Korean J. Limnol. 35 (2) : 79~91 (2002)

옥정호의 연직 수온분포에 관한 시변화 모델 연구

박 옥 란† · 박 석 순*

(이화여자대학교 공과대학 환경학과)

A Time Variable Modeling Study of Vertical Temperature Profiles in the Okjung Lake. ***Park, Ok-Ran⋆ and Seok-Soon Park* (Department of Environment Science and Engineering College of Engineering, Ewha Womans University)***

A time variable modeling study was performed for seasonal variations of vertical temperature profiles in the Okjung Lake located in upstream of the Sumjin River. Based on the model structure of the US Army Corps of Engineer's CE-QUAL-W2, the lake was divided into 3 branches, 50 longitudinal segments and 49 vertical layers and vertical profiles of water temperature and current velocity were simulated over one year. The model results were calibrated and verified against vertical profiles of water temperature measured every month from March 1998 to February 1999 at 5 different locations. The model results showed a good agreement with the field measurements. The hydrologic balance during this period was validated by comparing the simulated values of surface elevation level with the measured data. There was some discrepancy in July data between the model results and the field measurements. This could be attributed partially to the inadequacy of the model to the highly hydrodynamic nature of water body and partially to the lack of accuracy in local atmospheric temperature data during summer monsoon period. The model results have shown that there was no seasonal over-turn in most part of the Okjung Lake, where water temperature maintained above 4°C over one year. In the upstream shallow area (depth < 20 meter), however, temperature at surface layer fell below 4°C and water was frozen such that slight over-turn would occur during winter period. From this study, we concluded that the Okjung Lake is oligomictic. This conclusion is significantly different from the general pattern that the lakes located from 20° to 40° latitude would be warm monomictic. From the examination of simulated current velocity distribution, it was found that the upstream inflows would infiltrate into mesolimnion of the lake during hydrodynamic summer monsoon periods due to the thermal density of water.

Key words : Lake model, Temperature profile, Stratification, Over-turn, CE-QUAL-W2

서 론

호수의 수질은 수온에 의한 성층화 현상으로 수심에 따라 큰 차이를 보인다. 또한, 온대 지방의 계절 변화는 수체의 전도현상을 유발하여 수심별 수질 분포를 시간적으로 변화하게 한다. 따라서 계절별 연직 수온 분포와

* Corresponding author: Tel: 02-3277-3546, Fax: 02-3277-3275, E-mail: ssp@ewha.ac.kr
† 현주소 : 기상청 기상연구소

그에 따른 성층화 및 전도현상을 규명하는 것은 호수의 수질을 예측하고 관리하는데 가장 기본적으로 요구되는 과제이다.

호수의 성층화 및 전도현상을 추정하는데 일반적으로 사용되는 기준은 지리적 위치를 나타내는 위도이다. 위도 80° 이상에 위치한 호수는 계절별 전도현상이 전혀 일어나지 않는 무혼합(Amictic) 호수이고, 위도 60~80°에 위치한 호수는 여름에 한번 전도현상이 일어나는 추운 지방의 일회혼합(Cold Monomictic) 호수이다. 위도 40~60°에 위치한 호수는 봄과 가을에 두 번 전도현상이 일어나는 이회혼합(Dimictic)이며, 위도 20~40°의 경우는 겨울에 한번 혼합이 일어나는 더운 지방의 일회혼합(Warm Monomictic)이 일반적인 경향이다. 적도에서부터 20° 사이에 위치한 호수는 고도가 낮을 경우 특별한 기상변화가 없는 한 전도현상이 일어나지 않는 빈혼합(Oligomictic)이고 고도가 높을 경우 연중 여러 번의 전도현상이 나타날 수 있는 다혼합(Polymictic)이다(Wetzel, 1983).

이 기준에 따르면 한반도의 호수는 북한의 일부 지역을 제외하면 대부분 일회혼합 호수에 속한다. 그러나 대상 호수의 수심과 지역의 미기상학적인 특성에 따라 시공간적 열수지가 달리 나타나기 때문에 이 기준이 항상 적용될 수 있는 것이 아니다. 또한, 동일한 호수내에서도 수심과 미기상이 다르기 때문에 시공간적 수온이 차이를 보이며 혼합 형태가 다르다. 호수의 전도현상을 규명하는 것은 크게 두가지, 모니터링과 모델링을 통하여 이루어질 수 있다. 모니터링으로 전도현상을 규명하기 위해서는 호수내 여러 지점에서 연속적인 수직 관측이 이루어져야 한다. 모델링의 경우 대상 호수에서 일어나는 열수지와 수리적 변화를 적절히 표현해야 하는 단점이 있으나 간헐적으로 관측된 자료만으로도 보정 및 검증이 가능하고, 모델을 이용하여 대상 수체의 전도현상을 확인하고 호수 수질을 관리하는데 활용할 수 있다(Chapra, 1997).

지금까지 우리나라에서는 관측자료를 이용하여 몇몇 호수의 전도 현상을 보고한 적이 있다. 소양호의 경우 일회혼합 형태로 보고되었으며 이는 앞에서 설명한 일반적 경향에 잘 일치한다(김 등, 1989). 그러나 우리나라에는 체류시간이 길고 수심이 깊은 호수형 호수에서부터 체류시간이 짧고 얕은 하천형 호수에 이르기까지 여러 형태의 호수가 있으며 지역에 따라 기상변화가 크기 때문에 모든 호수가 일반적 경향을 따르는 것은 아니다.

본 연구는 모델을 이용하여 우리나라 남부지역에 위치한 옥정호를 대상으로 계절별 연직 수온 분포와 전도현상을 규명하는데 목적이 있다. 대상 호수의 지형과 수리 현상에 적합하게 개발된 미공병단의 CE-QUAL-W2 모델을 사용하였으며 1998년 3월부터 1999년 2월까지 관측된 연직 수온 분포를 이용하여 모델을 보정하고 검증하였다.

연 구 방 법

1. 연구대상

본 연구대상인 옥정호는 우리나라 남부지역의 섬진강 상류에 위치한 인공 호수로 1928년에 동진강 유역의 농업용수 공급을 위하여 유역변경식 댐 건설로 만들어졌다(Fig. 1). 1965년에 다시 전력생산과 저수량 증대를 위하여 지금의 섬진강댐이 건설되었으며 저수 용량도 466 $\times 10^6$ m^3으로 확대되었다. 옥정호는 섬진강 본류와 옥녀동천, 추령천 등이 모여서 형성된 가지가 많고, 폭이 좁으며, 유하 방향으로 긴 형상이다. 옥정호의 유역은 전북 진안, 순창, 정읍 등 1개 시와 3개 군이 속해 있으며 유역면적은 763 m^2이다. 유역의 동쪽에는 낙동강, 서쪽에는 동진강, 북쪽에는 금강과 만경강 유역에 접하고 있다(한국수자원공사, 1998).

섬진강댐의 높이는 64 m이며 길이는 344 m로 방류공과 여수로를 통하여 섬진강으로 물을 방류하고 있으며, 일부는 옥정호 중간 부분에 위치한 칠보취수구와 운암수갱을 통해 동진강으로 방류하고 있다. 댐의 방류공은 섬진강 하류에 대한 용수공급 시설물로서, 하천 유지수와 관개용수를 공급하며, 여수로는 홍수시 수위조절 목적으로 사용된다. 칠보취수구와 운암수갱으로부터 방류된 물은 발전에 사용된 후 농업용수와 광역상수원으로 이용된다. 옥정호의 유효 저수량과 주요 방류구의 고도는 Fig. 1에 제시되어 있다.

2. 모델 원리

옥정호는 원래 계곡이었던 곳에 물이 채워지면서 형성되어 Fig. 1과 같이 폭이 좁고 긴 수지형 호수(Dendritic Lake)이다. 또한 우리나라 대부분의 호수처럼 여름철에는 장마로 인하여 급격한 수체 이동이 이루어진다. 이러한 호수에 적합하게 개발된 것은 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)의 CE-QUAL-W2로 연직 방향의 2차원 시변화 모델이다(Cole and Buchak, 1995). CE-QUAL-W2 모델은 현재 널리 사용되고 있는 WASP5 모델(Ambrose *et al.*, 1987)에 비해 계절별 연직 수온 변화

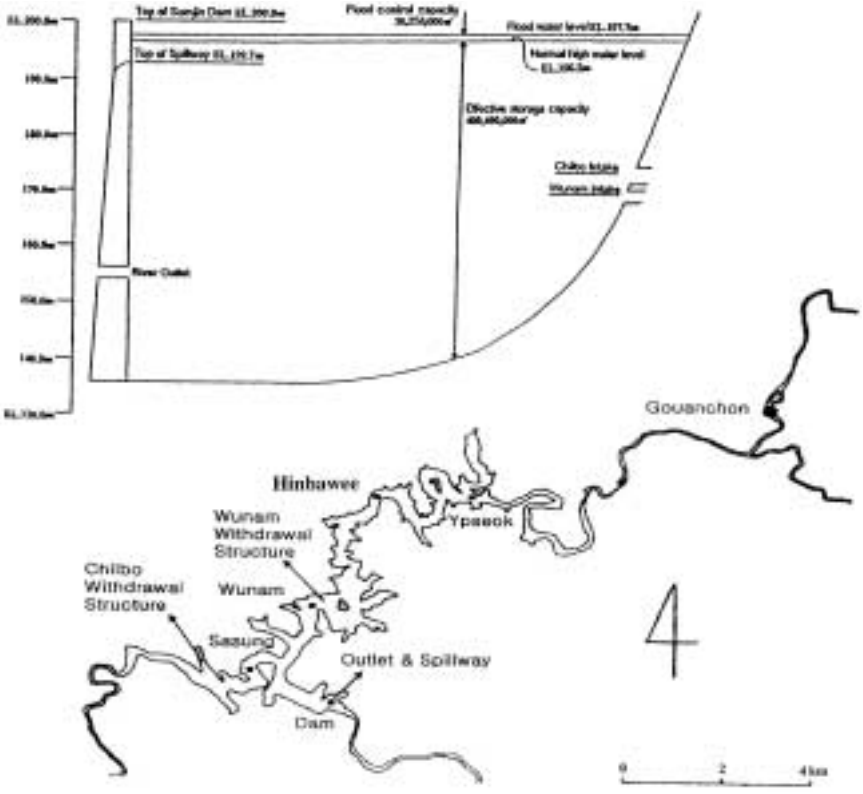

Fig. 1. The Okjung Lake and the Vertical Profile of Water Outfalls.

와 전도 현상 그리고 수리 현상을 비교적 잘 표현하는 장점이 있다(박과 나, 2000). 특히 성층화 현상이 심한 수체의 특성을 잘 표현하며(Kurup *et al*, 2000), 지금까지 국내외에서 수지형 호수에 널리 사용되고 있다(Martin, 1988; McKee *et al*., 1992; Murr *et al*., 1995; 김 등, 2001). 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 대상 호수의 특성과 연구 목적에 부합되는 CE-QUAL-W2 모델을 선정하였다.

CE-QUAL-W2 모델은 수체의 수리적 이동방정식은 크게 기본식과 보조식으로 구성되어 있다. 기본식은 유체유동식으로서 6개의 방정식, 즉 식(1)의 운동방정식, 식(2)의 연속방정식, 식(3)의 이류확산방정식, 식(4)의 수표면 고도방정식, 식(5)의 수압방정식, 식(6)의 상태방정식으로 구성되어 있으며, 6개의 미지수-자유수표고(η), 압력(P), 횡방향 유속(U), 종방향 유속(W), 구성성분농도(Φ), 그리고 밀도(ρ)-에 대한 6개 방정식의 해는 기본 모델구조를 형성한다.

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial BP}{\partial x} + \partial\frac{\left(BA_x\frac{\partial U}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_x}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (2)$$

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial\left(BD_x\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)}{\partial x} - \frac{\partial\left(BD_z\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)}{\partial z} = q_\Phi B + S_\Phi B \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\int_\eta^h UBdz - \int_\eta^h qBdz \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (5)$$

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS}) \quad (6)$$

여기서, U, W = x, z 방향으로 평균화된 유속(m/sec), B = 수체의 폭(m), t = 시간(sec), ρ = 밀도(kg/m^3), P = 압력(N/m^2), A_x = x 방향 운동확산 계수(m^2/sec), τ_x = 수평방

향 전단력 (m^2/sec), q = 유입 또는 유출유량 (m^3/sec), Φ = 물질농도 (g/m^3), D = 주어진 방향의 확산계수 (m^2/sec), q_Φ = 유입 또는 유출량 ($g/m^3/sec$), S_Φ = 유입 또는 유출량 ($g/m^3/sec$), B_η = 시 · 공간에 따라 변하는 수표면 폭 (m), η = 자유수표면 위치 (m), h = 총 수심 (m), g = 중력가속도 (m/sec^2), f (T_w, Φ_{TDS}, Φ_{SS}) = 온도, 총 용존성 고형물질 또는 염분도, 부유물질에 의존하는 밀도 함수이다.

보조식은 이 모델의 기본적인 유체역학과 난류 계산 기법의 독립된 과정을 설명하기 위한 방정식으로 난류 확산, 바람 전단력의 과정, 열교환, 증발, 밀도함수, 선택적 취수에 관한 방정식이 포함된다. 보조식에 대한 각각의 방정식은 Cole and Buchak (1995)에 상술되어 있다.

3. 모델 구성 및 적용

옥정호를 CE-QUAL-W2 모델에 적합하게 구획화하

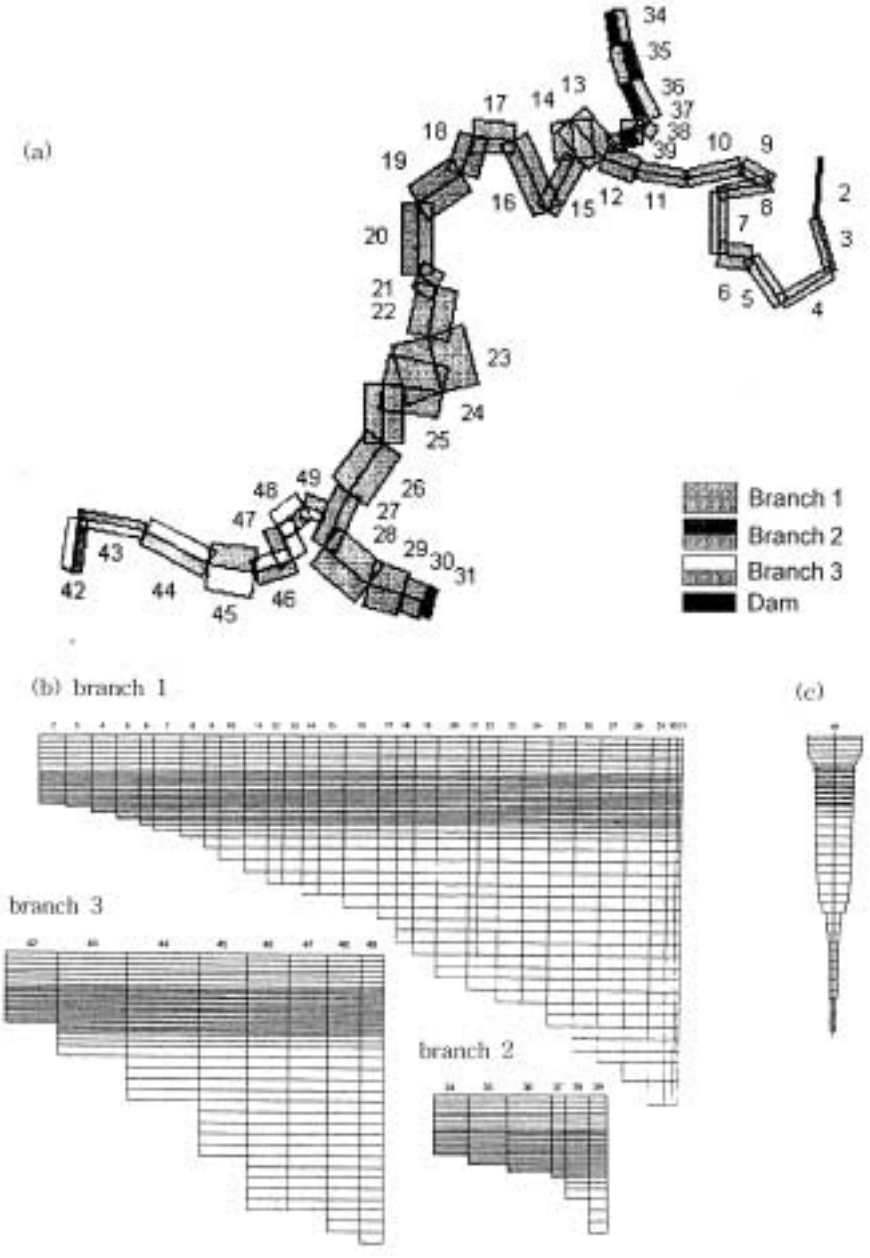

Fig. 2. Schematics of Model Grid: (a) Top View, (b) Side View (Branch 1: Sumjin River, Branch 2: Oknaedong Chun, Branch 3: Churyong Chun), and (c) End View at Sumjin Dam.

여 3개 지류(Branch)와 상하류 방향으로 50개 구획(Segment), 그리고 49개의 수직 수층(Layer)으로 구성하였다. 가장 깊은 호수 바닥(EL. 136 m)에서 최대홍수위(EL. 198 m)까지 총 62 m 깊이를 수직으로 분할하였다. 각 수층의 두께는 수온의 변화가 거의 없는 심층은 크게, 그리고 기온의 영향을 받아 수온변화가 비교적 심한 표층은 작게 설정하였다. 여름의 집중강우로 급격히 변화하는 수위를 적절히 재현하기 위해, 수위변화가 비교적 심한 EL. 192～183 m는 0.5 m 간격으로, EL. 198～192 m와 EL. 183～181 m는 1 m 간격으로, EL. 181～143 m는 2 m, EL. 143～136 m는 3 m와 4 m 간격으로 구성하였다. 섬진강 본류를 포함하는 지류 1의 구획 1과 32, 옥녀동천을 포함하는 지류 2의 구획 33과 40, 추령천을 포함하는 지류 3의 구획 41과 50, 그리고 수층 1과 49를 경계구획으로 하였다. 모델 적용 구획도는 Fig. 2에 제시하였다. Fig. 2 (A)는 위에서 내려다 본 구획도로서 길이방향과 폭방향의 2차원 그림이다. (B)와 (C)는 수체를 옆에서 본 구획도로서 길이방향과 종방향의 2차원 그림이다. (D)는 댐지점 구획을 폭방향과 종방향으로 바라본 그림이다.

모델 기간은 1998년 3월 1일부터 1999년 2월 28일까지 1년 동안이며, 최소 시간간격은 1초, 최대 시간간격은 3,600초, 입출력간격은 1일로 설정하여, 옥정호의 연중 수위와 수온 변화를 시뮬레이션하였다. 물수지는 운암수갱과 칠보발전소에서의 관측된 일별 취수량과 섬진강댐의 방류공과 여수로에서 관측된 일별 방류량을 모델에 입력하고 수위 변화로 확인하였다. CE-QUAL-W2 모델에 필요한 기상자료인 기온, 이슬점, 풍향, 풍속, 운량은 임실측후소의 일자료를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 물수지 재현 확인

연중 수온변화를 예측하기에 앞서 모델의 물수지 재현을 확인하는 과정이 필요하다. 호수의 유입량과 방류량 변화로 인하여 저수량이 변하며, 이는 호수의 수위 변화로 나타난다. 따라서 물수지 재현을 위해 수위 시뮬레이션이 필요하며, 정확한 수위 시뮬레이션을 위해서는 먼저 모델내 호수 지형을 실제와 근접하게 구성하여야 한다. 호수 지형도와 수위-면적-용량 곡선(elevation-area-capacity curve)을 이용하여 모델 지형을 구성하고 이를 실측값과 비교하였다. Fig. 3은 수위-면적-용량값의 실제 측정된 값과 모델에서 재현된 지형으로부터 계산된 값을 비교한 그림이다. 이 그림으로부터 수위-면적-용량값의 실제값과 예측값이 비교적 잘 일치하며 모델내 호수 지형이 비교적 잘 재현된 것을 알 수 있다.

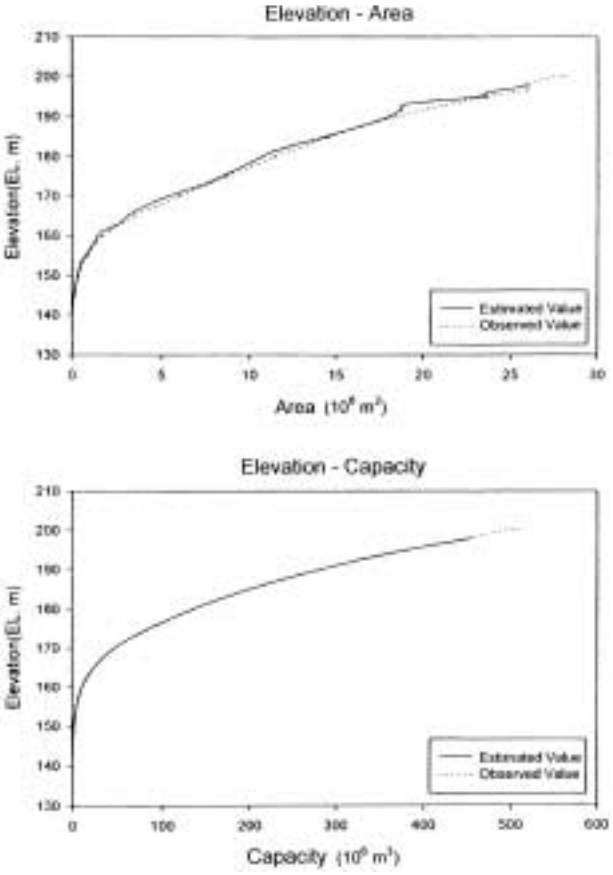

Fig. 3. Changes of Surface Area and Reservoir Capacity as a Function of Elevation.

Fig. 4는 년중 호수로 유입 및 방류되는 수량과 그에 따른 수위 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 6월말에서 10월에 걸쳐 3번의 큰 유입이 나타나고 있다. 6월말에는 수위가 현저히 낮아서 다량의 유입이 있음에도 일정한 방류를 계속하였으며 두 번째와 세 번째 유입시에는 여수로를 통하여 방류한 것을 보여주고 있다. Fig. 5는 섬진강댐의 일별 수위변화에 대한 실측값과 모델값을 비교한 그래프이다. 7, 8, 10월의 피크 시에는 다른 시기와 비교해 볼 때, 모델값과 실측값이 다소 차이를 보인다. 이는 CE-QUAL-W2 모델이 우리나라에 독특한 장마시 집중강우로 인한 급격한 수량 변화를 고려하지 못하기 때문이다. 사용된 모델은 미국에서 개발되어 아시아 지역의 몬순 기후로 인한 급격한 수량 유입과 수위 변화에 적합하지 못하며, 이러한 자료가 입력될

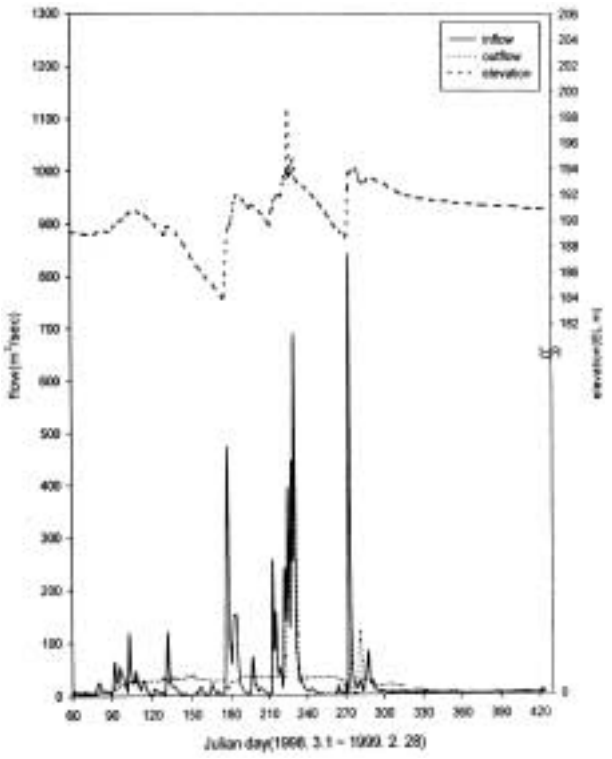

Fig. 4. Annual Changes of Inflow and Outflow, along with surface elevation.

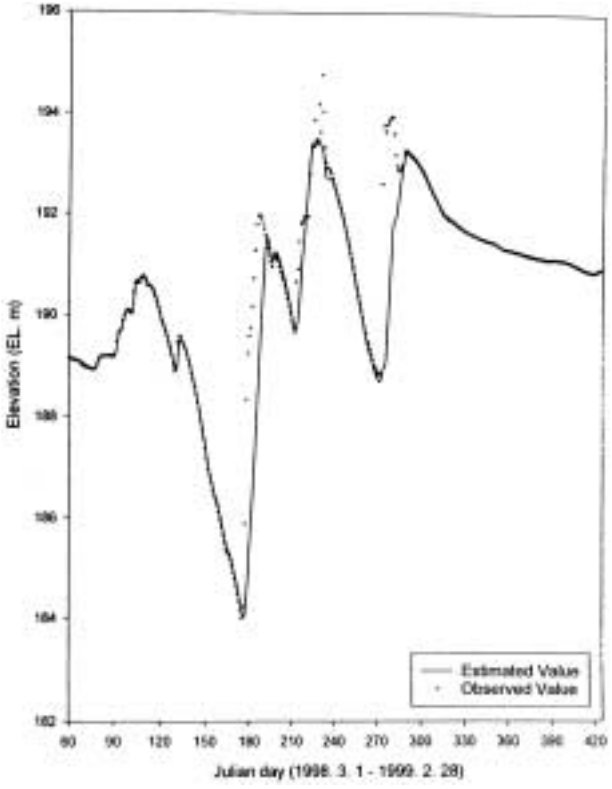

Fig. 5. Validation of Hydrologic Balance with Surface Elevation Wunam.

때 비록 시간 간격을 매우 짧게 준다하더라도 모델 실행은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 모델 실행을 가능하게 하기 위하여 한번에 다량 유입되는 것을 다소 완만하게 조절하여 시뮬레이션하였으며 그 결과 실측값과 차이를 보인다. 그러나 유입 유량 변화가 비교적 적은 기간에는 실측값과 모델값이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

2. 수온분포

1998년 3월부터 1999년 2월까지 총 12개월 동안 각 측정 지점에서의 수심별 수온 변화에 대해 실측값과 모델값을 비교하여 Fig. 6에서 10까지 제시하였다. 댐 앞 지점의 경우 3월과 4월에는 표층에서 약간의 수온차이를 나타내었으나 나머지 층에서의 수온은 매우 잘 일치하였다. 5월과 6월에는 전체적으로 일치하는 경향을 보여주며, 7월에는 표층과 수온 약층이 형성되는 깊이에서 다소 차이를 보였으나 심층의 수온은 매우 잘 일치하고 있다. 8, 9, 10월에는 수온 약층이 형성되기 전에 약간의 차이를 보이나 전체적인 경향이 매우 유사하고 수온 약층 아래에서는 일치함을 보인다. 11월과 12월에는 수온 약층이 실제보다 약간 아래에 형성되었지만 전체적으로는 유사하게 나타났으며, 다음해 1월과 2월에는 매우 잘 일치하고 있다. 나머지 지점들에서도 이러한 경향이 거의 유사하게 나타났다.

7월의 경우 모델값이 실측값보다 다소 높은 것으로 예측되었다. 이는 앞의 수위 예측 결과에서도 언급했듯이 7월초의 입력 유량값이 부정확하여, 모델내의 물수지가 실제와 다소 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 7월 14일의 경우 모델의 수위값은 실제와 유사하지만, 14일 이전에 있었던 집중 강우시 약 10일 가량 실제 유량보다 더 적은 양의 물이 호수에 있는 것으로 시뮬레이션되었기 때문에, 실제 호수의 수온보다 더 높은 수온 예측 결과가 나타난 것으로 보인다. 또한 본 연구에 사용된 기상자료는 옥정호에서 관측된 것이 아니라 임실 측후소의 자료이다. 수온은 기상자료 즉 기온, 풍향, 풍속 등에 의해 큰 영향을 받기 때문에, 기상자료의 부정확으로 인한 오차가 발생할 수 있다. 호수 내 수온 변화와 수온 성층 및 전도 현상에는 기상 조건이 가장 큰 영향을 미치며, 그 밖에 주요 유입 지류로부터의 유입량 및 유입수 특성 등이 영향을 미친다(Owen and Effler,

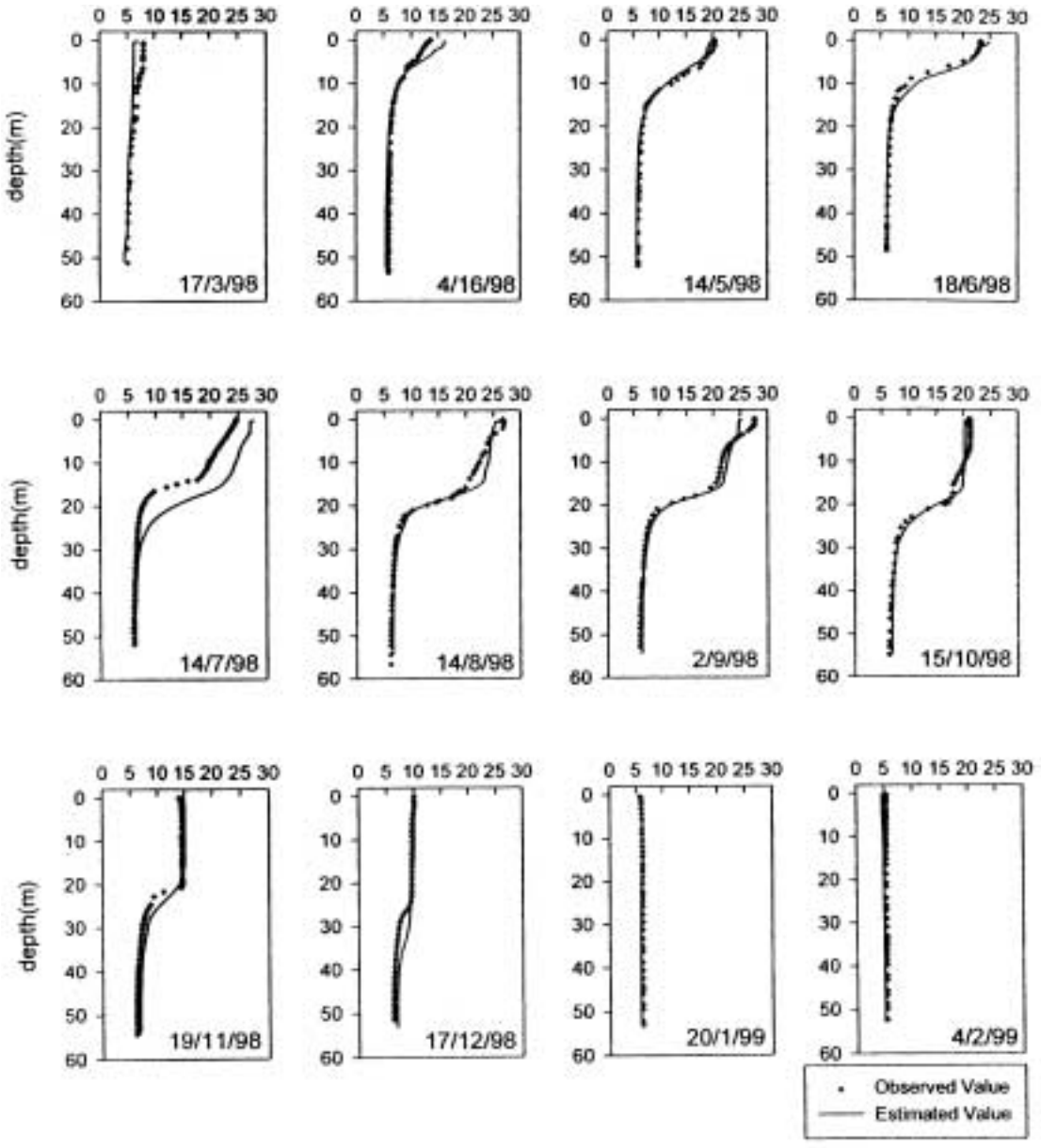

Fig. 6. Observed and Estimated Temperature Profiles at Sumjin River Dam.

1989).

이 등(1990)은 섬진강댐을 포함하여 청평댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 남강댐, 소양댐, 팔당댐, 안동댐, 대청댐, 전주댐, 합천댐을 주변의 기후를 변화시킬 정도의 대규모 댐으로 분류하였으며, 팔당댐 주변에 대한 연구 결과, 댐 건설후의 평균기온이 5월에서 11월까지는 댐 건설전에 비해 다소 낮아졌고, 12월에서 4월까지는 다소 높아졌으며, 특히 7월부터 9월까지는 댐 건설후 평균기온이 1～1.5°C가 낮아진 것으로 보고하였다. 이러한 사례로부터 7월의 경우 임실지역과 섬진강댐 주변지역과의 기온차이가 다른 시기에 비해 비교적 크게 나타난다는 것을 추측할 수 있으며, 섬진강댐 주변의 기상자료가 아닌 임실측후소의 기상자료를 사용하여 시뮬레이션 할 경우, 실제보다 더 높은 수온이 예측될 수 있을 것으로 사료된다.

3. 유속 분포

Fig. 11은 지류 1의 수온과 유속분포에 대한 그림으로

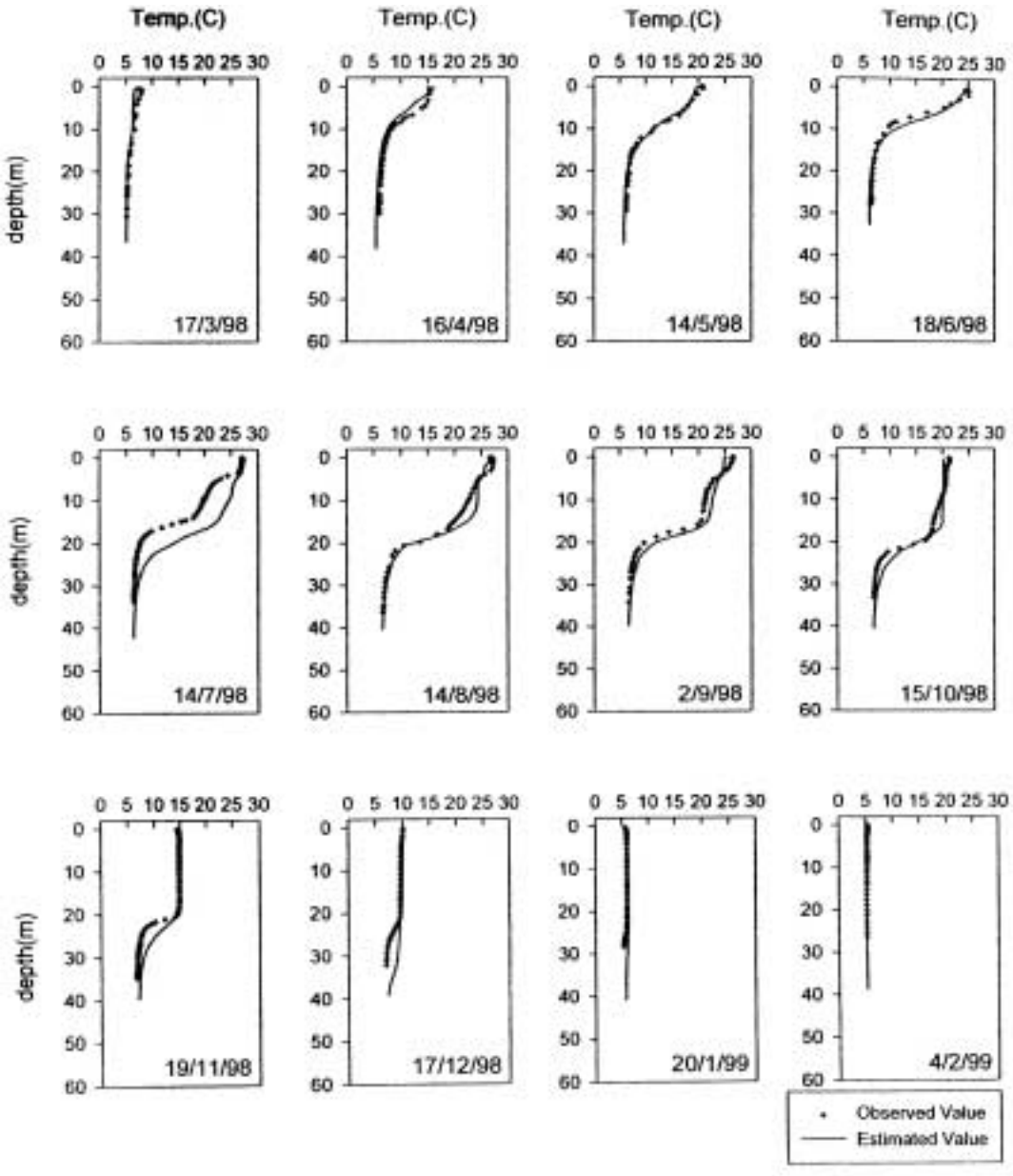

Fig. 7. Observed and Estimated Temperature Profiles at Sasung.

서, 수온은 등고선으로, 유속은 화살표로 표시되어있다. Fig. 11(A)는 1998년 6월 24일의 수온과 유속분포 그림으로서 온도분포로 보아 안정된 성층 현상이 나타나고 있음을 알 수 있으며, 유속의 세기가 매우 작은 것으로 보아 수체 이동이 거의 없는 것으로 판단된다. Fig. 11 (B)는 1998년 8월 16일의 수온과 유속분포 그림으로서 수온이 다소 증가하고 성층이 더욱 안정화된 것으로 보이며 대체로 앞 그림의 수온분포와 유사하지만, 수위가 15 m 정도 상승하였고 상류부의 유속이 매우 빨라진 것을 알 수 있다. (A)에 비해 (B)의 수위가 더 높고 상류부의 유속이 다른 부분보다 크게 표시되고 있는 것으로 보아, 8월 중순경의 집중 강우에 의해 많은 양의 물이 빠른 속도로 상류 하천으로부터 옥정호로 유입된 것을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 점은 유입수가 표층이 아닌 중층으로 유입되고 있는 것이다. 이는 상류하천이나 유역으로부터 호수로 물이 유입될 때 표층으로 유입되는 것이 아니라, 밀도가 같은 층 즉, 유입수의 수온과 호수의 수온이 같은 부분으로 유입되고 있다는 것을 나타

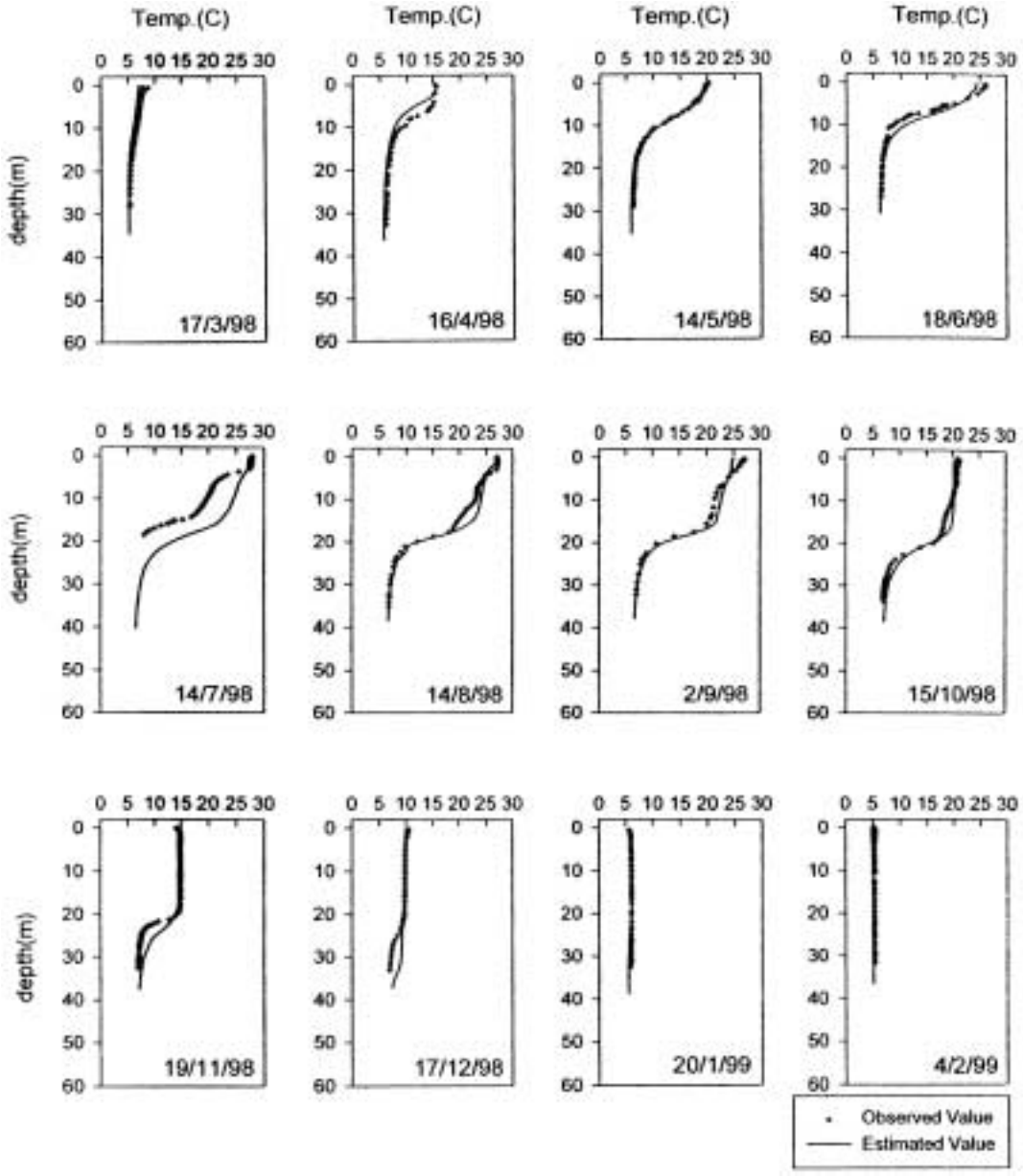

Fig. 8. Observed and Estimated Temperature Profiles at Wunam.

낸다.

여름의 성층현상으로 인해 표층으로부터의 산소 공급이 가장 많이 제한되는 심층에서 산소가 최대로 고갈될 것이라고 생각하기 쉬우나, 실제로는 소양호와 같은 여러 호수에서는 "중층의 용존산소 최소 현상"이 나타나고 있다는 보고가 있다(김과 조, 1989; 안, 2001). (B)의 유속분포 그림으로부터 여름철에 중층에서 용존산소 최소 현상이 일어나는 이유를 찾을 수 있다. 여름에 강우현상으로 인해 유역으로부터 다량의 물이 유입되면, 유입수 내에는 많은 양의 유기물이 포함되며, 유입된 유기물이 분해될 때 다량의 산소가 소비된다. 따라서 다량의 유기물을 포함한 유입수가 중층으로 유입될 경우 중층의 용존산소가 심층보다 더 많이 감소하여 심층이 아닌 중층에서 최소 농도를 나타내는 것으로 추측된다.

결 론

본 연구는 섬진강 상류에 위치한 옥정호에 CE-

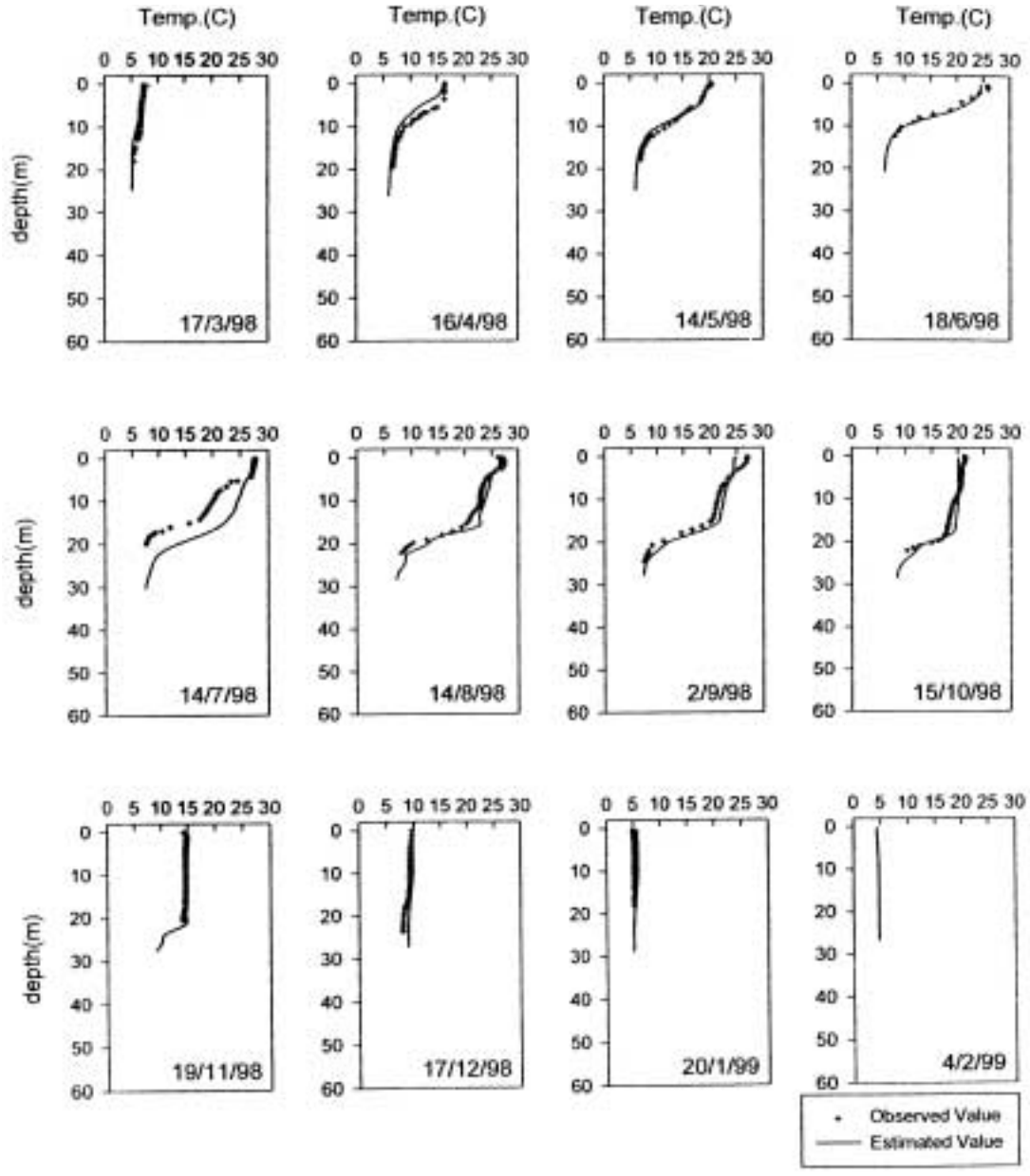

Fig. 9. Observed and Estimated Temperature Profiles at Hinbawee.

QUAL-W2 모델을 적용하여 연중 수위 변화와 시공간적 수온분포, 그리고 전도현상을 규명하였다. 적용한 모델은 연중 수위와 수온분포 변화를 실측값과 유사하게 재현시킬 수 있었다. 수위의 경우 유입 수량 변화가 적은 기간에는 실측값과 모델값이 매우 잘 일치하였으나 수량 변화가 급격할 경우에는 모델 실행이 불가능하였다. 이를 극복하기 위하여 유입 수량이 급격히 변할 기간에는 한번에 다량 유입되는 것을 다소 완만하게 조절하여 시뮬레이션하였으며 그 결과 실측값과 차이를 보였다. 수온 예측 결과 댐 앞 지점에서 상류로 갈수록 연중 수온변화의 폭이 증가하였다. 이는 댐 앞에서 상류로 갈수록 수심이 얕아져 기온의 영향이 크게 나타남을 의미한다. 또한 모든 수역에서 표층의 수온은 기온과 유사하였으며 심층보다 변화의 폭이 크게 나타났다. 섬진강댐에 가까이 갈수록 성층현상이 뚜렷해지지만 수온약층이 형성되는 깊이는 모든 수역에서 비슷하며, 주로 10~20 m 부근에 수온약층이 형성되는 것으로 예측되었다. 댐 앞 지점의 경우 4월부터 12월까지 수온약층이 형성

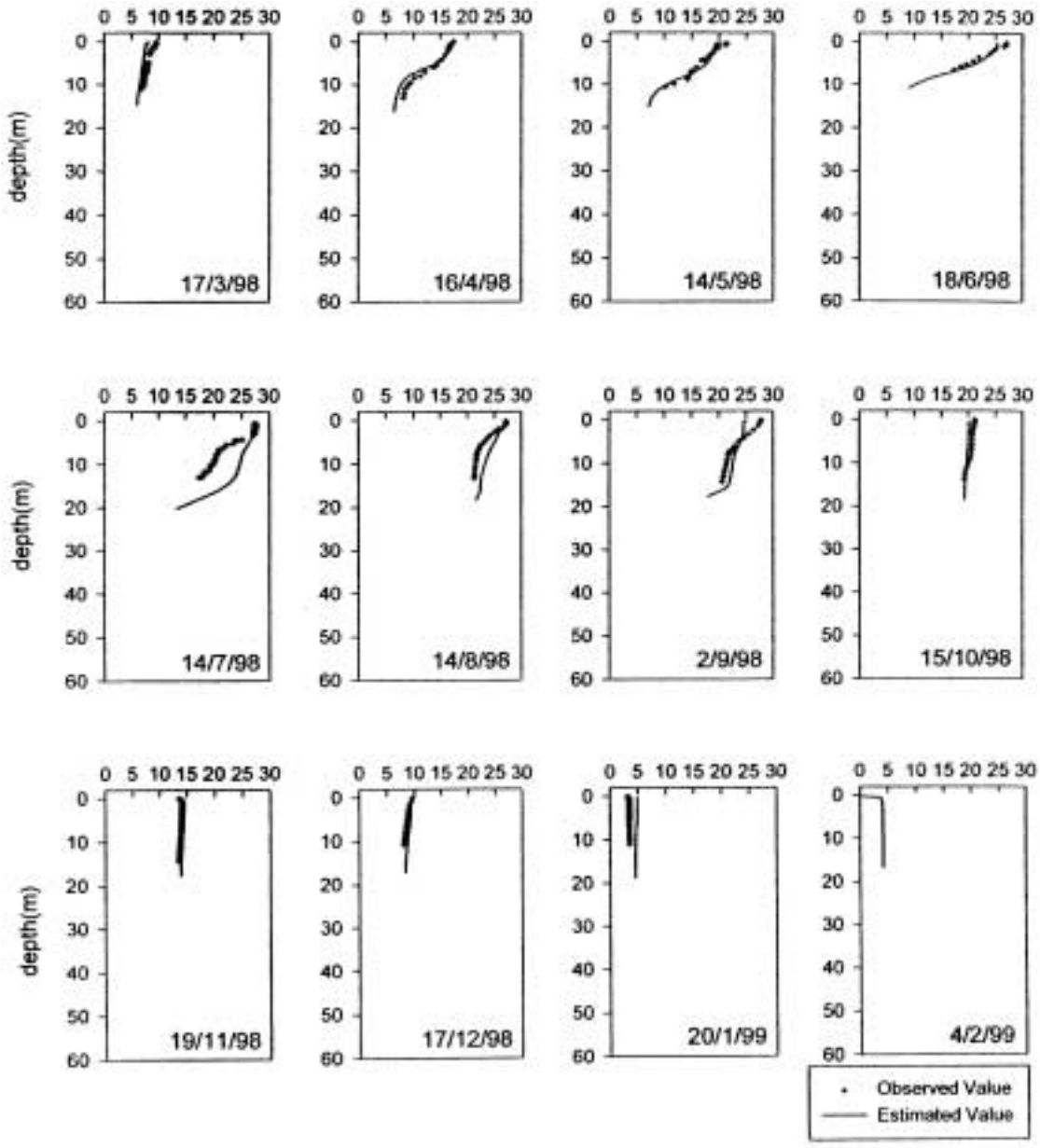

Fig. 10. Observed and Estimated Temperature Profiles at Ypseok.

되고, 그 깊이는 시간이 지날수록 점점 깊어지며, 이러한 경향은 나머지 지점들에서도 유사하게 나타났다. 이 결과로부터 옥정호의 경우 수심 20 m 중심으로 수질이 차이가 나며, 특히 표층으로부터 용존산소의 유입이 제한될 것으로 사료된다.

섬진강댐에서부터 흰바위 지점까지는 수온이 연중 4°C 이상을 유지하고 밀도차이에 의한 전도현상이 나타나지 않을 것으로 예측되었다. 그러나 수심이 20 m 이하가 되는 지점에서는 겨울에 표층 수온이 4°C 이하로 내려가기 때문에 전도 현상이 일어날 것으로 예측되었다. 따라서 옥정호는 빈혼합(Oligomictic) 호수이며 동시에 수심 20 m이내 수역에서는 겨울에 한번 혼합이 일어나는 호수인 것으로 예측되었다. 옥정호와 같이 위도 35.3~35.5° 부근에 위치한 호수는 일반적으로 일회혼합(Monomictic)이나 이 지역의 기상 특성 때문에 빈혼합이 되는 것으로 사료된다.

시뮬레이션한 유속 분포를 검토한 결과 집중강우가 나타나는 기간을 제외하면 수체이동이 미약한 것으로

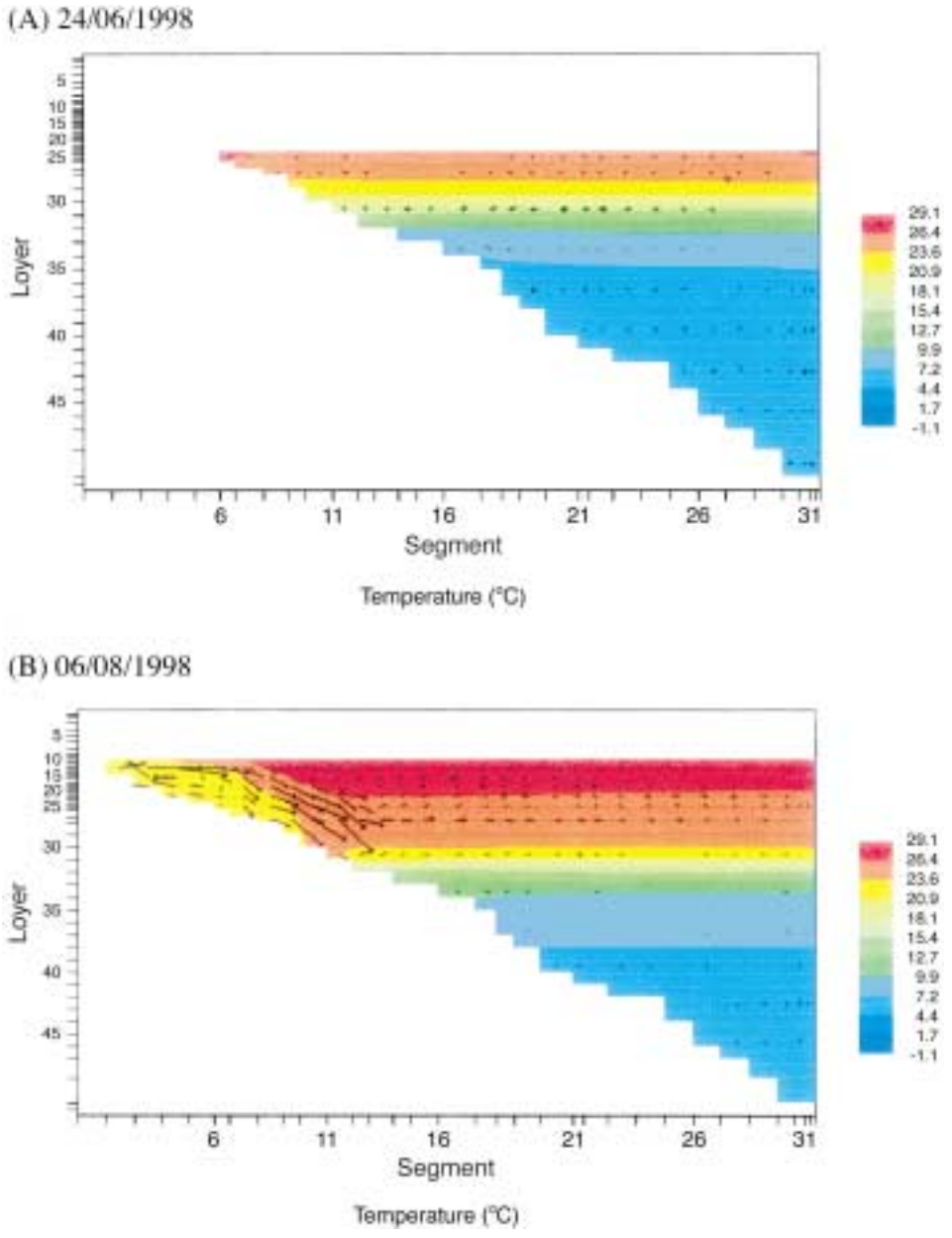

Fig. 11. Water Temperature Contour and Velocity Distribution of Branch 1 (A) June 24, 1998, (B) August 16, 1998.

예측되었다. 그러나 장마기간동안 유입수가 많을 경우 유속이 매우 빠르게 나타나며, 특히 여름철에는 밀도 차이로 인하여 여러 가지 오염물질을 함유한 유입수가 중층으로 들어오는 것이 확인되었다. 이 예측결과는 우리나라 여러 호수에서 보고되는 여름철에 용존산소 최저농도가 중층에서 나타나는 이유를 설명해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

섬진강 상류에 위치한 옥정호의 연직 수온 분포 계절변화에 대한 시변화 모델 연구를 수행하였다. 미공병단에서 개발한 CE-QUAL-W2 모델 구조에 기초하여 호수를 3개의 지류, 50개의 상하류 구획 그리고 49개의 수층으로 구성하였으며 일년동안의 연직 수온 및 유속 분

포를 시뮬레이션하였다. 호수내 5개 지점에서 매월 측정된 연직 수온 분포 자료를 이용하여 보정하고 검증하였다. 또한, 시뮬레이션한 연중 수위 자료 변화를 관측된 자료와 비교하여 호수내 물수지를 확인하였다. 모델 예측값은 실측값과 적절한 일치를 보였으나 7월 관측 자료에서 다소 차이를 보였다. 이것은 우리나라에서 여름 장마동안 급격한 수리 현상 변화를 모델이 표현할 수 없는 점과 이 기간동안 사용된 기온자료의 정확성이 부족하였기 때문인 것으로 사료된다. 모델 결과는 옥정호 대부분 수역에서 연중 4°C 이상을 유지하여 계절에 따른 전도현상이 없는 것을 보여준다. 그러나 상류 얕은 수역(수심 20미터 이내)에서는 수온이 4°C 이하로 떨어지며 겨울에 물이 얼어 혼합이 일어나는 것으로 나타났다. 본 연구로부터 옥정호는 빈혼합 호수라는 결론을 얻었다. 이러한 결론은 위도 20°부터 40°사이에 위치한 호수는 일회혼합이라는 일반적 경향과는 크게 다르다. 시뮬레이션한 유속 분포를 검토한 결과 여름 장마기간동안 상류에서 유입되는 물은 수온에 의한 밀도 차이로 인하여 호수 중층으로 유입되는 것이 확인되었다.

사 사

본 연구에 사용된 옥정호 관측 자료를 제공해준 한국수자원공사, 수자원연구소 이요상 박사님께 감사드립니다.

인 용 문 헌

김범철, 조규송, 허우명, 김동섭. 1989. 소양호 부영양화의 연변화 추이, 한국육수학회지 **22**: 151-158

김범철, 조규송. 1989. 소양호의 심층무산소층과 중층 산소최저층 형성, 한국육수학회지 **22**: 159-166

김윤희, 김범철, 최광순, 서동일. 2001. "2차원 수리수질모델을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링", 대한상하수도학회지 **15**: 40-49.

박석순, 나은혜. 2000. "환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 I: 수질 모델", 한국환경영향평가학회지, **9**: 13-24.

안광국. 2001. 인공호에서 수온의 수직분포와 수층혼합의 계절적 변화 및 중층수 유입 현상의 영향, 한국육수학회지 **34**: 9-20

이종범, 봉종헌, 조하만. 1990. 댐 건설에 따른 국지기후의 변화 실태, 한국기상학회지 **7**: 75-81.

한국수자원공사. 1998. 섬진강댐 운영합리화방안 보고서, 건설교통부.

Ambrose, R.B., T.A. Wool, J.P. Connolly, and R.W. Shanz. 1987. WASP5, a Hydrodynamic and Water Quality Model, EPA/600/3-87/039, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA.to

Chapra, S.C. 1997. Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill Inc., 844pp.

Cole, T.M. and E.M. Buchak. 1995. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0, Instructional Report EL-95-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Kurup, R.G., D.P. Hamilton, and R.L. Phillips. 2000. Comparison of two 2-dimensional, laterally averaged hydrodynamic model applications to the Swan River Estuary, *Mathematics and Computers in Simulation*, **51**: 627-638.

Martin, J.L. 1988. Application of Two-Dimensional Water Quality Model, *Journal of Environmental Engineering*, **114**: 317-336.

McKee, C.P., E.L. Thackston, R.E. Speede, D.J. Wilson, and R.J. Cardozo. 1992. Modeling of water quality in Chatham Lake Technical Report, No. 42, Environmental and Water Resources Engineering, Vanderbilt University.

Murr, A.C., E.L. Thackston, W. Reid, and R.E. Speece. 1995. Modeling of fecal coliform bacteria in the Cumberland river near Nashville, Technical Report No. 44, Environmental and Water Resources Engineering, Vanderbilt University.

Owens, E.M. and S.W. Effler. 1989. "Changes in stratification in Onondaga Lake, New York", *Water Resources Bulletin*, **25**: 587-597.

Wetzel, R.G. 1983. Limnology, CBS College Publish.

(Received 8 Feb. 2002, Manuscript accepted 25 Apr. 2002)