

부영양 도심하천 (안양천)에서 고빈도 관측에 의한 산소고갈과 기상조건의 영향 연구

김선정 · 신명선 · 김재구 · 이재용 · 정갑주¹ · 안부영² · 김범철*

(강원대학교 환경과학과, ¹전국대학교 유비쿼터스정보기술연구원, ²한국과학기술정보원)

Oxygen Fluctuation Monitored with High Frequency in a Eutrophic Urban Stream (the Anyang Stream) and the Effect of Weather Condition. Kim, Sunjung, Myoung-Sun Shin, Jai-Ku Kim, Jae-Yong Lee, Karpjoo Jeong¹, Buyoung Ahn² and Bomchul Kim* (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Korea; ¹Institute for Ubiquitous Information Technology and Applications, Kunkuk University, Korea; ²Korea Institute of Science and Technology Information, Korea)

The variation of dissolved oxygen (DO) was monitored with high frequency by an automatic data-logging sensor in a eutrophic urban stream (the Anyang Stream) located in a metropolitan area of Seoul, South Korea. In general, DO showed the diel variation of increase in daytime and decrease at night, implying that primary production is a major mechanism of oxygen supply in this ecosystem. The fluctuation of oxygen was determined by rainfall. DO depletion was most obvious after a rainfall resulting in an anoxic condition for a day, which is thought to be caused by scouring of periphyton and organic ooze at the stream bottom. Seasonally DO was higher in winter and frequently depleted in warm seasons. DO depletion was often at a dangerous level for fish survival. Fish survey showed that little fish was living at the study site and oxygen depletion may be the major stress factor for aquatic animals. From the results it can be suggested that a high frequency monitoring of oxygen should be established for the proper assessment of aquatic habitats and better management strategy.

Key words : Anyang Stream, DO depletion, Diel Oxygen fluctuation, high frequency monitoring

서 론

용존산소(Dissolved Oxygen, DO)는 수중에 녹아 있는 산소를 말하며, 수중 생물의 물질대사 반응의 전자수용체로서 사용된다. 용존산소는 수생동물의 생존 및 생장에 필수적인 요인이므로 현재 많은 나라에서 수질기준의 주요 항목으로 적용하고 있다. 수생동물의 종류와 생리활동

의 종류에 따라 요구되는 산소의 농도는 다르나, 대체로 어류의 성장에 적합한 용존산소 농도는 약 $4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이상이며, $3 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이하에서는 어류 성장에 현저한 제한을 주는 것으로 알려져 있다. 또한 $2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이하로 떨어질 경우, 내성이 없는 민감종은 산소가 있는 다른 지역으로 이동하거나 폐사하게 된다(Klyashtorin, 1976).

산소의 감소현상은 수온이 높고, 유기물 오염도가 높은

* Corresponding author: Tel: 033) 250-8572, Fax: 033) 251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

경우에 발생하게 되는데 하수의 유입으로 인하여 BOD가 높은 도시하천이 대표적인 사례이다. 하수처리나 정화조에 의해 BOD가 감소하더라도 인과 질소 등의 영양염류가 높은 경우에는 수체 내에서 조류의 번성으로 인하여 유기물이 많이 생성되며 용존산소의 일주기 변동이 크게 나타난다. 조류가 많은 경우에는 밤에는 산소가 감소하고 일조량이 많은 오후에는 조류의 광합성에 의하여 산소가 과포화되는 경우도 있다 (Kent *et al.*, 1990; Tadesse *et al.*, 2004; Goldman and Horne, 2008).

도시하천의 경우 소규모 강우가 내리는 초기 강우 유출수에 의해 하천 바닥의 슬러지가 일시에 교란되어 유출되고 하류에서 산소고갈이 발생하여 어류폐사의 원인이 되기도 한다. 서울 시내의 하천을 비롯하여 많은 도시하천들이 간헐적인 산소고갈을 일으키며 어류의 성장에 장애를 주는 것으로 보고된 바 있다 (Klyashtorin, 1976; Winn and Knott, 1992; Lee *et al.*, 2006a, b). 근래 하수관거가 증설되어 하수처리율이 증가하고 안양천을 비롯하여 많은 도시하천의 수질이 개선되고 있는 것으로 보고되고 있으나 산소고갈의 발생 실태는 면밀히 고빈도로 조사되지 않고 있다.

안양천은 유역이 서울과 경기도에 위치한 한강의 대표적인 도시하천으로서 하천 연장 32.5 km, 유역면적이 286 km²이다. 안양천은 1960년대부터 산업화의 중심지역에

위치하여 극심한 수질오염을 겪게 되었으며, 수질 개선을 위하여 하수관거와 상류의 하수처리장이 설치되었으며 2001년부터 '안양천 살리기' 사업도 시행되었다. 그러나 아직 하수의 차집이 완벽하지 않고 인, 질소 등의 영양염류 농도가 높아 조류가 많이 번성하고 있다. 도시하천에서는 흔히 강우 시에 하상의 슬러지가 유출되어 하류의 하천수질이 악화되고 산소가 감소하는 현상이 발생한다 (Bedient *et al.*, 1980; Gupta and Saul, 1996; Bang *et al.*, 1997). 특히, 봄철과 초여름에는 수온상승에 의한 하천 하상 퇴적유기물의 분해 작용이 활발해지고 소량의 강우에 의해 우수와 합류된 하수가 유입되면 수질이 급격히 악화되고, 용존산소 감소 등이 일어나 어류폐사가 발생하는 사례가 발생하고 있다 (Meyer and Barclay, 1990; Lugg, 2000; Park *et al.*, 2004).

본 연구에서는 서울시의 대표적인 도시하천인 안양천을 대상으로 용존산소를 고빈도로 측정하여 일주기 변동 및 강우와 계절에 따른 변동을 측정하여 산소고갈의 발생 실태를 조사하고 동물 서식처로서의 조건을 평가하였다.

재료 및 방법

조사정점은 안양천이며, 한강본류와 1.9 km 떨어져 있

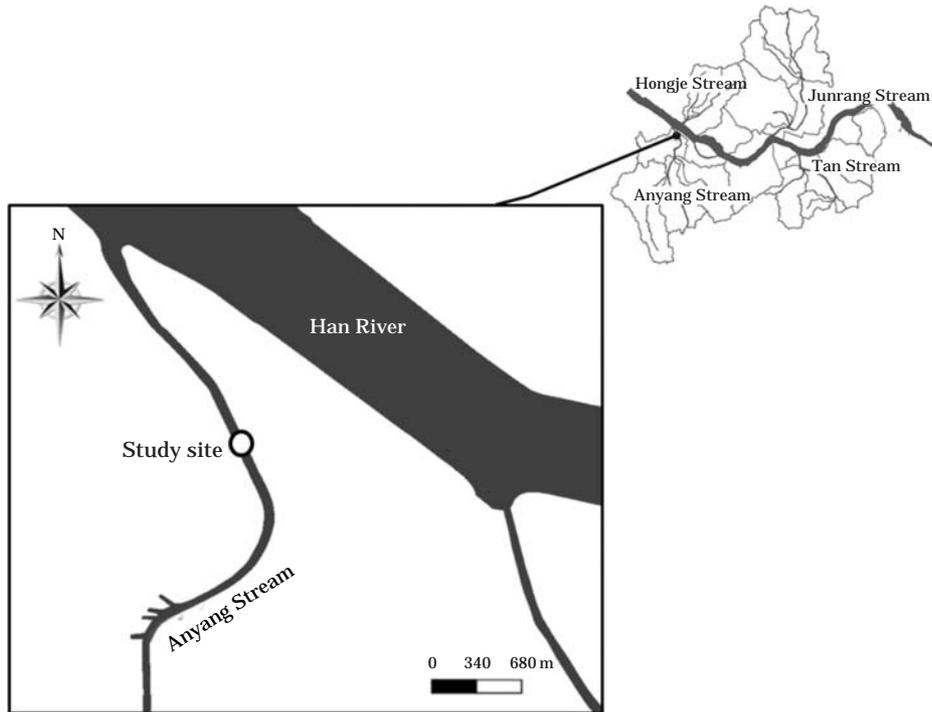


Fig. 1. Study site in the Anyang Stream 1.9 km off the main stream of the Han River.

는 양평교 정점이다 (Fig. 1). 안양천은 안양시를 관통하여 흐르는 도시하천이며, 목감천과 상류의 작은 지천들이 합수되어 안양천 하류로 흐르고, 최종적으로 한강분류로 흐른다. 조사기간은 2010년 3월 9일~31일 (14일간), 4월 21일~30일 (14일간), 5월 4일~6월 3일 (31일간), 7월 15일~19일 (5일간), 2011년 5월 1일~6월 8일 (29일간)이며, 자동수질측정기 (Troll 9500, In-situ Inc, USA)로 15분 간격으로 수온과 용존산소를 측정하였다. 측정기 내에 자료를 저장하였다가 정기적으로 자료를 다운받았으며, 한 달에 한 번씩 기기보정과 센서의 세척을 실시하였다.

어류조사는 양평교 정점에서 총 4회를 실시하였다. 1차 조사는 2009년 11월 17일, 2차, 3차, 4차 조사는 2010년 3월 9일, 4월 5일, 4월 15일에 각각 실시하였다. 어류는 투망 (망목 7 mm × 7 mm)을 사용하여 50분간 채집한 후, 채집 즉시 현장에서 10% formalin액으로 고정하였으며, 실험실에서 Kim과 Kang (1993), Kim (1997)의 검색표를 사용하여 분류하였고, 분류체계는 Nelson (1994)의 분류체계를 따랐다.

2010년 3월 9일~2011년 6월 8일까지의 기상자료 (일조량, 일조시간, 강우량)는 기상청의 서울지점 (002)의 측정자료를 사용하였고, 환경부에서 측정한 물환경정보시스템의 8일 간격 수질자료 (BOD, SS, TN, NH₃, TP, DIP, Chlorophyll *a*)를 이용하여 안양천의 연간 수질변동을 분석하였다 (2009년 1월~2011년 5월).

결 과

1. 용존산소의 계절변동

8일 간격으로 측정된 안양천의 BOD는 겨울에 가장 낮은 농도 ($4.3 \pm 3.0 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$)를 보였다. 봄 (4~6월)에 가장 큰 변동편차 ($9.6 \pm 3.1 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$)를 보였는데, 3~6월의 BOD는 $4.6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 에서 $14.2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 까지의 변동을 보였다. 여름에는 부유물질 농도가 평균 $20.8 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 로써 다른 계절에 비해 높았으나, 영양염류 농도 (N, P), 식물 플랑크톤 (chlorophyll-*a*) 농도는 다른 계절보다 낮았다

(Table 1). 이는 점오염원의 영향을 받는 한강수계하천의 일반적인 경향으로서 (Shin *et al.*, 2011) 유량의 증가에 의한 희석효과 때문인 것으로 해석된다.

환경부 수질측정망에 의해 8일 간격으로 측정된 용존산소는 $6 \sim 14 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 의 변동범위를 나타냈으며, 수온의 계절변동과 함께 역의 상관성을 보였다. 용존산소는 4월부터 감소하였으며 5~8월에 가장 낮은 농도를 나타냈고, 겨울에 가장 높은 농도를 나타냈다 (Fig. 2).

2. 용존산소의 일주기 변동

안양천의 조사정점은 한강분류 합류점에서 약 2 km 떨어져 있으므로 한강분류의 유량이 많을 경우에는 분류의 영향을 받을 수 있다. 따라서 한강분류 중 안양천 말단부 수위측정 지점인 행주대교정점의 수위를 안양천의 용존산

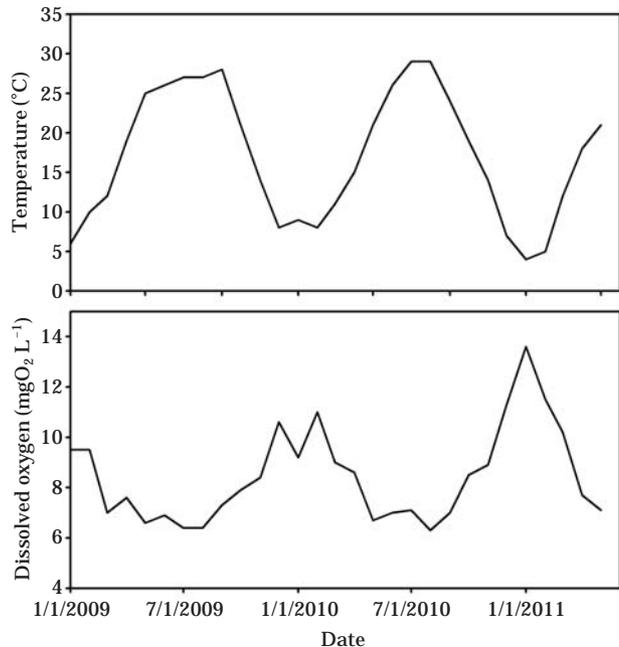


Fig. 2. The seasonal distribution of temperature and DO measured during daytime at a low frequency of 8 days interval in the Anyang Stream (data from Korean Ministry of Environment).

Table 1. Seasonal distribution of average water quality parameters at the downstream site of the Anyang Stream (1999. 1 ~ 2011. 5). (unit: mg L^{-1} , mean \pm standard deviation) (Data from the Korean Ministry of Environment).

Season	BOD	SS	TN	NH ₄	TP	DIP	Chlorophyll- <i>a</i> (mgChl m^{-3})
Jan. ~ Mar.	9.6 (± 3.1)	8.7 (± 5.2)	18.1 (± 2.2)	12.3 (± 3.6)	0.737 (± 0.240)	0.585 (± 0.268)	17.9 (± 12.0)
Apr. ~ Jun.	9.4 (± 4.8)	20.5 (± 7.8)	9.9 (± 2.5)	4.3 (± 2.4)	0.648 (± 0.219)	0.379 (± 0.113)	15.4 (± 7.1)
Jul. ~ Sep.	6.1 (± 2.4)	20.8 (± 17.1)	7.0 (± 1.8)	1.7 (± 1.5)	0.401 (± 0.088)	0.313 (± 0.095)	22.6 (± 29.8)
Oct. ~ Dec.	4.3 (± 3.0)	13.9 (± 6.9)	11.4 (± 2.5)	2.4 (± 2.6)	0.557 (± 0.218)	0.445 (± 0.182)	7.7 (± 4.2)

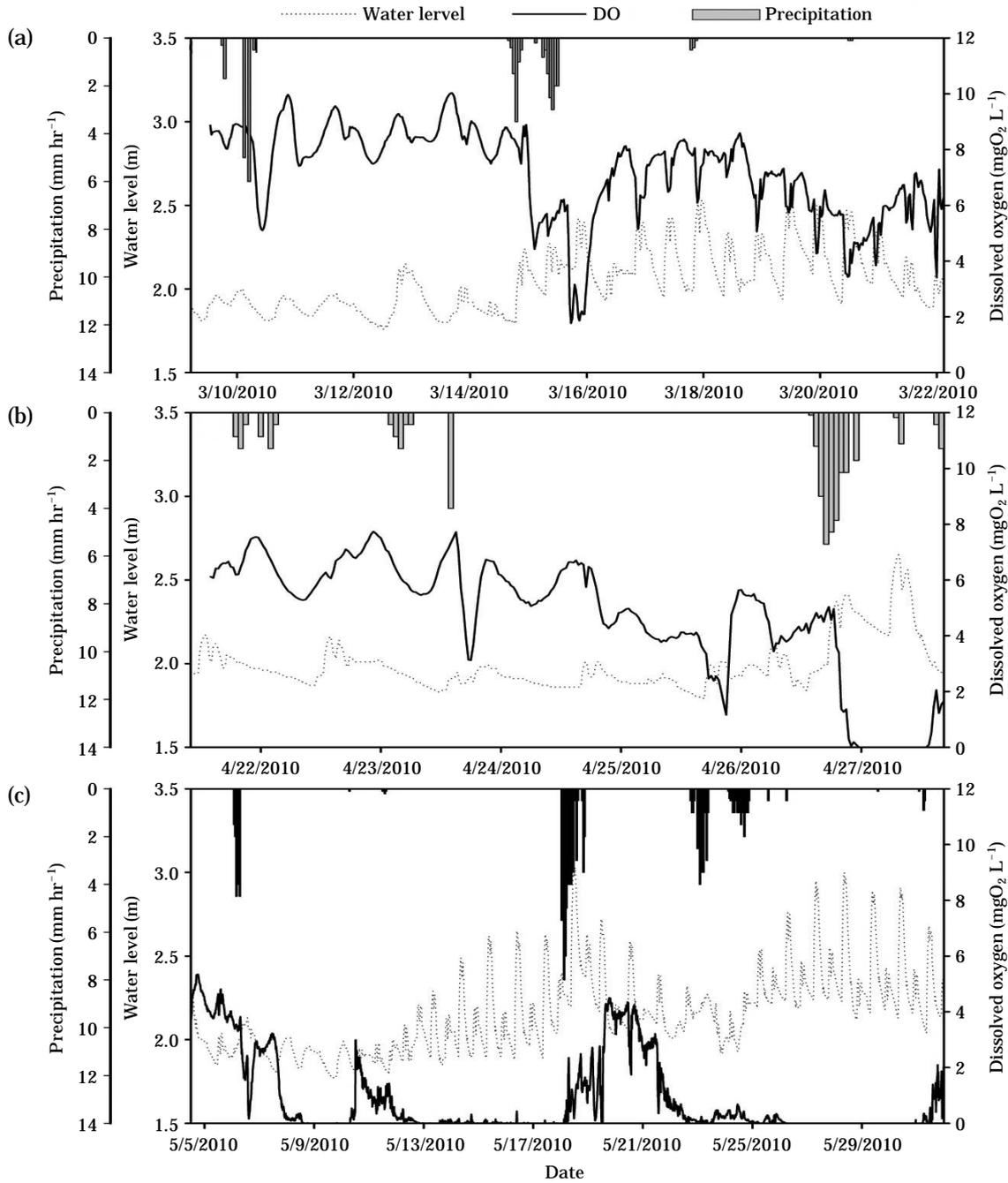


Fig. 3. Seasonal change of DO fluctuation in the Anyang Stream ((a) March; (b) April; (c) May 2010).

소농도와 함께 비교검토하였다. 3월에는 수위변동이 작았으며 (2.0 ± 0.2 m), 용존산소는 3월 14일 이전에는 $6 \sim 10$ $\text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ 의 범위를 보이다가 강우 후에 낮아져서 $4 \sim 8$ $\text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 강우 직후(2010년 3월 10일, 3월 14일)에는 용존산소가 급격히 감소하였다(Fig. 3(a)).

4월 중에도 4월 27일의 강우 이전에는 3월과 마찬가지로 안정적인 수위(2.0 ± 0.2 m)를 보였으며, 용존산소는

일사량에 따라 변동하는 양상을 보였다. 맑은 날에는 용존산소의 일주기 변동 폭이 $2.3 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ 로써 안정적이었지만, 강우 후에는(4월 23일, 4월 27일) 급격히 감소하였다. 4월 27일에는 일 강우량이 27mm day^{-1} 이었는데 이때 용존산소는 $0 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ 까지 감소하였다(Fig. 3(b)).

5월 중에는 4월에 비해 비가 온 날이 많았으며(5/10, 5/17, 5/22, 5/24), 수위도 불안정하였다. 4월 27일의 강우

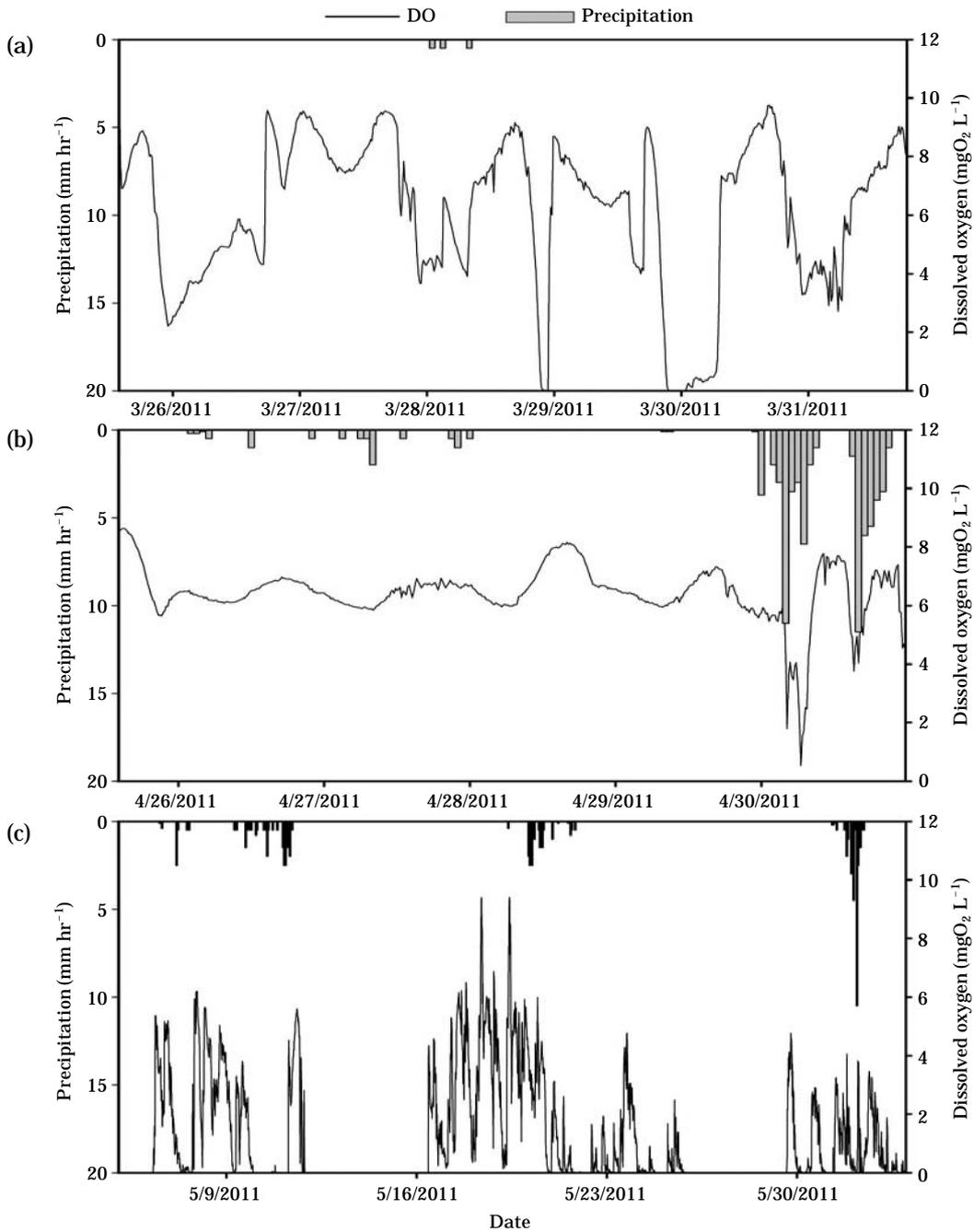


Fig. 4. Seasonal change of DO fluctuation in the Anyang Stream ((a) March; (b) April; (c) May 2011).

로 인해 낮아졌던 용존산소가 회복되기 전에 또 한 번의 강우로 용존산소가 $0\text{mgO}_2\text{ L}^{-1}$ 의 값을 나타냈으며, 5월 내내 $0.9 \pm 1.4\text{mgO}_2\text{ L}^{-1}$ 의 낮은 농도를 유지하였다. 5월 17일의 강우 이전에는 용존산소가 $1\text{mgO}_2\text{ L}^{-1}$ 이하의 저산소가 4일 이상 지속되었다가 강우에 의해 유량이 급증하면서 용존산소가 공급되는 현상이 나타났다. 3월과 4월에는 비강우시에 산소가 높게 유지되고 강우 후에 산소

가 급감하는 양상이 보였으나, 5월에는 반대로 평상시에는 용존산소가 고갈된 시기가 일정기간 지속되었다가 비가 내리면 용존산소가 공급되는 양상이 나타났다(Fig. 3(c)).

2011년에는 2010년에 비해 많은 양의 강우가 내렸는데 4월 30일에 시작된 강우에 의해 급격히 감소하였다. 강우에 의해서 용존산소는 약 $6\text{mgO}_2\text{ L}^{-1}$ 에서 $2\text{mgO}_2\text{ L}^{-1}$ 이하로 감소하였다. 5월의 용존산소는 2010년도와 마찬가지로

Table 2. DO fluctuation in the Anyang Stream on sunny days.

Day	DO minimum (mgO ₂ L ⁻¹)		DO maximum (mgO ₂ L ⁻¹)		ΔDO
	Time	DO value	Time	DO value	
	Mar. 03, 2010	1:30	7.4	16:30	
Mar. 12, 2010	8:00	7.5	18:30	9.3	1.8
Mar. 13, 2010	22:30	8.2	16:30	10.0	1.8
Apr. 24, 2010	21:30	4.3	15:30	6.5	2.2
Mar. 28, 2011	22:06	0.0	16:36	9.2	9.2
Mar. 29, 2011	21:36	0.0	17:36	9.0	9.0
Mar. 30, 2011	0:06	0.0	14:36	9.2	9.2
Apr. 30, 2011	6:30	0.5	10:15	7.8	7.3

지로 0 mgO₂ L⁻¹을 나타낸 날이 많았다. 5월에 용존산소는 0.9±1.4 mgO₂ L⁻¹로 매우 낮았다 (Fig. 4).

도시하천에서 용존산소의 일주기 패턴을 조사하기 위하여 강우의 영향을 받지 않는 맑은 날을 선택하여 용존산소의 변동을 확인하였다 (Table 2). 일출 이후에 증가하던 용존산소는 오후 늦게 감소하기 시작하는 일주기변동을 보였는데, 2010년 3월에는 16~18시 전후에 용존산소가 가장 높은 농도를 나타냈으며, 2010년 4월에는 15시 전후에 가장 높은 농도를 나타냈다. 용존산소가 최저농도를 나타낸 시기는 밤과 새벽으로, 3월과 4월 공히 주로 21~22시 전후에 나타났다 (Table 2). 일주기 변동 폭은 2010년 3월에 평균 1.9 mgO₂ L⁻¹ 였다가 4월이 되면서 2.2 mgO₂ L⁻¹으로 일주기 변동 폭이 커졌다. 2011년에는 2010년의 같은 시기보다 일주기 변동 폭이 컸는데, 이는 2011년 3월과 4월의 최저 용존산소농도가 0 mgO₂ L⁻¹까지 감소한 반면 낮동안의 최대 농도는 같은 농도를 나타냈다. 3월에 비해 4월의 최대 DO가 더 낮았는데 이는 수온의 상승으로 인한 것으로 해석된다.

고찰

안양천은 서울의 중요한 도심하천이며 도시하천 수질 복원의 상징으로서 많은 관심을 받고 있다. 본 연구의 결과로 보면 안양천 하류에서는 용존산소의 고갈이 흔히 발생하고 있어 어류의 서식이 어려운 상태인 것으로 평가된다. 용존산소의 계절적 변동을 보면, 3월에는 약 9 mgO₂ L⁻¹의 농도를 보여 어류 서식에 충분한 농도를 보였으나 4월에는 약 5 mgO₂ L⁻¹로 낮아지고, 5월부터는 산소고갈이 나타나기 시작하여, 6월에는 2 mgO₂ L⁻¹ 이하로 낮아져 어류가 서식하기 어려운 환경인 것으로 나타났다 (Figs. 3, 4). 실제로 어류 조사의 결과 안양천 하류수역에

Table 3. List of the number of fish collected at the study site of the Anyang Stream.

Species	Date			
	2009		2010	
	Nov. 17	Mar. 9	Apr. 5	Apr. 15
<i>Carassius auratus</i>			3	4
<i>Cyprinus carpio</i>		1		
<i>Muil cephalus</i>	1			5
<i>Rhodeus uyekii</i>				1
Total number of species	1	1	1	3

는 어류가 거의 살지 않고 있는 것으로 확인되었다. 4회의 조사에서 단지 4종의 어류만이 채집되었으며 채집된 개체수도 총 15개체에 불과하여 어류가 서식하기 어려운 환경임을 시사하고 있다 (Table 3).

안양천의 산소고갈은 일주기변동에 의해 밤에 주로 나타나며, 부정기적으로 강우 시에 나타나고 있다. 소규모 강우 시에 산소가 감소하는 현상은 유기물 오염도가 높은 도시 하천에서 흔히 나타나는 현상으로서 하상에 축적되어 있던 유기물과 미생물 슬러지가 유속증가에 의해 일시에 유출됨으로써 이 지류가 유입하는 하류 하천에서 산소고갈을 유발한다 (Kim et al., 2002; Roh et al., 2004; Kim et al., 2006; Kim et al., 2007).

용존산소농도와 관련된 수질 평가를 위하여 일반적으로 수층의 BOD가 사용되고 있는데 수심이 얇은 하천에서는 수층의 BOD보다는 하상의 부착조류에 의한 산소소비속도가 더 중요한 인자가 된다. 하상의 부착조류는 수층의 플랑크톤에 비하여 매우 높은 밀도를 가질 수가 있으므로 대부분의 하천에서 주된 일차생산자이다. 안양천의 경우에도 수층의 BOD는 10 mgO₂ L⁻¹ 이하로서 산소고갈이 심하게 발생할 정도의 오염도를 보이지는 않지만 부착조류에 의한 산소소비로 인하여 산소고갈이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 얇은 하천의 유기물 오염도 평가 및 부영양화 평가에서는 수층의 BOD조사 뿐 아니라 부착조류 조사가 주요항목으로 포함되어야 한다는 점을 시사한다.

하천에 외부기원유기물 (allochthonous organic matter) 이 많이 유입되면 산소의 감소요인이 증가하여 산소가 감소하게 된다. 반면에 유기물유입은 적으나 영양염류의 농도가 높은 부영양 하천에서는 높은 광합성량에 의해 산소의 과포화가 일어나게 된다 (Robert, 2001). 본 연구에서 측정된 안양천의 산소농도는 전체적으로 포화농도 이하의 농도를 보였으며 과포화 현상은 나타나지 않았다. 따라서 유역 또는 상류로부터 유기물의 유입이 많이 발생하

고 있으며 일차생산보다는 유기물 호흡작용이 더 활발하게 일어나고 있는 상황이라고 해석할 수 있다.

앞으로 안양천으로 배출되는 하수의 BOD를 더 저감한다고 해도 산소고갈현상은 상당한 기간 동안 계속될 가능성이 있다. 현재의 하수처리장은 주로 BOD제거에 치중하고 있으며 인 제거율이 낮다. 또한 소규모 정화조들은 인 제거율이 더욱 낮으므로 BOD가 현재보다 현저히 낮아져더라도 부영양화 상태는 계속되어 부착조류의 번성으로 인한 산소변동이 크게 나타날 것으로 예상된다.

외국에서는 이미 산소고갈이 발생하는 하천에서 산소를 공급하는 장치를 설치하여 수생태계를 보호하는 조치를 시행하기도 한다. 서울의 도심하천의 수생태계 건강성이 가지는 amenity 가치를 고려한다면 이제는 수질개선의 외에도 산소공급에 의한 서식처 개선도 대책으로서 고려할 가치가 있다고 본다.

부영양 하천의 산소는 하루 중 시각에 따라 급격히 달라지며, 기상조건의 영향을 크게 받기 때문에 전통적인 저빈도 관측으로는 급변하는 산소환경을 평가할 수 없는 것으로 판단된다. 저빈도 측정 자료에 의하면 안양천의 DO 농도는 하천수질 Ia등급($7.5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이상)에 해당하지만, 고빈도 측정에서는 IV등급($2.0 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ 이상)에 해당하는 측정치가 많이 나타나고 있다. 근래 용존산소 센서와 자동연속측정기의 보급이 확대되고 있어 앞으로는 수생태환경의 평가에 있어서 고빈도 연속측정을 필수 항목으로 포함시켜 관측하는 것이 필요한 시점이다. 연속 측정장치는 산소공급장치와 연계하여 산소고갈 시 자동으로 산소를 공급하여 어류폐사를 막는 설비로 활용할 수도 있다.

본 연구에서는 안양천의 지류들의 수질을 조사하지 않았으므로 간헐적인 산소고갈의 주원인이 어느 지역의 지류인지 확인하지는 못하였다. 앞으로 안양천의 수생태계 보호를 위해서는 여러 지류들의 수질변동을 정밀 연속 조사하여 산소감소의 원인이 되는 오염원을 찾는 조사가 필요하다.

사 사

본 연구는 한국과학기술정보연구원 (KISTI)의 지원에 의해 수행되었습니다 (과제번호 K-11-SG-32-01D-11).

인 용 문 헌

Bang, K.W., J.H. Lee and M.J. Yu. 1997. A study on the run-

- off characteristics of nonpoint sources in small urban watersheds. *Korean Society on Water Quality* **13**(1): 79-99.
- Bedient, P.B., J.L. Lambert and N.K. Springer. 1980. Stormwater pollutant load-runoff relationships. *Journal Water Pollution Control Federation* **52**(9): 2396-2404.
- Choi, S.H. 2004. STELLA modeling to estimate the sediment oxygen demand (SOD) in the shallow and eutrophic river. Department of Environmental Science Graduate school of Education, Inje University, pp. 30.
- Goldman, C.R. and A.J. Horne. 2008. *Limnology*, 2nd ed. McGraw-Hill, pp. 118-119.
- Gupta, K. and A.J. Saul. 1996. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research* **30**(5): 1244-1252.
- Han, J.G., Y.K. Lee and J.M. Nam. 2004. Analyses of seasonal water quality of the Anyang Stream. *The Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology* **7**(4): 52-60.
- Katryna, D. 2002. Fish kill events and habitat losses of the Richmond River, NSW Australia: An overview. *Journal of Coastal Research*, **SI 36**: 218-219.
- Kent, W.T., L.K. Bruce and E.P. Forrest. 1990. *Reservoir Limnology; Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, pp. 71-95.
- Kim, I.S. and E.J. Kang. 1993. *Illustrated fishes of Korea*, Academy book.
- Kim, I.S. 1997. *Illustrated Encyclopedia of fauna and flora of Korea*, 37, Freshwater fishes. The ministry of education, pp. 133-520.
- Kim, M.R., D.S. Shin, H.S. Kang and D.H. Rhew. 2007. An analysis of discharge unit-load of impervious land uses. *Seoul Studies* **8**(2): 187-196.
- Kim, S.K., Y.I. Kim, S.W. Kang, S.L. Yun and S.J. Kim. 2006. Runoff characteristics of non-point sources on the stormwater. *Environmental Engineering Research* **28**(1): 104-110.
- Kim, S.S., J.S. Kim, K.Y. Bang, E.M. Gwon and W.J. Chung. 2002. The estimation of the unit load and characteristics of non-point source discharge according to rainfall in Kyongan watershed. *Environmental Engineering Research* **24**(11): 2019-2027.
- Klyashtorin, L.B. 1976. The sensitivity of young sturgeons to oxygen deficiency. *Journal of Ichthyology* **16**: 677-681.
- Lee, E.H., D.I. Seo, H.D. Hwang, J.H. Yun and J.H. Choi. 2006a. Causes of fish kill in the urban streams 1- field surveys and laboratory experiments. *Korean Society of Water and Wastewater* **20**(4): 573-584.
- Lee, E.H., D.I. Seo, H.D. Hwang, J.H. Yun and J.H. Choi. 2006b. Causes of fish kill in the urban stream and pre-

- vention methods 2 - Application of automatic water quality monitoring system and water quality modeling. *Korean Society of Water and Wastewater* **20**(4): 585-594.
- Lee, Y.K and K.J. Kim. 2000. Aspect analysis of ecological water pollution in Anyang Stream. *Korean society of Civil Engineers* **20**(3): 447-459.
- Meyer, F.P. and L.A. Barclay. 1990. Field manual for the investigation of fish kills. United States Government Printing, pp. 41-42.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world. John Wiley and Sons. New York, pp. 600.
- Park, G.S. 2004. Salinity distribution and ecological environment of Han River Estuary. *Korean Wetlands Society* **6**(1): 149-166.
- Rhee, J.S., J. Iamchaturapatr, S.I. Yoon, K.H. Rhee, S.I. Choi and T.Y. Kim. 2011. Evaluating annual water quality of Anyang-stream using spatial analysis and self-purification criteria. *The Korea Society for Environmental Analysis* **14**(1): 38-44.
- Roh, S.D., D.K. Lee and Y.K. Chun. 2004. A study on the early-stage storm runoff treatment for the reduction of non-point pollution materials on the road. *Korean Society on Water Quality* **20**(5): 525-533.
- Shin, M.-S., J.-Y. Lee, B. Kim and Y.J. Bae. 2011. Long term variation of water quality in the lower Han River. *Journal of Ecology and Field Biology* **34**(1): 31-37.
- Tadesse, I.L., F.B. Green and J.A. Puhakka. 2004. Seasonal and diurnal variations of temperature, pH, and dissolved oxygen in advanced integrated wastewater pond system treating tannery effluent. *Water Research* **38**(3): 645-654.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and river ecosystem, 3rd ed. Academic Press, pp. 151-168.
- Winn, R.N. and D.M. Knott. 1992. An evaluation of the survival of experimental populations exposed to hypoxia in the Savannah River estuary. *Marine Ecology-Progress Series* **88**: 161.

(Manuscript received 21 October 2011,
Revised 27 January 2012,
Revision accepted 30 January 2012)