

급경사 계곡류의 에너지와 배수압소산을 위한 Gabion 낙차공

이 창 연 (정회원, 농업기반공사 경북지사 근무)
배 상 수 (정회원, 농업기반공사 수문조사처 근무)
지 흥 기 (정회원, 영남대학교 토목도시환경공학부 교수)

1. 서론

계비온은 많은 나라에서 비교적 표준화된 낙차공에 흔히 사용되고 있다. 계단식 여수로는 시공하기 쉽고 안정적이며, 하천유수에 대하여 저항성이 있어 하천구조물로 널리 자주 사용되고 있다. 그러나 계비온에 대한 명확한 설계법이 없으며, 특히 감세지 계단표면의 위치에너지 소산에 대하여 전혀 언급된 것이 없는 경사낙차공(Durand 1989)이나 낙차공(Agostini et al 1987)에 사용하는 방법을 제공하는 매뉴얼이어서 감세지의 규모가 과대하게 되고 있다. 단지 Stephenson (Stephenson 1979)만이 1/10 축척을 가진(투수성이 있고 하천낙차공에만 적용되는 투수성 상류면을 가진 높이 4m까지의) 계단식 계비온 월류에 대하여 실험한 바가 있을 뿐이다.

2. 실험 조건

중력이 다른 힘들보다 지배적이므로 Froude 상사의 1:5 축척비를 적용하였다. 계비온은 20mm 30mm(실축척 100mm 120mm)의 0.7mm(실축척 3.5mm) 철선으로 만든 육각형 눈금을 가진 망에 30~45mm 크기의 돌로 채운 20cm 30cm 60cm 크기로 정확하게 만들었다. 본 실험은 60cm폭의 가변 경사수로 내부에 여수로의 형상당 유량을 50~200

/sec까지 댐의 하류측만 모형실험의 대상으로 하였다. 모형은 그림 1과 같이 1/1, 1/2, 1/3 경사를 가진 0.2m 높이 계단으로 된 2~3단 높이로 되어 있다.

또한 4가지 모형은 그림 2와 같이 (1) 아무런 보호 없는 평이한 계비온, (2) 각 계단마다 수평콘크리트 슬래브를 얹은 층상구조, (3) 끝단이 들려진 층상구조, (4) 직사각형 턱이 각 계단 끝에 달린 구조 등으로 나누어 실험을 하였다. 이때 여수로 끝 부분의 비에너지 수두는 유선표면에 5cm 간격으로 작은 흡입구를 가진 동파이프 같은 수직 관에 모두 연결하여 만든 특수 피토관 세트를 흐름면에 교차시켜 측정하였다.

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

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

여기서, H : 여수로 높이, q는 단위여수로폭에서 $m^3/sec/m$ 의 흐름으로 표현된다.

따라서 감세지로 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 사류를 번갈아 나타나거나 거의 사류 형태일 것이다. 첫번째 경우 도수는 수맥

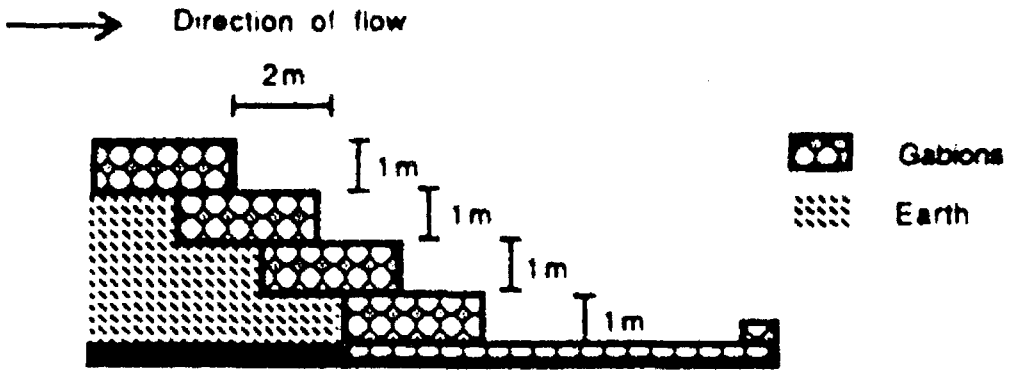
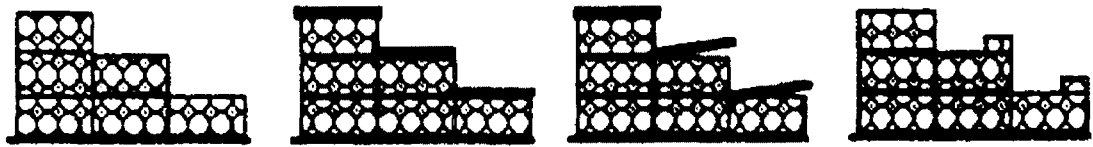


그림 1. 1/2 경사를 가진 높이 4m 계단식 위어와 게비온 감세지



(a)보통구조

(b)층상구조

(c)끝단이 올라간 구조

(d)턱을가진 구조

그림 2. 계단모형 실험

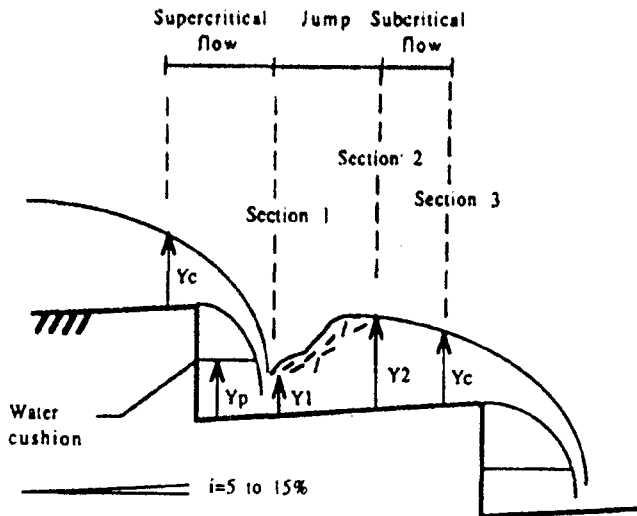


그림 3. 상류와 사류가 교차하는 격리수맥흐름

이 충돌하는 점을 지나서 나타나고 이러한 현상은 끝단이 들려진 계단과 턱이 있는 계단에서 소유량($< 1\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)일 때 관찰되며, 이런 특별한 경우의 간단한 해석은 실험치와 일치한다.

그림 3에서 수맥의 충돌점에서 수심이 최소값 Y_1 에 이르고 물방식의 깊이 Y_p 가 계단 안쪽 끝에 형성된다. 도수의 시점부는 단면1에 위치하고 끝이 도수의 하류는 단면2에 위치하며, 흐름은 수심 Y_2 에서

상류로 된다. 흐름은 가장자리 근처의 단면2와 단면3 사이에서 가속되고 단면3의 한계수심을 넘어서면 흐름은 다시 사류로 변한다.

각 층에서 조건들이 반복되며, 각각의 에너지 소산은 그들의 높이와 같아진다. 계단식 여수로를 통과하는 격리수맥흐름의 에너지 손실방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다. 각각 h높이의 n층을 가진 여수로 상단의 에너지를 $E_0 = n \cdot h + 3/2 Y_c$ 라 하면 여수로 끝단의 에너지는 $E_1 = Y_1 + \frac{V^2}{2g}$ 이다. 이때 손실수두 $E_0 - E_1$ 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 Rand(1955)는 h높이의 콘크리트 계단을 통과하는 흐름에 대한 변수를 포함한 식 (3)과 같은 경험식을 제안하였다.

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

여기서, Y_1 , Y_2 , Y_p 는 앞서 정의되었고, 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 실험결과

는 계산된 것보다 실제로는 10% 이상 소산된다는 이론과 매우 비슷하다. 차이는 계비온 속으로의 침투, 계비온과 콘크리트의 표면 조도차이, 여수로 경사로 인한 무시할 수 있는 오차로 설명될 수 있다. 들려진 끝단이나 턱이 없을 경우에는 유속이 빠르고 도수는 계단에서 분출된다. 그러면 수맥이 부딪히는 곳을 넘어서면서 상당한 난류가 발생하지만 흐름은 모든 위치에서 사류 상태이며, 그림 4와 같다. 평이한 계비온이나 층상의 계단식 계비온을 통과하는 수맥흐름은 항상 사류이고 들려진 끝단이나 턱이 있는 경우에는 일정한 유량을 넘어서면 점점 사류로 변한다.

2.2 부분수맥흐름

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

2.3 에너지 소산

실험에서 흐름을 지배하는 변수들은 (1) 기하학적 으로 하류면을 정의한 수로경사 i 와 높이 H (H미터는

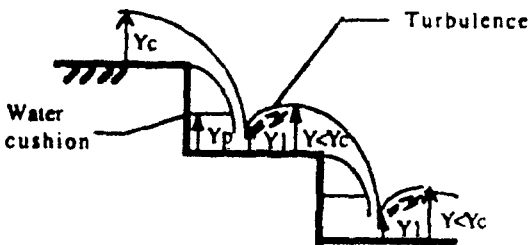


그림 4. 격리수맥(사류)

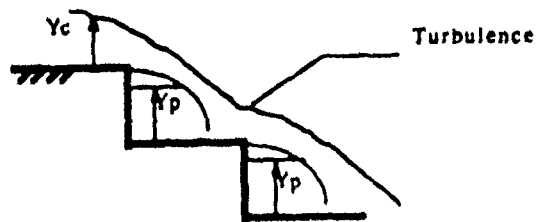


그림 5. 부분수맥흐름

H층수를 의미), (2) 계단의 종단면 : 끝단이 들려지거나 턱이 있든 없든 관계없음(여기서, 평탄한 표면을 가진 일반적인 계비온 계단만을 논한다), (3) 단위 바닥길이당 유량이다. 그것은 흐름의 형식을 지배하는 경사를 가지고 있다(수맥흐름 또는 부유물 제거흐름), (4) 비중. 비중은 다른 모든 힘보다 월등하다. 이 네가지 변수들은 여수로의 단위 길이당 미세하게 변하는 수두손실 $(E_0 - E_1)/H$ 를 나타내는데 적합하고 반드시 필요하며, 식 (4)와 같은 관계가 성립한다.

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

일반적으로 두 개의 미세한 변수들은 $(E_0 - E_1)/H$ 로 나타낸다; 첫번째는 완전히 논리적으로 하류면 경사 i 와 다른 하나는 (q, h, g) 를 포함하고 있고 Froude수의 제곱 $q^2/(g \cdot H^3)$ 과 다소 비슷하다. 그러므로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

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

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

$$\frac{Y_1}{H} = f_2\left(i, \frac{q^2}{g \cdot H^3}\right) \quad (6)$$

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 대수변환 하였다. 조정된 계수는 다음을 따른다. 그림에서 그래프들은 $3m^3/sec/m$ 보다 작은 흐름에 제한되어 있고 이보다 큰 흐름은 여수를 손상시킬 우려가 있다. 이것들은 3~5개의 층을 가진 여수로 실험을 근거로 하였으나 위의 조건들을 신중하게 바꾸면 2~7개 층의 범위 내에서 결과치를 추정할 수 있다. 이 결과는 치수가 없는 형태로 제공되어 높이 0.2~1.0m 범위, 경사 1/3~1/1 범위 내에서 모든 계단 크기에 유효하다(표 1 및 표 2 참조).

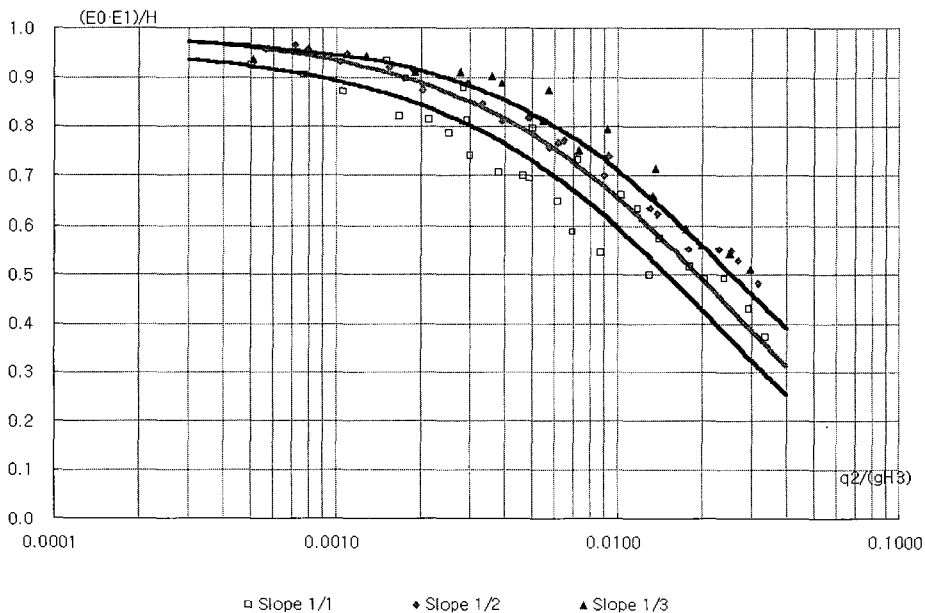


그림 6. 보통 계비온을 통과하는 흐름의 단위손실수두

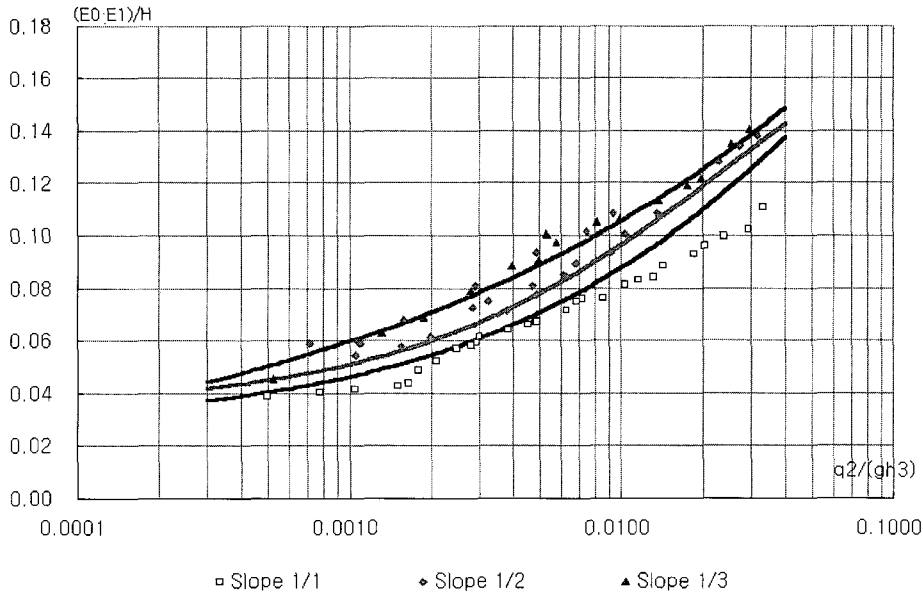


그림 7. 보통 계비온 여수로 말단부의 수심

표 1. $1/(1 - y_1) = a_1 \cdot x^{b_1}$ 일 때 $y_1 = (E_0 - E_1)/H$ 와 $y_2 = y_1/H$ 의 관계

경사(1)	점의 수(2)	$\ln(a_1)$ (3)	b(4)	r^2 (5)
1/3	6	-1.568 ^a	-0.647 ^a	0.904 ^b
1/2	25	-1.778 ^a	-0.654 ^a	0.964 ^b
1/1	28	-1.434 ^a	-0.526 ^a	0.874 ^b

※ a : 적합한 계수, b : 결정 계수

표 2. $y_2 = a_2 \cdot x^{b_2}$ 일 때 $x = q^2/(g \cdot H^3)$ 와 $y_2 = y_1/H$ 의 관계

경사(1)	점의 수(2)	$\ln(a_2)$ (3)	b(4)	r^2 (5)
1/3	16	-1.074 ^a	0.248 ^a	0.974 ^b
1/2	25	-1.157 ^a	0.247 ^a	0.941 ^b
1/1	28	-1.163 ^a	0.263 ^a	0.888 ^b

※ a : 적합한 계수, b : 결정 계수

3. 결론

지금까지 계단식 계비온 낙차공을 통과하는 흐름 현상과 에너지 소산효과를 기존의 감세지에 의한 방법과 비교해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 적당한 실제 구조물에서 하류면을 가진 계단식 계비온 여수로로는 3m³/sec/m 이상의 흐름을 받

아들이지 못하고 있음을 알 수 있었으며, 이것은 단지 계비온 월류모형에서만 이러한 작업을 할 수 있고 매끄러운 계비온 사면은 1m³/sec/m 이상의 흐름을 받아들이지 못함을 알 수 있었다.

- 2) 계단식 여수로로는 감세지보다 앞서 좀더 많은 에너지를 소산시킨다는 장점을 가지고 있고 본 연구에서는 이러한 효과를 확인할 수 있었다.

- 3) 따라서, 감세지를 설계함에 있어서 계단식 계비 온 여수로는 기존의 감세지에 의한 방법에 비해 10-30% 이상 바닥 길이를 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

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. Sorensen, R.M. (1985). "Stepped spillway hydraulic model investigation." J. Hydr. Engrg., ASCE, 111(12), 1461-1472.
5. Stephenson, D. (1979a). "Gabion energy dissipators." Q5R3, Proc., 13th ICOLD Congress, CIGB. Paris, France, 33-43.