위상도플러법에 의한 입자의 크기측정

최태민 · 김상진 · 박무룡

Particle Size Measurements Using Phase Doppler Technique

Tae-Min Choi · Sang-Jin Kim · Moo-Ryong Park

● 최태민(한국기계연구원 기계부품연구부)
● 1951년생
● 열전달을 전공하였으며, 열교환기 설계 및 유동가시화에 관심이 있다.

● 김상진(한국기계연구원 열유체기계실)
● 1962년생
● 내연기관을 전공하였으며, 미립화 및 연소기 설계에 관심이 있다.

● 박무룡(한국기계연구원 열유체기계실)
● 1960년생
● 열전달을 전공하였으며, 전산유체역학을 이용한 유동해석과 유체기계설계에 관심이 있다.

1. 머리말

레이저광이 가지는 지향성, 단색성, 공간적 집속성 등의 성질을 이용하는 각종 측정장치는 광섬유의 발달과 새로운 신호처리계의 개발로 그 적용 범위가 점점 확대되고 있다. 레이저 도플러 신호의 위상차를 이용하여 운동상태의 입자의 크기와 속도를 동시에 측정할 수 있는 측정장치가 80년대에 실용화되어 캐비테이션, 분무노즐, 기름버너, 엔진연소 등 많은 분야에서 다양하게 사용되고 있다.

이 측정방법은 Durst와 Zaré[1]에 의해 도플러 신호의 위상과 입자의 크기는 선형적인 함수 관계가 있음이 밝혀진 이래, Bachalo,[2] Buchhave, Knuhfsen과 Olldag[3] 등에 의해 급속히 발전되었다. 현재 국내에도 덴마크의 단텍사, 미국의 에어로메트릭스사 등에서 개발한 장비가 3~4기관에서 사용되고 있다.

이글에서는 위상도플러법에 의한 입자의 크기측정에 관한 기초 이론을 참고문헌을 인용하여 설명하고, 단텍사에서 개발한 위상도플러 측정장치인 입자운동 해석장치(PDA)를 사용하여 본 연구실에서 실험한 버너용 압력분사식 노즐에서 분사된 액적들의 국소부분 거동에 대해 소개하기로 한다.

2. 위상 도플러법의 일반원리

위상 도플러법에서도 레이저 도플러법으로 입자의 속도를 측정할 때와 마찬가지로 단색광이며 코히런스(Coherence)성이 뛰어난 레이저 광선이 어떤 입자에 주사될 때 그 입자로부터 산란되는 산란광으로부터 필요한 도플러 주파수, 위상각 등의 정보를 얻게 된

다.

그러나 공학적으로 의미가 있는 입자의 속도 범위는 레이저광의 속도와는 비교할 수 없을 정도로 느리기 때문에, 움직이는 입자에 직접 주사된 레이저광에 의한 산란광에 포함된 도플러 주파수의 변화는 너무 미소하여 유효한 정보를 직접 검출하기는 대단히 어렵다. 따라서 이러한 미소한 주파수의 변화를 검출하기 위하여 광 간섭법을 채택하게 된다.

2.1 입자의 속도 측정 원리

요즘 사용되고 있는 대부분의 레이저 도플러 속도계나 위상 도플러 장치에서 채택하고 있는 간섭 프린지에 의한 입자의 속도 측정 방법에 대하여 간단히 설명하기로 한다.

먼저 광원인 레이저 광선을 광 분할기를 사용하여 동일한 강도를 가지는 두 가닥의 광선으로 분리하고, 이 분리된 광선을 다시 렌즈를 이용하여 입자의 속도를 측정하고자 하는 위치에 촛점이 맞도록 조정하면, 이 두 입사광이 교차하는 지점에 간섭 프린지가 형성되게 된다.

그림 1에서 보인 바와 같이, 두 입사광이 교차하는 지점 즉 측정체적에서는 프린지간의 간격이 일정하고, 두입사광을 2분하는 선과 평행하며, 두 입사광이 놓여있는 평면에 수직인 면을 가지는 프린지들이 형성되게 된다.

프린지들로 형성된 측정체적을 어떤 입자가 통과하게 되면, 즉 빛의 명암이 교차하는 프린지들을 입자가 지나가게 되므로 이 측정체적을 주시하고 있는 광검출기는 주기적으로 명암이 교차하는 산란광을 검출하게 된다. 이때 검출되는 도플러 주파수는 측정체적을 통과하는 입자의 속도성분중 프린지와 직각인 방향의 속도성분과 비례한다.

이상에서 설명한 바와 같이, 주파수가 동일한 두 입사광에 의해 측정체적에 형성된, 위치가 고정된 프린지 사이를 입자가 통과할 때 광검출기에서 검출되는 도플러 주파수가 입자의 속도에 비례하는 것은 증명되나, 이 때 검출되는 도플러 주파수는 입자가 어느 방향으로 통과하든지 동일한 것이므로 실제 입자의 진행방향을 구별할 수가 없다.

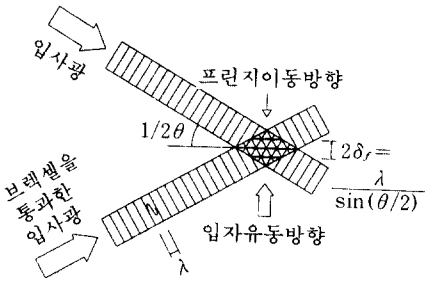

그림 1 프린지 및 측정체적

측정체적에 형성된 프린지가 정지되어 있기 때문에 야기되는 입자의 운동방향을 구별할 수 없는 어려움은 측정체적에 형성되는 프린지를 일정한 속도로 한쪽 방향으로 진행하게 함으로써 해결할 수 있다.

측정체적에 형성된 프린지가 어떤 지정된 방향으로 일정한 속도를 가지고 움직이게 하기 위해서는, 두 입사광의 주파수가 어떤 일정한 값만큼 차이나게 입사광중 한쪽의 주파수를 조정하면 가능하다. 이러한 주파수 조절은 브랙 셀(Bragg Cell) 등을 사용하면 쉽게 조정이 가능하며 일반적으로 40 MHz 정도 편이가 발생되도록 조정한다.

이 경우 입자의 운동 방향이 프린지가 진행하는 방향과 정반대 방향이면 광검출기에 검출되는 주파수는 프린지가 움직이는 주파수와 도플러 주파수의 합으로 나타나고, 입자의 운동 방향이 프린지가 진행하는 방향과 같은 방향이면 광검출기에 검출되는 주파수는 프린지가 움직이는 주파수에서 도플러 주파수를 뺀 값으로 나타나게 된다.

따라서 측정체적속에 형성된 프린지를 일정 방향으로 일정한 속도로 진행시킴으로써 측정하고자 하는 입자의 진행방향과 속도를 명확하게 측정할 수 있다.

2.2 입자의 크기 측정

위상 도플러법을 이용하여 입자의 크기를 측정하는 방법은, 입사광선이 측정하고자 하는 입자를 통과하여 굴절되거나, 혹은 입자의 표면에서 반사될 때 발생하는 산란광의 위상변화에 포함되어 있는 입자크기에 관한 정보를 이용하는 것이다.

레이저 도플러를 이용한 입자의 속도 측정법을 설명할 때와 같이 간단한 프린지 모델을 이용하여 입자크기와 입자에 의해 산란된 산란광의 위상과의 상관관계 및 입자 크기 측정법에 관하여 설명하기로 한다.

앞장에서 설명한 바와 같이 주파수가 동일한 두 입사광을 사용하면 측정체적에는 위치가 고정된 프린지들이 형성되게 된다. 이와 같이 형성된 광간섭 프린지를 그림 2에서 보인 바와 같이 간격이 일정한 광선이라고 가정하면, 이 프린지 영역에 놓여진 투명한 구형 입자에 의해, 입자를 통과하기 전에는 평행하던 프린지 패턴이 입자를 통과한 후에는 그림에서와 같이 집속되었다 다시 공간상으로 투영되어 진다.

이때 입자로부터 R만큼 떨어진 곳에서의 투영된 프린지 간격 S는 아래식과 같다.

$$S-(R-f)(\delta_f/f)-R\delta_f/f = R\delta_f\left\{\frac{4}{D}\right\}(m-1)/\mathrm{m} \qquad (1)$$

여기서, $f=\{m/(m-1)\}\{4/D\}$는 : 액적의 촛점거리, m은 외부매체에 대한 상대 굴절률 (n_p/n_m), D는 입자 지름, δ_f는 프린지 간격을 나타낸다.

한편 이 평행한 프린지영역 즉, 측정체적을 투명한 구형의 입자가 지나가게 되면 그림 2에서와 같은 형태로 투영된 프린지가 공간을 주사하게 된다. 이 경우 입자로부터 R의 거리에 광검출기가 고정되어 있다면, 이 광검출기 위로 투영되는 프린지의 명암이 교차하면서 지나가기 때문에, 이 광검출기로부터는 프린지의 명암에 의해 야기되는 도플러

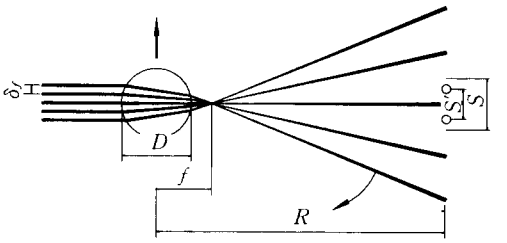

그림 2 프린지 모델

주파수 신호가 검출되게 된다. 입자로부터 R의 위치에 광검출기가 2개 고정되어 있다면 이 두 개의 광검출기에서 검출되는 도플러 신호의 주파수는 동일할 것이나, 광검출기의 프린지 패턴에 대한 상대적 위치가 다르므로 두 검출기에서 측정되는 빛의 강도 즉, 위상은 다르게 검출된다. 두 광검출기에서 측정된 위상의 차이 즉 상대 위상차(ϕ)는 두 광검출기 사이의 거리(S')를 투영된 프린지의 간격(S)으로 나눈 값에 비례하며 그림 2와 그림 3의 기호를 사용하면 식 (2)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}\phi &= 2\pi\frac{S'}{S} \qquad (2)\\ &= 2\pi 2R\sin\Phi\sin\psi/S\\ &= \pi\{m/(m-1)\}\sin\Phi\sin\psi(D/\delta_f)\end{aligned}$$

이상과 같이 간단한 프린지 모델을 이용하여 위상차 ϕ와 입자의 크기 D가 비례관계에 있음을 증명하였다. 또한 이 식에서 위상차 ϕ가 측정하는 위치, 즉 광검출기가 측정체적을 주시하는 위치는 각 Φ와 각 ψ의 함수임도 알 수 있다.

일반적으로 광의 파장보다 훨씬 큰 입자에 의한 산란광의 분포는 기하광학을 이용하면 더욱 정확히 유도될 수 있으며, Saffman[4] 등의 기하광학을 이용한 광산란에 관한 논문에서도 식 (2)와 동일한 결과, 즉 위상차 ϕ와 입자의 크기 D가 식 (2)와 같이 유도됨이 밝혀져 있다.

이상과 같이 간단한 프린지 모델 및 기하

광학을 이용하여 유도한 입자 크기와 위상차와의 관계는 미(Mie) 이론을 이용하여 확인할 수 있다.

Negus와 Drain[5]은 프린지를 지나는 구형입자에서의 산란광을 미 이론으로 계산하여 기하광학적 방법과 미 이론의 일치여부에 관하여 연구하였다. 그 결과에 의하면 임의의 광학 구성에서도 강도, 편광, 가시도 및 위상이 계산되며 계산된 결과와 기하광학의 결과가 잘 일치함을 밝혔다.

3. 광학계의 구성

측정체적에 프린지 패턴을 형성시키기 위한 전달광학부(Transmitting Optics)와 측정체적에서 입자로부터 정보를 검출하기 위한 수광부(Receiving Optics)의 3차원 공간 상에서의 상대적 위치를 그림 3에서 개략적으로 표시하였다.

이장에서는 수광부의 위치 즉 광검출기의 Ψ, Φ면에서의 위치 및 광검출기의 수, 그리고 입자에 의해 산란되는 산란광의 종류에 따른 입자측정 위치의 변경 등에 관하여 설명하고자 한다.

3.1 Ψ의 영향

식 (2)에서 보인 바와 같이 구형 입자에 의한 산란광 도플러 신호의 위상은 광산란 평면(그림 3의 Y−Z 평면)에서 측정한 각변위 Ψ에 의해 결정된다.

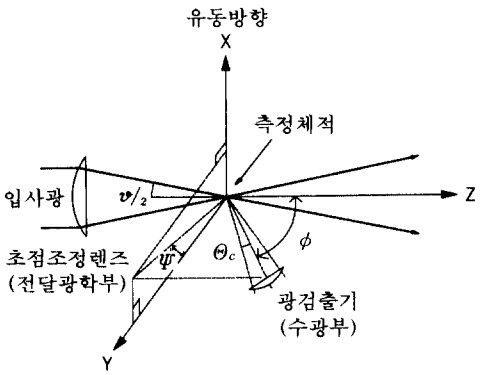

그림 3 측정체적에 대한 광학계의 상대적 위치

또한 2개의 광검출기를 이용하여 각 변위가 각각 Ψ_1, Ψ_2인 지점에서 동시에 도플러 신호를 검출하면, 이 두 도플러 신호의 위상차는 측정 체적을 지나는 구형입자의 직경 D에 선형적으로 비례하여 증가하게 된다. 이 위상차는 두 광검출기 사이의 거리 즉 $\Delta\Psi$가 증가할수록 증가하게 된다.

따라서 두 검출기 사이의 거리를 멀리 할수록 위상차가 커지므로 분해도가 향상되지만, 위상차가 360°를 초과하게 되면 입자의 직경과 위상차의 관계가 모호해지게 되므로 두 검출기 사이를 무한정 멀리 할 수는 없으며, 멀리 할수록 측정할 수 있는 입자의 최대 직경은 작아지게 된다.

360°를 초과함으로 인해 발생하는 이러한 문제는 광검출기 3대를 동시에 사용함으로써 쉽게 해결할 수 있다.

그림 4에서 보인 바와 같이, 각 Ψ와 각 Φ(그림 3 참조)에 의해 정의되는 좌표상에 광검출기 U_1, U_2 및 U_3를 배치하면, U_1과 U_2의 간격이 U_1과 U_3의 간격보다 멀리 떨어져 있으므로 앞에서 설명한 바와 같이 U_1과 U_2에 의해 측정되는 위상차의 분해도가 U_1과 U_3에 비해 훨씬 높지만, 측정할수 있는 입자의 최대 직경은 U_1과 U_3에 의해 측정할 수 있는 직경의 범위보다 훨씬 작다. 따라서 U_1과 U_3 및 U_1과 U_2에 의해 측정되는 위상차를 동시에 고려함으로써 측정분해도를 높

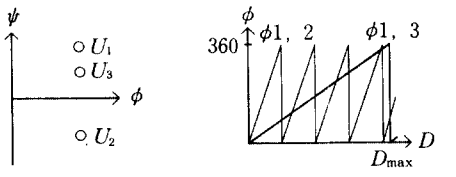

그림 4 광검출기의 위치에 따른 위상차 측정범위

임과 동시에 직경측정범위도 대폭 늘릴 수 있다.

이러한 방법으로, 직경측정범위 즉 광학장치를 변경시키지 않고 측정할 수 있는 최소입경과 최대입경의 비가 약 1 : 40인 장치들이 실용화되어 있으며, 이러한 장치의 광학계를 적절히 조합하여 실제 측정가능한 입자의 크기는 약 1 μm에서 약 10 mm 정도까지이다.

3.2 Φ의 영향

앞에서 광검출기가 놓이는 위치 즉 각 Ψ가 측정하려고 하는 위상차에 미치는 영향을 살펴보았듯이, 각 Φ(그림 3)가 위상차 측정에 미치는 영향을 고려해보기로 한다.

구형의 물방울에 어떤 두 줄기의 평행광이 입사될 때 산란되는 광을 간단히 그려보면 그림 5와 같이 여러가지 반사 및 굴절이 연속됨을 알 수 있다. 즉, 물방울의 표면에서 일부 빛이 반사되고, 물방울 내부로 진입한 광선은 다시 물방울 내부에서 일부가 반사되고 일부가 외부로 투과 즉 1차 굴절되어 나오게 된다. 1차 굴절점에서 물방울 내부에서 반사된 빛은 다시 2차 굴절점에서 일부가 내부에서 반사되고 일부는 외부로 또 다시 투과 즉 2차 굴절되어 나오게 된다.

물방울에 의해 그림 5와 같이 산란되는 산란광의 종류 즉, 반사광, 1차 굴절광, 2차 굴절광, 등에 따라 측정되는 위상차(그림 4의 $\phi_{1,2}$, $\phi_{1,3}$)와 물방울의 직경과의 관계가 다르게 된다. 즉, 기하광학 이론에 기초한 위상과 지름과의 선형적 관계는 한가지 형태의 산란이 우세한 각도에서만 정확하게 얻을 수 있다. 따라서 실제 광학장치의 설치에 있어서는 반사광, 1차 굴절광 혹은 2차 굴절광 중 어떤 한 종류만이 광검출기에 도달되도록 각도 Φ의 선택에 주의하여야 한다.

그림 6은 직경이 10 μm이고 굴절률이 1.33인 물방울에 파장이 0.633 μm인 레이저광선을 주사하였을 때 물방울에 의해 산란되는

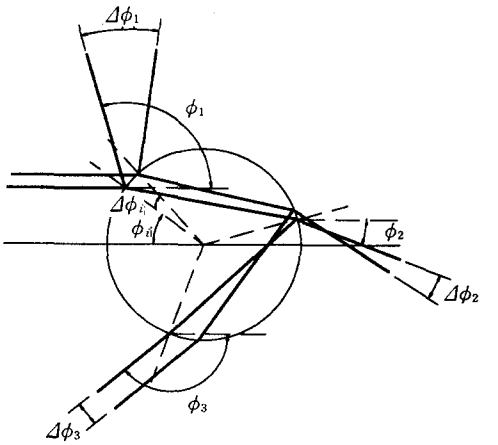

그림 5 투명한 물방울에 의한 산란광

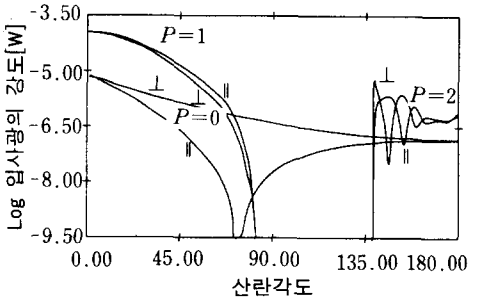

그림 6 기하광학법의 계산에 의한 물방울에서의 산란광의 강도 및 각도분포(파장 : 0.633μm, 굴절률 : 1.33, 지름 : 10μm)

산란광의 강도를 기하광학적으로 계산하여 산란각도에 따라 종류별로 그린것으로 P= 0, 1, 2는 반사, 1차 굴절, 2차 굴절을 각각 의미하며 기호 ∥과 ⊥는 산란평면에 평행한 P편광성분과 직각인 S편광성분을 각각 의미한다.

이 그림에서 반사 및 굴절이 전방산란의 주를 이루고 있음을 알 수 있으며 P성분 편광인 경우 브루스터 각(Brewster angle) Φ_B $=2\tan^{-1}\{1/m\}=73.8°$(공기중의 물방울인 경우)에서는 반사광이 없기 때문에 이 각도에 광검출기를 설치하게 되면 1차 굴절광만이 검출되게 되어, 입자직경과 위상차와의 관계

가 가장 선형적으로 나타나게 된다. 일반적으로, 공기중의 물방울인 경우는 산란각 약 30°~80°까지 어느 경우에나 입자크기와 위상차의 선형성이 상당히 양호하다.

4. 도플러 신호처리

입자의 크기에 비례하는 산란광의 위상차를 레이저 도플러 신호로부터 검출하기 위한 프로세서로는 여러가지가 있으나 도플러 신호를 디지털 방식으로 저장한 뒤 이를 다시 디스크리트 푸리에 변환(DFT ; Discrete Fourier Transform)와 패스트 푸리에 변환(FFT ; Fast Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 주파수영역(frequency domain)에서 스펙트랄(Spectral) 해석하는 방법, 그리고 도플러 신호들의 동적부분 즉 교류 성분들의 상호상관관계(cross-correlation)을 이용하여 위상차를 측정하는 코베리언스(covariance) 방법이 주로 채용되고 있다. 그 이외에도 시영역(time domain) 프로세서인 카운터(counter)프로세서 등이 있으나 입자의 크기 측정을 위해서는 앞의 두 방식에 비해 성능이 떨어지므로 별로 사용되지 않고 있다.

4.1 디스크리트 푸리에 변환 프로세서

패스트 푸리에 변환(FFT) 프로세서를 이용하여 주파수를 계산하기 위해서는 도플러 입력신호를 일차 필터링하여 아날로그/디지털 변환기로 보내어 디지타이저하고 이 신호를 FFT 프로세서에서 처리하게 한다. 이러한 FFT를 이용한 스펙트랄 해석법에서는 신호의 주파수를 결정하기 위해서 다음 식 (3)과 같이 주어지는 DFT를 이용한다.

$$F(n)=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}x(k)\left[\cos\frac{2\pi nk}{N}-i\sin\frac{2\pi nk}{N}\right] \quad (3)$$

여기서, N은 신호를 채집한 샘플수이며, n은 0에서 $N-1$까지의 정수 값을 택하게 된다.

이 식에서 알 수 있듯이 도플러 신호는 어떤 유한한 시간 간격 동안만 채집되며 이 신호에 대해서만 푸리에 상수가 계산됨을 알 수 있다.

식 (3)에 의하여 도플러 주파수가 결정되면, 이 도플러 주파수에 의하여 위상차 ϕ_i는 식 (4)와 같이 계산된다. 여기서, $\sin 2\pi nk$와 $\cos 2\pi nk$는 식 (3)으로 주어지는 DFT의 복소수 성분이다.

$$\phi_i=\text{atan}(\sin 2\pi nk/\cos 2\pi nk) \quad (4)$$

4.2 코베리언스 프로세서

코베리언스(Covariance) 프로세서를 이용하여 계산하기 위해서는 도플러 입력 신호를 일차 증폭하여, 그림 7에서 보인 바와 같이 밴드폭이 조정 가능한 밴드 패스 필터로 필터링하여 디지타이저하고 이 신호를 처리하게 된다.

그림 7에서의 입력신호는 측정체적에서 프린지를 통과하는 입자에 의해 산란된 산란광이 광검출기에 도달하는 신호로서 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$r(t-t_o)=a(t)\cos(\omega_o t) \quad (5)$$

여기서, t_o는 입자가 측정체적에 도달한 시간을 의미하며, $a(t)$는 측정체적의 변형조작에 의해 정의되는 포락선(envelope) 함수이다.

식 (5)와 같이 주어진 실제 입력신호를 90° 위상변위시킨 신호와, 실제 입력신호를 시간 τ만큼 지연시킨 신호를 곱하여 적분하면 식 (6)과 같은 복소수 신호의 허수부를 구할 수 있다.

$$C_i(\tau)=C_o(\tau)\sin(\omega_o\tau) \quad (6)$$

여기서, $C_o(\tau)=\int a(t)\,a(t+\tau)\,dt$이며, τ는 지연시간이다.

한편 실제 입력신호 식 (5)을 시간 τ만큼 지

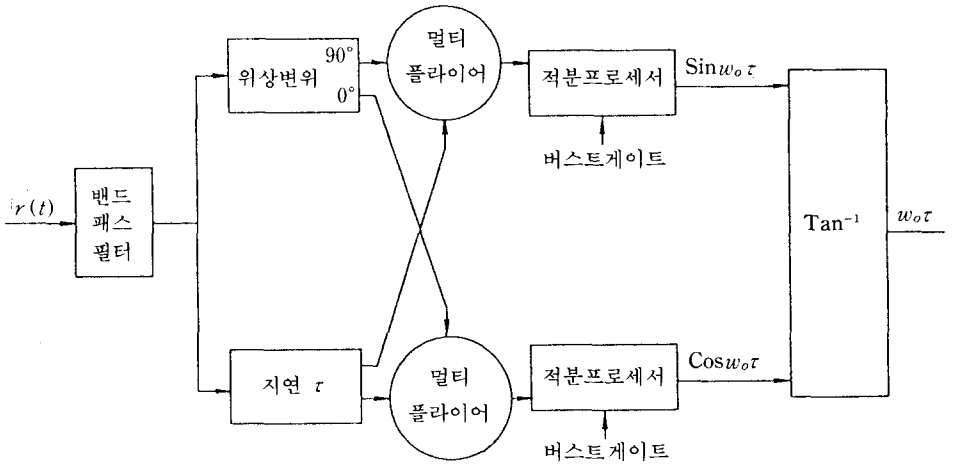

그림 7 주파수 측정 프로세서

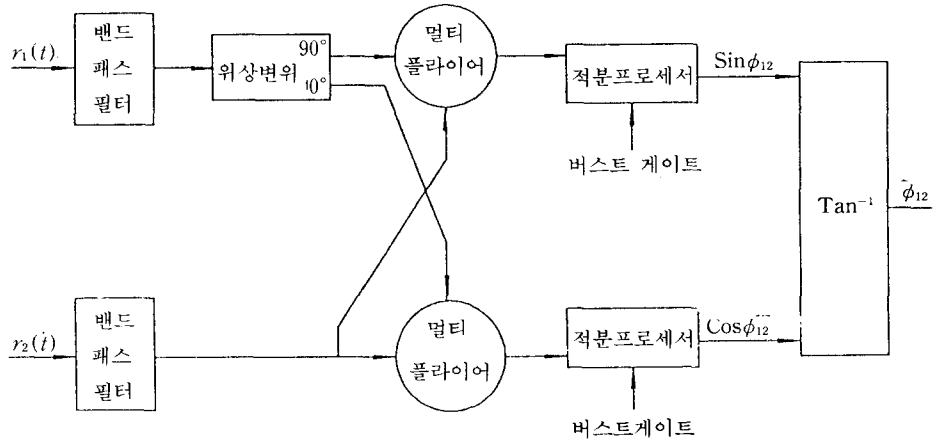

그림 8 위상차 측정 프로세서

연시킨 신호와 곱하면 식 (7)과 같은 복소수 신호의 실수부를 구할 수 있다.

$$C_r(\tau)=C_o(\tau)\cos(\omega_o\tau) \qquad (7)$$

식 (6)과 식 (7)의 비에서 $\tan(\omega_o\tau)=C_i(\tau)/C_r(\tau)$를 구할 수 있고, 지연시간 τ를 알면 이때 도플러 주파수 ω_o를 구할 수 있다.

두 개의 광검출기에서 검출되는 입력신호들을 이용하여 위와 유사한 방법으로 두 입력 신호의 위상차를 구할 수 있고 따라서 입자의 크기를 계산할 수 있다.

그림 8에서 2개의 실제 입력신호를 $r_1(t)=a_1(t)\cos(\omega_o t+\phi_1)$, $r_2(t)=a_2(t)\cos(\omega_o t+\phi_2)$라고 하면 이 두 신호의 상호상관관계 즉 코베리언스는 식 (8)로 주어진다.

$$C_c(\tau)=C_o(\tau)\ \cos(\omega_o\tau+\Delta\phi) \qquad (8)$$

여기서, $C_o(\tau)=\int a_1(t)\ \ a_2(t+\tau)\,dt$이고, $\Delta\phi=\phi_1-\phi_2$이다.

한편 $r_1(t)$ 신호를 90° 위상변화시켰을 때의 코베리언스는 식 (9)가 된다.

$$C_s(\tau)=C_o(\tau)\ \sin(\omega_o\tau+\Delta\Phi) \qquad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에서 $\tau=0$일 때의 위상차 즉 $\Delta\phi$를 구하면 $\Delta\phi=\tan^{-1}\{C_s(o)/C_c(o)\}$를 구할 수 있다.

5. 압력 분사식 노즐의 분무특성

앞에서 설명한 위상도플러법에 의한 입자의 크기 측정의 한 예로서 본 연구실에서 실험한 내용의 일부를 소개하기로 한다.

5.1 실험장치 및 실험조건

본 실험에 사용한 노즐은 가정용 기름보일러의 버너에 많이 사용되는 압력분사식 노즐로서, 단위시간당 분사량은 분무압 8.5 kg/cm²일 때 1.9l/h이며 분무각은 60°이다.

실험은 덴마크의 단텍사가 제작한 최고 출력 5 W인 위상도플러 장치를 사용하였으며, 실험장치의 개략적 구성은 그림 9와 같다.

그림 10은 실험용 노즐이 실제 보일러용 버너에 장착된 상태로 실험장치에 설치된 사진으로 버너 중앙부분에 노즐, 노즐주위 방사형 홈이 파진 것이 버너의 안정기(Stabilizer)이며, 오른쪽 위의 구경이 작은 렌즈가 전달 광학계이며 오른쪽 아래 직경이 큰 렌즈가 수광부의 렌즈이다.

그림 10에서 전달 광학계로부터 나온 4줄기의 광선이 노즐의 앞쪽에서 촛점을 이루어 측정체적이 형성되어 있음을 보여주고 있다.

본 실험에서는 노즐만의 특성 검사가 목적이므로 버너용 블로어는 작동시키지 않은 상태이며, 이때 분사되는 경유 입자들의 분포를 희미하나마 그림 10에서도 확인할 수 있다.

5.2 실험결과 및 고찰

그림 11은 노즐 출구에서 50 mm 및 100 mm 떨어진 지점에서 측정한 경유 입자의 입경분포를 나타내고 있다.

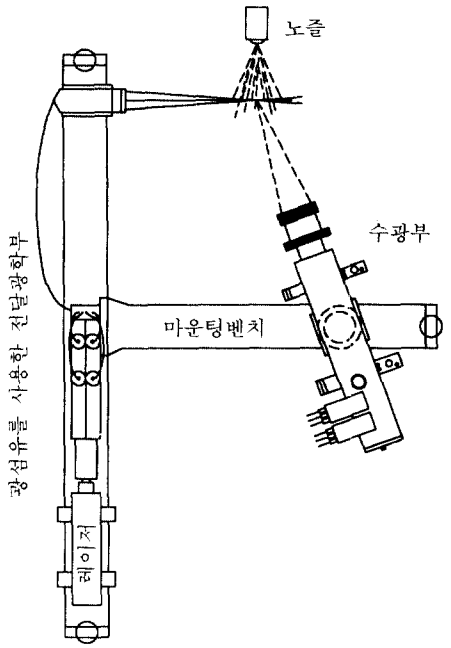

그림 9 위상도플러 실험장치의 개략도

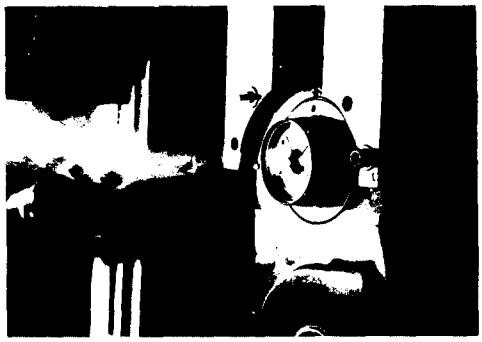

그림 10 압력분사식 노즐 시험

그림 11(a) 즉, 노즐의 축상에서 50 mm 떨어진 지점에서는 소터 평균직경(SMD)는 74.1 μm이고 평균직경이 45.3 μm인 상대적으로 미세한 입자가 주를 이루고 있으며, 같은 지점에서 반경방향으로 3 mm 떨어진 지점(그림 11(b))에서는 SMD가 88.6 μm, 평

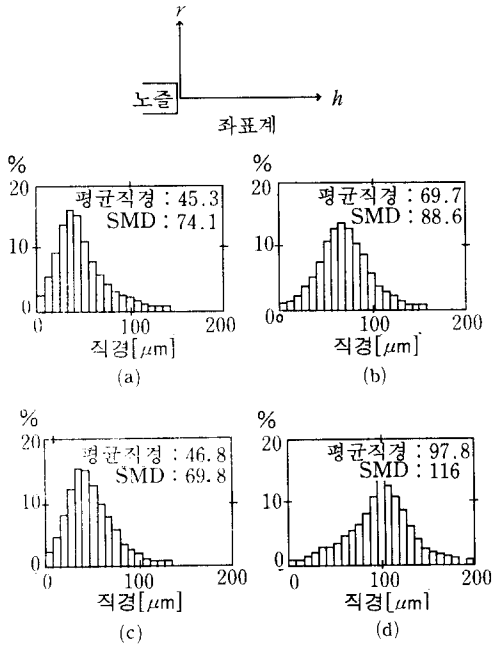

그림 11 입자의 크기 분포

(a) h=50, r=0 (b) h=50, r=3
(c) h=100, r=0 (d) h=100, r=5

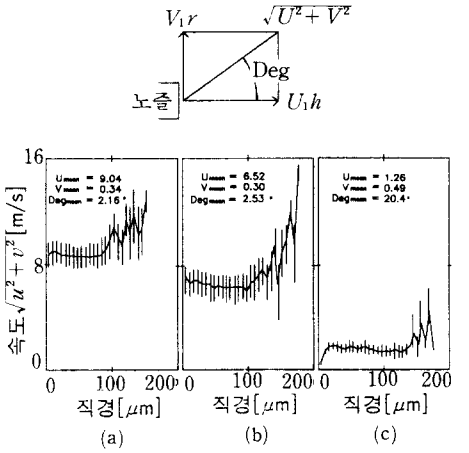

그림 12 입자의 속도 분포

(a) h=100, r=0
(b) h=100, r=5
(c) h=100, r=20

균직경이 69.7 μm로 비교적 큰 입자들로 입경분포가 형성됨을 알 수 있다.

그림 11(a)와 (c)를 비교해보면, 즉 노즐축상에서 거리가 50 mm인 지점과 100 mm인 지점, 입자의 분포 상태가 거의 유사하나 SMD는 노즐출구로부터 거리가 멀어질수록 약간 작아짐을 알 수 있다.

그림 11(d)에서 보인 바와 같이 노즐출구로부터 100 mm, 반경방향으로 25 mm 떨어진 지점에서는 SMD가 116 μm, 평균직경이 97.8 μm로서, 노즐에서 분무되는 압력에 의한 관성력이 상대적으로 큰 경유입자들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이 지점에서 평균입경이 다른 지점에 비해 클 뿐만 아니라 입경의 분포 범위도 넓은 것으로 보아, 노즐에 의해 분사된 미세한 경유입자가 분무되어 노즐로부터 멀어지는 과정에서 다시 재결합되는 경향도 보여주고 있다.

그림 12는 노즐로부터 100 mm 떨어진 노즐축상의 한곳과 반경방향으로 5 mm 및 20 mm 떨어진 지점에서 측정한 경유입자의 속도를 보여주고 있다.

6. 맺음말

광섬유의 발달과 특히 신호처리 프로세서의 획기적 발전으로 날로 그 적용 범위가 확대되어가고 있는 레이저 응용장치중 입자의 크기와 분포, 속도를 동시에 측정할 수 있는 위상 도플러 장치에 대하여 간략히 설명하고, 상용화되어 있는 위상도플러 장치를 사용하여 노즐의 분무상태를 측정한 결과를 일부 소개하였다.

현재 국내에도 신호처리 방법이 상이한 위상 도플러 장치가 몇몇 기관에서 사용중이거나 혹은 도입 예정이므로 이러한 장비를 적극 활용하여 엔진, 연소, 노즐 등에 관한 응용 연구뿐만 아니라, 장치자체의 개발에도 많은 연구가 활발히 진행되기를 바라는 바이다.

참고문헌

(1) Durst, F. and Zare, M., 1976, "Laser Doppler Measurements in Two-Phase Flows," Proc. of the LDA Symposium, Copenhagen.

(2) Bachalo, W. D., 1985, "Apparatus and Method for Determining the Size and Velocity of Particles, Droplets, Bubbles or the Like Using Laser Light Scattering," U. S. Patent Number 4, 540, 283.

(3) Buchhavé, P., Knuhtsen, J. and Olldag, E. S., 1987, "Laser Doppler Apparatus for Determining the Size fo Moving Spherical Particles in Fluid Flow," U.S. Patent Number 4, 701, 051.

(4) Saffman, M., 1987 "Optical Particle Sizing Using the Phase of LDA Signals," Dantec Information No. 05.

(5) Negus, C. R. and Drain, L. E., 1982, "Mie Calculations of the Scattered Light from a Spherical Particle Traversing a Fringe Pattern Produced by Two Intersecting Laser Beams," Phys. D : Applied Physics, 15, p. 375.