

산기장치를 이용한 호수의 성층파괴효과와 설계

송무석⁽¹⁾, 서동일⁽²⁾

On the Effect and Design of Diffusing Aerator for Thermal De-stratification

by

Museok Song⁽¹⁾ and Dongil Seo⁽²⁾

요 약

호수의 온도성층 파기를 위하여 이용되는 수체순환용 공기공급장치의 효과와 최적운용방법에, 거제도의 연초호의 경우에 초점을 맞추어 살펴보았다. 폭기장치의 효과를 가동 전후의 수질을 평가함으로써 고찰하였고 Schladow[1993]의 방법에 기초한 산기장치의 최적설계법 또한 연초호의 상태와 비교를 통하여 제안하였다. 전반적인 혼합효과의 파악을 위하여 단순화된 수체모델에 대한 모사시험도 수행하였다. 연초호의 경우 폭기장치의 효과가 나타나는 것으로 판단된다.

Abstract

The effect and the overall optimal operation of artificial aeration devices for mixing of thermally stratified water reservoir are under study, and its brief introduction is made. The study site is Yeoncho Lake in Geojae island, which is well known for its eutrophication problems in the summer. A few samplings have been made before and after the operation of two types of artificial aerators, and the effect is believed to be positive. Also, design methodology for such artificial aerators is reviewed and a few are applied to the case of Yeoncho Lake. Schladow's[1993] proposal is believed most proper based on the information we have gathered by now. In addition, a simple numerical experiment is also performed to see the overall effect of the device on the flow and temperature profile.

Keywords: 온도성층(Thermal Stratification), 부영양화(Eutrophication), 공기공급(Artificial Aeration), Hydraulic Gun, Pneumatic Diffuser, 성층파괴(Destratification of Reservoir).

(1) 정희원, 홍익대학교 조선해양공학과, msong@hongik.ac.kr

(2) 정희원, 충남대학교 환경공학과

1. 서 론

상수원으로 사용되는 대부분 호소에서 부영양화 현상이 심해지고 있어 다양한 문제를 발생시키고 있다(박주석[1987]). 이에 대한 처방의 하나로 부영양화의 부분적인 이유가 되고 있는 호소의 온도성층을 효과적으로 파괴하는 수괴의 인공순환방식이 연구 활용되고 있다(송무석, 서동일[2001]). 국내에 현재 설치 가능중인 기포발생 장치는 총 377기로 크게 산기식과 폭기식의 두가지 방식이 사용되고 있는데, 설치/운영/효과에 대한 체계적인 이해가 부족한 가운데 유사한 장치의 도입이 대체적인 추세이다(송무석 등[2002]).

공기공급을 이용하는 이러한 방식의 효과적인 활용을 궁극적인 목표로 하는 본 연구는, 현재 두가지 형식의 공기공급장치가 설치되어 운용되고 있는 거제의 연초댐을 대상으로 기초연구를 수행하였다. 연초댐은 Table 1에 보인바와 같은 소규모 호수이나 거제도민의 상수공급원으로 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 1979년 완공 이후 호수의 심한 부영양화로 상수원으로서의 기능에 어려움을 겪어왔고, 1988년에는 호수의 물을 전량 방류하여 재 담수를 실시하기까지 하였다. 이러한 노력도 호수의 부영양화문제를 해결하지 못하자 1991년 5기의 수중폭기장치를(Hydraulic Gun) 설치하여 온도성층을 파괴시키는 시도를 하였고, 1994년에 유사한 장치를 2기 추가하고 1997년에는 산기관장치를 (Pnematic Diffuser) 9기를 취수탑 근처에 (Fig. 1) 추가 설치하여 이취미 제거에 효과를 보고 있다(수자원공사[1997]).

본 연구에서는 주어진 호수 및 성층 정보를 토대로 원하는 수준의 성층파괴 효과를 얻기 위하여 요구되는 기포공급장치의 사양결정방법을 고찰하여 이후 도입될 시설에 활용될 수 있는 기본적인 설계법을 제시하고자 하였다. 정리된

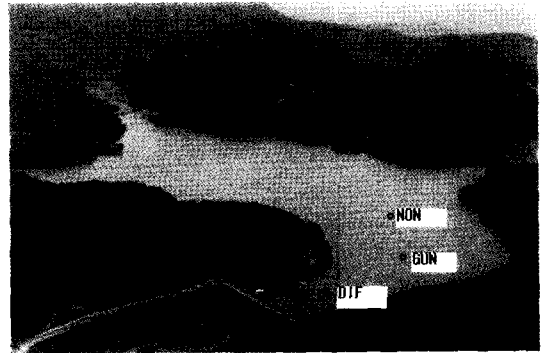


Fig. 1 Picture of Yeoncho Lake and the device sites.

방법을 거제도의 중요한 식수원으로 사용되고 있는 연초호의 상황에 적용하여 방법의 신뢰도를 평가하고 단순한 모델의 수치실험을 이용하여 장치의 영향반경과 효과를 살펴보았다.

2. 폭기장치의 효과고찰

Fig. 2에는 인위적인 공기공급을 이용하여 온도성층을 파괴해주는 상황을 개념적으로 보이고 있다. 필요한 공기공급 정도는 성층으로 인하여 호수에 저장되어 있는 수괴의 안정성의 크기에 따라 달라지고, 공급장치의 형식과 장치에 의하여 발생하는 공기방울의 특성에 따라서도 달라진다(ERL[1977]). 본 연구의 궁극적인 목표는 이러한 시스템의 효과를 체계적으로 규명하여 효율적인 설치와 운용안을 마련하자는 데 있다. 1차적으로 서론에 언급된 연초댐의 수괴 특성을

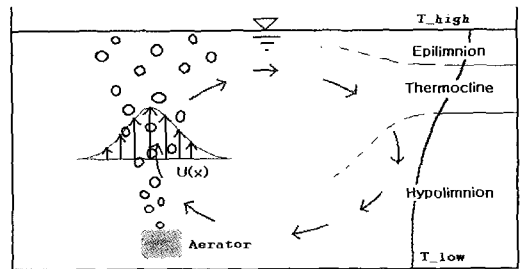


Fig. 2 Thermal stratification and the mixing by aeration.

Table 1 Main characteristics of Yeonco Dam.

유역면적	11.7km ²	댐높이	25m
만수면적	0.625km ²	댐길이	120m
총저수량	496만 m ³	수심	12-14m
완공	1979.12	재담수	1989.3

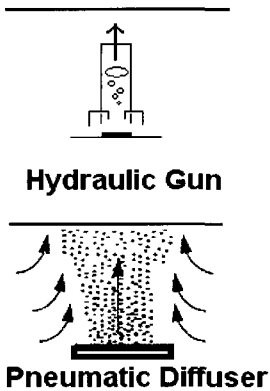


Fig. 3 Two types of aerator used in Yeoncho Lake.

파악하기 위하여 기본적인 조사를 수행하고 있으며, 본 논문에서는 공기공급장치를 가동하기 전인 2002년 3월 30일과 가동 후인 4월 12일의 (가동 시작은 4월 8일) 수심에 따른 온도, DO 그리고 탁도의 변화를 중심으로 장치의 성능을 개략적으로 살펴보았다.

Fig. 3은 연초호에 설치된 두가지 형식의 공기공급장치 개략도이다. Fig. 1에 'DIF'로 표시된 수심별 특성이 계측된 지점이고 주위에 9기의 산기식(Pneumatic Diffuser) 공기공급장치가 배치되어 있다. 산기식 장치는 가로세로가 각각 30cm, 두께 5cm인 쉘라믹 블록으로, 압축공기가 블록을 지나면서 작은 공기방울로 뿜어 나오도록 하는 간단한 개념이다. Fig. 1에 'GUN'으로 표시된 지점 역시 계측지점이나, 이곳 주위에는 7기의 폭기형(Hydraulic Gun) 장치가 설치되어 있다. 폭기형은 직경 50cm, 높이 7m (혹은 9m)의 원통 아래쪽에 압축공기가 모이게 하는 구획을 만들고 이 압축공기의 양이 증가하면서 원통 내부로 순간적으로 흘러들게 하여 상승 버블을 만들어 주는 장치이다. 총 16기의 이러한 장치가 50마력의 컴프레서 4대에 함께 물려 있어서 장치의 위치에 따라 배출되는 버블의 양이 차이를 다소 보이기는 하지만 전반적으로 모든 장치가 원활히 작동되고 있다. Fig. 1에 'NON'으로 표시한 지역은 공기공급장치가 설치된 지역과 100m 정도 떨어져 있는 곳으로 공기공급장치의 영향이 미미할 것으로 예측하고 있는 지점이다.



Fig. 4 Pattern of the surface flow with bubble plumes hitting the surface.

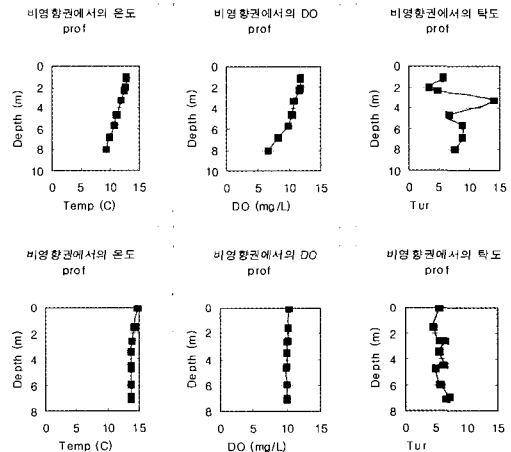


Fig. 5 Temperature, DO and turbidity vs depth at NON. Left three are 3/31 and right three are at 4/12.

Fig. 4는 폭기형의 장치 상부의 수면에서 관찰되는 모습이다. 대체로 직경 1cm 내외의 공기방울군이 상승하고 이들에 의하여 만들어지는 수면 유동은 제법 거칠다. 사진의 폭은 거칠게 3m 정도 되는데, 상승류와 수면이 만날 때 보이는 전형적인 수면형상을 보인다.

Fig. 5~7은 계측된 수심별 온도, DO, 탁도를 보이고 있다. 6개의 그림 중 위의 3개는 공기공급장치를 사용하기 전인 2002년 3월 30일의 결과이고 아래의 세그림은 2002년 4월 12일, 같은 지점에서 장치가 가동되고 있는 상황에서의 결과이다. 3월 12일 현재 4~5도 정도의 수온차를

산기장치를 이용한 호수의 성층파괴효과와 설계

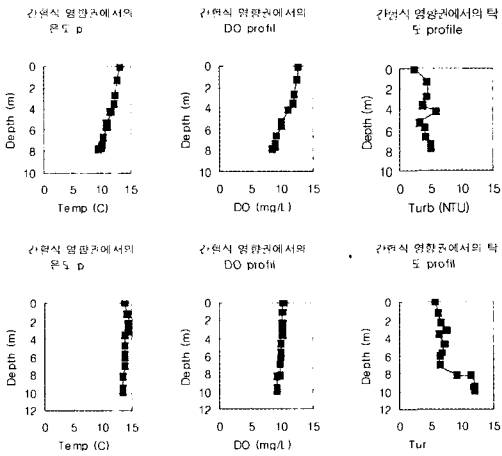


Fig. 6 Temperature, DO and turbidity vs depth at GUN. Left three are 3/31 and right three are at 4/12.

보이고 5~6mg/L 정도의 DO차이를 보이던 성층이 가동 4일이 지난 후에는 깊이별 변화가 완전히 사라졌음을 확인할 수 있다. 예상할 수 있듯이 전반적으로 탁도가 다소 상승한 점이 관찰된다. Fig. 7의 비영향권의 결과도 Fig. 5~6과 다르지 않는데, 이는 계획 당시 수심이 만수위에 모자랐던 영향도 있을 수 있겠지만, 설치 시 공급장치의 효과가 과소평가된 데 기인할 수도 있다.

3. 공급공기량 산출 방법

최적의 공기공급량을 결정하는 과정은 얻고자하는 효과의 성격에 따라 달라진다. 호수 하층부의 산소결핍을 완화하기 위한 경우는 사용되는 장치의 형태까지도 Fig. 3과 완전히 다를 수 있다. 우리나라의 경우 대부분의 문제가 온도성층에 따른 부영양화와 이어서 야기되는 악취를 동반한 혐오감, 음용수로의 처리비용 그리고 물맛의 저급성 등이다. 따라서 우리의 경우는 상대적으로 차가운 하층수를 더워진 상층부로 끌어올려서 수피의 수직온도 분포를 균일하게 해주고 결과적으로 얻어지는 균일한 온도 분포가 식물성 플랑크톤의 번식 억제 효과로 이어지도록 하는 것이 목표이다.

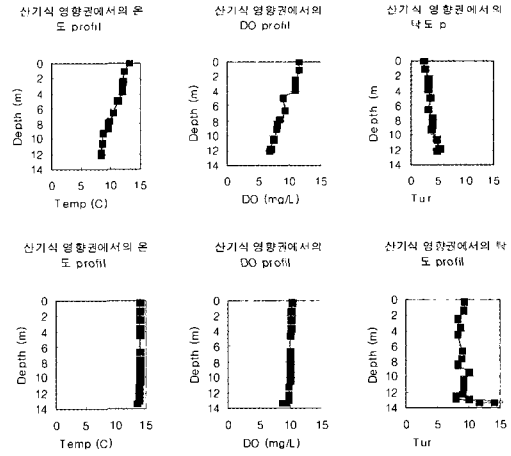


Fig. 7 Temperature, DO and turbidity vs depth at DIF. Left three are 3/31 and right three are at 4/12.

Lorenzen 등[1977]은 현재까지 구미에 설치되어 활용되고 있는 다양한 형태의 기포공급장치의 효과를 분석하여 공급공기량을 호수면적당 9.2 m³/min/km² 이상으로 주어야 성층파괴 효과가 기대된다고 보고하였다. 수피의 규모를 단지 호수의 수면적으로 처리하는 문제가 있지만 실용적인 비교치를 제공한다고 볼 수 있다.

보다 과학적인 근거를 가지는 방법으로, Davis [1980]와 같이 성층 수피의 위치에너지와 혼합된 가상 수피의 위치에너지를 평가하고 그 차이에 해당하는 에너지를 공급기포가 상승하며 수피에 줄 수 있도록 하는 방식이 있는데, 직선으로 된 구멍 뚫린 파이프를 사용하는 2차원의 경우에 대해 적용할 수 있다. 이 방식은 우리가 많이 사용하는 축대칭 장치로 확장이 가능하지만 기포 유동에 대한 과학적인 접근이 포함되어 있지 못하다.

Schladow[1993]는 McDougal[1978]의 기포상승류 모델을 기본으로 체계적인 설계방법을 제안하였다. 이를 간단히 요약하면 Fig. 8과 같은 기포류기둥(bubble pume)의 유동은 상사하다는(similar) 가정하에 수직 유동과 밀도분포를 가우시안(Gaussian)으로 하여 질량, 운동량, 부력의 보존을 적용하고 얻은 미분방정식을 풀어 기포류가 공급장치의 세기(M)와 성층정도(C)의 함수로 표시될 수 있음을 보였다. 여기서 M과 C는

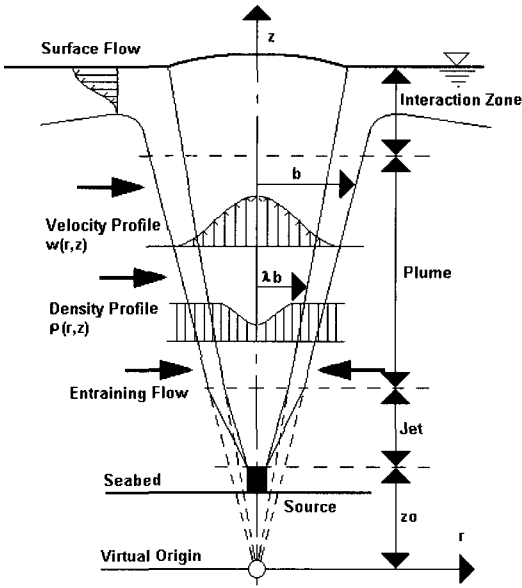


Fig. 8 Definition sketch of a bubble plume.

아래와 같이 정의된다.

$$M = \frac{Q_0 p_a}{4\pi a^2 \rho_r H^2 u_s^3 (\lambda^2 + 1)^2} \quad (1)$$

$$C = \left(\frac{N^3 H^4}{g Q_0} \right) \left(\frac{H}{h_a} \right) \quad (2)$$

λ = ratio of the effective buoyancy width to the effective momentum width within the plume

Q_0 = gas flow rate at atm [liter/sec]

$H = h + h_a$, $h_a = p_a / \rho_{rg}$

ρ_r = reference water density

$N = (-g/\rho_r) dp_0/dz)^{1/2}$, buoyancy frequency

u_s = bubble rising speed, typically 0.25m/s

a = entrainment factor

우선 주어진 수괴의 성층정보를 층별로 정리하여 위치에너지가 동일하도록 수직온도변화를 선형으로 변화시켜서 Fig. 9를 이용하여 대응되는 수심에서 두쌍의 M값과 기계적 효율을 구한다. 식(1)을 이용하여 Q_0 를 구하고 아래의 두 식을 이용하여 기포공급시간을 정하면 된다. 여기서 PE는 수괴의 희망 위치에너지와 초기 위치에너지이다.

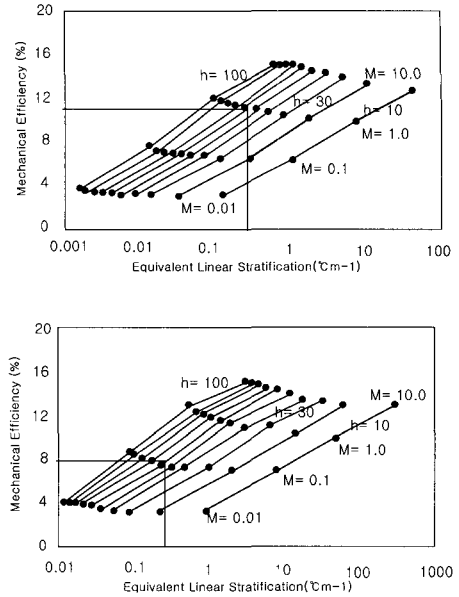


Fig. 9 Design charts for first and second peak from the top(Schladow(1993)).

$$\eta_{mech} = (PE_f - PE_i) / W_{i s o} \quad (3)$$

$$W_{i s o} = 2.303 p_a Q_0 \Delta t \log(p_h / p_a) \quad (4)$$

한편 하층에서 유입된 기포의 위치에너지가 수면에서 기포의 상승속도에 해당하는 운동에너지로 바뀌고 차이는 수괴의 상승류를 만드는데 기여했다고 보고 간단한 모델을 구성해 보면,

$$[(\rho_w - \rho_{a,h}) \nabla_{bub,h} g h - 0.5 \rho_{a,0} \nabla_{bub,0} U^2] \times \Delta t = PE_f - PE_i \quad (5)$$

위의 식은 기포내의 회전운동 등이 완전히 배제된 매우 이상적인 상황을 가정한 것이다.

4. 연초호 적용에

이상의 방법을 이용하여 거제도의 연초호의 온도성층 파괴를 위해 요구되는 적정 공기공급량을 살펴보았다. 연초호는 부영양화 문제가 자주 언급되는 거제주민의 중요한 상수원이고 현재 산기식 9기와 폭기식 7기의 장비가 설치되어 가

동되고 있다. 현재 주어지고 있는 공기공급량은 총 $0.15\text{m}^3/\text{s}$ 로 가동중인 현재 온도성층은 완전히 파괴된 상황이다.

전장에 설명한 방법들을 적용하기 위하여, 평균수심은 8m, 수면면적은 0.625km^2 , 온도성층은 상부는 25° 이고 하부는 20° 이다. 선형성층의 온도기울기는 $0.433^\circ/\text{m}$ 로 얻어지고 이때의 상부와 하부의 온도차는 3.46° 이며, ΔPE 는 $4.363 \times 10^7 \text{J}$ 이다. 우선 Lorenzen의 방법을 쓸 경우 공기공급량은 $0.063\text{m}^3/\text{s}$ 이다. Schladow의 방법에 따르면 공기량은 $0.045\text{m}^3/\text{s}$ 에서 $0.037\text{m}^3/\text{s}$ 이 적당한 것으로 얻어진다. 반면 간단한 에너지식(5)를 이용하는 경우는 $0.012\text{m}^3/\text{s}$ 의 공기량이 얻어져서 예상한대로 이론적인 하한값을 줄을 알 수 있다. 이들 값들을 현재 연초호의 상황과 비교하면 연초호의 공기공급이 과다하게 주어지는 것으로 나타나 어떤 방법이 가장 적절한지를 판단하기는 어렵다. 에너지 방식은 하한값의 의미가 있고, Schladow의 방법이 과학적 근거에서 제시된 것이라는 점, 그리고 많은 호수의 결과를 바탕으로 한 Lorenzen의 값과 크게 다르지 않다는 점에 유의하면 Schladow의 제안이 우리의 설계방식 개발에 좋은 모델이 될 수 있다고 생각된다.

5. 수치실험

공기공급이 이루어지는 경우 전반적인 유동 패턴을 고찰함으로써 영향반경을 파악하고 온도성층파괴의 효과를 예측하기 위하여 수치실험이 생각될 수 있다. 여기서는 기포상승을 중앙부에서의 기동벽의 상승으로 모델링하고 간단한 수치 실험을 수행하였다. 수치해석은 상용프로그램을(Fluent) 사용하여, 비압축성, 축대칭모델, 스탠더드 k-ε모델, wall function, full buoyance 효과, Boussinesq 가정을 쓴 비정상계산을 하였고, Fig. 10~12는 유동장, 시간에 따른 온도 분포, 그리고 유량함수를 보이고 있다. 적절한 모델에 대한 추후의 연구가 필요한 부분이다.

3. 결 론

공기공급을 이용한 온도 성층의 파괴를 목적으로 하는 각종 장치의 효과와 체계적인 설치/운

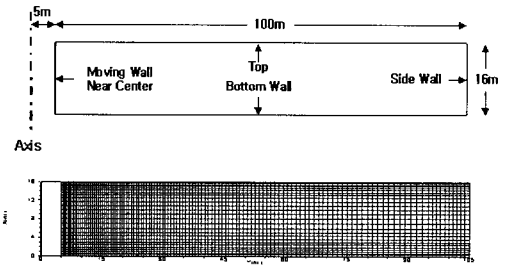


Fig. 10 Computation domain and grid.

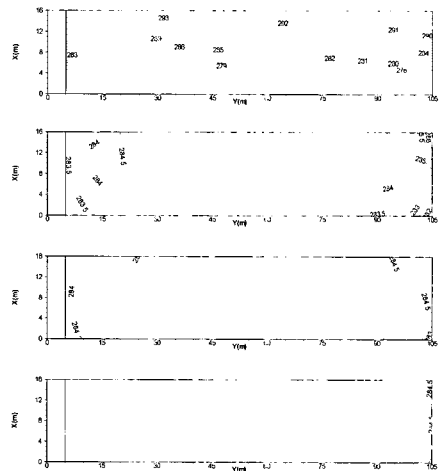


Fig. 11 Temperature profile at 0, 1, 2 and hours from the top.

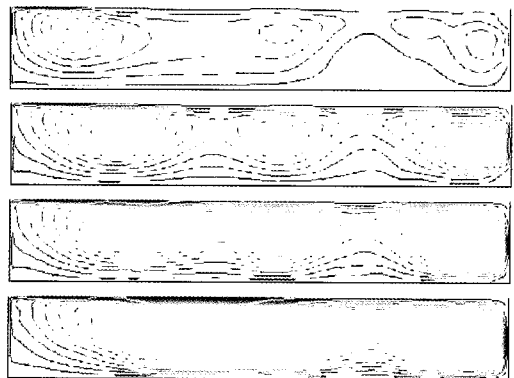


Fig. 12 Streamlines at 1, 2, 3, and 12 hours from the top.

용 방안을 도출하기 위한 연구의 일환으로, 현재 두 종류의 장치가 활용되고 있는 거제도의 연초댐의 기초조사를 토대로 장치의 성능을 확인하였다. 온도 및 DO 관점에서 존재하던 성층이 기포발생 장치의 구동으로 완전히 사라질 수 있음을 보았다.

또한, 주어진 환경에 적합한 공기공급량의 평가방식을 검토하고 연초댐의 실태와 비교하였다. Schladow[1993]가 제안한 방식이 현재까지의 연구결과를 바탕으로 할 때 합리적인 것으로 판단된다. 단순한 기포모델을 이용하여 영향반경과 성층파괴 효과를 수치실험을 통하여 살펴보고, 발생기포의 특성과 이에 따른 상승유동 파악, 그리고 이를 체계화한 설치/운용 체계화가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 연구의 일부는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] 박주석, “적조발생현황의 변천과 대책,” 수산진흥연구원, 1987.
- [2] 송무석·서동일, “공기공급을 이용한 호수의 수질개선,” 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 2001.
- [3] 송무석·강현선·서동일·이상욱·황현동, “공기공급을 이용한 호수의 성층파괴에 관한 기초연구(I),” 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, 2002.
- [4] 수자원공사 거제사무실, “연초댐 수질개선을 위한 산기관 설치안,” 1997.
- [5] Davis, J. M., “Destratification of reservoirs: a design approach for perforated-pipe compressed-air systems”, Water Research, 1980.
- [6] Environ. Research Lab, “A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management”, 1977.
- [7] Lorenzen, M. & Fast, A., “A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management”, Environ. Research Lab, 1977.
- [8] McDougall, T. J., “Bubble plumes in

stratified environments”, JFM, 85, 4, 1978.

[9] Schladow, S. G., “Lake destrification by bubble-plume systems: Design methodology”, J. Hydraulic Engin., 119, 3, 1993.