

슬래그 채움재를 사용한 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성

Hydraulic Characteristics of River Bed Revetments Using Slag Mattress

배 상 수 | 농업기반공사 설계조사처 대리
지 흥 기 | 영남대학교 토목도시환경공학부 교수

1. 서 론

매트리스는 일반적으로 철망 내에 자갈을 채운 구조물로서 수로사면의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. 매트리스 철망은 세굴이 발생하는 수로에서 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에 저항력을 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. 본 연구에서는 열병합 발전소의 부산물인 슬래그가 폐기물 관리법상 환경적인 측면에서 무해할 뿐만 아니라 그 양이 방대하다. 그러나 수로사면의 안정을 위한 공법으로 슬래그를 채움재로 사용한 매트리스(이하 슬래그 매트리스라 함)에 대한 수리학적 거동해석이나 특성에 관한 연구가 미흡하여 이를 실용화하는데는 많은 제약과 받고 있는 실정이다.

따라서 슬래그의 특성에 관련된 제반 연구실험을 통하여 토목재료로서 활용 가능성을 검토하여 현재까지 근거없이 일부 유용되는 차원에서 벗어나 하나의 새로운 토목재료로서 적극 활용할 수 있는 기반을 조성하고자 각각의 수리학적 흐름 조건에 따라 안정성 실험을 실시하였으며, 슬래그 매트리스로 보호된 수로에서 소류력과 유속에 대한 안정성 검토 및 빠른 흐름 상태에서의 변형과 경계면 유속 등을 규명하고 분석하였다.

2. 슬래그 매트리스의 안정성 이론

수로바닥에서 침식에 저항하려는 안정성은 수리흐름 영역에서 발생하는 유속과 전단응력에 대하여 재료가 영구적인 피해가 발생되지 않도록 저항하려는 요소들이 적당한지를 검토하는 것이다.

2.1 소류력에 의한 안정성 검토

수리학적 특성과 기하학적 특성에 관계되는 유효전단응력과 수로바닥의 재료에 관계되는 허용전단응력 비교에 근거한다. 슬래그를 채움재로 사용한 매트리스 호안공은 채움재의 움직임이 없을 때 안정하다고 할 수 있으며, 사석 호안공과는 달리 슬래그 매트리스는 철망 내에 슬래그로 채워지고, 안정성의 한계는 전단응력이 채움재를 막 이동시키려는 초기거동 응력지점과 같다.

따라서 수로바닥의 각 지점에서 유효전단응력 τ_b 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\tau_b = \gamma_w y_i i_{river} \quad (1)$$

여기서, γ_w : 물의 단위중량, y_i : 검토지점의 수위, i_{river} : 검토구간의 평균하상경사이다.

식생이 되지 않는 수로바닥에서 슬래그 매트리스에

대한 허용전단응력은 식(2)에서 구할 수 있다.

$$\tau_c = C^*(\gamma_s - \gamma_w)d_m \quad (2)$$

여기서, C^* : Shields 계수, γ_s : 채움재의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량, d_m : 채움재의 평균입경이다.

따라서 슬래그 매트릭스는 식 (1)과 식 (2)를 비교해서 얻은 부등식인 식 (3)을 증명할 수 있으면 안정하다고 할 수 있다.

$$\tau_b \leq \tau_c \quad (3)$$

표 1. 슬래그의 물리적 특성

항 목	
비 중(Gs)	2.36
균등계수(Cu)	10.0
곡률계수(Cc)	2.5
건조단위중량(γ_d , g/cm ³)	0.997
최대건조밀도(γ_{dmax} , g/cm ³)	1.51

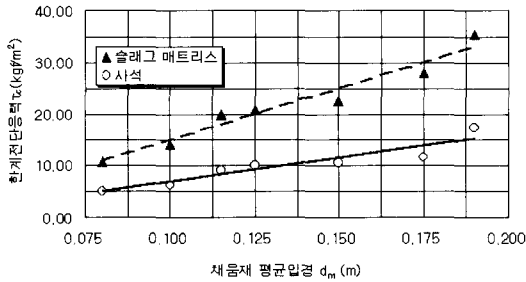


그림 1. 사석과 슬래그 매트릭스의 한계전단응력

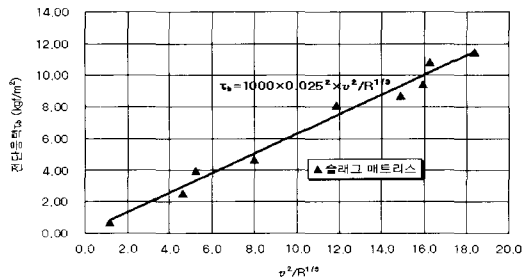


그림 2. 유속, 동수반경, 전단응력과의 관계

한편 Agostini, R. 등 (1988)에 의하면 철망에 채워지지 않는 느슨한 사석 호안공에 대한 Shield 계수는 $C^* = 0.047$ 이며, 철망에 채워진 자갈 매트릭스에 대한 Shield 계수는 $C^* = 0.10$ 이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 한계전단응력은 매트릭스를 사용할 경우보다 사석을 사용할 경우에 거의 2배 이상이 됨을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 철망에 의해서 채움재인 슬래그의 움직임이 제약을 받기 때문인 것을 알 수 있었다.

2.2 유속에 의한 안정성 검토

하상보호공의 안정성을 추정하는데 있어서 유속은 매우 중요하며, 한계유속은 수심 y 와 관계가 있다. 실제로 유속과 수심은 서로 연관성이 있으며, 수로바닥에서 전단응력, 유속, 동수반경 그리고 조도계수와 의 관계는 식 (4)와 같이 Manning 공식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_b = \gamma_w - n^2 \frac{V^2}{R^{1/3}} \quad (4)$$

1) 유속과 전단응력

그림 2는 위의 식(4)의 관계들을 나타냈으며, 그림 2에서 직선은 조도계수 $n = 0.025$ 라는 가정 하에 결정되었다. 실험에서 얻은 결과는 식 (4)의 이론 값과 매우 일치하고 있음을 보여주고 있다. 식(4)는 유속과 전단응력은 동수반경과 반비례하는 것을 알 수 있다. 또한 주어진 동일 유량조건하에서는 전단응력은 유속과 깊은 관계가 있고 수심과는 별로 관계가 없음을 알 수 있다. 전단응력이 주어진 유속에 대해서 돌망태 매트릭스나 사석 호안공을 안정화시키는데 제어하는 요소가 됨으로, 수심이 커질 때 전단응력의 감소로 인하여 안정성은 증가하게 될 것이다.

2) 자갈입경과 한계유속

그림 3은 중간 채움재의 입경에 대한 사석과 돌망태 매트릭스 하상보호공의 한계유속 u_c 를 나타냈다. 동일한 유속에 대해서 앞에서 설명한 바와 같이 사석과 매

트리스의 두께는 동일 유량조건하에서 얇은 수심조건에서도 깊은 수심조건과 동일한 안정성을 얻기 위해서는 사석과 매트리스의 두께가 커져야 한다.

3) 매트리스 두께와 한계유속

그림 4는 슬래그 매트리스의 초기거동을 일으키는 한계유속과 두께에 대한 관계를 나타냈으며, 매트리스 두께는 한계류 또는 상류($Fr \leq 1.0$)에 대한 돌망태 매트리스 두께와 동일한 안정성을 얻기 위해서는 아주 큰 사류($Fr > 1$)에서 한계유속이 작아져야 됨을 알 수 있었다.

2.3 변형에 대한 안정성 검토

전단응력이 초기거동조건 한계치에 도달할 때, 철망 내의 슬래그는 그림 5와 같이 매트리스 채움재 일부가 하류측으로 이동한다. 전단응력이 더욱 증가하면 다음 두 가지 중의 한가지 현상이 발생할 것이다.

먼저, 매트리스 아래의 바닥 흙이 드러나게 되면 호안공이 그 효력을 상실하게 되고 다음으로, 철망이 구속력을 발휘할 수 있는 강도의 범위 내에서 새로운 평형상태에 도달하게 될 것이다. 매트리스에 의한 보호의 정도는 매트리스 아래에서 유속이 크게 변화하지 않기 때문에 바닥 흙이 드러나지 않는 한 변형 후에도 변화는 발생되지 않는다.

변형의 정도를 추정하기 위해서 매개변수 $\Delta z/d_m$ 가 사용된다. 여기서, Δz 는 그림 5에서 매트리스 구간 내에 가장 높은 채움재와 가장 낮은 채움재와의 차이이며, 매트리스 구간의 상류측 채움재의 두께 감소는 $\Delta z/2$ 이다. 따라서 바닥 흙이 흐름에 직접적으로 드러나지 않고 보호되기 위한 조건은 식 (5)를 만족해야 한다.

$$\frac{\Delta z}{d_m} \leq 2 \left(\frac{t}{d_m} - 1 \right) \quad (5)$$

여기서, t 는 돌망태 매트리스 호안공의 두께이다. $\Delta z/d_m$ 와 C_*' 의 관계는 그림 6에서 나타냈으며, C_*'

값이 어떤 일정한 값을 넘어서면 매개변수 $\Delta z/d_m$ 는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 매트리스의 두께는 유효성을 잃지 않는 초기설계 조건보다 더욱 많은 불리한 조건에 저항할 수 있는 슬래그의 입경은 약 1.8~2배 정도이다.

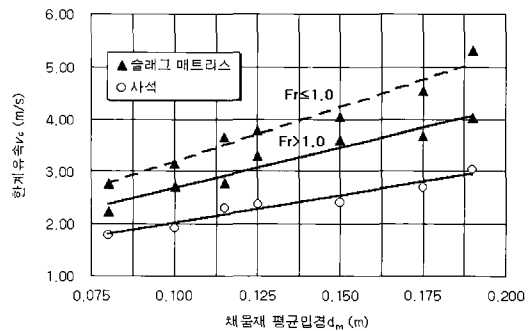


그림 3. 채움재 입경에 대한 하상보호공의 한계유속

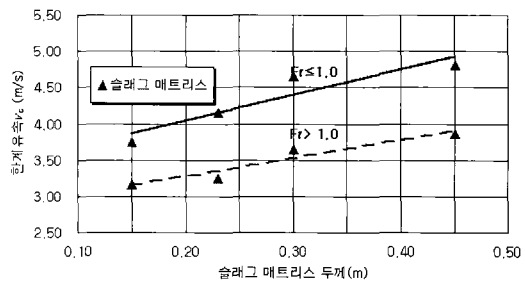
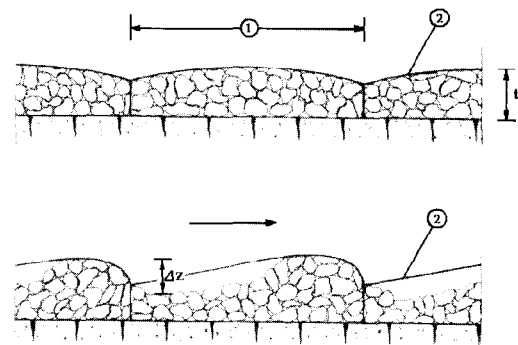


그림 4. 매트리스 대한 한계유속



- ① mattress compartment
- ② mattress lid

그림 5. 매트리스 구조내부에서 자갈이동과 변형

2.4 매트리스 경계면에서 침식저항에 관한 검토

매트리스와 바닥 흙과의 경계면에서 침식저항은 일반적으로 유속을 구하면서 할 수 있으며, 유속은 바닥 흙 재료에 따라 허용유속보다 더 작아야 한다. 매트리스의 경계면에서 유속은 식 (6)과 같다.

$$V_b = n_{filter}^{-1} (d_m/2)^{2/3} i_f^{1/2} \quad (6)$$

여기서, n_{filter} 는 조도계수(필터섬유 : 0.020, 자갈 필터 : 0.025)이다. 유속 V_b 는 바닥 재료와의 경계면에서 허용유속 V_e 와 비교되어야 한다. 자연 흙에 대한 V_e 의 값은 표 2.와 같다. 여기서, 필터섬유는 매트리스 아래에서 사용되고 필터를 통하여 지나가는 흐름 유속은 감소되며 이는 필터섬유 두께의 함수가 된다.

만약, 매트리스 아래에서 유속이 허용값보다 여전히 더 크다면 자갈필터를 사용하는 것이 권장된다. 일반적으로 자갈필터는 0.15m~0.20m 사이의 두께가 요구된다. 그리고 적어도 식 (7)보다 더 커야 한다.

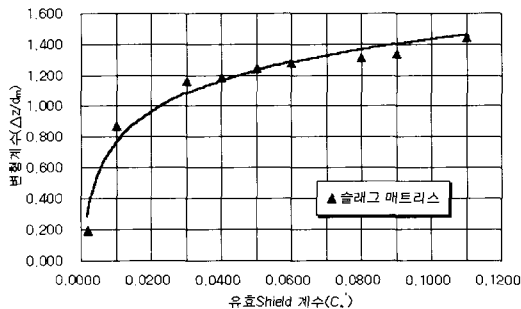


그림 6. 유효 Shield 계수에 대한 변형요소

표 2. 재료별 허용유속

흙 형태	허용유속(m/s)
Fine sand	0.760
Sand and gravel	1.500
Coarse gravel	1.800
Cobbles & Shingles	1.670
Shales & Hardpans(cohesive)	1.800
Silts with Cobbles(cohesive)	1.670

$$S = d_v/f(1-(V_e/V_b)^2) \quad (7)$$

여기서, f : Darcy-Weisbach 계수($f=0.05$)

d_v : 등가공극입경(필터 평균입자 크기의 1/5로 가정)이다.

3. 결론

수로바닥의 안정성을 확보하기 위해 다양한 호안공법이 지금까지 개발되어 왔다. 슬래그 매트리스는 이러한 요구에 알맞은 호안공법이며, 수로바닥의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. 매트리스의 철망은 세굴이 발생하는 수로에서도 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에도 강도를 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. 따라서, 슬래그 매트리스에 대한수리실험에 의한 안정성 검토와 수리학적 저항특성을 비교 고찰한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 슬래그 매트리스 호안공의 Shield 계수는 사석 호안공의 약 2배에 달하며, 이것은 동일한 수리학적 조건에서 매트리스에 사용된 슬래그의 평균입경이 사석의 1/2을 의미한다. 또한, 동일한 입경의 슬래그가 채움재로 사용될 때 허용유속에 대해서 매트리스의 경우 사석보다 거의 2배 이상 심지어 3~4배까지 견딜 수 있다.
- 2) 사석 호안공은 초기 거동조건을 넘어 한계조건에 도달하면 흐름에 의해 각각의 입자들은 분리되면서 점진적으로 파괴된다. 매트리스의 경우는 비록 초기 거동조건을 넘어 한계조건에 도달할지라도 철망에 의해 각각의 입자들은 분리가 억제됨을 알 수 있었다. 비록 변형된 매트리스일지라도 새로운 형태의 평형을 얻을 수 있으며, 더 이상의 변형과 악조건에도 저항하고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서, 수로바닥의 안정은 슬래그 매트리스 호안공이 가장 보편적인 공법이라 할 수 있으며, 더욱이 이것은 다공의 구조로서 하천생태계를 배려하고 수로를 안정화시키는 적절한 방법이라 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 환경부 한국환경기술진흥원이 추진하는 “2002년도 차세대 핵심환경기술개발사업”의 자유공모과제(과제번호 : 02-22-66)연구수행 결과의 일부이며, 연구비지원에 감사드립니다. >

참고/문/헌

1. 지홍기, 배상수, 임기석, 이순탁 (2000). 돌망태를 이용한 제방법면의 보호공법, 학술발표회논문집, 대한토목학회.
2. 지홍기, 배상수, 임기석, 허수영 (2001). 돌망태를 이용한 호안구조물의 수리학적특성, 학술발표회논문집, 한국수자원학회.
3. 배상수, 허창환, 지홍기, 이순탁(2002). 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성연구, 한국수자원학회 논문집 제35권 제1호
4. 배상수, 이경옥, 허창환, 지홍기(2002), 호안용 돌망태 매트리스의 수리학적 특성 연구, 한국농공학회논문집 제44권 제2호
5. Simons, D. B., Chen, Y. H. and Swenson, L. J. (1983). Hydraulic Test to Develop Design Criteria for the Use of Reno Mattresses, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins, Colorado.
6. Simons, D. B., Hi, R.H. and Liang, W. S. (1981). Design Guidelines & Criteria. Channels & Hydraulic Structures on Sandy Soils, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins, Colorado.
7. Fiuzat, A. A., Chen, Y. H. and Simons, D. B. (1982). Stability Tests of Rip-Rap in Flood Control Channels, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins Colorado.
8. Maynard, S. T. (1995). Gabion-mattress Channel Protection Design, J. Hydr. Engrg., ASCE, 121(7).