광음향 변조효과를 이용한 유체의 방향 결정

Determination of Flow Direction by Using an Acousto-Optic Effect

김규욱, 최종윤, 원종옥

한국표준연구소 레이저연구실

The flow direction in a glass tube is measured by using a forward scattering dual beam laser Doppler velocimeter with an acousto-optic modulator. We can determine the flow direction by measuring the shifted Doppler frequency which is dependent on the order of modulation of the laser beam and the fluid flow direction. The optical frequency shifting moves only the Doppler signal, enabling complete separation of the Pedestal and Doppler signal.

I. 서 론

LDV(Laser Doppler Velocimeter)는 레이저를 사용하여 유체의 유속을 측정하는 장치 로 유속의 크기와 방향을 조사할 때 유용하게 응용될 수 있다. 일반적인 경우에는 유체의 방향을 미리 알 수 있고 또 특수한 경우에는 유체가 한쪽 방향으로만 흐르는 경우가 있다. 그러나 recirculating flow나 pulsating flow 에서는 역방향의 속도가 존재하므로 유체의 방향을 결정하기 위한 광학적 배열이 필요하다.

또한 측정 체적부를 산란 입자가 통과할 때 검출기에서 얻어지는 신호에는 Doppler 주파수와 페데스탈 잡음(pedestal noise)이라고 하는 저주파 성분이 포함되어 있다. 이 잡음 은 Doppler 주파수와 중합하여 base line에 변이를 주게 되는데 유속 성분이 크면 즉, Doppler 맥놀이 주파수가 페데스탈 잡음에 비하여 충분히 크면 filter를 사용하여 페데스탈 잡음을 쉽게 제거할 수 있지만 평균 유속이 낮은 난류에서는 Doppler 주파수 가 페데스탈 잡음 영역에 포함되어 페데스탈 잡음만 제거할 수 없으므로 정확한 Doppler 주파수의 검출이 용이하지 않다.

주파수 편이법은 유체의 방향 결정과 페데스탈 잡음을 도플러 신호에서 분리시킬 수 있을 뿐 아니라, 평균 유속이 낮고 변동이 심한 경우 신호처리기의 일종인 tracker 의 성능을 개선할 수 있다. 주파수 편이법의 원리는 측정지점에 입사하는 레이저 빔의 한쪽 혹은 양쪽 모두에 서로 다른 주파수 편이 f_0를 주면 두 입사빔의 상대적인 주파수 차이가 생겨 측정지점에 생긴 간섭무늬는 공간적으로 이동하게 된다. 이때 지나가는 입자의 운동방향에 따라 $f_0 + f_D$ (f_0는 임의의 주파수 편이, f_D는 Doppler 주파수) 혹은 $f_0 - f_D$의 주파수를 측정하여 f 와 비교하고, 이를 이용하여 유체의 방향을 결정할 수 있다. 일반적으로 주파수 편이 f_0는 고주파이므로 저주파인 페데스탈 잡음은 쉽게 제거할 수 있다.

본 연구에서는 광음향 변조기(Bragg cell)를 사용한 이중광속 LDV를 구성하였으며, 주파수를 편이시켜 페데스탈 잡음을 Doppler 신호에서 분리하고 유체의 방향을 결정 할 수 있도록 하였다.

II. 광음향 변조기를 이용한 주파수 편이

이중 광속 LDV계에서 주파수 편이가 없을 때 검출되는 신호의 주파수는 도플러 주파수 f_D로서

$$f_D = |V_x| \frac{2\sin(\theta/2)}{\lambda} \qquad (1)$$

와 같이 주어진다.[1] 여기에서 λ는 레이저 파장, θ는 측정지점에 입사하는 두 레이저 빔이 이루는 각도이며, V_x는 측정 지점을 통과하는 유체의 유속이다.

주파수 편이가 없는 LDV계에서는 (1)식으로 주어지는 도플러 주파수 f_D를 측정함 으로써 유속 V_x를 측정할 수 있다. (1)식에서 알 수 있듯이 유속이 빠를수록 측정되는 Doppler 주파수는 비례적으로 높아진다. 그림 1은 이러한 사실을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 유속의 방향에 따라서 Doppler 주파수는 양의 값 (+) 또는 음의 값(-)을 갖는다. 그러나 실험적으로 측정하는 주파수의 값은 항상 양의 값이므로 주파수의 편이가 없을때에는 유속의 방향을 결정할 수 없게 된다.

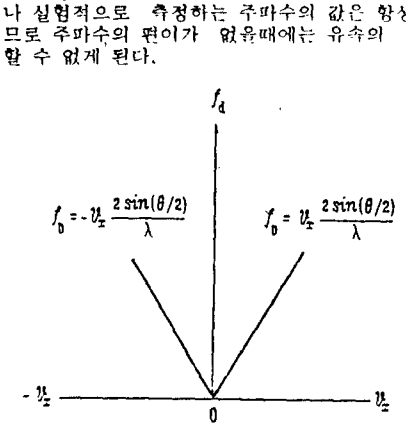


Fig. 1. Frequency of detected signal versus flow velocity without frequency shifting.

이제 입사하는 두개의 레이저 빔 중 하나를 f_0 라는 주파수로 변조시키면 두 빔 사이에 상대적인 주파수 차이가 생겨 측정 지점에 생기는 간섭무늬는 공간적으로 이동하게 된다. 이 때 검출되는 신호의 주파수 f_d는

$$f_d = | f_o \pm f_D | = | f_o \pm v_x \frac{2\sin(\theta/2)}{\lambda} | \quad (2)$$

로 된다.[2] 즉 f_o및 v_x의 부호에 따라서 $f_d = f_o + f_D$ 또는 $f_d = -f_o \pm f_D$이다. 그림 2는 이것을 도식적으로 나타낸 것이다. 여기에서 레이저 빔을 변조 시키는 주파수 f (보통은 수십 MHz)를 f_o (보통은 수백 kHz) 보다 훨씬 크게 해 주면 $f_d = f_o \pm f_D$가 된다. 따라서 변조 주파수(modulation frequency) f_o를 알고 있는 상태에서 f_d를 측정하면 유체의 방향을 결정할 수 있다. 즉, f_d의 값이 $f_d > f_o$일때 유체의 방향은 양의 값 ($v_x > 0$) 이고, $f_d < f_o$ 일때 유체의 방향은 음의 값 ($v_x < 0$) 이다.

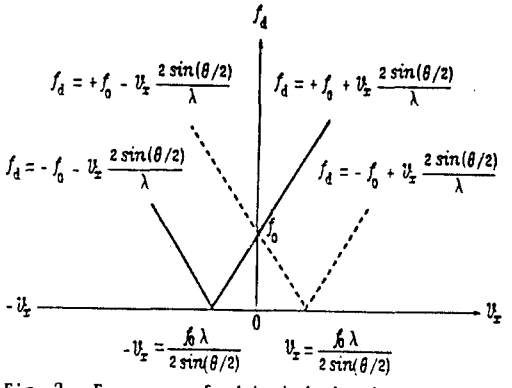


Fig. 2. Frequency of detected signal versus flow velocity with frequency shifting.

이렇게 레이저 빔을 변조시키면 유체의 방향을 결정할 수 있을 뿐 아니라 일반적 으로 Doppler 신호와 함께 검출되는 페데스탈 잡음을 쉽게 분리할 수 있다.

III. 광음향 변조기를 이용한 LDV의 구성

그림 3은 광음향 변조기(acousto-optic modulator)를 사용하여 구성한 전방산란 방식 LDV 장치의 광학계와 유로를 나타낸 개략도이다.[3]

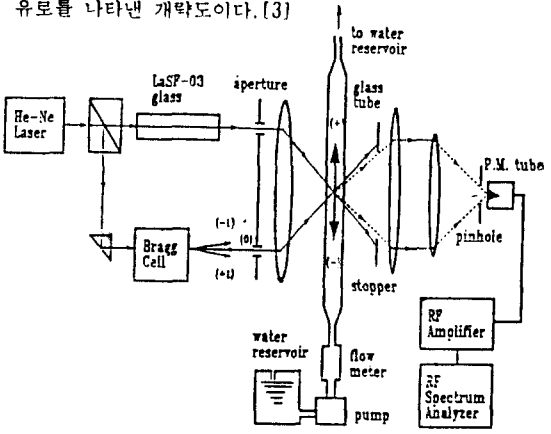
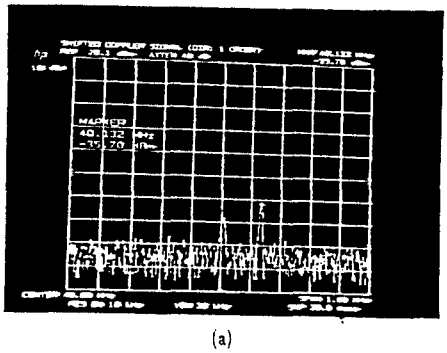


Fig. 3. Experimental set-up for forward dual beam LDV with acousto-optic modulator.

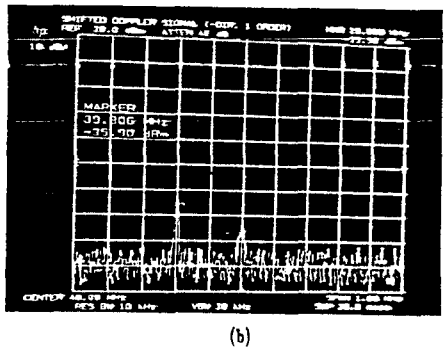
본 연구에서는 광음향 변조기를 사용하여 레이저 빔을 40 MHz로 변조시켰다. 이때 검출되는 신호는 산란광에 묻혀 있는 약한 것이어서 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 광다이오드 검출기(photo diode detector)로는 검출하기가 쉽지 않아서 광증배관을 사용하였다.

IV. 광음향 변조기를 이용한 유체의 방향 결정

이렇게 하나의 레이저 빔을 (+1)차 회절시키고, 물의 흐름 방향을 (+)로 하였을 때 이동된 Doppler 신호(shifted Doppler signal)를 관찰한 것이 그림 4(a) 이다. 그림에서 보이는 40 MHz는 광음향 변조기를 작동시킬 때 생기는 잡음이며, 이동된 Doppler 신호는 40.132 MHz 이어서, Doppler 신호는 132 kHz 이다. 즉, Doppler 신호 132 kHz는 40 MHz 만큼 이동되어서 40.132 MHz로 나타나는 것이다. 그림 4(b)는 물의 흐름을 (+)방향으로 하고, (-1)차 회절된 빔을 사용하였을때 얻은 이동된 Doppler 신호이다. 이동된 Doppler 신호는 변조 주파수 40 MHz 보다 작은 39.806 MHz 이어서, Doppler 신호는 194 kHz (= 40 MHz - 39.806 MHz) 이다.



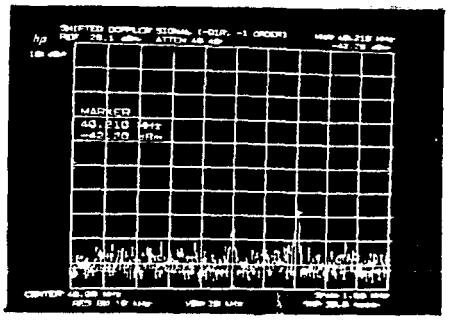
(a)



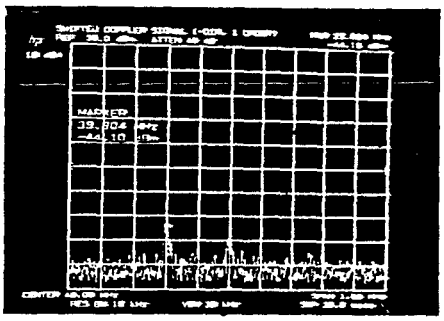
(b)

Fig. 4. Forward scattered signal with frequency modulation. The (+1) st modulated beam is used. Water direction is (+) for (a) and (-) for (b).

유체의 흐름 방향이 (+)일때 (+1)차 회절된 레이저 빔을 사용하면 Doppler 신호의 주파수는 변조 주파수보다 높게 나타나며, (-1)차 회절된 레이저 빔을 사용하면 Doppler 신호의 주파수는 변조 주파수보다 낮게 나타난다. 이와는 달리 유체의 방향이 (-)일때는 이와는 반대의 결과를 얻을 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. Forward scattered signal with frequency modulation. The (-1) st modulated beam is used. Water direction is (-) for (a) and (+) for (b).

그림 5(a)는 물의 방향이 (-)이고, (+1)차 회절된 레이저 빔을 사용하여 얻은 이동 된 Doppler 신호이고, 그림 5(b)는 물이 (-) 방향으로 흐르고, (-1)차 회절된 레이저 빔을 사용하여 얻은 이동된 Doppler 신호이다. 그림에서 보듯이 (a)의 경우에는 이동된 Doppler 신호 주파수가 39.804 MHz로 변조 주파수 40 MHz 보다 낮으며, (b)의 경우에는 이동된 Doppler 신호 주파수가 40.210 MHz로 변조 주파수보다 높게 나타난다.

레이저 빔을 변조시키지 않았을때 얻어지는 Doppler 신호는 페데스탈 잡음에 가깝게 있거나 유속이 낮을 경우 페데스탈 잡음속에 섞여 있을 수 있다. 이 경우 Doppler 신호만 얻는 filter를 구성하기가 쉽지 않다. 그러나 그림 4나 그림 5와 같이 레이저 빔을 변조시켰을 때 얻어지는 Doppler 신호는 페데스탈 잡음과 쉽게 분리된다. 따라서 이동된 Doppler 신호만 얻는 대역 filter를 사용하면 Doppler 주파 수를 쉽게 구할 수 있고, 유속의 크기 및 방향도 구할 수 있다.

위의 그림 4과 그림 5의 실험으로 얻은 결과로 부터 유체의 방향을 결정할 수 있는데, 이를 간단히 정리하면 아래와 같이 네가지 경우로 나눌 수 있다.

1) (+1)차 회절된 레이저 빔 사용, Doppler 신호가 (+)쪽으로 이동→유체는 (+)방향
2) (+1)차 회절된 레이저 빔 사용, Doppler 신호가 (-)쪽으로 이동→유체는 (-)방향
3) (-1)차 회절된 레이저 빔 사용, Doppler 신호가 (+)쪽으로 이동→유체는 (-)방향
4) (-1)차 회절된 레이저 빔 사용, Doppler 신호가 (-)쪽으로 이동→유체는 (+)방향

V. 결론 및 논의

본 연구에서는 전방산란 이중 광속 LDV계에서 하나의 레이저 빔을 광음향 변조기를 사용하여 40 MHz로 변조시킴으로써, 유체의 흐름 방향을 결정할 수 있었다. 회절된 레이저 빔 중 (+1)차 혹은 (-1)차 빔을 사용함에 따라서 이동된 Doppler 신호가 변조 주파수보다 낮게 나타나거나 높게 나타나는데, 이를 측정함으로써 유체의 흐름 방향을 결정할 수 있다.

지금까지의 결과에는 이동된 Doppler 신호와 함께 변조 주파수가 섞여서 검출되고 있는데, 현재 이를 대역필터(bandpass filter)로 제거하고, 앞서 본 연구실에서 발표 한 LDV 신호처리계와 연결시켜서, 유체의 속도 및 방향을 동시에 측정하는 연구를 진행중에 있다. 또한 본 연구실에서 개발하고 있는 2차원 LDV계에도 광음향 변조기를 사용하여 v_x, v_y 의 방향도 측정하고자 한다.

본 연구는 과학기술처 시행 특정연구 과제의 일환으로 수행 되었음.

참고문헌

[1] B.M. Watrasiewicz and M.J. Rudd, Laser Doppler Measurements (Butterworths Co., London, 1976).

[2] DISA Instruction Service Manual.

[3] 조재흥, 박정환, 최종운, 원종욱, 정명세, 응용물리, 2(1), 34 (1989).