

# 우리나라 담수생태계의 보전과 수자원 관리 효율성 극대화의 필요성



정 광 석 ▶▶▶

부산대학교 자연과학대학 생명과학과 /  
환경기술·산업개발연구소  
박사후 연구원  
kknd.ecoinfo@gmail.com

## 서론

담수생태계 중 하천이 다른 시스템과 비교하여 갖는 가장 큰 특징은 바로 ‘흐름’으로, 하천 생물분류군의 분포를 결정하는 1차적인 요소이다 (Descy 1987, O’Farrell 1993, Ha et al. 1998, Ha et al. 2002, Shcherbak and Boiidenko 2005). 조절강 생태계 (regulated river ecosystems)란, 하천 수로에 설치된 보 혹은 댐 등에 의해 흐름이 인위적으로 조절되는 하천생태계를 의미한다. 전세계적으로 수자원에 대한 수요가 증가하면서 이러한 인공구조물이 유수 시스템에 많이 설치되었으며 (Tharme 2003), 흐름의 조절은 하천생태계의 수질, 생물분류군의 생태학적 특성 및 환경과의 관계를 변화시키는데 결정적인 역할을 한다 (Stober and Nakatani 1992, Jeong et al. 2003b).

유량의 조절은 수자원 관리의 효율성 증진에서 그 필요성을 찾을 수 있다. Tharme (2003)은 전세계의 수많은 하천 중 아시아권의 하천에서 흐름 조절 현상이 가장 많이 보이고 있다고 하였으며, 몬순 기후와 같이 특정 계절에의 강우량 편중성이 이러한 현상을

유발하는 것으로 판단된다 (Jeong et al. 2007). 하천 유역 내에 발생하는 강우량의 시간적 불균등성 (동아시아권의 여름 집중강우와 겨울 무강우 현상)은 강우가 적게 발생하는 시기에 하천 유량의 감소를 야기하게 되며, 댐 등에 의한 흐름 조절은 이러한 문제점을 극복할 수 있는 방안이 될 수 있다.

하지만, 흐름 조절을 통한 수자원 관리의 효율성 증대에는 반대 급부가 따르며, 전술한 바와 같이 하천생태계의 구조와 기능적인 측면이 송두리째 바뀌는 현상이 발생할 수 있다. 가장 단적인 예는 댐 혹은 보에 의한 하천 상하류 단절성이다. Yoon (2011)은 어류의 이동성에 대한 포괄적인 연구를 통해, 하천에 설치된 인공구조물이 어류의 이동성에 많은 영향을 미친다고 보고하였으며, 특히 산란처와 평상시의 서식처가 다른 경우 이동성의 장애를 극복할 수 있는 효과적인 방안이 제시되어야 함을 강조하였다. 또 다른 문제점은 낙동강 중하류에 대한 일련의 modelling 연구로부터 제시되고 있는 흐름 조절과 수질 관련 문제이다 (Jeong et al. 2001, Jeong et al. 2003a, Jeong et al. 2003b, Joo and Jeong 2005, Jeong et al. 2006, Kim et al. 2006, Jeong et al. 2007, Kim et al. 2007, Jeong et al. 2010b, Kim et al. 2010). 이들 연구의 초점은 흐름 조절로 인한 유량의 정체는 자연적으로 흐르는 하천에 비해 체류시간의 증가를 야기하게 되고, 결과적으로 하천에서는 드문 빈도로 관측되는 남조류 (주로 *Microcystis aeruginosa*)의 대번성을 유발한다는 것이다. 특히 동아시아권의 담수계에서만 관측되

고 있는 겨울 구조류 (*Stephanodiscus hantzschii*)의 대변성은 매우 독특한 현상으로 인식되고 있다 (Kim et al. 2007).

조절강이 자연환경을 인간사회에 맞게 수정한 사례라고 본다면, 인간 사회는 수정한 자연환경을 더욱 효율적으로 사용할 수 있도록 하여야 할 것이다. 수자원 관리의 궁극적인 목표를 수량, 수질, 수생태계 관리로 요약한다면, 수자원의 관리 효율성을 극대화시키면서 조절강 내에 구성되어 있는 생태계의 구조와 기능을 잘 유지할 수 있는 전략의 마련이 필요하는 점에 귀결되며, 이러한 부분을 해결하기 위해 많은 노력들이 이루어지고 있다. 현재의 상태에서 진일보하기 위해서는 몇 가지 발전적인 전략 제시가 필요하다.

### 수자원-수생태계 효율적 관리 전략 제안

우리나라 수자원 관리의 주요 목표가 홍수통제이므로, 첫번째 요소를 1차원적 홍수통제로부터 2차원적 개념으로 전환하는 것으로 들 수 있다. 수자원의 관리는 유역 내 (2차원)에서 발생하는 강우량을 대상으로 하지만, 실제 홍수조절의 경우 댐을 통한 1차원적 (선형적인 형태)인 관리에 초점이 맞추어져 있다. 그리고 수자원 관리의 효율성 극대화 차원에서 좌우로의 관계를 단순화시키기 위해 높은 제방으로 범람을 억제시킨다. 이러한 현상은 하천생태계 고유의 특징인 측면 상호작용 (lateral interaction)을 저해한다. 많은 연구문헌에서 측면 상호작용을 보장하고 유역 내 분포하는 배후습지를 활용함으로써 홍수제어의 효율성을 높일 수 있으며, 또한 배후습지가 갖는 생태계 유지 기능이 작음하므로 보다 효과적인 전략이 될 수 있음이 보고되었다 (Galat et al. 1998, Nienhuis and Leuven 2001, Tockner and Stanford 2002, Dutta and Herath 2004). 최근 일련의 연구에서 대형강 유역에 인공적으로 습지를 복원할 경우 (강변저류지, washland 혹은 detention basin) 홍수조절 및 생물다양성 보존 및 증진이 가능함이 보고되고 있

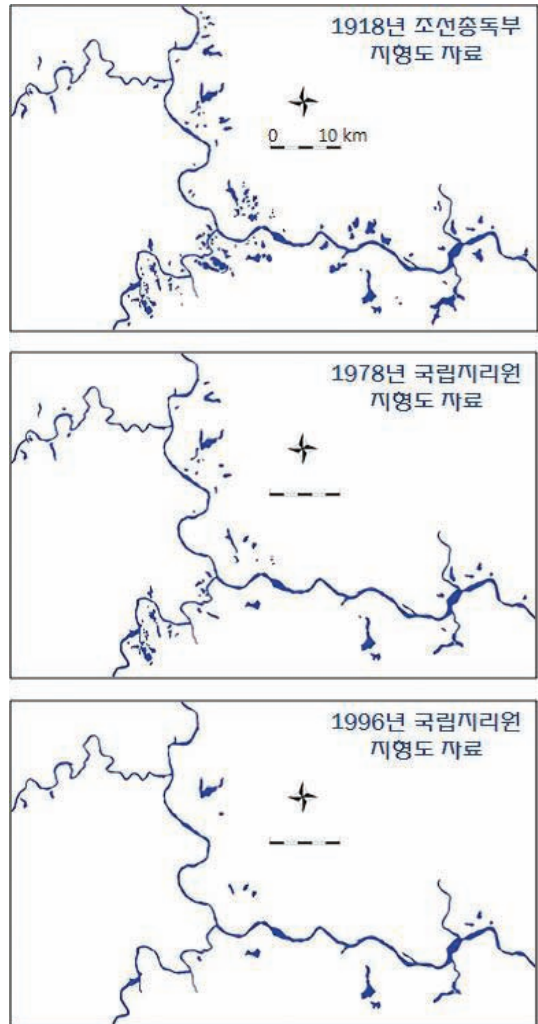


그림 1. 배후습지 소실의 예로서의 낙동강 하류 유역의 습지 분포현황. 손과 전 (2003)의 자료를 기반으로 주 등 (2011, 미발표자료) 포함. 습지가 소실된 곳은 현재 상태의 토지이용을 고려하여 복원가능 대상지점으로 활용 가능함.

어 (Joo et al. 2007, Joo et al. 2008b), 유역 전반을 활용한 수자원 관리 전략의 제고가 필요하다 할 수 있다 (그림 1).

두번째는 녹색성장에 부합하며 수생태계의 건강성을 증진할 수 있는 방향의 전략 수립이다. 생태계의 건강성 (ecosystem health)이란 생태계의 구조와 기능이 얼마나 건전한지를 의미하며, 교란으로부터 자유로울수록 건강성이 높다고 표현한다. 이는 생태

계의 온전성 (integrity)으로도 표현된다. 과거 우리나라의 정책적 측면에 따라 도시 발달 및 농경지 확장이 매우 급속히 이루어졌으며, 수생태계의 건강성에 대한 고려보다는 생산성 증대를 우선 당면과제로 삼고 있었다. 따라서 하천생태계와 인간사회의 조화로운 발전을 기할 여유가 없었으며, 하천의 부영양화 현상이 가속화되기 시작하면서 이를 해결하기 위한 별도의 노력이 재투자되고 있다. 정수처리 노력은 실질적인 수질 개선의 효과를 거두기는 하지만, 수생태계의 건강성보다는 인간사회의 건강성을 우선시하며, 이는 우리나라가 지향하는 녹색성장에 일부 배치되는 면이 있다. 따라서 인간사회와 수생태계 모두의

건강성을 회복 혹은 유지할 수 있는 전략의 수립이 필요하다. 조절 방류에 의한 체류시간 증가가 부영양화를 야기하여 건강성을 저해한다면, 이를 역이용하는 것이 좋은 대안이 될 수 있다 (Maheshwari et al. 1995, Sheldon et al. 2000, Webster et al. 2000, Maier et al. 2001). 낙동강의 경우도 조절방류를 통한 효과적인 수질 개선이 가능성이 보고되었다 (Jeong et al. 2007, Kim et al. 2007, Joo et al. 2008a, Jeong et al. 2010b; 그림 2). 물론 다음해의 강우량이 어떻게 분포할 것인지, 댐 내에 존재하는 수량을 어떻게 분산시킬지, 분산된 수량이 어느 정도의 기간동안 영향을 줄 수 있을 것인지, 수생태계 건강성 회복에 어느정도 기여할 수 있을지에 대한 면밀한 분석과 전략의 체계성 수립이 우선되어 하지만, 앞으로 충분히 가능성 있는 전략으로 판단된다.

세번째는 전술한 두 가지 전략의 기반이 될 수 있는 종합적 유역관리 전략의 발전이다. 유역관리를 수량과 수질에 초점을 맞추어 현재까지 전개해 왔다면, 앞으로는 수생태계를 수량과 수질과 동등한 수준의 요소로 인식하고 전략의 발전을 꾀하여야 할 것이다. 최근 4대강 유역에 분포하는 하천의 어느 곳이 얼마나, 어떻게 교란되고 있는지에 대한 광역적인 연구결

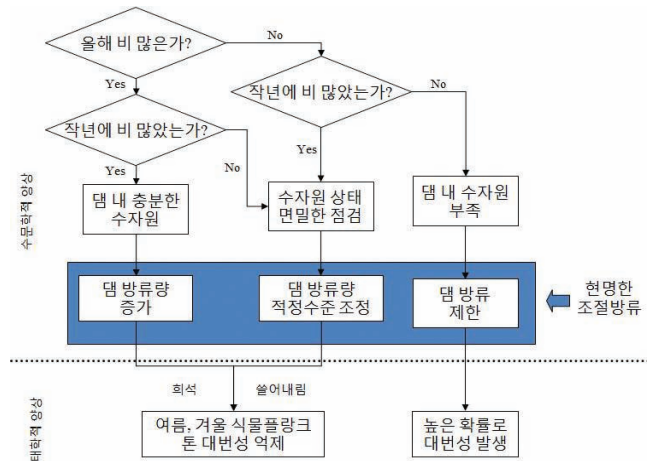


그림 2. 배후습지 조절방류를 통한 하천 수질 및 수생태계 관리 가능성 (Jeong et al. 2007 인용). 2-3년간의 강우량과 댐 저수량을 기반으로 당해 및 다음해까지 수자원을 사용하여 수생태계 건강성을 관리할 수 있음.

과들이 속속 제시되고 있으며, 이들 연구결과는 과거와는 달리 수생태계를 근본적으로 다루려는 의지를 보이고 있다 (예: Jeong et al. 2008, Jeong et al. 2010a; 그림 2). 각계 연구분야에서 제시되고 있는 다양한 정보는 IT와 GIS 기반 확충이 잘 진행된 상태에서 더욱 빛이 날 수 있다. 이러한 정보들의 유기적인 연동은 보다 효과적인 조절강 생태계의 유역 관리 전략으로 이어질 수 있으며, 학제간 융복합적 연구를 유도하여 수자원 관리의 효율성을 극대화할 수 있다고 여겨진다.

### 결론

기후변화가 이 시대의 주요 이슈로 떠오르는 와중에 조절강에 대한 우려의 목소리가 높아지고 있다. 단적인 예로 조절강의 배후습지는 자연적으로 흐르는 하천의 배후습지보다 기후변화 영향을 더 받을 수 있다고 보고되었으며 (Palmer et al. 2008), 기후변화가 초래할 것으로 예상되는 강우량의 시계열성 변화 (Jeong et al. 2011)는 전술한 바와 같이 수자원 관리상 발전적인 전략의 모색과 적용의 시급성을 일깨

운다. 기후변화가 가져오는 영향에 대해서 적응적 (adaptive)인 전략 수립의 필요성이 이미 모든 분야에서 인식되고 있으므로, 수량, 수질, 수생태계에 대한 포괄적인 수자원 관리전략으로의 발전을 통해 기

후변화에 대한 적응, 인간사회와 자연환경의 공존, 그리고 효과적인 녹색성장을 이룰 수 있는 초석을 마련해야 하겠다. 🌊

## 참고문헌

1. Descy, J.-P. 1987. Phytoplankton composition and dynamics in the River Meuse (Belgium). *Archiv für Hydrobiologie/supplement* 78:225-245.
2. Dutta, D. and S. Herath. 2004. Trend of floods in asia and a proposal for flood risk management with integrated river basin approach. Pages 128-137 in *Proceedings of the Second International Conference of Asia-Pacific Hydrology and Water Resources Association*, Singapore.
3. Galat, D. L., L. H. Fredrickson, D. D. Humburg, K. J. Bataille, J. R. Bodie, J. Dohrenwend, G. T. Gelwicks, J. E. Havel, D. L. Helmers, and J. B. Hooker. 1998. Flooding to restore connectivity of regulated, large-river wetlands. *BioScience* 48:721-733.
4. Ha, K., M.-H. Jang, and G.-J. Joo. 2002. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities along a regulated river system, the Nakdong River, Korea. *Hydrobiologia* 470:235-245.
5. Ha, K., H.-W. Kim, and G.-J. Joo. 1998. The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea. *Hydrobiologia* 369/370:217-227.
6. Jeong, K.-S., D.-G. Hong, M.-S. Byeon, J.-C. Jeong, H.-G. Kim, D.-K. Kim, and G.-J. Joo. 2010a. Stream modification patterns in a river basin: Field survey and self-organizing map (SOM) application. *Ecological Informatics* 5:293-303.
7. Jeong, K.-S., G.-J. Joo, D.-K. Kim, M. Lineman, S.-H. Kim, I. Jang, S.-J. Hwang, J.-H. Kim, J.-K. Lee, and M.-S. Byeon. 2008. Development of habitat-riparian quality indexing system as a tool of stream health assessment: case study in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* 41:499-511.
8. Jeong, K.-S., G.-J. Joo, H.-W. Kim, K. Ha, and F. Recknagel. 2001. Prediction and elucidation of phytoplankton dynamics in the Nakdong River (Korea) by means of a recurrent artificial neural network. *Ecological Modelling* 146:115-129.
9. Jeong, K.-S., D.-K. Kim, and G.-J. Joo. 2007. Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Microcystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong River (South Korea). *Water Research* 41:1269-1279.
10. Jeong, K.-S., D.-K. Kim, H.-S. Shin, H.-W. Kim, H. Cao, M.-H. Jang, and G.-J. Joo. 2010b. Flow regulation for water quality (chlorophyll a) improvement. *International Journal of Environmental Research* 4:713-724.

11. Jeong, K.-S., D.-K. Kim, H.-S. Shin, J.-D. Yoon, H.-W. Kim, and G.-J. Joo. 2011. Impact of summer rainfall on the seasonal water quality variation (chlorophyll a) in the regulated Nakdong River. *KSCE Journal of Civil Engineering* in press.
12. Jeong, K.-S., D.-K. Kim, P. Whigham, and G.-J. Joo. 2003a. Modelling *Microcystis aeruginosa* bloom dynamics in the Nakdong River by means of evolutionary computation and statistical approach. *Ecological Modelling* 161:67-78.
13. Jeong, K.-S., F. Recknagel, and G.-J. Joo. 2003b. Prediction and elucidation of population dynamics of a blue-green Alga (*Microcystis aeruginosa*) and diatom (*Stephanodiscus hantzschii*) in the Nakdong River-Reservoir System (South Korea) by a recurrent artificial neural network. Pages 196-213 in F. Recknagel, editor. *Ecological Informatics*. Springer, Berlin.
14. Jeong, K.-S., F. Recknagel, and G.-J. Joo. 2006. Prediction and Elucidation of Population Dynamics of a Blue-green Algae (*Microcystis aeruginosa*) and Diatom (*Stephanodiscus hantzschii*) in the Nakdong River-Reservoir System (South Korea) by Artificial Neural Networks. Pages 255-273 in F. Recknagel, editor. *Ecological Informatics: Scope, Techniques and Applications*. Springer, Berlin.
15. Joo, G.-J. and K.-S. Jeong. 2005. Modelling community changes of cyanobacteria in a flow regulated river (the lower Nakdong River, S. Korea) by means of a Self-Organizing Map (SOM). Pages 273-287 in S. Lek, M. Scardi, P. F. M. Verdonshot, J.-P. Descy, and Y.-S. Park, editors. *Modelling Community Structure in Freshwater Ecosystems*. Springer, Berlin.
16. Joo, G.-J., D.-K. Kim, J.-D. Yoon, and K.-S. Jeong. 2008a. Climate Changes and Freshwater Ecosystems in South Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 30:1-6.
17. Joo, G.-J., M. Lineman, D.-K. Kim, K.-S. Jeong, Y. Do, and C.-K. Shin. 2008b. Riverine Wetlands of the Lower Nakdong River in Korea: Biodiversity and Conservation. NIER, Nakdong River Environment Research Center, Busan.
18. Joo, G.-J., H.-S. Shin, S.-D. Kim, J.-W. Kim, H.-W. Kim, and S.-Y. Yoon. 2007. Assessment for Storage Capacity of Riverine Wetlands in the Nakdong River During Flood Event. 07-09, Nakdong River Water Environment Research Center, Goryeong.
19. Kim, D.-K., K.-S. Jeong, R. I. B. McKay, T.-S. Chon, H.-W. Kim, and G.-J. Joo. 2010. Model development in freshwater ecology with a case study using evolutionary computation. *Journal of Ecology and Field Biology* 33:275-288.
20. Kim, D.-K., K.-S. Jeong, P. A. Whigham, and G.-J. Joo. 2007. Winter diatom blooms in a regulated river in South Korea: explanations based on evolutionary computation. *Freshwater Biology* 52:2021-2041.
21. Kim, D.-K., G.-J. Joo, K.-S. Jeong, K.-H. Chang, and H.-W. Kim. 2006. Patterning zooplankton dynamics in the regulated Nakdong River by means of the Self-Organizing Map. *Korean Journal of Limnology* 39:52-61.
22. Maheshwari, B. L., K. F. Walker, and T. A. McMahon. 1995. Effects of regulation on the

- flow regime of the River Murray, Australia. *Regulated Rivers: Research & Management* 10:15–38.
23. Maier, H. R., M. D. Burch, and M. Bormans. 2001. Flow management strategies to control blooms of the cyanobacterium, *Anabaena circinalis*, in the River Murray at Morgan, South Australia. *Regulated Rivers: Research & Management* 17:637–650.
  24. Nienhuis, P. H. and R. S. E. W. Leuven. 2001. River restoration and flood protection: controversy or synergism? *Hydrobiologia* 444:85–99.
  25. O'Farrell, I. 1993. Phytoplankton ecology and limnology of the Salado River (Buenos Aires, Argentina). *Hydrobiologia* 271:169–178.
  26. Palmer, M. A., C. A. Reidy Liermann, C. Nilsson, M. Flörke, J. Alcamo, P. S. Lake, and N. Bond. 2008. Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:81–89.
  27. Shcherbak, V. I. and O. V. Boidmenko. 2005. Spatial and Temporal Dynamics of Phytoplankton in the "River-Reservoir-River" System. *Hydrobiological Journal* 41:36–41.
  28. Sheldon, F., M. C. Thoms, O. Berry, and J. Puckridge. 2000. Using disaster to prevent catastrophe: referencing the impacts of flow changes in large dryland rivers. *Regulated Rivers: Research & Management* 16:403–420.
  29. Stober, Q. J. and R. E. Nakatani. 1992. Water quality and biota of the Columbia River system. Pages 51–83 in C. D. Becker and D. A. Neitzel, editors. *Water Quality in North American River Systems*. Battelle Press, Ohio.
  30. Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19:397–441.
  31. Tockner, K. and J. A. Stanford. 2002. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation* 29:308–330.
  32. Webster, I. T., B. S. Sherman, M. Bormans, and G. Jones. 2000. Management strategies for cyanobacterial blooms in an impounded lowland river. *Regulated Rivers: Research & Management* 16:513–525.
  33. Yoon, J.-D. 2011. Characteristics of Korean Freshwater Fish Distribution and Investigation of Fish Migration Using Telemetry Methods. Pusan National University, Busan.