

심층 방류하는 안동호 내 탁수의 거동

박재총* · 정석원¹ · 박정원² · 김호준³

(한국수자원공사 수자원기획처, ¹한국수자원공사 안동댐관리단, ²국립공원관리공단 국립공원연구원, ³한국수자원공사 수자원연구원)

Spatial and Temporal Dynamics of Turbid Water in Hypolimnetic Discharging Reservoir (Andong), South Korea. Park, Jae Chung*, Seok Won Jung¹, Jung Won Park² and Hojoon Kim³ (Department of Water Resources Planning, Korea Water Resources Corporation; ¹Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation; ²National Park Research Institute, Korea National Park Service; ³Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation)

The spatial and temporal variations of the high turbid water by a single event of heavy rain (total 299.1 mm and daily maximum 99.4 mm) were studied in Andong Reservoir, which has hypolimnetic discharges. Turbid water entered into the reservoir, was isolated from the bottom at the midreservoir and then passed through the metalimnion as an interflow current in the lacustrine zone. Maximum turbidity was 290 NTU at 16 m depth of the midreservoir, but the initial turbidity showed about 10 NTU in the reservoir before the rainfall. Turbid water in the reservoir affected to increase the withdrawal turbidity from the 3rd day after the rainfall, the maximum turbidity was 129 NTU at 5th day after the rainfall. Turbid water that flew towards the downreservoir distributed within 5 m above the outlet gate of the intake tower, showing the maximum turbidity, and that was decreased in its thickness and concentration by discharging through the intake tower. It has taken 38 days until the turbidity in the withdrawal reduced to 30 NTU, and 87 days to reduce the turbidity to the way when it was before the rainfall, with the correlation coefficient of 0.96 and 0.97, respectively. Turbid water was withdrawn from the reservoir by entraining into the intake tower as a form of the interflow, and not be settled down to the bottom of the reservoir. Therefore, we assessed that the depth of the withdrawal was appropriately positioned in Andong Reservoir, so as to withdraw the turbid water effectively from the reservoir.

Key words : Andong Reservoir, hypolimnion, interflow, turbid water, withdrawal

서 론

태풍이나 집중 강우시에 토양침식과 탁수발생은 자연적인 현상이나, 여름철 수온성층 (thermal stratification)에 의해 호소의 중층으로 유입된 고탁수가 호소 내에 체

류하면서 장기간에 걸쳐 하류로 방류되면 댐 하류 수생태계와 물 이용에 각종 장애를 유발한다 (국립환경연구원, 2005). 국내에서 댐 저수지의 탁수가 사회적 문제로 대두된 것은 임하댐과 소양강댐이 대표적이다. 낙동강 수계의 임하댐의 경우 호소로 유입된 탁수의 원인물질은 상류하천 유역의 암석 풍화물질로 알려져 있으며 (황 등,

* Corresponding author: Tel: 042) 629-3574, Fax: 042) 629-3599, E-mail: jaechung@kwater.or.kr

2006), 북한강 지류에 위치한 소양강댐의 탁수는 유역에서 광범위하게 행해지는 고랭지 채소재배를 그 원인으로 지목하고 있다(김과 정, 2007). 우리나라의 하천과 호소의 수질기준은 부유물질량(suspended solids: SS)을 기준으로 설정되어 있고 탁도에 대한 기준은 없는 상태이다. 그러나, 임하댐에서의 탁수 장기화현상을 경험하면서 탁수를 새로운 수질 오염원으로 인식하고 발생원인 분석과 저감대책 마련에 다양한 방안을 시행하고 있다(한국수자원공사, 2004).

다목적댐은 홍수기에 물을 저장하고 갈수기에 공급하는 홍수조절과 용수공급을 주목적으로 하므로 풍수기에 저장한 고탁수로 인한 호소 및 하천 생태계에 악영향을 줄이고 용수 이용에 효율성을 높이기 위해서는 고탁수층을 단기간에 선택적으로 배제하는 방류체계 구축이 필요하다. 댐에서의 방류는 대부분 취수탑을 통하여 이루어지며 취수 수심에 따라 표면취수, 선택취수, 중·심층취수 등으로 구분된다. 신 등(2006)은 표층수를 방류하는 용담호를 대상으로 한 연구에서 표층수 방류가 탁수의 침강성을 저하시키므로 상층부의 탁도를 장기화시킬 수 있다고 지적한 바 있으며, 정 등(2007)은 2005~2006년 강우시 대청호로 유입되는 탁수 유발물질의 물리적 특성에 대한 기초정보를 제시하였다. 그 외에도 선택방류를 하는 황성호(Shin *et al.*, 2004)와 임하호(이 등, 2007), 중층방류를 하는 소양호(김과 정, 2007) 등에 대한 연구들이 있다. 박 등(2005)은 안동호를 대상으로 한 선행 연구에서 2002년, 2003년 및 2004년의 다양한 태풍과 몬순으로 유발된 고탁수의 이동과 소멸과정에 대해 보고하였으나, 본 연구에서는 고정 취수구를 통한 심층방류 시스템을 채택하고 있는 안동댐에서 단일사상의 강우에 의해 호소 내로 유입된 고탁수의 시·공간적 거동과 저수지 하류까지 이동한 탁수가 방류방류를 통해 댐 하류로 배출되는 경향을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구의 대상지인 안동댐은 낙동강 수계 최상류에 위치한 다목적댐으로 2개 도(강원도, 경상북도), 5개 시·군(태백시, 안동시, 봉화군, 영양군, 울진군)을 집수구역으로 하며, 유역면적 1,584 km², 저수용량 1,248 백만 m³, 저수지 면적은 51.5 km²이다. 안동호는 수지형 댐 저수지(dendritic lake)로서 상시만수위는 EL. 160 m이며 최대 수심은 65 m이다. 안동호로 유입되는 수량의 대부분은

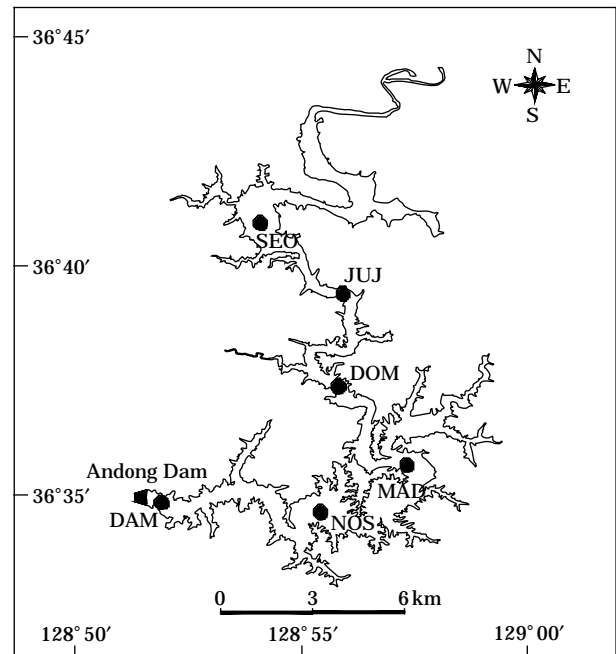


Fig. 1. Location of the sampling stations (●) in Andong Reservoir (SEO: Seobu, JUJ: Jujin, DOM: Domok, MAD: Madong, NOS: Nosan, DAM: Andong Dam).

강원도 태백시에서 발원한 낙동강을 통해서 유입되며, 낙동강 외에 안동호로 직접 유입되는 하천은 구계천, 동계천 및 역계천 등 3개이다(한국수자원공사, 2006). 안동호로 유입된 수량은 최대 160 m³ S⁻¹의 발전방류를 통해 하류에 위치한 역조정지(저수용량: 5 백만 m³)에 저류된 후에 댐 하류지역의 유황에 따라 일정 수량이 하류로 공급된다. 안동댐은 댐체 부근에 설치된 취수탑을 통하여 물을 방류하도록 되어 있으며, 취수구는 여름철 수온약층(thermocline) 아래의 심수층(hypolimnion)에 위치하고 있다(박 등, 2006). 방류관(bell-mouth type)의 입구는 상시만수위를 기준으로 할 때 수심 39 m(EL. 121 m)에 위치하고 있으며, 댐체를 터널(pressure tunnel)로 통과한 물은 수차발전기(hydraulic power plant)를 경유하여 최종 역조정지로 방류된다. 방류관은 1개이며 유입부(bulk-head gate)가 저수지 바닥에서 상부로 약 25 m이격된 상태로 고정되어 있어 선택취수는 불가능한 구조이다(Fig. 2).

2. 조사방법

만수시 안동호의 수면 길이는 43.5 km에 달하지만 저수지 상류수역은 홍수기를 제외한 연 중 대부분의 기간이 하천 상태를 유지한다. 호소 내의 조사지점은 유입부

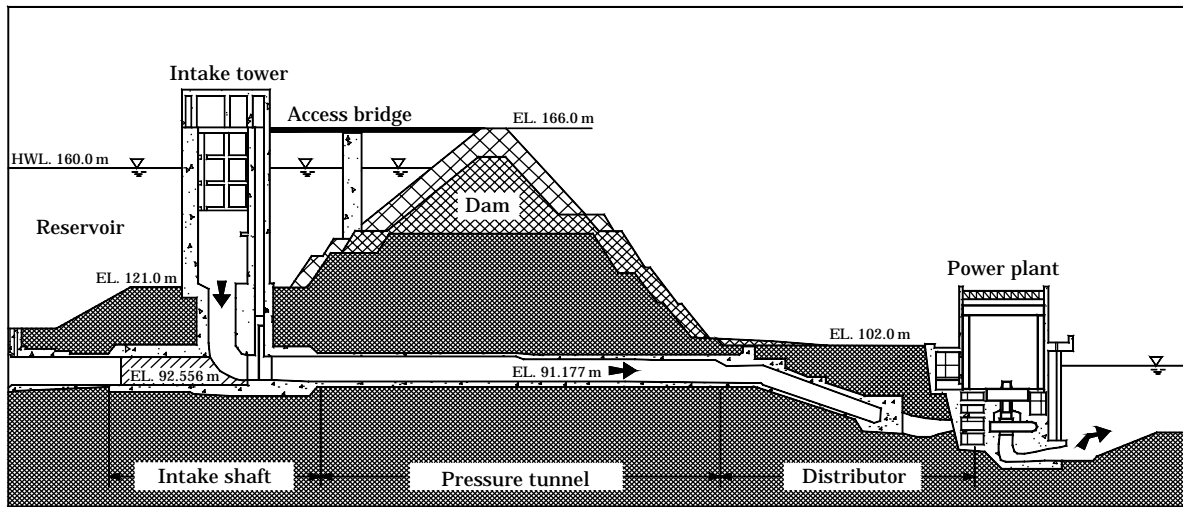


Fig. 2. Schematic diagram of the hypolimnetic withdrawal in Andong Dam.

에서 약 15 km 하류인 서부지점 (SEO)부터 댐축지점 (DAM)까지 5~7 km 간격으로 총 6개 지점을 선정하였으며 (Fig. 1), 다항목수질측정기 (YSI-6600, YSI)를 이용하여 각 지점의 수표면에서 바닥까지 수심 1 m 단위로 시기별, 이동거리별 탁도분포를 측정하였다. 조사는 평상시 탁도분포를 보인 2005년 6월부터 강우로 고탁수가 유입되었다가 이전의 탁도분포로 회복된 2005년 9월까지 총 6회를 실시하였다. 댐 방류수의 탁도는 홍수로 유입된 고탁수가 평상시의 수준으로 회복된 시기인 2005년 7월부터 9월까지 매일 1회 조사하였다. 방류수는 발전 방류수의 외류에 의해 충분히 혼합된 상태이므로 발전 방류를 시작한 30분 후에 채수하여 실험실에서 탁도계 (HACH-2100N, HACH)로 측정하였다. 탁도를 유발하는 기본인자인 강우량과 저수지 수문현황은 안동댐의 일수문현황 자료를 이용하였다 (한국수자원공사, 2006). 호소 내의 시기별, 지점별 탁도분포는 Surfer 8.01 (Golden Software)을 이용하여 도식하였으며 자료분석은 SPSS 12.0 (SPSS)을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 고탁수 유발의 환경요인

본 연구 기간에는 총 662.5 mm의 강우가 있었으나, 고탁수는 99.4 mm의 강우로 유발되었으며 이 시기를 전·후한 18일간 장마로 인해 299.1 mm의 강우가 있었다 (Table 1, Fig. 3A). 호소로 유입된 탁수가 최하류인 댐가

Table 1. Hydrological conditions during June 8 to September 9, 2005 (n=95).

Item	Rainfall (mm)	Inflow ($\text{m}^3 \text{S}^{-1}$)	Outflow ($\text{m}^3 \text{S}^{-1}$)	W. Level (EL. m)
Mean \pm SD	7.1 \pm 16.0	66 \pm 110	32 \pm 19	143.2 \pm 4.3
Minimum	0	0.1	9.9	135.1
Maximum	99.4	697.0	150.6	147.6
Total	662.5	6,220.7	3,002.9	-

지 이동한 시기는 강우 3일 후이며, 강우 전에 7.8 NTU의 방류 탁도가 강우 5일 후에는 129 NTU로 최고 상태를 보였다. 유입량은 평균 $66 \pm 100 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ 였으나 최대 $697 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ 까지 증가하였다. 저수지 수위는 EL. 135.1 m에서 강우 후에 최고 EL. 147.6 m로 12.5 m가 상승되었으나 방류량은 $20 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ 와 $45 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ (평균 $32 \pm 19 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$)로 일정하게 유지하였다. 안동댐의 방류는 하류의 하천 유황과 저수지 수문상황 등에 따라 결정되므로 급격한 방류량 변경은 극히 제한적으로 이루어진다. 본 연구 기간의 방류량은 초기에 $45 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ 를 유지한 상태였으며, 강우에 의한 유입량 증가로 댐 수위가 상승하는 상황에도 최대 강우가 있는 14일 후부터 $20 \text{ m}^3 \text{S}^{-1}$ 로 감량한 상태를 유지하였다 (Fig. 3B).

2. 호소 내 탁수층의 형성과 변화

강우에 의한 고탁수가 발생하기 이전 (2005년 6월 8일)의 호소 내 탁도는 최상류인 서부지점 (SEO)에서 28 NTU로 최고 분포를 보였으나 나머지 지점은 8~10 NTU

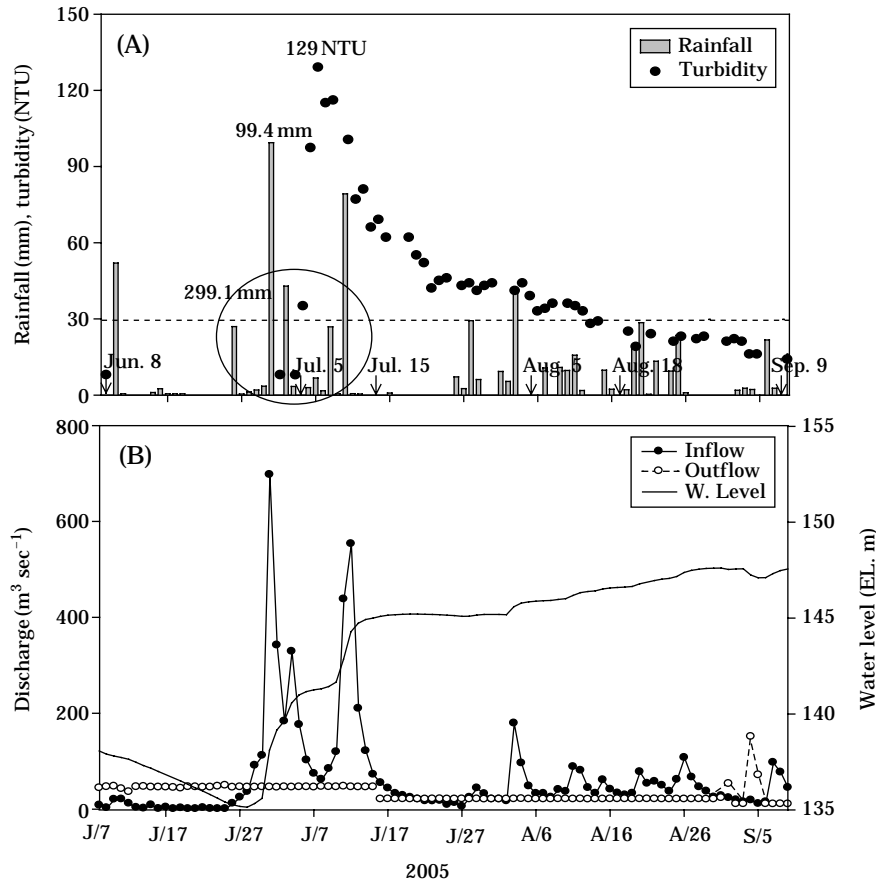


Fig. 3. Daily variations of hydrological factors and withdrawal turbidity during the study period.

Table 2. Spatial and temporal changes of the maximum turbid layers in the three zones, Andong Reservoir (SEO: Seobu, JUJ: Jujin, DOM: Domok, MAD: Madong, NOS: Nosan, DAM: Andong Dam, T: turbidity (NTU), D: depth (m), H: height (m) from the bottom of the reservoir).

Zone	Date	2005																	
		Jun. 8			Jul. 5			Jul. 15			Aug. 5			Aug. 18			Sep. 9		
		T	D	H	T	D	H	T	D	H	T	D	H	T	D	H	T	D	H
Upreservoir (riverine zone)	SEO	28	0	—	68	0	6	32	6	0	55	8	0	16	6	0	14/	10	0
	JUJ	—	—	—	96	12	0	79	16	0	44	8	10	11	20	0	59	16	0
Midreservoir (transition zone)	DOM	—	—	—	201	18	2	137	24	0	30	18	0	46	22	2	18/	22	0
	MAD	9	10	10	219	16	10	131	18	12	45	22	10	34	22	10	21	24	10
Downreservoir (lacustrine zone)	NOS	8	10	20	290	16	18	108	18	22	49	22	18	32	24	16	28	24	18
	DAM	10	10	28	196	16	30	79	18	28	47	21	25	31	22	26	27	24	26

의 범위로 낮은 상태였다 (Table 2, Fig. 4A). 박 등 (2005)의 선행 연구에서 밝힌 바와 같이, 안동호의 유입부인 서부지점 (SEO)은 표층에서의 조류발생에 의해 상대적으로 고탁도를 보인 것으로 판단되며 강우에 의한 탁수는 발생되지 않은 상태였다. 고탁수는 99.4 mm의 강우량을 보

인 7월 1일 강우에 의해 발생되었으며, 강우 4일 후 (7월 5일)의 조사에서 최상류인 서부지점 (SEO)은 52~68 NTU범위의 분포로 전체 수심에서 비교적 균일하여 유입된 고탁수가 동 조사지점을 통과한 상태였으며, 직하류인 주진지점 (JUJ)은 표층에서 22 NTU, 심층에서 96

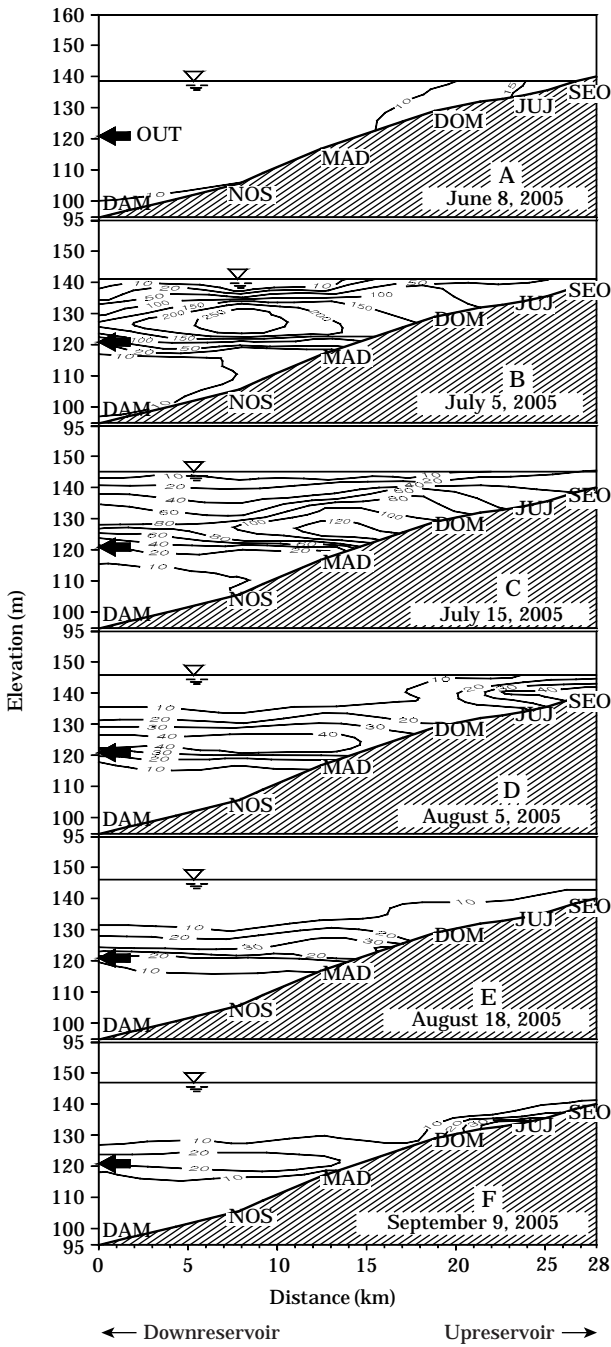


Fig. 4. Spatial and temporal variations of turbidity in Andong Reservoir during June 8~September 9, 2005. Dark arrows and numbers on the contours indicate the withdrawal depth and turbidity, respectively. SEO: Seobu, JUJ: Jujin, DOM: Domok, MAD: Madong, NOS: Nosan, DAM: Andong Dam

NTU로 분포하여 심층류 (underflow) 형태로 이동하는 상태였다. 도목지점 (DOM)은 직상류인 주진지점 (JUJ)과

유사하게 심층으로 탁도가 증가하여 수심 18m에서 최대 201 NTU였으나 직하부인 수심 20 m에서는 35 NTU를 보여 유입된 고탁수층이 호소 바닥에서 이탈되어 중층 밀도류 (interflow)를 형성하기 시작하였다. 호소 바닥에서 이탈한 고탁수층은 하류인 마동지점 (MAD)의 수심 16 m에서 219 NTU, 노산지점 (NOS)의 수심 16 m에서 290 NTU, 최하류인 댐측지점 (DAM)의 수심 16 m에서 196 NTU로 각각 최고 탁도를 보여 유입된 탁수가 중·하류지점부터 같은 수심대로 이동하였다 (Table 2, Fig. 4B). 완전한 중층 밀도류의 형태로 댐까지 이동한 고탁수층은 호소 바닥에서 25 m 이격된 취수구와 같은 수심이거나 5 m 이내의 직상부에 분포하였다. 강우 14일 후 (7월 15일)에는 중류부인 마동지점 (MAD)의 수심 18 m에서 131 NTU로 최고 탁도층이 분포하였으나 댐측지점 (DAM)에서는 79 NTU로 낮아진 상태였다 (Fig. 4C). 이후 댐측지점의 최고 탁도는 47 NTU (8월 5일), 31 NTU (8월 18일), 27 NTU (9월 9일)로 감소하였으며, 취수구와 일치하는 수심대에 최고 탁도층이 분포하였다 (Fig. 4D, 4E 및 4F).

조사지점 중 상류부인 서부지점 (SEO)과 주진지점 (JUJ)은 하천성향 (riverine zone)이 강하며, 중류부에 해당되는 도목지점 (DOM)과 마동지점 (MAD)은 전이대 (transition zone), 하류인 노산지점 (NOS)과 댐측지점 (DAM)은 완전한 호소성향지역 (lacustrine zone)에 해당된다 (Thornton *et al.*, 1990; 박 등, 2005). 안동호로 유입된 고탁수는 심층류 형태로 유입되어 중류에서 중층 밀도류를 형성하여 최하류까지 이동한 후 취수탑을 통해 하류로 배출되며 취수구 아래로는 침강되지 않았다 (Fig. 4). 본 결과는 2002~2004년의 태풍과 몬순으로 유입된 고탁수에서와 동일한 경향이였다 (박 등, 2005). 안동호로 유입된 고탁수는 심수층에 위치한 취수구를 통해 댐 하류로 배출됨으로써 최고 탁도층을 직하부인 취수구로 유인 (entrainment)하여 표수층 (epilimnion)으로의 탁수 확산을 억제하며, 취수구로 유입된 고탁수층은 상대적 고밀도층인 심수층 (hypolimnion)을 통과하여 호소 바닥으로의 침강현상은 일어나지 않으므로 고탁수 배제 측면에서 취수구의 위치는 적절한 것으로 판단된다 (Fig. 4).

3. 심층방류에 의한 탁수의 배출

강우 이전의 방류수 탁도는 7.8~7.9 NTU의 범위로 안정된 상태였으나 1일 최대 99.4 mm의 강우에 의해 고탁수가 발생되었다. 강우 2일 후까지는 8 NTU 이하의 균일한 분포이던 방류수 탁도가 강우 3일 후에 35 NTU, 4일

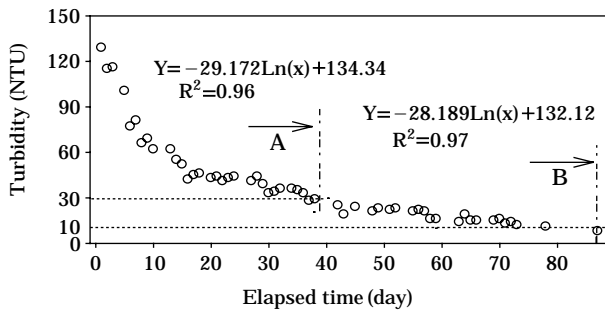


Fig. 5. Variations of the withdrawal turbidity after the rainfall (A) and before the heavy rain (B).

후에 97 NTU로 급격히 상승하였고, 5일 후에는 129 NTU로 최고를 보였다 (Fig. 3A). 미국의 경우 탁수를 수생태계를 파괴하는 요인인 수질 오염원으로 다루고 있다. 따라서, 하천의 탁도기준을 40 NTU 이하로 규정하고 있으며 탁도에 민감한 송어 서식지에서는 20 NTU 이하의 강화된 기준을 적용한다 (Bash *et al.*, 2001). 우리나라는 환경정책기본법에서 하천에서의 사람의 건강보호 기준으로 부유물질량(SS)을 25 mg L⁻¹ 이하로 규정하고 있어 탁도에 대한 기준은 없으나, 전국의 다목적댐을 관리하는 수자원공사에서는 댐 방류수의 탁도가 30 NTU 이상일 때 탁수발생으로 규정하고 있다.

본 연구에서는 단일사상의 강우에 의해 호소로 유입된 고탁수가 하류 배출을 통해 30 NTU 이하로 감소하는 경향과 탁수가 유입되기 이전의 상태로 회복되는 경향을 알아보고자 하였다. 유입된 탁수는 중층 밀도류로 댐까지 이동하여 방류수의 탁도는 강우 3일 후부터 빠르게 상승하여 5일 후에 최고 농도까지 상승하였다 (Fig. 3). 이후, 하류 배출을 통해 탁수상태로 관리하는 최소값인 30 NTU까지 감소하는 데는 38일이 소요되었고, 강우 이전의 상태인 8 NTU로 회복되는 기간은 87일이었다. 이 기간은 탁수의 추가 유입 여부와 방류량에 따라 가감될 것이다. 본 연구 기간의 1일 최대 약 100 mm, 총 300 mm의 강우로 안동호로 유입된 고탁수가 30 NTU로의 감소식은 $y = -29.172\ln(x) + 134.34$, $r^2 = 0.96$ 이며, 탁수가 유입되기 이전 상태로의 회복은 $y = -28.189\ln(x) + 132.12$, $r^2 = 0.97$ 이었다 (Fig. 5). 이러한 결과는 2006년에도 유사한 경향을 보였다 (미발표 자료). 2006년의 경우 1일 최대 140 mm의 강우로 유입된 탁수에 의해 방류수의 최고 탁도가 159 NTU였으나, 34일째에 30 NTU로 감소되었고 ($r^2 = 0.97$), 10 NTU 이하로는 90일이 소요되었다 ($r^2 = 0.96$).

강우로 유입된 탁수는 호소 내 확산, 침전 및 하류 배

출을 통해 감소한다 (Thornton *et al.*, 1990). 밀도류의 형태로 안동호의 중층으로 유입된 고탁수는 여름철 수온성층에 의해 심수층으로의 침전은 일어나지 않았으며 심층 취수구를 통한 하류 배출로 감소되었다 (Fig. 4). 그러나, 강우량, 유입량, 방류량 및 수문조건 등의 변동에 따라 탁수의 이동과 배제 기간, 감소 경향이 달라질 것이므로, 댐 저수지의 효율적인 탁수관리를 위하여 다양한 조건에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

적 요

본 연구는 심수층의 고정 취수구를 통해 방류하는 안동댐을 대상으로 1일 최대 99.4 mm, 총 299.1 mm인 단일사상의 강우로 유입된 고탁수의 호소 내 시·공간적인 거동과 방류수의 탁도가 감소하는 경향을 조사하였다. 유입된 고탁수는 중류지점부터 호소 바닥에서 이탈되어 중층 밀도류로 최하류까지 이동하였다. 강우 이전의 호소 내 탁도는 10 NTU 이하의 균일한 분포를 보였으나 강우에 의해 수심 16 m에 최고 290 NTU의 고탁수대가 형성되었다. 고탁수는 강우 후 3일부터 방류수의 탁도를 상승시켰으며 5일째에 129 NTU로 최고 탁도를 보였다. 댐까지 이동한 탁수층은 취수구 상부 5 m 이내의 수심에 최고 농도로 분포하였으며 하류 방류에 의해 탁수층의 두께와 농도가 감소하였다. 방류수의 탁도가 30 NTU까지 감소하는데 38일, 강우 이전의 상태로 회복되는데 87일이 소요되었으며, 감소경향의 상관계수는 각각 0.96, 0.97이었다. 중층에서 밀도류를 형성한 고탁수는 취수구 직상부에 분포하면서 취수구 방향으로 점차 유입되어 하류로 배출되었으며 호소 바닥으로의 침강은 일어나지 않았다. 안동호로 유입된 고탁수는 심층에 위치한 취수구를 통해 효과적으로 배출되므로 취수구 위치는 고탁수 배제에 적합한 것으로 판단된다.

사 사

본 논문의 기초자료 제공과 현장조사에 도움을 주신 한국수자원공사 안동댐관리단 직원들께 고마움을 드리며 아울러 논문을 세심하게 심사하여 주신 심사위원들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

국립환경연구원. 2005. 임하호의 탁수가 수생태계에 미치는

- 영향. 168p.
- 김범철, 정성민. 2007. 소양호의 탁수발생 실태와 환경학적 영향. *대한환경공학회지* **29(11)**: 1185-1190.
- 박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005. 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성. *한국육수학회지* **38(3)**: 105-117.
- 박재충, 박정원, 신재기. 2006. 안동호에서 중층 저산소층 형성의 요인 분석. *한국육수학회지* **39(1)**: 1-12.
- 신재기, 허진, 이홍수, 박재충, 황순진. 2006. 표층수를 방류하는 저수지(용담호)에서 몬순 탁수환경의 공간적 해석. *한국물환경학회지* **22(5)**: 933-942.
- 이상욱, 김정곤, 노준우, 고익환. 2007. CE-QUAL-W2 모델을 이용한 임하호 선택배제시설의 효과분석. *한국물환경학회지* **23(2)**: 228-235.
- 정세웅, 이홍수, 윤성환, 예령, 이준호, 추창호. 2007. 홍수시 대청호 유역에 발생하는 탁수의 물리적 특성. *한국물환경학회지* **23(6)**: 934-944.
- 한국수자원공사. 2006. 안동다목적댐 관리연보. 324p.
- 한국수자원공사. 2004. 임하호 탁수저감 방안 수립 보고서. 131p.
- 황상구, 정기영. 2006. 안동 임하댐 유역의 지질과 임하호 고탁수의 원인. *자원환경지질학회지* **39(6)**: 771-786.
- Bash, J., C. Berman and S. Bolton. 2001. Effects of turbidity and suspended solids on salmonids. Center for Streamside Studies, Univ. of Washington, Seattle, Washington, USA. 92p.
- Shin, J.K., S.A. Jeong, I. Choi and S.J. Hwang. 2004. Dynamics of turbid water in a Korean reservoir with selective withdrawal discharge. *Korean Journal of Limnology* **37(4)**: 423-430.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir limnology: Ecological perspective. John Wiley & Sons, Inc. 246p.

(Manuscript received 5 August 2008,
Revision accepted 9 September 2008)