

# 기체온도 측정을 위한 초음파 계측에 관한 연구

윤찬한\* · 최 영\* · 진흥신\*\*  
(1998년 12월 15일 접수)

## A Study on Ultrasonic Technique for Measuring Gas Temperature

Cheon Han Yoon, Young Choi and Heung Shin Jeon

**Key Words :** Ultrasonic Wave(초음파), Temperature(온도), Velocity of Sound(음속), Frequency(주파수), Lissajous' Figure(리사쥬 도형)

### Abstract

Measuring temperature with ultrasonic wave apparatus is desirable in the case of gas below 300 0°C 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 flow rate(air velocity). The frequency modulation method is used to measure the temperature which is varying in hot air flow up to 100°C. 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. 서 론

정확한 온도의 측정은 현상 연구, 제품이나 기계의 설계, 제작, 유지, 보수 등에 매우 중요하다. 따라서 온도계의 선정은 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°C 이상에서는 정확도가 떨어지고 내구성에서 문제가 발생한다. 또한 레이저와 같은 비접촉식 온도계는 고가이고 세팅에 큰 어려움이 있다. 따라서 비교적 가격이 저렴하고 조작이 간편한 새로운 비접촉식 온도계의 개발이 필요한데 이를 충분히 만족시켜 주는 것이 초음파를 이용한 측정이다. 초음파는 인간의 귀로 들을 수 없는 높은 진동의 음파로서 일

반적으로 20kHz 이상의 음향적(진동음) 진동이며 “정상적 청력을 가진 사람에게 청각각이 일어나지 않을 만큼 주파수가 높은 음파”로 정의할 수 있다. 초음파에 의한 측정법은 기체온도를 기체를 통한 음속의 측정값으로부터 구하는 방법이다. 이것은 기체의 온도가 음속만의 함수라는 것을 이용한 것이다.

종래의 연구는 음파가 기체중의 일정거리를 통과하는 시간거리를 직접 측정하여 음속을 구하는 방법을 사용하였다. 그런데 이 방법은 생음파를 사용하기 때문에 잡음 혼입의 염려가 많고 증폭시에도 많은 문제가 발생한다. 본 연구에서는 임의로 떨어진 음원과 수용기에서 받은 음파의 위상차가 임의의 설정된 값이 되었을 때의 주파수로부터 음속을 구하는 원리를 이용하지만 음파로서는 초음파를 반송파로 하고 이것을 주파수 변조한 파를 사용하고 있다. 실제로 왕복동 내연기관이나 각종 연소기의 연소실내의 가스온도는 미연가스와 연소가스의 유동이 매우 복잡하고 또 온도도 급변하기 때문에 측정이 곤란하다. 따라서 실린더내 온도 측정은 미연 또는 연소가스의 유동 특성을 고려하여 정확성을 기해야 한다.

\* 회원, 경희대학교 대학원

\*\* 회원, 경희대학교 기계공학과

본 연구에서는 실제 내연기관의 실린더내 온도측정을 위한 초음파 측정법을 적용하기에 앞서 센서 사이의 거리, 기체속도 및 기체흐름의 방향과 대향하는 센서의 각도를 변화시켜 가면서 온도를 측정하였다.

2. 초음파에 의한 온도측정 방법

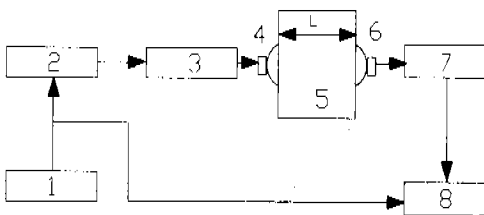
초음파에 의한 온도측정 방법은 매질을 통과하는 음파의 음속을 측정하여 온도를 구하는 방법이다. 이것은 측정기체 중에 일정거리 L을 사이에 두고, 음원과 수음기를 대향시킨 다음 적당한 저주파(주로 가청주파수 영역)의 주파수 f 를 반송파에 실어 일정 주파수의 초음파를 연속적으로 음원에서 방사하여, 피측정기체를 통과한 초음파를 수음기로 수신하여 온도를 측정하는 방법이다. Fig. 1은 초음파 온도측정 방법의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

음원과 수음기의 거리 L, 위상차 n, 주파수 f 및 음속 a와의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서,

- a : 음속(m/s)
- L : 거리(m)
- n : 파장수
- f : 주파수(Hz, 1/s)



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

Fig. 1 Block diagram of measurement.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 반송파 발진기에서 초음파신호를 발생시키고, 이것은 저주파 발진기에서 가청주파수영역의 신호에 따라 변조된다. 저주파를 실은 반송파는 출력이 약하기 때문에 증폭기로서 증폭시켜 음원으로 보낸다. 위상차 관측장치는 저주파발진기의 신호파와 검파기에서 얻은 저주파와의 위상차를 관측한다. 관측한 값이 소정의 값으로 될 때의 저주파 발진기의 주파수를 읽으면 식 (1)에서 음속을 다음 식 (2)에서 온도를 구할 수 있다.

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

여기서,

- $\bar{R}$  : 일반기체상수(8310Nm/kmolK)
- T : 절대온도
- m : 분자량(28.97)
- $\kappa$  : 비열비(1.4)

이다.

본 실험에서는 저주파 발진기로서 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 채택하였다. 음원과 수음기로는 각각 송신용 초음파센서와 수신용 초음파센서를 이용하고 검파기로 모듈레이션미터(Modulation Meter)를 사용하였다. 또한 위상차 관측장치로서는 디지털 오실로스코프를 사용하였다. 음원과 수음기의 거리 L에 따라 거리 L사이에서 저주파가 몇 파장 존재하는지를 오실로스코프 화면상의 리샤주도형(Lissajous' figure)을 이용하여 구할 수 있다. 계산을 용이하게 하고 정확도를 높이기 위해 거리 L사이의 변조파의 파장수 1 (n=1)로 만들어 실험하였으며, 이것은 저주파 발진기(함수 발생기)의 조정버튼을 미세 조정함으로써 얻을 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 리샤주도형이라 한다. Fig. 2는 각각의 정수비에 따른 리샤주도형을 나타낸다.

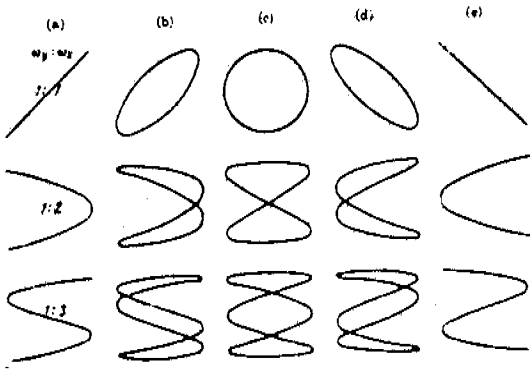
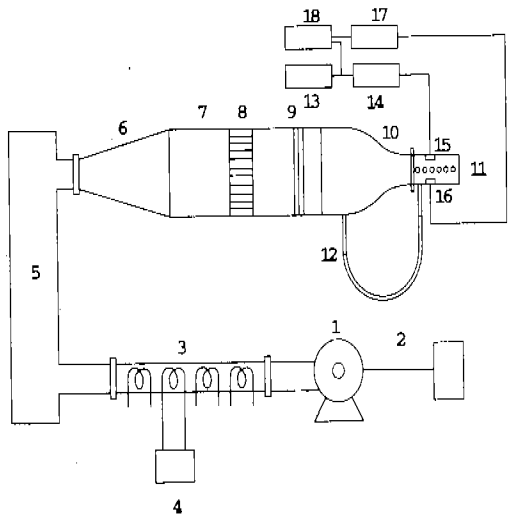


Fig. 2 Lissajous' figure.



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

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Fig. 3은 본 실험 장치의 개략도이다.

측정용 기체는 속도를 4m/s~27m/s까지 조절할 수 있도록 1마력(0.75kW) 팬타입 송풍기 ①와 인버터 ②를 설치하였다. 인버터 ②는 상용전력인 주파수 60Hz를 0~75Hz까지 변화시키면서 모터

의 속도를 제어할 수 있도록 하였다. 송풍기 ①에서 속도를 얻은 기체는 열선히터 ③(1kW, 이후 2kW 3개 설치)에서 열에너지를 얻어 가열된다. 두 번째 2kW 히터에는 슬라이믹스 ④를 설치하였다. 슬라이믹스 ④는 상용전력의 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 되도록 제작하여 설치하였다. 서지탱크 ⑤를 통과한 기체는 확대관 ⑥을 지나 아크릴판 ⑦을 통과하게 되는데 아크릴판 내부에는 외경 8mm 스테인레스판으로 제작한 허니콤 ⑧을 설치하였다. 이 허니콤 ⑧은 기체흐름에서 와류발생을 억제하여 층류를 발생시키고 균일한 속도분포를 유지하도록 해 준다. 허니콤 이후에는 금망(mesh 600) ⑨를 설치하여 보다 세밀한 층류가 유지 되도록 하였다. 금망 ⑨를 통과한 기체는 층류를 유지하게 하도록 설계된 축소관 ⑩을 지나 테스트 튜브인 아크릴판 ⑪을 지나가게 되고, 이 아크릴판 내에서 속도와 온도분포를 측정한다. 공기속도와 유량을 측정하기 위해 벤츄리타입 마노미터 ⑫를 설치하였다. 속도 측정은 벤츄리 마노미터 이외에 피토투브와 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, 변환된 신호파를 송·수신하는 송신용 초음파센서 ⑮와 수신용 초음파센서(각 400kHz) ⑯, 그리고 수신된 변조파에서 신호를 픽업하여 저주파 신호를 검출해 내는 모듈레이션미터 ⑰, 송신된 파와 수신된 파를 감지하여 비교, 분석할 수 있는 디지털오실로스코프 ⑱등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 시그널제너레이터의 출력이 너무 미약(약 -13 dbm 정도)하기 때문에 RF-Amplifier를 사용하여 약 22~25dB 정도 증폭되도록 증폭기를 사용하였다. 일반적으로 23 dbm은 3.2V 정도에 해당한다. 또 다른 방법으로 이번 실험에서는 외부소스 입력이 가능하고 주파수변조 기능

이 내장된 함수발생기를 사용하였다. 큰 출력(최대 10V까지)을 얻을 수 있기 때문에 증폭시키지 않고도 깨끗한 신호파를 더 멀리 보낼 수 있다.

### 3.2 실험방법

#### 3.2.1 속도 및 온도분포

인버터를 사용하여 속도를 변화시켜 가면서 각각의 속도를 피토투브, 벤튜리, 열선풍속계 등으로 측정하였다. 마노미터의 높이차를 속도식으로 환산해 속도를 구하고 아크릴 관벽으로부터의 거리에 따른 속도분포도 함께 측정하였다.

온도분포는 각각의 열선히터를 가동하여 즉, 0kW~5kW까지 변화시켜 가면서 그때 마다 속도를 변화시켜 온도를 측정하였다. 벽면으로부터의 거리에 따른 온도분포는 벽면으로부터 1mm마다 측정하여야 하는 측정장치의 특성상 열전온도계(K타입)로 측정하였다.

#### 3.2.2 초음파계측 방법

##### (1) 일정온도에서 거리에 따른 주파수 측정

거리에 따른 온도분포와 신뢰성을 파악하기 위해 트레이스에 아크릴판을 장착한 후 송·수신용 초음파센서를 부착시킨 후 일정한 온도(상온)에서 일정한 주파수의 초음파를 송신용 초음파 센서에 연속적으로 보내면서 오실로스코프 상에 나타나는 리사쥬도형을 관찰한다. 이때 두 센서의 거리를 0mm 로부터 서서히 트레이스를 이용하여 거리를 이격시켰다. 두 센서간의 거리가 멀어짐에 따라 각각의 위상차에 따른 리사쥬도형이 변화하게 되는데 이를 관찰함으로써 주어진 거리내에 몇 파장의 파가 존재하는지를 알 수 있다. 위상차가 0°, 180°, 360° 일 경우를 기준으로(이때가 관찰 및 비교가 가장 용이) 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 부착하고, 열선히터와 송풍기를 작동하여 가열된 공기를 보낸다. 덕트내의 온도가 정상상태가 될 때까지 유지한 상태에서 초음파 신호를 보낸다. 이때의 리사쥬도형을 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 확보하기 위해 인버터를 조작하여 속도를 변화시켜가면서 각각의 속도에 대해 히터와 슬라이믹스를 미세 조정하여 일정한 온도(본 실험에서는 상온, 40°C, 60°C, 80°C)를 유지시킨다. 본 실험에서는 66.3mm 로 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 없이 수평(0°)로 유지시켰지만, 본 실험에서는 각도를 5° 씩 증가시켜 가면서 30° 까지 측정하였다. 마찬가지로 조작하여 온도와 속도를 일정하게 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 이용하여 공기의 속도와 유량을 계산한다. 다음 Fig. 4는 측정 단면인 아크릴 덕트의 벽면으로부터 거리에 따른 속도분포의 결과를 나타낸다.

예측했던 대로 허니콕과 금망, 그리고 측정단면에서 층류가 유지되도록 설계된 축소판(Contraction nozzle)을 통과한 공기는 벽면의 일부를 제외하고는 거의 일정한 속도분포를 나타내고 있다. 따라서 초음파에 의한 온도 측정시 속도가 변화하더라도 측정 단면에서는 균일한 속도분포를 유지함을 알 수 있다. 즉 초음파에 의한 온도계측시 속도의 영향을 정확히 고찰할 수 있다. 수평온도분포는 K타입 열전온도계를 사용하여

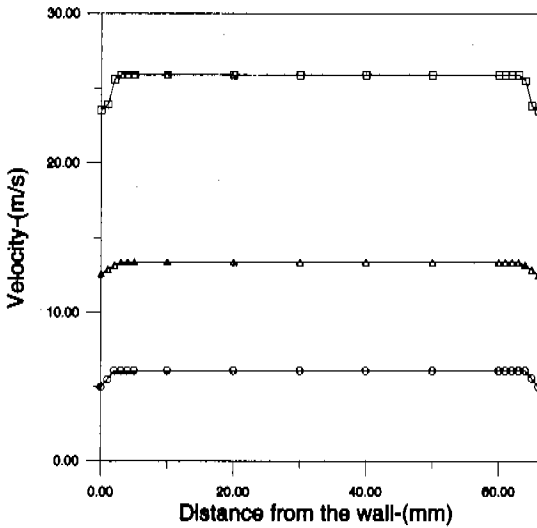


Fig. 4 Velocity distribution according to the distance from the wall.

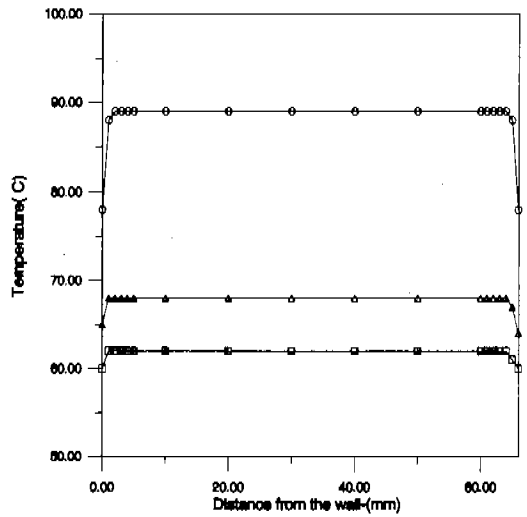


Fig. 5 Temperature distribution according to the distance from the wall.

수평으로 5mm씩 이동하면서 아크릴덕트 벽면으로부터의 온도분포를 측정하였는데 그 결과는 Fig. 5와 같다. 예측했던 대로 벽면에서는 온도가 떨어지고 5mm이후부터는 거의 균일한 수평온도 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 저속일 경우가 고속일 경우보다 온도차가 작음을 알 수 있고, 고온으로 갈수록 벽면과 덕트 내부와의 온도차가 더욱 현저하게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 아크릴 덕트의 측정 단면에서 온도가 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 사용하는 방법으로 초음파에 의한 온도측정시 균일한 온도분포이어야 하는 조건을 잘 만족시키는 결과이다.

4.2 센서간의 거리에 따른 주파수 관계

일정한 속도와 온도에서 거리 L을 변화시켜 가면서 n=1인 경우의 주파수 f를 구해보면 Fig. 6과 같은 결과를 얻는다. Fig. 6의 그래프에서 실선은 이론값을 x 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.

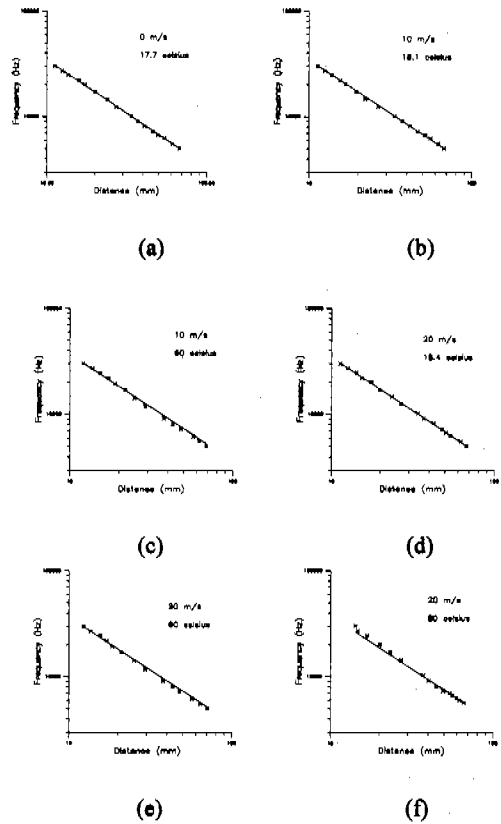


Fig. 6 Relation between length and frequency.

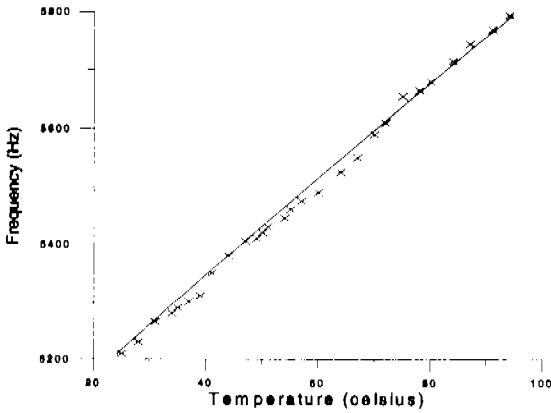


Fig. 7 Relation between frequency and temperature.

#### 4.3 일정거리에서 기체온도 측정

다음으로  $L$ 을 일정하게 하고(66.3mm) 리샤주도형을 관찰하면서  $n=1$ 일 때의 주파수를 구하고 그 값으로부터 음속과 임의기체(공기)의 온도를 측정하였다. 가로축을 온도, 세로축을 주파수로 놓고 이를 그래프로 그리면 Fig. 7과 같은 결과 그래프를 얻을 수 있다.

Fig. 7에서 실선은 이상기체에 대한 이론값이고  $\times$  표시는 실험에 의해 측정한 임의기체(공기)의 온도값으로 이론값과 거의 일치하고 있다.

#### 4.4 공기속도에 따른 영향

Fig. 8은 일정한 온도에서 각각의 속도변화에 따른 주파수와와의 관계를 나타낸다. 실선은 아래로부터 상온 18.9℃, 40℃, 60℃, 80℃인 경우의 이론값이고  $\circ$ 는 18.9℃,  $\square$ 는 40℃,  $\triangle$ 는 60℃,  $\times$ 는 80℃인 경우의 속도변화에 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 알 수 있다. 따라서 온도 측정시 온도만 일정하다면 속도의 변화에 상관없이 정확한 값을 얻을 수 있다.

#### 4.5 센서 대향각도에 따른 영향

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

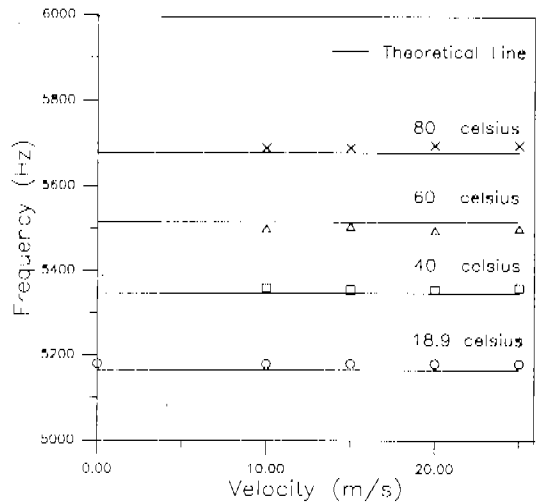


Fig. 8 Relation between velocity and temperature and frequency at constant temperature.

실선은 각각의 조건에서의 이론주파수값을 나타내고  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ 는 실험값을 나타낸다. 이 그래프의 결과는 공기의 흐름과 센서와의 대향각도를 변화시키더라도 주파수가 거의 변화하지 않으므로 온도측정에 지장이 없음을 나타낸다. 즉 초음파에 의한 온도 측정시 저속이든 고속이든 또는 저온이든 고온이든 센서의 대향각도의 영향은 없다는 것을 말해 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 Fig. 6에서 Fig. 9까지의 결과에서 오차가 발생한 요인을 분석해보면 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  $\pm 1^\circ\text{C}$  정도의 오차에 해당한다. 또 하나의 요인은 거리 계측의 부정확성이다. 트레이스의 눈금은 버니어캘리퍼스의 눈금으로 1/20 mm까지 읽을 수 있는데 계

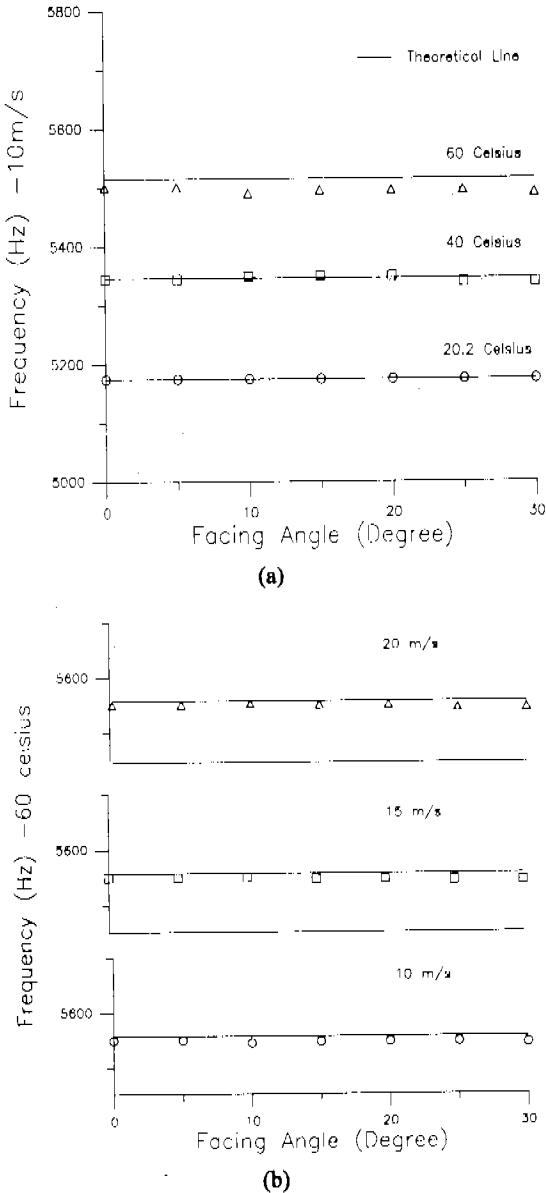


Fig. 9 Relation between facing angle and frequency at constant both temperature and velocity of air.

기를 조작할 때 눈의 오차물 0.1mm 정도로 보편이 또한  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  정도 범위의 오차물 얻게 된다. 따라서 이 두가지의 주된 오차의 요인을 고려하여 합치면 대략  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  정도의 오차물 나타내고 있는 것으로 분석된다. 본 실험에서  $n=1$  인 경우를 정확히 알 수 있도록 보여주는 리샤주도형은

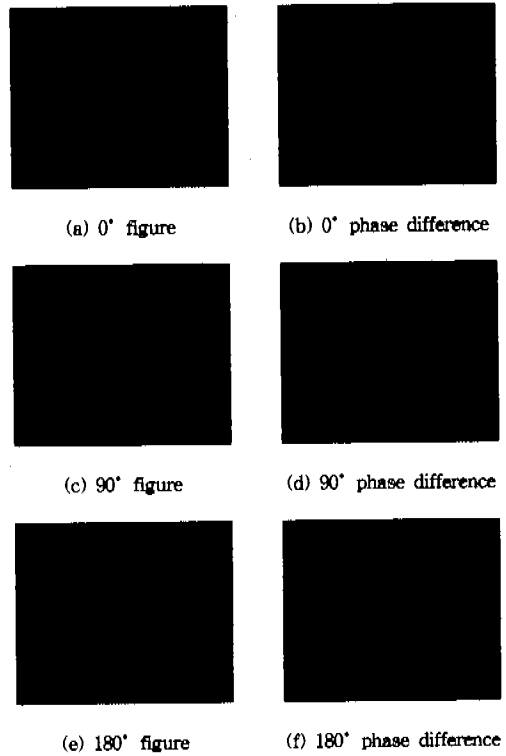


Fig. 10 Lissajous' figure on the screen of oscilloscope.

매우 중요한데 Fig. 10은 이번 실험에서 나타난 결과의 사진들이다. 차례대로 위상차가 각각  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$  일 때의 리샤주도형을 나타낸다.

향후 연구방향은 대형 연소로에서의 연소온도 측정을 목표로 먼저 왕복동 단기통 4행정 엔진의 연소실 온도를 초음파를 이용해 측정하는 실험을 수행하는 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 생음파를 이용하지 않고 주파수 변조된 초음파를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

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

(2) 초음파에 의한 기체온도 측정시 일정한 범위(10~70mm)에서는 거리에 관계없이 비교적 정확한 측정을 할 수 있다.

(3) 센서면과의 대향각도가  $0^\circ \sim 30^\circ$  범위에서는 기류의 속도가 변화하더라도 정확한 온도측정이 가능하다.

(4) 온도가 일정한 경우 일정한 범위( $0 \sim 27\text{m/s}$ ) 내에서는 속도변화에 관계없이 약간의 오차( $\pm 2^\circ\text{C}$ )는 발생하지만 비교적 정확한 온도측정이 가능하다.

### 참고문헌

- (1) 윤철한, 최영, 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, 昭光堂 pp. 165~173.
- (3) Ishii.C., 1935, "Supersonic in Gases," *Scientific Papers on the Inst. of Physical and Chemical Research*, 26, p. 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, p. 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 p. 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.
- (10) 谷腰欣司, 1998, 센서의 이야기, 도서출판 세화, p. 109.