광섬유 탐침과 고속가시화 기법을 이용한 원형탱크 내부의 기포직경 및 상승속도 측정

김규락*,** · 최성환* · 김윤기* · 김정천**†

Measurement of Bubble Diameter and Rising Velocity in a Cylindrical Tank using an Optical Fiber Probe and a High Speed Visualization Technique

Gyurak Kim, Seong Whan Choi, Yoon Kee Kim and Kyung Chun Kim

Abstract. An optical fiber probe system for measuring the local void fraction in the air-water two-phase flow was developed with a 1550 nm light source. Air was injected through a nozzle placed in the center of the bottom wall of a water-filled cylindrical tank. The optical fiber probe having a diameter of 125 μm was sufficiently thin to resolve the air-water interface of the bubbly flows. To verify the performance of the optical fiber probe, the synchronized high speed visualization study using a high speed camera was carried out. Comparison between the optical signals and the instantaneous bubble diffraction images confirms that the optical fiber probe is very accurate to measure the void fraction in two-phase flows. The estimated bubble diameter and the rising velocity by the optical fiber probe have 1% and 5% of accuracy, respectively.

Key Words: 광섬유 탐침(optical fiber probe), 기포분율(void fraction), 이상유동(two-phase flow), 고속가시화(high speed visualization)

1. 서 론

기체-액체 이상유동은 산업현장에서 매우 빈번하게 등장하는 유동이다. 최근, 기포나 액적의 크기나 속도를 측정해야 하는 문제는 스프레이, 자동차 엔진, 화학 공정 및 원자력발전소 등 여러 연구분야에서 중요하게 대두되고 있다. 특히, 기포분율(void fraction)의 측정은 기체와 액체가 공존하는 이상유동에 대한 연구에 있어 매우 중요한 변수중 하나이다. 기포분율을 측정하는 방법은 접촉식 기법 및 비접촉식 기법으로 구분할 수 있다. 접촉식 측정기법은 대표적으로 액체상과 기체상 사이의 전기저항 차이를 이용한 임피던스 프로브(impedance probe)⁽¹⁾와 서로 다른 상 사이의 굴절률의 차이를 이용한 광섬유 탐침(Optical fiber probe)를 이

용하는 기법으로 분류된다. 비접촉식 기법으로는 초음파 도플러 측정기법(ultrasonic Doppler method)⁽²⁾와 중성자 방사선 영상기법(neutron radio-graphy)⁽³⁾이 있다.

그 중 광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정기법은 직경이 작은 기포에 대해 높은 시간적/공간적 해상도를 가지는 측정기법로서 고정밀 유동측정에 적합하다고 할 수 있다. 현재까지 기포유동에서 광섬유 탐침의 정확성을 검증하기 위하여 고속카메라를 이용한 선행 연구로는 Julia *et al.*⁽⁴⁾, Rojas *et al.*⁽⁵⁾의 연구가 있다. Julia *et al.*⁽⁴⁾의 연구에서는 광섬유 탐침과 카메라를 직접적으로 동기화하지 않고 추가적인 광 측정장치를 트리거로 사용함으로써 측정신호간의 임의의 시간지연이 발생하는 한계가 있었다. Rojas *et al.*⁽⁵⁾의 논문에서는 Photonetic사의 광섬유 탐침을 이용하여 고속카메라를 외부 트리거에 의해 직접적으로 동기화시켜 기포분율을 측정하여 비교하였으나 버블의 기체/액체 경계면에서의 측정신호와 순간이미지의 정교한 타이밍에 대한 명확한 고찰이 결여되어 있다. Serdula and Loewen⁽⁶⁾

†부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

*부산대학교 대학원 기계공학과

**LG 전자(주)

은 신호의 상승시간과 기포의 속도에 대한 상관관계를 이용하여 단일 탐침에 의한 기포의 속도 및 크기를 예측하였고, 동 시간대의 화상 이미지와 비교하였다. Xue *et al.*⁽⁷⁾은 4-point 프로우브를 이용하여 기포의 방향까지 측정이 가능한 알고리즘을 구현하였으나, 이 방법은 실험 수행 전 프로우브 신호와 CCD 카메라와의 보정을 거쳐야 하는 번거로움이 있었다. Saito *et al.*⁽⁸⁾은 펄스 레이저와 미소한 홈이 가공된 광섬유 탐침을 이용하여 직경이 1 mm 보다 작은 액적의 크기 및 속도를 측정하는데 성공하였다.

Kim *et al.*⁽⁹⁾은 원형 탱크 내에서 기포로 구동되는 액체유동에 대한 동적 구조를 연구하였는데, 유동의 구조가 기포의 기하학적 및 운동학적 변수와 밀접한 관계가 있음을 보였다. 이 연구에서는 유동가시화에 의해 얻어진 기포의 영상을 바탕으로 기포의 평균 직경과 상승 속도를 구하였는데, 불규칙한 기포의 영상으로 인해 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 원형 탱크 내부에서 분출되는 공기 기포에 대해 초고속카메라를 이용한 고속가시화 기술과 광섬유 탐침을 이용한 기포의 크기 및 기포분율 측정의 정확도를 검증하고, 두 개의 광섬유 탐침을 이용하여 기포의 상승속도를 정밀하게 측정하고자 한다.

2. 광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정 원리

광섬유 탐침을 이용한 기포 유동의 기포분율 측정 원리는 광의 굴절율이 다른 물질 사이에서 경계면을 광이 통과할 때에 생기는 프레넬 반사(Fresnel reflection)를 응용한 것이다. 광섬유 탐침의 끝부분을 광섬유에 정확하게 수직으로 절단하였을 때, 탐침의 절단면에서의 반사계수는 각 매질의 굴절률에 의해 달라진다. 굴절율 n_1 과 n_2 를 가지는 매질 경계면에서의 수직방향으로의 반사율 R 은 식 (1)와 같이 나타내어 진다.

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

만약 광섬유의 굴절율이 약 1.46이면, 경계면에서의 반사율은 다음과 같다.

$$R_{g-a} = 3.5\% (\text{유리-공기})$$

$$R_{g-w} = 0.2\% (\text{유리-물})$$

$$R_{w-a} = 2.0\% (\text{물-공기})$$

따라서 광섬유 탐침의 끝이 물에 닿아 있을 때 보다 공기에 닿아 있을 때가 약 17.5배 높은 반사율을 가지므로 탐침에 닿아있는 매질이 바뀔 때 마다 반사되는 빛의 양이 달라지며, 이로 인해 광검출기(photodetector)에서 검출되는 전압레벨이 달라지게 된다. 이 신호의 차이를 이용하여 기포분율을 측정할 수 있다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 직경 0.3 m의 원형 실린더 탱크에서 2개의 광섬유 탐침을 이용한 기포의 크기 및 상승속도 측정을 위한 실험장치의 개략도 이다. 원형 탱크는 투명한 아크릴 관이며, 영상의 왜곡을 방지하기 위해 외부에 아크릴 관으로 제작한 사각형 탱크 내부에 설치되어 있고, 사이에는 물로 채워져 있다. 작동 유체로는 물을 사용 하였으며, 기포의 형성은 압축공기를 사용하였다. 기포를 분출하기 전의 자유 표면 높이는 바닥으로부터 0.15 m 이다. 공기 분사 노즐은 탱크 바닥의 중앙에 배치하였으며, 노즐의 직경 D_N 은 5 mm 이다. 노즐의 출구는 바닥으로부터 35 mm 올라가 있다. 압축 공기는 조절 밸브 및 유량계를 통하여 노즐로 공급이 되고 공

(a) Schematic diagram of experimental setup

(b) Photograph of experimental setup

Fig. 1. Schematic diagram and photograph of experimental apparatus.

Fig. 2. Timing chart of synchronization between the high speed camera and the optical fiber probe.

기의 유량은 정확하게 유량계에 의해 제어된다. 압축 공기의 유량은 1 L/min, 3 L/min, 5 L/min로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정에 있어 가장 중요한 고려사항은 높은 시간적/공간적 해상도 및 출력신호의 안정성이라 할 수 있다. 이를 효과적으로 구현하기 위해 통신용으로 많이 사용되는 Thorlabs사의 적외선 연속 광원 (1550 nm, S1FC1550)과 Photodiode 광검출기 (1.2GHz DET01CFC/M)를 이용하였다. 광원에서 출발한 광은 Beam coupler (6015-3-FC, Thorlabs)를 통해 광섬유 탐침에 도달하고 절단면에서 반사된 광은 Beam coupler를 거쳐 Photodiode에서 전압의 형태로 변환되어 실시간으로 컴퓨터에 저장된다. 모든 광 경로는 5 μ m의 코어직경을 가지는 싱글모드 광케이블(P3-SMF28-FC-5)을 이용하여 연결하였다.

본 실험에서 사용한 광섬유는 외경이 900 μ m인 Single core patch cable로서 코어의 직경은 10 μ m이다. 사람의 손으로 10 μ m 직경의 코어만 남기고 외부를 제거하는 것은 거의 불가능하므로 광섬유 탐침 제작시 125 μ m 직경을 가지는 클래딩 외부까지 Fiber optic stripping tool을 이용하여 제거한다. 그 다음 유리보다 강도가 높은 High precision fiber cleaver로 코어 부분을 절단하면 광섬유 탐침이 완성된다.

본 연구에서는 고속카메라와 2개의 광섬유 탐침을 사용하였으며, 고속카메라 내의 트리거를 사용하여 고속카메라와 광섬유 탐침을 이용한 기포분율 측정을 높은 해상도로 동기화시켰다. 동기화된 신호의 높은 시간 분해능을 얻기 위해 고성능의 초고속카메라의 확보가 필수적이며 본 연구에서는 Photron사의 SA1.1 고속카메라를 이용하여 최대 5000 frame/s의 시간 분해능을 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과는 Julia *et al.*⁽⁴⁾의 연구에서 사용되었던 고속카메라보다 5배 정도 빠른 데이터 수집 속도를 보였다. Fig. 2에는 광섬유 탐침과 고속카메라의 동기에 사용한 타이밍 차트를 보여주고

있다. 고속카메라를 구동하는 프로그램 상에서 사진촬영 시작과 동시에 Fiber optic probe 시스템으로 5V TTL 트리거 신호를 보낼 수 있으며, 이 후는 각각의 하드웨어 타이밍에 맞추어 각 신호를 수집하였다. 본 연구에서 사용된 DAQ 보드는 National Instrument사의 9401 제품으로서 2GHz의 대역폭을 가지는 것으로 버블 유동을 계측하기에 충분한 사양으로 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광섬유 탐침의 정확도 검증

Fig. 3은 동기화된 고속카메라로부터 얻은 이미지와 시간에 따른 출력신호를 그래프로 나타낸 것이다. 정확도 검증을 위해 사용된 고속카메라의 해상도는 1,024 픽셀 곱하기 1,280 픽셀이고, 관찰창의 크기가 가로 80 mm, 세로 100 mm 이므로 0.078 mm의 공간 분해능을 가지고 있다. 기포의 평균 크기가 5 mm 정도임을 감안할 때, 공간 오차의 범위는 0.8% 이므로 광섬

(a) Variation of output voltage as time elapsed

(b) Instantaneous bubble images at different time

Fig. 3. Output signal according to the location of rising bubble.

유 탐침의 정확도 검증에 충분한 신뢰성을 확보하고 있다. Fig. 3(a)에서 $125\ \mu\text{m}$ 직경을 가지는 광섬유 탐침의 끝부분은 주사기 바늘의 내부를 관통하여 바늘 끝에서 약 $11.9\ \text{mm}$ 아랫 쪽에 위치해 있으며, 이는 Fig. 3(b)에서 나타난 바와 같이 탐침이 버블의 위쪽 경계면과 닿는 찰나인 0.045 초일 때의 위치와 정확하게 일치함을 알 수 있다. 0.045 초 전후 $1\ \text{ms}$ 의 이미지를 이용하여 계산한 기포의 속도는 약 $0.35\ \text{m/s}$ 정도로 나타났다으며, 기상의 체류시간(residual time)은 0.015 초이므로 기포의 높이방향 길이는 $5.2\ \text{mm}$ 이다. 한편 순간이미지를 이용하여 한 버블의 높이방향 길이는 $4.53\ \text{mm}$ 로 체류시간을 이용한 값보다 약 12.9% 낮은 값을 보인다. 이는 버블이 상승하면서 버블의 아랫 쪽 경계면이 불룩하게 나오는 현상에 의해 발생된 오차로 사료된다. 정확도 검증 실험에서 광섬유 탐침은 기체-액체 경계면에서 매우 빠른 응답속도를 보이며, 두 개의 광섬유 탐침을 사용한다면 보다 정확한 기포의 상승속도를 측정할 수 있으리라 판단된다. 한편, 유동가시화 영상을 기준으로 구한 기포의 크기는 기포의 형상이 3차원이므로 정확도가 높지 않음을 알 수 있었다. 추후 연구에서 다수의 카메라로 3차원 촬영을 하고 기포의 3차원 형상을 재건하여 비교한다면 더욱 정확한 값을 얻을 수 있으리라 사료된다.

3.2 원형탱크 내부의 기포직경 및 상승속도 측정

Fig. 4는 공기의 유량이 $1\ \text{L/min}$, $3\ \text{L/min}$, $5\ \text{L/min}$ 일 때, 원형탱크 내에서 분출되는 기포의 영상을 촬영한 사진이다. 공기의 유량이 증가할수록 기포의 크기가 증가하고, 자유표면에서 기포가 파괴될 때 자유표면의 진동(sloshing) 현상이 커짐을 알 수 있다. 모든 경우의 실험에서 기포는 3차원 형상을 가지며, 심한 변형이 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 동기화된 고속카메라로부터 얻은 이미지와 시간에 따른 광섬유 탐침의 출력신호를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 $125\ \mu\text{m}$ 직경을 가지는 두 개의 광섬유 탐침의 끝부분은 지지대의 내부를 관통하여 $1\ \text{mm}$ 의 간격으로 유지되어 있다. 이를 이용하여 기포의 통과에 대한 신호를 측정된 결과 Fig. 5(b)에서 나타난 바와 같이 첫 번째 탐침이 기포의 위쪽 경계면과 닿는 찰나인 0.1104 초 일 때와 두 번째 탐침이 기포에 위쪽 경계면과 닿는 찰나인 0.1146 초에 정확하게 일치함을 알 수 있다. 기포가 첫 번째

(a) Case I, $Q_A = 1\ [\text{L/min}]$

(b) Case II, $Q_A = 3\ [\text{L/min}]$

(c) Case III, $Q_A = 5\ [\text{L/min}]$

Fig. 4. Flow visualization image of bubble stream ; (a) Case I, $Q_A = 1\ [\text{L/min}]$, (b) Case II, $Q_A = 3\ [\text{L/min}]$, and (c) Case III, $Q_A = 5\ [\text{L/min}]$.

탐침을 통과하는 순간인 0.1248 초에 반사광의 신호가 급격히 하락하여 0.125 초에 기저 상태로 도달하여 약 0.0002 초의 오차를 발견하였으나 이는 기포의 3차원 형상에 따른 오차로 사료된다. 두 번째의 탐침에서도 기포가 통과하는 순간인 0.1288 초에서 신호의 급격한

(a) Temporal voltage signal form optical probes

(b) Bubble images taken by the high speed camera

Fig. 5. Signals from two optical fiber probes and images taken by synchronized high speed camera.

하강을 관찰하였고, 기저 상태의 도달은 약간의 시간 편차를 두고 0.13초에 도달하였다. 기포가 두 개의 탐침을 통과하고 난 이후의 신호는 시간 0.135초에서 보는 바와 같이 두 탐침 모두 반사광이 없음을 보여주고 있다.

이와 같이 두 개의 탐침으로 부터 측정된 반사광 신호에서 기포가 통과하는 시간 간격을 알 수 있으므로, 탐침의 거리를 고려하면 기포의 상승속도를 정확히 계산할 수 있다. 또한 두 개의 탐침에서 기체의 상이 존재하는 시간 간격과 상승속도를 곱하면 기포의 크기를 정확히 측정할 수 있다. Fig. 5에서 측정된 기포의 상승속도는 0.238 m/s 이며, 측정오차는 0.2% 이내이다. 또한 기포의 크기는 첫 번째 탐침에서 3.43 mm로 측정되었고, 두 번째 탐침에서는 3.47 mm로 측정되었다. 기포가 탐침을 통과하는 동안 0.04 mm의 길이 변화가 생겼는데, 이는 기포의 평균 크기에 비해 1% 정도의 오차이며, 고속카메라의 영상에서도 이 정도의 크기 변화가 관찰되고 있다. 기포의 크기는 두 개의 탐침에서 측정된 크기를 평균하여 결정하였다.

(a) $Q = 1$ L/min (b) $Q = 3$ L/min (c) $Q = 5$ L/min**Fig. 6.** Reflectance signals from two optical fiber probes during 1 second.

Fig. 6에는 공기의 유량이 1 L/min, 3 L/min, 5 L/min 일 때, 원형탱크 내에서 분출되는 기포가 두 개의 탐침을 지나갈 때 얻어진 반사광 신호를 시간에 따라 1초 동안의 변화를 나타낸 그림이다. 유량이 증가할수록 동일한 시간 동안 탐침을 통과하는 기포의 수가 증가하고 있음을 알 수 있고, 기포의 크기를 나타내는 높은 반사광의 지속시간도 길어짐을 알 수 있다. 탐침의 상대적 위치가 고정되어 있다 하더라도 기포는 항상 두 개의 탐침의 중심을 지나지는 않는다. 즉, 기포가 첫 번

Table 1. Bubble diameters and rising speeds

Q_A [L/min]	$\langle D_B \rangle$ [mm] at the nozzle exit	$\langle D_B \rangle$ [mm] beneath the free surface	$\langle V_B \rangle$ [m/s]
1	12.2	18.1	0.460
3	16.7	24.2	0.596
5	21.0	29.6	0.747

째 탐침에는 중심의 위치에 존재하지만 두 번째 탐침에서는 옆으로 비껴 갈수도 있다. 또한 첫 번째와 두 번째 탐침 모두 지난다 하더라도 버블이 옆면만 스쳐 지나간다면 탐침에서 검출되는 기포의 속도 및 크기 계산에는 상당히 큰 차이를 유발하게 된다. 따라서, 기포속도 및 크기를 계산하는 알고리즘을 적용하기 위해서는 평균 크기에서 많이 벗어난 신호에 대해서는 적절한 필터링을 해주어야 발생 가능한 오차를 줄일 수 있다. 이를 위해 획득된 신호에서 측정된 기포 크기에서 표준편차에서 3배의 편차를 벗어나는 신호는 제외하고 기포의 크기와 속도를 측정하였다.

Table 1에는 각각의 실험조건에서 측정한 기포의 평균 직경과 상승속도를 정리하였다. 측정오차는 95%의 신뢰성 영역에서 5% 이하의 정확도를 보였다. 노즐의 출구가 5 mm임을 고려해 볼 때, 기포는 부력에 의해 노즐에서 분리되기 까지 노즐 직경의 3-4배 크기로 커짐을 알 수 있다. 공기 유량이 3배, 5배 커질 때 노즐 출구의 기포 평균직경은 1.37배, 1.72배 커짐을 알 수 있다. 자유표면에 가까운 위치에서의 기포의 크기가 더욱 커지는 이유는 노즐에서 분리된 기포들이 서로 합쳐서 크기가 증가하기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서 고속카메라와 광섬유 탐침을 동시시켜 원형 탱크 내부에서 분출되는 기포의 평균 직경과 상승속도를 측정한 결과 광섬유 탐침은 기포의 경계면에서 상당히 빠른 반응속도를 가짐을 확인하였고, 이에 따라 기포의 상승 속도는 0.2%이내의 정확도를 가지며, 기포직경은 순간적인 기포변형을 고려하더라도 1% 정도의 오차 범위 내에서 측정이 가능하였다. 두 개의 광섬유 탐침을 이용하여 원형탱크 내부에서 분출하는 기포의 평균 직경과 상승속도를 측정한 결과 기포의 움직임이 수직면에서 벗어남을 고려하더라도 5% 이내의 오차 범위 내에서 정확한 측정이 가능함을 보였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Zenit, R., Koch, D. L. and Sangani, A. S., 2001, "Measurements of the Average Properties of a Suspension of Bubbles Rising in a Vertical Channel", J. Fluid Mech., Vol.429, pp.307~342.
- 2) Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M., 2003, "Measurement of Liquid Turbulent Structure in Bubbly Flow at Low Void Fraction Using Ultrasonic Doppler Method", J. Nucl. Sci. Technol., Vol.40, No.9, pp.644~654.
- 3) Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., 1992, Neutron Radiography, Gordon and Breach Science Publishers, San Francisco, Vol.4, pp.415~422.
- 4) Julia, J. E., Hartevelde, W. K., Mudde, R. F., Akker, E. A., 2005, "On the accuracy of the void fraction measurements using optical probes in bubbly flows", Rev. Sci. Instrum., Vol.76, 035103.
- 5) Rojas, G. and Loewen, M. R., 2007, "Fiber-optic probe measurements of void fraction and bubble size distributions beneath breaking waves", Exp. Fluids, Vol.43, pp.895-906.
- 6) Serdula, C. D. and Loewen, M. R., 1998, "Experiments investigating the use of fiber-optic probes for measuring bubble-size distributions", IEEE J. Oceanic Eng., Vol.23, No.4, pp.385-399.
- 7) Xue, J., Al-Dahhan, M., Dudukovic, M. P. and Mudde, R. F., 2003, "Bubble dynamics measurements using four-point optical probe", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.81, pp.375-381.
- 8) Saito, T., Matsuda, K., Ozawa, Y., Oishi, S. and Aoshima, S., 2009, "Measurement of tiny droplets using a newly developed optical fibre probe micro-fabricated by a femtosecond pulse laser", Meas. Sci. Technol., Vol.20, 114002.
- 9) Kim, J. S., Kim, S. M., Kim, H. D., Ji, H. S. and Kim, K. C., 2011, "Dynamic structures of bubble-driven liquid flows in a cylindrical tank", Exp. Fluids., DOI 10.1007/s00348-011-1224-x.