

〈논 문〉 SAE NO. 953736

초음파센서를 이용한 전자식 연료분사엔진의 흡기유량측정

Air Flow Rate Measurement in Multi Point Injection Engine Using Ultrasonic Sensors

박 경 석,* 김 중 일,* 고 상 근,** 노 승 탁,** 이 종 화***
K. S. Park, J. I. Kim, S. K. Kauh, S. T. Noh, J. H. Lee

ABSTRACT

In this study an air flow meter was developed for MPI engine using ultrasonic sensors. The major characteristics of the ultrasonic flow meter are high speed response, flow direction recognition and linear output. The air flow rate measurements were conducted at upstream of the throttle and intake manifold. The characteristics of the ultrasonic flow meter are compared with those of the Bosch hot wire flow meter at both steady and unsteady engine conditions.

주요기술용어 : MPI engine(전자식 연료분사엔진), Air Flow Rate(공기유량), Ultrasonic Sensor(초음파센서), Hot Wire Flow Meter(열선유량계), Reverse Flow(역방향유동)

기 호 설 명

a	: Speed of sound in a flow	R	: Radius of pipe
a_0	: Speed of sound in a quiescent state	t_0	: Propagation time of ultrasonic wave in a quiescent state
c_1, c_2	: Calibration constants for the air mass flow rate equation	t_s	: Propagation time of ultrasonic wave in a flow
L	: Distance between the ultrasonic transmitter and receiver	t^*	: Normalized time
\dot{m}	: Air mass flow rate	U	: Velocity of ultrasonic wave
		u	: Velocity of air flow
		u^*	: Normalized velocity
		V_s	: Output voltage of ultrasonic air flow meter
		γ	: Specific heat ratio
		θ	: Cross angle

* 정회원, 서울대 대학원

** 정회원, 서울대 기계공학과

*** 정회원, 아주대 기계공학과

1. 서 론

전자식 연료분사엔진에서 연료량은 유량센서에 의한 계산량과 산소센서 피이드백에 의한 보정량으로 이루어진다. 그런데 기본연료분사량은 유량센서에 의해 결정되고 산소센서 피이드백제어에 의한 연료보정량은 상대적으로 작다. 특히 현재 대부분의 차량에서 사용되는 산소센서로는 가속과 같은 비정상상태시 피이드백제어를 하지 못하기 때문에 유량센서의 비중은 더욱 크다. 따라서 엔진에서 공기유량 측정을 위한 적절한 유량계의 선택은 매우 중요하다.

한편, 엔진용으로 쓰이기 위한 공기유량계의 요건을 살펴보면 다음과 같다.

첫째로 엔진이 비정상상태로 운전될 때 유량변화에 대한 유량계의 출력응답이 빠른 것이어야 한다. 즉 엔진이 급가속과 같은 상태가 될 때 유량변화가 매우 빨리 일어나므로 정확한 유량을 알기 위해서는 측정속도가 빠른 것이어야 한다. 또한 가속시의 유량계에 의한 연료량제어는 피이드백이 될 수 없기 때문에 시간지연이 있으면 그만큼 공연비제어에 어려움이 있게 된다. 이런 관점에서 열선형은 비교적 빠른 특성을 보이나 Manifold Absolute Pressure(이하 MAP)센서형은 매니폴드압력이 시간지연을 가지게 되므로 상대적으로 느린 특성을 보인다¹⁾.

둘째로 출력특성이다. 공기유량과 출력관계가 선형적일 경우 출력오차로 인한 유량오차는 유량에 관계없이 일정하지만 비선형적인 경우에는 유량에 따른 오차도 달라지므로 문제가 될 수 있다. 열선형은 유량과 출력이 비선형인데 특히 출력전압이 높을 때 출력이 조금만 변해도 유량에는 큰 차이를 가져오게 되므로 문제가 될 수 있다. 또한 출력전압을 필터링 할 때에도 전압에 따라 일률적으로 할 수가 없으므로 어려움이 있다. 이런 관점에서 칼만외류형²⁾과 MAP센서형은 선형성을 가지고 있으므로 유리하다.

세째로 유동의 방향 측정이다. 스톱들이 닫힌 경우에는 흡기매니폴드내의 압력이 대기압보다 낮으므로 유동의 방향이 엔진쪽을 향하지만 스톱들이 Wide Open Throttle(이하 WOT)에 이르

게 될수록 유동의 오실레이션이 커지면서 엔진에서 스톱들 앞쪽으로 유동이 생기게 된다. 따라서 엔진이 WOT상태에 있을 때 역방향유량을 순방향유량으로 측정하게 되면 연료량계산에 오차가 커지게 된다. 현재 쓰이는 거의 대부분 유량센서들은 유동의 방향을 감지하지 못하므로 별도로 보상테이블을 만들어야 한다.

네째로 내구성 및 가격 등의 요소가 있다.

본 연구에서는 초음파센서를 이용하여 엔진에서 유량을 측정할 수 있도록 하드웨어를 개발하였고, 이를 엔진 정상상태 및 비정상상태에 적용하여 위에서 제시한 조건에 따른 초음파유량계 특성을 열선유량계와 비교하여 살펴보았다.

2. 유속측정 원리

초음파는 어군탐지, 거리측정, 물체의 속도측정 등 여러 방면에서 응용이 되고 있다. 초음파를 이용하는 유속측정방법³⁾에는 여러 가지가 있으나 기본적인 원리는 음파와 같은 미소압력파 전달현상을 이용하는 것이다.

일반적으로 미소압력파가 공기중에서 전달될 때의 속도는 다음과 같이 표시된다⁴⁾.

$$U = a + u$$

$$= a_0 + \frac{\gamma + 1}{2} u \quad (a = a_0 + \frac{\gamma - 1}{2} u) \quad (1)$$

위 식에서 a_0 는 온도만의 함수이므로 온도를 측정하면서 계산할 수 있다. 그리고 U 는 초음파 송수신기 사이의 도달시간으로써 측정할 수 있으므로 결국 유체유속 u 를 측정할 수 있다. 물론 a_0 , γ 은 실험 조건에 따라 달라지므로 상수로 볼 수는 없으나 외기조건이 일정하게 유지되는 동안은 그 변화량이 상대적으로 작다고 볼 수 있으므로 중요한 요소는 되지 않는다. Fig.1은 1차원 정상상태의 원관유동인 경우에 초음파센서를 적용하였을 때이다. 사실상 초음파는 3차원으로 전파되나 편의상 1차원으로만 생각하고 유체의 속도는 초음파진행에 대하여 ξ 방향으로만 영향을

미친다고 가정한다.

식 (2)을 Fig.1에 적용하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 t_s &= \int_0^{L_s} d\tau \\
 &= 2 \int_0^{L/2} \frac{d\xi}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)u \cos\theta + a_0} \\
 &= LR \int_0^R \frac{dr}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)u \cos\theta + a_0} \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 유동이 없을 경우의 초음파 도달시간과 유동이 있을 경우의 초음파 도달시간사이의 시간차를 t 로 놓으면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 t &= t_0 - t_s \\
 &= \frac{L}{a_0} - \frac{L}{R} \int_0^R \frac{dr}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)u \cos\theta + a_0} \\
 &= \frac{L}{a_0 R} \left[R - \int_0^R \frac{dr}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \frac{u \cos\theta}{a_0} + 1} \right] \\
 &= \frac{L}{a_0 R} \left[\int_0^R \frac{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \frac{u \cos\theta}{a_0}}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \frac{u \cos\theta}{a_0} + 1} dr \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

다음과 같이 규준화변수를 도입하면,

$$\begin{aligned}
 t^* &= \frac{t}{(L/a_0)} \\
 u^* &= \frac{\gamma+1}{2} \frac{u \cos\theta}{a_0}
 \end{aligned}$$

식 (3)은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$t^* = \frac{1}{R} \int_0^R \frac{u^*}{(1+u^*)} dr \quad (4)$$

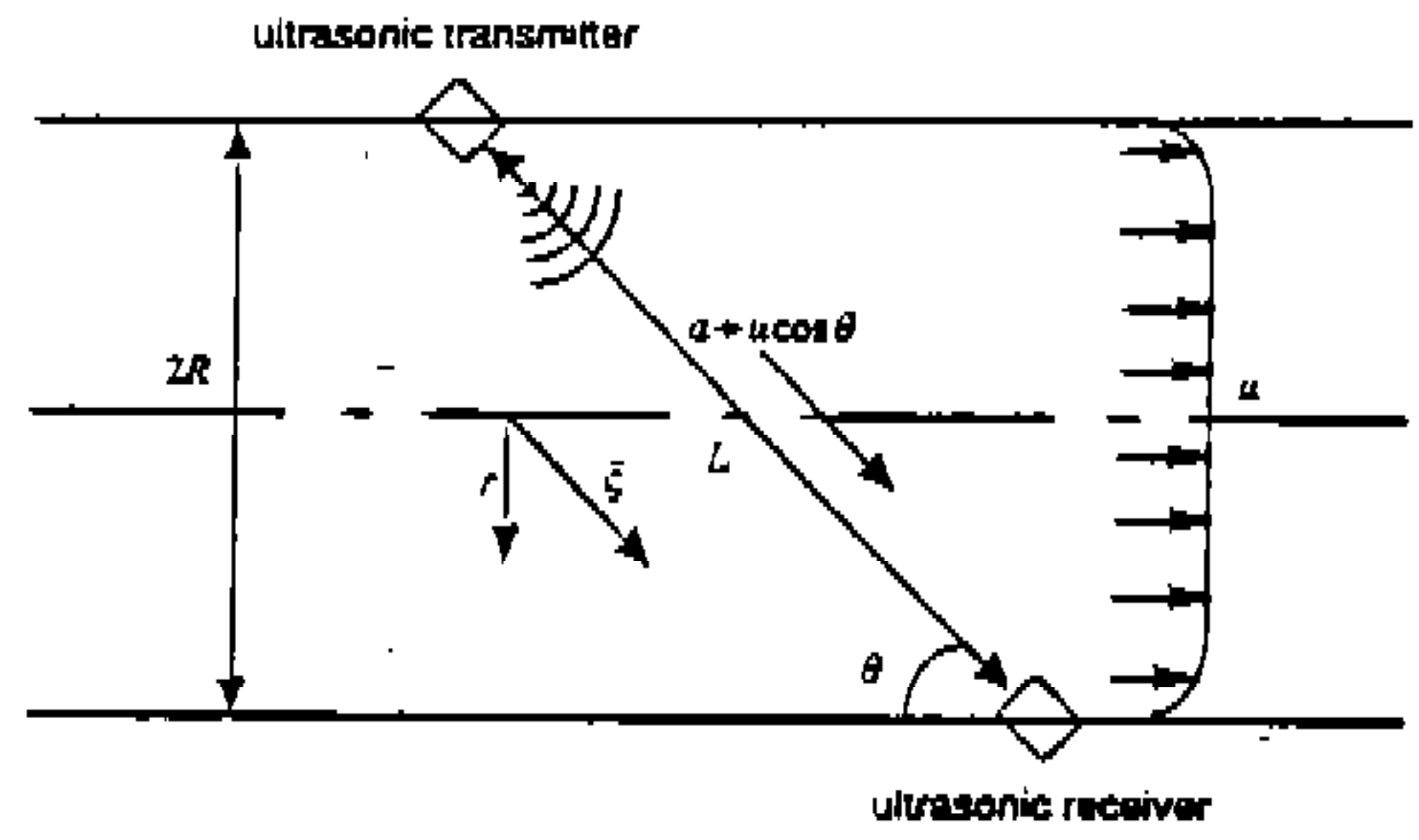


Fig.1 Schematic diagram of velocity measurement using ultrasonic sensors

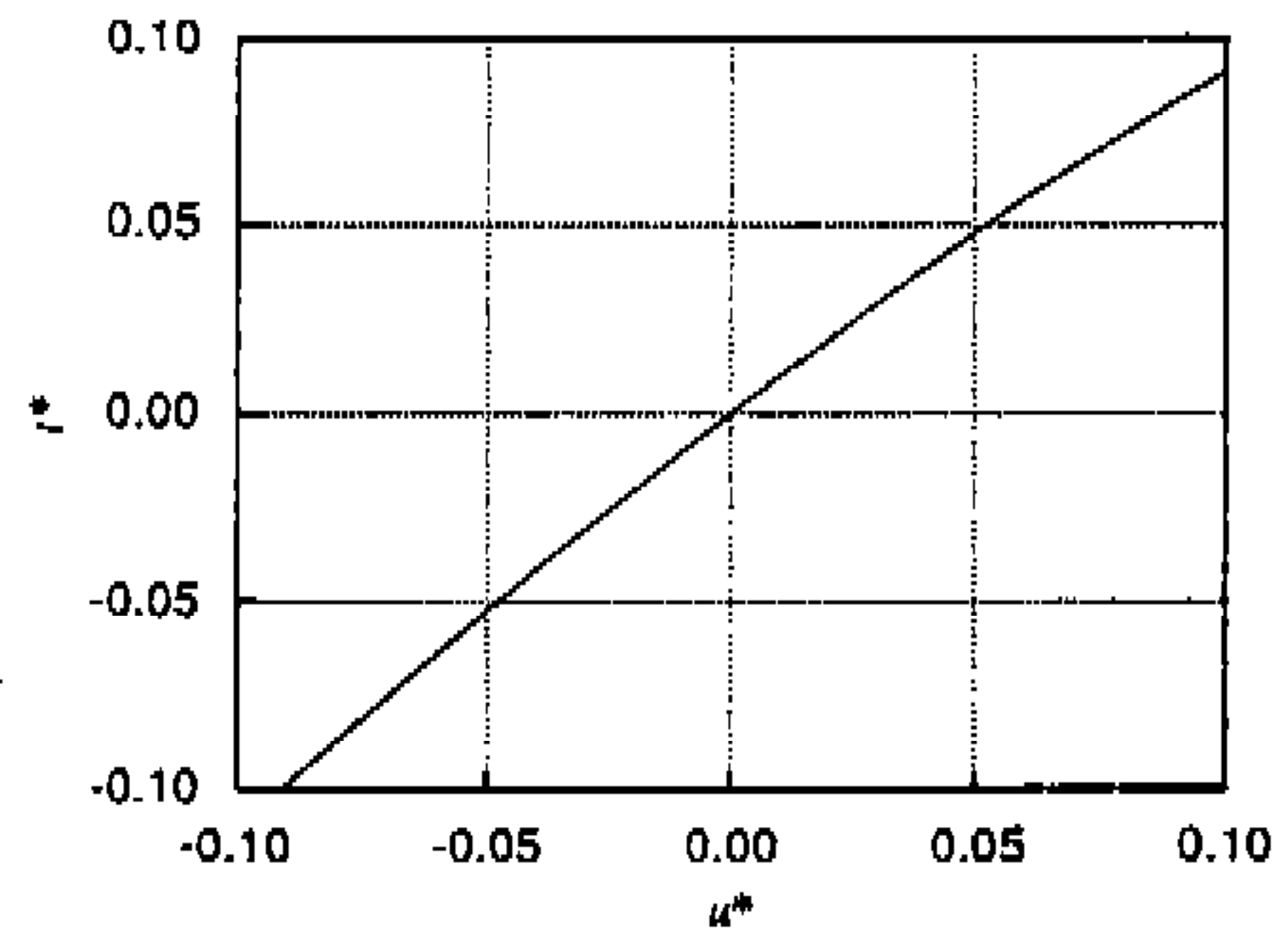


Fig.2 Relation between t^* and u^*

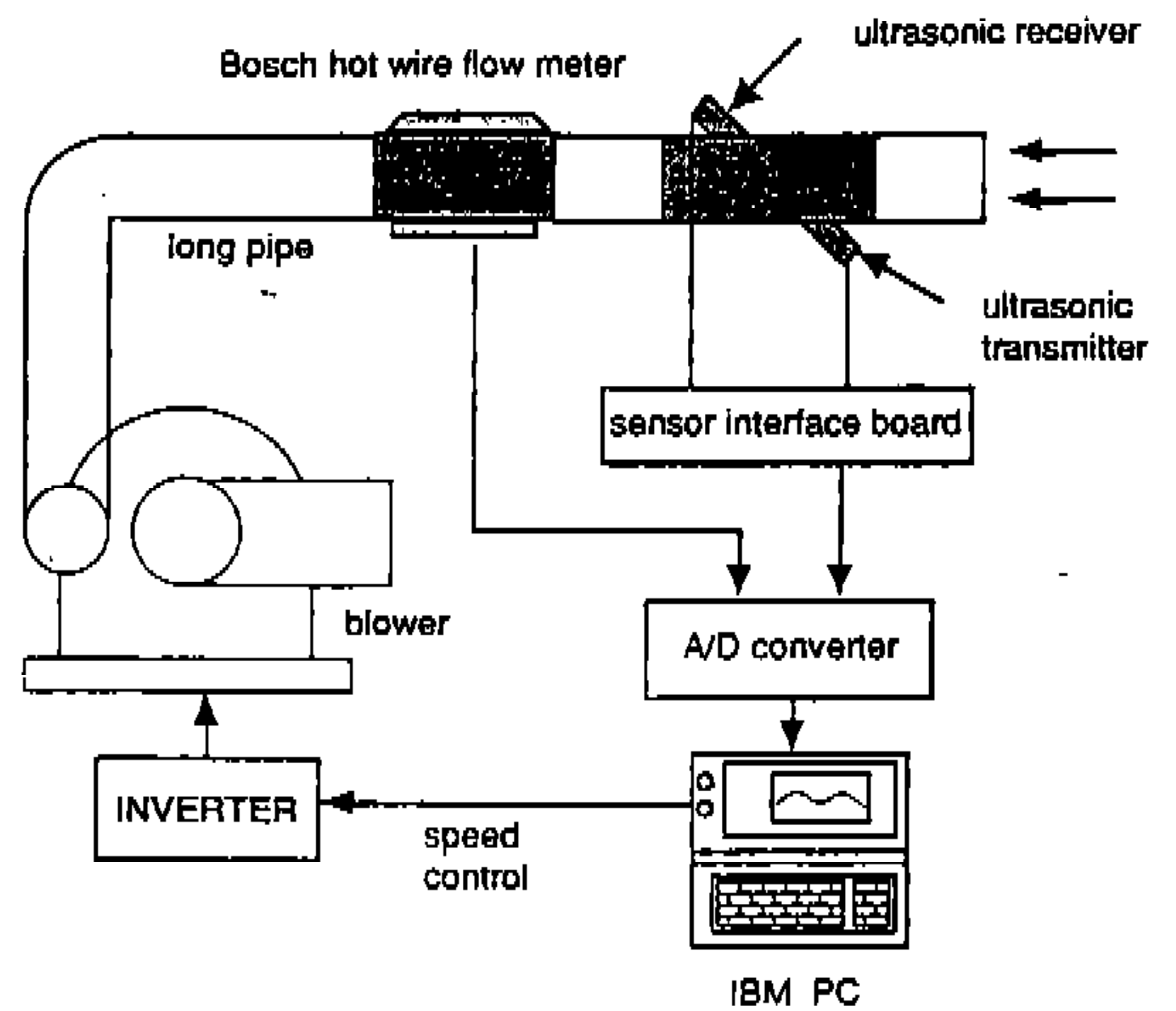


Fig.3 Schematic diagram of calibration test apparatus

u^* 가 r 에 따라 변하지 않는다면, 즉 관단면에 대해 유속이 거의 일정하다고 가정하면 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t^* = \frac{u^*}{(1+u^*)} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서 t^* 와 u^* 의 관계를 그래프로 나타내면 Fig.2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 u^* 가 크지 않을 경우(본 연구에서 실제 최대값은 대략 0.05)에는 거의 직선이 되므로 유속과 출력사이의 선형성이 좋음을 알 수 있다. 즉

$$t^* \cong u^* \quad (\text{if } u^* \ll 1) \quad (6)$$

3. 초음파 유량계의 보정

초음파센서를 이용한 유량계를 엔진에 적용하기 위해서는 보정이 필요하다. 즉 초음파센서로 측정된 유속은 관지름에 대해서 적분평균한 값이 측정되므로 관단면에 대해서 적분평균한 값과는 차이가 생긴다. 따라서 풍동에서 송풍기를 사용하여 보정실험을 실시하였다. 실험장치의 개략도를 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 사용된 유량계는 엔진 스톱틀에 그대로 설치되어 사용되었다.

유량측정 기준센서로는 Bosch사의 자동차용 열선유량계(HO 7460)⁵⁾를 사용하였다. 초음파 센서는 공진주파수가 40KHz인 MURATA사의 MA40LIS, MA40LIR을 사용하였는데 매초음파 1펄스마다 시간을 측정할 경우 유속측정속도는 최대 40KHz가 가능하다. 초음파센서 신호처리를 위한 하드웨어 및 인터페이스는 자체 제작하여 사용하였는데 구성을 간략하게 Fig.4에 나타내었다. 초음파 도달시간측정값은 회로에서 아날로그전압으로 변환시켜 출력하도록 설계하였는데, 그들 사이의 관계는 선형적이다.

실험은 엔진에서 실제 흡입하는 최대유량범위에 대해 송풍기의 속도를 제어하여 약 40개 단계로 나누었고 각 단계마다 일정한 시간동안 초음파유량계 및 Bosch 열선유량계의 평균출력을 측정하였다. 이 실험의 재현성을 확인하기 위해서 같은 실험을 4회 반복하였고 그 실험결과를 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에서 유량은 Bosch 열선유량계의 출력을 유량으로 환산⁴⁾한 것이고,

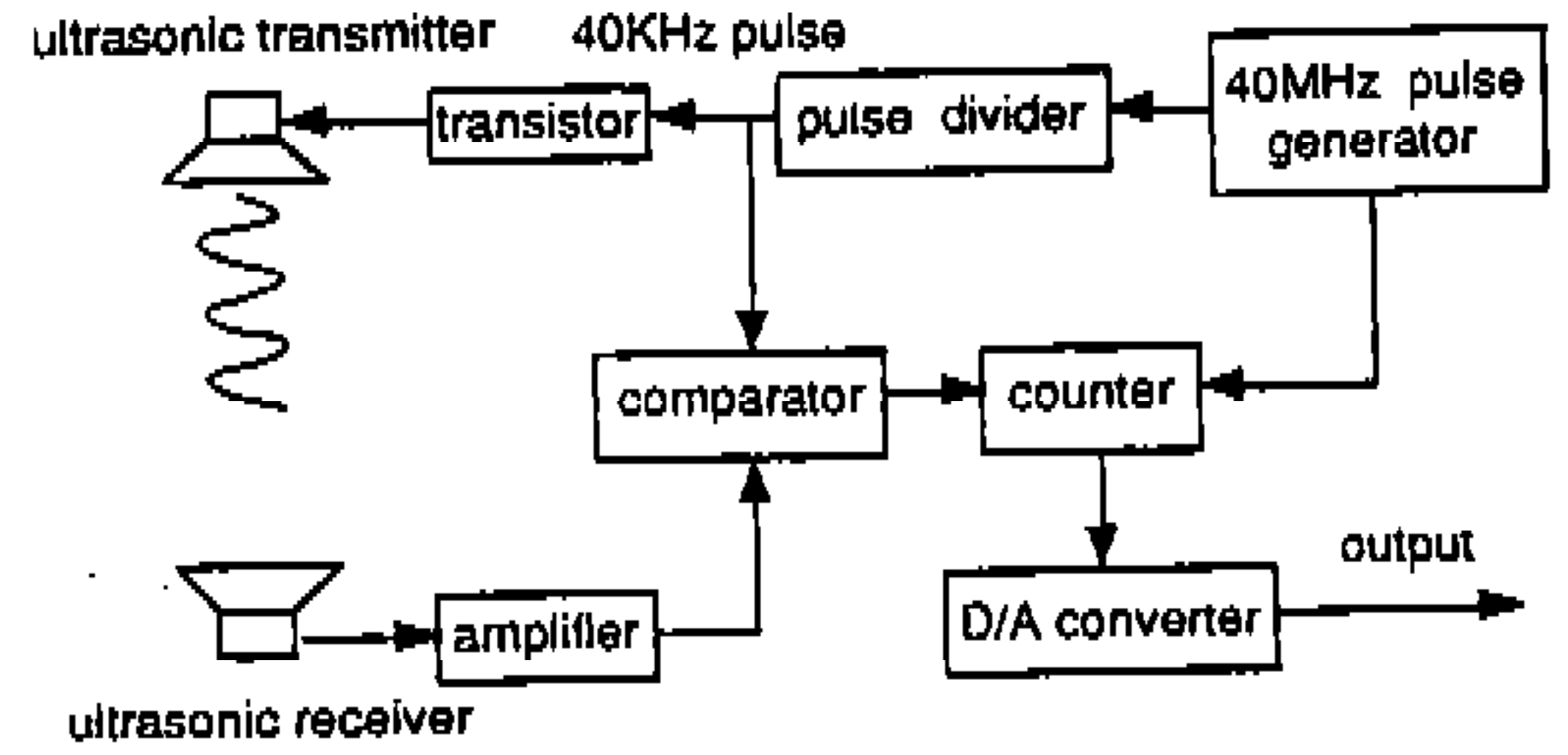


Fig.4 Schematic diagram of sensor interface circuit

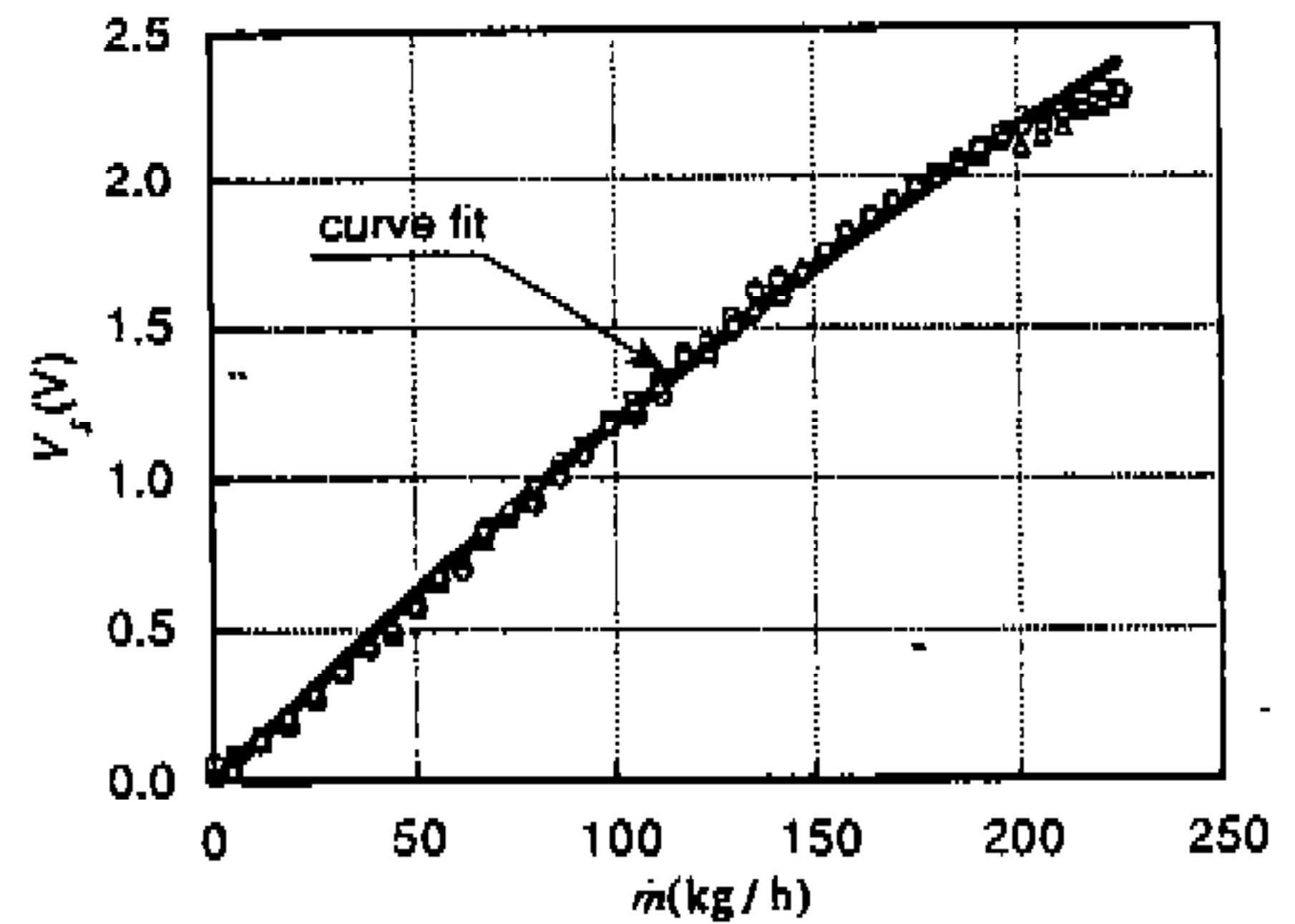


Fig.5 Calibration of ultrasonic flow meter (marks represent experimental data)

초음파 출력전압 V_s 은 식(2)에서 t 에 해당하는 전압이다. 즉 유동이 없을 때 t_0 에 해당하는 전압을 측정하고 유동이 있을 때 t_s 에 해당하는 전압을 측정하여 그 전압 차이를 나타낸 것이다.

Fig.5의 실험에서 최대 u^* 를 계산해 보면 대략 0.05정도인데, 결과를 보면 유량과 센서의 출력이 Fig.2에서 계산한 것과 비슷하게 선형적 관계를 잘 유지함을 알 수 있다.

이 결과로부터 유량과 초음파유량계사이의 관계를 직선으로 가정하고 관계식을 구할 수도 있지만, 식 (5)로부터 센서출력과 유량사이의 관계를 다음과 같이 결정하고 계수를 구하였다.

$$V_s = c_1 \frac{\dot{m}}{c_2 + \dot{m}} \quad (7)$$

$$\dot{m} = \frac{c_2 V_s}{c_1 - V_s} \quad (8)$$

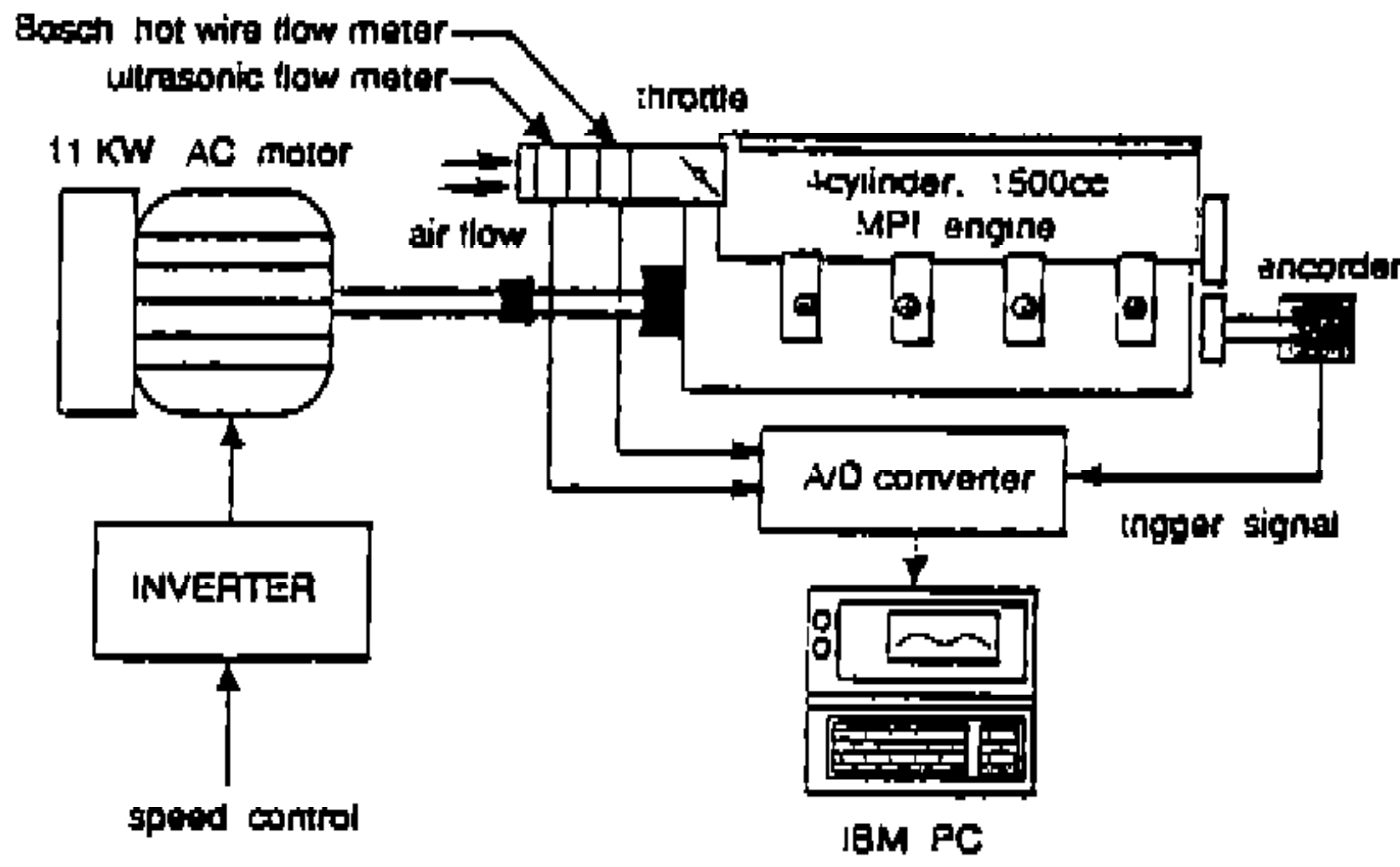
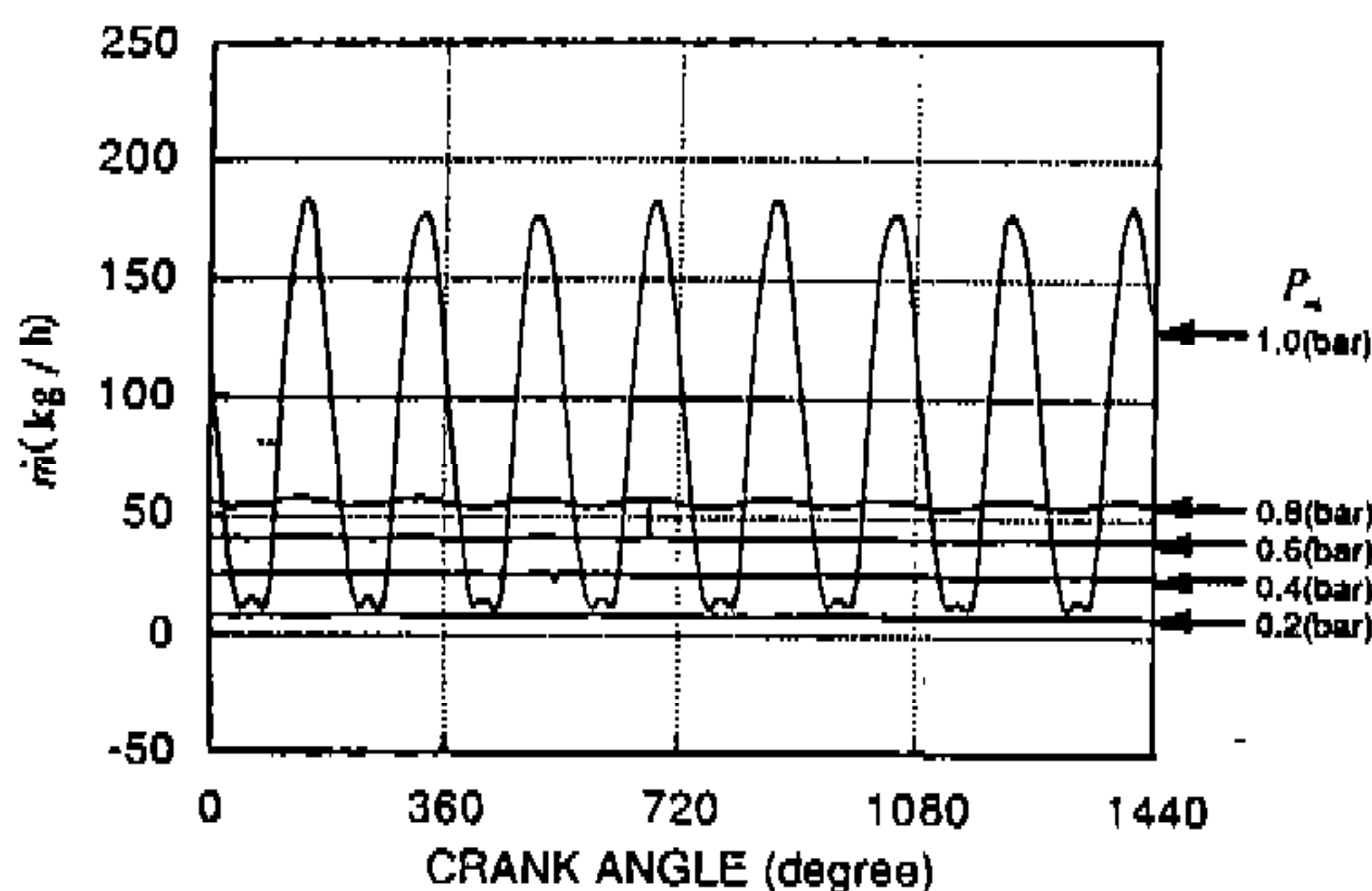
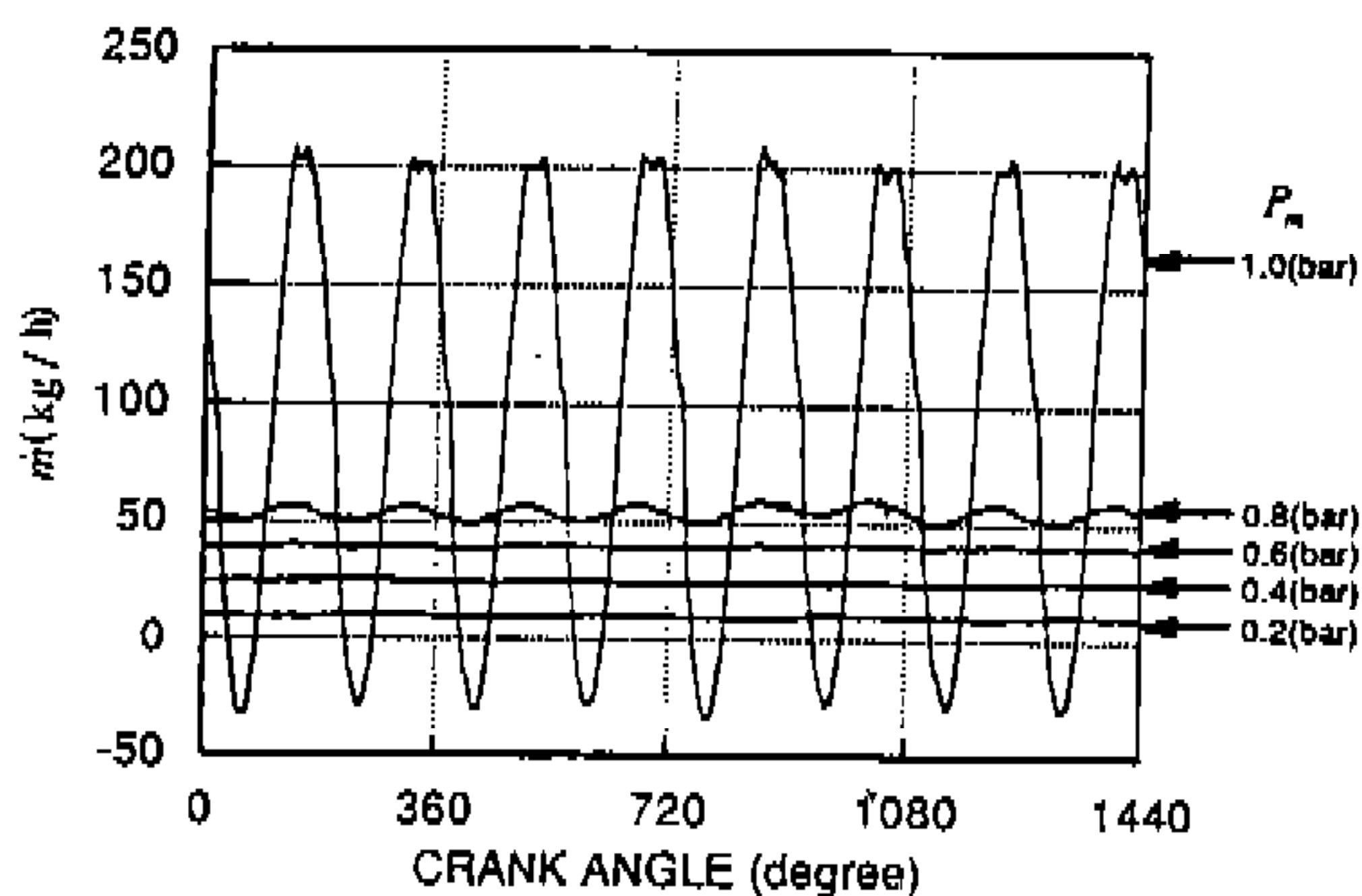


Fig.6 Schematic diagram of engine experimental apparatus



(a) Bosch hot wire flow meter



(b) ultrasonic flow meter

Fig.7 measured data at upstream of the throttle(1500rpm, steady state, P_m represents intake manifold pressure)

식 (8)은 엔진 실험에서 초음파유량계의 출력으로부터 유량을 계산할 때 사용되었다.

보정된 관계식과 측정값의 관계는 Fig.5에서 전반적으로 잘 맞음을 알 수 있으나 측정값이 S자 형태로 보인다. 이것은 실제 유량과 Bosch 열선유량계의 관계식을 구할 때의 오차와도 관련

이 있는 것으로 생각된다⁶⁾.

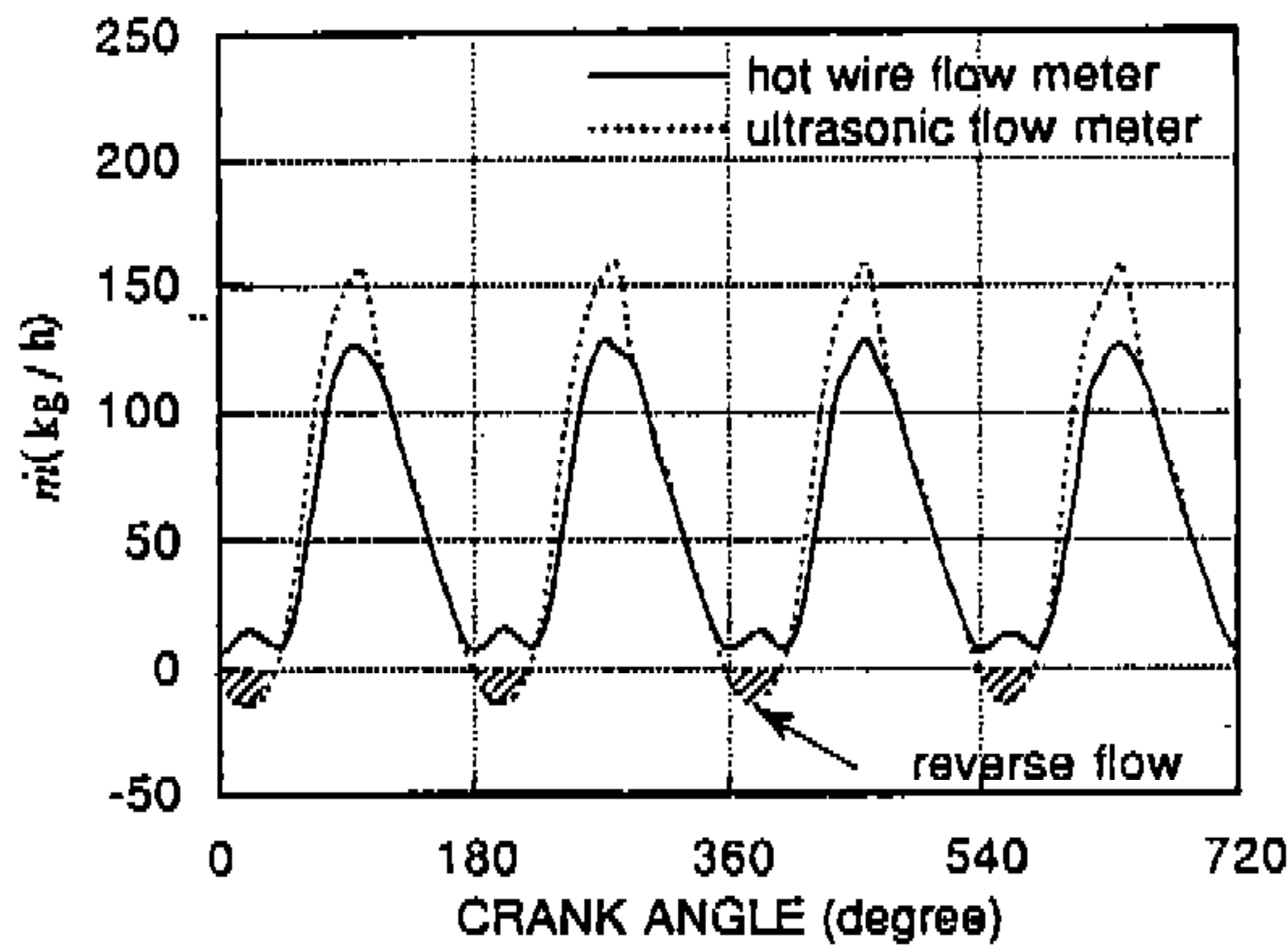
4. 엔진 스로틀상류(Upstream of the throttle)에서의 유량측정

앞에서 보정한 결과를 토대로 실제 엔진에서 유량센서가 부착되어 있는 스로틀상류에 초음파유량계와 Bosch 열선유량계를 직렬로 설치하여 동시에 유량을 측정해 보았다. 실험장치는 Fig.6에 나타내었다. 유량은 엔진에 부착되어 있는 엔코더(koyo, 360-RZ)로부터 신호를 받아서 크랭크각 1도 단위로 측정하였으며 실험조건을 일정하게 유지하게 하기 위하여 15마력 3상 모터를 이용해 모터링 상태에서 실험을 수행하였다.

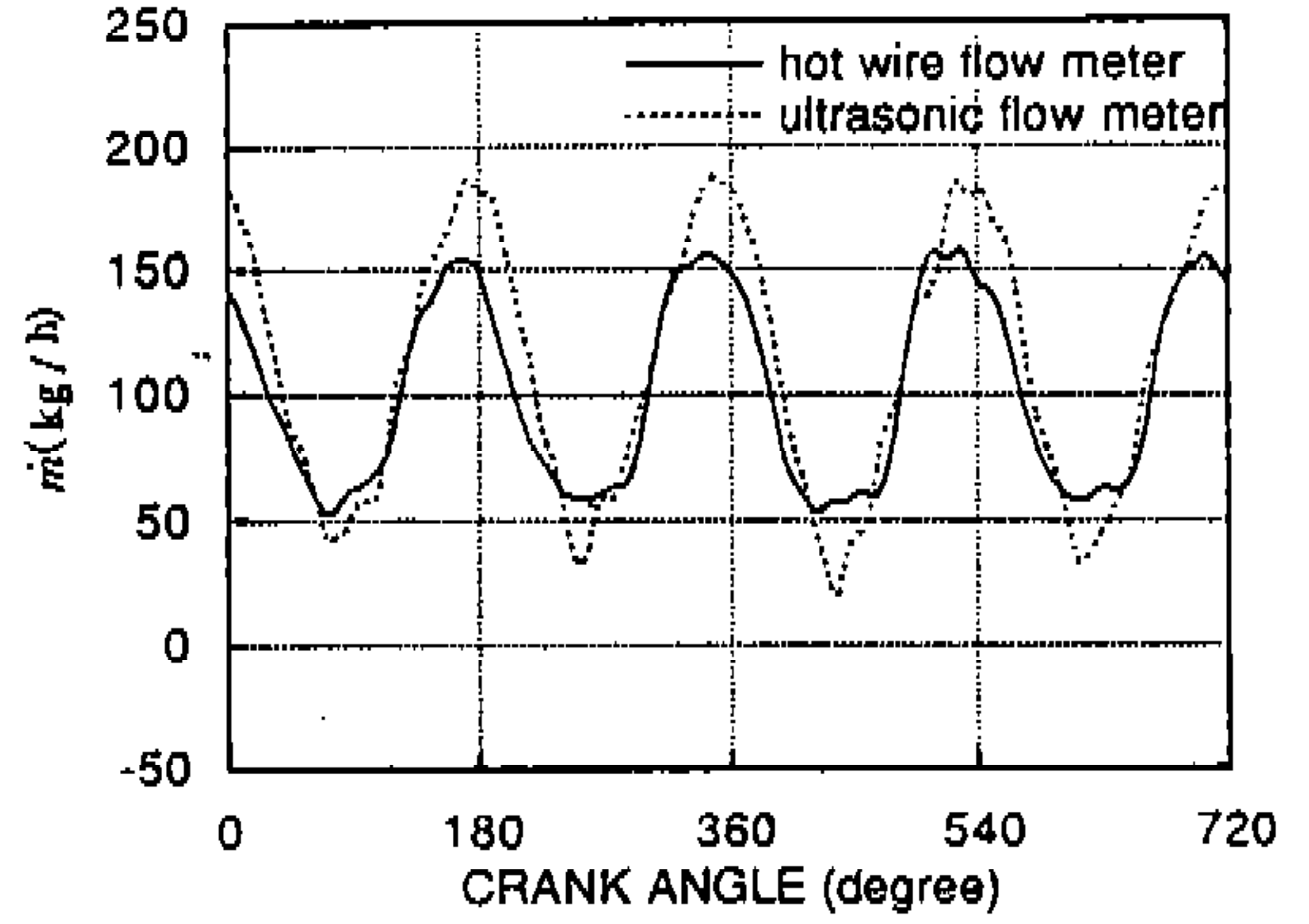
Fig.7은 엔진회전수를 1500rpm 상태로 일정하게 유지시키면서 스로틀변화에 따른 유량을 측정한 결과이다. Fig.7(a)는 열선유량계의 출력을 유량으로 환산한 것이고, Fig.7(b)는 초음파유량계의 출력을 유량으로 환산한 것인데 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig.8는 스로틀을 최대열림상태로 유지하면서 엔진회전수 변화에 따른 유량을 비교해 본 것이다. 그림에서 보면 엔진 1000rpm과 1500rpm에서 역방향유동(reverse flow)이 나타나는 부분이 있는데 열선유량계는 순방향으로 나타나는 반면 초음파유량계는 역방향으로 유동이 있음을 확실하게 보여준다. 또한 최소, 최대 피크치는 다소 틀리지만 평균적인 유량은 거의 동일하게 측정됨을 알 수 있다. 피크치 오차는 곡선근사식에 의한 것에도 원인이 있지만 측정방법상 열선유량계는 유동방향에 수직으로 열선이 배치되어 있으나 초음파유량계는 유동방향에 평행인 방향으로 어느 정도 진행하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 유동에 오실레이션이 있는 경우 위상차이와 더불어 피크치에도 차이가 발생하는 것으로 생각된다.

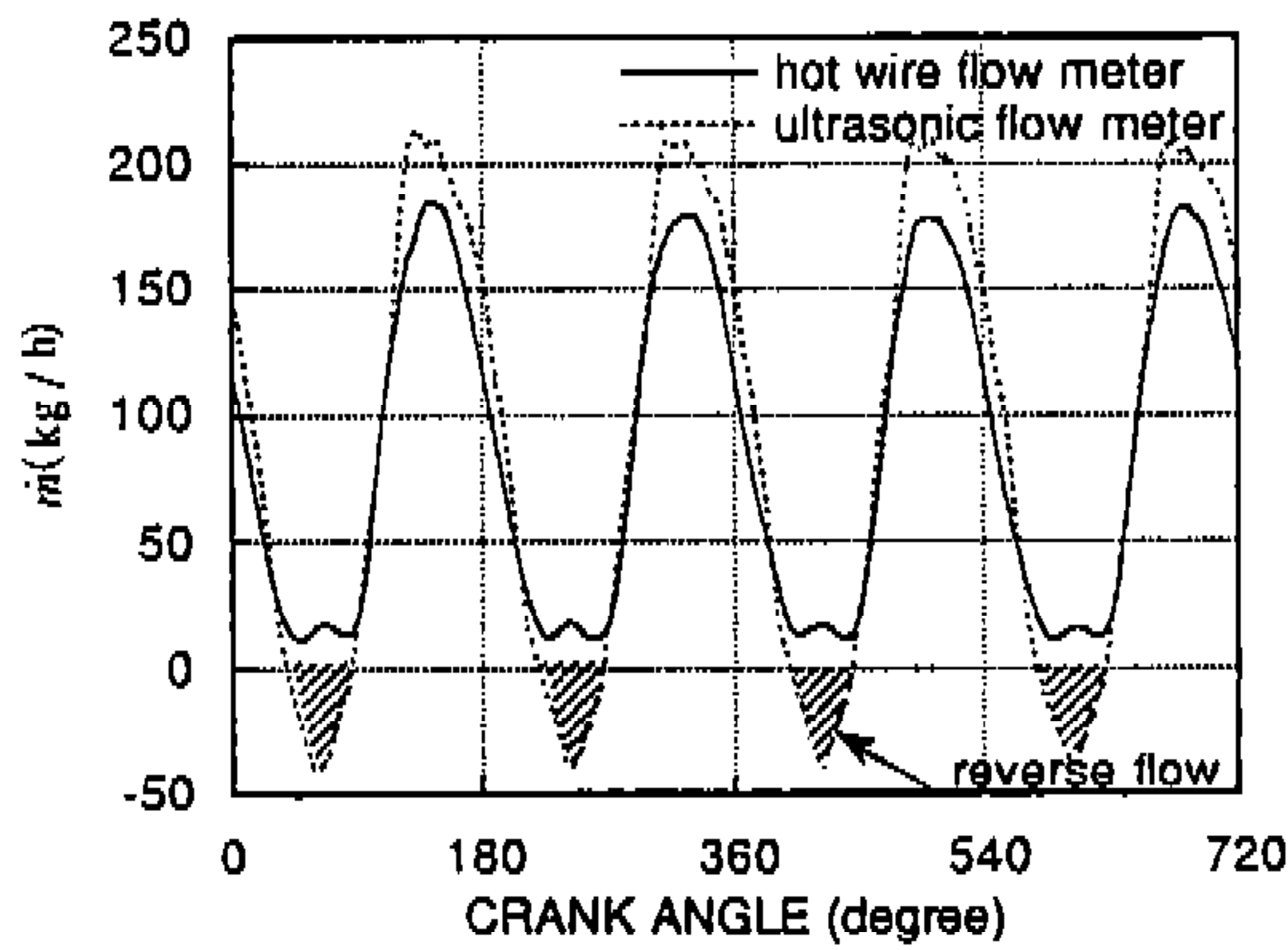
Fig.9은 가속시 스로틀을 급격하게 열었을 때를 비교해 본 것이고, Fig.10은 감속시 스로틀을 급격하게 닫았을 때를 비교해 본 것이다. 이 결과에서 볼 때 엔진 비정상상태일 때도 별 문제없이 고속측정이 가능함을 알 수 있다.



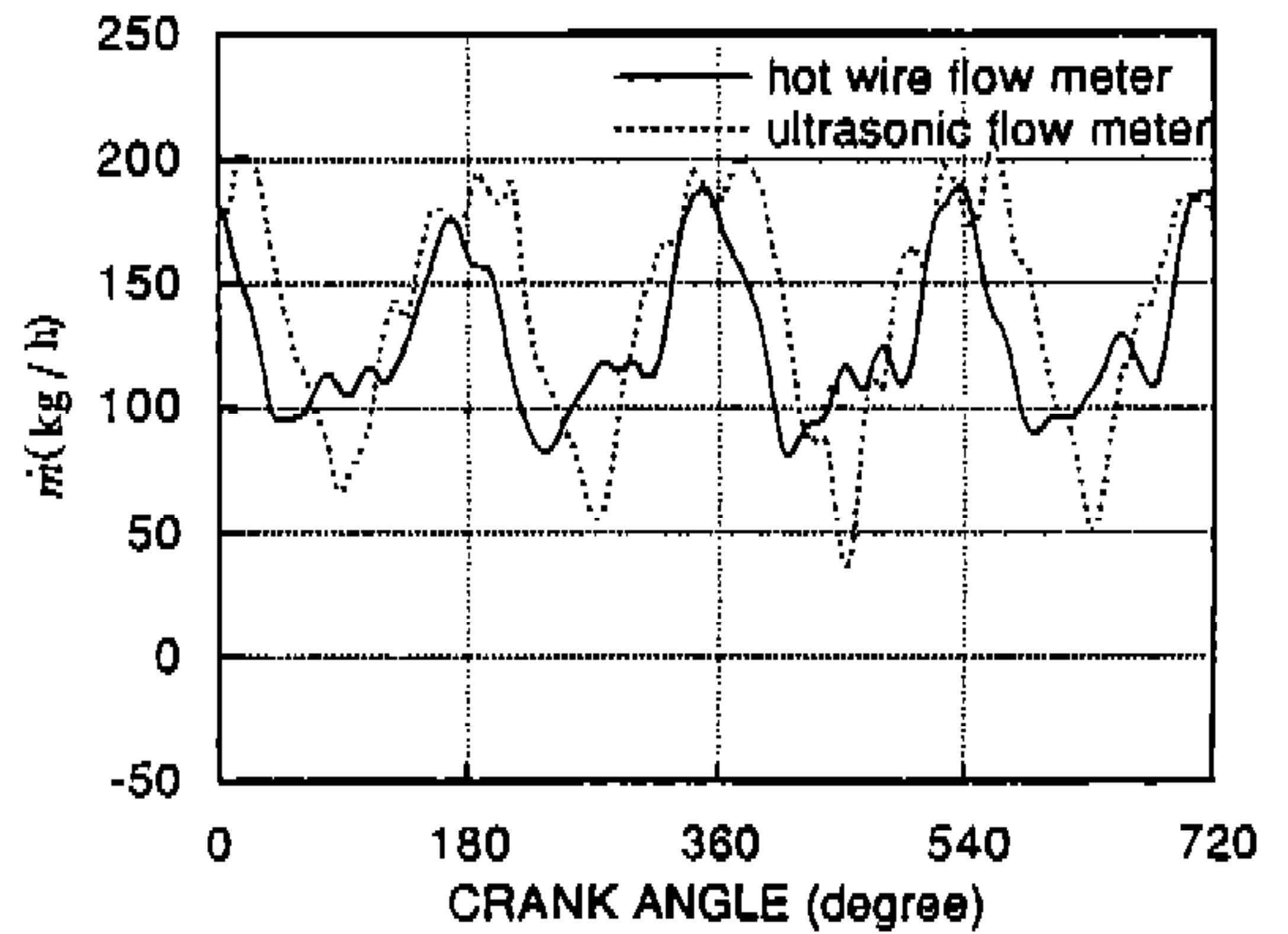
(a) 1000rpm



(c) 2000rpm



(b) 1500rpm



(d) 2500rpm

Fig.8 measured data at upstream of the throttle(WOT, steady state)

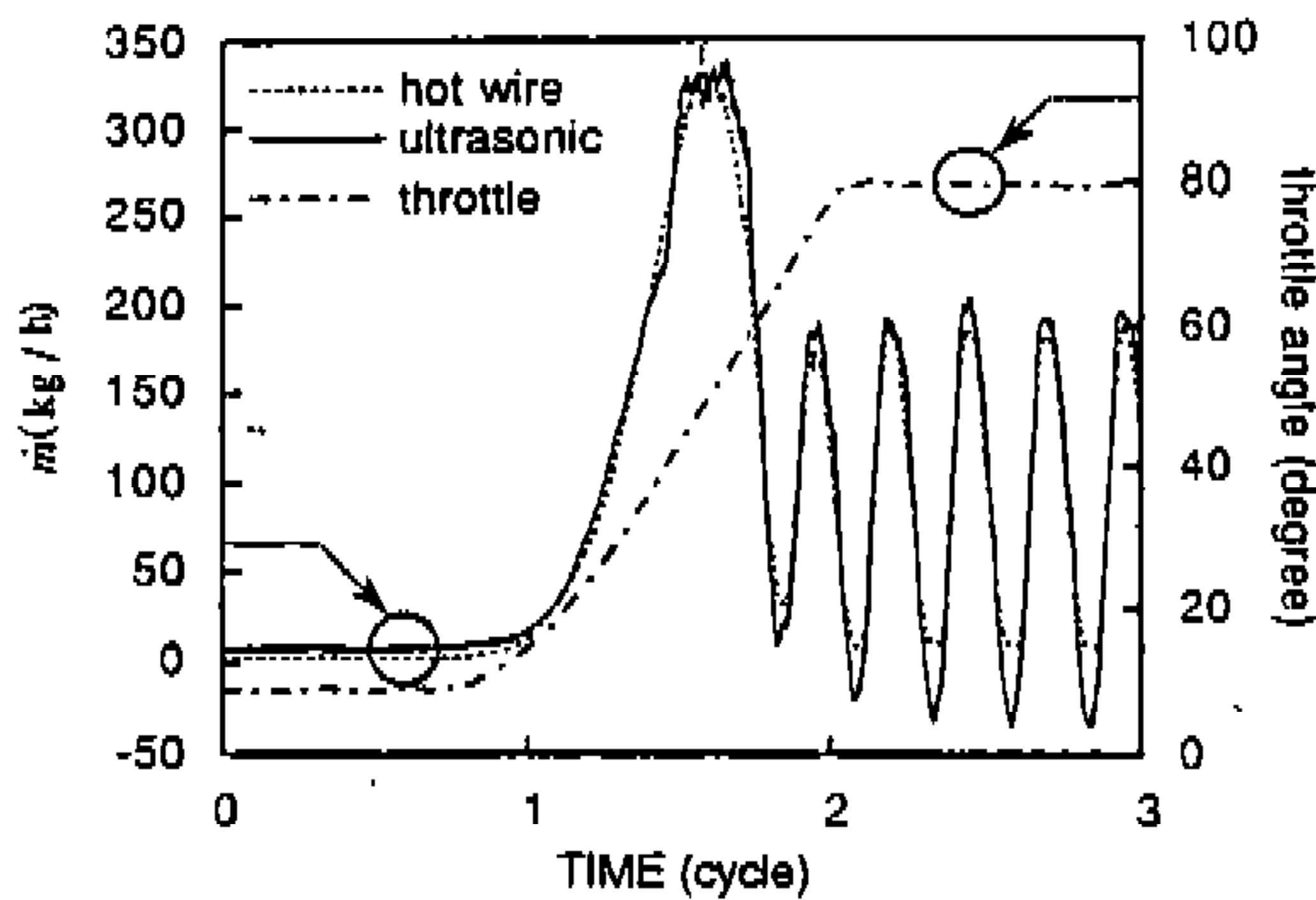


Fig.9 measured data at upstream of the throttle (rapid throttle opening, 1500rpm)

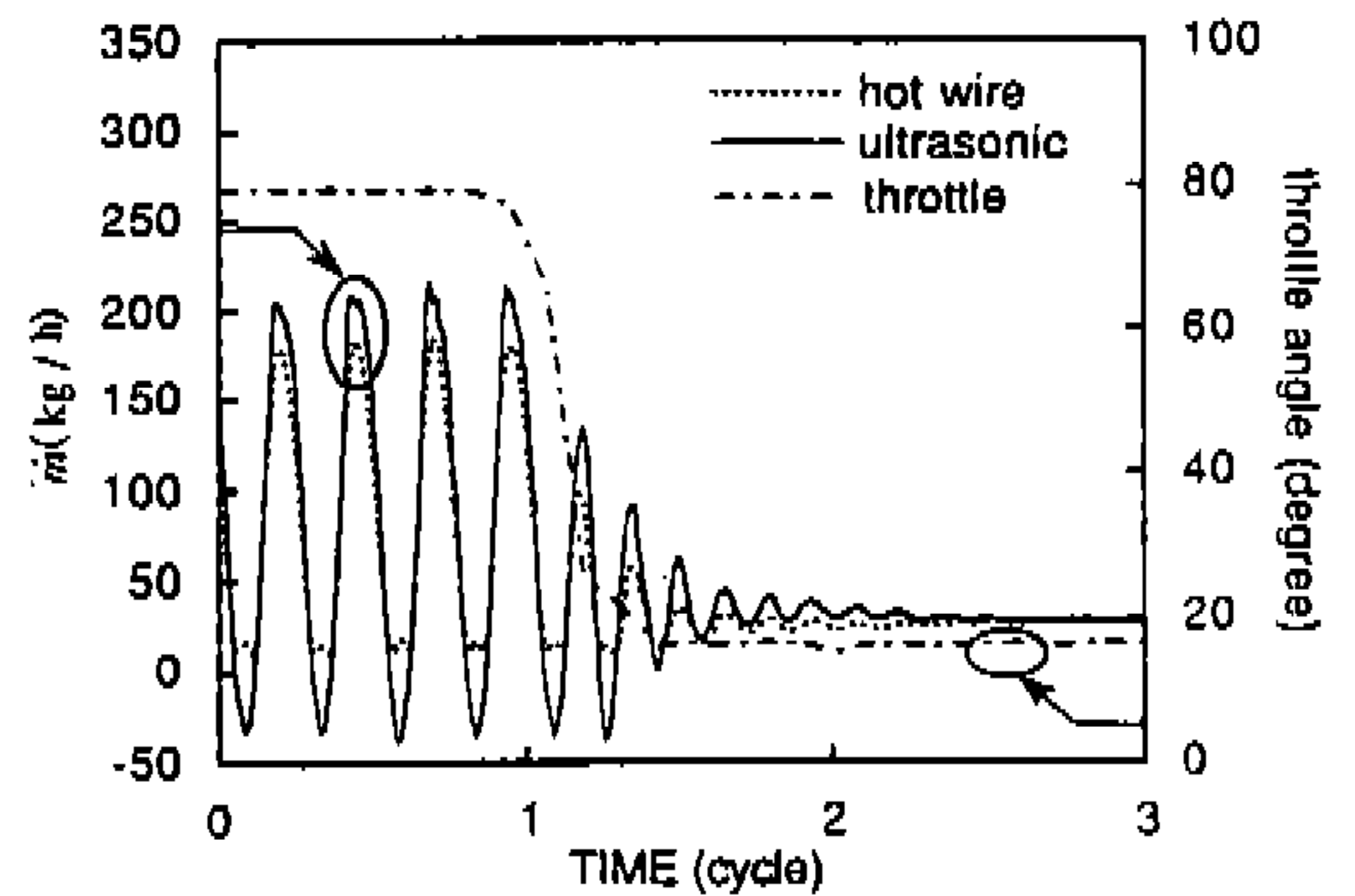


Fig.10 measured data at upstream of the throttle (rapid throttle closing, 1500rpm)

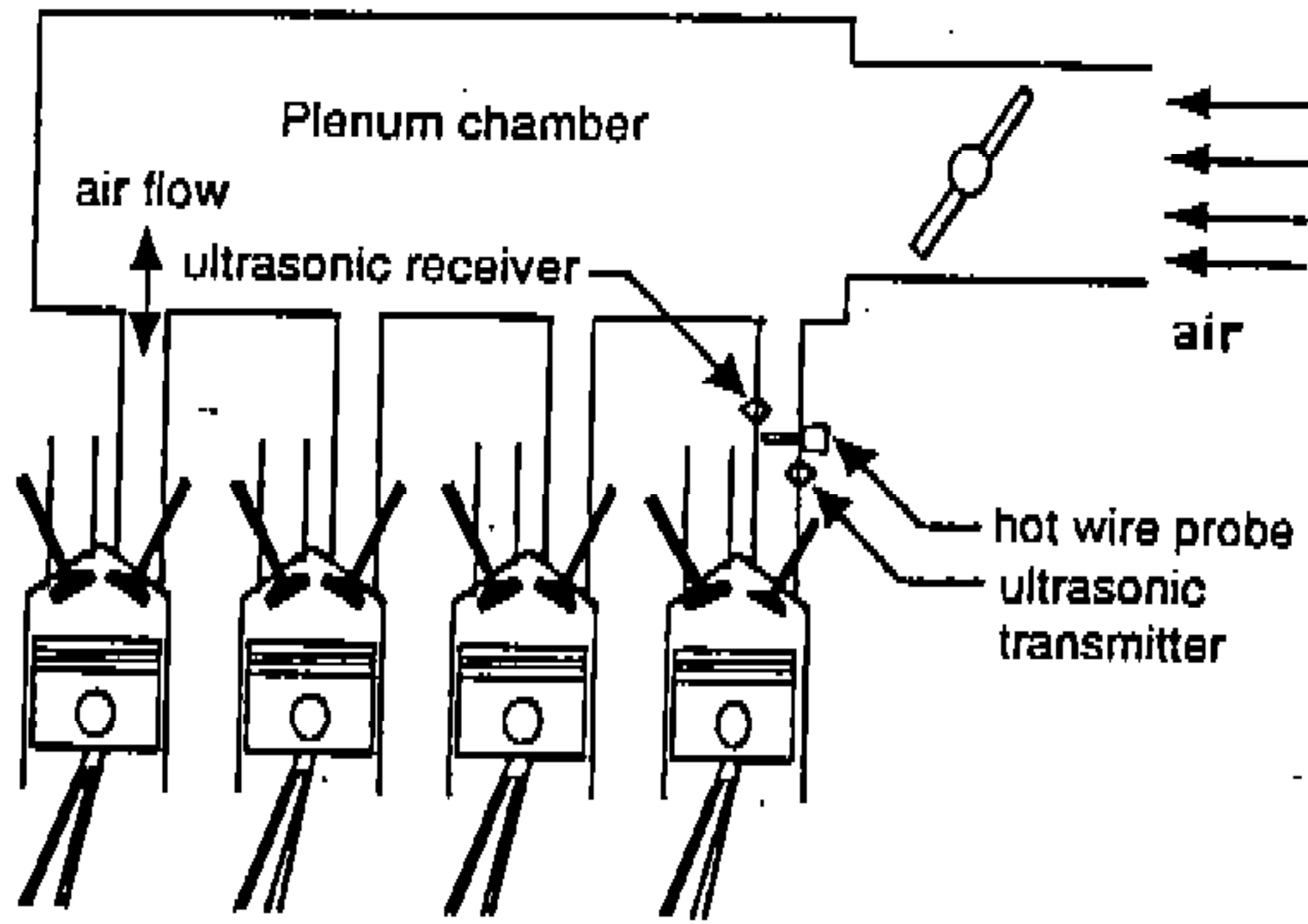


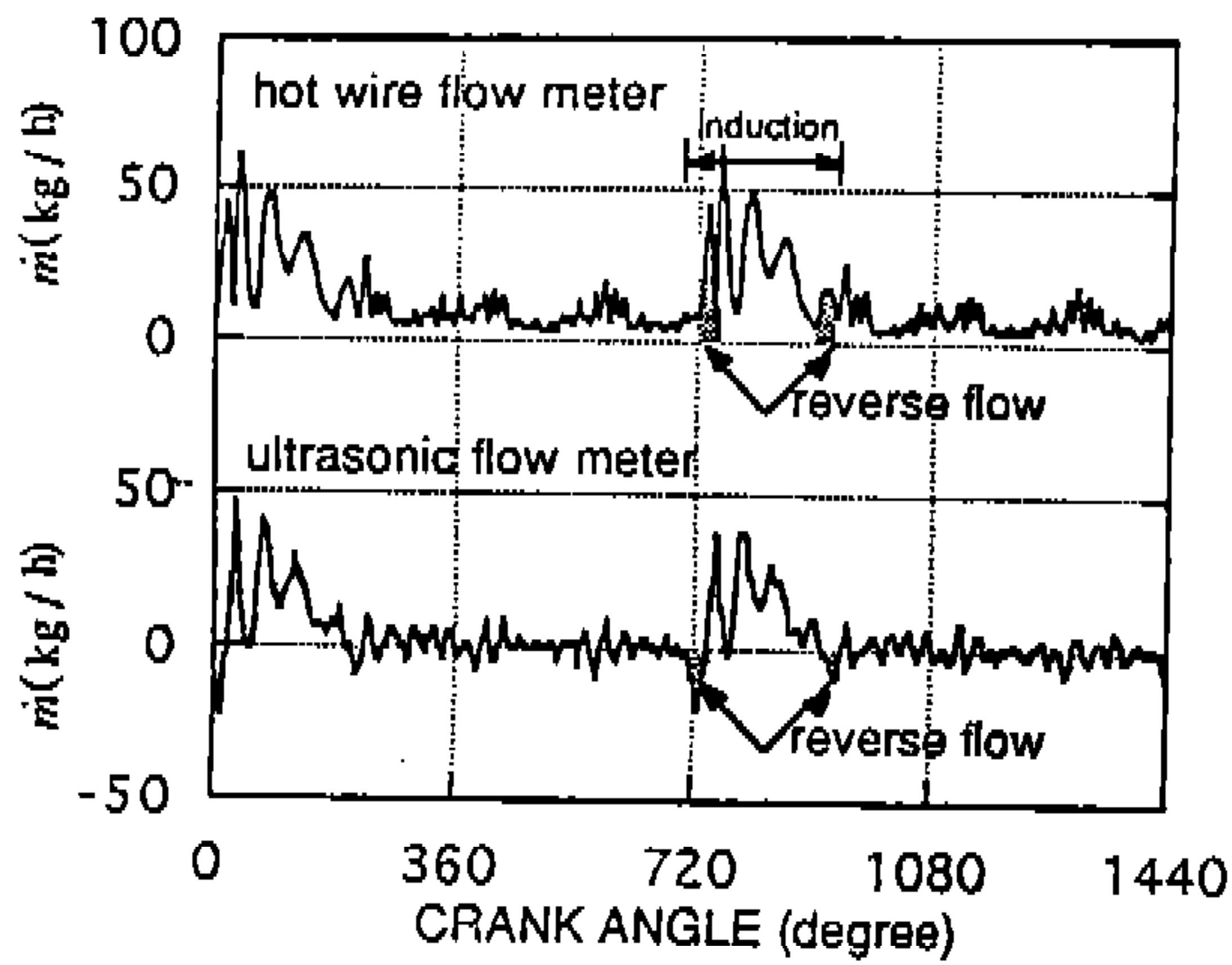
Fig.11 Schematic diagram of air flow measurement at the intake manifold

5. 엔진 흡기관내(Intake manifold)의 유량 측정

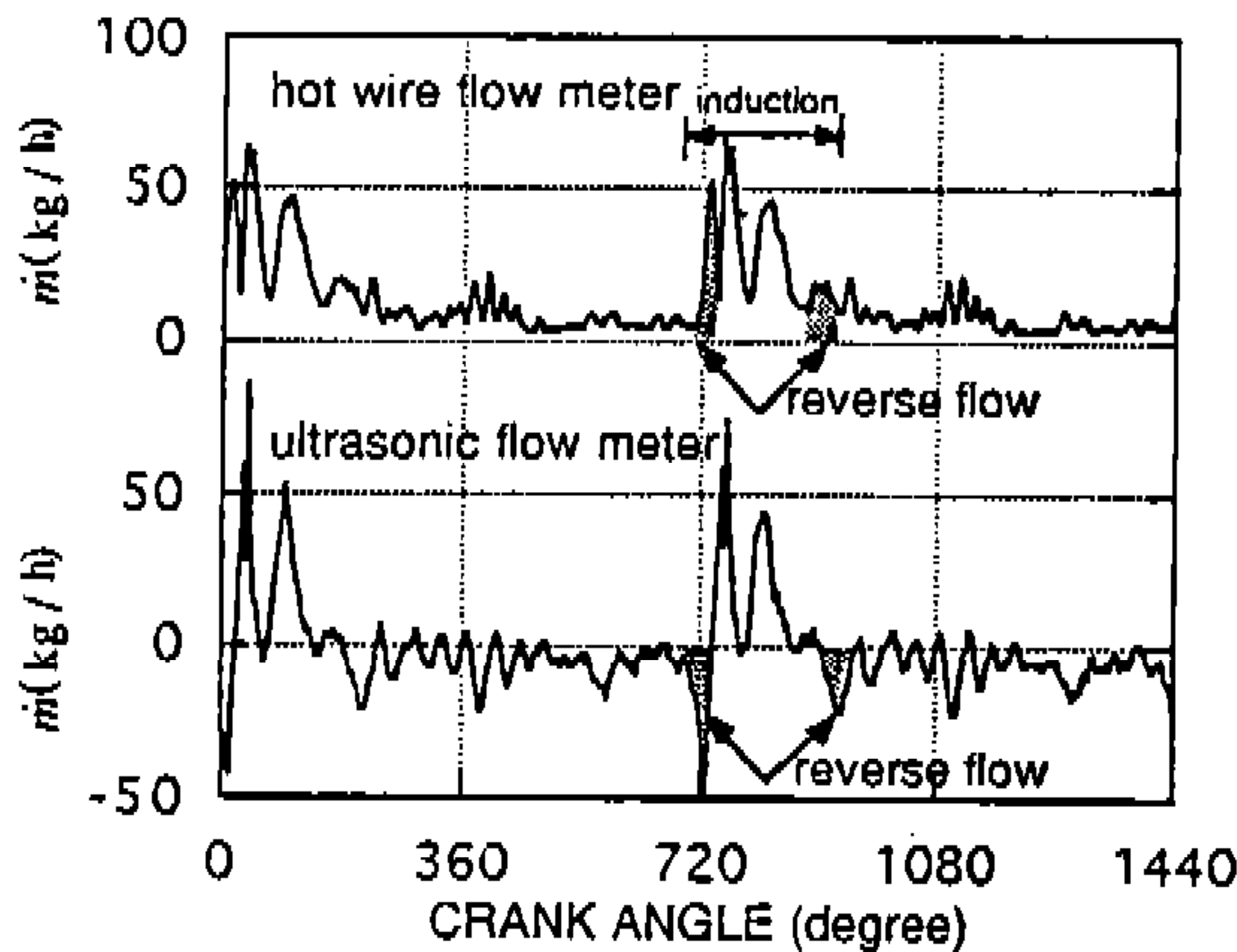
엔진의 흡기 유량은 스로틀 앞에서 측정 가능하지만 스로틀 급격열림과 같은 비정상상태일 경우에는 스로틀 통과유량과 흡기관을 통과하는 유량 사이에 큰 차이가 발생하므로 실제 흡기유량을 알기 위해서는 흡기관을 통과하는 유량을 측정할 필요가 있다. 또한 흡기관튜닝과 관련하여 흡기과정동안의 유량변화를 측정할 필요가 있는 경우도 있다. 이때 발생하는 문제점중의 하나는 유동형태 판별인데 그 이유는 역방향유동이 크게 나타나기 때문이다.

Fig.11는 초음파센서를 장착한 흡기관 일부를 나타낸 것이다. 엔진 흡기포트 상류에는 현재 사용되고 있는 유량계가 없으므로 측정 비교를 위해 자체 제작한 열선유량계를 중간 위치에 삽입하였다.

Fig.12과 Fig.13는 실제 운전시 흡기관에서 유동을 측정해 본 결과이다. 유속변화가 매우 심하므로 열선유량계 측정만으로는 유동패턴이 잘 파악되지 않으나 초음파유량계의 출력과 비교해 보면 비교적 쉽게 유동형태를 알아 볼 수 있다.



(a) 900rpm



(b) 1500rpm

Fig.12 measured data at intake manifold (steady state, firing test)

6. 결과 및 토론

본 연구에서는 초음파센서를 이용한 유량측정 장치를 만들었으며 이를 엔진 흡입공기유량측정에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 스로틀 상류에서 사용하였을 때 기존의 가장 감도가 좋은 열선유량계와 거의 동일한 측정감도를 가지고 있다.
- 2) 역방향유동까지도 감지가 되기 때문에 유량계산에서 오차를 줄일 수 있다.
- 3) 유량과 출력사이의 관계가 거의 선형적이므로 아날로그적인 필터링 및 직접적분이 가능하다.
- 4) 흡기관내의 유동형태를 측정할 경우 열선유량계와 비교하여 유동패턴 확인시에도 적절히 사용될 수 있다.

초음파유량계를 엔진에 시용할 경우 발생하는 문제점으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 초음파 센서 부착부분의 크기와 센서의 크기가 문제가 된다. 즉 센서의 크기에 비해 직경이 작은 관일 경우에는 어려움이 있다. 또한 수신기와 송신기 사이의 거리가 어느정도 필요하고 곡관과 같은 부분에도 설치가 힘들다. 그러나 이런 문제점들은 센서의 크기가 작아지면 해결 될 것으로 생각된다. 실제 실험에서 스토틀 앞부분에서는 관의 직경이 비교적 크기 때문에 문제가 되지 않는다.
- 2) 초음파센서는 기본적으로 높은 주파수의 미소 압력변동을 측정하므로 급격한 압력변동이 있을 경우에는 오동작할 위험이 있고 정량화된 값에 오차가 포함될 가능성이 있다.

7. 결 론

현재 대부분의 전자식 연료분사형 엔진에서는 연료량의 계산을 위하여 스토틀 앞부분에 유량센서를 사용하고 있으나, 기존의 유량센서들은 유동방향 및 유량과 출력관계를 비선형성 등에 따른 문제점들을 지니고 있다.

본 연구에서는 초음파센서를 사용하여 선형적 특성, 유동방향감지, 고속측정성 등의 특성을 가지는 유량계를 개발하여 실제 엔진에 적용해 본 결과 기존의 문제점들을 해결할 수 있었다. 또한 흡기관내 유동측정에서 있어서도 역방향유동으로 인한 복잡한 유동현상을 쉽게 판별할 수 있었다.

흡기모델링, 엔진튜닝 등의 엔진 관련 연구에 초음파유량계의 응용이 기대된다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원에 의하여 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Elbert Hendricks, Michael Jensen, "Conventional Event Based Engine Control", *SAE Paper* 940377, 1994
2. T.Sasaki, Y.Motoyoshi, "A Karman vortex airflow sensor", *SAE Paper* 820322, 1982
3. Richard J.Goldstein, "Fluid Mechanics Measurements", Hemisphere Publishing Corporation
4. I.G. CURRIE, "Fundamental Mechanics of Fluids", McGRAW-HILL, 1974
5. Jaihind S.Sumel and Rudolf Sauer, "Bosch Mass Air Flow Meter : Status and Further Aspects", *SAE Paper* 840137, 1984.
6. 조성권, "자동차용 정온도 열선식 공기유량계의 개발에 관한 실험적 연구", 1992, 서울대학교 석사학위논문.
7. Jan G.Drenthen, Floris. J.J. Huijsmans, "GASSONIC-400 & P.SONIC & Q.SONIC ULTRASONIC GAS FLOW METERS", 6th International Conference on Flow Measurement, 1993.