

## 호소 부영양화 방지기술의 현황과 전망

류 재 근

국립환경연구원 호소수질연구소

### The Status and Prospect of Lake Eutrophication Control Technologies in Korea

Jae-Keun Ryu

*Lake Environmental Research Laboratory  
National Institute of Environmental Research*

#### ABSTRACT

This paper included the preventive measures and the prospect of lake eutrophication in Korea.

All pollution control techniques must be applied after the characteristics of the lakes are surveyed sufficiently. Most of Korean lakes are the large man-made ones and their characteristics are different from those of natural ones in foreign nation. Some of many techniques for natural lakes can be applied in our lakes also, others must be revised. Lake water quality can be ameliorated only by systematic researches and technologies because lake ecosystem is very complicated. It is impossible to improve water quality with fragmentary and short-term projects.

### I. 서론

협소한 육지조건에 급속한 산업발달과 인구증가로 한국은 환경오염의 많은 문제에 직면해 있다. 특히 우리는 지난 30년간 많은 대형 댐들을 축조하여 발전과 음용수, 농업 및 공업용수의 자원으로 이용하여 왔다. 한국에는 10,000 m<sup>2</sup> 이상의 면적을 가지는 인공호가 대략 170 개나 되며 그중 대부분이 짧은 체류시간과 방대한 집수면적을 가지는 하천형 호수이다. 최근까지 이러한 인공호는 영양염류의 외적 및 내적 부하로 인해 부영양화되어 왔다. 이러한 상황에 대처하기 위하여 여러 가지 오염관리가 호수의 보전과

수질 회복을 우선적으로 요구되고 있다. 그러나 호수들은 경제적인 면에서 결코 어떤 수준 이하로 개선될 수 없는 역치값을 가지는 것 같으며, 호수의 특성에 따라서도 역시 서로 어떤 호수의 오염은 다른 호수에 비해 빨리 진행되고 있다. 그러므로 일반적이고 상투적인 오염관리로는 호수의 수질을 회복하는데 충분하지 않으며, 특히 면오염원(비점오염원)의 관리는 점오염원의 관리에 비해 더욱더 어려운 기술과 훨씬 더 큰 비용을 요구한다.

상기한 문제들을 해결하기 위하여 호수오염에 대한 여러 가지 방지대책이 요구되고 있어, 이 논문에서는 이러한 방지대책의 한국의 현황과 전망을 살펴보고자 한다.

### II. 한국 호수의 특징

Fig. 1은 한국 주요 호수에 대한 지도이다. 이들은 모두 강에 댐을 막음으로써 형성된 인공호이다.

Table 1은 주요 호수의 수리적 특성과 수질현황을 보여주는 것으로 비록 각 호수의 수리적 특성이 서로 다를지라도 최근 대부분이 부영양화가 진행되고 있다.

### III. 호수 부영양화의 관리

호수 오염의 관리는 크게 호수 외적인 대책과 내적 대책 및 정책적 대책으로 구분할 수 있다. 한국의 대부분의 호수는 짧은 체류시간으로 개방된 생태계로 볼 수 있으며 유역이 호수면에 비해 방대하여 무엇보다 먼

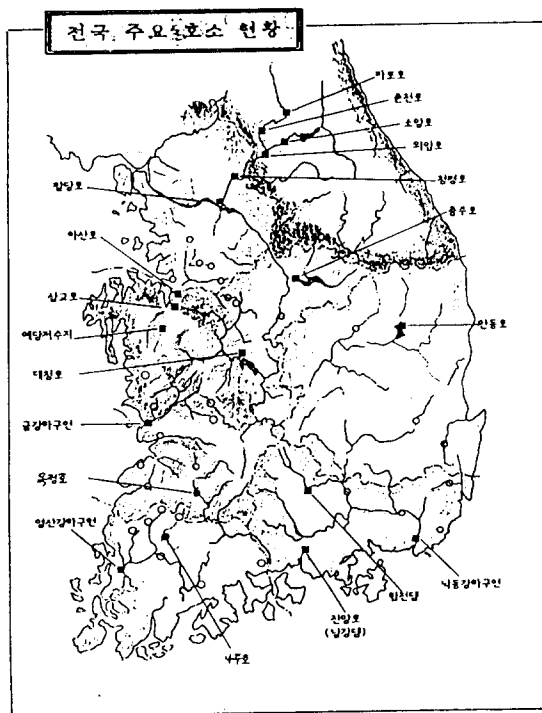


Fig. 1 한국 주요 호수의 위치도

Table 1. 한국 주요 호수의 수리적 특성과 수질 현황

수 계	호수명	수면적 (km <sup>2</sup> )	평균 수심 (m)	체류 시간 (일)	수 질(mg/l)				
					항 목	'87	'88	'89	'90
한 강	소양	70.0	41.4	530	COD	2.7	2.5	1.8	2.2
					T-N	0.630	0.253	0.478	0.647
					T-P	0.072	0.013	0.018	0.015
	팔당	36.5	6.5	5	COD	2.2	2.4	2.3	2.1
					T-N	0.840	0.512	0.917	1.448
					T-P	0.081	0.047	0.049	0.065
	충주	97.0	28.4	200	COD	2.0	1.3	1.9	2.1
					T-N	1.297	1.247	0.809	0.671
					T-P	0.114	0.076	0.058	0.063
낙동강	안동	51.5	24.2	468	COD	1.7	1.3	1.4	2.4
					T-N	1.103	0.582	0.605	1.248
					T-P	0.058	0.082	0.064	0.063
금 강	대청	72.8	19.1	200	COD	1.9	1.8	1.7	1.8
					T-N	0.141	1.106	0.993	0.892
					T-P	0.025	0.053	0.021	0.018
영산강	영산	34.6	6.6	34	COD	2.4	2.7	6.1	5.6
					T-N	1.224	1.616	1.337	2.254
					T-P	0.080	0.093	0.058	0.077
안성천	아산	28.0	5.1	34	COD	10.1	8.9	14.6	9.2
					T-N	2.610	4.633	9.063	2.027
					T-P	0.053	0.389	0.241	0.145
삽교천	삽교	20.0	9.2	15	COD	4.6	5.4	6.2	5.2
					T-N	1.622	5.592	2.182	1.614
					T-P	0.105	0.057	0.022	0.045

저 외적 오염관리가 매우 중요하다. 그러나 어떤 호수는 오염물질의 내적부하량이 총부하량의 50% 이상을 차지하고 있어 내적 오염관리 역시 간과할 수 없다. 또 다른 관리로는 정책적인 권장과 규제 관리를 들 수 있다.

3-1. 외적 오염관리

호수 오염의 외적관리는 호수로의 오염물질 유입을 궁극적으로 방지하는 것이다. 그러나 외적 오염원을 완전히 관리한다는 것은 불가능한 것이며 특히 자연계와 농업 및

축산, 생활계와 하천 저질과 같은 면오염원의 관리는 더욱 어려운 것이다. 그러므로 우리는 이러한 오염원에서 오염물질 발생과 배출 및 호수로의 유입을 감소시키는 점에서 노력을 기울여야 한다.

Fig. 2는 외적 오염원의 일반적인 관리대책을 도시한 것이다.

점오염원에 대한 통상적인 관리에 오염물질의 1, 2차 처리가 있다. 그러나 비록 비용이 더 많이 든다 할지라도 호수 부영양화의 원인물질인 영양염류에 대한 고도처리가 요

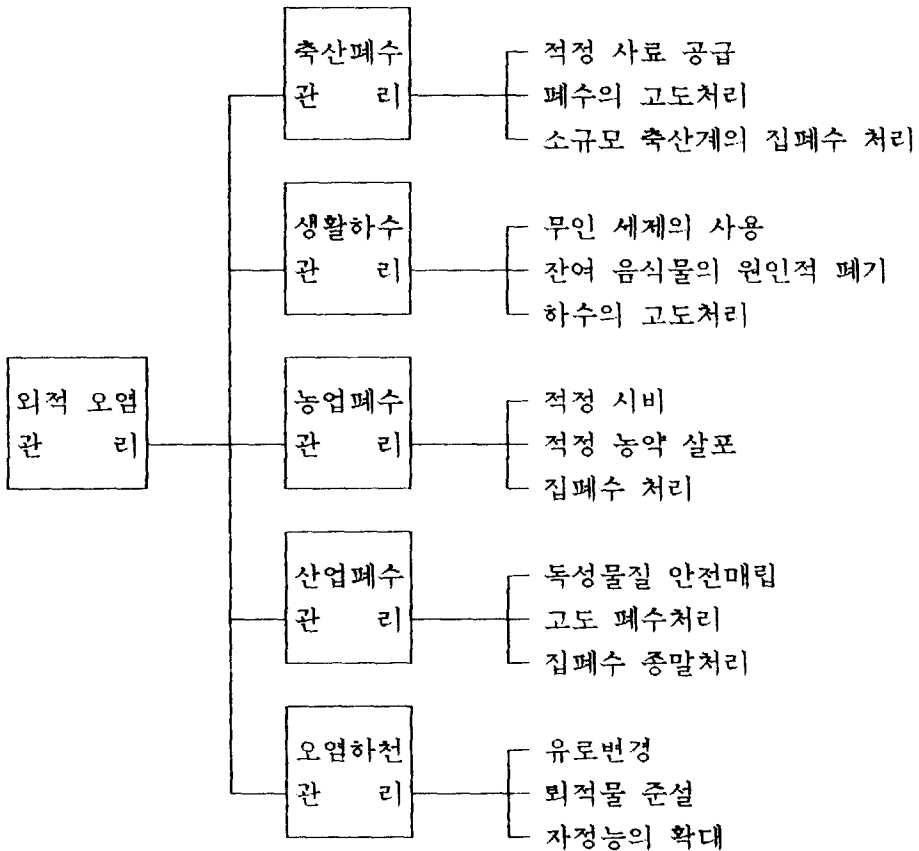


Fig. 2 호수 외적 오염관리의 유형

구되고 있다.

축산폐수의 관리에서는 소규모의 축산계에 대한 관리가 가장 어렵다. 이것은 일종의 면오염원으로 간주되어야 하며 그 수는 한국의 경우 매우 많다. 한국의 일부 호수에서 축산을 통한 인 부하량은 전체 부하량중 가장 크기 때문에, 호수 부영양화를 방지하기 위해서는 이러한 소규모 축산계의 집폐수 처리가 필수적이라 할 수 있다. 또한 가축 사육과정에서는 적절한 사료공급을 통해 경제적으로는 물론 수질관리면에서 손실을 피하여야 한다.

생활하수의 관리에서는 무인세제의 사용이 필수적이라 할 수 있다. 생활하수를 통한 호수내의 인 부하량이 매우 크고, 그중 20~30%가 세제에 의한 것으로 알려져 있는바, 무인세제의 사용으로 호수의 인부하량은 크게 감소될 수 있다. 따라서 무인세제의 사용에 대한 대중적 홍보가 대규모로 이루어져야 하고, 이를 통해 호수 인부하량의 약 10% 내외가 감소될 수 있을 것이다. 또한 주방에서의 음식 잔여물은 주로 유기물질로서 호수의 오염을 가중시켜 이의 일차적 제거 역시 중요하다.

농업 및 자연계의 오염물질 부하를 관리하는 것은 경제적으로 기술적으로 거의 불가능하며, 호수로의 총 인부하량중 이들이 차지하는 비율은 매우 낮아 그 관리가 간과되고 있다. 그러나 농업계에서 비료와 농약의 적정시비는 호수 부영양화를 다소 감소시킬 수 있을 것 같다.

산업폐수의 관리에서 독성물질은 매우 낮은 농도에서도 위험하기 때문에 안전하게

매립되어야 한다. 역시 공단지역에서는 종말 집폐수처리장이 설치되어야 한다.

위에 언급된 관리는 여러 오염원에서 오염물질의 발생이나 배출을 감소시키기 위한 것이다. 이에 더불어 배출된 오염물질이 축적된 호수 유입천을 관리하는 방법이 있다. 오염된 하천의 유로변경은 매우 유효한 것으로 보인다. 그러나 비록 이러한 관리가 많은 호수에서 성공적이었다 할지라도 이것은 매우 큰 비용이 따르게 된다. 또한 이 관리는 호수 외적부하에 비해 내적부하가 큰 호수에서는 큰 효과가 없으므로, 그것은 호수의 특성이 먼저 조사된 후에 적용되어야 한다. 또 하나의 대책은 오염된 하천 퇴적물의 준설이다. 이 역시 매우 큰 비용이 소요되며 제거된 준설물의 처리는 또 다른 어려운 문제로 남는다. 끝으로 부착조류를 이용하여 영양염류를 흡수시킴으로써 플랑크톤성 조류의 성장을 감소시키는 관리가 있을 수 있다.

### 3-2. 내적 오염관리

한국의 대다수 인공호는 유역이 호수면에 비해 방대하므로 대부분의 방지대책이 최근까지 주로 외적관리에 치중되어 왔다. 그러나 근래 호수내 어류양식이나 오염된 퇴적물, 과도번성한 수생식물이나 패류에 의한 내적부하는 계속하여 증가되어, 소양호와 같은 호수에서는 내적 인부하가 총인부하의 50%를 넘는다. 비록 다른 호수에서는 내적 부하가 외적부하에 비해 적다고 하지만 이러한 부하는 계절적 조류의 이상증식을 시발하는 요인으로 작용하는 것 같다. 한 예로서 팔당호에 과도번식한 수생 관속식물과

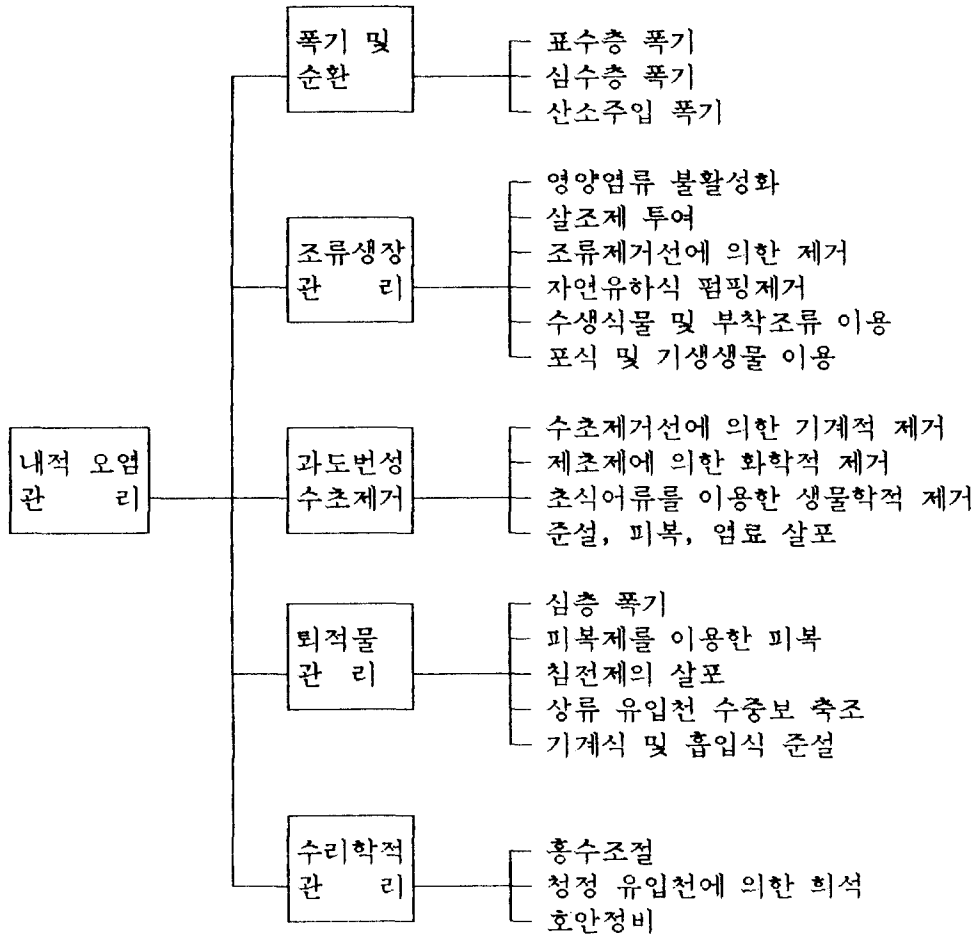


Fig. 3 호수 내적 오염관리의 유형

패류는 9월 이후 갑자기 사멸함으로써 오염 물질을 특정 계절에 집중시키는 결과를 가져온다. 이러한 고사체의 분해는 퇴적물에서 연쇄반응을 통해 호수의 오염을 가속화시킨다. 그러므로 여러 가지 방지대책이 호수 수질의 개선이나 내적부하의 감소를 위해 요구되고 있다.

Fig. 3은 호수오염의 여러 내적관리를 보여주고 있다.

폭기 및 순환은 영양염류 용출과 조류생장을 억제하기 위한 것이다. 호수의 부영양화는 성층형성에 의해 더욱 가속화 되는 것으로, 성층이 형성된 호수의 심층은 산소가 고갈되고 환원상태로 변화된다. 이러한 현상이 일어나면 수체와 퇴적물에서 영양염류 용출이 활성화 되고 조류의 생장이 가속화 된다. 인공적 폭기 및 순환은 이러한 성층을 파괴하고 심수층에 산소를 공급하는 것이다.

이외에 순환은 조류를 광보상점 이하로 밀어냄으로써 조류의 성장을 억제하는 효과를 보이는 것 같다. 이러한 관리는 공정이 간단한 장점을 가지고 있어 많은 바람직한 결과가 보고된 바 있다. 그러나 이는 단지 성층이 형성된 깊은 호수에서 효과적인 것으로, 산소결핍의 문제가 없는 얇은 호수에서는 그 효과가 낮은 것 같다. 오히려 어떤 경우에는 퇴적물이 교란되어 조류가 이상증식하는 역효과를 내기도 한다. 따라서 이 공정은 호수의 특성이 충분히 파악된 후에 적용되는 것이 바람직하다.

한국의 대부분의 호수는 얇아 여름철 성층이 형성되는 호수가 소양호나 대청호, 충주호 등 소수에 지나지 않는다. 실제로 이러한 호수는 매우 거대한 호수로 폭기관리는 한계점을 가지고 비용도 많이 든다. 따라서 이 방법은 성층이 심화되거나 오염된 호수 내 일부 수역에서 국부적인 적용으로 만족하여야 할 것이다.

조류생장에 대한 관리에서는 알루미늄이나 철, 탄소기 등의 화학 침전제를 사용하여 영양염류를 불활성화하는 방법이 잘 알려져 있다. 이 방법은 공정이 간단하고 효과가 신속한 장점을 가지고 있다. 그러나 침전된 영양물질은 수역이 환원상태로 변할 때 재용출되어 그 효과가 일시적인 것이며, 수체에 침전제가 축적되는 결과를 낳는다. 또한 이러한 침전제는 하천형 호수에서는 유속에 의해 소실되어 그 효과가 적다. 한국의 대다수의 호수는 짧은 체류시간을 가지는 하천형 호수가 많아, 이 역시 갈수기에 유속이 느리며 고도로 부영양화된 수역에서 일시적

으로 적용될 수 있을 것이다.

황산동( $\text{CuSO}_4$ ), 이산화염소( $\text{ClO}_2$ ), 오존( $\text{O}_3$ ) 등의 살조제 역시 조류의 제거에 이용될 수 있으며, 이중 황산동은 값이 저렴하여 가장 빈번히 이용되어 왔다. 그러나 이들 화학물질은 수체에 축적되게 되어, 조류의 저항성이 커져 갈수록 그 처리효과는 감소된다. 또한 이들 물질은 호수내의 곤충이나 물고기에게 영향을 줄 수도 있다. 따라서 살조제의 사용은 특별한 경우에 적절한 양만 투여되어야 한다.

조류는 선박에 의해 물리적으로 제거될 수도 있으며, 이는 수화상태의 조류 플록을 흡입과 여과 농축 및 탈수에 필요한 부속기들이 구비된 선박으로 제거하는 것이다. 그러나 이는 단지 조류의 농도가 고농도일 경우에만 효과적이므로, 조류 플록 현상이 빈번하지 않는 국내 호수에 적용하기 위해서는 차후 저농도 조류의 여과장치가 개발되어야 할 것이다.

또 다른 방법에는 자연 유하식으로 호수를 끌어올려 처리한 후 호수로 되돌리는 방법도 있다. 조류생장에 대한 생물학적 관리는 다른 수생생물에 의한 조류와의 경쟁이나 포식 작용을 이용하는 것이다. 수생대 형식물과 부착조류는 플랑크톤성 조류와 빛은 물론 영양염류에 대해 경쟁을 하며, 동물성플랑크톤이나 곤충류 및 어류는 조류를 포식하고, 바이러스는 기생을 통해 조류의 성장을 저해한다. 그러나 이러한 생물학적 관리는 아직 초보적인 단계에 있을 뿐이다.

비록 수생식물이 호수 생태계내에서 성장기에는 오염물질을 흡수하는 역할을 한다고

할지라도, 이들은 사멸후 부패시 미생물적 분해를 통해 오염물질을 다시 배출하게 된다. 수생식물의 부패는 수질에 여러 가지 악영향을 미치게 된다. 직접적인 영향으로서는 고사체의 분해과정에서 배출된 영양염류가 호수를 부영양화하여 조류의 성장을 가속시키는 것을 들 수 있다. 간접적인 영향은 더욱 복잡한 기작을 수반하게 된다. 미생물적 분해과정을 통해 산소가 소모될 때 산화환원전위는 떨어지게 되며 수체는 환원상태로 전환되어 퇴적물에서 왕성한 영양염류의 용출이 일어나고 조류생장이 가속화된다. 조류가 과잉성장하면 수체의 pH는 증가하고 투명도는 감소되며 심층에서 용존산소가 결핍되면 퇴적물에서의 영양염류 용출은 보다 왕성해지는 것이다. 이러한 연쇄반응을 막기 위해서 수생식물은 적절한 시기에 절단, 제거되어야 하는 것이다.

과잉성장한 대형식물의 관리에서 가장 일반적인 것은 수초제거선을 이용한 기계적 제거방법이다. 수초제거의 주요한 호기능적 환경효과는 분해시 산소를 요구하는 물질의 원인제거나 수체에서의 영양염류 제거를 들 수 있으며, 공정시의 악영향은 탁도의 일시적 증가나 동물 서식처의 훼손을 들 수 있다.

수초제거에서 가장 중요한 것은 제거시기를 결정하는 것이다. 만일 수초의 자정능을 그대로 유지한 채 제거코자 한다면, 우리는 먼저 수초의 생활사를 조사하여야 한다. 수초에 대한 최적의 관리시기는 사멸률이 생산력을 넘고 지하경에 영양분을 축적한 직후로 볼 수 있다. 한 예로서 팔당호 수생식

물은 약 80% 내외를 차지한다. 이들 우점 생활형의 보상시기(생산력=사멸률)는 대략 8월 중순이 되며, 적절한 제거시기는 9월말이 된다.

기타의 수초제거 방법은 2차적인 악영향을 주거나 수초의 자정능을 파괴시키거나 혹은 지나치게 이상적이란 점에서 실제로는 상수원이 되는 호수에서의 적용이 어렵다. 퇴적물 관리에는 이미 언급한 폭기방법이나 피복, 영양염류 불활성화, 상류천의 수중보 설치, 준설 등이 있다. 폭기에 관해서는 이미 언급된 바 있다.

피복법은 모래나 폴리에틸렌, 석회 등의 피복재를 가지고 퇴적물의 표면을 덮어 영양염류 용출을 방지하는 것이다. 이 방법은 공정이 간단한 잇점이 있으나 가스 발생에 의해 피복재가 훼손될 가능성이 있으며, 그 효과가 일시적인 단점이 있다. 영양염류를 불활성화하는 방안은 위에 언급된 바와 같다.

상류 유입천에 수중보를 축조하는 것은 일차적인 침전을 통해 호수로의 오염물질 유입을 저감시키는 것이다. 이 방법은 수중보의 월류가 빈번할 때는 효과가 없으며, 또한 수중보의 주기적 준설이 요구되며, 대규모 하천에 축조시는 매우 큰 비용이 드는 문제가 있다. 준설은 퇴적물의 오염물질을 궁극적으로 제거하는 것으로 퇴적물 관리시 일반적으로 적용되는 대책이다. 이 방법은 수질개선외에 저수용량의 증대와 같은 잇점을 가지게 된다. 그러나 오염된 퇴적물의 교란에 의한 여러 가지 악영향이 나타날 수 있으며, 준설물의 처리는 매우 어려운 문제



점으로 남는다.

준설은 크게 기계적 준설과 흡입식 준설로 구분되며, 기계식 준설은 디퍼식, 버켓식, 라더식 준설이 있고, 버켓 준설은 다시 드래그라인, 크랩 셀, 오렌지필과 같은 방법으로 세분된다.

흡입식 준설에는 호퍼식, 사이드캐스팅식, 파이프라인식, 진공식, 하이드로사이클론 및 진공압축식 준설이 있으며 파이프라인식은 다시 컷터헤드, 플레인섹션, 더스트판식, 준설로 세분된다. 일반적으로 공정중의 수질을 보전하기 위해서는 흡입식 준설이 추천되고

있다.

한국에서는 호수에 유입되는 유입천의 합류지점 퇴적물에서의 인의 내적부하가 국부적으로 매우 높다. 이러한 수역은 다소 유속이 빠르고 수심이 낮으며 매우 오염되어 있어, 국부적인 준설이 퇴적물의 관리에 가장 적합할 것 같다.

수리학적 관리에는 홍수기 배수와 청정천을 이용한 회석 및 호안의 정비가 있다. 한국의 대형호수는 모두 대규모 강에 댐을 건설함으로써 만들어졌으므로, 호수의 형상이 길고 매우 완곡하여 있으며 호수의 측선은

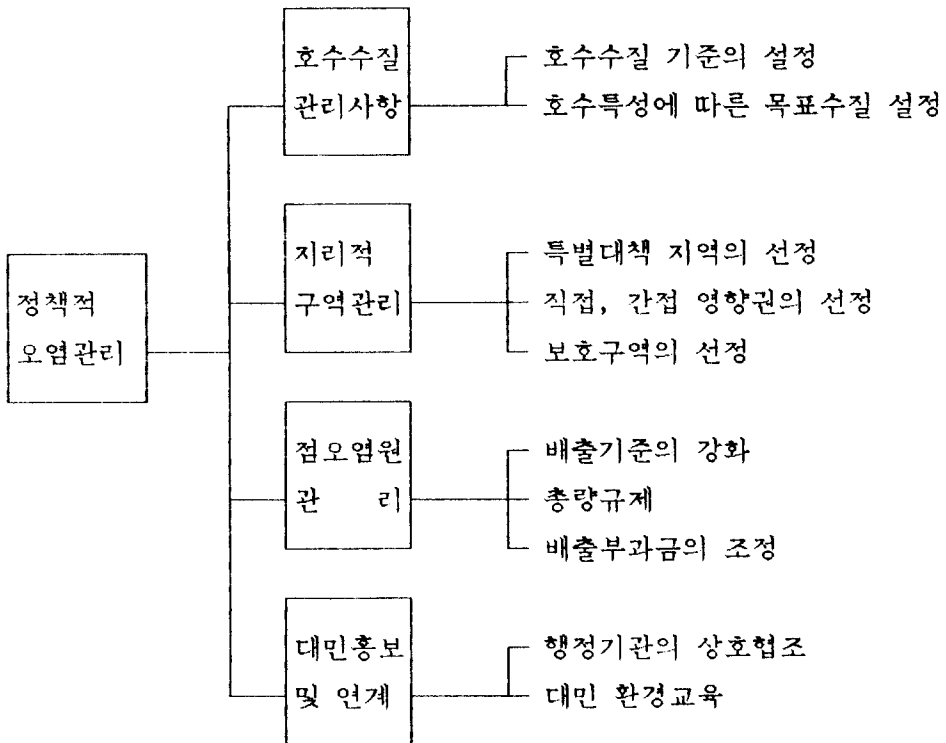


Fig. 4 정책적 오염관리의 유형

불규칙하다. 만입부의 매립을 통한 호안의 정비는 국부적인 정체수역에서의 부영양화와 조류 확산을 저감시킬 수 있을 것이다.

### 3-3. 정책적 대책

위에 언급된 현장관리외에 호수 회복을 위해서는 역시 정책적인 대책이 필요하다. Fig. 4. 는 호수오염에 대한 여러 가지 정책적 방지대책을 보여 주는 것이다.

어떤 호수의 수질을 개선하기 위해서는 그들의 특성에 따른 목표수질이 설정되어야 하며, 이 기준은 호수의 이수목적에 부합되어야 한다. 유역에 대한 지리적 구역관리에는 특별대책 구역이나, 영양권 및 보호구역의 선정이 있다. 점오염원에 대한 정책적 관리는 배출기준의 강화나 부과금의 조정과 같은 대책이 있다. 특히 부하량의 총량규제는 어떤 점오염원의 관리에 매우 효과적일 것으로 보인다. 단지 농도규제만으로는 점오염원에서의 회석배출을 막을 수 없는 것이다.

대민홍보 및 관련부처의 협조는 선진 수질관리에 필수적인 것이다. 물의 흐름은 행정구역에 따르는 것이 아니므로 상호협조 없이는 호수는 회복될 수 없는 것이다.

## IV. 결 론

모든 오염관리기술은 수역의 특성이 충분히 조사된 이후에 적용되어야만 한다. 대부분의 한국호수들은 대형의 인공호로 그 특

성은 외국의 자연호와 상이하다. 자연호에 대한 많은 방법들중 어떤 것은 우리의 호수에 역시 적용될 수 있으나, 또 다른 것들은 검토를 요하는 것이다. 호수 생태계는 매우 복잡하여, 수질보전은 종합적인 조사와 기술에 의해서만 가능하며 파편적이고 단기간의 사업계획으로는 기대하기 어렵다.

수질개선을 목적으로 하는 여러 사업에 이 논고가 참고가 되길 바란다.

## References

1. Seo, Y.S. 1988. Eutrophication of Artificial Lakes in Korea and Proposed Countermeasures. 1st. Kor-Jap. Env. Sci. Tech. Sym., pp. 111~125
2. Seo, Y.S. et al, 1988. A comprehensive studies on the Eutrophication of Paldang Reservoir(I). NIER, 88-15-240
3. Ryu, J.K. and Seo, Y.S. et al, 1989. A comprehensive studies on the Eutrophication of Paldang Reservoir(II). NIER, 89-16-265
4. Ryu, J.K. and Seo, Y.S. et al, 1990. A comprehensive studies on the Eutrophication of Paldang Reservoir(III). NIER, 90-17-291
5. Ryu, J.K., 1990. The status and prospect of lake water management technologies in Korea. Kor. Soc. Wat. Qua. Res. Con., 201~219