

만곡 및 세굴 영향에 의한 유속변화를 고려한 호안설계방법 적용성 검토

김수영, 윤광석*
한국건설기술연구원 수자원·하천연구소

Study on Applicability of River Revetment Design for consideration of Velocity Variation due to Meandering and Scour Effect

Sooyoung Kim, Kwang Seok Yoon*

Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 호안은 하천제방의 비탈면이 침식되지 않도록 보호하는 기능을 갖는다. 호안의 설계가 적정하지 않을 경우 강한 유속과 소류력에 의해 제방이 세굴되어 붕괴에 이를 수도 있다. 따라서 호안의 설계시 필요한 대표유속을 산정하는 것은 매우 중요하나 대부분 1차원 부등류해석에서 얻어진 수위와 평균유속자료를 적용한다. 이 경우 만곡 수로에서 발생하는 자유소용돌이와 강제소용돌이에 의한 유속증가는 반영되지 않으므로 만곡부 호안의 안정성을 확보하기 위해서는 대표유속에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 수치모의를 통해 단면의 최대유속과 평균유속을 산정하여 만곡 및 세굴영향을 고려한 대표유속 산정방법의 적용성에 대해 검토하였다. 그 결과 단면평균유속에 만곡의 영향과 세굴의 영향을 고려하여 적용한 대표유속과 수치모의결과에 추출된 최대유속을 비교한 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한, 호안재로로써 돌방태를 사용하는 경우에 대해서 만곡하도와 직선하도 일때의 사석크기를 기준 설계식에 적용하여 비교하였다. 향후, 우리나라의 특성에 맞는 호안설계방법을 제시하기 위하여 하천특성이 다른 대표적인 하천에 대한 추가적인 수치모의 및 분석이 필요하며, 이때 본 연구결과가 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Revetments help protect levee slopes from erosion. If the design of the revetment is not appropriate, the levee may collapse as a result of scouring due to the strong flow velocity and tractive force. Therefore, when designing a revetment, it is very important to calculate the representative velocity. However, the average velocity and depth calculated by 1-D varied flow analysis are generally applied to the design, which do not reflect the increase in velocity caused by the free and force vortex. Therefore, it is necessary to correct the representative velocity in order to ensure the stability of the revetment in a meandering channel. In this study, the applicability of the method of calculating the representative velocity considering the curve and scour was studied (by comparing it with) the average and maximum velocities determined by numerical simulation. The representative velocity corrected for the effect of the curve and scour and the maximum velocity calculated by the numerical simulation were found to match quite well. In addition, the riprap size of the gabion in the meandering and straight channels were compared by applying them to the conventional design formulas. In the future, it is necessary to perform additional numerical simulations for various rivers with different characteristics, in order to propose a method of designing a suitable revetment for Korean characteristics. At this time, the results of this study are expected to be able to be used as basic data.

Keywords : Meandering river, Radius curvature, Levee revetment, Velocity correction parameter, Representative velocity

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(16AWMP-B121095-01)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kwang Seok Yoon(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0270 email: ksyoon@kict.re.kr

Received November 2, 2016

Revised November 29, 2016

Accepted December 8, 2016

Published December 31, 2016

1. 서론

호안은 하천제방의 비탈면을 보호하는 시설물로서 홍수시 제방의 비탈면이 침식되지 않도록 하는 기능을 갖는다. 따라서, 호안의 설계가 적절하지 않을 경우, 강한 수류력에 의해 이탈하게 되고 흩으로 구성된 제방은 강한 유속 또는 소류력을 견디지 못하고 세굴되면서 결국 붕괴에 이르게 된다. 그러므로, 호안은 홍수시 발생하는 높은 유속에 저항할 수 있는 구조로 설계되어야 한다.

최근 친환경적인 호안이 많이 도입되어 설치되고 있으나, 홍수에 의한 피해가능성이 높은 구간에 대해서는 사석, 돌망태, 콘크리트 블록과 같은 경질성 호안이 사용되고 있다. 기존의 호안설계는 1차원 흐름해석에 의하여 산정된 유속이나 소류력을 적용하여 이에 저항할 수 있는 호안의 규격을 결정하는 방식으로 이루어져 왔다. 그런데, 1차원 흐름해석에서 산정된 값은 단면평균 유속을 의미하므로 횡단면을 따라 유속분포의 변화가 심한 구간에서는 과소산정된 설계값을 제공할 수 있으며, 이에 따라 결정된 호안의 규격은 실제 홍수가 발생시 형성되는 유속이나 소류력에 저항하지 못하고 붕괴될 가능성이 있다.

횡단면을 따라 유속분포가 다르게 나타날 수 있는 대표적인 경우는 만곡부가 포함된 구간에서의 흐름특성을 들 수 있다. 일반적으로 만곡부에서는 원심력에 의해 만곡부의 외측에 주흐름이 발생하면서 유속이 증가하는 특성을 가지고 있다. 따라서, 만곡외측에서의 유속은 1차원 흐름해석에서 산정된 평균유속보다 더 큰 유속이 발생하게 되며, 이에 따라 호안의 안정성도 저하된다. 유속의 횡단특성이 달라지는 또 하나의 경우는 하상의 세굴에 의한 유속의 변화를 들 수 있다. 일반적인 하천의 경우, 소류력이 큰 지점에서의 세굴이 발생하게 되며 이에 따라서 유속분포가 변화하여 호안의 안정성에 영향을 미치게 된다.

호안 설계에 대한 연구는 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서 수행되어 왔다. 특히, 유럽에서의 연구결과를 이용하여 적용하거나 개량해서 사용되고 있다. 최초 호안에 대한 정량적 설계 방법에 대한 연구는 유럽에서 시작되었으며 세굴이 심한 하천을 안정화시키기 위해 포설되는 사석의 크기를 결정하는 방법을 찾는 것이었다. 이런 연구를 바탕으로 이후에 여러 연구자에 의해 호안에 대한 설계방법들이 제시되었다. 호안 설계식에 대한 연구동향

을 살펴보면, Isbash[1]가 하천의 침식을 방지하기 위하여 평균유속을 이용한 사석크기 결정식을 제안한 이후에, Pilarczyk[2], Escarameia and May[3] 및 Maynord [4]등이 평균유속을 이용한 사석결정공식을 각각 제안하였다. 이후에도 호안설계에 관한 연구가 진행되었으며, 주로 호안재료에 따른 안정성에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

국내에서 수행에 호안설계에 관한 연구를 살펴 보면, Bae et al.[5]은 미국 콜로라도 주립대학교 공학연구소 수리실험실의 실험자료[6]를 분석하여 Shields의 계수와 전단응력을 산정하고 호안용 매트리스 채움재의 평균입경과 채움재 안정조건을 만족시키는 한계허용 전단응력의 범위를 결정하는 연구를 수행한 바 있다. Kim and Park[7]은 홍수시 발생하는 호안의 피해를 분석하기 위하여 그래프를 이용하는 방법과 Grid를 이용하는 방법을 제안한 바 있다. 위에서 소개한 국내외 연구는 주로 흐름에 따른 호안 재료의 안정성에 대한 내용에 관한 것이며, 만곡부에서의 사석호안공에 대한 연구는 최근에 수행된 Kim and Yoon[8]에 의해 수행되었다. Kim and Yoon은 수리실험을 통하여 2개의 곡률반경을 갖는 실험수로에서의 사석호안공의 이탈조건을 관찰하고, 만곡부에서의 사석호안 제원을 결정하는 실험식을 제안하면서 만곡수로에서의 호안의 안정성은 평균유속이 아닌 만곡외측에서 발생하는 국부유속에 의해서 결정됨을 보인 바 있다.

만곡부나 세굴의 영향을 고려한 호안의 설계방법은 일본의 JICE[9]에서 제시한 설계식이 있다. 여기서는 대표유속을 산정하여 호안의 제원을 결정하도록 하고 있으며, 대표유속은 평균유속에 만곡의 영향이나 하상 세굴을 고려할 수 있는 보정계수를 곱하여 산정하도록 함으로써 평균유속으로 계산했을 때 고려하지 못하는 하천의 종횡단 특성을 고려할 수 있도록 하였다.

이와 같이 호안의 설계에 활용하는 대표유속은 계획홍수위 이하의 수위의 다양한 유황조건하에서 실제 호안에 작용하는 유속중 최대값을 이용해야 호안의 안전성 확보가 가능하다. 일반적으로 계획홍수위에서 발생하는 유속이 가장 크게 산정되며 하천기본계획수립시 설계에 활용되는 유속은 1차원 수치해석결과를 통해 도출된 단면평균유속을 사용하는 경우가 대부분이다. 그러나 만곡부의 경우 만곡의 영향으로 인해 국부적인 유속의 증가와 감소로 유속분포가 균일하지 않게 되므로 평균유속을

사용하기 위해서는 이에 대해 보정이 필요하다. 본 연구에서는 실제 하천을 대상으로 수치모의를 수행하여 만곡 및 세굴 영향을 고려한 최대유속을 산정하고 JICE[9]에서 제시한 대표유속 산정 방법의 적용성에 대해 검토하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 대표유속 산정방법

JICE[9]에서는 호안의 설계를 위한 유속으로 대표유속을 제시하였다. 대표유속은 평균유속만으로 고려할 수 없는 만곡 및 세굴의 영향을 반영하기 위한 것이며, 대표유속(V_0)은 단면의 평균유속(V_m)에 만곡 및 세굴의 관한 보정계수를 곱해 산정한다. 평균유속은 Manning의 평균유속공식을 통해 산정하기도 하며 1차원 수치모의를 통해 도출된 단면평균 유속을 활용이 가능하다. 흐름이 복잡한 경우에는 평면 2차원 수치모의를 통해 산정하거나 수리모형실험을 통해 대표유속을 산정할 수도 있다.

2.1.1 만곡에 대한 유속보정계수

만곡에 대한 보정은 자유와류(free vortex) 및 강제와류(forced vortex)의 발생에 의한 유속의 변화를 고려하는 것이다. 만곡이 시작되는 유입부에서 내측은 자유와류에 의해서 유속이 증가하고, 외측은 감소하는 현상이 발생하고 만곡이 끝나는 유출부에서는 강제와류에 의해서 외측의 유속이 증가하게 된다. 따라서 만곡부 유출부에서는 호안의 보강 구간을 하쪽의 2배 만큼 길이를 연장하도록 하고 있다(Fig. 1 참조). 이 때, 만곡에 의해서 발생하는 자유와류와 강제와류를 고려한 유속보정계수(α_{curve})는 JICE[9]에서 식(1)과 같이 제시하였으며 만곡에 의한 유속보정계수는 하천폭과 하천 하도중심의 곡률반경의 비와 비례한다.

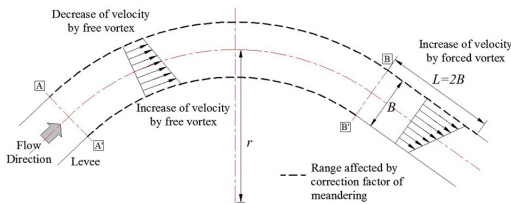


Fig. 1. Velocity corrections of meandering effects (JICE[9])

$$\alpha_{curve} = 1 + \frac{B}{2r} \quad (1)$$

여기서, B 는 하천폭(m), r 은 하도중심의 곡률반경(m)이다.

2.1.2 만곡 외측 세굴의 영향을 추가한 유속 보정계수

만곡부에서는 하천의 만곡에 의한 영향 외에도 외안이 깊이 파이는 것에 의해서도 유속이 증가하게 된다. Fig.2에 나타난 바와 같이 만곡부 흐름에서는 외안측 중간지점 이후(C~B구간)부터 세굴에 의해서 최심하상이 만곡외측에 형성됨으로써 유속이 증가하게 된다. 이와 같은 영향을 고려하여 유속을 보정할 필요가 있으며, 만곡 외측의 세굴 영향을 고려하여 제시된 유속 보정계수(α_{scour})는 식(2)에 나타난 바와 같다. 이 때, 식(2)은 만곡에 의해 발생하는 강제와류 및 자유와류의 영향도 포함하고 있다.

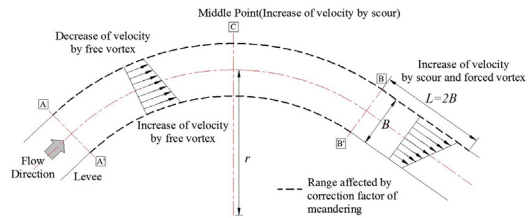


Fig. 2. Velocity corrections of scour effects(JICE[9])

$$\alpha_{scour} = 1 + \frac{\Delta Z}{2H_d} + \frac{B}{2r} \quad (2)$$

여기서, ΔZ 는 세굴깊이(m), H_d 는 설계수심(m)이다.

2.2 수치모형의 지배방정식

본 연구에서 적용한 수치모형은 Delft3D-Flow로 Deltares에서 개발한 유동해석모형이다. 지배방정식은 2차원 천수방정식이며 비압축성유체에 대한 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된다. 수치모형의 연속방정식인 식(3)은 수심적분된 연속방정식으로 비압축성유체에 대한 3차원 연속방정식을 적분하여 도출되며 수면과 바닥에서의 운동학적 경계조건이 고려되었으며 σ 좌표

계로 유도되었다[10].

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \quad (3)$$

여기서, ζ 는 수위(Water level), d 는 수심(depth), Q 는 유입, 유출, 강우, 증발로 인한 단위면적당 유량, \sqrt{G} 는 곡선좌표에서 직사각형 좌표로의 변환계수, U 와 V 는 수심평균유속이며 각각 수평방향(ξ , η)의 유속 성분이다.

운동량 방정식의 경우 정수압 경사를 제외한 밀도변화를 무시하는 Boussinesq 가정 하에서 수평방향(ξ , η)에 대한 운동량 방정식을 식(4), (5)에 나타냈다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \\ & - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v \\ & = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \\ & - \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_u \\ & = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ρ_0 는 물의 밀도, P 는 정수압 경사, F 는 수평방향 Reynold's stress의 불균형에 의해 발생하는 힘이며, M 은 모멘텀 생성항이다. 또한, ν_V 는 연직방향 와점성계수(vertical eddy viscosity coefficient)이며, w 는 연직방향 유속으로 연속방정식으로 계산이 가능하다.

3. 수치모의 조건

본 연구에서는 낙동강의 지류인 남강을 대상구간으로

하여 평균유속과 국부유속의 차이를 산정하여 유속보정계수를 산정하였다. 남강의 No. 129 측선부터 No. 069+390 측선까지를 대상으로 하였다. 이 구간은 직선구간으로 시작하고 끝나는 구간이기 때문에 경계부 형상에 의한 영향을 배제할 수 있으며 구간 내에 10개의 만곡부가 존재하여 다양한 만곡 조건에 대해서 검토가 가능할 것으로 판단된다.

3.1 경계조건

대상구간의 시점은 No. 129 측선으로 영천강 합류지 후에 위치한 지점이며 구간 내에 향양천과 반성천에서 홍수가 유입된다. 하류단은 장박교 지점으로 직선구간의 말단부이다. 세부적인 홍수량 및 홍수위 값은 Table 1에 나타냈다. 또한 하천의 조도계수는 남강하천기본계획(변경)보고서[11]에 제시된 값과 동일하게 0.025~0.027로 설정하였다.

Table 1. Boundary conditions

Type	Flood discharge (m^3/s) (100-year flood)			Flood stage at Downstream (EL.m)
	Nam River	Hyangyang stream	Banseong stream	
Value	2,750	580	680	17.43

3.2 지형 및 격자구성

하천기본계획에 제시된 횡단측량자료만으로는 하천의 만곡형상을 구현하기 어려우므로 1:5000 수치지도와 30m DEM 자료를 함께 활용하여 하천의 만곡형상을 표현하였다. 하도의 중심선을 따라 만곡부에서의 곡률을 도시하였으며 하천의 지형 및 유입부 위치 등은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 각 만곡부별 곡률반경(r) 및 하천폭(B)은 Table 2에 나타냈으며 하천의 지형 및 선형에 맞게 격자를 구성하였고 제방 부근의 격자를 더 조밀하게 구성하여 제방 인근 유속을 자세하게 관찰할 수 있도록 하였다. 생성된 격자의 수는 총 1,158,740 (5,060×229)개이고 Resolution은 최소 1.38 m에서 최대 10.97 m 이다.

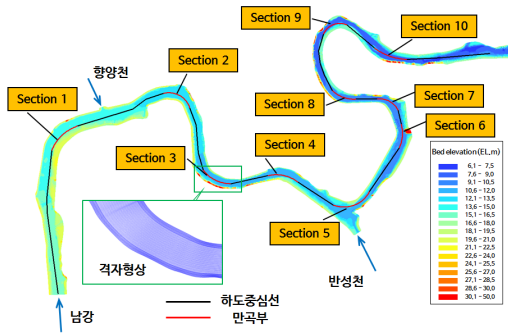


Fig. 3. Research reach and characteristics (bed elevation, mesh shape and positions of inlets and meandering zones)

Table 2. Curvature radius and river width for each section

Section	r	B
Section 1	1,536	504
Section 2	616	423
Section 3	651	302
Section 4	1,144	351
Section 5	806	274
Section 6	436	397
Section 7	379	487
Section 8	1080	280
Section 9	442	354
Section 10	1,543	370

4. 수치모의 결과

수치모의는 흐름이 정상상태에 도달할 때까지 수행하였으며 횡단별로 유속, 수위, 수심 정보를 추출하여 평균값 및 최대값을 도출하였다.

4.1 유속분포

수치모의의 결과에 따르면 예측된 바와 같이 만곡부의 내측과 외측간에 유속차가 발생하였다. 만곡 내측은 자유와류의 영향으로 인해 주로 유속이 증가하였으며, 만곡 외측에서는 강제와류에 의해 유속이 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4).

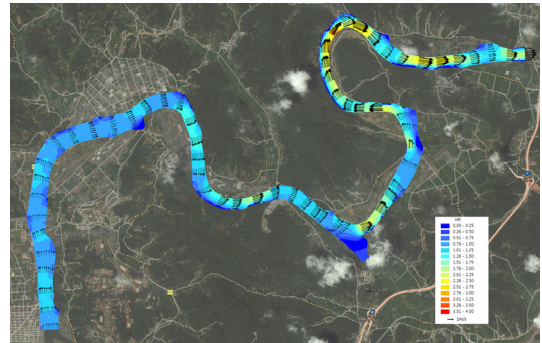


Fig. 4. Contour and vector of depth averaged velocity

4.2 유속보정계수 산정

수치모의의 결과를 바탕으로 하여 유속보정계수를 산정하였다. 만곡부 각 단면별로 평균유속 (V_m)과 최대유속 (V_{max})을 도출하여 식(1)을 통해 산정된 유속보정계수와 최대유속과 평균유속의 비로 계산된 유속보정계수를 Table 3에 나타냈으며, 그 결과를 그래프로 도시한 결과(Fig. 5), 수치모의에 의한 보정계수와 JICE(2007)의 방법에 의한 보정계수 산정 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. B/r 이 0.4보다 큰 경우 산정식에 비해 수치모의의 결과가 약 20 % 정도 과대산정되는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 B/r 이 클수록 하폭에 비해 곡률반경이 작아 만곡의 영향이 크기 때문으로 분석된다. B/r 이 0.4보다 작은 경우에는 산정식에 비해 수치모의의 결과가 과소산정되었을 뿐만 아니라, 상대적으로 오차도 크게 나타났다. 이러한 결과는 B/r 이 작은 경우에는 하폭이 작거나, 곡률반경이 큰 경우이므로 만곡에 의한 흐름변화가 크지 않기 때문인 것으로 분석될 수 있다.

Table 3. Velocities and α_{curve} of each section

Section no.	V_{max} (m/s)	V_m (m/s)	α_{curve}	
			Equation (1)	Simulation (V_{max}/V_m)
Section 1	0.80	0.76	1.16	1.05
Section 2	1.11	0.80	1.34	1.39
Section 3	1.35	1.07	1.23	1.26
Section 4	1.07	0.99	1.15	1.08
Section 5	1.98	1.76	1.17	1.12
Section 6	1.54	0.96	1.46	1.60
Section 7	1.28	0.77	1.64	1.67
Section 8	1.39	1.37	1.13	1.02
Section 9	2.24	1.50	1.40	1.49
Section 10	1.45	1.27	1.11	1.14

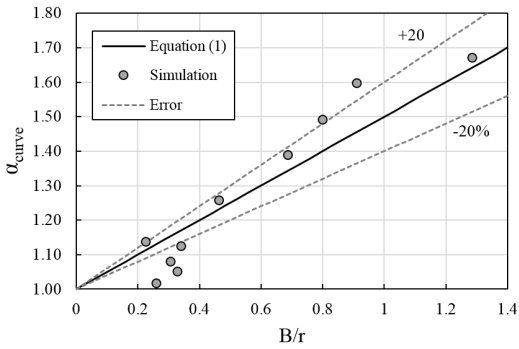


Fig. 5. Comparison of α_{curve} between Equation (1) and simulation

만곡외측의 세굴 영향을 추가로 고려하는 유속보정계수는 식(2)에서 나타내고 있는 바와 같이 하상의 세굴깊이(ΔZ)와 설계수심(H_d)의 관계로 정의되는 변수가 추

가된다. 세굴깊이는 평균하상고와 최심하상고의 차이이며, 설계수심은 단면의 평균수심으로 선정된다. 세굴깊이는 Fig. 6과 같이 제방 비탈면을 제외한 부분에 대한 평균하상고를 선정하고, 각 단면별로 추출된 최심하상고와의 차이를 선정하여 결정된다. 이와 같이 선정된 세굴깊이와 설계수심을 이용하여 세굴의 영향을 추가한 유속보정계수(α_{scurr})를 선정하였으며, 식 (1)에 의해서 선정된 만곡의 영향을 고려한 유속보정계수(α_{curve})에 각각 단면평균유속을 곱하여 JICE[9]의 방법대로 대표유속을 계산하였다. 또한 우리나라 하천특성에 따른 만곡부 최대유속과의 비교를 위해 수치모의를 통해 추출된 최대유속도 Table 4에 정리하여 나타내었다. Table 4에 나타낸 바와 같이 세굴영향을 추가한 유속보정계수의 범위는 1.17~1.70으로서 자유와류 및 강제와류만을 고려한 유속보정계수 범위 1.11~1.64보다 크게 나타났다.

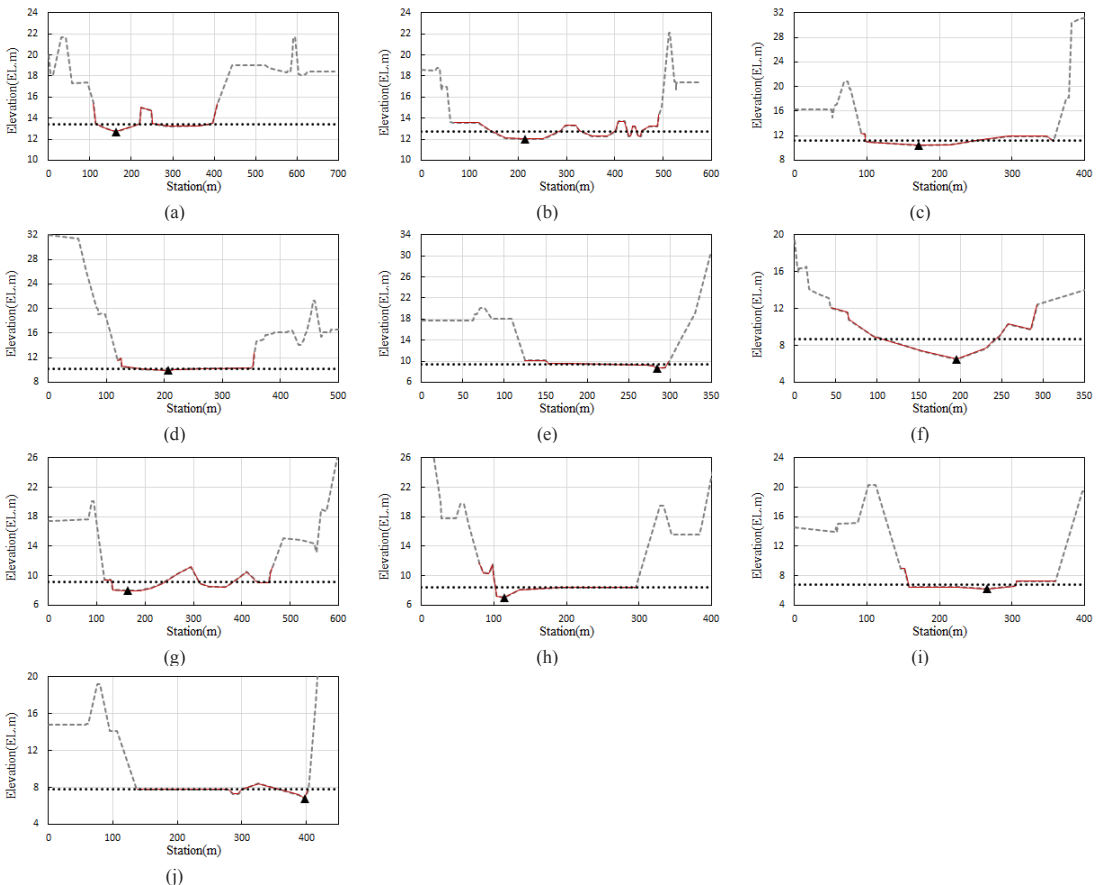


Fig. 6. Detection of average and minimum bed elevation (a) Section 1 (b) Section 2 (c) Section 3 (d) Section 4 (e) Section 5 (f) Section 6 (g) Section 7 (h) Section 8 (i) Section 9 (j) Section 10

JICE[9]방법에 의한 유속보정계수 산정 방법의 적용성을 검토하기 위해 유속보정계수에 의한 최대유속과 수치모의결과에서 추출된 최대유속을 Fig. 7에 도시하였다. 그리고 각각에 대해 선형회귀분석을 통해 직선의 기울기를 산정한 결과 만곡에 의한 보정유속은 기울기가 0.993, 세굴의 영향까지 고려한 보정유속은 기울기가 1.032로 나타났다. 거의 1에 근접하여 두 경우 모두 대표유속을 잘 예측하는 것으로 나타났다. 이를 통해 1차원 수치모의 결과에서 산정된 단면평균유속에 유속보정계수를 적용하여 유속을 산정하더라도 만곡의 영향을 충분히 반영할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 만곡에 의한 보정만 수행했을 경우 추세선의 기울기가 1보다 작게 나타나 호안 설계시 설계유속이 과소산정될 가능성이 있으므로 세굴의 영향까지 고려한 유속보정계수를 사용하는 것이 안전 측면에서 적절한 설계가 될 것으로 판단된다.

Table 4. Maximum velocities corrected by α_{curve} and α_{scour}

Case	ΔZ (m)	H_d (m)	α_{scour}	V_{max} (m/s)		
				Corrected by α_{curve}	Corrected by α_{scour}	Simulation
Section 1	0.72	7.10	1.21	0.89	0.93	0.80
Section 2	0.73	9.63	1.38	1.07	1.10	1.11
Section 3	0.72	10.15	1.27	1.32	1.36	1.35
Section 4	0.31	9.47	1.17	1.15	1.16	1.07
Section 5	0.80	8.62	1.22	2.06	2.14	1.98
Section 6	2.19	10.45	1.56	1.40	1.51	1.54
Section 7	1.16	10.37	1.70	1.26	1.30	1.28
Section 8	1.39	10.53	1.20	1.55	1.64	1.39
Section 9	0.53	8.18	1.43	2.10	2.15	2.24
Section 10	0.98	9.12	1.17	1.42	1.48	1.45

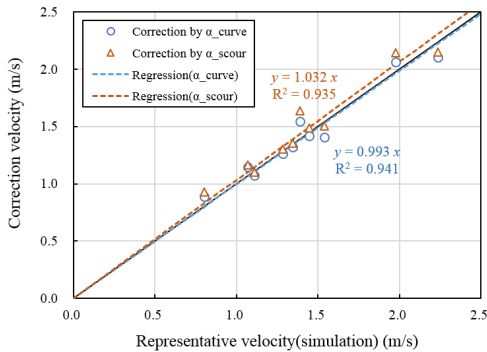


Fig. 7. Comparison of maximum velocity between corrected by JICE(2007) and simulated in this study

4.3 만곡부 호안의 돌망태 사석직경 산정

각 구간세굴의 영향까지 고려한 유속보정계수를 적용하여 산정된 대표유속을 이용하여 호안의 최소크기를 산정하였다. 호안의 종류는 만곡부의 보호를 위해 많이 적용되고 있는 돌망태로 가정하였다. 돌망태의 안전조건은 무차원 내력소류력(τ_{sd})이 무차원 외력소류력(τ_{*sd})보다 큰 경우 안전한 것으로 판정하며 식(6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_{sd}}{\tau_{*sd}} = \frac{\tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \Phi}}}{(V_0/\phi)^2 / (s \cdot g \cdot D_m)} \geq 1.0 \quad (6)$$

여기서, τ_{*d} 는 한계소류력(돌망태의 경우 0.1), θ 는 비탈면 각도, Φ 는 재료의 수중 안식각(Φ 의 표준치는 자연석의 경우 38°, 쇄석의 경우 41°), V_0 는 대표유속, ϕ 는 유속계수(= $n^{-1} \cdot H_d^{1/6} \cdot g^{-1/2}$), s 는 하상재료의 수중비중(=1.65), g 는 중력가속도, D_m 은 돌망태 속 사석의 평균 입경(m)이다.

식(6)을 D_m 에 관해 정리하면 식(7)의 형태로 유도되며 만약 모든 조건이 동일하다면, 직선수로와 만곡수로에서의 돌망태 속 사석의 평균입경비는 식(8)의 형태로 변형되고 세굴에 의한 보정을 무시하면 식(1)로부터 돌망태 속 사석의 평균입경비와 r/B 의 관계로 나타낼 수 있으며 Lagasse et al.[12]이 NCHRP(National Cooperative Highway Research Program) Report에서 제시한 하천공률에 따른 사석의 평균입경비와 함께 Fig. 8에 도시하였다. 그 결과 r/B 가 커질수록 1에 수렴하는 것으로 나타났으며 이는 Lagasse et al.의 결과와 유사하였으나 본 연구의 결과가 전체적으로 사석비가 낮게 산정되었다.

$$D_m \geq \frac{1}{s \cdot g} \times \frac{(V_0/\phi)^2}{\tau_{*d} \times \cos \theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \Phi}}} \quad (7)$$

$$\frac{(D_m)_{bend}}{(D_m)_{straight}} = \frac{(V_{max})^2}{(V_m)^2} = \alpha^2 = \left(1 + \frac{1}{2(r/B)}\right)^2 \quad (8)$$

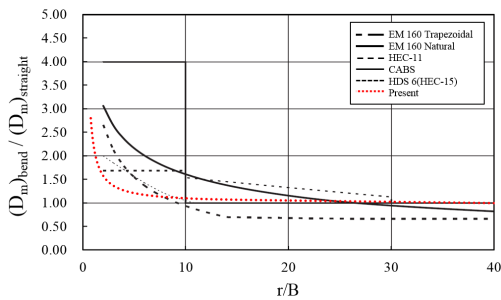


Fig. 8. Sensitivity of riprap size to bend curvature[12]

4. 결론

홍수가 발생하면 유속의 증가에 의하여 제방 비탈면에 설치된 호안이 손실되고, 이로 인하여 제방붕괴까지 이르게 된다. 호안을 설계를 위해서는 호안이 설치되는 비탈면에서의 최대유속을 산정해야 하나, 시간과 비용의 제약 때문에 1차원 수치해석에 의한 단면평균유속을 실무에서 사용하고 있다. 그런데, 직선 하도에서의 일반적인 유속분포인 경우, 최대유속이 하도의 가운데에서 발생하므로 적용이 가능하나, 만곡부와 같이 흐름이 한쪽으로 치우치는 경우, 최대유속은 단면평균유속보다 더 커지게 된다. 따라서, 이 경우 단면평균유속을 적용하여 과소설계 가능성이 있으므로 적절한 계수를 사용하여 보정을 할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 JICE[9]에 제시한 만곡부에 대한 유속보정계수 산정 방법의 적용성을 검토하기 위하여 남강에 대해 2차원 수치모의를 수행하고 단면평균유속과 최대유속을 산정하였다. 단면평균유속에 만곡의 영향과 세굴의 영향을 고려하여 적용한 대표유속과 수치모의결과에 추출된 최대유속을 비교한 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 1차원에서 계산된 단면평균유속에 유속보정계수를 적용하면 만곡의 영향을 고려한 설계유속을 산정할 수 있음을 보였다.

또한, 호안재료로서 돌망태를 사용하는 경우에 대해서 만곡하도와 직선하도일 때의 사석크기를 기존의 설계 공식에 적용하여 산정해 보았다. 산정 결과, 하폭에 대한 곡률반경(r/B)이 작을 때는 단면평균유속을 사용하는 경우와 보정계수를 적용한 경우의 사석크기의 차이가 크게 발생하고, 하폭에 대한 곡률반경(r/B)가 증가함에 따라 그 차이가 줄어들면서 1에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 즉, 만곡이 심할수록 만곡에 의해 발생하는 유속증

가 영향을 고려할 필요가 있음을 본 연구결과를 통해 알 수 있었다.

본 연구는 JICE[9]에서 제시한 만곡부에 대한 호안설계방법의 적용성을 검토하기 위하여 남강의 만곡부 10개 구간에 대한 수치모의를 수행하여 그 결과를 제시하였다. 향후, 우리나라의 특성에 맞는 호안설계방법 제시를 위하여 하천 특성이 다른 대표적인 하천에 대한 추가적인 수치모의 및 분석이 필요하며, 이를 위해 본 연구결과가 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. V. Isbash, "Construction of dams by dumping stones in flowing water, Translated by A. Dorijikov", *U.S. Army Engineering District, Eastport, Me.*, 1935.
- [2] K. W. Pilarczyk, "Stability Criteria for Revetments", *Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1990 National Conference, American Society of Civil Engineers, New York*. pp. 245-250, 1990.
- [3] M. Escarameia, and R.W.P. May, "Channel protection-Turbulence downstream of structures", *Report SR 313, HR Wallingford*, 1992.
- [4] S. T. Maynard, "Corps Riprap Design Guidance for Channel Protection", *International Riprap Workshop. Colorado State University, Fort Collins, Colorado*. 1993.
- [5] S.S. Bae, S.Y. Lee and H.K. Jee, "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, 2008. DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2008.41.2.137>
- [6] D.B. Simons, Y.H. Chen L.J. Swenson, L.J., "Hydraulic test to develop design criteria for the use of reno mattresses", *Simons and associates*, 1984.
- [7] C. Kim, and N. H. Park, "A Study of the Stability Analysis of the Bank Revetment at Urban Streams in Flood Times", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 10, no. 6, pp. 139-145, 2010.
- [8] H. J. Kim and K. S. Yoon, "Suggestion of Riprap Revetment Design Techniques considering River Meandering", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 14, no. 6, pp. 405-411, 2014. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.6.405>
- [9] JICE(Japan Institute of Construction Engineering), *Dynamic Design of Revetments*, Sankaido, 2007
- [10] Deltares, *Delft3D-FLOW user manual*. 2010
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Trnasport (MOLIT), *River Master Plan(Rivision) in the Nam River*, Ministry of Land, Infrastructure and Trnasport. 2013
- [12] P. F. Lagasse, P. E. Clopper, L.W. Zevenbergen and J.F. Ruff, *NCHRP Report 568: Riprap Design Criteria. Recommended Specifications, and Quality Control*. 2006.

김 수 영(Sooyoung Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원
건설도시공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원
건설도시공학부 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험

윤 광 석(Kwang Seok Yoon)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 대학원
토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 한양대학교 대학원
토목공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 연구위원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험, 환경공학