968, Laboratory and analytical studies of thermal stratification in reservoirs, MIT Tech. Report (112, MIT Cambridge, Mass.
- 12) Huber, W.C., and D.R.F. Harleman, 1972, Temperature Prediction in stratified Reservoirs, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 98, No. HY4, Apr., 645~666.
- 13) Imberger, J., 1980, Selective withdrawal: a review, Proc. 2nd Int. Symp. Stratified Flows, Trondheim, 1980, 1, 381~400.
- 14) Imberger, J. and Hamblin, P.F., 1982, Dynamics of lakes, reservoirs and cooling ponds, Ann. Rev. Fluid Mech., 14, 153~187.
- 15) Kao, T.W., 1965, The Phenomenon of block in stratified flow, J. Geophys. Res., 70, 815~822.
- 16) Koh, R.C.Y., 1964, Viscous stratified flow towards a line sink, W.M. Keck Laboratory Report KH-R-6, California Institute of Technology.
- 17) Markofsky, M. and D.R.F. Harleman, 1973, Prediction of Water Quality in stratified Reservoirs, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol.99, No. HY5, May, 729~745.
- 18) McDougall, T.J., 1978, Bubble plumes in stratified environments, J. Fluid Mech., 85, 655~672.
- 19) Rodda, J.C., R.A. Downing, and F.M. Law. Suptewatic Hydrology, Newnes-Butter Worths, 1976, 310~312.
- 20) Taggart, C.T. and McQueen, D.J., 1982, A model for the design of hypolimnetic aerators. Water Res., 16, 949~956.