J Korean Soc Disaster Secur 16(4): 9-18, 2023
https://doi.org/10.21729/ksds.2023.16.4.9

Print ISSN: 2466-1147 Online ISSN: 2508-285X
www.dssms.org

KSDS

Original Article

3차원 수치모델을 활용한 호안 블록 형상에 따른 하도 내 유속 분석

김동현[1] · 양수현[2] · 주성식[3] · 이승오[4]*

[1]홍익대학교 건설환경공학과 연구교수, [2](주)하이드로봇 수환경사업부 이사, [3](주)헥코리아 수자원환경사업부 이사,
[4]홍익대학교 건설환경공학과 교수

Analysis of Flow Velocity in the Channel according to the Type of Revetments Blocks Using 3D Numerical Model

Dong Hyun Kim[1], Su-Hyun Yang[2], Sung Sik Joo[3], and Seung Oh Lee[4]*

[1]Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University
[2]Director, Department of Water Environment, HydroBot
[3]Director, Department of Water Resource and Environment, HECOREA
[4]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

요 약

기후변화는 외수침수와 연관이 있는 하천제방 안전성에도 영향을 미친다. 제방의 안전성을 높이기 위해 비탈면 보강에 대한 연구가 활발히 수행되어왔다. 특히 최근에는 순환자원을 재활용하여 호안블록을 제작하는 기술 등이 개발되고 있다. 그러나 호안블록의 재료적인 측면의 연구와 더불어 블록 형상에 의해 제외지의 흐름특성에 미치는 영향을 분석하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 호안블록의 형상에 따라 호안면의 유속 등 수리학적 특성의 영향을 3차원 수치모의를 통해 수행하였다. 호안 블록 형상은 3가지 형상을 제안하였고, 이상적인 하천 수로에 블록을 설치하여 수치해석을 수행하였다. 3차원 수치해석은 FLOW-3D를 사용하였고, 호안블록의 형상에 따른 최대유속, 호안부의 바닥유속, 최대 전단응력의 변화를 분석하였다. 그 결과, 자연석형 식생블록인 블록 A가 요철의 크기와 규모가 불규칙하여 호안에 연결하여 설치할 경우 호안 블록 B, C보다 호안 설치구간의 유속변화가 가장 큰 것으로 분석되었다. 향후 하천의 지형적 특성을 고려한다면 현장적용성을 고려한 호안블록 설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 3차원 수치해석, FLOW-3D, 호안 블록, 흐름특성, 호안 안전성

ABSTRACT

Climate change affects the safety of river revetments, especially those associated with external flooding. Research on slope reinforcement has been actively conducted to enhance revetment safety. Recently, technologies for producing embankment blocks using recycled materials have been developed. However, it is essential to analyze the impact of block shapes on the flow characteristics of exclusion zones for revetment safety. Therefore, this study investigates the influence of revetment block shapes on the hydraulic characteristics of revetment surfaces through 3D numerical simulations. Three block shapes were proposed, and numerical analyses were performed by installing the blocks in an idealized river channel. FLOW-3D was used for the 3D numerical simulations, and the variations in maximum flow velocity, bed velocity beneath the revetment, and maximum shear stress were analyzed based on the shapes of the revetment blocks. The results indicate that for irregularly sized and spaced revetment blocks, such as the natural stone-type vegetation block (Block A), when connected to the revetment in an irregular manner, the changes in flow velocity in the revetment installation zone are more significant than those for Blocks B and C. It is anticipated that considering the topographical characteristics of rivers in the future will enable the design of revetment blocks with practical applicability in the field.

Keywords: 3-D numerical analysis, FLOW-3D, Revetment block, Flow characteristics, Revetment safety

***Corresponding author:** Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1726-3694

Received: 28 November 2023, **Revised:** 26 December 2023, **Accepted:** 27 December 2023

© Korean Society of Disaster & Security. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

기상청의 '2020년도 이상기후보고서'에 따르면 국내 이산화탄소(CO_2) 농도와 메탄가스(CH_4) 등 온실가스의 농도는 지속적으로 증가하고 있다(KMA, 2020). 이에 따른 이상기후로 인해 2020년 총54일의 역대 가장 긴 장마를 기록하였다. 태풍으로 인해 최대 1,562.8 mm의 강수량이 집중됨에 6,157건의 산사태와 13명의 인명피해, 1,343 ha의 재산피해가 유발되어 역대 3번째로 큰 피해가 발생하였다. Table 1에 나타난 것처럼 최근 10년간 발생한 재난 통계에 따르면 이상기후로 인하여 발생한 하천에서의 하천재해는 약 9,622건으로 집계되었고 이에 따른 피해는 약 6,540억 원에 달하였다(MOIS, 2022). 특히 2020년에는 여름철 태풍 및 집중강우가 발생한 상황에서 급격한 수리학적 변동에 충분하게 대응하지 못하여 낙동강 및 섬진강 유역의 하천 제방이 붕괴하였고, 이로 인한 많은 이재민 및 재산피해가 발생하였다. 이에 따라 대한민국 정부에서는 하천재해로부터 국민 보호를 위해 수문학적 안전성을 증대시키기 위한 하천 정비 등을 수행하고 있다. 그러나, 행정안전통계연보(MOIS, 2021)에 따르면 국가가 관리하고 있는 하천 3,832개소(총 연장 29,783 km)와 각 지방자치단체가 관리하는 소하천 22,343개소(총 연장 55,458 km)는 46.1%(2020년 기준)의 정비율을 나타내고 있어 하천재해에 효과적으로 대응할 수 있는 재료 및 기술의 개발이 요구되고 있다.

Table 1. River disasters caused by abnormal climate conditions (losses unit: 10^6 won)

Category		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Stream	Num.	1,019	98	304	194	3	70	151	14	7	1,299	3,289
	Losses	87,176	6,820	17,635	61,909	44	1,537	15,308	10,704	61	183,889	385,083
Brook	Num.	2,124	262	594	300	7	140	377	391	16	2,122	6,333
	Losses	67,147	5,858	23,762	11,229	48	1,835	14,612	7,022	480	137,016	269,009

급변하는 하천재해에 대응하기 위해 하천 비탈면을 보강할 수 있는 지반개량 바인더 및 호안블록 등이 개발되고 있다. 또한 최근에는 순환자원을 재활용하여 호안블록을 제작하는 기술 등도 개발되고 있다. 집중강우 및 태풍에 의해 증가된 하천수위는 하천 비탈면의 붕괴를 유발하는데 이 때 호안블록의 형상에 따라 호안면의 유속 등 수리학적 특성에 영향을 미친다. 따라서, 호안블록 형상에 의한 단면의 수리학적 특성을 분석하여 호안블록 단면의 성능분석이 필요하다. 관련 연구는 호안블럭 자체의 수리안전성에 대한 평가에 관해 지속적으로 수행되어 왔다. MOLIT(2016)는 하천공사설계실무요령에 의해 하도상황에 따라 적정공법을 제시하고 있다. 해당 요령에는 허용 유속 및 소류력에 대한 적정범위를 제시하고 있다. 2000년대 초반에는 호안공법에 대한 수리학적 안전성 검토, 식생과 같은 호안블록의 재료에 의한 안전성 검토 등의 연구가 수행되어 왔다(Bae et al., 2002; Lee et al., 2012). 최근 연구로는 Kim and Kim(2022)이 생분해성 식생호안블럭에 대한 수리안전성 평가를 위해 실험을 수행한 바 있다. 다양한 유량조건에 대하여 공법별 수리특성 인자 계측을 수행하였고, 식생이 활착되어 있을 경우 미활작 조건의 3배 이상의 안전성이 확보되는 것으로 나타났다. 그 외에도 Lee and Kim(2020)은 바이어폴리모 소재를 활용한 식생매트의 한계소류력을 평가한 사례도 있다. 국외의 경우 13종의 천연섬유 매트에 대한 사면의 안전성 실험을 수행하여 토양 유실 효과를 검토하는 등. 대부분 호안블록에 의한 제방 사면의 안전성에 대한 연구가 주를 이루었다(McCullah and Howard, 2000; Casas et al., 2002; USACE, 2006). 호안블록에 의해 하천의 수리학적 영향을 분석한 연구는 식생분포에 따라 영향을 확인하는 경우가 많다. 대표적으로 Fukuoka et al.(1992)은 하도 내 수목군의 밀집도에 따라 저항을 고려하여 운동량 방정식을 제안하고 이를 활용해 홍수 시 유속 분포와 수위형상을 예측하였다. Järvelä(2002)도 자연식재를 활용한 흐름저항 특성을 실험을 통해 규명하였고 그 외에도 Carollo et al.(2005)은 실제 잔디를 활용하여 흐름저항과 유속의 관계를 분석하였다. 자연복원 하천의 관심과 함께 식생 블록으로 인한 흐름특성 분석 연구가 수행되어왔다. 따라서, 본 연구

에서는 호안 블록 형상에 따른 하도 내 흐름 특성을 3차원 수치해석 모의를 통해 영향을 분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수치해석모델 FLOW-3D

하천 단면에 일정 유량(유속)이 흐르는 조건에서 호안블록의 안전성을 평가하기 위해 3차원 수치해석 수행하였다. 일반적으로 개수로 흐름 해석에 주로 활용되는 FLOW-3D를 사용하였다. FLOW-3D 모형은 자유수면 해석에 있어 정확한 해를 제공하고, 국내 댐 및 하천에서의 흐름해석에 적용사례가 많다.

FLOW-3D 모형은 기본 유한차분방식에 FAVOR를 도입한 유한체적법을 사용하는 모델이다. 특히 자유표면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어나가는 방법을 이용한다. VOF 방법은 해석영역을 작은 격자로 나눈 후, 이 격자 단위로 계산하는 것으로 각 격자에 있어 주어진 압력에 대해서 다음 시간에서의 속도를 구한다. 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하는 방식으로 계산이 이루어진다. FAVOR의 경우 직각형 격자 안에 들어있는 일반 현상을 기술하는 방법으로 한 직각형 격자에서 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적을 정의하는 것이다.

해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 운동량 보전(Navier- Stokes)방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열 유동 해석에, 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 생성항(Source Term)으로 사용하여 해석한다. 유체의 난류 유동에는 기본 대수 모형으로부터 RNG(Renormalized Group Theory) 모형까지의 난류 방정식을 선택할 수 있으며 자유표면 해석을 위해 VOF(Volume of Fluid) 방정식을 사용한다. 직각형상격자계 사용시 일반 형상 기술을 보다 정확히 모의하기 위해 FAVOR(Fractional Area/Volume Ratio) 기법을 각 방정식에 적용하여 사용한다. 비압축성 및 압축성의 계산 시에는 해석속도 증진을 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용한다. 아래의 식 (1)~(3)은 FLOW-3D 지배방정식을 나타낸 것이다.

① 연속방정식

- Incompressible Flow

$$\frac{\partial}{\partial x}(u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) = \frac{RSOR}{\rho} \tag{1}$$

- Variable Density or Compressible Flow

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u A_x \rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v A_y \rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z \rho) = RSOR + RDIF \tag{2}$$

여기서, u, v, w : Flow velocities in the x, y, and z directions, respectively, A_x, A_y, A_z : Area Fraction, V_f : Open Volume Fraction, ρ : Density, RSOR : Mass Source/Sink, RDIF : Density Diffusion이다.

② 운동량방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{u\,A_x\frac{\partial u}{\partial x}+v\,A_y\frac{\partial u}{\partial y}+w\,A_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+F_x-\frac{RSOR}{\rho\,V_f}u$$
$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{u\,A_x\frac{\partial v}{\partial x}+v\,A_y\frac{\partial v}{\partial y}+w\,A_z\frac{\partial v}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+F_y-\frac{RSOR}{\rho\,V_f}v \quad (3)$$
$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{u\,A_x\frac{\partial w}{\partial x}+v\,A_y\frac{\partial w}{\partial y}+w\,A_z\frac{\partial w}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+F_z-\frac{RSOR}{\rho\,V_f}w$$

여기서, F : Forces(Gravity, Non-Inertial Body Acceleration, etc.), ASOF : Accelerations Caused by Mass Injection at Zero Velocity이다.

2.2 FLOW-3D 모형 구성

2.2.1 시나리오 구성

호안블록의 안전성을 평가하기 위해 하천 단면에 일정 유량 조건으로 3차원 수치해석을 수행하였다. 모의수행을 위해서는 하천 형상과 하천 호안에 설치된 호안블록의 형상 결정이 필요하다. 하천형상은 향후 수행계획인 수리모형실험과의 연계성을 위해 KICT의 하천실험센터의 제원을 기준으로 하천 규모를 결정하였다. Fig. 1에 나타난 것처럼 하천 저면의 폭은 3.0 m, 하천 높이는 2.0 m로 가정하였고, 하천 종단의 경사는 1/70으로 설정하였다. 호안 경사의 경우는 소하천에 적합한 규모인 1:2로 가정하였다.

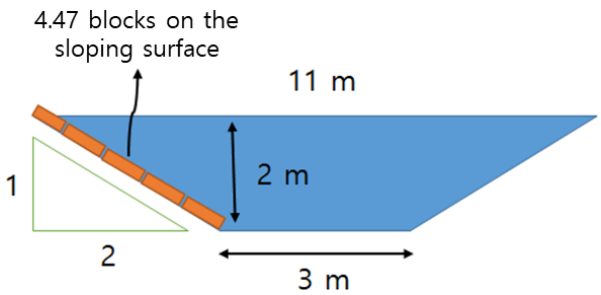


Fig. 1. Cross section of river

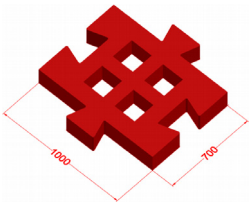
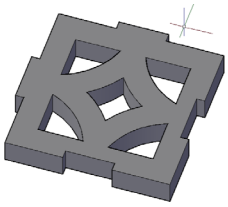
2.2.2 시나리오 조건

허용유속 범위 평가를 위해서 2가지 유량조건과 3가지 블록 형상(안)에 대하여 검토하였다. 하천에 흐르는 유량 규모에 따라 호안 블록(안)별 유속분포를 분석하여 허용유속을 만족하는지를 평가하였다. 수심은 모두 1.4 m로 동일한 조건에서 수행되었고, 이 때 하천의 단면적은 8.12 m^2이다. 허용유속 범위 평가를 위한 유속조건은 총 2가지 시나리오로 수행되었고, 각각 2.0 m/s와 6.0 m/s로 수행하였다. 일반적으로 호안공법에 따라 적용 가능한 설계유속 범위 중 환경보전형 블록은 비탈경사 1:2 및 비탈경사 1:1에서 설계유속 1.0~8.0 m/s 범위에 적용가능하다. 이 때 호안높이는 5 m 이내이다. 자세한 수치해석 조건으로 제시한 유속과 유량 조건은 Table 2와 같다. 블록 형상은 Table 3과 같이 제시하였고, Table 2에서 제시한 유량조건에 따라 Case를 나누어 선정하였다.

Table 2. Condition of numerical simulation

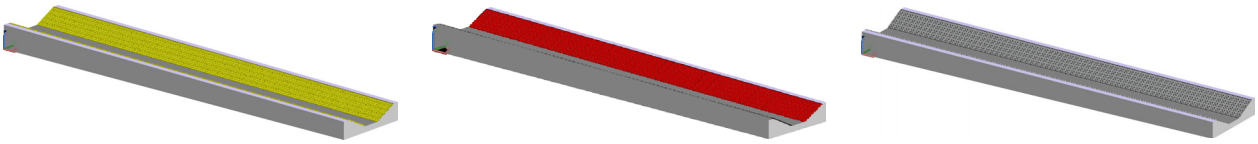
Case	Velocity (m/s)	Area (m^2)	Discharge (m^3/s)
1	2.0	8.12	16.24
2	6.0		48.72

Table 3. Condition of blocks

Case		Block A	Block B	Block C
Block	Shape			
	Characteristics	Natural stone type	Interlocking between blocks (no separate connection)	Interlocking between blocks (connected with I-shaped bolts)
	Size	W1,000 × L1,000 × H200 mm	W1,000 × L1,000 × H150 mm	W1,000 × L1,000 × H150 mm

2.2.3 수치해석 경계조건

FLOW-3D 수행을 위해 하도 및 블록의 형상을 Fig. 2와 같이 구현하였다. 하도는 주어진 단면을 기준으로 경사 1/70의 하도를 구성하였다. 블록형상을 FLOW-3D 상에 제대로 구현하기 위해서는 격자의 크기가 중요하다. 각 블록 형상 구현을 위한 적정 격자 크기는 12.5 cm이며, 해당 크기로 격자를 구성할 경우 총 약 370만개의 격자가 생성되었다. 수치해석의 경계조건은 Table 4와 같고, 조고 값(Roughness height)을 결정하여 부여하였다. 하도 흐름 해석은 블록 형상의 영향을 확인하기 위하여 블록 설치 전 흐름해석을 우선 수행하였다. 그 후 동일한 수치해석 조건에서 각 블록을 설치한 후 흐름해석을 수행하였다.



(a) Block A (b) Block B (c) Block C

Fig. 2. Set up of numerical simulation

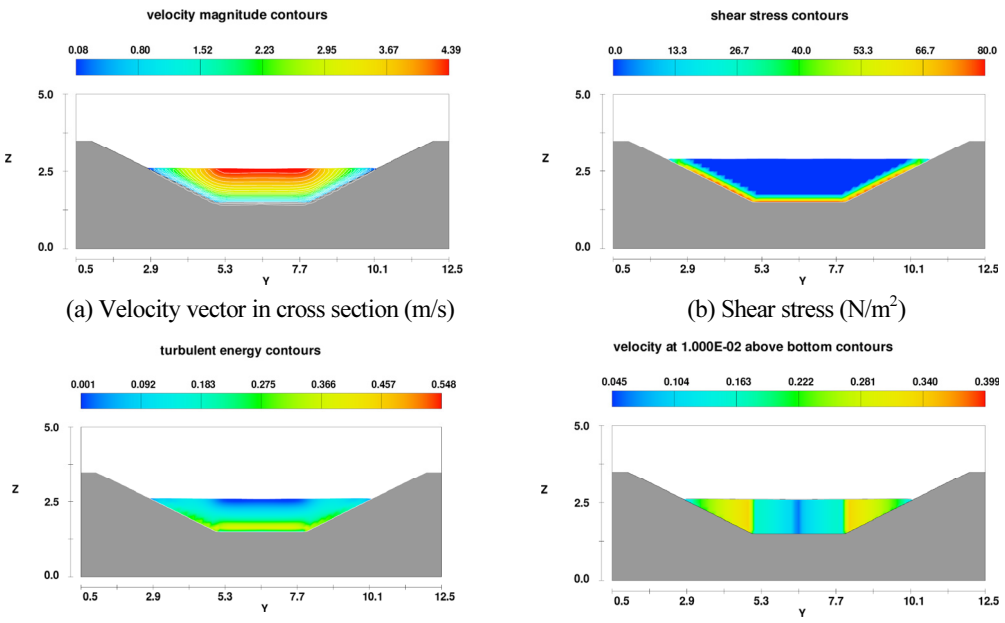
Table 4. Boundary condition of numerical simulation

Case	Block type	Upstream	Downstream	
		Discharge (m^3/s)	Water level (EL.m)	Roughness height (m)
1-N	-	16.24	2.4	2.1767
1-A	Block A			
1-B	Block B			
1-C	Block C			
2-N	-	48.72		0.0028
2-A	Block A			
2-B	Block B			
2-C	Block C			

2.3 FLOW-3D 수치해석 결과

2.3.1 기본 하도 흐름 해석 결과

블록형상의 영향을 확인하기 위해 우선적으로 블록이 설치되어 있지 않은 하도에서 흐름 해석 결과를 나타내었다. 유량 조건 16.24 m^3/s에서는 전 구간 유속분포 검토결과 하도 중앙 자유수면에서 최대유속이 4.39 m/s로 나타났다. 또한, 바닥부 유속분포 검토 결과, 호안부 유속은 0.2~0.4 m/s 범위로 나타났다(Fig. 3). 유량 조건 48.72 m^3/s에서는 중앙 자유수면에서 최대유속이 6.69 m/s로 증가하였고, 호안부의 바닥유속 또한 1.9~3.8 m/s로 증가하였다(Fig. 4).



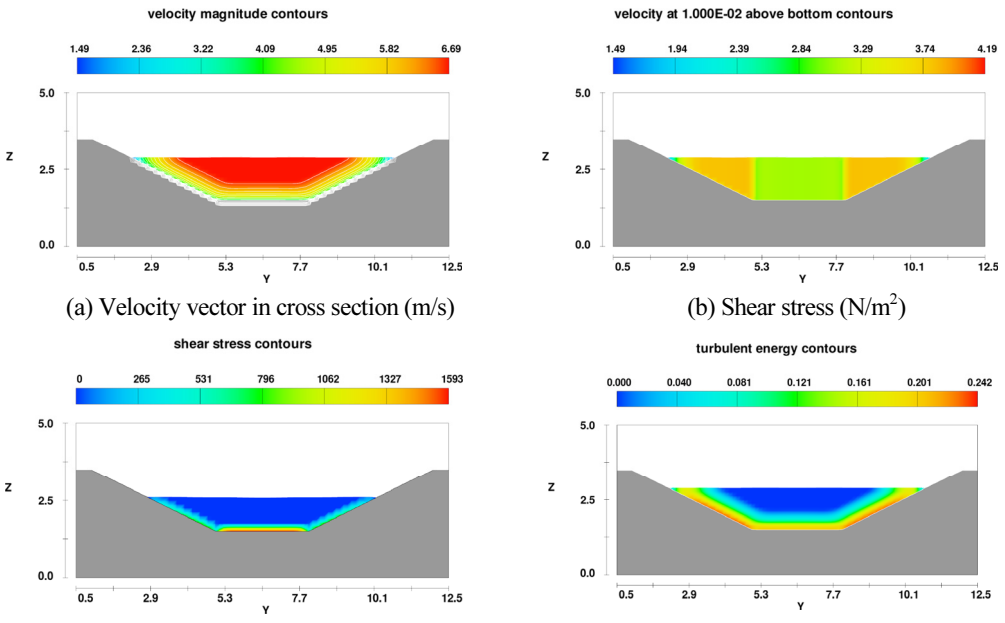
(a) Velocity vector in cross section (m/s)

(b) Shear stress (N/m^2)

(c) Turbulent energy (m^2/s^2)

(d) Velocity distribution at the bottom of revetment (m/s)

Fig. 3. Results of numerical simulation (Case 1-N)



(a) Velocity vector in cross section (m/s)

(b) Shear stress (N/m^2)

(c) Turbulent energy (m^2/s^2)

(d) Velocity distribution at the bottom of revetment (m/s)

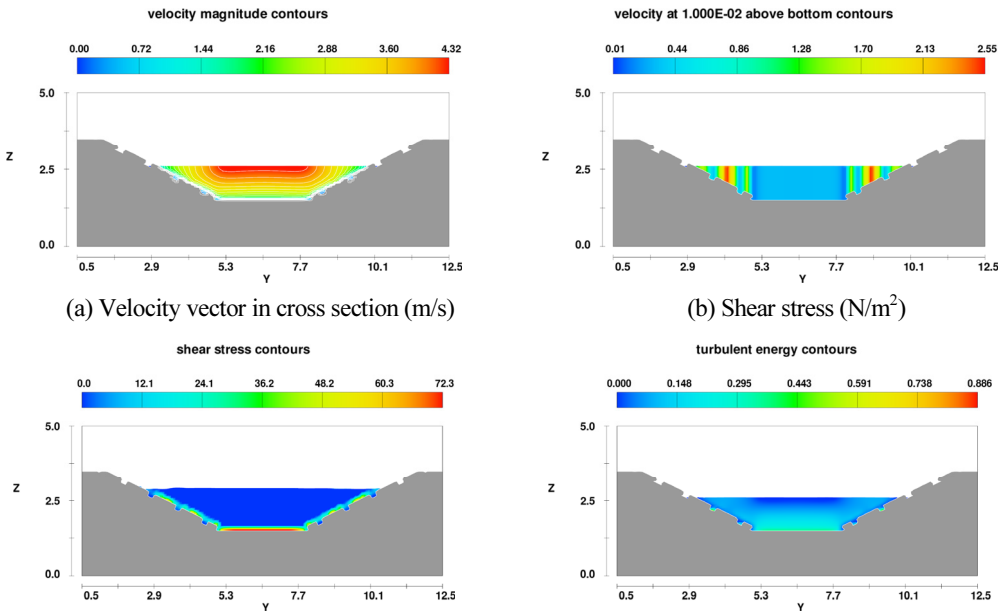
Fig. 4. Results of numerical simulation (Case 2-N)

2.3.2 블록에 따른 하도 흐름 해석 결과

셀룰로오스 형상에 따른 하도 흐름의 변화를 살펴보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 블록 A, 블록 B, 블록 C도 기본하도 흐름 해석과 같이 횡단면 유속분포, 전단응력, 난류에너지, 호안부 바닥 유속 분포를 도출하였다. 그 결과, 유량조건 16.24 m^3/s에서 블록 유형에 따라 중앙 자유수면의 최대유속은 각각 4.32 m/s, 4.31 m/s, 4.32 m/s로 나타났다. 유량 조건 48.72 m^3/s에서는 반면에 중앙 자유수면의 최대유속은 각각 7.13 m/s, 7.06 m/s, 6.65 m/s로 나타났으며, 블록 C에서는 중앙 자유수면의 최대유속이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 기본 하도흐름과 비교하였을 때, 유량조건 1에서는 최대유속이 소폭 감소하였으나, 유량조건 2에서는 오히려 최대유속이 증가하였고, 블록 C만 기본 하도흐름보다 최대유속이 감소하는 것으로 나타났다. 호안부 유속은 1.40~2.15 m/s로 셀룰로오스형상에 의해 증가하였으며, 자세한 결과는 Table 5에 나타나있으며, Fig. 5와 Fig. 6은 다른 양상의 결과를 나타내는 블록 C의 결과이다.

Table 5. Results of numerical simulation

Category	Case 1 (16.24 m^3/s)			
	Case 1-N	Case 1-A	Case 1-B	Case 1-C
Maximum velocity (m/s)	4.39	4.32	4.31	4.32
Bottom velocity (m/s)	0.40	1.80	2.41	2.55
Maximum shear stress (N/m^2)	80.0	83.6	81.9	72.3
Turbulent energy	0.548	0.726	0.457	0.886
Category	Case 2 (48.72 m^3/s)			
	Case 2-N	Case 2-A	Case 2-B	Case 2-C
Maximum velocity (m/s)	6.69	7.13	7.06	6.65
Bottom velocity (m/s)	4.19	2.90	4.11	4.52
Maximum shear stress (N/m^2)	1,593	261	335	318
Turbulent energy	0.242	0.567	0.308	0.449



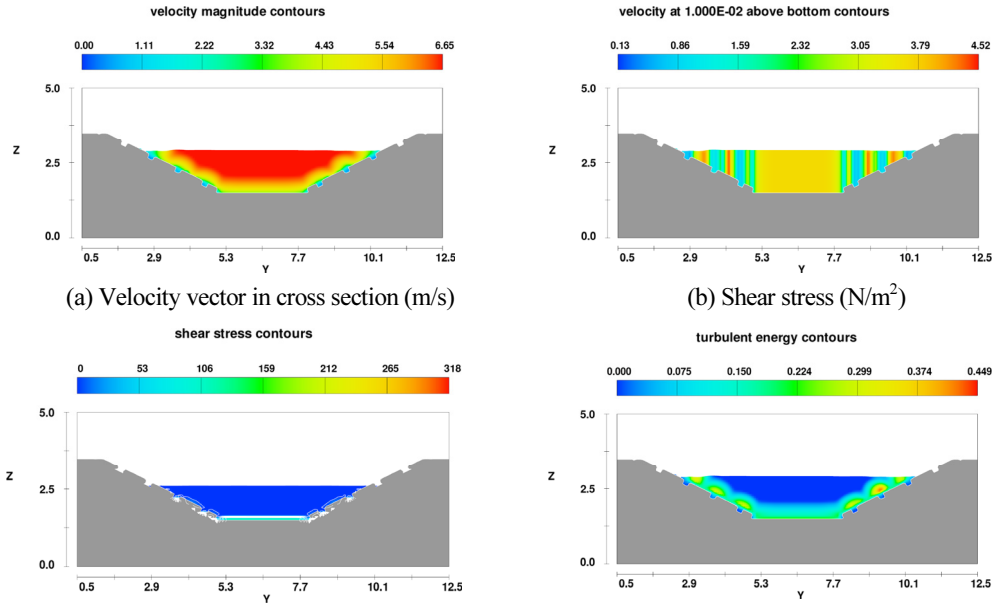
(a) Velocity vector in cross section (m/s)

(b) Shear stress (N/m^2)

(c) Turbulent energy (m^2/s^2)

(d) Velocity distribution at the bottom of revetment (m/s)

Fig. 5. Results of numerical simulation (Case 1-C)



(a) Velocity vector in cross section (m/s)

(b) Shear stress (N/m^2)

(c) Turbulent energy (m^2/s^2)

(d) Velocity distribution at the bottom of revetment (m/s)

Fig. 6. Results of numerical simulation (Case 2-C)

2.3.3 셀룰로오스 형상에 따른 흐름 분포

셀룰로오스의 유·무와 유량 조건에 따라 하도구간의 흐름분포 양상이 다른 것을 확인하였다. 유량조건 1의 경우 호안 블록을 설치할 경우 하도구간에서 최대유속이 약 0.07~0.08 m/s 감소하였으나, 유량조건 2의 경우 호안블록을 설치할 경우 최대 유속이 약 0.07~0.44 m/s 증가하였다. 이는 유량조건은 다르지만 수위조건이 동일하기 때문에 유량이 3배가 되었을 때 수위조건이 동일하여 단면적이 같으므로 유속 또한 증가하여 전반적인 하천단면의 유속이 증가하는 것으로 판단된다. 호안부의 유속 분포는 양상이 최대 유속과 다르게 나타났다. 저유량인 유량조건 1에서는 호안블록에 의해 바닥부 유속이 1.40~2.15 m/s 증가하였다. 호안블록의 굴곡을 통과하며 굴곡 사이사이에서 국부적인 유속의 증가가 발생하였고, 하도 중앙에서는 유속이 감소하는 양상을 나타내었다. 동일 유량 조건일 때, 호안부 바닥유속이 국부적으로 감소됨에 따라 다른 부분의 최대 유량이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 호안바닥유속의 차이로 인해 평균 유속이 호안 블록의 형상에 따라 유속 증가 위치 및 분포가 다르게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 고유량 조건인 유량조건 2의 경우 0.08~1.29 m/s 유속이 감소하였다. 마찬가지로 호안 블록의 형상에 따라 굴곡 사이사이의 국부적으로 유속의 변화가 있었으나 하도 중앙에서의 유속은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 호안 블록의 형상에 따라 유속 증가 위치 및 분포는 다르나 호안부 유속은 감소하는 것으로 나타났다.

호안부의 전단응력 검토결과, 저유량 조건일 경우 전단응력 변화는 미미한 것으로 분석되었다. 반면에 고유량 조건의 경우 전단응력이 1,258~1,332 Pa 감소하는 것으로 나타났다. 기본 하도 흐름에서는 호안부 전구간에서 300~800 Pa, 바닥부에서는 1,593 Pa로 나타났다. 호안블록을 설치하면 호안부에서 20~100 Pa, 바닥부에서는 약 80% 전단응력이 감소하는 것으로 나타났다. 호안블록에 의해 바닥부에서의 전단응력을 감소시킬 수 있다.

하도 내 호안 블록의 요철에 의한 난류흐름 발생으로 난류 에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 해당 부분은 유량과 관계없이 두 조건 모두 증가하는 것으로 나타났다. 호안블록은 각 안별로 유속, 전단응력, 압력분포의 변화를 나타내었다. 모두 형상 및 요철에 따라 유속의 증감은 국부적으로 발생하였고 전단응력은 바닥 및 호안부에서 크게 감소하는 것이 주요 특징이었다.

3. 결 론

기후변화로 인한 하천과 관련된 수재해에 대한 관심과 우려가 공존하는 가운데 다양한 분야에서 이에 대응하기 위해 많은 연구를 수행하고 있다. 그 중 하천 제방의 안전성 강화를 위한 비탈면 보강에 대한 연구가 활발하며 특히 순환자원을 재활용하여 호안블록을 제작하는 기술 등이 개발되고 있다. 재료적인 측면에서 제방 안전성 강화를 위한 호안블록은 호안블록 형상에 의해 제외지의 흐름특성에 어떠한 영향을 주는지 확인하는 절차가 꼭 필요하다. 따라서 본 연구에서는 호안블록의 형상에 따라 호안면의 유속 등 수리학적 특성의 영향을 3차원 수치모의를 통해 수행하였다.

호안 블록 형상은 자연석형 식생블록과 블록간 인터로킹(interlocking)이 가능한 2가지 형상의 블록을 제안하였고, 이를 국내의 대다수의 하천이 갖고 있는 1:2의 경사를 갖는 사다리꼴 단면형상에 설치하였다. 하천 단면과 지형조건을 배제하기 위하여 이상적인 하천 수로에 블록형상만을 변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 3차원 수치해석은 개수로 흐름에서 광범위하게 사용되는 FLOW-3D를 사용하였다. 제안한 호안블록은 재료의 비중과 형상, 규모가 다르기 때문에 호안블록의 탈락이나 균열 등의 거동이 다르지만 FLOW-3D에서는 비중의 변화를 적용할 수 없기 때문에 본 연구에서는 호안블록의 형상에 대한 부분만 검토하였다. 수치해석 결과, 자연석형 식생블록(블록 A)은 요철의 크기와 규모가 불규칙하여 호안에 연결하여 설치할 경우 호안블록 B, C보다 호안 설치구간의 유속변화가 가장 큰 것으로 분석되었다. 블록 B와 블록 C는 모두 오목형 반복패턴 형상으로 패턴에 따른 영향이 있고, 호안부의 유동에 변화가 있으나 흐름특성이 크게 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 제안한 호안의 블록 형상은 불규칙 형상(블록 A)와 규칙 형상(블록 B와 블록 C)으로 구분할 수 있다. 호안의 이탈 등과 관련된 전단응력의 경우 블록 설치에 의해 감소시킬 수 있으며 불규칙 형상인 블록 A가 가장 크게 감소되는 것으로 확인되었다. 또한 불규칙 형상인 블록 A는 호안에 연결하여 설치하는 경우 규칙 형상보다 유속변화가 큰 것으로 나타났다. 유속에 관해서는 반복되는 규칙적인 형상이 유속변화가 적은 것으로 나타났다. 그러나 국부적인 바닥 유속의 결과는 불규칙 형상인 블록 A에서 현저히 감소되는 것으로 보아, 수리안전성 측면에서는 불규칙 형상의 호안 설치가 유리한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 호안블록의 형상에 따라 최대유속, 호안부의 바닥유속, 최대 전단응력이 변하는 것을 확인하였다. 향후 지형적인 특성을 일반화하여 호안블록 형상과의 관계를 분석한다면 현장조건에 부합하는 호안블록 제작을 통해 호안블록에 의한 수리학적 영향을 최소화할 수 있을 것이며 이는 하천설계기준에 반영되어 호안 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실험을 통해 수치해석과 비교 검증된다면 설계 시 수치해석의 활용도도 높아질 수 있을 것이라 판단된다.

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (No. 2021R1A2C2013158).

References

Bae, Sang Soo, Chang Hwan Heo, Hong Kee Jee, and Soontak Lee. (2002). A Study on the Hydraulic Characteristics for River Bed Revetments Using Mattress. Journal of Korea Water Resources Association. 35(1): 77-90.

Carollo, F. G., V. Ferro, and D. Termini. (2005). Flow Resistance Law in Channels with Flexible Submerged Vegetation. Journal of Hydraulic Engineering. 131(7): 554-564.

Casas, B., I. Montavez, M. Bertran, E. Sanchis, and M. Fos. (2002). Evaluation of Different Erosion Control Covers in the Revegetation of Slope Areas. Proceedings of the 33rd Annual Conference, International Erosion Control Association (IECA), Orlando. 31-36.

Fukuoka, S., K. Fujita, and H. Nida. (1992). Prediction in Flood Water Level of River Courses with Vegetation. Doboku

Gakkai Ronbunshu. 1992(447): 17-24.

Järvelä, J. (2002). Flow Resistance of Flexible and Stiff Vegetation: A Flume Study with Natural Plants. Journal of Hydrology. 269(1-2): 44-54.

Kim, Sung-Jung and Myounghwan Kim. (2022). Evaluation of Hydraulic Stability of Biodegradable Vegetation Revetment Block. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 23(12): 23-31.

Korea Meteorological Administration. (2020). Extreme Weather Report. Daejeon: KMA.

Lee, Du Han and Myounghwan Kim. (2020). Evaluation of Critical Tractive Forces of Vegetation Mats Enhanced with Biopolymer Mixed Soil. Journal of Korea Water Resources Association. 53(3): 167-179.

Lee, Du Han, Dong-Hee Kim, Myounghwan Kim, and Dong Sop Rhee. (2012). A Real Scale Experimental Study for Evaluation of Permissible Shear Stresses on Vegetation Mats. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 13(12): 6151-6158.

McCullah, J. and V. Howard. (2000). Shasta College Erosion Control Blanket Study. Land and Water. 44(5): 21-25.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2016). River Construction Design Practice Tips. Sejong: MOLIT.

Ministry of the Interior and Safety. (2021). Statistical Yearbook 2021. Sejong: MOIS.

National Disaster and Safety Portal. (2022). Natural Disaster Situation Statistics (https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/sfk/cs/sfc/tot/toteaiList.jsp?emgPage=Y&menuSeq=111). Sejong: MOIS.

U.S. Army Corps of Engineers. (2006). Levee Certification for the National Flood Insurance Program (NFIP). Washington, D.C.: USACE.

Korean References Translated from the English

국민재난안전포털 (2022). 자연재난상황통계(https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/sfk/cs/sfc/tot/toteaiList.jsp?emgPage=Y&menuSeq=111). 세종: 국민재난안전포털.

국토교통부 (2016). 하천공사 설계실무 요령. 세종: 국토교통부.

기상청 (2020). 2020년 이상기후 보고서. 대전: 기상청.

김성중, 김명환 (2022). 생분해성 식생호안블럭의 수리안정성 평가. 한국산학기술학회 논문지. 23(12): 23-31.

배상수, 허창환, 지홍기, 이순탁 (2002). 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성 연구. 한국수자원학회 논문집. 35(1): 77-90.

이두한, 김동희, 김명환, 이동섭 (2012). 식생매트 허용 소류력 평가를 위한 실규모 실험 연구. 한국산학기술학회 논문지. 13(12): 6151-6158.

이두한, 김명환 (2020). 바이오폴리머 혼합토와 결합된 식생매트의 한계 소류력 평가. 한국수자원학회 논문집. 53(3): 167-179.

행정안전부 (2021). 2021 행정안전통계연보. 세종: 행정안전부.