

댐 재개발이 호수 수온 및 탁수 거동 변화에 미치는 영향 예측을 위한 모델 연구

정선아 · 박석순[†]

이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2005년 2월 3일 접수, 2005년 7월 29일 채택)

A Modeling Study of Lake Thermal Dynamics and Turbid Current for an Impact Prediction of Dam Reconstruction

Jeong, Seon-A · Park, Seok-Soon[†]

Department of Environment Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : This paper presents a modeling study of thermal dynamics and turbid current in the Obong Lake, Kangreung. The lake formed by the artificial dam in 1983 for agricultural water supply, is currently under consideration of reconstruction in order to expand the volume of reservoir for water supply and flood control in downstream area. The US Army Corps of Engineers' CE-QUAL-W2, a two-dimensional laterally averaged hydrodynamic and water quality model, was applied to the lake after reconstruction as well as the present lake. The model calibration and verification were conducted against surface water levels and temperature of the lake measured during the years of 2001 and 2003. The model results showed a good agreement with field measurements both in calibration and verification. Utilizing the validated model, an impact of dam reconstruction on vertical temperature and hydrodynamics were predicted. The model results showed that steep temperature gradient between epilimnion and hypolimnion would be formed during summer, along with extension of cold deep water after reconstruction. During winter and spring seasons, however, the vertical temperature profiles was predicted to be quite similar both before and after reconstruction. This results indicated that thermal stratification would become stronger during summer and stay longer after dam reconstruction. From the examination of predicted water movements, it was noticed that the upstream turbid current would infiltrate into the interface between metalimnion and hypolimnion and then suspended solids would slowly settle down to the bottom before reconstruction. After reconstruction, however, it was shown that the upstream turbid current would stay longer in metalimnion with similar density due to strong stratification. The model also predicted that dam reconstruction would make suspended solids near the dam location significantly decrease.

Key Words : Thermal Dynamics, Turbid Current, Lake Stratification, Seasonal Turnover, Dam Reconstruction, Vertical Temperature Profile, CE-QUAL-W2, Water Quality Model

요약 : 강릉 오봉호의 수온 및 탁수 거동에 관한 모델 연구 결과가 본 논문에 제시되었다. 농업용수 공급을 위해 1983년 만들어진 이 호수는 현재 하류 지역의 수자원 확보와 홍수 방지를 위하여 저수용량을 확대하는 재개발이 검토되고 있다. 횡방향 평균화 2차원 수리 수질 모델인 미공병단의 CE-QUAL-W2를 현재 상태와 재개발 후의 호수에 적용하였다. 2001년과 2003년에 관측된 수위와 수온 측정 자료를 이용하여 모델을 보정하고 검증하였으며, 측정 값과 모델 값이 적절한 일치를 보였다. 검증된 모델을 이용하여 댐 재개발이 수온과 수체 흐름에 미치는 영향을 예측한 결과 재개발 후에는 표층과 심층의 수온 구배가 강하게 나타나고, 낮은 수온을 가진 심층이 확대되나, 겨울과 봄에는 수직 수온 분포 형태가 재개발 전과 후 모두 비슷한 것으로 나타났다. 이는 댐 재개발이 여름철 호수 수온 성층현상을 더욱 강하게 만들고 지속시간을 길게 할 것임을 의미한다. 예측된 수체 이동현상을 관찰한 결과 재개발 전에는 상류의 탁수는 호수의 중층과 심층사이에 유입되어 부유물질이 천천히 침강하는 것으로 나타났다. 그러나 재개발 후에는 강한 성층현상이 나타나기 때문에 밀도가 비슷한 중층에 유입 탁수가 오래 머물 것으로 예측되었다. 또한 재개발로 인하여 댐 부근의 부유물질 농도가 크게 감소할 것이 예측되었다.

주제어 : 수온 변화, 탁수 거동, 호수 성층화, 계절별 전도현상, 댐 재개발, 연직 수온 분포, CE-QUAL-W2, 수질 모델

1. 서 론

최근 심화되어 가고 있는 기상이변과 수자원 부족을 대처하기 위하여 기존의 소규모 댐을 재개발하는 방안이 검토되고 있다. 이 방안은 댐 규모를 확대하여 저수 용량을

증가시키고 치수 능력을 강화하면서도 댐건설로 인한 환경 피해를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수체가 커지게 되면 호수의 수리, 수질, 생태계에 이르기까지 다양한 환경 변화가 나타난다. 특히, 수온 성층 및 전도 현상과 같은 수체 거동 변화는 호수와 하류 하천의 수질과 생태계에 중요한 영향을 미칠 뿐만 아니라 주변 지역의 기상 변화로 이어진다. 따라서 댐 재개발이 갖는 최대 장점인 환경 피해 최소화를 효과적으로 달성하기 위해서는 이러한

[†] Corresponding author
E-mail: ssp@ewha.ac.kr
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

영향을 사전에 예측하고 적절한 대책을 강구해야 한다.

호수의 수온 성층 현상은 수층간의 에너지와 물질 교환을 저해한다. 수표면으로부터 유입된 산소가 수직 방향으로 전달되는 것을 방해하여 심층에 혐기성 상태를 유발하여 저서 생태계에 피해를 준다. 혐기성 상태의 심층에서는 유기물 분해과정을 통하여 암모니아, 메탄, 황화수소 등과 같은 유해물질이 발생하고 퇴적물로부터 철이나 망간과 같은 중금속이 수층으로 용출된다. 또한 혐기성 상태의 심층에서는 많은 량의 인이 수중에 존재하게 되고, 이것은 계절에 따라 나타나는 전도현상을 통하여 표층으로 전달되어 녹조 현상으로 이어진다.¹⁾

호수의 체적이 커짐으로 나타날 수 있는 또 다른 수체 거동변화는 하절기 중층 밀도류 현상으로 상류 하천의 물이 호수로 들어오면서 동일한 밀도를 가진 수층으로 유입되기 때문에 발생한다. 호수에서 물의 밀도는 수온에 의해 결정되므로, 중층 밀도류는 유입수의 수온이 표층 수온보다 낮고 심층 수온보다 높은 경우에 발생한다. 특히, 강우 시에 발생하는 중층 밀도류는 유기물과 영양염류를 포함하여 호수로 유입되기 때문에 중층의 산소 결핍과 부영양화 현상을 초래하게 된다.^{2,3)}

댐 재개발로 인하여 발생할 수 있는 수온 성층 및 전도 현상, 그리고 밀도류를 사전에 예측할 수 있는 방법은 호수의 수리 및 수온 현상을 적절히 표현한 수학적 모델을 이용하는 것이다. 대상 호수의 지형과 수체 이동에 적합한 모델을 적용하고 주변 지역의 기상변화와 관측된 수온 분포로 모델을 보정하고 검증한 후, 재개발된 호수 지형과 여건을 입력함으로써 예측이 가능하다. 본 연구는 현재 재개발을 검토하고 있는 강원도 강릉 남대천 상류의 오봉호를 대상으로 모델을 적용하여 재개발에 따른 수온 분포 및 수체 거동을 예측하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 대상

본 연구 대상인 오봉호는 강릉 남대천 상류에 만들어진 소형 저수지로 1983년부터 주변 지역에 농업용수를 공급해 왔다(Fig. 1). 중앙점토식 석괴댐으로 이루어진 오봉댐은 남대천의 지류인 도마천과 왕산천이 합류되는 곳에 위치하고 있으며, 텐타게이트 형식의 물넘이 시설과 수문 4조로 구성되어 있다. 오봉호의 총 저수량은 1,445만 톤이며 현재 농업용수뿐만 아니라 강릉시 생활용수와 하류 하천의 유지용수 공급에도 중요한 역할을 하고 있다.

오봉호 유역은 한반도 동서를 분기하는 태백산맥의 해발 1,010~1,240 m에 달하는 고봉들로 분수령을 이루고 있어 지세가 험준하고 경사가 급하다. 호수 주변 유역은 행정구역 상 강릉시 왕산면 도마리, 왕산리, 목계리와 성산면 오봉리에 해당하며 총 유역면적은 109 km²이다. 호수 하류의 남대천 유역은 상류에 비해 비교적 완만한 지세가 이어지다 동해와 연결된다. 오봉호가 태백산맥과 동해의 중간부에 위치한 지리적 관계로 이곳 기후는 고산기후와 해안기후가 인접하는 특성을 보이며 시공간적으로 급격한 변화를 보인다.

최근 한반도에서 빈번히 발생하는 기상이변이 오봉호 주변에서는 이곳의 지리적 특성 때문에 강도가 더욱 증폭되는 것으로 나타나고 있다. 2002년 태풍 루사가 발생하였을 때 강릉에 하루 800 mm가 넘는 폭우가 내려 오봉댐은 붕괴 직전에 이른 것으로 기록되었다. 정부는 동해안 지역에서 늘어나는 물 수요와 댐의 치수능력 강화를 위하여 2001년 댐건설장기계획에서 오봉댐 재개발 계획을 수립하였다.⁴⁾ 현재 논의되고 있는 재개발 계획은 Table 1과 같다.⁵⁾ 평수위를 EL. 128.2 m로 계획하며, 저수 면적은 1.73 km²으로 재개발 전 0.86 km²에 비해 약 두 배 가량 확대된다. 저수

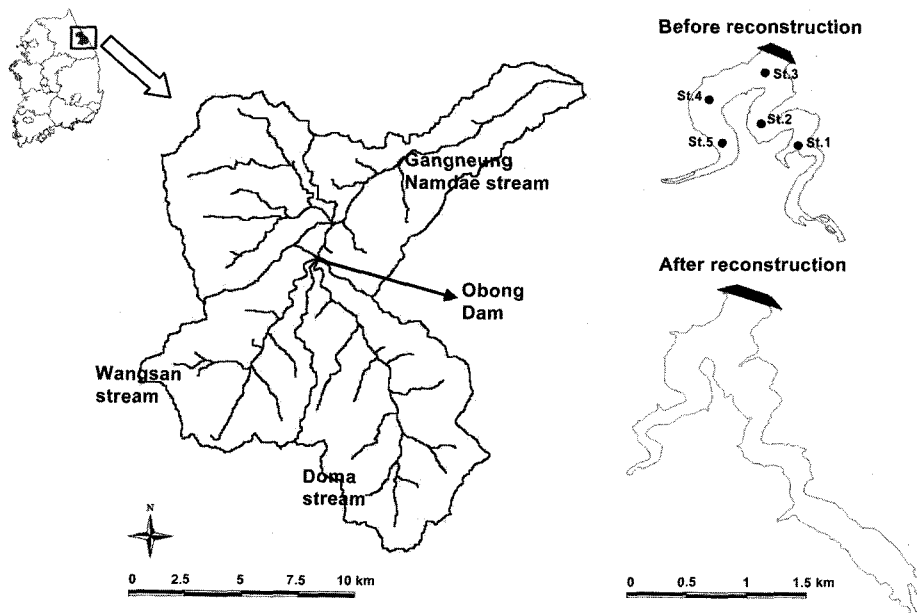


Fig. 1. Location of study area and the sampling sites.

Table 1. Comparison of morphological features of Obong Lake before and after reconstruction

Classification	Before reconstruction	After reconstruction
Storage Area(km ²)	0.86	1.73
Flood water level (EL. m)	120.0	135.3
Normal high water level (EL. m)	118.5	128.2
Low water level (EL. m)	83.0	95.0
Total capacity (10 ⁶ m ³)	14.4	38.6

용량은 3,860만 톤으로 재개발 전 1,445만 톤에 비해 2.5배 이상 증가하게 된다.

2.2. 모델 원리

호수의 수리 및 수질 현상을 재현하기 위하여 WQRRS, WASP, CE-QUAL-W2 등과 같은 다양한 모델이 개발되어 왔으며, 일반적으로 대상 수체의 특성과 목적에 따라 적합한 모델이 선택되어 진다. WQRRS는 호수의 수온 성층과 전도 현상을 재현할 수 있지만 수직 일차원 모델이기 때문에 하천을 막아 만들어진 우리나라의 수지형 인공 호수(dendritic lake)에는 적용하는데 문제가 있으며 현재 해외에서 거의 사용되지 않고 있다. WASP은 몇 개의 구획으로 나누어 수체를 구성하기 때문에 수온 성층과 전도 현상이 중요한 영향을 미치지 못하는 호수의 수질변화 예측에는 적절하지만 그렇지 않은 경우는 사용할 수 없다.⁶⁾ CE-QUAL-W2는 우리나라 산악 지형에 만들어진 수지형 인공 호수의 수온 성층과 전도 현상, 그리고 밀도류를 표현하는데 매우 적합한 것으로 알려져 있다.⁷⁻⁹⁾

오봉호는 우리나라 대부분의 인공호와 마찬가지로 하천 상류의 물줄기를 막아 형성된 호수이므로, 수심은 깊지만 폭이 좁고 여러 개의 지류를 포함하는 수지형 호수의 특징을 지닌다. 또한 저수 용량이 비교적 작아 강우에 의해 급격한 수위 및 수체이동 변화를 보인다. 이러한 특성을 잘 재현하기 위해 본 연구에서는 CE-QUAL-W2 모델을 오봉호에 적용하였다.

CE-QUAL-W2 모델은 미공병단(U.S Army Corps of Engineers)에서 1986년 개발된 이래 지금까지 개선되었으며 저수지, 호수 그리고 하구의 수질 변화 예측에 널리 적용되어 왔다. 이 모델은 폭 방향으로 수질이 균일하다고 가정하기 때문에 길이 방향과 수심 방향으로 수질 변화가 큰 수체에 적합하다. 또한 점원·비점원 등에 의한 오염부하 유입과 여러 개의 수체 구성이 가능하며, 선택적 취수, 발전방류 등 실제와 유사한 유입·유출의 표현이 가능하여 인공호의 수리 및 수질현상 예측에 많은 장점을 가지고 있다. 특히, CE-QUAL-W2는 길이방향과 수심방향 모두 다양한 크기의 격자를 이용하여 수체를 구획하므로, 산지형 인공호의 수온분포와 수체 이동 현상을 분석하기에 적합한 모델이다.^{8,10)}

CE-QUAL-W2 모델의 수리학적 이동을 결정하는 방정식은 크게 기본식과 보조식으로 구성되어 있다. 기본식은 유체운동식으로서 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-자유수표면고(η), 압력(P), 횡방향 유속(U), 종방향 유속(W), 구성성분농도(Φ), 그리고 밀도(ρ)에 대한 6개 방정식의 해는 기본 모델구조를 형성한다.

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

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

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

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

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

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

여기서, U, W = x, z 방향으로 평균화된 유속(m/sec), B = 수체의 폭(m), t = 시간(sec), ρ = 밀도(kg/m³), P = 압력(N/m²), A_x = x방향 운동확산 계수(m²/sec), τ_x = 수평방향 전단력(m²/sec), q = 유입 또는 유출유량(m³/sec), Φ = 물질농도(g/m³), D = 주어진 방향의 확산계수(m²/sec), q_Φ = 유입 또는 유출량(g/m³/sec), S_Φ = 유입 또는 유출량(g/m³/sec), B_η = 시·공간에 따라 변하는 수표면 폭(m), η = 자유수표면 위치(m), h = 총 수심(m), g = 중력가속도(m/sec²), f(T_w, Φ_{TDS}, Φ_{SS}) = 온도, 총 용존성 고형물질 또는 염분도, 부유물질에 의존하는 밀도 함수이다.

보조식은 이 모델의 기본적인 유체역학과 난류 계산기법의 독립된 과정을 설명하기 위한 방정식으로 난류확산, 바람 전단력의 과정, 열교환, 증발, 밀도함수, 선택적 취수에 관한 방정식이 포함된다. 모델식과 원리에 관한 설명은 Cole and Buchak(1995)에 상술되어 있다.¹¹⁾

2.3. 모델 적용

재개발 전과 후의 오봉호 모델 격자를 수심도와 지형도 그리고 재개발 계획안에 따라 구성하였다. Fig. 2에 제시한 바와 같이 재개발 전과 후의 오봉호를 각각 24개와 26개 구획으로 나누었다. Fig. 2의 격자를 구성하는 유입 지류는 도마천(branch 1)과 왕산천(branch 2)으로 재개발 후에 왕산천 부분은 변화가 크지 않은 반면, 도마천은 길이 방향으로 크게 늘어나는 특징을 보인다. 도마천과 왕산천을 옆

방향에서 나타난 구획도는 Fig. 2(b)와 Fig. 2(e)이며, 댐 앞 지점에서의 구획을 폭과 수심의 2차원, 즉 앞 방향에서 바라본 구획도가 Fig. 2(c)와 Fig. 2(f)이다. 수심방향은 재개발 전의 경우 24개의 수층으로, 재개발 후는 36개의 수층(layer)으로 구성하였다. 수층의 높이는 수질변화가 비교적 적은 심층은 2.5 m 간격으로 구성하였으며, 수위변화가 크고 수질과 수온이 급격히 변화하는 표층은 1 m 간격으로 구성하였다. 재개발 시 기존의 댐이 완전히 철거되지 않고 현재 댐 높이의 1/3 가량이 남게 되므로 이를 고려하여 호수 바닥 지형을 구성하였으며, 이때 남게 되는 댐의 높이는 EL. 95 m로 하였다.⁵⁾

CE-QUAL-W2 모델 구성 결과를 바탕으로 오봉호 재개발 전후의 수리 및 수온 변화에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 기간은 2001년 1월 1일에서 2001년 12월 31일까지의 1년과 2003년 3월 1일부터 2003년 11월 30일까지의 9개월이다. 모델 시간 간격은 최소 계산 0.9초, 최대 계산 3600초, 입출력은 1일로 설정하였다. 오봉호 수리 현상을 시뮬레이션 하기 위해 필요한 방류량 자료는 농업기반공사의 일별 유출량 자료를 사용하였으며, 여수로와 취수탑에서 선택적으로 취수되는 농업용수, 하천유지용수, 생활용수를 고려하였다. 유입량은 일별 수위와 수위-용량 곡선을 사용하여 계산하였다. 유입수 수온은 2001년의 경우 강원도 보건환경연구원에서 측정된 월별 측정자료를 사용하였으며, 2003년은 수자원공사에서 측정된 월별 실측자료를 입력하였다. 수온 계산에 필요한 기상자료는 강릉 기상대의 일별 기온, 이슬점온도, 풍향, 풍속, 운량 자료를 사용하였다. 재개발 후의 인공호는 구축된 유량조건과 기상조건 그리고 경계조건을 동일하게 입력하여 시뮬레이션 하였다.

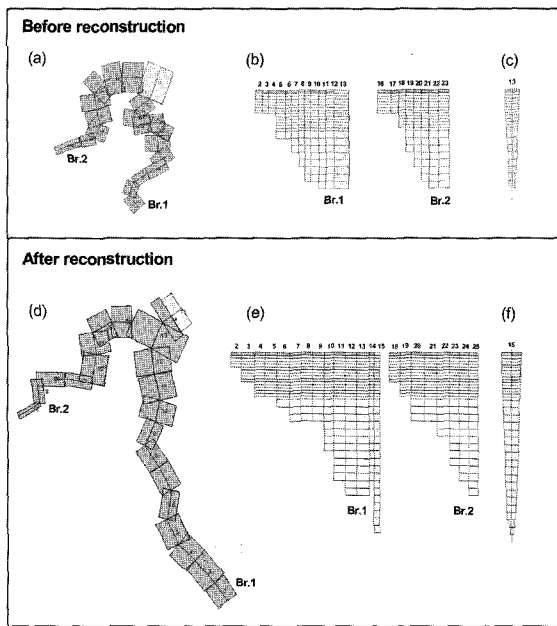


Fig. 2. System segmentation (a)(d) Top view(x-y), (b)(e) Side view(y-z), (c)(f) End view(x-z).

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델 재현성 검토

모델 재현성은 물수지와 수온 변화에 대하여 검토하였다. 물수지의 경우 일별 수위 실측자료와 모델 값을 비교 검토하였다. 연중 수위 변화에 대한 모델 예측값과 실측값의 비교 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모델 예측 수위는 실측 수위와 적절한 일치성을 보인다. 수온에 관한 재현성 검토는 보정과 검증 과정을 통해 확인하였다. 보정에는 호수 내 5 지점에서 측정된 연중 표층 수온자료와 연직 수온자료를 이용하였다. 보정 과정에서 모델이 시·공간적인 수온 특성을 적절히 반영하도록 하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 5에 제시하였다. 결과를 비교한 호수 내 5개 지점의 위치는 Fig. 1에 표기되어 있다. 또한 2001년의 모델결과 값과 댐 앞 지점에서 실측된 표층 수온 자료와의 비교를 통하여 모델을 검증하였다(Fig. 6). 그림에 제시된 보정 및 검증 결과로부터 적용 모델은 오봉호의 수온 변화를 적절히 재현하는 것을 알 수 있다.

3.2. 재개발 전 수체 특성

검증된 모델을 이용하여 재개발 전 오봉호의 수체 특성을 성층과 전도 현상을 중심으로 분석하였다. Fig. 7(a)은 2001년 입력조건 하에 시뮬레이션 한 댐 앞 지점의 연중 수온 분포를 표현한 것이다. 그림에서 계절에 따른 수위 변화와 연직 수온 분포를 관찰할 수 있다. 그림에서 보듯이 동절기인 1월과 2월에는 전 수심에 걸쳐 약 3~4℃ 수온을 유지하며 수표면에는 결빙현상이 나타난다. 이것은 온

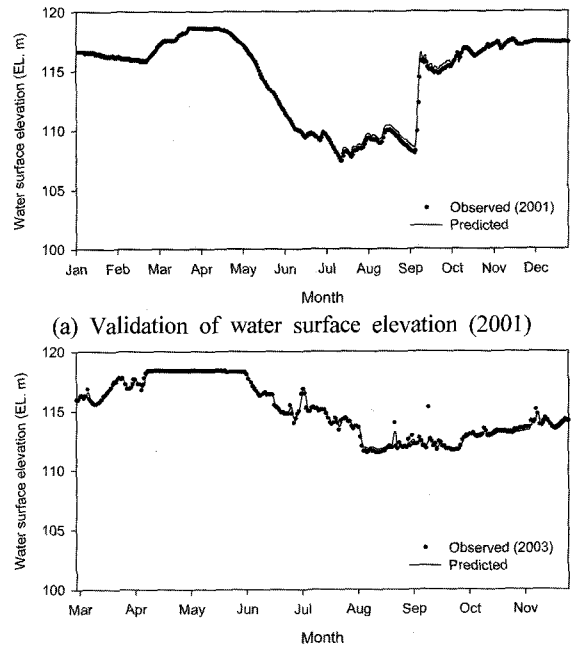


Fig. 3. Model validation of water surface elevation in Obong Lake (a)2001, (b)2003.

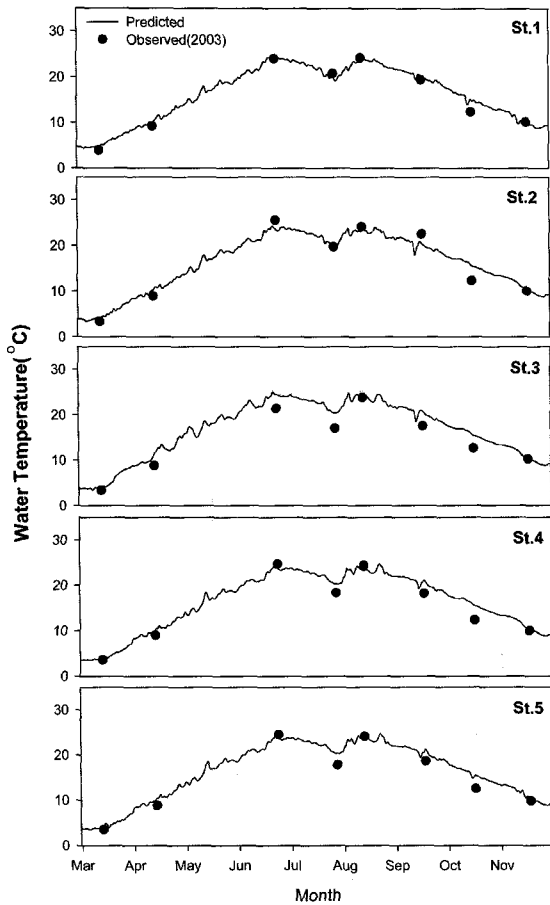


Fig. 4. Model calibration of surface water temperature.

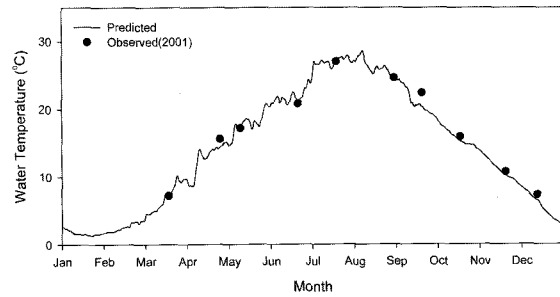


Fig. 6. Model verification of surface water temperature near the dam.

대지역 호수에서 겨울철에 일어날 수 있으며, 수체의 대부분이 3~4°C의 수온을 유지하지만 대기와 직접 접촉하는 수표면 가까이에서 이보다 낮은 수온을 보이는 역성층화(Winter-inverse stratification) 현상이다.

반면에 4월에는 수심이 증가함에 따라 수온이 낮아지는 성층 현상이 나타나기 시작한다. 성층 현상은 6, 7월에 안정된 수층을 형성하며 8월까지 지속된다. 주목할 점은 수심에 따라 수온이 급격히 변하는 수온약층의 생성 위치가 6월에서 8월 사이에 시기적으로 다르게 나타나는 것이다. 특히 최고 기온을 보이는 8월의 수온 약층이 6월과 7월에 비해 저층에 위치하며 수온 구배도 약해진다. 여름철 강우량이 많은 우리나라 호수에서 몬순 시기의 큰 강우 및 유입량은 수온 성층을 파괴할 수 있는 것으로 알려져 있다.^{7,12,13} 그러나 2001년 8월의 총강수량은 81.2 mm에 불과해 같은 하절기인 6월(121.3 mm)과 7월(122.9 mm), 강수

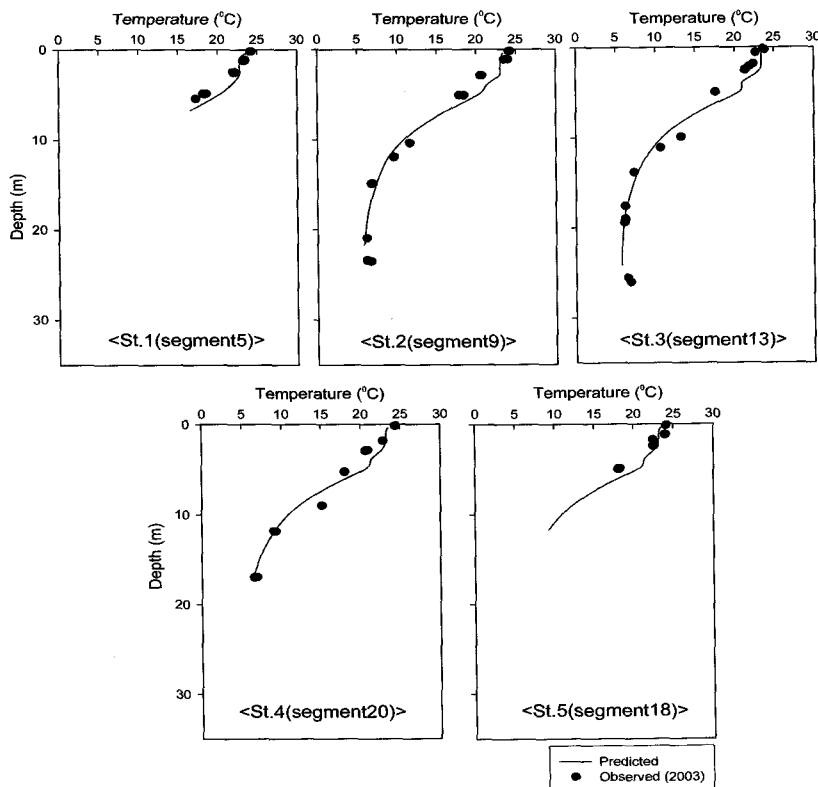


Fig. 5. Model calibration of vertical water temperature.

량이 많았던 9월(273.2 mm)에 비해 상대적으로 적었다.¹⁴⁾ 따라서 8월 수온 성층이 약해지는 현상은 이 시기 오봉호의 수온이 대기 및 큰 강우의 영향보다는 태백산맥에서 발원하여 유하하는 유입수의 영향을 비교적 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 9월이 되면 수온 구배가 더욱 약해져 중층까지 수온이 거의 일정하며 성층이 파괴되면서 전도 현상이 일어난다. 11월 중순 이후에는 거의 전 수층에 걸쳐 수온이 일정한 분포를 보이며, 12월에는 급감하는 기온의 영향을 많이 받아 전체 호수의 수온이 8℃에서 3℃까지 내려가는 것으로 나타났다.

3.3. 재개발 후 수온 변화

재개발의 영향에 의한 수온 변화를 예측하기 위해 댐 앞 지점에서의 연중 수온 분포를 비교 분석하였다. 모델에서 예측된 재개발 후 수위 및 연직 수온의 시공간적 분포는 Fig. 7(b)과 같이 나타났다. 재개발 전인 Fig. 7(a)와 비교했을 때 연중 수위 변화는 적어질 것으로 예측되었다. 이것은 수체 크기가 증가함으로써, 강우로 인해 수체에 가해지는 급격한 물리적 변화 요인이 약해지기 때문이다. 또한 동일한 유입, 유출 조건 하에서 수체의 크기가 늘어나기 때문에 체류시간이 길어져 수체 안정도가 증가함을 의미한다.

가장 큰 특징은 계절에 따른 수온변화가 거의 없는 수층이 크게 증가하는 것이다. 7℃ 이하의 낮은 수온을 가지며 상하층간의 교환이 적은 수층은 낮봄부터 초가을까지 약 30 m 이상을 차지한다. 또한 Fig. 7의 좁은 등고선 간격으로 확인할 수 있는 수온 약층의 형성은 생성 위치와 기간

에서 많은 차이를 보인다. 재개발 전의 수온 약층은 6~8월 사이에 가장 뚜렷하게 나타나지만 그 위치에 있어서는 차이를 보인다. 그러나 이와 비교하여 Fig. 7(b)의 수온 약층은 6~8월 동안 생성위치가 거의 동일하며 9월까지 지속되는 경향을 관찰할 수 있었다. 이러한 차이점은 재개발 전후의 월별 수직 수온분포를 비교한 Fig. 8에서도 확인할 수 있다. 재개발 전 오봉호의 수온 약층 형성은 성층이 시작되는 4월에서 6월까지 비슷한 양상을 보인다. 그러나 강우의 영향이 크게 작용하는 7월부터 차이를 보이며, 7월의 수온 약층 생성 위치는 재개발 전후 각각 수심 10 m와 7 m 이내, 8월에는 15 m와 10 m 이내로 비교된다. 이러한 현상은 재개발 후 오봉호의 수온 분포에 영향을 미치는 요인이 강우의 영향이 줄어드는 대신 대기의 영향이 상대적으로 커져, 수온 성층이 강하게 나타나고 전체적인 수체의 안정도가 증가하기 때문인 것으로 해석된다. 또한 그림에서 성층의 지속 현상은 전도시기를 늦추는 것으로 분석되었으며, 전도의 규모 및 기간은 축소되는 것으로 예측되었다.

재개발 후 수체에서 댐 앞 지점은 기존 댐의 잔체로 인해 특이성을 보인다. Fig. 8에서 연직 수온 값은 일정 위치에서 불연속성을 나타내는데 이러한 현상은 연중 지속된다. 기존 댐과 신축 댐 체 사이에는 깊이 약 15 m 정도 정체 구간이 생기며, Fig. 2(e)에서 확인할 수 있다. 이 공간은 상층과 물리적인 혼합이 어려워 연중 4℃정도를 지속적으로 유지할 것으로 예측되었다. 이러한 국부적인 정체 현상은 향후 수질관리의 주요 사항으로 고려되어야 할 것이다.

3.4. 수온 변화가 탁수 거동에 미치는 영향

댐 재개발로 인한 수온 변화는 특히 하절기에 두드러질 것으로 예상되므로 수온 성층에 직접적인 영향을 받는 하절기의 탁수 거동을 분석하였다. 2003년 7월 25일과 8월 1일의 부유물질 농도분포를 각각 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 재개발 전후로 비교하여 나타내었다. 그림은 제 1지류인 도마천에서 부유물질 농도를 나타내며 농도구배를 등고선으로, 유속은 벡터로 표현하였다. 재개발 전의 탁수는 중층과 심층의 중간으로 유입하기 때문에 상하층간의 혼합이 발생하여 심층까지 농도가 확산되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 재개발 후에는 수온 성층이 강하게 나타나므로 탁수가 같은 밀도를 가지는 수층에 유입하여 심층과 혼합되지 않고 중층에서 높은 농도를 나타낼 것으로 예측되었다.

Fig. 10에서 상류로부터 댐 축 부근까지 연직 수온과 부유물질 농도를 비교한 결과, 탁수 층의 위치와 수온 약층의 생성위치가 일치하는 것으로 나타났다. 이는 재개발 후에 뚜렷한 수온 성층현상으로 인해 탁수 층이 한정된 공간 내에서 거동할 것을 의미하며, 동일한 조건에서 수체 크기가 증가할 때 수체 특성이 크게 변화할 수 있음을 시사한다. 댐 부근의 탁수층 부유물질 농도는 전과 비교하여 재개발 후에 감소할 것으로 예측되었으며, 이것은 체류 시간 증가와 상류 유입하천의 정체수역 증가로 호수 내에서 침강하는 부유물질의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

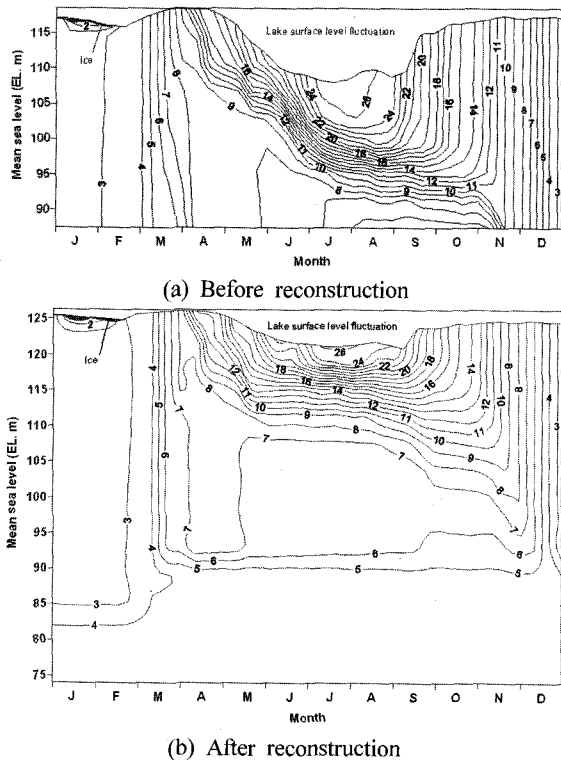


Fig. 7. Temperature isopleths for Obong Lake in 2001.

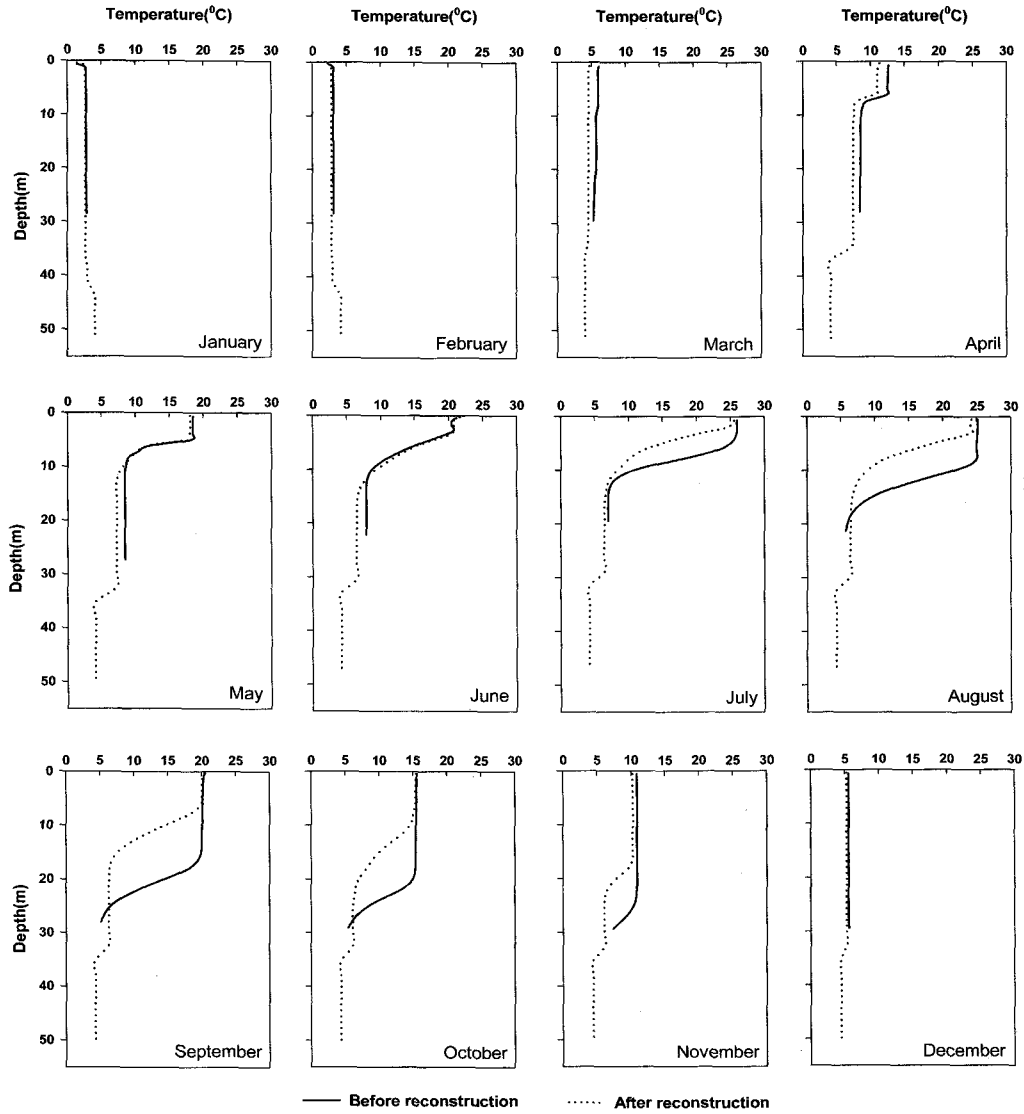


Fig. 8. Comparison of vertical water temperature between before and after reconstruction.

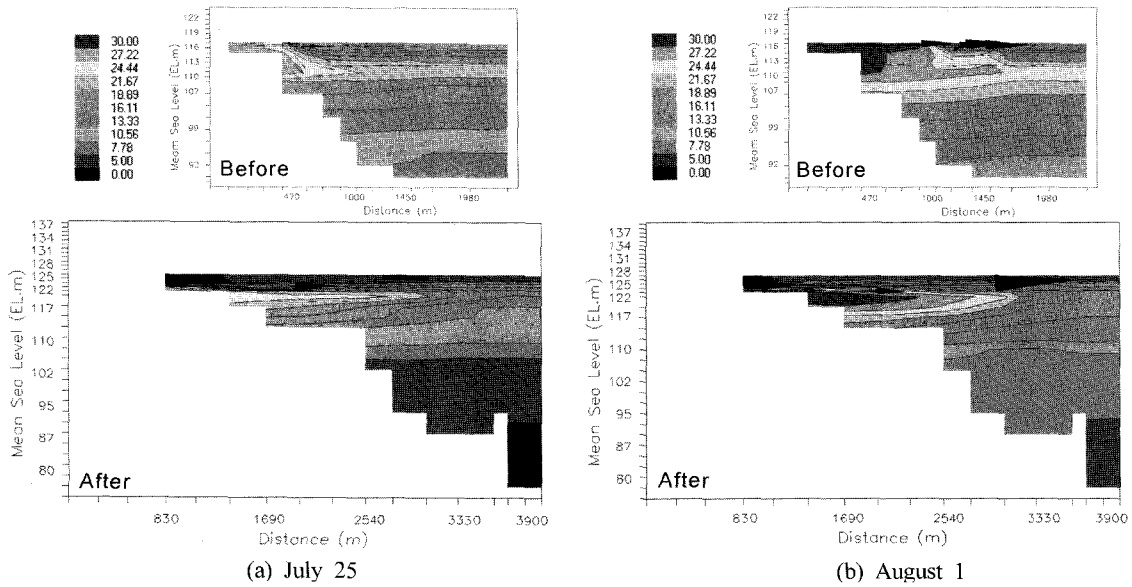


Fig. 9. Comparison of density current movement between before and after reconstruction.

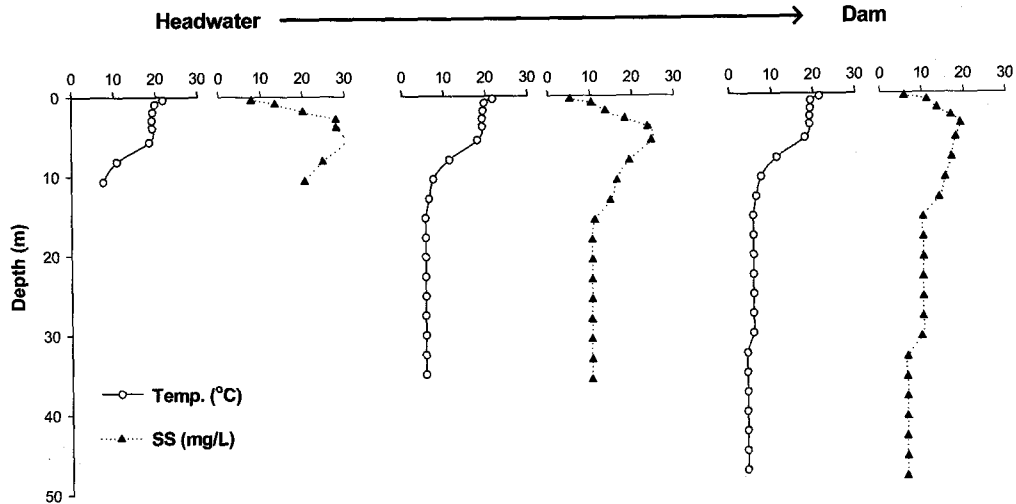


Fig. 10. Predicted vertical temperature and SS profile of Obong Lake in summer after reconstruction.

4. 결론

본 연구에서는 횡방향 평균화 연직 2차원 수리수질 모델인 CE-QUAL-W2를 사용하여 오봉호의 성층 및 전도현상을 분석하고, 재개발에 따른 수온과 수체 이동 특성을 비교 분석하였다. 관측된 연중 수위 및 수온 변화 자료를 통하여 모델의 물수지 및 수온에 대한 보정 및 검증이 이루어졌다. 모델은 대상 호수 내 수리 및 수온의 시공간적 변화를 적절히 표현하는 것으로 확인되었으며, 이를 이용하여 재개발 전후의 변화를 비교 분석하였다.

현재 오봉호는 온대지역 호수에서 일반적으로 나타나는 여름철 성층현상과 가을철의 기온하강으로 인한 전도현상을 뚜렷하게 보였다. 그러나 수온 약층의 생성위치와 성층과파현상은 고산지대와 해안지대의 중간에 위치하는 오봉호의 독특한 지리적 특성을 반영하고 있는 것으로 판단되었다. 재개발 후의 호수는 여름철 성층화가 더욱 뚜렷하게 나타나며, 연중 낮은 수온을 유지하는 수층이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수체 안정도가 높아져 성층의 지속기간이 길어지고 전도현상의 시기가 늦어질 것으로 예측되었다.

재개발에 따른 수온 분포 변화로 인해 발생하는 여름철 탁수 거동 변화를 비교 분석한 결과 재개발 후의 탁수 층 생성 위치는 수온 약층의 예측결과와 일치하였으며, 탁수 층의 두께는 성층화에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 재개발 전 탁수가 호수 전체에 확산되어 나타나는 현상과 달리, 재개발 후 호수 수온 변화로 인해 중층 밀도류 현상이 뚜렷하게 나타날 것으로 예측되었다. 이러한 예측 결과는 재개발 호수의 수질 분포에 중요한 요소로 작용할 수 있기 때문에 댐 내 취수 지점 및 방류 수위를 설계하고 수질관리를 효과적으로 수행하는데 반드시 고려되어야 할 사항으로 판단된다.

사 사

본 연구는 교육인적자원부 BK21 환경공학 신규사업 “지

표수 환경관리 시스템 연구” 사업의 일부 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Park, S. S. and Jaffe, P. R., “A numerical model to estimate sediment oxygen levels and demand,” *J. Environ. Qual.*, **28**, 1219~1226(1999).
2. Ford, D. E., “Reservoir transport process,” *Reservoir limnology: ecological perspectives*, Thorton, K.W. (Eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 15~42(1990).
3. 안광국, “인공호에서 수온의 수직분포와 수층혼합의 계절적 변화 및 증층수 유입 현상의 영향,” *한국육수학회지*, **34**(1), 9~19(2001).
4. 건설교통부, 댐건설장기계획, 건설교통부(2001).
5. 한국수자원공사, 오봉댐 재개발 타당성조사 보고서, 건설교통부(2004).
6. 박석순, 나은혜, “환경영향평가에 사용되는 컴퓨터 모델에 관한 연구 I: 수질모델,” *한국환경영향평가학회지*, **9**(1), 13~24(2000).
7. 나은혜, 안규홍, 박석순, “팔당호의 계절별 전도 현상과 연직 수온분포에 관한 모델 연구,” *대한환경공학회지*, **24**(5), 901~910(2002).
8. 박옥란, 박석순, “육경호의 연직 수온분포에 관한 시변화 모델 연구,” *한국육수학회지*, **35**(2), pp. 79~91(2002).
9. 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일, “2차원 수리 수질모델 (CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링,” *대한상하수도학회지*, **15**(1), 40~49(2001).
10. Bartholow, J., Hanna, R. B., Saito, L., Lieberman, D., and Horn, M., “Simulated limnological effects of the Shasta Lake Temperature Control Device,” *Environmental Management*, **27**(4), 509~626(2001).

11. Cole, T. and Buchak, E. M., CE-QUAL-W2: A two dimensional, Laterally averaged, Hydrodynamic and Water quality Model, Version 2.0 user's manual, Instructional report EL-95-1, U.S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS(1995).
12. Na, E. H. and Park, S. S., "A hydrodynamic modeling study to determine the optimum water intake location in Lake Paldang, Korea," J. American Water Resource Association, (in press), (2005).
13. An, K, G. and Park, S. S., "Indirect Influence of the Summer Monsoon on Chlorophyll-Total Phosphorus Models in Reservoirs: a case study," *Ecological Modelling*, **152**, 191~203(2002).
14. 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>, January(2005).