

부영양 하천의 용존산소 실태와 어류에 미치는 영향



이 새로미 |
한국건설기술연구원 연구원
saeromi@kict.re.kr



김 범 철 |
강원대학교 교수
bkim@kangwon.ac.kr



주 진 철 |
한국건설기술연구원 수석연구원
jcjoo@kict.re.kr



안 호 상 |
한국건설기술연구원 수석연구원
hahn@kict.re.kr



송 호 면 |
한국건설기술연구원 선임연구위원
hmsong@kict.re.kr



안 창 혁 |
한국건설기술연구원 연구원
chahn@kict.re.kr

1. 부영양 하천의 산소변동과 그 영향

하천 유역의 개발 및 인위적인 오염원에 의한 하천의 부영양화 현상이 빈번해지고 있다(그림 1). 빈

영양 하천의 산소 포화도는 90~110%의 수준으로 나타나는 반면, 부영양한 하천에서는 낮에는 200%, 밤에는 30%까지 감소하며, 광범위한 산소 변동이 나타난다. 국내의 도시 하천인 안양천에서

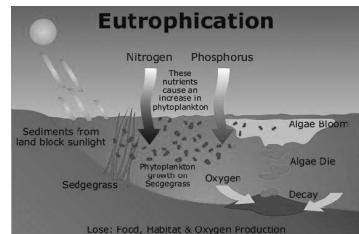
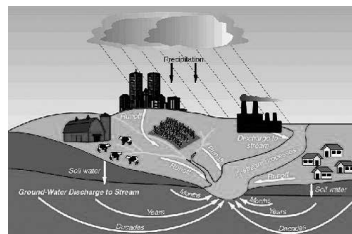


그림 1. 하천의 부영양화

도 주간에는 DO가 200% 포화되고 야간에는 20% 이하로 감소하는 일주변동이 나타났으며, 도시 하천의 광범위한 산소변동은 건기의 조류번성과 유기물의 활발한 분해, 강우시 비점오염원의 다량 유입이 원인 될 수 있다(김은희, 2007)(그림 1).

일반적으로 DO에 의한 어류폐사는 정체수역에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히, 도시 하천과 농촌 하천과 같이 인위적인 영향을 받기 쉬운 하천들은 부영양화 되기 쉽고, 이로 인해 DO의 변동이 급변하는 양상을 보인다. Graczyk and Sonzogni (1991)는 농업지역에 있는 4개의 하천(미국의 위스콘신)의 DO가 높은 농도를 보일때, DO의 급격한 감소현상이 있음을 보고한바 있다. 그 원인으로는 농업지역의 DO가 낮은 물이 하천으로 유입되었거나, 유기물의 유입, 수온의 증가로 인한 산소의 낮은 용해도 그리고 광합성의 감소와 같은 하나 이상의 원인이 복합적으로 작용하였기 때문임을 제시하였다. Birtwell et al. (1987)에 의하면 영국 컬럼비아의 Fraser강의 인접지역에서는 DO의 포화도가 0-165%의 넓은 포화도 범위를 보이며, 높은 DO는 광합성이 가장 활발한 시기에 그리고 흐름이 빠른 지역에서 나타났다.

하천에서의 급변하는 환경적인 요인과 DO변동에 대한 빠른 감지능력을 통해 어류폐사의 원인을 규명하고자 하는 연구 또한 진행되고 있다(Graczyk and Sonzogni, 1991). 일반적으로, 해양, 하천 및 호수에서의 DO는 낮에는 광합성 활동으로 증가하고, 밤에는 생물의 호흡으로 감소한다.

하천의 DO 변동의 계절적 양상은 봄에 식물플랑크톤의 번성으로 산소 포화도가 0-200%까지 나타나며, 여름에는 높은 일사량으로 플랑크톤의 광합성이 증가하여 가을과 겨울보다 산소변동이 광범위하게 나타난다. Robarts et al.(2005)는 과부영양한 Humboldt 호수에서 비록 동절기에 발생한 어류폐사 원인을 파악하지는 못했지만, 유역의 개발로 인한 영향과 호수의 표면의 장기간에 걸친 동결의 요인이 어류폐사를 야기시킬 가능성이 있음을 언급한 바가 있다.

국내에서는 산소 농도의 따른 어류폐사의 원인으로 산소고갈이 주된 원인으로 보고하고 있다(환경부, 2009; 배경석 등, 2002; 이은형 등, 2006; 김은희, 2007)(그림 2). 강원도에서 발생한 어류폐사의 원인의 19%가 산소고갈의 원인으로 추정하고 있고(환경부, 2009), 대전의 도시 하천에서도 강우시 하수관거 월류수에 의한 산소고갈로 어류폐사가 발생한다고 주장하고 있다(이은형 등, 2006). 서울의 중랑천에서는 2000년 4월 21일과 6월 11일에 중랑천 하수처리장 방류구 하류지점과 수중보내의 정체구역에서 DO가 고갈되어 어류폐사가 보고된 바 있다(배경석 등, 2002). 국외에서도 산소고갈 사례들이 보고되고 있으며, 호주의 뉴사우스웨일스의 강과 호수에서는 어류폐사의 원인 중 14%가 산소고갈이었다(Lugg, 2000). 캐나다의 Humboldt 호수에서는 2005년 겨울에 호수 표면에 얼음이 덮이면서 산소 고갈이 발생하여 어류폐사가 발생하였다(Robarts et al., 2005).



그림 2. 비점오염원 유입으로 인한 어류폐사(안양천)
(출처: 오마이뉴스(2010), www.ohmynews.com)

DO에 의한 어류폐사는 2006년 북한강 수계 중 삼림 지역에 있는 인북천에서 발생한 어류폐사를 둘러싼 원인에 대해서는 잠정적으로 DO고갈로 인한 영향일 것이라는 추정이 있을 뿐으로 여전히 명백한 원인을 제시하지 못하고 있다(그림 3). 이는 산소고갈 뿐만 아니라 산소 과포화에 의한 영향과 급격한 일주기 변동 등의 단일 또는 복합적인 요인이 어류의 생리적인 기작에 영향을 미쳤을 가능성을 또한 배제할 수 없기 때문이었다(환경부, 2009). 실제로 어류폐사 발생 이후 같은 북한강 수계에서는 DO의 고갈현상은 일어나지 않았고, 오히려 DO의 과포화 현상이 빈번히 발견되고 있다(그림 4).

최근까지도 국내에서 DO에 대한 연구는 과포화의 원인에 대해서는 거의 알려지지 않아 연구가 미미한 실정이다. 산소 과포화로 인한 영향은 어류폐사를 야기시키는 원인으로서는 거의 고려되지 않고 있다. 이는 하천에서 높은 산소 과포화상태(200-260%)를 보이는 지역에서도 담수어류 군집은 회피행동을 보이지 않기 때문이다(Serafy and Harrell, 1993). 그들은 산소과포화로 인한 어류의

행동학적인 회피현상의 원인을 파악하고자 어류를 다양한 DO의 수준에 노출시키는 실험을 시행하였으나, DO변동에 대한 행동 변화가 없었음을 제시하였다.

그럼에도 불구하고, 국외에서는 산소 과포화에 따른 어류피해 사례가 보고되고 있다. 산소 과포화에 의한 어류폐사는 1940년 4월 미국 위스콘신주 Lake Waubesa에서 처음 보고되었는데, 조류의 과다 번성(algal bloom)으로 인해 산소 농도가 30-32 mg/L까지 증가하여 어류폐사가 일어난 경우이다(Woodbury, 1942). Mckee와 Wolf(1963)의 연구에 따르면, 산소 포화도가 125% 이상일 경우 어류에게 해를 끼칠 수 있으며, 300% 이상일 때는 어류폐사가 발생할 수 있다고 보고하였다.

2. DO가 어류에게 미치는 영향

USEPA(2004)에서 산소 포화도 125%를 기준(식물플랑크톤 번성의 지표)으로 부영양 하천을 평



그림 3. 청정한천 인북천(왼쪽), 인북천 어류폐사 당시 하상(가운데), 인북천 어류폐사 수거작업(오른쪽)
(출처: 연합뉴스(2006). www.yonhapnews.co.kr)



그림 4. 과포화로 인해 기포가 발생한 인북천 하상(왼쪽), 동절기 인북천의 낮시간 산소 포화도(가운데), 동절기 인북천의 밤시간 산소농도(오른쪽)

가하고 있으며, 산소 포화도 125%는 잠재적으로 수생생물에게 해로운 영향을 줄 수 있는 수치로 정의하고 있다. 산소는 어류에게 있어서 생존, 성장률, 먹이활동에 까지 영향을 미친다. 산소 포화도 30% 이하의 저포화 상태에 어류가 노출될 경우는 질식 또는 치사가 발생 할 수 있고, 100% 이상의 산소 과포화가 발생했을 때는 기포병(GBD: gas bubble disease)이 발생 할 수 있다(Mallya, 2007). 기포병은 어류의 아가미, 조직, 혈관 등에 기포가 발생하는 병으로 총기체 포화도 110% 이상에서 발생하는 어병으로 알려져 있다(그림 5). Sengal Sole (*Solea senegalensis*)이라는 해산어 치어를 대상으로 산소 포화도 130-300%에 노출 시킨 결과 기포병과 여러 증상들(안구돌출, 피하기중, 아가미 장애, 출혈, 비정상적인 헤엄)이 나타났다(Salas-Leiton, 2009). 반면, Person-Le Ruyet, et al. (2002)의 연구에서는 해산어 치어인 turbot fish (*Scophthalmus maximus*)를 대상으로 산소 포화도 147 및 223%에서 노출 시킨 실험 결과, 신진대사, 성장률에 대해 특별한 영향이 나타나지 않았다고 보고한 바가 있다. 이러한 연구 결과의 차이는 산소 과포화가 어류에 미치는 영향이 종에 따라 다를 수 있음을 의미한다.

DO는 독성물질과 같이 생물에게 있어서 환경적인 스트레스로 작용할 수 있음이 잘 알려져 있다. 낮은 DO는 아가미를 통해 여과하는 물의 양을 증가시켜 쉽게 물속의 오염물질에 노출될 가능성을 높게 한다. 이는 아가미 조직을 쉽게 손상시키고 DO를 급격히 감소시키는 효과를 야기시키게 된다.

또한 DO의 수준은 어류 및 수중생물에게 있어서 치사 또는 반치사에 이르게 하는 효과(생리적인 측면과 행동학적인 측면)가 있음을 보인 바가 있다. 생리적인 연구들은 낮은 DO에서 어류의 생리적인 기작을 최적화하기 어렵다(Birtwell, 1989).

산소가 어류에 미치는 생리학적 영향으로 세포내에서는 산소 자체의 독성인 활성산소(ROS: Reactive Oxygen Species)를 생각할 수 있다. 산소 과포화 상태에서는 보통수준의 산소 상태에서 보다 활성산소를 더 많이 생성한다(Braunbeck et al., 1998). 활성산소란 산소가 불완전 환원을 할 때 발생하는 강력한 산화 물질로 superoxide radical($O_2^{\cdot-}$), hydrogen peroxide(H_2O_2), hydroxyl radical(OH^{\cdot})이 이에 속한다. 활성산소는 지질, 단백질 세포, DNA까지도 영향을 미친다. 생물의 체내에 활성산소가 발생하면 항산화시스템이 작용하여 활성산소를 제거한다(그림 6). 활성산소에 의한 손상으로 나타나는 산화물질은

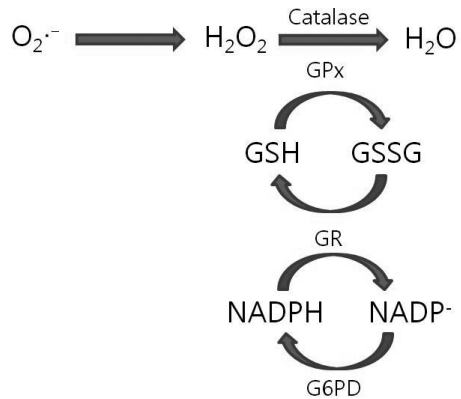


그림 6. GSH 항산화 시스템



그림 5. 기체과포화로 인한 어체(왼쪽), 지느러미(가운데), 체내(오른쪽)에 기포발생

lipid peroxidation(malondialdehyde, MDA; lipid hydroperoxide), protein carbonyl content와 같은 것들이 있다.

생체내에 직접적인 스트레스 효소인 코티졸은 어류의 생리학적인 영향을 관찰하기 위한 생체지표로서 널리 사용되고 있다(Martinez-Porchas, 2009). 코티졸은 스트레스에 대항하여 신체에 필요한 에너지를 공급해주는 역할을 하며, 일반적으로 스트레스를 받을 경우 코티졸의 분비가 증가한다. 그러나, 코티졸이 과다 분비될 경우에는 생물에게 약 영향을 줄 수 있다. 또한, 코티졸은 심한 스트레스를 받을 때는 오히려 분비가 저하 될 수도 있다.

국내어종인 참갈겨니를 산소농도 20 mg/L에 노출시킨결과 36시간 후에 코티졸이 급격히 증가하

였다. 그리고 버들치를 대상으로한 GSH실험에서는 산소농도에 따른 반응을 알 수 없었다(그림 7).

3. 맺음말

국내에서는 여전히 산소 고갈로만 중점적으로 연구가 이루어 지고 있으며, 모든 어류 폐사 원인도 산소 고갈로만 생각하고 있다. 산소에 대한 어류의 영향은 어종, 어류의 성장기, 서식환경 등 여러 가지 요인이 복합적으로 반영되기 때문에 다양한 방법으로 연구 해볼 가치가 있다. 또한, 낮은 농도의 산소 농도뿐만 아니라, 높은농도의 산소, 광범위한 산소 변동에 대해서도 연구해볼 필요가 있다. 🌊

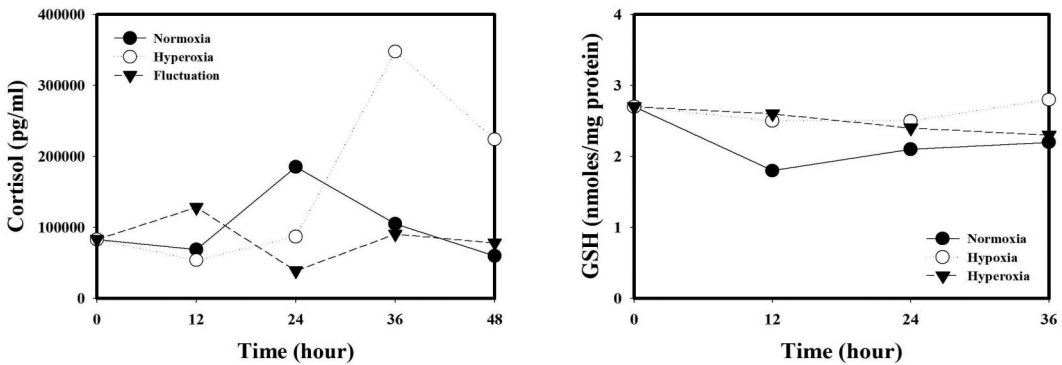


그림 7. 참갈겨니를 대상으로한 코티졸 실험(왼쪽), 버들치를 대상으로한 GSH 실험(오른쪽)

참고문헌

1. 김은희. 2007. 수질 연속 자동 측정을 통한 도시 하천의 스트레스 요인 규명. 박사학위논문. 서울대학교.
2. 배경석, 김교봉, 김혜경, 유병태, 김민영. 2002. 중랑천의 어류상과 어류군집 구조의 장기변동. 한국육수학회지. 35(2): 63-70.
3. 이은형, 서동일, 황현동, 윤진혁, 최재훈. 2006. 도시 하천에서의 어류폐사 원인분석 1 - 일반조사 및 실험. 한국상하수도학회. 20(4): 573-584.

4. 환경부. 2009. 어류폐사발생지역의 환경조사(2).
5. Birtwell, I.K., Nassichuk, M.D., Beune, H. 1987. Underyearling sockeye slamon (*Oncorhynchus nerka*) in the estuary of the Fraser River. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences. 96: 25-35.
6. Braunbeck, T., Hinton, D.E., Streit, B. 1998. Fish Ecotoxicology. Birkhauser.
7. Graczyk, D.J., Sonzogni, W.C. 1991. Reduction of dissolved oxygen concentration in Wisconsin streams during summer runoff. Journal of Environmental Quality. 20: 445-451.
8. Lugg, A. 2000. Fish kills in NSW. Report of NSW Department of Primary Industries. pp. 4-10.
9. Martinez-Porchas, M., Martinez-Cordova, L.R., Ramos-Enriquez, R. 2009. Cortisol and glucose: Reliable indicators of fish stress?. Pan-American Journal of Aquatic Sciences. 4(2): 158-178.
10. Mckee, J.E., Wolf, H.W. 1963. Water quality criteria, Second edition. State Water Quality Control Board, Sacramento, California. No. 3-A.
11. Robarts, R.D., Waiser, M.J., Arts, M.T., Evans, M.S. 2005. Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake. Lakes & Reservoirs: Research and Management. 10: 167-177.
12. Person-Le Ruyet, J., Pichavant, K., Vacher, C., Le Bayon, N., Severe, A., Boeuf, G. 2002. Effects of O₂ supersaturation on metabolism and growth in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Aquaculture. 205(3-4): 373-383.
13. Salas-Leiton, E., Canovas-Conesa, B., Zerolo, R., Lopez-Barea, J., Canavate, J.P., Alhama, J. 2009. Proteomics of juvenile Senegal Sole (*Solea senegalensis*) affected by gas bubble disease in hyperoxygenated ponds. Marine Biotechnology. 11: 473-487.
14. Serafy, J.E., Harrell, R.M. 1993. Behavioural response of fishes to increasing pH and dissolved oxygen: field and laboratory observations. Freshwater biology. 30: 53-61.
15. U.S. EPA. 2004. Assabet River total maximum daily load for total phosphorus. DEP, DWM TMDL Report MA82B-01-2004-01. p. 67.
16. Woodbury, L.A. 1942. A sudden motality of fishes accompanying a supersaturation of oxygen in Lake Waubesa, Wisconsin. Transactions of the American Fisheries Society. 71: 112-117