

개수로 다열기둥에 대한 상당저항계수의 측정

Measurement of the Equivalent Resistance Coefficient for Multi-piers in Open Channel

권갑근* · 최준우** · 윤성범***

Kwon, Kab Keun · Choi, Junwoo · Yoon, Sung Bum

Abstract

The influence of unsubmerged resistance bodies in a channel turbulence flow on energy loss was investigated by hydraulic experiments. Square-shaped multi-piers were used for unsubmerged structure or rigid vegetation in an open channel. In experimental channel flows multi-piers were arranged in double or single row along the channel direction, and mean-concept uniform elevations were attained and measured with a set of discharges and channel slopes. Applying the experimental results to the Manning equation, the equivalent resistance coefficient n , which implicates flow resistance and energy loss due to bottom friction as well as drag, was evaluated with varying the interval of piers and the uniform water depth. And the experimentally evaluated n values were compared with the semi-theoretical formula of the equivalent resistance coefficient derived from momentum analysis including a drag interaction coefficient. From the comparisons it was found that the interaction effect of piers on flow resistance was significant for the overall energy losses in a channel flow. The n values decrease when the interval of piers in flow-direction is less than about 2.2 times of the pier width. And it was also found that the n values increase with the $2/3$ power of water depth in the theoretical formula, since the drag interaction coefficient was found to be mostly dependent on the interval of piers.

Keywords : *unsubmerged multi-piers, hydraulic experiment, equivalent resistance coefficient, drag interaction*

요 지

개수로 난류흐름내 잠기지 않는 저항체들이 에너지 손실에 미치는 영향을 수리실험을 통해 연구하였다. 개수로의 잠기지 않는 구조물이나 식생을 연구하기 위하여 정방형 다열기둥을 실험에 사용하였다. 실험수로에 흐름방향 다열기둥을 횡방향으로 1열 및 2열로 배치하고 평균적 등류수위를 유지하여 일련의 유량과 수로경사를 조건으로 실험을 수행하고 측정하였다. 실험결과를 Manning공식에 적용하여 바닥마찰과 기둥의 형상저항에 의한 흐름저항 및 에너지손실을 표현하는 상당저항계수 값을 등류수심과 기둥의 이격거리를 변화시키며 산정하였다. 그리고 실험을 통해 산정된 값과 항력상호작용계수를 포함하는 운동량방정식으로부터 유도된 상당저항계수의 이론식과 비교하였다. 이론식과 실험치의 비교로부터 기둥에 의한 흐름저항의 상호작용이 수로전체의 에너지손실에 미치는 영향이 매우 중요함을 알 수 있었다. 그리고 기둥폭에 대한 기둥이격거리가 약 2.2배 이하 일 때 값이 감소하며, 항력상호작용계수가 기둥이격거리에 지배적으로 의존한다는 사실로부터 이론식에 나타난 값이 등류수심에 $2/3$ 승으로 증가함이 유효함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 잠기지 않는 다열기둥, 수리실험, 상당저항계수, 항력상호작용

1. 서 론

최근 지구온난화로 지구의 평균기온이 상승함에 따라 전 세계적으로 기상이변이 증가하고 있으며 우리나라의 경우도 최근 강우형태가 변화하여 장마가 끝난 후 단시간 동안의 다량의 호우가 발생하는 이른바 국지성 호우가 증가하는 추세이다. 또한 그 발생시기와 위치를 예측하기 어려운 해양지진이나 폭풍으로 인한 해일의 발생으로 해안지역 범람의 가능성도 높아지는 추세이다. 이러한 국지성 호우로 인한 하천

의 범람이나 폭풍 및 지진해일에 의한 해안의 범람은 하천 및 해안유역 도시의 침수피해를 발생시킬 것이다. 따라서 범람시 수위를 증가시키고 배수시스템의 통수능에 큰 영향을 주는 흐름 저항체들, 예를 들어 범람역 식생, 구조물 혹은 배수관거 구성체들에 의한 저항 매커니즘과 흐름 에너지 손실의 수리학적 특성에 관한 연구가 필요하다.

수심이 하상조고에 비해 상대적으로 큰 경우, 바닥마찰에 비해 개수로내에 존재하는 흐름저항체들에 의한 저항력과 에너지 손실이 지배적이다. Chow(1959)는 수로의 조도와 식생

*한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : kkkwon@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사후과정 (E-mail : wavechoi@hanyang.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수 (E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr)

에 의한 Manning의 조도계수를 비교하면서 위와 같은 사실을 언급하였다. 그러나 개수로 흐름내 구조물이나 강성식생은 배후에 생성되는 와류로 인하여 흐름저항을 크게 증가시키므로 잠기지 않는 저항체가 있는 수로의 Manning계수는 바닥마찰만 존재하는 일반적인 개수로와는 다르게 수심에 따라 변화하게 된다. 따라서 이러한 경우 수심에 무관하게 일정한 일반적인 Manning계수를 사용하는 것은 한계가 있다. 더욱이 Manning계수는 흐름저항기동들에 의해 변형된 흐름양상이 다른 기동들의 저항력에 영향을 주는 경우 구조물간의 이격거리에 따라 크게 변화한다.

많은 연구자들은 수리실험을 통해 다양한 저항체에 따른 혹은 배치방법에 따른 Manning계수의 변화를 연구하였다. Wu *et al.*(1999)은 고무를 입힌 말갈기 매트리스(horsehair mattress)를 이용하여 실험을 수행하여 식생이 부분적으로 수면아래로 잠겨있을 때 Manning계수는 수심이 증가하는 경우 감소한다고 하였다. Fathi-Maghadam and Kouwen(1997)은 잠기지 않는 유연한 식생을 대상으로 수리실험을 하여 Manning계수가 수심의 약 1/2승으로 증가한다고 하였다. Petryk and Bosmajian(1975), Chiew and Tan(1992), Musleh and Cruise(2006)은 모두 잠기지 않는 강성식생을 대상으로 연구하였으나 연구자에 따라 Manning계수가 수심과 어떤 관계가 있는지는 그 주장하는 바가 다르다. Petryk and Bosmajian(1975)은 수위가 증가하면 Manning계수가 수심의 2/3승으로 증가한다고 하였고, Chiew and Tan(1992)는 수심과 흐름저항이 독립적이라고 하였으며, Musleh and Cruise(2006)은 Manning계수가 수심에 대해 선형적으로 증가한다고 하였다. 이처럼 연구결과가 서로 다른 이유는 식생의 종류와 배치형태등 각기 다른 조건에서 연구가 진행되었기 때문이며 이러한 실험조건간에 서로 다른 에너지 손실 매커니즘이 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 수중에 잠기는 강성식생을 대상으로 실험한 James *et al.*(2002)은 식생의 배치형태를 다양한 조건으로 실험하여 배치형태에 따라 n 값이 변화한다는 것을 확인하였다. 국내의 경우, 권기원과 최성욱(2000), 강혁식과 최성욱(2007)이 수중에 잠긴 식생을 대상으로 식생의 밀도와 높이에 따른 조도계수를 산정하였지만, 수중에 잠기지 않는 구조물의 수심이나 이격거리에 따른 흐름저항에 대한 연구는 국내에서는 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 일정한 경사를 갖는 개수로 흐름에서 배수 시스템에 저항체 역할을 하는 식생이나 구조물을 연구하기 위하여 잠기지 않고 흐름에 변형되지 않는 고정된 정방향 기동을 사용하여 수리실험을 수행하였다. 이를 통하여 하상조도에 따라 변하는 마찰저항과 더불어 정방향 기동이 흐름에 미치는 저항 매커니즘과 에너지 손실을 연구하였다. 개수로 흐름내 수로전체에 규칙적으로 기동들이 배치되어 있는 경우, 이 기동들의 형상저항으로 변화되는 흐름양상은 일반적인 개념의 등류흐름과는 구별되지만 와류나 진동에 대한 평균적 개념의 등류를 수위조절을 통해 구현할 수 있었다. 실험수로에서 하류수위조절을 통하여 이 평균적 개념의 등류를 유지시킨 후 측정되는 실험결과들을 Manning의 평균유속공식에 적용하여 상당저항계수로서 Manning계수 n 값을 산정하였다. 또한 이미 알려진 형상항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 정방향 기동의 흐름조건, $Re \sim O(10^4)$ 과 정방향 기

동에 직각방향 흐름조건으로 수로내 유량들과 수위경사를 변화시키며 실험을 수행하여 기동간의 이격거리와 수위에 따른 흐름저항 정도와 에너지 손실 정도를 Manning계수 n 값의 변화를 통하여 파악하고 분석하였다. 이론식을 흐름저항기동들에 의해 변형된 흐름양상이 다른 기동들의 저항력에 영향을 주지 않는 경우를 가정하여 힘의 평형방정식으로부터 유도하였고 여기에 항력상호작용계수 C_D 를 이용하여 기동간 상호영향력을 고려하도록 하였다. 이 항력상호작용계수는 흐름방향과 흐름 횡방향에 따른 저항체의 배치간격만의 함수로 변화한다는 가정하에서 추정하고 이론식에 적용하여 실험결과로부터 산정된 Manning계수 n 값과 비교하고 분석하였다.

2. 이 론

일정한 경사를 갖는 개수로 흐름에 잠기지 않고 흐름에 변형되지 않는 고정된 물체가 존재할 때, 흐름저항은 하상조도에 따라 변하는 전단응력에 의한 저항과 더불어 이 고정된 저항체에 의한 흐름저항이 발생한다. 수심이 하상조고에 비해 상대적으로 매우 큰 경우 바닥마찰에 비해 흐름저항체에 의한 저항력과 에너지 손실이 지배적이다. 위와 같은 조건에서 바닥마찰에 의한 저항력(F_s)과 흐름저항체에 의한 저항력(F_d)은 각각 다음과 같이 표현될 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 이용하여 개수로 등류흐름에서 힘의 평형방정식을 수립하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 γ 는 단위중량, A 는 유수면적, $\tau_s = F_s / (PL)$ 는 바닥 전단응력, N 은 저항체의 개수를 나타낸다. 위 평형방정식에서 일반적인 C_D 는 하나의 독립적인 저항체에 대해 사용되기 때문에 흐름저항체에 의해 변형된 흐름양상이 다른 저항체의 저항력에 영향을 주지 않는 경우를 가정하고 있다. 식(3)을 수로경사(S_o)가 급하지 않다고 가정하고, $S_o \approx \sin \alpha$, 에너지경사(S_f) 혹은 수로경사(S_o)에 대한 식으로 변형하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_f = \frac{h_f}{L} = \left(C_{fA} \frac{P}{A} + N \frac{C_{DAp}}{L A} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 동수반경(R_h)의 정의, $R_h = A/P$ 를 사용하고, 흐름의 횡방향 저항체의 개수 N_T 과 흐름방향 저항체의 개수 N_F 로 수로에 배열된 전체 저항체의 개수를 $N = N_F \times N_T$ 로 나타낼 수 있다고 하면 식(4)는 다음과 같이 변형된다.

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

또한, 저항체들의 평면면적과 형상이 동일하고 흐름방향으로 저항체가 등간격으로 배열되어 있는 경우, 저항체의 흐름방향 폭을 b , 저항체 사이의 흐름방향 거리를 s 라고 하면,

위 식의 N_F/L 를 $1/(s+b)$ 로 교체할 수 있다. 그리고 유수 면적에 대한 저항체의 투영면적의 비를 $r_o = 1 - N_F A_p / A$ 와 같이 공극률(r_o)에 대해 변경하면 식(5)는 다음과 같이 변형된다.

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

여기서 C_f 를 마찰계수 f 로 대신하고, $C_f=f/4$, 개수로 난류 흐름이 등류상태일 때 적용될 수 있는 Manning 조도계수 n 과 에너지 경사의 관계, $n^2 = S_f R_h^{4/3} / V^2$ 을 이용하면 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

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

다시 식(7)에서 넓은 수로로 가정하여 동수반경을 수심(y)으로 대체하고, $R_h=y$, 마찰(조도)에 의한 Manning 조도계수(n_b)를 $n_b = \sqrt{f R_h^{1/3} / 8g}$ 라는 관계식을 적용하면 다음과 같은 상당저항계수의 이론식이 유도된다.

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

추가로, 흐름저항체의 평면단면이 사각형이고 흐름 및 흐름의 횡방향으로 일정한 간격을 가지고 배열되어 있을 때 식(8)은 다음과 같이 변형된다.

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

여기서 R_o 는 전체수조의 평면 면적에 대한 구조물들의 평면 면적을 제외한 면적의 비로 $(1-R_o)$ 는 수조 혹은 범람지역의 평면면적에 대한 구조물 평면면적의 비율을 나타낸다.

앞에서도 언급했던 것처럼 흐름저항체에 의해 변화된 흐름이 다른 저항체의 접근유속에 영향을 줄 수 있기 때문에 위 식들은 흐름내 저항체가 독립적으로 흐름의 에너지 손실에 작용하고 저항체의 배치가 규칙적인 경우에만 적용이 가능하

다. 저항체들의 흐름에 미치는 영향이 서로 의존적인 경우, 포괄적 흐름저항 혹은 에너지손실의 상호영향을 고려하여 나타낼 수 있는 다음과 같이 새로운 저항계수의 추가적용이 필요할 것이다.

$$n = \sqrt{n_b^2 + C_{DI} C_D \frac{1-r_o}{1+s/b} \left(\frac{y}{b} \right) \left(\frac{y^{1/3}}{2g} \right)} \quad (10)$$

여기서 C_{DI} 를 항력상호작용계수(drag interaction coefficient)라고 명명하고자 한다. 이 항력상호작용계수는 Reynolds 수, 저항체의 형상, 흐름방향과 흐름 횡방향에 따른 저항체의 배치간격, 그리고 흐름방향과 저항체 배치각도의 함수일 것이다. 또한 수심의 함수일 가능성도 배제하기 힘들다. 그러나 본 연구에서는 이미 알려진 형상항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 주어진 저항체(기둥)의 형상 및 흐름조건(Reynolds 수)과 저항체 배치의 정방향 흐름조건을 적용하여 이 항력상호작용계수 C_{DI} 가 흐름방향과 흐름 횡방향에 따른 저항체의 배치간격만의 함수로 변화한다고 가정하였다.

3. 수리실험

수로에 잠기지 않는 식생 혹은 구조물 연구의 목적으로 배치한 흐름저항기둥에 의한 에너지손실의 정도를 나타내기 위하여 넓은 개수로에서 난류흐름이 등류상태일 때 적용되는 Manning의 평균유속공식으로부터 변형된 다음의 관계식을 이용하였다.

$$n = \frac{1}{V} y^{2/3} S_f^{1/2} \quad (11)$$

여기서 에너지 경사 S_f 는 등류상태에서 바닥경사 S_o 와 동일하고, 평균유속 V 는 실험에 사용된 유량 Q 를 구조물을 무시한 유수단면적 A 로 나누어 계산하여 사용하였다. 또한 등류수심 y 의 측정을 위해 실험수로의 상류, 중류, 하류의 3 지점에서 기둥사이의 수위가 모두 일치하도록 수로 하류단의

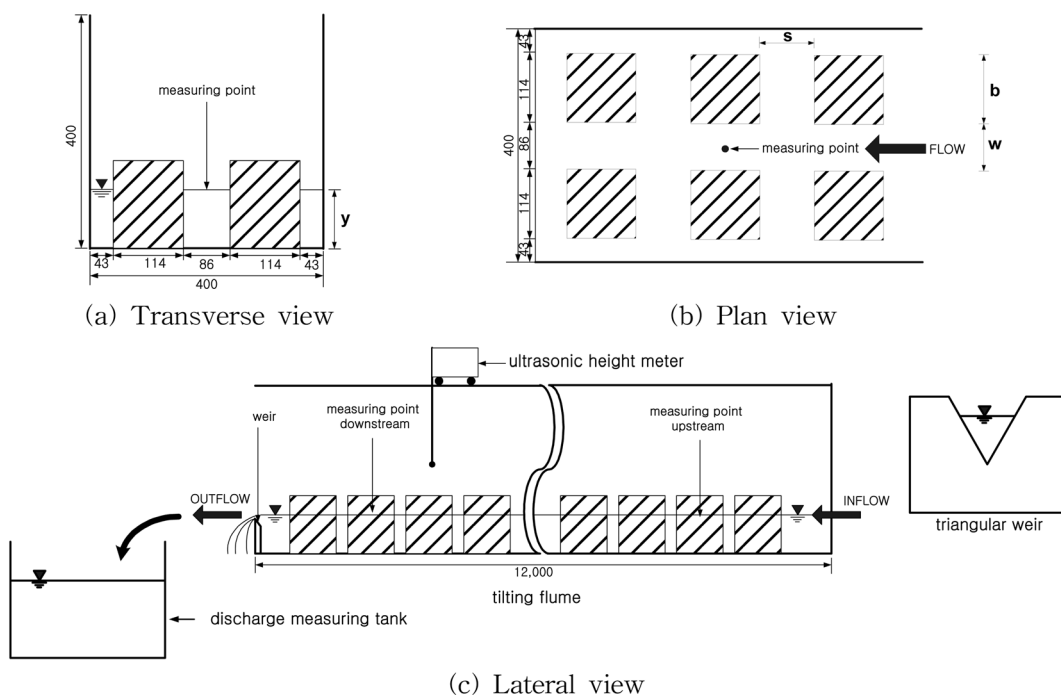


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental set-up of double-row piers (unit: mm)

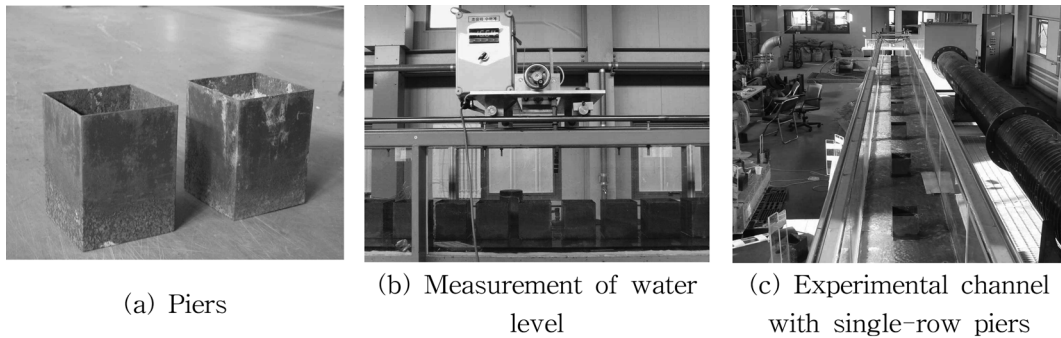


Fig. 2 Experimental facilities

수위를 조정하였다. 실험을 통해 얻어진 등류수심 y 와 S_o , V 를 이용하여 Manning 계수 값을 산정하므로 실험조건에 따른 기둥들에 의한 에너지 손실정도를 알 수 있었다.

수리실험은 Fig. 1과 2에 나타난 것처럼 유량과 경사를 조절할 수 있는 길이가 12 m이고 폭과 높이는 각각 0.4 m인 수로에 각변의 폭(b)이 0.114 m이고 높이는 0.150 m인 정방형 기둥을 수로를 따라 등간격(s)으로 1열 및 2열로 배치하여 수행하였다. 실험기둥은 유속에 의한 전도를 방지하기 위하여 내부에 시멘트 모르타르가 채워진 평평한 강철 박스로 제작하여 이용하였다. 실제 실험에 사용된 수로의 양쪽 측벽은 유리로 되어 있어 측벽에 의한 마찰손실이 기둥 배후에 발생하는 와류에 의한 손실에 비해 무시할 만큼 매우 작을 것으로 예상된다. 따라서 본 실험에서는 실험수로를 무한히 넓은 수로로 가정하였으며 수로의 측벽에 의한 영향은 무시하였다.

수리실험 장치내 물은 펌프에 의해 지하저수조에서 고수조로 올라가게 되며 자연유하식으로 고수조에서 상류수조로 관로를 통하여 이동된다. 상류수조에 설치된 삼각웨어를 통과하여 개수로에 유수된 물은 하류의 수위조절웨어를 거쳐 대용량 유량측정수조로 이동하고, 유량이 측정된 후 지하저수로로 순환된다. 유량측정수조를 이용하여 정상류 상태에 도달한 흐름이후의 유량을 측정하여 삼각웨어의 수위유량곡선을 작성하고 이를 이용하여 실험에 공급되는 유량을 삼각웨어를 이용하여 조절하였다. 실험에 사용된 유량은 약 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007 m^3/s 의 6가지이다. 일정한 유량으로 설정한 후 수위조절웨어를 조절하여 하류, 중류 및 상류부의 수심과 일치시켜 등류상태를 형성시킨다. 이때 수로경사를 0.001~0.01범위로 변경하여 여러 등류수심(y)에 따른 Manning 계수 n 값의 변화를 얻을 수 있었다.

기둥 배후에 발생하는 와류에 의한 흐름저항의 흐름방향 이격거리 s 에 대한 영향을 파악하기 위하여 s 를 0.0 m에서 기둥폭 b 의 약 10배(1.1 m)까지 다양하게 변화시켰다. 실험에 사용된 흐름방향 이격거리 s 는 0, 3.6, 6.0, 7.4, 8.6, 9.9, 11.0, 12.4, 16.3, 18.9, 24.8, 40.0, 50.0, 70.0, 111.0 cm의 15가지이다. 또한, 흐름 횡방향 기둥간 이격거리(w)에 대한 영향을 알아보기 위하여 w 를 0.286 m인 1열 및 0.086 m인 2열로 배치하여 실험하였다. 수로횡방향 1열과 2열 다열기둥 배치에 따른 실험은 유수면적에 대해 기둥의 면적을 제외한 물이 유수할 수 있는 면적의 비, 면적공극률 r_o 의 변화를 동반하므로 이에 대한 영향을 포함한다. 배열을 다르게 한 후 15가지의 흐름방향 이격거리 s 에 대한 실험

을 수행하였다.

앞에서 언급한 것처럼 본 실험에서는 이미 알려진 형상항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 조건하에서 이루어졌다. 즉, 정방형 기둥과 이 기둥에 대한 직각방향 흐름조건을 사용하고, Reynolds수는 $O(10^4)$ 의 범위를 유지하도록 수행되었다. 그리고 실험에서 기둥배후에 vortex shedding이 나타났고, 이는 흐름의 횡방향으로 수로내 부진동을 발생시켰다. 격렬한 부진동은 흐름 에너지 손실을 증가시키는 역할을 하므로 흐름저항의 과대측정이 예상된다. 따라서 이를 방지하기 위해 일정한 너비의 얇은 판을 실험기둥 뒤에 부착하여 부진동현상을 예방할 수 있는 수준에서 주기적 vortex shedding을 억제하였다. 이 부진동을 조절하는 수준에 의해 흐름저항이 어느 정도 과소측정 될 것이 예상된다.

4. 실험결과분석

4.1 이격거리에 따른 Manning 저항계수의 변화

실험결과 흐름방향 이격거리 s 에 따라 Manning 흐름저항 계수 값은 변화하였다. Fig. 3은 실험기둥을 횡방향 1열 및 2열로 배치하고 등류수심을 7 cm로 고정했을 경우의 실험결과를 흐름방향 이격거리에 따른 Manning계수 n 값의 변화로 도시한 것이다. s/b 가 약 2.2일때 Manning계수 n 값은 최대값을 보였고, s/b 가 2.2보다 작은 경우는 이격거리 s 가 증가할수록 Manning계수 n 값이 증가하였다. 이는 Chow(1959)에 의해 확인된 것처럼 매끄러운 표면의 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 Manning계수 n 값도 최대값을 가지게 된다. s/b 가 2.2보다 큰 경우는 이격거리 s 가 증가할수록 Manning계수 n 값이 감소하였다. 이는 이격거리 s 가 최대와류가 발생할 수 있는 공간을 주는 이격거리보다 더 증가하게 되어 와류가 발달할 수 있는 공간은 충분하지만 와류의 원인이되는 단위길이당 기둥의 수가 감소하며 따라서 Manning계수 값도 서서히 줄어드는 것으로 판단된다. 이는 이론식에서 $1/(s+b)$ 항이 흐름방향 단위길이당 저항체의 수 (N_F/L)로부터 변형되었다는 사실을 상기하면, 이해될 수 있다.

면적공극률 r_o , 즉 횡방향 이격거리 w 에 관한 에너지손실의 영향을 파악하기 위해 기둥을 횡방향 1열과 2열로 배치하여 실험하고 Manning계수 n 값을 비교하였다. 첫째, 기둥의 배열이 1열에서 2열로 증가하면 수로내 유수단면적의 감

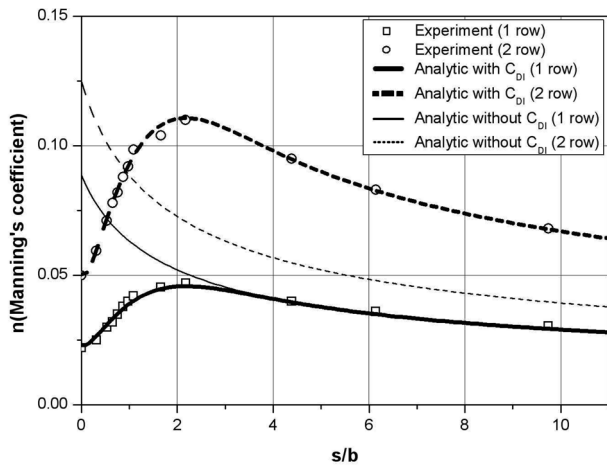


Fig. 3 Variation of value as changing s and w ($y=7$ cm)

소로 면적공극률 r_o 는 감소한다. 유수단면적의 감소로 인하여 기둥사이의 실제유속이 증가하고 따라서 이로 인한 수로 내 에너지 손실은 증가하여 Manning계수 n 값 역시 커지게 된다. 실험에서 사용된 기둥 횡방향 2열 배치의 경우 면적공극률 r_o 의 감소로 횡방향 간섭이 발생하여 에너지 손실이 횡방향 1열로 배치된 경우에 비해 크게 증가되었고, 따라서 Manning계수 n 값 역시 모든 s/b 범위에서 증가되었다.

기둥 1열과 2열의 실험결과 횡방향 이격거리 w 에 상관없이 s/b 가 약 2.2일때 Manning계수 n 값이 최대임을 알 수 있었고 흐름방향 이격거리 s 에 따른 Manning계수 n 값의 전반적인 변화양상도 비슷한 형상을 나타냈다.

Fig. 3에 나타난 가는 실선과 점선은 식(10)에 매끄러운 금속바닥의 Manning 조도계수를 위해 $n_b=0.012$ 를, 정방형 기둥의 형상항력계수를 위해 $C_D=2.1$ 을, 기둥폭은 $b=0.114$ m를, 등류수심에 $y=0.07$ m를 대입하고, 1열 실험기둥의 면적공극률로 $r_o=0.715$ 를, 2열 기둥의 면적공극률로 $r_o=0.43$ 을 대입하여 도식한 것이다. 따라서 이 선들은 $C_{DI}=1$ 이 적용된 것으로 기둥들에 의한 흐름변화가 서로의 저항력에 영향을 주지 않음을 가정한 이론값들이다. 이론식(10)으로부터 기둥들이 서로의 저항력과 상호간 에너지손실에 영향을 주지 않는 경우, 즉 $C_{DI}=1$ 이고, 또한, 바닥마찰에 의한 에너지 손실이 흐름저항체에 의한 에너지 손실에 비해 무시할 수 있을 때, 즉 $n_b=0$ 일 때, Manning계수 n 값이 흐름방향 이격거리와 $1/(1+s/b)^{1/2}$ 의 함수로 감소함을 알 수 있다. 흐름방향으로 1열의 기둥이 배치되고 $s/b>3$ 인 경우에 이론값과 실험치가 일치함을 보이는 것은 기둥들의 흐름방향 및 횡방향 이격거리에 따른 영향 없이 서로 독립적인 흐름저항을 가지는 경우 이론식(10)이 유효함을 의미한다. 그러나 $s/b<3$ 인 경우 이격거리와 와류발달 공간의 관계에 따라 기둥이 독립적 흐름저항을 가지는 경우에 비해 흐름저항이 감소하게 되므로 C_{DI} 가 적용되지 않은 이론치와 실험치는 차이가 발생한다. 더욱이 흐름방향으로 2열의 기둥이 배치된 경우의 실험치는 흐름방향 및 횡방향 이격거리에 따른 영향으로 전구간에서 C_{DI} 가 적용되지 않은 이론치와 큰 차이를 나타낸다.

우선 횡방향 기둥의 이격거리 w 의 영향을 포함하지 않고 흐름방향 이격거리 만의 영향에 따른 항력상호작용계수를 C_{DIF} 라고 정의하고, 이 계수가 s/b 만의 함수라고 가정하여 실험치에 근접하도록 경험식을 추정하였다.

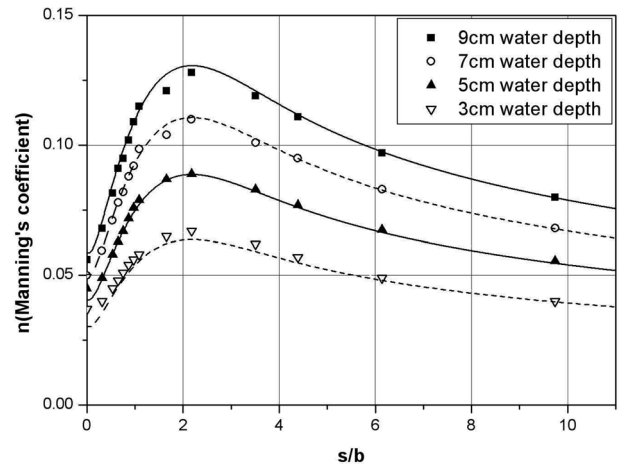


Fig. 4 Variation of value as changing with double-row piers

$$C_{DIF} = 1 - 0.95 \exp[-0.39(s/b)^{1.8}] \quad (12)$$

흐름방향 이격거리만의 영향을 포함하지 않고 횡방향 기둥의 이격거리 w , 즉 횡방향 공극률 r_o 의 영향만에 따른 항력상호작용계수를 C_{DIF} 라고 정의하면 C_{DI} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_{DI} = C_{DIF} \times C_{DI} \quad (13)$$

여기서 실험기둥 1열 배치의 경우($w/b=2.51$) 횡방향 이격거리 w 에 큰 영향이 없으므로, $C_{DIF}=1$, 즉 $C_{DI}=C_{DIF}$ 를 식(10)에 적용하고, 기둥 2열 배치의 경우($w/b=0.754$) 횡방향 이격거리 w 의 영향을 고려하여 실험치로부터 구한 경험상수를 도입, $C_{DI}=3.1C_{DIF}$ 를 식(10)에 적용하고 Fig. 3에 굵은 실선과 점선으로 도식하였다. 그림에서 적용된 경험적 항력상호작용계수 C_{DI} 를 적용한 이론식이 실험치와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 C_{DI} 가 다른 요소보다 이격거리 s/b 와 w/b 에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

앞의 경험 항력상호작용계수 C_{DI} 를 적용한 이론식을 실험기둥 2열을 배치한 다른 등류수심 y 를 갖는 조건에 적용하고 이를 실험치와 비교하여 Fig. 4에 도식하였다. 수심에 따른 저항계수의 변화에 대해서는 다음에 다시 설명하겠지만, 수심이 증가하게 되면 저항기둥 후면에 발생하는 와류의 깊이 또한 증가하므로 에너지 손실과 흐름저항은 증가하게 된다. 그림에서 이러한 수심에 따른 저항계수의 증가와 더불어 수심의 변화에 상관없이 s/b 에 따른 Manning계수 n 값의 변화양상은 유사함을 알 수 있다. 항력상호작용계수 C_{DI} 를 적용한 이론식이 수심이 다른 조건의 실험치와 비교적 잘 일치하지만 수심이 매우 작은 3 cm 수심의 경우에 다른 경우보다 차이가 있음을 알 수 있다.

4.2 수심비에 따른 Manning계수의 변화

개수로에서 바닥조도가 수심에 비해 충분히 작은 경우 Manning계수 n 값은 수심에 무관하게 일정한 값으로 나타나게 된다. 그러나 수로에 수심보다 높은 구조물 혹은 잠기지 않는 식생이 존재하는 경우 여러 논문에서 Manning계수 n 값은 수심에 따라 변화함이 확인되었다(Petryk and Bosmajian, 1975; Chiew and Tan, 1992; Musleh and Cruise, 2006). 그러나 수심이 증가함에 따라 Manning계수 n 값이

수심의 어떤 함수로 증가하는 지에 대한 실험결과는 실험자들마다 매우 다르게 나타난다. 예를 들어, Petryk and Bosmajian(1975)는 Manning계수 n 값이 수심 y 의 2/3승으로 증가한다고 하였으며 Chiew and Tan(1992)은 n 값이 수심에 독립적이라고 하였고, Musleh and Cruise(2006)는 n 값이 수심 y 에 대해 선형적으로 증가한다고 결론지었다.

본 연구에서는 수로에 수심보다 높은 정방향 기둥을 흐름방향에 대해 등간격으로 배치하여 수리실험을 수행하여 수심의 증가에 따른 Manning계수 n 값의 변화를 관측하고 이를 힘의 평형방정식으로부터 유도한 식(10)의 이론식과 비교하였다. 실험상의 제약조건으로 인하여 수심은 $y/b \leq 1.0$ 인 구간에서만 측정되었다. 식(10)에 따르면 흐름저항체들에 의한 흐름변화가 서로의 저항력과 상호간 에너지손실에 영향을 주지 않는 경우, 즉 $C_{Df}=1$ 이고, 바닥마찰에 의한 에너지 손실이 흐름저항체에 의한 에너지 손실에 비해 무시할 수 있을 때, 즉 $n_b=0$ 일 때, Manning계수 n 값이 수심 y 의 2/3승으로 증가한다. 이는 Petryk and Bosmajian (1975)의 결과와 동일한 것이다. 또한, 식(6)으로부터 $C_{Df}=1$ 이고 $n_b=0$ 일 때, 에너지경사는 형상항력계수, 저항체의 이격거리, 그리고 면적공극률의 함수이고 수심에 독립적임을 알 수 있다.

Figs. 5와 6은 횡방향 2열 기둥을 흐름방향에 대해 등간격으로 배치하여 실험한 결과를 바탕으로 정방향 기둥의 폭에 대한 등류수심의 비 y/b 에 대한 Manning계수 n 값의 관

계를 나타낸 것이다. 이 그림들로부터 수심이 증가할수록 Manning계수 n 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 수심보다 높은 기둥들이 배치되어 있는 수로에서 수심이 깊어질수록 기둥배후에 발생하는 와류의 깊이도 같이 깊어지므로 에너지 손실은 커지게 된다. Fig. 5는 $s/b < 2.2$ 의 경우이고, Fig. 6는 $s/b > 2.2$ 의 경우이다. 그림들에 앞에서 제시한 식(13)의 경험 항력상호작용계수 $C_{Df}=3.1C_{Df}$ 를 적용한 이론식(10)을 실험값들과 함께 도시하였다. 비록 실험치들 가운데 수심과 이격거리가 매우 작은 조건과 이격거리와 상관없이 수심이 깊은 조건의 경우에 이론치와 어느정도 오차가 있음을 알 수 있으나 제시한 경험계수를 적용한 이론값들은 실험값들과 전반적으로 잘 일치하고 있다. 수심과 이격거리가 매우 작은 실험조건에서의 오차는 이격거리만의 함수로 산정한 경험 항력상호작용계수 C_{Df} 값이 수심이 작아지는 경우 바닥마찰에 따른 유속분포로 인하여 수심의 함수로 변경되고 있음이 추정된다. 수심이 큰 실험조건에서의 오차는 일정한 유량에서 큰 등류수심을 만들기 위해 매우 작은 수로경사가 요구되며 이때 수로경사의 측정오차를 그 가능성으로 추정하고 있다. 그러나 힘의 평형방정식으로부터 유도된 이론식(10)에 상호독립적 저항계수에 경험적 항력상호작용계수를 곱하여 나타낸 수심 y 의 2/3승으로 증가하는 이론치들은 실험값들과 전반적인 일치를 보이고 있으며, 이는 결국 이론과 수리실험으로부터 수로내에 수위보다 높은 구조물이 존재할 경

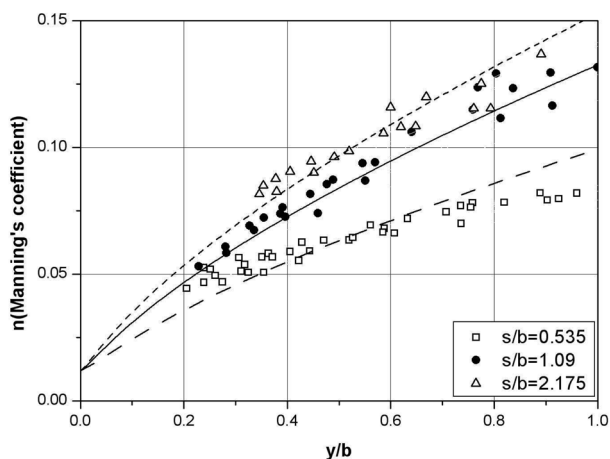


Fig. 5 Variation of n value as changing y/b with double-row piers (where $s/b=2.175, 1.09, 0.535$)

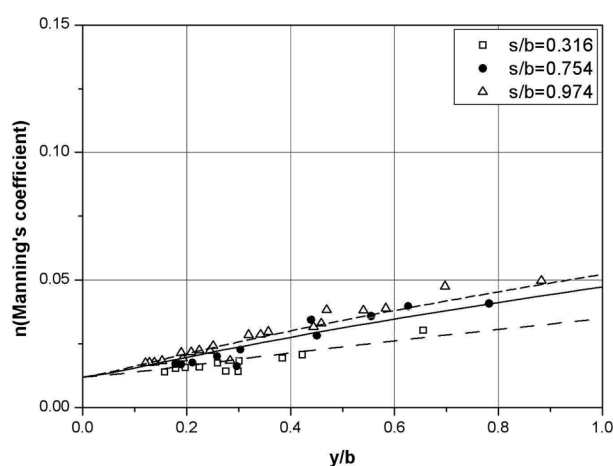


Fig. 7 Variation of n value as changing y with single-rows pier (where $s/b=0.973, 0.754, 0.316$)

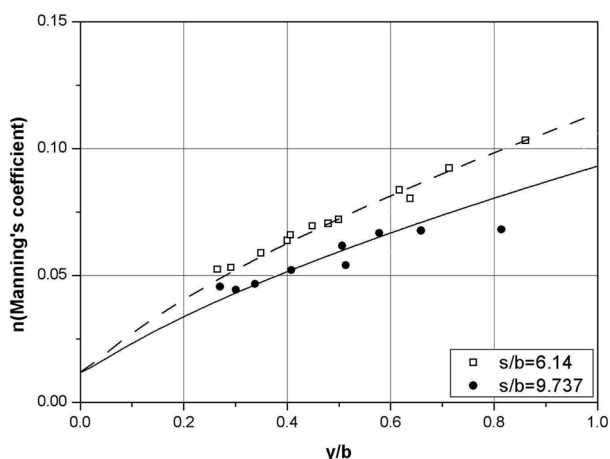


Fig. 6 Variation of n value as changing y/b with double-row piers (where $s/b=6.14, 9.737$)

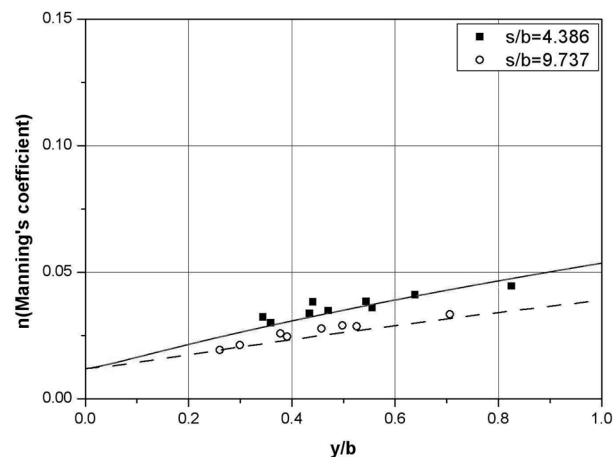


Fig. 8 Variation of n value as changing y with single-rows pier (where $s/b=4.386, 9.737$)

우, Manning계수 n 값은 수심 y 에 $2/3$ 승으로 증가함을 나타내는 것이라 할 수 있다.

Fig. 7과 8은 횡방향 1열 기둥을 흐름방향에 대해 등간격으로 배치하여 실험한 결과와 경험적 항력상호작용계수 $C_{DF}=C_{DIF}$ 값을 적용한 이론식(10)을 동시에 나타낸다. 이 실험조건에서도 실험치는 이론값들과 전반적으로 잘 일치하고 있으며, 이 경우로부터 역시 수로내에 수위보다 높은 실험기둥이 존재하는 경우, Manning계수 n 값은 수심 y 에 $2/3$ 승으로 증가함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

일정한 경사를 갖는 개수로 흐름에 잠기지 않고 흐름에 변형되지 않는 고정된 기둥들이 존재할 때, 흐름저항은 하상 조도에 따라 변하는 바닥마찰저항과 더불어 기둥들에 의한 흐름저항이 발생한다. 수심이 하상조고에 비해 충분히 큰 경우, 바닥마찰에 비해 흐름저항체에 의한 에너지 손실이 지배적이다. 본 연구에서는 실험수로에 수심보다 높은 정방형 기둥들을 등간격으로 수로 횡방향으로 1열 및 2열을 배치하고 이미 알려진 형상항력계수 C_D 가 일정한 값을 갖는 정방형 기둥의 흐름조건, $Re \sim O(10^4)$ 과 기둥에 직각방향 흐름조건으로 일정한 등류수심을 유지시켜 수리실험을 수행하였다. 실험결과를 Manning 평균유속공식을 이용하여 상당 저항계수로서 Manning계수 n 값으로 나타내고 이 값들을 기둥간 이격거리, 수심에 대하여 도시하여 이론식과 비교하고 분석하였다. 이론식은 흐름저항기둥들에 의해 변형된 흐름양상이 다른 기둥들의 저항력에 영향을 주지 않는 경우를 가정하여 유도하고 여기에 항력상호작용계수 C_{DF} 를 이용하여 이 상호영향력을 고려하도록 하였다. 이 항력상호작용계수는 흐름방향과 흐름 횡방향에 따른 저항체의 배치간격만의 함수로 변화한다고 가정하고 추정하여 실험치와 비교하고 분석하였다.

실험결과로부터 계산된 Manning계수 n 값은 이격거리와 기둥폭의 비 s/b 가 약 2.2일 때 최대값을 보였고, s/b 가 2.2보다 작은 경우는 이격거리 s 가 증가할수록 값이 증가하였으며, s/b 가 2.2보다 큰 경우는 이격거리 s 가 증가할수록 n 값이 감소하였다. 와류가 완전히 발달할 수 있는 배후공간이 충분히 확보되면 배후공간이 좁은 경우에 비해 와류의 크기는 커지고 에너지손실은 증가하여 일정 이격거리에서 에너지 손실이 최대가 되고 따라서 Manning계수 n 값도 최대 값을 가지게 된다. 그리고 이격거리 s 가 최대 에너지 손실이 발생할 수 있는 공간을 주는 이격거리 s 보다 더 증가하게 되면 와류가 발달할 수 있는 공간은 충분하지만 단위길 이당 와류의 수가 감소하여 Manning계수 n 값도 서서히 줄어든다. 이론식과 실험값들의 비교를 통하여 기둥들이 흐름방향 및 횡방향 이격거리에 따른 영향으로부터 서로 독립적인 흐름저항을 가지는 경우, 이론식이 유효함을 알 수 있었다. 그러나 일정범위 안으로 이격거리가 좁아지면 Manning계수 n 값이 이론식과 차이를 보였고 기둥의 흐름저항력 및 에너지손실은 상호작용에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 항력상호작용계수 C_{DF} 를 이론식에 적용하여 실험치와 비교함으로써 이 항력상호작용계수는 횡방향 및 흐

름방향 이격거리에 주된 영향을 받는다는 것을 알 수 있었으며, 바닥마찰 저항의 영향력이 무시될 수 있는 충분한 수심에서 이 항력상호작용계수는 기둥간 이격거리만의 함수로 추정할 수 있다.

흐름저항체들에 의한 흐름변화가 서로의 저항력과 상호간 에너지손실에 영향을 주지 않고 바닥마찰에 의한 에너지 손실이 흐름저항체에 의한 에너지 손실에 비해 무시할 수 있을 때, 이론식은 Manning계수 n 값이 수심 y 의 $2/3$ 승으로 증가함을 나타내고 있다. 이론식에 적용된 항력상호작용계수가 횡방향 및 흐름방향 이격거리만의 함수일 때, 기둥간 이격거리가 좁아져 기둥들의 흐름저항력 및 에너지손실에 상호작용이 큰 영향을 보인다고 해도, 수로내에 수위보다 높고 매끈한 기둥이 존재할 경우, Manning계수 n 값은 수심 y 의 $2/3$ 승으로 증가함을 알 수 있다. 실험값과 항력상호작용계수를 적용한 이론식의 비교로부터 이를 확인할 수 있었다.

향후연구로 개수로 흐름의 횡방향 이격거리에 따른 흐름저항체들에 의한 흐름변화가 서로의 저항력과 상호간 에너지손실에 미치는 영향에 대해 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한 정방형 기둥이외에 다양한 단면형상을 갖는 기둥들에 대한 연구 및 흐름저항체들의 흐름방향 엇갈린 배치등에 따른 연구도 필요할 것으로 생각한다.

감사의 글

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

참고문헌

- 강혁식, 최성욱(2007) 전단면 식생된 개수로 흐름에서 주흐름방향渦 구조의 수치모의, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3B호, pp. 289-299.
- 권기원, 최성욱(2000) 식생된 개수로 흐름의 $k-\epsilon$ 난류해석, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권 제1B호, pp. 11-21.
- Chiew, Y. and Tan, S. (1992) Frictional resistance of overland flow on tropical turfed slope. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, pp. 92-97.
- Chow, V.T. (1959) *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 97-114.
- Crowe, C.T., Elger, D.F., and Roverson, J.A. (2005) *Engineering Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons Inc., pp. 448.
- Fathi-Maghadam, M. and Kouwen, N. (1997) Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, pp. 51-57.
- James, C.S., Jordanova, A.A., and Birkhead, A.L. (2002) Hydraulic influences of emergent vegetation in rivers. *Enviro Flows 2002 4th Ecohydraulics*.
- 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*, Vol. 132, pp. 163-171.
- Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975) Analysis of flow through vegetation. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 101, pp. 871-884.

Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002) Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness, *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 128, pp. 500-506.

Wu, F., Shen, H.W., and Chou, Y. (1999) Variation of roughness

coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, pp. 934-942.

(접수일: 2008.3.3/심사일: 2008.5.8/심사완료일: 2008.9.1)