

정상류 수몰 사각실린더에 작용하는 항력 특성에 관한 수치모의 연구

이두한^{*}, 김영주¹, 이동섭¹
¹한국건설기술연구원 하천해안연구실

Numerical Study of Drag Forces Acting on a Submerged Square Cylinder in Steady Flow Condition

Du Han Lee^{1*}, Kim Young Joo¹, Dong Sop Rhee¹

¹River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

요약 본 연구에서는 수치모의를 통해서 월류 흐름이 존재하는 수몰 사각 실린더의 항력 특성에 대하여 분석하였다. 모의의 신뢰성을 검토하기 위하여 실험자료와 비교하였으며 실험에서 측정하기 어려운 실린더 접촉면의 압력에 대한 분석을 통해서 상대 수심의 따른 항력의 특성을 분석하였다. 3차원 동수역학 모형을 이용한 수몰 사각 실린더의 항력 계산 결과는 실험자료의 상대 수심의 변화에 따른 항력계수의 변화를 유사하게 모의하고 있음을 확인할 수 있었다. 수치모의 결과 분석에 의하면 수몰 사각 실린더에 작용하는 항력은 대부분 압력이며 상대 수심이 증가함에 따라 전단력의 비중은 감소하였다. 실린더 접촉면의 압력계수 분석 결과에 의하면 상대 수심이 낮은 경우에는 전면에 높은 압력계수가 형성되고 후면에 낮은 압력계수가 형성되어 결과적으로 높은 항력계수가 나타남을 확인하였다. 상대수심이 증가하면 전면부의 압력계수는 감소하고 후면부의 압력계수는 증가하여 2차원 흐름 내의 사각 실린더와 유사한 양상을 나타낸다. 정수압 영향 분석에 의하면 전면부와 후면부의 수위 차에 의한 정수압은 항력에 미치는 영향이 제한적이며 사각 실린더에 의해 형성되는 국부적인 수위와 함께 3차원적인 흐름에 의해 형성되는 동수압의 영향이 크다는 것을 확인하였다.

Abstract In this study, the drag forces on a submerged square cylinder were analyzed using a three dimensional hydrodynamic model. The numerical results were compared with the experimental results to check the reliability of the numerical simulations, and the characteristics of the drag forces with the relative depths were analyzed by analyzing the pressure acting on the cylinder surface, which are normally difficult to measure experimentally. The numerical results showed that the drag forces acting on a submerged square cylinder originate mainly from the pressure forces, and component of the shear forces decreased with increasing relative depth. The pressure coefficient distributions showed that in the case of a low relative depth, a relatively high pressure was formed in the front of a cylinder, and a relatively low pressure was formed in the rear, which gives a high drag coefficient. In a high relative depth, the pressure in the front decreased and pressure in the rear increased, which is a similar phenomenon to that normally observed in two dimensional square cylinder flow. The effect of the static pressure was analyzed and the surface elevation difference between the front and rear zone of a cylinder has a limited effect on the drag forces. Finally, the numerical results showed that the drag forces acting on a submerged square are dominated by the dynamic pressure formed by three dimensional flow and the distribution of local surface elevation.

Key Words : Drag coefficient, Dynamic pressure, Pressure coefficient, Submerged square cylinder, Three dimensional hydro dynamic model

본 연구는 환경부 Eco-STAR project(수생태 복원사업단) ‘수생태계를 위한 자연하상복원기술 개발’에 의해 수행됨

*Corresponding Author : Du Han Lee(Korea Institute of Construction Technology)

Tel: +82-31-910-0269 email: dhlee@kict.re.kr

Received December 4, 2013

Revised (1st April 29, 2014, 2nd May 15, 2014)

Accepted June 12, 2014

1. 서론

하천에는 흐름 저항에 영향을 미치는 다양한 자연적, 인위적 구성요소를 포함한다. 관목 및 교목을 포함하는 식생을 비롯하여 거석을 포함하는 다양한 하상재료, 보, 수제, 낙차공 및 교각 등의 구조물도 흐름 저항에 영향을 미치는 주요한 구성요소로 볼 수 있다. 이와 같은 다양한 구성요소가 흐름 저항에 미치는 영향을 평가하는 방법은 이미 제시되어 있으나[1,2], 유체역학적인 관계를 보다 정량적으로 평가하기에는 한계가 있다.

흐름장 내의 모든 물체는 흐름과의 상호작용이 발생하며 이 효과는 물체의 표면에서의 힘으로 표현할 수 있다. 유체의 점성 효과로 물체 표면에 평행하게 작용하는 힘은 벽전단력(τ_w)이며, 물체 표면에 연직으로 작용하는 힘은 압력(p)이다. 이 두 개의 응력 성분 중 물체에 흐름 방향으로 작용하는 힘의 총합이 항력(D)이며 이는 유체의 운동량 손실과 관계되어 흐름 저항으로 작용한다. 흐름장 내의 물체가 받는 항력에 대해서는 기계 및 항공 분야에서 많은 연구가 이루어져 왔으며[3], 수리학 분야에서는 식생의 흐름 저항 산정을 위해 흐름장 내의 단독 또는 다열 실린더에 작용하는 항력에 대한 다수의 연구가 수행되었다.

그러나 기존의 대부분의 실린더에 작용하는 항력 관련 연구는 항력 작용 특성이 2차원 상태와 유사한 비수몰(unsubmerged) 상태의 단독 및 다열 실린더에 대하여 수행되었으며 개수로 상태에서 실린더가 수몰된 경우에 대한 연구는 상대적으로 드문 편이다. 특히, 항력 모델을 적용하여 식생의 흐름저항을 산정하는 경우에도 기본 가정은 물에 잠기지 않은 식생을 가정한다. 수몰 상태의 물체에 작용하는 항력을 평가하는 것은 침수 식생 해석, 거석 등의 자연재료의 수리 안정성 평가, 수제 및 말뚝 등의 수리 구조물의 수리 안정성 평가, 제방 등의 수리 구조물 월류 해석 등을 위해 필수적이나 이에 대한 연구는 국내 외에서 부족한 편이다.

김지성 등[4]은 개수로 내 장애물의 항력계수 특성을 1차원 모형으로 분석하여 제시하였으나 수심의 영향을 고려하지는 못하였다. 이동섭 등[5]은 모형 식생에 대한 수심 영향을 고려한 실험을 수행하였다. 수몰상태의 물체에 작용하는 항력은 물체의 높이(k)와 수심(h)의 비로 나타내는 상대수심에 따라 다른 특성을 보이는데, 상대수심 h/k 가 5 이상인 경우에도 조도계수는 상대수심의

영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. Mirei 등[7]은 상대수심이 1.0~2.5 사이인 수몰 사각 실린더에 대한 항력 실험을 통해 상대수심이 2.0 이하인 경우에 항력계수 C_d 는 상대수심의 영향을 받음을 보여주었으나, 그 원인을 명확하게 제시하지는 못하였다.

본 연구에서는 Mirei 등[7]의 실험 결과를 이용하여 3차원 동수역학 모형을 이용한 수몰 상태의 사각 실린더에 작용하는 항력 모의의 적정성을 평가하고 이를 바탕으로 상대수심에 따른 항력계수의 변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 이론 및 연구 동향

유동장 내의 물체가 받는 힘은 압력과 전단응력으로 표현되고, 상류 유속(upstream velocity)과 같은 방향으로 작용하는 응력의 합을 항력으로 정의하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad (1)$$

여기서 F_D 는 항력, p 는 물체 표면에 작용하는 압력, θ 는 상류 유속에 대한 물체 표면의 각도, τ_w 는 상류 유속과 평행하게 작용하는 물체 표면의 전단 응력, A 는 상류 유속 방향에 대한 연직 면적이다.

식 (1)에 의해 항력을 산정하기 위해서는 물체 표면에 작용하는 전단응력과 압력의 분포가 필요하며 이를 위해서는 정밀한 수치모의나 실험이 필요하다. 항력을 간편하게 산정하기 위해서 다음과 같이 정의된 무차원 변수인 항력계수(C_D)를 이용하며, 외부 유동(external flow) 상황에서의 기본적인 형상의 2차원 및 3차원 물체의 항력 계수는 잘 알려져 있다[6].

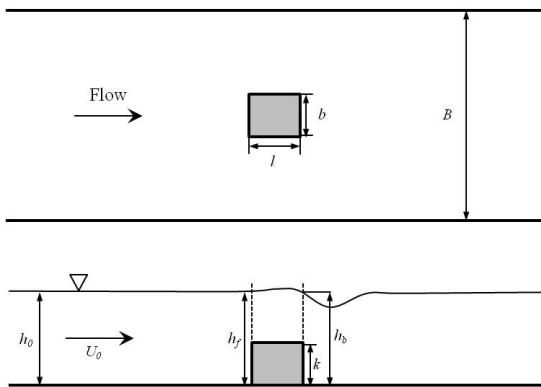
$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \rho U_0^2 A} \quad (2)$$

여기서 U_0 는 물체의 영향을 받지 않은 상류 유속이다. 차원해석에 의하면 항력계수는 물체의 형상, 표면의 상대 조도, 그리고 레이놀즈 수의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \rho U^2 A} = \Phi \left(\frac{l_i}{l}, \frac{\epsilon}{l}, \frac{\rho U l}{\mu} \right) \quad (3)$$

여기서 l 는 특성 길이이며, l_i 는 물체의 형상과 관련된 길이, ϵ 은 조고(roughness height)를 나타낸다.

자유수면이 있는 개수로 흐름의 경우에는 레이놀즈 수와 함께 프루드 수(F_r)도 고려하여야 하며, 상대 수심도 중요한 변수가 된다. 개수로 흐름의 수몰 사각 실린더의 형상 및 관련 인자는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. Mirei 등[7]은 개수로 비수몰 사각 실린더의 항력계수의 지배인자로 흐름상태(레이놀즈 수 및 프루드 수), 사각실린더 형상(l/k 및 b/k), 수로 형상과 실린더 상대적 크기(B/b), 사각 실린더와 흐름의 상대적인 관계(h_0/k) 등을 제시하였다. 여기서 h_0 는 물체의 영향을 받지 않는 상류 수심, B 는 수로 폭이며, 상류 유속 U_0 는 h_0 지점에서의 수심평균유속이 된다.



[Fig. 1] Conceptual diagram of a submerged square cylinder

개수로의 항력계수 평가에서는 수로 폭의 영향도 고려하여야 하는데 비수몰상태의 사각실린더의 경우에는 Juichiro 등[8]의 실험에 의하면 수로폭과 실린더 폭의 비(B/b)가 14 이상이면 수로폭의 영향은 무시할 수 있으며 항력계수는 2.21의 일정한 값을 취한다. Tatsuhiko 등[9]은 수몰 상태의 사각 실린더($b = 0.2$ m, $k = 0.03$ m) 실험을 통해서 무차원 상대 수심(h/k)이 2 이상이면 상대 수심에 따른 항력계수의 변화는 없으며 계수 값은 1.2의 일정한 값을 취함을 제시하였다. 이는 Shohei[6]가 실험을 통해서 무차원 상대 수심이 5 이상인 경우에도 조도계수

는 무차원 상대 수심의 영향을 받는다는 것과 다소 다른 관점을 나타내는데 항력계수와 조도계수의 특성이 상대 수심에 따라 달라짐을 시사한다고 할 수 있다. Mirei 등[7]은 상대 수심이 1.0~2.5 사이인 수몰 사각 실린더에 대한 항력 실험을 통해 상대 수심이 2.0 이하인 경우에 항력계수는 프루드 수와 상대수심의 영향을 받으며 상대 수심이 2.0 이상에서 l/k 가 1인 경우에 항력계수는 1.16으로 일정해짐을 제시하였다. 자유 수면이 없는 외부 유동 상태에서 사각 실린더의 경우에는 레이놀즈 수가 $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^8$ 이라면 레이놀즈 수의 영향은 무시할 수 있으며 이 상태에서 l/k 가 1인 경우에 항력계수는 1.05로 알려져 있다.

개수로 내의 사각 실린더에 작용하는 항력은 물체주변의 압력을 정수압으로 분포로 가정하여 비수몰 상태의 경우에는 식 (4)와 같이, 수몰 상태인 경우에는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho g b (h_f^2 - h_b^2) \quad (4)$$

$$F_D = \rho g b k (h_f - h_b) \quad (5)$$

Tatsuhiko 등[8]과 Mirei 등[7]은 그들의 실험결과를 이용하여 정수압 가정에서 유도된 식 (4)와 식 (5)의 적용성을 평가하였다. 그 결과에 의하면 비수몰 물체의 경우에는 오차가 크지 않았지만, 수몰 물체의 경우에는 실측된 항력은 정수압 가정에서 계산된 항력보다 크게 나타났다. 그 이유로는 수몰 물체 주변의 수면형의 곡률이 크고 3차원적 성격이 강한 흐름이 발생하며 배후 압력이 정수압에 비해 저하되기 때문이라고 주장하였다.

정수압 가정에서는 전단력이 고려되지 않지만, 사각 실린더 실험의 경우 대부분 표면이 매끄러운 상태이므로 이를 무시하는 것이 타당할 수 있다고 판단되며 실제로 전단력이 항력에 미치는 영향은 매우 제한적이다. 그러나 항력의 주 요인인 압력 분포는 물체 직상류부는 정수압 가정과 큰 차이가 없을 수 있으나 배후에서는 흐름 박리에 의한 와류 형성으로 인한 동압력의 저하가 발생하며 이 압력 저하가 총 항력의 주요 요인이므로 이를 정수압 가정으로 접근하는 것은 한계가 있다.

3. 수치모의

3.1 적용 모형

본 연구에서는 3차원 동수역학 모형으로 상용 모형인 Flow3D 모형을 적용하였는데 연속방정식과 x 방향 운동량 방정식은 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같다[9].

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \quad (7)$$

여기서 V_F 는 흐름 체적비(fractional volume open to flow), c 는 음속, t 는 시간, A_i 는 흐름 면적비(fractional area open to flow), u_i 는 i 방향 유속 등을 나타내며 f_i 는 점성항으로 식 (8)과 같이 정의된다[9].

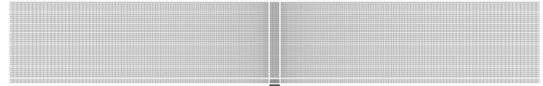
$$f_i = \left\{ u s x_i - \left[\frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{ix}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{iy}) + (A_z \tau_{iz}) \right] \right\} \frac{1}{\rho V_F} \quad (8)$$

여기서 $u s x_i$ 는 벽전단응력으로 벽 부근의 벽 유속분포 법칙(law of the wall velocity profile)에 의해 모의된다. 운동량 방정식에 적용되는 난류모형은 RNG (Renormalization Group method) $k-\epsilon$ 모형[10]을 적용하였다. RNG 모형은 표준 $k-\epsilon$ 모형이 단일 길이 척도에 의해서만 와점성항이 결정되는 단점을 보완하기 위해 제시된 모형으로 ϵ 방정식의 형태를 수정하여 다양한 길이 척도에서 발생하는 난류확산을 고려한 모형이다.

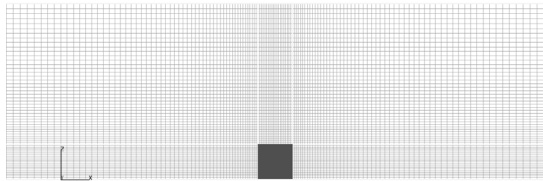
3.2 수치모의 구성

본 연구는 앞에서 소개한 수물 사각실린더를 대상으로 한 Mirei 등[7]의 실험 사례에 대하여 수치모의를 수행하였다. Mirei 등[7]은 b/k 는 1로 고정한 상태에서 l/k 는 0.5~2.5의 범위를 대상으로 실험을 수행하였다. 하상 경사는 1/1,000~1/1,400, 프루드 수는 0.658~0.824, 레이놀즈 수는 19,125~30,033의 범위였다. 본 연구에서는 b/k 및 l/k 는 1로 고정한 상태에서 하상경사가 1/1,200인 경우에 대해서 수치모의를 수행하였다. 수로 길이는 2 m, 수로 폭은 0.6 m, 하상 경사는 1/1,200로 설정하였으며, 사각 실린더의 높이(k)는 0.04 m로 설정하였다. 격자 구성은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 수로 중심에 대해서 흐름

조건이 대칭이라고 가정하여 구성하였다. 경계조건으로는 상류경계는 유량 및 수위 조건을 설정하였으며 하류는 Neumann 조건으로 설정하였다.



[Fig. 2] Computational meshes in a x-y plane



[Fig. 3] Computational meshes in a x-y plane

3.3 수치모의 결과 및 실험과의 비교

비교 대상인 실험의 흐름 조건은 Table 1과 같으며 수치모의는 이 중에서 case 1, case 2, case 4, case 5 및 case 7에 대해서 수행하였다. 이 중 실험 조건 case 3과 case 6은 실험 유량 조건에서 상류 경계 수위를 변화시켜도 유사한 상류 수심이 형성되지 않아 본 분석에서 제외하였다.

수치모의 결과는 Fig. 4~Fig. 6과 같다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 수위는 상대 수심이 낮은 경우에는 실린더 전면부 및 후면부에서 국부적인 변화가 다소 크게 나타나며 실린더 하류부에서의 수위 상승이나 하강은 관측되지 않는다. 상대 수심이 증가하면 실린더 상부에서 최대 수위가 발생하고 하류에 수위의 상승과 하강이 관측된다. Fig. 5는 수표면에서의 유속을 도시한 것인데 상대 수심이 낮은 경우에는 수표면에서 실린더 후면의 후류로 인한 저유속 구간이 나타나며 상대 수심이 증가하면 실린더 상부의 국부적 유속 증가와 후면의 국부적 유속 저하 구간이 나타난다. Fig. 6은 수로 중심 축의 유속분포를 도시한 것인데 상대 수심이 증가하면 후류로 인한 저유속 구간이 감소하면서 실린더 상부에 국부적인 고유속 구간이 형성되는 것을 보여주고 있다.

수치모의에 각 케이스별 흐름 특성은 Table 2와 같으며 실험 결과 중 수로 중앙부의 수위가 제시된 case 1, case 4 및 case 7과의 수위 비교는 Table 3 및 Fig. 7과 같다. 경계조건에 따라 실린더의 영향으로 형성되는 정상류 상태의 수위 및 유속이 달라서 실험조건과 정확히

[Table 1] Hydraulic conditions in experiments (Mirei et al.[5])

	Discharge Q(m ³ /s)	Depth averaged velocity V(m/s)	Depth h ₀ (m)	Froude No. (F _r)	Reynolds No. (R _e)	Bed slope
Case 1	0.0121	0.498	0.04	0.795	19,909	1/1200
Case 2	0.0170	0.572	0.05	0.817	22,879	
Case 3	0.0189	0.550	0.06	0.712	21,999	
Case 4	0.0236	0.600	0.07	0.724	24,000	
Case 5	0.0311	0.656	0.08	0.741	26,244	
Case 6	0.0402	0.754	0.09	0.799	30,033	
Case 7	0.0389	0.660	0.10	0.667	26,394	

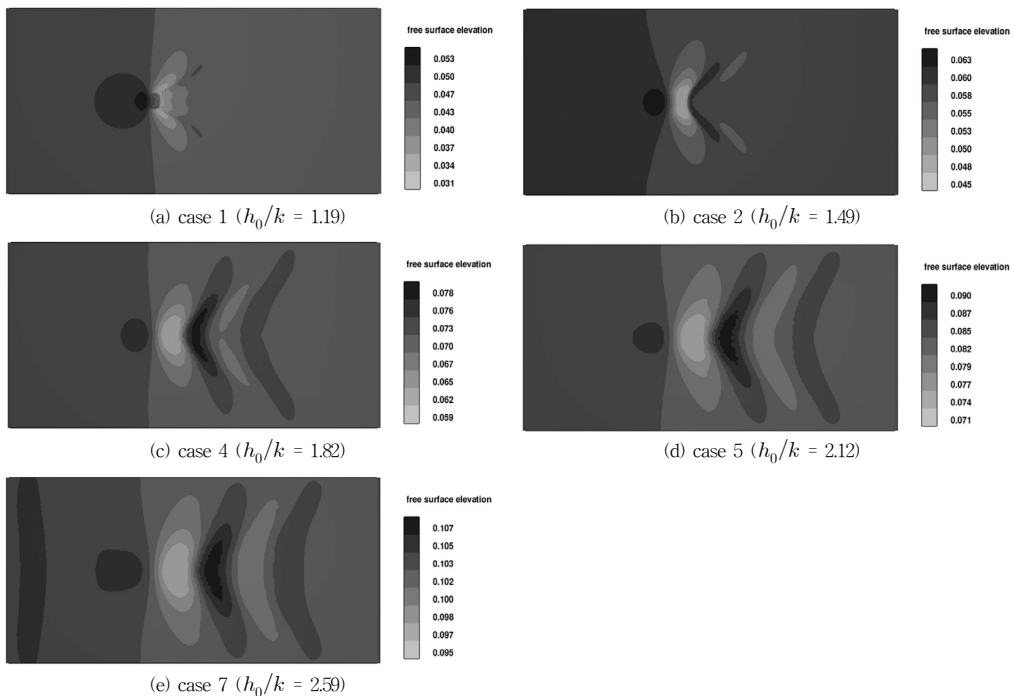
[Table 2] Hydraulic conditions in numerical simulations

	Discharge Q (m ³ /s)	Depth averaged velocity V (m/s)	Depth h ₀ (m)	Froude No. (F _r)	Reynolds No. (R _e)	Bed slope
Case 1	0.0121	0.426	0.047	0.625	16,990	1/1200
Case 2	0.0170	0.475	0.060	0.621	18,919	
Case 4	0.0236	0.542	0.073	0.642	21,613	
Case 5	0.0311	0.615	0.085	0.675	24,502	
Case 7	0.0389	0.629	0.103	0.625	25,080	

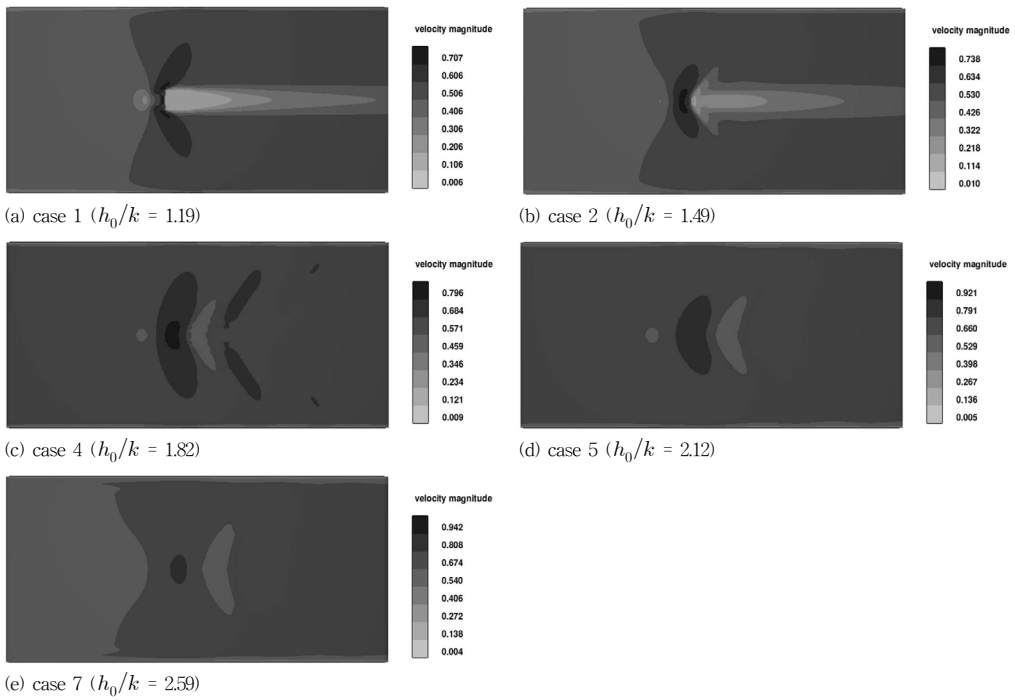
일치하는 흐름 조건을 형성할 수는 없었지만 실험 상태와 유사한 조건이 형성되었다고 판단된다. 실험과 동일한 유량 조건에서 수치모의 결과는 수심은 유사하지만 유속이 다소 낮게 형성되어 프루드 수 및 레이놀즈 수가

다소 낮게 나타나고 있다.

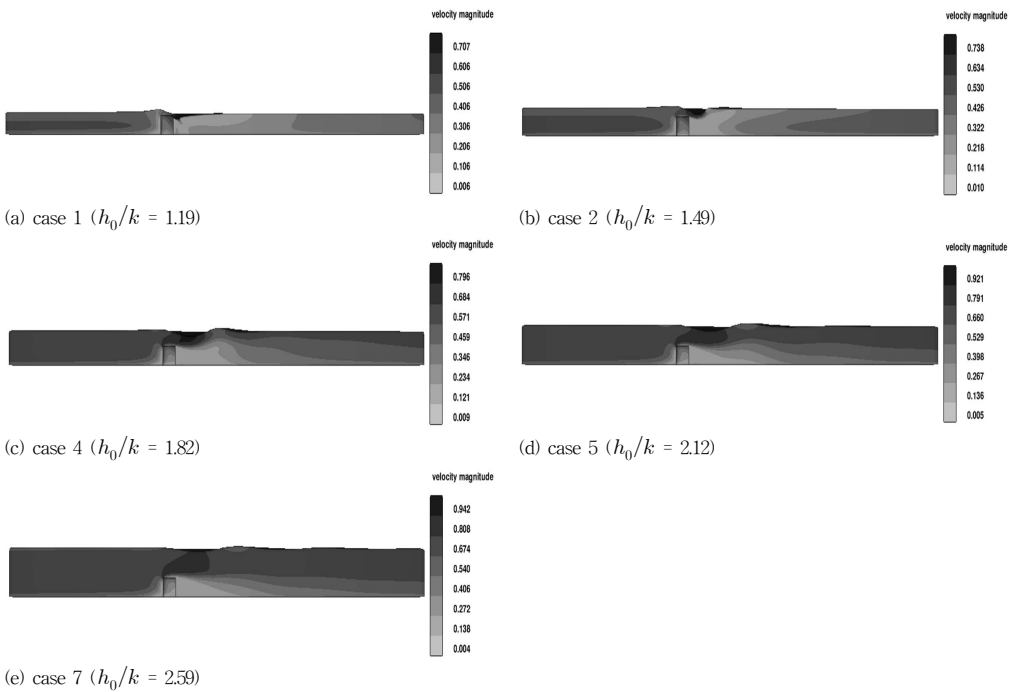
수위는 Fig. 7 도시한 바와 같이 실험과 수치 결과가 유사하게 나타나고 있다. Table 3에서는 실린더 전면부에 형성되는 최고 수위와 발생지점, 실린더 후면에서 형



[Fig. 4] Surface elevation distributions(x-y plane, unit : m)



[Fig. 5] Velocity distribution in water surface(x-y plane, unit : m/s)

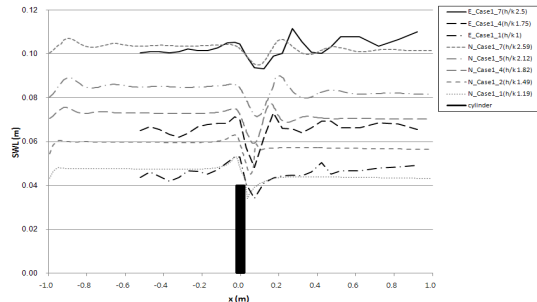


[Fig. 6] Velocity distribution at the center (x-z plane, unit : m/s)

[Table 3] Comparison of water surface elevations at the center

	Case name	h_0/k	h_0 (m)	Maximum water level in front of cylinder		minimum water level in rear of cylinder		Maximum water level in rear of cylinder		Average water level in downstream (m)
				Location (m)	Water level(m)	Location (m)	Water level(m)	Location (m)	Water level(m)	
Experimental results	case 1	1.00	0.045	-0.002	0.053	0.071	0.034	0.423	0.050	0.048
	case 4	1.75	0.065	-0.031	0.071	0.071	0.048	0.172	0.073	0.067
	case 7	2.50	0.101	-0.031	0.105	0.121	0.093	0.270	0.112	0.107
Numerical results	case 1	1.19	0.048	-0.029	0.053	0.039	0.034	0.001	0.047	0.043
	case 2	1.49	0.060	-0.030	0.063	0.051	0.045	0.081	0.059	0.057
	case 4	1.82	0.073	-0.919	0.076	0.065	0.059	0.152	0.077	0.070
	case 5	2.12	0.085	-0.891	0.089	0.086	0.071	0.202	0.090	0.082
	case 7	2.59	0.104	-0.905	0.107	0.090	0.095	0.209	0.107	0.102

성되는 최저 수위와 발생지점, 최고 수위와 발생 지점 등을 비교하였다. 케이스 별로 최고 수위 및 최저 수위는 매우 근사하고 있으며 발생 지점은 다소의 차이를 나타내지만 그 차이값이 크지는 않다. 전체적으로 실험의 흐름 상태와 수위를 비교적 근사하게 모의하고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 7] Comparison of water surface elevations at the center

3.4 항력계수 비교

Mirei 등[7]의 실험에서는 정격 용량 20 N/m²의 3분력 계를 사각 실린더에 연결하고 이를 수로 바닥에 장착하여 항력을 직접 측정하였다. 본 연구에서는 수치모의 결과를 이용하여 식(1)에 따라 항력을 산정하였다. 즉, 실린더 구조물에 접한 격자에서 계산된 압력 및 전단 응력을 합산하여 항력을 산정하였다. 실험에서 제시된 항력계수와 수치모의에서 계산된 항력계수는 Table 4와 같으며 이를 레이놀즈 수에 대해서 도시하면 Fig. 8과 같다.

앞에서 서술한 바와 같이 수물 물체의 항력계수는 레이놀즈 수와 함께 상대 수심의 영향도 받는 것으로 알려져 있다. 실험 조건에서는 레이놀즈 수를 변화시키기 위

해서는 유량 및 수심을 조정하게 되는데 이는 상대 수심을 변화시키게 되어 동일한 레이놀즈 수에 대해서 다양한 상대 수심을 조성하는 것에는 한계가 있다. 수치모의에서도 동일한 상황이 발생하는데 특히 본 연구에서는 수치모의 경계 조건을 Neumann 조건으로 설정하여 유사한 레이놀즈 수에 대해서 다양한 상대수심에 대한 모의를 수행하지는 못하였다.

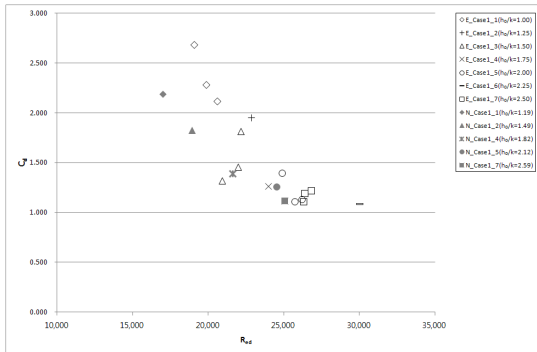
Table 4와 Fig. 5에서 보는 것과 같이 실험결과는 레이놀즈 수가 증가하면 항력계수가 감소하는 경향성을 잘 나타내고 있다. 실험의 CE03과 CE07의 경우에는 유사한 레이놀즈 수에서 상대 수심이 증가하면 항력계수가 감소함을 보여주고 있는데 레이놀즈 수가 각각 20,590과 20,916으로 큰 차이가 없는 상태에서 상대 수심이 1.00에서 1.50로 증가하면서 항력계수는 2.118에서 1.320으로 크게 감소한 것을 보여주고 있다.

수치모의 결과의 경우에는 상류 유량 조건만 변경하여 흐름 상태를 조정하였기 때문에 레이놀즈 수가 증가하면 상대수심도 증가하여 레이놀즈 수와 상대 수심의 영향을 명확하게 분리하기는 어렵지만, 전체적인 경향은 레이놀즈 수가 증가함에 따라 항력계수가 감소하는 양상을 잘 나타내고 있다. 실험 case 1의 경우에는 레이놀즈 수는 실험치보다 낮으나 상대수심이 CE04에 근접한 경우인데 이때의 항력계수 2.190은 실험 CE04와 CE01의 사이의 값으로 타당한 것으로 판단된다. 상대 수심 1.5인 경우에는 실험값의 항력계수가 레이놀즈 증가에 따라 증가하는 다소 다른 양상을 나타내고 있는데 수치모의 결과는 레이놀즈 수가 높은 경우와 유사한 값을 나타내고 있다. 수치모의 case 4의 경우에는 실험 CE08과 유사한 상대 수심에서 다소 낮은 레이놀즈 수를 보여 항력계수

는 CE08 보다 다소 높은 값을 나타내므로 타당한 값으로 판단된다. 마찬가지로 수치모의 case 5의 경우에는 실험 CE09와, 수치모의 case 7의 경우에는 실험 CE13과 비교하면 타당한 값으로 판단된다.

[Table 4] Comparison of drag coefficients

Case	Relative depth (h_0/k)	Reynolds No. (Re)	Drag coeff. (C_d)	
Experimental results	1.00	CE01	19,070	2.682
		CE02	19,862	2.281
		CE03	20,590	2.118
	1.25	CE04	22,843	1.951
		CE05	22,157	1.816
		CE06	21,956	1.455
	1.50	CE07	20,916	1.320
		CE08	23,987	1.264
		CE09	24,872	1.398
	2.00	CE10	25,732	1.110
		CE11	26,196	1.134
		CE12	30,019	1.088
	2.50	CE13	26,373	1.196
		CE14	26,307	1.109
		CE15	26,816	1.220
Numerical results	case 1	1.19	16,900	2.190
	case 2	1.49	18,919	1.824
	case 4	1.82	21,613	1.392
	case 5	2.12	24,502	1.259
	case 7	2.59	25,080	1.116



[Fig. 8] Drag coefficients with Reynolds No.

4. 항력 변화 특성 분석

앞에서 모의한 결과를 이용하여 수몰 물체의 율류심 변화에 따른 항력 작용 특성을 분석하였다. 실험의 경우에는 다양한 측면에 대한 수위, 압력, 전단력 등을 측정하거나 분석하는데 어려움이 있어서 정밀한 분석이 어려우나 수치모의의 경우 각 격자에서 수위와 압력을 비교적

용이하게 획득할 수 있으므로 이를 이용하여 분석을 수행하였다. 분석은 수몰 물체의 율류심 즉, 상대수심의 변화에 따라 사각 실린더의 항력에서 압력과 전단력의 구성비 변화, 사각 실린더 접촉면에서의 압력계수(C_p)의 변화, 사각 실린더 접촉면에서의 정수압과 동수압의 영향 등에 대해서 수행하였다.

4.1 상대 수심에 따른 압력과 전단력의 변화

사각 실린더에 작용하는 압력과 전단력은 3.4에서 서술된 것과 같이 식 (1)에 의해서 산정할 수 있으며 이를 상대 수심에 따른 압력과 전단력의 구성비로 나타내면 Table 5와 같다. 항력계수는 상대 수심의 증가에 따라 감소하는데 항력은 Table 5에서 보는 것과 같이 상대 수심 1.19~1.82 사이에는 큰 차이가 없고 상대 수심 2.12에서 최대값을 나타내며 2.59에서 감소하는 양상을 나타낸다. 항력을 구성하는 압력과 전단력의 구성 비율은 모든 케이스에서 압력이 98% 이상으로 나타났다. 대부분의 항력은 압력에 의해서 발생함을 알 수 있다.

전단력의 구성비는 상대수심이 증가하면 다소 감소하는 양상을 나타내고 있다. 수몰 사각 실린더의 항력으로 작용하는 전단력은 사각실린더의 윗면 및 측면에서 발생하는데 측면의 경우에는 상대 수심 변화에 따른 유속 변화가 크지 않고 유속도 상대적으로 윗면에서 비해서 느리므로 이의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다. 즉, 수몰 사각 실린더에 작용하는 전단력은 윗면이 지배적인데 상대 수심이 작은 경우에는 실린더 윗면을 율류하는 큰 유속이 형성되어 상대적으로 전단력의 영향이 커지게 된다. 이와 같은 율류면의 큰 유속은 상대 수심이 증가하면서 차츰 감소하며 이에 따라 전단력의 영향은 감소되는 경향을 나타낸다.

[Table 5] Ratio of pressure force and shear force

Case	h_0/k	Total drag force (N)	Pressure force (N)	Shear force (N)	% of pressure force	% of shear force
case1	1.19	0.1592	0.1576	0.0018	98.89	1.11
case2	1.49	0.1645	0.1627	0.0018	98.90	1.10
case4	1.82	0.1639	0.1622	0.0017	98.93	1.07
case5	2.12	0.1905	0.1887	0.0018	99.05	0.95
case7	2.59	0.1770	0.1754	0.0015	99.14	0.86

4.2 상대 수심에 따른 압력계수의 변화

사각 실린더에 작용하는 항력은 대부분 압력이므로

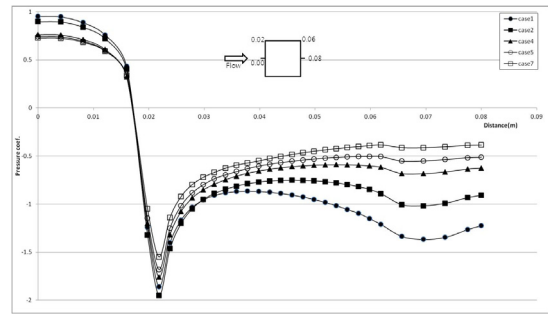
사각 실린더 표면에 작용하는 압력계수(pressure coefficient, C_p) 특성을 분석하여 상대수심에 따른 항력의 작용 특성을 분석하였다. 압력계수는 식 (9)와 같이 정의되는데 여기서 p_0 및 U_0 는 실린더의 영향을 받지 않는 상류 지점의 압력과 유속을 나타낸다.

$$C_p = \frac{p - p_0}{1/2 \rho U_0^2} \quad (9)$$

본 연구의 대상은 자유수면이 있는 개수로이므로 p 와 p_0 는 표고 0에서 실린더 높이 k 까지 수심 평균 값을 이용하였으며 계산된 압력계수는 수심평균 압력계수가 된다. 이를 x-y 평면 상에서 볼때 실린더 중심부를 원점으로 하여 시계 방향으로의 거리에 따른 실린더 표면의 압력계수로 도시하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 보는 것과 같이 압력계수 분포의 전체적인 경향은 일반적인 2차원 실린더 물체의 압력계수 분포와 유사하다. 즉, 실린더 전면부(0.00~0.02 m)에서 양의 압력 계수가 나타나며 실린더 모서리의 직하류 측면부(0.02~0.06 m)에서 최소 압력 계수가 나타나며, 측면부 및 후면부(0.06~0.08 m)에서 서서히 압력계수가 증가하는 양상을 보이고 있다. 실린더의 항력계수는 결국 압력계수 분포에서 전면부와 후면부의 압력계수의 차이에 비례하게 되는데 상대 수심이 높은 case 7의 경우는 2차원 사각 실린더에 가장 근접하는 압력계수 분포를 나타내고 있다.

Fig. 9에서 보는 것과 같이 상대 수심이 낮은 경우에는 전면부의 압력계수가 상대적으로 높은 값을 가지게 되며 후면부의 압력계수는 전체적으로 낮은 값을 나타낸다. 특히 측면부에서 후면부로 이어지는 압력계수 분포는 경향도 달라지는데, 상대 수심이 높은 경우에는 거리가 증가함에 따라 압력이 서서히 증가하며 0.062 지점에서 약간의 압력계수의 저하만 관측된다. 그러나 상대 수심이 낮은 경우에는 측면부에서 거리가 증가함에 따라 압력계수가 증가하다가 0.04 지점에서 다시 감소하는 현상이 나타나며 후면부에서는 그 감소폭이 증가되는 양상을 나타낸다.

즉, 상대 수심이 감소하면 전면부의 압력계수는 증가하고 후면부는 감소하여 압력에 의한 상대적인 항력은 증가하여 결과적으로 항력계수가 증가하는 것이다. 상대 수심에 따른 압력 계수 분포의 차이는 국부적인 수위 변화와 3차원적인 흐름 특성에 기인하는 것으로 추정되나 추가적인 분석이 필요하다.



[Fig. 9] Pressure coefficients with relative depths

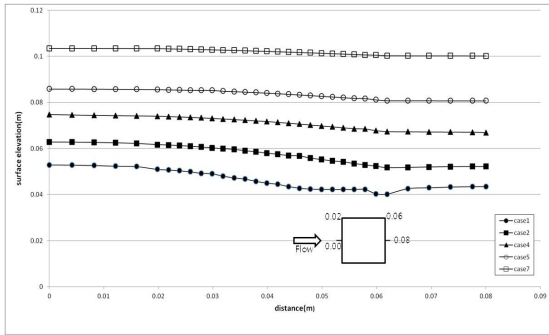
4.3 정수압의 영향 분석

수몰 사각 실린더 흐름에서는 사각 실린더 전면부와 후면부의 수위차가 발생하며 이는 정수압의 차이를 유발하여 항력에 영향을 미치게 된다. 수치모의 결과의 케이스별로 실린더 접촉면에 형성된 수위를 도시하면 Fig. 10과 같으며 전면부와 후면부의 수심 차이를 계산하면 Table 6과 같다. 실린더 전면부와 후면부의 수위차이는 상대수심이 증가함에 따라 감소함을 확인할 수 있는데 이는 상대 수심이 증가하면 정수압에 의한 항력은 감소함을 나타낸다.

정수압의 영향을 분석하기 위하여 실린더 접촉면의 전체 압력에서 수면에 의해 형성되는 정수압을 제외한 동수압을 계산하였으며 이를 상류 지점의 압력(p_0)로 나누어 상대 동수압으로 정의하여 도시하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 실린더 전면부에서는 상대수심이 증가하면 동수압의 영향이 증가하고 후면부에서는 상대수심이 증가하면 동수압의 영향은 감소함을 알 수 있다. 상류 압력과 비교되는 동수압의 상대적인 크기는 실린더 전면부에서는 상대수심이 큰 경우에 최대 19% 정도가 나타나며 후면부에서는 상대수심이 큰 경우에는 10% 내외, 상대수심이 작은 경우에는 최대 30% 정도가 나타나고 있다.

측면부의 동수압은 항력에 직접적인 영향을 미치지지는 않지만 후면부에 형성되는 압력에 영향을 미치게 되는데 최소 40%에서 최대 80%까지의 동수압이 형성됨을 나타내고 있다. 특히, 측면부는 Fig. 10에서 보는 수위 분포와는 전혀 다른 양상으로 동수압이 형성되고 있다.

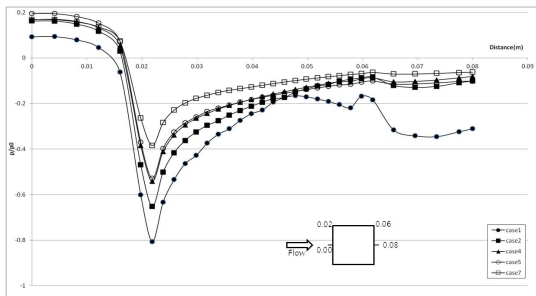
이는 정수압 가정에서는 상대 수심이 높은 경우에는 전면부에서 형성되는 높은 동수압을 충분히 고려할 수 없으며 상대 수심이 낮은 경우에는 후면부에서 형성되는 낮은 동수압을 고려할 수 없음을 나타낸다.



[Fig. 10] Water surface elevation along the edge of the cylinder

[Table 6] Depth differences between front and rear area

	case1	case2	case4	case5	case7
front average depth(m)	0.0523	0.0624	0.0743	0.0858	0.1034
rear average depth(m)	0.0426	0.0520	0.0671	0.0807	0.1002
depth difference (m)	0.0097	0.0104	0.0072	0.0050	0.0033



[Fig. 11] Relative dynamic pressure along the edge of the cylinder

5. 결론

본 연구에서는 수치모의를 통해서 월류 흐름이 존재하는 수물 사각 실린더의 항력 특성에 대하여 분석하였다. 모의의 신뢰성을 검토하기 위하여 실험자료와 비교하였으며 실험에서 측정하기 어려운 실린더 접촉면의 압력에 대한 분석을 통해서 상대 수심에 따른 항력의 특성을 분석하였다. 이상의 연구 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 수치모의 결과 분석에 의하면 수물 사각 실린더에

작용하는 항력은 대부분 압력이며 상대 수심이 증가함에 따라 전단력의 비중은 감소하였다.

2) 상대 수심이 낮은 경우에는 전면부에 높은 압력계수가 형성되고 후면부에 낮은 압력계수가 형성되어 결과적으로 높은 항력계수가 나타남을 확인하였다.

3) 상대수심이 증가하면 전면부의 압력계수는 감소하고 후면부의 압력계수는 증가하여 2차원 흐름 내의 사각 실린더와 유사한 양상을 나타낸다.

4) 상대수심이 낮은 경우에는 사각 실린더에 의해 형성되는 국부적인 수위와 함께 3차원적인 흐름에 의해 형성되는 동수압의 영향이 크다는 것을 확인하였다.

이상의 연구방법론 및 결론은 침수 식생 해석, 거석 등의 자연재료의 수리 안정성 평가, 수제 및 말뚝 등의 수리 구조물의 수리 안정성 평가, 제방 등의 수리 구조물 월류 해석 등과 같이 상대 수심 1~2 사이의 항력이 중요한 영향을 미치는 경우에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 최근의 연구([12,13])에 의하면 공기 연행이 항력의 감소에 기여하며, 상대 수심 1~2 사이에서는 주로 공기 연행 흐름이 발생하므로 향후에는 이를 고려한 연구가 필요하다.

사용기호

A : 상류 유속에 대하여 물체가 받는 연직 면적 (m^2)

A_i : 흐름면적비

B : 수로폭(m)

C_d : 항력계수

C_p : 압력계수

c : 음속(m/s)

F_D : 항력(N)

F_r : 프루드 수

f_i : 점성항

h : 수심(m)

h_0 : 상류수심(m)

k : 실린더 높이(m)

h/k : 상대수심

p : 압력(N/m^2)

R_e : 레이놀즈 수

U_0 : 물체의 영향을 받지 않은 상류 유속(m/s)

V_F : 흐름 체적비

θ : 상류 유속에 대한 물체 표면의 각도

τ_w : 전단응력(N/m²)

References

- [1] Chow, V.T., "Open-Channel Hydraulics", McGraw-Hill Civil Engineering Series, New York, N.Y., 1956.
- [2] Cowan, W.L., "Estimating hydraulics roughness coefficients", Agricultural Engineering, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475, 1956.
- [3] Hoerner, S.F., "Fluid dynamic drag", 1968.
- [4] Kim, Ji Sung, Dong Kyun Im, Won Kim, "The study on drag coefficient characteristics of obstaches in open channel", Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, pp. 1894-1899, 2008.
- [5] Rhee, Dong Sop and Lee, Du Han, "Variation of the drag force acting on vegetation model elements", Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, pp. 665. 2012.
- [6] Shohei, A., "On the artificial strip roughness", Disaster prevention research institute, Kyoto university, Kyoto, Japan. Vol. 69, pp. 1-20, 1964.
- [7] Mirei, S.E., Juichiro, A., Masayuki, N. and Takanori, A., "Hydrodynamic forces acting on a submerged obstruction in steady free surface flows [in Japanese]", Vol. 48, pp.877-882, 2004.
- [8] Juichiro, A., Mirei, S.D., Toshihiko, K. and Kazumasa, O., "Hydrodynamic force exerting on a square pillar in steady free surface shear flows[in Japanese]", Vol. 46, pp.827-832, 2002.
- [9] Tatsuhiko, U., Shoji, F., Takuji, F. and Masatoshi T., "Two-dimensional shallow water analysis over large roughness elements and its application [in Japanese]", Proceedings of JSCE 691, pp.93-103, 2001.
- [10] Hirt, C.W. and Nichols, B.D., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", J. Comput. Phys., Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, 1981.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [11] Yakhot, V. and Orszag, S.A., "Renormalization group analysis of turbulence 1. Basic theory", J. Sci. Comput., Vol. 1, No. 1, pp. 3-51, 1986.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01061452>
- [12] X. Shen, S. L. Ceccio, and M. Perlin, "Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction," Experiments in Fluids, vol. 41, no. 3, pp. 415 - 424, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-006-0169-y>

- [13] Ortiz-Villafuerte and Y. A. Hassan, "Investigation of microbubble boundary layer using particle tracking velocimetry," Journal of Fluids Engineering, vol. 128, no. 3, pp. 507 - 519, 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2174062>

이 두 한(Du Han Lee)

[정회원]



- 1994년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 토목공학과(공학석사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원

<관심분야>

수리학, 전산유체

김 영 주(Young Joo Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 이화여자대학교 공과대학 환경공학과(공학사)
- 2010년 2월 : 연세대학교 공과대학 원 토목공학과(공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구원

<관심분야>

환경공학, 수공학, 하천생태학

이 동 섭(Dong Sop Rhee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2000년 1월 ~ 2002년 12월 : (주) 금호엔지니어링 대리
- 2002년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

토목공학, 수공학