

<論 文>

熱線流速計의 試作研究

李 奎 漢*

(1986年 7月 23日 接受)

Construction of a Hot-Wire Anemometer

Kyu-Han Lee

Key Words; Hot-Wire Anemometer(열선유속계), Variable Exponent Linearizer(가변지수선형기), Fixed Exponent Linearizer(고정지수선형기), Wheatston Bridge(위이트스톤 브리지), Overheat Ratio(가열도)

Abstract

Hot-wire anemometer with constant temperature hot-wire anemometer bridge, linearizer, D.C. stabilization electric power source and square-wave generator has been constructed for trial and the test has been carried out. As a result the test showed the overall frequency response of 6 KHz over the change of air flow and the noise of approximately 1cm/s in an air flow of 10m/s. The accuracy of the linearizer stands comparison with the existing anemometer and turned out to be relatively good operational characteristics.

1. 서 론

유체의 흐름 속에 열선을 놓으면 유체에 열이 전달되어 열선 표면의 온도가 상승하게 되므로 온도가 내려가면서 저항치가 변화하는데 유속이 빠르면 냉각은 더욱 빨라진다. 이 유속 냉각과의 관계는 소위 킹의 법칙(King's law)으로 알려진 현상이며, 이 성질을 응용한 열선유속계가 1한 고정지수형의 유속계측기로서 유동현상 특히 난류 연구에 이용되어 유체 역학의 발전에 중요한 역할을 해온지 이미 반세기여 이르며 그간 많은 사람의 연구되어 왔다. 1977년까지 발간된 열선유속계에 관한 문헌만도 무려 1,300여편에 달하며⁽¹⁾, 그도 연구결과가 계속 보고되고 있다^(2~10). 그러나 나라에서는 아직 이에 관한 연구가 미미한 상태에

있다.

지금까지의 보고된 연구내용을 살펴보면 열선유속계의 제어회로를 해석한 회로방식에 관하여 주로 복잡한 수식으로 설명된 의문이 많다^(11~27). 이론을 구체화한 제작회로에 관한 문헌은 거의 찾아 볼 수가 없다. 그러나 종래의 이 여러 의문을 벗어나서 독자의 설계이론을 확립한다는 것은 불가능에 가까운 일이라고 생각된다.

본 연구는 난해한 수식을 구사한 새로운 제어회로에 관한 해석이나 설계 이론에 관한 것이 아니라 지금까지의 여러 연구자의 의문에 의하여 확립된 열선유속계의 기본계측이론을 충실하게 실현하는 단순회로로 구조가 간단하고 취급이 간편하며 저렴한 가격으로 제작할 수 있으며 성능면에서도 고가의 고성 상품에 비하여 그다지 손색이 없는 실용적인 경온도형 열선유속계를 개발하는 것이다.

2. 해 석

2.1 정전류방식과 정온도방식

열선유속계는 열선(저항선)의 가열방법 및 제어방법에 의하여 일반적으로 정전류 방식과 정온도방식으로 구분된다. 정전류방식(Fig. 1)은 열선을 한번으로 하는 부리지를 정전류회로에 접속하여 열선에는 항상 일정전류가 흐르는 상태에서 부리지의 평형을 취하도록 하여 부리지의 한번을 구성하고 있는 열선부분을 유체속에 넣으면 유속 및 유속변동에 의하여 열선으로부터 열이 빼앗겨서 열선의 온도가 변화하여 저항치도 변화하고 부리지의 평형이 깨어져서 불평형 전압으로부터 평균 유속 및 그것에 대한 변동분에 대응하는 전압을 빼낼 수가 있다. 비교적 간단한 회로방식이지만 변동속도에 대한 열선의 응답성은 열선 자신의 열용량에 의해서만 정하여지고 또 출력전압에는 열선의 온도와 저항변화의 양쪽의 현상이 들어오므로, 유속변동성분이 큰 경우의 측정에는 난점이 있다. 이에 대하여 정온도방식(Fig. 2)는 열선을 한번으로 하는 부리지를 그 출력을 광대역 귀환증폭기에 접속하고 그 증폭기의 출력을 부리지에 귀환시킴으로서 열선의 온도를 주어진 설치 온도의 값에 유속의 대소에 관계 없이 일정하게 유지하도록 하여 두번 열선의 저항치도

일정하게 된다. 이 경우 회로에는 열선을 초기 설정온도로 유지하도록 전류가 흐르게 되므로 이 전류를 측정함으로써 유속 및 변동분을 검출할 수가 있다. 이 회로방식은 정전류형에 비하여 다소 복잡하여지기는 하나 유속의 변동에 대한 응답성은 열선의 열용량에는 그다지 관계가 없이 그 제어계의 폐회로 이득에 의하여 정하여지므로 큰 변동속도의 측정이 가능하다. 또 열선의 온도가 일정함으로 저항치도 일정하여지고 따라서 대체적으로 출력전압의 자승과 유속의 평방근이 비례하게 되어 유속 변동성분이 큰 경우에도 정확한 측정이 가능하다. 그러나 정온도방식은 제작 및 조정이 어렵고 발전상의 잡음이 커서 좋지 않다고 하던 시기도 있었으나 증폭회로의 영점을 인위적으로 변경함으로써 해결법을 찾았고 최근의 집적화 연산증폭기의 발달에 의하여 저렴한 가격으로 손쉽게 제작할 수 있게 되었다. 그 밖에도 여러 점에서 정온도방식이 정전류방식에 비하여 유리하다는 것이 인정되어 현재는 거의 모두 정온도방식을 채택하게 되어 본 연구에서도 정온도형 열선유속계에 대하여 다루었다.

2.2 유속계측의 기본식

서론에서도 언급한 바와 같이 열선은 온도상승에 따라서 전기저항도 커지는 성질이 있다. 지금 열선의 온도를 T_w , 열선의 저항을 R_w , 라고 하면 백금선이나 텅스텐선의 경우는 전기저항과 온도와의 사이에 다음과 같은 직선관계가 성립한다.

$$R_w = R_0 \{1 + \alpha(T_w - T_0)\} \tag{1}$$

여기서 T_0 는 유체의 온도이며 R_0 는 그 때의 저항치이고 α 는 열선의 저항온도계수이다.

또 정상류에서 흐름속에 놓인 열선에 전류 I 가 흐를 때의 발생열 $R_w I^2$ 와 유체흐름에 의한 방열량이 평형상태를 유지한다고 하면 다음과 같은 관계식이 성립한다(King's law).

$$R_w I^2 = (B\sqrt{U} + C)(T_w - T_0) \tag{2}$$

여기서 U 는 유체의 속도이며 B 와 C 는 열선과 유체의 성질에 의하여 정하여지는 정수이다.

위의 식 (1), (2)로부터 $(T_w - T_0)$ 를 소거하여 다음식을 얻을 수 있다.

$$I^2 = \frac{1}{\alpha} (B\sqrt{U} + C) \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \tag{3}$$

여기서 $U=0$ 일때 열선에 흐르는 전류 I_0 는 다음과 같이 된다.

$$I_0^2 = \frac{C}{\alpha} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \tag{4}$$

따라서 다음의 관계가 성립한다.

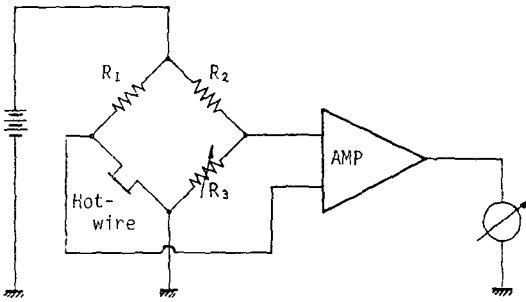


Fig. 1 Constant current type

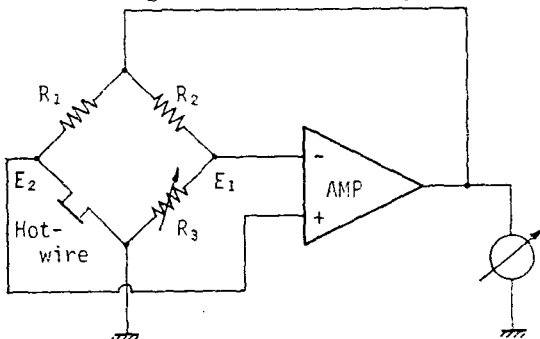


Fig. 2 Constant temperature type

$$\frac{I^2}{I_0^2} = \frac{B}{C} \sqrt{U} - 1 \quad (5)$$

정온도방식에서는 열선의 저항 R_w 는 유속이 변하여도 일정함으로 유동시의 열선의 양단간의 전압을 E , $U=0$ 에서의 전압을 E_0 라고 하면 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{E^2}{E_0^2} = \frac{I^2}{I_0^2} = \frac{B}{C} \sqrt{U} + 1 \quad (6)$$

이 식이 정온도형 열선유속계의 제속의 기본이 되는 이론식이다. 그러나 이식은 낮은 레이놀즈수에서는 실제와 잘맞지 않음으로 이식을 보정한 다음 관계식이 실제에 보다 잘 맞는 합리적인 식이다⁽¹¹⁾.

$$\frac{E^2}{E_0^2} = \frac{B}{C} U^{\frac{1}{2}} + 1 \quad (7)$$

여기서 지수 m 은 열선의 특성 및 흐름의 레이놀즈수에 따라서 변하는 수이다.

2.3 열선증폭기

어떤 유속에서 평형상태에 있는 열선에 유속이 조금 증가하면 열선으로부터 빼앗기는 열량이 많아짐으로 열선의 온도가 내려가서 열선의 저항은 작아지려고 한다. 이 저항의 변화를 즉시 검출하여 전류를 적당히 증가시키면 발열량이 많아져서 온도가 상승하게 되어 항을 원래와 같은 값으로 유지할 수 있다. 이 경우 항의 미소변화를 검출하여 그것에 응하여 전류를 가하는 동작이 유속의 변화 이상으로 신속히 이루어지지 않으면 열선의 저항은 실제로 변화하여 버려서 정도는 실현되지 않는다. 이와 같은 정온도의 실현은 선을 한번으로 하는 위이트스톤 브리지 (Wheatstone bridge)와 차동증폭기를 조합하여 달성할 수 있다. g. 2에서 열선(저항 R_w)과 3개의 고정저항 R_1, R_2, R_3 로 구성된 브리지의 성질을 살펴본다. 이 브리지에 전압 E 를 주었을 때의 각부의 전압을 각각 E_1, E_2 전류를 각각 I, I' 라고 하면 이들 사이에는 다음의 관계 성립한다.

$$E_1 = IR_w = \frac{R_w}{R_w + R_1} E \quad (8)$$

$$E_2 = I'R_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E \quad (9)$$

식 (8)에 있어서는 E 가 증가하면 I 가 증가하고 동시에 R_w 도 증가하기 때문에 E_1 과 E 는 비례관계가 성립하지 않고 U 를 변수로 하는 어떤 함수관계에 있으나 식 (9)에 있어서는 R_2 와 R_3 는 U 와는 관계가 없이 일정하므로 E_2 와 E 의 관계는 R_2/R_3 를 변수로 한 비례관계가 성립한다.

또 차동증폭기의 전압이득을 A 로 하고, 입력전압을 E_1, E_2 그 차를 E_i 로 하면 출력전압 E 는 다음과 같다.

$$E = -A(E_1 - E_2) = -AE_i \quad (10)$$

부리지와 증폭기를 그림과 같이 접속하고 증폭기의 임피던스(impedance)를 무한대로 하면 부리지로부터 증폭기에의 전류의 유입 또는 유출은 없다고 볼 수 있으므로 열선의 저항 R_w 는 일정하여진다. 따라서 정온도형의 열선유속계가 실현되어 열선을 흐르는 전류 I 를 측정함으로써 식 (7)로부터 알 수 있는 바와 같이 유속 U 를 측정할 수 있다. 다만 빠른 유속의 변동에 대하여 열선과 증폭기의 응답에 각각 지연(delay)이 있음으로 회로는 실제로는 발진을 이르켜서 사용할 수 없다. 따라서 이와 같은 발진을 피하기 위한 비평형전압을 차동증폭기의 영점조정을 역이용하여 설정한다. 이 경우 증폭기의 전압이득 A 를 충분히 크게 하여 불평형전압을 가능한 한 작게 한다. 이와같이 하여 실용에 견딜 수 있는 정온도 제어부를 구성할 수 있다.

2.4 선형화기

부리지와 차동증폭기의 조합에 의하여 확정된 정온도형 열선유속계의 회로는 유속 U 의 변화에 대하여 열선의 저항은 근사적으로 일정하다고 볼 수 있음으로 식 (8)로부터 열선을 흐르는 전류 I 는 증폭기의 출력전압 E 에 비례한다고 생각하여도 무방하다. 따라서 식 (7)이 성립한다. 이 식 (7)은 U 와 E 가 비례하고 있

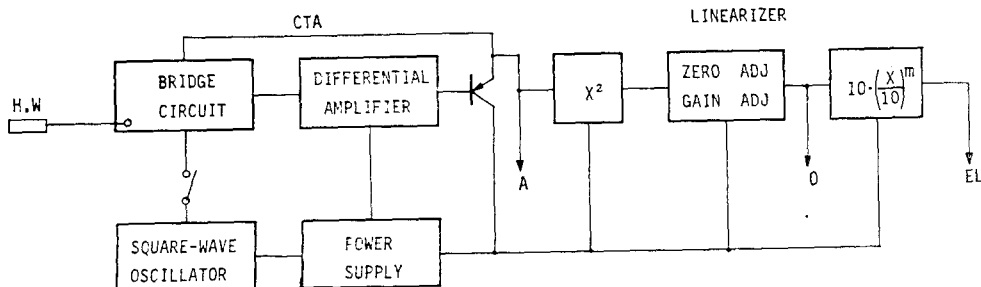


Fig. 3 Block diagram of a constant temperature hot-wire anemometer system

지 않으므로 증폭기의 출력 E 를 식 (7)에 의하여 계산하지 않으면 안된다. 여기서 출력전압 E 와 유속 U 가 비례하도록 하면 실용상 대단히 편리하여 진다. 식 (7)을 변형하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U = \left\{ \frac{C}{B} \cdot \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right) \right\}^m = aV \quad (11)$$

여기서 a 는 정수이다. 이와 같이 증폭기의 출력을 식 (11)과 같이 조작한 출력전압 V 는 유속 U 에 비례한다. 이 연산조작은 승산기 2개와 감산기 1개를 조합하여 실현시킬 수 있다.

3. 시작회로

정온도제어부와 연산조작부를 간결하게 일체화 하고 판넬구성은 측정원리상 필연적으로 정하여 지는 차례에 따라서, 조작하여 갈 수 있도록 한 취급이 극히 간편하고 단순하며 열가의 비교적 성능 좋은 정온도형열선유속계 회로를 시작하였다. 구성은 Fig. 3의 부리다이어그램으로 표시되며 기본적인 조작은 다음과 같다.

열선을 포함한 부리지가 평형하도록 열선의 대변(overheat)의 저항을 설정하고 최대유속으로 하여 열선의 응답특성을 점검한 다음 풍동을 정지시켜서 풍속 0의 상태에서 출력전압이 0이 되도록 조정한다. 다음에 선형화기에 있어서 유속 0에서 출력전압을 0으로 한 다음 유속대 출력전압의 관계가 직선이 되도록 최적의 지수 m 을 구하여 열선유속계의 교정을 한다. 교정이 끝나면 계속으로 들어가며 회로의 구체적인 기능은 다음과 같다.

3.1 정온도제어부

(1) 부리지

Fig. 4는 정온도제어부의 회로도를 나타내고 있다. 위이트스톤 부리지는 3개의 고정저항과 1개의 가변저항기 및 열선으로 구성되어 있어서 사용시 우선 등

작하는 열선의 저항(온도)을 결정할 필요가 있다. 여기서 차동증폭기의 이득이 충분히 크고, 비평형 전압이 충분히 작으면 다음과 같이 된다.

$$\frac{R_w}{R_1} = \frac{VR_2 + R_3}{R_2} \quad (12)$$

여기서 VR_2 를 적당히 조정하면 R_w 의 값을 σR_0 로 설정할 수 있다. 여기서 σ 는 가열도(overheat ratio)이고 R_0 는 그때의 유체온도에서의 저항값이다. 부리지비는 10:1로 하여 열선의 저항치 측정 및 동작온도 설정에 편리하도록 가변저항기에는 버니어 다이알을 붙여서 눈금의 설정이 용이하도록 하였다.

(2) 차동증폭기와 전류증폭기

연산증폭기는 일반적으로 출력전류를 $5\mu A$ 정도 밖에 빼낼 수가 없으므로, 열선을 충분히 가열하기 위하여는 출력의 증폭이 필요하게 된다. 이를 위하여 차동증폭기와 전류증폭기를 쓴다. 직류차동증폭기의 직류증폭율은 대략 1,000 정도로 한다. 가변저항 VR_2 는 입력비평형전압을 주기 위한 것으로 여기서 0점 조정을 한다. 직류차동증폭기로는 301A형 증폭기를 전류증폭용 트랜지스터로는 2SA496-0를 사용하였다. 또 트랜지스터의 베이스에 다이오드를 삽입하여 부주의로 전원을 잘못 넣었을 때에 작용하도록 하여 열선을 보호하도록 하였다.

3.2 연산조작부

Fig. 5는 연산조작부의 회로도이다. 열선증폭기의 출력전압은 1~1.5볼트 정도로 승산기의 입력으로는 너무 작으므로 5~6배정도 증폭할 필요가 있으며 이를 위한 증폭기가 제일 먼저 표시되어 있다. 가열비가 다소 변화하여도 조정가능 하도록 가변저항(VR_3)으로 하였다. 승산기 8013은 입력전압을 X 로 하면 $X^2/10$ 의 연산을 한다(이때 Y 입력은 입력이 10볼트일때 출력이 10볼트로 되도록 저항분할로 조정하고 조정후는

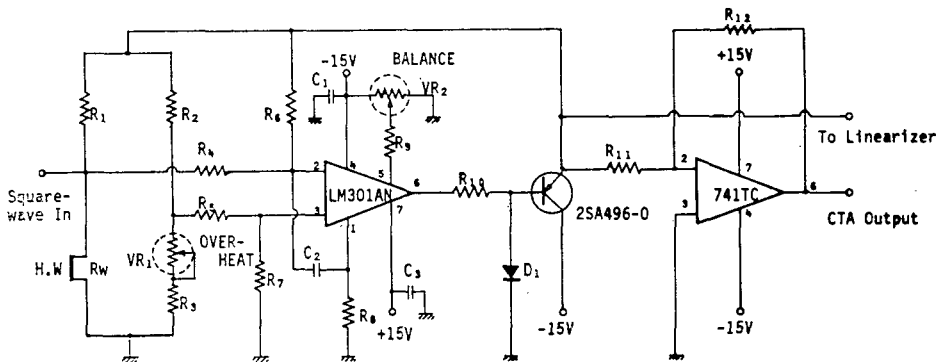


Fig. 4 Hot-Wire feedback circuit

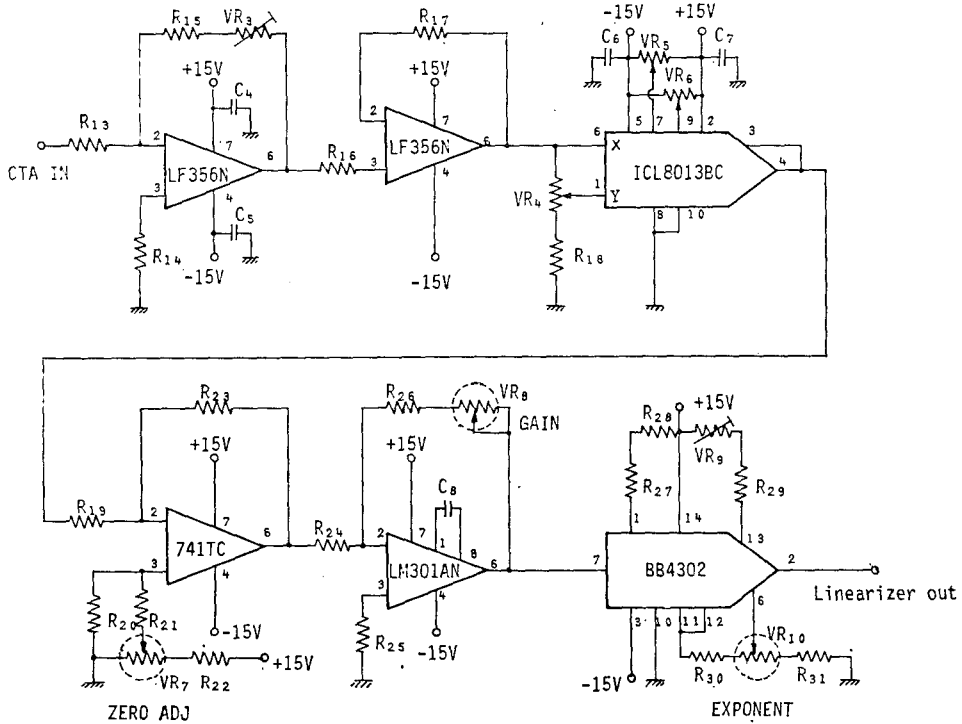


Fig. 5 Linearizer circuit

고정저항으로 고정한다). 승산기는 0점 조절을 필요로 한다. 741 증폭기는 열선유속계의 0점 조절용이고 301 증폭기는 선형화기의 출력전압 조절용이다. 또 하나의 승산기로는 BB 4302를 택하였다. 이 승산기는 입력전압을 E_1 으로 하면 $10(E_1/10)^m$ ($0.2 \leq m \leq 5.0$)의 연산을 한다. 이 승산기는 계측치와 실측치가 잘 맞지 않는 낮은 레이놀즈수의 유동의 경우에도 선형성이 좋아지도록 m 을 적당히 정할 수 있어서 편리하다. 풍속

이 어느 정도(2m/s전후) 이상의 경우에는 $m=2.0$ 로 하여 충분하므로 승산기 8013으로 족하다.

3.3 관련장치 기타

(1) 직류안정화 전원

Fig. 6에 이 직류안정화전원 ± 15 볼트의 회로를 표시한다.

(2) 구형파 발전기

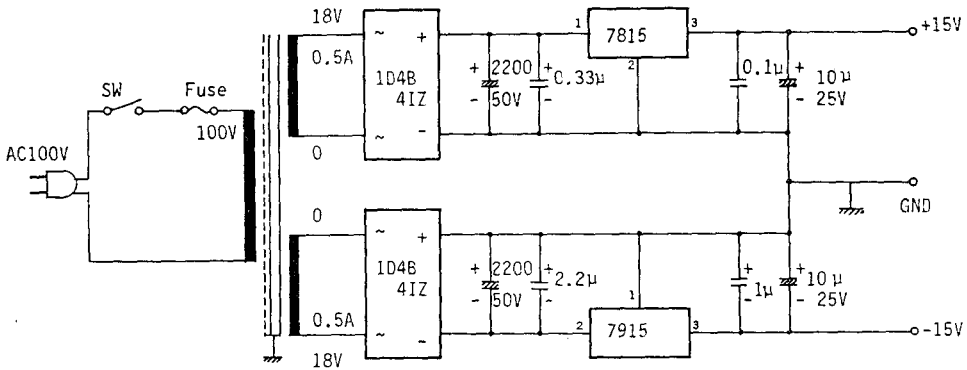


Fig. 6 D.C. stabilization electric power source

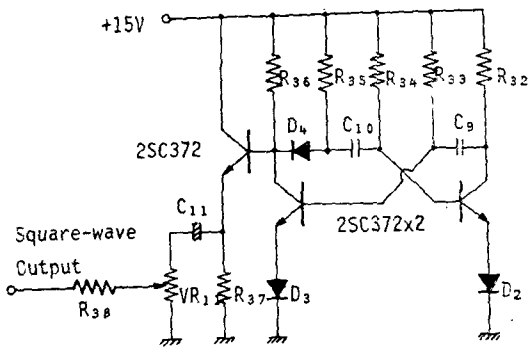


Fig. 7 Square-wave generator

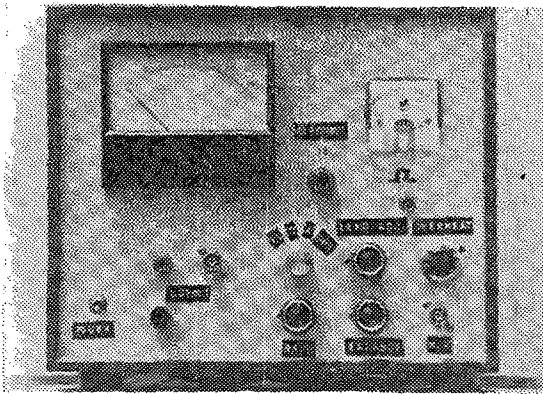


Fig. 8 Front panel

Fig. 7은 구형파 발진기의 회로도이다.

(3) 전면판넬

Fig. 8은 전면 판넬의 사진이다. 조작에 편리하도록 배열하였다.

4. 동작특성

시작회로의 주파수특성을 조사하기 위해 기류 10m/s

의 상태에서 $5\mu\text{m}\phi$ 의 텅스텐 열선으로 회로주파수 응답을 측정하였다. 평균속도가 약 0.1%의 난류도를 나타내는 작은 신호를 열선프로브를 가로질러 직접 주입하여 Fig. 9와 같은 회로주파수 응답을 얻었다. 그림으로부터 알 수 있는 바와같이 부리회로주파수 응답은 진폭 비율 0.7에서 80 KHz이고 통합응답인 선형회로주파수 응답은 진폭 비율 0.7에서 6 KHz, 0.5에서 8 KHz이다. 이 성능은 일반적인 난류연구에 하등의 지장이 없는 응답이다. 외국의 다른 열구결과와의 대비를 위하여 본 시작회로와 같은 등급에 속한다고 생각되는 Miller의 간이 선형화유속계⁽¹⁹⁾에 대한 본 실험과 동일 조건에서의 실험결과를 점선으로 표시하여 놓았다. Miller의 유속계는 회로에 있어서 열선 부리회와 선형화기 모두 본 시작회로와는 판이하고 약간 복잡한 구조로 되어 있다. 응답에 있어서 본 시작품보다 약간 높은 편이나 큰 차이는 아님을 알 수 있다.

잡음에 있어서는 10 mV RMS로 풍속환산 10 m/s에 대하여 1 cm/s이다. 이 잡음수준은 기존의 상품으로서 수입되어 많이 사용되고 있는 것⁽²⁸⁾(고정지수선형기방식)과 같은 수준으로 비교적 좋은 성능이다.

출력의 직선성에 있어서는 선형화연산 기구에 지수가변방식을 채용하여 2 m/s 이하의 저속으로부터 고속에 이르기까지 직선성이 좋게 계속할 수 있는 기능을 부여하였다. 지수 m 은 기성제품에서와 똑같이 교정곡선으로부터 최적의 값을 구하여 선형에 맞추도록 한다. Fig. 10은 출력의 직선성을 도시한 것이다. 직선성의 정도는 고가의 지수가변선형화방식의 유속계에는 미치지 못하나 고정지수선형화방식 계측시스템의 직선성 정도와는 같은 수준인 2.6% 이내이다.

본 시작품은 전원, 열선유속계 및 선형화기를 일체화한 간단한 구조의 간이선형화열선유속계임에도 불구하고

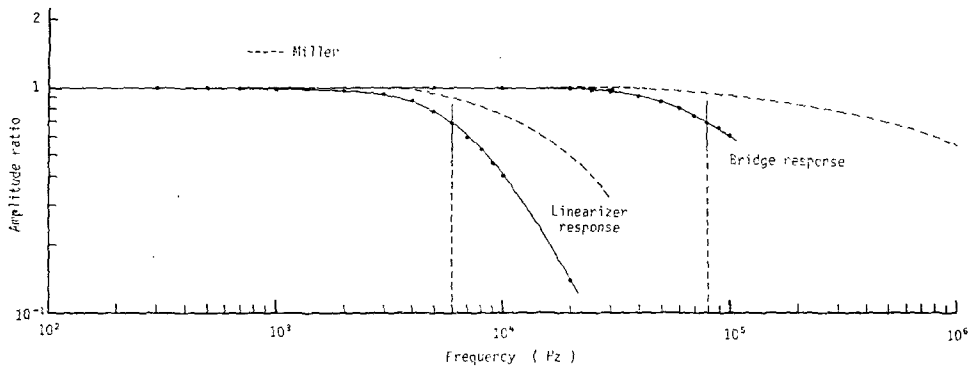


Fig. 9 Measured frequency response

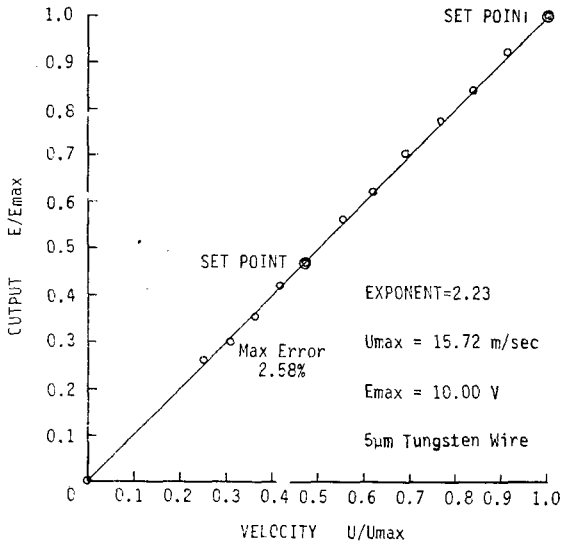


Fig. 10 Measured accuracy

하고, 기존의 고가의 전원유닛, 열선유속계유닛, 선형화기유닛등으로 구성된 계측시스템에 대체하여 대부분의 난류연구의 계측목적을 달성할 수 있는 동작특성을 구비하고 있다.

5. 결 론

정온도 열선부리지, 선형화기, 직류안정화 전원 및 구형파발전기를 구비한 열선유속계를 기본 계측원리에 따라서 충실히 실현한 정온도열선유속계를 시작하여 그 동작특성을 시험하였다.

그 결과 총합주파수 응답이 진폭비율 0.7에서 6KHz를 보였으며 직선성정도에 있어서도 기존의 고가의 상품에 비하여 큰 손색이 없었고 잡음수준에서도 풍속환산으로 10m/s에 대하여 약 1cm/s 정도로 비교적 성능이 좋았다.

실용면에서는 구조가 간단하여 취급이 간편하고 제작원가가 저렴하여 제작이 용이케 되었다.

후 기

이 논문을 위한 연구는 삼미문화재단의 1985년도 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계되는 여러분들에게 깊이 감사드리며, 또 실험에 많은 도움을 준 대학원학생 박천호군에게도 감사하는 바이다.

References

- (1) Freymuth, P. "A bibliography of Thermal Anemometry", TSI Quarterly 4, Issue 4, 1978
- (2) Smits, A.J., Perry, A.E., Hoffmann, P.H., "The Response to Temperature Fluctuations of a Constant-current Hot-Wire Anemometer", J. Phys. E. Vol. 11, pp.909~914, 1978
- (3) Perry, A.E., Smits, A.J., Chong, M.S., "The Effect of Certain Low Frequency Phenomena on the Calibration of Hot-Wires", J. Fluid Mech. Vol. 90, pp.415~431, 1979
- (4) Simpson, R.L., Heizer, K.W., Nasburg, R.E., "Performance Characteristics of a Simple Linearized Hot-Wire Anemometer", J. Fluids, Eng. Vol. 161, pp.381~382, 1979
- (5) Perry, A.E., Lim, T.T., Chong, M.S., "The Instantaneous Velocity Fields of Coherent Structures in Co-Flowing Jets and Wakes", J. Fluid Mech. Vol. 101, pp.243~256, 1986
- (6) Smits, A.J., Perry, A.E., "The Effect of Varying Resistance Ratio on the Behaviour of Constant Temperature Hot-Wire Anemometers", J. Phys. E. Vol. 13, pp.451~456, 1980
- (7) Perry, A.E., Watmuff, J.H., "The Phase-Averaged Large Scale Structures in Three Dimensional Turbulent Wakes", J. Fluid Mech. Vol. 103, pp.33~51, 1981
- (8) Smits, A.J., Perry, A.E., "A Note on Hot-Wire Anemometer Measurements of Turbulence in the Presence of Temperature Fluctuations", J. Phys. E. Vol. 14, pp.331~332, 1981
- (9) Itswire, E.C., Holland, K.N., "A High Performance Low-Cost Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer", J. Phy. E: Sci. Instrum, Vol. 16, pp.549~553, 1983
- (10) Yanuzkurt, S., "A Guide to Uncertainty Analysis of Hot-Wire Data", J. Fluid Eng. Vol. 106, pp.181~186, 1984
- (11) Collis, D.C., Williams, M.J., "Two Dimensional Convection from Heated Wires at Low Reynolds Numbers", J. Fluid Mech. Vol. 6, pp.357~359, 1959

- (12) Davis, M.R., "The Dynamic Response of Constant Resistance Anemometers", *J. Phys. E: Sci. Instrum*, Vol. 3, pp.15~20, 1970
- (13) Freymuth, P., "Feed Back Control Theory for Constant Temperature Hot-Wire Anemometers", *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 38-5, pp.667~681, 1967
- (14) Freymuth, P., "Non-Linear Control Theory for Constant Temperature Hot-Wire Anemometers", *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 40, pp.258~262, 1969
- (15) Freymuth, P., "Frequency Response and Electronic Testing for Constant Temperature Hot-Wire Anemometer", *J. Phys. E: Sci. Instrum*, Vol. 10, pp.705~710, 1977
- (16) Freymuth, P., "Further Investigation of the Non-Linear Theory for Constant-Temperature Hot-Wire Anemometers", *J. Phys. E*, Vol. 10, pp.710~713, 1977
- (17) Kinns, R., "Calibration of a Hot-Wire Anemometer for Velocity Perturbation Measurements", *J. Phys. E*, Vol. 6, pp.253~256, 1973
- (18) Kreider, J.F., "A Simple Stable Constant Temperature Hot-Wire Anemometer" *IEEE Instrum. Meas.* IM-22, pp.190~191, 1973
- (19) Miller, J.A., "Simple Linearized Hot-Wire Anemometer", *J. Fluids, Eng.* Vol. 98, pp.749~752, 1976
- (20) Morrison, G.L., Perry, A.E., Samuel, A.E., "Dynamic Calibration of Inclined and Crossed Hot-Wires", *J. Fluid Mech.* Vol. 52, pp.465~474, 1972
- (21) Ossowski, E., "Constant Temperature Operation of the Hot Wire Anemometer at High Frequency", *Rev. Scient Instrum*, Vol. 19, pp.881~889, 1948
- (22) Perry, A.E., Morrison, G.L., "A Study of the Constant Temperature Hot-Wire Anemometer", *J. Fluid Mech.* Vol. 47, pp.577~599, 1971
- (23) Perry, A.E., Morrison, G.L., "Static and Dynamic Calibrations of Constant-Temperature Hot-Wire Systems", *J. Fluid Mech.* Vol. 47, pp.765~777, 1971
- (24) Perry A.E., Morrison, G.L., "Errors Caused by Hot-Wire Filament Vibration", *J. Phys. E*, 5, pp.1004~1008, 1972
- (25) Rose, W.G., "Some Corrections to the Linearized Response of a Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer Operated in a Low-Speed Flow", *J. Appl. Mech.* Vol. 29, pp.554~558, 1962
- (26) Tutu, N.K., Cheuray, R., "Cross-Wire Anemometry in High Intensity Turbulence", *J. Fluid Mech.* Vol. 71, pp.785~800, 1975
- (27) Wood, N.B., "A Method for Determination and Control of the Frequency Response of the Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer", *J. Fluid Mech.* Vol. 67, pp.769~786, 1975
- (28) System 7000, CTA Cat No. 250, Kanomax International Corporation, Japan