

급류하천의 에너지 감소와 세굴방지를 위한 Gabion Mattress

배 상 수 (정회원, 농업기반공사 수문조사처 근무)

이 창 연 (정회원, 농업기반공사 경북지사 근무)

지 흥 기 (정회원, 영남대학교 토목도시환경공학부 교수)

1. 서론

사석(riprap)은 그다지 이용가치도 없고 비싼 가격 때문에 설계자들이 별로 요구하지 않기 때문에 이를 대신해 계비온-매트리스와 콘크리트 블록 매트리스 같은 보호공의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 콘크리트 블록 매트리스는 폭넓고 다양한 형상, 조도, 단위중량, 케이블 그리고 맞물림(interlocking) 특성들을 가지며, 안정계수를 얻기 위하여 각 제조업자들은 블록에 대한 실험이 종종 요구된다. 계비온-매트리스는 형상, 조도 및 단위중량의 상사와 인접한 구조물이 서로 부착되어 있기 때문에 하나의 안정방정식과 안정계수를 가지므로 수로보호공으로 사용될 기회가 더 많아진다. 이것은 계비온-매트리스 및 콘크리트 블록 매트리스에 대한 추천이 아니라 단순히 두가지 방법들이 여기서 다루어지지 않았었던 이유만 설명하였다. 본 논문의 목적은 2%이하의 바닥경사를 가지는 수로에 수로보호용으로 사용하기 위한 계비온-매트리스의 크기를 결정하기 위한 설계과정을 소개하는 것이다.

2. 제안 설계지침

일반적으로 수로보호공의 계비온-매트리스 설계에서 제안된 지침은 다음 사항들을 근거로 하고 있다.

먼저, 계비온-매트리스 수로보호공의 크기는 홍수 조절수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)에서 제공된 미육군공병단 사석설계 지침에서 사석이 설계되는 방법과 동일한 수심-평균유속에 근거하게 될 것이다. 그리고 이것은 다양한 수로단면과 수로노선에 대하여 요구되는 계비온-매트리스 수로보호공 두께를 결정하기 위한 더 좋은 방법이 될 것이다.

다음으로, 계비온-매트리스 수로보호공의 안정은 계비온-매트리스 내의 채움석재의 안정에 근거할 것이다. 이 요소는 개개의 석재크기의 범위(100~200mm)가 계비온-매트리스 수로보호공 두께의 범위와 잘 들어맞는다는 것(U.S. Army 1991b)과 계비온-매트리스 수로보호공 두께가 증가하기 때문에 계비온-매트리스 수로보호공 안정이 증가한다는 개념과는 반대이다. 흐름저항의 변화를 야기할 수 있는 철망의 변형에 관한 문제와 철사파괴를 초래할 수 있는 채움석재의 움직임에 관한 문제 때문에 계비온-매트리스 내 현저한 석재의 움직임은 허용되지 않는다. 적어도 두 개 이상의 제조업자들이 한계유속(critical velocity)(어떤 채움석재의 움직임도 없음)과 한계속도(limit velocity)(채움석재의 움직임이 약간 있지만 안정함)와 관련된 허용속도(allowable velocity) 표를 소개했다. 본 논문에서는 어떠한 채움석재의 움직임도 없는 것에 대한 설계지침을 권장하고 소개한다.

굵은입자 안정에 대한 차원해석이 Maynard (1989)에 의해 소개되었으며, 다음 식 (1)과 같이 무

차원비(dimensionless ratios)이다.

$$\frac{D_m}{d} = \text{function of} \left[\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gd}} \right] \quad (1)$$

여기서, D : 케비온-매트리스 내의 평균채움석재입경 (m), d : 수심-평균유속 V에서의 수심(m), V : 수심-평균유속(m/s), γ_w : 물의 단위중량(kg/m³), γ_s : 석재의 단위중량(kg/m³), g : 중력가속도(m/s²) 이다.

수심-평균유속은 모든 개수로 단면폭을 가로질러 가며 변화하며, 종종 자유표면으로부터 수심의 60% 되는 점의 유속을 측정하거나 또는 자유수면으로부터 수심의

20% 및 80% 깊이에서 유속을 측정하여 이를 평균하여 얻을 수 있다. 평균수로유속을 사용하는 수심-평균 유속을 추정하기 위한 방법들은 다음절에서 논의된다.

Simons et al.(1984)에 의해 제공된 모형자료 표 1은 케비온-매트리스 내 석재가 움직이기 시작할 때의 흐름조건들을 보여준다. 모형에서 석재의 단위중량은 2.547kg/m³이고 표 1에서 네가지 실험조건 모두 수로경사는 1%이며, 모난 석재가 케비온-매트리스 내에 사용되었다. 위의 식 (1)에서 무차원비는 Simons et al.(1984)의 모형자료에 대해서 계산되었으며, 그림 1에서 도식되었다.

표 1. 케비온-매트리스 내의 석재 안정

직경(Dm)		크기의 범위		두께		V ^a		d ^a	
mm(1)	in.(2)	mm(3)	in.(4)	cm(5)	in.(6)	m/s(7)	ft/sec(8)	m(9)	ft(10)
38	1.5	25-50	1-2	5.1	2	2.64	8.67	0.55	1.82
38	1.5	25-50	1-2	7.6	3	2.62	8.58	0.58	1.89
44	1.75	38-50	1.5-2	10.2	4	3.02	9.90	0.70	2.30
51	2.0	38-64	1.5-2.5	15.2	6	2.92	9.56	0.72	2.35

^a 채움석재의 움직임이 처음 관찰된 때 흐름조건

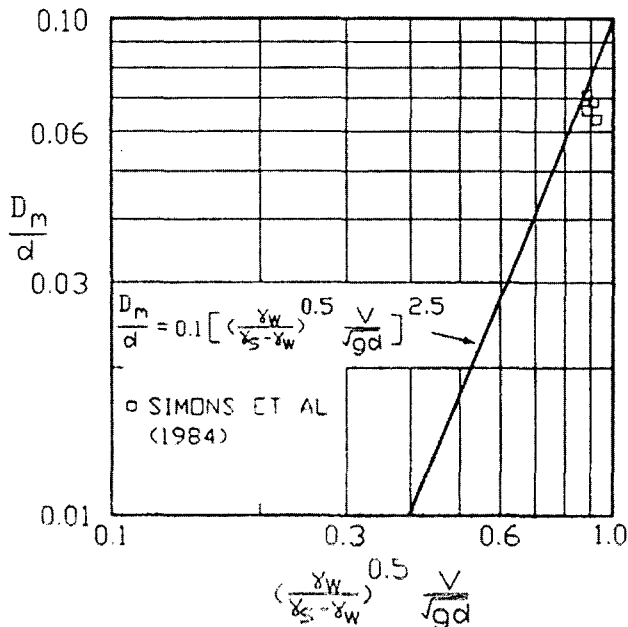


그림 1. 케비온-매트리스 내 채움석재의 안정

4개 자료로 그림 1에서 직선의 방정식을 수립하는 것은 적당하지 않다. 따라서 더 많은 자료를 수집하거나 기존 관계식의 기본형태가 채택되어야 한다. 굽은입자 안정에 대하여 본 연구에서 적용한 Neill(1967), Bogardi(1978), Pilarczyk(1987), Maynord(1989) 방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{D_m}{d} = C_s \left[\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gd}} \right]^{2.5} \quad (2)$$

전단응력 접근법과 같은 그밖에 다른 굽은입자 안정 방정식과 위의 식 (2)와의 관계는 Maynord(1989)에 의해서 소개되었다. 홍수조절용 수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)는 유속수면곡선(velocity profile), 사면경사각효과(side-slope-angle effects), 안전율(safety factor) 그리고 사석의 안정을 규정하는 사석피복두께(riprap-blanket-thickness) 계수를 통합시키는 위의 식 (2)의 수정식을 제시했다. 이 방정식으로부터 사석피복두께 계수를 생략하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있으며, 이 식은 계비온-매트리스 설계에서도 제안된다.

$$D_m = S_f C_s C_v d \left[\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gdK_i}} \right]^{2.5} \quad (3)$$

여기서, S_f : 안전율(최소값 1.1)

C_s : 계비온-매트리스 내 석재의 안정계수

C_v : 홍수조절용 수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)에서 정의된 유속-분포계수

V : 수로제방 보호공 설계에서 V_{ss}

V_{ss} : 수위선과 사면경사 하류사이에서의 중심-평균유속(엄밀히 말하면 사면경사 하류에서 사면경사 상류까지 거리의 20%)

K_i : 사면경사 보정계수(수로바닥의 한계전단과 사면경사의 한계전단과의 비)

Simons et al. (1984)의 자료는 계비온-매트리스 내 석재의 안정에 대해 식 (3)에서 C_s 를 결정할 때 사용되었다. 그리고 Simons et al. (1984) 자료에서

S_f , C_v , K_i 값은 모두 1.0이다. C_s 는 그림 1을 보면 식 (3)에서 값이 0.1이라는 것을 알 수 있으며, 계비온-매트리스 내 채움석재의 크기를 결정할 때 권장된다. 여기서, $C_s = 0.1$ 은 Simons et al. 실험에서 사용된 조건(모난 석재 사용, 최소와 최대 석재크기의 비가 1.5~2.0배)들로 제한된다.

계비온-매트리스 두께는 Simons et al. (1984)의 실험에서 두께는 $1.33D_m \sim 3D_m$ 범위가 된다. 여기서, 최소 계비온-매트리스 두께 $T = 2D_m$ 은 보호되고 있는 수로재료의 강도에 따라 계비온-매트리스 두께 T 를 변화시키기 위하여 매트리스/필터 경계면에서 유속을 추정하는 방법이 개발될 때까지 제안되었다. 매트리스 바닥의 유속 추정방법에서는 석재크기, 석재등급, 매트리스 두께의 영향도 포함되어야 한다. Simons et al. (1984)은 매트리스/필터 경계면에서 유속을 추정할 수 있는 다음과 같은 방정식을 제시했다. 이 식은 채움석재의 크기에만 관계하고 계비온-매트리스 두께에 대한 관계는 포함하지 않는다.

$$V_b = \frac{1.486}{n_f} \left(\frac{D_m}{2} \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

여기서, V_b : 매트리스/필터 경계면에서 유속

n_f : 0.02 (필터 fabric)

S : 수로경사

Simons et al. (1984)는 또한 필터섬유(필터 fabric) 바로 아래 인접한 유속은 V_b 의 1/4~1/2이 된다고 보고했다. Simons et al. (1984)의 실험들은 대략 $2D_m$ 의 계비온-매트리스 두께에서 실행되었기 때문에 식 (4)는 여기서 제안된 계비온-매트리스 두께 $2D_m$ 에 대해서 매트리스 바닥의 유속 추정하기 위해서 사용될 수 있다. 그러나 수로제방 재료의 강도가 변화함에 따라 계비온-매트리스 두께 $2D_m$ 의 변화량을 결정할 때는 사용될 수 없다. 대부분의 경우 계산된 계비온-매트리스 두께 $T = 2D_m$ 은 표준 계비온-매트리스 두께와 같지않고 더 큰 계비온-매트리스 두께를 사용하는 것이 일반적이다.

경험적인 유속-분포 계수 C_v 는 안정계수 C_s 를 결정할 때 사용된 직선수로에서 발생하는 연직유속 종단면과 다른 연직유속 종단면에 대하여 설명한다. 사석 보호공 설계에서 C_v 의 최소값은 1이고 수로 만곡부의 외제에 대해서는 $1.283 - 0.2\log(R/W)$ 값이다 (U.S. Army 1991a). 또한 이 값은 계비온-매트리스 설계에서도 사용하도록 제안되었다. 여기서 변수 R 과 W 는 홍수터를 포함하는 간선수로에서 흐름에 대한 수로중심선의 만곡부 동수반경과 수면폭이다. 그리고 콘크리트 수로의 하류(downstream)와 제방(dikes)의 끝부분(ends) 바로 가까이에서 $C_v = 1.25$ 이다. 이유는 이들 두지점에서 연직유속종단면의 차이 때문이다 (U.S. Army 1991a).

그림 2에서 보여준 자연수로에 대한 V_{ss}/V_{avg} 대 R/W 의 도식 (U.S. Army 1991a)은 관측치에 근거한다. V_{avg} : 간선수로에서의 평균수로유속이며, 홍수터 지역은 제외된다. 제형수로에 대한 지침은 홍수조절용 수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)에서 소개되었으며, 동일한 R/W 값을 가지는 자연수로 보다 더 작은 V_{ss}/V_{avg} 값을 가진다. 이것은 외제 근처 모래톱(bar)

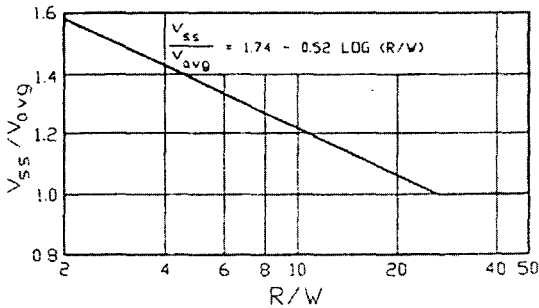


그림 2. 자연수로에서 유속추정

표 2. K_s 에 대한 측면 경사각

측면경사(1)	K_s (2)
1V : 1H	0.46
1V : 1.5H	0.71
1V : 2H	0.88
1V : 3H	0.98
1V : 4H or flatter	1.00

지점과 만곡부 용덩이(bend scour) 지점은 자연수로에서 외제부분의 빠른 유속의 결과에 기인하는 경향이 있기 때문이다. 1보다 더 작은 값을 사용할 만큼 충분한 직선을 가진 수로가 거의 없기 때문에 자연수로와 제형단면수로에서 최소값 $V_{ss}/V_{avg} = 1$ 이 권장된다.

홍수조절용 수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)로부터 사석보호공에 대하여 권장된 K_s 값은 표 2에 제시되어 있으며, 사석보호공의 안정실험에 근거한다(Maynard 1988). Carter, Carlson, 그리고 Lane의 관계(1953)는 사석보호공에 대하여 줄잡음(conservative)임을 알 수 있었다. 왜냐하면 보호공의 안식각이 일반적으로 통상 사용되는 40 보다 더 크기 때문이다. 표 2에 제시된 값들은 계비온-매트리스에 대하여 개략적으로 고려되지만 가장 이용가치가 있는 정보를 제공한다. Carter, Carlson, 그리고 Lane(1953)의 관계는 K_s 값을 정의하기 위해서는 사용될 수 있지만 계비온-매트리스 내 재료의 안식각은 알 수 없다.

계비온-매트리스와 느슨한 사석에 대하여 동일한 수로형상과 수리자료를 사용하면서 Simons et al.(1984)의 안정자료를 사용하면서 계산된 계비온-매트리스 두께와 이번에 제안된 진행과정은 홍수조절용 수로의 수리학적 설계(U.S. Army 1991a)에서 사용하는 과정과 사석등급(크기)으로 계산된 사석보호공 두께의 32%가 될 것이다. 이것은 Oswalt et al.(1975)과 잘 일치한다. 여기서, 계비온-매트리스는 느슨한 사석 두께의 1/3이며, 물리모형(physical model)에서 안정비교에 근거된 동일한 보호를 제공할 수 있다.

표 3은 안정계수 $C_s = 0.1$ 과 안전율 $S_f = 1.1$ 을 식 (3)에 적용하여 일반적인 만곡수로와 직선수로구간에서 제한하는 평균수로유속을 제공한다.

3. 적용 및 분석

Simons et al.(1984)은 수로바닥 폭 12.2m; 하류 수심 3.05m; 사면경사 1V:2H; 석재단위중량

표 3. 호안용 게비온 두께와 석재크기에 대한 평균유속
(1V:2H Side Slope, Angular Stone, and $\gamma_s = 2.643\text{kg/m}^3$)

게비온두께 cm(1)	Limiting Average Channel Velocity		
	Toe depth = 1.52m(m/s)(2)	Toe depth = 3.05m(m/s)(3)	Toe depth = 6.10m(m/s)(4)
(a) 자연 수로 만곡(Natural Channel bend), R/W = 3			
15.2	2.1	2.2	2.4
22.9	2.4	2.6	2.8
30.5	2.7	2.9	3.1
45.7	3.2	3.4	3.7
(b) 직선수로(Straight Channel), $V_{ss} = V_{avg}^b$			
15.2	3.3	3.5	3.8
22.9	3.9	4.2	4.5
30.5	4.4	4.7	5.0
45.7	5.1	5.5	5.9

주 : D_m = 게비온-매트리스 두께의 1/2

^aDepth at V_{ss} = 하류수심의 80%

^b수로바닥과 사면경사에 게비온-매트리스를 설치한 직선수로에서 설계자는 또한 수로바닥에 설치된 게비온-매트리스의 안정성을 검토해야 한다. 여기서, 수심-평균유속은 V_{avg} 보다 10~20% 더 크다.

2,643kg/m³; 수로바닥경사 1%; 평균수로유속 (V_{avg})5.7m/sec인 실례를 소개했다.

표 3은 두께 45.7cm를 가지는 게비온-매트리스는 평균수로유속 $V_{avg} = 5.49\text{m/s}$, 하류수심 3.05m을 가지는 직선수로에서 사면경사 1V:2H 사면경사에서 안정한 것을 보여준다. 이 두께는 5.7m/sec의 평균수로 유속에 대하여 안정하기 위한 Simons et al.(1984)에 의해 알게 된 45.7cm와 동일하다. 게비온-매트리스 바스켓 내의 석재의 크기는 이번에 제안된 방법에서는 150mm-300mm가 된다. 이에 반하여 Simons et al.(1984)에서 45.7cm 게비온-매트리스는 100-200mm 석재가 사용되었다. Simons et al.(1984)는 100-200mm 석재들로 채워졌을 때 게비온-매트리스 변형이 9.1cm가 일어났다고 계산되었다. 이러한 석재이동과 변형의 총합은 게비온-매트리스의 저항을 변화시키며, 장기간 게비온-매트리스 철망 보전을 위해서는 권장되지 않는다. Simons et al.(1984)에 근거하면 모형실험들은 여기서 소개된 과정을 사용하면 채움석재 150-300mm 크기는 어떤 변형도 일어나지 않을 것으로 기대된다.

사석제방의 설계(Federal 1989)에서는 75-

150mm의 채움석재를 가지는 게비온-매트리스에 대해 제방경사, 최대유속, 제방 재료 종류별 함수로서의 게비온-매트리스 두께를 나타내는 표를 소개했다. 여기서 최대유속 6.1m/sec, 사면경사 1V:1H를 가지는 수로에서 제방 재료 종류 대하여 최소 게비온-매트리스 두께는 30.5cm가 요구된다. 이것은 여기서 제안된 방법보다 상당히 얇으며, Simons et al.(1984) 결과로 주어진다. 현저한 석재이동과 게비온-매트리스 변형은 5.7m/sec와 100-200mm 채움석재에 대하여 Simons et al.(1984)에 의해서 제시된 결과에 근거한 채움석재 6.1m/sec 그리고 75-150mm로 기대된다.

U.S. Army Corps of Engineers(1991a) 사석설계 지침서를 이용하면 이번 예제에서 사석의 두께 1.37m를 사용하면 그 결과는 $V_{ss} = 5.49\text{m/sec}$ 이며 게비온-매트리스 두께는 소요사석두께의 1/3이 요구된다.

4. 결론

게비온-매트리스 내 채움석재의 크기를 결정하기 위한 설계과정이 소개되었으며, 이것은 미육군공병단

의 사석설계 지침서와 동일한 방법인 수심-평균유속에 근거한다. 이것은 단면형상과 수로선형에 따라 계비온-매트리스 크기의 변화를 허용한다. 안정은 계비온-매트리스의 두께보다는 오히려 계비온-매트리스 내 석재의 크기에 바탕을 둔다. 다음에 제시된 부가적인 연구영역은 계비온-매트리스 내 채움석재의 크기를 결정하기 위하여 설계과정을 개선하고 보강하기 위하여 요구된다.

- 1) 안정계수 C_s 는 계비온-매트리스 내 채움은 둥근 모양의 석재와 석재의 등급은 최대/최소 크기의 최대범위가 1.5~2.0배가 요구된다.
- 2) 계비온-매트리스 보호공이 설치된 수로바닥에

서 계비온-매트리스 보호공과 필터섬유(필터 fabric) 또는 입상여과(granular 필터) 사이의 경계면에서 유속을 결정하는 방법이 요구된다. 상술한 방법은 계비온-매트리스 내 채움석재의 등급과 계비온-매트리스의 두께 결정을 포함한다. 이것은 계비온-매트리스 철망두께가 $2D_m$ 보다 더 크거나 조금 작은 것 둘 다의 사용을 허용하며, 이것은 보호되고 있는 수로제방 재료의 강도에 의하여 변한다.

- 3) 수로사면경사 보호용으로 계비온-매트리스의 설치후의 효과는 불안정한 요인들을 보다 안정하게 한다.

참고문헌

1. U.S. Army Corps of Engineerings. (1991a). "Hydraulic design of flood control channels." Engr. Manual 1110-2-1601, U.S. Government Printing Ofc., Washington, D.C.
2. U.S. Army Corps of Engineerings. (1991b). "Wire mesh gabions." Civ. Works Constr. Guide Specification CW-02541, 29 July 1991, U.S. Government Printing Ofc., Washington, D.C.
3. Sorensen, R.M. (1985). "Stepped spillway hydraulic model investigation." J. Hydr. Engrg., ASCE, 111(12), 1461-1472.
4. Stephenson, D. (1979a). "Gabion energy dissipators." Q5R3, Proc., 13th ICOLD Congress, CIGB. Paris, France, 33-43.