

증산간 농업용 만운저수지의 수질환경특성

남귀숙* · 장정렬 · 이광식 · 윤경섭 · 이상준¹⁾

농업기반공사 농어촌연구원, ¹⁾부산대학교 미생물학과
(2002년 11월 29일 접수, 2003년 1월 13일 수리)

Characteristics of Water Environment on Manun Reservoir

Gui-Sook Nam*, Jeong-Ryeol Jang, Gwang-Sik Lee, Keung-Sup Yoon and Sang-Joon Lee¹⁾ (Rural Research Institute, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Ansan 425-170, Korea, ¹⁾Dept. of Microbiology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)

ABSTRACT : Manun Reservoir, located in Andong district, has the capacity of 2 million tons in irrigation water supply with the drainage area of 23.8 km². Manun Reservoir is over fifty year old, and shallow in depth. The ratio of drainage area (DA) to reservoir surface area (SA) as an effective physical parameter on water quality was 56.1 and was higher than those of other agricultural reservoirs. The ratio of reservoir storage (ST) to SA in Manun Reservoir was 4.79, and the mean depth was below 8 m. Both ratios of DS/SA, total area (TA)/ST and ST/SA in Manun Reservoir were relatively higher than those in other agricultural reservoir and natural lakes in Korea. These physical parameters in Manun Reservoir, however, had a eutropic potential significance. Average of COD, TN, and TP in Manun Reservoir were 11.1 mg/L, 1.426 mg/L, 0.093 mg/L, respectively. In the inflow stream of Manun Reservoir, the TN (1.426~3.809 mg/L) was higher than those in reservoir. Only *Lyngbya* spp. was dominant in phytoplankton for this study period, and *Gymnodinium* spp., *Peridinium* spp., and *Cryptomonas* spp. were dominant in zooplankton. According to the Carlson's trophic status index, Manun Reservoir was eutrophic in 1996, 1997, and 1999, and hypertrophic in 1998.

Key words: Manun Reservoir, physical parameter, water quality, trophic status index.

서론

우리나라는 기후특성상 연간 강수량이 1,274 mm로 세계 평균강수량 973 mm보다 1.3배가 많으나 6~9월 사이에 평균 강수량이 822 mm로써 연강수량의 65%가 집중되어있고, 유역 특성상 유역면적이 작고 유로연장이 짧으며, 산지가 많아 경사가 급한 까닭에 하천유량이 불안정하여 갈수기에는 하천유수량 부족으로 용수 공급에 어려움을 겪고 홍수기에는 물이 넘쳐서 수해가 발생하기도 하는 기후조건을 갖고 있다¹⁾. 우리나라의 수자원총량은 연간 1,276억톤으로 이중 43%인 545억 m³은 증발되고, 31%(400억 m³)는 바다로 유실되고, 연간 이용가능한 담수자원총량은 전체의 26%인 331억톤으로 하천수가 161억톤, 댐용수 133억톤, 지하수 37억톤으로 구성되어 있다²⁾. 수자원이용현황은 농업용수가 158억 m³으로 전체 48%, 생활용수가 73억 m³(22%), 하천유지용수가 71억 m³(21%),

공업용수 28억 m³(9%) 순으로 이용되고 있으며³⁾, 이중 농업용수는 농업의 사양화에 따른 경지면적의 감소로 절대적 수요는 계속 감소하나, 관개시설의 확충에 따라 단위용수량은 증가할 것이며, 또한 하천유지용수는 환경개선육구, 생태계보존, 친수환경조성등의 영향으로 증대될 것이다³⁾. 그러나 70년대 이후 농촌지역의 도시화와 산업화에 따른 생활하수 및 공장 폐수의 발생량 증가, 생활폐기물의 투기, 축산시설의 증가, 각종 위락시설의 증설, 농어민 소득향상을 위한 농공단지 조성, 농촌취락의 하수종말처리 및 분뇨처리 등 환경기초시설의 미비 등에 의하여 농촌 수질환경의 오염이 심화되고 있으며, 과학기술의 발달에 따른 오염물질의 다양화는 오염을 가중시키는 원인이 되고 있다⁴⁾. 농촌환경의 하천수질에 영향을 주는 요인은 적절하게 처리되지 않은 축산오수와 가축분, 그리고 농경지의 토양유실에 따른 영양염류의 수계유입이라고 볼 수 있다³⁾. 현재 농림부와 농업기반공사에서는 농업용수 수질관리를 위해 전국 농업용 저수지와 담수호 18,000개소에 대해 2년마다 일제조사(육안조사)를 실시하여 기초자료를 확보한 후 500지점을 선정하여 수질시료를 채취하여 수질현황을 파악하

*연락처:

Tel: +82-31-400-1838 Fax: +82-31-400-1889
E-mail: leo612@karico.co.kr

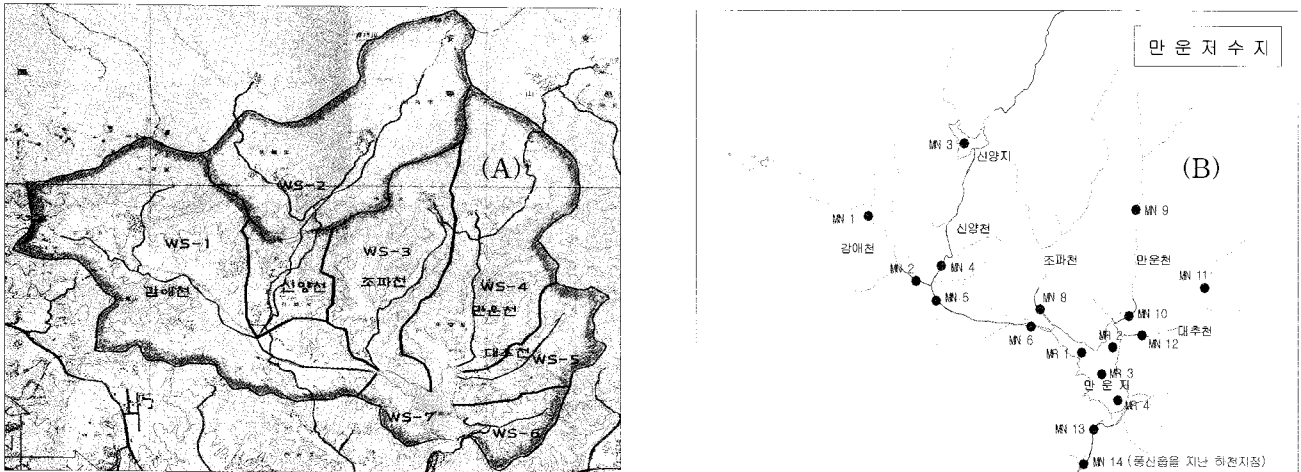


Fig. 1. Map showing the watershed (left) and sampling site (right) of Manun Reservoir.

고 있으며, 수질오염이 우려되는 저수지나 담수호 등 주요 농업용수원에 대해 수질측정망을 설치하여 연 2회 정기적인 수질조사를 실시하여 오염추이도를 평가, 분석하여 대책수립 및 수질관리 기초자료를 축적하고 있다⁹⁾. 본 연구대상지인 경북 안동의 만운저수지 역시 수질 측정망지구로 1996년부터 연 2회의 정기적인 수질조사가 이루어지고 있는 지구로서, 수질오염이 심화되어 1999년 저수지의 수질개선 대책마련 및 관리를 위해 수질환경특성조사를 실시하였으며, 유사한 농업용 저수지의 수질특성이해에 중요한 자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

조사지 개황

경북 안동시 풍산읍 만운리에 위치하는 만운저수지는 1959년에 축조된 유역면적 2,370 ha, 저수량 2.01×10⁶ m³의 중규모

농업용저수지로서, 북고남저형의 유역으로 북쪽은 해발 643 m의 보문산을 분수령으로 500~600 m 내외의 소백산맥의 준령에 둘러싸여 있고 남쪽으로 낮아지며 하천과 저수지를 형성하는 가지형에 가까운 저수지형 호소이다. 유역의 대부분이 임야와 농경지로 구성되어 있고, 중상류부의 경사가 급한 전형적인 중산간 농업용저수지로서 신앙저수지를 보조수원으로 하는 신앙천과 현가리(玄佳里) 감에마을에서 발원한 감에천이 합류된 신앙천과 서현리를 유역으로 하는 조파천이 유입되고 있는 저수지 좌안과 비교적 급경사의 산지를 유역으로 하는 만운천과 대추천이 유입되는 저수지 우안의 수계로 구성되어 저수지를 형성하고 있다. 만운저수지의 수리학적 특성 및 유역의 일반특성 등은 Table 1과 같다.

Table 1. Hydrological characteristics and utilization of drainage basin of Manun Reservoir

Drainage area(km ²)	23.8
Surface area(km ²)	0.4
Water capacity(×10 ⁶ m ³)	2.0
Yearly Water Inflow(×10 ⁶ m ³)	9.9
Yearly Water Outflow(×10 ⁶ m ³)	4.3
Maximum depth(m)	8.4
Mean Depth(m)	4.8
Hydraulic Residence Time(year)	0.2
Urban area in drainage basin(km ²)	23.7
Faddy and dry field area(km ²)	6.1
Forest and mountain area(km ²)	16.5
Annual precipitation(mm/yr)	1023.6
Air temperature(°C)	13.5
Longitude	128°35'10"E~128°34'40"E
Latitude	36°35'40"N~36°36'15"N

수질조사항목 및 분석방법

저수지의 시기별 수질변화 및 수심별 변화특성, 유입하천의 수질변화특성을 알아보기 위해 1999년 8월부터 11월까지 4회에 걸쳐 조사하였다. 만운저수지의 수질오염정도를 평가하기 위해 유역내 비교적 큰 보조수원인 신앙저수지를 대조구로 하여 지형·지질 및 기상 등의 자연환경특성에 따른 저수지의 수질특성을 분석하였다(Fig. 1).

저수지의 수질조사는 수질종합측정기(YSI 620)를 사용하여 현장에서 수온, pH, 전기전도도, 용존산소량, 탁도(NTU) 등을 측정하였고, 유입하천은 pH meter(Orion 265), EC meter(YSI 30), DO meter(Orion 830)등을 사용하여 현장에서 수질을 측정하였다. 또한 채취한 시료는 전처리 과정을 거쳐 수질오염 공정시험법⁶⁾ 및 Standard Method 제 19판⁷⁾에 따라 BOD, COD, SS, 총인, 총질소, Chl-a 등을 분석하였다.

동·식물 플랑크톤의 조사지점은 비교적 큰 유입하천인 신앙천과 조파천하류와 저수지 유입부 2지점, 저수지 중앙 1지점으로 선정하였고, 저수지의 규모가 적어 수체의 성격을 잘 대변할 수 있는 저수지 중앙에서 수심별 조사를 실시하였다. 각 지점에서 식물성플랑크톤과 동물성플랑크톤의 종조성과 세포수를 조사하였고, 식물성플랑크톤 중 동정이 어려워

제외되기 쉬운 nanoplankton 등은 Chl-a 양을 통해 보완하였다.

식물플랑크톤은 조사지점에서 500 mL 폴리에틸렌 시료병에 담아 Lugol 용액으로 현장 고정 후 약 2주일 이상 침강시켰다⁷⁾. 이 시료를 siphon으로 상등액을 뽑아 농축시켰으며, 세포의 계수는 Plamer-Maloney counting chamber를 사용하여 광학현미경 400~1000배에서 검정하였다. 동물성플랑크톤은 조사지점에서 플랑크톤 정량 넷트 (mesh size, 80~100 μ m)를 이용하여 채취한 후 250 mL 폴리에틸렌 시료병에 담아 현장에서 포르말린으로 고정한 후 실험실로 옮겨서 광학현미경 400~1000배에서 계수하였다. 종 동정은 水野⁸⁾, Hirose와 Yamogishi⁹⁾, 水野·高橋¹⁰⁾에 의하였다.

저수지의 수질환경특성의 평가는 환경정책기본법에 준한 수질 평가기준인 수질환경기준과 부영양화도 지수(trophic state index, TSI)¹¹⁾를 이용하였다. 수질환경기준은 이용목적별 적용대상에서 농업용수 등급인 생활환경 VI등급을 설정하여 평가하였고, 부영양화도 지수(TSI)는 유입하천의 탁도 증가 및 준설 등의 영향을 크게 받고 있는 우리나라 소규모 농업용저수지의 특성을 감안하여 투명도에 근거한 Carlson 지수¹¹⁾보다는 Chl-a 농도에 근거한 수정 Carlson 지수¹²⁾가 더욱 적절함을 감안하여 Carlson 지수와 함께 수정 Carlson 지수를 사용하여 판정하였다.

결과 및 고찰

유역환경특성

안동시는 대륙성 기후의 영향으로 기온의 연교차가 심하고, 동계에는 북서풍, 하계에는 서북서풍이 불며, 38년간(1961-1998) 기상현황을 분석한 결과 연평균기온 13.5°C, 연평균강수량 1,023.6 mm, 상대습도 65%로서 우리나라 연평균강수량 1,274 mm 보다 적어, 부족한 수자원을 안동댐과 임하댐에서 공급받고 있다. 무상기일(無霜期日)은 150~180일이며, 6월~8월에 장마의 영향으로 1년 강수량의 55% 정도가 나타난다.

본연구가 이루어진 1999년에는 평균기온은 12.4°C, 연강수량 1,339 mm로 이 지역 연평균 기온 13.5°C보다 다소 낮고, 연평균 강수량 1,024 mm보다 300 mm 이상 높으며, 7, 8월에 집중되어 나타나는 종래의 강우특성과 달리 7월이 낮고, 8월과 9월에 집중된 강우특성을 보여주고 있었다(Fig. 2).

만운저수지의 주유입하천은 5개로서 감애천은 유로연장 6.91 km로서 하천의 평균경사는 10.8%로 비교적 급한 편이고 하상은 주로 자갈과 모래로 이루어져 있다. 하천종류에 보조수원인 신양저수지가 위치해 있는 유로연장 6.18 km의 신양천은 산지형 하천으로 바위, 암반 등이 많고, 하천변을 따라 농경지가 형성되어 있으나 면적은 적은 편이고 평균경사는 약 8.3% 로 비교적 완만한 하천이며 하류에서 감애천에 합류된다. 그 외 하천은 소하천으로서 하상의 경사가 심하고 바위, 암반과 돌등으로 이루어져 있는 산지하천의 특징을 보이고 있다. 각 하천의 유역면적, 유로장, 유역평균폭, 형상계수, 하천 밀도, 평균경사는 Table 2와 같다.

수질에 영향을 미치는 유역 특성인자

호소의 수질 및 생산성에 영향을 미치는 유역특성인자로는 유역면적의 크기 및 인구, 경사도, 토지이용형태, 토양특성 등이 있으며, 일반적으로 유역면적이 크고 인구밀도가 높을수록, 경사가 급하고, 토양침식성이 클수록 영양염류의 부하량은 높다¹³⁾.

만운저수지의 유역특성인자는 호수에 직간접적으로 유입되는 영양염류의 양과 비례관계에 있는 유역면적 값(DA)과 이를 희석시키는 호수면적의 값(SA), 유입지천과 호소 수표면으로 직접 유입되는 오염부하량을 나타내는 총면적값(TA), 총면적으로부터 유입된 영양염류를 희석시키는 역할로 호수생

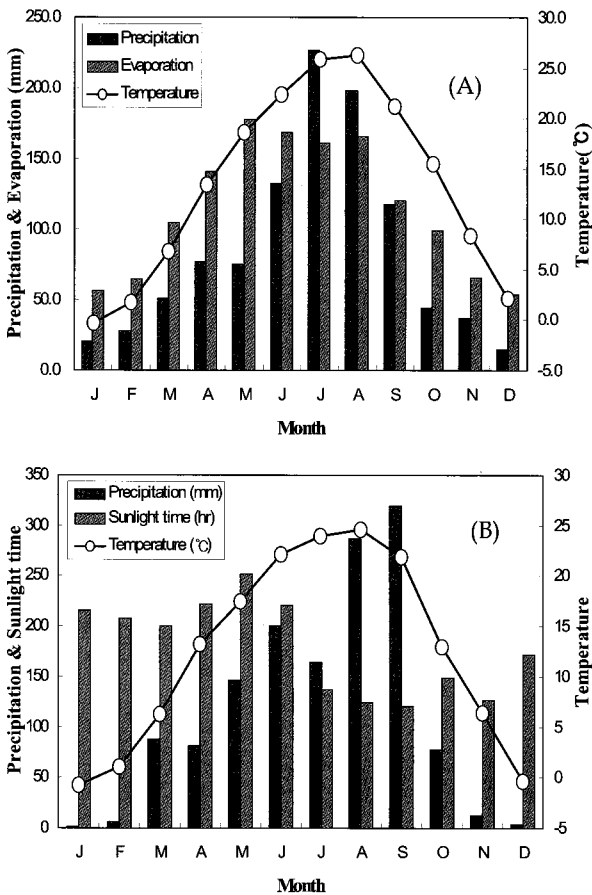


Fig. 2. The monthly climate states in 1961-1998 (A), and in 1999 (B).

Table 2. Characteristics of streams in Manun Reservoir

Stream Name	Watershed A(km ²)	Stream Length L(km)	Ave. of watershed width A/L(km)	Shape Factor A/L ²	River Density L/A	Mean Slope (%)
Gamae	6.91	4.96	1.39	0.28	0.72	10.83
Sinyang	6.18	3.32	1.86	0.56	0.54	8.33
Chofa	2.90	2.74	1.06	0.39	0.94	24.49
Manun	4.58	3.78	1.21	0.32	0.83	18.97
Daechu	1.52	2.09	0.73	0.35	1.38	47.54

Table 3. Physical parameters of Manun Reservoir, and other reservoirs and lakes

Name	Drainage area (DA, km ²)	Surface area of lake (SA, km ²)	DA/SA	Storage (ST, × 10 ⁶ m ³)	ST/SA (m)	TA/ST (m ² /m ³) (TA=DA+SA)
Manun	23.35	0.42	56.13	2.01	4.79	11.82
Masan	17.76	0.92	19.5	3.04	3.30	6.2
Wanggung	8.36	0.49	17.06	2.06	4.20	4.30
Camdon	9.50	0.35	27.1	1.67	4.77	5.90
Andong	1,584	51.5	30.8	1,200	23.30	1.6
Paldang	19,222	36.5	526.6	244	6.68	1,069.9
Sapkyo	1,639	20.2	81.1	84	4.16	19.80
Biwa(N.L)	3,174	674.0	4.71	27,500	40.8	0.14
Inwasiro	711	104.8	6.78	3,860	36.8	0.21
Laguna	3,820	900.0	4.24	3,260	3.62	1.45
Michigan	117,845	58,016.0	2.03	4,871,000	83.96	0.04
Ontarion	75,272	19,009.0	3.96	1,638,000	86.17	0.06

산성과 반비례관계에 있는 유효저수량(ST)을 DA/SA, TA/ST 등의 값으로¹⁴⁾ 각기 계산하여 다른 국내 농업용저수지와 대형 인공댐호, 담수호 및 국외 호소 등과 함께 Table 3에 나타내었다. 외국의 자연호소와 국내의 농업용저수지, 인공댐호, 담수호 등의 DA/SA, TA/ST의 값을 비교한 결과 국내 인공댐호, 담수호, 농업용저수지 등의 DA/SA, TA/ST값이 국외 자연호수들보다 상대적으로 높게 나타났으며^{14,16)}, 이 값이 크면 클수록 대상호수의 상대적 오염부하량이 크다고 할 수 있다^{14,16)}. Kim과 Hong¹⁴⁾은 DA/SA비 사이에는 지수적 증가함수를 나타내고 있는 것으로 보고한 바 있으며, Jeon 등¹⁷⁾은 총면적(m²)에 대한 유효저수량(m³)의 비율로 나타낸 TA/ST비가 체류시간과 역비례관계에 있음을 보고하였다. 유역면적에 비해 유효저수량이 클수록 체류시간이 증가하여 식물성플랑크톤에 의한 유기물생산 증가로 부영양화 될 가능성이 높다. 유¹⁶⁾는 부영양화와 체류시간의 관계를 평균 체류일수가 3.6일, 즉 연간 물의 교체회수가 100회 이하인 경우 수중 영양염류의 양이 조류발생 한계 이상이면 부영양화현상이 발생한다고 언급한 바 있다. 또한 유효저수량(ST, m³)에 대한 수표면적(SA, m²)의 비를 나타낸 ST/SA 값은 호소의 평균수심과 상관성이 높는데, 일반적으로 호소의 수심이 얕으면 부영양화 가능성이 높다. 일본의 조사결과 호소의 수심이 얕아짐에 따라 Chl-a 의 농도가 지수적으로 증가하고, 평균 수심 약 8 m 이하이면 부영양화가능성을 가지고 있다고 보고하였다¹⁶⁾. 만운저수지는 DA/SA의 비가 56.13으로 국내 다른 농업용 저수지보다 높게 나타나 유역의 오염물질 부하가 높은 편이며, 평균 수심과 관련되는 ST/SA 비는 4.79로서 인공댐호인 안동호, 팔당호보다는 낮고, 삼교담수호 등과 비슷한 값을 보여주었다. Yoon 등⁴⁾은 331개 농업용저수지를 대상으로 한 COD와 ST/SA의 관계를 분석한 결과 ST/SA 10이상인 저수지에서는 농업용수 수질기준인 COD 8 mg/L를 초과하는 곳이 없었던 반면, ST/SA 5이하에서는 많은 저수지가 COD 8 mg/L를 초과하여 나타남을 보고한 바 있으며, 만운저수지의 ST/SA가 5이

하로서 부영양화의 가능성이 높음을 알 수 있다. 체류시간과 관련되는 TA/ST비는 11.82로서 다른 농업용 저수지보다는 다소 크고, 삼교호 등 담수호보다는 낮은 값을 보여주었다. 만운저수지의 체류시간은 74일로서 1년에 4.9회 교환이 일어나는 셈이다(Table 3). 만운저수지의 저수지 형태상 분류를 보면, 긴 체류시간과 적은 용량, 낮은 수심을 나타내는 가지형의 특징을 보이는 저수지형 호소로서 하천형호소나 가지형 호소에 비해 높은 생산성이 유발되는 유역환경을 가지고 있다. 그 외 국내 인공호 역시 외국의 자연호에 비해 낮은 수심과 유역면적에 비해 적은 저수용량을 가지고 있어 높은 내부 생산성을 유발할 물리구조적 특징을 지니고 있다^{14,17)}.

만운저수지의 수질특성

양쪽으로 분지된 만운저수지의 주요 유입하천인 신양천(MN6)과 조파천(MN8)이 유입되고 있는 MR 1지점과 비교적 급경사의 산지형 하천인 만운천(MN10)과 대추천(MN12)이 유입되고 있는 MR 2지점을 호내 상류로 보고 MR 1, MR 2 ⇒ MR 3 ⇒ MR 4의 순으로 나타내어, 유입하천의 유입수질과 비교하여 그 변화를 살펴보았다.

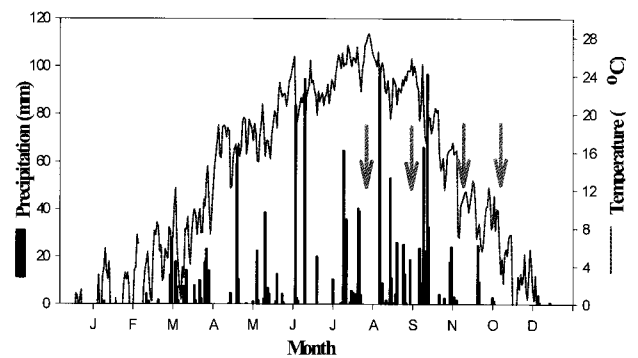


Fig. 3. Daily variation of climate states and sampling time (↓) in 1999.

저수지 및 하천의 수질현상은 유역과 저수지의 물리 구조적 특성과 오염원특성에 많은 영향을 받고 있지만, 무엇보다 강우, 일조량 등의 기상변화에 절대적 영향을 받고 있다^{18,19}. 1999년의 강우는 1,389 mm로 이 지역 38년 평균강우량인 1,024 mm보다 많았으며, 7월에 적고, 8월과 9월에 집중되어 나타났다. 특히 9월에 320 mm로 평년 117 mm보다 2배 이상이나 많이 내렸다(Fig. 3). 현장조사시기는 선행강우가 다소 있었던 8월 중순, 9월 중순, 그리고, 10월, 11월 4차례로서 연간 수질변화특성은 알 수 없으나 유역특성과 강우특성을 감안하여 그 결과를 고찰하였다.

하천과 호소에서 기본적인 생물서식환경을 나타내며, 수서생물의 활동을 반영하는 pH와 DO의 변화를 보면, 여름철인 8월에는 유입하천보다 저수지에서, 그중 오염원의 유입이 이루어지는 저수지 상류 두 지점에서 pH와 DO의 수치가 높은 전형적인 수질변화특성을 보여준 반면 9월과 10월에는 저수지보다 유입하천에서 pH는 다소, DO는 현저히 높은 특성을 보여주어 비교적 급경사의 산지하천인 유입하천의 특성상 산소포기 및 부착 조류의 성장 등의 영향을 알 수 있었다²⁰. 특히 9월에는 많은 양의 선행강우가 있었으며, 유역면적의 68%에 해당하는 강우유출수가 MR 1 지점으로 유입되어 이로 인해 pH, DO가 MR 2 지점보다 낮게 나타나고 있으며, 저

수지 지점 중 저수지 하류인 MR 4 지점에서 전 조사기간동안 가장 낮은 pH와 DO를 보였다. 자연대조구인 신양저수지 MN-3지점에서도 저수지와 유사한 pH, DO수치를 보였다(Fig. 4).

주요 유입하천과 저수지의 COD, SS, Chl-a를 비교함으로써 유역의 유기오염물질이 저수지 수질에 미치는 영향을 살펴본 결과 8월의 COD농도가 유입하천에서 보다 저수지에서 2배정도 높게 나타났으며, 이는 식물성플랑크톤의 현존량을 나타내는 Chl-a의 농도 변화와 유사한 특성을 보이므로 저수지내 유기물량이 조류에 의한 1차 생산의 기여가 큼을 알 수 있으며, 오염원의 유입이 이루어지는 상류에서 높고 하류로 가면서 감소하는 특성을 보여 유역의 유입된 오염원을 근거로 이루어지는 내부생산성 유기물질이 저수지의 수질특성을 지배함을 알 수 있다. 자연대조구인 MN-3 신양저수지에서도 유사한 특성을 보였다. 부유물질은 신양천(MN 6)과 조파천(MN 8)에서 높았는데, 이는 소유역면적이 넓은 2개 하천에서 선행강우의 지체현상으로 부유물질의 유입이 늦게 이루어지는 것으로 판단되며, COD의 양과 비교할 때 입자성 무기현탁물질이 대부분임을 알 수 있으며, 이러한 부유물질은 저수

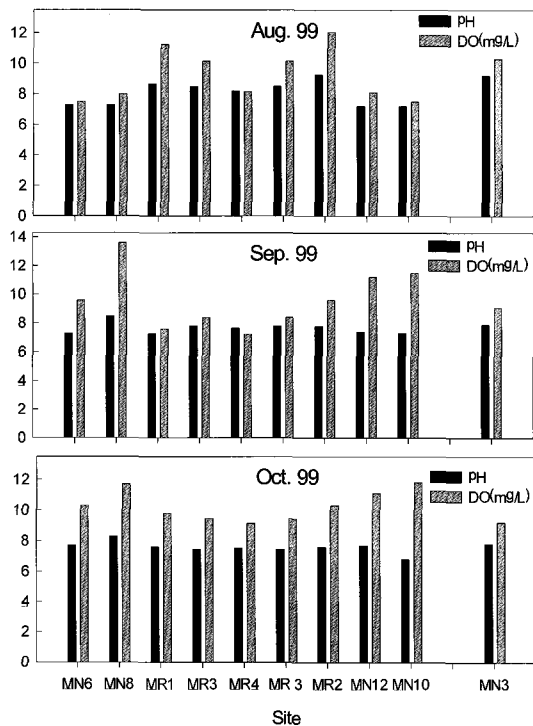


Fig. 4. Seasonal variation of pH and DO in Manun Reservoir from August to October, 1999. MN 6, Sinyang stream; MN 7, Chopa stream; MR 1, Inlet of reservoir; MR 3, Center of reservoir; MR 4, Outlet of reservoir; MR 2, Inlet of reservoir; MN 12, Daechu stream; MN 10, Manun stream; MN 3, Shinyang Reservoir (control).

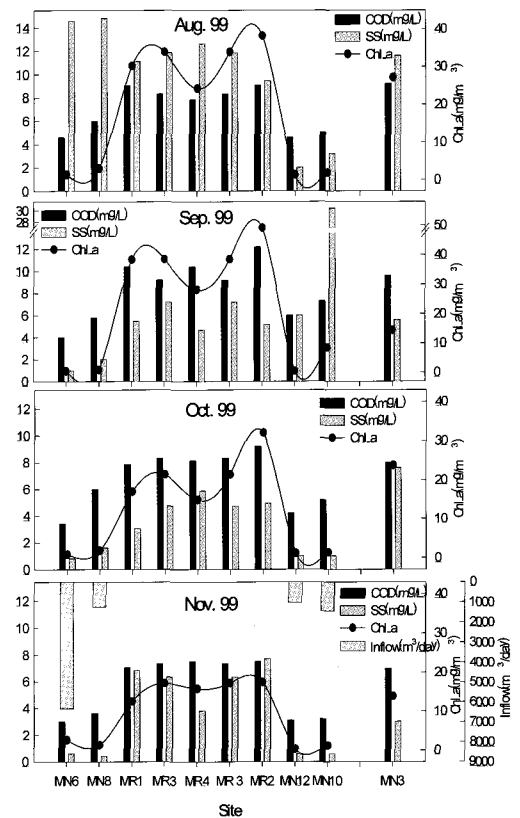


Fig. 5. Seasonal variation of COD, SS, and Chl-a in Manun Reservoir from August to November, 1999. MN 6, Sinyang stream; MN 7, Chopa stream; MR 1, Inlet of reservoir; MR 3, Center of reservoir; MR 4, Outlet of reservoir; MR 2, Inlet of reservoir; MN 12, Daechu stream; MN 10, Manun stream; MN 3, Shinyang Reservoir (control).

지 하류에까지 영향을 미치고 있었다. 9월의 COD, SS, Chl-*a* 변화를 보면, 8월과 달리 소유역 면적이 작고 하천경사가 급한 대추천과 만운천에서 높은 COD, SS 농도를 나타냈는데, 이는 간헐적으로 내리는 강우의 영향으로 판단되며, 비교적 수체가 안정화된 10월에는 수온저하로 식물성플랑크톤 현존량의 간접지표인 Chl-*a*와 COD, SS 농도가 다소 감소하였으나 상류에서 높고, 하류에서 낮은, 지점별 식물성플랑크톤의 변화가 현저히 나타났다. 11월에는 낮은 수온으로 인해 생물화학적 변동이 적은 시기로 저수지내 플랑크톤의 생산성이 많이 감소하여 COD, SS, Chl-*a*등이 크게 변화하지 않았으며, COD를 기준으로 한 환경정책기본법의 농업용수 수질기준인 호소 생활환경 IV등급을 만족하는 8 mg/L이하를 나타내고 있다. 자연대조구인 신양저수지에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있으므로 만운저수지의 유기물량은 점오염원에 의한 수질악화보다는 강우와 지형, 지질학적인 유역형태에 따른 자연적인 수질변화의 성격이 전반적인 경향으로 나타남을 알 수 있다(Fig. 5). 그런데, MR 1 지점으로 유입되는 유입하천인 신양천과 조파천이 전체 유역의 68%를 차지하고 있고 유역의 발생부하량 중 BOD 84.9%, TN 80.6%, TP 89.7% 등 발생오염원의 대부분에 해당되고 있으나, 호내 수질변화를 보면, 신양천과 조파천이 유입되는 MR 1지점보다 대추천과 만운천이 유입되는 MR 2지점의 유기물량(COD, Chl-*a*)이 항상 높은 값을 보여준다.

이는 유역의 오염발생물질량이나, 유입유량의 크기보다는 강우시 유역으로부터의 영양염류의 유출과 호소내에서 식물성플랑크톤의 거동이 호소의 수질에 더욱 큰 영향을 미침을 보여준다²¹⁾.

주요 유입하천의 평균유량(m³/day)을 보면, 신양천이 6,331 m³/day 로 가장 많으며, 만운천, 조파천, 대추천의 크기 순으로 유입되고 있었다.

TN의 경우 8, 9, 10월의 시기별, 조사지점별 변화를 보면, 저수지보다 유입하천에서 비교적 높게 나타났으며, 신양천, 조파천에서 특히 높음을 알 수 있다. TP는 시기적으로 다소 변화가 큰 편으로 강우의 영향이 있는 8월에는 신양천, 조파천, 대추천이 높게 나타났으며 9월과 10월에는 농도의 감소와 함께 전반적으로 비슷한 수치를 보이지만, 만운천에서 상당히 높은 수치를 보였다. 저수지내에서는 하류지점에서 가장 높은 수치를 보이고 있으며, 이는 오염물질의 점진적 퇴적현상이 이루어지는 저수지하류가 인의 Sink로서의 역할을 함을 보여주며, 저층의 오염물질 용출에 의한 원인이 큼을 퇴적물조사 결과 알려진바 있다²²⁾. 자연대조구인 신양저수지에서는 만운저수지에 비해 질소 및 인의 농도가 낮은 편으로 유기물량에 비해 유입하천에 의한 오염원 유입량이 크게 작용함을 보여준다(Fig. 6).

N/P 비에 따른 수질경향을 보면, 하천에서는 20이상의 높은 수치로 질소의 농도가 높게 나타나 인이 제한인자로 작용하는 반면, 저수지에서는 하천보다는 낮지만 역시 14~44 정도로 10월에 특히 높은 수치를 보이고 있으며, 반면, 오염원이 거의 없는 대조구인 신양저수지의 경우 11~19의 수치로 N/P비가 자연계 구성의 비로 나타나고 있다. 이들 영양염류는 저수지 내부 생산성에 직접 기여하고 있어 결론적으로 저수지 수질특성을 결정짓는 인자가 되고 있기 때문에 저수지의 수질개선을 위해서는 플랑크톤에 의한 1차 생산성을 제어해야 하며, 유입하천의 질소와 인의 제거에 초점을 맞춘 수질개선사업이 필요하다.

만운저수지에 출현한 식물플랑크톤은 남조류 5속 5종, 규조류 13속 28종, 녹조류 15속 29종으로 총 33속 62종이었다(Table 4). 6월에 출현하는 식물성플랑크톤은 남조류 1속 1종, 규조류 12속 23종, 녹조류 13속 22종으로 총 26속 46종이었다.

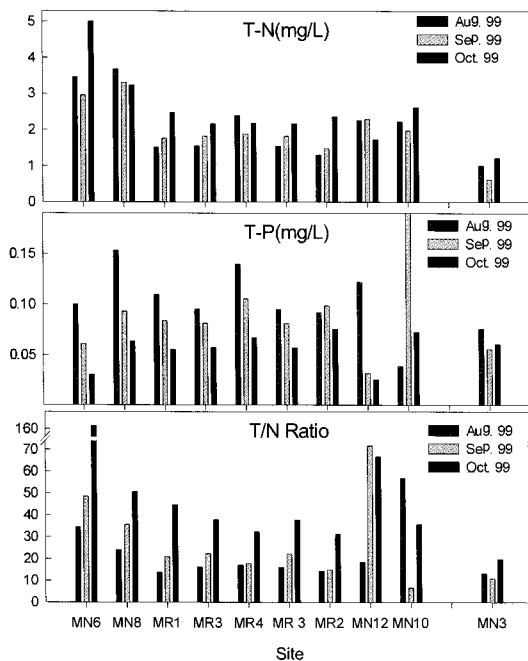


Fig. 6. Seasonal variation of TN, TP, and N/P ratios in Manun Reservoir from August to October, 1999. MN 6, Sinyang stream; MN 7, Chopa stream; MR 1, Inlet of reservoir; MR 3, Center of reservoir; MR 4, Outlet of reservoir; MR 2, Inlet of reservoir; MN 12, Daechu stream; MN 10, Manun stream; MN 3, Shinyang Reservoir (control).

Table 4. Seasonal changes of dominant phytoplankton species, and total number of phytoplankton taxa in Manun Reservoir

Site	June	August	October
Center of R.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.
MR 1	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.
MR 2	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.
Chofa S.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.
Sinyang S.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.	<i>Lyngbya</i> spp.
Total number of phytoplankton taxa	26속 46종	20속 27종	17속 24종

출현종수는 녹조류가 단연 많으나 세포수는 남조류가 대부분을 차지하였으며, 전 지역에서 우점종은 대체로 남조류인 *Lyngbya* spp. 였으며, 이 종의 출현 세포수가 가장 많은 곳은 저수지 중앙으로 약 4.5×10^5 cells/mL 였다. *Oscillatoria*와 유사한 종인 *Lyngbya* spp. 는 해역에서 간혹 피부병 또는 swimmer's itch를 유발한다는 보고가 있다²³⁾. 8월의 출현종은 남조류 5속 5종, 규조류 7속 11종, 녹조류 8속 11종으로 총 20속 27종으로 6월보다 출현종이 상당히 줄었다. 그러나 남조류인 *Lyngbya* spp., *Microcystis* spp.의 우점은 다른 종이 거의 출현하지 않을 정도로 극상을 이루었으며 가장 많은 세포수는 신양천, 조파천이 유입되는 MR 1지점에서 약 2.4×10^5 cells/mL이었다. 10월에는 식물성플랑크톤은 남조류 3속 3종, 규조류 7속 13종, 녹조류 7속 8종으로 총 17속 24종이 출현하여 8월보다 종수가 감소하였다. 이 시기에 우점종의 세포수는 감소하였지만 우점종이 여전히 대부분의 지역에서 남조류인 *Lyngbya* spp.였다. 다른 저수지에서는 남조류가 우점하면 두세 종이 같이 우점하는데 비하여 만운저수지에서는 한 종이 우점하는 특징을 보이고 있었다. 이것도 이 지역에서 지표종의 특성을 나타낼 수 있을 것이라고 생각되어진다.

일반적으로 TN/TP 비가 높고 수심이 얇으며, 투명도가 낮은 호수에서는 *Oscillatoria* 가 우점하고, TN에 비해 상대적으로 TP의 농도가 높아 TN/TP 비가 낮고, 수심이 깊은 부영양호수에서는 *Anabaena* 와 *Microcystis* 가 우점하는 것으로 보고되고 있으며, *Anabaena* 는 *Microcystis* 보다는 다소 낮은 수온상태를 선호하는 것으로 알려져 있다^{24,25)}. 만운저수지는 TN/TP 비가 비교적 높고(>16) 수심이 얇으며, 투명도가 낮은 호수로서 *Oscillatoria*와 근연종인 *Lyngbya*가 우점하는 것으로 판단된다. 식물성플랑크톤의 다양도지수는 6월에서 8월로 갈수록 감소하였고 다시 10월에 회복되는 경향이였으며 남조류가 많이 출현했던 8월에 종다양도지수가 가장 낮았다.

만운저수지에서 관찰된 동물성플랑크톤은 6월에 원생생물 10속 11종, 윤충류 8속 8종, 지각류 1속 1종, 요각류 2속 2종으로 총 21속 22종이었고, 대부분의 지역에서 우점종은 물에서 적조현상을 일으키는 외편모충인 *Gymnodinium* spp., *Peridinium* spp., 암색편모충인 *Cryptomonas* spp.이었다(Table 5). 조파천을 제외하면 모든 지역에서 이 우점종이 많은 개체수로 출현하였다. 6월부터 8월까지 각 지점에서 원생생물이 중요한 위치를 차지하고 있지만, 10월에는 그 양상이 약간 변하여 MR

Table 5. Seasonal changes of dominant zooplankton species, and total number of zooplankton taxa in Manun Reservoir

Site	June	August	October
Center of R.	<i>Gymnodinium</i> spp. <i>Peridinium</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.
MR 1	<i>Gymnodinium</i> spp. <i>Peridinium</i> spp.	<i>Polyarthra</i> spp.	<i>Asplanchna</i> spp. Nauplius of <i>Copepoda</i>
MR 2	<i>Gymnodinium</i> spp.	<i>Carchesium</i> spp. <i>Trichocerca</i> spp.	<i>Cryptomonas</i> spp.
Chofa S.	<i>Tintinnopsis cratera</i>	<i>Cryptomonas</i> spp.	<i>Cryptomonas</i> spp.
Sinyang S.	<i>Gymnodinium</i> spp.	<i>Gymnodinium</i> spp.	<i>Gymnodinium</i> spp.
Total number of zooplankton taxa	21속 22종	19속 24종	28속 29종

Table 6. Assessment of water quality by environmental criteria

Parameter	Environmental criteria		Manun Reservoir	Major stream				
				Sinyang	Jopa	Manun	Daechu	
COD(R.)	Water quality	below 8.0 mg/L	11.1	-	-	-	-	
	Grade of criteria	IV	Extra-value	-	-	-	-	
BOD(S.)	Water quality	below 8.0 mg/L	-	0.6	1.2	0.6	0.7	
	Grade of criteria	IV	-	I	II	I	I	
SS	R	Water quality	below 15 mg/L	11.0	-	-	-	
		Grade of criteria	IV	IV	-	-	-	
	S	Water quality	below 100 mg/L	-	4.3	4.7	2.4	8.8
		Grade of criteria	IV	-	I	I	I	I
TN	Water quality	below 1.0 mg/L	1.426	3.809	3.411	2.095	2.273	
	Grade of criteria	IV	V	-	-	-	-	
TP	Water quality	below 0.1 mg/L	0.093	0.051	0.085	0.046	0.111	
	Grade of criteria	IV	IV	-	-	-	-	
N/P ratio			15.3	74.7	40.1	45.5	20.5	

Table 7. Seasonal variation of trophic state index(TSI) in 1999

Month	TSI			TSI _M		
	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(SD)	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(SD)
Jul.	66	76	76	64	93	72
Aug.	62	69	69	59	96	67
Sep.	70	73	73	69	89	77
Oct.	63	65	65	61	95	69

※TSI<20, ultra-oligotrophic; 30<TSI<40, oligotrophic; 45<TSI<50, mesotrophic; 53<TSI<60, eutrophic; 70<TSI, hypertrophic.

2에서는 윤충류와 요각류가 원생생물보다 많이 출현하였다. 8월에는 원생생물 9속 9종, 윤충류 9속 13종, 요각류 1속 1종으로서 총 19속 23종이 출현하였다. 이때에 각 분류군이 고르게 출현하였는데 특히 지점 4에서 윤충류가 다양하고 고르게 출현하였다. 역시 이 시기에도 지각류는 출현하지 않았다. 10월에는 원생생물 12속 12종, 윤충류 9속 10종, 지각류 3속 3종, 요각류 4속 4종으로서 총 28속 29종이 출현하였다. 이때에 모든 지점에서 *Cryptomonas* spp.가 많이 나왔고, 지점 2에서 윤충류인 *Asplanchna*, *Polyarthra euryptera*, *Pompholyx* 그리고 요각류의 유생이 많이 출현하였다. 이 중에서 가장 많은 개체수를 보인 것은 지점 2에서 윤충류인 *Asplanchna* 종으로서 약 4.5×10^5 개체/m³에 달하였다.

수질평가 및 부영양화도 판정

국내 대부분의 호소는 하천에 건설되어진 인공호수로서 수심이 낮고 유역면적이 넓어 비점오염원의 조절이 어려우므로 부영양화에 특히 취약하다. 현재 국내 대부분의 호소는 중영양화(72%) 또는 부영양화(22%) 상태에 있으며, 호소유역에 점오염원이 증가하고 있는 점을 고려할 때 모든 주요 호소가 부영양화될 것이다(류, 1993). 만운저수지의 유입하천 및 저수지의 현황수질 환경정책기본법에 준한 수질 평가기준 및 평가결과를 Table 6에 나타내었다. COD를 기준으로 한 만운저수지의 수질 평가결과 COD를 기준으로 11.1 mg/L로 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하는 등급외의 수질을 나타내고 있으며, T-N 및 T-P는 1.426 mg/L, 0.093 mg/L로 IV~V 등급의 수질을 나타내고 있어 농업용수원으로서의 저수지 수질관리가 지속적으로 이루어져야함을 보여준다. BOD를 기준으로 하여 유입하천의 수질을 평가한 결과 0.6~1.2 mg/L로 I~II등급의 양호한 수질을 보이고 있었으나 유입하천의 T-N 농도는 1.426~3.809 mg/L, T-P농도는 0.046~0.111 mg/L로 비교적 높게 나타났으며, T-P보다는 T-N에 기준 수질 개선 방안이 요구됨을 보여준다.

부영양화도지수(TSI)를 이용한 만운저수지의 영양상태평가는 1999년도의 조사시기별 영양상태 변화(Table 7)와 1996년부터 조사된 농업용수 수질측정망 연도별조사결과를 이용한 연도별 영양상태변화(Table 8)로 나타내었다. 부영양화도지수가 엽록소 농도에 근거한 것이므로 TSI(Chl)을 중요하게 평가

Table 8. Annual variation of trophic state index(TSI)

Year	TSI			TSI _M		
	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(SD)	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(SD)
1996	63	71	71	60	95	68
1997	63	63	63	60	95	68
1998	80	72	72	79	80	88
1999	65	84	84	63	93	71

※TSI<20, ultra-oligotrophic; 30<TSI<40, oligotrophic; 45<TSI<50, mesotrophic; 53<TSI<60, eutrophic; 70<TSI, hypertrophic.

하였으며, Carlson 지수(TSI)와 수정 Carlson(TSI_M) 지수가 엽록소에 근거하여서는 큰 차이를 보이지 않았지만, TSI(TP) 또는 TSI(SD)와 비교해 보면, TSI 값이 TSI_M 값보다 좀더 안정적으로 나타났다. TSI값을 이용한 영양단계평가는 Kratzer and Brezonik²⁵⁾에 의한 5단계로 구분하였다. 7월부터 10월에 걸쳐 살펴본 1999년도의 시기별 영양상태 변화는 9월에 가장 높은 TSI(Chl) 70의 과부영양상태를 보였으며(Table 5), 1996년부터의 연도별 영양상태변화는 1998년에 TSI(Chl) 80으로 과부영양상태를 보였으나 1999년에는 강우량의 증가와 연평균기온의 감소로 다소 감소한 TSI(Chl) 65의 수준으로 나타났다(Table 6). Heavens²⁶⁾과 Shin²⁷⁾ 등은 TSI를 통해 식물성플랑크톤 제한요인 및 seston의 조성을 유추하는 시도를 하였는데 TSI(Chl)이 TSI(TP)보다 작다면, 인이 아닌 다른 요인이 조류의 성장을 제한한다고 유추할 수 있으며, TSI(Chl)이 TSI(SD)보다 훨씬 적다면 호수내 seston 중 아주 작은 무생물적 인자들의 구성비가 높으며, 이 경우 빛이 제한요소가 될 것이라고 하였다. 만운저수지에서의 결과를 보면 7월과 8월에는 TSI(Chl)이 TSI(TP), TSI(SD)보다 현저히 작아 인이 아닌 빛에 의한 제한이 일어나고 있으며, 9월, 10월에는 유사한 수치를 보여줌에 인이 제한인자로 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 연도별 TSI지수를 보면, 97년, 98년의 경우에는 TSI(Chl)이 TSI(TP), TSI(SD)보다 큰수치를 보여주었으나, 99년에는 작은값을 나타내어 97, 98년에 비해 강우가 다소 많았던 99년에는 강우의 영향으로 인보다는 입자성 무기물질에 의한 빛의 제한이 주요하게 작용하였음을 알 수 있었다. 따라서, 저수지의 물리구조적 유역특성 및 수리학적 특성상 부영양화에 취약한 특성을 가지고 있으며, 전반적으로 부영양화도가 증가하는 추세일 가능성이 높으며, 이와 같은 추세변화를 정확히 인식하고, 그에 적절한 대책을 마련하기 위해 농업용수 수질측정망 운영이 상당히 중요하며, 수질환경 특성을 감안한 합리적인영이 이루어져야 할 것이다.

요 약

농촌지역의 도시화와 산업화에 따라 농촌 수질환경의 오염이 심화되고 있다. 경북 안동의 중산간지대에 위치한 만운저수지는 유역면적 23.8 km², 수표면적 0.4 km², 저수량 2.0×10⁶

m³의 부영양화 된 중규모 농업용저수지로서 1999년 수질환경특성조사를 실시하여 오염된 유사 농업용 저수지의 수질특성 이해에 중요한 자료로 활용하고자 하였다. 만운저수지의 수질에 영향을 미치는 유역면적값(DA)/호수면적값(SA)의 비가 56.1로 국내 다른 농업용 저수지보다 높게 나타나 유역의 오염물질 부하가 높은 편이며, 평균 수심과 관련된 유효저수량(ST, m³)/수표면적(SA, m²) 비는 4.79로서 안동호, 팔당호보다 낮고 삼교담수호 등과 비슷한 값을 보여주어 부영양화의 잠재성이 높은 것으로 나타났다. 만운저수지의 수질조사결과 COD는 11.1 mg/L, 총질소 1.426 mg/L로 환경기준중 생활환경 IV등급인 농업용수 수질기준을 초과하였으며, 총인은 0.093 mg/L로 IV등급의 수질을 나타내고 있었다. 유입하천은 총질소(1.426~3.809 mg/L)가 비교적 높게 나타나고 있어 총질소에 기준한 수질개선 방안이 요구되었다. 식물성플랑크톤 조사결과 *Oscillatoria*와 근연종인 *Lyngbya*가 우점하였으며, 동물성플랑크톤은 대부분의 지역에서 적조현상을 일으키는 외편모충인 *Gymnodinium* spp., *Peridinium* spp., 암색편모충인 *Cryptomonas* spp.이 우점하였다. 부영양화도지수(TSI)를 이용한 1999년도의 시기별 영양상태 변화는 9월에 과부영양상태를 보였으며, 연도별 TSI_M지수는 '96년, '97년에 부영양, '98년의 과영양으로 영양상태가 증가하였으나, 강우가 다소 많았던 '99년에는 강우의 영향으로 다소 개선되어 나타났다. 결론적으로, 저수지의 물리구조적 유역특성 및 수리학적 특성상 만운저수지는 부영양화에 취약한 특성을 가지고 있으며, 강우량에 영향을 받고는 있으나 전반적으로 부영양화도가 증가하는 추세를 보인다. 따라서, 이와 같은 추세변화를 정확히 인식하고, 그에 적절한 대책을 마련하기 위해 농업용수 수질측정망 운영이 상당히 중요하게 인식되어지며, 수질환경 특성을 감안한 합리적 운영이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Seo, S. D. (1997) Irrigation water management and water quality conservation in the 21st century, '97 International Symposium Proceeding, Federation of Farmland Improvement Associations.
- Ministry of Construction & Transportation (2001) Water Vision 2020.
- Yang, J. W. and Lee, K. S. (2001) Agriculture and Environment, The Korean Society of Agricultural and Environment.
- Yoon, K. S. (2000) Water quality improvement for irrigation by natural treatment system, 'Environment-Friendly Development of Agricultural Infrastructure' Seminar Publications, p.85-129.
- Ministry of Agriculture and Forest, and KARICO (2001) Guide line for agricultural water quality investigation.
- 환경부 (1999) 수질오염공정시험법.
- APHA. (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th edition.
- Mizuno, S. (1964) Illustration of the fresh-water plankton, Hoiku-sa.
- Hirose, H. and Yamagishi, T. (1977) Illustration of the Japanese fresh-water algae, Uchidarokakuno Publishing Co..
- Mizuno, S. and Takahashi, E. (1964) An illustrated guide to freshwater zooplankton in Japan, Tokyo Univer. Press.
- Carlson, R. E. (1977) A trophic state index for lakes, *Limnol. Oceanogr.* 22, 361-369.
- Aizaki, M., Otsuki, T., Fukushima, T., Kawai, M., Hosomi and Muraoka, K. (1981) Application of modified carlson's trophic state index to Japanese and its relationships to other parameters related to trophic state, *Res. Rep.natl. Inst. Environ. Stud.* 23, 13~31.
- OECD (1982) Eutrophication of waters, Monitoring, assessment and control. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France.
- Kim, J. K. and Hong, W. H. (1992) Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in man-made lake of Korea, *J. of the Kor. Environ. Sci. Soc.* 1(2), 49-58.
- 곽결호 (1999) 호소수질보전정책. 호수의 수질관리, 도서출판 풍납, p.186-236.
- 유재근 (1999) 호소의 부영양화관리방안, 호수의 수질관리, 도서출판 풍납, p.344-359.
- Jeon, J. H., Yoon, C. G., Ham, J. H., Kim, H. I. and Hwang, S. J. (2002) Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoir, *Korean J. Limnol.* 35(1), 28-35.
- Jones, J. R., Knowlton, M. F. and An, K. G. (1997) Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoir. *Korean J. of Limnol.* 30, 463-471.
- An, K. G. (2000) The impact of monsoon on seasonal variability of basin morphology and hydrology, *Korean J. of Limnol.* 34(4), 342-349.
- 김범철, 전만식 (1999) 호수의 부영양화조사법, 호수의 수질관리, 도서출판 풍납, p.1-92.
- Shin, J. K., Cho, J. L., Hwang, S. J. and Cho, K. J. (2000) Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyongan stream to Paltang reservoir, *Korean J. of Limnol.* 33, 387-394.
- 농림부·농어촌진흥공사 (1999) 만운지구 농업용수 수질개선사업 기본계획(안).
- Reynolds, C. S. (1984) The ecology of fresh water phyto-

-
- plankton, Cambridge Univ. Press, New York, p.384.
24. Fogg, G. E. and Brenda T. (1987) Algal cultures and phytoplankton ecology, The Univ. of Wisconsin Press, p.156-163.
25. Kratzer, C. R. and Brezonik, P. L. (1981) A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes, *Water Resources Bulletin*. 17, 713-715.
26. Havans, K. E. (2000) Using trophic index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data, *Korean J. of Limnol.* 33(3), 187-196.
27. Shin, Y. K. and Jun, S. H. (2002) Ecological studies on the asan reservoir. 1. Physicochemical characteristics and trophic status, *Korean J. of Limnol.* 35(3), 181-196.
-