

## 스톤매트리스가 설치된 호안 내 식생둔덕의 안정성 연구\*

A Study on the Stability of Vegetation Mound Behind Stone Mattress along Revetment

Dong Woo Jang\*\*, Selenge Erdenesaikhan\*\*\*, Hyo Seon Park\*\*\*\*,

Gye Woon Choi\*\*\*\*\*, Dong Wook Kim\*\*\*\*\*

Department of Civil & Environmental Engineering, Room 509, College of Engineering, 119 Academy-ro  
Yeonsu-gu, Incheon, Korea

### Abstract

In this study, the hydraulic model experiment and numerical analysis were conducted to evaluate the stability of vegetation mound behind a stone mattress and hydraulic characteristics of the revetment. To produce critical scenario which adds serious instability on Vegetation Mound behind a stone mattress in our hydraulic model experimental tests, a strong supercritical flow having a Froude number of 2 was exposed to the vegetation mound. During the tests, the depth and velocity distribution of flowing water nearby vegetation mound were measured. The water flow velocity near the vegetation mound behind a stone mattress decreased approximately by 50% compared to the central section. Despite of the unfavorable condition, the vegetation mound was still safe. In addition, additional numerical analysis was performed producing a condition of overflows over the Stone mattress. From the analysis results, it was found that the determination of stone mattress's height based on the flood levels is important in order to protect the vegetation mound.

**Key words:** Stone mattress, Vegetation mound, Revetment, Hydraulic experiment, ANSYS FLUENT

---

\* 이 논문은 환경부 Eco-STAR project(수생태복원사업단)의 지원으로 수행되었음.

\*\* Tel. +82-32-850-5720. Fax. +82-32-851-5730, E-mail. nightray@paran.com

\*\*\* Tel. +82-32-835-4760. E-mail. seke\_0675@nate.com

\*\*\*\* Tel. +82-32-835-4760. E-mail. kokomanara84@naver.com

\*\*\*\*\* Corresponding author. Tel. +82-32-835-4760. E-mail. gyewoon@incheon.ac.kr

\*\*\*\*\* Tel. +82-32-835-8461. E-mail. dwkim@incheon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: May. 2, 2014 / Revised: May. 24, 2014 / Accepted: May. 29, 2014

### 국문초록

이 연구에서는 수리모형실험과 수치모형실험을 통하여 스톤매트리스와 식생둔덕이 설치된 호안의 흐름특성을 분석하고, 식생둔덕의 안정성을 판단하였다. 프루드 수가 2.0 정도인 강한 사류흐름에서 스톤매트리스에 의해 보호를 받는 식생둔덕의 활착 여부를 실험을 통해 확인하였고, 식생둔덕 주변의 수위, 유속분포를 제시하였다. 연구 결과, 스톤매트리스 하류부에 위치한 식생둔덕에서의 흐름특성은 스톤매트리스를 월류하지 않는 수심조건에서 수로 중앙부 유속보다 50%이상 낮게 나타나 식생둔덕 주변에서 안전구역이 형성되는 것을 확인하였다. 또한 수치 해석 결과를 통해 스톤매트리스를 월류하는 수심조건에서는 식생둔덕 주변에서 강한 흐름이 유지되어 홍수시 실제 하천에서 식생둔덕을 보호하기 위해서는 홍수위에 따라 스톤매트리스 높이를 결정해야 할 것으로 판단되었다.

**주제어:** 스톤매트리스, 식생둔덕, 호안, 수리모형실험, ANSYS FLUENT

## 1. 서론

기존의 하천관련 공사는 효율적인 정비를 목적으로 진행되어 왔으며, 하천의 생태적 요소보다는 이·치수적 요소의 개선이 강조되었다. 그 결과 국내에 있는 하천 중에서도 특히 도심하천은 획일적으로 조성되어 왔고, 하천의 생태적 기능이 크게 훼손됨에 따라 이제는 수리적 안정성과 함께 생태적 건강성이 확보된 기술이 요구되고 있는 실정이다(환경부, 2013).

그러나 최근에 개발된 다양한 생태복원공법은 충분한 기술적인 검토가 부족하여 각 공법에 대한 구조적, 수리적인 안정성 검토와 식생 활착성 등이 제대로 평가되고 있지 않고 있다(김진홍, 2006). 제방 및 하상침식을 방지하기 위한 국내의 호안 블록은 치수성 및 생태적 중요성에도 불구하고, 이론이나 기초적인 실험에 의하여 개발된 것이 아니고 경험 및 모방에 의해 개발되어 수리 실험에 의해 특성이 제시된 경우가 부족하다(이정우, 2012).

국내에서 수행된 호안과 관련된 연구는 주로 수리학적 안정성을 평가하기 위하여 수리모형실험과 수치모형을 이용한 연구가 진행되었다(한만신, 2012). 특히 수리모형실험은 실물과 상사로 되어 있는 모형에 물을 흘려서 실물과 똑같은 수리현상을 얻음으로써 목적에 부합한 결과를 획득하기 위한 연구 방법이다. 즉, 복잡한 자연현상을 예상할 수 없는 경우 상사법칙에 따라 수류를 상·하류부에 있어서 경계조건에 맞는 물을 흐르게 하여 실물의 축적으로 된 흐름이 모형에 생기도록 만드는 것으로 호안과 수리, 수문, 분류와 합류, 우수지, 사행 등에 적용되어 원형의 현상을 예상하는 것이다(최계운 2011).

관련 연구사례로 한만신 외(2012)은 수리실험을 통해 하천 정비사업 구간의 사행유도방안에 대해 스톤매트리스를 적용하는 방안을 제시하였고, 호안 공법의 배열에 따른 사행화 영향 정도를 분석하였다. 또한 스톤매트리스와 같은 강성 소재에 대한 안전지역을 제시하여 호안기법을 통한 영향범위를 제시하였다.

호안 내 식생에 대한 연구로 Wilson, et. al.(2003)은 침수식물이 서식중인 식생에 의한 유속 변화를

분석하였으며, 식물의 항력 계수와 줄기의 밀도사이의 상관관계를 도출하였다. Recio와 Oumeraci(2007)는 GSCs(Geotextile Sand Containers)의 변형이 발생하거나 파괴가 관측되는 연동된 과정 및 효과를 설명할 수 있는 안정성 방정식은 없다고 하였고, GSCs로 만들어진 구조물의 안정성 평가를 위하여 모래주머니에 작용하는 파랑에 의한 힘, 주머니 안 모래의 내부 모멘트, 변형을 이해할 수 있는 근본적인 과정을 수리실험을 수행하여 증명하였다.

Darby, *et. al.*(1996)은 단면의 기하학적 형태와 하도(법면) 경사, 하상재료 및 수변 특성을 가지는 하도에 대하여 수위-유량관계곡선을 계산하기 위한 물리기반모형을 제시하였다. Salikov(1987)는 수치 모의에 의한 분석 및 수체의 하류부 재순환 영역에 대하여 연구를 하였으며 불투과수체의 길이를 결정하는데 있어서 흐름의 집중과 제방보호 길이를 고려하여 25% 이내로 제안한다고 하였다.

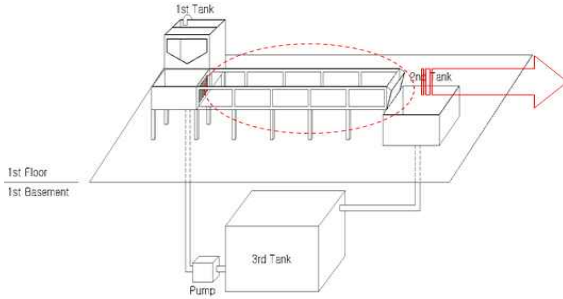
스톤매트리스 공법은 하천의 호안, 하상보호시설, 밑다짐 등 여러 가지 장소에 자연석을 하천내에 설치하여 제방보호와 친환경공간의 조성을 유도하는 공법이다. 일정크기의 사석을 설치하면서 공극을 발생시키고, 그 공극을 통하여 동식물의 서식환경을 조성할 뿐만 아니라 스톤매트리스 하류부에 안전 구역을 제공하여 식생활착시 자연 친화성을 높이고 안정적으로 식생이 유지되도록 돕는 역할을 한다.

이 연구에서는 스톤매트리스에 의한 식생둔덕의 안정성을 확인하고자 수리실험장치 내에 스톤매트리스와 식생둔덕을 생태안착형 입체호안공법 설계지침에 따라 설치하였고, 홍수시와 같이 강한 유속 조건을 구현하기 위해 실험장 내 수로에서의 하류수위를 최대한 낮추어 프루드 수가 1~2 정도의 사류흐름을 구현하였다. 강유속이 흐르는 흐름조건에서 식생둔덕주변의 수리학적 특성을 분석하여 식생둔덕의 안정성 확보여부를 연구하였다. 또한 3차원 수치모델인 ANSYS FLUENT 모델을 이용하여 스톤매트리스와 식생둔덕 주변에서의 상세유속을 검토하였다.

## II. 수리모형 실험

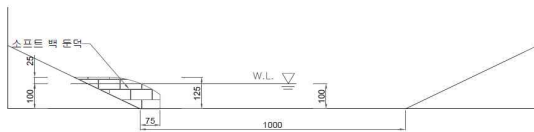
### 1. 실험장치의 구성

소프트 백이 분해 후 식생이 활착 시 둔덕의 안정성 검토 수리성능실험을 진행하기 위해 직강화된 하천의 일부 구간을 적용하여 길이 20 m, 폭 2 m, 수로 높이 1 m의 개수로 장치 <그림 1>을 이용하였다.

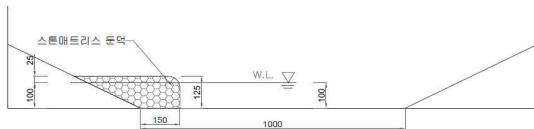


<그림 1> 수리실험장 모습

개수로 장치 내에 1:2(V:H) 경사를 갖는 호안을 양측으로 설치하였으며, 개수로 바닥의 폭을 100cm로 하였고, 호안의 제원은 폭 50cm, 높이 25cm로 하였다. 수리모형실험용 식생모형(넓이 40cm, 길이 33cm, 높이 12.5cm, 돌출부 7.5cm) 및 스톤매트리스(넓이 30cm, 길이 40cm, 높이 12.5cm, 돌출부 15cm)를 제작하였다. 스톤매트리스와 식생둔덕의 제원은 자연하안 창출 및 하안변화 유도기술 개발 중 인천대학교에서 개발한 생태안착형 입체호안공법 설계지침에 의거하여 제원을 결정하였고, 1/5 축소하여 <그림 2>와 같이 실험수로 내에 설치하였다.



(A) 식생둔덕의 단면



(B) 스톤매트리스의 단면



(C) 스톤매트리스와 식생둔덕의 설치 모습

<그림 2> 스톤매트리스와 식생둔덕의 설치

수심과 유속측정은 포인트 게이지와 3차원 유속계를 사용하였다. 0.1 mm 까지 측정이 가능한 포인트 게이지를 사용하여 수심을 측정하였으며, 3차원 유속계를 이용하여 x, y, z 방향의 10초 평균 유속 값을 백터로 환산하여 유속을 산정하였다. 물을 유입시키는 펌프는 개당 50마력의 용량을 갖는 펌프 3대를 이용하였고, 밸브 작동을 통해 유량 조작이 가능하도록 하였다.

## 2. 실험 조건 및 방법

개수로 내 실제적인 하천 호안 모형을 제작하기 위해 개수로 경사에 인공 소프트 백 둔덕이 설치된 조건과 소프트 백이 자연분해 후 식생이 활착된 조건을 가정하여 실험 조건을 선정하였다. 개수로 내 스톤매트리스 및 소프트 백 축척을 5:1로 축소 제작한 후 수심조건을 스톤매트리스 둔덕의 높이 (12.5cm)를 기준으로 스톤매트리스를 월류하지 않는 평수위 조건인 5cm, 10cm와 스톤매트리스를 월류하는 홍수위 조건인 13cm, 15cm로 나누어 실험조건을 선정하였고, 실험조건 별 유량은 하단부 흐름에 방해가 없는 자유방류조건으로 실험 Case 별 최고유속이 발생하는 유량을 <표 1>과 같이 선정하였다.

<표 1> 실험 조건

| 실험 Case | 스톤매트리스 구간에서의 수심 | 수심 조건 | 유량조건(Q)               |
|---------|-----------------|-------|-----------------------|
| Case 1  | 5cm             | 평수심   | 0.04m <sup>3</sup> /s |
| Case 2  | 10cm            |       | 0.07m <sup>3</sup> /s |
| Case 3  | 13cm            | 홍수심   | 0.14m <sup>3</sup> /s |
| Case 4  | 15cm            |       | 0.19m <sup>3</sup> /s |

### III. 수치모형실험

수리모형실험의 경우 구조물 주변의 복잡한 흐름 거동을 상세히 파악하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 3차원 수치모델인 ANSYS FLUENT 15.0을 이용하여 스톤매트리스와 식생둔덕 주변의 상세유속을 검토하였다.

ANSYS FLUENT 15.0은 복잡한 형상주위의 난류 유동과 열전달 문제를 해석하기 위해 개발된 범용 CFD 프로그램이다. FLUENT는 유동문제를 해석하는데 있어서 복잡한 형상문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있도록 격자망(mesh) 유연성을 가지고 있다. 유동해석에 적합한 격자를 배열하여 자유전단면과 경계층과 같은 큰 변화를 가지는 유동영역을 정확히 예측하는데 초점을 두고 수치해석을 수행하였다.

#### 1. FLUENT의 기본이론

FLUENT의 유동계산부는 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식과 난류 모델링 방정식을 수치적으로 풀어나간다. 직각격자(Cartesian coordinate) 상에서 평균류의 연속방정식 및 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $U_i$ 는 평균유속,  $P$ 는 압력,  $g_i$ 는 중력가속도,  $t$ 는 시간,  $x_i$ 는 Cartesian 좌표, 그리고  $\mu_{eff}$ 는 유효점도이다. 유효점도( $\mu_{eff}$ )는 분자점도( $\mu$ )와 난류점도( $\mu_i$ )의 합으로 정의된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_i \quad (3)$$

표준  $k-\epsilon$  난류모델의 경우 난류점도는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서,  $k$ 는 단위질량당 난류운동에너지,  $\epsilon$ 는 에너지 소산율, 그리고  $C_\mu$ 는 실험상수이다.  $k$ 와  $\epsilon$  값은 다음 이송방정식을 풀음으로써 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $\sigma_k$  그리고  $\sigma_\epsilon$ 은 모두 실험상수이다. 일반적으로 사용되는 이들 상수값은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

유동계산부는 식 (1), (2), (5) 및 (6)을 공간에 대해 검사체적법(control volume method)을 그리고 시간에 대해 음해법(implicit method)을 사용하여 각각 차분한다. 그리고 차분화된 방정식은 다양한 알고리즘을 통해 수치적으로 풀어진다(배석한, 2003).

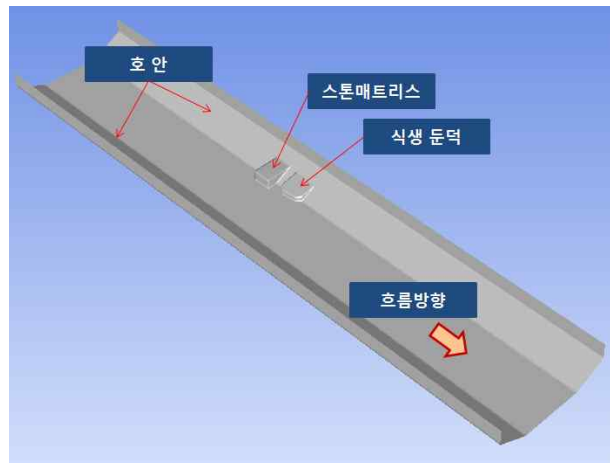
## 2. 수치모형 구축

수치모형실험은 상·하류 경계조건, 지형 등 수치모형실험과 동일한 조건을 적용하여 구축, 모의 하였으며 실험조건은 2.2절의 <표 1>과 같다. 수치모형실험을 통해 스톤매트리스에 영향을 받는 식생단덕 주변의 흐름특성을 규명하고, 수치해석의 결과를 통해 보다 상세한 유속 분포를 확인하는 방법으

로 연구를 진행하였다. 수치해석을 수행하기 위해서는 하도와 호안, 스톤매트리스와 식생둔덕의 지형(geometry) 및 격자망(mesh)을 생성하는 과정이 선행되어야 하며, 이 과정은 ANSYS DESIGN MODELER 프로그램을 이용하였다. 지형과 격자망 생성과정을 거친 후 ANSYS FLUENT 15.0 난류 해석 프로그램으로 해석하였다.

## 1) Geometry의 구성

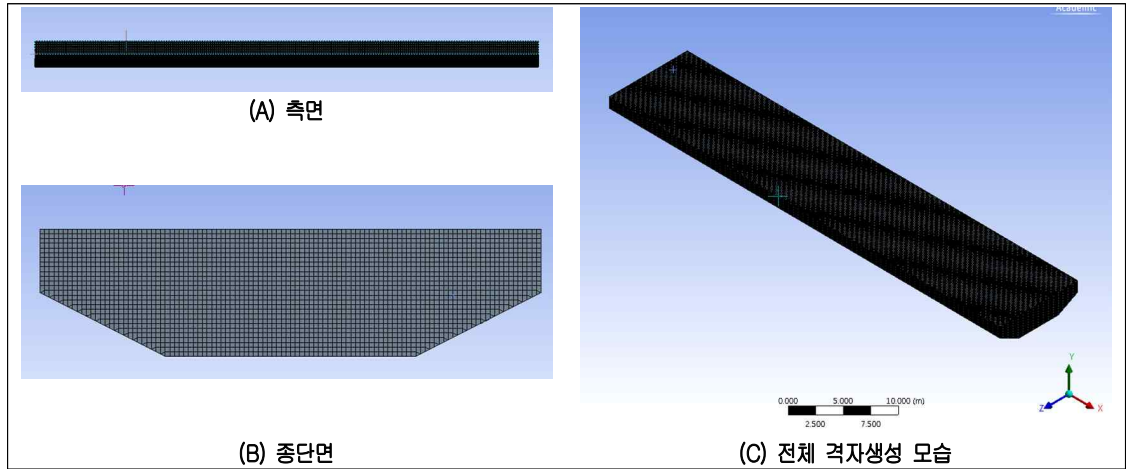
Geometry는 Point, Curve, Surface 로 구성되며 수리모형실험 규모와 동일한 사이즈로 종단과 횡단을 분석하였고, Point와 Curve 설정 후 구조물과 유체를 구분할 Surface를 생성하여 Geometry를 구축하였다. 완성된 수로 내 호안과 스톤매트리스, 식생둔덕의 모습을 <그림 3>에 제시하였다.



<그림 3> 지형 생성

## 2) 격자망(Mesh)의 구성

격자망은 모델 내 해석영역을 설정하기 위해 사용된다. 격자망의 구성은 구조물의 크기를 고려하여 선정하였고, 본 연구에서는 물과 접촉하게 되는 바닥과 호안면 부분에 격자 간 흐름에 대한 정보전달을 원활히 하기 위하여 격자망 크기를 조밀하게 구성하였다. 격자망의 개수는 총 1,367,521개로 최소 2.1cm 크기의 가변격자로 구성하였다. 격자망 형식은 사각 격자망인 Cutcell 형식을 채택하여 난류 흐름을 원활히 분석할 수 있도록 하였다. 구성된 격자망은 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 격자망 생성

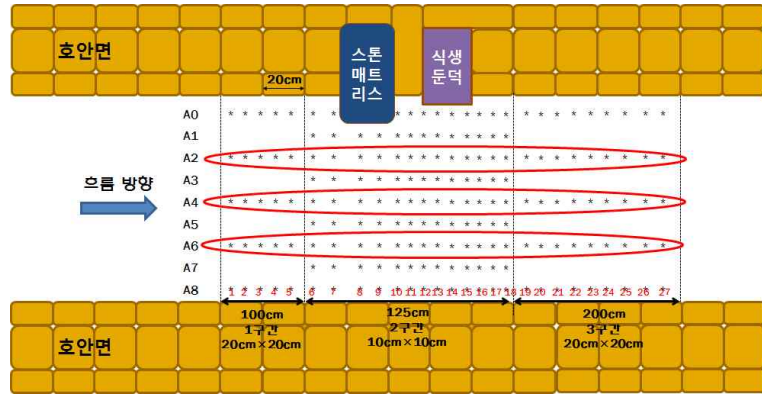
#### IV. 시험결과 및 고찰

##### 1. 수리실험 결과

2.2절의 <표 1>과 같이 개수로내 수심조건을 스톤매트리스를 월류하지 않는 평수심 조건과 월류되는 홍수심 조건에 대한 흐름 특성을 분석하기 위하여 수로 중앙부, 식생둔덕 주변, 스톤매트리스 전·후 흐름에서의 수심과 유속측정값을 비교하고, 프루드 수를 산정하였다. 수리모형실험 결과 분석을 통해 식생둔덕의 안정성을 검토하였다.

##### 1) 수로 중앙부 흐름 비교

개수로 내 측정 지점은 상류인 1구간, 스톤매트리스와 식생둔덕이 설치된 2구간, 하류부인 3구간으로 구분하여 <그림 5>와 같이 표시된 측정지점에 따라 수로 중앙부의 수위와 유속을 측정하였다. 전체 1~27번 측정지점 중 식생둔덕은 13~15번, 스톤매트리스는 8, 9번 구간에 위치하고 있다.



<그림 5> 수로 중앙부의 측정 지점

스톤매트리스가 설치된 호안에서 20cm, 40cm, 60cm 만큼 떨어진 A2, A4, A6 구간의 최대수심 및 최대유속, 프루드 수를 분석하여 <표 2>와 같이 나타내었다.

<표 2> 실험 조건별 최대 유속, 수심, 프루드 수의 비교

| 실험 조건  | 측정 구간 | 유량 조건 (m <sup>3</sup> /s) | 유속 (m/s) | 수심 (m) | 프루드 수 | 비고               |                 |
|--------|-------|---------------------------|----------|--------|-------|------------------|-----------------|
| Case 1 | A2    | 0.04                      | 1.529    | 0.067  | 1.89  | 스톤매트리스<br>비월류 조건 |                 |
|        | A4    |                           | 1.495    | 0.066  | 1.86  |                  |                 |
|        | A6    |                           | 1.594    | 0.067  | 1.97  |                  |                 |
| Case 2 | A2    | 0.07                      | 1.914    | 0.128  | 1.71  |                  | 스톤매트리스<br>월류 조건 |
|        | A4    |                           | 1.906    | 0.111  | 1.83  |                  |                 |
|        | A6    |                           | 1.783    | 0.125  | 1.61  |                  |                 |
| Case 3 | A2    | 0.14                      | 1.928    | 0.149  | 1.59  | 스톤매트리스<br>월류 조건  |                 |
|        | A4    |                           | 1.942    | 0.141  | 1.65  |                  |                 |
|        | A6    |                           | 1.885    | 0.148  | 1.56  |                  |                 |
| Case 4 | A2    | 0.19                      | 2.005    | 0.166  | 1.57  |                  | 스톤매트리스<br>월류 조건 |
|        | A4    |                           | 1.992    | 0.162  | 1.58  |                  |                 |
|        | A6    |                           | 1.945    | 0.181  | 1.46  |                  |                 |

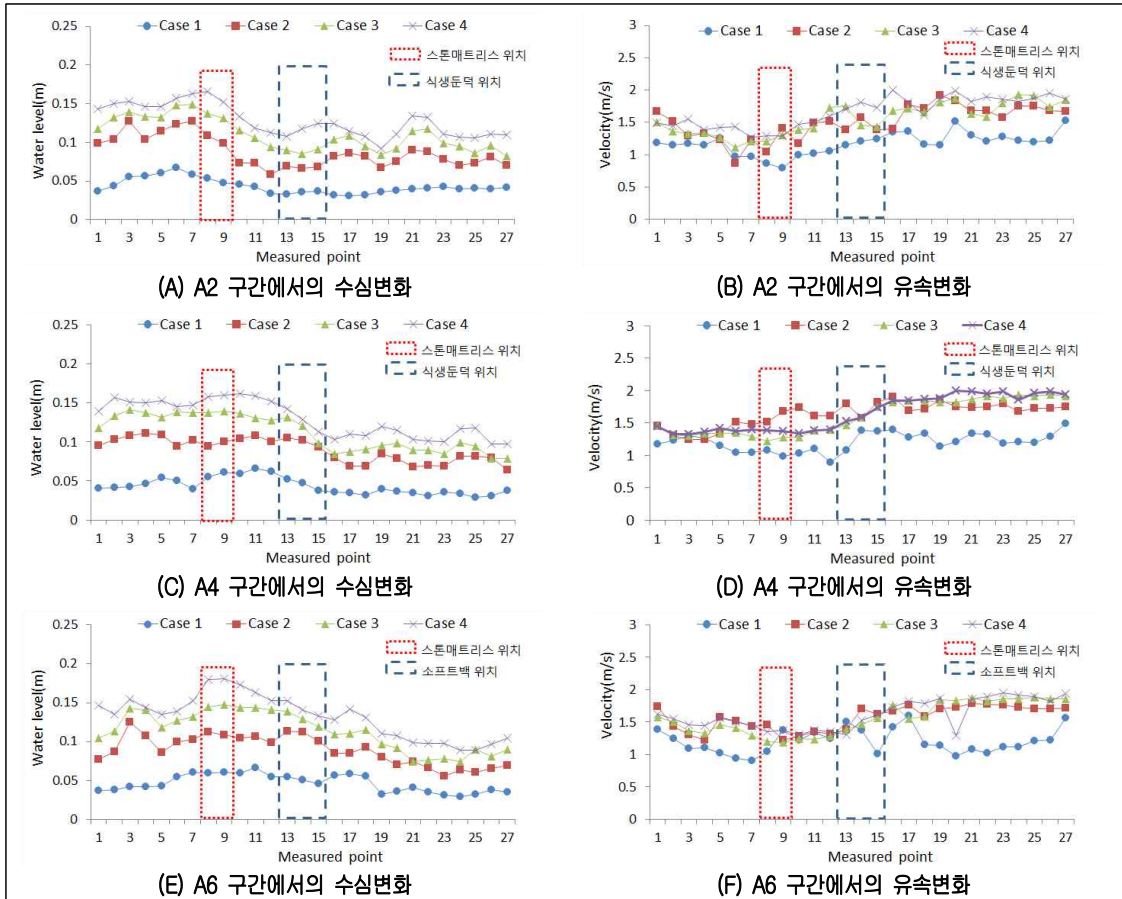
4개의 실험조건을 비교한 결과 최대유량조건인 Case 4에서 최대 2.0 m/s의 유속이 나타났고, 프루드 수는 수심조건이 낮은 Case 1에서 1.97로 나타났다. A2, A4, A6 구간의 유속, 수심, 프루드 수 검토 결과 모든 실험조건에서 15% 이내의 값으로 나타나 수로 중앙부의 흐름특성은 유사한 것으로 나타났다. 프루드 수의 경우 1.46~1.97 범위로 사류의 흐름을 나타내고 있다.

스톤매트리스를 월류하지 않는 조건인 Case 1, Case 2의 경우 스톤매트리스를 월류하는 Case 3, Case 4 조건에 비해 유속은 13% 정도 낮지만, 프루드 수는 15% 정도 높은 것으로 나타나 관성력의 영향이 흐름에 더 크게 작용하는 것으로 나타났다.

A2, A4, A6 구간의 수심 및 유속 변화는 <그림 6>과 같다. 모든 실험조건에 대하여 비교하여 나타냈으며 스톤매트리스와 식생둔덕이 위치한 구간을 그래프에 표시하였다.

평수심과 홍수심의 모든 실험조건에서 스톤매트리스 설치된 전단부에서 단면 축소에 의해 수심이

높아지고, 스톤매트리스의 하류구간 부터는 유속이 점차 증가되는 것으로 나타났다. A2, A4, A6 구간 모두 스톤매트리스 구간까지 수심이 점차 증가하였고, 스톤매트리스 구간을 지나고 나서 수심이 감소하면서 유속은 증가하는 경향이 모든 실험조건에서 나타났다. 특히 스톤매트리스와 식생둔덕에 인접한 A2 구간에서 스톤매트리스 구간 이후 수심이 급격히 감소하였다.



<그림 6> A2, A4, A6 구간의 수심, 유속 변화

## 2) 식생둔덕 구간의 흐름 비교

식생둔덕 구간의 흐름 비교를 위하여 <그림 7>에서 표시된 구간의 수심 및 유속을 각 실험조건 별로 분석하였으며 식생둔덕 지점인 A0, 식생둔덕에서 20cm 떨어진 A2, 식생둔덕에서 40cm 떨어진 A4에서의 평균유속 및 수심은 <표 3>과 같다.



<그림 7> 식생둔덕 구간에서의 측정 지점

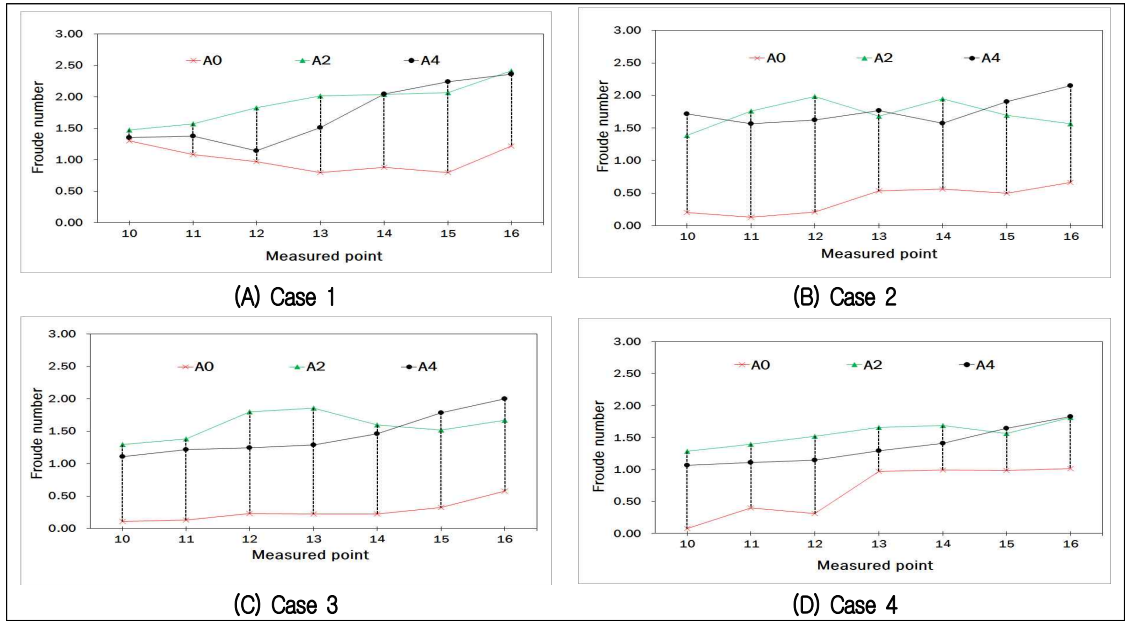
<표 3>은 A0, A2, A4 구간에서의 평균 수심, 유속, 프루드 수를 산정한 결과이다.

<표 3> 식생둔덕 구간에서의 평균수심과 유속 비교

| 실험 조건  | 측정 구간 | 수심(m) |           | 유속(m/s) |           | 프루드 수 |           |
|--------|-------|-------|-----------|---------|-----------|-------|-----------|
|        |       | 평균값   | A0구간과의 차이 | 평균값     | A0구간과의 차이 | 평균값   | A0구간과의 차이 |
| Case 1 | A0    | 0.031 | -         | 0.549   | -         | 1.01  | -         |
|        | A2    | 0.037 | 19%       | 1.146   | 109%      | 1.92  | 90%       |
|        | A4    | 0.051 | 65%       | 1.182   | 115%      | 1.72  | 70%       |
| Case 2 | A0    | 0.066 | -         | 0.328   | -         | 0.4   | -         |
|        | A2    | 0.07  | 6%        | 1.416   | 332%      | 1.72  | 330%      |
|        | A4    | 0.099 | 50%       | 1.721   | 425%      | 1.76  | 340%      |
| Case 3 | A0    | 0.091 | -         | 0.246   | -         | 0.26  | -         |
|        | A2    | 0.098 | 8%        | 1.55    | 530%      | 1.59  | 512%      |
|        | A4    | 0.119 | 31%       | 1.527   | 521%      | 1.44  | 454%      |
| Case 4 | A0    | 0.109 | -         | 0.696   | -         | 0.68  | -         |
|        | A2    | 0.12  | 10%       | 1.69    | 143%      | 1.56  | 129%      |
|        | A4    | 0.137 | 26%       | 1.544   | 122%      | 1.36  | 100%      |

모든 실험조건에서 식생둔덕구간(A0)에서의 수심, 유속, 프루드 수는 수로 중심부(A2, A4)에 비해 낮은 값을 보였다. 수심에 경우 스톤매트리스를 월류하지 않는 Case 1, Case 2에서 수심차이가 50% 이내로 나타났고, 유속차이는 65% 이내로 나타났다. 스톤매트리스를 월류하는 Case 3, Case 4에서의 수심은 최대 31%, 유속은 최대 500% 이상으로 유량 증가에 따라 식생둔덕주변과 수로 중심부의 유속 차이가 더 큰 것으로 나타났다.

A0, A2, A4 구간에서 식생둔덕 주변의 프루드 수 변화를 <그림 8>과 같이 나타내었다.



<그림 8> 식생둔덕 구간의 프루드 수 변화

Case 1과 Case 4의 일부구간을 제외하고, A0에서의 프루드 수는 1 이하로 나타나 상류흐름을 보이고 있으며 A2, A4구간에서의 프루드 수는 1 이상으로 하류흐름을 보이고 있다. 스톤매트리스를 월류하여 흐르는 Case 4의 경우 A0, A2, A4 구간 간의 프루드 수 차이가 가장 적게 나타나 스톤매트리스 월류유량이 프루드 수에 영향을 끼친 것으로 판단된다. 전반적으로 A2, A4에서의 프루드 수는 A0에 비해 높은값을 나타내고 있으며, 스톤매트리스에 의해 흐름 저감효과가 A0 구간에서 부각되는 것으로 판단된다.

<그림 9>는 스톤매트리스에서의 수심이 15cm인 조건에서 식생둔덕 주변의 흐름모습이다. 수로 중심부에 빠른 흐름이 나타나고 있지만 스톤매트리스의 영향으로 식생둔덕은 파괴되지 않고, 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다.



<그림 9> 식생둔덕 주변의 흐름 모습

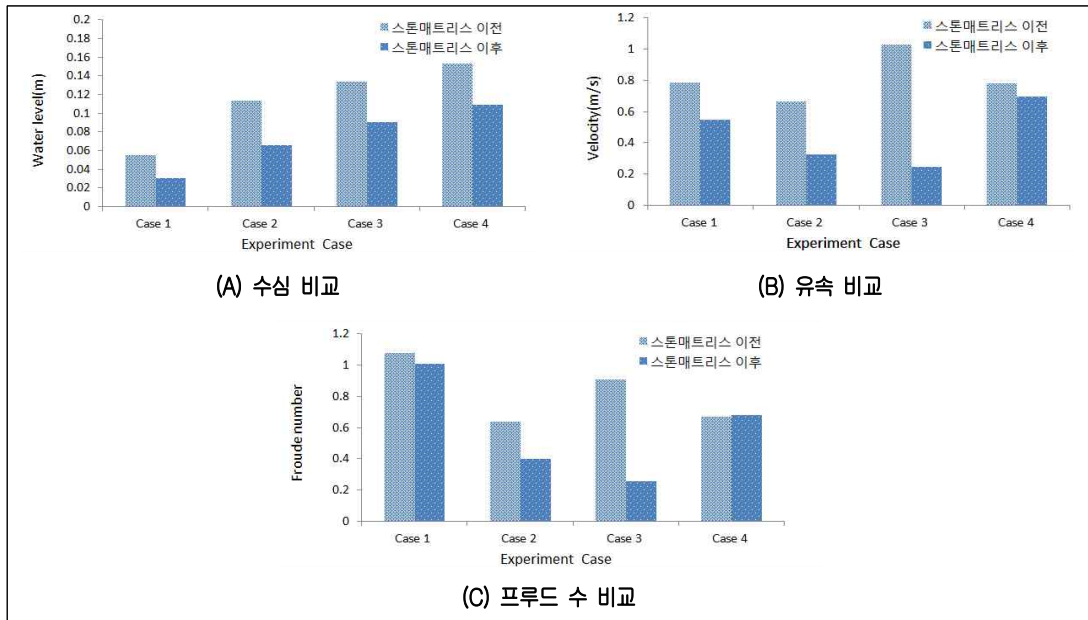
### 3) 스톤매트리스 전·후 흐름 비교

스톤매트리스에 의한 흐름영향을 상세히 분석하고자 <그림 10>에서 표시된 A0-1과 A0-2 구간의 수심 및 유속을 실험 조건별로 측정하였다. 스톤매트리스를 기준으로 A0-1은 상류부이고, A0-2는 하류부로 식생둔덕이 위치하고 있는 구간이다.



<그림 10> 스톤매트리스 전·후에서의 측정 지점

측정된 수심과 유속, 프루드 수를 실험조건별로 비교하여 <그림 11>과 같이 제시하였다.



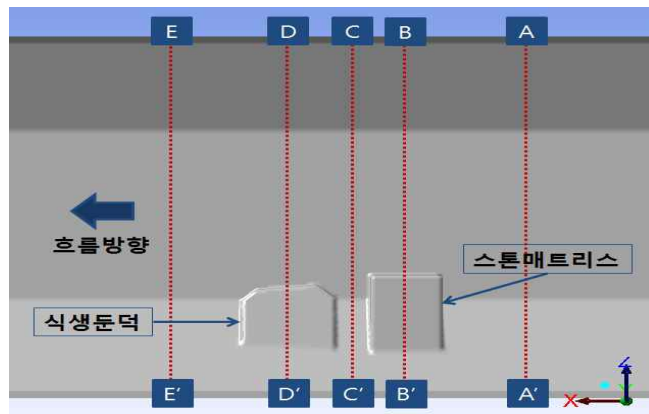
<그림 11> 스톤매트리스 전·후 구간에서의 실험조건별 수리학적 특성 비교

식생둔덕에서의 측정지점인 A0~A2 구간의 흐름은 스톤매트리스를 완전 월류하는 Case 4를 제외하고, 수심, 유속, 프루드 수가 모두 감소하는 것으로 나타났다. Cases 1~4의 유속은 각각 30%, 51%, 76%, 11%가 감소되었고, 프루드 수의 경우 Cases 1~3은 각각 6%, 38%, 71% 감소, Case 4는 1% 증가하는 것으로 나타났다.

스톤매트리스를 완전히 월류하는 조건에서는 프루드 수가 거의 영향을 받지 않고, 유지되기 때문에 실제 하천에 적용 시에는 홍수위를 고려하여 스톤매트리스가 설치되어야 식생둔덕의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

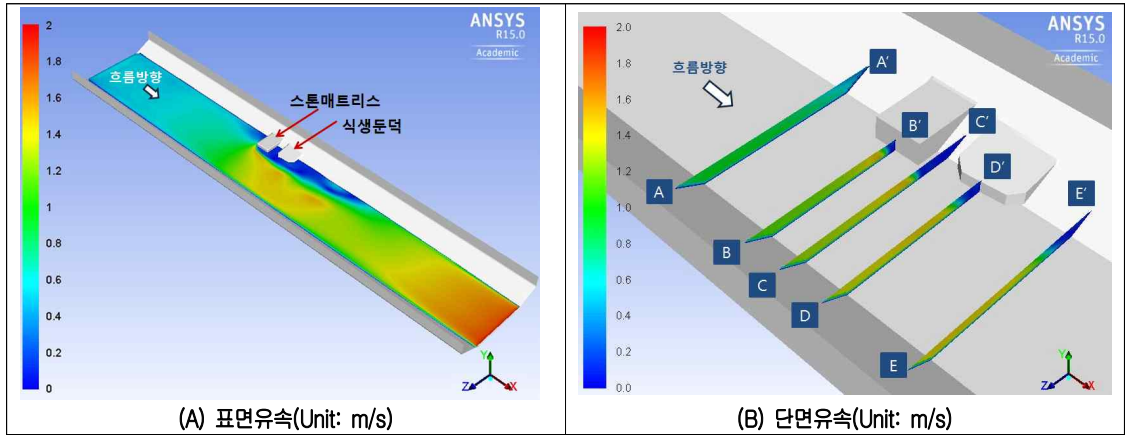
## 2. 수치실험 결과

호안에 설치된 스톤매트리스에 의한 식생둔덕 주변의 상세흐름을 분석하고자 ANSYS FLUENT 모형을 이용하여 수치실험과 동일한 모형을 구축한 후 동일한 유량 및 수위조건을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 식생둔덕에서의 안정성 검토는 둔덕 주변에서의 유속분포 해석이 가장 중요하므로 <그림 12>와 같이 수로내 5개의 단면(A~E)을 나누어 각 단면에서의 유속분포도를 통해 흐름을 분석하였다. 유속분포 색인은 2.0 m/s의 유속을 빨간색, 0.0 m/s의 유속을 파란색으로 표시하였다.

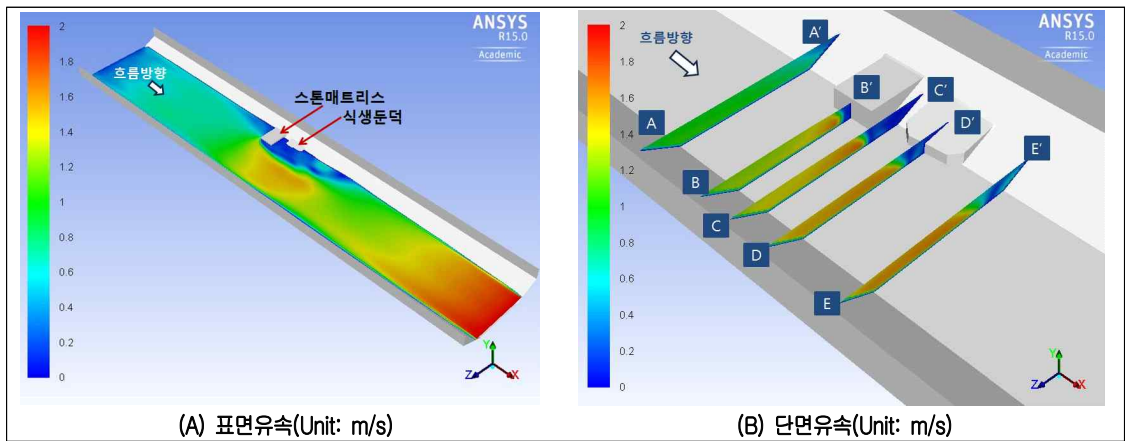


<그림 12> 유속 분석 단면

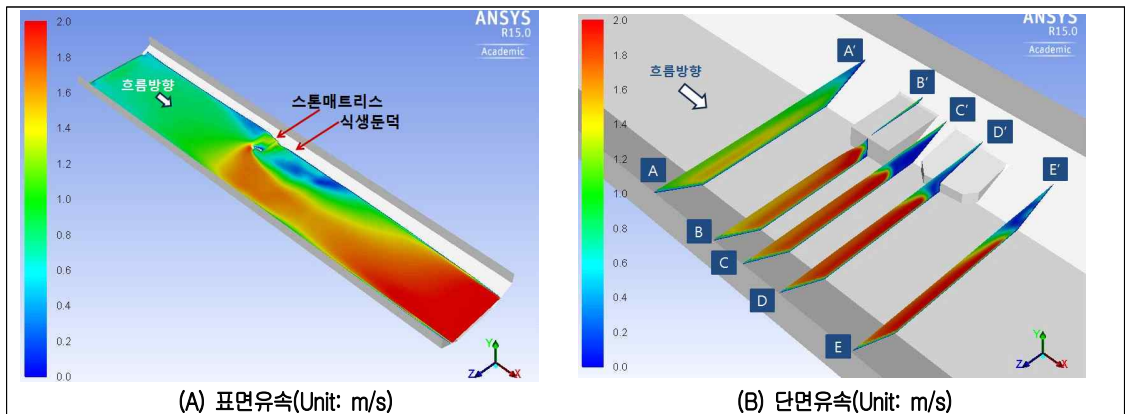
실험조건 별 호안 내 표면 유속과 식생둔덕 주변의 단면유속분포는 <그림 13>~<그림 16>과 같다.



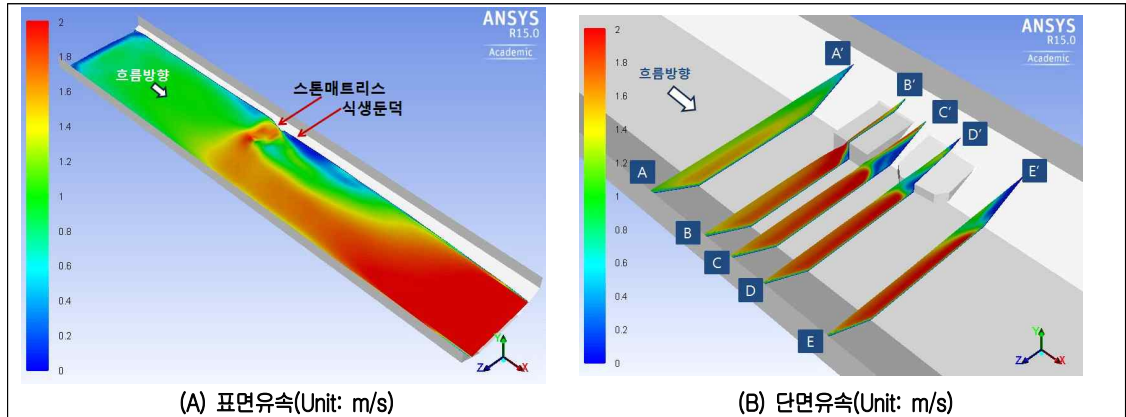
<그림 13> 5cm 수심조건에서의 유속분포(Case 1)



<그림 14> 10cm 수심조건에서의 유속분포(Case 2)



<그림 15> 13cm 수심조건에서의 유속분포(Case 3)



<그림 16> 15cm 수심조건에서의 유속분포(Case 4)

스톤매트리스를 월류하지 않는 Case 1과 Case 2에서는 스톤매트리스 벽면부, 식생둔덕 주위에서의 유속이 0.2 m/s 이하로 나타나 수로 중심부 유속보다 5배 이하로 저하된 것을 확인하였다. 스톤매트리스 월류조건인 Case 3, Case 4의 경우 스톤매트리스를 월류하며 발생하는 고유속이 식생의 상부 쪽에 영향을 미치며 특히 스톤매트리스에서의 월류량이 많은 Case 4의 경우 식생둔덕 측면과 상부에서 1.0 m/s 정도의 고유속이 유지되는 것으로 나타났다.

수치실험 결과를 통해 스톤매트리스를 월류하지 않는 조건에서는 식생둔덕 주변에서의 유속이 스톤매트리스에 의해 저감되어 식생둔덕에 대한 안정성이 확보될 것으로 보이며, 스톤매트리스를 월류하는 조건에서는 식생둔덕의 측면 및 상부에서 고유속이 유지될 수 있기 때문에 수위가 높은 홍수 시를 대비하여 스톤매트리스의 높이가 결정되어야 할 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 소프트 백이 분해 후 식생이 활착 시 둔덕의 안정성 검토 수리성능실험을 진행하기 위하여 스톤매트리스가 설치된 호안에서 소프트 백에 의해 식생이 활착된 조건과 소프트 백이 설치된 조건에서의 평수심과 홍수심으로 실험 조건을 구분하여 수리실험과 수치실험을 수행하였다. 스톤매트리스와 식생둔덕 주변의 수심 및 유속 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 하천의 호안에 스톤매트리스 둔덕이 설치될 경우 유수의 흐름 변화를 유도현상을 수리모형실험을 통하여 검증하기 위하여 수심조건을 스톤매트리스 둔덕의 높이를 기준으로 평수위와 홍수위 조건을 적용하여 실험한 결과, 모든 실험 조건에서 스톤매트리스 둔덕에 의해 수심이 낮아지고, 유속이 증가되었다. 수로중심부에서 최대 2.0 m/s의 유속조건, 프루드 수 2.0의 사류조건이 형성되었으나 식생 둔덕은 파괴되지 않고, 안정적으로 활착이 유지되는 것으로 나타났다.

둘째, 개수로 내에 설치된 스톤매트리스 둔덕의 영향으로 식생 둔덕의 주변부 유속은 개수로 중간 구간의 유속보다 50% 이상 낮게 나타나 둔덕 주변에서의 안정구역이 형성되는 것을 실험을 통해 증명되었다. 이에 따라 실제 하천에 적용 시 다양한 동·식물의 서식공간이 만들어져 생태적인 복원기능을 이루어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 호안면에서 스톤매트리스 전과 후의 흐름을 분석한 결과 스톤매트리스를 월류하지 않는 조건에서는 유속과 프루드 수 모두 스톤매트리스이후 저감되는 것을 확인하였다. 스톤매트리스를 월류하는 조건에서는 스톤매트리스 전과 후의 흐름특성이 유사한 것으로 나타나 식생둔덕을 보호하기 위해서는 홍수위를 감안하여 스톤매트리스의 높이를 결정해야 할 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

- 환경부. 2013. 자연하안 창출 및 인공하안 대체공법 개발. 수생태복원사업단 과제. 4단계 1차년도 최종 보고서. 세종: 환경부.
- 김진홍. 2006. 하천 호안공의 수리적 안정성 및 식생 활착성 평가. 한국수자원학회 학술발표회 초록집.
- 이정우. 2012. 블록호안의 안정성 평가방법에 관한 연구. 호남대학교 석사학위논문.
- 한만신, 최계운. 2012. 점착성 제방사면의 구간별 소류력 산정식 제안 및 적용. 한국수자원학회논문집. 45(6): 583-596.
- 최계운, 김동언, 윤근호, 한만신. 2011. 수질모형실험을 통한 인공수로와 호수에서 흐름유발시설 효과 검증 및 적용방법에 관한 연구. 한국수자원학회논문집. 44(6): 477-486.
- 한만신, 최계운, 이용현, 안상진. 2012. 자연 친화적인 하천 정비사업 구간의 사행 유도 방안. 한국수자원학회 학술발표회 초록집.
- 배석환, 정연철. 2003. FLUENT를 이용한 오일 붐 누유 모델링. 한국항해항만학회지. 27(2): 239-246
- Wilson, Catherine., T. Stoesser, P. D. Bates, and Pinzen A. Batemann. 2003. Open Channel Flow through Different Forms of Submerged Flexible Vegetation. *Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE*. 129(11): 847-853.
- Recio, Juan and Hocine Oumeraci. 2007. Effect of Deformations on the Hydraulic Stability of Coastal Structure made of Geotextile Sand Containers. *Geotextile and Geomembranes*. 25(4-5): 278-292.
- Darby, Stephen E. and Colin R. Thorne. 1996. Predicting Stage-discharge Curve in Channels with Bank Vegetation. *Journal of the Hydraulic Engineering, ASCE*. 122(10): 583-586.
- Salikov, V. G. 1987. Protection of Banks and Roadbeds from Erosion on River Nips. *Hydro-technical Construction*. 20(10): 575-580.

---

**장동우:** 인천대학교 토목환경공학과에서 석사학위를 취득한 후, 현재 인천대학교 건설환경공학과에서 박사과정으로 있으며 수자원, 수공학분야의 연구를 수행하고 있다(nightray@paran.com).

**Selenge Erdenesaikhan:** 인천대학교 건설환경공학과에서 석사과정으로 있으며 수자원, 환경 분야의 연구를 수행하고 있다(seke\_0675@nate.com).

**박효선:** 인천대학교 토목환경공학과에서 석사학위를 취득한 후, 인천대학교 건설환경공학과에서 박사 수료하였으며 기후변화, 수자원을 전공으로 하고 있다(kokomanara84@naver.com).

**최계운:** 콜로라도 주립대학교에서 박사학위를 취득한 후, 인천대학교 건설환경공학과 교수로 재직하였고, 현재 K-water 사장으로 활동 중이다(gyewoon@incheon.ac.kr).

**김동욱:** 퍼듀대학교에서 석사학위와 박사학위를 취득한 후, 인천대학교 건설환경공학과 조교수로 재직하고 있으며 지반분야 및 하천구조물 안전성에 관한 연구를 수행하고 있다(dwkim@incheon.ac.kr).