

디젤엔진 배기 가스 유량 측정용 삼각 분리 막대형 차압유량계 유량 특성 연구

A Study on Flow Characteristics of a Separate Triangular Bar Differential Pressure Flow Meter for Measuring Exhaust Flow Rate of Diesel Engine

이충훈[†] · 김광일* · 김민창* · 박동선**

Choong-Hoon Lee · Kwang-Il Kim · Min-Chang Kim · Dong-Sun Park

Abstract A separate triangular bar type differential pressure flow meter was developed for measuring exhaust gas flow rate from Diesel engine. Three kinds of the separate triangular bar flow meters whose aerodynamic angles are different one another are made and evaluated, respectively. The experimental results show that an aerodynamic shape has a effect on the pressure difference between upstream and downstream at the flow meter, that is, the thinner the shape of the separate triangular bar flow meter is, the smaller the pressure difference at the flow meter is. The separate triangular bar type flow meter was calibrated at both cold and high temperature of the gas flow. A burner system was designed for raising the gas temperature and it was well operated in controlling the gas temperature. An empirical correlation between mass flow rate and differential pressure at the separate triangular bar flow meter was obtained and the empirical correlation was also corrected by the gas temperature.

Keywords : Triangular Bar Type, Diesel Engine, Exhaust Gas, Flow Meter

요 지 디젤 엔진의 배기가스 유량을 측정하기 삼각 분리 막대형 차압유량계를 개발하였다. 3 종류의 삼각 막대형 차압유량계를 제작하였고 실험 평가하였다. 삼각 막대형 외부형상이 유선형에 가까울수록 차압유량계에서의 상류부 와 하류부의 차압이 감소하는 경향을 나타내었다. 삼각막대형 차압유량계를 사용하여 고온 및 상온 조건에서 유량 검정을 하였다. 고온 조건에서의 유량계 검정을 위해 버너를 제작하였다. 삼각막대형 상류부 및 하류부 간의 차압과 질량 유량의 실험식을 구했다. 또한 실험식은 기체 온도에 의한 보정을 포함하고 있다.

주 요 어 : 삼각막대형, 디젤 엔진, 배기가스, 유량계

1. 서 론

엔진의 배출 가스는 온도가 매우 높고 부식성이 강하기 때문에 그 유량 측정이 매우 어렵다. 또한 유량계가 배출 가스의 유동 저항으로 작용해서는 안 된다. 700 °C 내외의 내열성과 내부식성을 가지면서 유동 저항을 최소화할 수 있는 배출 가스 유량 측정 장치가 요구되며 이러한 조건을 만족하여 널리 사용되고 있는 것이 카르만 보텍스 유량계[1-4] (Karman Vortex flow meter), 벤투리 차압 유량계[5,6] (Venturi flow

meter) 등이다. 카르만 보텍스 유량계는 유동 저항이 거의 없고 구조도 간단한 장점을 가지고 있으나 정확도가 낮은 편이며 벤투리 차압 유량계는 정확도는 높은 편이나 제작비가 많이 들고 배기 저항이 높은 편이다. 최근에는 피토티관의 평균 유속 측정 원리를 이용한 Annubar[®] 형 차압유량계가 일부 사용되고 있다[7,8]. Annubar[®] 형 차압유량계는 상류부에는 유동이 흐르는 단면에서의 평균 전압 (total pressure)이 작용하고 후류부에는 평균 정압 (static pressure)이 작용하여 그 차압을 이용하여 유량을 측정한다. 본 연구에서는 디젤 엔진 배출 가스 유량 측정에 적용하기 위한 삼각 분리 막대형 유량계를 설계하고 제작하였다. 본 연구에서 개발한 삼각 분리 막대형 차압 유량계는 측정 원리는 Annubar[®] 형과 유사하며, 다른 특징은 배출 가스에 의한 전압 및 차압의 평균 압력이

† 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교 자동차공학과

E-mail : chlee5@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6393 FAX : (02)979-7032

* 서울산업대학교 자동차공학과

** 이플러스티(주)

작용하는 분리 공간 형상을 일체형 삼각형 형태로 가공하여 간결한 형상을 가지며 유량계 조립 및 유지 보수가 간단하다는 것이다. 냉간 유동 조건에서 삼각 분리 막대형 유량계와 층류 유량계를 직렬로 연결하고 유량을 검정하였다. 아울러 연소기를 제작하여 경유를 연소시킴으로써 매연이 포함된 고온의 가스를 대량으로 생성하였으며 본 유량계를 고온의 가스 유동 중에 노출시킨 조건에서 실험 조건을 바꾸어 가면서 유량계의 유량 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치

전형적인 Annubar[®] 형 차압 유량계 주변의 유동 상태를 Fig. 1에 나타내었다[7]. 상류부의 마름모 형상의 꼭지점에 유체의 동압과 정압이 합쳐진 압력인 전압이 작용하고 후류부의 마름모 꼭지점에는 정압이 작용한다. Fig. 1에 나타난 것과 같은 마름모 형상을 하고 있어서 유동의 박리점이 고정되는 장점이 있다. 만일 유량계 형상이 실린더 모양이면 박리점이 유

속에 따라 이동하여 유동이 불안정해 지는 문제점이 있다[7].

Annubar[®] 형은 유동 평균 압력이 작용하는 공간의 내부 구조는 Fig. 1에 나타난 것과 같으며 둥근 삼각형 형상의 튜브를 조립하였다. 본 연구에서 개발한 삼각 분리 막대형 유량계는 Annubar[®] 형과 다르게, Fig. 2와 같이 유량계가 전체가 일체형으로 설계되었으며 압력이 작용하는 공간을 와이어 방전 가공에 의해 삼각형 형태로 가공하였다. 또한, 삼각 분리 막대형 유량계는 주로 자동차 배기가스 유량 측정에 사용할 수 있도록 하기 위하여 형상이 간단하고 소형으로 설계하였으며 압력 작용 구멍이 막혔을 때 바로 분해 및 보수가 간단히 할 수 있도록 설계한 것이 특징이다.

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 마름모 형상을 하고 있는 삼각 분리 막대형 차압 유량계 3 종류를 제작하였다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계 형상 I, II, III 각각의 유동 단면에서의 폭은 모두 12.7mm로 똑같이 설계하였고 유동이 흐르는 방향의 유선형 각도는 각각, 45°, 37.5°, 32°로 하였다. 유량계의 유선형 설계가 전압과 정압간의 차압에 얼마나 영향을 미치는지 파악하기 위해 이와 같이 설계하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 상류부에 전압, 후류부에 정압이 작용하도록 하도록 하기 위해 1mm 직경의 구멍을 가공하였으며 유동 단면에서의 평균 압력이 작용할 수 있도록 막대 길이 방향으로 위치를 달리하여 4개를 가공하였다.

고온 가스 유동 조건에서 유량계 특성을 연구하기 위하여 연소기를 설계하고 제작하였다. 연소기는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 연료 노즐, 점화 장치, 연소 가스 믹싱 라이너(mixing liner), 스월러, 연료 차단 밸브, 1차 공기 공급 통로, 2차 공기 공급을 위한 삼지관 등으로 구성된다. 노즐은 화염에 의하여 가열과 냉각이 반복되어도 정상적인 작동이 가능하도록 내구성이 보장되어야 한다. 노즐의 유량 선정은 공급 공기량에 따라 적절한 연료량을 공급할 수 있도록 선정하여야 한다. 분

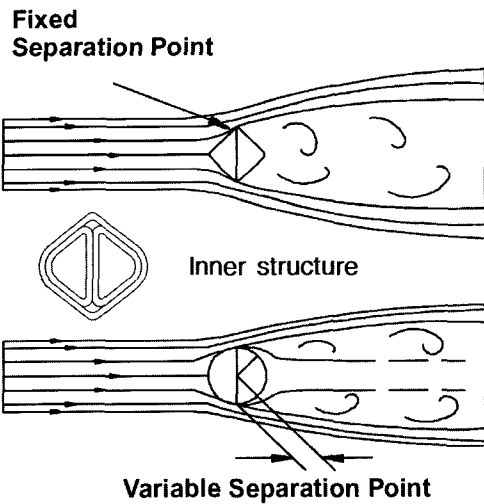


Fig. 1. Flow characteristics around the Annubar[®] flow meter [7]

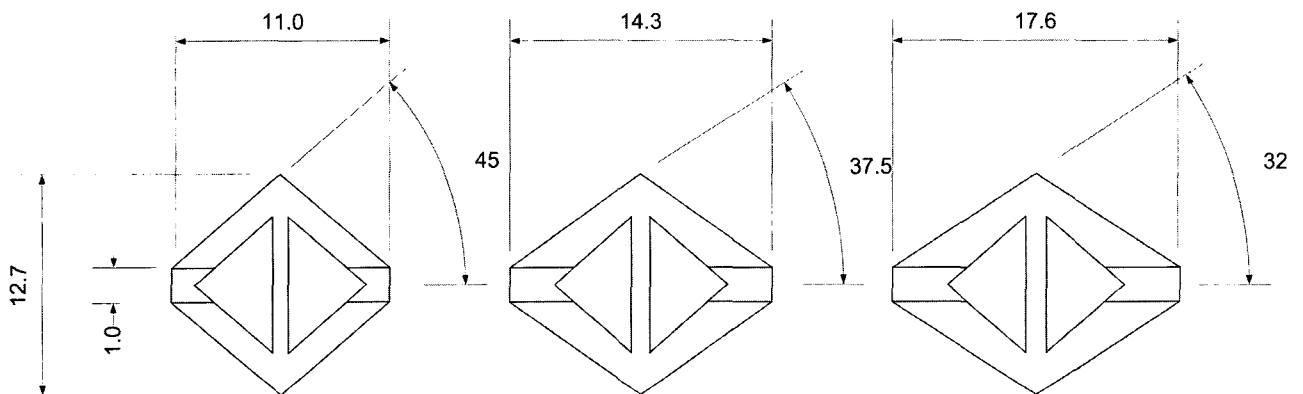


Fig. 2. The section of separate triangular bar type flow meter (a: type I, b: type II, c: type III)

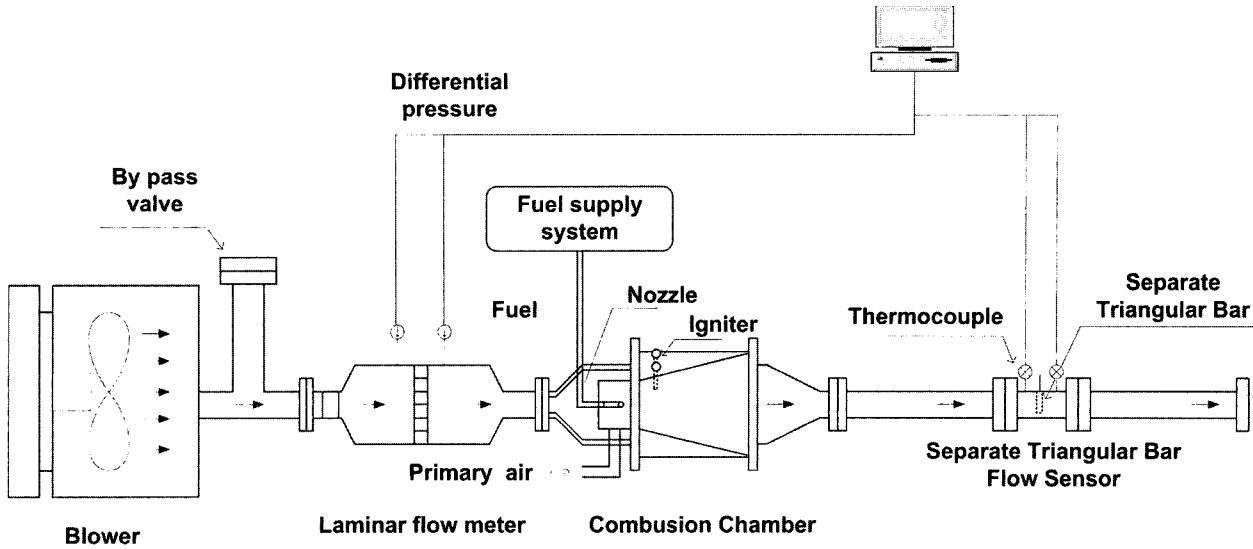


Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup for generating high temperature gas flow

사되는 연료가 연소되어 생성하는 이론적인 단열화염온도보다 실제로 약 20~40% 정도 낮은 가스 온도가 생성되는 것을 고려하여 선정한다.

노즐의 유량이 지나치게 크거나 낮으면 연료의 무화과 점화에 악영향을 끼치게 된다. 연료와 공기의 혼합을 위하여, 노즐은 중공 원뿔 형상(hollow cone type)의 분무 패턴을 갖는 노즐을 사용하였으며 분무각은 60°이다. 연소기 내부에 있는 스월러는 연료와 공기의 혼합을 일차적으로 담당하는 매우 중요한 부품이다. 본 연구에서는, 스월러에서 연료와 신선공기의 연소가 충분히 이루어지도록 노력하였다. 가정용 보일러의 연소기에 내장된 스테빌라이저 대신 강제적으로 원하는 형태의 스월을 생성시키기 위하여 블록 타입의 스월러를 사용하고 있다. 고온의 연소 가스는 엔진의 배기 가스와 동등 수준이 될 수 있도록 연료량과 공급 공기량을 제어하였다. 본 실험 장치로는 연소 가스 온도가 최대 900°C 수준까지 올라갔다. 연소기로의 공기 공급은 1차 공기와 2차 공기로 구성되는데 연료 노즐에서 공급되는 연료와 혼합이 믹싱 라이너에서 이루어지면서 동시에 연소가 이루어진다. 연소기의 주연소를 위하여 일차적으로 압축기를 이용하여 신선공기를 공급한다. 압축기에 의하여 공급되는 신선공기는 연료의 무화 및 1차 연소에 사용되므로, 공급되는 신선공기의 유량이 제어될 수 있어야 한다. 연료 분사 초기에 과다한 신선공기가 공급되면 점화가 잘 이루어지지 않으며 점화가 이루어진다 하더라도 소화가 발생할 가능성이 크다. 따라서 점화 시에는 작은 양의 신선공기를 공급하여 점화가 안정하게 이루어지도록 하여야 하며 점화가 확인되는 데로, 분사되는 연료의 완전 연소를 위한 유량까지 천천히 증가시킨다. 완전 연소를 지배하는

연료·공기 혼합은 스월러에 의하여 이루어지므로 신선공기 공급 시스템의 유량 역시 스월러의 특성과 연관되어 결정된다. 본 연구에서는 연소기의 주연소 공기유량을 0.25m³/min으로 일정하게 유지하였다. 점화 시스템은 연료·공기의 혼합기에 충분한 점화 에너지를 공급하여 연료 분사와 동시에 신속한 점화가 이루어지도록 하는 역할을 한다. 일반적으로 경유 혼합기는 신속한 점화가 어렵다. 따라서, 일차적으로 연료와 공기의 혼합에 깊은 주의를 기울여야 하나, 점화시스템의 선정과 점화봉의 위치 등에도 주의하여야 한다. 본 연구에서는 많은 실험을 통하여 연료 분사 후 5초 이내에 점화가 이루어졌다. 점화를 위하여 고전압(약12kV 이상)의 고주파 방전에 의한 아크를 점화봉 사이에 발생시킨다.

3. 결과 및 검토

Fig. 3에서 보는 바와 같이 1차 공기 공급은 압축기 공기를 이용하였고 드와이어(Dwyer) 로타미터를 사용하여 공급 유량을 조절하였다. 2차 공기는 블로어를 사용하여 공급하며 공급 공기량 측정은 층류 유량계를 사용하였고 공급 공기량의 조절은 바이패스 밸브 개폐를 제어하여 이루어졌다. Fig. 4는 냉간 조건에서 유량계를 검정한 결과를 나타낸 것으로, 삼각 분리 막대형 차압유량계에서 측정된 차압 변화에 대해 질량 유량을 각각 나타낸 것이다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 3종류의 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 바꾸어 조합하면서 검정 실험을 실시하였다. Fig. 2에서 보면 Type I, Type II, Type III의 순서로 유선형에 가까운 모양을 하고 있다. 즉, 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 상류부 각도 및 후류부 각도

가 유량계 타입에 따라 각각 45°, 37.5°, 32°로 줄어드는 형태를 취하고 있다. 유선형에 가까울수록 동일한 유량에 대한 삼각 분리막대형 차압 유량계의 상류·하류간의 차압이 상대적으로 약간 작게 측정됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 예상되었던 것으로 추후 유량계 설계 시에 참조될 수 있는 정량적 데이터이다. 전체 유량 범위에 걸쳐서 매우 일관된 측정 결과를 보여 주고 있다. 본 연구에서 사용한 블로어의 용량의 한계로 인해 최대 7m³/min 까지 측정하였다. 7m³/min 유량은 엔진 배기량 7ℓ/정격 회전수 2000rpm에 대응할 수 있는 것으로 본 실험 데이터는 7ℓ 엔진 모터링 시험시의 모든 운전

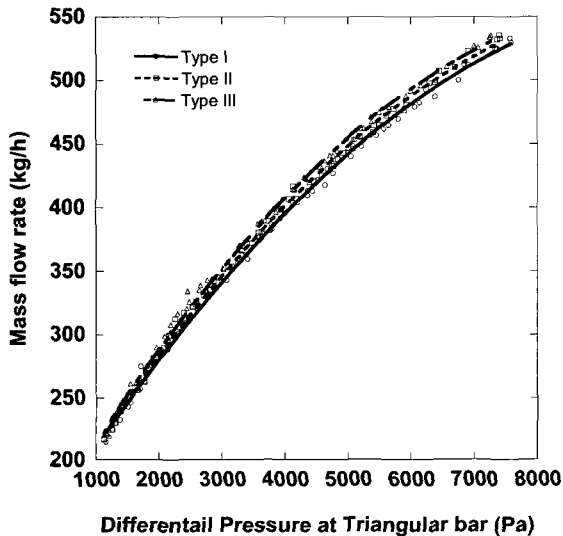


Fig. 4. Mass flow rate of the separate triangular bar flow meter with varying the differential pressure at the flow meter

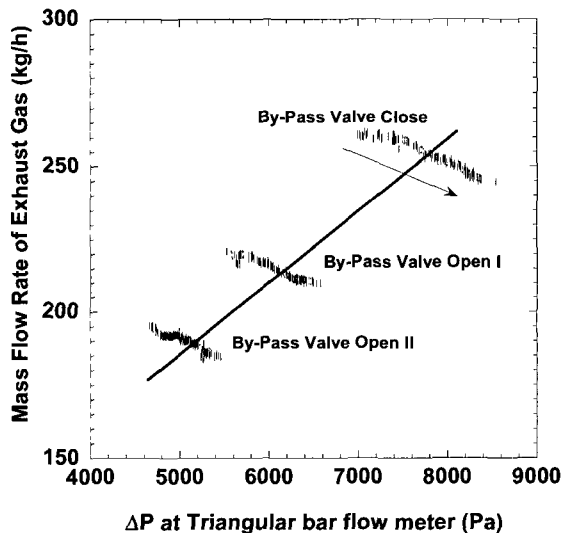


Fig. 5. Mass flow rate vs ΔP at the separate triangular bar flow meter

범위를 커버할 수 있는 유량 범위이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 삼각 분리 막대형 차압 유량계는 유량 증가시 차압이 지속적으로 증가하는 추세를 나타내고 있기 때문에 엔진 배기량이 크게 증가하여도 삼각 분리 막대형 차압 유량계 적용이 가능하다. 즉, 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 차압/공기유량의 감도가 증가하는 경향을 보이기 때문에 유량계의 측정 범위가 큰 특징을 보이고 있다.

Fig. 3의 실험 장치를 사용하여 전술한 방법으로 연소기를 점화시켜서 가열한 후 2차 공기 공급량을 바이패스 밸브 개폐 위치를 조절하여 설정한다. 본 연구에서는 바이패스 밸브 위치는 바이패스밸브 차단 위치, 바이패스 밸브 1단 열림 위치, 바이패스밸브 2단 열림 위치 등 3단계로 제어하며 각 단계 순서로 2차 공급 공기량이 줄어들게 된다. 한편, 1차 공급 공기량은 모든 실험 조건에서 항상 0.25m³/min로 항상 일정하게 유지하였다. 충분히 워밍업이 된 후 1차 공급 공기를 0.25m³/min으로 고정하고 2차 공급 공기량을 결정하는 바이 패스 밸브 위치를 고정시킨 조건에서 연료량을 조절하면서 삼각 분리막대형 차압 유량계를 검정하였다. 즉, 연료량 공급을 정상 상태로 유지하기 위해 연료압 조절 밸브를 조절하여 일정량의 연료가 노즐로 공급되는 조건을 유지한 상태에서 총류 유량계에서의 차압 및 공기 온도, 삼각 분리막대형 차압 유량계에서의 차압, 정압, 입·출구 부근에서의 연소가스 온도 등의 데이터를 PC와 NI 사 DAQ보드(PXI-6251M)에 의해 기록하였다. 우선 연소기로 공급되는 연료의 연료압을 조절하여 공급 연료량을 설정하고 나머지 실험 조건은 고정된 상태에서 전술한 과정을 반복하여 실시하였다.

Fig. 5는 전술한 실험 방법을 통하여 획득한 데이터를 정리한 것으로 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 차압에 대한 배기가스 질량 유량 특성을 나타내었다. 각 바이패스 밸브 각각의 개폐 조건이 고정된 조건에서 연료량을 증가시키면서(화살표 방향) 획득한 배기가스 질량 유량은 대체로 감소하는 경향을 가지는데 이는 연료량 증대에 의한 배기가스 온도 상승으로 인해 배기 가스의 팽창이 일어나서 동일 체적 유량에 대해 질량 유량이 감소하기 때문이다. 2차 공급 공기량을 조절하기 위해 바이패스 밸브 위치를 변경한 경우에도 동일한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 전술한 방법으로 획득한 데이터 중 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 차압에 대한 배기압의 특성을 나타낸 것으로 여기서 배기압은 삼각 분리막대형 차압 유량계의 후류부 정압을 측정하여 획득한 것이다. 2차 공기 공급 조건이 고정된 상태에서 연료량 변화에 대한 배기압 변화는 거의 크지 않고 대체로 일정한 값을 보이고 있다. 즉, 연료량 증가에 의해 삼각 분리막대형 차압 유량계의 차압은 증가하지만 후류

부 정압의 변화는 크지 않다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 전술한 방법으로 획득한 데이터 중 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 연소 가스 질량 유량에 대한 연소가스 온도를 나타내었다. 2차 공기 공급 조건이 고정된 상태에서 연료량이 증가함에 따라 연소가스 온도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

삼각 분리 막대형 차압 유량계 질량 유량은 배기 가스 온도 및 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 차압으로 나타낼 수 있으며 이들의 관계식을 구하기 위해 우선 질량 유량, 배기 가스 온도, 차압에 대한 무차원화가 필요하다. 유량계 차압의 무차원화를 위해서 냉간 유동 조건에서 바이패스 밸브를 차

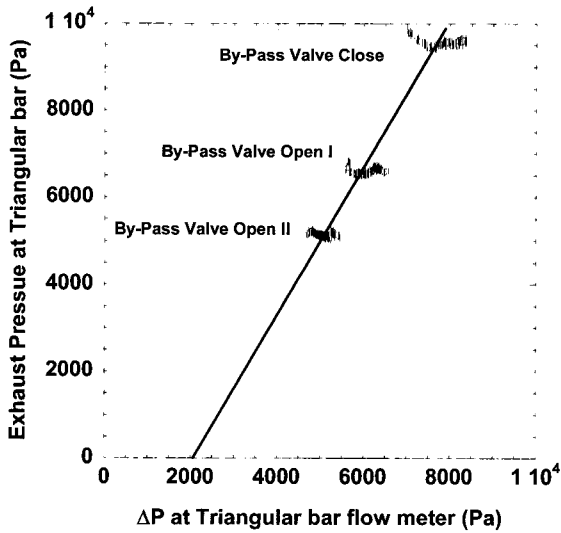


Fig. 6. Exhaust gas pressure vs ΔP at the separate triangular bar flow meter

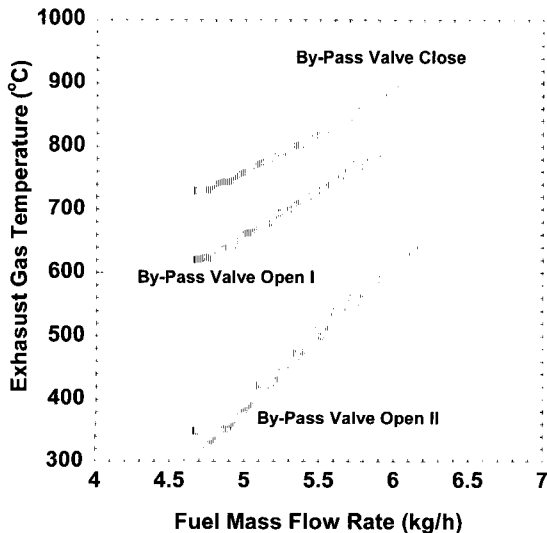


Fig. 7. Mass flow rate vs Exhaust gas temperature

단하고 측정한 Type I 삼각 분리 막대형 유량계에서의 차압을 기준 압력으로 사용하였다. 실험을 통하여 얻어진 유량계에서의 차압 ΔP 는 5217 Pa이다. $\Delta P = 5217$ Pa 값이 Fig. 4의 검정 결과값 7355 Pa 보다 작게 나타났는데 이는 냉간 검정시에는 실험 장치 중 연소기 부분을 빼고 측정하여 연소기 부분에 해당하는 유동저항이 줄어들었기 때문이다. 온도는 표준 상태 온도 298.2 K 로 무차원화 하였다. 질량유량 무차원화는 냉간 유동의 바이패스 밸브 차단 조건에서 측정한 Type I 삼각 분리막대형 차압 유량계의 차압 $\Delta P = 5217$ Pa 에 대응하는 질량 유량 410(kg/h)으로 나누어서 무차원화 하였다. m^* , ΔP^* , T^* 는 각각, 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 통과하는 가스의 질량유량, 차압, 가스 온도를 무차원화 파라미터를 나타낸 것이다. 고온 조건에서의 삼각 분리 막대형 차압 유량계 실험 데이터를 전술한 정의에 의해 무차원화하여 m^* , ΔP^* , T^* 데이터 조합을 구한다. 1개의 독립 변수를 사용하는 경우의 관계식을 구하는 것은 일반적인 그래픽 소프트웨어에 내장하고 있어서 손쉽게 추정 곡선을 구할 수 있으나, 2개 이상의 독립변수를 포함하는 관계식을 구하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 m^* 를 두개의 독립 변수 ΔP^* , T^* 로 나타내는 추정 곡선 (curve fitting)의 관계식을 구하기 위해 SlideWrite[®]라는 전용 소프트웨어[9]를 사용하였다. SlideWrite[®]를 이용하여 추정 곡선을 구하기 위해서는 우선 실험 데이터 경향을 살펴 보아야 하는데, 2개의 독립변수 ΔP^* , T^* 에 대해 m^* 를 선형적 특성 또는 다항식으로 나타낼 수 있는지 미리 파악한 후 구해야 할 계수를 포함하는 추정 관계식을 입력 하여야 한다. 본 연구에서는 실험 데이터의 특성을 고려하여 식(1) 및 식(2)와 같이 가정하였다.

$$m^* = C_1 \Delta P^* + C_2 T^* + C_3 \Delta P^* \Delta T^* + C_4 \quad (1)$$

$$m^* = C_5 \Delta P^* + C_6 T^* + C_7 \quad (2)$$

식(1), (2)를 입력하고 실험으로 구한 m^* , ΔP^* , T^* 데이터 조합을 SlideWrite[®] 소프트웨어에 입력하면 계수 $C_1 \sim C_7$ 를 구할 수 있다. 계수 $C_1 \sim C_7$ 대입한 것이 식(3)과 (4)이다. 실험 데이터와 식(3)과 (4)의 추정 관계식으로 구한 값을 비교한 결과 최대 $\pm 1\%$ 의 오차를 보였다.

$$m^* = 0.166 \Delta P^* - 0.089 T^* - 0.023 \Delta P^* \Delta T^* + 0.634 \quad (3)$$

$$m^* = 0.244 \Delta P^* - 0.0606 T^* + 0.539 \quad (4)$$

4. 결론

(1) 기존의 Annubar[®] 형 차압유량계의 형상을 개선한 삼각

분리 막대형 차압 유량계를 설계하고 제작하였으며 단면의 유선형 각도가 다른 3가지 형상으로 제작하였다.

- (2) 냉간 조건에서 성능 평가 실험을 실시한 결과 형상이 유선형에 가까울수록 동일 유량 통과시 삼각 분리 막대형 차압 유량계 상하류에서 각각 측정된 압력간의 차압이 상대적으로 작은 값을 나타내었다.
- (3) 고온 가스 조건에서 유량계를 검정하기 위해 연소기를 제작하여 유체 온도를 높여 검정하였으며 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 질량 유량과 온도 및 차압 관계식을 도출하였다.

후 기

본 연구는 차세대 핵심 환경 기술 개발사업 Eco- STAR 프로젝트연구비지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Beck, M. and Hinterhofer, K.(1998), "Direct High Dynamic Flow Measurement in the Exhaust of Combustion Engines PEUS-

Systems," SAE paper No.9808801.

- 2. Yassine, M.K., Marji, M. S., Berndt, R. W. and Laymac, T. D. (2003), "Parameters Affecting Direct Vehicle Exhaust Flow Measurement" SAE Paper No.2003-01-781.
- 3. Silvis, W., Williamson, J. and Kreft, N.(2003), "DVE-Direct Vehicle Exhaust Flow Measurement using Head-type Flow meters," SAE Paper No.2003-01-0782.
- 4. Hardy, J.E., McKnight, T.E. and Hylton, J. O. (1999), "Real-Time Measurement of Vehicle Exhaust Gas Flow", 4th International Symposium on Fluid Flow Measurement, Denver, Colorado USA, June 27-30.
- 5. Yamagishi, Y. (2003), "The MDLT-1302T Partial Flow Dilution Tunnel for Transient Test Cycle PM Sampling," Horiba Technical Report.
- 6. Yamagishi, Y. and Ohtsuki, S. (2000), "A particulate matter sampling system using a partial flow dilution method has been designed to perform sampling during a transient test cycle," Testing Technology International, February, 2000.
- 7. Rosemount Product Data Sheet, (1998), "Diamond II-Annubaar® bar Primary Flow Element", Dieterich, A Subsidiary of Rosemount Inc.
- 8. Wayne, W. S., Corrigan, E. R., Atkinson, R. J., Clark, N. N. and Lyons, D. W., (2001), "Measuring Diesel Emissions with a Split Exhaust Configuration", SAE paper No. 2001-01-1949.
- 9. Sliderwrite®Plus, <http://www.slidewrite.com>, (2007).

(2007년 7월 16일 논문접수, 2007년 10월 14일 심사완료)