

## 수조 수치실험에 의한 말뚝구조물의 항력계수 산정 Drag Coefficient Estimation of Pile Type Structures by Numerical Water Basin Experiments

박일흠\* · 이근효\*\* · 조영준\*\*\*

Il Heum Park\*, Geun Hyo Lee\*\* and Young Jun Cho\*\*\*

**요 지 :** RNG  $k-\varepsilon$  난류모형이 포함된 3차원 동수역학 수치모형(FLOW-3D<sup>®</sup>)을 사용하여 수조 수치실험을 통한 항력계수 산정 가능성을 검토하였다. 물리적 실험으로 항력계수가 알려져 있는 말뚝구조물에 대하여, 사각형 말뚝구조물의 수치해에 의한 항력계수값이 1.34~1.52로 물리적 실험값인 1.3~1.5의 범위와 매우 유사한 결과를 보였다. 원형 말뚝구조물은  $0.5 < h/D < 3.5$ 의 범위에서 수조 수치실험치가 0.75~0.78 정도로서 물리적 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 그리고 항력계수값이 알려지지 않은 열을 이룬 말뚝구조물의 경우 항력계수값은 구조물 간의 간섭으로 단일 구조물에 비해 항력계수가 크게 나타났으며, 각 구조물간의 거리비가 작아짐에 따라 구조물이 받는 항력계수값은 증가하는 양상을 보였다.

**핵심용어 :** 항력계수, 수치실험, 말뚝구조물, 후류, 난류모형

**Abstract :** A possibility of the drag coefficient estimation in numerical water basins was discussed where the numerical solution were calculated by the 3-dimensional hydro-dynamical model (FLOW-3D<sup>®</sup>) with the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model. On the known cases of the drag coefficients for a rectangle, the numerical drag coefficients got 1.34~1.52 and the wind tunnel values were 1.3~1.5. For a cylinder, the numerical values were calculated as 0.75~0.78 in the range of  $0.5 < h/D < 3.5$ . Therefore the numerical results showed a good agreement with the physical experiment in a cylinder body runs. On the unknown cases of a row of rectangle, the drag coefficients were more increase than the cases of single body because of the interaction of other structures. And also the drag coefficients had large values as the distance interval ratio of the structures more and more decrease.

**Keywords :** Drag coefficient, numerical experiments, pile type structure, wakes, turbulence model

### 1. 서 론

하천, 연안 및 항만에 설치된 교량의 교각, 돌핀부두의 말뚝 및 기타구조물 등과 같이 유수 중에서 이들 구조물이 받는 항력은 구조물 설계시 중요한 설계인자이다. 이에 따라 많은 연구자들은 구조물의 다양한 형상에 따른 항력계수를 수리모형 및 풍동과 같은 실내실험을 통해 측정하여 왔다(Blevins, 1984; Akins et al., 1977). 하지만 이 같은 물리적 실험의 경우 시간적 · 경제적 문제 및 상사법칙의

문제 때문에 최근에는 수치실험의 가능성 여부가 검토되어 왔다. 그러나 지금까지 개발된 대부분의 수치모형은 그 적용의 한계성 때문에 구조물의 항력계수를 직접 수치실험으로 산정한 예는 드물다.

본 연구에서는 이 같은 항력계수를 산정하기 위하여 최근 개발된 RNG  $k-\varepsilon$  난류모형이 포함된 FLOW-3D<sup>®</sup> 프로그램(Flow Science, 1999)을 사용하여 수조 수치실험을 수행하였다. 이를 위하여, 사각형 말뚝구조물의 경우 항력계수에 관한 Akins et al.(1977)의 풍동실험 결과를 수조 수

\*전남대학교 해양기술학부(Corresponding author: Il Heum Park, School of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea, parkih@chonnam.ac.kr)

\*\*SPP해양조선(주) 부산R&D센터(Busan R&D Center, SPP Plant & Ship Building Co., Ltd.)

\*\*\*전남대학교 대학원 해양공학과(Department of Ocean Engineering, Graduate School, Chonnam National University)

치실험으로 비교·검증하였다. 이 때 기지의 항력계수값을 사용하여 수치수조에서 후류의 해를 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)의 해석해(박일흠 등, 1998)와 비교하였고 Blevins(1984)에 의해 제시된 항력계수값과 검토하였다. 원형 말뚝구조물은 FAVOR(Fractional Area/Volume Representation) 기법을 사용하여 최대한 원형과 유사하게 구조물을 형상화하여 수조 수치실험하였고, Blevins(1984)의 항력계수값과 비교하였다. 또한, 항력계수가 알려져 있지 않는 열을 이룬 사각형 말뚝구조물에 대하여 구조물간의 간격과 구조물의 대표단면길이비의 변화에 따른 항력계수를 산정하고 그 결과를 토의하였다.

## 2. 수치모형

### 2.1 지배방정식

FLOW-3D<sup>®</sup> 모형은 1960년대 Los Alamos National Laboratory에서 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF(Solution Algorithm Volume of Fluid) 방식을 기초로 발전되었으며 1985년부터 FLOW-3D<sup>®</sup>로 명명되어 사용되고 있다. 이후 난류, 천수(Shallow Water) 등과 같은 여러 기능이 포함되어 현재와 같은 프로그램으로 발전되었다. 여기에서 사용하는 비압축성 유체의 연속방정식은 다음과 같다(Flow Science, 1999).

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

여기서,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속,  $A_x, A_y, A_z$ 는 각 방향별 Area Fraction,  $R_{SOR}$ 는 질량의 생성·소멸항,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 그리고 각 방향별 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}u}{\rho V_F} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}v}{\rho V_F} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}w}{\rho V_F} \quad (2c)$$

여기서,  $V_F$ 는 Volume Fraction,  $G_x, G_y, G_z$ 는 체적력항,  $f_x, f_y, f_z$ 는 점성력항, 그리고  $b_x, b_y, b_z$ 는 다공질 매체에서 흐름손실항이다.

그리고, 자유수면을 표현하기 위해 기체와 접하고 있는 액체의 표면형상은 식 (3)과 같이 VOF(Volume of Fluid) 함수  $F(x, y, z, t)$ 로서 정의되며, 여기서  $F$ 는 자유표면을 포함하고 있을 때 단위체적당 유체가 차지하고 있는 체적비를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (3)$$

여기서,  $F_{SOR}$ 은 질량의 생성·소멸으로 인한 유체의 체적변화율이며, 난류확산항  $F_{DIF}$ 는 다음과 같다.

$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(v_F A_x \frac{\partial F}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) \right\} \quad (4)$$

여기서,  $v_F$ 는 난류확산계수이다.

Orszag et al.(1992)에 의해 개발되어진 RNG(Renormalization Group)  $k-\varepsilon$  모형은 기존  $k-\varepsilon$  모형의 계수들을 통계적인 기법을 통해 조정된 것으로 작은 규모의 난류운동을 가지는 유체의 움직임 제거하고 제거된 유체가 큰 크기의 유체 움직임과 점성에 영향을 미치는 영향을 계수조정과 수정된 점성력을 사용하여 표현하는 것이다. 즉, 이 모형은  $k-\varepsilon$  모형의  $v_t$  대신 유효점성계수  $v_{eff}$ 를 도입하여 다음과 같이 나타낸다.

$$v_{eff} = \nu \left[ 1 + \sqrt{\frac{C_v k}{\nu \sqrt{\varepsilon}}} \right]^2 \quad (5)$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성계수,  $C_v$ 는 기존의  $k-\varepsilon$  모형보다 약간 작은 값인 0.085를 일반적으로 사용한다. 그리고 이 모형의 난류운동에너지  $k$ 와 난류감쇠  $\varepsilon$ 에 관한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + D_{DIF} - \varepsilon \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} P + R + D_{DIF} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6b)$$

여기서,  $P$ 는 생성항,  $D_{DIF}$ 는 확산항이고, 그리고  $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ 를 일반적으로 사용한다. 또한 변형율  $R$ 항은 다

음과 같다.

$$R = \frac{C_v \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (7)$$

여기서,  $\eta = \sqrt{\bar{P}} k / \varepsilon$ ,  $\eta_0 = 4.38$ ,  $\beta = 0.012$ 이다.

### 2.2 항력계수 산정

일반적인 구조물의 항력은 구조물의 계면마찰(Skin Friction)을 무시하고 유체에 의해 이 구조물이 받는 평균압력, 즉 각 방향별 압력항력을 구하여 벡터합으로 결정할 수 있으며, 이 때 각 방향별 항력계수를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{DX} = \frac{F_x}{0.5 \rho U_A^2 WH} \quad (8a)$$

$$C_{DY} = \frac{F_y}{0.5 \rho U_A^2 LH} \quad (8b)$$

$$C_{DZ} = \frac{F_z}{0.5 \rho U_A^2 WL} \quad (8c)$$

여기서,  $F_x, F_y, F_z$ 는  $x, y, z$ 방향의 항력,  $W$ 는 구조물의 단면폭,  $L$ 은 구조물의 단면길이,  $H$ 는 구조물의 높이,  $U_A$ 는 접근속도이다.

FLOW-3D<sup>®</sup> 모형에서 구조물의 항력계수를 구하는 방법은 유체흐름에 의해 구조물이 받는 항력의 크기 중 어느 한 셀이 받는 크기  $F(i, j, k)$ 는 식 (9a)와 같이 계산되며, 이 항력을  $x, y, z$ 방향으로 분리하여 식 (9b)와 같이 나타낼 수 있으며, 구조물이 받는 전체 항력은 식 (9c)와 같이 계산될 수 있다.

$$F(i, j, k) = p(i, j, k) dA \quad (9a)$$

$$F(i, j, k) = F_x i + F_y j + F_z k \quad (9b)$$

$$F_{total} = \sum F(i, j, k) = F_{x, total} i + F_{y, total} j + F_{z, total} k \quad (9c)$$

여기서,  $p(i, j, k)$ 는 각 셀별 압력,  $dA$ 는 한 셀내 구조물의 단면적,  $F(i, j, k)$ 는 한 격자내의 항력을 나타낸다.

FLOW-3D<sup>®</sup>는 기본적으로 비정상 유동의 수치해를 구하며, 해석기법으로 유한차분법에 직육면체의 요소로 일반형상을 정의할 수 있는 FAVOR 기법을 도입한 유한체적법 형식을 취하고 있다. 좌표계는 기본적으로 직교 또는 원통형 좌표계를 사용하며, 해석영역을 작은 셀 단위로 나눈 후 이 셀 단위로 계산이 이루어진다. 각 셀에 주어진 압력은 시간단계에서 속도를 구하게 되어 구해진 속도를 통해 Poisson 방정식 형태인 압력방정식의 해를 구한다. 그리고 다시 속도를 교정해 주고 그 후에 복잡한 자유표면의 해석이 요구될 때에는 VOF 방정식 또는 열해석시 내부에너지 방정식, 그리고 기타 필요시 스칼라 방정식을 풀어나가는 방법을 이용하고 있다. 그리고 각 면에서 속도, 기타 스칼라 양들은 격자 중심에 정의하는 엇갈린 격자체계를 사용하고 있다.

## 3. 수치실험 및 결과

### 3.1 사각형 말뚝구조물

Akins et al.(1977)은 풍동실험장치를 이용하여 바람에 의해 사각형 말뚝구조물이 받는 항력을 검토하였으며, 실험조건으로는 Fig. 1(a)와 같이 구조물의 형상에 관한 여러 길이비( $W/L, H/W$ )와 다양한 Reynolds 수에 대하여 항력계수를 측정하였다. 그리고 유사한 경우의 Blevins(1984)에 의하면,  $W/L = 1, \alpha = 0^\circ, H/W = 1$ 인 경우에서 항력계수는 1.3으로 알려져 있다.

본 연구에서 수치실험에 의한 항력계수를 산정하기 위하여 다음과 같은 단계를 거쳤다. 첫째, 이미 알고 있는 항

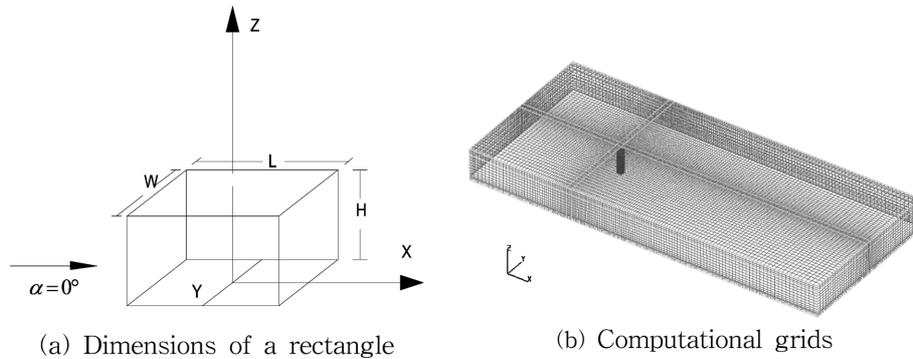


Fig. 1. Definition sketch of a rectangle and computational grids.

력계수  $C_D = 1.3$ 을 이용하여 RNG  $k-\epsilon$  난류모형으로 말뚝 구조물 배후의 후류를 재현하는 간접검증 수치실험을 수행하였다. 즉, 기지의 항력계수를 사용한 수치수조에서 후류의 수치해가 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)의 해석해와 좋은 일치를 보이면, 수치실험으로 항력계수를 충분히 산정할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 둘째, Akins et al.(1977)의 사각형 말뚝구조물에 대한 풍동실험과 동일한 조건으로 수조 수치실험을 수행하여 풍동실험치와 수조 수치해에 의한 항력계수를 서로 비교·검증하여 그 결과를 검토하였다.

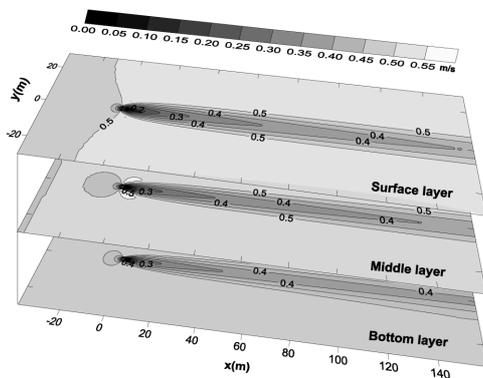
이에 따라  $W/L$ 과  $H/W$ 의 변화에 따른 항력계수 산정을 위한 수치실험시 사용된 수조와 말뚝구조물의 제원은 Table 1과 같다. 그리고 구조물 주변의 유동양상을 자세히 나타내기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 가변격자망을 구성하였으며 격자간격 최소셀은  $(\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)_{\min} = (0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.09 \text{ m})$ , 최대셀은  $(\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)_{\max} = (1.63 \text{ m} \times 1.63 \text{ m} \times 0.97 \text{ m})$ 이다. 경계조건은 유입경계에서 유속과 수위가 일정하게 유지되도록 하였으며, 하류경계에서 연속경계조건 즉, 유입되는

유량만큼 바로 유출되도록 하였다. 그리고 수조의 좌우측면은 유량플러스의 유통을 자유롭게 하였다. 저면에서 조건은 풍동실험조건과 유사하게 조도높이를 무시한 매끄러운 바닥처리를 하였으며, 연직방향으로 속도성분이 0인 벽(Wall) 조건 및 수평방향으로 비활동(Non-slip) 조건으로 처리하였다. 한편, Delft Hydraulics(1981)에 의하면 사각형 말뚝구조물의 경우,  $Re > 1.0 \times 10^3$  범위에서  $C_D$ 가 거의 일정한 값을 보이기 때문에  $Re = 1 \times 10^3$ 을 흐름조건으로 입력하였고, 흐름이 정상상태에 충분히 도달했다고 판단되는 시점인 1000초까지 수치모의를 수행하였다.

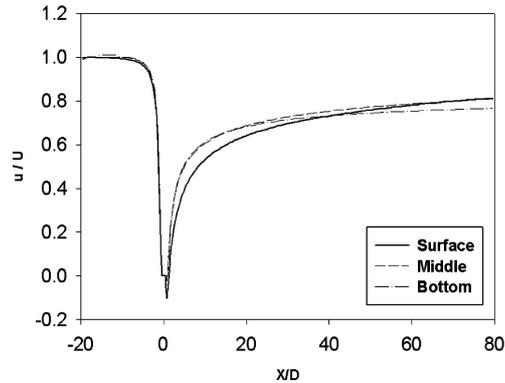
Fig. 2는 기지의  $C_D = 1.3$ 을 이용하여 후류재현에 관한 간접검증 수치실험을 수행한 결과이다. Fig. 2(a)는 말뚝구조물 주변의 유속분포로서, 접근유속보다 유속이 감소하는 후류역은 구조물 배후에서 형성의 꼬리처럼 길게 형성되며, 유속분포는 수조중심축을 따라서 서로 대칭이다. 그리고 구조물 전후에서 유속의 변동이 큰 매우 복잡한 유속 분포 형태를 보인다. Fig. 2(b)는 흐름방향으로 수조 중심축( $y = 0$ )을 따라서 상대속도분포를 층별로 나타낸 것으로

Table 1. Simulation conditions for a rectangle in water basin experiments

$W/L$	$H/W$	Basin Dimension ( $x \times y \times z$ )	Water depth ( $h$ )	Pile structure Dimension ( $W \times L \times H$ )	Free velocity	Reynolds number ( $Re = uW/\nu$ )
1.00	1.0	140 m × 60 m × 5 m	2.2 m	2 m × 2 m × 2 m	0.5 m/s	$1 \times 10^6$
	2.0	140 m × 60 m × 7 m	5.0 m	2 m × 2 m × 4 m		
	4.0	140 m × 60 m × 11 m	9.0 m	2 m × 2 m × 8 m		
0.50	1.0	140 m × 60 m × 5 m	2.2 m	2 m × 4 m × 2 m		
	2.0	140 m × 60 m × 7 m	5.0 m	2 m × 4 m × 4 m		
	4.0	140 m × 60 m × 11 m	9.0 m	2 m × 4 m × 8 m		
0.25	1.0	140 m × 60 m × 5 m	2.2 m	2 m × 8 m × 2 m		
	2.0	140 m × 60 m × 7 m	5.0 m	2 m × 8 m × 4 m		
	4.0	140 m × 60 m × 11 m	9.0 m	2 m × 8 m × 8 m		



(a) Velocity distribution



(b)  $u/U$  along the  $y=0$

Fig. 2. 3-D velocity distributions around a rectangle.

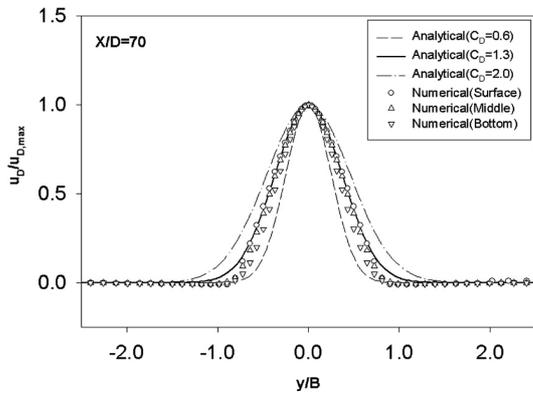


Fig. 3. Relative velocity differences and wake widths by the analytical and numerical solutions.

$U$ 는 접근유속,  $u$ 는 지점유속이다. 구조물과 만나기전 유속은 일정하게 유지되지만 말뚝구조물 바로 배후에서 유속이 급격하게 떨어져 심지어는 음의 유속이 나타나며 최저값은  $u/U = -0.13$ 으로 나타났다. 이후에는 유속이 급격히 회복하는 유속 급경사구간이 나타나며,  $x/D = 20\sim 40$  범위에서 유속분포가 일정해지는 영역이 나타난다. 그리고  $x/$

$D = 0\sim 40$ 의 구간에서는 표층보다 중층과 저층의 유속이 오히려 크게 나타나며,  $x/D > 40$ 에서는 다시 표층유속이 커지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 3은 기지의 항력계수를 사용한 Reichardt(1951)와 Görtler(1942)에 의한 해석해와 후류의 수조 수치실험치를 비교한 것으로  $x/D = 70$ 에서 층별 후류의 유속과 폭을 나타낸 것이다. 그림과 같이 해석해는  $C_D = 1.3$ 인 경우 후류의 폭과 유속의 크기가 비교적 일치하였지만,  $C_D = 0.6$ 과  $C_D = 2.0$ 인 경우 후류의 폭과 크기가 다소 차이를 나타내었다. 따라서, 후류의 수치계산결과는  $C_D = 1.3$ 을 사용한 해석해와 비교하여 좋은 일치를 보였기 때문에 수조 수치실험으로 항력계수를 산정하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 말뚝구조물에 대한 Akins et al.(1977)의 풍동 실내실험과 동일한 조건으로 수조 수치실험한 결과를 각 방향별 항력계수  $C_{DX}$ ,  $C_{DY}$ ,  $C_{DZ}$ 로 나타내었다. Fig. 4(a)는  $W/L = 1$ 일 때,  $H/W$ 의 변화에 따른 항력계수 계산결과로서 주흐름방향의  $C_{DX}$ 는 실내실험값과 좋은 일치를 보이며  $H/W$ 가 증가하면 항력계수값이 약간 감소하는 경향을

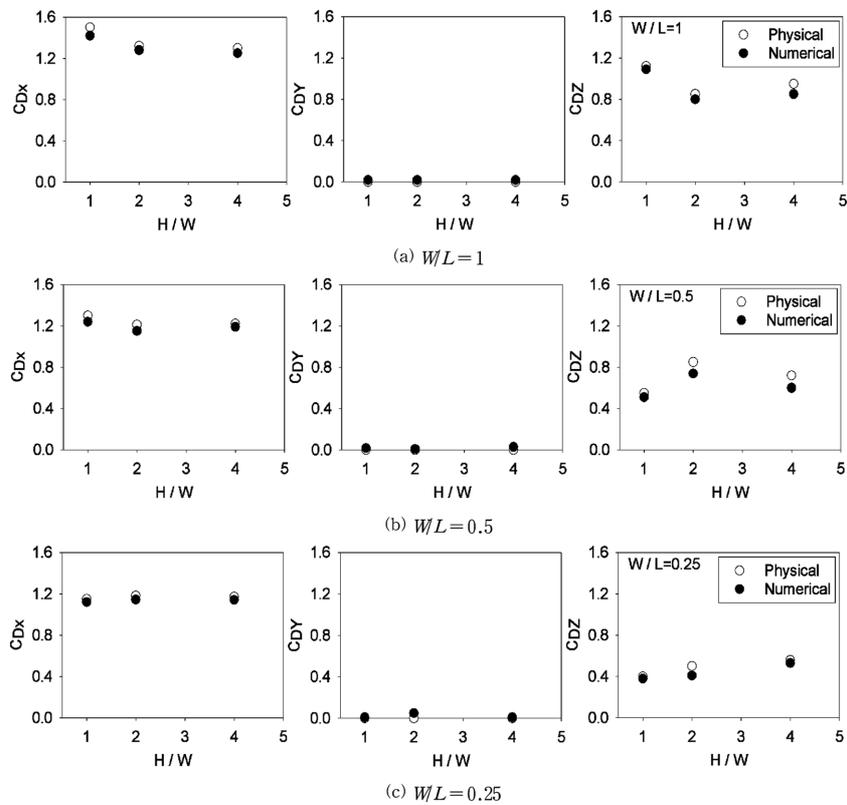
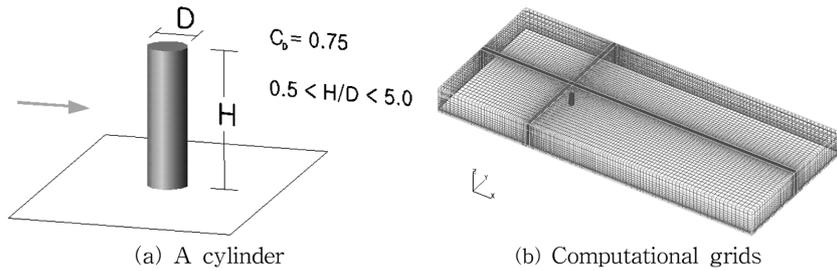


Fig. 4. Directional drag coefficients for a rectangle with variation of  $W/L$  and  $H/W$ .

나타내었다. 이것은 유체력을 받는 구조물의 투영면적에서  $W$ 가 감소한 효과라고 판단된다. 주흐름방향에 수직인  $C_{DY}$ 의 경우 기대되었던 대로 실내실험값과 수치실험 둘 다 항력계수는 0으로 나타났다. 그리고 구조물 배후에서 수평적인 흐름의 혼합도 강하지만 수직적인 혼합도 무시하지 못할 것이므로  $z$ 방향의  $C_{DZ}$ 는  $C_{DX}$ 의 약 2/3 값을 보이고 있다. Fig. 4(b)는  $W/L = 0.5$ 일 때  $H/W$ 의 변화에 따른 항력계수 산정결과이다. 실험결과,  $W/L = 1$ 일 때와 유사한 패턴으로 수치해는 실내 실험값과 좋은 일치율을 보이지만  $C_{DZ}$ 의 경우 다른 경우에 비해 오차가 크게 나타났다. Fig. 4(c)는  $W/L = 0.25$ 일 때의 결과로서 앞의 결과와 같이 수치해는 실내실험값과 모두 좋은 일치율을 보이고 전반적으로 다른 경우에 비해 오차도 작게 나타났다. 한편, Fig. 4(a)의  $W/L = H/W = 1$ 의 경우는 저항물체가 직육면체인 다른 경우와 달리 정육면체로서 항력계수가 다소 크게 나타났으며, 풍동실험 및 수조수치실험에서도 그런 경향이 잘 나타났다. 대개의 구조물 항력계수와 관련된 문헌은 방향별 항력계수보다 합성된 항력계수로 표현하고 있으므로, Fig. 4의 각 방향별 항력계수를 합성하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 즉,  $W/L = 1(1 < H/W < 4)$ 일 때  $C_D = 1.34 \sim 1.52$ ,  $W/L = 0.5(1 < H/W < 4)$ 일 때  $C_D = 1.30 \sim 1.35$ ,  $W/L = 0.25(1 < H/W < 4)$ 일 때  $C_D = 1.30 \sim 1.33$ 이다. 이와 같이 항력계수는  $W/L$ 가 작

**Table 2.** Drag coefficients of a rectangle by numerical simulations

CASE	$H/W = 1$	$H/W = 2$	$H/W = 4$
$W/L = 1.00$	1.52	1.35	1.34
$W/L = 0.50$	1.35	1.32	1.30
$W/L = 0.25$	1.33	1.30	1.32



**Fig. 5.** Definition sketch of a cylinder and computational grids.

**Table 3.** Simulation conditions for a cylinder in water basin experiments

Water depth ( $h$ )	Pile structure Dimension ( $D \times H$ )	Basin Dimension ( $x \times y \times z$ )	Free velocity	Reynolds number ( $Re = uD/\nu$ )
7.0 m	2 m $\times$ 9 m	140 m $\times$ 60 m $\times$ 11 m	0.5 m/s	$1 \times 10^6$
5.0 m				
3.0 m				
1.0 m				

아짐에 따라 1.30에 수렴하는 경향을 보인다. 한편,  $W/L = 1(1 < H/W < 4)$ 의 조건일 때, 물리적 실험에 의한 Blevins (1984)가 제시한 항력계수 값은 1.3~1.5이다. 본 연구에서 수조수치실험결과  $C_D = 1.34 \sim 1.52$  이므로 이 둘은 서로 근접하는 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

**3.2 원형 말뚝구조물**

Fig. 5(a)와 같이 원형 말뚝의 경우, Blevins(1984)에 의하면  $0.5 < H/D < 5$  범위에서 물리실험적으로  $C_D = 0.75$ 로 알려져 있다. 같은 조건으로 수조 수치실험에 의한 항력계수를 구하기 위하여 Table 3에 수조 및 말뚝구조물의 체원을 나타내었다. 그리고 구조물 주변의 유동양상을 자세히 나타내기 위하여 Fig. 5(b)와 같이 가변격자망을 구성하였고 FAVOR 기법을 사용하여 최대한 원형말뚝구조물과 유사하게 격자를 구성하였다. 격자간격 최소셀은  $(\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)_{\min} = (0.22 \times 0.22 \times 0.10)m$ , 최대셀은  $(\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)_{\max} = (1.87 \times 1.94 \times 1.5)m$ 이며, 계산은 총 500초까지 수행하였다. 그리고 다른 조건은 사각형 말뚝의 경우와 거의 동일하게 처리하였다.

수치실험결과, Fig. 6(a)-(d)와 같이  $0.5 < h/D < 3.5$  범위에 대한 항력계수값은 풍동실험값과 아주 유사한 0.75~0.78로 산정되었다. 한편 계산결과를 도시하지 않았지만 수심  $h = 0.5$  m인  $h/D = 0.25$ 인 경우에는 수치해가 다소 진동하는 경향을 보였으며 항력계수는 1.1정도의 값을 보였다. 이와 같이 수조 수치실험시에도 풍동실험과 같이  $0.5 < H/D (\approx h/D) < 5$  범위에서는 구조물의 높이나 수심에 상관없이 항력계수값이 거의 일정하게 나타날 것으로 판단된다.

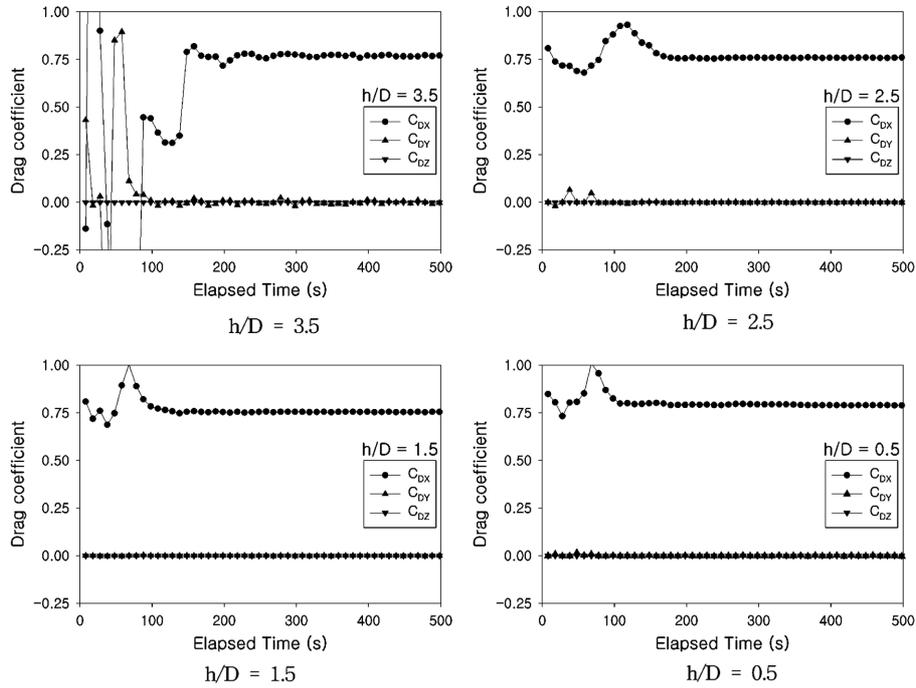


Fig. 6. Time series of drag coefficients for a cylinder in various water depths.

3.3 열을 이룬 사각형 말뚝구조물

열을 이룬 말뚝구조물의 항력계수를 산정하기 위하여, Fig. 7(a)와 같이 동일한 크기의 정사각형단면의 말뚝구조물 3개를 열방향으로 배치하였으며, 말뚝구조물 사이의 간격  $l_s$ 와 구조물 단면 대표길이  $D$ 와의 비( $l_s/D = 2, 3, 4, 5,$

6, 7)에 대하여 수치실험으로 각각의 항력계수를 산정하였다. 격자구성은 Fig. 7(b)와 Table 4와 같은 조건으로 가변 격자망을 사용하여 각각 구조물 주변의 흐름양상을 정확하게 표현되도록 하였으며, 총모의시간은 1300초로 하였다. 기타 실험조건은 3.1절의 경우와 동일하다.

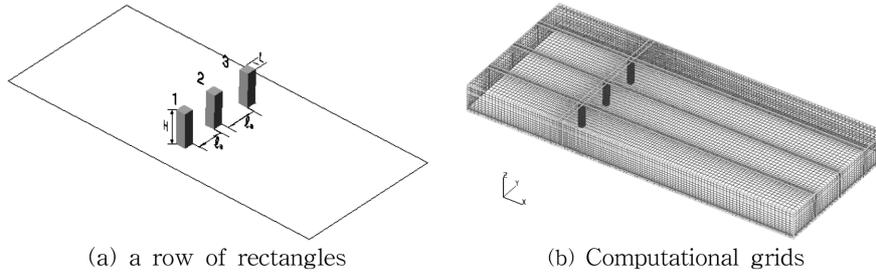


Fig. 7. Definition sketch of a row of rectangles and computational grids.

Table 4. Simulation conditions for a row of rectangles in water basin experiments

	Basin Dimension ( $x \times y \times z$ )	Water depth ( $h$ )	Pile structure ( $W \times L \times H$ )	Minimum cell $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$	Maximum cell $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$
7	140m×60m×11m	7.0m	2 m×2 m×9 m	0.4 m × 0.4 m × 0.1 m	1.63 m × 1.83 m × 1.02 m
6					1.63 m × 1.96 m × 1.02 m
5					1.63 m × 1.92 m × 1.02 m
4					1.63 m × 1.88 m × 1.03 m
3					1.63 m × 1.98 m × 1.03 m
2					1.63 m × 2.27 m × 1.03 m

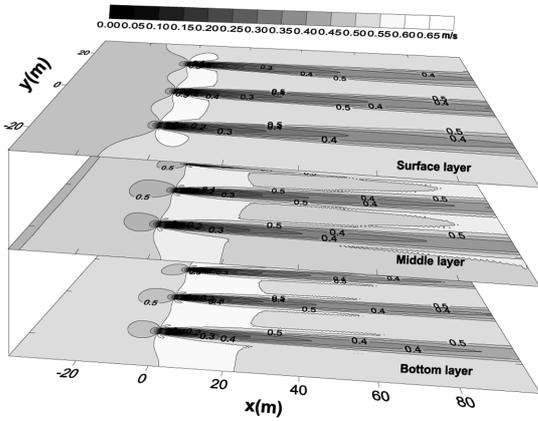


Fig. 8. Wake distributions behind a row of rectangles ( $l_s/D = 7$ ).

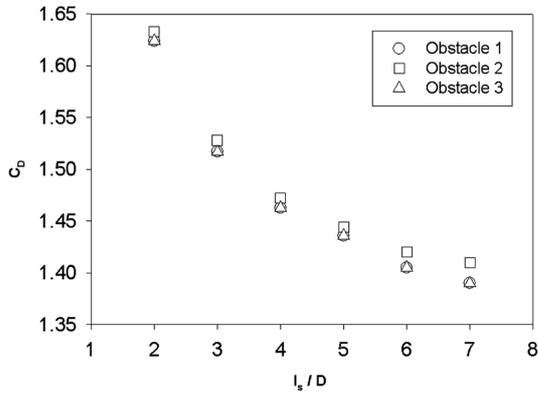


Fig. 9. Drag coefficients of a row of rectangles.

계산결과, 열을 이룬 구조물의 유속분포는 Fig. 8과 같이 구조물 배후영역에서 후류역이 길게 나타나며 구조물 바로 뒷부분에는 저압부가 형성되어 유속이 현저하게 작음을 알 수 있다. Fig. 9와 같이 열을 이룬 구조물의 경우, 일반적으로 항력계수는 단일 구조물에 비해 크게 나타났다. 각 구조물간의 거리 비가 가장 큰  $l_s/D = 7$ 일 때 중앙구조물의 항력계수는 1.41이며, 양측면구조물은 1.39로 조금 작게 나타났다. 구조물 간 거리 비가 가장 작은  $l_s/D = 2$ 일 때 중앙구조물의 항력계수는 1.63이며, 양측면구조물은 1.62로 나타났다. 이상과 같이 각 구조물간의 간격이 점점 작아지면 구조물이 받는 항력계수는 점점 증가하는 양상을 나타내었다. 즉, 중앙에 배치된 구조물의 경우 양쪽 구조물의 간섭으로 유체저항을 크게 받는 것을 알 수 있는데, 각 구조물간 거리가 작아짐에 따라 구조물간의 상호간섭에 의해 구조물이 받는 항력이 단일 구조물에 비해 크게 나타나는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

수조 수치실험에 의한 항력계수 산정 가능성을 검토하기 위하여, 사각형단면, 원형단면의 단일말뚝구조물 및 열을 이룬 말뚝구조물을 대상으로 RNG  $k-\epsilon$  난류모형이 탑재된 FLOW-3D® 프로그램을 사용하여 다양한 수치실험을 수행하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 기지의 항력계수를 사용한 사각형 말뚝구조물의 후류에 관한 수치계산결과, 수치해는 해석해와 좋은 결과를 보였기 때문에 수조 수치실험으로 항력계수를 산정하여도 무리가 없을 것으로 판단 할 수 있었다.

(2) 사각형 말뚝구조물의 수조 수치실험결과, 각 방향별 항력계수는 구조물의 폭에 대한 길이비와 높이에 대한 폭비의 변화에 따른 각 항력계수값이 풍동실험치와 서로 유사한 값을 보였다.

(3) 사각형 말뚝구조물의 수치해에 의한 합성항력계수는 1.34~1.52로 물리적 실험에 의한 1.3~1.5와 거의 일치하는 값의 범위를 보였다.

(4) 원형 말뚝구조물에 있어서 수조 수치실험에 의한 항력계수는 0.75~0.78로 물리적 실험으로 제시된 0.75와 비교하여 거의 일치하는 값을 주었다.

(5) 열을 이룬 사각형 말뚝구조물의 경우 일반적으로 항력계수는 단일 구조물에 비해 큰 값을 보였으며, 각 구조물간의 거리가 작아짐에 따라 구조물간의 상호간섭에 의해 항력계수값은 점점 증가하는 결과를 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년도 전남대학교 수산과학연구소 해양환경조사사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

박일흠, 이종섭, 이문욱 (1998). 저항물체 배후의 이차원 후류에 관한 대격자 수치모형. 한국해양-해양공학회지, 10(2), 83-92.

Akins, R.E., Peterka, J.A. and Cermak, J.E. (1977). Mean Force and Momentum Coefficients for Buildings in Turbulent Boundary Layers. J. Indust. Aeronaut., 2, 195-209.

Blevins, R.D. (1984). Applied fluid dynamics handbook. Van Nostrand Reinhold Co., New York.

Delft Hydraulics (1981). Hydro Compendium. Delft, The

Netherlands.  
Flow Science (1999). FLOW-3D User's Manual. Los Alamos,  
NM, USA.  
Grtler, H. (1942). Berechnung von Aufgaben der freien Tur-  
bulenz auf Grund eines neuen Nherungsansatzes. ZAMM,  
22, 244-245.  
Orszag, S.A., Yakhot, D.B., Thangam, S. and Gatski, T.B.

(1992). Development of turbulence models for shear flows  
by a double expansion. technique phys. Fluid, A, 4(7).  
Reichardt, H. (1951). Gesetzmssigkeiten der freien Turbulenz.  
VDI- Forschungsheft 414(1942), 2nd Edition.

---

Received December 17, 2008

Accepted February 17, 2009