

대류 순환식 폭기장치에 의한 성층화된 저수지 혼합 모의 Simulating Stratified Reservoir Mixing by a Convection Circulator

이요상*, 이광만**, 고덕구***

Yosang Lee, Gwang Man Lee, Deuk Goo Koh

요 지

저수지에서 잠재적 대규모 조류발생을 감소시키기 위하여 인공적 성층파괴 장치가 2006년 용담댐에 설치되었다. 본 연구는 저수지에서 여름철 발생하는 성층파괴에 대한 대류순환식 폭기장치의 효과를 검토하기 위해 수행되었다. 성층파괴 장치의 성능을 분석하기 위하여 반경 25m, 높이 45m의 실린더 용기에 34.6만개의 격자로 구성된 CFD모형을 적용하였다. 적용결과, 사면체 격자 온도 및 유속에서 실측자료와 밀접하게 일치하였다. 이와 같은 결과는 난류확산항이 제거되었을 때보다 태양광 열전도를 고려한 경우가 보다 좋은 결과를 보였다. 결과적으로 성층파괴 장치의 지속적인 운영은 인공적 외부력을 통하여 성층화된 수체를 혼합시키는데 유용할 것으로 나타났으나 현재 설치되어 있는 장비로는 크기나 숫자에서 충분하지 못해 원래 목적을 달성하기에는 부족한 것으로 나타났다.

핵심용어 : CFD, 성층파괴, 대류순환식, 혼합

1. 서론

저수지 수질관리에서 가장 일반적이고 명확하면서 고질적인 문제는 부영양화이다. 이런 현상을 인위적으로 제어하기 위한 방안으로 인공순환 기법이 이용되고 있다. 대규모 저수지 수체의 경우 수체내부 동적활동이 미약하여 이로 인한 부작용이 발생하고 있어 인공순환을 통해 수층에 산소를 공급하는 물리적 방법이 하나의 대안으로 활용되고 있다. 수체를 순환시키는 방법으로는 기계적인 혼합장치, 수류 및 공기방울 등이 사용되며 다양한 형식의 장치들이 개발되어 활용되고 있다. 인공적 성층파괴는 성층의 발생을 막거나 감소시키는 일련의 과정을 포함한다. 이것은 수체에 혼합에너지를 제공하여 순환류를 만들고 온도차에 의한 밀도의 기울기를 해소하여 혼합활동이 원활히 이루어지게 하는 것이다.

국내의 대부분의 인공호소도 부영양화로 인해 하절기에 조류의 과잉성장이 종종 발생되며 이로 인한 경관장애 및 상수원 사용시에 문제점이 발생하고 있다. 이런 문제점을 개선하는 방법의 하나로 수중폭기장치를 설치하여 운영하고 있으며 현재까지 500여기 이상이 설치되어 운영되고 있다. 설치된 장치의 형식은 간헐식과 산기식이며, 최근에 용담다목적댐에 대류식 장치 10기가 설치되었다. 본 연구는 저수지에서 여름철 발생하는 성층을 파괴하기 위해 용담댐에 설치된 대류순

* 정희원 · 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 · E-mail : yslee@kwater.or.kr
** 정희원 · 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원 · E-mail : lkm@kwater.or.kr
*** 정희원 · 한국수자원공사 K-water연구원 연구위원 · E-mail : dkkoh@kwater.or.kr

환식 폭기장치의 효과를 검토하기 위해 수행되었다. 성층과괴 장치의 성능을 분석하기 위하여 반경 25m, 높이 45m의 실린더 용기에 34.6만개의 격자로 구성된 CFD모형을 적용하였다. 적용결과, 사면체 격자는 온도와 유속에서 실측자료와 밀접하게 일치하였다. 이와 같은 결과는 난류확산항이 제거되었을때 보다 태양광 열전도를 고려한 경우가 보다 좋은 결과를 보였다. 결과적으로 성층과괴 장치의 지속적인 운영은 인공적 외부력을 통하여 성층화된 수체를 혼합시키는데 유용할 것으로 나타났으나 현재 설치되어 있는 장비로는 크기나 숫자에서 충분하지 못해 원래 목적을 달성하기에는 부족한 것으로 나타났다.

2. 대류 순환식 혼합 시스템

저수지 수질 복원 방법으로 많이 이용되는 폭기나 혼합기법은 물에 어떤 부정적 영향도 미치지 않는다는 장점 때문에 활용도가 높아지고 있다. 일반적으로 폭기에는 두 종류가 있는데 혼합이나 성층과괴 그리고 심층에 산소를 주입하는 것이다. 첫 번째 방법은 펌프나 분사기, 공기방울을 이용하여 상층에 영향을 주는 것이고(Verner, 1984), 심층폭기는 성층과괴없이 심층에 산소를 공급하여 호기성으로 만들어 생물학적 분해를 촉진시키는 것이다(Ashley, 1983). 심층폭기방식은 공기식과 순산소식이 있으며, 공기식에는 육상폭기법, 전상향류폭기법, 반상류폭기법, 하향류폭기법, 스탠드파이프법, 사이폰법이 있으며, 순산소식에는 육상흡입형과 수중흡입형이 있다.

본 연구에서 적용대상으로 하고 있는 대류식 순환 시스템은 간헐식과 유사하게 양수통을 이용하는 방식이나, 양수통 내의 호소수를 임펠러를 이용하여 상부로 밀어 올려 수체가 순환하도록 운영하는 시스템이다(그림 1). 따라서 연속으로 수체가 순환하며, 산소는 대기에서 공급받아 주변의 DO농도가 높은 물과 혼합하게 된다. 이 장치는 압축공기를 공급하는 시설 없이 전기에너지를 직접 임펠러에 사용하므로 에너지 효율이 높고 유지관리비가 상대적으로 저렴하다. 양수량은 관의 직경과 임펠러의 구조 및 임펠러의 회전속도 등에 따라 다르기 때문에 시설물의 구조에 따라 그 양을 계산할 수 있다. 다만 상승하여 확산되는 유체가 주변의 물을 끌어 들이기 때문에 효율이 높다.

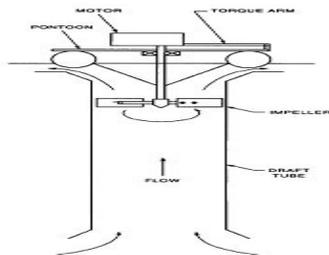


그림 1 대류식 수중폭기 장치



그림 2 용담댐 위치도

3. 저수지 수체 순환 모의

본 연구에서 다루고 있는 대류순환식 폭기장치의 성능을 실험하기 위한 수학적 공식화는 편미분방정식의 집합으로 나타낼 수 있는데 연속방정식과 운동량방정식 그리고 에너지 방정식이다. 이 중 운동량 방정식(Momentum Transport Equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \nabla \cdot (\rho \bar{V}\Phi) = \nabla \cdot (\gamma_{\Phi} \nabla \Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, Φ 는 종속변수, V 는 속도벡터, ρ 는 유체밀도, γ 는 종속변수의 이송계수, S 는 단위체적당 Φ 의 모멘트원 그리고 ∇ 는 미분연산자 벡터이다. 이 식은 유동을 지배하는 방정식으로 우변의 첫 번째 항은 부정류항, 두 번째 항은 대류항, 좌변의 첫 번째 항은 압력구배항, 두 번째 항은 점성에 의한 운동량 확산항, 세 번째 항은 운동량에 대한 에너지공급원이다. 복잡한 편미분 방정식의 형태를 갖고 있으며, 물리적으로 의미하는 바는 미소체적에 작용하는 힘의 균형상태를 묘사한 것이다. 따라서 각 축방향으로 3개의 운동량방정식과 연속방정식에 수치해석 기법을 적용하여 각각의 해석격자에 대하여 얻어진 차분식을 풀면 유동장에 대한 정보, 즉, 속도성분(u, v, w)과 압력값(p)을 얻을 수 있다.

4. 대류 순환식 폭기장치 효과 분석

본 연구에서는 대류 순환식 혼합장치가 설치되어 있는 용담댐을 대상으로 모의하였다. 용담댐은 전주권의 용수공급과 홍수피해를 방지하기 위하여 금강의 상류에 건설된 다목적 댐으로서 진안군, 장수군과 무주군의 일부가 유역에 포함되고 있다(그림 2). 2002년 5월 수립된 용담댐 수질오염방지대책에 의해 한국수자원공사는 댐내 폐기물 처리장, 인공습지 조성 및 수중폭기장치 등의 호내대책을 추진해 왔으며, 2007년에는 대류 혼합식 수중폭기장치 10기를 도수터널의 취수탑 주변에 설치하여 운영하고 있다.

4.2 혼합모의

CFD를 이용한 수체거동을 모사하기 위해 영향범위(domain)을 설정하였다. 대류식 폭기 장치가 분출하는 유량의 모멘텀이 수평방향으로 영향을 미치지 않도록 반경을 멀리 잡을수록 유리하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 격자가 늘어나 계산시간이 많이 걸리게 되므로 25m로 정하였다. 또한 계산 시간을 줄이기 위해 유동형상이 원형인 점을 고려해 45° 각도의 형상만을 이용하여 모사를 수행(그림 3)한 후 전체면으로 확대하여 해석하였다. 격자는 사면체 격자를 적용하였고, 벽 근접영역의 속도구배를 모사하기 위해 벽쪽으로 프리즘 격자를 적용하였다. 사용된 격자수는 약 34.6만 개의 요소로 분할하였으며 수면부는 폭기장치의 분출부에서 멀어질수록 속도가 느려지는 경향을 반영하여 격자를 구성하였다. 폭기장치는 직경 790mm의 원형관이 수심 30m지점까지 도달하고, 수면부에 임펠러가 위치되어 있는 형태로 되어 있다. 유동은 장치내의 임펠러 작동으로 수심 아래 부분의 저온층 물이 관입되어 상층으로 이동하여 수면부로 분출하는 형이다.

수치모의를 위해 적용한 경계조건으로 분출부의 유속은 해석조건으로 제공된 폭기장치의 1일 양수량 10,656 m³/day을 분출부의 면적과 유속과의 관계를 이용하여 결정하였으며, 벽조건으로 적용해야 할 대상에는 바닥면, 폭기장치의 파이프 면, 바깥쪽 면 등이며 고체와 유체의 경계면 벽에서 유체의 유속은 미끄럼이 없는 것으로 적용하였으며, 열전달 조건으로 바닥면은 수심별 온도분포 값에서 저층의 온도를 일정하게 유지하는 것으로 설정하였고, 바깥쪽 면은 수심별 온도분포를 일정하게 유지하는 것으로 설정하였다. 유속에 대한 초기조건은 정지해 있는 상태에서 수체거동 모사를 시작하는 것으로 가정하여 속도와 상대압을 0으로 설정하였다. 이렇게 하여도 부력모델을 적용하였기 때문에 수치 계산시 깊이에 비례하는 정압분포가 반영된다. 초기 온도분포는 2008년 6

월 18일에 측정된 실측값을 그림 4와 같이 수심별로 적용하였다.

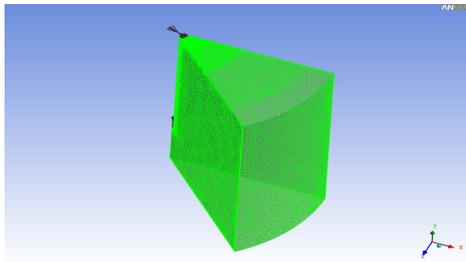


그림 3. 적용된 Domain 및 격자계

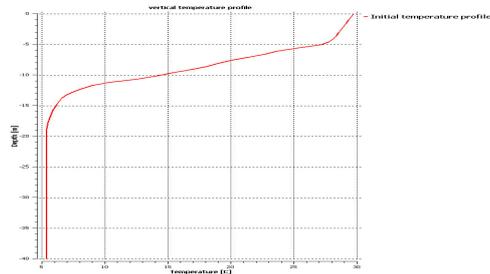


그림 4. 초기 온도분포 그래프

그림 5는 급격한 유동장을 보이는 수직선을 따라 분포하는 온도를 나타내고 있다. 온도는 초기 부터 매 4시간 간격으로 나타내고 있는데, 온도 경계층의 상층부가 시간이 갈수록 수심 아래로 확장되어 가는 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 실제와 달리 초기의 온도성층이 유지되지 못하는 이유는 실제 열전달 조건을 단순화하여 적용한 것과 수체가 자연조건처럼 무한정 크지 않음으로 인해 나타나는 현상으로 판단된다. 그림 6은 시간 변화에 따른 표면유속의 변화를 보여 준다.

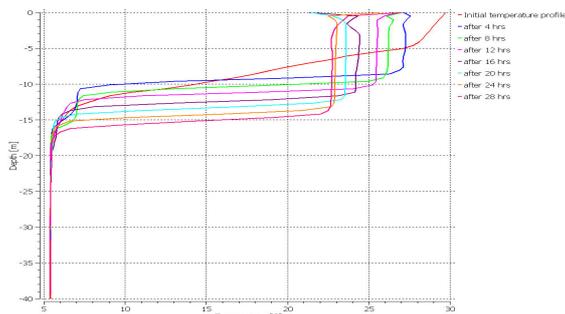


그림 5. 수심별 시간에 따른 온도의 변화

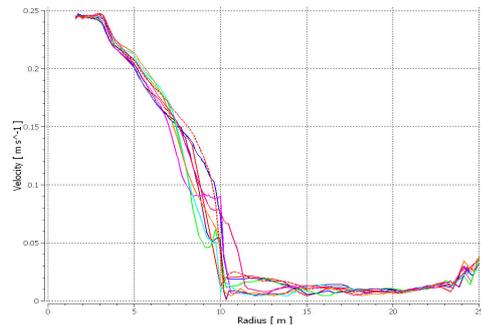


그림 6. 반경에 대한 수면 속도 분포

그림 7은 28시간 후 수면 온도분포를 보이고 있으며, 그림 8은 반경방향의 수면 온도분포를 보여주고 있다. 장치로부터 분출된 저온의 물이 반지름 약 10m 지점까지는 수온변화에 영향을 미치는 직접영향권인 것을 알 수 있다.

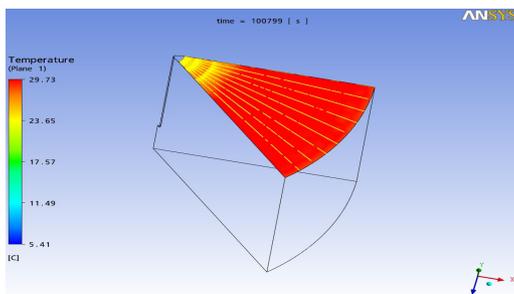


그림 7. 수면의 온도분포

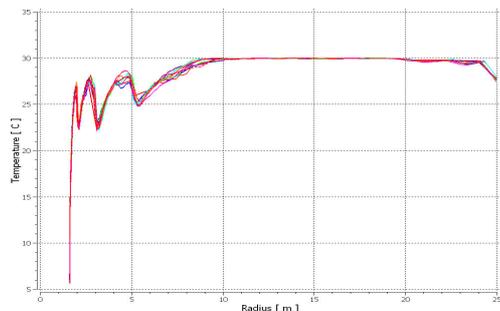


그림 8. 반경에 대한 수면온도 분포

그림 9는 복사모형을 적용한 경우와 복사모형을 적용하지 않은 경우에 20시간 후의 결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림으로부터 복사모형을 적용한 경우가 보다 더 온도성층을 잘 유지하는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 실제 자연 상태에서 저수지의 온도성층을 유지하는데 복사열이 크게 작용한다는 것을 유추해 볼 수 있다.

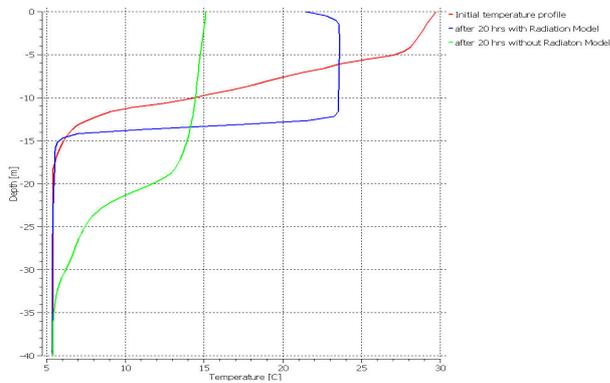


그림 9. 수심별 온도의 시간에 따른 변화 비교

로 볼때 상층으로 올라온 수체는 상층부에서 계속 수평방향으로 확산되어 나가는 것으로 평가할 수 있으며, 조사한 결과에 의하면 1개월을 가동하면 하층에서 올라온 수체가 대류식 장치 주변으로 수심 8m, 지름 120m의 수층을 이루게 되며 50일을 가동하면 수심 10m, 지름 130m의 수층을 이루는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 저수지 수질관리에서 가장 일반적이고 고질적인 문제 중 하나인 부영양화를 억제하기 위한 수단으로 대규모 저수지인 용담댐에 처음으로 설치된 대류식 인공순환 장치에 의한 저수지 수체의 혼합과정을 모의하였다. 모의방법은 기상변화나 수위변화, 성층강도변화 그리고 장치간 간섭효과 등 다양한 조건하에서 CFD적용을 통해 대류식 폭기시설의 수리적 영향범위를 분석하여 효과 및 문제점을 분석하여 수질개선 효과를 극대화 할 수 있는 최적운영방안을 도출하고자 하였다. 분석결과 복사모형을 적용한 경우가 실측값에 가까워 수표면의 수온을 좌우하는 태양광의 영향이 여름철 성층형성에 결정적인 역할 하는 것으로 나타났으며, 현재 설치되어 있는 10기의 폭기장치로는 성층을 완전히 파괴하는데 한계가 있는 것으로 나타나 추가적인 설치가 필요한 것으로 분석되었다. 따라서 이와 같은 장치의 설계시 저수지 수체의 유동특성을 상세히 모의하여 평가한 후 적정의 규모나 수를 정하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Ashley, K. (1983). "Hypolimnetic aeration of a naturally eutrophic lake: physical and chemical effects", Can J Fish Aquat Sci, Vol.40.
2. Verner, B. (1984). "Long-term effect of hypolimnetic aeration of lakes and reservoirs with special consideration of drinking water quality and preparing cost.", EPA-440/5-84-001, pp.134-138.