

## 쇄파에 의한 월파의 기포분율에 대한 실험적 연구 Experimental Study of Overtopping Void Ratio by Wave Breaking

유용욱\* · 이종인\*  
Yong-Uk Ryu\* and Jong-In Lee\*

**요 지 :** 본 연구에서는 직립 구조물 전면에서 발생하는 권파에 의한 월파의 기포분율을 수리모형실험으로 검토하였다. 구조물 직립벽 전면에서 쇄파되는 내습파랑은 쇄파와 월파 과정동안 기포를 연행하거나 액적화되며 강한 난류세기를 갖는 다위상흐름이 된다. 본 연구에서는 광섬유반사율계와 기포를 이용한 영상유속계기법으로 월파의 기포분율, 유속, 그리고 층두께를 측정하였다. 반복된 실험으로 얻어진 기포분율과 유속은 조화평균과 시간평균을 적용하여 분석하였다. 평균된 기포분율의 분포로부터 높은 기포분율은 주로 월파수피의 전면부에서 발생하는 것을 알 수 있었으며, 구조물 상단표면에 접한 영역과 월파수피의 후면부 영역은 상대적으로 낮은 기포분율을 보여주었다. 측정된 월파의 기포분율, 유속, 그리고 층두께로부터 월파의 흐름율과 운동량을 산정하였고, 실험결과로부터 기포분율이 중요한 인자임을 알 수 있었다. 수심평균된 기포분율, 유속, 두께의 상사적 분포특성을 이용하여 경험식을 제시하였고, 1차원적 경험식을 이용하여 흐름율과 운동량을 검토하였다.

**핵심용어 :** 수리모형실험, 월파, 다위상흐름, 액적화, 기포분율, 광섬유반사율계

**Abstract :** The aeration of an overtopping wave on a vertical structure generated by a plunging wave was investigated through laboratory measurements of void fraction. The overtopping wave occurring after wave breaking becomes multi-phased and turbulent with significant aeration, so that the void fraction of the flow is of importance. In this study, fiber optic reflectometer and bubble image velocimetry were employed to measure the void fraction, velocity, and layer thickness of the overtopping flow. Mean properties were obtained by ensemble- and time-averaging the repeated instantaneous void fractions and velocities. The mean void fractions show that the overtopping wave is very high-aerated near the overtopping wave front and relatively low-aerated near the deck surface and rear free surface of the wave. The flow rate and momentum of the overtopping flow estimated using the measured data show that the void ratio is an important parameter to consider in the multiphase flow. From the similarity profiles of the depth-averaged void fraction, velocity, and layer thickness, one-dimensional empirical equations were obtained and used to estimate the flow rate and momentum of the overtopping flow.

**Keywords :** hydraulic model test, overtopping, multiphase flow, void ratio, droplet, fiber optic reflectometer

### 1. 서 론

해양 및 해양구조물에서의 월파는 높은 파고의 파랑과 파랑의 쇄파 등에 의해 주로 발생한다. 따라서 월파는 상당한 운동량을 가질 것으로 판단되며, 이는 구조물, 구조물 상부 및 배후면의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 쇄파는 상당한 기포를 연행하거나 액적(droplet)으로 나누어지고, 물과 공기가 섞인 다위상(multi-phase)상태가

된다. 쇄파의 기포연행 및 액적화는 쇄파영역에서의 유사 이동과 관련된 난류 발생 및 파랑에너지의 감쇠 관점에서 주로 연구되어 왔다. 반면, 구조물에 미치는 충격과 안정성에 관련된 쇄파 및 월파 연구에 있어서 기포연행은 흐름밀도와의 상관관계가 중요한 관점이 된다. 다위상상태일 경우에 흐름밀도는 주된 위상에 따라 변할 것이고, 이는 운동량 산정에 있어 중요한 인자가 될 수 있다. 즉, 해안구조물 전면으로 내습하는 쇄파 및 그에 따른 월파의

\*한국건설기술연구원 하천해양연구실(Corresponding author: Jong-In Lee, River and Coast Research Division, KICT, Ilsan, Gyeonggi 411-712, Korea, jilee@kict.re.kr)

충격량 산정은 일반적으로 흐름의 밀도변화를 고려하지 않고 파랑 유속에 의존하고 있으며, 이는 유속이 정확하다는 가정하에 그 예측량이 과대 추정될 가능성이 있다. 특히 월파의 경우에 해안구조물로의 내습 이후 기포연행 및 액적화가 두드러져 밀도변화가 커지기 때문에 그 차이는 커지게 된다. 운동량 산정에 필요한 흐름의 밀도 산정은 흐름 내 기체의 양을 산정하는 기포분율(void ratio)을 통하여 추정할 수 있으며, 이는 흐름의 밀도와 반비례한다. 일반적으로 유속은 운동량 및 압력의 산정에 이용되지만 다위상흐름의 기포분율을 고려하지 않았을 경우에는 이를 과대 예측하는 문제점이 발생할 수 있다.

기포분율에 대한 실험적 연구는 쇄파에 의한 유체의 흐름에 대해 다양하게 수행되어왔다. Lamare and Melville(1992)은 쇄파에 의해 발생하는 기포플룸(bubble plume)의 기포분율 측정을 위해 전기저항을 이용한 측정기를 개발하여 실험실과 현장에 적용하였다. Deane(1997)은 쇄파의 기포분율 측정을 위하여 광학적 방법과 음향학적 방법을 이용하였으며, 천해역에서의 쇄파는 약 30~40%의 기포분율을 갖는다고 보고하였다. Chanson et al.(2002)은 연직으로 방류되는 제트에 기포를 주입하여 가상의 쇄파를 발생시키고, 쇄파에 의한 기포의 연행과정에 대해 실험을 수행하였다. Cox and Shin(2003)은 저항식 기포측정기를 이용하여 쇄파의 기포분율을 측정하였으며, 선형적 증가와 지수적 감소 형태를 보이는 기포분율의 시간적 분포를 제시하였다. 기존 연구들은 쇄파에 의한 흐름의 기포분율에 관심을 가져온 반면, 월파에 의한 기포분율에 대한 연구는 활발하지 않았다. 쇄파의 기포분율에 관한 대부분의 연구는 쇄파에 의한 난류도 증가로 인한 에너지 소산과 유사 부유의 영향을 검토하기 위한 것이었기 때문에 이들 연구가 월파 영역으로 확장되지 않았던 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기포분율이 월파의 운동량에 영향을 미치는 인자일 것으로 판단하고 이를 검토하고자 수리실험을 수행하였다. 쇄파에 의해 발생된 월파의 기포분율은 Chang et al.(2003)에 의해 고안된 광섬유반사율계(fiber optic reflectometer)를 이용하여 측정하였고 유속장 측정은 기포영상유속계(bubble image velocimetry)를 이용하였다. 광섬유반사율계는 광섬유의 고유신호 변화를 이용하여 흐름의 위상을 측정하는 기법이다. 동기화된 조파기와 실험장치로부터 얻어진 점측정의 기포분율 결과는 위상평균하여 공간적, 시간적으로 분석하였으며, 또한 수심 평균된 기포분율의 분포를 검토하였다. 그리고 무차원화

된 변수들의 관계로부터 수심평균된 기포분율, 유속, 그리고 층두께에 대한 실험적 경험식을 제시하였고, 1차원 경험식을 이용하여 월파의 흐름율과 운동량을 산정하였다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험장치 및 절차

수리모형실험은 길이 35 m, 폭 0.9 m, 깊이 1.2 m의 2차원 수로에서 수행되었다. 아크릴로 제작된 직립구조물 모형은 길이 0.15 m, 높이 0.31 m, 폭 0.9 m의 직사각형의 형태에 0.22 m의 상판이 추가된 총 0.37 m의 상부길이를 가지며, 조파기로부터 21.6 m 지점에 위치한다(Fig. 1참조). 그리고 실험에 적용된 수심은 0.8 m이고, 구조물 모형의 흘수는 0.2 m이다. 수로 양단에는 다른 실험장치들과 동기화된 Flap Type 조파기와 반사파를 최소화하기 위한 1:5.5 경사의 소파망이 설치되어있다.

본 실험에서는 조파신호 조작을 통해 모형 구조물 전면에서 권파(plunging breaker)가 발생하도록 하였다. 즉, 다양한 주기를 갖는 파군으로부터 파랑집중을 발생시켜 일정한 크기의 파랑이 구조물의 전면에서 쇄파되도록 하였으며, 이용된 파군은 0.7 Hz에서 1.3 Hz 사이의 주파수를 갖는 21개의 파랑으로 이루어졌다. 입사파 스펙트럼의 첨두주기( $T_p$ )는 1.3s이고, 이에 해당하는 파속  $C$ 는 1.95 m/s이며, 구조물 전면에서 쇄파시의 파고는 약 24 cm이다. 쇄파는 여러 인자에 민감하기 때문에 동일 조건하에서 수행된 실험일지라도 재현성이 낮아 쇄파의 크기와 형태에 대한 지속적인 확인이 필요하다. 본 실험에서는 쇄파의 재현성을 확인하기 위해 파고계를 구조물 전면에 설치하여 파고를 측정하였고, 쇄파의 연행기포에 의한 파고계 측정값의 오차를 보완하기 위해 기포영상유속계측정에 이용된 영상을 이용하여 쇄파형태를 검토하였다. 얻어진 파고와 영상판독으로부터 분석에 이용할 실험안 및 실험결과를 선별하였다. Fig. 2는 구조물 전면에서 쇄파되는 권파와 연이어 발생하는 처오름 및 월파의 순간영상을 나타낸 것이다.

### 2.2 기포분율 및 유속 측정

월파수괴의 기포분율은 광섬유반사율계를 이용하여 측정하였다. Chang et al.(2003)에 의해 고안된 광섬유반사율계는 광섬유의 절단면이 위치하는 지점의 다위상흐름의 유속과 기포분율을 측정할 수 있는 기법이다. 광섬유반사율계의 원리는 광섬유의 절단면에 접촉한 물질에 따른 광

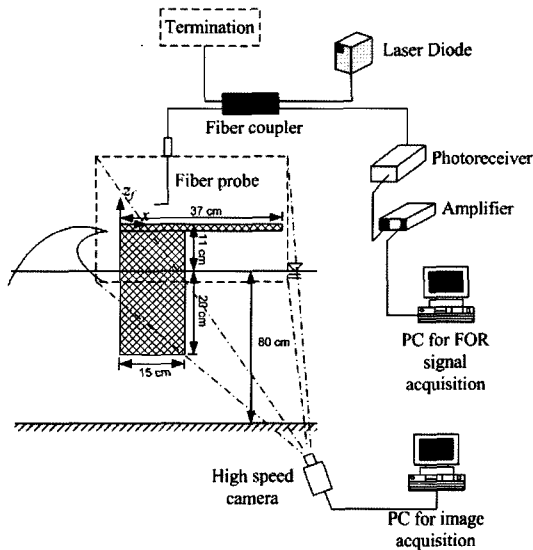


Fig. 1. Experimental setup.

섬유 신호파형의 변화를 이용하여 유체의 농도나 기포분율을 측정하고, 광섬유의 고유파장과의 관계를 통하여 유속을 측정할 수 있는 계측기법이다. 다이오드 레이저 (diode laser)로부터 연속적 광학신호가 광섬유의 절단면으로 보내어지고, 절단면에 접촉된 물질에 따라 변화된 신호는 광섬유를 따라 역방향으로 전파되어 연결장치 (coupler)를 통하여 전파탐지장치로 신호가 전달된 후 적절한 증폭을 거쳐 컴퓨터에 저장된다. 광섬유반사율계 시스템은 Fig. 1에 도시되어 있다. 본 기법은 농도나 기포분율의 측정을 위해서는 일반적으로 1~10 kHz대의 측정율이 필요하고, 유속의 측정을 위해서는 상대적으로 높은 10 MHz대의 측정율을 요구한다. 광섬유로부터 전달되어 저장된 신호의 시계열의 예가 Fig. 3에 제시되어 있으며, 이

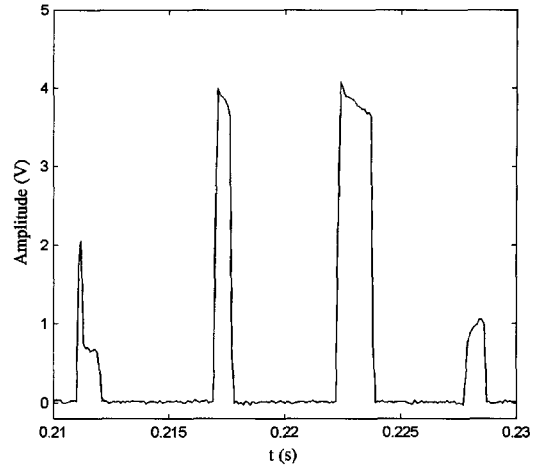


Fig. 3. Signal of fiber optic reflectometer.

시계열은 10 kHz의 측정율로 측정된 것이다. 시계열에서 전압 신호가 0 V에 가까운 순간은 광섬유의 절단면에 접촉된 물질이 물이라는 것을 나타내고, 전압이 0V보다 급격히 상승한 순간은 광섬유의 절단면이 공기 중 또는 기포에 노출되어 있다는 것을 나타낸다. 광섬유반사율계의 자세한 소개는 Chang et al.(2003)을 참조할 수 있다.

광섬유반사율계는 광섬유의 절단면을 측정위치에 고정하는 접촉식 점측정 기법으로서 본 실험에서는 월파의 기포분율 측정을 위하여 구조물 상단에 광섬유의 절단면을 설치하였다. 본 기법은 접촉식 측정법이지만, 광섬유의 직경이 125  $\mu\text{m}$ 이고, 광섬유가 부착된 스테인리스관(stainless steel tube)은 직경이 1 mm로서 측정대상 흐름의 교란은 미미할 것으로 판단된다. 월파의 기포분율 측정을 위한 계측점은 구조물 상부면  $x=0\sim 300$  mm지점까지 50 mm간격으로 수평측점 7개, 연직방향으로는  $z_f=10\sim 150$  mm까지

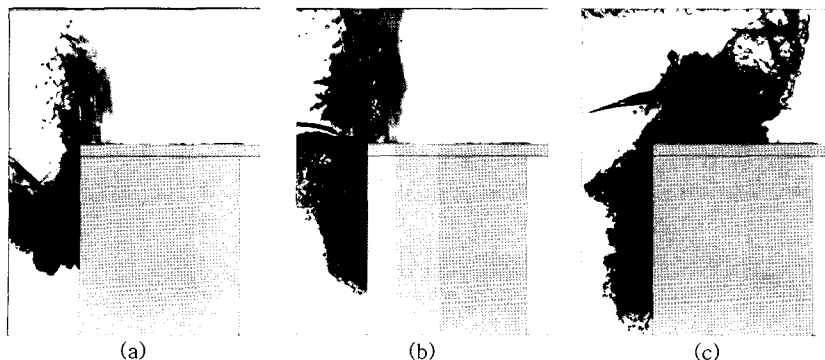


Fig. 2. Instantaneous images of (a) wave breaking, (b) runup and (c) overtopping.

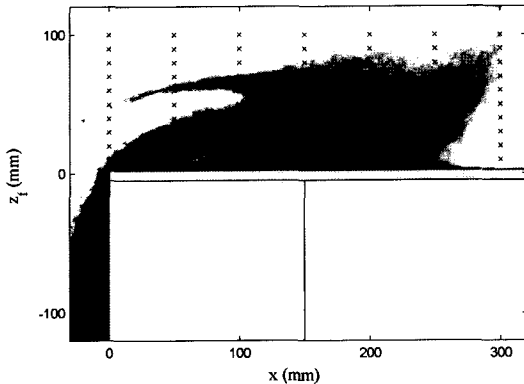


Fig. 4. Mean image of overtopping flow and measurement points.

10 mm 간격으로 연속측점 10개를 설정하였다(Fig. 4참조). 여기서,  $x$ 는 모형 구조물 상단의 전면선단을 원점으로 하는 수평방향 좌표이고,  $z_f$ 는 모형 구조물 상단면을 원점으로 하는 연직방향 좌표이다(Fig. 1참조). 각 계측점별로 동일 조건의 실험을 20회 이상 반복 수행하였으며, 얻어진 결과는 위상평균을 통하여 기포분율의 시간적, 공간적인 분석에 이용되었다. 본 실험에서 수행한 조건으로부터 얻어진 결과에 대한 예비분석시  $z_f = 100$  mm보다 높은 영역의 월파수괴는 거의 공기에 가깝다는 사실을 알았으며, 이를 바탕으로 기포분율의 분석은  $z_f = 10 \sim 100$  mm 영역을 대상으로 하였다.

월파의 유속장은 기포영상유속계를 이용하여 측정하였다. 기포영상유속계는 쇄파에 의한 산란(Chang and Liu, 1999; Cox and Ortega, 2002; Govender et al. 2002)을 피하기 위한 입자영상유속계(PIV)의 변형된 기법으로 그림자 기법(shadowgraphy)을 이용하여 기포를 가시화하고 상관관계를 이용하여 유속을 측정하는 기법이다(Ryu et al., 2007). 가시화된 기포 화상은 고속카메라를 이용하여  $1024 \times 768$  픽셀의 해상도와 1000 fps의 속도로 저장되었다. 화상의 상관관계를 이용하여 초기조사구간(initial interrogation window)과 최종조사구간(final window)으로 나누어 계산하였고, 후처리과정을 통하여 오류벡터를 제거하고 보정하였다.

### 3. 실험결과 및 토론

#### 3.1 기포분율의 결정

기포분율은 Fig. 3에 제시된 것과 같은 광섬유반사율계의 신호로부터 결정하였다. 기포분율은 한 계측점에서 전

체 혼합흐름의 시간에 대해 공기가 존재하는 시간의 비로 나타내어진다. 광섬유반사율계로부터 얻어진 시계열에서 일정한 혼합흐름 시간을 설정하고, 설정된 시간 동안에 공기가 존재하는 시간을 추적하여 해당시간의 기포분율을 결정하게 되며, 기포분율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_i = \frac{T_{air,i}}{T_{total,i}} \quad (1)$$

여기서,  $V_i$ 는 순간 기포분율,  $T_{total,i}$ 는 기포분율 결정을 위한 물과 공기의 전체 혼합흐름시간,  $T_{air,i}$ 는  $T_{total,i}$  동안 공기가 존재하는 시간이며,  $n$ 는 측정횟수를 나타낸다. 즉, 측정된 흐름시간 동안 기포가 없는 순수한 물에 접촉되어 있었다면 기포분율 값은 0이고, 전체시간 동안 공기 중에 노출되어 있었다면 기포분율 값은 1이 된다. 기포분율 결정을 위한 혼합흐름의 시간을 결정시간이라 하며, 기포분율은 이 결정시간의 크기에 따라 기포분율 값이 변하게 된다. 즉, 결정시간이 작을수록 기포분율의 시간적 변화를 알 수 있고, 결정시간이 커질수록 시간적인 경향보다는 전체적인 대표 기포분율을 산정할 수 있다. 결정시간의 결정은 연구목적에 따라 결정되며, 본 연구에서는 광섬유반사율계를 이용하여 10 kHz의 측정율로 월파수괴의 흐름을 측정하였고, 기포분율의 결정시간을 0.01 s로 하였다. 즉, 하나의 기포분율은 100개의 광섬유 신호값으로부터 결정되며, 결과적으로 각 측정지점별로 100 Hz의 기포분율 시계열값을 얻었다. 이는 기포분율의 시간적인 변화를 검토하기 위한 것이며, 시간평균을 통해 전체 기포분율도 확인하였다. 순간 기포분율은 수회에 걸친 반복측정을 통해 결정하였으며, 다음과 같이 조화평균인 위상평균을 적용하여 평균 기포분율을 계산하여 시간에 따른 변화를 분석하였다.

$$V = \frac{1}{n} \sum V_i \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 위상평균 기포분율이고,  $n$ 은 측정횟수를 나타낸다.

본 실험에서는 실험장치의 동기화를 통해 각 지점별 측정값을 시간적, 공간적으로 분석하려고 노력하였다. 그러나 쇄파가 주변인자에 민감하기 때문에 반복실험시 쇄파 형태가 완벽하게 일치하지는 않았으며, 이로 인한 오차를 최소화하기 위하여 쇄파과정 중 한 순간을 기준으로 전후 시간단계를 결정하였다. 기준시간( $t=0$ )은 파랑의 자유

수면이 모형의 전면선단을 지나 월파하려는 순간으로 설정하였고, 기준시간에 의한 시간설정 및 조화평균을 위해 쇄파의 형태를 측정된 20개의 순간영상을 평균하였으며, 하나의 예가 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4에서 어두운 부분은 기포영역을 나타내며, 월파수괴 전면은 기포화로 인해 그 경계가 불분명하지만 후면의 자유수면은 선명한 선을 보이며 경계를 나타내고 있다. 이와 같은 수위면의 미소한 변동을 바탕으로 하여 각 지점에서 측정된 기포분율과 유속의 시간단계를 설정하였으며, 이를 기준으로 실험결과를 시간적, 공간적으로 분석하였다.

3.2 월파의 기포분율의 변화

Fig. 5는  $t=0.02\sim 0.22$  s 동안 계측점에서 위상평균된 기포분율을 도시한 것이다. Figs. 5(a-d)에 제시된 분포로부터 월파수괴의 전면부는 기포분율이 1에 가까운 값을 보이며, 따라서 전면부 흐름의 대부분은 연행기포나 적은 양의 액적으로 이루어져 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 월파수괴의 전면부가 구조물 후면선단을 지나가는 시점인  $t=0.15$  s에 가까운 순간으로서 월파수괴 전체에 걸쳐 높은 기포분율이 분포함을 알 수 있다. 월파수괴 전면부가 모형 구조물 후면선단을 지나간 후에는 기포분율이 연직방향으로 변동을 보인다(Fig. 5(f)참조). 월파가 발생된 초기

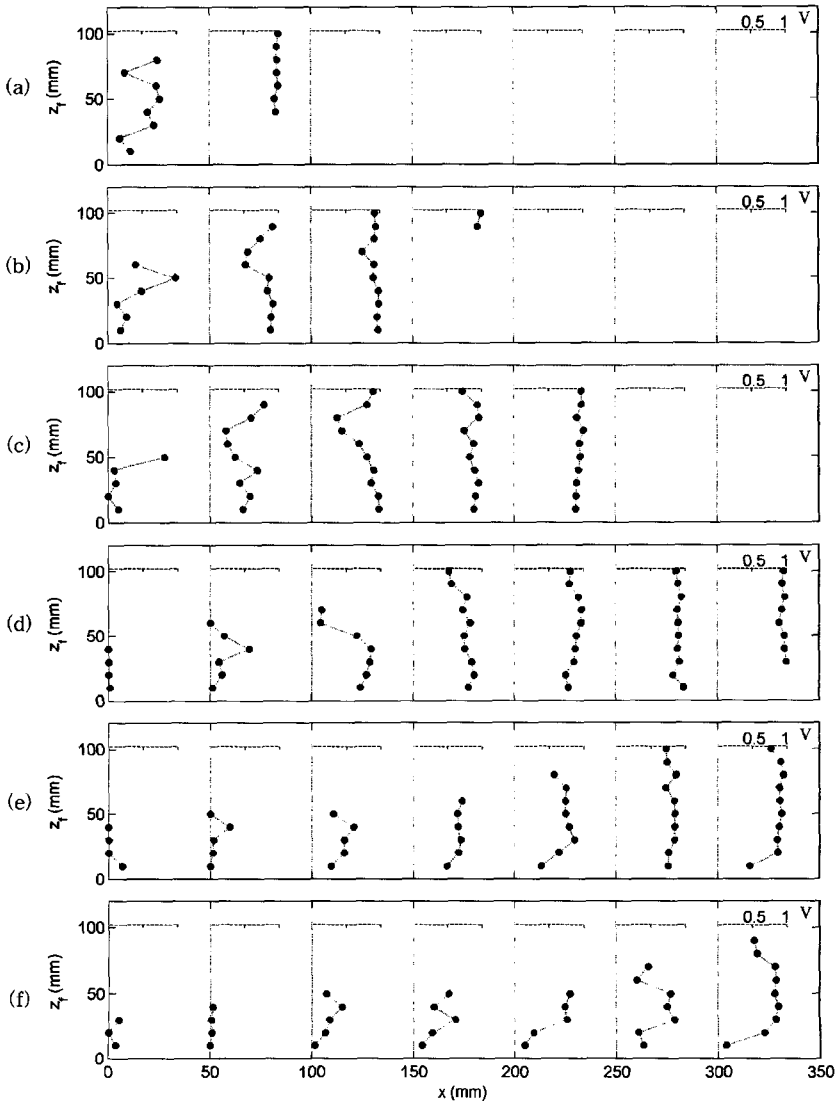


Fig. 5. Vertical distribution of mean void fraction at  $t=(a)$  0.02s, (b) 0.06s, (c) 0.10s, (d) 0.14s, (e) 0.18s, and (f) 0.22s.

시간에 해당하는 Figs. 5(a-c)를 살펴보면 월파수괴 전면이 지나간 후 월파수괴 상부영역에서 상대적으로 낮은 기포분율을 보여준다. 이는 월파수괴가 운동량에 의해 상승한 후 구조물 상단으로 떨어지는 형태, 즉 권파의 형태를 보임을 의미한다. 그리고 월파시간이 경과함에 따라 월파수괴의 하부에서도 낮은 기포분율이 나타남을 알 수 있다(Figs. 5(d-e)참조). 전체적으로 월파수괴 전면부는 심한 기포화로 상대적으로 높은 기포분율을 보이고, 구조물을 따라 하류단으로 진행할수록 점차 낮은 기포분율을 보이게 된다. 이는 월파수괴의 자유수면 영역과 구조물 상단부와 접하는 월파수괴의 하부영역에서 상대적으로 물의 비중이 커진다는 것을 의미한다.

전체 월파과정동안 각 계측점별 시간평균 기포분율은 식 (3)으로 산정하였다.

$$V_T = \frac{1}{t_e - t_s} \int_{t_s}^{t_e} V dt \quad (3)$$

여기서,  $V_T$ 는 시간평균 기포분율,  $t_s$ 는 각 지점별로 월파수괴가 도달한 시점,  $t_e$ 는 월파수괴가 지나간 시점이다. Fig. 6은 시간평균 기포분율 결과를 도시한 것으로서 분포특성을 고려하여 세 구간으로 나누었다. Fig. 6(a)는 구조물의 전면선단에 가까운  $x=0$  mm 지점과  $x=50$  mm 지점에서의 기포분율에 대한 연직분포이다. 월파수괴의 기포분율은 구조물 상부면에 접한 영역에서부터 월파수괴의 자유수면까지 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 월파가 시작되는 구조물 전면선단의 기포분율이 일정하게 증가함을 알 수 있다. 구조물 중간영역에 해당하는  $x=100$  mm와  $x=150$  mm 지점의 시간평균 기포분율을 도시한 것이 Fig. 6(b)이다. 이 구간의 기포분율은  $z_f=30$  mm까지 급격히 상승하고,  $z_f=80$  mm까지는  $V_T \approx 0.7$ 의 일정한 기포분율을 보인 후,  $V_T \approx 0.9$ 까지 기포분율이 증가한다.  $x=100$  m 지점과  $x=150$  mm 지점에서 기포분율의 연직분포는 서로 유사한 형태를 보이지만 기포분율 값은 약간의 차이가 있으며, 하류단으로 갈수록 기포분율이 증가하였다. Fig. 6(c)는  $x=200$  mm,  $x=250$  mm 및  $x=300$  mm 지점에서의 시간평균 기포분율 분포로서 연직분포의 형태와 기포분율의 크기에 있어 유사함을 알 수 있다.  $z_f=40$  mm까지는 기포분율이 급격히 상승하고,  $z_f=40$  mm 이상에서는  $V_T \approx 0.9$ 로 거의 일정한 값을 보이며, 이는 경계층 주변에서의 유속 분포형태와 유사한 모습이다. Fig. 6은 월파수괴의 시간평균 기포분율을 분포형태에 따라 세 개의 구간으로 나누어 도시한 것으로서 구조물 전면선단 근

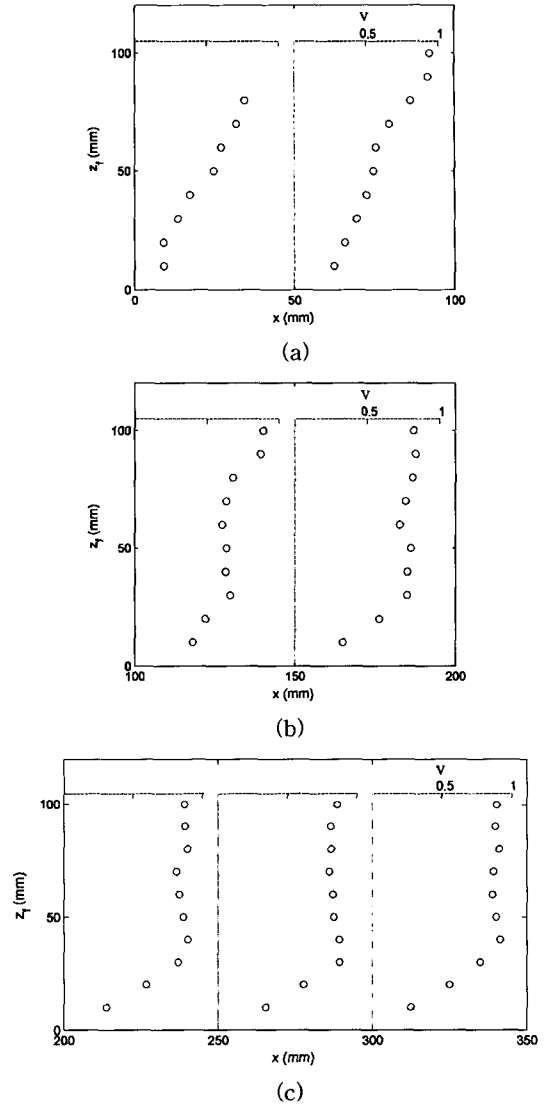


Fig. 6. Time averaged void ratio at  $x$  = (a) 0 and 50 mm, (b) 100 and 150 mm, (c) 200, 250, and 300 mm.

처에서는 선형적인 분포를 보이는 반면, 후면선단 근처에서는 경계층 유속분포와 유사한 형태로 변해가는 것을 알 수 있다.

그리고 기포영상유속계를 이용하여 측정된 유속은 기포분율 계측점에 상응하는 각 지점에 시간적·공간적으로 분포되었으며, 계측결과는 유 등(2007)에 검토되었으므로 본 연구에서는 생략하였다.

### 3.3 체적유량과 운동량

각 계측점별로 측정된 기포분율과 유속으로부터 월파

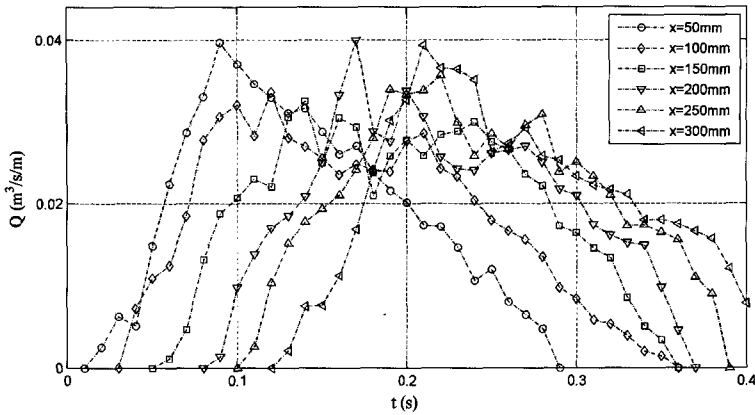


Fig. 7. Flow rate of overtopping flow.

의 체적유량(volume flow rate)  $Q$ 를 산정하였다. 월파는 기포영역을 포함한 다위상흐름이므로 기포분율을 체적유량 산정에 적용시켰다. 기포분율( $V$ )이 1인 경우는 공기이고,  $V=0$ 인 경우는 물을 나타내며, 유체체적은  $(1-V)$ 를 적용하여 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$Q = \int_{d_i}^{d_h} U(1-V)dz_f \quad (4)$$

여기서,  $U$ 는 위상평균된 수평유속,  $d_h$ 는 월파의 상부수위면,  $d_i$ 는 하부수위면이다.  $d_h$ 는 일반적인 자유수면이고, 하부수위면  $d_i$ 는 월파수위가 구조물 상단에 접하지 않고 떨어져 이동하는 경우의 흐름 하부경계를 의미한다. 구조물 상단의 각 단면에서 체적유량을 계산하여 Fig. 7에 도시하였다. 체적유량은 월파수위 전면에 도달한 후 급격히 증가하고 약 0.1 s 후 최대값을 보인 후 감소하며, 이러한 경향은 측정된 모든 단면에서 동일하였다. 이와 같은 월

파수위의 체적유량 분포는 전면에서 최대값을 보이는 유속분포와 다른 경향을 보이며, 이는 월파수위 전면에서 높은 기포분율을 갖기 때문이다. 이는 다위상흐름의 체적유량 분포에 있어 기포분율이 중요한 인자임을 보여주는 것이다.

Fig. 8은 각 단면에서 측정된 값을 이용하여 계산된 운동량(momentum flux)이다. Fig. 8에서 운동량은 물의 밀도로 나누었으며, 다음과 같다.

$$M/\rho = \int_{d_i}^{d_h} U^2(1-V)dz_f \quad (5)$$

운동량의 분포도 체적유량 분포와 같이 월파수위 전면에 도달한 후 증가하는 형태를 보인다. 증가하는 정도가 체적유량 증가에 비해 더 빠르며, 월파수위 전면에 도달 후 약 0.06 s 후에 최대값을 보이고 감소한다. 운동량 분포결과로부터 다위상흐름인 월파의 최대유속은 월파수위 전면

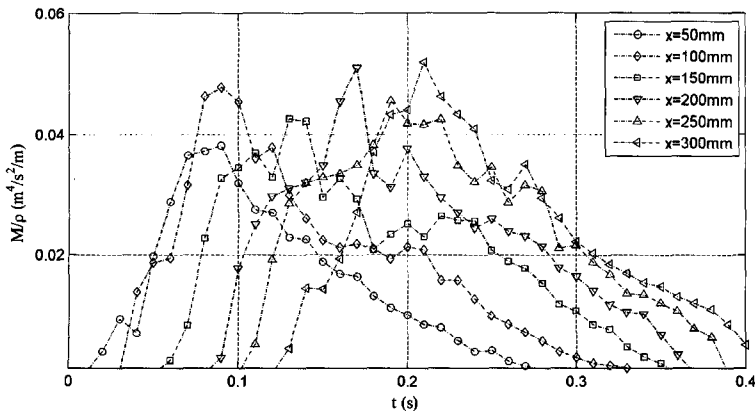


Fig. 8. Momentum flux of overtopping flow.

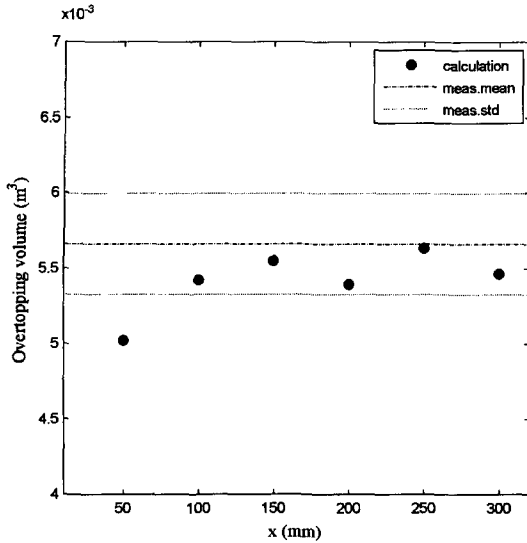


Fig. 9. Overtopping water volume.

에서 나타나지만, 최대운동량은 월파수괴 전면이 지나간 후 나타남을 알 수 있다.

월파량은 각 단면의 체적유량을 월파과정 동안 적분하여 결정하였으며, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\text{Volume} = \int_{t_1}^{t_2} \int_{d_1}^{d_h} U(1-V) dz_f dt \quad (6)$$

식 (6)으로 계산한 값과 수리실험시 직접 측정된 월파량을 비교한 것이 Fig. 9이다. 월파량은 10회를 측정하여 그 평균값과 표준편차를 구하였다. 기포분율과 유속으로부터 계산된 값이 직접 측정된 월파량에 비해 전반적으로 작으나 그 차이는 크지 않았고, x=50 mm 지점을 제외한 다른 단면에서는 표준편차내의 값을 보였다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 다위상상태인 월파수괴의 밀도를 기포분율로부터 결정하여 운동량 및 체적을 산정하였다. Fig. 9로부터 이와 같은 기포분율을 이용한 월파수괴 밀도의 추정치가 적절함을 알 수 있었으며, 수행된 실험측정의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 또한, 작은 편차를 보인 체적값의 분포로부터 월파수괴의 체적이 보존되었음을 알 수 있었다.

### 3.4 유속과 기포분율의 수심평균 분포 및 층두께

월파수괴의 기포분율과 유속분석에 있어 2차원 문제를 1차원으로 단순화, 즉 수심평균하여 검토하였다. 수심평균은 각 계측점에서 시간별 기포분율과 유속의 연직분포를

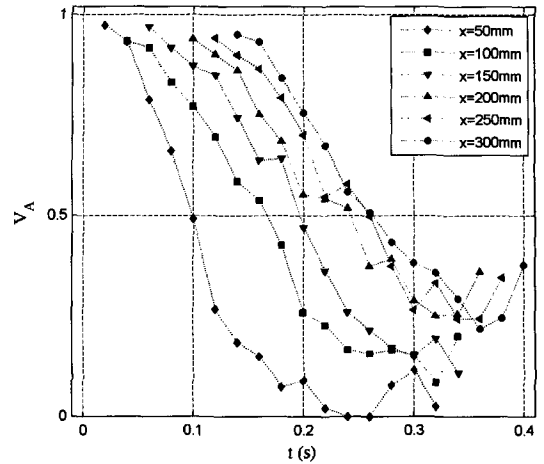


Fig. 10. Depth averaged void fraction at time.

평균하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$V_A = \frac{1}{d_h - d_1} \int_{d_1}^{d_h} V dz_f \quad (7)$$

$$U_A = \frac{1}{d_h - d_1} \int_{d_1}^{d_h} U dz_f \quad (8)$$

여기서,  $V_A$ 는 수심평균 기포분율,  $U_A$ 는 수심평균유속이다.

Fig. 10은 각 단면에서 시간에 따른 수심평균된 기포분율 분포를 도시한 것이다. Fig. 10으로부터 모든 지점에서 월파수괴가 도달한 시점에서는 높은 기포분율을 보이고, 월파가 진행하면서 기포분율은 감소함을 알 수 있으며, 이는 월파수괴 전면부에서 상당한 연행기포가 포함되어 있음을 의미한다. 월파수괴의 기포분율이 감소하고 물의 비중이 커지는 정도는 구조물 전면선단에 가까운 지점일수록 크게 나타났으며, 구조물 상단부 중간지점부터는 비슷한 감소정도를 보였다.

그리고 수심평균된 1차원적 기포분율이 무차원 변수에 대해 상사성을 갖도록 변수관계를 유도하였다. 수심평균 기포분율  $V_A$ 는 각 지점에서 월파의 무차원 도달시간  $x/(U_f T)$ 를 뺀 무차원시간  $t/T$ 에 대해 상사적인 관계를 갖는다는 것을 Fig. 11에서 알 수 있다. 여기서,  $U_f$ 는 월파수괴의 전면속도로서 광섬유반사율계에 도달순간과 광섬유반사율계의 배치거리로부터 계산되었으며, 파속  $C$ 의 약 1.2배 크기를 갖는다. Fig. 11은 6개 단면에서의 기포분율을 도시한 것으로 상사적 분포는 Gaussian 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변수들간의 관계를 다음 식으로 표현하였다.



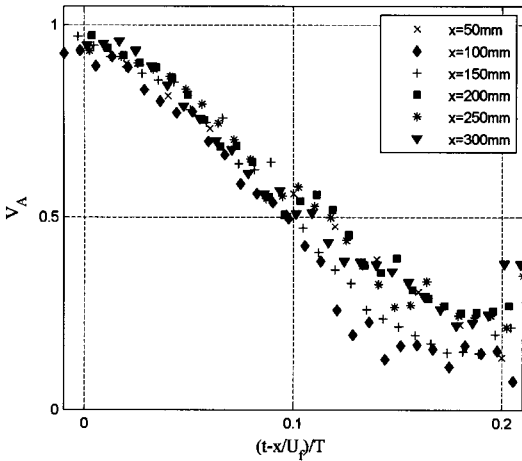


Fig. 11. Depth-averaged void ratio vs. non-dimensional parameters.

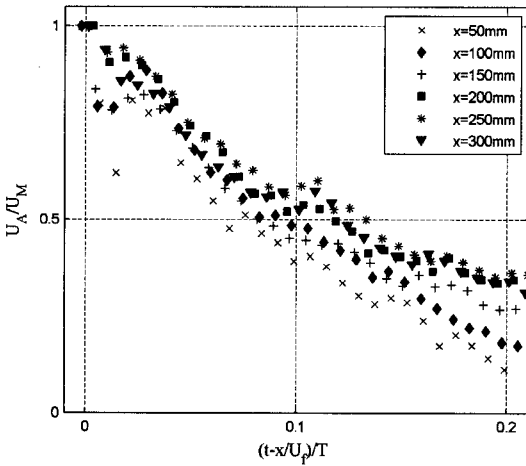


Fig. 12. Similarity profiles of depth-averaged velocity.

$$V_A = \alpha \exp\left[-\beta\left(\frac{t-x/U_f}{T}\right)^\gamma\right] \quad (9)$$

여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 실험적으로 결정되는 계수이고, 실험결과로부터 최소자승법을 이용하여 각각 0.98, 65, 및 2로 결정되었다.

Fig. 12는 최대 수심평균유속  $U_M$ 에 대해 무차원화된 수심평균유속  $U_A$ 를 Fig. 11과 같은 무차원 변수의 관계로 나타낸 것이다. 기포분율과 같이 상사성을 보이며, 분포 또한 Gaussian 형태를 보이고 있으며, 그 관계는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$U_A = \alpha \exp\left[-b\left(\frac{t-x/U_f}{T}\right)^c\right] C \quad (10)$$

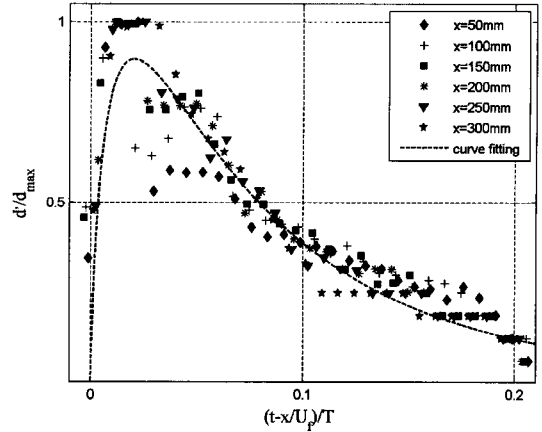


Fig. 13. Layer thickness of overtopping flow.

여기서, 실험결과로부터  $a, b, c$ 는 각각 0.95, 7.0, 및 1로 결정되었고, 유속의 단위는 m/s이다.

수심평균 값은  $x$ 에 관한 1차원 분포를 나타내므로 이를 활용하기 위해서는 월파수괴의 층두께(layer thickness)의 정보가 필요하다. 층두께  $d$ 는  $d_h-d_f$ 로 표현되며, 본 연구에서는 기포영상유속계로 기록된 영상의 분석과 광섬유 반사율계 신호를 분석하여 층두께를 산정하였다. 각 지점별 층두께의 최대값  $d_m$ 으로 무차원화된 분포가 Fig. 13에 도시되어 있다. 무차원 층두께 또한 상사성을 보여주었으며, 다음과 같이 표현된다.

$$d' = n\left(\frac{t-x/U_f}{T}\right) \exp\left[-k\left(\frac{t-x/U_f}{T}\right)^r\right] d_m \quad (11)$$

여기서, 실험결과로부터  $n, k, r$ 는 각각 325, 14, 및 1/2로 결정되었고, 층두께의 단위는 m이다.

실험결과로부터 기포분율, 유속, 층두께에 관한 1차원 경험식을 얻었으며, 본 연구에서는 이와 같은 경험식을 이용하여 체적유량과 운동량을 산정한 후 실험결과와 비교하였다. 체적유량과 운동량에 대한 경험식은 각각 다음과 같다.

$$Q = U_A(1-V_A)d' \quad (12)$$

$$M/\rho = U_A^2(1-V_A)d' \quad (13)$$

Fig. 14는 경험식(식 (12) 및 식(13))을 이용하여 계산한 값과 실험결과를  $x=100$  mm와  $x=300$  mm지점에서 비교하였다. Fig. 14(a)는 체적유량 결과로서 식 (12)에 의한 계

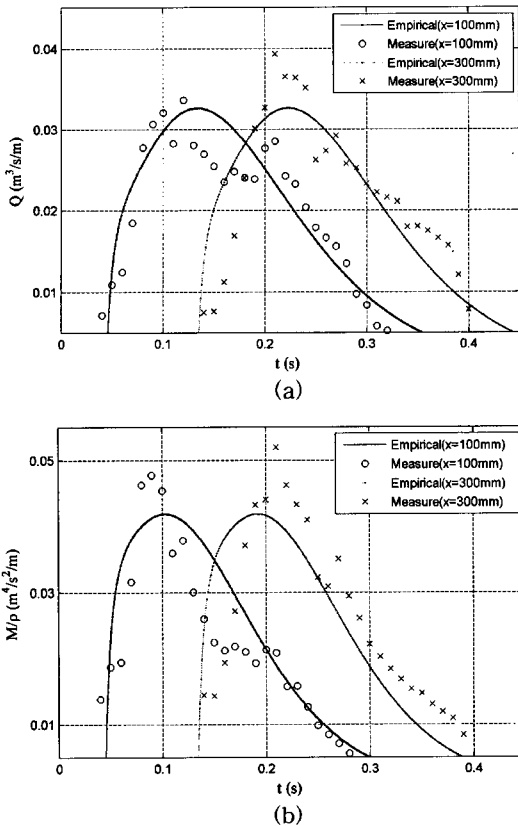


Fig. 14. Comparisons between measurements and empirical formulas: (a) flow rate, (b) momentum flux.

산값과 실험값이 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 월파수피 전면이 도달한 후 체적유량이 증가하고 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 잘 나타내었으며, 계산값과 측정값은 20% 이내의 차이를 보였다. 식 (13)에 의한 운동량을 비교한 것이 Fig. 14(b)로서 전체적인 분포특성은 잘 나타나고 있으나, Fig. 14(a)에 비해 차이가 큼을 알 수 있다. 이는 측정값에 내재된 비선형성을 고려하지 못하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 월파수피의 기포분율 측정을 위한 수리 모형실험을 수행하여 월파의 기포화를 검토하였고, 기포분율과 함께 유속과 층두께를 계측하여 월파 체적유량과 운동량 산정에 있어서 기포화의 영향을 분석하였다. 수리 모형실험에서는 광섬유반사율계와 기포를 이용한 영상유속계를 이용하였으며, 70개 측정에서 계측된 자료로부터

기포분율을 위상평균한 후 시간적, 공간적 특성을 분석하였다. 공간적인 기포분율의 분포로부터 높은 기포분율은 월파수피 전면부에서 발생하는 것을 알 수 있었으며, 월파수피 하부와 후면부에서의 흐름은 상대적으로 낮은 기포분율을 보여주었다. 기포분율은 흐름의 밀도에 영향을 주는 인자로서 높은 기포분율은 흐름의 낮은 밀도를 나타낸다. 측정된 유속분포로부터 월파수피는 전면부에서 상대적으로 큰 유속을 보이는 것을 알 수 있었으며, 기포분율과 유속분포를 이용한 체적유량과 운동량을 산정하여 기포화의 영향을 확인하였다. 체적유량과 운동량은 월파수피 전면이 도달할 때 작은 값을 보인 후 상승하고, 이후 최대값을 보이는 분포특성을 보였으며, 유속분포와는 다른 경향을 보였다. 이로부터 기포분율은 월파수피 운동량 산정에 있어 확인해야 할 하나의 변수임을 알 수 있었다. 기포분율과 유속의 중심평균값으로부터 1차원 분포를 구하고 무차원변수 사이의 상사관계를 이용하여 경험식을 얻었다. 월파수피 기포분율과 유속을 나타내는 경험식과 함께 층두께를 나타내는 분포식을 이용하여 체적유량과 운동량을 산정하였다. 세 개의 1차원식을 이용한 체적유량과 운동량의 계산은 연직방향 성분을 고려하지 않았음에도 불구하고 분포특성을 비교적 잘 모의하였다. 체적유량의 계산값은 측정값과 20%내의 차이를 보인 반면, 운동량의 계산값은 측정값과의 오차가 증가하였다. 운동량 산정은 체적유량에 비해 비선형성이 증가하는데 비해 1차원식을 이용한 계산식은 이를 고려하지 못하기 때문에 그 오차가 증가한 것으로 판단된다.

본 연구는 직립 구조물 전면에서 발생하는 권파에 의한 월파를 대상으로 기포화의 영향을 검토한 것이다. 월파는 내습파랑 체원에 따라 거동이 달라질 수 있고, 기포분율 또한 월파형태에 따라 변할 수 있으므로 다양한 형태의 월파에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

유용욱, 이종인, 김영택 (2007). 쇄파에 의한 처오름과 월파 유속. 한국해양과학기술지, 19(6), 606-613.  
 Chang, K.-A. and Liu, P.L.-F. (1999). Experimental investigation of turbulence generated by breaking waves in water of intermediate depth. *Physics of Fluids*, 11, 3390-3400.  
 Chang, K.-A., Lim, H.-J., and Su, C.B. (2003). Fiber optic reflectometer for velocity and fraction ratio measurements in multiphase flows. *Review of Scientific Instruments*, 74, 3559-3565.

- Chanson, H., Aoki, S., and Maruyama, M. (2002). Unsteady air bubble entrainment and detrainment at a plunging breaker: Dominant time scales and similarity of water level variation. *Coastal Engineering*, 46, 139-157.
- Cox, D.T. and Ortega, J.A. (2002). Laboratory observations of green water overtopping a fixed deck. *Ocean Engineering*, 29, 1827-1840.
- Cox, D.T. and Shin, S. (2003). Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(10) 1197-1205.
- Deane, G.B. (1997). Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(5), 2671-2689.
- Govender, K., Mocke, G.P. and Alport, M.J. (2002). Video-imaged surf zone wave and roller structures and flow fields. *Journal of Geophysical Research*, 107(C), 3072.
- Lamarre, E. and Melville, W. K. (1992). Instrumentation for the measurement of void-fraction in breaking waves: Laboratory and field results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 17, 204-215.
- Ryu, Y., Chang, K.-A. and Mercier, R. (2007). Runup and green water velocities due to breaking wave impinging and overtopping. *Experiments in Fluids*, 43, 555-567.

---

Received December 14, 2007

Accepted March 24, 2008