

영산호의 부영양화 평가를 위한 燐負荷모델의 檢討

류일광[†] · 이치영
광주보건대학 환경위생과

A Study on Phosphorus Loading model for Eutrophication Response in the Yongsan Lake

Il Kwang Ryu[†] and Chi Young Lee

Dept. of Environmental Sanitation, Kwangju Health College

(Received 26 October 2000 ; Accepted 12 December 2000)

ABSTRACT

The purpose of this study is made an examination of phosphorus loading model for eutrophication response in the Yongsan lake. For the model, we measured the total amount of nutrients derived from the Yongsan river watershed, inflow rate to the Yongsan lake, water quality, and water budget from January to December in 1999. The total amount of precipitation in the Yongsan river watershed was $4,951.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ and inflow amount was $2,569.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$, therefore the outflow rate of the Yongsan river watershed was 51.9%. The develop loading of total nitrogen was 86,928.1 kg/d and that of total phosphorus was 22,007.6 kg/d at the Yongsan river watershed. But, as the inflow loading of total nitrogen was 33,962 kg/d and the inflow loading of total phosphorus was 2,218 kg/d to the Yongsan lake, so each inflow rate was 39.0% and 10.1%. The hydraulic residence time was 34days, total phosphorus loading [$L(P)$] on the surface area was 23,398 g/m³/y, the hydraulic load(Q_s) of inflow water was 74.269 m/y, the reserve rate of phosphorus in the lake was 0.359, and the settling velocity of phosphorus was 0.114 m/d at the Yongsan lake. Mathematical model of phosphorus loading to estimate the responses of eutrophication at the Yongsan lake is $[P_t] = 0.838 [L(P)/Q_s] \cdot (1 + \sqrt{T_w})^{-1}$

Keywords : Yongsan lake, Eutrophication, Phosphorus loading, Vollenweider's, Water quality

I. 서 론

영산호는 우리나라 서남부의 전라남도 영암군과 무안군 사이에 위치한 인공 담수호로서 영산강유역 농업 개발사업의 2단계 사업으로 1981년 12월 8일 준공되었다. 이 호는 유역면적 3,471.4 km², 만수면적 34.6 km², 총저수량 2억 5천 3백만 m³, 유효저수량 1억 8천 1백 만m³로서 인근 20,700 ha의 농경지에 2억 5천 8백만 m³/년의 용수를 공급하고¹⁾ 1일 12만m³의 생활용수와 1일 11만5천 m³의 공업용수를 공급하고 있으나 1994년 4월 영산강 유역 물고기 대량 폐사 사고가 발생하는 등 수질오염이 날로 심화되고 있다.

영산호는 유입수원으로서 유로연장 136 km의 영산강 본류와 광주천, 황룡강, 지석천, 금천, 고마천, 함평천등의 지류로 구성되어 있으며, 유역내에 1광역시, 2시 7

군의 행정구역이 있고 상주인구는 1,730,885명²⁾으로써 날로 변화하고 있는 상류지역의 산업화, 도시화로 인하여 호수의 수질은 악화되고 있고 특히 부영양화현상이 뚜렷이 나타나고 있는데도 불구하고 영산호의 수질에 관한 연구는 장³⁾, 류⁴⁾, 주⁵⁾, 김^{6,7)}등에 불과하며, 광주지방환경청 주관 영산호 환경용량조사연구(1990)⁸⁾ 및 광주광역시 주관 영산강 수질종합대책 수립에 관한 연구(1996)⁹⁾가 있을뿐 최근에는 부영양화에 관한 연구가 별로 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 영산호의 수질 및 수문 특성을 조사하고 Vollenweider-OECD의 부영양화 평가모델을 이용하여 영산호에 적합한 인(P)부하 모델식을 도출함으로서 효과적인 수질관리와 부영양화대책 수립의 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지점

본 연구의 수질조사지점은 영산호의 유입부로서 영산

[†]Corresponding author : Department of Environmental Sanitation, Kwangju Health College
Tel: 062-958-7611, Fax: 062-958-7614
E-mail: ryuik@kjhc.ac.kr

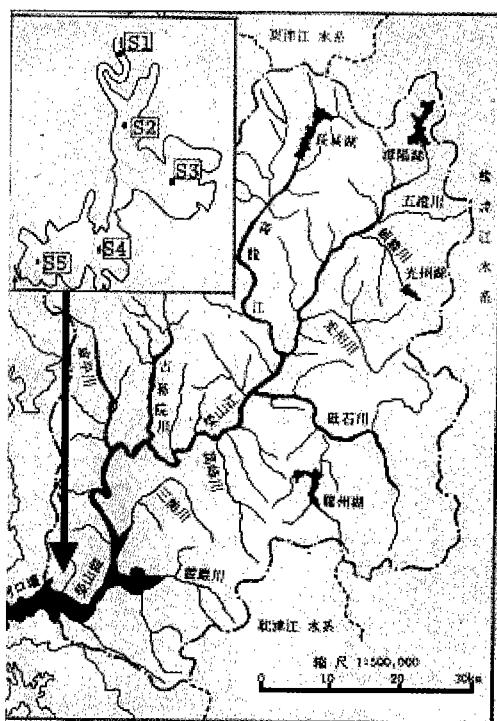


Fig. 1. Location of sampling station in the Yongsan lake.

강 본류와 함평천 합류지점 아래지점을 선정하였고 호수내는 봉탄취수장으로부터 하구둑 쪽으로 4개지점을 선정 조사하였다(Fig. 1).

S1 : 함평천 합류지점 1 km 하류

S2 : 무안군 봉탄면 봉탄취수장 부근

S3 : 무안군 삼양면 청호리 소맹이 나루(영암군 군서면 원해창 지류와 합류지점)

S4 : 무안군 삼양면 망월리 비로촌 (S3 지점과 하구둑 중간지점)

S5 : 영산호 하구둑 200 m지점 (영산호 관광 유람선 선착장)

2. 수질조사

영산호의 수질조사는 1999. 1. 10부터 1999년 12월 13일까지 매월 1회 조사하였다. 채수는 가능한 한 맑은 날을 택하여 실시하였고 강수후 1주일 이내의 채수는 피했다. 각지점의 수심 50 cm 표층수를 채수하였고, 분석방법은 우리나라 환경오염공정시험법에 따랐다.

3. 수리수문조사

본 연구에 인용된 수문자료는 국립기상청자료(99), 농업기반공사 영산강 사업단의 관리연보(99)¹⁰⁾ 및 영산강

환경관리청의 환경편람('99)²⁾을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 영산호의 특성

1) 유역의 특성

영산호는 1981년 12월 8일 영산강 하구에 둑을 축조하여 형성된 인공호로서 주로 전남 남부지역의 농업용수의 안정적 공급을 위한 농업기반사업의 일환으로 이루어졌다.

영산호를 이루는 영산강은 유역면적 3,471 km²로 광주광역시와 전라남도의 2시 8군의 전체 또는 일부를 포함하고 있으며, 유로연장 197.1 km인 직할하천 5개, 유로연장 46.2 km인 지방하천 2개, 유로연장 1,228.9 km인 준용하천 178개로서 총 185개의 하천으로 이루어져 있다.

영산강 본류 상류지역에는 총저수용량 $66.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 담수댐과 $17.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 광주댐이 축조되어있고, 영산강 지류인 황룡강 상류에는 $87.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 장성댐이, 또 지류중의 하나인 대초천에는 $91.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 나주댐 등 4개 인공호가 축조되어 있어 주로 홍수조절과 농업용수 공급에 이용되고 있다.³⁾ 유역내의 총인구는 173만1천명이고 이중 134만명이 도시계획구역 안에 살고 있어 도시와 농촌인구비는 약 8:2가 되며, 산업체는 광주광역시의 6개 산업단지에 327개 산업체와 전남지역 4개 산업단지에 62개 산업체가 있으며, 기타 소규모 폐수배출업소가 산재해 있다. 또 한우 및 젖소가 19만 3천두, 돼지가 42만두가량 사육하고 있으나 대부분 농가의 영세한 축산시설 때문에 수질오염이 심하며, 특히 유수량이 적기 때문에 유역면적은 한강유역면적의 9.8% 이지만 평균유수량은 한강의 평균유수량의 4.2%에 불과하여 더욱더 오염부하에 취약하다.⁹⁾

최근까지 영산강 유역에는 광주광역시 하수종말처리장을 비롯하여 각 시군단위의 하수처리장 및 분뇨처리장 그리고 농공단지의 종합 오수처리장 등 과거에 비해서 많은 수처리시설이 들어서고 있으나 영산강의 수질은 거의 개선되지 않고 있으며 특히 질소, 인동 영양염류의 처리를 위한 고도처리시설은 전무하여 영산호의 부영양화 방지에는 별 도움이 되지 못하고 있다. 영산호 유역내의 수질오염방지를 위한 환경기초시설 현황은 Table 1과 같다.

2. 수리수문 현황

영산호는 영산강 하류의 하구에 둑을 축조하여 생성된 인공호이기 때문에 호의 배수방류량은 하구둑 밖의

Table 1. Present conditions on Wastewater treatment plant in the Yongsan river watershed²⁾

| Sewers treatment location | capacity(m ³ /d) | Nightsoil treatment location | capacity(m ³ /d) | Sewage treatment location | capacity(m ³ /d) | Livestock wastewater location | capacity(m ³ /d) |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Gwangju | 600,000 | Gwangju | 750 | Gwangju Sochon | 600 | Damyang | 50 |
| Gwangju Songdea | 60,000 | Naju | 100 | Naju Dongsoo | 350 | | |
| Naju | 23,500 | Damyang | 50 | Naju Oryang | 200 | | |
| Naju Gongsan | 500 | Jangsung | 40 | Damyang Gumsung | 750 | | |
| Naju Sanpo | 3,000 | Hampyung | 20 | Damyang Moojung | 350 | | |
| Hwasoon Bukmyun | 2,000 | Hwasoon | 50 | Yongam Sinbook | 1,300 | | |
| Hwasoon Dogok | 6,000 | Yongam | 40 | Jangsung Donghwa | 200 | | |
| Jangsung | 11,000 | | | Hampyung Haggyo | 400 | | |
| Muan | 4,500 | | | Hwasoon Dongmyun | 1,200 | | |
| Muan-Ilo | 3,000 | | | | | | |
| Damyang | 7,000 | | | | | | |
| Yongam | 5,500 | | | | | | |
| Total | 725,000 | Total | 1,050 | Total | 5,350 | Total | 50 |

해수면수위에 따라 배수갑문 조작을 하고 있어 다른 인공호와는 다르다. 영산호의 수문 현황을 파악하기 위한 자료로써 영산강 유역의 강수량은 기상청의 99년도 광주지역의 월별 강수량을 이용하였고, 호면 강수량은 기상청의 무안지역 99년도 강수량을 사용하였으며, 댐방류량 및 용수공급량은 농어촌진흥공사 영산강 사업단 '99년도 하구둑 관리연보¹⁰⁾를 사용하였다. 호면 증발산량의 산정은 기상학적으로 여러 변수 즉 순방사, 풍속, 공기온도, 상대습도등이 민감하게 작용하기 때문에¹¹⁾ 이들 변수들에 따른 정확한 증발산량의 산정은 별도의 연구가 필요한 사항이므로 여기서는 일반적인 증발산율을 적용하기로 했다. 한강유역의 경우 증발산량은 강수량의 57.5%,¹²⁾ 금강유역의 경우는 55.3%¹³⁾라고 보고하고 있으나 여기서는 일반적으로 호면 강수량의 1/2~1/3을 증발산량으로 본다고 하므로¹⁴⁾ 50%를 적용하여 증발산량으로 산정하였다.

유입수량의 산정은 지하수의 유입, 유출을 고려하지 않은 다음 식을 사용하였다.

$$I = Q - P + (O + E)$$

I : 영산호 유입량

Q : 호수의 저수량

O : 배수갑문 방류 및 용수 취수량

P : 호면 강수량

E : 호면 증발산량

여기서 호수의 저류량은 뎅 관리수위 -143 cm 때의 저수량 $239.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 을 사용하였는데 이는 하구둑 만수위 -135 cm 때의 총저수량 $253.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 로부터 계산한 값이다. 배수갑문 방류량 $2,070.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 및 용수취수량 $286.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 을, 호면강수량은 $53.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 을, 호면증발산량은 $26.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 으로 하여 유입수량을 산정하니 $2,569.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 이 되었다. 따라서 영산강 유역 내 강수량 $4,951.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 에 대한 강수 유출율은 51.9%로서 영산강 수질관리 종합대책(96)등에서 적용하고 있는 유출율 57%와는 약 5%의 차이가 있었다.

또 호수는 하천과 달라서 비교적 긴 정체기간을 갖고 있으므로 유입수에 의해 운반된 오염물질도 대부분 그 곳에 정체하고 있다. 따라서 호수의 체류특성은 그 호수의 생물생산, 수질상태, 부영양상태를 논할 때 대단히 중요하다. 따라서 영산호의 체류시간의 산정은 다음 식으로 계산하였다.

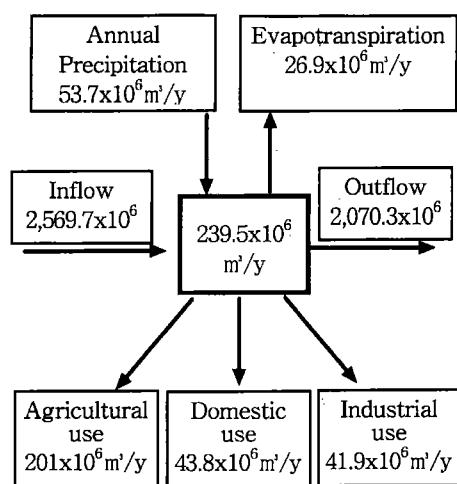


Fig. 2. Diagram of water budget on the Yongsan lake(99).

$$T_w = \frac{V}{Q} \times 365$$

여기서 T_w : 체류시간(day)

V : 1년간 평균 저수량(m^3)

Q : 1년간 총 유입량 (m^3/y)

따라서 년평균 저수량 $239.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$, 년간 총유입량 $2,623.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (호수유입수량과 호면 강수량의 합)을 적용하여 산정한 결과 영산호의 평균 체류시간은 33.3일이 되었다.

이는 1995년도 기준 소양호는 350일, 충주호는 164일, 대청호는 332일 등¹⁵⁾에 비하면 매우 짧은 체류시간으로써 이들 호수에 비하면 규모가 작고 수심이 얕아 물의 교류가 활발한 편이다. 영산호의 물수지 현황은 Table 2와 같고 이를 모식도로 나타내면 Fig. 2와 같다.

Table 2. Summary data concerning of water budget on the Yongsan lake(99)

| Date | Precipitation on watershed (mm/M) | Amount of precip. ($10^6 \text{ m}^3/\text{M}$) | Amount of inflow at lake ($10^6 \text{ m}^3/\text{M}$) | Amount of precip. at lake ($10^6 \text{ m}^3/\text{M}$) | Amount of outflow through dam ($10^6 \text{ m}^3/\text{M}$) | $\Delta V/\Delta t$ ($10^6 \text{ m}^3/\text{M}$) | Residence time (day) |
|----------|--------------------------------------|--|---|--|--|--|-------------------------|
| Jan.-'99 | 41.0 | 142.3 | 73.9 | 1.5 | 5.7 | 65.9 | |
| Feb.-'99 | 34.9 | 121.1 | 62.9 | 0.9 | 0 | 60.4 | |
| Mar.-'99 | 111.9 | 388.4 | 201.5 | 4.5 | 118.4 | 82.3 | |
| Apr.-'99 | 44.9 | 155.8 | 80.9 | 2.4 | 86.3 | -37.3 | |
| May.-'99 | 106.9 | 371.1 | 192.6 | 4.7 | 115.3 | 36.4 | |
| Jun.-'99 | 135.4 | 470.0 | 243.9 | 5.1 | 101.3 | 81.8 | |
| Jul.-'99 | 220.5 | 765.4 | 397.2 | 7.8 | 306.7 | 51.2 | |
| Aug.-'99 | 287.1 | 996.5 | 517.1 | 10.7 | 339.6 | 149.7 | |
| Sep.-'99 | 281.7 | 977.8 | 507.4 | 11.4 | 779.0 | -268.9 | |
| Oct.-'99 | 126.7 | 438.0 | 227.3 | 2.9 | 142.0 | 83.7 | |
| Nov.-'99 | 19.2 | 66.6 | 34.5 | 1.0 | 37.6 | -5.6 | |
| Dec.-'99 | 16.9 | 58.7 | 30.5 | 0.8 | 38.3 | -10.4 | |
| Total | 1,426.6 (mm/y) | 4,951.7 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) | 2,569.7 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) | 53.7 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) | 2,070.3 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) | 289.2 ($10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) | 33.3 (day) |

Table 3. Water quality of the Yongsan lake (1999)

| Date | W.T. (°C) | pH | DO (mg/l) | COD (mg/l) | Inflow position | | In lake | |
|----------|--------------|-----|--------------|---------------|-----------------|------------|-----------|-----------|
| | | | | | T-N (mg/l) | T-P (mg/l) | T-N(mg/l) | T-P(mg/l) |
| Jan.' 99 | 4.3 | 7.6 | 10.3 | 4.5 | 4.164 | 0.284 | 3.701 | 0.142 |
| Feb.' 99 | 7.4 | 7.5 | 11.5 | 5.1 | 3.955 | 0.253 | 3.492 | 0.110 |
| Mar.' 99 | 7.7 | 7.7 | 8.1 | 6.8 | 5.380 | 0.298 | 4.917 | 0.154 |
| Apr.' 99 | 15.6 | 7.5 | 7.7 | 5.9 | 4.762 | 0.269 | 4.385 | 0.325 |
| May.' 99 | 19.1 | 7.3 | 6.7 | 6.6 | 5.081 | 0.356 | 4.618 | 0.212 |
| Jun.' 99 | 24.0 | 7.2 | 7.0 | 7.3 | 5.573 | 0.396 | 4.351 | 0.252 |
| Jul.' 99 | 25.5 | 7.8 | 6.3 | 7.6 | 5.364 | 0.346 | 4.293 | 0.221 |
| Aug.' 99 | 27.2 | 7.6 | 6.0 | 6.9 | 4.756 | 0.337 | 4.213 | 0.193 |
| Sep.' 99 | 24.2 | 7.3 | 6.3 | 5.8 | 4.876 | 0.303 | 4.121 | 0.259 |
| Oct.' 99 | 18.8 | 7.4 | 6.1 | 6.6 | 4.584 | 0.372 | 4.320 | 0.228 |
| Nov.' 99 | 10.5 | 7.5 | 8.2 | 4.7 | 4.963 | 0.295 | 3.956 | 0.151 |
| Dec.' 99 | 4.5 | 7.6 | 9.7 | 4.5 | 4.419 | 0.269 | 3.637 | 0.175 |
| Mean | 15.7 | 7.5 | 7.8 | 6.0 | 4.824 | 0.315 | 4.157 | 0.202 |

3. 수질현황

영산호내 각 지점의 수질을 평균한 월별 수질현황은 Table 3과 같다. '99년도 영산호의 수질은 pH가 7.2-7.8로서 거의 중성을 나타내고 있고, 수온이 낮은 1, 2월에는 DO가 10.3 mg/l, 11.5 mg/l로 높게 나타났으나 7, 8월의 수온이 높을때는 6.3 mg/l, 6.0 mg/l로 낮아졌다. COD는 평균 6.0 mg/l로서 호수의 수질환경기준 III등급의 수질을 보이고 있으나 월별로는 IV등급의 경우가 많아 상수원수로는 적합치 않고 공업용수 및 농업

용수로만 이용가능한 수질을 보이고 있다. 총질소, 총인의 경우는 영산호 유입부분의 경우는 각각 4.824 mg/l와 0.315 mg/l를 나타냈고, 호수내 수질의 경우 총질소는 평균 4.157 mg/l, 총인은 평균 0.202 mg/l를 나타내고 있어 호수의 수질환경기준 V등급도 훨씬 초과하는 오염도를 보이고 있으며, Vollenweiders¹⁶가 제시하고 있는 인(P)의 부영양화 허용기준인 10 µg/l을 훨씬 초과하고 과잉기준농도라고 하는 20 µg/l도 10배나 초과하는 상태로서 부영양화가 심각한 지경에 이르고 있다.

Table 4. Develop loading of nitrogen and phosphorus by Pollutant sources at the Yongsan lake watershed

| Sources | Parameter | Loading unit | | Loading amount | |
|--------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------|---------------|
| | | T-N | T-P | T-N | T-P |
| Population | 1,730,885 per. | - | - | 19,228.9 kg/d | 2,149.3 kg/d |
| urban area | 1,340,300 | 10.5 g/p.d | 1.2 g/p.d | 14,073.2 | 1,608.4 |
| agricultural | 390,585 | 13.2 | 1.5 | 5,155.7 | 585.9 |
| Land | 3,470.823 km ² | - | - | 13,591.6 kg/d | 1,070.1 kg/d |
| paddy field | 716.779 | 6.56 kg/km ² | 0.61 kg/ | 4,702.1 | 437.2 |
| field | 332.133 | 9.44 | 0.24 | 3,135.3 | 79.7 |
| forest | 1,781.024 | 2.20 | 0.14 | 3,918.3 | 249.3 |
| urban area | 126.703 | 13.69 | 2.10 | 1,734.6 | 266.1 |
| pasture | 13.253 | 3.37 | 1.72 | 71.2 | 22.8 |
| others | 500.931 | 0.06 | 0.03 | 30.1 | 15.0 |
| Industrial | 112,597 m ³ /d | | | 4,721.0 kg/d | 1,497.4 kg/d |
| 1500'~ | 26,847 | 25.3-99.7 g/m ³ | 5.6-17.2 g/m ³ | 1278.9 | 305.0 |
| 1600'~ | 2,073 | 38.7 | 1.4 | 80.2 | 2.9 |
| 1700'~ | 2,375 | 21.0-73.0 | 4.4-16.4 | 65.8 | 21.9 |
| 1900'~ | 900 | 125.5 | 20.1 | 113.0 | 18.1 |
| 2000'~ | 200 | 1.1 | 0.0 | 0.2 | 0.0 |
| 2100'~ | 7,963 | 19.5-35.0 | 2.9 | 155.3 | 23.1 |
| 2500'~ | 1,119 | 33.4-110.7 | 38.9-267.4 | 52.8 | 89.2 |
| 2600'~ | 810 | - | - | - | - |
| 2700'~ | 7,128 | 46.8-73.2 | 6.5 | 333.8 | 46.4 |
| 2800'~ | 15,209 | 38.5 | 43.4 | 585.5 | 660.1 |
| 3100'~ | 200 | 2.5-36.3 | 0.1-3.8 | 0.5 | 0.02 |
| 3600'~ | 1,060 | 2.9-58.0 | 0.0-66.0 | 5.5 | 7.3 |
| 5000'~ | 120 | 2.5 | 2.0 | 0.3 | 0.2 |
| 8500'~ | 673 | 21.6 | 3.3 | 14.5 | 2.2 |
| 9300'~ | 286 | 9.3 | 1.7 | 2.7 | 0.5 |
| 15204-15499* | 35,450 | 32.5-56.9 | 6.6-10.5 | 1,216.4 | 244.8 |
| 24249* | 3,569 | 154.4 | 8.5 | 551.1 | 30.3 |
| 3* | 1,000 | 13.3 | 0.3 | 13.3 | 0.3 |
| 4* | 790 | 2.9 | 3.3 | 2.3 | 2.6 |
| 5* | 4,825 | 51.6 | 8.8 | 248.9 | 42.5 |
| Livestock | 8,309,243 head | - | - | 43,939.8 kg/d | 15,750.6 kg/d |
| cattle | 166,747 | 116.8 g/head/d | 36.1 g/head/d | 19,476.0 | 6,019.6 |
| dairy cow | 26,848 | 161.8 | 56.6 | 4,344.0 | 1,519.6 |
| hogs | 420,774 | 27.7 | 12.2 | 11,655.4 | 5,133.4 |
| poultry | 7,694,874 | 1.1 | 0.4 | 8,464.4 | 3,078.0 |
| Fishfarm | 366,720 | 15.0 g/m ² /d | 4.2 g/m ² /d | 5,500.8 kg/d | 1,540.2 kg/d |
| Total | | | | 86,982.1 kg/d | 22,007.6 kg/d |

Number* ; Category code of standard industry.

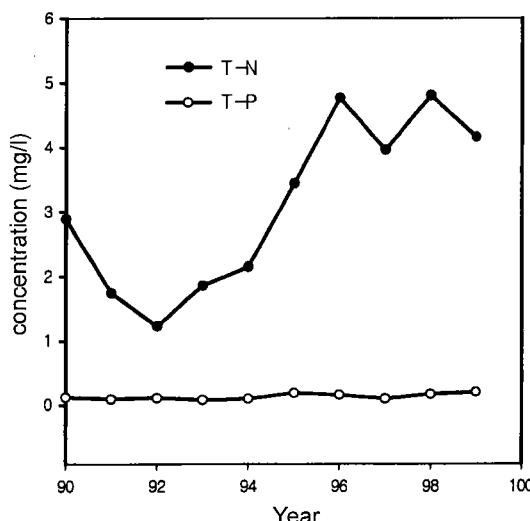


Fig. 3. Annual variation of T-N and T-P concentration at the Yongsan lake.

Fig. 3은 영산호에 있어서 1990년도부터의 T-N 및 T-P의 농도의 연간변화 추이²⁾를 나타낸 것이다. 여기서 보여준 바와 같이 T-N의 경우는 매년 크게 증가하는 경향을 보이나 그 변화가 불규칙하고, T-P의 농도는 거의 일정한 증가 경향을 보이고 있어 인(P)의 농도를 가지고 부영양화 평가 모델을 만드는데 별 무리가 없을 것으로 보인다.

4. 유입부하량 산정

영산강 유역에서의 총질소 및 총인의 발생부하량 산정결과는 Table 4와 같다. 오염원 자료는 '99년도 환경 편람에 의한 자료를 이용하였고, 발생 원단위는 환경부 고시제 1999-143호를 이용하였다. 특히 산업폐수에 의한 발생량 산정은 동 지침에 의한 표준산업분류코드별 원단위를 적용하였다. 영산강 유역에서의 총질소 발생부하량은 86,982.1 kg/d이었고, 총인의 발생부하량은 22,007.6 kg/d이었다. 그러나 영산호의 유입부에서의 총질소 및 총인농도는 각각 평균 4.824 mg/l, 0.315 mg/l 이므로 이를 유입수량에 대해 부하량을 산정하면 총질소의 유입부하량은 33,962 kg/d가 되므로써 유역내 발생부하량에 대해 39.0%가 호수유입율이 되고 있고, 총인의 유입부하량은 2,218 kg/d만이 영산호에 유입되므로써 총인의 유입율은 10.1%가 되었다. 총질소에 비해서 총인의 유입부하율이 낮은 것은 총인이 발생원으로부터 영산강을 통하여 유하되면서 인산염의 형태로 유역내에 침전되는 경향이 높기 때문인 것으로 생각된다.

각 오염원별 총질소와 총인의 발생부하량 기여율을

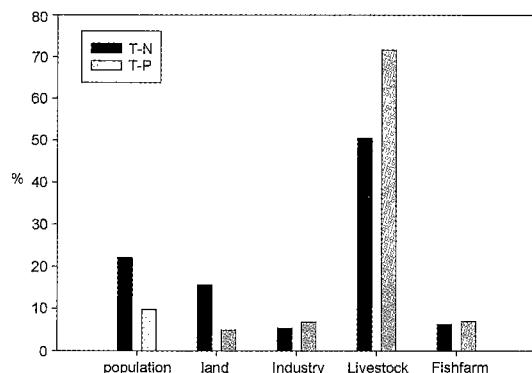


Fig. 4. Contribution rate of develop loading of T-N and T-P at the Yongsan lake watershed.

분석한 결과 Fig. 4와 같다. 총질소의 발생부하량을 보면 사람이 22.1%, 토지 15.6%, 산업 5.4%, 축산 50.5%, 양식장 6.3%로서 축산에 의한 기여도가 가장 높았고, 그 다음 사람에 의한 것이었다. 또 총인 발생부하량은 사람 9.8%, 토지 4.9%, 산업 6.8%, 축산 71.6%, 양식장 7.0%로서 총인부하량의 기여율 역시 총질소와 마찬가지로 축산에 의한 경우가 가장 높았고, 그 다음 사람에 의한 경우였다. 그러나 총인부하률을 보았을 때 충주호는 사람에 의한 부하율이 30.9%로 가장 높고 다음이 22.1%의 양식장에 의한 오염이었으며, 축산계는 10.8%로 가장 낮은 것으로 조사되었고, 대청호 역시 사람에 의한 경우가 47.2%로 가장 높고 다음이 가축에 의한 24.8%였으며, 산업이 3.4%로 가장 낮은 것으로 조사되었다.¹⁵⁾ 이처럼 영산강유역에서는 타 호수와는 달리 사람이 아닌 가축에 의한 발생부하량이 매우 높은 비율을 차지한 것은 영산강 유역에 광주광역시와 나주시를 제외하고서는 대부분이 농촌으로서, 거주인구는 작고 가축은 많이 기르고 있는 특성이 반영된 것이라 생각된다.

5. 인(P) 부하 모델

호수의 생태계에서 조류는 매우 중요한 기초생산자로서 호수의 생산력에 큰 영향을 미친다. 이러한 조류의 생산력은 조류의 주요성분인 탄소(C), 질소(N), 인(P)에 의해 크게 영향을 받는다. 이중 탄소(C)의 경우는 대기와 수중에 충분히 존재하기 때문에 생산력을 조절하는 경우는 거의 희박하고 질소(N)와 인(P)의 동태가 호수의 생산력을 조절하는 중요한 요인으로 작용한다. 그러나 호수의 생산력은 대부분 인(P)에 의해서 조절되는 것이 일반적이다. 이는 질소(N)와 인(P) 모두가 조류의 생장에 제한 요소이기는 하나 인(P)을 관리하는 쪽이

훨씬 적은 비용으로 관리할 수 있기 때문이다.¹⁷⁾ 따라서 호소의 부영양화를 예측하는데는 인(P)의 농도가 매우 중요하며 일반적으로 호소내의 평균 인(P)농도의 산정은 다음과 같은 Vollenweider-OECD(1976)의 표준 인(P)부하모델을 사용한다. 이 모델은 1970년 중반에 OECD의 지원을 받아 약 5년간에 걸쳐 미국, 캐나다, 호주, 일본 그리고 유럽 14개국에 있는 호소의 수질을 조사하고 이를 통하여 부영양화와 영양염류 부하량과의 관계를 규명한 모델로서 호소의 체류시간, 평균수심 등 수리학적 특성과 인(P)의 수면적부하량으로부터 호소수질의 인(P)농도를 예측하는 대표적인 모델이다.¹⁷⁾ 이 Vollenweider 형 모델은 (i) 호소를 완전혼합조로 보고, (ii) 1년 단위로 반복되는 현상이라고 생각하고, (iii) 유입, 유출농도차를 일괄하여 수지잔량으로 취하는 등의 가정 하에서 성립¹⁸⁾하기 때문에 본 영산호에 적용하여도 별 무리가 없을 것으로 판단하여 이를 적용하여 보았고, 그 기본식은 다음과 같이 주어진다.

$$[P_j] = \frac{L(P)}{Q_s} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{T_w}} \quad (1)$$

여기서, $[P_j]$ 는 호수중의 평균 인(P)농도 (gP/m^3)

$L(P)$ 는 유입수중 인(P)의 수면적부하량($\text{gP/m}^2/\text{y}$)

Q_s 는 수리적 표면부하량(m/y)

T_w 는 체류시간(year)

위의 식을 이용하여 영산호의 인(P) 평균농도를 계산하면 실측치와는 약간의 차이가 생긴다. 즉, 영산호의 유입수 평균 인(P)수면적 부하량은 $23.398 \text{ g/m}^2/\text{y}$ 이고 수리적 표면부하량은 $74.269 \text{ m}/\text{y}$ 이며, 평균 수심은 6.9 m , 평균체류시간은 0.093년(34일)이므로 이를 대입하면 영산호의 평균 인(P)농도는 0.241 g/m^3 이 되지만 실측 평균 인(P)농도는 0.202 g/m^3 이므로 이를 보정하기 위한 상수(C)로서 0.838을 적용하여야 하였다

따라서 영산호의 유입 인(P)부하량으로부터 산정된 호수내 평균 인(P)농도를 구하는 model식은 다음과 같은 식을 만들 수 있겠다.

$$[P_j] = 0.838 \cdot \left[\frac{L(P)}{Q_s} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{T_w}} \right] \quad (2)$$

또는

$$[P_j] = 0.838 \cdot \left[\frac{L(P)}{Q_s} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{z}{Q_s}}} \right] \quad (3)$$

여기서 z 는 평균수심 (m)

또는 $L(P)/Q_s$ 는 유입수중의 인(P)농도 $[P]$ 로 표현하고, 축적률을 R 로 표현하면

$$[P_j] = \frac{L(P) \cdot (1 - R)}{Q_s} = [P_j] \cdot (1 - R) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

축적률 R 의 표현은 여러 가지¹⁹⁾가 있겠지만 영산호의 경우는 다음과 같이 표현할 수 있겠다.

$$R = 0.469 [1 + \sqrt{T_w}]^{-1} \quad (5)$$

$$R = \frac{v}{v + Q_s} = \left(1 + \frac{Q_s}{v} \right)^{-1} \quad (6)$$

여기서 v 는 겉보기 침강속도(m/y)

따라서 (5)식에 의해 계산된 영산호의 인(P)축적률은 0.359가 되며, (6)식에 의해 계산된 영산호의 인(P)겉보기 침강속도는 0.114 m/d 가 됨을 알 수 있었다.

IV. 결 론

영산강하류에 위치한 영산호를 대상으로 1999년 1월부터 12월까지 1년간의 수문 및 수질조사 자료를 이용하여 영산강 유역 내에서의 총영양염류의 발생부하량과 영산호에 대한 유입율을 산정하고 부영양화를 평가할 수 있는 인(P)부하 모델을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 영산강 유역내의 총강수량은 $4,951.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 이었으나 영산호 유입수량은 $2,569.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 로서 유역내 강수유출율은 51.9%이었다. 또 영산호내의 체류시간은 34일이었다.

2. 영산호의 수질은 pH 7.5 mg/l(7.2~7.8 mg/l), DO 7.8 mg/l(6.1~11.5 mg/l), COD 6.0 mg/l(4.5~7.6 mg/l), T-N 4.157 mg/l(3.492~4.917 mg/l), T-P 0.202 mg/l(0.110~0.325 mg/l)로서 Vollenweiders가 제시하고 있는 인(P)의 부영양화 과정한계농도 $20 \mu\text{g}/\text{l}$ 보다 10배나 초과되는 부영양상태에 있음이 확인되었다.

3. 영산강유역내에서의 총질소 발생부하량은 $86,928.1 \text{ kg/d}$ 이고 총인 발생부하량은 $22,007.6 \text{ kg/d}$ 이었다. 그러나 영산호에 유입하는 총질소부하량은 $33,962 \text{ kg/d}$, 총인부하량은 $2,218 \text{ kg/d}$ 로서 유입율은 각각 39.0%와 10.1%가 되었다.

4. 오염원별 총질소 발생부하량의 기여율을 분석한 결과 사암은 22.1%, 토지는 15.6%, 산업은 5.4%, 양식장은 6.3%이고 축산에 의한 발생량이 50.5%로서 가장

높았다. 또 총인 발생부하량의 기여율은 사람이 9.8%, 토지가 4.9%, 산업이 6.8%, 양식장이 7.0%이고 축산에 의한 발생량이 71.6%로서 가장 높았다.

5) 영산호의 유입수 평균 인(P)수면적부하량[L(P)]은 $23.398 \text{ g/m}^2/\text{y}$ 이고, 유입수의 수리적 표면부하량(q_s)는 $74.269 \text{ m}^3/\text{y}$ 이며, 호내의 인(P)축적율은 0.359가 되었고, 인(P)의 침강속도는 0.114 m/d 가 되었다.

6) 영산호의 부영양화 평가를 위한 인(P)부하 모델식은 $[P_j] = 0.838[L(P)/Q_s \cdot 1/1 + \sqrt{T_w}]$ 로써 Vollenweider-OECD의 표준 인부하모델에 0.838의 보정상수가 필요했다.

감사의 글

이 논문은 1999년 광주보건대학 학내지원 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) 農業振興公社 : 榮山江開發 2段階 農業綜合開發事業 河口堰 工事誌. 農林水產部, 1984.
- 2) 영산강환경관리청 : 환경편람(1999), 광주, 1999.
- 3) 장순천 : 모델링에 의한 영산호 부영양화 예측에 관한 연구. 한양대학교 환경과학대학원, 석사학위논문. 서울, 1987. 8.
- 4) 류일광, 이치영, 강영식, 김관천 : 영산호의 부영양화방지를 위한 질소, 인의 배출 원단위에 관한 조사연구. 한국환경위생학회지, 15(2), 51-58, 1989.
- 5) 주홍규, 박봉현 : 영산호 주위의 수질 및 생물군집구조에 관한 연구, 한국수질보전학회지, 9(1), 31-46, 1991.
- 6) 김병환, 강영식 : 영산호의 수질에 관한 조사 연구, 광주보건대논문집, 17, 317-343, 1992.
- 7) 김병환 : 영산호의 식물성프랑크톤 분포조사, 한국환경 위생학회지, 18(2), 26-38, 1992.
- 8) 이성기외 10인 : 영산호 환경용량 조사연구, 광주지방환경청, 광주, 1990.
- 9) 오준성 외 7인 : 영산강 수질관리 종합대책 수립에 관한 연구, 광주광역시, 광주, 1996.
- 10) 영산강 사업단 : 관리연보(99년 하구둑, 영암, 금호방조제), 농업기반공사, 2000.
- 11) 임창수, 이종태, 윤세희 : 계절과 수문기상학적 조건에 따른 지역 증발산의 특성화, 한국수자원학회지, 29(2), 235-247, 1996.
- 12) 김문일 : 한강유역의 강수량과 증발량의 비. 중앙관상대 기상연구소, 14-16, 1979.
- 13) 김광식 : 수자원개발을 위한 금강유역의 수문기상학적 연구, 중앙관상대 연구조사부, 110-118, 1972.
- 14) 일본수질오탄연구협회 : 호수환경조사지침, 93, 공해대책기술동우회, 동경, 1984.
- 15) 김재운 : 우리나라 인공호의 부영양화 평가 및 예측에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 7(4), 331-449, 1998.
- 16) Lee, G. F., Jones-Lee, A. and Rast, W.: Alternative Approaches for Trophic State Classification for Water Quality Management, Parts I and II, Application of Vollenweider-OECD Eutrophication Modeling Approach. Submitted for publication, 1-48, March, 1995.
- 17) Jones, R. A. and Lee, G. F.: Eutrophication Modeling for Water Quality Management; An Update of the Vollenweider-OECD Model. World Health Organization's Water Quality Bulletin 11, 67-174, 118, 1986.
- 18) 合田健, 村岡浩爾福島武彥 : 霞ヶ浦の栄養塩の物質收支について, 國立公害研究所研究報告, 54, 9-29, 1984.
- 19) T. FUKUSHIMA, K. AMANC, K. MURAOKA: Simple model to predict lake water qualities. Journal of water pollution research, Japan, 9, 586-595, 1986.