

축제식 양식장에서 수차에 의한 순환 모델링

강 윤 호

여수대학교 창업보육센터 여수테크

Modeling Paddlewheel-Driven Circulation in a Culture Pond

Yun Ho KANG

Yosutech, Yosu National University Business Incubator,
Yosu 515-749, Korea

Paddlewheel-driven circulation in a culture pond has been simulated based on the depth integrated 2 dimensional hydrodynamic model. Acceleration by paddlewheel is expressed as shaft force divided by water mass discharged by paddlewheel blades. The model has been calibrated and applied to culture ponds as following steps:- i) The model predicted velocities at every 10 m along longitudinal direction from the paddlewheel. The model was calibrated comparing the results with the measured values at mass correction factor α and dimensionless eddy viscosity constant γ , respectively, in a range 15~20 and 6. ii) Wind shear stress was simulated under conditions of direction 0°, 90° and 180° and speed 0.0, 2.5, 5.0 and 7.5 m/s. Change rate of current speed was <1% at wind in parallel or opposite direction to the paddlewheel-driven jet flow, while 4% at orthogonal angle. iii) The model was then applied to 2 culture ponds located at the Western coast of Korea. The measured and predicted currents for the ponds were compared using the regression analysis. Analysis of flow direction and speed showed correlation coefficients 0.8928 and 0.6782 in pond A, 0.8539 and 0.7071 in pond B, respectively. Hence, the model is concluded to accurately predict circulation driven by paddlewheel such that it can be a useful tool to provide pond management strategy relating to paddlewheel operation and water quality.

Key words: Pond circulation, Paddlewheel, Numerical model, Mass correction factor, Wind effects

서 론

축제식 양식장 호지의 노령화를 방지하기 위해서는 수차를 이용한 포기과 순환, 저질준설, 저질산화, 교환율증가와 오염물 제거를 위한 호지설계 개선 등의 공학적 방법이 있다 (Rogers, 1989). 이상의 여러 가지 방법 중 수차를 이용하여 호지에 포기 및 순환 작용을 활성화하여 수질과 저질을 개선하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 포기는 호지의 수괴와 저질의 용존산소 농도에 직접적으로 영향을 미치며, 수질과 저질을 개선하는 효과를 갖는다. 순환은 DO가 공급된 수체를 멀리 보내어 DO가 낮은 곳의 수체와 혼합함으로써 호지 전체의 DO농도를 증가시킨다. 이와 같은 방법으로 수온성층과파괴, DO의 연직혼합, 퇴적물두께의 감소, 수질개선, 그리고 양식생물을 위한 적당한 서식처를 제공한다. 따라서, 포기과 순환은 수질 및 저질을 개선하는데 탁월한 효과가 있는 것으로 보고되었다 (ASCE, 1979). 이러한 수차의 일차적 기능은 포기기능인데, 산소전달효과에 대해서는 이미 많은 연구가 이루어졌다 (Ahmad and Boyd, 1988; ASCE, 1983; Boyd and Watten, 1989; Chamberlain, 1988; Fast et al., 1999; Rogers, 1989; Rogers and Fast, 1988).

반면, 수차의 순환기능에 대해서는 아직 활발한 연구가 진행되지 않은 형편이며 유속관측, 혼합속도, 적정위치 등에 대해서 다음과 같은 연구가 보고된 바 있다. 수차가 물을 밀어내는 효과, 즉 순환기능 또는 펌핑속도를 유량 혹은 유속을 측정하여 결정할 수

있는데, Price et al. (1973)은 수차로부터 일정거리에서 유속계를 이용하여 유속을 관측한 바 있다. Shell (1979)은 프로펠러 분사기의 펌핑속도를 웨어와 펌핑곡선을 이용하여 측정한 바 있다. Boyd and Martinson (1984)은 호지에서 염료실험을 통해 수차에 의한 혼합속도를 관측하였다. 관측은 염료를 수차 전방에 투하하고 호지 전 영역에서 몇 군데 지점의 전도도를 측정하여 전도가 모두 일정한 값을 보일 때까지의 시간을 측정하여 혼합속도를 관측하였다: $MR=AD/PT$. 여기서 MR 은 혼합속도 (m^3/kwH), A 는 호지면적, D 는 수심, P 는 소비전력 (kw) 그리고 T 는 완전혼합시간 (H : hour)이다. Boyd and Stone (1987)은 직각형 호지 (0.4 ha)에서 수차의 적정위치를 결정하기 위해 플라스틱 병에 물을 채우고서 수차 전방에 투하한 후 이들의 궤적을 기록하였다. 실험결과 최적위치는 직사각형 호지의 네 벽 중 긴 방향의 중앙이며 수차의 방향은 긴 방향에 직각으로 향하도록 하는 것이고, 가장 효율이 낮은 위치는 수차를 모서리에 위치하고서 반대편 모서리를 향해 대각선 방향으로 가속도를 발생시키는 것이라 보고하였다. Kang (2001)은 축제식 대하양식장에서 한 대의 수차를 작동할 때와 변장비가 서로 다른 2곳의 호지에서 수차를 2대 그리고 4대 작동할 때 각기 유속을 관측하여 보고한 바 있다. 실험결과 수차 1대의 성층방지 (5 cm/s)에 따른 유효거리는 수차로부터 33 m, 유기물제거와 용존산소의 분산 및 저질교란방지 (7.6 cm/s)에 따른 유효거리는 25 m 그리고 입자성물질 침강방지 (15.2 cm/s)에 따른 유효거리는 16 m인 것으로 보고하였다. 또한 변장비가 서로 다른 2곳의 호지에서 수차 2대와 4대를 작동하면서 21~23개 지점에서 유속을 관측하여 본 결과, 수차의 수와 관계없이 호지중앙

의 유속범위는 부분적으로 성층을 방지하기에 충분치 않을 뿐더러, 유기물 제거 혹은 입자성물질의 침강을 방지하기에도 미약하다고 판단하였다.

다른 한편, 수차의 순환기능에 대한 수치모형실험은 거의 이루어진바가 없으며 단지 다음과 같은 연구결과가 보고된 바 있다. Peterson (1999, 2000)과 Peterson et al. (2000)은 직사각형 호지에서 유속을 관측하였고, 이를 FIDAP CFD 해석패키지를 이용한 AUTOPOND를 개발하여 수차와 프로펠러 분사기에 의한 유속을 계산하여 비교한 바 있다. 모형은 호지의 기하학적 모양과 수차의 특성을 고려할 수 있으며 유속과 바닥퇴적물에 미치는 전단력에 근거하여 퇴적물상태를 6가지 형태로 분류하였다. 모형은 3차원 Reynolds 방정식을 사용하였고, 이때 Reynolds 항들을 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산하였다. 지배방정식에서 수차에 의한 운동량을 질량력으로 대입하였다. 수차에 의한 가속도는 축력을 수차날개에 의해 밀려간 유체의 질량으로 나눈 값으로 산정하였다.

본 연구에서는 현재 우리나라의 축제식 고밀도 대하양식장에서 널리 사용되는 수차의 순환 기능에 대한 모델링에 중점을 주고자 한다. 기존의 2차원 수심적분 수리역학 모형에 수차에 의한 질량력을 포함하여 수치모형을 개발하였다. 이를 이용하여 수차의 순환효과를 재현하였고 순환에 대한 해석을 시도하였다. 모형실험에서는 유량보정계수 α 와 무차원와점성상수 γ 의 민감도실험을 통해 관측값과 비교하여 모형을 보정하였다. 특히, 바람에 의한 전단효과가 순환에 미치는 영향을 파악하였으며, 양식호지 2곳에서 수차 4대를 운영할 때 발생하는 유속구조에 대해 실험하였다. 모형의 결과는 유속관측값을 비교적 잘 재현하였다.

재료 및 방법

1. 양식장

호지에서 수차와 바람에 의한 순환효과를 해석하고 이를 수치모형으로 실험하기 위해 전북 고창군 부안면 송현리에 위치하는 양식장에서 관측된 유속자료를 이용하였다 (Kang, 2001). 양식장은 9개의 사육호지와 2개의 저장호지로 구성되어 있으며, 본 실험에 사용된 사육호지는 Fig. 1의 A, B와 F이다. 호지는 사각형으로서 직각의 모서리를 갖으며 호지벽의 경사는 사육이 시작되는 4월에는 약 45°이나 사육이 끝나는 10월에는 부분적으로 경사가 약 30° 정도까지 완만한 형태로 변한다. 호지벽의 토양은 주로 니질로 구성되어 있어, 강우시 심하게 침식되어 호지내로 유입되는 경향을 보인다. 호지의 바닥은 주로 니질로 구성되어 있으며, 수심은 배수구가 있는 구역이 가장 깊으며 대각선으로 반대편 구역이 가장 높다. 양쪽의 수심차는 약 30~50 cm에 달한다. 그리고 양쪽을 연결하는 대각선을 따라 골을 파서 바닥에 침강하는 오염물이 배수구로 이동하도록 되어있다. 본 연구에서 사용된 호지 A, B와 F의 변장비 (길이/폭)는 각기 1.05, 0.68 그리고 0.48이다.

2. 수 차

본 연구에서 사용되는 수차는 대만산 FORZET Model 201로서 모터에 공급되는 전원은 1.5 kW (2 HP)이며, rpm은 1,600이며, 수

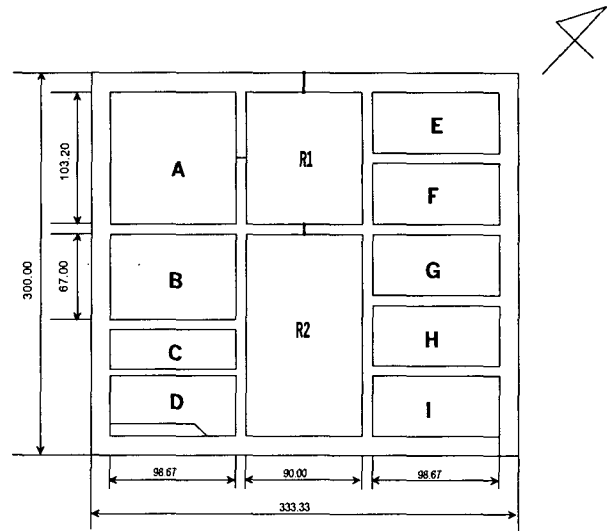


Fig. 1. Schematic diagram of culture ponds.

차날개의 rpm은 모터에 대해 14:1의 비율을 갖는다. 수차는 물에 뜨게 하기 위해 부양판을 갖고 있으며 호지에 설치시에는 말뚝을 이용하여 고정한다 (Fig. 2). 전면에서 보았을 때, 수차의 높이는 87 cm이고, 폭은 217 cm이다. 중앙부에는 모터가 내장된 몸체가 있고, 아래에는 3개의 부양판이 염에 산화되지 않는 철구조물로 연결되어 있다. 부양판은 31×20×180 cm의 크기를 갖으며, 모서리는 직각이 아니라 유선형으로 되어 있다. 중앙 모터에 연결된 축을 따라 4개의 허브가 고정되어 있고, 각각의 허브에 8개의 날개가 부착되어있다 (Fig. 3). 날개와 허브의 재질은 플라스틱이며 날개의 규격은 가로, 세로가 18×21 cm이며, 원형의 구멍이 4개씩 4줄로 나란히 뚫어져 있어 회전시 물과 충돌하여 공기방울을 발생시켜 포기가 잘 이루어지도록 함과 동시에 물을 전방으로 밀어내도록 고안되었다.

3. 지배방정식

호지에서 수차에 의한 순환을 재현하기 위해 본 연구에서 사용된 수리역학 모형의 지배방정식은 Newtonian 비압축성유체에 관한 질량 및 운동량보존방정식이다. 층류에서 운동량보존방정식인 Navier-Stokes 방정식을 난류에서 전개하기 위해 순간값을 평균값과 변동값으로 분해하였고, 이때 발생하는 Reynolds항들을 시간에 대해 평균한 값을 사용하여 3차원 Reynolds 방정식을 수심에 대해 적분한 수심적분방정식을 사용하였다 (Schlichting, 1979). 연직방향의 가속도는 중력보다 작기 때문에 무시하였고, 정압력조건을

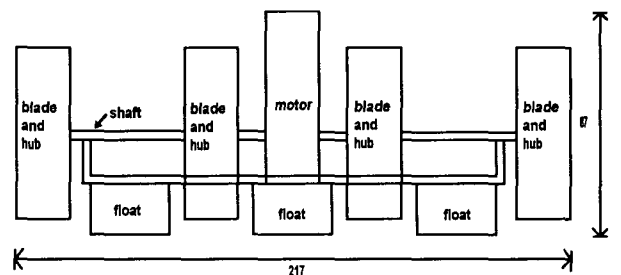


Fig. 2. Front view of paddlewheel (unit: cm).

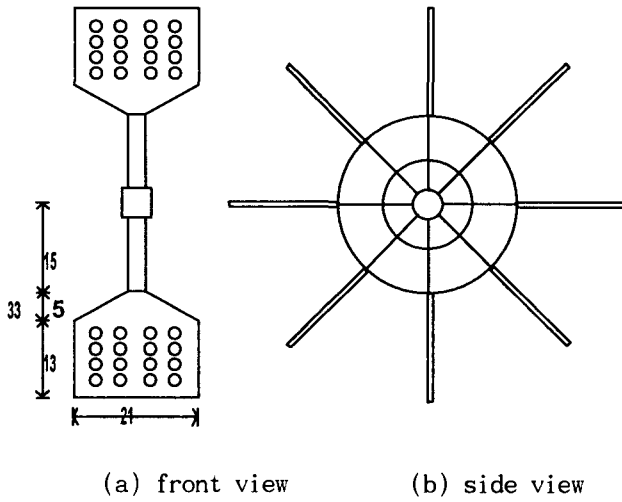


Fig. 3. Blade and hub of paddlewheel (unit: cm).

가정하였고, 그리고 연직방향의 Reynolds 응력은 Boussinesq 근사로 표현하였다 (Rodi, 1984). 수차에 의한 스트러스트효과를 질량력으로 간주하고서 가속도로 환산하여 운동량방정식에 포함시켰다 (Peterson et al., 2000). 수심적분 연속방정식과 운동량방정식은 x-와 y-방향에서 각기 아래와 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial \beta HU^2}{\partial x} + \frac{\partial \beta HUV}{\partial y} = HFpw_x - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{bx}}{\rho} + \varepsilon H \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial \beta HUV}{\partial x} + \frac{\partial \beta HV^2}{\partial y} = HFpw_y - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{by}}{\rho} + \varepsilon H \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right]. \quad (3)$$

위 식에서 η 는 수면변위; t 는 시간; x 와 y 는 평면직각좌표; U 와 V 는 x -와 y -방향에서 수심평균 유속성분; H 는 전수심; β 는 연직방향 유속단면의 운동량보정계수; Fpw_x , Fpw_y 는 x -와 y -방향에서 수차에 의해 발생한 단위질량당 질량력; ρ 는 유체밀도; τ_{xx} , τ_{yy} 는 x -와 y -방향에서 바람에 의한 전단응력; τ_{bx} , τ_{by} 는 x -와 y -방향에서 바닥의 마찰전단응력; ε 는 수심평균 와점성계수이다 ($=\gamma U^*H$; γ 는 무차원와점성상수, U^* 는 전단속도).

연직유속단면을 칠승법칙으로 가정하였을 때 운동량보정계수는 1.016이다. 그러나, 바람에 의한 전단효과를 고려할 경우, 연직유속단면을 포물선으로 가정할 수 있으며 (Koutitas and Gousidou-Koutita, 1986):-

$$u = \left[\frac{3C_x}{4} - \frac{3U}{2} \right] \left[\left(\frac{h+z}{h+\xi} \right)^2 - 1 \right] + C_x \left[\left(\frac{h+z}{h+\xi} \right) + 1 \right] \quad (4)$$

여기서, $C_x = H\tau_{sw}/\rho v$ 이며 v 는 표면에서 동점성계수이다. 이러한 경우 이류가속도를 아래와 같이 보정해 주어야 하며 (Falconer and Chen, 1991), β 는 1.2가 된다.

이류보정 =

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_x q_x}{20} + \frac{C_x^2 H}{120} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{C_y q_y}{40} + \frac{C_x q_y}{40} + \frac{C_x C_y H}{120} \right] \quad (5)$$

y 방향의 운동량 방정식에서도 유사하게 적용된다. 바람에 의한 표면의 전단응력은 다음과 같이 주어진다:-

$$\tau_{xx} = \rho_a C_w W^2 \cos \phi, \quad \tau_{yy} = \rho_a C_w W^2 \sin \phi \quad (6)$$

여기서, ρ_a 는 공기밀도, W 는 풍속, ϕ 는 풍향, 그리고 C_w 는 공기와 물의 저항계수로서 Wu (1969)에 의한 경험식이 널리 사용된다:-

$$\begin{aligned} C_w &= 0.00125 \times W^{-0.2} \text{ for } W < 1 \text{ m/s,} \\ C_w &= 0.0005 \times W^{-0.5} \text{ for } 1 \leq W < 15 \text{ m/s,} \\ C_w &= 0.0026 \text{ for } W \geq 15 \text{ m/s.} \end{aligned} \quad (7)$$

바닥마찰응력은 2차 마찰법칙에 의해 표현할 수 있다:-

$$\tau_{bx} = \rho g U \sqrt{U^2 + V^2} / C^2, \quad \tau_{by} = \rho g V \sqrt{U^2 + V^2} / C^2 \quad (8)$$

여기서, Chezy 조도계수는 $30 \sim 100 \text{ m}^{0.5} \text{ s}^{-1}$ 의 범위에서 상수로 정할 수 있으나, 본 연구에서는 Colebrook-White 방정식을 사용하여 계산하였다.

수차에 의한 가속도는 축력을 단위시간당 수차의 모든 날개에 의해 운반되는 유체의 질량으로 나누어 결정한다 (Peterson, 2000):-

$$Fpw = \frac{T}{\rho V_b} \quad (9)$$

여기서, T 는 축력 (단위: N), V_b 는 수차에 의해 운반되는 유량 ($=\alpha \cdot rps \cdot NPw \cdot NBPPw \cdot V_b$)이다. 여기서, α 는 유량보정계수, rps 는 무차원회전수, NPw 는 수차의 수, $NBPPw$ 는 수차당 날개수, V_b 는 회전시 날개 1개가 물과 만나는 체적 ($=A \times W_w$; A 는 회전시 날개와 물과 만나는 부체적의 단면적이며 W_w 는 날개의 너비)이다.

지배방정식에 대한 유한차분식은 시간증분 구간을 두 개의 가상구간으로 나누어 두 번의 계산과정을 수행하는 교호방향음해법 (Alternating Direction Implicit; Smith, 1985)을 사용하여 표현하였다. 전반시간격자 ($n\Delta t \sim n+1/2\Delta t$)에서 수위와 x -방향의 수심적분 유속성분은 음해법으로 y -방향의 유속성분과 수위의 y -방향 도함수는 양해법으로 구하도록 하였다. 이때 q_x 와 η 를 삼중대각행렬에서 Thomas algorithm을 이용해 전개할 수 있다. 후반시간격자 ($n+1/2\Delta t \sim n+1\Delta t$)에서도 위와 마찬가지로 전개하여 q_y 와 η 를 구한다.

4. 수치모형실험

본 연구에서 개발된 수치모형을 보정 및 검증하고 바람에 의한 효과를 파악하기 위해 아래와 같은 수치실험을 실행하였다. 특히, 유속관측값으로는 서해안 대하양식장에서 획득한 유속관측 자료를 이용하였다 (Kang, 2001).

i) 수차 1대에 의한 유속구조

양식호지에서는 일반적으로 여러 대의 수차를 동시에 작동하여 포기 및 순환효과를 거두고 있다. 수차에 의한 순환효과를 수치모형실험으로 재현하고 모형을 보정하기 위해 가장 먼저 수차 1대에

의한 효과에 대해 실험을 하였다. 유속관측은 수차로부터 직선거리 10 m씩 50 m까지 표층, 중층 그리고 저층에서 획득한 자료를 연직방향으로 수심 평균한 값을 이용하였다 (Kang, 2001). 수치모형실험을 위해 양식호지 F (Fig. 1)를 계산영역으로 제한하였다. 수심은 실제 호지와 같은 기울기를 갖도록 하여 수차가 위치하는 지점과 유속이 관측된 지점에서 호지와 동일한 수심으로 제한하였다. 수치모형 실험의 제반 기본조건은 다음과 같다: $\Delta x = \Delta y = 2.5$ m, $\Delta t = 1$ s, 그리고 $k_s = 20$ mm.

ii) 바람효과에 의한 유속구조

바람에 의한 전단효과를 파악하기 위해 수치모형실험을 실시하였다. 풍속은 서해안에서 관측되는 기상자료를 근거로 평균값과 최대값이 포함되는 구간을 고려하여 2.5, 5.0 그리고 7.5 m/s 세 가지 경우를 설정하였다. 각 경우에 대해 풍향은 수차가 물을 밀어내는 방향을 진북이라 하였을 때 시계방향으로 0°, 90° 그리고 180° 세 방향으로 정하였다. 실험결과는 수차로 인한 호지내 순환이 일정한 구조를 보이는 시간 (모형수행 시작 후 3시간)에, 수차로부터 10 m씩 80 m까지 직선방향에서 예측된 유속을 바람이 없는 경우와 비교하였다. 이때 바람의 전단효과에 의한 평균 유속변화율은 다음과 같이 구하였다: $\text{변화율} = 1/N \sum |U - U'|/U$. 여기서, U 는 바람 응력이 없을 때 속력, U' 는 바람이 미칠 때 속력 그리고 N 은 비교지점의 수이다. 수치모형 실험의 제반 기본조건으로 $\Delta x = \Delta y = 2.5$ m, $\Delta t = 5$ s, $\alpha = 15$, $\gamma = 6$ 그리고 $k_s = 20$ mm이며, 계산영역은 105×102.5 m (42×41격자구조), 수심은 1.2 m로 일정하다고 가정하였다.

iii) 수차 4대에 의한 유속구조

양식호지 A와 B에서 수차 4대에 의해 발생하는 순환효과를 제한하였다 (Fig. 1). 수치모형 실험의 제반 기본조건으로 $\Delta x = \Delta y = 2.5$ m, $\Delta t = 5$ s, $\alpha = 15$, $\gamma = 6$ 그리고 $k_s = 20$ mm이며, 호지 A의 계산영역은 103.2×98.7 m (43×42격자구조)이며 호지 B의 계산영역은 67.0×98.7 m (29×42격자구조)이다. 바람에 의한 전단효과를 고려하기 위해 호지에서 가장 가까운 기상관측소인 부안 관측소에서 유속관측 당일 관측시간동안 (2000년 9월 3일 오전 9~오후 5시)의 대기자료 (시간평균 풍속 3 m/s, 풍향 NNW)를 모형의 실험조건으로 입력하였다.

결 과

1. 수차 1대에 의한 유속구조

첫 번째 실험에서는 유량보정계수 α 의 민감도를 실험하였다. α 를 1, 5, 10, 15, 20, 25 그리고 30으로 변화해 가면서 수차로부터 거리별 유속구조를 파악한 결과를 Table 1에 정리하였다. 실험결과 α 가 15에서 25의 범위일 때, 수차로부터 10 m 지점의 유속과 비교적 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 그 외의 값들은 관측값에 비해 상당히 크거나 작게 계산되었다. 한편, α 가 15에서 25의 범위일지라도 거리가 멀어짐에 따라 관측된 유속은 급격히 감소함에 비해 계산된 유속은 완만한 경사를 보였으며, 관측값보다 다소 크

Table 1. Sensitivity analysis of α (unit: m/s)

		Distance (m)					
		0	10	20	30	40	50
Measured	Surface	·	0.25	0.11	0.06	0.03	·
	Middle	·	0.27	0.12	0.06	0.04	·
	Bottom	·	0.26	0.11	0.05	0.02	·
	Mean	·	0.26	0.11	0.06	0.03	·
Predicted (α)	1	1.26	0.94	0.77	0.71	0.52	0.43
	5	0.57	0.49	0.34	0.30	0.19	0.15
	10	0.40	0.35	0.23	0.19	0.12	0.10
	15	0.33	0.28	0.19	0.17	0.11	0.09
	20	0.28	0.23	0.18	0.12	0.11	0.09
	25	0.25	0.21	0.17	0.13	0.11	0.08
	30	0.23	0.20	0.15	0.13	0.10	0.08

게 계산되었다. 다음 단계에서 첫 번째 실험결과를 근거로 α 를 15와 20으로 결정하고서, 무차원와점성상수 γ 를 1.2, 3, 6, 12와 18로 주고서 γ 에 대한 민감도를 실험하여 보았다. 수차로부터 거리별 유속구조를 파악한 결과를 Table 2에 정리하였다. 실험결과 α 가 15와 20일 때, γ 는 6인 2가지 경우가 관측값과 가장 유사한 유속 범위를 나타냈다. 그 외의 값들은 관측값에 비해 상당히 차이를 나타냈다. 그러나 실험결과를 20 m를 기준으로 20 m 전에서는 관측값보다 작게 그리고 20 m 후에는 관측값보다 다소 크게 계산되었다 (Fig. 4).

Table 2. Sensitivity analysis of α and γ (unit: m/s)

α	γ	Distance (m)					
		0	10	20	30	40	50
15	1.2	0.33	0.28	0.19	0.17	0.11	0.09
	3	0.32	0.23	0.15	0.13	0.10	0.08
	6	0.31	0.18	0.12	0.09	0.05	0.03
	12	0.29	0.14	0.07	0.04	0.02	0.01
	18	0.27	0.11	0.05	0.02	0.01	0.00
20	1.2	0.28	0.23	0.18	0.12	0.11	0.09
	3	0.28	0.20	0.14	0.11	0.09	0.07
	6	0.27	0.16	0.10	0.08	0.04	0.02
	12	0.25	0.12	0.06	0.03	0.01	0.01
	18	0.24	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00

2. 바람효과에 의한 유속구조

풍향이 0°인 경우 즉, 바람이 수차가 물을 밀어내는 방향과 정반대일 때, 풍속증가 (2.5~7.5 m/s)로 인한 유속변화는 0.76%에서 0.99%인 반면, 풍향이 180°인 경우 유속변화는 0.29%에서 0.65%이었다 (Table 3). 그리고 바람이 수차에 의한 흐름에 직각인 90°로 부는 경우 유속변화는 0.57%에서 3.85%까지 증가한 것으로 계산되었다. 바람에 의한 흐름구조의 평면적 특성을 알아보기 위해 바람이 불지 않는 경우 및 90° 두 가지 조건에 따른 유속분포 벡터도를 Fig. 5와 6에 도시하였다. 바람이 없는 경우 수차에 의한 제트류 좌우에서 와류의 위치와 크기는 대칭적으로 나타났으나, 바람이 부는 방향에 따라 와류의 위치는 이동되었으며 순환구조는

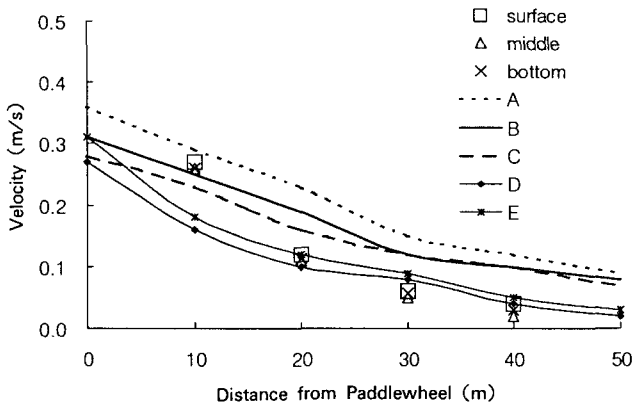


Fig. 4. Comparison of the measured (surface, middle and bottom) and predicted velocities along longitudinal direction from paddlewheel (A- $\alpha=15$, $\gamma=1.2$; B- $\alpha=20$, $\gamma=1.2$; C- $\alpha=25$, $\gamma=1.2$; D- $\alpha=15$, $\gamma=6$; E- $\alpha=20$, $\gamma=6$).

Table 3. Change rate of velocity at various wind speeds compared to those without wind effects (unit: %)

Direction	Wind speed (m/s)			
	2.5	5.0	7.5	mean
0°	0.76	0.91	0.99	0.89
90°	0.57	1.86	3.85	2.09
180°	0.29	0.57	0.65	0.50

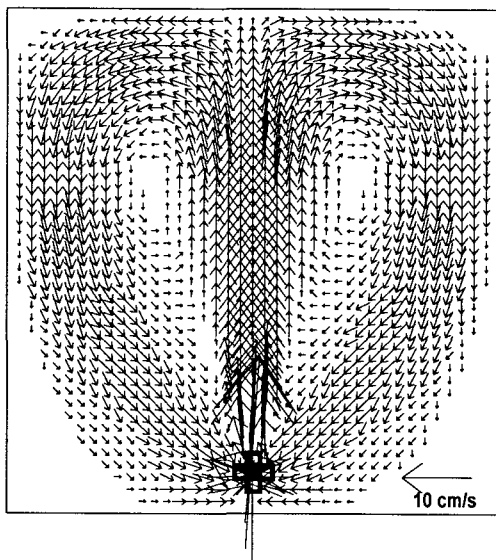


Fig. 5. Flow vector diagram with no wind (cross: paddlewheel, maximum velocity: 0.28 m/s).

바람의 영향을 뚜렷하게 보여주었다.

3. 수차 4대에 의한 유속구조

수차순환모형을 대하양식장의 호지 A와 B (Fig. 1)에 적용하였고, 그 결과를 관측자료와 비교하였다. 먼저 호지 A의 경우 유속

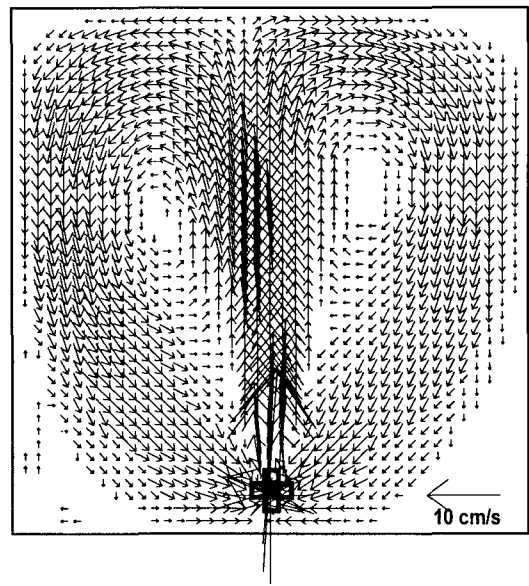


Fig. 6. Flow vector diagram with wind speed 7.5 m/s at direction 90° (cross: paddlewheel, maximum velocity: 0.28 m/s).

장을 Fig. 7과 같이 재현하였다. 선형회귀해석을 실행하여 계산값과 관측값의 상관관계를 해석하였다. 이때 관측값은 21개 지점의 표층, 중층 그리고 저층에서 측정된 유속과 유향을 수심에 대해 평균한 값으로 정의하였다. 해석결과 유향의 경우, 회귀곡선의 상관계수는 0.8928이며 기울기는 0.9875이다 (Fig. 8). 유속의 상관계수는 0.6782이며 회귀곡선의 기울기는 0.8294이다 (Fig. 9). 호지 B의 경우 유속장을 Fig. 10와 같이 재현하였으며, 회귀해석의 결과 유향의 상관계수는 0.8539, 기울기는 0.9401이며 유속의 상관계수는 0.7071, 기울기는 0.9383이다 (Figs. 11 and 12).

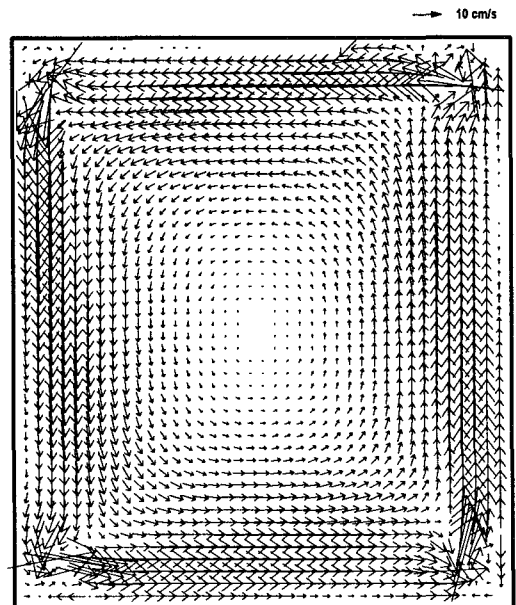


Fig. 7. Predicted circulation vector diagram for pond A.

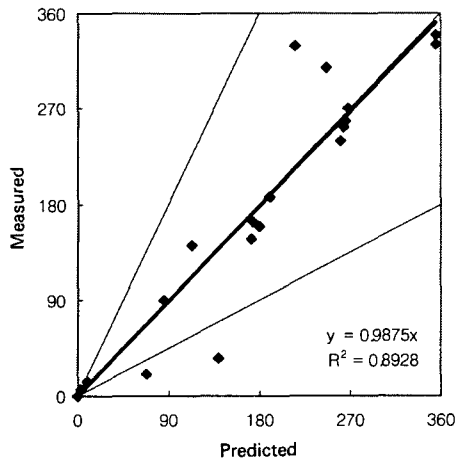


Fig. 8. Comparison of flow direction between the measured and predicted at pond A with 4 paddlewheels operation.

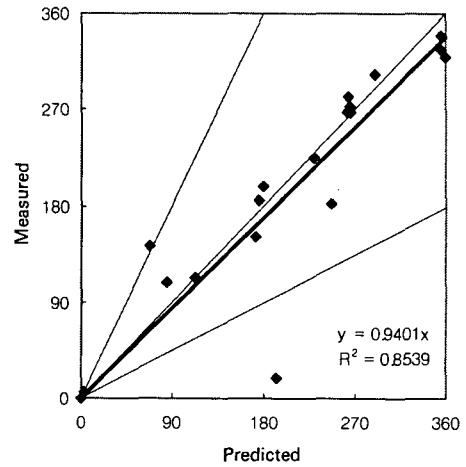


Fig. 11. Comparison of flow direction between the measured and predicted at pond B (unit: degree).

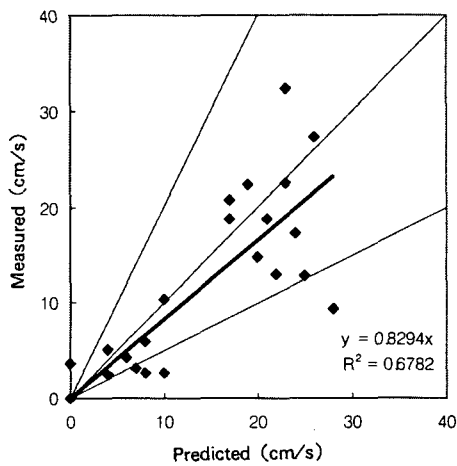


Fig. 9. Comparison of magnitude of velocity between the measured and predicted at pond A.

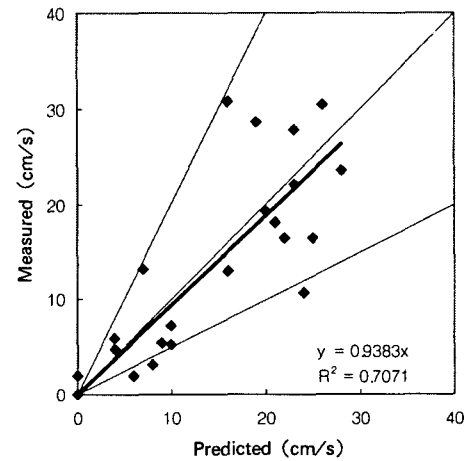


Fig. 12. Comparison of flow speeds between the measured and predicted at pond B.

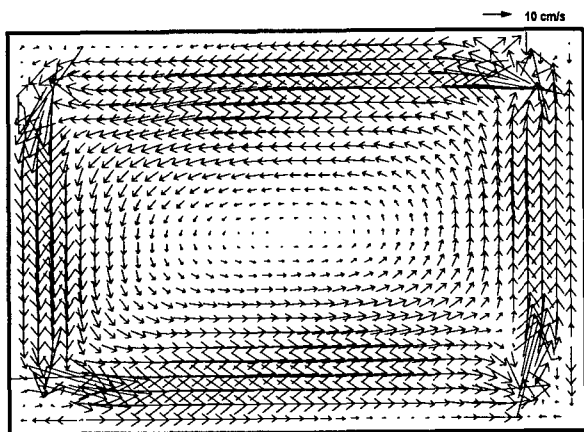


Fig. 10. Predicted circulation vector diagram for pond B.

고찰

수차의 날개에 의해 운반되는 유량은 날개가 밀어내는 유량이라고 할 수 있다. 유량측정은 현장이나 실내 실험수조에 웨어를 설치하거나 유속을 측정하여 결정할 수 있다 (Price et al., 1973; Shell, 1979). 그러나 본 연구에서는 운반되는 유량을 수차 회전시 날개가 통과하는 물의 체적으로 산정하였고, 관측유속과의 보정을 위해 유량보정계수 α 를 제시하였다. 유량보정계수는 본 연구에서 처음 제시되었으며, 관측자료가 없거나 관측이 용이하지 않을 경우 매우 효과적으로 사용할 수 있다. 수차가 물에 부딪치면서 발생하는 물거품, 난류와 바닥전단 그리고 이로 인한 압력경사와 다양한 척도의 난류에너지 소산 등에 관한 복잡한 현상을 수치실험에서 단순하게 처리할 수 있다는 장점이 있다. 민감도실험에서 α 는 15~20 사이가 적당한 것으로 나타났다. 그러나 수차모형의 결과가 거리증가에 따라 매우 급하게 감소하는 유속구조를 정확하게 재현하지 못하고 다소 완만한 기울기를 보였다 (Fig. 4). 그 이유는

본 모형에서 Reynolds 응력을 Boussinesq 근사로 표현하였기 때문에, 수차에 의해 발생하는 복잡한 난류특성을 정확히 재현하는데 제약이 따른다고 사료되었다. 비록, two-equation 모형이 zero-equation 모형에 비해 계산비용이 큰 만큼 정밀도 향상이 크지 않다고 보고된 바 있으나, 향후 보다 안정되고 정밀한 유속장 재현을 위해 two-equation 모형을 이용해야 할 것으로 생각되었다 (Rodi, 1983).

바람에 의한 전단효과를 실험하여본 결과 바람의 방향이 수차의 방향과 평행하거나 정반대일 경우 유속변화는 1% 이하이며, 수차에 의해 발생된 제트류 좌우에 대칭으로 형성되는 와류의 형태와 위치는 바람이 없을 경우와 유사하게 나타났다. 그러나 바람이 제트류에 직각으로 향할 경우 제트류 좌우의 와류는 풍향에 의해 위치가 뚜렷이 바뀌며, 유속은 약 4%까지 감소하는 것으로 나타났다. 수치실험에서 풍향에 따라 유속변화가 다르게 나타나는 것은 단순히 바람응력 한가지의 결과가 아니라 호지의 기하학적 평면구조 혹은 변장비에 따른 여러 가지 효과가 복합되어 나타나는 것으로 생각되었다. 예를 들어 호지의 경계가 무한하다고 가정하였을 때, 제트류에 동반하는 와류의 형태는 본 실험조건에 따른 결과와는 달리 매우 작은 규모로 나타날 것이며 변화 또한 미약할 것으로 사료되었다. 7.5 m/s의 풍속에 의한 유속변화 4%가 오직 바람응력의 효과라고 가정할 경우, 호지에서 관측된 평균 유속 10 cm/s (Kang, 2001)에 대해 4%는 0.4 cm/s이며 이 값은 매우 미약하다고 할 수 있다. 따라서 호지에 미치는 바람응력 자체의 효과는 미약하나 호지의 기하학적 특성과 관련한 와류형성 기구에 대해서는 무시할 수 없는 것으로 생각되었다.

호지 A와 B의 유속구조는 Fig. 7과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 호지 4곳 구석에서 작동하는 수차가 일으키는 강한 제트에 의해 호지의 중앙에 생성되는 와류라고 정의할 수 있다. 수차의 설치위치와 물을 밀어내는 방향에 의해 호지 A와 B에서는 반시계방향의 와류가 형성된다. 수차에 의한 제트 운동량은 수차가 물을 밀어내는 방향과 평행하게 호지벽을 따라 이동하면서 벽과 바닥의 마찰에 의해 운동량을 일부 손실한다. 특히 호지벽과 바닥은 완만한 경사를 갖고 만나기 때문에 제트류는 벽쪽으로 더 많은 마찰을 받게 되어 유향은 호지중앙을 향해 다소 편향하게 된다. 반대편벽에 도달한 제트류는 다시 새로운 수차에 의해 가속되어 직각으로 방향을 바꾸어 이동한다. 호지의 벽면에서는 강한 제트류가 계속 유지되는 반면, 호지의 중앙은 주변부의 흐름에 의해 강제적으로 와류가 형성되어 상대적으로 매우 느린 유속을 유지하며 점차 중앙으로 갈수록 감소하여 거의 0에 가까워지는 사수역이 발생한다 (이, 1996). 따라서 호지의 순환구조는 quasi-steady state closed system이라 정의할 수 있다 (Peterson, 2000).

와류유속의 단면구조를 보면, 중앙과 주변의 압력경사와 원심력의 불균형에 의해 와류 바닥층은 와류의 중심을 향한 나선형의 유속을 갖게되며, 각속도가 클수록 중앙으로 향하는 유속 역시 증가하여 바닥층으로 유입된 물질은 빠른 속도로 중앙을 향해 집적되는 현상을 보인다 (Fig. 13; Denk and Dürholt, 1991; Peterson et al., 2001). 이러한 현상을 일반적으로 찻잔효과라 하며, 수질관리의 측면에서 매우 중요한 사항이라 할 수 있다 (Kang, 1999;

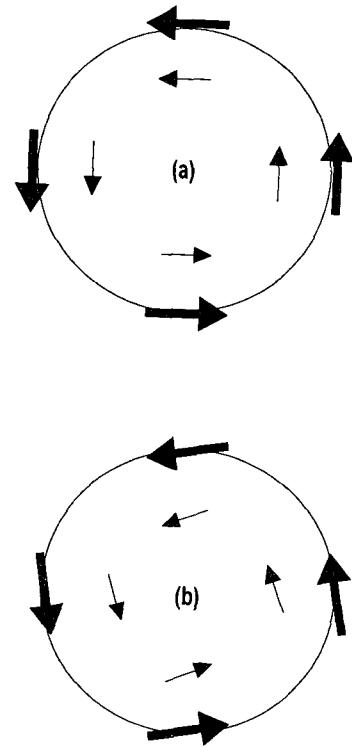


Fig. 13. Schematic illustration of flow pattern in top (a) and bottom (b) layers of gyre.

Kang, 2000; Kang, 2001). 특히 축제식 대하양식장에서 생물의 배설물, 소비되지 않고 남은 사료 그리고 강우시 무너진 호지벽의 토사가 호지로 유입되면서 호지의 흐름에 의해 운반되거나 바닥에 가라앉게 되는데, 찻잔효과에 의해 이들 물질이 호지중앙에 집적되는 경향을 뚜렷이 보인다. 이러한 현상은 양식이 끝난 후 사육수를 전부 배출하였을 때, 호지중앙에 퇴적물이 두껍게 쌓여있음을 육안으로 관찰하여 쉽게 알 수 있다 (Kim, 2000).

호지 A와 B에 수치모형을 적용한 결과를 관측값과 비교하여 회귀해석하였을 때, 호지 A에서 유향 및 유속의 상관계수는 각기 0.8928, 0.6782이며 호지 B의 경우 각기 0.8539, 0.7071인 것으로 나타났다. 호지내 수차에 의한 순환과 수치모형실험에 대해 본 연구와 유사한 기존의 연구결과를 참고하자면, Peterson et al. (2000)과 Peterson (2000)의 연구가 보고된 바 있다. 면적 1 ha (=120 m×87 m), 평균수심 1.2 m 그리고 조도계수 24 mm의 특징을 갖는 호지에 2대의 수차와 4대의 프로펠러분사기를 설치한 후 24개 지점에서 총별로 유속을 관측하였고, AUTOPOND라는 수치모형을 개발하여 적용하였다. 모형은 3-D Reynolds 방정식에 와점성항을 구하기 위해 k-ε model을 사용하였다. 모델관측값과 계산값에 대해 선형회귀해석을 하여본 결과, 표층유속의 경우 회귀곡선의 기울기와 절편은 각기 0.3208, 0.0445이며 상관계수는 0.1049이다. 그리고 유향의 경우, 기울기는 0.9854 상관계수는 0.8164이다. 바닥층의 경우 유속의 회귀곡선의 기울기는 1.1243이며 상관계수는 0.4235이다. 유향의 상관계수는 0.7983이다. 본 연구와 Peterson et al. 연구의 공통점은 1 ha 크기의 호지에서 24개 지점 상·중·하

3개 층 유속관측값을 사용하였다는 점이다. 그리고 두 연구의 중요한 차이점은 두 가지이다. 첫째, 본 연구에서는 양식호지에 수차 4대가 운영된 반면, Peterson et al.의 연구에서는 수차 2대와 프로펠러 분사기 4대가 동시에 운영되었으며 6대 기구에 대해 전부 조사하였다. 둘째, 유속구조에 대한 접근방식으로서 본 연구에서는 수심적분 2차원 모형을 사용하였고, Peterson et al.의 연구에서는 3차원 모형을 사용하였다. 3차원적 접근 방식은 수차에 의한 특히 연직방향에서의 순환구조를 파악하는데 유용하다. 부유물의 침식/퇴적에 따른 호지내 수체 및 바닥퇴적물의 환경과 관련해 수차가 발생시키는 바닥전단과 연직방향의 유속성분은 퇴적기구의 주요 기구이기 때문에 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구와 Peterson et al. 연구의 결과를 직접 비교하기는 적절치 않으나 수평방향의 유속성분에 대해서만 비교하자면, 유속의 상관계수는 약 0.25~0.57 정도 차이가 있는 것으로 나타났다.

호지내 유속구조는 호지에 작용하는 여러 가지 힘들, 예를 들어 바람, 호지의 기하학적모양, 바닥수심, 난류 그리고 수차에 의한 제트류 등의 복합적 효과에 의해 생성된 것이다. 관측시 수심의 불균일성, 바람에 의한 가속, 마찰과 난류 등의 영향 때문에 유체운동의 순간적인 불규칙성을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 따라서 관측시 적절한 평균값을 얻기 위해서는 유체운동에 미치는 요인이 단순한 것이 바람직하다. 그리고 여러 가지 효과 중 수차나 바람에 의한 효과만을 파악하기 위해서는, 다른 효과가 미치지 않도록 하거나 만일 다른 효과가 있을 때, 그 효과에 대한 정량적 파악이 가능한 조건아래에서 구조실험을 실시하여야 한다. 이러한 과정을 거치지 않고 유속구조에 대해 해석하거나 수치모형을 직접 현장에 적용할 때 여러 가지 문제점이 뒤따를 수 있다. 따라서 보다 정확도 높은 모형을 개발하기 위해 향후 구조실험이 실행되어야 할 것으로 생각된다. 그러나 그럼에도 불구하고 본 연구에서 개발된 수치모형실험의 결과는 현장의 유속구조를 재현하는데 매우 유용한 것으로 밝혀졌다.

요 약

축제식 양식장에서 수차에 의한 순환효과를 재현하기 위해 수치모형을 개발하였다. 수치모형의 지배방정식으로는 2차원 수심적분 Reynolds 방정식을 사용하였고, 수차에 의한 가속도는 축력을 수차날개에 의해 밀려가는 유체의 질량으로 나눈 값으로 산정하였다.

수치모형을 적용하여 1대의 수차를 작동하고서 수차로부터 직선방향 10 m 간격으로 관측된 유속자료와 비교하였다. 모형의 보정을 위해 유량보정계수와 무차원 와점성계수의 민감도를 실험하였다. 유량보정계수는 본 연구에서 처음 제시된 항으로 실험결과 15와 20에서 모형의 결과가 관측값과 가장 유사하였다. 유량보정계수는 관측자료가 없거나 관측이 용이하지 않을 경우 효과적으로 사용할 수 있으며, 특히 수치실험에서 수차에 의해 발생하는 복잡한 수리특성을 비교적 단순하게 처리할 수 있다는 장점이 있다. Reynolds 응력을 Boussinesq 근사로 표현하는 본 연구에서 무차원 와점성계수는 6이 가장 적당한 것으로 계산되었다.

바람에 의한 전단효과를 파악하기 위해 유향 0°, 90°와 180° 그리고 풍속 0, 2.5, 5와 7.5 m/s 조건의 경우를 비교하였다. 풍향이 수차에 의한 제트류 방향과 평행하거나 정반대일 경우 유속변화는 1% 이하이나, 제트류에 직각으로 향할 경우 제트류 좌우의 와류는 풍향에 따라 위치가 뚜렷이 바뀌며, 유속은 약 4%까지 감소하는 것으로 나타났다. 유속변화 4%는 바람응력 외에 호지의 기하학적 평면구조 혹은 변장비 등에 따른 효과도 포함하는 것으로 생각되었다. 호지에 미치는 바람에 의한 유속변화가 4% 이하인 것으로 보아, 바람응력의 영향은 매우 미약한 것으로 나타났다. 그러나 호지의 기하학적 특성과 관련한 와류형성 기구에 대해서 바람이 미치는 효과는 무시할 수 없는 것으로 생각되었다.

모형은 또한 축제식 양식장 2곳에 적용하였다. 양식장 호지 A와 B는 각기 변장비 1.05와 0.68, 면적 1.02 ha와 0.66 ha 그리고 평균 수심 1.2 m를 갖는다. 각각의 호지에 수차 4대를 작동하고서 관측된 유속과 수치모형을 적용한 계산결과를 회귀해석하였다. 호지 A에서 유향 및 유속의 상관계수는 각기 0.8928, 0.6782이며 호지 B의 경우 각기 0.8539, 0.7071인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용된 모형은 호지의 순환특성을 비교적 잘 재현하였으며, 향후 수차운영과 양식호지의 수질관리에 관한 유용한 도구로 사용될 수 있을 것으로 생각하였다.

감사의 글

수차 및 호지 특성에 대한 자료 및 양식일지를 제공한 선일수산의 김 영돈 대표에게 감사 드린다. 논문의 심사를 맡아 준 익명의 심사위원에게도 감사 드린다.

참 고 문 헌

- Ahmad, T. and C.E. Boyd. 1988. Design and performance of paddle wheel aerators. *Aquacult. Eng.*, 7, 39~62.
- ASCE. 1979. Symposium on Reaeration Research, Specialty Conference held in Gatlinburg, Tennessee, October 1975. ASCE, 345 E 47th St, New York, NY 10017.
- ASCE. 1983. Development of standard procedures for oxygen transfer devices. US EPA, Washington, DC, EPA-600/2-83-102, 292pp.
- Boyd, C.E. and D.J. Martinson. 1984. Evaluation of propeller-aspirator-pump aerators. *Aquaculture*, 36, 283~291.
- Boyd, C.E. and N. Stone. 1987. Unpublished data.
- Boyd, C.E. and B.J. Watten. 1989. Aeration systems in aquaculture. *Rev. Aquacult. Sci.*, 1, 425~472.
- Chamberlain, G.W. (ed.) 1988. Rethinking shrimp pond management. In *Coastal Aquaculture*, Vol. 5.
- Denk, V. and A. Dürholt. 1991. Experimental investigations of the unsteady rotating flow field in a cylindrical vessel. *Experiments in Fluids*, 12, 97~105.
- Falconer, R.A. and Y. Chen. 1991. An improved representation of flooding and drying and wind stress effects in a two-dimensional tidal numerical model. *Proc. Inst. Civil Engrs, Part 2*, 91, 659~678.
- Fast, A.W., E.C. Tan, D.F. Stevens, J.C. Olson, J. Qin and D.K.

- Barclay. 1999. Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities. *Aquacult. Eng.*, 19, 99~103.
- Kang, Y.H. 1999. Flow structure prediction for a square harbour using various wall boundary conditions. *J. Oce. Eng. Tech.*, 13, 151~158 (in Korean).
- Kang, Y.H. 2000. Solute transport experiments in a square harbour using dye and a mathematical model. *J. Kor. Soc. Civil Engrs.*, 20(6-B), 783~794 (in Korean).
- Kang, Y.H. 2001. Effects of paddlewheel on water circulation in shrimp culture ponds. *J. Aquacult.*, 14, 43~50 (in Korean).
- Kim, Y.D. 2000. Personal Communication.
- Koutitas, C. and M. Gousidou-Koutita. 1986. A comprehensive study of three mathematical models for wind generated circulation in coastal areas. *Coastal Eng.*, 10, 127~138.
- Peterson, E.L. 1999. Benthic shear stress and sediment condition. *Aquacult. Eng.*, 21, 85~111.
- Peterson, E.L. 2000. Observations of pond hydrodynamics. *Aquacult. Eng.*, 21, 247~269.
- Peterson, E.L., J.A. Harris and L.C. Wadhwa. 2000. CFD Modelling pond dynamic processes. *Aquacult. Eng.*, 23, 61~93.
- Peterson, E.L., L.C. Wadhwa and J.A. Harris. 2001. Arrangement of aerators in an intensive shrimp growout pond having a rectangular shape. *Aquacult. Eng.*, 25, 51~65.
- Price, K.S., R.A. Conway, and R.H. Cheely. 1973. Surface aerator interactions. *J. Env. Eng. Div. ASCE*, 99, 283~292.
- Rodi, W. 1984. *Turbulence models and their application in Hydraulics*. 2nd ed. IAHR Delft, 104pp.
- Rogers, G.L. 1989. Aeration and Circulation for Effective Aquaculture Pond Management. *Aquacult. Eng.*, 8, 349~355.
- Rogers, G.L. and A.W. Fast. 1988. Potential benefits of low energy water circulation in Hawaiian prawn ponds. *Aquacult. Eng.*, 7, 155~165.
- Schlichting, H. 1979. *Boundary layer theory*. 6th ed. McGraw-Hill Book Co., New York, 742pp.
- Shell, G. 1979. Momentum: innovative concept for surface aeration. *Ind. Wastes*, May/June.
- Smith, G.D. 1985. *Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods*. 3rd ed. Oxford University Press, 337pp.
- Wu, J. 1969. Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *J. Geophy. Res.*, 74, 444~455.
- 이종섭. 1996. 순환여과식 양어장의 사육조 및 침전조 설계. 해양사업 개발 총서 1, 양식공학, 편집. 류청로, 부경대학교 해양산업개발연구원, 37~70.

2001년 1월 10일 접수

2001년 11월 21일 수리