

인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성

박재총^{1,4,*} · 박정원² · 신재기³ · 이희무⁴

(¹한국수자원공사 안동댐관리단, ²경북대학교 생물학과
³한국수자원공사 수자원연구원, ⁴안동대학교 생물학과)

Dynamics of High Turbid Water Caused by Heavy Rain of Monsoon and Typhoon in a Large Korean Reservoir (Andong Reservoir). Park, Jae-Chung^{1,4,*}, Jung-Won Park², Jae-Ki Shin³ and Hee-Moo Lee⁴ (¹Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Andong 760-360, Korea; ²Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea; ³Korea Institute of Water and Environment Korea Water Resources Corporation KOWACO Taejon 305-730, Korea; ⁴Department of Biology, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

During the period of heavy rain from 2002 to 2004, the characteristics of the inflow, temporal and spatial fluctuations of high turbid water according to thermal stratification were studied on the Andong Reservoir which is the largest artificial lake in the Nakdong River basin, Korea. Thermal stratification was formed in June. Its structure determined to the pathway of inflowing turbid water and has affected by the transportation of high turbid water. Regardless of the time and amount of inflow, the high turbid water showed the shape of underflow at the riverine zone, separated from the bottom at the transition zone and moved to the lacustrine zone with the shape of density current. The plunging point depended on the time and amount of inflow. The distributions of thermal stratification and DO concentrations were changed by inflowing discharge. Two thermoclines and minimum DO layers were found out existing at metalimnion in a specific time, respectively. The layer of high turbid water which formed with the thickness of 20 m at the maximum below the depth of 15 m moved toward dam. Not settled to the bottom, the newly formed layer was discharged through the intake-outlet and dispersed into all layers by the circulation in the fall.

Key words : Andong Reservoir, density current, heavy rain, monsoon, stratification, turbid water, turbidity, typhoon

서 론

우리나라는 몬순(monsoon) 기후지역에 해당되어 장마, 집중호우 및 태풍 등이 여름철에 집중되므로 주요 하천

의 중·상류에는 치수를 주목적으로 하는 다목적댐을 건설하여 방류량 조절을 통한 하류지역의 홍수피해 경감에 큰 역할을 담당하고 있다(한국수자원공사, 2003). 매년 6~9월의 강우 집중현상에 의해 댐 저수지로 유입되는 수량과 수질의 편차는 매우 크며 특히, 홍수기에 고탁수

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

가 포함된 많은 유량을 저장한 댐이 이후에는 일정 수량을 장기간 방류해야 하는 이수 특성상 하류지역의 수생태계와 물 이용에 장기적인 타도장해가 유발되기도 한다 (Horne and Goldman, 1994; 한국수자원공사, 2004b).

홍수기의 집중호우와 유입 수량 급증은 저수지 유역의 용존성, 입자성 물질을 저수지 내로 운반하고 혼합(mixing)을 일으키는 주요한 에너지원으로 작용한다. 단기간에 저수지 내로 대량 유입된 고탁수층은 이 시기의 수온 성층(thermal stratification)과 일치하는 수심대에서 밀도류(density current with turbid water)를 형성하여 하류부로 유하하면서 가을철 순환기(fall circulation)까지 안정된 수층대를 형성하여 저수지 내에 장기간 체류하게 된다. 유입수는 위도, 계절에 따라 다소 차이는 있으나 유입 하천수의 자체 밀도와 저수지 내부의 수직적인 성층 구조에 따라 진행 경로가 결정되며, 일반적으로 가을, 겨울 및 봄철에는 상층류(overflow), 여름철에는 중층류(interflow)나 심층류(underflow)의 형태로 이동하게 된다(조 등, 1991; Horne and Goldman, 1994; 한국수자원공사, 2000; 황 등, 2002).

여름철 홍수기에 집중 유입되는 고탁수는 유역 내 비점오염물질의 주요한 부하경로이며 대량의 영양염류와 유기물질을 함유한 밀도류를 형성하여 하류부로 이동하면서 저수지 내부의 용존산소 결핍, 식물플랑크톤 대량 번식 및 하류 정수장의 고탁수 장해 등을 유발하기도 한다(Horne and Goldman, 1994; 김, 1998; 허 등, 1998; AWWA, 1999; An, 2000a; 박 등, 2001; 황 등, 2002; 한국수자원공사, 2004b).

우리나라는 댐 저수지에 따라 정도의 차이는 있으나 대부분 고탁수가 발생되고 있으며 비교적 최근에 준공된 임하호를 비롯하여 안동호, 소양호, 대청호 및 팔당호에서도 고탁수가 보고되고 있다(김과 조, 1989; 김, 1998; 허 등, 2000; An, 2000a, 2001; An et al., 2001; 신 등, 2003). 임하호의 경우 2002년 8월의 집중호우와 태풍에 의해 유발된 고탁수가 저수지 내에 장기간 체류하면서 전도현상(turnover)과 2003~2004년에 연속된 장마, 태풍에 의한 고탁수 유입이 반복되면서 하류에 위치한 정수장의 취수원 이전이 검토되고 있어 자연현상으로 유발된 고탁수가 사회문제로 확산되고 있는 실정이다(전 등, 2004; 한국수자원공사, 2004b).

우리나라의 탁수에 대한 선행 연구는 소양호, 대청호, 팔당호 및 임하호 등에 한정되었으며 안동호는 경제적, 사회적 중요성에 비해 주목을 받지 못한 실정이다. 본 연구의 대상지인 안동호는 낙동강 수계의 최대 다목적댐 저수지임에도 고탁수의 발생과 거동에 관한 연구는 극소

수에 불과하다. 허 등(2000)은 1993년부터 7년간의 안동호 연구에서 중층에 60~70 NTU의 탁수층이 존재함을 보고한 바 있으며, 전 등(2004)은 2004년 태풍 이후 안동호에서 154 NTU의 고탁수층을 보고하였다.

본 연구는 동일 수계의 인근지역에 위치한 임하호에서 고탁수 현상이 장기화된 2002년 이후 안동댐 저수지의 탁수발생과 소멸과정에 대해 연구함으로써 우리나라의 강우패턴 변화에 따른 인공호의 이수과 치수사업에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

안동댐은 1976년에 준공되었으며 낙동강 본류에 위치(동경 128°46', 북위 36°35')하고 있다. 안동호는 저수용량 1,248 × 10⁶ m³, 수면적 51.5 km² 및 만수시 저수지 길이가 43.5 km인 수지형(dendritic type) 저수지로서 최대 수심 67 m, 평균수심 24 m 및 체류시간은 0.85년이다. 유역면적은 1,584 km²로 임야가 1,292 km² (81.6%), 농경지는 145 km² (9.1%)이고 인구는 77,454명이며 연평균 강수량은 1,139 mm이다(한국수자원공사, 2003). 본 연구에

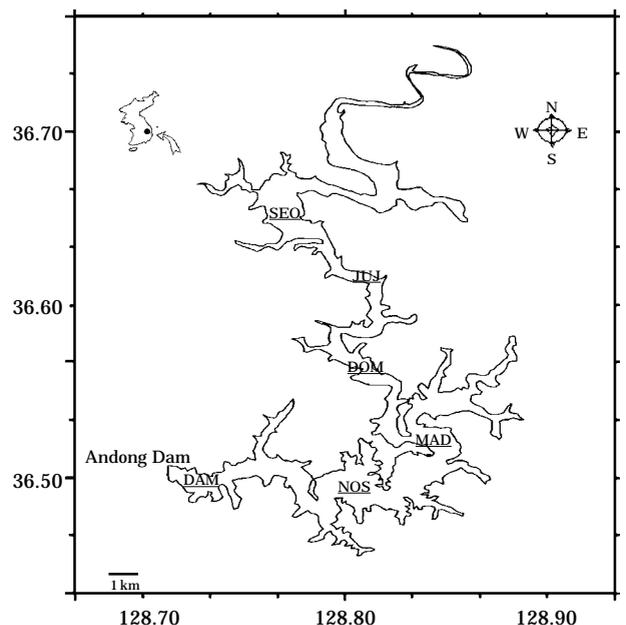


Fig. 1. Map showing sampling stations in Andong Reservoir. **DAM:** Dam site, 0.5 km upstream from dam; **NOS:** Nosan, 8 km upstream from dam; **MAD:** Madong, 13 km upstream from dam; **DOM:** Domok, 18 km upstream from dam; **JUJ:** Jujin, 23 km upstream from dam and **SEO:** Seobu, 28 km upstream from dam.

서는 낙동강 본류가 안동호로 유입되는 유입지점 (Seobu station)과 호소수가 방류구를 통해 하류로 유출되는 댐 축지점 (Dam station)을 기준으로 5~7 km의 간격으로 6개 지점을 선정하여 2002~2004년의 매년 6월부터 최장 12월까지 각각 6회씩 수체의 시·공간적, 물리·화학적 수질변화를 조사하였다 (Fig. 1).

조사빈도는 집중호우나 태풍에 의해 연중 최대 유입량을 보인 시기를 기준으로 강우 전·후에 각각 1회와 5회 수행하였다. 수온, 탁도 및 DO (dissolved oxygen)는 선박을 이용하여 Multiprobe (YSI 6600)로 수면으로부터 수심 1~2 m 단위로 각 지점에서 연속 측정하였으며 강우량, 유입량, 유출량 및 저수위는 안동댐 관리연보의 자료를 이용하였다 (한국수자원공사, 1992~2004). 강우량 (mm)은 월별 누계량을 사용하였고 유입·유출량 (CMS, m³ sec⁻¹) 및 저수위 (E.L. m)는 월 평균값을 사용하였다.

안동댐의 하류 용수공급과 홍수량 조절은 중층의 취수탑 (intake tower)과 월류식의 여수로 수문 (gateway)을 통하여 이루어지고 본 연구기간 중 2002년과 2003년에 댐 준공 이후 최초의 수문방류가 행해졌으나, 그 기간이 짧았고 수량이 적어 취수탑을 통한 방류량으로 통합하여 사용하였다. 댐 하류 방류수의 수온과 탁도조사는 1~12월까지 매월 초순에, 댐축지점에서의 수심별 수온, 탁도

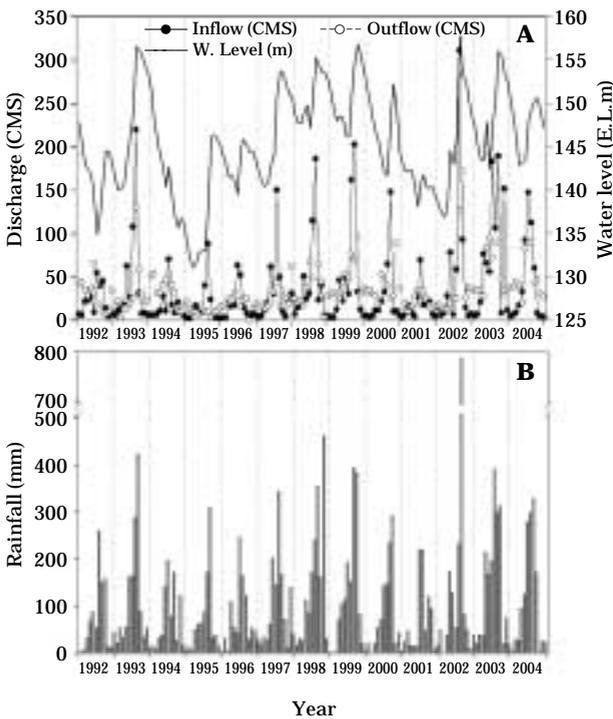


Fig. 2. Monthly variations of hydrological parameters in Andong Reservoir from 1992 to 2004.

및 DO변화는 6~11월 동안 매월 1회씩 각각 수행하였다.

결 과

1. 수문환경의 장기 변동

1992년부터 2004년까지의 연도별 평균 강우량은 1,205.0 ± 327.4 mm (최대 1,797.4 mm~2003년, 최소 840.5 mm~2001년)이었고 연도별로 최대 2배 이상의 편차를 보였으며 안동댐 유역의 연평균 강우량 (1,139.2 mm)보다 약 70 mm가 증가하였다. 월 평균 강우량은 104.4 ± 118.3 mm로 홍수기인 6~9월에 집중되어 몬순 기후지역의 일반적인 경향을 보였다 (Fig. 2B). 유입량은 강우량과 강한 상관을 보였으며 평균 유입량은 35.6 ±

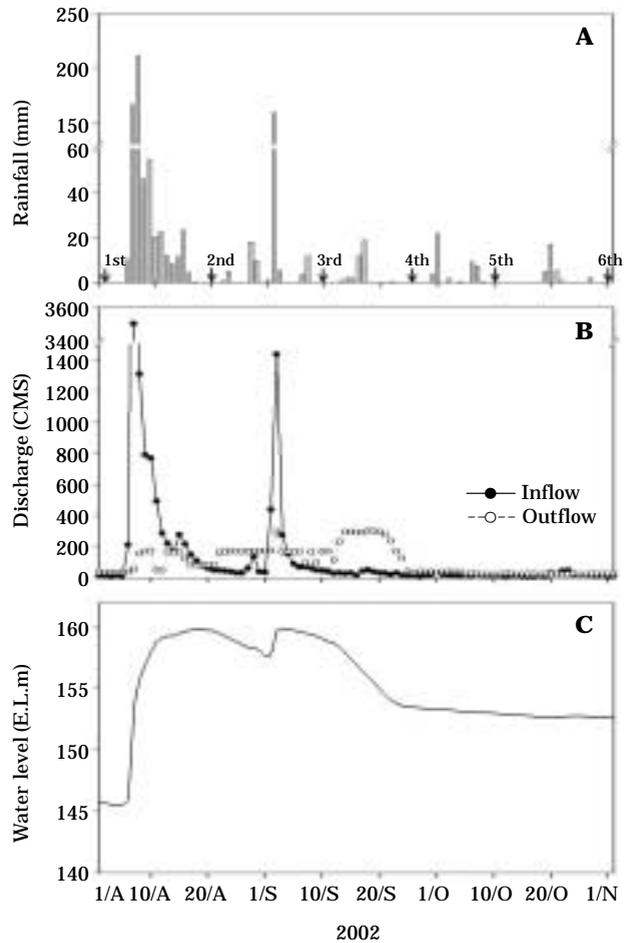


Fig. 3(a). Daily variations of hydrological parameters in Andong Reservoir from August to November 2002. Down-arrows, from 1st to 6th, indicate sampling time, respectively.

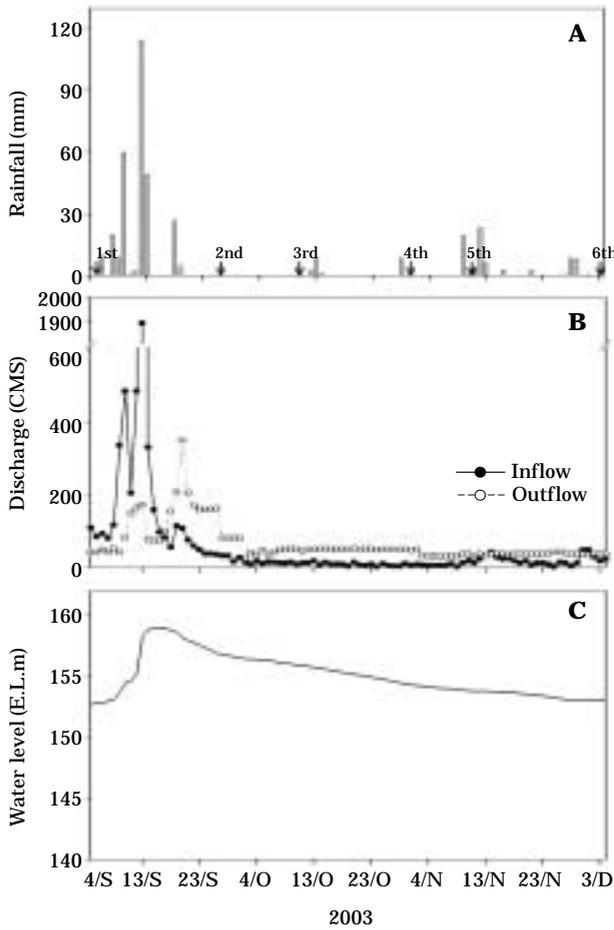


Fig. 3(b). Daily variations of hydrological parameters in Andong Reservoir from September to December 2003. Down-arrows, from 1st to 6th, indicate sampling time, respectively.

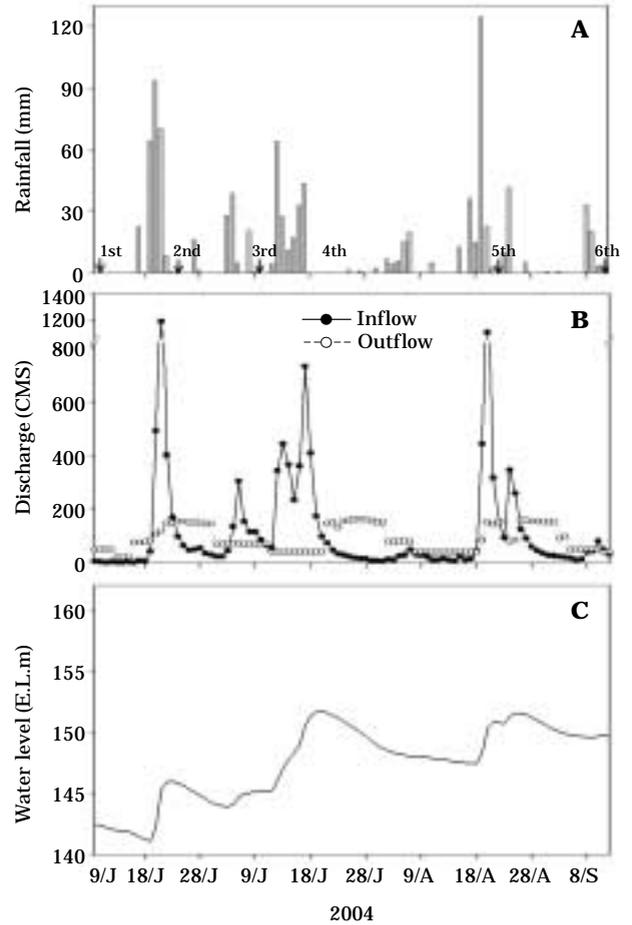


Fig. 3(c). Daily variations of hydrological parameters in Andong Reservoir from June to September 2004. Down-arrows, from 1st to 6th, indicate sampling time, respectively.

50.3 CMS이었고, 댐 저수위는 유입량과 방류량에 따라 최고 E.L.157.8 m (2002년 8월)에서 최저 E.L.131.1 m (1995년 3월)로 약 27m의 수위변동을 보였다(Fig. 2A).

2. 강우패턴에 따른 수문변화

본 연구에서 3년간의 각기 다른 강도의 강우와 태풍에 의한 집중호우 형태를 대상으로 하였다. 2002년에는 약 15일간의 연속 강우(장마)와 1회의 강한 태풍 후의 간헐적인 강우패턴을(Fig. 3a), 2003년에는 태풍에 의한 1회의 강한 강우 후의 무강우 지속을(Fig. 3b), 2004년에는 반복된 태풍과 장마를 연구대상으로 하였다(Table 1, Fig. 3c).

2002년(8~10월), 2003년(9~11월), 2004년(6~9월)의 강우는 각각 919.0 mm, 389.8 mm 및 964.4 mm로서 연

강우량의 56%, 22% 및 71%를 기록하였고, 6~9월에 강우의 편중현상은 장마와 태풍의 영향이 큼을 반영하였다. 2002년에는 8월 초에 15일간 연속하여 593.2 mm를 기록하여 단일 강우사상으로는 최대를 보였으며, 1일과 2일간의 최대 강우량과 강우강도는 각각 211.7 mm, 8.82 mm hr⁻¹와 378.0 mm, 7.88 mm hr⁻¹를 보였다(Table 1). 이 시기에 저수위는 14.3m가 증가하였으며, 최대 3,499.3 CMS가 유입되었고 이 때의 유출량은 56.7 CMS로서 최대 98.4%가 저수지 내에 저장되었다(Figs. 3a-A, B). 이후 12일간 무강우(20 mm 미만)를 보인 후 태풍의 영향으로 159.1 mm (6.63 mm hr⁻¹)가 내렸으며 10~20 mm 범위의 간헐적인 강우가 5회 연속되었다(Fig. 3a-A). 유입량의 변화는 강우패턴과 거의 일치하였고, 홍수조절이 주요 목적인 다목적댐의 기능상 최대 유효량을 저장한

후에 저수위는 유출량과 수위조절에 의존적이었다 (Figs. 3a-B, C).

2003년의 수문변화에서 9월에는 2002년의 8월과 유사하였으나 무강우 일수는 차이를 보였다. 전년도의 풍부한 강우와 봄철 강우에 의해 저수위는 E.L.152.7 m로 높은 상태를 유지하였고 약 90 mm의 선행강우가 있는 2일 후에 태풍으로 163.2 mm (최대 강우강도 4.76 mm hr⁻¹)의 강우가 있었으며, 9일간의 누계 강우량은 294.2 mm였고 저수위는 6.3 m가 상승하였다. 이후에는 19.5~26.6 mm의 강우가 3회 있었을 뿐 무강우가 장기간 지속되었다 (Figs. 3b-A, C).

2002년과 2003년은 단회성의 집중강우에 이은 무강우가 장기간 지속되었으나 2004년은 연속된 장마와 태풍에 의해 유사한 강우패턴이 반복되었다. 2004년 6~9월까지 1일 100 mm 이상의 강우는 1회(124.6 mm, 강우강도 5.19 mm hr⁻¹)였고 50 mm 이상은 4회로서 2002년의 3회, 1회 및 2003년의 1회, 1회와는 대조적이었다. 또한 강우사상당 4~10일간 지속되는 특징을 보였으며 초기에 고탁수를 유발한 강우강도는 3.90 mm hr⁻¹ (93.5 mm)로서 2002년 (8.82 mm hr⁻¹)의 44%, 2003년 (4.76 mm hr⁻¹)의

82% 수준이었다 (Fig. 3c-A). 하천을 통한 유입량과 방류에 의한 유출량도 다른 해 (2002, 2003년)와는 차이를 보였으며 반복 강우와 방류량에 따라 수위가 등락하였다 (Figs. 3c-B, C).

3. 수온성층의 형성과 소멸특성

중위도에 위치한 우리나라의 호수는 기온, 지리적 위치 등에 따라 약간의 차이는 있으나 기온상승에 따라 대개 4~5월경부터 수온성층이 형성되기 시작하여 8월까지 중층 (metalimnion)을 기준으로 상·하 수층간 구별이 뚜렷해지며 9월 이후 수온약층 (thermocline)이 하강하면서 성층은 점차 소멸되며 이듬해 1~2월경까지 전체 수층이 등온 (isothermal) 상태를 유지하는 과정을 반복한다. 안동댐 저수지에서도 6월부터 수온성층이 존재하였고 상층 수온상승에 의해 상·하층간 뚜렷한 수온차이 (최대 24.9°C)를 보인 후 9월부터 표수층 (epilimnion)의 수온하강으로 수온약층은 점차 하강하고 상층과 중층이 혼합되는 과정을 보였다 (Fig. 4).

안동호의 댐축지점 (DAM)에서는 수심에 따라 수온이 급격히 하강하는 층이 2개의 수심대에서 동시에 존재하

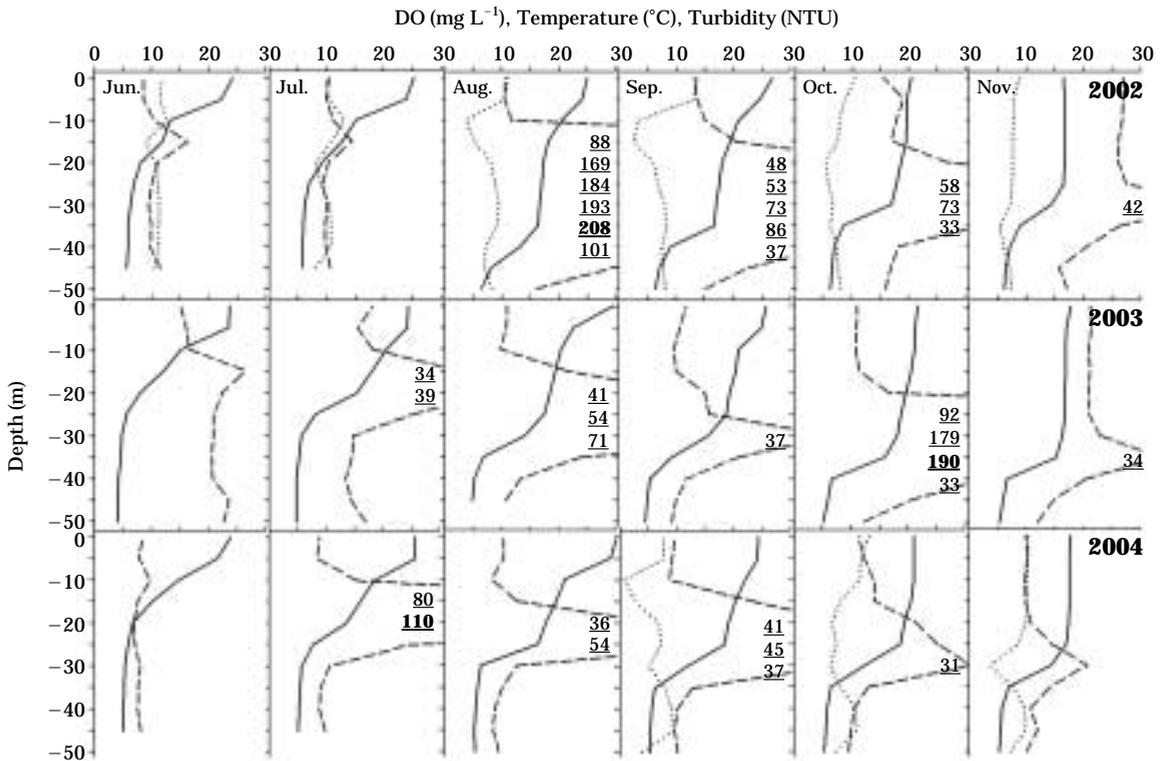


Fig. 4. Temporal variations of water temperature (solid line), dissolved oxygen (dotted line) and turbidity (dash line) at Dam Station in Andong Reservoir between June and November from 2002 to 2004. Underline numerics indicate turbidity (NTU) at each depth.

Table 1. Characteristics of hydrological parameters in Andong Reservoir from 2002 to 2004.

Year	Study event	Date	Rainfall (mm)	Max. rainfall per day (mm)	Rainy day (days)	Antecedent rainless day* (days)	Daily inflow mean (max./min.) (CMS)	Daily outflow mean (max./min.) (CMS)	Water level mean (max./min.) (E.L.m)
2002	1st**	8. 1	231.6	71.7	19	9	59.2 (176.5/4.7)	25.2 (29.3/21.2)	144.4 (145.9/142.7)
	2nd	8.20	593.2	211.7	15	4	454.6 (3,499.3/7.8)	91.3 (172.1/34.3)	154.4 (159.8/145.5)
	3rd	9.10	214.5	159.1	9	9	155.3 (1,433.6/30.0)	159.9 (299.4/83.6)	159.1 (159.9/157.7)
	4th	9.26	36.0	18.8	7	9	28.9 (50.5/9.6)	217.3 (304.7/35.7)	155.9 (158.9/153.5)
	5th	10.11	45.1	22.1	8	11	14.6 (36.8/9.0)	33.0 (41.2/24.9)	153.2 (153.5/153.0)
	6th	11. 1	30.2	17.0	6	12	15.7 (49.8/2.9)	25.8 (37.2/24.9)	152.7 (152.9/152.5)
2003	1st**	9. 4	300.4	58.8	17	0	106.6 (531.1/6.7)	89.0 (158.6/19.8)	150.4 (152.1/149.5)
	2nd	9.25	294.2	114.3	11	6	240.5 (1,887.1/36.6)	121.6 (351.9/40.1)	156.3 (159.0/152.7)
	3rd	10.9	0.3	0.2	3	14	19.2 (37.1/7.8)	68.4 (161.4/23.4)	156.5 (157.1/156.1)
	4th	10.29	20.2	8.7	4	20	7.8 (17.5/1.2)	49.4 (50.6/43.4)	155.3 (156.0/154.5)
	5th	11.10	19.8	19.5	2	11	6.8 (16.8/1.0)	35.8 (50.1/29.0)	154.1 (154.4/153.8)
	6th	12. 3	55.2	23.3	10	21	19.2 (48.1/1.3)	36.5 (42.9/26.9)	153.4 (153.8/153.0)
2004	1st**	6. 9	125.4	43.4	15	22	33.1 (103.7/9.7)	20.2 (21.0/19.8)	143.1 (143.6/142.3)
	2nd	6.23	258.7	93.5	5	10	154.3 (1,185.5/0.8)	67.7 (147.5/20.3)	142.4 (145.9/141.1)
	3rd	7. 8	112.0	38.7	10	0	90.3 (305.5/22.6)	113.1 (154.2/70.1)	144.8 (146.0/143.9)
	4th	7.20	201.3	64.1	9	2	282.2 (732.4/55.6)	47.9 (70.6/40.1)	147.7 (151.6/145.2)
	5th	8.20	273.1	124.6	15	0	73.9 (1,096.8/6.8)	92.0 (162.1/40.1)	148.9 (151.7/147.4)
	6th	9.10	117.9	41.5	11	2	89.7 (346.0/10.9)	105.9 (158.4/40.1)	150.4 (151.6/149.6)

* the number of days when it rained below 20 mm a day before sampling, ** hydrological data during 1 month before sampling

Table 2. Comparisons of the maximum turbidity (NTU) in Andong Reservoir from 2002 to 2004. The values in the parentheses indicate temperature (°C) and depth (m) at that position (temperature/depth).

Year	Study event	Date	Station					
			DAM	NOS	MAD	DOM	JUJ	SEO
2002	1st	8. 1	12.4 (5.8/50)	10.5 (28.5/0)	12.1 (7.4/30)	12.9 (12.7/20)	13.1 (21.1/10)	11.2 (22.3/10)
	2nd	8.20	208.0 (16.4/35)	183.0 (16.6/30)	187.0 (16.2/35)	75.2 (16.7/25)	60.4 (16.8/25)	76.6 (16.7/25)
	3rd	9.10	86.1 (16.6/35)	102.1 (16.8/35)	244.2 (17.7/25)	305.0 (17.4/30)	188.0 (18.1/20)	132.7 (18.5/20)
	4th	9.26	78.3 (16.3/30)	95.4 (17.1/30)	99.3 (17.5/25)	116.7 (17.7/25)	63.3 (18.8/20)	27.4 (19.1/20)
	5th	10.11	73.2 (16.9/30)	70.1 (16.5/30)	75.5 (17.0/30)	92.0 (17.0/30)	43.2 (18.0/25)	27.0 (19.4/20)
	6th	11. 1	42.1 (14.4/30)	25.5 (16.6/0)	29.3 (16.8/5)	31.3 (16.8/5)	43.4 (14.7/25)	23.3 (15.9/15)
2003	1st	9. 4	37.0 (15.6/30)	30.4 (18.1/30)	35.1 (19.0/25)	39.7 (18.2/30)	34.0 (18.3/20)	28.3 (20.1/15)
	2nd	9.25	339.0 (17.8/35)	322.0 (17.6/35)	-	299.0 (18.5/30)	83.7 (18.1/30)	49.5 (19.9/20)
	3rd	10.9	190.3 (15.9/35)	171.4 (17.8/35)	120.4 (15.4/35)	65.2 (16.8/35)	58.8 (19.2/25)	20.2 (20.2/20)
	4th	10.29	83.9 (14.3/35)	51.9 (17.4/35)	-	29.8 (17.3/35)	56.4 (16.7/25)	16.9 (17.3/20)
	5th	11.10	33.5 (15.2/35)	22.3 (15.4/35)	20.0 (15.0/35)	35.1 (16.0/30)	38.4 (16.2/25)	15.1 (16.3/15)
	6th	12. 3	22.2 (6.7/40)	19.0 (12.4/35)	17.4 (13.2/30)	14.6 (13.1/25)	16.3 (13.4/20)	14.8 (13.0/15)
2004	1st	6. 9	9.8 (14.8/10)	12.9 (5.4/30)	9.2 (6.0/25)	-	-	-
	2nd	6.23	37.6 (16.6/15)	140.0 (16.4/15)	330.0 (16.7/15)	440.0 (15.2/20)	380.0 (14.7/20)	430.0 (14.8/10)
	3rd	7. 8	87.2 (14.4/20)	101.4 (14.0/20)	122.6 (14.8/20)	172.8 (14.6/20)	239.0 (15.8/20)	48.7 (21.2/10)
	4th	7.20	50.3 (10.2/30)	59.0 (16.7/25)	90.8 (17.9/20)	140.7 (17.2/25)	123.3 (16.8/25)	113.1 (17.1/15)
	5th	8.20	30.0 (12.0/30)	38.0 (10.5/30)	81.0 (21.6/15)	186.0 (21.3/15)	323.0 (19.3/20)	270.0 (19.9/10)
	6th	9.10	43.3 (18.5/25)	42.8 (18.3/25)	38.3 (18.6/25)	113.8 (14.6/30)	84.4 (18.8/25)	19.4 (22.2/10)

였으며, 수심 5~10 m에 상부약층이 약하게, 수심 20~35 m에 하부약층이 강하게 존재하였다(Fig. 4). DO는 수온성층 구조와 탁도분포에 따라 변동을 보였고, 시기에

따라 심층 DO 감소현상(hypolimnetic oxygen deficit)과 함께 상부약층에서 DO가 급격히 감소하였으며, 2004년에는 중층 저산소층이 하부약층(30~35 m)에서도 관찰

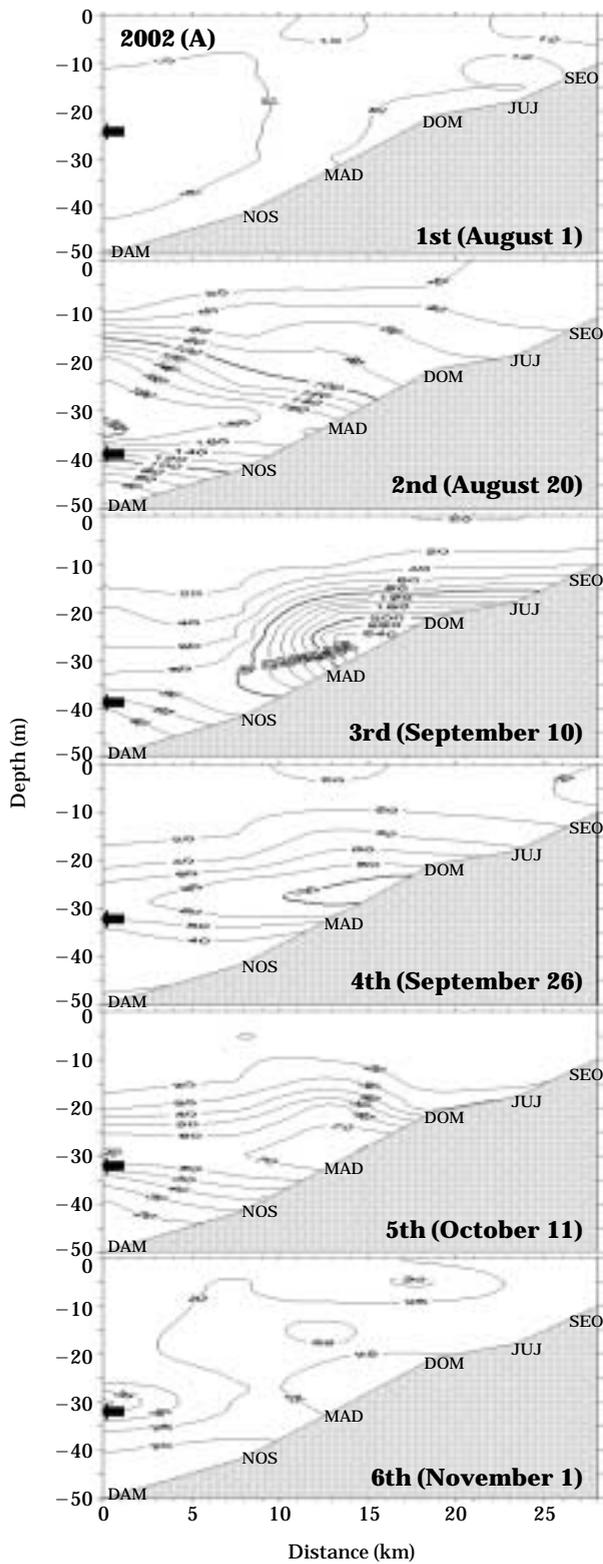


Fig. 5(a). The isopleths of turbidity distribution in Andong Reservoir from August to November 2002. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

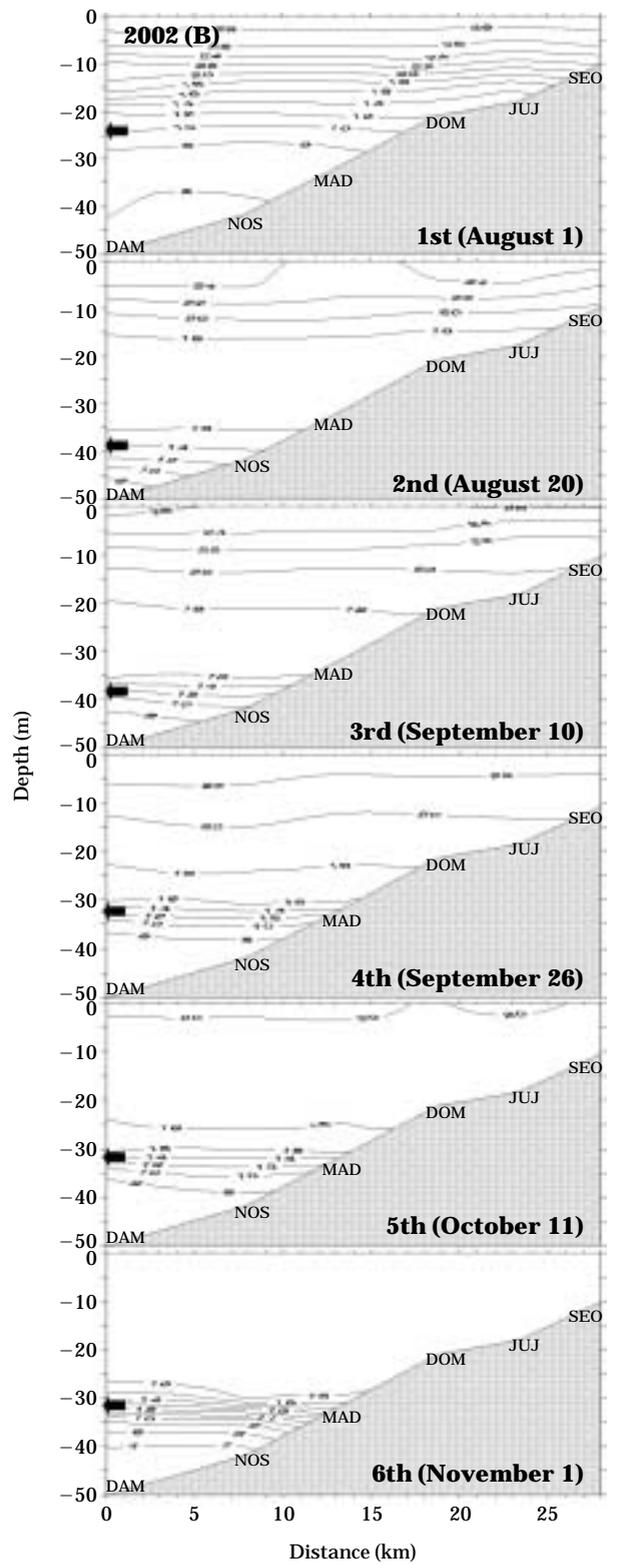


Fig. 5(b). The isopleths of temperature distribution in Andong Reservoir from August to November 2002. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

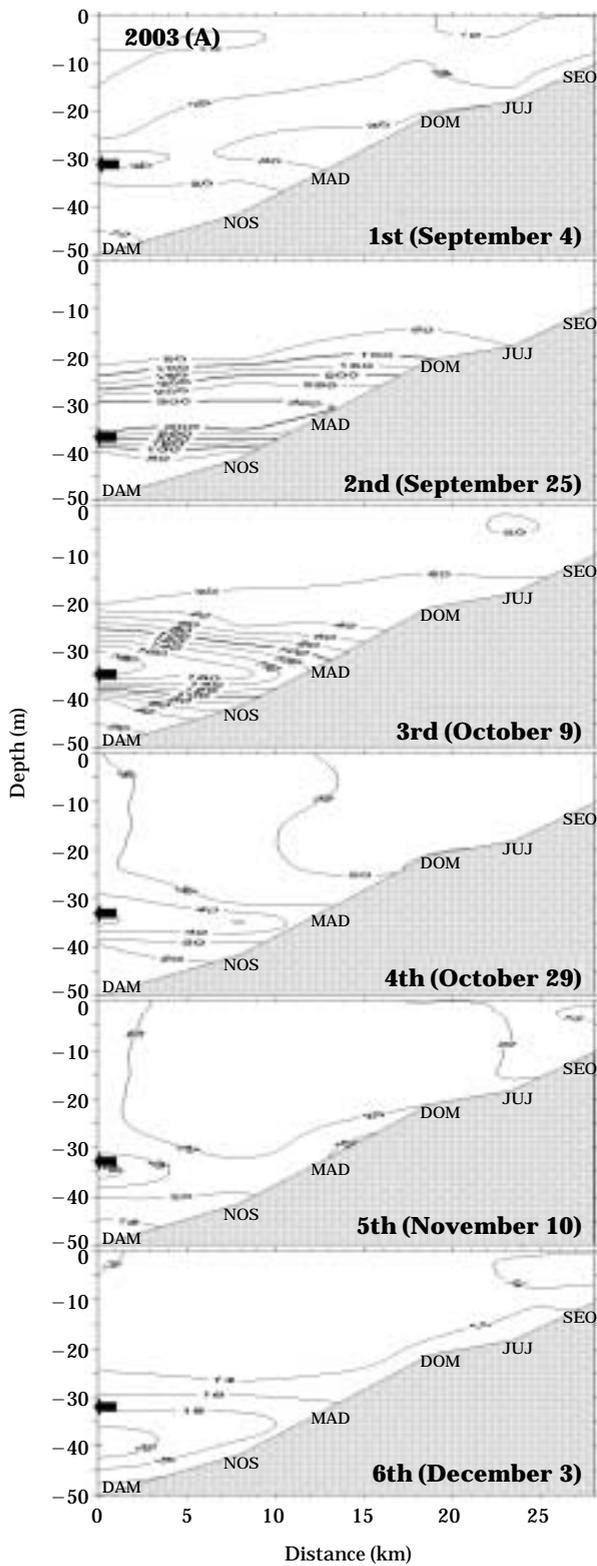


Fig. 6(a). The isopleths of turbidity distribution in Andong Reservoir from September to December 2003. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

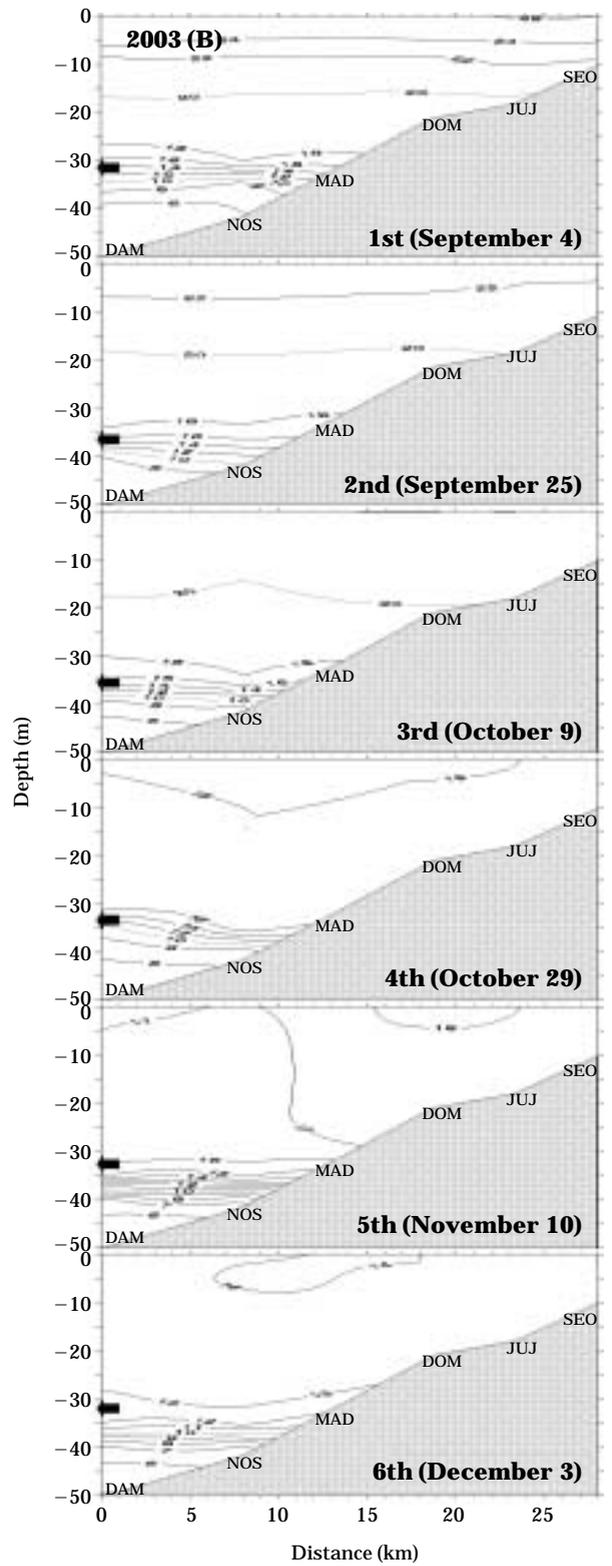


Fig. 6(b). The isopleths of temperature distribution in Andong Reservoir from September to December 2003. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

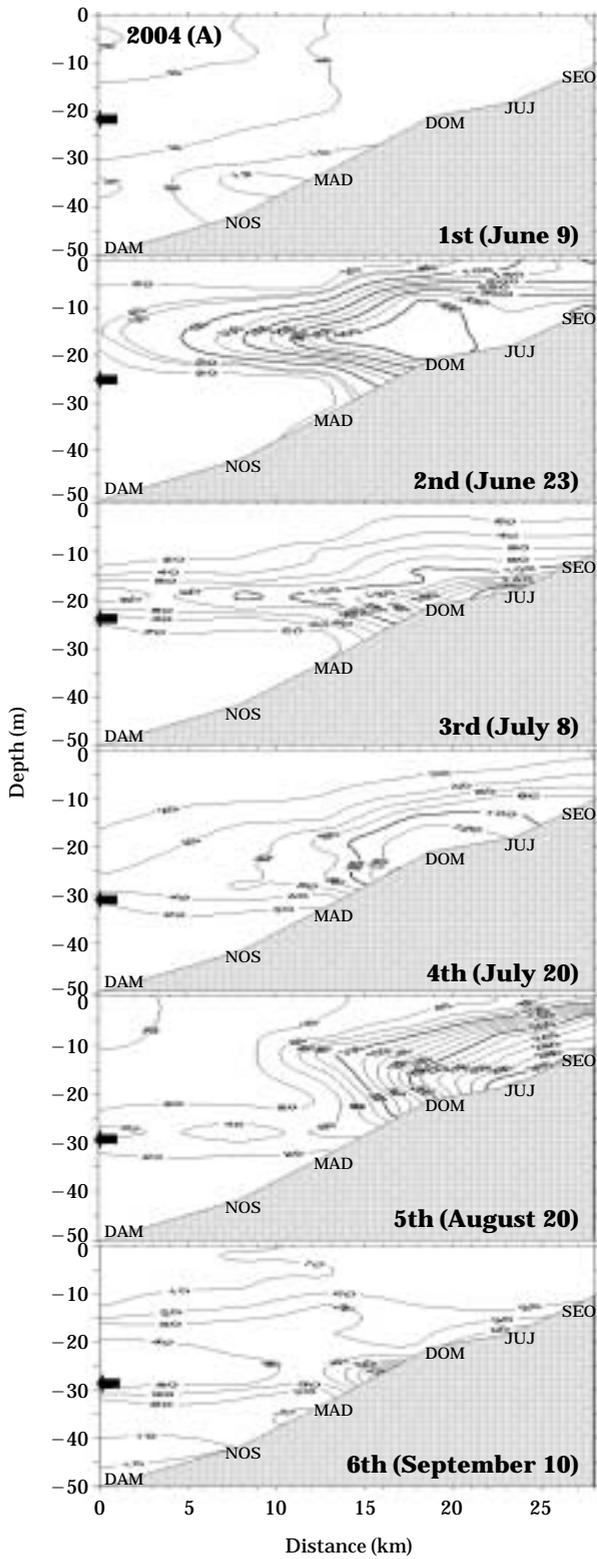


Fig. 7(a). The isopleths of turbidity distribution in Andong Reservoir from June to September 2004. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

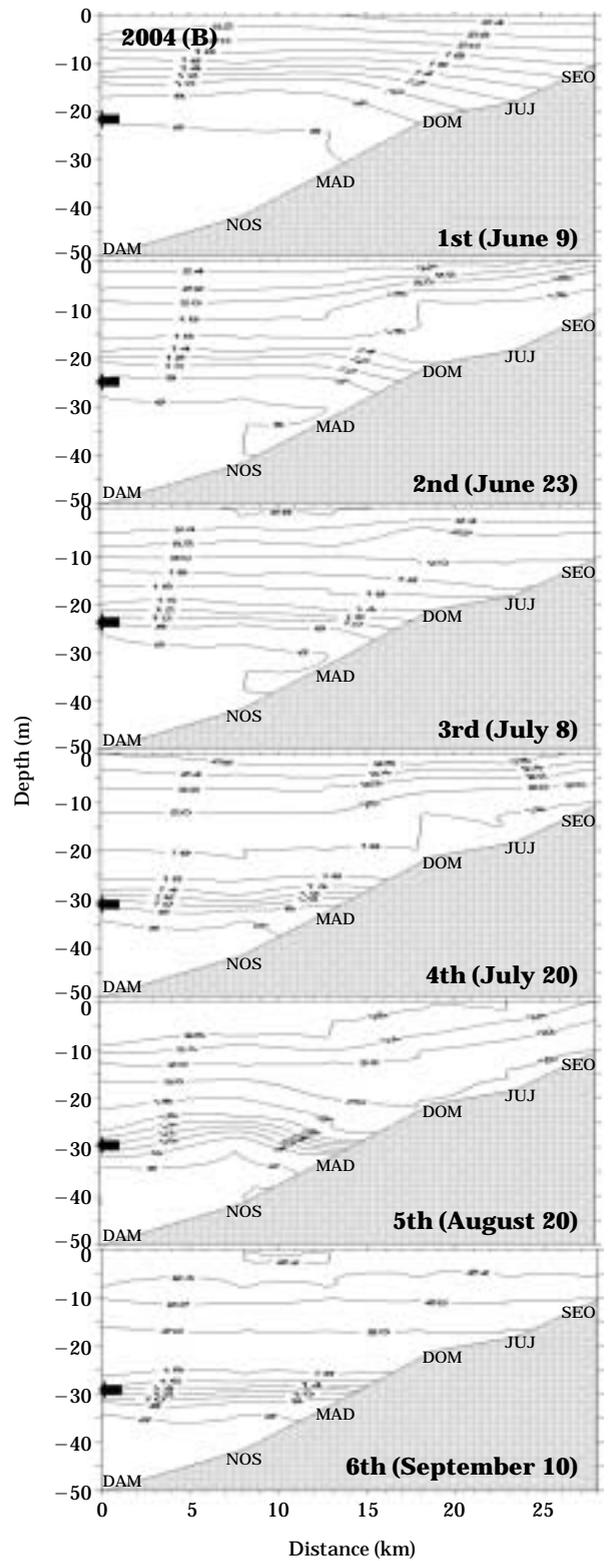


Fig. 7(b). The isopleths of temperature distribution in Andong Reservoir from June to September 2004. Dark arrows indicate discharging point by electric power-generation.

되었다. 상부 저산소층은 이 시기의 고탁수층 상부와 일치하였으며 점차 하강, 약화되면서 10월까지 존재하였고, 하부 저산소층은 수온약층과 심수층의 경계면에 존재하면서 11월에 최저의 DO 농도를 보인 후 이듬해 1월 이후에 완전히 소멸되는 과정을 보였다(미발표 자료).

4. 탁도와 수온의 시·공간적 변화

각기 다른 강우패턴과 강우량, 강우빈도 및 강우강도에 따른 시·공간 탁도와 수온성층의 변화를 조사하였다. 유입 하천에서의 최고 탁도는 2004년 6월 하순에 590 NTU였으며 댐 저수지 내에서는 중상류부인 DOM에서 440 NTU이었다. 상류에서 하류지점 순으로 최고 탁도는 SEO, JUJ, DOM, MAD, NOS 및 DAM에서 각각 430, 380, 440, 330, 322 및 339 NTU로 최하류부인 댐까지 고탁수 상태로 이동하였다(Table 2).

지점별로 최고 탁도층이 존재하는 수심은 10~40 m 범위였으며 상류부(SEO, JUJ), 중류부(DOM, MAD) 및 하류부(NOS, DAM)에서 각각 10~30, 15~35 및 15~40 m의 범위로서 저수지 상류부에서는 심층류로 유입되어 중류부에서 수층간 밀도류를 형성하여 최하류인 댐까지 이동하였다(Figs. 5, 6, 7).

시기별 최고 탁도는 홍수기 전에는 유의한 수심이 없었으나 2003년에는 연구기간 이전 1개월간의 선형강우(300.4 mm)에 의해 수심 15~30 m에 28.3~39.7 NTU 범위의 탁도가 잔류한 상태였다(Table 2). 최상류부인 SEO의 최고 탁도 수심은 10~25 m 범위로 시기별로 15 m의 차이가 발생하나 수위변동을 고려하면 심층부에 해당되고, 직하류에 위치한 JUJ에서는 10~30 m의 분포로 최고 탁도층이 시기에 따라 상류보다 0~10 m 하강하였으며, DOM에서도 직상류(JUJ)보다 0~10 m 하강하여 최고 탁도층의 밀도류(density current)는 유입부에서 약 25 km 하류(DAM에서 18 km 상류)까지 심층 밀도류의 형태로 이동하였다. MAD에서는 3,499.3 CMS로 최대 유입량을 보인 2002년 8월 조사에서 10 m 하강한 것을 제외하고는 직상류와 같거나 5 m 상승한 수심에 최고 탁도층이 존재하여 중상류부인 MAD와 DOM(DAM에서 13~18 km 상류)에서 탁도층이 바닥에서 이탈(separation)되어 중층 밀도류를 형성하였다. 최하류부인 DAM과 NOS에서는 직상류인 MAD와 같은 수심대를 유지하거나 5~10 m까지 하강하였으며 취수구가 위치한 수심대로 탁도층의 분포방향이 이동하였다(Table 2, Figs. 5a, 6a, 7a).

2002년에는 댐까지 이동한 100 NTU 이상의 고탁수층

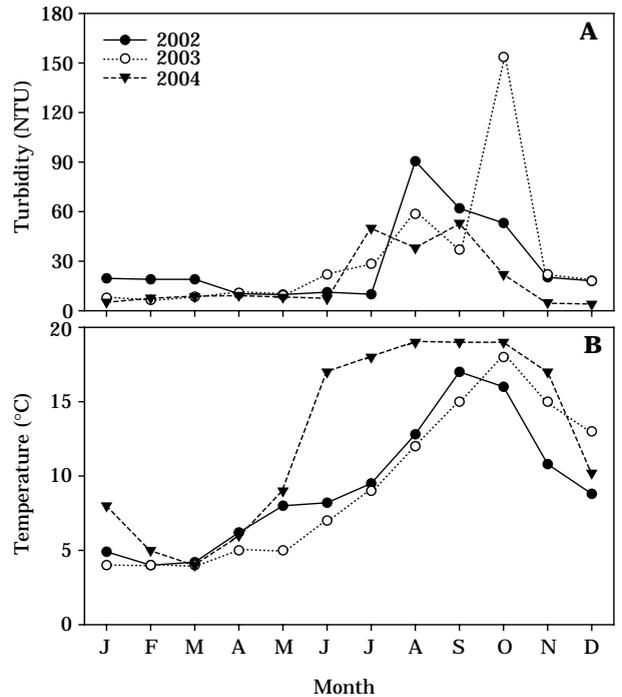


Fig. 8. Monthly variations of turbidity (A), temperature (B) discharged from Andong Reservoir from January 2002 to December 2004.

이 두께 20 m의 수괴를 형성하여 수면방향으로 상승류(upwelling)를 형성하였으나 수심 15 m 아래로 한정되었으며 취수구 하부 수심으로의 탁도 증가현상은 관찰되지 않아 심수층으로의 침전은 거의 없었다. 저수지 내에 체류하는 고탁수층은 하부약층 직상부의 수온변곡점에서 최고 농도를 보였다(Figs. 3, 5a, b, 6a, b, 7a, b).

유입된 고탁수층의 흐름을 결정하는 저수지 내의 수온 분포는 탁수 수괴에 의해 교란되었다. 4~5월경에 형성되기 시작하는 수온성층은 6월에는 뚜렷한 수층으로 분리되지만 고탁수를 포함한 많은 유량에 의해 상층(epilimnion)과 중층(metalimnion)의 수온차는 감소하였고 심층(hypolimnion)은 하부로 이동되었다(Figs. 5b, 6b, 7b).

고찰

계절간 강우편차가 큰 우리나라는 하천의 중·상류부에 댐을 건설하여 이·치수를 하고 있으나 풍수기의 집중 강우에 의한 고탁수로 여러 장해를 겪고 있다. 집중 강우와 홍수량의 일시 유입에 의한 고탁수는 자연적인

오염현상이나 수중 생태계 교란, 정수처리 비용 증가 및 바이러스 감염 우려 등으로 사회적 관심이 증가하는 실정이다 (김과 조, 1989; Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994; 김, 1998; 서, 1998; AWWA, 1999; 신 등, 2003; Ahn *et al.*, 2003; 한국수자원공사, 2004b).

본 연구는 2002년부터 3년간의 홍수기를 대상으로 안동댐 저수지 내의 탁도발생과 시·공간적 거동에 대해 조사하였다. 안동호는 12월부터 이듬해 2월까지 연중 1회 완전혼합 (holomictic) 되는 온대형 단순환호 (warm monomictic lake)에 해당하였고 (Horne and Goldman, 1994; 허 등, 2000; Kalff, 2002), 수온성층은 6월부터 형성되어 수심 5~20 m의 수온약층과 상부에 표수층, 하부에 심수층으로 분리되었으며, 시기에 따라 심층의 용존산소 감소현상과 함께 중층에는 2개의 저산소층이 존재하였다 (Fig. 4). 수온성층은 고탁수 유입과 가을순환에 의한 수체교란으로 이동, 변화되며 9월부터 수온하강에 따른 수직혼합으로 수온약층은 심층부로 하강, 12~1월에 소멸되어 우리나라 다수의 댐 저수지 연구결과와 유사하였다 (김과 조, 1989; 서, 1998, 허 등, 1998, 2000; An, 2001). 반면, 최근의 연구결과인 선택취수를 하는 저수지에서의 전개 유형과는 다소의 차이가 있어 향후 이에 대한 비교 연구도 필요한 것으로 사료된다 (Shin *et al.*, 2004).

2002년, 2003년 및 2004년의 최고 탁도는 각각 8월, 9월 및 6월에 유입되어 하류 유출과 가을순환에 의해 혼합되기까지 점차 낮아지는 상태로 최대 11월까지 존재하였으며, 댐 저수지로의 고탁수 유입은 홍수기인 6~9월 동안에 집중되었고 이 시기의 호수 내 수온성층에 의해 유입 수심과 이동경로가 결정되었다. 고탁수는 유입 수량에 따라 댐축까지 이동하여 상승류를 형성하였으며 수면 15 m 아래에서 취수구까지 100 NTU 이상의 고탁수층이 최대 20 m의 두께로 존재하였다. 일시에 유입된 고탁수층은 상층과 중층을 교란하여 수온차이를 감소시키고 심수층을 하부로 이동시켰다.

고탁수의 상부 경계면과 일치하는 상부약층과 최고 탁도가 장기간 체류하는 하부약층에서는 수심 1 m마다 수온은 0.9°C (수심 8~10 m)와 2.5°C (수심 28~30 m), DO는 3.4 mg L⁻¹와 0.7 mg L⁻¹까지 각각 최대로 감소하였다 (미발표 자료).

Shapiro (1960)는 Washington호의 중층에서 요각류 (copepod)인 *Diaptomus ashlandi*의 호흡활동으로 산소가 감소 (metalimnetic oxygen minimum)한다고 보고하였고, 김과 조 (1989)는 소양호의 심층 무산소층과 중층 산소 최저층의 보고에서 여름철의 수심 10~20 m에 존재하는 중층 저산소현상은 장마철에 유입되는 고탁수와

관련이 있다고 하였다. 또한 서 (1998)는 대청호에서 7~8월경에 수심 10 m 부근에서 산소가 극부적으로 고갈되는 현상을 상층에 존재하는 입자상 물질의 침강, 분해에 의한 산소 소모 때문이라 하였다. 안동호의 중층에 존재하는 저산소층은 2개의 수온 급감층과 고탁수층의 상·하부에 각각 위치하였고, 상부의 저산소층은 상층에 존재하던 조류사체 등의 침강물질이 고밀도의 탁수층 상부에 체류, 분해되거나 이를 포식하는 동물플랑크톤의 호흡활동이나 세균활동에 의해, 하부의 저산소층은 고탁수층에 포함된 토양성분, 유기물질이 상대적 고밀도층인 심수층 상부에 체류하면서 산소를 소모한 때문으로 보이며 (Shapiro, 1960; 김과 조, 1989; Harper, 1992; Horne and Goldman, 1994; Wotton, 1994; 서, 1998; Kalff, 2002), 이에 대해서는 추가 연구가 필요하다고 본다.

2004년에 안동호로 유입된 최고 탁도는 590 NTU로 정 등 (2004)의 460 NTU보다 높았으며, 중상류 수역까지는 농도 (최고 440 NTU)의 심층류로 이동하다가 중류부 (MAD, DOM)에서 바닥으로부터 이탈하여 중층 밀도류를 형성하였다. 하류부로 이동하면서 농도는 낮아졌으며 점차 취수구가 위치한 수심에서 최고 탁도층이 형성되므로 홍수량의 유입 직후부터 증가하는 하류 방류에 의해 고탁수의 흐름방향이 결정되는 것으로 판단된다 (Table 2, Fig. 3).

신 등 (2003)은 하천형 저수지인 팔당호의 연구에서 저수지의 중류부보다 하류부에서 약 44%의 탁도 증가현상을 보고한 바 있으나, 안동댐 저수지에서는 심층류가 바닥에서 이탈하여 중층류로 될 때까지 침전 저질층의 재부유현상은 없었으며, 이는 유입강도에 따라 다소의 차이는 있으나 저수용량, 저수지 형태, 유하거리, 수심, 회석 및 확산에 의해 중류부 이하에서는 완전한 호소성향 (lacustrine)으로 전환되기 때문으로 보인다 (Gorden and Bekel, 1985; An, 2001; 황 등, 2002; 박 등, 2004). 전 등 (2004)은 유역면적이 비슷한 임하호와 안동호의 비교 연구에서, 2004년 태풍으로 임하호에서는 최고 994 NTU였으나 안동호는 154 NTU로서 유입 탁도의 농도와 성상, 저수용량 및 유하거리의 차이로 설명하였다 (한국수자원공사, 1994; 황 등, 2002; 최 등, 2004).

안동댐 저수지에서의 고탁수층은 홍수량의 유입 시기에 관계없이 상류부에서는 심층류의 형태로 이동하고 중류부 이하부터는 중층 밀도류로 댐축까지 이동하지만 하부약층 아래로의 침전은 일어나지 않고 발전 방류구를 통해 댐 하류로 배출되며 잔량은 수층 혼합시기에 전체 수층으로 확산되어 일시적인 탁도증가를 유발하였다 (Figs. 4, 5, 6, 7, 8).

최근, 홍수기에 댐 저수지로 집중 유입되는 비점오염원의 영향과 예측을 위한 연구활동이 활발하다(한국수자원공사, 1994, 2000, 2004a; 김, 1998; 허 등, 1998; An, 2000b; 박 등, 2001; 이 등, 2001; An et al., 2001; 김 등, 2002; 이와 배, 2002; Ahn et al., 2003; 김과 김, 2004; 오 등, 2004; 최 등, 2004). 유역에 산재한 고농도의 각종 오염물질을 함유하고 댐 저수지 내로 유입된 고탁도 수괴가 저수지 중층에 체류와 고탁수의 장기 방류에 의한 수중 생태계 교란, 물 이용 장애를 최소화하기 위해서는 발생원인 유역의 특성에 적합한 비점오염물질의 저감방안 수립과 시행이 필요하다. 또한 고탁수의 유입 및 거동에 대한 장기적인 연구자료를 바탕으로 저수지의 효과적인 수질관리 방향이 결정되어야 할 것으로 본다.

적 요

낙동강 수계의 최대 인공호인 안동댐 저수지에서 2002~2004년 동안 홍수기의 수온성층 구조에 따른 고탁수의 유입특성과 시·공간적 변동을 조사하였다. 6월부터 수온성층이 형성되었으며 성층구조에 따라 유입 수괴의 이동경로가 결정되었고 고탁수의 유입에 의해 성층구조가 변하였다. 고탁수는 유입 시기와 수량에 관계없이 저수지 상류부에서는 심층류로 유입되었고 중류부에서 바닥으로부터 분리되어 중층 밀도류의 형태로 하류까지 이동하였다. 또한 중층 밀도류의 형성지점은 유입량과 시기에 따라 공간적으로 다소 차이가 있었다. 유입량에 의해 수온성층과 DO 분포가 변하였고, 시기에 따라 변수층에는 2개의 수온 급감층과 저산소층이 각각 존재하였다. 최하류까지 이동한 홍수량의 고탁수층은 상승류를 형성하여 수심 15 m 아래에서 최대 20 m 두께로 고탁수층을 형성하였다. 고탁수층은 저수지 바닥으로 침전되지 않았고 중층의 취수구를 통해 하류로 배출되었으며 가을 순환시기 이후 완전 소멸되었다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 안동댐관리단의 지원에 의해 수행되었으며, 현장조사와 자료분석에 도움을 주신 남시익, 김대현 두 분께 감사드립니다.

인 용 문 헌

김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형댐(소양호)에서

의 인순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 37: 205-212.

김범철, 조규승. 1989. 소양호의 심층무산소층과 중층 산소최저층 형성. 한국육수학회지 22: 159-166.

김성수, 권은미, 방기연, 정육석. 2002. 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. 대한환경공학회 논문집, pp. 179-180.

김윤희. 1998. 홍수시 소양호에서 중층탁류의 이동 및 영향에 관한 연구. 강원대학교 석사학위 논문, 92p.

박재영, 오종민, 김영철. 2001. 삼교호 유입하천에서 강우시 주요 오염물질의 유출특성. 한국육수학회지, 34: 62-69.

박재충, 박정원, 김대현, 이희무. 2004. 안동호의 수역별 영양상태와 평가방법간 상관성 비교. 한국육수학회지(인쇄 중) 서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. 대한환경공학회지 9: 1219-1234.

신재기, 강창근, 황순진. 2003. 팔당호에서 수중 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포. 한국육수학회지 36: 257-268.

오영택, 박제철, 김동섭, 류재근. 2004. 강우시 소옥천에서의 비점오염원 유출 특성. 한국물환경학회지 20: 657-663.

이현동, 안재환, 배철호, 김윤지. 2001. 강우시 유출부하량을 이용한 팔당상수원 유역의 비점오염원 원단위와 발생량 추정. 한국물환경학회지 17: 313-326.

이현동, 배철호. 2002. 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리기법. 한국물환경학회지 18: 569-576.

전홍진, 정경모, 김관휘, 이효진, 박재충. 2004. 대형댐 저수지에서 홍수기 탁수유입 특성 및 거동에 관한 비교연구. 대한상하수도학회 추계학술발표회 논문집, pp. 439-444.

정선아, 이철숙, 신재기, 황순진. 2004. 하천-저수지 시스템에서 탁수의 입자 분포. 대한상하수도학회 추계학술발표회 논문집, pp. 398-404.

조규승, 김범철 외 9인. 1991. 호소환경조사법. 동화기술, 365p.

최중대, 권순국, 권기석. 2004. 점토질 롬 발과 논의 비점오염원 부하량 평가. 한국농공학회논문집 46: 107-114.

한국수자원공사. 1992~2004. 안동다목적댐 관리연보. 302p.

한국수자원공사. 1994. 임하댐 저수지 탁도상승의 원인조사 보고서. 66p.

한국수자원공사. 2000. 댐 저수지 탁류 및 오염물질 이송·확산 모의기술 개발. 97p.

한국수자원공사. 2003. 다목적댐 운영 종합보고서. 211p.

한국수자원공사. 2004a. 안동댐 비점오염물질 유입특성 및 저감방안조사 보고서(2차년도). 277p.

한국수자원공사. 2004b. 안동시 용상정수장 개선방안 타당성 검토 보고서. 43p.

허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변동. 한국육수학회지 33: 260-266.

허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 31: 1-8.

황상구, 장윤득, 이윤중. 2002. 안동저반 심성암류의 암석성인.

- Jour. Petrol. Soc. Korea.* **3**: 200–212.
- 황순진, 안광국, 류재근. 2002. 호소생태학-인공댐호·저수지의 육수학. 신광출판사, 373p.
- Ahn, C.-Y., H.S. Kim, B.D. Yoon and H.M. Oh. 2003. Influence of rainfall cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir. *Koan J. Limnol.* **36**: 413–419.
- An, K.-G. 2000a. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Koan J. Limnol.* **33**: 213–221.
- An, K.-G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Koan J. Limnol.* **33**: 222–229.
- An, Kwang-Guk. 2001. Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and modifications by interflow current. *Koan J. Limnol.* **34**: 9–19.
- An, K.-G., J.W. Seo and S.S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung Reservoir. *Koan J. Limnol.* **34**: 327–336.
- AWWA. 1999. Water quality and treatment, A handbook of community water supplies. 5th ed. American Water Works Association, McGraw-Hill, Inc. New York, USA.
- Gordon, J.A. and R.M. Bekel II. 1985. Suspended sediment characteristics of Lake Cumberland, Kentucky. In Proc. N. Am. Lake Mgt. Soc. 1984. pp. 259–264.
- 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.
- Shapiro, J. 1960. The cause of a metalimnetic minimum of dissolved oxygen. *Limnol. Oceanogr.* **5**: 216–227.
- Shin, J.-K., S.N. Jeong, I.H. Choi and S.J. Hwang. 2004. Dynamics of turbid water in a Korean reservoir with selective withdrawal discharge. *Koan J. Limnol.* **37**: 423–430.
- Wotton, R.S. 1994. The biology of particles in aquatic system. 2nd ed. CRC Press, Inc. 325p.

(Manuscript received 10 January 2005,
Revision accepted 3 March 2005)