

유수실 상부 덮개가 유공 케이슨 방파제의 전면벽 및 후면벽 파압에 미치는 영향

오상호* · 지창환** · 오영민*** · 장세철****

Oh, Sang-Ho*, Ji, Chang-Hwan**, Oh, Young-Min***, Jang, Se-Chul****

Influence of Wave Chamber Slab on Wave Pressure on First and Second Wall of Perforated Caisson Breakwater

ABSTRACT

In this study, the effect of wave chamber slab on wave pressure along the first and second wall of the perforated caisson breakwater was investigated by performing physical experiment. The experiment was performed without and with the wave chamber slab of the perforated caisson by varying the front wall porosity. The discrepancy in magnitudes of the measured wave pressure along the both walls of the perforated caisson was apparent according to the existence of the wave chamber slab as significantly greater pressures were acquired for all the test cases when the wave chamber was closed upward by the slab. As a result, the magnitudes of the total wave force calculated by integration of the measured wave pressure also were much larger for the caisson breakwater having the wave chamber slab, exceeding the value based on the well known Takahashi's formula (Takahashi and Shimosako, 1994). With respect to the porosity of the front wall, meanwhile, higher pressures were obtained with a larger porosity, at both the first and second wall of the breakwater.

Key words : Caisson breakwater, Perforated caisson, Wave pressure, Wave chamber slab, Physical experiment

초 록

이 연구에서는 수리모형실험을 통해 유수실 상부 덮개가 유공 케이슨 방파제 전면벽 및 후면벽에서의 파압에 미치는 영향을 고찰하였다. 수리모형실험은 유공 케이슨의 유수실 상부 덮개가 있는 경우 및 없는 경우에 대해서 전면벽 유공률을 변화시키면서 이루어졌다. 유수실 상부가 덮개로 막혀 있을 때에는 모든 실험 조건에서 유의미하게 더 큰 파압이 취득되었으며 따라서 유수실 상부 덮개 존재에 따른 두 벽에서의 계측 파압 차이는 매우 뚜렷하게 나타났다. 그 결과 계측 파압을 적분하여 계산된 전파력의 크기 역시 상부 덮개가 있는 케이슨 방파제의 경우가 더 컸으며, 이 경우 잘 알려진 Takahashi의 파압식에 근거한 과력값을 상회하였다. 한편, 전면벽 유공률에 따라서는 방파제 전면벽 및 후면벽에서 모두 유공률이 클수록 더 큰 파압이 계측되었다.

검색어 : 케이슨 방파제, 유공 케이슨, 파압, 유수실 덮개, 수리모형실험

* 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 책임연구원 (Corresponding Author · KIOST · ohsangho@kiost.ac)

** 한국해양과학기술원 연수연구원 (chji@kiost.ac)

*** 정회원 · 한국해양과학기술원 책임연구원 (ymoh@kiost.ac)

**** 한국해양과학기술원 선임기술원 (scjang@kiost.ac)

Received June 11, 2013/ revised August 8, 2013/ accepted September 17, 2013

1. 서론

지금까지 다양한 형식의 유공 케이슨 방파제가 개발되어 항만에 적용되었으며, 이에 관련된 연구도 폭넓게 수행되어 왔다. 유공 케이슨에 관련된 연구 중에서 가장 많은 비율을 차지하는 것은 반사율 저감 효과에 관련된 연구들이다(Jarlan, 1961; Evans, 1990; Losada et al., 1993; Suh and Park, 1995; Isaacson et al., 2000; Suh et al., 2006). 한편, 유공 케이슨 방파제에 작용하는 파압에 관해서도 여러 연구들이 수행되어 왔으며(Takahashi and Shimosako, 1994; Allsop et al., 1996; Franco et al., 1998; Bergmann and Oumeraci, 2000; Tabet-Aoul and Lambert, 2003; Liu et al., 2008), 국내의 경우 Takahashi 파압 공식(Takahashi and Shimosako, 1994)이 주로 사용되고 있지만 다양한 형상 및 재원을 고려한 유공 케이슨 설계 실무에 활용되기에는 한계점을 가지고 있다.

특히, Takahashi의 파압 공식은 상부 덮개가 없는 단일 유수실 유공 방파제에 대한 수리모형실험 결과에 근거하고 있기 때문에 상부 덮개가 존재하는 경우에 대해서는 적용하기가 어렵다. 일반적으로는 유수실 상부 덮개가 있을 경우 유수실 내 파압이 더 커지며 상부 덮개에 타상력이 작용하는 등 부정적인 효과가 많기 때문에 가급적 유수실 상부 덮개가 없는 형태의 방파제를 설계하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 그러나 현장 여건 및 특수한 필요가 있는 경우에는 유수실 상부 덮개를 막는 형태의 방파제 시공을 고려해야 하는 경우도 생기게 되며, 이러한 경우 어느 정도로 파압의 크기를 산정하는 것이 타당한지 결정하는데 많은 어려움이 있다. 이와 관련하여 최근 수행된 Oh et al. (2013)의 연구에서는 유수실 상부 덮개가 있는 경우의 유공 전면벽 파압 분포를 제시한 바 있지만, 유수실 상부 덮개가 없는 경우 및 유수실 내측벽 파압 분포에 대한 실험 결과는 없었기 때문에 유수실 상부 덮개가 파압에 미치는 영향에 관하여 보다 심도있는 결론을 도출하지는 못하였다.

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 유수실 상부 덮개가 있는 경우 및 없는 경우에 대한 실험을 각각 수행하여 유수실 상부 덮개가 케이슨 방파제의 전면벽 및 후면벽 파압에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 이를 위해서 케이슨 방파제 전면벽의 유공률을 변화시키면서 유공 케이슨 전면벽 및 유수실 내측벽에 작용하는 파압을 함께 계측하여 유수실 상부 덮개 유무에 따른 수평파압 분포 및 파력의 변화 양상을 종합적으로 검토하였다.

2. Takahashi 파압 공식

본 연구에서 수리모형실험을 통해 계측된 수평파압을 Takahashi의 파압 공식(Takahashi and Shimosako, 1994)과 비교하였기 때문에 이 파압 공식의 핵심적인 내용을 아래에 요약하여 제시하였다.

Takahashi의 파압 공식은 무공 직립벽에 대하여 제안된 Goda의 파압식을 유공 케이슨 방파제에 적용 가능하도록 확장한 형태이다. 무공 직립벽과는 달리 유공 케이슨의 경우 각 부재에 작용하는 최대 파압이 파의 위상(phase)에 따라 다르게 작용할 수 있기 때문에 파압 공식도 파의 중요한 위상 별로 다르게 평가될 필요가 있으며 (Tanimoto and Takahashi, 1994), Takahashi 파압 공식에서는 Fig. 1에 보인 것과 같이 여섯 개의 서로 다른 파의 위상을 고려하였다. Fig. 1에서 Crest I은 유공 전면벽에서 가장 큰 파압이 작용하는 경우에 해당하며, Crest IIa 및 IIb는 각각 유수실 후면벽에 충격파 및 비충격파적 파력 최대값이 작용하는 경우에 해당한다. 또한 Trough I, II, III는 방파제에 부압(negative force)이 작용하는 경우의 파의 위상에 대응된다.

Takahashi 공식에 따른 수평 파압 분포는 충격파를 고려한 Goda의 파압 공식(Takahashi et al., 1993)에 보정 계수 λ_1 및 λ_2 를 포함시킨 형태로서 다음과 같이 표현된다.

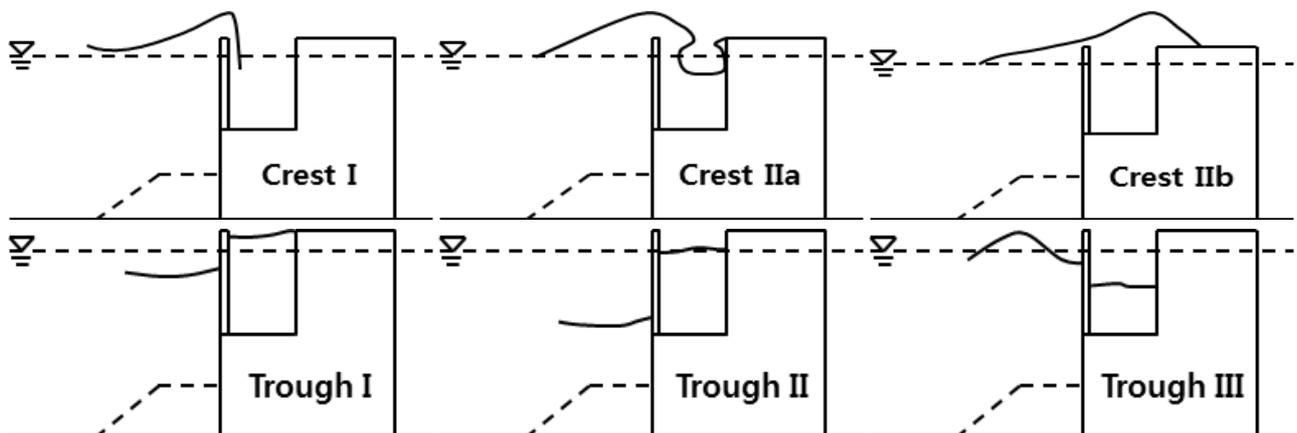


Fig. 1. Six Different Wave Phases on the Perforated Caisson Defined by Takahashi and Shimosako (1994)

$$p_1 = 0.5(1 + \cos\beta)(\lambda_1\alpha_1 + \lambda_2\alpha^* \cos^2\beta)w_0H_{\max} \quad (1)$$

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos\beta)\lambda_1H_{\max} \quad (2)$$

여기서 보정계수 λ_1 , λ_2 를 제외한 나머지 파라미터의 정의는 Goda의 파압 공식과 동일하므로 설명을 생략하였다. 한편, λ_1 , λ_2 의 값은 위에서 언급된 여섯 개 파의 위상별로 다르게 주어지며, Fig. 2에 예를 들어 보인 것처럼 유공 케이스는 방파제의 부재별 위치에 따라 서로 다르게 적용된다. 만약 보정계수들의 값이 1이면 Goda의 파압 공식과 일치하게 된다. 본 논문에서는 Crest I, Crest IIa 및 Crest IIb 위상에 대하여 전면벽의 유공부(λ_S) 및 무공부(λ_L), 그리고 후면벽(λ_R)에 대한 조정계수 값을 Table 1에 제시하였다.

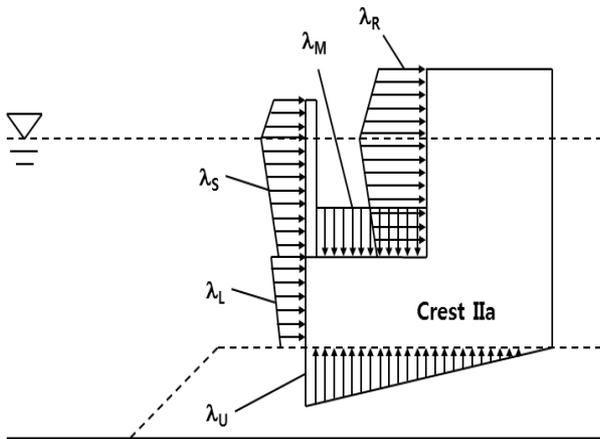


Fig. 2. Wave Pressure Distributions on the Perforated Caisson at Crest IIa Defined by Takahashi and Shimosako (1994)

3. 수리모형실험

3.1 실험시설 및 모형

수리모형 실험은 한국해양과학기술원 2차원 조파수조(길이 53 m, 높이 1.25 m, 폭 1 m)에서 수행되었다. 실험을 효율적으로 수행하기 위해서 수조의 종방향으로 연직 분할판을 설치하여 수조를 폭 0.6m의 광수로와 폭 0.4m의 협수로로 분할하여 광수로는 방파제 모형을 설치하였고, 협수로는 통과 입사파를 계측하였다. 모형 방파제는 조파기로부터 36m 떨어진 평평한 곳에 설치되었으며, 방파제 전면 해저 경사는 1/40로 재현되었다.

모형 방파제의 제원은 Fig. 3에 보인 것처럼 높이 55 cm, 폭 59cm, 길이 70cm이며, 투명 아크릴로 제작되어 높이 5.5cm의 사석 마운드 위에 설치되었다. 방파제 전·후면으로부터의 사석 마운드 길이는 모두 21cm로 동일하였다. 방파제는 유수실이 1개인 유공 방파제 형식이며, 전면 유공벽의 유공률(P)은 20, 25, 30%로 변화시키고 유수실 상부 덮개는 열거나 닫을 수 있도록 제작되었다. Fig. 3에 보인 케이스 모형의 측면도는 상부 덮개가 있는 경우를 나타내며, 케이스 모형 전면도는 유공률이 20%인 경우에 해당한다. 한편, 케이스 전면벽의 유공부 위치는 케이스 바닥으로부터 22cm 높이로부터 케이스 상단 아래 5.5cm까지 27.5cm 구간이며, 이는 케이스 높이의 50%에 해당한다. 모형 방파제 위쪽에는 높이 10cm인 상치 구조물을 설치하였다. 본 실험 대상 방파제의 제원은 특정한 적용 지역을 염두에 두고 선정된 것은 아니지만, 실험 축척을 1:40으로 가정하여 모형 제원 및 실험 조건 결정 시 활용하였다. Fig. 4에는 실험 모형이 조파수조 내에 설치된 사진을 제시하였다.

Table 1. Modification Factors for Horizontal Wave Forces on Perforated Caisson

| Phase | Value |
|-----------|---|
| Crest I | $\lambda_{S1}=0.85, \lambda_{S2}=0.4(\text{if } \alpha^* \leq 0.75), 0.3/\alpha^*(\text{if } \alpha^* > 0.75)$ |
| | $\lambda_{L1}=1.0, \lambda_{L2}=0.4(\text{if } \alpha^* \leq 0.75), 0.2/\alpha^*(\text{if } \alpha^* > 0.75)$ |
| | $\lambda_{R1}=0, \lambda_{R2}=0$ |
| Crest IIa | $\lambda_{S1}=0.7, \lambda_{S2}=0$ |
| | $\lambda_{L1}=0.75, \lambda_{L2}=0$ |
| | $\lambda_{R1}=20B/3L(\text{if } B/L \leq 0.15), 1.0(\text{if } B/L > 0.15), \lambda_{R2}=0.56(\text{if } \alpha^* \leq 25/28), 0.5/\alpha^*(\text{if } \alpha^* > 25/28)$ |
| Crest IIb | $\lambda_{S1}=0.3, \lambda_{S2}=0$ |
| | $\lambda_{L1}=0.65, \lambda_{L2}=0$ |
| | $\lambda_{R1}=1.4(\text{if } H_{\max}/h \leq 0.1), 1.6-2H_{\max}/h(\text{if } 0.1 < H_{\max}/h < 0.3), 1.0(\text{if } H_{\max}/h \geq 0.3), \lambda_{R2}=0$ |

h : the water depth in the wave chamber

B : the width of the wave chamber

L : the wave length at water depth h

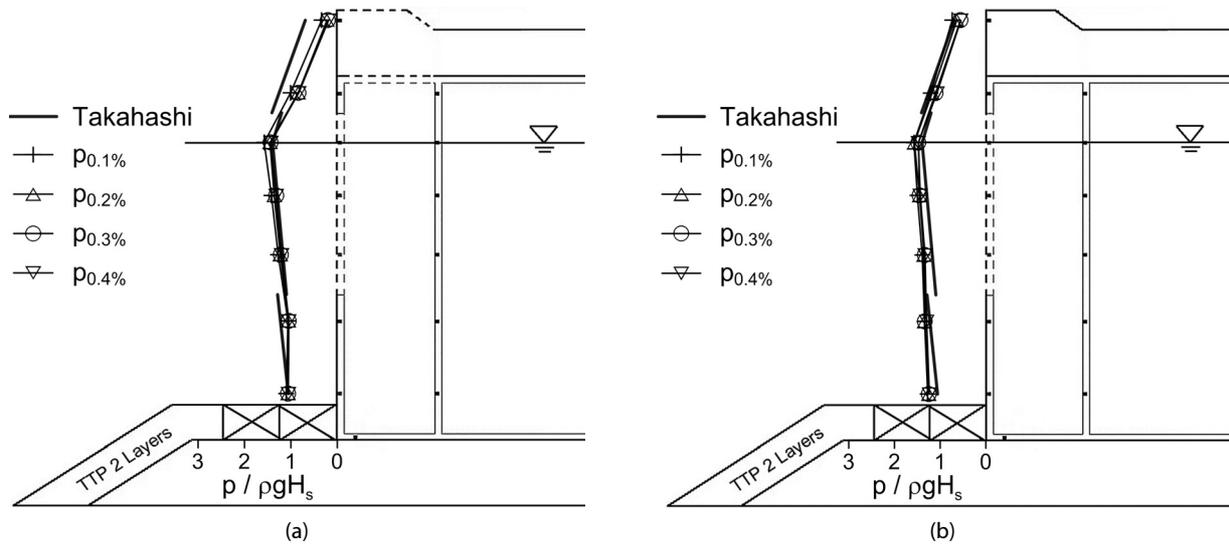


Fig. 5. Distribution of $p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$ on the First Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab (When $P = 0.25$, $T_s = 2.44$ s, and $H_s = 11.8$ cm)

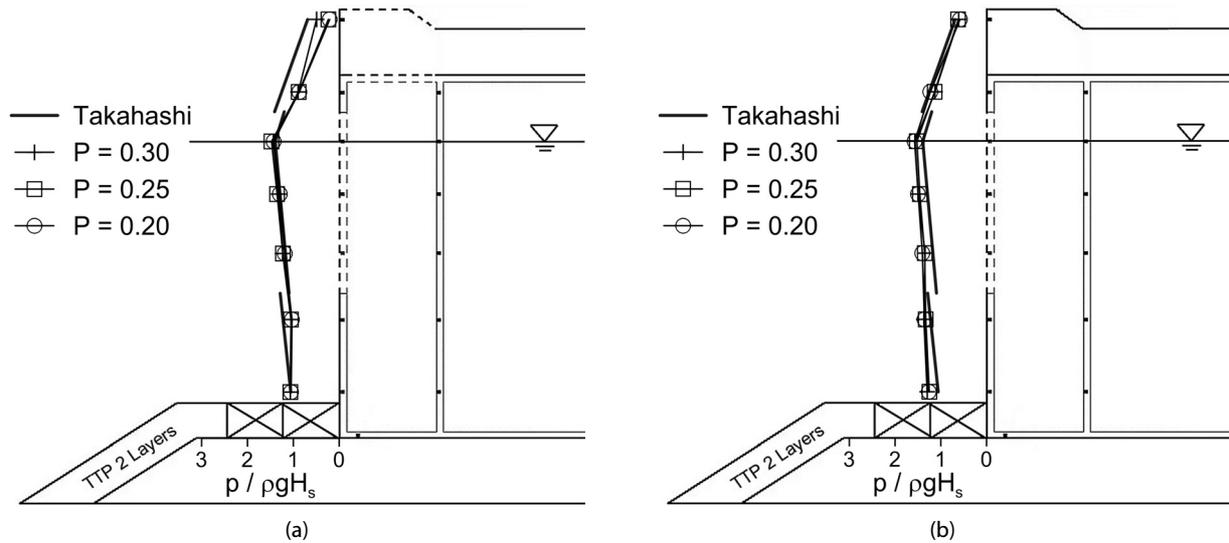


Fig. 6. Comparison of $\bar{p}_{0.4\%}$ on the First Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab for Different Front Wall Porosity ($T_s = 2.44$ s, and $H_s = 11.8$ cm)

중에서 $T_s = 2.44$ s, $H_s = 11.8$ cm 일 때에 유공 케이슨 전면벽에서 계측된 상위 4개 파압($p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$)을 $\rho g H_s$ 로 무차원화하여 제시하였다. 여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, 그리고 H_s 는 유의파고를 나타낸다. 상위 4개의 계측 파압은 동시 파압이 아니며, 각 지점별 최대파압을 나타낸다. Fig. 5(a)에는 유수실 상부 덮개가 없는 경우, Fig. 5(b)에는 있는 경우의 그림을 각각 제시하였으며, 각 그림에서 굵은 실선은 Takahashi의 파압식에서 전면벽에 가장 큰 파압이 작용하게 되는 파의 위상(Takahashi and Shimosako (1994)에서 Crest I에 해당)일 때의 파압을 나타낸다. Takahashi의 파압식에 의하면 유

공부의 경우 작용 파압이 더 작게 계산되기 때문에 Fig. 5에 보인 것처럼 유공부와 무공부의 경계면에서는 파압이 불연속적으로 변하게 된다. Fig. 5에 보인 실험과 조건($T_s = 2.44$ s, $H_s = 11.8$ cm)에서는 상부 덮개 유무에 상관 없이 공통적으로 상위 4개 파압 사이에 큰 차이가 없었으며, 대체로 Takahashi의 파압 공식과 유사한 형태의 파압 분포를 나타내었다. 다만, 유수실 상부 덮개가 없는 경우(Fig. 5(a))에 비해서 있을 때(Fig. 5(b))의 파압이 18.9% 더 크게 계측됨을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 6에는 이렇게 계측된 상위 4개 파압의 평균 분포($\bar{p}_{0.4\%}$)

를 나타내었으며, 전면벽 유공률이 20%인 경우($P=0.2$)와 30%인 경우($P=0.3$)의 결과도 함께 제시하였다. Fig. 6에서 세 가지 유공률에 대한 평균 파압분포는 유수실상부 덮개가 있는 경우가 없는 경우에 비해서 20.8% 더 크게 나타났으며, 이것은 Figs. 5(a) and (b)에서 나타난 파압 차이에 상응하는 결과이다. 한편, 유수실상부 덮개 유무에 관계없이 $\bar{p}_{0.4\%}$ 의 분포는 유공률이 서로 다르더라도 서로 비슷함을 알 수 있다. 다만, Fig. 6(a)의 경우 $P=0.3$ 인 경우 상치구조물에 위치한 가장 윗 쪽의 파압계(P1)에서 계측된 평균 파압이 나머지 두 가지 경우($P=0.2, 0.25$)에 비해서 2배 가까이 컸는데 이것은 유공률 30%

인 경우의 최대 파압($p_{0.1\%}$)이 Takahashi의 파압식에 비해서 약 3배 정도 크게 계측된 것에 따른 결과이다. 그러나 최대파압을 제외한 나머지 상위 3개 파압($p_{0.2\%} \sim p_{0.4\%}$)의 경우에는 모두 Takahashi 파압식보다 작은 파압이 계측되었다. 이처럼 Takahashi 파압을 초과하는 큰 파압이 상치구조물 위치에서 실험 중 1회 계측된 이유는 명확하지 않지만 일시적으로 큰 파가 해당 파압계 위치에 작용하였기 때문인 것으로 추정된다.

비록 Figs. 5 and 6에서는 유공 케이슨 전면벽의 상위 4개 파압분포가 서로 유사하면서 Takahashi의 파압식과도 잘 일치하였고, 전면벽

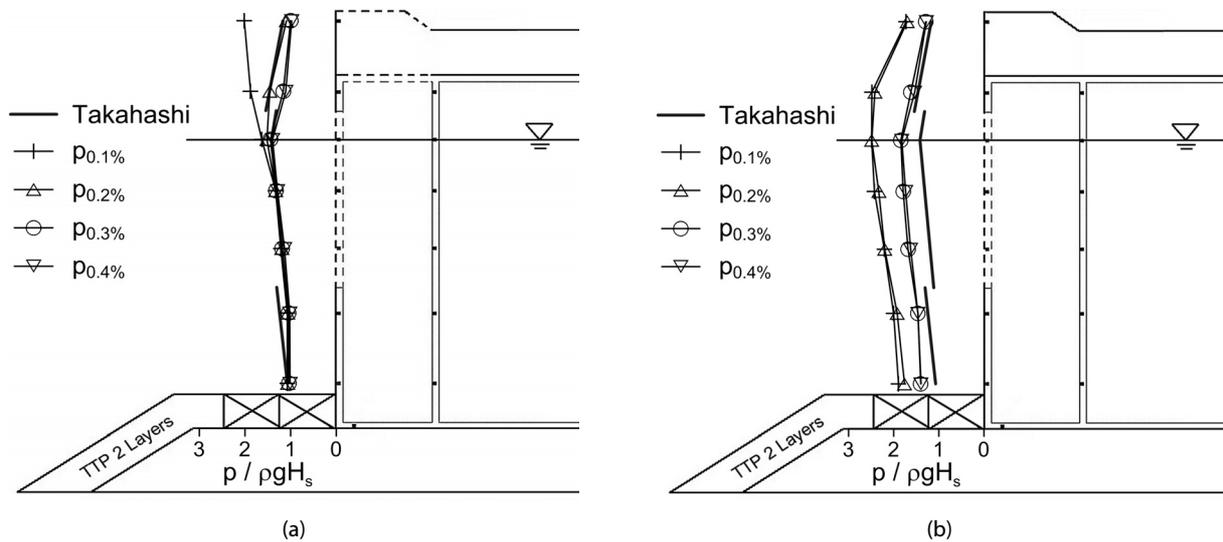


Fig. 7. Distribution of $p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$ on the First Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab (When $P = 0.25$, $T_s = 2.44$ s, and $H_s = 23.1$ cm)

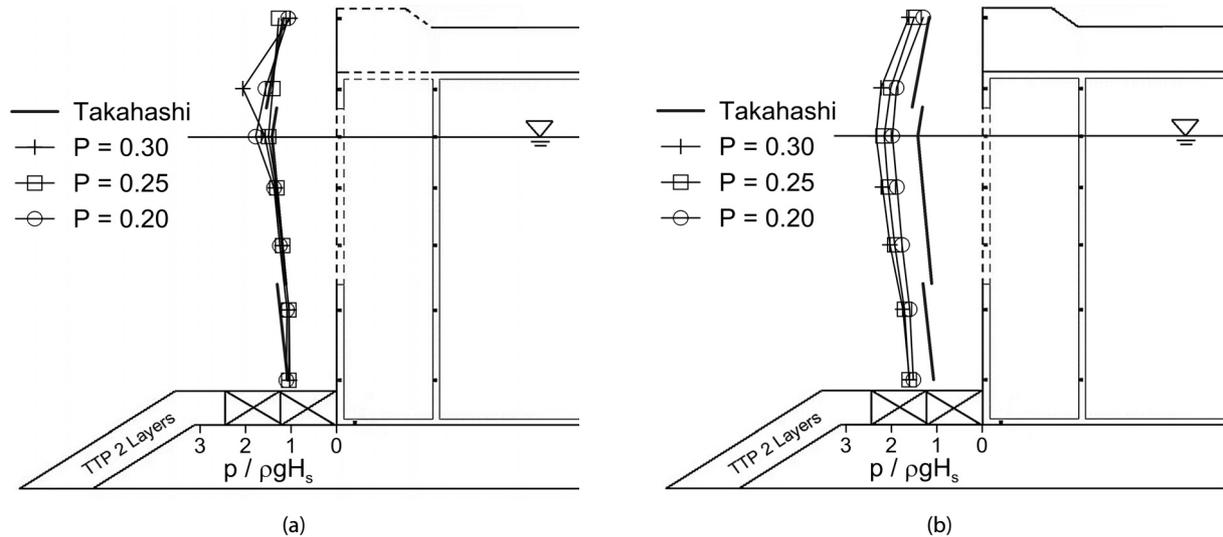


Fig. 8. Comparison of $\bar{p}_{0.4\%}$ on the First Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab for Different Front Wall Porosity ($T_s = 2.44$ s, and $H_s = 23.1$ cm)

유공률에 따른 파압 차이도 크지 않은 경향을 나타내었지만 이러한 결과가 모든 실험과 조건에 대해서 적용되는 것은 아니었다. Figs. 7 and 8에는 Figs. 5 and 6에서 보인 실험과 조건과 주기는 같고 파고는 약 2배 정도 되는 $T_s = 2.44$ s, $H_s = 23.1$ cm인 경우에 대한 결과를 제시하였으며, 이 그림들로부터 Figs. 5 and 6과는 구별되는 파압 분포 특성을 발견할 수 있다. Fig. 7에는 유수실 상부 덮개 유무에 따른 $p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$ 의 분포가 제시되었으며 앞서 보인 Fig. 5와는 달리 상위 4개 파압간 차이가 더 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 유수실 상부 덮개가 없는 경우(Fig. 7(a))에는 정수면을 포함하여 그보다 아래쪽에 있는 파압계(P3~P7)에서는 $p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$ 간의 파압 차이가 7% 이내였던 반면 그 위쪽 파압계(P1~P2)에서는 $p_{0.3\%}$ 및 $p_{0.4\%}$ 에 비해서 $p_{0.2\%}$ 는 20%, $p_{0.1\%}$ 는 83% 큰 파압이 계속되었다.

한편, 유수실 상부 덮개가 있는 경우(Fig. 7(b))에는 방파제 전면벽 전단면을 따라서 $p_{0.1\%}$ 및 $p_{0.2\%}$ 의 분포가 $p_{0.3\%}$ 및 $p_{0.4\%}$ 에 비해서 모든 계측점에서 훨씬 더 큰 값을 나타내었다. $p_{0.4\%}$ 에 비해서 $p_{0.3\%}$ 는 2% 컷을 뿐이지만, $p_{0.2\%}$ 는 37%, $p_{0.1\%}$ 는 40% 큰 파압이 계속되었다. 또한 Fig. 5(b)에서 보인 경향과는 달리 모든 계측점에서 상위 4개 파압의 크기가 모두 Takahashi 파압식에 비해서 더 크게 계속되었으며, 평균적으로는 계속값이 파압식에 비해서 48% 더 컸다. 한편, Fig. 8(b)에 보인 것처럼 전면벽 유공률에 따른 평균파압($\bar{p}_{0.4\%}$)의 크기도 명백한 차이를 보였다. $P=0.2$ 인 경우에 비해서 $P=0.25$ 일 때는 9%, $P=0.3$ 일 때는 15% 큰 파압이 계속되어 유공률이 클수록 유공벽 전면에서의 전체적인 파압 크기가 커지는 경향을 나타내었다. 반면에 유수실 상부 덮개가 없는 경우에는 Fig. 8(a)에서와 같이 정수면 위쪽에서의 파압 분포는 서로 차이를 보였지만, 유공률 증가에 따른 파압의

크기가 일관된 경향을 나타내지는 않았으며 위에서도 언급된 것처럼 한두 차례의 큰 파압이 상치구조물 부분에 작용함에 따른 결과로 나타나는 현상으로 파악되었다.

Figs. 5~8에서 보인 것처럼 유수실 상부 덮개 유무에 따른 유공 전면벽의 파압 분포는 분명한 차이를 나타내었다. 모든 실험 조건에 대해서 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우의 파압 크기가 더 크게 나타났으며 일부 실험과에서는 Takahashi의 파압식에 비해서 2~3배 더 큰 지점별 파압이 계속되기도 하였다. 이처럼 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우의 파압이 일관되게 크게 계속되는 이유는 상부 덮개가 존재하는 경우 전면벽 유공부를 통해서 배출되지 못하고 남은 유수실 내 공기가 압축되었다가 갑자기 터지면서 이로 인해 발생하는 압력이 유수실 벽체 및 상부 덮개에 전달되기 때문인 것으로 파악된다. 근본적으로 Takahashi의 파압식은 유수실 상부 덮개가 존재하지 않는 경우의 수리모형 실험 결과(Takahashi and Shimosako, 1994)에 근거하여 만들어진 식이기 때문에 상부 덮개가 존재하는 경우에는 Takahashi의 파압식에 비해서 더 큰 파압이 취득될 수 있다. 다만, 유수실 내 공기 압축 및 터짐 현상은 실험과 조건 중에서 비교적 파형경사가 큰 실험과의 경우에 더 강하게 발생하게 되기 때문에 그 경우 파압 계속값과 Takahashi 파압식과의 차이도 더 커지게 되는 것으로 나타났다. Fig. 8에 보인 것처럼 상부 덮개가 존재하는 경우 전면벽 유공률이 클수록 전면벽 파압의 크기가 커지게 되는 것도 유공률이 큰 경우 더 많은 물이 유공부를 통해서 유수실 안쪽으로 침투하게 됨에 따라 유수실 내부에서 더 빠르고 강한 공기 압축을 유발하면서 더 큰 파압이 계속되는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 9에는 20개의 모든 실험과 조건에 대해서 유공 전면벽에서

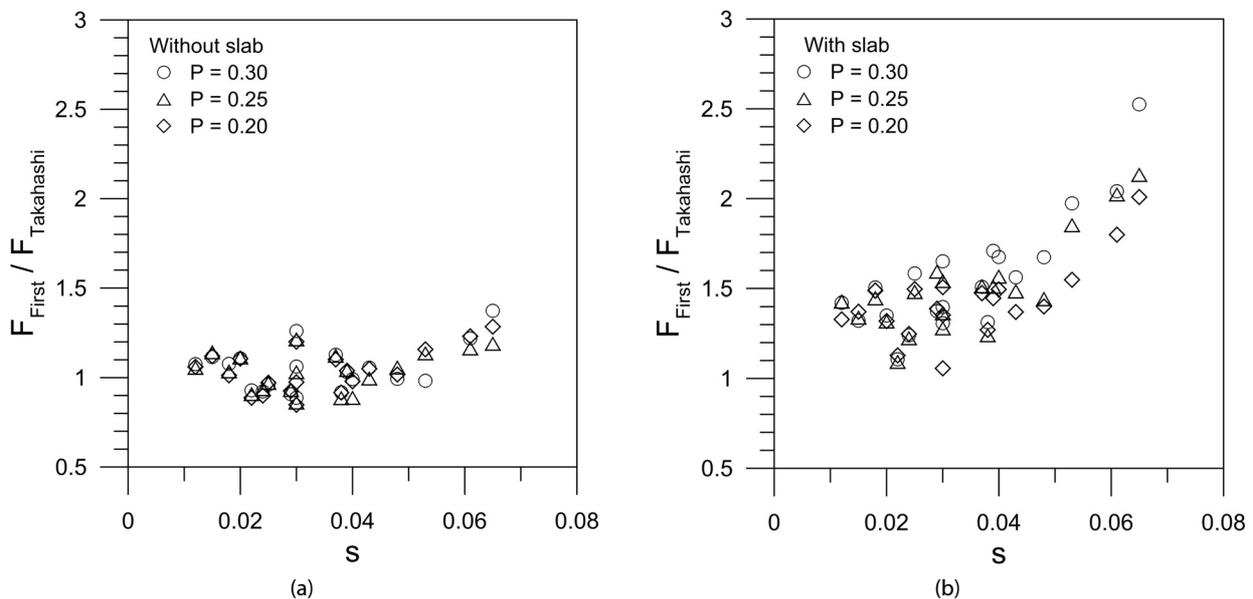


Fig. 9. Normalized Integrated Wave Force Acting on the First Wall of Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab

계측된 상위 4개 파압의 평균 분포($\bar{p}_{0.4\%}$)를 계산하고 이를 적분하여 총파력(F_{First})을 계산한 후 이를 Takahashi의 파압식에 의해 구해지는 파력($F_{Takahashi}$)으로 무차원화한 값을 파형경사(s)에 관하여 나타내었다. 단, 총파력 계산 시에는 전면벽 유공부의 유공률에 따른 단면적 감소를 고려하여 계산을 수행하였다. Fig. 9(a)에 보인 것처럼 유수실 상부 덮개가 없을 때는 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 의 값이 대체로 1 근처에서 형성되었다. 다만, 일부 실험 자료의 경우에는 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 의 값이 1.4 정도에 이르는 등 비교적 큰 경우가 있었는데, 이것은 Figs. 6(a) and 8(a)에서와 같이 정수면 위쪽에 위치한 파압계에서 1~2회 정도 Takahashi 파압을 크게 상회하는 파압이 계측됨에 따른 결과이다. 반면에, Fig. 9(b)에 보인 것처럼 유수실 상부 덮개가 있는 경우에는 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 의 값이 대체로 1보다는 큰 값을 나타내었으며, 특히 파형경사(s)에 따라서 증가하는 경향을 보였다. 이로부터 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우 유공 케이스 전면벽에 작용하는 파력이 Takahashi의 파압식에 비해서 더 크며, 그 상대적인 차이는 파형경사가 커짐에 따라서 더욱 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한, 파압의 결과와 마찬가지로 유공률 증가에 따라서 전면벽 작용 파력이 커지게 됨을 확인할 수 있었다. $P=0.2$ 인 경우에 대한 총파력의 증가율은 $P=0.25$ 일 때는 4.8%, $P=0.3$ 일 때는 9.6%로 나타났다. 이처럼 파형경사 및 유공률 증가에 따른 파력의 증가 경향은 이러한 조건에서 유수실 내 공기 압축 및 터짐 현상이 더 쉽게 발생하기 때문인 것으로 추정된다.

한편, Oh et al. (2013)의 Fig. 12(c)에서도 Fig. 9(b)와 유사한 그림을 제시한 바 있는데, 전체적인 경향은 두 그림이 유사하지만 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 의 값이 Oh et al. (2013)에서는 1.05~1.72의 범위였던 반면 본 논문에서는 1.06~2.53의 범위로서 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 의 값이

대체로 더 크게 제시되었다. 이러한 차이가 발생한 이유는 Oh et al. (2013)에서 제시한 일부 결과의 경우 파압계의 용량한계 등의 문제로 인해서 유수실 내 강한 공기 압축이 발생한 경우의 일부 실험 자료에서 파압의 최대값이 온전히 계측되지 못했기 때문이다. 본 연구에서는 선행 연구에서 이러한 문제점이 있음을 발견한 후 해당 실험과 조건에 대하여 용량이 더 큰 파압계를 배치하고 재실험 및 재분석을 수행하여 유수실 내 공기 압축 발생에 따른 충격과적 파압 최대값이 잘 계측되도록 하였으며, 이 실험 자료를 이용하여 분석된 결과를 Fig. 9(b)에 제시하였다.

4.2 유공 케이스 후면벽에 작용하는 파압 및 파력

유공 케이스 후면벽에 작용하는 파압에 대해서도 전면벽의 경우와 마찬가지로 초과확률 0.4%에 대응되는 상위 4개 파압 분포를 찾고 이를 평균한 파압($\bar{p}_{0.4\%}$)과 Takahashi의 파압식을 비교하는 분석을 수행하였다. 유공 케이스 후면벽의 경우 일반적으로 파봉이 후면벽에 위치하는 위상에서 가장 큰 파압이 발생하기 쉬우며, 실제로 Takahashi 파압식에서도 이러한 조건(Takahashi and Shimosako (1994)에서 Crest IIb에 해당)에서 후면벽 파압이 가장 크게 계산된다. 따라서 본 연구에서도 유수실 후면벽에서 계측된 파압을 Crest IIb 조건에서의 Takahashi 파압식과 비교하였다. Fig. 10은 전면벽 유공률이 25%인 경우 $T_s=2.44$ s, $H_s=11.8$ cm인 실험과에 대한 무차원 후면벽 파압계측 결과를 나타낸 것이다. 4.1절에서와 마찬가지로 Fig. 10에 보인 상위 4개 계측파압($p_{0.1\%}\sim p_{0.4\%}$)은 동시 파압이 아니며 각 지점별 최대파압에 해당한다. 이 실험과 조건에서는 유수실 상부 덮개가 없거나(Fig. 10(a)) 있는(Fig. 10(b)) 경우 모두 상위 4개 계측파압의 값이 큰 편차를 보이지 않았다. 또한, 계측파압의 크

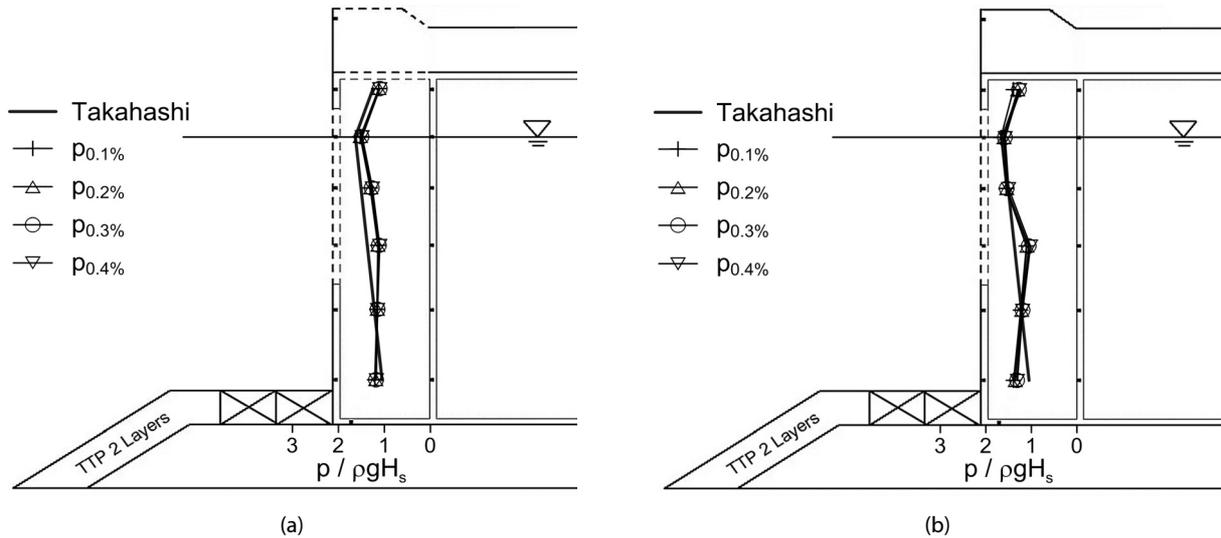


Fig. 10. Distribution of $p_{0.1\%}\sim p_{0.4\%}$ on the Second Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab (When $P=0.25$, $T_s=2.44$ s, and $H_s=11.8$ cm)

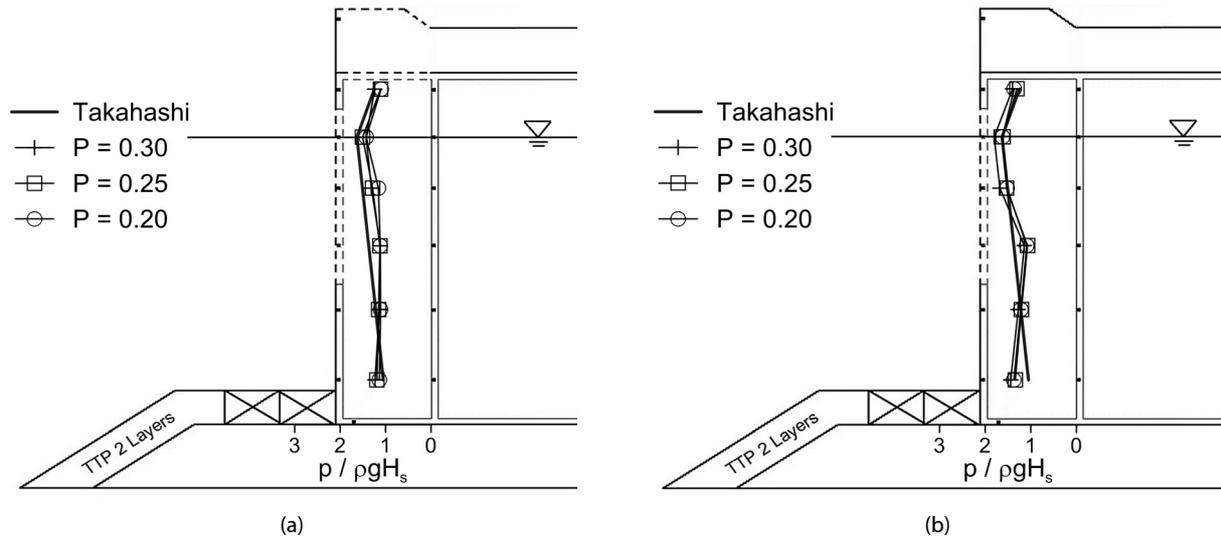


Fig. 11. Comparison of $\bar{p}_{0.4\%}$ on the Second Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab for Different Front Wall Porosity ($T_s = 2.44$ s, and $H_s = 11.8$ cm)

기는 상부 덮개가 없는 경우와 있는 경우 모두 Takahashi 파압식과 비교적 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 한편, Fig. 11에는 전면벽 유공률이 20, 25, 30%인 경우 각각에 대해서 상위 4개 파압의 평균 분포 ($\bar{p}_{0.4\%}$)를 제시하였으며, 이 실험과 조건에서는 상부 덮개 유무에 상관없이 전면벽 유공률이 다름에도 불구하고 $\bar{p}_{0.4\%}$ 의 분포가 대체로 비슷함을 확인할 수 있다.

그러나 Figs. 12 and 13에 보인 것처럼 주기는 같지만 파고는 2배 정도로 더 큰 $T_s = 2.44$ s, $H_s = 23.1$ cm인 조건에서는 유공 케이스 후면벽에서의 상위 4개 파압의 분포 및 그 평균파압의 유공률에 따른 차이가 전혀 다른 특성을 나타내었다. Fig. 12(a)에서와 같이 유수실 상부 덮개가 없는 경우에도 전반적으로 Takahashi 파압식을 초과하는 파압이 계측되었다. 특히 정수면 및 그 위쪽에 위치한 파압계(P10~P11)와 유수실 하부측(P14~P15)에 위치한 파압계에서 상대적으로 큰 파압이 취득되었다. 한편, 유수실 상부 덮개가 있는 경우에는 이와는 다른 특성이 나타났는데 정수면 바로 아래에 위치한 파압계(P12) 및 유수실 하부측 파압계(P14~P15)에서 큰 파압이 계측되었으며 그 크기는 Takahashi 파압식의 2배 이상이 될 정도로 매우 컸다. 특히, 이 경우에는 상위 4개 파압 간 크기가 매우 뚜렷한 차이를 나타내었다.

한편, Fig. 13에서 전면벽 유공률에 따른 평균파압($\bar{p}_{0.4\%}$)의 분포를 살펴보면, 상부 덮개가 없는 경우(Fig. 13(a))에는 대체로 유공률에 따른 파압분포의 차이가 크지 않았다. 정수면 바로 아래에 위치한 파압계(P12) 계측 자료를 제외하면 유공률에 따른 파압 크기는 2% 이내에 불과하였다. 다만, 정수면 바로 아래에 위치한 파압계(P12)에서는 유공률이 20%인 경우($P=0.2$)의 평균파압분포가 가장 크게 나타났는데, 최대 파압($p_{0.1\%}$)의 값이 다른 유공률 조건($P=0.25$ 또는

0.3)에 비해서 30% 이상 크게 계측됨에 따른 결과이다. 이러한 현상은 $P=0.2$ 일 때의 실험 중 $p_{0.1\%}$ 에 해당하는 파압을 유발한 특정한 하나의 파가 유공 케이스 후면벽에 큰 파압을 작용시켰기 때문에 나타난 결과로 분석되었다. 특별히, 상부 덮개가 없는 경우에는 전체 20개 실험과 중 2개 실험과 조건에서 $P=0.25$ 또는 0.3일 때에 비해서 $P=0.2$ 일 때 현저하게 큰 충격파적 파압이 정수면 바로 아래에 위치한 파압계(P12)에서 계측되었다. 이처럼 $P=0.2$ 일 때에만 특징적으로 큰 파압이 후면벽에 작용하게 되는 이유는 이 경우 비록 유수실 상부 덮개는 없지만 상대적으로 유수실 전면벽 유공부 면적이 가장 좁아서 충격파 형태로 유수실 내로 침투한 물의 일부가 순간적으로 유수실 내에 차폐되는 효과와 관련이 있을 것으로 추정된다.

반면에, 상부 덮개가 있을 때(Fig. 13(b))에는 전반적으로는 유공률이 증가함에 따라 5~15% 정도 더 큰 파압이 계측되는 경향이 나타났으며, 이는 전면벽에서 나타났던 결과와 같은 경향이였다. 그러나 정수면 바로 아래에 위치한 파압계(P12)에서만은 다른 계측점에 비해서 1.5~2배 정도 되는 매우 큰 파압이 계측되었으며, 또한 유공률이 작을수록 상대적으로 더 큰 파압이 나타났다. 또한 Fig. 12(b)에서도 알 수 있듯이 최대 파압($p_{0.1\%}$)은 물론 나머지 3개의 상위 계측 파압($p_{0.2\%} \sim p_{0.4\%}$)에서 모두 이러한 강력한 파압 작용 현상이 관측되었다. 녹화된 비디오 관측 영상을 관찰해 본 결과 방파제 전면에서 쇄파가 발생하면서 권파(plunging)와 유사한 형태로 직접 유수실 내로 물이 침투하면서 후면벽에 직접 물이 부딪힐 때 이러한 현상이 발생하기 쉬우며, 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우 유수실 내에서 순간적으로 물이 갇히기 때문에 상부 덮개가 없는 경우에 비해서 상대적으로 더 큰 파압이 계측된 것으로 분석되었다.

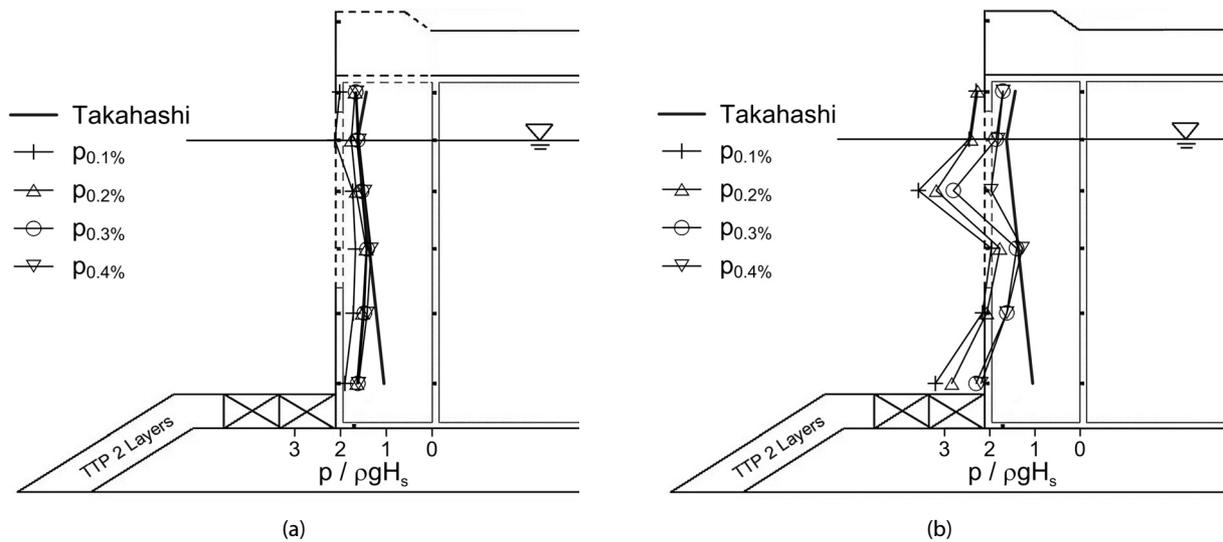


Fig. 12. Distribution of $p_{0.1\%} \sim p_{0.4\%}$ on the Second Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab (When $P = 0.25$, $T_s = 2.44$ s, and $H_s = 23.1$ cm)

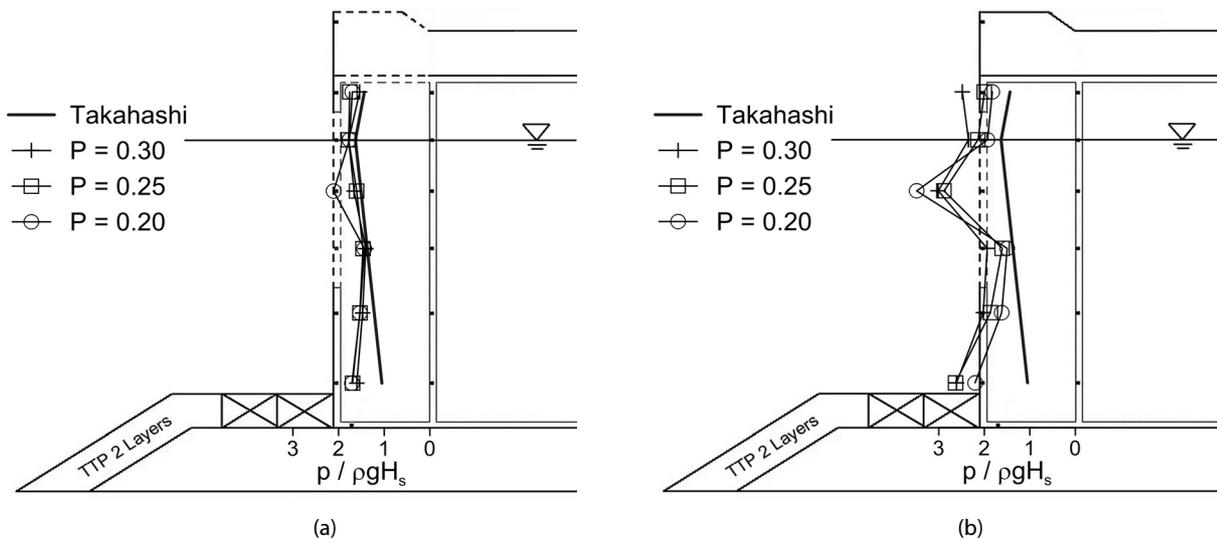


Fig. 13. Comparison of $\bar{p}_{0.4\%}$ on the Second Wall of the Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab for Different Front Wall Porosity ($T_s = 2.44$ s, and $H_s = 23.1$ cm)

마지막으로, Fig. 14에는 20개 전체 실험과 조건에 대해서 후면벽에서 계측된 상위 4개 파압의 평균 분포($\bar{p}_{0.4\%}$) 및 Takahashi 파압식을 이용한 파력 계산값을 비교하여 제시하였다. Fig. 14(a)에 보인 것처럼 상부 덮개가 없을 경우에는 $F_{Scond}/F_{Takahashi}$ 의 값이 대체로 1 근처에 분포하였으나 일부 실험과 조건에서는 1.5 이상 되는 큰 값을 나타내기도 하였으며, 이것은 위에서 언급한 것처럼 정수면 근처에서 매우 강한 충격파적 파압이 1~2회 정도 후면벽에 작용하게 됨에 따른 결과이다. 반면에, 상부 덮개가 존재하는 경우에는 $F_{Scond}/F_{Takahashi}$ 의 값이 대체로 1보다는 큰 값을 나타내었으며 파형경사(s)가 증가

함에 따라 급격하게 커지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 앞서 $F_{First}/F_{Takahashi}$ 에 대한 계산 결과와 매우 유사한 경향이지만, 전면벽 작용 파력(F_{First})에 비해서 후면벽 작용 파력(F_{Scond})이 상대적으로 파형경사가 작은 경우($s < 0.04$)에는 Takahashi 파압식에 의한 결과($F_{Takahashi}$)와 더 유사한 반면 파형경사가 커지게 되면($s \geq 0.04$) 오히려 $F_{Takahashi}$ 와의 편차가 더 커지는 경향을 나타내었다. 또한, Fig. 14(b)에서 유공률이 증가함에 따라서 후면벽 작용 파력도 대체로 커지는 경향을 확인할 수 있었다. $P=0.2$ 인 경우에 대한 총파력의 증가율은 $P=0.25$ 일 때는 5.2%, $P=0.3$ 일 때는 11.4%로 나타

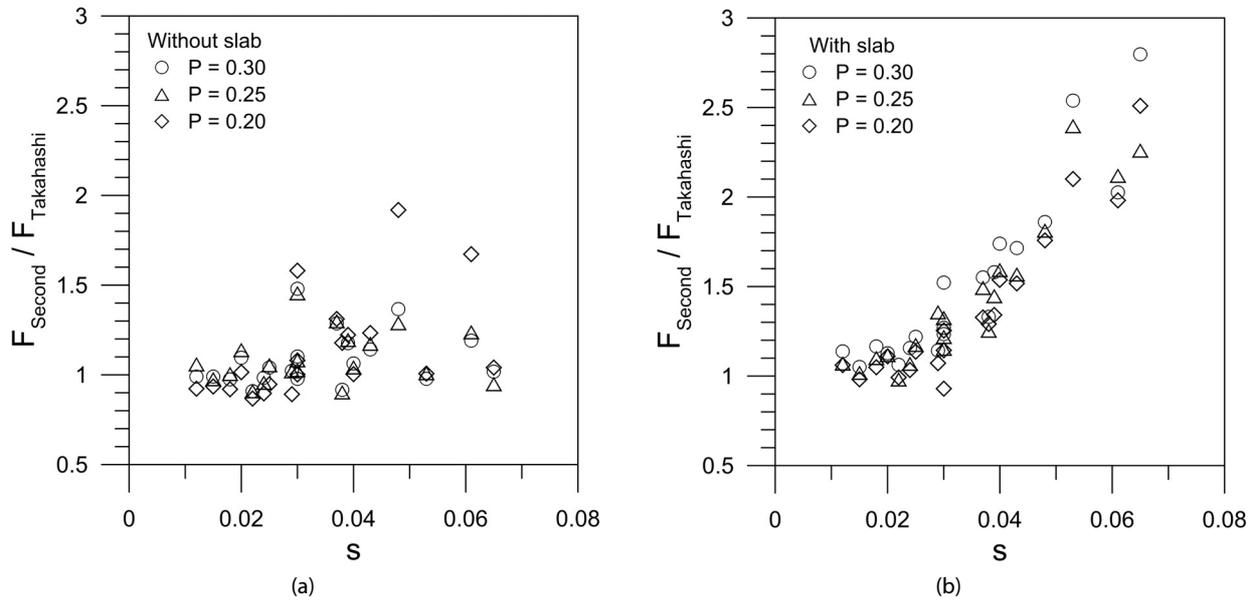


Fig. 14. Normalized Integrated Wave Force Acting on the Second Wall of Perforated Caisson (a) Without and (b) With the Wave Chamber Slab

났으며, 이것은 상부 덮개가 있는 경우의 전면벽 작용 파력 결과(Fig. 9(b))와 거의 일치하는 경향이다.

5. 결론

본 연구에서는 유공 케이슨 유수실 상부 덮개가 있는 경우 및 없는 경우에 대한 단면 수리모형실험을 수행하여 케이슨 전면벽 및 후면벽에 작용하는 파압분포를 계측하고 그 분석 결과를 제시하였다. 그 결과 유수실 상부 덮개가 있는 경우의 전면벽 및 후면벽 파압이 그렇지 않은 경우에 비해서 뚜렷하게 크다는 것을 분명하게 확인할 수 있었으며, 이것은 상부 덮개로 인해 유수실 내부에서 미처 배출되지 못한 공기가 압축되었다가 터지는 현상에 따른 현상 때문인 것으로 분석되었다. 특히, 전면벽 유공률이 클수록 많은 물이 유수실 내부로 침투하여 더 빠르고 강한 공기 압축 현상을 발생시킬 가능성이 높으며 이러한 이유로 대체로 유공률 증가에 따라 더 큰 파압이 계측된 것으로 파악된다. 전면벽 유공률이 30%인 경우는 20%인 조건에 비해서 평균적으로 약 10% 정도 더 큰 파압이 계측되었다. 계측된 파압을 적분하여 얻어진 파력도 상부 덮개가 있는 경우에는 대부분의 실험과 조건에서 Takahashi의 파압식에 의한 파력보다 큰 값을 나타내었다. Takahashi 파압식에 의한 파력값에 대한 전면벽 및 후면벽에서 계측된 파력값의 비율은 파형경사 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 파형경사가 큰 실험과 조건에서는 2.5 이상 되는 값을 보이기도 하였다. 이러한 점을 고려해볼 때 Takahashi의 파압식으로는 예측할 수 없는 매우 큰 파압이 케이슨 방파제에 작용하는 것을 방지하기 위해서 유수실 상부 덮개가 존재하는 유공 케이슨 형식은 가급적 채택하지

않는 것이 바람직하지만 불가피한 경우 파형경사가 큰 파 작용 시의 충격적인 파압을 가능한 피할 수 있도록 설계 시 많은 주의를 기울이는 것이 필요할 것이다. 다만, 본 연구에서 제시된 파압계측 결과는 국부적인 부재 설계 관점에서 의미있게 적용하는 것이 바람직하며 유수실 상부 덮개가 있을 경우의 유공 케이슨 방파제 자체의 안정성을 검토하기 위해서는 로드셀 등을 이용하여 파 작용에 따른 파력을 직접 계측한 수리모형실험을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 ‘기후변화대응 항만설계기준 개선 방인연구(1단계)(PM57220)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Allsop, N. W. H., Vicinanza, D. and McKenna, J. E. (1996). *Wave forces on vertical and composite breakwaters*, HR Wallingford Report, SR 443.
- Bergmann, H. and Oumeraci, H. (2000). “Wave loads on perforated caisson breakwaters.” *Proc. 27th Int. Conf. Coast. Engrg*, ASCE, pp. 1622-1635.
- Evans, D. V. (1990). “The use of porous screens as wave dampers in narrow wave tanks.” *J. Engrg. Mech*, Vol. 24, pp. 203-212.
- Franco, L., de Gerloni, M., Passoni, G. and Zacconi, D. (1998). “Wave forces on solid and perforated caisson breakwaters: comparison of field and laboratory measurements.” *Proc. 26th Int. Conf.*

- Coast. Engrg*, ASCE, pp. 1945-1958.
- Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N. and Cowdell, S. (2000). "Wave interactions with perforated breakwater." *J. Wtrwy. Port Coast. Ocean Engrg*, Vol. 126, No. 5, pp. 229-235.
- Jarlan, G. E. (1961). "A perforated vertical wall breakwater." *The Dock and Harbor Authority*, Vol. XII, No. 486, pp. 394-398.
- Liu, Y., Li, Y. C., Teng, B., Jiang, J. J. and Ma, B. L. (2008). "Total horizontal and vertical forces of irregular waves on partially perforated caisson breakwaters." *Coast. Engrg*, Vol. 55, pp. 537-552.
- Losada, I. J., Losada, M. A. and Baquerizo, A. (1993). "An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers." *Appl. Ocean Res*, Vol. 15, pp. 207-215.
- Oh, S. H., Ji, C. H., Oh, Y. M. and Jang S. C. (2013). "Comparison of wave pressure acting on the front wall according to the porosity of caisson breakwater having cap of wave chamber." *J. Korean Soc. Civil Engrs*, Vol. 33, No. 2, pp. 573-584 (in Korean).
- Suh, K. D. and Park, W. S. (1995). "Wave reflection from perforated-Wall caisson breakwaters." *Coast. Engrg*, Vol. 26, pp. 177-193.
- Suh, K. D., Park, J. K. and Park, W. S. (2006). "Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater." *Ocean Engrg*, Vol. 33, pp. 264-280.
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003). "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson." *J. Wtrwy. Port Coast. Oc. Engrg*, Vol. 129, No. 1, pp. 34-40.
- Takahashi, S. and Shimosako, K. (1994). "Wave pressure on a perforated wall caisson." *Proc. Int. Conf. Hydro-tech. Eng. Port Harbor Const (HYDRO-PORT '94)*, pp. 747-764.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1993). *Experimental study of impulsive pressures on composite breakwaters - Fundamental features of impulsive pressure and the impulsive pressure coefficient*, Rep. Port Harbour Res. Inst, Vol. 31, No. 5, pp. 33-72.
- Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). "Design and construction of caisson breakwaters - The Japanese experience." *Coast. Engrg*, Vol. 22, pp. 57-77.
- Van der Meer, J. W., d'Angremond, K. and Juhl, J. (1994). "Probabilistic calculations of wave forces on vertical structures." *Proc. 24th Int. Conf. Coast. Engrg*, ASCE, pp. 1754-1767.