

광음향 변조기를 이용한 유체의 방향결정

김규욱·최종운·원종욱

한국표준연구소 레이저연구실

(1990년 1월 15일 받음)

광음향 변조기를 사용하여 전방산란 이중광속 LDV 를 구성하고 유리관 속을 흐르는 물의 방향을 조사하였다. 하나의 레이저 빔을 40 MHz 로 변조시킬 때 회절된 빔의 차수 및 유체의 방향에 따라서 이동된 Doppler 신호의 주파수를 측정함으로써 유체의 방향을 결정하였다. 또한 LDV 장치의 검출기에서 검출된 고주파 신호를 증폭하기 위하여 대역폭이 0-300 MHz 이고 이득이 38 dB 인 증폭회로를 설계 제작하였다.

I. 서 론

LDV(Laser Doppler Velocimeter)는 레이저를 사용하여 유체의 유속을 측정하는 장치로 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 flow 나 pulsating flow 에서는 역방향의 속도가 존재하므로 유체의 방향을 결정하기 위한 광학적 배열이 필요하다.

또한 측정 체적부를 산란 입자가 통과할 때 검출기에 서 얻어지는 신호는 Doppler 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 Doppler 주파수와 중첩하여 base line 에 변이를 주게 되는데 유속 성분이 크면 즉, Doppler 맥놀이 주파수가 페데스탈 잡음에 비하여 충분히 크면 filter 를 사용하여 페데스탈 잡음을 쉽게 제거할 수 있지만 평균 유속이 낮은 난류에서는 Doppler 주파수가 페데스탈 잡음 영역에 포함되어 페데스탈 잡음만 제거할 수 없으므로 정확한 Doppler 주파수의 검출이 용이하지 않다.

따라서 유체의 방향을 결정하고 Doppler 신호와 페데스탈 잡음을 분리시키기 위한 방법으로 레이저광을 편광시키는 방법,⁽¹⁾ 서로 다른 파장(색)의 레이저광을 사용하는 방법⁽²⁾ 및 주파수 편이(frequency shift)를 이용하

는 방법⁽³⁾ 등이 있는데 주로 주파수 편이 방법이 많이 사용되고 있다.

주파수 편이법은 유체의 방향결정과 페데스탈 잡음을 Doppler 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_0 를 주면 두 입사 빔의 상대적인 주파수 차이가 생겨 측정지점에 생긴 간섭무늬가 공간적으로 이동하게 된다. 이 때 지나가는 입자의 운동방향에 따라 $f_0 + f_0$ (f_0 는 입자의 주파수 편이, f_0 는 Doppler 주파수) 혹은 $f_0 - f_0$ 의 주파수를 측정하여 f_0 와 비교하고, 이를 이용하여 유체의 방향을 결정할 수 있다. 일반적으로 주파수 편이 f_0 는 고주파이므로 저주파인 페데스탈 잡음은 쉽게 제거할 수 있다.

다. 일반적으로 주파수 편이 f_0 는 고주파이므로 저주파인 페데스탈 잡음은 쉽게 제거할 수 있다.

주파수 편이를 주기 위한 방법으로는 회전회절격자(rotating diffraction grating),⁽⁴⁾ 전기광학변조기(electro-optic modulator; Kerr cell, Pockels cell)⁽⁵⁾ 및 광음향 변조기(acousto-optic modulator; Bragg cell)⁽⁶⁾ 등을 사용할 수 있으나, 일반적으로 기계적 구동부가 없고 취급하기 쉬운 Bragg cell 이 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 광음향 변조기(Bragg cell)를 사용한 이중광속 LDV 를 구성하였으며, 주파수를 편이시켜 페데스탈 잡음을 Doppler 신호에서 분리하고 유체의 방향

을 결정할 수 있도록 하였다.

II. 광음향 변조기를 이용한 주파수 편이

이중광속 LDV 계에서 주파수 편이가 없을 때 검출되는 신호의 주파수는 Doppler 주파수 f_D 로서

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

와 같이 주어진다.⁽⁷⁾ 여기에서 λ 는 레이저 파장, θ 는 측정지점에 입사하는 두 레이저 빔이 이루는 각도이며, v_x 는 측정지점을 통과하는 유체의 유속이다. 주파수 편이가 없는 LDV 계에서는 (1)식으로 주어지는 Doppler 주파수 f_D 를 측정함으로써 유속 v_x 를 측정할 수 있다. (1)식에서 알 수 있듯이 유속이 클수록 측정되는 Doppler 주파수는 비례적으로 높아진다. 그림 1은 이러한 사실을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 유체의 방향에 따라서 Doppler 주파수는 양의 값(+) 또는 음의 값(-)을 갖는다. 그러나 실험적으로 측정하는 주파수의 값은 항상 양의 값이므로 주파수의 편이가 없을 때에는 유체의 방향을 결정할 수 없게 된다.

이제 입사하는 두 개의 레이저 빔 중 하나를 f_0 라는 주파수로 변조시키면 두 빔 사이에 상대적인 주파수 차이가 생겨 측정지점에 생기는 간섭무늬는 공간적으로 이동하게 된다. 이 때 검출되는 신호의 주파수 f_d 는

$$f_d = |f_0 \pm f_D| = \left| f_0 \pm v_x \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} \right| \quad (2)$$

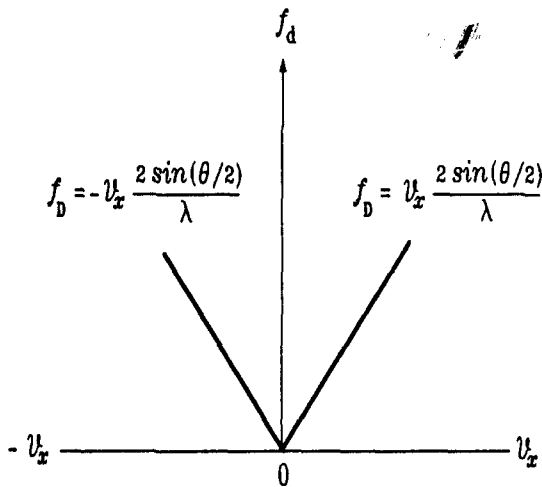


Fig. 1. Frequency of detected signal versus flow velocity without frequency shifting.

로 된다.⁽⁸⁾ 즉, f_0 및 v_x 의 부호에 따라서 $f_d = f_0 \pm f_D$ 또는 $f_d = -f_0 \pm f_D$ 이다. 그림 2는 이것을 도식적으로 나타낸 것이다. 여기에서 레이저 빔을 변조시키는 주파수 f_0 (보통은 수십 MHz)를 f_D (보통은 수백 kHz)보다 훨씬 크게 해주면 $f_d = f_0 \pm f_D$ 가 된다. 따라서 변조주파수 (modulation frequency) f_0 를 알고 있는 상태에서 f_d 를 측정하면 유체의 방향을 결정할 수 있다. 즉, f_d 의 값이 $f_d > f_0$ 일 때 유체의 방향은 양의 값($v_x > 0$)이고, $f_d < f_0$ 일 때 유체의 방향은 음의 값($v_x < 0$)이다.

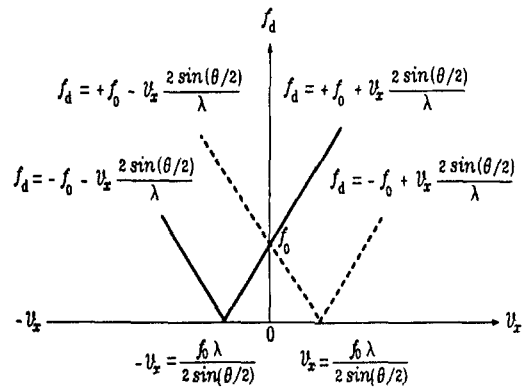


Fig. 2. Frequency of detected signal versus flow velocity with frequency shifting.

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

III. 광음향 변조기를 이용한 LDV의 구성

1. 광학계

그림 3은 광음향 변조기(acousto-optic modulator)를 사용하여 구성한 전방산란방식 LDV 장치의 광학계와 유로를 나타낸 개략도이다.⁽⁹⁾ 본 연구에서 구성한 LDV는 이중광속(dual beam) LDV로, 광원은 4 mW He-Ne 레이저(Melles Griot 05-LHR-141)를 사용하였고, 광속을 광속분할기(cube beam splitter)를 써서 둘로 나누고, 그 중 하나는 광음향 변조기(Isomet; 1201-E1)를 사용하여 40 MHz로 변조시켰다.

실험에서는 변조된 광속 중 (± 1)차 회절된 것을 사용하였고, 두 광속이 광축상에서 각각 4 cm 떨어지도록 하였다.

두 광속은 각각 직경 1.5 mm의 개구(aperture)를

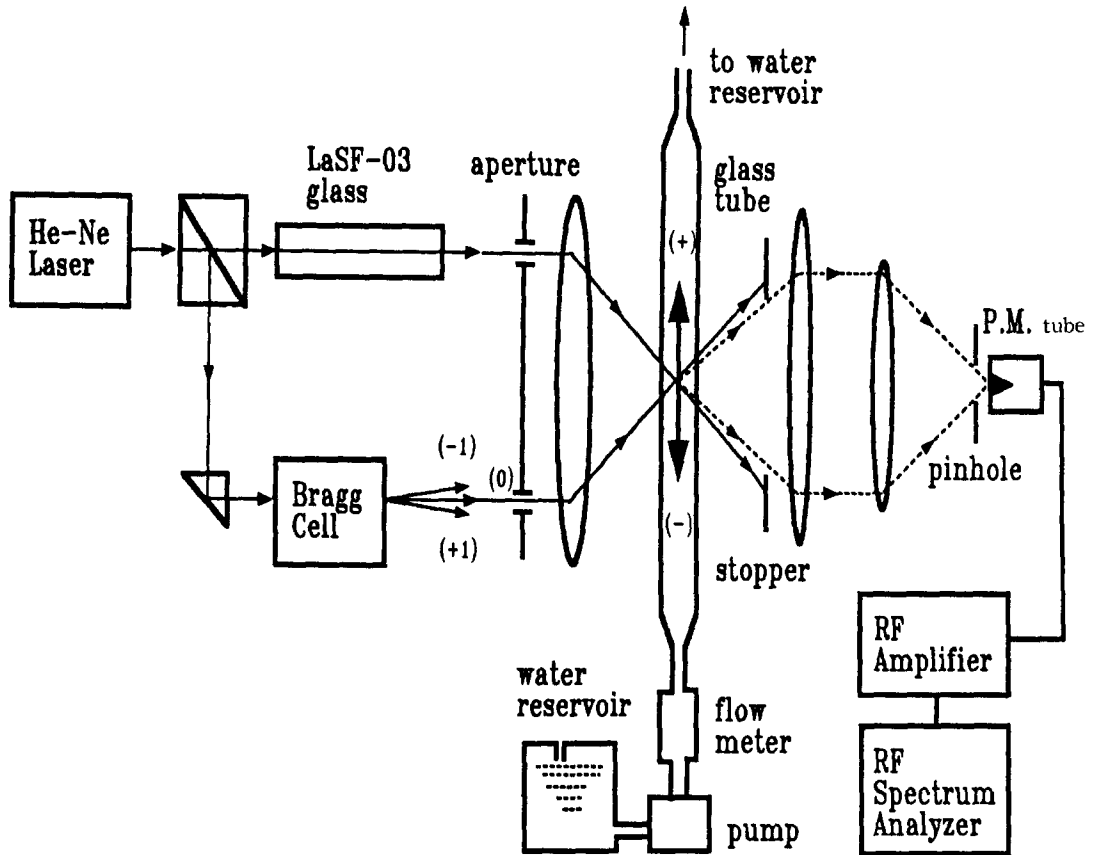


Fig. 3. Experimental set-up for forward dual beam LDV with acousto-optic modulator.

통과한 후 렌즈 L_1 (초점거리 20 cm, 직경 11 cm)에 의하여 유속측정 체적부에 집속시켜 간섭무늬를 형성시켰으며, 개구는 간섭무늬의 visibility를 좋게하기 위하여 설치하였다.⁽¹⁰⁾ 유속측정 지점에 설치한 유로는 그림 3과 같이 내경 40 mm, 길이 1 m의 유리관을 사용하였다. 수조의 물을 0.5마력의 펌프로 유량계(flow meter; Emerson Electronic Co., 1110 BBK 5BIZ)와 유리관 속을 통과시킨 후, 다시 수조로 들어가게 하였으며, 대략적으로 유속을 조절하기 위하여 펌프의 회전수를 슬라이더의 전압으로 조절하였다.

이 때 (1)식의 $\theta/2$ 는 11.3° 이며, 유리관 및 물의 굴절률을 고려한 실제 $\theta/2$ 는 8.68° 이다. 물속의 산란입자들에 의하여 측정지점의 간섭무늬에서 산란된 광속은 렌즈 L_2 (초점거리 20 cm)와 L_3 (초점거리 20 cm)에 의하여 검출기에 집속되며, stopper와 핀홀에 의해 산란광만이 검출기에 입사되도록 하였다. 검출기로는 광증배관(photomultiplier tube; Hamamatsu R1923)을 사용

하였다.

2. 신호증폭회로의 제작

본 연구에서는 광음향 변조기를 사용하여 레이저 빔을 40 MHz로 변조시켰다. 이 때 검출되는 신호는 산란광에 묻혀 있는 약한 것이어서 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 광다이오드 검출기(photo diode detector)로는 검출하기가 쉽지 않아서 광증배관을 사용하였다. 광증배관에 의해 검출된 신호는 증폭기를 통과시키고, 이를 다시 대역필터(bandpass filter 20-100 MHz)를 지나게 하여 페데스탈 잡음을 제거하였고 이를 오실로스코프(oscilloscope; Kikusui; COM 7201) 혹은 RF 주파수 분석기(spectrum analyzer; HP 8566B)에 입력시켜 관찰하였다. 그림 4는 광증배관으로 검출한 신호를 증폭하는 회로로서 본 연구에서 설계 제작한 것이다. 이의 특성은 대역폭이 0-300 MHz 이고 이득(gain)이 38 dB 로서 비교적 높은 주파수의 신호도 증폭할 수 있도록

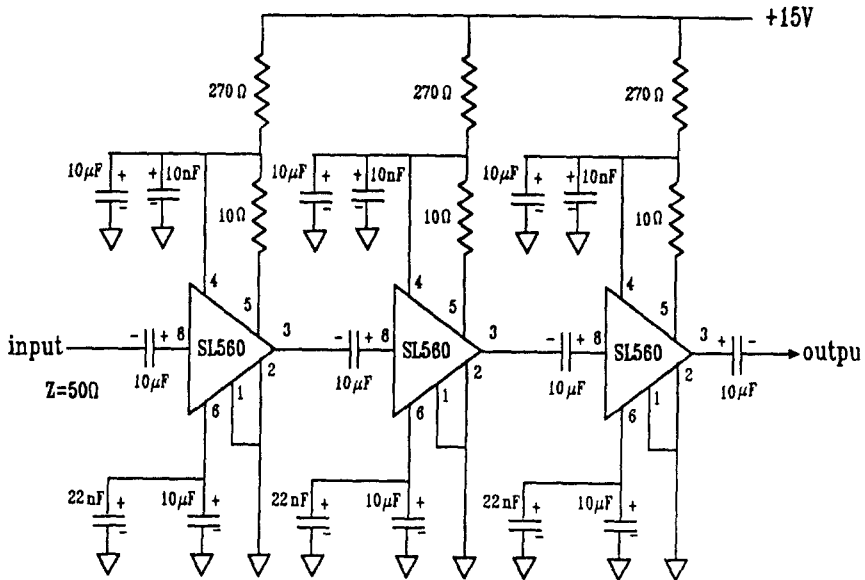


Fig. 4. Electronic amplifier for Doppler signal obtained with PM tube.

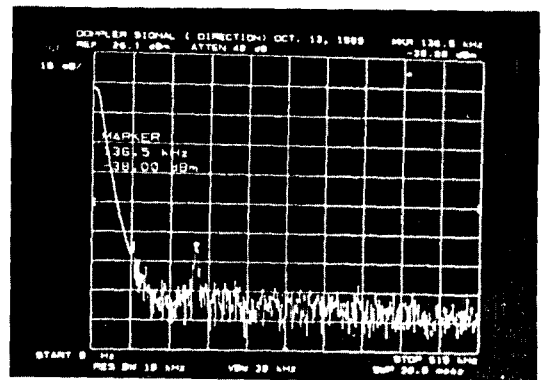
하였다.

IV. 광음향 변조기를 이용한 유체의 방향결정

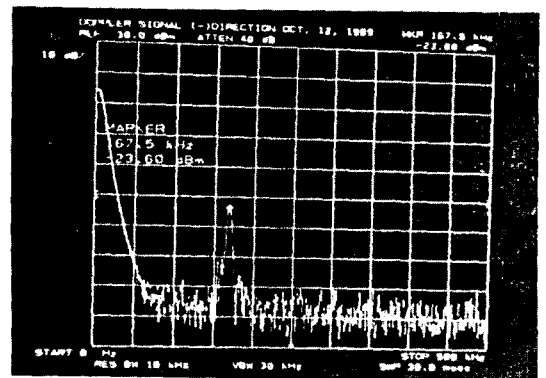
그림 5는 그림 3과 같이 구성한 LDV를 이용하여 얻은 전방산란 신호이다. 이 때 광음향 변조기는 작동시키지 않았으며, 그림 5(a)는 물의 흐름이 (+)방향일 경우이고, (b)는 물의 흐름이 (-)방향일 경우이다. 그림 5(a), (b)와 같이 광음향 변조기를 사용하지 않고 즉, 한쪽 레이저 빔에 주파수 편이를 주지 않고 물의 흐름방향만 바꾸었을 때에는, 물이 (+) 또는 (-)방향으로 흐르는지 구별할 수 없고, Doppler 주파수만 알 수 있다.

본 연구에서는 물의 흐름방향을 판별하기 위하여 광음향 변조기로 변조시킨 광속 중 (± 1)차 회절된 광속을 사용하였다. 그림 6은 (+)차 회절된 광속과, 변조되지 않은 광속을 맥놀이(beat)시킨 것을 RF 스펙트럼분석기를 사용하여 관찰한 것으로 회절된 광속이 40 MHz로 변조된 것을 나타내주고 있다.

이렇게 하나의 레이저 빔을 (+1)차 회절시키고, 물의 흐름방향을 (+)로 하였을 때 이동된 Doppler 신호(shifted Doppler signal)를 관찰한 것이 그림 7(a)이다. 그림에서 보이는 40 MHz는 광음향 변조기를 작동시킬 때 생기는 잡음이며, 이동된 Doppler 신호는 40.132 MHz 이어서, Doppler 신호는 132 kHz이다. 즉, Doppler 신호 132 kHz는 40 MHz 만큼 이동되어서



(a)



(b)

Fig. 5. Forward scattered signal without frequency modulation. Water direction is (+) for (a) and (-) for (b).

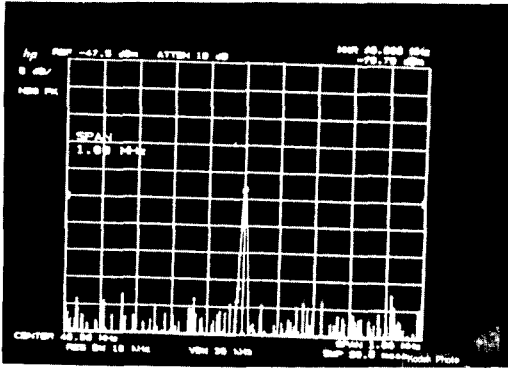
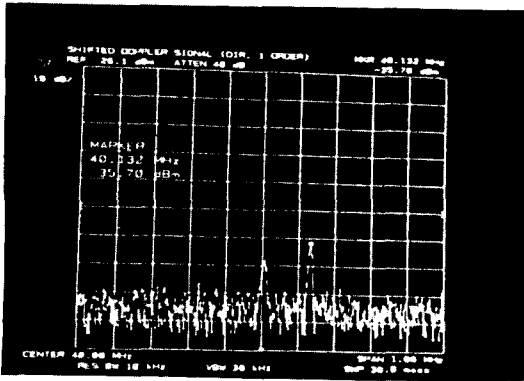
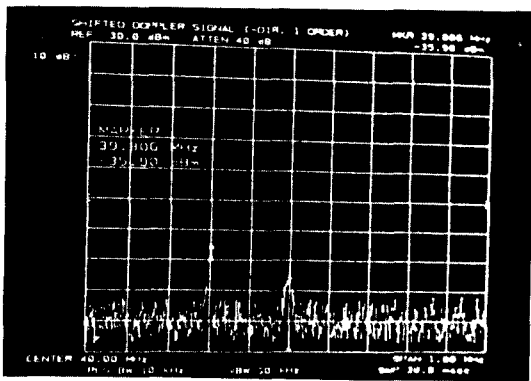


Fig. 6. Beating signal of He-Ne laser beam and modulated beam at 40 MHz.



(a)



(b)

Fig. 7. Forward scattered signal with frequency modulation. The (+1) st modulated beam is used. Water direction is (+) for (a) and (-) for (b).

40.132 MHz로 나타나는 것이다. 그림 7(b)는 물의 흐름을 (+)방향으로 하고, (-1)차 회절된 빔을 사용하였을 때 얻은 이동된 Doppler 신호이다. 이동된 Doppler 신호는 변조주파수 40 MHz 보다 작은 39.806 MHz 이어서, Doppler 신호는 194 kHz 이다. 이와 같이 유체의 흐름방향이 (+)일 때 (+1)차 회절된 레이저 빔을 사용하면 Doppler 신호의 주파수는 변조주파수보다 높게 나타나며, (-1)차 회절된 레이저 빔을 사용하면 Doppler 신호의 주파수는 변조주파수보다 낮게 나타난다. 이와는 달리 유체의 방향이 (-)일 때는 이와는 반대의 결과를 얻을 수 있다.

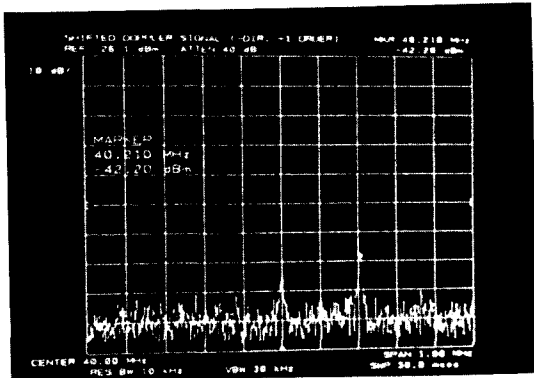
그림 8(a)는 물의 방향이 (-)이고, (+1)차 회절된 레이저 빔을 사용하여 얻은 이동된 Doppler 신호이고, 그림 8(b)는 물이 (-)방향으로 흐르고, (-1)차 회절된 레이저 빔을 사용하여 얻은 이동된 Doppler 신호이다. 그림에서 보듯이 (a)의 경우에는 이동된 Doppler 신호주파수가 39.804 MHz로 변조주파수 40 MHz 보다 낮으며, (b)의 경우에는 이동된 Doppler 신호주파수가 40.210 MHz로 변조주파수보다 높게 나타났다.

그림 5와 같이 레이저 빔을 변조시키지 않았을 때 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 7이나 8과 같이 레이저 빔을 변조시켰을 때 얻어지는 Doppler 신호는 페데스탈 잡음과 쉽게 분리된다. 따라서 이동된 Doppler 신호만 얻는 대역 filter를 사용하면 Doppler 주파수를 쉽게 구할 수 있고, 유속의 크기 및 방향도 구할 수 있다.

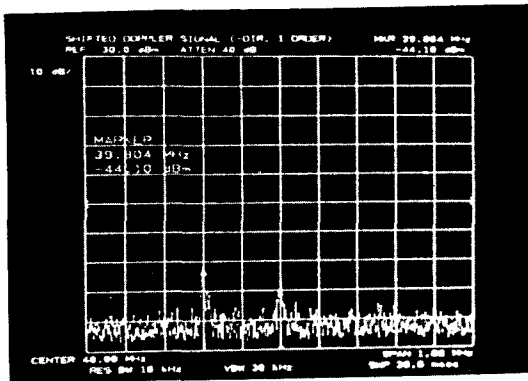
위의 그림 7과 8의 실험으로 얻은 결과로부터 유체의 방향을 결정할 수 있는데, 이를 간단히 정리하면 아래와 같이 네 가지 경우로 나눌 수 있다.

- 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

여기에서 Doppler 신호가 (+)쪽으로 이동되었다는 것은 Doppler 주파수가 변조주파수보다 높은 것을 의미하고, (-)쪽으로 이동되었다는 것은 변조주파수보다 낮은 것을 의미한다. 그리고 회절된 빔의 (± 1)차 방향과 유체의 (\pm)방향은 그림 3에 표시된 것에 따른다. -



(a)



(b)

Fig. 8. Forward scattered signal with frequency modulation. The (-1) st modulated beam is used. Water direction is (-) for (a) and (+) for (b).

V. 결론 및 논의

본 연구에서는 전방산란 이중 광속 LDV 계에서 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 발표한 LDV 신호처리계와 연결시켜서, 유체의 속도 및 방향을 동시에 측정하는 연구를 진행 중에 있다. 또한 본 연구실에서 개발하고 있는 2차원 LDV 계에도 광음향 변조기를 사용하여 u_x , u_y 의 방향도 측정하고자 한다.

본 연구는 과학기술처 특정연구 개발 사업의 일부로써 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Dandliker and P. D. Iten, *Appl. Opt.* **13**(2), 286 (1974).
- [2] G. R. Grant and K. L. Orloff, *Appl. Opt.* **12**(12), 2913 (1973).
- [3] J. Oldengram, A. H. Krienken and H. J. Raterink, *Optics & Laser Tech.* **5**(6), 249 (1973).
- [4] W. H. Stevenson, *Appl. Opt.* **9**(3), 649 (1970).
- [5] L. E. Drain and B. C. Moss, *Opto-Electronics*, **4**, 429 (1972).
- [6] J. Knuhsten, E. Olldag and P. Buchhave, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **15**, 1188 (1982).
- [7] B. M. Watrasiewicz and M. J. Rudd, *Laser Doppler Measurements* (Butterworths Co., London, 1976).
- [8] DISA Instruction & Service Manual.
- [9] 조재홍, 박정환, 최중운, 원종욱, 정명세, 응용물리, **2**(1), 34(1989).
- [10] T. S. Durrani and C. A. Greated, *Laser Systems in Flow Measurement* (Plenum Press, New York, 1977).

Determination of Flow Direction by Using an Acousto-Optic Modulator

Gyu Ug Kim, Jong Woon Choi and Jong Wook Won
Laser Laboratory, Korea Standards Research Institute

(Received: January 15, 1990)

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. Also, an electronic amplification circuit which has a bandwidth of 0 - 300 MHz and a gain of 38 dB is designed and fabricated to amplify the high frequency signal.