

기본연구과제 2003 - 08

금강호 유기성 퇴적물의 특성과 수질영향

발간사

하상이나 호소의 퇴적물은 전통적으로 수운을 위한 수로유지, 하천의 홍수통제를 원활히 하고 저수지의 저수량 확보를 위해 준설의 대상으로 관리 되어왔으나 최근에는 환경 및 생태적 관점에서의 관리로 점차 변화되어가고 있습니다. 이러한 퇴적물에 포함된 질소와 인 등의 영양염류와 유해물질은 하천과 호소의 수질악화의 원인이 되고 있지만 아직도 퇴적물은 단순한 오염물질의 저장고로 간주되고 있는 것이 현실입니다. 금강호는 금강유역의 최하단에 위치하는 지형학적 특성상 유속이 느리고 체류시간이 커서 수질관리면에서 불리한 경우가 많습니다. 금강호는 물이 부족한 저수기나 갈수기에 농업용수 공급을 위한 관리수위 유지를 위해 수리학적 체류시간을 증가시키면 침전된 퇴적물의 용출에 의해 수질이 악화될 개연성을 갖고 있습니다.

이러한 상황에서 장차 새만금 간척사업과 관련하여 새로이 조성될 만경수역에 체염담수를 위해 금강호물을 도수한다면 금강호내의 퇴적물 오염원관리나 수질관리가 더욱 요구된다고 하겠습니다. 나아가 금강호 물을 어느 특정지역에서 일방적으로 과도하게 사용하면 서해안 해역에 부정적 환경영향이 우려되거나 금강호의 물 배분을 둘러싸고 행정기관 및 지역주민간에도 갈등이 제기될 수 있습니다.

현재 금강호는 금강천리의 끝단에 위치하여 상류지역으로부터의 지속적인 오염원의 유입과 수위유지를 위한 체류시간 조절 등으로 저수기나 갈수기에는 농업용수 수질기준을 초과하는 경우가 자주 나타나고 있는 상황입니다.

이에 금강호의 장차 물 부족 상황을 예측하고 이에 대한 용수수요전망, 물의 체류시간 증가가 금강호 수질에 어느 정도 영향을 주는지 과학적 실험 자료치를 근거로 하여 합리적 용수배분으로 지역간의 갈등을 해소할 수 있는 근거연구가 된다면 환경문제의 해결에도 도움이 될 것입니다. 특히 금강하구의 장항 서천 군산지역은 서해안 시대를 맞이하여 장차 국가산업단지의 입지 등 대규모 개발

사업을 앞두고 있으므로 이에 대한 수질이 보장되는 충분한 용수의 확보가 지역의 지속가능한 발전의 지표가 된다고 하겠습니다.

따라서 이러한 연구를 통해 호소의 수질이나 퇴적물 관리에 대한 관심을 높이고, 퇴적물이 호소의 수질에 미치는 영향을 고려하여 환경상 피해를 최소로 하는 안정적인 준설작업 대안의 마련도 필요하다고 보겠습니다. 특히 금강호의 홍수시 통수단면확보는 상류지역의 침수를 방지하고 나아가 안정적인 수량관리를 위해서도 꼭 필요한 부분입니다.

끝으로 이러한 연구를 수행하는데 자문과 협조를 아끼지 않은 관계 전문가와 공무원, 연구원 여러분들의 노력에 감사드리며, 어려운 여건 하에서 환경분석과 측정을 통해 금강호 퇴적물의 환경관리 방향을 제시하는 연구를 수행한 정종관 연구위원의 노고에 감사의 뜻을 표합니다.

2003년 12월 31일

충남발전연구원장
오 제 직

목 차

제 1 장 서론

1. 연구의 필요성 1
2. 연구의 목적 2
3. 연구 방법 및 내용 3

제 2 장 관련연구 고찰

1. 호소 수질개선 방법 6
2. 영양염류 용출 11
3. 호소내 인 부하 14

제 3 장 재료 및 방법

1. 시료채취 및 분석 16
2. 인의 용출 17

제 4 장 결과 및 토의

1. 금강호 특성 21
2. 수질변화 추세 34
3. 퇴적물 용출분석 41
4. 금강호 수질영향 예측 51

제 5 장 결론 및 제언 56

참고문헌

< 표 차 례 >

<표 2-1> 호소의 수질개선을 위한 방법 및 특성	8
<표 4-1> 금강유역의 7개 소유역	22
<표 4-2> 주요지점의 자연유량	25
<표 4-3> 금강유역 수문특성	25
<표 4-4> 금강수계 주요지점의 유황	26
<표 4-5> 금강하류 하천유지용수	27
<표 4-6> 금강호의 수리학적 특성인자	28
<표 4-7> 단계별 농업용수 공급계획	29
<표 4-8> 금강수계 용수수요 예측	30
<표 4-9> 금강하류(규암~하구연) 물 수요공급 분석	31
<표 4-10> 규암~금강호 용수수요 예측	32
<표 4-11> 농업용수의 수질환경기준	33
<표 4-12> 농업용수의 수질 기준 (지하수)	34
<표 4-13> 금강호 현장 수질측정 결과	35
<표 4-14> 퇴적물내 유기물질의 함량	43
<표 4-15> 퇴적물내 인의 존재형태	44
<표 4-16> 금강호 퇴적물에 의한 수질예측 적용 변수	51
<표 4-17> 금강호 유황별 퇴적물에 의한 수질예측 결과	53
<표 4-18> 금강호 유황별 인 축적률	53
<표 4-19> 우리나라 주요 호소의 인 축적률	54

< 그 립 차 례 >

<그림 2-1> 호소수의 수질악화 과정 및 단계별 수질개선방법	7
<그림 2-2> 퇴적물과 물의 계면 표시	13
<그림 2-3> 물과 인접한 퇴적구성물질간의 대략적 화학물질 교환 을 나타내는 퇴적물과 물의 계면표시	13
<그림 3-1> 퇴적물내 인의 존재형태를 결정하기 위한 분석절차 모 식도	19
<그림 3-2> 퇴적물로부터 인의 용출플럭스를 측정하기 위한 실험 장치도	20
<그림 4-1> 금강호 수질측정망 지점 및 양수장 위치도	28
<그림 4-2> 금강호 수심별 산화환원전위 측정결과	36
<그림 4-3> 금강호 퇴적물의 pE - pH의 관계도	37
<그림 4-4> 금강호 pH 변화추세(1995~2002)	39
<그림 4-5> 금강호 COD 변화추세(1995~2002)	39
<그림 4-6> 금강호 T-N 변화추세(1995~2002)	40
<그림 4-7> 금강호 T-P 변화추세(1995~2002)	40
<그림 4-8> 금강호 chl-a 변화추세(1995~2002)	41
<그림 4-9> 퇴적물의 C/N비 분포와 부식화도	43
<그림 4-10> 퇴적물내 인의 존재형태 분포도	45
<그림 4-11> 호기성조건하의 T-P 농도변화	47
<그림 4-12> 호기성조건하의 T-P 용출률 변화	47
<그림 4-13> 혐기성조건하의 T-P 농도변화	48
<그림 4-14> 혐기성조건하의 T-P 용출률 변화	48

제 1 장 서론

1. 연구의 필요성

1) 연구대상과 관련된 현상과 문제점

금강호는 금강의 하단에 위치하는 자연지리적 특성상 관리수위 유지를 위해 주기적으로 배수갑문 개폐가 이뤄짐에 따라 오염물질의 축적과 퇴적물의 용출이 반복되는 경향을 보이고 있다. 특히 상류지역에서 유입되는 영양염류의 축적에 의해 갈수기가 지속되면 영양염류의 과잉과 수온, 햇빛 등의 기상조건에 의해 녹조현상이 심화되어 장항 및 군산해역에도 영향을 끼친다.

1994년 8월 금강호 갑문 폐쇄 이후 평균적인 수질은 COD_{Mn} 3.5~10.0 mg/L 로 Ⅲ~Ⅴ등급을 보이고 있다. 장차 새만금 간척사업의 방조제 완공 후 내부개발이 본격화 될 경우 새로 형성될 새만금호의 제염(除鹽) 담수를 위해 금강호 물을 도수할 계획이 추진되고 있다. 이 경우 현재 농업용수를 취수하여 쓰고 있는 지역주민에게 물 부족 및 수질악화로 민원이 제기될 뿐만 아니라 장항항 및 군산항 지역 등 해역생태계의 변화, 취수를 둘러싸고 지역 간의 갈등도 초래할 우려가 있다. 금강호를 취수원으로 하는 부여, 서천, 장항, 군산 지역의 안전한 용수공급 및 수환경 생태계의 보호를 위해서 이러한 만경강 수계로의 유역변경 취수 시 환경상 문제점을 파악하여 대비할 필요가 있다.

2) 연구대상과 관련된 정책·제도 등의 내용과 문제점

호소의 체류시간 증대에 따라 퇴적물 오염으로 인한 문제는 다

른 환경매체와는 달리, 퇴적물은 적절한 질을 유지해야하는 관리 대상 보다 수질오염원으로 인식하여 관리하고 있는 것이 현실이다. 이러한 배경에는 퇴적물이 하상에 퇴적되기 전까지 물 흐름의 2차원 영향권에 속하며 다른 오염물질과는 달리 일상적으로 체감되지 않는 속성과 수계에서 유입된 오염물질이 퇴적물 내에 저장되는 저장소로만 인식되어 왔기 때문으로 판단된다. 이러한 퇴적물은 상류 육지로부터 유입되거나 호소 내부적인 물리화학적 작용으로 호소바닥에 쌓이는 점토, 유기물질 및 무기물질의 총칭이다. 퇴적물에 포함된 영양염류와 유해물질은 부영양화 및 수질악화의 원인이 되고 장기적으로 수생 생태계에도 부정적인 영향을 줄 뿐만 아니라 물의 이용면에서도 경제적인 가치하락을 초래할 수 있다.

3) 연구의 필요성

따라서 퇴적물 특성에 대한 체계적 연구를 통해 퇴적물에 의한 환경 영향을 파악하고, 호소수의 취수량 증가에 따른 관리수위유지를 위한 물의 체류시간이 증가함에 따른 퇴적물의 용출이 수질에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기초연구가 필요하다.

2. 연구의 목적

하구호는 유역의 최하단에 위치하는 지형적 특성상 유속이 느리고 체류시간이 길어 수질관리면에서 불리하다. 특히 저수기나 갈수기시 관리수위 유지를 위해 수리학적 체류시간을 증가시키

면 침전된 퇴적물의 용출에 의해 수질이 악화될 수 있다. 이러한 상태에서 유역변경식 취수량 증대는 호소의 체류시간을 증대시키는 결과를 가져온다. 퇴적물 내에 부영양화를 초래하여 수질악화에 결정적인 요소로 작용하는 인화합물의 존재형태를 분석하여 용출에 의한 수질악화 가능성(기여도)을 파악한다. 퇴적물로부터 영양염류의 용출에 영향을 주는 물리, 화학, 생물학적 요소를 살펴 본 다음 저수기나 갈수기시 금강호의 체류시간 증가가 퇴적물 용출에 어느 정도 영향을 주는지를 판단한다. 그런 다음 수리학적 체류시간별 수질 변동치를 예측하여 금강호의 수질관리에 적용, 기여할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 특히 금강호가 장래 조성될 새만금호의 제염담수화를 위해 희석수 공급원으로 사용될 경우 물의 배분을 둘러싸고 충남권과 전북권의 수리권 분쟁도 예상되므로 이에 대비할 수 있는 이론적 근거로도 적용될 수 있다.

3. 연구 방법 및 내용

1) 이론 및 방법론 검토

퇴적물의 성분원소 분석은 적당한 시료채취기술이 수반된다면 퇴적물과 호소에 영향을 주는 외부환경요인을 이해하는데 많은 정보를 제공해 줄 수 있다. 호소의 퇴적물은 외부 토양의 유실이나 하천의 침식에 의해 유입되는 물질(외생기원 물질)과 오염물질의 침전과 분해, 용출 등 자체에서 생성되는 물질(내생기원 물질)로 구성된다. 따라서 퇴적물의 화학적 구성은 퇴적물과 호소 수질 사이의 함수관계를 나타낸다고 볼 수 있다. 이러한 정보자

료를 토대로 최근에 퇴적물과 수층간의 물질교환작용 등을 통해 호소수질을 파악하려는 시도가 추진되고 있다.

호소내 부영양화 유발의 결정요소인 인의 거동과 관련하여 침강은 호소내에 상류에서 하류에 이르기까지 여러 개의 정점에 퇴적물 포집장치(sediment trap)를 설치하여 일정한 주기마다 침강물을 채취 분석함으로써 측정할 수 있다. 그러나 저질로부터 재용출되는 인의 양은 실측하기가 어렵고 현실적으로 정확도가 낮아 실측보다 인의 물질수지로부터 간접적으로 계산하는 방법도 있다. 재용출량을 측정하는 방법으로서 퇴적물 용출장치(chamber)를 사용하는 방법, 퇴적물 표면의 인농도 구배를 사용한 확산모델법 등이 있으나 현장의 산화환원전위(ORP) 재현, 난류(turbulence)재현 등의 문제로 인하여 정확도가 낮다.

인의 물질수지 관계식인 **【인유입량 = 유출량 + 침강량 - 재용출량】**의 관계로부터 유입량, 유출량, 침강량을 측정한 경우에는 재용출량의 산정이 가능하나, 재용출량을 실측하지 않는 경우에는 침강과 재용출을 구분할 필요없이 **【침강량 - 재용출량】**을 호소내 순제거율로 간주하고 **【유입량 - 유출량】**의 관계로부터 구할 수도 있다. 그러나 이를 위해서는 호소 유입부 및 유출부의 오염부하량을 정확히 측정해야한다는 어려움이 있다.

2) 국내 · 외 선행연구 검토

덴마크, 스웨덴, 네덜란드 등 호소가 많은 선진국에서는 퇴적물과 수질간의 상관관계 규명을 위한 연구가 일찍 시작되었다. Hakanson은 퇴적물에 관하여 체계적으로 연구하였으며, Hansen은 퇴적물과 호소의 부영양화 정도를 판단하는 기준을 설정하였다. 그는 퇴적물 내 탄소와 질소의 함량으로 호소의 영양상태를 판

단하는 기준을 정립하였다. Anderson은 퇴적물 내 인 함량을 분석하는 데 기존의 표준화법과 연소분석법을 비교하였다. 한편 동양권에서는 일본의 Hosomi가 퇴적물의 영양염류 용출속도식을 기존의 연구자들과는 다른 형태의 식을 제안하였다. Nakajima는 퇴적물 내 인 함량과 인과 결합하여 용출되어 나오는 유기성 인, Ca-P, Al-P, Fe-P의 함량 분포에 대해 연구하였다. 국내에서는 팔당호 준설을 위한 수질영향평가 차원에서 진행되었거나 마산만 준설이 해양환경에 미치는 영향평가 등에서 다루어진 바가 있다.

3) 본 연구에서 다루는 사항

금강호는 금강수계의 끝단에 위치한 만큼 물 이용에 따른 환경상의 영향이 크므로 장차 물 이용을 위한 수요변화를 고려하여 호소의 수리적 특성과 퇴적물의 물리화학적 특성을 파악한 다음 금강호의 체류시간, 수온, pH 등 수리적 특성이 변할 경우 용출조건을 고려하여 수질에 어느 정도 영향을 줄 수 있는지를 정성·정량적으로 판단할 수 있는 결과를 도출한다. 이러한 결과에 대한 수질변화의 검증을 위해 1994년 이후 현재까지 금강유역환경청의 수질측정망 수질자료를 이용하여 퇴적물 용출이 호소 수질에 미치는 영향을 정량적으로 다룬다. 따라서 평·갈수기 등 유황조건에 따라 취수량 증가에 따른 퇴적물 용출에 의한 부영양화의 대표적 원인물질인 인 농도의 변화를 예측하고 이에 대한 대책을 모색한다.

제 2 장 관련연구 고찰

1. 호소 수질개선 방법

호소에 대한 수질개선정책은 주로 조류의 성장 제한요인으로 작용하는 인산염에 대해서 수행되어지기 때문에, 주로 인산염에 관한 처리방안들이 외적관리와 내적관리 측면에서 거론되고 있다. 영양염의 전도(顛倒, turnover)현상이 높은 경우 이러한 현상을 줄이기 위한 방법들을 우선적으로 실행하고 그 이후 발생하는 문제들에 따라 적절한 방법을 선택하게 된다.

호소의 수질오염 방지를 위한 방안은 호소외부 즉 발생원에 대한 관리와 호소내부 즉 오염물질의 유입으로 오염물질이 축적된 호소를 생태학적으로 복원하는 방법으로 구분할 수 있다.

호소의 오염원의 특성에 따라 적용되는 방법에는 차이가 있을 수 있으며, 때로는 호소 내·외부에서 오염원에 대한 관리와 오염물질 처리가 동시에 이루어져야 할 필요도 있다. 왜냐하면 발생원에 대한 관리로 오염물질의 유입부하량이 감소하였다 하더라도 장시간 유기물이 축적되면 퇴적물로 인해 수질회복이 지연되거나, 수질개선의 효과를 얻을 수 없기 때문이다. (호소 내부 부하에 기인)

유입수를 통한 오염물질 유입 (1) 호소내 직접적인 오염물질 유입 (1)

↓ (3, 4)

↓ (2, 5, 6)

호소에서 오염물질 농도의 증가 (7, 16)

↓

퇴적층에서의 오염물질 농도 증가 (9)

↓ (8, 12)

퇴적층으로부터 배출되는 오염물질의 배출량 증가 (9)

↓ (11, 12, 13, 14, 15, 16, 18)

조류의 증가 (7, 13, 17, 19)

↓ (11, 21)

투명도감소 (18)

↓

남조류의 우점

주 : 각 번호는 수질개선방법으로 세부적인 내용은 <표 2-1> 참조

<그림 2-1> 호소수의 수질악화 과정 및 단계별 수질개선방법

<표 2-1> 호소의 수질개선을 위한 방법 및 특성

No.	수질개선방법	경험	효과	비용
	오염물질 전도현상(turnover)의 감소			
1	점오염원의 배출 억제	+	+	±
2	폐수유출 억제	+	+	+
3	유입수의 수질개선			
	- 침전	±	±	±
	- 인산염의 화학적 처리	+	+	±
	- 여과	+	-	±
4	점오염원의 배출수의 유로 변경			
5	농경지역에 산재된 오염물질 제거	±	-	★
6	가정하수의 유입억제	+	-	+
	호소내 오염물질의 감소			
7	회석	+	+	★
8	수심의 증가	±	-	+
9	준설	+	±	+
10	생물의 기계적 제거	+	+	+
	호소내 오염물질의 유용성 감소			
11	호소물의 배수	-	-	-
12	심층 폭기	±	+	-
13	수온약층의 인위적 파괴	±	±	-
14	퇴적층의 표면피복	-	-	★
15	퇴적물로부터의 인의 불활성화	±	±	-
16	수체 내에서의 인의 불활성화	±	+	-
	생태계의 인위적 조작			
17	서식지 조작	±	-	+
18	저니 조작	±	-	-
19	조류의 화학적 제거	±	-	±
20	조류의 생물학적 제거	+	±	-
21	적극적인 생물학적 관리	+	+	-

주 : +; 많음, ±; 적당함, -; 적음, ★; 지역 환경에 크게 영향을 받음

(1) 호소 외적인 관리 (발생원 관리)

- 점오염원 관리
- 비점오염원 관리
- 유입수 관리

Case 1. 침전시설(응집제 사용)을 통한 유입수의 수질개선

네덜란드의 Naardermeer호 유입되는 유입수내 인산염 제거를 위해 최대 처리 용량이 600m³/h인 화학적 침전시설을 유입구 부분에 설치함으로써 유입수내 0.5mg/L의 인산염 농도를 0.1~0.15 mg/L로 약 75% 감소시켰다.

Case 2. 유로변경에 의한 수질개선

Lake Washington은 많은 지류를 가지고 있으며, 11개의 폐수 배출시설에서 유입되는 하수를 유로 변경함으로써 수질을 개선에 성공한 사례로 잘 알려져 있다. 유로변경 전 연평균 T-P농도는 64μg/L이었으나 1964년부터 1967년까지 유로변경 사업이 진행된 이후 1972년에는 T-P의 농도가 21μg/L로 감소하였다. 그로 인해 외부에서 유입되던 인부하의 88%가 제거되었다. chl-a 농도 또한 유로 변경 전 연평균농도가 36μg/L이었던 것이 7년 동안의 평균농도가 6μg/L로 감소하였다. 1976년에는 Daphnia가 급격히 증가하여 chl-a농도가 1/2로 감소하였다. 또한 유로 변경

전 여름 평균 투명도의 깊이가 1m 이었던 것이 1970년 중반까지 3.1m로 증가하였다. 결과적으로, 1970년 이후의 호소상태는 T-P 농도가 $17\mu\text{g/L}$, chl-a농도가 $3\mu\text{g/L}$, 투명도는 7m 까지 향상되었다.

(2) 호소 내적인 관리

- 회석
- 호소의 수심 확장
- 준설
- 생물조작
- 호소물의 배수
- 심층폭기
- 수온약층 파괴
- 퇴적층과 수체의 차단
- 퇴적층내 인의 불활성
- 수체내 인의 불활성
- 식물플랑크톤의 서식환경에 대한 인위적인 처리
- 화학적인 생물제거
- 생물학적인 생물량 제거

Case 3. 준설 사례

Zuid-Holland에 위치한 Geerplas는 30ha의 수면과 평균 1.7m의 깊이를 가지고 있다. Geerplas는 상대적으로 높은 인 농도를 나타내고 있으며, 외부 유입원에 대한 개선에도 불구하고, 수질은 여전히 악화된 상태였다. 퇴적층의 깊이는 1~100cm였으나, 퇴적층에 대한 준설 후에 호소의 깊이는 2.5m로 증가하였고 투명도의 증가와 함께 조류의 일시적인 감소가 나타났다.

Case 4. 퇴적물내 인의 불활성을 위해 응집제 투여 사례

화학적 처리 방법은 1989년 말에 처음 네덜란드에 도입되어 Groot Vogelenzang에 적용되었다. Groot Vogelenzang의 수면적은 18ha이고 평균수심은 1.75m로 얕은 수체이다. 퇴적물에 포함된 인을 불활성 시키기 위해 총 120톤의 40% FeCl_3 를 100~150 배로 희석하여 3주 동안 주입시켰다. 주입후 인의 배출량은 3배 가량 감소하였으나, 호소의 체류시간이 1개월 정도로 너무 짧아 지속적인 효과를 얻을 수는 없었다.

2. 영양염류 용출

일반적으로 퇴적물내에서의 질소나 인화합물 농도는 수층에서 보다 매우 높기 때문에 퇴적물 표층에서 수층의 영양염류와 교환이 이루어지기도 하지만 전체적으로는 수층으로 영양염류가

용출된다고 볼 수 있다. 퇴적물로부터의 영양염류 용출은 미생물의 분해작용, 저서생물의 물질대사, 농도차에 의한 확산, 퇴적층의 압축 및 밀림 작용 등의 물리적 변화에 의해 이루어진다. 그리고 수온, 유속, 저질구조 등의 물리적 특성과 pH, 용존산소, 산화환원전위 등의 화학적 요인에 의해 영향을 받는다.

퇴적물의 표층에서 수층으로 용출되는 영양염류의 용출속도는 수리모델법으로 구할 수 있는데, 이는 퇴적물내 간극수와 상층의 수체간 농도 기울기에 의한 확산식을 이용하여 구한다.

이러한 영양염류 용출관련 확산플럭스 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_i = -D\Phi dC_i/dz, \quad C_i = C_s - C_w$$

여기서, D : 유효확산계수

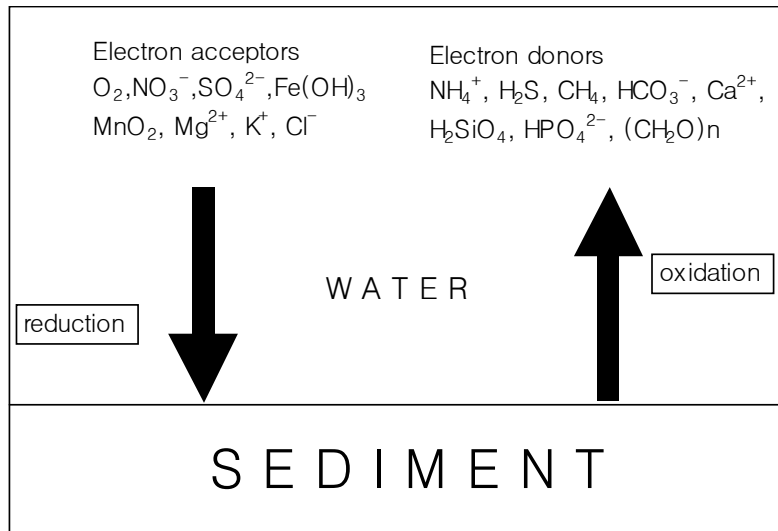
Φ : 공극률

C_s : 퇴적물 간극수의 영양염류 농도

C_w : 퇴적물 위 상층수의 영양염류농도

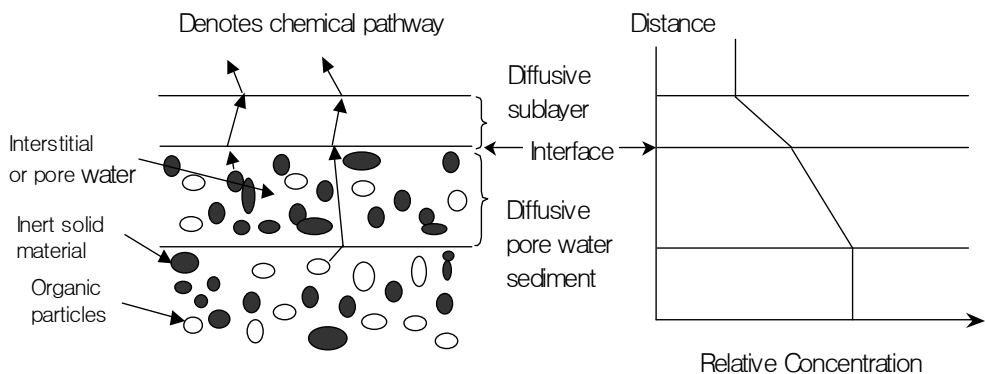
z : 퇴적물 층 두께

퇴적물과 수층계면 간의 물질이동 및 확산을 도식화하면 다음 그림처럼 나타낼 수 있다.



주 : 화살표의 방향은 퇴적물 공극수와 계면상층수와의 플럭스 방향

<그림 2-2> 퇴적물과 물의 계면 표시



<그림 2-3> 물과 인접한 퇴적구성물질간의 대략적 화학물질
교환을 나타내는 퇴적물과 물의 계면표시

3. 호소내 인 부하

수심이 낮아 혼합이 잘되는 호소는 대개 호기성 상태를 유지하며 퇴적물에서의 인 용출은 철의 산화환원보다는 높은 pH, 미생물 호소에 의한 리간드교환, 수온상승에 의한 가수분해에 의해 발생하는 것으로 알려졌다. 즉 수심이 낮은 호소는 성층화된 호소에 비해 호소 바닥에 많은 산소가 전달되지만 상대적으로 온도가 높아 상쇄된다. 이러한 상태는 전자수용체인 산소나 산소결합체(NO_3^- , SO_4^{2-} 등)를 더 많이 요구하게 되는 반면, 전자공여체인 유기물이나 환원상태의 물질(CH_4 , H_2S , $(\text{CH}_2\text{O})_n$ 등) 등이 호소바닥에서 수체내로 이동하기 쉬운 조건이 형성된다. 결국 호소바닥과 수체 사이에 무산소상태가 형성되어 퇴적물 간극수의 인 용해상태가 증가하여 상부의 수층으로 이동이 용이해진다.

1) 외생기원(allochthonous) 인부하

여름철 집중강우에 의한 비점오염원 유입시 용해성인(SRP)에 의해 호소표면에 조류가 급속하게 번식하는 수화(algal bloom) 현상이 발생한다. 이를 해결하기 위해 여름철 우기 시 수질관리 목표는 특히 용해성인의 저감이 필요한데 이를 위해 비점오염원에 의한 유입관리 등 종합적인 유역관리가 요구된다. .

2) 내생기원(autochthonous) 인부하

금강호처럼 수심이 얕고 성층화현상이 잘 생기지 않는 호소는 대체로 호기성 상태를 유지하는 경향을 보인다. 수온의 증가에 따른 미생물 활성화와 박테리아의 호소가수분해, pH의 상승에 의해 리간드 교환에 의해 퇴적물내의 인용출이 발생한다고 볼

수 있다. 내부오염 부하를 증가시키는 퇴적물과 물의 계면에서 인의 이동 메카니즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 유기인의 미생물적 효소 가수분해
- ② 퇴적물과 물의 계면에서 일시적 혐기성 조건에서 인의 용해, 철의 환원
- ③ pH가 높을 때 OH^- 이 인산이온(PO_4^{3-})으로의 리간드 교환

제 3 장 재료 및 방법

1. 시료채취 및 분석

1) 채니 방법

각 채니 지점에 있어서 안지름이 3cm 이상의 주상 채니기(core sampler)로 3회 이상 저질을 채취하고 표층 5cm를 혼합하여 시료로 사용한다.

수직분포에 대한 조사가 필요한 경우에는 주상시료(core sample)를 채취한다.

시료채취의 정점으로는 환경부 수질측정망 대표지점인 금강하구1, 금강하구2, 금강하구3 등 세 지점을 택한다.

2) 시료용기 및 사용시약

퇴적물 채취 및 보관에 사용되는 유리나 플라스틱 재질의 제품을 사용하는 것을 원칙으로 한다.

3) 저니 시료의 조제방법

퇴적물 시료는 통상 상당량의 물이 채취할 때에 들어가기 때문에 원심분리기를 사용해 상등액을 없애고 퇴적물을 잘 혼합해서 습시료를 준비한다.

본 연구에서는 2mm 이하의 것만 취하여 분석하지만 가능한 한 시료의 입도를 측정하여 모래, 실트, 점토의 분율이나 평균 입도

를 계산하여 퇴적물의 입도에 따른 오염물질의 농도변화 양상을 고려하는 것이 바람직하다.

원시료, 습시료, 건시료로 구분하여 목적에 맞게 준비하고, 간극수의 채집은 원심분리법이나 가압여과법을 이용하여 획득한다.

4) 시료의 보존방법

물리·지구화학적 측정을 위한 시료는 건조해서 보존하고 화학 분석을 위한 시료는 냉동 또는 건조보존한다.

채취한 퇴적물은 플라스틱 병(시판하는 연고병에는 여지가 들어서 편리)에 공기가 남지 않도록 채워 넣고 테이프로 밀봉한다.

2. 인의 용출

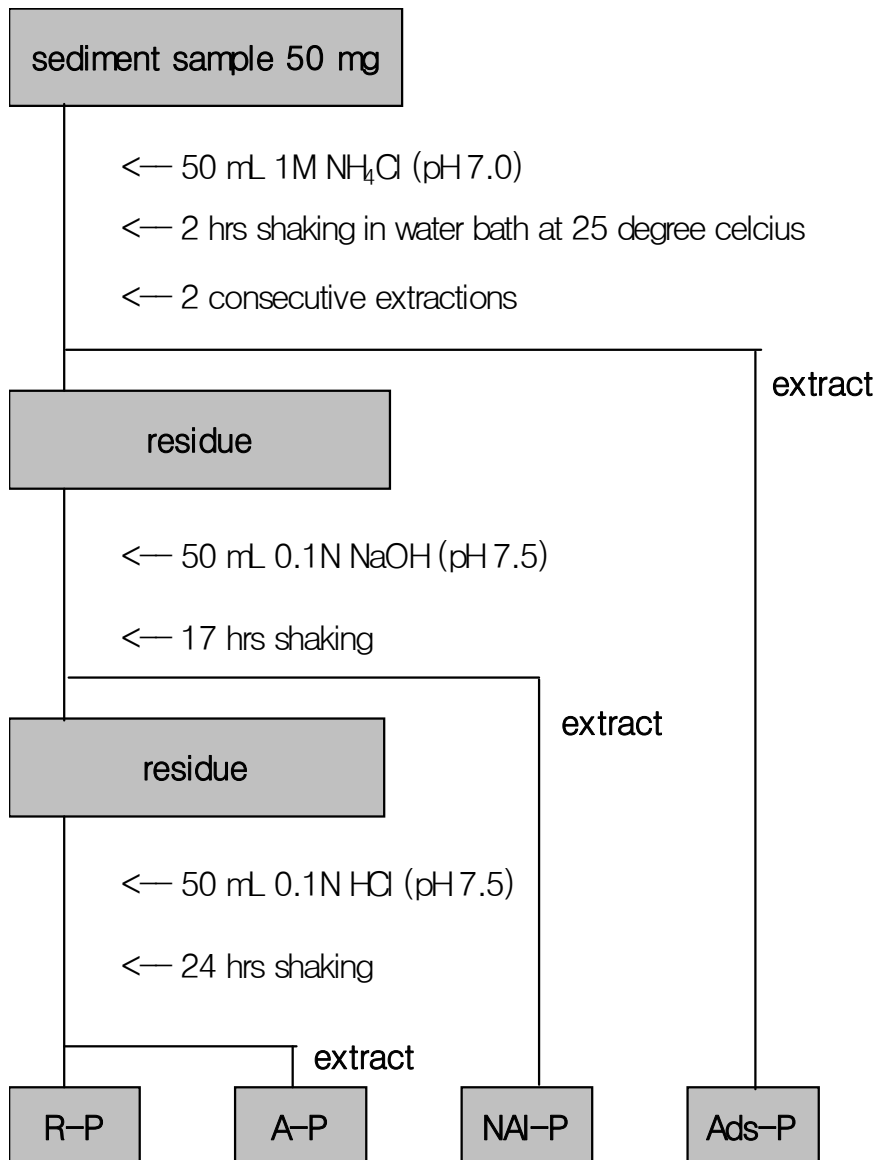
호기성과 혐기성조건 각각에 대해 pH 변화에 따른 총 용존인의 농도변화를 보면 호기성의 경우 pH 6~8의 범위 안에서 시간의 경과에 따라 용출량이 큰 변화를 보이지 않지만, pH 9에서는 호기성 조건에서 더 많은 용출이 일어나지만 그 이외의 pH에서는 혐기성 조건일 때 더 많은 용출이 일어나는 경향을 보인다.

용존무기인의 경우는 호기성 및 혐기성 조건하에서 용존무기인의 용출양상은 총용존인의 경우와 상당히 유사하게 나타난다. 호기성환경의 경우 pH 9에서만 다량의 용출을 보였으나, 혐기성 조건에서는 pH 6~9의 모든 조건에서 실험기간의 경과에 따라 지속적인 용출량의 증가를 보였으며, pH가 높을수록 더 많은 용

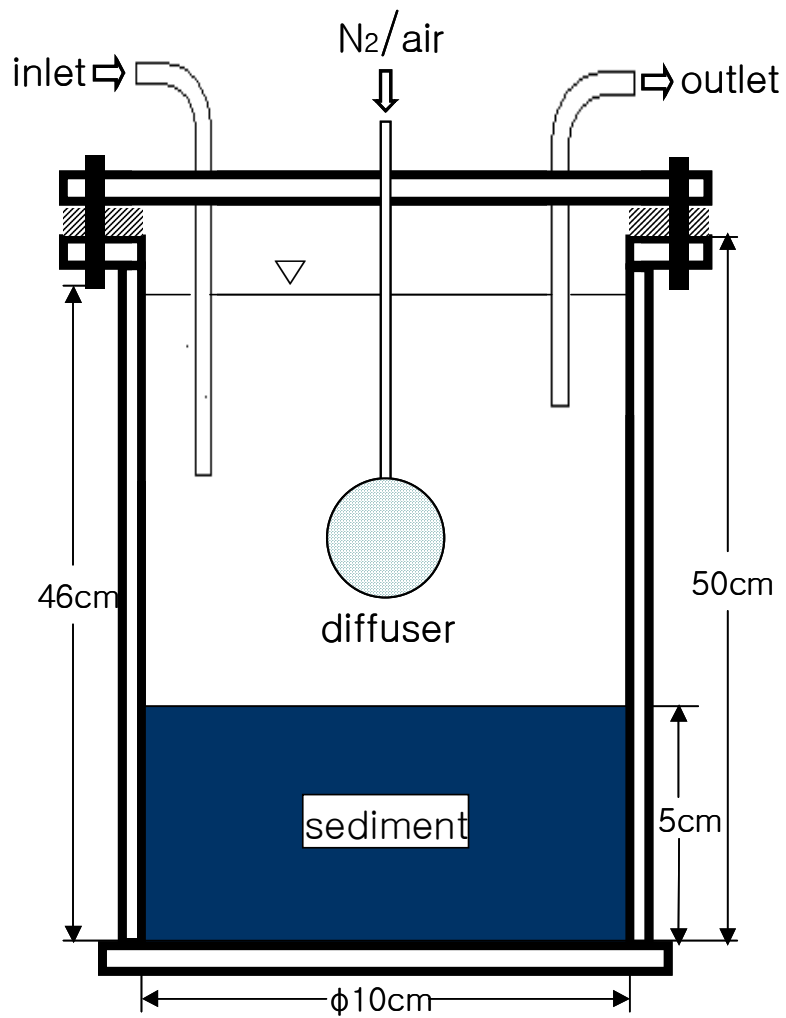
출을 보이고 있다. 이는 철 또는 알루미늄과 화합물을 형성하고 있는 형태의 인이 pH 9이상이면 호기성 및 혐기성 조건 모두에서 용출이 가능함을 의미한다.

용존유기인의 경우 호기성 및 혐기성 환경에서 용존유기인의 용출농도는 pH 조건에 관계없이 실험시간 경과에 따라 변화를 보이지 않았다. 따라서 총용존인의 용출량 변화는 주로 무기인의 용출로 인한 것이며 퇴적물로 포함된 잔류성인으로부터의 용출 가능성은 매우 낮음을 알 수 있다. 이는 금강호 표층퇴적물의 부식화도가 과부식(oligohumic) 상태로 유기물의 분해가 낮은 상태이기 때문에 유기물의 분해로 인한 잔류인의 용출 가능성이 높다는 것을 보여준다.

퇴적물 중 인이 흡착상 인과 비인회석인 등의 형태로 존재할 경우 수층으로 이동 가능하여 수층을 오염시킨다. 금강호에 존재하는 인의 존재형태를 보면 대부분 인회석인 또는 잔류인으로 존재하고 있다. 특히 무기인 중 비인회석인은 철, 알루미늄 등의 중금속과 착물을 이루고 있는 인이 많은 부분을 차지하고 있으며, 이러한 형태가 수층으로 용출된다. 무기인은 산화환원전위가 낮아지거나 pH 상승시 용출이 증가하고 영양염류 형태로 습생 식물에 단기간에 흡수된다. 이에 비해 잔류인은 식물에 공급해도 쉽게 흡수되지 않는다. 그러므로 수질의 상태와 부영양화의 지표인 인의 농도는 여러 가지 인자에 의해 결정되므로 다각도로 수질변화를 예측할 필요가 있다.



<그림 3-1> 퇴적물내 인의 존재형태를 결정하기 위한 분석절차
모식도



<그림 3-2> 퇴적물로부터 인의 용출플럭스를 측정하기 위한
실험장치도

제 4 장 결과 및 토의

1. 금강호 특성

1) 물수지 분석

금강하구둑은 염수 침입 방지용 하천유지용수를 유효하게 이용하여 서해안 일대인 금강, 만경강 및 동진강의 농업용수와 인근의 군산시, 익산시, 전주시 및 장항읍의 생공용수 공급 목적을 갖고 있다. 금강하구둑이 건설되어 대청댐에서의 하천유지용수의 공급은 2001년 이후 생공용수 및 농업용수 공급 전용으로 쓸 수 있게 되었고, 이에 따라 하천의 수질개선에도 일익을 담당할 수 있다.

금강하구호는 $365 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{년}$ 의 용수공급능력을 갖고 있다. 따라서 금강유역내 대청댐 및 하구둑의 2개 대형댐의 연간 용수공급량은 대청호에서 16.5억 $\text{m}^3/\text{년}$, 하구호에서 3.65억 $\text{m}^3/\text{년}$ 으로 총 20.15억 $\text{m}^3/\text{년}$ 이 되며 여기에 소규모의 자체수원에 의한 용수공급량까지 포함하면 20.15억 $\text{m}^3/\text{년}$ 보다 약간 넘는다.

물수지는 장래 물 소모량의 시간적 분포와 불규칙한 하천의 자연유량을 비교 검토하는 것이다. 이에 금강 중·하류부의 물수지를 검토해 봄으로써 현재 새만금 간척사업과 관련하여 계획되어 있는 금강하구둑의 금강회석수 도입 수량 가능성을 타진하는데 그 목적이 있다. 여기에서는 금강 중·하류부의 물수지를 이용하기 위하여 용담다목적댐 타당성 조사보고서, 대청댐관리연보, 수계별 수질보전종합계획 등을 인용하였다.

(1) 물수지분석의 내용

물 소모량은 물 이용에 따른 지표수의 손실량을 말하며, 하천의 자연유량이란 용수수요가 전혀 없는 상태의 하천유량을 의미한다. 물 소모량이 자연유량을 초과할 때 물 부족이 발생하며 이 부족량은 수자원개발에 의해 공급되어야 할 수량이다. 또한 물부족의 연간 시간적 분포는 저수지의 운영규정을 결정하며, 물부족 총량과 장래 증가량 추세는 댐의 규모와 건설시기를 결정하여 준다. 한편 물부족의 지역적인 발생분포 및 특성을 알기 위해서는 각 지류 및 본류를 소구간으로 나누어 검토하여야 한다.

본 연구에서는 현 용수공급계통 및 과거 실시한 유역조사에서 검토, 수립한 소유역을 기초로 금강유역 전체를 7개 소유역으로 구분하였는데, 가장 하류구간으로 금강호에 밀접한 영향을 줄 수 있는 규암~하구둑 구간을 중점적으로 다룬다.

<표 4-1> 금강유역의 7개 소유역

금강유역의 7개 소유역
<ul style="list-style-type: none"> ○ 용담수위표지점 상류 유역 ○ 용담수위표지점 ~ 대청댐지점 유역 ○ 갑천유역 ○ 미호천유역 ○ 대청댐 지점 ~ 공주수위표지점 유역(갑천 및 미호천유역 제외) ○ 공주수위표지점 ~ 규암수위표지점 유역 ○ 규암수위표지점 ~ 하구언지점 유역

물수지분석은 유역의 규모와 유하속도를 고려하여 5일 간격으로 시행하였다. 물수지분석에서는 상류댐의 공급영역이 댐으로부터 하류의 본류 연안에 국한되므로, 본류의 용수수요와 지류의 용수수요는 취수원의 위치에 따라 먼저 취수 소모된 후 그 나머지가 본류로 유입되는 것으로 보며, 지류 유역의 물소모량이 하천 자연유량을 초과할 때 지류유역에 물부족이 발생하고 본류에서 이용 가능한 자연유량은 하천유지용수 외에는 없게 된다.

(2) 물수지분석 과정

자연유량 즉, 유역이 개발되지 않았을 경우에 발생하는 유량은 실측 하천유량과 관개용수 및 생공용수의 물 소모량과의 합계이다. 이것이 바로 장래 물 소모량과 대비되는 기준 하천유량이다. 자연유량의 기준갈수년도는 과거 2년 연속하여 가뭄이 발생했던 1967~68년, 1982~83년, 1994~95년으로 하였으며 각 기준년도의 기상상태가 계획년도에 그대로 재현되는 것으로 가정하였다.

각 소유역의 물부족 발생분포 및 특성은 다음과 같은 절차에 의해 계산된다.

구분	계산법	계산결과
a	각 소유역의 자연유량 + 희귀수 - 각 소유역의 목표년도별 지류 물 소 모량	$a < 0$: 지류물부족 $a > 0$: 본류가용수량
b	본류가용수량 + 상류로부터 유하량 (하류본류가용수량) - 목표년도별 본류 물소모량	$b < 0$: 본류물부족 $b > 0$: 하류본류가용수량

하천의 자연유량이란 용수수요가 전혀 없는 상태의 하천유량을 의미한다. 엄밀한 의미에서 자연유량은 유역내의 도시개발의 정도, 유역의 식생상태, 새로운 농경지 개발에 따라 영향을 받게 된다. 유역상태의 변동에 따라 유황에 미치는 영향을 개략적으로 검토하면 도시개발에 따라 홍수 시 유출계수가 커져 하천유량은 증가하나 유황이 악화될 것으로 예상되며, 장래 유역내 산림상태가 양호해지면 산림에 의한 증발산으로 물 손실량은 증가할 수 있으나, 기저유출량의 증가로 갈수기의 유황은 개선될 것이다.

그러나 과거의 기상상태가 재현될 경우 장래 유역상태에서 하천자연유량 변화를 정량적으로 정확히 예측하는 것은 불가능하다. 또한 유역내 새로운 농경지의 개발은 지형적인 여건으로 보아 크게 기대할 수 없으며 농업개발은 수리불안전답을 수리안전답으로 전환하고 유역외에 위치한 해안간척에 주력하게 될 것이다. 따라서 유역내 상태변화에 의한 하천유량의 변동은 없는 것으로 가정한다. 전술한 바와 같이 자연유량은 어떤 기간의 실측유량에 같은 기간 동안의 모든 목적의 순물소모량을 더하여 계산할 수 있다.

물수지분석 기준지점의 자연유량은, 기준갈수년도인 1967~68년도의 경우 용담수위표 지점의 실측유하량을 사용하였고, 1982~83년과 1994~95년의 경우에는 대청댐 유입량을 기준 실측유하량으로 하여 각 기준지점의 유하량을 면적비 및 월별 면적유량비에 의해 산정한 후 각 기준지점 상류부의 농업용수 물 소모량을 더하여 산정하였다. 왜냐하면 대청댐이 준공된 1980년 12월 이후 하류유하량은 대청댐의 조절방류량에 크게 영향을 받기 때문에 하류수위표 지점들의 실측유량은 자연유량을 구하기 위한 기준 하천유량 자료로 사용하기 곤란한 바, 기존 하천유량으로 대청댐지점 유입량 자료를 이용하였다. 대청댐 지점은 유역면

적 4,134km²으로 금강유역면적의 약 42%에 해당된다.

<표 4-2> 주요지점의 자연유량

(단위:CMS)

지점	기준	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
대청 조정지	1967	17.8	29.3	67.9	90.3	12.3	53.6	159.3	76.2	19.7	19.8	53.6	33.2
	1982	39.0	31.4	34.2	45.7	67.1	35.5	16.1	19.6	48.4	28.3	19.4	46.6
	1994	44.2	52.9	39.9	38.1	40.6	65.1	36.0	24.4	11.0	4.6	1.5	9.3
금강 하구둑	1967	39.7	55.9	155.8	202.6	46.2	130.4	439.1	232.9	441.3	54.7	146.2	89.5
	1982	92.7	74.6	81.3	108.6	159.5	84.4	38.3	46.6	115.0	67.3	46.1	110.8
	1994	105.1	125.7	94.8	90.6	96.5	154.7	85.6	58.0	26.1	10.9	3.6	22.1

주 : 기준년도는 갈수년임

2) 금강수계의 수문특성과 유황

금강수계의 연평균 강수총량은 125억m³에 달하고 있으며, 유출 계수 0.49를 적용하였을 경우 평균 유출량은 62억m³에 달하고 있다. 1959~88년까지 40년간 금강유역 평균 강수량 및 유출량은 다음과 같다.

그리고 1959~88년까지 40년간의 금강유역의 평균 강수량과 유출량을 고려한 금강수계 주요 지점의 유황은 다음 표로 나타냈는데 장기간의 유황 자료이므로 이러한 추세가 계속된다는 가정 하에 대표치로 사용한다.

<표 4-3> 금강유역 수문특성

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	계
강수량 (mm)	26	31	60	95	92	147	304	248	132	52	53	28	1269
유출량 (10 ⁶ m ³)	160	194	291	397	367	400	1492	1261	1013	315	188	171	6205

<표 4-4> 금강수계 주요지점의 유황 (단위 : m³/sec)

주요 지점	유역면적 (km ²)	유 럳			
		갈수량 Q ₃₅₅ (97.3%)	저수량 Q ₂₇₅ (75.3%)	평수량 Q ₁₈₅ (50.7%)	풍수량 Q ₉₅ (26.0%)
대청호	4,134	10.88	24.37	42.94	82.48
미호천 합류점	6,663	15.01	33.63	59.26	113.8
규암수위표	8,273	18.64	41.76	73.58	141.3
논산천 합류점	9,383	21.14	47.36	83.45	160.9
금강하구둑	9,828	22.27	49.90	87.93	168.9

3) 대청댐 하천유지용수 방류기준

금강호 물수지분석시 대청댐 하천유지용수는 30.0CMS를 적용하였다. 그러나 대청댐(조정지댐)의 하천유지용수 방류기록을 보면 1981~2002년까지 22년간의 평균 방류량은 76.5CMS이나, 월 평균 방류량 개념으로 볼 때, 총 264개월 중 목표치 30.0CMS에 도달하지 못한 기간은 68개월로 25.8%의 미달률을 보이고 있다.

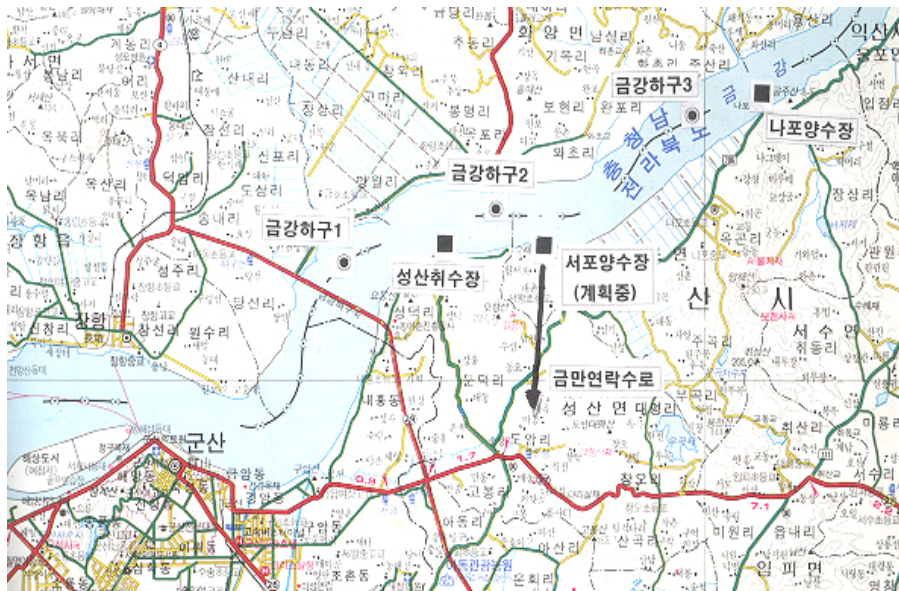
이는 대청댐 하류수계 하천 및 금강호에 갈수량 공급문제 뿐만 아니라 금강호 수질보전에 결정적 문제를 제기하고 있다. 이수계획상 수질기준에 적합한 수자원이 확보되지 않고는 수량기준의 수자원 확보는 의미가 없다. 따라서 금강호의 수자원은 금강상류의 수질관리에 좌우되므로 갈수기 및 한발년도 관개기 필요수량의 수질보전을 위한 대청댐과 용담댐의 하천유지용수 방류량 확보 등의 수자원 확보가 필요하다.

<표 4-5> 금강하류 하천유지용수

년도	검토기관	지점	유지유량 (CMS)	비고
1976	건설부	규암	30.0	건설부고시자료 수자원개발공사 조사년도
1979	건설부	하구	40.0	전국 주요하천 기초조사 수자원장기종합
1983	국립환경연구원	공주	45.0	개발기본계획 수정분 금강유역 조사보고서
1985	건설부	하구	40.0	금강수계 종합 정비계획 한국수문학회지
1986	한국수자원공사	하구	30.0 (1986) 53.0 (2001)	댐하류 최소 25CMS 방류시
1988	건설부		40.0	
1990	충북대학교		33.8 51.5	
1993	한국수자원공사		35.0 (2006 까지) 40.0 (2011 이후)	

4) 금강호의 수리학적 특성

금강호의 총 저수면적은 36.58km²이고, 년평균 강우량은 1,269mm로 비교적 많은 편이고, 이에 따른 총 하천유입량은 연간 6,205×10⁶m³에 달한다. 월별 유입량을 보면 풍수기인 7, 8, 9월의 3개월동안 연간 총 유량의 2/3정도가 유입되고 있으며, 나머지 9개월동안 1/3의 유량이 유입되고 있다. 한편 금강호의 제원과 물수지 특성으로부터 얻어진 수리학적 인자들은 다음 표와 같다.



<그림 4-1> 금강호 수질측정망 지점 및 양수장 위치도

<표 4-6> 금강호의 수리학적 특성인자

적 용 인 자	단 위	내 용
년간 유입량, Q	$10^6 \text{ m}^3/\text{년}$	6,205
평균 저수량, V	10^6 m^3	136.8
평균 수표면적, A	km^2	36.58
평균수심, Z	m	3.74
수리학적 체류시간, τ_w	년	0.022 (8.05일)
수표면적 부하, q_s	m/년	169.63
순환률, ρ	1/년	45.45

퇴적물 시료채취지점은 환경부 수질측정망 지점과 일치시키기 위해 금강하구1(서천군 마서면 도삼리), 금강하구2(서천군 화양

면 와초리), 금강하구3(서천군 화양면 완포리)으로 하였는데 실제의 시료채취지점은 충남과 전북의 경계선인 금강호 수역 중간으로 하였다.

평균수심 Z 는 만수위용량에 대한 평균수심인 3.74m를 사용하였다. 평균 수리학적 체류시간(τ_w)은 0.022년으로 비보존성 물질인 인의 호수내 반응을 설명할 때에, 수리학적 체류시간만이 통계적으로 유의한 인자이므로 중요하다. ρ 는 순환률(flushing rate)로서 $1/\tau_w$ 로 표시할 수 있는데 45.45가 된다. 이것은 금강호 내 물이 1년에 45.45번이 대체됨을 의미하며 일반적으로 ρ 값이 커지면 침전율계수(phosphorous retention coefficient) R 값이 작아지는 경향을 나타내고 있다. 또한 유입유량의 단위 수표면적 부하(q_s)는 169.63m³/년이다.

5) 금강수계 용수 수요 및 전망

금강호의 담수가 시작되고 난 후, 군산에 공급되는 공업용수는 「군산공업용수로사업」의 일환으로 당초 1996년을 기준으로 시설용량 130천m³/일 계획되었으나, 현재 약 76.8천m³/일인 일부만이 공급되고 있다. 따라서 필요수량 계산에 이용된 생공용수 공급량은 군산 공업용수로사업에 대한 공급량 130천m³/일과 군장지구 산업기지 200천m³/일을 합해 합계 330천m³/일을 확정하였다. 군장산업기지 용수공급 기본조사 보고서(한국수자원공사, 1995)에 의하면 급수대상지역에 대한 공업용수의 단계별 개발계획이 다음과 같이 수립되었다.

건설부의 수자원 장기종합개발계획(1991~2001)보고서 및 건설부(1995)의 수자원 정책 자료에 의하면, 금강수계의 2001년 용수

<표 4-7> 단계별 공업용수 공급계획

(단위: $10^3\text{m}^3/\text{일}$)

공업용수	용도	개발용량	공급시기	취수원	목표년도	비고
I 단계	공업용수	280.0 (280.0)	1999년	금강호	2001년	()는 누적공급량
II 단계	공업용수	90.0 (370.0)	2006년	금강호	2011년	
III 단계	공업용수	430.0 (800.0)	2016년	금강호	2021년	

수요량은 3,685백만 m^3 에 공급계획은 2,424백만 m^3 으로 대청댐에서 1,649백만 m^3 , 금강호 365백만 m^3 을 공급하고 잔여분은 2001년까지 용담댐을 완공하여 공급토록 계획되었다. 한편 「군장산업기지 용수공급 기본조사 보고서(한국수자원공사, 1995)」에 의하면 1996년도 금강수계 총 용수수요량은 36억 m^3 에서 2011년에는 38% 늘어난 약 50억 m^3 소요가 추정되므로 수자원 확보대책이 필요하다고 하였다.

한편 군장산업기지의 단계별 개발계획에 의한 공업용수 수요전망을 보면 2001년까지 29만 $\text{m}^3/\text{일}$, 2011년까지 66만 $\text{m}^3/\text{일}$, 2021년까지 74만 $\text{m}^3/\text{일}$ 의 공업용수 수요가 추가로 발생할 것으로 전망하고 있으며, 총소요량은 금강호에서 공급받는 것으로 계획되어 있어 2001년까지는 문제가 없으나, 그 이후 수요량에 대하여는 금강하구둑의 저수량을 높여 충당하거나 용담-대청댐을 연계하여 확보하거나 신규 댐 건설 등의 수자원 확보 방안을 찾는 것으로 되어있다.

<표 4-8> 금강수계 용수수요 예측

(단위: 10⁶m³)

구분	2001 년도	2006 년도	2011 년도	2016 년도	2021 년도	비고
생활용수	546.3	763.3	938.0	1,120.5	1,499.6	
공업용수	268.0	465.7	496.2	611.6	624.1	
농업용수	1,675.1	1,980.4	2,410.4	2,410.4	2,410.4	2003년부터 회석수 년간 430백만톤
하천유지용수	1,103.8	1,103.8	1,103.8	1,261.4	1,261.4	35→40CMS 증가
계	3,593.2	4,313.2	4,948.4	5,576.2	5,795.5	

하천유지용수와 생공용수 등 수요전망에 따른 예측내용을 정리하면 다음과 같다. 잉여유량은 본류가용수량에서 하천수 공급량을 제한 것이며, 물 부족량은 하천유지용수를 포함한 물 소모량에서 하천수 공급량(자연유출량)을 뺀 것이다.

6) 수자원 관리체계

금강하구둑의 수자원 운영관리는 금강호가 평면적으로는 호수의 형태를 갖추고 있으나 금강하구에 위치하여 유역유출량에 비하여 금강호 저수용량이 상대적으로 작아 홍수 및 금강호 연변의 침수대비 내용적을 극히 적게 운영할 수밖에 없는 특성을 갖고 있다. 금강호 유입량 대비 방류량 비율은 84.7%이다.

<표 4-9> 금강하류(규암~하구연) 물 수요공급 분석 (단위: 10^6m^3)

구 분	2001 년도	2006 년도	2011 년도	2016 년도	2021 년도
본류가용수량	1499.09	1490.71	1482.12	1472.45	1461.92
물소모량	235.52	640.38	676.88	713.38	746.23
물부족량	173.28	334.26	346.10	360.37	376.20
하천수공급량	62.24	306.12	330.78	353.01	370.03
잉여 유량	1436.85	1184.59	1151.34	1119.44	1091.89

<표 4-10> 규암~금강호 용수수요 예측 (단위: 10^6m^3)

구 분	2001 년도	2006 년도	2011 년도	2016 년도	2021 년도
생공용수	66.95	105.25	141.72	178.18	211.12
농업용수	651.42	1017.09	1016.70	1016.39	1016.16
계	718.38	1122.35	1158.42	1194.58	1227.29
하천유지용수	946.08	946.08	946.08	946.08	946.08

따라서 금강호의 수면관리는 관개기인 6월부터 9월 사이는 이
 양기 필요수량 확보를 위해 금강하구둑 관리지침에 기준관리 수
 위를 「3월~6월 : EL+2.0m」, 이후는 관리용수 공급을 위해
 「7월~다음 해 2월 : EL+1.0m」로 관리하게 되어 있고 집중호
 우시 금강하구둑 배수갑문 외측은 조석의 영향을 받으므로 외조
 위의 상승시는 금강호에 일시 저류하였다가 방류해야 하므로 이
 때는 배후지 침수방지 등 내수위 상승을 방지하기 위하여 금강

호의 내용적을 사전 방류, 금강호 관리수위를 적정하게 운영해야 하는 등 금강호 수면관리에 어려운 면이 있다.

현재 금강호 수자원 이용률이 계획대비 10% 정도로 수자원이 용과 홍수관리에 별문제가 없으나 금강Ⅱ단계 사업과 군장산업 기지 조성계획이 완성되는 시점의 금강호 용수수급운영은 대청댐과 연계한 금강호 운영관리 체계가 원활하지 않을 경우, 관개 기간은 물론 갈수기 생공용수의 용수수급에 문제를 유발할 수 있다.

금강호의 수자원 이용을 위해 수질오염의 기준으로는 물의 이용목적에 따라 등급별로 차등을 두고 있으며, 농업용수나 공업용수2급은 IV등급에 해당한다. 농업용수의 기준치를 <표 4-11>에서 살펴보면 하천과 호소에 따라 그 기준치가 다소 차이를 보이고 있는데, 특히 부유물질량의 차이가 두드러지고 있다.

<표 4-11> 농업용수의 수질환경기준 (단위: mg/L)

구분	수소이온 농도지수 (pH)	생물학적 산소요구량 (BOD)	화학적 산소요구량 (COD)	부유물질 (SS)	용존산소 (DO)	총질소 (T-N)	총인 (T-P)
하천	6.0~8.5	8.0 이하	8.0 이하	100 이하	2.0 이상	-	-
호소	6.0~8.5	-	8.0 이하	15 이하	2.0 이상	1.0 이하	0.1 이하

자료 : 환경부, 환경기준(농업용수), 환경정책기본법 제10조.

<표 4-12> 농업용수의 수질 기준 (지하수)

(단위: mg/L)

pH	COD	NO ₃ -N	Cl	Cd	Pb	As	Cr ⁶⁺
6.0~8.5	8.0 이하	20 이하	250 이하	0.01 이하	0.1 이하	0.05 이하	0.05 이하

주 : Trichoroethylene; 0.03,
Tetrachloroethylene; 0.01
Hg, CN, 유기인; 불검출.

자료: 건설부, 지하수법 제13조 수질기준령 5조 지하수 수질기준.

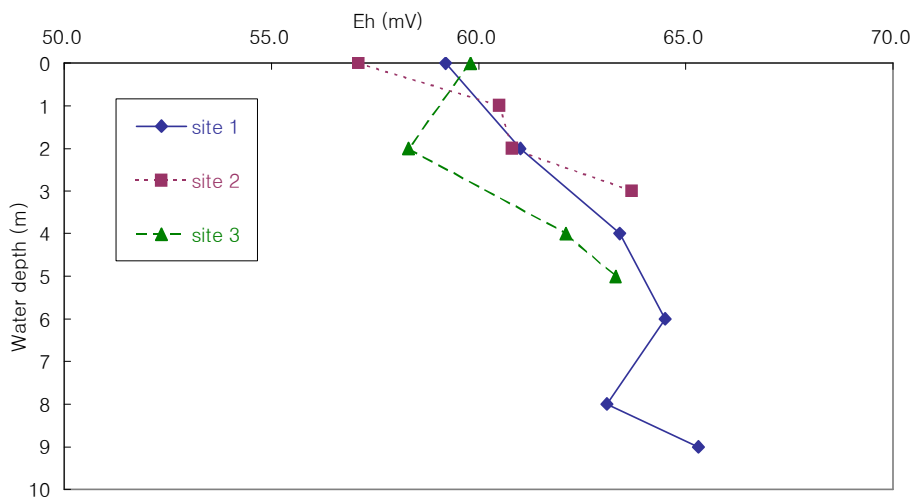
수질오염은 자연생태계를 파괴하고 사람의 건강을 직접적으로 위협할 뿐 아니라 축산 및 농업의 생산성에도 악영향을 미친다. 수질오염 정도를 판단하는 지표로 생물학적 산소요구량(biological oxygen demand; BOD)을 많이 사용한다. BOD란 미생물이 물 속에 있는 오염물질을 분해하여 안정화시키는데 요구되는 산소의 양을 말하는 것으로 산소 요구량이 많을수록 오염이 심하다는 것을 의미한다. 특히 상·중류에 산업공단 및 농업지역이 많이 분포되어 있는 낙동강, 금강, 영산강은 오염 진행속도가 빠르며, 이미 상수원으로 쓸 수 없을 정도로 오염 정도가 심각한 경우도 있다. 이와 같은 하천의 오염은 상수원의 수질을 악화시켜 음용수의 안전성을 위협하고 관개수로 사용할 경우 농작물에 피해를 줄 수 있다.

2. 수질변화 추세

금강호의 수질변화 추세를 고찰하기 위해 환경부 수질측정망 지점인 금강하구1, 금강하구2, 금강하구3 등 세 정점에서 현장에서 측정한 주요 항목의 수치는 아래 표와 같다. 특히 수심별 세 정점의 산화환원전위 변화치는 그림과 같다. 측정 결과 수심별 수온변화, 전기전도도, 용존산소변화, pH 등의 변화가 거의 없는 완전혼합형태를 유지하고 있음을 알 수 있으며, 산화환원전위는 수심이 낮아질수록 대체로 낮아지는 추세를 보인다.

<표 4-13> 금강호 현장 수질측정 결과

위치(수심)	수심 (m)	수온 (℃)	전기전도도 (μS/cm)	산화환원전위 (mV)	DO (mg/L)	pH
금강하구1 (9.6m)	0	22.2	161	59.2	11.9	8.95
	2	20.6	160	61.0	11.9	9.06
	4	20.5	160	63.4	11.6	8.97
	6	20.5	160	64.5	11.6	8.95
	8	20.4	160	63.1	11.4	9.00
	9	20.4	161	65.3	11.3	9.00
위치(수심)	수심 (m)	수온 (℃)	전기전도도 (μS/cm)	산화환원전위 (mV)	DO (mg/L)	pH
금강하구2 (3.5m)	0	22.2	161	57.1	11.7	9.24
	1	21.1	161	60.5	11.7	9.35
	2	20.6	160	60.8	11.3	9.18
	3	20.5	160	63.7	11.3	9.12
금강하구3 (5.3m)	0	21.7	161	59.8	12.1	9.16
	2	20.6	161	58.3	11.9	9.23
	4	20.5	160	62.1	11.6	9.12
	5	20.4	160	63.3	11.3	9.10



<그림 4-2> 금강호 수심별 산화환원전위 측정결과

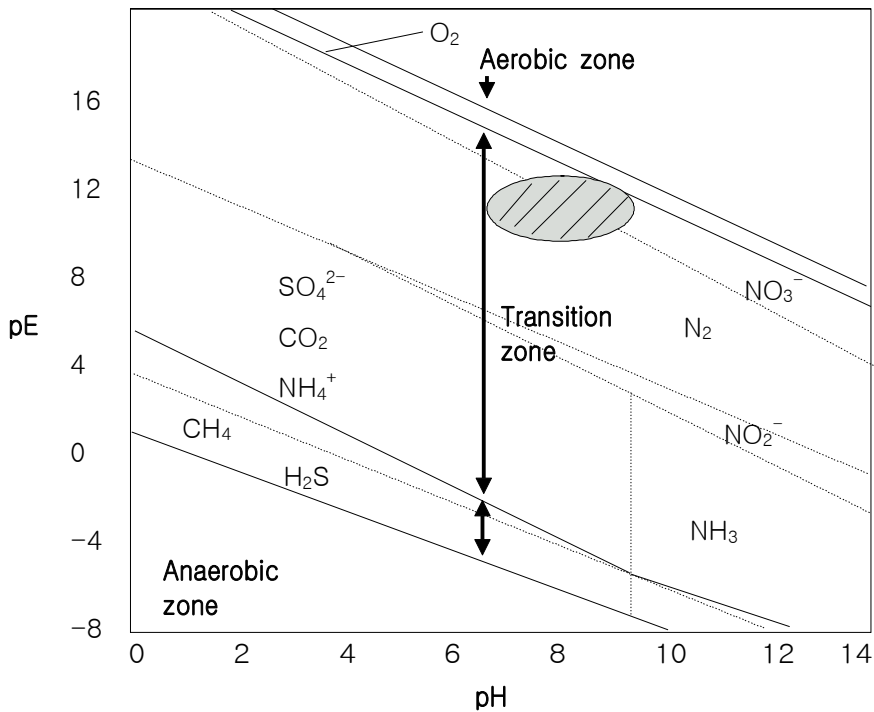
퇴적물 내 철이온의 존재형태와 관련한 전기화학적 전위는 아래와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 이온의 활성을 나타낸 이온활성도지수(pE)와 철이온간의 관계는 다음 식으로 나타낸다.

$$E = 0.73 + RT \ln \{Fe(III)/Fe(II)\} \text{ 또는}$$

$$pE = 12.4 + \log \{Fe(III)/Fe(II)\}$$

인과 철이온의 착물 형성정도는 철(III)이 철(II)보다 강하다. 퇴적물 내에서 착물을 형성하면 환원에 대해 안정한 상태를 유지할 수 있다. pE와 pH의 관계는 퇴적물과 상층수간의 안정한 계면에서 상호변동하는 특성을 갖는다. 이러한 철 이온의 산화환원과 관련한 금강호내 철이온과 착물을 형성한 퇴적물의 pE와 pH의 관계를 도식화하면 아래 그림과 같다. 금강호 퇴적물에 존재하는 철이온의 대략적 존재범위는 빗금범위 영역을 유지한다

고 볼 수 있다.



<그림 4-3> 금강호 퇴적물의 pE - pH의 관계도

1994년 8월 금강호 배수갑문 폐쇄로 담수화가 진행된 이래 주요 수질지표로 pH, COD, T-N, T-P, chl-a를 설정하였고 월별 수질 변화추세는 다음 <그림 4-4> ~ <그림 4-8>과 같다.

pH의 경우 금강호의 이수목적인 농업용수기준인 pH 6.0~8.5 범위를 초과하는 경우가 나타난다. 특히 조류의 번식이 왕성한 여름에서 초가을의 경우에 조류의 탄소동화작용에 의한 탄산염의 축적과 용해에 따른 수산이온 생성으로 pH가 상승하는 현상이 집중되는 것을 알 수 있다.

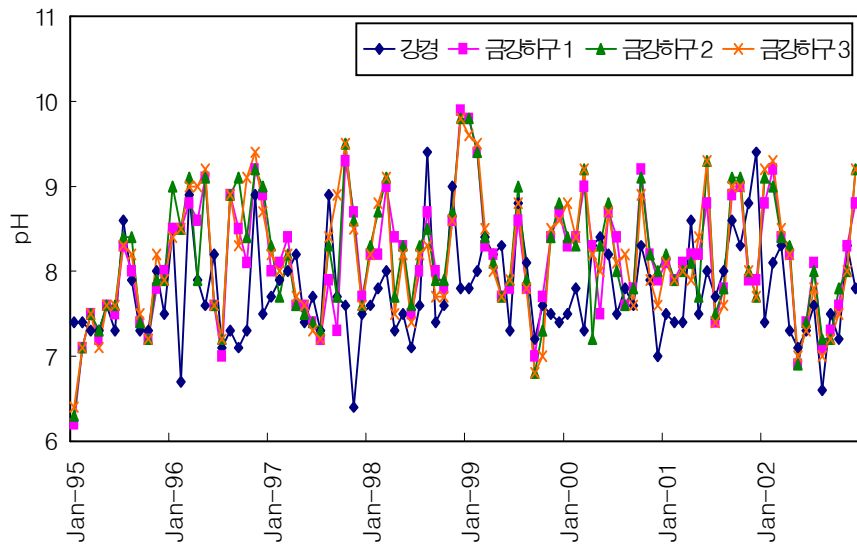
COD는 호소의 유기물 상태를 나타내는 주요 지표인데 농업용

수 수질관리를 위한 목표기준치인 8mg/L를 전후하여 유지되고 있으나 2001~2002년 갈수기가 지속되었을 때 기준치를 초과하는 현상이 나타났다. 따라서 장래 형성될 새만금호의 제염담수화를 위해 금강호 물을 도수할 경우 유기물의 축적에 의한 퇴적물의 혐기성 변화로 수질악화가 우려된다.

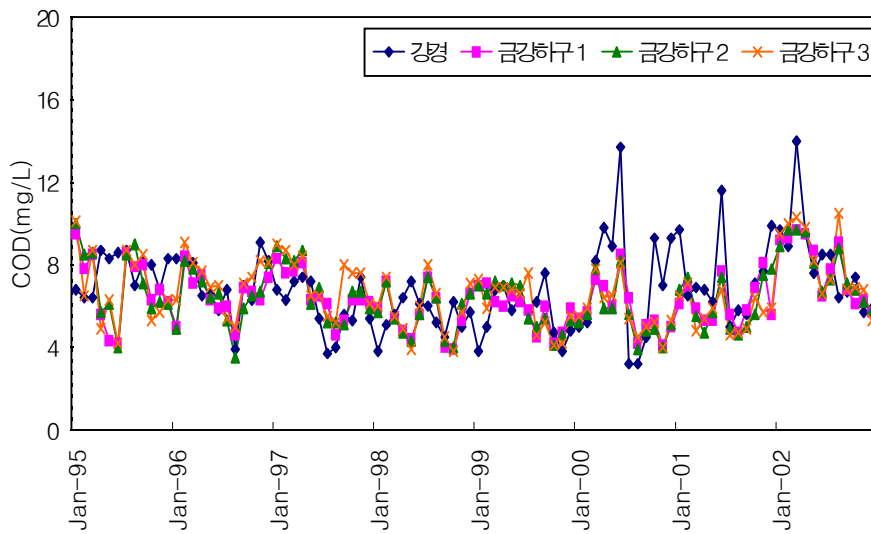
T-N의 경우는 수질관리를 위한 목표기준치 1mg/L를 항상 초과하는 수준을 보이고 있는데 금강호가 금강수계의 끝단에 위치하고 있어 상류에서 유출된 유기질소 화합물질이 유하하면서 산화되어 주로 질산염 형태로 존재한다. 금강호의 영양염류 농도 가운데 T-N의 T-P에 대한 농도비율이 상시적으로 높아 수질관리상 중요도가 덜하다 하더라도 방류되는 해역의 적조현상의 원인이 되므로 지속적인 저감대책이 요구된다.

T-P는 호소수질 부영양화 현상유발의 가장 중요한 요소로 농업용수 수질관리 목표치는 0.1mg/L 이하지만 조류 증식의 최소 작용 결정치인 T-N/T-P비율이 16이상일 경우 T-P기준만 적용된다. 대체로 수질변화추세는 담수화이후 2000년 말까지 낮아지는 경향을 보였으나 2001년 이후 약간 상승하여 목표치에 근접하는 경향을 보이고 있다.

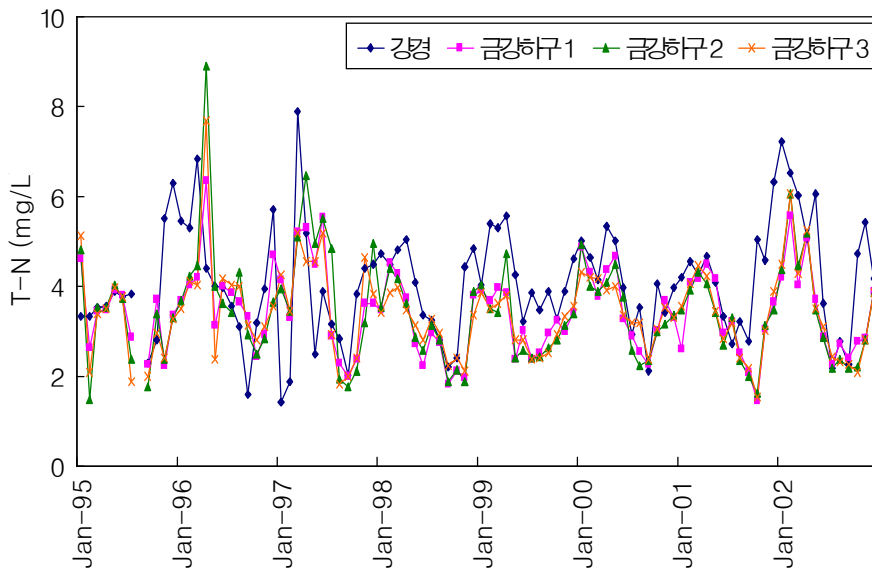
녹조류의 농도를 나타내는 chl-a는 농업용수 수질관리 기준에는 해당되지 않으나 녹조의 발생은 미관을 저해하고 이취미를 유발하는 등 수생태계 안정에 악영향을 준다. 상수원으로 사용되는 호소의 조류주의보 발령 기준은 25mg/m³으로 설정되어 있다.



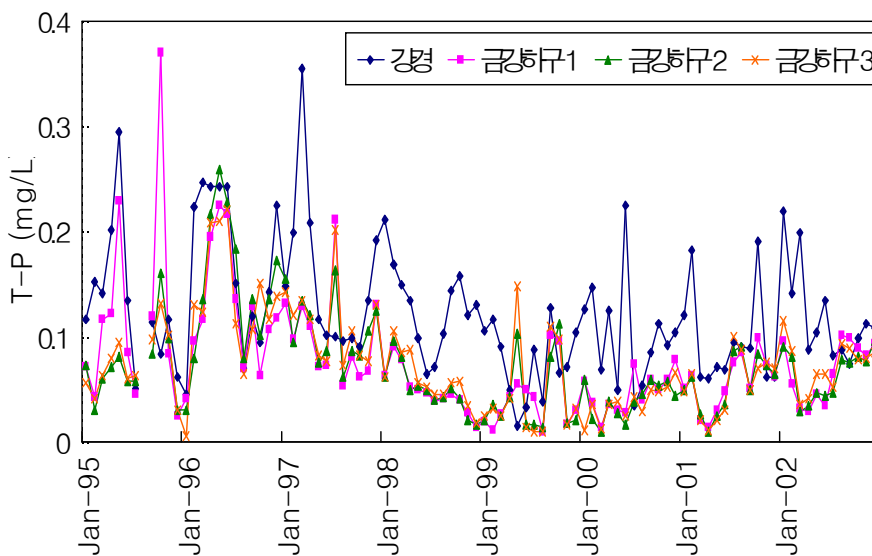
<그림 4-4> 금강호 pH 변화추세(1995~2002)



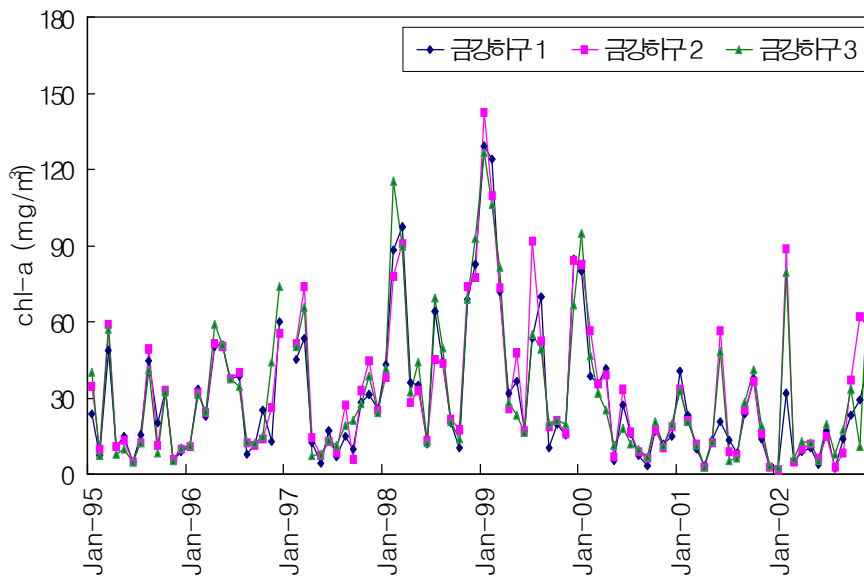
<그림 4-5> 금강호 COD 변화추세(1995~2002)



<그림 4-6> 금강호 T-N 변화추세(1995~2002)



<그림 4-7> 금강호 T-P 변화추세(1995~2002)



<그림 4-8> 금강호 chl-a 변화추세(1995~2002)

3. 퇴적물 용출분석

1) 오염물질의 이동과 부식화도

퇴적물의 오염이 수층에 영향을 주는 경우에 가장 주목을 받는 오염물질은 인과 중금속이다. 이들 물질들은 생물지구화학적 순환에서 퇴적물이나 토양에 저류되는 물질로 자연적인 환경에서는 퇴적물에 주로 함유되어 있다가 오염된 환경에서는 수층으로 이동하는 경향을 갖는다. 이들 인이나 중금속이 퇴적물에 저류되어 있다가 수층으로 이동되는 가장 중요한 원인은 유기물의 분해와 관련되어 일어나는 퇴적층내의 pH와 산화환원전위(Eh)의 변화이다.

따라서 퇴적물에 함유된 오염물질의 이동을 예측하는 데에는 오염물질의 함량을 파악하는 방법에는 강열감량법(loss on ignition:Ig), COD법, 산화상태판단법, 유기탄소정량법 등이 있는데 퇴적물의 유기물함량 측정은 강열감량법(Ig)이 간단하고 시간도 적게 걸린다. 또 이 방법은 유기질소량과 비교하여 유기물의 분해정도를 판정하는데도 쓰일 수 있다.

유기물의 분해정도를 판정하는데는 C/N비, 산화상태, 강열감량/유기질소비(Ig/ON)로 판단하는 방법이 있으나 Ig/ON를 이용하는 것이 비교적 간단하고 여러가지 환경에 퇴적된 퇴적물에 적용하는데 어려움이 없다.

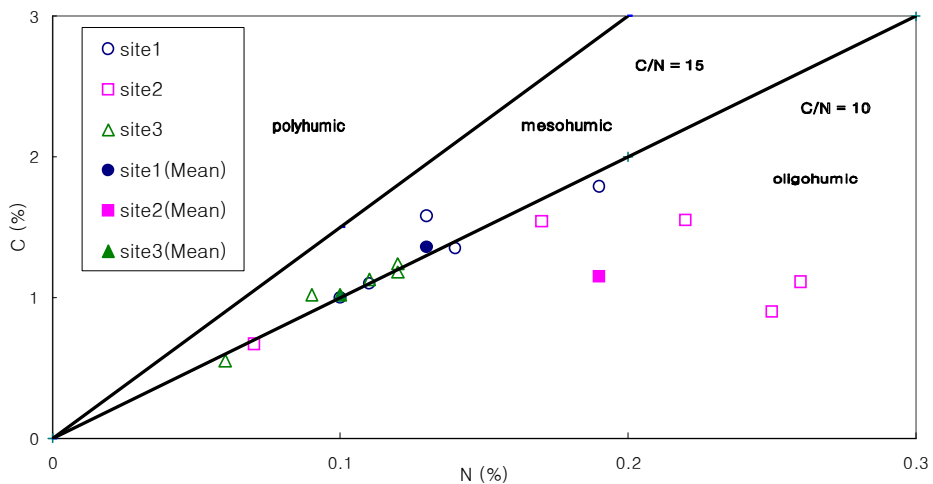
토양, 물, 퇴적물 내에서 생물활동에 의해 생성되는 물질은 여러 단계를 거치면서 부식되는데 Hakanson과 Jasson이 제안한 질소와 강열감량의 비로 표현되는 부식화도가 유기물의 부식정도를 나타내는 지표로 사용된다. Ig/ON의 비율로 유기물의 분해정도를 알 수 있으며 그 비율이 20이하이면 과부식성(oligohumic), 20~25 사이이면 중부식성(mesohumic), 25이상이면 다부식성(polyhumic)으로 구분한다.

한편 C/N비에 의한 유기물의 부식화도를 판단할 경우는 C/N비가 10이하일 경우 과부식성(oligohumic), 10~15는 중부식성(mesohumic), 15이상은 다부식성(polyhumic)으로 분류하고 있는데 금강호 표층퇴적물의 부식화도는 대체로 중부식성에 가까운 상태로 낮은 부식상태를 나타내고 있다. 이러한 상태에서는 유기물 분해로 인한 퇴적물의 pH와 Eh의 변화에 의해 착물상태의 인이 퇴적물 내의 간극수(interstitial water)로 용출될 가능성이 높고 간극수에 용출된 영양염류는 분자확산과 물리적 기작을 통해 호소수층으로 이동해 호소의 부영양화를 발생시키는 주요 원인이 될 것으로 판단된다.

퇴적물내 유기물의 함량은 다음 표와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 퇴적물내 C/N비는 6.1~10.5 범위 값을 보이고 있어 대체로 과부식성에 가까운 특성을 보이고 있으며, 이에 따라 환경여건의 변화에 따라 간극수내 인의 착물이 상층수로 용출될 가능성이 높다고 판단된다.

<표 4-14> 퇴적물내 유기물질의 함량 (단위 : %)

성분	횟수 위치						Mean	SD	CV
		1	2	3	4	5			
C	금강하구1	1.79	1.58	1.10	1.00	1.35	1.36	0.33	24.10
	금강하구2	1.55	1.11	0.90	1.54	0.67	1.15	0.39	33.80
	금강하구3	1.24	0.55	1.13	1.18	1.02	1.02	0.28	27.20
H	금강하구1	1.34	1.43	1.60	0.97	1.43	1.35	0.23	17.30
	금강하구2	1.27	1.00	1.01	1.16	0.40	0.97	0.34	34.70
	금강하구3	0.68	0.30	0.89	0.51	0.65	0.61	0.22	35.80
N	금강하구1	0.19	0.13	0.11	0.10	0.14	0.13	0.04	26.90
	금강하구2	0.22	0.26	0.25	0.17	0.07	0.19	0.08	41.10
	금강하구3	0.12	0.06	0.11	0.12	0.09	0.10	0.03	25.50



<그림 4-9> 퇴적물의 C/N비 분포와 부식화도

2) 퇴적물내 인의 존재형태

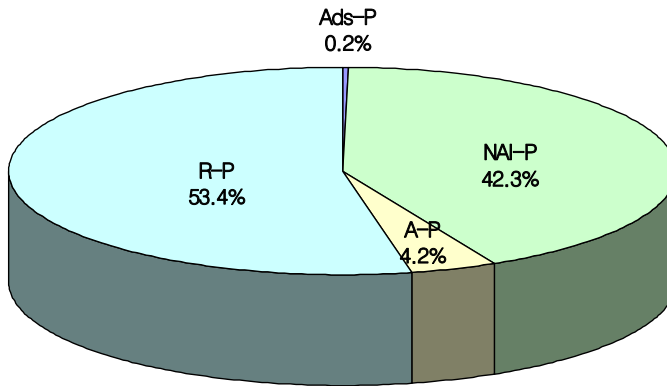
인의 존재형태 분류는 크게 고착성의 인으로 인회석인(A-P)과 잔류인(R-P)으로, 유동성의 인으로는 비인회석인(NAI-P)과 흡착상인(Ads-P)으로 나눌 수 있다. 이 중에 퇴적물내의 간극수에 용존되어 호소의 수질에 영향을 줄 수 있는 것은 비인회석인과 흡착상인 등의 유동성의 인이다.

인의 존재형태를 분류하는 실험방법은 퇴적물 시료 50g을 취해서 상온에서 pH 7.0 염화암모늄 용액으로 추출하여 흡착상의 인을 원심분리하고 잔류물 여액 가운데 pH 7.5 NaOH 용액으로 쉐이킹하면 비흡착상인이 추출된다. 나머지 잔류물 가운데 NaCl용액(pH 7.5)으로 추출하면 인회석인이 추출되고 최종적으로 잔류인이 남게 된다.

금강호 지역 퇴적물의 인의 존재형태는 퇴적물 표면에 불안정하게 흡착된 흡착상은 0.2%정도로 낮으며, 유동성을 나타내는 비인회석인이 42.3%를 차지하였다. 그 이외에 고정상의 인은 57.6%를 차지하였다. 이러한 퇴적물 내 인의 존재형태를 나타낸 것은 아래 표 및 그림으로 도시할 수 있다.

<표 4-15> 퇴적물내 인의 존재형태 (단위 : mg/kg, %)

형태 위치	T-P	Ads-P	NAI-P	A-P	R-P
금강하구1	1230 (100)	2 (0.2)	497 (40.4)	26 (2.1)	705 (57.3)
금강하구2	1150 (100)	1 (0.1)	478 (41.6)	53 (4.6)	618 (53.7)
금강하구3	1067 (100)	2 (0.2)	484 (45.4)	65 (6.1)	516 (48.4)
평균	1149 (100)	2 (0.2)	486 (42.3)	48 (4.2)	613 (53.4)



<그림 4-10> 퇴적물내 인의 존재형태 분포도

3) 퇴적된 인의 용출률

수심이 낮고 성층화되지 않은 호수는 대개 호기성 상태를 유지하며 퇴적물에서의 인 용출은 철 산화환원 기작보다는 높은 pH, 세균의 효소에 의한 물질전환(ligand exchange), 수온 상승에 의한 가수분해에 의해 발생하는 것으로 알려졌다. 즉 수심이 낮은 호소는 성층화된 호소에 비해 호소 바닥에 많은 산소가 전달되지만 상대적으로 수온이 높아 상쇄된다. 이러한 상태는 전자수용체인 O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} 를 더 많이 요구하게 되는 반면, 전자공여체인 NH_4^+ , H_2S , CH_4 , HCO_3^- , HPO_4^{2-} 등이 호소바닥에서 수체내로 이동하기 쉬운 조건이 형성된다. 결국 호소바닥과 수체 사이에 무산소 상태를 만들어 퇴적물 간극수내의 인 용해상태가 증가하여 상부의 수층으로 이동이 용이해진다. 이러한 관점에서 금강호내 3개 측정지점과 직상류인 강경 황산대교 지점의 1995~2002년까지 8년간의 연평균 pH가 7.0~9.5 정도를 유지하고 있어서 상대적으로 인의 용출 가능성이 높다고 볼 수 있다.

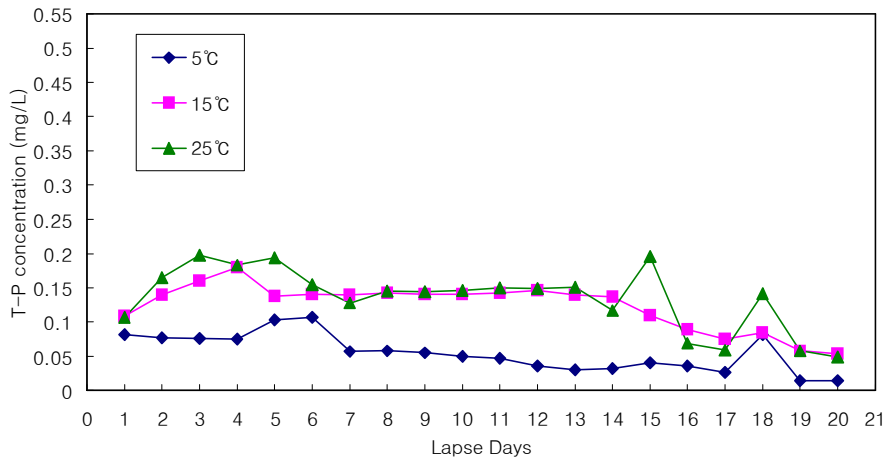
pH가 증가함에 따라 NAI-P의 용출이 증가하였고 이러한 현상은 OH⁻ 이온과 PO₄³⁻ 이온의 리간드 교환(ligand exchange)에 의한 것으로 판단된다. 온도가 높아지면 미생물의 활동이 활발해져 용존산소 소모량이 많아져서 DO 농도가 저하하고 퇴적물의 인과 간극수의 인 사이의 평형이 변화하여 간극수 인 농도가 상승하기 때문에 퇴적층과 수층의 인 농도 구배가 높아져서 인의 용출이 증가하게 된다.

고정상의 인회석인(Apatite-P)은 재용출된 인과 퇴적물이 Ca 이온이 결합하여 침전되기 때문에 용출실험 후 오히려 증가하였으며 pH가 증가할수록 증가량이 더 많아졌다. 이에 비해 유동상의 흡착성인(Adsorbed-P)은 수층과 간극수의 용존인과 동역학적인 평형을 유지하며 존재하게 된다.

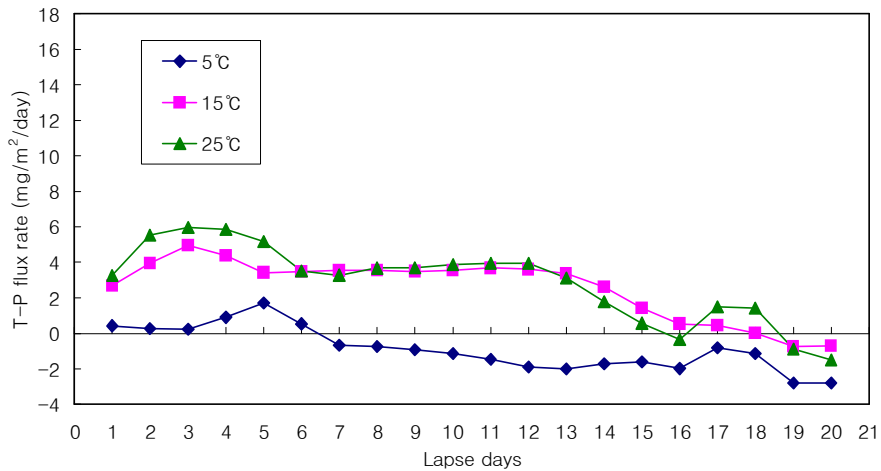
인의 용출과 수질에 대한 영향을 정량적으로 파악하기 위해서 밀봉된 인 용출실험장치를 만들어 이용하였다. 이 장치는 직경 10cm의 아크릴 수지판을 사용하고 빛을 차단시킨다. 퇴적층의 두께는 약 5cm, 전체 높이는 50cm 정도로 하여 호기성조건을 유지할 경우는 디퓨저로 공기를 공급한다. 혐기성 조건을 유지하기 위해서는 순질소만을 공급한다. 각각의 조건으로 호기성/혐기성, 수온(5℃, 15℃, 25℃)별, 시간경과별 퇴적물 상등수의 농도를 측정하고 단위면적, 단위시간당 용출량을 계산하여 이러한 조건을 비슷하게 모사하여 금강호에 적용할 경우 갈수량 Q₃₅₅, 저수량 Q₂₇₅, 평수량 Q₁₈₅ 별 유황을 고려한 수질 변화를 계산하여 예측한다.

호기성 조건을 유지하기 위해 용존산소의 농도는 8.6~9.0mg/L를 유지하였고, 대표적인 온도범위는 5℃, 15℃, 25℃로 하여 경과일수별 T-P의 농도변화와 용출률을 구하였다. 그 결과 각각에 대한 결과는 아래 그림과 같다. 여기에서 용출률은 실험기간 중

각 온도에서 최대값 1.7~5.9 mg T-P/m²/day의 범위를 보였는데 수온이 높을수록 용출률이 증가하였다.



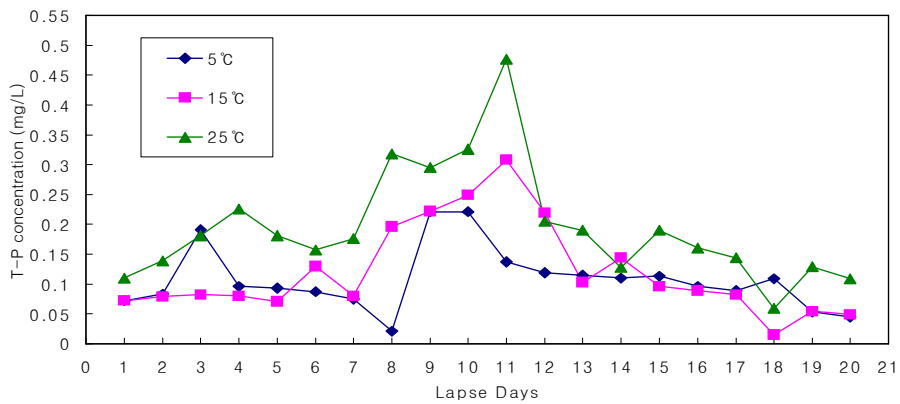
<그림 4-11> 호기성조건하의 T-P 농도변화



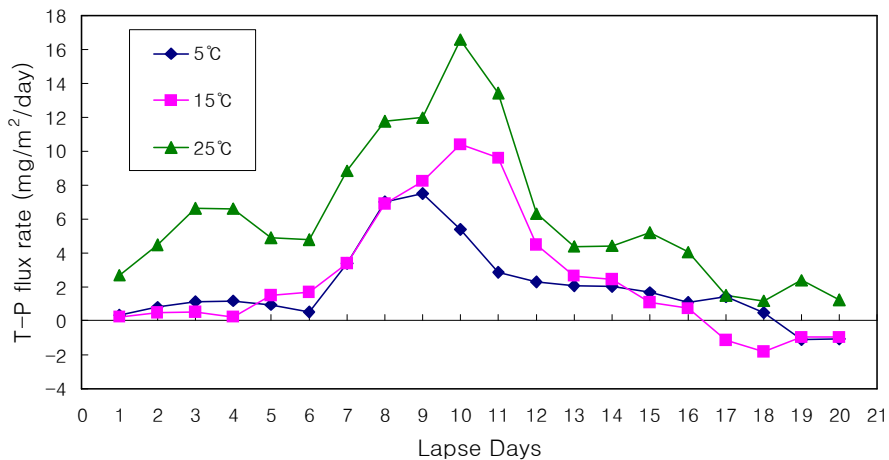
<그림 4-12> 호기성조건하의 T-P 용출률 변화

혐기성 조건을 유지하기 위해 용존산소의 농도는 0.5mg/L를 유지하였고, 대표적인 온도범위는 5°C, 15°C, 25°C로 하여 경과일수

별 T-P의 농도변화와 용출률을 구하였다. 그 결과 각각에 대한 결과는 아래 그림과 같다. 여기에서 실험기간 중 최대 용출률은 7.5~16.6 mg T-P/m²/day의 범위를 보였는데 수온이 높을수록 용출률이 증가하였다. 특히 최대 용출률을 보인 것은 실험개시 10일 정도 지났을 때 최고치를 보였다.



<그림 4-13> 혐기성조건하의 T-P 농도변화



<그림 4-14> 혐기성조건하의 T-P 용출률 변화

4) 인의 용출률 산정모델

금강호의 수리적 특성모양, 지형, 물의 흐름 등을 고려하면 마개형 흐름(plug flow)에 맞는 모델을 적용해야 하지만 저수기에서 갈수기시 호소의 체류시간이 길어지는 만큼 완전혼합 반응조의 형태라고 보고 퇴적물 내 용해성 인의 용출에 의해 수질이 악화될 것으로 예측한다. 퇴적물이 퇴적층 전역에 분포되어 있는 연속교반 반응조(CSTR) 모델을 가정할 때 수중에 존재하는 인의 물질수지는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = q_{in} \cdot C_i - q_{out} \cdot C + F \cdot A \dots\dots(1)$$

$$\text{Accumulation} = \text{Input} - \text{Output} + \text{Generation}$$

여기서, V : 수층 체적 (m³)

$\frac{dC}{dt}$: 수중 인농도 변화 (g/m³/일)

q_{in} : 유입유량 (m³/일)

q_{out} : 유출유량 (m³/일)

C_i : 유입 인농도 (g/m³)

C : 수중 인농도(=C_{out}) (g/m³)

F : 퇴적물 표면에서의 용출속도 (g/m²/일)

A : 퇴적층 표면적 (m²)

퇴적물 표면에서 인의 용출속도는 간극수 인 농도와 수중 인 농도 차의 함수로 나타낼 수 있다. 물질의 유출입이 평형을 이룬 상태라면 $q_{in} = q_{out} = q$ 이 되어 T-P의 물질수지는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
V \frac{dC}{dt} &= q \cdot C_i - q \cdot C + k(C_s - C) \cdot A \\
&= (qC_i + kA \cdot C_s) - (q + kA)C \\
&= a + bC \quad \dots\dots (2)
\end{aligned}$$

여기서, C_s : 간극수 인농도 (g/m^3)

k : 물질전달계수(mass transfer coefficient) (m/일)

$t = t_0$ 에서 $C = C_0$ 라고 두고 식(2)를 적분하면 최종적으로 수 중의 인 농도 $C(\text{g/m}^3)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = -\frac{a}{b} + (C_0 + \frac{a}{b}) \exp[\frac{b}{V}(t - t_0)] \quad \dots\dots (3)$$

퇴적시료를 대상으로 한 용출실험에서는 유입과 유출이 없으므로 식(4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = F \cdot A = kA(C_s - C) \quad \dots\dots (4)$$

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = kA(C_s - C)$$

$$\frac{dC}{C - C_s} = -\frac{kA}{V} \cdot dt$$

양변을 적분해서 풀면,

$$k = -\frac{V}{tA} \cdot \ln \frac{C_s - C}{C_s} \quad \dots\dots (5)$$

로 나타낼 수 있다.

용출실험 결과로부터 산출된 물질전달계수 k 를 바탕으로 금강호 퇴적물의 분자확산계수(diffusion coefficient)를 구할 수 있으며, 간극수와 수중의 농도구배 및 분자확산 계수를 적용하여 호소 내 심층 환경조건에 따른 퇴적인의 용출률을 예측할 수 있는데 이는 퇴적물에 의한 내적오염부하량(autochthonous pollution load)을 산출하는 데 적용될 수 있다. 이러한 모델 적용과정에 사용된 변수들을 정리하면 다음 표와 같다.

<표 4-16> 금강호 퇴적물에 의한 수질예측 적용 변수

변 수	수 량	비 고
$V(m^3)$	1.22×10^8	금강호 유효저수량
$Q_{in}(m^3/day)$	8.63×10^6	평수기 유입량
$Q_{out}(m^3/day)$	7.60×10^6	평수기 유출량
$C_i(mg/m^3)$	127	강경지점 T-P 평균농도
$C(mg/m^3)$	79	금강하구1 지점 T-P 평균농도
$F(mg/m^2/day)$	1.7~5.9	인 용출 실험치(호기성 상태)
$A(m^2)$	3.65×10^7	금강호 수표면적
$dC/dt(mg/m^3/day)$	4.57~5.83	평수기 계산치

4. 금강호 수질영향 예측

1) 금강호 퇴적물의 용출 기여도

퇴적물에서 용출되는 오염물질이 호소 수질에 어느 정도 영향을 미치는가를 알아보기 위해 저질에서 측정 분석한 용출률을

현장에 적용해 보았다. 수질항목 중 T-P를 금강호의 면적($3.65 \times 10^7 \text{m}^2$)에 용출률을 곱하고, 유효 저수량($122 \times 10^6 \text{m}^3$)으로 나누어 퇴적물로부터 최대 용출량을 구한다. 금강호의 수리학적 체류시간은 평수량(Q_{185}) 87.93CMS에서 16.1일, 저수량(Q_{275}) 49.90CMS에서 28.3일, 갈수량(Q_{355}) 22.27CMS에서 63.4일로 계산되었다.

금강호의 평균수심은 3.7m내외지만 하류부의 수심이 6~10m에 달하는 곳도 있다. 수층의 수심별 수온 및 산화환원전위 분포, 수리적 특성을 고려한 밀도는 금강호가 완전혼합반응조(CSTR)의 특성을 보인다. 또한 T-P의 용출속도는 물 순환이 원활한 다순환형(polymictic) 호소특성을 보이고 있으므로 이러한 속성을 고려하여 호소 바닥이 대체로 호기성 조건을 유지할 수 있다고 보고 파일럿 용출실험 결과치 $1.7 \sim 5.9 \text{ mg T-P/m}^2 \cdot \text{일}$ 을 적용하였다.

1995~2002년까지 8년간 월평균으로 나타낸 환경부 수질측정망 평균 대표치인 0.090 mg/L 을 적용하면, T-P농도가 평수기에는 $0.098 \sim 0.12 \text{ mg/L}$ 범위, 저수기에는 $0.10 \sim 0.14 \text{ mg/L}$ 범위, 갈수기에는 $0.12 \sim 0.20 \text{ mg/L}$ 범위 정도로 상승하는 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 체류시간별 퇴적물에 의한 T-P의 오염기여도는 평수기에 8.9~31%, 저수기는 16~56%, 갈수기는 36~120%까지 상승할 것으로 예상되었다. 유황별 오염기여도 상승률과 평균예측 농도는 다음 표와 같다.

<표 4-17> 금강호 유황별 퇴적물에 의한 수질예측 결과

유황	유량 (m ³ /sec)	순환률 (yr ⁻¹)	영향 (T-P mg/L)	상승률 (%)	평균예측농도 (T-P mg/L)
풍수량 Q ₉₅	168.9	43.45	0.004 ~ 0.02	4.4 ~ 17	0.094 ~ 0.11
평수량 Q ₁₈₅	87.93	22.73	0.008 ~ 0.028	8.9 ~ 31	0.098 ~ 0.12
저수량 Q ₂₇₅	49.90	12.90	0.014 ~ 0.050	16 ~ 56	0.10 ~ 0.14
갈수량 Q ₃₅₅	22.27	5.760	0.032 ~ 0.11	36 ~ 120	0.12 ~ 0.20
연평균 Q _m	196.8	44.96	-	-	-

<표 4-18> 금강호 유황별 인 축적률

유황	체류시간 (days)	인축적률 R _{TP} (%)
풍수량	8.4	16.1
평수량	16.1	27.8
저수량	28.3	41.8
갈수량	63.4	63.4
연평균	8.1	15.5

2) 호소의 인 농도 저감방안

(1) 예비댐 건설

호소와 저수지는 영양물질 및 기타 각종 오염물질의 보유능력

이 매우 높으며, 우리 나라 주요 호소의 경우 유입된 T-P의 60~70%가 호소 내에 축적되고 있다. 다음 표는 체류시간을 이용한 경험식에 의한 우리 나라 주요 호소의 인 축적률이다.

<표 4-19> 우리나라 주요 호소의 인 축적률

구 분	소양호	안동호	대청호	낙동강하구호	금강호
체류시간(RT:일)	604	485	160	13	8
인축적률(R _{TP} : %)	76.1	76.0	75.2	23.3	15.5

주) $R_{TP}[\%] = 76.1 \times [1 - \exp(-0.0282 \times RT)]$ 경험식 사용

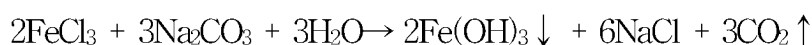
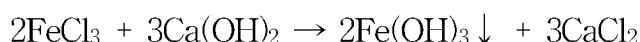
물의 체류기간이 작으면 T-P의 축적률이 매우 낮지만, 체류기간의 증가와 함께 호소 내 축적률도 급격히 증가하여 체류기간이 100일을 넘으면 호소에 유입된 T-P는 평균 75%가 호소 내에 축적된다. 따라서 체류시간이 대부분 100일을 상회하고 있는 우리 나라 주요 다목적댐들의 경우, 인의 호소내부 축적률은 상당히 높게 된다. 금강호는 체류시간이 다른 호소에 비해 상당히 짧은 편이지만 저수기에는 체류시간이 28.3일로 인 축적률은 41.8%가 되고, 갈수기에는 63.4일로 인 축적률은 63.4%에 이르고 있어 유량이 감소할 경우 인 축적률은 급격히 증가하게 된다.

이처럼 높은 인의 축적률을 저감하기 위한 생태공학적 기법의 하나로 오염조절용 예비댐(pre-impoundment)의 건설을 들 수 있다. 오염조절용 예비댐은 호소의 유입부에 건설함으로써 인의 부하감소에 기여할 수 있고 이 예비댐에서 퇴적물 처리, 인의 침전제거 및 습지를 이용한 다양한 생태기술의 적용을 통해 호소의 부영양화를 억제할 수 있다. 그러나 금강호는 유역면적이 크고 경사도가 완만한 하구에 위치함으로써 생태공학적 예비댐을

건설할 적지가 없어 현실적으로 금강호 연안에 예비댐을 설치하는 것은 불가능하다고 본다.

(2) 오염물질의 고화 및 재용출 방지

물 속의 인산염 과잉상태의 경우는 2단계의 침전물 처리방법을 이용한다. 2단계 침전물 처리방법이란 먼저 염화철(Ⅲ)을 사용하여 응집 침전시킨 후 수산화철(Ⅲ) 생성 시 알칼리도의 보충을 통해 물의 완충능력을 유지하기 위해 석회석이나 소다회를 뿌리고 침전된 물질의 재용출을 방지하기 위해 침전물에 포함된 산소요구물질을 산화제를 이용해 산화시키는 방법이다. 이러한 과정을 반응식으로 나타내면 다음과 같다.



금강호는 대체로 pH와 알칼리도가 높아 별도의 알칼리제를 투입할 필요는 없겠으나 새만금호 제염담수화를 위해 회석수 취수량이 초당 20톤을 예상한다면 취수량이 상당한 양이고 호소의 수면적이 커서 인의 용출을 방지한다는 것이 현실적으로 어렵다. 이러한 방법은 비교적 소규모 저수지의 퇴적물 내 인 용출에 의한 수질악화를 방지하는 대안으로 적용될 수 있을 것이다.

제 5 장 결론 및 제언

새만금 간척사업과 관련하여 간척사업의 시행자인 농업기반공사는 장차 만들어질 새만금호에 대해 금강호에서 제염담수화용 회석수를 도수기로 계획을 세웠다. 2001년 5월 정부는 순차적 개발을하기로 결정하고 우선 수질이 상대적으로 양호한 동진수역에 대해 먼저 간척사업을 시행하고 그 다음 수질개선 성과 여부에 따라 만경수역은 차후에 개발하기로 결정하였다. 수질개선을 위해 2011년에 내부개발이 완료되면 목표년도 2012년에 농업용수 수질기준인 COD 8mg/L, T-P 0.1mg/L를 목표로 하고 있다.

이를 위해 금강호에서 도입계획수량은 평수량 기준으로 연간 430백만~470백만톤을 목표로 하고 있다. 이는 금강호의 연평균 방류량 5,498백만톤의 8.0~8.5%에 해당하며, 이러한 수량산정은 금강수계 전체의 용수이용계획, 용담댐 및 대청댐 건설전후의 가뭄이 심한 갈수년의 유출량, 금강호에서의 하천유지용수량, 대청댐 및 용담댐의 운영실적 등을 고려하면 과도한 취수량 계획이라 할 수 있다. 새만금 간척사업 논의 시점에서 검토한 내용은 방조제 공사가 마무리되면 총 사업비 632억원으로 금강호와 만경강을 연결하는 금만연락수로 14.2km를 건설하고 자연유하 방식으로 제염담수용 회석수를 공급하는 것으로 되어 있다. 그러나 정부의 새만금 간척사업 순차개발 방식 채택으로 새만금호유역 내 만경수역 개발사업은 상당히 늦춰질 개연성이 있지만 금강호의 수질개선 및 금강호 방류수역인 서해연안의 해역환경개선을 위해서라도 기득수리권에 대한 정립과 물 부족에 대비한 합리적 수자원 이용방안 정립, 유역변경에 따른 충남과 전북간의 사전환경협의 조건 확립, 지속적인 수질개선 노력이 요구된다.

본 연구에서는 회석수를 금강호에서 공급할 경우 금강수계의 끝단에 위치하는 지리적 특성상 수질에 불리한 점이 있으므로 금강호의 수리수문 특성과 물수지 특성을 고려하여 평수량 기준으로 초당 20톤을 도수할 경우 금강호의 방류량 감소와 수체의 체류시간 증가에 따른 수질변화를 예측하고 이에 대한 대책을 모색하는 데 중점을 두었다. 이를 위해 본 연구에서 행한 실험 및 예측결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 퇴적물에서 용출되는 오염물질이 호소 수질에 미치는 영향 정도는 실험실적 조건에서 측정 분석한 용출률을 현장에 적용해 보았다. 수질항목 중 T-P를 금강호의 면적($3.65 \times 10^7 \text{ m}^2$)에 용출률을 곱하고, 유효 저수량($122 \times 10^6 \text{ m}^3$)으로 나누어 퇴적물로부터 최대 용출량을 구하였다. 금강호의 수리학적 체류시간은 평수량(Q_{185}) 87.93CMS에서 16.1일, 저수량(Q_{275}) 49.90CMS에서 28.3일, 갈수량(Q_{355}) 22.27CMS에서 63.4일로 계산되었다. 이에 따라 갈수년 상황이 지속되면 수리적 체류시간 증가로 금강호의 수질악화 개연성은 증가한다.
2. 수층의 수심별 수온 및 산화환원전위 분포, 수리적 특성을 반영하는 밀도화지수로 나타내면 금강호가 완전혼합반응조(CSTR)의 특성을 보인다. 또한 T-P의 용출속도는 물 순환이 원활한 다순환형(polymictic) 호소특성을 보이고 있으므로 이러한 속성을 고려하여 호소 바닥이 대체로 호기성 조건을 유지할 수 있다고 보고 파일럿 용출실험 결과치 $1.7 \sim 5.9 \text{ mg T-P/m}^2 \cdot \text{일}$ 을 적용하였다. 그러나 전자공여체인 유기물의 축적으로 용존산소나 질산염, 황산염 등의 산소공급원이 소모되면 혐기성 조

건으로 변화할 수 있다. 특히 수온이 높고 혐기성 상태가 되면 용출률은 크게 증가하여 수질이 악화될 것이다.

3. 1995~2002년까지 8년간 월평균으로 나타난 환경부 수질측정망 평균 대표치인 0.090mg/L을 적용하면, T-P농도가 평수기에는 0.098~0.12 mg/L범위, 저수기에는 0.10~0.14 mg/L범위, 갈수기에는 0.12~0.20 mg/L 범위 정도로 상승하는 것으로 볼 수 있다. 이에 따라 체류시간별 퇴적물에 의한 T-P의 오염 기여도는 평수기에 8.9~31%, 저수기는 16~56%, 갈수기는 36~120%까지 상승할 것으로 예상되었다.
4. 공학적으로 퇴적물내 인의 축적에 의한 오염기여도를 저감시키는 방안을 고려해 볼 수 있다. 그 중에 생태공학적 기법의 하나로 오염조절용 예비댐(pre-impoundment)의 건설을 들 수 있다. 오염조절용 예비댐은 호수의 유입부에 건설함으로써 인의 부하감소에 기여할 수 있고 이 예비댐에서 퇴적물 처리, 인의 침전제거 및 습지를 이용한 다양한 생태기술의 적용을 통해 호수의 부영양화를 억제할 수 있다. 그러나 금강호는 유역면적이 크고 경사도가 완만한 하구에 위치함으로써 생태공학적 예비댐을 건설할 적지가 없어 현실적으로 금강호 연안에 예비댐을 설치하는 것은 불가능하다고 본다.
5. 금강호는 pH와 알칼리도가 높아 수질관리를 위해 별도의 알칼리제를 투입할 필요는 없겠으나 새만금호 제염담수화를 위해 회석수 취수량이 초당 20톤을 예상한다면 취수량이 상당한 양이고 호소 수면적이 커서 인의 용출을 방지한다는 것은

현실적으로 어렵다. 따라서 공학적인 오염의 사후처리 방안보다 오염원을 근본적으로 줄이기 위한 수계전역에 오염총량관리제도의 정착, 농업용수 사용과 관련한 기득수리권에 대한 이론정립, 물 부족에 대비한 합리적 수자원 이용방안 정립, 갈수기시 기존 물 사용권자와 새만금호 관리자간 물배분과 관련한 원칙 정립, 당사자인 충남과 전북간의 유역변경에 대한 사전환경협의 조건 명시 등 지속적이고 종합적인 수질개선 노력이 필요함을 알 수 있다. 금강호의 유지관리, 수질개선, 수리권 배분 등에 대해 하천법상 국가하천으로 건설교통부의 관리권이 있고, 홍수시 침수방지를 위한 배수관리는 농업기반공사가 담당하고 수질개선은 환경부가 담당하고 있다. 따라서 금강호의 유지관리 및 이용에 대한 이해당사자간의 기능과 역할 부분에 대한 명시화의 추진이 필요하다.

6. 금강호의 호소생태계 유지관리와 관련하여 홍수시 퇴적물의 침전으로 규모가 큰 모래톱이 확장되고 있으며, 관리주체인 농업기반공사 금강사업단은 담수량 확보 및 통수단면증대를 위해 모래톱의 준설을 검토한 적이 있으나 철새도래지 훼손문제로 사업이 유보되었다. 여름철에서 초가을까지 퇴적물 축적 및 영양염류 용출, 녹조류 번성에 의한 투명도 감소문제는 금강호 뿐만 아니라 장항, 군산의 해역 생태계에도 영향을 줄 수 있으므로 새만금호 회석용수 취수시 이러한 해양환경영향 평가도 필요하다.
7. 금강호는 금강유역의 끝단에 위치한 관계로 홍수시 상류에서 많은 부유성 폐기물이 유입되어 금강호 연안이나 서해연안에 심대한 영향을 주므로 폐기물처리 비용은 금강수계관리위원회의 협의를 거쳐 상하류지역 자치단체간의 비용분담에 대한 정책협약이 요구된다. 그리고 부유성 폐기물 처리를 위한 로

프형 폐기물 차단망의 설치는 대청호 등 내륙형 호소와는 다른 수위변동이 심해서 유지관리가 어려운 특성을 가지므로 수리적 안전성 등을 검토한 후 설치여부를 고려해 볼 필요가 있다.

참고문헌

1. 전상호, 호소퇴적물준설이 수질에 미치는 영향의 평가방법에 관한 연구, 한국환경과학연구협의회, 1991, pp.1-60
2. 이요상, 퇴적물 영향평가예측, 한국환경영향평가학회지, 2000, pp.99-107
3. 황종연, 대청호, 삽교호 및 금강호의 퇴적물 분석, 박사학위논문, 2001, pp.35-55
4. 안재환, 호소 및 하천의 퇴적오니 오염현황과 처분, 대한환경공학회, 2002, pp.23-72
5. 이창희, 퇴적물 환경기준 개발방안, 대한환경공학회, 2002, pp.75-106
6. 국무조정실, 새만금사업 관련부처 합동검토, 2001, pp.296~298
7. 새만금사업환경영향공동조사단, 새만금사업환경영향공동조사 결과보고서(수질보전분야), 2000, pp.25~30
8. 환경부, 수질오염공정시험법, 2000, pp.260~300
9. 금강유역환경청, 금강유역수질오염원현황, 2001, pp.57~198
10. 한국수자원공사, 대청다목적댐 유역 수문유출 해석, 1997, pp.46~47
11. 건설교통부, 유수량관리추정 및 이용현황조사, 1999, pp.559~605
12. 대전대학교, 금강수질측정연구보고서, 1995, pp.224
13. 농업기반공사 금강사업단, 금강하구독유지관리보고서, 1997, pp.12~53
14. 농업기반공사, 금강지구 대규모 농업개발사업 사후환경관리보고서, 2000, pp.69~85
15. Straskraba M., Ecotechnological Methods for Managing Nonpoint Source Pollution in Watersheds, Lakes and Reservoirs, Water Science Technology, Vol. 33, 1996, pp.73~80
16. State Affairs Coordination Commission, Review Material from Related Ministries on Saemangum Reclamation Project, 2001, pp.120-131
17. Stumm W., Aquatic Chemistry, John Wiley & Sons, 1996, pp.903-904

18. Thibodeaux L., Environmental Chemodynamics, John Wiley & Sons, 1996, pp.163-164
19. Sawyer C., Chemistry for Environmental Engineering, McGraw-Hill, 1994, pp.173-175
20. Kum River Watershed Environmental Office, State in quo of Water Pollution Sources in Kum River Basin, 2001, pp.37-48

■ 집 필 자 ■

정 종 관(鄭鍾寬)

- 충남발전연구원 연구위원
- 공학박사(환경공학 전공)
- 폐기물관리기술사
- asset@cdi.re.kr

기본연구과제 2003-08

금강호 유기성 퇴적물의 특성과 수질영향

발 행 자 : 오 제 직(충남발전연구원장)

발 행 일 : 2003년 12월 31일

발 행 처 : 충남발전연구원

305-313 대전광역시 유성구 상대동 138-42

전화 : (042)824-7813

팩스 : (042)824-7817

인 쇄 처 :

- 이 책에 실린 내용은 출처를 명기하면 자유로이 인용할 수 있습니다. 무단전재하거나 복사, 유동시키면 법에 저촉됩니다.
- 이 연구는 본 연구원의 공식 견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

<비 매 품>