

## 충주호의 환경특성에 관한연구

사성오 · 정영도 · 김학성\*\*  
한국 수자원공사 · 한국 원자력연구소\* · 충북대학교 환경공학과\*\*

### The Study on Environmental Characteristics of Chungju Reservoir

Sonug-Oh Sa · Young-Do Jeoung\* · Hag-Seong Kim\*\*  
Korea Water Resources Corporation, Korea Atomic Research Center\*  
Dept. of Environmental Eng., Chungbuk Nat'l Univ.\*\*

#### Abstract

Chungju reservoir is a multipurpose dam lake located at the upstream of Nm Han river and known as having the biggest watershed and the second water volume in Korea. Conclusions are made as follows.

1. Environmental characteristics of the reservoir appear to be as follows. Chungju reservoir has long hydraulic retention time, 60-160 days. Water column has oxygen depletion zone in hypolimnion. Chungju reservoir is found to be in the midst of eutrophication. Chlorophyll-a and other physical parameters are found to be significantly dependent.
2. Nitrogen to phosphorus ratio was 50-350 for the water samples taken from the reservoir in 1996. It is very important clue for water quality management in relation to phytoplankton growing kinetics. Variations in chlorophyll-a contents appear to be related closely to total phosphorus concentration.

**Key words** : Oxygen depletion zone, Chlorophyll-a, Chungju reservoir

#### I. 서론

다목적댐 인공호는 현재 상수원수, 농공용수 등 각종 용수를 공급하는 이수부문과 홍수조절의 치수부문 그리고, 전력생산등 에너지 생산부문을 담당하고 있으며, 장래 수자원의 중심적 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다<sup>1)</sup>.

그러나, 최근들어 가두리 양식장, 축산폐수, 각종 도시 오하수 등으로 인해 오염발생량이 증가됨에 따라 댐이 보유한 호수의 생태계와 수질에 많은 수질환경 문제를 야기하고 있다. 다목적댐 호수의 주요 수질오염 문제는 첫째, 부영양화 현상

과 그로 인해 야기되는 수질오염 둘째, 독성물질에 의한 오염, 셋째, 폐기물로 인한 오염이 있는데, 수계의 상류에 위치한 대부분의 다목적댐 인공호수들은 부영양화로 인한 오염문제가 심각한 실정이다.<sup>2)</sup>

부영양화가 심각하게 된 원인으로는 첫째, 호수의 가장 중요한 생태특성인 유역특성과 수체특성 때문이다. 유역특성은 유역의 기상학적, 지리사회적 여건에 의해 결정되며, 수체 특성은 수리수문과 같은 물리적 특성과 생물학적, 환경화학적 특징으로 구성된다. 이는 호수가 하천의 상류에 위치하여 주로 미개발지역이고, 수체가 반폐쇄성 수

역이기 때문이다.<sup>3)</sup> 둘째, 호수는 하천에 비해 저수 용량이 크고, 유역면적이 넓어 비점오염원으로 인해 발생하는 오염물질 부하가 많고, 강우가 홍수 시 집중되기 때문에 홍수유출율이 높아져 발생된 오염물질이 일시에 호수수체로 유입되기 때문이다.<sup>3)</sup> 셋째, 호수의 자정작용은 하천, 하구 등과는 달리 성층시에는 침강에 의해, 늦가을과 봄사이에는 전도현상에 의해 이뤄지는데 유입되거나, 호수 수체에서 생산된 유기물질량에 비해 방류 등 유출되는 양이 적어 오염물질이 축적되고 저층에서 분해되어 식물플랑크톤이 이용하는 무기영양물질이 되므로 호수의 생산성이 더욱 커져 결국 호수 저층으로부터 산소고갈현상 등이 심화되는 부영양화 현상이 급속히 진행되게 되기 때문이다.

부영양화는 크기가 미세하고 세포구조가 단순한 수중식물인 식물플랑크톤이 햇빛과 영양물질, 온도에 영향을 받아 물의이용에 방해가 될 정도로 과잉성장하여 수질오염을 유발하고, 호수 저층의 산소를 고갈시키는 현상이 시간에 따라 반복하여 진행되는 현상으로 정의된다.<sup>4,5,6)</sup> 식물플랑크톤 과잉성장의 원인은 자연적인 요소 외에 인구의 도시화와 토지 개발 등으로 점오염과 비점오염원에서 발생하는 질소, 인 등 식물플랑크톤이 이용하는 무기영양물질이 다량으로 유입되기 때문이다.

본 연구의 목적은 우리나라 인공호수 중 유역면적이 가장 크고 수체의 저장능력이 두 번째로 크며 한강수계의 주요 용수공급원인 충주호를 연구대상 호수로 선정하여 환경조사를 통하여 대상 호수가 지닌 환경특성을 규명하고자 하였다.

## II. 실험방법

### 1. 충주호의 현황

충주댐은 1985년 12월에 완공된 다목적 댐으로 우리나라 다목적댐 중에서 가장 넓은 유역면적인 6,648 km<sup>2</sup>를 갖고 있으며, 총저수량 27억 5천만 m<sup>3</sup>이고, 한강수계의 홍수조절, 용수조절, 용수공급, 전력공급, 하천 유지용수의 공급, 또한 관광자원으로서의 역할까지 담당하고 있다. 규모는 높이 97.5 m, 길이 447 m, 체적 902,000 m<sup>3</sup>인 국내최대의 콘

크리트 중력식 댐으로서 남한강상류, 충주시 북동쪽 약 9 km 지점에 위치하며, 본댐 하류 19 km 지점의 충주시 가금면 장천리와 금가면 월상리를 연결하는 높이 21 m, 길이 480.7 m, 수문 20개의 조정지댐을 갖추고 있다.<sup>7)</sup>

남한강은 강원도 평창군 진부면 오대산에서 발원하여 유역면적은 약 12,514 km<sup>2</sup>, 유로연장은 375 km에 달하는 대하천으로서 서울 동쪽 약 20 km 지점에서 북한강과 합류하여 한강의 본류를 형성한다.

### 2. 실험방법 및 범위

연구대상호수는 우리나라에서 유역면적이 가장 넓고, 저수용량이 두 번째로 크며, 다목적댐 호수의 형태특성인 나무가지 모양을 주요 특징으로 하는<sup>8)</sup> 충주호를 선정하였으며, 호수로 유입되는 상류하천은 본류인 남한강과 지류인 제천천에서만 유입되는 것으로 가정하였으며, 시료채취지점은 6 지점으로서 장혜(Jangheu), 청평(Chungpung), 왕강(Whanggang), 제천천(Jechun stream), 탄구리

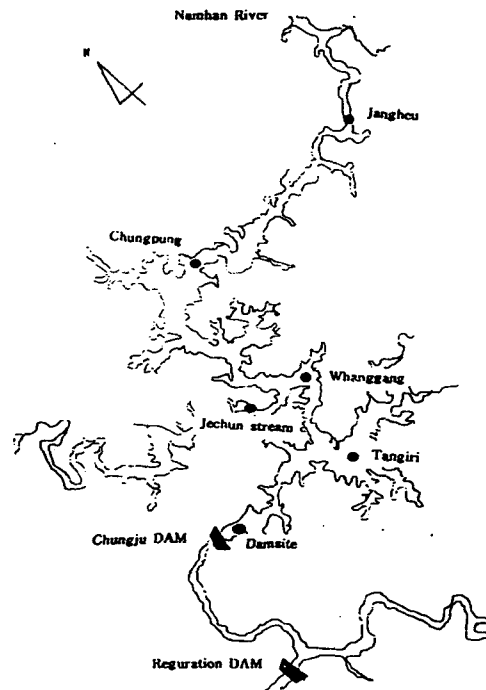


Fig. 1. Basin and sampling site in Chungju reservoir.

(Tanggiri), 댐(Dam site)이며, Fig. 1.에 나타내었다. 대상호수의 환경특성에 대해 규명하고자 대상호수를 물리적특성과 생물화학적 특성으로 구분하였다. 물리적 특성은 수문기상특성, 유역 오염발생원별 부하량 비교, 호수수체의 담수이후 체류시간 변동, 대상수체의 수체칼럼에 있어서 용존산소와 수온의 분포특성, 유입부하를 의미하는 유입량과 chlorophyll-a농도의 시간 변화에 따른 상관경향, 충주호의 환경화학적 특성을 알아보기 위한 대형인공호의 전기전도도 실측결과를 비교 분석하였다. 생물화학적 특성은 대상수체의 식물플랑크톤의 증식에 대한 제한영양물질을 규명하기 위한 월별수체내 질소와 인의 비율을 조사하였고, 수체내 총인의 농도와 chlorophyll-a농도의 월별 상관경향에 대해 조사하였다. 대상수체의 용존산소 및 수온의 측정은 YSI-6820으로 하였으며, chlorophyll-a, 질소, 인의 측정은 standard method에 의하여 분석을 하였다<sup>9)</sup>. 충주호의 강우량, 풍속, 일사량 등 기상현황은 기상청에서 발행하는 기상월보를 이용하였다<sup>10)</sup>. 충주호에 유입되는 오염부하량에 관련된 자료는 한국수자원공사 수질환경연감의 자료를 이용하였다<sup>11)</sup>.

### III. 실험결과

#### 1. 물리적특성

충주호의 수문학적 특성으로 연간 강우량을 보면 Fig. 2.에 나타낸 바와 같이 1991년 이후 9월

사이에 강우가 집중되고 있으며, 이에 따라 유입량과 방류량이 큰 폭으로 증감되는 것을 알 수 있다. 특이한 점으로는 봄철과 가을철의 수위가 년 평균보다 비교적 높게 유지되고 있다. 이것은 봄철에는 기온이 올라가면서 겨울동안 유역에 내린 눈 등의 해빙으로 인한 영향으로 보이며, 이때 하천으로 흐르는 물에서의 탁도와 영양염류의 농도가 높게 되어, 호수와 하천이 접하는 수역의 봄철 녹조의 원인이 되는 것으로 추정된다. 이는 강우의 특성에 따른 인과 질소의 토양 유출특성을 보면 알 수 있는데, 질소와는 달리 인산염의 경우 진흙이 5%이상 존재하는 흙입자의 분자구조에 전기적으로 안정되게 결합되어 있다. 이것이 해빙으로 인해 호수유역의 토양용집력이 약해져 토사와 함께 하천으로 유입되기 때문인 것으로 사료된다.<sup>12)</sup> 대청호 상류유역의 토양과 유출특성을 연구한 보고서에 의하면 강우의 토양내 인 용출능력은 약 20-25%, 질소 용출능력은 약 7%가 되어 강우로 인한 비 점오염원의 오염물질 유출이 상당할 것으로 사료된다.<sup>13)</sup>

Fig. 3.에서 1996년의 월별 기상현황을 보면 7월과 8월에 최고 기온이 25℃ 이상을 나타내고 있으며, 1월, 2월, 12월에는 0℃ 이하를 나타내는 날이 많았다. 4월은 기온이 최저 15℃ 이상까지 올라가는 날이 많았고, 11월에도 평균 5℃ 이상의 기온을 유지하고 있다. 기온은 대기에서 수체로 용존산소의 재포기와 식물플랑크톤의 증식에 영향을 주는 주된 요인인 수온에 절대적인 영향을 미치게 될 것으로 사료된다.<sup>14)</sup>

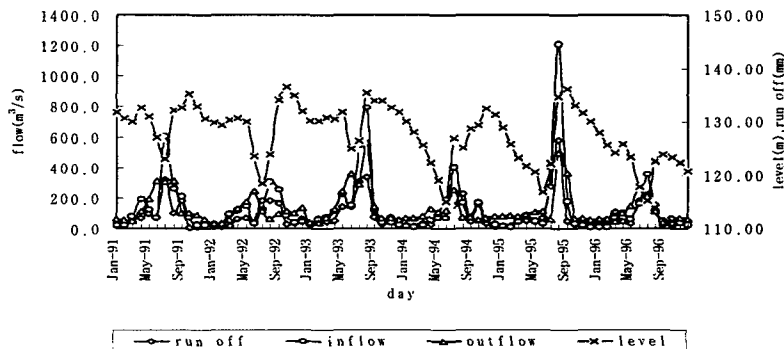


Fig. 2. Comparison of water level and flow in Chungju reservoir in 1996.

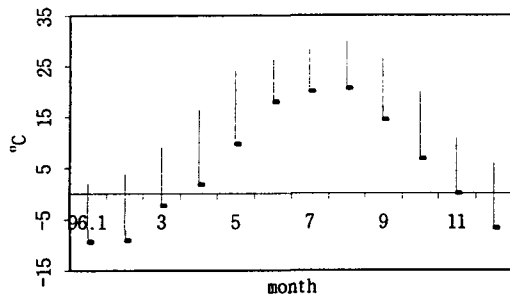


Fig. 3. Monthly air temperature in Chungju reservoir in 1996.

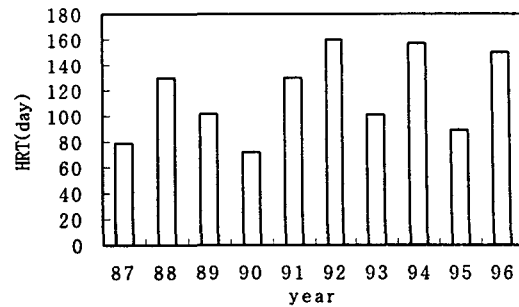


Fig. 4. Hydraulic retention time variation in Chungju reservoir during 1987-1996

Table 1. Waste load ratio from watershed to Chungju reservoir during 1996.

Notation	BOD(%)	SS(%)	T-N(%)	T-P(%)
Population	24,270(45.4)	25,899(40.9)	3,231(26.5)	679(39.1)
Live stock	6,063(11.4)	2,990(4.7)	950(7.8)	175(10.1)
Land use	13,226(24.8)	19,977(31.6)	5,030(41.3)	204(11.7)
Industry	3,695(6.9)	3,695(5.8)	2,217(18.2)	296(17.0)
Fish nursery	6,163(11.5)	10,749(17.0)	754(6.2)	385(22.1)
Sum	53,416(100)	63,310(100)	12,182(100)	1,739(100)

충주호는 다목적댐 저수지 중 가장 넓은 유역 면적을 갖고 있는데 Table 1.에서 보면 유기물의 발생 부하비는 인구에 의한 비가 45.4%, 총인의 배출은 인구에 의한 비가 39.1%인 것으로 나타났다. 가두리 양식장은 인구 다음으로 높은 총인 배출비를 보였는데 인구에 의한 부하가 하수처리장, 자연에 의한 흡수 및 정화에 의해 자정된다고 볼 때 부영양화의 관점에서 보면 호수 수환경에 미치는 영향이 큰 것으로 사료된다.

체류시간은 호수가 하천과는 다른 수환경특성을 나타내게 하는 주요 물리적 인자이다. Fig. 4.와 같이 충주호의 수리학적 체류시간은 담수된 1986년 이후 60일에서 160일이었으며, 이는 유역에 내린 연간 강우량에 의해 결정되는 때문으로 호수에 미치는 수질영향은 유입량, 방류량, 호수 수위의 변화, 강우 강도등과 함께 다양하게 나타났지만 체류시간의 길이가 최소 연간 60일 이상인 점을 고려하면 하천과는 다른 수환경이 조성

되어 식물플랑크톤의 증식에 의한 수질영향이 클 것으로 사료된다. 반면에 물리적 특성인 호수내 유체의 흐름이 클 경우 이송량과 흐름특성에 의한 영향도 클 것으로 사료되며, 이관계를 Fig. 5.에 나타내었다. 유입부하를 의미하는 유입량과 호수내 chlorophyll-a의 농도를 시간변화에 따른 상관관계를 조사한 것이다. 연구결과는 유입량의 변동이 클 경우, 유입량과 chlorophyll-a의 농도가 더욱 상관관향이 큰 것으로 나타났다.

충주호, 소양호, 대청호, 안동호, 합천호, 주안호의 전기전도도를 Fig. 6.에 나타내었다. Fig. 6.에서 보는 바와 같이 다목적댐 인공호수 중 가장 높은 값을 연간 나타내고 있으며, 원인으로는 상류 유역의 지리학적 특성인 석회암지대가 발달하여 Ca의 하천유출이 많기 때문으로 사료된다.<sup>14)</sup> 이 특성은 호수 수체 칼럼의 침강특성등 물리조건과 물질의 반응조건에 영향을 미치는 환경화학적 변이에 영향을 주는 특성인 것으로 사료된다.

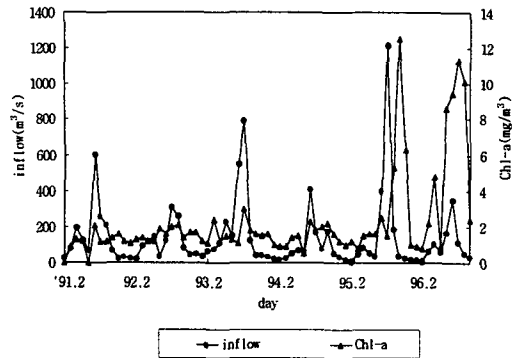


Fig. 5. Comparison of inflow and chlorophyll-a in Chungju reservoir during 1991-1996.

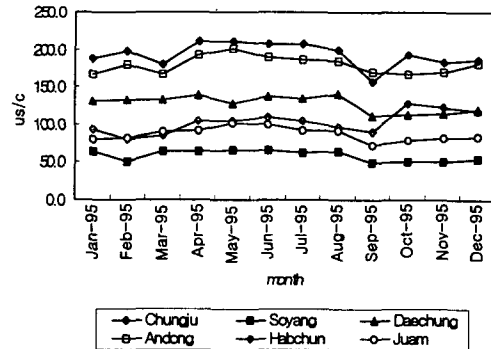


Fig. 6. Comparison of conductivity in multi-purpose dam reservoir in 1995.

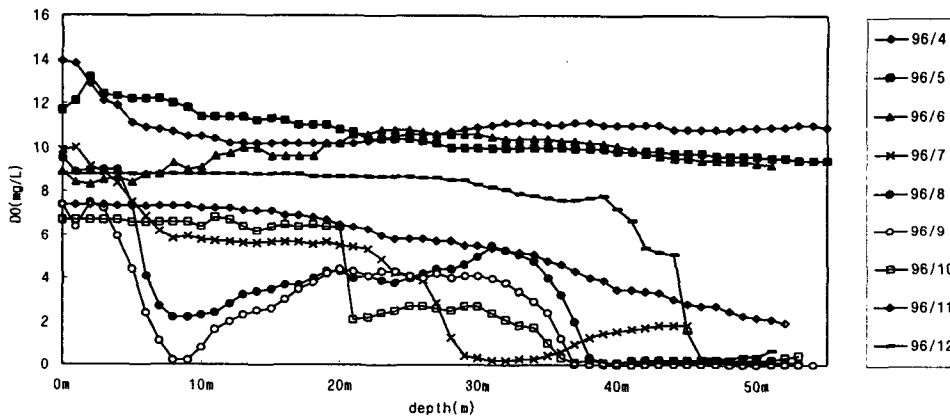


Fig. 7. Variation of dissolved oxygen concentration in Chungju reservoir in 1996.

충주호의 용존산소 연직분포를 Fig. 7.에 나타내었다. Fig. 7.에서 보듯이 겨울철 년 1회 장기간에 걸쳐 전도현상이 유지되는 것을 볼 수 있으며 여름철에는 저층의 무산소 상태가 장기간 깊은 수심까지 약 10m 정도 나타나는 것을 볼 수 있다. 9월의 경우 표층은 수심 10m 가량에서 형성되었으며 수심이 10m를 넘어서면서 용존산소 농도의 감소 경향이 급격해지고 용존산소농도가 거의 발견되지 않는 무산소층이 발견되었다. 이는 소위 전이층 산소최저점이라 불리는데 표층수의 유기물이 침강하다가 전이층 부근에서 밀도가 높은 수층을 만나 침강속도가 저하되어 유기물의 농도가 국부적으로 증가하는데 기인하는 현상이다.<sup>14)</sup>

부영양화가 상당히 진행된 호수의 특징으로 심

층의 무산소층 형성이 중요한 지표로 보고되고 있는데<sup>6)</sup>, 이는 수체갈림의 유기물 생산성과 저니층의 산소요구량이 수체의 용존산소를 고갈시킬 수 있는 정도로 충분하다는 것을 의미하기 때문이다.

Fig. 8.은 1996년 충주호 수체의 수온분포를 나타내고 있다 월별 수온은 6월 이후 뚜렷한 온도성층화가 진행된 것을 볼 수 있다. Fig. 7.에서 조사된 용존산소와의 분포와 비교해 보면 온도성층이 뚜렷해진 한달 경과 후 수체내에서 용존산소의 소모가 수심 15m 지점 이하 수층에서 진행되고 있음을 볼 수 있다. 위의 결과에서 특이한 점은 11월과 12월에도 성층이 완전소멸되지 않고 있음을 볼 수 있다.

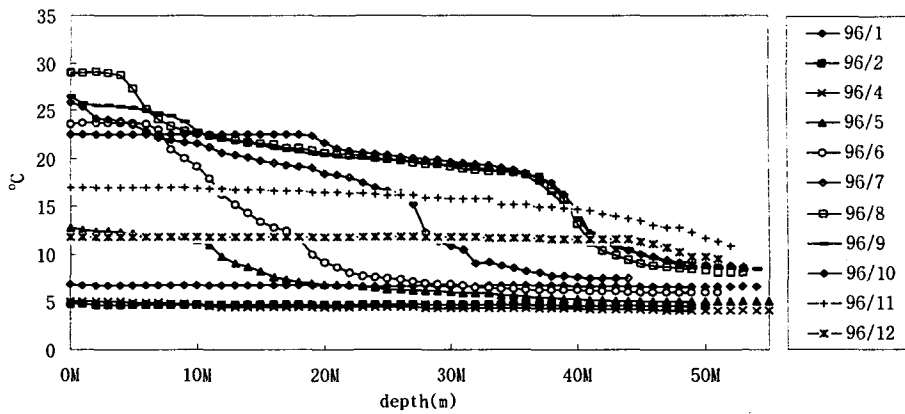


Fig.8. Variation of water column temperature in Chungju reservoir in 1996.

Table 2. Inflow of upstream in Chungju reservoir.

Location	Inflow (m <sup>3</sup> /s)	day	Inflow (m <sup>3</sup> /s)	day	Inflow (m <sup>3</sup> /s)	day	Inflow (m <sup>3</sup> /s)	day
Nam Han River	13.3	1	11.2	76	44.6	84	67.1	89
	57.1	96	99.8	108	88.9	115	104	121
	106.5	127	61.1	136	130.5	169	163.8	203
	351.3	213	116.2	219	50.7	239	51.3	246
	44.6	255	35.2	269	27.1	309	54.6	319
	25.0	365						
Jechun stream	0.9	1	1.3	76	8.7	84	6.0	89
	15.5	96	5.9	108	12.4	115	6.5	121
	9.8	127	5.8	136	2.8	169	22.6	203
	48.6	213	14.1	219	4.7	239	20.9	246
	5.9	255	3.2	269	2.5	309	5.0	319
	2.3	365						

2. 생물화학적 특성

식물플랑크톤의 영양제한 물질인 인과 질소는 식물플랑크톤의 생체내 구성요소로서 성장제한요인이다. Fig. 9에서 보면, 1996년의 수체내 NP 비는 충주호 4개 조사 지점에서 최소 50에서 최대 350까지 분포됨을 알 수 있으며, Thodmann은 NP 비가 10 이상일 경우 인이 제한인자가 된다고 연구보고에 따르면<sup>5)</sup>, 충주호 수체는 인농도가 식물플랑크톤 성장의 영양제한 물질임을 추정할수 있다. Table 2.와 Fig. 9.에서 보는 바와 같이 유입량이 현저히 감소된 9월에서 11월 사이에는 NP 비가 각지점에서 더욱 커짐을 볼수 있었고, 남한

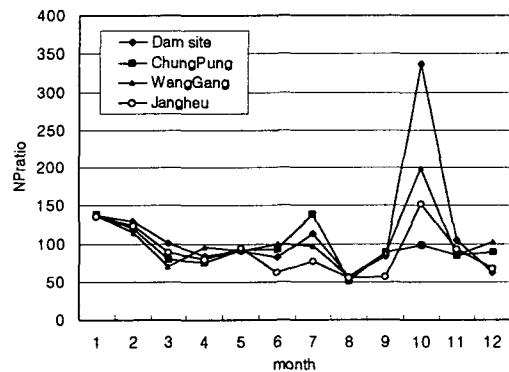


Fig. 9. Comparision of NP ratio at Chungju reservoir sampling site in 1996.

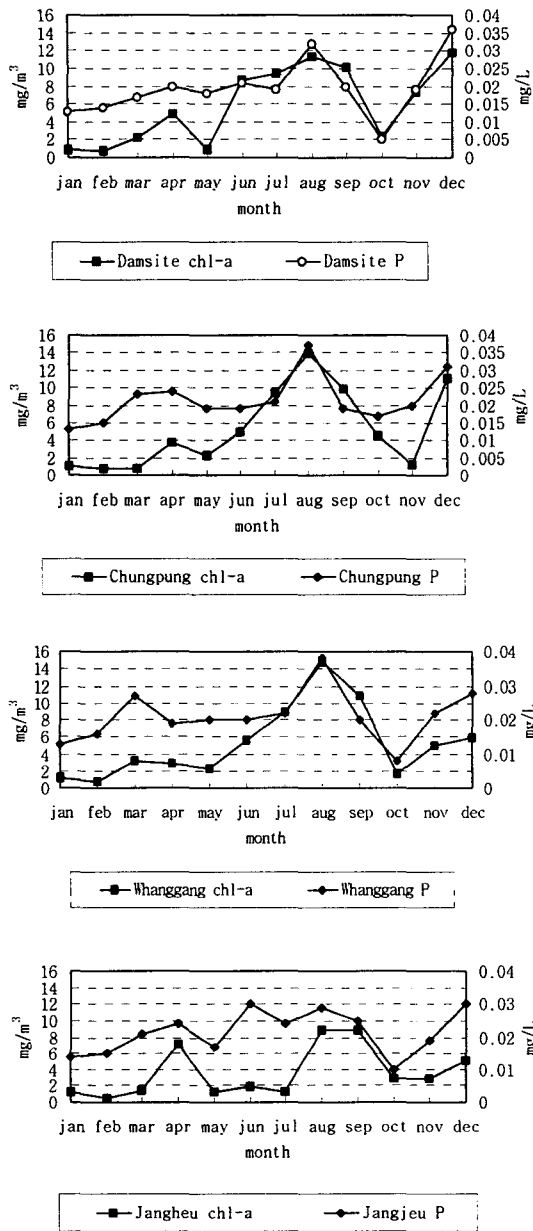


Fig. 10. Comparison of phosphorus and chlorophyll-a in Chungju reservoir sampling site in 1996.

강 유입지점인 장희지지점보다 하류인 댐지점에서 NP 비가 크게 나타났는데 이는 기간중 호수로 유입된 인성분이 하류로 이송되면서 침강물질에 의한 부착특성으로 인해 수체칼럼에서 침강된 때문

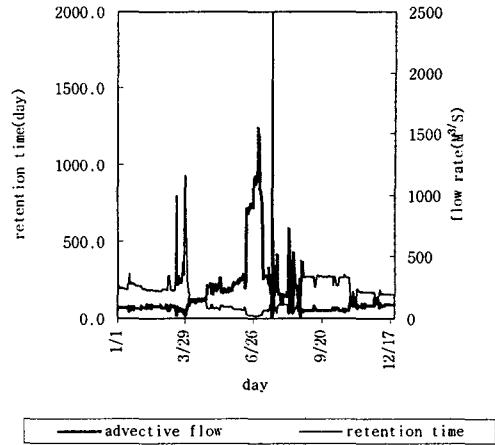


Fig. 11. Comparison between retention time and advective flow in Chungju reservoir in 1996.

으로 사료된다.<sup>15)</sup>

Fig. 10.은 수질조사 지점의 chlorophyll-a와 총인농도와의 연중 경향을 고찰할 것인데 총인 농도는 년중 0.005 mg/L까지 분포하였으며, 총인 농도의 변동과 chlorophyll-a 농도변화가 년중 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있는데, Fig. 11.과 비교해보면 수체이송량의 변화와 수질항목간의 변화사이에 뚜렷한 상관경향이 있음을 알 수 있었다. 이송량이 증가하는 6월부터 수질항목의 농도가 증가되었고, 감소되는 9월 이후부터 총인 농도와 chlorophyll-a 농도가 현저히 낮아지는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 과

본 연구는 충주호의 물리적 특성과 생물학적 특성을 규명하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 호수유입량과 chlorophyll-a의 상관관계가 높게 나타났으며 이는 유입량이 증가함에 따라 호수에 투여되는 오염물질의 부하량도 증가한다는 것을 뜻한다.
2. 충주호의 전기전도도값이 다른지역의 댐보다

도 높게 나타나고 있으며, 이것은 상류지역의 석회암 지역에서 용출된 Ca의 영향으로 사료되며 이로 인해 수체의 침강특성 등 물리조건이 영향을 받을 것으로 사료된다.

3. 전이층 산소최저점이 수심 10m지점에서 나타났으며, 전이현상이 장기간에 걸쳐 년 1회 겨울철에 일어났다.
4. 충주호의 NP 비는 최소50에서 350까지로 조사 되었으며 이것은 충주호의 부영양화 제한 인자가 P임을 나타낸다.
5. 총인의 농도변화와 chlorophyll-a의 농도변화가 년 중 비슷한 경향을 띄고 있으며, 수체이송량과 수질함몰 간의 상관관계가 높게 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. 한국수자원공사: 미래 수자원전망에 관한 연구, 한국수자원공사, 1997.
2. 김범철, 박주현, 황길순, 최광순: 우리나라 호소의 부영양화 현황, 호소의 부영양화 방지대책에 관한 한일세미나, 39-42, 1996.
3. 조규송, 강인규, 권오길, 김범철, 나규환, 안태혁, 이종범, 이찬기, 이해금, 진상호, 최준길: 호수환경조사법, 동화기술, 365, 1991.
4. 이시진, 윤세의, 박석순: 수질모델과 관리, 동화기술, 1993.
5. Rovert V.T., J.A. Mueller: Principles of surface water quality modeling and control, Haepcollins Publishers Inc, 1987.
6. S.E. Jorgensen: Fundamentals of ecological modelling, Elsevier, 1994.
7. 한국수자원공사: 1996년 충주댐 관리연보, 한국수자원공사, 1996.
8. 김자관, 홍옥희: 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구, 한국환경과학회지, 1(2), 49-57, 1992.
9. APHA, WEF, AWWA: Standard methods APHA, 1992.
10. Gaydy A.F., E.T. Gaudy: Microbiology for environmental scientists and engineers, McGraw-Hill, 736, 1980.
11. 한국수자원공사: 다목적댐 수문자료집, 1996.
12. 홍선관: 생태학적 모델을 이용한 호수의 부영양화 평가에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 1991.
13. 한국수자원공사: 댐유역 오염물질 유입특성 및 영향에 관한 연구, 1996.
14. Wetzel G: Limology, Saunders College Pub., 1983.
15. 최영길, 한명수, 안태영: 담수의 부영양화, 신평문화사, 1995.