

## 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성 연구

### A Study on the Hydraulic Characteristics for River Bed Revetments using Mattress

배 상 수\* / 허 창 환\*\* / 지 홍 기\*\*\* / 이 순 탁\*\*\*\*

Bae, Sang Soo / Heo, Chang Hwan / Jee, Hong Kee / Lee, Soontak

---

#### Abstract

The condition of initial movement for the river bed revetment using rip rap is a limit condition beyond which the lining is progressively destroyed as the separate elements are removed by the flow. In the case of the river bed revetment using mattress, however, after the initial movement the containment offered by the mesh remains. A new situation of equilibrium with a deformed river bed revetment using mattress is obtained, allowing it to withstand more severe conditions without compromising the resistance and without further bed deformation.

Shield's coefficient for the river bed revetment using mattress is twice the value of that for the river bed revetment using rip rap. This means that with the same hydraulic behavior conditions, the average dimension of the rocks to be used in the river bed revetment using mattress is half that of the river bed revetment using rip rap rock. When the same size rocks are used the allowable velocity for the river bed revetment using mattress is more than twice, even as much as 3 or 4 times that for the river bed revetment using rip rap.

*keywords* : revetment using mattress, revetment using rip rap, Shield's coefficient, initial movement, bed deformation.

---

#### 요 지

하상보호용 사석은 초기 거동조건을 넘어 한계조건에 도달하면 흐름에 의해서 각각의 자갈 또는 석재가 분리되면서 점진적으로 파괴된다. 이와 반대로 하상보호용 매트리스의 경우는 비록 초기 거동조건을 넘어 한계조건에 도달할지라도 매트리스 철망에 의해 각각의 자갈 또는 석재의 분리가 역제가 될 수 있었다. 비록 변형된 하상보호용 매트리스일지라도 새로운 형태의 평형을 얻을 수 있으며, 더 이상의 변형과 나쁜 조건에서도 저항할 수 있음을 확인하였다.

---

\* 정회원 · 영남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 053-810-3791  
(E-mail : m0056012@chunma.yu.ac.kr)

\*\* 정회원 · 충주대학교 토목공학과 강사 043 843-9942  
(E-mail : chheo@hanmail.net)

\*\*\* 정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 053-810-2414  
(E-mail : hkjee@yu.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 이학박사 053-810-2416  
(E-mail : leest@yu.ac.kr)

동일한 수리학적 거동조건에서 하상보호용 매트리스의 채움재로 사용된 자갈 또는 석재의 평균 크기가 하상보호용 사석의 1/2 정도이며, 하상보호용 매트리스에서 Shield 계수는 하상보호용 사석의 약 2 배임을 알 수 있었다. 또한 동일한 크기의 자갈 또는 석재가 채움재로 사용될 때 허용유속에 대해서 하상보호용 매트리스의 경우 하상보호용 사석보다 2 배 이상 심지어 3~4 배까지 견딜 수 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 하상보호용 매트리스, 하상보호용 사석, Shield 계수, 초기거동, 하상변형.

## 1. 서 론

매트리스는 철망 내에 자갈 또는 석재를 채운 구조물로서 수로바닥의 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. 한편 매트리스는 다공체이기 때문에 침투성이 높아서 부력으로 인한 양력에 유효하게 대응할 수 있으며, 식물의 성장을 촉진시켜 식생수로를 쉽게 형성시키는 친생태성 구조물이다. 그러므로 수로바닥의 안정을 위한 공법으로 매트리스가 가장 널리 적용되고 있으며, 수로바닥의 자연경관을 고려하고 수로를 안정화시키는 적절한 방법이라 할 수 있다. 그러나 아직까지 매트리스의 수리학적 거동해석이나 수리학적 특성에 관한 연구가 미흡하여 이를 실용화하는데는 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

국내에서는 농업기반공사가 새만금간척사업에서 방조제물막이 수리모형시험을 통하여 매트리스의 안정성과 석재와 매트리스의 적정 혼합비율에 관한 수리모형 시험을 시행한 바 있으며, 당시의 실험을 통해서 박상현 (1997)은 방조제 제방구간의 투하석재와 돌망태의 안정성에 관한 수리실험을 수행한 결과를 발표하였다. 그리고 정철호 등 (1994)은 돌망태 옹벽의 변형거동 및 진단특성에 관한 연구와 기술 동향을 발표한 바 있으며, 윤태훈 등 (2000)에 의해서 돌망태에 의한 교각주변의 세굴방지에 관한 연구가 발표된 바 있다. 또한 최근에는 지홍기, 배상수 등 (2000, 2001)에 의해서 돌망태를 이용한 제방법면의 보호공법, 돌망태를 이용한 호안구조물의 수리학적 특성, 돌망태를 이용한 방재 및 친환경구조물 개발 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

국외에서는 하상보호용 매트리스의 수리학적 안정성을 검토하기 위한 실험이 미국 포트 콜린스 콜로라도대학 공학연구소 수리실험실에서 1982~1983년에 실험을 실시한 바 있으며, Simons, D. B. 등 (1983)은 하상

보호용 매트리스의 설계기준을 개발하기 위한 실험으로 설계에 필요한 기준을 제시한 바 있다. 미국 공병단의 Maynard, S. T. 등 (1995)이 유수에 의한 매트리스의 안정성에 관한 수리모형시험 연구를 수행한 바 있으며, 하상보호용 게비온-매트리스의 설계기준에 관한 연구가 있었다. 영국 윌링포드연구소의 Motyko, J. M. & Welsby가 매트리스를 이용한 해안방파 구조물 연구 등이 있으며, 독일 뉘른베르크에서 "Gabin 2000 박람회"를 개최하여 유럽뿐만 아니라 전세계에 돌망태의 친생태, 친환경성을 홍보하고 수리역학적으로 그 안정성을 홍보하고 있다. 한편 이태리 Maccaferri사의 Agostini, R. 등 (1988)은 유연성이 큰 게비온(Gabion)과 르노 매트리스(Reno Mattress)구조의 해석과 설계기준에 대하여 연구한 결과를 발표하여 세계 각국에 널리 보급되고 있다.

따라서 본 연구에서는 수로의 흐름조건에 따라 하상보호용 매트리스를 수리실험장에서 수리실험을 실시하여 수리학적 특성을 규명하고 수로의 흐름방정식 유도 및 매트리스의 조도계수 추정 및 수로바닥의 수리특성에 따른 수리해석 및 계산방법을 제시하였으며, 매트리스를 사용한 하상보호공의 차원 및 수리실험은 콜로라도 주립대학(Fort Collins - U.S.A.)에서 수행한 수리실험의 조건과 동일한 실험 방법을 실시하여 그 실험결과를 비교검토 하였다. 즉, 매트리스에 작용하는 소류력 및 유속에 대한 안정성, 변형 및 수리학적 저항특성 등은 수리실험을 통해서 비교 분석하여 매트리스가 하상보호공으로서의 우수함을 확인코자 하였다.

## 2. 수로의 수리이론 및 계산

### 2.1 수로의 흐름과 하상보호용 매트리스의 저항

개수로의 고정된 단면에서 발생하는 흐름의 형태 중에서 등류는 수로단면이 일정하고 배수(back water)는 단면 또는 상·하류 수로경사의 변화에 의해서 영향을 주지 않는다. 그림 1에서 수로의 종단면과 횡단면을

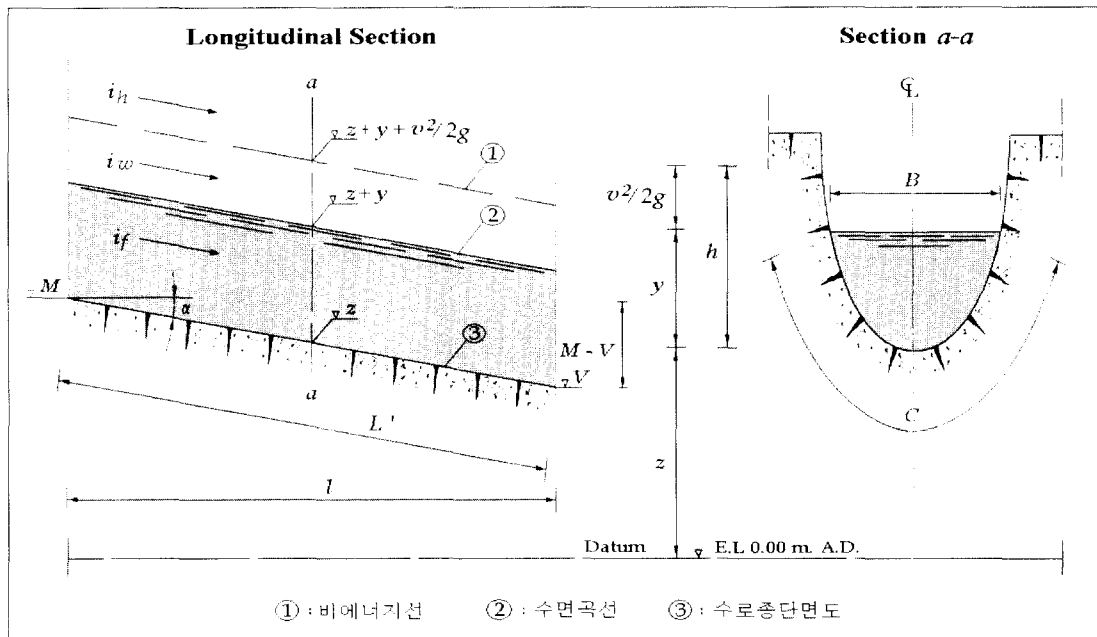


그림 1. 기하학 및 에너지요소에 사용된 기호

도해적으로 나타냈으며, 등류인 경우 각각의 경사는  $i_h = i_w = i_f$ 로 주어진다. 수로의 경사  $a$ 가 매우 작으면  $l = L'$ 가 되면서  $\sin a \approx \tan a$ 로 가정할 수 있다.

여기서,  $y$ : 수역에서 최대깊이(m),  $C$ : 유변(m),  $A$ : 수면적(m<sup>2</sup>),  $B$ : 수면의 폭(m),  $R = A/C$ : 동수반경(m),  $L'$ : 수로의 길이(m),  $l = L' \cos a$ : 수로의 수평방향 길이(m),  $M$ : 상류 바닥의 표고(EL. m),  $z$ : 단면 a-a 바닥의 표고(EL. m),  $V$ : 하류 바닥의 표고(EL. m),  $\alpha$ : 수로바닥과 수평면이 이루는 각,  $i_f = \sin a = (M - V)/l$ : 바닥경사,  $i_w$ : 수면경사,  $i_h$ : 에너지 경사,  $v$ : 평균유속(m/sec),  $g$ : 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>),  $v^2/2g$ : 속도에너지(m),  $h = y + v^2/2g$ : 비에너지(m),  $Q$ : 유량(m<sup>3</sup>/sec)이다.

따라서 등류에서 수로의 경사  $i$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = \frac{\lambda}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 동수반경과 조도에 영향을 미치는 요철의 평균크기와 Reynolds 수에 관계되는 조도함수이다.

식 (1)을 Chezy 공식으로 전환하면 유속  $v$ 는 식 (2)와 같다.

$$v = \chi \sqrt{Ri} \quad (2)$$

여기서,  $\chi$ 는 Chezy의 조도계수이며,  $\chi$ 와 조도함수  $\lambda$ 의 관계는 식 (3)과 같이 상호작용을 하게 된다.

$$\chi = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (3)$$

거친 수로에서 난류인 경우에 저항계수는 표면마찰과 동수반경에 관계되지만 Reynolds 수의 크기는 무시된다. 이 계수는 경험식으로 얻을 수 있으며, Bazin 및 Manning-Strickler 식이 사용되고 있다. Bazin 및 Manning-Strickler 식은 자연수로에 관계되는 동수반경  $R$ 과 조도계수( $\lambda, c, n$ )의 함수가 되기 위하여 Chezy의 조도계수  $\chi$ 는 식 (4) 및 식 (5)와 같이 가정하였다.

$$\chi = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \quad (4)$$

$$\chi = c R^{1/6} = 1/n R^{1/6} \quad (5)$$

여기서,  $c = 1/n$ 이며,  $n$ 은 Manning 조도계수이

표 1. 실험에 사용된 실물크기의 매트리스 치수

No.	두께 (m)	베쉬 (mm)	철선직경 ( $\Phi$ , mm)	자갈크기 (mm)
1	0.15	6×8	2.0~2.2	75~150
2	0.23	8×10	2.4~2.7	115~150
3	0.23	6×8	2.0~2.2	75~150
4	0.30	6×8	2.0~2.2	115~150
5	0.45	8×10	2.4~2.7	115~190

다.

## 2.2 하상보호용 매트리스의 조도계수 추정

바로바닥에 작용하는 Chezy의 조도계수  $\chi$ 는 Basin과 Manning-Strickler 식을 이용하여 구할 수 있으며, Meyer-Peter와 Muller 식에 의하면 모래와 자갈 등의 혼합사로 구성된 수로바닥의 Manning 조도계수  $n$ 은 식 (6)에서 구할 수 있다.

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (6)$$

여기서,  $d_{90}$ 은 수로바닥 재료의 90% 통과를 허용하는 체의 직경이다. 식 (6)은 이론적인 공식이며, 수로바닥의 재료가 모래와 자갈로 구성된 혼합사 수로에 적합하다. 유속이 증가함에 따라 매트리스 내의 자갈은 수로바닥에서 파랑운동에 의하여 하류쪽으로 움직이게 된다. 이 때 매트리스 구간 내에서 가장 높은 지점과 가장 낮은 지점 사이에서 수로바닥의 표고 차이가 채움재의 중간크기와 동일하다면 Manning 조도계수  $n$ 은 5% 정도 증가하는 것으로 알려져 왔다. 이러한 현상은 Manning 조도계수  $n$ 을 약간 증가시킬 것이다.

## 3. 매트리스를 사용한 하상보호공의 수리실험

### 3.1 수리실험 조건

실험은 (주)선비공영에 임시로 설치된 수리실험장에서 수행되었으며, 매트리스의 거동형태를 파악하기 위하여 실물크기 실험수로를 사용하였다. 그림 2(a) 및 그림 2(b)는 실물크기의 매트리스를 실험하는데 사용되는 실험장치를 나타냈으며, 수로는 가변경사로서 0~3% 경사가 가능하고 수로의 크기는 폭 2.00m, 높이 1.20m, 길이 25m인 수로로 구성되어 있다. 물은 저수조로부터 0.60m 관경을 통해 수로에 공급하며, 대략 2.50m<sup>3</sup>/sec의 유량을 공급할 수 있다. 본 실험 시스템은 실험수로 내에서 6m/sec 이상의 유속을 발생시킬

수 있으며, 유량의 조절은 수로 위에 위치한 밸브의 작동으로 이루어진다.

또한 표 1은 (주)선비공영에 임시로 설치된 실험수로에서 실험한 실물크기의 매트리스의 치수를 나타냈다. 하상보호용 매트리스 실험은 실제크기의 철망으로 제작된 매트리스를 사용하였다. 채움재는 하천 주변에서 쉽게 구할 수 있는 자갈과 채석장에서 공급되는 석재를 사용하였으며, 채움재는 약간의 모가 나있고 직경은 0.075~0.19m이다. 채움재를 채운후, 뚜껑은 안전하게 묶었으며, 매트리스는 모래/필터 바닥층 위에 설치하였다.

매트리스는 모래/필터섬유 바닥층 위에 놓여졌으며, 모래바닥의 0.14m 층 위에 폴리프로필렌 필터섬유를 깔았다. 바닥모래는 젓어있고 섬유필터 설치 전보다 치밀하며, 섬유필터는 수로옆 벽위에 못으로 고정하였다.

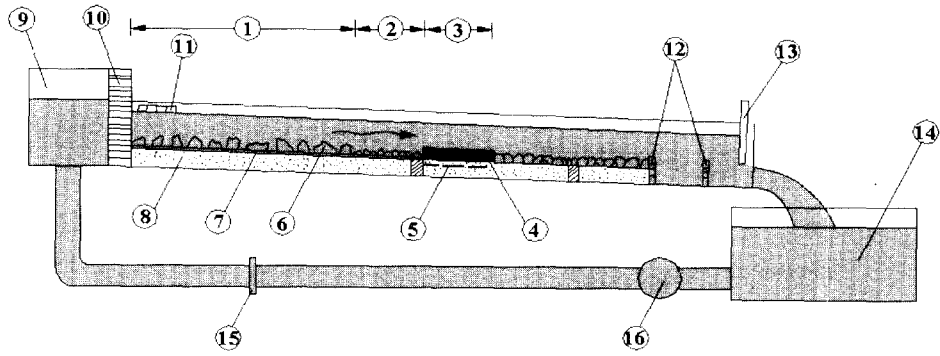
### 3.2 실험방법 및 수리조건

본 실험에서는 흐름단면과 매트리스가 설치된 수로바닥에서 유속, 조도계수의 결정, 저항운동의 분석, 하상보호공의 안정성 연구 그리고 수로바닥에 매트리스가 설치된 조건에서 하상보호공의 변형분석 등을 연구하고자 하였다.

매트리스 하상보호공에서는 Shield 계수  $C^*$ 를 결정하는 것이 가장 중요하다. 이 값은 동일한 이론적인 기준을 따르는 다른 하상보호공과 비교하여 안정성을 분석할 수 있으며, 특히 느슨한 사석 하상보호공과 비교하여 매트리스 하상보호공의 장점을 제시하고자 하였다.

그림 3은 실험수로에서 매트리스 구간을 통과하는 지점에서의 유량(매트리스 상·하부의 유량 :  $Q_s$  및  $Q_m$ ), 매트리스 변형 전·후의 수심(매트리스 변형부의 수심 :  $y_1$  및  $y_2$ ) 및 이 때의 유속( $v_1$  및  $v_2$ )를 나타냈으며, 다음과 같은 방법을 이용하였다.

먼저, 유량의 조절과 측정은 세 개의 펌프를 이용하여 각각의 실험환경에 요구되는 흐름비를 만들기 위해서 단독 또는 복합적으로 사용된다. 각 펌프에서 제공된 흐름비는 모든 펌프의 공급라인에 위치한 오리피스



- |            |             |              |           |
|------------|-------------|--------------|-----------|
| (1) 흐름발생단면 | (5) 필터층유    | (9) 고수조      | (13) 수문   |
| (2) 변이단면   | (6) 자갈 및 사석 | (10) 나팔관     | (14) 저수조  |
| (3) 실험단면   | (7) 콘크리트    | (11) 파랑 방지장치 | (15) 오리피스 |
| (4) 매트리스   | (8) 모래기초    | (12) 포착장치    | (16) 펌프   |

그림 2(a). 실물크기 실험에 사용된 실험수로 개요도

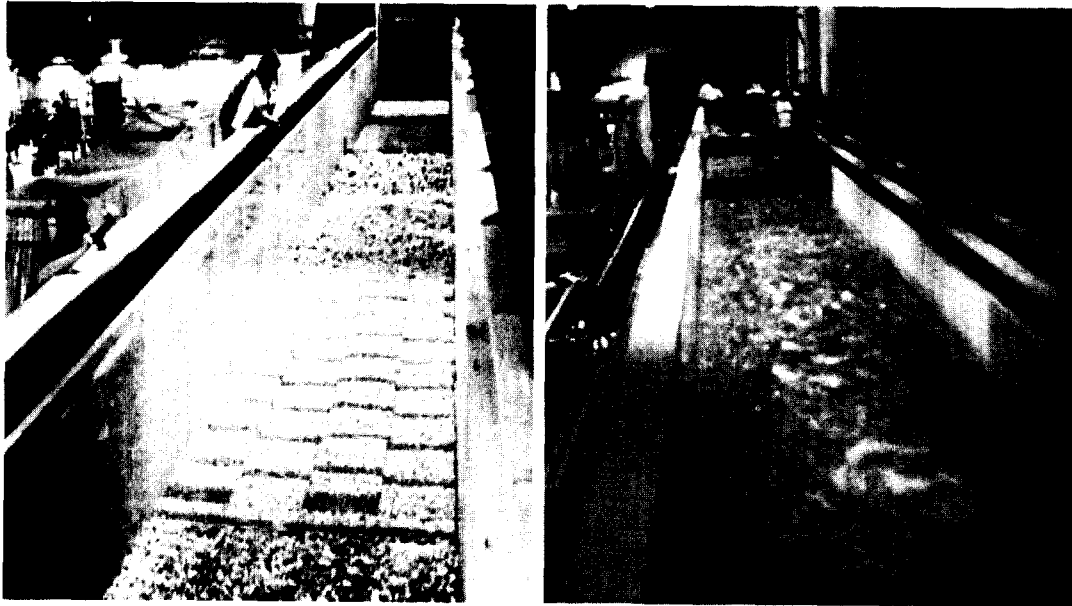


그림 2(b). 실물크기 실험에 사용된 실험수로

를 지나면서 수두차로서 유량값을 측정할 수 있다.

다음으로, 수심의 조절과 수위와 유속의 측정에서 상류조건( $Fr \leq 1$ )에서 흐름의 깊이는 수로의 하류부에 위치한 수문에 의해 맞춰진다. 상류조건( $Fr > 1$ )에 대해서는 흐름의 깊이는 유량, 수로경사, 수로바닥의 조도에 의해 결정되며, 하류 수문은 흐름을 조절하는데 이용된

다. 또한 포인트 게이지는 물과 수로바닥면의 높이를 측정하는데 이용되었다. 유속은 프로펠러 타입의 유속계를 이용하여 측정하였다.

마지막으로, 실험전 중, 후에 발생하는 연속적인 단계는 실험전에서는 수로경사 설치 및 육안과 사진으로 실험전 환경을 확인하며, 기록계를 조절한다. 실험중에

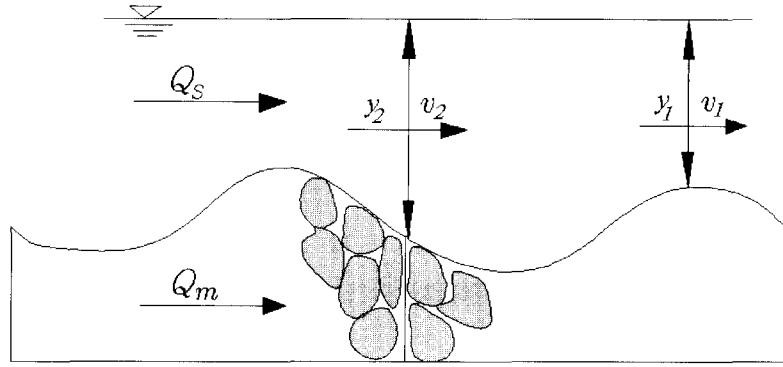


그림 3. 실험수로에서 매트리스 변형 전·후의 수리특성

는 펌프의 조절로 원하는 흐름조건, 유량 그리고 수심을 얻는다. 펌프 유량의 관계를 이용한 액주계 값을 통해 전체유량을 결정한다. 수면경사, 수심, 흐름조건을 결정하기 위하여 포인트 게이지를 이용, 매트리스 테스트 단면위의 수면 높이를 측정한다. 수로의 센터라인에서 유속계를 이용하여 평균 유속을 측정한다. 상류와 하류끝으로부터 1.5m 지점에 위치한 세 개의 단면과 매트리스 실험단면의 중간에서 측정된 값을 얻는다. 실험후에는 펌프를 정지하고, 수로의 물을 뺀다. 매트리스에서 암석이동, 철망의 변형 또는 실험으로 인한 어떤 변화에 대해서도 세밀히 조사한다. 매트리스에서 관찰

된 중요한 변화를 기록하기 위해 사진을 찍는다.

표 2는 실험수로에서 매트리스의 상·하부의 수리특성인 매트리스 상부와 하부공극을 통해서 흐르는 각각의 유량 ( $Q_s$  및  $Q_m$ ), 매트리스 변형 전·후의 유속 ( $v_1$  및  $v_2$ ) 및 수심 ( $y_1$  및  $y_2$ )를 나타낸 값이다.

또한 실험수로에서 유량의 크기에 따른 예비실험을 실시하였으며, 각 유량의 크기와 수로경사에 따라 측정된 수심 ( $y$ ), 유속 ( $v$ ), 전단응력( $\tau$ ), Shield 계수 ( $C^*$ ), Froude 수 ( $F_r$ ) 및 조도계수 ( $n$ )는 표 3과 같았다.

표 2. 실험수로에서 매트리스 상·하부의 수리특성

공급유량 ( $Q$ , $m^3/s$ )	유 속 ( $v$ , $m/s$ )	깊 이 ( $y$ , $m$ )	유 속 ( $v$ , $m/s$ )	깊 이 ( $y$ , $m$ )	매트리스위 유량 ( $Q_s$ , $m^3/s$ )	매트리스내 유량 ( $Q_m$ , $m^3/s$ )
0.51	2.07	0.10	2.07	0.10	0.38	0.13
0.85	3.29	0.12	3.08	0.13	0.74	0.11
1.13	3.78	0.13	3.23	0.17	1.01	0.12
1.70	5.00	0.15	4.32	0.20	1.57	0.13
2.27	5.30	0.17	4.08	0.27	2.14	0.13
2.50	5.91	0.17	4.45	0.30	2.43	0.12

표 3. 실험수로에서 유량의 크기에 따른 예비실험 결과

유 량 ( $Q$ , $m^3/s$ )	수로경사 ( $m/m$ )	수 심 ( $y$ , $m$ )	유속 ( $v$ , $m/s$ )	전단응력 ( $\tau$ , $Kg/m^2$ )	Shield 계수 ( $C^*$ )	Froude 수 ( $F_r$ )	조도계수 ( $n$ )
1.50	0.004	0.66	2.16	2.60	0.044	0.86	-
1.98	0.004	0.79	2.25	3.15	0.053	0.81	-
1.56	0.010	0.55	2.64	5.55	0.094	1.13	0.0199
2.04	0.010	0.64	2.75	6.40	0.108	1.10	0.0208
2.41	0.010	0.74	2.96	7.40	0.125	1.10	0.0205
2.01	0.020	0.57	3.30	11.33	0.192	1.40	0.0243
2.58	0.020	0.65	3.50	13.04	0.221	1.38	0.0247

#### 4. 수리실험 결과 분석

##### 4.1 소류력에 의한 하상보호공의 안정성 실험

###### 4.1.1 소류력에 의한 안정성 검토

일반적으로 사석이나 매트리스 하상보호공은 자갈 또는 석재가 각각의 움직임이 없을 때에 안정하다고 할 수 있다. 따라서 사석 하상보호공과는 달리 매트리스 하상보호공은 철망 내에 자갈 또는 석재로 채워지며, 이들 구조물에서 안정성의 한계는 전단응력이 채움재를 막 이동시키려는 초기거동 응력지점과 같다. 수로바닥에서 하상보호공의 전단응력  $\tau_b$ 는 식 (7)에서 구할 수 있다.

$$\tau_b = \gamma_w y i \quad (7)$$

여기서,  $\gamma_w$  : 물의 비중,  $y$  : 수심,

$i$  : 수로바닥의 경사이다.

동일한 직경을 가지는 자갈 또는 석재는 채움재의 평균 직경  $d_m$ 과 동일하다. 또한 자갈 또는 석재의 크기는 식 (8)에서 구할 수 있으며, Shield 계수로 정의된다.

$$C^* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} \quad (8)$$

여기서,  $\tau_c$  : 초기거동의 한계상태일 때의 전단응력,

$\gamma_s$  : 자갈 또는 석재의 비중이다.

식 (8)에서  $(\gamma_s - \gamma_w) d_m$ 은 채움재의 수중 단위 중량 때문에 수로바닥에서 수직응력에 비례한다. 따라서 Shield 계수는 그 결과 마찰계수와 유사하다. 수로바닥에서 전단응력은 채움재의 거동(한계 전단응력) 없이 도달될 수 있으며, 그 결과는 식 (9)와 같다.

$$\tau_c = C^* (\gamma_s - \gamma_w) d_m \quad (9)$$

따라서 매트리스 하상보호공은 식 (7)과 식 (9)를 비교해서 얻은 부등식인 식 (10)을 증명할 수 있으면 안정하다고 할 수 있다.

$$\tau_b \leq \tau_c \quad (10)$$

한편 Agostini, R. 등 (1988)에 의하면 철망에 채워지지 않는 느슨한 사석 하상보호공에 대한 Shield 계수는  $C^* = 0.047$ 이며, 철망에 채워진 자갈 또는 석재 매트리스에 대한 Shield 계수는 식 (11)과 같다.

$$C^* \cong 0.10 \quad (11)$$

###### 4.1.2 소류력에 의한 하상보호공의 안정성 실험

하상보호공에서 사석이나 매트리스 채움재가 동일한 크기  $d_m$ (0.080, 0.100, 0.115, 0.125, 0.150, 0.175, 0.190 m)으로 나누어 실험을 실시하였다. 자갈 또는 석재의 크기에 따른 한계 전단응력은 매트리스 하상보호공의 채움체인 자갈이나 석재의 크기를 나타냈으며, 그 결과는 표 4 및 그림 4와 같았다. 여기서, 채움재의 크기가 달라짐에 따라 Shield 계수와 조도계수가 변화할 수 있으나 이를 감안하더라도 전단응력은 대체로 매트리스를 사용할 경우보다 사석을 사용할 경우에 거의 2배 이상이 됨을 알 수 있었다. 이러한 현상은 철망에 의해서 채움재 내의 각각의 자갈 또는 석재가 제약을 받기 때문인 것을 알 수 있었으며, 또한 매트리스 철망은 사석과 비교하여 한계전단응력에 대한 채움재의 안정성을 강화시키고 있음을 알 수 있었다.

매트리스 하상보호공의 내부 채움재가 초기거동을 유발하는 유속과 전단응력은 사석을 사용하는 경우보다 2 배 정도 소요되며, 이에 대응하는 Shield 계수는 진 질에서 언급했듯이 사석에서 대략  $C^* = 0.047$ 이고 매트리스에서  $C^* = 0.10$ 이다. 매트리스 철망은 채움재의 안정성을 크게 증가시키며, 실험에서 매트리스 구조물의 안정성은 같은 두께에서 사석의 안정성보다 크다는 것을 가리킨다. 이와 같은 안정성을 얻기 위해서는 사석구조물의 자갈 및 석재의 크기는 매트리스내 채움재의 자갈 및 석재의 크기보다 약 2 배 정도 커야하고, 매트리스보다 두꺼워져야 한다. 이것은 매트리스 구조물이 사석보다 경제적이란 것을 알 수 있었으며, 유속이 6m/sec 이하에서는 제시된 사석의 두께가 50~200%가 줄어드는 효과를 보여준다.

흐름에 의한 이동을 막는 매트리스 하상보호공의 기능은 이동에 저항하는 결속력에 달려있으며, 매트리스 내의 채움재는 철망에 의해 구속되어 있다. 일반적으로 유속과 전단응력이 한계에 도달했을 때, 매트리스 내의 채움재는 주요 흐름방향으로 이동하기 시작한다. 매트리스 하상보호공 실험에서 매트리스의 철망은 전단응력을 두 배로 늘림으로써, 사석과 비교하여 채움재의 안정성을 증가시킨다. 사석 하상보호공의 Shield 계수가 대략  $C^* = 0.047$ 인 것에 비하여 매트리스는  $C^* = 0.10$ 의 값을 가지게 되며, 이러한 현상은 매트리스가 적절하게 설계되고 설치되어 있다면 사석 구조물보다

표 4. 자갈크기별 사석과 매트리스 하상보호공의 한계 전단응력

자갈크기(d <sub>m</sub> , m)	한계전단응력(τ <sub>s</sub> , Kg/m <sup>2</sup> )	
	사 석	매트리스
0.080	5.64	12.06
0.100	7.08	15.94
0.115	10.35	22.45
0.125	10.56	23.50
0.150	11.84	26.70
0.175	13.22	32.77
0.190	15.38	37.20

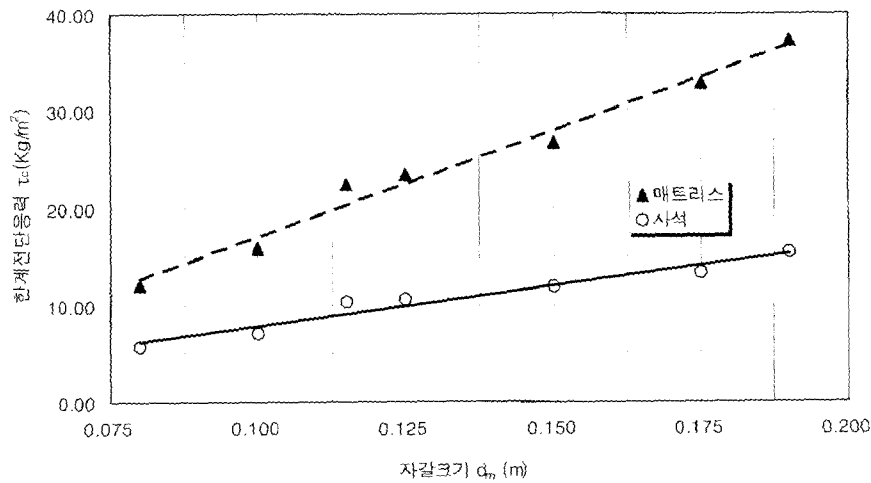


그림 4. 자갈크기별 사석과 매트리스 하상보호공의 한계 전단응력

안정적임을 알 수 있었다.

#### 4.2 유속에 의한 하상보호공의 안정성 실험

##### 4.2.1 유속에 의한 안정성 검토

하상보호공의 안정성을 추정하는데 있어서 유속(단면에서 흐름의 평균유속  $v$ )은 매우 중요한 관계가 있으며, 한계유속은 수심  $y$ 와 관계가 있다. 실제로 유속과 수심은 서로 연관성이 있으며, 수로바닥에서 전단응력, 유속, 동수반경 그리고 조도계수와 관련된 식 (12)와 같이 Manning 공식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_b = \gamma_w n^2 \frac{v^2}{R^{1/3}} \quad (12)$$

식 (12)는  $\tau_b = \gamma_w R i$  처럼 평균  $\tau$ 를 표현하면서 얻을 수 있으며, 경사  $i$ 는 Manning 공식의 마찰경사

와 같다.

##### 4.2.2 유속에 의한 하상보호공의 안정성 실험

###### 1) 유속과 전단응력

표 5와 그림 5는 식 (12)의 관계들을 나타냈으며, 그림 5에서 직선은 Manning 조도계수  $n=0.025$ 라는 가정 하에 결정되었다. 실험에서 얻은 결과는 식 (12)의 이론적인 값과 매우 일치하고 있음을 보여주고 있다. 식 (12)는 유속과 전단응력은 동수반경과 반비례하는 것을 알 수 있다. 또한 전단응력은 유속과 같은 관계가 있고 수심과는 별로 관계가 없음을 알 수 있다. 전단응력이 주어진 유속에 대해서 매트리스나 사석의 하상보호공을 안정화시키는데 제어하는 요소가 됨으로, 수심이 커질 때 전단응력의 감소로 인하여 안정성은 증가하게 될 것이다. 매트리스 하상보호공의 안정성은 일반적인 패턴을 따른다고 가정하고 빠른 유속과 상대적으로



표 5. 매트리스에 작용하는 전단응력 대 유속 및 동수반경과의 관계

$v^2 / R^{1/3}$	전단응력( $\tau$ , Kg/m <sup>2</sup> )
1.24	0.72
4.85	2.65
5.46	4.15
8.38	4.92
12.45	8.50
15.67	9.16
16.78	9.92
17.12	11.35
19.35	12.07

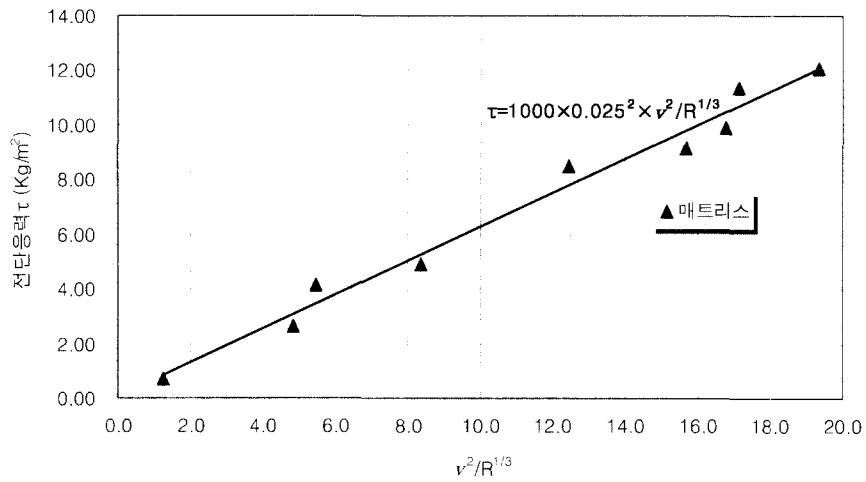


그림 5. 매트리스에 작용하는 전단응력 대 유속 및 동수반경과의 관계

얕은 수심의 환경에서, 깊은 수심에서 보다 더 큰 한계 상황을 만난다. 매트리스와 사석 구조물의 안정성은 주로 유속에 영향을 많이 받고 수심의 영향을 적게 받는다. 매트리스와 사석 구조물에서 유속과 수심의 상대적 효과는 약 6:1이다.

따라서 하상보호용 매트리스는 유속조건과 관계없이 변화하지 않고 매트리스 하류부의 유속은 매트리스 두께에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 흐름이 매트리스 표면과 평행이 될 때만 적용이 된다. 매트리스와 필터의 경계면에서 유속은 동수반경이 대략 자갈 또는 석재 층상의 1/2이고 Manning 조도계수  $n$ 은 0.025을 가진다고 추정된 Manning 공식을 이용하여 개략적으로 결정할 수 있다.

## 2) 자갈크기와 한계유속

표 6 및 그림 6은 중간 채움재의 크기에 대한 사석과 매트리스 하상보호공의 한계유속  $v_c$ 를 나타냈다. 동일한 유속에 대해서 전 절에서 설명한 바와 같이 사석과 매트리스 하상보호공의 두께는 얕은 수심조건에서도 깊은 수심조건과 동일한 안정성을 얻기 위해서는 사석과 매트리스의 두께가 커져야 한다. 사석 하상보호공의 Shield 계수  $C^* = 0.047$ 을 근거로 결정된 사석과 매트리스 하상보호공의 초기거동에 대한 한계유속은 그림 6에 도식화되었다. 이 그림은 매트리스의 철망이 자갈 및 석재를 묶어줌으로써 채움재의 안정성을 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 0.075~0.19 m 크기의 자갈 또는 석재를 움직이게 하는 유속은 사석 하상보호공의 경우 2.81~4.48 m/sec, 매트리스 하상보호공인 경우 3.18~

7.01 m/sec까지 지탱해주고 있음을 보여주고 있다.

동일한 크기의 자갈 또는 석재가 주어진다면 매트리스 하상보호공은 사석 하상보호공보다 더 큰 유속에서도 저항할 수 있으며, 동일한 유속이 주어진다면 매트리스는 사석보다 요구되는 두께가 더 적다. 매트리스 하상보호공에 대한 Shield 계수는 느슨한 사석 하상보호공 보다 약 2 배 정도 더 크다. 표 6과 그림 6은 매트리스 하상보호공 두께에 따른 한계유속  $v_c$ 을 나타냈으며, 수로의 흐름이  $Fr \leq 1.5$  및  $Fr > 3.0$ 일 때, 실험에서 사용되는 매트리스 하상보호공에 의해서 저항하는 자갈크기 ( $d_m$ )에 따른 한계유속을 나타냈다.

### 3) 매트리스 두께와 한계유속

표 7 및 그림 7은 매트리스 하상보호공의 초기거동을 일으키는 한계유속과 매트리스 두께에 대해서 도식화하였으며, 하상보호용 매트리스 두께는 한계류 또는

상류( $Fr \leq 1.5$ )에 대한 매트리스 두께와 동일한 안정성을 얻기 위해서는 아주 큰 사류( $Fr > 3$ )에서는 한계유속이 작아져야 됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 결정된 다양한 매트리스 하상보호공의 두께는 동일한 한계유속에 대하여 상류( $Fr \leq 1.5$ )보다 사류( $Fr > 3$ )에서 더 큰 매트리스 하상보호공의 두께가 요구됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 수로의 흐름이  $Fr \leq 1.5$  및  $Fr > 3.0$ 일 때, 매트리스 하상보호공의 두께에 따른 새로운 한계유속을 이용함으로써 매트리스의 두께를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

### 4) 하상보호공의 두께와 한계유속

또한 표 8과 그림 8은 동일한 크기의 자갈 또는 석재가 채움재로 사용될 때 허용유속에 대해서 매트리스 하상보호공의 경우 사석 하상보호공 보다 2배 이상 심지어 3~4 배까지 견딜 수 있음을 알 수 있다. 사석과

표 6. 채움재의 크기에 대한 사석과 매트리스 하상보호공의 한계유속

자갈크기( $d_m$ , m)	한 계 유 속( $v_c$ , m/s)		
	매 트 리 스		사 석
	$Fr \leq 1.5$	$Fr > 3$	
0.080	3.96	3.18	2.81
0.100	4.48	3.88	2.96
0.115	4.88	3.98	3.45
0.125	5.40	4.72	3.57
0.150	5.77	5.13	3.66
0.175	6.72	5.55	4.12
0.190	7.01	6.18	4.48

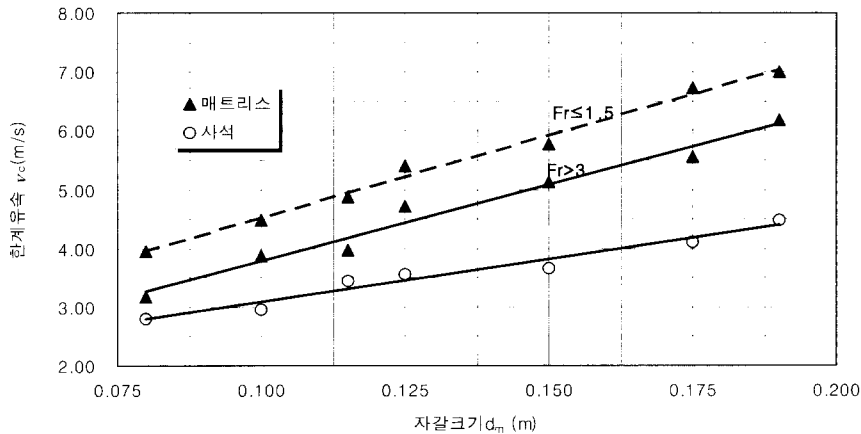


그림 6. 채움재의 크기에 대한 사석과 매트리스 하상보호공의 한계유속

표 7. 매트리스 하상보호공 두께에 따른 한계유속

매트리스 두께( $t$ , m)	한 계 유 속( $v_c$ , m/s)	
	$Fr \leq 1.5$	$Fr > 3$
0.15	4.23	3.56
0.23	4.44	4.05
0.30	5.02	4.16
0.45	5.27	4.52

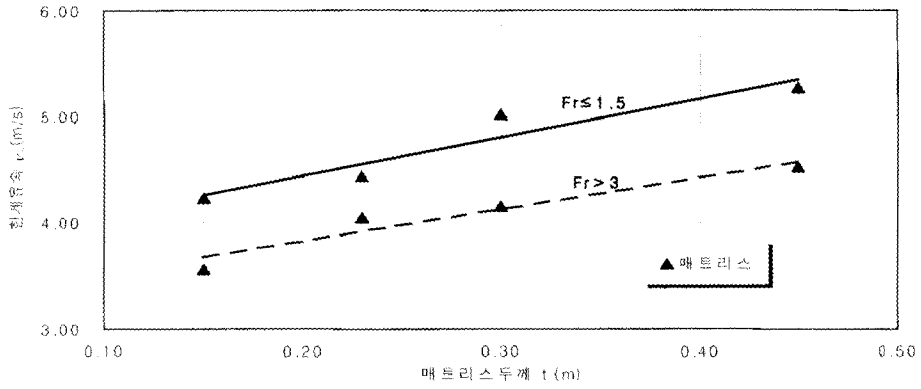


그림 7. 매트리스 하상보호공 두께에 따른 한계유속

표 8. 하상보호공의 두께와 한계유속

하상보호공 두께 ( $t$ , m)	한 계 유 속( $v_c$ , m/s)			
	사 석 층		매트리스	
	$t = 1.5d_m$	$t = 2.0d_m$	굵은자갈	작은자갈
0.15	1.98	1.65	4.22	3.32
0.23	2.40	2.25	4.57	3.97
0.30	2.94	2.33	5.20	4.16
0.45	3.34	2.88	5.73	4.88

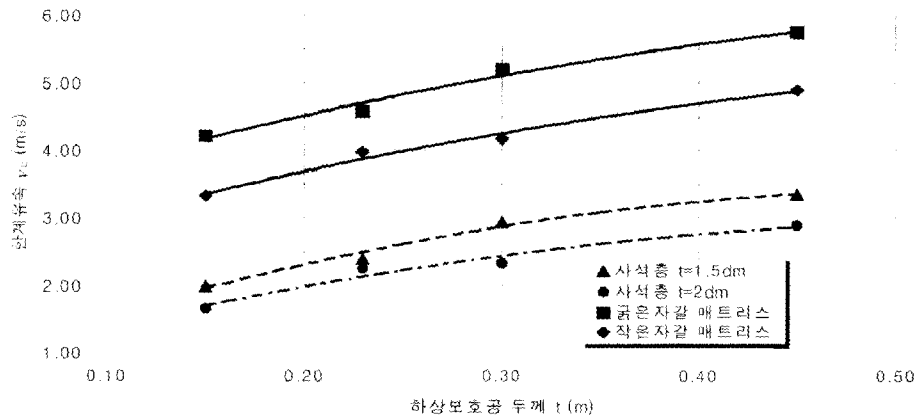
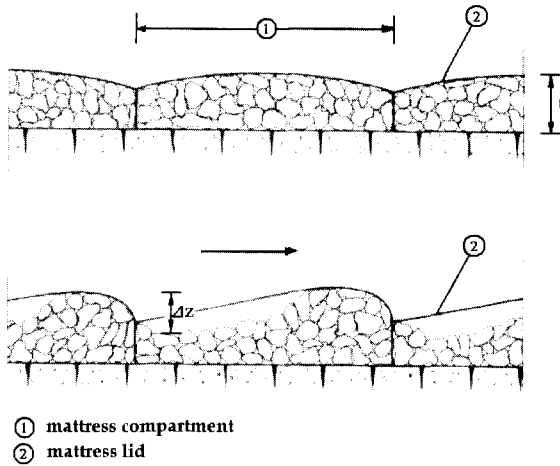
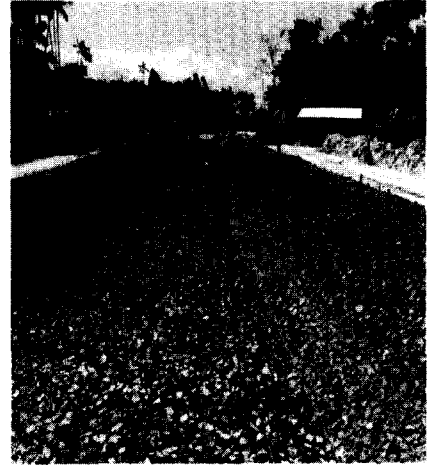


그림 8. 하상보호공 두께와 한계유속의 관계



① mattress compartment  
② mattress lid

(a)



(b)

그림 9. 매트리스 구조내부에서 자갈이동과 변형

매트리스의 사용에서 매트리스를 사용하면 25~30 %의 절약효과가 있다는 것을 알 수 있으며, 더욱이 사석과 비교하여 매트리스의 수중설치는 적어도 50 %의 절약효과가 있다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 변형효과의 평가 실험

#### 4.3.1 변형효과의 검토

전단응력이 초기 거동조건에 도달할 때, 철망 내의 자갈 또는 석재는 그림 9와 같이 매트리스 내의 채움재 일부가 하류측으로 이동한다. 만약 전단응력이 더욱더 증가하면 다음 두 가지 중의 한 가지 현상이 발생될 것이다. 먼저, 매트리스 하상보호공 아래의 바닥 흙이 드러나게 되면 하상보호공이 그 효력을 상실하게 된다. 다음으로, 철망이 구속력을 발휘할 수 있는 강도의 범위 내에서 새로운 평형상태에 도달하게 될 것이다. 매트리스 하상보호공에 의한 보호의 정도는 매트리스 하상보호공 아래에서 유속이 그다지 크게 변화하지 않기 때문에 바닥 흙이 드러나지 않는 한 변형 후에도 변화는 발생되지 않는다.

변형의 정도를 추정하기 위해서 매개변수  $\Delta z/d_m$ 가 사용되었다. 여기서,  $\Delta z$ 는 그림 9(a)에서 매트리스 하상보호공 구간 내에 가장 높은 채움자갈 또는 석재 표면과 가장 낮은 채움자갈 또는 석재 표면과의 차이이며, 그림 9(b)는 하상보호용 매트리스를 현장에 시공한 사례이다. 따라서  $C_s^*$ 는 유효 Shield 계수로서 정의될

수 있으며, 식 (13)과 같다.

$$C_s^* = \frac{\tau_b - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} \quad (13)$$

매트리스 하상보호공 구간의 상류측 채움자갈 또는 석재 두께의 감소는  $\Delta z/2$ 이다. 그러므로 바닥 흙이 흐름에 직접적으로 드러나지 않고 보호되기 위한 기본적인 조건은 식 (14)를 만족해야 한다.

$$\frac{\Delta z}{d_m} \leq 2 \left( \frac{t}{d_m} - 1 \right) \quad (14)$$

여기서,  $t$ 는 매트리스 하상보호공의 두께이다.

#### 4.3.2 변형효과의 실험

$\Delta z/d_m$ 와  $C_s^*$ 의 관계는 표 9와 같고 이를 그림 10에서 곡선으로 나타냈으며,  $C_s^*$  값이 어떤 일정한 값을 넘어서면 매개변수  $\Delta z/d_m$ 는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유 때문에 매트리스 하상보호공의 두께는 유효성을 잃지 않는 초기 설계조건보다 더욱 많은 불리한 조건에 저항할 수 있는 안정한 자갈 또는 석재의 크기는 1.8~2.0배이다. 전 절에서 보는 바와 같이  $t_b$ 는  $t_c$ 의 범위를 넘는 것은 허용되지만 20 % 이상은 허용되지 않으며, 이것은 아무리 주어진 설계유량에서 변형을 조절하기 위해서라도 필요하다. 또한 초기 설계유량보다 더 많은 유량에서도 변형은 추정될 수 있으며, 변형은 하상보호공의 두께, 철망의 구간

표 9. 유효 Shield 계수에 대한 변형요소

유효 Shield 계수( $C_s$ )	변형요소( $\Delta z/d_m$ )
0.002	0.22
0.010	0.98
0.030	1.31
0.040	1.34
0.050	1.40
0.060	1.44
0.080	1.48
0.090	1.51
0.110	1.63

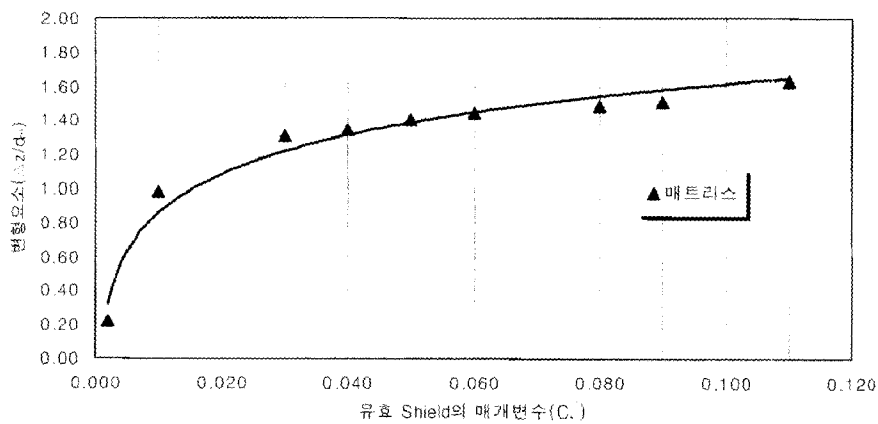


그림 10. 유효 Shield 계수에 대한 변형요소

크기, 철망의 강도 그리고 자갈 또는 석재의 밀도에 의존하는 경향이 있다.

그림 10에 의하면 매트리스에 의해 보호된 흙은 한계유속까지는 노출되지 않았으며, 심지어는 초기 거동 조건보다 큰 흐름의 지배하에서도 바닥재를 보호하는 효과를 가지고 있다. 매트리스가 매우 빠른 흐름에 지배될 때 매트리스 구획내의 자갈 또는 석재는 하류부로 전달되고 파동에 의한 변형표면을 유발시킨다. 만일 감소된 자갈 또는 석재의 두께가 중간 채움재 크기보다 크면 매트리스는 수로보호에 유효하다.

유속과 전단응력의 증가는 많은 양의 자갈 또는 석재를 매트리스 상류부에서 하류부로 이동시킬 것이다. 이것은 매트리스 위의 부분에 있는 자갈 또는 석재 두께의 감소와 아래 부분의 자갈 또는 석재두께의 증가를 가져올 것이다. 변형요소는 매트리스 구획내의 크고 작은 자갈 또는 석재 표면의 아주 다른 비에 의해 정의된

다. 이 비는 유효 Shield 계수에 관련되어 있다. 이 관계는 수리학적 조건과 매트리스 강도의 기능에 대한 매트리스의 변형을 결정하기 위하여 사용한다.

매트리스 실험에 근거하면 매트리스 움직임의 범위가 크지 않다면 매트리스 변형은 특별한 매트리스 아래의 수두변화에 큰 영향을 끼치지 않는다. 이것은 변형후의 매트리스는 변형전 매트리스와 비슷하게 구조물을 보호한다는 것을 보여준다. 매트리스/필터의 경계면의 유속이 바닥층의 안정성에 영향을 준다면 자갈필터 혹은 섬유필터/자갈필터의 혼합재는 바닥물질을 손상시키는 매트리스/필터 사이의 경계유속을 감소시키기 위해 사용해야 한다.

## 5. 결론

수로바닥의 안정성을 확보하기 위해 다양한 하상보호 공법이 지금까지 개발되어 왔다. 매트리스 하상보호

공은 이러한 요구에 알맞은 하상보호 공법이며, 수로바다의 침식을 억제하고 수로의 안정화에 사용되고 있다. 매트리스 하상보호공의 철망은 세굴이 발생하는 수로에서도 변형에 유연하게 적응하는 유연성을 가지고 있으며, 철망으로 조직된 구조물이기 때문에 변형 또는 유수력에도 강도를 발휘할 수 있는 특수성을 지니고 있다. 한편 매트리스 하상보호공은 다공체이기 때문에 침투성이 있어서 부력에 유효하게 대응할 수 있으며, 초기에는 철망에 부유물이 걸릴 경우 미관상 다소 불리할수도 있으나 식물의 성장을 촉진시켜 식생수로를 쉽게 형성시키는 친생태성 구조물이다. 따라서 매트리스 하상보호공에 대한 수리이론 및 계산과 수리실험에 의한 안정성 검토와 매트리스 하상보호공의 수리학적 저항특성을 비교 고찰한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 매트리스 하상보호공의 Shield 계수는 사석 하상보호공의 2 배에 달하며, 이것은 동일한 수리학적 조건에서 매트리스 하상보호공에 사용된 자갈 또는 석재의 평균크기가 사석의 1/2을 의미한다. 또한 동일한 크기의 자갈 또는 석재가 채움재로 사용될 때, 허용유속에 대해서 매트리스 하상보호공의 경우 사석 하상보호공 보다 2 배 이상 심지어 3~4 배까지 견딜 수 있다.
- 2) 사석 하상보호공은 초기 거동조건을 범위를 지나 한계조건에 도달하면 흐름에 의해 각각의 자갈 또는 석재가 분리되면서 점진적으로 파괴된다. 매트리스 하상보호공의 경우는 비록 초기 거동조건을 범위를 지나 한계조건에 도달할지라도 철망에 의해 각각의 자갈 또는 석재의 분리가 억제됨을 알 수 있었다. 비록 변형된 매트리스 하상보호공 일지라도 새로운 형태의 평형을 얻을 수 있으며, 더 이상의 변형과 약조건에도 저항하고 있음을 확인할 수 있었다.

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

### 감사의 글

이 논문은 2001학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의해서 수행되었으며, (주)선비공영의 제품지원과 실험장비에 의해서 실험이 수행되었는 바, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 박상현 (1997). 방조제 개방구간의 투하석재와 돌망태 안정성 수리실험 연구, **한국관개배수 논문집**, 제4권 제2호, 한국관개배수위원회.
2. 윤태훈, 김대홍, 이지송 (2000). 돌망태에 의한 교각세굴 방지, **한국수자원학회 논문집**, 제33권 제6호, 한국수자원학회.
3. 지흥기, 배상수, 임기석, 이순탁 (2000). 돌망태를 이용한 제방법면의 보호공법, **학술발표회 논문집**, 대한토목학회.
4. 지흥기, 배상수, 임기석, 허수영 (2001). 돌망태를 이용한 호안구조물의 수리학적 특성, **학술발표회 논문집**, 한국수자원학회.
5. 지흥기 (2001). 돌망태를 이용한 방재 및 친환경적 수리구조물 개발, **방재행정세미나**, 제6집, 행정자치부 국립방재연구소.
6. 지흥기 (2001). Gabion을 이용한 방재 및 친환경 구조물, **시설물방재와 친환경건설 학술심포지움 논문집**, 영남대학교부설 방재연구소.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Maynard, S. T. (1995). Gabion-mattress Channel Protection Design, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 121(7).
11. Agostini, R., Cesario, L., Ferraiolo, F. and Papetti, A. (1988). Flexible Gabion and Reno Mattress Structures in River and Stream Training Works, *Officine Maccaferri Technical Report*, Italy.

(논문번호:02-04/접수:2002.01.11/심사완료:2002.1.30)