

유수실 상부 덮개가 있는 케이슨 방파제의 유공률에 따른 전면벽 작용 파압 비교

오상호* · 지창환** · 오영민*** · 장세철****

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

Comparison of Wave Pressure Acting on the Front Wall According to the Porosity of Caisson Breakwater Having the Cap of Wave Chamber

ABSTRACT

This study experimentally investigated the change in distribution of wave pressure on the front wall according to the variation of the front wall porosity of the caisson breakwater having the cap of wave chamber. First, the wave pressure for the non-porous caisson corresponding to zero porosity was measured and compared with the pressure formula suggested by Goda(1974). The analysis showed that the measured pressure distribution fairly well agreed with the Goda formula, which confirmed the accurate measurement of wave pressure in the present experiment. In case of the porous caisson, meanwhile, the experiment was performed by varying the front wall porosity as 0.2, 0.25, and 0.3. The wave pressure distribution at the front wall showed little difference according to the porosity for most of the test wave conditions, whereas the pressure slightly increased with the porosity for some test waves whose wave heights and periods were relatively large. However, the difference according to the porosity was insignificant for the wave force at the front wall.

Keywords : Caisson breakwater, Wave pressure, Perforated caisson, Porosity, Front wall

초록

본 연구에서는 유수실 상부 덮개가 있는 케이슨 방파제의 전면벽 유공률 변화에 따라서 전면벽 파압 분포가 어떻게 달라지는지 실험적으로 고찰하였다. 우선 전면벽 유공률이 0인 무공 케이슨에 대해서 파압을 측정하여 이를 Goda(1974)의 파압 분포와 비교하였다. 분석 결과, 계측된 파압 분포는 Goda의 파압 공식과 대체로 잘 일치하였으며, 이를 통해서 본 실험에서 파압이 정확하게 측정되었음을 확인하였다. 한편, 유공 케이슨의 경우 전면벽 유공률을 0.2, 0.25, 0.3으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 대부분의 실험 조건에서는 유공률에 따른 전면벽 파압 분포에 차이가 거의 없었던 반면, 비교적 파고 및 주기가 큰 일부 실험파의 경우에는 유공률이 클수록 파압이 근소하게 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 전면벽 총파력은 대체로 유공률에 따른 차이가 미미하였다.

검색어 : 케이슨 방파제, 파압, 유공 케이슨, 유공률, 전면벽

* 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 선임연구원 (Corresponding Author · Korea Institute of Ocean Science and Technology · ohsangho@kiost.ac)

** 한국해양과학기술원 연수연구원 (chji@kiost.ac)

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

**** 한국해양과학기술원 기술원 (scjang@kiost.ac)

Received August 12 2012, Revised September 10 2012, Accepted February 7 2013

1. 서론

유공 케이슨 방파제는 Jarlan(1961)에 의해 제안된 이래, 많은 연구 및 시공이 이루어져왔다. 우리나라에서도 설계시공 일괄 입찰 방식 시행 이후 유공 케이슨 방파제가 본격적으로 시공되기 시작하여 다수의 시공 실적을 보유하게 되었으며, 최근에는 구조 및 수리 특성을 개선하기 위한 목적으로 다양한 형상의 방파제가 개발되고 있다.

유공 케이슨 방파제는 무공 방파제에 비해서 반사를 저감 효과가 있음이 다수의 연구를 통해서 이미 잘 알려져 있다(예: Fugazza and Natale, 1992; Kakuno et al., 1992; Park et al., 1993). 한편, 유공케이슨에 작용하는 파압 및 파력에 관한 연구는 상대적으로 많지 않은 편이며, 몇몇 연구자들이 Goda(1974)에 의해 제안된 무공 혼성 방파제 작용 파압 공식(이하 Goda 파압식)을 유공 케이슨 방파제로 확장하기 위한 연구를 수행한 바 있다. Takahashi et al.(1991)은 2차원 단면수리모형실험을 수행하여 직립소파 케이슨에 작용하는 파압을 예측하고, 파력보정계수를 제안하여 유공케이슨 부재 설계 시 활용할 수 있도록 하였다(Takahashi and Shimosako, 1994; Tanimoto and Takahashi, 1994). 한편, Tabet-Aoul and Lambert(2003)은 수리실험 자료를 바탕으로 위상보정계수를 도입하여 Takahashi et al.(1991)과 유사한 파압 산정식을 제안하였다(De Gerloni, 1998). 또한, Huang et al.(2011)은 유공케이슨에 작용하는 총파력을 산정하는 간편식을 소개하였다. 국내에서는 Chun et al.(1993)이 유공방파제의 파압 분포 특성과 안정성에 관한 연구를 수행하여, 작용 파력 및 활동 안정성 측면에서 유공 방파제가 유리함을 입증한 바 있다.

과거에는 유공케이슨 관련 연구가 대부분 실내 수리실험 및 현장관측을 통해 이루어져 왔지만 최근에는 수치해석 기법의 발전과 더불어 수치모델링을 통해서 유공방파제의 파압 특성을 분석한 연구도 본격적으로 소개되고 있다. 대표적인 연구로서 Chen et al.(2007)은 상부 덮개가 있는 유공방파제에 작용하는 규칙파의 수평 총파력을 VOF 및 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산하고 간편식을 제안하였으며, 이를 불규칙파에 대해서까지 확장한 결과는 보다 최근에 Liu et al.(2008)에 의해 제시되었다. 한편, Zhu and Zhu

(2010)는 해석적 방법의 하나인 impedance analytical method (IAM)을 사용하여 규칙파에 대한 유공 케이슨 파력을 수치적으로 계산하고 실험 자료와 비교하였다.

이처럼 최근 유공 케이슨 방파제에 작용하는 파압 및 파력에 관련된 수리실험 및 수치해석 연구가 지속적으로 수행되어 왔지만, 여전히 유공 방파제 설계 실무 측면에서는 여러 가지 불확실성이 존재하고 있는 실정이다. 국내에서 이루어지는 유공 방파제 설계 시에는 Takahashi et al.(1991)이 제안한 파압 공식(이하 Takahashi 파압식)을 주로 활용하고 있지만, 이 파압 공식은 상부 덮개가 없는 단일 유수실 유공 방파제에 대한 특정 수리모형실험 결과에 근거하고 있기 때문에 유공률, 유수실 폭, 유수실 개수 등 다양한 방파제 형상에 따른 영향을 고려하고 있지 않다. 특히, 현장 여건 등에 따라서는 상부 덮개가 있는 유공 방파제의 설계 및 시공이 이루어지고 있는데 이 경우에는 Takahashi 파압 공식을 적용하는 것에 주의가 필요한 것으로 알려져 있지만 현재로서는 명확한 연구 결과가 부족한 편이다. 또한, 유공률에 따른 파압강도 산정에 관해서도 현재 국내·외에서 사용되고 있는 관련 설계기준에서는 이에 대한 영향을 고려한 파압 산정식이 제시되어 있지 않다. 이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 유수실 상부 덮개가 존재하는 유공 케이슨 방파제의 전면벽 유공률을 변화시키면서 수리모형실험을 수행하여 유공률에 따른 수평파압 분포 및 파력의 변화 양상을 평가하였으며, 그 주요한 결과를 본 논문에 제시하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설 및 모형

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

모형 방파제의 제원은 Fig. 2에 보인 것처럼 높이 55cm, 폭 59cm,

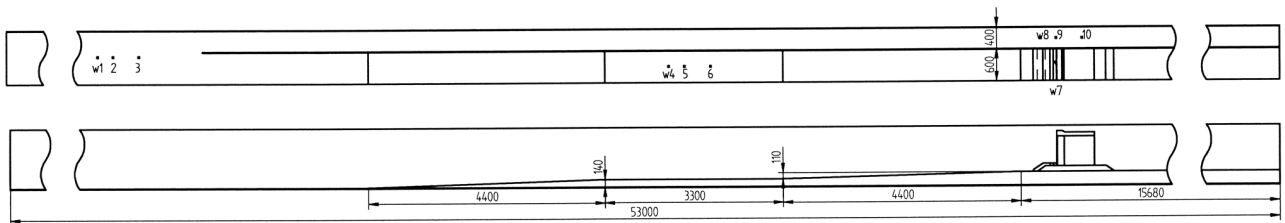


Fig. 1. Experimental setup (unit: mm)

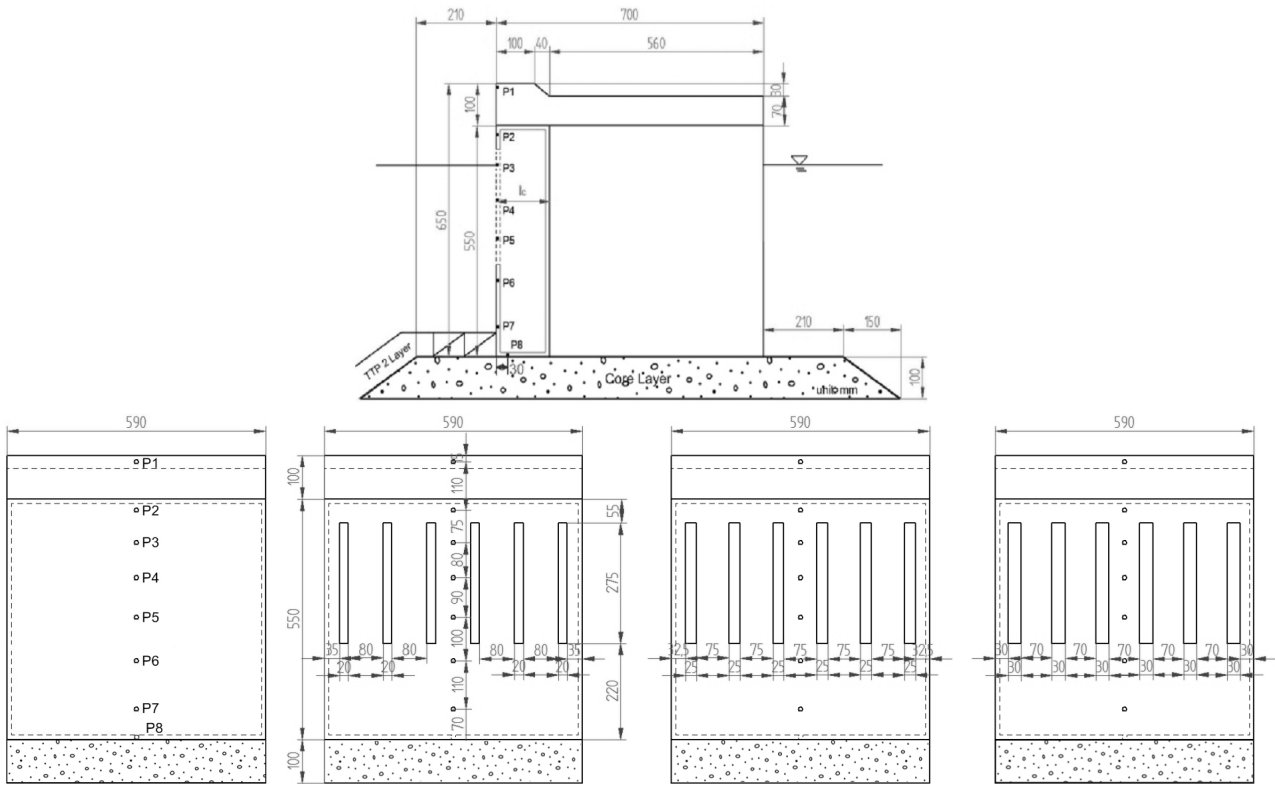


Fig. 2. Side and front views of the caisson model (unit: mm)

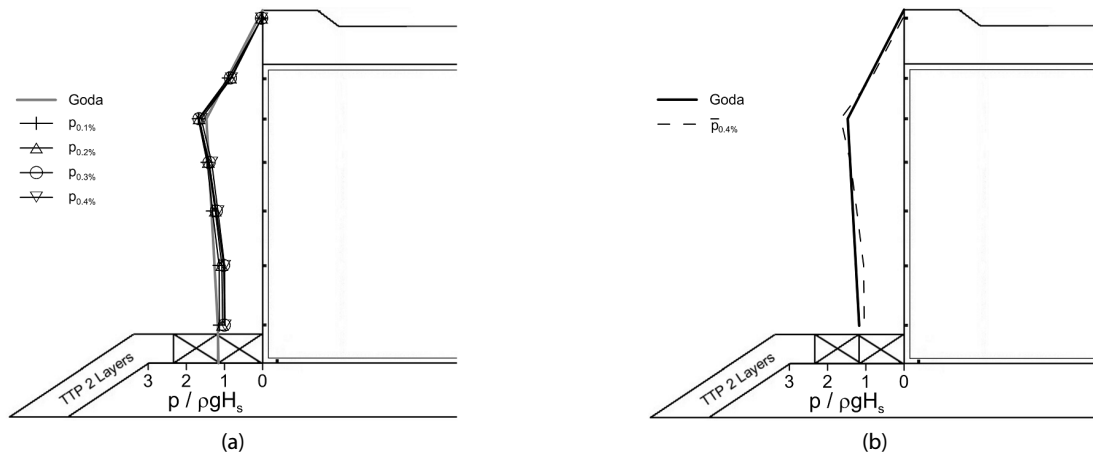


Fig. 3. An example of measured wave pressure distribution compared with the Goda formula ($T_s=1.88s$, $H_s=7.2cm$)

길이 70cm이며, 투명 이크릴로 제작되어 높이 10cm의 사석 마운드 위에 설치되었다. 방파제 전·후면으로부터의 사석 마운드 길이는 모두 21cm로 동일하였다. 방파제는 유수실이 1개인 유공 방파제 형식이며, 전면 유공벽의 유공률을 0, 20, 25, 30%로 4가지로 변화시킬 수 있도록 제작되었다. 유공률이 0%인 경우는 유수실이 차폐된 무공 방파제의 경우에 대응된다. Fig. 2의 측면도는 전면벽이 유공벽인 경우를 기준으로 제시한 것이며, 무공 전면벽의 경우에

는 Fig. 3과 같이 전면벽 유공부가 없다. 한편, 본 연구에서 유공률을 20~30% 범위에서만 변화시킨 이유는 최근 국내에서 시공된 유공 케이슨 방파제 대부분이 이 범위 내의 유공률을 채택하고 있기 때문이었다. 전면벽의 유공부 위치는 케이슨 바닥으로부터 22cm 높이로부터 케이슨 상단 아래 5.5cm까지 27.5cm 구간이며, 이는 케이슨 높이의 50%에 해당한다. 한편, 모형 방파제 위쪽에는 Fig. 2에 보인 것처럼 높이 10cm인 상치 모형을 설치하였다. 본 실험

대상 방파제의 제원은 특정한 적용 지역을 염두에 두고 선정된 것은 아니지만, 일반적으로 수리모형실험 시 모형 축척을 설정하는 것이 계측 결과를 현장값으로 환산하여 물리적인 의미를 파악하는데 도움이 되기 때문에 모형 축척을 명목상 1:40로 가정하여 모형 제원 및 실험 조건 결정 시 활용하였다.

2.2 계측기기 및 실험방법

실험에는 Fig. 1에 보인 것처럼 총 10개의 파고계를 사용하였다. 파고계 W1~W3로는 조파기 수심에서의 파랑을 계측하였고, W8~W10은 모형이 설치된 수심에서의 파랑을 계측하였다. W4~W6은 반사율을 계측하는데 사용하였고, W7은 방파제 전면에서의 처오름을 계측하기 위해 설치하였다. 파압계는 Fig. 2에 보인 것처럼 케이슨 모형 전면에 6개, 상치콘크리트 최상부에 1개, 총 7개를 설치하였으며, 유수실 바닥에 추가로 1개를 설치하였다. 파압계의 자료 독취 시간 간격은 800Hz였다.

실험 수심은 모형 설치 위치에서 55cm였고, 실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하여 조파하였다. 파고 및 주기가 서로 다른 총 20개의 실험파를 조파하였으며, Table 1에 그 값을 제시하였다. 각 실험파 조건 별로 1000파에 해당하는 시간 동안 조파하여

Table 1. Test wave conditions

No.	Laboratory		Field (assumed)		s
	Ts (s)	Hs (cm)	Ts (s)	Hs (m)	
1	1.35	6.3	8.5	2.5	0.025
2	1.35	7.3	8.5	2.9	0.029
3	1.35	10.0	8.5	4.0	0.040
4	1.35	13.2	8.5	5.3	0.053
5	1.35	16.3	8.5	6.5	0.065
6	1.88	4.8	11.9	1.9	0.012
7	1.88	7.2	11.9	2.9	0.018
8	1.88	9.5	11.9	3.8	0.024
9	1.88	11.9	11.9	4.8	0.030
10	1.88	14.7	11.9	5.9	0.038
11	1.88	18.9	11.9	7.6	0.048
12	1.88	23.9	11.9	9.6	0.061
13	2.44	8.0	15.4	3.2	0.015
14	2.44	11.8	15.4	4.7	0.022
15	2.44	16.1	15.4	6.4	0.030
16	2.44	19.5	15.4	7.8	0.037
17	2.44	23.1	15.4	9.2	0.043
18	2.71	11.8	17.1	4.7	0.020
19	2.71	17.8	17.1	7.1	0.030
20	2.71	23.1	17.1	9.2	0.039

파고 및 파압 데이터를 취득하였다. 또한 분석 보조 목적으로 활용하기 위하여 계측이 진행되는 동안 방파제 모형 측면에서 비디오 촬영을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 무공 전면벽 작용 파압

유공 케이슨에 대한 실험 자료 분석에 앞서 본 실험에서 계측된 파압 분포를 Goda의 파압식과 비교하기 위하여, 케이슨 전면벽이 무공 조건인 경우에 대한 실험 자료를 우선적으로 분석하였다. van der Meer et al.(1994)에 의하면 Goda의 파압식은 초과확률 0.4%에 대응되며, 이는 곧 상위 1/250 파의 평균 파압으로 표현될 수 있다. 본 실험에서는 모든 실험 조건에 대하여 1000파를 조파하였기 때문에, 파고의 내림치순으로 상위 4개 파의 최대파압 평균 ($p_{1/250}$)이 Goda 파압에 대응된다고 할 수 있다. 한편, 파압 계측 실험에서는 준 정적(quasi-static) 상태에 해당하는 맥동성(pulsating) 파압 뿐만 아니라, 극히 짧은 시간에 매우 큰 파압이 작용하는 충격파압(impulsive wave pressure)이 종종 출현할 수 있다. 통상적으로 충격파압은 파고가 큰 경우에 출현 가능성이 높아지기는 하지만 파고가 크다고 해서 반드시 충격파압이 나타나는 것은 아니다. 충격파압의 크기는 쇄파의 형태 및 파압계의 위치에 가장 큰 영향을 받게 되며, 경우에 따라서는 파고가 아주 크지 않더라도 방파제 전면벽에서 쇄파 발생 시 큰 충격파압이 발생할 수 있다. 이처럼 실험 중 충격파의 발생 가능성이 있음을 고려하여 본 실험에서는 파고 기준으로 상위 4개 파의 파압 평균 대신 파압 계측값 기준으로 상위 4개 파압을 평균한 값($\bar{p}_{0.4\%}$)을 Goda의 파압 공식과 비교하였다.

Fig. 3에는 전면벽이 무공벽인 경우에 대하여 이러한 방법으로 계측된 파압을 $\rho g H_s$ 로 무차원화한 그림을 제시하였다. 여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도 그리고 H_s 는 유의파고를 나타낸다. 전체 20개 실험 조건 중에서 유의파주기가 1.88s, 유의파고가 7.2cm인 경우의 결과를 예시로서 나타내었으며, Fig. 3(a)에는 상위 4개 최대파압을, Fig. 3(b)에는 이 4개 파압의 평균을 나타내었다. 단, Fig. 3(a)와 (b)에 보인 파압은 동시 파압이 아니며, 각 지점별 최대파압을 나타낸다. 즉, 각 파압계별로 계측된 상위 4개 파압과 그 평균값을 나타낸 것이다. Fig. 3에 보인 것처럼 상위 4개 파의 파압 분포에는 큰 차이가 없었으며, 평균파압은 Goda 파압과 대체로 잘 일치하였다. 다만, 가장 아래쪽에 위치한 파압계 P8의 경우에는 케이슨 전면에 설치된 것이 아니라 유수실 안쪽 케이슨 바닥에 설치되었으며, 케이슨 전면이 유공벽인 경우 유수실 내의 수압 측정을 위해 설치된 것이므로 케이슨 전면벽에 설치된 파압계 P1~P7의 자료에 대해서만 Goda 파압 공식과의 비교를

수행하였다.

Fig. 4에는 Fig. 3(a)에 보인 최대파압($p_{0.1\%}$)이 발생하였을 때 정수면에 위치한 파압계(P3)에서 최대파압이 관측된 시점을 기준으로 전후 0.5초 동안 각 파압계의 동시 파압 시계열을 나타내었다. 따라서, P3를 제외한 나머지 경우에는 Fig. 4의 파압 시계열에서의 각 파압계별 파압이 Fig. 3에서의 각 지점별 최대파압($p_{0.1\%}$)과 꼭 일치하지는 않을 수 있다. Fig. 4에서 각 지점별 최대파압 발생 시의 개별 파압 시계열 대신 P3를 기준으로 동시 파압 시계열을 제시한 이유는 비록 이 경우에는 충격파적 파압 특성이 나타나지

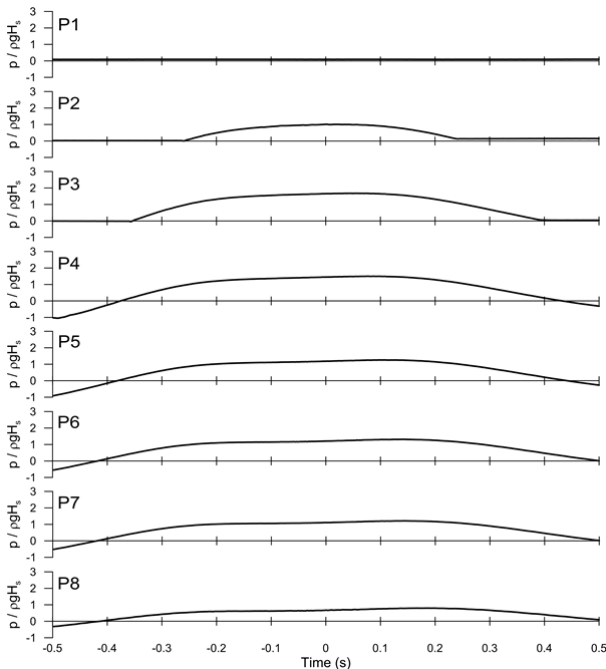


Fig. 4. Exemplary signals of the non-breaking wave pressure on the non-porous front wall ($T_s=1.88s$, $H_s=7.2cm$)

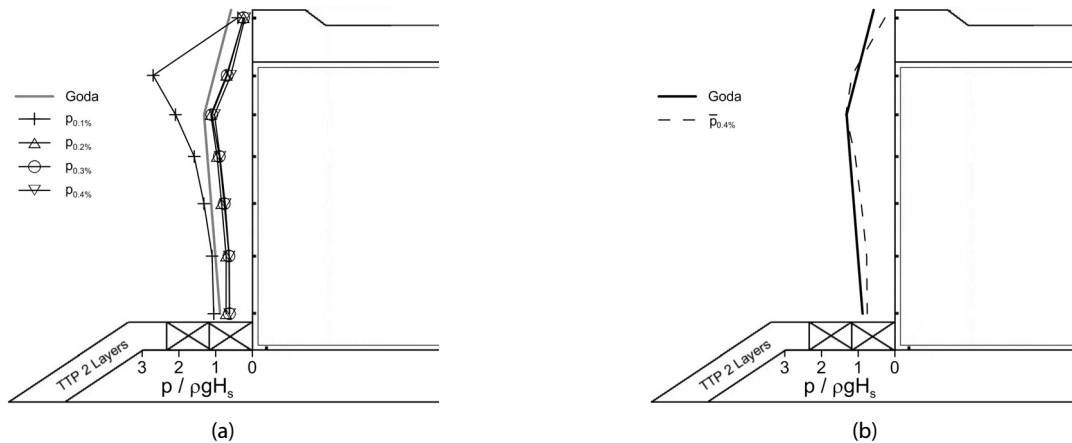


Fig. 5. An example of measured wave pressure distribution compared with the Goda formula ($T_s=1.35s$, $H_s=13.2cm$)

않았지만 통상적으로 충격파압 발생 여부를 판단하기 위해서는 동시 파압 시계열을 검토하는 일이 필요하기 때문이다. Fig. 4에 보인 것처럼 모든 파압계에서 준 정적 상태에 해당하는 맥동성 파압이 관측되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 3에 보인 경우 이외에 나머지 실험과의 경우에도 관측된 파압 분포는 Goda 파압과 대체로 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 그러나 실험 중 경우에 따라서는 무공벽 전면에서 Goda 파압보다 더 큰 파압이 드물게 발생하는 것을 관찰할 수 있었으며, 그 한 예를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)로부터 최대파압($p_{0.1\%}$) 분포의 경우 P1~P7의 모든 파압계에서 Goda 파압을 초과하는 파압이 관측되었다. 그러나, 상위 2번째($p_{0.2\%}$)부터 4번째($p_{0.4\%}$)까지의 관측 파압은 Goda 파압보다 더 작음을 확인할 수 있다. 결과적으로는 Fig. 5(b)에 보인 것처럼 상위 4개 파압을 평균한 파압 분포 ($\bar{p}_{0.4\%}$)는 대체로 Goda 파압과 일치하는 경향을 나타내었다. Fig. 5(a)에 보인 최대파압($p_{0.1\%}$)의 경우처럼 Goda 파압보다 큰 파압이 발생하는 경우는 드물게 나타났으며, 이러한 파압이 관측되었을 때의 파압 시계열 및 비디오 촬영 영상을 분석한 결과, 모형 방파제 전면에서 약한 쇄파(gentle wave breaking)가 발생하여 충격파와 유사한 현상이 나타나는 경우에 이처럼 큰 파압이 출현함을 확인할 수 있었다.

Takahashi et al.(1993)에 의하면, 방파제 전면벽에서 발생하는 충격파압은 크게 Wagner형과 Bagnold형 및 그 중간 형태의 3가지로 구분된다. 일반적으로 파가 구조물에 직접 부딪히게 되면 Wagner형, 파와 구조물 사이에 공기 주머니가 형성된 채로 파가 구조물에 부딪히게 되면 Bagnold형 파압이 나타나게 된다. Wagner형 파압은 대개 쇄파되기 직전의 파가 방파제 전면벽에 부딪치는 경우에 발생하기 쉬우며, 공기가 혼입되지 않은 채로 파랑이 방파제 전면벽을 타고 올라가면서 발생하게 되며, 따라서 연직으로 설치된 파압계 중에서 가장 아래에 위치한 파압계에서 가장 먼저 최대파압이

나타난 후, 순차적으로 더 위쪽 파압계 순으로 최대파압이 나타나는 시점이 조금씩 늦어지는 위상차가 존재하게 된다. 반면에, Bagnold 형 파압은 파랑 전면이 앞쪽으로 부서지면서 방파제와 부딪칠 때 그 사이에 존재하는 공기가 압축되면서 발생시키는 큰 압력의 영향으로 모든 파압계에서 최대파압이 거의 동시에 나타나는 특성을 보이게 되며, 쇄파되는 파랑 속에 갇힌 공기가 벽에 부딪치면서 압축될 때 발생시키는 큰 압력의 영향으로 파압 침두값 근처에서 미세한 떨림 또는 진동이 나타나게 된다.

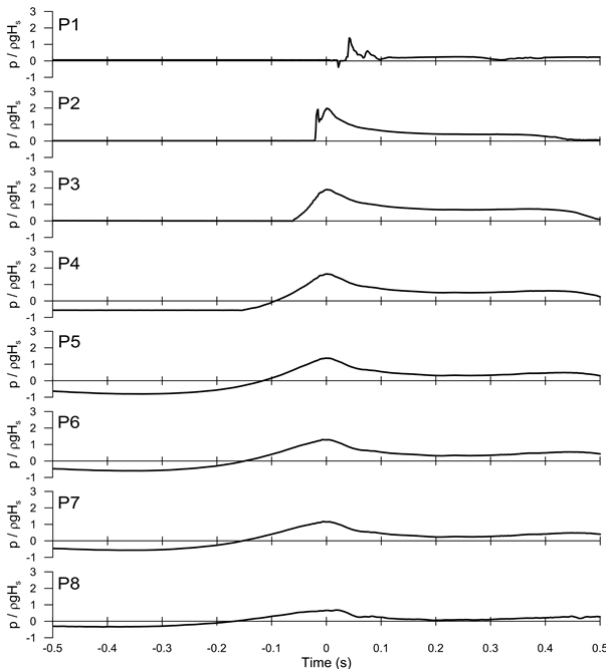


Fig. 6. Exemplary signals of the gently breaking wave pressure on the non-porous front wall ($T_s=1.35s$, $H_s=13.2cm$)

Fig. 5(a)의 최대파압($p_{0.1\%}$)의 성격이 Wagner형 또는 Bagnold 형 충격파압에 해당하는지를 검토하기 위하여 이에 대응되는 파압 시계열을 분석하였다. Fig. 6에는 $p_{0.1\%}$ 에 해당하는 파압이 관측되었을 때 정수면에 설치된 파압계(P3)에서 최대파압이 관측된 시간을 기준으로 전후 0.5초 동안 각 파압계에서의 파압 시계열을 제시하였다. Fig. 6에 보인 것처럼 전면벽 가장 아래에 위치한 관측점 P7로부터 위쪽에 위치한 관측점으로 올라갈수록 최대파압이 나타나는 시점이 미세하게 조금씩 늦어짐을 확인할 수 있으며, 또한 파압 침두값에 도달하는 시간(rising time)도 점점 짧아짐을 확인할 수 있다. 특히, P2에서는 이 시간이 극히 짧았으며, 이는 파랑 전면이 거의 연직으로 P2 관측점에 부딪혔음을 시사하는 것이다. 이로부터 이 경우에는 Wagner형에 해당하는 파압이 발생한 것으로 추정할 수 있다. Takahashi et al.(1993)에 의하면, 충격파 발생 시 Goda 파압의 수배에 이르는 극한파압이 발생하기도 하나, 본 실험 대상 방파제의 경우 비교적 케이스 마운드가 낮아서 강한 권파형 쇄파(plunging wave breaking)는 발생하지 않기 때문에 Fig. 5(a)의 최대파압($p_{0.1\%}$)과 같이 Goda 파압을 약간 초과하는 정도의 충격파압만이 관측된 것으로 판단된다. 한편, Fig. 6에 보인 것과 같은 Wagner형 파압은 Table 1에 보인 총 20개 실험과 중에서 오직 4가지 경우에만 발생하였으며, 그 경우에도 최대파압($p_{0.1\%}$) 또는 제2 최대파압($p_{0.2\%}$)까지만 Goda 파압을 유의미하게 초과하였고, 나머지는 모두 Goda 파압보다 같거나 작은 파압 분포를 나타내었기 때문에 충격파의 발생 빈도는 매우 낮다고 할 수 있다.

Fig. 7에는 전체 20개 실험과 조건에 대해서 상위 4개 파압 분포의 평균($\bar{p}_{0.4\%}$)으로부터 전면벽에 작용하는 총파력을 계산하여 이를 Goda 파압에 의한 파력으로 무차원화한 결과를 제시하였다. Fig. 7로부터 계측된 파력이 Goda 파압에 의한 전파력의 0.7~1.0배 범위에 분포함을 확인할 수 있다. 즉, 실험 결과가 Goda

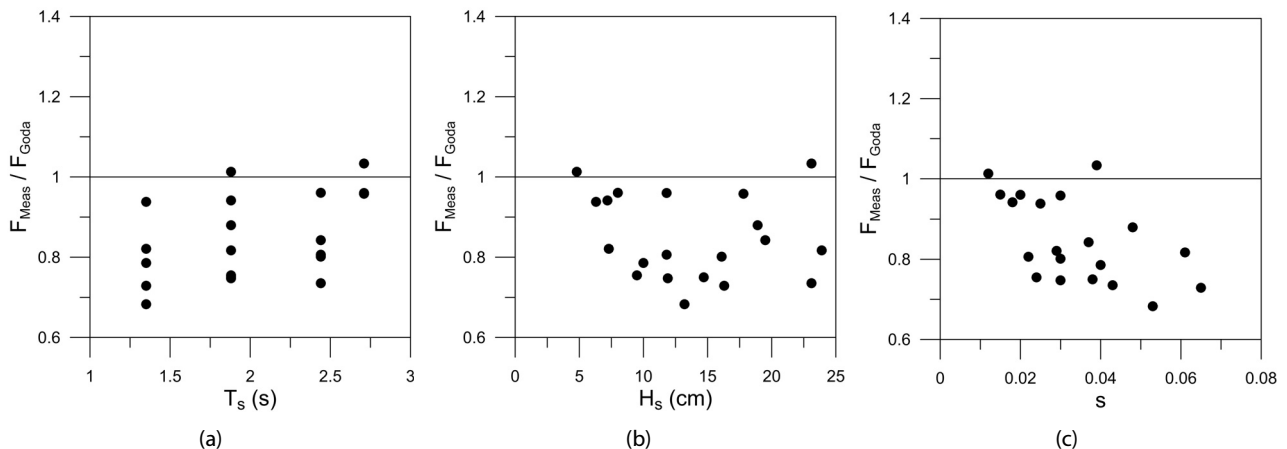


Fig. 7. Comparison of the integrated wave force on the non-porous wall calculated from the measurement and the Goda formula

의 파압에 따른 파력과 대체로 잘 일치하였고, 파압 계측 실험이 정밀하게 이루어졌음을 확인할 수 있다. 계측된 전파력이 Goda 파압에 의한 결과보다 약간 크게 나타난 경우는 위에서 설명한 것처럼 최대파압($p_{0.1\%}$) 또는 제2 최대파압($p_{0.2\%}$)이 Goda 파압을 초과하는 경우가 발생하였던 일부 실험과 조건에 대응되며, 나머지 경우에는 Goda 파압에 의한 파력이 계측 파압의 상한선으로서 작용하고 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 7로부터 대체로 파형경사(s)가 증가할수록 F/F_{Goda} 의 값은 감소하는 반면, 유의파주기 및 유의파고에 따라서는 주목할 만한 경향이 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

3.2 유공 전면벽 작용 파압

케이슨 모형 전면벽이 유공 구조인 경우에 대해서도 무공 전면벽의 경우와 동일한 방법으로 분석을 수행하였다. 즉, 각 실험 조건별로 전체 취득 자료 중에서 상위 4개 최대파압을 평균한 값($\bar{p}_{0.4\%}$)을 계산하고 이를 무공 전면벽의 결과 및 Takahashi et al.(1991)이 제안한 유공케이슨 전면벽에 대한 파압 공식과 비교하였다.

Fig. 8(a)~(c)에는 $T_s=2.44s$, $H_s=11.8cm$ 인 실험과 조건에

대하여 유공률이 0.2, 0.25, 0.3으로 각각 서로 다른 경우에 대한 무차원 파압 계측 결과를 Takahashi et al.(1991)의 파압식과 비교하여 나타내었다. Fig. 8에서 회색 실선이 Takahashi의 파압식 중에서 전면벽에 가장 큰 파압이 작용하게 되는 파의 위상(Takahashi et al.(1991)에서 Crest I에 해당)일 때의 계산 결과를 나타낸다. Takahashi의 파압식에 의하면 유공부의 경우 작용 파압이 더 작게 계산되기 때문에 Fig. 8에 보인 것처럼 유공부와 무공부의 경계면에서는 파압이 불연속적으로 변하게 된다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 유공률이 서로 다른 3가지 실험 조건의 경우 전면벽에 작용하는 상위 4개 최대파압에는 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, 전반적으로 Takahashi 파압식에 비해서 약간 더 큰 파압이 계측되었다. 또한, Takahashi 파압식에서는 유공부 구간의 파압이 무공부 구간의 파압에 비해서 작게 평가되기 때문에 파압 분포의 불연속점이 존재하지만, 계측된 파압 분포에서는 이 두 구간에 따른 파압 크기에 큰 차이가 없었다. 참고로, 비록 Fig. 8에 도시하지는 않았지만 Goda 파압식과 비교할 경우에는 계측된 상위 4개 최대파압은 Goda 파압에 비해서는 작았다.

그러나, 모든 실험과 조건에 대해서 Fig. 8과 같이 유공률에

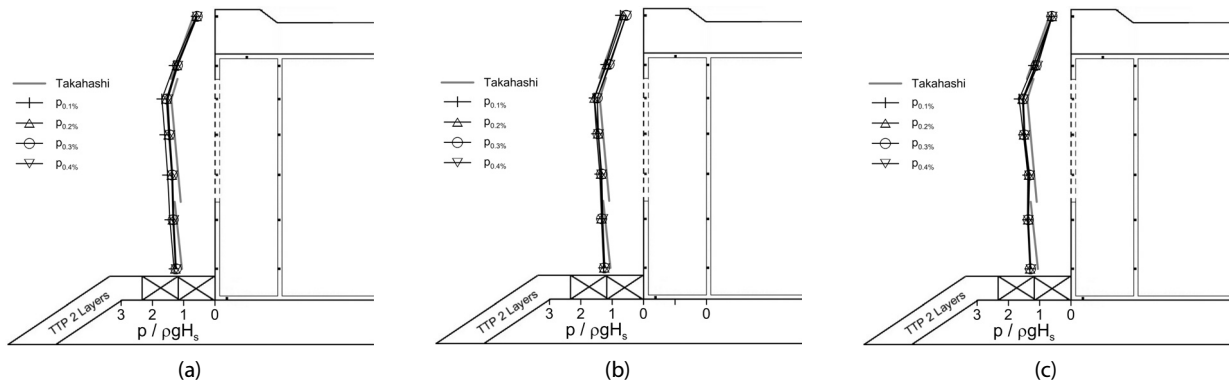


Fig. 8. Normalized wave pressures on the porous front wall for the case of $T_s=2.44s$ and $H_s=11.8cm$. (a) $P=0.2$, (b) $P=0.25$, and (c) $P=0.3$

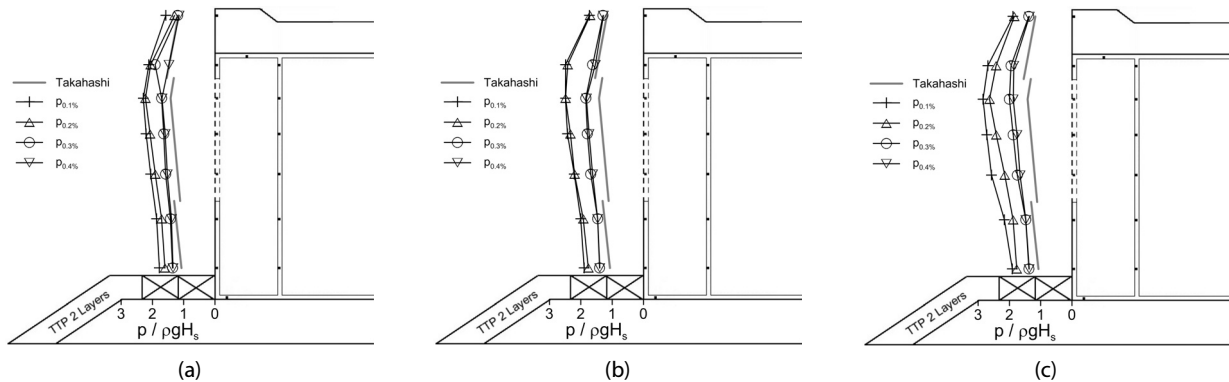


Fig. 9. Normalized wave pressures on the porous front wall for the case of $T_s=2.44s$ and $H_s=23.1cm$. (a) $P=0.2$, (b) $P=0.25$, and (c) $P=0.3$

무관하게 유사한 파압 분포가 얻어진 것은 아니었다. Fig. 9(a)~(c)에는 동일한 분석 방법에 의해 얻어진 계측 결과를 $T_s=2.44s$, $H_s=23.1cm$ 인 실험 조건에 대하여 나타낸 것이며, 이 경우에는 유공률에 따른 파압 분포의 차이가 보다 분명하게 나타났다. 즉, Fig. 9로부터 유공률이 증가할수록 케이스 전면벽에 위치한 각 계측점에서 취득된 상위 4개 최대파압의 크기가 대체로 더 커지는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 계측된 파압과 Takahashi 파압식의 차이가 Fig. 8에 비해서 더 컸으며, 최대파압($p_{0.1\%}$)과 상위 4번째 파압($p_{0.4\%}$)의 크기도 상대적으로 더 큰 차이를 나타내었다.

한편, Fig. 8과 Fig. 9에 보인 파압 계측값에 해당하는 시점의 파압 시계열을 분석한 결과 그 형태가 Fig. 4에 보인 맥동성 파압 시계열 또는 Fig. 6에 보인 약한 쇄파가 발생하는 경우의 파압 시계열과도 차이가 있음을 알 수 있었다. 그 한 예로써 Fig. 9(c)에서 $p_{0.1\%}$ 에 해당하는 최대파압 분포가 얻어졌을 때의 시계열을 Fig. 10에 제시하였다. Fig. 10에 보인 것처럼 유수실 전면벽에 설치된 모든 파압계(P1~P7)에서 침투값이 여러 번 나타나는 형태의 파압 시그널이 계측되었으며, 특히 정수면 아래에 위치한 P4~P7 파압계의 경우 첫 번째 침투 부근에서 매우 짧은 시간 동안 파압 계측값이 진동하는 특성을 보였다.

Fig. 10에 보인 파압이 계측된 시점의 비디오 영상을 자세히 관찰한 결과, 케이스 모형 전면벽에서 쇄파는 발생하지 않았으며, 파고가 매우 높은 파가 전면벽 유공부를 통과하여 유수실 내로

침투한 후 유수실 안쪽 벽에 강하게 부딪치면서 유수실 내부에 강한 소용돌이 및 쇄파에 준하는 파의 산란이 발생함을 확인할 수 있었다. 이로 인해 유수실 내 수위가 빠르게 상승하면서 동시에 파가 유공부를 통과하면서 순간적으로 유공부를 차폐시키는 효과로 인해 유수실 내 공기가 미처 전면벽 유공부를 통해서 다 빠져나가지 못하고 유수실 내부에서 압축되면서 이로 인해 발생하는 압력이 유수실 상부 덮개 및 케이스 전면벽 뒤쪽면에 작용하게 된 것으로 분석되었다. 이러한 이유로 인해서 Fig. 10에 보인 것처럼 파압의 침투값이 한번이 아니라 여러 번 나타나게 되었으며, 파압이 감소하는 과정에서도 단조롭고 완만하게 감소하는 것이 아니라 계속 동요하면서 감소하는 현상이 관측된 것으로 판단된다. 비록 Fig. 10에는 Fig. 9에 보인 파압 계측값 중 한 예를 나타낸 것이지만, 그 외 다른 경우 및 Fig. 8에 보인 파압 계측값에 해당하는 경우에도 세부적인 형태나 파압의 크기는 차이가 있지만 전반적인 형태는 Fig. 10과 유사한 파압 시계열이 관측되었다.

Fig. 10에 나타난 파압 시계열은 Fig. 6에 보인 것처럼 본 실험 중 무공벽 전면에서 드물게 발생하였던 Wagner 타입의 충격파 발생 시의 시계열과는 전혀 다른 형태이며, 또한 케이스 전면 마운드가 높은 경우 주로 관측되는 Bagnold 타입의 충격파 발생 시의 전형적인 시계열과도 차이가 있다. 통상적으로 Bagnold 타입의 충격파는 권파(plunging) 형태의 쇄파가 직접 방파제 전면벽에 부딪치면서 쇄파되는 파 내부에 혼입된 압축 공기가 전면벽에 미치는 충격에 의해 발생하게 되며, 이 경우의 파압 시계열은 압축 공기가 케이스 전면벽에 직접 작용하는 충격파압으로 인해 Goda 파압의 수배에 이르는 극단적으로 큰 파압이 매우 짧은 시간에 발생하며, 이로 인해 뾰족한 침투와 같은 형태의 파압 시계열이 출현하는 것이 일반적이다. 따라서 Fig. 10의 경우에는 전형적인 Bagnold 타입의 충격파 현상에 따른 시계열도 아니며, 위에서 설명한 바와 같이 유수실 바깥으로 미처 빠져나가지 못한 공기가 짧은 시간 동안에 압축되었다가 팽창하면서 발생시키는 충격 파압이 케이스 제체에 전달됨으로 인해서 Takahashi 파압식을 다소(1.5 배 내외) 초과하는 파압이 계측된 것으로 분석되었다.

만약 본 실험에서 사용된 케이스 모형이 유수실 상부 덮개가 없는 형태였다면 유수실 위쪽으로 공기가 자유롭게 배출되게 되므로 압축 공기가 발생하지 않으며, 따라서 파압 계측값도 더 작았을 것으로 추론할 수 있다. 이처럼 유수실 상부 덮개가 없는 경우 케이스 전면벽의 파압 분포는 이러한 조건에 대한 수리실험 결과로부터 도출된 Takahashi 파압식과 대체로 잘 일치할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서와 같이 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우에도 실험 축척이 다르거나 케이스 유공부의 형상이 바뀌게 되면 세부적인 파압 분포 형태 및 그 크기가 큰 차이를 보일 수 있다. 특별히 유수실 상부 덮개로부터 케이스 전면벽 유공부의 상단까지의 연직 거리에 따라서 파압 특성이 변하게 될 가능성이 높다.

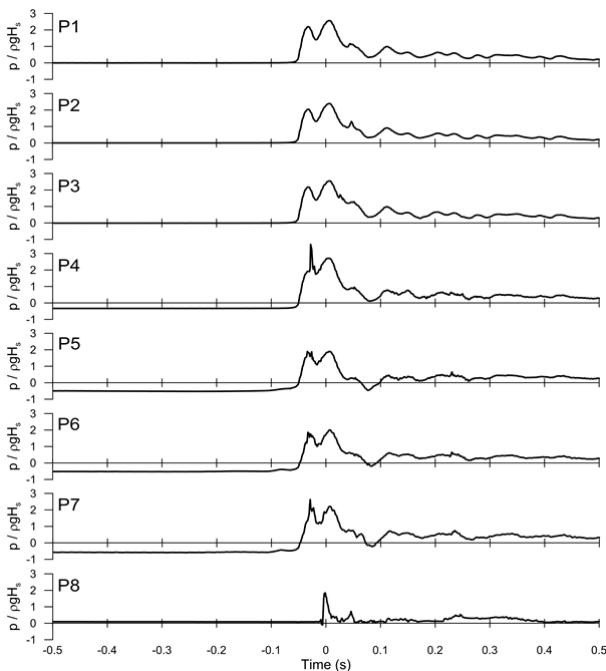


Fig. 10. Exemplary signals of the quasi-impulsive wave pressure on the porous front wall due to air compression inside the wave chamber ($T_s=2.44s$, $H_s=23.1cm$)

이 거리가 짧을 경우에는 유수실 내에 공기가 갇힐 가능성이 상대적으로 낮고, 이 거리가 길 경우에는 그 반대의 상황이 될 것이기 때문이다. 또한, 유수실 내 갇힌 압축 공기의 영향이 포함된 파압 계측값을 정량적으로 어떻게 평가할 것인지에 관해서도 세심한 고찰이 필요하다. 무공벽 전면에서 작용하는 Bagnold 타입의 충격파의 경우 일반적으로 실험 측척을 고려하여 Cuomo et al.(2010a, 2010b)의 방법에 따라 실험실 계측 파압의 크기를 보정하는데, 본 실험의 경우에서와 같이 유수실 내 압축공기로 인한 파압의 평가에 있어서도 이와 유사한 분석방법을 취하는 것이 가능할 것으로 사료된다. 이러한 점들을 보다 명확하게 파악하기 위해서 향후 유수실 상부벽이 개방된 조건을 비롯하여 케이슨 모형 제원이 본 실험 조건과 다른 경우에 대하여 유수실 안쪽 벽에서의 파압 계측을 포함하는 포괄적인 실험을 추가로 수행하여, 유공 케이슨 방파제 상부 덮개가 존재하는 경우의 케이슨 전면벽 및 유수실 내 파압 분포 특성을 보다 종합적으로 고찰할 계획이다.

한편, Fig. 11에는 Figs. 8 및 9에 제시된 바 있는 유공률이

서로 다른 3가지 경우($P=0.2, 0.25, 0.3$)에 대한 상위 4개 파압 분포의 평균($\bar{p}_{0.4\%}$)을 각각 비교하여 나타내었다. 위에서 설명한 것처럼 Fig. 8에 보인 실험과 조건($T_s=2.44s, H_s=11.8cm$)에서는 유공률에 따른 파압 분포의 차이가 거의 없었으며, 세 경우 모두 Takahashi 파압에 비해서는 각 지점별 파압의 크기가 근소하게 크게 나타났다. 반면에, Fig. 9에 보인 실험과 조건($T_s=2.44s, H_s=23.1cm$)에서는 유공률이 클수록 더 큰 파압분포가 얻어졌으며, Takahashi 파압에 비해서 뚜렷하게 큰 파압이 관측되었다. 본 실험에서 수행된 20개의 실험과 조건 중 대부분의 경우에는 Fig. 11(a)와 유사하게 유공률에 따른 파압 분포의 차이가 미미한 수준이었으며, 비교적 주기가 길고 파고가 높은 일부 실험과 조건에 대해서만 Fig. 11(b)와 유사하게 유공률에 따른 파압 분포의 차이가 유의미하게 나타났으며, 이 경우 대체로 유공률이 클수록 더 큰 파압이 계측되었다.

Fig. 12에는 20개의 모든 실험과 조건에 대해서 Fig. 11과 같이 상위 4개 파압의 평균 분포($\bar{p}_{0.4\%}$)를 계산하고 이를 적분하여

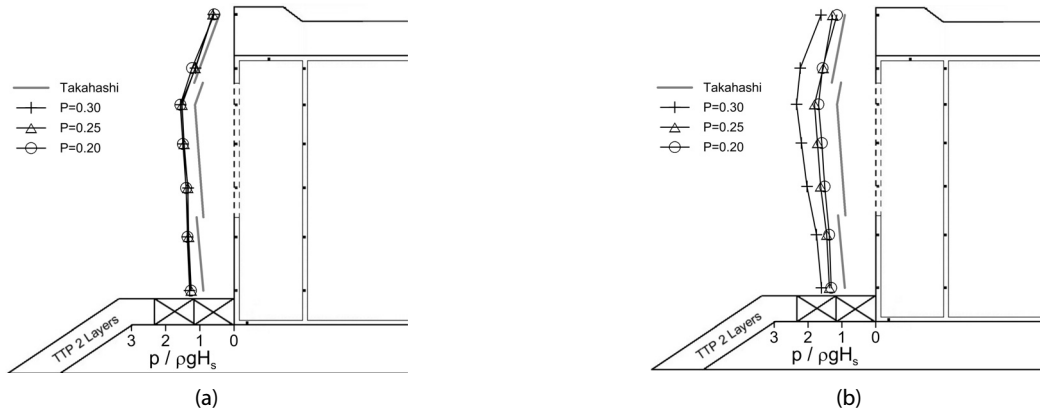


Fig. 11. Comparison of the pressure distribution $\bar{p}_{0.4\%}$ according to the porosity of the front wall for the test case shown in Figs. 8 and 9, respectively

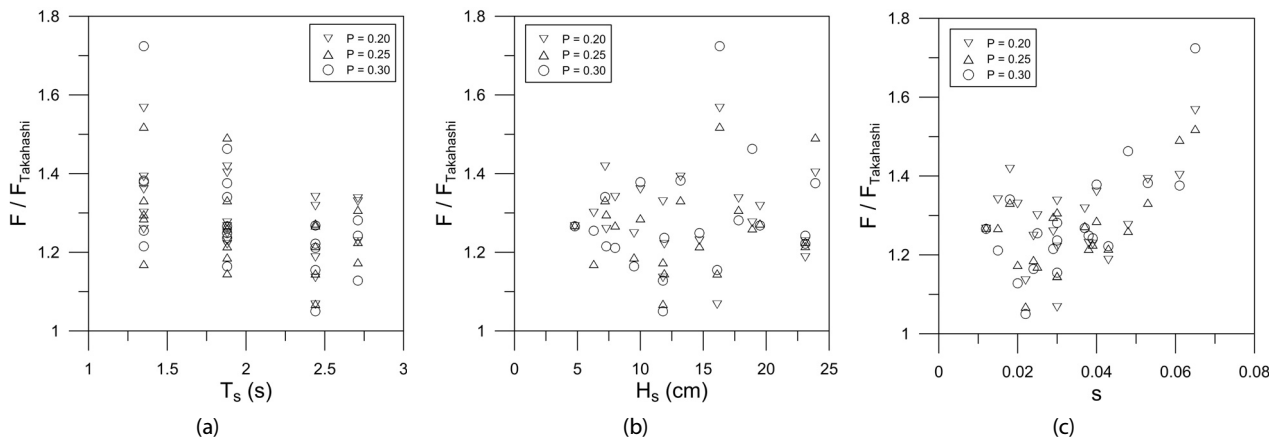


Fig. 12. Comparison of the normalized integrated wave force according to the porosity of the front wall

총파력(F)을 계산한 후 이를 Takahashi 파압식에 의해 구해지는 파력($F_{Takahashi}$)으로 무차원화한 값을 나타내었다. 또한, Table 2에는 전체 실험과 조건에 대하여 유공률에 따른 $F/F_{Takahashi}$ 의 값을 정리하여 제시하였다. 단, 총파력 계산 시에는 전면벽 유공부의 유공률에 따른 단면적 감소를 고려하여 계산을 수행하였다. Fig. 12로부터 $F/F_{Takahashi}$ 의 값이 모두 1보다 크을 알 수 있으며, 이는 케이슨 전면벽에서의 파압 계측값이 Takahashi 파압을 초과함을 의미한다. 이러한 결과는 위에서 언급된 바와 같이 Takahashi 파압식은 유공케이슨에 유수실 상부 덮개가 없는 경우에 대하여 제안된 식인 반면, 본 연구에서의 실험은 유수실 상부 덮개가 존재하는 경우에 대한 것이므로 유수실 내 압축 공기의 영향으로 Takahashi의 파압 예측식을 초과하는 파압이 계측되었기 때문에 나타난 것으로 이해할 수 있다. 한편, Fig. 12로부터 유의과주기 (T_s) 및 유의파고(H_s)에 따라서는 $F/F_{Takahashi}$ 의 값이 특별한 경향성을 보이지 않았지만, 파형경사(s)에 대해서는 파형경사 값이 증가함에 따라 $F/F_{Takahashi}$ 의 값이 대체로 증가하는 추세를 나타내었다. 또한, Fig. 12 및 Table 2로부터 유공률에 따른 전면벽 작용 파력의 차이는 미미하였음을 확인할 수 있다.

Table 2. Values of $F/F_{Takahashi}$ for the test waves

No.	Ts (s)	Hs (cm)	$F/F_{Takahashi}$		
			P=0.20	P=0.25	P=0.30
1	1.35	6.3	1.30	1.17	1.25
2	1.35	7.3	1.26	1.30	1.22
3	1.35	10.0	1.36	1.29	1.38
4	1.35	13.2	1.39	1.33	1.38
5	1.35	16.3	1.57	1.52	1.72
6	1.88	4.8	1.27	1.27	1.27
7	1.88	7.2	1.42	1.33	1.34
8	1.88	9.5	1.25	1.19	1.16
9	1.88	11.9	1.22	1.15	1.24
10	1.88	14.7	1.23	1.22	1.25
11	1.88	18.9	1.27	1.26	1.46
12	1.88	23.9	1.40	1.49	1.38
13	2.44	8.0	1.34	1.27	1.21
14	2.44	11.8	1.13	1.07	1.05
15	2.44	16.1	1.07	1.15	1.15
16	2.44	19.5	1.32	1.27	1.27
17	2.44	23.1	1.19	1.22	1.22
18	2.71	11.8	1.33	1.17	1.13
19	2.71	17.8	1.34	1.31	1.28
20	2.71	23.1	1.23	1.23	1.24
Average			1.29	1.26	1.28

3.3 반사율

본 연구의 주된 목적은 케이슨 방파제 전면벽에 작용하는 파압에 대한 것이지만, Fig. 1에 보인 것처럼 방파제 전면의 반사율도 계측하였으며, 그 분석 결과를 Fig. 13에 제시하였다. Fig. 13에서 가로축은 유수실 폭(B)을 파장(L)로 무차원화한 값이며 세로축은 반사계수(K_R)을 나타낸다. 본 실험자료의 경우 B/L 의 값이 대부분 0.02~0.05 사이의 범위에 위치하였으며, 통상 반사계수의 값이 최소가 되는 것으로 알려진 $B/L=0.2$ 에 비해서 상대적으로 파장 대비 유수실 폭이 좁은 경우에 해당한다. 이러한 이유로 반사계수의 값은 0.56~0.84로 비교적 크게 나타났다. 한편, 20개 실험과 전체에 대한 반사계수의 평균값은 유공률이 20%, 25%, 30%일 때 각각 0.710, 0.715, 0.726으로 유공률이 증가함에 따라서 근소하게 커지는 경향을 나타내었다. 본 연구와 유공케이슨 제원 및 실험 조건은 다르지만 Korea Institute of Construction Technology(2000)에서도 유공률 증가 시 반사계수 값이 대체로 증가하는 경향이 보고된 바 있다.

유공 케이슨 방파제의 유공률에 따른 반사율과 전면벽 작용 파력의 상관관계를 분석하기 위해서 Fig. 14와 같이 유공률 별 $F/F_{Takahashi}$ 와 반사계수의 값을 비교하여 나타내었다. Fig. 14에서 유공률에 따른 두 변수 사이의 뚜렷한 경향은 발견되지 않았으며, 이것은 위에서 언급된 바와 같이 유공률에 따른 전면벽 작용 파력의 차이가 미미하고 반사계수 값의 변화도 유의할만큼 크지 않기 때문인 것으로 분석된다. 한편, 유공률과 상관없이 반사계수의 값이 작을수록 대체로 $F/F_{Takahashi}$ 의 평균값 및 그 변동성이 큰 경향이 나타났으며, 이것은 유공케이슨 전면벽에서의 에너지 소산이 활발할수록 반사계수의 값은 상대적으로 작게 나타나게 되며,

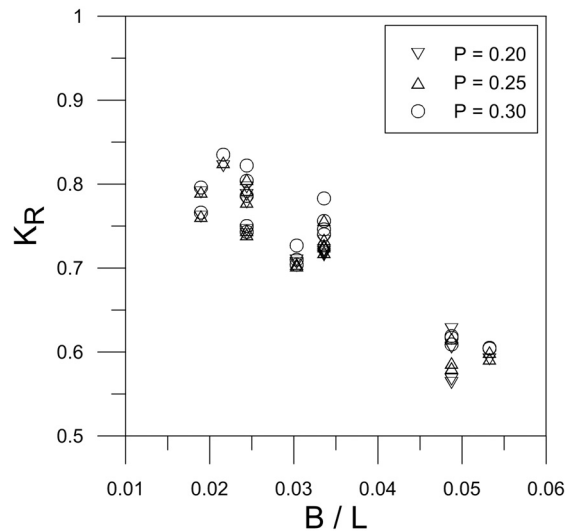


Fig. 13. Comparison of the reflection coefficient according to the porosity of the front wall

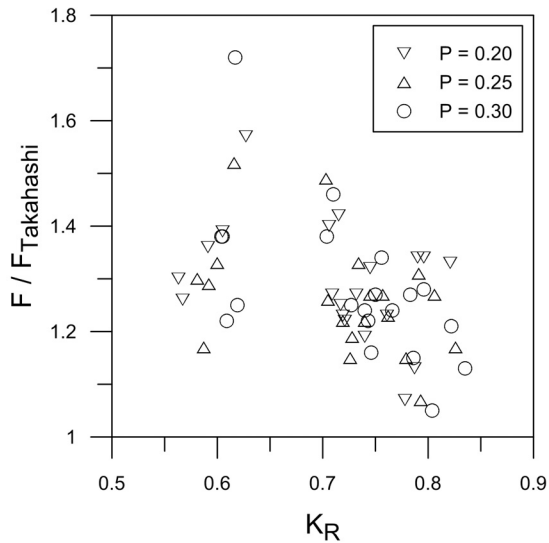


Fig. 14. Relationship between $F/F_{Takahashi}$ and K_R according to the porosity of the front wall

반면에 케이슨 전면벽 및 유수실에서의 유동 현상이 더 복잡하게 전개됨으로써 상대적으로 파력의 변동성 및 큰 파력의 출현 가능성이 높아지게 되는 것이라고 해석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2차원 단면 수리모형실험을 수행하고 각 실험 조건 별로 Goda의 파압식에 대응되는 초과확률 0.4% 평균 파압 ($\bar{p}_{0.4\%}$)을 계산하여 분석을 수행하였다. 전면벽이 무공 구조인 경우 대부분의 실험 조건에 대하여 상위 4개 파압 평균($\bar{p}_{0.4\%}$)이 Goda 파압 공식 범위 내에서 형성되었으며, 파압 계측 실험이 정밀하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 드물게 방파제 전면에서 약한 쇄파(gently breaking)가 발생하는 경우에는 최대파압($p_{0.1\%}$) 또는 제2 최대파압($p_{0.2\%}$)이 Goda 파압을 약간 초과하는 경우가 발생하였지만, 대체로 Goda 파압에 의한 파력이 계측 파압의 상한선으로서 작용하였다. 한편, 유공케이슨 모형에 대한 실험 결과는 Takahashi의 파압공식과 비교하였으며, 전반적으로 Takahashi 파압식에 비해서 약간 더 큰 파압이 계측되었으며, 그 주된 이유는 유수실 상부 덮개가 존재하여 유수실 내부 공기가 압축되는 현상 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 유공률에 따른 케이슨 방파제 전면벽의 파압 분포 차이는 대체로 미미하였지만, 상대적으로 주기가 길고 파고가 높은 일부 실험과 조건에서는 유공률이 클수록 상대적으로 더 큰 파압이 계측되었다. 그러나 전면벽 유공부의 유공률에 따른 단면적 감소를 고려하여 계산한 총파력의 경우에는 유공률에 따른 차이가 미미하였다. 향후 유수실 상부 덮개가 없는

조건에 대한 추가 실험을 수행하여 케이슨 전면벽 및 유수실 내에 작용하는 파압 특성에 대한 보다 종합적인 결론을 도출하는 것이 필요하다.

감사의 글

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

References

- Chen, X., Li, Y., and Teng, B. (2007). Numerical and simplified methods for the calculation of the total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover. *Coast. Engrg.*, Vol. 54, pp. 67-75.
- Chun, I. S., Park, W. S., and Lee, D. S. (1993). “Pressure distribution and caisson stability of perforated breakwaters.” *J. Korean Soc. Coast. Oc. Engrs.*, Vol. 5, No. 2, pp. 66-75 (in Korean).
- Cuomo, G., Allsop, W., Bruce, T. and Pearson, J. (2010a). “Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters.” *Coast. Engrg.*, Vol. 57, pp. 424-439.
- Cuomo, G., Allsop, W., and Takahashi, S. (2010b). “Scaling wave impact pressures on vertical walls.” *Coast. Engrg.*, Vol. 57, pp. 604-609.
- De Gerloni, M. (1998). *Forces on perforated structures: Proposal for a Goda modified formula*. MAST III-PROVERBS-CT95-0041 Overall Workshop, Grenoble, France (in French).
- Fugazza, M. and Natale, L. (1992). “Hydraulic design of perforated breakwaters.” *J. Wtrwy, Port, Coast. Oc. Engrg.* Vol. 118, No. pp. 1, 1-14.
- Goda, Y. (1974). “New wave pressure formula for composite breakwaters.” *Proc. 14th Int. Conf. Coast. Engrg.*, ASCE, pp. 1702-1720.
- Jarlan, G.E. (1961). “A perforated vertical wall breakwater.” *The Dock and Harbor Auth.*, Vol. XII, No. 486, pp. 394-398.
- Kakuno, S., Oda, K., and Liu, P.L.F. (1992). “Scattering of water waves by vertical cylinders with a backwall.” *Proc. 23th Int. Conf. Coast. Engrg.* ASCE, pp. 1258-1271.
- Korea Institute of Construction Technology (2000). *Wave Reflection of Perforated-Wall Caisson Breakwaters* (in Korean).
- Liu, Y., Li, Y., Teng, B., Jiang, J., and Ma, B. (2008). “Total horizontal and vertical forces of irregular waves on partially perforated caisson breakwaters.” *Coast. Engrg.*, Vol. 55, pp. 537-552.
- Huang, Z., Li, Y. and Liu, Y. (2011) “Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: A review.” *Ocean Engrg.*, Vol. 38, pp. 1031-1053.
- Park, W. S., Chun, I. S., and Lee, D. S. (1993). “Hydraulic experiments for the reflection characteristics of perforated breakwaters.” *J. Korean Soc. Coast. Oc. Engrs.*, Vol. 5, No. 3, pp. 198-203 (in Korean).

- Korean).
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003). "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated caisson." *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, Vol. 129, No. 1, pp. 34-40.
- Takahashi, S., Shimosako, K., and Sasaki, H. (1991). "Experimental study on wave forces acting on perforated wall caisson breakwaters." *Report of P.H.R.I.*, Vol. 30, No. 4, pp. 3-34 (in Japanese).
- Takahashi, S., Tanimoto, K., and Shimosako, K. (1993). "Experimental study on impulsive pressures on composite breakwaters." *Report of P.H.R.I.*, Vol. 31, No. 5, pp. 33-72 (in Japanese).
- Takahashi, S. and Shimosako, K. (1994). "Wave pressure on a perforated wall caisson." *Proc. Int. Conf. Hydro-tech. Eng. Port and Harbor Const. (HYDRO-PORT '94)*, pp. 747-764.
- 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.
- Zhu, D. and Zhu, S. (2010). "Impedance analysis of hydrodynamic behaviors for a perforated-wall caisson breakwater under regular wave orthogonal attack." *Coast. Engrg.* Vol. 57, pp. 722-731.