

방조제 체결시 사석 및 돌망태의 적정규모 산정을 위한 매뉴얼 개발

I. 이론 및 모형의 검증

Assessment Manual for Optimization of Structural Scale of Stone and Gabion at the Final Closure of Sea Dike

I. Verification of Theories and Models

송헌구* · 김종규** · 황인찬***

Hyun Gu Song*, Jong Kyu Kim** and In Chan Hwang***

요 지 : 방조제 시공구간의 사석 및 돌망태의 적정규모를 산정하기 위한 매뉴얼을 개발하였다. 본 매뉴얼은 새만금 방조제 끝막이 구간의 상고공, 바닥보호공, 1차 사석재 구간을 대상으로 한 재료의 이동한계유속을 측정된 수리모형실험 결과와 기존의 경험공식에서 산정되는 규모별 이동한계유속의 비교 및 검증을 통해 개발되었다. 또한 현재까지 수행되지 않았던 사석과 돌망태를 혼용할 경우에 대하여도 이동한계유속을 측정하여 매뉴얼에 추가하였다. 본 매뉴얼은 새만금방조제 끝막이 기간 동안 발생유속에 대한 일별로 시공구간별 적정규모를 제시하였으며, 새만금방조제 끝막이가 끝난 후 그 적용성이 상당히 높게 평가되었다.

핵심용어 : 방조제, 끝막이, 사석, 돌망태, 이동한계유속

Abstract : This paper focuses on the attempt to manual application for optimization structural scale of stone and Gabion at the closing gap of sea dike. The manual was developed through hydraulic model experiment that measured the critical velocity of sill-crest, bottom protection and dam-face at the final closure of Saemangeum sea dike, and through the comparison and verification of critical velocity for each scale calculated by existing empirical formula. Also, the critical velocity when rocks are used together with gabion is measured to add to the manual, which is an initial attempt that had not been executed before. The manual proposes the appropriate structural scale according to the measured critical velocity per day during the final closure period of Saemangeum sea dike, and its application was appraised highly after the completion of the final closing.

Keywords : Seadike, Final closure, Stone, Gabion, Critical velocity

1. 서 론

새만금 간척사업은 군산, 김제, 부안을 연결하여 총길이 33 km의 방조제를 축조해 토지 283,000,000 m², 담수호 108,000,000 m²로 총면적 401,000,000 m²의 토지를 조성하는 사업이다. 1991년 11월에 착공하여 2006년 4월 21일 방

조제 최종 끝막이를 성공적으로 끝내고 2년이 지난 현재 방조제 외곽공사가 마무리 중이며, 내부개발공사를 준비중에 있다. 새만금방조제 끝막이 구간은 수심이 깊고, 기초지반의 지질은 극히 연약한 사질 실트 층으로 2개의 개방구간을 통해 최대 7 m/sec 이상의 유속이 발생하는 악조건으로 간척 선진국인 네덜란드 또는 일본 등에서도 유래를 찾아

*한국농어촌공사 농어촌연구원(Rural Research Institute Korea Rural Community Corporation, 1031-7 Sa-dong, Sangrok-gu, An-san, Gyunggi-do 426-908, Korea. hksong@ekr.or.kr)

**전남대학교 해양기술학부(Chonnam National University Dept. of Ocean Engineering, San 96-1, Dunduck-Dong, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea. kimjk@chonnam.ac.kr)

***한국농어촌공사 프로젝트개발처(Project Development of Korea Rural Community Corporation, 487 Poil-Dong Uiwang-Si, Gyeonggi-do 437-703, Korea. hwangbo@ekr.or.kr)

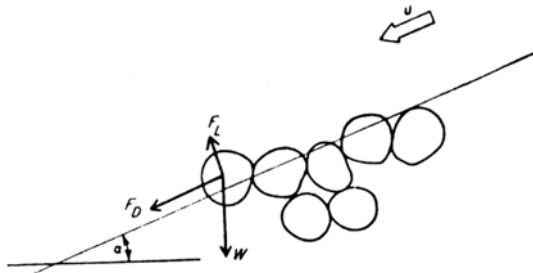


Fig. 1. Force diagram on a particle in loose bed.

볼 수 없는 난공사였다. 이러한 악조건인 상황에서도 새만금 방조제의 끝막이가 성공할 수 있었던 요인은 무엇보다도 끝막이 시공구간별 발생유속에 따른 적정 사석 및 돌망태의 규모를 적기에 제시하였다는 것이다.

일반적으로 수중에서의 비점착성 입자의 이동은 Fig. 1 과 같이 입자의 중량과 입경 및 흐름특성에 의한 마찰속도에 영향을 받으며, 하상의 입자가 받는 힘은 입자를 움직이게 하려고 하는 항력(Drag force), 양력(Lifting force)과 이러한 힘의 관계를 이용하여 흐름특성에 저항하는 입자의 수중중량(Submerged weight)을 구하는 연구가 수행되었다 (Graf, W. H., 1971).

일반적으로 방조제 시공구간 별로 발생유속에 따른 적정 사석 규모를 산정하는 경험공식으로는 Netherlands 간이공식, Isbash 공식, Pilarczyk 공식 등이 주로 사용되고 있다. Netherlands 간이공식은 화란의 방조제 축조시 끝막이 공사 에서 모래 또는 흙주머니가 사용된 사례를 중심으로 유도 (Delft University press, 1984)되었으며, 접근유속과 공사에 사용된 재료의 상대밀도의 함수로 구성되어 수중에서 안착된 모래 주머니의 중량이 흐름에 충분히 견딜 수 있도록 하기 위한 설계식이다. Isbash 공식은 방조제 개방구간에서 난류가 심하게 발생하는 상고공 부근의 유속에 따라 사석의 크기를 결정하는 식으로 수심과 사석직경의 관계(h/D_s)가 5~10의 범위 내에서 유용하게 사용되는 경험식이다(CUR Report, 1998). Pilarczyk 공식은 방조제 개방구간의 바닥보호공 사석의 크기를 산정하기 위해 제안된 식으로, 특별한

계수와 상수를 Shields 공식과 Isbash 공식을 혼용하여 제안된 공식이다(CUR Report, 1998). 이 공식은 2002년 2월 화옹방조제 끝막이 보고서(Delft Hydraulics, 2002) 바닥보호공 안정성에 적용된 바 있다.

한편, 돌망태(Gabion)는 다양한 크기로 구성된 돌들의 집적체를 철선 등의 망으로 일체로 하여 제작된 것으로서 빠른 흐름에 대한 저항력이 있어 큰 규모의 사석을 대체할 수 있는 축조재료로 1967년 동진강 하구의 계화도 방조제 물막이 공사에서 최초 사용된 이래 삼교천방조제 공사, 시화방조제 물막이 공사 등 대부분의 방조제 물막이 공사에 돌망태가 사용(농업기반공사, 2001) 되어왔다. 그러나 현재까지 돌망태의 수리학적 거동해석이나 안정성, 크기 산정 방식에 관한 연구가 매우 미흡하여 이를 실제 현장에 적용하는데는 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 다년간의 수리모형실험을 통해 사석 및 돌망태의 이동한계유속 등을 분석한 결과와 기존의 경험공식에서 산정되는 이동한계유속의 비교 및 검증을 통하여 변수들을 조정하고, 발생유속에 따른 적정 사석 및 돌망태의 규모를 산정하는 매뉴얼을 개발하였다. 본 매뉴얼은 새만금방조제 끝막이 시공계획 및 끝막이 수행 시 현장에서 일별 발생유속에 따른 사석규모를 산정하는데 사용되었으며, 본 논문에 제시된 매뉴얼은 새만금방조제 끝막이가 끝난 후 그 적용성이 높게 평가되었다.

2. 방조제 구조

방조제는 조수를 차단하고 해수 유통을 방지하여 내부개발지 및 배후지를 안전하게 보호하기 위하여 설치되는 외곽구조물로 축조재료 및 물막이구간, 해상조건, 기초지반의 토질, 축조공법에 따라 차이가 있으나, 일반적으로 Fig. 2 와 같은 단면으로 시공된다. 특히 상고공 사석(Sill-crest), 바닥보호공(Bottom protection) 사석, 1차사석재(Dam-face) 사석은 끝막이의 성공을 좌우하는 중요한 역할을 한다. 바닥보호공 및 상고공 사석은 물막이 구간의 1차 사석 시공시 기초지반의 보강 및 물막이시 발생하는 유속에 의한 기초지

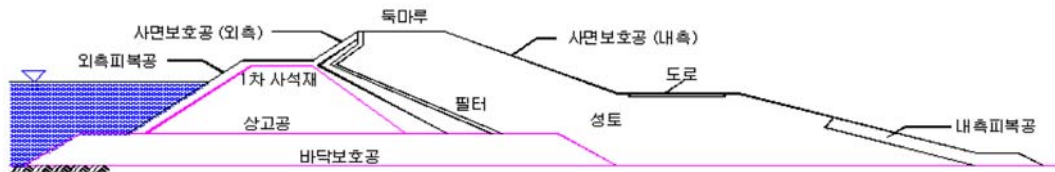


Fig. 2. Typical cross section of sea dike.

반의 세굴을 방지하는 역할을 하며, 1차 사석재는 방조제 체절시 상고공 또는 바닥보호공 상부에 시공되는 사석이다 (농업기반공사, 2000).

3. 모형실험

3.1 모형규모 및 실험재료

수리모형실험은 새만금 방조제 끝막이 개방구간을 대상으로 하였으며, 실험수조 범위는 방조제 상하류의 유동상황, 방조제 개방구간 및 노선방향의 수리특성을 재현할 수 있도록 수조시설과 여유공간을 감안하여 축척 1:50의 정상모형으로 제작하였다. 모형규모는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가로, 세로 각각 40 m, 60m인 실험수조에 원형에서 1,500 m (모형: 30 m)구간의 방조제 노선이 포함되며, 방조제 개방구간의 중앙부 내측 및 해측으로 각각 750m(모형: 15 m)까지의 현장영역을 포함시켰다. 또한 모형의 바닥지형은 현장 수심자료를 이용하여 고정상으로 재현하였다.

방조제 개방구간에서의 사석과 돌망태의 한계유속을 평가하기 위한 실험대상구간은 Photo. 1에서 보는 바와 같이 방조제 개방구간이 75 m(모형: 1.5 m)일 때, 바닥보호공 구간은 해측 방향으로 125 m(모형: 2.5 m)길이를 평균해면 기준 EL.(-)15.0m까지 균등하게 포설하였으며, 상고공 사석은 방조제 계획노선의 중앙부 내측 및 해측으로 50 m(모형: 1.0 m)구간에 평균해면 기준 EL.(-)10.0 m까지 포설하였다.

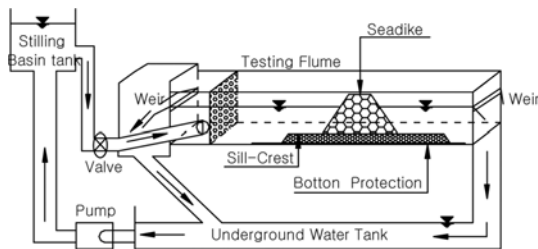


Fig. 3. Layout of the seadike hydraulic model.

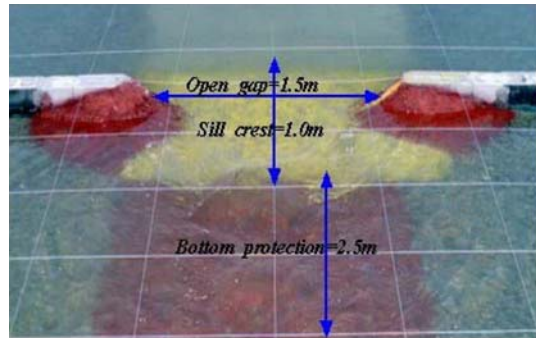


Photo 1. Model test boundary.

또한 1차 사석재 경우는 방조제 선단부에서 3~4초 간격으로 낙하시켜 단면이 자연적으로 형성되지 않았을 때의 유속을 측정하였다.

방조제 끝막이 구간에서의 흐름은 중력의 지배를 받고 있으므로 방조제 축조재료인 사석과 돌망태는 Froude 상사법칙을 적용하여 제작하였다. 모형실험에 사용된 사석은 새만금 방조제 공사시 현장에서 실제 제작되어 사용되는 사석 크기를 선정하여 모형사석으로 사용되었으며, 현장시공 사석은 규격별로 0.3, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0 ton/EA의 사석과 3.0, 5.0 ton/EA의 돌망태이다. 원형사석과 모형사석 크기에 대한 상세한 내역은 Table 1과 같고, 또한 돌망태는 Fig. 4와 같이 현장제작 조건과 유사하게 입경이 작은 사석에서부터 큰 사석으로 혼합하였고, 유연성이 있도록 제작하였다.

3.2 실험조건 및 방법

방조제 개방구간이 75 m인 조건에서 사석과 돌망태를 이용하여 개방구간의 축조재료가 투하되는 전구간(상고공, 바닥보호공, 1차 사석재)에 대하여 각각 사석, 돌망태만으로 시공되었을 조건과 1차 사석재 구간에서 각각 사석중량이 0.3~1.0 ton/EA, 2.0~3.0 ton/EA, 3.0~5.0 ton/EA, 3.0~6.0 ton/EA인 혼합사석에 3.0 ton/EA 돌망태를 일정비율로 혼합하여 시공되었을 조건에 대하여 수행되었다. 여기서 사

Table 1. Characteristics of prototype and model stone

Scale	Prototype stone weight (ton/EA)	Model stone weight (g)	Model stone diameter(cm)	
			Nominal diameter (D_n)	Sphere diameter (D_s)
Prototype: 1 Model: 1/50	0.3	2.07	0.92	1.14
	1.0	6.90	1.37	1.70
	2.0	13.79	1.72	2.14
	3.0*	20.69*	1.97	2.45
	5.0*	34.48*	2.35	2.91

※ "*" included gabion

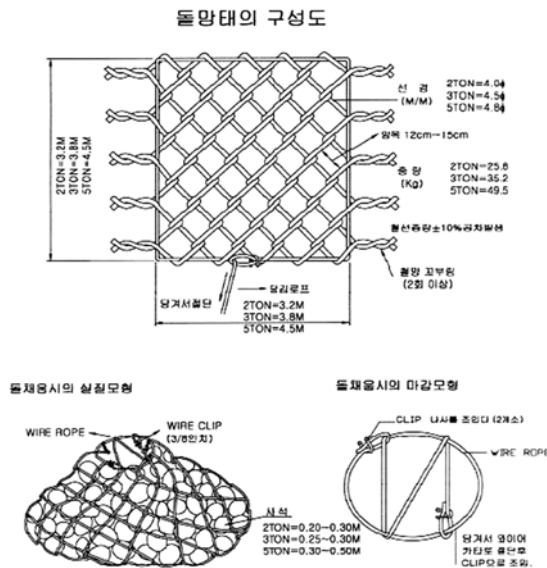


Fig. 4. Model gabion.

석과 돌망태 혼용률은 사석만으로 시공되었을 경우와 사석과 돌망태가 혼용되었을 경우의 전체 중량을 100%로 보았을 때 사석 80%의 중량, 돌망태 20% 중량에서 시작하여 사석을 10%씩 감소, 돌망태는 10%씩 증가시켜 사석 50%, 돌망태 50%까지 되었을 때까지 실험을 수행하였다.

바닥보호공과 상고공 사석의 이동한계유속 측정은 미리 설정된 위치에 일정한 높이로 포설하여 흐름조건에 따른 이동성 실험을 수행하였으며, 1차 사석제 경우는 사석, 돌망태, 사석 및 돌망태 혼용의 순으로 방조제 선단부에서 3~4초 간격으로 낙하시켜 단면이 자연적으로 형성되지 않았을 때의 유속을 이동한계유속으로 평가하여 실험을 수행하였다. 이때의 1차 사석제 선단부 사면각도는 약 45° 정도로 하였다. 축조재료의 이동한계유속을 파악하기 위한 유속은 방조제 내외측 수위차에 의해 발생시켰으며, 이때 발생유속은 1.0 m/s부터 시작하여 약 0.5 m/s씩 증가시키면서 10.0 m/s 까지 유속을 발생시켰다. 또한 현장수위 조건은 평균해수면인 EL.(+)0.0 m으로 고정한 후 실험을 수행하였으며, 수위의 측정은 유속의 영향을 받지 않은 곳에 수위계를 설치하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

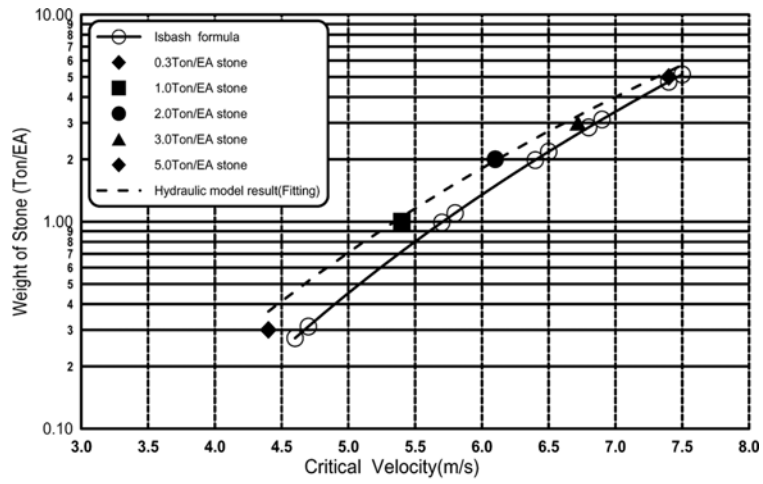
4.1 사석의 이동한계유속 측정결과와 경험공식과의 비교

방조제 시공구간별로 사석이 안착되었을 경우 사석 중량

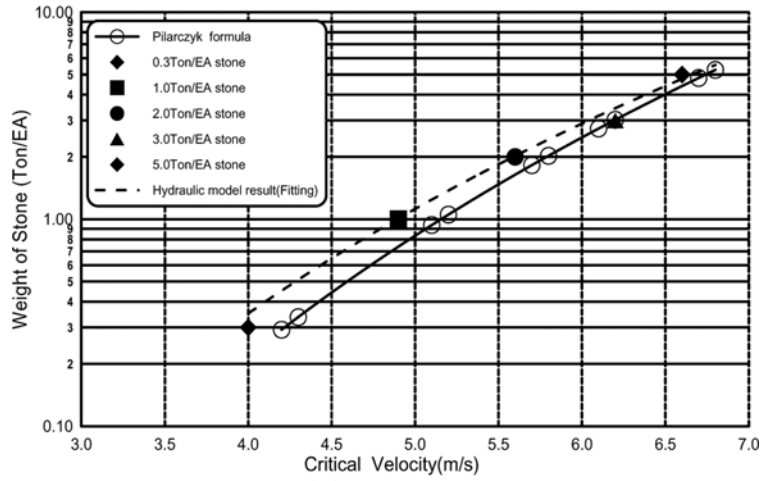
이 0.3 ton/EA, 1.0 ton/EA, 2.0 ton/EA, 3.0 ton/EA, 5.0 ton/EA인 경우에 대하여 상고공 구간에서의 이동한계유속 측정결과는 4.49 m/s, 5.42 m/s, 6.13 m/s, 6.72 m/s, 7.40 m/s, 바닥보호공 구간에서는 3.89 m/s, 4.94 m/s, 5.63 m/s, 6.22 m/s, 6.60 m/s, 1차 사석제 구간에서는 3.31 m/s, 4.23 m/s, 4.81 m/s, 5.13 m/s, 5.72 m/s로 나타났다. 시공구간 별로 Fig. 5에 이동한계유속을 도시하였으며, 동일 사석규모라 하더라도 시공 구간별로 이동한계유속이 다르게 나타남을 보여주었으며, 방조제 시공구간별로 사석규모별 이동한계유속을 경험공식과 수리모형실험 결과와 비교한 결과 동일사석규모에서 수리모형실험 결과의 이동한계유속이 적게 나오는 경향을 나타냈다. 이는 향후 경험공식을 이용하여 사석규모를 산정할 경우 변수를 조정할 필요성이 있음을 의미한다. Fig. 5의 (a)와 같이 상고공의 경우는 수류의 수축현상 및 심한 난류현상으로 비교적 강한 조류속이 부분적으로 발생되므로 상고공의 안정성 측면에서 동일유속에서 사석규모가 크게 산정되는 Isbash 공식으로 산출된 사석규모를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, Fig. 5의(b)와 같이 바닥보호공의 경우는 유속이 증가 할수록 Pilarczyk 공식과 일치하는 경향으로 나타나 6.0~8.0 m/s의 강한 조류속이 발생하는 구간에서는 Pilarczyk 공식을 사용하길 추천하지만 이 공식을 적용시는 반드시 정확한 유속자료와 수심중량 자료가 필요하다. Fig. 5의(c)와 같이 1차 사석제의 경우는 Netherlands 간이 공식, Isbash 공식이 비슷한 경향을 나타내고 있으며 두 공식을 사용하여도 될 것으로 판단되지만 사석이 유수 중에 시공될 경우와 이미 시공되었을 경우를 고려해야 한다.

4.2 사석과 돌망태의 한계유속 비교

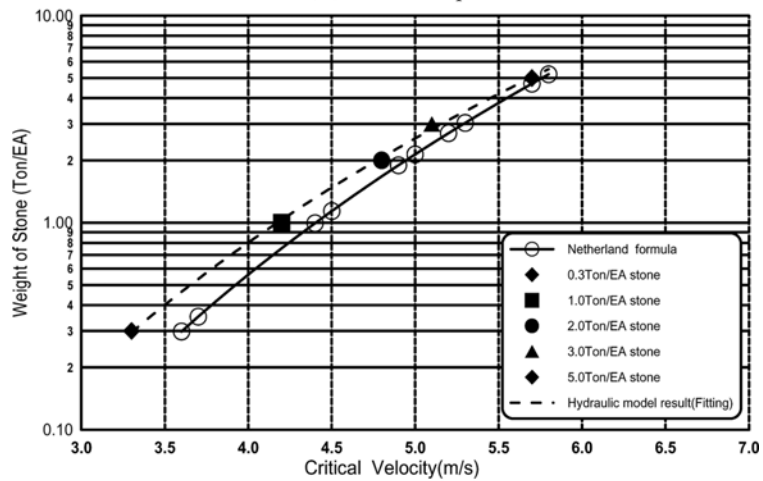
돌망태의 수리학적 거동을 파악하고자 3.0 ton/EA, 5.0 ton/EA의 사석과 동일 규모의 돌망태를 시공하였을 경우 이동한계유속을 각각 측정하였다. 먼저 상고공 구간을 3.0 ton/EA, 5.0 ton/EA의 사석과 돌망태로만 각각 시공하였을 경우 Fig. 6의 (a)와 같이 돌망태의 이동한계유속은 3.0 ton/EA 사석의 이동한계유속보다 1.22배, 5.0 ton/EA 사석의 이동한계유속보다 1.26배로 크게 나타났으며, 단일 사석으로 대체하여 시공될 경우 3.0 ton/EA 돌망태는 10.0 ton/EA 사석, 5.0 ton/EA 돌망태는 15.0 ton/EA의 대체 사석규모 효과가 있는 것으로 나타났다. 바닥보호공 구간의 경우 Fig. 6의 (b)와 같이 돌망태의 이동한계유속은 3.0 ton/EA 사석의 이동한계유속보다 1.36배, 5.0 ton/EA 사석의 이동한계유속보다 1.38배 큰 것으로 나타났으며, 단일 사석으로 대체하여



(a) Sill-crest



(b) Bottom protection



(c) Dam-face

Fig. 5. Comparison of critical velocities between exiting formula and hydraulic model results.

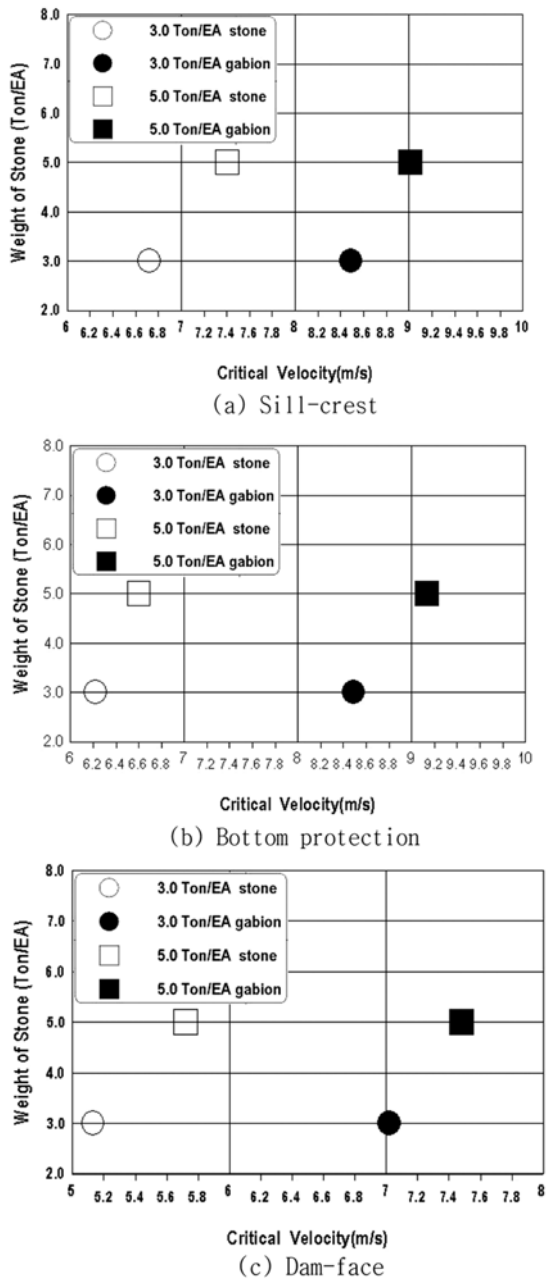


Fig. 6. Comparison of critical velocity between construction stone and gabion.

시공될 경우 3.0 ton/EA 돌망태는 20.0 ton/EA 사석, 5.0 ton/EA 돌망태는 30.0 ton/EA의 대체 사석규모 효과가 있는 것으로 나타났다. 1차 사석재 구간은 Fig. 6의 (c)와 같이 돌망태의 이동한계유속은 3.0 ton/EA 사석의 한계유속보다 1.30배, 5.0 ton/EA 사석의 한계유속보다 1.36배 큰

것으로 나타났으며, 단일 사석으로 대체하여 시공될 경우 3.0 ton/EA 돌망태는 16.0 ton/EA 사석, 5.0 ton/EA 돌망태는 24.0 ton/EA의 대체 사석규모 효과가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 사석재보다 돌망태의 이동한계 유속이 큰 원인은 돌망태가 바닥의 안착성과 맞물림효과(Interlocking effect)가 사석보다 크게 작용하였기 때문이라 판단된다. 따라서 방조제 끝막이 구간에서 빠른 유속에 저항할 수 있는 시공사석의 개당중량이 미달될 경우 돌망태를 사용하여 시공한다면 방조제의 안정성 증가 측면에서 상당한 역할을 할 것으로 기대된다.

4.3 사석과 돌망태의 혼용률에 따른 한계유속 비교

사석과 돌망태의 혼용률에 따른 이동한계유속 측정결과는 Fig. 7과 같으며, 사석만으로 시공되었을 경우보다 돌망태를 20% 정도 혼용하여 시공하였을 경우 0.45~0.54 m/s의 유속에 저항하는 것으로 나타나 사석자체만의 시공보다는 사석에 돌망태를 혼합하여 시공하였을 경우도 수리학적으로 안정성이 있는 것으로 나타났다. 또한 돌망태 혼용률이 20%에서 10%씩 증가하여 50%에 이를 때까지 10%의 돌망태 증가에 따라 이동한계 유속도 0.24~0.29 m/s로 증가하는 경향을 나타냈다. 돌망태 혼용률에 따른 이동한계유속의 증가는 사석과 돌망태 간의 맞물림 작용, 공극감소 등의 원인으로 발생유속에 대한 저항성을 증가시켜 주었기 때문이라 판단된다.

또한 위 실험결과를 이용하여 현장 시공시 발생유속에 따른 사석과 돌망태의 적정 혼용률을 구할 수 있도록 Fig. 8과 같이 선형 회귀법을 이용한 식들로 나타냈다. 이들 회귀식은 0.99의 높은 회귀계수를 나타냈다.

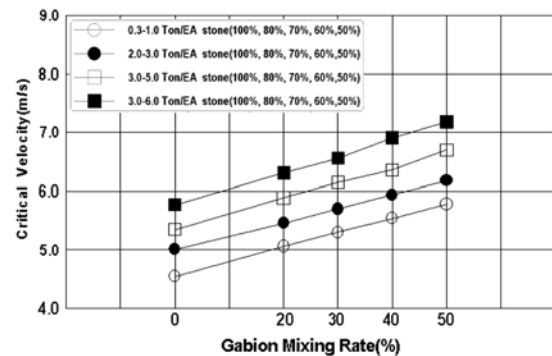


Fig. 7. Comparison of critical velocity according to mixing ratio of gabion.

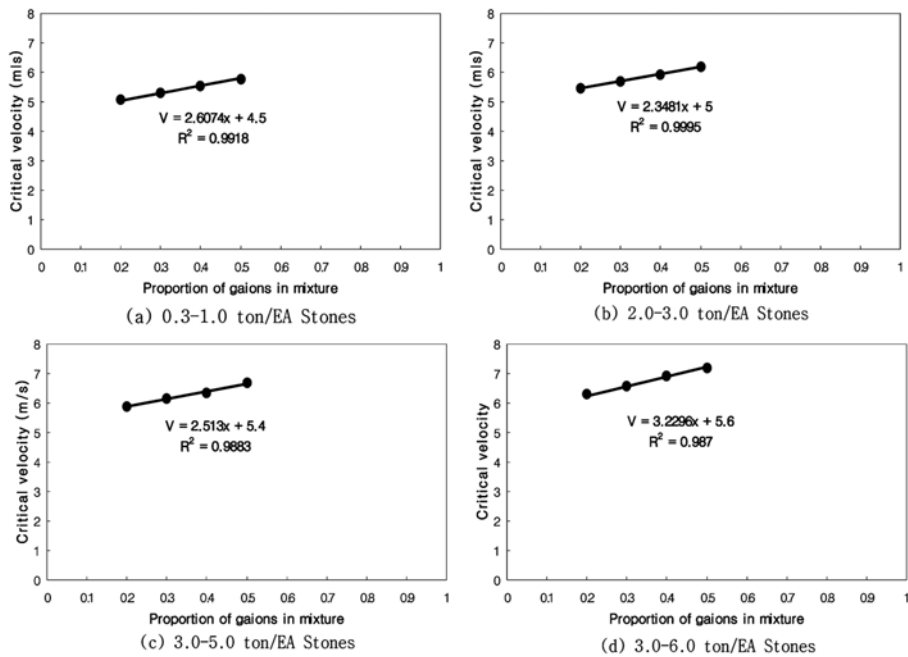


Fig. 8. Relationship between critical velocities and proportions of 3.0ton/EA gabion in the stone-gabion mixture.

(Netherlands 간이공식의 시석구조물의 규모(중량 및 직경) 결정)

1. 무지
 시석적용을 구하는 공식: $D_s = \left(\frac{V_c}{K_s}\right)^2 \left(\frac{W_s}{\rho_s}\right)$ [중량적용을 구하는 공식: $D_s = 0.0002D_s$] [시석적용을 구하는 공식: $W_s = \rho_s(D_s)^3$]

2. 큰 무지 적용 구조물: 변칙의 보강 30%공식 규모 결정시, 수계물 선단부, 방조제 구조물 중 1차시석, 방조제에서 규모결정시

3. 무지 적용순서: (4의)-(8의)-(15의, 16의) 순으로 연속된 적용하면 됨

4. 무지 직경이 시석의 직경을 구할 경우(방조제 등)는 방조제에서 무지 직경으로 판정해서 사용

5. 무지: 전체시석의 50%가 적당양만큼 조여야만 함

6. 전체시 85% 축소해서 선택

(Ishbah 공식의 시석구조물의 규모(중량 및 직경) 결정)

1. 무지
 시석적용을 구하는 공식: $D_s = \left(\frac{V_c}{K_s}\right)^2 \left(\frac{W_s}{\rho_s}\right) + 0.17-1.4$ [중량적용을 구하는 공식: $D_s = 0.0002D_s$] [시석적용을 구하는 공식: $W_s = \rho_s(D_s)^3$]

2. 큰 무지 적용 구조물: 변칙의 보강 30%공식 규모 결정시, 수계물 선단부, 방조제 구조물 중 1차시석, 방조제에서 규모결정시

3. 무지 적용순서: (2의)-(3의)-(14의) 순으로 연속된 적용하면 됨

4. 무지 직경이 시석의 직경을 구할 경우(방조제 등)는 방조제에서 무지 직경으로 판정해서 사용

5. 무지: 전체시석의 50%가 적당양만큼 조여야만 함

6. 전체시 70% 축소해서 선택

(Pilarczyk 공식의 시석구조물의 규모(중량 및 직경) 결정)

1. 무지
 중량적용을 구하는 공식: $D_s = \left(\frac{V_c}{K_s}\right)^2 \left(\frac{W_s}{\rho_s}\right)$ [시석적용을 구하는 공식: $W_s = \rho_s(D_s)^3$]

2. 큰 무지 적용 구조물: 인공석과 자연석의 정형도의 차이로 중량에 관한 결정시, 방조제 구조물에서 방조제에서 규모결정시, 방조제에서 규모결정시

3. 무지 적용순서: (1의)-(2의)-(3의)-(4의)-(5의)-(6의)-(7의)-(8의)-(9의) 순으로 연속된 적용하면 됨

4. 무지 직경이 시석의 직경을 구할 경우(방조제 등)는 방조제에서 무지 직경으로 판정해서 사용

5. 무지: 전체시석의 50%가 적당양만큼 조여야만 함

6. 전체시 70% 축소해서 선택

(시석과 돌맹이 적정 혼용용 공식)

1. 공식: 0.5~1.5ton/EA 시석에 3.0ton/EA 돌맹이 혼용용(%)

2. 공식상수 5 돌맹이용이대 40%의 돌맹이대 사용시 시석 및 돌맹이 혼용용에 따른 한계속도 (m/s)

3. 공식: 3.0~5.0ton/EA 시석에 3.0ton/EA 돌맹이 혼용용(%)

4. 공식: 3.0~6.0ton/EA 시석에 3.0ton/EA 돌맹이 혼용용(%)

Fig. 9. Manual applied to each section of sea dike constructions site.

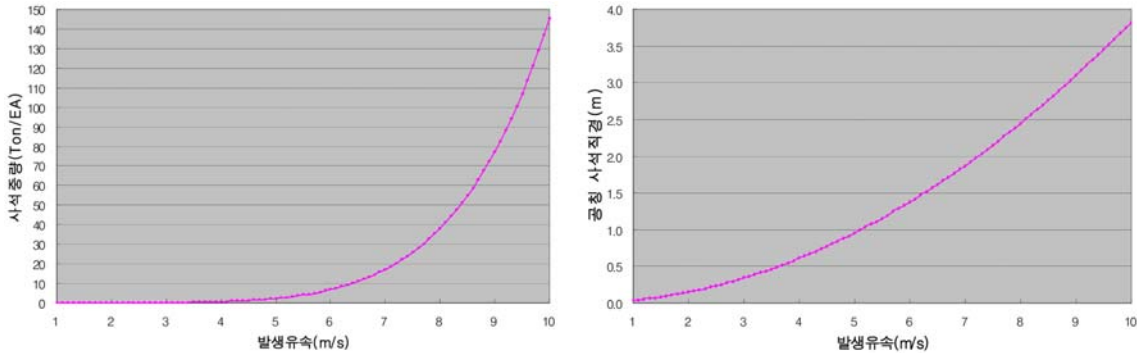


Fig. 10. Structural scale of dam-face calculated by utilizing the manual.

5. 사석 및 돌망태 규모 산정을 위한 매뉴얼 개발

사석, 돌망태, 사석 및 돌망태 혼용에 따른 이동한계유속을 수리모형실험을 통하여 정리하였다. 사석규모별 이동한계유속과 경험공식에서 산정된 이동한계유속과 비교를 하였다. 대체적으로 수리모형실험결과와 경험공식이 비슷한 경향으로 나타났지만, 동일한 유속에서는 경험공식으로 산정되는 사석규모가 크게 나타났다. 따라서 설계실무자들에게 있어 사석규모의 산정시 사용의 편의성과 신뢰도를 높이기 위해 수리모형실험결과를 바탕으로 경험공식을 적용토록 EXCEL 프로그램을 이용하여 매뉴얼화 하였다. 개발된 매뉴얼내에는 경험공식 적용시 변수들에 대한 설명을 자세하게 하여 설계실무자들이 쉽게 적용할 수 있도록 하였다. Fig. 9는 상고공, 바닥보호공, 1차 사석재의 사석규모 및 사석과 돌망태를 혼용할 경우 적정 혼용을 산정할 때 사용되는 매뉴얼을 보여주며, Fig. 10은 매뉴얼을 이용하여 산정된 1차 사석재의 발생유속별 사석중량(왼쪽) 및 사석직경(오른쪽)의 규모를 보여준다.

6. 결 론

설계실무자들이 방조제 시공구간별로 적정 사석과 돌망태의 규모를 산정하기 위해서는 경험공식의 선정, 경험공식의 적용변수 이해 등 여러 가지 어려운 절차를 거쳐야 했다. 장기간의 수리모형실험 실험을 통해 축적된 자료와 기존의 경험공식들과의 비교, 검증과 변수들의 자세한 설명을 통해 이러한 문제점들을 극복할 수 있도록 사석규모 산정 매뉴얼이 개발되었다. 방조제 시공구간별로 사석의 이동한계유속 측정결과와 경험공식을 비교한 결과 거의 비슷한 경향으로 나타났으나, 3.0 ton/EA 이하의 사석규모에서

는 변수를 일부 조정해야 할 필요성이 있음을 나타냈다. 그리고 현재까지 연구가 수행되지 않았던 사석과 돌망태의 한계유속 비교를 통하여 돌망태의 시공구간별 이동한계 유속 측정 결과 사석의 이동한계유속 보다 1.22배~1.38배 크게 나타났으며, 3.0 ton/EA의 돌망태는 20 ton/EA, 5.0 ton/EA의 돌망태는 30 ton/EA의 사석 대체 효과가 있는 것으로 분석되어 돌망태가 바닥의 안착성과 맞물림효과(Interlocking effect)가 사석보다 크다는 것을 증명하였다. 또한 사석과 돌망태의 혼용률에 따른 한계유속 비교를 통하여 사석만으로 시공되었을 경우보다 돌망태를 20% 정도 혼용하여 시공하였을 경우 0.45~0.54 m/s의 유속에 저항하는 것으로 나타났고, 돌망태 혼용률이 20%에서 10%씩 증가하여 50%에 이를 때까지 10%의 돌망태 증가에 따라 이동한계 유속도 0.24~0.29 m/s로 증가하는 경향을 나타나 사석자체만의 시공보다는 사석에 돌망태를 혼합하여 시공하였을 경우 수리학적으로 안정성이 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 수리모형실험의 기초자료와 방조제 시공구간별로 사용되는 Netherlands 간이공식, Isbash 공식, Pilarczyk 공식에 기초를 두어 개발된 매뉴얼은 새만금방조제 끝막이 시 현장적용을 통하여 적용성이 상당히 높게 평가되었다. 본 매뉴얼을 통하여 향후 설계실무자들이 매뉴얼을 좀더 간편하게 적용할 수 있도록 전문소프트웨어를 이용한 시스템으로 개발된다면 방조제 뿐 만 아니라 사석 및 돌망태가 이용되는 구조물의 안정성 평가에 크게 기여할 것으로 판단 된다.

참고문헌

농업기반공사 농어촌연구원 (1994). 시화 방조제 끝막이 보고서.

- 농업기반공사 농어촌연구원 (2001). 돌망태를 이용한 수리 구조물 개발연구.
- 농업기반공사 농어촌연구원 (2002~2006). 새만지구 수리모형실험 보고서.
- 농업기반공사 (2000). 농업생산기반정비사업 조사설계 실무요령, 제4편 간척.
- 박상현 (1997). 방조제 개방구간의 투하석재와 돌망태 안정성 수리시험 연구, 한국관개배수지, Vol. 4, No. 2, 168-177.
- 박영욱, 황인찬, 구분충, 권순국 (2004). 급변류 구간에서의 사석 및 돌망태 안정성 비교, 한국농공학회 학술발표회.
- 서영제 (1994). 조류속에 따른 사석직경 및 중량공식 검토, 한국수자원학회 학술대회지, 57-62.
- 윤태훈, 이재진, 이봉희, (2003). 원형교각 주위의 돌망태 세굴 보호공, 수자원학회논문집, 23(18), 1-9.
- CUR Report (1998). Manual on the Use of Rock in Hydraulic Engineering.
- Das, Bishnu P. (1972). Stability of rockfill in end-dump river closure. *Journal of the Hydraulic Division. ASCE.* 98(11), 947-968.
- Delft University press (1984). *The Closure of Tidal Basins.* Delft Hydraulics (2002). *Hwaong Dike Closure.*
- Graf, W. H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport, Water Resource and Environment Eng.*
- Maynard Stephan T. (1995). Gabion mattress channel-protection design, *Journal of hydraulics Engineering. ASCE.* 121(7), 519-522.
- R. F. de Graaff. (2002). *Hwaong Dike Closure, Hydrodynamic and Scour Study.* Rotterdamseweg 185 postbus 177 2600 MH Delft The Netherlands. Delft Hydraulics.

Received April 4, 2009

Accepted April 10, 2009