

대청호 상류 하천에서 강우시 하천 수온 변동 특성 및 예측 모형 개발

River Water Temperature Variations at Upstream of Daecheong Lake During Rainfall Events and Development of Prediction Models

정 세 응* / 오 정 국**

Chung, Se Woong / Oh, Jung Kuk

Abstract

An accurate prediction of inflow water temperature is essentially required for real-time simulation and analysis of rainfall-induced turbidity flows in a reservoir. In this study, water temperature data were collected at every hour during the flood season of 2004 at the upstream of Daecheong Reservoir to justify its characteristics during rainfall event and model development. A significant drop of river water temperature by 5 to 10°C was observed during rainfall events, and resulted in the development of density flow regimes in the reservoir by elevating the inflow density by 1.2 to 2.6 kg/m³. Two types of statistical river water temperature models, a logistic model(DLG) and regression models(DMR-1, DMR-2, DMR-3) were developed using the field data. All models are shown to reasonably replicate the effect of rainfall events on the water temperature drop, but the regression models that include average daily air temperature, dew point temperature, and river flow as independent variables showed better predictive performance than DLG model that uses a logistic function to determine the air to water relation.

keywords : River Water Temperature, Regression models, Logistic model, Reservoir Turbidity Flow, Density flow

요 지

강우시 저수지로 유입하는 탁수의 시공간분포를 실시간으로 예측하기 위해서는 하천 유입수 수온의 정확한 예측이 필요하다. 본 연구에서는 강우시 하천 수온의 변동특성을 조사하기 위해 2004년 홍수기 동안 대청호 상류 하천에서 한 시간 단위의 연속측정을 실시하였다. 강우사상 동안 하천수온은 강우 전 보다 최대 5~10°C 정도 하강하는 것으로 나타났으며, 이것은 저수지로 유입하는 하천수의 밀도를 1.2~2.6 kg/m³ (0.12~0.26%) 상승시켜 중층 밀도류를 형성하는 원인으로 작용했다. 실측자료를 이용하여 두 가지 종류의 통계형 수온 예측모형인 로지스틱모형(DLG)과 다중회귀모형(DMR-1, DMR-2, DMR-3)을 개발하였다. 모든 모형들이 강우-유출 사상에 따른 하천 수온의 급격한 강하 현상을 비교적 잘 묘사하는 것으로 나타났으나, 일 평균기온, 이슬점 온도 그리고 하천 유량을 모형의 독립변수로 사용한 회귀모형이 대기 기온과 하천 수온의 로지스틱 함수관계를 가정한 DLG 모형보다 수온예측 성능이 보다 우수한 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 하천수온, 회귀모형, 로지스틱모형, 저수지 탁수, 밀도류

* 충북대학교 환경공학과 조교수, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12 (e-mail: chung@chungbuk.ac.kr)
Assistant Prof., Dept. of Environ. Engrg., Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

** 충북대학교 환경공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Environ. Engrg., Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

1. 서 론

매년 홍수기가 되면 임하호를 비롯한 소양호와 대청호 등 국내 대부분의 대형 댐 저수지에서는 고탁도의 탁수가 유입하여 수개월씩 체류하면서 하류 하천으로 장기간 방류됨에 따라 지역주민의 민원을 야기할 뿐만 아니라 댐을 수원지로 하는 정수장의 물리·화학적 수처리 비용증가와 수자원 이용에 막대한 지장을 초래하고 있다(한국수자원공사, 2000; 2004; 김윤희 등, 2001; 정세웅, 2002). 중요한 용수공급원인 저수지의 수질과 생태계를 보호하고 장기간 탁수방류로 인한 사회적 불편과 피해를 최소화하기 위해서는 과학적 해석에 근거한 저수지 탁수조절 운영기술이 확보되어야 한다. 즉, 저수지 운영자는 탁수 조절을 위해 선택취수 또는 최대발전 방류를 통한 선택배제 등을 수행 할 수 있으며 이를 기술적으로 지원하기 위해서는 탁수거동에 대한 실시간 예측모의 기술이 필요하다. 인공 저수지로 유입한 탁수는 유입수와 저수지 수체의 수온 차이로 인해 밀도류를 형성하므로 탁수의 시공간분포와 취수시설 도달시간을 정확히 예측하기 위해서는 유입 경계지점에서의 수온예측이 필요하다(정세웅, 2004). 그러나 대부분의 국내 저수지에서는 상류하천의 하천수온자료가 연속적으로 수집되지 않고 있으므로 저수지 탁수 거동 해석과 수치모델링을 위한 상류 유입경계지점에서의 수온자료의 확보에 어려움이 있었다(이상욱 등, 2003; 박기영, 2003; 정세웅 등, 2004).

하천 수온은 기상, 유량, 외부 에너지원 등 다양한 변수에 의해 변동될 수 있으며, 일반적으로 수온 예측에 사용된 모형의 종류에는 경험적 또는 통계적 모형과 에너지 보존법칙에 근거한 물리적 모형이 있다(Neumann et al., 2003; Caissie et al., 2001; Rowell, 1998; Hockey et al., 1982). 물리적인 모형은 대상지점의 기상조건이 하천수온에 미치는 영향을 보다 개념적으로 해석하며 외부의 열 부하 변동과 같은 변화에 따른 원인과 결과 분석을 보다 능동적으로 할 수 있다는 장점이 있다(Raphael, 1962; Taylor, 1998; Carron and Rajaram, 2001). 그러나 대부분의 물리적 모형들은 하천의 수리해석모형과 연계되어 있고 상세한 지형자료와 풍향, 풍속, 복사에너지와 같은 매우 많은 양의 기상자료를 필요로 하며 복잡한 계산과정을 요구하는 단점이 있다. 반면에 회귀분석모형과 같은 통계형 수온예측모형은 비교적 적은 양의 입력자료를 이용하여 신속한 수온예측이 가능하여 어류의 적절한 서식환경에 필요한 하천수온의 평가 등에 자주 활용되고 있다(Caissie et al., 1998; Mohseni et al., 1998; 2002, Mohseni and Stefan,

1999). 대기기온과 하천수온은 매우 높은 상관성이 있어 많은 연구자들이 하천의 수온을 결정하기 위해 선형 회귀모형을 사용한 바 있다(Crip and Howson, 1982; Webb, 1987; Stefan and Preud'homme, 1993; Pilgrim et al., 1998). Neumann et al.(2003)은 미국의 Truckee 강에서 여름철 저수량 기간 동안 하천의 최대수온을 예측하기 위해 대기기온과 하천유량을 독립변수로 사용한 선형회귀모형을 개발하여 적용한 바 있으며, 개발된 모형은 어류의 서식환경 개선을 위한 상류 저수지 추가 방류 등 저수지운영의 의사결정시스템에 활용되었다. Mohseni et al.(2002)은 미국의 서부 건조지대에서 일주일 평균 최대 하천수온을 예측하기 위해 대기기온과 하천수온의 로지스틱 함수관계를 이용한 모형을 개발하여 적용한 바 있다. Gu et al.(1999)은 다양한 기상조건에 대해서 하천수온 회귀모형을 개발하였으며, 기상조건이 모형으로부터 분리될 수 있다면 하천의 유량과 하천수온은 유의할 만한 상관성을 가진다는 결론을 내린 바 있다.

본 연구의 목적은 저수지로 유입하는 탁수의 실시간 거동 예측의 정확도를 높이기 위해 강우-유출 사상 동안 하천의 수온변동 특성을 조사하고 수문기상 자료를 이용하여 수온을 통계적으로 예측할 수 있는 모형들을 개발하는데 있다. 이를 위해 2004년 홍수기 동안 대청호 상류 하천에서 한 시간 단위로 하천 수온을 연속 측정하였으며 강우사상 동안 수온의 변동 특성을 분석하여 제시하였다. 본 연구에서 개발한 수온예측 모형은 대기기온과 하천수온의 로지스틱함수관계를 가정하는(Mohseni et al., 1998; Caissie et al., 2001) 로지스틱모형과 대기 기상자료와 하천 유량자료를 독립변수로 사용한(Neumann et al., 2003) 다중회귀모형이다. 개발된 모형은 다양한 통계지표를 이용하여 예측 성능을 비교 평가하였다.

2. 연구방법 및 재료

2.1 실험방법

2004년 7월1일부터 9월30일까지 3개월 동안 대청호 상류 옥천군 동이면에 위치한 옥천정수장의 착수정(Sta.7 지점)에 준 실시간 탁수감시 장치(YSI6920)를 설치하고 수온, 탁도, 전기전도도, pH, DO를 한 시간 단위로 계속하였다(Fig. 1). 착수정의 수원은 100m 정도 떨어진 곳에 위치한 금강분류이며 하천수를 직접 취수하고 있으며 체류시간이 4분 미만이어서 하천과 착수정 내 물의 수온과 수질특성은 동시성이 유지 되는 것으로 조사되었다. 2004년 한 해 동안 대청댐 유역의 총 강우

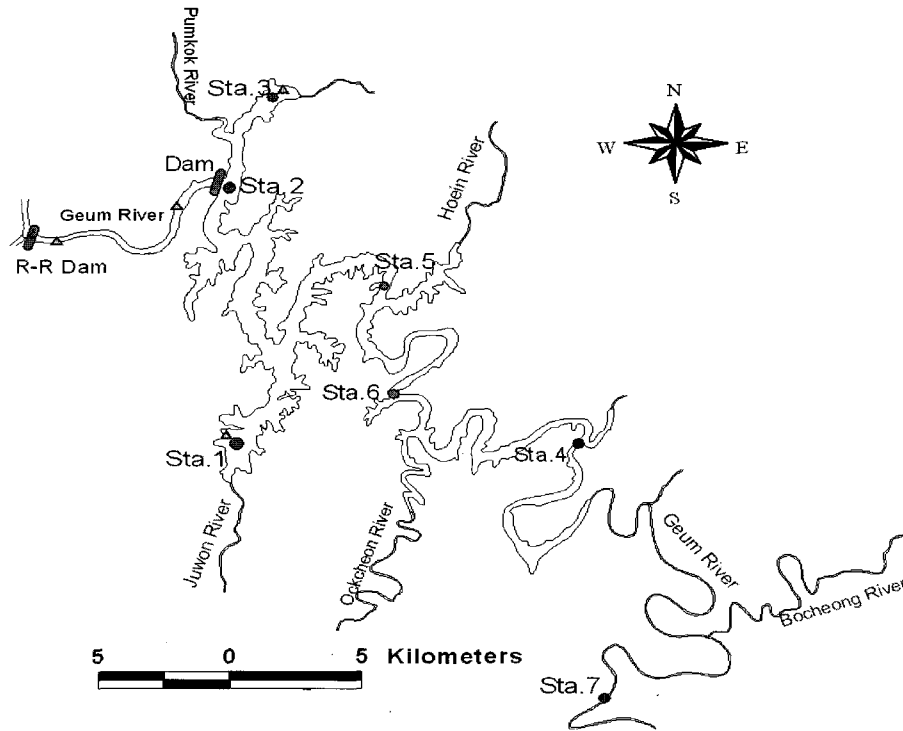


Fig.1 Layout of the study reservoir and monitoring stations

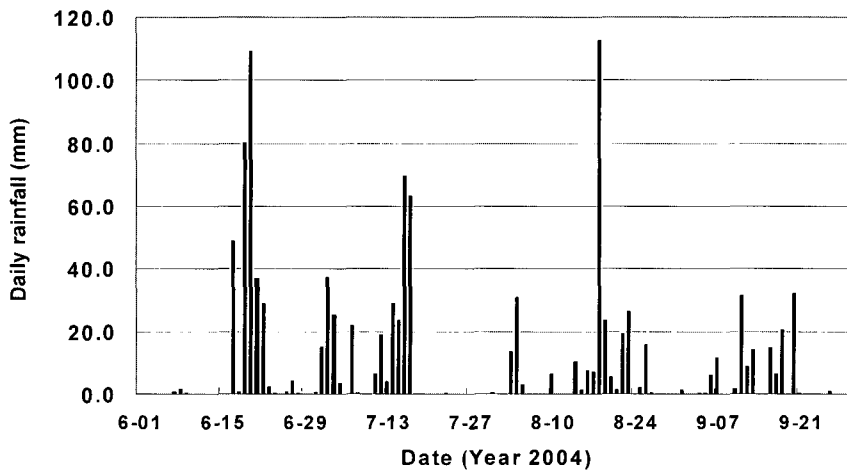


Fig. 2 Daily rainfall amount during the flood season of 2004 at study site

량은 1,381mm이며 홍수기인 6월~9월 사이에 내린 강우량은 1,070mm로써 전체 강우의 77.5%를 차지했다. 이 기간 동안의 일별 강우강도는 Fig. 2와 같으며 일평균 유입량이 1,000 m³/sec를 초과한 홍수사상은 6월, 7월, 8월에 각각 한번 씩 발생하였다. 한 해 동안 대형댐의 총 유입량은 27억3천7백만m³이었으며 이중 79%에 해당하는 21억7천3백만m³이 홍수기인 6월부터 9월 사이에 유입되었다.

2.2 수온예측모형

수온예측모형은 실시간 저수지 탁수거동 예측을 위

해 필요한 저수지 유입부 경계조건인 수온 자료를 생산하기 위한 것이므로 가능한 적은 입력 변수로 신속하게 예측할 수 있는 통계형 모형을 고려하였으며 다중회귀 모형과 로지스틱모형을 선정하였다. 기온과 수온의 로지스틱(Logistic) 함수를 이용한 로지스틱모형은 일평균 독립변수 자료를 이용한 DLG 모형과 시간 독립변수 자료를 이용한 HLG 모형으로 구분하여 Table 1과 같이 구성하였다. 로지스틱모형의 매개변수 a 는 최대 수온 상수, β 는 변곡점에서의 대기온도, γ 는 로지스틱함수의 최고경사를 나타내며 실측수온자료로부터 a 는 32°C로 결정하고 나머지 매개변수는 Eq. (1)과 같이 실측값과

모의값의 잔차 제곱합을 최소화하는 목적함수를 Excel의 비선형최적화기법(Solver)으로 산정하였다.

$$\text{Min } S_r = \text{Min} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (1)$$

여기서 y_i 와 \bar{y}_i 는 각각 실측수온과 모의수온, S_r 은 실측값과 모의값의 잔차 제곱합을 나타낸다.

다중회귀모형의 구성은 입력 변수의 종류와 개수에 따른 모형의 예측성능을 평가하기 위해 Neumann 등 (2003)이 사용한 단계별 회귀분석과정(stepwise regression procedure)을 적용하였다. 대기기온, 이슬점온도, 하천유량 자료를 단계적으로 추가하여 모형을 구성하고 예측 성능을 평가하였다. 다중회귀모형은 일평균 기상과 유량 자료를 이용한 DMR1, DMR2, DMR3 모형과 시간자료를 이용한 HMR3 모형으로 구분하여 구성하였으며, 모형의 구조와 입력 독립변수는 Table 1과 같다.

각 모형의 예측성능을 평가하기 위하여 실측값과 계산값 간의 절대평균오차(absolute mean error, AME), 결정계수(coefficient of determination, R^2), 평균제곱오

차의 평방근(root mean square error, RMSE)을 통계지표로 사용하였다(Table 2). 예측오차 AME는 실측값과 모의값의 잔차에 대한 절대값을 산술평균한 값으로서 0에 가까울수록 모형의 성능이 우수하다. 결정계수 R^2 는 실측값의 총 변동 중에서 모형으로 설명되는 비율을 나타내며, 0과 1사이 범위의 값을 가지며 값이 1에 가까울수록 모형의 정확도와 적합성이 양호한 것으로 평가한다. RMSE는 실측값과 모의값의 제곱오차로부터 평균제곱오차를(root mean square errors) 구하여 제곱근을 구한 것으로 표준계산오차(standard error of estimates)가 된다. RMSE는 그 단위가 실제 변량의 단위와 같고 값이 작을수록 모형의 오차가 작은 것으로 평가된다. Table 2에서 y_i = 실측값, \bar{y}_i = 모의값, y_{ave} = 실측값 평균, N = 자료수를 나타낸다. 모의결과와 실측값의 도해적 비교 방법으로는 시계열 비교와 95%신뢰구간 및 예측구간을 갖는 1:1 선형비교 등을 사용하였다. 모의값과 실측값 사이의 선형회귀분석을 통해 구한 신뢰구간 폭이 작을수록 실측값에 대한 모의값의 분산이 작은 것을 의미하며 모형의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

Table 1. Structures of water temperature prediction models and independent parameters

Model	Model structure	Data	Variable
DLG	$T_w = \frac{\alpha}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}}$	Daily	T_a
DMR1	$T_w = a_0 + a_1 \cdot T_a + e$	Daily	T_a
DMR2	$T_w = a_0 + a_1 \cdot T_a + a_2 \cdot Q + e$	Daily	T_a, Q
DMR3	$T_w = a_0 + a_1 \cdot T_a + a_2 \cdot T_d + a_3 \cdot Q + e$	Daily	T_a, T_d, Q
HLG	$T_w = \frac{\alpha}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}}$	Hourly	T_a
HMR3	$T_w = a_0 + a_1 \cdot T_a + a_2 \cdot T_d + a_3 \cdot Q + e$	Hourly	T_a, T_d, Q

T_a = air temperature (°C), T_d = dew point temperature(°C), Q = flow(m³/s), e = error

Table 2. Statistical analysis index for assessing model performance

Statistical Index	Equation	Desired value
Absolute mean error	$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \bar{y}_i - y_i $	0
Coefficient of Determination	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2}$	1
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}$	0

2.3 수온예측모형의 입력자료

하천수온 예측을 위한 로지스틱모형과 다중회귀분석 모형의 최적 매개변수는 7월25일~9월30일 동안 실측한 대기기온(T_a), 이슬점온도(T_d), 하천유량(Q), 하천수온(T_w) 자료를 사용하여 산정하였으며, 각 독립변수의 시계열 변화는 Fig. 3과 같다. 기온과 이슬점온도 자료는 수온 측정 지점에서 북서쪽으로 25 km 떨어진 대전기상청에서 관측된 자료를 사용하였으며, 하천 유량 자료는 하류방향으로 2.5 km 떨어진 곳에 위치한 옥천 수위표 지점의 수위자료를 수위-유량 관계식을 이용하여 유량으로 환산하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대청호 유입탁수의 수온 및 수질특성

Fig. 4는 대청호 상류 관측지점 Sta.7에 설치한 실시간 탁수감시장치를 통해 측정된 시간단위의 탁도, 수온, 전기전도도, pH, DO 농도의 시계열 변화를 보여주고 있다. 탁수 감시장치가 7월1일부터 가동되어 6월21일에 발생한 강우사상은 포함되지 못했지만, 대체로 유출수문곡선과 탁도곡선은 높은 유사성을 보였으며 7월의 강우시에는 일시적으로 1,000 NTU 이상의 높은 탁도가 발생하였고 8월에도 최고 250 NTU의 탁도가 발생하였다. 강우사상으로 탁수가 발생하는 기간 동안 하천의 수온은 강우 전 보다 대체로 5~10°C 정도 하강하는 것으로 나타났다. 탁수 유출기간 동안 하천수온의 하강은 대기온도의 영향이 크며 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 탁수

의 밀도는 저수지 표면수보다 수온차이로 인해 1.4~2.6 kg/m³ 높게 되어 저수지에서 중층 밀도류를 형성하는 직접적인 원인이 된다. 탁수의 전기전도도는 강우에 따른 단기 유출 효과 때문에 이온강도가 낮아 강우 전의 하천수 보다 약 40~50µs/cm 정도 낮아졌다. pH는 큰 변화를 보이지는 않았지만 강우의 산성도 영향으로 평균적으로 강우 전에 비해 약 0.6 정도 하강하였다. 하천의 DO 농도는 기온의 강하로 인해 강우 전에 비해 약 1~3 mg/L 정도 상승하였으며, 무강우 기간 동안 하천의 식생과 부착조류 때문에 나타나고 있는 일주기 변화가 유출기간 동안에는 약화되는 현상을 보인다.

3.2 수온예측모형 성능비교

Table 3은 로지스틱모형과 다중회귀모형의 매개변수 산정결과와 모형의 성능을 나타내는 통계지표 값들을 보여주고 있다. DLG 모형의 절대평균오차 AME는 1.689°C인 반면, DMR 모형은 1.271~1.285°C의 범위를 보였다. RMSE와 R² 값도 DLG 모형은 각각 1.980°C와 0.734이나, DMR 모형들은 1.605~1.644°C와 0.813~0.822의 범위로 나타나 대기기온과 하천수온의 로지스틱 함수관계를 가정한 로지스틱모형보다 다중회귀모형이 일별 하천수온 예측 성능이 대체로 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Mohseni et al.(1998)의 연구에서도 로지스틱모형은 일별 예측보다는 주간평균 수온 예측에 적합한 모형으로 평가된 바가 있어 기존 연구결과와 잘 일치하고 있으며, 대청호 상류 하천에서도 시간 또는 일별 수온예측에 로지스틱모형은 적합하지 않은 것으로 보인다.

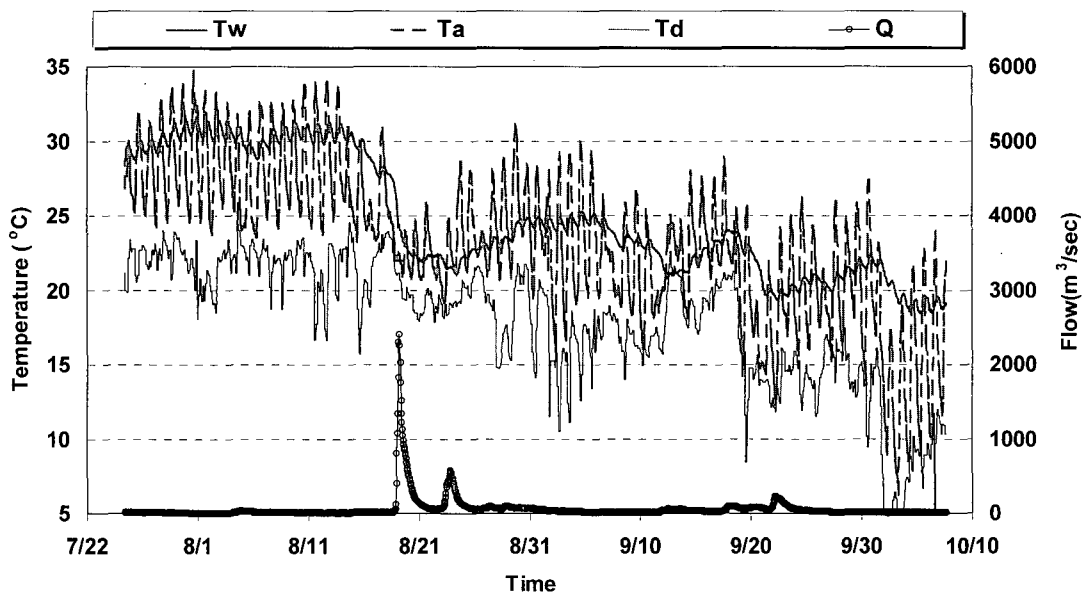


Fig. 3. Observed meteorological data and flow that used as input data

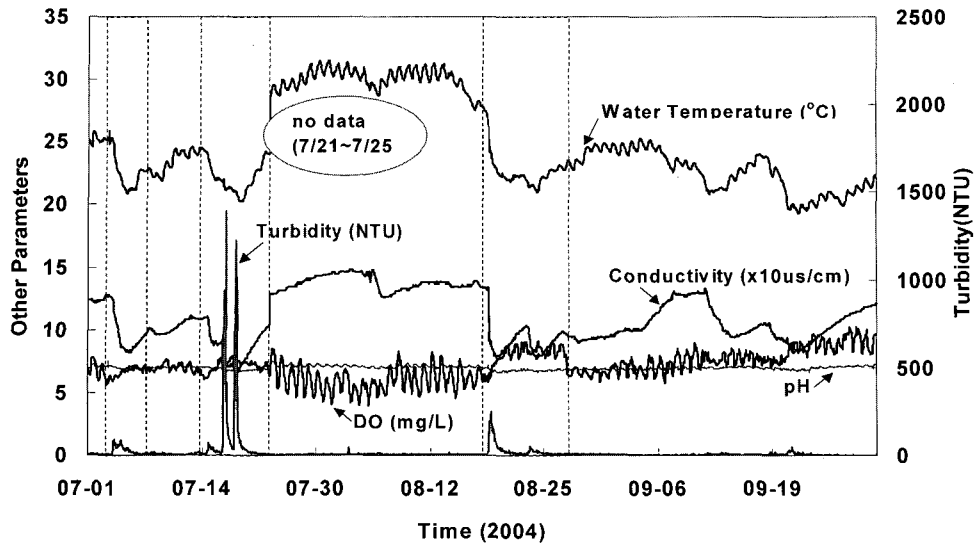


Fig. 4. Observed water temperature, turbidity, conductivity, pH, and DO at Sta.7

Table 3. Optimized model coefficients and statistical indices showing model performance

Model	Model equations	AME	RMSE	R ²
DLG	$T_w = \frac{32.0}{1 + e^{0.172(16.2 - T_a)}}$	1.689	1.980	0.734
DMR1	$T_w = 0.6045 + 1.0184 T_a$	1.285	1.644	0.813
DMR2	$T_w = 1.284 + 0.997 T_a - 0.002 Q$	1.271	1.624	0.818
DMR3	$T_w = 1.3109 + 0.8828 T_a + 0.1479 T_d - 0.0021 Q$	1.277	1.605	0.822
HLG	$T_w = \frac{32.0}{1 + e^{0.113(12.1 - T_a)}}$	2.362	2.771	0.475
HMR3	$T_w = 5.995 + 0.3835 T_a + 0.5490 T_d - 0.0034 Q$	1.772	2.161	0.680

T_a = air temperature (°C), T_d = dew point temperature(°C), Q = flow(m³/sec), e = error

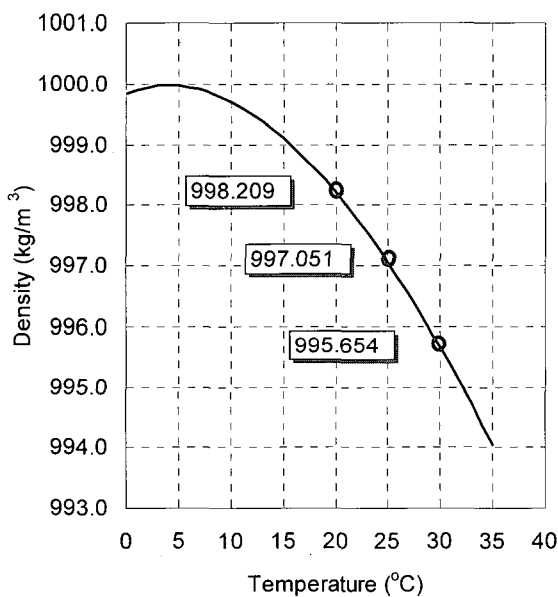


Fig. 5. Water density as a function of water temperature

시간자료를 사용한 모형과 일 평균 자료를 사용한 모형의 성능비교에서는 모든 통계지표에서 시간자료를 사용한 HLG와 HMR3 모형보다 일평균자료를 사용한 DLG 및 DMR 모형의 성능이 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 실시간 탁수 거동 예측 시뮬레이션을 위한 대청호 유입 하천수온의 단기 예측을 위해서는 시간단위의 모형보다는 일단위의 모형을 적용하는 것이 유리하며 예측 신뢰도를 향상시킨다는 것을 의미한다.

통계적으로 회귀모형은 계산값과 실측값의 잔차가 정규분포의 특성을 가지며, 이들 잔차는 평균이 0이며 평균값에 대칭하여 분포한다는 가정조건을 전제로 하고 있다(Neumann et al., 2003). 본 연구에서 개발한 하천수온 회귀모형의 통계적 적합성을 평가하기 위해 잔차의 히스토그램을 작성하고 확률분포를 평가하였다. 잔차분석 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 모의수온과 관측수온의 잔차값들은 평균값 0.000597°C를 가지며 대체로 정규분포형태를 보이고 있어 회귀모형의 적용이

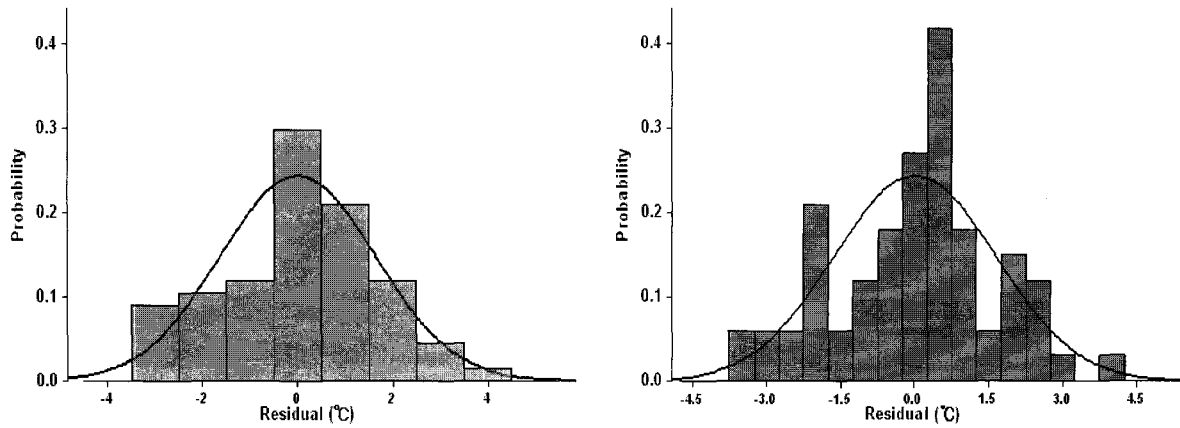


Fig. 6. Water temperature regression residuals histograms: delta = 1.0°C (left), 0.5°C (right)

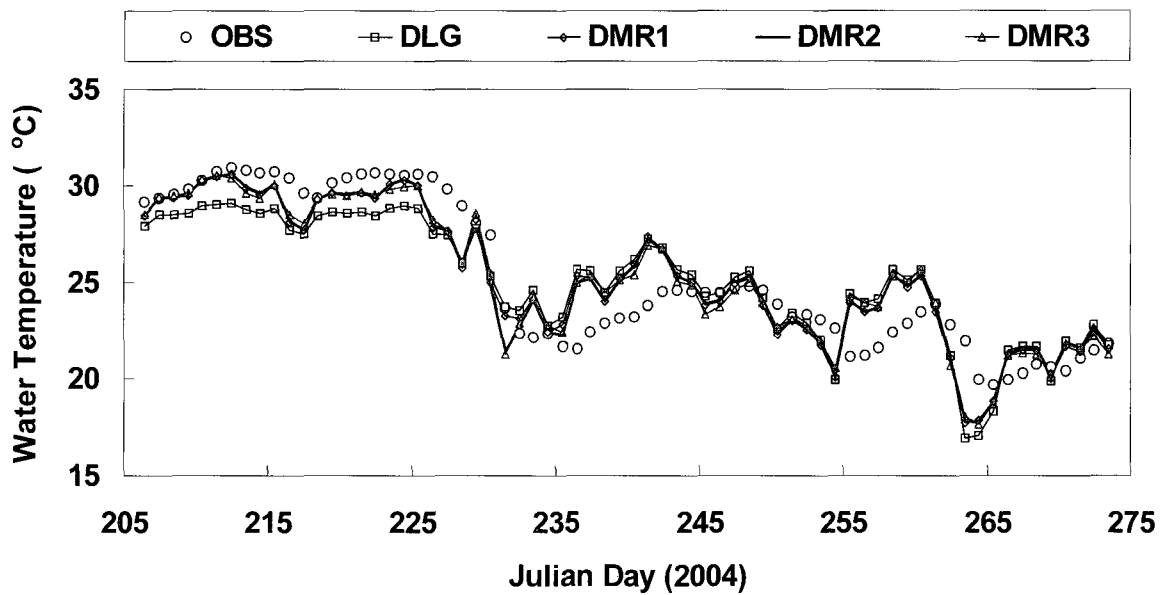


Fig. 7. Time series comparisons of daily models results with observed water temperatures

타당한 것으로 평가되었다.

Fig. 7은 각 모형의 모의결과와 실측 하천수온의 일 평균 값을 시계열로 비교한 그래프를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 대체로 모든 모형들이 강우-유출 이후 발생하는 하천수온의 급격한 하강 현상을 비교적 잘 모의하고 있으나, DLG 모형은 무 강우시 하천수온이 30°C 이상으로 높게 올라가는 구간에서 실측 수온을 3~4°C 정도 과소평가하는 경향이 있다. 다중회귀모형은 대기의 이슬점온도와 하천유량을 모두 포함한 DMR3 모형이 약간 향상된 성능을 보이고 있다. 그러나 DLG와 DMR 모형은 모두 강우-유출 이후 대기기온의 영향으로 하천수온이 회복되는 구간에서는 수온을 과대평가하는 경향을 보인다. 이것은 비교적 수온이 낮은 지하수의 기저유출에 따른 영향으로 판단된다.

Fig. 8은 시간자료를 사용한 다중회귀모형인 HMR3 모형과 로지스틱모형인 HLG 모형의 수온예측 결과의 실측값을 보여주고 있다. 일 자료를 사용한 모형과 같이 다중회귀모형이 로지스틱모형 보다 하천수온의 변동 추세를 더 잘 모의하는 것으로 나타났으나, 두 모형 모두 하천수온이 대기기온의 영향으로 평형온도에 도달하는 데 소요되는 시간을 물리적으로 고려하지 않기 때문에 대기기온의 큰 일주기 변화에 직접적인 영향을 받고 있으며, 또한 침투 유출시 하천유량의 변화에도 너무 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 따라서 탁수 유출시 시간별 대기기온과 하천유량자료를 이용하여 하천수온을 통계적으로 예측하는 것은 물리적으로 한계가 있다고 판단된다.

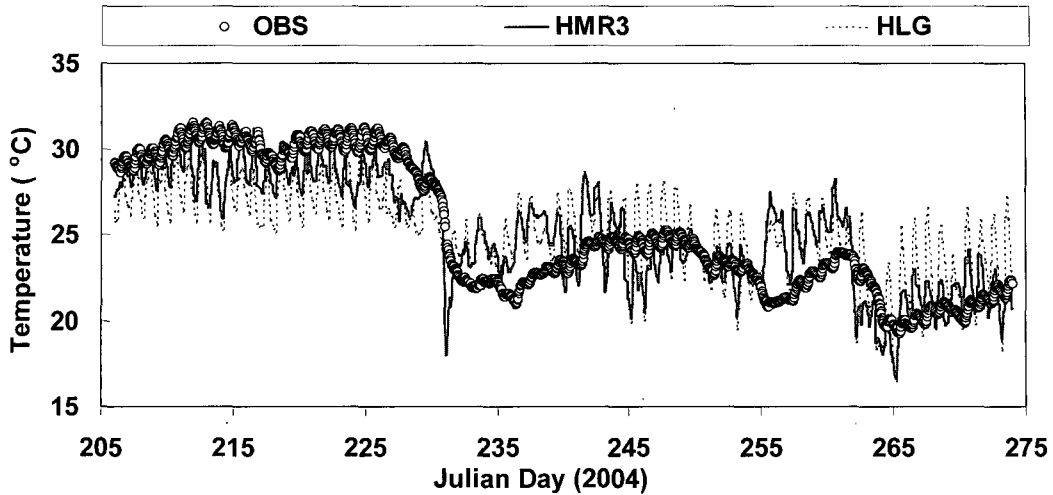


Fig. 8. Time series comparisons of hourly models results with observed water temperatures

실측값과 각 모형에 의한 계산값과의 선형관계는 Fig. 9에 제시되었다. 그림에서 점선구간은 실측값의 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 의미하며 실선구간은 모형 예측값에 대한 95% 신뢰구간을 나타낸다. 시간단위의 예측모형인 HLG와 HMR3 모형의 예측 신뢰구간의 폭이 일단위 모형의 신뢰구간보다 대체로 크게 나타나고 있으며, 이것은 시간단위의 모형은 실측값의 평균에 대한 예측값의 분산이 매우 큰 것을 의미한다. 일별 수온 예측모형들은 비교적 비슷한 분산을 보이고 있으나 DMR3 모형이 다소 향상된 성능을 보여주고 있다.

이상의 모의결과를 종합해 볼 때, 저수지로 유입하는 탁수의 밀도류 거동해석을 위해 유입 하천의 수온을 통계적으로 예측하기 위해서는 독립변수로써 일평균 수문기상자료를 사용하는 것이 바람직하며, 이 경우 다중회귀모형이 로지스틱모형보다 다소 개선된 예측성능을 보여주었다(Caissie et al., 2001). 또한 다중회귀모형의 입력변수로써 대기기온, 이슬점온도, 하천유량 자료를 단계별로 추가하며 회귀분석을 실시하고 모형의 예측 성능을 비교한 결과, 기상과 유량의 3 가지 독립변수를 모두 사용한 DMR3 모형이 상대적으로 다소 작은 오차를 보였으나 개별 자료의 예측에 대한 신뢰도 등을 고려할 때 통계적으로 유의할 수 있는 수준인지에 대한 평가는 향후 장기적인 자료 수집이 이루어지면 가능할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 금강 유역에 위치한 대청호를 대상으로 강우-유출 사상 동안 저수지로 유입하는 탁수의 수온변동 특성을 조사하고 수문기상 자료를 이용하여 하천수온을 통계적으로 예측할 수 있는 모형들을 개발하

고 각 모형의 예측 성능을 비교 평가하였다. 현장실험과 수온 예측 모형의 비교 분석을 통해 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 조사 기간동안 강우로 인해 탁수 유출이 발생할 때 하천 수온은 강우 이전의 하천수온 보다 5~10°C정도 하강하는 것으로 나타났다. 이로 인해 저수지로 유입한 탁수의 밀도는 호수의 표층수보다 1.4~2.6 kg/m³ 높아져 탁수는 저수지 내에서 운동에너지가 소멸된 후 음의 부력이 작용하여 중층 밀도류를 형성하였다.
- (2) 대기기온과 하천수온의 로지스틱 함수관계를 이용한 수온예측 모형인 DLG 모형과 대기기온, 이슬점온도, 하천유량을 단계별로 독립변수에 포함하는 다중회귀모형(DMR1, DMR2, DMR3)을 개발하고 실측값과 비교하여 각 모형의 특성과 성능을 평가한 결과, 모든 모형들이 강우-유출 이후 발생하는 하천수온의 급격한 하강 현상을 비교적 잘 반영하였으나, DMR 모형이 DLG 모형 보다 대체로 AME와 RMSE 값이 작았으며 일별 하천수온 예측 성능이 우수한 것으로 평가되었다.
- (3) 시간별 수문기상 자료를 이용한 HLG와 HMR3 모형은 하천수온이 대기기온의 영향으로 평형온도에 도달하는 데 소요되는 시간을 물리적으로 고려하지 않기 때문에 대기기온의 일주기 변화에 민감하게 영향을 받았으며, 또한 침투 유출시 하천유량의 변화에 너무 민감한 반응을 보이는 것으로 나타나 탁수 유출시 하천의 시간별 수온변화를 통계적으로 예측하는 것은 한계가 있다고 판단된다.

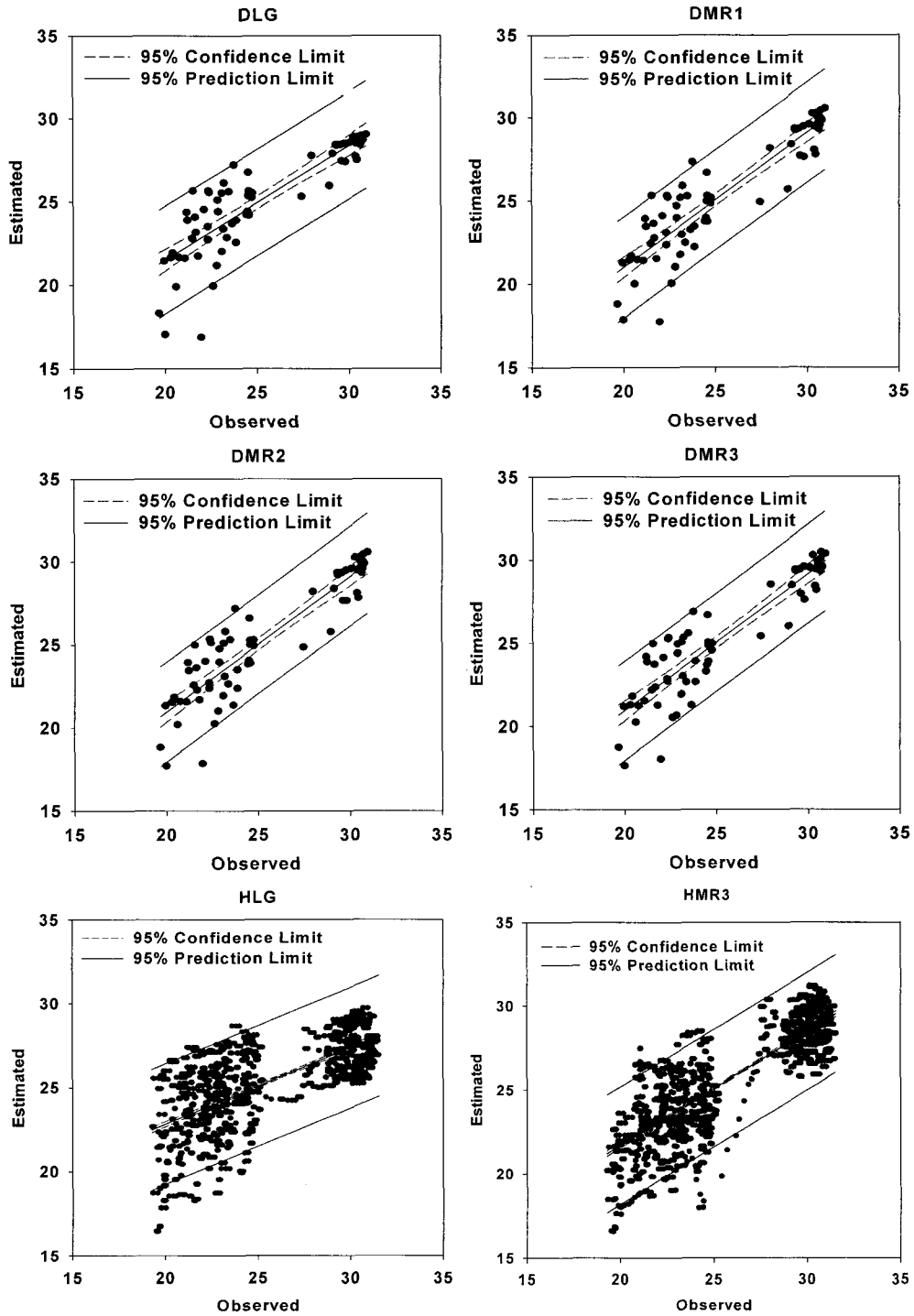


Fig. 9. Linear regressions between observed and estimated water temperatures

(4) 기온, 이슬점온도, 유량자료를 모두 사용하는 DMR3 모형이 기온자료만을 사용하는 DMR1 모형보다 상대적으로 다소 작은 오차를 보였으나, 독립변수의 예측 신뢰도 등을 고려할 때 통계적으로 유의할 수 있는 수준인지에 대한 평가는 보다 장기적인 자료 수집을 통해 검증되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련된 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일 (2001). "2차원 수리수질모델을 이용한 소양호 수온성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링." **대한상하수도학회지**, Vol. 15, No. 1, pp. 40-49.
- 박기영 (2003). 2차원 수치모형을 활용한 임하댐 탁도 분석 시스템 구축, 석사학위논문, 경북대학교
- 이상욱, 서동일, 정세웅 (2003). "2차원 수리·수질모델 (CE-QUAL-W2)을 이용한 대청호 수온 성층 현상의 모델링." **2003 춘계학술연구발표회논문집**, 대한환경공학회, pp. 676-678.
- 정세웅 (2004). "성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링." **대한환경공학회지**, Vol. 26, No. 90, pp. 970-978.
- 정세웅 (2002). "성층 저수지로 유입하는 탁류의 유동 특성과 영향에 관한 연구" **2002년 한국농공학회 학술발표 논문집**, 한국농공학회, pp. 269-272.
- 정세웅, 박기영, 한진연, 박기영 (2004). "임하호 탁수 거동 분석을 위한 CE-QUAL-W2 모형의 적용." **2004 춘계학술발표회 논문집**, 대한환경공학회, pp. 1220-1225.
- 한국수자원공사 (2000). **댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발**.
- 한국수자원공사 (2004). **임하댐 탁수저감 방안 수립 보고서**.
- Caissie, D., El-Jabi, N., and Satish, M.G., (2001). "Modeling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures." *J. of Hydrology*, Vol. 251, pp. 14-28.
- Caissie, D., El-Jabi, N., St-Hilaire, A., (1998). "Stochastic modeling of water temperatures in a small stream using air to water relations." *Canadian J. Civil. Eng.*, Vol. 25, pp. 250-260.
- Carron, J.C., and Rajaram, H. (2001). "Impact of variable reservoir releases on management of downstream temperatures." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No. 6, pp. 1733-1743.
- Crip, D.T., Howson, G., (1982). "Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District." *Freshwater Biol.*, Vol. 12, pp. 359-367.
- Gu, R., McCutcheon, R., and Chen, C.J. (1999). "Development of weather-dependent flow requirements for river temperature control." *Environ. Manage.*, Vol. 24, No. 4, pp. 529-540.
- Hockey, J.B., Owens, I.F., and Tapper, N.J. (1982). "Empirical and theoretical models to isolate the effect of discharge on summer water temperature in the Hurunui River." *J. of Hydrology*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-21.
- Mohseni, O., Stefan, H.G., and Erickson, T.R. (1998). "A nonlinear regression model for weekly stream temperatures." *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 10, pp. 2685-2692.
- Mohseni, O. and Stefan, H.G., (1999). "Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation." *J. of Hydrology*, Vol. 218, pp. 128-141.
- Mohseni, O., Erickson, T.R., and Stefan, H.G. (2002). "Upper bounds for stream temperatures in the contiguous United States." *J. Environ. Eng.*, Vol. 128, No. 1, pp. 4-11.
- Neumann, D.W., Rajagopalan, B., and Zagona, E.A., (2003). "Regression Model for Daily Maximum Stream Temperature." *J. of Envir. Engr.*, Vol. 29, No. 7, pp. 667-674.
- Pilgrim, J.M., Fang, X., Stefan, H.G., (1998). "Stream temperature correlations with air temperatures in Minnesota: implications for climate warming." *JAWRA*, Vol. 34, No. 5, pp. 1109-1121.
- Raphael, J.M., (1962). "Prediction of temperature in rivers and reservoirs" *ASCE, J. Power Division*, 88, pp. 157-181
- Rowell, J.M. (1998). "A history of temperature modeling in the Central Valley." Presentation at the Bay Delta Modeling Forum, Temperature Modeling Workshop, October 22, Sacramento.
- Stefan, H.G., Preud'homme, E.B., (1993). "Stream temperature estimation from air temperature." *Water Resour. Res.* Vol. 29, No. 1, pp. 27-45.
- Taylor, R.L. (1998). *Simulation of hourly stream temperature and daily dissolved solids for the Truckee River, California and Nevada*. Water-Resources Investigations Rep. No. WRI 98-4064, U.S. Geologic Survey, Reston, Va.

(논문번호:05-52/접수:2005.03.31/심사완료:2005.11.14)