기후변화에 대응하기 위한 항외곽시설 설계기준 개정에 관한 제언: 설계 충실도 지수와 피복석 공칭지름 변화에 따른 파괴확률 변화율을 중심으로

Preliminary Study on an amendment to the Design Guideline of Outer Port Facilities Against Harsh Wave Conditions due to Climate Change based on Design Fidelity Index

조용준 · 조성희
서울시립대학교 토목공학과

Yong Jun Cho · Sung Hee Cho
Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Abstract

This study aims to develop an amendment to the design guidelines for the outer port facilities based on quantitative indexes to address harsh wave conditions due to climate change. To this end, the author first looked into the in situ data of damage to outer port facilities collected in about a dozen major ports in Korea, where the outer port facility has failed in fulfilling its intended disaster prevention against typhoons over the last decade. In doing so, the design fidelity index, a quantitative index that can rationally determine the scope of reinforcement of outer port facilities, was developed based on the specified failure mechanism. The design fidelity index evaluates the degree of loss of armoring rocks, erosion of main body of breakwater, displacement of cap-concrete, lee side damage by overtopping, and scouring near the toe, which are the primary failure mode of the outer port facilities, and displays these damage extents of each of 5 primary failure mode in polar coordinates. Among the various failure modes mentioned above, scouring near the toe has been found in most outer port facilities, and as a result, the current design practice like whether to install scouring-prevention work is determined based on the limit depth for the incipient sediment motion needs to be revised. Numerical simulation shows that with sediment motion triggered by harsh water surface displacement in the standing waves formed in front of vertical type breakwater being accounted for, the robustness of scouring prevention works, which takes the maximum scour depth as the maximum wave height, could be secured. In addition, among the various quantitative indexes that can provide information concerned with how robust or vulnerable the outer port facilities would be by adjusting design waves return period, it turns out that the increasing rate of failure probability associated with the unit change in the nominal diameter of armoring rocks could provide most promising results.

Keywords : Climate change, Outer port facilities, Design fidelity index, Maximum scouring depth, Hybrid design, Failure probability gradient

1. 서론

최근 급속히 진행되고 있는 기후변화로 지난 10년간 우리나라 주변 해역의 수온은 약 0.67℃ 상승하였으며 이러한 추이는 이른 시일 안에 극적인 반전이 없는 한 앞으로도 상당 기간 지속될 것으로 보인다 (Cho and Song, 2021). 전술한 수온 상승으로 인해 북태평양 남서부에서 발생하여 한반도를 향해 북동진하는 과정에서 그 세력이 약해지던 열대성 저기압 [태풍]은 공급될 수 있는 수증기량의 증가로 그 세력이 유지될 수 있으며, 이는 향후 우리가 일찍이 경험하지 못한 초대형 태풍과 기상해일에 우리나라가 노출될

수 있음을 함의한다. 기후변화로 인해 최근 우리나라의 해수면은 연평균 0.1~0.2cm가량 상승하였으며, 고도 위성 자료 분석 결과 1996년부터 2005년까지 최근 9년간 동해 평균 해수면 상승률은 연평균 5.4±0.3mm, 동해남부는 6.6±0.3mm, 서남해는 5.0±0.3mm로 전 세계 연간 해수면 상승률(3.1mm)의 2배를 웃돈다 (Choi et al., 2018; Korean Ministry of Ocean and Fisheries, 2007) [Fig. 1 참조].

최근 우리나라 해안공학계에서는 전술한 해수면 상승과 기후변화로 이전보다 거칠어진 해양환경에 대응하기 위해서는 항 외곽시설 설계기준이 개정되어야 한다는 의견이 지배적으로, 개정에 필요한 선행연구도 활발하게 진행되어

Fig. 1. Sea-level rise in the sea surrounding South Korea

연구성고가 상당하다. 개정작업은 크게 항 외곽시설의 주 외력으로 작용하는 파랑의 성격을 오십 년 빈도에서 백 년 빈도로 상향 조정하는 것으로 요약할 수 있으나, 이러한 상향조정으로 항외곽시설이 얼마나 강건해질 수 있는지에 대한 정량적 지표는 찾아보기 힘들다.

이러한 시각에서 본 연구에서는 기후변화에 대응하기 위한 항외곽시설 설계기준 개정안이 정량적 지표에 준거하여 제시된다. 여러 지표 중 가장 우월한 정량적 지표로 보이는 설계 충실도 지수 산출과정을 정리하면 다음과 같다: 설계 충실도 지수는 먼저 항 외곽시설의 주 파괴 양식인 피복층 손실, 제체 침식, 상치 콘크리트 활동, 월파로 인한 배후면 손상, 기부 침식 정도를 평가하고 이를 극좌표에서 정리한 것으로, 평면에 형성되는 오각형의 면적으로 항 외곽시설의 강건도를 가늠할 수 있다. 제일 사분면과 제이 사분면에서의 심한 손상은 설계과고가 과소하게 평가되었음을 함의하며, 제삼 사분면에서의 심한 손상은 과소하게 평가된 설계과고와 기후변화에 따른 해수면 상승이 주요 파괴 기제로 기능한다. 또한 제사 사분면에서의 심한 손상은 정상 파동계에서의 표사 이송을 간과한 우리나라 항만설계기준의 오류, 과소하게 평가된 설계과고, 기후변화에 따른 해수면 상승 등이 복합적으로 작용한 결과로 보인다. 오각형의 면적이 기준치를 상회하는 경우 방재 기능을 상실하였다는 것을 의미한다.

전술한 설계 충실도 지수 외에도 설계빈도 조정으로 얼마나 항외곽시설이 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표를 찾기 위한 노력은 최근 연구성고가 상당한 신뢰성 기반 설계를 중심으로 수행된다. 검토 결과 설계빈도 조정에 따른 항외곽시설 강건도 변화를 판단할 수 있는 정량적 지표로는 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 피복석 공칭지름별 파괴확률변화율이 활용될 수 있을 것으로 보인다. 최근 Cho(2021e)는 주관적 판단이 강제될 개연성이 높은 결정론적 설계의 한계를 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 공칭지름별 파괴확률변화율을 활용하여 치유한 hybrid 설계법을 제시한 바 있다. Cho(2021e)의 연구성고에 의하면 우

리나라 해양환경에 내재한 불확실성을 고려하면 피복석 공칭지름이 임계치보다 커지면 파괴확률변화율이 완만하게 감소하는 Gradually Varying Zone이 존재한다. 전술한 피복석 공칭지름별 파괴확률변화율에서 Gradually Varying Zone의 존재는 설계빈도를 특정 빈도보다 상향 조정하더라도 추가로 얻을 수 있는 항외곽시설의 강건도는 제한적이라는 사실을 함의하여 상당한 공학적 가치를 지닌다.

이상의 논의를 토대로 본 연구에서는 정량적 지표에 준거하여 기후변화에 대응하기 위한 항외곽시설 설계기준 개정안이 제시된다. 개정안 마련을 위해 먼저 지난 십여 년간 태풍으로 인해 방재 기능이 상실된 우리나라 십여 개 주요 항에서의 외곽시설 피해사례를 살펴보았다. 이어 이 과정에서 특정된 파괴 기제에 준거하여 항 외곽시설 보강 규모를 합리적으로 결정할 수 있는 정량적 지표인 설계 충실도 지수가 산출된다. 이와 더불어 공칭직경에 따른 파괴확률변화율이 설계빈도 조정으로 얼마나 항 외곽시설이 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표로 기능할 수 있는지를 확인하는 작업도 함께 수행된다.

2. 우리나라 인근 해역에서의 태풍 이동 경로

반시계 방향으로 선회하는 태풍 특성상 항을 우측에 두고 접근하는 태풍에 노출되는 경우 항 외곽시설의 피해는 상대적으로 증가한다. 이처럼 태풍의 이동 경로는 항 외곽시설의 피해 규모를 결정하는 중요한 설계 인자로 과거 우리나라에 영향을 미친 태풍의 이동 경로를 세 개 권역으로 나누어 태풍의 성격을 정리하면 다음과 같다(Fig. 2 참조).

- 서해권역

최근 30년간 서해권역에 영향을 미친 태풍의 연평균 발생 횟수는 1.53개이며, 그 영향은 41.9일간 지속되었으며, 평균 중심기압 960.9hpa, 평균 최대 풍속은 36.9m/s에 이른다.

- 남해권역

지난 30년간 남해권역에 영향을 미친 태풍의 연평균 발생 횟수는 평균 2.13개이며, 태풍의 영향은 39.6일간 지속되었다. 평균 중심기압 960.2hpa, 평균 최대 풍속은 36.8m/s에 이른다.

- 동해권역

동해권역에 영향을 미친 태풍의 연평균 발생 횟수는 평균 1.43개로 그 영향은 40.6일간 지속되었으며 평균 중심기압은 956.6hpa, 평균 최대 풍속은 38.3m/s에 이른다.

쉽게 예상 해 볼 수 있듯 모든 권역에서 기후변화로 인해 태풍 발생 횟수, 영향이 지속되는 기간, 최대 풍속은 증가하는 추세를 보였다. 본 연구에서는 전국에 산재해 있는 우리나라 항의 특성을 고려하기 위해 태풍의 이동 경로를 7개로 더 세밀하게 분류하여 항 외곽시설 파괴 기제를 살펴보았으며, Fig. 3에는 이렇게 분류한 7개의 태풍 이동 경로를 정리하였다. Table 1에는 경로별 발생 횟수를 정리하여 수록하였다.

Fig. 2. Classification of typhoons by their passing track near South Kora

Fig. 3. Re-classification of typhoons by their passing route near South Kora into seven types

Table 1. List of occurring rate of typhoon along each of seven different route

	Classification of typhoons by their passing route near South Kora [see Fig. 3]						
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	Type 7
	12 times	20 times	9 times	14 times	17 times	4 times	14 times
Occurring rate	11%	19%	9%	13%	16%	4%	13%

3. 해역별 태풍 피해사례 조사 · 분석

기후변화에 대응하기 위한 해역별 항 외곽시설 보강방안을 마련하기 위해 항 외곽시설 파괴 기제를 자세히 살펴보았다. 우리나라의 주요 무역 · 연안항 중 본 연구의 대상 항 선정과정을 정리하면 다음과 같다: 먼저 지난 이십 년간 우리나라에 영향을 미친 태풍의 이동 경로를 고려하여 위도 28~40도, 경도 120~132도 사이를 태풍의 영향에 노출된 권역으로 선정하였다. 이어 최근 이십 년간 내습한 태풍의 경로를 따라 해역별 항만 수와 피해 규모 등을 고려하여 열 개 항을 선정하였다. 선정된 항의 외곽시설 형식, 외곽시설이 거처된 해역의 수심 등은 Table 2에 정리하였으며, Table 3에는 항별 피해 양상과 파괴 기제를 정리하였다. 수심 15m 전후에서 선호하는 항 외곽시설 구조형식이 사석 경사제에서 케이슨 혼성제로 바뀌는 것으로 보인다 [Fig. 4 참조].

3.1 항외곽시설 설계 충실도 지수

태풍으로 인한 방파제 구조형식별 주요 피해사례를 살펴보면, 사석 경사제의 경우 주요 파괴 양식은 파랑 내습 시 소파블록의 이탈 후 내부 사석이 유실되는 경우로 보인다. 이처럼 제체 사석이 드러난 채 태풍에 노출되는 경우 제체 사면 붕락, 상치 콘크리트의 활동 · 전도가 결과되는 것을 확인할 수 있다[Fig. 5(a) 참조]. Fig. 6에는 이해를 돕기 위해 태풍으로 인한 감천항 외곽시설 피해 양상을 도시하였다. 무역항 외곽시설 구조양식으로 가장 선호되는 케이슨 혼성제의 경우 월파로 인한 상부 전도, 이격 피해와 충격 쇄파압

으로 인한 상치 콘크리트와 구조체 일부 파손, 균열 등이 피해사례 대부분을 차지한다. 전술한 파괴 양식은 케이슨 혼성제의 방제 기능 상실로 이어지는 것은 아니나, 방제 기능 상실로 이어지는 대규모 파괴는 세굴에 의한 기초부 교란 및 붕괴로 시작된다는 사실에 유념할 필요가 있어 보이며 [Fig. 5b 참조], 이러한 추론의 근거는 4.1절에 후술하였다.

Fig. 7, 8에는 현재 운영 중인 항 외곽시설의 방제 기능 정도를 가늠하기 위해 본 연구에서 개발한 설계 충실도 지수 산출 결과를 정리하여 도시하였다.

설계 충실도 지수 산출 과정을 정리하면 다음과 같다 (Cho, 2021e):

- I. 먼저 외곽시설의 주 파괴 양식인 피복층 손실, 제체 침식, 상치 콘크리트 활동, 배후면 손상, 기부 침식 정도를 평가한다.
- II. 이어 전술한 주 파괴 양식과 상대적 침식 정도로 구성된 평면에서 상대적 침식 정도 등을 극좌표 상에서 등간격으로 도시한다.
- III. 전술한 평면에서 최종적으로 얻게 되는 오각형의 면적은 현재 운영 중인 항 외곽시설의 방제 기능 정도를 가늠할 수 있는 정량적 지표로 활용될 수 있다.

제일 사분면과 제이 사분면에서의 심한 손상은 설계파고 가 과소하게 평가된 것을 함의하며, 제삼 사분면에서의 심한 손상은 과소하게 평가된 설계파고와 기후변화에 따른 해수면 상승이 주요 파괴기제로 판단된다. 또한 제사 사분

Table 2. List of harbors considered in this study and their breakwaters structural type

Year	Typhoon	Moving Track	Harbor	Estimated damage [million ₩]	Structural Type
2010	NO.9 Kompasu	Type 1	Hongdo (West)	1,472	Rubble Mound
2011	NO.9 Muifa	Type 3	Yongkepo (West)	875	Hybrid Caisson
2012	NO.14 Tenbin	Type 2	Sungsanpo (Jeju)	509	Rubble Mound
2012	NO.15 Bolaven	Type 3	Seoguipo (Jeju)	57,250	Rubble Mound
2012	NO.15 Bolaven	Type 3	Hwahungpo (South)	7,063	Rubble Mound
2016	NO.18 Chaba	Type 4	Gamchun (South)	91,910	Hybrid Caisson
2016	NO.18 Chaba	Type 4	Dadaepo (South)	30,134	Rubble Mound
2018	NO.25 Kongrey	Type 4	Pusan North (South)	9,635	Hybrid Caisson
2020	NO.9 Maysak	Type 7	Hupo (East)	9,759	Rubble Mound
2020	NO.9 Maysak	Type 7	Sadong (East)	20,002	Rubble Mound

Table 3. List of damages done by the typhoon to outer port facilities

Harbor	Scope of damage	Driving force of a failure
Hongdo	Main structure: damaged armoring block (TTP) and its loss	High waves exceeding a design wave condition
Yongkeopo	Main structure: damaged armoring block (TTP) and its loss Foundation: lost armoring block and rocks	High waves exceeding a design wave condition
Sungsanpo	Top structure: damaged cap concrete and pavement Foundation: loss of armoring block and rocks constituting the foundation Armoring layer: damaged TTP, damaged electric facilities and safety fence	High waves exceeding a design wave condition (Typhoon occurring during high waters)
Seoguipo	Top structure: damaged cap concrete Main structure: damaged TTP and its loss, loss of rocks constituting main body	High waves exceeding a design wave condition
Hwahungpo	Top structure: damaged cap concrete Foundation: disturbed armoring rocks Main structure: loss of rocks constituting the main body	High waves exceeding a design wave condition
Gamchun	West-breaker: damaged parapet, loss of rocks comprising a foundation East-breaker: loss of foundation rocks, loss of armoring blocks South-breaker: loss of foundation rocks, loss of armoring blocks Jetty: loss of armoring blocks, damaged caisson for water quality control	High waves exceeding a design wave condition (Typhoon attacking during high waters)
Dadaepo	East-breaker: sliding and overturning of cap concrete, damaged armor blocks West-breaker: damaged armor block and its loss, damaged safety fence	High waves exceeding a design wave condition (under-designed armoring block, enhanced impulsive wave force)
Pusan North	Main structure: subsidence, overturning, sliding, separation, lost filling rocks Foundation: disturbed foundation rocks, damaged armoring block and its loss	High waves exceeding a design wave condition (wave force acting on the vulnerable spot of structure)
Hupo	Top structure: cracked cap concrete, damaged and separated cap concrete Main structure: caisson sliding due to lack of filling rocks during construction Foundation: damaged armoring block and rock, cell block and its separation	Exposed to high waves during a construction phase (caisson sliding, enhanced impulsive wave force)
Sadong	South-breaker: cracked cap-concrete, separated caisson, foundation scouring East-breaker: damaged and subsided cap concrete, separated block and its loss, damaged armoring block and its loss	High waves: under-estimated design wave condition

Fig. 4. Schematic sketch of the variation of preferred breakwater structural type according to the depth **Fig. 6.** Schematic sketch of in situ erosion data collected at Gamcheon port **Fig. 5.** Schematic sketch of the primary failure modes of breakwaters of varying characteristics

Fig. 7. Diagnosis of the robustness of major ports in south Korea by grades in five failure mode [Design fidelity index]

면에서의 심한 손상은 3.2.1 절에서 다루었던 정상 파동계에서의 표사 이송을 간과한 우리나라 항만설계기준의 오류, 과소하게 평가된 설계파고, 기후변화에 따른 해수면 상승 등이 복합적으로 작용한 결과로 보인다. 오각형의 면적이 기준치를 상회하는 경우 방제 기능이 상실하였다는 것을 의미한다. 태풍으로 인한 피해가 가장 큰 곳은 감천항과

서귀포항으로 보이며, 유입 수로가 남쪽에 있다는 지형적 성정을 공유한 항에서 피해가 상대적으로 큰 것을 알 수 있으며, 이는 향후 항만 평면배치계획수립 시 우리에게 시사하는 바가 적지 않아 보인다 [Fig. 8a 참조]. 서귀포항의 경우 피복층 손실이 두드러지게 큰 것으로 나타났으며, 피복층 손실이 제체 침식으로 이어진 것을 확인할 수 있으나,

Fig. 8. Comparison of design fidelity index of major ports in Korea

상치 콘크리트 활동이나 기부 침식이 결과되지는 않았다 [Fig. 8a 참조]. 이러한 현상은 서귀포항이 개방된 해역에 위치하여 기상해일 높이가 상대적으로 작다는 사실에 준거하면 수용이 가능한 관측 결과로 판단된다.

4. 항 외곽시설 파괴 기제별 개정안

4.1 항 외곽시설 기초부 세굴방지공

직립식 기초부의 경우 내습하는 단일 진행파에 구조물로부터 반사된 파랑이 더해진 정상파에 노출되기 마련으로 이 경우 한층 거칠어진 해수면 요동으로 기초부는 교란되며 기초부를 구성하는 사석은 쉽게 거치 해역의 제자리를 벗어난다 (Lee and Cho, 2021). 전술한 현상은 본 연구에서 수행된 관측 결과 대부분에서 확인되어 이러한 현상을 결과한 기제를 살펴보기 위해 현재의 항 외곽시설 기초부 설계기준을 자세히 들여다보았다.

현재 항 외곽시설 기초부는 표사이동 한계수심이라는 개념을 준거하여 설계되는 것으로 보인다. 항 외곽시설이 표사이동 한계수심보다 깊은 곳에 거치되는 경우 세굴방지공은 거치되지 않으며, 한계수심보다 얇은 곳에 거치되는 경우 세굴방지공은 거치된다. 세굴방지공은 수심이 깊은 곳에서는 소단형, 얇은 곳에서의 매립형으로 설계된다 (Korean Ministry of Ocean and Fisheries, 2020).

논의를 전개하기 위해 표사이동 한계수심 h_c 를 옮겨적으면 다음과 같으며(SPM, 1984),

$$\frac{H_o}{L_o} = \alpha \left(\frac{d_s}{L_o} \right)^n \left(\sinh \frac{2\pi h_c}{L} \right) \frac{H_o}{H} \quad (1)$$

여기서 n 은 해저면 경사, H 는 파고, L 은 파장, d_s 는 표사 입경, 아래첨자 o 는 먼바다를 각각 나타내며, α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \begin{cases} 1.35 & \text{for incipient motion} \\ 2.4 & \text{for sheet flow} \end{cases} \quad (2)$$

상기 식에서 알 수 있듯, 표사이동 한계수심은 단일방향으로 진행되는 흐름을 대상으로 임계 Shield parameter에 준거해 모래의 초기운동 여부를 가늠하던 하천공학 설계 관행에 근거하는 것을 알 수 있다.

Table 4에는 표사이동 한계수심을 사용하여 세굴방지공 거치 여부를 검토한 결과를 수록하였다. Table 4에서 알 수 있듯 상당한 항 외곽시설에서 세굴방지공이 필요하지 않은 것으로 나타났으며, 이렇게 지나치게 낙관적인 결과는 표사이동 한계수심에 기댄 현재의 항만 설계기준이 상당히 잘못된 결과를 제공할 수 있음을 함의한다.

비교를 위해 미국에서 선호하는 기준인 CERC (SPM, 1984)에서 권하는 직립식 항 외곽시설 전면해역에서의 최대세굴 깊이 S_m 에 대한 해석모형을 옮겨 적으면 다음과 같으며,

$$\frac{S_m}{(H_{mo})_o} = \sqrt{22.72 \left(\frac{h}{(L_p)_o} \right) + 0.25} \quad (3)$$

여기서 $(H_{mo})_o$ 는 먼바다에서의 유의파고, h 는 직립식 방파제가 거치된 해역의 수심, $(L_p)_o$ 는 침두 주기 T_p 에 해당하는 먼바다에서의 파장을 각각 나타낸다.

CERC (SPM, 1984)는 전술한 해석모형 외에도 최대세굴 깊이에 대한 경험적 모형도 제시한 바 있으며, 이 경우 최대세굴 깊이는 최대파고 H_{MAX} 와 같은 크기를 지니며, 전술한 해석모형은 경험모형과 비슷한 결과를 제공한다. 현재 우리나라에서 가장 선호되는 구조양식인 직립식 케이슨 방파제 기부는 상대적으로 큰 반사계수로 인해 전면해역에 형성되는 거친 정상 파동계에 노출되기 마련으로, 이렇듯 거친 정상 파동계가 형성되면 마디[node]에서의 강한 흐름으로 마디 인근 바닥으로부터 부유된 모래가 경계층 streaming으로 배[antinode]를 향해 이동되는 등 표사 이동이 활발하게 진행되며 이는 마디에서의 침식을 결과한다(Cho, 2020;

Table 4. Classification of whether or not scouring prevention works is needed based on the present state of art

		Scouring Prevention Works [SPW]					Remarks
		State of art	Type of wave breaking	h_c^S [m]	h_c^L [m]	depth [m]	
Hongdo	Rubble Mound	deployed	Non-Breaking	25.9	16.03	17.5	Required
Yongkeepo	Rubble Mound	non-deployed	Non-Breaking	13.7	8.01	18.3	Unnecessary
Sungsanpo	Rubble Mound	deployed	Non-Breaking	23.2	13.78	16.7	Required
Seoguipo	Rubble Mound	non-deployed	Breaking	32.2	19.75	17.2	Required
Hwahungpo	Rubble Mound	non-deployed	Non-Breaking	12.6	7.23	18.2	Unnecessary
Gamchun	Hybrid Caisson	deployed	Breaking	26.5	15.95	15.6	Required
Dadaepo	Rubble Mound	deployed	Non-Breaking	14.1	8.11	15.6	Unnecessary
Pusan North	Hybrid Caisson	deployed	Breaking	25.9	15.59	15.5	Required
Hupo	Rubble Mound	non-deployed	Non-Breaking	15.4	9.18	14.4	Required
Sadong	Rubble Mound	non-deployed	Breaking	21.2	13.00	14.5	Required

* h_c^L denotes the limit depth of sediments movement from surface layer

** h_c^L denotes the limit depth of movement from entire sediments layer

Fig. 9. Schematic sketch of scouring-prevention works by stacking multi-layers of rock

Cho, 2021c; Cho 2021d; Cho 2021g). 전술한 침식은 CERC에서 권하는 최대세굴 깊이 S_m 모형에서도 충실히 반영된 것으로 보이나, 단일 진행파를 대상으로 제시된 표사이동 한계 수심 h_i 에 준거하여 세굴방지공 설치 여부가 결정되는 현재의 우리나라 항만 설계기준에서는 누락된 것으로 판단된다.

이상의 논의를 종합하면 우리나라 항 외곽시설의 기부에는 다수의 사석층으로 구성된 세굴방지공이 반드시 거치되어야 하며, 세굴방지공 설계과정에는 설계파고에 견줄만한 세굴 깊이가 활용되어야 할 것으로 판단된다 [Fig. 9 참조].

전술한 문제 외에도 파고가 증가하면 주기도 단순 비례하여 증가하는 것으로 인식하는 우리나라 해안공학계의 설계 관행도 상당한 영향을 미친 것으로 보인다 (Suh et al., 2009). 식(3)에 비추어보면 파고가 유지된 상태에서 주기가 증가하는 경우 최대세굴 깊이 S_m 는 알아진다. 따라서 파고와 주기는 단순 비례하는 사상으로 간주하는 우리나라 해안공학계의 설계 관행으로 최대세굴 깊이가 과소하게 평가하는 결과가 초래된 것으로 추정되며, 이러한 추론의 근거는 본 연

구에서 조사한 열 개의 우리나라의 중요 무역·연안항 항 외곽시설의 대부분이 기부 침식으로 인한 방제 기능을 부분적으로 상실하였다는 사실에서 찾을 수 있다

4.2 항 외곽시설 피복석

설계빈도 조정 시 개정으로 인해 항 외곽시설이 얼마나 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표는 최근에 제시된 hybrid 설계법 (Cho, 2021e)에서 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 전술한 hybrid 설계법은 사용이 쉬운 결정론적 설계의 골격은 유지하되 주관적 판단이 강제될 개연성이 높다는 결정론적 설계의 한계는 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 공칭지름별 파괴확률변화를 활용하여 치유된다. 본 연구에서는 공칭지름별 파괴확률은 Level III 신뢰성 기반 설계법과 Van der Meer 식에 준거하여 산출하였으며, 이 과정에서 우리나라 해양환경에 내재한 변동성을 기술하기 위해 Gumbel 파고 분포와 Tri-modal Gaussian 파형경사 분포를 활용하였다 (Cho, 2021a; Cho, 2021b; Cho 2021f; Cox and Munk, 1954a; Cox and Munk, 1954b; Cox and Munk, 1956).

이해를 돕기 위해 전술한 hybrid 설계법의 진행 과정을 정리하면 다음과 같다 (Cho 2021e):

- I. 먼저 희망하는 설계빈도를 결정한다.
- II. 이어 결정된 설계빈도에 해당하는 파랑으로 피복석 규모 혹은 피복석 공칭지름을 Van der Meer 식에 준거하여 결정론적 설계법으로 가늠한다.
- III. 산출된 공칭지름이 공칭지름별 파괴확률변화를 도표에서 gradually varying zone 안에 위치하면 전술한 설계빈도와 피복석은 항 외곽시설 설계과정에 활용될 수 있다.

IV. 산출된 공칭지름이 rapidly varying zone 안에 위치하면 설계빈도를 적절히 조절하여 I-III 과정을 반복하여 수행한다.

상기한 Hybrid 설계법에 대한 이해를 돕기 위해 4.2.1절에는 신뢰성 기반 설계 분류체계에서 Level 0으로 분류되는 기존의 결정론적 설계법을 정리하였으며 4.2.3절에는 공칭지름별 파괴확률변화율 산출이 가능한 Level III 신뢰성 기반 설계를 정리하였다. 4.2.3절에는 설계빈도 조정에 따른 항외곽시설 강건도 변화를 예단할 수 있는 정량적 지표인 피복석 공칭지름별 파괴확률변화율 모의 결과를 정리하였다.

4.2.1 결정론적 설계 -Van der Meer 식

Van der Meer (1988)는 Thompson and Shuttler(1975)의 초기 작업을 승계하여 일련의 수리모형 실험을 Delft Hydraulics에서 추가로 수행한다. 전술한 실험은 다양한 파랑 조건과 제체 투수 특성을 고려하여 수행된 것으로 이 과정에서 얻은 자료에 준거하여 Van der Meer는 권파와 쇄기파를 대상으로 피복석 규모를 산정할 수 있는 경험식을 제안한 바 있다. Tetrapod로 구성된 사면 경사 1:1.5인 피복층의 경우 Tetrapod

Fig. 10. Definition sketch of rubble mound breakwater armored by two layers of tetrapod [TTP]

의 크기는 다음과 같이 산출될 수 있다[Fig. 10 참조].

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \left(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85 \right) S_{om}^{-0.2} \quad (4)$$

식(4)에서 Δ 는 $\rho_{rock}/\rho_{water} - 1$ 로 정의되는 상대밀도, $D_{n50} = (W_{TTP}/\rho_{rock})^{1/3}$ 는 공칭지름[Nominal Diameter], W_{TTP} 는 피복석 무게, N_{od} 는 평균 해수면 인근의 침식 면적을 공칭지름으로 나눈 침식 계수[Relative Damage Level], S_{om} 은 파형경사, N_z 는 내습하는 파랑 수, ρ_{rock} 는 ρ_{water} 는 각각 피복석과 해수의 밀도를 나타낸다.

Table 5에는 Van der Meer 식에 근거하여 설계빈도를 100년으로 상향 조정하여 검토한 피복석 크기를 수록하였다.

4.2.2 Level III 신뢰성 기반 설계

물리적 의미를 확연하게 드러내기 위해 각 항을 세분하면 식(4)에 정의된 Van der Meer 식은 다음과 같이 기술될 수 있으며

$$\frac{S}{R} = \frac{H_s}{\left(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85 \right) S_{om}^{-0.2} \Delta D_{n50}} \quad (5)$$

여기서 확률변수는 굵은 글씨로 표기하였다.

Van der Meer 식으로부터 사석 방파제 피복석 강도 R 과 파력 S 의 차이로 신뢰 함수 Z 를 정의하면 Z 는 다음과 같이 기술될 수 있으며,

Table 5. List of re-estimated armoring rock's weight based on wave conditions of 100 year return period

		Armoring rock's weight(present)			re-estimated Armoring rock's weight		
		H[m] (T[s])	Weight	Type	H[[m] (T[s])	Weight	Type
Hongdo	Breakwater	5.62 (10.54)	183.2kN	T.T.P 64 T	9.10 (13.50)	468.8kN	T.T.P 64 T
Yongkeopo	East-Breaker	3.40 (9.00)	38.8kN	T.T.P 5 T	4.20 (12.10)	90.20kN	T.T.P 10 T
Sungsanpo	East-Breaker	10.05 (15.71)	981.0kN	DOLOS II 100 T	8.10 (16.50)	637.7kN	DOLOS II 100 T
Seoguipo	Outer-port breaker	11.00 (15.00)	493.4kN	DOLOS II 100 T	11.90 (17.50)	981.0kN	DOLOS II 100 T
Hwahunpo	Jungdo breaker	4.30 (13.00)	78.5kN	T.T.P 20 T	4.00 (16.50)	63.2kN	T.T.P 20 T
Gamchun	South breaker	12.10 (15.87)	264.9kN	TRI-BEAM 30 T	9.90 (17.50)	117.7kN	TRI-BEAM 30 T
Dadaepo	East-Breaker	5.82 (14.49)	195.2kN	T.T.P 25 T	4.90 (17.50)	245.3kN	T.T.P 25 T
Pusan North	Jodo Breaker	10.40 (16.43)	981.0kN	SEALOCK8 100 T	9.70 (17.50)	563.1kN	SEALOCK8 100 T
Hupo	East-Breaker	4.61 (11.96)	122.6kN	T.T.P 12.5 T	5.36 (11.80)	196.2kN	T.T.P 20.0 T
Sadong	East-Breaker	10.30 (13.84)	137.4kN	TRI-BEAM 30 T	7.88 (13.05)	49.1kN	TRI-BEAM 30 T

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= \left(3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85 \right) \mathbf{S}_{om}^{-0.2} \Delta D_{n50} - \mathbf{H}_s \\ &= \mathbf{R} - \mathbf{S} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 피복석 강도 $\mathbf{R}$ 과 파력 $\mathbf{S}$ 는 각각 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \left(3.75 \frac{N_{od}^{0.5}}{N_z^{0.25}} + 0.85 \right) \mathbf{S}_{om}^{-0.2} \Delta D_{n50} \\ \mathbf{S} &= \mathbf{H}_s \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 피복층 강도 $\mathbf{R}$ 이 파력으로 구성되는 외력 $\mathbf{S}$ 보다 작으면 사석 방파제 피복층은 불안정하며 반대의 경우 안정적이라 할 수 있으므로 구조물의 신뢰도는 다음과 같이 분류할 수 있다.

$$\begin{cases} \mathbf{Z} > 0, & \text{stable} \\ \mathbf{Z} = 0, & \text{failure} \\ \mathbf{Z} < 0, & \text{unstable} \end{cases} \quad (8)$$

4.2.3 설계빈도 조정에 따른 항 외곽시설 강진도 변화

본 절에서는 설계빈도 조정으로 얼마나 항 외곽시설이 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표인 피복석 공칭지름에 따른 파괴확률 변화율 모의 결과를 정리하였다. 수치 모의는 4.2.1절에서 다룬 결정론적 설계에서 피복석 규모가 상당한 크기로 상향 조정될 필요가 있는 것으로 나타난 용기포항과 부산 북항을 대상으로 수행하였다.

(1) 용기포항

불규칙한 해양환경의 특성을 이해하기 위해 1979.1.1.부터 2019.12.31.까지의 파랑관측자료 [situ wave data]로부터 유의파고의 연 최댓값 H_{MAX} 와 주기를 특정하고, 빈도해석을 수행하였다 (Jeong et al., 2018). 빈도해석 과정에서 우리나라

라 해양환경에 내재한 변동성을 기술하기 위한 기저 확률분포로는 대표적인 극치분포로 알려진 Gumbel 파고 분포와 Tri-modal Gaussian 파형경사 분포를 활용하였으며 Tri-modal Gaussian 파형경사 분포 $f_{S_{om}}(S_{om})$ 와 Gumbel 파고 분포 $f_{H_{MAX}}$ 는 각각 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{S_{om}}(S_{om}) &= \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{om}-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{om}-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} \\ &\quad + \frac{1-P_1-P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_3} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{om}-\mu_3}{\sigma_3}\right)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_{H_{MAX}} = \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{H_{MAX}-\mu}{\beta}\right] \exp\left[-\frac{H_{MAX}-\mu}{\beta}\right] \quad (10)$$

식(9), (10)에서 P_i 는 mode 별 가중계수, μ_i 와 σ_i 는 i^{th} mode의 평균과 표준편차, β 와 μ 는 Gumbel 파고 분포의 확률 모수를 각각 나타내며, 최대가능도법 [Maximum Likelihood Method]을 활용하여 산출한 Tri-modal Gaussian 분포의 확률 모수는 Table 6에, Gumbel 파고 분포의 확률 모수는 Table 7에 각각 수록하였다.

Fig. 11에는 H_{MAX} 와 T_{Peak} 의 결합확률 분포를 정리하였다. 여기서 H_{MAX} 가 증가하면 H_{MAX} 에 연계된 T_{Peak} 도 선형적으로 증가하는 것이 이채롭다. 이러한 현상은 H_{MAX} 가 상대적으로 큰 경우 H_{MAX} 와 T_{Peak} 사이의 상관관계가 열린

Table 6. List of probability coefficients of tri-modal gaussian wave slope distribution

P_1	P_2	μ_1	μ_2	μ_3	σ_1	σ_2	σ_3
0.255	0.425	0.030	0.037	0.039	0.003	0.001	0.005

Table 7. List of probability coefficients of Gumbel wave height distribution

β	μ
0.635	4.076

(a) Histogram plot

(b) Contour plot

Fig. 11. Joint distribution of H_{MAX} and its associated period T_{Peak}

Fig. 12. Probability density function of H_{MAX}

Fig. 13. Wave slope distribution of extreme waves

(a) Failure probability of armor block [in semi-log scale]

(b) Failure probability of armor block [zoom in]

Fig. 14. Failure probability of armor block in semi-log scale

(a) Failure probability of armor block [in linear scale]

(b) Armor block's failure probability gradient

Fig. 15. Armor block's failure probability gradient for varying D_{50}

다는 해안공학계의 정설(Cavanie, 1976; Cho, 2021a; Cho, 2021b; Choi and Cho, 2019; Forristall, 2008; Park and Cho, 2019; Park et al., 2021)과는 다소 거리가 있어 향후 상당한 논의가 필요하나, 풍성과 성장에 필요한 취송거리가 제한적 방위에서만 확보되는 서해의 특성으로 풍성파가 충분히 성장하지 못하여 발생하는 것으로 추정된다 (Kim and Cho, 2021; Cho and Kim, 2019; Cho et al., 2019; Hasselmann, 1967; Phillips, 1980).

Fig. 12에는 H_{MAX} 확률분포를 정리하였으며, Fig. 13에는 파형경사분포를 정리하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯 Tri-modal Gaussian 분포에서 높은 적합도를 확인할 수 있으며, Fig. 14에는 Van der Meer 식과 Monte Carlo simulation method를 사용하여 수행한 Level III 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 피복석 공칭지름별 파괴확률을 중심으로 정리하였다. Fig. 15a에는 피복석 공칭지름별 파괴확률을 linear scale에서 다시 정리 하였으며, Fig. 15b에는 TTP 공칭지름 변화에 따른 파괴확률변화율을 정리하였다.

결정론적 설계에서 제시한 $D_{50} = 1.29\text{ m}$ [5톤], $D_{50} = 1.63\text{ m}$ [10톤]의 파괴확률은 각각 0.557, 0.069로 산출되었다. 이는 기후변화로 인해 거칠어진 해양환경으로 인해 피복석의 내구성이 현저하게 감소하였음을 의미하며 설계빈도를 백 년으로 상향 조정하는 경우 파괴확률은 Gradually Varying Zone 언저

리에 위치한다. 이는 설계빈도를 이 보다 상향 조정하더라도 기대할 수 있는 항 외곽시설의 강건도 증가는 제한적이라는 것을 의미하며, 따라서 용기포항의 경우 설계 파랑을 100년 빈도로 조정하는 경우 기후변화로 거칠어진 해양환경에서도 충분한 내구성을 담보할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 부산 북항

용기포항과 유사한 과정을 거쳐 빈도해석을 수행하였으며, H_{MAX} 와 T_{Peak} 의 결합확률 분포는 Fig. 16에 정리하였다. H_{MAX} 가 상대적으로 큰 경우 H_{MAX} 와 T_{Peak} 사이의 상관관계가 떨어진다는 해안공학계의 정설(Cho, 2021a; Cho, 2021b; Choi and Cho, 2019; Forristall, 2008; Park and Cho, 2019; Park et al., 2021)에 부합하는 거동을 확인할 수 있다.

Fig. 17에는 H_{MAX} 확률분포를 정리하였으며, Fig. 18에는 파형경사분포를 정리하였다. Fig. 18에서 알 수 있듯 Tri-modal Gaussian 분포에서 높은 적합도를 다시 한번 확인할 수 있으며, Fig. 19a에는 Van der Meer 식과 Monte Carlo simulation method를 사용하여 수행한 Level III 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 파괴석 공칭지름별 파괴확률을 중심으로 정리하였다. Fig. 19b에는 TTP 공칭지름을 변화에 따른 파괴확률변화율을 정리하였다.

결정론적 설계에서 제시한 $D_{50} = 3.51\text{ m}$ [100톤]의 파괴확률은 0.00019로 산출되었다. 이러한 파괴확률은 Gradually Varying Zone의 임계치를 훨씬 상회하는 것으로 Gradually

(a) Histogram plot

(b) Contour plot

Fig. 16. Joint distribution of H_{MAX} and its associated period T_{Peak}

Fig. 17. Probability density function of H_{MAX}

Fig. 18. Wave slope distribution of extreme waves

(a) Failure probability of armor block [in linear scale]

(b) Armor block's failure probability gradient

Fig. 19. Armor block's failure probability gradient for varying D_{50}

Fig. 20. The effect of sea wave conditions on the armor block's failure probability

Varying Zone 임계치 $D_{50} = 2.8\text{m}$ [50톤] 이상으로 조정하더라도 얻을 수 있는 항 외곽시설의 강건도 증가는 제한적이라는 것을 상기하면 과다설계로 판단된다.

Fig. 20에는 해양환경이 피복석 공칭지름별 파괴확률에 미치는 영향을 살펴보기 위해 용기포항과 부산 북항을 대상으로 수치 모의 된 파괴확률과 파괴확률변화율을 비교하였다. 거친 해양환경의 경우 피복석 크기를 증가하더라도 파괴확률이 감소 되는 비율은 온화한 해양환경에 비해 상대적으로 적다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

최근 우리나라 해안공학계에서는 기후변화에 대응하기 위해서는 항 외곽시설 설계기준이 개정되어야 한다는 의견이 지배적으로, 개정에 필요한 선행연구도 활발하게 진행되어 연구성과가 상당해 보인다. 개정작업은 크게 항 외곽시설의 주 외력으로 작용하는 파랑의 성격을 오십 년 빈도에서 백 년 빈도로 상향 조정하는 것으로 요약할 수 있으나 전술한 상향조정으로 얼마나 항 외곽시설이 강건해질 수 있는지에 대한 정량적 지표는 문헌에서 찾아보기 힘들다. 이러한 인식에 기초하여 본 연구에서는 정량적 지표에 근거한 항 외곽시설 설계기준 개정안을 마련하였다. 개정안 마련을 위해 먼저 지난 십여 년간 태풍으로 인해 방재 기능이 상실된 우리나라 십여 개 주요 항의 외곽시설 피해사례의 파괴 기제를 자세히 살펴보고, 이어 이렇게 특정된 파괴 기제를 검토한 결과를 토대로 항 외곽시설 보강 규모를 합리적으로 결정할 수 있는 설계 충실도 지수를 개발하였다. 설계 충실도 지수는 항 외곽시설의 주 파괴 양식인 피복층 손실, 제체 침식, 상치 콘크리트 활동, 율파로 인한 배후면 손상, 기부 침식 정도를 평가하고 이를 극좌표에서 등간격으로 도시한 것으로 이렇게 얻게 되는 오각형의 면적은 현재 운영 중인 항 외곽시설의 강건성 정도를 가늠할 수 있는 정량적 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 전술한 여러 개의 파괴 기제 중 기부 침식은 본 연구에서

검토한 항 대부분에서 상당량 진행되어 표사 이송 한계수심에 준거하여 세굴방지공 설치 여부가 결정되는 현재의 항만 설계기준은 개정되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 결과를 토대로 직립식 방파제의 높은 반사율로 구조물 전면에 형성되는 정상 파동계로 거친어진 수면 변위가 초래하는 표사이송을 고려하여 최대세굴 깊이를 최대파고로 취하는 세굴방지공이 거치될 필요가 있는 것으로 판단된다. 이러한 문제 외에도 파고가 증가하면 주기도 단순 비례하여 증가하는 것으로 인식하는 우리나라 해안공학계의 관행도 부실한 세굴방지공이 결과된 것에 기여한 것으로 보인다. 이러한 추론의 근거는 파고가 같다면 주기가 증가하는 경우 최대세굴 깊이는 얕아진다는 사실에서 찾을 수 있다. 따라서 파고와 주기는 단순 비례하는 사상으로 간주하는 우리나라 해안공학계의 관행으로 최대세굴 깊이가 과소하게 평가하는 결과를 초래하며, 이러한 경향은 본 연구에서 조사한 열 개의 우리나라의 중요 무역·연안항 항 외곽시설의 대부분이 기부 침식으로 인한 방재 기능을 부분적으로 상실하였다는 사실에서도 확인할 수 있다.

설계빈도 조정 시 개정으로 얼마나 항외곽시설이 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표는 최근에 제시된 hybrid 설계법 (Cho, 2021e)에서 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 전술한 hybrid 설계법은 사용이 쉬운 결정론적 설계의 골격은 유지하되 주관적 판단이 강제될 개연성이 높다는 결정론적 설계의 한계는 신뢰성 기반 설계의 주 결과물인 공칭지름별 파괴확률변화율을 활용하여 치유할 수 있다. 본 연구에서는 공칭지름별 파괴확률은 Level III 신뢰성 기반 설계법과 Van der Meer 식에 준거하여 산출하였으며, 이 과정에서 우리나라 해양환경에 내재한 변동성을 기술하기 위해 Gumbel 파고 분포와 Tri-modal Gaussian 파형경사 분포를 활용하였다.

이해를 돕기 위해 전술한 hybrid 설계법의 진행 과정을 정리하면 다음과 같다:

- I. 먼저 희망하는 설계빈도를 결정한다.
- II. 이어 결정된 설계빈도에 해당하는 파랑으로 피복석

규모 혹은 피복석 공칭지름을 Van der Meer 식에 준거하여 결정론적 설계법으로 가늠한다.

III. 산출된 공칭지름이 공칭지름별 파괴확률변화율 도표에서 gradually varying zone 안에 위치하면 전술한 설계빈도와 피복석은 항 외곽시설 설계과정에 활용될 수 있다.

IV. 산출된 공칭지름이 rapidly varying zone 안에 위치하면 설계빈도를 적정히 조절하여 I~III 과정을 반복하여 수행한다.

수치 모의는 본 연구에서 수행한 결정론적 설계에서 피복석 규모가 상당한 크기로 상향 조정될 필요가 있는 것으로 나타난 용기포항과 부산 북항을 대상으로 수행하였다. 용기포항의 경우 설계 파랑의 빈도를 백 년으로 상향 조정하는 경우 파괴확률은 Gradually Varying Zone 언저리에 위치하는 것으로 확인되었다. 이는 항 외곽시설을 100년 빈도의 파랑 사상에 대해 설계하는 경우 기후변화로 거칠어진 해양환경에서도 충분한 내구성을 담보할 수 있다는 것을 함의한다. 이에 비해 부산 북항의 경우 설계 파랑의 빈도를 백 년으로 상향 조정하는 경우 파괴확률이 Gradually Varying Zone의 임계치를 훨씬 상회하였다. 이는 피복석 크기를 Gradually Varying Zone 임계치 이상으로 조정하더라도 얻을 수 있는 항 외곽시설의 강건도 증가는 제한적이라는 것을 상기하면 과다설계로 보인다. 이상의 논의를 종합하면 공칭직경에 따른 파괴확률 변화율은 설계빈도 조정으로 항 외곽시설이 얼마나 강건해지고 취약해지는지를 판단할 수 있는 정량적 지표로 기능할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Cavanie, A., Arhan, M. and Ezraty, R. (1976). "A statistical relationship between individual heights and periods of storm waves." *Proc. Conf. on Behaviour of Offshore Structures*, Vol. 2, pp. 354-360.
- Cho, Y.J. and Song, T.K. (2022). "The effects of sea-level rise and harsh wave conditions due to climate change on the run-up height and overtopping over the coastal defense system: a numerical study." *J. Mar. Sci. Eng.* (submitted).
- Cho, Y.J. (2020). "Numerical analysis of the changes in sea wave conditions by the presence of LCB [Low Crested Breaker]: centered on rip current formed at the open Inlet between LCB." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 181-193.
- Cho, Y.J. (2021a). "Level III reliability design of an armor block of rubble mound breakwater using probabilistic model of wave height optimized for the Korean sea wave conditions and non-Gaussian wave slope distribution." *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021. 9. 223p.
- Cho, Y.J. (2021b). "Deformation of wave slope Distribution due to the presence of infra-gravity waves and its effect on the shoreline motion." *Journal of Physical Oceanography*. (submitted).
- Cho, Y.J. (2021c). "Numerical analysis of modified seabed topography due to the presence of breakwaters of varying reflection characteristics using physics-based morphology model [SeoulFoam]." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 168-178.
- Cho, Y.J. (2021d). "Development of physics-based morphology model with an emphasis on the interaction of incoming waves with transient bed profile due to scouring and accretion using dynamic mesh." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8 No. 4, pp. 211-219.
- Cho, Y.J. (2021e). "Proposal on hybrid design method of outer port facilities using failure probability." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 4, pp. 237-253.
- Cho, Y.J. 2021f. "On the effects of non-Gaussian wave-slope distribution on the failure probability of an armour block of rubble mound breakwater." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 3, pp. 165-179.
- Cho, Y.J. (2021g). "Numerical analysis of modified bed-profiles due to the presence of a rubble mound breakwater using physics-based morphology model [SeoulFoam]." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 8, No. 3, pp. 151-163.
- Cho, Y.J. and Kim, I.H. 2019. "Preliminary study on the development of platform for the selection of an optimal beach stabilization measures against the beach erosion-centering on the yearly sediment budget of the Mang-Bang beach." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 28-39.
- Cho, Y.J., Kim, I.H., Cho, Y.J. 2019. Numerical analysis of the grand circulation process of Mang-Bang beach- centered on the shoreline change from 2017. 4. 26 to 2018. 4. 20, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 31(3), 101-114.
- Choi, J.H., Lee, O.J., Jang, S.H., Jo, D.J. and Kim, S.D. (2018). "Effect of sea surface temperature on maximizing Typhoon rainfall depth." *J. Korean Soc. Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 443-452.
- Choi, S.H. and Cho, Y.J. (2019). "Development of a probabilistic model for the estimation of yearly workable wave condition period for offshore operations-centering on the sea off the Ulsan harbor." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 3, pp. 115-128.
- Cox, C. and Munk, W. (1954a). "Statistics of the sea surface derived from sun glitter." *J. Mar. Res.*, Vol. 13, pp. 198-227.
- Cox, C. and Munk, W. (1954b). "Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the Sun's glitter." *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 44, pp. 838-850.

- Cox, C. and Munk, W. (1956). "Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter, bulletin of the scripps institution of oceanography." In: C. E. ZoBell, R. A. Arthur, and D. L. Fox, (eds.), University of California Press, Vol. 6, No. 9, pp. 401-488.
- Forristall, G.Z. (2008). "How should we combine long and short term wave height distributions?" *Proceedings of OMAE08 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal.
- Hasselmann, K. (1967). "A criterion for nonlinear wave stability." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 30, No. 4, pp. 737-739.
- Jeong, W.M., Oh, S.H., Ryu, K.H., Back, J.D. and Choi, I.H. (2018). "Establishment of wave information network of Korea (WINK)." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 30, No. 6, pp. 326~336.
- Kim, I.H. and Cho, Y.J. (2021). "Transmission characteristics of Low crested breakwaters (LCB) with an emphasis on Korean marine environments." In: Lee, J.L., Suh, K.S., Lee, B., Shin, S., and Lee, J. (eds.), Crisis and integrated management for coastal and marine safety, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 114, 494-498. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Korean Ministry of Ocean and Fisheries, 2007. The study on marine and fishery sector-integrated climate change response plan.
- Korean Ministry of Ocean and Fisheries, 2020. Port design guideline.
- Lee, J.L., and Cho, Y.J. (2021). "Numerical analysis of sediment transport rates from rip currents at an open inlet between Low Crested Breakwaters (LCB): The role of infra-gravity waves." In: Lee, J.L., Suh, K.S., Lee, B., Shin, S., and Lee, J. (Eds.), Crisis and integrated management for coastal and marine safety, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 114, 489-493. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
- Park, S.H., Choi, J.G. and Cho, Y.J. (2021). "Development of a probability model for the transmission coefficient of Low Crested Breakwaters (LCB)." In: Lee, J.L., Suh, K.S., Lee, B., Shin, S., and Lee, J.(eds.), Crisis and Integrated Management for Coastal and Marine Safety, Journal of Coastal Research, Special Issue No. 114, 484-488. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208
- Park, S.H. and Cho, Y.J. (2019). "Joint distribution of wave crest and its associated period in nonlinear random waves." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 5, pp. 278~293.
- Phillips, O. M. (1980). *The dynamics of the upper ocean*. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- SPM, 1984. *Shore protection manual*. 4th Edition, US Army Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Suh, K.D., Yang, Y.C., Jun, K.C. and Lee, D.Y. (2009). "Coastal waters around Korean Peninsula using empirical simulation technique." *Journal of Korean society of coastal and ocean Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 254-265.
- Thompson, D.M. and Shuttler, R.M. (1975). "Riprap design for wind-wave attack-a laboratory study in random waves." Report EX 707 Hydraulics Research, Wallingford.
- Van der Meer, J.W. 1988. "Deterministic and probabilistic design of break water armour layers." *Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Jnl Waterways Ports, Coastal and Ocean Eng. Div.*, No. 1, 114p.