

다위상 유체 속도 계측을 위한 영상기법 적용

류용욱* · 정광효**

*현대건설(주) 연구개발본부

**동의대학교 조선해양공학과

Multi-phase Flow Velocity Measurement Technique using Shadow Graphic Images

Yong-Uk Ryu* and Kwang-Hyo Jung**

*R&D center, Hyundai Engineering and Construction Co. Ltd., Yongin, Gyunggido, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

KEY WORDS: Multi-phase flows 다위상 흐름, Bubble image velocimetry 기포영상유속측정법, Shadow graphy image technique 그림자 영상기법, Fiber optic reflectometer 광섬유반사율 측정법, Overtopping flows 월파유동

ABSTRACT: Air-water flow measurements are of importance for the coastal and ocean engineering fields. Although kinematic investigations of the multi-phase flows have been conducted for long time, velocity measurements still are concerned with many researchers and engineers in coastal and ocean areas. In the present study, an imaging technique using shadowgraphy and fiber optic probe for velocity measurements of air bubbles is introduced. The shadow graphy image technique is modified from the typical image velocimetry methods, and optical fibers are used for the well-known intrusive coupled phase-detection probe system. Since the imaging technique is a non-intrusive optical method from the air, it is usually applied for 2D flows. On the other hand, the double fiber optic probes touch flows regardless of flow patterns. The results of the flow measurements by both methods are compared and discussed. The methods are also applied to the measurements of overtopping flows by a breaking wave over the structure fixed on the free surface.

1. 서 론

물과 공기로 이루어진 다위상 흐름은 해안 및 해양공학 분야의 연구자들이 많은 관심을 갖는 분야이다. 쇄파 등과 같은 운동량이 큰 흐름은 난류 및 기포를 포함하는 흐름을 만들면서 연안침식 및 해양구조물 등에 영향을 준다. 특히, 기포를 포함하는 다위상 흐름은 강한 난류세기를 만들기 때문에 유속 정보는 중요한 의미를 갖는다. 다위상 흐름은 수치적, 실험적으로 접근되고 있으나, 다위상의 특성상 수치적 모사가 쉽지 않으며, 유체 밀도의 차이로 인해 이동 변위 및 유속을 실험적으로 정량적인 계측에 기술적인 난관이 많다. 공기와 물의 다위상 흐름 실험적 계측은 공극율이나 기포 크기 등에 관한 연구가 주를 이루고 있으나, 유체 운동량 및 난류에 관한 직접적인 정보를 줄 수 있는 유속은 실험의 어려움으로 인해 다양한 연구가 부족하다. 일반적인 다위상 흐름의 유속 계측을 위한 실험적 방법은 흐름에 대한 접촉의 유무를 기준으로 하여 관입식 및 비관입식 측정법으로 나뉜다. 대부분의 측정법은 전도 및 저항식 장치를 이용한 관입식 방법을 주를 이루고 있으며, 광섬유를 응용한 기법이 쓰이기도 한다(Chanson, 1997). 관입식 기법은 측정장치의 물질의 위상에 대한 출력값의 차이로부터 위상의 종류를 인지하여 다위상 흐름의 특성치

를 산출하는 기법이다. 비관입식 측정법은 대부분의 방식이 흐름 외부에서 광학적 영상측정을 통해 유속을 측정하는 기법으로, 현재 여러 분야에서 이용되는 입자영상유속계(Particle image velocimetry, PIV)가 대표적인 기법이다.

기포의 밀도가 작은 다위상흐름의 경우, 입자영상유속계에 쓰이는 광원에 의한 빛 산란의 정도가 크지 않기 때문에 부분적으로 적용할 수 있으나, 공극률이 높은 다위상 흐름의 경우는 측정에 한계가 있다. 특히, 해안 및 해양공학 분야의 기포는 그 밀도가 크기 때문에 레이저 등의 강한 광원을 이용한 측정에 어려움이 많다. 더불어, 공기와 기포의 사이 경계면은 곡률에 따라 빛을 굴절 및 반사시키기 때문에 연구원의 안전에 문제를 발생시킬 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 그림자 기법(Shadowgraphy image technique)을 이용한 측정기법이 적용되어왔다. 영상측정의 반대편에 광원을 설치하여 기포의 그림자를 측정하는 기법으로 기포 형상을 가시화할 수 있다. 그림자 기법에 사용된 광원은 그 산란의 문제는 피할 수 있으나, 밝기가 약하여 기포의 밀도가 증가할수록 그림자의 형상을 가시화하기 어려운 단점이 있었다(Nishino et al., 2000). 또한, 수조가 넓을 경우, 수조 내 모든 기포가 화상에 기록되어 원근에 의한 오차가 증가하는 단점이 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로서 광학적 초점두께를

조절하여 해당 영역 내에서 화상의 기포 형상을 연속 촬영한 두 개의 화상간 상호관계(Cross correlation)를 계산하여 유속측정의 정도를 향상시키는 연구가 소개되었다(Ryu et al., 2005). 본 연구에서는 발광다이오드(Light emitting diode, LED)를 광원으로 이용하였는데, 단순한 광원의 대체가 아닌 LED의 얇은 두께를 이용하여 2차원 흐름 내 삽입하여 흐름에 대한 방해 최소화하며, 광원의 밝기 증가, 기포 밀도에 대한 기포형상 가시화 저감, 그리고, 원근에 의한 오차 감소를 가능하도록 하였다.

본 연구의 시작은 해안 및 해양공학에서 발생하는 다위상 흐름의 측정에서 시작되었으며, 해당 분야에 적용가능한 기법을 고안하고자 하였다. 쇄파(Breaking wave)에 의해 발생한 다위상 흐름은 많은 연구자들의 관심분야였으나, 측정의 어려움으로 인해 그 연구수가 부족하였다(Chang and Liu, 1999, 2000; Melville et al., 2002). 쇄파영역에 대한 연구의 경우, 물과 기포의 영역의 구분이 없는 유속 결과를 제시하거나(Jansen, 1986), 상세한 유속장을 도출하였음에도 불구하고 넓은 측정영역의 측정방법 등에 대한 한계가 있었다(Govender et al., 2002). 본 연구에서는 자유수면에 고정된 구조물 주위에서 발생하는 기포 공극율이 높은 쇄파 및 월파 흐름의 유속 측정에 영상 기법의 적용성을 검토하였다.

본 연구는 다위상 흐름을 측정하기 위해 입자영상유속측정법(PIV)을 응용한 기포영상유속측정법(Bubble image velocimetry, BIV)을 이용하였다. 영상기법의 정도를 검토하기 위해 광섬유반사율측정법(Fiber optic reflectometer)를 활용하여 동일한 기포 플룸에서 측정 및 비교 검토하였다. 수리모형실험의 단락에서는 고안된 기포영상유속측정법(BIV)과 광섬유반사율측정법에 대해 간략한 소개를 하였다. 두 기법에 의한 측정치를 비교하기 위해 수직수조에서 기포플룸을 발생시켜 중심선 유속을 측정하였으며, 두 기법에서 얻어진 결과를 통해 기포영상유속측정법의 정도를 확인하였다. 본 연구의 시작점이었던 해양공학 분야에 대한 적용성을 검토하기 위해 기포영상유속계를 이용하여 2차원 조파수조 내에서 자유수면에 고정된 사각형 구조물 주변에서의 쇄파 및 월파 흐름을 측정하였다. 기포영상유속측정법에 의한 유속장을 통해 흐름의 물리적 특성을 검토하여 영상기법의 다위상 흐름 측정의 적용성을 평가하였다.

2. 실험기법

2.1 기포영상유속측정법(Bubble image velocimetry, BIV)

기포영상유속측정법(BIV)은 물과 공기로 이루어진 다위상흐름에서 기포의 속도영역을 얻기 위해 사용된 측정기법이다. 일반적인 영상유속계로 널리 알려진 입자영상유속측정법은 유체 내 작은 입자의 거동을 입자 운동을 영상장치로 연속 촬영하고, 연속 화상을 분석하여 입자의 속도를 계산하는 기법이다. 일반적인 입자영상기법에서는 유체 내 입자의 가시화를 위해 레이저 등과 같은 빛의 회절이 적은 광원을 이용한다. 반면, 레이저와 같은 강한 빛 세기를 갖는 광원은 물과 공기가 함께 존재하는 다위상 유체의 경우 빛의 산란으로 인해 화상측정을 방해한다. 이와 같이 발생하는 빛의 산란을 피하기 위해 다위상흐름의 측정에 그림자 기법을 적용하여 기포를 형상화하였다. 그림자 기법은 기포의 그

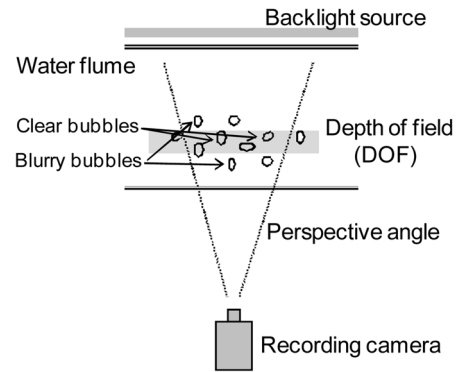


Fig. 1 Scheme of the image technique

림자를 연속 촬영하고, 그 연속 이미지간의 상호관계 해석을 통하여 기포의 속도를 계산한다. 즉, 기포의 거동과 속도 측정은 다위상 흐름에서 중요한 물리적 의미를 가지며, 흐름의 유속이 큰 경우, 흐름의 관성적 거동 대비 기포 부력에 의한 거동이 미미해져 주위의 유체 흐름을 동시에 추정할 수 있다. 본 연구에서는 그림자기법에 사용된 후면 광원으로 발광다이오드(LED)를 적용하였다(Fig. 1). LED는 점멸신호에 대한 발광의 반응이 빨라 짧은 시간에 두 화상을 녹화해야 하는 영상유속기법에 적합하며, LED 기술의 발달로 빛의 세기가 강해져 기포밀도가 높은 다위상 흐름에도 적용 가능할 수 있게 되었다. 일반적으로 그림자 기법을 이용한 기포영상유속측정법의 조명은 실험수조 외부에 설치된다. 하지만, 수조의 너비가 넓거나 기포밀도가 높은 경우는 화상의 원근에 의한 왜곡 및 빛의 투과문제로 인해 결과에 대한 신뢰도가 감소한다. LED는 반도체 칩이 부착된 회로판이 5 mm 안팎의 두께를 가지므로, 2차원 흐름에 대하여 방수막 내 LED회로를 삽입하여 수조 안에 설치할 경우, 얇은 너비로 인해 흐름의 방해 최소화하며 강제적인 DOF(Depth of field) 두께 감소와 함께 측정된 화상에 만족스러운 음영차이를 만들 수 있다. 이와 같은 방법으로 LED를 이용한 기포영상기법의 2차원 흐름에 대한 적용시 정량적인 실험 결과의 신뢰도 향상을 기대할 수 있다.

2.2 광섬유반사율측정법(Fiber optic reflectometer)

다양한 분야에서 응용되고 있는 광섬유를 다위상 유체의 유속측정에 활용하였다. 광섬유는 침단에 접촉하는 물질의 위상에 따라 그 출력신호가 각기 다른 신호크기를 나타낸다. 공기와 물의 다위상 흐름의 경우, 반사율차에 따른 신호변화로 광섬유에 닿고 있는 매질의 종류를 파악할 수 있으며 이를 이용하여 측정계에서의 물과 공기를 판단한다. 기포의 유속은 이와 같은 두 개의 광섬유를 약간의 거리 간격을 두고 설치하여, 광섬유간의 공간적 거리와 두 광섬유에서 기포의 시간적 도착차를 가지고 유속을 추정할 수 있다. 쌍으로 이루어진 반사율측정계를 이용한 기포 측정은 다양하게 응용되어왔으나, 전도식 장치가 일반적으로 사용되었다. 광섬유는 높은 반응 민감도와 얇은 장점을 가지고 흐름방해를 최소화할 수 있는 관입식 측정계로 고안되었다. 본 연구에서 광섬유반사율측정법과 기포영상유속측정법을 기포수조에서 동일한 조건 아래 측정하여 비교 검토하였다. 광섬유반사율측정법의 개요도는 Fig. 2에 도시되었다.

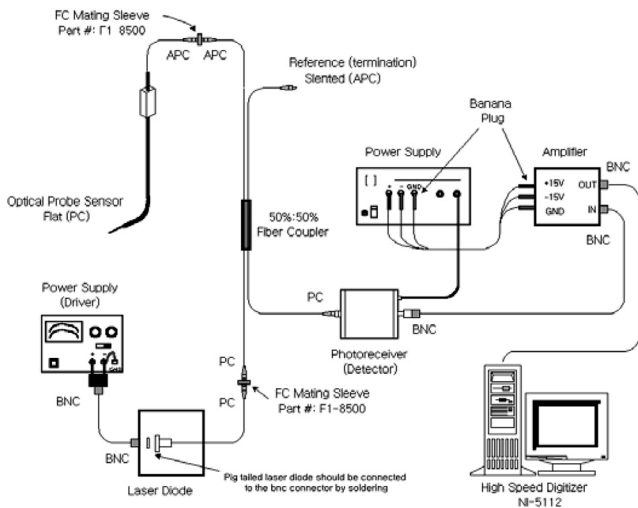


Fig. 2 Fiber optic reflectometer system

3. 실험적 응용

3.1 기포수조 실험

본 연구에서는 소개된 기포영상유속측정법과 광섬유반사율측정법의 정도를 검토하기 위하여 직육면체 기포수조에서 기포유속을 측정하였다. 기포수조의 기포흐름은 난류성질이 강하고 일정한 위상이 발생하지 않기 때문에 준정상류(Quasi-steady flow)로 간주하고 일정시간 동안 측정하여 그 평균값을 대표값으로 사용하였다. 기포영상유속측정법은 2차원 유속장을 측정 할 수 있는 반면, 광섬유반사율측정법은 점 측정(Point measurement)이기 때문에 기포영상유속측정법의 측정영역내에서 반복실험을 통하여 기포 유속변화를 측정하였다. 직육면체 수직수조는 0.5m×0.5m의 평면에 0.8m높이를 가지며, 수조 내 수심은 0.7m로 고정되었다. 기포수조는 수조 바닥에 설치된 기포공급기(1.0L/min)에서 발생이 되었으며, 기포수조의 측정된 영상을 바탕으로 기포의 직경이 약 1.2 mm의 크기를 갖는 것을 알 수 있었다.

기포영상유속측정법은 기포수조에서 15cm×15cm 크기의 측정장(Field of view)을 대상으로 기포 유속을 측정하였다. 수조 뒤에 설치된 LED판은 넓게 분포시켜 측정장 내 광원면이 일정한 밝기를 갖도록 하였다. 이를 위해 점광(Point light)으로 빛을 발광하는 LED회로판 앞에 반투명 백색 아크릴판을 설치하여 여러 점광을 면광(Plane light)으로 바꾸어 주었다. 영상측정에 사용된 디지털 카메라는 고해상도를 가지고 있으며, DOF(Depth of field)의 두께를 줄이기 위해 낮은 조리개 값에 고정된 장초점 렌즈를 사용하여 원거리에서 측정하였다. 카메라는 전기조절신호를 통해 LED와 함께 동기화하여 화상 짝을 측정하기 위해 조절되었다. 일반적인 PIV기법의 경우 화상 짝의 시간간격은 Pulse레이저의 경우 레이저의 시간간격을, 연속레이저를 이용할 경우 카메라 노출 시간 간격으로 결정되는데, LED는 연속발광체이기 때문에 후자의 경우를 따른다.

광섬유반사율측정법은 기포수조의 중심선을 따라 수직방향 일정한 간격(1cm)으로 10개 지점에서 기포 유속을 측정하였다. 광섬유반사율측정법은 광섬유 침단을 향한 방향만의 유속을 측정할

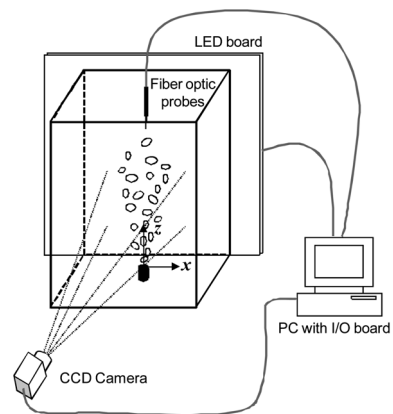


Fig. 3 Sketch of the bubble plume measurement

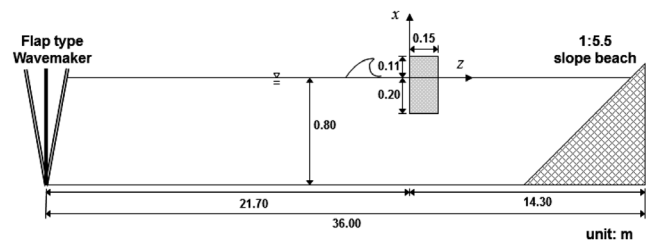


Fig. 4 Sketch of the overtopping flow measurement

수 있기 때문에 기포수조의 바닥으로부터 자유수면으로 상승하는 기포의 속도를 측정하기 위하여 측정계를 연직 하향으로 향하게 하여 설치하였다. 물과 공기면에서 반사된 신호는 고해상도 자료 저장 장치시스템을 통해 10MHz로 저장되어 스펙트럼 분석을 통하여 기포의 유속을 계산한다. 기포영상유속측정법의 개요도가 Fig. 3에 도시되었다.

3.2 월파 실험

기포발생을 유발하는 구조물 월파 수리모형실험을 2차원 조파수조에서 수행하였다. 구조물 앞이나 위에서 쇄파를 동반하는 월파의 경우 강한 운동량으로 인해 많은 기포를 포함한 다위상 흐름이 발생한다. 조파수조의 제원은 길이 35m, 폭 0.9m, 깊이 1.2m이다. 월파를 발생시키기 위해 수조 내 아크릴로 제작된 고정식 구조물 모형을 설치하였으며, 제원은 길이 0.15m, 높이 0.31m, 폭 0.9m의 직사각형 구조이고, 0.8m 수심에 0.2m 출수를 갖도록 설치되었다(Fig. 4). 본 실험에 쇄파는 수심의 변화 없이 여러 주기의 파랑을 한 지점에 집중시켜 쇄파를 발생시키는 파랑집중(Wave focusing)법을 이용하여 생성하였다. 고정된 수심에서 쇄파발생을 위하여 파주파수 4.4rad/s에서 8.2rad/s 사이의 10개의 다른 파주파수를 갖는 규칙파 조합을 구성하였다. 쇄파를 동반하는 월파흐름의 유속은 기포영상유속측정법으로 측정하였다.

4. 실험 결과 및 토론

기포영상유속측정법과 광섬유반사율측정법을 이용하여 측정된 기포수조의 유속장을 비교 검토하였다. 기포영상유속측정법에 의해 획득된 화상은 그림자 기법을 이용하였기 때문에 배경영역이

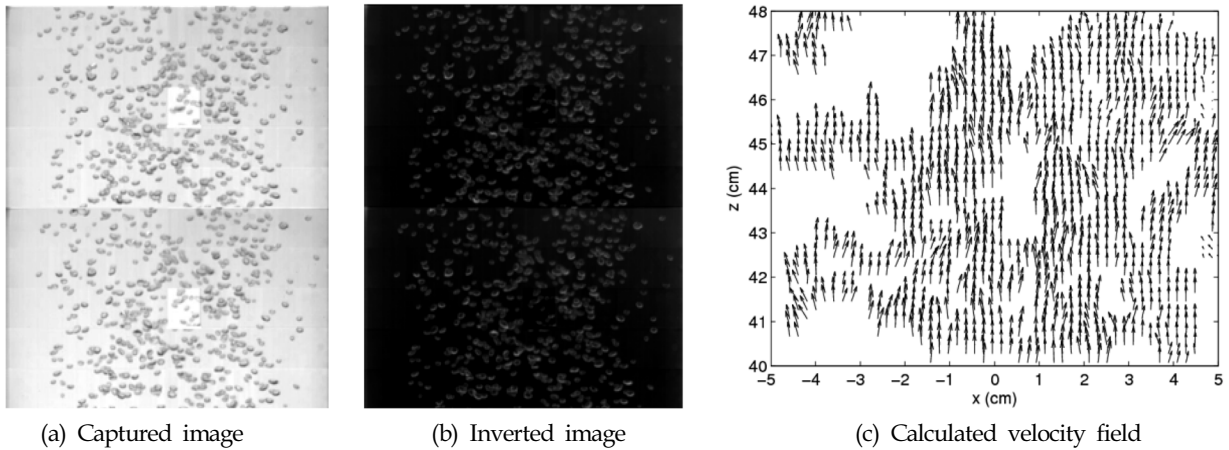


Fig. 5. Images and instantaneous velocity field

밝고 측정자인 기포가 어둡게 이미지에 나타난다. 일반적인 영상분석기법에서 측정자는 밝은 색의 영역으로 인식하고 이의 상관관계를 분석하기 때문에 화상을 명도반전을 해야 한다. Figs 5(a) 와 5(b) 획득 화상 원본과 명도 반전된 화상을 보여준다. 어둡게 나타났던 기포가 명도 반전 후 밝은 색으로 나타나며 측정자의 역할을 하고 있다. Fig. 5(c)는 명도 반전된 연속 화상의 상관관계 분석을 통하여 얻어진 순간 유속장을 제시하였다. 순간 유속장으로부터 난류도가 큰 흐름의 특성을 알 수 있다. 그림에 도시된 유속장은 순간 유속장이기 때문에 기포가 없는 영역이나 상관관계가 일정 수준을 넘기지 않을 경우 속도벡터를 얻지 못한다. 본 연구의 기포영상유속측정법의 순간유속벡터 획득율은 약 80%로서 가장자리의 기포 밀도가 낮은 영역과 난류도 큰 흐름의 특성을 고려했을 때 만족스러운 결과라고 평가할 수 있다. 이러한 순간 유속장 50개를 평균하여 기포수조 중심선 유속을 추정하고, 유속장 내 중심선을 따라 10개 지점에서 광섬유반사율측정법으로 측정된 결과와 비교하였다.

Fig. 6은 기포영상유속측정법과 광섬유반사율측정법을 이용한

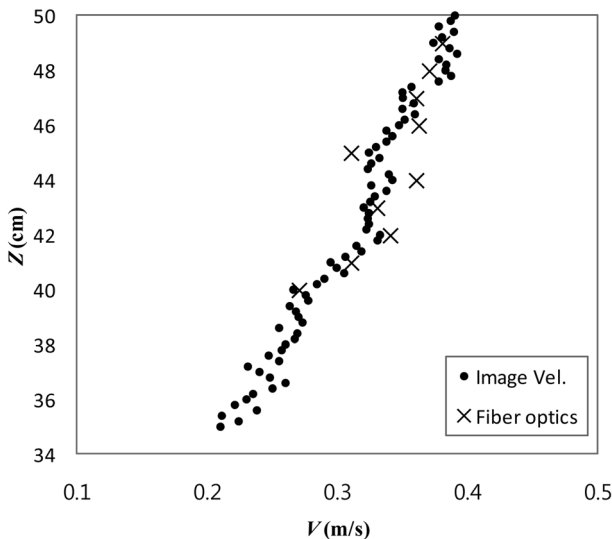


Fig. 6 Comparison between the image velocimetry and the fiber optic probe

실험 결과를 비교하였다. Fig. 6에서 기포수조 중심선의 기포 상승 속도가 큰 난류도로 인해 약간의 산포도를 보이나 유속의 분포 경향을 파악할 수 있으며, $z=40\text{cm}$ 에서 약 0.27m/s 이던 기포 속도가 $z=50\text{cm}$ 에서 약 0.4m/s 까지 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기포가 자유수면 방향으로 상승하면서 수조 깊이로 인한 유체 정압이 감소하면서 기포가 커져 기포부력증가로 인한 기포 속도가 상승하기 때문이다. 광섬유반사율측정법을 이용한 측정은 2분간 측정된 출력신호를 분석하여 얻어진 기포 속도를 평균한 것이다. 기포수조 내 기포의 주된 방향성이 부력방향인 연직방향이기 때문에 한쪽 방향만 측정이 가능한 광섬유반사율측정법의 측정률이 높았다. Fig. 6에서 도시된 바와 같이 광섬유측정법의 점결과는 상응하는 지점의 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있지만, 두 측정법의 표본수 증가와 기포 크기 및 공극률 변화 등을 통해 좀 더 명확하게 검토될 수 있을 것으로 판단된다.

쇄파가 구조물 전면에서 내습 후 구조물 위에서 진행되는 월파의 유속장을 기포영상유속계로 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 시간별 유속장은 쇄파가 구조물 전면에서 내습하고 관성적인 운동량으로 인해 전면벽을 타고 오르며 월파까지 발생하는 과정을 보여준다. Fig. 7의 유속장은 동일한 실험을 20회 반복하여 얻은 순간 유속장을 통계적인 방법을 이용하여 얻어진 평균 유속장이다. 각 유속장의 시간간격은 $t=0.08\text{s}$ 로서 아주 짧은 시간에 쇄파에서 월파에 과정이 진행된다. Fig. 7의 x와 z는 각각 수평방향과 연직방향의 좌표계로서 구조물 전면벽과 정수면이 교차되는 점을 원점으로 하고 있다. Fig. 7(a)는 쇄파가 전면에서 내습하는 순간의 유속장을 보여주는데 쇄파 롤러(Roller)의 모습을 파악할 수 있다. Fig. 7(b)는 전면벽에서의 내습 후 전면벽을 타고 쳐오르는 순간에서의 유속장으로 쇄파의 공기주머니(Air pocket)가 구조물 전면부에서 압축이 되며 기포 와류가 형성되고, 연직방향 쳐오름 흐름이 기포 기동형상으로 형성된다. Fig. 7(c)는 구조물 전면부에서 생성된 기포와류가 발전하면서 구조물 전면부와 평행한 기포 흐름으로 전환되는 과정이다. 연직방향 쳐오름 흐름이 구조물 천단으로 기울면서 기포의 연직방향 속도 성분이 수평방향 속도 성분으로 전환되는 과정을 보여준다. Fig. 7(d)는 구조물 천단에서 월파 흐름을 보여준다. 월파의 수평유속은 연직 유속에 비해 상대적으로 작으나, 구조물 전면에서 쇄파가 된 직후에 나타났던 연직

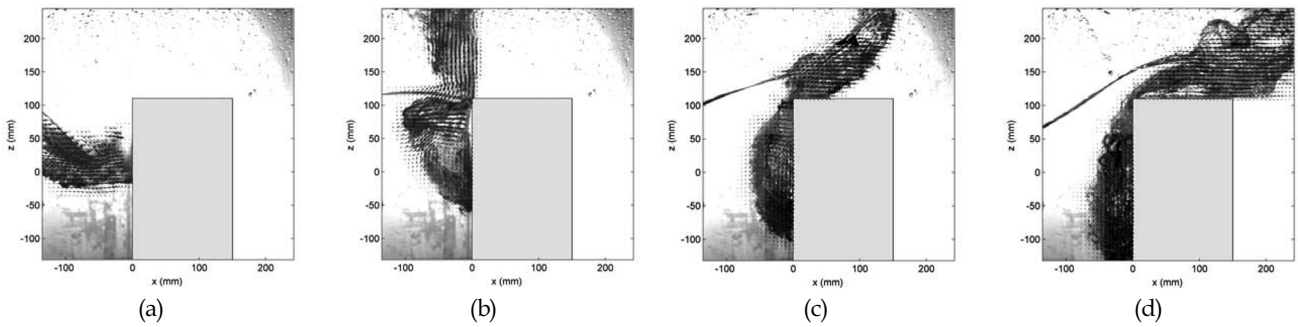


Fig. 7 Consecutive velocity fields of the overtopping flow

방향 운동량이 수평방향으로 전환됨을 알 수 있다. 또한, 구조물 전면부에서 생성된 기포 와류는 구조물 전면부와 평행한 수직하강 흐름 전환된다. 이와 같이 짧은 시간에 큰 운동량을 가지고 진행되는 기포와 물이 혼합된 유장의 유속장을 기포영상유속측정법이 적용 가능함을 보여준다. 쇄파나 월파처럼 기포와 유체가 동일한 방향으로 큰 운동량을 가지고 진행되는 흐름은 기포의 부력의 영향이 흐름의 관성력에 비해 미미하여 기포 속도부터 전체 흐름의 유속을 추정할 수 있다. 큰 운동량의 다위상 흐름 유속측정은 상대적으로 어려움이 있기 때문에 본 연구에서 제시된 기포영상유속측정법이 폭 넓게 적용 될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구는 기포와 물을 포함하는 다위상 흐름의 속도를 측정하기 위해 기포를 이용한 영상기법인 기포영상유속측정법과 그 정확도를 검증하기 위하여 광섬유반사율측정법을 소개하였다. 현재 실험 유체 분야에서 다양하게 사용되는 입자영상유속측정법은 추적자를 직접 가시화하여 유속을 계산하는 반면, 기포영상유속계는 후면 광원을 이용한 그림자 기법을 이용하여 기포를 측정자로 가시화한 유속측정기법이다. 기포영상유속측정법으로부터 얻어진 유속결과는 광섬유를 이용한 유속 측정기법을 통해 얻어진 결과와 비교를 통해 그 정도를 검토하였다. 두 기법의 비교를 위해 기포수조에서 기포 상승 속도를 측정하여 그 결과들이 작은 오차범위(약 5%) 내에서 일치함을 보였다. 기포영상유속측정법의 적용성을 검토하기 위해 쇄파와 사각형 고정 구조물에 의해 발생한 월파의 유속장을 계측하였다. 쇄파와 구조물에 의한 월파의 경우 큰 운동량 변화와 쇄파의 특성으로 기포 밀도가 높은 다위상흐름이 생성된다. 기포영상유속측정법은 빠르게 진행되는 쇄파 및 월파의 기포 속도장을 측정하여 유체 흐름의 속도장을 계측할 수 있다. 구조물 앞에서의 쇄파 및 롤러(Roller), 전면벽에서의 처오름과 기포 와류, 그리고 구조물 천단 위로 넘어가는 월파의 흐름의 유속장을 잘 묘사하였다. 기포영상유속계는 2차원 흐름에 적용성이 좋다고 판단되며, 관입적 점측정 기법인 광섬유반사율측정법을 함께 적용한다면 3차원 흐름에서도 좋은 결과를 얻을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술

진흥재단(또는 한국과학재단)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0068310).

참 고 문 헌

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*, Vol11, pp 3390-3400.

Chang, K.A. and Liu, P.L.F. (2000). "Pseudo Turbulence in PIV Breaking-wave Measurements," *Experiments of Fluids*, Vol 29, pp 331-338.

Govender, K., Mocke, G.P. and Alport, M.J. (2002). "Video-imaged Surf Zone Wave and Roller Structures and Flow Fields," *J. of Geophysics Research*, Vol 107. pp 3072-3092.

Chanson, H. (1997). *Air Bubble Entrainment in Free-surface Turbulent Shear Flows*, Academic Press, London, UK

Jansen, P.C.M. (1986). "Laboratory Observations of The Kinematics in The Aerated Region of Breaking Waves," *Coastal Engineering*, Vol 9, pp 453-477.

Melville, W.K., Veron, F. and White, C.J. (2002). "The Velocity Field under Breaking Waves: Coherent Structures And Turbulence," *J. of Fluid Mechanics*, Vol 454, pp 203-233.

Nishino, K., Kato, H. and Torii, K. (2000). "Stereo Imaging for Simultaneous Measurement of Size and Velocity of Particles in Dispersed Two-phase Flow," *Measurement Science and Technology*, Vol 11, pp 633-645.

Ryu, Y., Chang, K.A. and Lim, H.J. (2005). "Use of Bubble Image Velocimetry for Measurement of Plunging Wave Impinging on Structure and Associated Greenwater," *Measurement Science and Technology*, Vol 16, pp 1945-1953.

2012년 6월 11일 원고 접수
 2012년 6월 13일 심사 완료
 2012년 6월 19일 게재 확정