

상당저항계수식 산정을 위한 3차원 수치실험 : 횡방향 이격거리의 영향 3-D Numerical Experiment for Estimation of Equivalent Resistance Coefficient due to Multi-piers : Effect of Transverse Intervals

김형석* · 최준우* · 고광오* · 윤성범**

Hyeong Seok Kim*, Jun Woo Choi*, Kwang Oh Ko* and Sung Bum Yoon**

요 지 : 수면보다 높은 사각기둥 저항체가 등간격으로 배치되어 있는 경우의 상당저항계수 식의 횡방향에 따른 항력상호작용계수를 연구하여 제안하였다. 저항체의 횡방향 이격거리에 따른 에너지 손실이 오리피스 공극물에 따른 에너지 손실과 동일하다고 가정하고 오리피스의 에너지 손실계수를 차용하여 횡방향 항력상호작용계수를 제안하였다. 이 항력상호작용계수를 사용하는 상당저항계수 식을 김 등(2008)에 의해 사용된 수리조건에 대해 그 해석능력이 검증된 FLOW-3D를 이용하여 수치실험한 결과와 비교하였다. 그 결과가 잘 일치하였고 이로부터 바닥 마찰뿐만 아니라 수면보다 높은 정방형 다열기둥의 종방향 및 횡방향 이격거리에 따라 변화되는 저항정도를 고려할 수 있는 제안된 상당저항계수 식의 타당성을 검증하였다.

핵심용어 : 상당저항계수, 항력상호작용계수, 수치실험, 횡방향 이격거리, FLOW-3D

Abstract : A transverse drag interaction coefficient of the equivalent resistance coefficient formula for square multi-piers higher than water depth and arranged with equal intervals was studied. From the assumption that the energy loss due to drag interaction according to transverse intervals of resistance bodies is essentially identical to the energy loss due to thick orifice according to porosities, the transverse drag interaction coefficient was derived by employing the orifice's energy loss coefficient. The equivalent resistance coefficient formula including the drag interaction coefficient was compared with the numerical experiments using FLOW-3D, the performance of which was verified by Kim et al. (2008) in the experimental condition with the multi-piers. The comparisons showed good agreement and thus, the equivalent resistance coefficient formula, which does not only consider frictional resistance but also consider the multi-piers' drag resistance varied according to the intervals in longitudinal or transverse direction, was verified.

Keywords : equivalent resistance coefficient, drag interaction coefficient, numerical experiment, transverse interval, FLOW-3D

1. 서 론

지구온난화에 기인한 지진이나 폭풍 등에 의해 발생하는 해일 및 집중호우의 발생빈도가 높아지고 그 강도가 증가하고 있으므로 해안지역이나 하천근처의 도시에 범람에 의한 피해가 발생할 가능성이 매우 높아졌다. 해안지역 및 하천유역에 침수피해를 주는 범람은 건물이나 구조물 및 식생 등으로 인한 흐름 저항의 영향을 받아 범람수위가 증

가된다. 따라서 범람시 수위를 증가시키고 통수능에 가장 큰 영향을 주는 구조물 및 식생 등에 의한 저항정도와 관련하여 수리학적 특성에 관한 연구가 필요하다.

여러 연구자들이 수리실험 및 수치실험을 통하여 상당저항계수로서의 Manning계수를 산정하는 방법으로 흐름 내에 저항체들이 존재할 때 발생하는 흐름저항 정도를 연구하여 다음과 같은 결과들을 발표하였다. Petryk and Bosmajian (1975)과 Musleh and Cruise(2006)는 수면보다 높은 강성

*한양대학교 대학원 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Hanyang University)

**한양대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Dept. of Civil & Environ. Engrg. 1271 Sa-3-dong, Sangnok-gu, Ansan, Kyunggi, 426-791, Korea. sbyoon@hanyang.ac.kr)

식생을 대상으로 수치실험을 수행하여 수위가 증가하면 Manning계수가 수심의 2/3승으로 증가한다고 하였으며, Musleh and Cruise(2006)는 수심변화와 저항체의 밀집도 변화에 대해 선형적으로 증가한다고 하였다. 권 등(2008)은 수면보다 높은 사각기둥 저항체를 등간격으로 배치하고 수치실험을 수행하여, Manning계수가 수심 및 기둥 간 이격거리의 변화에 따라 비선형적으로 변화함을 보였다. 김 등(2008)은 권 등(2008)의 수치실험 조건을 FLOW-3D를 사용하여 3차원 수치실험하였고, 그 결과를 Manning계수가 수심의 2/3승으로 증가하는 것과 흐름방향 이격거리에 지배적인 함수임을 보였다. 특히, 김 등(2008)은 FLOW-3D를 이용하여 개수로 흐름내 수면보다 높은 사각기둥이 존재하는 조건에 대하여 저항에 따라 변화하는 흐름양상을 수치실험하여 기존의 수치실험과 비교함으로써 그 해석능력을 검증하였다. 위 연구자들의 연구결과가 서로 일치하지 않는 부분들은 흐름조건, 저항체의 형상 및 배치 등의 실험조건이 다르기 때문이라고 생각되며, 저항체간의 상호작용으로 인한 흐름현상에 관한 연구가 아직 명확한 결론에 도달하지 못했음을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 김 등(2008)에서 사용한 FLOW-3D와 그 계산조건들을 이용하여 권 등(2008)이 수치실험 장치의 제약조건으로 인하여 수행할 수 없었던 횡방향 이격거리에 따라 변화하는 흐름양상을 수치실험하고 그 결과를 오리피스 손실계수 식을 차용하여 새로이 제안한 상당저항계수 식과 비교하고 분석하였다.

2. 이론 및 수치모형

2.1 이론

일정한 경사를 갖는 개수로 등류에 잠기지 않고 흐름에 의하여 변형되지 않는 고정된 저항체가 등간격으로 존재하는 경우에 저항체에 의해 변형된 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 주지 않는다는 가정을 하여 바닥마찰력과 항력의 평형방정식으로부터 권 등(2008)이 식 (1)을 유도하였다. 이 이론식 (1)은 흐름 저항체에 의한 항력의 영향을 포함하는 Manning계수형태의 상당저항계수(n)를 나타내며, 이 유도과정 가운데 넓은 수로라는 가정과 수로경사가 급하지 않다는 가정을 사용한다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_D \frac{1-r_o}{1+s/b} \left(\frac{h}{b}\right) \left(\frac{h^{1/3}}{2g}\right)} \quad (1)$$

여기서 n_b 는 마찰저항만을 나타내는 Manning의 조도계수

를 나타내고, h 는 수심이며, g 는 중력가속도이고, s 는 흐름방향의 저항체 이격거리이고, b 는 저항체의 흐름방향 폭이며, r_o 는 유수면적에 대한 저항체의 투영면적의 비로 공극률을 나타내고, C_D 는 형상항력계수이다. 위 식 (1)은 흐름 저항체가 등간격으로 배치되어 있으며 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 미치지 않는 흐름에서 적용이 가능하다. 따라서 권 등(2008)은 흐름 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 주는 경우에, 저항체의 상호영향에 의한 에너지손실을 고려하기 위해 항력 상호작용계수(drag interaction coefficient)라고 명명한 C_{DI} 를 식 (1)에 도입하여 식 (2)와 같은 상당저항계수 식을 제안하였다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_{DI} C_D \frac{1-r_o}{1+s/b} \left(\frac{h}{b}\right) \left(\frac{h^{1/3}}{2g}\right)} \quad (2)$$

여기서 C_{DI} 는 식 (3)과 같이 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIT} 와 흐름방향 이격거리 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIF} 의 곱으로 정의하고 각각의 항력상호작용계수를 수치실험을 통하여 경험적으로 얻으려고 시도하였다.

$$C_{DI} = C_{DIT} \times C_{DIF} \quad (3)$$

이 항력상호작용계수는 Reynolds 수, 저항체의 형상, 흐름방향과 흐름 횡방향 이격거리 그리고 흐름방향과 저항체 배치각도 등의 함수일 것으로 생각할 수 있다. 권 등(2008)은 수치실험 결과를 바탕으로 동일한 형상의 사각기둥 저항체들이 등간격으로 배치되어 있고 C_D 가 일정한 값을 갖는 흐름조건($Re > 10^4$)에서 항력상호작용계수 C_{DI} 는 흐름방향과 횡방향의 이격거리의 지배적인 함수라고 하였고, 김 등(2008)은 수치실험을 통하여 이를 확인하였다. 권 등(2008)은 흐름방향 이격거리 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIF} 를 수치실험결과를 바탕으로 다음과 같은 경험식을 도출하였다.

$$C_{DIF} = 1 - 0.95 \exp[-0.39(s/b)^{1.8}] \quad (4)$$

그러나 권 등(2008)은 수치실험장치의 제약으로 인하여 횡방향 이격거리 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIF} 를 추정할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 수치실험으로는 수행할 수 없었던 횡방향 이격거리 변화에 따른 흐름양상을 수치실험하여 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력 상호작용의 특성을 유추하고자 하였다. 이를 위해 횡방향 이격거리에 따른 에너지 손실은 역학적으로 오리피스

의 에너지 손실과 동일하다는 가정으로부터 횡방향 이격 거리 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIR} 를 제안하고자 한다.

일반적으로 관수로 오리피스에서의 흐름저항은 관의 표면거칠기에 의한 마찰과 단면변화에 의한 흐름저항이 발생한다. 따라서 총 에너지손실은 관마찰 손실과 오리피스의 에너지손실의 합으로, 정상류이면서 등류인 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} + N_o \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

여기서 f 는 마찰저항계수, D 는 관의 직경, L 은 관의 길이, g 는 중력가속도, α 는 에너지 손실계수, N_o 는 독립적으로 작용하는 흐름방향 오리피스의 개수이고, V 는 유속이다. 개수로의 경우에 식 (5)를 관의 마찰저항계수 f 와 개수로에서의 Manning 조도계수 n_b 와의 관계, $\sqrt{8g/f} = R_h^{1/6}/n_b$ 을 이용하면 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$h_L = \frac{8gn_b^2 L}{R_h^{1/3} 4R_h 2g} \frac{V^2}{2g} + N_o \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

위 식 (6)에서 바닥마찰에 의한 에너지 손실과 오리피스에 의한 에너지손실을 상당저항계수 α 를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{8gn_b^2 L}{R_h^{1/3} 4R_h 2g} \frac{V^2}{2g} + N_o \alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{8gn^2 L}{R_h^{1/3} 4R_h 2g} \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

위 식(7)에서 저항체의 흐름방향 폭을, 저항체의 흐름방향 이격거리를 라고 하면 로 교체할 수 있고, 넓은 수로로 가정하여 동수반경을 수심 로 대체하고, 에 관하여 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n = \sqrt{n_b + \frac{\alpha}{1+s/b} \left(\frac{h}{b} \right) \left(\frac{h^{1/3}}{2g} \right)} \quad (8)$$

식 (8)을 권 등(2008)이 항력상호작용계수가 포함되고 힘의 평형방정식으로부터 구한 상당계수식 (2)와 같다고 하여 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\alpha = C_{DI} C_D (1 - r_0) \quad (9)$$

전술한 바와 같이 항력상호작용계수 C_{DI} 는 방향별 흐름 저항체의 배치간격에 따라 변화한다고 하여 식 (3)과 같이 나타내었다. 흐름방향 이격거리에 따른 영향이 없을 때 즉, 흐름방향으로 저항체들의 저항이 독립적일 때 $C_{DI}=1$

이므로 횡방향 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIR} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{DIR} = \frac{\alpha}{C_D(1-r_0)} \quad \text{for } r_0 \leq \lambda \quad (10a)$$

$$C_{DIR} = 1.0 \quad \text{for } r_0 > \lambda \quad (10b)$$

여기서 오리피스의 에너지 손실계수를 차용하여 유도한 식 (10a)는 저항체들이 횡방향으로 서로 상호작용할 때 적용할 수 있으며 저항체간 상호간섭이 발생하지 않으면 횡방향 항력상호작용계수 C_{DIR} 는 1.0, 즉 식 (10b)를 적용해야 할 것이다. 두 식의 상호작용영향 유무에 따른 경계가 되는 공극률을 라고 정의한다. 횡방향 항력상호작용계수 C_{DIR} 의 적용범위에 관한 내용은 3.2에 자세히 언급하였다. 오리피스 에너지 손실계수 α 는 윤 등(2006)이 제안한 벽두개의 효과 즉, 사각기둥 흐름방향 폭(b)의 효과를 고려한 다음의 식 (11)을 적용하였다.

$$\alpha = (0.6 + 0.4e^{-2.5(b/a)}) \left(\frac{1}{r_0 C_c} - 1 \right)^2 \quad (11)$$

여기서 a 는 저항체의 횡방향 이격거리, C_c 는 단면 수축계수를 나타낸다. 단면 수축계수 C_c 는 Mei(1989)가 제시한 경험식 $C_c=0.6+0.4r_0^2$ 을 사용하였다.

2.2 수치모형

본 연구에서 사용한 FLOW-3D는 미국 국립 연구소 LANL(Los Alamos National Laboratory)에서 개발되고 FLOW Science Inc.에 의해 상용화된 3차원 전산유체해석모형이다. FLOW-3D는 연속방정식, 난류모형을 사용하는 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유한차분법 및 유한체적법을 사용하여 해석한다. FLOW-3D는 비정상 상태의 비압축성 및 압축성 유체의 유동현상을 모의할 수 있으며, 복잡한 자유수면 운동을 간단히 해석하고 경계면을 정확하게 표현하기 위해 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용한다. 그리고 유한차분법 사용시 가장 큰 문제가운데 하나인 계단형 격자경계에 따른 정확도를 개선하기 위해 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 사용한다. 자세한 모형의 설명은 FLOW-3D 사용자 매뉴얼(Flow Science, Inc., 2000)로 대신하며, 본 연구에서 언급하지 않는 대부분의 수치해석과정의 선택사항과 모형계수들은 FLOW-3D의 초기 지정값들을 사용하였다.

3. 수치실험

3.1 수치실험의 개요

FLOW-3D를 이용한 수치실험을 위해 수면보다 높고 폭이 0.114 m인 사각기둥 저항체들이 무한히 분포하는 효과를 나타내면서 계산시간의 단축을 위하여 Fig. 1과 같은 계산영역과 Fig. 2와 같은 경계조건을 설정하였다. 흐름(X) 방향 계산영역의 상류단과 하류단에 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 사용하여 하류단에서 계산된 유속분포 및 수심 등의 정보가 상류단의 조건으로 들어가 사각기둥 저항체들이 등간격으로 연속해서 존재하는 무한히 긴 수로를 모형화하였다. 측면은 모두 대칭형 경계조건(symmetry boundary condition)으로 하여 횡(Y)방향으로 사각기둥 저항체들이 무한히 존재하는 경우를 모형화하였다. 연직(Z)방향의 바닥경계면은 수리학적으로 매끈한 벽면의 no-slip 경계조건을 사용하였다. 등류형성에 필요한 하상경사($S_0=0.0049$)를 위해 중력성분을 종(X)방향과 연직(Z)방향 성분으로 구분하여 입력하고 초기 수심에 따

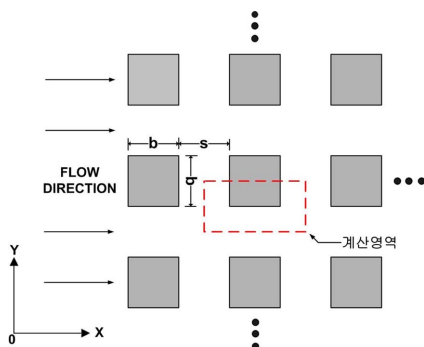


Fig. 1. Computational domain.

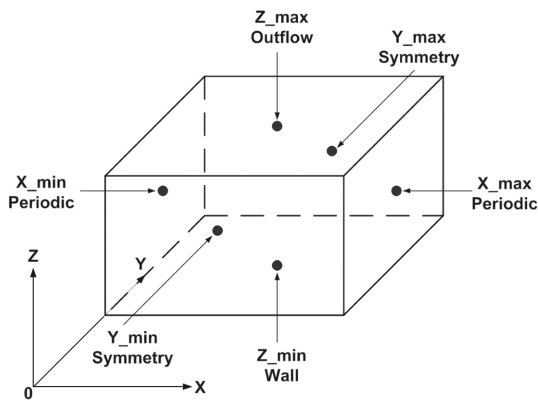


Fig. 2. Boundary condition.

라 최종 정상상태의 등류수심이 형성되었다.

횡방향 이격거리에 따른 Manning계수 변화를 측정하기 위해 다음과 같은 격자를 구성하였다. 수심 0.09 m의 자유수면을 표현하도록 Z방향 영역을 설정한 후, Y방향 영역을 0.07125 m~0.259 m($r_0=0.2\sim0.78$)로 변화시키며 격자를 구성하고, X방향 계산영역으로는 0.1368 m($s/b=0.2$), 0.171 m ($s/b=0.5$), 0.228 m($s/b=1.0$), 0.3648 m($s/b=2.2$), 0.57 m($s/b=4$), 0.684 m($s/b=5.0$) 및 1.026 m($s/b=8$)로 다양한 흐름방향 이격 거리에 대해 격자를 구성하여 수치실험을 실시하였다. 흐름방향 이격거리에 따른 Manning계수 변화를 측정하기 위해 다음과 같이 격자를 구성하였다. 수심 0.09 m의 자유수면을 표현하도록 Z방향 영역을 설정한 후, Y방향 영역을 0.127 m($r_0=0.55$), 0.0814 m($r_0=0.3$) 및 0.0726 m($r_0=0.215$)로 설정하고 X방향 계산영역으로는 0.1368 m($s/b=0.2$)~1.026 m ($s/b=8$)로 변화를 주며 격자를 구성하여 수치실험을 수행하였다. 격자크기는 모든 경우 동일하게 $\Delta X=\Delta Y=\Delta Z=0.0028$ m를 사용하였고, 수치계산을 위해 물성치는 20 °C의 물을 사용하였다. 그리고 사각기둥의 항력계수 C_D 가 2.1로 일정한 값을 갖고(White, 1994), Manning계수를 적용할 수 있는 완전난류의 흐름조건($Re>10^4$) 안에서 수치실험을 수행했으며, 난류모형으로는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 선택하여 수치모의를 수행하였다.

각각의 조건에 따른 Manning계수를 산정하기 위해 Manning의 평균유속공식으로부터 변형된 관계식 (12)를 사용하였다.

$$n = \frac{1}{V} h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (12)$$

여기서 h 는 등류수심이고, 단면평균유속 V 는 FLOW-3D에서 지원하는 Baffle기능을 사용하여 유량 Q 를 얻은 후, 저항체가 없는 구간의 유수단면적 A 로 나누어 산출하였고, S_f 는 등류상태에서 바닥경사 S_0 와 동일하다. 이 값들을 식 (12)를 대입하여 사각기둥 저항체와 바닥마찰에 대한 상당저항계수로서의 Manning계수 n 값을 산정하였다.

3.2 횡방향 항력상호작용계수의 적용범위

오리피스 에너지 손실계수 식을 차용하여 유도된 횡방향 이격거리에 따른 항력상호작용계수 C_{DI} 는 횡방향으로 저항체사이의 이격거리가 좁아져 단면의 급변화에 의한 저항체간 상호간섭이 발생하는 경우에 적용이 가능하고, 횡방향 이격거리가 충분하여 저항체간 상호간섭이 없다면 C_{DI} 는 1.0을 적용해야 할 것이다. 따라서 항력상호작용계수 C_{DI} 식 (10a)의 적용범위에 대해 알아볼 필요가

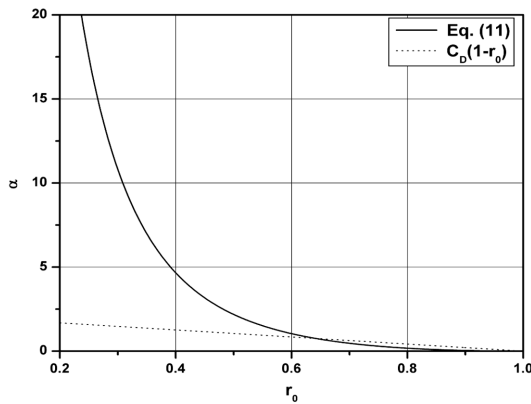


Fig. 3. Variation of energy loss coefficient according to r_0 .

있다. Fig. 3은 윤 등(2006)이 제안한 에너지 손실계수 식 (11)의 α 값과 저항체의 이격거리에 독립적인 흐름인 경우에 식 (2)와 (8)과의 관계로 얻어진 α 값, 즉 $\alpha=C_D(1-r_0)$ 을 공극률의 변화에 따라 도시한 것이다. 흐름방향 저항체간의 상호간섭이 없는 경우($C_{DIF}=1$)에 Fig. 3에서 식 (11)의 α 값과 $\alpha=C_D(1-r_0)$ 의 값이 공극률 r_0 가 약 0.643인 곳에서 교차하는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 공극률 r_0 가 약 0.643 이하에서는 식 (10a)를 사용할 수 있으나 공극률 r_0 가 약 0.643보다 커지면 횡방향 이격거리에 대하여 독립적인 흐름으로 볼 수 있으므로 식 (10b)의 $C_{DIF}=1$ 을 사용해야 할 것으로 판단된다. 따라서 식 (10)에서 $\lambda=0.643$ 으로 제안한다.

3.3 횡방향 이격거리에 따른 Manning계수의 변화

3.3.1 흐름방향 이격거리에 독립적인 저항체의 배치

먼저 사각기둥 저항체가 흐름방향으로 독립적으로 배치되어 있을 때, 공극률의 변화에 따른 Manning계수 n 값의 변화를 살펴보고자 하였다. 이를 위해 사각기둥의 항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 흐름조건($Re > 10^4$)에서 흐름방향 이격거리 비를 $s/b=5$ 가 되도록 고정하고 공극률 r_0 를 0.2에서 0.78로 변화시키며 수치실험을 수행하였다. 이격거리 비 $s/b=5$ 가 사각기둥 흐름방향 저항체간의 상호간섭이 발생하지 않는다는 전제조건은 권 등(2008)이 수치실험을 통하여 공극률 r_0 가 0.715이고 $s/b > 4$ 인 경우에 실험값과 식 (1)과 매우 잘 일치했다는 근거로부터 도출되었다. 따라서 이 조건에서 $C_{DIF}=1$ 을 적용할 수 있었으며, 이격거리 비 $s/b=5$ 인 경우에 식 (4)는 $C_{DIF}=1$ 과 동일한 값을 갖는다.

Fig. 4에 도시된 실선은 이론식 (2)에 매끄러운 금속바닥의 마찰계수 $n_b=0.012$, 사각기둥의 항력계수 $C_D=2.1$, 기

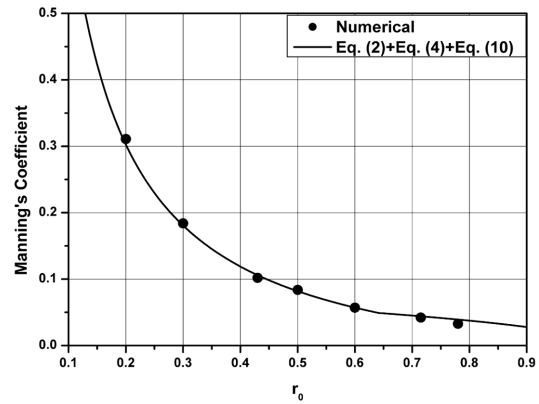


Fig. 4. Variation of n value according to r_0 ($s/b=5.0$).

동폭 $b=0.114$ m, 등류수심 $h=0.09$ m을 적용하였고 항력상호작용계수 C_{DI} 를 위해 흐름방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIF} 는 식 (4)를 적용하였고, 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수 C_{DIT} 는 공극률이 약 0.643이하에서는 식 (10a)를 적용하고, 공극률이 약 0.643보다 커지면 식 (10b)를 적용하여 얻은 결과를 도시하였다. 이격거리가 충분하여 사각기둥 저항체간의 흐름방향 상호간섭이 발생하지 않는 조건인 $s/b=5$ 인 경우로 격자구성하여 공극률을 변화시키며 수치실험을 수행하여 산정된 Manning계수 n 값의 변화를 Fig. 4에 원형의 점(Numerical)으로 도시하였다. 항력상호작용계수 C_{DI} 에 오리피스 손실계수식을 차용하여 도출한 식 (10)을 적용한 이론식 (2)와 수치실험한 결과는 잘 일치하였으며, 공극률 즉, 횡방향 이격거리가 점점 커질수록 Manning계수 n 값이 서서히 감소하는 양상을 보였다. 이로부터 공극률이 약 0.643이하 범위에서는 오리피스 손실계수식을 차용하여 도출한 C_{DIT} 식 (10a)를 사용하는 것이 타당하고, 횡방향 이격거리에 독립적 흐름을 나타내는 공극률이 약 0.643이상의 범위에서는 식 (10b) $C_{DIT}=1$ 을 적용함이 타당함을 알 수 있다.

흐름방향 이격거리 비 $s/b=5$ 이외에 흐름방향 이격거리 (s/b)에 따른 사각기둥 저항체의 상호간섭이 발생하지 않는 조건인 $s/b=4$ 와 8에 대하여 추가적으로 공극률에 따른 Manning계수 n 값의 변화를 살펴보기 위해 공극률을 $r_0=0.215\sim 0.55$ 로 변화시키며 수치실험을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 C_{DIF} 는 식 (4)를 적용하고 C_{DIT} 는 오리피스 손실계수식을 차용하여 도출한 식 (10)을 적용한 이론식 (2)와 함께 도시하였다. 흐름방향 이격거리 비 $s/b=5$ 의 경우와 마찬가지로 이론식 (2)와 수치실험으로부터 얻은 Manning계수 n 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

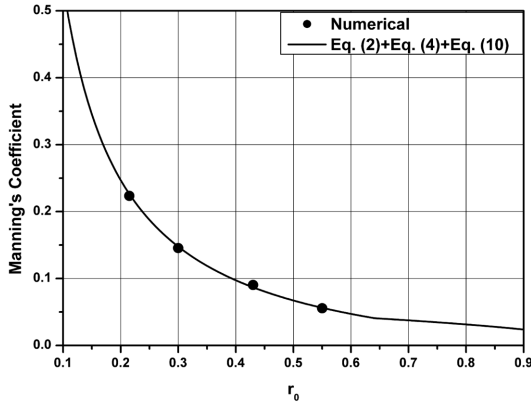


Fig. 5. Variation of n value according to r_0 ($s/b=8.0$).

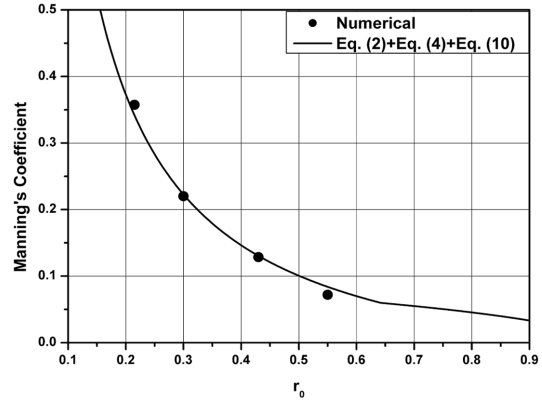


Fig. 7. Variation of n value according to r_0 ($s/b=2.2$).

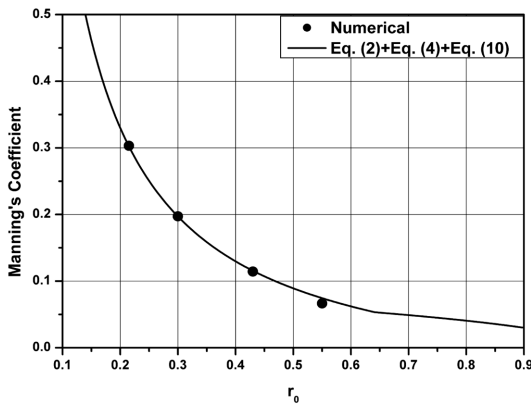


Fig. 6. Variation of n value according to r_0 ($s/b=4.0$).

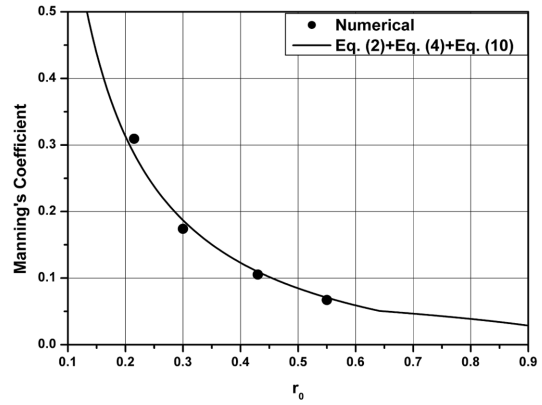


Fig. 8. Variation of n value according to r_0 ($s/b=1.0$).

3.3.2 흐름방향 이격거리에 따라 상호작용하는 저항체의 배치
 3.3.1에서의 실험조건은 흐름방향으로 이격거리(s/b)가 충분하여 흐름방향 저항체간 상호흐름영향이 발생하지 않는 조건이다. 흐름방향 이격거리가 좁아져 저항체간의 상호간섭이 발생하는 경우에도 공극률이 변화함에 따라 본 연구에서 제안된 항력상호작용계수 C_{DII} 가 적용된 이론식 (2)가 타당한지 검증하고자 한다. 이를 위하여 흐름방향 이격거리 비가 $s/b=0.2, 0.5, 1.0, 2.2$ 인 경우에 대하여 공극률을 $r_0=0.215\sim 0.55$ 로 변화시키며 수치실험을 수행하였다. 수치실험한 결과로부터 Manning계수 값을 산정하고, 그 결과를 항력상호작용계수 C_{DIF} 는 식 (4)를 적용하고 C_{DIF} 는 식 (10)을 적용한 이론식 (2)와 비교하였다. 흐름방향 이격거리 비가 $s/b=0.2, 0.5, 1.0, 2.2$ 인 경우에 대하여 Fig. 7~10에 도시하였다. 저항체의 흐름방향 이격거리가 충분하지 못해 상호간섭이 발생하는 경우에서도 C_{DIF} 와 C_{DII} 를 위해 각각 식 (4)와 식 (10)을 적용한 이론식 (2)와 수치실험결과로 얻은 Manning계수 n 값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

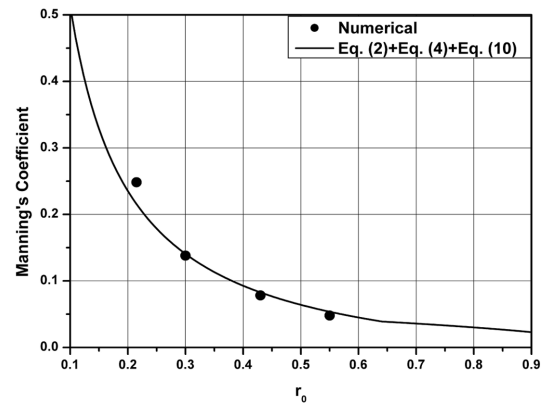


Fig. 9. Variation of n value according to r_0 ($s/b=0.5$).

다만, 공극률이 작은 경우, $r_0=0.215$ 에 대하여는 도출된 상당저항계수 식과 수치결과가 약간의 차이를 보이고 있다. 공극률이 매우 작기 때문에 발생된 사각기둥 저항체의 상하류간 수면차이가 흐름방향 이격거리도 좁아질 경우에 회복될 수 있는 공간이 충분치 못하게 된다. 따라서 이러한

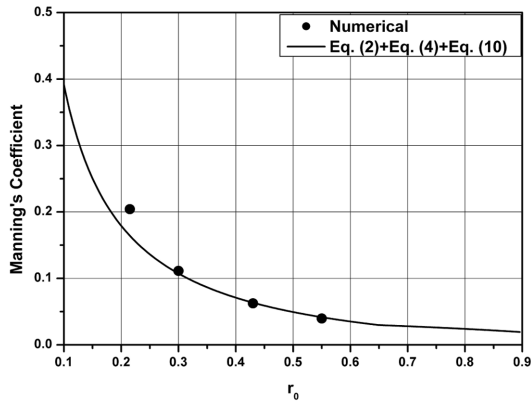


Fig. 10. Variation of n value according to r_0 ($s/b=0.2$).

문제를 포함한 좁은 오리피스에 대한 에너지 손실계수의 오차라고 추정된다.

3.3 흐름방향 이격거리에 따른 Manning계수의 변화

횡방향 이격거리가 충분하지 못하여 저항체간 상호작용이 발생하는 경우에 흐름방향 이격거리에 따라 변화하는 흐름양상을 수치실험하고, 그 결과를 항력상호작용계수 식 (4)와 식 (10)이 적용된 이론식 (2)와 비교하였다. Fig. 11~13에 도시된 점선은 공극률 r_0 가 각각 0.55, 0.3, 0.215이고 수심 $h=0.09$ m일 때, 항력상호작용계수 C_{DI} 와 C_{DII} 를 적용한 이론식 (2)를 도시한 것이다. 원형 점들은 FLOW-3D를 사용하여 $s/b=0.2(0.1368\text{ m})\sim s/b=8(1.026\text{ m})$ 로 증가시키며 수치실험한 결과로부터 얻은 Manning계수 n 값을 나타낸 것이다. 수치실험 결과로 산정된 Manning계수 n 값은 흐름방향으로 상호간섭을 받는 경우에도 이론식 (2)에 의한 값들과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 전술한 것처럼 공극률이 작은 $r_0=0.215$ 에 대하여 도시한 Fig.

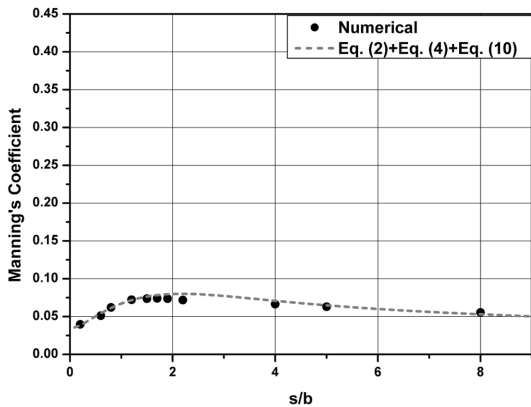


Fig. 11. Variation of n value as changing s/b ($r_0=0.55$).

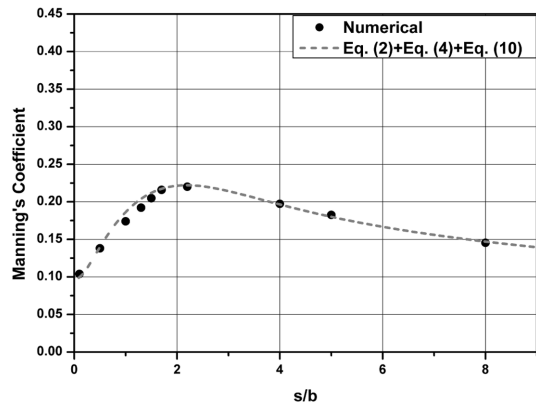


Fig. 12. Variation of n value as changing s/b ($r_0=0.3$).

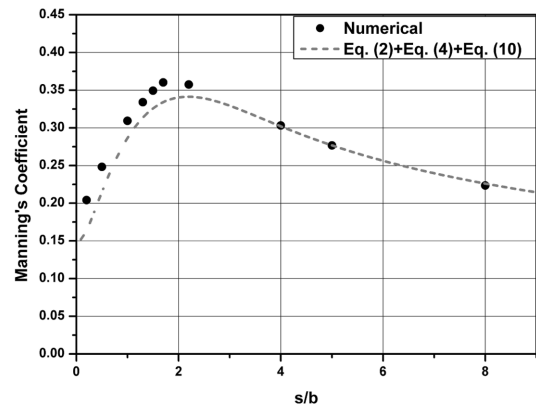


Fig. 13. Variation of n value as changing s/b ($r_0=0.215$).

13에서 s/b 가 약 2.0보다 작은 경우에는 수치실험 결과와 이론식 (2)가 차이를 나타나는 것을 알 수 있다. 저항체의 상하류의 수위차등의 작은 공극률을 갖는 경우에서 발생하는 오차를 제외하고는 수치실험 결과값과 제안한 항력상호작용계수를 적용한 상당저항계수 식 (2)는 흐름방향 이격거리의 변화에 따라 그리고 다양한 공극률의 경우에 있어서도 잘 일치하였다. 따라서 수면보다 높은 사각기둥의 저항체가 등간격으로 배치되어 있고, C_D 가 일정한 값을 갖는 흐름조건($Re > 10^4$)에서 항력상호작용계수 C_{DI} 가 저항체간의 이격거리에 지배적인 영향을 받고 있다는 것과 공극률 r_0 가 약 0.643 이하일 때 사용한 오리피스 에너지손실 계수식으로부터 유도된 횡방향 항력상호작용계수 식 (10)이 유효하다는 것을 증명하는 것으로 볼 수 있다. 이 식이 유효하다는 것은 공극률 r_0 즉, 횡방향 이격거리가 줄어들어 따라 기둥사이의 실제 유속이 증가하고 단면 급확대에 의한 에너지 손실에 의하여 전반적으로 Manning계수 n 값이 증가한다는 것을 의미한다. 또한, 흐름방향 이격거리 변화에 따라 Manning

계수 n 값이 변화하는 양상은 공극률의 변화에 관계없이 권 등(2008) 및 김 등(2008)의 결과와 동일하게 s/b 가 약 2.0보다 작을 때는 이격거리 s 가 증가할수록 Manning계수 n 값은 증가하였고 s/b 가 약 2.0보다 커지면 이격거리 s 가 증가할수록 Manning계수 n 값이 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

넓은 범람영역을 2차원 천수방정식 모형으로 범람수치 모의하는 경우에 천수방정식의 바다마찰항에 있는 Manning 조도계수를 구조물에 의한 에너지 손실을 포함하는 상당저항계수 값으로 대체하여 적용한다면 구조물보다 큰 격자를 사용하여 수치모의를 수행할 수 있으므로 계산시간을 크게 단축시킬 수 있을 것이다. 이러한 범람수치모의의 효율성을 위해 권 등(2008)은 수리실험을 수행하여 마찰저항뿐만 아니라 형상저항까지 포함하는 Manning계수 형태의 상당저항계수를 도출하고자 하였다. 그리고 힘의 평형방정식으로부터 이론식을 유도하고 경험적 항력상호작용계수를 도입하여 상당저항계수 식을 제안하였다. 그러나 수리실험장치의 제약으로 인하여 다양한 조건에서 실험을 수행할 수 없었기 때문에 횡방향 이격거리에 따른 항력상호작용계수등을 산정하기에는 한계가 있었다. 따라서 수리실험이 갖는 제약없이 다양한 조건에서 실험할 수 있고 김 등(2008)에 의해 그 해석능력이 검증된 FLOW-3D를 사용하여 수리실험으로 수행할 수 없었던 횡방향 이격거리에 따른 수치실험을 수행하고 분석하였다.

사각기둥 저항체들이 흐름방향 및 횡방향에 각각 등간격으로 배치되어 있고 항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 흐름조건에서 횡방향 이격거리 변화에 따른 흐름을 수치실험하였다. 그리고 횡방향 이격거리에 따른 영향과 오리피스 공극률에 따른 영향이 역학적으로 동일하다는 가정으로 오리피스 에너지 손실계수 C_{DI} 식을 차용하여 횡방향 이격거리에 따른 항력상호작용계수 식을 유도하고, 적용가능한 범위를 제시하였다. 항력상호작용계수 C_{DI} 에 대해 횡방향 이격거리에 따른 항력상호작용계수 C_{DIR} 는 공극률 r_0 가 약 0.643이하에서는 오리피스 에너지 손실계수 식을 차용하여 유도한 식을 대입하고, 공극률 r_0 가 0.643보다 크면, 즉 횡방향 이격거리에 독립적인 흐름을 나타내는 경우에서는 $C_{DIR}=1$ 을 대입한 이론식의 결과를 수치실험결과와 비교하였고, 잘 일치하였다. 또한 이격거리에 대해 저항이 독립적인 경우를 비롯해서 상호작용하는 경우에서도 제안한 횡방향 항력상호작용계수 C_{DIR} 와 경험적으로 얻어진 흐

름방향 항력상호작용계수 C_{DIR} 를 사용한 이론식이 수치실험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 항력상호작용계수 C_{DI} 가 사각기둥 저항체간의 이격거리에 지배적인 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었으며, 제안한 항력상호작용계수를 사용하는 상당저항계수 n 값을 구하는 이론식의 우수성을 확인할 수 있었다.

끝으로 본 연구에서 문제점이 발견된, 매우 작은 공극률이 좁은 흐름방향 이격거리를 동반하는 경우, 즉 초밀집 도시형 구조물분포의 경우에 대한 저항정도를 보다 정확하게 나타낼 수 있는 상당저항계수 이론식에 대한 연구가 필요하며, 구조물의 배치방법에 따른 영향에 관한 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 첨단도시개발사업의 해저시설물 차폐기술 개발(과제번호 05건설핵심D10)을 위한 한국건설기술연구원의 위탁과제중 일부로서 본 연구를 가능케 한 연구비 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

권갑근, 최준우, 윤성범 (2008). 개수로 다열기둥에 대한 상당저항계수 측정. 대한토목학회 논문집, 28(6), 635-642.
 김형석, 최준우, 고광오, 윤성범 (2008). 구조물 밀집지역 범람수치모의를 위한 상당저항계수 산정 수치실험. 한국해양공학학회논문집, 한국해양-해양공학회, 20(6), 532-539.
 윤성범, 이종인, 남두현, 김선형 (2006). 유공벽의 두께를 고려한 파의 에너지손실계수. 한국해양-해양공학회지, 한국해양-해양공학회, 18(4), 321-328.
 Flow Science, Inc. (2000). FLOW-3D User Manual.
 Mei, C.C. (1989). The Applied Dynamic of Ocean Surface Waves. World-Scientific, Singapore, 2nd printing with correction.
 Musleh, F.A. and Cruise, J.F. (2006). Functional Relationships of Resistance in Wide Flood Plains with Rigid Submerged Vegetation. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 132, 163-171.
 Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). Analysis of Flow through Vegetation. J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 101, 871-884.
 White F.M. (1994). Fluid Mechanics. 3rd Edition. McGraw-Hill, Inc.

원고접수일: 2009년 3월 2일
 수정본채택: 2009년 4월 20일
 게재확정일: 2009년 5월 28일