

범람수치모의를 위한 다열기둥의 Manning계수 산정 Estimation of Manning Coefficient of Multi-Column for Inundation Simulation

권갑근¹, 최준우², 김형석³, 윤성범⁴

Kab Keun Kwon¹, Junwoo Choi², Hyeong Seok Kim³, Sung Bum Yoon³

1. 서 론

범람수치모의에서 범람지역내 구조물 표현의 한계성과 긴 계산시간으로 인하여 3차원 모델보다는 일반적으로 2차원 비선형 천수방정식(NSWE, Nonlinear Shallow Water Equation)을 사용한다. 이때 범람지역의 구조물은 바닥마찰로 표현되고 이를 Manning의 조도계수로 환산하여 천수방정식에 적용한다. 그러나 해수의 범람시 범람지역내 구조물 주위에 발생하는 와류로 인하여 흐름저항이 크게 증가하기 때문에 바닥조고에 의한 일반적인 개수로와는 다르게 수심에 따라 에너지 손실은 변화하게 된다. 따라서 이러한 경우 수심에 대해 일정한 일반적인 Manning계수를 적용하는 것은 한계가 있으므로 바닥마찰뿐 아니라 수면보다 높은 구조물에 의해 발생하는 흐름저항까지 고려할 수 있는 새로운 Manning계수의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 범람수치모의시 범람지역내의 구조물로 인한 복합적인 흐름저항의 표현이 가능한 Manning계수의 이론식을 제시하였으며 흐름에 잠기지 않고 변형되지 않는 다열기둥을 이용한 수리실험을 수행하여 이론식과 비교분석하였다.

2. 이 론

개수로에 흐름에 잠기지 않고 변형되지 않는 저항체가 존재하는 경우 바닥조고에 의한 저항외에도 저항체에 의한 흐름저항이 발생한다. 이런 저항은 다음과 같이 바닥마찰에 의한 저항력(F_s)과 저항체에 의한 저항력(F_d)으로 나타낼 수 있다

$$F_s = C_f \frac{\rho V^2}{2} PL \quad (1)$$

$$F_d = C_D \frac{\rho V^2}{2} A_p \quad (2)$$

여기서 C_f 는 마찰저항계수, C_D 는 형상저항계수, ρ 는 유체밀도, V 는 평균접근유속, P 는 수로 윤변, L 는 흐름방향 수로 길이, A_p 는 저항체의 흐름방향 투영면적이다. 이 두 저항력을 등류시 개수로의 운동량 방정식에 적용하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma A L \sin \alpha - \tau_s P L - N F_d = 0 \quad (3)$$

여기서 γ 는 단위중량, A 는 유수면적, $\tau_s \equiv F_s / (PL)$ 는 바닥전단응력, N 은 저항체의 개수를 나타낸다. 경사가 완만하고 등류라고 가정하면 $S_0 \approx \sin \alpha$ 이고 $S_0 = S_f$ 이다. (3)식을 에너지경사(S_f)에 관한 식으로 정리하면

$$S_f = \frac{h_f}{L} = \left(C_f \frac{P}{A} + N \frac{C_D}{L} \frac{A_p}{A} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

P/A 는 동수반경 R_h 이고, 저항체의 총개수 N 은 흐름방향 저항체의 개수 N_T 와 흐름의 횡방향 저항체의 개수 N_L 의 곱으로 나타내면 다음과 같이 정리할 수 있다.

1 발표자: 한양대학교 토목공학과 박사과정
 2 한양대학교 토목공학과 박사후과정
 3 한양대학교 토목공학과 석사과정
 4 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

$$S_f = \left(\frac{C_f}{R_h} + \frac{N_f C_D}{L} \frac{N_T A_p}{A} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

저항체의 형상이 동일하고 흐름방향이나 횡방향으로 일정한 간격으로 배열되어 있는 경우, 저항체의 흐름방향 폭을 b , 흐름방향으로 이격된 간격을 s 라 하면 (5)식의 N_f/L 를 $1/(s+b)$ 로 교체할 수 있다. 또한 전체 유수단면적에서 저항체의 투영면적의 비율 공극률 $\tau_0 = 1 - N_T A_p/A$ 의 식으로 변경하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = \left(\frac{C_f}{R_h} + C_D \frac{1 - \tau_0}{s + b} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (6)$$

C_f 를 $f/4$ 로 교체한 후 에너지 경사 S_f 를 Manning의 평균유속공식에 대입하면 다음과 같은 Manning계수의 형태로 정리가 가능하다.

$$n = \sqrt{\left(\frac{f}{4} + C_D \frac{1 - \tau_0}{1 + s/b} \frac{R_h}{b} \right) \frac{R_h^{1/3}}{2g}} \quad (7)$$

무한히 넓은 수로로 가정하여 R_h 를 수심 y 로 대체하고, 바닥조교만에 의한 Manning의 조도계수 $n_b = \sqrt{f R_h^{1/3}/8g}$ 를 식(7)에 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_D \frac{1 - \tau_0}{1 + s/b} \left(\frac{y}{b} \right) \left(\frac{y^{1/3}}{2g} \right)} \quad (8)$$

식(8)은 일정한 간격으로 배열되어 있는 저항체에 의해 발생하는 흐름저항이 다음 저항체의 흐름저항에 영향을 미치지 않는 경우에 적용이 가능한 식이다. 만약 저항체들의 흐름저항이 서로의 흐름에 영향을 미치는 경우 이를 표현할 수 있는 새로운 저항계수의 추가적용이 필요하다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_{DI} C_D \frac{1 - \tau_0}{1 + s/b} \left(\frac{y}{b} \right) \left(\frac{y^{1/3}}{2g} \right)} \quad (9)$$

여기서 C_{DI} 는 항력상호작용계수(Drag Interaction Coefficient)라고 명명하였다. C_{DI} 는 Reynolds수, 저항체의 형상, 저항체의 배열이나 이격거리등의 함수일 것으로 추정하나 본 연구에서는 C_D 가 일정한 값을 가지는 형상과 Reynolds수의 흐름조건을 적용하여 C_{DI} 가 흐름방향과 흐름 횡방향에 따른 저항체들 간의 간격의 함수라고 가정하였다.

3. 수리실험

범람지역내 잠기지 않는 구조물에 의한 흐름저항을 파악하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 수리실험은 Fig. 1과 같이 길이 12m, 높이와 폭이 각 40cm인 유량과 경사를 조절할 수 있는 수로에서 한번의 길이가 11.4cm인 강철재질의 정방향 다열기둥을 일정하게 배열하여 실험하였다.

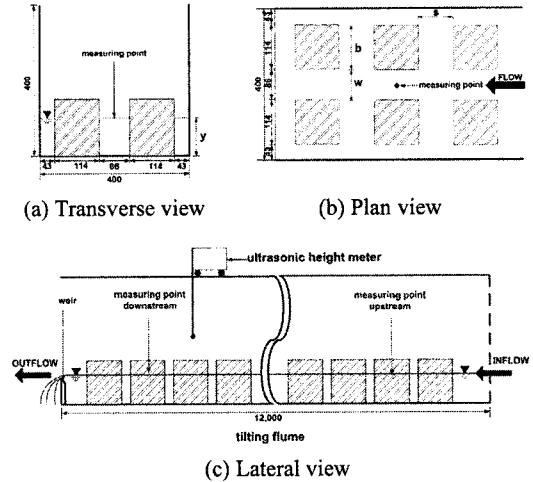


Fig. 1. Schematic diagrams of experimental set-up of double-row piers(unit: mm)

유수시 유속에 의한 다열기둥의 진동을 방지하기 위하여 기둥내부에 모르타르를 채워 사용하였다. 실험방법은 우선 다열기둥을 일정한 간격으로 배열한 후 0.002~0.007m³/s범위의 일정한 유량의 물을 수로에 유수시켰다. 다열기둥의 간격은 흐름방향으로 0~1.1m까지 다양하게 변화시켰으며 수로 횡방향으로는 1열및 2열로 배치하여 실험하였다. 다양한 수심값을 얻기 위하여 수로의 경사를 0.001-0.01범위로 일정하게 변경한 후 하류웨어를 조절하여 상류, 중류, 하류부의 수심을 일치시켜 등류를 형성하였다. 수심은 초음파수위계를 사용하여 측정하였으며 아래와 같은 Manning공식에 대입하여 흐름에 잠기지 않는 구조물에 의한 에너지 손실을 나타내는 Manning계수를 측정하였다.

$$n = \frac{1}{V} y^{2/3} S_f^{1/2} \quad (10)$$

여기서 등류상태에서 실험을 수행하였기 때문에 에너지 경사 S_f 는 수로경사 S_0 와 동일하다. V 는 평균유속으로 실험에 사용된 유량 Q 를 구조물을 무시한 유수단면적 A 로 나누어 계산하였다.

본 실험은 일정한 C_D 값을 유지하기 위해 정방

형의 형상이 일정한 C_D 값을 갖는 범위인 10^4 범위의 Reynolds 수를 유지하였다. vortex shedding으로 인한 수로내 부진동현상을 방지하기 위하여 기둥배후에 얇은 판을 부착하여 실험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1 이격거리에 따른 Manning계수의 변화

이격거리에 대한 실험결과 이격거리가 변화할수록 n 값 역시 변화하였다.

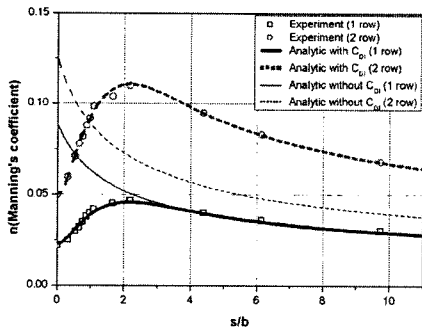


Fig. 2. Variation of n value as changing s and w ($y=7\text{cm}$)

Fig. 2는 수심이 7cm 이고 수로 횡방향으로 기둥을 1열과 2열로 배치한 경우 흐름방향 이격거리 s 의 변화에 따른 n 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 실험결과 s/b 가 약 2.2에서 n 값은 최대값을 보였으며 s/b 가 2.2보다 작은 경우에는 이격거리가 증가할수록 n 값은 증가하였다. 이는 기둥 뒤에 와류가 완전히 발달할 수 있는 배후공간이 충분히 확보되면 배후공간이 좁은 경우에 비해 와류의 크기는 커지고 에너지손실은 증가하여 일정 이격거리에서 에너지 손실이 최대가 되고 따라서 n 값은 최대가 된다. s/b 가 2.2보다 큰 경우에는 이격거리가 증가할수록 n 값은 서서히 감소하였다. 이는 이격거리가 와류가 완전히 발달할 수 있을 만큼 충분하지만 단위길이당 기둥의 수가 감소하기 때문에 기둥뒤에 발생하는 와류의 수도 감소하여 n 값은 서서히 감소하게 된다.

면적공극률 r_0 에 대한 영향을 파악하기 위해 수로 횡방향으로 일정한 흐름방향 이격거리 s 로 배치된 다열기둥을 1열과 2열로 배열하고 실험을 수행하였다. 실험결과 면적공극률이 작은 경우, 즉 2열 배열의 결과가 1열배열의 결과보다 n 값이 더 높게 측정되었다. 기둥이 배열이 1열에서 2열로 증가하면 즉 면적 공극률이 감소하면 단위폭당 와류를 발생시키는 기둥의 수가 2배로 증가하여 수로내 에너지 손실은 증가하고 결국 n 값은

증가하게 된다.

Fig. 2의 가는 점선과 실선은 이론식(8)을 도시한 것이다. n_b 의 값은 매끄러운 금속바닥을 나타내는 조도계수인 0.012, C_D 의 값은 정방형의 형상계수인 2.1, 기둥폭 b 는 0.114m, 등류수심 $y=0.07\text{m}$ 를 이론식(8)에 대입하였다. 공극률 r_0 는 수로 횡방향 1열배열인 경우 0.715, 2열배열인 경우 0.43을 대입하였다. 이론식(8)은 C_{DI} 가 1인 경우로 기둥의 의한 흐름저항이 다른 기둥의 의한 흐름저항에 영향을 미치지 않는 즉 각 기둥에 의한 흐름저항이 서로 독립적이라고 가정한 식이다. 이론식(8)의 도시결과 기둥이 1열로 배치된 결과에서 $s/b>3$ 인 경우 실험치와 이론값은 일치하였다. 이는 $s/b>3$ 일 때 1열 다열기둥의 흐름방향 이격거리에 의한 공간과 수로 횡방향 이격거리에 의한 공간이 충분하여서 와류로 인한 흐름저항이 다른 기둥에 의한 흐름저항의 영향을 받지 않는다는 의미이다. 그러나 1열 기둥의 $s/b<3$ 인 경우나 2열기둥의 경우 실험치와 이론값은 많은 차이를 보였으며 이는 기둥간의 간격이 충분하지 못하여 흐름저항이 상호간에 영향을 주어 실험치와 이론값과의 차이가 발생한 것으로 파악된다. 흐름저항의 중첩으로 인한 영향을 고려하기 위하여 C_{DI} 를 고려한 이론식(9)를 적용하였다. 우선 수로 횡방향 이격거리 영향을 포함하지 않고 흐름방향 이격거리만의 영향에 따른 항력상호작용계수를 C_{DIF} 라고 정의하고 s/b 만의 함수라고 가정한 후 실험치에 근접하도록 다음의 경험식을 추정하였다.

$$C_{DIF} = 1 - 0.95 \exp[-0.39(s/b)^{1.8}] \quad (11)$$

수로 횡방향 이격거리에 관한 상호작용계수를 C_{DIF} 라고 정의하면 C_{DI} 는 $C_{DI} = C_{DI} \times C_{DIF}$ 로 나타낼 수 있다. 다열기둥의 수로 횡방향 1열 배치인 경우 수로 횡방향 이격거리에 대한 영향이 거의 없으므로 $C_{DIF}=1$ 을 적용하고, 2열배치의 경우는 횡방향 이격거리의 영향을 고려하여 실험치에서 얻은 경험상수를 적용하여 $C_{DIF}=3.1$ 을 대입한 후 Fig. 2에 굵은 실선과 점선으로 도시하였다. Fig. 2에서 C_{DI} 가 적용된 이론값과 실험치는 잘 일치하였으며 따라서 C_{DI} 가 다른 요소보다 흐름방향 이격거리와 수로 횡방향 이격거리에 큰 영향을 받고 있음을 확인하였다. Fig. 3은 수로 횡방향으로 2열로 배치된 다열기둥의 다양한 등류수심값에서 얻은 실험치를 C_{DI} 가 적용된 이론값과 비교한 그림이다. 다양한 수심에서도 C_{DI} 가 적용된 이론값은 실험치와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

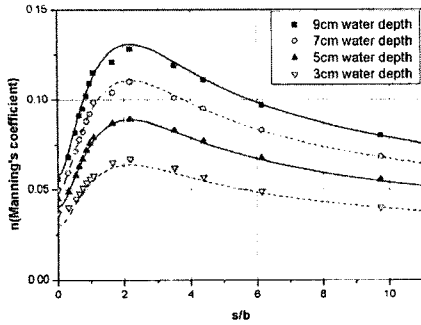


Fig. 3. Variation of n value as changing s/b with double-row piers

4.2 수심에 따른 Manning계수의 변화

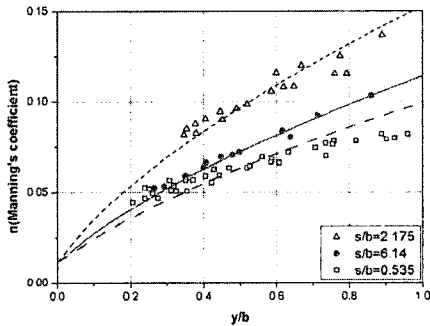


Fig. 4. Variation of n value as changing y/b with double-row piers
(where $s/b=0.535, 2.175, 6.14$)

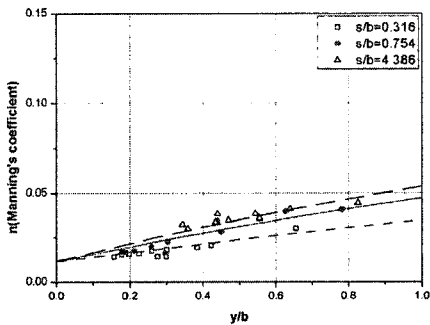


Fig. 5. Variation of n value as changing y/b with single-row piers
(where $s/b=0.316, 0.754, 4.386$)

개수로에서 바닥조교가 수심에 비해 상당히 작은 경우 n 값은 수심에 무관하지만 범람지역의 경우처럼 수로에 수면보다 높은 구조물이 존재하는 경우 n 값은 수심에 따라 변화하고 이를 다열기둥을 이용한 수리실험을 통해 확인하였다. 이는 수면보다 높은 구조물이 존재하는 경우 유수시 수심이 증가할수록 기둥 뒤에 생기는 와류의 길이

도 같이 증가하기 때문에 n 값은 증가하는 것으로 파악된다. Fig. 4와 5는 각각 수로 횡방향 2열기둥과 1열기둥에 대한 실험치와 C_{DI} 가 적용된 이론값을 도시한 그림이다. 수리실험결과 수심이 증가할수록 n 값은 비선형적으로 증가하였으며 이를 C_{DI} 가 적용된 이론값과 같이 도시한 결과 이론값과 실험치는 잘 일치하였다. 바닥마찰에 의한 에너지 손실이 흐름저항체에 의한 에너지 손실에 비해 무시할 수 있는 경우 이론식(9)에서 n 값은 수심의 2/3승으로 증가하게 된다. 실험값과 이론치는 비교적 잘 일치하였으므로 이로부터 수로내 수면보다 높은 구조물이 존재하는 경우 n 값은 수심의 2/3승으로 증가하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

범람시 범람수위가 지역내 구조물보다 낮게 형성되는 경우 흐름은 일반적인 개수로와는 다르다. 따라서 범람흐름에 의한 흐름저항을 고려하여 범람수치모의에 이용하기 위해 Manning계수의 이론식을 제시하였고 다열기둥을 이용한 수리실험을 수행하여 이론식과 비교하였다. 수리실험결과 s/b 가 약 2.2에서 최대 n 값을 나타냈으며 실험결과로부터 추정하여 C_{DI} 의 경험식을 구하였다. 또한 실험값과 비교하여 C_{DI} 의 상수값을 구하였으며 C_{DI} 와 C_{DIT} 가 적용된 C_{DI} 를 본 논문에서 제시한 이론식에 적용하여 실험치와 비교한 결과 이론값과 실험치는 잘 일치하였고 이를 통해 C_{DI} 는 수로의 횡방향 이격거리와 흐름방향 이격거리에 주된 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 또한 수면보다 높은 구조물이 존재하는 경우 수리실험을 통하여 수심이 증가할수록 n 값도 비선형적으로 증가하는것을 확인하였으며 C_{DI} 가 적용된 이론식을 실험결과에 적용한 결과 n 값이 수심의 2/3승으로 증가한다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구의 수행을 위한 소방방재청 자연재해저감기술사업(지진해일 재해저감기술 개발, 과제번호 : NEMA-06-NH-06)의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 97-114.