



고파랑이 내습하는 방조제 피복석의 안정성 평가 - 새만금방조제를 중심으로 -

Stability Evaluation of Armor Stones in the Seadike of Incoming High Waves - Focused on Saemangeum Seadike -

손재권* · 고남영*·† · 김덕구** · 박설화**

Son, Jae Gwon · Goh, Nam Young · Kim, Duk Gu · Park, Seol Hwa

Abstract

This study is on the stability re-evaluation of armor stones in saemangum seadike according to recently increased sea-level and frequent high wave incoming and the results are in the following. The field inspection of armor stones in the seadike revealed that damages of armor stones have been caused by higher waves than designed waves and that the reconstruction of armor stones and concrete grouting method have been used as the reinforcement work. The result of numerical simulation of wave channel conducted to estimate the safety weight of armor stones influenced by flows revealed that the safety weight of armor stones in the seadike No.4 was estimated as 5.47 tons by using the Isbash method, which is about 122 % more than 4.49 tons estimated by using Van der Meer method. Therefore, in designing armor stones which can be influenced by high waves such as the case of Saemangum seadike, it is necessary to apply the safety weight method of armor stones, based on the Isbash method, which produced the significant figures among the safety weight methods using flows as well as the safety weight method using high waves based on the Hudson method.

Keywords: seadike; armor stone; safety weight; high wave

1. 서 론

우리나라 서해안 지역은 굴곡이 크고 큰 조수간만의 차에 의하여 넓은 간석지가 잘 발달하여 간척사업의 천혜의 적지로 여겨졌으며 1960년대에 이르러 국가 경제개발계획의 일환으로 시행된 동진강 간척사업을 필두로 많은 간척사업이 서해안에서 시행되었다(KRC, 2009). 특히 2010년에 완공된 새만금 방조제는 세계에 서 가장 긴 방조제(L=33.9 km)이며 세계최초의 심해방조제로서 우리의 독창적인 기술로 설계·시공되었다(KRC, 2015). 그러나 완공된 방조제의 피복석 피해 및 보강방법에 대한 연구는 주로 방조제 주변 조류의 변화, 수질변화, 생태계변화, 지형변화 등이고 고파랑 내습에 따른 피복석의 안정성 평가에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

과거에 축조된 방조제는 대부분 내습파랑이 작고 방조제 전면

의 수심이 낮아 파력이 제체의 안정성을 저해할 만한 외력으로 취급되지 않았기 때문에 파랑내습에 따른 제체의 안정성 평가에 대한 연구의 필요성이 적었으며 이에 대한 연구실적도 미미한 편이다. 방조제 피복석의 안정에 대한 국내외 연구동향을 살펴보면 다음과 같다.

Hudson (1959)은 사석식 방파제의 피복석 안정중량을 산정하기 위해 내습파랑의 파고와 피복석 중량에 따른 안정성을 평가하여 피해율에 따른 피복석 안정중량 산정식을 제시하였다. CERC (1984)는 Shore Protection Manual에서 경사제 경사면에서의 유속에 의한 사석중량 산정을 위하여 Isbash공식을 제시하였다. Van de meer (1987)은 내습파랑의 주기 변화에 따른 사석식 방파제의 피해율을 수리실험을 통해 평가하여 주기변화에 따른 피해율을 제시하였으며, 기존 Hudson의 피복석의 안정중량 산정식에 파랑 주기를 고려할 수 있도록 수정하여 제시하였다. Baek et al. (2011)은 새만금 방조제를 중심으로 파랑하중이 작용하는 동안 피복석층에 발생하는 응력과 변형에 대한 거동을 지반공학적인 측면에서 평가하여 파랑하중 증가에 따른 피해발생 가능성을 제시하였다. Son et al. (2013)은 새만금 방조제 구간 중 고파랑 내습구간의 피복석의 안정성이 미확보 되는 것은 지속적인 파랑 내습으로 인하여 피복석이 설계중량 이하로 마모되는 것이 그 원인이라고 하였다. MOF (2014)는 항만 및 어항설계 기준

* Department of Regional Construction Engineering, Chonbuk National University

** Hyein Engineering & Construction

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2515 Fax: +82-63-270-2517

E-mail: nygoh@jbnu.ac.kr

Received: March 31, 2016

Revised: July 26, 2016

Accepted: July 27, 2016

서에서 경사제의 경우 피복재의 안정중량 및 두께를 중심으로 안정성을 평가하도록 제시하고 있으며, 피복재의 안정중량은 경험 공식 (Hudson, Van de meer)에 의한 방법과 수치모형실험을 통해 산정하는 방법을 제시하고 있다. Goh et all. (2015)은 파랑에 의한 방조제 피복석의 피해방지를 위해서는 재료특성의 차이가 큰 피복석의 조합시공을 방지할 수 있는 시방규정의 제정이 필요하다고 하였다. 이와 같이 피복석에 대한 선행연구는 주로 Hudson식에 의한 사석중량 산정방법으로 안정성 평가가 이뤄지고 있다. 그러나 최근 지구온난화로 인한 해수면상승 및 고파랑 내습빈도 증가로 인해 방조제 피복석에 피해가 발생하고 있다 (KRC, 2009).

따라서 본 연구에서는 방조제 피복석의 안정중량을 산정할 경우 파랑에 의한 안정중량 산정방법뿐만 아니라 흐름에 의한 안정중량산정방법을 추가로 분석하여 고파랑이 내습하는 방조제의 피복석 설계 및 보수·보강 시 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상구간 및 방조제 현장조사

연구대상구간은 Fig. 1과 같이 4개의 방조제 중에서 고파랑이 내습하는 새만금 1호 및 4호 방조제를 중심으로 현장조사 및 피복석 안정성을 분석하였다. 또한 심해에 시공된 새만금 방조제와 같이 고파랑이 내습하는 방조제의 안정성 평가에 필요한 자료를 제공하기 위하여 새만금 방조제 및 기 시공된 방조제의 피복석 피해현황을 현장조사 하였다.

2. 새만금방조제에 내습하는 파랑 분석

새만금 방조제 심해설계파 분석을 위하여 최근 산출된 "전해역



Fig. 1 The spatial extent of study

심해설계파 추정보고서Ⅱ (KORDI, 2005)"의 자료를 이용하여 빈도별 입사파제원 (1,000년 빈도는 외압)을 적용하여 수치모형 실험의 경계조건으로 사용하였다. 수치모형실험은 불규칙파를 모의할 수 있는 SWAN 모형을 사용하여 설계파를 산정하였다.

가. SWAN 모형

SWAN (Simulation WAVes Nearshore) 모형은 수치 파랑 모델로서 심해입사파, 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안 역, 호수 및 하구의 파랑을 계산하며 기본방정식은 파동 평형방정식 (wave action balance equation)으로 다음과 같다 (Komen et al., 1994).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

여기서, σ 는 각주파수, $N(\sigma, \theta)$ 는 SWAN 모형에서 사용되는 파동 스펙트럼이다.

평형방정식의 좌변 제1항은 파랑작용의 시간 변화량, 제2항과 제3항은 지리적 공간에서의 파랑작용의 전파, 제4항은 σ 상에서 수심과 해류의 변화로 인한 상대 주파수의 이동, 제5항은 θ 상의 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타낸다.

SWAN의 격자구성은 Fig. 2와 같으며, 수치해석은 지형공간에서 4개의 90°간격의 구역에서 전진법인 일차풍상차분법과 Four sweep법으로 해석한다. 스펙트럼공간에서 여러 변수들을 풍상차분법과 중앙차분법을 사용하여 음해법으로 해석하며, 원천항에 대한 수치해석법은 양해법과 음해법을 같이 사용한다 (Wesseling, 1992).

나. 설계파 산정방법

심해설계파 파랑제원은 Fig. 3과 같이 새만금 인근의 13개 격

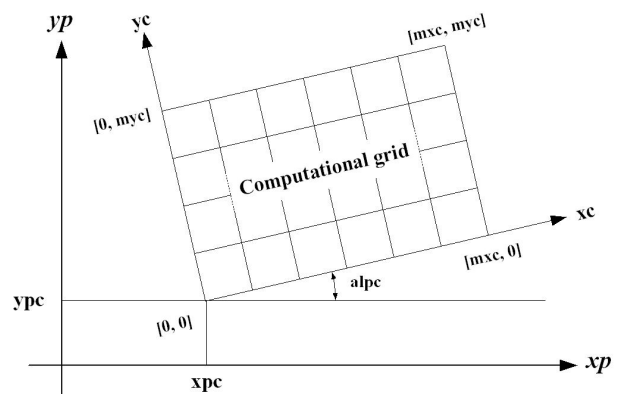


Fig. 2 Grid of SWAN

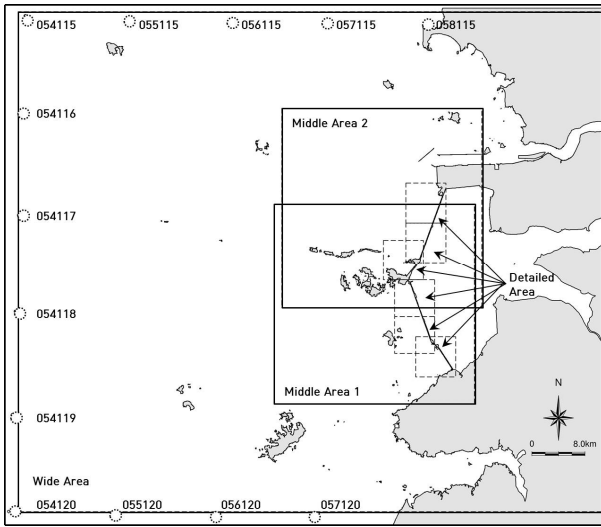


Fig. 3 Deepwater design waves grid point

자점을 토대로 격자점별 파고를 내삽하고 파향별로 대상지에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 대표주기를 선정하여 수치모형의 경계조건으로 사용하였으며, 실험영역은 광역 (87 km × 75 km, 200 m), 중간역 (30 km × 30 km, 50 m), 상세역 (6 km × 6 km, 10 m)으로 구분하여 설계파랑을 실험하였다.

3. 피복석 안정성 분석

방조제 피복석의 안정성 분석은 조위별·빈도별 설계파 산정 결과를 토대로 구간별 설계파고에 대한 사석의 안정중량식을 이용하여 안정중량을 산정하고 시공된 중량과 비교·분석하였다. 또한 CADMAS-Surf 모형을 이용하여 불규칙 설계파 내습시 각 방조제 전면에서의 최대유속을 산정하여 최대유속에 의한 사석의 안정중량을 검토하여 안정성을 평가하였다.

가. 사석 안정중량

파력을 받는 경사면의 표면에 피복하는 사석의 안정질량은 적절한 수치모형실험 또는 다음 식으로 산정하는 것을 표준으로 한다 (MOF, 2005).

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (2)$$

여기서, M은 사석 또는 블록의 안정에 필요한 최소질량 (t), ρ_r 는 사석 또는 블록의 밀도 (t/m^3), S_r 는 사석·블록의 해수에 대한 비중, H는 안정계산에 사용하는 파고 (m), N_s 는 피복재의 형상, 구배 또는 피해율 등에 의해 결정되는 안정계수이다.

1) Hudson식

Hudson식은 경사면 피복 시 필요한 피복재의 중량을 구하기 위하여 제안된 식으로 Iribarren이 제안한 수식에서 마찰계수를 경험계수에 포함시켜 경사제의 기울기에 대한 복잡한 형태를 단순화하여 다음과 같이 나타낸다 (Hudson, 1959).

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (3)$$

여기서, α 는 사면이 수평면과 이루는 각 ($^\circ$), K_D 는 주로 피복재의 형상 또는 피해율 등에 의해서 결정되어지는 정수이다. K_D 는 사석의 종류나 형상, 쌓는 방식에 대한 고유계수로 수리모형 실험을 통하여 구하도록 권장한다 (C.E.M., 2003). 본 연구에서는 방조제 피복석을 항만 및 어항설계기준 (MOF, 2005)에서 제시된 거칠고 모가 있는 돌의 난적거치방법에 따른 K_D 값 (쇄파: 2.0, 비쇄파: 4.0)을 사용하여 중량을 산정하였다.

2) Van der Meer식

Hudson식에서 쓰이는 K_D 값이 고려하지 못하는 파주기, 투수성, 파의 불규칙성, 사면에서의 쇄파형태, 피해정도 등을 고려하여 개발한 식으로 쇄파형태에 따라 다음과 같이 표현된다 (Van der Meer, 1987).

$$N_s = \max(N_{spl}, N_{ssr}) \quad (4)$$

$$N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S^{0.2} / N^{-0.1}) I_r^{-0.5} \quad (5)$$

$$N_{ssr} = C_H P^{-0.13} (S^{0.2} / N^{-0.1}) (\cot \alpha^{0.5}) I_r^P \quad (6)$$

여기서, N_{spl} 는 권파 (Plunging breakers)에 대한 안정계수, N_{ssr} 는 쇄파 (Surging breakers)에 대한 안정계수, I_r 는 이리바렌수 (Iribarren Number) ($\tan \alpha / S_{om}^{0.5}$), S_{om} 는 파형구배 ($H_{1/3} / L_o$), L_o 는 심해파장, $H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$ 는 유의파고 및 주기, C_H 는 쇄파효과 계수 $\{= 1.4 / (H_{1/20} / H_{1/3})\}$ 로 비쇄파영역에서는 1.0이다.

3) Isbash공식

Isbash (1935)는 구조물이 없는 흐름에서 사석을 떨어뜨려 하류로 쓸려가지 않는 사석의 크기 및 중량 산정식을 평균유속 개념으로 제안하였으며 그 식은 다음과 같다 (MOF, 2005).

$$W = \frac{\pi \gamma_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (7)$$

여기서, U는 사석 상부에서의 유속 (m/s), g는 중력가속도, γ_r

은 피복석의 밀도 (2.65t/m^3), θ 는 법면의 경사각, y 는 Isbash계수, S_r 는 피복석의 해수에 대한 비중 (2.57)을 나타낸다. 이때, y 는 Isbash계수로 조밀하게 채워진 사석의 경우 1.4, 느슨하게 채워진 사석의 경우 0.7, 사석이 노출된 경우 0.86, 사석이 흠에 묻힌 경우 1.2를 사용한다.

4) 양력·항력 공식

한 개의 석재가 유수 중에서 이동하기 위한 한계조건을 양력 및 항력, 사석의 수중중량의 향으로 표현하고 사석의 안식각을 고려하여 사석의 중량을 산정하였다 (MOF, 2005).

$$W = \frac{k_3 \gamma_r (C_D k_1 + C_L k_2 \tan \phi)^3 (u_b)_{cr}^6}{48 k_3^3 g^3 (S_r - 1)^3 (\tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad (8)$$

여기서, k_1, k_2, k_3 은 형상계수, γ_r 은 피복석의 밀도 (2.65 t/m^3), α 는 사면경사($^\circ$), C_D, C_L 은 항력계수, 양력계수, S_r 은 피복석의 해수에 대한 비중 (2.57), $(u_b)_{cr}$ 은 사석 상부에서의 유속 (m/s), ϕ 는 사석의 안식각 ($^\circ$)이다.

나. 수치파동수로 (CADMAS-SURF) 모형

수치파동수로 (CADMAS-SURF)의 기초 방정식은 2차원 비

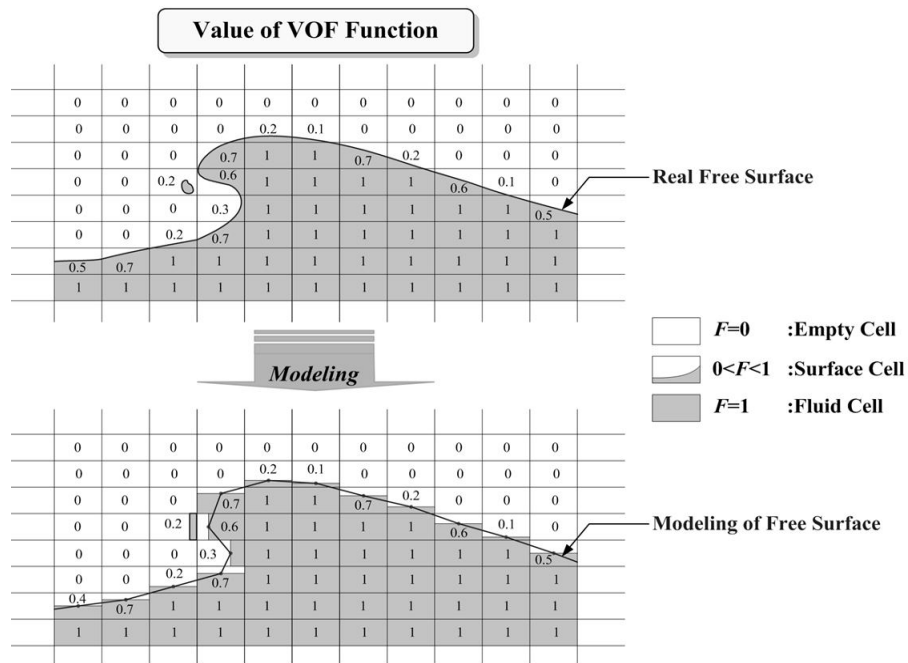


Fig. 4 Outline of VOF Model

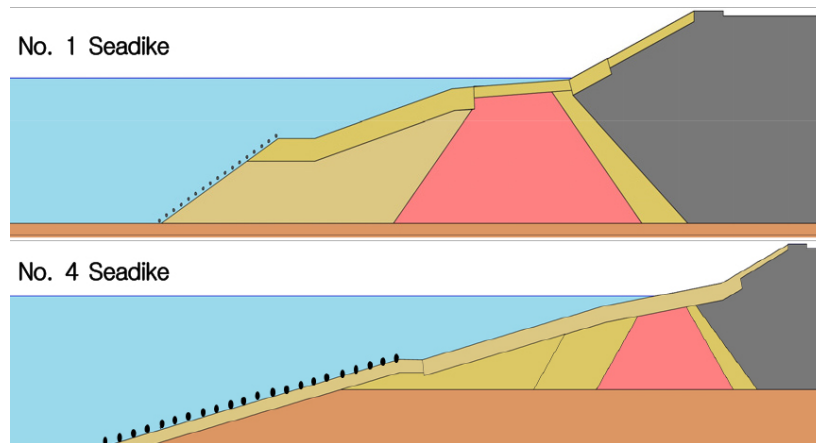


Fig. 5 Embankment of model for estimating maximum velocity

압축성 점성유체를 대상으로 한 연속방정식과 Porous모형을 근거하여 확장한 Navier-Stokes 운동방정식으로 구성되며 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \lambda_\nu \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (2 \frac{\partial u}{\partial x})] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\gamma_z \nu_e (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] - D_x u + S_u - R_x \\ \lambda_\nu \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = & -\frac{\gamma_\nu}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} [\gamma_x \nu_e (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\gamma_z \nu_e (2 \frac{\partial w}{\partial z})] - D_z w + S_w - R_z - \gamma_\nu g \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, D_x, D_z 는 에너지감쇠대의 저항력계수, S_p, S_u, S_w 는 조파소스항, R_x, R_z 는 다공질체에서의 저항력을 나타낸다.

또한 Fig. 4과 같이 VOF방법을 사용하여 자유표면의 이동을 셀 내부에서도 정의하여 사용하므로 실제 현상과 유사한 유체운동을 모의할 수 있다 (Hirt et al., 1991).

1) 최대유속 산정방법

최대유속에 의한 안정중량 산정을 수치파동수로 실험을 수행하여 최대유속을 산정하였다. 먼저 수치파동주조는 축적비율은 1:1로 실제와 동일하게 진행하였으며, 실험에 사용된 수조는 Fig. 5와 같이 총 길이는 1,900 m로 하였다. 최대유속산정은 먼저 각 방조제별 설계파 (불규칙파)에 대한 조파검증을 실시하고 (Fig. 6) Fig. 5에서와 같이 각 방조제의 근공 사면의 해측 격자면에서 유속을 추출하여 조파시간 (300과 :1.5시간 내외) 동안 발생된 가장 큰 유속을 최대유속으로 결정하여 사석의 안정중량을 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 방조제 피복석 현장조사

가. 새만금방조제의 피복석 상태

새만금 1·4호 방조제 피복석의 상태를 조사하기 위하여 피복석의 마모 및 이탈을 중심으로 현장조사 하였다. 1호 방조제의 경우, 상부사면은 전구간이 보강공사가 시공된 상태이며, 1개소에 균열이 발견되었을 뿐 전반적으로 안정된 상태이다. 하부사면은

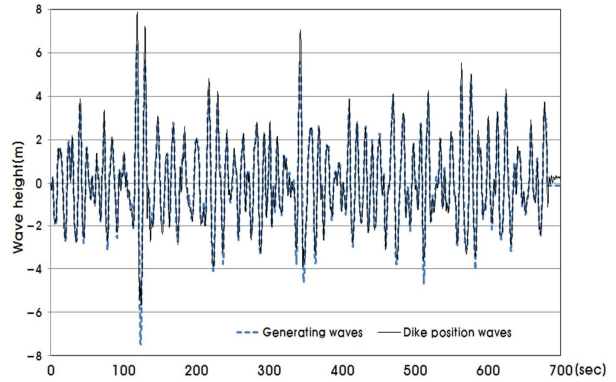


Fig. 6 generating incident waves calibration



Fig. 7 Deviation of armor stones (Seadike 1)



Fig. 8 Deviation of armor stones (Seadike 4)

피복석의 모양이 불규칙하고 크기도 일정치 않은 편이며, 마모가 상당히 진행된 상태이다. 또한, 피복석 이탈은 No.10~20구간에서 12개소, No.20~30구간에서 8개소, No.30~40구간에서 5개소에서 조사되었으며 특히 No.18~32구간에서는 Fig. 7과 같이 비교적 큰 피복석이 이탈되는 피해가 발생하였다.

4호 방조제의 경우, 피복석의 마모 및 이탈현상은 4호방조제 전구간에서 다수 조사되었으며 특히 Fig. 8과 같이 여러 개의 피복석이 동시에 이탈되는 피해는 피복석 간격이 이완되어 방조제 안정성에 문제를 유발할 수 있으므로 보수·보강이 필요한 실정이다. 현재 주로 시행되는 보수·보강 방법은 이탈된 피복석을 재시공하고 콘크리트로 채워 보강하는 방법이 주를 이루고 있으나 이러한 방법은 사면 공극률의 감소에 따른 양압력 및 최대유속의 변화에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

나. 기존 방조제의 피복석상태

현재 시공된 방조제들 중 피복석 피해와 보수보강사례 (KRC, 2009)가 있는 9개 방조제 (시화 방조제, 남양방조제, 아산방조제, 삼교천방조제, 석문방조제, 대호방조제, 대천방조제,



Fig. 9 State of armor stone reinforcement (Siwha)



Fig. 10 State of armor stone reinforcement (Nampo)

남포방조제, 부사방조제)에 대하여 현장조사를 실시하였다.

시화방조제의 경우 동절기에 발생하는 북서계절풍의 영향으로 피복석 일부가 탈락되었고 아산 방조제도 해일로 인하여 피복석이 이탈되고 월파로 인한 균열 및 파손이 발생하였다. 남포 방조제, 부사방조제, 대천방조제의 경우 설계파고보다 높은 고파랑이 발생하여 피복석이 붕괴되는 피해가 발생하였다. 대호 방조제는 피복석이 빈번히 발생하는 북서계절풍의 영향으로 유실되었다. 삼교천 방조제 및 석문방조제의 경우 아직 큰 피해는 발생하지 않았으나 피복석에 짜임이 다소 느슨해진 상태이다.

피복석의 피해 현장조사 결과 피복석 피해는 설계파고보다 높은 파랑내습으로 인한 피복석이 이탈이 대부분이었다. 또한 피복석의 보수·보강방법은 Fig. 9~Fig. 10에서 보는 바와 같이 시공방법이 비교적 간편하고 공사비가 상대적으로 저렴한 피복석 재시공 및 콘크리트 채움공법이 주로 시행되었다. 따라서 피복석을 보수·보강할 경우에는 기존의 파랑에 의한 안정중량 산정방법뿐만 아니라 피복석 틈새에 콘크리트 채움으로 발생하는 파압 및 월파랑 변화를 고려할 수 있는 흐름에 의한 중량산정방식을 이용한 피복석 안정중량 산정이 필요하다고 판단된다.

2. 설계 파랑 산정

설계파랑은 최근 지구온난화로 인한 해수면상승 및 태풍내습강도의 증가 등 기후변화, 기존 설계파 빈도 (1,000년 빈도)

Table 1 Calculation result of Design wave (Seadike No.1)

Tide level		SSW	SW	WSW	W	NW	NW	NNW
wave hights (m)	H,H,W	4,33	4,43	4,21	4,13	3,87	3,21	1,81
	A,H,H,W	3,92	3,96	3,82	3,77	3,53	3,06	1,96
	M,S,L	2,20	2,14	2,22	2,24	2,19	2,07	1,86
	A,L,L,W	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,54	0,55
Periods (s)		13,87	15,31	11,94	12,27	12,56	11,94	10,72

Table 2 Calculation result of Design wave (Seadike No.4)

Tide level		SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
wave hights (m)	H,H,W	5,53	5,76	4,90	5,87	6,28	6,05	5,71
	A,H,H,W	5,27	5,48	4,88	5,50	6,03	5,92	5,63
	M,S,L	4,05	4,11	4,46	4,74	4,97	4,83	4,82
	A,L,L,W	3,49	3,59	3,40	3,61	3,61	3,43	3,45
Periods (s)		13,87	15,31	11,94	12,27	12,56	11,94	10,72

Table 3 Weights of constructed armor stones

Seadike	Seadike No.1	Seadike No.4
Weights of constructed armor stones (ton)	3,19	2,70

및 방조제의 내용년수(100년 이상)에 따른 파괴확률 등을 고려하여 빈도별·조위별 실험결과 중 방조제에 가장 악영향을 미칠 것으로 판단되는 1,000년 빈도 심해설계파 및 1,000년 빈도 고극조위시로 결정하여 적용하였으며 수치모형실험(SWAN)결과는 Table 1~Table 2에서 보는 바와 같다.

1호방조제는 SW파향에서 4.43 m, 주기 15.31 s로 가장 큰 파고분포를 보였다. 이와 같은 결과로 미루어 판단할 때 1호 방조제는 SW파향일 때 가장 큰 피해가 발생하며 파향이 대부분 SW인 하절기 태풍의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

4호방조제는 WNW파향일 때 파고 6.28 m, 주기 12.56 s로 가장 높은 파고분포를 보였다. 전면 수심이 가장 깊지만 신시도 등 다수의 도서들로 차폐되어 있어 SW방향의 태풍 영향은 적으나, 동계 북서계절풍(WNW)에 의한 파랑은 외해에서 내습하는 파랑이 방조제에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 피복석 안정성 분석

가. 파랑에 의한 피복석 안정중량 분석

기 시공된 피복석 중량은 Table 3과 같다(KRC, 2011). 수치모형실험분석 결과에서 나타난 최대 파고를 적용하여 Hudson 및 Van der Meer식을 이용한 안정중량 산정 결과는 Table 4~Table 5와 같다. 1호 방조제 피복석의 안정중량산정 결과(Table 4) No.18~32구간 안정중량이 Van der Meer식에서 5.38 톤으로 가장 크게 나타났으며 시공된 중량 (Table 3)

과 비교할 때 안정중량이 시공중량을 약 168% 초과한 것으로 나타났다. 이는, 과거 설계당시보다 장주기의 파랑 내습으로 인해 주기에 따른 안정중량이 증가하는 Van der Meer식에서 안정중량이 크게 산정된 것으로 판단된다.

4호 방조제의 경우 사면경사가 1:6으로 1:5이상 경사에 대한 안정계수 값이 없는 허드슨식은 사용할 수 없으므로 반테미어식만 이용하여 피복석의 안정중량을 산정한 결과는 Table 5와 같다. No.22~No.33구간에서 4.49 톤으로 가장 크게 산정되었으며, 전 구간에서 Table 3의 시공된 중량과 비교할 때 안정중량이 시공중량을 약 130%~166%초과하는 것으로 나타났다. 4호 방조제 또한 과거 설계파보다 파고와 주기 모두 증가함에 따라 안정중량이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 4호 방조제의 경우 과거 설계 당시보다 높아진 고파랑 내습을 고려하여 피복석의 안정중량을 향상시킬 필요가 있다고 판단된다.

나. 최대유속(흐름)을 고려한 안정중량 분석

최대유속(흐름)을 고려한 피복석의 안정 중량을 산정하기 위하여 수치파동수로시험을 실시하였으며 방조제 사면에서 내습파랑에 의한 최대유속을 조위별로 산정한 결과는 Table 6~Table 7과 같다. Table 6과 같이 1호 방조제 최대유속은 5.32 m/s로 평균하면 일 때 가장 빠르게 산정되었고 최대유속에 의한 피복석의 안정중량은 Isbash식의 경우가 유속이 가장 빠른 평균해면에서 4.03 톤으로 가장 크게 산정되었다. 이와 같은 결과는 Table 4의 파랑에 의한 피복석 최대 안정중량

Table 4 Safety Weights of armor stones (ton), (Seadike No.1)

Tide level	Sector	Hudson	Van der Meer	Remarks
1,000-year frequency, H.H.W	No.00~No.17	1.99	2.75	
	No.18~No.32	3.88	5.38	168 % larger than 3.19 (Table 3)
	No.33~No.36	1.83	2.90	

Table 5 Safety Weights of armor stones (ton), (Seadike No.4)

Tide level	Sector	Hudson	Van der Meer	Remarks
1,000-year frequency, H.H.W	No.00~No.07	-	3.50	
	No.08~No.21	-	3.93	
	No.22~No.33	-	4.49	166 % larger than 2.70 (Table 3)
	No.34~No.60	-	3.64	
	No.61~No.74	-	3.93	
	No.75~No.90	-	4.44	
	No.91~No.98	-	3.93	
No.99~No.100	-	-	3.54	

Table 6 Estimation result of maximum velocity and Safety weight (ton), (Seadike No.1)

Tide level	Maximum velocity (m/s)	Equation of Isbash (ton)	Equation of Lift·drag force (ton)	Remarks
H,H,W	2,29	0,03	0,02	
A,H,H,W	1,89	0,01	0,01	
M,S,L	5,32	4,03	2,53	25 % smaller than 5,38 (Table 5)
A,L,L,W	0,94	-	-	

Table 7 Estimation result of maximum velocity and Safety weight (ton), (Seadike No.4)

Tide level	Maximum velocity (m/s)	Equation of Isbash (ton)	Equation of Lift·drag force (ton)	Remarks
H,H,W	4,34	0,19	0,09	
A,H,H,W	5,16	0,54	0,26	
M,S,L	7,59	5,47	2,64	122 % larger than .49 (Table 6)
A,L,L,W	5,33	0,66	0,32	

(Van der Meer식, 5.38 t) 보다 약 25 % 작은 것으로 산정되어 흐름을 고려한 안정중량에 대하여 안정한 것으로 나타났다.

그러나 파랑의 영향이 가장 큰 4호 방조제의 경우는 Table 7과 같이 최대 유속이 평균해면일 때 7.59 m/s로 산정되었으며, 이때 피복석 안정중량은 Isbash식의 5.47 톤으로 가장 크게 산정되었다. 이와 같은 결과는 Table 5의 파랑에 의한 피복석 최대 안정중량 (Van der Meer식, 4.49 t) 보다 약 122 % 더 크게 산정 된 것이다.

따라서 고파랑이 내습하는 방조제의 피복석의 설계 시에는 기존의 파랑에 의한 안정중량방법과 최대유속 (흐름)을 고려한 안정중량방법을 비교하여 가장 큰 안정 중량을 적용하는 안전측 설계가 필요하다고 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 해수면 변화 및 고파랑 내습 빈도가 높아짐에 따라 새만금 방조제를 중심으로 피복석 안정중량 및 최대유속을 산정하여 피복석 안정성을 재평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 방조제 피복석 현장조사 결과 피복석 피해는 설계파고보다 높은 파랑내습으로 인한 피복석 이탈이 대부분이며 피복석의 보수·보강방법은 피복석 재시공 및 콘크리트 채움공법이 주를 이루고 있다. 따라서 콘크리트 채움으로 발생하는 파압 및 월파랑 변화를 고려할 수 있는 피복석 안정중량 산정방법이 필요하다고 판단된다.
2. Hudson식 및 Van der Meer식을 이용하여 파랑에 의한 피복석 안정중량 산정결과 1호 방조제의 경우 일부구간

(No.18~32), 4호방조제의 경우 전 구간에서 안정중량이 시공된 중량보다 130 %~168 %크게 산정되었기 때문에 시공된 피복석은 안정중량을 만족하지 못한 것으로 분석되었다. 이는, 기존 설계파보다 주기가 길어진 영향과 주기를 고려할 수 있는 Van der Meer식을 적용한 결과로서, 피복석 안정중량 산정시 주기를 고려하는 산정식의 적용이 필요하고 판단된다.

3. 최대유속(흐름)을 고려한 피복석의 안정 중량을 산정하기 위하여 수치파동수로시험을 실시한 결과 4호 방조제에서 피복석 안정중량이 Isbash식에서 5.47 톤으로 산정되어 Van der Meer식에 의한 4.49 t 보다 약 122 % 더 크게 산정되었다. 따라서 고파랑이 내습하는 방조제의 피복석의 설계 시에는 기존의 파랑에 의한 안정중량방법과 최대유속 (흐름)을 고려한 안정중량방법을 비교하여 가장 큰 안정 중량을 적용하는 안전측 설계가 필요하다고 판단된다.

따라서 새만금 방조제와 같이 고파랑이 내습하는 방조제 피복석의 설계 및 보수·보강 시에는 기존의 Hudson식을 중심으로 한 파랑에 의한 안정중량방법 이외에 Isbash식을 중심으로 한 흐름에 의한 안정중량방법 중 가장 크게 산정된 피복석 안정중량을 적용하는 방안을 추가로 도입하여 피복석 안정성을 제고할 수 있는 평가방법의 개선이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 논문은 한국농어촌공사 새만금사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Baek, seung cheol, Lee, so yeul, 2011, Study on movement features of seaside armor stones according to wave in saemangum sea dike, *Korean geo-environmental society* 12-7 (in Korean).
2. Coastal Engineering Research Center(CERC), 1984, Shore Protection Manual, Department of Army Corps of Engineers.
3. Goh, N. Y., H. W. Kim, J. K. Choi, T. I. Jang, J. G. Son, 2015, Abrasion Characteristics of Seaside Armor Stones of Seadike, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 19-27 (in Korean).
4. Hirt, C. W., B. D. Nichols, 1991, Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics* 39: 201.
5. Hudson. R.Y. 1959, Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, *Proc. ASCE* 85(3): 93-121.
6. Isbash, S. 1935, Construction of Dams by Dumping Stones into Flowing Water, Rep., U.S. Army Engineering District, *U.S. Army Corps of Engineers*, Eastport, Maine.
7. Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P.A.E.M. Janssen, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, 532.
8. Korea ocean research & development institute (KORDI), 2005, Deep waters design wave estimation report II (in Korean).
9. Korea rural community corporation(KRC), 2009, Report of Tideland reclamation 3-10 (in Korean).
10. Korea rural community corporation(KRC), 2011, Study of abrasion proection of seaside armor stones of saemangeum seadike (in Korean).
11. Korea rural community corporation(KRC), 2015, Study of saemangeum no. 1, 4 seadike bottom protection reinforcement construction test (in Korean).
12. Ministry of oceans and fisheries, 2005, Harbor and fishing port design criteria (in Korean).
13. Numerical wave channel committee, 2003, Research and development of numerical wave channel (in Korean).
14. Son, J. G., N. Y. Goh, J. K. Choi, H. W. Kim, 2013, Analysis on the Cause of Abrasion according to Deformation Types of Seaside Armor Stones in Saemangeum Seadike, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 187-196 (in Korean).
15. The SWAN team, 2013, SWAN Cycle III version 40.91A. Technical documentation, Delft University of Technology, Netherlands.
16. US Army Corps of Engineers, 2003, Coastal Engineering Manual(C.E.M).
17. Van der Meer J.W., 1987, Stability of breakwater amour layer-Design formulae, *Coastal Engineering* 11: 219-239.
18. Wesseling, P., An introduction to multigrid methods, John Wiley and Sons, Chichester, 1992.