

하천형 저수지 팔당호의 육수학적 특성: 수문과 수환경 요인

신재기 · 황순진* · 강창근¹ · 김호섭

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹국립수산과학원 환경관리과)

Limnological Characteristics of the River-type Paltang Reservoir, Korea: Hydrological and Environmental Factors. *Shin, Jae-Ki, Soon-Jin Hwang*, Chang-Keun Kang¹ and Ho-Sub Kim (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Division of Environmental Management, National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI), Pusan 619-902, Korea)*

This study aimed to determine the relationship between rainfall-discharge patterns and major aquatic environmental factors in a river-type reservoir. Specifically, daily monitoring was conducted in Paltang Reservoir from January 1999 to December 2001. Observation of the daily changes of the environment factors showed that natural meteorological factors and hydrological factors causing the change of water discharge had a major effect on the aquatic environment. Rainfall was the main source of hydrological changes, with its frequency a possible direct variable governing the range of discharge changes. Rainfall was weak in November~May and heavy in June~October (heaviest in summer). The range of water discharge was greatest during summer (July to September) and lowest during winter (January to February). A principal component analysis (PCA) showed that aquatic environmental factors could be classified into three different types in the pattern of annual variation. First, type I included water temperature, turbidity, water color and organic matter (COD), which increased with increasing water discharge. Second, type II consisted of DO and pH, which decreased with increasing water discharge. Third, type III included conductivity, alkalinity and chloride ion, which showed middle values with increasing water discharge. Monthly variation of aquatic environments explained by the first two dimensions of the PCA suggests that aquatic environments of Paltang Reservoir may have annual cycle typical of river-type reservoirs depending on hydrological factor such as water discharge.

Key words : reservoir, hydrology, environmental factor, discharge, water level, water quality, river-type reservoir

서 론

저수지는 홍수조절을 비롯하여 제한된 수자원을 생활, 농업, 공업, 발전 및 하천유지유량 등 각종 용수에 효율적이고 다목적으로 이용하기 위하여 개발되고 있으며

(Winston and Criss, 2002), 지리적 여건에 따라 그 규모가 다양하여 연중 수문과 수환경의 변동에서 다른 양상을 보이고 있다(Thornton *et al.*, 1990; Criss *et al.*, 2001; Wetzel, 2001; Kalf, 2002). 하천은 댐 건설로 인해 저수지화됨에 따라 수표면적, 수위 및 수심 등 수문을 포함한 지형 변화를 가져오고, 정체성의 증가로 유수 (lotic)

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

에서 정수(lentic)생태계로 전환되는 과정을 겪게 된다(Thornton *et al.*, 1990; Kalf, 2002). 이러한 과정은 생태계의 구조와 기능적 변화를 초래할 뿐만 아니라 담수 후 계절적 특성에 따라 유량·수위의 변동, 수온·DO의 성층화 및 탁수 유입과 밀도류(density current) 형성이 연주기로 발생한다. 또한, 유입 하천의 영향이 큰 상류 수역(riverine zone)과 저수지의 하류 수역(lacustrine zone)간에 주요 환경요인, 영양염 농도 및 생물량에서 시공간적 또는 수평·수직적 차이를 보이게 된다(Cole and Hannan, 1990; Ford, 1990; Kennedy and Walker, 1990).

인공호는 유역의 강우 사상에 의해 하천으로부터 유입되는 유량을 고려하여 체류시간에 따라 크게 하천형과 호수형 저수지로 나눌 수 있다(공, 1992; 김과 홍, 1992). 우리나라의 내륙에 위치한 댐 저수지는 대부분 체류시간이 길지 않아 하천형 저수지에 해당하나, 수심과 저수 면적의 크기에 따른 저수량의 차이로 하천형과 호수형으로 구분이 가능하다. 특히, 팔당호는 수심이 얇고, 저수량이 적을 뿐만 아니라 대하천의 중하류부에 위치하고 있어 유역으로부터 공급되는 유량의 계절적 변동이 매우 큰 대표적인 하천형 저수지 시스템에 해당한다.

수환경의 변화를 유도하는 환경 요인에는 크게 물리·화학적 및 생물학적 영향이 포함된다. 이들은 밀접한 상호 관련성을 가지고 있으며, 그 중에서 강수량과 유량을 중심으로 한 물리적 수문 요인 영향이 매우 중요하다(Parks and Baker, 1997; Winston and Criss, 2002). 수체에서 용존성 물질(영양염, 금속 이온)과 입자성 물질(유기 또는 무기입자)의 이동 및 혼합은 아주 복잡하고 상호 의존적인 물리적 기작에 의해 조절된다. 이러한 기작은 수온, 광환경 및 수질 화학 등의 수환경 변화를 야기하여 수중 생태계에 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 작용으로 볼 수 있다. 또한, 구성 요소(이류, 대류, 와류, 확산, 전단력, 분산, 유인, 혼합 및 침전)의 상대적 크기와 중요성은 수역마다 다르고, 기상학적 영향, 유입량, 유출량, 저수 형태, 수온 성층화 및 수문 조절 등에 의해 변화될 수 있다(Ford, 1990; Winston and Criss, 2002).

국외에서는 하천과 호수 등의 다양한 수환경에 대해 기후·수문 요인의 직접적인 영향을 평가한 많은 선행 연구가 제시되고 있는데(Thornton *et al.*, 1990; Criss *et al.*, 2001; Wetzel, 2001; Kalf, 2002), 국내에서도 여름철의 강우 사상(rainfall pattern)이 수환경에 미치는 영향에 대한 다양한 연구들이 소개되었다. 반면, 육수생태학적 단일 연구와 부영양화에 따른 수질 오염 영향 및 식

물플랑크톤 발생을 규명하기 위한 연구는 활발하였으나(공, 1995; 김 등, 2003), 수문을 포함하는 수환경 요인의 동시적 연구는 미흡한 실정에 있다. 김 등(1995)과 Kim *et al.*(2000)은 소양호에서 여름철의 장마동안 탄소와 인의 유입 및 분포가 저수지의 수질에 미치는 영향을 연구하였고, An(2000a, b, c)은 1993~1994년 동안에 대청호에서 DO 변동, 인 동태, 저수지 형태 및 수리·수문학적 거동에 대한 몬순 세기의 영향을 평가하였다. 김 등(2002b)은 팔당호의 댐 부근에서 1988~2000년동안 월조사 자료를 이용하여 수질의 계절별 장기 변화 특성을 보고하였고, 박 등(2002)은 1997년에 낙동강 하류에서 장마 강우가 하천 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 신 등(2003)은 최근에 하천형 저수지에서 탁도의 일 변동과 탁수의 입자 분포를 파악하여 수문 요인의 중요성을 제시한 바 있다.

본 연구는 하천형 저수지(팔당호)에서 강우·유량 패턴과 주요 수환경 요인의 일 변동을 통해 상호 관련성을 파악하고자 하였다. 본 연구의 목적은 호수형 저수지의 수문 또는 수환경 특성과 비교할 때 다소 이질적인 양상을 보이는 하천형 저수지를 이해하고, 효과적인 관리를 위해 필요한 유용한 정보를 제공하는데 있다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구는 한강의 지류인 북한강, 남한강 및 경안천이 합류되어 저수지를 이루는 팔당호(37°30'N, 127°20'E)를 대상으로 하였다(Fig. 1). 댐은 남·북한강 합류점에서 하류 7 km, 서울의 북방 35 km지점에 위치하고 있다. 저수지의 주요 제원은 Table 1과 같다. 팔당호는 1972년 12월부터 수력발전을 목적으로 담수를 시작하였으나, 현재는 홍수조절, 하천유지용수 공급 및 광역 상수원의 기능이 추가되어 다목적 저수지로 이용되고 있다(한국수력원자력주식회사, 1999~2001). 저수지의 형상은 수지형(dendritic type)을 띠고 있고, 수체의 혼합은 빈번하여 다중 순환형(polymictic pattern)으로 분류된다(이 등, 1988; 공, 1992; Kong, 1997).

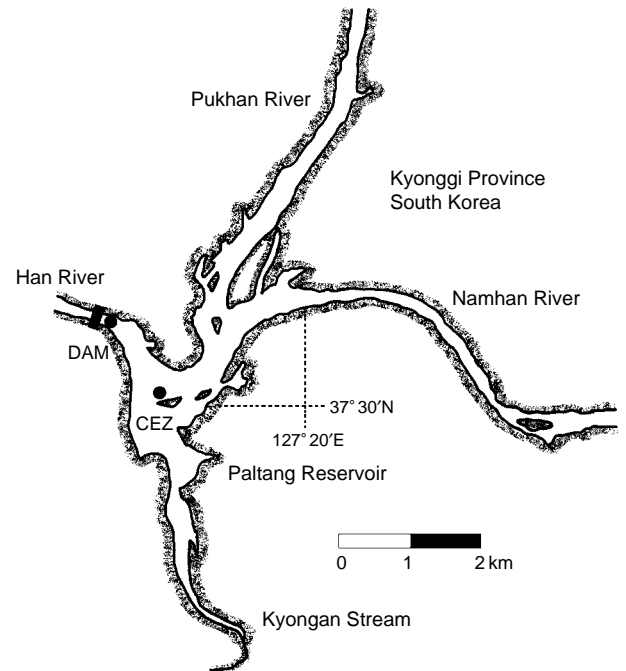
유역의 총면적은 23,618.3 km²이고, 북한강(45.3%), 남한강(52.3%), 경안천(2.4%)의 유역을 포함하고 있다. 팔당호의 상류에는 북한강 유역에 5개(화천호, 춘천호, 소양호, 의암호 및 청평호), 남한강 유역에 2개(충주호, 괴산호) 등 총 7개의 중·대형 인공호가 위치하고 있으며, 경안천은 하상에 건설된 다수의 수중보를 제외하고는

Table 1. General geographic and limnological features of the Paltang Reservoir Basin.

Attributes	Paltang Reservoir
Latitude	37° 30'N
Longitude	127° 20'E
Dam Elevation (m)	32.0
Project period of dam construction	June 1966 to May 1974
Impoundment of reservoir	29 December, 1972
Functions	Multipurpose reservoir water supply, flood control, hydroelectric power generation
Reservoir shape type	Dendritic
Circulation pattern	Polymictic, river-reservoir system
Trophic state	Meso-eutrophic
Average rainfall (mm/day)	15.8
Average inflow (m ³ /s)	516.5
Average outflow (m ³ /s)	474.6
Watershed area (km ²)	23,618.3
- Pukhan River Watershed	10,698.4 (45.3%)
- Namhan River Watershed	12,355.1 (52.3%)
- Kyongan Stream Watershed	564.8 (2.4%)
Reservoir surface area (km ²)	38.2
Reservoir shoreline (km)	75.0
Reservoir width (m)	520.0
Maximum depth (m)	25.5
Mean depth (m)	6.6
Reservoir storage volume (× 10 ⁶ m ³)	244.0
Active storage volume (× 10 ⁶ m ³)	18.0
Hydraulic residence time (days)	5.1 (0.12 ~ 22.8)
Dam height (m)	29.0
Dam length (m)	575.0

특별한 저류 시스템이 없다. 저수지의 수표면적은 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/s이다. 총저수량은 244.0 × 10⁶ m³이고 유효저수량은 18.0 × 10⁶ m³이다. 평균 수심은 6.6 m이고, 최대 수심은 25.5 m로써 하천 유입부에서 얇고, 댐 부근에서 가장 깊으며, 평균 체류시간은 5.1일 (0.12~22.8일 범위)에 해당한다. 팔당호로 유입된 물은 크게 여수로, 발전 방류구 및 취수구를 통해 최종적으로 배출된다 (한국수력원자력주식회사, 1999~2001). 여수로와 발전 방류구는 댐에 위치해 있고, 취수구는 댐부터 상류의 좌안에 다수 분산되어 있다.

팔당호는 수리학적 교체가 연평균 80회 수준으로 빈

**Fig. 1.** Map showing sampling stations of Paltang Reservoir. CEZ: central zone station, DAM: dam station.

번하고, 평균 수심이 얇아 성층의 발달이 미약한 전형적인 하천형 인공호로서 유역 강우와 물질 부하에 따라 경시적으로 변하는 불안정한 생태계이며, 그 외 수문 조절과 지속적인 외부 유입의 영향 등 인위적인 간섭을 받는 역동적인 수환경 시스템에 해당한다 (공, 1992; 공, 1995). 또한, 여름철을 중심으로 저수지의 하천 유입부와 만곡부의 연안대에 정수식물의 애기부들 (*Typha angustifolia*), 줄 (*Zizania latifolia*), 갈대 (*Phragmites cummunis*)와 부엽식물의 연꽃 (*Nelumbo nucifera*), 어리연꽃 (*Nymphoides indica*) 및 침수식물의 붕어마름 (*Ceratophyllum demersum*), 검정말 (*Hydrilla verticillata*), 나사말 (*Vallisneria gigantea*), 말즘 (*Potamogeton crispus*), 새우가래 (*Potamogeton maackianus*) 등이 4~10월동안 번성하였으며 (Cho and Kim, 1994; 조 등, 1994; 김과 조, 1996), 이들 수생식물들은 유황에 따른 수위 증감에 의해 표면 분포의 시기적 차이가 관찰되었다.

2. 연구방법

본 연구의 조사 지점은 팔당호에서 북한강, 남한강 및 경안천의 유입 하천이 합류되는 저수지의 중심 상류부 (CEZ, 댐으로부터 상류 1.5 km 지점)와 댐 (DAM) 부근 중앙의 두 정점으로 하였다 (Fig. 1). 주요 수환경 요인을

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

Factors\Years	Paltang Reservoir			
	1999	2000	2001	Total
Rainfall (mm)	16.0±27.0 (158.5/0.5)	13.9±24.0 (149.5/0.5)	17.9±30.8 (156.0/0.5)	15.8±27.1 (158.5/0.5)
Discharge (m ³ /s)				
-Influent water	668.7±1,453.2 (16,562.7/147.2)	527.5±816.7 (6,987.0/168.3)	353.3±621.5 (5,620.4/126.0)	516.5±1,034.1 (16,562.7/126.0)
-Effluent water	623.3±1,459.0 (16,629.0/125.0)	485.5±814.2 (7,050.0/127.0)	315.0±615.7 (5,514.0/124.0)	474.6±1,034.6 (16,629.0/124.0)
1) Watergate	1,861.1±3,308.2 (16,629.0/27.0)	1,730.5±1,749.9 (6,418.0/40.0)	1,443.4±1,661.1 (4,827.0/37.0)	1,737.2±2,615.3 (16,629.0/27.0)
2) Spillway	348.0±183.9 (831.0/0.0)	329.5±172.5 (819.0/127.0)	228.1±180.7 (786.0/124.0)	301.9±186.5 (831.0/0.0)
-Intake water	45.7±2.8 (53.5/37.7)	41.9±2.5 (49.2/34.1)	38.5±2.0 (45.0/29.2)	42.0±3.8 (53.5/29.2)
Water level (EL. m)	25.3±0.1 (25.5/24.6)	25.3±0.1 (25.5/24.9)	25.2±0.2 (25.5/24.7)	25.3±0.1 (25.5/24.6)

1999년 1월부터 2001년 12월까지 일 모니터링하였다. 일 강수량은 팔당호 유역에 위치한 측후소의 평균값을 적용하였고, 일 평균 유입량 및 유출량은 한국수력원자력주식회사(1999~2001)의 관측 자료를 이용하였다.

현장 조사는 소형 보트를 이용하였고, 동일 지점의 확인을 위해 수중 부표를 설치하였으며, 유입량이 급증한 시기에는 GPS (geological postioning system)를 이용하여 수시로 확인하였다. 수질 분석을 위한 시료는 수심 0.5 m 깊이의 표층수를 채수하였다. 겨울철 (1~2월)의 결빙 기간에는 채수 지점에 내한성 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, 즉시 측정 및 분석하였다. 수온, DO는 YSI 6000 UPG meter, pH는 Orion 230A meter, 전기전도도는 LFT-190, WTW meter를 이용하여 매번 보정한 후 현장에서 직접 측정하였다. Alkalinity는 Gran 적정법 (Wetzel and Liken, 1991), 색도는 platinum-cobalt 비교법, 염소 이온은 mercuric nitrate 적정법으로 각각 측정하였고, COD는 potassium dichromate법으로 분석하였다 (APHA *et al.*, 1995).

3. 자료 분석

본 연구에서 환경요인들 간의 상관관계의 정도에 대한 통계적 측정 방법으로서 Pearson 상관계수를 구하여 그 선형관계를 파악하였다. 측정된 수환경 요인들의 공변동을 평가하기 위하여 8개 수환경 변수들의 상관관계 행렬 (correlation matrix)을 이용하여 주성분분석 (Prin-

cipal Component Analysis)을 실시하였고, 2차원 공간에 그 결과를 도시하였다. 여기서 분석에 사용된 수환경 변수들은 수온, COD, 색도, 알칼리도, 전기전도도, 염소 이온농도, DO 및 pH 등이었다. 이때, 각각 다른 측정 단위에 따른 자료의 편중을 피하고 각 변수 자료들의 분포를 정규화하기 위하여 각 대상의 측정 자료들은 대수변환 $[\log_{10}(x+1)]$ 하였다. 수환경 요인과 수문 요인사이의 관계는 주성분 축에 대하여 가지는 요인 적재값들이 유사한 수환경 요인들의 유량 변동에 따른 변동 양식을 파악함으로써 평가하였다. 이와 함께 전체적인 수환경 요인의 연 변동 양상은 주성분분석에서 추출된 새로운 주성분들에 대하여 각 월별로 보이는 성분점수 (principal component scores)들의 좌표상의 위치로부터 평가하였다. 이상의 통계분석은 SPSS 10.0 (SPSS Inc., 1999) 프로그램을 이용하여 수행하였다.

결 과

1. 수문 요인의 변동

1999~2001년 동안 무강수일을 제외한 일 강수량의 범위는 0.5~158.5 mm이었고, 평균값은 15.8 mm이었다 (Table 2). 연간 총강수량은 1999, 2000 및 2001년에 각각 1,378.0 mm, 1,085.0 mm 및 1,143.5 mm로서 다소 차이가 있었다. 대체적으로, 강수량은 11~5월에 적었고, 6~10월에 풍부하여 대비가 되었으며, 여름철과 가을철에 편중된 구조를 보였다 (Fig. 2A). 일 최대강수량은

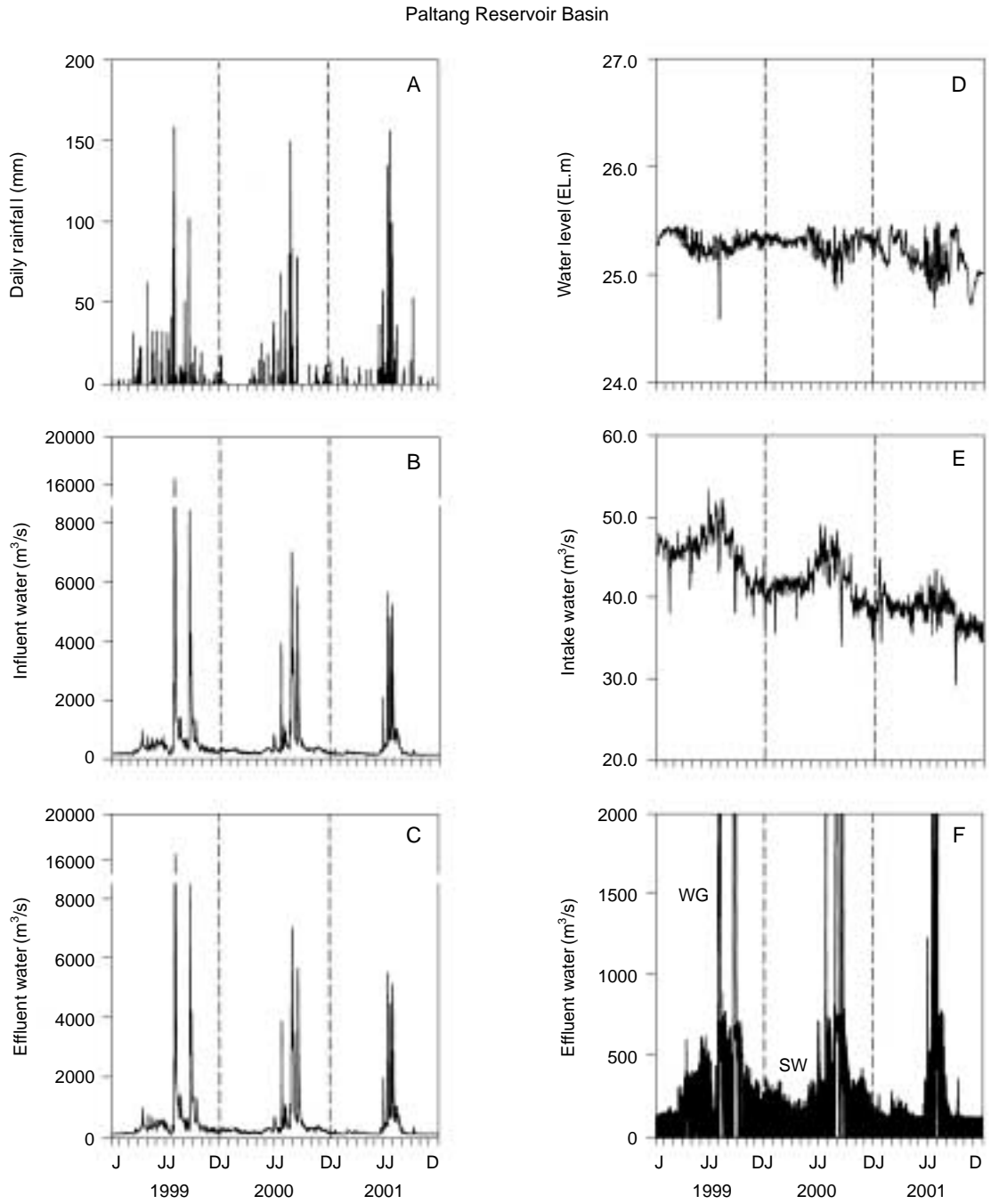


Fig. 2. Daily variations of hydrological factors in Paltang Reservoir from January 1999 to December 2001. WG: watergate, SW: spillway.

7~8월에 관찰되었고, 100 mm를 초과한 강수량은 연 1~3회 범위이었다. 강수일에 따른 연중 우량의 분포에서 선형 강우 사상이 적거나 무강수일이 장기화될 때 저수지에서 유량 변동에 민감하지 않은 수준인 0.5~15.8 mm범위가 76.3%로써 높은 빈도를 보였고, 50 mm 이상

은 0.9%를 차지하였다. 또한, 연간 강수 패턴에서 1999년은 8월을 중심으로 좌우 대칭되었고, 2001년은 7월을 중심으로 조밀하였으며, 2000년은 4월을 기준으로 점진적으로 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2A).

유입량과 방류량은 강수량과 빈도의 양적 패턴에 밀

접한 관련성을 보였다. 유입·방류량의 변동에서 침두 유량은 1999년에 가장 높았고, 2001년에 낮았으며, 2000년에는 그 중간적 분포를 보였다. 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 2). 1,000 m³/s 이상의 유량은 7~10월사이에 분포하였고, 최대 유량은 강수량의 영향이 지배적이었다 (Fig. 2B, C). 유입량과 방류량의 변동 양상은 큰 차이가 없었고, 방류량은 유입량의 91.9%를 차지하였다. 또한, 저수지수의 방류 시스템은 댐에 위치한 수문(watergate, WG)과 발전 방류구(spillway, SW)의 2가지로 구분된다 (Fig. 2F). 수문에 의한 방류는 선행 강수량과 유입량이 각각 67.1 (±30.8) mm, 1,258.0 (±662.0) m³/s 이상일 때 이루어졌고, 그 외 기간은 대부분 발전 방류구를 통해 배출되었다. 연 평균 방류량 중에서 수문 개방과 발전에 의한 유량은 각각 36.4%, 63.6%를 차지하였고, 수문 또는 발전 방류 양상은 매년 차이가 있었다.

저수지의 일 수위는 평균값이 25.3 m이었고, 변동 범위는 24.6~25.5 m이었다 (Table 2). 수위는 유입량 또는 방류량에 의해 변동 조절되었고, 특히 집중 호우로 인해 유입량이 급증하기 직전에 급감하는 양상이 현저하였다 (Fig. 2D). 수위의 변동 폭이 가장 큰 시기는 여름철에 집중되어 있었다. 일 최대 변동 폭을 보인 시기는 1999년 8월이었고, 그 값은 0.8 m이었다. 용수에 대한 취수량은 1999~2001년동안 해가 갈수록 감소하는 경향이었고, 다른 계절에 비해 여름철에 비교적 많았다 (Fig. 2E). 연도별 평균 취수량(범위)은 1999년에 45.7 m³/s (37.7~

53.5 m³/s), 2000년에 41.9 m³/s (34.1~49.2 m³/s)이었고, 2001년에는 38.5 m³/s (29.2~45.0 m³/s)이었다 (Table 2). 또한, 취수량은 유입량과 방류량에 대해 각각 8.1, 8.9%를 차지하였다.

2. 수환경 요인의 변동

수온은 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각 0.8~27.7°C, 13.7°C이었고, 정점 DAM에서 1.0~27.2°C, 13.5°C이었다 (Table 3). 수온의 연중 변동은 전형적인 sine 곡선의 형태를 보였고, 일 분포에서 최대값은 7~8월에, 최저값은 1~2월에 각각 관찰되어 계절에 따른 여름철과 겨울철의 자연적 특성이 잘 반영되었다 (Figs. 3A, 4A). 또한, 겨울철(12~2월)에는 변동 폭이 7.2°C로 적었으나, 여름철(6~8월)에는 9.8°C로 조금 커서 기후 변동에 따른 수문학적 영향이 여름철에 다소 빈번함을 알 수 있었다. DO는 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각 4.5~14.3 mg O₂/l, 9.4 mg O₂/l이었고, 정점 DAM에서 4.3~14.2 mg O₂/l, 9.3 mg O₂/l이었다 (Table 3). DO는 수온 분포와 역구조를 보여, 수온이 낮을 때 높고, 수온이 높을 때 낮았으며, 수온과 달리 최대 및 최저값의 정도가 해마다 다소 차이를 보였다 (Figs. 3B, 4B). 연간 DO 변동에서 1999년에는 5.8~14.3 mg O₂/l, 2000년에는 4.3~13.9 mg O₂/l 범위이었고, 2001년에는 6.6~12.5 mg O₂/l 범위이었다. 또한, DO는 1~2월에 높고, 6~8월에 낮아 수온 증감의 기후학적 영향 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 생물학적 영향과 유입·유출의 수문학적 영향이 직간접적으로 관여됨이 현저하였다.

Table 3. Mean values of environmental factors 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
Water temperature (°C)	13.3±8.2 (27.7/1.3)	13.3±8.2 (27.0/1.1)	14.3±8.9 (26.5/0.8)	13.7±8.4 (27.7/0.8)	13.2±8.1 (27.2/1.2)	13.2±8.1 (26.7/1.0)	14.2±8.5 (26.3/1.3)	13.5±8.2 (27.2/1.0)
DO (mg O ₂ /l)	9.8±2.3 (14.3/5.8)	8.6±2.9 (13.9/4.5)	9.8±1.6 (12.5/6.6)	9.4±2.4 (14.3/4.5)	9.8±2.2 (14.2/5.9)	8.5±2.9 (13.9/4.3)	9.7±1.6 (12.4/6.7)	9.3±2.3 (14.2/4.3)
pH	8.1±0.6 (9.4/6.9)	8.2±0.5 (9.5/6.9)	8.2±0.6 (9.7/7.1)	8.2±0.6 (9.7/6.9)	8.0±0.6 (9.3/6.9)	8.2±0.5 (9.4/6.9)	8.1±0.6 (9.6/7.0)	8.1±0.5 (9.6/6.9)
Conductivity (µS/cm)	133.2±23.3 (195.0/87.0)	141.5±21.0 (207.0/80.8)	145.9±28.6 (193.0/70.0)	140.1±25.0 (207.0/70.0)	132.6±19.7 (185.0/85.5)	140.1±20.6 (204.0/80.7)	149.3±19.3 (189.0/69.0)	140.7±21.0 (204.0/69.0)
Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	43.7±5.9 (58.0/18.0)	43.5±6.5 (68.0/24.0)	45.3±8.5 (63.0/20.0)	44.2±7.1 (68.0/18.0)	42.9±5.8 (56.0/19.0)	43.4±6.2 (66.0/23.0)	44.7±8.1 (60.0/17.0)	43.7±6.8 (66.0/17.0)
Water color (units)	3.1±0.7 (5.0/1.0)	2.8±2.5 (18.0/1.0)	3.9±1.9 (10.0/1.0)	3.3±1.9 (18.0/1.0)	3.0±0.7 (6.0/1.0)	2.8±2.5 (21.0/1.0)	3.5±1.6 (9.0/1.0)	3.1±1.8 (21.0/1.0)
Chloride (mg Cl/l)	8.0±0.3 (8.9/7.4)	7.7±1.0 (17.2/5.6)	7.7±0.9 (15.0/6.1)	7.8±0.8 (17.2/5.6)	8.0±0.3 (8.8/7.2)	7.6±1.0 (16.8/5.3)	7.4±0.9 (15.0/6.1)	7.7±0.8 (16.8/5.3)
COD (mg O ₂ /l)	3.0±0.3 (3.8/2.4)	3.0±0.3 (3.8/2.4)	3.0±0.5 (4.0/2.0)	3.0±0.4 (4.0/2.0)	3.0±0.3 (3.8/2.4)	2.9±0.2 (3.6/2.4)	3.1±0.5 (4.0/2.0)	3.0±0.4 (4.0/2.0)

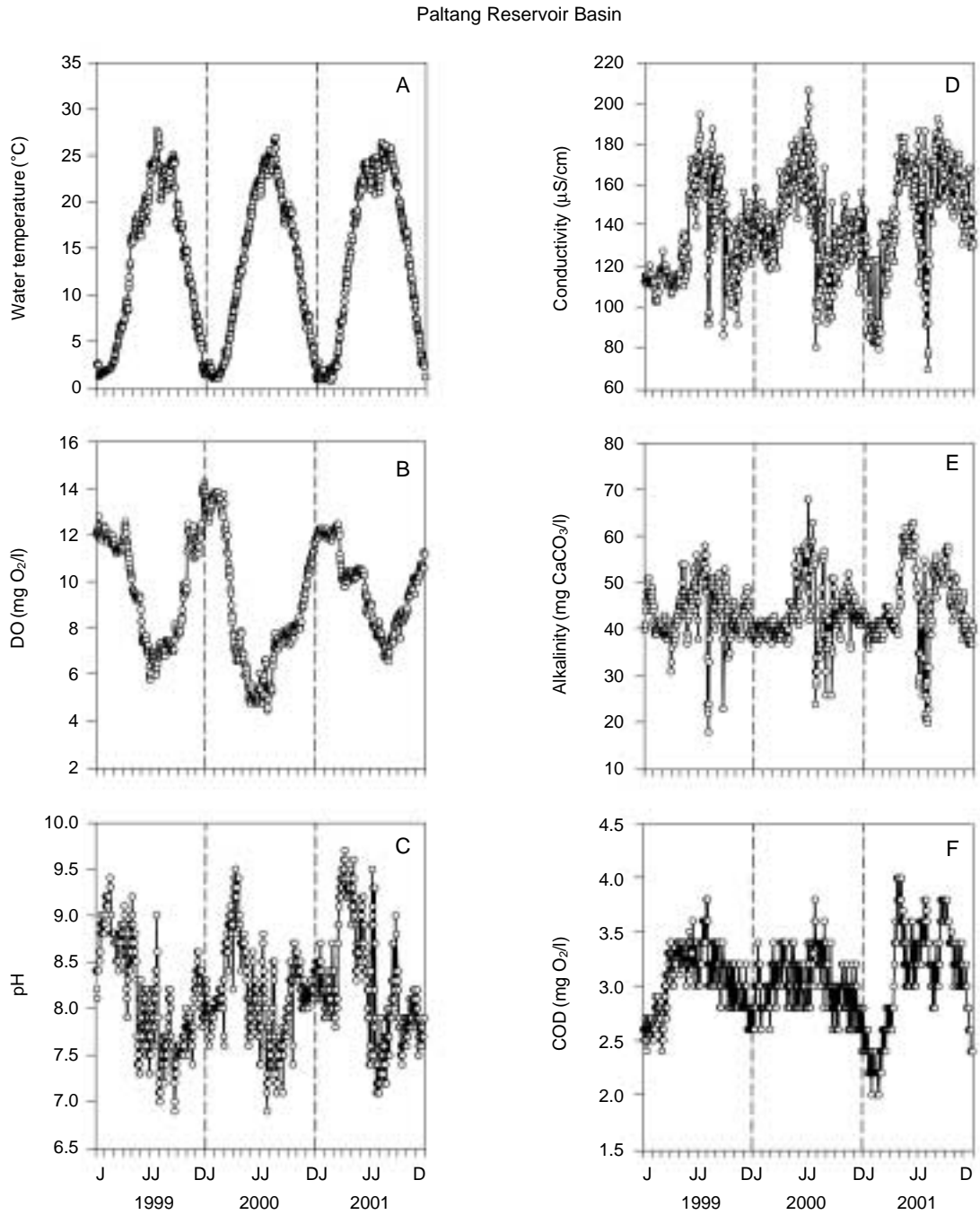


Fig. 3. Daily variations of major environmental factors in the CEZ station of Paltang Reservoir from January 1999 to December 2001.

pH는 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각 6.9~9.7, 8.2이었고, 정점 DAM에서 6.9~9.6, 8.1이었다 (Table 3). 수중 pH는 매우 불규칙적인 변동이었으나, DO의 분포와 유사한 패턴을 보였고, 증감 양상은 DO에 비해 다소 후행하는 구조를 나타냈다 (Figs. 3C, 4C). pH의 평균값

은 2월과 4월에 높았고, 8월에 낮았다. 전기전도도는 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각 70.0~207.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 140.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었고, 정점 DAM에서 69.0~204.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 140.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었다 (Table 3). 전기전도도는 평균값으로 볼 때, 5~7월에 높았고, 2월과 9월에 낮았으며, 그 경향

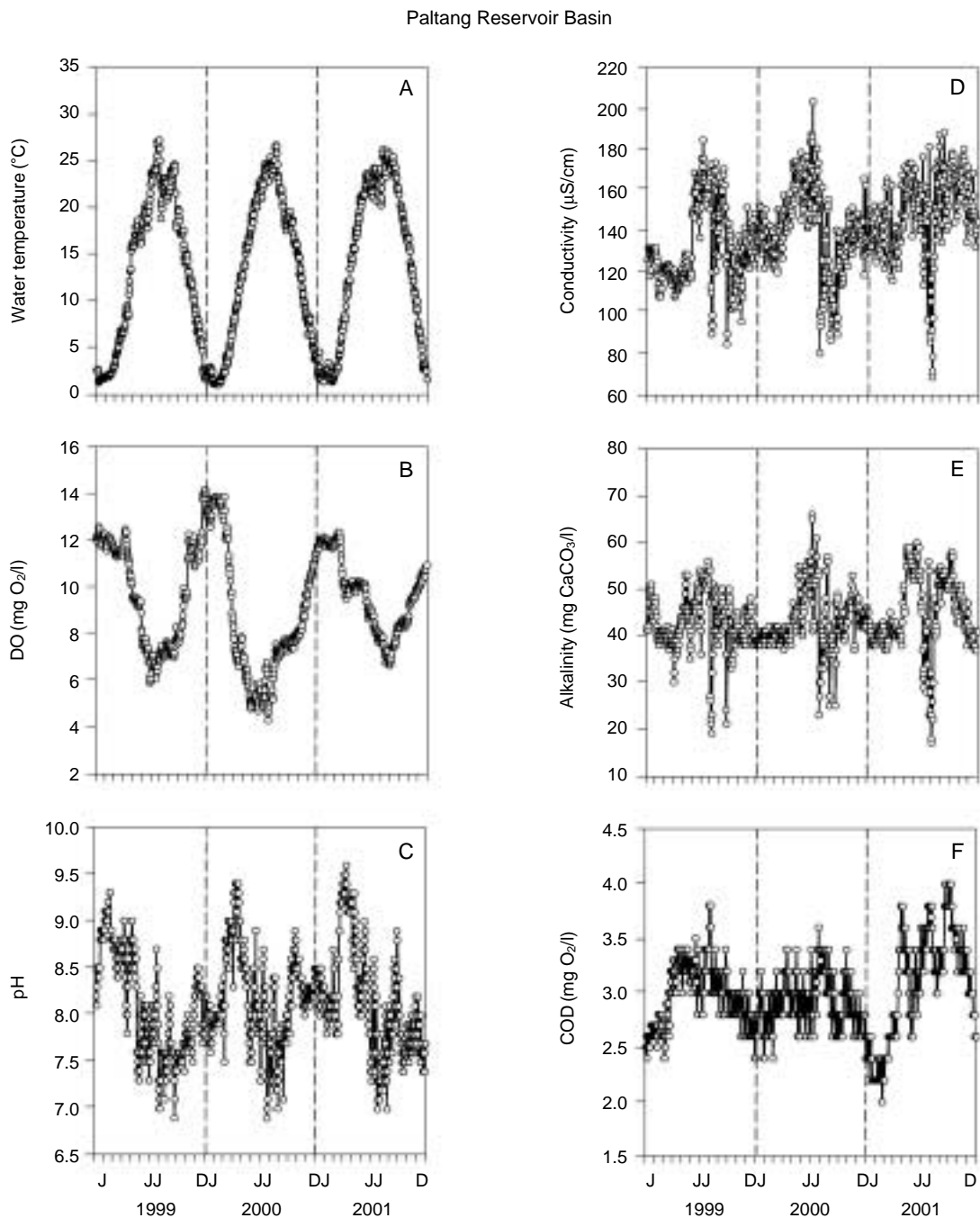


Fig. 4. Daily variations of major environmental factors in the DAM station of Paltang Reservoir from January 1999 to December 2001.

은 유입량이 커지는 초기 강우 때 증가하였다가 장마 기간의 최대 유입량을 보인 때에 급감하였다(Figs. 3D, 4D). 이때, 변동 폭은 117.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로써 연중 가장 변동이 심한 시기에 해당하였다.

알칼리도는 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각

18.0~68.0 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$, 44.2 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$ 이었고, 정점 DAM에서 17.0~66.0 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$, 43.7 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$ 이었다(Table 3). 변동 구조는 전기전도도와 유사하였으나, 그 변화 폭은 적었다. 알칼리도의 증감 변동은 6~8월에 가장 빈번하였다(Figs. 3E, 4E). 색도는 정점 CEZ에서

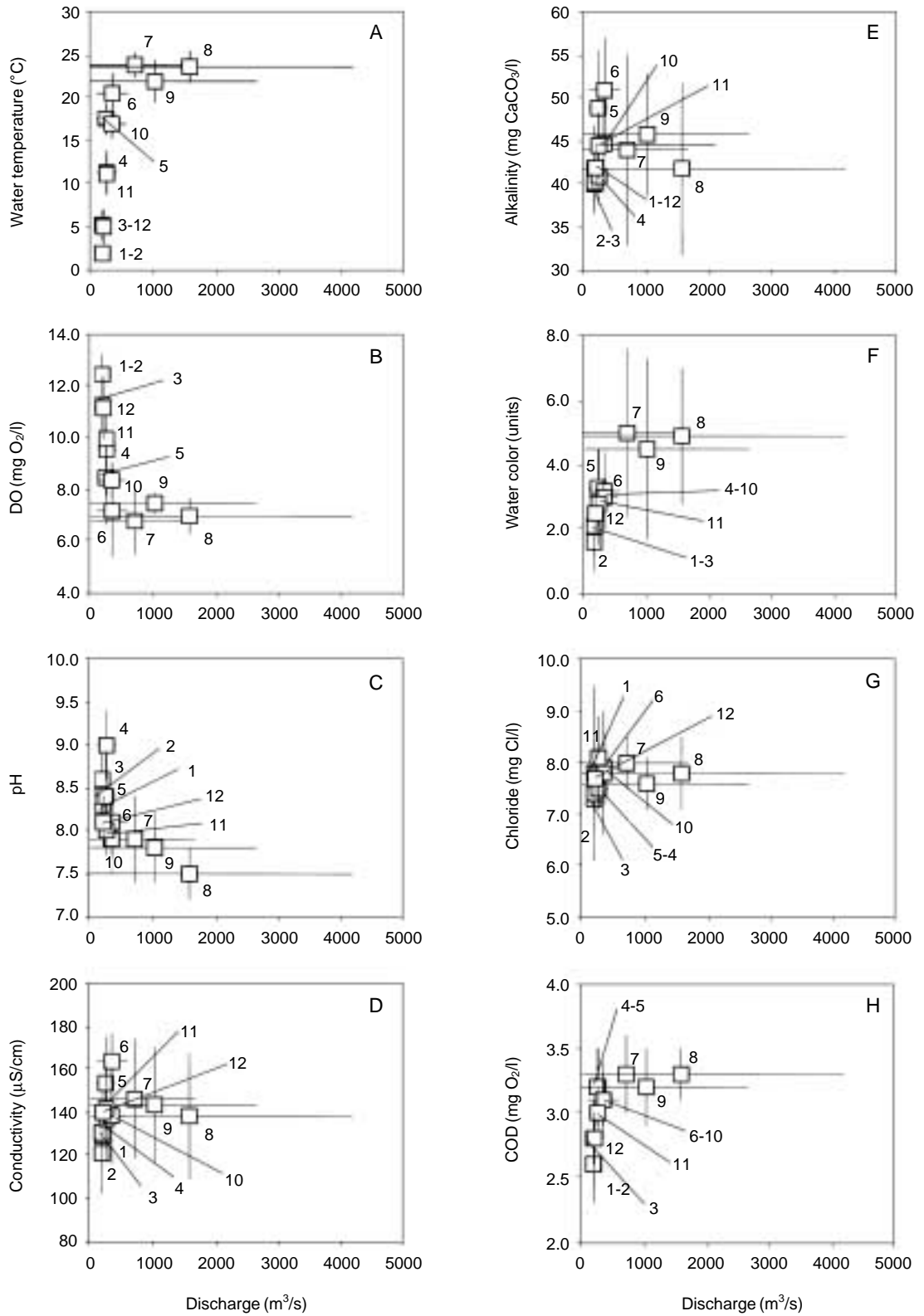


Fig. 5. Relationships between flow and major environmental factors by monthly mean values in Paltang Reservoir. Numerics and bars indicate sampling month and standard deviation.

범위와 평균값이 각각 1.0~18.0 units, 3.3 units이었고, 정점 DAM에서 1.0~21.0 units, 3.1 units이었다 (Table 3). 염소 이온은 정점 CEZ에서 범위와 평균값이 각각 5.6~17.2 mg Cl/l, 7.8 mg Cl/l이었고, 정점 DAM에서 5.3~16.8 mg Cl/l, 7.7 mg Cl/l이었다 (Table 3). 수중 유기물 지표 중의 하나인 COD는 정점 CEZ와 DAM에서 범위와 평균값이 각각 2.0~4.0 mg O₂/l, 3.0 mg O₂/l로 동일하게 나타났다 (Table 3). COD는 수온, 전기전도도 및 알칼리도의 증감 양상과 유사하였고, 유입 및 유출량이 증가한 시기에 높았으며, 유량이 빈약한 갈수기에 오히려 낮은 값을 보였다 (Figs. 3F, 4F).

3. 수문과 수환경 요인의 관계

수환경 요인의 변동에 대한 수문학적 영향은 1999~2001년 동안 환경 요인과 방류량의 월 평균값에 의해 비교하였고, 그 결과는 Fig. 5A-H와 같다. 유량은 7~9월 사이에 변동 폭이 가장 컸고, 1~2월로 갈수록 변동 폭이 크게 낮았다. 수온은 최저값을 보인 1~2월에서 최고값을 보인 7월로 갈수록 급격하게 증가하여 평균 수온 차이는 22.8°C를 기록하였다 (Fig. 5A). 수온의 월 변동 폭은 다른 시기에 비해 3월에서 5월, 9월에서 12월로 갈수록 컸고, 7~8월은 가장 적은 시기에 해당하였다. DO는 수온과 반대로 겨울철에서 여름철로 갈수록 급감하였고, 1월에서 6월까지 일정하게 감소한 반면에 6~9월 동안은 평균 7.2 mg O₂/l 수준을 유지하였다 (Fig. 5B). 또한, DO의 월중 편차는 3월, 6~7월 및 12월에 가장 컸고, 월간 차이는 3~4월과 4~5월에 각각 최대와 최소를 나타냈다.

pH는 1월에서 4월까지 점진적으로 증가하다가 8월까지 급감하였고, 이후에 다시 증가하는 패턴을 보여 DO와는 다소 차이가 있었으며, 다른 요인에 비해 전기전도도와 함께 7~9월 동안에 다소 하향 직선적 증감 분포를 나타냈다 (Fig. 5C). 전기전도도와 알칼리도는 2월에서 6월까지 증가하다가 이후 8월까지 다시 감소하는 유사한 경향을 보였는데 ($p < 0.001$), 전기전도도는 7월이 9월보다 높았으나 알칼리도는 오히려 9월에 조금 높은 경향을 보였다 (Fig. 5D, E).

색도는 겨울철보다 봄철~가을철 동안에 조금 높았고, 6~7월과 9~10월 사이에 차이가 더욱 큼이 완연하였다 (Fig. 5F). 수환경 요인 중에서 시공간적으로 연중 차이가 가장 적었던 것은 염소 이온으로 볼 수 있었고, 월중 편차는 유량이 풍부한 7~9월에 비교적 작았다 (Fig. 5G). COD는 수온과 색도가 낮은 겨울철에 그 값이 낮

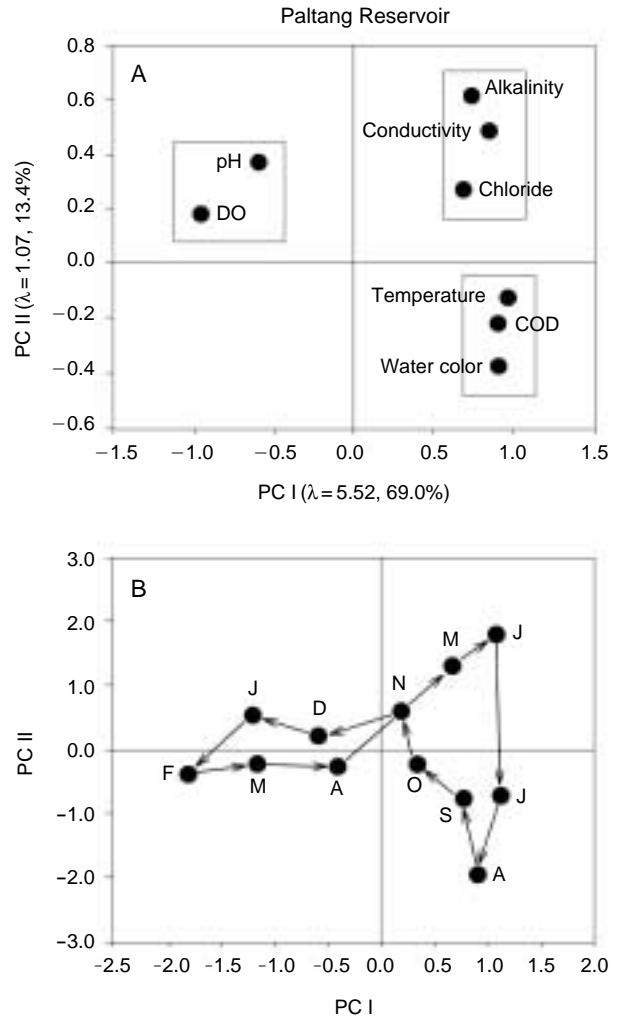


Fig. 6. PCA ordination of the environmental factor data of Paltang Reservoir waters. A. The ordination of environmental factors along the first two axes. B. The ordination of monthly sample scores along the first two axes showing annual variation of water environments. The first (PC I) and second (PC II) axes account for 69.0% and 13.4% of variance in environmental data.

고, 수온과 색도가 높을 때 높은 경향을 보였으며 ($r = 0.873 \sim 0.927, p < 0.001$), 농도가 높은 때는 유량이 급증하는 시기에 해당하였다.

팔당호에서 관측된 수환경 요인의 월 평균값 자료들을 이용한 주성분 분석 결과, 2개의 주성분으로 측정된 수환경 변수 자료의 82.4%를 설명할 수 있었다 (Fig. 6). 전체 자료 분산의 69.0%를 설명하는 주성분 축 I (PC I)에는 수온, COD, 색도, 알칼리도, 전기전도도 및 염소 이온이 유의한 양의 요인 적재값을 나타낸 반면, DO와

pH는 음의 요인 적재값을 보였다(Fig. 6A). 주성분 축 II(PC II)는 전체 자료 분산의 13.4%를 설명하였고, 알칼리도, 전기전도도, 염소 이온, pH 및 DO가 이 축과 양의 요인 적재값을 나타낸 반면, 수온, COD 및 색도가 음의 요인 적재값을 보였다. 이와 같은 수환경 요인의 2개 주성분 축에 대한 요인 적재값의 배열에 따라 측정된 수환경 요인들을 3개의 유형(types)으로 구분할 수 있었다.

이러한 3가지 유형은 수환경 요인과 수문 요인의 관련성에서 증가형, 감소형 및 중간형으로 나타났다. 먼저, 유량이 증가할 때 동일하게 증가하는 패턴을 보인 것은 수온($r = 0.703$, $p < 0.001$), 색도($r = 0.834$, $p < 0.001$) 및 COD($r = 0.606$, $p < 0.001$)가 해당하였고(Fig. 5A, F, H), 감소하는 유형에는 DO($r = 0.659$, $p < 0.001$), pH($r = 0.712$, $p < 0.001$)가 해당하였다(Fig. 5B, C). 또한, 연중 분포에서 유량이 증가할 때 중간 농도를 보이는 유형에는 전기전도도($r = 0.133$), 알칼리도($r = 0.025$) 및 염소 이온($r = 0.172$)이 해당하였고(Fig. 5D, E, G), 다른 요인에 비해 유량과 상관성이 크지 않았다($p = 0.001$).

주성분 축 I과 II(PC I과 PC II)에 대한 월별 주성분 점수(principal component scores)의 분석에서 팔당호 수환경의 월 변동 양상이 잘 요약되었다(Fig. 6B). 즉, 겨울철에 해당하는 12~4월의 성분 점수값들은 좌표상의 왼쪽에 배열하여 높은 pH와 DO 농도에 의해서 다른 계절과 구분되어지는 특성을 잘 반영하였고, 봄철과 가을철인 5~6월과 11월은 좌표 평면의 우측 상단부를 점유하여 이 시기에 팔당호 수중의 높은 전기전도도, 알칼리도 및 염소 이온 농도 특성을 잘 나타내었다. 여름철인 7~9월의 성분 점수값들은 좌표 평면의 우측 하단부에 위치하여 이 시기의 높은 유량 증가와 함께 나타나는 수온, 색도 및 COD의 증가 현상을 잘 설명하였다.

고 찰

1. 수문과 수환경 요인의 변동 특성

팔당호에서 수환경의 일 변동을 관찰한 결과 자연적 기후 요인과 유량 변동의 수문학적 요인 영향이 주요한 것으로 나타났다. 강수량은 수문 변동의 주된 근원이 되었고, 강수 빈도는 유량의 변동 폭을 좌우하는 직접적인 변수가 될 수 있었다(Winston and Criss, 2002). 우리나라는 북반구 중위도 온대 지역의 지리적 분포 영향이 우세하여 강수량이 봄철~가을철에 집중되어 있었고, 특히 여름철에는 계절성 기후 영향인 장마, 태풍 또는 집

중 호우로 인해 수량적으로 더욱 강한 편중 경향을 보이고 있었다(기상청, 1999~2001). 강수 구조는 춘·가을철에는 증발량이, 여름철에는 강우량이 각각 더 우세하고, 겨울철에는 그 차이가 크지 않음을 제시한 공 등(1996a)의 결과와 유사하였다. 봄철(3~5월)의 강수량은 1999년에 241.5 mm로서 가장 풍부하였고, 2001년에 38.0 mm로서 상대적으로 적었다. 겨울철의 강설량은 1999년(26.5 mm)보다 2000년(76.0 mm)과 2001년(61.5 mm)에 더욱 풍부하여 다소 차이가 있었다.

저수지의 유량은 강우 패턴에 거의 비례하였고, 그 반응은 일시에 나타났다(Winston and Criss, 2002). 유입량의 증가는 강우가 20 mm 이상일 때 현저하였고, 방류량은 유입량의 92%를 차지하여 대부분 유출되는 수문학적 구조를 갖고 있었다(공, 1992). 따라서, 팔당호는 강우-유출 현상이 거의 동시에 이루어져 유출율이 56.7%에 달하는 전형적인 하천형 저수지의 특성을 잘 반영하였다(공 등, 1996b). 유입량과 방류량의 급속한 증가는 폭우를 동반한 일 강수량이 크거나 강우 빈도가 빈번할 때 두드러진 현상이었고(박 등, 2002; Old et al., 2003), 이러한 현상은 1999~2001년 동안 최대 일 유량의 증감 변동에서 잘 나타났다. 또한, 연중 유량의 변동 차이가 큰 것은 하상 계수가 약 200 정도로 높은 것과 체류시간이 5.1일로 극히 짧은데서 기인함을 알 수 있었다(공 등, 1996b). 팔당호에서 체류시간은 3시간~23일 범위로서 겨울철에서 여름철로 갈수록 급격하게 감소하였는데, 이것은 저수지의 물 교환(flushing)이 그 만큼 활발하였기 때문이었다. 공 등(1996b)에 의하면, 물 교환율은 21년(1974~1994년)을 평균한 값에서 비강우기(1월)와 강우기(7월)에 각각 월 2회와 15회이었고, 총 유입량을 기준으로 추정된 연 교환율은 갈수년(1982, 1994년)과 풍수년(1990년)에 각각 11.2%(41회)와 38.4%(140회)에 해당하였다. 한편, 9월에 선행 강우가 크지 않음에도 불구하고 유량이 증가하는 것은 팔당호의 상류에 위치한 저수지의 수문 방류와 발전 방류량의 증가에 의한 영향이 반영되었기 때문이었다(공, 1992; 한국수력원자력 주식회사, 1999~2001; 한국수자원공사, 1999~2001).

팔당호의 수위 변동은 취수량을 포함하여 유입 및 유출량의 영향이 주요하게 작용하였다. 수위의 변동 폭은 계절적으로 여름철의 강수량이 풍부하고 유입·유출량이 빈번할 때 가장 컸다(공 등, 1996b). 또한, 7월에 일시적으로 급감한 것은 호우와 유입량 증가에 대비하여 인위적인 방류량의 증가로서 저수위를 낮춘 경우에 해당하였고, 2월과 11~12월에 수위가 낮은 것은 무강수일의 장기화에 의한 갈수기의 유입량이 감소된 영향이

켰기 때문이다. 수위는 저수 폭, 수표면적 및 저수용량을 변화시키는 주 인자에 해당하였고, 공 등 (1996b)은 저수지에서 수위의 일 변동을 보이는 것은 취수와 발전방류에 의한 유출과 상류에 위치한 댐의 방류 주기성에 의한 불규칙적인 유입의 영향으로 설명하였다. 특히, 여름철에 집중호우로 인한 수위의 상승은 연안대의 수생식물 분포 환경에 지대한 영향을 미칠 수 있는 것으로 볼 수 있었고, 많은 면적이 침수 환경으로 전환될 뿐만 아니라 유입량 증가에 따른 유속의 증가로 일시적인 생육 분포 및 환경에 교란을 제공하였다. 또한, 수위의 상승은 유입 하천수가 풍부한 남·북한강 유입량이 역류(back-water)현상을 통해 유입량이 상대적으로 적고 보다 오염된 경안천의 수질을 희석시킬 수 있는 가능성도 제시되고 있다(공 등, 1996b; 김 등, 2002b). 한편, 저수지에서 인위적인 수위 조절로 인해 순간적으로 저수위가 유지될 때, 상시적으로 부영양화된 정체성 수역의 경우 하천으로부터 유입량은 적으나 수층-저질층의 상호 작용이 원활하여 식물플랑크톤의 성장을 촉진시킬 뿐만 아니라 발생된 생물량의 농축을 야기할 수 있는 가능성도 제시될 수 있다. 이러한 현상은 여름철의 부유력 성향이 강한 남조류의 수화 시기에 더욱 현저하여 고밀도의 스컴을 형성하기도 한다(미발표 자료). 취수량은 겨울철보다 여름철에 월등히 많았고, 이는 물 소비량의 계절적 패턴에 따른 것으로 추정되었다. 발전 방류량은 방제 기간의 인위적 요인을 제외하고는 유입 유량과 수위 변동에 따라 그 양이 비례하였다. 결과적으로, 발전 방류량은 매년 수문 방류가 조작될 때 최대값을 보였고, 갈수기에는 유입량을 고려하여 하천유지용수 정도만 조절되었다.

저수지내에서 수환경의 주요 요인은 유입 하천의 합류부(CEZ)인 상류와 댐(DAM)의 하류 구간에서 큰 차이가 없었다. 이것은 하천에서 나타나는 일반적 특성과 유사하였고, 수체의 체류 시간과 관련성이 있을 것으로 보여진다. 수온의 일 변동은 다른 요인에 비해 가장 안정된 증감 양상을 보였다(한 등, 1993; 공 등, 1996a). 특히, 봄철~가을철동안의 불규칙적인 변동은 강우 시기와 장마 기간에 의한 영향이 현저하였고, 월 변동 폭을 결정하는 직접적인 변수가 될 수 있었다(공 등, 1996a; 박 등, 2002). 반면에, 겨울철에는 변동 폭이 적었는데 기후적 영향 뿐만 아니라 결빙되어 수체의 유동성이 감소한 요인도 작용하였을 것으로 보여진다. 또한, 저수지의 상·하류 구간 또는 유입부간에 수온의 근소한 수평적 차이를 보이는 것은 유량과 하폭이 다르고, 하류로 갈수록 수심이 깊어져 이에 따른 수체의 열용량의 차이로 볼 수가 있었다(공 등, 1996a; 김 등, 2002b). 팔당호에서

수온은 기온과 강수량의 직접적인 영향이 관찰되었고, 평균 수온으로 보면 중온성 수역에 해당하였다. 또한, 수온의 수직 구배가 뚜렷하지 않아 성층화, 밀도류의 존재 및 전도 현상은 미약한 것으로 추정되었다(공 등, 1996a; 공과 정, 1999).

DO는 수온의 증감 경향과 상반되었고, 수온과 유량 변동이 클 때 변동 폭이 더욱 컸다. DO의 평균 농도가 가장 작았던 것은 2000년 5~8월기간이었고, 이것은 동일한 시기를 비교할 때 1999년과 2001년에 비해 강수량과 유량이 크지 않았기 때문이며, 이후 8월 하순에 유량이 증가하면서 급격히 감소하였다. 한 등(1993)은 겨울철에 DO 상승은 갈수기에 식물플랑크톤의 활발한 광합성 영향으로, 여름철의 DO 감소는 수중 유기물의 왕성한 분해로 인한 산소 소비의 영향으로 해석하였다. pH의 변동은 전반적으로 매우 불규칙하였고, DO와 유사한 경향을 보였다. 그러나, 증감의 시기는 DO보다 다소 후행하는 경향이었고, 특히, 유량 변동이 큰 시기에 일 차이가 매우 큼이 뚜렷하였다(Winston and Criss, 2002). 월변동에서 여름철에 pH가 높은 것은 DO의 증가와 함께 식물플랑크톤의 광합성 영향으로 볼 수 있었으나(한 등, 1993; 김 등, 2002b), 일 변동에서는 그 영향이 미약하였다.

전기전도도는 봄철의 강우 시기와 정도에 따라 크게 증가하였고, 연중 최대 유량을 보이는 시기에 급감하여 가장 낮은 값을 기록하였다(Winston and Criss, 2002). 이와 더불어 겨울철에 결빙된 시기에 낮은 값을 보이기도 하였다(한 등, 1993). 동일하게 결빙된 조건에서 발전 방류량의 정도에 따라 농도 뿐만 아니라 변동 폭도 크게 변화되었다. 결빙 기간동안 발전 방류량이 적을 때는 전기전도도가 매우 낮았으나, 방류량이 많을 때는 농도가 큰 폭으로 상승하였다. 이것은 수체에 그만큼 유동성이 작용하여 유입 하천수가 이동 공급된 것으로 추정된다. 수중 알칼리도는 전기전도도와 유사한 경향을 보였고(박 등, 2002), 봄철의 초기 강우기에 증가한 후 우기의 홍수 발생을 제외하고는 다른 요인에 비해 비교적 유량에 대한 민감성이 다소 작았다. 또한, 유기물 오염의 지표가 되는 COD도 전기전도도의 증감과 관련성이 있었다(김 등, 2002b). 연중 초기 강우 시기와 갈수기에 발전 방류량이 많을 때 높은 농도를 보이는 유사성이 있는가 하면, 풍수기에 유입량이 많을 때 더욱 증가하는 비유사성도 관찰되었다. 이러한 비유사성은 유입량이 클 때, 탁수 입자에 흡착된 유기물의 양이 그만큼 풍부하였기 때문으로 보여진다.

2. 기초 수환경과 생태계에 대한 수문학적 영향

수환경에 대한 기후학적 영향 요인은 기온과 강수 패턴으로 구분할 수가 있었다. 기온은 수온을 변화시키게 될 뿐만 아니라 DO의 포화도를 결정할 수 있는 유도 인자에 해당한다. 반면에, 강수 현상은 유량의 증감과 직결되어 있었고, 수환경의 전반에 걸쳐 강한 영향력을 보였다. 그 예로서, 수중 방사환경과 열수지(공 등, 1996a)에 관련성이 컸을 뿐만 아니라 유량과 환경 요인간의 상관에서 우기 또는 그 직후인 7, 8 및 9월은 다른 시기와 뚜렷하게 구분되는 것을 지적할 수 있었다. 월별 수환경 요인의 평균값을 이용한 주성분 분석(PCA)에서 팔당호의 수환경은 유량의 변동에 따라 계절별로 비교적 큰 변동을 나타낸다는 것을 잘 알 수 있었다. 일반적으로, 하천형 저수지에서 수환경의 변화는 연중 강수 패턴과 유량의 변동에 의존하는 현상인 것으로 잘 알려져 있다(Ryding and Rast, 1989). 수환경 요인에 대한 수문학적 영향은 각 환경 요인의 계절적 변동을 좌우하였고, 그 양상은 크게 유량의 증가에 따른 증가형, 감소형 및 중간형의 3가지 유형으로 나눌 수 있었다. 환경 요인 중에서 수온, 탁도, 색도 및 유기물(COD) 요인은 증가형에, DO, pH는 감소형에 해당하였고, 중간형에는 전기전도도, 알칼리도 및 염소 이온 농도가 포함되었으며, 각 요인간에도 상호 관련성이 관찰되었다(한 등, 1993; 김 등, 2002b; Winston and Criss, 2002).

팔당호는 저수 면적에 비해 유역 면적이 매우 확장되어 있고, 다양한 오염원에 노출되어 있어 담수 후부터 점진적으로 부영양화가 진행되었다. 이것은 수질의 측면에서 오염도, 영양단계 평가 및 식물플랑크톤의 발생에서 잘 반영되고 있다(김과 김, 1990; 공, 1992; 한 등, 1993; 김 등, 1995; 한 등, 1995; 김, 1996; 공과 정, 1999; 박 등, 2000; 신 등, 2000; 홍, 2001; 김 등, 2002a; 김 등, 2002b). 이 중에서 식물플랑크톤의 발생 규모로 볼 때, 경안천 유입부에서 유입 수질의 오염도는 남·북한강보다 더욱 높게 나타나고 있다. 이러한 양상은 유역 환경 뿐만 아니라 수문 환경과 지형·구조적 차이에서 더욱 가중되는 것으로 볼 수 있었다. 남·북한강은 상류에 중·대형 저수지가 위치하고 있어 하천 유지 용수가 지속적으로 공급되므로 물의 유동성과 희석 효과가 기대될 수 있으나, 이와는 달리 경안천은 우기를 제외한 시기에 대부분 오염수가 유출되기 때문에 영양염의 농도 수준에서 크게 대조적이었다(공 등, 1996b; 신 등, 2000). 그 결과, 갈수기에 식물플랑크톤의 수량적 증가와 더불어 저수지 전체에 확산됨으로서 물 이용의 제한성을 장기화시킬

가능성이 크다. 또한, 경안천은 본류 하천에 비해 하폭이 좁고 만곡도가 심할 뿐만 아니라 유량이 상대적으로 매우 적어서 역류 현상이 야기되어 국지적으로 체류시간이 더욱 큰 데서도 수질 악화의 부가적 원인이 될 수 있었다(공 등, 1996b; 공과 정, 1999). 따라서, 경안천의 유량은 저수지의 전체 수위가 하강되거나 수문 방류 때 본류로 이동 공급되는 양이 많아질 것으로 추정되며, 이 시기가 길어지고 빈번할수록 하류의 수질이 더욱 악화될 수 있는 가능성이 높다.

한편, 하천형 저수지로 구분될 수 있는 팔당호의 저수 환경과 국내의 다른 저수 환경사이에는 다음과 같은 차이점을 가진다는 결론을 얻을 수 있었다. 호수형 저수지는 저수 수심, 폭 및 길이가 상대적으로 매우 크기 때문에 성층화와 밀도류를 포함한 상·하류 구간에서 수질의 이질적인 면이 다소 관찰되나, 하천형 저수지는 만곡부를 제외한 본류에서 그 차이가 크지 않았다(신 등, 1999; 신 등, 2003). 또한, 대하천(낙동강, 금강, 영산강)의 하구 저수지는 무엇보다도 유역에 대도시가 위치해 있어 점오염원의 규모가 큰 것이 팔당호와 뚜렷하게 비교되었고, 이것은 부영양화의 진행 속도와 관련성이 있을 것으로 보여진다(Ryding and Rast, 1989; Ryszkowski and Bartoszewicz, 1989).

적 요

본 연구는 하천형 저수지(팔당호)에서 강우·유량 패턴과 주요 수환경 요인과의 관련성을 파악하기 위해 1999년 1월부터 2001년 12월까지 일 모니터링 하였다. 수환경의 일 변동을 관찰한 결과 자연적 기후 요인과 유량 변동의 수문학적 요인 영향이 주요한 것으로 나타났다. 강수량은 수문 변동의 주된 근원이 되었고, 강수 빈도는 유량의 변동 폭을 좌우하는 직접적인 변수가 될 수 있었다. 강수량은 11~5월에 적었고, 6~10월에 풍부하여 대비가 되었으며 여름철과 가을철에 편중된 구조를 보였다. 유량은 7~9월사이에 변동 폭이 가장 컸고, 1~2월로 갈수록 변동이 거의 없었다. 주요 환경 요인에 대한 수문학적 영향은 각 요인의 계절적 변동을 좌우하였고, 그 양상은 크게 증가형, 감소형 및 중간형의 3가지 유형으로 나눌 수 있었다. 환경 요인 중에서 수온, 탁도, 색도 및 유기물(COD) 요인은 증가형에, DO, pH는 감소형에 해당하였다. 중간형에는 전기전도도, 알칼리도 및 염소 이온 농도가 포함되었으며, 각 요인간에도 상호 관련성이 관찰되었다. 육수학적 특성으로 볼 때, 호수형 저

수지의 특성과 다소 이질적인 하천형 저수지의 수환경 관리에 대해 수문학적 요인의 중요성이 제시될 수 있다.

인 용 문 헌

- 공동수, 윤일병, 류재근. 1996a. 팔당호의 방사환경 및 열수지, 한국육수학회지 **29**: 39-50.
- 공동수, 윤일병, 류재근. 1996b. 팔당호의 물수지 및 수문특성, 한국육수학회지 **29**: 51-64.
- 공동수, 정동일. 1999. 하천형 인공호(팔당호)의 수환경 특성 및 수질관리, 제6회 국제심포지움-21C 환경 현안과 변화, 경북대학교 환경과학연구소 논문집, pp. 41-83.
- 공동수. 1992. 팔당호의 육수생태학적 연구, 고려대학교 대학원 박사학위논문, 422pp.
- 공동수. 1995. 팔당호의 영양구조적 특성, 수질개선 시스템 개발에 관한 한·일 심포지움 논문집, 한국물환경학회, pp. 167-196.
- 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.
- 김범철, 허우명, 황길순, 김동섭, 최광순. 1995. 소양호에서 인의 존재 형태별 분포에 관하여, 한국육수학회지 **28**: 151-157.
- 김용재. 1996. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가, 한국육수학회지 **29**: 323-345.
- 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.
- 김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 한명수. 2003. 호소형 및 하천형 댐 호의 육수학적 특성과 조류발생과의 상관관계, 한국육수학회지 **36**: 124-138.
- 김좌관, 홍옥희. 1992. 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구, 한국환경과학회지 **1**: 49-57.
- 김준호, 조강현. 1996. 대형수생식물에 의한 상수원 수질의 개선: 팔당호의 연구 사례. 한·일 지방간 생태공학적 수질 개선공법에 관한 심포지움 논문집, 강원대학교 환경연구소, pp. 3-17.
- 박성배, 이상근, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기의 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향, 한국육수학회지 **35**: 160-171.
- 박해경, 정원화, 권오상, 류재근. 2000. 팔당호에서 남조류 및 남조류 생산 독성물질의 계절 변동, *Algae* **15**: 29-35.
- 신재기, 강창근, 황순진. 2003. 팔당호에서 수중 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포, 한국육수학회지 **36**: 257-268.
- 신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동, 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성, 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 이종남, 고병욱, 강응태. 1988. 팔당 상수원 보호 종합대책에 관한 연구 (8. 수리수문 편). 국립환경연구원 보고서 NIER **88-15-240**. pp. 351-470.
- 조강현, 박상규, 김준호. 1994. 팔당호 연안대에서 저토와 수체에 대한 대형수생식물의 반작용, 한국육수학회지 **27**: 59-67.
- 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.
- 홍성수. 2001. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구, 한양대학교 이학석사 학위논문, 62pp.
- An, K.G. 2000a. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean J. Limnol.* **33**: 213-221.
- An, K.G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of inflake phosphorus. *Korean J. Limnol.* **33**: 222-229.
- An, K.G. 2000c. The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology. *Korean J. Limnol.* **33**: 342-349.
- APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Cho, K.H. and J.H. Kim. 1994. Distribution of aquatic macrophytes in the littoral zone of Lake Paltangho, Korea. *Korean J. Ecol.* **17**: 435-442.
- Cole and Hannan. 1990. Dissolved oxygen dynamics. In: Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. eds. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. John Wiley & Sons, Inc. pp. 71-107.
- Criss, R.E., M.L. Davison and J.W. Kopp. 2001. Nonpoint sources in the lower Missouri River. *J. AWWA* **93**: 112-122.
- 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.

- Kalff, J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592pp.
- Kennedy, R.H. and W.W. Walker. 1990. Reservoir nutrient dynamics. In: Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. eds. *Reservoir Limnology-Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 109-131.
- Kim, B., K. Choi, C.G. Kim, U.H. Lee and Y.H. Kim. 2000. Effect of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* **43**: 3495-3504.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristic of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean J. Limnol.* **30**(supplement): 524-535.
- 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).
- Parks, S.J. and L.A. Baker. 1997. Sources and transport of organic carbon in an Arizona River-Reservoir System. *Water Research* **31**: 1751-1759.
- Ryding, S.O. and W. Rast. 1989. *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. Man and Biosphere Series. UNESCO, Parthenon Publishing Group.
- Ryszkowski, L. and A. Bartoszewicz. 1989. Impact of agricultural landscape structure on cycling of inorganic nutrients. In: Clarholm, W.M. and L. Bergstrom. eds., *Ecology of Arable Land*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 241-246.
- SPSS Inc. 1999. *SPSS Base 10.0 User's Guide*. Chicago, IL, USA.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. *Reservoir Limnology-Ecological Perspectives*. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 246pp.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006pp.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. *Limnological Analyses*. 2nd ed. Springer-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.

(Manuscript received 10 July 2003,
Revision accepted 25 August 2003)