

소파블록으로 피복된 사석경사식 방파제 소파층의 어깨 폭과 마루높이를 고려한 안전점검 기준 제안

김용희, 강윤구*
한국항만협회 항만기술기준센터

Proposal of Safety Inspection Criteria Considering Armor Layer Shoulder Width and Crest Height of Rubble Mound Breakwater Armored with Dissipating Block

Yong-Hee Kim, Yoon-Koo Kang*

Technical Standards Center for Ports and Harbours, Korea Ports and Harbours Association

요약 본 논문에서는 사석경사식 방파제 소파층 어깨부의 소파블록 거치배열(어깨 폭)과 소파층 피복상태(마루높이)를 고려한 새로운 안전점검 기준을 제안하였다. 최근 사석경사제와 같이 방파제 전면부에 소파블록을 피복한 방파제에서 태풍에 의한 피해발생이 증가하고 있다. 그럼에도 사석경사제의 파랑저항 안정성 확보를 위한 중요인자인 소파층 어깨 폭과 마루높이에 의한 영향이 현행 안전점검 세부지침에 반영되어 있지 않다. 이에 전술한 소파층 어깨 폭과 마루높이를 고려한 평가항목과 평가기준을 제안하였다. 새로 제안된 평가기준은 소파층에 피복된 소파블록의 거치배열 상태와 소파층과 직립부의 마루높이 차이를 고려할 수 있도록 개발하였다. 제안된 안전점검 기준의 적정성을 검증하고자 항만 설계 기준에서 규정한 소파층 어깨 폭과 마루높이를 모두 준수하지 않은 방파제 안전점검 결과와 제안 평가기준을 적용한 결과를 비교하였다. 그 결과, 상태등급은 B등급에서 C등급으로, 상태지수는 4.35에서 3.06로 하향되었다. 본 연구에서 제안한 안전점검 기준을 적용할 경우, 사석경사제 전체의 성능과 안전에 직접적인 영향을 미치는 소파층의 상태를 고려할 수 있어 보다 안전한 항만 구축이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, a new safety inspection criterion to consider the armor layer's shoulder section state of the rubble mound breakwater was suggested. Recently, damage to the collapse level of the rubble mound breakwater due to typhoon has been occurring. The shoulder width and crest height of armor layer are very important factors in securing the stability of wave resistance of the rubble mound breakwater. Nevertheless, these attributes are not considered in the current safety inspection criteria. The new inspection criterion was hence proposed to consider the difference in the crest height between armor layer and cap concrete and the shoulder width according to the arrangement state of the armor layer. The suitability of the proposed inspection criterion was assessed compared to the existing inspection criteria. As a result of applying the newly proposed criterion, the condition rating was lowered from B to C and condition index was lowered from 4.35 to 3.06. The new safety inspection criterion is expected to directly evaluate the condition of the armor layer, which affects the performance and safety of the rubble mound breakwater.

Keywords : Rubble Mound Breakwater, Inspection Criteria, Armor Layer, Shoulder Width, Crest Height

본 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구과제(생애주기별 항만시설 통합 운영관리를 위한 BIM 기반기술 개발)로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Yoon-Koo Kang(Korea Ports and Harbours Association)

email: kangyk@koreaports.or.kr

Received September 15, 2021

Revised October 13, 2021

Accepted November 5, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

항의 최외곽에 설치하는 방파제는 항내의 계류시설, 배후시설 등을 파랑으로부터 보호하고 항내의 정온도를 확보하여 원활한 항만 양하역작업이 이루어질 수 있도록 보호하는 구조물이다. 방파제는 외해에서부터 상시 전달되는 파랑과 비상시적인 태풍, 너울 같은 외력으로부터 자중으로 저항하여 안정성을 확보한다. 그 과정에서 방파제의 일부가 파손과 변형되더라도 손상된 부분 외에는 본연의 기능을 계속 수행할 수 있어야 하며, 보수를 통하여 지속적으로 사용할 수 있어야 한다. 이러한 방파제의 대표적인 형상으로는 Fig. 1과 같은 방파제 전면면에 테트라포드 같은 이형 소파블록을 피복한 사석경사제가 있다.

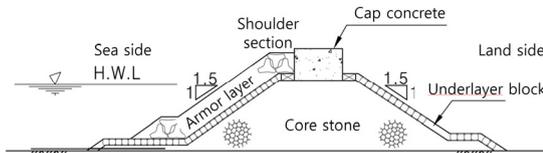


Fig. 1. Profile of rubble mound breakwater [1]



Fig. 2. Panoramic view of rubble mound breakwater armored with tetrapods

사석경사제는 방파제 전면면에 돌이나 이형블록을 쌓아 제체를 구성하고 보호하는 방식으로 단순한 거동특성과 시공방법, 편리한 재료수급, 유지보수 등으로 오래전부터 사용해온 대표적인 방파제의 구조형식이다.

방파제 전면의 이형블록은 Fig. 2와 같이 블록 자중과 블록 간 맞물림(interlocking)에 따른 일체 거동으로 파랑에 저항하는 소파효과를 얻으며, 이를 키우기 위해서는 적절한 블록 형상과 거치배열, 충분한 소파층의 확보가 필수적이다.

이 과정에서 소파블록은 파손, 이탈, 재배열되어 소파층은 쉽게 변형되기 때문에 공용기간 동안 꾸준한 유지보수를 통해 그 기능을 유지시켜줘야 한다[1].

최근 Fig. 3과 같이 사석경사제에서 태풍으로 인한 대형 붕괴사고가 잇따르고 있다. Fig. 3의 피해 방파제는 모두 준공 3년 이내에 태풍에 의한 피해가 발생한 것이며, 모두 소파층 뿐만 아니라 상부공, 제체까지 붕괴되는 큰 피해가 발생한 사례로 일반적인 사석경사제의 피해로는 흔히 볼 수 있는 양상이 아니다.

국내에는 항만과 같은 국가 대형·중요 SOC시설물의 관리·운영을 위하여 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(이하, 시설물안전법)이 존재하며, 이에 따른 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」(이하, 세부지침)에 따라 주기적으로 시설물의 상태와 안전성을 점검·평가하여 적기에 유지관리가 실시될 수 있도록 정하고 있다[2,3].

대형·중요 항만시설물도 시설물안전법에 따라 평균 2년에 1회 씩 정밀안전점검이 실시되며, 1, 2중에 해당하는 대형 방파제의 81.5%가 기능 발휘에 지장이 없는 B 등급(양호) 이상으로 판정받았다.

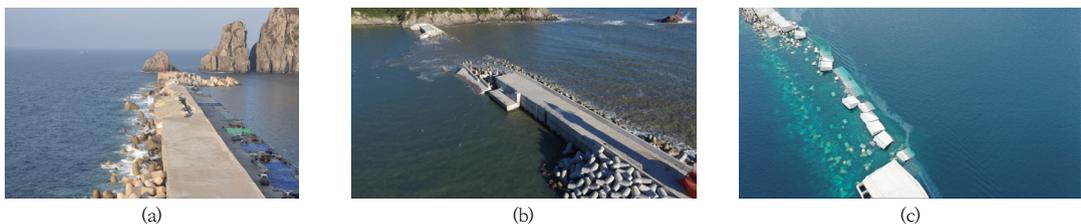


Fig. 3. Bird's-eye view of damage to rubble mound breakwater caused by typhoon

- (a) Gageodo port breakwater (9th typhoon Muifa, 2011.07)
- (b) Busan dadaepo port east-breakwater (18th typhoon Chaba, 2016.09)
- (c) Ulleungdo island sadong port south-breakwater (9th typhoon Maysak, 2020.08)

그럼에도 불구하고 Fig. 3과 같은 사석경사제 제체붕괴가 지속적으로 발생하는 것은 현행 세부지침이 사석경사제의 거동특성을 적절히 반영하지 않고 있기 때문으로 판단되며, 이에 대한 검토가 필요해 보인다.

방파제 등 항만시설물의 현장 여건이 고려된 유지관리와 관련한 기존 연구는 다음과 같다. 항만시설물 유지관리를 위한 점검시기 결정 및 최적의 유지보수예산 투자 우선순위 연구[4,5], 외곽시설의 상태평가 기법 정립을 위한 손상형태 전반에 걸친 연구[6], 연약지반에 설치되는 사석경사제의 침하특성이 반영된 침하 평가기준에 대한 연구[7] 등이 수행된 바 있으나, 소파블록이 방파제 전면에 피복된 사석경사제의 소파층 특성이 반영된 상태평가 기법 개발은 부족해 보인다.

이에, 본 연구에서는 항만 방파제에 최적화된 안전점검을 위한 새로운 상태평가 기준을 제시하고자 한다. 특히, 사석경사제의 파랑저항성 및 안정성에 직접적인 영향을 미치는 소파층에 대한 평가기준을 새로 제시하고자 하며, 세부지침에서 기준에 제시하고 있는 사석경사면 및 소파공 평가기준에 대하여 재정립하고 그 적정성을 확인하기 위해 기존의 점검결과와 비교하였다.

2. 사석경사제 관련 기준

2.1 「항만 및 어항 설계기준」

KDS 64 45 20 : 2017 - 방파제

KDS 64 45 20에서는 사석경사제와 소파블록 피복제의 안정성 확보를 위해 소파층 어깨부의 어깨 폭과 마루높이에 대하여 다음과 같이 규정하고 있다[1].

2.1.1 소파층의 어깨 폭

KDS 64 45 20에서는 소파층 어깨부의 어깨 폭은 파압저감 효과를 결정하는 인자로서 충분한 소파효과를 얻기 위해서는 소파블록 2개를 설치한 폭 이상이 필요하다고 규정하고 있다.

여기서 말하는 2개를 설치한 폭이란 것은 Fig. 2와 같이 어깨부의 소파블록이 서로 어긋나게 맞물려 사면층의 소파블록과도 연결되어 방파제의 소파블록 간의 interlocking 작용이 발휘될 수 있도록 맞물린 상태를 말한다.

2.1.2 소파층의 마루높이

KDS 64 45 20에서는 소파층 어깨부의 마루높이를

직립부(상치콘크리트)의 마루높이와 같게 하는 것이 적정한 것으로 규정하고 있다.

만약, 마루높이가 직립부보다 낮으면 직립부에 충격쇄파압이 작용하여 제체의 상치콘크리트와 사면의 소파블록에 영향을 미치며, 소파블록의 어깨가 너무 높으면 소파블록 거치의 안정성 확보가 어려워진다.

2.1.3 사석경사제의 유지관리

사석경사제는 앞서 설명한 것과 같이 파랑에 저항하며 소파블록이 파손, 이탈, 재배열되므로 이에 따른 단면형성, 파괴 거동특성이 고려된 설계와 유지보수를 고려한 최적설계를 수행하여야 한다.

이 때문에, 사석경사제와 같이 소파블록이 피복된 방파제는 지속적으로 소파층에 대한 유지보수를 실시하도록 규정하고 있다.

2.2 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부 지침」 - 항만 외곽시설편

시설물안전법은 방파제의 상태와 안전을 평가하고 상태등급을 정할 수 있도록 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침-항만 외곽시설(이하, 세부지침)」을 제시하고 있다[3].

세부지침에서는 Table 1과 같이 경사면의 사면변화 및 피복석 유실, Table 2와 같이 소파공 교란·유실 및 파손에 대하여 평가기준을 제시하고 있다. 이 중 Table 1의 피복석(underlayer block)과 Table 2의 소파공(armor block)은 유사한 평가항목으로 중복되는 평가기준으로 판단된다.

전술한 어깨부의 배열·피복상태는 Table 1의 사면변화에서 고려되어야 하나, 수상·수중부에서의 경사면 변화에 대해서만 기술되어 있어 그 상태를 적절히 고려할 수 없다. 이에, 사석경사제 사면의 평가기준을 보다 현실적으로 수행할 수 있도록 조정할 필요가 있다고 판단된다.

2.3 사석경사제 해외 평가기준

2.3.1 일본 항만시설 평가기준

일본의 국토교통성 산하 연안기술연구센터에서는 사석경사제의 소파층에 대한 안전점검 방법을 Table 3과 같이 정하고 있다[8]. 육상과 해상에서 사석경사제 소파층에 대한 육안 점검방법을 소파블록의 이동, 산란, 침하, 손실 등의 변형을 중심으로 규정하고 있다.

Table 1. Condition evaluation criteria of slope change and underlayer block loss

Rating	Index	Inspection status
a	5	·Good condition
b	4	·Condition of locally minor slope change
c	3	·Condition of widely severe slope change
d	2	·Condition that can affect the stability of the body due to extensively and severely slope change in water surface and underwater
e	1	·Condition that can very seriously affect stability of the body due to serious change in the overall slope and extensive scattering of armor stone

Table 2. Condition evaluation criteria of armor block disturbance and loss

Rating	Index	Inspection status
a	5	·Good condition
b	4	·Condition of locally minor armor block disturbance
c	3	·Condition of widely severe armor block disturbance and partial loss
d	2	·Condition in which armor block is partial lost, causing significant change in slope and loss of wave break capacity in some section
e	1	·Condition in which armor block is widely lost and wave break capacity is lost in most sections

Table 3. Armor layer inspection criteria of rubble mound breakwaters (CDIT Japan, 2018) [8]

Item	Inspection method	Inspection status
Movement, Scattering, Subsidence	[Visual Inspection] ·Shoulder width & crest height, slope ect. deformation ·Block movement, scattering	a ·Reduction of at least one armor layer cross-section over inspection unit length
		b ·Reduction of at armor layer cross-section over inspection unit length(1 or less)
		c ·Some of armor blocks scattering, subsidence
		d ·No abnormality
Damage, Crack	[Visual Inspection] ·Number of armor block damage, crack, defect	a ·More than 1/4 of Defected blocks
		b ·Intermediate status of a and b
		c ·More than one defect, partially deformed blocks
		d ·No abnormality

Table 4. Rating guidance for armor block loss (U. S. Army Corps of Engineers, 2011) [9]

Minor or No Damage	85 to 100	·At most, slight movement of the armor in a few isolated spots. Movement has left a depression no larger than 1/4 of one armor stone (or unit) diameter.
	70 to 84	·Armor movement has caused some waviness along the slope surface with depressions less than 3/4 the armor layer thickness. Any bridging is over a void less than 1/2 of the armor diameter. Underlayer may be seen in spots, but none have been lost.
Moderate Damage	55 to 69	·Some loss of armor in spots, leaving voids or depressions about the size of an armor unit. Units surrounding the void may be rocking or gradually moving out of place. Underlayer or core might be seen at these spots, but armor position still prevents loss of this material. Bridging to a diameter of an armor stone may be visible in several places.
	40 to 54	·Armor units have been lost or displaced in some portions of the reach length. Voids are just large enough to allow loss of underlayer.
Major Damage	25 to 39	·Armor units have been fully displaced or lost. Voids are large enough to easily allow underlayer and re loss.
	10 to 24	·Armor units have been fully displaced or lost. Underlayer loss is evident.
	0 to 9	·Armor units are gone or fully displaced. Structure is unraveling.

일본의 점검기준 역시 우리 기준과 동일하게 육안에 따른 개략적인 조사방법을 제시하고 있으나, 우리와 달리 평가항목, 방법을 보다 세분화하고 있다. 또한, 소파블록 침하, 손실 등으로 발생한 불연속면에서 파랑에 의한 제체 피해가 발생할 수 있다는 점을 그림 등을 포함하여 설명하고 있으며, 평가항목에는 사석경사제의 거동특성을 고려한 소파층 어깨부의 어깨 폭과 마루높이에 대한 평가기준이 포함되어 있다.

2.3.2 미국 연안시설 점검기준

미국 공병단에서는 소파블록이 피복된 연안시설물의 구조적 결함판정항목을 파손, 제체 노출, 소파층의 손실, 피복석 간의 결합(interlocking) 손실, 소파층 품질 저하, 사면의 변화로 정하고 있다[9]. Table 4는 평가기준 중 소파층 손실에 대한 평가기준이며, 이외의 다른 판정항목에 대한 평가기준은 Oliver et al. (2016)[10]을 따르도록 정하고 있다.

Table 4에서 확인할 수 있듯이 미국의 평가기준은 우리와 일본에 비하여 비교적 시설물의 등급을 세부적으로 구분하고 있으며, 점검자가 시설물의 상태를 보다 자세히 평가할 수 있도록 각 등급에 따른 상태를 상세히 기술하고 있다.

3. 사석경사제의 거동 특성

3.1 방파제 어깨부 관리 사례

전술한 것과 같이 최근 발생한 태풍에 따른 방파제의 대규모 피해는 대부분 사석경사제 또는 소파블록 피복 케이슨제에서 발생하고 있으며, 그 대부분이 준공 이후 3년 이내에 발생한 것이다. 이러한 피해가 지속적으로 발생하는 것은 소파블록이 파랑에너지를 저감하는 구조 거동특성에 대한 설계기준의 주의사항을 준수하지 않은 설계와 시설물 관리에서 비롯된 것이라 판단된다.

Fig. 4는 준공 후 12년이 지난 소파블록 피복 케이슨제의 전면 소파블록 피복상태를 조사한 사진이다. 사진에서 보는 것과 같이, 침하 등으로 인하여 소파블록의 어깨 폭 감소 및 불완전 소파층이 발생하고 있음을 확인할 수 있다[11].

그럼에도 불구하고 해당 시설물은 최근 실시한 정밀안전점검에서는 소파공의 상태가 양호하다는 점검의견과 함께 상태등급 B등급으로 판정을 받았다.

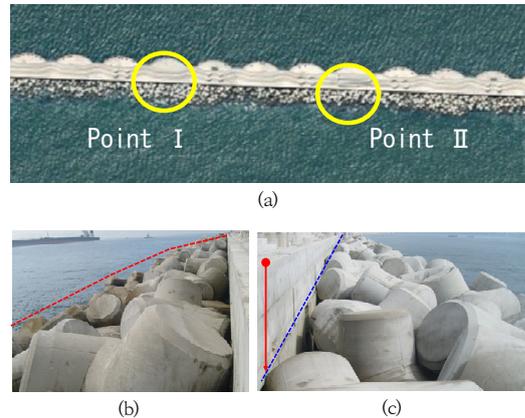


Fig. 4. Field view of site inspection (2018)
 (a) Aerial photo with shooting point(Kakao map, 2017)
 (b) [I] Reduction of shoulder width due to subsidence
 (c) [III] Incomplete armor of shoulder section

3.2 사석경사제의 거동 영향인자

Fig. 5는 소파블록에 작용하는 하중작용도를 나타낸 것으로 피복재의 안정성은 파랑이 사면에 작용한 후 쳐내려갈 때(down-rush) 피복재에 작용하는 파력(F_{wave})과 피복재 간의 인터록킹(interlocking)에 의해 결정되며, 쳐내림 때의 안정 중량 산정식의 도출과정은 식 (1)과 같다[12].

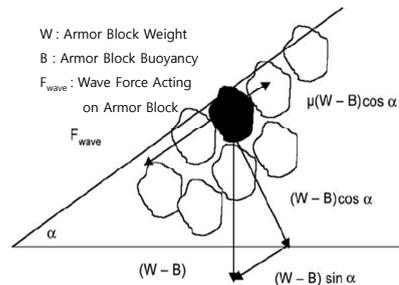


Fig. 5. Loading diagram on armor block

$$F_{wave} < N\mu(W - B)\cos\alpha - (W - B)\sin\alpha \quad (1)$$

$$\rho_w g d_n^2 H < N(W - B)(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)$$

$$\rho_w g d_n^2 H < N(\rho_s - \rho_w) g d_n^2 (\mu\cos\alpha - \sin\alpha)$$

$$\frac{H}{\Delta d_n} < N(\mu\cos\alpha - \sin\alpha)$$

Where, H denotes wave height, d_n denotes armor

block nominal dimension(= $V^{1/3}$), ρ_s, ρ_w denote armor block and water density, N denotes armor block shape factor

피복재 안정중량 산정식의 모태가 되는 Hudson식 (1959)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 현재 우리 항만설계에서 피복재의 안정중량 산정에 가장 널리 사용되고 있다[13].

$$W \geq \frac{N\rho_s g H^3}{\Delta^3(\mu \cos\alpha - \sin\alpha)^3} \quad (2)$$

Where, W denotes armor block weight

피복재 안정중량 산정식에서 피복재에 작용하는 파력을 일정 흐름 속에서의 유체력으로 가정할 때, 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 유속의 제곱은 사면에서의 쇄파고(H_b)로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$F = f(V^2) \quad (3)$$

$$V^2 = f(H_b) \quad (4)$$

식(2)의 피복재 안정중량(W)은 사면에서의 처내림(down-rush) 때, 유속(V)과 피복재의 형상에 따른 마찰(interlocking) 등의 안정계수(K_D)로 나타내면 식 (5)와 같다. 이에서 확인할 수 있듯이 피복재의 안정중량에 가장 큰 영향을 미치는 것은 처내림시 발생하는 유속임을 확인할 수 있다.

$$W = f\left(\frac{V^6}{K_D}\right) \quad (5)$$

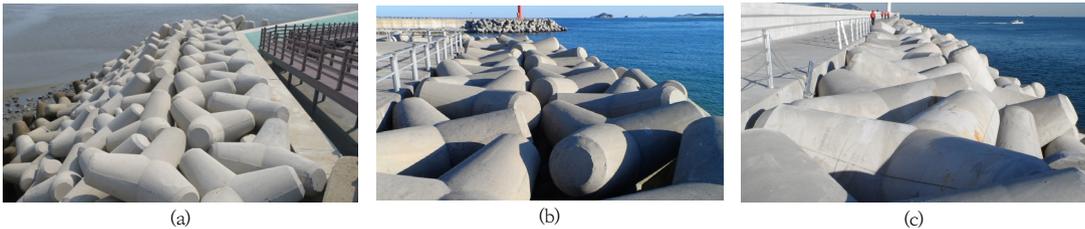


Fig. 6. Field View of Armor Block Mounted State at Shoulder

- (a) [Standard Array] - 2 Rows of Armor Block
- (b) [Non-standard Array] 4 Rows of Armor Block
- (c) [Non-standard Array] 2 Rows of Armor Block

3.3 사석경사제의 거동 특성

전술한 것과 같이 소파블록의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유속으로 정의할 수 있다. 따라서 설계단계에서 이러한 처내림시의 유속을 감소시키기 위한 단면 형상 및 제원결정이 필요하다.

하지만 Fig. 4에서 확인할 수 있는 것과 같이 설계·시공 상의 누락 또는 적합한 유지보수 미실시로 인해 불완전 소파조건이 발생할 수 있다. 그 조건을 정리하면 다음과 같다.

- ① (어깨 폭) 소파층 어깨부의 소파블록 거치배열 및 교란 등에 따른 어깨 폭 미확보
- ② (마루높이) 소파층 어깨부와 직립부의 마루높이 차이에 따른 불완전 피복

3.3.1 어깨 폭 미확보

Fig. 6은 소파층의 어깨부 상태를 설명하기 위하여 도시한 소파층의 현장조사 사진이다. Fig. 6 (a)~(c)의 소파층의 어깨부 소파블록 거치는 모두 KDS 64 45 20에서 규정한 바와 같이 소파블록을 2개 이상 배열한 것이다.

하지만, 거치배열은 (a), (b), (c) 모두 상이한데, (a)의 경우 가장 표준적인 배열로 어깨부의 소파블록이 서로 어긋나게 맞물려 있고, 사면의 소파블록까지 맞물려서 있는 표준적인 배열이다. 하지만 (b), (c)의 경우 (a)와 달리 어깨부의 소파블록이 바로 물려 있어 서로 맞물린 소파블록 2개가 독립적인 1개의 열과 같이 배열되어 있다. 이러한 거치형태(이하, 비표준 배열)는 인접한 소파블록 또는 사면의 소파블록과 맞물릴 수 없어 interlocking 작용을 기대할 수 없으며, 맞물리는 소파블록의 배열이 좁아져 충분한 소파층의 확보가 어려워진다. 또한, 어깨부와 사면부의 소파블록이 맞물리지 않아, 지반침하 시 사면부 소파블록이 아래로 흘러내릴 때, 어깨부와 함께 거동하지 못하고 불연속한 공간이 발생하여 파랑과 처내

림에 따른 피해발생이 증가하게 된다.

대부분의 사석경사제의 설계도면은 (a)와 같은 배열로 작성되나, (b), (c)와 같은 소파블록 거치배열이 자주 이루어지고 있다. 이는 현장에서 소파블록 거치 전에 적절한 거치 시뮬레이션이 이루어져야 하지만 이러한 사전검토가 적절히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

3.3.2 마루높이 차이에 따른 불안전 피복

최근 정온수역 확보를 위한 월파저감을 목적으로 Fig. 7과 같이 방파제의 마루높이를 상향하는 설계·시공사례를 쉽게 찾아볼 수 있다. 이와 같이 소파층의 높이가 직립부의 마루높이보다 낮게 거치된 불안전 피복의 경우, 월파는 저감될 수 있으나, 월파되지 못한 수위가 처오름과 이후 처내림 과정에서 낙하되며 사면에 발생하는 유속이 증가한다.



Fig. 7. Field view of rubble mound breakwater with increased crown elevation height (2019)

Fig. 8은 전술한 마루높이 상향에 따른 소파층의 거동을 확인하기 위하여 방파제 사면에서의 파랑 소파과정을 도식화한 것이다[12]. KDS 64 45 20에서 정한 것과 같이 소파층과 직립부의 마루높이가 동일한 (a)의 경우, 파랑이 소파되면서 상당 양의 수위가 월파되어 배후로 넘어간다.

반면, 월파저감을 위하여 마루높이를 상향한 (b)의 경우, 수위가 월파되지 못하고 대부분 제체 벽면을 타고 쳐오른 후 낙하하게 된다. 이 과정에서 유속이 증가한 많은 양의 수위는 소파층으로 낙하하면서 피복층에 큰 피해를 발생시킨다. 이러한 반복적인 수위작용은 소파블록의 이동, 파손을 가속화시키는 요인으로 방파제의 안정성에 악영향을 미친다.

따라서, 전면에 소파블록을 적용하는 방파제의 안전점검에는 이러한 상태를 포함할 필요가 있다.

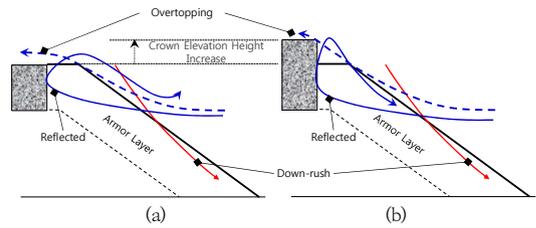


Fig. 8. Incomplete wave break due to increased crest elevation height for reducing wave-overtopping

(a) Standard cross-section : complete armor
(b) Elevation increase cross-section : incomplete armor

4. 사석경사제의 안전점검 결과 분석

시설물안전법 및 세부지침의 사석경사제 안전점검방법 및 평가기준의 적정성을 검토하기 위하여 최근(19~21년) 안전점검결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Recent safety inspection results of rubble mound breakwater [14]

Classification No.	Safety inspection results				Arrangement type ¹⁾	Armored status ²⁾
	Year	Rating	Index	Year		
B-W 1	'50	B	4.00	'19	N-4r	C-A
B-W 2	'61	B	3.61	'20	S-4r	I-A
B-W 3	'61	B	3.53	'20	S-2r	C-A
B-W 4	'76	B	4.00	'20	N-4r	C-A
B-W 5	'80	B	4.00	'19	N-2r	C-A
B-W 6	'81	B	4.00	'20	S-2r	C-A
B-W 7	'89	B	4.00	'19	S-2r	I-A
B-W 8	'89	B	4.35	'20	N-2r	I-A
B-W 9	'92	B	3.73	'20	S-4r	C-A
B-W 10	'94	B	4.00	'20	S-4r	C-A
B-W 11	'95	C	3.27	'19	N-2r	I-A
B-W 12	'99	B	4.04	'20	S-2r	C-A
B-W 13	'00	A	4.52	'19	S-2r	C-A
B-W 14	'01	B	4.00	'19	S-2r	C-A
B-W 15	'02	C	3.24	'20	S-4r	C-A
B-W 16	'02	C	3.25	'20	S-4r	C-A
B-W 17	'04	B	4.00	'20	S-2r	I-A
B-W 18	'04	B	3.88	'19	S-4r	C-A
B-W 19	'06	B	4.00	'21	N-2r	I-A
B-W 20	'09	B	4.02	'20	S-2r	I-A

1) Arrangement type

S : standard / N : non-standard - 4r : 4 rows / 2r : 2 rows

2) Armor status

C-A : Complete Armor / I-A : Incomplete Armor

Table 5의 대상 방파제는 시설물안전법에 따른 1, 2종 방파제 중 사석경사제 또는 전면 소파블록 피복(케이슨 또는 직립) 방파제이며, 각 대상 방파제의 준공년도와 최근 실시한 안전점검 결과(상태등급, 상태지수)를 나타내었으며, 현재 방파제 소파층 어깨부의 상태를 거치배열 형태와 피복상태로 구분하여 나타내었다.

거치배열 상태는 표준 배열과 비표준 배열, 4열 배열과 2열 배열로 구분하여 각 배열상태를 조합하여 나타내었다. 피복상태는 어깨부와 직립부의 마루높이가 동일한 것을 완전 피복으로 어깨부가 직립부의 마루높이가 낮으면 불완전 피복으로 구분하였다.

총 20개소의 방파제 중 3개소를 제외한 나머지 방파제가 B등급 이상의 상태등급을 판정받았다. 사면변화 및 피복석·소파공의 유실에 대한 평가결과에서는 극히 일부 수중 소파블록 이탈을 지적한 결과를 확인할 수 있었으나, 사면부, 소파층에 대한 특별한 점검의견은 없었다. 20개소 방파제의 사면과 소파공에 대한 평가결과는 대부분이 우수한 a로 판정받았다.

상태등급 B등급 이상인 방파제 중 비표준 배열인 것은 17개소 중 5개소, 불완전 피복 상태인 것은 17개소 중 7개소에 해당한 것을 확인할 수 있다.

기존 사석경사제 등의 안전점검 결과를 비교·분석한 결과, 현행 안전점검 평가기준과 현장조사에서 소파층의 소파블록 배열 및 피복 상태를 적절히 반영하고 있지 않음을 확인할 수 있어 본 연구에서 수행하는 소파층 상태 평가 기준개발이 적절해 보인다.

5. 소파층의 거동특성 반영된 평가기준

전술한 것과 같이 현행 시설물안전법에 따른 안전점검 기준과 그 결과는 KDS 64 45 20에서 정하고 있는 소파층의 어깨 폭 및 마루높이에 대한 규정 및 파랑 저항특성을 적절히 반영하지 못하고 있다. 물론 피복층의 상태는 설계단계에서의 불완전 피복과 시공단계에서의 거치배열 문제이다. 그럼에도 불구하고, 설계기준에서도 언급한 것과 같이 소파블록은 변형되기 쉬우므로 지속적인 유지보수를 수행하여야 하기 때문에 이를 반영한 안전점검 기준의 마련이 필요해 보인다.

5.1 조사항목 변경

현행 세부지침에서는 Table 6과 같이 사석경사제의 조사항목을 사석경사면과 소파공으로 구분하고 각각 사

면변화, 피복석 유실 그리고 소파공 교란 및 유실, 파손으로 세부 점검항목으로 정하고 있다.

하지만, 사면 변화와 소파공 유실·교란은 파랑과 침하 등의 영향으로 복합적으로 발생하는 손상이므로 이를 구분하여 독립적인 평가항목으로 구분하는 것은 쉽지 않다. 따라서 Table 7과 같이 사면 변화를 평가항목에 통합하는 것이 적합하다고 판단된다.

이와 함께 앞서 설명한 것과 같이 사석경사제의 구조 안정성을 결정짓는 중요인자인 소파층의 어깨부에 대한 조사항목을 신설하는 것이 적합하다고 판단되므로 조사항목은 KDS 64 45 20에서 규정한 어깨부 어깨 폭(배열 상태)과 마루높이(피복상태)에 대하여 평가하는 것이 적합하다.

5.2 영향계수 변경

세부지침에서는 구조물 안정성에 미치는 영향을 고려하여 결함 및 손상을 중요결함, 국부결함, 일반손상으로 구분하며, Table 6과 같이 사석경사제에서는 사면의 변화와 소파공의 교란 및 유실을 국부결함으로 파손을 일반손상으로 분류하고 있다.

사석경사제와 같이 방파제 전면이 소파블록이 피복된 구조형식에서는 소파블록의 피복, 거치상태가 방파제에 전반에 걸친 안정성에 직접적인 영향을 미치며 손상을 가속화시킬 수 있는 중요한 인자로 판단된다. 이에, 소파층 어깨부의 영향계수는 국부결함보다는 구조물 전체의 구조적인 안전에 직접적인 영향을 미치는 결함인 중요결함으로 분류하는 것이 타당하다. 또한 기존 조사항목을 통합한 사면 변화와 소파공 유실은 국부결함으로 분류하였으며, 이를 종합하면 Table 7과 같다.

5.3 상태평가 기준 변경

본 연구에서는 Table 7과 같이 새로 평가항목과 영향계수를 제시하였으며, 이 평가항목에 따른 평가기준을 Table 8, 9와 같이 제안하였다.

Table 8은 기존 세부지침에 규정되어 있는 사면변화 및 피복석 유실과 소파공 교란 및 유실에 대한 상태평가 기준을 통합하여 제시한 상태평가 기준으로 기존 평가기준에서는 소파공(armor layer)과 피복석(underlayer block)을 구분하여 기준을 제시하고 있으나, 소파공이 상당 부분 유실되어야 피복석을 육안으로 확인할 수 있으므로 소파공의 유실 및 파손을 중심으로 통합·기술하였다.

Table 6. Existing defect type and inspection items of Table 7. Modified defect type and inspection items of slope and armor block

Classification		Defect type	Rating	Effect factor	Condition index	Classification		Defect type	Rating	Effect factor	Condition index
Slope	Slope change	Local defect	a(5)	1.0	5.0	Shoulder	Shoulder crown height	Critical defect	a(5)	1.0	5.0
	Armor stone loss		b(4)	1.1	4.4				b(4)		4.0
Disturbance & loss	c(3)		1.2	3.6	c(3)		3.0				
	d(2)		1.4	2.8	d(2)		2.0				
	e(1)		2.0	2.0	e(1)	1.0					
Armor block	Breakage	Normal damage	a(5)	1.0	5.0	Slope	Slope change	Local defect	a(5)	1.0	5.0
			b(4)	1.1	4.4				b(4)	1.1	4.4
			c(3)	1.3	3.9		c(3)		1.2	3.6	
			d(2)	1.7	3.4		d(2)		1.4	2.8	
			e(1)	3.0	3.0		e(1)		2.0	2.0	

Table 8. Modified condition inspection criteria of slope change and armor block loss

Rating	Inspection status
a(5)	·Good condition
b(4)	·Condition of slight sliding of the slope and some armor block movement
c(3)	·Condition of sliding occurred to point and some loss of armor in spots
d(2)	·Condition in which steepening or sliding is readily apparent across much of the slope and armor blocks have been fully displaced or lost
e(1)	·Condition in which slope has generally deteriorated over most of the reach length and underlayer loss is evident

Table 9. Newly proposed condition inspection criteria of rubble mound breakwater shoulder section

Rating	Inspection status	
	Shoulder width (arrangement state)	Shoulder crest height
a(5)	·Condition in which armor layer is arranged over 2 rows and achieve good interlocking of armor block	·Condition in which crest height of armor layer and concrete cap is same or slightly higher
b(4)	·Condition in which armor layer is arranged 2 rows and few armor block have lost contact with adjacent blocks	·Condition in which crest height of armor layer and concrete cap is slightly lower
c(3)	·Condition in which armor layer is arranged 2 or more rows but loss of contact or interlock with adjacent blocks in some places	·Condition in which crown height of armor layer and concrete cap has settled a distance equivalent to about 1/2 diameter of an armor block
d(2)	·Condition in which wave breaking capability is partially lost because many armor units are loosely nested and act alone	·Condition in which crown height of armor layer and concrete cap has settled a distance equivalent to about 1 diameter of an armor block
e(1)	·Condition in which wave breaking capability is lost because most armor blocks are loosely nested and are acting alone	·Condition in which underlayer or core has been disturbed or lost

Table 10. Comparison of evaluation results according to existing method and newly proposed method

Section No.	Length [l_n]	Existing method			Newly proposed method		
		Evaluation result	Condition index [CI_n]	$CI_n \times l_n$	Evaluation result	Condition index [CI_n]	$CI_n \times l_n$
1	350.0m	b	4.19	1,466.5	c	3.00	1,050.0
2	181.0m	a	4.80	868.8	c	3.33	602.73
3	139.0m	a	4.65	646.35	c	3.00	417.0
Σl_n	670.0m	$\Sigma CI_n \times l_n =$		2,981.65	$\Sigma CI_n \times l_n =$		2,069.73
Total		$CI = 4.35$		Rating = B	$CI = 3.06$		Rating = C

또한, 소파층 어깨부의 어깨 폭과 마루높이의 상태가 고려된 새로운 상태평가 기준은 Table 9와 같다.

어깨 폭은 KDS 64 45 20에서 규정한 것과 같이 소파블록 2열 배치를 표준으로 interlocking 작용에 대한 상태를 중심으로 상태평가 기준을 제안하였다.

어깨부 마루높이도 KDS 64 45 20에서 규정한 소파층과 직립부의 마루높이의 상태를 기준으로 하여 상태평가 기준을 제안하였으며, 현장에서 간편하게 마루높이 차이를 조사할 수 있도록 방파제에 거치된 소파블록의 직경을 활용하여 평가할 수 있도록 하였다.

5.4 새롭게 제안된 평가기준의 적용

본 연구에서 제안한 사석경사제의 소파층 어깨부와 사면변화 상태평가 기준의 적절성을 검증하기 위하여 기존 평가결과와 본 연구에서 제안한 평가기준을 적용한 평가결과를 비교하였다.

비교 대상은 Table 5 중 KDS 64 45 20에서 규정한 피복층 어깨 폭(비표준 2열 배열)과 어깨 마루높이(불안전 피복)를 모두 준수하지 않은 Breakwater 8, 11, 19 중 Breakwater 8을 대상으로 하였다.

Breakwater 11과 19는 비교적 파랑의 영향이 적은 서해권역의 연안항에 위치한 방파제이므로 어깨부의 피복상태가 안정성에 민감하게 반영되지 않기 때문에 비교에서 제외하였다.

Breakwater 8은 남해안의 무역항에 위치한 사석경사식 방파제로 전체 670.0 m 중 조사단위 1에 해당하는 350.0 m는 방파호안의 역할을 한다. 기존의 상태평가 결과에서는 사면과 소파블록에 관한 점검결과 및 의견으로 소파블록 일부가 경미하게 파손된 것 이외에는 전반적으로 양호한 상태로 판정되었다.

본 연구에서 제안한 평가방법을 적용하여 각 조사단위, 평가단위 별로 상태지수를 재평가 및 취합하여 최종 상태지수와 등급을 산출하였으며 그 결과를 기존의 평가

결과와 비교하여 Table 10에 도시하였다.

Breakwater 8은 일부 보강 부분을 제외하면 전 구간에 걸쳐 소파층 어깨부의 거치배열이 비표준 2열 거치배열을 가지고 있으며, 제두부 구간에 해당하는 조사단위 3의 경우, 직립부의 마루높이보다 어깨부의 마루높이가 소파블록 직경의 1/2 수준정도 낮게 거치되어 있다. 이러한 평가결과를 종합하여 상태평가를 재산정한 결과, 상태지수가 4.35에서 3.06으로 약 29.6% 낮게 평가되며, 상태등급은 B등급에서 C등급으로 저하된 것으로 판정되었다.

하향 조정된 상태지수는 1.29로 B, C, D 등급의 상태지수 범위 간격인 1.00 보다 큰 값으로 본 연구에서 제안한 소파블록 피복층의 어깨부 조사항목 및 기준을 적용하는 경우, 시설물 유지관리 의사결정에 큰 영향을 미치는 상태등급이 1단계 이상 하향 조정할 수 있어, 안전한 항만확보 및 방파제의 성능검증을 위하여 보다 현실적인 사석경사제 상태평가 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

방파제의 주요 구조형식인 사석경사제는 제체 전면에 피복된 소파블록이 파랑에너지를 저감시키는 주요 부재임에도 불구하고, 현행 시설물안전법에 따른 안전점검에서는 그 중요도가 부각되지 않고 직립부 등 제체의 안전 및 상태에 중요도가 집중된 측면이 있다. 또한, 소파층 및 사면의 상태평가 기준도 중복된 조사항목을 다루고 있으며 방파제의 설계기준인 KDS 64 45 20에서 규정하고 있는 피복층 어깨부의 소파블록 거치배열 및 마루높이에 대한 사항이 상태평가 기준에 반영되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 사석경사제의 피복층 어깨부에 거치되는 소파블록 거치배열 상태와 피복층의 마루높이를

평가할 수 있는 항목 및 기준을 신설 제안하였으며, 기존의 사면과 소파공 평가기준을 통합하여 보다 합리적으로 평가할 수 있도록 제안하였다.

또한, 손상형태가 전체 구조물에 미치는 영향을 고려하는 영향계수를 국부결함에서 중요결함으로 상향하여 사석경사제의 안정성에 영향을 미치는 피복층 어깨부와 사면 변화의 상태평가 결과 안전점검 결과에 보다 지배적인 인자로 취급될 수 있도록 제안하였다.

연구를 통하여 제안하는 소파층 어깨부의 평가기준 적정성을 평가하기 위하여 최근 3년간 실시된 방파제 전면 소파블록이 피복된 사석경사제 등의 안전점검 결과와 각 방파제의 어깨부 소파블록 거치상태 및 피복상태를 조사하였으며, 어깨부의 거치배열 및 피복상태가 안전점검 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있었다.

본 연구결과의 적정성 검증을 위하여 피복층의 어깨부 거치배열과 피복상태를 모두 준수하지 않은 방파제 (Breakwater 8)의 기존 점검결과와 본 연구에서 제안한 평가기준을 적용한 결과를 비교하였다. 현행 세부지침에 따른 상태지수와 상태등급은 4.35, B등급 이었으나, 본 연구에서 제안한 방법에 따르면 3.06, C등급으로 하향 조정되었다. 이때 하향 조정된 상태지수의 차이는 상태등급을 1단계 이상 하향 조정할 수 있는 수준으로 향후, 새롭게 제안된 평가기준을 활용하면 사석경사식 방파제의 유지관리 의사결정에 상당한 영향을 미칠 수 있는 인자로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 항만을 파랑 등의 외력으로부터 보호하기 위하여 설치되는 방파제 중 사석경사제에 대하여 보다 합리적인 안전점검을 통한 최적의 성능을 판정할 수 있는 상태기준을 마련하고자 수행하였으며 향후, 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」의 개정의 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), KDS 64 45 20, 2017, pp.12-32

[2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT), Special Act on the Safety Control and Maintenance of Establishments, 2020

[3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), Detailed Guidelines of Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis - Port Counter Facility, 2019

[4] C. H. Lee, "Development of Stochastic Decision Model for Estimation of Optimal In-depth Inspection Period of Harbor Structures", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.28, No.2, pp.63-72, Apr. 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2016.28.2.63>

[5] Y. H. Kim, Y. H. Lee, J. J. Song, S. Y. Lee, "The Development of Investment Prioritization Criteria for the Mooring Facilities's Maintenance by the Delphi Study", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.1 pp.515-524, Jan. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.1.515>

[6] J. E. Park, K. S. Kyung, D. S. Kim, H. W. Ryu, B. G. Shin, "A study on establishing assessment method for performing precision check-up and precision safetyinspection of coastal structures(breakwaters)", Proceedings of KSMI Conference, The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection, Pyeongchang, S. Korea, Vol.2015 No.10, pp. 29-30, October. 2015.

[7] Y. H. Kim, "The Practical Simplified Equation for Settlement Evaluation of Counter Facility in Soft Ground Centering on Rubble Mound", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 21, No. 6, pp. 317-324, June, 2020
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.6.317>

[8] Coastal Development Institute of Technology(in Japan), Technical Manual for Port Facility Maintenance, pp.72-83, 2018

[9] U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Manual Part VI Design of Coastal Project Elements (EM 1110-2-1100), 2011

[10] J. Oliver , D. Plotkin , J. Lesnik, D. Pirie, A Condition and Performance Rating System for Breakwaters and Jetties, 25th International Conference on Coastal Engineering, December 31, 2016
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784402429.144>

[11] Y. K. Kang, Connotative Sense of Design Standard and Our Future Tasks(2), Ports & Harbours, Vol.151, pp.63-72, 2019

[12] Y. K. Kang, Connotative Sense of Design Standard and Our Future Tasks(3), Ports & Harbours, Vol.152, pp.41-51, 2020

[13] R.Y. Hudson, "Laboratory investigation of rubble mound breakwaters", Journal of Waterway and Harbors Division, ASCE, 85(WW3), pp. 93-121, 1959
DOI: <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000142>

[14] Korea Infrastructure Safety Corporation, Facility Management System(FMS) [Internet], Korea Infrastructure Safety Corporation, c2019 [cited 2021 Sep. 1], Available From: <http://www.fms.or.kr> (accessed Sep. 1, 2021)

김 용 희(Yong-Hee Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 상명대학교 토목 공학과 (구조공학, 공학석사)
- 2021년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 (해안공학, 공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2015년 2월 : 한국 건설기술연구원 석사후연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국항만협회 기준개발팀 과장

<관심분야>

항만시설물, 사석경사제, 유지관리, 안전점검

강 윤 구(Yoon-Koo Kang)

[정회원]



- 1995년 3월 : 일본 나고야대학교 토목공학과(해안공학 전공, 공학박사)
- 1995년 10월 ~ 2002년 3월 : 일본 항만공학기술연구소 연구관
- 2002년 4월 ~ 2003년 5월 : 현대 건설 기술연구소 책임연구원

- 2003년 6월 ~ 2015년 3월 : 삼성물산(건설부문) 토목사업본부 부장
- 2015년 4월 ~ 2018년 12월 : 세광종합기술단 기술연구소장
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국항만협회 기준개발팀장

<관심분야>

항만구조물 계획·설계, 해안침식, 해양생태환경 복원