

# 淡水湖 Multiple Box 水質模型의 開發과 適用

## Development and Application of Multiple Box Water Quality Model for Estuary Reservoirs

林 鍾 完\* · 權 純 國\*\*  
Lim, Jong Wan · Kwun, Soon Kuk

### Summary

A multiple box model which is suitable for the prediction of water quality in shallow lakes with active mixing is a water quality model expected to be used widely in estuary reservoir. In this study, a multiple box water quality model for estuary reservoirs (MBQER) was developed and the applicability of the MBQER was tested by applying data obtained from Asan-estuary reservoir.

The results of this study can be summarized as follows.

1. The MBQER, dynamic water quality model, was developed to estimate 10-day water qualities of estuary reservoirs. For the proper analysis and the application of hydraulics needed to build a model, lake hydraulics was simplified by considering only hydrological inflow and lake mixing currents. The box division in the MBQER is longitudinal one dimension for upper and middle part, and two layers for lower part of the reservoir.

2. The methods of box division for the multiple box model were examined and applied to Asan-estuary reservoir. For determining the number of boxes, Pe number and Pk number were used. In case of three boxes, the error by the model simplification would be estimated about 5%. Therefore, in Asan reservoir, the proper number of boxes was three.

3. The MBQER was calibrated and verified using measured data in Asan-estuary reservoir from 1986 to 1988. The Root Mean Squares(RMS) for the differences between measured data and simulated results by the MBQER were  $1.10^{\circ}\text{C}$  for water temperature,  $75.8\text{mg}/1$  for salinity,  $0.082\text{mg}/1$  for total-phosphorus showing good estimations.

4. Through the simulation of water temperature and salinity by the MBQER, the exchange flow and the mixing coefficients for the estuary lake were determined. As a result of simulation, the horizontal mixing coefficients in Asan-estuary reservoir were in the range of  $1.07 \times 10^5$  to  $1.12 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$  and vertical mixing coefficient was  $2.90 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}$ .

---

\* 農業振興公社

\*\* 서울대학교 農科大學

## I. 緒 論

우리나라 대부분의 淡水湖는 內陸地에 위치하는 一般湖沼와는 달리 水深이 얇고 水面積이 넓은 전형적인 얇은湖로서 河口海岸에 위치하여 바람의 영향을 크게 받으므로 수평 수직혼합이 활발하게 일어나고 있다. 특히 배수갑문 바닥sill높이 이상의 上層部는 水文學的 流出入水의 흐름과 이에따른 水柱安定度の 파괴로 年中 完全混合層을 형성하는 것이 일반적 경향이다.

이러한 淡水湖 特性에 적합한 淡水湖 水質豫測模型의 개발은 湖의 長期 水質豫測뿐만 아니라, 효과적인 水質管理 對策의 樹立도 가능케 하므로 매우 중요하다.

湖沼水質 豫測模型은 가정조건과 해석방법에 따라 여러종류로 분류되며, 그중에서 multiple box 水質模型은 空間代表點의 數가 적고, 入力資料의 空間分布特性的 파악과 流出入水의 처리가 容易하며, 境界條件의 처리가 간편하여, 淡水湖와 같이 水質分布變化가 크지 않은 湖沼의 水質豫測用으로서 活用도가 클것으로 기대된다.<sup>7)</sup>

本 研究에서는 multiple box模型의 基本理論에 입각하여, 水溫, 鹽分, 總磷등 3個 水質項目에 대한 各 box에서의 旬別 平均水質을 예측할 수 있는 淡水湖multiple box 水質模型(MBQER)을 개발하고, box분할 방법에 대한 理論的 考察을 실시하며, 이를 牙山湖에 適用하여 模型의 適用性을 검토함과 아울러 模型의 모의발생을 통하여 box間 交換流量을 결정하는데 主目的을 두었다. Box間 交換流量의 결정은 餘他水質項目의 예측에도 적용될 수 있다. MBQER模型은 水質豫測項目을 追加한다면 綜合的인 水質豫測模型으로 확장될 수 있다는 점을 염두에 두고 水質模型의 基本模型으로 구성되었다.

## II. Multipl Box 水質模型의 開發

淡水湖의 Multiple box 水質模型의 開發을 위해서는 湖 水理現象의 究明과 解析을 통하여 模型에 적합한 湖內 物質傳達體系를 확립하는 것이 重要하다. 또한 模型의 開發段階에서는 box間 交換流量의 결정과 汚染物質의 負荷形態에 따른 模型의 適用性 檢討가 基本的이고도 필수적인 사항이 된다. 本 研究에서의 豫測水質項目인 水溫, 鹽分, 總磷은 淡水湖의 主要水質項目일 뿐만 아니라, 負荷形態가 각각 相異하여 開發模型의 적용범위를 檢討할 수 있는 장점이 있고, 水溫과 鹽分은 交換流量의 결정에 자주 사용되는 水質項目이다.

### 1. 理論的 背景

#### 가. 淡水湖 水理

淡水湖의 水理現象은 크게 水文學的 流出入水와 바람에 의한 吹送流로 구분할 수 있다. 水文學的 流出入水는 流域으로부터의 流入水와 排水閘門 放流등이 의한 縱方向흐름을 뜻하며, 吹送流는 湖沼와 같은 정지상태 水體에서의 대표적인 湖流이다. 이와같은 湖流는 보통 水平流動과 鉛直流動등이 혼합된 복잡한 樣相을 나타내며<sup>2)</sup>, 여기에 水文學的 流出入水흐름이 중첩되었을 경우를 가정하면, 湖流의 流動을 理論的으로 정확히 규명하기는 매우 어렵다고 하겠다. 따라서 本 研究에서는 開發된 multiple box 水質模型에 적합토록 淡水湖 現象을 水文學的 流出入水와 混合湖流의 2개의 형태로 구분, 단순화 하였다. 여기서 水文學的 流出入水는 押出流형태로 간주하였으며, 그외의 모든 湖流를 합하여 이를 混合湖流로 취급하여 box間 移流量과 交換流量을 구하도록 하였다.

#### 나. 基本方程式

河口에 造成된 人工淡水湖에서는 移流와 擴散이 모두 중요하게 되며, 따라서 物質輸送式으로서 移流分散方程式을 취하게 된다. 連續形態

의 移流分散方程式으로부터 離散形態의 multiple box基本式을 구하기 위해서, 各box의 平均化에 의하여 集中常數化를 행하면 식(1)과 같은 基本方程式을 얻는다.

$$V_i \frac{d\hat{C}_i}{dt} = \underbrace{\sum_j [(Q_{ji}\hat{C}_j - Q_{ij}\hat{C}_i)]}_{\textcircled{1}} + \underbrace{\frac{E_{ij}A_{ij}}{l_{ij}} (\hat{C}_j - \hat{C}_i)}_{\textcircled{2}} + S_i \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $V_i$ 는 box  $i$ 의 체적,  $Q_{ij}$ 는 移流量,  $\hat{C}_i$ 는 box  $i$ 의 平均濃도,  $E_{ij}$ 는 확산계수,  $A_{ij}$ 는 box間 境界面積,  $l_{ij}$ 는 box中心間 거리,  $S_i$ 는 source와 sink이다. (Fig 1 참조) 식(1)에서 ①은 box間 移流에 의한 物質移動量이며, ②는 box間 交換流量에 의한 物質交換量을 나타낸다. ②에서 ( $E_{ij} A_{ij}/l_{ij}$ )는 box  $i$ 와 box  $j$ 와의 交換流量( $Q_e$ )을 의미하며, 같은 境界面에서도 box분할형태에 따라서 交換流量( $Q_e$ )은 달라질수 있다.

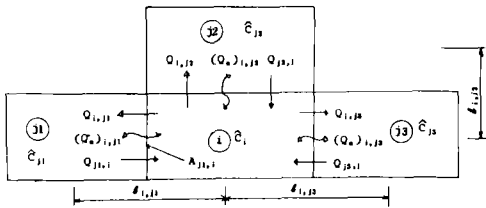


Fig.1. General schematic figure of multiple box model.

식(1)은 1, 2, 3次元의 형태를 취할수 있으며, 本研究에서 開發한 MBQR 모형에서는 2차원을 적용하였다. 한편, “다” 項에서 기술되는 Box분할방법에 대한 고찰을 위하여 식(1)을 單단방향의 1次元式으로 나타내면 식(2)와 같으며 模式圖는 Fig 2와 같다.

$$\frac{dV_i \hat{C}_i}{dt} + Q_i \hat{C}_i - Q_{i-1} \hat{C}_{i-1} = Q_{ei} (\hat{C}_{i+1} - \hat{C}_i) + Q_{ei-1} (\hat{C}_{i-1} - \hat{C}_i) - (kV_i \hat{C}_i + Q_{ri} \hat{C}_i) \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $Q_{ei}$ 는 交換流量이고,  $Q_{ri}$ 는 橫流入量이며,  $k$ 는 반응계수이다.

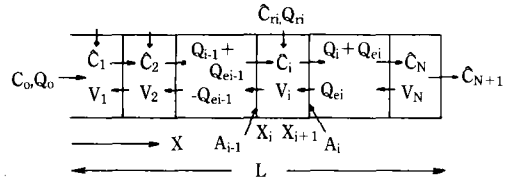


Fig. 2. Schematic figure of 1-dimensional multiple box model.

다. Box分割方法

Multiple box模型은 여러가지 長點을 갖고 있지만, 한편 空間平均化와 分散項의 表現등에 따른 오차가 발생될수 있는 短點을 가지고 있다. Box分割에는 일반적으로 湖盆狀態, 水質分布, 湖流特性등을 고려하게 되지만, Muraoka등(1984)은 오차를 줄이기 위한 방법으로서 1次元 multiple box 模型(Fig2)의 水理的영향을 검토한바 있다.

Box분할數(N)의 영향을 검토하기 위하여 단면적(A)과 확산계수( $E_x$ )가 일정한 等分割模型에서 1次元 移流分散式과 multiple box 基本式(식2)의 解를 구하여 各式에 의한 終端에서의 濃度  $C(L)$ 과  $\hat{C}_{N+1}$ 의 차이를 비교하였다.<sup>7)</sup> 일반적으로 box분할數(N)가 증가하면  $C(L)$ 과  $\hat{C}_{N+1}$ 의 값이 접근하게 되며  $\hat{C}_{N+1}$ 은 移流項과 分散項의 比( $Pe$ )와 變化項과 移流項의 比( $Pk$ )로서 표시할수 있는데  $Pe$ 와  $Pk$ 는 식(3)과 같이 정의된다.

$$\left. \begin{aligned} P_e &= UL/E_x = Q/Q_e \\ P_k &= KL/U = VK/Q \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $U$ 는  $X$ 방향의 流速이며,  $K$ 는 물질의 1차 反應계수(변화계수)를 나타낸다.

따라서 水域의  $Pe$ ,  $Pk$ 를 주고  $C(L)$ 과  $\hat{C}_{N+1}$ 을 비교하면, 오차( $\epsilon$ )에 관한 조건으로부터 必要한 최소한의 box분할數(N)를 구할 수 있다. Fig.3는  $Pe=1.0$ 일 때의  $Pk$ ,  $N$ ,  $\epsilon$ 間의 관계를

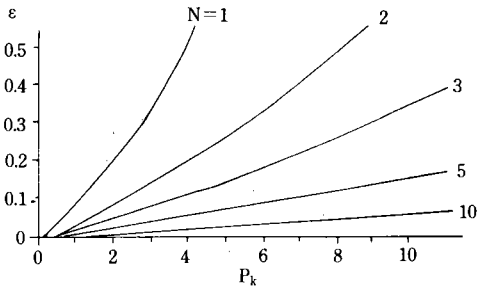


Fig. 3. Relationship among  $P_k$ ,  $N$ , and  $e$  in case  $P_e=1.0$ .

나타낸 것으로서 分割數( $N$ )가 증가하면 오차( $\epsilon$ )가 감소함을 볼수 있다.<sup>7)</sup>

Box分割位置의 영향을 檢討하기 위하여 식(2)에서 正常狀態이고 橫流入이 없다고 가정하면 식(4)와 같이 변형된다.

$$\frac{1}{T_i} \hat{C}_{i-1} + \frac{Q_{ei}}{V_i} (\hat{C}_{i+1} - \hat{C}_{i-1}) - \left(\frac{1}{T_i} + k\right) \hat{C}_i = 0, \quad (i=2 \sim N-1) \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $T_i = V_i / (Q + Q_{e,i-1} + Q_{e,i})$  즉, 交換流量을 포함한 帶溜時間이다. 分割數  $N$ 을 크게하면  $|\hat{C}_{i-1} - \hat{C}_{i+1}|$  이므로 식(4)는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{C}_i \approx \hat{C}_{i-1} / (1 + kT_i) \dots \dots \dots (5)$$

식(5)는 box內 水質變化가  $k \cdot T_i$  즉, 交換流量을 포함한 帶溜時間과 反應係數와의 積에 관계된다는 것을 보여준다. 이것은  $k \cdot T_i$ 의 값이

水域內에 均等하게 되도록 box분할을 행하면 各box에서의 水質變化의 比率을 갖게 하는 것을 의미한다.

한편, 斷面積과 擴散係數가 변화하는 경우의 分割斷面에 의한 오차의 크기에 대하여 檢討한바, 單位面積當 移流量과 擴散係數와의 比( $Q/A \cdot Ex$ )가 큰 곳이 分割位置로서 適當하였다.<sup>7)</sup>

## 2. 模型의 構成

### 가. 模型의 構造

우리나라 대부분의 既存淡水湖는 上·中流部는 水深이 얇고 排水口 부근의 下流部는 水深이 깊어지는 형태를 가지고 있다. 그러므로 本 研究에서 開發되는 MBQER模型의 box분할 형태는 上·中流部에서는 縱단방향의 1차원으로 分割하고 下流部는 排水口 Sill높이를 기준하여 上·下層box로 구분토록 하였다.

한편 豫測 結果值의 安定性을 위하여 計算時間간격을 日別로 하였으며, 氣象·水文 入力資料는 一般화된 旬別값을 적용하여 日別로 分割·使用토록 함으로써 模型의 實用性을 증대시키도록 하였다.

MBQER模型에 포함된 副프로그램의 名稱과 機能은 Table-1과 같다.

### 나. 水溫豫測副模型

湖의 水溫은 主要source 즉, 太陽輻射의 變化를 定量的으로 예측가능하며, 實測資料를 利用

Table-1. List of subroutines in the MBQER.

Name	Function
QMBOX	To compute hydrologic mass transfer
WSHEX	To compute water surface heat exchange
BTHEX	To compute bottom heat exchange
SALIN	To compute salinity by boxes
TOTLP	To compute total-phosphorus by boxes
CHDIM	To make some data into dimension
CONFIR-CONTHR	To compute capacity and surface area of boxes
SECFIR-SECSEC	To compute section area between boxes

할 수 있어서 이러한 水溫模型의 開發은 여타 水質項目들의 物理的인 混合程度를 결정하는데 기여할 뿐만 아니라 水質模型構成의 첫단계 역할을 한다고 할수 있다. MBQER模型의 水溫豫測 副模型은 湖水面 熱收支와 바닥底質 熱收支로 구성하였으며 河川流入水의 水溫은 旬別 平均氣溫을 사용하였다.

1) 湖水面 熱收支

水面에서의 熱交換은 蒸發, 傳導, 輻射등에 의하여 熱에너지의 流入과 發散이 이루어지며, 水表面에 流入된 熱에너지는 주로 短波輻射에너지이다. 이러한 熱交換過程은 식(6)의 熱흐름 방정식으로 나타낼수 있다.

$$H_N = H_{SN} + H_{L1} - H_{L2} - H_E - H_C \quad (JL^{-2}T^{-1}) \dots (6)$$

여기서  $H_N$ : 湖水面을 통한 純 熱에너지 流入量,  $H_{SN}$ : 短波 熱에너지 流入量,  $H_{L1}$ : 長波 熱에너지 流入量,  $H_{L2}$ : 長波 熱에너지 流出量,  $H_C$ : 熱 傳導量,  $H_E$ : 蒸發 潛熱量이다.

식(6)의 오른쪽項의 計算은 U.S.Tennessee Valley Authority(TVA)에서 제시한 방법을 사용하였다.<sup>2)</sup>

2) 湖바닥에서의 熱收支

일반적으로 內陸地의 湖沼는 水深이 깊은 관계로, 年中 水溫變化가 없는 水溫의 不易層이 존재하게 된다. 따라서 一般湖沼의 水溫模型에서는 바닥의 熱收支를 고려치 않는다. 그러나 淡水湖와 같이 水深이 적은 얕은湖에서는 바닥층 熱收支를 고려하여야 할것이다. Likens & Johnson(1969), Iwakuma(1981)등은 水深이 얕은湖에서 바닥底泥의 熱收支를 實測한 결과, 湖水部에 대한 바닥層의 熱收支比 (Heat budget ratio, HBR)가 크기 때문에 湖內 熱흐름의 해석에 바닥層 熱水支를 고려하여야 한다고 하였다. 熱收支比 HBR은 식(7)로 표시된다.

$$HBR = \theta_s / \theta_l \dots \dots \dots (7)$$

식(7)에서  $\theta_l$ ,  $\theta_s$ 는 각각 湖水部와 바닥層底

泥에서의 熱收支로서, 이는 湖水部와 바닥層底泥에서 1年中 熱의 蓄積이 가장 적은 때와 가장 클 때와의 期間 사이에 流入하는 熱의 총화로서 정의된다. Table-2는 지금까지 조사된 얕은湖들의 熱收支比(HBR)를 정리한 것이다.<sup>3)6)</sup>

Table-2. Annual heat budget ratio(HBR) of some lakes.

Lake	Mean depth (m)	Lake heat budget, $\theta_l$ (cal/m <sup>2</sup> )	Sediment heat budget, $\theta_s$ (cal/m <sup>2</sup> )	HBR $\theta_s/\theta_l$
Mendota	12.10	23.50 * 10	2.00 * 10	0.08
Hula	1.70	2.29 * 10	1.40 * 10	0.61
Tub	3.60	8.00 * 10	0.97 * 10	0.12
Stewart's Dark	4.30	7.00 * 10	0.73 * 10	0.10
Takahamairi	1.40	3.10 * 10	2.00 * 10	0.66
Beloie	4.15	8.00 * 10	2.50 * 10	0.31

本 研究에서는 Table-2를 利用하여 平均水深(DEP)과 HBR과의 관계식을 구하여 湖水部의 水溫豫測에 적용하였으며, 관계식은 식(8)과 같다.

$$HBR = -0.016 + (0.870/DEP), \quad (R^2 = 0.866) \dots \dots \dots (8)$$

다. 鹽分豫測副模型

鹽分은 淡水湖化過程뿐만 아니라 淡水湖化가 完了된 후에도 鹽度成層을 형성하는 등 계속 담수호의 主要 水質項目으로 간주된다. MBQER의 鹽分豫測副模型에서는 淡水湖化 해석을 위하여 개발된 鹽分收支式을 이용하였다.

1) 鹽分 溶出

淡水湖化 進行中の 염분용출은 主로 海水와 湖水의 鹽度差와 締切이후의 경과시간 등에 따라서 변화하지만, 淡水湖化가 완료되고 평형상태에 도달한 후에는 鹽度の 변화가 크지않고 또 海水에 비하여 湖水의 鹽分濃도가 매우 작기 때문에 일정한 값으로 볼 수 있다. 따라서

本 模型에서는 식(9)와 같이 單位面積當 溶出率을 일정한 常數로 보았다.

$$SLCH = KBU \times BTM \dots\dots\dots (9)$$

여기서, SLCH는 湖底土로부터의 礫분용출량 (g/day), KBU는 溶出率(g/m<sup>2</sup>/day), BTM은 바닥면적(m<sup>2</sup>)이다.

2) 堤體 浸透量

防潮堤 堤體를 통한 海水流入量은 浸透係數를 이용하여 식(10)으로 구하였다.

$$Q_d = \frac{KSD \cdot (H_1^2 - H_2^2)}{2\ell} \times DLS \dots\dots\dots (10)$$

여기서 Q<sub>d</sub>는 방조제를 통한 海水浸透量(m<sup>3</sup>/sec), KSD는 浸透係數(m/sec), ℓ은 침윤선길이 H<sub>1</sub>은 外海의 水深, H<sub>2</sub>는 淡水湖의 水深, DLS 堤體의 길이(m)이다.

라. 總磷豫測 副模型

湖의 富營養化를 초래하는 限界營養物質에 관해서는 Liebig의 最少量法則에 따라 단 한가지 營養物質만이 藻類成長을 制限하게 되는데, 磷은 오래전부터 限界營養物質로 인식되어 왔다.

磷負荷에는 外的負荷(流入負荷)와 內的負荷(湖內循環負荷)가 있으며, 실제로 光合成에 이용되는 磷의 형태는 溶解性 磷(PO<sub>4</sub>-P)이다. 磷의 Source와 Sink에는 여러가지 要因이 관련되지만, 本 模型에서는 流入河川을 통한 外的負荷와 湖內에서의 沈降 및 溶出로 단순화 하였다.

1) 流入河川을 통한 外的負荷

淡水湖에 負荷되는 總磷 流入負荷量은 流域의 發生汚染負荷量에 流出率을 곱하여 구할수 있다. 이러한 流入負荷量은 氣象·水文條件과 季節에 따라서 변화하게 된다. 本 模型에서는 實測資料로 부터 流入水量과 總磷濃度와의 관계식(식.11)을 구하여 流域으로부터의 流入水 總磷濃度を 결정토록 하였다.

$$WRP = A - B \cdot \log(Q) \dots\dots\dots (11)$$

여기서, WRP는 淡水湖 流入河川水의 總磷濃度(mg/l), Q는 流入河川水量(m<sup>3</sup>/10day), A,B는 係數이다.

2) 沈降 및 溶出

總磷은 粒子狀態와 溶存狀態의 磷으로 구분되는데 粒子狀態의 磷은 주로 土粒子에 부착되어 移動·沈降하며, 溶存狀態의 磷은 藻流 등의 光合成에 이용되고 결국에는 有機植物體의 형태로 沈降하게 된다. 한편, 底泥로부터의 溶出은 沈降·推積物質이 分解되어 溶出하게 되는데 溶出率은 下層水의 水溫, PH, 용존산소(DO), 底泥의 特性에 따라 변화한다. 이러한 底泥로부터의 磷의 溶出은 靜止狀態에서의 溶出과 下層水의 流動에 의한 流動放出로 구분되며, 亂流流動이 큰 경우에는 流動放出量이 靜止溶出보다 比重이 커지게 된다. 따라서 靜止溶出과 流動放出은 각각 水溫과 風速에 의하여 가

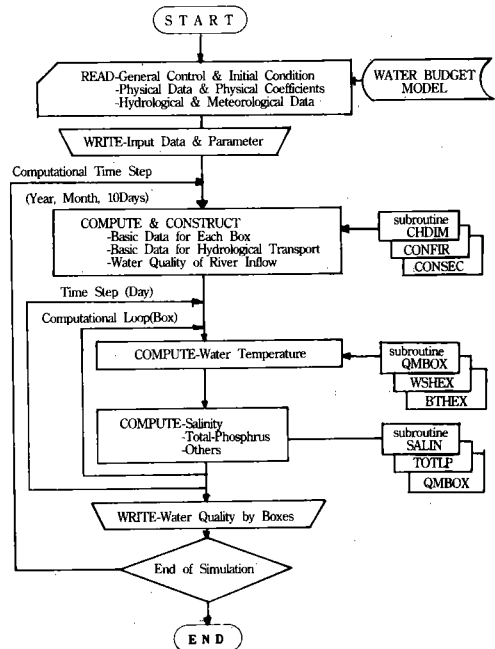


Fig. 4. Flow chart of the computer program for MBQER.

장 큰 영향을 받는 것으로 생각된다.

本 模型에서는 溶出率과 沈降率을 식(12) 및 식(13)의 형태로 나타내고 가급적 實測値에 近接한 값이 되도록 補正, 決定토록 하였다.

$$KLCH = (ALK \times LCH) + (AUK \times UW^2) \dots (12)$$

靜止溶出                      流動放出

$$KFL = (KFL) + (CNSM) \dots \dots \dots (13)$$

物理的沈降                      光合成消耗

여기서 ALK, AUK는 補正媒介變數, LCH와 CNSM은 水溫의 함수(f(t)), UW는 風速(m/sec), KFL은 物理的 沈降率이다.

Fig. 4는 MBQER模型의 전산프로그램 흐름도를 보여준다.

### III. 模型의 檢定과 應用

#### 1. 對象地區 및 資料

##### 가. 適用 淡水湖

MBQER模型의 適用에 적합한 淡水湖는 湖水面積이 크고 湖盆形態가 비교적 복잡하며, 水質汚染이 예상되는 湖로서 多年間의 水質測定資料를 얻을수 있어야 한다. 本 研究에서는 위의 事項들을 고려하여 牙山湖를 對象地區로 선정하였다.

Table-3은 牙山湖의 諸元特性을 보여준다.

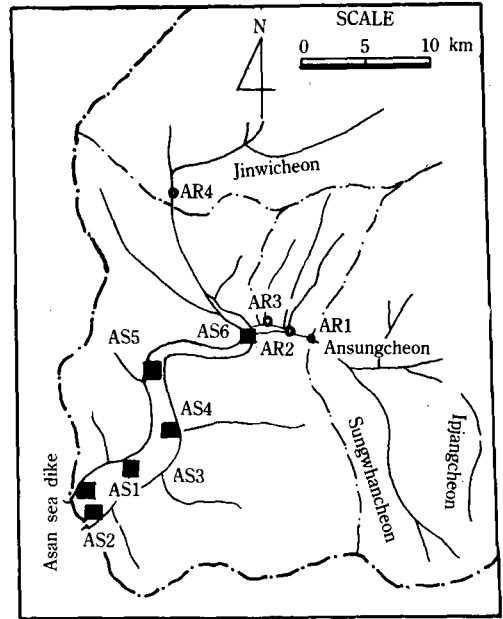
Table-3. Characteristics of Asan-reservoir.

Items	Description
Watershed area	163,454 ha
Benefited area	14,415 ha
Full water surface area	2,800 ha
Total capacity	142 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Flood water level	+4.5 m
Management water level	+2.5 m

##### 나. 水質資料

水質資料는 서울대학교 農業開發研究所에서

淡水湖 水質環境 研究事業의 일환으로 1987~1988년 期間中 6회에 걸쳐 실시한 牙山湖 水質測定資料와 여기에 農業振興公社의 1986년 水質汚染調査에 의한 2회의 牙山湖 水質測定資料를 合하여 전부 3箇年에 걸친 8회의 測定資料를 利用하였다.<sup>8)9)10)</sup> 水質測定位置는 6箇地點으로 Fig. 5에 표시된바와 같다.<sup>8)</sup>



■ 수질측정지점 ○ 유입지천의 측정지점

Fig. 5. Watershed of Asan-reservoir and sampling sites.

測定方法은 水溫은 奉狀溫度計와 Do-meter (YSI 51B)를 사용하였고, 鹽分은 SCT-meter (YSI 33)로 測定하였으며, 總磷(T-P)의 分析方法은 U.S. Standard method에 의하였다.

#### 2. 牙山湖의 box分割

牙山湖에 적합한 box분할數를 결정코자 分割數가 3인 경우에 식(3)에 의하여 1985~1988(4개년)의 年平均 Pe數를 계산한 결과는 Table-4와 같으며 Pk數를 계산한 결과는 Table-5와 같다. 즉 Pe는 0.39~1.00으로서 4개년 平均값이 0.64이었으며, Pk는 分割數가 3인 경우에 대하

여 최대값이 0.25로 나타났다. 여기서 交換流量  $Q_e$ 는  $5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{day}$ 로 가정하였으며, 반응계수  $K$ 는 일본의 카스미가우라湖에서 T-N, T-P에 대한 物質收支로부터 實測된 값 0.01을 適用하였다. 이와같은  $Pe$ ,  $Pk$ 값은 계절, 기상상태, 對象水質項目등에 따라 變化하므로 여유를 고려하여  $Pe=1.0$ ,  $Pk=2.5$ 를 취하면 Fig. 2로부터 水質豫測오차( $\epsilon$ )는 5% 이내임을 예상할수 있다. 따라서 牙山湖의 box分割數는 3이면 충분한 것으로 판단된다.

Box분할위치는  $(Q/AE)$ 가 큰곳을 정하되, 급적 각 box의 帶溜時間( $T$ )이 均等히 되는 곳이어야 한다.  $(Q/AE)$ 가 큰곳은 斷面積이 작고 混合이 적은곳이며, 따라서 牙山湖의 湖盆形態와 水質分布 및 湖流特性등을 고려하여 결정하였으며 上·下層의 분할은 배수갑문 바닥Sill 높이(-3.0m)를 기준하여 구분하였다. Fig. 6은 box분할數가 3과 4일 때의 분할형태와 物質輪

送體系를 보여준다.

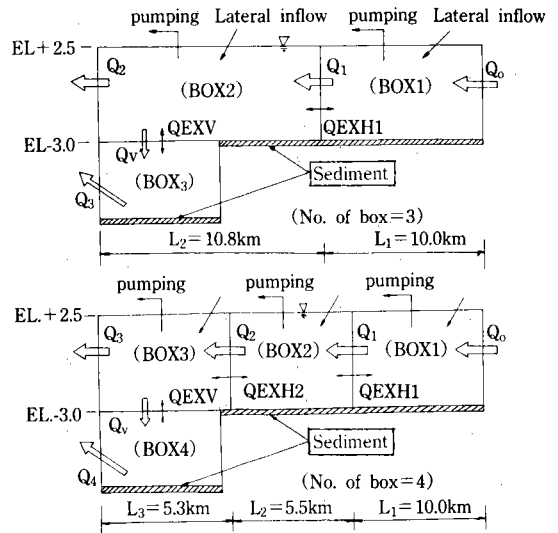


Fig. 6. Segmentation and mass transfer system of MBQER.

Table-4. Computation of  $Pe$  number during four years.

Year	Inflow( $Q_{in}$ ) ( $10^6 \text{m}^3/\text{Yr}$ )	Exchange flow( $Q_e$ ) ( $10^6 \text{m}^3/\text{Yr}$ )	Peclet No. ( $Pe$ )	Remark
1985	1,127	$5 * 365$	0.62	$Pe = Q_{in}/Q_e$
1986	967	$5 * 365$	0.53	
1987	1,835	$5 * 365$	1.00	
1988	720	$5 * 365$	0.39	
Mean	1,162	1,825	0.64	

Table-5. Computation of  $Pk$  number during four years.

Year	Inflow ( $Q_{in}$ ) ( $10^3 \text{m}^3/\text{day}$ )	Reaction coeff. ( $K$ ) (1/day)	BOX 1		BOX 2		BOX 3	
			volume ( $10^3 \text{m}^3$ )	* $Pk$	volume ( $10^3 \text{m}^3$ )	* $Pk$	volume ( $10^3 \text{m}^3$ )	* $Pk$
1985	3,088	0.01	12,780	0.04	71,890	0.23	8,162	0.03
1986	2,649	0.01	12,780	0.05	71,890	0.27	8,162	0.03
1987	5,027	0.01	12,780	0.03	71,890	0.14	8,162	0.02
1988	1,973	0.01	12,780	0.06	71,890	0.36	8,162	0.04
Mean	3,184	0.01	12,780	0.05	71,890	0.25	8,162	0.03

\* $Pk \text{ No.} = (\text{volume} \times K) / Q_{in}$



### 3. 模型의 補正과 檢定

#### 가. 媒介變數

MBQER 模型의 補正은 '86~87의 2個年 實測資料를 利用하였으며, 模型의 結果에 큰 影響을 미칠 수 있는 主要媒介變數와 交換流量에 대하여 實測值의 豫測值간의 RMS오차를 比較함으로써 실시하였다. 主要媒介變數로는 風速 調整係數KUW, 鹽分溶出率KBU, 磷沈降率 KFAL을 택하였다.

#### 나. 交換流量

Box間 交換流量의 결정은 水溫, 鹽分등과 같은 保全性物質을 대상으로 하게 되는데, 특히 水溫은 垂直混合, 鹽分은 水平混合의 크기를 결정하는 데 유리하다.<sup>2)</sup>

Box분할數가 3인 경우에는, 水平交換流量 QEXH1과 垂直交換流量QEXV 모두  $3,000 \times 10^3$   $m^3/day$ 일 때 水溫의 RMS는  $1.30^\circ C$ , 鹽分의 RMS는  $63.9mg/l$ 로서 가장 적게 나타났다. 한편 box분할數가 4인 경우에는 水平交換流量 QEXH1은  $4,000 \times 10^3$   $m^3/day$ , QEXH2는  $9,000 \times 10^3$   $m^3/day$ , 그리고 垂直交換流量 QEXV는  $3,000 \times 10^3$   $m^3/day$ 가 가장 적합한 것으로 판단 되었다. 以上에서 결정된 box間 交換流量을 利用

하여 水平混合係數(KMXH)와 垂直混合係數(KMXV)를 구한 結果는 Table-6에서 보듯이 水平混合係數는  $1.07 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^5$   $cm^2/sec$ 이며, 垂直混合係數는  $2.90 \times 10^1$   $cm^2/sec$ 이었다.

이상과 같이 補正된 모형을 1988년도 牙山湖 實測資料를 이용하여 檢定하였으며, Table-7은 MBQER모형의 補正 및 檢定결과를 보여주며, 水溫, 鹽分, 總磷의 平均 RMS오차는 각각  $1.10^\circ C$ ,  $75.8mg/l$ ,  $0.082mg/l$ 이었다.

Fig. 7은 box分割數가 3인 경우에 box2에서의 實測值와 豫測值를 比較한 것으로서 水溫과 鹽分에 比하여 總磷의 豫測誤差가 比較적 크게 나타났다.

#### 4. 銳敏度 分析

銳敏度分析은 模型의 舉動과 特性을 把握할 수 있으므로 模型의 開發段階에서 중요한 의미를 갖는다. 本 研究에서는 初期條件, 水質項目別 主要媒介變數, 流入水濃度, 그리고 交換流量에 대해서 銳敏度分析을 실시하였다. 初期條件에 대한 銳敏度分析은 初期濃度の 影響력 감쇄 경향을 分析하였고, 媒介變數등에 대해서는 銳敏度 係數, 즉 相對變化比(Relative Variation

Table-6. Computations of mixing coefficient from exchange flow.

Division	Exchange flow( $10^3m^3/day$ )			Mixing Coefficient( $cm^2/sec$ )		
	QEXH1	QEXH2*	QEXV	KMXH1	KMXH2*	KMXV
No.of Box=3	3000	—	3000	$1.08 \times 10^5$	—	$2.90 \times 10^1$
No.of Box=4	4000	9000	3000	$1.07 \times 10^5$	$1.12 \times 10^5$	$2.90 \times 10^1$

\* Do not exist in case that No. of box is three.

Table-7. RMS errors between measured and simulated water qualities.

Run mode	Year	Water Qualities		
		Water-temp. ( $^\circ C$ )	Salinity ( $mg/l$ )	Total-P ( $mg/l$ )
Calibration	1986-1987	1.30	63.9	0.079
Verification	1988	0.90	87.7	0.086
Mean		1.10	75.8	0.082

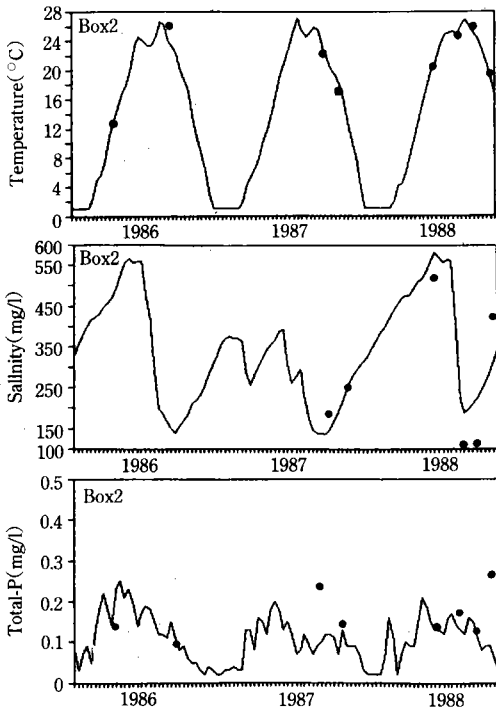


Fig. 7. Comparison of measured and simulated water qualities.

Ratio, RVR)를 구하였다.

相對變化比(RVR)은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$RVR_{ij} = (\Delta C_i / C_i) / (\Delta \beta_j / \beta_j) \dots\dots\dots (14)$$

여기서,  $\beta_j$ 는 媒介變數,  $C_i$ 는 狀態變數(濃度)를 가리킨다.

가. 初期條件

水溫은 3月初旬의 初期水溫을 0.0, 4.0, 8.0°로 각각 4°C씩 증가시켜 初期水溫의 影響력 感쇄를 검토한바, 약 2.5개월(75회 반복계산) 후에는 初期水溫의 影響을 무시할 수 있었다.

鹽分의 경우는 初期鹽分濃度를 100mg/l, 300 mg/l, 500mg/l로 200mg/l씩 증가시켜 分析한 결과, 약5개월(150회 반복계산) 경과후에는 각각의 結果值가 거의 일치하였으며, 總磷의 경우에는 初期濃度를 각각 0.0mg/l, 0.06mg/l, 0.12 mg/l로 취하였을때 약0.7개월(20회 반복계산)

후에는 初期值의 影響을 무시할 수 있었다.

나. 主要 媒介變數 및 流入水濃度

주요 매개변수로서, 水溫예측에서는 風速(UW), 鹽分예측에서는 鹽分溶出率(KBU), 總磷예측에서는 沈降率(KFAL)을 취하였다. 그 결과 風速에 대한 水溫의 相對變化比(RVR)은 -0.105이며, 溶出率에 대한 鹽分의 RVR과 沈降率에 대한 總磷의 RVR은 각각 0.65와 -1.37로서 다소 크게 나타났다. 한편 流入水의 濃度

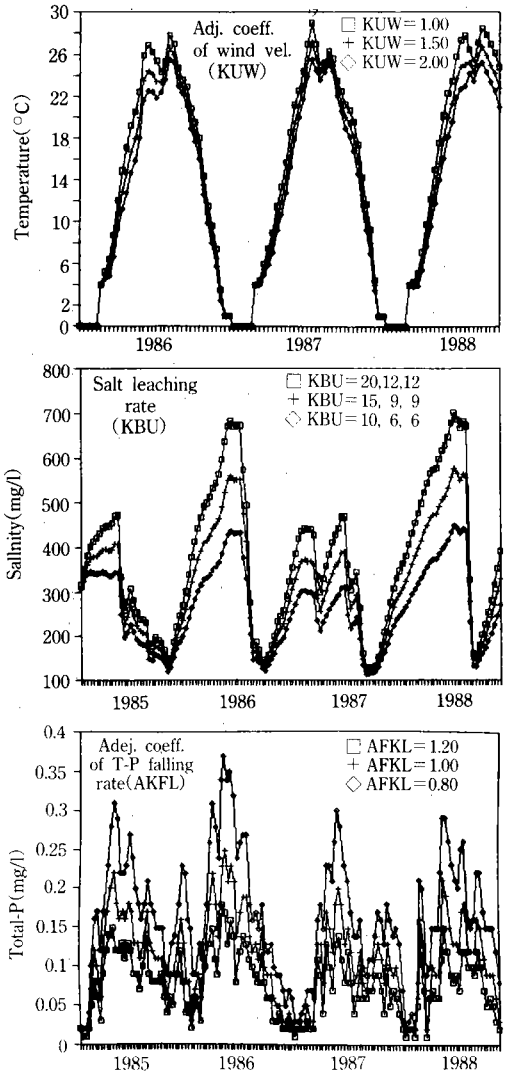


Fig. 8. Sensitivity analysis for major parameters.

에 대한 淡水湖水質의 RVR은 鹽分이 0.16, 總磷이 0.77이었으며 水溫은 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 主要媒介變數에 대한 銳敏度分析 結果를 보여준다.

다. 交換流量

교환유량에 대한 예민도분석은 교환유량이 box間 混合에 관련되므로 水質濃度の 分布差 즉, 水質濃度の 최대값과 최소값의 차에 대하여 실시하였다.

水溫의 경우 分析時期는 box別 水溫分布差가 年平均과 비슷한 '87.9.初旬을 택하였으며, 이 때의 平均水溫 23°C에 대한 水溫分布差의 변화

에 대하여 실시하였다. 그 결과 RVR은 -0.034 ~ -0.086으로 나타났다.

鹽分の 경우는 水溫의 경우와 같은 理由로 分析時期를 '87.10.中旬으로 택하였으며, 이 때의 平均鹽度 214mg/l에 대한 鹽分 分布差의 변화에 대한 예민도를 분석하였다. 그 결과 RVR은 -0.028 ~ -0.112로서 水溫과 비슷한 경향을 보여주었다.

이상과 같이 교환유량에 대한 RVR은 一定한 값이 아니고 交換流量의 크기가 작아질수록 RVR이 커지는 경향을 나타냈다. Table-8은 交換流量에 대한 銳敏度分析結果를 보여준다. (box분할數가 3인 경우)

Table-8. Sensitivity analysis for exchange flow.

Water Temperature

QEXH QEXV (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d)	Difference	Rate A (%)	* ΔT (°C)	Difference	Rate B (%)	Relative Var. Ratio B/A
1500 1500	-1500	-50.0	2.7	1.0	4.3	-0.086
3000 3000	0	0.0	1.7	0.0	0.0	—
4500 4500	-1500	-50.0	1.3	-0.4	-1.7	-0.034

Salinity

QEXH QEXV (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /d)	Difference	Rate A (%)	** ΔS (mg/l)	Difference	Rate B (%)	Relative Var. Ratio B/A
1500 1500	-1500	-50.0	24	12.0	5.6	-0.112
3000 3000	0	0.0	12	0.0	0.0	—
4500 4500	1500	50.0	9	3.0	1.4	-0.028

\* Water temp. of box 1 - Water temp. of box 3

\*\* Salinity of box 3 - Salinity of box 1

IV. 結 論

Multiple box 水質 模型은 中·長期 湖沼水

質 豫測模型으로서, 淡水湖와 같이 혼합이 활발한 얕은 湖에 적합하며 장래 활용도가 클 것으로 기대되는 水質模型이다. 本 研究에서는 mu-

ltiple box 淡水湖 水質 模型 MBQER을 개발하고, 개발된 모형을 牙山湖에 적용하여 적용성을 검토한 바, 그 結果는 다음과 같이 要約할 수 있었다.

1. 淡水湖의 旬別 平均水質을 예측할 수 있는 動的 水質 模型 MBQER을 개발하였다. 模型開發에 必須的인 水理 現象의 적절한 해석과 적용을 위하여 湖水理 現象을 水文學의 流出入水와 混合湖流의 2개 형태로 구분, 단순화 하였으며, 모형의 box分割 形態는 湖의 中·上流部는 종단방향의 1次元으로, 그리고 下流部는 上·下層으로 분할하였다.

2. Multiple box 模型의 box分割方法을 牙山湖에 적용하여 검토하였다. Box分割數를 결정하기 위하여 Pe數(Pe)와 Pk數(Pk)를 추정 한 결과, 分割數가 3일 때 基本式의 單純化에 의한 수질예측 오차는 5% 이내일 것으로 예상되므로 分割數는 3이 적절한 것으로 판단되었다.

3. MBQER 模型은 1986~1988(3개년) 期間 中の 牙山湖 실측자료를 이용하여 보정 및 검증을 하였으며, 보정된 MBQER에 의한 計算値와 實測値를 比較한 結果 RMS誤差는 水溫 0.10°C, 鹽分 75.8mg/l, 總磷 0.082mg/l로써 實測値에 접근되는 양호한 결과를 보여주었다.

4. MBQER 模型에 의한 水溫과 鹽分의 模擬發生을 통하여 交換流量을 결정하고 이를 이용하여 混合係數를 구하였다. 그 결과 牙山湖의 水平 混合係數는  $1.07 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ , 垂直混合係數는  $2.90 \times 10^1 \text{cm}^2/\text{sec}$ 이었다.

## 參 考 文 獻

1. Chapra, S. C., and K. H. Reckhow, 1983, Engineering approaches for lake management(II), Ann Arbor science, pp. 71-235
2. Fisher, H. B., et al., 1979, Mixing in inland and costal waters, Academic Press, pp. 146-228
3. Likens, E., N. M. and Johnson, 1969, Measurement and analysis of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin lakes, Limnol. Oceanogr.(14), pp. 115-135
4. Shanahan, P., and D. R. E. Harleman, 1984, Transport in lakes water quality modeling, J. of EN., ASCE, Vol. 110, No. 1.
5. Thomann, R. V., 1972, Systems analysis and water quality management, Environmental research and applications, INC., pp. 123-189
6. Iwakuma, T., 1981, Seasonal change in depth profile of sediment temperature and annual heat budget of Takahamari-bay in lake Kasumigaura, 日本 國立公害研究所 研究報告(22), pp. 51-61
7. Muraoka, K., and T. Fukushima, 1984, Box model 構築に關する水理學的 檢討, 國立公害研究所 研究報告(54), pp. 31-51
8. 權純國외, 1987, 淡水湖의 環境汚染 및 富營養化 防止對策 樹立(I), 서울大 農大 부속 농업개발연구소
9. 權純國외, 1988, 淡水湖의 環境汚染 및 富營養化 防止對策(II), 서울大 農大 부속 농업 개발연구소.
10. 農業振興公社, 1981-1986, 農業用水 水質汚染調査 報告書.