

# 완경사 하천에서 계단식 Mattress의 에너지 소산효과

## Effects of Energy-Dissipation by Stepped Mattress in Flat Slope River

김도훈<sup>\*</sup>, 장경수<sup>\*\*</sup>, 배상수<sup>\*\*\*</sup>, 지홍기<sup>\*\*\*\*</sup>

Do Hun Keum , Kyung Soo Jang, Sang Soo Bae, Hong Kee Jee

### 1. 서론

Mattress는 철망 내에 자갈 또는 석재를 채운 구조물로서 수로바닥의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. Mattress 철망은 세굴이 발생하는 수로에서 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에 저항력을 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. Mattress는 다공체로서 유수력을 쉽게 흡수함으로써 감세지 계단표면의 위치에너지를 소산시키는데 매우 효과적이다. Stephenson은 1/10 축적을 가진(투수성이 있고 하천낙차공에만 적용되는 투수성 상류면을 가진 높이 4m까지의) 계단식 Mattress를 월류 실험한 바가 있으며, 그 연구결과가 실무에서 인용되고 있다.

### 2. 실험 조건

본 실험에서는 완경사의 에너지 소산효과를 조사하기 위하여 중력이 다른 힘들보다 지배적이므로 Froude 상사법칙을 이용하였다. Mattress는 20mm×30mm의 0.7mm 철선으로 만든 육각형 눈금을 가진 망에 30~50mm 크기의 돌로 채운 20cm×30cm×60cm 크기로 만들었다. 실험은 60cm폭의 경사수로 내부에 여수로의 형상당 유량을 50~250 l/sec까지 모형실험을 하였다. 모형은 <그림 1>과 같이 1/1, 1/2, 1/3 경사를 가진 계단을 적용하였다.

계단모형실험은 그림 2와 같이 (a)보통구조 (b)층상구조 (c)끝단이 올라간 구조 (d)턱을 가진 구조 등으로 나누어 실험하였다.

바닥  $E_0$ 에서의 전체 초기수두는 흐름의 전체 계단에서 계산되며 식(1)에서 계산된다.

$$E_0 = H + 3/2 Y_c \quad (1)$$

H : 여수로의 높이, q : 단위여수로폭에서  $m^3/sec/m$ 의 흐름으로 표현된다.

그러므로 감세지 들어가기 전에 여수로 말단부  $E_1$ 에서의 잉여수두와 도수는 다단식으로 된 피토관으로 측정되며, 손실수두  $E_1 - E_0$ 는 이때 계산된다.

#### 2.1 격리수맥흐름

격리수맥흐름은 상류와 사류로 번갈아 나타나거나 사류형태로 나타난다. 첫 번째 경우는 수맥이 충돌하는 점을 지나서 나타나고 이러한 현상은 끝단이 들려진 계단과 턱이 있는 계단에서 소유량(  $1m^3/sec/m$ 이하)일 때 관찰된다.

그림 3 상류와 사류가 교차하는 격리수맥흐름은 수맥의 충돌점에서 수심이 최소값  $Y_1$ 에 이르고 물방석의 깊이  $Y_p$ 가 계단 안쪽 끝에 형성된다. 도수의 시점부는 단면1에 위치하고 곧이어 도수의 하류는 단면2에

\* 정회원 · 영남대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail : jesusceo@hanmail.net  
\*\* 정회원 · 영남대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail : whiteveis@hanmail.net  
\*\*\* 정회원 · 영남대학교 건설환경공학부 박사과정 · E-mail : ssbae@karico.co.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 영남대학교 건설환경공학부 교수 · E-mail : hkjee@yu.ac.kr

위치하며, 흐름은 수심  $Y_2$ 에서 상류로 된다. 흐름은 가장자리 근처의 단면2와 단면3사이에서 가속되고 단면3의 한계수심을 넘어서면 흐름은 다시 사류로 변한다.

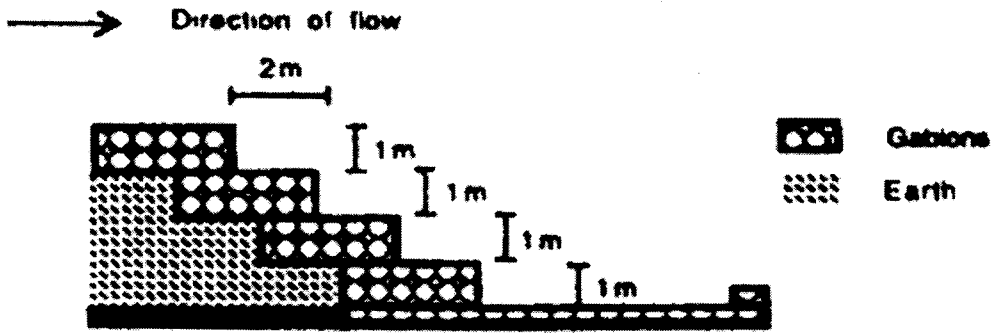


그림 1. 1/2경사를 가진 높이 4m 계단식 위어와 계비온 감사지

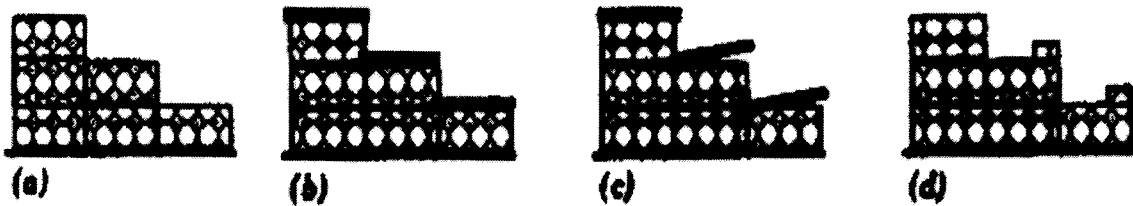


그림 2. 계단모형 실험 (a) 보통구조 (b)층상구조 (c)끝단이 올라간 구조 (d)턱을가진 구조

각 층에서 조건들이 반복되며, 각각의 에너지 소산은 그들의 높이와 같아진다. 계단식 여수로를 통과하는 격리수맥흐름의 에너지 손실방정식을 다음과 같다. 각각  $h$ 높이의  $n$ 층을 가진 여수로 상단의 에너지를  $E_0=n$

•  $h+3/2Y_c$ 라 하면 여수로 끝단의 에너지는  $E_1 = Y_1 + \frac{V^2}{2g}$ 이다. 이때 손실수두는  $e_l$   
 $E_1-E_0$ 는 식(2)와 같다.

$$E_0 - E_1 = n \cdot h \cdot \frac{3}{2} Y_c - Y_1 - \frac{q^2}{2g \cdot Y_1^2} \quad (2)$$

한편 Rand는  $h$ 높이의 콘크리트 계단을 통과하는 계단을 통과하는 흐름에 대한 변수를 포함한 식(3)과 같은 경험식을 제안하였다.

$$\frac{Y_1}{h} = 0.54 \left( \frac{q^2}{g \cdot h^3} \right)^{0.425} \quad \frac{Y_2}{h} = 1.66 \left( \frac{q^2}{g \cdot h^3} \right)^{0.27} \quad \frac{Y_p}{h} = 0.54 \left( \frac{q^2}{g \cdot h^3} \right)^{0.22} \quad (3)$$

$q$  : 월류량( $m^3/sec/m$ )이다.

식(1)과 식(2)를 결합하면 계단식 여수로를 통과할 때의 수두손실을 계산할 수 있다. 실제로는 대부분의 수맥흐름이지만 격리수맥흐름에 대한 실험결과는 계산된 것보다 실제로는 10%이상 소산된다는 이론과 매우 비슷하다. 차이는 계비온 속으로 침투, 계비온과 콘크리트의 표면 조도차이, 여수로 경사로 인한 무시할 수 있는 오차로 설명될 수 있다. 들려진 끝단이나 턱이 없을 경우 난류가 발생하지만 흐름은 모든 위치에서 사류 상태이며, <그림 4>와 같다. 평이한 계비온이나 층상의 계단식 계비온을 통과하는 수맥흐름은 항상 사류이고 들려진 끝단이나 턱이 있는 경우에는 일정한 유량을 넘어서면 점점 사류로 변한다.

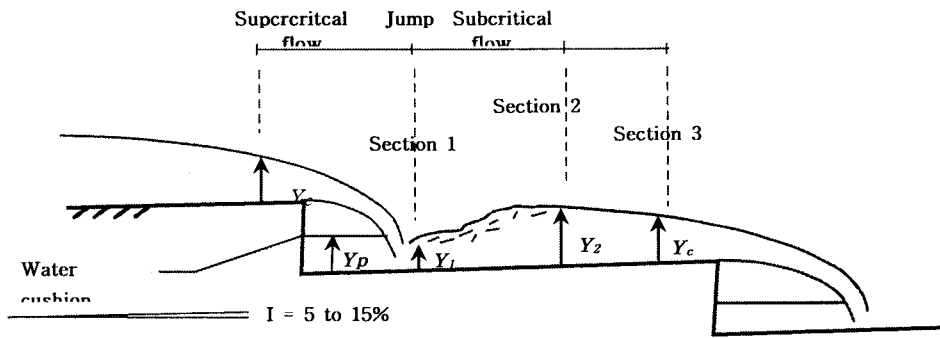


그림 3. 상류와 사류가 교차하는 격리수맥 흐름

### 2.2 부분수맥 흐름

부분수맥흐름에서는 계단표면에 전체적으로 부딪히지 않고 난류로 흘러진다. 그림 5에서 흐름은 여수로 전구간에 사류로 떨어진다. 수맥흐름에서 두수의 형태든 아니든 에너지는 평탄한 표면에 떨어질 때 수맥의 분산으로 발생하는 난류속에서 이단으로 소산된다. 계단식 게비온 여수로의 초기 위치에너지의 소산 추정치는 일반적인 수맥흐름에 대한 추정격리수맥흐름 이론에서 얻을 수 있다. 연구결과는 식(2)와 (3)의 가정이 명확히 10%이내에 있음을 보여준다.

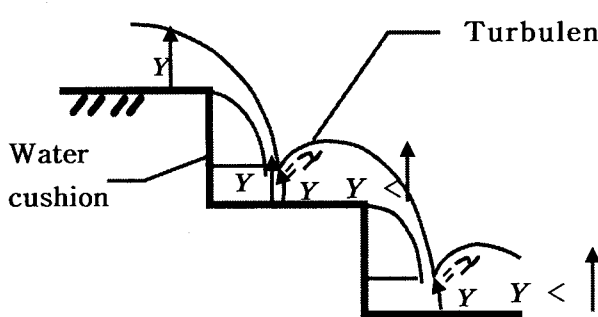


그림 4. 격리수맥(사류)

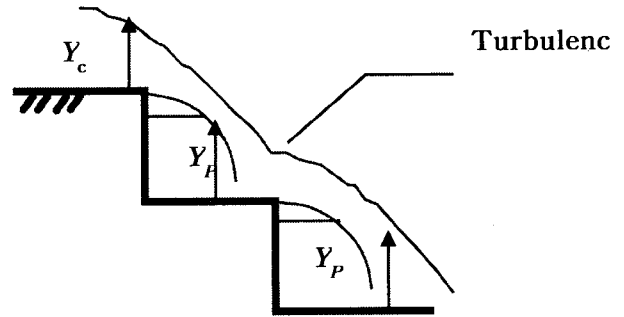


그림 5. 부분수맥 흐름

### 2.3 에너지 소산 효과

이 실험에서 흐름을 지배하는 변수들은 수로경사  $i$ 와 높이  $H$  ( $H(m)$ 는  $H$  계단을 의미) 그리고 계단의 종단면, 바닥길이와 유량, 비중이다. 흐름을 지배하는 이 변수는 여수로의 단위 길이당 미세하게 변하는 수두손실  $(E_0 - E_1)/H$ 을 나타내는데 적합하고 반드시 필요하다. 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\frac{E_0 - E_1}{H} = f(q, h, i, g) \quad (4)$$

두 개의 미세한 변수들은  $(E_0 - E_1)/H$  을 나타내는데 첫 번째는 논리적으로 하류면 경사  $I$ 와 다른 하나는 Froude수의 제곱  $q^2/(g \cdot H^3)$ 과 다소 비슷하다. 그러므로 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{E_0 - E_1}{H} = f_1(i \cdot \frac{q^2}{g \cdot H^3}) \quad (5)$$

미세하게 변하는  $Y_1/H$  (여수로 높이를 통과하는 끝단의 수심)는 식(6)과 같다.

$$\frac{Y_1}{H} = f_1(i \cdot \frac{q^2}{g \cdot H^3}) \quad (6)$$

그림 6과 그림 7은 실험의 결과에 의하여  $y_1=(E_0-E_1)/H$ 와  $y_2=y_1/H$ 에 대비하여  $x=q^2/(g \cdot H^3)$ 와  $i$ 를 보여준다.  $y_1$ 과  $y_2$ 가 1과 0으로 갈 때,  $x$ 는 0으로 가고 곡선은 각각  $1/(1-y_1)=a_1 \cdot x^{b_1}$  그리고  $y_2=a_2 \cdot x^{b_2}$ 의 형태를 가진다. 실험에서 얻어진 점들은 최소자승법에 의해 대수변환하였다. 조정된 계수는 다음을 따른다. 그림에서 그래프들은 3m<sup>3</sup>/sec/m보다 작은 흐름에 제한되어 있고 이보다 큰 흐름은 여수로를 손상시킬 우려가 있다. 이것들은 3~5개의 층을 가진 여수로 실험을 근거로 했으나 위의 조건들은 신중하게 바꾸면 2~7개 층의 범위 내에서 결과를 추정한다.

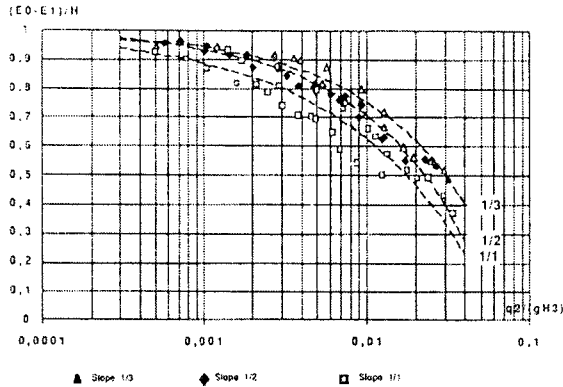


그림 6. Mattress 낙차공을 통과하는 흐름의 단위수두손실

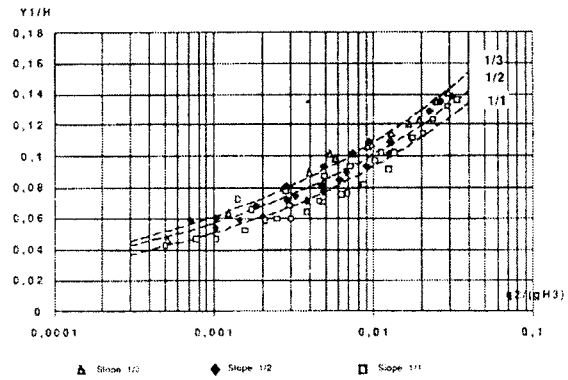


그림 7. Mattress 낙차공 하류부에서 수심

### 3. 결 론

본 연구에서 지금까지 Mattress 낙차공을 월류하는 흐름현상과 에너지 소산효과를 비교분석해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Mattress 낙차공을 월류하는 흐름은 계단형 보의 월류흐름과 유사하며, 일반적으로 유량 및 계단형상에 따라 도수를 동반하는 자유낙하 흐름(nappe flow), 수평상 계단에서의 표면흐름(skimming flow) 및 완경사 계단에서의 표면흐름으로 구분되었다.

2) Nappe flow는 계단끝단(trailing edge)에는 흐름의 자유낙하(free-falling) nappe이 형성되고 계단안쪽에는 air pocket가 생기며, 이때 자유낙하 흐름은 사류를 형성한다. 사류흐름은 nappe가 계단에 부딪히고 이후 도수 현상이 발생되면서 상류흐름으로 바뀌게 되며, Skimming flow의 경우 계단끝단에는 Nappe flow와 달리 흐름의 분리현상으로 인해 와류가 발생되었다.

3) 따라서, 감세지를 설계함에 있어서 계단식 Mattress는 기존의 감세지에 의한 방법에 비해 8~15% 이상 바닥 길이를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 에너지 소산 효과는 계단높이차고에 비례하고 월류수심에 반비례하며, 계단경사와는 큰 관련성이 없는 것으로 나타난다.

### 참고문헌

1. Essery, S. and Horner, W, (1978). "The hydraulic design of stepped spillways"
2. Rajaratnam, N. (1990). "Skimming flow in stepped spillways." J. Hydr. Engrg., ASCE, 116(4). 587-591.
3. Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillway. "Proc., ASCE, ASCE, 81, 1-13.
4. Stephenson, D. (1979a). "Gabion energy dissipators." Q5R3, Proc., 13th ICOLD Congress, CIGB.
5. 배상수, 이경욱, 지홍기, 이순탁(2002) 사면의 배수압 소산을 위한 계비온 옹벽의 설계기법, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 775~780.