삼각 분리 막대형 차압유량계 압력탭 조건이 유량 측정에 미치는 영향

이 충 훈
서울산업대학교 자동차공학과
(2009. 12. 7. 접수 / 2010. 4. 4. 채택)

Effects of Pressure Tapping Conditions on Flow Rate Measurement of Triangular Separate Bar Differential Pressure Flow Meter

Choong-Hoon Lee
Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology
(Received December 7, 2009 / Accepted April 4, 2010)

Abstract : Flow characteristics of differential pressure flow meters which have a shape of triangular separate bar (TSB) was investigated according to the machining conditions in pressure tapping holes. Diameter of the pressure taping holes is either 1.0 mm or 1.5 mm. Also, number of the pressure tapping holes are drilled either 9 or 17. The mass flow rate of the TSB flow meters are calibrated with a laminar flow meter by connecting them in line. The mass flow rate in the TSB flow meters are plotted with a non-dimensional parameter H which includes the gas temperature, exhaust gas pressure and differential pressure at the flow meters. An empirical correlation between the mass flow rate at the TSB flow meter and the non-dimensional parameter H was obtained. The empirical correlation showed highly linear relationship between the mass flow rate and the non-dimensional parameter H. The hole size of the pressure tapping holes has a bigger effect on the flow rate than the number of the tapping holes.
Key Words : triangular separate bar, differential pressure flow meter, non-dimentionalized differential pressure parameter H, size of pressure tapping, number of pressure tapping

1. 서 론

소각탑 가스 및 차량 배출가스 등과 대용량의 기체 유량을 측정하는 유량계가 갖추어야 할 조건은 유량계에 의한 유동 저항이 크지 않아야 하며 유량을 감지하여 나타내는 신호가 커야 한다. 일반적으로 기체 유량 측정을 위해서는 오리피스, 플로우 노즐, 벤튜리 튜브 등과 같은 차압 유량계[1]를 가장 많이 사용하고 있으나 유량계에서의 압력 손실이 큰 단점이 있다. 유동 손실이 거의 없는 유량계는 카르만 보텍스 유량계가 있으나 정확도가 낮은 편이다[2,3]. 차압 유량계의 일종으로 유동 손실이 크지 않고 정확도가 1%로 다양하게 적용되고 있는 것이 Annubar®형 차압유량계이다[4,5]. Annubar®형 유량계의 상류부에는 유동이 흐르는 단면에서의 평균 동압과 평균 정압을 합친 평균 전압이 작용하고 후류부에는 평균 정압이 작용하며 그 차압인 평균 동압을 이용하여 유량을 측정하는 유량계이다[6].

디젤 차량의 배출 가스 중 매연은 도시 주민의 호흡기 계통의 질병을 유발하고 있어 안전한 대기 환경을 위해 디젤매연필터(DPF)를 장착하는 것이 일반화 되어 있다. DPF의 매연 제거를 위한 재생 제어에 배기가스 유량 측정이 요구되고 있는 가운데 Annubar형 차압 유량계가 주목을 받고 있다.

Kim 등[6]과 Lee 등[7]은 기존의 Annubar®형 차압 유량계의 형상을 삼각 분리 막대 모양으로 간결하게 제작하여 측정 대상 기체의 온도 변화 및 유량계의 형상에 따른 유량 특성을 연구하였다. 한편, Annubar®형 차압유량계와 삼각 분리 막대형 차압 유량에서의 압력탭의 수 및 크기에 따른 기존의 연구는 거의 없는 편이다. 이에 본 연구에서는 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 압력탭의 수 및 크기에 따른 유량 특성을 연구하였다. 압력탭의 수는 9개 및 17개인 경우에 대해 비교하였으며 압력탭의 직경은 1.0mm 및 1.5mm인 경우에 대해 비교하였다.

† To whom correspondence should be addressed.
chlee5@snut.ac.kr

2. 실험 장치 및 방법

삼각 분리 막대형 차압 유량계의 형상은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 단면의 모양이 마름모 형상을 하고 내부 단면이 두 개의 삼각형이 분리된 형상을 하고 있다. 유량계의 유선형 각도가 유량 특성에 미치는 영향을 Kim[6] 등이 연구하였는데 이들의 연구에 의하면 각각 45°, 37.5°, 32°의 유선형 각도 중 32°의 경우가 동일 유량에 대해 차압이 상대적으로 작게 나타났으나 그 차이가 미미하여 본 연구에서는 제작 상의 편의를 위해 단면의 유선형 각도를 45°로 하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 상류부에 전압, 후류부에 정압이 작용하도록 하기 위해 직경 1mm 또는 1.5mm 구멍을 가공하였으며 유동 단면 전체의 평균 압력이 작용할 수 있도록 유량계 막대의 길이 방향으로 12mm로 9개 또는 6mm로 17개 등 간격으로 각각 가공하였다. 본 연구에서는 3종류의 유량계를 제작하였다. 3종류의 유량계는 Type I(압력탭 직경 1.0mm×9hole×12mm 간격), Type II(압력탭 직경 1.5mm×9hole×12mm 간격), Type III(압력탭 직경 1.0mm×17hole×6mm 간격) 이다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계가 조립된 파이프의 내경은 110mm이다.

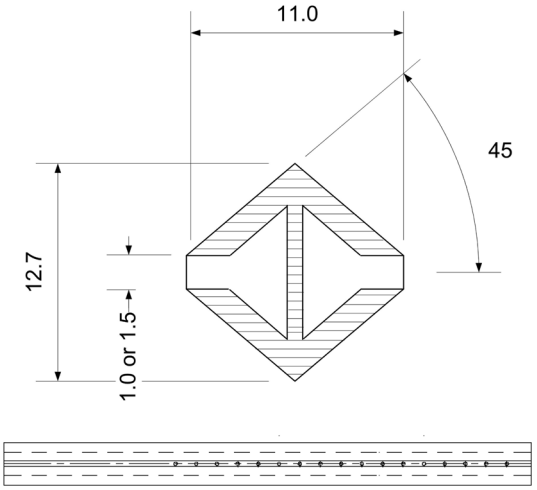


Fig. 1. The section of triangular separate bar type flow meter.

삼각 분리 막대형 차압 유량계를 검정하기 위한 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치는 유량 검정의 기준 유량계인 층류 유량계(laminar flow meter: Meraim사 제작), 30,000liter/min 용량의 고압 송풍기, 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 마운트하기 위한 시스템, 차압 측정을 위한 U-자관 3개(dwyer사), 경사압력계(dwyer사) 1개, 온도 측정 시스템(Yokokawa사) 등으로 구성되어 있다.

송풍기를 가동하면 흡입 공기는 층류유량계 입구의 공기 필터를 통과하고 층류유량계를 거쳐 송풍기를 지나 삼각분리 막대형 차압 유량계를 마지막으로 지나 대기 중으로 배출된다. 경사 압력계는 층류유량계의 차압을 측정하고, U-자관 1개는 층류유량계의 입구 압력을 측정하였으며 동시에 흡입 공기 온도를 측정하여 유량의 밀도 보정에 사용하였다. 삼각 분리 막대형 차압 유량계에서의 차압 측정은 U-자관을 사용하였고 또 다른 U-자관을 사용하여 배압을 측정하였다. 삼각 분리 막대형 유량계의 상류부와 후류부 두 위치에서 온도를 측정하여 평균한 온도를 기체 밀도 보정에 사용하였다.

실험 과정은 우선 인버터를 조절하여 송풍기의 풍량을 일정하게 유지시켜 정상 상태에 도달하였을 때 3개의 U자관 압력계, 경사압력계의 압력값, 층류 유량계 및 삼각분리 막대형 차압 유량계에서의 온도 값을 기록한다. 인버터를 조정하여 풍량을 증가시켜 일정하게 유지한 후 전술한 실험 과정을 반복하는 방법으로 진행하였다. 유량을 바꾸어 가며 20개 내외의 측정 점에서 실험을 수행하였다.

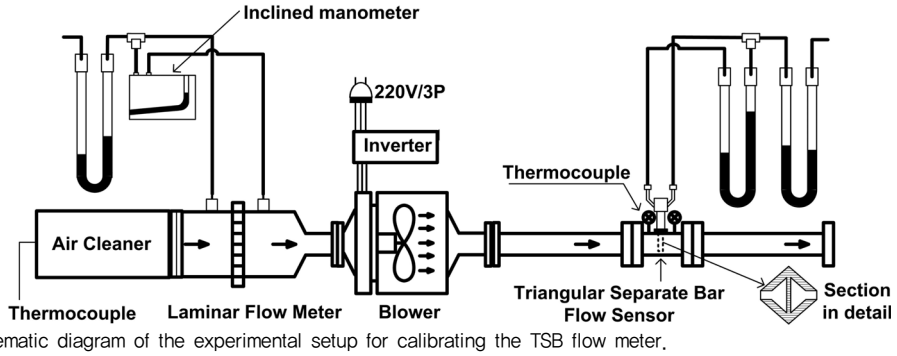


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for calibrating the TSB flow meter.

3. 결과 및 검토

삼각 분리 막대형 차압 유량계의 유량 특성을 나타내기 위해 식 (1)에 나타낸 것과 같은 무차원 파라미터로 H를 도입하였다[8]. H 값은 유량계에서 측정한 전압과 동압의 차압, 배기가스 온도, 배기압 등을 조합한 무차원 파라미터로 온도 및 압력에 따라서 변화하는 배기가스의 밀도 값을 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 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[6].

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

여기서, P_{exh} : 배압 (kPa)
T_{exh} : 가스 온도 (K)
γ : 표준상태(293.15K, 101.3kPa) 배기가스밀도
h_w: 유량계 차압 (kPa) 이다.

Fig. 3은 Type I, II, III 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 측정 실험 동안 흡입 공기 온도 변화를 나타낸 것으로 거의 공기의 온도 변화가 크지 않은 조건에서 실험이 이루어 졌음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Type I, Type II의 삼각분리 막대형 차압 유량계의 검정 결과를 나타낸 것으로 각각 압력탭의 직경이 1.0mm, 1.5mm이다. Type I, Type II 모두 압력탭의 수는 9개이며 각각 12mm의 동일한 간격으로 가공하였다.

유량계의 상류부에 작용하는 전압은 압력탭의 직경에 관계없이 정압과 동압 합쳐진 압력이 작용하므로 압력탭의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있으며[9] 후류부의 정압값은 압력탭 크기 및 관내의 유속값 즉 유량에 따라 유동의 동적 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서 유량계 후류부의 정압을 측정하기 위해 U-자관을 설치하였으며 정압은 유속의 크기 또는 압력탭의 크기에 따라 1~27mmH_2O 정도의 부압을 나타내었다. 각각의 유량계 검정 곡선에서 동일한 y-축 값, 즉 동일한 질량 유량에 대해 대응하는 각각의 H값을 읽었을 때 압력 탭 크기가 1.5mm로 가공한 유량계(Type II)가 더 큰 차압을 나타냈다. 여기서, 동일한 질량 유량은 파이프 내에 흐르는 유체의 레이놀즈수가 동일한 조건을 의미하며 유량계 상류부 전압은 Type I, II 모두 거의 같다고 볼 때 차압이 상대적으로 크게 측정되었다는 것은 유량계의 후류부 부압이 더 크다는 것을 의미한다. 즉, 유량계 후류부 압력이 압력탭 사이즈에 영향을 받는다는

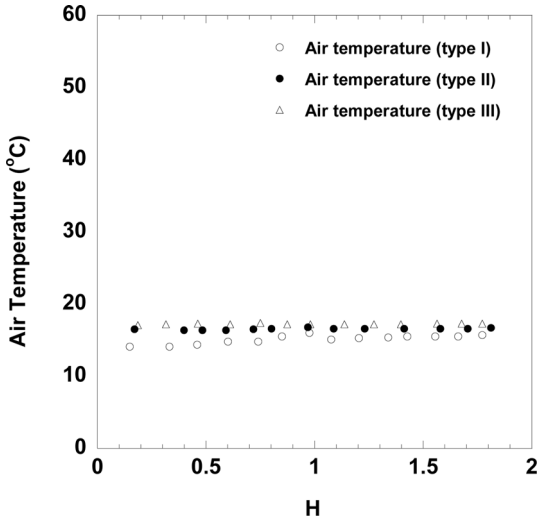


Fig. 3. Temperature distribution according to H(Type I, II, III).

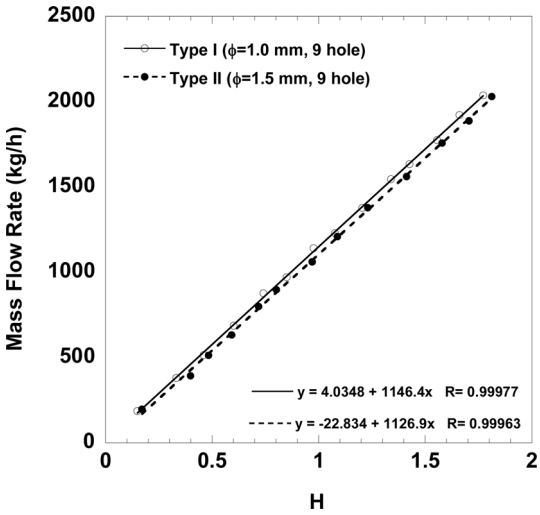


Fig. 4. Measurement results of flow rate for the TSB flow meters in calibration rig(Type I and Type II).

것을 의미하며 Fig. 4의 결과는 압력탭의 크기가 1.5mm인 경우 유동의 동적 특성이 유량계 후류부 압력에 상대적으로 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 Type I과 Type III 유량계의 유량 검정 결과를 나타내었다. Type I과 Type III 모두 압력이 작용하는 압력탭 크기가 1.0mm로 동일하고 단지 압력탭의 개수가 각각 9개 및 17개일 때의 유량 특성을 나타내었다. 압력탭의 개수가 9개인 경우는 압력탭의 간격이 12mm이며 17개인 경우는 6mm 간격이다.

압력탭의 크기의 영향을 나타낸 Fig. 4의 결과와는 달리 Type I, Type III 유량계의 동일 질량 유량에 대한 차압(무차원 H 파라미터) 에 대응하는 H 값의 차이가 거의 없었으며 이는 유량계의 후류부 압력 특성이 압력탭의 개수에는 영향을 받지 않음을 의미한다.

유량계를 장시간 사용할 경우 압력탭 구멍들이 막힐 수 있으며 특히, 전압이 작용하는 유량계 상류부 압력 구멍이 막힐 가능성이 높다. 유량계 상류부 압력탭이 막히는 상황을 시뮬레이션하기 위해, Type I, II, III 3개의 유량계 중 압력탭 직경이 1.0 mm 압력탭수 17개를 가공한 Type III에 대해 압력탭들을 여러 가지 조건으로 막으면서 유량 측정 실험을 실시하였다. 유량계 상류부의 압력탭이 막힐 수 있는 5가지 조건을 상정하여 실험하였으며 본 연구에서 사용한 5가지 조건을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에 나타낸 정상 조건은 신품의 삼각

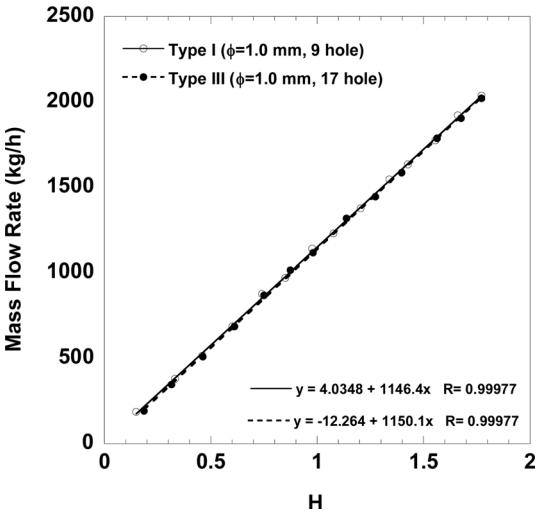


Fig. 5. Measurement results of flow rate for the TSB flow meters in calibration rig(Type I and Type III).

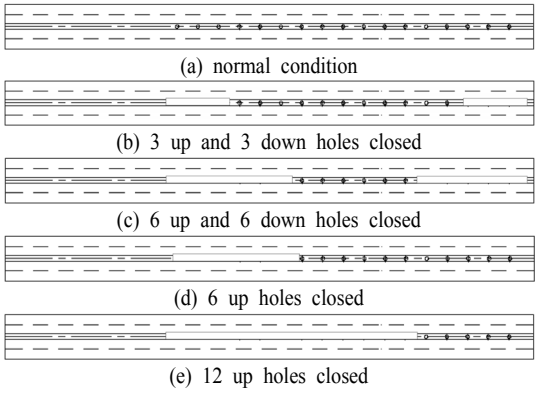


Fig. 6. Experimental conditions to evaluate the effects by blocking the pressure tabs in the TSB flow meter on the flow rate.

분리 막대형 차압 유량계를 사용할 경우 모든 압력탭이 정상적으로 뚫려 있는 경우를 말한다. Fig. 6(b)의 조건은 삼각분리 막대형 차압 유량계의 위쪽 3개 압력탭과 아래쪽 3개의 압력탭을 막은 조건이다. Fig. 6(c)의 조건은 유량계의 위 아래쪽 각각 6개의 압력탭을 막은 조건이다. Fig. 6(d)는 유량계의 위쪽 압력탭의 6개를 막은 경우이며 Fig. 6(e)는 위쪽 12 압력탭을 막은 경우이다. Fig. 6(a)~(e) 모든 경우에 대해서 유량계 후류부 압력탭은 정상 조건으로 모든 압력탭이 정상적으로 열린 상태에서 실험을 실시하였다.

Fig. 7은 5개 조건 모두에 대해 질량 유량 측정 결과를 하나의 그래프에 나타낸 것이다. 5개 조건에

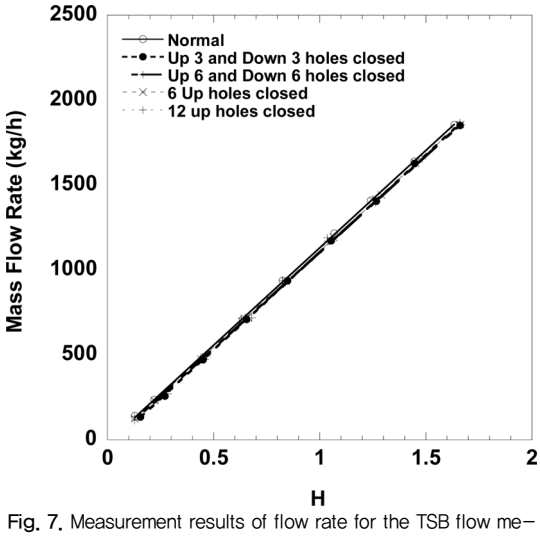
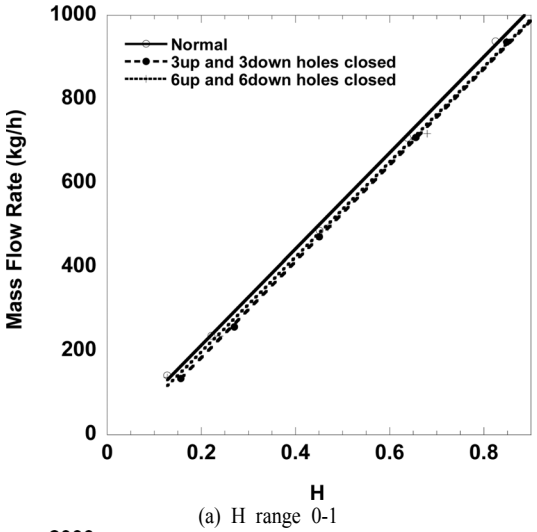
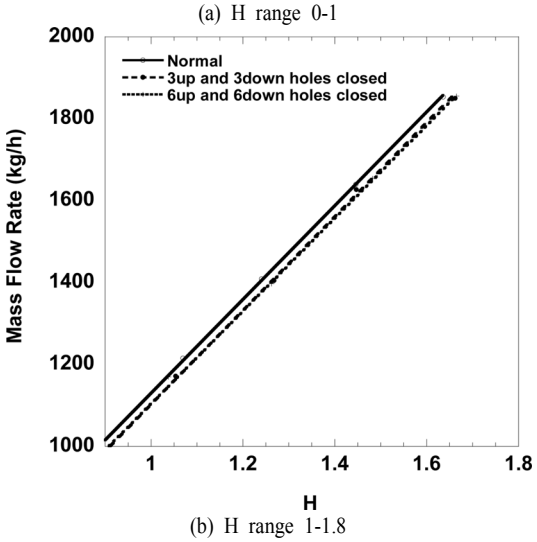


Fig. 7. Measurement results of flow rate for the TSB flow meters in calibration rig with pressure tab hole being blocked at 5 kind conditions.



(a) H range 0-1



(b) H range 1-1.8

Fig. 8. Measurement results of flow rate for the TSB flow meters in calibration rig with dividing the H range by two sub-sections.

서의 H값 변화에 대한 각각의 질량 유량 특성은 선형적인 특성을 보이고 있으며 동일한 H값에 대해 각 실험 조건에서의 질량 유량은 큰 차이를 보이지 않고 일관된 경향을 보이고 있다. 즉, 정상 조건(Fig. 6(a)의 조건)에서 질량 유량이 동일한 차압(H 파라미터)에 대해 상대적으로 큰 값을 보이고 있으며 유량계 상류의 압력탭 위쪽 12개를 막은 조건에서의 질량 유량 값이 가장 작게 나타났다. 즉, 유량계 상류 압력탭을 막을수록 유량 값이 상대적으로 작은 질량 유량값을 나타내었다. Fig. 8(a)와 (b)는 유량계 상류 압력탭의 막힌 조건에 따른 유량 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 Fig. 6의 실험 조건 중 정상조건(Fig. 6(a)), 상류 압력탭 상하 3개를 막은 조건(Fig. 6(b)), 상하 6개를 막은 조건(Fig. 6(c))에 대해 H 값 구간별로 나누어 확대하여 유량계의 질량 유량 특성을 나타낸 것으로 압력탭의 막힘 조건에 따라서 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

기체의 유량 측정시 유량계에 의한 압력 손실을 크게 줄일 수 있는 삼각 분리 막대형 차압 유량계를 제작하였다. 냉간 조건에서 삼각 분리 막대형 차압 유량계 상류 및 후류에서의 압력을 감지하기 위한 압력탭의 크기 및 개수 변화에 따른 유량 특성을 측정하였으며, 오랜 시간 유량계 사용 시 유량계의 상류 압력탭이 막힐 것을 시뮬레이션하기 위해 상류 압력탭을 여러 조합으로 막아가면서 유량 특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 삼각 분리 막대형 차압 유량계와 유사하게 무차원 파라미터 H에 대해 질량 유량이 선형 회귀 곡선의 상관 계수는 0.999로 거의 완벽한 선형적 특성을 나타내었다.

2) 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 압력탭의 크기가 일정하고 단지 압력탭의 숫자를 다르게 하였을 때에는 유량 특성은 거의 차이가 없었으나 압력탭의 수는 동일하게 하고 압력탭의 크기를 달리한 경우에는 유량 특성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 유량계 후류부 압력탭의 크기에 따라 동압이 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 삼각 분리 막대형 차압 유량계의 상류부 압력탭을 막았을 때 유량 특성이 영향을 받았다. 동일한 질량 유량에 대해 대응하는 H값이 상류부 압력탭을 막은 조건에서 더 큰 값을 나타내었다.

참고문헌

1) 한국표준협회, 조임 기구에 의한 유량 측정 방법, KSA0612, 1997.
2) K. Tsuchiya, S. Ogata and M. Ueta, “Karman vortex flow meter”, Bull. JSME 58, pp. 573～582, 1970.
3) C.O. Popiel, J.T. Turner and D.I. Robinson, “Evolution of an improved vortex generator”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 4, pp. 249～259, 1993.
4) Rosemount Product Data Sheet, Diamond II-Annubar®

bar Primary Flow Element, Dieterich, A Subsidiary of Rosemount Inc., 1998.

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

6) K.I. Kim, W.Y. Yoo and C.H. Lee, “A Study on Flow Rate Characteristics of a Triangular Separate Bar Differential Pressure Flow Meter according to the Variation of Gas Flow Temperature”, KSMTE, Vol. 17, No. 4, pp. 89～94, 2008.

7) 이충훈, 김광일, 김민창, 박동선, “디젤엔진 배기가스 유량 측정용 삼각 분리 막대형 차압유량계 유량 특성 연구”, 한국철도학회 논문집, 제10권, 제5호, pp. 563～568, 2007.

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

9) Systec Control, “Precision and Process Viability of the deltaflow Dynamic Pressure Probe”, Research report, http://systec-controls.de/files/deltaflow_research_report_e.pdf., 2008.