

## 순환여과식 사육수조의 수리학적 연구

李 宗 燮

부산수산대학교 해양공학과

## Hydraulic Studies on Recirculating Aquaculture Basin

Jong-Sup LEE

*Department of Civil Engineering, National Fisheries University of Pusan,**Pusan 608-737, Korea*

A numerical experiment on the effective discharge of waste materials caused in recirculating aquaculture basins was performed. The numerical model used in this study was a 4-level hydrodynamic and advection-diffusion model. Flow structures and settling processes of ss in the various mathematical model basins are discussed. The calculated flow fields of the numerical basin corresponded well with the measured velocity in field basin. In the cases of steep bottom slopes in 4/30, the non-dimensional tractive force( $U/U_c$ ) which is an important parameter for the deposition pattern of waste materials was stronger than with the mild slope one. The settling pattern of ss depended considerably on the degree of bottom slope of basin. To concentrate deposited waste materials into the center discharge pipe, it is useful to design a cylindrical basin with a steeply conical bottom. In addition, to prevent movement of the deposit area away from the center, it is necessary to locate the circulating ducts at diametrically opposed points on the basin sides.

## 서 론

순환여과식 사육수조는 단위면적당 생물의 양이 많은 고밀도 양식방법으로서 인위적인 환경관리가 용이하고 생산성 증대를 위한 수온 등 환경요인의 조절이 가능하므로 자연환경에서는 양식이 불가능하거나 생산성이 낮은 생물을 대량 생산할 수 있는 장점이 있어 산업적으로 각광을 받고 있는 새로운 양식방법이다.

그러나, 산업적으로 성공을 이루기 위해서는 수질관리를 통한 치어의 생존률을 높이는 것이 무엇보다도 중요하다. 수질관리 문제에 있어서는 사육수조내에서 발생하는 사료찌꺼기나 물고기의 배설물 등 노폐물의 효과적인 유출을 위한 사육수조의 설계가 요구된다.

Fig.1은 일반적인 순환여과식 사육시스템의 모식

도를 나타낸다. 물은 사육수조 (A)에서 배수파이프 (B)를 통하여 일부는 파이프 (C)를 통하여 수조 밖으로 유출되고, 재순환수는 파이프 (D)를 통하여 침전지 (G)를 거쳐 여과드림 (H)를 통과한 후, 파이프 (E)를 통하여 재순환 유입된다. 공급수 파이프 (F)에서는 파이프 (C)를 통한 유출 유량만큼 새로운 물을 공급하며, 수조내의 수위는 배출수 파이프 (C)의 높이에 의하여 조절된다. 수조 (A)에서의 순환유속은 파이프 (E)와 (F)로부터 공급되는 사출수의 유속과 낙하각도 및 기포발생파이프 (J)로부터 방출되는 기포의 방출각도 등에 의하여 조절이 가능하다. 수조 (A)의 중심인 배수파이프 (B)부근에 퇴적된 노폐물은 파이프 (C)를 일시적으로 제거하여 수두차에 의한 강한 유속을 발생시켜 수조 밖으로 배출시킨다. 부유상태에 있는 미세한 입자들은 침전수조 (G)로 유입하게 되며, 여기

※ 이 연구는 한국과학재단지정 우수공학연구센터인 해양산업개발연구소의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

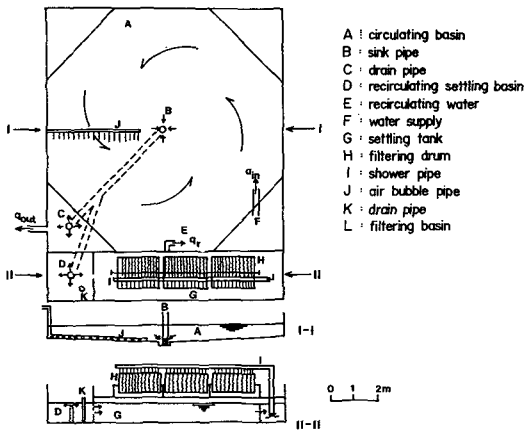


Fig. 1. Schematic diagram of recirculating aquaculture basin.

서는 이들 입자들을 침전시켜 여과수조 (L)로 유입되는 부유물질의 양을 줄인다.

따라서, 사육수조내의 수질관리를 위해서는 노폐물이 밖으로 잘 배출되고, 재순환 유입수중에 부유물질을 포함하지 않도록 침전수조를 설계할 필요가 있다. 최근, Zhou and McCorquodale (1992)은 직사각형 침전탱크의 유동구조와 SS의 농도분포 예측을 위하여 연직 2차원 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 순환여과식 사육수조 (A)에서의 유동구조와 노폐물의 거동을 예측하기 위하여 3차원 해수유동과 부유물질의 이류, 확산 및 침강해석 수치모형을 적용하여 노폐물의 거동에 미치는 저면경사와 수조형태등의 영향에 대하여 연구한다.

## 자료 및 방법

### 1. 현지 수조의 조사내용 및 방법

순환여과식 사육수조의 현황과 문제점을 파악하고, 수치실험의 입력자료를 얻기 위하여 전남 여천군 돌산도에 위치한 현지 사육수조에서 수조의 제원과 형상 및 재순환 유입 유량을 측정하였다. 그리고, 현지수조의 유동구조를 파악하기 위하여 수조내의 3개 단면 25개 지점에서 표층, 중층 및 저층의 유속을 프로펠러형 소형 정밀유속계(C510AP, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 한 점에서 안정된 평균유속을 얻기 위하여 약 2~3분간에 걸쳐 평균 유속을 사용하였다. 수조내에서 사료의 침강속도와 이동한계 소류력등을 구하기 위하여 실험실에서 시료의 함수비, 건조비중 및 침강속도등을 측

정하였다. 함수비는 97.8~103.7 정도이고, 건조비중은 1.25 이었다. 정수중에서 측정된 침강속도는 미세한 입자의 경우 약 1cm/s 정도 이었다.

### 2. 수치실험의 내용 및 방법

노폐물의 거동해석을 위하여 金等(1993)에 의한 3차원 해수유동모델과 金·李(1993)에 의한 3차원 이류, 확산 및 침강해석 모델을 이용하였다. 본 연구에서는 수심을 4층으로 나눈 4-level model로 해석하였다. Fig.2는 수치실험에 적용한 수조의 형태와 수심분포를 나타낸다. Fig.2에서 수조의 규모는 6×6m이고, 최대수심은 0.8m 이다. 본 연구에서는 수조의 평면형태를 사각형과 팔각형의 2가지로 하고, 저면경사는 각각 4/30와 2/30의 2가지로 하여 총 4가지 경우에 대하여 수치실험을 행하였다. 여기서, 사각형수조의 저면경사 4/30인 경우가 현지 사육수조의 형태와 같은 경우이고, 나머지 경우는 저면경사와 평면형상을 각기 다르게 한 경우이다.

본 연구에서는 Fig.2의 각 수조에 대하여 3차원적인 유속분포와 저면전단응력 및 이동한계 저면전단응력을 산정하여 노폐물이 퇴적하는 부분을 추정하고, 부유물질의 이류, 확산 및 침강해석에 의하여 침강특성과 퇴적률의 평면적인 분포를 계산하였다.

해수유동모델에 적용한 계산조건과 물리적 파라미터의 제원은 Table 1과 같으며, 부유물질의 이류, 확산 및 침강해석에 사용한 계산조건은 Table 2와 같다.

확산계산에 있어서 수평확산계수를 격자간격의 4/3승에 0.1배 한 값을 사용하였다. 여기에 대한 물리적인 의미는 명확하지 않으나 연안해역에서 해양의 확산계수와 격자간격에 의한 확산계수의 추정치가 잘 맞았기 때문에 본 연구에서도 현지에서의 경험관계식을 적용하였다. 연직 확산계수  $K_v$ 는

Table 1. Computation conditions and physical parameters of the flow models

Parameters	Used values
Grid space	$\Delta X = \Delta Y = 20cm$
Level height	$\Delta h = 20cm \times 4 \text{ level}$
Time interval	$\Delta t = 0.1s$
Internal friction coefficient	$f_i = 0.001$
Bottom friction coefficient	$f_b = 0.0026$
Eddy viscosity coefficient	$K_x = K_y = 0.02m^2/s$

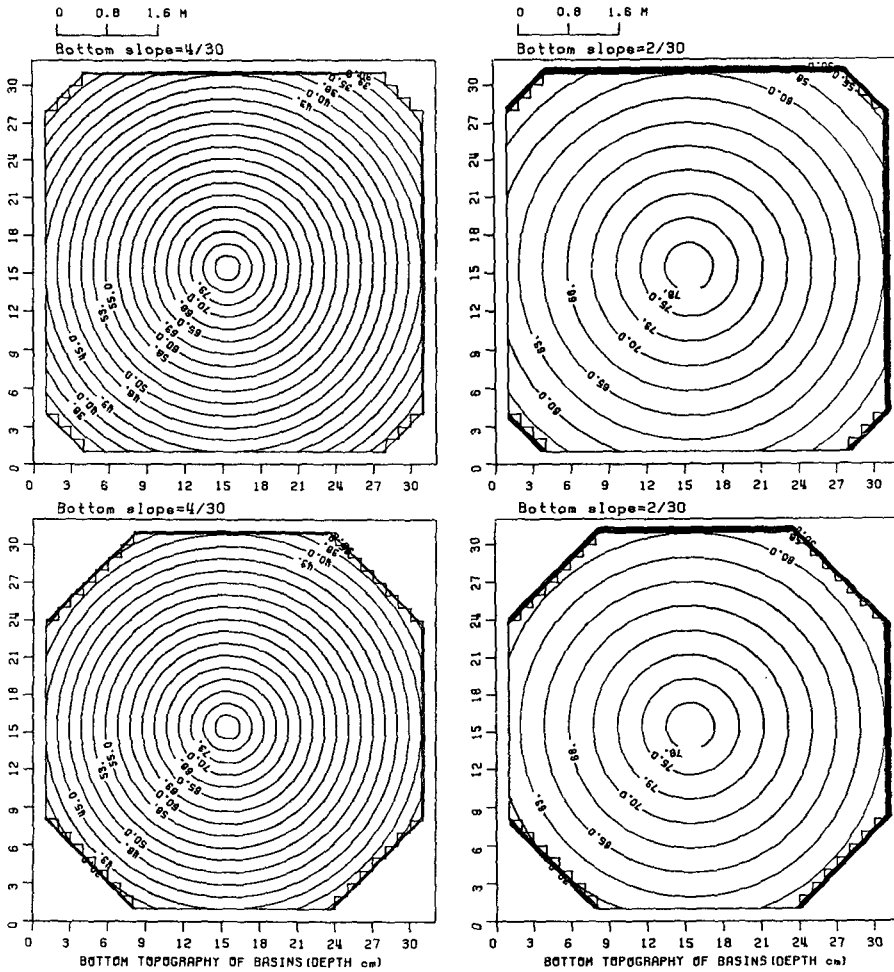


Fig. 2. Dimension of the experimental basins(upper left:regular square type, s=4/30, upper right:regular square type,s=2/30, lower left:octagonal type, s=4/30, lower right:octagonal type,s=2/30).

Table 2. Computation conditions and physical parameters of the advection-diffusion models

Parameters	Used values
Grid and level	same as flow model
Time interval	$\Delta t=0.5s$
Horizontal diffusion coefficient	$K_x=K_y=0.1 \times \Delta X^{4/3}=0.012m^2/s$
Vertical diffusion coefficient	$K_z=0.01 \times K_x=0.00012m^2/s$
Settling velocity	$W_j=0.01m/s$

해양에서 대개  $10^{-4}m^2/s$  정도의 크기를 갖는 값으로 많이 사용하는데, 본 연구에서는 수평확산계수

의 1/100정도의 값으로 주었다. 유동계산의 경계조건은 현지수조에서의 실측결과로부터 유속값을 주었으며 계산결과가 정상상태에 달할때까지 30분간 계산하였다.

이류, 확산 및 침강해석의 계산은 수조내의 표층 1점에서 초기농도 1,000ppm을 주고 계산을 행하였다. 여기서, 초기농도 1,000ppm에 대한 산정근거는 다음과 같다.

$$\text{체적농도 } C = \frac{\text{유량중의 부유물질량}}{\text{단위시간} \cdot \text{단위폭당 유량}} = \frac{q_s}{q} \quad (1)$$

$$C(ppm) = 1000 \times \sigma \times \left(\frac{q_s}{q}\right) = 1.25 \times 10^6 \left(\frac{q_s}{q}\right) \quad (2)$$

단,  $\sigma=1.25$

$$\frac{q_s}{q} = \frac{0.0008V}{V} = 8 \times 10^{-4} \quad (3)$$

여기서, 단위폭당 유량중의 부유물질량은 0.08%로 가정하였음.

$$C(ppm) = 1.25 \times 10^6 \times \frac{q_s}{q} = 1000(g/m^3) \quad (4)$$

즉, 초기농도 1,000ppm은 물 1m<sup>3</sup>중에 사료를 1kg의 비율로 섞어서 공급한 것과 같다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 현지수조의 유동구조

Fig.2는 가로 6m 세로 6m, 최대수심 80cm, 최소수심 35cm 이고 저면경사가 4/30인 거의 직사각형에 가까운 수조에서 속도분포의 측정결과를 나타낸다. 유속계에 의한 속도측정에 있어서 유향은 측정할 수 없었으므로, 속도벡터는 벽면과 평행하게 나타났다. 여기서 상층부의 유속은 전수심  $h$ 의 약 0.1 $h$  되는 수심의 유속이고, 중층은 0.5 $h$  그리고 저층은 0.9 $h$  되는 수심의 유속이다. 속도측정 결과에 의하면 최대유속은 유량공급용 파이프로부터 해수가 공급되고 표층으로 부터 기포를 분사시키는 지점(세로축 좌표  $X=15$ , 가로축 좌표  $Y=5$ )에서 24.3cm/s를 나타냈다. 강제순환시키는 지점으로 부터 시계방향으로 회전하면서 점차 유속이 약해지면서 표층으로 부터 중층 및 저층으로 운동량이 확산되는 양상을 나타내고 있다. 각 단면에서의 유속분포는 수조 중심에서는 유속이 거의 없고 반경 방향으로 멀어짐에 따라 속도가 증가하는 강제와동(forced vortex)의 속도분포를 나타낸다. 속도가 영(zero)이 되는 지점은 수조의 기하학적 중심보다 약 50cm 왼쪽으로 이동하였다. 이것은 강제순환에 의한 수조내 흐름의 비대칭 현상에 기인하는 것으로 생각된다.

#### 2. 유동구조의 수치실험결과

유동계산 결과의 정확도를 알아보기 위하여 Fig. 3에 나타난 제원에 대한 계산결과와 실측결과를 비교해 보면 유속의 크기는 양자가 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 유향에 있어서 양자가 차이를 나타내는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 현지 수조에서는 유향측정이 불가능하였기 때문에 실측결과는 반경방향에 대한 법선 방향의 속도성분으로 나타내었기 때문이다.

Fig.4는 계산 결과의 속도분포를 알아보기 위하여 Fig.2에서 저면경사 4/30인 8각형 수조에서의

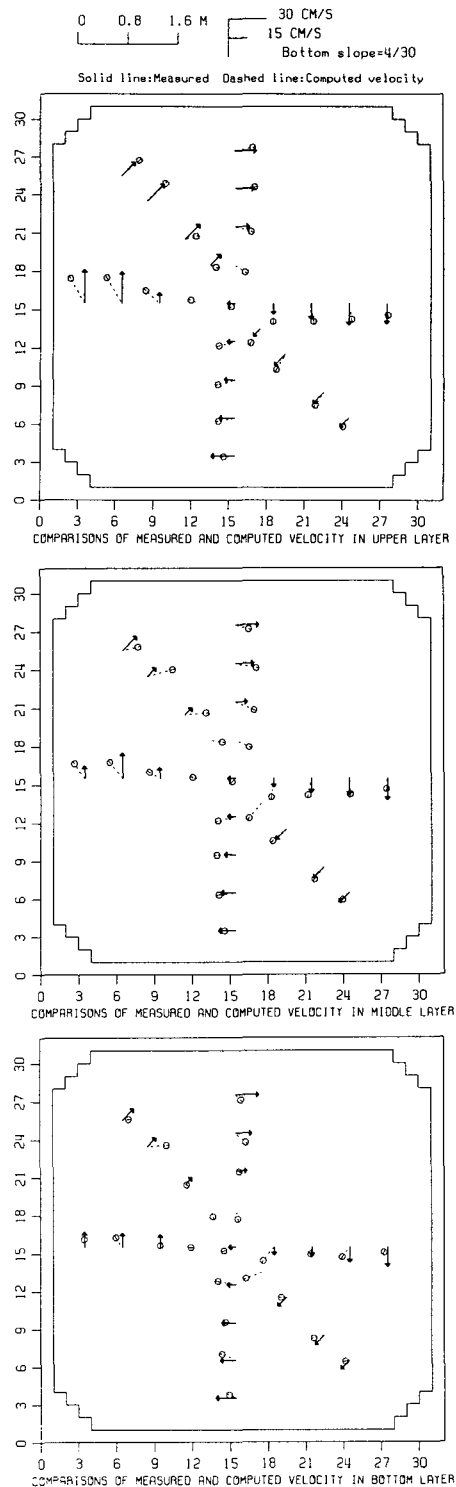


Fig. 3. Comparisons of measured and computed velocity distribution for the prototype basin.

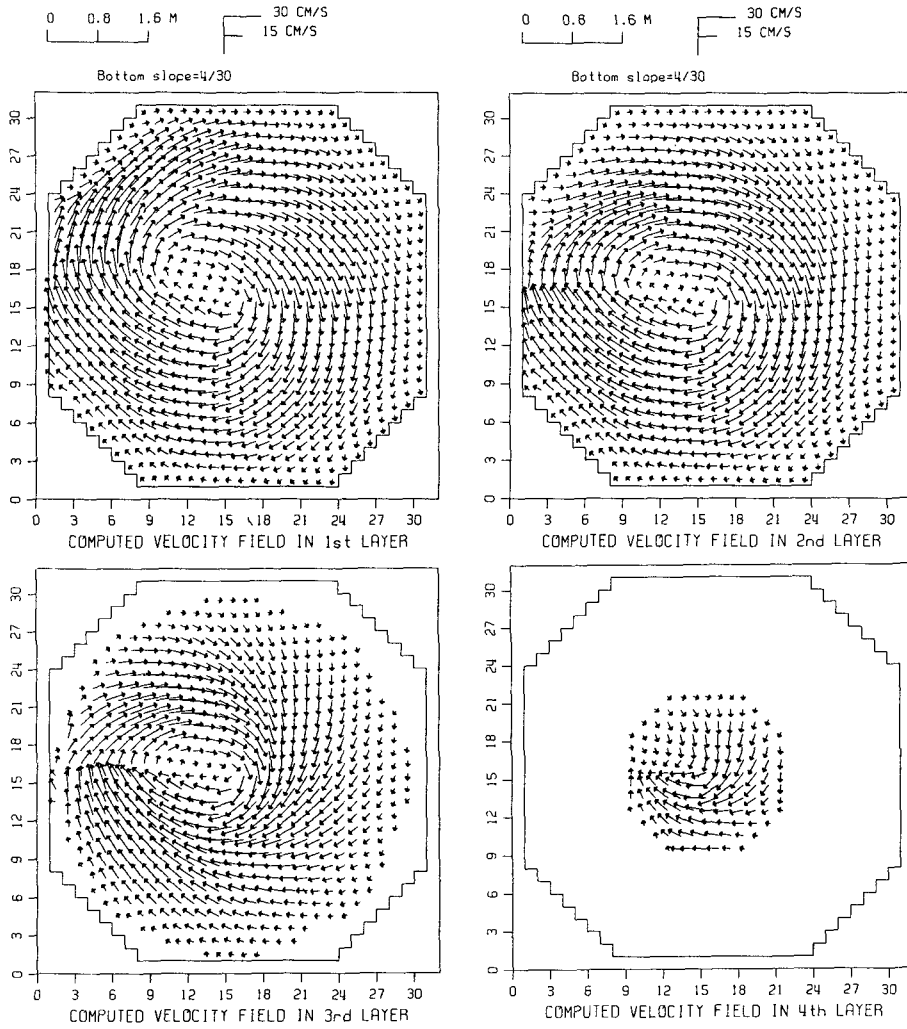


Fig. 4. Computed horizontal velocity distribution for the octagonal type basin.

계산결과를 층별 속도벡터로 나타낸 그림이다. 계산결과에서 와류의 중심은 수조의 기하학적 중심보다 왼쪽으로 약 50cm 정도 치우쳐 있음을 볼 수 있다. 그밖에 경우에 있어서도 평면적인 속도분포는 Fig.4와 거의 유사하게 나타났다.

수조의 평면형상과 저면경사에 따른 속도차를 비교하기 위하여 Fig.2의 4가지 형태의 수조에 대하여 수조의 중심을 지나는 가로축 좌표 Y=16인 단면에서의 속도분포를 나타낸 것은 Fig.5와 같다. Fig.5에서 수평길이와 연직방향 길이는 1:4로 변형되어 있으며, 각 층에서의 최소수심은 2cm로 하였다. Fig.5에서 저면경사 S=4/30인 경우 수조의 단면이 복단면 형태로 나타나는 것은 수심을 4개층

으로 나누었기 때문이다. 이 그림에서 속도의 최대치와 연직분포에 크게 영향을 미치는 요인은 저면경사인 것을 알 수 있다. 그리고, 같은 저면경사의 조건하에서 8각형 수조가 4각형 수조보다 최대유속에서 약 1~2cm/s 큰 값을 나타냈다. 이와같은 양상은 수조의 중심을 지나는 세로축 좌표 X=16인 단면에서도 Fig.5와 같은 결과를 나타냈다.

### 3. 퇴적물의 이동한계 소류력 분포

수조바닥에 가라앉은 사료찌꺼기가 이동하는 곳과 퇴적되는 곳을 파악하기 위하여 사료찌꺼기의 이동한계 소류력  $\tau_c (= \rho U_c^2)$ 와 저면마찰속도  $U_* (= \sqrt{\tau_b/\rho})$ 를 구한다.

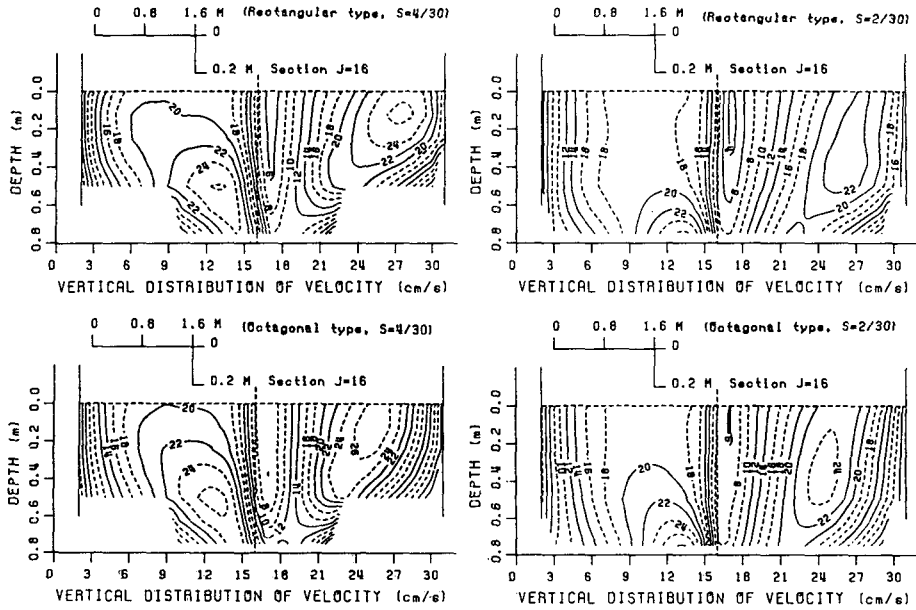


Fig. 5. Velocity contour in the cross section at Y=16.

이동한계소류력은 일정한 입경의 한계소류력에 관한 Shields 함수를 이용하면 다음과 같다.

$$Y_c = \Phi_b(X_c) = (const)_b \quad (5)$$

$$Y_c = U_c^2 / (\sigma(\rho-1)gd) \quad (6)$$

$$X_c = U_c \cdot d / \nu \quad (7)$$

여기서,  $\sigma$ 는 시료의 밀도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $d$ 는 시료의 입경,  $\nu$ 는 물의 동점성계수이다. Yalin(1972)에 의하면  $s = \sigma/\rho$ 가 0.06~3.25의 범위이고,  $d$ 가 1.06mm~8.5mm의 범위에 대한 Shield의 함수값은  $X_c > 35$ 인 경우 식(5)의 우변 상수는 0.05의 값을 나타냈다. 한계마찰속도  $U_{*c} (= \sqrt{\tau_c/\rho})$ 는 일반적인 저면마찰용력의 산정식인 식(8)에 의하여 구한다.

$$\tau_c = 0.5\rho U_{*c}^2 \quad (8)$$

여기서 저면마찰계수  $f$ 는 수리학적 조면·난류의 경우로서  $f=0.40$ 로 하였다. 한계마찰속도는 식(5)에 의하여 다음과 같이 된다.

$$U_{*c} = 0.05(\sigma-\rho)gd/\rho \quad (9)$$

여기서,  $\sigma=1.25$ ,  $\rho=1.02$ ,  $g=9.8m/s^2$  그리고  $d=0.2cm$ 인 값을 사용하면 한계마찰속도  $U_{*c} = 1.49 cm/s$ 가 얻어진다. Fig. 6은 한계소류력으로 무차원화 시켜서 나타낸 무차원소류력 ( $U/U_{*c}$ )의 평면적인 분포를 나타낸다. 여기서,  $U/U_{*c}$ 의 값이 1보다 작은 부분은 사료찌거기가 퇴적할 수 있음을 나타낸다. Fig.6에서 무차원 소류력의 값이 1보다 작은

곳은 수조의 뺨면과 우각부 그리고 와류의 중심에 해당하는 중앙부분에서 나타난다. 여기서, 무차원 소류력은 같은 저면경사인 경우에는 4각형수조인 경우에 비하여 8각형 수조에서 크게 나타나고, 동일한 평면형태의 경우에는 저면경사가 4/30인 경우가 2/30인 경우보다 무차원 소류력의 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 무차원소류력의 값이 벽면부근이나 우각부에서 1보다 훨씬 작게 나타났는데, 이것은 유한차분법에 의한 계산영역의 분할에서는 벽면의 형상을 실제와 같이 매끄럽게 나타내지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 현지수조의 유속 측정에 의하면 수조의 벽면이나 우각부에서 노폐물이 퇴적할 정도의 작은 유속이 나타나는 문제점은 없었다. 그러나, 4각형 수조를 설계할 경우에는 우각부에서 사수영역이 발생하여 노폐물이 퇴적되지 않도록 유의 할 필요가 있다.

#### 4. 부유물질의 침강특성

수조내에 투하된 사료의 확산과 침강거동을 해석하기 위하여 수조내의 한점( $X=8, J=16$ )에서 초기농도 1,000ppm를 주고 계산을 행하였다. Fig.7(a)는 방출지점에서 층별 부유사 농도의 시간적인 변화를 나타낸 것이고, Fig.7(b)는 방출지점으로 윗쪽으로 1.6m 떨어진 수조중심에서의 값을 나타낸다. Fig.7(a)와 Fig.7(b)에서 농도의 시간적이 변화

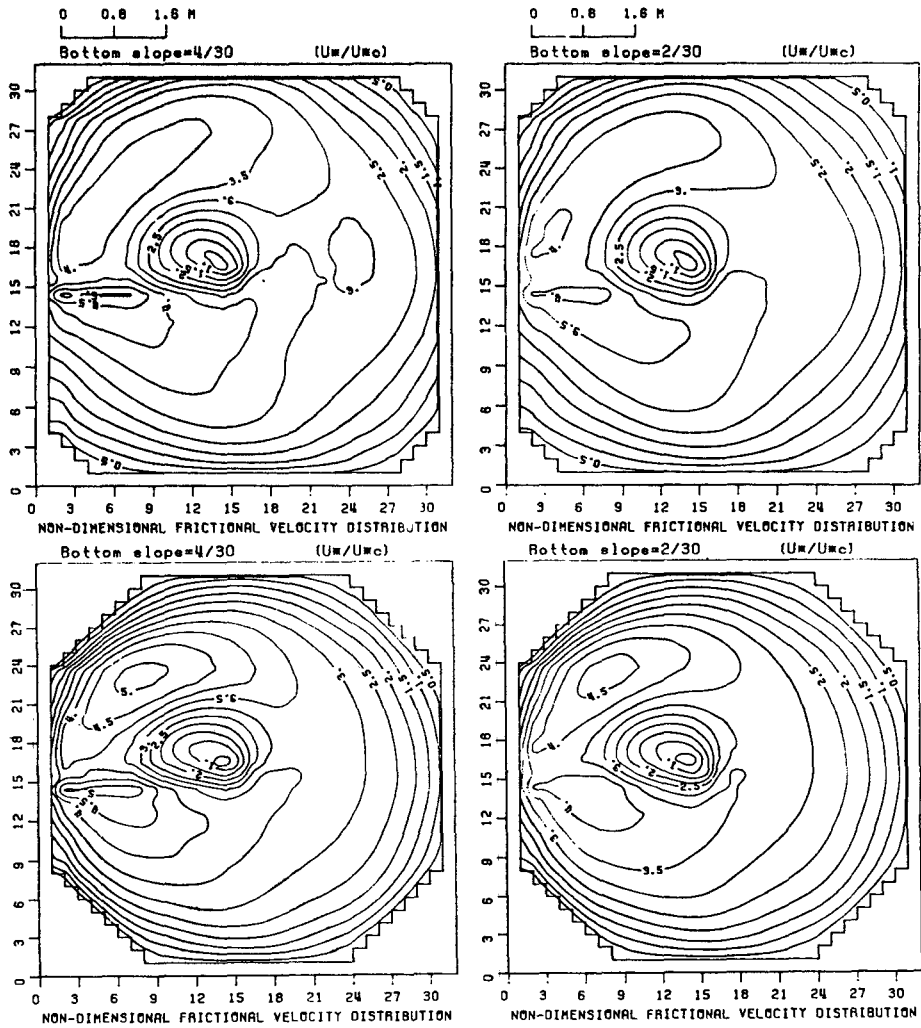


Fig. 6. Distribution of non-dimensional tractive force ( $U_w/U_{wc}$ ) at the bottom.

양상은 수조의 평면적인 형상보다 저면경사에 크게 영향받는 것을 알 수 있다. 한편, 부유물질이 전부 침강하는데 걸리는 시간은 저면 경사가 같은 경우 4각형 수조보다 8각형수조가 약간 더 길게 나타났다. 수조의 중앙(Fig.7(b))에서 농도의 시간적 변화를 보면, 저면경사가 4/30인 경우 방출후 1~2분 이내에 2~3ppm 정도로 부유물질이 집중하여 서서히 침강하는 양상을 나타내는데 비하여, 저면경사가 2/30인 경우에는 방출후 30초 후에 1ppm 이하의 저농도가 나타나 장시간 부유상태로 머물러 있다.

Fig.8은 저면에 침강한 부유물질의 침강 flux를 나타낸다. 여기서, 침강형태는 수조의 형태보다는 저면경사에 커다란 영향을 받는 것을 알 수 있다. 수조의 벽면 근처에서 침강 flux가 집중하는 것으로 나타났는데 침강 flux는 Fig.4의 평면적인 유동구조와 연직방향 속도분포에 크게 좌우될 것으로 생각된다. 방출후 초기 약 80초 이내에 대부분의 부유물질이 침강하며, 침강한 부유물질은 저면에서 소류력의 영향으로 소류 또는 재부상하여 결국은 무차원 소류력의 값이 1보다 작은 곳에 퇴적하게 될 것으로 생각한다.

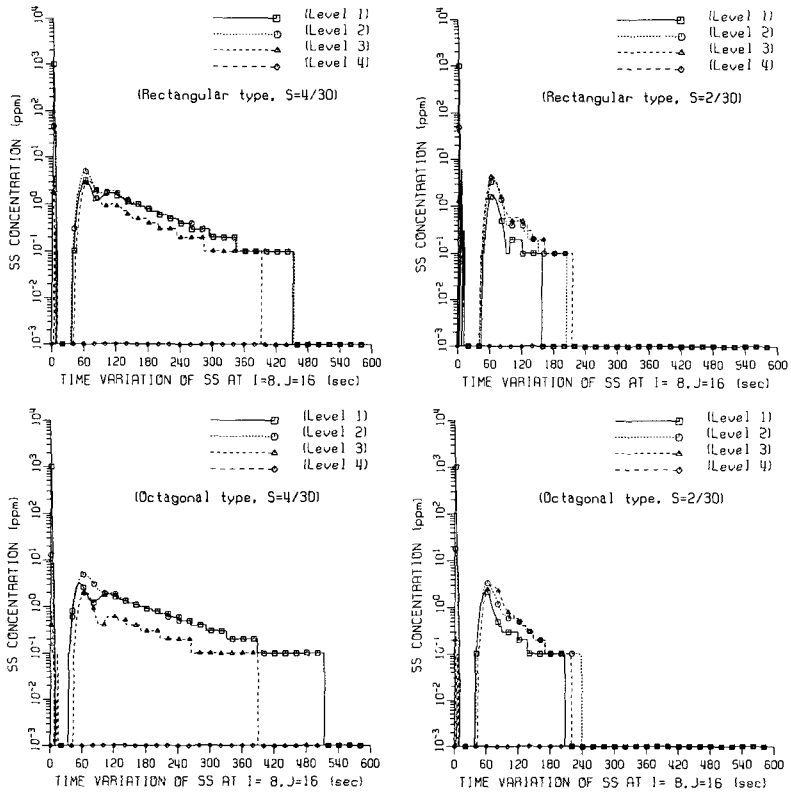


Fig. 7. (a) Variations of SS concentrations according to time at discharge point.

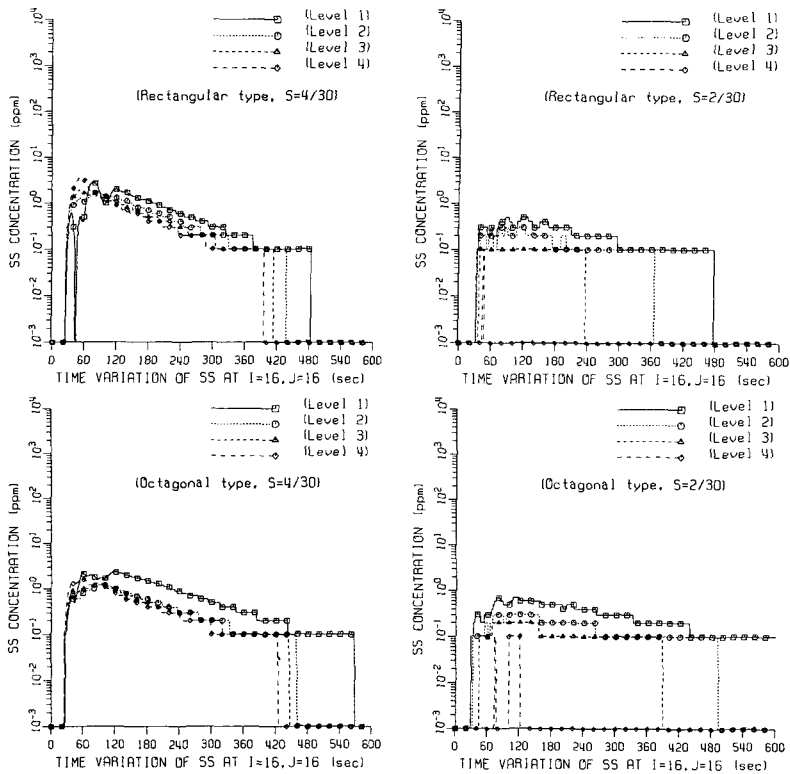


Fig. 7. (b) Variations of SS concentrations according to time at center.



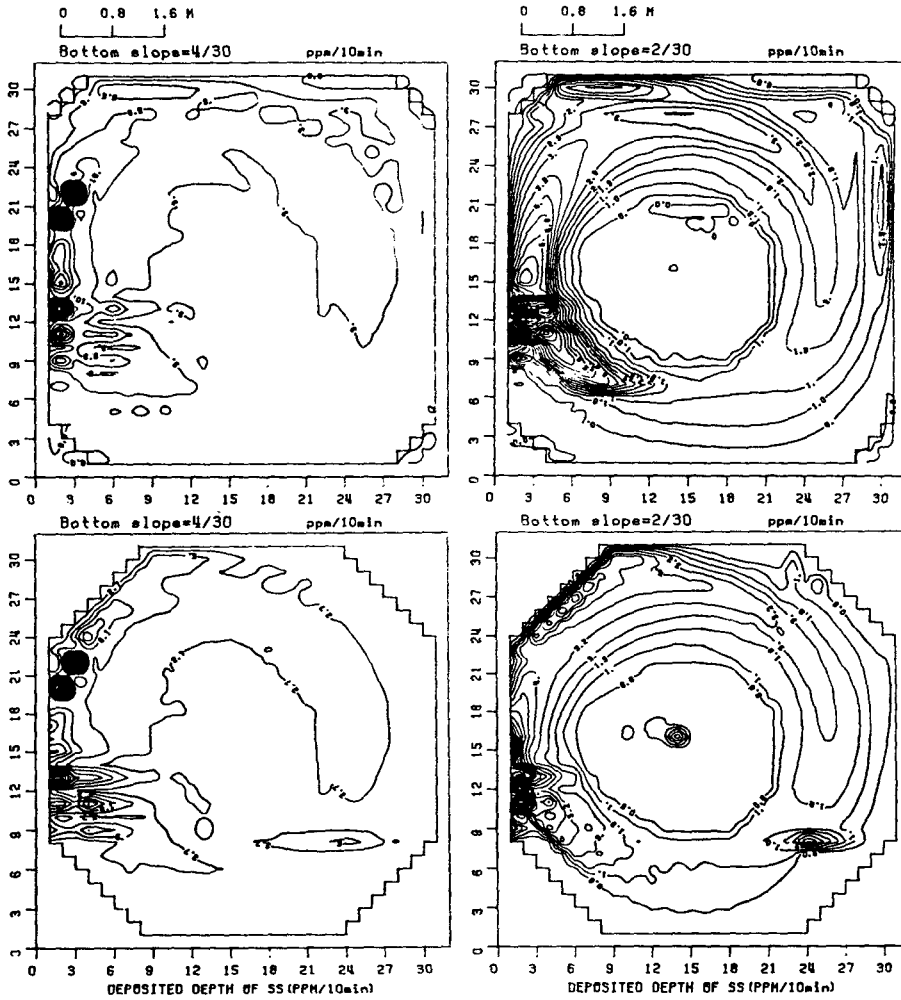


Fig. 8. Horizontal distribution of settling flux.

### 요약 및 결론

순환여과식 사육수조의 수리학적 형상설계와 관련하여 유동구조와 부유물질의 거동에 미치는 수조의 평면형상과 저면경사의 영향을 3차원수치모형을 이용하여 검토하였다. 실험조건은 현지에서 사용하고 있는 수조의 제원을 기준으로 하여 수조의 평면형태를 4각형과 8각형으로 하고, 저면경사를 4/30와 2/30로 하여 각각 4가지 경우에 대하여 수치계산 결과를 비교하였다.

현지수조를 대상으로 수치모형에 의한 유동구조의 재현성을 검토한 결과 매우 양호한 결과를 얻었다. 저면경사가 클수록 수조내의 유속이 커지며

같은 저면경사하에서는 8각형 수조가 4각형수조보다 더 큰 유속을 나타낸다. 저면에서 속도가 작아 사료찌꺼기가 퇴적 할 수 있는 곳은 와류의 중심부분인 수조중심의 극히 좁은 영역과 수조의 벽면 및 우각부분에 대하여 폭넓게 나타났다. 저면에서 소류력을 증대시키고 사료찌꺼기가 퇴적되는 부분을 수조중심으로 집중시키는 것은 8각형 수조에서 저면경사가 클수록 유리한 것으로 나타났다.

부유물질은 침강속도가 1cm/s 정도로 크기 때문에 수조내에서 방출후 초기에 거의 대부분이 침강한다. 침강하는 장소는 수조의 벽면을 따라 유속이 큰 곳에 집중적으로 나타났다.

수조내에서 노폐물의 효과적인 배출을 위하여

노폐물을 수조중심에 집중시키기 위해서는 저면경사를 4/30이상으로 크게 하는 것이 유리하고, 수조의 평면형태를 사각형보다는 원형에 가까운 형태로 설계함이 바람직하다. 와류의 중심이 수조의 중심에서 한 쪽으로 편향되지 않도록 하기 위해서는 수조내 물을 순환시키는 사출수와 기포등을 수조의 좌우대칭이 되는 두개의 지점에서 공급 할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단지원 해양산업개발연구소의 “순환여과사육시스템의 시설공학적 연구”결과의 일부이며 이에 감사한다.

참 고 문 헌

金次謙 ·李宗燮 ·張善德. 1993. 3次元 傾壓海水流動모델의 開發과 水營灣의 海水流動, 韓國海洋學會誌, 28(2), 86~100.

金次謙 ·李宗燮. 1993. 水營灣의 浮遊物質擴散, 大韓土木學會誌, 13(1), 179~192.

Yalin, M. S. 1972. Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, Oxford, 74~110.

Zhou, S and J.A.McCorquodale. 1992. Modeling of rectangular settling tank, Jour. Hydraulic Eng. A. S. C. E. 118(10), Oct. 1391~1405.

1993년 7월 22일 접수

1994년 3월 6일 수리