

## 구조물 밀집지역 범람수치모의를 위한 상당저항계수 산정 수치실험 Numerical Experiment for the Estimation of Equivalent Resistance Coefficient for the Simulation of Inundation over Densely Populated Structures

김형석\* · 최준우\* · 고광오\* · 윤성범\*\*

Hyeong Seok Kim\*, Junwoo Choi\*, Kwang Oh Ko\*, and Sung Bum Yoon\*\*

**요 지 :** 권 등(2008)은 수면보다 높은 사각기둥 저항체를 등간격으로 배치하고 항력계수가 일정한 값을 갖는 흐름조건( $Re > 10^4$ )에서 수치실험을 수행하여 바닥마찰과 형상저항에 의한 흐름저항을 나타내는 상당저항계수로서의 Manning계수 값을 산정하였다. 그리고 힘의 평형방정식으로부터 유도된 이론식에 실험결과를 사용하여 얻어진 경험적 항력상호작용계수를 도입하여 얻은 상당저항계수 식을 제안하였다. 본 연구에서는 이 수치실험을 3차원 전산유체해석 프로그램인 FLOW-3D를 사용하여 수치모의하고 그 결과를 실험결과 및 상당저항계수 식과 비교하여, 그 값들이 매우 잘 일치하는 것을 보였다. 이로부터 이론식에 나타나 있는 것처럼 수면보다 높은 저항체가 존재할 때 Manning계수가 수심의 2/3승으로 증가한다는 것과 항력상호작용계수가 이격거리의 지배적 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어 :** Manning 계수, 상당저항계수, 항력상호작용계수, 수치모의, FLOW-3D

**Abstract :** Kwon et al.(2008) carried out a hydraulic experiment in order to evaluate Manning coefficient, which implicates flow resistance due to bottom friction as well as drag caused by the squared piers higher than water depth and arranged with equal intervals, under the flow condition with a constant drag coefficient,  $Re > 10^4$ . And, based on the equation of equilibrium, they proposed a formula for the equivalent resistant coefficient including empirical drag interaction coefficient obtained by using the experimental results. In this study, the hydraulic experiment was simulated using FLOW-3D, a 3-dimensional computational fluid dynamic code. The computations were compared with the experiment results as well as the semi-theoretical formula, and the comparisons show a good agreement. From the agreement, it was confirmed that when flow resistance bodies were higher than water depth, Manning n value increases with 2/3 power of water depth as shown in the theoretical formula and that drag interaction coefficient was dominated by their intervals.

**Keywords :** Manning coefficient, equivalent resistance coefficient, drag interaction coefficient, numerical simulation, FLOW-3D

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 지구온난화로 인한 기상이변이 빈번하게 발생하고 있으며, 우리나라도 장마가 끝난 후 국지성 호우가 증가하는 추세이다. 단시간 동안의 집중호우는 급격하게 하천의 수위를 증가시키므로 하천유역의 범람이 발생할 가능성이 높아진다. 또한, 이상기후에 기인한 다양

한 원인으로 부터 해일이 발생하고 있으며, 따라서 해안지역 범람의 가능성도 높아지고 있다. 특히, 하천 및 해안지역 도시의 침수피해를 주는 범람은 건물이나 주변 구조물 및 식생 등으로 인하여 흐름저항이 발생한다. 이러한 저항의 증가는 범람수위를 증가시키므로 저항체들에 의한 에너지 손실과 관련하여 수리학적 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

\*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)

범람의 원인지역을 포함하는 넓은 범람대상영역의 규모를 고려할 때, 아직까지 전체영역에 대한 완전한 3차원 수치모의는 사실상 불가능하다. 따라서 하천유역 및 해안의 범람을 수치모의하기 위해 일반적으로 수심방향으로 적분된 형태의 2차원 수치모형인 비선형 천수방정식 모형을 사용한다. 그러나 비선형 천수방정식을 사용하는 평면 2차원 모형을 이용하는 경우에 있어서도, 범람영역내의 모든 저항체들을 표현하고 그 저항체들에 의한 와류를 재현하기 위해 조밀한 격자를 구성하여 수치모의를 수행하는 것은 3차원 유동특성을 고려하지 못해 그 정확도가 저하될 뿐만 아니라 계산시간 측면에서도 비효율적이다. 대상이 되는 계산영역의 규모에 따라 정확도와 효율성을 고려한 선택이 요구되나, 효율성이 우선되어야 하는 규모의 계산이라면 천수방정식의 바닥마찰항에 사용되는 Manning 조도계수  $n$ 값을 저항체에 의한 에너지손실까지 포함하는 상당저항계수로 대체하여 저항체보다 큰 격자를 구성하여 수치모의를 수행하는 방법을 고려할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이러한 큰 격자로 표현할 수 없는 저항체들의 에너지손실을 포함하는 상당저항계수를 적절히 산정하기 위해 수면보다 높은 저항체가 있는 경우에 발생하는 에너지손실의 기본적인 메커니즘을 연구한다.

국내 외 연구자들이 수치실험으로부터 Manning계수를 산정하여 흐름 내에 저항체들이 존재할 때 발생하는 에너지손실 정도를 연구한 결과들을 발표하였다. Fathi-Maghadam and Kouwen(1997)은 수면보다 높은 유연한 식생을 대상으로 수치실험을 수행하여 Manning계수가 수심의 약 1/2승으로 증가한다고 하였고, Petryk and Bosmajian(1975)은 수면보다 높은 강성식생을 대상으로 수치실험을 수행하여 수위가 증가하면 Manning계수가 수심의 2/3승으로 증가한다고 하였다. 또한, Musleh and Cruise(2006)는 수면보다 높은 강성식생을 대상으로 수치실험을 수행하여 Manning계수가 수심변화와 저항체의 밀집도 변화에 대해 선형적으로 증가한다고 하였다. 그리고 권 등(2008)은 수면보다 높은 사각기둥 저항체를 등간격으로 배치하고 수치실험을 수행하여, 수심의 2/3승으로 Manning계수가 증가하고 기둥간 이격거리의 변화에 따라 Manning계수가 변화한다고 하였다.

앞에 서술한 연구자들의 결론이 서로 일치하지 않는 이유는 흐름조건, 저항체의 형상 및 특성, 그리고 배치와 같은 실험조건들이 다르기 때문으로 생각되며, 저항체들에 의해 발생하는 흐름들이 서로 상호작용하는 경우에 대한 연구결과의 도출이 간단하지 않을 뿐만 아니라 그 역학에 대

한 분석들도 아직까지 명확하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 가장 근본적인 문제는 Manning계수가 수심의 함수이므로 수심과 Manning계수 사이의 관계를 찾기 위해 등류를 발생시켜야하는 어려움이 있기 때문이다. 대부분의 기존 실험에서는 수심이 변하는 부등류를 발생시키고 평균수심에 대한 평균치 개념의 Manning계수를 산정하여 수심과 Manning계수간의 명확한 관계를 파악할 수 없었다.

권 등(2008)은 힘의 평형방정식으로부터 유도한 이론식을 바탕으로 Manning계수 값이 수심의 2/3승으로 증가한다고 가정하고 이를 수리실험결과를 이용하여 확인하려 하였지만 매우 작은 수심에 대해서만 수리실험을 수행하였기 때문에 검증이 완전히 이루어지지 못하였다. 이는 실험장치의 제약으로 인하여 깊은 수심에 대한 수리실험을 수행할 수 없었기 때문이다.

본 연구에서는 권 등(2008)의 수리실험 조건보다 큰 수심에 대하여 3차원 전산유체해석 프로그램인 FLOW-3D를 사용하여 수치모의하고 그 결과를 이론식과 비교함으로써 이론식의 타당성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 수리실험 결과가 제시되어 있는 작은 수심의 경우에 대해 FLOW-3D를 사용하여 수치모의하고 이를 실험치와 비교하여 수치모형의 적용가능성을 판단한 후, 수리실험으로는 수행할 수 없었던 큰 수심에 대하여 수치실험을 수행하여 수심에 따라 Manning계수  $n$ 값이 2/3승으로 증가한다는 사실을 확인하고, 나아가 실험장치의 제약이 없는 수치실험을 통한 저항체의 형상과 배치에 따른 Manning 계수식에 대한 연구의 가능성을 보이고자 하였다.

## 2. 이론 및 수치모형

### 2.1 이론

일정한 경사를 갖는 개수로 등류에 잠기지 않고 흐름에 변형되지 않는 고정된 저항체가 등간격으로 존재할 때 저항체에 의해 변형된 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 주지 않는다는 가정으로부터 바닥마찰력과 저항체의 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 유도 과정 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 조도계수를 나타내고,  $h$ 는 수심이며,  $g$ 는 중력가속도이고,  $s$ 는 흐름방향의 저항체 이격거리이고,  $b$ 는 저항체의 흐름방향 폭이며,  $r_0$ 는 유수면적에 대한 저항체의 투영면적의 비로서 공극률을 나타내고,  $C_D$ 는 형상항력계수이다. 위 식 (1)은 흐름 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 미치지 않는 흐름에서 적용이 가능하고 저항체들이 등간격으로 배치되어 있는 경우에 적용이 가능하다. 따라서 권 등(2008)은 흐름 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 주는 경우에, 저항체의 상호영향에 의한 에너지손실을 고려하기 위해 항력상호작용계수(drag interaction coefficient)라고 명명한  $C_{DI}$ 를 식 (1)에 도입하여 식 (2)와 같은 상당저항계수 식을 제안하였다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_{DI} C_D \frac{1-r_0}{1+s/b} \left(\frac{h}{b}\right) \left(\frac{h^{1/3}}{2g}\right)} \quad (2)$$

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

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

이 항력상호작용계수는 Reynolds 수, 저항체의 형상, 흐름방향과 흐름 횡방향 이격거리 그리고 흐름방향과 저항체 배치각도의 함수일 것으로 생각할 수 있다. 권 등(2008)은 동일한 형상의 사각기둥 저항체들이 등간격으로 배치되어 있고  $C_D$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건( $Re > 10^4$ )에서의 수리실험 결과를 바탕으로 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 는 흐름방향과 횡방향의 이격거리의 지배적인 함수라고 추정하고 흐름방향 이격거리 영향에 따른 항력상호작용계수  $C_{DIF}$ 를 구하기 위해 다음과 같은 경험식을 도출하였다.

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

그리고 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수  $C_{DII}$ 를 구하기 위해  $r_0 = 0.715$ 인 경우, 실험치로부터  $C_{DII} = 1$ 과  $r_0 = 0.43$ 인 경우의 실험치로부터  $C_{DII} = 3.1$ 을 경험상수로 도입하여 적용하였다. 이러한 경험상수를 도입한 이유는 40 cm인 수로 폭의 한계로 인하여 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용의 특성을 유추해 낼 수 없었기 때문이다. 그러나 도입된 경험상수들은 식 (2)에서 횡방향 이격거리에 따른 영향이 없는 경우, 즉 공극률이 상

당히 큰 경우에 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수는  $C_{DII} = 1$  이어야 하고, 횡방향 이격거리가 가까워져 흐름에 영향을 미친다면 오리피스 효과에 의해  $C_{DII} > 1$ 이 될 것이라는 유체역학적 상식에 부합한다고 판단된다.

## 2.2 수치모형

본 연구에서 사용한 3차원 전산유체해석 프로그램인 FLOW-3D는 복잡한 유체 흐름을 해석하기 위해 연속방정식, 난류모형을 사용하는 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 지배방정식으로 하는 CFD (Computational Fluid Dynamics) code이다. FLOW-3D는 비정상 상태의 비압축성 및 압축성 유체의 유동현상을 모의할 수 있으며, 자유수면 해석을 위해 VOF (Volume of Fluid) 기법을 사용한다. 그리고 자유수면과 구조물의 형상 표현을 위해 FAVOR (Fractional Area/ Volume Obstacle Representation) 기법을 사용하여 유한차분법 사용시 가장 큰 문제가운데 하나인 계단형 격자경계에 따른 정확도를 개선한다. 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. 수치모의

### 3.1 수치모의의 개요

FLOW-3D를 이용한 수치모의를 위해 개수로 흐름에 수면보다 높고 폭이 0.114 m인 사각기둥 저항체들이 무한히 분포한다는 가정으로 저항체의 효과를 충분히 나타내고 계산시간의 단축을 위하여 Fig. 1과 같은 계산영역을 설정하였다. 수치실험을 위해 사용된 직각좌표축을 Figs. 1과 2에 표시하였고, Fig. 2에 수치모의를 위해 사용된 경계조건들을 나타내었다. 측면 경계는 모두 대칭형으로 하여 횡(Y) 방향으로 사각기둥 저항체들이 무한히 존재하는 경우를 모형화하였다. 연직(Z)방향의 바닥경계면은 수리학적으로 매끈한 벽면의 no-slip 경계조건을 사용하였다. 하상경사 ( $S_0 = 0.0049$ )를 모형에 적용하기 위해 중력성분을 종(X)방향과 연직(Z)방향 성분으로 구분하여 입력하고 계산영역의 상류단과 하류단에 주기적 경계조건(periodic boundary condition)을 사용하였다. 따라서 X방향에 대하여 계산된 하류단에서의 유속분포 및 수심 등의 데이터가 상류단의 조건으로 들어가 등간격의 사각기둥 저항체들이 무한히 존재

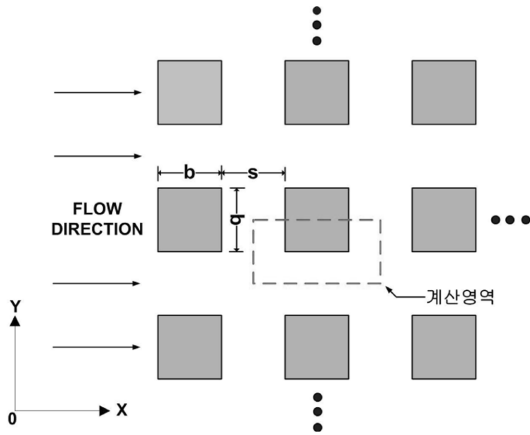


Fig. 1. Computational domain.

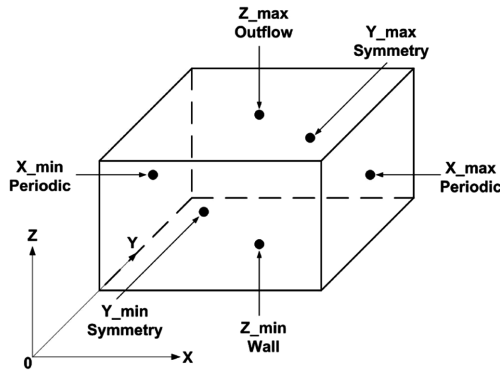


Fig. 2. Boundary condition.

하는 무한히 긴 수로를 모형화하였다. 초기 수심에 따라 최종 정상상태의 등류수심이 형성되었다.

이격거리 변화에 따른 Manning계수 변화를 측정하기 위해, Y방향 계산영역은 0.1 m( $r_0=0.43$ )로 설정하고 2가지 수심 0.05 m와 0.09 m에 따른 자유수면이 포함되도록 Z방향 계산영역을 0.11 m로 설정한 후에, 이격거리 증가효과를 파악하기 위해 X방향 계산영역을 0.1368 m에서 1.026 m로 증가시키며 수치모의를 실시하였다. 그리고 수심에 따른 Manning계수 변화를 측정하기 위해, 계산영역을 횡방향인 Y방향으로 0.1 m( $r_0=0.43$ )로 고정하고 흐름방향인 X방향으로는 0.362 m와 0.614 m의 2가지 계산영역을 구성한 다음, 수심을 0.0285 m~0.342 m로 변화시켰으며, 모든 경우에 있어서 자유수면이 포함되도록 Z방향의 계산영역을 충분히 크게 설정하고 수치모의를 실시하였다. 격자크기는 모든 경우 동일하게  $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0.0028$  m를 사용하였다. 수치계산을 위해 물성치는 20의 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 조건들에 따른 Manning계수를 산정하기 위해 Manning의 평균유속공식으로부터 변형된 관계식 (5)를 사용하였다.

$$n = \frac{1}{\sqrt{h}} S_f^{2/3} S_f^{1/2} \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 등류수심이고, 단면평균유속은 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 값을 식 (5)에 대입하여 사각기둥 저항체와 바닥마찰에 대한 상당저항계수로서의 Manning계수  $n$ 값을 산정하였다.

### 3.2 이격거리에 따른 Manning계수의 변화

#### 3.2.1 독립적으로 작용하는 흐름 저항체

상호작용하는 흐름저항체의 이격거리 및 수심에 따른 Manning계수의 변화를 수치모의하기에 앞서, 사각기둥 저항체가 흐름방향 및 횡방향 이격거리가 충분하여 저항체의 저항 및 에너지손실이 독립적으로 작용하는 경우에 대하여 수치모의하고, 수치모의 결과를 이론식 (1)과 비교하여 FLOW-3D의 해석능력을 검토하였다.

수치모의를 위해 횡방향인 Y방향으로 폭이 0.114 m인 사각기둥 저항체에 대해 공극률  $r_0=0.715$ 가 되도록 0.2 m인 계산영역을 정하고, 수심 0.09 m의 자유수면을 표현하도록 Z방향 영역을 설정하였다. 그리고 사각기둥 폭( $b$ )에 대한 흐름방향 이격거리( $s$ )의 비( $s/b$ )가 4, 5, 6.5가 되도록 각각 0.57, 0.684, 0.855 m의 X방향 계산영역을 설정하여 격자를 구성하였다. 그리고 완전난류의 흐름조건( $Re > 10^4$ )을 유지하여 수치모의를 수행하였다. 선택된 공극률  $r_0$ 과 흐름방향 이격거리의 비  $s/b$ 는 권 등(2008)에서  $r_0=0.715$ 이고  $s/b > 4$ 인 경우에 실험값과 이론식 (1)이 매우 근접했다는 근거로부터 도입하였다.

수치모의의 결과로부터 산출된 항력계수  $C_D$ 는 1.8~2.4로서 기존의 실험으로부터 얻어지는 2.1(White, 1994)이라는 수치와 정확하게 일치하고 있지는 않다. 그러나 많은 연구결과(Murakami and Mochida, 1995; Sohankar et al., 2000; Wienken et al., 2006)에서도 찾아볼 수 있는 것처럼 RANS 방정식 모형이나 LES(Large Eddy Simulation)를 채택하는 CFD code로 부터의 수치해석 결과가  $C_D=2.1$ 라

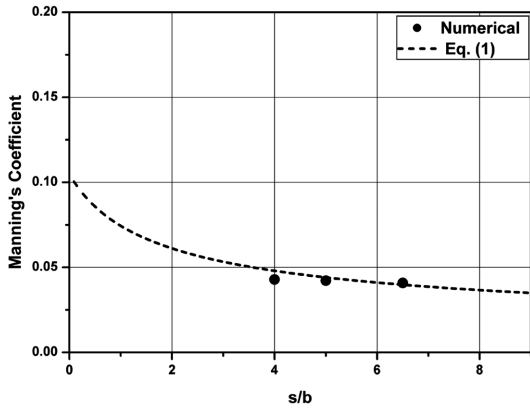


Fig. 3. Variation of n value as change s/b ( $h=0.09$  m,  $r_0=0.715$ ).

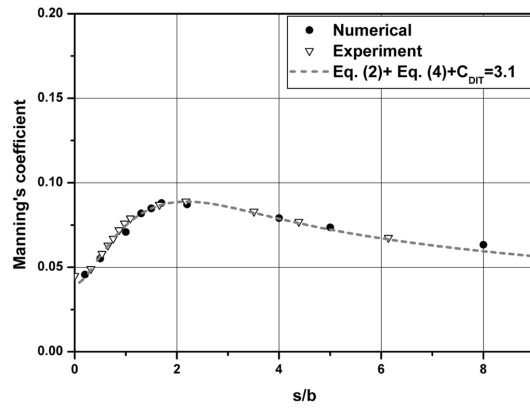


Fig. 4. Variation of n value as change s/b ( $h=0.05$  m,  $r_0=0.43$ ).

는 실험값을 정확하게 재현하는 데 상당한 어려움이 있으며, FLOW-3D를 이용한 수치모의의 결과로 나타난 항력계수가 다른 연구결과들과 비교해도 상당히 타당한 범위 안에 있음을 알 수 있다. 더욱이, 본 연구의 실험조건이 자유수면이 있는 경우이고, 선정된 수로폭( $r_0=0.715$ )과 길이가 무한히 넓고 긴 수로를 재현하기에는 충분하지 못하며, 바닥마찰에 의한 경계층 내에 저항체가 존재하는 경우이기 때문에 수리 및 수치실험 결과가 나타내는 위와 같은 정도의 변동오차는 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 식 (1)로 표시된 선은 매끄러운 금속바닥의 마찰계수  $n_b=0.012$ , 사각기둥의 항력계수  $C_D=2.1$ , 기둥폭  $b=0.114$  m, 등류수심  $h=0.09$  m, 그리고 공극률  $r_0=0.715$ 를 식 (1)에 대입하여 얻은 것으로 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 주지 않는 경우에는  $s/b$ 의 함수로서 서서히 감소함을 알 수 있다.  $s/b$ 가 4.0이하인 경우는 저항체 간의 상호간섭이 발생하므로 이론식 (1)과 수치실험결과를 비교할 수 있는 구간이 아니고,  $s/b$ 가 4.0이상인 경우가 흐름방향으로 상호간섭이 무시될 수 있으므로(권 등, 2008) 수치실험결과와 비교할 수 있는 구간이다. 그림에서 이론식 (1)을 도시한 점선은  $s/b$ 가 4.0보다 큰 경우에 FLOW-3D를 이용한 수치모의에서 구한 Manning계수  $n$ 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.  $s/b > 4.0$ 인 구간 내에서 상대적으로 이격거리가 작은 경우에 수치실험결과가 이론식 (1)에 잘 일치한다면, 이 경우보다 이격거리가 큰 경우는 흐름저항이 더 독립적인 것이므로 당연히 이론식 (1)을 만족시킬 것이라 판단할 수 있다.

사각기둥 저항체가 흐름방향 및 횡방향 이격거리가 커서 사각기둥 상호간의 영향이 상대적으로 작은 경우에 대해 수행된 수치모의의 결과와 사각기둥 상호간의 영향을 무

시한 경우에 대해 유도된 이론식 (1)에 의한 결과의 비교로부터 FLOW-3D의 결과가 상당히 타당함을 알 수 있었다.

### 3.2.2 상호작용하는 흐름 저항체의 배치

흐름방향 무차원 이격거리  $s/b$ 가 약 4.0보다 작아지면 3.2.1에 사용된 이론식 (1)과 다르게 흐름방향 이격거리에 따른 저항체사이에 상호 흐름영향이 발생하므로 이론식 (2)에 따라 상호항력작용계수  $C_{DI}$ 의 도입이 필요하게 된다. Fig. 4는 등류수심이 0.05 m이고 공극률이  $r_0=0.43$ 일 때의 수리실험 및 수치모의의 결과를 이용하여 흐름방향 이격거리  $s$ 에 따라 Manning계수  $n$ 값을 산정하여 도시한 것이다. 그림에 나타난 점선은 식 (4)를 사용하고  $C_{DII}$ 는 경험상수 3.1을 사용한 경험적 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 를 이론식 (2)에 적용하고, 등류수심  $h=0.05$  m, 공극률  $r_0=0.43$ 을 대입하여 얻어진 값을 도시한 것이다. 수치모의 결과로 산정된 Manning계수  $n$ 값은 권 등(2008)의 수리실험 결과와 마찬가지로 흐름방향 이격거리  $s$ 에 따라 변화하는 모습을 보여주고 있을 뿐만 아니라 수리실험 및 이론식 (2)에 의한 값들과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 등류수심이 0.09 m이고 공극률이  $r_0=0.43$ 일 때의 결과들을 도시한 것이다. 이 경우에 있어서도 FLOW-3D를 사용하여 수치모의한 결과로부터 산정된 이격거리  $s$ 에 따른 Manning계수  $n$ 값의 변화가 수리실험 결과 및 이론식 (2)의 결과와 매우 잘 일치하였으며, Fig. 4의 수심 0.05 m인 경우에 비해 전반적으로 Manning계수  $n$ 값이 증가한 것을 알 수 있다. 수심에 따른 Manning계수  $n$ 값의 변화는 3.3에 자세히 기술한다.

수심이 다른 2가지 경우에서 모두 수치모의 결과가 수리실험 결과와 매우 잘 일치하는 것으로부터 FLOW-3D의

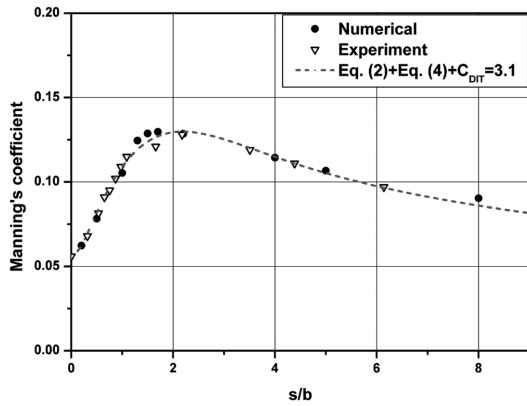


Fig. 5. Variation of n value as change s/b ( $h=0.09$  m,  $r_0=0.43$ ).

결과가 3.2.1에서 기술했던 것처럼 매우 타당하다는 결론을 얻을 수 있다. 또한, 수심이 다른 두 경우에서 모두 이론식 (2)에  $C_{DI} = 3.1C_{DIF}$ 를 적용하여 나타낸 값들이 수치모의 및 수치실험 결과값과 매우 잘 일치하는 것은 동일한 형상의 저항체들이 등간격으로 배치되어 있고  $C_D$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건( $Re > 10^4$ )에서  $C_{DI}$ 가 흐름방향 이격거리와 횡방향 이격거리에 지배적인 영향을 받고 있다는 것을 나타내는 것이다. 따라서 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 가 흐

름방향과 횡방향 이격거리만의 함수라고 기술한 권 등 (2008)의 연구결과가 타당하다는 것이 확인되었다고 할 수 있다. 이러한 항력상호작용의 영향으로 나타나는 Manning 계수 형태의 상당저항계수  $n$ 값의 변화는 흐름방향 이격거리  $s$ 에 따라서 다음과 같은 특성을 나타내고 있다.  $s/b$ 가 약 2.0일 때 Manning계수  $n$ 값은 최대값을 보이고,  $s/b$ 가 약 2.0보다 작은 경우에는  $s/b$ 가 증가함에 따라 Manning계수  $n$ 값이 증가한다. 이는  $s/b$ 가 작을 때는 와류가 발달할 수 있는 배후공간이 충분하지 못했지만,  $s/b$ 가 점점 커지면서 와류가 발달할 수 있는 배후공간이 충분하여 와류의 크기도 커지고 따라서 에너지 손실도 증가하는 것으로 생각할 수 있다. 그러나  $s/b$ 가 약 2.0 보다 큰 경우에는 이격거리가 증가함에 따라 Manning계수  $n$ 값은 감소한다. 이 결과는  $s/b$ 가 약 2.0보다 큰 경우에는 와류가 발달할 수 있는 배후공간은 충분하지만 단위길이당 와류를 발생시키는 구조물의 수가 감소하여 그에 따른 단위길이당 에너지손실도 작아져 Manning계수  $n$ 값도 점점 줄어드는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 6은 FLOW-3D를 이용하여 등류수심이 0.09 m이고 공극률이 0.43일 때를 수치모의한 결과 가운데  $s/b$ 가 0.2, 1.0, 5.0인 경우에  $Z = 0.05$  m에서의 X-Y단면 유속분포의 벡터도를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이  $s/b$ 가 작은 경

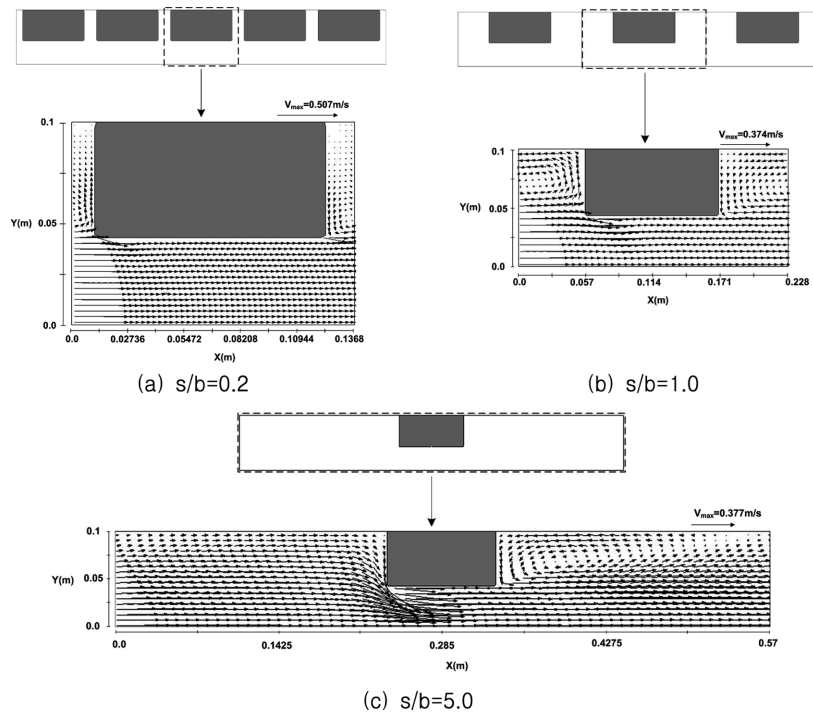


Fig. 6. Velocity vectors of X-Y plane.

우에는 와류가 발달할 수 있는 배후공간이 충분하지 못하지만  $s/b$ 가 조금씩 커짐에 따라 와류가 발달할 수 있는 배후공간이 증가하며,  $s/b$ 가 약 2.0보다 커지면 와류가 발달할 수 있는 배후공간은 충분하지만 단위길이당 와류를 발생시키는 구조물의 수가 감소함을 그림을 통하여 확인할 수 있다.

### 3.3 수심에 따른 Manning계수의 변화

개수로 흐름내에 수면보다 높은 저항체가 있을 때 Manning계수 값이 수심에 따라 변화한다는 사실은 여러 연구자들에 의해 확인되어 왔다. 그러나 수심이 증가함에 따라 Manning계수  $n$ 값이 어떠한 함수로 증가하는지 연구자들마다 다르게 보고되고 있다(Fathi-Maghadam and Kouwen, 1997; Petryk and Bosmajian, 1975; Musleh and Cruise, 2006). 힘의 평형방정식으로부터 유도된 이론식 (1)에 의하면, 저항체의 저항 및 에너지손실이 독립적으로 작용하도록 저항체들이 배치되어 있고 바닥마찰에 의한 에너지 손실이 저항체에 의한 에너지 손실에 비해 매우 작아 무시할 수 있을 때, Manning계수  $n$ 값은 수심  $h$ 의 2/3승으로 증가하게 된다. 또한, 동일한 형상의 저항체들이 등간격으로 저항 및 에너지손실이 상호작용하도록 배치되어 있고 항력계수  $C_D$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건( $Re > 10^4$ )일 때, 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 가 흐름방향과 횡방향 이격거리만의 함수이므로,  $C_{DI}$ 를 포함하는 이론식(2)에 근거하여 개수로내 수면보다 높은 저항체가 있을 때 Manning계수  $n$ 값이 수심  $h$ 의 2/3승에 비례한다고 판단할 수 있다.

이를 증명하기 위해 수행된 권 등(2008)의 수리실험은 실험장치의 제약으로 수심이 약 0.11 m까지의 경우만 수행되었으므로, 수심에 따른 Manning계수 값의 변화를 파악하

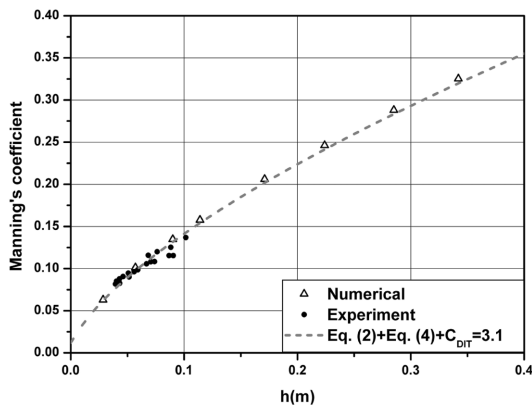


Fig. 7. Variation of  $n$  value as changing  $h$  (where  $s/b=2.175$ ,  $r_0=0.43$ ).

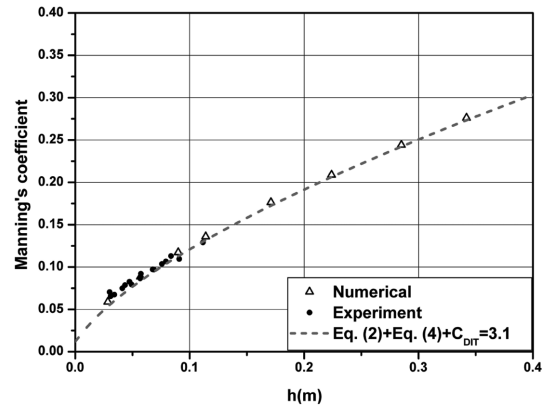


Fig. 8. Variation of  $n$  value as changing  $h$  (where  $s/b=4.386$ ,  $r_0=0.43$ ).

기에 충분하지 못 하였다. 따라서 실험장치의 제약이 없고, 이격거리에 따른 수치실험을 통해 그 결과의 타당성이 검증된 FLOW-3D를 이용하여 수치모의를 수행하여 그 결과를 Figs. 7과 8에 도시하였다.

Figs. 7과 8은 각각 흐름방향 이격거리 비  $s/b$ 가 2.175이고 공극률  $r_0$ 가 0.43일 때, 그리고 흐름방향 이격거리 비  $s/b$ 가 4.386이고 공극률  $r_0$ 가 0.43일 때, 수심 변화에 따른 Manning계수  $n$ 값을 수리 및 수치실험의 결과로부터 산정하여 나타낸 것이다. 그림에 FLOW-3D를 이용한 수치모의 결과와 권 등(2008)의 수리실험결과를 도시하고, 더불어 경험식 (4)와 경험상수를 적용한 항력상호작용계수  $C_{DI}=3.1$ 가 도입된 이론식 (2)에 각각의 이격거리 비와 공극률을 대입하여 얻은 결과를 점선으로 도시하였다. 그림을 통해 알 수 있듯이 수치모의 결과, 수리실험 결과 그리고 이론식이 모두 잘 일치하고 있으며, 특히 실험장치의 제약으로 수행되지 못했던 수심이 0.11 m 이상인 구간에서 수치모의 결과와 이론식은 매우 잘 일치하고 있다. 이것으로부터 Manning계수  $n$ 값이 수심  $h$ 의 2/3승으로 증가된다고 결론지을 수 있다.

## 4. 결 론

2차원 비선형 천수방정식을 사용하여 대상영역이 넓은 범람수치모의를 하는 경우에, 구조물에 의한 에너지 손실을 포함하는 Manning계수  $n$ 값을 산정하여 천수방정식에 적용하면 구조물을 무시하고 구조물 보다 큰 격자를 사용할 수 있으므로 계산시간을 크게 단축시킬 수 있을 것이다. 이러한 목적으로부터 마찰저항과 형상저항을 포함하는 Manning

계수 형태의 상당저항계수를 산정하기 위해 권 등(2008)은 힘의 평형방정식을 바탕으로 이론식을 유도하고 이 이론식에 수치실험을 통해 경험적 항력상호작용계수를 도입하였다. 그러나 실험장비의 제약으로 부분적으로 충분한 실험이 수행되지 못한 것이 사실이다. 본 연구는 FLOW-3D를 이용하므로 수치실험이 갖는 제약없이 수치모의를 통해 항력상호작용계수에 대한 추가적 연구를 수행하려는 목적을 가지고 있다. 기존의 수치실험과 이론식을 이용하여 FLOW-3D가 흐름내 수면보다 높은 저항체가 존재할 때의 흐름양상을 정도 높게 계산하고 있는지 검토하고, 수치실험, 이론식 그리고 수치모의 결과들의 일치정도로부터 기존 연구의 타당성을 검토하였다.

우선 저항체에 의한 흐름양상이 다른 저항체에 영향을 거의 주지 않도록 이격거리가 크고, 항력계수  $C_D$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건( $Re > 10^4$ )에 대해 수치모의를 수행하여 그 결과가 이론식과 잘 일치함을 보였다. 그리고 수면보다 높은 사각기둥 저항체들이 등간격으로 배치되어 있고  $C_D$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건에서, 저항체의 이격거리가 좁아져 상호작용이 발생하므로 저항 및 에너지손실이 변화하는 흐름을 수치모의하였고, 그 결과가 수치실험 결과뿐만 아니라 이격거리만의 함수로 가정된 경험적 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 를 적용한 이론식과 잘 일치함을 보였다. 이로부터 항력상호작용계수  $C_{DI}$ 가 이격거리만의 함수라는 연구결과가 타당하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 수치모의에 사용된 FLOW-3D가 흐름내의 저항체에 의해 변화하는 흐름을 정도 높게 계산한다는 것을 알 수 있었으며, 본 연구의 조건에서 Manning계수  $n$ 값이 어떻게 변화하는지를 알아내기 위해 FLOW-3D를 사용한 수치실험이 수치실험을 대신하여 사용되어도 무리가 없을 것으로 판단하였다.

사각기둥 저항체들이 등간격으로 서로 상호작용하는 거리에 배치되어 있고,  $C_{DI}$ 가 일정한 값을 갖는 흐름조건에서 수치실험으로는 수행할 수 없었던 큰 수심 조건에 대하여 FLOW-3D를 사용하여 수치실험을 수행하였다. 기존 Manning계수  $n$ 값이 수심의 2/3승으로 증가한다는 주장은 매우 작은 수심에 대해서만 수행된 수치실험으로 반론의 여지가 있었으나 본 연구의 수치실험결과가 수치실험결과와 잘 일치할 뿐만 아니라 이론식과 완벽히 일치하므로 Manning계수  $n$ 값이 수심의 2/3승으로 증가하는 사실을 완전하게 확인하였다.

FLOW-3D를 이용하여 수치실험장비의 한계로 인하여 자세히 연구되지 못했던 횡방향 이격거리의 영향에 따른 항력상호작용계수를 추정하므로 본 연구의 최종성과물이 되는 Manning 계수식을 보완하는 연구가 계속 진행되고 있으며, 더 나아가 다른 형상을 가진 저항체의 배치방법에 따른 연구를 지속적으로 수행할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(지진해일 재해저감기술 개발, 과제번호: NEMA-06-NH-06)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 포함합니다.

## 참고문헌

- 권갑근, 최준우, 윤성범 (2008). 개수로 다열기둥에 대한 상당저항계수 측정. 대한토목학회 논문집, 인쇄중.
- Fathi-Maghadam, M. and Kouwen, N. (1997). Nonrigid, Non-submerged, Vegetative Roughness on Floodplains. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, 51-57.
- Flow Science, Inc. (2000). FLOW-3D User Manual.
- Murakami, S., and Mochida, A. (1995). On Turbulent Vortex Shedding Flow Past 2D Square Cylinder Predicted by CFD, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 54, 191.
- Musleh, F. A. and Cruise, J. F. (2006). Functional Relationships of Resistance in Wide Flood Plains with Rigid Unsubmerged 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.
- Sohankar, A., Davidson, L. and Norberg, C. (2000). Large Eddy Simulation of Flow Past a Square Cylinder: Comparison of Different Subgrid Scale Models. *Journal of Fluids Engineering*, 122, 39-47.
- White F. M. (1994). *Fluid Mechanics*. 3rd Edition. McGRAW-HILL, INC.
- Wienken, W., Stiller, J. and Keller, A. (2006). A Method to Predict Cavitation Inception Using Large-Eddy Simulation and its Application to the Flow Past a Square Cylinder, *Journal of Fluids Engineering*, 128, 316-325.

Received October 20, 2008

Accepted December 1, 2008