

레이저 도플러 속도계

최종운, 김용평*

(*호남대 정보통신공학부, **경희대 전자정보학부)

유체 속에서 움직이는 입자에 의해서 레이저광이 산란되었을 때 발생하는 도플러 변이를 이용하여 유체의 속도를 측정하는 것을 laser Doppler velocimetry(LDV)라고 한다. LDV는 laser Doppler anemometry 라고도 불리고 광분광학의 한 분야이기도 하다.

일반적으로 유체의 유속을 측정하기 위하여 기계적인 유속계가 많이 사용되고 있다. 그 예로는 피토 튜브(pitot tube)와 열선유속계(hot wire anemometry)등이 있다. 그러나 이러한 기계적인 유속계는 측정대상인 유체 내부에 유속계의 탐촉자(probe)를 설치하여야 하므로 유체에 물리적인 교란을 주게 되어서 그 측정 정밀도가 떨어지고, 측정 대상 및 범위에 제한을 갖게 된다. 이와 같은 기계적인 유속계의 단점을 보완하기 위한 비접촉식 측정 방법인 레이저 도플러 속도계(Laser Doppler Velocimeter)가 개발되었다. LDV는 난류와 같은 복잡한 유체변화를 측정하기 위한 기존의 많은 방법들과 비교하여 많은 장점을 제공하고 있다. 즉 LDV는 비접촉식 측정이며, 도플러 주파수의 변화와 유속과의 관계는 선형성을 나타내므로 광학계의 기하학적 조건에 의해서 주파수가 결정되므로 많은 경우 교정이 필요없고, 피측정 유체의 온도와 화학적인 특성에 의해서 크게 영향을 받지 않는다. 또한 미리 정의한 입자의 속도벡터에 의한 속도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 두 개 혹은 세 개 방향 벡터를 측정할 수도 있다. 매우 넓은 범위의 속도를 측정할 수 있고, 평류 뿐만 아니라 난류도 측정이 가능하고, 시간 및 공간적인 분해능도 뛰어나다. 따라서 불안정한 난류를 측정하는 도구로 아주 적합하다. 이와 같은 이유로 인하여 실험 유체역학, 난류, 다상 유체 등을 연구하는데 필수적인 도구로 사용되고 있다.

1. 레이저 도플러 속도계의 원리

고속도로를 주행하는 자동차에서 내는 경적소리와 같은 음파와 우리별과 같은 저궤도 위성에서 방사되는 전파 신호에서 우리는 주파수가 변화되는 도플러 현상을 흔히 경

험할 수 있다. 이 같은 현상을 도플러가 1842년에 발표된 이극성별의 색깔에 관한 논문에서 광파도 음파와 똑같이 송신부 혹은 수신부가 움직이면 주파수 변이를 갖는다고 예측하였다. 빛의 특성을 모르는 상황에서 이와 같은 생각을 하였다니 놀라울 따름이다. 따라서 이와 같은 생각은 그 후로 많은 논란을 거쳤으며, 겨우 40여년 전에 광파에서도 음파와 똑같은 도플러 현상이 일어남을 실험적으로 확인하였다.

모든 파장의 영역에서 전자파가 전파될 때 그 파장의 광원(source), 수신기(receiver), 그리고 전파매질(propagation medium)등의 상대적인 운동에 의하여 본래의 주파수에 대하여 변화를 갖게되는데 이때의 주파수의 변화를 도플러 변이(Doppler shift)라 한다. 즉 움직이는 물체에 부딪혀 산란되는 광파는 도플러효과에 의해서 물체의 속도에 비례하는 주파수변화를 갖는다. 그림 1에서 레이저광이 속도 u 로 움직이고 있는 2번 입자에 의해서 산란되었을 때 산란광의 주파수 변이량 ω' 은

$$\omega' = \omega_0 [1 - (u/c) \cos \theta]$$

로 표시된다. 여기에서 ω_0 는 레이저 주파수, c 는 광주파수, θ 는 입자의 운동방향과 산란광 사이의 각이므로 주파수 변

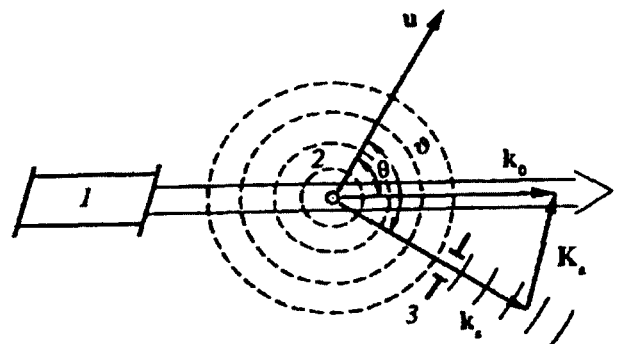


그림 1. 도플러 효과



이량을 계산할 수 있다. 따라서 도플러효과를 이용하면 입자의 속도를 알 수 있다.

도플러효과를 유체의 속도측정에 도입한 것은 1964년 Cummins, Knable, Yeh에 의해서 시도되었다. 이들은 He-Ne레이저를 사용하여 용액 속의 입자가 확산될 때 발생하는 산란광의 스펙트럼 변화를 측정[1]하였고, 곧이어 유체 흐름에서 발생하는 도플러 변이 값을 측정[2]하였다. 유체의 유속을 측정하는 광원과 수신기의 상대적인 운동이 없는 대신에 유체 속에서 운동하고 있는 미소 입자가 광원으로 부터 받은 광을 산란시켜 검출기로 보내는 과정에서 생기는 주파수의 도플러 변이를 이용하였다. 이때 도플러 변이 값은 빛의 파장, 입자에 조사되는 입사광의 방향, 산란광의 방향, 입자의 속도 등에 의해서 결정된다.

도플러 변이는 위 조건에 따라서 수백 kHz~수 MHz 정도가 발생된다. 그러나 수백 m/s로 움직이는 입자에서 발생하는 도플러 변이 값도 수백 THz 인 광주파수에 비하여 아주 미미한 정도의 주파수 변이 값에 불과하다. 따라서 레이저의 광주파수와 산란광의 도플러 변이 값을 직접 측정하는 것은 불가능하다. 초기에는 변이 값을 검출하는데 어려움이 있었으나, 많은 연구자들의 노력으로 산란광의 도플러 변이 값을 간접적으로 측정할 수 있도록 해주는 여러 가지 광학계 구성 방법이 개발되었다. 즉 레이저광을 두 개로 분리하여 한쪽 광은 참조광으로 사용하고, 다른 한쪽 광은 측정체에 입사시켜 도플러 변이된 산란광으로 만들어 사용하는 헤테로다인 검출법이 Cummins 팀과 Foreman[3] 등에 의해서 시도되었다. 두 개의 다른 주파수를 갖는 광파를 검출기 표면에서 혼합시키는 '광 헤테로다인(Heterodyne) 검출법'을 사용하여 두 주파수간의 차주파수(도플러 변이)를 쉽게 검출할 수 있게 되었다. 도플러 변이의 주파수 값은 전기적으로 정확히 측정할 수 있는 값이고, 단위 속도당 발생하는 도플러 변이 값은 도플러효과에 의해서 결정되므로 LDV를 사용하면 매우 늦게 움직이는 입자의 속도도 측정할 수 있게 된다. 곧이어 이 방법을 가스의 속도를 측정하는데도 적용하게 되었으며, 아직까지도 이들의 아이디어는 현대식 LDV에 적용이 되고 있다.

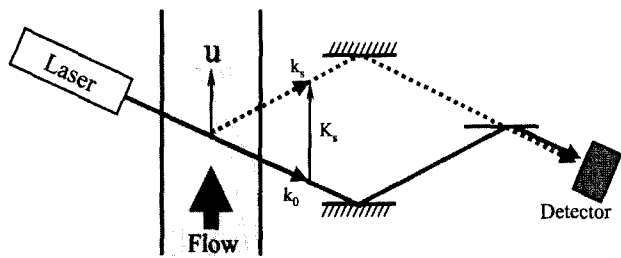


그림 2. Reference-beam LDV의 광학계 구성

그림 2에서 참조광 LDV는 레이저에서 발생한 광을 피측정 유체에 통과시키면 유체 속에 있는 입자에 의해서 점진적으로 표시된 산란광이 발생하게 된다. 이때 산란광의 광주파수는 입자의 속도만큼 도플러 변이 되어 있다. 유체를 통

과한 참조광(k_0)와 산란광(k_s)를 반사시켜 검출기에 입사시키면 검출기에서는 두 광주파수의 차 주파수 즉 도플러 변이 주파수가 광전류 형태로 나타나게 된다. 참조광 LDV는 광학적 구성이 대단히 단순하나, 레이저광이 유체 속을 통과하면서 입자가 있는 모든 곳에서 광산란을 발생시키므로 정확한 측정지점을 정의할 수 없는 단점을 가지고 있다. 또한 참조광 방법은 낮은 S/N비를 가지므로 두 개의 광 모두를 측정광 및 참조광으로 동시에 사용하는 dual beam 방법[4] 혹은 differential Doppler방법[5]으로 발전되었으며 현재 LDV의 광학계의 표준구성이 되어 사용되고 있다.

Dual beam 방법은 두 개 측정광에 의해서 발생하는 산란광을 혼합하여 두 신호 사이의 차 주파수를 얻는데, 차 주파수는 입자의 속도, 광주파수, 측정광의 방향에 의해서만 결정된다. 또한 각 입자로부터의 산란광은 공간상 똑 같은 지점에서 발생되므로, 넓은 구경을 가진 산란광 채집용 렌즈를 사용하면 참조광 방법에 비하여 강한 측정광 신호를 얻을 수 있다.

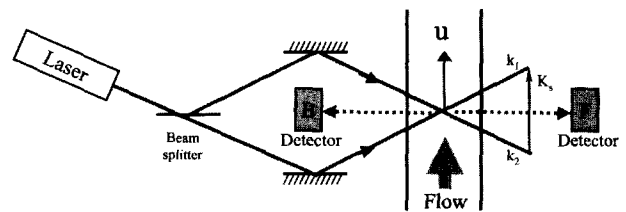


그림 3. Differential LDV 광학계구성도

Dual beam 방식은 그림 3과 같이 광분할기를 사용하여 둘로 분리된 레이저광을 측정 지점에서 교차시켜 형성된 측정 체적부(probe volume)의 간섭무늬들을 유체 속의 입자가 지나가면서 발생시키는 산란광의 도플러 이동을 이용하여 유속을 측정하는 것이다. 이 방식은 검출된 도플러 주파수가 관측 위치(검출기위치)에 무관하기 때문에 구경이 큰 수렴용 집광렌즈를 사용하여 강도가 큰 신호를 얻을 수 있으므로 reference beam 방식보다 실제 응용에 많이 사용되고 있다. 산란된 신호를 수광하는 방향에 따라, 즉 그림 2에서 검출기를 측정부위의 전방, 후방에 설치하는 방법에 따라서, 전방산란(그림 2의 F)과 후방산란(그림 2의 B)으로 분류한다. 전방산란은 광산란 신호의 세기가 후방산란에 비하여 크다는 장점을 가지고 있으나 사용하기 불편하므로, 측정장치를 한 개의 몸체로 제작할 수 있는 후방산란을 많이 사용하고 있다.

2. LDV 신호 이론

LDV 신호를 해석하는 방법에는 도플러 변이를 이용한 고전적인 해석방법과 방법과 프린지(fringe) 모델을 사용하여 해석하는 방법이 있다. 프린지 모델[6]을 사용하면 LDV 신호가 발생하는 원리를 직감적으로 쉽게 알 수 있다. 그림 4의 좌측과 같이 두 개의 코히эр던트한 광이 서로 교차하게

되면 교차점에는 간섭무늬가 발생하게 된다. 간섭무늬사이를 유체속의 입자가 지나가게 되면 간섭무늬의 밝고 어두운 선들에 의해서 그림 4의 우측과 같은 산란신호의 세기 변화로 나타난다. 이때 산란광의 세기 변화율(주파수)은 입자의 속도와 간섭무늬의 간격에 의해서 결정되므로 간섭무늬 간격을 알고 산란광의 변화율을 측정하면 입자의 속도를 계산할 수 있다. 간섭무늬의 간격은 레이저 파장과 측정지점에서 입사하는 두 광속의 교차각에 의해서 결정된다. 따라서 측정용 레이저 파장과 교차각을 알면 간섭무늬의 간격을 알 수 있다. 흥미로운 것은 프린지 모델을 사용하여 해석한 신호의 주파수와 고전적인 도플러 변이를 이용한 해석이 정확하게 일치한다는 점이다. 또한 간섭무늬의 모양을 이용해서 구한 타원체 모양의 측정부위 크기는 도플러 변위를 이용해서 구한 값과 동일하게 나타난다.

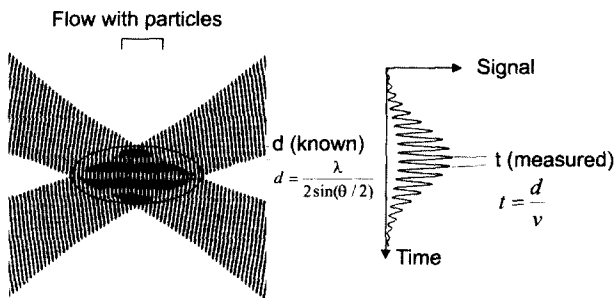


그림 4. 두 광선의 교차점에서 발생하는 간섭무늬와 도플러 신호

일반적인 경우에는 유체의 방향을 미리 알 수 있고, 혹은 유체가 한쪽 방향으로만 흐르는 경우에는 문제가 없으나 난류의 경우와 같이 유체가 전진 후진을 하는 경우에는 기존 방법에서는 똑같은 도플러 변위가 발생하므로 방향을 판별할 수 없다. 따라서 유체의 방향을 판별하기 위한 방법[7]으로 Dual beam LDV의 한쪽 측정광의 주파수를 변화시키는 방법[8]을 사용한다. 또한 측정 체적부를 산란입자가 통과할 때 검출기에서 얻어지는 신호는 도플러 주파수와 페데스탈 잡음(Pedestal noise)이라고 하는 저주파 성분이 포함되어 있다. 이 페데스탈 잡음의 원인은 주위의 다른 광원에서 야기되는 신호나 검출기 자체가 고유하게 가지고 있는 광암전류(photo dark current)등이 그 원인이 된다. 이 잡음은 도플러 주파수와 중합하여 base line에 변이를 주게 되는데 유속성분이 크면 즉, 도플러 맥놀이 주파수가 페데스탈 잡음에 비하여 충분히 크면 필터를 사용하여 페데스탈 잡음을 쉽게 제거할 수 있지만 평균유속이 낮은 난류에서는 도플러 주파수가 페데스탈 잡음 영역에 포함되어 페데스탈 잡음만 제거할 수 없으므로 정확한 도플러 주파수의 검출이 용이하지 않다.

따라서 유체의 방향을 결정하고 도플러 신호와 페데스탈 잡음을 분리시키기 위한 방법으로 레이저광을 편광시키는 방법, 서로 다른 파장(색)의 레이저광을 사용하는 방법 및 주파수 편이(frequency shift)를 이용하는 방법 등이 있는데

주로 주파수 편이 방법이 많이 사용되고 있다. 주파수 편이 방법은 유체의 방향결정과 페데스탈 잡음을 도플러 신호에서 분리시킬 수 있을 뿐 아니라, 평균유속이 낮고 변동이 심한 경우 신호처리의 일종인 tracker의 성능을 개선할 수 있다. 주파수 편이법의 원리는 측정지점에 입사하는 레이저광의 한쪽 혹은 양쪽에 서로 다른 주파수 편이를 주면 두 입사광의 상대적인 주파수 차이가 발생하여 측정지점에 생긴 간섭무늬가 공간적으로 이동하게 된다. 이때 지나가는 입자의 운동방향에 따라 그림 5와 같이 주파수가 달리 발생되므로 유체의 방향을 결정할 수 있다. 또한 레이저광을 고주파로 변조시키면 저주파인 페데스탈 잡음을 쉽게 제거할 수 있다. 주파수 편이를 주기 위한 방법으로는 회전식회절격자(rotating diffraction grating)[9], 전기광학변조기(electro-optic modulator: Kerr cell, Pockels cell)[10], 광음향 변조기(acousto-optic modulator: Bragg cell)[11] 등을 사용할 수 있으나, 일반적으로 기계적인 구동부가 없고 취급이 간편한 Bragg cell 이 많이 사용된다.

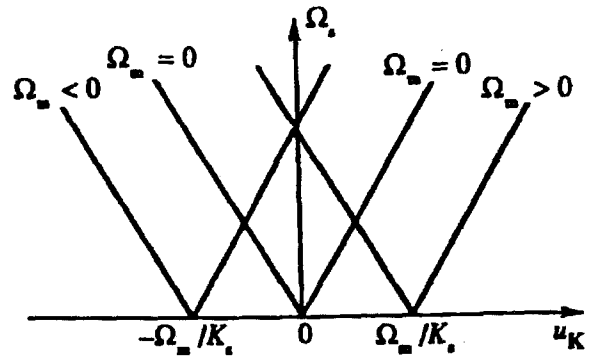


그림 5. 주파수 편이를 이용한 유체의 방향결정

3. 광학시스템과 신호처리계

한 개의 측정지점에서 변화하는 유속의 성질을 알기 위해서는 최소한 세 개의 속도 벡터를 동시에 측정할 필요가 있다. 각각의 속도 벡터가 다른쪽 측정벡터에 서로 영향을 미치지 않으면서 측정을 수행할 수 있는 여러 가지 방법이 연구 개발되어 사용되고 있다.

그림 6은 x, y축의 광원을 번갈아 가면서 사용하는 시간 분할 측정방식이다. 1번에서 발생한 레이저를 2번 광학식 좌표 변조기를 사용하여 x, y 축으로 분리한다. 3번 L자 모양의 aperture를 통과시킨 뒤, 4번 렌즈를 사용하여 5번 측정부위에 집속 시킨다. 산란광은 6번 렌즈를 통하여 7번 광검출기에 수집된다. 10번 동기발생기에서 발생한 신호를 기준으로 9, 11번 전원공급기에서는 2번 좌표 분리를 동작시키고 각각의 측정 벡터에서 발생한 신호는 8번 처리기에서 순차적으로 처리를 한다. 좌표 변조기는 수십 kHz로 x, y축을 번갈아 가면서 선택할 수 있도록 측정광을 분리한다. 이 방법의 장점은 측정순간에 레이저에서 발생한 전체 광

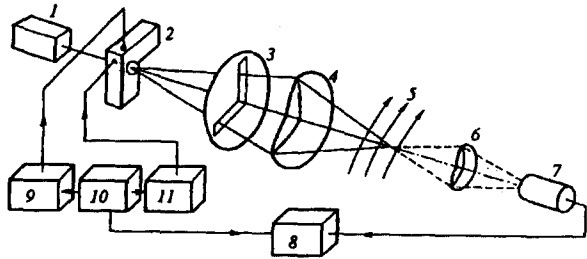


그림 6. 시분할식 2차원 LDV의 광학계 구성

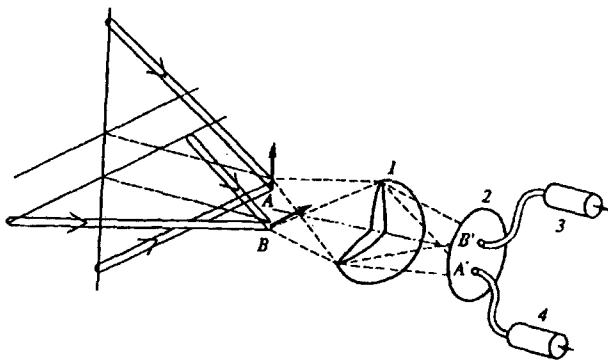


그림 7. 공간분할식 2차원 LDV의 광학계 구성

에너지를 사용하기 때문에 산란광의 세기가 크다는 점이다.

그림 8은 편광을 사용한 채널 분리 방법을 보여주고 있다. 1, 2번은 수직편광, 3, 4번은 수평편광을 가진 광을 측정 지점 5에 집중 시킨다. 측정점에서 발생한 산란광은 6번 렌즈를 사용하여 수집되고, 7번 편광분리 광분할기를 사용하여 각각 분리된 뒤, 8,9번 광검출기에 입사된다. 따라서 서로 다른 편광을 가진 측정부는 서로를 간섭하지 않으면서 x,y 두 개의 벡터를 측정할 수 있는 방법이다.

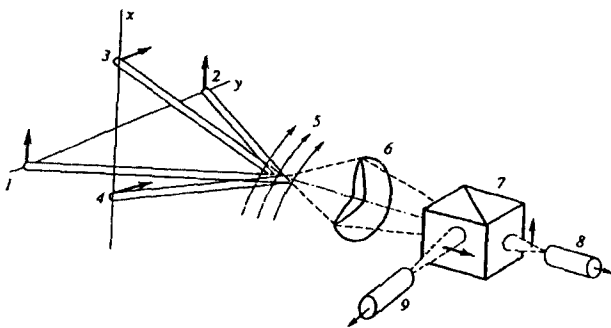


그림 8. 편광을 이용한 2차원 LDV의 광학계 구성

그림 7에서는 4개의 측정광을 사용하여 두 개 지점에서 동시에 측정을 하는 방법을 보여준다. y축으로 정렬된 광은 A 지점에 집중되어 x 방향의 벡터를 측정하고, B지점에서는 y 방향의 벡터를 측정하도록 구성한 것이다. 공간적으로 분리되어 있는 측정지점은 1번 렌즈를 통하여 편광이 있는 2번에 상을 맺고 각각 광섬유를 사용하여 3, 4번 광검출기

를 사용하여 산란광을 검출하는 방법을 보여주고 있다. 이 방법은 광학계는 비교적 단순하게 구성할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 측정광 집중지점 A, B는 서로에 영향을 미치지 않는 범위에서 최대한 접근시키더라도 한 개 지점에서 일어나는 현상을 측정하는 것이 아니라 단점을 가지고 있다.

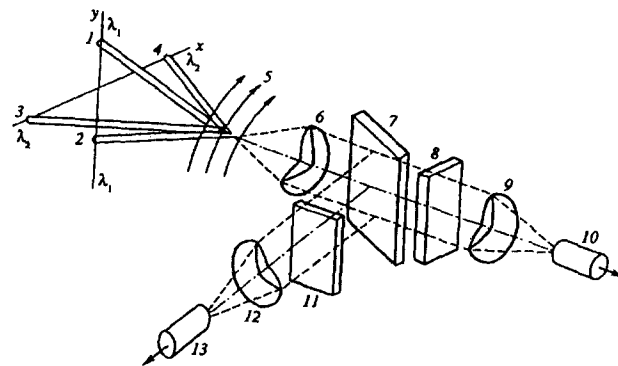


그림 9. 다른 파장의 광원을 이용한 2차원 LDV의 광학계 구성

서로 다른 색을 가진 광, 즉 두 개의 서로 다른 파장을 가진 레이저를 사용하는 기술[12]이 개발되었다. 가스레이저 중에서 아르곤 레이저는 여러 가지 파장을 쉽게 출력시킬 수 있는 레이저 중의 하나다. 예를 들어 $\lambda_1 = 488 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 514.5 \text{ nm}$ 를 사용하여 측정지점 5에 집중한다. 측정점에서 발생한 산란광을 6번 렌즈를 사용하여 수집하고 7번 광분할기로 분할 한 뒤, 8, 11번 필터를 사용하여 x,y 성분을 각각선택하고 9, 12번 렌즈를 사용하여 10, 13번 광검출기로 각각 입사시킨다.

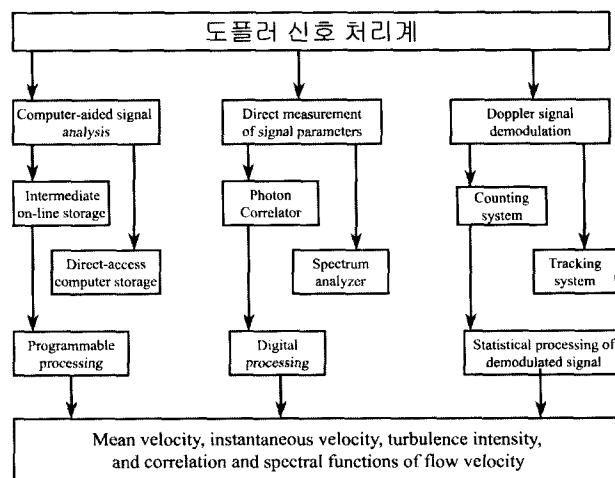


그림 10. LDV용 도플러 신호처리계의 구분

LDV로 측정해야 하는 유속은 $10^2 \mu\text{m/s}$ 에서 10^4 m/s 까지 다양한 범위를 가지고 있다. 이를 도플러 신호의 주파수로 환산하면 10^2 Hz 에서 10 GHz 정도의 저주파수부터 고주파

신호까지의 넓은 범위의 신호를 처리해야 한다. 따라서 한 가지 방식의 신호처리계를 사용해서는 넓은 범위의 도플러 신호를 처리할 수 없다. 초음속 풍동에서와 같이 수백 MHz 이상의 도플러신호는 Fabry-Perot 간섭계와 같은 광스펙트럼 분석기를 사용하여 광파장을 직접 측정하는 방법[13]도 있으나, 일반적인 경우에는 전기적인 신호처리계를 사용하여 측정하는 것이 보편화 되어있다. 신호처리계는 종류에 따라서 다양한 신호분석 결과를 제공하는데 신호처리 방식을 선택할 때에는 다음사항을 고려해야 한다. 첫째, 입력신호의 S/N 비, 둘째, 측정정밀도, 셋째, 원하는 측정결과, 예를 들면, 파워스펙트럼, 평균주파수, 순간주파수 등을 고려하여 신호처리계를 선택하게 된다.

전기적인 신호처리계는 그림 8과 같이 크게 3가지로 구분된다. 첫 번째는 컴퓨터를 사용하여 직접 신호를 처리하는 방식으로, 최고 처리 가능한 주파수는 A/D(analog-to-digital) 변환기의 속도에 의해서 결정되는데 보통 수 MHz 정도이다. 컴퓨터 프로그램을 사용하여 다양하게 도플러 신호를 분석할 수 있어 여러 가지 유체의 성질을 평가하는데 편리한 신호처리 방식이다. 두 번째는 스펙트럼 분석기와 광상관기(photon correlator)를 사용하여 도플러 신호의 통계적인 특성을 직접 측정하는 방식이다. 스펙트럼 분석기는 LDV 초기에서부터 사용되어진 신호 처리방식으로 다수의 입자가 다수의 속도로 측정부를 지나면서 도플러 신호를 발생시켜도 통계적인 방법을 적용하여 처리할 수 있을 정도로 기술이 발달한 신호처리계이다. 최근에는 FFT를 이용한 디지털 스펙트럼 분석기가 개발되어 100 Hz에서 150 MHz 정도의 도플러 신호를 처리하는데 사용되고 있다. 세 번째 방식은 카운터 혹은 트랙커(frequency tracker)를 사용하여 도플러 신호의 순간적인 변화를 측정하는 방식이다. 카운터방식은 두 개의 미리 정한 구간동안 시간을 측정하여 서로를 비교하는 방식[14,15]으로 비교적 낮은 S/N비를 가진 도플러신호 처리에 사용된다.

4. LDV 응용 시스템

레이저광에서 발생하는 도플러효과를 이용하여 회전체 혹은 물체의 속도를 측정하거나, 피부조직을 순환하는 혈류의 속도를 측정하는데 많이 적용되고 있다. 이 같은 목적을 위한 광학계는 되도록 간단한 구조를 가지도록 하기 위해서 되먹임(Self-Mixing)방식을 많이 사용한다. 되먹임 방식은 레이저 공진기의 고유주파수와 도플러 이동된 산란광을 공진기 속에서 자체 혼합하여 발생한 차주파수를 레이저 공진기 뒤쪽에 설치한 광검출기로 측정하는 구조를 가진다.

그림 11에서 운동하는 물체의 표면에서 산란된 광은 도플러효과에 따른 주파수 변이가 발생하게 된다. 따라서 주파수 변이된 산란광의 일부를 렌즈를 통하여 레이저로 다시 되먹임시키면, 레이저 공진기 속에서는 되먹임된 산란광과 레이저 고유의 발진주파수 사이의 간섭이 발생하게 된다. 결국 공진기 속에서는 두 개의 광주파수 사이의 차주파

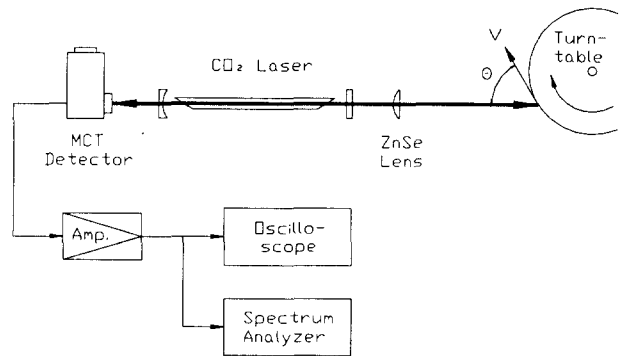


그림 11. CO₂ 레이저의 되먹임을 이용한 LDV의 구성

와 같은 주파수로 레이저 출력이 변조된다. 이와 같이 되먹임식 도플러 속도계는 기존의 LDV에 비하여 장치가 간단하므로 쉽게 속도계를 구성할 수 있는 장점이 있다. 초기에는 He-Ne 레이저를 사용하여 시도되었는데[16], 최근에는 다이오드 레이저[17]와 CO₂ 레이저[18]에도 많이 응용되고 있다. 특히 CO₂레이저에 적용할 때는 액체질소로 냉각되는 MCT (HgCdTe)검출기를 사용하는 번거로움이 있으므로, CO₂레이저의 공진기 자체에서 발생하는 광전류 효과를 이용하여 도플러 효과에 의해 변이된 신호를 검출하는 방법도 연구되고 있다.[19]

레이저 다이오드는 자체에 광검출기가 부착되어 있으므로 소형 LDV를 구성하는 것이 대단히 간단해진다. 먼저 레이저광의 주파수가 움직이는 물체에 의해 도플러 주파수 변이 되었을 때, 주파수 변이된 산란광의 일부를 Laser Diode (LD) 공진기에 되먹임시키면, 공진기 속에서는 산란광과 레이저 고유의 발진 광이 혼합된다. 이때 공진기 속에서는 두 주파수간의 차주파수로 레이저광의 세기가 변조되고, 광전류 효과에 의해서 광의 세기에 따른 임피던스 변화³⁾가 발생한다. 따라서 임피던스 변화에 따른 레이저 공진기에 흐르는 전류 변화를 측정하면 도플러효과에 의해 변이된 주파수 값을 측정할 수 있다. 이와 같은 원리를 이용한 소형 LDV는 의학용으로 많이 연구되어 사용되고 있다.

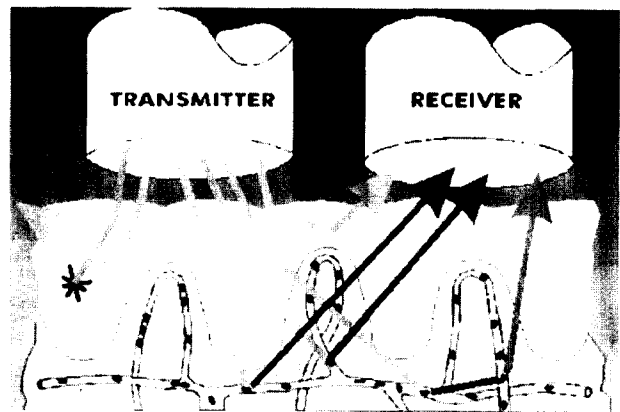


그림 12. 레이저 다이오드와 광파이버를 사용한 혈류계



레이저광이 혈액속에 있는 헤모그로빈에 의해서 산란되어 도플러신호를 발생시키면 혈액의 속도를 측정할 수 있다. 즉 피부조직을 이식했을 때 이식한 피부조직에 혈액 공급이 원활히 되고 있는지 판별하는데 탁월한 성능을 발휘하고 있다.

5. 결 론

도플러가 1842년에 광파와 음파와 똑같이 송신부 혹은 수신부가 움직이면 주파수 변이를 갖는다고 예측한 뒤, 많은 논란이 발생하였다. 그 뒤 광파에서 발생하는 도플러 변이를 이용한 물체의 속도측정은 적합한 광원이 없어 발전하지 못하였으나, 1960년 레이저가 발명되면서 본격적인 연구가 시작되었다. 1964년 He-Ne레이저를 사용한 LDV가 발표된 뒤, 많은 형태의 LDV가 제안되고 있다. 현재도 많은 연구결과들이 발표되고 있으며 유체역학 연구의 필수적인 도구로 발전하였다. 최근에는 광파이버와 레이저 다이오드를 사용한 광학계는 기존 LDV를 한층 더 소형화하였으며, 사용하기 편리하면서, 저가로 사용할 수 있도록 발전하고 있다.

참고문헌

[1] H. Z. Cummins, N. Knable, and Y. Yeh, "Observation of diffusion broadening of rayleigh scattered light," *Physical Review Letters*, Vol. 12(6), pp. 150-153, (1964).

[2] Y. Yeh and H. Z. Cummins, "Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer," *Applied Physics Letters*, Vol. 4(10), pp. 176-178 (1964).

[3] J. W. Foreman, E. W. George, and R. D. Lewis, "Measurement of localized flow velocities in gases with a laser Doppler flowmeter," *Applied Physics Letters*, Vol. 7(4), pp. 77-78, (1965).

[4] C. M. Penny, "Differential Doppler velocity measurements," *IEEE J. of Quantum Electronics*, Vol. QE-5, P 318, (1969).

[5] H. D. Vom Stein and H. J. Pfeifer, "A Doppler difference method for velocity measurements," *Metrologia*, Vol. 5(2), pp. 59-61, (1969).

[6] M. J. Rudd, "A new theoretical model for the laser Dopplermeter," *J. of Scientific Instruments*, Vol. 2, pp. 55-58, (1969).

[7] M. K. Mazumder, "Laser Doppler velocity measurement without directional ambiguity by using frequency shifted incident beams," *Applied Physics Lettes*, Vol. 16(11), pp. 462-464 (1970).

[8] 김규욱, 최중운, 원중욱, "광음향 변조기를 이용한 유체의 방향결정," *한국광학회지*, Vol. 1, No. 1, pp. 58-64, (1990).

[9] W. H. Stevenson, *Appl. Opt.* 9(3), 649 (1970).

[10] L. E. Drain and B. C. Moss, *Opto-Electronics*, 4, 429 (1972).

[11] J. Knuhsten, E. Olldag and P. Buchhave, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 15, 1188 (1982).

[12] George R. Grant and Kenneth L. Orloff, "Two-color dual-beam backscatter laser Doppler velocimeter," *Applied Optics*, Vol. 12, pp. 2913-2916 (1973).

[13] H. J. Pfeifer and H. D. Stein, "Application of the laser velocimeter in a suspersonic wind tunnel," *Optoelectronics*, Vol. 5, pp. 1061-1063 (1973).

[14] 조재홍, 박정환, 최중운, 원중욱, 정명세, "전방산란과 후방산란 Dual Beam LDV 의 구성과 신호처리계," *한국물리학회지*, Vol. 2, No. 1, pp. 34-41 (1989).

[15] 최중운, 조재홍, 정명세, "유체속도 측정을 위한 레이저 도플러 유속계의 구성에 관한 연구," *대한전자공학회지*, Vol.28 A, No. 5, pp.23-31 (1991).

[16] M. J. Rudd, *J. Phys.*, E. 1, 723 (1968).

[17] 이병욱, 황대석, 최중운, 김용평, "되먹임 효과를 이용한 회전체의 속도측정," *한국광학회지*, Vol. 11, No. 4, pp. 250-254 (2000).

[18] 최중운, 김용평, 김윤명, "산란광의 되먹임을 이용한 CO₂ 레이저의 도플러 속도측정," *한국광학회지*, Vol. 7, No. 2, pp. 157-161 (1996).

[19] J. W. Choi, Y. P. Kim, and Y. M. Kim, "Optogalvanic laser Doppler velocimetry using the self-mixing effect of CO₂ laser," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 68, No. 12, pp. 4623-4624 (1997).

저 자 소개



최 중 운(崔鍾云)

1959년 2월 16일생. 1981년 단국대학교 전자공학과 졸업. 1988년 단국대학교 대학원(공학석사), 1997년 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1981~1984년 육군기술장교. 1986~1988 해태전자 중앙연구소. 1995년 공업계측제어기술사. 1996년 전기통신기술사. 1988~2000 한국표준과학연구원 레이저그룹 책임연구원. 2000~현재 호남대학교 정보통신공학부 교수.



김 용 평(金容平)

1955년 2월 9일생. 1979년 경희대학교 전자공학과 졸업. 1981년 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1986년 일본 慶應義塾大學 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~1988년 Imperial College of Science, Technology and Medicine 연구원. 1988년~1996년 한국표준과학연구원 레이저연구실장. 1996년~현재 경희대 전자정보학부 교수.