

부영양화 인공호소의 수질관리를 위한 초고속응집침전(URC)공정의 적용

윤태광 · 윤태일 · 김창균* · 박세진

인하대학교 환경공학과
*인하대학교 서해연안 환경연구센터

(2000년 5월 16일 접수, 2000년 9월 27일 채택)

The Application of URC Process for Water Quality Management of An Artificial Eutrophicated Lake

Tai-kwang Yoon · Tai-il Yoon · Chang Gyun Kim* · Se-jin Park

Department of Environmental Engineering, Inha University
**Regional Research Center for Coastal Environments of Yellow Sea, Inha University*

ABSTRACT

A physicochemical process called ultra rapid coagulation(URC) was applied as a pilot scale to recover eutrophicated lake water at Inkyung Lake located on-campus in Inha university. The URC was uniquely designed to completely remove the presence of phosphorus up to 95%, which in turn leading to lessen the level of eutrophication of lake. For a pilot test of period, the lake was restored showing Carlson's Trophic State Index(TSI) of mesotrophic state which accounts for the reduction of total phosphorus and chlorophyll-a down to approximately 55 from 70 and 73, respectively. A residual presence of aluminum and additional coagulants in the effluent was tested for their potential effects on *Photobacterium phosphoreum*. The effect concentration (EC₅₀-15 min) observed in the effluent revealed that the bioactivity of *Photobacterium phosphoreum* was not influenced by the residual presence of coagulants. After the pilot test of period, the lake was consequently restored as a mesotrophic state in obtaining the second grade of lake water quality. The URC may be further applied for restoration of greater scale of lake in eutrophication.

Key Words : Ultra Rapid Coagulation(URC), Eutrophication, Trophic State Index (TSI), Mesotrophic State, *Photobacterium phosphoreum*, EC₅₀-15min

요 약 문

부영양화 호소의 수질관리를 위한 물리화학적 처리공정-초고속응집침전(URC)공정의 적용가능성을 확인하기 위해 인하대학교내에 있는 위탁용 소형호소인 인경호를 대상으로 pilot plant 규모의 실험이 수행되었다. URC 공정은 부영양화를 억제할 수 있는 주요인자인 총인을 95%이상 제거할 수 있도록 특별하게 설계되어졌다. 실험기간 중 총인과 클로로필-a를 기준으로 하는 Carlson의 호소영양상태지수는 운전 전 각각 70과 73에서 운전 후 약 55로 개선되었다. 또한 응집처리에 의해 유출수내에 존재할 수 있는 잔류 알루미늄과 추가적으로 주입되는 가중응집제와 고분자응집제에 의한 *Photobacterium phosphoreum*의 잠재적인 독성영향이 평가되었으며 실험결과 응집 유출수는 형광 미생물에게 어떠한 영향(EC₅₀-15min)도 미치지 않음을 확인할 수 있었다. URC 공정의 운전 이후 인경호는 국내 호소 수질환경기준 II등급으로 투명도를 회복할 수 있었으며, 보다 큰 호소의 수질관리를 위한 URC 공정의 적용이 기대된다.

주제어 : 초고속응집침전공정, 부영양화, 호소영양상태지수, 중영양상태, *Photobacterium phosphoreum*, EC₅₀-15min

1. 서 론

최근 국내 상당수의 호소가 봄철과 가을철에는 규조류, 여름철에는 남조류가 대량 발생하고 있으며 그에 따른 장애의 빈도 및 정도가 더욱 커지고 있다. 특히 국내 호수들은 대부분이 인공호로서 호수의 상류유역에 주거 및 산업시설 등 인위적인 오염원을 가지고 있어 건설한 후 10~30년 경과시, 모두 중영양호 또는 부영양호의 수질을 보이고 있다. 일산호수를 제외한 국내의 위탁용 호수는 설계단계부터 수질관리를 고려하지 않고 계획되었으며, 또한 수도권 일대에 상수를 공급하고 있는 팔당호 역시 오염도가 점차 심화되는 등 사회적인 문제로 대두되고 있어 국가적 관리가 시급한 상태이다.

상수원으로서 이용되는 호수의 경우 부영양화에 의한 조류번식은 정수장에서의 응집저해, 여과지의 조기폐쇄, 맛, 냄새 유발, 그리고 THMs와 같은 유해물질 생성¹⁾ 등 여러 문제를 유발할 수 있다. 이러한 조류를 제어하기 위해서 황산동(CuSO₄ · 5H₂O)과 같은 약품처리를 하거나 수화펜스(algal bloom fence), 성층파괴, 마이크로스트레이너(microstrainer)등과 같은 처리방안이 모색되어 왔다.

호소의 수질관리 및 부영양화 억제를 위해서 영양염류물질인 질소와 인의 조절이 가장 중요하며, 특

히 인은 부영양화의 주요한 제한인자로서 이에 대한 제어가 반드시 필요하다.²⁾ 국내의 경우, 하천과 호소수로 유입되는 유입지천의 처리는 점오염원을 대상으로 생물학적 공정에만 의존하고 있어, 강우시 우수와 함께 유입되는 비점오염원을 효과적으로 처리하지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 생물학적 공정으로는 호소내 부영양화의 주요인자인 총인농도를 부영양화 한계농도인 0.02 mg/L(EPA)로 유지시키기에는 현실적으로 불가능하다고 볼 수 있다. 이에 외국의 경우에는 예비호를 만들고 물리화학적 응집공정을 이용하여 호소수를 처리하고 우기에 유입되는 유량을 처리하는 보다 적극적인 방법으로 문제에 접근하는 많은 연구들이 진행되고 있다.³⁾

본 연구는 국내에서 개발된 초고속응집침전(URC)공정을 이용하여 인하대학교내에 위치한 부영양호인 인경호의 수질 개선을 위하여 수행되었다. URC 공정의 특징은 Alum, 철염 등과 같은 무기응집제와 고속 침전을 가능하게 하는 가중응집제를 주입하여 가벼운 조류 floc의 침전을 용이하게 하며, 침전조에서 일정량 슬러지를 반송하여 응집 반응조내에 일정량의 초기입자를 확보함으로써 입자의 충돌수를 높여주기 때문에 기존 응집공정보다 약 10배 이상 빠른 처리 속도를 가지게 된다.⁴⁾ 따라서 강우시 우수유출에 의한 유량변동에 대처가 가능하고

원수의 수질변동이 있더라도 안정한 처리수질과 부영양화의 주원인 물질인 인 및 조류의 직접적인 제거가 가능하다.

이와 같은 URC 공정의 장점을 이용, 총인을 제어하여 조류 생산력 억제와 직접적인 호내의 조류 제거를 통하여 호소의 복원 및 수질관리 가능성을 알아보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 호소의 물리적 특성과 실험방법

인경호는 인하대학교내에 위치한 유효저수량 2,300 m³, 평균수심 0.7 m, 최대 수심 1.1 m, 체류시간 약 28~46일의 소형 위락용 호소이다. 호소의 유입원으로서 지하수가 2곳에서 유입되고 있다.

Fig. 1은 인경호의 단면도로서 호소의 평균수질을 평가하기 위한 각 시료채취지점과 원수(지하수)유입지점, 호소 저부로 퇴적되는 부하량을 산정하기 위한 침강량 실험지점, 그밖에 물리적 환경으로서 수차와 강우시 집중 우수유입 지점을 표시하였다.

호소의 순환특성과 양적인 특성을 평가하기 위한 침강량 실험은 직경 7 cm, 높이 15 cm인 플라스틱 원통형 용기를 지지대에 고정시켜 호소내에 설치하였으며, 수심과 용기의 상단부분과 차이는 15~25 cm 정도였다.

기저의 인 용출 실험은 core-sampler를 이용하여

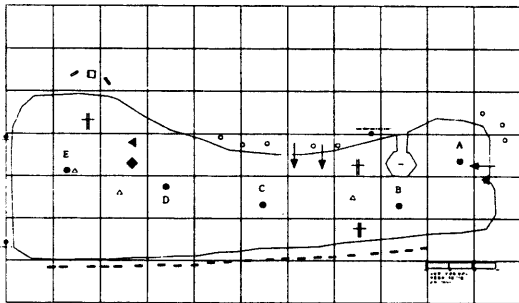


Fig. 1. A cross sectional view of Inkyung Lake (● : sampling point, ▲ : groundwater inflow point, △ : location of settling test, —▶ : runoff inflow point).

호저 퇴적물을 채취하여 가로, 세로, 높이 20 cm의 아크릴 반응기 2개를 이용하여 수행되었다. 인경호의 퇴적물과 호소수를 동일한 비율로 반응기에 주입하고, 용출되는 인이 조류에 의해 섭취되는 것을 방지하기 위해 차광막을 설치하였다. 2개의 반응기 (A, B) 중 한 곳에는 산기판을 설치하여, 호기성과 무산소 또는 혐기성 조건에서 기저에서의 인 용출량을 비교하였다. 인경호에서 기저를 채취하여 A는 인위적인 폭기가 없는 상태로써 실험기간 동안 0.3~1.5 mg/L의 DO농도를 유지하였고, B는 지속적인 폭기에 의하여 기저의 유동없이 DO 농도를 7이상으로 유지시켰다. 식물성 플랑크톤의 성장을 막기 위해 차광막을 설치하였으며, 실험기간은 33일이며, 수온은 25~30℃를 유지하였다.

본 연구에서 사용된 URC pilot plant의 처리수구 생태계에 주는 영향을 평가하기 위해 Microtox법에 의한 생물독성영향평가를 실시하였다. 이 실험은 발광 미생물인 *Photobacterium phosphoreum*을 15분 동안 시료에 노출시켜 50% 이상 발광량이 차이가 발생되면 독성이 있다고 판단하는 것이다. Microtox test는 인경호, URC 처리수 및 control로서 Hg 1ppm을 첨가한 시료를 대상으로 실시하였다. 각 독성 물질의 농도에 따른 발광량의 감소 경향을 알아보기 위해서, 초기 발광량에 대한 상대적인 감소 비율(percent of relative bioluminescence)을 계산하였다. COD_{Cr}, TSS, T-P, T-N, 그리고 Chl-a는 Standard Methods, COD_{Mn}은 수질오염 공정시험법에 준하여 실시하였고 Trophic State Index(TSI)는 Carlson이 제시한 방법으로 계산하였다.

2.2. URC 공정의 특징 및 운전 기간

본 연구에서 사용된 초고속응집침전 pilot 설비의 개략도는 Fig. 2와 같다. 최대처리속도 6.5 m³/hr, injection tank 3분, rapid mixing tank 1분, slow mixing tank 5분, 그리고 settling tank에서의 체류시간은 6분이다. 사용된 약품은 Alum (Eyang chemical, 17% of Al₂O₃) 10~60 mg/L, anionic polyelectrolyte(Eyang chemical, FLO-PAM AN 934 PWG) 0.5~0.8 mg/L, 가중응집제 (URC Tech)는 규조토와 유리를 5 : 5로 혼합하여

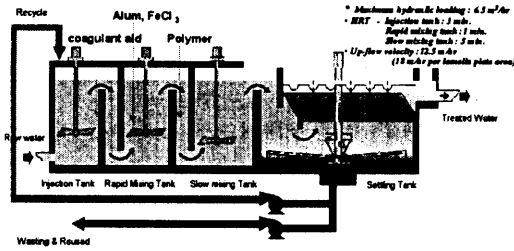


Fig. 2. Schematic of the URC process.

20~40 mg/L 주입하였다. 침전조는 하부에 침전 농축된 슬러지의 일부를 혼화조 또는 급속교반조로 반송하고 생성된 슬러지의 일정량을 주기적으로 인출하도록 되어 있으며 상부에는 경사판이 설치되어 있다.

운전기간은 '99. 9. 20~11. 30일까지 약 70일간 운전되었고, 인경호의 유효 수용량과 URC pilot plant의 처리속도를 비교해 볼 때, 비가 오지 않는 건기를 기준으로 약 16일 정도가 인경호의 수리학적 처리순환 1주기로 볼 수 있으며, 본 연구는 건기 기준 4.4주기 동안 운전되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. URC 공정에 의한 처리 특성

3.1.1. 유기물, TSS와 클로로필-a

호소내 유기물과 TSS는 외부유입과 내부생성에 기인하는 부분으로 나눌 수 있으며, 클로로필-a는 호소의 영양상태에 의존하는 내부 생성원이 된다. 일반적으로 호소의 생물학적 요인을 분석하기 위하여 식물성 플랑크톤 및 1차 생산력을 조사하는데 식물성 플랑크톤의 농도를 나타내는 지표로서 보통 클

로로필-a가 이용되고 있다. 식물성 플랑크톤의 생산력은 일사량, 수온, 영양염류에 직접적인 영향을 받게 된다. 이 중 영양염류인 총인, 총질소는 호내의 식물성 플랑크톤 성장에 충분한 양이 존재하고 있으므로, Table 1, 2와 Fig. 3과 같이 일사량과 수온이 충분히 제공되는 6, 7월에 식물성 플랑크톤이 높게 유지되고 있다. 여름과 가을철의 우점종인 조류는 남조류 *Microcystis sp.*, 녹조류 *Scenedesmus sp.*, 그리고 규조류 *Synedra sp.*와 *Melosira sp.* 등이 관측되었다.

현재 인경호는 두 지점에서 지하수가 유입되며 (Fig. 1), Table 2와 같이 유입 지하수의 수질은 총인의 경우 평균 0.035 mg/L, 총질소는 질산성 질소 형태로서 6~10 mg/L의 높은 농도로 유입된다. URC 운전 전, 평균 인경호의 수질은 총인 농도 0.094 mg/L, 식물성 플랑크톤의 지표농도인 클로로필-a는 91.5 mg/m³로서, 이미 호수의 영양상태는 부영양상태에 있었다. 한편, 총질소 농도는 3.63 mg/L로 인경호의 N/P ratio가 16이상으로, 호소 영양상태는 총인이 주요 제한인자라고 볼 수 있다.

유입 지하수는 유기물과 TSS를 거의 함유하지 않기 때문에 인경호로 유입되는 외부부하는 없다 (Table 2). 따라서, 인경호내 존재하는 유기물과 TSS 농도는 강우시 유입되는 비점오염원과 임의적으로 투기되는 오염원을 제외하면, 식물성 플랑크톤에 의해 기인된다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 URC 운전 전·후의 TSS, TCOD_{Cr} 그리고 클로로필-a 농도 변화를 보여주는데, 운전개시 후 클로로필-a 농도는 선형적으로 감소하였고, TSS와 TCOD_{Cr}도 비슷한 경향으로 감소하였다. 즉, 식물성 플랑크톤 농도 변화는 TSS와 TCOD_{Cr}의 농도 변화에 직접적으로 관계하며, 따라서 호내의 식물성 플랑크톤의 양 조절이 이 두 항목의 변화에 영향을

Table 1. Meteorological data in Incheon

	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Precipitation (mm)	112.2	187.4	565.1	247.6	91.4	31.7	18.7
Sunshine hour (hr)	236.5	165.4	185.6	153.8	168.5	170.0	143.1
Solar radiation at surface (MJ/m ²)	23.38	18.15	17.69	14.04	12.02	10.20	8.43

(Monthly weather report, 1999)

Table 2. Water quality of Inkyung lake and groundwater influent

Average Data	COD _{Mn} (mg/L)	TSS (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)
Inkyung Lake	18.2	47.7	91.5	0.094	3.63
Groundwater	0.4	0.63	0	0.035	7.24

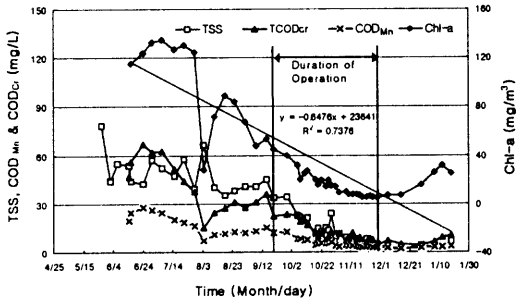


Fig. 3. Variation of TSS, COD_{Mn}, TCOD_{Cr}, & Chl-a concentration.

받는 것으로 판단된다.

URC 운전 개시 전 평균 클로로필-a 농도는 91.5 mg/m³으로 OECD기준 과영양 상태인 75 mg/m³ 이상이었으나, 운전이 시작된 후, 11월(처리순환주기 2.5 이후)에는 10 mg/m³까지 감소하여 호소 수질이 중영양상태로 개선되었다. COD_{Mn}은 평균 18.2에서 5.1 mg/L, TSS는 평균 47.7에서 12.9 mg/L로 감소되었으며, 처리순환주기 2.5 이후에는 각각 3.47, 7.3 mg/L로 국내 호소 수질환경기준 II 등급을 유지하였다.

3.1.2. 영양염류

부영양화의 대표적 현상인 식물성 플랑크톤의 성장에는 C, H, O, N, P 등을 함유한 다양한 종류의 영양염류가 필요하며 이들 중 C, H, O를 함유한 영양염류는 대부분 수계에 매우 풍부하게 존재한다. 그러나 질소(N), 인(P)은 수계에 그 양이 제한되어 있어, 식물성 플랑크톤의 성장은 영양염류들 중 질소와 인의 농도에 의하여 결정되며, 특히 인을 함유한 영양염류의 농도가 부영양화 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.²⁾ 그러므로, 이들 질소 또는 인을 함유한 영양염류의 농도를 측정함으로써 부영양화의 발생 여부 및 진행정도를 평가할 수 있다. 또한 질소와 인의 비율이 중요 제한인자이다.

즉, 질소(N)/인(P) 비(ratio)가 16을 넘게 되면 호소의 부영양화의 주요인자는 인이 되고, 그 이하가 되면 질소가 주요인자가 된다. 인경호의 경우, URC 처리전의 호소수의 N/P ratio가 16을 넘었으므로, 인이 주요한 제한인자가 된다고 판단된다. 또한 조류의 일반적인 방정식 즉, 조류 화학식(C₁₀₆H₂₆₃O₁₁₀N₁₆P)을 보면 인 1 mole에 질소 16 mole이 결합된 형태이기 때문에 인의 제거를 통해서 식물성 플랑크톤의 생산력을 감소시키는 것이 보다 경제적이다.⁵⁾ 식물성 플랑크톤의 생산력의 경우, N/P ratio가 중요한 요소지만, 질소 유무에 관계없이 인의 존재 유무 또는 양의 대소에 따라 좌우된다고 알려져 있다.⁶⁾ 이 두 영양염류의 주요 부하원인은 유입원수에 기인한다. 인경호의 경우는 유입원수가 지하수이므로 암모니아성 질소는 거의 없지만, 질산성 질소는 매우 높은 농도로 유입되고 있어 질산성 질소의 부하가 상당히 높다(Table 2). 부유성 조류는 질소원으로서 암모니아성 질소와 질산성 질소를 이용할 수 있는 능력이 있다. Gu와 Alexander⁷⁾는 일반적으로 이용 에너지 측면에서 유리하기 때문에 암모니아성 질소를 우선적으로 섭취한다고 보고한 바 있으나, 다른 질소 형태의 이용은 조류종의 능력과 무생물환경 조건에 달려있다. 따라서 호소내의 총질소 농도가 중요하며, Fig. 4와 같이 인경호의 경우 평균 총질소 농도는 3.92 mg/L로 상당히 높으며, 총인인 경우 유입수의 농도가 부영양화를 제한할 수 있는 농도인 0.02 mg/L보다 높은 0.035 mg/L로 유입되고 있어, 운전 전 호소의 총인의 평균농도는 0.094 mg/L로 부영양상태를 나타내는 농도 범위에 있다.

인경호는 1995년 기저준설 이후에도 지속적으로 부영양화가 진행되면서 봄, 여름철에 생산된 식물성 플랑크톤이 겨울철에 사멸되어 호소 바닥에 침전되었다. 인의 경우 질소와 달리 대기와의 접촉으로 인한 호수내 유입을 무시할 수 있으므로, 오염 부하는 궁극적으로 초기 외부유입원, 강우시 우수유입과 내

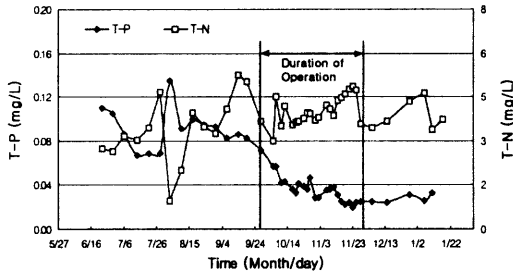


Fig. 4. Variation of T-P & T-N concentration.

부생성원에 의한 것이 대부분이다.

Fig. 4는 URC 처리 전·후의 총인와 총질소 농도 변화를 보여준다. 총인의 경우 URC 운전 후 선형적인 감소를 보이고 있으나, 질소의 경우 운전 전·후 농도 변화는 거의 없다. 운전 개시 후 조류가 감소함에 따라 조류에 의해 섭취되는 암모니아성 질소는 감소되지만, 유입원수 중 질소원이 대부분 질산성 질소이므로 이로 인한 호소내 질산성 질소가 증가하게 되어 총질소의 농도는 비슷하게 유지되는 것으로 보여진다.

Karjalainen 등⁶⁾은 영양염류 중 총인은 농도에 따라 식물성 플랑크톤의 생장에 영향을 주고 총질소는 미생물의 body builder로서 작용한다고 하였다. 인경호에 존재하는 총질소는 호소수질 5등급 1.5 mg/L 보다 높은 농도이므로 식물성 플랑크톤의 증가와 감소에는 직접적인 제한인자로 작용하지 않는 것으로 판단된다.

한편, 식물성 플랑크톤의 생산력과 직접적인 관계를 가지고 있는 총인은 호소내의 수체와 기저로부터 농도 경사에 따라 용출되는 인 생성속도보다 빠른 속도로 URC 공정에 의하여 제거되어 지속적인 감소추세를 보였으며, 처리순환주기 2.5 이후에는 호소 총인농도는 0.02~0.027 mg/L를 나타내었다.

Fig. 5에서 URC 운전 전 수질은 6월부터 9월 하순까지 약 3개월간의 호소 평균수질을, 처리 후 수질은 9월 하순부터 11월말까지의 운전기간 70일 동안의 호소수질을 평균한 것이다. 또한 2.5주기(11월) 이후의 호소수질을 나타내었다. 운전 개시 후 TSS, 유기물, 그리고 클로로필-a는 총인보다 더 빠른 추세로 감소되었으며, 총인의 경우는 URC 공정에 의하여 제거되더라도 기저에서의 연속적인 용출

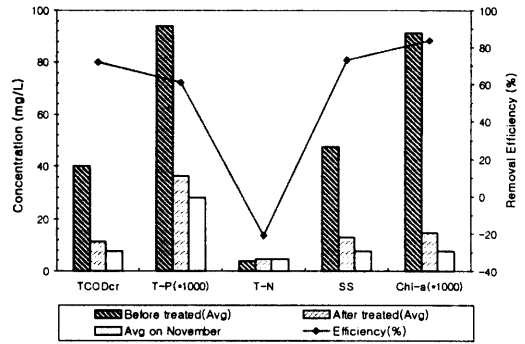


Fig. 5. Comparison of water quality between before and after URC application in Inkyung Lake.

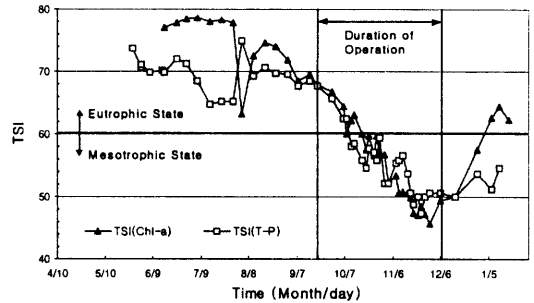


Fig. 6. Variation of the TSI.

에 기인하여 다른 항목보다 느린 제거속도를 보였다. 이는 운전기간을 전(운전 개시부터 10월까지), 후반기(11월)로 크게 나누었을 때 전반기의 호소수질 평균 클로로필-a/총인 ratio는 약 0.5 정도이나 후반기에는 0.25로 줄어드는 것을 보더라도 총인이 기저로부터 용출된다고 판단된다.

Carlson⁸⁾은 호소의 영양상태를 총인과 클로로필-a 농도를 기준으로 0~100의 수치로 나타내는 호소 영양상태지수(TSI, Trophic State Index)를 제시하였는데, TSI > 60에서는 부영양상태(Eutrophic state), 40 < TSI < 60은 중영양상태(Mesotrophic state), 그리고 TSI < 40에서는 빈영양상태(Oligotrophic state)라고 평가하였다.

Fig. 6은 URC 적용 전·후 호소의 TSI를 나타내었다. 운전 전 인경호의 TSI는 70을 넘고 있으나, 운전 25일(순환처리주기 1.6)부터는 60이하로 감소하여 11월말(순환처리주기 4.3) 인경호의 영양상태는 총인과 클로로필-a를 기준으로 각각 51과 46으로 중영양상태로 평가되었다.

3.2. 퇴적 침강물의 영향

인경호의 경우 얇은 수심(평균 0.7 m)과 수차의 운전으로 인하여 식물성 플랑크톤과 퇴적물이 침전되어 고착되기보다는 저부에서 일정 높이로 부유되는 형태를 보인다. 호소 수질관리에 있어 유입되는 영양염류들이 식물성 플랑크톤에 의한 섭취, 침강 및 퇴적과 호수 순환계에서의 이탈 과정을 분명하게 파악하는 것은 매우 어려우나 침강량 실험을 통해 부유물질이 퇴적되는 양과 기저와 수층사이에 영양염류의 거동을 관찰하고 호소내의 순환특성과 계절적 변화에 따른 유기물과 영양염류의 변화량을 평가하는 것은 호소관리를 위한 유용한 정보를 제공한다⁹⁾ Table 3과 같이 인경호 4개 지점에서 설치 높이에 따른 침강량을 측정하였다.

Settling-1은 실험 기간 중에 강우가 내리지 않았고, Settling-2, 3, 4는 집중 강우시에 실험이 수행되었다. 침강량 실험위치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, Settling-2는 인경호에서 가장 많은 기저를 보유하고 흐름이 비교적 적은 정체구역으로 분류될 수 있으며, 따라서 우수유출에 직접적인 영향을 받지 않는 지점이라고 할 수 있다. 반면 Settling-3은 기저가 비교적 적고, 우수유입지역에 근접하여 우수유출에 직접적인 영향을 받는 지점이다. 그러나 이 지점에서의 클로로필-a/TSS ratio는 각각 0.095와 0.081로 우기에 호수내 침강 유형은 위치와 관계없이 같은 높이에서 유사한 경향을 보인다고 할 수 있다.

Settling-3과 4는 같은 지점에서 높이만을 달리 하여 실시한 실험이므로 호소내에서 물질의 수직이동 즉, 수직혼합정도를 파악할 수 있다. Settling-4 지점은 호소 바닥으로부터 약 15 cm 정도 기저층이 형성되었기 때문에 기저의 상당량이 침강량과는 관계없이 채취된 점을 고려하면, Settling-3의 식물성 플랑크톤 침강량은 유기물, 영양염류 그리고 클로로필-a 농도의 비교로부터 상대적으로 매우 높은 것을 알 수 있었다. 특히, 식물성 플랑크톤은 얇은 호소의 특성상 대기중에서 수면위로 부는 바람의 영향에 의한 취송류와 분수 및 수차의 가동에 의한 영향, 수생생물의 이동에 의한 영향 때문에 호소의 전역이 수직, 수평으로 완전혼합을 이루고 있어서 식물성 플랑크톤과 침강된 기저의 일부가 부유한 결과로 보여진다.

계절에 따른 성층현상과 전도현상에 의해서 용출되는 인이 광합성을 하는 식물성 플랑크톤이 이용할 수 있는 수층까지의 밀도차에 의한 대류순환을 요하는 깊은 호수의 경우와는 달리, 인경호와 같은 얇은 호수의 경우 직접적인 혼합 순환특성에 의하여 식물성 플랑크톤의 번식이 매우 용이한 조건을 가지고 있다고 볼 수 있다.

3.3. 호소영양상태에 미치는 수온의 영향

본 연구는 가을과 겨울에 수행되어, 식물성 플랑크톤과 총인의 제거가 URC 공정에 의한 직접적인 제거보다도 오히려 계절적 변화에 따른 수온 저하로

Table 3. Water quality parameters observed from settled materials in Inkyung Lake

	Settled matter (g/m ² /day)	COD _{Cr} (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TSS (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
Settling-1 ^a	123.2	3644.2	11.48	8.1020	12320	3497.6
Settling-2 ^b	153.3	2328	3.20	7.3355	13140	1319
Settling-3 ^b	162.1	2328	3.08	6.0713	13890	1124.1
Settling-4 ^b	297.4	2970	8.78	7.9202	25490	933.8

a : 1) Date : '99. 6. 30~7. 7,

2) Sampling point : Point E in Inkyung Lake (The height of 15 cm from the sediment), Depth : 1.0 m

b : 1) Date : '99. 7. 29~8. 4,

2) Sampling point

· Settling-2 : Between point D and E in Inkyung Lake (The height of 30 cm from the sediment), Depth : 0.7 m

· Settling-3 : Between point B and C in Inkyung Lake (The height of 30 cm from the sediment), Depth : 0.6 m

· Settling-4 : Between point B and C in Inkyung Lake (At the sediment)

기인된다고 할 수도 있다. 수온은 식물성 플랑크톤의 활성화와 생산력에 큰 영향을 주는 인자이며, 이는 식물성 플랑크톤의 종에 따라 다르지만 수온 증가에 따라 assimilation number(광포화상태에서 단위 클로로필당 광합성 속도)가 선형적 또는 대수적으로 증가한다.¹⁰⁾ 따라서 호내의 수온은 용집반응의 효율과 기저내의 인 용출 속도와 더불어 영양염을 이용하는 식물성 플랑크톤의 활성에 직접적인 영향을 주게 된다.

Fig. 7에 나타난 것과 같이 처리순환주기와 운전 기간 동안에 수온이 하강되는 곡선과 클로로필-a와 총인 농도 변화 곡선이 같은 움직임을 보이고 있다. URC 공정 운전 기간 중, 총인 농도 변화는 호내의 클로로필-a 농도와 수온에 따른 기저로부터의 인 용출 속도와 관계가 있으므로 수온 변화에 의해 직접적인 영향을 받는 것으로 보인다. 그러므로 클로로필-a는 URC 공정에 의한 수계의 총인 제거와 수온 하강에 의한 생산력 억제에 의해 지속적인 감소추세를 보였다.

그러나 URC 공정의 운전 정지 후 43일간 평균 수온이 8.8℃(10월~11월)에서 2.7℃(12월~1월)로 감소하였으나 총인과 클로로필-a의 농도가 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 특히, 클로로필-a의 경우는 운전 정지 전과 후 각각 43일 동안의 평균 수온 차이가 약 6℃를 보이고 있음에도 불구하고 운전 정지 후 증가속도는 0.307 mg/L/d를 보였으므로, 운전 기간 중의 수온에서는 더욱 빠른 증가속도를 보일 것이다. 운전 기간 중 10월 중순부터 11월 까지 43일 동안, URC 공정에 의한 제거속도는 0.41 mg/L/d로 낮은 수온에서 클로로필-a 증가속도보다 약 0.1 mg/L/d 정도 빠른 것으로 나타났다.

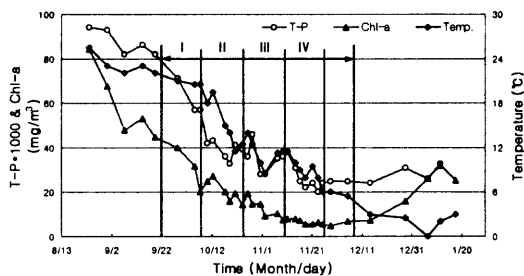


Fig. 7. Relation among water temperature and T-P, Chl-a concentration.

그러므로 운전 기간 중, 수온에 의한 조류생산속도의 저하도 수계 클로로필-a 농도의 감소에 영향을 미쳤을 것으로 보이나, URC 공정에 의한 클로로필-a 제거가 부영양 호소의 수질 개선 효과에 직접적인 원인으로 판단된다.

3.4. 기저로부터 인 용출 실험

자연적 혹은 인위적으로 외부로부터 고형물의 유입 혹은 내부생성 유기물은 활성의 저하와 용집, 공침 등에 의해 호저에 침적되어 호소내의 기저를 형성하게 된다. 기저중의 영양염류와 유기물 농도는 호소 수층의 농도에 비하여 일반적으로 매우 높은 농도로 존재하며, 단지 그 형상이 고체상으로 고착되어 수체와는 일정 농도경사를 이루며 평형을 유지하게 된다.¹¹⁾ 따라서 호소내의 인 농도가 감소하면 농도경사에 의해 인은 기저로부터 용출되어 호내 평형 농도를 유지하게 된다. URC로서 인경호의 인을 연속적으로 처리를 하는 것은 인경호 수체를 처리하는 것이지 기저를 처리하는 것이 아니므로 운전이 진행되면서 호소의 인 농도가 감소하면 농도경사에 따라 인의 용출이 일어난다.

인경호의 수심이 평균 0.7 m로 얕기 때문에 수심에 따른 DO 농도 변화는 거의 관찰할 수 없었으며, 운전기간동안 평균 DO 농도는 9.9 mg/L로써 인 용출이 쉽게 일어나지 않을 것이라고 예측할 수 있다. 그러나 Gachter와 Wehrki¹²⁾는 기저에서의 인 용출은 기저표면에 새로운 침전물이 쌓이면서 기저 내부에 무산소 또는 혐기성 상태가 형성되어 인이 용출되기 때문에 수체의 DO 농도와 무관하다고 보고하고 있다. 인경호에서 내부 공급원으로서 인 생성부하를 알아보기 위하여 DO 농도에 따른 기저로부터 인 용출 정도를 평가하기 위해 용출 실험을 수행하였다.

Fig. 8에서와 같이 용출되는 인의 양은 DO 농도에 따라 다소 차이를 보이지만, DO 농도가 7 mg/L 이상으로 유지된 호기성 조건 B의 경우에도 인은 낮은 농도의 DO 조건 A보다 약 0.2 mg 정도 낮게 용출된다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 A와 B의 경우 모두, 수층의 인 농도는 실험시작 18일까지 용출에 의해 증가 추세를 보이다가 이후 감소하게 된

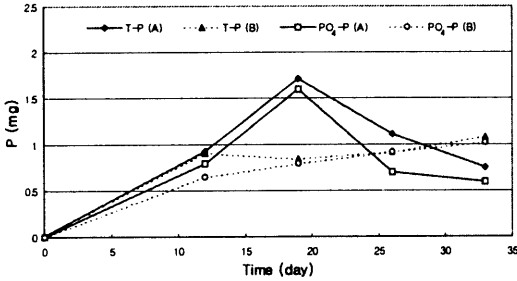


Fig. 8. Amount of P release from sediment in Inkyung Lake.

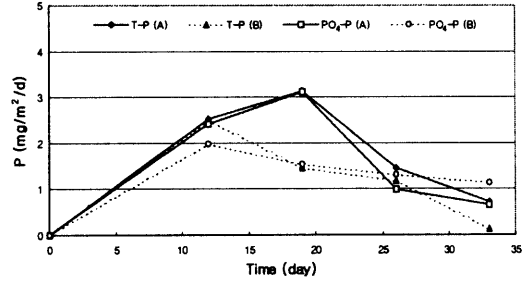


Fig. 9. Rate of P release from unit area sediment.

다. 이는 기저로부터의 용출되는 인의 농도와 수계의 인 농도간의 경사가 감소함으로써 수중으로의 용출속도가 저하되고, 일단 용출된 인은 수계의 인 농도에 비례하여 침전되었기 때문이라고 판단된다.

Gachter와 Wehrki¹²⁾는 호소에서 인의 순침전(net sedimentation)은 수계의 인 농도에 비례하지만 인 농도가 임계농도(호소의 물리적인 특성인 호소 용량과 인 침전속도상수에 의해 결정)를 초과하면 순침전은 더 이상 인농도에 비례하지 않고 일정한 상수값에 접근하며, 전체 침전이 최대 인 보유능력(상수값)을 초과할 때 초과량이 수체로 용출된다고 하였다. 즉, 최대 인 보유능력은 침전물 표면의 산화환원 조건에 의존하는 것이 아니고 침전된 유기물질의 diagenesis 후에 인을 침강 또는 흡착할 수 있는 무산소 침전물내의 광물질 침전에 의존하기 때문에 침전물 표면의 수계에 DO 농도를 증가시켜도 침전물 표면 아래부분은 무산소 상태가 되기 때문에 인을 함유한 산화된 광물질(Fe, Mn)은 환원되고 흡착된 인은 용출된다는 것이다.

B의 경우, 인 용출이 상대적으로 A보다는 적었으나, 농도 평형이 일어날 때까지 지속적인 증가가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 침전물로부터의 인 용출은 수중의 DO 농도에 의존하기 보다 총인의 침전량과 무산소 상태에서 환원된 침전물 층에서 초기 침전물의 diagenesis로부터 생성되는 기저의 인 보유능력에 의존하게 된다고 판단된다.

Fig. 9는 용출 실험을 토대로 단위시간, 단위 침전물 면적당 인 용출 속도를 나타내었다. A의 경우는 최대 3.13 mg/m²/day이고, B는 2.51 mg/m²/day로 나타났다. 그러나 이는 회분식 실험을 통해 초기 설치 조건이후 변화되는 인의 농도를 통해 구

한 용출 속도이므로, 이 속도를 새로운 침전물로 인해 표면 아래에 무산소 상태를 만드는 인경호의 실제적인 인 용출 속도라고 보기는 어렵지만, DO 농도가 호기상태로 유지되어도 높은 속도로 인이 용출된다는 사실을 확인할 수 있었다. 실제 인경호의 경우, URC 운전으로 인해 총인 농도가 감소하더라도 인의 내부공급원인 기저에서의 인 용출이 측정되었다(Fig. 7).

3.5. 비점오염 부하량 관리의 필요성

하천과 달리 정체구역인 호소는 유속이 낮고 체류시간이 길어 유입된 영양염류의 축적과 조류 번성을 촉진할 수 있다. 따라서 호소로 유입되는 하천수와 강우시 우수유출수 관리가 적절하게 이루어지지 못할 경우, 호소 부영양화의 진행을 억제하기 어렵다. 특히 국내의 경우, 대부분의 수처리 시설이 점오염원의 삭감에만 편중되어 있는 반면, 비점오염원에 대한 관리가 미흡한 실정이다. 시화호의 경우도 연간평균, 강우시 유입되는 인 부하량은 하루평균 677 kg, 무강우시 297 kg으로 강우시 오염부하량이 전체 오염부하의 69.5%를 차지하고 있으며, 대다수의 호소 역시 비슷한 실정이다.¹³⁾

Table 4는 본 연구기간 동안 발생된 집중강우 및 그에 따른 우수 유출수 유입에 의한 인경호의 유기물 및 영양염류의 농도와 강우 수질을 나타내었다. 실험기간동안 내린 강우 중 초기강우 시료의 경우, 비교적 높은 영양염류 농도를 보이는데, 6월 16일과 7월 28일 경우는 초기강우로서 상당히 높은 인 농도를 함유하고 있고, 7월 10일, 8월 2, 3일 경우는 어느 일정기간 지속된 후의 강우이므로 상대적으로

Table 4. Water quality obtained from runoff and Inkyung Lake

Date	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	TSS (mg/L)	pH	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)
'99. 6. 16 (Precipitation)	1.12	0.3122	0	-	6.48	-
'99. 7. 10 (Precipitation)	1.40	0.0667	0	-	6.26	-
'99. 7. 28 (Precipitation)	2.26	0.2631	0	-	5.11	-
'99. 8. 2 (Precipitation)	2.28	0.0075	0	-	5.63	-
'99. 8. 2 (Lake water)	3.41	0.1442	24.2	139	7.33	97.5
'99. 8. 3 (Precipitation)	0	0.0013	0	-	5.30	-
'99. 8. 3 (Lake water)	1.89	0.1126	28.8	68	7.45	62.5
'99. 8. 3 (Runoff)	3.50	0.2092	44.8	233	6.59	12.5

로 낮은 인 농도를 보였다.

7월 27일부터 8월 4일까지 내린 강우는 611.8 mm로 7월과 8월 한달 평균 강우보다 더 많은 양이 호소로 유입되는 것을 관찰할 수 있었다. 이로 인하여, 8월 2, 3일의 인경호 수질분석 결과를 보면 인 농도가 높아진 것을 확인할 수 있으며, 8월 3일 우수 유출수를 분석한 결과, 질소보다는 인의 높은 오염 부하량을 확인하였다.

강우가 여름철에 집중적으로 내리는 국내의 경우, 하천의 하상계수가 대부분 300이상으로서 매우 커서 하상계수가 30 이하인 유럽에 비해 집중강우에 의한 오염원의 축적이 적을 수 있다는 판단은 일부 하천에 해당되며, 수용량이 큰 호소의 경우 영양염 축적을 촉진하는 비점오염원에 대한 부하가 훨씬 크기 때문에 강우시 우수 유출수에 대한 관리가 반드시 필요하고 볼 수 있다.

3.6. URC 처리수 유입에 따른 호소의 생태학적 영향

pH, DO, 그리고 온도는 수서 생태계, 미생물 및 조류의 활동을 크게 지배하는 환경요인들이다. 부영양화된 호수는 식물성 플랑크톤의 개체수가 매우 크

며, 식물성 플랑크톤의 활발한 광합성 작용에 의해 수중에 존재하는 중탄산염이나 탄산염으로부터 CO₂를 섭취한다. 따라서, 유리 CO₂ 농도를 공기와의 평형농도 이하까지 감소시킬 수 있으므로, pH의 급격한 증가를 야기시킬 수 있다. 반면 일조량이 없는 야간에는 호흡작용에 의해 CO₂를 소비하기보다는 생산하며, CO₂ 생산은 반대로 pH를 감소시키게 된다.

이러한 pH의 변화는 호소의 식물성 플랑크톤의 생산성을 판단하는 중요한 지표로도 생각된다. 운전이 수행되는 동안(9월~11월) 인경호의 pH는 URC 운전 전 평균 8.5에서 URC 처리후 8.1로 다소 감소하였다. 이는 URC 공정이 Alum을 이용한 응집 침전공정이므로, 알칼리도를 소모하여 pH가 감소하기 때문이다. Pilot plant 운전기간 동안, Alum 주입량은 10~60 mg/L로써 반응 pH는 6.8~7.8을 유지하였고, URC 처리 이후에도 호수의 알칼리도는 약 100 mg/L as CaCO₃ 부근에서 일정하게 유지되었다. 따라서 인경호에 적용된 응집공정은 수체내의 알칼리도 평형에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

일반적으로 수체내 DO 농도 변화는 재폭기 현상, 유기물 분해에 따른 탈산소현상, 기저의 분해로 인한 산소소모량(SOD), 식물성 플랑크톤의 광합성 및 호흡작용 등인데, 이 중 DO의 증가에 영향을 주

는 인자는 재폭기와 광합성이고, 감소의 경우는 유기물 분해, SOD(sedimentation oxygen demand)와 호흡작용 등에 의해 일어난다. 하천의 경우는 주로 재폭기 현상에 의존하지만, 일반호수에서는 느린 유속으로 인해 식물성 플랑크톤의 광합성 작용에 의해, DO 포화 및 과포화 현상이 표수층에서 일어나게 된다. Fig. 10은 시간에 따른 DO와 pH의 변화를 나타내고 있으며 운전 전·후의 주목할 만한 변화는 찾아 볼 수 없으나 운전 후 DO 농도가 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 운전 중지후 증가한 식물성 플랑크톤의 영향과 수온 하강의 영향으로 보여진다.

URC 공정의 응집 과정에서 사용되는 무기·고분자 응집제 등의 잔류에 의한 독성 영향 가능성에 대한 조사를 실시하였다. Fig. 11에서와 같이 URC 처리수에 대하여 15분 동안 *Photobacterium phosphoreum* 발광량이 50% 이상 감소하지 않았다. EC₅₀-15min은 Microtox test에 의한 생물 독성 평가방법으로서 15분 동안 *Photobacterium phosphoreum*의 발광량이 50% 이상 감소되면 대상 시료에 대하여 독성이 있다고 판단한다. 따라서 URC 공정에 의해 처리된 수용액상에 대하여 *Photobacterium phosphoreum*의 독성영향은 없는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 하천 및 호소 관리를 위해서 개발된 초고속응집침전(URC)공정을 인하대학교내 부영양화 호소인 인경호를 내부 순환형으로 처리하여 호소 복원 및 수질관리에 URC 적용 가능성을 실험하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 인경호에 대한 URC pilot plant 운전결과, 처리수질은 평균 COD_{Cr} 6.25 mg/L, TSS는 3.6 mg/L, 그리고 총인의 경우는 EPA의 부영양화 한계농도 0.02 mg/L 이하인 0.017 mg/L으로 나타났다.
- 2) URC 운전 전·후 인경호 수질은 평균 COD_{Mn} 18.2/5.1 mg/L(72.2%), TSS 47.7/12.9 mg/L(73%), 클로로필-a 91.5/14.7 mg/m³ (83.9%), 그리고 총인 0.094/0.036 mg/L

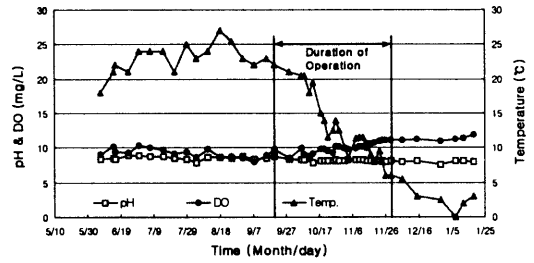


Fig. 10. Variation of DO, pH, and temperature.

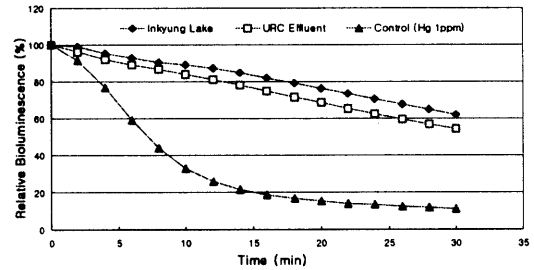


Fig. 11. Variation of relative bioluminescence.

(61.4%)이며, 운전후기인 11월 평균 수질농도는 COD_{Mn} 3.47 mg/L, TSS 7.3 mg/L, 클로로필-a 7.6 mg/m³, 그리고 총인 0.028 mg/L로 호소 수질환경기준 II등급을 만족시킬 수 있었다.

- 3) 인경호의 영양상태는 운전 전·후 평균 TSI (T-P)는 69.5/55.3이고 TSI(Chl-a)는 73.9/55.1, 그리고 운전후기인 11월에는 각각 50.6과 45.7로 호소수질 상태가 기저의 제거 없이 과영양상태에서 중영양상태로 개선되었다. 운전 전·후 인경호 pH, 알칼리도, 그리고 DO의 변화는 거의 없었고, 인경호와 URC 처리수를 대상으로 독성평가를 실시한 결과, EC₅₀-15min는 100%로 잔류 무기응집제와 고분자응집제에 대한 독성은 나타나지 않았다.
- 4) URC 운전을 통한 호소의 총인 농도 감소로 호소수질 개선 효과를 확인하였고, 반면 운전 중지 후 수온하강에 관계없이 기저로부터 인 용출에 의한 총인 농도 증가가 일어나 클로로필-a 농도의 급격한 증가를 확인할 수 있었다. 호소 관리의 가장 중요한 인자는 호소의 총인 농도이며, 호소의 부영양화 억제를 위한 본 공

정의 적용은 순환처리주기 5.6이상의 지속적인 처리가 필요함을 확인할 수 있었다.

사 사

본 논문은 서해연안환경연구센터로부터 연구비 지원을 받아(제1특별 단독과제, 과제번호 : 1999-1) 이루어진 연구의 일부를 정리한 것입니다. 서해연안 환경연구센터에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Hoehn, R. C., Barnes, D. B., Thompson, B. C., Randall, C. W., Grizzard, T. J., and Shaffer, P., "Algae as Source of Trihalomethane Precursors," *J. AWWA*, **72**(6), 344~352(1980).
2. Golterman, H. L., "Chlorophyll-Phosphate Relationship, a Tool for Water Management," *Algae and the Aquatic Environment*, Biopress, pp. 205~224(1988).
3. Heinzmann, B., "Restoration Concept for Lake Tegel, a Major Drinking and Bathing Water Resource in a Densely Populated Area," *Environ. Sci. Technol.*, **28**(8), 1410~1416(1994).
4. 영창건설(주), 유알씨테크놀로지, 슬러지 순환형 초고속응집침전공법 신기술, 건설교통부 신기술 고시 신청 자료(1999).
5. 박종운, 물리·화학적 수처리 원리와 응용, 도서출판 지샘, 서울, pp. 51~56(1998).
6. Karjalainen, H., Seppala, S., and Walls, M., "Nitrogen, phosphorus and Daphnia grazing in controlling phytoplankton biomass and composition - an experimental study," *Hydrobiologia.*, **363**, 309~321(1998).
7. Gu, B. and Alexander, V., "Seasonal variation in dissolved inorganic nitrogen utilization in a Alaskan lake," *Arch. Hydrobiol.*, **126**, 273~288(1993).
8. Carlson, R. E., "A Trophic state index for lake," *Limnol. Oceanogr.*, **22**(2), 361~369(1977).
9. 지재성, 일산호수의 최적수질 관리를 위한 연구 보고서, 한국건설기술연구원, II-6-III-2(1997).
10. Fogg, G. E. and Bajpai, S. P., "Temperature effects on natural phytoplankton populations," *Algae and the Aquatic Environment*, Biopress, pp. 197~204(1988).
11. Clasen, J., Bernhardt, H., Hoyer, O., and Wilhelms, A., "Phosphate remobilization from the sediment and its influence on algal growth in a lake model," *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn Limnol.*, **18**, 101~113(1982).
12. Gachter, R. and Wehrki, B., "Ten Years of Artificial Mixing and Oxydenation : No Effect on the Internal Phosphorus Loading of Two Eutrophic Lakes," *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 3659~3665(1998).
13. 한국수자원공사, 사회호수질관리대책 수립 연구, 최종 보고서 초안(1998).
14. APHA, Standard methods for the examination of Water and wastewater, 17th Ed., Washington, DC, American public health association(1992).
15. 편집부, 수질오염공정시험방법, 동화기술(1996).