Korean J. Limnol. 37 (2) : 205～212 (2004)

아시아 몬순지역의 대형댐(소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용

김 범 철* · 김 윤 희

(강원대학교 자연과학대학 환경학과)

Phosphorus Cycle in a Deep Reservoir in Asian Monsoon Area (Lake Soyang, Korea) and the Modeling with a 2-D Hydrodynamic Water Quality Model [CE-QUAL-W2]. ***Kim, Bomchul* and Yoonhee Kim (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea)***

Phosphorus cycle was studied in a deep stratified reservoir in summer monsoon area (Lake Soyang, Korea) by surveying phosphorus input from the watershed and the movement of phosphorus within the reservoir. And the spatial and temporal distribution of phosphorus was modeled with a 2-dimensional water quality model (CE-QUAL-W2). Phosphorus loading was calculated by measuring TP in the main inflowing river (the Soyang River) accounting for 90% of watershed discharge. TP of the Soyang River showed a large daily variation with the flow rate. High phosphorus loading occurred during a few episodic storm runoff laden with suspended sediments and phosphorus. Because storm runoff water on rainy days have lower temperature, it plunges into a depth of same temperature (usually below 20m depth), forming an intermediate turbidity layer with a thickness of 20～30 m. Because of stable thermal stratification in summer the intermediate layer water of high phosphorus content was discharged from the dam through a mid-depth outlet without diffusing into epilimnion. The movement of runoff water within the reservoir, and the subsequent distribution of phosphorus were well simulated by the water quality model showing a good accuracy. The major parameter for the calibration of phosphorus cycle was a settling velocity of detritus, which was calibrated to be 0.75 m · day^{-1}. It is concluded that the model can be a good simulator of limnological phenomena in reservoirs of summer monsoon area.

Key words: CE-QUAL-W2, Lake Soyang, phosphorus cycle, storm runoff, water quality modeling

서 론

인은 생물의 성장에 필요한 필수원소이며 담수에서는 용해도가 작아 결핍이 일어나고 있다(Hecky and Kilham, 1988). 인산이온은 Ca^{2+}, Al^{3+}, Fe^{3+} 등의 이온과 결합하면 불용성의 침전을 형성하여 호수저질에 퇴적된다 (Horne and Goldman, 1994). 그러므로 수체내 인의 농도는 낮은 상태를 유지하며 인의 결핍은 생물의 성장량을 결정짓는 제한영양소가 된다. 일차적으로 식물플랑크톤의 성장을 억제하며 그 결과 호수생태계의 유기물 에너지 흐름을 좌우하고 유기물량과 용존산소 등의 수질인자

* Corresponding author: Tel: 033-250-8572, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

를 결정한다 (Wetzel, 2001).

따라서 호수생태계의 연구와 관리에 있어서 인의 수지(budget)와 순환은 가장 많은 관심의 대상이다. 호수에서 인의 유입과정과 순환과정은 다음과 같이 정리할 수 있다. 외부 유역으로부터 인은 하천수를 통하여 유입된다. 정상적인 상태에서는 대개 용존인의 형태로 유입하지만, 농경지의 토양침식이 심한 곳에서는 강우시 많은 입자상 인이 유출된다. 특히 우리 나라와 같이 폭우가 내리는 지역에서는 강우시 부유물질의 호수유입이 크게 증가하며, 이 부유물질들은 인을 흡착하고 있으므로 인의 유입량이 급증한다 (허 등, 1998).

호수로 유입된 입자상 인은 호수의 상류부에서 상당 부분 침강하여 퇴적된다. 그러나 용존인, 작은 점토광물입자에 흡착된 입자상 인, 작은 유기부유물질(detritus)에 함유된 인, 등은 침강속도가 느려서 오랫동안 부유할 수 있다. 우리 나라에서는 장마기에 유입한 부유물이 수개월이 지나도록 침강하지 않고 남아 있어 호수를 혼탁하게 하는 사례들이 체류시간이 긴 대형댐에서 많이 관찰되고 있다(허, 1993).

대형댐에서는 체류시간이 수개월에 이르므로 이 동안 많은 양의 부유물질이 퇴적된다. 이 부유물질들은 인을 함유하고 있으므로 자연히 인도 부유물질과 거동을 함께 하며 퇴적된다. 퇴적된 유기부유물은 미생물의 분해 작용으로 무기화되고 입자상유기인은 무기인산이온으로 재용출된다. 저질에서 용출되는 인은 호수표층으로 서서히 확산되어 조류 성장에 이용될 수 있다(Wetzel, 2001).

이러한 인의 순환과 수지는 호수의 인부하량에 대한 호수의 반응이라고도 표현할 수 있다. 동일한 양의 인부하량이 유입하더라도 표층의 조류성장이 많기도 하고 적기도 하다. 또한 인의 호수내 침전제거율도 차이가 날 수 있다. 즉, 인의 대부분이 침전제거되는 호수가 있는가 하면 체류시간이 짧은 인공호에서는 하천과 마차가지로 인의 제거가 거의 일어나지 않으며 침전과 저질의 침식유출이 평형을 이루고 있다(Larsen and Mercier, 1976; Vollenweider, 1976).

호수내 인의 이동을 모델링하는 것은 호수 부영양화모델의 근간이 되고 있으며 심지어는 호수부영양화 예측모델로서 인 수지만을 모의하고 조류의 밀도는 인농도와의 경험적 상관관계로부터 유추하는 방법이 널리 사용되어 왔다. 복잡한 생태계모델에 비하여 단순한 인모델이 오히려 부영양화를 더 잘 예측하는 경우가 많으며, 특히 정상상태(steady state)를 가정하면 더욱 모델이 간단해 지므로 사용하기 편리하여 유럽과 미국의 자연호에서 널리 적용되어 왔다 (Dillon and Rigler, 1975; Vollenweider, 1976). 그러나 우리 나라에서는 인부하량이 폭우시에 집중됨으로써 정상상태를 가정할 수 없는 환경이며, 댐의 방류구의 위치도 중층방류와 표층방류가 혼용되고 있는 등 복잡한 영향인자가 많다.

본 논문에서는 대형댐의 예로써 소양호의 인순환과정을 분석함으로써 아시아 몬순지역에서 대형댐의 인순환(phosphorus cycle)과정의 특징을 파악하고자 한다. 또한, 이를 모의하기 위해 2차원 수질모델인 CE-QUAL-W2를 적용하여 인의 호수내 순환과정을 모의한 결과를 제시함으로써 모델의 적합성을 검토하였다.

재료 및 방법

본 연구의 대상지인 소양호는 최대 저수량이 29억톤으로서 국내 최대인 저수지이며, 만수시 최대수심이 118 m로서 가장 깊다 (Table 1). 좁고 긴 나뭇가지형의 저수지로서 상하류간의 수질변이가 나타나는 예도 있으나 안정된 성층으로 인하여 수직변이가 크게 나타나는 호수이다 (Kim, 1987).

유역의 대부분은 산림(87%)이며 농경지는 약 6%이다. 소양호의 유역유출의 90%가 소양강의 인제읍 지점을 통하여 유출되므로 이 지점에서 측정된 부하량은 90%에 해당하며, 이로부터 전체 유역의 부하량을 추정하는데 사용할 수 있다. 본 연구에서는 인제읍의 하류지점에 위치한 살구미교에서 수질을 측정하여 소양호 유입수의 수질로 사용하였다 (Fig. 1). 이외에 나머지 유역에서는 큰 오염원이 없고 소양호 전체 유역과 유사하므로 유출수의 수질이 소양강과 동일한 것으로 간주하였다.

유입수의 수질은 살구미교에서 갈수기에 주 1회 조사

Table 1. Morphological characteristics of Lake Soyang (Kim, 1987).

Maximum surface area	70 km^2
Average surface area	44.4 km^2
Maximum water capacity	29×10^8 m^3
Average water storage	20×10^8 m^3
Mean hydraulic residence time	0.75 yr
Mean depth	33.8 m
Maximum length	57 km^2
Mean width	0.45 km
Maximum surface water level (as elevation)	198 m
Average surface water level (as elevation)	176 m
Elevation of outlet (as elevation)	130 ~ 150 m
Elevation of lake bottom	80 m
Watershed area	2,703 km^2
Forest area in the watershed	2,524 km^2 (87%)
Agricultural area	159 km^2 (6%)

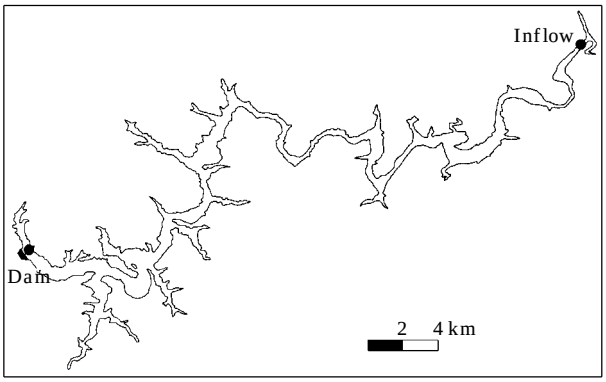

Fig. 1. Map of the study site in Lake Soyang (●: sampling site).

Table 2. Model coefficients of CE-QUAL-W2 employed in this study.

Coefficient	Value
Longitudinal eddy viscosity	1.2 $m^2 s^{-1}$
Longitudinal eddy diffusivity	1.2 $m^2 s^{-1}$
Chezy coefficient	70 $m^{0.5} s^{-1}$
Wind sheltering coefficient	0.85
Coefficient of bottom heat exchange	7×10^{-8} W m^{-2} °C^{-1}
Extinction coefficient for water	0.45 m^{-1}
Extinction due to inorganic suspended solids	0.10 m^3 m^{-1} g^{-1}
Extinction due to organic suspended solids	0.17 m^3 m^{-1} g^{-1}
Suspended solids settling rate	0.75 m day^{-1}

하였으며, 강우시에는 1일 1회 이상 측정하였다. 수온의 변화는 수중 온도기록장치를 사용하여 연속측정하였다. 유입수량과 방류수량은 수자원공사에서 측정한 자료를 사용하였다. 모델에 필요한 기상자료는 인근의 춘천기상대에서 측정한 자료를 사용하였다.

사용한 수질모델은 CE-QUAL-W2 version 3.1로서 2차원수질모델이다 (Cole and Wells, 2001). CE-QUAL-W2는 2차원 수리역학·수질모델이며 수위, 유속, 수온, 그리고 수온에 따른 유체의 밀도 등의 변화를 모의할 수 있다. 호수 장축에 직각인 수평방향으로는 수질이 균일하다고 가정하기 때문에 우리나라의 경우와 같이 산간지역에 대형 댐이 건설되어 길이 방향 및 깊이 방향으로 수질의 차이가 있는 길고 좁은 나뭇가지형(dendritic) 인공호에 적합한 모델이다. 그러나 횡축방향의 수질변화가 중요한 폭이 넓은 수체에서의 3차원적 분포에 대해서는 이 모델이 적절치 않다(Cole and Wells, 2001).

수질의 보정을 위하여 호수의 댐앞 지점에서 매주 1회 수질의 수직분포를 측정하여 모델의 보정 및 검증자료로 사용하였다. 모델의 보정(claibration)에는 2000년 1월부터 12월까지 측정된 자료를 이용하였으며, 모델의 검증(verification)에는 1999년 1월부터 2002년 12월까지 측정된 자료를 이용하였다. 대부분의 모델 계수는 Cole과 Buchak (2001)이 제시한 값을 사용하였으며, 주로 보정의 대상이 된 계수는 수평확산계수와 수직확산계수이며, 그 외 주요 계수들은 Table 2에 제시하였다.

결 과

소양강의 유량과 인농도는 강우에 따라 크게 변동하였다. 유량은 갈수기에 100 $m^3 \cdot sec^{-1}$ 이하에서 홍수기에는 4,000 $m^3 \cdot sec^{-1}$ 이상으로 크게 변동하였는데(Fig. 1) 이때 인의 농도도 유량의 증가에 따라 크게 증가하였다. 갈수기에는 TP가 0.03 mgP·L^{-1} 로서 부영양호의 경계농도 수준이지만 홍수기에는 1,000 mgP·L^{-1} 이상으로 부영양호 기준의 30배 이상으로까지 증가하였다 (Fig. 2).

그러므로 유량과 TP의 곱으로 계산된 1일 인부하량은 비강우시와 강우시의 차이가 1,000 배이상 차이가 나며, 결국 연간인부하량은 연간 1~3회의 큰 강우에 집중되어 있다. 즉, 호수의 인부하는 연속적인 현상이 아니라 간헐적으로 발생하는 현상이라고 표현할 수 있다.

유입수의 인의 형태를 용존인(dissolved total phosphorus, DTP)과 입자상인(particulate phoshphorus, POP)로 나누어 보면 입자상인은 유량의 증가에 따라 크게 증가하지만 용존인은 유량과 유의적 상관관계를 보이지 않았다. 비강우시에는 용존인이 주를 이루지만 강우시에는 입자상인이 크게 증가하여 총인의 대부분을 이루고 있는 것으로 나타났다 (Fig. 3).

용존인의 농도는 강우시에 크게 증가하지 않지만 비강우시에는 유량이 작기 때문에 비강우시의 용존인의 유입량은 무시할 정도로 작다. 소양호에 유입하는 TP 부하의 대부분은 입자상인인 것으로 볼 수 있다.

호수로 유입한 강우유출수는 밀도가 같은 수층까지 침강한 후 수평방향으로 이동하여 중층류를 형성한다. 소양강의 수온은 비강우시에는 대기온도와 유사하여 여름에 20°C 이상을 나타내지만 강우시에는 크게 낮아져서 여름에도 13~15°C의 수온을 보인다(Fig. 4). 게다가 탁도가 높아 물의 밀도를 더욱 증가시키므로 강우시에 소양호로 유입하는 물은 수심 15~20 m 수층으로 유입하여 표수층을 밀어 올리면서 중층을 형성한다. 이 중층은 홍수가 끝난 후 두께가 20~30 m에 이른다 (Fig. 5).

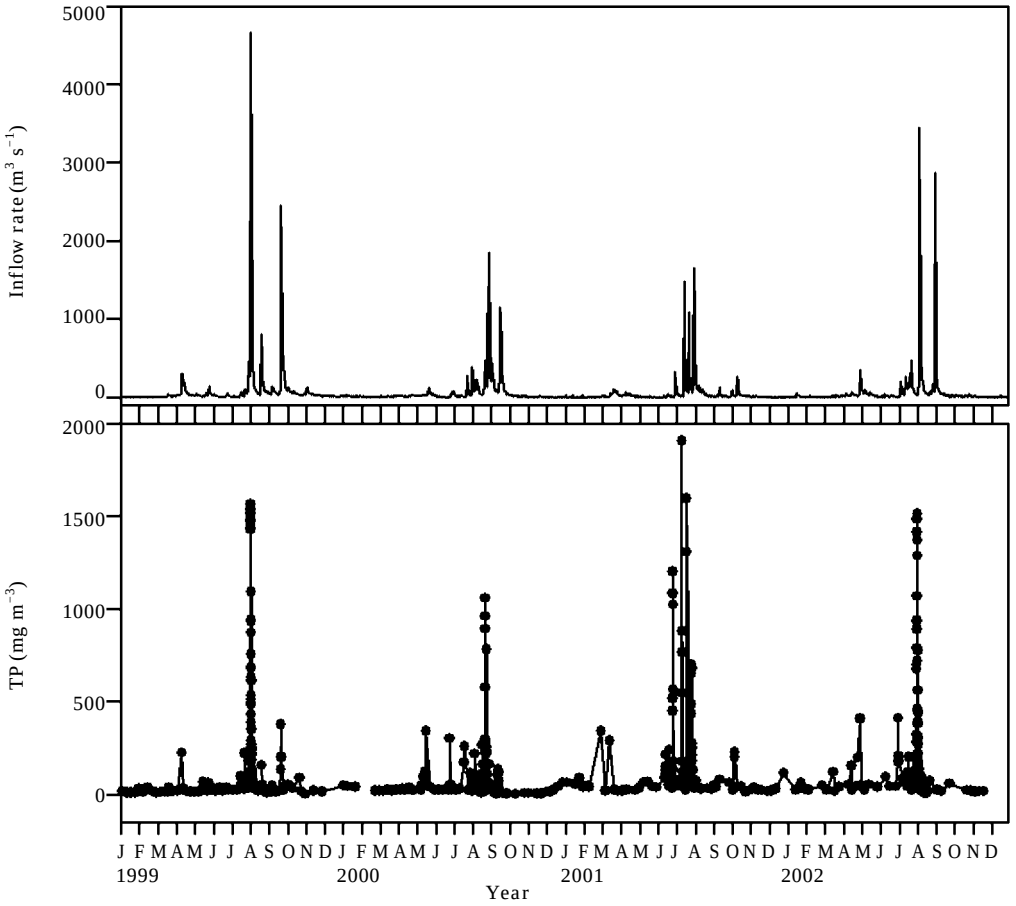

Fig. 2. The variation of daily average inflow rate and TP in the main tributary (the Soyang River) of Lake Soyang.

홍수유출수로 형성된 중층은 수온의 구배가 작고, 부유물질의 농도가 높으며, 인의 농도가 높은 특징으로 인하여 뚜렷하게 구분된다. 유입 후 호수내에 저류된 탁수층은 시간이 지나면서 부유물질의 침강으로 인하여 탁도가 서서히 감소한다. 동시에 중층의 발전방류구를 통하여 서서히 방류되어 10월말이면 대부분의 탁수가 배출되고 있다.

중층의 탁수는 높은 인 농도를 보이고 있으나 표층으로는 확산되지 않는 것으로 나타났다. 탁수가 유입하는 시기가 성층이 안정한 여름이고 유입수가 혼합층의 아래인 약 15 m 이하의 수심으로 유입하므로 바람에 의한 혼합이 영향을 미치지 않는 수심이다. 그 결과 중층의 높은 인농도는 표층으로 혼입되지 않고 호수를 빠져나간다 (Fig. 5).

호수저질에 퇴적된 인은 분해되어 용존인을 발생시킨다. 저질의 표면 가까이에서는 높은 인 농도가 관찰되고 있으며 특히 무산소층이 형성된 곳에서는 더욱 인농도가 높게 나타나고 있다. 그러나 저질에서 재용출되는 용존인은 표층까지 도달하지 않는 것으로 보인다. 여름에는 성층이 강하여 수직혼합이 없고, 중층방류로 인하여 저질에서 인이 방출되더라도 중층류를 타고 하류로 배출되기 때문이다. 그러나 겨울에는 수직혼합이 일어나므로 저질에서 발생한 인이 표수층으로 확산될 수 있는 물리적 요건을 가지고 있으나 현장조사결과는 겨울에도 인의 증가를 보이지 않고 있다. 따라서 저질에서 발생한 인이 다시 침강하여 표수층에 도달하지 않는 것으로 나타났다.

이러한 인의 순환과정은 2차원수질모델인 CE-QUAL-W2 를 사용하여 잘 모의할 수 있었다. 중층탁수의 유입수심과 이동시간은 관측결과와 잘 일치하였다. 이 모델이 수리학적 현상을 잘 모의하기 때문인 것으로 보인다. 수온은 모의의 정확도가 높았으며 성층의 깊이와 시기 등을 정확히 예측하였다(Fig. 6). 모델에 의한 예측값과 실측값의 평균 오차정도는 RMSE (Root mean square error)를 사용하여 평가하였으며, 보정기간에 대한 수온의 RMSE는 1.21°C로 산정되었다.

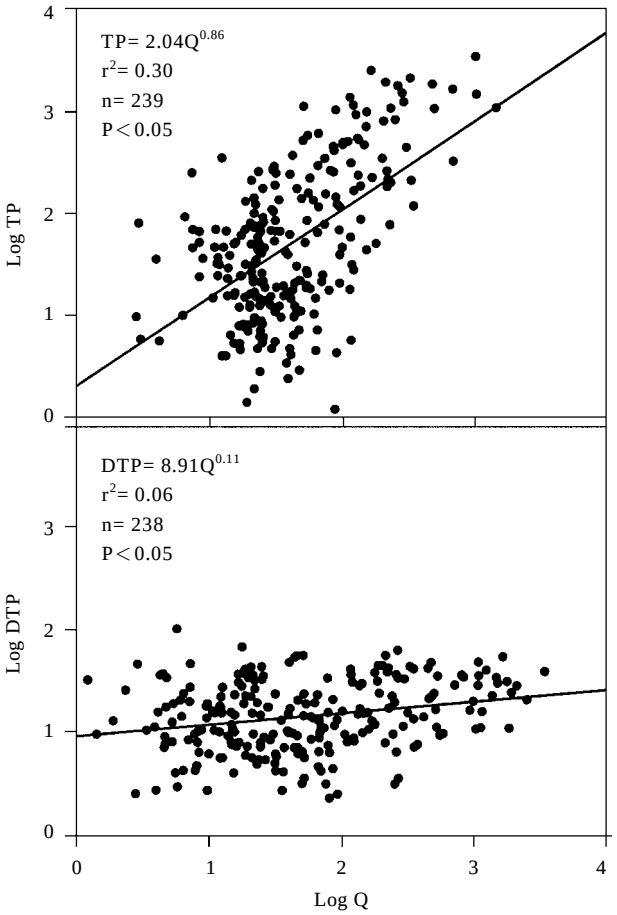

Fig. 3. Scatter plot of phosphorus concentration (mg m^{-3}) in the Soyang River versus inflow rate (Q; m^3 s^{-1}) for the period of 2000 to 2003.

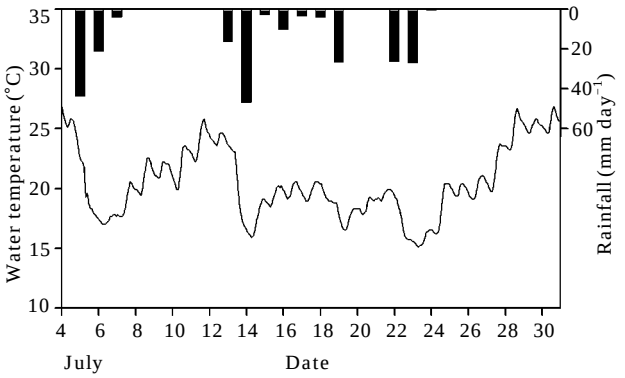

Fig. 4. The variation of water temperature measured continuously by submersible temperature logger in the main inflowing river (the Soyang River) in July 2002. Bars indicate daily rainfall.

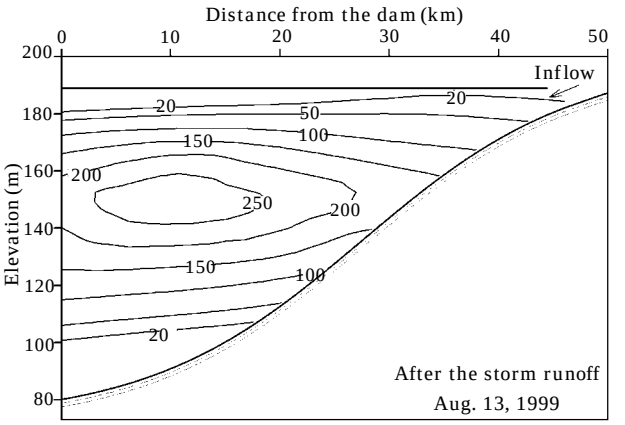

Fig. 5. A depth-distance profile of TP (mg m^{-3}) in Lake Soyang after monsoon season.

총인의 농도는 2000년의 결과를 사용하여 보정한 결과 RMSE가 4.7 mg m^{-3}로 산정되어 예측의 정확도가 유의적인 것으로 판단되며(Fig. 7), 1999년부터 2002년까지의 자료를 사용한 검증에서도 수온의 경우 RMSE가 1.84°C, 총인의 경우 RMSE가 10.2 mg m^{-3}로 산정되어 편차가 보정결과보다 더 크기는 하였으나 편향됨이 없이 모의하는 것으로 판단된다(Fig. 8).

토 의

전반적으로 현장조사에서 관측된 소양호내 인의 순환과정이 수질모델에 의해 잘 모의되었다. 소양호에서는 안정된 성층, 강우시 유입수의 중층유입, 중층에 위치한 방류구 등의 요건이 결합하여 독특한 인순환구조를 가지고 있는데 이러한 특성이 잘 모의된 것으로 평가된다.

일반적으로 하천의 수질변동을 보면 용존물질의 농도는 강우시에 농도의 증가가 없거나 희석에 의해 농도가 감소하는 현상을 나타낸다. 반면에 입자상 물질은 강우시에 유량의 증가에 따라 함께 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 소양강의 DTP는 용존형 물질임에도 불구하고 유량에 따라 감소하지 않고 오히려 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이는 무기인산이온을 흡착한 토양입자가 수중에 용존무기인을 용출시키기 때문에 용존인이 입자와 거동을 함께 한 것으로 해석할 수 있다.

홍수유출수는 강우 직후 유입하여 댐앞에 도달하기 까지 약 1주일의 시간이 소요되는 것으로 관측되었는데 탁도가 높은 홍수유출수의 이동기간, 유입수가 잠류하는 수심, 이동경로등이 CE-QUAL-W2 모델로 잘 모의되었다. 홍수유출수가 호수내에서 잠류하는 수심은 하천의 수온에 의해 결정된다. 본 연구에서는 소양강의 수온을 자동

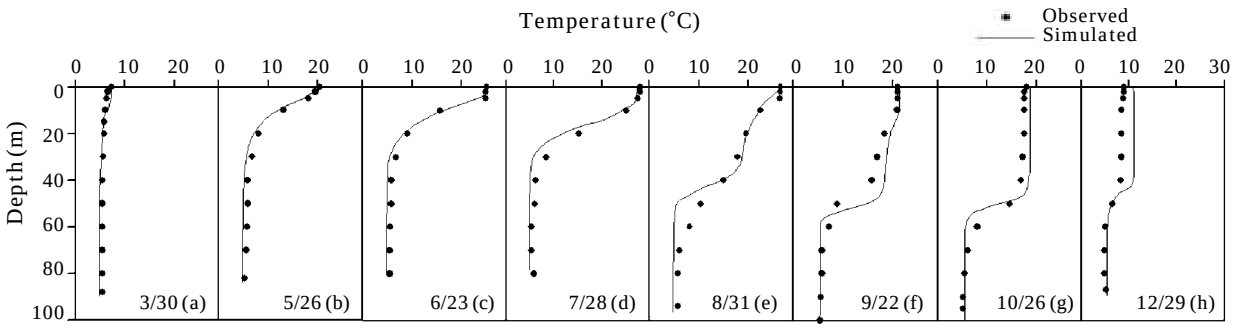

Fig. 6. Calibration result of vertical temperature profiles at the dam site of Lake Soyang with the data of 2000.

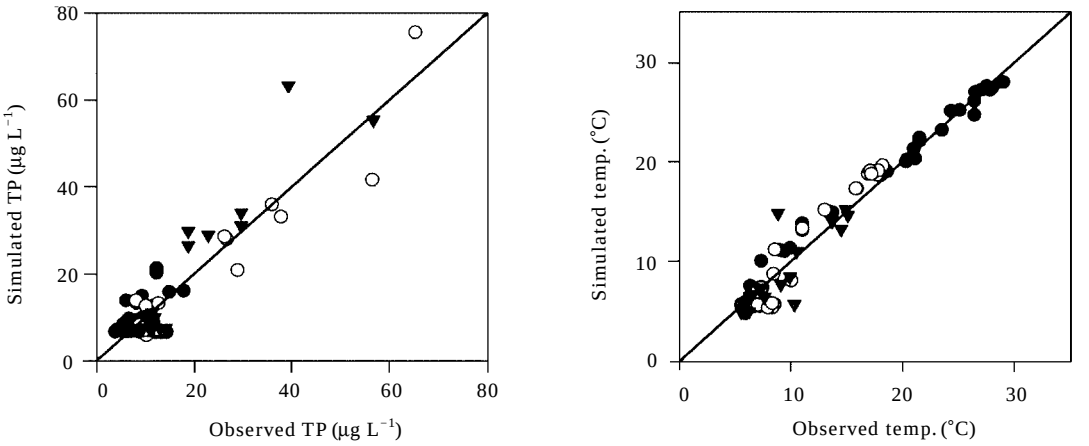

Fig. 7. The result of calibration of TP and temperature in epilimnion (●), metalimnion (○) and hypolimnion (▼) of Lake Soyang with the data of 2000. Diagonal lines are lines of slope 1 (i.e. measured = simulated).

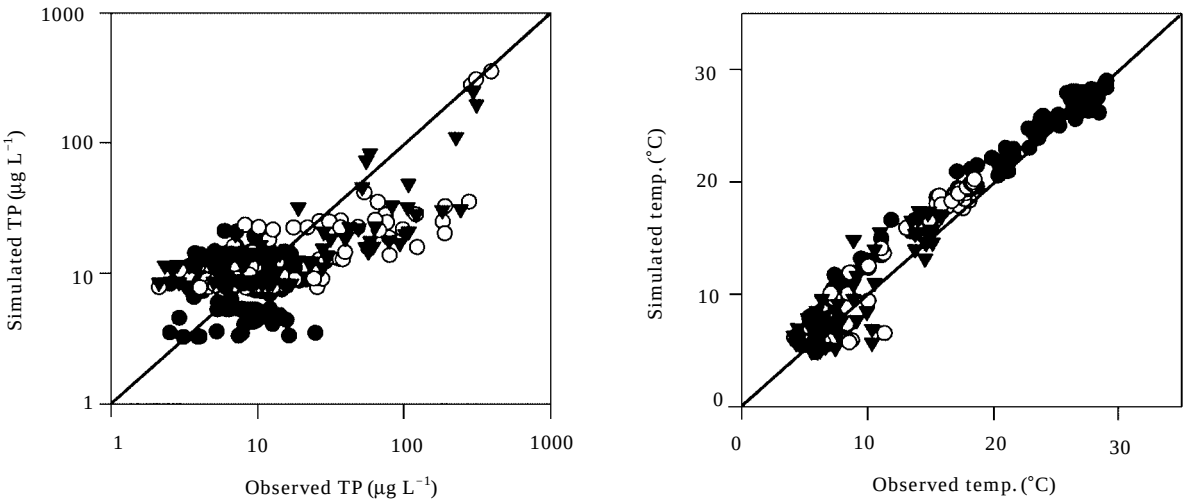

Fig. 8. The result of verification of total phosphorus and temperature in epilimnion (●), metalimnion (○) and hypolimnion (▼) of Lake Soyang with the data of 1999～2002. Diagonal lines are lines of slope 1 (i.e. measured = simulated).

측정기에 의해 연속측정하였는데 그 결과 강우시 수온이 크게 하강함을 관찰할 수 있었다. 여름에 갈수기의 소양강 수온이 약 20°C인데 비하여 폭우 후에는 13~15°C로 수온이 낮아 지는 것으로 관측되었다. 이 때 수온이 유입수의 잠류수심을 결정하므로 모델의 입력자료로 사용하기 위해서는 강우시 유입하천의 수온을 정확히 측정하여야만 한다. 홍수기에는 수온 뿐아니라 인의 농도도 크게 변동하므로 모델의 보정에 사용할 유입수 수질을 강우시에 집중하여 정밀하게 측정하여야만 한다. 대형하천이라도 강우시에는 1일 1회 이상의 수질측정이 필요하며 소형하천에서는 1~3시간 간격의 수질측정이 필요하다.

호수내 인의 침강은 댐으로부터의 인의 방류량을 좌우하는 주요기작인데 부유물질의 침강속도계수가 모델 결과에 큰 영향을 미치므로 호수내 입자상인의 모델링에서는 부유물질의 인함량, 분해 속도, 침강속도 등을 결정하는 것이 보정의 주요 과제일 것이다. 본 연구에서는 부유물질의 침강속도계수를 여러 가지로 변화 시켜 본 결과 최종적으로 0.75 m day^{-1}가 최적인 것으로 확정하여 모의하였다. 그러나 실제로는 저수지의 상류부에서는 입자가 크고 침강속도가 큰 부유물질이 많아서 평균보다 더 빠른 속도로 침강할 것이고, 반면에 입자가 작고 침강속도가 느린 것은 장기간 부유하며 댐앞까지 이동하므로 하류부에서는 침강속도가 평균보다 더 작을 것이다. 본 연구에서는 부유물질의 침강속도를 하나의 계수를 적용하였으나, 부유물질을 여러 종류로 나누고 각각 다른 침강속도계수와 인함량계수를 부여한다면 더 정확한 모델링이 가능할 것이다. 이를 위해서는 부유물질의 분류, 침강속도 측정, 인함량 측정 등의 추가연구가 필요하다.

본 연구의 결과를 보면 저질의 인재용출(regeneration)이 표수층의 수질에 영향을 미친다는 증거가 없다. 이것은 소양호의 수심이 깊고 중층에 방류구가 위치하여 중층류가 형성됨으로써 심수층과 표수층을 격리시키는 효과가 있기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한 소양호의 심저층에 무산소층이 많이 발달하지 않기 때문에 심저층의 인의 농도가 크게 증가하지 않는다는 점도 하나의 요인이 될 수 있고, 호수가 깊어 심저층의 난류확산속도가 작을 것으로 추정된다. 이 결과는 앞으로 대형댐에서 저질의 영향을 평가하는 데에 참고가 될 수 있을 것이다.

결론적으로 볼 때 아시아 몬순지역에서 호수의 수질모델에서 가장 필수적인 자료는 강우시의 빈도 높은 수질조사 자료이다. 유입수의 유량과 수질에 의해 이후의 호수내 수질변화가 결정되는 것이므로 호수수질자료의 거의 전부이다. 우리나라에서는 공식적 수질조사가 대개 월 1회 이하의 빈도로 이루어지고 있으며 더구나 비강우시에 조사하는 것을 원칙으로 하고 있어 강우시에 집중된 비점오염부하량을 정확히 정량할 수 있는 수질자료가 부족하기 때문에 수질모델링에 큰 제한요인이 되고 있다. 앞으로 호수로 유입하는 하천에 대해서는 강우시 비점오염유출을 정량화할 수 있도록 수질조사의 시기와 빈도를 조정하여야 할 것이다.

적 요

아시아 몬순지역에서 대형댐의 인순환(phosphorus cycle)과정의 특징을 파악하기 위하여 소양호를 대상으로 인순환 과정을 조사하였다. 또한, 이를 모의하기 위해 2차원 수질모델인 CE-QUAL-W2 를 적용하여 수중생태계의 물질순환과정을 모의하였다. 소양호는 수심이 깊고 성층이 강하여 수직적인 변이가 뚜렷한 인의 분포를 보였다. 인의 부하량은 유역면적의 90%를 차지하는 주유입하천인 소양강의 인농도를 측정하여 산정하였다. 소양강의 인농도는 강우시 유량 증가에 따라 크게 증가하는 변동을 보였으므로 인의 부하량은 간헐적으로 발생하는 폭우 유출에 집중되었다. 폭우시 유출수는 수온이 낮아지기 때문에 호수의 중층으로 잠류하여 중층 탁수대를 형성하는 것으로 관측되었다. 여름 우기가 끝난 후 중층에는 두께 20~30 m의 인함량이 높은 탁수층이 형성되었으며 이 탁수층은 댐 중간수심에 만들어진 발전방류구를 통하여 서서히 방류되었다. CE-QUAL-W2 모델은 호우시 탁수의 잠류현상과 인함량이 높은 중층의 형성, 인의 수평수직분포 등의 인순환 과정이 잘 모의 하여, 아시아 몬순지역의 댐에서 수질모델로서 육수학적 현상을 잘 모의하는 것으로 평가된다.

사 사

이 논문은 2000년도 강원대학교 기성회 교수해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

인 용 문 헌

허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31**: 1-8.

허우명. 1993. 소양호의 부영양화와 남조류 bloom에 관한 연

구. 강원대학교 박사학위논문.

Cole, T.M. and S.A. Wells. 2001. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.1, User Manual. U.S. Army Corps of Engineers.

Dillon, P.J. and F.H. Rigler. 1975. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status *J. Fish. Res. Bd. Can.* **31**(9): 1519-1531.

Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichments. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 796-822.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. 2rd ed. McGraw-Hill Book Company.

Kim, Bomchul. 1987. An Ecological Study of Phytoplankton in Lake Soyang. Ph.D. Thesis. Seoul National University, Korea.

Larsen, D.P. and H.T. Mercier. 1976. Phosphorus retention capacity of lakes. *J. Fish Res. Board Canada* **33**: 1742-1750.

Vollenweider, R.A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **33**: 53-83.

Wetzel, R.G. 2001. *Limnology*: Lake and river ecosystem (3rd ed.). Academic Press.

(Manuscript received 11 April 2004,
Revision accepted 12 June 2004)