한국공작기계학회논문집 Vol.17 No.4 2008. 8.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

유동 가스 온도 변화에 따른 삼각 분리 막대형 차압 유량계 유량 특성에 관한 연구

김광일*, 유원열**, 이충훈***

(논문접수일 2008. 2. 25, 심사완료일 2008. 4. 22)

A Study on Flow Rate Characteristics of a Triangular Separate Bar Differential Pressure Flow Meter according to the Variation of Gas Flow Temperature

Kwangil Kim*, Wonyuel Yoo**, Choong Hoon Lee***

Abstract

Differential pressure flow meters which have a shape of triangular separate bar(TSB) were tested for investigating the flow rate characteristics of the flow meters with varying the temperature of the gas flow. Three kinds of the triangular separate bar flow meters whose aerodynamic angles are different one another are used. The mass flow rate of the flow meters are evaluated using a non-dimensional parameter which includes the gas temperature, exhaust gas pressure and differential pressure at the flow meters, and atmospheric pressure. A burner system which is similar to gas turbine was used for raising the gas flow temperature. The burner system was operated with varying the air/fuel ratio by controlling both the fuel injection rate from the fuel nozzle and air flow rate from a blower. An empirical correlation between the mass flow rate at the TSB flow meter and the non-dimensional parameter was obtained. The empirical correlation showed linear relationship between the mass flow rate and the non-dimensional parameter H. Also, the mass flow rate characteristics at the TSB flow meter was affected by the gas temperature.

Key Words : Triangular separate bar(삼각분리막대), Differential flow meter(차압유량계), Gas temperature(가스온도), Non-dimensional parameter(무차원파라미터), Calibration(검정), Accuracy(정확도)

1. 서 론

차량의 배기가스 유량을 측정하려면 유동 저항을 최소화 할 수 있는 유량계가 필요하다. 차량 배기가스를 배출하는데 있어서 유동 저항을 거의 주지 않으면서 유량을 측정할 수 있는 유량 측정 장치는 카르만 보텍스 형의 유량계[1~4],

* 서울산업대 자동차공학과
** (주)이플러스티
*** 교신저자, 서울산업대학교 자동차학과 (chlee5@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

벤튜리 차압 유량계[5,6] 등이다. 카르만 보텍스(Karman Vortex) 유량계는 유동 저항이 거의 없고 구조도 간단한 장점을 가지고 있으나 정확도가 낮은 편이며 벤투리 차압 유량계는 정확도는 높은 편이나 제작비가 많이 들고 배기 저항이 약간 높은 편이다. 최근에는 유동 저항을 원천적으로 없앨 수 있는 비접촉식 유량 측정법이 최근 관심을 끌고 있는데 레이저 평행광을 유동 단면에 주사한 후 신호를 토모그래피 재구성 방법으로 유량을 측정하는 방법인데 배기 가스 유량 측정에는 문제가 있는 방식이다[7,8]. 또한, 유동 손실이 거의 없으면서 차량의 배기 가스 유량 측정 뿐만아니라 다양한 분야에 적용되는 유량계로 관심을 끌고 있는 것이 피토관의 평균 유속 측정 원리를 이용한 Annubar® 형 차압유량계이다[9,10]. Annubar® 형 유량계는 상류부에는 유동이 흐르는 단면에서의 평균 동압과 평균 정압을 합친 평균 전압이 작용하고 후류부에는 평균 정압이 작용하며 그 차압인 평균 동압을 이용하여 유량을 측정하는 장치이다.

본 연구에서 개발한 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 측정 원리는 기존의 Annubar® 형과 유사하며, 다른 특징은 유동 가스에 의한 전압 및 차압의 평균 압력이 작용하는 분리 공간 형상을 일체형 삼각형 형태로 가공하여 간결한 형상을 가지며 제작 및 유지 보수가 간단한 특징을 가지고 있다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계에 대한 질량 유량과 차압 및 온도 간의 관계식은 Kim[11] 등이 연구한 바가 있으나 가스 온도 변화에 대한 유량 특성 연구는 매우 부족한 편이다. 본 연구에서는 고온 및 저온 조건에서 유동 손실을 거의 일으키지 않으면서 엔진 배기 가스와 같이 대용량의 가스 유량 측정에 적합한 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 설계하고 제작하였으며 검정 실험을 통해 유량계의 유량 특성을 평가하였다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 질량 유량 특성과 유량계에서의 차압, 온도, 배압 등을 포함하는 무차원 파라미터 간의 관계식을 구하였다. 유동 가스의 온도 변화 특성에 따른 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 특성을 연구하기 위해 연소기를 포함하는 검정시스템을 개발하여 사용하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 삼각 분리 막대형 차압 유량계는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 전체 단면의 모양이 다이아몬드 형상을 하고 있으며 내부 단면 두 개의 삼각형이 분리된 형상을 하고 있다. 공기의 유동 저항에 큰 영향을 미치는 단면의 유선형 각도가 각각 다른 3 종류를 제작하였다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계 type I, II, III 각각의 유동 단면에서의 폭은 모두 12.7mm로 똑같게 설계하였고 유동이 흐르는 방향의 유선형 각도는 각각 45°, 37.5°, 32°로 하였다. 유량계의 유선형 설계가 상류부 평균 전압과 후류부 평균 정압 간의 차압에 미치는 영향을 파악하기 위해 이와 같이 설계하였다. Fig. 1에 나타낸 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 각각 4개를 가공하였다.

고온 가스 유동 조건에서 유량계 특성을 연구하기 위하여 연소기를 사용하였으며 Kim[11] 등이 제작한 연소기의 장치 구성은 유사하며 연료 공급 및 연료 유량 측정 방법을 달리하였다. Kim[11] 등은 전자 제어 방식으로 작동되는 유압용 방향 제어 밸브를 사용하여 연료 공급 장치가 복잡하였으나 본 연구에서는 연료 탱크를 디지털 저울 위에 올려놓고 주어진 시간 동안 연료 소모에 따른 무게 감소량을 측정하여 사용된 연료 질량 유량을 측정하는 방식으로 간소하면서도 정확하다. 고압의 질소를 레귤

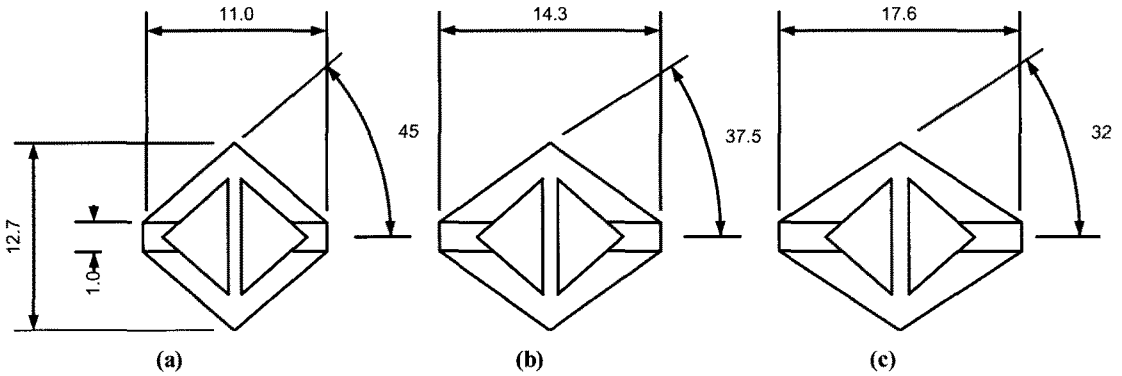

Fig. 1 The section of separate triangular bar type flow meter(a: type I, b: type: II, c: type III)[11]

레이터로 통과시켜 일정 압력으로 조절된 후 연료 탱크를 가압하여 일정 압력 상태에서 연료를 연료 노즐로 공급하였다.

연소기는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 연료 노즐, 점화 장치,연소 가스 믹싱 라이너(mixing liner), 스월러, 연료 차단 밸브, 1차 공기(primary air) 공급 통로, 2차 공기(secondary air) 공급을 위한 삼지관 등으로 구성된다. 노즐은 화염에 의하여 가열과 냉각이 반복되어도 정상적인 작동이 가능하도록 내구성이 검증되었다. 연료 노즐의 유량 선정은 공급 공기량에 따라 적절한 연료량 을 공급할 수 있도록 선정하였다. 노즐의 유량이 지나치게 크거나 낮으면 연료의 무화와 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 담당한다. 가정용 보일러의 연소기에 내장된 스태빌라이저 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 제어하였으며 연료 질량 유량계는 0.0032%의 정확도를 가지고 있다[11,12]. 본 실험 장치로는 연소 가스 온도가 최대 900℃수준까지 올라갔다. 연소기로의 공기 공급은 1차 공기와 2차 공기로 구성되는데 1차 공기 공급은 압축기로부터 공급되며 2차 공기 공급원은 고압 송풍기(blower)이다. 1차 공급 공기 유량은 2%의 정확도를 가진 Dwyer 사의 로타미터를 사용 측정하였고 조절 밸브로 유량 조절이 가능하다. 2차 공기의 유량 측정은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 Meriam 사의 층류 유량계를 사용하여 측정하였고 정확도는 1%이다.

연료 노즐에서 공급되는 연료와 공기 혼합이 믹싱 라이너에서 이루어지면서 동시에 연소가 이루어진다. 연소기의 주연소를 위하여 일차적으로 압축기를 이용하여 고압의 공기를 공급한다. 압축기에 의하여 공급되는 공기는 연료의 무화 및 1차 연소에 사용되므로 공급되는 공기의 유량이 제어될 수 있어야 한다. 연료 분사 초기에 과다한 공기가 공급되면 점화가 잘 이루어지지 않으며 점화가 이루어진다 하더라도 소화가 발생할 가능성이 크다. 따라서 점화 시에는 작은 양의 공기를 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 공기 공급 시스템의 유량 역시 스월러의 특성과 연관되어 결정된다[11,12]. 본 연구에서는 연소기의 주연소 공기 유량을 0.15m^3/min으로 일정하게 유지하였다. 점화 시스템은 연료·공기의 혼합기에 충분한 점화 에너지를 공급하여 연료 분사와 동시에 신속한 점화가 이루어지도록 하는 역할을 한다. 신속한 점화를 위해 일차적으로 연료와 공기의 혼합에 깊은 주의를 기울여야 하며, 점화 시스템의 선정과 점화봉의 위치 등에도 주의하여야 한다. 본 연구에서는 많은 실험을 통하여 연료 분사 후 5초 이내에 점화가 이루어졌다. 점화를 위하여 고전압(약12kV 이상)의 고

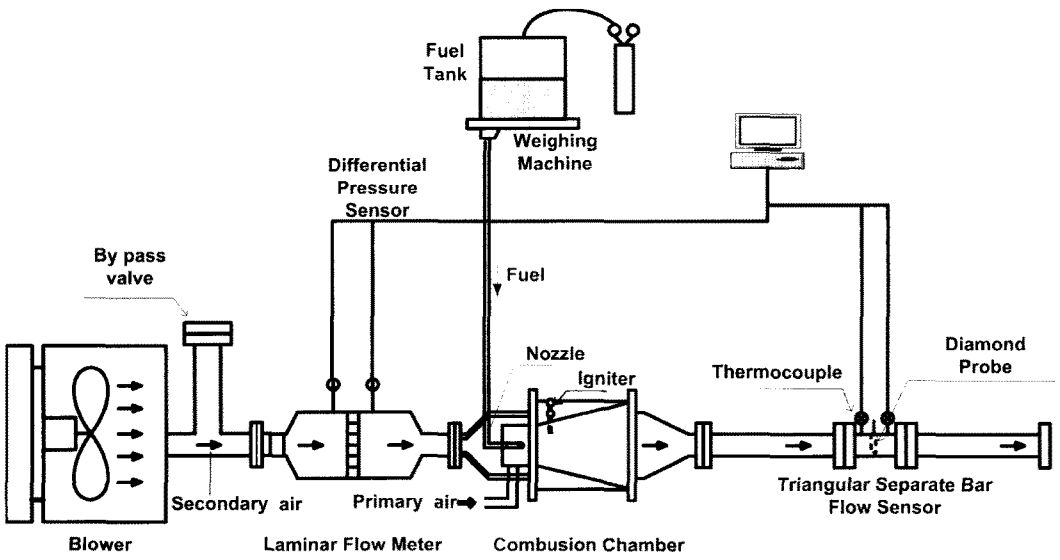

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for generating high temperature gas flow

주파 방전에 의한 아크를 점화봉 사이에 발생시킨다[11,12].

3. 결과 및 검토

삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 측정 원리는 국제 표준화 되어 있는 일반적인 차압 유량계인 오리피스, 벤투리, 플로우 노즐 유량계 등과 유사하다[13]. 다만, 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성을 나타내기 위해 식 (1)에 나타낸 것과 같은 무차원 파라미터로 H를 도입하였다[14]. H 값은 삼각 분리 막대형에서 측정한 전압과 동압의 차압, 배기 가스 온도, 배기압 등을 조합한 무차원 파라미터로 온도 및 압력에 변화하는 배기 가스의 밀도값을 반영한다고 볼 수 있다. h_w는 유량계에서의 평균 전압과 평균 정압의 차이를 나타내는데 h_w의 제곱근 형태로 H 파라미터에 포함되어 있다. 오리피스, 플로우 노즐, 벤튜리 튜브 등과 같은 일반적인 차압 유량계는 h_w의 제곱근에 비례하는 특징을 가지고 있으며[15] 삼각 분리 막대형 차압 유량계도 이와 유사한 특성을 포함하고 있다고 볼 수 있다. 따라서 H 파라미터 변화에 대하여 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성은 선형적으로 변화할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

$$H = \frac{P_{exh}}{101.3(kPa)} \times \frac{293.15(K)}{T_{exh}} \sqrt{\frac{h_w}{\gamma}} \qquad (1)$$

여기서,

P_{exh} : 배압(kPa)

T_{exh} : 가스 온도(K)

γ : 표준 상태 293.15 K, 101.3 kPa 배기 가스 밀도

h_w : 유량계 차압(kPa)이다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 유선형 각도가 45°, 37.5°, 32°로 각각 다른 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 사용하여 냉간 유동(cold flow) 조건에서 유량 특성을 측정하였다. 냉간 유동 조건에서는 Fig. 2의 실험 장치 중 배기 저항으로 크게 작용하는 연소기(combustion chamber)를 탈거한 후 층류 유량계와 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 직결하고 실험을 실시하였다. Fig. 3은 냉간 유동 조건에서 H 파라미터 변화에 대한 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 체적 유량을 나타낸 것이다. 유선형 각도가 서로 다른 3 종류 유량계의 체적 유량이 무차원 파라미터 H 값에 대해 선형적 특성을 보이고 있으며 Fig. 3의 하단부에 나타낸 3개의 선형 회귀 곡선의 선형 상관 계수 모두가 0.998로 거의 선형적이라는 것을 보여 주고 있다. 유선형 각도가 작아짐에 따라서 동일한 H 값

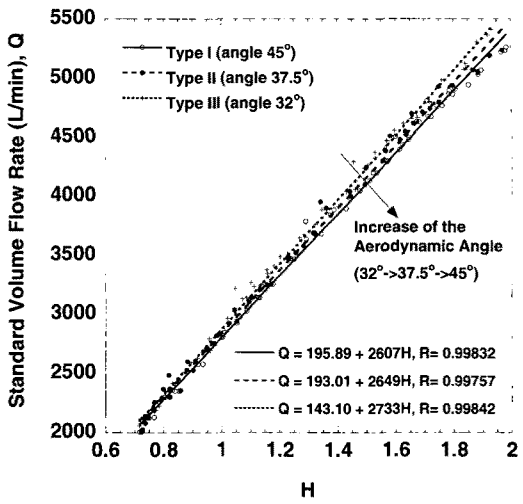

Fig. 3 Volume flow rate of the triangular separate bar flow meter with varying H

에 대해 체적 유량이 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 형상이 유선형에 가까울수록 즉, 유선 각도 값이 작아질수록 유동 과정에서의 손실이 감소한다는 것을 의미한다. 이것은 유선형에 가까울수록 유동 저항이 줄어드는 경향을 보이는 기존의 유량 특성 연구 결과와 일치한다고 볼 수 있다. 무차원 파라미터 값은 0.5-2 범위이며 이것에 대응하는 삼각분리 막대형 차압 유량계에서의 전압과 정압의 차압은 1000-8000 Pa 수준이다.

삼각 분리 막대형 차압 유량계를 엔진 배출가스와 같은 높은 온도 조건에서의 사용하려면 유량계를 고온 가스에 노출한 상태에서 검정하여야 한다. 따라서 고온의 가스를 획득하기 위해 연소기를 사용하였는데 이로 인해 삼각 분리 막대형 차압 유량계로 공급되는 질량유량을 계산하기 위해서는 1차공급공기량, 2차공급 공기량, 연료 유량을 측정하여야 한다. 한편, 고온 조건에서도 유량과 H 파라미터의 관계식은 기본적으로 선형적 특성을 가진다고 볼 수 있다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 고온 가스에 노출된 조건으로 검정하려면 Fig. 4는 연료 분사압 변화에 따른 type-II 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 질량 유량 특성을 나타낸 것이다. 연료 분사압 조절은 연료 탱크로 공급되는 공압 레귤레이터의 출구 압력을 분사하고자 하는 압력으로 조절하면 된다. 연료 분사압을 일정하게 유지하고 1차 공급공기량은 0.15m^3/min으로 일정하게 유지한 후, 2차 공급 공기량을 조절하면서 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 질량 유량을 측정하였다. 연료 질량 유량과 1차 공급 공기 질량 유량은 일정하게 유지한

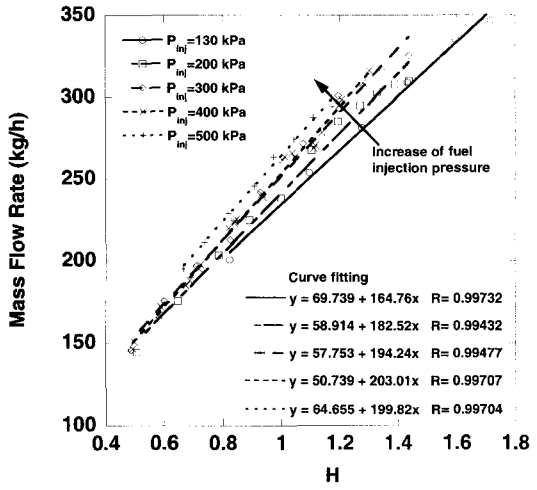

Fig. 4 Effect of fuel injection pressure on the mass flow rate of the triangular separate bar flow meter with varying H

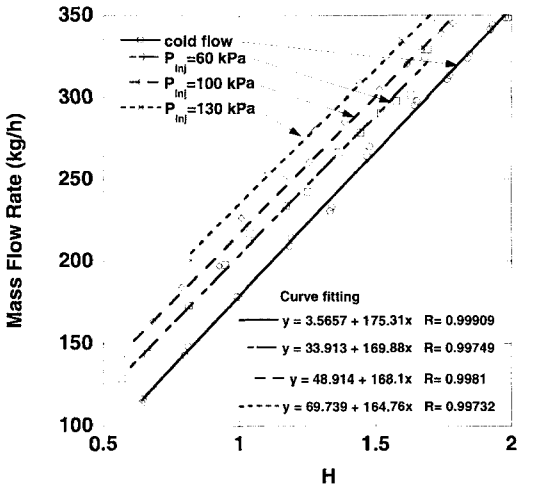

Fig. 5 Comparison results between steady state and low fuel injection pressure on the effect of the mass flow rate characteristics with varying H

상태에서 2차 공급 공기량을 설정한 후 삭각 분리 막대형 차압 유량계에서의 가스온도, 배압, 유량계 차압을 측정하면 이에 대응하는 H값을 계산할 수 있다. 이 때 H값에 대응하는 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 질량 유량은 연료 질량 유량, 1차 공급 공기 질량 유량, 2차 공급 공기 질량 유량 셋을 모두 합치면 된다. 이와 동일한 실험 방법을 적용하여 연료 분사압을 130kPa부터 500kPa까지 5단계의 압력 변화에 따른 질량 유량 곡선을 구할 수 있었다.

Fig. 4에서 연료 분사압이 증가하면 할수록 H 값에 대응하는 질량 유량값은 증가하는 특성을 보이고 있다. 연료압 변화에 따른 질량 유량 곡선이 H값이 0.5 근처에서 수렴하고 H값이 증가하면 유량 특성이 부채살 모양으로 펼쳐지는 특성을 보이고 있다. 이는 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성이 사용 가스 온도에 영향을 받고 있음을 의미한다.

Fig. 4의 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성을 평가하는데 있어서 어려운 점은 연소압이 변하면 연소가스 온도와 공연비가 변한다는 것이다. 연소 가스의 공연비가 변하면 가스 성분이 변하게 되어 특정 성분의 유량 특성을 파악하는데 어려움이 있다. 연소 가스 온도의 영향을 정확히 파악하려면 연소 가스의 공연비가 일정하게 제어되는 조건에서 온도 변화에 따른 유량 특성을 파악하는 것이 바람직하다. 그러나 본 실험과 같이 대용량의 가스가 흐르는 조건에서 공연비를 일정하게 유지하고 동시에 배기가스 온도를 제어하는 것은 매우 어렵다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 연료 공급 압력을 크게 낮추었다. 연료압을 60~130kPa 인 조건에서는 전체 가스의 질량 유량 중 연료가 차지하는 비율은 0.4~1% 정도로 연소 가스 성분의 대부분은 공기라고 가정하여도 큰 무리가 없으며 가스 성분이 거의 일정하게 유지되는 조건이라고 볼 수 있다.

60, 100, 130kPa의 압력 수준으로 낮춘 조건에서 H값 변화에 따른 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성을 측정하여 Fig. 5에 나타내었으며 냉간 유동 조건에서의 유량 특성도 함께 비교하여 나타내었다. 연료압을 증가시킨 조건은 연소 가스 온도가 상대적으로 높다는 것을 의미한다. Fig. 5의 결과를 보면 Fig. 4의 복잡한 결과와 비교하여 삼각 분리 막대형 질량 유량계의 H값 변화에 대한 질량 유량 특성이 뚜렷하게 나타났다. 즉, 가스 온도가 증가하면 주어진 H값에 대해 질량 유량값이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

삼각 분리 막대형 차압 유량계를 제작하여 냉간 조건 및 연소 조건에서 유량 특성을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼각 분리 막대형 차압 유량계는 형상이 유선형에 가까울수록 유동 저항이 감소로 인해 무차원 파라미터 H에 대해 유량계에서의 차압이 상대적으로 작은 값을 나타내었다.
(2) 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 사용 환경이 유량 변화에

대해 가스의 온도 변화가 크지 않을 경우 유량과 H 파라미터를 사용한 하나의 선형 관계식으로 나타낼 수 있다.

(3) 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서 무차원 파라미터 H에 대해 질량 유량이 선형적으로 변하는 특성을 보였으며 선형 회귀 곡선의 상관 계수는 0.998로 나타났다 .

(4) 삼각 분리 막대형 차압 유량계가 적용되는 사용 환경이 가스 온도 변화가 큰 경우 유량과 H 파라미터의 관계식이 하나의 선형 관계식으로 나타낼 수 없으며, 가스 온도가 증가하면 주어진 H값에 대해 질량 유량 값이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 차세대2007 핵심환경기술개발사업 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., and Joy, R. D., 1999, "Real-Time Measurement of Vehicle Exhaust Gas Flow," *4th International Symposium on Fluid Flow Measurement*, Report Number ORNL/CP-102550 Denver, Colorado.

(5) Yamagishi, Y., 2000, "The MDLT-1302T Partial Flow Dilution Tunnel for Transient Test Cycle PM Sampling," *Horiba Technical Report.*

(6) Yamagishi, Y. and Ohtsuki, S., 2000, "Tunnel Vision - A Particulate Matter Sampling System Using a Partial Flow Dilution Method Designed to Perform Sampling during a Transient Test Cycle," *Testing Technology International*, pp 95-99.

(7) Rahim, R. A., Fea, P. J., and San, C. K., 2005, "Optical Tomography Sensor Configuration Using Two Orthogonal and Two rectilinear Projection Arrays," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 16, pp. 327~340.

(8) Yang, W. Q. and Liu, S., 2000, "Role of Tomography in Gas/Solids Flow Measurement," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 11, pp. 237~244.

(9) Rosemount Product Data Sheet, 1998, Diamond II-Annubaar® bar Primary Flow Element, Dieterich, A Subsidiary of Rosemount Inc, 00813-0100-4760 Rev. DA 11/98, USA.

(10) Wayne, W. S., Corrigan, E. R., Atkinson, R. J., Clark, N., and Lyons, D. W., 2001, "Measuring Diesel Emissions with a Split Exhaust Configuration," *SAE paper*, No. 2001-01-1949.

(11) Kim, K. I., Kim, M. C., Park, D. S., and Lee, C. H., 2007, "A Study on Improvement of an Annular Bar Type D2P Flow Meter for Measuring Exhaust Flow Rate of Diesel Engine," *2007 Spring conference proceedings*, Vol. 1, pp. 489~494.

(12) Lee, C. H., Kim, K. I., Kim, M. C., and Park, D. S., 2007, "A Study on Flow Characteristics of a Separate Triangular Bar Differential Pressure Flow Meter for Measuring Exhaust Flow Rate of Diesel Engine," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 9, No. 6, pp. 563~568.

(13) ISA 1932 (ISO-5167-3), 2003, *Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular-Cross Section Conduits Running Full - Part3: Nozzles and Venturi Nozzles, International Organization for Standardization*, Geneva.

(14) Nakamura, H., Kihara, N., Adachi, M., and Ishida, K., 2002, "Development of a Wet-Based NDIR and Its Application to On-Board Emission Measurement System," *SAE Paper*, No. 2002-01-0612.

(15) Lee, C. H., 2005, "A Study on the Automatic Measurement of Swirl Generated from Intake Port of Engine Cylinder Head Using an I-IEEE-1394 Camera and Step Motors," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 6, pp. 88~94.