

원격탐사를 이용한 대형 수체의 수질 모델 검증 효과 제고 방안에 관한 연구

임현주 · 최정현 · 박석순[†]

이화여자대학교 공과대학 환경공학과

(2006년 1월 2일 접수, 2006년 3월 29일 채택)

Application of Remote Sensing Technique to Enhance the Water Quality Model Validation in a Large Water Body

Hyun Ju Lim · Jung Hyun Choi · Seok Soon Park[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT : The remote sensing technique was applied to enhance the water quality model validation in a large water body. Since the satellite image usually covers the wide surface area of a large water body, it can compensate for the lack of measured data points required for model calibration and verification. This paper describes the analysis of Landsat ETM+ images collected on April 29th and September 4th in year 2000 to evaluate surface water temperature of Lake Paldang. The water temperature data obtained from the satellite image were compared with model results by estimating three different methods of error criteria. The residual ratios on April 29th and September 4th were 0.13 and 0.04 respectively. This showed that the model result accords with the data obtained from the process of satellite image. Without considering atmospheric interference, however, transformation process of satellite image causes relatively large residual ratio in the surface water temperature distribution pattern on April 29th. In the future study, therefore, the atmospheric properties of image acquisition point needs to be considered for the application of radiance transformation model.

Key Words : Model Validation, Sensing Remote, Surface Water Temperature

요약 : 대형 수체의 수질 모델 검증 효과를 향상시키기 위하여 원격탐사 기술이 적용되었다. 인공위성 영상은 대형 수체의 넓은 표면을 한꺼번에 파악할 수 있으므로 모델의 보정 및 검증에 사용되는 관측 자료의 부족함을 보완할 수 있다. 이 논문은 2000년 4월 29일과 9월 4일에 촬영된 Landsat ETM+영상을 분석하여 팔당호 표층 수온 검증 연구를 제시하고 있다. 영상으로부터 계산된 수온과 모델의 표층 수온의 자료를 획득하여 3가지 방법으로 영상에 의한 수온과 모델의 결과를 비교하였다. 4월 29일 영상의 경우 모델 결과를 기준으로 오차율이 0.13이며 9월 4일에는 오차율이 0.04로 모델의 표층 수온이 영상으로부터 계산된 수온과 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 영상촬영 시점의 대기의 간섭을 고려하지 못한 것이 4월 29일 결과의 오차를 발생시킨 주요 원인으로 사료된다. 그러므로 정확한 수질자료를 얻기 위해서는 영상촬영 시점의 대기의 효과를 고려한 대기보정이 필요할 것이라 사료된다.

주제어 : 모델 검증, 표층 수온, 원격탐사

1. 서론

수질 모델은 대상 수체의 장래 수질 변화 예측과 시스템 분석, 그리고 최적 허용 부하량 결정 등 과학적인 수질관리를 위하여 중요한 도구로 널리 활용되고 있다. 그러나 수질 모델이 이러한 용도로 활용되기 위해서는 대상 수체의 수질 변화를 적절히 재현하고 있음을 나타내는 타당성이 입증되어야 한다. 이를 위하여 필요한 과정이 대상 수체에서 관측된 수질 자료를 이용한 보정 및 검증이다.

모델 보정과 검증에 사용되는 자료는 많은 경우 대상 수체의 몇몇 지점에서 일시적인 그래브 샘플(Grab Sample)로 얻어지기 때문에 시공간적 변이가 심한 수체는 만족할 만한 결

과를 얻지 못할 수 있다. 이 경우 보다 많은 지점에서 시변화 관측 자료를 얻어 타당성 검증 효과를 높일 수 있으나 수체의 전체적 경향을 파악하는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 시도되는 방법 중 하나는 원격탐사기법을 사용하는 것으로 몇몇 수질(수온, 부유물질, 그리고 엽록소 등) 변화에 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.^{1,2)}

원격탐사는 관측하고자 하는 대상 물체나 지역에 접근 또는 접촉하지 않고 센서에서 수집된 전기 신호를 분석하여 현상이나 물체를 식별하는 과학기술로서 한꺼번에 넓은 지역의 표층에 관한 자료를 취득할 수 있고 지리적으로 접근이 어려운 지역의 자료 수집이 가능하며 광학적 또는 전자적 센서를 활용하므로 우리 눈에 보이지 않는 파장의 자료를 수집할 수 있다.^{3,4)} 또한 동일지역의 반복관측이 가능하기 때문에 시간과 장소에 따라 다양하게 변화하는 수체 표면 오염물질의 공간적인 분포 및 이동 상태를 파악하는데 용이하

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

Fax: 02-3277-3275

다.^{5,6)} 호수 수질변화에 주요한 영향을 미치는 수온은 위성 영상의 열적외선 밴드 신호를 수온 변환식을 이용하여 전환하면 영상 신호와 오염물질 농도와의 상관관계를 얻기 위한 지상 참조자료(Ground Reference Data)의 사용 없이 독립적으로 수체전체의 표층수온 자료를 얻을 수 있으므로,⁷⁾ 표층수온의 실측을 수반하지 않고도 수질 모델의 공간적 검증에 위한 수온 자료의 획득이 가능하다.²⁾

본 연구는 인공위성 영상신호를 이용하여 수온 자료로 전환하고 모델의 표층 수온과의 오차기준을 산정하고, 수온의 분포를 가시적으로 비교함으로써 모델결과를 공간적으로 검증하여 3차원 수질모델의 수온 항목에 대한 검증 효과를 향상시키고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 Landsat ETM+를 이용하여 위성자료에서 획득 가능한 수질 평가 항목으로 판단되는 표층수온을 정량적으로 해석하고자 위성영상의 신호를 수온데이터로 전환하는 영상의 전처리 과정을 수행하였다. 이렇게 하여 얻어진 수온 자료는 3차원 수질 모델에서 얻어진 수온 분포와 가시적으로 비교됨으로써 모델의 공간적 검증을 수행한다.

2.1. 연구대상지역

팔당호는 동경 127° 26', 북위 37° 29'에 위치하며 남한강, 북한강 그리고 경안천 합류 지점에 위치한 인공호로 평균 수심 6.5 m, 수표면적 36.5 km², 총 저수량 2.5×10⁸ m³, 유역면적 23, 618 km²이다. 팔당호의 평균수심에 대한 수표면적의 비는 0.17 m/km²(소양호 0.59)에 불과하며 체류시간이 짧은 하천형 호수로, 성층 현상이 미약하여 수심에 따른 수온 및 용존산소의 구배가 적다.

경안천의 경우 남, 북한강에 비해 유량이 매우 작으며, 겨울철을 제외한 연중 대부분의 기간 동안 다소 높은 수온이 유지되고 있다. 이처럼 유량과 수온이 상이한 세 지류가 각각 다른 방향으로 유입됨에 따라 팔당호 내 흐름이 매우 복잡하다. 또한 팔당호로 유입되는 세 지류는 몬순 기후에 의한 여름철 집중 강우의 영향으로 계절에 따른 유량 및 수질의 변이가 심하며, 특히 남, 북한강의 유량 및 수질은 상류에 위치하고 있는 여러 개 댐에서의 유출에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 팔당호는 복잡한 지형과 유역 환경으로 인하여 시·공간적 수리 및 수질 변화가 매우 심한 수체이다.⁸⁾

2.2. 영상의 전처리

위성 영상은 수질모델의 실측 자료를 이용한 보정 검증일과 다른 날짜인 2000년 4월 29일과 2000년 9월 4일에 촬영된 Landsat ETM+영상으로 팔당호를 포함하는 영역인 path 116, row 34를 사용하였다. Landsat ETM+는 Landsat TM에서 지표면에서 방사되는 지열, 식생 분류, 토양 수분 측정 등에 유용하게 사용되는 열적외선 밴드의 공간 해상도가 커지고 전정색 밴드인 Panchromatic 밴드가 첨가되었다.

Table 1. Meteorological Conditions of April 29th and September 4th

	Weather Station	Average Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Cloud Cover (1/10)	Precipitation (mm)	Wind Speed(m/s) / Wind Direction
April 29th	Yang-Pyeong	14.5	52	0.7	0	1.1 /NWN
September 4th	Yang-Pyeong	22.9	71	-	0	1.0 /ESE

위성영상은 3차원의 대상체를 2차원의 평면으로 투영하여 표현할 때 발생하는 기하학적 왜곡을 수정하고 원본 영상에 좌표를 부여하기 위한 목적으로 기하보정(Geometric Correction)을 수행하였다. 영상에서 식별할 수 있는 동시에 실 좌표를 알고 있는 도로의 교차점, 댐 등을 지상기준점(Ground Control Point)으로 대상지역에 균일하게 지정하여 부등각사상변환식(Affine Transform)을 적용하였으며 화소의 재배열 기법으로는 원본 영상 DN(Digital Number)값의 전환을 최소화하기 위하여 최근린 내삽법(Nearest-Neighbor)을 적용하였다. 대상 유역에서 수체만을 추출하기 위하여 영상의 근적외선 영역의 밴드 4를 사용하여 수역을 분리하였다. 밴드 4는 수체에 대하여 근적외선을 강하게 흡수하여 0에 가까운 DN 값을 갖는다. 이러한 분광학적 특성을 이용하여 영상에서 밴드 4만을 나타내어 수체를 다지타이징하여 경계 파일을 생성한 후에 마스크(masking) 기법을 적용하여 수체 이외의 지역의 화소값은 0이 되도록 하여 수역을 분리하였다.

위성영상은 대기 중의 수증기와 미세입자에 의한 산란으로 수표면의 방사에너지가 영향을 받게 되므로, 이러한 대기의 간섭효과를 고려하기 위하여 대기 중 수증기압, 습도 및 기온 등의 자료를 필요로 한다. 영상이 촬영된 4월 29일과 9월 4일은 상대습도와 운량이 낮아 대기의 방해가 크지 않은 것으로 판단되어 대기보정을 생략하였다(Table 1).

2.3. 표층수온 검출방법

지표의 특성에 따라 반사되는 태양에너지가 위성영상에 DN값으로 기록되며 영상의 분광밴드마다 고유한 반응함수를 가지고 있으므로 영상의 DN값과 방사량을 연결시키는 식을 적용하여 영상의 화소값을 물리량인 방사량으로 전환하였다.⁹⁾ 위성영상밴드 중 열적외선 밴드인 밴드 6은 지표상 물질의 온도를 탐지하도록 고안된 밴드이다. 따라서 밴드 6의 DN값을 수온으로 전환한다. 밴드 6의 방사량을 수온으로 전환하기 위하여 현장에서 실측된 온도와 영상자료 분석에 의한 밝기온도 사이의 관계를 통해 Markham과 Baker(1986)가 제시한 수온전환식을 적용하였다.^{2,7)}

$$T = \frac{K_2}{\ln[(K_1/L_\lambda) + 1]} \quad (1)$$

여기에서, T 는 수온, L_λ 는 특정파장에서의 방사에너지를

의미하며 Landsat ETM+의 경우 K_1 은 $666.09 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$, K_2 는 1282.71 K 의 값을 가진다. 또한 수온전환식은 방사체가 입사하는 모넨 에너지를 흡수하고 재방출하는 완전흑체를 가정하므로 선택 복사체인 물의 방사에너지를 같은 온도의 흑체의 방사에너지에 대한 비를 적용하여 보정하였다. 이때 발생하는 에너지는 온도의 4제곱에 비례하며 물의 방출률은 0.986을 적용하였다.

2.4. 수질 모델 결과

수질 모델은 3차원 시변화 모델 통합 시스템인 GEMSS (Generalized Environmental Modeling System for Surface-waters)를 사용하여 팔당호에 2000년 1-12월에 대하여 모의되었다.^{8,10)} GEMSS에서 수체 내 시간에 따른 유속 및 수표고 변화와 이에 기초한 수온 변화를 시뮬레이션하기 위하여 3차원 수치모델인 GLLVHT(Generalized Longitudinal Lateral-Vertical Hydrodynamic and Transport) 모델을 이용한다. GLLVHT 모델의 입력 자료는 남, 북한강 그리고 경안천의 유입부 수온으로서 환경부에서 운영 중인 수질 측정망 중 세 지류의 유입 지점에 위치하고 있는 강상(남한강), 삼봉리(북한강), 그리고 경안천(광동교) 수질 측정 지점의 월별 수질측정자료를 이용하였다. 모델의 결과 중에서 영상의 날짜와 일치하는 2000년 4월 29일과 9월 4일의 한반도 위성 통과 시각 근처의 오전 11시의 결과를 추출하여 사용하였다.

3. 연구결과

수온으로 전환된 영상자료를 이용하여 모델의 결과를 검증하기 위해서 모델결과 중 영상자료와 시간적·공간적으로 일치하는 자료를 추출하였다. Landsat ETM+의 촬영 시각을 고려하여 수질 모델 결과 중 오전 11:00시의 결과에서 모델 격자망을 따라 공간적으로 임의성을 배제하여 166개의 결과를 추출하였고 위성영상자료에서도 TM 좌표상 동일한 166지점의 자료를 추출하였다. 수집된 자료의 영상과 모델의 수온값을 비교하여 표로 나타내었다(Table 2).

영상으로부터 계산된 수온과 모델의 표층 수온의 자료를 획득하여 평균 비교를 실시한 결과 각 일자에 대하여 영상과 모델 결과의 수온 값이 비슷한 값을 가짐을 알 수 있었다. 그러나 이러한 평균 비교는 전체적인 수온의 유사도만을 확인할 수 있으므로 표층수온의 검증 방법이라 할 수 없으므로 영상에서 추출된 수온을 기준으로 모델 결과와의

Table 2. Comparison between model and image derived surface temperature

		Mean	SD	Range
April 29th	Model(°C)	12.87	1.76	10.24 ~ 15.58
	Image(°C)	12.92	1.04	9.8 ~ 15.37
September 4th	Model(°C)	23.28	0.76	22.17 ~ 25.15
	Image(°C)	22.84	0.83	22.21 ~ 25.25

Table 3. Estimated Error Criteria of April 29th and September 4th in year 2000

	Error Criteria	
	April 29th	September 4th
Number of Data	166	166
AMB(Absolute Mean Bias)	1.37	0.72
RMSE(Root Mean Square Error)	1.67	0.86
RRMSE(Relative Root Mean Square Error)	0.13	0.04

오차를 산정하였다. 오차는 영상값과 모델값의 잔차의 절대값을 평균한 AMB(Absolute Mean Bias), 잔차의 제곱합을 평균하여 제곱근을 구한 RMSE(Root Mean Square Error), 영상값을 기준으로 오차의 비를 구한 RRMSE(Relative Root Mean Square Error)을 기준으로 산정하였다.

2000년 4월 29일에 AMB는 1.37이며 RMSE는 1.67로 10~15°C 사이의 온도 분포에서 0.13의 오차가 산정되었다. 9월 4일에는 AMB가 0.72, RMSE가 0.86으로 22~25°C 사이의 온도 분포에서 0.04 비율의 오차가 산정되었다. 이러한 오차율은 ±0.1을 보정·검증의 기준으로 삼을 때 4월 29일의 오차기준이 9월 4일에 비해서는 크나 양일모두 수용 가능한 오차라 판단되어진다.

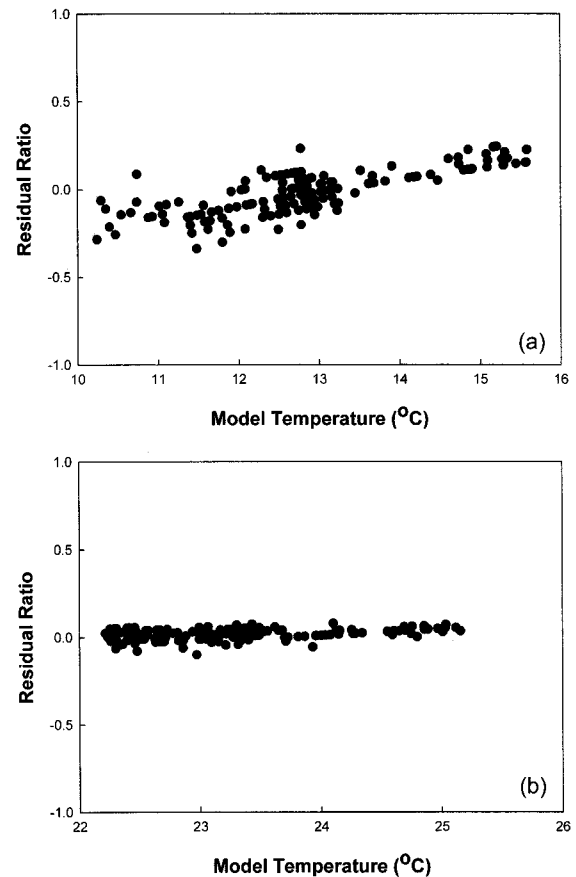


Fig. 1. Residual ratio. (a) April 29th, (b) September 4th.

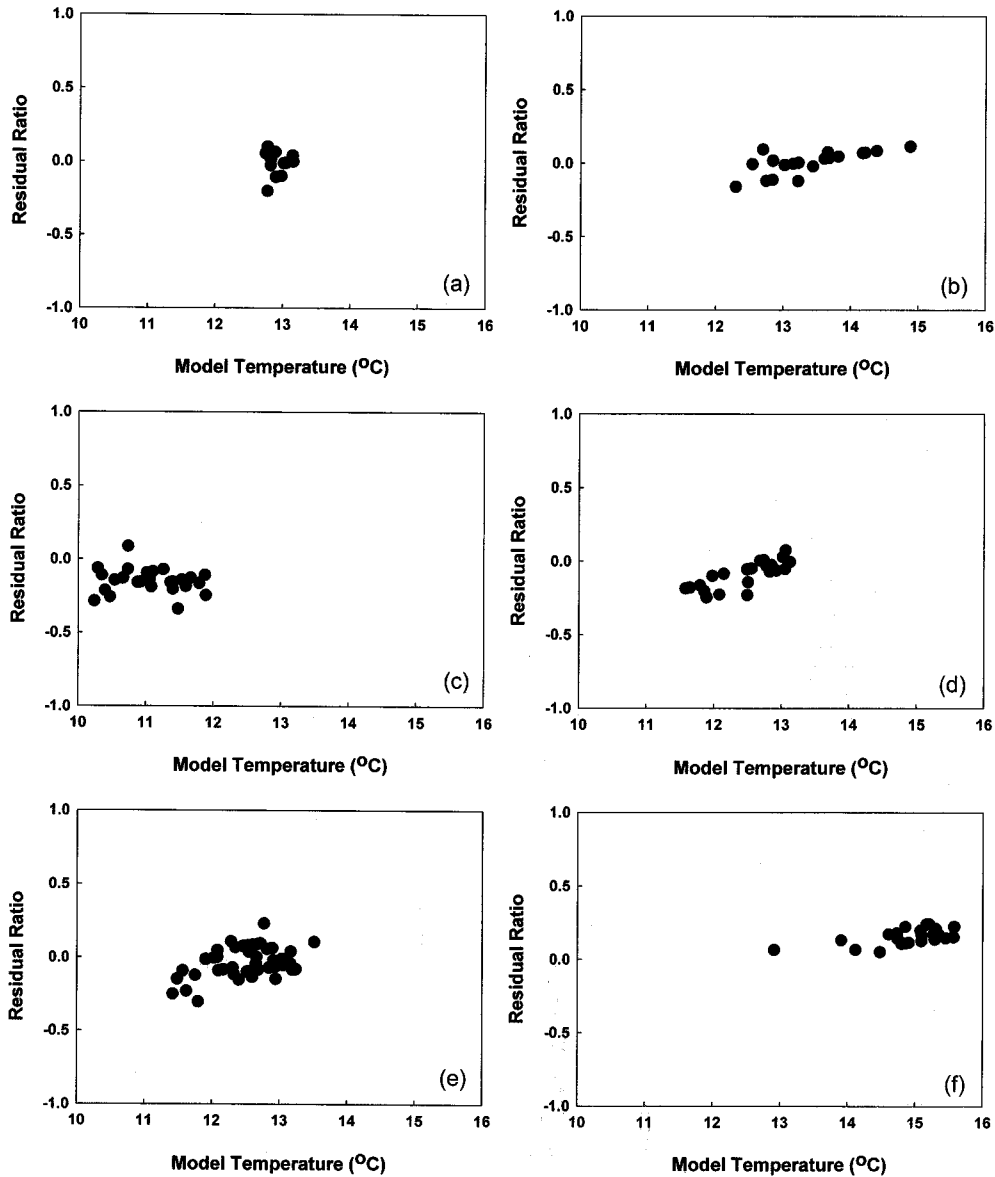


Fig. 2. Residual ratio of divided study sites. (a) Paldang Dam Front Area, (b) Paldang Lake Area, (c) North Han River, (d) Joining Area of North and South Han River, (e) South Han River, (f) Kyungan Stream Area.

영상값을 기준으로 영상과 모델값의 차이를 비율로 계산하여 잔차율(Residual Ratio) 그래프로 나타내었다(Fig. 1). 잔차율을 확인함으로써 모델의 결과가 값에 따라 경향성이 없이 잘 모의되었는지를 확인할 수 있는데, 9월 4일의 경우 0을 기준으로 영상값이 모델값에 비하여 약간 높으나 오차가 크지 않은 반면 4월 29일의 경우 모델값이 증가함에 따라 오차율이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 차이의 원인을 규명하기 위하여 대상지역을 6개(팔당댐 앞 지역, 팔당호 지역, 남한강, 경안천, 북한강 그리고 남·북한강 합류지역)의 영역으로 나누어 각각에 대한 잔차율을 그래프로 나타내었다(Fig. 2).

Fig. 2를 보면 팔당댐 앞 지역, 남·북한강 지역의 잔차율은 경향성을 보이지 않으며 다른 지역에서는 수온에 따른 잔차율의 증가가 크지 않음을 알 수 있다. 다른 지역에 비해

수온이 높은 경안천의 경우 모델의 수온값이 영상의 수온값 보다 높아 전체적으로 Fig. 1과 같은 경향을 나타낸 것으로 사료된다. 그러므로 수온이 증가함에 따라 영상값과 모델값의 오차율이 커지는 것은 물리적 현상이 아니라 지역적 온도분포 차이에 의한 것이다.

위성 영상에 수온 변환식을 적용하여 얻어진 수온 주제도와 모델 결과의 온도분포도를 비교하여 모델 결과 수온과 위성영상 수온이 공간적으로 일치하는지를 가시적으로 확인하였다(Fig. 3). 2000년 4월 29일에 온도분포의 공간적인 차이가 보이며 경안천 지역에서 모델의 수온이 영상의 수온에 비해 약 3°C가량 높으며, 남·북한강 합류지점과 댐 앞지점은 영상 전체에서 높은 온도를 나타내고 있다. 모델의 보정·검증체인 1998년과 2000년의 환경부 실측 수질자료를 보면 연중 경안천의 수온이 다른 지역에 비해 높고 모델의 결과값

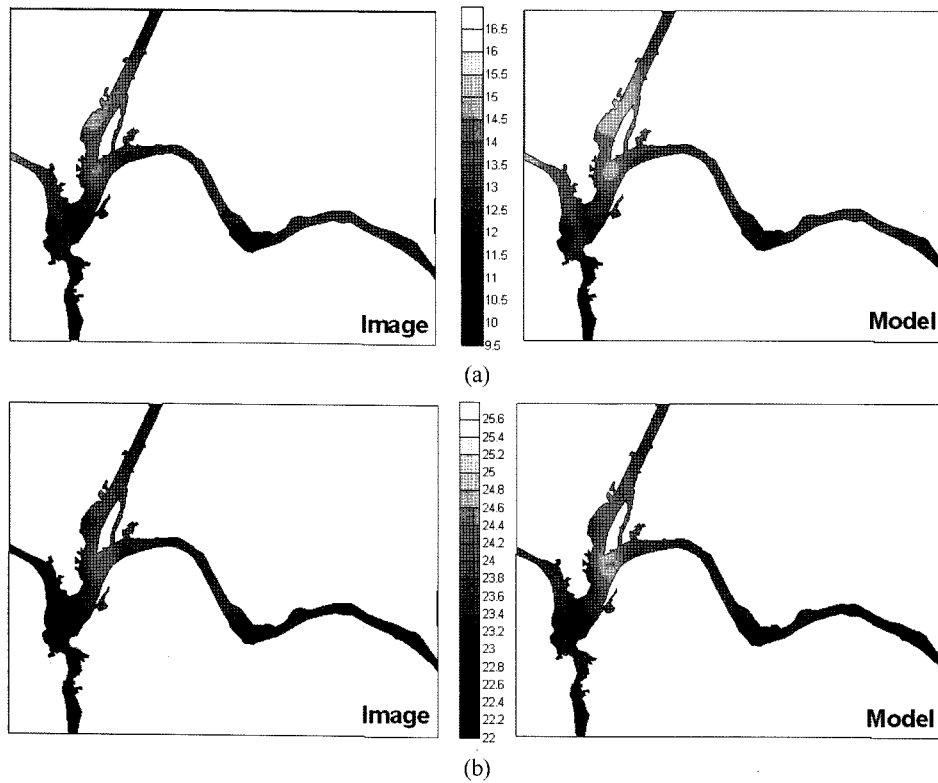


Fig. 3. Comparison of surface water temperature between image and model (a) April 29th, (b) September 4th.

도 경안천의 수온이 다른 지역에 비해 높게 나타나 영상 값은 경안천의 수온이 더 낮게 산정되었다. 경안천의 수온이 다른 지역에 비해 높은 현상은 팔당호 유역에 나타나는 일반적 현상이므로 발생한 오차는 영상에서 기인된 오차일 가능성이 높다. 영상에서는 수체 방사에너지를 숫자로 압축하여 기록하므로 수온의 변화가 선형으로 나타나더라도 영상 신호가 계단식으로 기록되어 수질 데이터에 비해 민감성이 낮으며 영상의 전처리 과정과 대기 중 입자상 물질에 의한 에너지의 산란과 감쇠효과도 연구 결과에 큰 영향을 미친다. 9월 4일 영상도 같은 종류의 영상을 동일한 방법으로 전처리를 수행하였으므로 4월 9일 결과는 영상 자체의 특성에 의한 오차와 전처리 과정에서 발생하는 오차에 의한 효과는 배제할 수 있고 대기의 간섭을 고려하지 못한 것이 오차의 주요 원인으로 사료된다.

4. 결론

하천이나 호수와 같은 자연수체 대한 과학적인 수질관리를 위하여 수질모델 적용이 널리 이루어지고 있다. 시·공간적으로 변이가 큰 수질을 잘 모의하기 위해서는 수체 특성상 중요한 여러 지점에서 시간을 달리하여 실측된 이용하여 보정·검증이 이루어져야 한다. 그러나 많은 실측자료를 얻기에는 여러 가지 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 사용할 수 있는 방법이 실측 자료와 병행하여 위성영상을 분석하여 모델의 검증효과를 제고하는 것이다. 인공위

성 영상은 센서에서 기록된 분광 신호를 분석하여 한꺼번에 수표면에 관한 자료를 취득할 수 있고 열 적외선 밴드의 분광 신호를 수온으로 전환하여 독립적인 수온 자료로 사용할 수 있으므로 본 연구에 적합한 방법으로 제시될 수 있다.

모델 보정 검증에 사용된 수질 실측 날짜와 다른 두 시점에 대하여 수온 모델의 표층 수온 검증 연구가 수행되었으며 평균 비교, 오차 기준의 산정, 잔차율과 수온 분포도 비교의 3가지 방법으로 영상에 의한 수온과 모델의 결과를 비교하였다. 2000년 4월 29일 영상의 경우 모델 결과를 기준으로 오차율이 0.13이며 9월 4일에는 오차율이 0.04로 기존 수질 모델 보정·검증 오차율이 ± 0.1 을 기준으로 이루어진다고 할 때 받아들일 수 있는 결과로 판단되어진다. 또한 수온을 주제도로 표현함으로써 모델 결과와 함께 공간적 분포를 가시적으로 비교할 수 있어 수온에 대한 모델의 검증 효과를 제고할 수 있는 적합한 방법으로 제시될 수 있다. 그러나 영상자료는 영상신호 센서에 의해 간접 획득되는 신호이므로 실측 보조 자료가 반드시 필요하며 정확한 수질자료를 얻기 위해서는 영상촬영 시점의 대기의 효과를 고려한 대기보정이 필요한 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 교육인적자원부 BK지 신규사업 환경공학분야 프로젝트 지표수 환경관리시스템 연구의 연구원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ritchie, J. C., Cooper, C. M., and Schiebe, F. R., "The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll and temperature in Moon lake, Mississippi," *Remote Sens. Environ.*, **33**, 137~148(1990).
2. 정종철, "원격탐사기법에 의한 소양호의 표층수온과 엽록소 분포, 환경영향평가," **9**(3), 177~183(2000).
3. Carpenter, D. J. and Carpenter, S. M., "Modeling inland water quality using landsat data," *Remote Sens. Environ.*, **33**, 137~148(1983).
4. Dekker, A. G. and Peters, S. W. M., "The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes : a case study in the Netherlands," *Int. J. Remote Sens.*, **14**, 799~821(1993).
5. Mayo, M., Gitelson, A., and Yacobi, Y. Z., "Chlorophyll distribution in lake Kinneret determined from Landsat TM data," *Int. J. Remote Sens.*, **16**, 175~182(1995).
6. 한의정, 김태근, 정동환, 천세억, 김신조, 유순주, 황종연, 김태승, 김명희, "Landsat TM 영상자료를 이용한 대청호의 영양상태 평가," *환경영향평가*, **7**(1), 81~91(1998).
7. Markham, B. L. and Baker, J. L., "Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, Exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures," *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1, 3~8(1986).
8. 나은혜, 박석순, "팔당호 수온, 유속, 체류시간의 시·공간적 분포 및 유입지류 흐름 특성에 관한 3차원 모델 연구," *대한환경공학회지*, **27**(9), 978~988(2005).
9. Rovinove, C. J., "Computation with physical values from landsat digital data," *Photogrammetric Eng. Remote Sens.*, **48**, 781~784(1982).
10. Na, E. H. and Park, S. S., "A hydrodynamic modeling study to determine the optimum water intake location in Lake Paldang, Korea," *J. Am. Wat. Res. Ass.*, **41**(6), (2005) (in press).