

테트라포드로 피복된 케이슨에 작용하는 수평파압 산정방법 Estimation of Horizontal Wave Pressure on the Caisson Protected by Tetrapods

오상호* · 이주연** · 오정은***
Sang-Ho Oh*, Jooyeon Lee** and Jung-Eun Oh***

요지 : 2차원 조파수조에서 테트라포드로 피복된 수평혼성체에 작용하는 수평파압을 계측하는 수리실험을 수행하였다. 실험은 케이슨 높이, 수심, 사석 마운드 높이 등이 서로 다른 케이슨 모형에 대하여 테트라포드 소파공의 피복률을 다양하게 변경하여 파고 및 주기 조건이 서로 다른 20개의 규칙파를 이용하여 수행되었다. 실험 결과 테트라포드가 케이슨 마루높이까지 완전히 피복되지 않을 경우 케이슨 노출부에 작용하는 파압은 테트라포드가 설치되지 않은 일반 직립벽에 작용하는 파압에 비해 확연히 증가하는 경향을 나타내었다. 현재 설계 기준에는 이러한 경우의 파압을 산정할 수 있는 방법이 없기 때문에 Lee and Oh(2025)에 제시된 피복률(C_R)의 정의를 바탕으로 수평파압을 산정할 수 있는 파압보정계수를 제시하였으며, 이 방법은 케이슨 전면이 테트라포드로 완전 피복되거나 부분 피복된 경우에 대한 파압 산정 시 모두 적용 가능하다.

핵심용어 : 수평혼성체, 파압, 피복률, 테트라포드, 파압보정계수

Abstract : Physical experiments were performed in a two-dimensional wave flume to measure the horizontal wave pressure acting on a caisson protected by Tetrapods. The experiments were conducted using 20 regular waves with varying wave heights and periods. The coverage ratio of Tetrapods placed in front of the caisson was adjusted under different conditions of caisson height, water depth, and rubble mound height. The results indicate that when Tetrapods do not fully cover up to the crest level of the caisson, the wave pressure on the unprotected section of the caisson increased significantly compared to the pressure on an upright vertical wall without Tetrapods. Since the current design standard do not provide a method for estimating wave pressure on this type of structure, a pressure adjustment factor is proposed based on the concept of the coverage ratio (C_R) defined by Lee and Oh (2025). The proposed method can be applied for estimating horizontal wave pressure on the caisson when it is fully or partially covered with Tetrapods.

Keywords : horizontally composite breakwater, wave pressure, coverage ratio, Tetrapods, pressure adjustment factor

1. 서 론

파랑 조건에 따른 케이슨 방파제의 파압 산정은 해안 및 항만 구조물의 설계에 있어 핵심적인 요소로, 구조물의 안정성과 경제성을 결정짓는 중요한 요인이다. 특히 수평혼성체(horizontally composite breakwater)는 전통적인 직립식 케이슨 방파제의 변형된 구조 형식으로, 케이슨 전면에 소파블록을 설치하여 파랑에너지를 감소시키고 구조물의 안정성을 높이는 형태이다. 이러한 구조는 통상적인 케이슨 방파제에 비해 서 반사와 저감, 파압 감소, 충격파압(impulsive wave pressure)

방지 등의 효과를 거둘 수 있는 것으로 알려져 있다.

케이슨 앞에 아무것도 피복되지 않은 일반적인 혼성체의 경우 Goda(1974)가 제안한 파압 공식이 널리 적용되고 있다. Goda 공식은 쇄파 및 비쇄파 조건 모두에 적용 가능한 단일 공식으로, 다양한 현장 조건에서 그 신뢰성이 입증되었다(Goda, 2010). 그러나 케이슨 전면에 소파블록 등을 설치하여 파압 저감 효과를 기대하는 수평혼성체에 작용하는 파압 산정에 관해서는 아직까지 연구가 많지 않고 보편적으로 통용되는 방법론이 충분히 확립되지 않은 실정이다.

케이슨 전면이 소파블록으로 완전히 피복될 경우 케이슨에

*국립창원대학교 스마트그린공학부 건설시스템공학전공 부교수(Corresponding author: Sang-Ho Oh, Associate Professor, Department of Civil Engineering, School of Smart and Green Technology, Changwon National University, Changwon 51140 Korea, Tel: +82-55-213-3779, coast.oh@gmail.com)

**한국해양과학기술원 해양공간개발·에너지연구부 연구원(Researcher, Ocean Space Development & Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

***국립부경대학교 지속가능공학부 토목공학전공 강사(Lecturer, Department of Civil Engineering, School of Sustainable Engineering, Pukyong National University)

작용하는 수평파압은 Goda의 파압식에 파압저감계수를 적용하여 산정하는 방법이 제안된 바 있다(Takahashi et al., 1990).

$$\lambda = \begin{cases} 1.0 & (H/h \leq 0.3) \\ 1.2 - 2(H/h)/3 & (0.3 < H/h \leq 0.6) \\ 0.8 & (H/h > 0.6) \end{cases} \quad (1)$$

여기에서 λ 의 값은 파고(H)와 수심(h)의 비율에 따라 달라지며 0.8부터 1.0 사이에서 변하게 된다. 이 식은 국내 항만 및 어항 설계기준에도 수록되어 있으나 파압저감계수가 수심과 파고의 비율에 따라서만 비교적 단순하게 결정되며, 소파블록이 마루높이까지 피복되지 않는 조건에 대해서는 적용하기 어렵다는 한계점이 존재한다.

수평혼성제 설계 시에는 소파블록을 케이슨 마루높이까지 충분히 피복해야 하며, 시공 이후의 소파블록 다짐에 따른 침하를 고려하여 케이슨 마루높이보다 오히려 약간 더 높게 설치하는 것이 바람직하다. 그러나, 현장 여건에 따라서는 소파블록이 케이슨 마루높이까지 완전히 피복되지 않는 경우가 발생하게 된다. 예를 들어, 방파제 건설이 진행 중인 상황에서 소파블록 일부만 피복된 상태에서 큰 파랑 하중을 받게 되거나 반복적인 파랑 작용에 의해 소파공의 침하가 발생할 수 있다(Takahashi et al., 2000a, 2000b). 이러한 경우 소파공으로 피복되지 않은 노출부에 작용하는 수평파압은 충격파의 성격을 가지게 되므로 Goda 파압의 크기를 훨씬 상회하게 되며 구조물 파손을 유발할 수 있다.

실제로 일본의 무츠-오가와라 항에 설치된 케이슨 방파제는 폭풍으로 인해 케이슨 앞에 설치된 블록이 흩어진 이후 케이슨 노출부에 충격파 하중이 가해져 심하게 손상된 바 있다(Hitachi, 1994; Alsop et al., 1996). 또한, Takayama et al. (2008)은 소파블록 침하 시 케이슨에 작용하는 파압이 Goda 파압을 상회함을 실험실 실험을 통해 보고하였다. Mase et al. (2013)도 비슷한 연구를 통해 케이슨 전면의 침하된 소파블록을 보수하여 소파공 높이를 회복시켰을 때 케이슨의 슬라이딩 거리가 감소함을 입증하였다. 보다 최근에는 Oh et al. (2019)이 소파공 피복률을 변화시키면서 실험을 수행하여 소

파블록 피복률이 감소함에 따라 케이슨 작용 파압이 크게 증가함을 보였다. 특히, 케이슨이 완전하게 피복되지 못할 경우 노출된 부분에 작용하는 파압이 Goda 파압의 1.5~2배까지 증가할 수 있다는 결과를 제시하였다.

이러한 점을 고려할 때 소파블록 피복 정도와 배치에 따라 케이슨에 작용하는 파압 분포가 크게 달라질 수 있다. 따라서, 현재 설계 시 적용되고 있는 식(1)의 방법은 한계점을 가지고 있으며, 소파블록 피복 범위 및 파랑 조건 등을 종합적으로 고려한 파압 산정 방법을 개발하고 실용적인 설계 지침을 개발할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 서로 다른 케이슨 단면 형상에 대해 소파블록 피복 조건을 다양하게 변화시키면서 수행된 수리실험 자료를 분석하여 피복률에 따른 파압 분포의 변화 특성을 규명하였다. 그리고 이를 바탕으로 소파블록으로 피복된 케이슨에 작용하는 수평파압 산정 공식을 제안하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험 시설 및 모형

수리실험은 한국해양과학기술원 수리실험동의 길이 50 m, 높이 1.6 m, 폭 1.2 m인 2차원 조파수조에서 수행되었다(Oh and Lee, 2018). 케이슨 모형은 길이 0.45 m, 폭 0.5 m, 높이 0.6 m인 투명 아크릴로 제작하여 조파기로부터 28 m 떨어진 지점에 케이슨 실험모형을 설치하였다. 케이슨 모형의 폭이 0.5 m로 수조의 폭 1.2 m에 비해 작기 때문에 모형 뒤쪽으로는 실험모형과 길이와 높이는 같고 폭만 0.35 m로 다른 두 개의 유사 모형(dummy)을 설치하였다. 유사 모형도 투명 아크릴로 제작되었으며 별도의 계측 장비는 부착되지 않았다.

Fig. 1에 보인 것처럼 11대의 파고계를 사용하여 입사파 및 반사파를 계측하였다. 파고계 E01~E05 및 E06~E10은 각각 조파기 수심과 모형이 설치된 수심에서의 파랑을 계측하기 위한 용도로 사용되었으며, 구조물 바로 앞에 설치된 파고계 E11은 케이슨 전면 수위를 계측하기 위한 용도로 사용되었

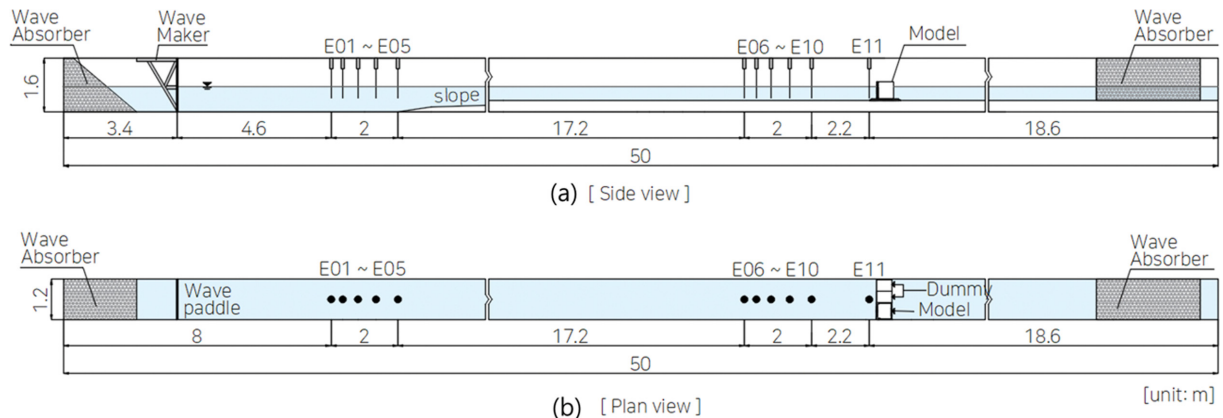


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup in the wave flume. (a) side view, (b) plan view.

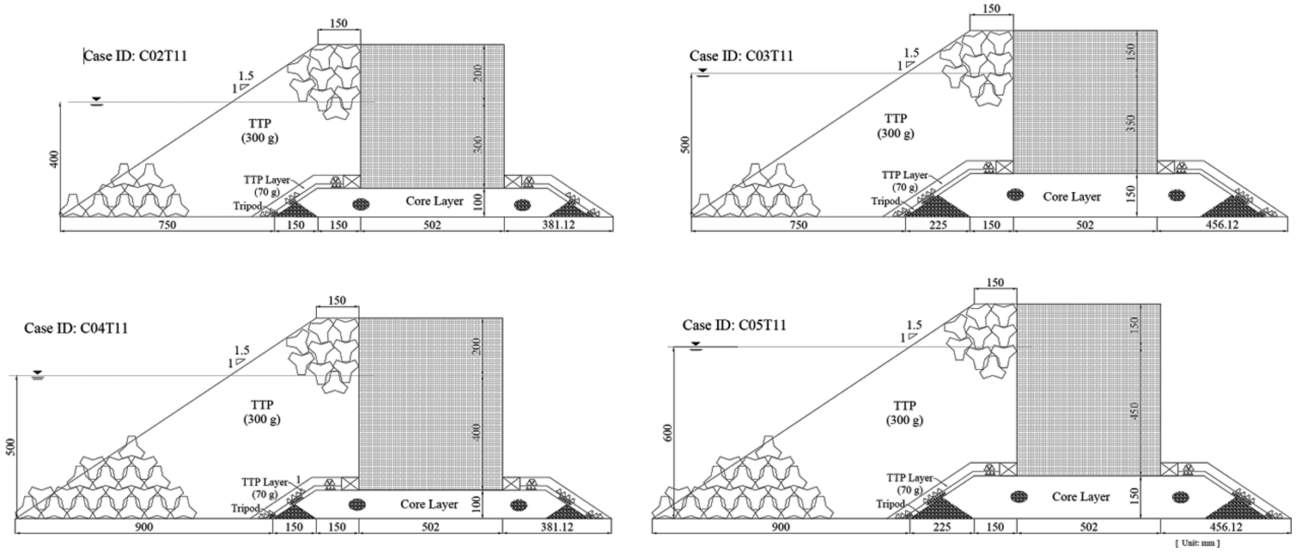


Fig. 4. Cross-sectional view of the four different caisson models used in the experiment when the front wall of the caisson was fully covered with Tetrapods.

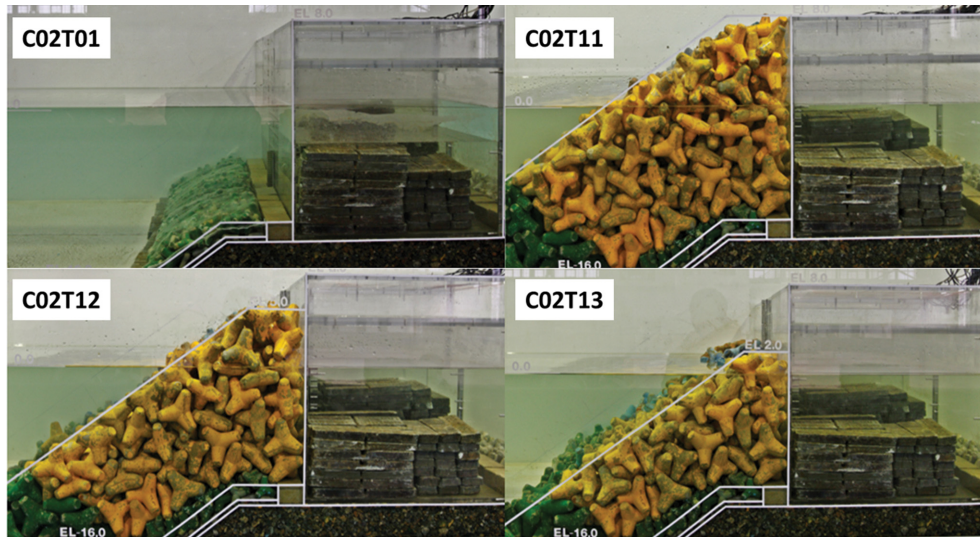


Fig. 5. Photographs of four different conditions where the front wall of the caisson model was covered with Tetrapods.

Table 3. Parameter ranges of the test waves used in the experiment

h (m)	T (s)	H (m)	s	ξ
0.4	1.5~2.5	0.10~0.26	0.02~0.10	2.13~4.59
0.5	1.5~2.5	0.14~0.30	0.03~0.11	2.05~4.08
0.6	1.5~2.5	0.18~0.38	0.03~0.13	1.87~3.74

가지 경우의 모형 설치 사진을 나타내었다.

주기(T)와 파고(H)가 서로 다른 20개의 규칙파를 60초간 조파하여 계측이 이루어졌다. 실험파 주기는 1.5~2.5 s 범위에서 0.25 s 간격으로 설정되었으며, 쇄파 및 비쇄파 조건이 모두 포함될 수 있도록 각 주기별로 4개의 서로 다른 파고를 조파하였다. Table 3에는 실험파 주기 및 파고와 함께 파형 경사(s)와 쇄파지수(surf-similarity parameter, ξ)의 범위도 함께 제시하였다. 쇄파지수는 $\xi = \tan\alpha / \sqrt{H/L}$ 로 정의된다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 수평파압의 연직 분포

파압계 계측 결과로부터 케이슨 전면벽에 작용하는 지점별 최대 수평파압의 연직분포를 파악할 수 있다. Fig. 6에는 C03 실험 단면에서 테트라포드 피복 조건이 서로 다른 경우 동일한 실험파($T = 1.5$ s, $H = 0.26$ m)를 조파했을 때 최대 수평파압 분포 예시를 나타내었다. 케이슨 전면 테트라포드가 설치되지 않은 경우(T01)에는 대체로 Goda 공식과 유사한 형태의 수평파압 연직분포가 관찰되었다. 한편 케이슨 마루높이까지 테트라포드로 완전 피복되는 경우(T11)에도 Goda 공식에 식(1)에 의한 파압저감계수 λ 를 곱한 Takahashi 공식에 상응하는 분포가 나타났다. 계측된 파압의 전반적인 분포 형태는 Takahashi 공식과 유사하지만 최대파압 값은 공식에

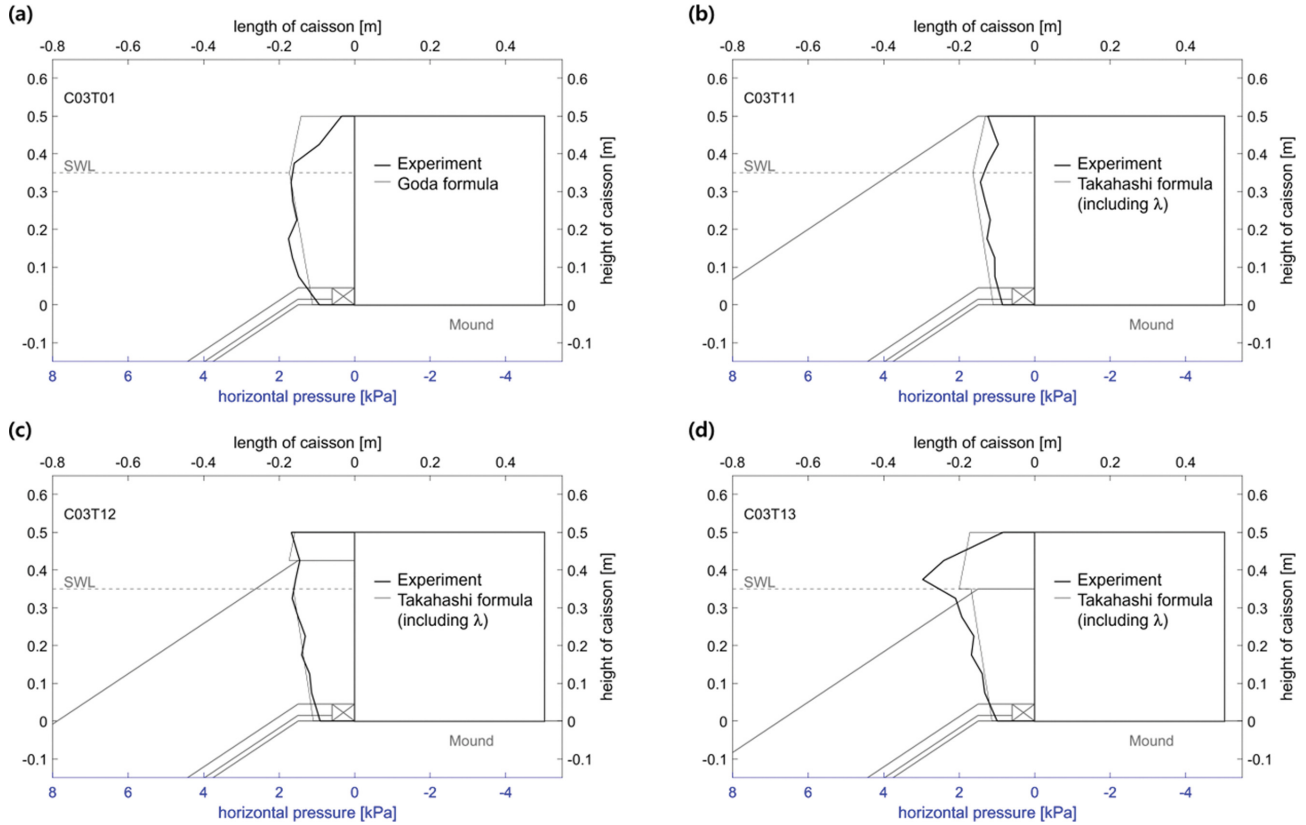


Fig. 6. Comparison of the maximum horizontal pressure with Goda's or Takahashi's formulae for the four different covering conditions with Tetrapods ($T = 1.5$ s, $H = 0.26$ m).

비해 근소하게 작았다. 주목할 점은 테트라포드 피복의 효과로 전체적으로 수평파압이 감소하였지만 케이슨 최상단부 근처의 파압은 오히려 더 커졌다는 것이다.

한편, 케이슨 상단 15%가 피복되지 않고 노출된 경우 (T12)에도 Takahashi 공식을 따르는 파압 분포가 예측되었다. 다만 완전피복 조건에 비해서는 케이슨 전면에 작용하는 파압의 크기가 증가했음을 알 수 있다. 마지막으로 케이슨 상단 30%가 피복되지 않고 노출된 경우(T13)의 수평파압은 Takahashi 공식에 비해 확연히 컸다. 특히, 정수면 부근에서는 공식에 비해 20~30% 정도 큰 파압 예측 결과가 얻어졌다. 이렇게 큰 파압이 나타나게 되는 것은 케이슨 전면에 설치된 테트라포드 피복층의 두께가 충분히 두껍지 않기 때문에 오히려 피복층 사면에서 쇄파 발생을 유도하게 되어 충격파성 파압이 케이슨 전면벽에 작용하기 때문인 것으로 추정된다. 실험 단면 및 실험과 조건에 따라서는 테트라포드 부분 피복 시 이와 같은 강한 파압이 나타나지 않는 경우도 존재하였으나, 완전 피복 조건에 비해서는 전반적으로 파압이 증가하는 경향은 공통적으로 관측되었다.

3.2 피복률의 정의

케이슨 전면부에 설치되는 테트라포드 피복 정도에 따라 수평파압 분포가 큰 차이를 보이기 때문에 피복률에 따른 수평파압 분포의 특성을 분석하고 이를 바탕으로 경험 공식을 개

Table 4. Values of the coverage ratio (C_R) depending on the caisson models and the coverage conditions

Case ID	T11	T12	T13
C02	1.0	0.625	0.25
C03	1.0	0.5	0
C04	1.0	0.625	0.25
C05	1.0	0.5	0

발할 필요가 있다. 이를 위해서는 피복률에 대한 정의가 필요한데, 본 연구에서는 사석마운드 위 소파블록으로 피복된 수평혼성제에 작용하는 수평파압 산정에 관한 연구인 Lee and Oh(2025)와 동일하게 정수면으로부터 소파공 상단까지의 연직거리(A_c)를 여유고(R_c)로 나눈 비율을 피복률로 정의하였다.

$$C_R = A_c/R_c \quad (2)$$

식(2)와 같이 피복률을 정의하게 되면 소파공 상단 높이가 정수면과 일치할 때 $C_R = 0$ 이 되며, 소파공 상단 높이가 케이슨 마루높이와 동일할 때 $C_R = 1$ 이 된다. Table 4에는 각각의 케이슨 모델 단면에 대하여 소파블록으로 피복된 조건(T11~T13)에 따른 피복률의 값을 정리하여 나타내었다.

3.3 수평파압 분포의 매개변수화

Lee and Oh(2025)의 분석 방법과 동일하게 케이슨 바닥으로부터 임의의 높이까지의 연직거리(h_p)를 케이슨 전체 높이

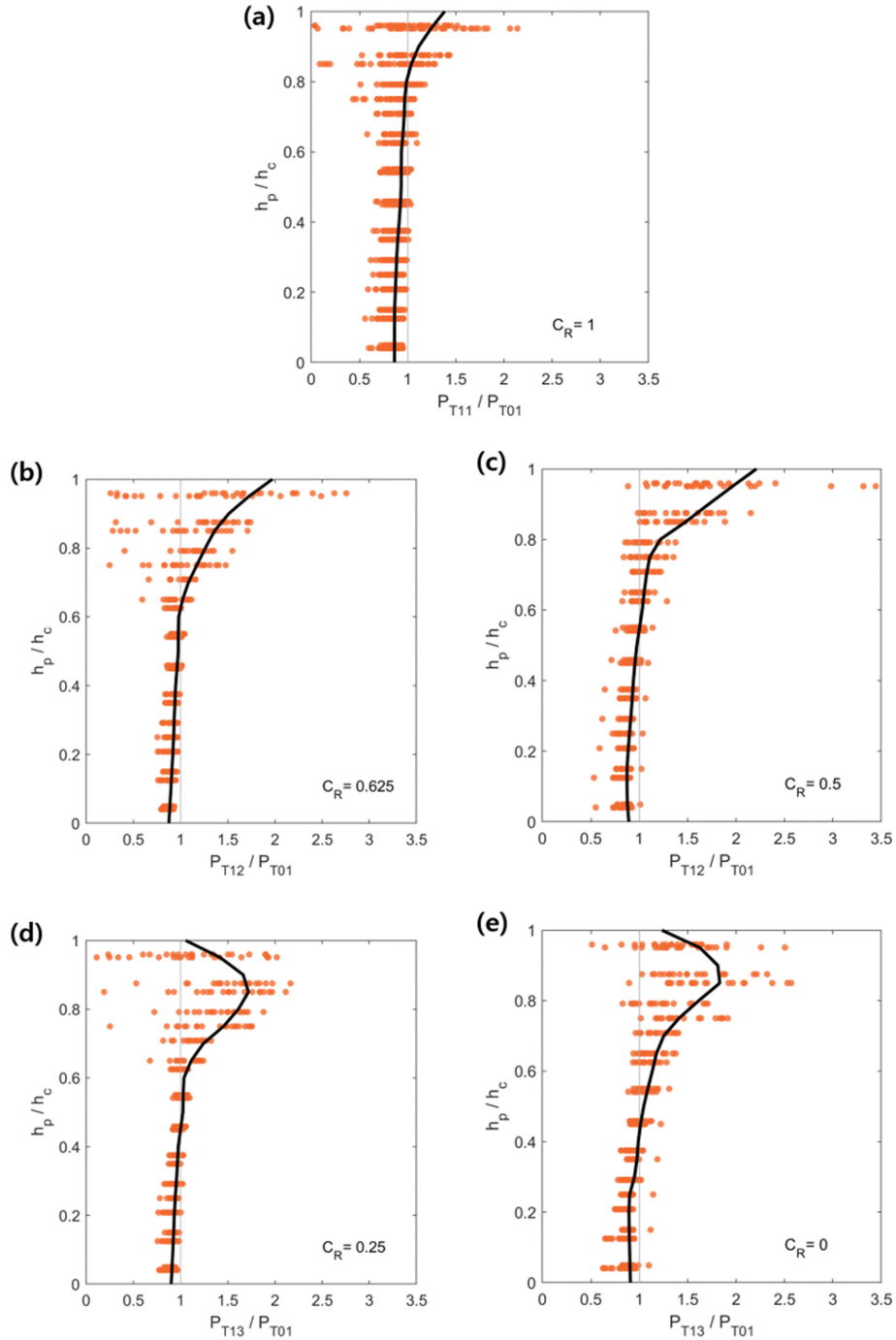


Fig. 7. Non-dimensionalized horizontal wave pressures for different coverage ratios. (a) $C_R = 1.0$, (b) $C_R = 0.625$, (c) $C_R = 0.50$, (d) $C_R = 0.25$, and (e) $C_R = 0$.

(h_c)로 나누어 무차원화한 변수인 h_p/h_c 에 따라 서로 다른 실험단면 조건에서 작용하는 최대 수평파압의 상대적인 크기를 서로 비교하였다. 이러한 분석을 위해 케이스 전면이 피복된 조건(T11, T12, 및 T13)에서 계측된 값을 피복이 이루어지지 않은 조건(T01)에서의 값으로 나누어 무차원화하였다. 모든 실험 자료에 대해 이와 같은 무차원 분석을 수행하고 피복률 조건에 따라 분류한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기에서 주황색 점은 계측된 파압을 나타내며, 검은색 실선은 각 높이 별 무차원 파압의 평균값(μ)에 표준편차(σ)의 절반을 더한 값

을 의미한다. 이는 통계적으로는 파압 계측 데이터 중 상위 33%에 해당하는 값으로, 파압 평균값을 사용하는 것에 비해 파압을 더 보수적으로 평가하는 것이다.

케이스 전면이 완전히 피복된 경우에는 Fig. 7(a)에 보인 것처럼 h_p/h_c 의 값이 대략 0.8 이하인 구간에서는 검은색 실선으로 나타낸 값이 1보다 작았다. 이는 케이스 마루높이까지 테트라포드로 완전 피복되면 케이스 최상단부 구간을 제외하고는 케이스만 있을 경우에 비해 파압이 감소하게 됨을 의미한다. Fig. 7(b)~(e)에는 케이스 전면이 부분적으로 피복된 경

우의 무차원 파압 분포도를 제시하였고, 검은색 실선의 값이 1보다 큰 구간이 더 케이슨 아래쪽으로 확대됨을 확인할 수 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 케이슨 마루높이까지 테트라포드가 완전 피복되지 않았기 때문에 파압을 직접 받게 되는 케이슨 노출부에 충격파 성격의 파압이 작용했기 때문이다. 파압의 침투값은 $C_R = 0.625$ 및 $C_R = 0.5$ 인 조건에서는 케이슨 최상단부에서 나타났으며(Fig. 7(b)~(c)), $C_R = 0.25$ 및 $C_R = 0$ 인 조건에서는 케이슨 최상단보다 약간 아래 위치인 $h_p/h_c = 0.85$ 부근에서 나타났(Fig. 7(d)~(e)). 한편, 케이슨 바닥 근처에 작용하는 수평파압은 피복률의 차이에 따

라서 크게 달라지지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 부분 피복 조건에서 C_R 이 1에 가까운 경우에는 피복되지 않은 노출부 연직 길이가 비교적 작기 때문에 소파공 사면에서 쇄파된 파랑이 노출부에 전체적으로 작용하게 되면서 파압 침투값이 케이슨 최상단에서 나타나게 된다. 그런데 C_R 이 0에 가까운 경우에는 노출부 연직 길이가 상대적으로 더 크기 때문에 소파공 사면에서 쇄파된 파랑이 노출부 하단에 더 집중적으로 작용하므로 케이슨 최상단보다 조금 더 아래쪽인 $h_p/h_c = 0.85$ 부근에서 파압 침투값이 나타나게 된다.

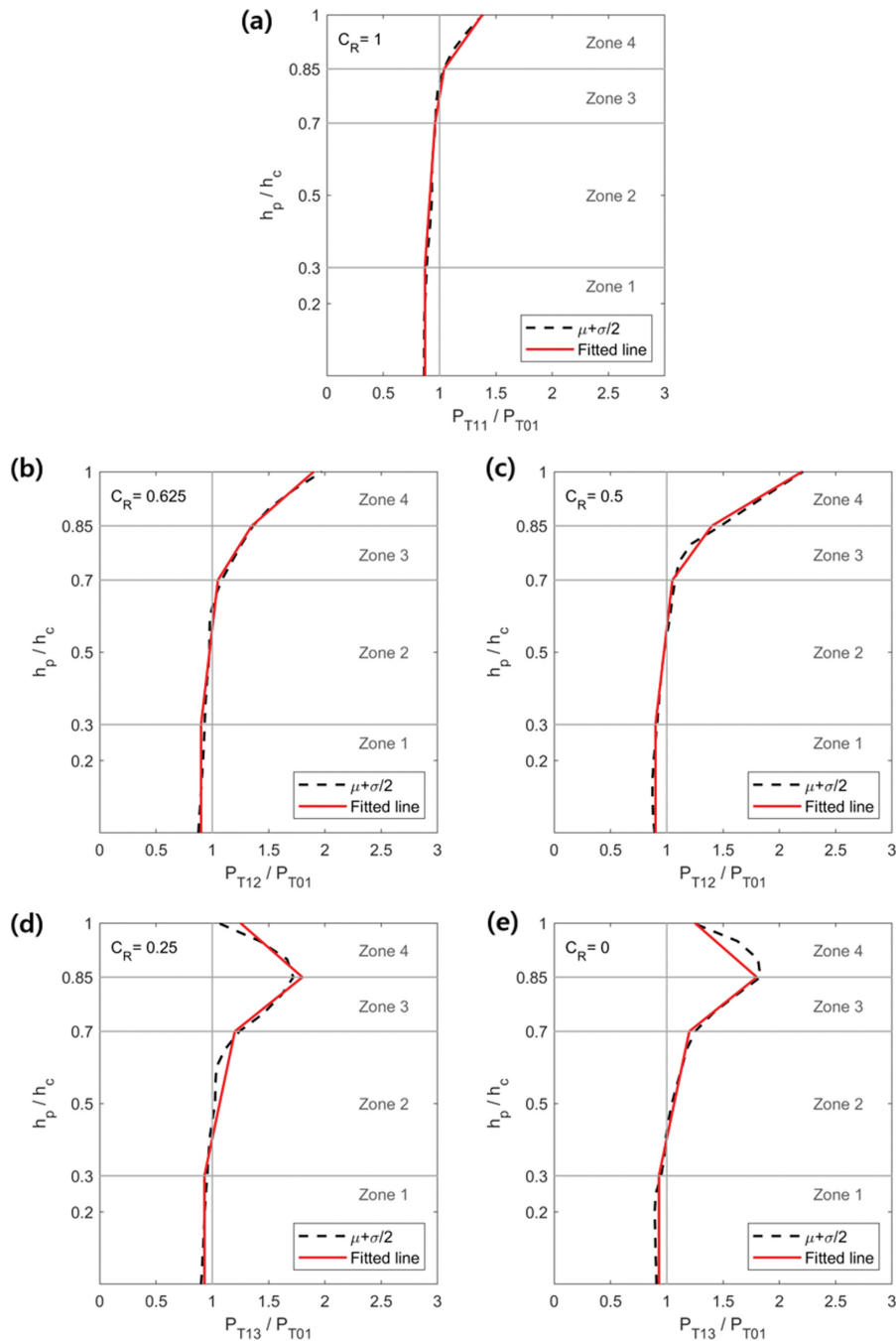


Fig. 8. Separation of ranges of the wave pressure distribution for parameterization depending on different coverage ratios. (a) $C_R = 1.0$, (b) $C_R = 0.625$, (c) $C_R = 0.50$, (d) $C_R = 0.25$, (e) $C_R = 0.0$.

Fig. 8(a)~(e)에는 Fig. 7(a)~(e)에서의 검은색 실선을 점선으로 표시하였다. 그리고, 이 점선을 4개의 구간으로 구분하여 선형적으로 근사화한 회귀선(fitted lines)을 빨간색 실선으로 함께 나타내었다. 여기에서 4개의 구간(zone)은 Lee and Oh(2025)와 마찬가지로 h_p/h_c 값을 기준으로 정하였으며, $0 < h_p/h_c \leq 0.3$ 구간을 Zone 1, $0.3 < h_p/h_c \leq 0.7$ 구간을 Zone 2, $0.7 < h_p/h_c \leq 0.85$ 구간을 Zone 3, $0.85 < h_p/h_c \leq 1.0$ 구간을 Zone 4로 정의하였다. Fig. 8에 보인 선형 회귀선을 식 (3)~(6)에 제시하였으며, 이는 케이스 전면에 작용하는 무차원 파압(p/p_{T01})을 C_R 및 h_p/h_c 의 값에 따라 나타낼 수 있음을 의미한다.

$$\frac{p}{p_{T01}} = \begin{cases} 0.87 & 0 < h_p/h_c \leq 0.3 \\ 1.01 - 0.2\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.3 < h_p/h_c \leq 0.7 \\ 1.15 - 0.67\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.7 < h_p/h_c \leq 0.85 \\ 1.35 - 2\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.85 < h_p/h_c \leq 1.0 \end{cases}$$

when $C_R = 1.0$ (3)

$$\frac{p}{p_{T01}} = \begin{cases} 0.90 & 0 < h_p/h_c \leq 0.3 \\ 1.16 - 0.38\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.3 < h_p/h_c \leq 0.7 \\ 1.65 - 2\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.7 < h_p/h_c \leq 0.85 \\ 1.90 - 3.67\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.85 < h_p/h_c \leq 1.0 \end{cases}$$

when $C_R = 0.625$ (4)

$$\frac{p}{p_{T01}} = \begin{cases} 0.90 & 0 < h_p/h_c \leq 0.3 \\ 1.16 - 0.38\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.3 < h_p/h_c \leq 0.7 \\ 1.75 - 2.33\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.7 < h_p/h_c \leq 0.85 \\ 2.20 - 5.33\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.85 < h_p/h_c \leq 1.0 \end{cases}$$

when $C_R = 0.5$ (5)

$$\frac{p}{p_{T01}} = \begin{cases} 0.93 & 0 < h_p/h_c \leq 0.3 \\ 1.40 - 0.67\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.3 < h_p/h_c \leq 0.7 \\ 2.4 - 4.00\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.7 < h_p/h_c \leq 0.85 \\ 1.25 + 3.67\left(1 - \frac{h_p}{h_c}\right) & 0.85 < h_p/h_c \leq 1.0 \end{cases}$$

when $C_R = 0$ and $C_R = 0.25$ (6)

3.4 수평파압 보정계수 도출

Table 5에는 식(3)~(6)으로부터 Zone 1부터 Zone 4까지 4개의 구간 각각에 대해 무차원 파압의 평균값을 계산하여 나타내었다. Zone 1에서 Zone 4로 갈수록(h_p/h_c 가 증가할수록) 무차원 파압 값도 증가하며, 이러한 경향은 피복률(C_R)이 작을수록 더 뚜렷하게 나타난다. 무차원 파압은 케이스 전면이 피복된 경우의 파압(p)을 피복이 이루어지지 않은 조건의 파압(p_{T01})으로 나눈 비율을 의미하고, 후자의 경우 Goda 파압식에 대응된다. 따라서, 무차원 파압 값은 사석마운드 위 소파블록으로 피복되는 수평혼성제의 수평파압 보정계수로 정의할 수 있으며, 이를 λ_c 의 기호로 표현하였다.

Fig. 9에는 Table 5에 제시된 피복률(C_R)에 따른 구간별 무차원 파압의 평균값, 즉 파압 보정계수(λ_c) 값들을 그래프로 나타내었다. 또한, Zone 1부터 Zone 4까지 각 구간별로 λ_c 의 데이터를 바탕으로 각 구간별로 λ_c 의 경향을 보여주는 선형 근사화 결과를 실선으로 함께 나타내었다. 그리고 실선으로 나타난 4개의 선형 근사식을 식(7)에 수식으로 제시하였다. 식(7)은 본 실험을 통해 도출된 최종 결과에 해당하며, 이 식을 이용하여 소파블록으로 피복되는 수평혼성제에 작용하는 파압을 산정하는 파압보정계수(λ_c)의 값을 피복률(C_R) 0부터 1 사이의 범위에 대해 계산할 수 있다.

Table 5. Average values of the normalized horizontal wave pressures calculated from the fitted lines from Zone 1 to 4 for different coverage ratios

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
1.0	0.87	0.91	1.00	1.20
0.625	0.90	0.98	1.20	1.63
0.50	0.90	0.98	1.23	1.80
0.25	0.93	1.07	1.50	1.53
0	0.93	1.07	1.50	1.53

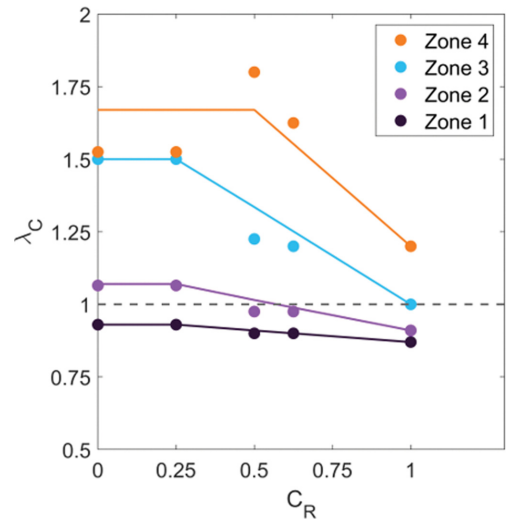


Fig. 9. The mean values of λ_c from Zone 1 to 4 and the corresponding fitted lines for the different coverage ratios.

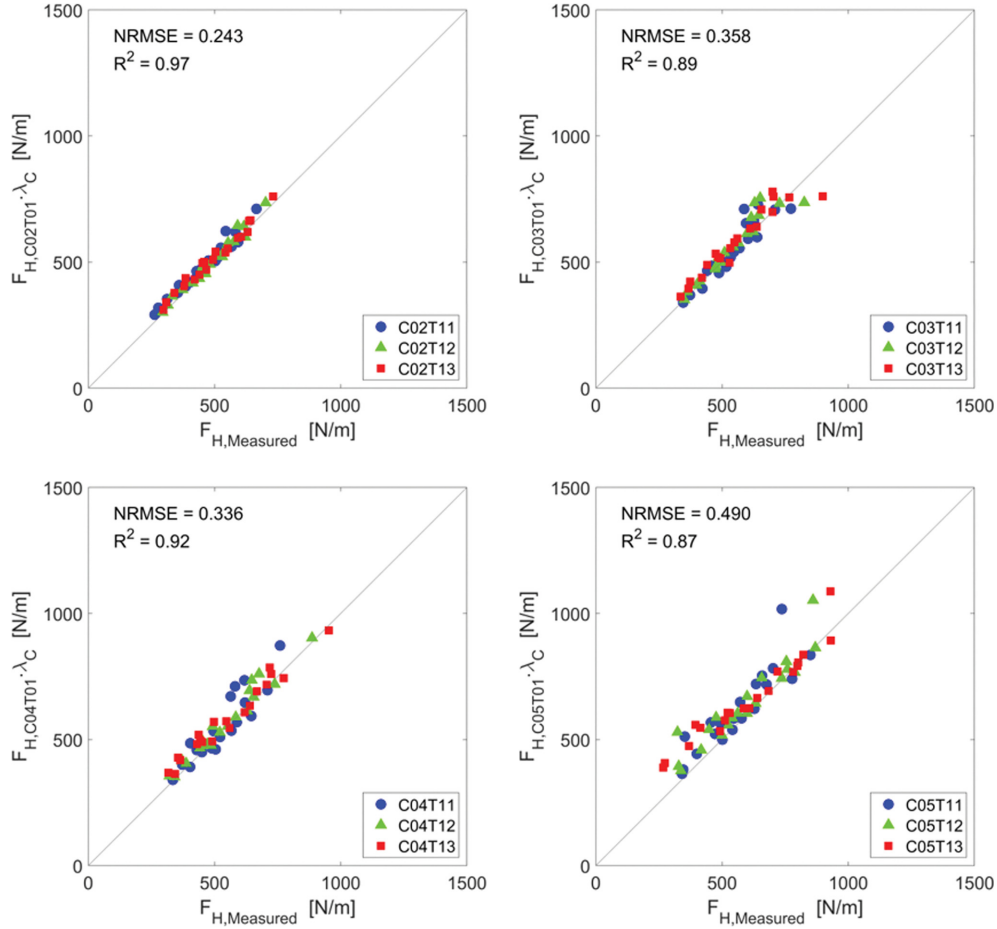


Fig. 10. Comparison of horizontal wave forces calculated from the experiment with the estimates by Equation (7).

$$\lambda_C = \begin{cases} \min\{0.93, 0.95 - 0.08C_R\} & 0 < h_p/h_c \leq 0.3 \\ \min\{1.07, 1.12 - 0.21C_R\} & 0.3 < h_p/h_c \leq 0.7 \\ \min\{1.50, 1.67 - 0.67C_R\} & 0.7 < h_p/h_c \leq 0.85 \\ \min\{1.67, 2.14 - 0.94C_R\} & 0.85 < h_p/h_c \leq 1.0 \end{cases}$$

for $0 \leq C_R \leq 1$ (7)

Fig. 10에는 식(7)을 사용하여 계산된 수평파력과 실험을 통해 예측된 값을 비교한 결과이다. 즉, 네 가지 실험 단면(C02~C05)에 대해서 케이슨 전면 테트라포드가 설치된 경우(T11~T13)의 실험 값에 대해서 테트라포드가 설치되지 않은 경우(T01)의 예측값에 식(7)에 의한 파압보정계수(λ_C)를 곱하여 서로 비교한 것이다. 상대적으로 큰 파압이 작용할 경우 예측값과 실험값 사이의 오차가 다소 커지는 경향이 나타났지만 전반적으로는 서로 잘 일치하는 결과가 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안된 식(7)에 의한 파압 저감계수를 사용함으로써 테트라포드로 피복된 수평혼성제에 작용하는 파압을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 식(2)와 같이 피복률(C_R)을 정의하였는데, 만일 소파공의 마루높이가 정수면보다 낮은 경우에는 피복률이 0보다 작은 음수 값을 가지게 될 수 있다. 그런데 이러한 경우는 시공 중 소파블록을 쌓는 과정에서 일시적으로 형성될

수는 있지만 영구적인 구조물 단면으로서는 설계 시 피해야 할 조건에 해당한다. 본 연구에서 $0 \leq C_R \leq 1$ 범위에 대해서 λ_C 값을 제시하였지만 가급적 C_R 이 1에 가까운 범위에서 사용하는 것이 바람직하며, $C_R < 0$ 인 조건에 대해서는 설계 시 고려할 필요가 거의 없을 것이다.

한편, Takahashi et al.(1990)이 제시한 파압저감계수는 파고(H)와 수심(h)의 비율에 따라 달라지는 반면, 본 연구에서 식 (7)을 통해 제시한 파압저감계수는 케이슨에 대한 상대 높이(h_p/h_c)에 따라 달라지는 형태로 주어진다. 그 이유는 Fig. 7에 보인 것처럼 서로 다른 파고 및 주기의 실험과 조건에서 예측된 무차원파압의 평균과 분산을 취하여 파압저감계수가 도출되었기 때문이다. 이러한 측면에서 향후 식(7)에 추가로 파랑 조건의 특성까지 고려함으로써 더욱 정교한 파압저감계수를 개발할 수 있는 가능성도 있을 것이다.

3.5 사석마운드 위 소파블록 피복 수평혼성제와의 비교

최근 이루어진 연구에서 Lee and Oh(2025)는 케이슨 앞쪽 이 경사식 마운드에 의해 피복될 경우 케이슨 전면에서 작용하는 수평 압력 산정 방법을 새롭게 제시한 바 있다. 본 연구에서 분석 대상으로 삼은 실험 단면은 케이슨 전면이 오직 테트라포드로만 피복된 반면, Lee and Oh(2025)의 연구에서는

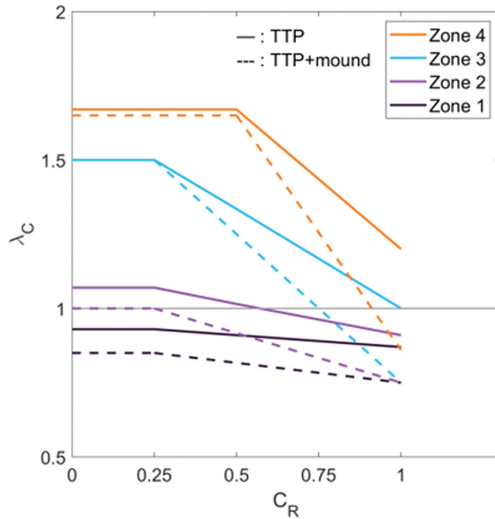


Fig. 11. Comparison of the pressure adjustment factors calculated from the experiment with the estimates by Equation (7).

경사식 마운드 위에 테트라포드가 2열로 피복되는 형태로 소파공이 설치된다는 점이 다르다. 이 두 경우에 Goda 파압식에 대한 파압보정계수 값이 각각 제시되었으므로 Fig. 11에 제시된 그림을 통하여 간단히 서로 비교해 보았다. 그 결과, 대체로 테트라포드만으로 피복한 경우의 파압보정계수 λ_c 값이 다소 크게 제시되었음을 알 수 있다. 케이슨의 하단부에 해당하는 Zone 1과 Zone 2에서는 피복률 값에 무관하게 대략 7~9% 정도 컸으며, 케이슨 상단부에 해당하는 Zone 3과 Zone 4에서는 피복률이 작은 경우에는 거의 비슷하고 피복률이 1에 가까워질수록 그 차이가 커졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 조파수조에서 수행된 규칙파 수리실험 결과를 바탕으로 테트라포드로 피복되는 수평혼성제에 작용하는 수평파압을 다양한 피복 조건에 대해 산정하는 경험식을 제시하였다. 케이슨 전면이 소파블록으로 완전히 피복될 경우의 파압은 Takahashi et al.(1990)이 제안한 방법에 의해 산정하고 있다. 그러나 소파블록이 케이슨 마루높이까지 완전히 피복되지 않는 조건에 대해서는 마땅한 파압 산정식이 없는 실정이었기 때문에 본 연구를 통해 제안된 파압보정계수를 적용하여 현업 실무에서의 애로사항이 해소될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 실험 결과를 통해 입증된 것처럼 케이슨 마루높이까지 소파공이 설치되지 않을 경우 Goda 파압에 비해서 상당히 큰 충격과 성격의 파압이 케이슨 상단의 미피복부에 작용할 수 있기 때문에 설계 시 이러한 점에 유의해야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 “재해안전항만 구축 기술개발 사업” 및 한국연구재단의 “딥러닝 기반 해안구조물

작용 파력 평가기술 개발”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Allsop, N.W.H., McKenna, J.E., Vicinanza, D. and Whittaker, T.T.J. (1996). New design methods for wave impact loadings on vertical breakwaters and seawalls. *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, 2508-2521.
- Goda, Y. (1974). New wave pressure formulae for composite breakwaters. In *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*, 1702-1720.
- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*, 3rd ed., World Scientific, Singapore.
- Hitachi, S. (1994). Case study of breakwater damages Mutsu-Ogawara Port. *Proceedings of the Workshop on Wave Barriers in Deepwaters*, Port and Harbor Research Institute, 308-331.
- Lee, J.S. and Oh, S.H. (2025). Revision of the Method of Estimating Horizontal Wave Pressure on the Caisson Protected by Armor Blocks on the Rubble Mound. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 37(2), 60-67 (in Korean).
- Mase, H., Tsujio, D., Yasuda, T. and Mori, N. (2013). Stability analysis of composite breakwater with wave-dissipating blocks considering increase in sea levels, surges and waves due to climate change. *Ocean Eng.*, 71, 58-65.
- Oh, S.-H. and Lee, D.S. (2018). Two-dimensional wave flume with water circulating system for controlling water level. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(6), 337-342 (in Korean).
- Oh, S.H., Lee, J. and Lee, J.S. (2019). Experimental investigation of the wave force on the caisson according to different coverage of armor units. *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Hanoi, Vietnam, 987-993.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1990). Wave and block forces on a caisson covered with wave dissipating blocks. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 30, 3-34.
- Takahashi, S., Ohki, Y., Shimosako, K., Isayama, S. and Ishinuki, K. (2000a). Seawall Failures by Typhoon 9918 and Their Reproduction in Wave Flume Experiments. *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, 3-50.
- Takahashi, S., Shimosako, K., Kimura, K. and Suzuki, K. (2000b). Typical failures of composite breakwaters in Japan. *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, 1899-1910.
- Takayama, T., Tsujio, D. and Yasuda, T. (2008). Estimation of expected sliding distance of a caisson affected by damage of armor concrete blocks. *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, 3645-3654.

Received 21 May, 2025

Revised 17 June, 2025

Accepted 17 June, 2025