"수리모형실험에서의 다상유동 측정"

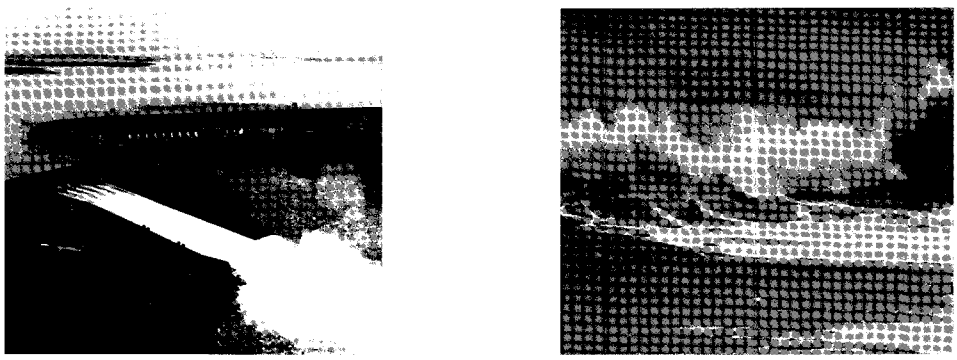
- Measurements of Multiphase flows in Laboratories -

류 용 욱 |
한국건설기술연구원
수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 박사후연구원
yuryu@kict.re.kr

1. 다상흐름과 수리실험

수공학에 있어서 유체흐름은 중요한 연구대상이며 흐름이 존재하는 여러 분야에서 다양한 유동형태를 보여주고 있다. 다양한 유동형태 중 물과 공기가 함께 흐름 안에 존재하는 다상유동(multiphase flow)은 물리적 성질이 다른 두 가지의 위상 상태가 함께 유동을 형성한다. 다상유동은 큰 운동량이나 자유수면으로의 유체 및 다른 위상물질의 관입, 그리고 급격한 수로형상이나 큰 유속경사에 의해 기포를 연행하거나 물방울을 발생시키며 다상(multiphase)상태가 되는데, 흐름 내 다른 두 위상이 함께 존재함과 동시에, 기포의 3차원적인 거동특성, 그에 따른 주변 유동의 난류도가 증가되어 거동해석에 있어서 많은 어려움을 초래한다. 이와 같이 다상유동은 다양하고 복잡한 원인으로 인해 발생이 되며, 발생 이후엔 두 위상차에 따른 임의적(random) 거동특성 및 가변적인 위상경계면의 형상으로 인해 그 분석에 있어 여러 물리적 특성을 고려해야 한다. 언급한 바와 같이 복잡한 특성으로 인해 다상유동은 아직 많은 연구가 필요한 대상으로서 수리분야에서 관심이 높아가는 유동형태이다.

다상흐름은 수리학의 응용분야인 하천 및 해안공학 등 다양한 분야에서 발생하는데 큰 운동량 및 흐름 내 위상 경계면 및 강한 난류도는 수리구조물의 안정성 및 부유사를 유발하여 하상 변화에 큰 영향



(a) (b)

그림 1. 다양한 다상흐름: (a) Hyraulic jump, (b) breaking wave

을 준다. 하천공학에서 일반적인 다상흐름의 예로서 하상저면의 급격한 변화에 따른 수위차나 흐름의 불안정으로 인한 기포연행 및 보와 같은 하천구조물 하류에서의 다상흐름이 하천에서 발생하는 유동형태이다. 해안공학에서는 쇄파를 다상흐름의 대표적인 예로 들 수 있는데, 쇄파는 운동량과 기포의 압축성이 복합적으로 해안구조물의 안정성에 영향을 주는 중요한 외적 요인으로 작용하고, 난류도가 강한 흐름은 구조물 주위 세굴 및 해안의 유사이동에 영향을 준다. 이와 같은 수리학에 관련한 다상흐름의 연구는 수치모의와 수리실험분야에서 다양하게 수행되어지고 있다.

다상흐름에 관한 수리실험연구는 일반적으로 물과 기포의 물리량을 측정하여 흐름을 분석한다. 다상흐름은 액체와 기체가 같은 영역에서 서로 혼합되어 존재하나, 각기 다른 물리적인 특성으로 인해 두 위상의 물리량을 하나의 방법으로 동시에 측정하기는 쉽지 않다. 따라서, 유체실험은 일반적으로 액체와 기체의 중요한 물리량을 각각 측정하게 되는데 수리학의 응용분야에서는 물의 경우 유속과 압력이 주로 측정되고, 기체의 경우 기포공극률 및 기포속도가 측정된다. 유속 및 압력은 이미 오랫시간을 통해 검증된 다양한 정도 높은 측정계 및 기법을 이용하여 측정되어 오고 있으며, 기포의 공극률 및 속도 측정은 기존의 기법을 이용한 측정과 함께 새로운 기법이 소개되어 오고 있다.

2. 다상흐름의 기포공극률 측정

다상흐름의 수리실험에서 가장 기본적으로 측정되는 인자가 기포공극률이다. 기포공극률이란 다상흐름 내 기포가 차지하는 비율을 나타내는 것으로 다상흐름의 중요한 특성이다. 기포공극률은 한 지점에서 측정된 신호시계열을 이용하여 그 값을 결정하는데, 일정한 시간에 대한 공기가 차지하는 시간의 비로 나타내고 있다. 여기서, 기포공극률 계산을 위한 전체 기간은 흐름의 특성을 고려하여 연구자가 결정한다. 기포공극률은 접촉식 기포측정계를 이용하여 측정하는데, 측정계에 접촉하는 물질의 위상에 따라 시계열 값이 변하는 저항식 기포측정계가 주로 많이 사용된다. 저항식 기포측정계는 측정되는 첨단에 접촉하는 물질에 따라 일정한 전압 값을 갖게 되는데 그에 따라 그 위상을 알 수 있다. 대부분의 기포공극률은 저항식 기포측정계가 쓰이고 있는데, 이는 물질의 위상에 따른 전압의 변화는 다양한 소재에서 손쉽게 관측이 되므로 측정대상의 흐름에 영향을 주지 않을 정도의 크기로 제작되어 사용되고 있다. 최근에는, 다양한 분야에서 사용되고 있는 광섬유가 사용되기도 하는데, 광섬유를 따라 전달되는 레이저의 신호가 광섬유의 절단면에서 접촉하는 물질에 따라 변하는 파장 및 진폭에 차이를 이용하여 물질의 위상을 측정한다. 광섬유의 경우, 저항식 기포측정계에 비해 시계열신호가 발생하는 원리는 다르나 물질에 따라 변하는 신호값을 이용하는 방식은 유사하다. 다상흐름의 기포공극률 측정에 사용하는 광섬유의 장점은 머리카락 정도의 가는 굵기로 인해 접촉하는 흐름을 교란시키는 정도가 상대적으로 크지 않다. 저항식 기포측정계의 경우, 흐름과 접촉하는 부분만을 드러내기 위하여 주위를 감싸는 강성의 절연체가 부착이 되기 때문에 측정계의 직경이 커지게 된다. 반면, 광섬유의 경우, 절단면에서만 물질에 대해 반응하기 때문에 광섬유가 드러나 있는 부분을 상대적으로 길게 유지할 수 있어 교란시키는 정도를 크게 낮출 수 있다.

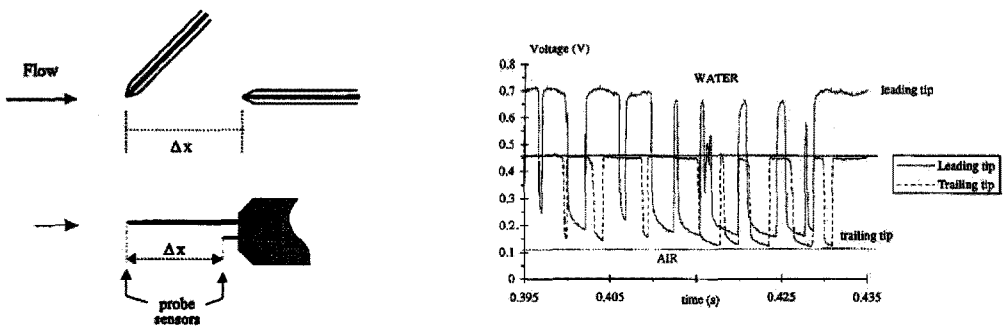
3. 다상흐름 내 유속 및 기포속도 측정

수리학과 관련한 다상흐름의 실험연구에 있어서 기포공극율과 함께 주로 측정되는 인자는 유체의 속도이다. 수리학과 관련한 다상흐름에 있어서 측정되는 유체의 속도는 액체의 입자속도과 기체로 되어있는 기포속도를 의미한다. 대부분의 접촉식

유속계는 액체의 물질특성을 고려하여 유속을 측정하는 것으로 다른 위상물질에 대한 적용은 불가능하다. 광학적 측정기법의 경우, 위상차에 따른 빛 투과율의 차이에 의해 어려움을 갖는다.

최근, 기포속도를 측정하는데 있어 주로 사용되고 있는 기법은 한 쌍의 저항식 기포측정계 시스템이다. 두 개의 기포측정계가 미소한 거리를 두고 한 쌍으로 설치된 본 측정 시스템은 기포경계면이 각 측정계에 도달하는 시간차와 두 측정계의 거리차를 이용하여 기포속도를 측정하는 기법으로, 두 개의 동기화된 시계열을 분석하여 기포속도를 측정한다. 그림 2는 기포속도 측정을 위한 두 개의 측정계의 묘사도와 함께 각각의 측정계의 시계열값이다. 저항식 기포측정계는 사용에 있어 용이한 장점이 있으나, 상대적으로 큰 측정계 크기를 단점으로 말할 수 있다. 실험대상인 기포는 그 크기가 다양한 편인데, 큰 기포는 형상이 쉽게 변하고 그 변화의 정도가 두 개 측정계의 거리차보다 클 수 있으며, 작은 기포의 경우, 각 측정계를 모두 통과하지 않을 확률이 커지는 단점을 내재하고 있다. 또한, 그 시스템의 특성상 1차원/1방향 측정만이 가능하다. 저항식 기포측정계와 함께 광학적 측정법 또한 다상흐름 측정에 사용되고 있는데, 최근 널리 사용되고 있는 입자영상유속측정기법(particle image velocimetry, PIV)이다. 기포속도 측정에 사용하는 PIV의 경우, 광원으로 사용하는 레이저의 세기를 작게 하여 위상경계면에 의한 빛의 산란효과를 줄인다. 이와 같이 PIV를 이용한 기포속도의 측정은 흐름 내 기포의 흐름양상에 따라 측정의 난이도가 결정된다. 흐름에서 기포가 차지하는 비율이 크지 않을 경우, 즉 기포공극률이 작을 경우는, 레이저를 이용한 PIV측정은 상대적으로 높은 정도를 보인다. 기포플룸(air bubble plume)은 기포의 초기 운동량이 크지 않은 대표적인 다상흐름으로 기포공극률이 크지 않다. 이와 같은 경우, 주위흐름의 작은 운동량으로 인해 기포의 3차원적인 운동이 활발해지고 결과적으로 기포속도와 주변유속은 큰 차이를 보인다. 레이저를 이용한 PIV는 기포공극률이 작은 기포플룸의 측정에서 기포속도와 주변유속의 두 위상을 동시에 측정하게 하는 장점을 가지고 있다. 하지만, 기포공극률이 큰 경우 레이저를 이용한 PIV측정에 있어 위상경계면에 의한 색포화(saturation)를 발생하며 영상을 이용한 광학적 측정방법을 불가능하게 한다. 특히, 전술한 바와 같이 수리학에서 발생하는 일반적인 다상흐름은 운동량이 크고 기포공극률이 크기 때문에, 레이저를 이용한 PIV는 비접촉식기법과 동시측정이라는 장점을 가지고 있음에서 불구하고 수리학적 흐름의 적용성에 있어 문제점을 가지고 있다.

현재 많은 연구자들이 다상흐름을 측정하기 위해 다양한 기법을 개발하고 있는데, 이 중 영상기법을 응용한 기법과 광섬유를 이용한 기포측정계를 소개하고자 한다. 먼저, 기포 그림자와 PIV에서 사용되는 영상의 상호상관관계를 이용하여 기포속도를 측

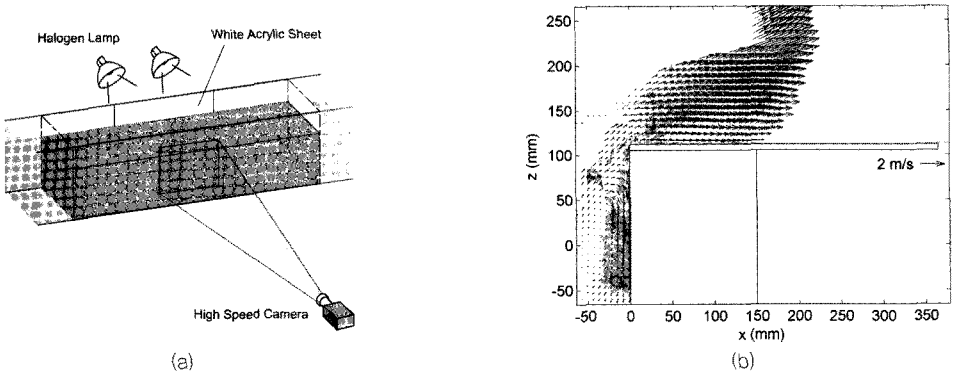


(a) (b)

그림 2. 저항식 기포측정계의 (a)개요도 및 (b)측정시계열. (Chanson, 2002)

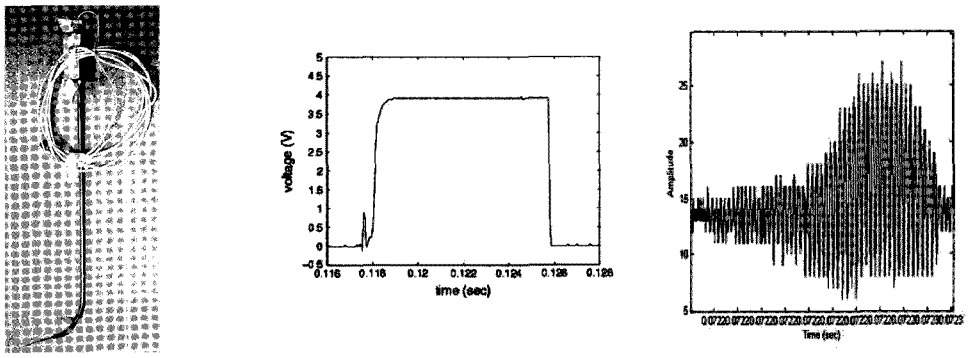
정하는 기포영상유속계 기법이다. 기포는 전면에서 빛에 반사되면 산란을 시키기 때문에 기포를 가시화하기 위해서는 그림자를 이용해야 한다. 가시화를 위한 광원으로 일반적인 PIV에 쓰이는 레이저 대신 할로겐등과 백색아크릴판을 이용하여 어느 영역 내 일정한 강도의 밝기를 유지할 수 있는 면광을 발생시킨다. 이렇게 만들어진 면광은 녹화카메라의 반대편에서 기포를 비추어 그림자를 발생시킨다. 그림??은 그림자기법을 위한 면광과 카메라의 설치 묘사도이다. CCD카메라에 녹화된 영상이 원근과 상관없이 모두 선명하게 측정될 경우, 피사체의 위치적인 거리를 결정할 수 없기 때문에, 카메라의 조리개를 조절하여 초점심도(depth of field)를 최소로 할 수 있게 설치하고 원하는 영역만을 선명하게 한다. 영상의 상관관계 분석에 있어 선명하게 녹화된 피사체는 흐릿한 다른 물체와 달리 상관함수에 큰 크기를 보이며 선명한 피사체의 위치적 상관관계를 계산할 수 있게 한다. 이와 같은 방법으로 초점심도가 맞추어진 영역 내 기포의 위치적 이동정보를 알 수 있다. 즉, 일반적인 PIV는 레이저를 이용하여 미세 입자를 가시화하여 유속을 측정하였다면, 기포영상유속계는 그림자기법과 초점심도를 이용하여 기포를 가시화하여 기포를 측정하였다. 기포영상유속계의 장점은 고가의 레이저를 사용하지 않고 쉽게 구할 수 있는 할로겐을 광원으로 사용한다는 점과 수리학 분야에서 자주 관측되는 기포공극률과 운동량이 큰 흐름의 경우에 적용성이 좋다는 점이다. 다만, 기포영상유속계는 레이저와 같은 강한 광원을 이용하지 않기 때문에 물 입자의 유속은 측정이 불가능하기 때문에 다상흐름을 모두 측정하기 위해서는 다른 유속측정기법을 이용하여야 한다. 하지만, 기포크기에 의한 기포의 Froude수가 10을 넘기는 경우는 기포거동과 주변유속의 상대적인 차이가 미미하기 때문에 기포속도로부터 주변유속을 측정할 수 있다. 그림 3은 단면조파수조 내 방파제의 월파 유속을 측정하기 위한 기포영상유속계 개요도와 월파의 속도장 결과를 나타낸 것이다.

다상흐름을 측정하는 다른 기법은 광섬유(optical fiber)를 이용한 측정기법이다. 광섬유의 절단면에서 나오는 신호가 접하는 물질에 의해 변화하는 원리를 응용하여 물과 공기의 위상경계면으로부터 기포공극률과 기포속도를 측정하는 기법이다. 광섬유는 절단면에 다른 위상의 물질이 접근해 오면 신호가 진동을 하며 변화하는데 이때 그 접근속도에 따라 주파수가 변화한다. 신호시계열의 측정률을 O(10 kHz)이하로 맞출 경우 접촉 물질의 위상을 파악할 수 있게 하여 기포공극률 등을 측정할 수 있으며, O(1 MHz)이상으로 맞출 경우 주파수분석이 가능하게 되어 Spectrum분석을 통해 접근하는 다른 위상물질의 접근속도의 측정을 가능하게 한다. 광섬유에서 나오는 신호가 물질에 반사되어 변화하는 시계열을 분석하여 결과를 얻기 때문에 광섬유반사계(fiber optic reflectometer)라고 불리는 본 기법은 접촉식이긴 하나 높은 측정률을



(a) (b)

그림 3. 기포영상유속계의 (a)개요도 및 (b)월파속도장



(a) (b) (c)

그림 4. 광섬유반사계: (a) 측정 probe; (b) O(10 kHz) 측정시계열; (c) O(1 MHz) 측정시계열

이용하여 기포공극률과 기포속도를 동시에 측정할 수 있다는 점과 경제성을 장점으로 가지고 있는 기법이다. 그림 4는 광섬유와 광섬유반사계 장치, 그리고 측정된 신호시계열을 나타내고 있다. 광섬유반사계는 반응하는 신호가 접근하는 물질의 위상에 따라 고유의 크기를 가지고 있기 때문에 물과 공기의 다상흐름 뿐만 아니라 물과 고체입자의 다상흐름 또한 그 측정을 가능하게 할 수 있다고 판단된다. 이는 하천 및 해안공학에서 중요한 연구분야인 유사이동에 있어서 유속 및 부유한 모래 및 퇴적물의 속도를 측정할 수 있게 하여 유사이동 분석에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 맺음말

다상흐름은 수리학의 많은 응용분야에서 중요하게 다루어지고 있는 흐름형태로서 많은 연구자들에 의해 수치 및 수리모형실험을 통해 연구되어 오고 있다. 현재 다상흐름에 관한 실험연구를 위해 다양한 측정기법들이 사용되고 또한 새로운 기법들이 소개되어지고 있으나, 각 기법의 장점과 단점이 상이하여 이를 측정에 적용하기 위해서는 그 적용성을 충분히 검토하여야 한다.

기포공극률과 기포속도 측정을 위한 기법으로 소개된 기포영상측정계와 광섬유반사계는 다상흐름의 측정을 위한 편리한 사용성과 적용의 다양성을 장점으로 가지고 있다. 기포영상측정계는 최근에 가장 많이 쓰이고 있는 영상기법을 응용한 기법으로 일반적 광원을 사용하여 경제성과 안전성에 있어 장점을 가지고 있으며, 광섬유반사계는 기포공극률과 기포속도의 측정을 동시에 가능하게 하고 그 크기가 작아 접촉식이긴 하나 흐름의 교란정도를 최소화할 수 있다.

수리학적 다상흐름은 그 형태와 거동특성이 다양하여 실험적인 연구를 위해서는 그 흐름을 예상하고 접근하여야 하고, 연구자는 이를 바탕으로 적합한 측정기법을 선택한다. 소개된 두 가지 기법은 기존의 다른 기법과 함께 다상흐름의 실험적 연구에 더 넓은 선택의 기회를 줄 것이며 이를 통해 다상흐름을 보다 쉽고 정확하게 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Chanson, H. (2002). Air-Water Flow Measurements with Intrusive, Phase-Detection Probes: Can We Improve Their Interpretation. J of Hydraulic Engineering, 128, pp. 252.

2. Chang, K.-A., Lim, H.J., and Su, C.B. (2003) Fiber optic reflectometer for velocity and fraction ratio measurements in multiphase flows. Rev. Sci. Instrum., 74, pp. 3559.
3. 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, 16, pp. 1945.
4. Vazquez, A., Sanchez, R.M., Salinas-Rodr i ′ guez, E., Soria, A., and Manasseh, R. (2005). A look at three measurement techniques for bubble size determination. Experimental Thermal and Fluid Science, 30, pp. 49.