

소양호 극한 홍수 사상에 대한 탁수 수치 모의

Numerical Modeling of Turbidity Current during Extreme Flood Event in Soyang Reservoir

이아람*, 정세웅**, 류인구***, 정희영****

A Ram Lee, Se Woong Chung, In Gu Ryu, Hee Young Jeong

요 지

최근 들어 기후 변화로 인한 이상 강우 현상과 기록적인 집중 강우로 탁수 발생의 빈도와 강도가 증가하고, 탁수의 장기간 하류 방류로 인해 경제적인 피해가 발생할 뿐만 아니라 환경적으로도 중요한 문제로 대두되고 있다. 저수지로 유입된 탁수의 시공간적 분포 예측 결과의 신뢰도는 탁수 밀도류 해석의 정확도에 가장 큰 영향을 받으므로 유입 하천수의 밀도 거동에 대한 정확한 해석이 필요하다. 따라서 탁수의 거동해석은 수리 및 수질의 연동 모의(Coupled modeling)가 필수적이다. 본 연구의 목적은 수리 및 수질의 연동 해석이 가능한 2차원 횡 방향 평균 모형(CE-QUAL-W2)을 소양호에 구축하고, 기록적인 강우 사상을 보인 2006년 수문조건에서의 모형의 적용성과 한계점을 평가하는데 있다. 구축한 소양호 탁수 예측 모델을 2006년 탁수사상에 적용한 결과, 홍수 사상으로 이중 침투 유량이 발생한 후 저수지 내에서 중층 밀도류와 바닥밀도류의 두 가지 밀도류 형태가 혼재하여 진행되는 현상이 적절히 모의되었다. 하지만, 저수지내에서 측정된 탁수 수괴(plume)의 시공간적 수직분포(profiles)는 모의결과와 다소 편차를 보였으며, 특히 저수지 바닥 인근에서 모델은 실측값을 과대평가 하였다. 오차의 원인은 모델 입력 자료의 불확실성과 수치모델의 불확실성으로 판단된다. 따라서 향후 탁수 거동 모델링과정의 불확실성을 최소화하고 모의결과의 신뢰도를 개선하기 위해서 극한 탁수 사상에서 발생하는 수리학적 현상과 SS 입자 동력학에 대한 이론적 연구와 입력 자료의 정확한 산정을 위한 현장 실험이 필요하다.

핵심용어 : 탁수 예측 모델, 밀도류 해석, 소양호, CE-QUAL-W2, 이중 침투 유량

1. 서 론

수 환경 모니터링과 수질 평가에 사용되고 있는 탁도는 NTU(Nephelometric Turbidity Unit)단위로 측정되며 물속에 존재하는 입자들로 인한 빛의 투과능 감쇠 정도(light attenuation)를 나타내는 간접지표로서 많은 연구자들에 의해 물속에 존재하는 부유물질(SS ; Suspended Solid)의 농도를 대표하는 항목으로 사용되어왔다(Gippel, 1995; Lewis, 1996). 탁도는 부유입자의 크기분포, 비표면적, 전기적 특성, 빛의 산란 특성(Light scattering)에 따라 좌우 된다. 따라서 동일한 부유물질 농도에 대해서도 탁도 값은 다를 수 있으며, 결과적으로 수생태계에 미치는 영향도 다르다(Henley et al., 2000). 일반적으로 SS 농도는 연속계측이 어려워 탁도를 실시간 계측한 후 SS-탁도의 선형 또는 비선형 회귀식을 개발하여 변환한 SS 농도 자료를 수치모델의 경계조건 및 종속변수로 사용한다(Umeda et al., 2006; Sullivan et al., 2007).

본 연구의 목적은 국내 최대 규모의 저수지인 소양호에서 2005년과 2007년 수문사상을 대상으로 보정 및 검증된 2차원 횡 방향 평균 수리 수질 모형(CE-QUAL-W2)을 적용하여 기록적인 강우 사상을 보인 2006년

* 비회원 · 충북대학교 환경공학과 대학원 석사과정 · E-mail : 95115090@hanmail.net

** 정희원 · 충북대학교 환경공학과 교수 · E-mail : chung@chungbuk.ac.kr

*** 정희원 · 충북대학교 환경공학과 대학원 박사과정 · E-mail : ilovmi@live.co.kr

**** 비회원 · 충북대학교 환경공학과 대학원 석사과정 · E-mail : jhy@chungbuk.ac.kr

수문 조건에서 저수지 밀도류와 탁수거동 해석의 적용성과 한계성에 대하여 평가하는데 있다. 소양강댐 유역에서는 2006년 태풍 에위니아의 영향으로 홍수기 동안 큰 홍수와 산사태가 발생하여 댐 유역으로부터 다량의 토사가 저수지로 유입되었다. 유입 SS 농도는 최고 2,500 mg/L까지 상승하였으며, 이로 인해 유입수의 밀도는 수온뿐만 아니라 SS 농도로 인해 크게 증가되어 댐 내에서 중층밀도류와 심층밀도류의 두 가지 밀도류 형태가 혼재하는 특이한 현상을 보였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상 지역

북한강 지류인 소양강에 위치한 소양강댐은 한강 연안과 서울을 비롯한 수도권 지역에 생·공 용수 및 농업용수 공급과 홍수조절, 전력 생산을 목적으로 건설되었다. 그 규모는 최대 수심이 120 m, 수리학적 체류시간은 0.75년, 만수면적은 70.0 km², 총 저수용량은 2,900 백만m³을 갖는 국내 최대 규모의 인공호이다.

소양호의 수질 측정지점과 기타 주요 지점의 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 수질 측정망 지점은 소양강댐1 (SY-1), 소양강댐2 (SY-2), 소양강댐3 (SY-3), 소양강댐4 (SY-4), 소양강댐5 (SY-5)이고, 수리 수질 모형의 경계 조건을 입력하기위해 사구미교(Sagumi Bridge)와 자동 기상 관측소의 위치를 나타내었다.

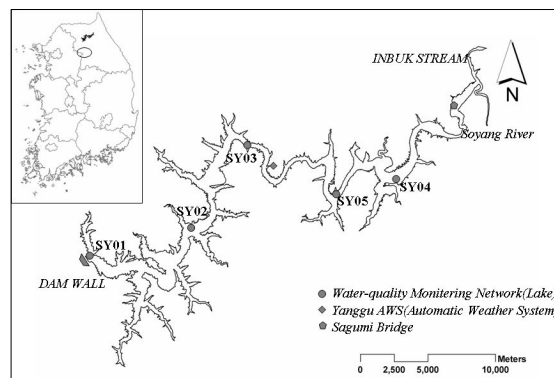


Fig 1. Layout of Soyang reservoir and locations of monitoring stations

2.2 입력자료 구성

소양호의 유한 차분 격자는 소양강댐 저수지퇴사조사측량용역 보고서(한국수자원공사, 1994)에서 제공하는 실측자료를 사용하였으며, 흐름방향으로 500 m간격으로 138개의 Segment와 수직 방향으로 격자 간격 1 m로 최대 134개의 Layer로 구성하였다(Fig. 2). 지형 자료의 신뢰성은 계산된 저수지 수위별 저수용량과 수위 저수용량 관계식을 비교하였고, 총 저수용량에 약 2%의 오차를 보였다.

모델의 초기조건으로 수위는 소양강댐 운영 자료를 참고 하였고, 수온, SS 농도 등의 수질 측정 항목은 한국 수자원공사에서 제공한 저수지 주요 지점별 실측 자료를 사용하였다. 모델의 경계조건으로 저수지의 유입 및 유출 유량은 모의 기간의 소양강댐 운영 자료를 사용하였으며, 탁수 거동 예측 모델링의 시간 규모를 고려하여 저수기와 갈수기에는 소양강댐 운영 자료 중 일 평균 자료를 사용 하였고, 강우로 인한 유출이 발생할 경우 시간 평균 자료를 사용하여 경계 조건 자료를 구축하였다. 유입수 수온은 사구미교의 실측 수온을 바탕으로 미계측 된 구간에 대해서 다중회귀분석을 통해 산정하여 사용하였다. 유입수 SS 농도는 유입 유량과 측정된 SS 농도를 회귀 분석하여 2000 CMS를 기준으로 유입 유량이 높은 경우 SS 농도의 비선형 증가를 고려하여 회귀식을 산정하여 사용하였다.

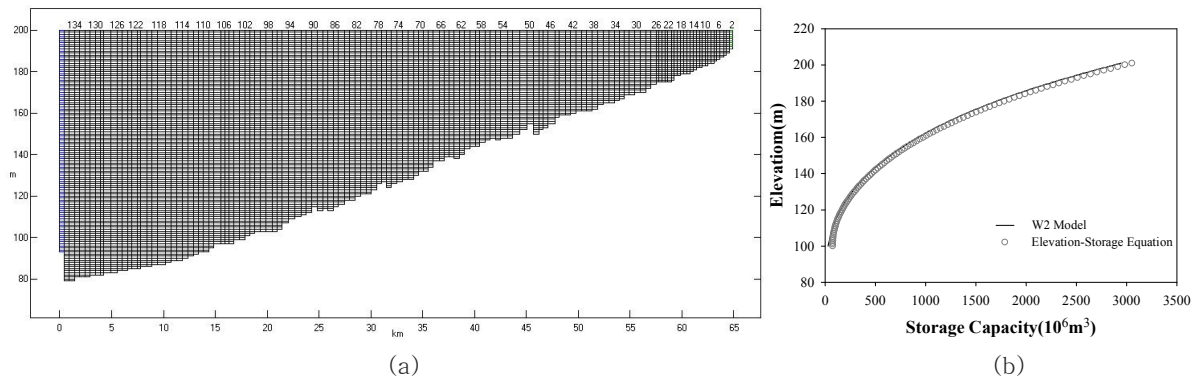


Fig 2. Grid system for Soyang reservoir (a) and comparison of storage capacity relationships (b)

2.3 탁수 모델링 방법

기존의 CE-QUAL-W2(이하 W2) 모형은 SS의 침강 속도를 고정된 상수 값으로 가정하고 저수지의 수심별 수온 변화를 고려하지 않는다. 본 연구에서는 정세웅 등(2008)의 연구를 기반으로 침강 속도 산정 코드를 수정하여 입경 분포별 입자의 침강속도가 시공간적으로 계산되는 수정된 모형을 적용하였다. 모델에 적용되는 부유입자의 2차원 횡 방향 평균 이송-확산-침강 모델의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial BSS_i}{\partial t} + \frac{\partial UBSS_i}{\partial x} + \frac{\partial WBSS_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_x \frac{\partial SS_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(BE_z \frac{\partial SS_i}{\partial z} \right) - v_{s_i}(x,z) \frac{\partial SS_i}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, SS_i = SS 그룹 i의 농도, g/m^3 , E_x = SS의 종 방향 확산계수, m^2/sec , E_z = SS의 수직방향 확산계수, m^2/sec , U, W = 종 방향 및 수직방향 유속, m^2/sec .

실제 저수지에서 탁도를 유발하는 부유입자의 크기는 $0.1 \mu m$ 에서 수백 μm 까지 연속된 스펙트럼으로 분포하기 때문에 입경분포를 고려하여 SS를 몇 개의 대표입경을 갖는 그룹으로 구분하여 입력 자료를 구성하였다. SS를 구성하는 입경 분포가 공간적으로 일정하지 않는 점을 고려하여 저수지 내부의 주요 측정 지점에 대해 실험결과를 근거로 독립적인 SS-탁도 상관 관계식을 개발하였다. 이러한 과정을 거쳐 생성된 그룹별 유입 SS농도(SS_i)는 수치 모형의 경계조건자료 및 지배방정식의 종속변수로 사용되었다. 수치 모의 결과는 각 지점별 SS-탁도 상관 관계식을 이용하여 다시 탁도로 변환하여 현장에서 실측한 주요 지점별 수심별 탁도 자료와 방류수 탁도 자료와 비교함으로써 모형의 보정과 검증을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

극한 홍수 사상 동안 저수지 내부로 유입한 탁수의 시공간적 분포에 대한 모의 결과를 Fig. 3에 정지영상(Snapshot)으로 나타냈으며 탁도의 모의값과 실측값의 수직분포를 Fig. 4 ~ 5에 비교하여 제시하였다. Fig. 4 ~ 5에서 선은 모의값을 심볼은 실측값을 나타낸다.

Day 199에 측정된 실측값을 보면 수직 탁도 분포에서 EL. 120 m이하의 심층에서 최고 1,229.2 NTU가 측정되었고, EL. 120 m 이상 상부에서는 EL. 150 m에서 110.0 NTU가 측정되었다. 여수로 방류와 중층 취수에서 중층 취수로 전환한 후에도 탁수 중심축의 탁도는 120 NTU로 지속 되고, 심층의 탁도는 100 NTU를 유지하였다(Fig. 4). 실측 자료를 분석한 결과 2006년 홍수 사상 이후 탁수는 중층 이하에서 지속적으로 유지되고 있었다. Day 195에 앞서 Day 193일에 일평균 2,000 CMS이상 유입 사상이 발생하였고, 이는 중층 밀도류를 형성하여 댐 앞 지점까지 진행하였다. 측정된 탁도 자료를 바탕으로 Day 195에 발생한 홍수 사상으로

고농도의 탁수가 심층 밀도류를 형성하여 댐 앞까지 진행되었다. 탁수 모형에서는 Day 193일 유입된 탁수 사상에 대한 중층 밀도류 형성은 잘 재현하였지만, 이후 발생한 사상에 대한 심층 밀도류에 대한 모의는 실측 자료와 다르게 모의 되었다. 중층 밀도류 보다는 심층 밀도류가 우세하게 모의 되어야 하지만, 탁수 모형에서는 심층 밀도류와 중층 밀도류가 동시에 댐 앞 지점 까지 도달한다(Fig. 5).

2006년 1차 강우 사상은 Double Peak를 나타내었고, 초기 침투 유량 유입 시 중층 밀도류는 잘 모의 되었지만 2차 침투 유량 유입 시 심층 밀도류와 중층 밀도류가 동시에 댐 앞 지점 까지 도달하게 되었다. 이는 SS-유량 관계식으로 추정된 SS 농도를 유입 SS 농도로 적용할 때 발생한 불확실성과 수온 추정식 등의 불확실성이 오차의 원인으로 판단된다. SS-유량 관계식이 극한 홍수 사상에서 유입량, 탁수의 유입시점, SS 입경 분포 분율 등과 같은 불확실성 요소와 더불어 심층 밀도류 해석을 어렵게 하였다.

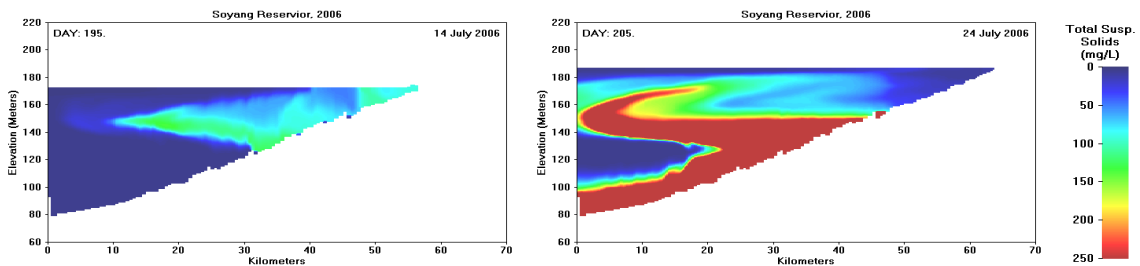


Fig. 3. Snapshot of simulation for turbidity plume on 2006

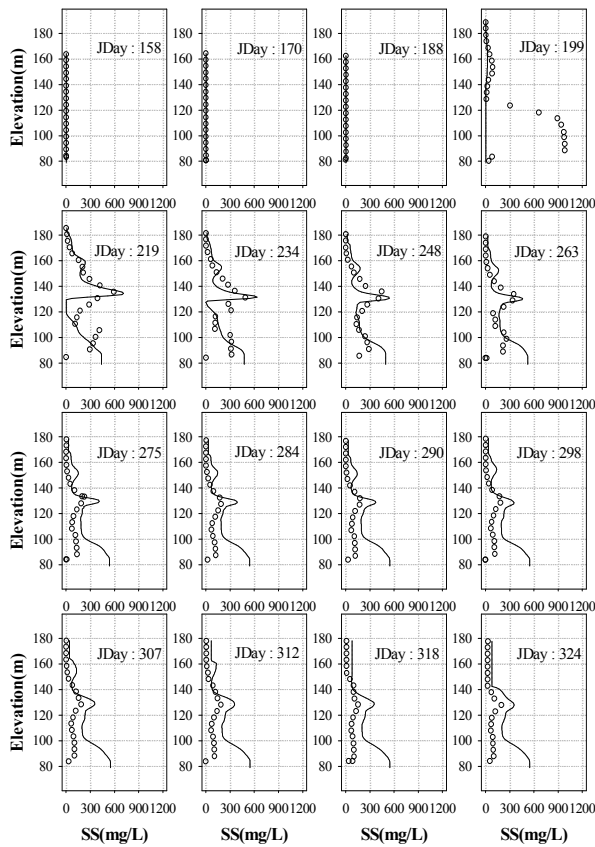


Fig. 4. SS concentration profiles at the site SY-1 on 2006

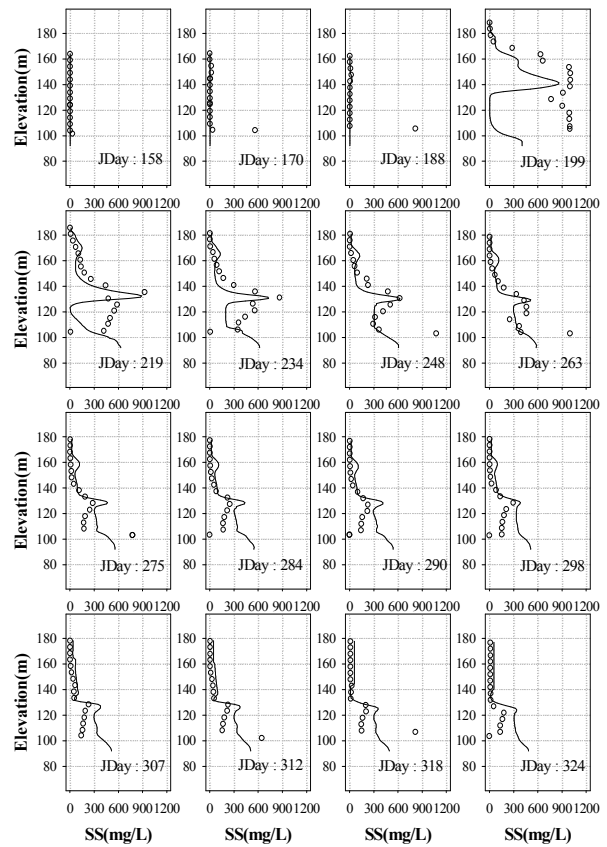


Fig. 5. SS concentration profiles at the site SY-2 on 2006

4. 결론

모의 결과 2006년 극한 홍수 사상으로 이중 침투 유량이 발생하여 저수지 내에서 중층밀도류와 심층밀도류의 두 가지 밀도류 형태가 혼재하여 진행되었다. 소양강댐의 심층수 수온은 연중 약 5 °C 내외를 유지하지만, 극한홍수 유입 시 SS 농도에 의한 하천수의 밀도 증가로 인해 댐 앞까지 바닥 밀도류가 발달하면서 최심층의 수온이 최대 11.05 °C까지 관측되었다. 이로 인해 탁수모형의 오차가 크게 증가하였으며, 오차의 원인은 유입 수 유량, 수온, SS 농도 산정의 불확실성과 이러한 현상에 대한 모델의 이론적 한계 때문으로 유추된다. 극한 홍수 사상의 경우 SS-유량 관계식, SS 입경 분포와 분율 등에 대해 실험과 연구가 더 필요한 부분이며, 바닥 밀도류의 진행과정에서 발생할 수 있는 Fingering 효과와 주변 수체와의 난류 혼합 및 저니층의 재부상 효과가 W2 모델에 정확히 반영하는 지에 대한 이론적 연구와 현장 실험이 향후 필요하고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 정세웅, 이홍수, 정용락(2008). 입자크기 분포를 고려한 부력침강 저수지 밀도류의 탁도 모델링, 한국 물 환경 학회지, 제24권 3호, pp.365-377.
2. Lewis, J.(1996). Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation, *Water Resources Research*, 32(7), pp. 2299-2310.
3. Henley, W. F., M. A. Patterson, R. J. Neves, and A. Dennis Lemly.(2000). Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers. *Reviews in Fisheries Science*, 8(2), pp. 125-139.
4. Umeda, M., K. Yokoyama, and T. Ishikawa.(2006). Observation and simulation of floodwater intrusion and sedimentation in the Shichikashuku Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(9), pp. 881-891.
5. Sullivan A. B., Rounds, S. A., Sobieszczyk, S., and Bragg, H. M.(2007). Modeling hydrodynamics, water temperature, and suspended sediment in Detroit Lake, Oregon. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5008, VA, USA.
6. Gippel, C. J.(1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrol. Process.*, 9, pp. 83-97.
7. Gelda, R.K. and Effler, S.W.(2007). Simulations of Operations and Water Quality Performance of Reservoir Multilevel Intake Configurations. *J. of Water Resources Planning and Management*, 133(1), pp. 78 ~ 86.
8. Gelda R.K. and Effler S.W.(2007). Modeling turbidity in a water supply reservoir: Advancements and issues. *J. Environ. Eng.*, 133(2), 139-148.
9. 한국수자원공사(2000), 댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발.
10. 한국수자원공사(2004), 대청댐 일원 수문기초조사 보고서.
11. 한국수자원공사(2007), 다목적댐(소양강댐 등 4개댐) 탁수저감 방안 수립 용역 보고서(소양강댐).
12. 한국환경정책·평가연구원(2005), 유역관리를 통한 다목적댐 저수지의 효율적인 탁수관리방안.
13. 한국수자원공사(1994), 소양강댐 퇴사량 측정 보고서.