

# 방조제 개방구간의 투하 석재와 돌망태 안정성 수리시험 연구

## A Study on the Stability of Dumping Stone and Gabion in the Seadike Closure

박 상 현\*  
Park, Sang-hyun

### Abstract

In the final stage of seadike closing, the flow in the tidal gap changes rapidly to high accelerating flow, causing losses of construction materials. As the tidal velocity through the gap of an end dump contraction is highly nonuniform, flow equations on relevant studies have been of questionable accuracy to evaluate the figure of accelerating flow and the adequate size of closure material on the advancing boundary. A physical model study was carried out in a 44m long by 0.6m wide and 0.7m deep flume. The model was manufactured with quarry stone and gabion. Each of closure materials were dumped at the head of spurdike and bottom of closure gap. The model has been calibrated by data measured in the final closing stage of Saemankeum seadike and Shiwha seadike in western coast of Korea. Stability of the dumping materials in the closing gap could be shown as a function of multidimensional parameters such as current velocity, tidal depth, rock size and the efficiency of closing materials.

In the model study, the quarry stones were lost in the rapid flow where Froude number is more than 0.65, however, the gabions were rather resistable than the stones to be useful as the final closing materials in the seadike closure.

The result of the study may contribute to decide the stable size of the closure material dumped into the rapid flow in the final stage of tidal gap closure.

### I. 서 론

지금까지 우리 나라에서 방조제 물막이 공사 재료를 비롯한 방조제 축조 재료는 주로 석산에서 발파한 석재와 돌망태를 이용하여 왔다.

이러한 석재 재료는 항만건설과 해안 매립사업에 널리 사용되는 테트라포드(Tetrapod) 등 콘크리트 블록 형태의 인공 재료에 비하여 저렴하고, 축조 후 유지관리도 용이하며, 해안의 어류와 수생 생물의 생태를 보존하는데 있어서

\* 농어촌진흥공사 농어촌연구원

키워드 : 무차원 전단응력, 돌망태, 석재, 방조제 선단부, 바닥보호공

다른 재료에 비하여 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 이러한 방조제 공사에서 물막이 개방구간에 투하되는 축조 재료의 이동성은 공사 진행에 따른 내외 수위 차와 유속이 증가함에 따라서 함께 증대된다. 아직까지 제방의 축조 재료의 안정성에 관하여는 경험적인 자료와 개략적인 공식에 의하여 설계하고 있는 실정이다. 이의 대표적인 경험식 중 Isbash식은 정류 상태의 흐름에서 점고식으로 석재를 투하하는 하천 횡단 구조물의 설계에 적당한 방식이며, 방조제의 점 축식 물막이 개방구간 양단인 제체 선단에서 급격하게 가속되는 유속의 영향과 수심의 영향이 무시된다. 특히, 돌망태의 안정성과 규모 결정 방식에 관한 연구는 더욱 미흡한 편이다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 방조제의 축조 석재의 규격은 유수 중 투하되는 석재와 돌망태의 이동에 관한 3차원 수리모형시험을 실행하고 이들 축조 재료의 이동과 유실 안정성을 유속과 수심의 영향을 고려하여 결정코자 한다.

## II. 축조재료의 안정성에 관한 이론

지금까지 제방 축조재료의 이동성과 규격결정에 관하여 널리 사용되어 온 Isbash식은 다음과 같다.

$$\frac{U_c}{\sqrt{s'gD_{50}}} = 1.7 \quad (1)$$

여기서,  $U_c$ 는 석재가 움직이기 시작하는 유속이며,  $s'$ 는 석재의 수중 단위중량,  $g$ 는 중력가속도,  $D_{50}$ 은 석재의 평균 직경이다. 또한, Shields가 제안한 무차원 전단응력의 개념은 유사와 돌의 이동을 유속과 수심의 영향을 고려한 것으로써 Daryl(1977), 박(1985), 유(1996) 등에 의하여 제방 축조를 위한 석재의 안정규격 결정 방식에 활용된 바 있으며, 이의 정의는 다음과 같다.

$$F^* = \frac{\tau}{s'gD_{50}} \quad (2)$$

여기서,  $F^*$ 는 무차원 전단응력이며,  $\tau$ 는 전단 응력이다.

$$\tau = \rho_w U_*^2 \quad (3)$$

또한,  $\rho_w$ 는 물의 밀도이며,  $U_*$ 는 전단속도이다.

$$U_* = V / (5.75 \text{Log}(11h / 2.5D_{50})) \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 개방구간의 평균 유속,  $h$ 는 수심,  $D_{50}$ 은 축조 재료의 평균 직경이다. 방조제 축조재료의 안정성의 유실에 관련된 인자들은 물막이 전체 구간 폭( $B$ ), 개방 구간폭( $b$ ), 접근 수로의 평균유속( $V$ ), 접근수로의 평균수심( $h$ ), 축조 재료와 물의 단위 중량( $\rho_s, \rho_w$ ), 개방 구간에서 하상 재료의 직경( $D$ ), 수중에서 축조재료의 안식각( $\phi$ ) 등이다. 이를  $\pi$  정리에 의하여 다음의 무차원함수로 나타낼 수 있다.

$$\eta = f_2 \left[ \frac{B-b}{b}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{D}{h}, \frac{D_{50}}{h}, \frac{B}{h}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \phi \right] \quad (5)$$

이중 하상 재료의 직경과 축조 재료의 안식각( $\phi$ ) 등을 무시하면 식 (5)는 다음과 같이 정리된다.

$$\eta = f_3 \left[ m, Fr, \frac{D_{50}}{h}, \frac{B}{h} \right] \quad (6)$$

여기서,  $m = \frac{B-b}{b}$ 이다. 식 (6)은 투하 재료의 이동성을 나타내는 지표이며, 유수 중 축조 재료의 이동에 있어서 수심과 Froude 수의 영향은 유속의 수직분포에 영향을 줌으로써 임의의 유속에서 수심이 작은 경우는 깊은 경우에 비하여 바닥 면의 견인력과 유속을 증대시킬 수 있다. 축조 재료의 유수중 안정성은 박 등(19

95)이 시험한 방조제 축조 재료의 침하 유실에 관한 연구에서 축조 재료의 유실률로써 정의된 바 있다.

### Ⅲ. 수리모형시험

방조제 개방 구간의 축조재료 안정성 시험을 위한 수리모형은 폭 0.6m의 모형수로(Flume)에 설치되었다. 모형 수로의 길이는 44m로서 상류에는 유량 조절 밸브와 웨어 시설을 설치하고, 하류에는 수위조절 수문을 설치하여 상하류의 유량 및 수위조건을 재현하였다. 또한, 수로 벽은 투명한 유리로 구성되어 석재의 이동과 물막이 구간 각 지점의 유속과 수위를 측정하였다. 한편, 유수 중 석재의 이동에 관한 수리시험의 상사 이론은 Froude 상사법칙을 적용하였다. 즉,

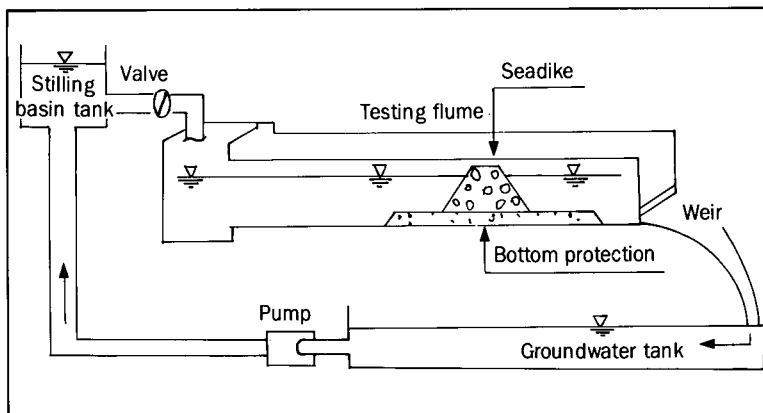
$$(F_r)_R = 1 \quad (7)$$

$$\frac{(F_r)_M}{(F_r)_P} = \frac{V_M}{(g_M L_M)^{1/2}} \bigg/ \frac{V_P}{(g_P L_P)^{1/2}} = 1 \quad (8)$$

여기서,  $(F_r)_R$ 는 Froude 수의 축척,  $V_M$ 과

$V_P$ 는 모형과 원형의 유속,  $L_M$ 과  $L_P$ 는 모형과 원형의 길이이다. 모형 수로에서 물막이 공사 구간의 지형 축척은 1:50을 기준으로 하였으며, 축조 재료의 축척은 축척의 영향을 최소화하기 위하여 1:50과 1:25의 두 가지 경우로 검토하였다. 시험 수로에서 방조제 모형의 바닥 보호공은 자갈과 시멘트 모르타르로 형성한 고정상 모형으로 제작하였으며, 방조제 모형은 상부 폭 18cm, 높이 26cm, 사면 기울기 1:2로 단면을 석재와 돌망태를 규격별로 설치하였다. 모형에서 바닥 보호공의 표고는 -8m를 기준으로 하였으며 바닥보호공의 높이는 8m(모형에서 16cm)로 정하였다.

시험 수위는 서해안 중부 지역의 대조시 수위차 6m를 기준으로 설정하여 Hook gauge로 측정하였으며, 유속은 시화지구와 새만금지구의 물막이 단계의 최대 유속을 고려하여 7m/s를 기준으로 설정하였다. <Fig. 1>은 수리시험용수가 순환하는 계통을 나타내고 있으며, 수리시험용수는 지하 저수조에서 양수기를 거쳐서 고수조에서 일정한 수압을 유지하며 정수된 후 취수 밸브를 거쳐서 모형수로에 유입되어 시험에 활용된 후 하류 웨어를 넘어서 지하 저수조에 유입된다. <Table 1>은 수리모형의 상하류 경계 조건과 시험재료로 사용된 방조제 석재와 돌망태 규격을 나타내고 있다. 모형시험의 축조



<Fig. 1> Layout of the seadike model

<Table 1> Model boundary of the seadike closure

Upstream Boundary	Closing Materials		Downstream Boundary
	Rock	Gabion	
flow discharge (m <sup>3</sup> /s)	mean diameter (m)	mean diameter (m)	water depth (m)
0.082	0.017	0.05	0.10
0.065	0.022	0.055	0.17
0.050	0.028	0.06	0.20
0.032		0.07	0.24
		0.08	0.30
			0.33

<Table 2> Gabion in the model

Weight in Model(g)	D <sub>50</sub> (m)	Shape Factor				Weight in Prototype(kg)
		a	b	c	SF	S=25
320	0.096	10	8	5	0.559	5,000
192	0.081	8	7	5	0.668	3,000
128	0.070	7	6	4	0.617	2,000
75	0.059	6.5	5.5	3.5	0.585	1,172
65	0.056	5	5	3.5	0.700	1,016

재료 중 석재는 세 가지 규격의 깐돌을 사용하며, 돌망태는 철망안에 석재를 넣고 철선으로 묶어서 제작하였다.

<Table 2>는 모형 시험에 사용된 돌망태의 규격별 중량을 축척 25와 50의 경우로 비교 분석한 것으로서, 축척을 25로 정하는 경우, 돌망태 중량은 5톤, 3톤, 2톤, 1톤 규모를 대상으로 설정한 것이다.

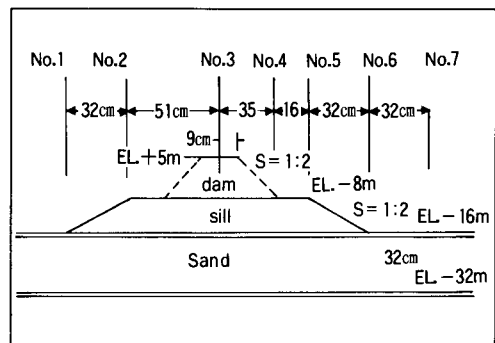
<Table 2>에서 평균 직경 D<sub>50</sub>은 다음 식으로 구하였다.

$$D_{50} = 2 \times \{W / (1.333 \times 3.14 \times G_s')\}^{0.333} \quad (9)$$

여기서, W는 모형에서 돌망태의 중량이며, G<sub>s</sub>'는 돌망태의 수중 중량으로서 700kg/m<sup>3</sup>으로 하고, 돌망태의 평균 직경(D<sub>50</sub>)은 완전한 구형으로 가정하여 계산된 값이다. 또한, SF는 형상계수로서 다음 식으로 계산된 것이다.

$$SF = c / \sqrt{a \times b} \quad (10)$$

여기서, a는 장변, b는 중변, c는 단변이며, 모형에 사용된 재료의 평균 형상계수는 0.6정도를 나타내고 있다.



<Fig. 2> Cross section of seadike closure in the model

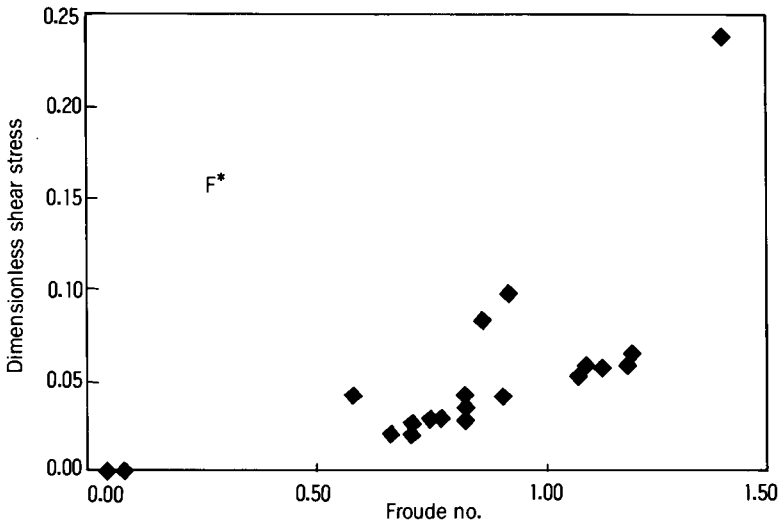
〈Fig. 2〉는 방조제 시험 모형의 단면을 나타내고 있다. 모형에서 방조제 물막이 단계별 유속과 수심은 시험구간을  $x, y$  좌표에 따라 약 0.3m 간격의 측점으로 구성된 격자망에 두 방향 유속계와 Hook gauge를 폭 0.65m의 이동 가교 (Over head bridge)에 설치하여 시험 수조의 종방향으로 이동하면서 방조제 선단부와 개방 구간 중심부 등에서 측정하였다. 시험유속은 표층과 중층 및 저층의 세 지점에 대하여 측정하

고 이를 산술 평균한 값을 평균 유속으로 정하였다.

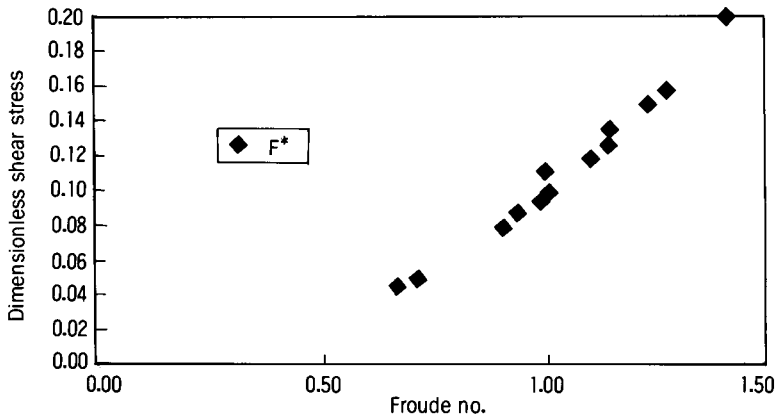
#### IV. 시험결과 및 분석

##### 1. 방조제 개방구간의 수리 특성

방조제 개방구간에서 바닥보호공의 안정성은



〈Fig. 3〉 Froude number and dimensionless shear stress of dumping rock at the end of bottom sill of tidal closure (No. 5)



〈Fig. 4〉 Froude number and dimensionless shear stress of gabion at the end of bottom sill of tidal closure

무차원 전단응력과 이에 상응하는 수리적인 인자들의 규모에 의하여 검토하였다.

〈Fig. 3〉은 전단응력이 급증하는 개방구간의 바닥보호공 말단인 No. 5에서 측정된 석재의 직경에 관한 Froude 수와 무차원 전단응력의 변화를 나타내고 있다. 이는 Froude 수가 증가함에 따라서 무차원 전단응력도 함께 선형적으로 비례함을 나타내고 있다.

한편, 〈Fig. 4〉는 바닥보호공 말단에 투하된 돌망태의 무차원 전단응력과 Froude 수의 관계를 나타내며, 이들의 선형적인 상관성은 〈Fig. 3〉에 나타난 석재에 비하여 높다. 이는 돌망태의 입도별 균등성이 석재보다 양호한 데에 기인한 것으로 판단된다.

## 2. 방조제 바닥보호공의 안정성

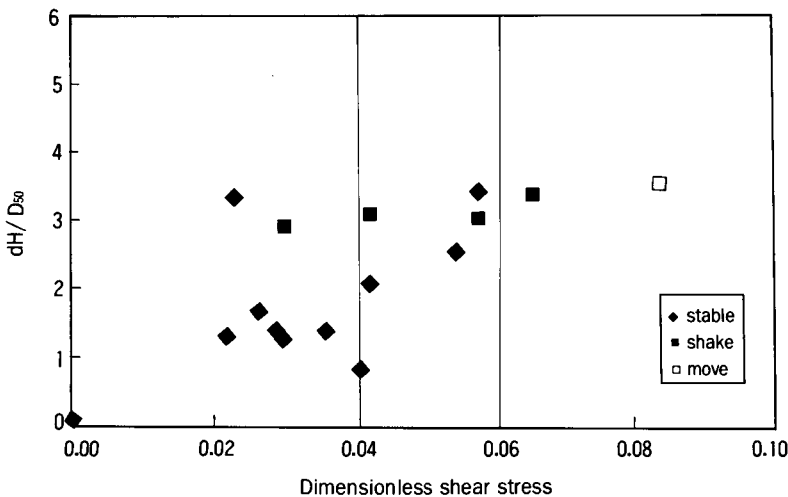
방조제 바닥보호공의 이동 안정성은 모형시료의 이동성을 관측하고 이 때의 수심과 유속측정 결과에 의하여 분석되었다. 〈Fig. 5〉는 방조제 바닥보호공 말단인 측정점 No. 5에서 측정된 유속과 수심 및 바닥보호공으로 설치된 석재의 입도에 따른 무차원 전단응력과 상하류 수두차의 관계를 나타내고 있다. 여기서, 무차원 전단

응력은 수두차에 대한 석재직경( $dH/D_{50}$ )에 선형적으로 증가한다. 이는 무차원 전단응력이 0.04으로부터 0.06까지의 범위에서 석재가 이동하기 시작하는 떨림 상태(Shake로 표시)에 있음을 나타내며 0.06 이상에서 움직임(Move로 표시)을 나타내고 있다.

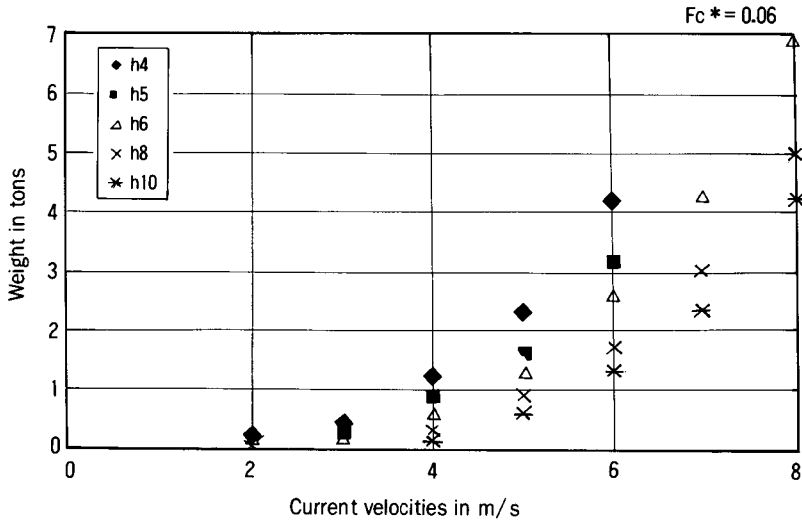
모형시험에서 축조재료의 이동과 떨림, 그리고 이동의 특징을 분명히 구분하기는 어렵지만 재료가 방조제 단면을 완전히 이탈하는 수량이 3개 이상 되는 경우를 이동으로 설정하였다. 이러한 변화는 '86년 농어촌진흥공사에서 수행한 방조제 수리시험연구에서 분석한 결과와 잘 일치한다.

이와같이 방조제 바닥보호공 말단에서 석재의 이동성에 관해 시험된 결과는 수심과 유속에 따른 함수로 나타낼 수 있으며, 이를 정리하면 〈Fig. 6〉과 같다. 이는 바닥보호공 말단에서 유수 중 석재가 이동하기 시작할 때의 무차원 전단응력을 0.06으로 설정하고 이에 상응하는 유속과 수심에 의하여 중량을 계산하여 나타낸 것이다.

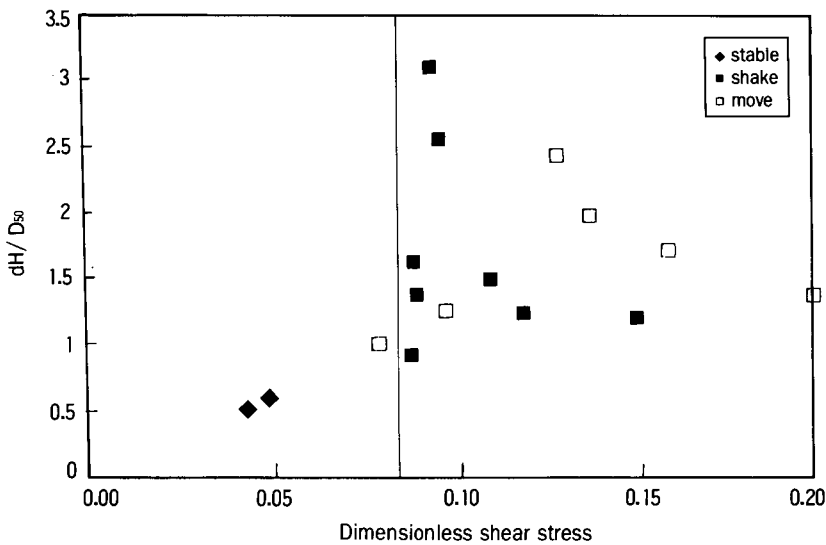
한편, 〈Fig. 7〉은 방조제 바닥보호공 말단의 축조 재료를 돌망태로 사용한 결과를 나타낸 것으로서, 바닥보호공 말단에서 무차원 전단응력



〈Fig. 5〉 Stability of rock in the bottom sill of tidal closure



〈Fig. 6〉 Optimal rock weight at the end of bottom protection in seadike closure



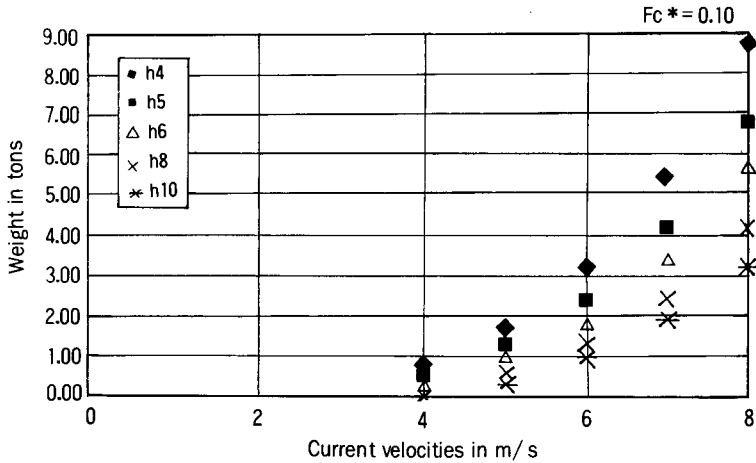
〈Fig. 7〉 Stability of gabion in the bottom sill of tidal closure

은 수두차에 대한 돌망태 평균 직경( $dH/D_{50}$ )에 선형적으로 증가하지만 석재의 경우에 비하여 무차원 응력이 증가할 수록 이들의 상관성은 산포도가 심하게 나타났다.

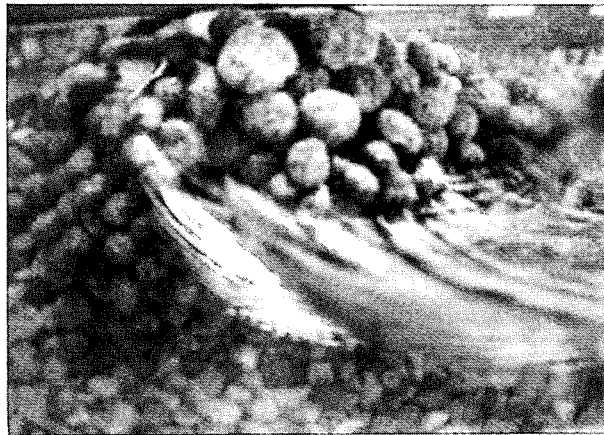
여기서, 돌망태의 경우는 무차원 전단응력이 0.07로부터 0.12까지의 범위에서 석재가 이동하기 시작하는 떨림 상태(Shake로 표시)에 있으며, 0.1 이상에서 움직임(Move로 표시)을 나타내고 있다. 또한, 축조 재료의 떨림 현상과 이동

되는 범위가 중복되는 것은 명확하게 구분할 수 없기 때문에 좀 더 세밀한 연구가 필요하지만 돌망태의 이동이 시작되는 무차원 전단응력은 석재보다 20% 이상 큰 것으로 나타나고 있다.

이와같이 방조제 바닥보호공 말단에서 돌망태의 이동성에 관해 시험된 결과는 수심과 유속에 따른 함수로 나타낼 수 있으며, 이를 정리하면 〈Fig. 8〉과 같다. 이는 바닥보호공 말단에서 유수 중 돌망태가 이동하기 시작할 때의 무차원



〈Fig. 8〉 Optimal gabion weight at the end of bottom protection in seadike closure



〈Fig. 9〉 Movement of dumping materials in the spurdike of the tidal closure

전단응력을 0.10으로 설정하고 이에 상응하는 유속과 수심에 의하여 중량을 계산하여 나타낸 것이다. 이러한 시험 결과에 따라서, 돌망태는 조류속이 7m/s 정도의 급류가 발생하는 방조제 끝물막이 구간에서 바닥보호공 재료로서 유용한 재료임이 입증되었다.

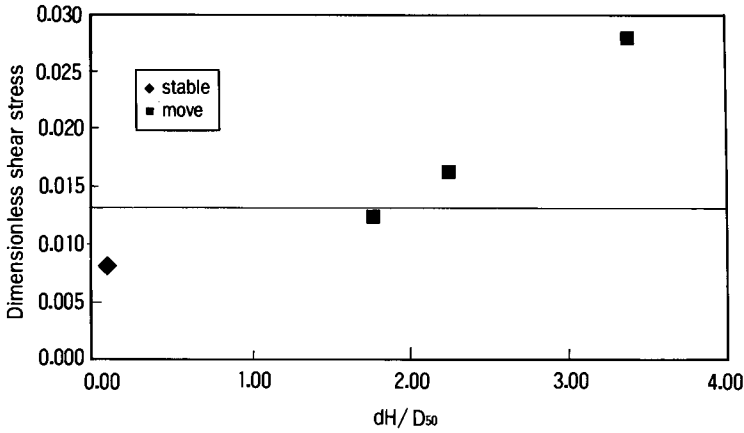
### 3. 물막이 제체 선단부에서 투하 석재와 돌망태 안정성

방조제 물막이 구간의 제체 선단부에 투하된 석재는 개방구간으로 유하되는 흐름이 제방 사

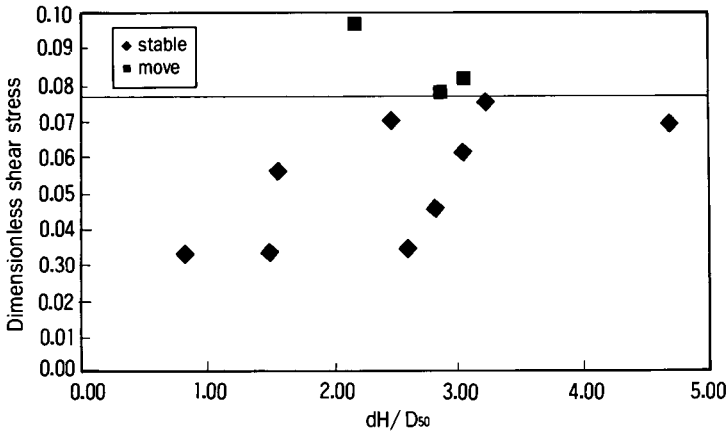
면에 작용하는 건인력과 양력 등에 의하여 제체를 벗어나 굴러 내리거나 안정된 상태를 유지한다. 이러한 축조재료 이동성은 수심(h), 석재의 직경(D<sub>50</sub>)의 영향을 크게 받는다. 〈Fig. 9〉는 이러한 영향인자에 의하여 석재의 유실 안정성을 촬영한 것이다.

방조제 선단부에 투하된 석재의 안정성에 관한 시험 결과는 〈Fig. 10〉에 나타나 있으며, 무차원 전단응력이 0.013 이상에서 석재의 떨림 현상이 시작되었으며, 0.03 정도에서 이동되기 시작하였다. 이러한 흐름 상태에서 석재를 투하하는 경우 제방의 비탈면을 따라서 흘러내리는





〈Fig. 10〉 Stability of rock in the spurdike of tidal closure



〈Fig. 11〉 Stability of gabion in the spurdike of tidal closure

양이 많기 때문에 본 시험은 정수상태에서 석재를 쌓고 흐름을 가속시키며 유실 규모를 측정하였다.

한편, 돌망태를 제체 선단부에 투하하여 시험한 결과는 〈Fig. 11〉에 나타나 있으며, 돌망태가 이동하기 시작하는 무차원 전단응력 값은 0.08 정도이다. 이러한 결과는 석재의 경우에 비하여 2.5배 정도 큰 값이므로 돌망태가 석재보다 빠른 유속에 견딜 수 있음을 정량적인 수치로 나타내는 결과이다.

또한, 석재의 무차원 전단응력은 돌망태 직경에 대한 상하류 수위차의 비율( $dH/D_{50}$ )이 커질수록 선형적으로 증가함을 나타내고 있다.

## V. 결 론

방조제 축조 재료의 안정성에 관한 수리시험은 방조제 선단부와 바다보호공에 석재와 돌망태를 적절히 배치하여 시험하였다.

시험 결과 방조제 축조 재료의 이동성에 영향을 가장 많이 주는 중요한 요소는 Froude 수와 개방구간 상하류의 수두차, 수심에 따른 석재 또는 돌망태의 개방구간의 축소율 등이며, 시험 과정을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 방조제 개방구간의 바닥보호공으로 설치된 축조 석재의 유실 안정성은 유입부의 Froude

수 및 수두차, 유속 등의 흐름의 특성에 큰 영향을 받는다. 바닥보호공 말단의 석재가 움직이기 시작하는 경우의 무차원 응력은 0.045 정도이다. Froude 수가 0.4 이하인 경우 석재 유실은 경미하며 Froude 수가 0.65 이상이면 석재의 안정성이 저하되었다.

2. 방조제 개방구간 바닥보호공 말단에 설치된 돌망태의 경우는 석재에 비하여 안정성이 높으며, 돌망태가 움직이기 시작하는 Froude 수는 약 0.8정도이다. 이때의 무차원 전단응력은 0.1정도로써 석재에 비하여 약 2배 정도의 전단저항력을 갖는다.

3. 방조제 개방구간의 제체 선단부에 설치된 석재와 돌망태의 유실안정성은 유입부의 Froude 수의 특성에 큰 영향을 받는다.

Froude 수가 0.6 이하인 경우 석재 유실은 경미하며 Froude 수가 0.8 이상이면 돌망태의 안정성이 저하되기 시작한다. 이때의 무차원 전단응력은 석재의 경우 0.04이며, 돌망태는 0.08 정도로써 석재보다 2배 정도의 큰 전단저항력을 갖고 있다.

4. 방조제 물막이 구간의 투하재료의 안정성에 관하여 비교한 결과, 돌망태가 석재에 비하여 2배 가량의 전단저항을 갖고 있다. 이를 중량별로 비교한 결과는 돌망태가 약 30% 정도 이상의 저항력이 크며, 물막이 모형시험 구간에서 유속이 7m/s 이상으로 상승할 때, 석재의 안정성은 매우 미약한 반면, 돌망태는 비교적 안정된 상태를 유지한다.

5. 일반적으로 돌망태의 공사비가 고액으로 소요되므로 석재와 혼합하여 투하되며 이러한 석재와 돌망태의 혼합에 따른 안정성은 향후 추가적인 연구가 필요하다.

3. 박상현, 박영옥, 1995. 방조제 개방구간에서 투하석재의 안정성에 관한 연구, 농공기술 No. 49, 농어촌진흥공사.
4. 유동훈, 1996. 소유사랑 산정식, 한국 해안해양 공학회지, 8(1):52-60.
5. B. P. Das, et al, 1981. Shear Stress Distribution at Channel Construction. J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 107, No. HY12, Dec., pp. 1695~1711.
6. B. P. Das, 1972. Stability of Rockfill in End-Dump River Closures, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 98, HY11, Nov.
7. Delft University Press, 1984. The Closure of Tidal Basins.
8. Novak, Cabelka and Pitman, 1978. Models in Hydraulic Engineering.
9. Daryl B. 1976. Simons and Fuat Senturk, Sediment Transport.
10. Technology Sedimentation Engineering, 1975. Manual No. 54, ASCE.

약 력

박 상 현



1974. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업  
 1982. 건국대학교 대학원 농학석사  
 1982. 농어업토목 기술사  
 1990. 서울대학교 대학원 농학박사  
 현재 농어촌진흥공사 농어촌연구원 수리시험장장  
 KCID 관개배수실행분과위원장 / 편집·학술분과위원  
 ICID 관개배수실행분과위원

참고문헌

1. 박상현, 1986. 방조제수리모형시험 연구 No. 8 6-05-04, 농업진흥공사.
2. 박상현, 1996. 방조제 물막이 구간의 투하석재와 돌망태 안정성 수리시험, 새만금지구 수리실험 및 파랑관측보고서, 농어촌진흥공사.