

저층수 흡입식 광역 순환장치의 설계변수에 따른 배출량 및 소비동력 변화 특성에 대한 수치 해석 연구

송동근^{*,**} · 홍원석^{*} · 김영철^{***} · 박명하^{****}

Numerical Analysis on Changes in Flowrate of Draft Water and Power by Changing Design Parameters of a Long-Distance Water Circulation

Dong-Keun Song^{*,**}, Won-Seok Hong^{*}, Young-Cheol Kim^{***}, Myong-ha Park^{****}

Key Words : Draft tube(흡입관), Impeller(임펠러), Long-distance circulation(광역순환), Lake water(호소수)

ABSTRACT

A draft tube which has impeller to elevate bottom water and spread it over surface of lake water, induces convective circulation of lake water, a Long-Distance Circulation (LDC). Circulation of lake water make stratified water mixed and enhance DO (Dissolved Oxygen) of bottom water. Circulation rate of water is determined by draft rate of the tube, which is dependent on design parameters of the draft tube system, i. e. dimension of impeller and diffuser, inclined angle of impeller, impeller shape, and rotational speed. In this study, change in draft rate and power consumption of circulation equipment was investigated numerically with changing impeller dimension, angle and rotational speed. It was found that flowrate of draft water was increased as the dimensions of draft tube and impeller, and rotational speed and inclined angle of impeller increased. The power consumption was also elevated with increasing parameter values, and final selection of parameter values was made to satisfy target flowrates and power consumption.

1. 서 론

호소수의 낮은 용존산소량(DO, Dissolved Oxygen)은 망간 및 철분의 과다 함유, 물고기 죽음, 악취 및 독성 녹조 성장 등의 문제를 유발한다.⁽¹⁾ 용존산소량은 수표면에서 대기와의 분압 평형에 의해 결정되며, 바람 및 물의 파형 등에 의한 확산 혼합에 의해 저층수의 용존산소량이 증가한다. 저층보다 수표층의 온도가 낮은 겨울철에는 호소수의 대류에 의해 확산 혼합이 증가되어 저층수의 용존산소량이 부족하지 않지만, 수표면이 가

열되어 수표면의 호소수 밀도가 저층보다 낮은 여름철에는 호소수의 대류가 일어나지 않고 호소수의 성층화(stratification)가 이루어져 저층수의 용존산소량은 크게 감소한다.

성층화 된 호소수의 용존산소량을 증가시키기 위해서는 추가 산소의 공급이나 인위적인 혼합이 이루어져야 하며, 이를 위해 수중 폭기 설비를 이용하고 있으나 공기 투입에 매우 많은 에너지 사용이 필요하며, 부상 공기에 의한 순환이 발생하는 영역이 협소하고 침전물의 부상에 의한 호소수 탁도가 증가하는 등 여러 문제점이 있는 실정이다.⁽²⁾ 이에 대한 대안으로 흡입관(draft tube)을 통해 저층수를 수표면으로 공급하여 호소수의 대류 및 확산 혼합을 발생시키는 광역순환 장치가 개발되어 적용되고 있다.⁽³⁻⁹⁾ 본 연구의 대상인 수직 흡입관 및 회전 확산부로 구성된 광역 순환장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 호소수 상부에서 회전체를 이용하여 확산부 외곽으로 수표

* 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부

** 금오공과대학교 환경공학과

*** 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

**** (주)엠에스테크

† 교신저자, E-mail : kyc@kimm.re.kr

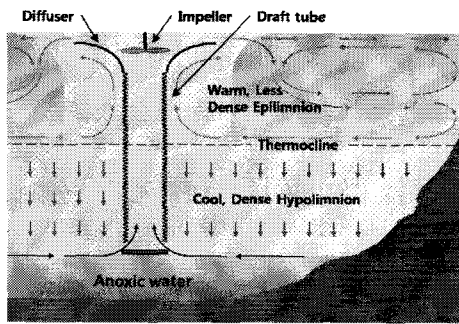


Fig. 1 Circulation of lake water by a vertical upflow impeller and draft tube

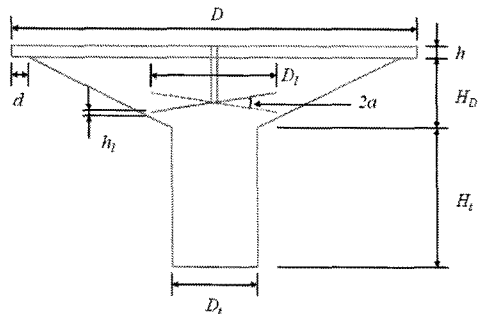


Fig. 2 Schematic diagram of a vertical upflow impeller, diffuser and draft tube

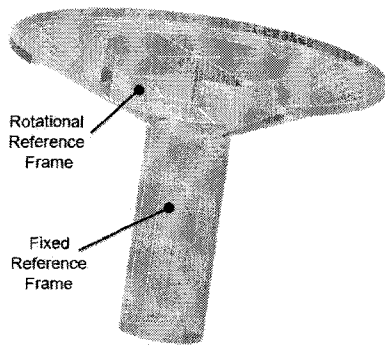


Fig. 3 Multiple reference frames used for numerical simulations

면의 물을 이동시키고 이때 발생하는 압력 차이에 의해 저층수를 수표면으로 끌어올려 대류 순환을 유발하는 장치이다. 적용 대상 호소수의 담수 용량에 따라 흡입관 및 회전확산부로 구성된 광역 순환장치의 순환유량의 조절이 필요하며, 회전 임펠러의 형상 및 회전수, 확산부의 크기 및 확산각 등의 설계변수에 의해 순환유량이 달라진다. 본 연구에서는 회전 임펠러 및 확산부의 크기와 임펠러의 각도 및 회전 속도에 따른 순환유량 및 소요 동력의 변화 특성을 수치해석을 통해 살펴보고자 한다.

Table 1 Design parameters of a vertical upflow impeller, diffuser and draft tube

Case	A	B
D (m)	1.8	2.7
D_t (m)	0.6	0.9
D_i (m)	0.4	0.6
H_D (m)	0.3	0.45
H_i (m)	1.0	1.5
d (m)	0.05	0.075
h (m)	0.05	
h_i (m)	0.03	

2. 수치해석 모델

확산부, 임펠러 및 흡입관으로 구성된 광역 순환장치에 대한 수치해석 대상 영역은 Fig. 2에 도시한 바와 같다. 회전 임펠러와 고정 확산부 및 흡입관의 상호작용을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 회전 임펠러를 포함하는 일부 영역을 회전영역으로 설정하는 MRF (Multiple reference frame) 모델을 이용하였다. 흡입관과 확산부의 유동 해석에는 FLUENT v6.1을 사용하였으며, 3차원 정상상태(steady-state)에서 표준 $k-e$ 난류 모델을 이용하여 배출유량 및 소요 동력을 계산하였다.

수표면에서는 공기의 밀도가 물에 비해 상대적으로 작아 물의 운동에 미치는 저항은 무시할 수 있어⁽⁴⁰⁾ 미끄러짐 경계조건을 적용하였으며, 확산부, 임펠러 및 흡입관의 경계조건으로 점착조건을 적용하였다. 해석에 사용된 설계변수는 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 계산 영역은 Fig. 2에 나타내었다. Case B는 Case A 크기의 1.5 배인 순환장치를 의미하며, 수표면으로부터 확산부 상부의 거리(h)와 임펠러 최저점과 확산부와의 수직 거리(h_i)는 A, B 두 경우에 모두 동일한 값을 적용하였다. 회전 영역과 고정 영역의 격자는 각각 최소 크기가 10 mm와 20 mm인 사면체 격자를 이용하였으며, 계산영역은 총 1,340,820개의 Cell로 구성된다.

임펠러의 각도 a 는 각각 5, 10, 15°에 대해, 임펠러 회전수 M (rpm)은 60~160rpm 범위에서 해석을 수행하였으며, 하나의 경우에 대한 해를 얻는 데에 약 4시간의 계산시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

확산부, 회전 임펠러 및 흡입관의 크기가 다른 Case A, B에 대해 임펠러의 경사 각도와 회전수 변화에 따른 순환유량의 변

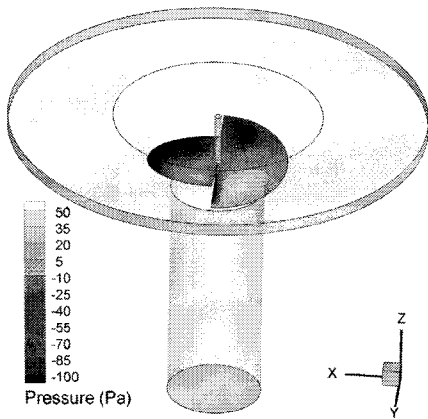


Fig. 4 Static pressure distribution over impeller surface for a Case A of $a = 10^\circ$ and $N = 60$ rpm

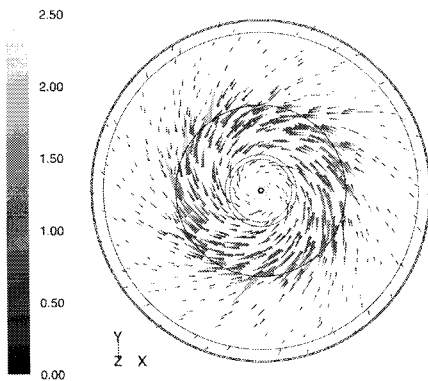


Fig. 5 Velocity component of water surface flow for a Case B of $a = 5^\circ$ and $N = 140$ rpm

화를 살펴보았으며, 이때 임펠러에 작용하는 회전모멘트 $M(N \cdot m)$ 으로부터 소요동력 $P(W)$ 를 식 (1)을 이용하여 산출하였다.

$$P = 2\pi MN/60 \quad (1)$$

회전 임펠러는 시계방향으로 회전하며, 회전 시에 임펠러 표면에 작용하는 압력 분포와 수표면에서의 유속 분포는 각각 Figs. 4와 5에 보이는 바와 같다.

3.1 배출 유량의 변화

확산부 배출부에서의 배출 유량을 계산하여 설계변수에 따른 조건별로 정리하면 Table 2와 같다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 임펠러 회전수가 증가함에 따라 배출 유량이 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 임펠러 경사각이 증가함에 따라 유량이 증가하였다. 임펠러 경사각과 회전수가 동일한 조건에서

Table 2 Mass flowrate for various test conditions

Case	A			B		
	a	5°	10°	15°	5°	10°
N	Q_m , Mass flowrates [ton/min]					
60	1.17	1.37	1.68	4.14	4.44	5.32
80	1.64	1.78	2.14	5.64	5.80	7.24
100	1.90	2.20	2.70	7.29	7.34	9.43
120	2.76	2.61	3.30	8.91	9.09	11.71
140	3.20	3.05	3.94	10.53	10.97	13.99
160	3.33	3.54	4.60	12.10	12.85	16.30

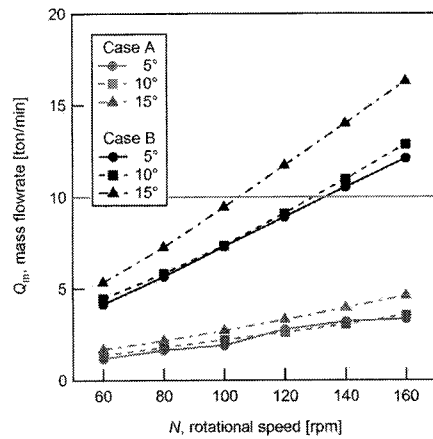


Fig. 6 Changes in Q_m with various conditions

순환장치의 크기가 증가함에 따라 배출 유량이 증가하였으며, 형상비가 1.5배 증가함에 따라 모든 해석 조건에서 약 3.5배 (3.455 ± 0.18)의 배출 유량 증가 효과가 나타났다. 임펠러의 경사각이 15° 인 경우에는 경사각이 각각 5° 와 10° 인 경우에 비해 임펠러 경사각도 증가에 따른 배출유량 증가가 두드러지게 나타났으나, 임펠러 각도가 5° 인 경우와 10° 인 경우의 차이는 상대적으로 크지 않았다.

Case A와 B에 대해, 임펠러 경사각 변화에 따른 배출 유량 변화를 회전수에 따라 도시하면 Fig. 7과 같다. Case A의 경우, 회전수가 120rpm과 140rpm인 경우에 임펠러 각도가 5° 인 경우가 10° 인 경우보다 많은 배출 유량을 나타낸 것을 제외하고 모든 경우에서 임펠러 각도의 증가에 따라 배출 유량이 증가하는 결과를 얻었다. 이때 각도 증가에 따른 최소 경사각 대비 최대 경사각에서의 배출 유량의 증가 비율은 Case A의 경우 약 1.33배(± 0.10), Case B의 경우 약 1.31배(± 0.03)로 나타났다. 회전수 증가에 따른 배출 유량의 증가를 최저 회전수인 조건에서의 유량에 대한 최고 회전수에서의 유량의 비로 나타내는 경우, Case A의 경우에는 약 2.72배(± 0.13), Case B의 경

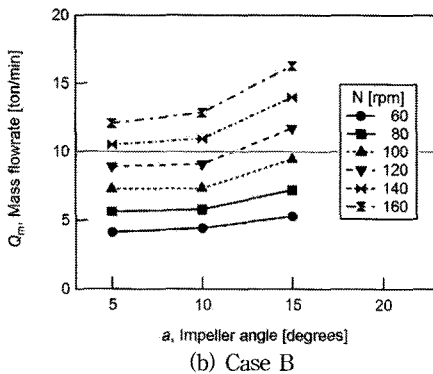
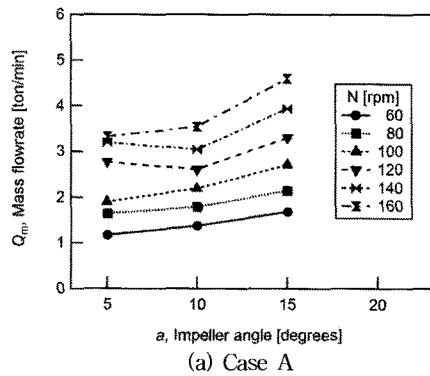


Fig. 7 Changes in mass flowrates Q_m for Cases A and B by changing impeller angles

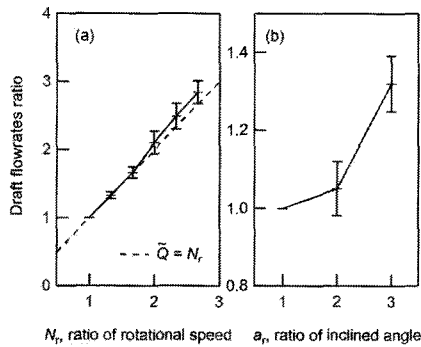


Fig. 8 Relative draft flowrate ratio over ratios of (a) rotational speed and (b) inclined angle of impellers

우 약 2.96배(±0.09)로 나타났다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 흡입관과 회전 확산부로 구성된 광역 순환장치를 이용하여 호소수 순환을 발생시키는 경우, 순환 유량을 증가시키기 위해서는 순환장치의 전체적인 크기를 증가시키는 것이 가장 효과적이며, 회전수 증가에 비해 임펠러 경사각의 영향은 상대적으로 작게 나타났다. 형상 비율(b), 임펠러의 회전수 및 경사각 증가에 따른 배출 유량의 변화를 Case A의 최소 회전수 및 최소 경사각 조건에서의 유량(Q_0)을 기준으로 표현하면 다음과 같다.

$$\bar{Q}(N_r) \equiv Q/Q_0(N_r) = 0.9864 \cdot N_r^{1.0789} \quad (2)$$

$$\bar{Q}(a_r) \equiv Q/Q_0(a_r) = 0.11 \cdot a_r^2 - 0.275 \cdot a_r + 1.17 \quad (3)$$

$$\bar{Q}(b) \equiv Q/Q_0(b) = b^{3.0897} \quad (4)$$

여기서 순환량은 회전수 증가에 비례하고, 임펠러 크기 증가의 3승에 비례하여 증가한다는 일반적인 상사법칙과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 8 (a)에 회전수 증가에 따른 순환량 증가에 대한 일반적인 상사법칙의 관계를 함께 나타냈다.

3.2 소요 동력의 변화

대용량의 호소에 적용하기 위해서 설계변수 조절을 통한 순환유량 증가가 가능하지만, 호소수에 설치하는 장치 특성상 충분한 동력 공급이 원활하지 않은 점을 고려하여 고효율 순환장치의 설계가 요구된다. 이를 위해 각 설계조건에서의 소요 동력의 변화를 살펴보았으며, 각 조건별로 산출한 소요 동력을 Table 3과 Fig. 9에 나타냈다.

Table 3 Power consumption for various test conditions

Case	A			B		
	5°	10°	15°	5°	10°	15°
N	P , power consumption [W]					
60	1.89	2.65	4.67	12.70	18.01	32.54
80	4.23	6.01	9.88	28.78	40.20	70.52
100	7.90	11.09	18.32	53.95	75.55	133.96
120	12.97	18.50	30.97	91.47	127.21	228.82
140	20.42	28.52	48.56	142.01	197.79	360.82
160	30.90	41.63	71.98	208.33	291.15	536.54

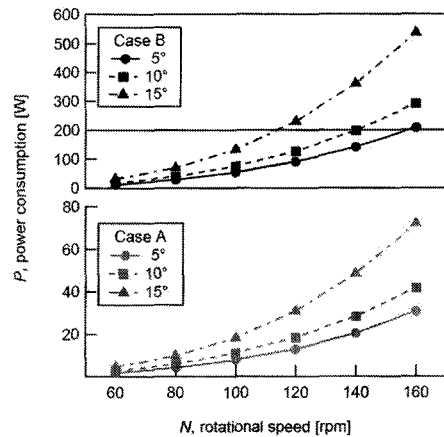


Fig. 9 Changes in power consumptions with various rotational speed of impeller

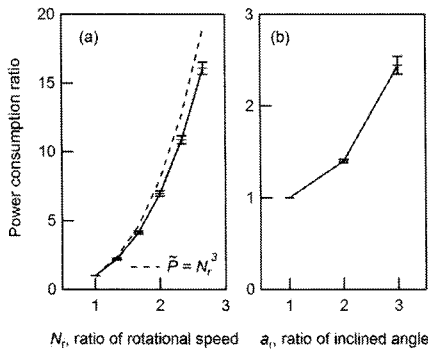


Fig. 10 Relative power consumption ratio over ratios of (a) rotational speed and (b) inclined angle of impellers

임펠러의 회전수와 경사각도가 증가함에 따라 소요 동력은 지수함수 형태로 증가하였다. 최소 회전수 60rpm 조건에서의 소요 동력에 대한 회전수 증가에 따른 소요 동력의 증가 비율 ($N_r = N/M$, $M=60\text{rpm}$)은 임펠러 경사각과 형상 크기가 다른 경우에서도 동일하게 나타났다. 또한 Fig. 10에 나타난 바와 같이, 임펠러 회전수와 크기가 다른 조건에서 임펠러 회전각 증가에 따른 소요 동력 증가 비율도 동일하게 나타났다. 흡입관 및 확산부와 회전 임펠러의 크기 증가에 따른 소요 동력의 증가율은 약 7.0배(6.99 ± 0.25)로 나타났다.

형상 비율(b), 임펠러의 회전수 및 경사각 증가에 따른 소요 동력의 변화를 Case A의 최소 회전수 및 최소 경사각 조건에서의 소요 동력(P_0)을 기준으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tilde{P}(N_r) \equiv P/P_0(N_r) = 0.9723 \cdot N_r^{2.8667} \quad (5)$$

$$\tilde{P}(a_r) \equiv P/P_0(a_r) = 0.323 \cdot a_r^2 - 0.569 \cdot a_r + 1.25 \quad (6)$$

$$\tilde{P}(b) \equiv P/P_0(b) = b^{4.7992} \quad (7)$$

여기서 소요 동력은 회전수 증가의 3승에 비례하고, 임펠러 크기 증가의 5승에 비례하여 증가한다는 일반적인 상사법칙과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 회전수 증가에 따른 소요 동력의 증가가 상사법칙에 비해 다소 적은 것으로 나타났다. Fig. 10 (a)에 회전수 증가에 따른 소요동력 증가에 대한 일반적인 상사법칙의 관계를 함께 나타냈다.

3.3 순환 효율

앞서 살펴본 바와 같이, 임펠러의 회전수와 경사각 및 크기 증가에 따른 배출 유량의 증가에 비해 소요 동력의 증가율이 더 크며, 이를 투입 동력 대비 배출 유량(Q/P)으로 나타내면 Fig. 10과 같이 나타난다. 높은 순환 효율을 얻기 위해서는 보

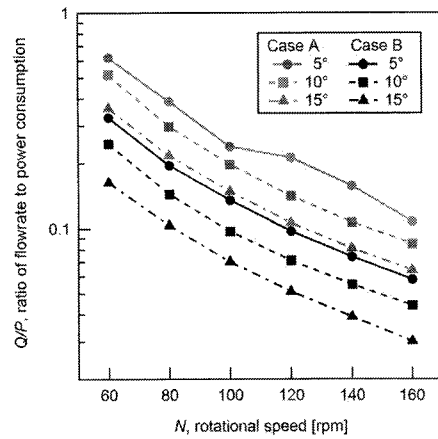


Fig. 11 Draft efficiency at various conditions

다 작은 크기의 경사각이 작은 임펠러를 저속으로 회전시켜야 한다는 결론에 이르지만, 적용 장소에서 요구하는 순환 유량과 공급 가능한 동력이 제한되어 있으므로, 적용 환경에 적합한 운전 조건을 선정해야 한다.

본 연구의 적용처에서 요구되는 광역 순환장치의 경우, 태양전지와 풍력발전기로부터 약 200W의 전력을 공급받을 수 있으며, 최대 10 ton/min 유량으로 호소수를 순환할 수 있어야 한다. 수치해석 결과를 토대로 해당 조건을 만족하는 설계 조건은 Case B의 경우에 경사각 5도인 임펠러가 140 rpm 또는 160 rpm으로 회전하는 경우와 경사각이 10도인 임펠러가 140 rpm으로 회전하는 경우로 한정된다.

4. 결론

이상의 흡입관, 확산부 및 회전 임펠러로 구성된 광역 순환 장치의 설계변수에 따른 배출유량 및 소요 동력의 변화에 대한 수치해석을 통해 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 광역 순환장치의 크기 증가, 임펠러의 회전수 및 임펠러의 경사각 증가에 따라 순환장치의 배출유량이 증가하였으며, 장치의 크기, 회전수, 임펠러 경사각 순으로 많은 영향을 주었다.
- 2) 광역 순환장치의 크기 증가, 임펠러의 회전수 및 임펠러의 경사각 증가에 따라 순환장치의 소요 동력이 크게 증가하였으며, 장치의 크기, 회전수, 임펠러 경사각 순으로 많은 영향을 주었다.
- 3) 광역 순환장치의 크기, 임펠러의 회전수 및 경사각 증가에 따른 소요 동력의 증가율이 배출 유량의 증가율보다 크게 나타났다.

- 4) 투입 동력에 대한 배출 유량의 비율은 광역 순환장치의 크기, 임펠러의 회전수 및 경사각이 증가함에 따라 감소하였으며, 적용 환경에 따라 배출유량과 공급 가능한 소요 동력을 고려한 최적 설계 및 운전 조건 선정이 요구된다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-353-D00015). 본 연구는 지식경제부 부품소재전문기업기술지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kirke, B., and Gezawy, A. E. 1997, "Design and model tests for an efficient mechanical circulator/aerator for lakes and reservoirs," *Water Research*, Vol. 31, pp. 1283~1290
- (2) 박한영, 이동근, 김한일, 2006, "신개념 대류식 호소수 순환장치개발," 2006 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 520~525
- (3) Ridley, J. E., Cooley P., and Steel, J. A. 1966, "Control of thermal stratification in Thames Valley Reservoir," *Proc. Soc. Water Treatment Examination*, Vol. 15/16, pp. 225~244
- (4) Irwin, H. W., Symons, J. M., and Robeck, G. G. 1966, "Impoundment destratification by mechanical pumping," *J. Sanitary Eng. Div., Proc. ASCE Dec. issue*, pp. 21~40
- (5) Steichen, J. M. 1974, *The Effect of Lake Destratification on Water Quality Parameters*, PhD Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK.
- (6) Brown, I. K. 1986, *Review of the Application of Aeration/ Destratification Techniques in Australian Water Storages*, Department of Local Government, Queensland.
- (7) Lamping, J., Worrall, F., Morgan, H., and Taylor, S. 2005, "Effectiveness of aeration and mixing in the remediation of a saline stratified river," *Environmental Science and Technology*, Vol. 39, No. 18, pp. 7269~7278
- (8) Lawson, R., and Anderson, M. A. 2007, "Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake," *Water Research*, Vol. 41, No. 19, pp. 4457~4467
- (9) Hill, D. F., Vergara, A. M., and Parra, E. J. 2008, "Destratification by mechanical mixers: Mixing efficiency and flow scaling," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 12, pp. 1772~1777
- (10) Terzuoli, F., Galassi, M. C., Mazzini, D., and D'Auria F. 2008, "CFD Code Validation against Stratified Air-Water Flow Experimental Data," *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 8, Article ID, 434212, doi: 10.1155/2008/434212