

유수실이 2개인 유공케이슨의 파력 산정에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation for Evaluating Wave Forces on Perforated Caisson with Two Wave Chambers

오상호* · 지창환* · 이달수**

Sang-Ho Oh*, Chang-Hwan Ji* and Dal Soo Lee**

요 **지** : 유수실을 두 개 가지는 유공케이슨에 작용하는 파력 산정식은 아직까지 없다. 이 연구에서는 이러한 이중 유수실 케이슨 모형에 작용하는 파력을 측정한 수리실험 자료 분석 결과를 제시하였다. 실험결과로부터 세 가지 연직벽체에 작용하는 파력의 첨두값에 연관된 다섯 가지 파의 위상에 따른 파력의 변화 양상을 명확하게 규명할 수 있었으며, 이로부터 Takahashi and Shimosako (1994)와 유사한 형태의 이중유수실 파력보정계수를 산정하였다. 이 결과는 향후 추가 실험 및 현장 실무에의 적용을 통해 검증될 필요가 있다.

핵심용어 : 유공케이슨, 유수실, 중간벽, 파력, 수리모형실험

Abstract : Design formula for estimating the wave loading on the perforated caisson having two wave chambers is yet available. In this study, the analysis results are presented with the experimental data for the wave force acting on such a breakwater model. Based on the experimental results, it was able to clarify the variation of wave action according to five different wave phases that are associated with peak wave loading at the three vertical walls. Then the force adjustment factor for double-chamber caisson was estimated, similarly as Takahashi and Shimosako (1994), which needs to be further validated with subsequent experiments and practical application in the field.

Keywords : perforated caisson, wave chamber, middle wall, wave force, physical experiment

1. 서 론

유공케이슨 방파제 설계 시 일반적으로 사용되고 있는 Takahashi 파압공식 (Takahashi and Shimosako, 1994)은 단일유수실 유공케이슨에 대한 수리실험 결과로부터 도출되었다. Takahashi 파압공식 외에도 유공케이슨 파압을 산정하는 방법에 관한 다른 연구들도 있지만(Tabet-Aoul and Lambert, 2003; Li et al., 2007), 우리나라와 일본 및 미국 등에서 발행하는 항만설계기준에는 Takahashi 파압공식이 수록되어 있으며 실제 현업에서도 유공케이슨 방파제 설계 시 이 공식이 가장 보편적으로 활용되고 있다.

그런데 Takahashi 파압 공식은 근본적으로 유수실이 1개인 단일유수실 유공케이슨 설계를 위해 제안되었기 때문에 이 조건을 벗어나는 형태의 유공케이슨 설계 시에는 이 공식을 적용하는데 한계가 있다. 최근 우리나라에서는 수리 성능 및 구조 안정성을 향상시키기 위한 목적으로 다양한 형태의 유공케이슨 형상이 개발되었으며, 이 중에는 케이슨 내부의 유수실이 2개인 이중유수실 형태의 방파제 단면도 존재한다. 현

재로서는 이러한 방파제 설계 시 적용할 수 있는 파압공식이 없기 때문에 단일유수실 케이슨에 대하여 개발된 Takahashi 파압공식을 이중유수실 케이슨 설계 시에도 사용하고 있으며, 이 과정에서 설계자의 경험 및 판단에 따라 다소 임의적으로 설계가 이루어지고 있는 실정이다.

한편, 비록 이중유수실 케이슨 설계 파력을 산정할 수 있는 공식은 없지만, 이러한 형식의 방파제에 작용하는 파력에 관한 연구는 일부 연구자들에 의해 이루어진 바 있다(Franco et al., 1996; Bergmann and Oumeraci, 2000; Chen et al., 2002). 이러한 선행 연구들을 통해 유수실 수가 증가할 경우 최대 수평파력이 감소하는 경향이 있음이 어느 정도 밝혀졌으나 실제 설계 시 적용 가능한 형태의 파력 산정식은 제시되지 않았다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 이중유수실 케이슨에 작용하는 수평 및 연직파력을 정밀하게 계측하는 수리실험 결과를 토대로 Takahashi 파압공식이 개발된 과정과 유사한 분석 방법을 취하여 이중유수실 작용 파력을 산정할 수 있는 새로운 파압공식을 제시하였다.

*한국해양과학기술원 연안공학연구본부 (Corresponding author: Sang-Ho Oh, Coastal Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan 15627, Korea, Tel: +82-31-400-7822, Fax: +82-31-408-5823, coast.oh@gmail.com)

**(주)혜인이엔씨 기술연구소(Hyein E&C, Research and Development Division)

2. Takahashi 파압 공식

본 연구 내용이 Takahashi 파압 공식 (Takahashi and Shimosako, 1994)이 개발된 근거가 되는 실험 및 분석방법과 상당히 유사하기 때문에 본 연구 내용을 기술하기기에 앞서 Takahashi 파압공식을 개괄적으로 요약하여 제시하고자 한다.

Takahashi 파압공식은 Goda 공식(Goda, 1974)을 기초로 제안된 공식으로서, 정수면에서의 파압 p_1 과 양압력 p_u 는 다음과 같이 계산된다.

$$p_1 = 0.5(1 + \cos\theta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha^*\cos^2\theta)w_0H_d \quad (1)$$

$$p_u = 0.5(1 + \cos\theta)\lambda_3\alpha_1\alpha_3w_0H_d \quad (2)$$

$$\alpha^* = \max\{\alpha_2, \alpha_1\} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5[(4\pi h/L)/\sinh(4\pi h/L)]^2 \quad (4)$$

$$\alpha_3 = 1 - (h'/h)[1 - 1/\cosh(2\pi h/L)] \quad (5)$$

위 식에서 λ_1 과 λ_2 는 각각 수평파압의 중복파 및 충격파 성분에 대한 파력보정계수이며, λ_3 는 양압력에 대한 파력보정계수를 나타낸다. α^* 는 식(3)에 표현된 것처럼 쇄파(α_2) 및 충격파(α_1)의 영향을 고려한 파라미터에 의해 계산되며, 자세한 계산 방법은 Takahashi et al.(1994a,b)에 제시되어 있다. 또한 w_0 는 해수의 단위중량, H_d 는 설계파고, θ 는 입사파의 파향, L 은 설계파의 파장, h' 은 케이슨 바닥면의 수심, h 는 마운드 끝(toe) 위치에서의 수심을 각각 나타낸다.

Takahashi 파압공식에서는 정압(positive pressure) 및 부압(negative pressure)이 작용할 때 각각 세 가지, 즉 총 여섯

가지 서로 다른 위상에 따라 유공케이슨에 작용하는 파력을 다르게 계산하며, 이는 각 위상 별로 유공케이슨 벽체에 대한 파압보정계수($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)의 값을 다르게 적용함으로써 이루어진다. Table 1에는 정압이 작용하는 경우에 대하여 Takahashi and Shimosako(1994)에 의해 제시된 각 위상 별 파압보정계수의 값을 나타내었고, Fig. 1에는 Crest-IIa 위상에서의 파압 분포도를 한 예로써 나타내었다.

3. 실험자료 및 파 작용 위상

3.1 수리실험 자료

본 연구에서는 Oh et al. (2014)의 수리실험 자료 중 이중 유수실 케이슨에 대한 실험자료 및 Fig. 3(c)에 보인 것처럼 높은 마운드 조건에서 이루어진 추가 실험자료를 이용하여 이 중유수실 케이슨 각 벽체에 작용하는 파력을 산정하였다. Oh et al. (2014)에 제시된 것처럼 파 작용 시 케이슨 벽에 작용하는 힘을 직접 계측하기 위해서 1축 하중계(load cell)를 이

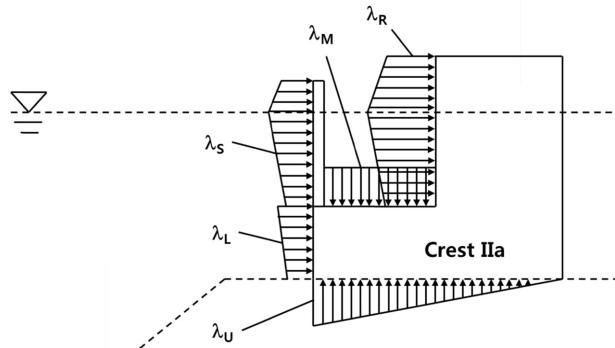


Fig. 1. Schematic distribution of the wave pressure on the perforated caisson at the phase of Crest-IIa defined by Takahashi's formula.

Table 1. Wave force adjustment factors for single-chamber perforated caissons given by Takahashi and Shimosako (1994)

	Crest-I	Crest-IIa	Crest-IIb
λ_{S1}	0.85	0.7	0.3
λ_{S1}	0.4 ($\alpha^* \leq 0.75$) 0.3/ α^* ($\alpha^* > 0.75$)	0	0
λ_{L1}	1	0.75	0.65
λ_{L2}	0.4 ($\alpha^* \leq 0.5$) 0.2/ α^* ($\alpha^* \leq 0.5$)	0	0
λ_{R1}	0	20l/30L' ($l/L' \leq 0.15$) 1.0 ($l/L' > 0.15$)	1.4 ($H_D/h \leq 0.1$) 1.6 - 2 H_D/h ($0.1 < H_D/h < 0.3$) 1.0 ($H_D/h \geq 0.3$)
λ_{R2}	0	0.56 ($\alpha^* \leq 25/28$) 0.5/ α^* ($\alpha^* > 25/28$)	0
λ_{M1}	0	20l/30L' ($l/L' \leq 0.15$) 1.0 ($l/L' > 0.15$)	1.4 ($H_D/h \leq 0.1$) 1.6 - 2 H_D/h ($0.1 < H_D/h < 0.3$) 1.0 ($H_D/h \geq 0.3$)
λ_{M2}	0	0	0
λ_{U1}	1	0.75	0.65

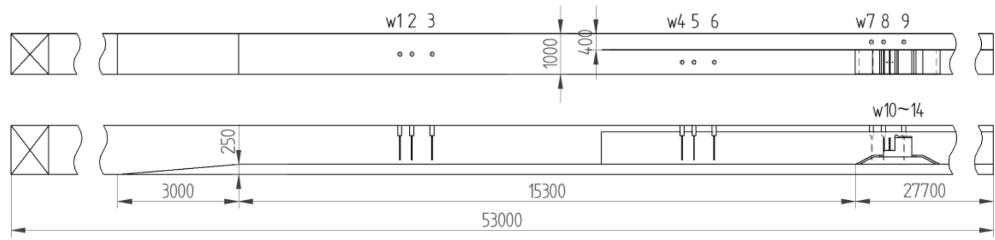


Fig. 2. Experimental setup (unit: mm).

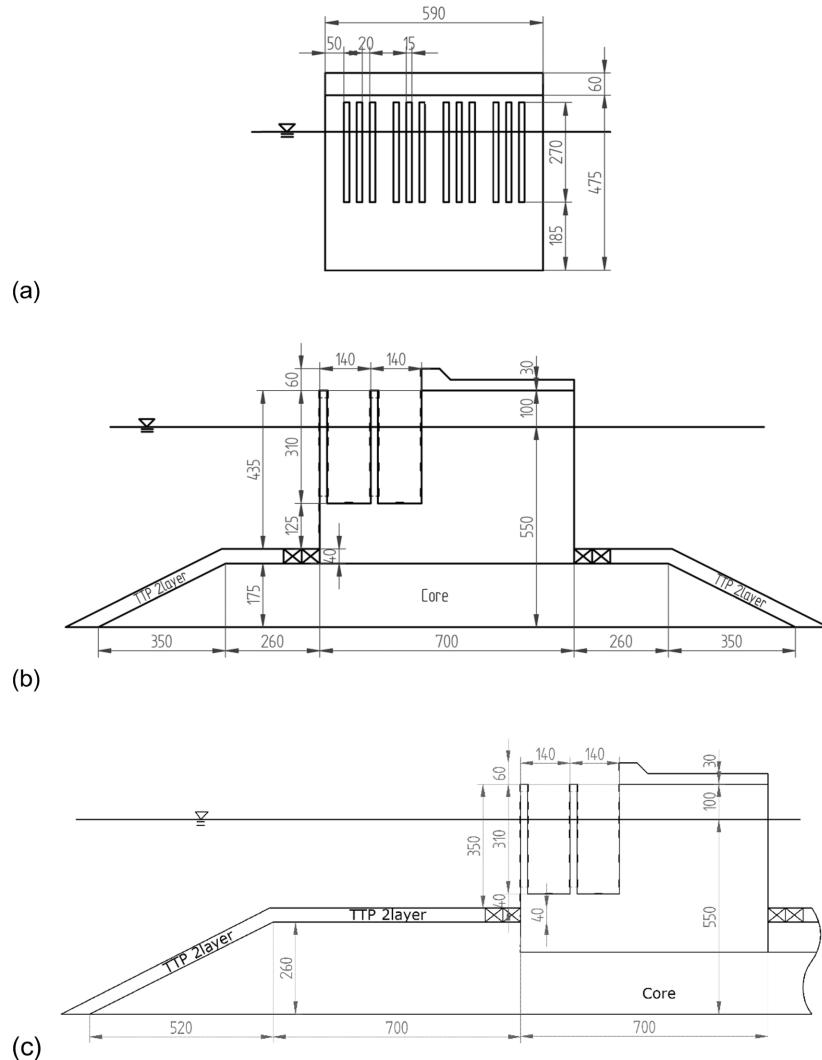


Fig. 3. Drawings of the caisson model. (a) front view, (b) side view of the model placed on the low mound, (c) side view of the model placed on the high mound.

용한 파력 계측 시스템을 구성하여 전면벽의 무공부 및 유공부, 중간벽, 후면벽, 그리고 상치구조물에 작용하는 파력이 독립적으로 각각 측정되었다. Oh et al. (2014)에서는 Fig. 3(b)와 같이 마운드가 낮은 조건에서 단일 및 이중 유수실 유공케이슨에 작용하는 수평파력을 상호 비교하는 연구가 이루어졌으며, 본 연구에서의 초점은 이중 유수실 케이슨의 파력 산정식을 Takahashi 과압 공식과 유사한 형태로 제안하는 데 있다.

실험은 길이 53 m, 높이 1.25 m, 폭 1 m인 2차원 조파수조에서 수행되었으며, 실험에 사용한 케이슨 방파제 모형은

전체 높이 53.5 cm, 폭 59 cm, 길이 70 cm로서 투명 아크릴로 제작되어 사석 마운드 위에 설치되었다. Fig. 2에는 실험 모식도를, Fig. 3에는 방파제 모형의 정면도 및 측면도를 제시하였다. Fig. 3에 보인 케이슨 모형은 Takahashi and Shimosako(1994)의 실험 모형과 매우 비슷한 형상이지만, 유수실이 2개인 이중 유수실 구조인 점은 차이가 있다. 방파제 모형은 높이가 서로 다른 2개의 마운드 위에 각각 설치되어 별도로 실험이 수행되었다. 높이가 17.5 cm인 낮은 마운드의 케이슨 전후면으로부터의 길이는 26 cm였으며, 높이가 26 cm

인 마운드의 길이는 70 cm였다. 이 두 가지 마운드 형상은 Takahashi and Shimosako (1994)의 마운드 제원을 고려하여 결정되었다. 한편, 유수실 뒤쪽에는 6 cm 높이의 상부구조물이 위치하였다. 케이슨 전면벽 유공부 및 중간벽의 유공률(ε)은 20% 및 30%의 두 가지로 변화시켰다. Fig. 3(a)에 보인 정면도는 전면벽 유공률이 30%인 경우에 해당한다. 한편, 유공케이슨 설치 위치에서의 수심은 51, 55, 59 cm의 세 가지로 다르게 변화시켰다. 이러한 조건에 대하여 주기(T)는 0.77~2.70 s, 파고(H)는 2.8~24.8 cm 범위에서 서로 다른 37 개 규칙파를 조파하여 계측을 수행하였으며, 수리모형실험에 대한 보다 상세한 설명은 Oh et al. (2014)에 제시되어 있다.

이렇게 취득된 실험자료 중에서 본 연구에서는 $T=1.7\sim2.7$ s 범위에 해당하는 실험자료만을 분석에 활용하였다. 실험파 주기가 이 범위일 때 유수실 폭(B)과 파장(L)의 비를 나타내는 파라메터인 B/L 의 값은 0.05~0.08이 되며, 이는 유공케이슨 방파제의 통상적인 설계파 주기에 따른 값의 범위에 해당한다.

3.2 케이슨에 파가 작용하는 상황에 따른 위상

Takahashi and Shimosako (1994)는 단일유수실 케이슨에 작용하는 파의 위상을 정압(positive pressure)^o이 작용하는 경우 3 가지(Crest I, Crest IIa, Crest IIb), 부압(negative pressure)^o이 작용하는 경우 3 가지(Trough I, Trough II, Trough III)의 6 가지 위상(phase)으로 각각 구분하였다. 유수실이 2개인 이중유수실 케이슨의 경우 유수실을 구성하는 벽체가 3개(전면벽, 중간벽, 후면벽) 존재하므로 케이슨에 정압이 작용하는 경우에 대해서는 보다 세분하여 아래와 같이 5개의 위상을 고려할 수 있다.

- ① Crest-F: 전면벽에서의 파력이 최대가 되는 위상
- ② Crest Mi: 중간벽에 충격파적 성격의 파력 첨두가 나타나는 위상 (중간벽에 파가 처음으로 부딪칠 때의 위상)
- ③ Crest Mp: 중간벽에 비교적 느리게 변화하는 파력의 첨두가 나타나는 위상 (중간벽에서의 수위가 최대가 될 때의 위상)
- ④ Crest Ri: 후면벽에 충격파적 성격의 파력 첨두가 나타나는 위상 (후면벽에 파가 처음으로 부딪칠 때의 위상)
- ⑤ Crest Rp: 후면벽에 비교적 느리게 변화하는 파력의 첨두가 나타나는 위상(후면벽에서의 수위가 최대가 될 때의 위상)

여기에서 Crest F, Crest Ri 및 Crest Rp는 각각 Takahashi 파압공식의 Crest I, Crest IIa 및 Crest IIb에 대응되며, Crest Mi와 Crest Mp는 본 연구에서 새롭게 정의된 위상이다. Fig. 4에는 위 다섯 개 위상에서 케이슨에 작용하는 파 형상을 개념적으로 제시하였다. 한편, 이중유수실 케이슨에 부압이 작용하는 경우에 대해서도 비슷한 방법으로 더 세분하여 파의 작용 위상을 고려할 수 있지만 정압이 작용하

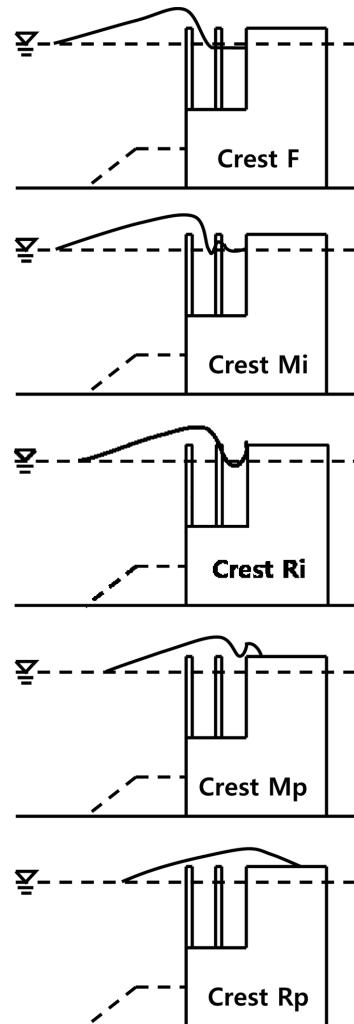


Fig. 4. Graphical description of the five wave phases during positive wave loading on the double-chamber caisson.

는 경우에 비해서는 위상차에 따른 파력 변화의 차이가 크지 않기 때문에 본 연구에서는 별도로 세분화된 위상을 정의하지 않았다.

Fig. 5에는 이중유수실 유공케이슨을 구성하는 서로 다른 연직벽체에 작용하는 수평파력 계측 사례를 제시하였다. Fig. 5는 $T=1.70$ s, $H=16.5$ cm인 파가 작용했을 때 대략 한 주기 정도에 해당하는 시간 동안의 수평파력 시계열을 보여주며, 여기서 F_s 는 전면벽 유공부, F_L 은 전면벽 무공부, F_M 은 중간벽, F_R 은 후면벽에 작용하는 수평파력을 나타낸다. 따라서 전면벽에 작용하는 전체 파력은 F_s 와 F_L 을 더한 값이 된다. 한편, F_H 는 이 4개 벽체에 작용하는 파력을 모두 더한 값으로서 유공케이슨에 작용하는 총 수평파력을 의미한다. 각각의 시계열 그림에서 ○ 기호로 표시된 곳은 제시된 시간 동안 각 벽체에서 발생한 최대파력이 발생했을 때의 파의 위상에 해당한다. 즉, F_s 와 F_L 의 시계열에서는 Crest F에 해당하며, F_M 및 F_R 시계열에서는 각각 Crest Mp 및 Crest Rp에 해당하는 위상이다. 한편, F_M 과 F_R 의 그림에는 ◇ 기호로 표시된 곳이 있는데, 이는 파가 중간벽 및 후면벽에 부딪칠 때

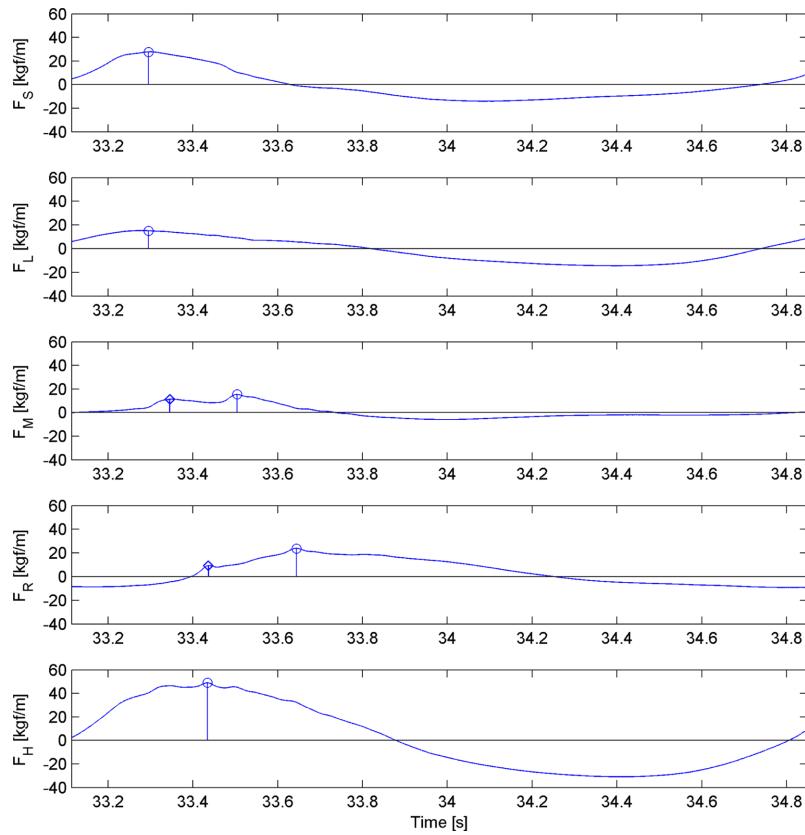


Fig. 5. Typical time series of the measured force on the model caisson.

의 위상인 Crest Mi와 Crest Ri에 해당한다. Fig. 5에 보인 그림에서는 중간벽 및 후면벽에서 모두 Crest Mi와 Crest Ri 위상에 비해서 Crest Mp와 Crest Rp 위상에서 계측된 파력 값이 각각 더 커졌는데, 파 조건에 따라서는 이와는 반대의 경향이 나타나기도 한다. 한편, Fig. 5에 보인 실험과 조건에서는 총파력(F_H)의 최대값은 Crest Ri (F_R 의 시계열 그림에서 ◇ 기호로 표시된 위상)에서 나타나게 됨을 확인할 수 있다.

4. 파력보정계수 산정

4.1 Crest F 위상에서의 파력보정계수 산정

Fig. 6에는 Takahashi 파압공식(Takahashi and Shimosako, 1994)에서 λ_{SI} 파라메터를 도출할 때와 동일한 방법을 적용하여 마운드 높이가 낮은 경우 Crest F 위상에서 전면벽 유공부에 작용하는 무차원 평균파력강도(f_S^E/f_S^G)를 파고 대수심의 비(H/h)에 대해서 나타낸 것이다. 여기서 f_S^E 는 전면벽 유공부에 작용하는 평균파력강도, 즉 유공부에 작용하는 파력 계측값을 유공부의 면적으로 나눈 값이며, f_S^G 는 비슷한 방법으로 Goda의 파압공식에 의해 계산된 평균파력강도를 의미한다. 따라서 f_S^E/f_S^G 는 전면벽 유공부를 만약 무공벽이라고 가정했을 경우 Goda 공식에 의해 계산되는 파력에 비해서 실제로 작용하는 파력이 어느 정도의 값을 가지는지를 나타내는 지표가 된다. 즉, 이 값이 만약 1이라고 한다면 이것은 전면벽 유공부에 대하여 계측된 파력이 Goda 파압공식에 의한

무공벽 작용 파력값과 동일하다는 의미가 된다. 따라서 이러한 그림으로부터 전면벽 유공부에 대한 무차원 평균파력강도 f_S^E/f_S^G 의 값을 어떠한 상수 또는 함수 형태로 나타내게 된다면 그것을 Crest F 위상에서의 전면벽 유공부에 대한 파력저감계수인 λ_{SI} 의 값으로 사용할 수 있게 된다.

Fig. 6에서 무차원 평균파력강도(f_S^E/f_S^G)의 값은 대략 0.5~0.9 범위에 분포하며, 전체 데이터의 평균값은 0.72가 된다. 한편, Takahashi and Shimosako (1994)의 논문에서 이와 대응되는 그림을 살펴보면 전면벽 유공부에 대한 무차원 평균파력강도의 값이 본 실험과 유사하게 0.6~0.9 범위에 분포함을 확인할 수 있다. Takahashi and Shimosako (1994)는 이로부터 전면벽 유공부 파력저감계수 λ_{SI} 의 값을 0.85로 제시하였다. 이 값은 그들의 실험자료 평균값과 최대값 사이에 해당하게 되는데 이 값을 제시하게 된 이유나 근거는 설명되어 있지 않다. 아마도 방파제의 안정성과 직결되는 파력 산정의 중요성을 감안하여 다소 보수적인 관점에서 전체데이터의 평균값보다는 조금 더 큰 값을 주관적으로 채택하였을 것으로 추정된다.

이처럼 파력을 보수적으로 평가하는 관점은 유지하되, 보다 통계적으로 의미있고 일관성 있는 기준을 제시하기 위하여 본 연구에서는 f_S^E/f_S^G 의 평균(μ)에 표준편차(σ)를 더한 값으로서 파력저감계수 λ_{SI} 의 값을 산정하였다. Fig. 6에 보인 붉은 색 실선이 이에 해당하는 값을 나타낸 것이며, 통계적으로 이는 전체 데이터에서 상위 16%에 해당하는 값을 의

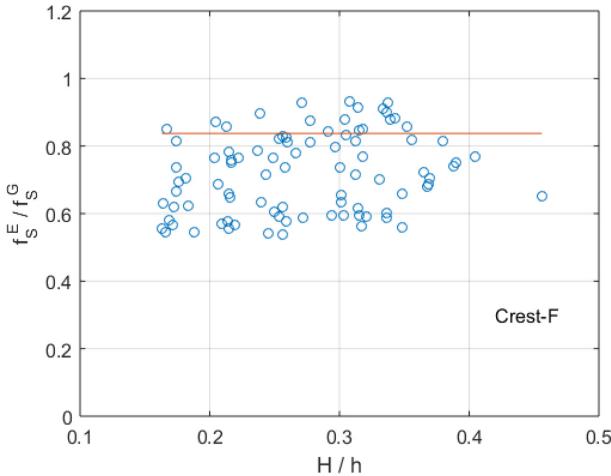


Fig. 6. Normalized wave load on the perforated front wall at the phase Crest-F.

미하게 된다. 한편, 단일유수실 케이슨에 대하여 제안된 Takahashi 파압공식에서는 λ_{s1} 의 값으로 0.85를 제시하였으며, 본 연구에서 산정한 파력보정계수 값과 거의 같다. 본 연구에서의 실험은 이중유수실 케이슨에 대한 것이지만, Crest F 위상에서는 파가 처음으로 구조물에 부딪치는 시점이므로 단일유수실과 이중유수실 케이슨에 작용하는 파력이 크게 다르지 않을 것으로 추정할 수 있다.

한편, Crest F 위상에서 전면벽 유공부에 작용하는 충격파 성분 (식(1)에서 두 번째 항에 해당하는 성분)에 의한 파력보정계수를 나타내는 λ_{s2} 의 값을 산정하는 과정 역시 Takahashi and Shimosako (1994)에 제시된 방법을 따랐다. 즉, 마운드가 높은 조건에서 수행된 실험자료에 대하여 유공벽 전면부에 대한 파력 계측값(f_s^E)에서 식 (1)에 $\lambda_1 = 0.84$, $\alpha^* = 0$ 을 대입하여 계산한 값(f_s^C)을 뺀 후 물의 단위중량(w_0) 및 파고(H)로 나눈 값을 계산하고, 이를 Fig. 7에 보인 것처럼 α_l 의 값에 대하여 그래프로 나타내었다. α^* 는 Goda 파압공식에서 쇄파의 영향을 나타내는 α_2 와 충격파적 영향을 나타내는 α_1 의 큰 값을 채택하도록 정의되어 있으며, 마운드가 높은 경우에는 α^* 의 값은 대체로 α_l 의 값에 의해 결정되므로 Fig. 7의 가로축을 α_l 에 대하여 나타내었으며, 이는 Takahashi and Shimosako (1994)에서도 동일하게 적용된 방법이다.

Fig. 7로부터 $(f_s^E - f_s^C) / w_0 H$ 의 값은 α_l 가 증가함에 따라서 근소하게 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있으며, 따라서 Takahashi 파압공식과 마찬가지로 원점을 지나는 선형 회귀식을 도출하였다. Takahashi and Shimosako (1994)에서는 $\alpha_l \geq 0.75$ 범위에서는 $\lambda_{s2} = 0.4$, $\alpha^* < 0.75$ 범위에서는 $\lambda_{s2} = 0.3 / \alpha^*$ 로 제시하고 있는데, 역시 이 경우에도 위 값이 도출된 근거에 대한 명확한 설명은 제시되지 않았으며 실험자료를 바탕으로 경험적인 판단에 따라 결정된 것으로 추정된다. 본 연구에서는 Fig. 6에서와 마찬가지로 다소 보수적인 관점에서 회귀분석 결과로부터 84% 확률을 가지는 신뢰구간

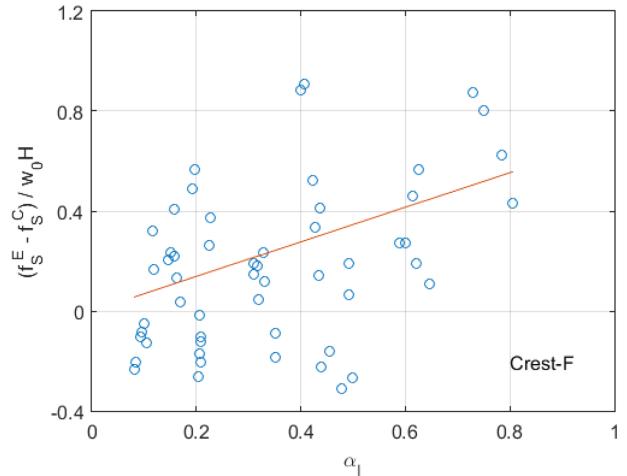


Fig. 7. Impulsive wave components on the perforated front wall as a function of α_l .

(confidence interval)의 상한값에 대응되는 회귀식을 계산하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 회귀직선의 기울기는 0.69이며, 따라서 λ_{s2} 의 값으로 0.69를 제시할 수 있다. 이 값은 Takahashi 파압공식에 의한 λ_{s2} 값에 비해서는 더 크며, 따라서 충격파적 성분의 파 작용 시의 파력을 Takahashi 공식보다 더 크게 산정하는 결과가 된다. 이는 본 연구에서 마운드가 높은 조건에서 수행된 실험에서의 계측 파력이 Takahashi and Shimosako (1994)의 실험보다 더 커음을 시사하는 것이다.

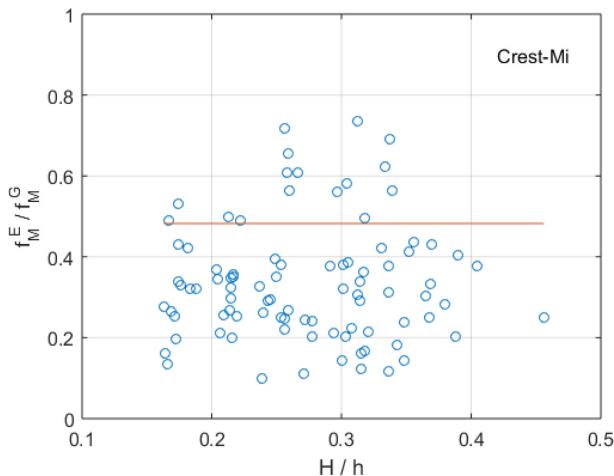
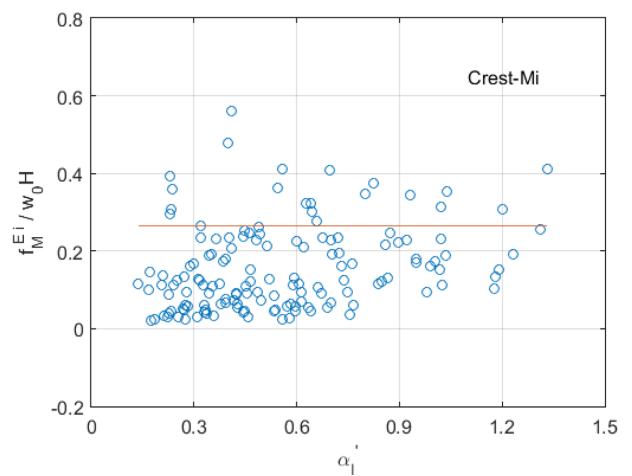
Table 2에는 λ_{s1} 과 λ_{s2} 의 산정 결과를 제시하였으며, Figs. 6~7에 보인 것과 동일한 분석 방법을 통해서 도출된 전면벽 무공부의 파력저감계수 λ_{l1} 및 λ_{l2} 의 값도 나타내었다. Crest F 위상에서는 파가 아직 중간벽 및 후면벽에는 도달하지 않은 상태이기 때문에 중간벽과 후면벽에 대한 파력보정계수의 값은 자연스럽게 0이 된다. 한편, Table 2에는 이후에 설명하게 될 Crest Mi에서부터 Crest Rp까지의 위상에 대한 각 벽체 별 파력보정계수 값을 모두 수록하였다.

4.2 Crest Mi 위상에서의 파력보정계수 산정

Fig. 8에는 Crest Mi 위상에서 두 개의 유수실 사이에 위치한 중간벽에 작용하는 계측파력(f_M^E)을 이에 대응되는 Goda 파압공식에 의한 계산값(f_M^G)으로 나눈 결과를 제시하였다. 여기서 f_M^G 는 Goda 파압공식에서 $\alpha_2 = 0$ 으로 설정하였을 때의 값이다. Fig. 8은 근본적으로 Fig. 6과 동일한 형태의 그림이며, 파 작용 위상이 Crest Mi이고 검토하는 대상 벽체가 중간벽이라는 점만이 다르다. Fig. 8로부터 무차원 평균파력강도 f_M^E / f_M^G 의 값은 대략 0.1에서 0.7 정도에 분포하였으며, 이는 Fig. 7과 비교해 봤을 때 상대적으로 더 작은 값이다. 즉, Crest Mi 위상에서 중간벽에 작용하는 평균파력강도가 Crest F 위상에서 전면벽 유공부에 작용하는 평균파력 강도에 비해서 더 작다는 것을 알 수 있다. 이 경우에도 4.1절에서 설명한 것처럼 전체 데이터의 평균에 표준편차를 더한 값인 0.48

Table 2. Wave force adjustment factors for double-chamber perforated caissons.

		Crest F	Crest Mi	Crest Mp	Crest Ri	Crest Rp
Front slit	λ_{S1}	0.84	0.64	0.77	0.50	0.12
Wall	λ_{S2}	0.69	0	0	0	0
Front non-porous wall	λ_{L1}	1.00	0.90	1.00	0.78	0.54
	λ_{L2}	0.26	0	0	0	0
Middle wall	λ_{M1}	0	0.48	0.51	0.31	0.08
	λ_{M2}	0	0.26/ α^*	0	0	0
Rear wall	λ_{R1}	0	0	0	1.04	1.07
	λ_{R2}	0	0	0	0.46/ α^*	0
Former chamber floor	λ_{A1}	0	0.44	0.29	0.55	0.68
	λ_{A2}	0	0	0	0	0
Latter chamber floor	λ_{B1}	0	0	0	0.62	0.72
	λ_{B2}	0	0	0	0	0
Caisson bottom	λ_{U1}	1.00	0.90	1.00	0.78	0.54
	λ_{U2}	0	0	0	0	0

**Fig. 8.** Normalized wave load on the middle wall at the phase Crest-Mi.**Fig. 9.** Impulsive wave components on the middle wall at the phase Crest-Mi.

을 λ_{M1} 의 값으로서 Table 2에 제시하였다. Table 2에는 Crest Mi 위상에서의 λ_{M1} 의 값뿐만 아니라 이 위상에서의 λ_{S1} , λ_{L1} 및 λ_{A1} 산정 결과도 제시되어 있는데, 이 값들은 유공부 전면벽 및 무공벽, 그리고 첫 번째 유수실의 바닥판에 작용하는 파력에 대해서 각각 Fig. 8에 보인 것과 동일한 분석을 실시하여 얻어진 값이다.

유수실 중간벽에는 실험과 조건에 따라서 매우 큰 충격파 성분에 의한 파력이 작용할 수 있으며, Takahashi and Shimosako (1994)에서 후면벽에 작용하는 충격파 성분을 고려하기 위하여 적용한 방법을 따라 Crest Mi 위상에서의 충격파 성분에 대한 파력보정계수 λ_{M2} 의 값을 산정할 수 있다. 즉, Crest-Mi 위상에서 중간벽에 작용하는 파력의 계측 시계열로부터 0.2초 동안의 이동평균을 시행한 시계열을 뺀 값을 계산함으로써 충격파적 성분(f_M^{Ei})을 분리해내었다. 그리고 이 충격파적 성분을 $w_0 H$ 로 나누어 무차원화한 값을 Fig. 9에 보인 것

처럼 α'_i 의 함수로써 나타내었다. 여기서 α'_i 는 Takahashi and Shimosako (1994)에 제시된 것처럼 유수실의 수심(d')과 폭(B_M') 및 유수실 내 파장(L')을 고려하여 계산된 값이다. Fig. 9에서 $f_M^{Ei}/w_0 H$ 의 값은 대부분 0~0.4 범위에 분포하였다. 위에서와 마찬가지로 평균에 표준편차를 더한 값으로써 파력저감계수(λ_{M2})를 산정하였으며, 이 값은 0.26이었다. 그런데, 이 경우에는 파력을 무차원화한 방법이 λ_{M1} 의 경우와는 다르기 때문에 λ_{M2} 의 값은 Table 2에 보인 것처럼 $\lambda_{M2} = 0.26/\alpha^*$ 와 같이 표현된다.

한편, Crest Mi 위상에서는 전면벽 유공부와 무공부 및 첫 번째 유수실 바닥에도 파력이 작용하게 되며, Fig. 6 및 Fig. 8과 마찬가지로 해당 벽체에 대한 계측 파력을 Goda 파악 공식에 의해 계산된 파력으로 무차원화함으로써 파력저감계수를 각각 산정할 수 있다. Table 2에는 이렇게 얻어진 λ_{S1} , λ_{L1} 및 λ_{A1} 의 값을 제시하였다.

4.3 Crest Mp 위상에서의 파력보정계수 산정

중간벽에 중복과 성분의 파력이 작용하게 되는 위상인 Crest Mp에서의 파력저감계수 역시 위에서 제시된 방법에 따라서 산정하였다. Fig. 10에는 그 한 예로서 중간벽에 작용하는 파력에 대한 결과를 제시하였다. 즉 Crest Mp 위상에서 중간벽에 대하여 계측된 파력(f_M^E)을 Goda 파압공식에 의한 값(f_M^G)으로 나눈 값을 그림으로 나타내었다. f_M^E/f_M^G 의 값은 대체로 0.3~0.6의 범위에 분포하며, Fig. 10에 붉은 선으로 표시된 것처럼 이 위상에서의 λ_{M1} 의 값은 0.51로 산정되었다. Crest Mp 위상에서 다른 벽체에 작용하는 파력저감계수의 값 역시 Table 2에 수록되었으며, 이 위상에서는 충격파 성분의 파력을 고려하지 않으므로 λ_2 의 값은 모든 벽체에서 0이 된다.

4.4 Crest Ri 및 Crest Rp 위상에서의 파력보정계수 산정

Crest Ri 및 Crest Rp 위상에서의 파력보정계수 산정 방법은 4.2절과 4.3절에 제시된 방법과 동일하다. 다만, 이 두 가지 위상에서는 모든 벽체가 파력을 받기 때문에 λ_i 의 값은 Table 2에 제시된 것처럼 각 벽체 별로 모두 제시된다. 한편,

λ_2 의 값은 후면벽에 충격파적 파력이 작용하는 Crest Ri 위상에 대해서만 산정하게 된다.

Fig. 11과 Fig. 12에는 Crest Ri 위상에서 유수실 후면벽에 작용하는 파력에 대한 실험 결과를 나타내었다. Fig. 11은 이 위상에서 λ_{R1} 의 값을 산정하기 위한 그림이며 f_R^E/f_R^G 의 값은 이 위상에서 0.2에서부터 1.6까지 매우 큰 범위에서 변화한다. 여기서 f_R^G 는 Goda 파압공식에서 $\alpha_2=0$ 으로 설정하였을 때의 값이며, 이는 Takahashi 파압공식에서 Crest Iia (Fig. 4에서의 Crest Ri) 위상의 파력저감계수 λ_{R1} 을 계산할 때의 과정과 동일하다. 전체 데이터의 평균에 표준편차를 더한 값은 1.04였으며, Fig. 9에 붉은 색 선으로 표시되었다. 또한, Fig. 12는 λ_{R2} 의 값에 대응되는 그림으로서 $f_R^E/w_0 H$ 의 값은 많은 경우 0 근처에 머무르며, 이러한 데이터들은 해당 파 조건에서 충격파가 거의 작용하지 않았음을 의미하는 것이다. 전체 데이터의 평균에 표준편차를 더한 값은 0.46이었으며, 따라서 Table 2에 보인 것처럼 $\lambda_{R2} = 0.46/\alpha^*$ 로 표현된다.

마지막으로, Crest Rp에서의 파력저감계수를 산정하는 사례로 유수실 후면벽에 작용하는 파력을 무차원화한 그림을

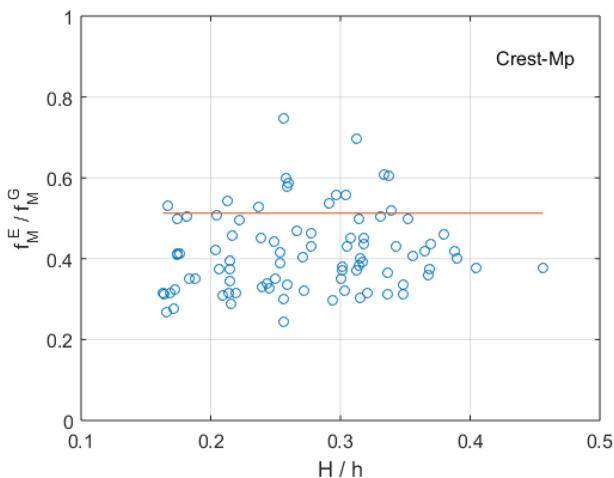


Fig. 10. Normalized wave load on the middle wall at the phase Crest-Mp.

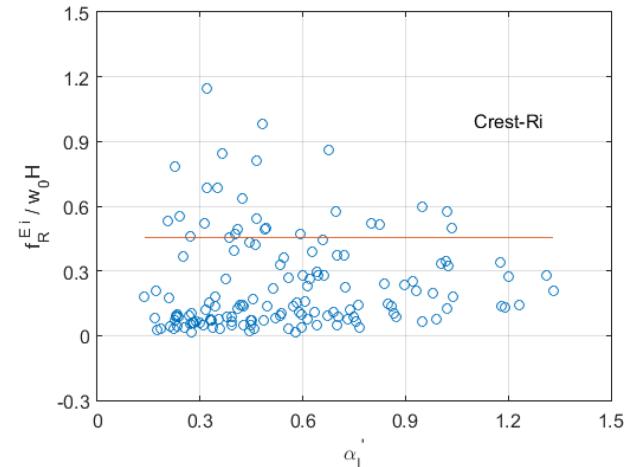


Fig. 12. Impulsive wave components on the rear wall at the phase Crest-Ri.

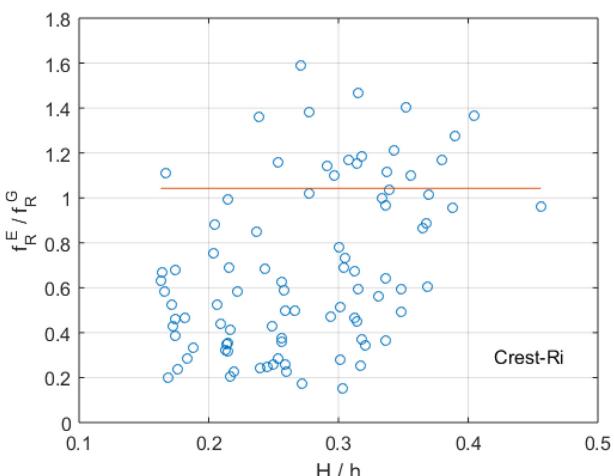


Fig. 11. Normalized wave load on the rear wall at the phase Crest-Ri.

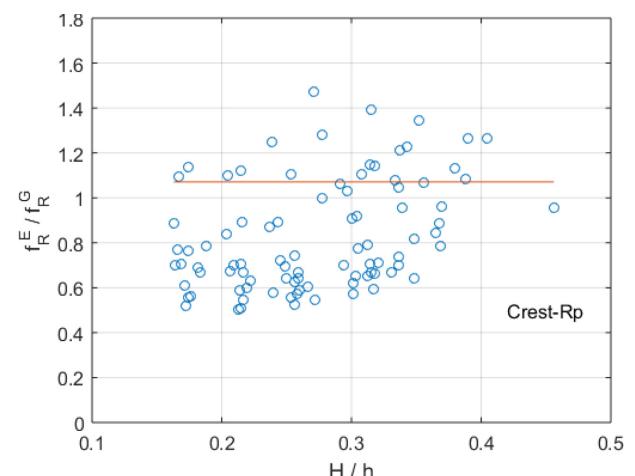


Fig. 13. Normalized wave load on the rear wall at the phase Crest-Rp.

Fig. 13에 나타내었다. 이 위상에서 f_R^E/f_R^G 의 값은 대략 0.5에서 1.5사이의 범위에서 분포하며 Fig. 13에 붉은 선으로 표시한 것처럼 λ_{R1} 의 값은 1.07로 나타났다.

Crest Ri 및 Rp 위상에서 나머지 벽체들에 작용하는 파력 보정계수 값들도 이와 동일한 과정을 통해서 Table 2에 제시하였다.

5. 결 론

이중유수실 케이슨의 경우 전면벽과 후면벽 사이에 존재하는 유공 중간벽에 작용하는 파력을 산정하는 방법은 지금까지 명확한 공식이 제안되지 않았으며, 따라서 설계 측면에서 많은 관심을 가지게 되는 사항이다. 본 연구에서는 이처럼 현업 실무에서 필요성이 높은 설계기법을 제안하기 위해서 수리모형실험을 통하여 유수실이 2개인 유공케이슨에 작용하는 파력을 염밀하게 계측하고, 중간벽을 포함하여 이중유수실 케이슨을 구성하는 모든 벽체에 대한 파력저감계수 값을 새롭게 산정하였다. 이중유수실 케이슨의 경우 유수실을 구성하는 연직 벽체가 세 개 존재하게 되기 때문에 파가 유수실에 부딪치는 순간에 대한 위상을 세 가지로 구분한 Takahashi and Shimosako (1994)의 방법론을 토대로 중간벽에 관련된 두 가지 위상을 추가로 새롭게 도입하여 총 다섯 개의 서로 다른 파 작용 위상에 따른 파력저감계수 산정 결과를 제시하였다. 실제 설계 시에는 Takahashi 파압공식과 마찬가지로 각 벽체에 작용하는 파력을 Goda 파압식으로 계산한 후 위상을 고려하여 해당 파력저감계수를 곱해 줌으로써 파력을 산정할 수 있다. 다만, 본 연구에서는 Table 2에 보인 것처럼 모든 파력저감계수를 상수로 나타내었는데, 이중에서 일부 계수들은 Takahashi 공식과 같이 함수 형태 또는 구간별로 다른 값을 가지는 형태로 제시하는 방법을 검토할 필요가 있다.

그 결과 이중유수실 중간벽의 파력저감계수 값은 전면벽 및 후면벽에 비해서는 훨씬 작게 나타났으며, 평균적으로 Goda 파압공식에 의해 계산되는 파력의 50% 이내에 분포하였다. 한편, 이중유수실 케이슨 전면벽과 후면벽의 파력저감계수 값은 단일유수실 케이슨에 대하여 제안된 Takahashi 파압공식과 유사한 값을 보였다. 다만, 본 연구에서는 Table 2에 보인 것처럼 모든 파력저감계수를 상수로 나타내었는데, 이중에서 일부 계수들은 Takahashi 공식과 같이 함수 형태 또는 구간별로 다른 값을 가지는 형태로 제시하는 방법을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서 제시된 결과는 이중유수실 케이슨 설계 실무에 시범적으로 활용하는 것이 가능할 것으로 기대되며, 향후 실제 설계사례를 대상으로 한 안정성 검토 및 불규칙파를 대상으로 한 검증 실험 등을 통해 다양한 측면에서 적용성에 대한 종합적인 검토가 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 ‘기후변화대응 항만설계기준 개선 방안연구(1단계) (PM59110)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bergmann, H. and Oumeraci, H. (2000). “Wave loads on perforated caisson breakwaters.” Proc. 27th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 1622-1635.
- Chen, X., Li, Y. and Sun, D. (2002). “Regular waves acting on double-layered perforated caissons.” Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, 736-743.
- Franco, L., de Gerloni, M., Passoni, G., and Zaconi, D. (1998). “Wave forces on solid and perforated caisson breakwaters: comparison of field and laboratory measurements.” Proc. 26th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 1945-1958.
- Goda, Y. (1974). “New wave pressure formulae for composite breakwaters.” Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. (ICCE1974), 1702-1720.
- Li, Y.C. (2007). “Interaction between waves and perforated-caisson breakwaters.” Proc. 4th Int. Conf. Asian Pac. Coasts., 1-16.
- Oh, S.-H., Ji, C.-H., Oh, Y. M., Jang, S.-C., and Lee, D. S. (2014). “Comparison of maximum horizontal wave force acting on perforated caisson breakwater with single and double chamber.” Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(5), 335-341 (in Korean).
- Tabet-Aoul, E-H. and Lambert, E. (2003). “Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson.” J. Wtrwy., Port, Coast. Oc. Engrg., 129(1), 34-40.
- Takahashi, S. and Shimosako, K. (1994). “Wave pressure on a perforated wall caisson.” Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction (HYDRO-PORT '94), 747-764.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K (1994a). “Dynamic response and sliding of breakwater caisson against impulsive breaking wave forces.” Proceedings of the International Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, 362-401.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1994b). “A proposal of impulsive pressure coefficient for design of composite breakwaters.” Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction.

Received 28 October, 2015

1st Revised 7 December, 2015

2nd Revised 15 December, 2015

Accepted 16 December, 2015