

기포흐름 측정을 위한 영상기법 및 광섬유센서 적용

Application of Image Technique and Optical Fiber Sensor for Air-water Mixture Flow

류 용 옥* / 정 태 화**

Ryu, Yonguk / Jung, Tae-Hwa

Abstract

Measurements of multiphase flows containing bubbles have been limited because most existing methods target one phase flows. Especially, multiphase flows with a high void ratio have been rarely successful in measurements due to the sudden change of density and thick interfaces between air and water. This study introduces two methods that are capable of measuring flow fields regardless of bubble void ratio, named bubble image velocimetry and bundle fiber optic flow meter. The calculation of the depth of field is suggested to reduce and estimate errors by perspective image velocimetry. The bundle fiber optic flow meter is designed to increase a measurement rate using many optical fibers with a thin diameter. The two methods measured bubble plumes to test reliability and the velocity measurements show good agreement. In addition a hydraulic jump, one of the multiple flows in rivers was measured to test applicability of the methods.

Keywords : Multi-phase flows, Image velocimetry, Shadowgraphy, Optical fiber, Hydraulic jump

요 지

기포가 포함된 다상흐름의 측정은 중요함에도 불구하고 많은 제약이 있었다. 특히, 공극률이 높은 다상 흐름은 밀도차의 급격한 변화와 두꺼운 공기-물 경계면으로 인해 측정이 매우 어렵다. 본 연구에서는 공극률에 상관없이 기포흐름을 측정할 수 있는 기포영상유속측정법과 다발 광섬유유동측정계를 소개하고자 한다. 기포영상측정기법의 경우, 화상측정시 발생하는 원근에 의한 오차를 최소화하고 추정할 수 있는 피사계 심도에 대한 계산방법을 제시하여 정도 분석을 위한 방안을 제시하였다. 다발 광섬유유동측정계는 얇은 광섬유의 특성을 이용해 다발로 제작하여 측정률을 증가시키고자 하였다. 제시된 두 기법을 기포플룸에 적용하여 신뢰도를 검토하였으며 잘 일치하는 것을 확인하였다. 소개된 기법으로 대표적인 하천 다상흐름인 도수흐름을 측정하여 그 적용성을 검토하였다.

핵심용어 : 다상흐름, 영상유속측정기법, 그림자기법, 광섬유, 도수흐름

1. 서 론

다양한 형태로 존재한다. 특히, 하천과 연안에서는 큰 운동량, 구조물과의 상호작용 또는 환경 작용 등 다양한 요인과 기포가 동시에 포함된 기포흐름은 수리분야에서 인에 의해 기포흐름이 발생한다. 두 가지 이상의 위상이

* 한국건설기술연구원 수자원하천연구소 수석연구원 (e-mail: yuryu@kict.re.kr)
Senior Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, 411-712, Korea

** 교신저자, 한밭대학교 건설환경공학과 부교수 (e-mail: thjung@hanbat.ac.kr, Tel: 82-42-821-1104)
Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

동일한 흐름 내에 존재하여 다상흐름(multiphase flow)이라고도 불리는 기포흐름은 위상차로 인해 복잡한 흐름특성을 가지고 있다. 흐름 내 위상차가 존재할 경우 밀도차 및 위상경계면의 영향으로 실험측정에 많은 제약이 따른다(Govender et al., 2002; Jansen, 1986).

기포흐름의 실험적 연구는 기포의 공극률이나 크기 등에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 3차원적 거동양상 측정에는 한계를 지니고 있다. 기포의 공극률 및 크기에 관한 연구는 전도도(conductivity)식 장치를 사용한 실험이 주를 이루고 있다. 전도도식 장치는 공기 및 물의 위상변화에 따라 전압값이 변화하게 되며 이러한 신호 변화를 이용하여 위상변동을 감지한다. 신호의 시계열로부터 위상 상태를 검토하고 지속시간을 바탕으로 공극률 및 크기를 추정한다(Chanson, 1997). 전도도식 장치 외에 위상차에 신호변화를 나타내는 광섬유를 활용한 기법도 연구에 사용되고 있다(Chang et al., 2002; Chang et al., 2003). Chang et al. (2003)은 광섬유반사율계를 고안하여 다상흐름의 유속을 측정하였다. 광섬유반사율계는 광섬유 고유신호의 변화를 이용하여 흐름의 위상을 측정하는 기법으로서 시계열 신호를 주기적으로 분석하여 유속을 추정하지만, 1 MHz 이상의 광섬유 표본 추출 비율(sampling rate)이 요구되는 반면 기포 측정 성공률이 낮다는 단점이 있다. 광섬유를 활용한 기포흐름 측정은 아직 초기단계이며 관련 연구도 많이 부족한 편으로서 광섬유 원리에 대한 이해가 요구되는 분야이다. 광섬유센서와 같은 장치를 측정하고자 하는 영역에 설치하는 접촉식 측정방법과 이를 해석하는 영상기법은 최근 수리분야에서 활발하게 응용되고 있다. 대표적인 측정기법인 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry, PIV)는 실내 실험에 국한되어 이용되거나 비접촉식 측정 및 장(field)개념의 유속 값을 제시할 수 있어 활용도가 매우 높다(Ryu et al., 2007). 단상흐름에 사용되는 PIV는 일반적으로 레이저를 광원으로 사용하는데, 이 레이저 광원을 다상흐름에 적용할 시에는 위상경계면에서 빛을 산란하는 문제점이 있다. 이 방법은 기포율(void fraction)이 작은 경우에는 광원의 세기를 적절하게 조절하여 사용할 수 있으나 대신에 오차가 증가하는 문제점이 발생하며 밀도가 높은 경우에는 산란 정도가 심해 측정이 거의 불가능하다. Ryu et al. (2005)은 그림자 기법과 상호관계를 이용한 기포측정방법을 소개하였으나, 할로젠을 광원으로 사용하여 균등한 면광을 발생시키기 위해 대규모의 장치와 넓은 설치공간이 요구된다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기포흐름을 측정하기 위한 실험기법으로

영상기법과 광섬유센서를 소개한다. 기포흐름용 영상 기법인 기포영상유속측정법은 기존 입자영상유속측정법(PIV)을 응용한 기법이다. 본 영상기법에서 기포흐름 가시화에 사용되는 그림자기법(shadowgraphy)은 원근에 의한 오차를 내재하고 있는데, 본 연구에서는 오차 분석을 위한 피사계 심도 산정법을 제시하여 오차를 최소화할 수 있는 방안을 제시하였다. 광섬유센서를 활용한 광섬유 유속측정계는 3개의 레이저 광섬유센서를 다발로 구성하여 구축하였다. 소개된 두 기법의 신뢰도를 검토하기 위해 동일한 조건에서 기포흐름 수리실험을 수행하여 유속 분포를 비교 검토하였다. 또한, 일반적인 흐름에 대한 적용성을 검토하기 위해 대표적인 기포흐름인 도수흐름을 영상기법으로 측정하여 순간유속장을 제시하였다.

2. 다발 광섬유유속측정계

2.1 다발 광섬유유속측정계 개요

광섬유유속측정계는 광섬유센서를 활용하여 기포들의 크기, 발생빈도 및 이동속도를 측정할 수 있는 기법이다. 본 기법은 수중 기포 및 물과 공기의 위상차 단면을 통과할 때 발생하는 광섬유센서의 신호성분을 분석하여 기포의 물성치를 추정하는 기법으로서 광섬유센서의 첨단에 접근하는 매질의 위상에 대한 반응을 기반으로 한다. 센서 중에서 시각에 해당되는 것이 광센서로서 시각센서라고도 불린다. 광센서는 빛의 양, 물체의 모양이나 상태, 그리고 움직임 등을 감각하는데, 예전에는 자연의 빛을 감각하였으나, 지금은 인공적으로 큰 빛을 발하여 그 빛이 물체에 부딪혀 반사되어 오는 것을 받아들여 그 물체의 움직임이나 빠르기를 알아내는 방식이 보편적이다. 광섬유유속측정계의 원리는 이러한 광섬유센서에서 발하는 빛이 위상차 단면으로부터 반사되어 오는 신호를 분석하는 것이다. 본 광섬유유속측정계는 광원으로서 레이저다이오드를 사용하는데, 이는 출력 스펙트럼의 폭이 좁아 분산영향이 작고, 방향성이 좋아 광섬유로 결합하기가 용이하다.

광섬유는 발광 신호에 접근하는 물질의 위상에 따라 반사신호가 다른 크기를 나타내는데, 기포의 경우, 반사율차에 따른 신호변화로 광섬유에 접근하는 매질의 종류를 파악할 수 있으며 이를 이용하여 물성치를 추정한다. 광섬유 유속측정계는 레이저다이오드, photoreceiver, 광 coupler, 신호증폭기 및 광섬유센서 probe로 구성된다(Fig. 1).

Photoreceiver에서 추출된 신호는 증폭기를 거쳐 컴퓨터에 저장되어 분석되며, 물성치를 추정할 수 있는 분석기법이 적용된다. 기포의 물성치 중 기포 유속은 그 측정이

가장 난해하다고 알려져 있다. 본 연구의 광섬유유동측정계는 기포유속 측정을 위해 세 개의 광섬유센서를 일정한 거리 간격(dx_1 , dx_2)을 두고 설치하여, 광섬유간의 공간적 거리와 각 광섬유에 도착하는 기포의 시간차를 이용하여 유속을 측정하였다(Fig. 2).

기포유속은 쌍으로 이루어진 전도식 장치가 일반적으로 사용되어 왔으나, 전도장치의 측정부위인 침단 크기가 상대적으로 커 교란이 많이 발생한다는 문제점이 있었다. 광섬유는 높은 반응 민감도와 두께가 얇아 흐름방해를 최소화할 수 있는 관입식 측정계로 고안되었으며, 매우 얇은 두께(약 0.25 mm)를 가지기 때문에 여러 개의 광섬유를 다발식으로 설치할 수 있다. 기존 전도장치 및 쌍다발형 광섬유측정계의 경우, 측정장치에 실제적인 기포가 접촉하는 횟수에 비해 취득률이 낮은 결과를 보여주었는데, 이는 전도장치의 큰 침단 크기 및 레이저광원의 고직진성에서 그 원인을 유추할 수 있다(Chanson, 1997; Jung and Ryu, 2012). 본 연구에서 제시된 3개의 광섬유 다발로 이루어진 광섬유유동측정계는 다발성 광섬유를 설치하여 그 취득률을 높이고자 하였다. 3개의 광섬유 위치는 중앙부에 가장 긴 광섬유를 위치하고 양쪽에 상대적으로 짧은 광섬유를 설치하여 양쪽으로 이동하는 기포의 측정률을 향상시키고자 하였다. 이는 레이저 광원이 직진성이 좋아 물과 공기의 interface가 광원의 방향에 직각에 가까울수록 취득률이 높아지는 현상을 고려하여 고안되었다. 광섬유간 간격과 기포가 도달하는 시간차를 활용하여 유속측정에 사용되는 계산식은 다음과 같다.

$$V = \frac{dx_1}{dt_{AB}} \quad \text{or} \quad \frac{dx_2}{dt_{AC}} \quad (1)$$

여기서, V 는 기포유속, dx_1 은 fiber probe A와 B의 거리간격, dt_{AB} 는 fiber probe A와 B의 기포도달 시간차, dx_2 는 fiber probe A와 C의 거리간격, dt_{AC} 는 fiber probe A와 C의 기포도달 시간차이다.

2.2 기포플룸(plume) 수리실험

본 연구에서는 제안된 측정기법을 사용하여 방향성이 일정한 기포플룸을 측정하여 광섬유유동측정계의 적용성을 검토하였다. 다상흐름의 하나인 기포흐름은 관성력과 부력이 복합적으로 작용하는 난류흐름으로 흐름의 방향을 구하기 쉽지 않다. 이러한 기포흐름 중 대표적인 흐름인 기포플룸은 부력으로 발생하는 흐름으로서 연직방향 흐름이 주가 되는 거동 특성을 갖는다. 본 연구에서는 방향성을 최소화하기 위해 직경이 기포플룸 단면 직경과 유사한 작은 원통수조 내에 흐름을 발생시켜 횡방향 흐름을 최소화하고 연직방향 흐름을 극대화하였다. 원통형 수직수조는 0.2m 직경에 1.0m 높이를 가지며, 수조 내 수심은 0.8m로 고정하였다(Fig. 3). 수조 직경이 충분히 크지 않아 수조 벽면의 마찰이 기포플룸 흐름에 영향을 줄 수 있으나, 본 연구 목적은 기포플룸 거동분석보다는 소개한 측정기법의 비교검증이기에 때문에 이와 같은 제원의 수조를 사용하였다.

수조 내에 기포플룸을 발생시키기 위해 바닥에 기포 공급기(1.0 L/min)를 설치하였으며, 기포 분출량을 조절하였다. 광섬유유동측정계는 원통수조 주변에 설치된 철제 측정대에 고정되어 연직방향으로 상하조절이 가능하도록 하였다. 광섬유유동측정계를 이용한 기포플룸 측정은 흐름의 중심선을 따라, $z=30$ cm에서 $z=50$ cm구간 내 20개

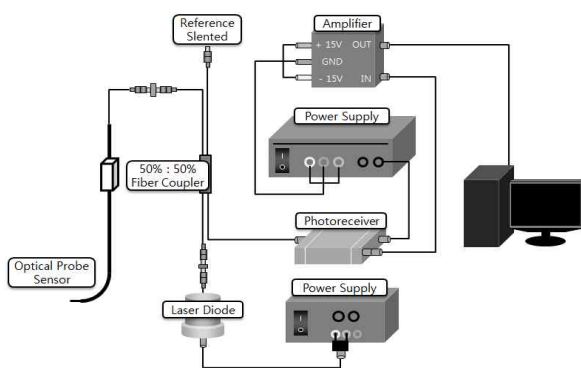


Fig. 1. Optical Fiber Flow Meter System

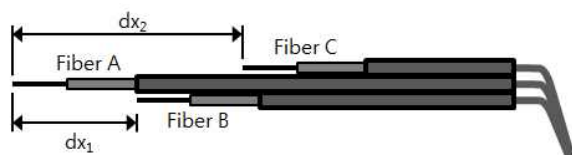


Fig. 2. Sketch of the Fiber Probe

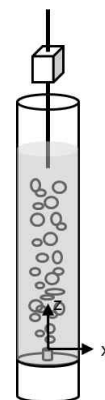


Fig. 3. Scheme of the Bubble Plume Experiments

지점에서 수행되었다. 기포플룸은 제트흐름과 유사하게 확산되는 형태를 가지고 있으나, 초기 관성력이 거의 없이 부력 혹은 확산으로 발전하는데, 대표성을 갖는 유속을 측정하기 위해 중심선 유속을 측정하였다. 기포플룸은 3차원적 거동을 일으키는 기포의 특성으로 인해 난류성이 큰 편이나, 본 연구에서는 임의성을 최소화하기 위해 직경이 크지 않은 원통수조에서 수행하여 횡방향의 확산성을 제한하였다. 이는 본 연구 목적이 기포플룸의 거동분석이 아니라 기포흐름의 측정 가능성을 확인하는 것이기 때문에 기포 측정 성공률을 높이기 위한 방안으로 본 수조를 사용하였다. 유속장 분석은 30개의 순간측정값을 계산하였으며, 3개의 광섬유 중 2개 이상의 광섬유에서 측정된 기포를 대상으로 유속을 측정하였다. 각 순간유속은 난류 및 임의성으로 인해 직접적으로 비교하기 어려우므로 12초간 약 3Hz의 취득빈도로 얻어진 순간유속으로부터 평균값을 계산하여 그 적정성을 검토하였으며, 본 연구에서 소개된 다른 측정기법인 영상유속측정기법을 통해 얻은 결과와 비교하여 신뢰성을 비교분석하였다.

광섬유유동측정계에서 측정된 신호 중 3개 probe 모두에서 측정된 대표적인 경우를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에 도시된 경우는 probe A, B, C 모두에 기포가 통과할 경우를 나타내었으며, 기포 거동에 따라 3개의 probe 중 종류에 상관없이 2개 probe에서 측정될 경우 유속을 추정할 수 있다. 본 연구의 기포플룸은 직진성을 향상시키기 위해 직경이 상대적으로 작은 원통수조에서 수행하여 횡방향 기포의 신호 취득률을 높였으며, 유속측정이 가능했던 취득 기포의 96% 이상이 probe A를 통과하였다. probe A를 통과하지 않고 probe B 혹은 probe C를 통과하는 경

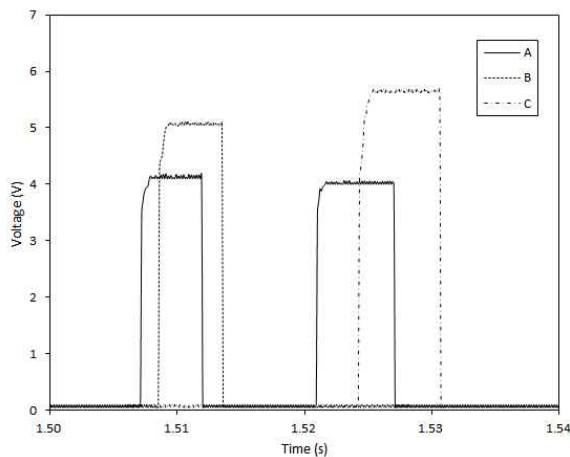


Fig. 4. Time Series of the Optical Fiber Signal: Probe A, B, C

우는 4% 미만으로 매우 작은 비중을 차지하였는데, 이는 probe간의 간격이 기포크기에 비해 작은 편이고, 또한 본 실험이 횡방향의 흐름이 제한되도록 설계되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4에 제시된 3개 probe의 시계열에서 나타난 초기 접촉시간 차는 유속을 계산하기 위해 중요한 인자로서 접촉하는 매질이 물에서 공기로 변화하며 광섬유 신호값이 상승하는 순간의 시간차를 이용한다.

광섬유유동측정계를 사용한 유속측정 중 기포플룸의 중간선을 따라 $z=30, 40$ cm의 두 개 지점에서 측정된 값의 순간유속과 이로부터 얻어진 평균유속값을 Fig. 5에 제시하였다. 측정구간에서의 기포 크기는 수평방향 2.6 mm, 연직방향 2.2 mm이었으며, 영상 내 기포 경계면을 기준으로 평균하여 계산하였다. 그림에서는 각 지점에서 측정된 순간유속값들을 제시하였으며, 평균유속값은 플룸이 발전할수록, 즉 기포 유출구에서 멀어질수록 큰 유속값을 보인다. 이는 일반적인 기포플룸의 중심선 유속분포와 동일하기 때문에 광섬유측정계의 측정이 적절하다는 것을 알 수 있다. 제시된 순간유속은 측정계의 probe 종류에 상관없이 두 개 이상의 probe에서 측정된 기포의 유속을 적용하였다.

3. 기포영상측정법

3.1 기포영상측정법 및 피사계 심도(depth of field)의 산정

기포영상측정법은 기포를 포함한 다상흐름에서 기포의 속도를 측정하기 위해 광학적 원리를 응용한 기법이다 (Jung and Ryu, 2012). 본 기법은 입자영상유속측정법과 유사하나, 흐름 내 작은 입자 대신 기포 및 물과 공기의

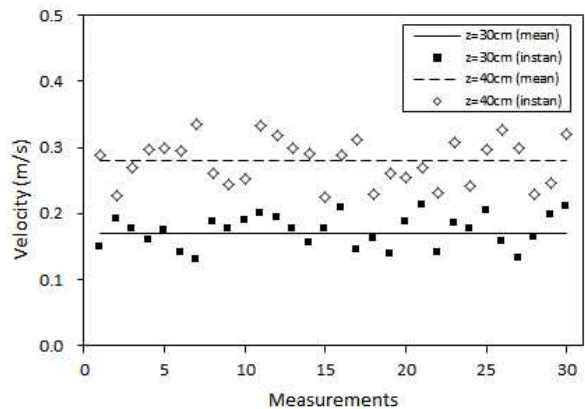


Fig. 5. Instantaneous and Mean Velocity by the Optical Fiber Flow Meter

위상경계면의 이동을 분석하여 유속을 계산하는 기법이다. 흐름 단면의 유속을 측정하기 위한 PIV기법은 일반적으로 입자 가시화를 위해 레이저를 광원으로 이용하는데 기포 및 위상경계면에 의해 산란이 되어 측정 정도가 떨어지거나 측정 자체가 불가능한 문제가 발생한다. 기포영상유속측정법은 그림자기법의 원리를 이용하여 이와 같은 빛 산란 문제를 해결한다. 그림자기법은 측정대상을 중간에 위치시킨 후 서로 반대되는 쪽에 영상취득용 카메라와 광원을 설치하여 측정하는 방법이다. 그림자기법 적용 시, 광원의 밝기가 측정영역에 고르게 분포할 수 있는 면광 발생 및 영상의 원근효과를 최소화할 수 있는 방안이 요구된다. 최근 발광다이오드(LED)의 발달로 작은 LED칩을 등간격으로 배치할 수 있어 면광발생에 유리하고, 또한 외부신호를 통해 pulse형 광원 조절이 가능하여 응용성이 증가하고 있다. 면광과 더불어 원근효과 최소화는 측정기법의 신뢰도를 평가할 수 있는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 광학 원리에서 피사계 심도(depth of field) 원리를 이용하여 원근효과를 평가할 수 있는 이론적 근거를 제시하였다.

Fig. 6에 제시된 개요도는 피사계심도의 원리를 도시하였다. 영상에 녹화되는 피사체는 피사계심도내에 위치할 경우 선명하게 측정되는 반면, 바깥 영역에서는 피사체가 흐리게 측정된다. 영상유속측정기법에 적용되는 상관관계는 선명한 피사체들만을 사용하여 계산하여 신뢰성을 높였다. 즉, 피사계 심도가 좁을수록 선명하게 측정되는 피사체는 제한된 영역에서만 가능하게 되고 따라서 광각에 의한 원근효과는 감소하게 된다. 피사계 심도의 근거리 경계와 원거리 경계는 다음과 같은 식으로 추정할 수 있다.

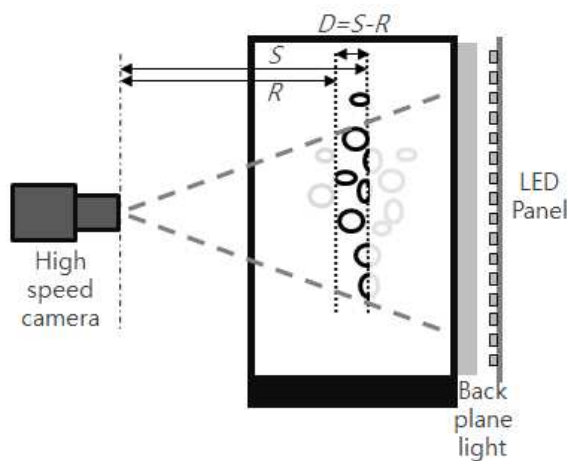


Fig. 6. Scheme of the Bubble Image Velocimetry and the Depth of Field

$$R = Lf^2 / (f^2 + NCL) \quad (2)$$

$$S = Lf^2 / (f^2 - NCL) \quad (3)$$

여기서, R은 초점심도의 근경계, S는 원경계, L은 피사체 거리, f는 초점거리, N은 조리개수, C는 렌즈별 고유수이다. 피사계 심도의 위치를 통해 측정지점을 예상할 수 있으며, 피사체가 측정되는 두께 (D)는 Eq. (4)와 같이 간략하게 추정할 수 있다. 이는 오차 분석시 필요한 수치이다.

$$D = S - R \quad (4)$$

본 식을 사용하여 피사계심도 및 측정구간을 계산할 수 있으며, 신뢰도 분석에 적용이 가능하다. 피사계심도는 카메라부터 측정영역까지 거리가 짧을수록 좁아지는데, 이는 측정거리 대비 상대오차가 크게 변하지 않으며 광각이 상대적으로 작은 120 mm 초점렌즈의 조리개수(f-stop)를 f2.0으로 고정할 경우, 일반적인 영상유속측정법의 측정거리인 1~4m에서 2±2%의 오차범위를 보여준다.

3.2 기포플룸 비교

광섬유유동측정계로 측정하였던 기포플룸을 동일한 조건 아래서 기포영상유속측정법으로 측정하였다. 기포영상측정법을 위해 고속카메라와 연속발광 LED로 이루어진 고시간해상도, 기포영상측정법을 구성하였다. 고속카메라는 최대 1024×1024 픽셀의 해상도를 가지고 있으며, 본 실험에서는 연직방향으로 길게 형성된 측정장을 효율적으로 측정하기 위해 1024×512픽셀의 해상도로 기포플룸을 측정하였다. 측정영역은 광섬유유동측정계를 이용하여 얻어진 중심선유속과 비교가 가능하도록 측정지점을 포함하였다. LED발광판은 일정한 전압을 공급하여 연속발광이 가능하도록 하였으며, 카메라의 조리개 수에 적합한 빛의 세기를 선정하여 실험동안 일정하게 유지하였다. 빛의 세기가 일정한 면광을 발생시키기 위해 회로판에 LED칩을 2.5cm간격 직각형태로 배치하였으며, LED 칩 패널의 전면 약 5cm에 불투명 흰색 아크릴판을 놓아 면광을 발생시켰다.

원통수조 곡면부에 의한 영상왜곡 현상을 제거하기 위해 측정 전 피사계심도 영역에 설치한 격자판의 왜곡보정을 수행하였다. 굴절현상에 의한 왜곡은 격자판을 이용하여 보정을 하는데 왜곡전 기준 격자판과 왜곡후 격자판의 각 격자간 공간정보의 상호관계를 정량적으로 계산하여 보정하는 방법이다. Fig. 7은 왜곡격자, 기준격자, 그리고 각 격자의 꼭지점 배열 번호이다. 기준격자의 네 꼭지점

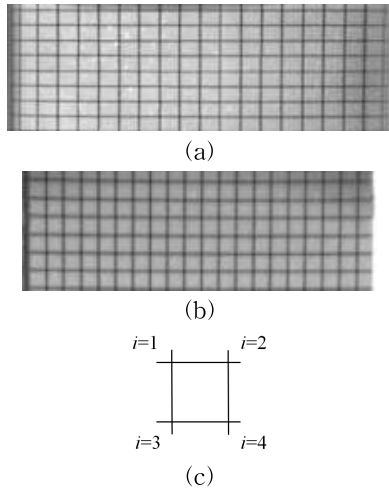


Fig. 7. Image Distortion: (a) Distorted Grid Image, (b) Reference Grid Image, (c) Grid Corner Numbering

과 이에 상응하는 왜곡격자의 꼭지점 간 상관관계를 Eqs. (5) and (6)으로 나타낼 수 있다. 여기서, x'_i 와 y'_i 은 왜곡된 영상격자의 x 및 y축의 공간정보이며, x_i 와 y_i 은 고정격자의 상응하는 지점의 공간정보이다. 아래첨자 i 는 격자의 네 꼭지점의 위치이며, Fig. 7(c)에 제시되어 있다. a_0, a_1, a_2, a_3 와 b_0, b_1, b_2, b_3 는 공간정보의 상호관계를 나타내는 변수로서 4개 꼭지점에 관한 4개 방정식으로부터 구하여 보정을 할 수 있다.

$$x'_i = a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i \quad (5)$$

$$y'_i = b_0 + b_1x_i + b_2y_i + b_3x_iy_i \quad (6)$$

기포영상측정법에 의해 획득한 화상은 그림자기법을 이용하였기 때문에 배경영역이 밝고 측정자인 기포가 어둡게 이미지에 나타난다. 영상분석기법시 사용되는 상관관계해석은 일반적으로 밝은색 영역의 변화를 인식하므로, 명도를 반전시켜 영상분석을 수행한다. 영상분석 및 상관관계를 적용하여 얻어진 순간유속장을 Fig. 8에 제시하였다. 순간유속장이기 때문에 기포 및 물-공기 경계면이 없거나 피사계 심도밖의 화상으로 인해 희미할 경우, 상관관계가 낮아 유속이 존재하지 않는 영역이 있다.

Fig. 9는 광섬유유동측정계와 기포영상유속측정법으로 측정된 기포플룸 유속의 결과를 비교한 결과이다. 광섬유유동측정계로 측정된 20개 지점의 유속에 해당하는 기포영상유속측정법의 유속을 계산하여 비교하였다. 광섬유유동측정법에 의해 구해진 유속값이 다소 크게 나타났지만

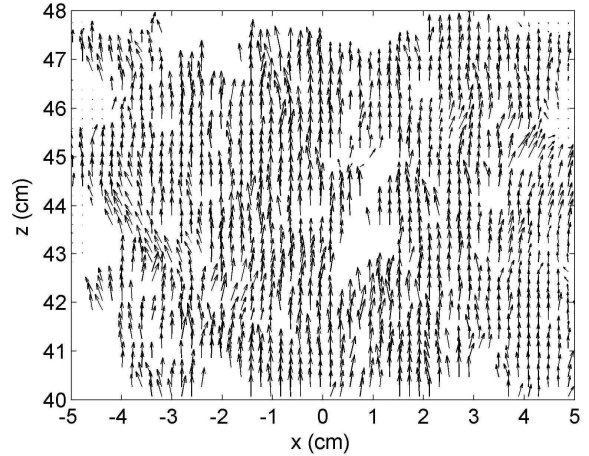


Fig. 8. Instantaneous Velocity Field of the Bubble Plume by the Bubble Image Velocimetry

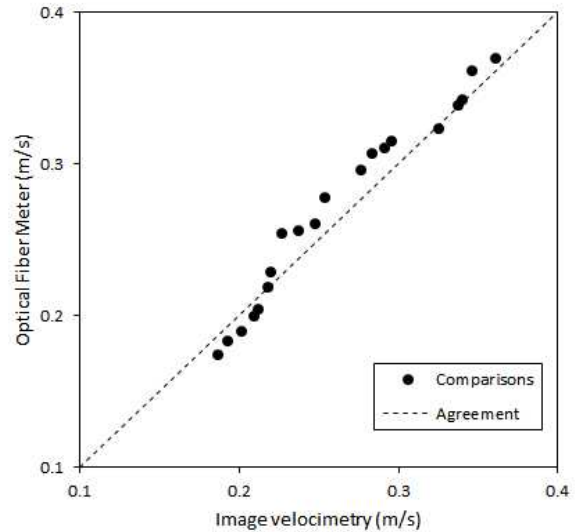


Fig. 9. Comparison of the Centerline Velocity

전체적으로 좋은 일치율을 보여준다. 여기에서 비교되는 유속은 각 기법으로 얻어진 순간유속장을 평균하여 얻어진 유속으로서 30개의 순간유속으로부터 계산하였다. 일반적으로 기포플룸은 방출 후 연직방향으로 상승하며 유속이 증가하는 양상을 보인다. 두 기법을 사용하여 구한 유속분포에서 모두 연직방향으로 상승하는 양상을 보이고 있으며, 각 위치의 유속값은 10% 내의 상대오차를 보인다. 일반적으로 난류성 기포흐름에서 10% 이내의 유속오차는 면측정과 점측정 같이 측정방식이 다른 기법을 고려하였을 때, 잘 일치하는 것으로 판단되며 두 기법이 기포를 포함한 다상흐름의 유속 측정에 적용할 수 있다고 판단된다. 본 연구에서 수행된 비교는 Jung and Ryu (2012)에서 소개된 2개 광섬유로 이루어진 시스템과 유사한 오

차범위를 보여주지만, 3개 광섬유를 적용한 본 연구의 광섬유측정계는 기존 방식에 비해 약 30%이상 향상된 측정 성공률을 보여준다. 전도식 측정방법에 비해 다수의 광섬유를 동일 시스템에 적용이 가능하다는 특성을 활용한다면 향후 더욱 향상된 측정기법을 제안할 수 있을 것으로 기대한다.

4. 도수흐름 수리실험

하천에서 발생하는 대표적인 기포다상흐름인 도수흐름을 기포영상유속측정법을 적용하여 측정하였다. 보(round-crested weir)를 자유유향한 흐름은 수평바닥인 수로에서 보 마루를 통과하며 사류가 되어 빠른 유속을 보이나 하류로 진행할수록 수로와의 마찰저항에 의해 흐름의 에너지는 소멸되어 그 결과 흐름이 진행됨에 따라 연속법칙에 따라 유속은 감소되고 수심은 증가하게 된다. 이때 도수표면에 기포를 내포한 흐름이 역순환흐름의 양상을 보이며 발생하는데, 그 기포흐름의 영역이 매우 두껍고 수면이 매우 불안정한 흐름특성을 보여준다. 특히 기포흐름 영역은 공극률이 매우 크기 때문에 밀도차 및 위상경계면의 굴절효과로 인해 기존 유속측정기법이나 장치를 이용한 측정이 매우 제한적이다. 본 연구에서는 순환수조에 보를 설치하고 자유유향류가 보 하류부에서 도수를 발생하는 수리모형실험을 수행하였다. 실험을 수행한 순환수조 제원은 길이 35m, 폭 0.9m, 깊이 1.2m이다. 보의 수리모형은 아크릴로 제작되었으며, 보 제원은 높이 0.236m, 폭 0.477m의 곡면형(round-crested) 단면형태이다. Fig. 10은 실험개요도와 도수흐름이 발생하는 장면을 보여주고 있다. 본 수리모형실험에서 도수발생을 위한 수리조건은

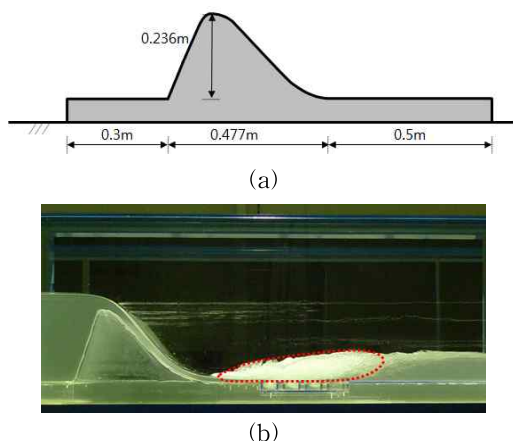


Fig. 10. Hydraulic Jump Experiment: (a) Weir Model, (b) Hydraulic Jump

공급유량이 $0.034\text{ m}^3/\text{s}$, 상류수심이 0.374m, 그리고 하류수심은 0.184m이었다.

본 실험에서는 도수흐름을 발생하기 위하여 자유유향류를 발생시키고, 수로 하류의 수문을 조절하여 측정영역이 보 하류 끝단에서 안정도수(steady jump)가 발생하도록 하였다. Fig. 10(b)에 제시된 사진에서 점선 내부 영역이 기포흐름 영역이며, 역순환방향으로 회전흐름을 갖기 때문에 롤러(roller)라고 칭한다. 롤러의 유속측정은 에너지소산 및 난류발생과 관련하여 중요한 역할을 하기 때문에 이러한 유속정보를 제공할 수 있는 본 기법은 중요한 의미를 갖는다. 도수흐름의 롤러 측정을 위한 기포영상유속측정법의 실험장면을 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11(a)는 보 모형을 기준으로 측정 카메라 및 상대편에 위치한 LED 면광을 보여주고 있으며, Fig. 11(b)는 카메라 및 동기화 시스템이다.

Fig. 12는 도수흐름의 기포흐름부분을 기포영상유속측정법으로 측정한 결과를 제시하고 있다. Fig. 12(a)에 제시된 롤러 이미지는 그림자기법에 의해 기포영역이 카메라 반대편에 위치한 광원에 의해 가시화된 화상이다. 일반적인 기포영역은 영상광학기법 적용시 빛이 산란되어 구분을 할 수 없어 그냥 흰색에 가까운 밝은 색으로 영역만 확인이 가능하였다(Fig. 10(b)). 본 연구에서는 그림자기법을 적용하여 기포 및 물-공기 경계면의 그림자를 가시화하였고 경계면 추적을 통해 유속 분석이 가능하도록 하였다. Fig. 12(a)에 제시된 도수의 그림자화상은 상관관계분석을 위한 화상 짝(pair) 중 첫 번째에 해당하는 화상

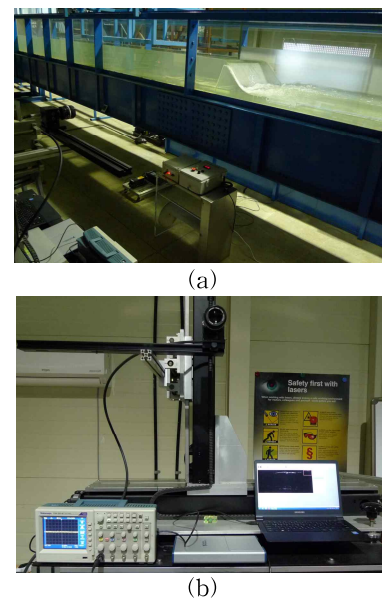


Fig. 11. Bubble Image Velocimetry for Hydraulic Jump Measurements: (a) Weir Model & LED Backlight, (b) Camera & Synchronization System

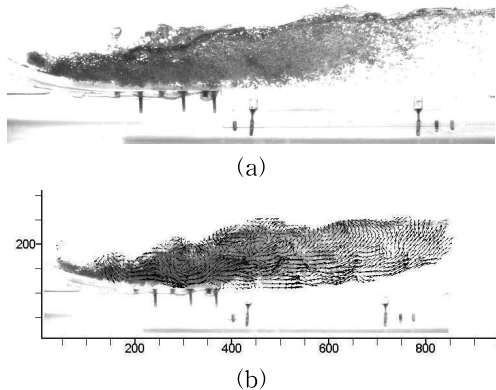


Fig. 12. Velocity Field Measurement of the Hydraulic Jump: (a) Shadowgraphy Image, (b) Instantaneous Velocity Field

으로서 0.005 ms 이후의 두 번째 화상과 함께 유속분석에 사용되었다. 두 화상의 영상분석 및 상관관계분석을 통해 얻어진 순간유속장이 Fig. 12(b)에 제시되었다. 도수흐름은 난류도가 큰 흐름특성을 갖는 흐름으로서, 본 연구에서 측정된 순간유속장은 난류흐름의 형태를 보여준다. Fig. 12(b)의 배경은 12(a)에 제시된 그림자화상으로서 기포영역과 유속장 영역이 상응하여 잘 중첩되고 있다. 도수흐름의 물리는 역순환흐름 형태를 나타낸다고 알려져 있으나, 본 순간유속장에서 보이는 순간흐름은 임의성(randomness)이 큰 거동형태가 나타났으며, 작고 많은 와류흐름을 포함하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 흐름 하부에서 발생하는 단상흐름부와 접한 영역에서는 하류방향으로 진행되는 수평흐름이 주된 양상을 보여준다. 반면, 수면부에 가까운 상부영역에서는 유속벡터의 수평성분이 상류를 향하고 있는 경향을 갖는다. 이와 같은 유속분포는 물리의 역순환방향 회전흐름과 유사한 형태이다. 본 결과로서, 본 연구에서 제시된 기법의 적용성을 확인할 수 있었으며, 기포 크기 및 공극률과 함께 기포흐름의 동적거동해석에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구는 유체 내 기포를 내포하고 있는 기포 다상흐름을 측정하기 위한 방법으로 광섬유유동측정계와 기포영상측정법을 소개하였다. 광섬유유동측정계에서는 매우 얇은 광섬유소재 특성을 이용하여 3개 광섬유로 이루어진 측정계를 소개하였다. 본 기법은 기존 신호분석 혹은 2개 probe시스템의 낮은 측정률을 개선하였으며 3개 이상의 다발성 광섬유시스템의 응용 가능성을 제시하였다. 다발

성 광섬유시스템으로 측정한 기포플룸 중심선 유속을 기포영상유속측정법을 적용한 실험결과와 비교하였으며, 상호간 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 기포영상유속측정법의 중요한 원리인 광학적 피사계 심도(depth of field)의 산정기법을 제시하여 오차분석을 통한 신뢰도 검토가 가능하게 하였다. 소개된 기법의 수리분야 측정 적용성을 검토하기 위해 대표적 하천 다상흐름인 도수흐름을 측정하였다. 도수흐름의 기포흐름 영역인 물리를 대상으로 하였으며, 역순환방향의 회전흐름 특성을 나타낸 순간유속장을 제시하였다. 물리는 도수흐름 발달과정에서 매우 중요한 영역으로서 에너지소산 및 난류분석에 반드시 필요한 유속정보를 본 기법을 통해 제시할 수 있었다. 광섬유유동측정계는 기존의 접촉식 방식에 비해 측정센서 직경이 축소되어 측정가능한 기포 크기의 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대하며, 기포영상유속측정법의 경우 2차원 측정기법이나 비접촉식 기법으로서 교란 및 기포크기의 영향이 미미하며 유속장의 결과를 제시할 수 있다. 특히, 기포영상측정법은 입체적(stereo type) 기법의 적용 가능성이 있으므로 3차원 측정기법으로의 연구개발이 필요하다.

감사의 글

본 논문의 제1저자는 “한국건설기술원KICT2014-0217”의 지원을 받아 연구를 수행하였으며 제2저자는 “정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2012R1A1A1011884)”을 받아 연구를 수행하였습니다.

References

- Chang, K.A., Lim, H.J., and Su, C.B. (2002). “A fibre optic fresnel ratio meter for measurements of solute concentration and refractive index change in fluids.” *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, pp. 1962-1965.
- 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*, Vol. 74, No. 7, pp. 3559-3565.
- Chanson, H. (1997). *Air Bubble Entrainment in Free-surface Turbulent Shear Flows*, Academic Press, London.
- Govender, G.P., Mocke, G.P., and Alport, M.J. (2002).

- “Videoimaged surf zone wave and roller structures and flow fields.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, pp. 3072-3092.
- Jansen, P.C.M. (1986). “Laboratory observations of the kinematics in the aerated region of breaking waves.” *Coastal Engineering*, Vol. 9, pp. 453-477.
- Jung, K.H., and Ryu, Y.U. (2012). “Multi-phase flow velocity measurement technique using shadow graphic images.” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 26, No. 3, pp. 61-65.
- Ryu, Y.U., Lee, J.I., and Kim, Y.T. (2007). “Behavior of non-buoyant round jet under waves.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 596-605.

paper number : 15-013

Received : 13 February 2015

Revised : 28 April 2015 / 14 May 2015

Accepted : 14 May 2015