

KU-RLMS 모형을 이용한 반변천 합류부 수온 예측에 관한 연구

A Study on the Prediction of Water-Temperature near the Confluence of Banbyeoncheon by Using the KU-RLMS Model

이용진^{*}, 이남주^{**}, 류시완^{***}, 여홍구^{****}
Yong Chin Lee, Nam Joo Lee, Siwan Lyu, Hong Koo Yeo

요 지

수온은 수계에서 가장 중요한 물리적 특성 중 하나로서, 생물 군집, 특히 어류와 무척추 동물에 관련된 많은 수질 인자에 영향을 미친다. 하천의 생태학적 모습을 개선하기 위한 하천 복원 사업 수행에 있어서, 서식처 및 산란처 조건으로서의 수온 조사 및 모델링의 필요성이 점차 증가하고 있는 상황이다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 수온의 변화 특성을 규명할 목적으로 수행하였다.

KU-RLMS 모형은 하천 및 저수지의 국부적인 수리, 수질, 유사이동 해석을 위해 개발된 평면 이차원 비정상 수치모형이다. 직사각형 격자를 사용하는 유한차분법의 단점을 보완하기 위해, 수심 적분된 2차원 연속방정식, 운동량방정식, 이송확산방정식을 불규칙한 경계를 현실적으로 묘사할 수 있는 직교곡선 좌표계로 변환한 방정식을 사용한다. 이 모형은 흐름, 농도, 지형변화를 조합하여 계산할 수 있는 모형으로서 점착성 및 비점착성 유사의 이동, 보존성 및 비보존성 오염물질의 이동, 수온 변화를 모의할 수 있다.

수치모형 적용을 위한 현황분석으로 안동 및 임하 조정지댐의 방류량, 안동 수위관측소의 수위, 법흥교 및 포진교 지점의 수온 자료를 분석하였다. 이송확산모형의 보정을 위해, 안동대교 지점의 수온 횡분포 측정 자료를 사용하여 확산계수에 대한 매개변수 추정 및 검증을 수행하였다. 또한, 안동조정지댐과 임하조정지댐의 방류량 및 방류수온을 고려하여 수치모의조건을 결정하였으며, 각 조건에 대한 수온 변화 특성을 분석하였다.

핵심용어: KU-RLMS, 수온, 낙동강, 매개변수추정, 수치모의

1. 서 론

수온은 수계의 가장 중요한 물리적 특성 중 하나로서, 생물 군집, 특히 어류와 무척추 동물에 관련된 많은 수질 인자에 영향을 미친다(Deas et al. 2000). 연어나 송어와 같은 냉혈(ectothermic) 동물인 어류의 생존은 주위의 수온에 의존한다. 생물학적으로 최적인 범위 보다 온도가 약간 높아지면 특정 성장 단계에 해당하는 연어과 어류의 건강성이 줄어들기 시작기도 하며, 너무 높은 수온은 연어과 어류 폐사의 직접적인 원인이 되기도 한다(Poole et al. 2001). 최근에 미국에서 수행되고 있는 다양한 하천 복원 사업은 하천의 생태학적 모습을 개선하기 위한 수단이 되어 왔으며, 서식처 조건에서 수온의 중요성이 크게 부각되고 있는 상황이다.

하천 및 호수 수온 모델링에 대한 연구(Anderson 1954, Bowen 1926, Brown 1969, Edinger 등. 1968, Evans 등. 1998, Sinokrot과 Stefan 1993)가 다수 수행되었다. Bonjour(1998)와 Meier(2002)는 과거의 하천 온도 모델링에 대한 연구를 조사한 결과에 기초하여 열 수송 모형을 개발하였다. 이 모형은 두 가지 주요 요소로 구성되어 있는데, 하나는 산지 하천에서 수리학적 조건을 묘사하기 위한 사수역을 포함하는 이송-확산

* 정회원·경성대학교 토폭공학과 석사과정 E-mail: atc201co@hotmail.com

** 정회원·경성대학교 건설환경공학부 부교수 E-mail: njlee@ks.ac.kr

*** 정회원·창원대학교 토폭공학과 조교수 E-mail: minilite@changwon.ac.kr

**** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 E-mail: yeo917@kict.re.kr

모형이며, 다른 하나는 열 평형 모형이다. JORDE와 SCHERRER(2005)는 이 모형을 미국의 레드강에 적용하여 서식처 복원 평가를 수행한 바 있다.

하천의 생태학적 모습을 개선하기 위한 하천 복원 사업 수행에 있어서, 서식처 및 산란처 조건으로서의 수온 조사 및 모델링의 필요성이 점차 증가하고 있는 상황이다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 수온의 변화 특성을 규명할 목적으로 수행하였다.

2. KU-RLMS 수온 예측 모형

KU-RLMS 모형은 1996년에 의해 개발된 평면 이차원 하상변동 예측모형으로서, 직교곡선격자계로 좌표 변환된 유한차분기법을 사용한다. 이 모형은 점착성 및 비점착성 유사를 종류별로 수치모의할 수 있으며, 정상/비정상 흐름 계산, 수문/수중보 등과 같은 수공구조물을 고려할 수 있다. 직교좌표계에서 Reynolds 방정식을 수심적분하면 흐름모형의 지배방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다(이남주, 1996).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h U) + \frac{\partial}{\partial y}(h V) = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U) + \frac{\partial}{\partial x}(h U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(h UV) \\ = Fh V - gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w1} - \tau_{b1}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h T_{11}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h T_{12}) \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h V) + \frac{\partial}{\partial x}(h UV) + \frac{\partial}{\partial y}(h V^2) \\ = -Fh U - gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w2} - \tau_{b2}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h T_{12}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h T_{22}) \end{aligned} \quad (1c)$$

여기서, x, y 는 수평면상의 공간좌표, t 는 시간, F 는 Coriolis 상수, g 는 중력가속도, h 는 수심, z_b 는 하상고, ρ 는 물의 밀도이며, U, V 는 x, y 방향의 수심평균 유속성분, τ_{b1} 과 τ_{b2} 는 각각 x, y 방향의 바닥 전단응력, τ_{w1} 과 τ_{w2} 는 각각 x, y 방향의 바람에 의한 응력, T_{11}, T_{12}, T_{22} 는 유효응력이다.

수온 예측은 이송확산방정식을 사용하여 계산하며, 지배방정식은 3차원 이송확산방정식을 수심적분하여 얻을 수 있다(이남주, 1996).

$$\frac{\partial(h T)}{\partial t} + \frac{\partial(h UT)}{\partial x} + \frac{\partial(h VT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(h k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + P_T \quad (4)$$

여기서, T 는 수심적분된 수온, k 는 열전도도(thermal conductivity), P_T 는 외부로 부터의 열플럭스이다. 열플럭스는 태양 단파장, 대기 장파장, 수표면 반사 장파장, 전도, 증발 등에 의해 결정된다(Chapra, 1996).

편미분방정식을 사용하는 격자생성기법 중 모형의 적용경계가 명확히 규정된 경우에 일반적으로 많이 사용되는 타원형 방정식을 사용한다. 격자생성시 직교성, 밀집성 등은 Poisson 방정식의 비제차항에 적당한 제어함수를 도입하는 방법으로 고려할 수 있다. 타원형 격자생성 Poisson 방정식은 다음과 같다.

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} = P(\xi, \eta), \quad \eta_{xx} + \eta_{yy} = Q(\xi, \eta) \quad (6)$$

수치 연산을 위해 지배방정식을 직교좌표계로 좌표변환하였으며, 유한차분은 Arakawa-C 형태의 엇갈린 격자계에서 Leendertse(1967) 방법을 이용하였다. ADI 방법에 의한 흐름모형과 이송확산방정식의 차분식은 3중 대각행렬로 구성되고, 이것은 Thomas 알고리듬을 이용하여 해를 구한다.

3. KU-RLMS 모형의 적용

본 연구에서는 수심적분 이차원 흐름 및 이송확산 예측 모형인 KU-RLMS 모형을 낙동강 상류에 위치한 반변천 합류점 인근 하도에 적용하여 비홍수기 수온의 평면적 거동을 분석하고자 하였다. 흐름 및 수온 계산을 위한 수치격자는 그림 1과 같이 20×270 개의 엇갈린 격자로 구성하였다. 그림의 계산격자망에서 공간격자 간격은 $\Delta\xi = \Delta\eta = 200$ 인 격자를 사용하였다. 그림 2는 수치모형에서 사용한 지형자료를 도시한 것으로,

건설부(1993)의 단면 자료를 사용하여 구하였다. 정상류 흐름을 계산하기 위한 시간격자간격 Δt 는 0.5 s를 사용하였다. 직교곡선격자 발생을 위한 SOR 방법의 완화계수는 0.1을 사용하였다. 물의 밀도는 1,000 kg/m³, 동점성계수는 $1.139 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다.

수치모형의 적용영역은 낙동강 본류의 상류경계는 반변천 합류점에서 약 0.37 km 상류(안동댐의 역조정지 땜 직하류)에 위치하며, 반변천쪽의 상류경계는 합류점에서 약 0.36 km 상류에 위치한다. 하류경계는 합류점에서 약 3.13 km 하류에 위치한다. 본 연구에서 사용한 지형자료는 현재의 지형과는 상당한 차이가 있지만, 1993년 이후에 새로 측량된 자료가 없는 실정이어서 과거의 지형자료를 그대로 사용하였다. 표 1은 2차원 수치모의의 매개변수인 열전도도를 보정하기 위해 현장에서 측정한 수온 분포를 나타낸 것으로서, 열전도도 보정에는 7월 12일자 측정결과를 사용하였다. 그럼 3은 수온 예측을 위해 이송확산방정식 계산에 사용되는 7월 12일의 유속장을 도시한 것이다. 본 연구에서는 이송확산모형의 열전도도를 변화시켜 가면서 열전도도에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 열전도도는 0.1, 0.01, 0.001 m²/s에 대하여 정상상태의 수온을 예측하였으며, KU-RLMS 모형의 적용결과는 그림 4와 같다. 그림에서 열전도도는 완전히 혼합되는 거리에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 수치모의 결과와 현장 실측 결과를 비교하면, 수온에 대한 열전도도는 대략 0.001 ~ 0.01 m²/s의 범위에 있다고 판단된다.

4. 결 론

하천의 생태학적 모습을 개선하기 위한 하천 복원 사업 수행에 있어서, 서식처 및 산란처 조건으로서의 수온 조사 및 모델링의 필요성이 점차 증가하고 있는 상황이다. 본 연구는 낙동강의 중상류에 위치한 반변천 합류부에 평면 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형을 적용하여 수온의 변화 특성을 규명할 목적으로 수행하였다. 열전도도 보정에는 7월 12일자 수온 측정 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 이송확산방정식의 열전도도를 변화시켜 가면서 열전도도에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 0.1, 0.01, 0.001 m²/s의 열전도도에 대하여 정상상태의 수온을 예측하였다. KU-RLMS 모형의 적용결과, 열전도도는 완전히 혼합되는 거리에 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 수치모의 결과와 현장 실측 결과를 비교하면, 수온에 대한 열전도도는 대략 0.001 ~ 0.02 m²/s의 범위에 있다고 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심 B01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이남주 (1996). 좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형의 개발 및 적용. 공학박사 학위논문, 서울대학교 토목공학과.
2. Anderson, E.R. 1954. Energy budget studies, water loss investigations. Lake Hefner studies. Prof. Paper No. 269. U.S. Geological Survey, Reston, Va.
3. Bonjour, C. 1998. Modellierung des Wärmeaustausches über die Wasseroberfläche eines Gebirgsbaches. Unpublished Thesis, EAWAG Dubendorf, Switzerland.
4. Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Phys. Rev., Ser. 2, Vol. 27, P. 779-787.
5. Brown, G. W. 1969. Predicting temperature of small streams. J. Water Resour. Res., Vol. 5, Nr. 1, P. 68-75.
6. Chapra, S. (1996). Surface Water Quality Modeling, McGraw-Hill.
7. Deas, L.M., and C.L. Lowney. 2000. Water temperature modeling review. California water modeling forum, Central Valley, California.

8. Poole, G., Dunham, J., Hicks, M., Keenan, D., Lockwood, J., Materna, E., McCullough, D., Mebane, C., Risley, J., Sauter, S., Spalding, S., and D. Sturdevant. 2001. Scientific Issues Relating to Temperature Criteria for Salmon, Trout, and Charr Native to the Pacific Northwest. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 910-R-01-007, Seattle, Washington.
9. Edinger, J.E., Duttweiler, D.W., and J.C. Geyer. 1968. The response of water temperatures to meteorological conditions. *J. Water Resour. Res.*, Vol. 4, Nr. 5, P. 1137-1143.
10. Evans, E.C., McGregor, G.R., & G.E. Petts. 1998. River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological Processes*, Vol. 12, P. 575-595.
11. Jorde, C. and Scherrer, I. (2005). "STREAM TEMPERATURE MODELING AND THERMAL RESTORATION POTENTIALS." XXXI IAHR Congress, 2131-2141.
12. Leendertse, J. J. (1967). Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation, U. S. Air Force Project, RAND Memorandum RM 5294, The Rand Cooperation.
13. Meier, W.K. 2002. Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbachen. Diss. ETH Zurich. Nr. 14526.
14. Sinokrot, H.G., and B.A. Stefan. 1993. Stream temperature dynamics: measurement and modeling. *J. Water Resour. Res.*, Vol. 29, Nr. 7, P. 2299-2312.

표 1. 매개변수 검보정을 위한 현장실측 결과(허성남 등, 2006)

측정장소	4/14	6/26	6/27	6/28	7/5	7/12	7/13	7/14
안동조정지 방류량(CMS)	26.2	53.9	53.6	52.3	47.7	48.3	54.8	52.3
임하조정지 방류량(CMS)	2.5	16.3	15.2	15.1	10.6	108.3	107.1	106.1
합류부 유량(CMS)	28.7	70.2	68.8	67.4	58.3	156.6	161.9	158.4
하류 수위(El. m)	78.94	79.49	79.49	79.49	79.49	79.5	79.5	79.5
법흥교 탁도(NTU)	5	1.4	1.9	1.2	4.1	11.4	38.1	13.2
포진교 탁도(NTU)	7	3.2	3.8	2.2	2.9	231	236	189
안동대교 1 탁도(NTU)	9.9	1.1	2.1	1.5	6.6	235	184	185
안동대교 2 탁도(NTU)	9.7	2.2	3.7	1.8	4.6	235	180	179
안동대교 3 탁도(NTU)	8.6	2.3	1.6	2.6	2.5	245	180	221
안동대교 4 탁도(NTU)	5	1.9	2.6	2.3	4.7	196	181	150
안동대교 5 탁도(NTU)	4.3	1.3	2.1	1.2	1.4	52.8	181	73.5
안동대교 6 탁도(NTU)	3.9	1.1	1.4	1.8	0.7	22.4	169	29

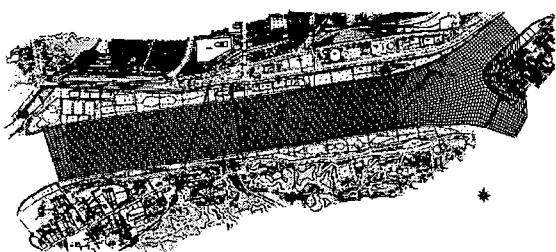


그림 1. 수치모의 격자

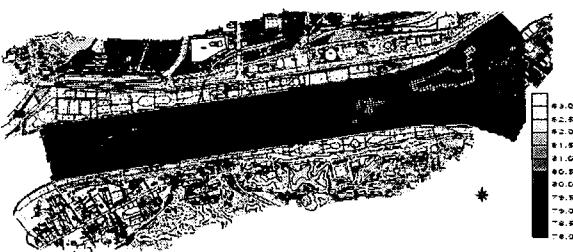


그림 2. 지형 입력자료 (단위: EL. m)

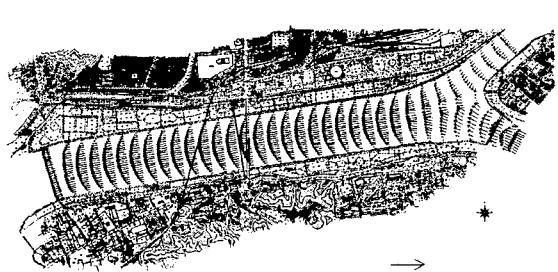
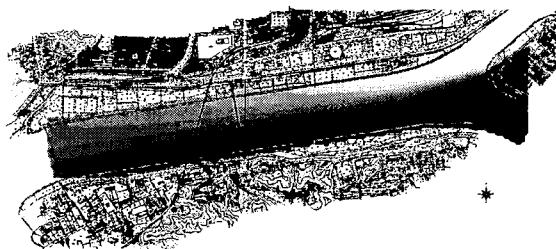
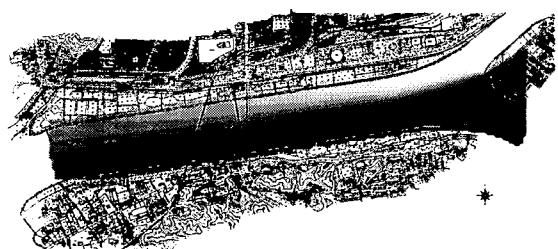


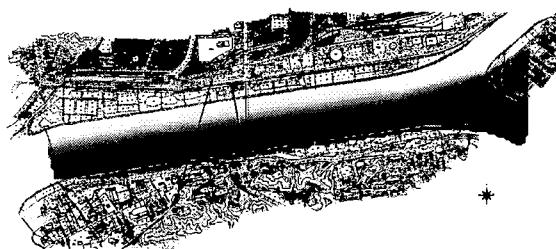
그림 3. 정상류 흐름 계산 결과



(a) $k = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$
그림 4. 수온 모의 결과



(b) $k = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$
그림 4. (계속)



(c) $k = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$
그림 4. (계속)