한국에너지공학회(1998년도)
추계 학술발표회 논문집p150 - 160

기체온도 측정을 위한 초음파 계측

최 영, 윤 천 한*, 전 홍 신**
경희대원, 경희대원*, 경희대**

A ultrasonic technique for measuring gas temperature

Y. Choi, C.H.Yoon*, H.S.Jeon**
Kyunghee Univ., Kyunghee Univ.*, Kyunghee Univ.**

ABSTRACT

Measuring temperature with ultrasonic wave apparatus is desirable in the case of both below 3000℃ and ideal gas because of the fact that the temperature of gas is the function of only sound velocity. In this study, being used a heatable wind channel and a blower, the variation of temperature is observed in accordance with diverse flow rate(air velocity). The frequency modulation method is used to measure the temperature which is varying in hot air flow till 100℃. The length changed in the position of ultrasonic sensors is considered. Also, the effects of air velocity at the same temperature and various facing angles of ultrasonic sensors are considered. As a result of this study, it has been found that the temperature in gas flow is correctly measured regardless of both the distance of ultrasonic sensors and the variation of air velocity, and that there is just a little influence of facing angles.

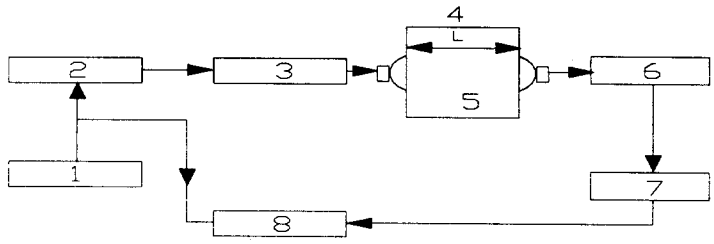
1. 서론

열에 관한 양의 기본은 온도이며 정확한 온도의 측정은 현상 연구, 제품이나 기계의 설계, 제작, 유지, 보수 등에 매우 중요하다. 따라서 온도계의 선정에 있어 측정 대상물의 성질, 상태를 충분히 파악하고 온도범위, 측정정도, 동특성, 비용 등을 고려하여 측정 대상물에 적합한 온도계를 선정할 필요가 있다. 열전대 온도계, 저항 온도계, 복사 온도계, 스펙트로 온도계 등을 사용한 종래의 온도측정법은 1000℃ 이상에서는 정확도가 떨어지고 내구성에서 문제가 발생한다. 또한 레이저와 같은 새로운 비접촉식 온도계는 고가이고 세팅에 큰 어려움이 있다. 따

라서 비교적 저가이고 조작이 간편한 새로운 비접촉식 온도계의 개발이 필요한데 이를 잘 만족시켜 주는 것이 초음파이다. 초음파에 의한 측정법은 기체온도를 그 음속의 측정치로부터 구하는 방법이다. 이것은 기체의 온도가 3000℃ 이하이고 이상기체인 경우 기체의 온도는 음속만의 함수라는 것을 이용한 것이다. 종래의 연구는 음파가 기체중의 일정거리를 통과하는 시간거리를 직접 측정하여 음속을 구하는 방법을 사용하였다. 그런데 이 방법은 잡음 혼합의 염려가 많고 증폭시에도 많은 문제가 발생한다. 이번 연구에서는 음원과 수음기에서 받은 음파의 위상차가 임의의 설정된 값이 될 때의 주파수로부터 음속을 구하는 원리를 사용한다. 또한 초음파를 반송파로 하고 이것을 주파수 변조한 파를 사용하고 있다. 실제로 왕복동 내연기관이나 각종 연소기의 연소실내의 가스온도는 미연가스와 연소가스의 유동이 매우 복잡하고 또 온도변화도 급변하기 때문에 측정이 곤란하다. 따라서 실린더내 온도 측정은 미연 또는 연소가스의 유동 특성을 고려하여 정확성을 기해야 한다. 본 연구에서는 실제 내연기관의 실린더내 온도측정을 위한 초음파 측정법을 적용하기에 앞서 센서 사이의 거리에 따른 기체의 온도측정을 실험하고 일정거리에서 기체의 온도를 주파수로써 측정한다. 또한 동일 온도에서 기체속도에 따른 온도와 주파수의 관계를 알아보고 기체흐름의 방향과 대향하는 센서의 각도를 변화시켜 가면서 온도 측정에 미치는 영향을 살펴 본다.

2. 초음파 계측

초음파 계측법은 매질을 통과하는 음파의 음속을 측정하여 온도를 구하는 방법이다. 다시 말하면 측정기체 중에 일정거리 L을 사이에 두고, 음원과 수음기를 대향시킨다. 다음 적당한 저주파(주로 가청주파수 영역)의 주파수 f 를 반송파에 실어 일정 주파수의 초음파를 연속적으로 음원에 방사하여, 피측정기체중을 통과한 초음파를 수음기로 수신하여 온도를 계측하는 방법이다. 수신된 저주파에 따라 변조된 초음파 신호는 검파하여 변조신호인 저주파만 출력시켜 음원측의 변조신호와 위상차를 측정한다.



1. Low-frequency oscillator
2. Carrier wave oscillator
3. Amplifier
4. Sound source
5. Measured gas
6. Sound receiver
7. Detector
8. Phase difference observer

Fig. 1 Block diagram of measurement

음원과 수음기의 거리 L을 알고, 위상차를 확인하면, 거리 L사이에 변조된 저주파가 몇 파장 존재하는가를 알 수 있다. 따라서 다음 식으로부터 음속 a를 구할 수 있다.

$$a = \frac{L}{n} f \tag{1}$$

여기서,

a : 음속(m/s)　　L : 거리(m)

n : 파장수　　f : 주파수(Hz, 1/s)

그림 1에서 볼 수 있듯이 반송파 발진기에서 초음파신호를 발생시키고, 이것은 저주파 발진기에서 가청주파수영역의 신호에 따라 변조된다. 저주파를 실은 반송파는 출력이 약하므로 증폭기에 의하여 증폭되어 음원에 들어간다. 위상차 관측장치는 저주파발진기의 신호파와 검파기에서 얻은 저주파와의 위상차를 관측한다. 관측한 값이 소정의 값으로 될 때의 저주파 발진기의 주파수를 읽으면 (1)식에서 음속을 다음 (2)식에서 온도를 구할 수 있다.

$$T = \frac{ma^2}{\gamma \overline{R}} \tag{2}$$

여기서,

$\overline{R}$: 일반기체상수(8310Nm/kmolK)

T : 절대온도

m : 분자량(28.97)

γ : 비열비(1.4)

이다.

본 실험에서는 저주파 발진기로써 함수 발생기(Function Generator)를 사용하여 20Hz~10kHz 정도의 가청주파수를 발생시킨다. 반송파 발진기로는 시그널 제너레이터(Signal generator)를 사용하는데 주로 100~500kHz 정도의 반송파를 사용하게 되고 본 실험에서는 400kHz를 사용한다. 증폭기로는 대략 25dB 정도의 이득을 얻을 수 있는 RF-Amplifier를 채택한다. 음원과 수음기로는 각각 송신용 초음파센서(400kHz)와 수신용 초음파센서(400kHz)를 이용하고 검파기로 모듈레이션미터(Modulation Meter)를 사용한다. 또한 위상차관측장치로서는 디지탈 오실로스코프를 사용한다. 음원과 수음기의 거리 L에 따라 거리 L사이에 저주파가 몇 파장 존재하는지를 오실로스코프 화면상의 리샤쥬 도형(Lissajous' figure)을 이용하여 구할 수 있다. 계산을 용이하게 하고 정확도를 높이기 위해 거리 L사이의 변조파의 파장을 1 (n=1)로 만들어 실험하게 된다. 이것은 저주파 발진기(함수 발생기)의 조정버튼을 미세 조정함으로써 얻어질 수 있다. 2개의 정현파를 오실로스코프의 수평축과 수직축에 별도로 가하고 양자의 주파수 비를 정수비가 되게 하면 양 주파수 비와 위상차에 따라 특이한 도형이 CRT화면상에 그려지게 되는데 이 도형을 리샤쥬 도형이라 한다. 그림 2는 각각의 정수비에 따른 리샤쥬

도형을 보여준다.

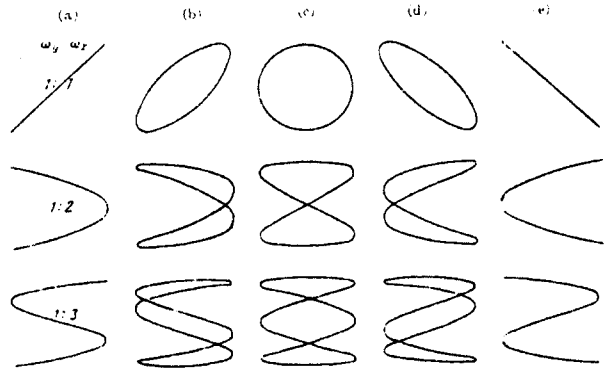
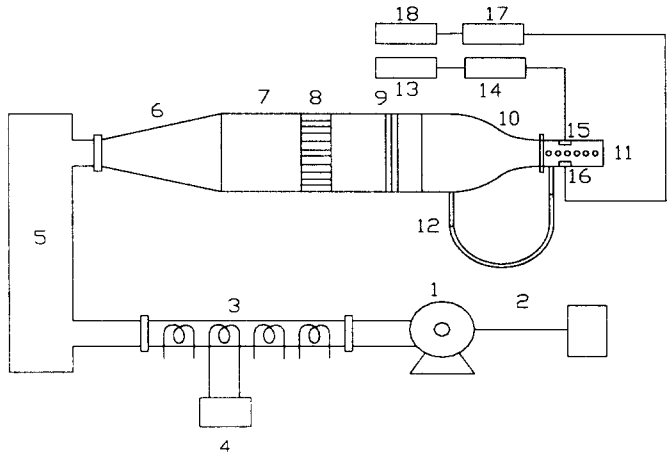


Fig. 2 Lissajous' figure

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

그림 3은 본 실험 장치의 개략도이다.



1. Blower
2. Inverter
3. Heater
4. Slidux
5. Surge tank
6. Magnified duct
7. Acryl duct
8. Honey comb
9. Screen
10. Reduced duct
11. Acryl duct
12. Manometer
13. Function generator
14. Signal generator
15. Ultrasonic transmitter
16. Ultrasonic receiver
17. Modulation meter
18. Digital oscilloscope

Fig. 3 Schematic diagram

기체의 속도를 4m/s~27m/s까지 조절할 수 있도록 1마력(0.75Kw) 팬타입 송풍기 ①와 인버터 ②를 설치하였다. 인버터 ②는 상용전력의 주파수 60Hz를 0~

75Hz까지 변화시키면서 모터의 속도를 제어할 수 있도록 하였다. 송풍기 ①에서 속도를 얻은 기체는 열선히터 ③(1Kw, 이후 3개의 2Kw)에서 열에너지를 얻어 가열되어진다. 두 번째 2Kw 히터에는 슬라이덕스 ④를 설치하였다. 슬라이덕스 ④는 상용 전력의 전압을 0~240V까지 변화시킬 수 있다. 따라서 열공급을 조절할 수 있으므로 온도변화를 미세하게 조작할 수 있다. 열선히터 ③를 통과하면서 열에너지를 얻은 기체는 서지탱크 ⑤에서 균일하게 혼합되어 일정한 압력과 온도를 유지하게 된다. 혼합이 용이하도록 서지탱크 하단부의 공기유입관을 편심이 지도록 제작하여 설치하였다. 서지탱크 ⑤를 통과한 기체는 확대관 ⑥을 지나 아크릴관 ⑦을 통과하게 되는데 아크릴관 내부에는 외경 8mm 스테인레스관으로 제작한 허니콤 ⑧을 설치하였다. 이 허니콤 ⑧은 기체흐름에서 와발생을 억제하여 층류를 발생시키고 균일한 속도분포를 유지하도록 해 준다. 허니콤 이후에는 금망(mesh 600) ⑨을 설치하여 보다 세밀한 층류를 지속시키도록 하였다. 금망 ⑨을 통과한 기체는 층류를 유지하게 하도록 설계된 축소관 ⑩을 지나 테스트 튜브인 아크릴관 ⑪을 지나가게 되고 이 아크릴관 내에서 속도와 온도분포를 측정하게 된다. 공기속도와 유량을 측정하기 위해 벤튜리타입 마노미터 ⑫를 설치하였다. 속도 측정은 벤튜리 마노미터 이외에 피토튜브와 열선풍속계를 사용하여 그 정확성을 기했다. 온도 측정은 표준온도계, 열선풍속계, 열전온도계를 사용하여 측정, 비교하였다.

다음으로 초음파에 의한 온도 측정부분 장치를 살펴보면 신호를 발생시키는 함수발생기 ⑬와 발생된 신호를 반송파에 실어 발신하는 시그널제너레이터 ⑭, 변화된 신호파를 송·수신하는 송신용 초음파센서 ⑮와 수신용 초음파센서(각 400kHz) ⑯, 그리고 수신된 변조파에서 신호를 잡아내어 저주파의 신호를 검출해 내는 모듈레이션 미터 ⑰, 송신파와 수신된 파를 감지 비교분석할 수 있는 디지털오실로스코프 ⑱등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 시그널제너레이터의 출력이 너무 미비(약 -13 dbm 정도)하기 때문에 RF-Amplifier를 사용하여 약 22~25dB 정도의 이득을 얻도록 증폭기를 사용하여야만 했다. 일반적으로 23 dbm은 3.2V 정도에 해당한다. 또 다른 방법으로 이번 실험에서는 외부소스 입력이 가능하고 주파수 변조 기능이 내장된 함수 발생기를 사용하였다. 큰 출력(최대 10V까지)을 얻을 수 있기 때문에 증폭시키지 않고도 잡음없이 더 멀리 신호파를 보낼 수 있다.

3.2 실험방법

3.2.1 속도 및 온도분포

인버터를 사용하여 속도를 변화시켜가면서 각각의 속도를 피토튜브, 벤튜리, 열선풍속계 등으로 측정한다. 마노미터의 높이차를 속도식으로 환산해 속도를 구하고 아크릴 관벽으로부터의 거리에 따른 속도분포도 함께 측정한다.

온도분포는 각각의 열선히터를 가동하여 즉, 0kW~5kW까지 변화시켜 가면서 그 때 마다 속도를 변화시켜 온도를 측정한다. 벽면으로부터의 거리에 따른 온도분포는 벽면으로부터 1mm마다 측정하여야 하는 측정장치의 특성상 열전온도계

(K타입)로 측정한다.

3.2.2 초음파계측 방법

(1) 일정온도에서 거리에 따른 주파수 측정

거리에 따른 온도분포와 신뢰성을 파악하기 위해 트래버스에 아크릴판을 장착한 후 송·수신용 초음파 센서를 부착시킨다. 일정한 온도(상온)에서 일정한 주파수(400kHz)의 초음파를 송신용 초음파 센서에 연속적으로 보내면서 오실로스코프 상에 나타나는 리샤쥬 도형을 관찰한다. 이 때 두 센서의 거리를 0mm 로부터 서서히 트래버스의 손잡이를 돌려 먼 곳으로 이동시킨다. 두 센서간의 거리가 멀어짐에 따라. 각각의 위상차에 따른 리샤쥬 도형이 변화하게 되는데 이를 관찰함으로써 주어진 거리내에 몇 파장의 파가 존재하는지를 알 수 있다. 위상차가 0° , 180° , 360° 일 경우를 기준으로(이 때가 관찰과 비교시 가장 유용) 그 때마다의 파장을 알 수 있고 이로부터 음속과 온도를 구한다.

(2) 일정거리에서 기체온도 측정

다음으로 일정한 거리에서의 온도변화를 측정한다. 66.3mm 의 아크릴 덕트를 가열 풍동이 달린 장치에 장착하고 덕트 좌우에 센서를 부착한다. 열선히터와 송풍기를 작동하여 가열된 공기를 보낸다. 덕트내의 온도가 정상상태가 될 때까지 유지한 상태에서 초음파 신호를 보낸다. 이 때의 리샤쥬 도형을 보면서 1파장의 파가 두 센서 사이에 존재하게 한다. 바로 이 때의 주파수를 오실로스코프에서 읽어서 음속을 계산하고 임의 공기의 온도를 구한다. 열전온도계와 열선풍속계로 구한 온도와 비교하여 그 오차를 구하고 정확성을 파악한다.

(3) 일정온도에서 공기속도에 따른 주파수 측정

속도에 따른 온도분포의 신뢰성을 파악하기 위해 인버터를 조작하여 속도를 변화시켜가면서 각각의 속도에 대해 히터와 슬라이덕스를 미세 조정하여 일정한 온도(본 실험에서는 상온, 40℃, 60℃, 80℃)를 유지한다. 본 실험에서는 66.3mm로 거리 L을 고정시킨 후 1파장의 파가 주어진 거리내에 존재(n=1)할 때에 각각의 속도변화에 따른 주파수 변화를 측정하여 다양한 속도에 따른 온도 변화를 알아본다.

(4) 센서 대향각도 변화에 따른 주파수 측정

다음으로 각도변화에 따른 측정의 신뢰성을 파악한다. 앞의 모든 실험에서는 유체의 흐름과 센서단면과의 각도가 0° 로 일정하였지만 본 실험에서는 각도를 5° 씩 증가시켜가면서 30° 까지 측정한다. 마찬가지로 조작하여 일정온도 일정속도를 유지하면서 각각의 온도와 속도에서의 주파수를 측정하여 각도에 따른 주파수의 변화를 살펴본다. 또한 일정거리에서 한 쪽 센서는 고정하고 다른 한 쪽 센서만 각도를 주면서 지향성의 영향도 살펴본다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 속도 및 온도분포

마노미터의 높이차를 가지고 공기의 속도와 유량을 계산한다. 다음 그림 4는

측정 단면인 아크릴 덕트의 벽면으로부터 거리에 따른 속도분포 결과를 보여준다.

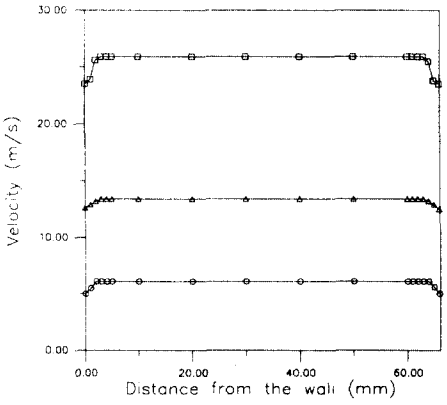


Fig.4 Velocity distribution according to the distance from the wall

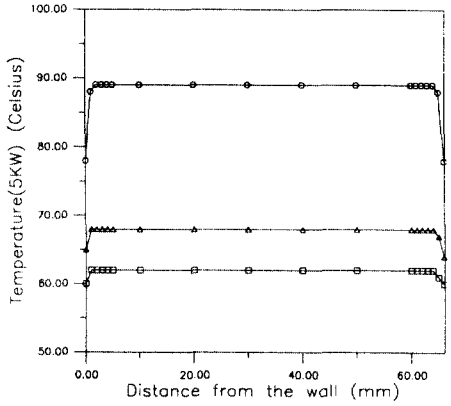


Fig.5 Temperature distribution according to the distance from the wall

예측했던 대로 허니콤과 금망, 그리고 측정단면에서 층류가 유지되도록 설계된 축소관(Contraction nozzle)을 통과한 공기는 벽면을 제외하고는 거의 일정한 속도분포를 나타내고 있다. 따라서 초음파에 의한 온도 측정시속도가 변화하더라도 측정 단면에서는 균일한 속도분포를 유지함을 알 수 있다. 즉, 초음파에 의한 온도 계측시 속도의 영향을 정확히 고찰할 수 있다.

수평온도분포는 K타입 열전온도계를 사용하여 수평으로 5mm씩 이동하면서 아크릴덕트 벽면으로부터의 온도분포를 측정하였는데 그 결과는 그림 5와 같다. 예측했던 대로 벽면에서는 온도가 떨어지고 5mm이후부터는 거의 균일한 수평온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 저속일 경우가 고속일 경우보다 온도차가 덜 심함도 함께 알 수 있다. 고온으로 갈수록 벽면과 덕트 내부와의 온도차가 더욱 현격하게 나타남을 또한 알 수 있다. 이와 같은 결과는 아크릴 덕트의 측정단면에서 균일한 온도분포를 나타냄을 확인시켜준다. 이는 본 실험에서 사용하는 방법으로 초음파에 의한 온도측정시 균일한 온도분포이어야 하는 조건을 잘 만족시키는 결과이다.

4.2 센서간의 거리에 따른 주파수 관계

일정속도에서 온도를 달리할 때 거리 L을 변화시켜가면서 n=1인 경우의 주파수 f 를 구해보면 그림 6과 같은 결과를 얻는다. 그림 6의 그래프에서 실선은 이론값을 ×표시는 실험값을 나타낸다.

본 실험에서는 L이 10~70mm 범위에서 실험값이 거의 이론값과 일치하고 있다. 즉 이 결과는 초음파 센서가 감지할 수 있는 거리내에서 기체의 속도와 센서 사이의 거리에 상관없이 온도 측정이 가능함을 보여주고 있다.

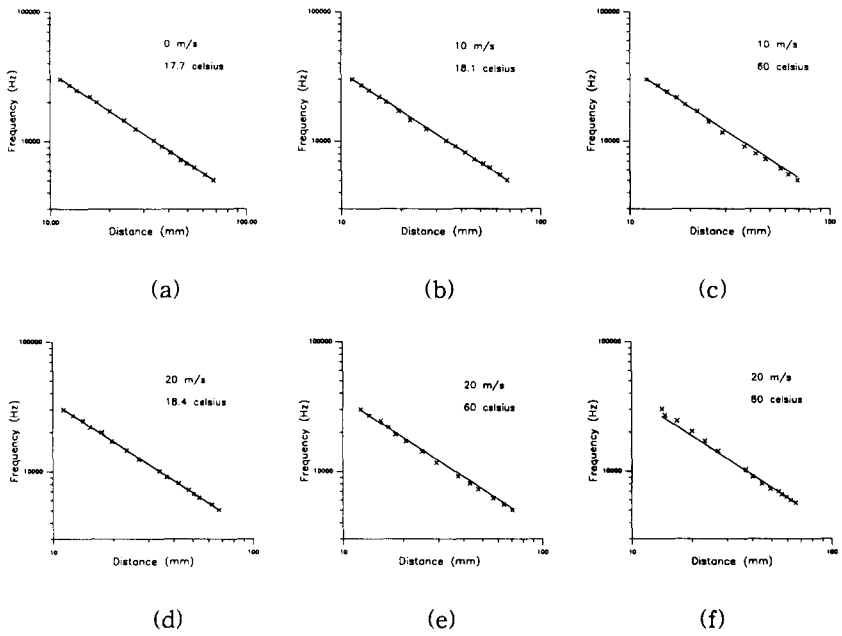


Fig. 6 The relation between length and frequency

4.3 일정거리에서 기체온도 측정

다음으로 L을 일정하게 하고(66.3mm) 리샤쥬 도형을 관찰하면서 n=1일 때의 주파수를 구하고 그 값으로부터 음속과 임의 기체의 온도를 측정하였다. 가로축을 온도, 세로축을 주파수로 놓고 이를 그래프로 그리면 그림 7과 같은 결과 그래프를 얻을 수 있다.

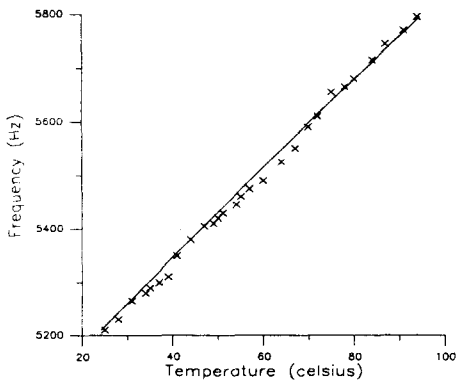


Fig. 7 The relation between frequency and temperature

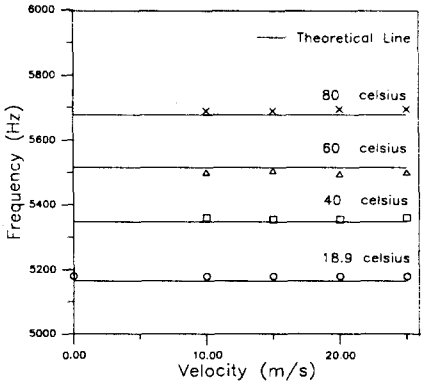


Fig. 8 The relation between velocity and frequency at constant temperature

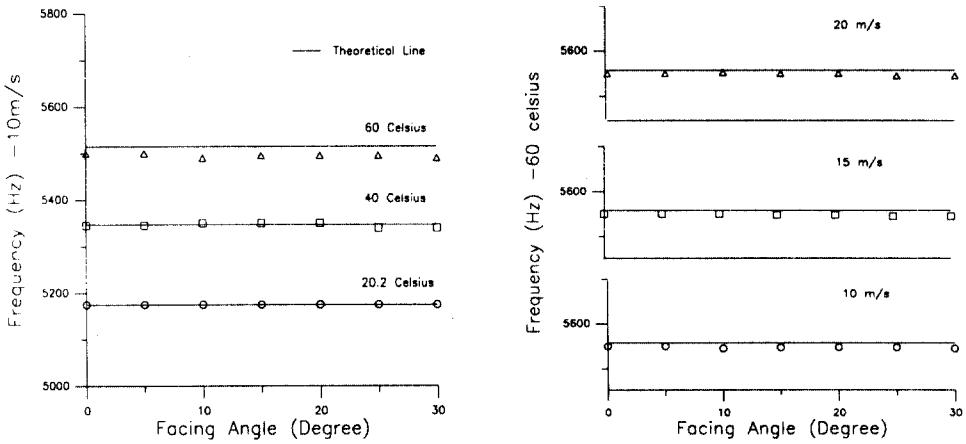
그림 7에서 실선은 이상기체에 대한 이론값이고 ×표시는 실험에 의해 측정한 온도값으로 이론값과 거의 일치하고 있다.

4.4 공기속도에 따른 영향

. 그림 8은 일정한 온도에서 각각의 속도 변화에 따른 주파수와의 관계를 보여준다. 실선은 아래로부터 상온 18.9℃, 40℃, 60℃, 80℃인 경우의 이론값이고 ○는 18.9℃, □는 40℃, △는 60℃, ×는 80℃인 경우의 속도 변화에 따른 주파수의 실측값들이다. 이론값과 실측값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있는데 이 결과는 속도가 0~27m/s 까지 변해도 속도 분포만 균일하다면 주파수에 대한 영향이 적기 때문에 음속의 변화가 거의 없음을 말해준다. 따라서, 온도 측정시 온도만 일정하다면 속도의 변화에 상관없이 정확한 값을 얻을 수 있다

4.5 센서 대향각도에 따른 영향

그림 9의 결과는 센서의 대향각도에 따른 주파수 변화를 보여주고 있다.



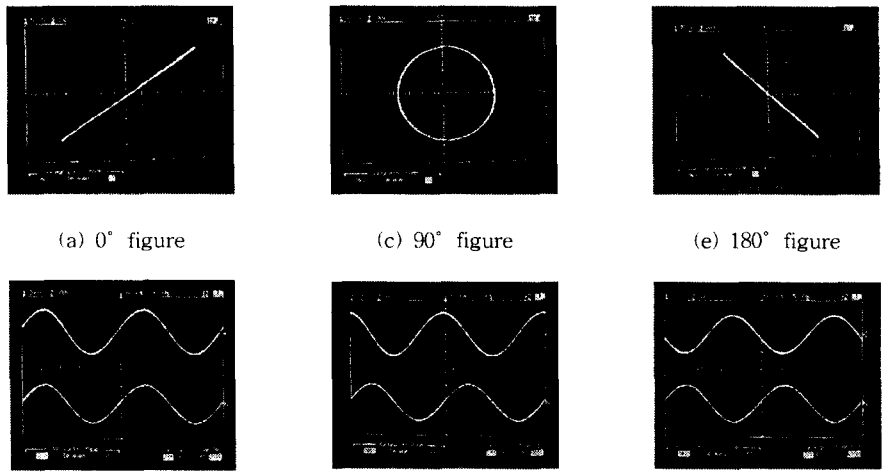
(a) (b)

Fig. 9 The relation between facing angle and frequency at constant both temperature and velocity of air

실선은 각각의 조건에서의 이론주파수값을 나타내고 ○, □, △는 실험값을 나타낸다. 이 그래프의 결과는 공기의 흐름과 센서와의 대향각도를 변화시키더라도 주파수가 거의 변화하지 않으므로 온도 측정에 지장이 없음을 보여준다. 즉, 초음파에 의해 온도 측정시 저속이든 고속이든 저온이든 고온이든 센서의 대향각도의 영향은 없다는 것을 확인시켜 주고 있다. 또한 66.3mm의 거리에서 한 쪽 센서만 각도를 변화시켰을 때는 좌우로 각각 15° 까지는 신호파가 잡혀서 측정이 가능했으나 15° 를 넘어서 부터는 신호파가 떨림이 심하고 고정되지 않아 측정이 불가능함을 확인할 수 있었다.

이번 실험의 그림 6에서 그림 9까지의 결과에서 오차가 발생한 요인을 분석해 보면 먼저 저주파 발생기인 함수발생기의 안정성과 정도를 들 수 있다. 본 실험에서 사용한 저주파의 범위가 대략 5.0~6.5kHz 정도인데 함수발생기의 디스플레이는 최소 10의 자리 단위로 밖에 읽을 수 없다. 따라서 이는 온도로 환산했을

경우 약 ±1℃ 정도의 오차에 해당한다. 또 하나의 요인은 거리 계측의 부정확성이다. 트래버스의 눈금은 버어니어캘리퍼스의 눈금으로 1/20 mm까지 읽을 수 있는데 계기를 조작할 때 눈의 오차를 0.1mm 정도로 보면 이 또한 ±1℃ 정도 범위의 오차를 얻게 된다. 따라서 이 두가지의 주된 오차의 요인을 고려하여 합치면 대략 ±2℃ 정도의 오차를 나타내고 있는 것으로 분석된다.



(a) 0° figure (c) 90° figure (e) 180° figure

(b) 0° phase difference (d) 90° phase difference (f) 180° phase difference

Fig. 10 Lissajous' figure on the screen of oscilloscope

본 실험에서 n=1 인 경우를 정확히 알 수 있도록 보여주는 리샤쥬 도형은 매우 중요한데 그림 10은 이번 실험에서 나타난 결과의 사진들이다. 차례대로 위상차가 각각 0° , 90° , 180° 일 때의 리샤쥬 도형을 보여준다.

앞으로의 연구방향은 대형 연소로에서의 연소온도 측정에 앞서 왕복동 단기통 4행정 엔진의 연소실에서 초음파를 이용해 온도를 측정하는 실험을 수행하는 것이다.

5. 결론

(1) 가청주파수의 음파를 초음파에 실어 보내는 주파수변조방법을 사용함으로써 외부 잡음의 혼입을 막을 수 있고 비교적 정확히 기체의 온도를 측정할 수 있다.

(2) 초음파에 의한 기체온도 측정시 비교적 정확하게 10~70mm의 범위에서 거리에 상관없이 온도 측정이 가능하다.

(3) 온도만 일정하다면 0~27m/s 범위에서는 속도변화에 관계없이 ±2℃ 정도의 오차로 비교적 정확히 온도 측정이 가능하다.

(4) 초음파에 의한 기체온도 측정시 기체의 흐름과 센서면과의 대향각도가 0° ~ 30° 범위에서 변화하더라도 정확히 온도 측정이 가능하다.

6. 참고문헌

(1) 최영, 윤천한, 전홍신, 1998.11, "초음파에 의한 기체온도 측정에 관한 연구 (Ⅰ)-센서간의 거리에 따른 주파수 관계", 대한기계학회 추계학술대회논문집 B, pp. 360~365

(2) 丹羽 登, 1984, 超音波計測, 昭光當 pp. 165~173

(3) Ishii.C., 1935, "Supersonic in Gases", Scientific Papers on the Inst. of Physical and Chemical Research, 26, pp. 560

(4) 土子良治, 小堀泰宏, 村上邦雄, 桑原清, 1962.12, "超音波 風速溫度計に ついて", 電子通信學會 超音波研究會資料, 69, pp. 27

(5) 丹羽 登, 佐下橋市太郎, 宇野義雄, 寺西昭男, 1967, "超音波共振法による氣體溫度の測定", 計測と制御, 6, 7

(6) Kaimal,J.C., Businger,J.A., 1963, "A Continuous Wave Sonic Anemometer and Thermometer", J. of Applied Meteorology, 2

(7) McDonald, C. 1963, "Balloon-borne Acoustic Interferometer for Upper Atmospheric Measurements", J.Acoust. Soc. Amer., 35, 5 pp. 813

(8) Gurvitch, A.S, 1960, "Frequency Spectra and Functions of Distribution of Probabilities of Vertical Wind Velocity Components, Bull. Acad. Sci, No.7, pp. 695-703

(9) 谷腰欣司, 1997, 초음파와 그 사용법, 도서출판 세화, pp. 88-89