

## 기포장막으로 인한 파 에너지 감소 효과에 관한 실험적 연구

장성철<sup>1,†</sup> · 김민수<sup>1</sup> · 이상협<sup>1</sup> · 윤한삼<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 해양산업공학 협동과정 대학원생

<sup>2</sup>부경대학교 생태공학과 교수

## An Experimental Study on the Effect of Decreasing the Surface Wave Energy due to the Bubble Curtain

Sung-Chul Jang<sup>1,†</sup>, Min-Su Kim<sup>1</sup>, Sang-Hyub Lee<sup>1</sup>, and Han-Sam Yoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering,  
Pukyong National University, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

### 요 약

본 실험연구에서는 다공관에서 압축공기를 방출하여 생성되는 기포장막으로 인한 파 에너지 감소 효과를 살펴보기 위해 2차원 단면 수리모형실험을 수행하였다. 기포장막에서 상승 기포는 수직 흐름을 유도하고 기포장막 영역에서 양방향으로 멀어지는 수평흐름을 생성한다. 본 연구에서는 기포장막의 파 에너지 감쇠 효과의 주요 요인을 알아보기 위하여 입사파 조건과 다공관의 설치 깊이 그리고 공기배출량을 고려하여 실험시설을 구축하였다. 결과적으로 본 실험연구를 통해 기포장막으로 인한 파 에너지 저감에는 다공관에서 발생하는 압축공기의 배출량, 다공관의 설치 수심, 입사파 조건과의 상관관계가 매우 밀접하게 관련이 있음을 나타냈다. 특히 기포장막은 단주기파의 제어에 큰 영향을 줄 수 있는 것을 확인할 수 있었으며, 입사파의 상대수심 및 파형경사가 클수록 효과적임을 알 수 있었다.

**Abstract** – In this experimental study, the two-dimensional hydraulic model experiments were conducted to examine the effect of attenuating the surface wave energy due to the bubble curtain generated by releasing compressed air from a perforated pipe. Rising bubbles in the bubble curtain induce vertical current, which produces horizontal currents flowing away from the bubble curtain area in both directions. In this study, wave experimental system was constructed in consideration of the incident wave conditions, the depth of the perforated pipe and the air flow rate due to find main factors of the wave attenuation effect of the bubble curtain. From the results of this experimental study, it was confirmed that the attenuation of wave energy due to the bubble curtain is very closely related to the air flow rate generated from perforated pipe, the depth of air source and the incident wave condition. In particular, it was found that the bubble curtain can have a great influence on the control of the short periodic wave and the greater the relative depth and wave slope of the incident wave is the more effective.

**Keywords:** Bubble curtain(기포장막), Compressed air(압축공기), Hydraulic model test(수리모형실험), Wave energy attenuation(파 에너지 감쇠)

### 1. 서 론

외해 입사 파랑에너지를 저감시킴으로써 항만 및 어항, 해안 시설물 파괴를 방지하고 그 기능을 지속적으로 유지하는 방안은 대단히 어렵다. 또한 그 목적을 달성하기 위해 설계·시공된 구조물은 대부분 경사제 또는 직립제의 중력식 구조물이 가장 보편적으로 사

용되고 있으며, 일반적으로 대규모이고 고비용이 소요되며 어떠한 경우는 환경적인 문제를 초래하기도 한다.

이중 중력식 방파제의 설치비용은 수심과 파랑 및 기후 조건에 따라 기하급수적으로 증가한다. 특히 대수심 해역에서 방파제의 중량과 건설비용을 줄이기 위해 수많은 연구자와 공학자들은 특정 개선사항의 도입 필요성을 제안하였고 상술한 문제를 극복하기 위한 연안보호 구조물을 구상함과 아울러 새로운 공법이나 설계에 지속적으로 관심을 가져왔다(Paprot[2017]).

<sup>†</sup>Corresponding author: sungchul0617@gmail.com

이를 극복하기 위한 다양한 종류의 방파제가 시범 적용되어 왔다. 그 중에서 중력식 방파제의 매력적인 대안으로 해저 또는 해중에서 공기 방울로 생성된 기포장막(bubble curtain) 형태의 비중력식 방파제가 제안되었는데, 이는 이동성(mobility)과 일시성(temporality)을 가지는 이동식 방파제의 일종으로 초기 설치비용이 상대적으로 낮은 장점이 있다(Carr[1950]). 또한 입항하는 선박의 운항에 방해가 주지 않으며 추가로 해수 순환을 발생시켜 해역 수질을 향상시킬 수 있다(Xu et al.[2019]). 아울러 구조상 파이프라인(pipeline)으로 이루어진 이점으로 파랑의 영향을 받지 않는 수심에 설치할 수 있고 파력 작용 면적이 작아 직접적으로 파이프가 받는 파력은 매우 작다(Wang et al.[2005]). 이처럼 비중력식 방파제는 연약지반 등의 조건에 대해 이점이 있으나 어느 것이든 성능, 뇌파성의 측면에서 그 적용 한계가 있어 일반적으로 내항이나 항내 등 파고가 비교적 작은 곳에서 선정되는 형식이라 할 수 있다(MOF[2014]).

기포장막의 파 에너지 감소에 관한 연구는 설계이론에 관한 연구가 수행된 지 오랜 시간이 지났지만, 연구 진행 상황은 매우 제한적이라 할 수 있다. Zhang et al.[2010], Paprota[2013, 2014, 2017]에 의하여 기포장막의 유효성을 평가하고 파 에너지 소산의 유체역학적인 메커니즘을 확인하기 위한 실험 연구 및 관련 이론 연구가 수행되어왔으며 Seo et al.[2017]은 해파리 등 수중생물들의 침입을 막기 위해 해수 취수구 시스템에 적용하기 위한 연구를 수행한 바 있다.

하지만 기존 중력식 방파제와 구조상, 수리학적 현상이 다른 이들 비중력식 방파제에 있어서는 파력, 파의 투과율, 반사율, 투과성 등의 수리특성이 아직 충분히 파악되지 않은 상황이다(MOF, 2014). 특히 기포장막에서 매우 빠른 속도로 상승하는 압축공기와 입사파 사이의 상호작용, 기포장막 주변 난류 영역에서 파 에너지 소산 해석 등은 매우 복잡한 현상으로 공학적인 설계에 적용할 수 있는 정보가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 파동장 하에서의 상술한 기포장막 주변의 수리학적 특성을 고찰하기 위한 기초연구로서 기포장막의 파 에너지 감소 효과를 살펴보기 위한 2차원 단면 수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험은 수조내 수심, 저면 기포 배출량, 입사파의 파고와 주기를 변화시키면서 기포장막 전·후면에서의 파 수면 변동을 관측하여 그 특성을 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 기초 실험 연구 결과는 향후 기포장막 주변 난류 영역에서의 파 에너지 소산 해석을 위한 수치모형 해석 검증자료로 활용하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 기포장막에 대한 선행연구

물속에 잠긴 다공관(perforated pipe)으로부터 배출된 기포의 상승으로 만들어진 기포장막이 파를 저지하기에 효과적일지도 모른다는 아이디어는 1900년대 초 미국의 P. Brasher에 의해 제기되었으며, 그 이후 몇 개의 시제품 설치가 이루어졌으며 다소 단편적인 데이터에 근거하여 성공 사례로 제시되었다(Lorenz et al.[1959]).

1930년부터 1950년까지 기간 동안 일부 모형실험연구가 수행되었지만, 그 결과는 불완전하고 경우에 따라서는 모순되었으나(Kobus[1968]) 기포장막과 관련된 연구주제는 그 이후로 1세기 동안 수많은 연구자의 시선을 끌었다.

대표적으로 Evans[1955]는 기포장막으로 유도된 수표면에서의 수평흐름 속도는 표면에서 최대이고 깊이에 따라 선형적으로 감소하여 특정 깊이에서 사라진다는 것을 발견하였다. 이와 같은 수심에 따른 특정 속도분포를 이용하여 다양한 주기의 파 에너지를 완전히 소멸시키는 데 필요한 수평흐름 속도에 대한 데이터와 공기압축기의 마력 조건에 대한 일반적인 표를 제공하였다. 또한 실험을 바탕으로 수평흐름 속도의 균일한 속도분포를 가정한 것에 기초하여, 기포장막으로 유도된 수평흐름 속도의 계산식을 제시하였다. 또한 Taylor[1955]는 성분파(partial wave)의 소산(wave damping)을 고려하지 않고 규칙파를 대상으로 제한하여 가정함으로써 기포장막이 가진 방파제로서의 기능을 이론적으로 정리하였다. 즉, 입사하는 파의 파장을 알고 있을 때 파의 진행을 멈추게 하는데 필요한 표면에서의 흐름 속도를 이론적으로 예측한 것이다.

Lorenz et al.[1959]은 기포 및 물의 압축 분사로 발생하는 파 에너지 감쇠 구조의 최적 설계를 위한 자료를 제시하기 위하여 수리 모형실험을 수행하고 입사파장에 대한 전력요구량 추산식을 제시하였다. 이를 통해 수심이 깊을수록 파 에너지 감쇠에 효과적이고 파랑감쇠는 압축기의 성능이 커져도 입사파 에너지의 80%까지만 감쇠가 발생한다고 주장하였다. Bulson[1968]은 기존 선행연구와 그의 실험연구를 검토함으로써 기포장막으로 생성된 수평흐름 속도와 그 발생 두께 그리고 입사파의 파장과 파고를 알고 있을 때 입사파를 제어하는데 필요한 공기량을 계산식으로 제시하였다. Kobus[1968]는 다공관에서 발생하는 기포에 의하여 생성되는 수직·수평흐름에 대한 이론 연구를 수행하였는데, 그 연구결과에서 평균 수직속도에 대해 측정된 표준 편차가 이론식으로 잘 재현됐지만, 중심선에서의 속도는 다소 높게 제시된 바 있다.

그 이후 Ditmars and Cederwall[1974], Wang et al.[2005], Zhang et al.[2010], Paprota[2013, 2014, 2017]에 의해 실험 및 이론 연구가 수행되어 왔으며 이를 바탕으로 정리된 이론연구의 목적은 방파제로 사용되는 기포장막의 유효성을 평가하고, 파 에너지를 감쇠시키는 데 충분한 공기의 양을 추정하며 파 에너지 소산의 유체역학적인 정확한 메커니즘을 확인하는 것이었다. 결과적으로 기포장막의 주요 파 에너지 감쇠 메커니즘은 기포의 상승으로 생성되는 흐름 및 난류와 관련이 있으며 기포장막 활성 영역의 파형을 분석하여 설명할 수 있음이 밝혀졌다(Brevik[1976]).

국내에서는 Kim and Shin[2004]이 다공관(perforated pipe)의 분기관(manifold) 배치에 따른 소파 효과로서 분기관 설치 수심이 깊을수록 효과적이지만 그 배치 간격에 따라 소파 효과가 차이므로 설계시 이를 중요한 인자로 고려하여 적용할 것을 제안한 바 있다. 그리고 Seo et al.[2017]은 해안 및 하안에 위치한 취수시설에 해파리 등 수중생물들의 침입을 막기 위하여 도입된 기포장막 형태의 취수구 시스템에 PIV를 이용한 기포 거동 특성연구를, Seo and

Kim[2018]은 수치해석 기법을 이용한 기포 유동의 가시화 연구를 진행한 바 있다.

## 2.2 기포장막의 파 에너지 감쇠 개념

상승 기포의 방파 구조물로서 기본개념은 해저 또는 해중에 설치된 다공관에서 기포(air bubble)를 발생시켜 수직 기포장막(bubble curtain)을 생성하는 것이다. 일반적으로 항구의 해저 또는 심해 특정 깊이에 다공관을 설치하고 공기압축기(air compressor)를 통하여 제공된 압축공기가 수중에 배출되는 형태로 구성된다.

Fig. 1은 기포장막의 파 에너지 감쇠 메커니즘을 도식화하여 나타낸 것이다. 다공관을 통해 수중에 배출된 기포가 수면으로 상승함에 따라 수립자에 항력이 가해지고 혼합물(공기와 물)의 상승운동이 발생한다. 혼합물이 수면에 도달하였을 때, 공기는 대기로 빠져나가고 물은 양방향으로 나뉘어 수평흐름(surface current)이 유도된다. Taylor[1955]는 이 수평흐름 속도를 다공관의 공기배출량과의 관계로 수면에서 특정 길이까지 균일하게 감소하는 속도분포로 정의한 바 있다. 만약 수면이 파동장인 경우 다공관에서 배출되는 기포의 발생으로 유도된 난류가 파를 일부 감쇠시키지만, 일반적으로 입사하는 파와 대립하는 수평 흐름이 흐름장의 마찰을 증가시켜 진행되는 파를 파쇄(wave damping)시키고 결과적으로 입사파 에너지의 난류 확산을 일으킨다(Lorenz et al.[1959]).

그리고 Unna[1942]는 조류가 파랑을 제어하는 임계속도에 관한 연구에서 파의 진행 방향과 반대 흐름이 발생할 때 파속(wave celerity) 및 파장(wave length)이 감소하는 결과가 나타났으며 임계속도의 크기는 파속의 1/4과 같음을 발견하였다. Taylor[1955]와 Evans[1955]는 기포장막으로 유도된 수평 흐름이 진행되는 파속에 영향을 주어 파형경사(wave steepness) 증대, 쇄파(wave breaking)

유도하여 입사파 에너지를 소산시키고 투과파의 파고 감소를 일으킨다고 제시하였다.

## 2.3 2차원 단면 수리모형실험

본 연구에서는 전술한 Brevik[1976]의 기포장막의 주요 파 에너지 감쇠 메커니즘을 적용하여 기포 상승으로 생성된 흐름 및 난류, 기포장막 활성 영역의 파형 변형을 수리실험으로 확인하고자 하였다. 즉, 기포장막의 파 에너지 감쇠 효과에 대하여 2차원 단면 수리모형실험을 수행하였다. 본 실험에 적용한 실험 조건들을 정리하면 Table 1과 같고 실험의 구성과 계측기 위치는 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험연구에 사용된 2차원 단면 조파수조 및 압축 공기 배출 장치의 제원은 Table 1과 같다. 수리모형실험은 길이 35.0 m, 폭 1.0 m, 높이 1.0 m의 체원을 가지는 2차원 단면 조파수조에서 수행되었다. 다공관은 PVC 재질이며, 분기관(공기배출부)의 각 오리피스(orifice) 크기는 0.0025 m, 간격은 0.02 m로 총 길이 0.84 m로 제작하여 수면을 향하고 조파관과 수평이 되도록 수조 바닥에 설치하였다. 또한 다공관에 압축기(air compressor)에서 만들어지는 압축 공기를 전달하기 위하여 강관을 사용하여 파이프라인을 구축하였다. 그리고 압축기에서 생성되는 압축공기의 내부압력을 계측하고 일정 압력을 유지하기 위하여 압력게이지를 밸브 간에 부착하였으며 압력게이지와 파이프라인 사이에 공기 유량계(rotameter)를 설치하여 배출되는 압축공기량을 일정하게 공급할 수 있게 하였다(Fig. 2).

실험에서는 규칙파 및 비쇄파 조건(non-breaking condition)을 대상으로 총 27개의 파 조건에서 수행하였으며 실험조건은 Table 2에 나타내었다. 수심( $h$ ), 주기( $T$ ), 파고( $H$ ) 그리고 공기배출량( $Q$ , LPM)을 변화시켜 수행하였으며, 조파기에서 파의 생성은 기포장막을 형성

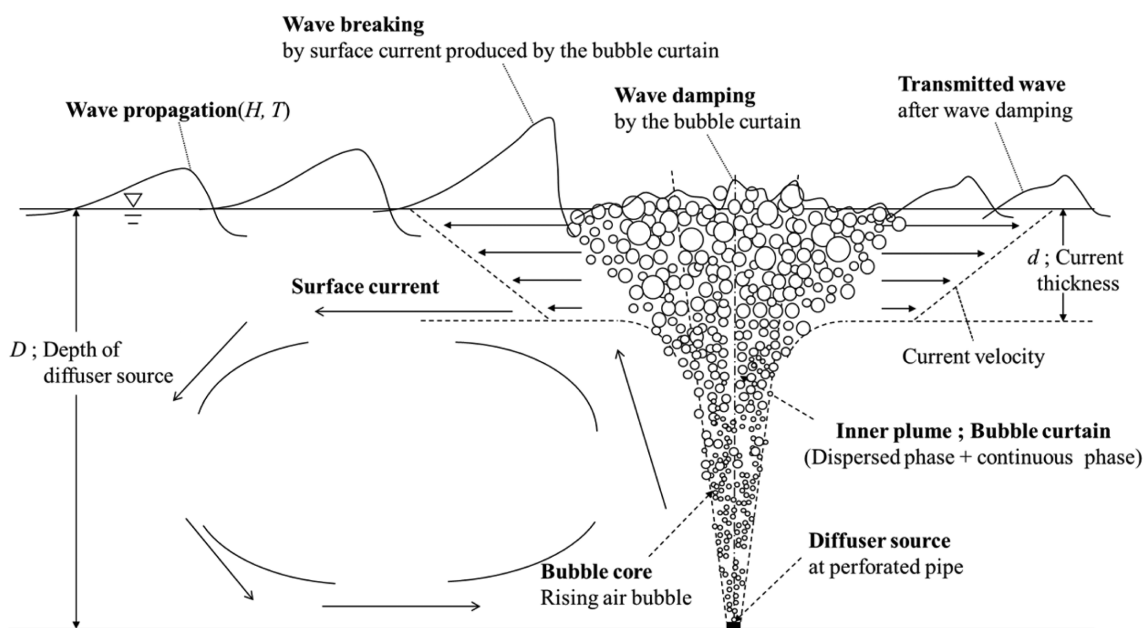
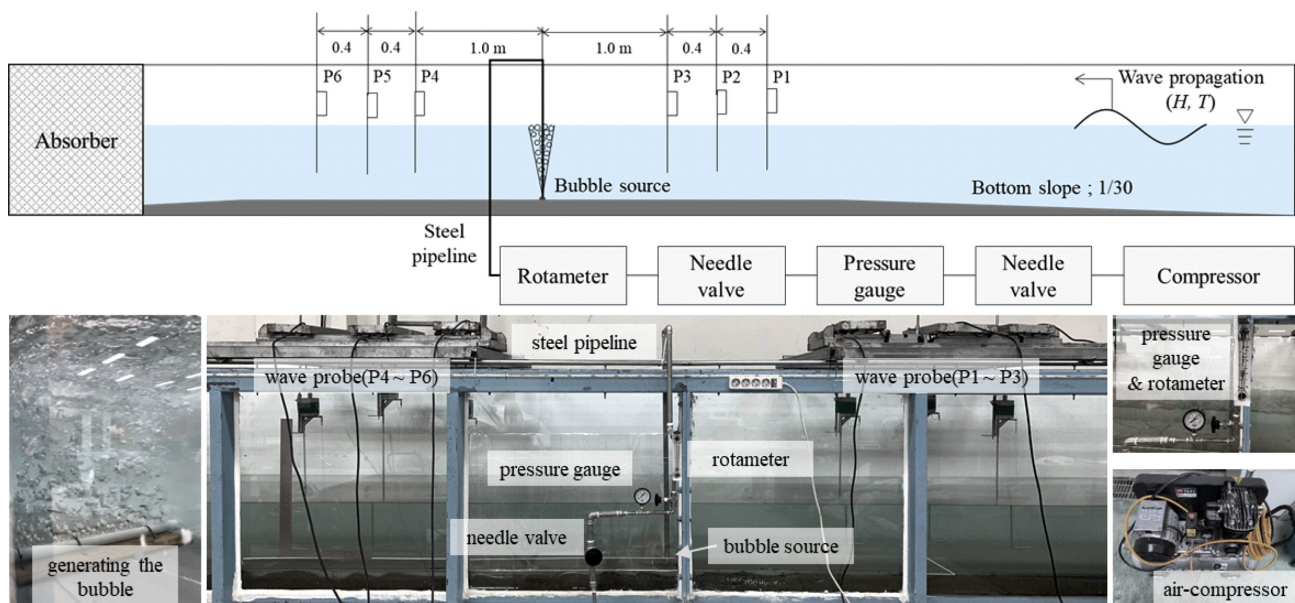


Fig. 1. Wave attenuation mechanism of the bubble curtain under wave field condition.

**Table 1.** The specification of water tank and the bubble generator

| Classification   |                           | Specification                |
|------------------|---------------------------|------------------------------|
| Water tank (m)   |                           | 35.0 (L) × 1.0 (W) × 1.0 (H) |
| Wave maker       | Paddle size (m)           | 1.0 (W) × 1.0 (H)            |
|                  | Max. Wave height (m)      | 0.3                          |
|                  | Reproducible period (sec) | 0.5 ~ 2.5                    |
|                  | Max. Water depth (m)      | 0.8                          |
|                  | Method of operation       | Servo motor piston type      |
| Bubble generator | Orifice diameter (m)      | 0.0025                       |
|                  | Orifices spacing (m)      | 0.020                        |
|                  | Total length (m)          | 0.840                        |
|                  | Air-compressor            | 5.5 HP, 366 liter/min, 2ea   |

**Fig. 2.** Wave flume experimental setup of this study.**Table 2.** The 2D hydraulic model test conditions

| Cases     | Wave conditions        |                          |                        |                        | Air flow conditions         |
|-----------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
|           | Water depth ( $h$ , m) | Wave period ( $T$ , sec) | Wave height ( $H$ , m) | Wave length ( $L$ , m) | $Q$ (LPM, liter per minute) |
| No. 01~12 | 0.3                    | 0.7                      | 0.037 ~ 0.046          | 0.755                  | 5.0, 9.0, 13.0              |
|           |                        | 0.8                      |                        | 0.961                  |                             |
|           |                        | 0.9                      |                        | 1.168                  |                             |
|           |                        | 1.0                      |                        | 1.373                  |                             |
| No. 13~27 | 0.5                    | 0.79                     | 0.055 ~ 0.063          | 0.971                  | 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0   |
|           |                        | 0.94                     |                        | 1.353                  |                             |
|           |                        | 1.26                     |                        | 2.207                  |                             |

한 이후에 조건별 대상 파를 생성하였다. 파의 생성은 프로그램이 가능한 피스톤 타입 조파 시스템(wave maker system)으로 생성되며 수조 끝단에 다공판을 제작하여 입사파의 강제 소파를 유도하여 반사파에 대한 영향을 최소화하였다.

기포장막의 전·후면에 총 6기(P1~P6)의 용량식 파고계를 설치하여 수면의 수위변동을 계측하였다. 파고계 위치는 기포장막으로 생성된 난류 영역을 벗어나도록 하고 수조 측면에서의 반사 영향을 최

소화하도록 수조 중앙부에 위치시켰다.

## 2.4 기포장막 주변 수위변동 해석

본 실험은 일차적으로 외부 파 작용이 없는 경우에 기포장막의 공기배출량에 의한 수면의 수위변동을 정량적으로 알아보기 위하여 수행되어졌다. 즉, 공기배출량 변화에 따른 수면파의 발생 크기를 살펴보기 위해 기포장막이 생성된 상태에서 압축공기 배출량에 따른

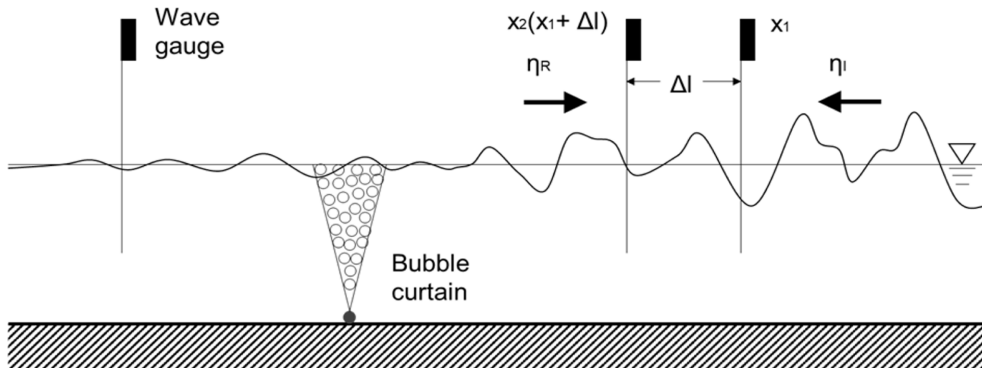


Fig. 3. Definition sketch of wave field around the bubble curtain.

수위변동을 측정하여 파형을 분석하였다. 또한 다음으로 외부 파가 있을 경우, 기포장막 주변의 파 에너지 감쇠 효과를 정량적으로 나타내기 위하여 수심, 공기배출량, 파고와 주기를 변화시키면서 수위변동을 측정하여 파형을 분석하였다.

기포장막으로 인한 반사계수를 산정하기 위해 Fig. 2와 같이 기포장막 전면 P1~P3에서 얻어진 수위변동 데이터를 Goda and Suzuki[1976]의 입·반사파 분리방법을 적용하여 다음과 같이 산정하였다. Fig. 3과 같이 입사파와 반사파가 공존하는 중복파장에서  $\Delta l$  만큼 떨어진 2지점  $x_1$ 과  $x_2 = x_1 + \Delta l$ 에서 동시에 측정한 파형은 일반적으로 다음식 (1)~(2)와 같이 나타낸다.

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \sigma t + B_1 \sin \sigma t \quad (1)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = A_2 \cos \sigma t + B_2 \sin \sigma t \quad (2)$$

여기서,  $\sigma (= 2\pi/T)$ 는 각주파수,  $T$ 는 주기이며, 아래 첨자  $I, R$ 은 입사파와 반사파를 나타낸다. 위 식에서 진폭  $A_1, A_2, B_1, B_2$ 는 각 측정점에서 얻어진 시계열 데이터를 FFT(Fast-Fourier Transform) 분석을 통해 값을 얻을 수 있다. 그리고 입사파와 반사파의 진폭  $a_I, a_R$ 은 다음 식 (3)~(4)를 이용하여 산정한다.

$$a_I = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2} \quad (3)$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} \sqrt{(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l + B_1 \cos k\Delta l)^2} \quad (4)$$

여기서,  $k$ 는 파수(wave number,  $k = 2\pi/L$ )이다.

반사계수(reflected coefficient;  $K_R$ )는 기포장막 전면에서 얻어진 수위변동 데이터로부터 입·반사파 분리방법을 사용하여 계산된 반사파고( $H_R = 2a_R$ )와 입사파고( $H_I = 2a_I$ )의 비로 다음 식 (5)와 같이 정의한다.

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (5)$$

전달계수(transmitted coefficient;  $K_T$ )는 기포장막 후면에서 얻어진 전달파고( $H_T$ )와 전술한 입·반사파 분리를 통하여 계산된 입사파고( $H_I$ )의 비로 다음 식 (6)과 같이 정의한다. 그리고 전달파고는 각 파고계 위치에서 샘플링 주파수 50 Hz로 100초 동안 취득한 수위변동 데이터를 영점상향교차법(zero-up crossing method)을 사용하여 파형 분석을 수행한 뒤 상위 1/3 값들의 평균값을 적용하였다.

$$K_T = \frac{H_T}{H_I} \quad (6)$$

기포발생에 따른 수면에서의 진행파 에너지의 소산(wave damping) 이외의 내부 점성, 벽면을 통한 마찰 등의 기타 소산 현상을 무시하면, 반사파 및 전달파는 에너지 보존법칙을 충족해야 한다. 따라서 이를 적용하여 기포장막 주변에서 소산되는 파 에너지를 반사계수와 전달계수 식으로 표현하면, 파 에너지 소산계수(dissipation coefficient;  $K_D$ )는 다음 식 (7)과 같이 정의한다.

$$K_D = \sqrt{1 - K_R^2 - K_T^2} \quad (7)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 파의 수위변동 시계열 해석

본 연구에서는 먼저 다공관으로부터 배출된 공기배출량의 변화가 수면에서 진행되는 파의 수위변동에 어떠한 영향을 주는지를 관찰·분석하였다. 전술한 Table 1의 실험조건과 같이 규칙파를 대상으로 공기배출량( $Q$ )과 수심( $h$ ) 그리고 입사파 조건( $H, T$ )을 변화시키며 수면에서의 수위 변화를 계속하였다.

Fig. 4는 입사파 조건  $H = 0.054$  m,  $T = 0.7$  sec, 공기배출량( $Q$ ) 5 LPM(liter per minute)일 때의 실험 장면으로 기포장막 주변에서의 파형 변화를 1/8  $T$  간격으로 영상을 캡처하여 나타낸 것이다. Fig. 4(e)와 Fig. 4(f)를 통하여 기포장막 설치 전면 위치에서 파장의 변화로 인한 파형경사가 증가하고 쇄파가 발생되는 것을 확인할 수 있으며, 결과적으로 실험 과정에서 수면에서 전달되는 파는 기포로 구성된 기포장막에 의하여 일부는 전면에서 반사와 기포장막 설치 전면 위치에서 쇄파되었으며 기포장막 배후에서는 입사파보다는



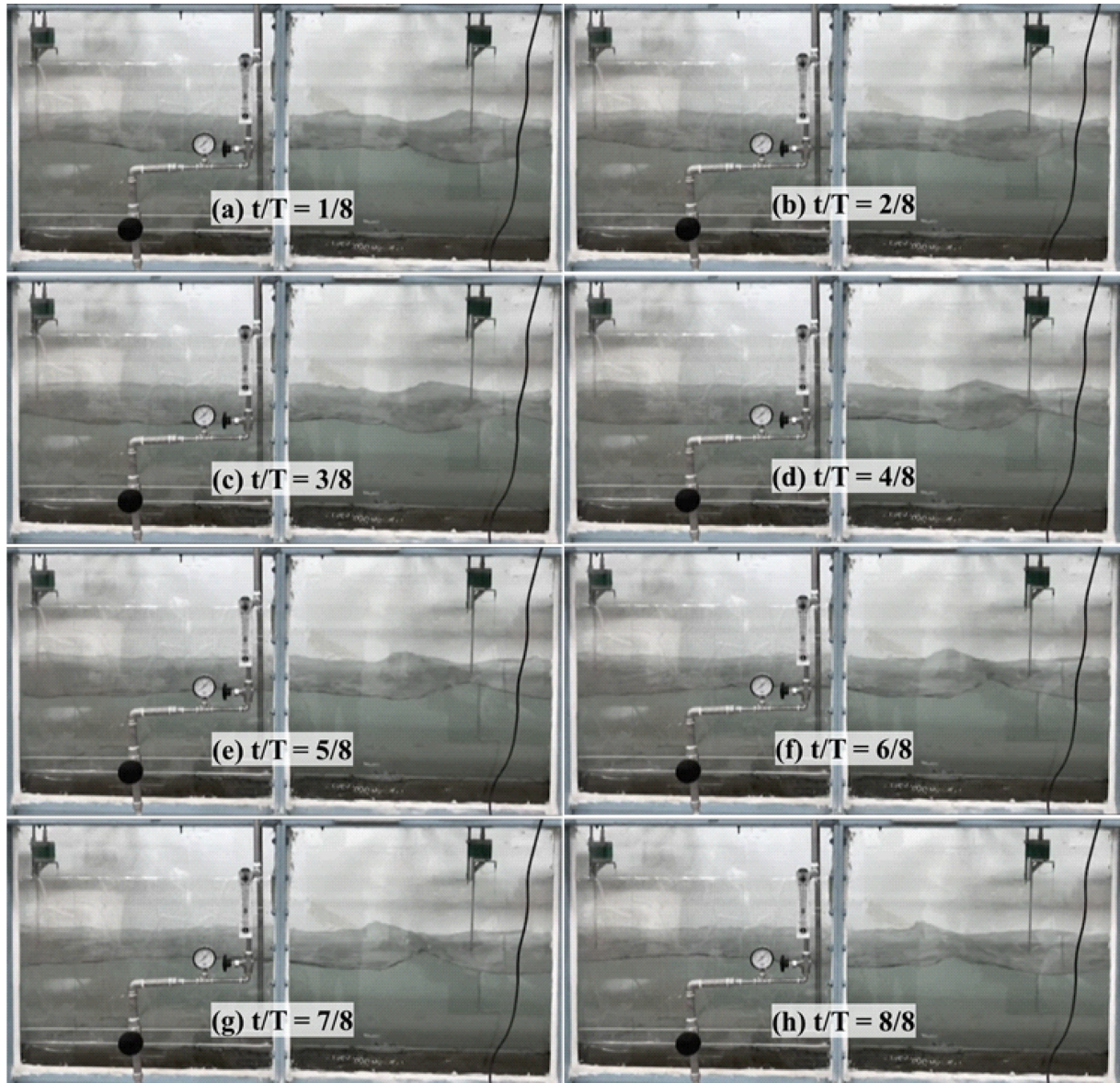


Fig. 4. The wave attenuation effect due to the bubble curtain under experiment condition;  $h=0.3$  m,  $H=0.054$  m,  $T=0.70$  sec,  $Q=5$  LPM.

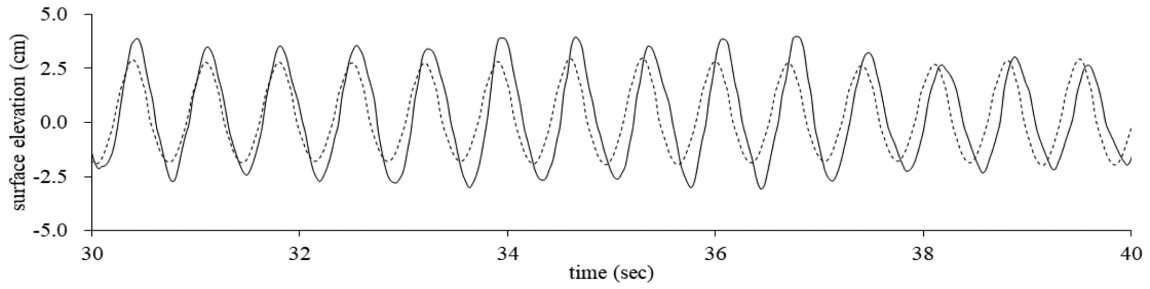
월등히 작은 파가 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

기포장막의 전·후면에 설치된 총 6기(P1~P6)의 파고계를 이용하여 수면에서의 수위변동 데이터를 시계열 해석하였다. 본 실험 결과의 대표적인 경우로서 Fig. 5와 Fig. 6은 공기배출량이 가장 큰 경우(공기배출량 13.0 LPM으로 동일)에 수심 및 입사파 조건이 다른 경우의 2가지 실험의 진행하는 파의 기포장막으로 인한 수위변동 시계열을 나타내고 있다. 점선은 공기배출량이 없는 조건( $Q=0$ )에서의 각 계측점에서의 파형을, 실선은 기포장막이 활성화가 된 이후 파의 수면 파형을 나타내고 있다.

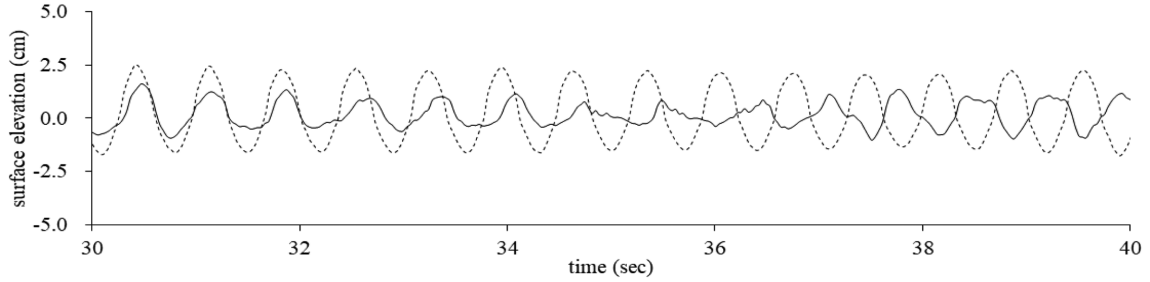
먼저 Fig. 5는 수심 0.3 m의 조건에서 파고 0.054 m, 주기 0.70 sec의 파가 진행될 때, 그리고 Fig. 6은 수심 0.5 m의 조건에서 파고 0.064 m, 주기 0.79 sec의 파가 진행될 때 기포장막 전면(P1 지점)과 후면(P6 지점)의 수위변동 시계열을 나타낸다. P1 지점에서의 수

위변동은 입사파의 파고와 기포장막으로 인한 반사파가 중첩되어 다소 증가 또는 동일한 경향을 보였으나 P6 지점에서의 수위변동 값을 살펴보면 진행되는 파고의 크기가 기포 작용을 하지 않았을 때 보다 수심 0.3 m의 경우 52.4%, 수심 0.5 m의 경우 61.0% 감소한 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 수위변동 시계열 해석 결과로부터 기포장막으로 인한 파의 수면 변화를 확인할 수 있으며 진행되는 파의 크기는 기포장막 배후에서 급격히 감소함을 나타내었다. 그리고 각 계측점에서 파 주기의 위상(phase) 차이가 일부 발생하는데, 이는 기포장막으로 유도된 수평흐름과 진행되는 파가 상호작용하여 입사파 주기의 변화를 발생시킨 결과로 전술한 Taylor[1955]와 Evans[1955]의 기포장막이 파형경사(wave steepness) 변화를 일으킨다는 주장과 일치한다.

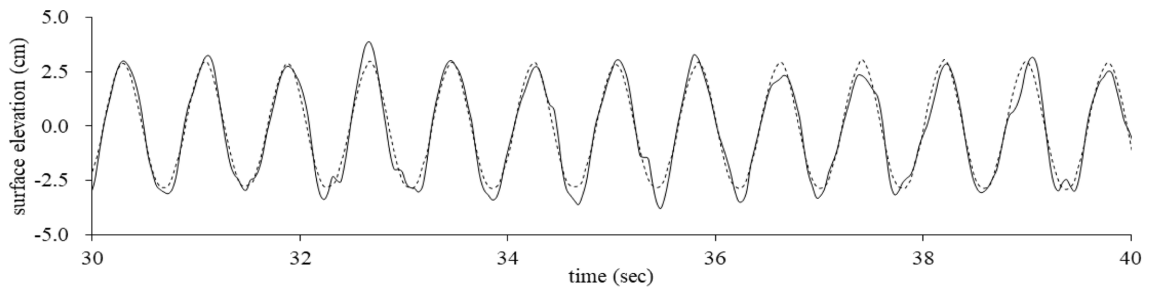


(a) The surface elevation at the P1(in front of the curtain) under wave condition.

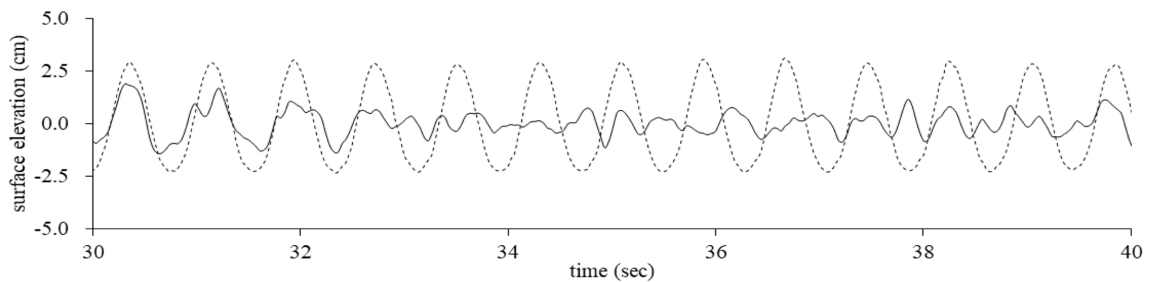


(b) The surface elevation at the P6(behind the curtain) under wave condition.

**Fig. 5.** The measured time series of the surface elevation in front of and behind the bubble curtain under experiment condition;  $h=0.3$  m,  $H=0.054$  m,  $T=0.70$  sec, no air flow (dashed line),  $Q=13$  LPM (black line).



(a) The surface elevation at the P1(in front of the curtain) under wave condition.



(b) The surface elevation at the P6(behind the curtain) under wave condition.

**Fig. 6.** The measured time series of the surface elevation in front of and behind the bubble curtain under experiment condition;  $h=0.5$  m,  $H=0.064$  m,  $T=0.79$  sec, no air flow (dashed line),  $Q=13$  LPM (black line).

### 3.2 공기배출량에 따른 수위변동

기포장막에 대한 공기배출량 변화에 따른 수위변동을 계측하였는데, 실험 수심 0.5 m일 때의 실험 장면은 Fig. 7과 같다. 결과적으로 실험 과정에서 다공관에서 배출되는 압축공기의 상승으로 생성된 기포장막으로 인해 수면에서 파형이 생성되며 기포장막 양방향으로 유사한 패턴의 파형이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

실험 결과로서 수위변동을 계측(샘플링 주파수 100 Hz로 50초

동안 기록)하여 Fig. 8에 나타내었는데, 상단은 파고( $H$ ), 하단은 주기( $T$ )를 의미한다.

Fig. 8에서 기포장막으로부터 거리가 멀어질수록(P4→P6) 기포장막으로 인하여 파고가 감소하고 주기는 상대적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 공기배출량이 증가할수록 파고 및 주기 값의 증가가 나타났으며, P4 계측점에서 기포장막으로 생성된 파의 특성을 살펴보았을 때 파고는 1.12~1.61 cm, 주기는 0.33~0.37 sec

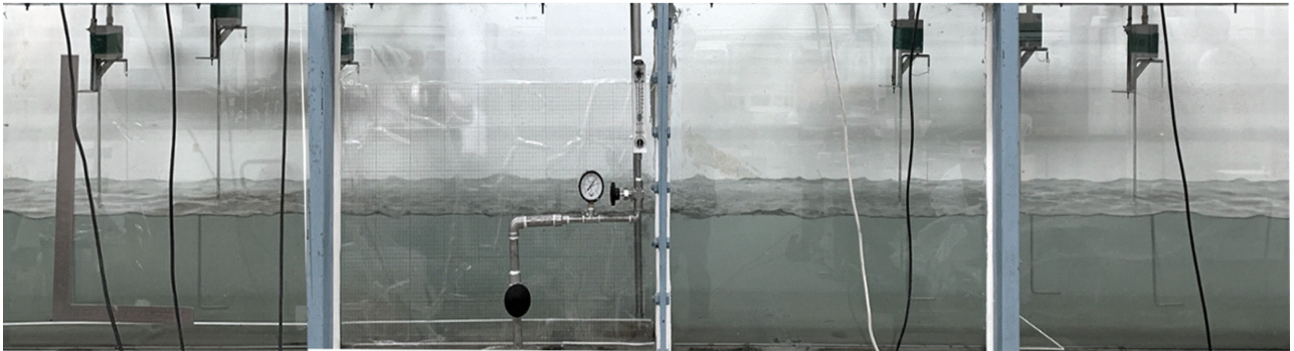


Fig. 7. The scene measuring the wave and currents induced by the bubble curtain.

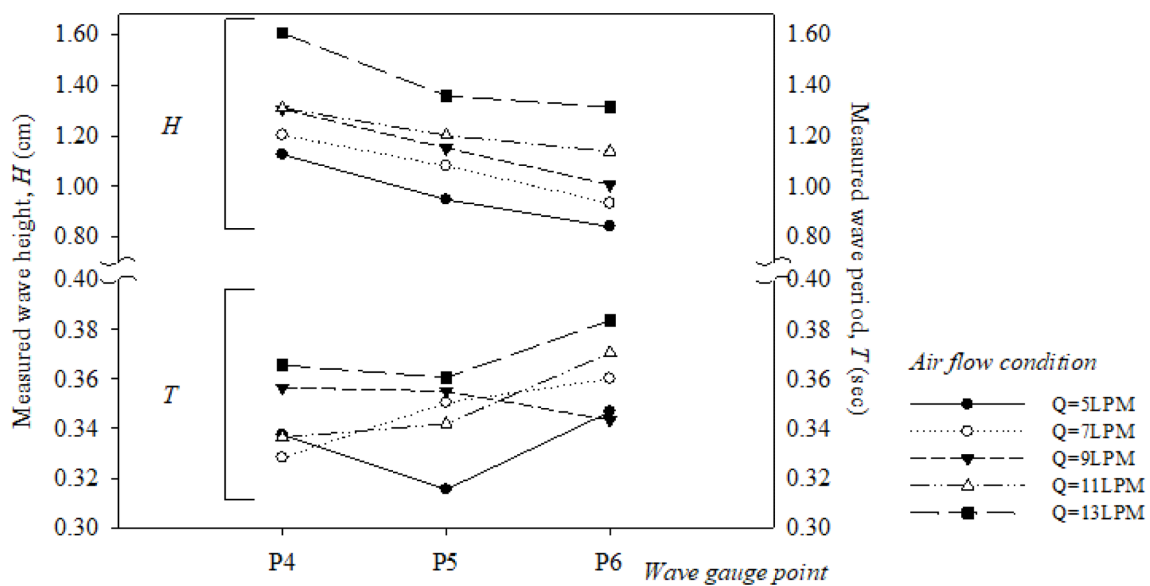


Fig. 8. The significant wave height and period of the wave induced by the bubble curtain at three measuring points (P4, P5, P6).

범위의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 P6 계측점에서 파의 특성을 살펴보았을 때 파고는 0.84~1.31 cm, 주기는 0.35~0.38 sec 범위의 값을 나타내어 결과적으로 기포장막에서 멀어질수록 파고 감소, 주기 증가의 경향을 나타내었다.

### 3.3 파 에너지 감쇠 효율

기포장막 주변의 수위변동 계측 자료를 이용하여 파 에너지 감쇠 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여 반사계수 및 전달계수를 계산하고 그 결과를 이용하여 진행하는 파의 에너지 소산율을 산출하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Table 1의 실험조건에 따라 실험 파고계로부터 얻어진 데이터를 활용하여 상대수심( $kh$ )과 파형경사( $H/L$ )의 변화에 따른 반사계수( $K_R$ )와 전달계수( $K_T$ )를 정리하여 나타낸 것이다.

먼저 Fig. 9는 공기압축기에서 공기 배출로 유도된 기포장막으로 인해 진행파에 미치는 영향을 살펴보고자 기포장막 전면에서 실험 조건별 반사와 크기를 나타낸 것이다. 기포장막으로 인한 반사와 크기 비교는 반사계수를 산정하여 나타내었다. 결론적으로 실험 결과로부터 반사계수는 수심 0.3 m에서 0.158~0.329, 수심 0.5 m에서

0.128~0.398의 범위를 나타내었다. 하지만 실험조건 중 주기가 0.8 sec 보다 커지면 0.20 이하의 반사계수를 가지는데 이는 기포장막으로 유도된 파의 유의파 주기인 0.32~0.38 sec보다 입사파 주기가 두 배수 이상일 때 기포장막 전면에서의 반사는 거의 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 그리고 파형경사 0.06 값을 기준으로 하여 반사계수가 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

일반적으로 진행하는 파가 수심 변화 또는 구조물 영향에 의해서 파 에너지( $E = 1/8 \rho g H^2$ )는 일부 반사·소산되고 나머지는 전달된다. 하지만 Fig. 9의 결과를 살펴보면 기포장막으로 인한 반사는 진행하는 파에 크게 영향을 미치지 않으며 공기배출량과 입사파 조건에 따라서 변화특성이 나타나지만, 그 변화 폭이 작으므로 에너지 감쇠의 변화에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단할 수 있다.

또한 Fig. 10은 진행파가 기포장막을 통과하였을 때의 전달계수를 상대수심과 파형경사 변화에 따라 실험조건별로 정리하여 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 상대수심과 파형경사가 클수록 전달계수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 공기배출량의 크기가 커질수록 동일 입사파 조건이라 하더라도 전달계수의 크기가 감소하는 것을



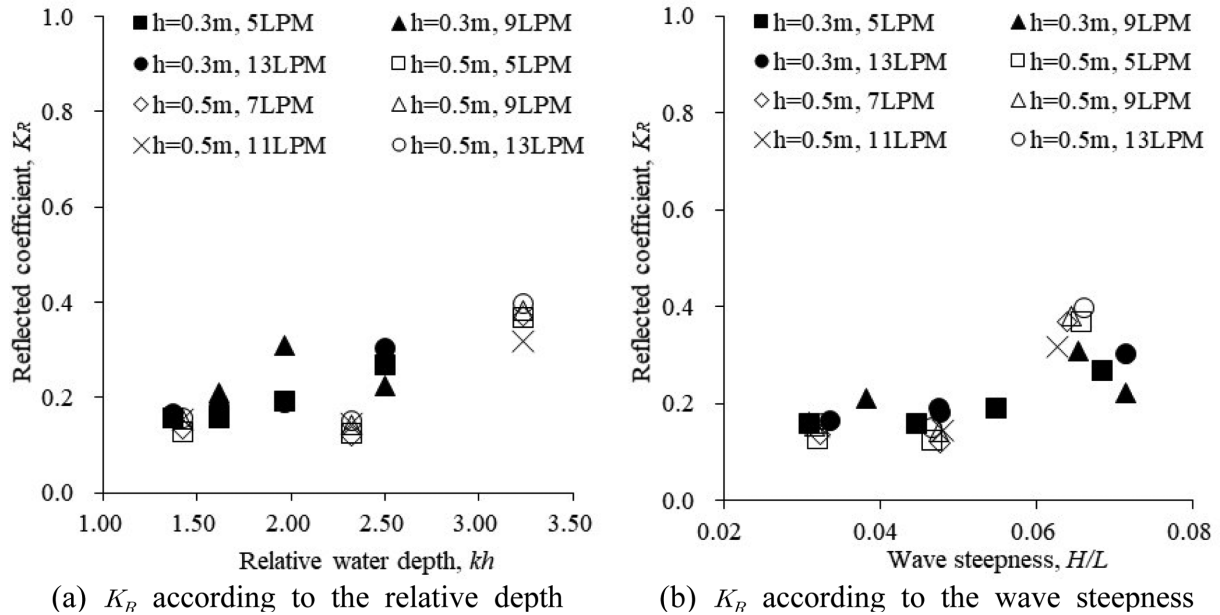


Fig. 9. Comparison of the reflected coefficient ( $K_R$ ) of the wave induced by the bubble curtain under the experiment condition according to change the relative water depth ( $kh$ ) and wave steepness ( $H/L$ ).

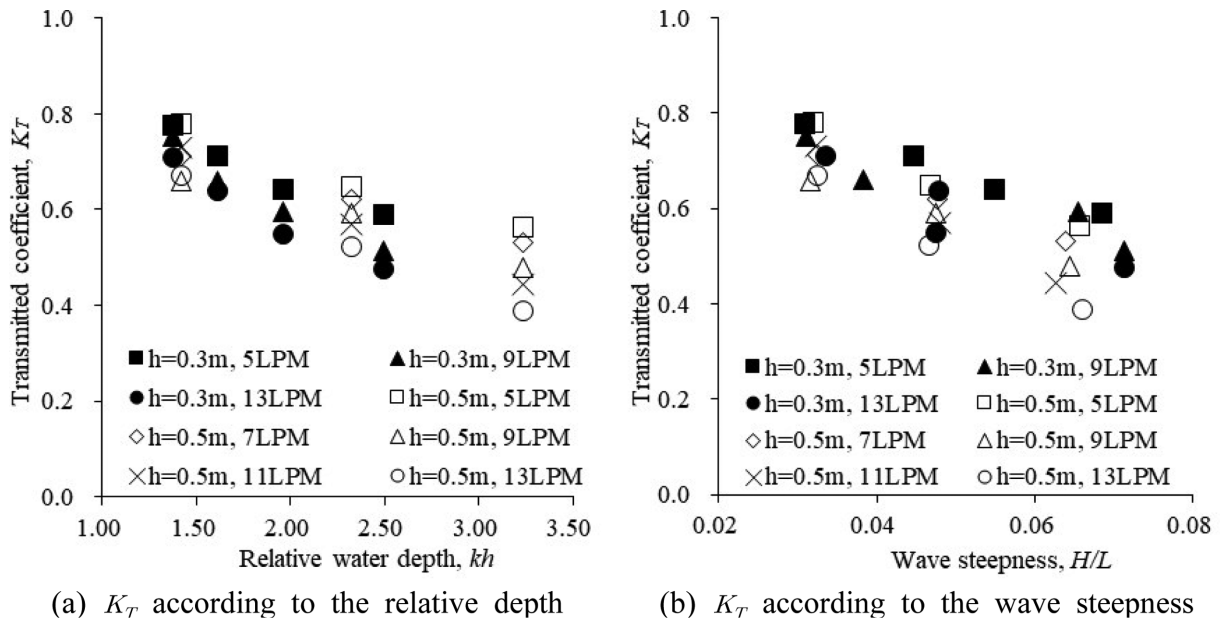


Fig. 10. Comparison of the transmitted coefficient ( $K_T$ ) of the wave induced by the bubble curtain under the experiment condition according to change the relative water depth ( $kh$ ) and wave steepness ( $H/L$ ).

알 수 있다.

전달계수는 수심 0.3 m의 실험조건인 경우 주기 0.70 sec에서 0.476~0.590, 주기 0.80 sec에서 0.550~0.641, 주기 0.90 sec에서 0.639~0.712 그리고 주기 1.0 sec에서 0.709~0.776의 범위로 나타났다. 그리고 수심 0.5 m의 조건인 경우 주기 0.79 sec에서 0.390~0.563, 주기 0.94 sec에서 0.523~0.648 그리고 주기 1.26 sec에서 0.659~0.780의 범위로 나타났다.

이를 통해 전달계수의 크기는 진행하는 파 주기에 따라 변동하고

단주기파에 대해서 파 에너지 전달이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 아울러 Fig. 10(b)의 결과에서 살펴보면 동일 주기를 가지는 입사파 조건일지라도 수심(수심 0.5 m)이 더 클 때 전달계수가 상대적으로 더 감소하였다. 이는 수심이 깊을수록 다공관에서 배출되는 기포가 상승하여 자유수면 위로 빠져나갈 때의 크기가 상대적으로 수심이 낮을 때보다 더욱 크게 성장하여 진행하는 파에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다.

마지막으로 Fig. 11은 기포장막 전면에서의 반사파로 인한 쇄파

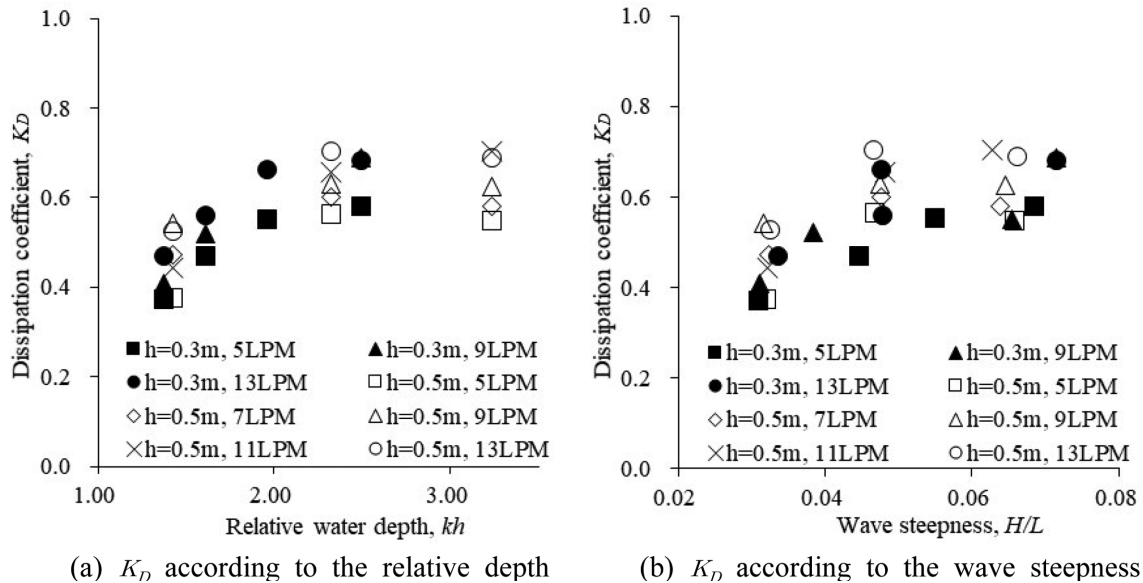


Fig. 11. Comparison of the dissipation coefficient ( $K_D$ ) of the wave induced by the bubble curtain under the experiment condition according to change the relative water depth ( $kh$ ) and wave steepness ( $H/L$ ).

및 기포장막 주변 난류 영역에서의 수립자 마찰을 통한 에너지 소산의 크기를 소산계수를 이용하여 정량화하여 나타낸 것이다.

결과적으로 진행하는 파 에너지 손실에 의한 파고 감소는 37.2~68.8%의 범위를 가진다. 실험조건별로 파고 감소를 살펴보면 수심 0.3 m 조건인 경우 주기 0.7 sec 및 0.8 sec에서는 55.1% 이상, 주기 1.0 sec에서는 46.9% 미만의 값을 나타내었다. 그리고 수심 0.5 m 조건의 실험결과에서도 유사한 경향을 보였는데 주기 1.0 sec 미만의 파 주기 조건에서는 최대 70.0%까지 감소하였지만, 그 이상의 주기에서는 50.0% 미만으로 나타났다. 이는 일반적으로 공기 방파제가 주기가 긴 파랑에 대해서는 효과가 작다는 기존 연구(MOF, 2014)와 일치하는 결과이다.

공기배출량이 커질수록 파 에너지 소산도 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 공기배출량의 증가로 인한 기포장막 주변 난류 영역의 확장으로 인한 결과로 여겨진다. 즉, 수면에서의 파형을 관찰한 바에 따르면 배출된 공기 입자가 진행하는 파의 파형 변형을 초래하는데 이는 진행하는 파와 기포장막 주변 난류 영역에서 극대화된다. 또한 단주기 파인 경우 파형경사의 증가로 인한 쇄파 발생으로 에너지 손실이 추가로 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2차원 단면 수리모형실험을 수행하여 기포장막으로 인한 파 에너지 감소 효과에 관해 살펴보려고 하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기포장막은 파의 수위변동에 영향을 주며 기포장막 배후에서 입사파의 크기는 수심 조건에 따라 52.4~61.0% 감소하였다.
- (2) 기포장막 배후에서 분기관으로부터 거리가 멀어질수록 파고

는 감소, 주기는 상대적으로 증가하였으며, 공기배출량이 증가할수록 파고 및 주기는 증가하였다.

- (3) 기포장막으로 인한 반사는 진행하는 파에 크게 영향을 미치지 않으며 상대수심과 파형경사가 클수록 전달계수가 감소하였다.
- (4) 기포장막의 쇄파 및 난류 영역에서의 파 에너지의 소산 효율은 실험조건하에서 약 37.2~68.8%의 범위를 나타내었다.

결과적으로 본 실험을 통해 기포장막으로 인한 파 에너지 저감에는 다공관에서 발생하는 압축공기의 배출량, 다공관의 설치 수심, 입사파 조건과의 상관관계가 매우 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있었다. 특히 기포장막은 단주기파의 제어에 큰 영향을 줄 수 있는 것을 확인할 수 있었으며, 입사파의 상대수심 및 파형경사가 클수록 효과적임을 알 수 있었다. 하지만 본 실험은 기포장막에서 매우 빠른 속도로 상승하는 압축공기와 입사파 사이의 상호작용, 기포장막 주변 난류 영역에서의 파 에너지 소산의 해석 등에 대해서는 한계를 가진다. 따라서 향후 본 실험결과를 검증자료로 활용하여 기포장막 주변 난류 영역에서의 파 에너지 소산에 대한 정밀한 수치해석이 요구된다.

한편 이상과 같은 결과는 기포장막을 해수 취수구, 양식장 등 소규모 실험역에서 해적생물 퇴치 및 해수순환 등의 해양환경문제를 해결하기 위한 방안으로 활용 가능하지만 공학적인 설계에 적용할 수 있는 상세 정보 도출 등에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2018R1D1A1B07049564).

## References

- [1] Bulson, P.S., 1968, The theory and design of bubble breakwaters, in *proc. of Coast. Eng. Conf.*, ASCE, London, UK, II, 995-1015.
- [2] Brevik, I., 1976, Partial wave damping in pneumatic breakwaters, *J. of Hydraul. Div.* 102(9), 1167-1176.
- [3] Carr, J.H., 1950, Mobile breakwater studies, Pasadena, USA: California Inst. of Technol., Hydrodyn. Lab., Rep. No. N-64.2.
- [4] Ditmars, J.D. and Cederwall, K., 1974, Analysis of air-bubble plumes, in *proc. of Coast. Eng. Conf.*, Copenhagen, Denmark, 2209-2226.
- [5] Evans, J.T., 1955, Pneumatic and similar breakwaters, in *proc. of R. Soc. London*, UK, Ser. A 231, 457-466.
- [6] Goda, Y. and Suzuki, Y., 1976, Estimation of incident and reflected wave in random wave experiments. in *proc. of 15th Conf.*, on Coast. Eng., Honolulu, Hawaii, 828-845.
- [7] Kim, J.W. and Shin, H.S., 2004, Experimental study on wave attenuating effect of a pneumatic breakwater by using a multiple parallel manifold, in *proc. of Soc. Ocean Eng. in Korea*.
- [8] Kobus, H.E., 1968, Analysis of the flow induced by air-bubble systems, in *proc. of Coast. Eng. Conf.*, London, UK, II, 1016-1031.
- [9] Lorenz, G. Straub, C.E. Bowers, and Zal, S. Tarapore, 1959, Experimental studies of pneumatic and hydraulic breakwaters, University of Minnesota St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. *Technic. Pap.*, No. 25, Ser. B.
- [10] Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2014, Design standards for harbour and fishery port.
- [11] Paprota, M., 2013, Laboratory investigations of wave transmission through a submerged aerial barrier, in *proc. of Short Course/ Conf. Appl. Coast. Res.*, Lisbon, Portugal.
- [12] Paprota, M., 2014, PIV measurements of air bubble breakwater kinematics, 3rd IAHR Eur. Congr., IAHR, Porto, Portugal, 978-989.
- [13] Paprota, M., 2017, Experimental study on wave-current structure around a pneumatic breakwater, *J. Hydro-Environ. Res.*, 17, 8-17.
- [14] Seo, H.D., Aliyu, A.M., Kim, H.G. and Kim, K.C., 2017, A study on bubble behavior by an air-driven ejector for ABB (Air Bubble barrier) (II): Comparison of bubble behavior with and without ejector, *J. Korean Soc. Vis.*, 15(2), 59-67.
- [15] Seo, H.D. and Kim, K.C., 2018, Direct numerical simulation on turbulent bubbly flow, in *proc. of Korean Soc. Vis. Conf.*, 11, 35-36.
- [16] Taylor, G.I., 1955, The action of a surface current used as a breakwater, in *proc. of R. Soc. London*, UK, Ser. A 231, 466-478.
- [17] Unna, P.J.H., 1942, Waves and tidal streams, *Nature*, 149, 219-220.
- [18] Wang, Y., Wang G, Li, G, and Cheng, Y., 2005, Investigation on model law of air bubbles breakwater. in *proc. of Hydrodyn. VI – Theory and Appl.*, 319-324.
- [19] Xu, T.J., Wang, X.R., Guo, W.J., Dong, G.H. and Bi, C.W., 2019, Numerical simulation of the hydrodynamic behavior of a pneumatic breakwater, *Ocean Eng.*, 180, 108-118.
- [20] Zhang, C., Wang, Y., Wang, G, and Yu, L., 2010, Wave dissipating performance of air bubble breakwaters with different layouts, *J. Hydrodyn.*, 22(5), 671-680.

---

Received 13 August 2020

1st Revised 20 September 2020, 2nd Revised 15 October 2020

3rd Revised 23 October 2020

Accepted 28 October 2020