

LDV와 이중전기전도도 탐침을 이용한 기포속도의 비교 측정

Comparative Measurements of Bubble Velocity by LDV and Two-Conductivity Probe

김문오, 이태호, 조형규, 박군철

서울대학교
서울시 관악구 신림동 산56-1

요 약

본 연구에서는 1개의 PMT를 갖는 후방산란형 상용 LDV를 사용하여 slug flow에서 bubbly flow까지의 영역에서 발생하는 기포속도 측정 법을 개발하고 기포크기가 커졌을 때의 측정상의 문제점과 이를 극복하기 위한 방법을 연구하였다. 기포속도는 FFT를 통한 주파수 영역에서 이루어 졌으며 유로는 단 면적이 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 인 투명 사각 아크릴로 이루어 져있다. 측정된 기포 속도의 범위는 $0.2 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 이고 크기는 $1 \sim 10 \text{ mm}$ 의 범위를 갖는다. 또한 위 방법으로 측정한 결과를 이중전기전도도 탐침을 사용하여 측정한 결과와 비교하여 LDV를 통한 기포속도 측정의 신뢰성 향상 및 측정 기법의 개선에 궁극적인 목적을 두고 있다. LDV를 이용해 측정한 기포속도는 최대 4.16%이내의 오차 범위 안에서 이중전기전도도 탐침에 의해 측정된 결과와 일치한다.

ABSTRACT

The subject of this paper is to verify measurement of vapor velocity by conductive probe using Laser Doppler Velocimetry in an air-water flow. A comparison of the two method is made on the basis of simultaneous measurements of local mean velocities through a $10 \times 10 \text{ mm}^2$ transparent acryl vertical channel, And High speed video system was used to measure vapor velocity independently. The range of velocity measured is from 0.2 to 1.2m/sec. The flow regimes vary from slug to bubbly flow. When LDV is applied, a dependency of velocity measured on bubble size is investigated. A standard LDV was used to the vapor velocity using direct backscattered light. A bubble velocity measured by LDV agrees with the result by measured two-conductivity probe with maximum 4.16% error.

1. 서 론

현대 산업사회의 여러 분야에서 이용되고 있는 다상유동 중에서 액상과 기상의 두 상이 서로 혼합되어 흐르는 이상유동은 각종 보일러, 응축기, 건조기 같은 단위 기기로부터 공기조화장치, 냉동장치, 석유화학 플랜트, 그리고 화력 및 원자력 발전소의 열 교환장치에 이르기까지 여러 곳에서 볼 수 있기 때문에 오늘날 이상유동에 대한 연구의 필요성과 중요성은 크게 증가하고 있다. 이러한 이상유동 연구에서 필수적인 기포속도 측정에 대한 연구는 그 동안 많이 이루어져왔지만 이상 유동에서의 기포속도 측정에는 많은 어려움이 존재하여 특수한 측정기법이 요구된다. 기포속도 측정기법은 크게 삽입방식과 비삽입방식으로 나누어지는데 유체내부 측정지점에 검출기를 설치해서 유체에 교란을 주는 단점이 있는 hot-wire나 conductivity 형태의 삽입방식의 probe와 달리 광학적인 방법을 이용하는 LDV는 유동에 교란을 주지 않으며 정확도가 높을 뿐만 아니라 교정이 필요 없으며 공간 분해능이 우수한 장점이 있어 최근 많이 연구되어지고 있다.

70년대 이전까지 LDV의 신호는 간섭무늬보다 큰 입자에 의해 산란된 빛은 낮은 신호 대 잡음비와 무시할 만한 변조를 가진 signal을 생산한다고 생각되어져와서 작은 산란입자를 사용할 수 있는 단상유동 측정에서 주로 사용되어져왔다. 그러나 Durst와 Zare [1]는 지름 1~10mm인 큰 입자도 입자의 속도와 크기 같은 정보를 제공할 수 있는 양질의 Doppler signal을 생산할 수 있다는 것을 보였으며 이로부터 속도와 함께 입자의 지름을 계산하였다.

Ohba [2]는 reference-beam LDV를 사용하여 기포의 국부 속도를 측정하였으며 기포와 같은 큰 입자의 속도 측정에 LDV 응용의 타당성을 보였다. Martin [3]은 기포의 크기와 페데스탈(pedestal) 성분이 선형적인 관계에 있다는 것을 발견하였으며 Doppler signal의 크기를 이용하여 상분리를 하고 기포 크기와 속도(rising velocity)를 구하였다.

Lee et al. (Lee&Srinivasan [4] ; Lee&Cho [5])은 특별 제작된 filterbank를 이용해서 시간과 주파수에 근거한 상분리를 하는 신호진폭 gating을 사용하였다. 이 기법은 Tsuji, et al.(1986) 에 의해 레이저 광선의 경로가 기포에 의한 방해로 감지하는 photodiode를 사용하여 신호 파형에 근거한 상분리 방법으로 쓰여졌다. 액체로부터 기포를 분별하는 이 기법은 검사 체적 내에 오직 하나의 기포만이 존재한다고 확신되어지는 낮은 기포율에 제한되어져 있다.

그러나 대부분의 이들 연구들은 검사체적(measuring volume)보다 큰 기포가 지나갈 때의 문제점과 레이저 광선의 경로를 다른 기포들이 방해할 때 생기는 문제점, 낮은 데이터 수집율의 문제점 때문에 주로 단일 기포에 대한 rising velocity를 측정하였다. 또한 후방으로 산란되는 빛의 강도가 약한 관계로 대부분 전방 산란형의 LDV로 측정한 연구가 대부분이다. 비록 최근에 refrigerant-113를 매질로 사용하는 후방산란형 LDV를 이용하여 기포속도를 측정한 연구가 나타나고 있지만(Velidandla [6]), 후방산란형 LDV에 의한 기포속도 측정은 매우 드문 형편이다.

본 연구에서는 1개의 PMT를 갖는 후방산란형 LDV를 사용하여 slug flow에서 bubbly flow 영역까지의 기포속도 측정법을 개발하고 기포크기가 커졌을 때의 측정상의 문제점과 이를 극복하기 위한 방법을 연구하였다. 또한 위 방법으로 측정한 결과를 이중전기전도도 탐침과 고속카메라를 사용하여 측정한 결과와 비교하여 LDV를 통한 기포속도 측정의 신뢰성 향상 및 측정 기법의 개선에 궁극적인 목적을 두고 있다.

2. 실 험

2.1 LDV 시스템

1960년대부터 유체의 유속 측정을 위해 등장한 LDV는 유체 중에 존재하는 산란입자에 레이저 광을 입사하여 그 산란광의 Doppler 주파수 변화를 검출하여 유체의 속도를 측정하는 장치이다.

Doppler 효과에 의하여 관측된 주파수 편이량은 엄밀하게는 상대성 원리를 따른 Lorentz transformation을 사용해서 구해야 하나 산란 transformation 또는 고전적 방법에 의해서 근사적으로 구할 수 있다. 이러한 LDV는 산란입자의 광전류 정보로부터 속도를 구하는 데 Doppler 효과를 받은 산란광과 Doppler 효과를 받지 않은 기준광(reference beam)을 중합시켜서 Doppler 주파수 편이를 검출하는 reference beam mode와 레이저광을 두 개의 평행한 광선으로 나누어 원하는 측정지점에 교차시켜 형성된 간섭 무늬들을 입자가 지나면서 발생하는 Doppler 신호를 이용하는 dual beam mode로 나뉘어진다. 본 실험에서는 dual beam mode의 후방산란방식의 LDV를 사용하였다. 후방산란 방식은 전방산란 방식에 비해 10^{-2} 에서 10^{-3} 정도의 약한 산란광의 강도를 갖기 때문에 신호처리의 어려움이 있으나 이송장치의 제작과 광학계의 조정이 용이한 장점이 있어 관측 창을 양측에 설치하기 곤란한 경우 이용되며 약한 산란광의 문제점을 극복하기 위해 고출력의 에너지를 사용한다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 514.5nm의 파장을 갖는 Ar-Ion 레이저가 광분리기를 통과하여 두 개의 광선으로 나뉘어진 후 초점거리가 1000mm인 집광렌즈를 통해서 검사체적에 모아진다. LDV는 Dantec사의 후방산란형, 이중광선형 55×modular LDA optics 시스템으로 표 1 처럼 구성되어 있다.

Fringe spacing	6.7746 μm
Number of Fringe	37 개
Wave length	514.5 nm
Gaussian Beam Dia.	1.34 mm
Beam separation	76 mm
Lens Focal Length	1000 mm
Beam Collimator Exp	1
Beam expander Exp.	1.95

Table 1. Characteristic of Optical part of LDV system

기포속도 측정에 적합한 LDV 시스템의 상태를 위해 gain은 low에 맞추어져 있고 Ar-Ion 레이저의 출력은 3W, 4MHz의 bandwidth를 갖는다. 그림 1에서 검사체적에서 입자에 의한 산란광은 PMT를 통하여 증폭, 수집되어서 대역필터를 통과하고 그림 2와 같은 대역 필터된 신호는 oscilloscope(TEK 744A, 500MHz)에 입력되어 A/D 변환된 후 GPIB를 통해 컴퓨터에 입력된다.

Oscilloscope의 신호채집률은 FFT 크기와 함께 FFT 실행후 주파수 간격을 결정하는데 본 실험에서는 250Ms/sec의 신호채집률로 50,000개의 샘플을 채집하여 65536의 FFT 크기를 갖는다. 이 경우 FFT에 의한 주파수 분해능은 5,000Hz이며 이에 해당하는 속도 측정의 오차는 최대 $\pm 2.58\text{cm}$ 이다. 신호의 주파수 대역은 FFT의 크기에 의해 정해지는데 처리 가능한 최대 주파수는 Niquist frequency로 신호 채집률을 f_s 라 할 때 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f_{\text{nyquist frequency}} = \frac{f_s}{2} \quad (1)$$

LDV와의 속도 비교를 위해 전기전도도 탐침(Park et al [7])은 레이저 광선의 교차점으로 부터 1mm 위에 설치되었으며 고속비디오 카메라로 이를 검증하였다. 유로는 두께 10mm인 투명 아크릴로 1m의 높이로 제작되었으며 단면적은 1cm^2 이다. 유량은 최대 8lpm 이다.

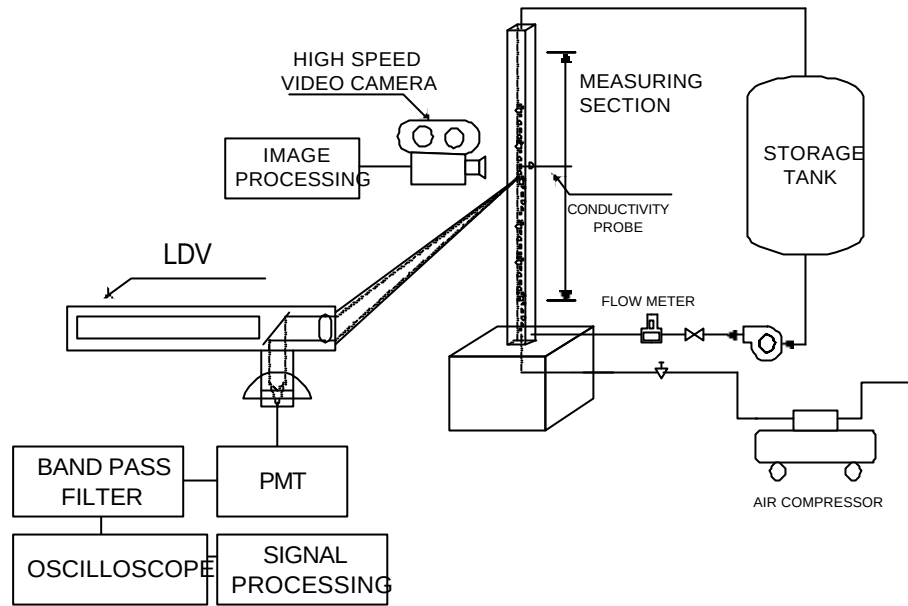


Figure 1 Schematic diagram of LDV system

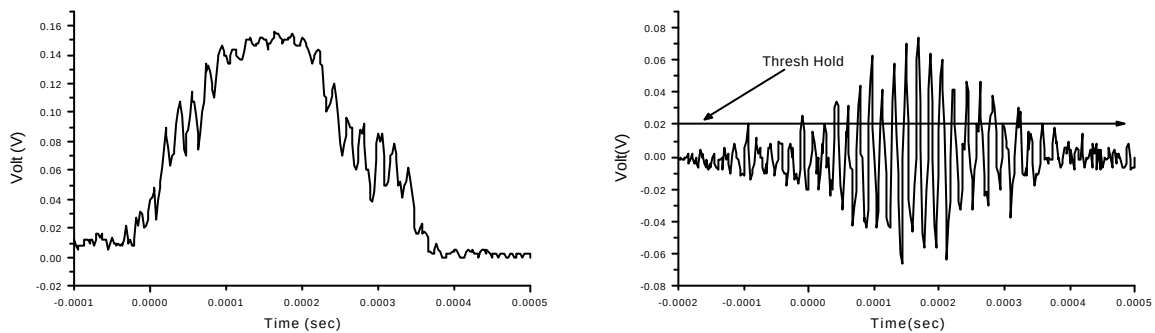


Figure 2 Typical Doppler signal bandpass filtered

2.2 신호 처리

LDV를 이용해 정확한 정보를 최대한 얻기 위해서는 PMT로 부터의 analog signal을 digital signal로 전환하는 전자장비가 필요하다. 이런 장비들은 크게 시간 영역에서 분석하는 방법과 주파수 영역에서의 분석하는 방법으로 나누어질 수 있는데 시간영역에서 주파수 분석은 주파수 계수기(counter)나 주파수 추적기(tracker)등이 있고 주파수 영역에는 주파수 분석기(spectrum analyzer) 등이 있다. 이러한 신호처리기를 중에서 신호처리기를 선택할 때 모든 상황에 완벽하게 적용할 수 있는 신호처리기는 없기 때문에 각 상황과 목적에 맞는 신호처리기를 선택해야 한다. 신호처리기를 선택할 때 고려해야 될 것은 연속성과 관련된 신호의 유형 그리고 신호 대 잡음비, turbulence level 등이다.

일반적으로 주파수 추적기(tracker)는 신호 대 잡음비가 계수기(counter)보다 높은 장점이 있지만 신호가 간헐적이고 강한 경우에는 주파수 계수기(counter)가 더 선호된다. 그러나 주파수 계수기는 낮은 SNR에서는 주파수 측정에 편향이 일어나는 단점이 있다. 만약 충분한 신호 수집 시간이 있고 낮은 SNR의 신호일 경우는 주파수 분석기가 적당하다. 본 실험에서는 낮은 SNR을 갖고 간헐적인 신호가 나오는 기포속도 측정의 경우이므로 주파수 영역에서 신호처리를 시도하였다.

주파수 영역에서의 신호처리는 시간에 대한 함수를 FFT를 통하여 power spectrum을 구함으로

써 실행하였다. $f(t)$ 의 불연속적인 신호들이 Fourier Transform 되어 $F(\nu)$ 가 된다고 하고 $W_N = e^{-2\pi/N}$ 이라고 하면 $F(\nu)$ 는 다음과 같다.

$$F(\nu) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) W_N^{\nu t} \quad (2)$$

$f(t)$ 는 osilloscope로부터 시간에 대한 실수값을 갖는 전압의 함수이므로 $f(t)$ 의 허수부는 0이 되고 $F(\nu)$ 는 Nyquist frequency에 대해 대칭을 이룬다. N 은 2의 배수 $2M$ 으로 표시하고 식 (2)를 변형하면

$$F(\nu) = \frac{1}{2M} \sum_{t=0}^{2M-1} f(t) W_{2M}^{\nu t} \quad (3) \text{ 이 된다.}$$

다시 식 (3)을 홀수항과 짝수항으로 나누면

$$F(\nu) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} f(2t) W_N^{\nu(2t)} + \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} f(2t+1) W_N^{\nu(2t+1)} \right) \quad (4) \text{ 이 된다.}$$

$W_{2M}^{2t} = W_M^{\nu t}$ 이고 $W_{2M}^{2t+1} = W_M^{\nu t} W_{2M}^{\nu}$ 이므로 식 (4)는

$$F(\nu) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} f(2t) W_N^{\nu t} + \frac{1}{M} \sum_{t=0}^{M-1} f(2t+1) W_N^{\nu t} W_{2M}^{\nu} \right) \quad (5)$$

와 같이 나타내어지며 식 (5)에서는 처음 M 개의 항들은 식 (7)로 계산되고 나중 M 개 항들은 식 (8)로 계산 될 수 있다.

$$F(\nu) = \frac{1}{2} [F_{\text{even}}(\nu) + F_{\text{odd}}(\nu) W_{2M}^{\nu}] \quad (7)$$

$$F(\nu) = \frac{1}{2} [F_{\text{even}}(\nu) - F_{\text{odd}}(\nu) W_{2M}^{\nu}] \quad (8)$$

여기서 식 (7), (8)의 $F(\nu)$ 가 실수 $R(\nu)$ 와 허수 $I(\nu)$ 로 이루어져 있다면 $F(\nu) = R(\nu) + iI(\nu)$ 이고 다시 $F(\nu) = |F(\nu)|e^{-i\phi(\nu)}$ (9) 로 표현된다.

식 (9)에서 $|F(\nu)| = \sqrt{R(\nu)^2 + I(\nu)^2}$ (10) 이고 $\phi(\nu) = \tan^{-1}\left(\frac{I(\nu)}{R(\nu)}\right)$ (11) 이다.

식 (9)로 부터 $F(\nu)$ 의 절대값이 최대가 되는 주파수를 찾으면 Doppler주파수가 구해진다. FFT를 수행할 때는 주파수 영역이 연속적이지 않고 불연속적으로 $\frac{1}{N\Delta t}$ 의 간격을 갖기 때문에 도플러 주파수는 최대 주파수 주위의 세 점을 fitting 한 후 그 곡선상의 최대값을 읽는다. 여기서 N 은 FFT의 크기를 말하며 Δt 는 osilloscope의 sampling 속도를 의미한다.

신호는 상용 PMT로 부터의 대역 필터(band pass)된 신호를 osilloscope를 통해 받아 처리하게 되어있는데 이의 순서도는 그림 3에 나타나 있다. 신호처리 프로그램은 LDV 시스템 변수들을 입력받고 velocity factor $\frac{\lambda}{2\sin\theta/2}$ 를 계산한다. 다음으로 osilloscope의 trigger state를 감시하다가 정해놓은 trigger level 이상의 신호가 발생할 때 osilloscope로 부터 50,000개의 raw 데이터를 받아 이를 calibration한다. Trigger level의 설정은 산란입자가 없는 상태의 단상유동에서 측정했을 때의 최대 잡음 신호의 2배로 설정하였다. 기포가 측정 체적부를 지날 때 기포 표면에서 반사되는 강한 레이저광이 PMT 수광부 안으로 들어 올 때 설정한 trigger 된 신호를 발생시킨다.

Calibration 된 데이터에 대한 FFT를 수행한 후 최대 power를 찾은 후 그에 해당하는 주파수를 아래와 같이 계산한다.

$$f_D = k \times \text{신호채집률} / \text{FFT 크기} \quad (12)$$

(k 는 주파수 영역에서 최대 power를 갖는 위치)

식 (12)로 부터 주파수 영역에서 Doppler 주파수에 해당하는 최대 power를 갖는 주파수를 찾고 그 주위의 두 점에 대해서 interpolation한 값을 구함으로써 최종적인 Doppler 주파수를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 Doppler 주파수는 두 가지 기준에 의해 신호의 상태를 판별 받게 된다. 첫 번째 기준은 잡신호가 많이 섞여 신호의 상태가 나쁠 경우, 그 신호는 데이터로 인정 될 수 없는 데 이의 기준은 신호 대 잡음비 (SNR)이다. SNR은 이론적인 식으로 실제로는 계산하기가 어려워 본 실험에서는 SNR을 main power와 두 번째 power의 비로 정의하여 그 값이 1/3 보다 작을 경우는 적합한 신호로 인정하지 않았다. 두 번째 기준은 계산되어져 나온 주파수에 해당하는 속도가 평균속도의 $\pm 30\%$ 밖에 있을 때는 신호로서 인정하지 않았다.

Doppler Signal Spectrum Analyzer

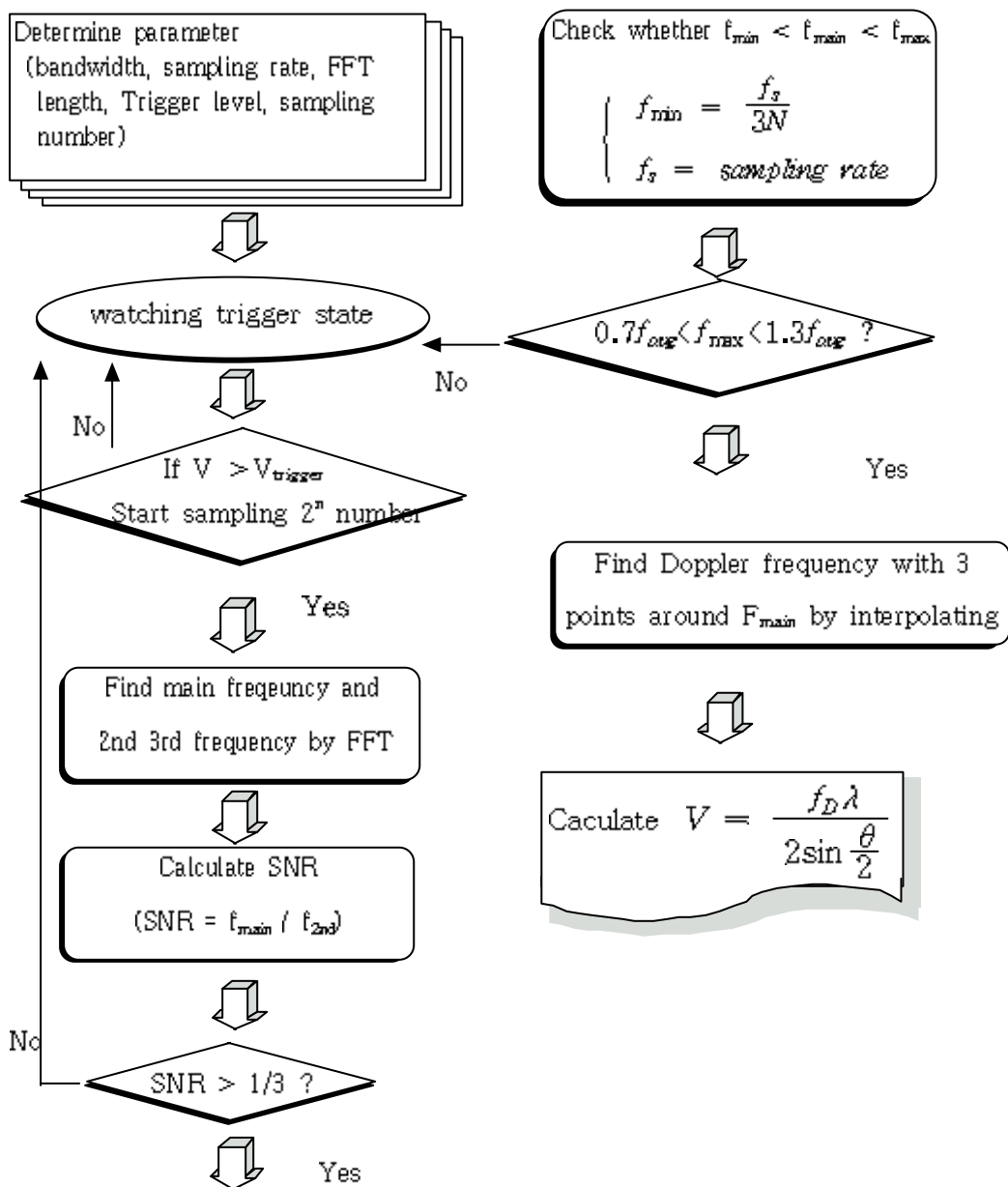


Figure 3 Signal processing algorithm

3. 실험결과 및 분석

실험은 정지 상태, 2lpm, 4lpm, 6lpm, 8lpm 의 유속의 변화를 주며 그림 4와 같이 LDV와 이중 전기전도도 탐침, 그리고 고속카메라에(HSV) 의해 각각 기포속도의 확률밀도 함수를 측정하였다. 그 결과는 그림 4-6에 나타나 있다. 그림 4-(a)의 정지상태에서의 속도 측정은 기포의 움직임이 측방향으로만 국한되지 않고 실제에 있어서는, 측면방향으로 요동하면서 움직이기 때문에 실제 거리보다 더 많이 움직여 속도가 상대적으로 작게 측정되었다. 그림 7은 HSV에 정지 상태와 3LPM의 유량일때 촬영된 기포의 움직임이다.

그림 8은 고속카메라에 의한 결과를 LDV와 이중전기전도도 탐침에 의한 결과를 비교하는데 정지상태를 제외한 다른 유량에서는 각각 최대 5.16 %와 3.5 %의 오차범위에서, 평균 4.6%와 2.7%의 오차를 보인다. 한편 LDV 와 이중전기전도도 탐침의 측정결과를 비교하면 상대적으로 적은 3.6%의 오차를 갖는다. 이는 고속카메라는 탐침에 비해 긴 구간에서의 속도 평균 값을 갖으며 평균되어지는 기포 개수와의 차이 때문에 LDV와 이중전기전도도 탐침과의 오차가 발생되어지는 것으로 짐작된다. LDV에 의한 기포속도는 그림 9와 같은 FFT에 의한 power spectrum을 통하여 구하여지는데 50,000개의 데이터를 FFT하기 때문에 하나의 기포당 신호처리의 시간이 2-3초 가량 걸리게 되어 100개의 기포속도를 측정하는데 전기전도도 탐침보다 20배 가량 많은 20분 정도의 측정시간이 필요하다. 기포크기에 따른 신호취득률은 그림 10에 나타나는 데, 기포크기가 작을 수록 신호로서 인정될 확률이 커짐을 알 수 있다. 이는 직경 10mm 정도의 기포가 검사 체적을 지날 때 기포의 모양에 따라 레이저광선의 산란방향이 불규칙하기 때문인 것으로 추정된다. 그림 24는 상용 LDV의 기존 신호처리기(FVA)와의 결과를 비교한 것인데 상용 LDV의 신호처리기는 평균 속도의 8.7 %에 해당하는 큰 편차를 보이고 고속카메라의 결과와 10.2 %의 오차를 보이고 있어 기포속도 측정에는 부적당한 것으로 판단된다.

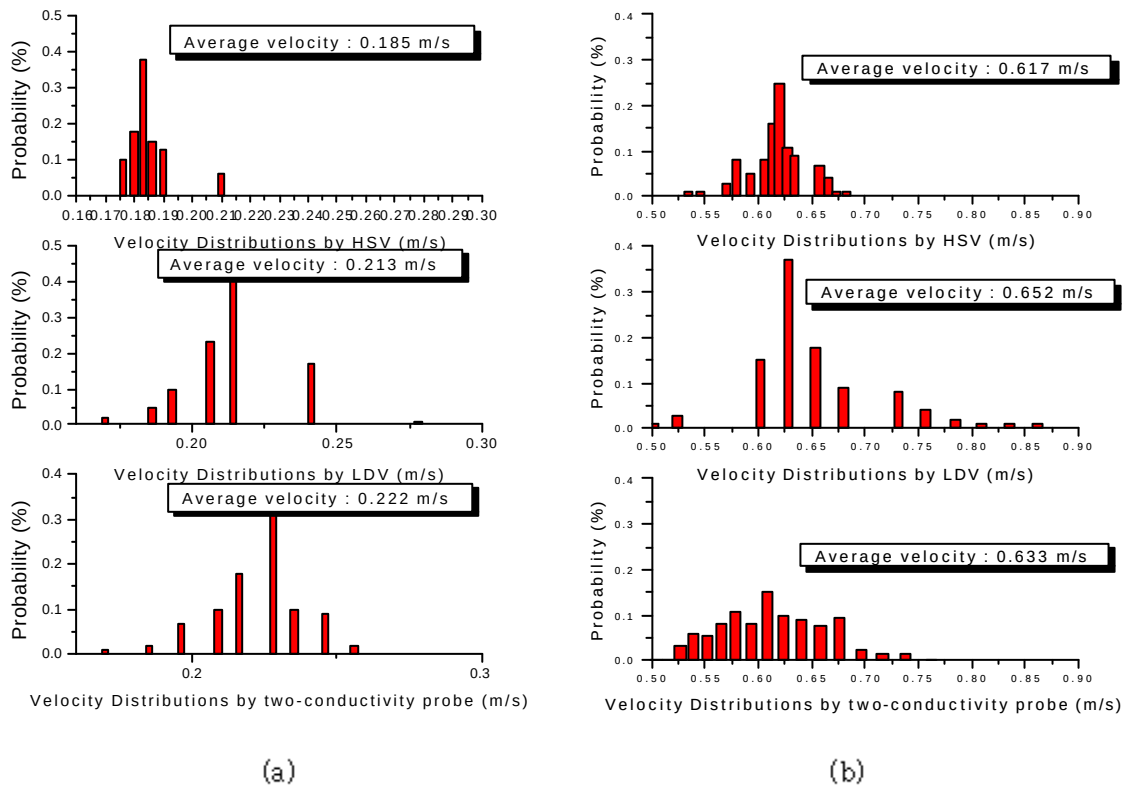
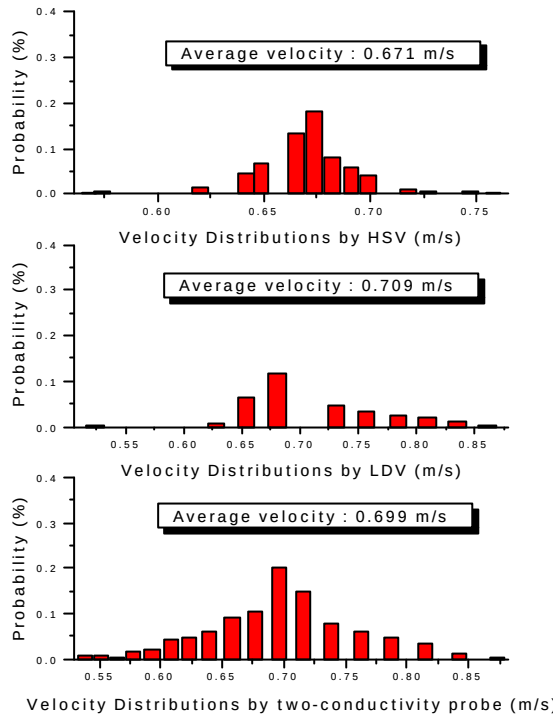
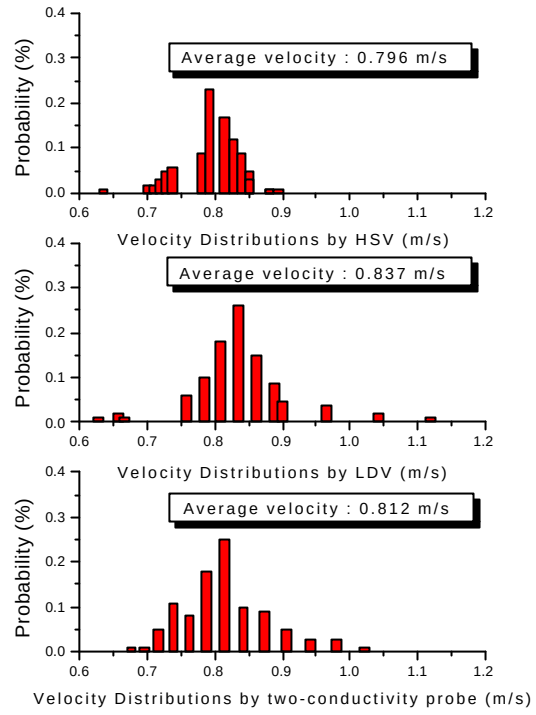


Figure 4 Comparisons of measured velocity distributions by LDV, two-conductivity probe and HSV - liquid flow rate: 0 & 2lpm

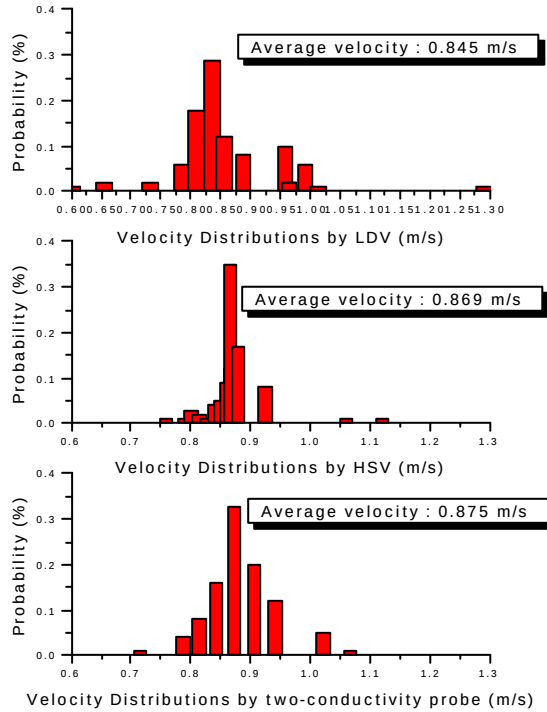


(a)

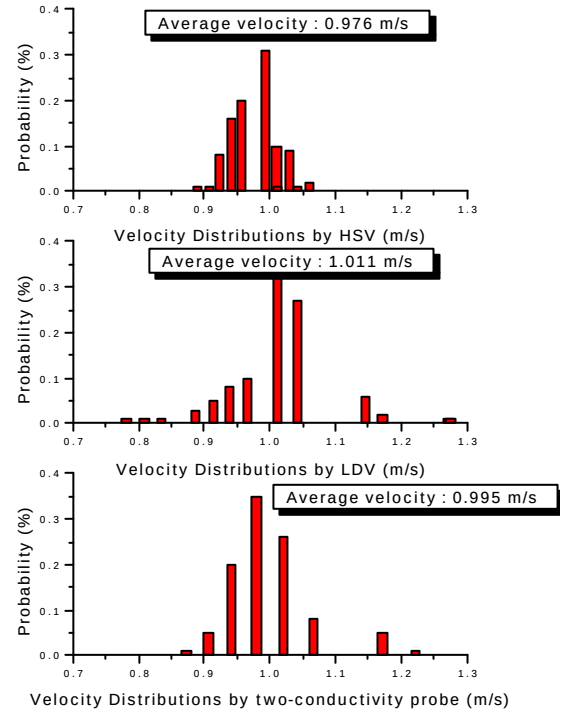


(b)

Figure 5 Comparisons of measured velocity distributions by LDV, two-conductivity probe and HSV - liquid flow rate: 3 & 4 lpm

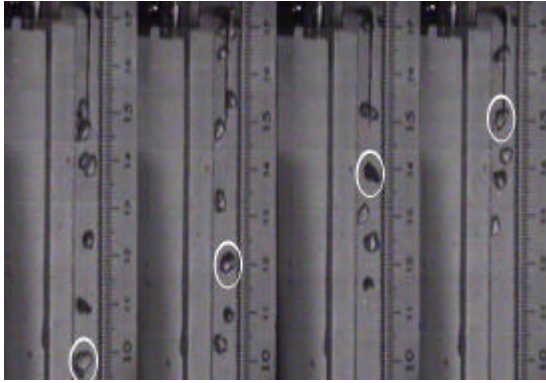


(a)

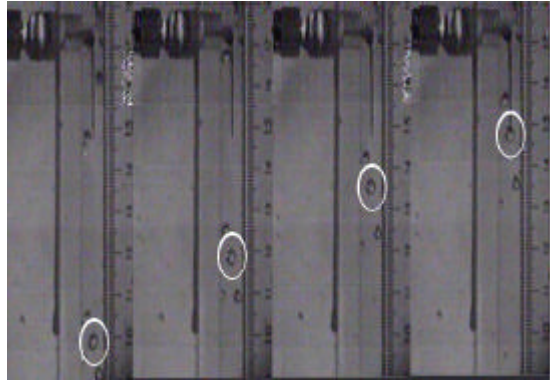


(b)

Figure 6 Comparisons of measured velocity distributions by LDV, two-conductivity probe and HSV - liquid flow rate: 6 & 8 lpm



(a) liquid flow rate : 0 lpm



(b) liquid flow rate : 3 lpm

Figure 7 Bubbles motion by HSV

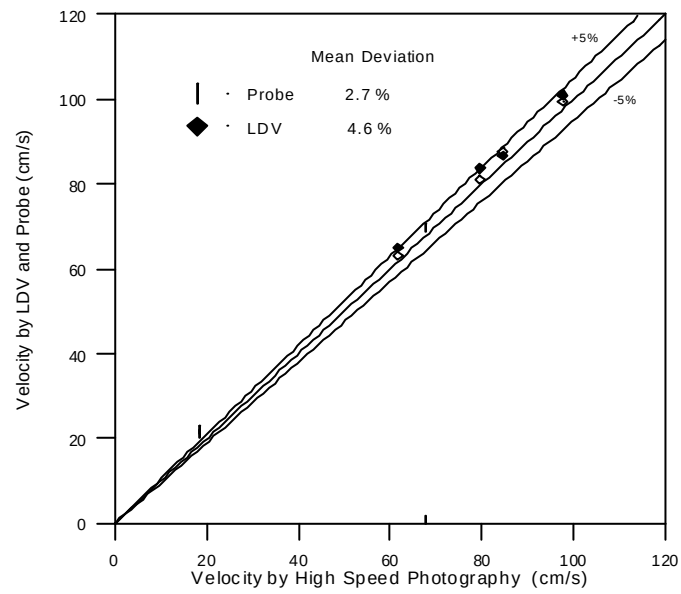


Figure 8 Comparisons of bubble velocity by LDV and two-conductive probe with by

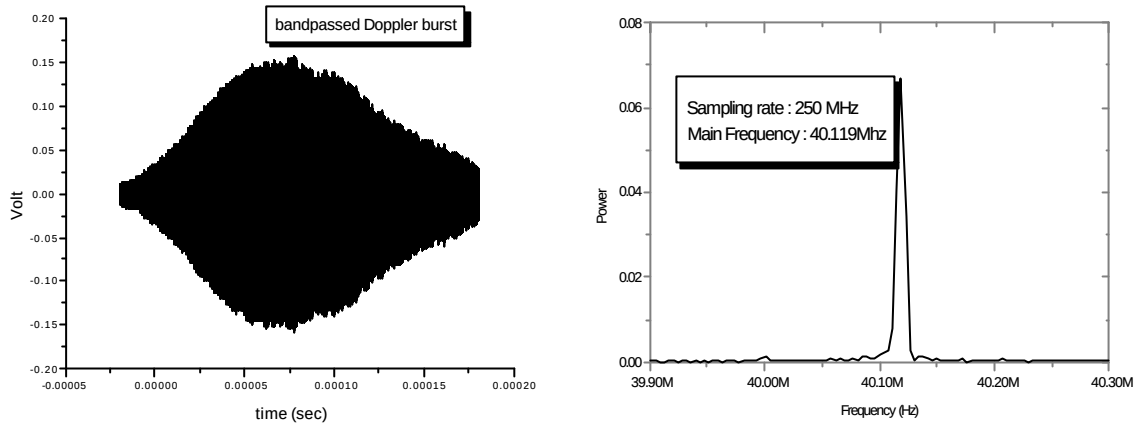


Figure 9 Bandpassed Doppler burst and power spectrum by FFT

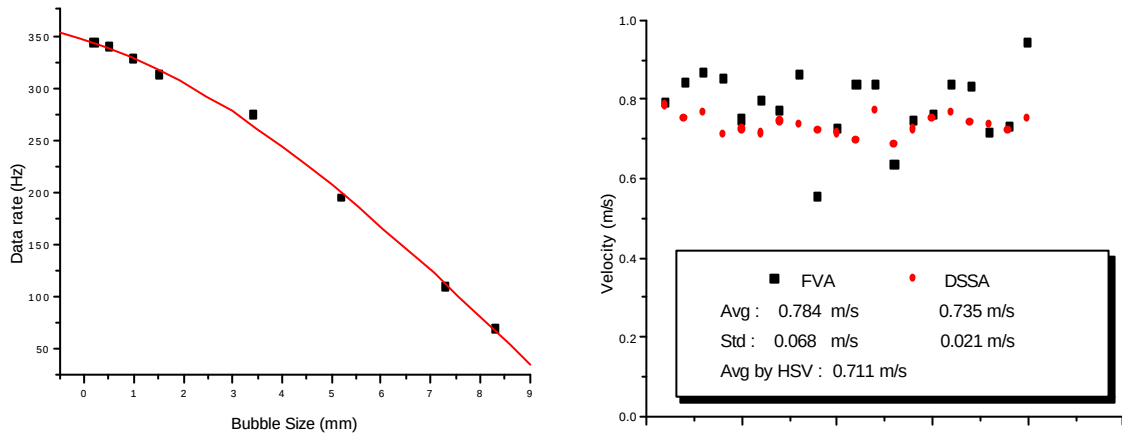


Figure 10 Data rate with bubble size

Figure 11 Comparison of bubble velocities
by FVA with by DSSA

4. 결 론

- (1) 본 연구에서는 후방산란형 LDV를 사용하여 주파수 영역에서 신호처리 프로그램을 구성하여 기포속도를 측정하였다.
- (2) 후방산란형 LDV는 전방산란형에 비해 신호강도가 $10^2 \sim 10^3$ 배 가량 낮기 때문에 신호 취득률이 매우 낮아 측정시간이 매우 오래 걸린다.
- (3) 산란입자의 속도 성분을 구분하기 bragg cell에서 레이저광이 40MHz 편이 되는데 이는 FFT 실행 후 주파수 영역에서 높은 정밀도를 갖기 위해서 50,000개 이상의 데이터를 저장해야 하는 문제를 일으킨다. 이는 컴퓨터의 메모리 문제와 신호처리 시간을 길게 하여 매우 비효율적이다.
- (4) 따라서 상용 LDV에서 나오는 대역필터된 신호를 주파수 mixer기를 통해 1MHz이하의 신호로

낮추어 신호처리를 할 필요가 있다.

- (5) 상용 LDV에서의 기포속도는 기포의 크기와 관련하여 30%가량의 편차를 보이고 있어 기포속도 측정에는 부적절한 것으로 판단된다.
- (6) 기포 크기가 커짐에 따라 신호취득률이 낮아짐을 알수가 있었다.
- (7) 액상과 기상을 구분하기 위한 trigger level에 따른 신호취득률이 많은 차이를 보이기 때문에 이에 대한 개선이 필요하다.
- (8) LDV, 이중 전기전도도 탐침과 고속카메라에 의해 동시에 기포속도 측정이 이루어 졌으며 그 결과는 고속 카메라와 비교해 각각 최대 5.16 %, 3.5% 이내의 오차 범위에서 맞는다.
- (9) LDV와 이중전기전도도탐침은 최대 4.5% 이내의 오차 범위 안에서 결과가 일치하는 것을 보이므로 LDV가 기포속도 측정에 적용이 가능 한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Durst, F. & ZARE, M., 1975, "Laser Doppler measurements in two phase flows," Report SFB80/TM/63, Univ. of Karlsruhe, F.R.G.
- [2] Ohba, K., & Yuhara, T., 1986, "Simultaneous measurements of bubble and liquid velocities in two-phase bubbly flow using laser Doppler velocimeter," Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 254 pp. 2487-2493
- [3] Martin, W. W., & Chandler, G. M., 1982, "The local measurement of the size and velocity of bubbles rising in liquids," Appl scient. Res. 38, 239-246
- [4] Lee, S. L. & Srinivasan, J., 1978, "Measurement of local size and velocity probability density distributions in two-phase suspension flows by laser-Doppler technique," Int. J. Multiphase Flow, Vol 8, pp 45-57
- [5] Tsuji, Y. & Morikawa, Y., 1982, "LDV measurement of an air-solid two-phase flow in a horizontal pipe," J. Fluid Mech., Vol. 120, pp 385-409
- [6] Roy, R.P., Velidandla, V., Kalra, S.P, 1997, "Velocity Field in Turbulent Subcooled boiling Flow," ASME, Vol. 119, pp. 754-766.
- [7] Park, G. C., Yun, B. J., Kang, K. H. and Oh, S. M., 1995, "Experimental Determination of Drift-Flux Parameters in Co-Current Steam-Water Two Phase Flow," KAERI Report, KAERI/CM-054/94.
- [9] Domnick, J., Ertel, H. and Tropea, C., 1988, "Processing of phase-Doppler signals using the cross-spectral density function," Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Springer-Verlag, New York.
- [10] Edwards, R. V., Angus, J. C., French, M. J. & dunning, J. W., 1971, "Spectral analysis of the signal from the laser-Doppler velocimeter : time-independent systems," J. Appl. Phys 42, 837-850.
- [11] Hishida, K.; Kobashi, K.; Mameda, M., 1989, "Improvement of LDA/PDA using a digital signal processor," 3rd International Symposium on Laser Anemometry Advances and Applications / Swansea (1989), S2.1
- [13] 이상용 , 박병서, 고광웅, 김주연 1993, "입자크기 및 속도의 동시 측정기법에 관한 연구," 한국원자력연구소 수탁 과제 연구보고서, 한국과학기술원.