

제방뒤틀비탈 월류보호공의 안정성 분석을 위한 수리실험 연구

김수영, 윤광석*

한국건설기술연구원 수자원·하천연구소

Experimental Study on Stability of Revetment on Inland Slope of River Levee for Prevention of Failure due to Overtopping

Sooyoung Kim, Kwang Seok Yoon*

Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology

요약 본 최근 전 세계적으로 홍수의 강도와 빈도가 증가하고 있어 홍수재해가 큰 문제로 대두되고 있다. 이 중 가장 큰 비중을 차지하는 홍수재해는 태풍 및 집중호우와 동반되는 홍수라고 할 수 있다. 이로 인해 하천의 수위가 제방의 둑마루까지 상승하여 월류하는 피해가 발생하고 있으며 이러한 피해는 시설물 자체의 피해뿐만 아니라 제내지의 인명 및 재산피해도 함께 유발시킨다는 점에서 대책 마련이 시급하다. 제방이 월류하였을 때 제방이 붕괴되는 것과 붕괴하지 않고 단순 월류하는 경우의 피해정도는 매우 다르며 제방 자체의 피해는 발생하더라도 붕괴되지 않으면 제내지로 유입되는 유량을 현저히 감소시켜 홍수피해를 감소시킬 수 있다. 따라서 제방의 붕괴가 발달하기 시작하는 뒤틀비탈의 보호는 중요한 홍수방어방법의 하나이다. 본 연구에서는 제방뒤틀비탈 월류보호공의 형상과 유공율에 따라 수리학적으로 유리한 보호공을 제안하고 각 보호공의 안정성 검토를 위하여 수리실험을 수행하였다. 수리실험을 통해 제방뒤틀비탈 보호공의 안정성은 보호공의 단위면적당 중량과 높은 상관성이 있음을 규명하고, 보호공이 이탈되는 순간의 유속인 한계유속과 단위면적당 중량과의 관계식을 도출하였다. 본 연구결과를 통하여 국내에서는 아직 도입되지 않은 자연친화적 월류보호공이 현장에 적용됨으로써 홍수시 월류에 의해 발생하는 인명 및 재산피해를 경감시키고, 더 나아가서는 자연친화적인 하천공간이 조성될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Recently, the intensity and frequency of floods has increasing worldwide, and flood disasters have become a big problem. Flood disasters, which account for the largest portion of disasters, are floods accompanied by typhoons and localized heavy rainfall. As a result, they cause damage of levee overtopping, in which the water level of a river rises to the levee crown. Therefore, countermeasures are essential and necessary because of the damage to the facility itself as well as to life and other property. The damage magnitude depends on the collapse of the levee. A levee that is difficult to collapse will reduce the discharge inland significantly. Accordingly, the protection of the inland slope, where the collapse of the levee is initiated, is one of the most important countermeasures. In this study, revetments with various porosity and forms were suggested and hydraulic experiments were carried out for each type. The hydraulic experiments showed that the stability of a revetment in an inland slope is strongly correlated with the weight per unit area of the revetment. The relationship between the critical velocity, which is the velocity at the moment of leaving the revetment, and the weight per unit area was derived. Through this study, by applying the nature friendly revetment, which has not yet been applied to Korea, it is expected that life and property damage caused by levee overtopping during flooding can be reduced, and a nature friendly river space can be constructed.

Keywords : Inland slope revetment, Levee overtopping, Porosity, Critical velocity, Hydraulic experiment

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B121095-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kwang Seok Yoon(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0270 email: ksyoon@kict.re.kr

Received October 30, 2017

Revised (1st November 16, 2017, 2nd November 22, 2017)

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

1. 서론

최근 전 세계적으로 홍수의 강도와 빈도가 증가함에 따라 이로 인한 물 관련 재해(water related disaster)가 큰 문제로 대두되고 있다. 특히, 국내의 경우 집중호우와 강한 태풍으로 인해 심각한 피해가 발생될 것으로 예상된다. 1980년대 후반부터 기온이 상승하면서 태풍 등 기상이변의 빈도가 증가하는 추세이며 여름철 호우재해의 발생빈도가 연평균 5.3회(1940년 ~ 1970년)에서 8.8회(1980년 ~ 1999년)로 증가하고 있다. 2000년 이후, 태풍 등 기상재해에 따른 경제적 피해가 급증하였다. 대표적인 사례로 2002년 태풍 ‘루사’에 의해 5조 5천억원(사망 124명, 실종 60명, 이재민 88,625명), 2003년 태풍 ‘매미’에 의해 4조 8천억(사망 117명, 실종 13명, 이재민 10,975명)의 피해가 있었다. 특히, 1987년 ~ 2003년에 발생한 제방붕괴 원인을 분석해 보면, 전체 제방붕괴 사례 758건 중 월류 300건(39.6%), 침식 295건(38.9%), 제체 불안정에 의한 붕괴 87건(11.5%), 구조물에 의한 붕괴 76건(10.0%)으로 나타났다. 따라서, 월류에 의한 붕괴가 전체 제방붕괴사례중 39.6%를 차지하고 있어 이에 대한 대책이 시급한 것으로 나타났다[1].

제방붕괴는 하천시설물 자체의 피해뿐만 아니라, 제내지의 인명 및 재산피해를 유발시킨다는 점에서 심각성이 크다. 초과규모의 홍수가 유하하더라도 월류에 의해서 제방이 붕괴되는 것과 붕괴되지 않고 단순히 월류하는 경우의 피해 정도는 매우 다른 양상으로 나타난다. 제방이 붕괴되는 경우, 제내지 유입량 및 유입기간의 증가로 인명 및 재산피해가 가중된다. 따라서, 인구가 집중되고 재산이 밀집되어 있는 지역에 대해서는 제방붕괴에 의한 피해를 감소시키기 위한 특별한 대책이 필요하다.

제방월류에 의한 붕괴와 관련하여 많은 연구가 수행되었다. Takao Uno 등[2]은 하천제방 안정성 평가를 위하여 제방붕괴사례를 조사하여 분석한 바 있고, Fujita 등[3]은 하천제방의 붕괴형상에 관한 2차원적 실험을 실시한 바 있다. Apel 등[4]은 월류에 의한 제방붕괴 조건과 관련하여 하중계수(load factor)와 저항계수(resistance factor)를 사용하여, 월류시 저항계수에 대한 하중계수로 붕괴조건을 결정하였다. 또한 Coleman 등[5]은 폭 2.4 m, 길이 12 m을 갖는 인공 수로를 설치하여 제방이 붕괴되는 흐름을 관찰하였으며, Chinnarasri 등[6]은 제방이 파괴되는 패턴을 분석하기 위해 제체제

료, 제방의 뒤틀림경사 및 유량 변화에 따른 9가지 경우에 대해서 실험하였다. 제방붕괴에 대한 수치해석적인 접근으로는 Frenette and Pestov[7]는 제방 붕괴의 중요 인자 중 하나인 Headcut migration 현상을 롤러(roller) 모델과 와류(vortex) 모델로 구분하여 서로 비교하였다. 일본의 경우, 하천제방설계지침[8]에 제방의 안전도평가를 위한 구체적인 침투, 월류, 침식에 대한 내·외력 산정방법을 제시하여 경험적인 판단에 의한 제방설계에 우선하도록 했으며, 초과홍수로 인한 월류가 발생하더라도 붕괴를 지연시킬 수 있는 난파제 설계기법을 개발한 바 있다. 또한 최근 조사 결과에 의하면 취약제방에 대한 환경사화가 이뤄지고 있는데 설계기준에 제시되어 있는 뒤틀림경사 1V:3H보다 더 완만한 1V:7H 제방이 시공되고 있다. Pan 등[9]은 수리실험을 통해 다른 형식의 뒤틀림 보호공에 대한 월류특성인자를 분석하였다. Li 등[10]은 홍수과에 의한 제방월류시 총 응력, 간극 수압, 유효 응력, 토양 변형률 및 토양 수분 함량 등을 분석하여 보호공의 효과를 분석하였다.

본 연구에서는 홍수위 상승으로 제방 월류가 발생할 때 제방의 붕괴를 방지하거나 지연시키는 공법을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 최근 하천에 대한 자연친화적 공법 적용 추세를 반영하여 식생 조성이 가능한 유공성 블록을 적용하여 실험실증연구를 수행하였으며, 기존 연구결과와 본 연구에서의 수리실험결과를 분석하여 월류에 안정한 제방의 설계기법을 제시하였다.

2.1 제방 뒤틀림 보호공의 기존 설계공식

본 연구에서 제안한 제방 뒤틀림 보호공은 콘크리트 블록의 형태로 제안되었으며 프리캐스트 콘크리트 블록은 크기와 형태에 따라 많은 종류로 분류할 수 있지만 크게 단체형 블록과 군집형 블록으로 구분되며 단체형 블록은 각각의 블록이 분리된 것이며 군집형 블록은 블록과 블록이 케이블과 같은 것으로 연결되어 일체로 거동하는 경우이다.

단체형 블록에 대한 설계식은 Escarameia and May[11]가 제안하였으며 제방사면의 흐름유속에 따른 블록의 두께(D_n) 산정이 가능하다(식(1), (2) 참조).

$$D_n = 0.037 V_{end}^2 / (s - 1) \quad (\text{비탈면}) \quad (1)$$

$$D_n = 0.048 V_{end}^2 / (s - 1) \quad (\text{비탈끝}) \quad (2)$$

여기서, V_{end} 는 제방끝단에서의 유속(m/s), s 는 콘크리트의 상대밀도이며 콘크리트의 밀도와 물의 밀도의 비 (ρ_c/ρ_w)로 산정한다.

Escarameia and May[12]는 단체형 블록이지만 난류의 영향이 큰 지역에서 사용할 수 있는 물립 콘크리트 블록의 두께를 산정하는 식(3)을 제안하였다.

$$D_n = C \frac{V_{end}^2}{2g(s-1)} = 0.00765 \frac{V_{end}^2}{s-1} \quad (3)$$

여기서, C 는 난류계수(Escarameia가 0.15로 제시), g 는 중력가속도(= 9.81 m/s^2)이다.

군집형 블록에 대한 설계식은 Pilarczyk[13]가 제안하였으며 식(4)와 같다. 이 식을 통해 케이블로 일체화된 콘크리트 블록의 두께 산정이 가능하며 시산법을 통해 산정이 가능하다.

$$D_n = \frac{0.026 V_{end}^2}{(1-n)(s-1)[\log(12h/D_n)]^2 K_s} \quad (4)$$

여기서, n 은 제방 뒷비탈 보호공의 유공률, h 는 수심(m), K_s 는 경사계수이며 식(5)에 의해 산정된다.

$$K_s = \cos \alpha \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right)^2\right]} \quad (5)$$

여기서, α 는 비탈면 경사, ϕ 는 안식각이며 일반적으로 $35 \sim 42^\circ$ 값을 사용한다.

일본의 호안 역학 설계법[14]에서는 박리모델(Separation model)에서의 콘크리트 블록의 설계 방법에 대해 제시하였다. 블록이 외력에 의한 모멘트에 대해서 자중이 저항하는 형태로 유도 되었으며 식(6)과 같다 (Fig. 1참조). 또한, 블록의 수중중량(W_w)은 식(7)을 통해 산정한다.

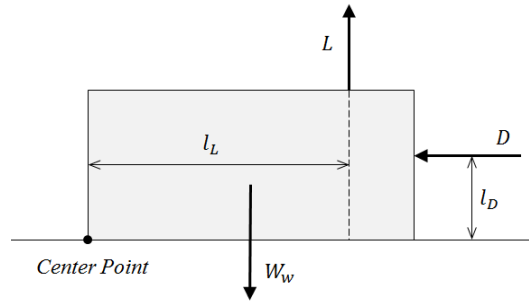


Fig. 1. Schematic of separation model[12]

$$W_w \cos \alpha l_b/2 \geq L l_L + D l_D \quad (6)$$

$$W_w = (\rho_c - \rho_w) g K_V A_b t_b \quad (7)$$

여기서, L 은 양력, D 는 항력, K_V 는 체적보정계수, A_b 는 블록의 투영면적(m^2),

3. 연구방법

본 연구에서는 제방 뒷비탈 보호공의 안정성을 분석하기 위해 제방의 뒷비탈에 다양한 형태의 블록을 제작하여 포설한 후 월류 유량을 증가시키면서 보호공의 들림, 이탈 현상을 관측하였으며 제방 사면의 수심을 측정하여 흐름특성을 분석하였다.

3.1 실험수로의 제원

수리실험은 높이가 3.0 m이고, 제방 뒷비탈의 경사가 1:3인 수로로 제작하여 실험을 수행하였다. 제방의 둑마루로 월류유량이 위어를 통해 유입되며 폭 5.0 m의 둑마

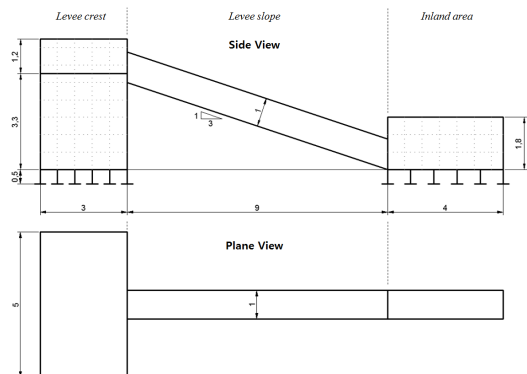


Fig. 2. Dimensions of experimental facilities

루를 지나 제방사면으로 월류하도록 제작되었다(Fig. 2 참조). 제방사면 수로의 폭은 1.0 m이며 제방사면의 끝단에 제내지를 두어 제내지로 유입될 때의 흐름을 재현하도록 하였다. 유량공급수조를 통해 실험수로에 물을 공급하며 최대가능유량은 $1.043\text{m}^3/\text{s}$ 이다(Fig. 3 참조).



Fig. 3. View of experimental channel

3.2 측정방법

3.2.1 유량검증

유입유량을 정확히 공급하기 위해 제방 둑마루에 피에조 메터를 설치하고 피에조메터의 수위와 유량의 관계를 설정하고 유량을 제어하였다. 유입유량조절 밸브가 4개 이므로 각각의 밸브에서 유입되는 유량을 합산하는 것보다 제방둑마루에서의 수위-유량관계를 통해 조절하는 것이 보다 쉽고 정확하게 유량조절이 가능하다. 따라서 총 13유량에 대해서 수위를 측정하였으며 그 관계와 추세선을 Fig. 4에 도시하였다.

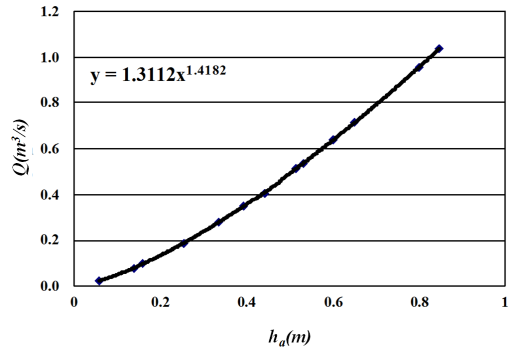


Fig. 4. Research Relation curve of h_a and Q

3.2.2 계측기기

본 실험에서 수심은 초음파 수위계로 측정하였으며 사면의 유속은 매우 크게 산정되고 수심이 얇아 유속계를 통한 측정이 어려워 직접 측정하지 않고 연속방정식 ($Q = AV$)을 통해 산정하였다.



Fig. 5. Ultrasonic water-level meter

제방 뒤틀림 보호공의 상태는 세가지로 분류하였다. 들림상태는 블록이 블록 두께의 반 이하로 움직인 상태를 의미하며 이탈상태는 블록이 블록의 반 이상, 블록 두

Table 1. Definitions of critical state

State	Definition	Schematic
Lift state	$h \leq \frac{1}{2}D$	
Leave state	$D > h \geq \frac{1}{2}D$	
Collapsed state	$h \geq D$	

계 이하로 거의 다 들렸지만 위치는 유지한 상태로 정하였다. 또한, 붕괴상태는 블록이 블록 두께 만큼 들려서 위치가 이동한 경우이다(Table 1 참조).

3.3 보호공 형상

본 연구에서 적용된 보호공의 형상은 총 3가지 이다. 원안은 기존에 수행된 일본과 유럽의 연구에서 적용된 블록의 형상이며 개선1안과 개선2안은 본 연구에서 제안한 형상으로 유공율을 증가시켜 단위면적당 식생이 많이 자랄 수 있고 단위면적당 콘크리트의 사용량을 감소시켜 경제성도 증가되도록 제안하였다.

3.3.1 원안(Original)

콘크리트 블록이 I형 모양을 가지며 내부에 두 개의 공간에서 식생이 자랄 수 있도록 설계된 형상이다(Fig. 6 참조). 블록의 유공율은 26%이며 블록 상호간에 결합력을 증가시킬 수 있는 물림배열(interlocking)이 될 수 있도록 제안되었다. 평면형상을 그대로 두고 두께를 0.045 m, 0.055 m, 0.070 m로 변화시켜 단위 면적당 중량에 변화를 주어 실험하였다.

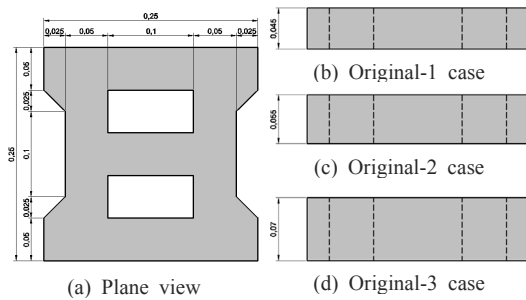


Fig. 6. Shape of protection block(Original)

3.3.2 개선1안(Modified 1)

기존의 제방 뒷비탈 보호공에서 유공율을 증가시켜 식생이 많이 자랄 수 있도록 공간을 확보하였으며 1층과 2층으로 나뉜진 구조로 2층의 콘크리트 블록이 1층의 콘크리트 블록의 들림현상을 억제할 수 있도록 제안되었다(Fig. 7참조). 1층 블록의 두께를 0.045 m, 0.065 m, 0.090 m 변화시켰으며 원통모양의 2층 블록은 두께 0.020 m으로 고정하였다. 이 블록 역시 물림배열이 가능하도록 제안되었다.

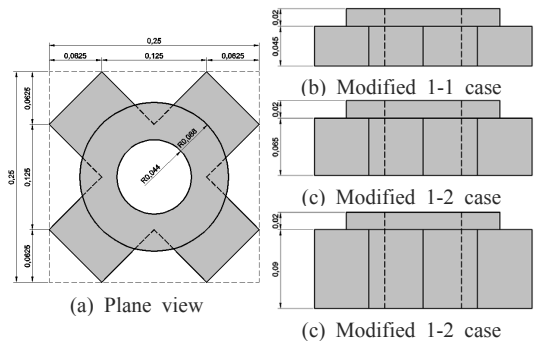


Fig. 7. Shape of protection block(Moified 1)

3.3.3 개선2안(Modified 2)

개선 2안의 경우 단층구조로 되어 있으며 원통형 구조로 기존에 비해 유공률을 크게 증가시켰다(Fig. 8 참조). 사방에 흙과 돌출부를 두어 맞물려 끼워지도록 설계되었다. 블록의 두께를 0.055 m, 0.080 m, 0.100 m 변화시켰으며 유공률은 46.6 %이다.

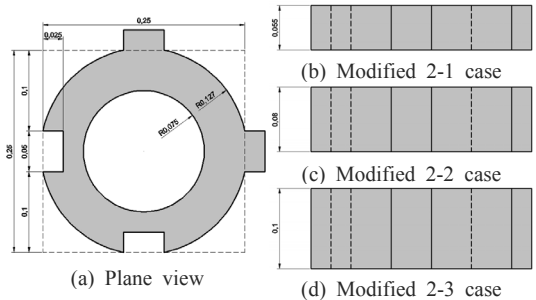


Fig. 8. Shape of protection block(Moified 2)

모든 제방 뒷비탈 보호공에 대해서 제원을 Table 2에 나타냈다. 각 블록을 실제로 제작한 후에 무게를 측

Table 2. Specifications of protection block

Design plan	Covered area (m ²)	Thickness (m)		Weight (kg/EA)	Weight per unit area (kg/m ²)	Porosity (%)	Feature
		layer 1	layer 2				
Original	0.25 × 0.25	40	0	3.48	55.68	25.9	-
		55	0	3.91	62.56		
		70	0	5.42	86.72		
Modified 1	0.25 × 0.25	45	20	3.63	58.08	34.1	Increase of porosity and stability
		65	20	4.37	69.92	38.1	
		90	20	4.65	74.40	40.7	
Modified 2	0.25 × 0.25	55	0	2.46	39.36	46.6	Maximum porosity and Increase of stability
		80	0	4.62	73.92		
		100	0	5.32	85.12		

정하였으며 이 실증량에 대한 단위면적당 증량을 산정하였다.

4. 연구 결과

수리실험은 총 9 case에 대해서 수행하였으며 각 case마다 유량을 증가시키고 안정된 상태일 때 수심을 측정하고 블록의 상태를 점검한 후 다시 유량을 증가시키는 방식으로 진행되었다(Fig. 9 참조).

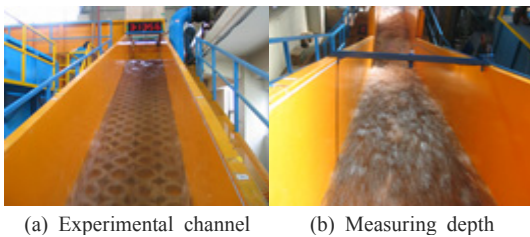


Fig. 9. View of experimental process

4.1 유량에 따른 블록 상태변화

수리실험은 3가지 형태에 대한 제방 뒤틀림 보호공을 포설하고 유량을 증가시키면서 보호공의 상태를 관측하였다.

4.1.1 원안(Original)

원안에 대한 유량변화 및 보호공의 상태는 Fig. 10에 나타났다. 원안-1 case에서는 유량이 0.15 m³/s에서 블록의 들림현상이 발생하기 시작하였으며 유량 0.30 m³/s일 때 이탈이 발생하면서 보호공이 붕괴하였다. 원안-2 case에서는 유량 0.16 m³/s에서 들림현상이 발생하기 시작하였으며 유량 0.25 m³/s에서 이탈이 발생하면서 붕괴되었다. 원안-3 case에서는 유량 0.272 m³/s 일 때 들림현상이 발생하기 시작하였으며 유량을 최대유량인 1.043 m³/s까지 증가시켜도 어느 정도 안정되어 이탈현상이 발생되지 않다가 420분이 경과한 시점에 블록이 이탈하며 연쇄적으로 붕괴하였다.

4.1.2 개선1안(Modified 1)

개선1안에 대한 유량변화 및 보호공의 상태는 Fig. 11에 나타났다. 개선1안-1 case에서는 유량이 0.20 m³/s

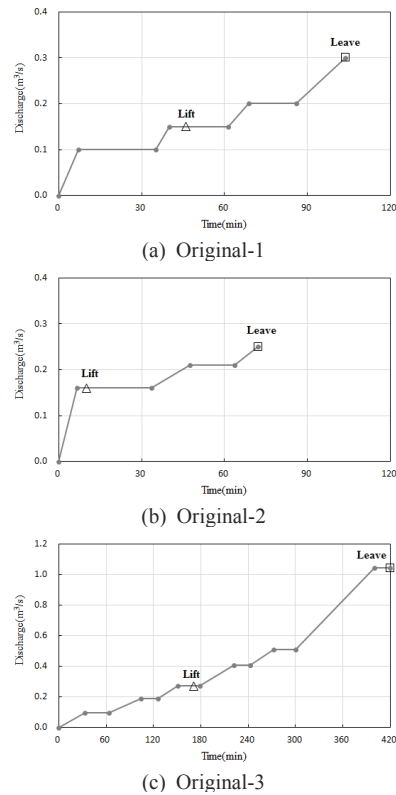
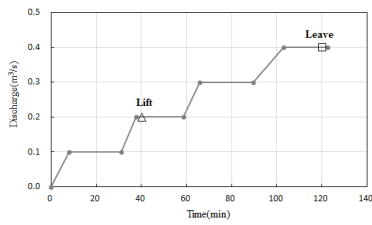


Fig. 10. Shape of protection block(Original)

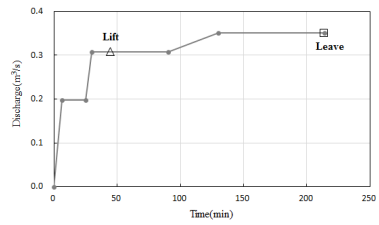
에서 블록의 들림현상이 발생하기 시작하였으며 유량 0.40 m³/s일 때 이탈이 발생하면서 보호공이 붕괴하였다. 개선1안-2 case에서는 유량을 0.2 m³/s까지 증가시켜도 들림현상이 발생하지 않다가 유량이 0.33이 되면서 이탈이 발생하였으며 연쇄적으로 붕괴하였다. 또한, 개선1안-3 case에서는 유량을 최대유량인 1.043 m³/s까지 증가하여도 들림 또는 이탈현상이 발생하지 않고 안정된 상태를 유지하는 것으로 나타났다.

4.1.3 개선2안(Modified 2)

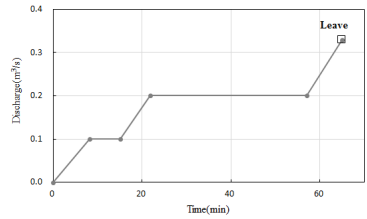
개선2안에 대한 유량변화 및 보호공의 상태는 Fig. 12에 나타났다. 개선2안-1 case에서는 유량이 0.308 m³/s에서 블록의 들림현상이 발생하기 시작하였으며 유량 0.51 m³/s에서 이탈이 발생하며 붕괴하였다. 개선2안-2 case에서는 유량이 0.591 m³/s에서 들림현상이 처음 발생하였으며 유량이 0.684 m³/s까지 증가했을 때 블록이 이탈하면서 붕괴하였다. 개선2안-3 case에서는 유



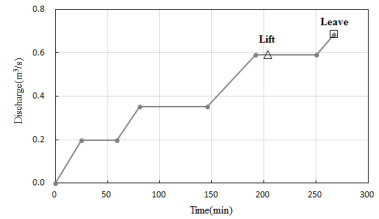
(a) Modified 1-1



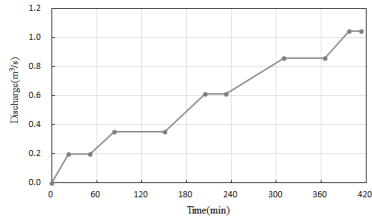
(a) Modified 2-1



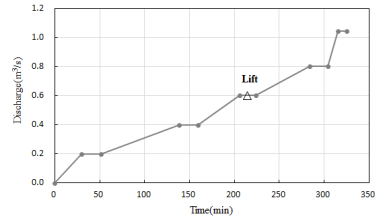
(b) Modified 1-2



(b) Modified 2-2



(c) Modified 1-3



(c) Modified 2-3

Fig. 11. Shape of protection block(Modified 1)

Fig. 12. Shape of protection block(Modified 1)

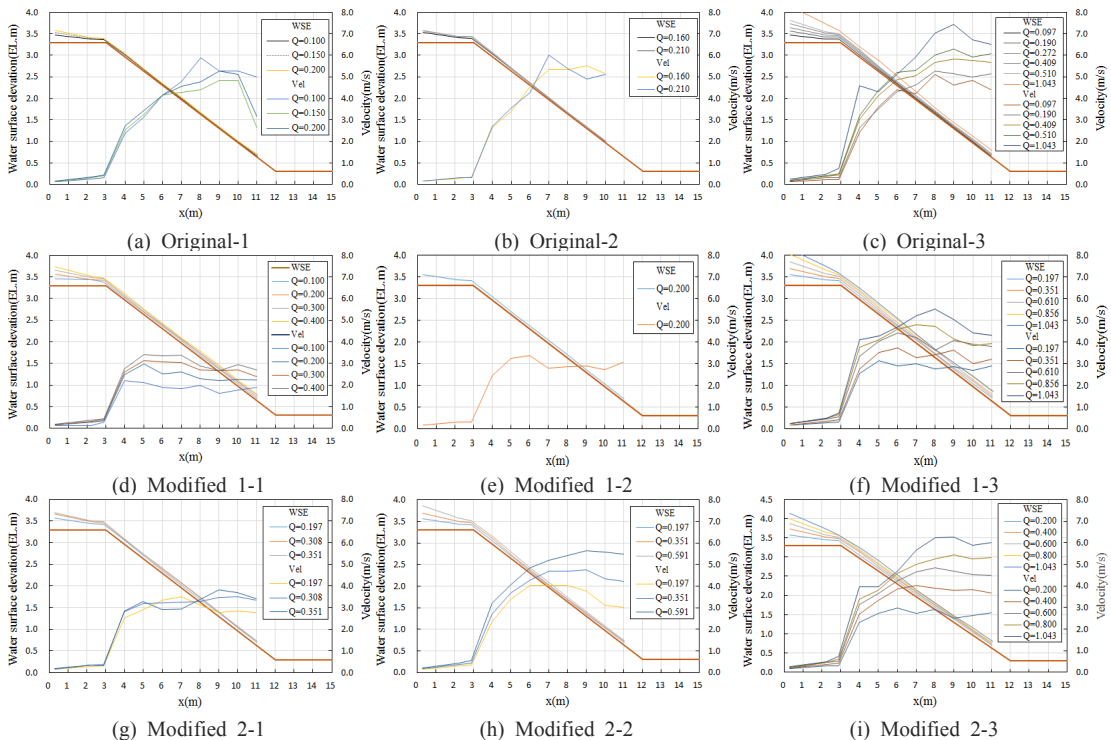


Fig. 13. Distribution of water surface elevation(WSE) and velocity(Vel)

량 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 들림현상이 발생하였으나 유량이 최대유량인 $1.043 \text{ m}^3/\text{s}$ 까지 증가하여도 이탈현상이 발생하지 않고 안정된 상태를 유지하는 것으로 나타났다.

4.2 수심 및 유속분포

모든 실험 케이스에 대한 유량별 수위변화는 Fig. 13에 도시하였다. 모든 케이스에서 제방경사면이 시작되는 지점으로부터 4.0 m 지점에서 10 m 까지의 흐름은 수위 변화가 거의 없는 등류흐름을 나타냈으며 제방경사로 인해 유속이 큰 사류흐름의 특성도 함께 나타났다.

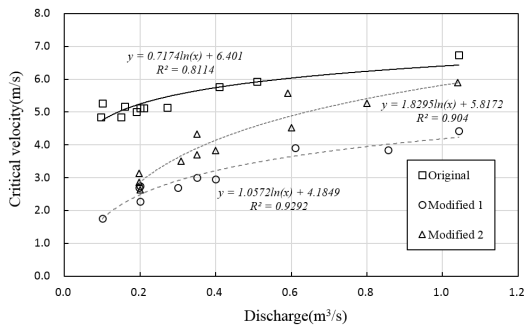


Fig. 14. Relationship of inlet discharge and velocity at end of levee slope

4.3 단위면적당 중량과 한계유속

월류제에 대한 설계매뉴얼[15]에 제시된 콘크리트 블록의 재원별 한계유속을 Table 3에 나타냈으며 이 실험 결과로부터 단위면적당 중량과 한계유속의 관계를 도출하여 Fig.15에 나타냈다.

Table 3. Results of Critical velocity experiment for concrete block(CIRIA, 1987)

no.	Type of concrete block	Weight per unit area (kg/m^2)	Critical velocity (m/s)	Critical discharge (m^3/s)
1	cable tied	135	6.9	0.736
2		143.5	6.9	0.725
3		160	7.9	1.095
4	non-tied interlocking	95	4.5	0.3

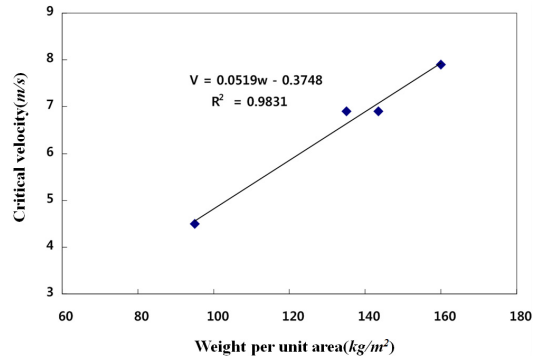


Fig. 15. Fitted regression line to the scatter plot of weight per unit area and critical velocity

Table 4에 제방뒤틀비탈 보호공의 단위면적당 중량과 본 연구를 통해 도출된 유량-한계유속 관계로부터 계산된 한계유속을 나타냈으며 CIRIA[15]의 실험결과와 비교하여 Fig.16에 나타냈다. 그 결과 CIRIA의 실험결과와 유사한 결과를 나타냈으며 본 연구에서 제안한 제방뒤틀비탈 보호공이 충분한 안정성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 블록들이 기존의 것들보다 유공율이 블록 내로 흐름이 유입되고 강한 난류가 발생하여 흐름에 많이 저항하기 때문으로 판단된다.

Table 4. Specifications of protection block

Design plan	Weight per unit area (w) (kg/m^2)	Critical discharge (m^3/s)		Critical velocity (m/s)	
		Lift	Leave	Lift	Leave
Original	1	0.150	0.300	6.266	6.315
	2	0.160	0.250	6.270	6.302
	3	0.272	1.043	6.308	6.404
Modified 1	1	0.200	0.400	2.483	3.216
	2	-	0.330	-	3.013
	3	-	-	-	-
Modified 2	1	0.308	0.351	3.663	3.902
	2	0.592	0.684	4.855	5.122
	3	0.600	-	4.883	-

4. 결론

본 연구에서는 홍수위 상승으로 제방 월류가 발생할 때 제방의 붕괴를 방지하거나 지연시키는 공법을 개발하기 위하여 자연친화적 공법인 유공성 블록의 월류 방지

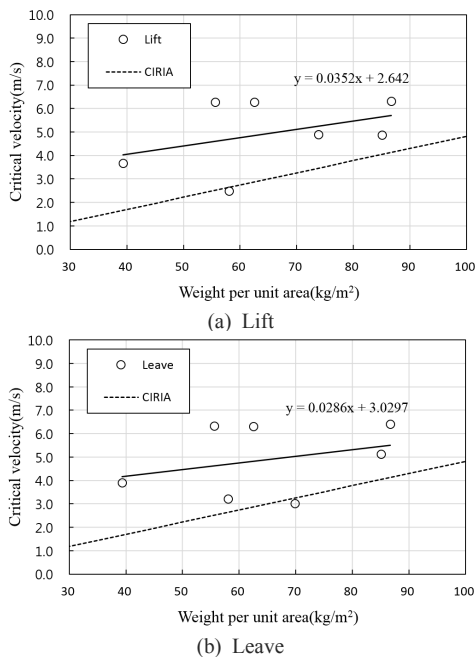


Fig. 16. Comparison of critical velocities estimated by the equations derived by CIRIA[15] and this study

효과에 대해서 실험실증연구를 수행하였다. 본 연구에서 적용된 월류 보호공의 형상은 원안, 개선1안 및 개선2안 등 총 3가지이다. 원안은 기존에 수행된 일본과 유럽의 연구에서 적용된 블록의 형상이며 개선1안과 개선2안은 본 연구에서 제안한 형상으로 유공율을 증가시켜 식생이 많이 자랄 수 있고 단위면적당 콘크리트의 사용량을 감소시켜 경제성도 확보하면서 월류에 대한 안정성을 확보할 수 있도록 제안하였다. 본 연구에서는 개선된 월류보호공에 대해 수리실험을 실시하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 월류시 제방붕괴를 방지할 수 있는 자연친화적 월류보호공을 제안하여 1:3 경사의 수로에서 수리실험을 수행한 결과, 제방뒷비탈 보호공의 안정성은 보호공의 단위면적당 중량과 높은 상관성이 있음을 규명하고, 보호공이 이탈되는 순간의 유속인 한계유속과 단위면적당 중량과의 관계식을 도출하였다.
- (2) 월류보호공의 단위면적당 중량이 증가할수록 월류에 대한 안정성도 증가하였고, 보호공의 이탈상

태에서의 유속인 한계유속은 단위면적당 중량과 선형관계인 것으로 나타났다.

- (3) 제방을 월류할 때의 흐름특성을 관찰한 결과, 제방 독마루에서 한계류가 발생하고 뒷비탈 구간에서는 사류(supercritical flow)가 형성되어 유속이 증가하고 이로 인해 제방 뒷비탈면의 세굴잠재성이 커지는 것으로 나타났다. 세굴잠재성의 증가는 제방붕괴가능성의 증가를 의미하므로 월류보호공 설계시 사류 특성을 고려할 필요가 있는 것으로 파악되었다.
- (4) 모든 실험조건에서 제방경사면이 시작되는 지점으로부터 4.0 m 지점에서 10m 까지의 흐름은 수위변화가 거의 없는 등류 및 사류흐름 특성도 함께 나타났으며, 월류보호공 설계시 이구간에 대한 흐름특성을 반영할 필요가 있는 것으로 파악되었다.

본 연구를 통해 월류보호공의 제원을 결정할 수 있는 설계식을 실험적으로 제시하였다. 홍수에 의해 제방이 월류되는 경우 제방 뒷비탈면에서 고유속이 발생하고 그로 인해서 비탈면 세굴이 발생한다. 이에 대해서 자연친화적인 유공성 블록에 대한 수리실험을 수행하여 단위면적당 중량과 한계유속과의 상관관계를 도출하였다. 그러나 실험연구에서 계측장비의 한계로 보호공주변의 흐름특성에 대한 분석이 수행되지 않아 형상에 따른 영향을 파악하기 어려워 추후 수치모의를 통해 보완이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과를 통하여 국내에서는 아직 도입되지 않은 자연친화적 월류보호공이 현장에 적용됨으로써 홍수시 월류에 의해 발생하는 인명 및 재산피해를 경감시키고, 더 나아가서는 자연친화적인 하천공간이 조성될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Ministry of Construction Transportation, *Development of Advanced Technologies for Levees*, 2004.
- [2] Uno, T., Kamiya, K. and Tanaka, K, "The distribution of sand void diameter by air intrusion method and moisture characteristic curve method", *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1998(603), pp. 35-44, 1998. DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.1998.603_35
- [3] Fujita, Y., Tamura, T. & Muramoto, Y. "Experiments on Enlarging Process of River Bank Breaches" *University of*

Tokyo, Institute of Hazard Mitigation, Annual Report no. 27, pp. B-2, 1984.

- [4] Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B. and Blöschl, G., "A probabilistic modelling system for assessing flood risks", *Natural hazards*, vl. 38, no. 1, pp. 79-100, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7>
- [5] Coleman, S. E., Andrews, D. P. and Webby, M. G., "Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments" *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, no. 9, pp. 829-838, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:9\(829\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(829))
- [6] Chinnarasri, C., Tingsanchali, T., Weesakul, S., and Wongwises, S. "Flow patterns and damage of dike overtopping" *International Journal of Sediment Research*, vol. 18, no. 4, pp. 301-309, 2003.
- [7] Frenette, R., & Pestov, I., "Flow and erosive stresses at the base of a headcut" *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, no. 2, pp. 139-141, 2005.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(139))
- [8] Ministry of construction Japanese Government, *Design Guideline of River Levee*, 2000.
- [9] Pan, Y., Li, L., Amini, F., & Kuang, C. "Influence of three levee-strengthening systems on overtopping hydraulic parameters and hydraulic equivalency analysis between steady and intermittent overtopping" *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 139, no. 4, pp. 256-266. 2012.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000179)
- [10] Li, L., Amini, F., Pan, Y. & Li, C. "Stability Monitoring of Articulated Concrete Block Strengthened Levee in Combined Wave and Surge Overtopping Conditions" *In Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* pp. 262-271, 2014.
- [11] Escarameia, M., & May, R.W.P., "Stability of Riprap and Concrete Blocks in Highly Turbulent Flows" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, vol. 112, no. 3, pp. 227-237, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.27885>
- [12] Escarameia, M. & May, R.W.P. "Channel protection-Turbulence downstream of structures", *Report SR 313, HR Wallingford*, 1992.
- [13] Pilarczyk, K.W. "Stability Criteria for Revetments", *Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1990 National Conference, American Society of Civil Engineers, New York*. pp. 245-250, 1990.
- [14] JICE(Japan Institute of Construction Engineering), *Dynamic Design of Revetments*, Sankaido, 2007.
- [15] Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), *Design of reinforced grass waterways*. Report 116, London, 1987.

김수영(Sooyoung Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험

윤광석(Kwang Seok Yoon)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험, 환경공학