입자의 속도 및 입경의 동시측정을 위한 신호처리 소프트웨어의 개발

(Development of a Signal Processing Software for Simultaneous Measurement of Particle Size and Velocity)

김주연*(한국과학기술원), 이상용(한국과학기술원)
Joo Yeun Kim*(KAIST), Sang Yong Lee(KAIST)

Keywords : PDA(Phase Doppler Analyzer), Signal Processing Software

ABSTRACT : In the present study, an integrated software to process the phase/Doppler signal for simultaneous measurement of sizes and velocities of spray drops/particles in two-dimensional motion has been developed. The memory segmentation technique has been adopted to achieve a higher performance in signal processing. The software was based on the Microsoft Windows' graphical environment for easy interaction with the user. This software not only performs the data storage and input/output jobs, but also calculate the mean and representative diameters and the velocities of drops and, consequently, enables us to measure and analyze the spray flow behavior highly effectively. Finally the reliability of the newly developed software routine has been evaluated through a series of experiments.

1. 서 론

위상/도플러 기법은 레이저를 이용해 입자의 속도와 크기를 동시에 측정하는 방법이다. 이 기법은 Durst 와 Zare(1975)에 의해서 처음 소개된 이래 Bachalo(1980)에 의해 실용화가 되었는데 유동을 교란하지 않는 비접촉식 측정방법이고 공간상의 한 점에 지나가는 입자의 크기와 속도를 동시에 측정하는 장점을 가지고 있어 최근에 세계적으로 많이 사용되고 있는 방법이며 아직도 많은 연구가 진행중이다. 분무유동, 연소등 2 상유동의 여러분야에서 열 및 물질전달의 실험적 해석을 위해서는 각각의 입자에 대한 운동량의 크기를 알아야 하는데 기존에 사용해오던 유동의 속도 혹은, 입자의 크기만을 측정하는 방법으로는 입자의 운동량을 알 수 없으며 이러한 점에서 위상/도플러 기법을 이용한 측정이 부각되었으며 이 기법을 상용화한 제품을 이용하여 많은 측정이 이루어 지고 있다. 그러나 기존의 상용화된 제품의 경우 정상상태의 유동에 대한 측정은 잘 이루어지고 있으나 고체-액체 슬러리, 과도분무, DCH 현상과 같이 측정 여건이 복잡하고 어려운 경우에는 각각의 상황에 맞는 측정이론, 신호처리방법의 변화가 불가피하게 되는데 이에 따른 능동적인 대처가 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 위상/도플러 기법의 이론을 적용한 신호처리 소프트웨어를 개발하는데 목적을 두었다. 이는 측정의 효율성을 향상시키고 실험 해석을 용이하도록 하는 여러 대표값의 계산과 측정 데이타의 저장 및 출력이 가능한 통합 소프트웨어의 개발을 의미한다. 이를 위해 빠른 신호처리를 위해 데이타 인터페이스 기법을 개발하고 개발된 프로그램의 정확도 및 신뢰성 검증을 하였다. 또한, 2 차원 속도 측정 시스템의 구현을 위한 신호/데이타 처리방식을 개발하고 이를 적용한 2 차원 속도측정 데이타의 제시 및 측정상의 문제점을 파악하였다. 이러한 연구의 수행은 분무유동의 미립화 기구 해석을 위해 필수적이라 할 수 있다.

2. 신호 및 데이타 처리기법의 확립

위상/도플러 방식의 신호 처리 기법은 다음과 같이 크게 세 단계로 설명할 수 있다. 첫번째 단계로는 광센서(photodetector)를 통해 입자에 의해 발생된 도플러 신호를 전기적 아날로그 신호로 바꾼다. 여기서는 입자에 의한 산란광을 얼마나 정확히 받아들일 수 있는 지가 최대 관건이며 이는 광학적 정렬상태에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 둘째 단계로 도플러 신호를 전기적인 신호로 바꾸고 나면 오실로스코우프(LeCroy 9314L)에 내장되어 있는 A/D(Analog to Digital) 변환기를 이용해 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸는 작업을 한다. 입경과 속도를 구한다고 하는 것은 결

국 도플러 신호의 위상과 주파수를 구함을 의미하는데, 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꿀 때 사용되는 신호 채집률(sampling rate)에 의해서 최대 주파수와 최소 주파수가 결정되므로 측정하고자 하는 주파수 즉, 속도의 영역이 대략 어느 범위에 들어가는 가에 대한 정보가 요구된다. 또한 이외에도 도플러 신호를 디지털 신호로 바꿀때 사용되는 트리거링(trigger time, trigger level, digitizing resolution)에 대해서도 고려를 해야한다. 입자에 의해 발생되는 산란광을 오실로스코우프를 통해 보면 실제로 측정영역인 두 레이저 광의 교차점에 지나가는 입자는 간헐적으로 발생하기 때문에 각 도플러 신호 사이에는 잡신호만 존재하는 영역이 있게 된다. 이러한 신호 전체를 디지털화(digitizing)해서 처리를 하는 것은 매우 비효율적이기 때문에 본 연구에서는 메모리 세그멘테이션(memory segmentation)기법(Fig.1)을 적용한

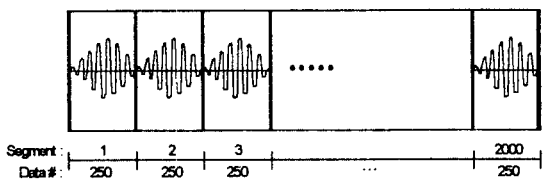


Figure 1 Graphic illustration of segmented memory

디지털화 방법을 사용하고 있다 [Domnick et al.(1988)]. 이는 전체 메모리를 블럭화하여 작은 조각(segment)들로 나눈후 도플러 신호가 발생한 시점으로부터 일정 시간동안만 메모리에 저장하는 방법이므로 메모리의 낭비를 막고 도플러 신호가 발생한 시점을 알 수 있기 때문에 과도분무의 측정에 적용될 수 있다. 세번째 단계로 위에서의 디지털화된 신호를 GPIB (National instrument 사 제공)를 통하여 컴퓨터에 저장한 후 cross-spectral density function 을 이용해 입경과 속도를 계산하면 된다.

3. 소프트웨어의 구성

Figure 2 는 전체적인 소프트웨어의 흐름도(flow chart)를 보여주는 것인데 이는 개략적으로 크게 네 부분으로 구성되어 있다. 첫번째로는 측정에 필요한 각종 변수들을 설정하고 두번째로 GPIB를 이용해 오실로스코우프로부터 도플러 신호를 받아 컴퓨터에 저장한다. 세번째로 컴퓨터에 저장된 도플러 신호 데이타로부터 cross-spectral

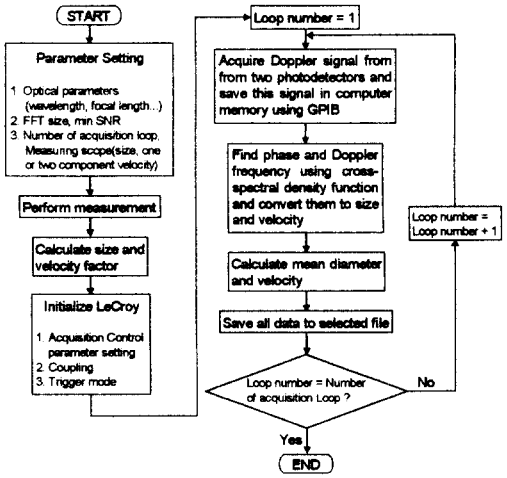


Figure 2 Flow chart of processing Doppler signal

density 함수를 이용해 위상과 주파수를 계산하고 마지막으로 계산된 위상과 주파수로부터 평균 입경, 속도등을 계산하고 출력 및 저장을 한다. 참고로 본 연구에서 만들어진 소프트웨어는 Microsoft Windows 3.1 을 기반으로 하며 컴파일러는 Visual C++ 1.51 을 사용하였다. 그 이유로는 윈도우즈가 그래픽 환경(Fig.3)을 기반으로 하고 있어 사용자의 편리성이 증대되고 윈도우즈 자체가 장치 독립성을 유지시켜 주기 때문에 임의의 컴

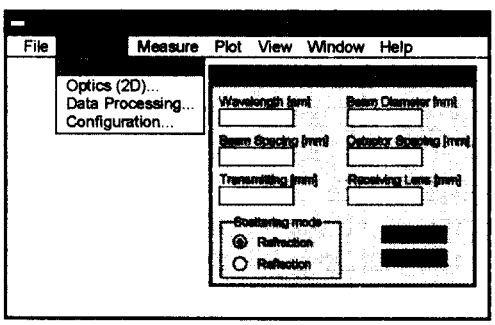


Figure 3 Example of graphical environment

퓨터 환경에서 실행 및 출력이 가능하기 때문이다. 또한, Microsoft Foundation Class(MFC)를 사용하였는데 이는 앞으로 나올 윈도우즈 95 의 32 비트 운영체제에서의 실행을 가능하게 한다. 이는 4 기가 바이트의 메모리 사용이 가능함을 의미하는데 모든 데이타를 메모리에 저장하는 것이 가능해 지금과 같이 하드상에 데이타를 저장한 후 신호처리를 하는 방법에 비해 신호 처리시간의

상당한 감소 효과를 가져 올 수 있을 것이다.

4. 신호처리 시스템의 구성

본 연구에서 구성한 신호 처리 시스템은 figure 4

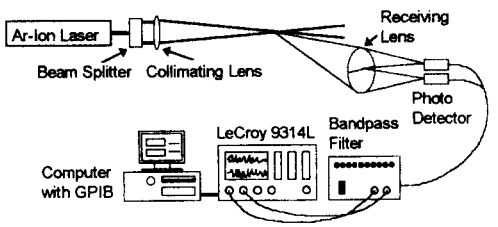


Figure 4 Schematic diagram of PDA system

에 나타나 있다. 레이저 광을 광분리기(beam splitter)와 집광렌즈(collimation lens)를 이용해 공간상의 한 점에 교차시킨다. 입자에 의해 발생되는 도플러 신호는 광센서(photodetector)와 대역필터(bandpass filter)를 통과하여 오실로스토우프의 메모리에 저장한 후 GPIB 를 이용하여 컴퓨터에 입력한다. 컴퓨터에 저장된 도플러 신호는 각 세그먼트별로 소프트웨어적으로 입경과 속도를 구한 후 이를 저장한다. 참고로 본 시스템은 입경과 1 차원 속도 즉, 한 방향만의 속도를 측정할 수 있다.

5. 실제 분무에의 적용 및 검증

지금까지는 도플러 신호를 디지털화 한 후 이로부터 입자의 크기와 속도를 구하는 처리 방법에 대한 설명을 하였다. 즉, 앞에서의 설명은 프로그램 개발에 필요한 방법론과 이들의 구체적인 구현에 관한 내용이라 할 수 있다. 그러나 아직 프로그램의 신뢰성 검증 및 성능에 대한 평가는 이루어지지 않았으므로 이번에 개발된 소프트웨어를 측정 실험에 적용하기 위해서는 우선 이에 대한 논의가 이루어져야 한다. 따라서 본 절에서는 실제 분무로부터 감지되는 신호에 대해 이번에 개발된 프로그램을 다른 측정장치의 소프트웨어와의 결과 비교를 통해 신뢰성을 검증하는데 목적을 두었다. Figure 5 는 본 실험에서 사용한 시스템의 구성도를 보여주는 것이다. 광학 시스템은 기존의 상용화 되어 원자력 열유동 연구실에 설치되어 있는 위상/도플러 입경 측정장치인 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer, Aerometrics Inc. 제품)를 그대로 이용하였다. PDPA 시스템은 크게 레이저, 파이버 드라이버(fiber driver), 집광 렌즈를 포함하는 transmitter 부, 수광렌즈, 광센서를 포함하는 receiver 부, 그리고 신호처리를 위한 DSA(Doppler Signal Analyzer) 및 컴퓨터로 구성되어 있다. PDPA 시스템의 모든 신호처리는 DSA 에서 하드웨어적으로 처리되는 반면 컴퓨터는 측정 데이타의 저장 및 간단한 대표값들의 계산에만 사용된다. 즉, 대부분의 처리가 내부적으로 수행되며 figure 5 에서와 같이 DSA 상의 BNC 케이블 단자는 오실로스코우프를 통해 도플러 신호가 적절히 나오는 지에 대한 시각적 판단을 위 해 설치되어 있다. 이에 반하여 본 연구에서 개발한 신호처리 프로그램인 PDA(Phase Doppler Analyzer, 본 연구에서는 Aerometrics 의 DSA 와의 구분을 위해 명명)는 오실로스코우프를 통해 도플러 신호를 받고 컴퓨터 상에서 모든 처리를 하고 있기 때문에 BNC 케이블 단자를 figure 5 에서와 같이 연결하면 DSA 에서의 신호처리와는 별도로 PDA 를 이용하여 동시에 같은 도플러 신호에 대한 처리를 할 수 있다. 즉, 이는 동일한 입자에 의해 발생된 도플러 신호를 별개의 신호처리 장치로 동시에 계산하는 것이 가능함을 의미하며 본 실험에서는 이러한 구성을 근거로 하여 상용화된 PDPA 의 DSA 를 이용한 신호처리 결과와의 비교를 통해 PDA 프로그램의 신뢰성 검증을 하였다.

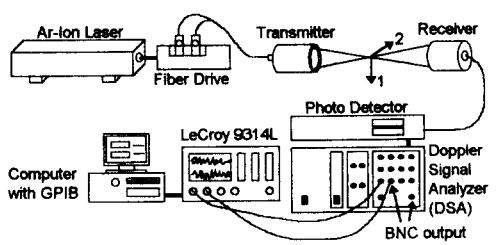


Figure 5 Experimental setup to varify signal processing software

5.1 측정 결과 및 오차 해석

측정은 일반 가습기로부터 발생되는 입자를 이용하였고 도플러 신호의 판단 기준인 신호 대 잡신호비(SNR, Signal to Noise Ratio)는 PDA 와 DSA 모두 0.3 을 주었으며 매번 2000 개의 입자를 측정하여 평균값을 계산한 후 그 결과를 비교하여 오차 해석을 하였다. 참고로 본 실험에서는 신호처

리 기법상의 오차에 대한 논의에 중점을 두고 있다. 따라서, 광학적 정렬 상태 등 다른 요인에

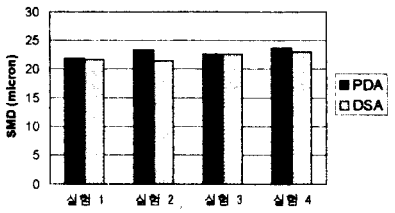
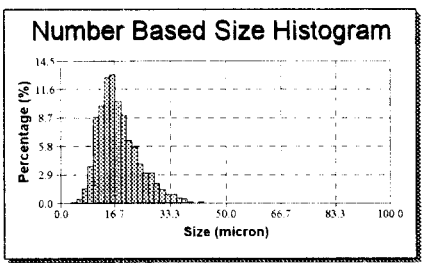
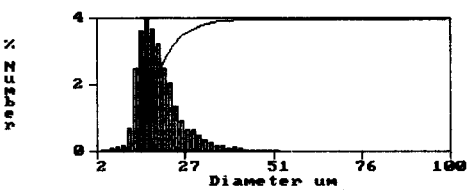


Figure 6 Comparison of measured SMD between PDA and DSA



(a) Measured size histogram using PDA



(b) Measured size histogram using DSA

Figure 7 Comparison of size histogram between PDA and DSA

의한 오차는 논의하지 않았는데 이는 물론 그 영향이 실제 측정상에서 작게 나타나기 때문이 아니라 모든 측정장치에서 공통으로 나타나는 문제이고 동일한 광센서로 부터 나오는 도플러 신호를 단지 두 개의 다른 신호처리 프로그램인 DSA와 PDA에서 처리하므로 신호처리상 이외의 다른 요인에 의한 오차는 공통적으로 동일하며 아울러 본 실험의 목적이 신호처리 프로그램의 신뢰성 검증이기 때문에 다른 인자들은 고려할 필요가 없었기 때문이다. Figure 6은 두 신호처리 프로그램의 신호처리 결과를 비교한 것이다. 위의 그림을 검토해 보면 알 수 있듯이 결론적으로 측정결과는 만족할만 하다. 즉, 실험 #2를 제외하면 DSA에서 계산된 결과를 기준으로 할 때 대략 3 % 이내의 차이를 보이고 있다. 이는 보통 위상/도플러 장치 자체의 측정 오차범위 이내이므로 PDA 프로그램의 신뢰성은 입증되었다고 할 수 있다. Figure 7은 이 중 한 예로서 실험 #3에 대한 입경분포를 비교한 것인데 갯수 및 체적 중심의 히스토그램의 형태가 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이론적으로는 동일한 평균입경에 대해서도 다른 입경 분포를 가질 수 있으나 본 연구에서와 같이 동일한 입자에 대해 측정을 한 경우에는 평균입경과 입경 분포 모두 같은 결과를 보여주어야 한다. 즉, figure 7은 두 신호처리 프로그램에서 나온 결과가 평균입경 만이 아니라 입경분포에서도 측정 오차범위 이내에서 잘 일치하고 있음을 보여준다. 그러나 두 계산결과가 측정오차 범위 이내라 하더라도 동시에 측정된 결과과 정확히 일치하지 않는 것은 엄밀히 아직도 논의의 여지가 있음을 의미한다(비교적 큰 오차를 보이고 있는 실험 #2에 대해서는 뒤에 논의). 그 이유로는 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째, DSA와 PDA는 각각 도플러 신호의 판단 기준으로 설정된 신호 대 잡신호비의 값이 다르기 때문이다. 이는 신호 대 잡신호비의 정의가 다르기 때문인데 신호 처리상에서 기준값으로 준 0.3은 DSA 상에서는 -5.2 dB를 의미하는 반면 PDA 상에서는 0.3 dB을 의미하게 된다. 즉, 상대적으로 잡신호가 많은 도플러 신호의 경우 DSA는 받아들이고 PDA는 버리게 되는데 이는 PDA가 상대적으로 양질의 도플러 신호만을 처리함을 의미한다. 이 경우 두 신호처리 장치는 서로의 장단점을 가 지게 된다. SNR 기준값이 높은 경우 데이타의 인정률(Acceptance ratio)이 높아지는 반면 처리시간이 길어지고 아울러 상대적으로 작은 입자가 데이타로서 인정되지 못할 확률이 높아져 측정된 평균 입경이 약간 증가하게 된다. 둘째, 광센서로부터 나오는 아날로그 신호를 디지털화 할 때의 기준이 다르기 때문이다. DSA는 threshold level을 기준으로 하고 PDA는 trigger level을 기준값으로 하여 그 이상의 신호에 대해서만 디지털화 하는데 이 기준값이 서로 다르기 때문에 처리되는 도플러 신호가 약간씩 틀리게 된다. 이 기준은 SNR의 경우와 같이 너무 높게 설정 되면 도플러 신호를 받아들이는 시간이 오래 걸리고 검사체적을 통과하는 모든 입자를 처리했다고 볼 수 없으며 너무 낮게 설정이 되면

잡신호가 많이 섞인 도플러 신호도 디지털화를 하기 때문에 위에서 설명한 데이타 인정률이 떨어지게 된다. 따라서 각 시스템 별로 최적의 신호를 얻기 위한 적절한 값으로 기준치를 설정하기 때문에 그 값은 서로 다르게 되어 있다. 세째, 디지타이저의 수직 분해능(vertical resolution)이 다르기 때문이다. DSA 는 1-bit quantization 을 사용하고 PDA 는 8-bit quantization 을 사용하고 있는데 이는 1-bit 의 경우는 연속적인 도플러 신호를 0 과 1 의 값으로 나타내고 8-bit 의 경우는 127 과 -128 사이의 값으로 나타냄을 의미한다. 이론적으로 위상과 주파수를 FFT 를 이용해 구하는 경우 1-bit 를 사용하는 것은 8-bit 를 사용하는 것에 비해 정확도가 현저히 떨어지는 것은 당연하므로 잡신호가 들어 있는 경우에 동일한 도플러 신호에 대해서도 위상차와 주파수를 동일하게 얻을 수는 없다. 다만, DSA 의 경우는 FFT 상에서 자체 하드웨어를 통하여 도플러 신호의 인정 여부를 판단한 후 1-bit quantization 을 통해 위상과 주파수를 구하기 때문에 이론적으로 나타나는 정확도의 감소는 상당부분 개선되어 있다고 할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 실험 #2 는 논의에서 제외시켰는데 그 이유를 설명하면 다음과 같다. 이 경우 SMD 는 8 %의 차이를 보이고 있는데 이는 개별적인 데이타 분석을 통해 그 이유를 알 수 있으며 table 1 에 이를 나타내었다. Table 1 은 측정

PDA		DSA	
Size (μm)	Number	Size (μm)	Number
69.17	1	69.25	1
65.83	1	54.39	1
59.17	1		
54.17	1		

Table.1 Comparison of size between PDA and DSA

된 데이타 중에서 최대값을 기준으로 차례로 나타나는 입경 측정치를 비교한 것인데 DSA 의 경우에 비해 PDA 는 54 μm 이상의 크기를 가진 입자가 두 개 더 감지되고 있음을 알 수 있다. SMD 의 계산시 예를 들어 65.83 μm 의 입자가 하나 더 감지되는 것은 17 μm 의 입자가 58 개, 또는 10 μm 의 입자는 285 개 더 감지되는 것과 같은 결과를 보이게 된다. 이러한 이유로 SMD 의 계산 결과는 많은 차이를 보이게 된다. 그런데 table 3 에서 나타난 두 측정 방법상의 차이 즉, 처리 시간, 처리 데이타 갯수등의 차이로 인해 입자가 더 측정될 개연성이 존재하게 되며 이로부터 8 %의 차이가 발생하는 것이다. 따라서 실험 #2 의 차이는 처리 프로그램의 오차가 아니라 신호처리 대상입자의 부분적인 상이함으로 인해 발생한 것이다. 이상의 논의로부터 두 측정결과가 정확히 일치하지 않는 이유를 알 수 있다. 결론적으로 이상에서 나타난 3 % 이내의 편차는 무시할 만하며 비교 측정결과는 서로 잘 일치한다고 할 수 있다.

5.2 2 차원 속도측정 루틴의 검증

2 차원 속도측정 프로그램의 신뢰성 검증을 위한 실험 장치는 figure 4 에서 설명한 PDPA 의 구성을 그대로 사용하였다. 속도 측정시 PDPA 시스템은 반대 방향의 속도를 측정하기 위해 주파수 편이기(frequency shifter)를 사용하여 원래의 도플러 주파수에 40 MHz 의 주파수를 더해 주는데 이를 그대로 푸리에 변환을 하게 되면 주파수 분해능이 대략 40 분의 1 로 떨어지게 된다. 따라서 편이된 도플러 주파수는 다운믹서(downmixer)를 통해 원래의 도플러 주파수로 환원시키도록 되어 있으며 PDPA 시스템은 신호채집률과 FFT

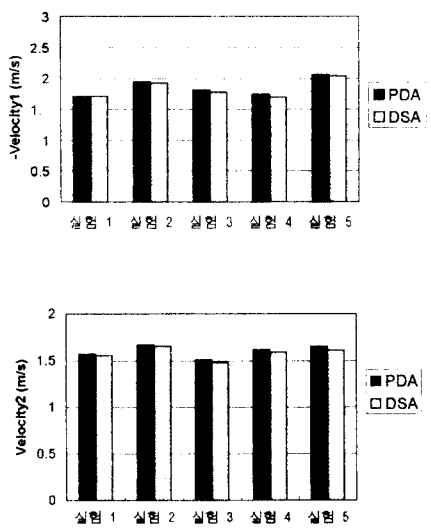


Figure 8 Comparison of measured velocity between PDA and DSA

크기의 함수로 이를 자동적으로 설정한다.

Figure 8 은 각 실험에 대해 두 성분의 평균 속도를 비교한 것이다. 결론적으로 2 차원 속도 측정의 경우도 PDA 와 DSA 측정결과 모두 각각 -1.70 ~ -2.06 및 1.50 ~ 1.67 m/s 의 속도 사이에서 3 % 이내의 오차로 잘 일치하고 있으며 실험 결

과는 만족할 만 하다. 여기서 - 값은 반대 방향 속도를 의미한다. 단, 이 경우에도 앞서의 입경 측정시에 지적한 문제들이 모두 나타나며 이를 감안하더라도 두 결과가 3 % 이내의 편차를 보이고 있이므로 PDA 신호처리 프로그램의 2 차원 속도 측정에 있어서의 신뢰성은 검증되었다고 할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 위상/도플러 기법의 측정의 효율성을 향상시키고 실험 해석을 용이하도록 하는 신호처리 소프트웨어를 개발하였다. 기존의 신호처리 프로그램과의 비교 검토를 통해 신뢰성 검증을 하였으며 2 차원 속도 측정 루틴을 개발하였으며 이는 앞으로 고체-액체 슬러리, 과도분무, DCH(Direct Containment Heating)등의 측정에 기반이 될 것이다. 그리고 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메모리 분할 기법을 이용하여 측정의 효율성을 향상시켰으며 이로 인해 과도분무의 측정이 가능해졌다.

(2) 신호처리 소프트웨어는 윈도우즈의 그래픽 환경을 기반으로 하고 있다. cross-spectral density 함수를 이용하여 입경과 속도를 구하고 이의 평균값, 입경 및 속도 분포, Rosin-Rammler 함수 파라미터 등을 계산하며 이를 그래픽으로 표현하도록 하였다.

(3) 개발된 신호처리 프로그램의 신뢰성 검증 및 성능에 대한 평가를 위해 기존의 신호처리 프로그램인 DSA(PDPA, 원자력 연구소 열유동 연구실)를 이용한 비교 측정을 하였으며 그 결과는 만족할 만 하며 신뢰성은 검증되었다고 할 수 있다.

(4) 2 차원 속도 측정을 위해서는 다른 파장을 갖는 두 레이저광을 한 점에서 교차시킨 후 이로부터 발생하는 각각의 도플러 신호를 이용해 두 개의 속도 성분을 구해야 한다. 본 연구에서는 이를 신호처리 프로그램에 구현하였으며 DSA 를 이용한 비교 측정을 통해 개발된 루틴의 신뢰성을 검증하였다.

참고문헌

[1] Bachalo, W. D., 1980, "Method for Measuring the Size and Velocity of Spheres by Dual Beam Light-Scatter Interferometry," Applied Optics, Vol. 19, pp. 363-370.

[2] Brigham, E. O., 1974, "The Fast Fourier Transform," Prentice Hall, New Jersey.

[3] Class Library Reference For the Microsoft Foundation Class Library, 1993, Microsoft Corporation.

[4] Domnick, J., Ertel, H. and Tropea, C., 1988, "Processing of Phase-Doppler Signals Using the Cross-Spectral Density Function," Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Springer-Verlag, New York.

[5] Durst, F. and Zare, M., 1975, "Laser Doppler Measurement in two phase flows," Proc. LDA Symp., pp. 403-429, Copenhagen, Denmark.

[6] LeCroy model 9314L Digital Oscilloscope Manual, 1993, Lecroy Corporation.

[7] NI-488.2™ Software Reference Manual for MS-DOS, 1992, National Instruments Corporation.

후 기

본 연구는 1995 년도 과학기술처 출연기관 연구과제, 한국과학재단 목적기초연구(KOSEF 92-51-00-02) 및 '94 원자력연구개발 중장기 계획 사업(KAERI/CM-054/94)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.