

〈논 문〉

Fluidic 유량계의 기하학적 변수가 유동률에 미치는 영향

박경암* · 윤기영** · 유성연***

(1997년 5월 6일 접수)

Effects of Geometric Parameters of Fluidic Flow Meter on Flow Rate

Kyung-Am Park, Kee-Young Yoon and Seong-Yeon Yoo

Key Words : Fluidic(유동논리소자), Flow Meter(유량계), Oscillation(진동), Frequency(주파수), Jet(제트), Oscillation Chamber(진동실)

Abstract

The fluidic flow meter detects the gas flow rate based on the principle of fluidic oscillation instead of the conventional displacement method. It has many merits: wide rangeability, no moving mechanical parts and calibration insensitive to physical properties of fluids. The width of nozzle, size of oscillation chamber, size of target, width of outlet are tested to obtain the effects of jet oscillation on the fluidic flow meter. As the width of nozzle is too wide compared with the size of target, jet oscillation is unstable. The oscillation frequency decreases as the distance between the nozzle and target increases and also as the distance between target and outlet contraction increases. Two different vortexes exist in the front and the rear regions of the target, and they affect the oscillation frequency. The outlet contraction is very important, because the feedback flow is generated by the blocking of the flow. As the width of outlet increases, the jet oscillation frequency decreases. The linearity of this tested flow meter is quite good.

기 호 설 명

- B : 진동실의 출구폭(mm)
- C : 사각막대의 폭(mm)
- d : 노즐과 사각막대 사이의 거리(mm)
- f : 제트의 진동 주파수(Hz)
- L : 진동실의 길이(mm)
- Re : 레이놀즈 수, $Re = (V \cdot w) / \nu$
- St : 스트로울 수, $St = (w \cdot f) / V$
- V : 노즐에서의 평균속도(m/s)
- w : 노즐 폭(mm)
- ν : 동점성계수(m^2/s)

1. 서 론

천연가스는 공해가 적고 수송이 용이하기 때문에 세계적으로 그 사용량이 급증하고 있으며, 우리 나라에서도 정부가 환경정책의 하나로 대형 업무용 빌딩이나 신축 아파트에서 천연가스의 사용을 의무화 권장화 하고 있어 천연가스의 수요는 더 늘어날 전망이다. 이에 따라 천연가스의 유량을 측정하기 위한 가스유량계의 수요가 많아질 것으로 예상된다. 용량이 큰 경우에는 가스 터빈 유량계를 사용하고 있지만 대형 막식 유량계도 많이 사용되고 있고, 반도체 제조 공정에서는 열량형 유량계가 많이 사용되고 있는 등 여러 종류의 유량계들이 산업체에서 사용되고 있다. 현재 가정용 가스 유량계로

*회원, 한국표준과학연구원 유체유동그룹

**회원, 대전·충남지방 중소기업청 시험검사과

***회원, 충남대학교 기계설계공학과

많이 사용되고 있는 막식 가스 유량계는 과압에 의한 손상, 큰 부피, 마모, 막(membrane) 부분의 짧은 수명, 큰 측정 오차등 많은 단점을 가지고 있다. 따라서 소비자에게 공급되는 천연가스의 유동율 측정 정확도와 신뢰도는 천연가스 산업에서 필수적인 요소이며, 이를 위해 가스 유동율의 측정 정확도와 신뢰도의 향상을 위한 연구와 노력이 세계적으로 진행되고 있다.

가스 유량계의 한 종류로 유체제트의 진동을 이용하는 유량계에 관한 연구가 일본, 미국 등의 천연가스 회사와 학계에서 많은 연구가 진행되고 있다. 제트는 유동 중에 제트와 주위사이의 압력차와 와류에 의해서 주위의 유체를 흡입한다. 제트가 벽면을 지날 때 제트에 의한 흡입으로 벽과 제트사이의 압력이 떨어져 제트가 벽면에 부착하는 코안다 현상(coanda effect)이 발생한다. 이 현상을 응용한 제트의 논리기구(fluidic)를 이용하여 유동율을 측정하는 것이 fluidic 유량계이다.

이 fluidic 유량계에서는 제트의 일부가 피드백(feedback)되어 노즐에서 분출되는 제트의 유동방향을 바꾸어서 제트는 진동하게 된다. 이때 제트의 진동 주파수는 노즐을 흐르는 유동율과 비례하는데 이것을 이용하여 유동율을 측정할 수 있다. 따라서 다른 종류의 유량계와 비교하여 긴 수명, 재 교정의 불필요, 간단한 구조, 값싼 단가 등의 장점을 가지고 있다.

Williams⁽¹⁾는 Australian type의 fluidic 유량계의 실험결과 유체의 온도는 제트의 진동특성에 영향을 주지 않으며, 제트를 진동시키는 최소유량을 달성하기 위해서는 피드백 루프에서 유동저항을 줄여야 한다고 하였다. Mansy 등에⁽²⁾ 의해 개발된 TVP(trapped vortex pair) 유량계는 와류의 주기적인 성장과 소멸에 따른 제트의 진동으로 유동율을 측정하는 유량계로서, 그들은 이 유량계에서 작동유체로서 물과 공기를 사용하여 유체제트의 진동 주파수는 유체의 밀도와 점성에 영향을 받지 않는다는 것을 밝혔다. Huang 등에⁽³⁾ 유체제트와 U자형상의 챔버(chamber)안에서 제한되는 두 와류의 상호작용에 기인하여 자기유지진동을 하는 switch fluidic oscillator를 개발하여 진동기(oscillator) 특성곡선의 선형성을 개선하기 위해 와류의 거동을 제어할 수 있는 챔버 형상을 연구하였다. Honda 등에⁽⁴⁾ 유체제트와 bluff body로 구성된 단순한 형태의 유량계를 개발하여 제트의 진동 메커니즘을

구명하였는데 진동기의 출구 벽은 제트의 진동을 안정시키고 유량계로서의 성능을 개선시키는데 큰 역할을 한다고 하였다. Sakai 등에⁽⁵⁾ $8.3 \times 10^{-7} \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 와 같은 미소유량에서는 IC flow 센서를 사용하고 $4.2 \times 10^{-5} \sim 8.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 에서는 제트의 진동주파수를 이용하여 유동율을 측정하는 fluidic 유량계를 개발하였다. Okabayashi 등에⁽⁶⁾ 스트레이트너(flow straightener)의 사용으로 노즐에서 2차원 제트를 만드는 것이 넓은 범위의 유동율에서 안정된 제트의 진동을 유지하여 fluidic 유량계의 측정 정확도를 향상시키는 중요한 조건이라고 밝혔다. 이와 같이 여러 가지 fluidic 유량계 형상에 대한 연구결과가 많이 발표되었으나 진동실 내부의 기하학적인 변수에 관한 체계적인 연구와 최적화에 관한 연구결과와 발표는 없었다.

따라서 fluidic 유량계의 기하학적인 변수가 유동율과 진동 주파수의 관계에 미치는 영향을 분석하고 유동율과 진동 주파수의 선형관계가 가장 우수한 기하학적 변수를 구하는 것이 본 논문의 연구목적이다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구를 위해 설계·제작한 유동논리 소자의 실험장치는 Fig. 1과 같으며 상세도는 Fig. 2이다. 유동율 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 범위에서는 압축기에서 토출되는 공기를 사용하였으며, 유동율 $0.005 \sim 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ 범위에서는 주파수 제어장치와 유동율 조절 밸브가 부착된 송풍기(15 Hp)로 유동율을 변화시키면서 실험하였다. 유동율 조절밸브는 송풍기의 토출량 일부를 외기로 유출시켜 시험관으로 들어가는 유동율을 조절한다. 유동율은 교정된 면적식 유량계(rotameter) 2개로 측정하였으며, 각각의 측정 범위는 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 와 $0.005 \sim 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 면적식 유량계의 측정오차는 $\pm 0.5\%$ 이며, 유동논리 소자에서 제트의 평균 유속은 면적식 유량계에서 측정한 유동율과 노즐 단면적으로부터 계산하였다. 면적식 유량계의 출구 압력은 차압계(최대 측정 압력 12.5 psi)로 측정하였으며, 출구 온도는 유리제 온도계로 측정하였다.

노즐에서 제트가 3차원이면 제트의 진동이 이상적이지 못하므로⁽⁶⁾ 2차원 제트를 얻기 위해 높이 100 mm, 폭 160 mm, 길이 1000 mm인 사각 관을 면적식 유량계 후단에 연결하고, Fig. 2와 같이 이

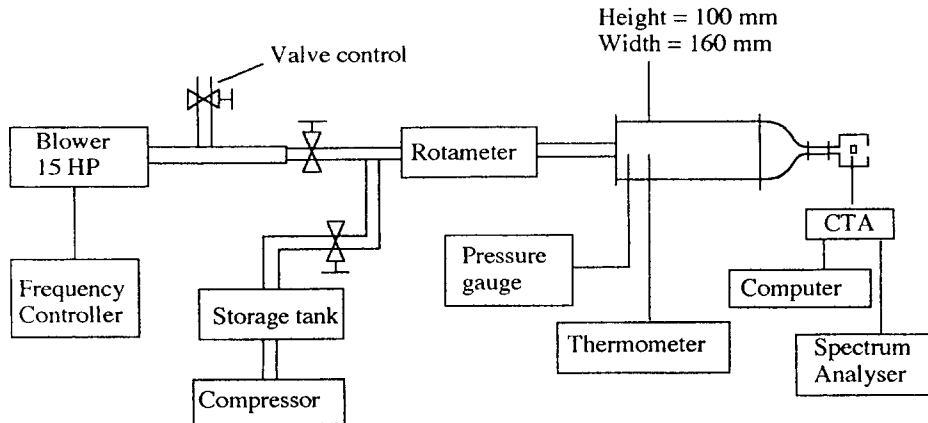


Fig. 1 Schematic diagram of test rig

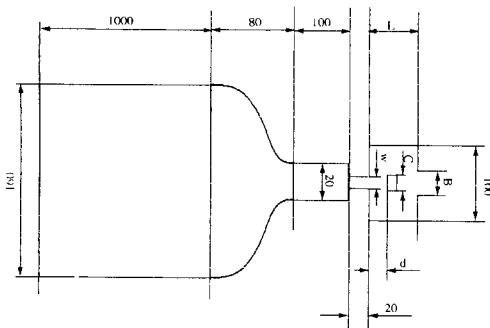


Fig. 2 Oscillation chamber

사각관 후단에 Morel⁽⁷⁾이 제안한 축소부 설계기술을 이용하여 축소면적비가 8이고, 입구에서의 최대 압력계수와 출구에서의 최대 압력계수가 각각 0.3과 0.041로 설계 제작한 축소부를 연결하였으며, 높이 100 mm, 폭 20 mm, 길이 100 mm인 사각관을 노즐 상류에 설치하였다.

노즐에서 분출된 제트는 처음에는 진동실내의 사각막대에 부딪혀 좌 우 어느 한쪽 벽으로 흐르는데 이 제트의 일부가 진동실의 출구벽에 부딪쳐 퍼드백되어 노즐에서 분출되는 제트의 유동 방향을 반대쪽 벽으로 방향을 바꾸어 준다. 이 과정이 반복되면서 제트는 주기적인 진동을 하게 된다. 이 제트의 진동 주파수는 사각막대에서 진동실 벽 쪽으로 약 11 mm 떨어진 지점에서 열선 유속계 (CTA, Dantec 56C)의 I형 센서로 감지하여 그 신호를 주파수 분석기(spectrum analyser)로 측정하였다. Fig. 3은 열선 유속계로 감지한 신호를 주파수 분석기로 출력한 전형적인 결과이다.

진동실의 기하학적 매개변수가 제트의 진동에 미치는 영향을 실험하기 위해 진동실의 기하학적 매개변수를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

노즐 폭(w), 사각막대(target)의 폭(C), 노즐 출구와 사각막대 사이의 거리(d), 사각막대 후방의 출구 폭(B)의 크기, 진동실의 길이(L)가 제트의 진동 주파수에 미치는 영향을 고찰하였다. 5개의 기하학적 변수중 4개를 고정하고 1개를 변화시켜가면서 최적의 조건을 찾고, 그 조건에서 다른 변수를 하나씩 변화시켜가면서 결과를 고찰하였다. Fig. 4는 사각막대의 폭(C) 10 mm, 두께 6 mm이고 진동실은 $L=80$ mm, $d=30$ mm, $B=30$ mm로 고정시키고, 노즐의 폭(w)은 2, 5, 10 mm로 변화시켰을 때의 결과이다. 보다 넓은 범위에서 실험을 수행하였으나 제트를 진동시키는 사각막대의 폭 10 mm보다 노즐의 폭이 넓은 경우에는 제트의 진동 주파수가 불안정하여 데이터를 얻을 수 없었다. 유동율과 제트의 진동 주파수는 비례 관계를 갖고 있음을 잘 보여주고 있으며 유동율에 따른 제트의 진동 주파수는 노즐 폭이 커지면서 작아지는 것을 알 수 있다. 노즐 폭이 작을 때 제트의 진동 주파수가 크므로 유량계로 사용할 때 분해능이 커진다. Fig. 4의 결과를 노즐 폭(w)과 노즐에서의 평균속도(V)를 특성길이와 특성속도로 각각 사용한 레이놀즈 수($Re=V \cdot w/\nu$)와 제트의 진동 주파수(f)를 무차원화시킨 스트로울 수($St=w \cdot f/V$)의 관계로

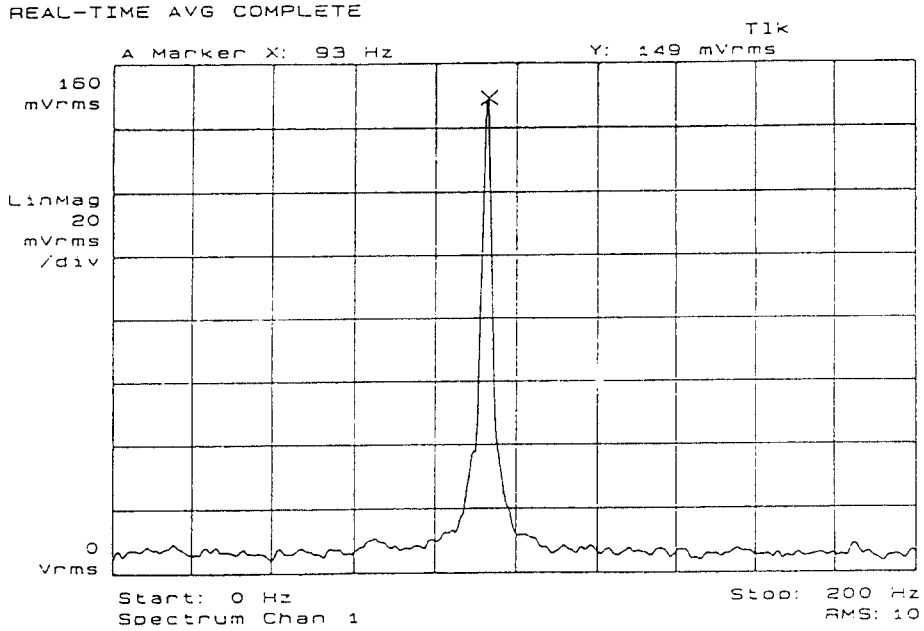


Fig. 3 Typical output of spectrum analyser

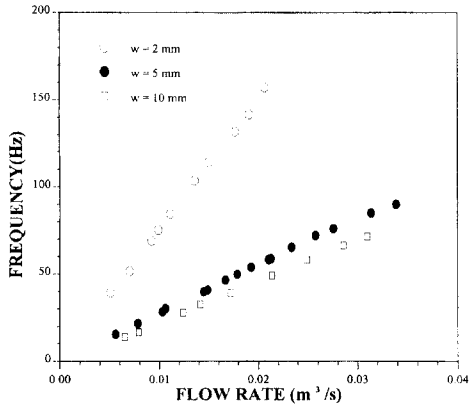


Fig. 4 Dependence of oscillation frequency on flow rate for various nozzle width

나타낸것이 Fig. 5이다. 노즐 폭이 10 mm일 때 스트로울 수가 가장 크나 선형성은 좋지 않다. 노즐 폭이 2 mm인 경우에는 노즐출구에서 유체의 운동량이 증가하여 사각막대가 받는 힘이 너무 커지므로 사각막대를 유지하기가 힘들어 실험 영역이 좁다. 노즐 폭이 5 mm인 경우에 선형성이 가장 좋으므로 다른 기하학적 인자의 영향을 실험할 때 노즐 폭은 5 mm로 고정시켜 실험하였다.

Fig. 6은 사각막대의 폭(C)을 5, 10 mm로 변화시키면서 얻은 결과이며, 이때 사각막대의 두께는

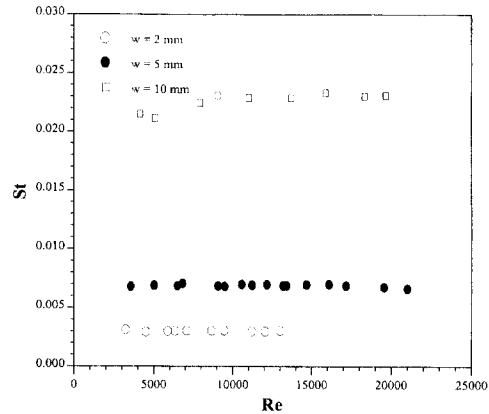


Fig. 5 Dependence of Strouhal number on Reynolds number for various nozzle width

6 mm이고, 노즐 폭은 5 mm, $L=95$ mm, $d=35$ mm, $B=30$ mm로 고정시키고 실험을 하였다. 사각막대의 폭이 2 mm인 경우도 실험을 하였으나 사각막대의 폭이 아주 작은 경우에는 제트를 진동시키지 못하여 데이터를 얻을 수 없었다. 사각막대의 폭이 5 mm인 경우에는 선형성이 좋지 않으며, 레이놀즈 수가 약 20000 이상에서는 제트의 진동이 불안정하여 데이터를 얻을 수 없었다. 사각막대의 폭이 10 mm일 때 스트로울 수가 가장 크며, 선형성도 좋다.

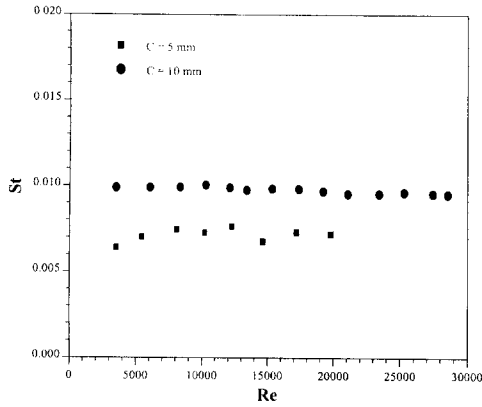
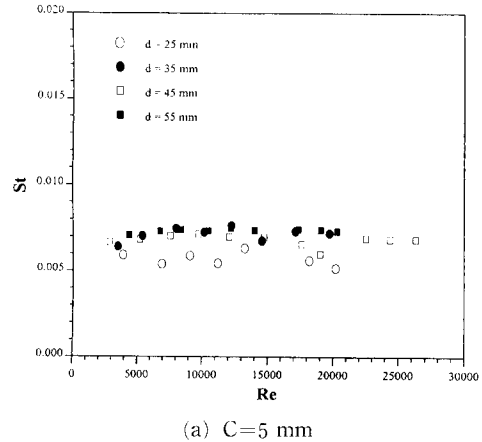


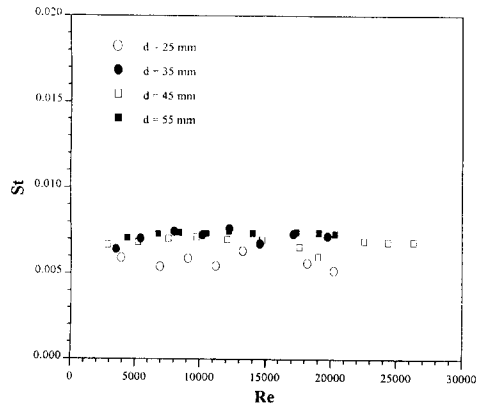
Fig. 6 Dependence of Strouhal number on Reynolds number for various target width

사각막대의 폭 5 mm와 10 mm일 때의 노즐과 사각막대 사이의 거리(d)에 관한 실험 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 사각막대의 두께는 6 mm이고 노즐 폭은 5 mm, $L=95$ mm, $B=30$ mm로 고정시켰으며, 노즐과 사각막대사이의 거리(d)를 5 mm에서 55 mm까지 10 mm씩 증가시키면서 실험을 하였다. Fig. 7(a)의 사각막대의 폭이 5 mm인 경우에는 $d=5$ mm, $d=15$ mm에서 제트의 진동이 발생하지 않았다. 선형성은 사각막대의 폭이 10 mm인 경우보다 좋지 않으며, 제트의 레이놀즈 수에 따른 진동 범위도 작다. 그러나 사각막대의 위치 변화에 따른 스트로울 수의 변화가 작은 것으로 보아 사각막대의 폭이 5 mm인 경우에는 노즐과 사각막대사이의 거리가 제트의 진동에 미치는 영향이 작은 것으로 보인다. Fig. 7(b)의 사각막대의 폭이 10 mm인 경우에도 $d=5$ mm, $d=15$ mm에서 제트의 진동이 발생하지 않았으며, 노즐과 사각막대 사이의 거리가 커지면서 스트로울 수가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 사각막대에 부딪혀 휘어진 제트에 의해 노즐과 사각막대 사이에서 와류가 형성되는데, 노즐과 사각막대 사이의 거리가 커지면서 이 와류를 형성하는데 보다 많은 시간이 걸려 제트의 진동수에 영향을 미치는 것으로 보인다. 선형성은 노즐과 사각막대사이의 거리(d)가 55 mm인 경우가 가장 좋은 결과를 보였다. 따라서 사각막대의 폭(C)과 노즐과 사각막대사이의 거리(d)는 각각 10 mm와 55 mm일 때가 최적으로 나타났다.

사각막대 후방의 출구 벽은 제트의 흐름 일부를 막아 역류시켜 제트의 방향을 바꾸어 주는 역할을



(a) C=5 mm



(b) C=10 mm

Fig. 7 Dependence of Strouhal number on Reynolds number for various distance between nozzle outlet and target

한다. 이 출구폭(B)을 10 mm에서 80 mm까지 10 mm씩 변화시키면서 얻은 실험결과를 Fig. 8에 보여주고 있다. 사각막대의 폭과 두께는 각각 10 mm, 6 mm이고, $w=5$ mm, $L=95$ mm, $d=55$ mm로 고정시키고 실험을 하였다. $B=10, 20$ mm인 경우에 스트로울 수는 비슷한 값을 가지며, $B=30, 40$ mm인 경우에도 같은 양상을 보인다. 출구 폭이 커지면서 스트로울 수는 작아지는 경향을 보이고 있으며 그 차는 거의 일정한 값을 가지고 있다. 레이놀즈 수에 따른 스트로울 수의 선형성은 레이놀즈 수 3000 지점까지는 좋지 않으나 그 이후에는 스트로울 수의 변화가 작다. 스트로울 수의 변화가 가장 작은 경우(선형성이 가장 좋은 경우)는 $B=30, 40$ mm일 때이다.

Fig. 9는 진동실의 길이를 변화시키면서 실험한

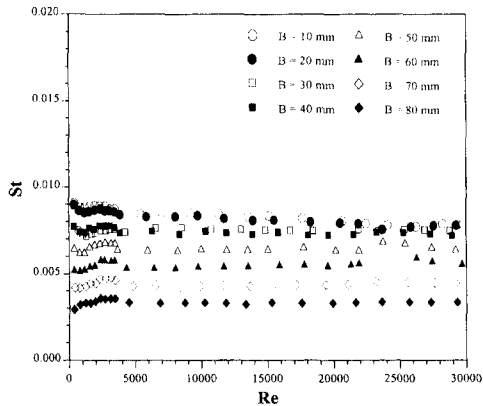


Fig. 8 Dependence of Strouhal number on Reynolds number for various outlet contraction of oscillation chamber

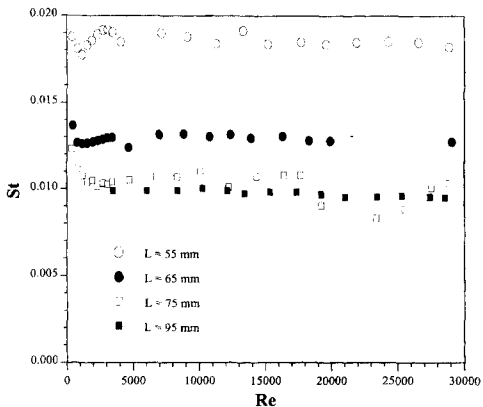


Fig. 9 Dependence of Strouhal number on Reynolds number for various length of oscillation chamber

결과로 사각막대의 폭과 두께는 각각 10 mm, 6 mm 이고, $w=5$ mm, $d=35$ mm, $B=30$ mm로 고정시키고, 진동실의 길이를 55, 65, 75, 95 mm로 변화시켰다. 앞의 결과에서 노즐과 사각막대사이의 거리(d)가 55 mm일 때 최적의 값을 보였지만, 보다 넓은 범위로 진동실의 길이를 변화시키기 위해서 $d=35$ mm로 고정시키고 실험을 하였다. 진동실의 길이가 커지면서 스트로울 수는 작아지는 경향을 보인다. 즉, 사각막대와 출구 사이의 길이가 증가함에 따라 제트의 진동 주파수는 감소하는 것으로서, 이것은 출구벽에 부딪친 제트에 의해 사각막대와 출구벽 사이에서 와류를 형성하게 되는데, 이 와류는 노즐과 사각막대 사이에서 형성된 와류가 커지면서 축소 이동하게 된다. 사각막대와 출구 사

이의 길이가 커지면서 이 영역에서 제트가 출구벽에 부딪쳐 형성된 와류를 축소 이동시키는데 보다 많은 시간이 걸리기 때문인 것으로 보인다. 선형성은 $L=95$ mm 일 때가 가장 좋다.

4. 결 론

(1) 노즐 폭이 제트를 진동시키는 사각막대의 폭보다 큰 경우에는 제트의 진동이 불안정하거나 제트를 진동시키지 못하므로 사각막대의 폭은 노즐폭보다 커야 한다.

(2) 노즐과 사각막대 사이의 거리(d)와 진동실의 길이(L)가 증가하면서 스트로울 수는 작아지는데 이것은 사각막대의 전면과 후면에서 형성되는 두 와류가 제트의 진동수에 영향을 미치기 때문이다.

(3) 진동실의 출구 폭이 증가함에 따라 스트로울 수는 감소하며 그 이유는 출구 벽의 길이가 감소하면서 출구벽에 부딪쳐 피드백되는 유동의 압력이 감소하여 제트의 진동 주파수를 감소시키기 때문이다.

(4) 기하학적 변수를 체계적으로 변화시키면서 유동율과 진동주파수의 선형관계가 우수한 최적의 형상을 실험적인 방법으로 찾아 특성이 우수한 유량계의 형상을 얻었다.

참고문헌

- (1) Willams, D. R., 1987, "Feasibility and Analysis of Fluidic-Type Devices in Gas Flow Measurements," *G. R. I Report*, GRI-87/0283
- (2) Mansy, H. and Willams, D. R., 1989, "Flow Meter Based on the Trapped Vortex Pair Fluidic Oscillator," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 60, No. 5, pp. 935~938
- (3) Huang, B., Hocquet, P. and Ligneul, P., 1992, "The Switch Fluidic Oscillator for Gas Metering," *International Gas Research Conference*, pp. 714~724
- (4) Honda, S. and Yamasaki, H., 1988, "Fluidic Oscillator Type Flowmeter Without Control Ports," *The 2nd International Symposium on Fluid-Control, Measurement, Mechanics-and Flow Visualization*, Sheffield, U. K.
- (5) Sakai, K., Okabayasi, M. and Yasuda, K., 1989,

- "The Fluidic Flowmeter-A Gas Flowmeter Based on Fluidic Dynamic Oscillation," *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 1, pp. 44~50
- (6) Okabayasi, M. and Yamasaki, H., 1991, "Feasibility Study of New Fluidic Gas Meters," *FLUCOME '91*, pp. 313~318
- (7) Morel, T., 1977, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions," *J. of Fluids Engineering*, Vol. 99, pp. 371~378.