

Annubar[®]형 차압유량계 형상 개선에 따른 유량 특성 연구

오대산*, 이충훈**

(논문접수일 2009. 10. 19, 심사완료일 2010. 2. 2)

A Study on Flow Rate Characteristics of a Annubar[®] Type Differential Pressure Flow Meter with a Shape Improvement

Daesan Oh*, Choonghoon Lee**

Abstract

The inner structure of the triangular separate bar (TSB) was improved to enhance the productivity of the TSB flow meter by simplifying the machining process for making the flow meter. The cross section of upstream and downstream pressure chamber in the TSB was changed from triangle to circle, which make it possible to substitute the wire cutting by drilling in the process of machining the pressure chamber. The flow rate characteristics of the flow meters was calibrated with a laminar flow meter. Six kinds of flow meters whose diameters of pressure tap for measuring pressure of both upstream and downstream pressure chamber were different one another were made. The effects of the pressure tap diameter on the flow rate characteristics of the TSB flow meter was little. The mass flow rate characteristics of the flow meters with increasing a non-dimensional parameter which includes the gas temperature, exhaust gas pressure and differential pressure at the flow meters and atmospheric pressure shows nearly linear relationship with a correlation coefficient of $R=0.998$.

Key Words : Flow rate(유량), Pressure tap diameter(압력탭 직경), Differential flow meter(차압유량계), Triangular separate bar (삼각분리막대), H parameter(H 파라미터)

1. 서론

유체가 흐르는 단면에 프로브를 넣어 유량 또는 유속을

측정하는데 있어서 문제점은 측정 프로브가 유동에 영향을 미친다는 것이다. 유체의 유속 또는 유량을 측정하는데 있어서 가장 많이 사용되는 프로브 중의 하나가 피토펜^(1,2)이다.

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

Annubar[®] 형 차압유량계는 유량이 흐르는 관내 단면에 걸쳐 평균 동압을 측정하여 유량을 측정하는 피토관 형 (averaging pitot tube) 유량계^(3,4)의 일종으로 최근 다양한 형상⁽⁵⁾의 유량계가 개발되고 있다. Annubar[®] 형 차압 유량계는 상류부에는 유동이 흐르는 파이프 단면에서의 평균 동압(dynamic pressure)과 평균 정압(static pressure)을 합친 평균 전압(total pressure)이 작용하고 후류부에는 평균 정압이 작용하며 그 차압인 평균 동압을 이용하여 유량을 측정하는 장치이다. Annubar[®] 형 유량계 설치로 인한 유동 저항이 크지 않으면서 대용량의 유량을 측정할 수 있고 형상이 단순하여 제작이 쉬운 것이 이러한 유량계의 장점이다.

Annubar[®] 형 차압 유량계의 형상 개선과 관련된 연구는 Britton 과 Mesnard⁽⁶⁾에 의해 이루어졌으며 주로 측정 프로브의 외형에 따른 유량 특성을 연구 하였다. Britton 과 Mesnard⁽⁶⁾ 가 연구에 사용한 유량계 단면 외형은 원형, 다이아몬드형, 육각형(hexagon) 등이며 유량계 계수의 변동성을 주로 측정하였으며 원형보다는 다이아몬드형 또는 육각형일 때 변동폭이 작게 나타났다. Cutler⁽⁷⁾는 유동이 흐르는 단면의 평균 동압을 측정하기 위해 뚫은 압력탭의 수가 유량 특성에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 압력탭을 1개만 가공하여도 큰 차이가 없다는 연구 결과를 발표하였다. Annubar[®] 형 유량계의 최근 국내의 연구는 Kim 등⁽⁸⁾과 Lee 등⁽⁹⁾에 의해서 이루어졌으며 주로 다이아몬드 모양의 외형을 가진 유량계를 사용하여 외부 형상과 기체의 온도 변화가 유량 특성에 미치는 영향에 대해서 연구를 수행하였다.

전술한 Annubar[®] 형 유량계와 관련된 연구는 주로 유량계 단면의 외부 형상과 기체 물성 변화에 따른 유량 특성과 관련된 연구로, Annubar[®] 형 유량계의 대량 생산시 생산성 향상과 관련하여 형상 개선과 관련된 기존의 연구는 거의 없는 형편이다. 본 연구에서는 생산성을 고려한 유량계 내부 형상 개선을 위해 Annubar[®] 형 유량계의 상류압과 후류압이 작용하는 유량계 압력 작용실 단면 형상을 와이어 컷 가공이 필요한 기존의 삼각형에서 드릴에 의한 원형으로 가공하였다. 기존의 유량계 내부 단면 형상은 일반적으로 삼각형 형태를 하고 있으며 이러한 형상은 제품을 제작하는데 많은 시간과 비용이 요구된다. 내부 형상 변경은 유량계 내부의 압력실 형상 변경을 의미하기 때문에 유량계 내부 형상 변경에 따라 압력탭에서의 압력 특성이 변하는지를 연구하였다. 총 6종류 형상 개선 Annubar[®] 형 유량계를 제작하였다. 형상 개선 Annubar[®] 형 유량계에 대해 유량 특성을 평가하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

기존의 삼각분리막대형 유량계(TSB) 내부 단면 형상이 두 개의 삼각형 모양으로 분리된 모양을 하고 있다^(1,8). 반면에 본 연구에서 사용한 Annubar[®] 형 차압 유량계는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 유량계 내부 단면 형상이 가공이 쉽게 설계되어 있음을 알 수 있다. 외형은 기존의 것과 유사하게 다이아몬드 형상을 하고 있으나 내부 단면의 형상을 보면 상류압 및 후류압 각각의 압력탭에 연결된 압력이 작용하는 공간 (pressure chamber)이 원형의 형상을 하고 있다. 원형이기 때문에 압력이 작용하는 공간을 드릴 가공으로 손쉽게 만들 수 있다. 삼각 모양을 하고 있는 기존의 유량계와 비교하여 형상 개선 유량계의 생산이 보다 더 용이하다. 측정 대상 유체가 흐르는 관 내에 설치된 유량계의 상류에 작용하는 전압과 후류부에 작용하는 후류압을 측정하기 위해 각각의 압력탭의 직경을 다양한 조합으로 가공하여 Table 1에 나타난 것과 같이 총 6 종류의 유량계를 제작하였다. 유량계 번호

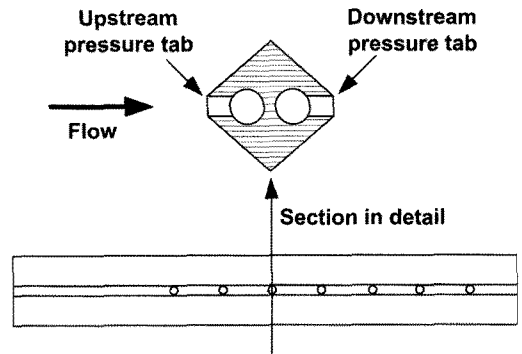


Fig. 1 The cross section of the separate triangular bar type flow meter

Table 1 Upstream and downstream pressure tap diameter of the shape improved flow meter

No.	Upstream pressure tap diameter (mm)	Downstream pressure tap diameter (mm)
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	1	2
5	1	3
6	2	3

1, 2, 3은 상류 및 후류부 압력탭의 직경이 동일하고 각각 1mm, 2mm, 3mm이다. 유량계 번호 4, 5, 6은 상류부 압력 탭 및 후류부 압력탭의 크기를 다르게 하였을 때의 유량 특성을 파악하기 제작하였으며 각각의 상류부-후류부 압력탭의 크기 조합은 (1,2)mm, (1,3)mm, (2,3)mm이다. 압력탭 가공 구멍의 수는 6개이다.

유량계를 검정하기 위해 Fig. 2에 나타난 것과 같이 실험 장치를 구성하였다. 공기 정화를 위한 에어클리너, 유량 검정을 위한 기준 유량계인 Meriam사의 층류유량계를 사용하였으며 0.72%의 정확도를 가지고 있다. 또한 공기를 흡입할 수 있도록 진공 압력 형성을 위한 3상 220V 송풍기, 송풍기 회전 속도 제어를 위한 인버터, 검정 대상인 Annubar[®]형 차압 유량계, 압력 측정을 위한 경사압력계, U-자관, 온도 측정 센서(J-형 열전대)와 써모미터 등으로 구성되어 있다. 송풍기를 회전시키면 공기는 에어클리너, 송풍기, 층류유량계, Annubar[®]형 차압 유량계를 차례로 지나 대기 중으로 방출된다.

송풍기의 인버터 속도 조절 노브를 이용하여 일정한 목표 유량을 설정하면 정상 상태에 도달하면 층류유량계의 라미나엘레먼트(laminar element) 전후의 차압 및 입구압력, 흡입 공기 온도, Annubar[®]형 차압 유량계에서의 상류압력, 후류부 압력, 정압, 공기 온도 등을 측정한다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 Annubar[®]형 차압 유량계와 층류 유량계를 직렬로 연결한 조건이므로 송풍기로 공기를 공급하면 층류 유량계의 유량값은 이미 검정성적서로부터 계산하여 낼 수 있고 Annubar[®]형 차압 유량계의 유량값은 층류 유량계의 유량값과 동일하게 된다. 즉, 층류유량계에서 측정한 유량값은 검정대상 Annubar[®]형 차압 유량계의 유량으로 볼 수

있다. 층류유량계는 체적유량을 측정하며 측정된 체적유량을 유체온도, 유체압력, 대기압을 보정하여 질량유량을 계산하였다. 다시 송풍기 인버터의 노브를 조절하여 풍량을 조절 한 후 동일한 과정을 반복하여 검정 대상 Annubar[®]형 차압 유량계의 유량을 검정하였다. Table 1에 나타난 유량계를 차례로 교체하여 검정하였다.

3. 결과 및 검토

Annubar[®]형 차압 유량계의 유량 특성을 나타내기 위해 식 (1)에 나타난 것과 같은 파라미터로 H를 도입하였다.⁽¹⁰⁾ H 값은 Annubar[®]형 차압 유량계에서 측정한 전압과 동압의 차압, 기체 온도, 배기압 등을 조합한 파라미터로 온도 및 압력에 변화하는 측정 대상 유체의 밀도값을 반영한다고 볼 수 있다. h_w 는 유량계에서의 평균 전압과 평균 정압의 차이를 나타내는 수두압(hydraulic head pressure)이다. 오리피스, 플로우 노즐, 벤투리 튜브 등과 같은 일반적인 차압 유량계는 h_w 의 제곱근에 비례하는 특성을 가지고 있으며⁽¹¹⁾ Annubar[®]형 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.

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

여기서,

P_{exh} : 배압(kPa)

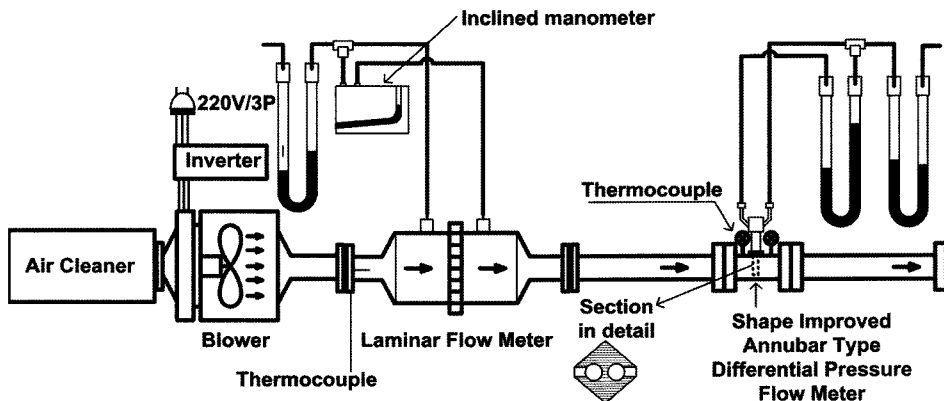


Fig. 2 Experimental setup for calibrating the shaped improved Annubar[®] type differential flow meter

T_{exh} : 가스 온도(K)
 γ : 293.15K, 101.3kPa 에서의 공기 밀도
 h_w : 유량계 차압(kPa) 이다.

Fig. 3(a), Fig. 3(b), Fig. 3(c)는 각각 유량계 번호 1, 2, 3 (Table 1 참조)에 대한 검정 실험을 실시한 결과 중 실험 장치의 여러 위치에서의 압력 측정 결과를 나타낸 것이다. 유

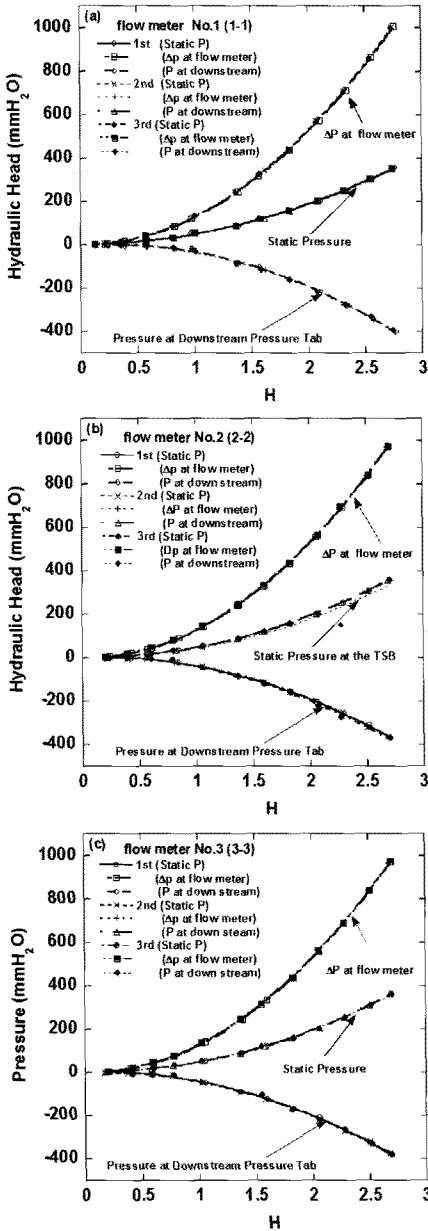


Fig. 3 Hydraulic head with increasing non-dimensional parameter H for flow meter (a) No. 1, (b) No. 2 and (c) No. 3

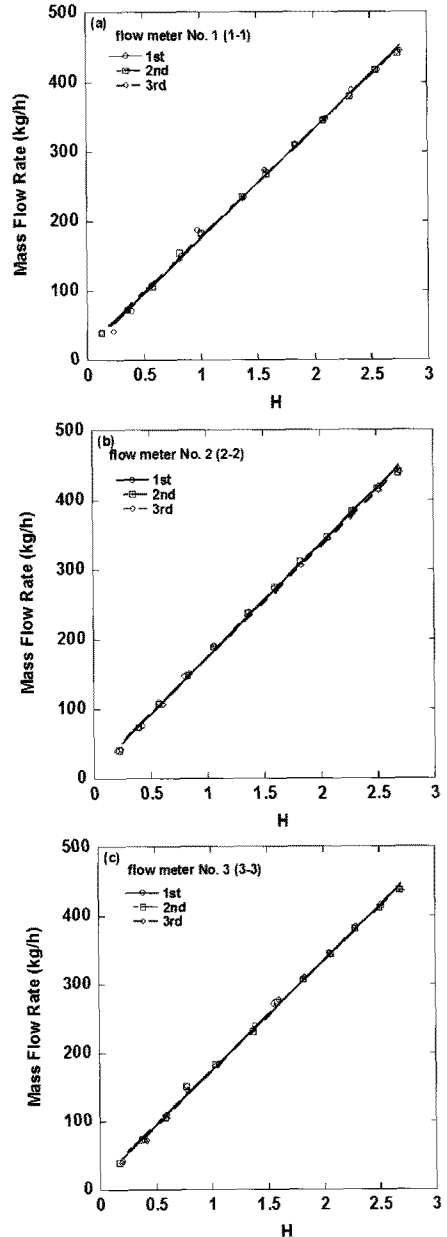


Fig. 4 Mass flow rate with increasing non-dimensional parameter H for flow meter (a) No. 1, (b) No. 2 and (c) No. 3

량계 1, 2, 3 각각에 대해서 동일한 조건으로 3회에 걸쳐서 반복하여 실험한 결과를 나타낸 것으로 거의 완전한 재현성(repeatability)를 보여 주고 있음을 알 수 있다. 식 (1)에서 정의한 H 파라미터 변화에 대해 유량계의 상류압 압력탭에서 측정된 평균 전압과 후류 압력탭에서 측정된 평균 후류압 간의 차압(Δp), 유량계가 장착된 파이프 벽면에서의 압력 즉 파이프 내에서의 정압(static pressure), 유량계 후류부 압력 탭(Fig. 1 참조)에서의 압력을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 송풍기로부터 공급되는 유량이 증가할수록 즉, H값이 증가할수록 유량계에서의 차압(Δp)은 증가하는 특성을 보이고 있으며 이는 유량 증가에 따라 유속이 증가하면서 유체 동압의 크기 점점 증가하기 때문이다. 유체가 흐르는 파이프 벽면에서의 압력(유체 정압)도 유량 증가에 따라서 증가하였는데 이는 유체 밀도 증가에 기인한다. 유량계 후류부 압력 탭에서 측정된 압력은 약간의 진공압을 보이고 있는데 이는 유량계로 인한 유동 박리에 의해 유체의 정압이 완전히 회복되지 못하였기 때문이다. 또한 H값이 증가함에 따라서 유량계 후류부 진공압은 점점 증가하는 특성을 보이고 있다. 유량계 1, 2, 3의 각각의 측정 결과가 매우 동일한 특성을 보이고 있는데 이는 유량계의 특성이 압력탭의 크기 변화에 대해 크게 영향을 받지 않음을 의미한다.

Fig. 4(a), Fig. 4(b), Fig. 4(c) 는 각각 유량계 번호 1, 2, 3 에 대해 유량 특성 곡선을 구하기 위한 검정 실험 결과를 나타낸 것이다. 유량계에서의 질량 유량을 파라미터 H 값을 증가시켰을 때의 실험 결과를 나타낸 것이다. 3번 반복 측정하여 측정의 정밀도(precision) 평가하였으며 그림에 나타낸

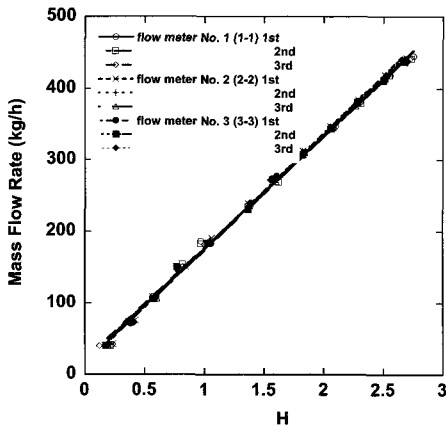


Fig. 5 Mass flow rate with increasing non-dimensional parameter H for flow meters No. 1, 2, 3

결과에서 알 수 있듯이 비교적 높은 정밀도를 보였다. 유량계의 질량유량과 H는 거의 선형적 특성을 보이고 있으며 선

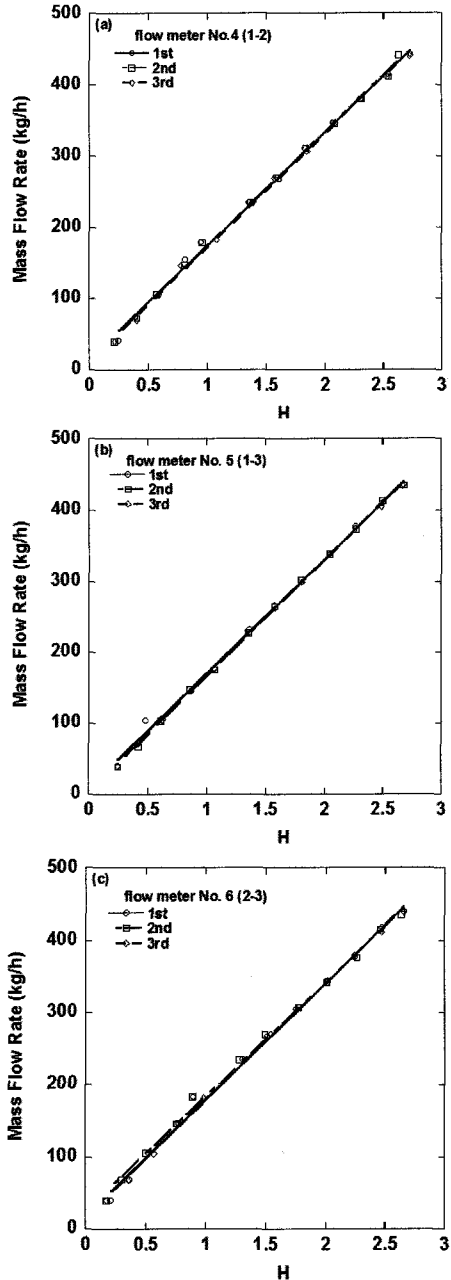


Fig. 6 Mass flow rate with increasing non-dimensional parameter H for flow meter (a) No. 4, (b) No. 5 and (c) No. 6

형상 관 계수는 0.998 이다. 형상이 개선된 유량계의 이러한 유량 특성은 기존의 Annubar[®] 형 차압 유량계의 유량 특성⁽⁸⁾ 과 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다. 따라서 생산이 용이하고 생산비용을 대폭 절감할 수 있는 형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계가 생산성 측면을 고려하면 매우 우수한 형상이라고 사료된다.

Fig. 5는 Fig. 4(a), Fig. 4(b), Fig. 4(c)의 결과를 하나의 그래프 위에 나타낸 것으로 형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계의 유량 특성이 유량계의 상하류 압력탭의 크기에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6(a), Fig. 6(b), Fig. 6(c)는 각각 유량계 번호 4, 5, 6 (Table 1 참조)에 대해 대해 유량 특성 곡선을 구하기 위한 검정 실험 결과를 나타낸 것이다. 1, 2, 3 번 유량계의 경우 상류 및 후류 압력 탭의 직경이 동일하게 가공되었으나, 4, 5, 6 번 유량계는 상류 및 후류부 압력탭의 직경을 다르게 가공하였을 때의 유량 특성을 평가하였다. 유량계 4, 5, 6번의 각각의 유량계에 대해서 실험에서 구한 질량 유량을 파라미터 H 값을 증가시켰을 때의 실험 결과를 나타낸 것으로 동일 유량계에 대해 3회 걸쳐서 반복 측정하였다. 4(a), Fig. 4(b), Fig. 4(c)의 결과와 유사한 유량 특성을 보이고 있다

Fig. 7은 Table 1의 1번~6번 유량계 모두 6개의 유량 검정 결과를 하나의 그래프에 나타낸 것이다. 압력탭의 크기 조합에 의한 유량 특성이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 즉, 형상이 개선된 유량계의 유량 특성이 압력 탭 사이즈 조합에 거의 영향을 받지 않음을 의미한다.

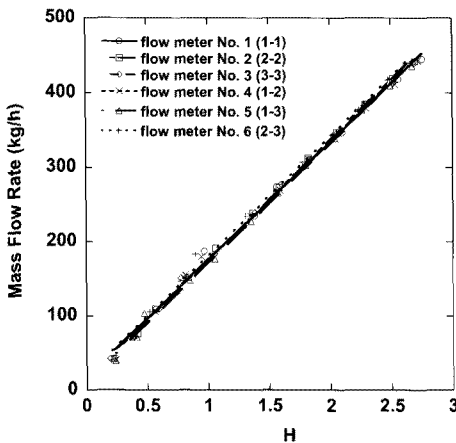


Fig. 7 Mass flow rate with increasing non-dimensional parameter H for flow meters No. 1, 2, 3, 4, 5, 6

4. 결론

형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계를 6종류 제작하여 유량검정 시스템을 구성하여 유량값을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계의 유량값이 파라미터 H값이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 유량계 내부 단면 형상 개선함으로써 유량계 생산성 향상 및 제작 시간 단축이 기대된다.
- (2) 형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계의 유량과 H 값 관계식을 나타내는 선형 회귀 곡선의 상관 계수는 0.998 로 나타났다 .
- (3) 형상이 개선된 Annubar[®] 형 차압 유량계의 유량특성과 H값 간의 관계식은 유량계의 상류 및 후류 압력탭의 크기에 거의 영향을 받지 않았다.

참고 문헌

- (1) Baker, R. C., 2000, *Flow Measurement Handbook*, Cambridge University Press, New York, pp. 427-433.
- (2) Travoullis, S., 2005, *Measurement in Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, New York, pp. 213-214.
- (3) Rosemount Product Data Sheet, 1998, *Diamond II-Annubar[®] bar Primary Flow Element*, Dieterich, A Subsidiary of Rosemount Inc.
- (4) 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.
- (5) Baker, R. C., 2000, *Flow Measurement Handbook*, Cambridge University Press, New York, pp. 170-171.
- (6) Britton, C. and Mesnard, D., 1982, "A Performance Survey Round and Diamond-shaped Averaging Pitot Type Primaries," *Meas. Control*, Vol. 15, pp. 341-350.
- (7) Cutler, G. D., 1982, "Averaging Pitot-type Primaries," *Meas. Control*, Vol. 15, pp. 436-437.
- (8) Kim, K. I., Yoo, W. Y., and Lee, C. H., 2008, "A Study on Flow Rate Characteristics of a Triangular Separate Bar Differential Pressure Flow Meter according to the Variation of Gas Flow Temperature," *Transactions*

of the Korean Society of Machine Tool Engineers,
Vol. 17, No. 4, pp. 89~94.

- (9) 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.

- (10) 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: Nozzle and Venturi Nozzle*, International Organization for Standardization, Geneva.