

표층수를 방류하는 저수지(용담호)에서 몬순 탁수환경의 공간적 해석

신재기[†] · 허진^{*} · 이흥수 · 박재충^{**} · 황순진^{***}

한국수자원공사 수자원연구원

^{*}세종대학교 지구환경과학과

^{**}한국수자원공사 안동댐관리단

^{***}건국대학교 환경과학과

Spatial Interpretation of Monsoon Turbid-water Environment in a Reservoir (Yongdam) Discharging Surface Water, Korea

Jae-Ki Shin[†] · Jin Hur^{*} · Heung-Soo Lee · Jae-Chung Park^{**} · Soon-Jin Hwang^{***}

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (KOWACO)

^{}Department of Earth and Environmental Science, Sejong University*

*^{**}Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation (KOWACO)*

*^{***}Department of Environmental Science, Konkuk University*

(Received 27 June 2006, Accepted 21 July 2006)

Abstract

In this study, temperature, turbidity, suspended particulate matter (SPM) distribution and mineral characteristics were investigated to explain spatial distribution of the turbid-water environment of Yongdam reservoir in July, 2005. Six stations were selected along a longitudinal axis of the reservoir and sampling was conducted in four depths of each station. Water temperature was showed the typical stratified structure by the effects of irradiance and inflow. Content of inorganic matter in suspended particles increased with the concentration of suspended particulate matter (SPM) due to the reduction of ash-free dry matter (AFDM). Turbidity ranged from 0.6 to 95.1 NTU and the maximum turbidity value of each station sharply increased toward downstream from upstream. The high turbidity layers were located at the depth between 12~16 m. Particle size ranged from 0.435 to 482.9 μm . Clay and silt-sized particles corresponded 91.9~98.9% and 1.1~8.0% in total numbers of SPM, respectively. Turbidity showed high correlations with clay ($r=0.763$, $p<0.05$) and silt content ($r=0.870$, $p<0.05$). Inorganic matter content ($r=0.960$, $p<0.01$) was more correlated with turbidity than organic matter ($r=0.823$, $p<0.05$). Mineral characterization using x-ray diffraction and electron probe microanalyzer demonstrated that the major minerals contained in the SPM were kaolinite, illite, vermiculite and smectite. As results of this study, surface water discharge as well as small size of the SPM were suggested as long-term interfering factors in settling down the turbid water in the reservoir.

keywords : Monsoon, Particle, Reservoir, Selective withdrawal, Surface water discharge, Turbidity, Turbid-water

1. 서론

우리나라는 장마와 이상기후의 집중호우를 포함하여 계절적 또는 지역적인 강수량의 편중으로 인해 수자원의 재해와 용수 이용의 많은 어려움을 겪고 있다(Shin, 2005). 이러한 기후적 영향은 다양한 규모와 형태의 다목적댐, 용수댐 저수지를 통해 대응하고 있는 실정에 있다. 또한, 도시화와 생활수준의 향상으로 양질의 용수 요구도가 높아져 수자원의 수질관리가 더욱 노력되고 있으나 산업화, 경제발전 및 지역개발의 과정에서 다양한 오염물질에 노출되어 이용 가능한 수자원의 오염 수준은 더욱 높아만 가고 있다. 이러한 시점에 탁수는 새로운 오염물질로 분류되고 있으며

(신 등, 2003; Shin et al., 2004a), 이에 대한 사회적 논란도 점진적으로 증가되고 있어 수자원 관리에 많은 어려움이 따르고 있다(박, 2005).

우리나라의 댐 저수지는 기존에 증충 이하의 수심에서 심층 방류하는 시스템을 갖춘 곳이 많았으나, 저수지 하류 지역의 농업활동에 대한 냉수 피해(냉해) 및 안개 발생이 우려되고 있어 이를 방지하기 위하여 상대적으로 수온이 높은 표층수를 선택적으로 취수하여 방류하는 시스템을 갖춘 곳이 증가하게 되었다. 또한, 이러한 표면 취수하는 방식을 채택하고 있는 저수지(임하호, 용담호)에서 탁수에 의한 수질오염 문제가 가중되어 사회적 해결 현안으로 대두되었다.

탁수의 발생은 자연적 또는 인위적 영향으로 나타나며, 일년 중 다른 계절에 비해 집중호우에 의한 토양 침식이 활발한 여름철에 그 수준은 최고값을 기록하고 있다(Shin

[†] To whom correspondence should be addressed.
jaekishin@kowaco.or.kr

et al., 2004a). 탁수에 의한 수환경 변화는 외부 기원성 유기물 증가, 수중 영양염의 공급, 투명도 저하, 생산성 감소 및 저질의 토성 변화 등을 들 수가 있다. 탁수의 유입은 수질과 생태계를 포함하는 수환경을 일시에 변화시킬 뿐만 아니라 용수 이용에 대한 수처리 비용 증대 등의 경제적 손실도 가중시키게 된다(AWWA, 1999).

저수지의 성층현상(stratification)은 수심에 따른 온도와 부유입자 농도 차이에 의해 수체의 밀도 변화가 현저하게 형성됨으로서 나타나는 것이다. 수온 성층은 대다수 저수지에서 광범위하게 전개되는 자연적인 현상으로서 온도구배에 따라 수층을 크게 3개의 층(epilimnion 표수층, metalimnion 중수층, hypolimnion 심수층)으로 구성하게 된다(Wetzel, 2001). 이러한 성층현상의 발달과 소멸 과정은 계절성을 가지며 수질관리 측면에서 부가되는 문제점을 야기하게 되고, 빈영양 환경부터 부영양 또는 과영양 환경의 수중 영양상태에 따라 시공간적으로 다양한 물리, 화학 및 생물학적 영향을 미치게 된다(Thornton et al., 1990).

우리나라에서 성층현상은 4월부터 초기화되어 다른 계절에 비해 여름철(7월~9월)에 뚜렷하게 형성되고, 몬순 홍수기에 유역으로부터 공급되는 고탁수층(high turbidity current layer)이 수온약층(thermocline)을 중심으로 그 상부에 분포하는 특성을 보이고 있다(Shin et al., 2002, 2004b). 이렇게 형성된 고탁수층은 심수층으로 재빠르게 하강하지 않고 장기간 중수층에 체류(3~4개월)하게 되어 저수지의 평균 탁도와 댐 방류수의 탁도 증가를 증가시키는 요인을 제공하게 된다.

외부로부터 저수지에 공급되는 입자성 물질의 구성은 생물 또는 비생물 요소로 구분될 수 있고, 이 중에서 비생물 요인은 비강우 시기보다 강우가 빈번한 시기에 발생 유입이 더욱 우세하다(Wotton, 1994; Winston et al., 2002). 특히, 장마와 집중호우로 인한 유입량이 급증하는 시기에는 탁수의 유입으로 수중 탁도가 급상승하게 되고, 이는 일시적이긴 하나 매년 발생하는 자연적 수질오염의 대표적인 경우에 해당한다(신 등, 2003; Shin et al., 2004a). 탁수에 의한 수질오염은 원인 제공 측면에서 인위적 성향이 강한 점 오염으로 볼 수 있으나 유출 공급 특성 측면에서 전형적인 비점 오염에 해당하여 하천과 달리 어느 정도 체류시간을 유지하는 저수지 환경에서 수질적 측면에서 더욱 세심한 관리의 필요성을 지적하고 있다(Thornton et al., 1990; Shin et al., 2004a).

하천과 저수지는 연속된 시스템으로써 상호 밀접한 관련성을 가지고 있다. 저수지에 하천 유입의 영향은 식물플랑크톤의 생산성과 영양염 및 부유입자의 관계에 대해 종종 연구되어 왔었다. 또한, 탁수(turbidity current)와 관련한 연구로써 Thornton 등(1990)은 탁수 밀도류가 수온과 밀도 차이에 의해 표층류, 중층류 및 심층류의 형태로 저수지에 유입됨과, 강수의 세척효과로서 상류로부터 저수지내에 공급 운반되는 침식토양의 퇴적 영향을 최소화하는데 주안을 두어 선택적 방류의 수리학적 해석을 소개하였다.

우리나라에서 저수지의 탁수에 관련된 선행연구는 최근에 집중 소개되었고, 주로 수질 모델링 연구가 많았다. 김 등(2001)은 소양호의 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상을 모델링하였고, 정(2004)은 성층화된 대청댐 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성을 2차원 횡방향 평균 수치모델로 재현하였다. 또한, 심층방류(대청호)와 선택취수(횡성호)하는 저수지의 탁수 동태(Shin et al., 2002, 2004b), 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸 특성 연구(박, 2005) 등이 있었다. 그 외 탁수와 관련성 있는 연구로는 우리나라 담수생태계에서 탁수의 발생과 그 영향(Shin et al., 2004a), 하천-저수지 시스템의 탁수입자 분포 특성(정 등, 2004) 등이 있었다. 임하호 탁수층의 혼합거동 해석(한국수자원공사, 2004b), 밀도 성층화된 저수지내의 탁수배제시설 접근흐름에 관한 수치해석(한국수자원공사, 2004a) 등이 연구 보고되었다.

본 연구는 표층수를 방류하는 담수 초기 저수지에서 여름철에 집중 발생하는 고탁수에 대해 기초 수환경, 수중 탁도, 입자 분포 및 토성 등을 측정 분석하여 그 특성을 파악한 후 이를 공간적으로 해석하고자 하였다. 그 결과 저수지의 고탁수 환경에 대한 수자원 및 수질관리에 유용한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개황

본 연구의 대상인 용담댐(N35°56', E127°31')은 금강 상류에 위치하고 있으며(Fig. 1), 홍수조절, 용수공급 및 수력발전 등 다목적으로 1992년 10월에 착공하여 2001년 11월에 준공되었고, 2002년부터 본격적으로 저수를 시작하였다. 용담저수지의 유역 면적은 930 km²이고 저수 면적은 36.2

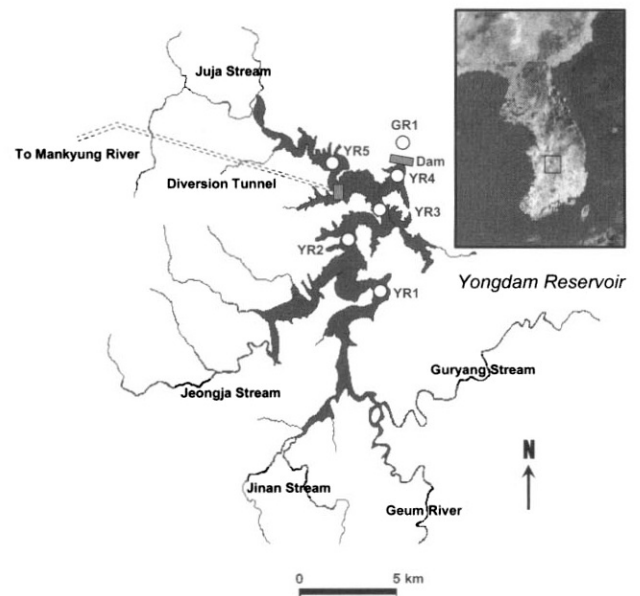


Fig. 1. Map showing sampling stations for the survey of turbid water environment in Yongdam Reservoir. YR: Yongdam Reservoir, GR: Geum River, respectively.

Table 1. General geographic and limnological features of the Yongdam Reservoir watershed

Attributes	Yongdam Reservoir
Latitude	35°56'N
Longitude	127°31'E
Dam elevation (m)	EL.268.5
Project period of dam construction	October 1992 to November 2001
Impoundment of reservoir	November 2001
Functions	Multi-purpose
Trophic state	Meso-eutrophic
Yearly rainfall (mm/year)	1,485.7
Mean rainfall (mm/day)	9.8
Mean influent water (m ³ /s)	33.0
Mean effluent water (m ³ /s)	28.9
Watershed area (km ²)	930.0
Reservoir surface area (km ²)	36.2
Reservoir storage volume (×10 ⁶ m ³)	815.0
Effective storage volume (×10 ⁶ m ³)	672.0
Dam height (m)	70.0
Dam length (m)	498.0

km²로서 유역면적/저수면적의 비율은 25.7에 해당하여 오염 부하가 매우 높은 특성을 가지고 있다(Table 1). 연 강수량은 1,485.7 mm이고, 일 평균 강수량은 9.8 mm이다. 유입량과 유출량의 평균값은 각각 33.0 m³/s, 28.9 m³/s이다. 총저수량은 815×10⁶ m³이고, 유효저수량은 672×10⁶ m³에 해당한다. 최대 수심은 52.0 m이고, 평균 수심은 23.9 m로써 하천 유입부의 상류에서 얕고, 댐 부근에서 가장 깊다.

유역의 주요 하천은 금강 본류, 구량천, 진안천, 정자천 및 주자천의 5개로 구성되어 있다. 하천별 소유역의 면적은 9.5~39.5%범위이고, 이 중에서 규모로 볼 때 금강 본류가 가장 크고, 진안천이 가장 작다. 이들 하천으로부터 저수지에 최종 유입된 물은 크게 여수로, 발전방류구 및 취수구를 통해 하류 하천으로 배출된다. 취수탑은 댐 부근과 주자천 유입 하류부에 각각 1개씩 건설되어 금강과 만경강의 본류로 방류되고 있다. 취수는 수위 증감에 따라 표층수를 중심으로 이루어지고 있고, 만경강으로 방류되는 수량은 취수 후 도수로(11 km)를 통해 공급되고 있다. 금강과 만경강으로 공급되는 일 평균 유량은 2,497×10³ m³이다. 따라서 용담저수지 하류의 금강 본류와 만경강 상류부는 저수지(용담)의 수질과 밀접한 관련성을 가지고 있다.

용담저수지 완공 이후에 유역에는 도로, 교량 건설 및 공단 조성 등 국가기반시설의 개발 공사 및 하천정비 사업이 매우 활발하게 성행하고 있었다. 이러한 대형 공사는 기간으로 볼 때 일시적이긴 하나 지표면 토양에 인위적 교란을 가하게 되어 기존의 자연환경(산림) 및 생활환경(경작지) 요인과 함께 우기에 탁수 발생의 주된 근원으로 작용할 수 있다. 따라서 저수지로 유입되는 탁수는 인간 활동에 의한 직·간접적인 영향이 매우 크며, 강수 세기와 빈도에 의존적이긴 하나 연중 강수량의 대부분을 차지하는 장마기에 점 또는 비점오염원의 형태로 수질오염을 가중시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

2.2. 현장 조사

본 연구는 담수 초기단계에 있는 용담저수지를 대상으로 하였고, 장마 강우 후 전 수역에서 최대 탁도값을 보이는 시기에 상류부터 하류까지 기초수질, 탁도 및 입자 관련 항목을 조사하였다. 조사 지점은 유입 지류를 고려하여 저수지의 본류 구간은 상·하류의 4개 지점(YR1, YR2, YR3 및 YR4)이었고, 지류는 만경강으로 도수하는 취수탑 부근의 1개 지점(YR5) 및 댐 부근 취수탑 방류구의 하류 하천에서 1개 지점(GR1) 등으로서 총 6개 지점을 선택하였다. 탁수환경 조사는 FRP 선박을 이용하여 각 정점까지 이동하였고, 최우선적으로 측심기(Hondex PS-7 digital sounder, Japan)를 이용하여 수심을 조사하였다. 그 후, 다항목 측정기 YSI-6600 UPG meter를 이용하여 표층부터 0.5 m간격으로 저층까지 수심, 수온, DO, DO 포화도, pH, 전기전도도 및 탁도를 동시에 측정하였다. 투명도는 광의 영향을 피하여 반대편에서 Secchi disc를 이용하여 2회 측정하였고(Wetzel et al., 1991), 평균값을 사용하였다. 탁수 분석을 위한 시료는 수심별 측정 자료를 기준으로 최고 탁도층을 선별하였고, Van Dorn sampler를 이용하여 표층, 최고 탁수층, 중층 및 저층의 4개 수층에서 각각 채수하였다. 채수한 시료는 아이스박스에 담아 실험실로 운반하였고, 즉시 전처리한 후 실험 분석하였다. 강수량, 유입량, 유출량 및 수위는 한국수자원공사 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 댐 수문자료(2001~2005년)를 이용하였다.

2.3. 분석 방법

수층별로 채수한 시료의 탁도는 HACH 2100N meter로서 실험실에서 재측정하였고, 현장에서 YSI-6600 UPG meter로서 직접 측정된 것과 비교 자료로 활용하였다. 탁수에 포함된 입자 크기 및 분포는 Model LE400-05 sensor가 장착된 AccuSizerTM 780 광학입자분석기(Particle Sizing Sys-

tems Inc., USA)를 이용하여 측정하였고, 시료는 균일하게 흔들면서 취하였다. 입자 분석은 0.4~500.0 μm 범위에서 2회 측정하여 평균값을 사용하였다. SPM(suspended particle matter)은 전 처리(중류수 통과 후 건조)한 GF/F 여과지에 시료 일정량을 여과하여 105°C에서 무게 차가 없을 때까지 건조시킨 전·후의 차이로 산정하였다. AFDM(ash-free dry matter)은 시료를 여과하여 건조시킨 GF/F 여과지를 550°C의 항온 전기로(muffle furnace)에서 2시간동안 태운 전·후의 무게 차이로 구하였다(APHA et al., 1995). Chlorophyll-a(Chl-a)는 일정 양의 시료를 GF/F 여과지에 여과하였고, 여과지에 90% Ethanol 용매를 첨가하여 비등 추출한 후 정량하는 Nusch(1980)법으로 하였다. 모든 수질 항목은 2회 반복하여 분석하였다.

탁수의 광물 및 원소 분석을 위한 시료의 전처리는 다음과 같이 수행하였다. 고탁도 시료에 포함된 유기물을 제거하기 위해 산화제 과산화수소수(H_2O_2)를 첨가한 후 끓여서 넘치지 않을 정도의 온도에서 비등 분해시켰고, 산화제를 제거하기 위해 중류수를 이용하여 5~6회 세척 및 침강 작업을 반복하였다. 유기물 제거과정을 마친 시료는 원심분리관에 옮겨 담아 5,000 rpm에서 30분 동안 원심분리하였다. 원심분리한 후, 침강된 시료가 재부유되지 않도록 조심스럽게 상등액을 버리고 최종적으로 바닥층의 입자 시료만 취하였다. 습성 시료는 60°C의 항온 건조기내에서 약 2~3일 동안 완전 건조시켜 수분을 제거하였다. 시료에 수분이 흡수되지 않도록 dessicator에 보관하였다. 광물분석은 XRD(X-ray diffraction)의 CuK α 선과 Ni-filter를 이용하여 측정하는 회절분석법(Geigerflex 2301, Rigaku Co.)으로 하였다. 측정 전압을 30 kV, 전류를 15 mA, Scan speed를 2° 2 θ /min, 시정수는 1 sec 및 slit는 1°-0.3 mm-1°의 조건하에서 하였다. 원소분석은 EPMA(electron probe microanalyzer)법으로 하였다.

2.4. 자료 분석

수질항목의 상호관계는 SPSS 12.0 통계소프트웨어를 이용하였고, Person's correlation analysis를 통해 수행되었다(SPSS, 2003). 유의 수준은 $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수문 환경

2001년 1월~2005년 8월동안 무강수일을 제외한 일 강수량의 범위는 0.1~186.0 mm이었고, 평균값은 9.8 mm이었다(Table 2). 총강수량은 2001년, 2002년, 2003년, 2004년 및 2005년에 각각 1,023.0 mm, 1,660.0 mm, 2,044.8 mm, 1,373.1 mm 및 1,327.6 mm로써 다소 차이가 있었고, 평균값은 1,485.7 mm이었다. 강수량은 11~5월에 적었고, 6~10월에 풍부하여 대비가 되었으며, 여름철과 가을철에 편중된 구조를 보여 몬순 기후지역의 일반적인 경향을 보였다.

유입량과 방류량의 증감은 강수량과 강수 빈도의 패턴과 밀접한 관련성(Shin et al., 2002)을 보였다. 유입·방류량의 변동에서 최대 유량은 2005년에 높았고, 2001년과 2004년에 낮았으며, 2002년과 2003년은 그 중간 분포를 보였다. 2001~2005년동안 유입량의 범위와 평균값은 각각 0.1~1,979.8 m^3/s , 33.0 m^3/s 이었고, 방류량은 각각 2.3~705.5 m^3/s , 28.9 m^3/s 이었다. 또한 저수위는 유입량과 방류량에 따라 변화하였고, 2002년 9월에 최고 EL. 264.4 m, 2001년 1월에 최저인 EL. 218.2 m로서 약 46 m의 수위변동을 보였다.

3.2. 기초 수환경 요인

현장조사에서 관측된 기초 수질의 수직 분포는 Fig. 2에 나타내었고, 주요 환경 요인의 수층 분석 결과는 Table 3과 같다. 본 조사 시기에 저수지의 각 정점에 따른 수심은 5.0~42.0 m범위이었고, 평균 수심은 33.6 m이었다(Table 3). 수온은 표층과 저층에서 평균값(범위)이 각각 21.3°C(20.7~22.0°C), 8.7°C(5.6~18.2°C)이었다(Fig. 2). 저수지에서 7월에 수온의 수직 분포는 전형적인 S자 형태를 띠었고, 표층을 제외한 3개의 변곡층 구조를 나타냈다. 수온의 수직 분포는 상류 또는 지류로부터 하류의 댐까지 동일한 양상을 보였다(Fig. 2). 표층 수온은 상류에서 하류로 갈수록 다소 감소(1.3°C경향을 보였으나 큰 차이는 아니었다. 특히, YR4에서 수온이 급감한 수위는 1.0~7.2 m에서 29.7~

Table 2. Mean values of hydrological factors in Yongdam Reservoir during January 2001 to August 2005. Plus-minus and parenthesis values indicate standard deviation, maximum and minimum, respectively

Factors \ Years	Yongdam Reservoir				
	2001	2002	2003	2004	2005
Total rainfall (mm)	1,023.0	1,660.0	2,044.8	1,373.1	1,327.6
Mean rainfall (mm)	7.0±13.4 (92.0/0.1)	9.5±23.1 (186.0/0.1)	12.2±20.9 (108.7/0.1)	8.9±16.9 (145.7/0.1)	12.0±26.7 (182.8/0.1)
Total inflow (m^3/s)	7,137.4	13,547.0	18,153.1	8,472.1	8,894.9
Mean influent water (m^3/s)	19.6±36.0 (450.0/0.8)	37.1±98.5 (1,021.7/1.5)	49.7±106.0 (937.4/2.2)	23.1±52.4 (408.5/0.9)	36.6±156.0 (1,979.8/0.1)
Total outflow (m^3/s)	5,400.7	9,815.9	18,406.0	8,288.4	7,404.9
Mean effluent water (m^3/s)	14.8±7.8 (21.3/2.3)	26.9±43.1 (411.6/5.7)	50.4±86.3 (520.5/10.3)	22.6±11.8 (124.4/10.3)	30.5±61.5 (705.5/11.9)
Water level EL. (m)	233.6±8.2 (252.3/218.2)	248.1±8.7 (264.4/237.3)	255.5±2.7 (262.6/250.4)	251.9±4.7 (258.7/243.4)	249.9±5.0 (261.6/241.2)

Table 3. Comparison of major environmental factors according to the water layers at six stations of Yongdam Reservoir

Factors	Reservoir																Tributary				Effluent
	YR1				YR2				YR3				YR4				YR5				GR1
	S	M	H	B	S	H	M	B	S	H	M	B	S	H	M	B	S	H	M	B	
Depth (m)	5.0	10.4	12.0	15.7	5.0	14.0	14.9	24.6	5.0	13.7	20.3	35.2	5.0	15.3	21.3	42.0	5.0	12.5	16.0	27.1	.
Temperature (°C)	20.9	18.9	18.7	18.2	22.0	18.4	18.3	7.5	21.2	18.6	15.9	5.8	20.7	18.3	12.7	5.6	21.5	18.7	18.1	6.5	22.7
Turbidity (NTU)	5.0	47.5	49.0	32.7	1.6	78.1	76.2	14.4	2.5	94.3	64.5	3.6	3.3	95.1	31.8	3.0	0.6	74.2	46.2	4.1	21.4
TWL 20*	[8.2~20.7]				[7.5~22.9]				[7.1~21.7]				[7.2~21.3]				[7.7~22.2]				
Thick of TWL 20	12.5				15.4				14.6				14.1				14.5				
TWL 20/Dm ratio	79.6				62.6				41.5				33.6				53.5				
DO (mg O ₂ /L)	10.4	6.8	6.9	6.5	9.5	6.9	7.0	6.8	11.2	6.3	6.8	8.1	10.0	5.9	6.5	8.9	12.4	6.8	6.8	8.0	.
pH	9.0	8.4	8.3	8.2	9.0	8.3	8.2	8.2	8.8	8.1	8.1	7.7	8.8	8.0	8.2	7.6	8.7	7.9	7.8	7.6	.
Conductivity (μS/cm)	77	63	63	72	82	58	57	91	77	60	76	88	79	64	91	92	66	61	55	88	.
SPM (mg/L)	5.0	16.7	.	10.3	2.0	.	22.0	5.7	2.0	27.3	22.7	2.0	3.0	30.3	6.7	2.7	2.3	.	22.7	4.3	12.0
AFDM (mg/L)	5.0	8.0	.	6.0	2.0	.	6.3	5.7	2.0	7.7	8.7	2.0	3.0	9.7	5.7	2.7	2.3	.	7.0	4.3	8.0
Chlorophyll-a (μg/L)	26.0	1.7	.	0.9	11.3	.	1.4	1.0	10.0	1.1	0.9	0.6	12.5	1.2	0.6	0.5	5.1	.	1.0	0.6	5.1
Transparency (m)	2.0	.	.	.	3.0	.	.	.	3.3	.	.	.	3.3	.	.	.	3.0	.	.	.	.

* Turbid water layer above 20 NTU

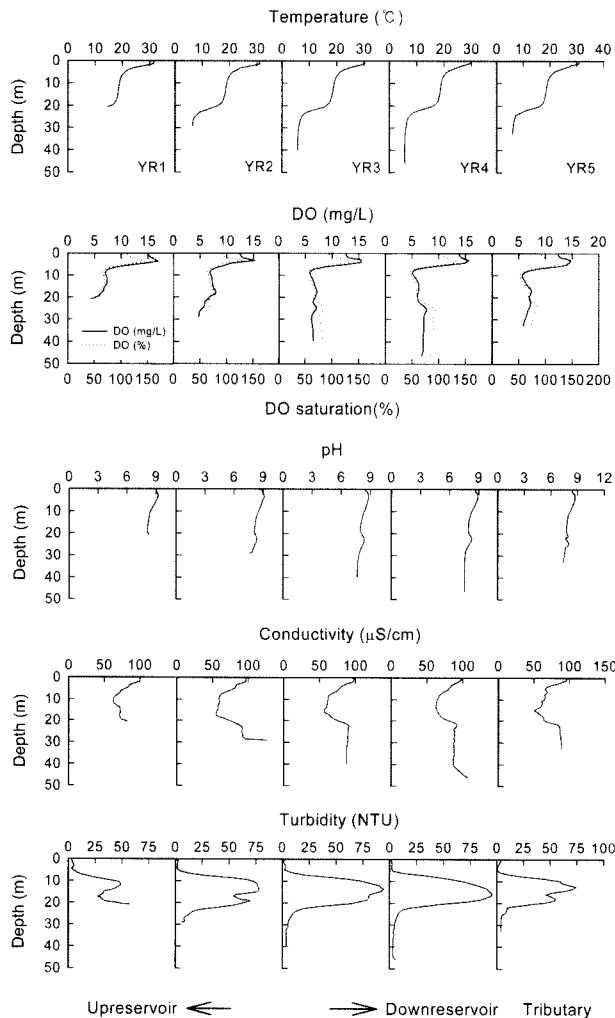


Fig. 2. Vertical depth-profiles of major environmental factors in Yongdam Reservoir in July 25, 2005.

19.6°C, 19.4~26.0 m에서 16.8~6.8°C범위이었고, 완만하거나 일정한 수위는 8.1~18.4 m에서 19.3~17.4°C, 26.4~46.0 m에서 6.5~5.7°C범위이었다. 이러한 변동 수위를 반

복하면서 상·하층의 수온 차이는 24.2°C로서 매우 컸다 (Fig. 2). 용담저수지에서 관찰된 수온 구조는 전형적인 성층현상을 반영하였고, 일사량과 유입수의 온도에 의한 영향이 매우 커 그에 대한 의존성을 보였다(Thornton et al., 1990; Wetzel, 2001; Kalff, 2002).

DO의 농도와 포화도는 각각 4.4~14.5 mg/L, 43.0~169.6%의 범위를 보였다. 수평 또는 수직 분포에서 2개 요인의 경향은 유사하였다(Fig. 2). DO 농도는 상류(YR1)의 표층에서 11.2 mg/L이었으나, 중·하류 구간(YR2~YR4)과 지류(YR5)에서 9.2~10.5 mg/L범위로서 조금 감소하였다. DO는 전 수역에서 수심 4.0 m까지 증가하여 고산소 상태이었고, 9.6 m까지는 급격하게 감소(12.9~4.7 mg/L범위)하여 상대적으로 저산소 상태의 양상을 보였다. DO가 감소되는 농도 차이는 상류에서 하류로 갈수록 더욱 현저하게 컸다. 특히, 수심 25.5 m 이하의 저층에서는 증감을 반복하는 불규칙적인 분포를 나타냈다(Fig. 2). YR1~YR2 구간과 YR3~YR4 구간에서 중·저층 DO의 수직 분포를 달리 하였는데 이것은 수심에 따른 수체의 안정도와 저질층의 O₂ 소비에 대한 요구도 차이의 결과로 볼 수 있었다. DO 포화도는 100%를 기준으로 할 때, 수심 4.5~5.9 m범위에서 증감 차이를 두고 구분되었다. 수심 5.3 m까지는 108.5~169.6% 범위로서 포화 또는 과포화 상태이었으나, 그 이하 수심에서는 43.0~95.0% 범위로서 저포화 또는 불포화 상태이었다. 수심에 따른 포화도의 면적은 하류로 갈수록 협소해 지는 경향이었고, 총 수심의 평균값은 65.6~72.3% 범위이었다(Fig. 2). 또한, 수심 25 m이하에서 O₂ 포화도는 YR1에서 YR3~YR4로 갈수록 더욱 증가하는 형태를 보였다.

pH의 평균값은 8.2이었고, 범위는 7.6~9.0이었다. 표층수의 pH 값은 상류에서 하류로 갈수록 조금 감소하여 DO의 변화와 유사하였다(Fig. 2). 수직 분포에서 pH는 수심이 깊어질수록 지속적으로 다소 감소하거나 일정한 양상이었고, 수온이 감소하고 DO가 증가하는 수층에서 조

금 증가하는 변화를 보였다. 결과적으로 수심에 따른 상·하층의 차이는 0.8~1.2범위였고, 평균값은 1.0이었다.

전기전도도는 수체에서 이온 농도의 수준을 나타내는 것(Wetzel et al., 1991; APHA et al., 1995)으로서 범위(평균값)가 55.0~92.0 $\mu\text{S/cm}$ (73.0 $\mu\text{S/cm}$)이었다. 전기전도도는 표층과 저층에서 높았고, 9.8~17.7 m범위에서 낮았다(Fig. 2). 최저값은 YR1~YR2 구간에서 조금 감소하다가 YR4로 갈수록 증가하였고, YR2와 YR4의 바닥층 부근에서 100 $\mu\text{S/cm}$ 이상되는 값이 관찰되었다.

SPM(suspended particulate matter)은 표층, 최고 탁도층, 중층 및 저층에서 범위(평균값)가 각각 2.0~5.0 mg/L(2.9 mg/L), 27.3~30.3 mg/L(28.8 mg/L), 6.7~22.7 mg/L(18.2 mg/L) 및 2.0~10.3 mg/L(5.0 mg/L)이었다. AFDM(ash-free dry matter)은 각각 2.0~5.0 mg/L(2.9 mg/L), 7.7~9.7mg/L(8.7 mg/L), 5.7~8.7 mg/L(7.1 mg/L) 및 2.0~6.0 mg/L(4.1 mg/L)이었다. 또한, SPM에 대한 AFDM의 차지하는 비율은 SPM의 농도가 높을수록 감소하여 무기물의 함량이 더욱 증가함을 알 수 있었다.

Chl-a 농도는 0.5~26.0 $\mu\text{g/L}$ 범위였고, YR1에서 가장 높았다. 수층 별 평균값은 표층, 중층 및 저층에서 각각 13.0 $\mu\text{g/L}$, 1.1 $\mu\text{g/L}$, 0.7 $\mu\text{g/L}$ 로서 저층과 비교할 때 12.3 $\mu\text{g/L}$ 정도의 차이를 보였다(Table 3). 최고 탁수층은 평균값이 1.2 $\mu\text{g/L}$ 로서 표층보다 현저하게 낮으나 중·저층보다 조금 높은 수준이었다. 투명도는 2.0~3.3 m범위였고, 평균값은 2.9 m이었다(Table 3). 투명도는 수심이 얇은 상류에서 낮았고, 수심이 깊어지는 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

3.3. 탁수층의 공간적 분포

탁도는 저수지의 상·하류 및 지류에서 범위가 0.6~95.1 NTU이었고, 정점별 수직적 평균값의 범위는 2.6~78.1 NTU이었다. 최고 탁도값을 기준으로 할 때, 상류에서 하류로 갈수록 현저하게 증가하였고, 이 중에서 가장 높은 값을 보인 정점은 YR4(댐 부근, 15.3 m)이었다(Fig. 2). YR1~YR3와 YR5는 수심 12.0~20.7 m범위에서 수중 어류의 입벌린 형태로서 상층과 하층이 다소 분리되는 구조를 보였고, 하류로 갈수록 그 모양이 소멸되는 양상이었다. 이와는 달리 YR4는 말단부만 미약하게 역전된 형태를 나타냈다.

수중 탁도 분포에서 장마 강수 후 각 지점의 최고 탁수층은 비교적 다양한 수심(12~16 m범위)에 위치하였고 수온은 18.2~18.6°C범위에 걸쳐 안정된 밀도층을 유지하는 것으로 조사되었다(Fig. 2, Table 3). 또한, 탁수층 중에서 20 NTU이상의 탁도값을 가진 수심(TWL 20)으로 기준할 때 그 두께는 상·하류간에 비교적 일정하였으나, TWL 20을 상·하류간의 수심으로 나누어 보면 그 비율은 상류에서 하류로 갈수록 감소되었다.

3.4. 탁수 구성입자의 수층별 분포

2005년 7월에 용담저수지의 탁수에 포함된 입자를 측정

한 결과 크기는 0.435~482.9 μm 범위이었다(Fig. 3, Table 4). 전 정점에서 clay 성분의 미세입자가 월등히 풍부하였고, 크기에 따른 분포도 더욱 조밀하였고, 보존성이 매우 강하였다(Shin et al., 2004b). 또한, 다른 토성에 비해 상대적으로 차지하는 비율도 현저하게 높았다. 정점별로 측정된 총 입자수는 상류(YR1)에서 하류(YR3~YR4 구간)로 갈수록 증가하는 양상을 보였다.

특히, 하류의 최고 탁도층에서 입자수는 YR3에서 279×10^3 numbers/mL로서 가장 높았고, YR4의 최고 탁도층은 260×10^3 numbers/mL로서 유사한 값을 보였다(Fig. 3). 또한, YR3와 YR4에서 표층, 중층 및 저층의 입자수는 각각 48×10^3 numbers/mL, 35×10^3 numbers/mL, 46×10^3 numbers/mL와 102×10^3 numbers/mL, 145×10^3 numbers/mL, 77×10^3 numbers/mL로서 YR4에서 입자수가 더욱 많았다(Fig. 4). 이러한 결과는 상류하천으로부터 유입된 탁수가 댐 부근까지 진행하여 발달된 영향(Thornton et al., 1990; Shin et al., 2004b)으로 사료되어진다.

방류수에서의 총 입자수는 64×10^3 numbers/mL이었고, clay와 silt 입자의 비율은 각각 92.62%, 7.23%로서 YR4지점 표층의 98.90%, 1.06%와 비교하였을 때 silt의 비율이 다소 높았다(Fig. 3, Table 4). 저수지의 각 정점별 탁수에 포함된 입자의 크기별 분포에서 clay는 91.87~98.90%, silt는 1.06~8.01%범위로서 2개의 토양 조성만으로도 총 입자수의 100%에 가까웠고, sand는 0.1%이내이었다.

3.5. 탁수에 포함된 유기물과 무기물의 함량

저수지의 상·하류간에 유기물과 무기물이 차지하는 구성비는 각 정점에서 다소 차이가 있었다. 유기물 함량의 범위는 2.0~9.7 mg/L이었고, 표층과 저층보다 중층에서 높은 양상을 보였다. 또한, 무기물 함량은 상류의 중층과 저층에서 유기물과 비슷한 수준(41.7~52.1%)이었으나, 하류로 갈수록 중층과 최고 탁도층에서 61.7~71.8%범위로서 매우 높은 양상을 보였다(Table 5). 이러한 결과로서 탁수는 최고 탁도층과 중층사이에서 고밀도로 집적되어 고립된 수층대를 이루는 것으로 평가되었다. 이것은 저수지내 수중에서 물질의 이동 경로 및 순환 과정을 의미하는 것(Thornton et al., 1990)이고, 정수환경에서 연중 가장 큰 변화를 경험하는 시기(Thornton et al., 1990; Kalf, 2002)로 볼 수 있었다.

수중 탁도, 유기물 및 무기물과 탁수의 토성별 입자수간의 상호 관련성을 나타낸 것은 Fig. 5와 같고, 상관분석의 계수값을 정리한 것은 Table 6과 같다. 수중 탁도는 clay와 silt에 각각 0.763, 0.870으로서 관련성이 높았다. 또한, 유기물과 무기물의 관계에서 각각 0.823, 0.960으로서 무기물이 차지하는 관련성이 더욱 높았다. 탁도값이 낮을 때 clay, sand 및 무기물의 관계에서 높은 입자수를 보이는 현상(Figs. 5B, 5D, 5J 및 5L)은 총 입자수에 그대로 반영됨으로써 중요성은 부여되나 정확한 해석이 어려웠고, 이에 대한 원인은 향후 더욱 연구되어야 할 부분으로 사료된다.

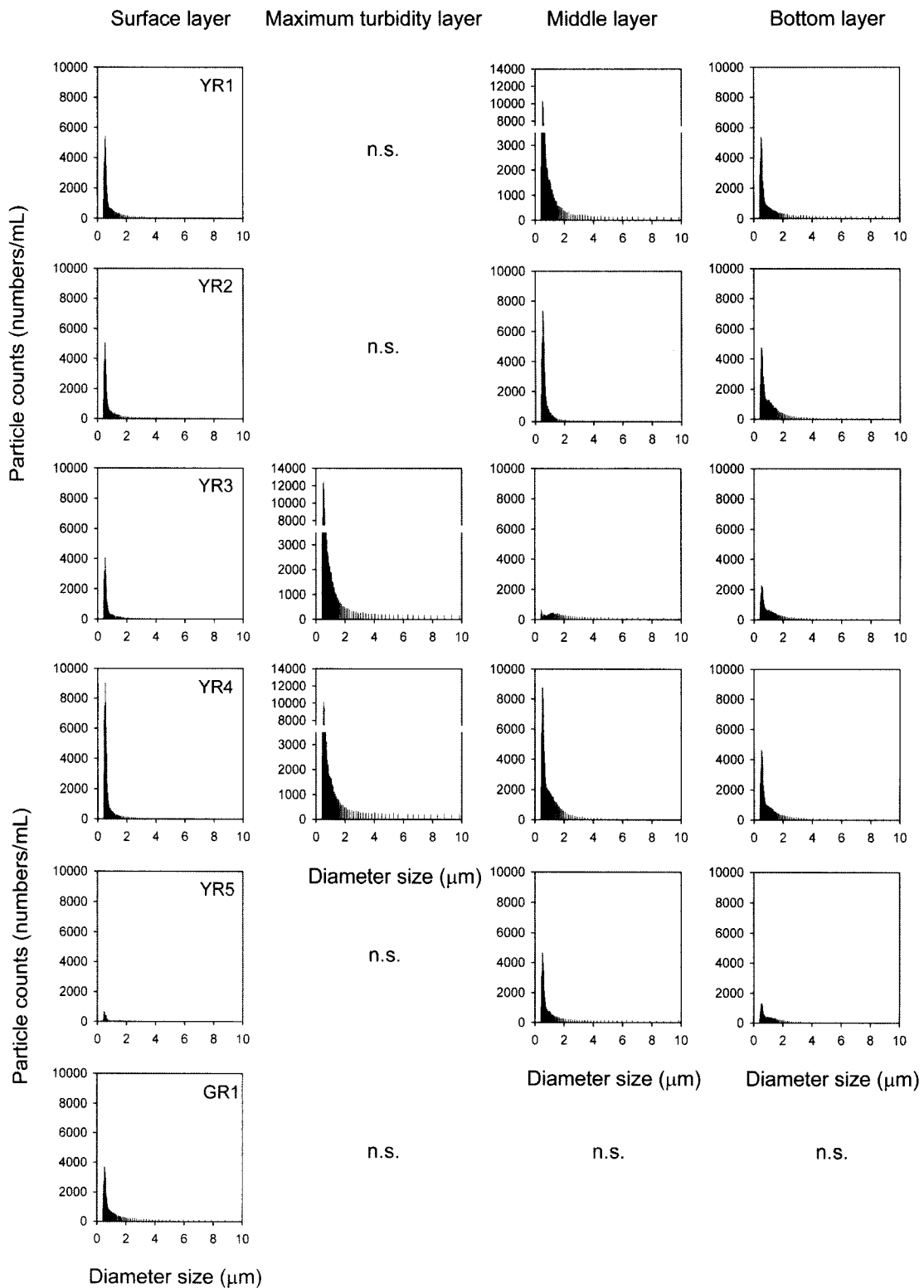


Fig. 3. Size distributions of suspended particles according to the water layers in the major stations of Yongdam Reservoir. n.s. : no sample.

3.6. 탁수 입자의 성분 분석 및 침강 속도 추정

탁수에 포함된 무기물의 원소 정량분석 결과로부터 O를 제외한 원소 조성은 Si > Al > Fe > Mg > K 순으로 풍부하였고, 이 중에서 질량을 기준으로할 때, Si와 Al이 79%로서 가장 많은 부분을 차지하였다(Table 7). 또한, 탁수를 구성하고 있는 주요 성분의 기원으로 추정되는 주종 물질은

Kaolinite, Illite, Vermiculite 및 Smectite 등 4가지의 점토 광물이었다. 탁수를 형성하는 성분은 대부분 점토질 무기물로 이루어져 있음을 암시하는 것이다. 이들 대부분의 광물 질은 강수에 의해 비교적 안정적인 표토층이 파헤쳐진 상태에서 탁수로 발생되었다고 추정할 수 있는 증거가 될 수 있다(Walling et al., 1989; Wotton, 1994; Walling et al.,

Table 4. Percentile(%) composition of suspended particles contained in turbid water in Yongdam Reservoir Basin in July 25, 2005 (Unit: numbers/mL)

Factors \ Stations	Reservoir												Effluent			Tributary		
	YR1			YR2			YR3			YR4			GR1			YR5		
	U	M	B	U	M	B	U	H	M	B	U	H	M	B	U	M	B	
CLA*	97.51	95.64	91.87	98.24	97.84	97.40	98.24	95.28	75.50	96.02	98.90	93.69	98.42	97.34	92.62	92.71	91.12	93.39
SIL*	2.41	4.30	8.01	1.64	2.07	2.52	1.58	4.67	24.18	3.85	1.06	6.26	1.56	2.60	7.23	5.20	8.70	6.29
VFS*	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	ND	0.02	0.02
FIS*	0.03	0.04	0.08	0.09	0.07	0.05	0.13	0.03	0.19	0.09	0.03	0.03	0.02	0.04	0.08	1.18	0.12	0.23
MES*	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.08	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.91	0.04	0.07
COS*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

*CLA: clay (<3.9 μm); SIL: silt (3.9~62.5 μm); VFS: very fine sand (62.5~125.0 μm); FIS: fine sand (125.0~250 μm); MES: medium sand (250.0~500 μm); COS: coarse sand (500~1,000 μm); respectively

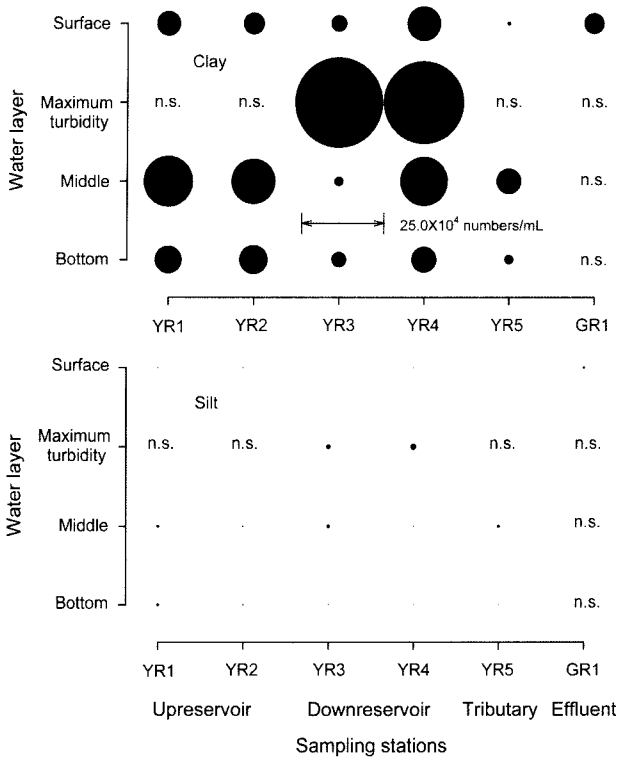


Fig. 4. Spatial distribution of clay and silt particles contained in the turbidity water in Yongdam Reservoir in July 25, 2005. n.s.: no sample.

2000). 따라서 탁수의 발생과 전개 시기를 고려할 때, 몬순기의 집중 호우로 인한 토양 침식 후 유출된 것으로 비롯되나(Shin et al., 2004a), 그 기원은 자연 토양의 표층에 근간을 둘 수도 있고, 경작지의 객토와 하천정비, 도로 공사, 교량 건설 및 주택 건설 등 다양한 대형 공사로 인한 분해가 잘 되어진 채굴토로부터 공급되었을 가능성도 소홀히 할 수 없을 것으로 사료된다.

또한, 저수지내 전역에서 탁수에 포함된 입자는 대부분 3.9 μm이하의 clay 성분(90%이상)이고, 평균 수온이 18.5°C의 수층에 분포하는 것으로 밝혀졌다. Stoke's equation(eq. 1)에 의해 탁수 입자의 침강속도는 1.214×10⁻⁷ m/s이하로 계산되었다(Morris et al., 1998). 따라서 고탁수에 포함된 입자가 외부의 물리적 영향이 거의 없는 상태에서 약 10 m 침강하는데 약 2.61년(약 953일) 정도로 추정되어 당시

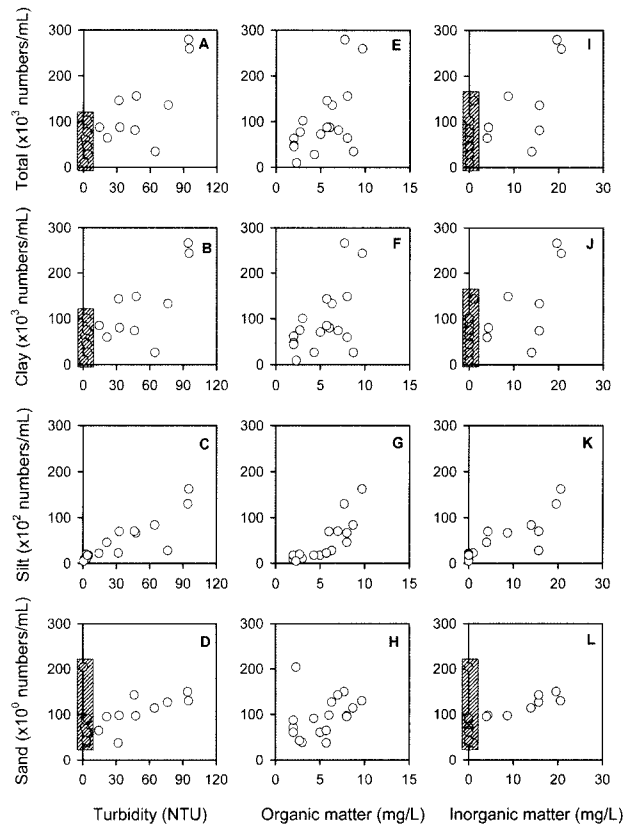


Fig. 5. Relationships between turbidity, organic matter, inorganic matter and soil compositions in Yongdam Reservoir in July 25, 2005.

$$w_i = g \frac{d^2(\rho_s - \rho)}{18\mu} \tag{1}$$

(ρ_s - ρ) = 1.65×10³ kg/m³ (density difference between sediment and water)

g = 9.806 m/s²

μ = 1.0431×10⁻³ N · s/m² or kg/m · s at 18.5°C

간에 자연적 침강이 매우 어려운 성상으로 볼 수 있었다. 고탁수층의 배제 작용은 수리학적 영향에 따라 침강속도가 더욱 감소될 수 있으므로 이러한 결과로 비추어 볼 때 고탁수가 일단 저수지로 공급된 이후에는 부유입자들의 특

Table 5. Composition of organic and inorganic matter contained in turbid water in six stations of Yongdam Reservoir

Factors	Reservoir																Tributary				Effluent
	YR1				YR2				YR3				YR4				YR5				GR1
	S	M	H	B	S	H	M	B	S	H	M	B	S	H	M	B	S	H	M	B	
Organic matter(mg/L)	5.0	8.0	.	6.0	2.0	.	6.3	5.7	2.0	7.7	8.7	2.0	3.0	9.7	5.7	2.7	2.3	.	7.0	4.3	8.0
Content (%)	100	47.9	.	58.3	100	.	28.6	100	100	28.2	38.3	100	100	32.0	85.1	100	100	.	30.8	100	66.7
Inorganic matter(mg/L)	0	8.7	.	4.3	0	.	15.7	0	0	19.6	14.0	0	0	20.6	1.0	0	0	.	15.7	0	4.0
Content (%)	0	52.1	.	41.7	0	.	71.4	0	0	71.8	61.7	0	0	68.0	14.9	0	0	.	69.2	0	33.3

Table 6. Correlation coefficients (r) between the major environmental factors of water quality in the Yongdam Reservoir (n=18)

Factors	Clay	Silt	Sand	Turbidity	Organic matter	Inorganic matter
Clay	1.000	.	.	.	.	.
Silt	0.725*	1.000	.	.	.	.
Sand	0.123	0.429	1.000	.	.	.
Turbidity	0.763*	0.870*	0.472	1.000	.	.
Organic matter	0.556	0.810*	0.319	0.823*	1.000	.
Inorganic matter	0.663	0.863*	0.569	0.960**	0.781*	1.000

: significant at p<0.05 level; **: significant at p<0.01 level, respectively

Table 7. Elemental composition of suspended particles contained in turbid water in Yongdam Reservoir in July 25, 2005

Sampling material	Element composition	Weight(%)	Atomic(%)	Oxide composition	Weight(%)
Heavy turbid water layer (12~16 m)	O	38.22±0.46	62.27±0.12	.	.
	Na	0.99±0.90	1.11±0.54	Na ₂ O	1.34±0.66
	Mg	1.97±0.92	2.13±1.01	MgO	3.27±1.52
	Al	10.88±0.87	10.51±0.08	Al ₂ O ₃	20.56±1.63
	Si	21.95±0.51	20.37±0.32	SiO ₂	46.95±1.10
	K	1.60±0.15	1.06±0.10	K ₂ O	1.92±0.18
	Ca	0.05±0.03	0.09±0.01	CaO	0.20±0.03
	Cr	0.02±0.02	0.01±0.01	Cr ₂ O ₃	0.04±0.01
	Mn	0.07±0.03	0.03±0.02	MnO	0.08±0.04
	Fe	5.15±1.12	2.41±0.54	FeO	6.63±1.44
Total		81.00±0.78	100.00±0.00	Total	84.34±3.91

성에 의해 단시일 내에 퇴적층까지 침강하는 것은 매우 어려울 것으로 보여진다.

하천으로부터 저수지에 공급되는 탁수의 경로는 수온 성층대와 관련성이 있었다. 수온의 성층화가 강하게 발달된 저수지에서 탁수는 일정 수심에서 더욱 안정적인 수평대(밀도층)를 이루게 될 뿐만 아니라 수중 영양염의 공급원으로 작용(Hannan et al., 1974; 허 등, 1998; Shin et al., 2004a) 할 수 있는 가능성이 매우 높다. 강우에 의해 유입량이 급증하는 것에 비해 상대적으로 방류량이 적어서 수위 상승과 함께 하류로 갈수록 탁수층의 수직적 폭이 넓어지는 형태를 보이게 되었다. 최종적으로, 저수지의 최하류에 위치하고 있는 댐에 의해 탁수층의 이동이 차단되어 더 이상 진행할 수 없는 귀착(fate)을 겪게 되는 것이다. 이러한 환경하에서 표층수의 방류는 침강성이 약한 탁수층의 이동 방향을 수체의 상부층으로 유도하게 되는 결과를 초래하게 되는 것이다(Shin et al., 2004b). 또한, 표면 방류하는 저수지 시스템에서 수위 상승은 상부 표층수의 양이 점진적으

로 감소하게 되어 보다 저층에 존재하는 탁수층의 상승 작용을 유도하게 된다. 이로 인해 수체의 전도(turn-over) 시기가 빨라지게 되고 최종적으로 표층수는 탁수층으로 대체되는 영향을 야기하게 된다. 이에 대한 구체적인 기작은 국내에서 아직까지 보고되지 않고 있어 지속적인 모니터링을 통해 더욱 명확하게 밝혀져야 할 부분으로 사료되어진다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 표층수를 방류하는 저수지에서 고탁수 환경의 특성을 파악하기 위하여 기초 수환경, 수중 탁도, 입자 분포 및 토성을 2005년 7월에 집중적으로 조사하였다. 수온은 일사량과 유입수 온도에 의한 영향으로 전형적인 성층 구조를 형성하였다. SPM(suspended particulate matter)의 농도가 높을수록 AFDM(ash-free dry matter)의 농도가 감소하여 무기물의 함량이 더욱 증가하였다. Chl-a 농도는 상류에서 높고, 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 투명도

는 chl-a와 반대 양상이었다. 탁도는 0.6~95.1 NTU범위 이었고, 최고 탁도값은 상류에 하류로 갈수록 현저하게 증가하였다. 고탁수층은 수심 12~16 m범위에 분포하였고, 수온은 18.2~18.6°C범위로서 비교적 안정된 밀도층을 유지하였다. 탁수에 포함된 입자 크기는 0.435~482.9 μm 범위 이었다. 총입자수에서 clay와 silt는 각각 91.87~98.90%, 1.06~8.01%범위를 차지하였고, sand는 0.1%이내이었다. 수중 탁도는 clay($r=0.763$, $p<0.05$)와 silt($r=0.870$, $p<0.05$)와 관련성이 높았다. 또한 유기물($r=0.823$, $p<0.05$)과 무기물($r=0.960$, $p<0.01$)의 관계에서 무기물의 관련성이 더욱 컸다. 탁수를 구성하는 물질은 대부분 점토성으로써 기원 광물은 Kaolinite, Illite, Vermiculite 및 Smectite 등이었다. 고탁수의 입자는 약 10 m 침강하는데 약 2.61년 정도로 추정되어 자연적 침강이 매우 어려운 성상으로 볼 수 있었다. 표층수를 방류하는 시스템은 탁수의 침강성을 저하시켜 상층부의 탁도를 장기화시키는 주요한 요인으로 작용하였다. 따라서 방류시스템의 개선과 단시간에 배제할 수 있는 관리 방안이 필요하였다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 수자원연구원의 연구개발비 (KIWE-ERC-05-05)에 의해 수행되었으며, 탁수의 토성 분석을 도와 준 부산대학교 기초과학연구소 연구원들과 논문을 세심하게 심사해 주신 위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- 김윤희, 김범철, 최광순, 서동일, 2차원 수리수질모델 (CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링, *상하수도학회지*, **15**, pp. 40-49 (2001).
- 박재충, 안동호의 육수학적 특성과 식물플랑크톤의 동태학적 연구, 안동대학교 대학원 박사학위논문, p. 141 (2005).
- 신재기, 강창근, 황순진, 팔당호에서 수중 탁도의 일변동과 고탁수의 입자 분포, *한국육수학회지*, **36**, pp. 257-268 (2003).
- 정선아, 이해숙, 신재기, 황순진, 하천-저수지 시스템에서 탁수의 입자 분포, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계 학술발표회 논문집*, pp. 398-404 (2004).
- 정세웅, 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, *대한환경공학회지*, **26**, pp. 970-978 (2004).
- 한국수자원공사, 밀도 성층화된 저수지내의 탁수배제시설 접근흐름에 관한 연구, KIWE-CHR-04-10, p. 110 (2004a).
- 한국수자원공사, 임하호 탁수층의 혼합거동 해석, KIWE-CHR-04-09, p. 57 (2004b).
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순, 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동, *한국육수학회지*, **31**, pp. 1-8 (1998).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., American Public Health Association, Washington, DC., USA (1995).
- AWWA, *Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies*, 5th ed., American Water Works Association, McGraw-Hill, Inc. New York, USA (1999).
- Hannan, H. H. and Young, W. J., The Influence of a Deep-storage Reservoir on the Physicochemical Limnology of a Central Texas river, *Hydrobiologia*, **44**, pp. 177-204 (1974).
- Kalff, J., *Limnology: Inland Water Ecosystems*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. p. 592 (2002).
- Morris, G. L. and Fan, J., *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw-Hill Companies, Inc, USA, pp. 5.1-5.28 (1998).
- Nusch, E. A., Comparison of Different Methods for Chlorophyll and Phaeopigment Determination, *Arch. Hydrobiol. Beih.(Ergebn. Limnol.)*, **14**, pp. 14-36 (1980).
- Shin, J. K. and Hwang, S. J., Development and Dynamics of Turbid Water in the Lotic and Lentic Ecosystems, Korea, *Annual Meeting Congress, Korean Society of Limnology in 2004*, (2004a).
- Shin, J. K., Hwang, S. J. and Cho, K. J., Phosphorus Flux from the Sediment and Its Behavior through Hypolimnetic Discharge in a Large Reservoir in S. Korea (Taechong Reservoir), *Proceedings of ISRLE. Japan*, (2002).
- Shin, J. K., Jeong, S. A., Choi, I. and Hwang, S. J., Dynamics of Turbid Water in a Korean Reservoir with Selective Withdrawal Discharge, *Korean Journal of Limnology*, **37**, pp. 423-430 (2004b).
- Shin, J. K., Recent Climate Change and Freshwater Environment Management in Korea, *Symposium Report for the Annual Meeting Congress, Korean Society Water Resources in 2005* (2005).
- SPSS, *SPSS 12.0 base user's guide*, SPSS, Chicago, USA (2003).
- Thornton, K. W., Kimmel, B. L. and Payne, F. E., *Reservoir Limnology-Ecological Perspectives*, A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. p. 246 (1990).
- Walling, D. E. and Moorhead, P. W. The Particle Size Characteristics of Fluvial Suspended Sediment: an Overview, *Hydrobiologia*, **176/177**, pp. 125-149 (1989).
- Walling, D. E., Owens, P. N., Waterfall, B. D., Leeks, G. J. L. and Wass, P. D., The Particle Size Characteristics of Fluvial Suspended Sediment in the Humber and Tweed Catchments, UK, *The Science of the Total Environment*, **194/195**, pp. 205-222 (2000).
- Wetzel, R. G. and Likens, G. E., *Limnological Analyses*, 2nd ed., Spring-Verlag New York, Inc. USA, pp. 15-30 (1991).
- Wetzel, R. G., *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed., Academic Press, California, USA. p. 1006 (2001).
- Winston, W. E. and Criss, R. E., Geochemical Variations during Flash Flooding, Meramec River Basin, May 2000, *Journal Hydrology*, **265**, pp. 149-163 (2002).
- Wotton, R. S., *The Biology of Particles in Aquatic Systems*, 2nd ed., CRC Press, Inc. USA, p. 325 (1994).