

# 유체속도 측정을 위한 레이저 도플러 유속계의 구성에 관한 연구

## (A Study on the Construction of LDV System for a Measurement of the Fluid Velocity)

崔 鐘 云\*, 曹 在 興\*, 鄭 明 世\*

(Jong Woon Choi, Jae Hung Jo, and Myung Sai Chung)

### 要 約

유체속도 측정을 위한 dual beam 레이저 도플러 유속계(laser doppler velocimeter:LDV)의 광학계와 신호처리계를 설계 제작하였다. LDV 광학계는 이중광속(dual beam)형태와 전방산란 신호광 형태로 구성하였으며 신호처리계는 카운터 방식으로 구성하였고, 기준 clock은 500 MHz ECL oscillator를 사용하였다. 또한 오신호 제거를 위해 시간 공간에서 11:6 비교법을 적용한 로직을 구성하였다. 이러한 방식으로 제작된 신호처리계의 측정 가능한 도플러 주파수는 10kHz~70 MHz이다. 그리고 24bit shift register를 사용하였을 경우, 이 주파수대에서 주기 카운터부의 정밀도는  $1.81 \times 10^{-4} \% \sim 1.27\%$ , 이고, 진위판별기의 정밀도는 0.78%~14.78%로 추정된다.

### Abstract

The optics and the signal processor of dual beam laser Doppler velocimeter (LDV) was fabricated. By using the dual beam and the forward scattering, the optics part of LDV was fabricated. And the signal processor of LDV was designed by the frequency counter type using new 11:6 period timing device in order to remove error signals, and was made of the reference clock of a 500 MHz ECL oscillator. Doppler frequencies from 10 kHz to 70MHz can be measured using the signal processor. In the accuracy of the period counting part, from  $1.81 \times 10^{-4} \%$  to 1.27% is estimated, and in the accuracy of the validation logic part, from 0.78% to 14.78 % is estimated.

### I. 서 론

유체의 유속을 측정하기 위한 방법은 오래전부터 기계적·열적인 검출기가 많이 사용되어 왔으며 그 대표적인 검출기로서는 정압과 동압을 검출함으로써

시간평균 유속을 산출하는 피토포관(pitot tube)과 순간 유속측정이 가능한 열선 유속계(hot wire anemometer)를 들 수가 있다.<sup>1)</sup> 이들 pitot tube는 장치가 간단하고 유체의 유속을 정확하게 측정할 수 있어서 지금까지 폭넓게 사용되어져 왔지만 이 장치는 주파수 응답(frequency response)과 공간분해능(spatial resolution)이 좋지 못하여 유체의 난류(turbulence)를 연구하는 분야에서 중요한 미소한 소용돌이를 분석할 수 없다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여서 열선유속계가 뒤늦게 개발되어 유체의 교란을 연

\*正會員, 韓國標準研究所, 레이저研究室

(Korea Standards Research Institute, Laser Lab.)

接受日字: 1991年 3月 4日

(※본 연구는 과학기술처 특정 연구 사업의 지원을 받았음.)

구하는 곳에서 여러해 동안 표준장비가 되어 왔다.<sup>[1]</sup> 그러나 이 열선 유속계도 근본적인 몇가지 문제를 가지고 있다. 그 첫번째가 유체속에 탐촉자(probe)를 삽입함으로써 생기는 물리적 교란을 피할 수가 없기 때문에 높은 정밀도의 유속측정이 어렵고, 따라서 피측정 대상유체와 유체속도의 측정범위에 제한을 받는다.<sup>[2]</sup> 물론 이 문제는 모든 기계적 검출기가 가지고 있는 공통된 문제이기도 한다. 두번째로 열선 유속계의 검출기 모두가 다소 다르기 때문에 유속의 함수로서 전압을 결정하기 위하여 표준장비로 교정(calibration)을 하는 번거로움이 있고, 이는 pitot tube를 교정 표준으로 사용하여 왔다.

난류를 분석하려면 비접촉성 검출기로 측정해야 하며 또한 그 검출기는 시간분해능과 공간분해능이 매우 우수해야 한다. 이 때문에 기계적인 검출기에 의한 유속측정 이외의 다른 형태의 난류를 검출하는 방법이 필요하게 되어 광학적인 측정방법이 대두하게 되었다.<sup>[3]</sup> 이 장치는 레이저광을 유체중에 움직이고 있는 입자에 접촉시키면 입자로 부터 산란된 광은 도플러효과에 의해 입자의 이동속도에 대응하는 주파수의 변화(frequency shift)가 생기게 되는데 이 주파수의 변화를 검출함으로써 입자의 속도 및 유체의 속도를 구할 수 있다. 이것이 레이저 도플러유속계(laser doppler velocimeter:LDV)의 기본원리이다. 이 LDV는 기존의 기계적인 검출기와는 다르게 유체속에 탐촉자를 삽입할 필요가 없기 때문에 물리적 교란을 주지 않으며 온도와 압력의 제한이 없다. 또한 검출된 주파수의 변화와 유속과의 관계는 선형적이며 광학계의 기하학적 조건에 의해서 결정되므로 특별한 교정이 필요없다.<sup>[3]</sup>

이러한 장점을 갖는 LDV는 크게 레이저광속을 헤테로다인 방식으로 유속을 측정하는 직경  $50\mu\text{m}$ 이내의 탐사부(probe)를 형성하는 광학계, 이 광학계에서 수광된 산란광에서 오신호를 제거한후 유속을 환산하는 신호처리계, 그리고 광학계에서 만든 탐사부를 피측정물내에서 3차원으로 이동시키는 3차원 이송대로 구성된다. 광학계는 전방산란광 또는 후방산란광을 이용하는 방식에 따라, 측정할 수 있는 유속 벡터의 성분수에 따라, 유속의 전후 방향을 판별하기 위한 광음향변조기의 사용여부에 따라 구조가 구별된다.<sup>[4,5]</sup> 그리고 신호처리계는 시간공간에서 산란광의 신호주기를 측정하는 주파수 카운터방식, 주파수 공간에서 도플러 주파수를 실시간으로 추적하는 주파수 트랙커방식, 역시 잡음을 줄이기위하여 주파수 공간에서 FFT를 사용하는 방식, 그리고 autocorrelation을 사용하여 유속을 구하는 방식등이 사용된다.<sup>[2,3]</sup>

특히 이러한 LDV에서 잡음과 오신호를 포함한 신호광에서 정밀하고 정확한 유속에 대한 정보를 실시간으로 알아내기 위해서는 신호처리계의 성능이 가장 중요시된다. 위에서 언급한 신호처리계 방식중 주파수 카운터방식과 주파수 트랙커 방식은 hardware 적으로 구성되고 있으며, 가장 최근에는 software 적으로 신호처리를 하는 FFT 방식과 autocorrelation 방식이 소개되고 있다.<sup>[6]</sup> 이중에서 주파수 카운터 방식은 표준장비용으로 사용될 경우 유체에서 발생하는 간헐적인 burst 형태의 신호광을 수 Hz에서 수십 MHz까지의 넓은 주파수 범위에서(이는 넓은 속도범위를 뜻함)정밀하게 측정이 가능하다. 하지만 연속적인 신호를 발생하는 경우(즉, 난류의 경우)를 대비하여 측정 가능한 주파수 범위가 비록 수 MHz정도에서 밖에 되지 않는 주파수 트랙커 방식을 겸용하여 사용하는 것이 통례이다. 이러한 두가지 기능을 하나로 묶으면서 동시에 신호대잡음비를 줄이고자 시도하는 형태가 FFT 방식과 autocorrelation 방식이다.<sup>[6]</sup>

본 논문은 장치의 구성과 정렬이 간단한 일차원 유속벡터성분을 측정하는 전방산란 이중광속 LDV 광학계를 설계, 구성한 후, 이 광학계에서 수광한 산란광에서 유속에 대응하는 주파수 변화를 확인하고, 짧은시간 동안 burst 형태로 발생하는 도플러신호의 주파수를 측정하여 유속으로 환산하는 주파수 카운터방식의 신호처리계를 개발하였다. 특히 70MHz까지 신호를 증폭할 수 있는 초단 증폭부와 500 MHz ECL oscillator의 기준 clock을 사용하여 이 신호처리계는 최대로 147m/s의 유속까지 측정이 가능하며, 또한 잡음에 의한 가짜 도플러 신호를 구분할 수 있는 독특한 11:6비교법에 의한 진위판별 로직을 사용하였다.

## II. 유체유속 측정원리

모든 과정의 영역에서 전자파가 전파될때 그 파장의 광원(source), 수신기(receiver) 그리고 전파매질(propagating medium:scatterer)등의 상대적인 운동에 의하여 본래의 주파수에 대하여 변화를 갖게되는데 이때의 주파수변화를 도플러 이동(doppler shift)이라고 한다. 유체의 유속을 측정하는 LDA 에서는 광원과 수신기의 상대적 운동이 없는 대신에 유체중에 부유하고 있는 미소한 입자가 광원으로부터 받은 광을 산란시켜 수신기로 보내는 과정에서 생기는 주파수의 도플러 이동을 이용하게 되는 것이다.

그림 1은 이중광속(dual beam)LDV의 유속 측정

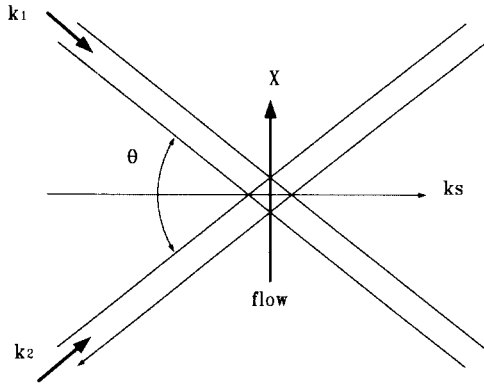


그림 1. 두개 광속에 의한 탐사부의 파수 벡터  
Fig. 1. The configuration of wave vectors in the probe volume.

원리를 보여주는 것으로 레이저에서 나온 두개의 광속이 유체내에서 간섭무늬를 형성하는 것이다. 측정 지점에 입사되는 두 광속의 단위파수 벡터(unit wave vector)를  $k_1$  과  $k_2$  로 하고  $k_s$  방향에서 산란광을 관찰할 때 두 광속의 산란광의 주파수  $f_1$  과  $f_2$  는

$$f_1 = \frac{1}{\lambda} V \cdot (k_s - k_1)$$

$$f_2 = \frac{1}{\lambda} V \cdot (k_s - k_2)$$

가 된다. 여기에서  $\lambda$  는 사용되는 레이저 광의 파장이고,  $V$  는 측정지점에서의 유속벡터이다. 이때  $V$  의 크기는 광속도에 비해서 작다고 가정한다. 두 산란광을 beating 시키면 검출되는 주파수  $f_D$  는

$$\begin{aligned} f_D &= |f_1 - f_2| \\ &= \frac{2}{\lambda} |V \cdot (k_1 - k_2)| \\ &= \frac{1}{\lambda} V_x \sin(\theta/2) \end{aligned} \quad (1)$$

가 된다. 이때  $V_x$  는 유속벡터  $V$  의 x방향 성분이며,  $\theta$  는 측정지점에서 입사하는 두 광속의 교차각이고  $\theta_1 = \theta_2 = \theta/2$  인 경우이다.

같은 이론을 두광속에 의한 간섭무늬를 이용하여 나타내면, 입사하는 두 광속은

$$E_1 = E_{10} \exp(-ikx \sin \theta_1)$$

$$E_2 = E_{20} \exp(-ikx \sin \theta_2)$$

이다. 이때 두 입사 광속을 평면파라 가정했으며,  $E_{10}$  과  $E_{20}$  는 두 광속의 진폭이고  $k$  는 파수이다. 강도분

포  $I(x)$  는

$$\begin{aligned} I(x) &= (E_1 + E_2)^2 \\ &= E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2 E_{10} E_{20} \cos(\theta_D \cdot x) \end{aligned} \quad (2)$$

이고, 여기서  $\theta_D = k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$  이다.

간섭무늬 간격  $d$  는 식(2)에서  $\theta_{Dd} = 2\pi$  를 만족시키는 조건으로부터

$$d = \frac{2\pi}{k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)} \quad (3)$$

이다.  $\theta_1 = \theta_2 = \theta/2$  라 하면 식(3)은

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (4)$$

이 된다. 무늬 사이의 간격  $d$  를 횡단하는데 걸리는 시간  $T$  는

$$T = d/V_x$$

이며, 신호의 주파수  $f_D$  는

$$f_D = 1/T = (2/\lambda) V_x \sin(\theta/2) \quad (5)$$

이 된다. 그러므로  $V_x$  는

$$V_x = f_D \cdot [(2/\lambda) \sin(\theta/2)]^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 식(5)의 표현은 식(1)의 도플러 주파수를 파동 광학적 입장에서 재유도 한 것이다. 이 경우는 측정 탐사부내에 산란입자가 극히 적다는 가정에서 출발 하였으나 산란입자가 많은 경우에도 식(1) 또는 식(5)는 계속 유효하며, 다만 산란광의 시간적 변화 또는 visibility에 통계적 개념이 들어가는 것이 다르고 이것에 대해서는 많은 사람들이 이미 연구를 하였다.<sup>7,8)</sup>

### III. 시스템 구성

그림 2는 전방산란된 LDV 장치의 광학계와 유로를 나타낸 개량도이다. 본 연구에서 구성한 LDV 는 이중광속 LDV로 광원은 25mW He-Ne레이저(spectra physics Co., MODEL 127)를 사용하였고, 광속을 광속분할기(cube beam splitter)를 사용하여 둘로 나누고, 그중 하나는 광로차 보정을위해 LaSF-03 glass를 통과시켰다. 두 광속은 각각 직경 1.5mm의 개구(aperture)를 통과후 렌즈L(초점거리 20cm, 직경 11cm)에 의하여 유속 측정 탐사부에 집속시켜 간섭무늬를 형성시켰으며, 유속측정 지점에 설치한 유로는 그림 2와 같이 내경 40mm 길이 1m의 유리관을 사용하였다. 유속측정은 가정용 수도물을 사용하였으며 수도물내에 특별한 입자를 첨가하지 않아도

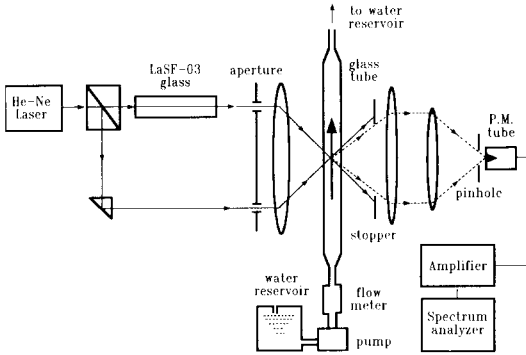


그림 2. 전방산란 LDV 실험 장치도.  
Fig. 2. Experimental setup for forward scattering dual beam LDV.

1 $\mu$ m 전후의 입자들이 이미 포함되어 있어 유속측정을 위한 자연적인 조건을 주었다. 수조의 물을 0.5 마력의 펌프로 유량계(flow meter:emerson electronics Co., 1110 BBK 5 BIZ)와 유리관속을 통과시킨 후, 다시 수조로 들어가게 하였다. 이때 식(1)의  $\theta/2$ 는 11.30°이며, 유리관 및 물의 굴절율을 고려한 실제  $\theta/2$ 는 8.68°이다. 물속의 산란입자들에 의하여 측정지점의 간섭무늬에서 산란된 광속은 렌즈L<sub>2</sub>(초점거리 20cm)와 L<sub>3</sub>(초점거리 20cm)에 의하여 검출기에 집중되며, stopper와 핀홀에 의해 산란광만이 검출기에 입사되도록 하였다. 산란된 신호광의 세기가 미약하였기 때문에 검출기로는 광증배관(photomultiplier tube:hammatsu R1923)을 사용하였다.

IV. 신호처리계 구성 및 실험

광전변환기인 광증배관에 검출된 도플러 신호에서 유속에 관한 정보를 알아내기 위해서는 신호처리 장치가 필요하다. 제작한 신호처리계는 burst 형태의 도플러 신호 처리에 적합한 주파수 카운터의 일종인 frequency burst processing type이며, 전체적인 구성도는 그림 3 과 같다.

Frequency burst 방식의 신호처리계는 그림3과 같이 기본적으로 초단증폭기, 대역필터, level detector, 주기 카운터, 진위 판별기, 그리고 컴퓨터의 6부분으로 이루어진다. 광학계에 의하여 형성된 간섭무늬로부터 산란된 도플러 신호는 초단 증폭기에 의해 38 dB 증폭된 뒤 대역필터에 들어간다. 광증배관에 의하여 검출된 신호에는 도플러 신호뿐만 아니라 낮은 주파수성분의 잡음인 기저잡음(pedestal noise)이

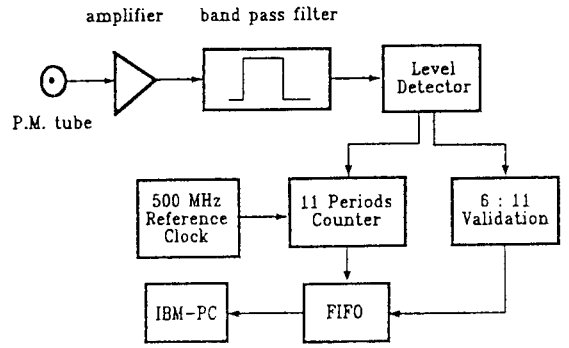


그림 3. 신호처리계의 개략도  
Fig. 3. The block diagram of signal processor.

함께 발생하므로,<sup>[1]</sup> 기저잡음은 대역필터를 사용하여 제거하였다. 그림 4는 10 KHz에서 300 KHz까지 통과되는 대역필터를 사용하여 광증배관에 검출된 신호에서 기저잡음을 제거한 시공간에서의 도플러 신호를 디지털 오실로스코프(kikusui 7200)로 측정된 것이며, 그림 5는 이러한 도플러 신호를 RF 주파수 분석기(hewlett packard 8566B)를 사용하여 주파수 공간에서 측정된 스펙트럼이다. 그림 5에서 보듯이 이 경우 측정된 도플러 주파수는 167.5KHz로 식(6)에 의하면 35.12cm/s의 유속에 대응된다.

유체내에서 간섭무늬를 형성하기 위하여 입사되는 레이저의 단면은 Gaussian 광도분포를 가지고 있으므로, 유체속의 입자들이 이 간섭무늬를 수직으로 횡단하면서 산란시킨 도플러 신호는 그림 4와 같이 burst 형태로 발생한다.<sup>[6]</sup> 그러므로 f<sub>0</sub>의 측정은 burst가 유지되는 시간내에 측정을 해야한다. 이는 level

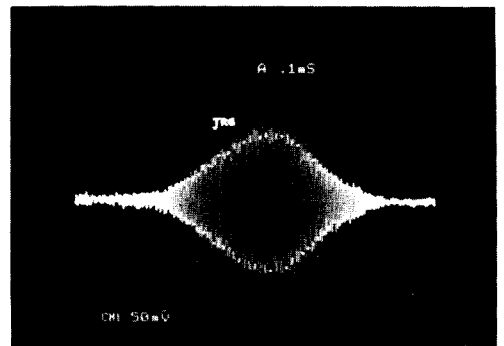


그림 4. LDV 장치에서 검출한 도플러 신호 (x축: 0.1ms/div., y축: 50mV/div.)  
Fig. 4. The typical laser doppler signal of LDV system. (x axis : 0.1ms/div., y axis : 50mV/div.)

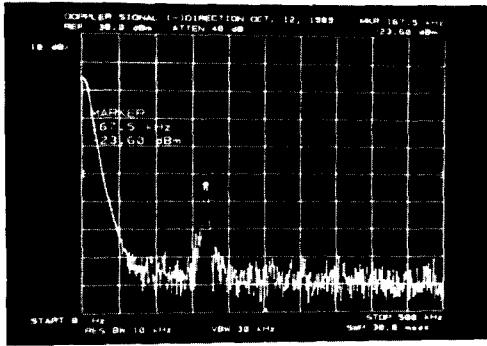


그림 5. 도플러 신호의 스펙트럼  
(10 dBm/div, 50KHz/div, 30KHz 밴드폭)  
Fig. 5. The spectrum of the doppler signal.  
(10 dBm/div, 50KHz/div, 30KHz band width)

detector를 사용하여 입력신호가 미리정해진 값 이  
상이 되면 측정을 시작하고, 그 값 이가 가 되면 측  
정을 멈추게 하여(그림 7의 ST\_END), burst의 유  
무를 감지하도록 하였다.

$f_D$ 의 측정은 도플러 신호가 시작한뒤 수회 zero  
crossing 하는 시간을 측정하여 주파수로 환산하는  
방법으로 측정하였다. 주 측정하고자 하는 신호가  
 $\Delta\tau$  시간동안 N회 zero crossing 하였다면  $f_D$ 는  $N/\Delta\tau$ 가 된다. 이 실험에서는 도플러 신호가 11회 동  
안 zero crossing 하는 시간을 500 MHz의 기준  
clock을 사용하여 측정하였다.

측정 지점에서 산란광으로부터 얻어지는 도플러  
신호는 일반적으로 유체내의 입자들이 간섭무늬의  
중앙을 수직으로 횡단하지 못하여 발생하는 오신호  
와 여러가지 잡음을 가질 수 있는데, 이 오신호와  
잡음은 신호의 크기 뿐만아니라 zero crossing 하는  
데에도 통계적 변동(statistical fluctuation)의 결과  
를 가져온다.<sup>9,10</sup> 따라서 신호처리계는 검출된 도플러 신  
호가 진짜 유속의 정보를 포함한 신호임을 가리는  
신위 판정을 해야한다. 신위 판정 방법은 측정하려  
는 도플러 신호의 두개의 임의 구간에서 각각 주기  
를 측정하여 두개 구간의 주기차가 정해진 오차이내  
이면 받아 들이고, 오차 이상일 경우에는 거절하는  
방식이다. 이 실험에서는 6주기와 11주기를 취하여  
비교하도록 하였다. 6주기와 11주기간의 오차는

$$E = (11/T_{11}) | (T_{11}/11) - (T_6/6) | \times 100 \quad (7)$$

이며, 여기에서  $T_{11}$ 과  $T_6$ 은 각각 11번과 6번 zero  
crossing 하는데 걸리는 시간이다. 이 값이 허용오차

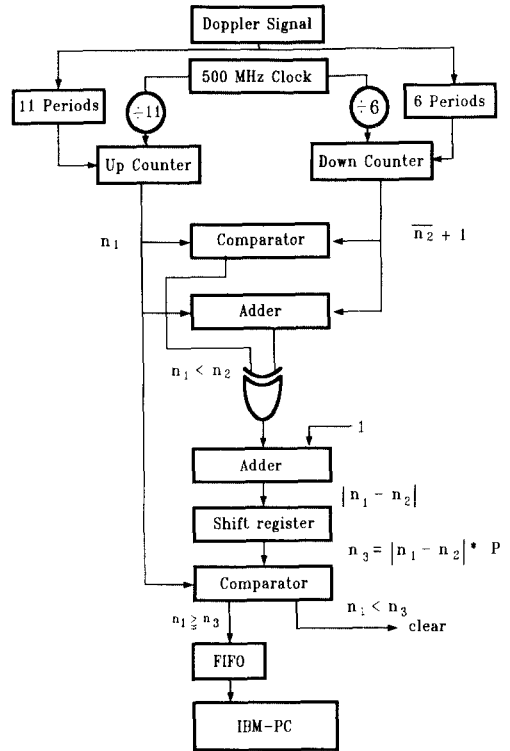
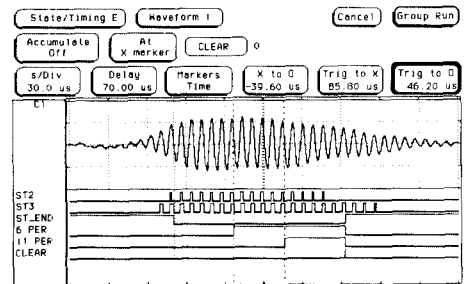


그림 6. 도플러 신호 진위 판별 및 주기 측정 구성도  
Fig. 6. The block diagram of validation and period  
timing device.



C1: 도플러 신호  
ST2: 200mV 문턱전압을 가진 비교기를 사용하여 구한  
도플러신호  
ST3: 100mV 문턱전압을 가진 비교기를 사용하여 구한  
도플러신호  
ST\_END: ST2와 ST3를 이용하여 구한 도플러신호의 시작과 끝  
6 PER: 도플러신호의 6 주기  
11 PER: 도플러신호의 11주기  
CLEAR: 측정 끝

그림 7. 측정된 도플러 신호를 사용한 신호처리계  
각부분의 타임 다이어그램.

Fig. 7. The timing diagram of doppler signal  
processor.

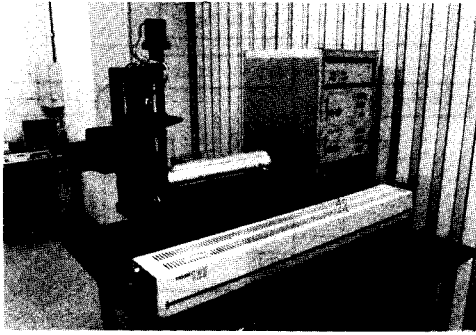


그림 8. 제작된 LDV의 사진

Fig. 8. Photograph of fabricated LDV system.

범위 P안에 있으면, 즉 다음과 같은 식이 만족되면  $T_{11}$ 을 도플러 신호가 11회 진동한 시간으로 계산한다.

$$(T_{11}/11) \geq |(T_{11}/11) - (T_6/6)| \times (100/P) \quad (8)$$

여기에서 P는 사용자가 정할 수 있는 변수로서, 본 실험에서는 50~0.8%까지 정할 수 있도록 하였다. 식(8)와 같은 조건을 logic 회로를 사용하여 구성하기 위해서 다시 전개하면 다음과 같다.  $f_c$ 를 reference clock의 주파수라 할 때,  $n_1 = (f_c/11)T_{11}$ ,  $n_2 = (f_c/6)T_6$  이라 하면 식(8)는

$$n_1 \geq |n_1 - n_2| \times (100/P) \quad (9)$$

가 되고,  $|n_1 - n_2|$ 는 이진법 논리에서

$$\begin{aligned} |n_1 - n_2| &= \frac{n_1 + \bar{n}_2 + 1}{n_1 + \bar{n}_2 + 1} & \text{if } n_1 \geq n_2 \\ &= \frac{n_1 + \bar{n}_2 + 1}{n_1 + \bar{n}_2 + 1} & \text{if } n_1 < n_2 \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 표현된다

와 같이 표현된다. 따라서 그림 6 과 같이 도플러 신호의 11주기 동안 reference clock을 11로 분주한 것을 up counter에 보내면  $n_1$ 을 구할 수 있다. 또한 도플러 신호의 6주기 동안 reference clock을 6으로 분주한 것을 down counter에 보내면  $n_2$ 의 2의 보수를 구할 수 있다. 이를 식(10)의 조건에 맞추어 adder에 넣으면  $|n_1 - n_2|$ 를 구할 수 있다.

$|n_1 - n_2|$ 에 오차범위(100/P)를 곱하기 위하여 24 bit shift register를 사용하였다. (100/P)를 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128로 하면, 즉 shift register를 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7회 좌측으로 shift 하면, 오차는 50, 25, 12.5, 6.3, 3.2, 1.5, 0.8% 값을 갖는다. 다음에는 shift register의 값  $n_3$ 를 comparator에 보내서  $n_1$ 과 비교한다. 만일  $n_1 \geq n_3$  이면 입력신호를 진짜 도플러 신호로 판

명하여 이때의 카운터(counter) 값을 FIFO에 저장하고 다음 측정을 시작한다. 반면  $n_1 < n_3$  이면 카운터 값은 FIFO에 저장되지 않고 다시 측정을 시작한다. FIFO에 저장된  $n_1$ 값은 .도플러 신호가 11회 zero crossing한 시간 이므로, 컴퓨터로 읽어들이 11로 나누면 도플러 신호의 주기 및 주파수  $f_D$ 를 구할수 있고,  $f_D$  값을 식(6)에 대입하여 유속  $V_x$ 로 환산하였다. 또한 한 지점에서 최대 1024개 까지의  $n_1$  값을 FIFO (first in first out) register에 저장시킨후, 각각의  $V_x$  값을 구하고,  $V_x$ 의 평균값을 평균유속으로 하였고, 표준편차를 분산값으로 계산하도록 프로그램 하였다.<sup>11)</sup>

그림 7 에서는 logic analyzer(hewlett packard 16500 A)를 사용하여 제작된 신호처리계에서 도플러 신호의 시작과 끝(그림 7의 ST\_END)을 검출하고, 도플러 신호의 6주기(그림 7의 6PER)와 11주기(그림7의 11 PER)를 검출한 것을 보여준다. 그리고 그림 (8)은 제작된 LDV system의 사진이다.

### V. 신호 처리계의 추정된 성능 평가

제작한 신호처리계의 주기카운터와 진위판별기에서 측정할 수 있는 최대주파수와 최소주파수는 사용된 reference clock의 주파수와 counter의 bit수에 의하여 결정된다. 최저 측정 가능 주파수  $f_{min}$ 은 24bit counter와 500MHz를 사용하였으므로 11주기내에서

$$11/f_{min} + (500 \text{ MHz})/11 = 2^{24} \quad (11)$$

이 되므로  $f_{min} = 29.8 \text{ Hz}$ 이다. 또한 게이트 시간(gate time)이 clock pulse와 동기가 되지 않을 경우에  $\pm 1$ 의 오차를 가질 수 있으므로 최소한 2개이상의 clock이 필요하므로 식(12)에서  $2^{24}$  대신에  $2^i$ 이면 최대 측정 가능 주파수  $f_{max}$ 는 250 MHz가 된다. 그러나 실제적으로는 제작한 신호처리계의 초단 증폭기의 주파수 특성이 10 KHz부터 70 MHz까지만 증폭이 되므로 최대와 최저 측정가능 주파수는 각각 이러한 증폭기의 특성에 의하여 제한된다. 이를 유속으로 환산하면 2.10cm/s에서부터 146.76 m/s까지의 유속이 된다.

신호 처리계의 주기 카운터부에서 얻을 수 있는 도플러 신호의 측정 정밀도  $\Delta f$ 는

$$\Delta f = (f_D/Nf_c) \times 100 (\%) \quad (12)$$

와 같이 주어진다.<sup>12)</sup> 여기에서  $f_D$ 는 도플러 신호의 주파수 N은 측정 구간에서 zero crossing 하는 최대수,  $f_c$ 는 reference clock의 주파수이다. 식(12)에서 보듯이 도플러 신호의 주파수를 높은 정밀도로 측정

하기 위해서는, 측정구간에서 zero crossing 하는 수를 많이 하고, reference clock의 주파수를 높여야 한다. 그러나 zero crossing 하는 수를 많이 할 경우, 최저 측정 가능 주파수를 측정하려면 counter 및 로직회로의 bit수를 늘려야 한다. Reference clock은 counter에 사용된 ECL(F100K ECL과 MECL)소자의 toggle rate에 의하여 결정된다. 본 논문에서는 한측정 구간에서 zero crossing 수를 11로 하고, reference clock은 500 MHz의 ECL oscillator를 사용하였다. 그림 5에서 측정된 167.5 KHz의 도플러 신호 주파수경우 0.003%의 정밀도로 측정할 수 있다. 제작된 신호처리계의 10 KHz 부터 70 MHz까지만 증폭이 되는 초단 증폭부에 의하여 제한된 측정가능한 도플러 주파수의 경우에는  $1.81 \times 10^{-4}\%$ 부터 1.27%까지의 측정정밀도를 추정할 수 있다. 즉 식(12)에서 보듯이 유속이 빠를수록 주기 카운터부의 측정정밀도는 나빠지나, 이는 N과  $f_c$  값을 크게하면 측정정밀도를 개선할 수 있다. 그러나 N을 증가시킬 경우 최저측정 가능한 주파수값이 커지게되고,  $f_c$  값을 500 MHz 이상으로 증가시킬 경우 신호처리계 구성이 기술적으로 어려워지기 때문에 N은 11,  $f_c$ 는 500 MHz를 선택하였다.

또한 gate time과 clock pulse와의 비동기는 진위판별기의 판별정밀도에 관계된다. 예를 들어 식(10)에서 P를 6.3% (shift수 S=4)에 두었을 경우, 1 MHz의 도플러 신호가 입력되면 비동기에 의하여  $n_1$ 은 499~501이 될 수 있다. 이에따라  $n_1=499$  일때  $n_2$ 는  $530 \geq n_2 \geq 468$ 이고,  $n_1=500$ 일때  $n_2$ 는  $532 \geq n_2 \geq 469$ 이고,  $n_1=501$  일때  $n_2$ 는  $533 \geq n_2 \geq 469$ 가 된다. 그러므로 실제적인 진위판별기의 정밀도는 6.5%가 된다. 이를 다시 정리하면 진위판별기의 정밀도  $\delta f$ 는

$$\delta f = \left[ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{2^S} \right] 100 (\%) \quad (13)$$

가 된다.<sup>[12]</sup>  $\delta f$ 를 최소로 하기 위해서는  $n_1$ 을 크게하거나 S를 크게해야 하며,  $n_1$ 을 크게 할 경우( $f_c$ 를 크게 할 경우) 식(12)에 의하여 주기카운터부의 측정정밀도도 좋아지나 주기카운터부의 경우와 마찬가지로 신호처리계의 구성이 기술적으로 어려워진다. 또한 S의 값은 24 bit shift register를 사용한 관계로 7이 최대값이 된다. S=7인 경우, 그림 5에서 측정된 167.5 KHz의 도플러 주파수에 대한 진위판별기의 정밀도는 식(13)에 의하여 0.81%이다. 그리고 초단증폭부에 의하여 제한된 측정가능한 주파수인 10 KHz의 경우(S=7인 경우)  $\delta f=0.78\%$ 이고, 70 MHz의 경우  $\delta f=14.78\%$ 이다.

식(12), (13)에서 보듯이 신호처리계의 모든값(즉 N, S값 등)들이 고정 되었을때, 측정하고자하는 유속이 빠를수록, 즉 도플러 주파수가 높을수록 신호처리계의 정밀도는 나빠진다. 이는 오직 reference clock의 주파수를 높임으로서 해결할 수 있으나 이는 기술적인 문제로 남게된다. 또한 현재의 설계·제작한 신호처리계는 식(12), (13)에서 보듯이 식(14)에 의한 진위판별기의 정밀도가 신호처리계 전체에 더 많은 영향을 준다. 그러므로 가능한한 낮은 도플러 주파수 영역대에서 shift값인 S를 크게해야만이 신호처리계의 정밀도를 높일 수 있다. 500 MHz로 정해진 reference clock의 주파수를 갖는 본 신호처리계에서는 낮은 도플러 주파수영역에서 높은 정밀도를 갖게 된다. 그러므로 비점측식으로 측정하는 LDV는 유체가 저속의 난류인 경우 다른 기계적·열적 유속 측정기들보다 우수한 측정기가 될 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 He-Ne 레이저를 이용하여 비점측식으로 유체의 속도를 측정하는 전방산란 이중광속 LDV system을 구성하고, 여기에서 검출된 산란광의 신호에서 유속을 구하는 주파수 카운터 방식의 신호처리계를 설계·제작하였다. 제작된 신호처리계는 38 dB의 초단 증폭기, 대역폭을 임의로 조절이 가능한대역필터, burst 형태의 도플러 신호를 감지하는 level detector, 500 MHz clock을 이용한 주기 카운터, 11:6 비교법을 이용한 진위 판별기, 그리고 IBM PC로 구성되었다. 그리고 제작된 LDV 신호처리계의 성능은 측정가능한 도플러 주파수대역과 측정정밀도로 평가되며, 측정가능한 도플러 주파수대역은 초단 증폭기에 의하여 10 KHz 부터 70 MHz까지로 제한되며, 위의 도플러 주파수대에서의 24 bit shift register를 사용하였을 경우 측정정밀도는 주기 카운터부에서  $1.81 \times 10^{-4}\% \sim 1.27\%$ 이고, 진위판별기에서는 0.78%~14.78%이다. 그러므로 신호처리계의 성능을 향상시키기 위해서는 진위판별기의 성능을 향상시켜야하고, 이 정밀도를 높이기 위해서는 reference clock의 주파수를 높이거나, shift register의 shift 값을 증가시키면 된다. 이 LDV system을 이용할 경우 비점측식 이므로 저속의 난류를 측정하는데 있어서 기계식, 열식 유속 측정계보다 유리하다.

앞으로는 현재 구성한 레이저 도플러 유속계의 유속측정의 정밀정확도 측정 실험을 수행할 예정이며, 이 실험에서는 이미 알려진 입자의 영향<sup>[12]</sup>에 대한

관계 등도 추가로 연구할 예정이다. 또한 광학계를 후방산란 형태로 구성하고, 난류측정을 위한 2개 벡터의 속도를 동시에 측정할 수 있도록 연구를 계속 수행할 것이다.

#### 參 考 文 獻

- [1] 원종욱, 조재홍외, 레이저를 응용한 유체유속 측정기술 개발, KSRI-88-47-1R (한국표준연구소, 1988).
- [2] B. M. Vatrasiwicz and M.J. Rudd, *Laser Doppler Measurements*, Butterworths & Co. Ltd., 1976.
- [3] Tariq S. Durrani and Clive A. Greated, *Laser Systems in Flow Measurement*, Plenum Press, 1977.
- [4] 조재홍, 박정환, 최중운, 원종욱, 정명세, "전방산란과 후방산란 Dual Beam LDV의 구성과 신호처리계 제작" 응용물리, 제 3 권 제 1 호, pp. 34-41, 1989년 2월.
- [5] 김규욱, 최중운, 원종욱, "광음향변조기를 이용한 유체의 방향결정" 한국광학논문지, 제1권 제 1 호, 1990년 3월.
- [6] F. Durst, A. Melling and J.H. Whitelaw, *Principles and practice of laser Doppler anemometry*, Academic Press. 1976.
- [7] W.M. Farmer and D.B. Brayton, "Analysis of Atmospheric Laser Doppler Velocimeters," *Appl. Opt.* 10, 2319, 1971.
- [8] 이기백, 주은선, 권영길, "Dual beam LDV의信號合成에 關한 研究" 새물리, 제24권, 제4호 1984년 12월.
- [9] Prabha Venkatesh, "Influence of validation schemes in a laser Doppler anemometer period timing device for frequency measurement," *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, vol. 14, pp. 587-592, 1982.
- [10] Friedrich Kopp, Felix Bachstein, and Christian Werner, "On-line data system for a cw laser Doppler anemometer," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 15, Aug. 1984.
- [11] G.U. Kim, J.W. Choi, J.H. Jo, J.W. Won and M.S. Chung, "A New Period Timing Device for Laser Doppler Velocimeter," to be published in IMEXO TC14 Proceeding, 1991.
- [12] Prabha Venkatesh and C.R. Prasad, "Simple period timing device for laser Doppler signals," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 53, no. 4, pp. 461-468, April. 1982.

#### 감사의 글

본 연구를 수행함에 있어서 연구에 도움을 준 강선모, 박정희씨에게 감사드립니다.



## 著者紹介



崔鐘云(正會員)

1959年 2月 16日生. 1981年 단국대학교 전자공학과 졸업. 1981년 6월~1984년 12월 육군기술장교. 1985년 9월~1988년 2월 단국대학교 대학원(석사). 1987년 7월~1988년 7월 나우정밀

(주)중앙연구소 근무. 1988년 7월~현재 한국표준연구소 레이저실 연구원. 주관심분야는 신호처리 및 광응용 기술 등임.



曹在興(正會員)

1959년 11월 8日生. 1982년 2월 고려대학교 물리학과 졸업. 1984년 2월 한국과학기술원 물리학과 석사학위 취득. 1987년 2월 한국과학기술원 물리학과 박사학위 취득. 1987년 3월~현재 한

국표준연구소 레이저연구실 선임연구원. 1989년 1월~1990년 4월 독일 Physikalisch-Technische Bundesanstalt 객원연구원. 1991년 3월~현재 한남대학교 물리학과 객원부교수. 주관심분야는 DFWM 비선형 광학, 레이저주파수 제어, 레이저 분광학, 레이저계측 등임.



鄭明世(正會員)

1942년 4월 28日生. 1965년 2월 서울대학교 물리학과 졸업. 1972년 9월~1978년 6월(미) The Univ. of Tennessee(이학박사). 1965년 3월~1967년 4월 육군통신장교. 1967년 6월~1969년

2월 대한광학공업(주)근무. 1969년 3월~1972년 8월 서울대학교 공과대학 조교. 1975년 9월~1978년 6월 Oak Ridge National Lab. 연구원. 1978년 6월~1978년 12월 미연방표준국 방문연구원. 1987년 8월~1988년 8월 Oak Ridge National Lab. 방문연구원. 1978년~현재 한국표준연구소 선임연구부장. 주관심분야는 Laser Interferometry, Dimensional metrology 등임.