

만곡수로 내의 호안 안정성 연구

A Study on Stability of Levee Revetment in Meandering Channel

김수영* / 윤광석** / 김형준***

Kim, Sooyoung / Yoon, Kwang Seok / Kim, Hyung-Jun

Abstract

The levee protect lives, houses, and properties by blocking overflow of river. The revetment is forced to be covered on the slope of levee in order to prevent erosion. The stability of revetment is very important enough to directly connected to the stability of levee. In this study, the weak points of revetment on meandering channel were found by movable revetment experiment and the velocity and the water surface elevation (WSE) were measured at main points. The 3-D numerical simulations were performed under same conditions with experiment. And unclear flow characteristics by the limit of measuring instruments were analyzed through numerical simulation. Consequently, the section of large wall shear stress and the failure section are almost the same. Despite of small wall shear stress, the revetments located at right bank were carried away because of circulation zone due to secondary flow by meandering. With existing riprap design formula, the sizes of riprap determined using maximum local velocity were 1.5~4.7 times greater than them using mean velocity. As a result of this study, it is necessary to calculate the size of riprap in other ways for meandering and straight channel. At a later study, if the weighted value considered the radius of curvature and shape of hydraulic structure is applied to riprap design formula, it is expected that the size of revetment was evaluated rationally and accurately.

Keywords : meandering channel, stability of revetment, wall shear stress, hydraulic experiment, numerical simulation

요 지

제방은 홍수가 발생했을 때 하천의 범람을 막아 제내지의 인명, 가옥, 재산 등을 보호하는 중요한 기능을 하는 하천구조물이다. 제방의 붕괴원인은 크게 월류에 의한 붕괴, 침투에 의한 붕괴, 침식에 의한 붕괴로 분류되며, 침식에 의한 붕괴를 방지하기 위하여 호안을 설치한다. 따라서, 이러한 호안의 안정성은 제방 전체의 안정성과 직결되는 중요한 요소이다. 특히, 흐름의 강도가 증가하는 만곡부와 같은 수충부에서는 호안의 안정성이 급격히 저하되므로 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 경질성 호안의 수리실험을 통해 만곡수로에 설치된 호안의 취약지점을 파악하였으며 주요 지점의 유속과 수위를 측정하였다. 또한, 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 수행하여 실험에서 예측장비의 한계로 확인하기 어려운 흐름특성을 분석하였다. 그 결과 제방사면의 전단응력이 크게 산정된 부분과 사석호안이 붕괴된 위치가 거의 일치하는 것으로 나타났으며 전단응력은 작으나 붕괴가 발생한 지점에서는 만곡의 영향으로 발생한 2차류에 의해 순환흐름이 발생되어 호안의 붕괴를 유발하는 것으로 나타났다. 기존의 사석안정공식을 이용하여 사석호안의 규모를 결정하였으며 하도의 평균유속보다 국부적인 최대유속으로 산정하였을 때, 1.5~4.7배 크게 산정되었다. 본 연구를 통해 만곡수로에서는 직선수로에서와는 사석의 규모를 산정하는 방법을 달리해야 하는 것을 알 수 있었으며, 추후 곡률반경 및 구조물에 대한 영향을 고려하고 대표형상에 대한 가중치를 부여 할 수 있으면 보다 합리적이고 정확한 호안사석의 규모를 결정할 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어 : 만곡수로, 호안 안정성, 벽면전단응력, 수리실험, 수치모의

* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 박사후연구원 (e-mail: sooyoungkim@kict.re.kr)
Post-Doctoral Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

** 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구위원 (e-mail: ksyoon@kict.re.kr)
Research Fellow, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

*** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 전임연구원 (e-mail: john0705@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0276)
Corresponding Author, Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Gyeonggi, Korea

1. 서 론

제방은 홍수가 발생했을 때 하천의 범람을 막아 제내지의 인명, 가옥, 재산 등을 보호하는 중요한 기능을 하는 하천구조물이다. 수위가 높아지는 홍수시에 제방의 붕괴 위험성은 증가하게 되며, 지금까지 조사된 결과에 의하면 제방의 주요 붕괴원인은 월류에 의한 붕괴, 침투에 의한 붕괴, 침식에 의한 붕괴 등으로 분류되며, 침식에 의한 붕괴를 방지하기 위한 수단으로 다양한 종류의 호안을 설치하고 있다. 따라서, 이러한 호안이 홍수에 의해 이탈하는 경우 제체가 흐름에 노출되므로 호안의 안정성은 제방 전체의 안정성과 직결되는 중요한 요소이다. 특히, 만곡부에서는 흐름이 집중되어 수층부가 형성됨으로써 흐름의 강도가 증가하고 호안의 안정성이 급격히 저하되어 제방붕괴로 이어지므로 이에 대한 연구가 필요하다.

호안의 설계에 대한 연구는 일정 흐름조건에 대해서 이동하지 않는 입경을 결정하는 식을 제안하는 연구로부터 시작되었다. Isbash (1935)는 사면을 월류하는 흐름에 의한 침식을 방지하기 위하여 사석크기 결정식을 제안하였다. 이후 Pilarczyk (1990), Escarameia and May (1992) 및 Maynard (1993) 등에 의해 개선된 사석결정공식을 제안하였으나 이는 모두 하도의 평균유속에 대한 사석의 결정공식으로 직선수로에 적합한 식이라는 한계를 가지고 있으나 안전율을 적용하여 자연하천과 같은 만곡수로에도 적용하여 호안 설계시 주로 사용되는 공식들이다. Kim et al. (2007)은 유선의 형태, 하상경사, 유속 및 소류력비 등에 대한 호안의 평가점수를 제안하였으나 평가기준의 명확한 물리적인 근거가 제시되지 않았다. 또한, Bae et al. (2008)은 Simons et al. (1984)이 수행한 실험자료를 분석하여 Shields 계수와 전단응력을 산정하고 호안용 매트리스 채움재의 안정조건을 만족시키는 한계허용 전단응력의 범위를 제시하였다.

이러한 호안의 설계에 대한 연구는 대부분 하천의 선형이 직선인 조건에서 산정된 것이 대부분으로 만곡부에 대한 호안의 안정성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 현재까지는 만곡부에 대해서는 흐름특성의 규명에 국한된 연구가 주를 이루고 있으며 만곡의 영향에 의한 2차류, 난류, 수층부에서의 흐름특성에 대한 연구가 진행 중이다. Blanckaert, and Graf (2001)는 수리실험을 통해 평균유속, 난류응력, 난류에너지 등을 측정하여 만곡부의 지형생성 과정 및 만곡수로와 직선수로의 흐름특성의 차이를 설명하였다. Sham et al. (2002)은 FLUENT 모형으로 직사각형 만곡수로의 흐름을 모의하여 3차원적인 흐름과 여러

개의 소용돌이를 갖는 2차류가 발생함을 보였으며 이러한 흐름이 만곡부내 입자의 이송과 퇴적에 관여함을 설명하였다. Huang et al. (2009)은 만곡수로에 대해서 3차원 수치모형을 통해 다양한 난류모형을 적용하여 실험결과와 비교하고 수위변화 및 난류와 2차류에 대한 특성을 분석하였다. Stoesser et al. (2010)은 2차원 수치모형을 이용하여 만곡수로에서의 주흐름과 2차류, 경계면에서의 전단응력을 산정하는 연구를 수행하였으며 RANS 모델과 LES 모델을 적용하여 비교하였으며 유변을 따라 발생하는 전단응력을 계산하고 평가하는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 만곡수로에 대한 경질성 호안의 수리실험을 통해 만곡수로에 설치된 호안의 취약지점을 파악하고 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 수행하여 실험에서 계측장비의 한계로 인해 확인이 어려웠던 흐름특성을 분석하고자 한다.

2. 적용모형의 기본이론

2.1 수치모형의 지배방정식

CFX는 ANSYS사에서 개발한 상용 3차원 유동해석 프로그램으로 구조적 격자뿐만 아니라 비구조적 사면체 격자를 혼용할 수 있어 효율적인 격자구성이 가능하며 벽면이나 수로바닥에서의 전단응력과 같이 고체와 유체의 접촉면에서의 흐름해석이 정확한 편이다. 지배방정식으로는 연속방정식과 운동량방정식을 따르며 각각 Eqs. (1), (2)와 같다(ANSYS Inc., 2010).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도(kg/m³), U 는 유속성분, p 는 압력이다. $\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U)$ 는 변형률과 관련된 응력텐서이며, S_M 은 외부 모멘텀 생성항이다.

본 연구에서는 벽면의 전단응력을 이용하여 호안의 안정성을 분석하였으며 지배방정식은 Eqs. (3a)~(3c)와 같다.

$$\tau_x = n_x \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + n_y \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) + n_z \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (3a)$$

$$\tau_y = n_x \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + n_y \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) + n_z \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3b)$$

$$\tau_z = n_x \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + n_y \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + n_z \mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3c)$$

여기서, n 은 벽면의 연직방향벡터이며 n_x, n_y, n_z 는 연직 방향벡터의 x, y, z 방향의 성분이고, μ 는 동점성계수, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향 유속성분이다.

2.2 호안 사석 산정 공식

유수로부터 제방의 사면을 보호하는 보호공에 대해서는 다양한 설계식이 제안되었다. 그러나, 사석의 거동을 해석하는 과정을 물리적으로 표현하기 어려워 다양한 가정이 적용되어 각 연구에 의한 결과식이 다양한 형태로 나타나고 있다. 특히 국내에서는 호안에 대한 연구가 미흡하여 다음과 같은 국외의 연구를 활용하여 하천설계에 적용하고 있다.

Pilarczyk (1990)는 사석호안, 균체형 블록, 상자형 돌망태 등에 적용할 수 있는 호안설계식을 Eq. (4)와 같이 제안하였다.

$$D_{n50} = \frac{\phi}{s-1} \frac{0.035}{\psi_{cr}} K_T K_h K_s^{-1} \frac{U_d^2}{2g} \quad (4)$$

여기서 D_{n50} 은 사석호안의 중앙입경(m)이며, ϕ 는 안정보정계수, s 는 상대밀도, 한계전단계수, K_T 는 난류계수, K_h 는 수심계수, K_s 는 경사계수이며, U_d 는 흐름의 유속(m/s), g 는 중력가속도(m/s²)이다. 안정보정계수 ϕ 는 호안공의 종류에 따라서 0.5~1.5의 범위에서 정해지며, 한계전단계수 ψ_{cr} 는 사석호안인 경우 0.035를 적용한다.

Escarameia and May (1992)는 제방의 경사가 1V:2H보다 완만한 제방에 적합한 사석호안 설계식을 Eq. (5)와 같이 제안하였다.

$$D_{n50} = C \frac{U_b^2}{2g(s-1)} \quad (5)$$

여기서, D_{n50} 은 사석호안의 통과백분율 50%에 해당하는 입경(m)이며, C 는 흐름특성에 따라서 0.12~0.60의 범위에서 정해지는 보정계수이며, U_b 는 하상에서 수심의 10% 지점에서 측정된 유속(m/s)이며, s 는 ρ_s/ρ_w 로 정의되는 석재의 상대밀도이다.

Maynord(1993)는 하도내의 한계소류력과 사석호안의 관계를 수리실험을 통하여 분석하고 Eq. (6)과 같은 설계식을 제안하였다.

$$D_{30} = S_f C_s C_v C_T y \left[\left(\frac{1}{s-1} \right)^{0.5} \frac{U_d}{\sqrt{K_g y}} \right]^{2.5} \quad (6)$$

여기서, D_{30} 은 사석호안의 통과백분율 30%에 해당하는 입경(m)이며, S_f 는 1.1~1.5 범위에서 정해지는 안전계수,

C_s 는 사석의 형태에 따른 안정계수, C_v 는 하천시설물 유무 및 하천만곡을 고려한 계수이며, C_T 는 피복두께지수이다. U_d 는 설계유속(m/s)으로서 앞비탈기슭으로부터 20% 사면으로 올라간 지점의 수심평균유속이며, K_g 는 횡방향의 경사를 고려한 계수, y 는 설계수심(m)이다.

일본 국토기술연구센터(JICE)에서는 Dynamic Design of Revetments (2007)에 사석호안에 대한 설계식을 다음 Eq. (7)와 같이 제안하였다.

$$D_m = \frac{K}{E_i^2 \cdot 2g(\rho_s/\rho_w+1)} V_o^2 \quad (7)$$

여기서, D_m 은 사석호안의 평균입경(m)이며, K 는 사면경사와 하상경사에 의해 산정되는 계수, E_i 는 난류강도 실험계수, g 는 중력가속도(m/s²), ρ_s 는 사석호안의 밀도(kg/m³), ρ_w 는 물의 밀도(kg/m³)이며, V_o 는 대표유속(m/s)이다.

호안에 대한 국내설계는 하천설계기준·해설(Korea Water Resources Association, 2009)의 설계편 제24장에 준하여 수행되고 있다. 호안설계를 위하여 비탈경사의 표준, 홍수시 세굴깊이 등에 대한 규정은 있으나, 호안 크기 설정에 관한 기술은 미국, 영국, 일본의 설계기법을 주로 활용하고 있다.

3. 연구방법

3.1 경질성 호안 수리실험

하천의 만곡이 사석호안의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 만곡수로를 설치하고 수리실험을 수행하였다. 제방경사는 1V:2H로서 현재 하천의 가장 일반적인 제방경사를 구현하였다. 하천의 사행에 의해 발생하는 원심력이 사석호안에 미치는 영향을 분석하기 위하여 곡률반경 2.5m의 연속된 만곡을 갖는 수로를 설치하였다. 수로의 폭은 주수로가 0.5m이며 경사면은 각각 0.9m이다. 수로의 길이는 유입부로부터 유출부까지 직선거리가 25.2m이다(Fig. 1).

사석호안의 제원은 수로에 공급할 수 있는 유량과 예상 최대 유속을 고려하여 $d_{50}=0.010$ m으로 설정하였으며 XS #03~XS #06까지 길이 약 5.8m인 사석호안을 설치하였다. 만곡수로에는 원심력에 의해 유속 및 전단응력이 가장 크게 발생하는 지점을 예측하기 어려우므로, 만곡지점부터 종점까지 양안의 제방 경사면에 사석호안을 설치하였다. 설치된 사석호안은 고정상 제방 사면위에 전체적으로 1층으로 포설한 후 1층을 추가 포설하여 사석의 층이 최소 2층이 되어 사석 간에 맞물림 현상을 가질 수 있도록 하였

다. 본 실험에 적용된 공급유량은 0.3, 0.4, 0.5 m³/s 총 3가지로 설정하였으며 하류단 수위조건은 사석 이탈이 시작되는 시점의 수위로 설정하였다.

3.2 만곡흐름특성분석 수치모의

만곡흐름특성분석을 위한 수치모의는 경질성 호안 수리실험과 동일한 조건으로 수행하였다. 하류단 말단은 경계조건을 설정하기 위해 XS #10을 최하류단으로 설정하였으며 실험으로 측정된 수위의 평균수위를 적용하였다.

3.2.1 격자 및 수치모의조건 설정

격자는 자유로운 형상구현이 가능한 4면체격자를 활용하였으며 자유수면 표현의 정확도를 높이기 위해 자유수

면 주변에는 Inflation 기능을 이용하여 프리즘형태의 격자를 생성하였다. 격자의 Node 수는 613,710, Element는 2,644,129개이다. 수치모의에 적용된 난류모형은 $k-\omega$ 모형을 기반으로 한 SST (Shear Stress Transport)모형이며 이 모형은 흐름분리의 시작과 양을 정확하게 예측할 수 있다 (ANSYS Inc., 2010). 수치모의에서는 흐름특성을 확인하기 위해 수로의 형상은 실험과 동일하게 적용하였으나 사석의 포설형상은 수치모의에서는 적용하지 않았다. 수로 상류의 탱크 하부에는 Mass flow rate로 설정하여 일정한 유량이 유입되도록 하였으며 하류에는 Opening pressure로 설정하고 정수압조건을 설정하여 일정한 수위가 유지되도록 하였다. 하류수위 값은 실험에서 측정된 값으로 입력하여 실험과 동일한 조건이 되도록 경계조건을 설정하였다(Fig. 2).

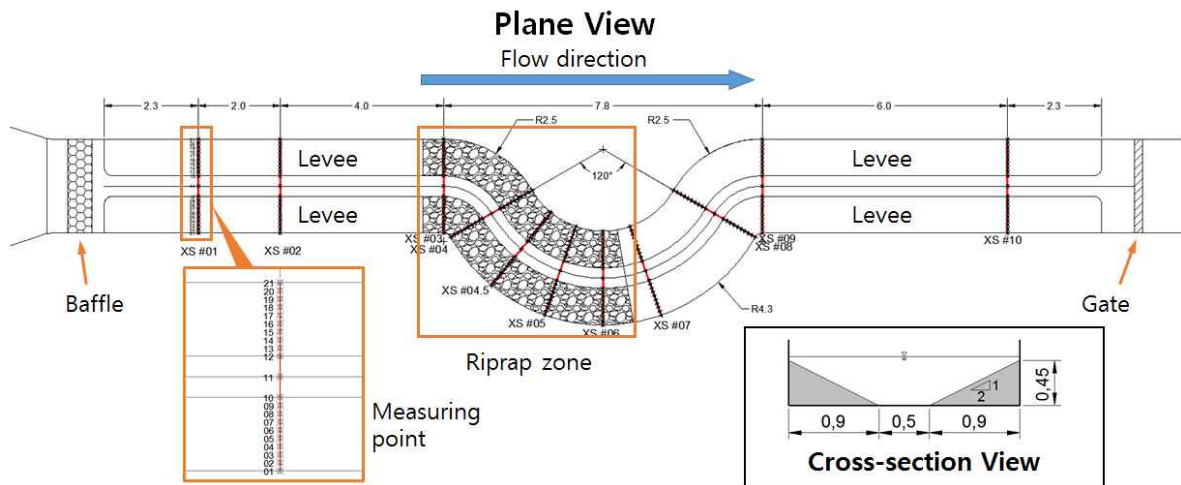


Fig. 1. Experimental Channel and Measuring Points

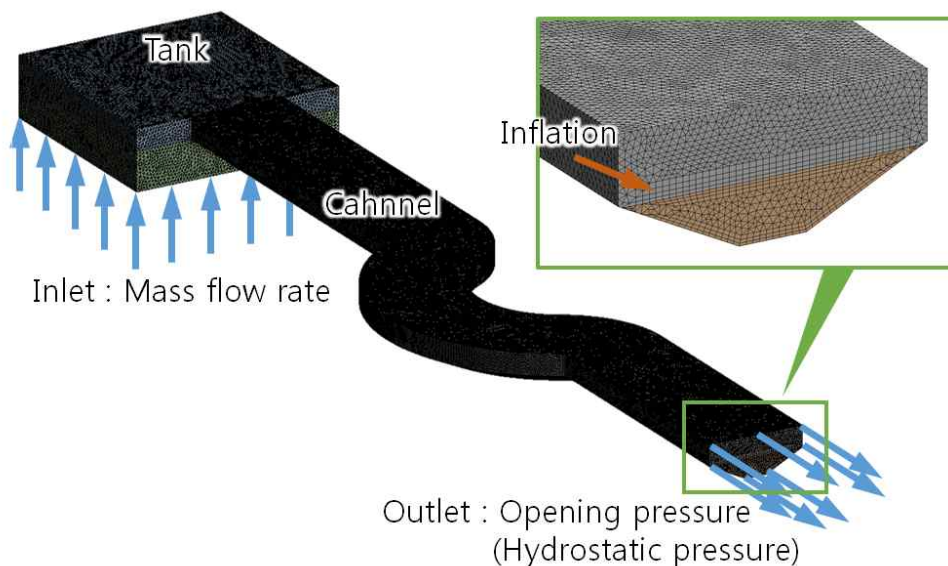


Fig. 2. Generating Mesh and Boundary Conditions

3.2.2 수치모의 케이스

유입유량을 0.3, 0.4, 0.5 m³/s로 변화시켜 만곡수로를 흐르는 흐름에 변화를 주었으며 각각의 유량에 대한 상류위치 XS # 01의 Froude 수는 0.39, 0.37, 0.33이다. 수로의 곡률반경은 2.5m로 동일하며 포설되는 사석 또한 0.01 m로 동일하게 설정하여 동일조건하에서 흐름변화에 따른 만곡수로의 취약부분을 확인하였다(Table 1).

4. 연구결과

4.1 경질성 호안 수리실험 결과

수로내의 흐름이 사석호안의 안정성에 영향을 미치는 조건을 구현하기 위하여 하류에 설치된 수문을 점진적으로 개방하면서 호안의 이탈상태를 관찰하였다. 호안이 이탈하기 시작하면 하류수문을 고정하고 이탈상황을 관찰하면서 더 이상 사석호안의 이탈이 발생하지 않는 시점에서 수로 내의 수심과 유속을 관찰하였다. 수심은 0.1 mm까지 측정이 가능한 포인트 게이지를 이용하여 측정하였

으며, 유속은 1차원 유속계를 이용하여 3점법으로 측정하는 것을 기본으로 하였다. 수심이 얕아 3점을 적용하기 어려운 경사면 위의 관측지점에서는 1점법으로 유속을 관측하였다. 수심과 유속의 관측지점은 Fig. 1에 나타났다. 경질성 호안 수리실험을 통해 호안의 취약지점을 분석하였다.

수리실험에서는 일정한 유량과 최대로 설정할 수 있는 하류단 수위를 설정한 후 포설된 사석이 탈퇴되는 시점까지 하류단 수위를 천천히 낮춰서 유속을 증가시켰다. 만곡수로에서 호안이 최초로 이탈하기 시작하는 지점은 유입부의 만곡부며 하도의 만곡에 의하여 발생하는 수층부의 유속 및 소류력 증가로 호안이 이탈하기 시작했다. 유입부의 만곡부에서 형성되기 시작한 사석호안의 이탈은 소류력에 의하여 점차 하류 및 수심방향으로 확장된다. 붕괴된 형상은 촬영된 사진을 활용하여 Image process를 통해 평면 좌표로 변환하여 정확한 붕괴지점을 도출하였다(Fig. 3(a)). 그 결과 유량이 클수록 붕괴위치가 하류로 길게 전파되었으며 Case 03의 경우 우안에도 사석붕괴부가 형성되는 것으로 나타났다(Figs. 3(b)~3(d)).

Table 1. Cases of Numerical Simulations

Case	Froude Number at XS #01	Inlet discharge (m ³ /s)	WSE of Downstream (m)	Radius of curvature (m)	Diameter of riprap (m)
Case 01	0.39	0.3	0.310	2.5	0.01
Case 02	0.37	0.4	0.372		
Case 03	0.33	0.5	0.434		

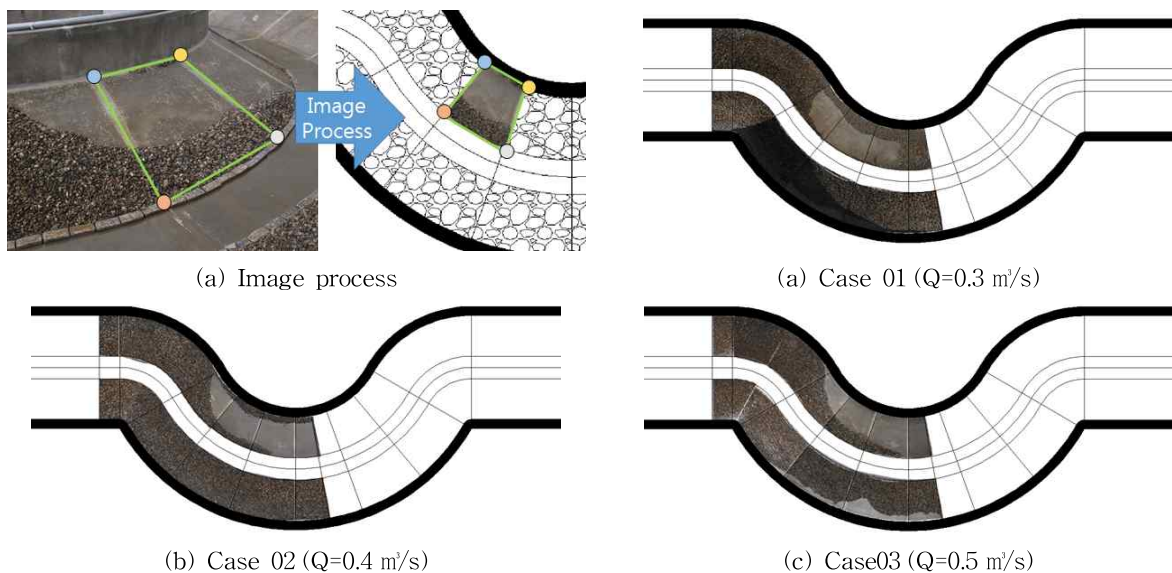


Fig. 3. Failure Section of Riprap Protection after Image Process

4.2 수치모의 결과

4.2.1 수리실험과 비교

경질성 호안 수리실험과 동일한 조건으로 수치모의한 결과에 대한 동일지점의 유속과 수위를 비교하여 Table 2에 나타냈다. 그 결과 유속의 경우 대부분 유사하게 나타났으며 만곡에 의한 유속의 집중 및 변화의 양상을 잘 구현하는 것으로 나타났다. 수위의 경우는 수리실험에서 더 큰 수위의 변동성을 나타냈다. 이는 수리실험에서 포인트 게이지에 의해서 순간수위를 측정된 것이고 수치모의는

정상류상태가 유지되어 수면의 복잡한 파형까지는 재현하지 못한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 취약지점을 파악하는 것이 목적이므로 각 단면에 대한 최대유속이 중요한 인자 이다. 수리실험과 수치모의에 대해서 최대유속을 비교한 결과 만곡부가 끝나는 지점의 2개 지점(Case 01, 02의 XS #08)을 제외하고 모두 10% 이내 오차로 재현이 가능한 것으로 나타났다(Fig. 4(a)). 수위의 경우는 수면의 변동성은 유사하게 재현되지 않았으나 평균수위로 비교하면 5%이내의 오차로 재현이 되는 것으로 나타났으므로 수리실험에서도 연

Table 2. Depth Averaged Velocities and Water Surface Elevations for each Cross-sections

Case	Cross Section					
	XS #03		XS #04		XS #05	
	XS #06		XS #07		XS #08	
Case 01						
Case 02						
Case 03						

Δ Depth averaged vel.(Expt.) - - - - Depth averaged vel.(Numerical) × Water surface elevation(Expt.) — Water surface elevation(Numerical) — Channel shape

속적인 측정을 통해 평균된 수위를 비교하면 더 정확한 예측이 가능 할 것으로 판단된다(Fig. 4(b)).

4.2.2 전단응력 분석

수로의 바닥과 제방의 사면에 작용하는 전단응력의 분포와 붕괴형상을 함께 도시하여 Fig. 5에 나타냈다. 모든 Case에 대해서 첫 번째 만곡부의 좌안에서 붕괴가 시작되어 하류단으로 붕괴가 발달해 나가는 실험결과와 같이 동일한 지점에서 전단응력이 크게 나타났으며 붕괴가 발생한 지점과 전단응력이 큰 지점이 거의 일치하였다. Case 01과 Case 02와 달리 Case 03의 경우 두 번째 만곡부 우안에서도 붕괴가 발생하였으나 전단응력은 작게 나타났

다. 이러한 붕괴는 전단응력이 관여하지 않는 또 다른 영향에 의한 것으로 판단되며 2차류와 난류에 의한 붕괴로 흐름특성에 대한 분석이 필요할 것으로 예측된다.

4.2.3 유속분포 분석

각 케이스에 대한 유속 분포를 분석한 결과 모든 Case에 대해서 첫 번째 만곡부를 지나 우안에 정체영역이 발생하였으나 Case 03의 경우 넓은 영역에 대한 순환영역이 발달하였다(Fig. 6). 또한 수면에 대해서 난류운동에너지(Turbulence Kinetic Energy)분포를 분석한 결과에서도 Case 03의 우안 상부에서 국부적으로 큰 값이 나타났다(Fig. 7). 이러한 3차원적인 복잡한 흐름이 우안 상부사석

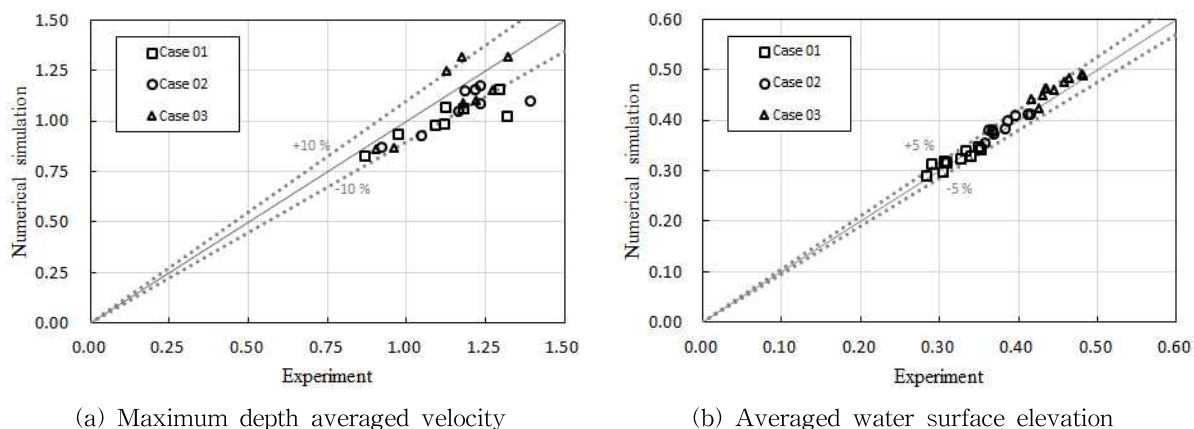


Fig. 4. Comparison with Experiments and Numerical Simulations

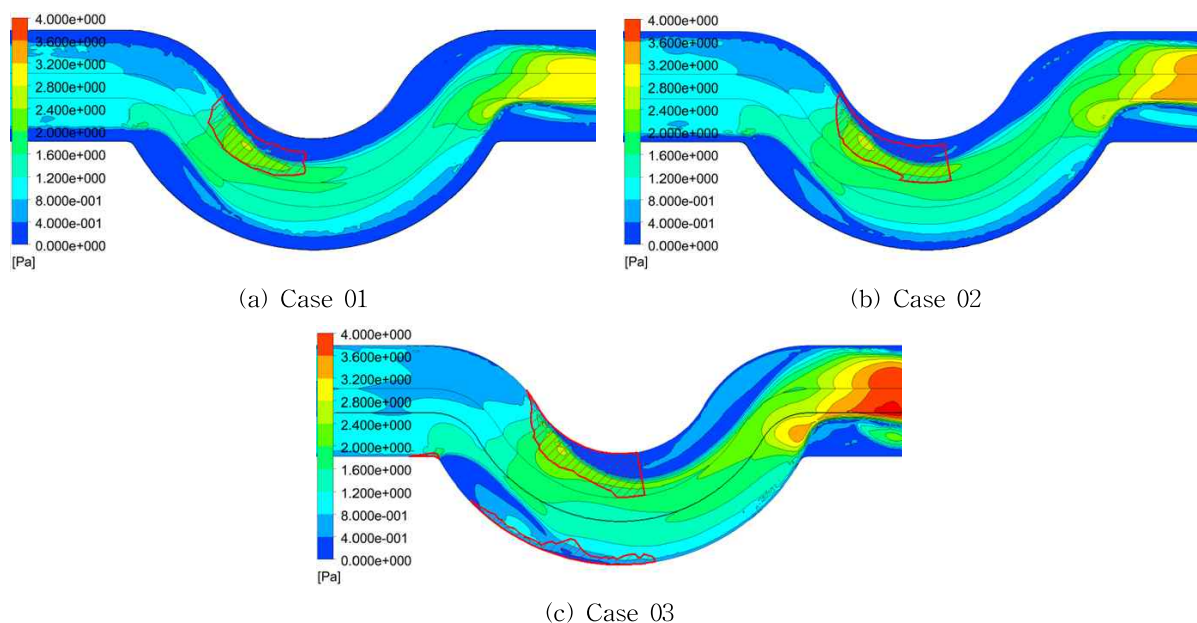


Fig. 5. The Distributions of Wall Shear Stress at Bottom and Slope of Levee (▨: failure of riprap protection)

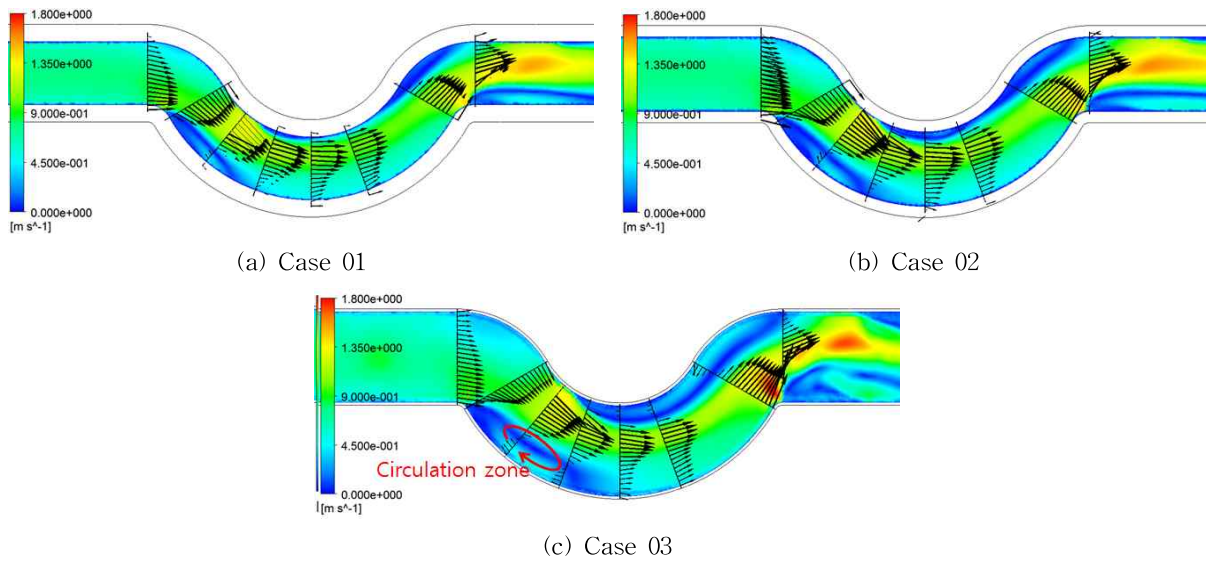


Fig. 6. The Distributions of Velocity on Water Surface

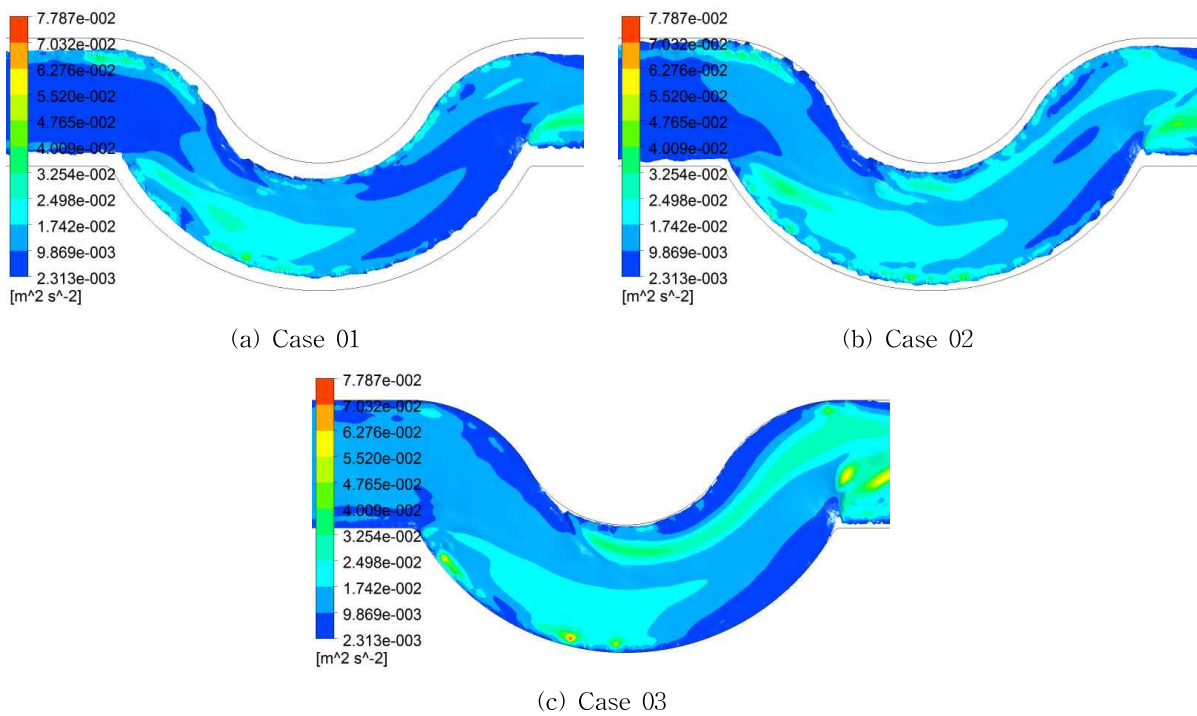


Fig. 7. The Distributions of Turbulence Kinetic Energy at Water Surface

을 이탈시키는 지배인자라고 판단되며 실험의 설정에서 최상부의 사석의 경우 맞물림 효과가 중간에 포설된 사석에 비해 작기 때문에 사석의 이탈을 가속화 시킨 것으로 예측된다.

이처럼 만곡부의 경우 복잡한 3차원적인 흐름이 발생해 제방사면의 전단응력뿐만 아니라 난류, 2차류 등도 호안의 안정성에 영향을 미치기 때문에 직선수로에서와 같

은 호안사석 결정 공식을 통해 호안을 설계할 경우 안전성을 확보하지 못할 가능성이 높으므로 적절한 수리해석 및 안전율 적용이 필요할 것으로 판단된다.

4.2.4 호안사석직경 분석

단면에서의 평균유속과 최대유속을 이용하여 호안사석 직경을 산정하여 비교하여 적용유속에 따른 사석직경의

차이를 분석하였다. 호안사석결정공식은 2.2절에서 설명한 공식 중 하도의 평균유속을 사용하고 본 연구에서 설정된 변수들만으로 계수들을 결정할 수 있는 Pilarczyk이 제시한 공식을 적용하였다. 적용유속에 따른 상대적인 차이를 확인하기 위한 것이므로 다른 호안사석결정공식에 대해서는 적용하지 않았다. Pilarczyk가 제시한 호안사석결정공식으로 사석규모를 산정한 결과를 Table 3에 나타냈다. 그 결과 평균유속으로 산정하였을 경우 Case 01의 경우 약 0.01 m로 포설된 사석과 동일한 규모로 이론적으로는 거의 붕괴가 발생하지 않아야 하지만 실제로 붕괴가 발생하였으며 최대유속으로 사석직경을 산정한 결과 평균유속으로 산정한 사석규모에 비해 2.97~4.66배 크게 산정되었다. Case 02와 Case 03의 경우에서도 각각 2.33~

3.73배, 1.50~3.60배 크게 산정되었다(Fig. 8).

이러한 적용유속의 차이에 따른 보정계수를 Maynard (1993)는 만곡에 의한 보정계수(C_v)라고 제시하였고 Eq. (8)과 같다.

$$C_v = \frac{(D_{50})_{local}}{(D_{50})_{ave}} \quad (8)$$

Maynard 는 곡률에 따른 유속보정계수는 자연하천과 사다리꼴 수로에 대해서 제시하였으며 Kim and Yoon (2014)의 연구도 사다리꼴 실험수로에서 산정된 곡률에 따른 유속보정계수를 제시하였다. 이전 연구의 결과들을 Fig. 9에 본 연구에서 도출된 결과와 함께 도시하였다. 그 결과 급회 산정한 결과는 하나의 곡률반경에 대해서 다양

Table 3. Calculation of Riprap Diameter with Average and Maximum Velocity

Cross section	Case 01			Case 02			Case 03		
	Avg.	Max.	C_v	Avg.	Max.	C_v	Avg.	Max.	C_v
XS #03	0.009	0.028	2.97	0.013	0.030	2.42	0.016	0.029	1.88
XS #04	0.011	0.036	3.35	0.015	0.035	2.33	0.020	0.030	1.50
XS #04.5	0.010	0.046	4.64	0.016	0.054	3.44	0.020	0.069	3.49
XS #05	0.010	0.047	4.66	0.014	0.053	3.73	0.017	0.053	3.11
XS #06	0.011	0.040	3.67	0.015	0.048	3.25	0.017	0.048	2.77
XS #07	0.011	0.039	3.54	0.014	0.044	3.14	0.016	0.047	2.90
XS #08	0.010	0.043	4.15	0.014	0.049	3.60	0.019	0.069	3.60
XS #09	0.016	0.055	3.42	0.017	0.056	3.32	0.028	0.062	2.17

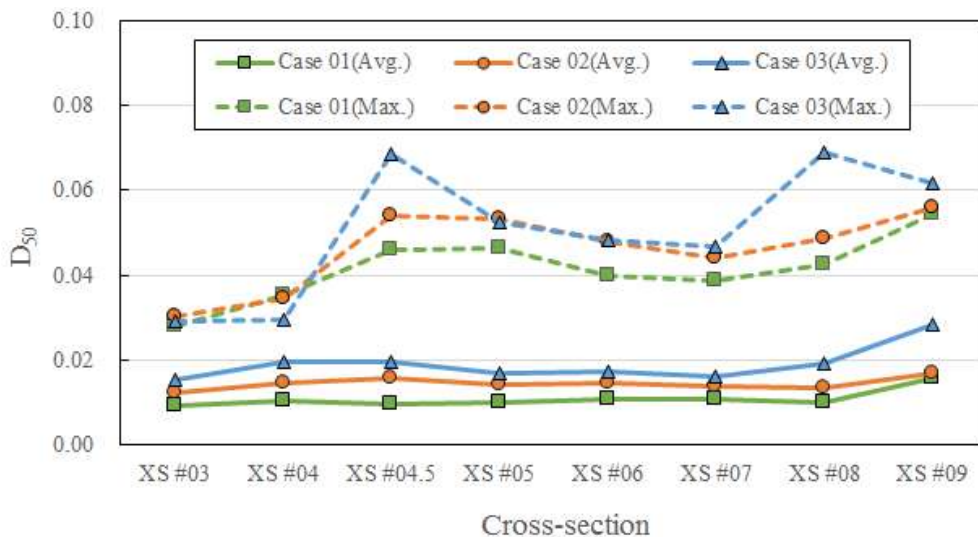


Fig. 8. Riprap Diameter(D_{50}) for Average and Maximum Velocities

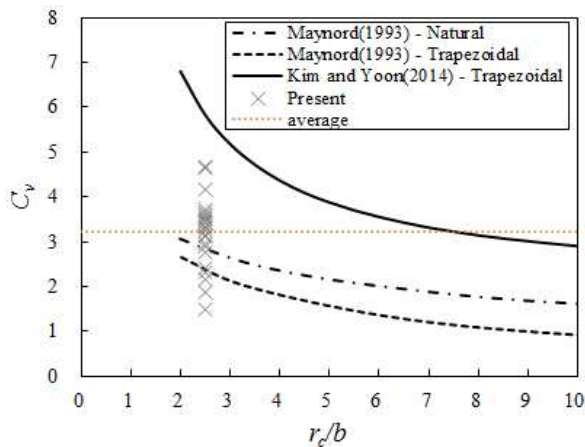


Fig. 9. Correction Coeff. of Riprap Size on Channel Curvature

한 흐름조건에 대한 것으로 그 범위가 Maynard와 Kim and Yoon 이 산정한 보정계수범위와 유사하게 분포하였으며 보정계수의 평균값은 3.21로 Maynard가 제시한 보정계수와 근접한 결과를 나타냈으나 과다 산정되는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 만곡수로에서의 호안의 안전성을 확보하기 위한 붕괴특성을 분석하였다. 분석을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 동일한 조건의 수리실험과 수치모의를 수행한 결과 유속분포와 평균수위를 잘 재현하는 것으로 나타남
- 2) 수리실험을 통해 도출된 붕괴영역과 수치모의에서 산정된 사면에서의 전단응력의 분포를 비교한 결과 전단응력이 큰 곳에서 붕괴가 발생함
- 3) 유입유량이 가장 큰 Case 03의 경우 전단응력이 작은 우안에서도 붕괴가 발생하였는데 이 위치에서 순환수역이 발생함
- 4) 평균유속과 국부적인 최대유속에 대해 호안사석직경을 산정한 결과 최대유속으로 산정한 경우가 1.5~4.7배 크게 산정됨
- 5) 적용유속에 따른 호안사석직경의 보정계수인 C_p 값은 곡률 2.5일 때 평균 3.21로 나타났으며 Maynard가 제시한 보정계수와 근접하지만 과다산정됨

본 연구의 결과에서 직선수로에서의 호안사석의 직경을 산정하는 것과 만곡부에서의 호안사석의 직경은 그 산정방법을 달리해야 하는 것을 알 수 있다. 3차원적인 복잡한 흐름이 발생하는 하천의 만곡부에서는 직선수로에서

사용하는 호안사석결정공식을 그대로 사용하는 경우 안전성확보가 어려울 수 있다. 따라서 만곡부에 대한 호안의 설계시 유속분포의 확인을 통해 난류나 2차류와 같은 흐름특성을 검토하고 국부적인 최대유속을 고려하여 호안사석의 직경을 결정하는 것이 안전측에서 타당한 것으로 판단된다. 또한 기존에 제시된 곡률에 대한 보정계수는 흐름조건이 고려되지 않았지만 본 연구의 결과를 통해 동일한 곡률을 갖는 수로에서도 흐름조건에 따라 보정계수 값이 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 추후 곡률반경 및 흐름조건에 대한 영향을 고려하고 대표형상 및 흐름에 대한 가중치를 부여 할 수 있으면 보다 합리적이고 정확한 호안사석의 규모를 결정할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- ANSYS Inc. (2010). *ANSYS CFX-solver theory guide*. ANSYS release 13.0.
- Bae, S.S., Lee, S.Y., and Jee, H.K. (2008). "Study on Critical Allowable Shear Stress of Filling Rocks with Mattress Revetment." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 137-147.
- Blanckaert, K., and Graf, W.H. (2001). "Mean flow and turbulence in open-channel bend." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 10, pp. 835-847.
- Escarameia, M., and May, R.W.P. (1992). "Channel protection-Turbulence downstream of structures. Report SR 313" HR Wallingford.
- Huang, S.L., Jia, Y.F., Hsun-Chuan, C.H.A.N., and Sam, S.Y. (2009). "Three-dimensional numerical modeling of secondary flows in a wide curved channel." *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 21, No. 6, pp. 758-766.
- Isbash, S.V. (1935). "Construction of dams by dumping stones in flowing water Translated by A. Dorijikov." U.S. Army Engineering District, Eastport, Me.
- Japan Institute of Country-ology and Engineering (2007). *Dynamic Design of Revetments*, Sankaido.
- Kim, Y.H., Park, N.H., Jin, Y.H., and Kim, C. (2007).

- “Development and Application of Evaluation Technique for Revetment for Nature-Friendly River Improvement.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 1007–1014.
- Kim, H.J., and Yoon, K.S. (2014). “Suggestion of Riprap Revetments Design Techniques considering River Meandering.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 6(Dec. 2014), pp. 405–411.
- Korea Water Resources Association (2009). *River Design Criteria*.
- Maynard, S.T. (1993). *Corps Riprap Design Guidance for Channel Protection*, Coastal and Shoreline Protection: Erosion Control Using Riprap and Armourstone, pp. 41–52.
- Pilarczyk, K.W. (1990). “Stability Criteria for Revetments, Hydraulic Engineering.” *Proceedings of the 1990 National Conference*, American Society of Civil Engineers, New York. pp. 245–250.
- Shams, M., Ahmadi, G., and Smith, D.H. (2002). “Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers.” *Advances in Water Resources*, Vol. 25, No. 6, pp. 689–699.
- Simons, D.B., Chen, Y.H., and Swenson, L.J. (1984). “Hydraulic test to develop design criteria for the use of reno mattresses.” Simons and associates.
- Stoesser, T., Ruether, N., and Olsen, N.R.B. (2010). “Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel.” *Advances in Water Resources*, Vol. 33, No. 2, pp. 158–170.

paper number : 15-094

Received : 16 November 2015

Revised : 3 December 2015 / 4 December 2015

Accepted : 4 December 2015