

팔당호에서 수중 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포

신 재 기 · 강 창 근¹ · 황 순 진*

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹국립수산과학원 환경관리과)

Daily Variations of Water Turbidity and Particle Distribution of High Turbid-Water in Paltang Reservoir, Korea. Shin, Jae-Ki, Chang-Keun Kang¹ and Soon-Jin Hwang* (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Division of Environmental Management, National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI), Pusan 619-900, Korea)

Daily monitoring was conducted to elucidate the changes in turbidity and distribution of particles in the turbid water of a river-type reservoir (Paltang Reservoir) from 1999 to 2001. Water turbidity and the particle distribution of turbid water were principally affected by meteorological factors particularly rainfall patterns and hydrological factors such as inflow and outflow. The mean concentration of turbidity was constant each year, with the concentration of less than 10 NTU accounting for 85%. Seasonal characteristics were remarkable, with winter and spring having < 5 NTU, autumn 5 ~ 10 NTU, and summer > 20 NTU. Unlike hydrological changes, maximum turbidity was observed from late July to early August and continuously increased from 1999 to 2001. In particular, the maximum turbidity of reservoirs remarkably increased toward the lower part of reservoir in 2001. Discharge and turbidity increased or decreased slowly in 1999; in contrast, turbidity rapidly increased in the early rainfall period of 2000 and 2001 but later decreased as discharge increased. In the particles of turbid water, clay ingredients were more densely distributed and more dominant in all stations. Of the total particles in turbid water, clay constituted 63.9 ~ 66.6% and silt 33.4 ~ 36.1% to account for a combined total of 98.9 ~ 100%. Sand made up less than 1.1%. The turbidity of river-type reservoir was also found to be mainly affected by the biomass of plankton in a non-rainfall period. During a rainfall period, however, the quantity and relative ratio of inorganic particles depending on the soil components affected turbidity.

Key words : discharge, particle, Paltang Reservoir, river, turbid water, turbidity, water quality

서 론

저수지는 이수와 치수의 다목적으로 하천의 상·하류 일부 구간에 댐을 막아 인공 조성된 대표적인 정수 환

경이며, 하천의 연속성이 단절되어 다양한 구조적, 기능적 특성 변화를 가지게 된다(Hannan and Young, 1974; Egborge, 1979a, b; Baxter, 1985; Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001). 팔당호는 유역 면적에 비해 저수 면적이 매우 작을 뿐만 아니라 수심이 얇고 평균 체류 시간이

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3748, Fax: (02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

극히 짧은 연중 수층의 상·하 차이가 크지 않은 특성을 보이는 전형적인 하천형 저수지에 속한다(공, 1992; 김과 홍, 1992; 김 등, 2002a). 따라서, 강우량 정도에 따라 유량이 풍부한 여름철(풍수기)에는 하천의 성격이 현저하나, 유량이 빈약한 평수기 이하 기간(저·갈수기)에는 저수지의 성향을 보다 강하게 보이는 이중적 복합 수계로 볼 수 있다(Kong, 1997; 홍, 2001). 또한, 이러한 하천형 저수지는 수심이 깊고 저수량이 큰 호수형 저수지와는 달리 저수지 전체에 걸쳐 유역의 영향을 매우 빠르게 수용하게 되므로 이를 대상으로 연구하는 것은 유역의 수환경 상황을 신속하게 파악하는데 유용할 뿐만 아니라 오염 관리적 측면에도 도움이 될 수 있다(신 등, 2000; 신 등, 2003).

우리나라는 기후학적으로 온대에 위치하여 사계가 뚜렷하고, 대륙과 해양의 중간에 위치하여 계절성 기후의 영향이 강하다. 이러한 계절성 기후의 영향은 수문학적으로 볼 때, 여름철의 장마, 집중호우 및 폭우성 태풍의 자연적 요인이 가장 중요하게 선택될 수 있으며, 수문인자의 발생기간, 빈도 및 크기는 수환경에 시공간적으로 다양한 영향을 미칠 수 있다(Thornton *et al.*, 1990; Mulliss *et al.*, 1996; Richter, 1996; Poff *et al.*, 1997; Winston and Criss, 2002). 또한, 이 시기에 물질의 이동은 수중 생태계의 대변화를 야기하는 결정적 요인에 해당한다(Ford, 1990).

수중에서 탁도는 미세 플랑크톤 생물 입자(bioseston)와 비생물 입자(abioseston)의 양에 의해 의존된다(Wetzel and Liken, 1991; Wetzel, 2001). 이 중에서 플랑크톤 생물 입자는 체류 시간이 길고 부영양화될 수록 그 수가 증가하게 되고, 비생물 입자는 유입·유출량의 증감에 따른 수체의 유동성에 의해 변동 폭이 좌우된다. 하천과 저수지의 수체에 유역으로부터 다량 공급되는 입자성 물질의 이동 및 혼합은 아주 복잡하고 상호 의존적인 다양한 물리적 기작에 의해 조절되며, 수중 탁도의 증가는 수중 광환경과 생태계에 교란적 영향을 미치기 때문에 중요한 변수로 볼 수 있다(Ford, 1990; Ogbeibu and Oribhabor, 2002). 또한, 전술한 기작에 대한 구성 요소의 상대적 크기와 중요성은 유역마다 다르고, 지형 조건, 수온 성층화, 기상학적 영향, 유입량, 유출량 및 댐의 수문 조절 등에 의해 변화될 수 있다(Ford, 1990; Wangner and Zalewski, 2000). 저수지의 외부로부터 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 and Criss, 2002). 특히, 장마와

집중호우로 인한 유입량이 급증하는 시기에는 탁수의 유입으로 수중 탁도가 급상승하게 되고, 이는 일시적인 하나 매년 발생하는 자연적 수질오염의 대표적인 경우에 해당한다.

하천을 통해 저수지로 유입되는 탁수는 토양 성분, 부식질 및 동·식물 고사체를 근간으로 하는 물질(Wotton, 1994)과 유역에 산재되어 있던 각종 오물과 쓰레기 등을 동반하고 있다. 물의 흐름에 의한 이동 및 운반성을 고려할 때, 부유 가능한 성분 및 요소가 주된 관심의 대상이 될 수 있다. 탁수에 의한 수환경 변화는 투명도 저하, 생산성 감소, 외부 기원성 유기물 증가, 수중 영양염의 공급 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). 탁수 발생은 무엇보다도 유역의 토지 이용도에 따른 강우 사상의 자연적 영향이 크게 작용하게 된다(김 등, 2002). 토양 침식과 지표면의 세척이 주요한 근원으로 들 수가 있고, 최근에는 유역의 토지 개발, 주택·도로 건설과 골재 채취, 하천 정비 사업 및 준설 등의 각종 공사장 유출수가 차지하는 비중이 증가되고 있는 실정에 있다(신 등, 2000; 신 등, 2003).

국내에서 수문과 관련된 탁도와 탁수에 관한 선행 연구는 미흡하였고, 대부분 수질의 부영양화 관점에 치중되어 왔다(김 등, 2002a). Kim(1987)은 호수형 저수지인 소양호에서 여름철에 발생하는 탁수의 중층 유입을 제시하였고, Shin *et al.*(2002)은 대청호에서 중층으로 유입된 탁수가 발전 방류구를 통해 대부분 배출되는 현상을 규명하였다. 공(1992)과 김 등(2002b)은 하천형 저수지인 팔당호에서 수문과 관련하여 식물플랑크톤의 밀도 감소에 탁도의 영향을 지적한 바 있었다. 또한, 박 등(2002)은 1997년 6~8월에 낙동강 하류(물금)에서 하천 수환경에 대한 장마 강우의 영향을 평가하면서 탁도의 변동을 설명하였고, 신과 조(2000)는 금강 하구호에서 유역의 빈번한 강우 현상이 수중 입자성 현탁물질의 양을 증가시키는 원인이 됨을 제시하였다.

본 연구는 하천형 저수지(팔당호)에서 1999~2001년 동안 수중 탁도를 일 모니터링하여 입자성 물질의 거동을 파악함과 동시에 여름철의 고탁수에 포함된 입자 크기를 측정하여 입자 분포를 분석하고자 하였다. 그 결과, 최근에 저수지 수환경에서 부영양화와 관련하여 대표적인 비점 오염물질로서 관심이 고조되고 있는 탁수의 영향을 이해하는데 목적을 두었다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 한강의 지류인 북한강, 남한강 및 경안천이 합류되는 지점을 중심으로 저수지를 이루는 팔당호(37° 30'N, 127° 20'E)를 대상으로 하였다(Fig. 1). 팔당호는 1972년 12월부터 수력발전을 목적으로 담수를 시작하였으나, 현재는 홍수조절, 하천유지용수 공급 및 광역 상수원의 기능이 추가되어 다목적용 저수지로 이용되고 있다(한국수력원자력주식회사, 1999~2001). 저수지의 형상은 수지형(dendritic type)이고, 수체의 혼합은 빈번하고 복잡하여 다순환형(polymictic pattern)으로 분류된다(이 등, 1988; 공, 1992).

유역의 총면적은 23,618.3 km²이고, 북한강(45.3%), 남한강(52.3%), 경안천(2.4%)의 유역을 포함하고 있다. 저수지의 표면적은 38.2 km²로서 유역면적/저수면적의 비는 618.3에 해당한다(이 등, 1988; 공, 1992). 연 강수량은 1,417 mm이고, 일 평균 강수량은 15.8 mm이다. 평균 유입량과 유출량은 각각 516.5 m³/s, 474.6 m³/s이고, 총 저수량은 244.0 × 10⁶ m³이며, 유효저수량은 18.0 × 10⁶

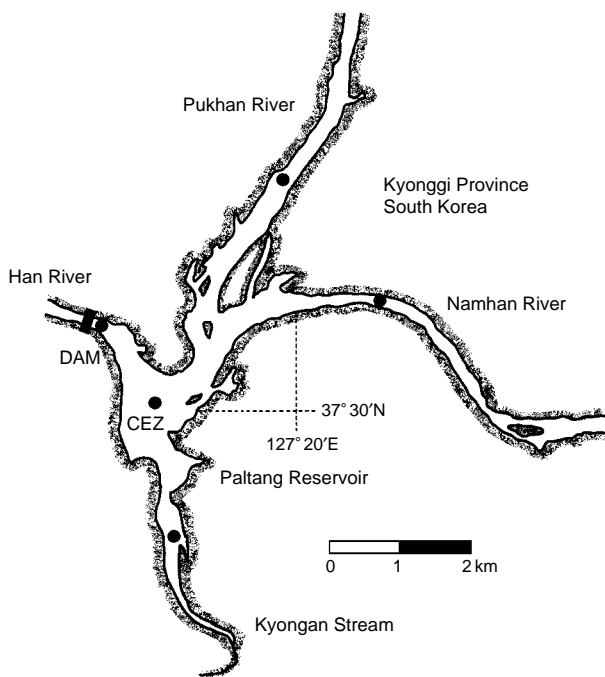


Fig. 1. Map showing sampling stations of Paltang Reservoir. CEZ: central zone station (upper part), DAM: dam barrage station (lower part).

m³에 해당한다(한국수력원자력주식회사, 1999~2001). 평균 수심은 6.6 m이고, 최대 수심은 25.5 m로써 하천 유입부에서 얕고, 댐 부근에서 가장 깊으며, 평균 체류시간은 5.1일(0.12~22.8일 범위)에 해당한다(공 등, 1996, 김 등, 2002a; 신 등, 2003). 팔당호로 유입된 물은 크게 여수로, 발전방류구 및 취수구를 통해 최종적으로 배출된다.

2. 연구방법

본 연구는 팔당호에서 유입하천의 합류점에 해당하는 상류부(CEZ, 댐으로부터 1.5 km 지점)와 댐 부근(DAM)의 하류부에서 수중 탁도를 1999년 1월부터 2001년 12월까지 일 모니터링하였다. 일 강수량은 팔당호 유역에 위치한 측후소의 평균값을 이용하였고, 일 평균 유입량과 유출량은 한국수력원자력주식회사(1999~2001)의 관측 자료를 이용하였다. 탁수의 입자 크기는 2001년 7월에 선행 일 강수량이 158 mm가 있는 직후에 4개 지점의 중심부에서 채수하여 측정하였다.

현장 조사는 소형 보트를 이용하였고, 동일 지점의 확인을 위해 수중 부표를 설치하였으며, 유입량이 급증한 시기에는 GPS (geological postioning system)를 이용하여 수시로 확인하였다. 탁도 측정을 위한 시료는 수층을 균일하게 저어면서 수심 0.5 m에서 채수하였다. 겨울철(1~2월)의 결빙 기간에는 채수 지점에 뚜껑이 달린 파이프(1.0 m[D] × 2.0 m[H] × 10 mm[T])를 설치하여 바닥에 앵커(anchor)로 고정시킨 후 채수하였다. 시료는 아이스 박스에 담아 실험실로 운반하였고, HACH 250A meter로 즉시 측정하였다. 탁수에 포함된 입자 분포는 Model LE400-05 sensor가 장착된 AccuSizerTM 780 광학입자분석기(Particle Sizing Systems Inc., USA)를 이용하였고, 측정 시료는 균일하게 흔들면서 취하였다. 입자 분석은 1.75~500.0 μm (<1.75 μm, threshold value) 범위에서 2회 측정하여 평균값을 사용하였다. TSS (total suspended solids)의 양은 전 처리(증류수 통과 후 건조)한 GF/F 여과지에 시료를 여과하여 105°C에서 무게 차가 없을 때까지 건조시킨 전·후의 차이로 산정하였다(APHA et al., 1995). 유기물 함량을 추정하기 위한 AFDM (ash-free dry matter) 측정은 시료를 여과하여 건조시킨 GF/F 여과지를 550°C의 항온 전기로에서 1~2시간동안 태운 전·후의 무게 차이로 구하였다(APHA et al., 1995). Chlorophyll-a 농도는 90% ethanol을 용매로 사용하여 색소를 비등 추출하였고 665 nm와 750 nm 파장에서 측정된 흡광도값으로 산정하였다(Nusch, 1980). 수중 투명도는 직경 20 cm의 Secchi disc

(Wildcore, USA)로 측정하였다 (Wetzel and Liken, 1991).

결 과

1. 강수량, 유입량 및 방류량의 일 변동

1999년~2001년동안 무강수일을 제외한 일 강수량의

범위는 0.5~158.5 mm이었고, 평균값은 15.8 mm이었다 (Table 1). 총강수량은 1999년, 2000년 및 2001년에 각각 1,378.0 mm, 1,085.0 mm 및 1,143.5 mm로써 다소 차이가 있었고, 평균값은 1,202.2 mm이었다. 강수량은 11~5월에 적었고, 6~10월에 풍부하여 대비가 되었으며 여름철과 가을철에 편중된 구조를 보였다. 또한, 50 mm 이상의 강수를 기준으로 할 때, 1999년과 2000년은 다소 분산된 형태를 보였으나, 2001년은 7월에 집중된 구조

Table 1. Mean values ($\pm 1SD$) of hydrological factors in Paltang Reservoir during January 1999 to December 2001. Parenthesis values indicate standard deviation, maximum and minimum, respectively.

Factors\Years	Paltang Reservoir			
	1999	2000	2001	Total
Rainfall (mm)	16.0 \pm 27.0 (158.5/0.5)	13.9 \pm 24.0 (149.5/0.5)	17.9 \pm 30.8 (156.0/0.5)	15.8 \pm 27.1 (158.5/0.5)
Discharge (m ³ /s)				
- Influent water	668.7 \pm 1,453.2 (16,562.7/147.2)	527.5 \pm 816.7 (6,987.0/168.3)	353.3 \pm 621.5 (5,620.4/126.0)	516.5 \pm 1,034.1 (16,562.7/126.0)
- Effluent water	623.3 \pm 1,459.0 (16,629.0/125.0)	485.5 \pm 814.2 (7,050.0/127.0)	315.0 \pm 615.7 (5,514.0/124.0)	474.6 \pm 1,034.6 (16,629.0/124.0)

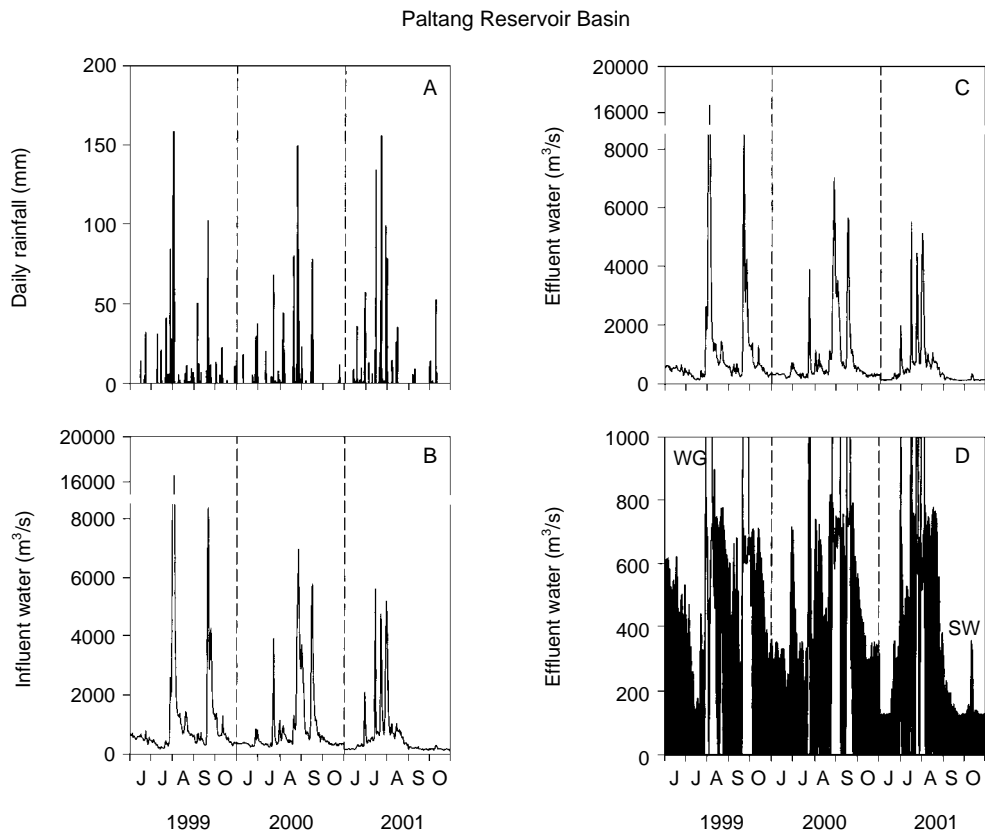


Fig. 2. Daily variations of hydrological factors in the Paltang Reservoir Basin from June to October of 1999 to 2001. WG: watergate, SW: spillway against an electric power generation.

를 나타냈다 (Fig. 2A). 6~10월동안 일 강수 변동에서 강수량과 빈도가 특히 조밀하였던 시기는 1999년 7월 하순, 9월 하순 및 2000년 8월 하순이었고, 유입·방류량이 6,000 m³/s를 초과하였다. 일 최대강수량은 7~8월에 관찰되었고, 100 mm를 초과한 강수량은 연 1~3회 범위로 제한되었다 (Fig. 2A). 연중 우량의 분포에서 선행 강우가 장기간 없었을 때, 유량 변동에 민감하게 반응하지 않는 수준인 0.5~15.8 mm 범위가 76.3%로써 높은 빈도를 보였고, 50 mm 이상은 0.9%를 차지하였다 (Fig. 2A).

유입량과 방류량의 증감은 강수량과 강수 빈도의 패턴과 밀접한 관련성을 보였다. 유입·방류량의 변동에서 최대 유량은 1999년에 가장 높았고, 2001년에 낮았으며, 2000년에는 그 중간 분포를 보였다 (Fig. 2B, 2C). 1999~2001년동안 유입량의 범위와 평균값은 각각 126.0~16,562.7 m³/s, 516.5 m³/s이었고, 방류량은 각각 124.0~16,629.0 m³/s, 474.6 m³/s이었다 (Table 1). 1,000 m³/s 이상의 유량은 7~10월사이에 발생하였고, 최대 유량은 강수량의 영향이 지배적이었다 (Fig. 2B, C). 유입량과 방류량의 변동 양상은 큰 차이가 없었고, 방류량은 유입량

Table 2. Mean values of turbidity in Paltang Reservoir during January 1999 to December 2001. Plus-minus and parenthesis values indicate standard deviation, maximum and minimum, respectively.

Factors\Samplings	CEZ				DAM			
	1999	2000	2001	Total	1999	2000	2001	Total
Turbidity (NTU)	10.6±23.2 (254.0/0.6)	8.1±23.7 (332.0/1.0)	11.0±35.8 (437.0/1.3)	9.9±28.2 (437.0/0.6)	10.2±22.3 (247.0/0.6)	8.8±24.1 (333.1/1.7)	12.0±45.9 (630.0/1.9)	10.3±32.6 (630.0/0.6)

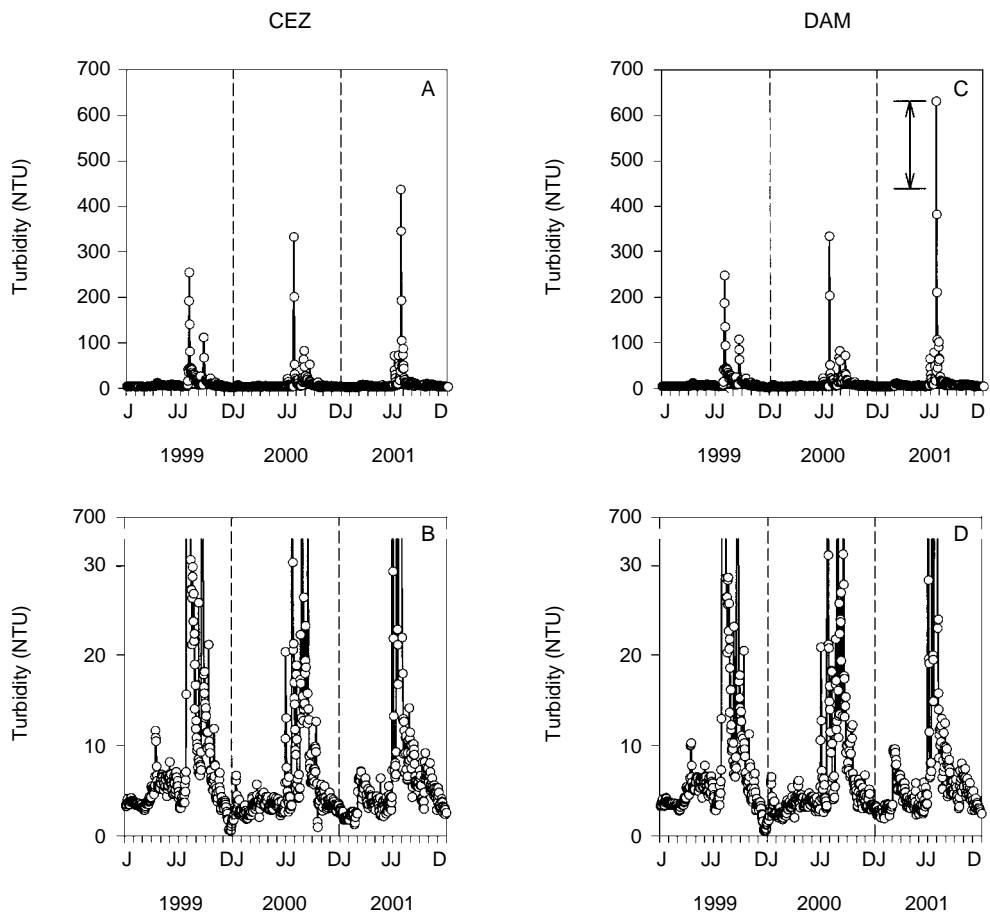


Fig. 3. Daily variations of turbidity in Paltang Reservoir from January 1999 to December 2001. Bidirectional arrow-line indicates difference between CEZ and DAM station.

의 91.9%를 차지하였다. 또한, 취수량을 제외한 저수지 수의 댐 방류는 수문 (watergate, WG)과 발전 방류구 (spillway, SW)의 2가지로 구분된다 (Fig. 2D). 수문에 의한 방류는 선행 강수량과 유입량이 각각 67.1 (±30.8) mm, 1,258.0 (±662.0) m³/s 이상일 때 조작되었고, 그 외 기간은 대부분 발전 방류구를 통해 하류로 배출되었다. 수문과 발전에 의한 평균 방류량은 각각 36.4%, 63.6%를 차지하였고, 연중 수문 또는 발전 방류의 양상은 해마다 다른 시기적인 차이가 있었다.

2. 수중 탁도의 일 변동

1999~2001년동안 수중 탁도의 일 변동 범위는 0.6~630.0 NTU이었고, 평균값은 10.1 NTU이었다 (Table 2). 탁도는 기후·수문학적 영향이 매우 컸고, 최대 탁도는 매년 여름철에만 관찰되었다 (Fig. 3A, 3C). 탁도의 연중 분포에서 <5 NTU는 1999년, 2000년 및 2001년에 각각

47.1%, 69.2% 및 56.7%이었고, 5~10 NTU 범위는 35.3%, 15.4% 및 31.4%, 11~20 NTU 범위는 7.8%, 9.6% 및 5.5% 및 >20 NTU는 9.8%, 5.8% 및 6.5%에 해당하였다 (Fig. 3B, 3D). 연중 10 NTU를 초과하는 시기는 누적 선행 유입량이 1,000 m³/s 이상일 때 관찰되었다. 또한, 탁도가 100 NTU를 초과한 경우는 1999년에 5회, 2000년에 2회 및 2001년에 5회로서 총 12회이었다 (Fig. 3A, 3C).

계절적으로 볼 때, 봄철 (3~5월), 여름철 (6~8월), 가을철 (9~11월) 및 겨울철 (12~2월)에 <5 NTU는 각각 63.9%, 34.2%, 21.9%, 97.2%이었고, 5~10 NTU 범위는 34.7%, 25.9%, 55.3%, 2.8%, 11~20 NTU범위는 1.4%, 15.4%, 16.7%, 0% 및 >20 NTU는 0%, 24.6%, 6.0%, 0%에 해당하였다 (Fig. 3B, 3D). 이상의 결과로서, 연중 10 NTU 이하는 85.0%를 차지하였다. <5 NTU는 겨울철~봄철에 우세하였고, 5~10 NTU 범위는 가을철에, >20 NTU 이상은 여름철에 각각 차지하는 비율이 높은 계절

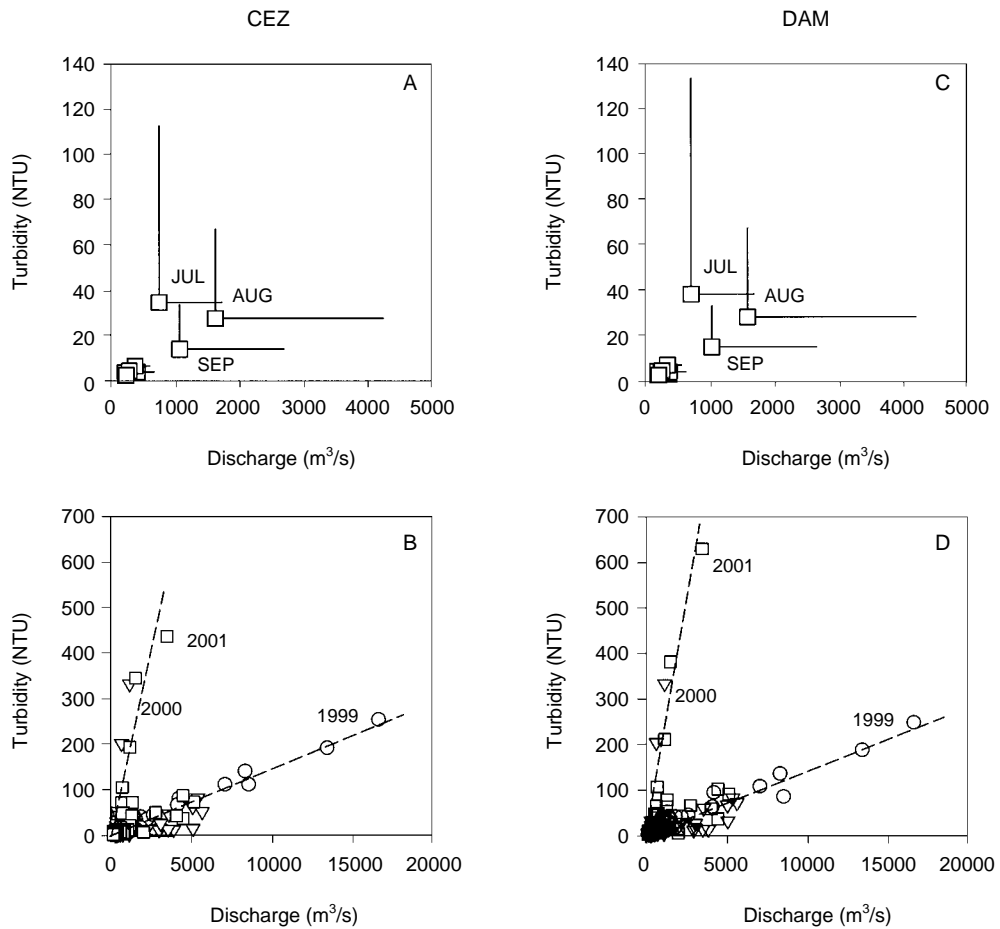


Fig. 4. Relationships between flow and turbidity in Paltang Reservoir. Letters and numerics indicate each sampling month (A, C) and year (B, D). Vertical and horizontal bars indicate standard deviation of each factor.

적 특성이 현저하였다. 저수지의 상·하류 두 정점 (CEZ, DAM)에서 탁도의 연 평균 농도는 거의 비슷하였으나 1999년에서 2001년으로 갈수록 최대값이 증가하였다. 특히, 2001년에는 최대 탁도가 유입하천의 합류 지점인 상류의 CEZ보다 DAM에서 193.0 NTU 더 높아 저수지의 하류로 갈수록 더욱 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 3A, 3C).

3. 수문 요인과 수중 탁도의 관계

유량과 탁도의 상호 관련성을 나타낸 것은 Fig. 4A~D와 같다. 월 평균값에 의한 유량 분포를 보면 7월~9월 기간을 제외한 다른 시기에는 500 m³/s 이하 수준으로서 우기와 비우기의 차이가 구분되었다. 유량은 7월에 증가하기 시작하여 8월에 가장 풍부하였고, 9월에 다시 감소하는 순환 구조를 나타냈으며, 변동 폭은 유량이 증가하는 정도에 따라 더욱 커짐을 알 수 있었다. 반면

에, 탁도는 7월에 급속히 증가하였고, 8~9월에 감소하는 양상을 보여 유량의 변동과 다소 차이가 있었다 (Fig. 4A, B).

이러한 경향은 유량과 탁도의 일 변동 상관에서 보다 자세하게 설명되었다 (Fig. 4B, 4D). 1999년에는 유량 변동에 따라 탁도가 직선적인 완만한 기울기로 증가 또는 감소되었다. 반면에, 2000년과 2001년에는 유입량이 증가하는 초기에 탁도가 급격하게 증가하였고, 이후 유량이 더욱 증가하면서 100 NTU 이하로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 2000년과 2001년의 최대 탁도는 동일하게 7월 하순에 관찰되었으나, 1999년에는 8월 초순에 관찰되었다.

4. 탁수의 입자 분포 및 유기물 함량

2001년에 일 강수량과 유입량이 각각 158 mm와 4,765.5 m³/s일 때, 하천의 각 유입부와 댐 부근의 중심

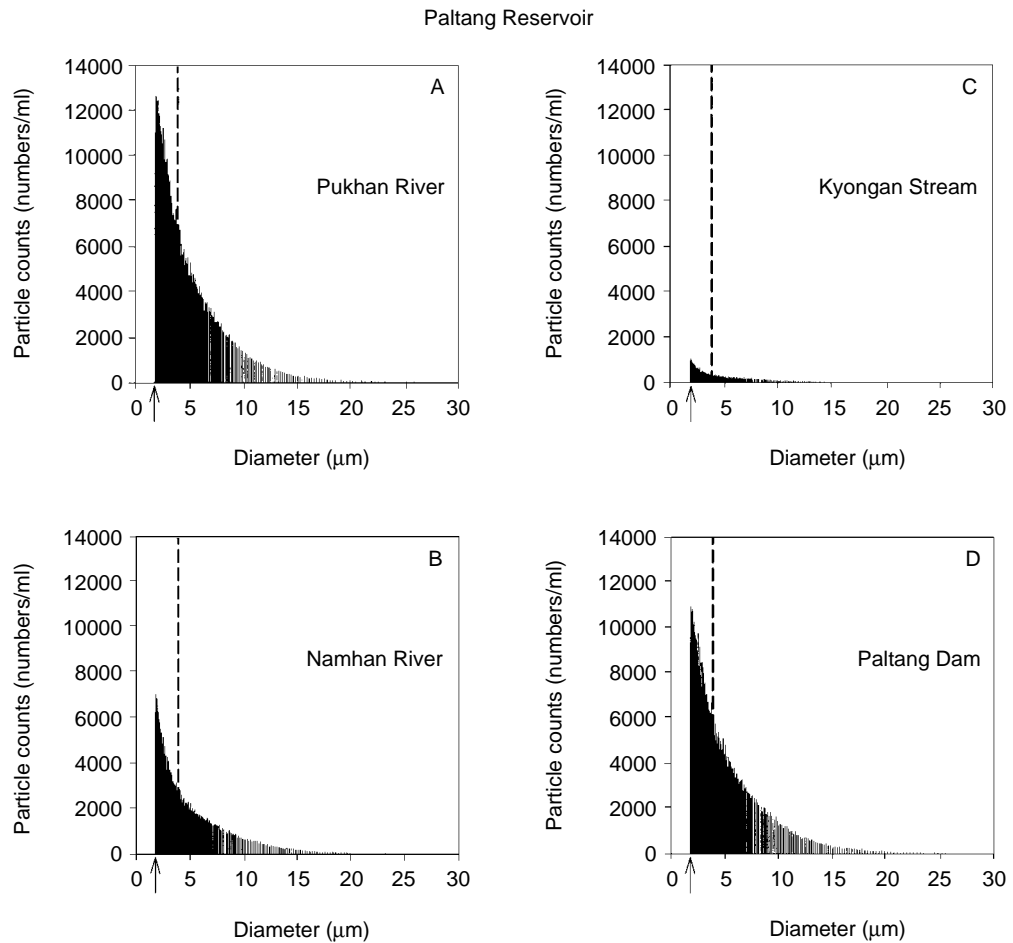


Fig. 5. Distributions of particles with size in the major stations of Paltang Reservoir in July 2001. Arrows and dashed lines indicate threshold value (1.75 μm) and compartment of clay (left) and silt (right) as particle size 3.9 μm.

Table 3. Composition and density of suspended particles in high turbid water of Paltang Reservoir Basin in July 2001. Parentheses indicate percentage among total particles. (Unit: numbers/ml)

Factors\ Stations	Pukhan River	Namhan River	Kyongan Stream	Paltang Dam
Clay (< 3.9 μm)	553,067 (65.6)	262,924 (66.6)	36,081 (64.7)	476,915 (63.9)
Silt (3.9~62.5 μm)	290,534 (34.4)	131,794 (33.4)	19,093 (34.2)	269,255 (36.1)
Very fine sand (62.5~125.0 μm)	87 (0.01)	31 (0.8 × 10 ⁻²)	20 (0.04)	70 (0.9 × 10 ⁻²)
Fine sand (125.0~250.0 μm)	22 (0.3 × 10 ⁻²)	8 (0.2 × 10 ⁻²)	ND	14 (0.2 × 10 ⁻²)
Medium sand (250.0~500.0 μm)	8 (0.9 × 10 ⁻³)	13 (0.3 × 10 ⁻²)	4 (0.7 × 10 ⁻²)	28 (0.4 × 10 ⁻²)
Coarse sand (500.0~1,000 μm)	ND	ND	ND	ND

Note) ND: no determination

Table 4. Comparison of environmental factors for turbid water of Paltang Reservoir Basin in July 2001.

Factors\ Stations	Pukhan River	Namhan River	Kyongan Stream	Paltang Dam
Particle density (numbers/ml)	843,718	394,770	55,798	746,282
TSS (mg/l)	248.0	167.7	31.3	246.5
AFDM (mg/l)	31.0	20.7	7.0	31.5
Turbidity (NTU)	305.0	306.0	35.9	313.0
Chlorophyll- <i>a</i> (μg/l)	5.9	8.4	5.7	10.9
Secchi depth (m)	0.23	0.21	0.39	0.15

Note) TSS: total suspended solids, AFDM: ash-free dry matter.

부에서 채수한 고탁수에 포함된 입자의 크기를 측정된 결과는 Fig. 5A~D와 같다. 실제 측정된 입자 크기의 범위는 1.76~296.6 μm이었고, 전 정점에서 clay성분의 미세립자로 갈수록 크기 분포가 더욱 조밀하였을 뿐만 아니라 상대적으로 차지하는 비율도 높았다. 정점별로 측정된 총 입자수는 북한강이 8.4 × 10⁵ numbers/ml, 남한강이 3.9 × 10⁵ numbers/ml, 경안천이 5.5 × 10⁴ numbers/ml 및 팔당호댐에서 7.5 × 10⁵ numbers/ml이었다. 입자수는 경안천에 비해 북한강과 남한강이 월등히 풍부하였고, 팔당호댐은 북한강과 남한강의 중간 수준이었다 (Fig. 5A~D). 탁수의 입자 분포에서 clay는 63.9~66.6%, silt는 33.4~36.1% 범위로서 총 입자수의 98.9~100% 범위를 차지하였고, sand는 1.1%이내이었다 (Table 3).

탁수의 입자 크기를 측정된 동일 시료에 대해 주요 환경 요인을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 탁도는 35.9~313.0 NTU 범위이었고, 평균값은 240.0 NTU이었다. 총부유물질 (TSS)과 유기물 (AFDM)의 함량은 각각 31.3~248.0 mg/l 범위 (평균값 174.3 mg/l)와 7.0~31.5 mg/l 범위 (평균값 22.6 mg/l)이었다. TSS의 양이 많을수록 AFDM의 양도 많았고, TSS에 대해 AFDM이 차지하는 비율은 12.3~22.4% 범위 (평균값 15.0%)이었다. Chl-*a* 농도는 5.7~10.9 μg/l (평균값 7.7 μg/l) 범위를 보였고, 정점에 따라 다소 차이가 있었다.

고 찰

팔당호에서 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포를 관찰한 결과 강우 패턴의 기후학적 요인과 유입·방류량의 수문학적 요인 영향이 주요한 것으로 나타났다 (Winston and Criss, 2002). 여름철과 가을철에 강수량의 급증은 계절성 기후 영향인 장마와 태풍 또는 불안정한 기압골 형성에 의한 예측하기 어려운 집중 호우가 크게 작용하는데 원인을 들 수 있었다 (기상청, 1999~2001). 저수지의 유량은 유역의 강수량에 거의 비례하였고, 방류량은 유입량의 92%를 차지하여 대부분 유출되는 수문학적 구조를 갖고 있었다 (공, 1992). 따라서, 팔당호는 호수형 저수지와는 달리 수문 방류의 기간이 긴 전형적인 하천형 저수지의 특성을 잘 반영하였다 (공 등, 1996). 유입량과 방류량의 급속한 증가는 집중된 폭우성 일 강수량과 강우 빈도가 밀집될 때 두드러진 현상이었고 (Old *et al.*, 2003), 이것은 최대 유입·방류량이 1999년에서 2001년으로 갈수록 감소한 결과에서 잘 나타났다. 또한, 1999년과 2000년 9월에 선행 강우가 크지 않음에도 불구하고 유량이 증가한 것은 팔당호의 상류에 위치한 중·대형 저수지의 수문과 발전 방류량의 증가에 의한 영향이 반영되었기 때문이었다 (공, 1992; 한국수력원자력주식회사, 1999~2001; 한국수자원공사, 1999~2001).

탁도는 유량의 분포와 달리 1999년, 2000년, 2001년으로 갈수록 오히려 증가하는 경향을 보였고, 저수지내의 중·하류 구간에서 다소 다른 양상이 관찰되기도 하였다. 1999년과 2000년에는 차이가 크지 않았으나 2001년에는 중류부 (CEZ)보다 하류부 (DAM)에서 44.2% 정도 증가한 양상이 뚜렷하였다. 하류부에서 탁도의 증가는 하천의 유입 영향보다 저질층의 재부유 영향이 큰 것으로 추정될 수 있었다. 저질층의 교란으로 인한 탁도의

증가는 최대 탁도가 발생한 시기와 일치하였고, 초기 유량의 증가에서 현저하였다. 따라서, 탁도의 내적 증가 현상은 유입 유량의 양적인 증가 뿐만 아니라 저수지의 지형 구조적 영향도 작용한 것으로 볼 수 있었다. 팔당호는 하천 유입부보다 댐으로 갈수록 수심은 다소 증가하나 저수 폭이 좁아져 유입량이 클 때 이 구간에서 수위가 상승하면서 유속이 급증(김 등, 1991) 하기 때문에 수리·수문의 구조적 변화와 밀접한 관련성이 있었다. 따라서 이 시기에 그만큼 저질층에 내재된 풍부한 유기물(신 등, 2000)과 영양염(전, 1990) 및 산소 소모(홍 등, 2000)가 많은 내부 오염원 영향을 감소시키는 결과를 가져올 수 있을 것으로 본다. 이러한 결과는 풍수기에 수온을 비롯하여 대다수 수질 항목에서 상·하층의 차이가 없어 수체의 혼합이 원활한 하천의 일반적 특성을 잘 반영하기 때문으로 볼 수 있었다(Wetzel, 2001). 또한, 김 등(2002c)이 1990년과 1991년의 저수지 수질을 비교하면서 유입량이 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 초과할 때, 저질에 축적된 표층 퇴적 입자가 유실될 수 있다는 가능성을 제시한 내용과도 무관하지 않을 것으로 본다.

수중 탁도와 유량의 관련성에서 탁도는 초기 유량 증가에 의해 급격하게 상승하였으나, 이후 유량이 더욱 증가하면서 감소하는 경향을 보였다(Winston and Criss, 2002). 또한, 7월에 유량의 변동 폭은 작은 반면에 탁도의 변동 폭은 컸고, 이와 대조적으로 8~9월에는 유량이 증가하면서 탁도는 오히려 감소하는 양상을 보였다. 이러한 경향은 유량이 증가하면서 선행 고탁수의 농도를 낮추는 희석 효과로 볼 수 있었다(Winston and Criss, 2002). 초기 유량에 의해 최대 탁도를 보인 1999년에 유량이 $465.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 $16,562.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 으로 대폭 증가함에 따라 탁도는 완만한 기울기로 증가하였으나, 반면에, 2000년과 2001년에는 초기 유량이 적을 때 탁도는 3.3 NTU에서 333.0~630.0 NTU 범위로 일시에 증가하였고, 이후 평균 유량이 $5,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 더욱 커지면서 탁도는 66.0~90 NTU 범위로 감소함이 현저하였다.

탁수의 농도와 입자는 유역 환경과 유량의 영향을 추정하는데 유용한 도구가 될 수 있었다(Winston and Criss, 2002). 탁수에 포함된 입자의 분포 비율은 정점간에 차이가 없었으나, 총 입자수는 북한강(65.0%), 남한강(30.5%), 경안천(4.5%)의 순으로 적었고, 팔당호댐은 북한강과 남한강의 중간 수준(47.8%)보다 9.9%가 더 많았다. 유입하천 중 남한강이 북한강보다 낮은 입자수를 보이는 것은 남한강의 유량이 그만큼 많기 때문이며, 경안천은 유량이 적을 뿐만 아니라 유역 면적이 작은 데도 원인을 둘 수 있었다. 실제, 팔당호로 유입되는 총 하천

수 중 북한강이 44.5%, 남한강은 52.8%, 경안천은 2.7%를 차지하고 있다(공 등, 1996). 또한, 탁도의 증가는 유역의 토지 이용도에 의한 차이도 관련성이 있을 것이다. 경안천 유역은 수도권과 인접해 있어 도로 포장과 도시화 비율이 높은 반면에, 남·북한강 유역은 도시지역보다 상대적으로 유출계수가 낮은 농경지와 임야의 비율이 높으나 노출된 지표면 토지가 더욱 풍부하기 때문으로 볼 수 있었다.

호우로 인해 발생하는 유입 탁수에 포함된 입자는 유입 유량과 부유 물질의 양이 많을 수록 조립자($>63 \mu\text{m}$)의 비율이 증가하거나(Ellis, 1979; Old *et al.*, 2003), 입자 크기가 일정 또는 불규칙한 경향을 보이기도 한다(Walling and Moorhead, 1989; Lewis, 1996; Walling *et al.*, 2000). 또한, 조립자는 탁도에 덜 민감하여 탁도-부유성 침강물질의 관계가 비선형을 보일 수도 있다(Foster *et al.*, 1992; Gippel, 1995). 본 연구에서 탁수에 포함된 입자의 크기는 대부분 clay와 silt의 세립자로 구성되어 있었고, 그 비율은 99% 이상을 차지하였다. 따라서, 유입하천으로부터 저수지에 사질의 운반성은 매우 미약한 것으로 볼 수 있었으며, 사질은 침강성이 니질에 비해 매우 빠르기 때문에(Kalff, 2002) 유입하천의 상류부에 대부분 침강 후 퇴적되는 것으로 추정되었다.

탁수의 입자 크기는 저수지의 저질 토성에 영향을 줄 수 있을 것이다. 탁수의 유입으로 인해 저수지 전체가 탁수 환경으로 전환되고, 이러한 환경은 수문 방류가 중단된 이후에도 한동안 유지된다. 그 결과, 잔존하는 탁수 영향 물질은 방류량의 급감으로 인해 저수지 내부에 침강하는 작용이 초래된다. 반면에, 전술한 바와 같이 저수지 내부에서 유량이 급증한 시기에 탁도 뿐만 아니라 입자수도 하류로 갈수록 크게 증가하는 것은 저수지내 저질 표층에 축적된 입자의 이동이 반영되기 때문이며 유량의 증가에 따른 물의 유동성에 민감한 미세 입자의 유출량이 매우 높을 것으로 본다.

또한, 탁수의 거동 측면에서 저수지의 구조적 문제점이 비교 지적될 필요성이 있다. 하천형 저수지(팔당호)와 댐 하부에 발전방류 시스템을 갖춘 호수형 저수지(소양호, 대청호, 충주호 등)는 탁수가 표층 또는 중·하층을 통해 대부분 하류로 배출된다(Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001; Kalff, 2002; Shin *et al.*, 2002). 반면에, 만수 월류식 저수지(옥정호, 주암호, 농업용 저수지)는 저수 수심이 변수로 작용하나, 인위적인 강제 배출시스템이 없기 때문에 중층 또는 비월류층에서 고립 또는 분산되어 시간이 경과함에 따라 최종적으로 저층에 침강하는 운명을 겪게 된다(Thornton *et al.*, 1990; Wetzel,

Table 5. Comparison of discharge, phytoplankton biomass (chl-*a*) and turbidity in major stations of Paltang Reservoir during June to August 2001.

Factors\ Samplings	Month	North Han River	South Han River	Kyong-an Stream	Paltang Dam
Influent water (m ³ /s)	June	.	.	.	186.7
	July	.	.	.	1,679.3
	August	.	.	.	367.6
Chlorophyll- <i>a</i> (µg/l)	June	11.2	9.5	71.3	17.6
	July	5.9	8.4	5.7	10.9
	August	34.5	33.3	51.8	16.9
Turbidity (NTU)	June	1.7	2.6	12.8	2.4
	July	305.0	306.0	35.9	313.0
	August	2.1	2.3	9.8	2.8
Effluent water (m ³ /s)	June	.	.	.	130.0
	July	.	.	.	1,516.0
	August	.	.	.	322.0

2001; Kalf, 2002). 따라서, 탁수의 동태에 따라 저수지의 구간별 저질층의 입도 구배가 형성될 뿐만 아니라 그 입도 차이에 의해 비점 오염 영향에 의한 내적 오염원의 규모가 달라질 것이다. 저질층의 입도는 조립자보다 미세립자에 의해 오염도가 더욱 가중되므로 (Wotton, 1994) 이에 대한 향후 다양한 연구가 필요할 것으로 제시되어진다.

수질적 측면을 고려할 때, 탁수에 포함된 운반성 부유물질의 성분이 매우 중요하다 (Winston and Criss, 2002). 수중에 탁도가 높을 때 부유물질의 양이 증가하여 투명도는 현저하게 감소하였고, 그 중 유기물 함량은 12.3~22.4% 범위를 차지하였다. 또한, 유기물 함량은 탁도와 TSS가 높을 때 많았으나 TSS에 대한 비율로 보면 오염도가 높은 유입하천(경안천)에서 더욱 컸다. Table 5는 2001년 6월~8월 동안에 팔당호의 하천 유입부 3개 지점과 댐 중앙 1개 지점에서 조사된 유량, chlorophyll-*a* 및 탁도의 결과를 나타낸 것이다. 유입량과 방류량이 6월에 비해 7월에 각각 9.0배, 11.7배 증가하였을 때, 탁도는 북한강이 184.8배, 남한강이 118.6배 및 팔당호댐에서 133.2배 증가하였고, 이에 비해 경안천은 소폭(2.8배)으로 증가하였다. 반면에, chl-*a*는 북한강이 47.3%, 남한강이 11.6%, 팔당호댐이 38.1% 감소하였고, 경안천은 92.0% 감소하였다. 이후, 8월에는 6월보다 유량이 2배 증가하였으나 탁도는 6월 수준으로 회복되었고, chl-*a*는 북한강이 3.1배, 남한강은 3.5배 증가하였다. 한편, 탁수와 관련하여 수중에서 탁도가 상승하면 용수 처리비의 가중과 수인 병원성 미생물오염의 가능성 (AWWA, 1999; 미발표 자료)이 높아지므로 더욱 세심한 관리가

요구된다고 하겠다.

유량의 증가는 수중 탁도를 증가시켜 수색을 변화시킬 뿐만 아니라 광소산계수를 증가시켜 식물플랑크톤의 생물량과 생산성을 감소시키는 여름철의 주된 조절 인자로 볼 수 있었고(김과 김, 1990; 김 등, 1995; 공 등, 1996; 박 등, 2000; 박 등, 2002), 이 시기에 팔당호는 식물플랑크톤의 생물량보다 미세 현탁 무기물의 양에 따라 투명도 저하 영향이 더욱 큰 것으로 연구되었다(김 등, 2002b). 그러나, 하상계수가 매우 크기 때문에 급격한 유량의 감소로 인해 물의 유동성이 줄어들면서 수체의 수리학적 체류 시간이 증가하게 되고, 탁수 입자가 침강하여 유광층이 증가하면서 식물플랑크톤의 생장에 더욱 유리한 환경을 제공할 것으로 본다(한 등, 1993; 한 등, 1995; 김, 1996; 김 등 2002b).

팔당호에서 수중 탁도는 유역의 기후와 수리수문학적 환경을 기반으로 비강우기에는 식물플랑크톤의 생물량과 미세 무기입자에 의해 영향을 많이 받으나 강우기에는 토양 성분을 근간으로 하는 무기입자의 상대적 비율이 매우 우세한 것으로 평가되었다. 따라서, 하천형 저수지에서 수환경과 생태계를 연구함에 있어 수문 요인과 탁도 항목은 중요하였고, 특히 해마다 여름철에 주기적으로 발생하는 탁수 환경의 동태를 파악하는 것은 최근 비점오염 중심의 유역 또는 수질관리에 있어 선행되어야 할 내용으로 제시될 수 있었다. 아울러 본 연구 결과는 호수형 저수지와 비교할 때 많은 차이점이 있어 육수학적 측면에서 인공호의 개념 정립에 더욱 도움이 될 것으로 본다.

적 요

하천형 저수지(팔당호)에서 탁도의 변동과 탁수에 포함된 입자의 분포를 파악하기 위해 1999~2001년 동안 일 모니터링 하였다. 수중 탁도와 탁수의 입자 분포는 강우 패턴의 기후학적 요인과 유입·방류량의 수문학적 요인 영향이 중요하게 작용하였다. 탁도의 연 평균 농도는 매년 비슷하였고, 연중 10 NTU 이하는 85.0%를 차지하였다. <5 NTU는 겨울철~봄철에, 5~10 NTU 범위는 가을철에, >20 NTU 이상은 여름철에 우점하는 계절적 특성이 뚜렷하였다. 탁도의 최대값은 7월 하순~8월 초순에 발생하였고, 수문 변동과 달리 1999년에서 2001년으로 갈수록 증가하였다. 특히, 2001년에 저수지의 최대 탁도는 하류로 갈수록 더욱 증가하는 양상이 현저하였다. 또한, 1999년에는 유량과 탁도가 완만하게 증감되었

으나, 2000년과 2001년에는 초기에 급격하게 증가한 후 유량이 커지면서 감소하는 패턴을 보였다. 탁수의 입자는 전 정점에서 clay성분으로 갈수록 분포가 더욱 조밀하였을 뿐만 아니라 차지하는 비율도 높았다. 탁수에서 clay는 63.9~66.6%, silt는 33.4~36.1% 범위로서 총 입자수의 98.9~100% 범위를 차지하였고, sand는 1.1%이 내이었다. 하천형 저수지에서 수중 탁도는 비강우기에 플랑크톤의 생물량에 의한 영향을 많이 받으나 강우기에는 토양 성분을 근간으로 하는 무기입자의 양과 상대적 비율이 매우 우세한 것으로 평가되었다.

인 용 문 헌

- 공동수, 윤일병, 류재근. 1996. 팔당호의 물수지 및 수문특성. 한국육수학회지 **29**: 51-64.
- 공동수. 1992. 팔당호의 육수생태학적 연구. 고려대학교 대학원 박사학위논문. 422p.
- 국립환경연구원. 1989. 팔당상수원 보호 종합대책에 관한 연구. pp. 355-358.
- 기상청. 1999-2001. <http://www.kma.go.kr>, 기후자료.
- 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현. 1995. 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994). 한국수질보전학회지 **11**: 295-302.
- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산. 한국육수학회지 **23**: 167-179.
- 김성수, 김종석, 방기연, 권은미, 정옥진. 2002. 경안천 유역의 강우사상별 비점오염원 유출특성 및 원단위 조사. 대한환경공학회지 **24**: 2019-2027.
- 김용재. 1996. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가. 한국육수학회지 **29**: 323-345.
- 김원만, 홍사욱, 서운수, 최의소, 조광명, 유재근, 김동근, 이인선, 신상철, 이길철, 이홍재, 이홍근, 박인보, 하영철, 윤일병. 1991. 팔당호 시험준설 영향조사. 한국수질보전학회지 **7**: 47-84.
- 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수. 2002a. 소양호와 팔당호 수질의 수지 및 계절적 변화. 한국육수학회지 **35**: 10-20.
- 김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 정완중, 임연택. 2002b. 팔당호 수질의 계절별 변화특성 및 장기추세. 한국물환경학회지 **18**: 67-76.
- 김좌관, 홍옥희. 1992. 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구. 한국환경과학회지 **1**: 49-57.
- 박성배, 이상균, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기의 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 **35**: 160-171.
- 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근. 2000. 팔당호에서 남조류 및 남조류 생산 독성물질의 계절 변동. *Algae* **15**: 29-35.
- 신재기, 조경제. 2000. 금강 하구호에서 수질의 계절변동과 오염도. 한국육수학회지 **33**: 251-259.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 신재기, 황순진, 조경제. 2003. 평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가. 한국육수학회지 **36**: 38-47.
- 이종남, 고병옥, 강응태. 1988. 팔당 상수원 보호 종합대책에 관한 연구 (8. 수리수문 편). 국립환경연구원 보고서 NIER 88-15-240. pp. 351-470.
- 전상호. 1990. 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구- 팔당호 퇴적물의 인과 중금속을 중심으로. 한국육수학회지 **23**: 31-42.
- 한국수력원자력주식회사. 1999~2001. <http://www.khnp.co.kr>, 수계 댐운영 정보.
- 한국수자원공사. 1999~2001. <http://www.kowaco.or.kr>, 수자원관리 종합정보 시스템- 다목적댐 수문 정보.
- 한명수, 어운열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집 구조의 변화. 한국육수학회지 **28**: 335-344.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재. 한국육수학회지 **26**: 141-149.
- 홍선희, 석정현, 김동주, 박경미, 전선옥, 안태석. 2000. 팔당호 수계에서 산소의 생성과 소모. 한국육수학회지 **33**: 374-379.
- 홍성수. 2001. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구. 한양대학교 이학석사 학위논문. 62p.
- APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- AWWA. 1999. Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies. 5th ed. American Water Works Association, McGraw-Hill, Inc. New York, USA.
- Baxter, R.M. 1985. Environmental effects of reservoir. In: Gunnison, D., ed. Microbial Processes in Reservoirs. Developments in Hydrobiology 27. Dr. W. Junk Publ., Dordrecht. pp. 1-26.
- Egborge, A.B.M. 1979a. The effect of impoundment on the phytoplankton of River Oshun. *Nova Hedwigia*. **31**: 407-417.
- Egborge, A.B.M. 1979b. The effect of impoundment on the water chemistry of Lake Asejire. *Niger Freshwater Biol.* **9**: 403-412.
- Ellis, J.B. 1979. The nature and sources of urban sediments and their relation to water quality: A case study from north-west London. In: Hollis, G.E. ed. Man's Impact on the Hydrological Cycle. Norwich: Geo Books. pp. 199-216.

- Ford, D.E. 1990. Reservoir transport process. *In*: Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. eds. Reservoir Limnology- Ecological Perspectives. John Wiley & Sons, Inc. pp. 15-41.
- Foster, I.D.L., R. Millington and R.G. Grew. 1992. The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.* **210**: 51-62.
- Gippel, C.J. 1995. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrol. Process* **9**: 83-97.
- Hannan, H.H. and W.J. Young. 1974. The influence of a deep-storage reservoir on the physicochemical limnology of a Central Texas river. *Hydrobiologia* **44**: 177-204.
- Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592pp.
- Kim, B. 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph.D. Thesis, Seoul National University. 125pp.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristic of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean J. Limnol.* **30** (supplement): 524-535.
- Lewis, J. 1996. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. *Water Resour. Res.* **32**: 2299-2310.
- Mulliss, R.M., D.M. Revitt and R.B. Shutes. 1996. The impacts of urban discharges on the hydrology and water quality of an urban watercourse. *The Science of the Total Environment* **189/190**: 385-390.
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih. (Ergebn. Limnol.)* **14**: 14-36.
- Ogbeibu, A.E. and B.J. Oribhabor. 2002. Ecological impact of river impoundment using benthic macro-invertebrates as indicators. *Water Research* **36**: 2427-2426.
- Old, G.H., G.J.L. Leeks, J.C. Packman, B.P.G. Smith, S. Lewis, E.J. Hewitt, M. Holmes and A. Young. 2003. The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment: Bradford, West Yorkshire. *The Science of the Total Environment*. (in press).
- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks and J.C. Stromberg. 1997. The natural flow regime. *BioScience* **47**: 769-784.
- Richter, B.D., J.V. Baumgartner, J. Powell and D.P. Braun. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* **10**: 1163-1174.
- Shin, J.K., S.J. Hwang and K.J. Cho. 2002. Phosphorus flux from the sediment and its behavior through hypolimnetic discharge in a large reservoir in S. Korea (Taechung Reservoir). Proceedings of ISRLE. Japan.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology- Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 246pp.
- Wagner, I. and M. Zalewski. 2000. Effect of hydrological patterns of tributaries on biotic processes in a lowland reservoir-consequences for restoration. *Ecological Engineering* **16**: 79-90.
- Walling, D.E. and P.W. Moorhead. 1989. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview. *Hydrobiologia* **176/177**: 125-149.
- Walling, D.E., P.N. Owens, B.D. Waterfall, G.J.L. Leeks and P.D. Wass. 2000. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *The Science of the Total Environment* **194/195**: 205-222.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Limnological Analyses. 2nd ed. Spring-Verlag New York, Inc., USA. pp. 15-30.
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal Hydrology* **265**: 149-163.
- Wotton, R.S. 1994. The Biology of Particles in Aquatic Systems. 2nd ed. CRC Press, Inc. USA. 325pp.

(Manuscript received 10 July 2003,
Revision accepted 20 August 2003)