

안동호에서 중층 저산소층 형성의 요인 분석

박재총* · 박정원¹ · 신재기²

(한국수자원공사 안동댐관리단, ¹경북대학교 생물학과
²한국수자원공사 수자원연구원)

The Cause of Metalimnetic DO Minima in Andong Reservoir, Korea. Park, Jae-Chung, Jung-Won Park¹ and Jae-Ki Shin² (Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Andong 760-360, Korea, ¹Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea and ²Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, Taejon 305-390, Korea)*

Distributions of water temperature and DO profiles were investigated in Andong Reservoir from 1992 to 2004. Thermal stratification began to form from May of every year. Increasing water temperature of epilimnion, temperature difference between epilimnion and hypolimnion increased until August. Lower oxygen layer was formed at metalimnion from June or July of every year and there were 2 layers depending on each year. The two lower oxygen layers were affected by rainfall and inflow between July and September when thermal stratification was formed. The metalimnetic oxygen minima strongly formed at 2 layers, upper and lower part, when the average rainfall and inflow were ≥ 170 mm, ≥ 50 m³ sec⁻¹, respectively. It formed weakly when they were > 400 mm and > 200 m³ sec⁻¹ for one month. The upper part of low oxygen layers formed on the interface of epilimnion and metalimnion showed larger decreasing rate of DO than temperature and it disappeared around November. The lower part of those formed on interface of metalimnion and hypolimnion existed until December and disappeared in January, this layer showed larger decreasing rate of temperature than DO. DO increased between the upper and lower part of the low oxygen layers. DO on hypolimnion increased under metalimnion and dramatically decreased near the bottom of the reservoir. Temperature of the inflow during rainy season was similar to that of the reservoir's metalimnion, DO was similar or higher and BOD, COD and SS increased. Density layer caused by turbidity was formed in metalimnion, and turbidity increased under the upper part (oxygen increasing layer) of metalimnetic DO minima layers reaching the maximum at the direct upper part of the lower DO minima layer. The upper part of DO minima layers formed on the interface of epilimnion and metalimnion is related to organic activity on the surface, and the lower part of those was considered to be the result of turbid water inflow to metalimnion during rainy season.

Key words : Andong Reservoir, inflow, metalimnetic oxygen minima, monsoon, rainfall, stratification, thermocline, turbidity

* Corresponding author: Tel: 054) 850-4215, Fax: 054) 850-4236, E-mail: jaechung@kowaco.or.kr

서 론

호수에서 수온과 DO 동태에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다 (Edmondson and Anderson, 1956; Shapiro, 1960; Lasenby, 1975; Landon and Stasiak, 1983; Stauffer, 1985; Cornett and Rigler, 1987; Lind, 1987; Kim and Cho, 1989; Whitmore *et al.*, 1991; 서, 1998; 허 등, 1998; An, 2000; An, 2001). 온대지역의 호수는 계절적인 변화로 여름철에 수온성층 (thermal stratification)이 형성되며, 성층이 지속되면서 각 층은 화학적, 생물학적으로 서로 다른 특징을 보이게 된다. 수온이 상승하면서 대기와 접한 표층 (epilimnion)에서는 1차 생산자인 식물플랑크톤과 이를 포식하는 동물플랑크톤이 번성하게 된다. 표층에서는 대기로부터의 확산과 광합성에 의해 DO가 풍부하지만 성층으로 상층에서의 DO 공급이 차단된 심층 (hypolimnion)은 미생물의 분해활동에 의해 DO는 점차 고갈된다. 생물체의 사체나 배설물은 심층으로 침전, 분해되며, 심층의 체적, 호수의 수심, 성층의 지속기간 및 표층에서의 생물량 등에 의해 고갈률이 영향을 받는다 (Cornett and Rigler, 1980; Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994; Kalf, 2002). 또한, 성층화 형성시기의 기온, 바람 및 강우 형태와 빈도 등의 기후학적인 요인과 저수지 형태, 방류구 위치 등에 따라라도 호수의 화학적, 생물학적 특성이 영향을 받으며, 중층에서의 저산소현상은 수심이 얇은 전이대 (transition zone) 형태의 호수보다 수심이 깊은 인공호의 정수대 (lacustrine zone)에서 더 일반적으로 나타난다 (Thornton *et al.*, 1990; 안, 2000; An, 2000).

Shapiro (1960)는 Washington호 (최대 수심 66 m)의 연구에서 중층에서의 DO 감소현상은 일반적인 현상이지만 조사빈도와 수심간격이 넓으면 발견하지 못할 수 있음을 지적하였으며, 수심 10~20 m 범위의 수온약층 (thermocline)에 집중적으로 분포한 Copepod (요각류)인 *Diatomus ashlandi*의 호흡활동으로 DO가 감소한다고 하였다. Landon and Stasiak (1983)는 Arco호 (Minnesota 주, 최대 수심 10.2 m)의 연구에서 수심 6.5 m에 집적된 Cladocera (지각류)인 *Daphnia pulex*에 의해 DO가 최저 0.47 mg L⁻¹까지 감소하고, Stauffer (1985)는 표층의 침강 체질물 (falling seston)이 높은 수온에서 활발하게 분해 (산화)되고 동물플랑크톤의 호흡에 의해 수심 10 m 부근에서 저산소층이 형성된다고 하였다.

우리나라에서도 수온성층화 기간에는 중층과 심층에 저산소층이 각각 존재하며 형성 원인에 대한 다수의 보

고 있다. Kim and Cho (1989)는 소양호에 심층 무산소층이 존재하고 매년 여름철에 수심 10~20 m 범위에서 형성되는 중층 저산소층이 홍수기의 유입수와 관련이 있음을 제시하였다. 서 (1998)는 대청호에서 DO의 수직분포는 수온성층과 밀접한 관련이 있으며 7~8월에는 수심 10 m에서 극부적으로 DO가 감소하였다고 보고하였다. 허 등 (2000)은 안동호의 수심 10~15 m 범위에 수온약층이 존재한다고 하였고, An (2001)은 대청호의 수온성층은 몬순시기의 유입량에 의해 영향을 받는다고 하였다.

수중 DO의 부족 또는 고갈은 호기성 생물상에 부정적인 영향을 끼치므로 호수 생물의 종 조성을 변화시키고 어류의 집단적인 폐사를 유발하기도 한다. Miranda and Hodges (2000)는 어린 큰입배스 (*Misropterus salmoides*)가 DO 5 mg L⁻¹ 이하에서는 유영속도가 감소하고 3~4 mg L⁻¹ 이하일 때는 소화효율의 저하로 성장이 크게 둔화됨을 보고하였으며, 1.5~2.0 mg L⁻¹ 미만 (hypoxia)이 지속되면 치명적이며 치어가 성어보다 민감하게 반응한다고 하였다. 우리나라의 대청호에서도 여름철 DO 부족으로 냉수성 어종인 빙어 (*Hypomesus olidus*)의 대량 폐사가 보고되었다 (An, 2000). 또한, 성층현상에 의해 심층에 혐기성 조건이 형성되면 철, 망간 등이 환원되어 용존 물질화 되므로 정수처리 곤란, 수돗물 착색 등으로 물 이용에 장애를 유발하며, 이들과 결합되어 있던 인산염이 분리되어 수층으로 이동하게 되므로 표층에서의 1차 생산을 촉진하게 된다 (Edmondson and Anderson, 1956; Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994; 서, 1998; Kalf, 2002).

호수의 수질문제는 유역의 수문특성, 오염물질의 유입 특성, 호수 내부에서의 혼합 및 반응특성 등이 서로 복잡하게 연결되어 나타나는 현상이다. 수온성층과 수중의 DO 거동에 대한 원인과 현상에 대한 다수의 보고들은 수중 용존산소의 중요성을 호수의 부영양화, 수질문제와 연계하려는 다양한 욕구와 필요성을 반영한 결과로 사료된다. 그러나, 대부분의 선행 연구들은 호수의 부영양화에 관련된 영양염과 생물상의 거동에 대한 보고이며, 댐 저수지에서 시기에 따라 중층의 상부와 하부에 각각 형성되는 2개의 저산소층에 대한 연구 보고는 없는 실정이다. 본 연구는 안동호를 대상으로 장기간에 걸친 수온성층과 DO의 변동을 조사한 것으로서, 중층에 형성되는 2개의 저산소층을 보고함과 동시에 DO의 시·공간적 변동과 저산소층의 형성 원인 및 소멸과정에 대하여 고찰함으로써 우리나라 댐 저수지의 수질관리와 육수학적 연구의 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

결과

본 연구의 대상지인 안동댐 저수지에서의 조사방법은 다음과 같다. 댐측지점 (DAM)의 시기별, 수심별 수온과 DO 변화는 댐 부근에서 수면부터 바닥까지 5 m 단위로 매월 조사하였으며 (YSI 58, YSI 6600), 연구기간은 1992년부터 2004년까지이다 (Fig. 1). 이 중에서 2000년, 2001년 및 2003년은 자료 부족으로 제외하였다. 탁도는 2002년부터 조사하였으며, 수온과 DO를 동시에 측정하였다 (YSI 6600). 시·공간적 수온성층에 따른 DO는 2004년 9월부터 2005년 2월까지 상류 (upstream; JUJ), 중류 (midstream; MAD) 및 하류 (downstream; DAM) 지점에서 수온, 탁도와 함께 각각 수심 2 m 단위로 7회 조사하였다. 저수지 수질에 직접적인 영향을 미치는 유입 하천인 낙동강의 수온, DO, BOD, COD 및 SS는 안동호로부터 5 km 상류에서 측정된 환경부의 매월 수질측정망 자료를 이용하였으며, 13년간 (1992~2004년)을 대상으로 하였다 (<http://water.nier.go.kr>). 안동댐 유역과 저수지의 기온, 강우량, 유입량 및 유출량 등의 수문자료는 기상청 (www.kma.go.kr)의 월별 일일 관측값과 안동댐관리단의 관리연보 (1992~2004년)를 이용하였다.

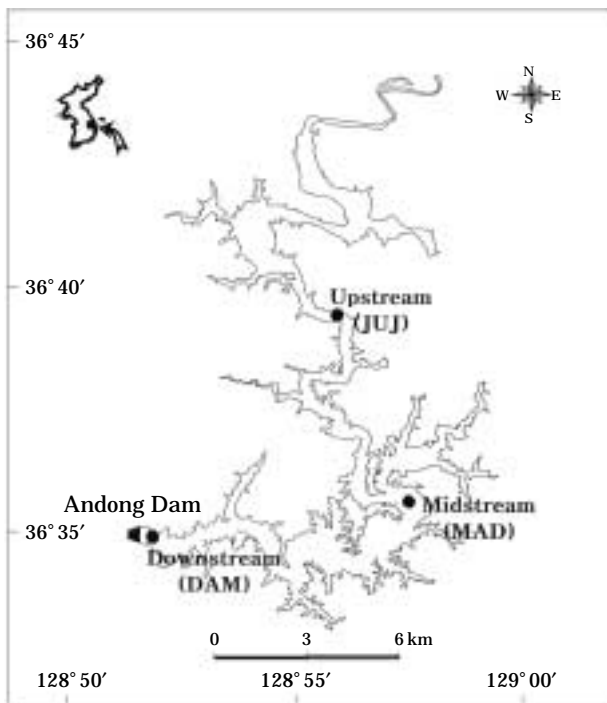


Fig. 1. Map showing the location of the sampling stations (●) in Andong Reservoir.

1. 유입수의 물리·화학적 수질변화

안동댐은 낙동강의 본류에 위치하므로 낙동강을 통하여 대부분의 유량이 유입된다. 유입수의 평균 (±SD), 최고 및 최저 수온은 각각 13.0 ± 9.0 , 30.0 및 0°C 로 7~8월에 최고, 1~2월에 최저를 보여 안동호의 연간 수온변화와 유사한 변동을 보였다 (박 등, 2005a). DO는 고수온기인 6~9월에 상대적으로 낮았으며 평균, 최대 및 최소값은 각각 11.3 ± 2.2 , 17.0 및 6.2 mg L^{-1} 로서 1996년 2월에 가장 높았고 1992년 7월에 최저를 보였다. BOD, COD 및 SS는 강우량이 집중되는 6~9월에 상대적으로 높았다.

각 항목별 평균 (±SD), 최대 및 최소값은 각각 BOD가 1.0 ± 0.3 , 2.4 , 0.5 mg L^{-1} , COD가 2.3 ± 0.7 , 5.6 , 0.9 mg L^{-1} 및 SS가 3.3 ± 3.4 , 20.3 , 0.3 mg L^{-1} 로서 다른 항목에 비해 SS의 변화가 컸다 (Table 1).

2. 기후요인과 수온변화

수온변화에 직접 영향을 미치는 기온은 월 평균 $12.0 \pm 9.3^\circ\text{C}$ 로서 7~8월에 최고였으며 1월에 최저를 보였다. 평균 기온과 댐 저수지의 평균 수온은 각각 12.0 ± 9.3 , $15.4 \pm 8.6^\circ\text{C}$ 였고, 최고/최저는 각각 $28.3/-3.7$, $30.5/1.7^\circ\text{C}$ 로서 최고는 수온이 높았고 최저는 기온이 낮았다. 저수지 표층에서의 수온은 기온보다 1개월 늦은 2월에 최저 수온을 보인 반면, 최고 수온은 6~9월로 최고 기온과 동일한 시기이거나 1개월 늦은 경향을 보였다 (Table 2).

댐측지점 (DAM)에서의 수심별 수온은 1~3월까지는 전체 수심에서 등온상태를 유지하였으며, 4월 (1995, 1996년은 5월)에 표층 수온이 상승하면서 5월부터 수온성층이 약하게 형성되기 시작하여 6월에는 표층 수온이 20°C 이상인 반면, 심층 수온은 $4.6 \sim 5.7^\circ\text{C}$ 의 범위로서 성층현

Table 1. Inflow water quality at Andong Reservoir. The values indicate the monthly average, standard deviation (±SD) and maximum/minimum during the period between 1992~2004 (n=156, data from <http://water.nier.go.kr>).

Item	Temperature (°C)	DO (mg L ⁻¹)	BOD (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)
Mean ±SD	13.0 ± 9.0	11.3 ± 2.2	1.0 ± 0.3	2.3 ± 0.7	3.3 ± 3.4
Max./Min.	30.0/0.0	17.0/6.2	2.4/0.5	5.6/0.9	20.3/0.3

상을 보였다 (Figs. 2a, b), (박 등, 2005b). 시기·수심별 최저 수온은 1995년 2월에 평균 $2.5 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 였으며, 1996년 2월에는 연구기간 중 유일하게 수심 5 m까지 겨울철 역성층이 형성되었다. 표층은 수온성층이 형성되기 시작하는 5월부터 수심 5~10 m 범위 이내에서 형성되었고 수심 10~20 m 범위에 중층이 존재하였지만, 8월 경부터는 중층이 수심 30 m 부근까지 확장되었다. 9월부터는 표층의 수온 하강에 따라 상·하 수층간 수온차가 감소하여 11월에는 표층이 수심 20~30 m까지 확장되고 1월에

수온성층이 완전히 소멸되었다 (Figs. 2a, b).

3. 시기·수심별 DO 변화

수심별 DO는 12~4월까지 수온분포와 유사한 경향을 보였다 (Figs. 2a, b). 5~6월까지는 바닥층을 제외한 전체 수층에서 10 mg L^{-1} 분포로 DO가 균일하게 풍부한 상태를 유지하였지만 표층의 수온 상승으로 수온성층이 강하게 형성되는 7월부터 수심 5~10 m 범위에서 DO가 감소하였다. 1999년 5~6월과 2002년 6~7월에는 중층

Table 2. Limnological and environmental factors at the Dam Station of Andong Reservoir. The values indicate the monthly average, standard deviation (\pm SD) and maximum/minimum from 1992 to 2004 ($n=156$).

Item	Precipitation (mm)	Inflow ($\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)	Air temperature ($^\circ\text{C}$)	Water temperature ($^\circ\text{C}$)	Secchi disc depth (m)	Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Mean \pm SD	103.4 ± 117.9	35.2 ± 50.1	12.0 ± 9.3	15.4 ± 8.6	3.0 ± 0.8	4.6 ± 2.8
Max./Min.	787.0/0.1	311.2/2.2	28.3/-3.7	30.5/1.7	6.1/1.0	14.4/0.8

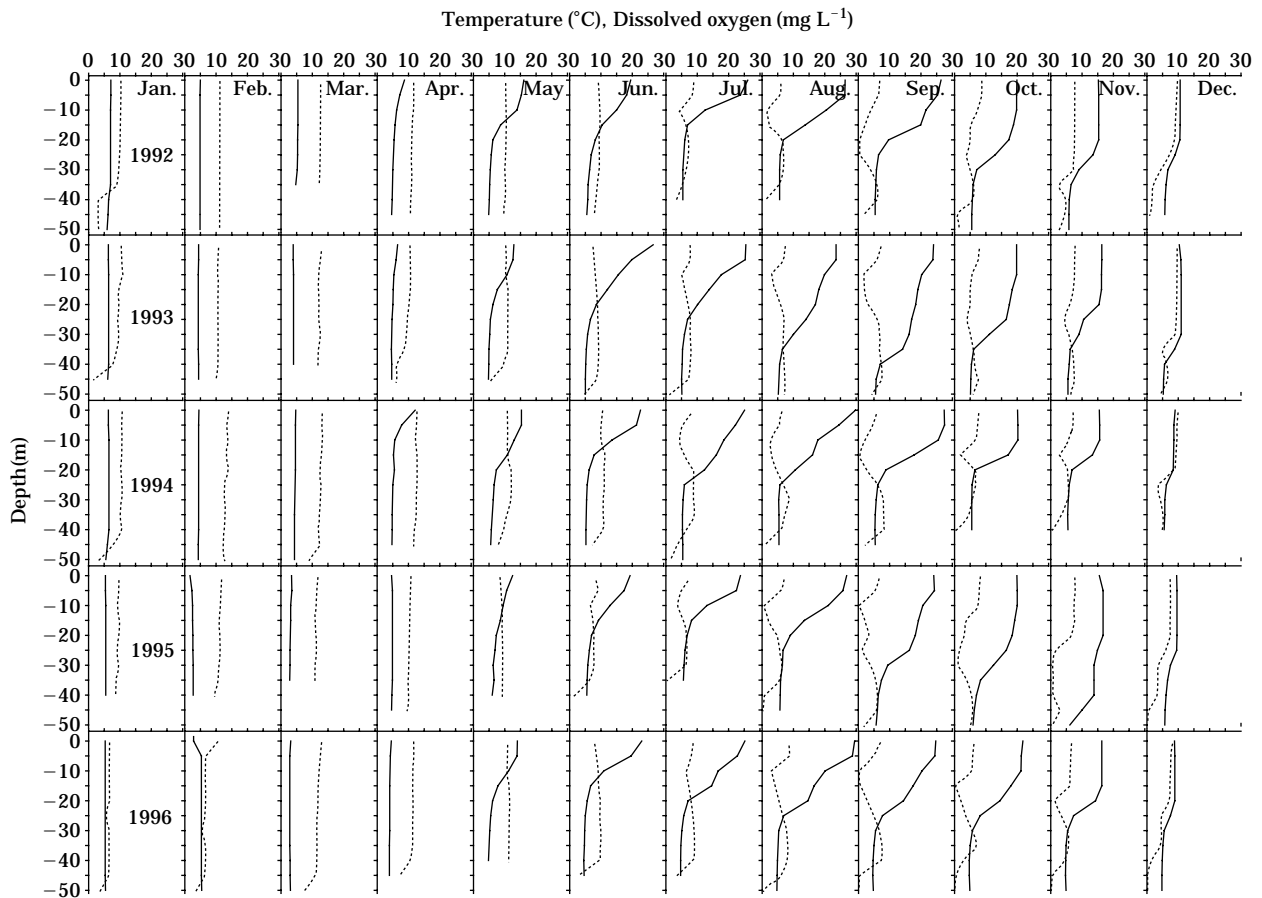


Fig. 2(a). Monthly temperature (solid line) and DO (dotted line) profiles at the Dam Station in Andong Reservoir from 1992 to 1996.

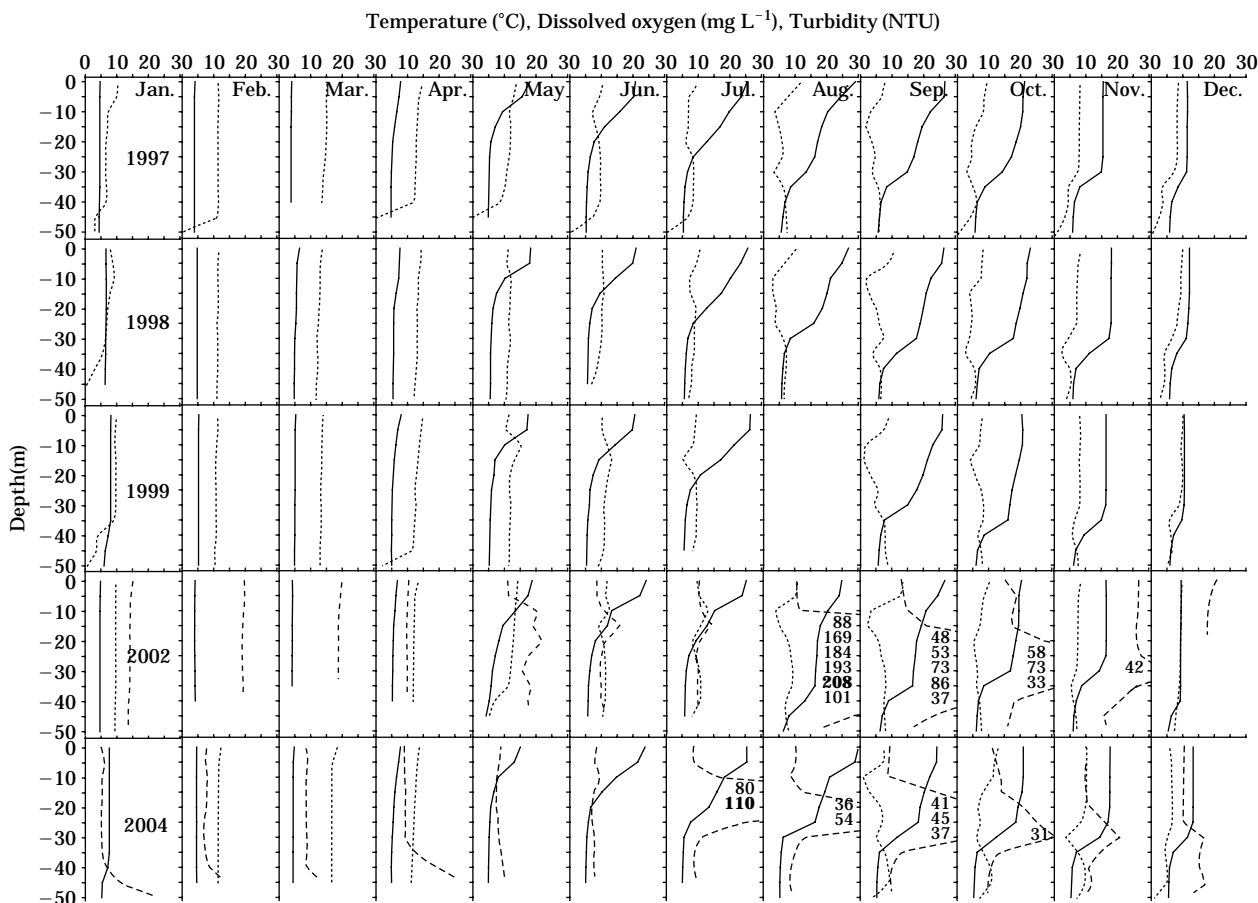


Fig. 2(b). Monthly temperature (solid line), DO (dotted line) and turbidity (dash line) profiles at the Dam Station in Andong Reservoir from 1997 to 2004. Numerals indicate turbidity (NTU) at each depth.

산소최대현상 (metalimnetic oxygen maximum)이 수심 10~15 m 범위에 존재하였으나 점차 소멸되고 동일 수심대에 산소최소층 (metalimnetic oxygen minimum)이 형성되었다. 중층 산소최대층은 연구기간 중 2회만 형성되었으나 중층에서의 산소최소현상은 연구기간 중 매년 나타났다 (Figs. 2a, b). 중층 산소최소층이 형성되는 시점은 6~7월로 수온성층이 강하게 형성되는 시기와 일치하였으며 8~9월까지의 농도가 점차 낮아져 1992년 9월, 1995년 8월 및 2004년 9월에는 각각 0.4, 0.6 및 0.9 mg L⁻¹까지 감소하였다. 초기의 중층 산소최소층은 수심 5 m 부근에서 두께 5 m 이내로 한정되었고 최소층 직하부에서는 DO가 다시 증가한 후 심층에서 급격히 감소하는 경향을 보였다 (Figs. 2a, b).

중층에서의 산소최소층은 최장 12월까지 존재하였으며 시기에 따라 2개의 수심대에서 각각 존재하였다. 본 연구에서 대상으로 한 10년 중 5년간(1995, 1997, 1998, 1999 및 2004년)은 중층에 2개의 뚜렷한 산소최소층이 형성되

었다. 또한 1992, 1993년 및 2002년에도 중층에서 2개의 저산소층이 존재하였으나 상·하층간의 농도 차이는 크지 않았다. 중층에서의 상부 저산소층은 수심 10 m에서 형성되고 하부층은 수심 25~30 m 범위에서 형성되었으며, 중층에서 2개의 저산소층으로 뚜렷이 구분되는 시기는 9월(1997년은 8월)이었다. 표층 수온의 하강으로 상부의 저산소층은 점차 하부로 이동되면서 소멸되었고, 하부층의 DO는 상부층이 소멸되면서 낮아졌으며 하부층이 완전히 소멸되는 시기는 수온성층의 소멸시기와 같은 1월이었다 (Figs. 2a, b).

중층에 상부의 저산소층이 형성되는 시기의 DO와 수온은 각각 0.4~3.4 mg L⁻¹, 19.2~20.8°C의 범위였으며 수심이 깊어지면서 수온은 지속적으로 감소하는 반면, DO는 증가하였다가 감소하는 경향을 보였다. 두 개의 저산소층 사이에 존재하는 DO 증가층에서는 최대 3.6~7.7 mg L⁻¹ 범위까지 증가하였으며, 이 때의 수온은 18.2~19.9°C의 범위였다. 하부 저산소층에서는 상부 저산소층

Table 3. Changes in minimum DO and temperature at the metalimnetic zone in Andong Reservoir for 5 years. The asterisks (*) show the maximum DO and temperatures between the upper and lower zones.

Month/Year	DO (mg L ⁻¹)			Temperature (°C)		
	Upper zone	Intermediate zone	Lower zone	Upper zone	Intermediate zone	Lower zone
Sep. 1995	0.4	3.6*	1.2	19.2	18.2*	9.4
Aug. 1997	3.4	6.1*	3.4	20.3	18.4*	13.5
Sep. 1998	1.6	7.7*	3.5	20.8	19.9*	11.4
Sep. 1999	1.0	5.8*	4.3	19.8	17.8*	14.9
Sep. 2004	0.9	7.2*	5.0	20.3	19.0*	11.7

Table 4. Temporal, spatial changes of mean turbidity and DO in Andong Reservoir from September 2004 to February 2005. JUJ, MAD and DAM are upstream, midstream and downstream, respectively.

Item	Station	2004					2005	
		10 Sep.	21 Sep.	8 Oct.	4 Nov.	2 Dec.	10 Jan.	4 Feb.
Turbidity (NTU)	JUJ	28.3	36.2	25.5	22.0	19.3	-	-
	MAD	23.4	17.9	15.9	14.1	19.9	14.1	-
	DAM	20.1	17.0	15.9	12.0	12.5	15.9	13.1
DO (mg L ⁻¹)	JUJ	6.5	10.8	13.4	11.4	5.8	-	-
	MAD	5.5	6.8	9.3	9.4	6.2	11.0	-
	DAM	6.6	7.8	9.4	9.0	5.6	7.9	13.6

의 DO와 비슷하거나 높은 수준인 1.2~5.0 mg L⁻¹ 범위까지 감소하였고 심층에서 다시 증가한 후 저수지 바닥부근에서 급격히 감소하였다(Table 3, Figs. 2a, b).

4. 저산소층의 시·공간적 변화

중층에 2개의 뚜렷한 저산소층이 존재한 5년 중에서 2004년을 대상으로 수심 2 m 단위로 시·공간적인 수온, DO 및 탁도변화를 조사하였다. 수온변화는 예년과 유사한 경향을 보였으나(Fig. 3A), 태풍에 의해 7월부터 수심 15~20 m 범위에는 최고 100 NTU 이상의 고탁수층이 존재하였다(Fig. 2b).

하류(DAM)의 중층에 위치한 취수구를 통한 방류로 저수지에서의 월별 최고 탁도(수심)는 각각 7월에 110 NTU (20 m), 8월에 54 NTU (25 m), 9월에 50 NTU (28 m), 10월에 31 NTU (30 m), 11월에 21 NTU (30 m), 12월에 18 NTU (32 m) 및 1월에 17 NTU (34 m)로서 농도와 수심이 점차적으로 낮아졌다(Figs. 2b, 3C). 중층에 존재하던 상대적 고탁도층은 상류(JUJ)는 12월에 소멸되었으나 중·하류(MAD, DAM)에서는 1월에 완전히 소멸되어 시·공간적인 차이를 보였다(Fig. 3C).

하류(DAM)의 탁도는 수층혼합으로 전체 수심에서 1°C 미만의 수온차이를 보이는 1월이 12월보다 수심 32 m까지는 4~5 NTU 범위로 증가하였고 바닥에서 두께 10 m

까지는 최대 11 NTU까지 증가하였다(Fig. 3C), (박 등, 2005b). 지점별 전체 수심의 평균 탁도는 상류(JUJ)에서 36.2~19.3 NTU의 범위로 점차 낮아졌으나, 중류(MAD)에서는 11월까지 23.4~14.1 NTU의 범위로 점차 낮아지다가 12월에는 19.9 NTU로 증가한 후 1월에 14.1 NTU로 낮아지는 경향을 보였다. 중류와 마찬가지로 하류(DAM)에서도 11월까지 20.1~12.0 NTU의 범위로 낮아졌으나 12월과 1월에 각각 12.5, 15.9 NTU로 증가하였고 2월에 13.1 NTU로 낮아졌다(Table 4).

중층에 저산소층이 형성되어도 수심 8 m까지는 DO가 비교적 균일하였으며 수온이 하강하면서 표층의 DO 균일층은 점차 깊은 수심으로 확장되었다. 수심이 20 m인 상류(JUJ)에서는 연구기간 중에 중층 저산소층이 형성되지 않았고, 수심 36 m였던 중류(MAD)에서는 9월에 2개 수심대에 약하게 형성되었으나 11월에 소멸되었다. 하류(DAM)는 9월 초순에는 수심 10 m와 30 m에, 9월 중순에는 14 m와 32 m에, 10월에는 16 m와 32 m에 각각 존재하였으며, 상부 저산소층은 11월에 완전히 소멸되어 중류(MAD)보다 2개월 정도 길게 존재하였다(Fig. 3B). 상부의 저산소층이 소멸할 때 하부층의 DO는 10월에 비해 2.6 mg L⁻¹까지 감소하였다. 전체 수심에서의 평균 DO는 중층에 2개의 저산소층이 존재하는 10월까지는 DO가 1.2~1.6 mg L⁻¹ 범위로 증가하였으나 상부의 저산소층이 소멸되는 11월과 하부 저산소층이 소멸되는 12

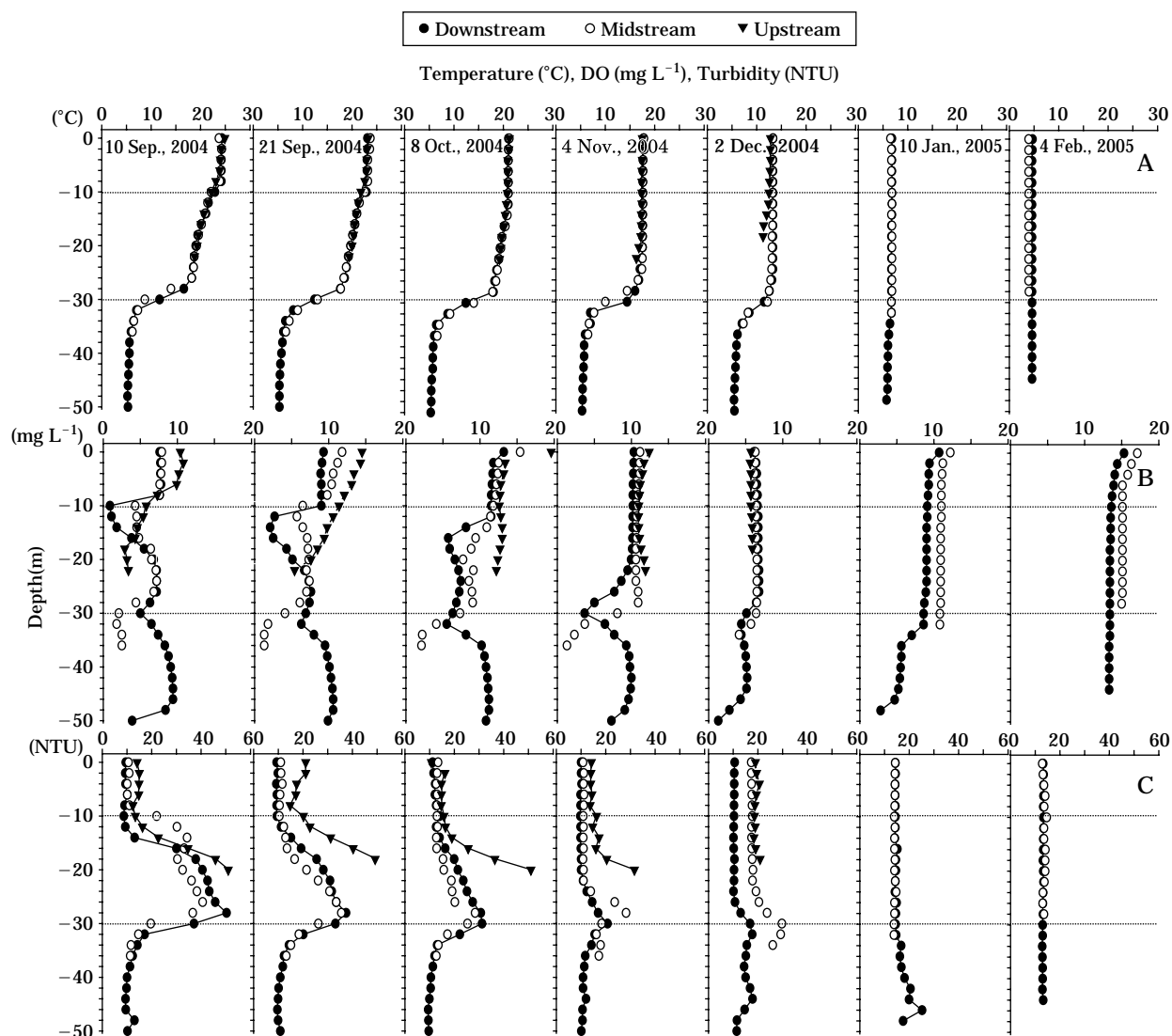


Fig. 3. Temporal and spatial profiles of temperature (A), DO (B) and turbidity (C) at 3 sections in Andong Reservoir from September 2004 to February 2005.

월의 평균 DO는 각각 9.0, 5.6 mg L⁻¹로 낮아졌으며 감소 범위는 0.4~3.4 mg L⁻¹였고 12월이 컸다. 하부에 저산소층이 남아있는 1월과 전체 수심에서의 수온, DO 및 탁도가 균일한 상태를 보이는 2월의 평균 DO는 각각 7.9, 13.6 mg L⁻¹로 증가하여 예년과 유사한 변화경향을 보였다 (Table 4, Fig. 3B).

고찰

안동호는 중위도에 위치한 우리나라의 다른 호수들과 같이 매년 여름철에 수온성층과 중층에 저산소층이 형성

되었으며 심층에 무산소층이 존재하기도 하였다 (Kim and Cho, 1989; 서, 1998; An, 2000). 본 연구기간 중 2년간 (1994, 1996년)은 중층에 하나의 저산소층만 형성되었으며 3년간 (1992, 1993 및 2002년)은 2개의 저산소층이 약하게 형성되었다. 그러나 5년간 (1995, 1997, 1998, 1999 및 2004년)은 중층 상·하부에 각각의 저산소층이 뚜렷하게 형성되었고 두 층 사이에 DO 증가층이 존재하였다 (Table 3, Figs. 2a, b). 중층의 상부 저산소층은 수온성층이 형성되기 시작하는 5월보다 1~2개월 늦은 6~7월부터 존재하였다. 형성 초기에는 수심 10 m 부근에서 DO가 급격히 감소 (negative heterograde curve) 하였으며 점차 15 m 정도의 두께로 저산소층이 확장되었다. 하부의

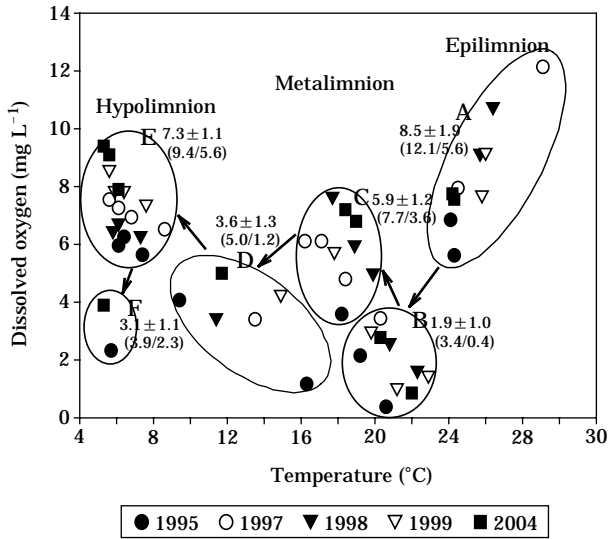


Fig. 4. Relationship between temperature and DO at the Dam Station in Andong Reservoir for 5 years (August 1997 and September 1995, 1998, 1999 and 2004). A-Epilimnion; B, C and D-Metalimnion; E and F-Hypolimnion and arrows indicate the direction of water depth. The values are mean \pm SD (maximum/minimum) concentrations of DO at each category.

저산소층은 상부층보다 1~2개월 늦은 8월 경에 수심 25~30 m 범위에서 형성되어 12월까지 존재하였으며 1월에 수심 35~40 m 범위에서 소멸되었다 (Figs. 2a, b).

중층에 2개의 저산소층이 뚜렷하게 형성될 때의 수심별 수온과 DO는 6개의 category로 구분되었으며 (Fig. 4), 표층 (epilimnion)은 1개 (A), 중층 (metalimnion)은 3개 (B, C 및 D) 및 심층 (hypolimnion)은 2개 (E, F)의 category가 해당되었다. 표층 (A)과 심층 (E)의 평균 수온과 DO는 각각 $25.4 \pm 1.6^\circ\text{C}$, $8.5 \pm 1.9 \text{ mg L}^{-1}$ (A)와 $6.4 \pm 0.9^\circ\text{C}$, $7.3 \pm 1.1 \text{ mg L}^{-1}$ (E)이었으며, 심층이 표층보다 일정한 경향을 보였다. 중층의 상부 저산소층 (B)에서의 평균 수온과 DO는 각각 $20.9 \pm 1.2^\circ\text{C}$, $1.9 \pm 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ 로 표층 (A)보다 평균 수온과 DO가 각각 4.5°C , 6.6 mg L^{-1} 까지 감소하였다 (Fig. 4B).

중층의 산소증가층 (C)에서는 DO가 평균 $5.9 \pm 1.2 \text{ mg L}^{-1}$ 까지 증가하였으며 수온은 $18.2 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 감소하였다 (Fig. 4C). 일반적으로 빈영양호에서는 수심이 깊어질수록 수온 하강에 따라 DO는 증가 (orthograde curve)한다 (Thornton *et al.*, 1990; Kalf, 2002).

선행 연구에서 안동호는 중영양상태로 평가되었으며 (허 등, 2000; 박 등, 2005a), 여름철에 중층 상부에서는

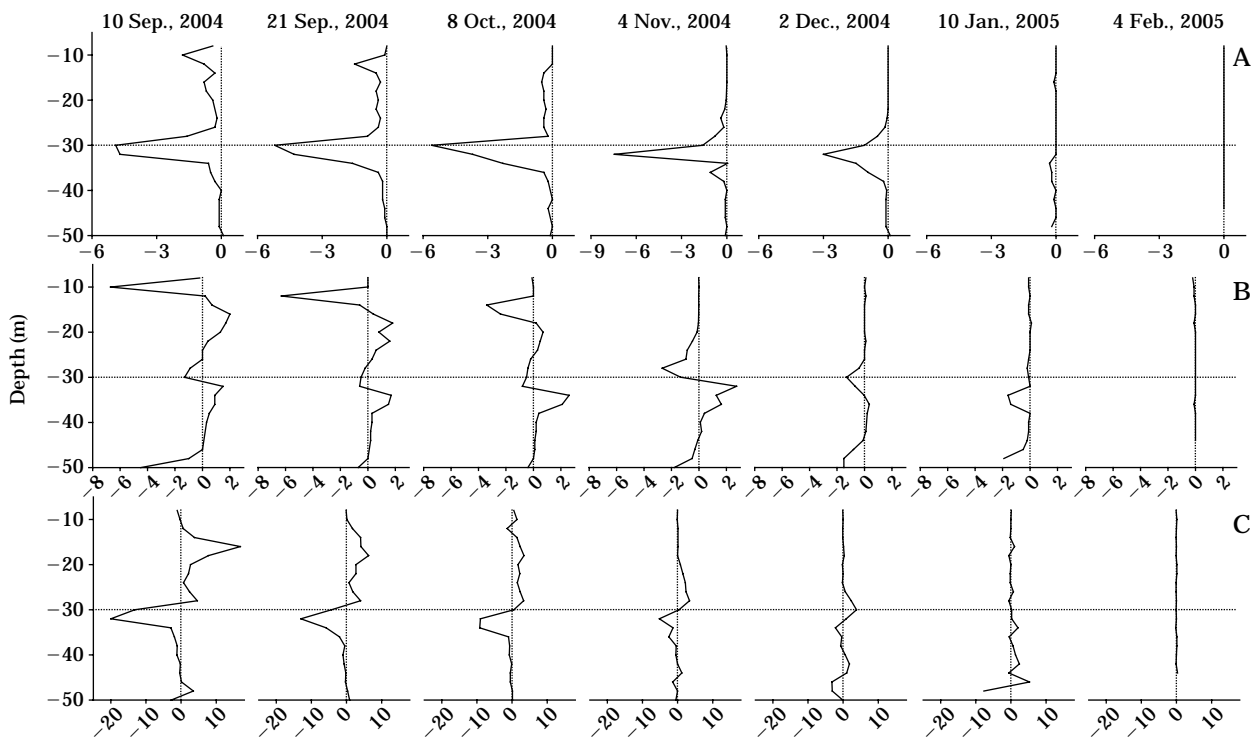


Fig. 5. Changes in temperature (A), DO (B) and turbidity (C) below the epilimnion boundary in Andong Reservoir from September 2004 to February 2005. units; temperature ($^\circ\text{C}$), DO (mg L^{-1}), turbidity (NTU).

negative heterograde DO curve를 보이고 직하부에는 positive heterograde DO curve가 형성되었다 (박 등, 2005b). 이것은 본 연구기간에도 매년 나타난 현상으로, 수온성층이 형성되기 전에 전체 수심에서 균일하게 분포 하던 DO가 수온성층 시기에 표층과 중층 상부 사이에서 급격히 감소 (negative)하기 때문에 다시 증가 (positive) 되는 과정에서 나타나는 현상으로 판단된다. 중층에 2개의 저산소층이 형성되지 않은 1994년과 1996년에는 수온성층이 형성되기 이전 수준까지 중층에서 DO가 증가되었지만, 형성되었던 시기 (5년)에는 깊은 수심의 심층에서 증가되는 경향을 보였다 (Figs. 2a, b).

중층 저산소층의 형성 원인은 여름철 표층에서 침강한 입자상 물질 (Stauffer, 1985; 서, 1998), 고탁수에 의한 밀도류 (Soltero *et al.*, 1974; Kim and Cho, 1989), 동물플랑크톤의 섭식과 호흡활동 (Shapiro, 1960; Landon and Stasiak, 1983; Horne and Goldman, 1994) 및 세균활동 (Drury and Gearheart, 1975; Kalf, 2002) 등으로 다양하게 보고되어 있다. 안동호의 평균 Chl-*a*와 투명도는 각각 $4.6 \pm 2.8 \mu\text{g L}^{-1}$, $3.0 \pm 0.8 \text{ m}$ 이지만 여름철에는 Chl-*a*가 최대 $14.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 증가하고 투명도는 최소 1.0m까지 감소하여 (Table 2), 고수온기에 생물활동이 활발함을 알 수 있었다 (박 등, 2005a). 중층의 상부 저산소층은 고수온기의 다양한 생물활동 (biotic)이나 강우시에 표층으로 유입된 토양기원성 무기입자 (abiotic)가 밀도가 증가하는 표층과 중층의 경계면에서 산소를 소모한 때문이라는 기존의 연구들과 부합된다고 판단된다 (Kim and Cho, 1989; 서, 1998; 박 등, 미발표자료).

반면에 호수의 수온성층과 DO에 관한 선행 연구들은 중층 상부의 산소최소현상과 심층 무산소상태에 국한되어 있으며 중층에 각각 형성되는 2개의 저산소층에 대한 보고는 없는 상태이다. 안동호의 중층에 형성되는 2개의 저산소층 중에서 상부층은 기존 연구들과 유사한 경향을 보였지만 (Kim and Cho, 1989; 서, 1998; 허 등, 1998; An, 2000), 하부 저산소층은 8월 경에 수심 25~30 m 범위에서 형성되어 약 5개월 동안 지속되다가 가을순환으로 수

온성층이 없어지는 시기에 수심 35~40 m 범위에서 소멸되었다 (Figs. 2a, b). 상부의 저산소층 (Fig. 4B)은 5~15 m의 두께까지 확장되지만, 하부층의 두께는 10 m 정도로서 상대적으로 얇았으며 직하부인 심층 (Fig. 4E)에서는 DO가 다시 증가하였다. 하부 저산소층 (Fig. 4D)에서의 평균 DO는 $3.6 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 직상부의 산소증가층 (Fig. 4C)보다 평균 2.3 mg L^{-1} 감소하였으며 상부 저산소층 (Fig. 4B)보다는 평균 1.7 mg L^{-1} 가 높은 상태를 보였다. 하부 저산소층의 평균 수온은 $12.9 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 로서 상부의 저산소층보다는 5.3°C 낮은 상태였다 (Table 3).

박 등 (2005b)은 3년간 (2002~2004년)의 안동호에 대한 연구에서 고탁수를 포함한 밀도류가 댐 앞까지 이동하여 중층에 새로운 수괴를 형성하여 장기간 체류하며, 많은 유량의 고탁수가 호수 상류에서는 심층류로 유입되어 전이대에서 중층 밀도류의 형태로 댐까지 이동함을 밝힌 바 있다. 본 연구에서 안동호의 유입수의 연 평균 수온은 13.0°C 로서 댐 저수지 표층의 연 평균 수온 (15.4°C)보다 낮았으며 (Tables 1, 2), 중층에 2개의 저산소층이 형성된 비슷한 시기 (7~9월)의 유입수의 평균 수온과 DO는 각각 $21.0 \sim 25.0^\circ\text{C}$, $9.2 \sim 10.3 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 저수지의 표층 하부에서 중층 상부 사이의 수온, DO 분포와 유사한 상태를 보였다 (Table 5, Figs. 2a, b). 또한, 2004년의 장마, 태풍 시기 (6~8월)의 유입수의 수온과 DO는 각각 $18.3 \sim 23.8^\circ\text{C}$, $8.6 \sim 9.2 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 이 시기의 상부 저산소층 직하부 (산소증가층)와 유사하거나 높았다 (Table 6). 중층에 1개의 저산소층만 형성되었던 1994년과 1996년에는 저산소층 아래에서 DO가 증가되어 심층의 산소감소층까지 높은 상태를 유지하였지만, 수온성층 시기에 강우량과 유입량이 많았던 해에는 중층에 새로운 산소감소층 (하부 저산소층)이 형성되었다 (Table 7).

안동호에서 2개의 중층 저산소층 형성은 수온성층이 형성된 시기 (7~9월)의 강우량과 유입량에 영향을 받는 것으로 판단된다. 이 시기의 평균 강우량과 유입량이 각각 $92.2 \sim 105.3 \text{ mm}$, $25.1 \sim 32.3 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 범위로 ≤ 100

Table 5. DO and temperature of inflow at Andong Reservoir for 5 years. Bold values are approximately the same time as those found in Table 3 and Fig. 4 (Data from <http://water.nier.go.kr>).

Year	DO (mg L^{-1})				Temperature ($^\circ\text{C}$)			
	Jul.	Aug.	Sep.	Mean	Jul.	Aug.	Sep.	Mean
1995	7.6	9.3	10.3	9.1	26	26	21	24.3
1997	9.1	9.2	10.1	9.5	22	24	20	22.0
1998	9.5	8.8	9.4	9.2	14	23	22	19.7
1999	9.0	7.9	10.3	9.1	26	28	25	26.3
2004	9.4	9.6	10.1	9.7	21	28	21	23.3

Table 6. Inflow water quality of the rainy season in Andong Reservoir (Data from KOWACO, 2004).

Date	Temperature (°C)	DO (mg L ⁻¹)	BOD (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)	Inflow (m ³ sec ⁻¹)
21 Jun. 2004	18.3	9.2	1.7	2.9	22.6	1,694
7 Jul. 2004	19.6	9.1	1.1	2.0	15.7	382
17 Jul. 2004	21.7	9.0	2.3	3.8	28.4	1,212
19 Aug. 2004	23.8	8.6	2.0	3.5	27.5	1,344
Mean	20.9	9.0	1.8	3.0	23.6	1,158

Table 7. Distribution of rainfall and inflow when the metalimnetic oxygen minima were formed from 1992 to 2004 in Andong Reservoir, except for 2000, 2001 and 2003.

Item	Month /Year	Uniform		Weak form			Strong form				
		1994	1996	1992	1993	2002	1995	1997	1998	1999	2004
Rainfall (mm)	Jul.	79.2	164.4	259.0	288.8	231.6	171.5	343.4	241.1	152.6	298.6
	Aug.	170.6	122.0	151.8	422.8	787.0	309.4	169.0	354.7	394.3	328.7
	Sep.	26.8	29.7	157.7	87.7	82.4	34.2	71.2	162.0	383.2	171.1
	Mean	92.2	105.3	189.5	266.4	367.0	171.7	194.5	252.6	310.0	266.1
Inflow (m ³ sec ⁻¹)	Jul.	70.2	52.6	54.7	107.9	59.0	40.3	150.2	115.3	30.7	147.6
	Aug.	18.0	14.5	39.8	220.0	311.3	88.7	50.2	186.2	162.4	112.4
	Sep.	8.7	8.4	45.3	31.5	93.5	24.2	10.3	23.6	203.1	60.5
	Mean	32.3	25.1	46.6	119.8	154.6	51.1	70.2	108.4	132.1	106.8

mm, $\leq 30 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 일 때 (1994, 1996년)에는 중층에 1개의 저산소층만 존재하였다. 2개의 저산소층이 약하게 형성될 때 (1992, 1993 및 2002년)에는 강우량과 유입량이 각각 $189.5 \sim 367.0 \text{ mm}$, $46.6 \sim 154.6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 범위였고, 뚜렷하게 형성될 때 (1995, 1997, 1998, 1999 및 2004년)에는 $171.7 \sim 310.0 \text{ mm}$, $51.1 \sim 132.1 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 의 범위였다. 중층의 저산소층은 7~9월의 평균 강우량과 유입량이 각각 $\geq 170 \text{ mm}$, $\geq 50 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 이면 2개가 강하게 형성되었으나 1개월간의 최대 강우량과 유입량이 $> 400 \text{ mm}$, $> 200 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 인 경우에는 약하게 형성되었다 (Table 7). 서 (1998)는 대청호의 연구에서 강우량이 증가하면 성층구조가 교란되고 7월 중순에 그 영향이 컸으며, 허 등 (1998)은 소양호에서 수온약층의 상부로 유입된 홍수기 (7월) 밀도류가 중층 방류에 의해 8월에는 수온약층이 하강함을 보고하였다.

본 연구기간 중 최대 강우량과 유입량을 보인 1993년 8월 (422.8 mm , $220.0 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$)과 2002년 8월 (787.0 mm , $311.3 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$)에는 표층과 중층의 수온차이가 감소되고 중층의 확장으로 심층은 하부로 이동되었으며, 이 시기에 중층 상·하부에는 저산소층이 약하게 형성되었다 (Table 7, Figs. 2a, b).

안동호를 비롯하여 소양호, 대청호에서도 몬순 기간 동안 오염부하량이 증가하고 중층에 고탁수층이 형성된다

(Kim and Cho, 1989; 서, 1998; 허 등, 1998; 허 등, 2000; An, 2000; 박 등, 2005b). 안동호로 유입되는 수량의 대부분을 차지하는 낙동강의 연 평균 BOD, COD 및 SS는 각각 1.0, 2.3 및 3.3 mg L^{-1} 이었으나 (Table 1), 홍수기인 2004년 6~8월의 평균값은 각각 1.8, 3.0 및 23.6 mg L^{-1} 로서 강우시에 유·무기물질의 유입량이 증가하였다 (Table 6). 홍수기에 집중 유입되어 중층 밀도류의 형태로 장기간 체류하는 고탁수는 이 시기의 호수 내 중층의 DO 농도와 유사하거나 높았다 (Table 6, Figs. 2a, b). 고탁수층은 하류 배출을 통해 탁도는 점차 낮아졌으나, 심층으로 침전은 일어나지 않았고 중층과 심층의 경계면에서 최고 탁도를 보였다 (Fig. 2b), (박 등, 2005b).

안동호의 수심 10 m 부근에서 형성되는 중층의 상부 저산소층은 2004년에는 수심 8~10 m에서 수온과 DO가 각각 1.8°C , 6.7 mg L^{-1} 까지 최대로 감소하였다. 이 수심까지 탁도는 10 NTU 이하로 낮은 상태였으며 수심 16 m부터 40 NTU 이상으로 증가하여 28 m에 최고 탁도가 분포하였다 (Figs. 3C, 5C). 상부 저산소층 하부에서는 DO와 탁도가 함께 증가하는 유사한 경향을 보이므로 고탁도의 유입수가 상부 저산소층 아래 (산소증가층)에서는 DO를 소모하지 않는 것으로 판단된다. 하부의 저산소층은 수심 2 m마다 수온이 최대 4.9°C 까지 급격히 하강하는 수심 30 m에서 형성되며, 이 수심대에서 DO는 최대

1.3 mg L⁻¹까지 감소한 후 증가하였다가 심층의 바닥 부근에서 급격히 감소하는 경향을 보였다(Figs. 3B, 5B). 안동호에서 중층 상부에 형성되는 저산소층은 홍수기에 유입된 고탁수의 영향보다는 수온변화에 따른 상대적 고밀도 환경에서 표층의 생물활동이나 수면 부근으로 유입된 피산화물과 관련이 있을 것으로 판단된다(서, 1998). 그러나 하부의 저산소층은 중층에 장기간 체류하는 고탁수 중에 함유된 유·무기입자가 중층과 심층의 경계면에 침전, 체류하면서 DO를 소모하기 때문에 형성되는 것으로 사료된다.

적 요

안동호에서 1992년부터 2004년까지 장기간에 걸친 수십밀 수온분포와 DO 변동을 조사하였다. 매년 5월부터 수온성층이 형성되기 시작하였고 표층의 수온상승으로 8월까지 상·하층간의 수온차이는 증가하였다. 중층에는 매년 6~7월부터 저산소층이 형성되었으며 연도에 따라 2개가 존재하였다. 2개의 저산소층은 수온성층이 형성된 7~9월의 강우량과 유입량에 영향을 받았다. 이 시기의 평균 강우량과 유입량이 각각 ≥ 170 mm, ≥ 50 m³ sec⁻¹ 일 때 중층 상부와 하부에서 각각의 저산소층이 강하게 형성되었으며, 1개월간 > 400 mm, > 200 m³ sec⁻¹인 경우에는 약하게 형성되었다. 표층과 중층의 경계면에 형성되는 상부 저산소층에서는 수온 감소율보다 DO 감소율이 컸으며 11월 경에 소멸되었다. 중층과 심층 경계면에 형성되는 하부 저산소층은 12월까지 존재하다가 1월에 소멸되며 이 층에서는 DO보다 수온 감소율이 컸고, 상·하부의 저산소층 사이에서는 DO가 증가하였다. 심층의 DO는 중층 아래에서 증가하였으며 저수지 바닥 부근에서 급격히 감소하는 경향을 보였다. 홍수기에 유입수의 수온은 저수지 중층의 수온분포와 유사하였으며 DO는 유사하거나 높았고, BOD, COD 및 SS는 농도가 증가하였다. 고탁수층은 중층에 형성되었으며, 탁도는 중층의 상부 저산소층 아래(산소증가층)에서 증가하여 하부 저산소층 직상부에서 최고 농도로 존재하였다. 표층과 중층의 경계면에 형성되는 상부 저산소층은 표층에서의 생물활동과 관련이 있으며, 하부 저산소층은 홍수기에 중층으로 유입된 고탁수가 원인인 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

박재충, 박정원, 김대현, 신재기, 이희무. 2005a. 안동호의 수역

- 별 영양상태 평가 및 평가방법간 상관성 비교. 한국육수학회지 **38**: 95-104.
- 박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005b. 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성. 한국육수학회지 **38**: 105-117.
- 서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. 대한환경공학회지 **9**: 1219-1234.
- 안광국. 2000. 호수 지형 및 수리수문학적 변화에 대한 문헌연구. 한국육수학회지 **33**: 342-349.
- 허우명, 권상용, 김법철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변동. 한국육수학회지 **33**: 260-266.
- 허우명, 김법철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31**: 1-8.
- 한국수자원공사(KOWACO). 2003. 안동다목적댐 관리연보. 302p.
- 한국수자원공사(KOWACO). 2004. 안동댐 일원 수문조사 보고서. 312p.
- An, K.G. 2000. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean J. Limnol.* **33**: 213-221.
- An, K.G. 2001. Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and modifications by interflow current. *Korean J. Limnol.* **34**: 9-19.
- Cornett, R.J. and F.H. Rigler. 1980. The areal hypolimnetic oxygen deficit: An empirical test of the model. *Limnol. Oceanogr.* **25**: 672-679.
- Cornett, R.J. and F.H. Rigler. 1987. Decomposition of seston in the hypolimnion. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **44**: 146-151.
- Drury, D.D. and R.A. Gearheart. 1975. Bacterial population dynamics and dissolved-oxygen minimum. *J. Am. Wat. Works Assoc.* **67**: 154-158.
- Edmondson, W.T. and G.C. Anderson. 1956. Artificial eutrophication of Lake Washington. *Limnol. Oceanogr.* **1**: 47-53.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters-Principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London, 327p.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc. 576p.
- Kalff, J. 2002. Limnology, Prentice-Hall, Inc. 592p.
- Kim, B.C. and K.S. Cho. 1989. The hypolimnetic anoxic zone and the metalimnetic oxygen minimum layer in a deep reservoir, Lake Soyang. *Korean J. Limnol.* **22**: 159-166.
- Landon, M.S. and R.H. Stasiak. 1983. *Daphnia* hemoglobin concentration as a function of depth and oxygen availability in Arco Lake, Minesota. *Limnol. Oceanogr.* **28**:

- 731-737.
- Lasenby, D.C. 1975. Development of oxygen deficits in 14 southern Ontario lakes. *Limnol. Oceanogr.* **20**: 993-999.
- Lind, O.T. 1987. Spatial and temporal variation in hypolimnetic oxygen deficits of a multidepression lake. *Limnol. Oceanogr.* **32**: 740-744.
- Miranda, L.E. and K.B. Hodges. 2000. Role of aquatic vegetation coverage on hypoxia and sunfish abundance in bays of a eutrophic reservoir. *Hydrobiologia* **427**: 51-57.
- Shapiro, J. 1960. The cause of a metalimnetic minimum of dissolved oxygen. *Limnol. Oceanogr.* **5**: 216-227.
- Soltero, R.A., J.C. Wright and A.A. Horpestad. 1974. The physical limnology of Bighorn Lake-Yellowtail Dam Mountain: Internal density currents. *Northwest Sci.* **48**: 107-123.
- Stauffer, R.E. 1985. Nutrient internal cycling and the trophic regulation of Green Lake, Wisconsin. *Limnol. Oceanogr.* **30**: 347-363.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir limnology: Ecological perspectives. John Wiley & Sons, Inc. 246p.
- Whitmore, T.J., M. Brenner, B.E. Rood and K.E. Japy. 1991. Deoxygenation of a Florida lake during winter mixing. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 577-585.
- (Manuscript received 27 August 2005,
Revision accepted 10 December 2005)