

〈논 문〉

차압식 유량계에서 점탄성유체의 유출 및 손실계수

전우청* · 조병수* · 박복춘** · 백병준**

(1995년 10월 26일 접수)

Discharge and Loss Coefficients for Viscoelastic Fluids in Differential Pressure Flow Meters

W. C. Chun, B. S. Cho, B. C. Pak and B. J. Baek

Key Words : Differential Pressure Flow Meter (차압유량계), Non-Newtonian Fluid (비뉴턴 유체), Discharge Coefficient (유출계수), Loss Coefficient (손실계수), Orifice (오리피스), Venturi (벤투리)

Abstract

Differential pressure devices such as an orifice and Venturi are widely used in the measurement of flow rate of fluid mainly due to cost effectiveness and easy installation. In the current study, the viscoelastic effect on discharge and loss coefficients of those flow meters were investigated experimentally. Aqueous solutions of Polyacrylamide (200, 500, and 800 ppm) as viscoelastic fluids were used. Discharge coefficient of an orifice for viscoelastic fluids increased significantly up to approximately 15-20% when compared with that for water, while loss coefficient decreased up to 10-25% depending on the diameter ratio, β . Also, pressure recovery for viscoelastic fluids was extended much longer than that for water. On the other hand, discharge and loss coefficients of Venturi for viscoelastic fluids were found to be strongly dependent on the Reynolds number. In both flow meters, the concentration effect for discharge and loss coefficients was not observed at more over than 200 ppm of aqueous solution. Conclusively, orifice and Venturi flow meters should be calibrated very carefully in the flow rate measurement for viscoelastic fluids.

기호 설명

D : 관 직경 (m)
 d : 오리피스 혹은 벤투리목 직경 (m)
 f : Darcy 관마찰계수
 \dot{m} : 질량유량 (kg/s)
 C_D : 유출계수, 식 (1)
 K : 손실계수, 식 (3)
 ΔP : 오리피스 혹은 벤투리에서 압력차 (N/m²)
 Re_a : 길보기 레이놀즈수
 U : 관에서 평균유속 (m/s)

x : 오리피스 혹은 벤투리목으로부터 유동방향으
 거리 (m)
 β : 오리피스 및 벤투리의 조임비 (= d/D)
 ρ : 유체의 밀도 (kg/m³)
 η_a : 길보기 점성계수 (mPa · s)
 $\dot{\gamma}$: 전단율 (1/s)

1. 서 론

공정산업에서 공정의 효율적 조업과 유체의 상업
 적 거리에 있어서 유체의 정확한 유량 측정과 그의
 경제성은 매우 중요한 일이다. 특히 항공, 조선,

*전북대학교 대학원 기계공학과

**회원, 전북대학교 기계공학부

원자력, 정밀화학 산업 등의 기술집약적 산업에서는 높은 정확도를 갖는 유량측정의 필요성이 점점 증대되고 있으며, 또한 열유체분야의 실험연구에서 정확한 유량측정은 실험 데이터의 신뢰성에 있어서 필수적이다.

유량측정은 유체가 유량계를 통과할 때 발생하는 압력손실, 힘, 또는 열손실 정도를 측정하거나 유동장과 초음파의 상호작용결과, 전자기 거동, 와류 발생빈도, 유동장에서의 광산란 효과 등 분명하고 반복성이 좋은 현상을 관찰함으로써 가능하며, 최근에 유량계의 종류 및 장단점, 유량 측정 표준 등 유량계 전반에 대한 정보가 논문^(1,2)이나 저서^(3,4) 등에 잘 요약되어 있다. 유량계 중 차압식유량계는 유체가 통과할 때 발생하는 압력차를 이용하여 유량을 측정하는 것으로, 오리피스, 벤투리, 유동 노즐 등이 있으며 설치가 비교적 용이하고 가격이 저렴하다는 이점 때문에 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있다. 이중, 특히 오리피스는 가장 오랫동안 사용한 유량계로서 유량계의 유출계수가 KS규격⁽⁵⁾, 국제규격(International Standards Organization) 등⁽⁶⁾에 주어져 있으며, 사용방법에 관한 규격이 유량계 중에서 가장 잘 기술되어 있다. 오리피스에 관한 최근의 연구동향은 유량측정의 정확성을 보다 향상시키기 위한 것으로, 오리피스 전방에 설치된 엘보우 등과 같은 곡관부⁽⁷⁻¹⁰⁾나 판다발 형태의 스트레이트너 설치⁽⁸⁾ 및 와류의 존재^(7,9,10) 등, 오리피스 입구에서 유동상태가 유량계수에 미치는 영향에 관한 것이 주류를 이루고 있다.

그러나, 이제까지 기술한 각종 유량계는 기체나 물과 같은 뉴턴 유체의 유량측정 사용 목적으로 연구 개발이 이루어져 왔으며, 공정산업이 다양화, 대형화됨에 따라 석유화학 공정, 천연가스 채굴 및 분배공정, 원유 채유 및 수송공정 등에서 취급되는 혼합상의 유체나 화공학, 화학, 식품학 및 의공학 등 제반분야에서 취급되는 비뉴턴 유체에 기존의 유량 측정기술의 적용은 상당한 제약이 따를 것으로 사려되며 사용하더라도 많은 오차를 포함한다 할 수 있다.

최근의 연구결과에 의하면^(11,12), 대부분의 차압식 유량계나 와 유량계와 같이 유동의 박리 및 재부착이 일어나는 유동과 유사한 돌연 팽창하는 원형관 내의 난류유동의 경우 유체의 점탄성이 증가함에 따라 같은 레이놀즈수에서 뉴턴 유체에 비해서 재순환 영역이 매우 커지며⁽¹¹⁾, 뉴턴 유체의 경우는

손실계수가 레이놀즈수에 관계 없이 팽창비만의 함수인 반면에, 점탄성유체의 경우는 팽창비만 아니라 레이놀즈수의 강한 의존성을 나타냄을 보고하고 있다.⁽¹²⁾ 이는, 점탄성 유체의 유량 측정시 차압식 유량계나 와 유량계를 사용할 경우 기존의 측정된 뉴턴 유체의 데이터를 사용할 때 상당한 오차를 가져올 수 있는 가능성을 내포하고 있으며, 특히 이러한 유체의 대량의 상업적 거래에 있어서는 유량 측정의 부정확성으로 인하여 상거래자에게 심한 손익을 편중시키는 심각한 문제를 야기시킬 수 있다.

따라서, 본 연구는 상기한 여러 가지의 기존의 유량계 중에서 현재 비교적 저렴한 가격으로 많이 사용되고 있으며, 산업계 전반의 주종을 이루고 있는 오리피스나 벤투리와 같은 차압식 유량계에 의한 유량측정시 유체의 점탄성효과를 고찰하고자 함이 그 목적이다.

2. 이론적 배경

오리피스 유량계는 유동관내에 오리피스 판을 삽입하여 측정된 판의 전·후 압력차를 이용하여 유량을 측정하는 것으로 Fig. 1은 본 연구에서 사용한 오리피스의 치수 및 유동방향에 따른 정압분포

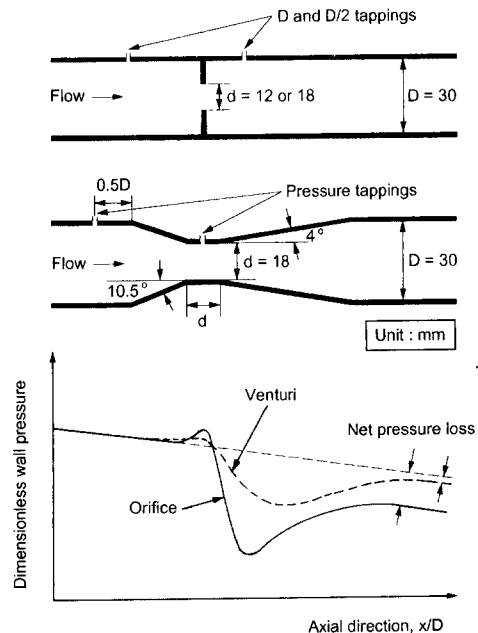


Fig. 1 Detailed view of orifice and Venturi flow meters

의 일반적인 경향을 보여주고 있다. 오리피스 판의 두께 및 형상, 팽창비등은 판의 직경, 레이놀즈수의 범위에 따라 달라지며, 이에 관한 사용규격은 참고문헌^(1,2)에 보다 상세하게 잘 요약되어 있다. 오리피스의 형태는 축대칭형의 표준형이 가장 많이 쓰이며, 형상은 입구의 가장자리가 사분원형태로 곡면 처리된 quadrant edged 오리피스와 sharp edged 오리피스로 구분되어진다. 표준형 sharp edged 오리피스의 경우, 오리피스의 두께가 매우 얇은 경우를 제외하고는 오리피스 출구 쪽에서 경사각을 가진다. 압력차를 측정하기 위한 압력 탭은 그 위치에 따라, 코너탭핑, 플랜지탭핑, vena contracta 탭핑 및 D and $D/2$ 탭핑이 있으며, 특히 가스의 유량측정에는 플랜지탭핑이, 액체의 유량측정에는 D and $D/2$ 탭핑이 많이 사용된다.

오리피스의 유출계수(C_D)는 이론유량에 대한 실제유량의 비로 정의되어지며, 이는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$C_D = \frac{\dot{m}\sqrt{1-\beta^4}}{\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (1)$$

여기서 조임비(β)는 관직경에 대한 오리피스의 직경의 비로 정의되며, \dot{m} 은 측정질량유량, d 는 오리피스 직경, ρ 는 유체의 밀도, ΔP 는 탭 사이의 압력손실을 각각 나타낸다.

유출계수는 일반적으로 레이놀즈수 및 조임비의 함수로서, 뉴턴 유체의 경우는 실험 데이터로부터 기초를 둔 반경험식인 다음과 같은 Stolz 식⁽¹³⁾이 많이 사용된다.

$$C_D = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} + 0.090L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0.033L_2\beta^3 \quad (2)$$

여기서 Re_D 는 관에서의 레이놀즈수이고, L_1, L_2 는 오리피스 판에서 상류 및 하류방향의 탭까지의 거리를 관직경으로 무차원화시킨 값이다.

한편, 유량계 전·후에서 에너지 방정식을 적용하면 오리피스의 손실계수(K)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$K = \frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2}\rho U^2} - f\frac{x_1 + x_2}{D} \quad (3)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 오리피스로부터 전방 $3D$ 의 지점과 하류에서 압력회복이 완전히 이루어진 후 다시 압력강하가 시작되는 위치이며, p_1 과 p_2 는 각각 그 위치의 압력을 나타낸다. 따라서, 손실계수의 결정에 있어 x_2 의 위치는 압력분포 곡선으로부터 결정되어지며, 그 값은 유체의 종류에 따라 다를 수 있다. 그리고, Darcy 관 마찰계수(f)는 뉴턴 유체의 경우에는 식 (4)에 의해서, Separan 수용액과 같은 점탄성유체는 난류유동에서 최대 마찰저항 감소현상이 존재하므로,⁽¹⁴⁾ 식 (5)에 의해 계산된다.

Blasius equation :

$$f = 0.3164 Re_D^{-0.25} \quad (4)$$

Cho and Hartnetts' asymptotic equation :

$$f = 0.20 Re_{a,D}^{-0.48} \quad (5)$$

특히, 비뉴턴 유체의 유동 및 열전달 실험결과와 표현에 있어 중요한 사항 중의 하나는 명확한 레이놀즈수에 대한 정의이다. 이는 연구자들에 따라 각기 달리 정의되어지는 여러 형태의 레이놀즈수가 있으며 보다 자세한 사항은 문헌에 잘 요약되어 있다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에서는 Separan 수용액과 같은 점탄성유체는 식 (7)과 같이 겔보기 점도(Apparent viscosity), 관직경 및 질량유량으로 정의되는 레이놀즈수를 사용하였다.

$$Re_{a,D} = \rho U D / \eta_a \quad (6)$$

그리고, 일반적으로 비뉴턴 유체로서 실험에 주로 사용하는 고분자 폴리머 수용액의 열전도도나 밀도와 같은 물성치는 그 변화가 매우 적으므로, Separan 수용액의 밀도는 용매인 물의 밀도를 그대로 사용하였다.⁽¹⁴⁾

표준형 벤투리미터는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 원추형 수렴부, 원통형 목부, 그리고 수렴부보다는 경사가 완만한 원추형 발산부로 구성되어진다. 이 유량계는 오리피스에 비해서 압력손실이 매우 적기 때문에 비교적 대용량에 효과적이거나 제작비가 많이 든다는 단점이 있다. 특히 수렴부의 가공방법에 따른 벤투리미터의 유출계수 및 사용범위에 관한 정보는 ISO 5167-1⁽⁶⁾에 자세히 수록되어 있으며, 관 직경(D)에서 레이놀즈수가 2×10^5 이상일 때 유출계수가 거의 일정하며 설계의 정도에 따라 0.5%~2%의 허용오차 범위에서 예측이 가능하다. 그러

나, 상기한 레이놀즈수 이하에서는 유출계수에 대한 조도, 팽창비 및 레이놀즈수에 대한 영향이 있으나 이에 대한 충분한 자료는 없는 상태이다. 특히 본 연구에 사용한 벤투리류브는 수렴부를 기계 가공한 상태로 벤투리 목직경(d)으로 정의된 레이놀즈수 의존성에 대한 약간의 정보가 문헌상에 나타나 있다^(5,6). 벤투리미터에서 유출계수 및 손실계수는 오리피스에서와 마찬가지로 각각 식 (1)과 (2)에 의하며 계산하였으며, 실험결과와 비교를 위하여 벤투리에서는 식 (6)에서 특성 길이를 관직경 대신 벤투리 목직경(d)으로 정의된 레이놀즈수를 사용하였다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 약 2.0 m³의 저장 탱크, 펌프, 바이패스 라인, 서지 탱크, 유동 안정화실, 수력학적 유동 입구영역, 유량계 설치부, 혼합실, 질량 유량 측정부로 구성되며, 유동 라인을 통과한 유체는 저장 탱크로 다시 유입되는 재순환 시스템으로 설치하였다. 일반적으로 관내 난류유동 실험에서 장시간 실험장치의 운전시 유체에 가해지는 열원이 없더라도, 난류유동으로 인한 소산 에너지가 발생하게 되어 시간의 경과와 더불어 유체의 온도가 상승하기 때문에 실험유체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 저장 탱크 내에 최대 냉각능력이 54000 KJ/hr인 자동 온도조절이 가능한 항온조를 설치하였으며, 실험중에 유동안정화실과 혼합실에 설치된 열전대로 유체의 온도를 점검하였다.

교분자용액과 같은 비뉴턴 유체의 실험시 원심 펌프와 같은 통상적인 펌프를 사용하면 심한 기계

적 퇴화(mechanical degradation)가 발생하므로, 이를 최소화하기 위하여 모노 펌프를 사용하고, 펌프로부터 필연적으로 발생하는 유동의 맥동현상을 줄이기 위하여 펌프와 실험부 사이에 서지 탱크를 설치하였다. 유동 안정화실로부터 혼합실에 이르는 유동계의 주실험부는 내경이 3.0 cm이고 이음새가 없는 스테인리스 강관을, 기타 부분은 용접 스테인리스 강관을 사용하였으며, 기타 엘보우, 티, 밸브 등도 스테인리스 강재를 사용하여 장기간 실험으로 인한 부식 및 화물링(fouling)에 의한 영향을 최소화하였다. 원형관내 난류유동에서 수력학적 발달유동 입구 길이가 뉴턴 유체인 경우는 관직경의 30-40배 정도인 반면에, 비뉴턴 유체 중 특히 점탄성 유체는 관직경의 약 110-120배 정도 긴 것으로 알려지고 있다.⁽¹⁴⁾ 따라서, 본 실험장치에서는 유량계 입구에서 유동이 충분히 발달될 수 있도록 직경의 140배 정도 길게 유동 입구영역을 설치하였다. 유량계의 제작은 국제표준규격(ISO)에 따랐으며, Fig. 1은 실험에 사용된 오리피스 및 벤투리의 형상 및 치수를 보여주고 있다. 오리피스는 동심원상의 표준형으로, 판은 두께가 3mm인 스테인리스 강관을 사용하여 조임비가 0.4와 0.6이 되도록 가공하였으며, 유출계수 계산에 있어 압력손실측정을 위한 탭의 위치는 D and $D/2$ 탭핑을 채택하였다. 벤투리는 수렴부 및 발산부의 경사각이 각각 21°, 8°으로 관직경에 대한 벤투리 목직경에 대한 비가 0.6으로 기계 가공하였다. 또한, 유체가 유량계를 통과할 때 발생하는 유량계 전후의 압력분포 및 손실계수 측정을 위하여 오리피스의 경우는 전방에 12개, 후방에 열 개를 설치하였으며, 벤투리의 경우는 양 플랜지 사이에 11개를 추가 설치하였다.

Fig. 2에서와 같이 재순환 유동회로에서 실험중 유량은 바이패스 라인과 모노 펌프에 부착된 속도 조절기를 조합하여 조절하였으며, 유량계의 성능검증 및 레이놀즈수 계산에 있어서는 정확한 유량의 측정이 매우 중요하다. 따라서, 보다 정확한 유량 측정을 위하여 컴퓨터에 의하여 제어되는 세 방향 공기압축식 조절 밸브를 사용하여 일정 시간동안 탱크에 수집된 유체의 양을 로드셀로 측정하여 질량유량을 계산하였다. 압력 탭은 Validyne 압력 변환기에 연결되고, 이로부터 나오는 아날로그 신호는 컴퓨터에 설치된 32채널 데이터 처리시스템(Data Translation, U.S.A.)으로 처리하였다.

본 연구에서 실험은 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)의 일정온도에서

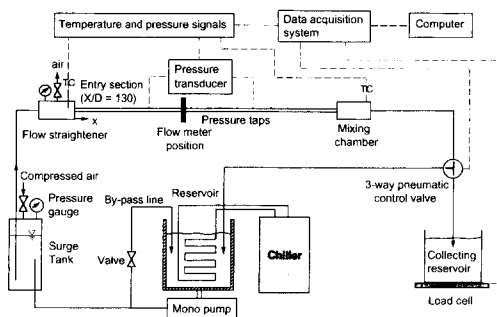


Fig. 2 Schematic diagram of the flow loop

실시하였으며, 뉴턴 유체로는 이온 교환수지로 정제된 물을, 점탄성 유체로는 폴리아크릴 라마이드 수용액 (Separan AP-273 ; 200, 500, and 800 ppm)을 각각 사용하였으며, 유체의 점도측정은 Brookfield (Cone-and-Plate형) 점도계와 모세관 점도계를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 점도 측정

비뉴턴 유체는 일반적으로 점도가 전단율의 함수이므로 점도측정의 선행이 필수적이다. Fig. 3은 실험시작전에 채취된 Separan AP-273 수용액의 농도변화에 따른 점도곡선을 보여주고 있다. 점도계에 따라 측정범위가 다르며, 전단율이 400(1/s) 이하에서는 Brookfield 점도계로, 그 이상에서는 모세관점도계로 측정된 결과이다. Separan 수용액의 점도는 전단율이 약 1000 이내에서는 멱법칙에 따르나, 그 이상의 변형률에서는 점도가 일정한 무한전단율 점도(infinite-shear-rate viscosity)가 존재한다. 본 실험에서는 유동영역이 난류이며 특히 오리피스 통과시 유동의 박리현상으로 전단율은 무한전단율 범위로 가정할 수 있으므로, 레이놀즈수 계산에 있어서 이 무한전단율 점도를 사용하였다. 또한, 실험 데이터의 산란 및 실험적 오차를 야기하는 중요한 요인 중의 하나가 기계적 퇴화현상이다. Fig. 3은 실험 중 시간의 경과에 따라 유체의 점도변화를 보여주고 있다. 농도의 감소에 따라 그 정도는 다소 적어지나, 800 ppm 에서 실험시작전과 한 시간동안 운전 후의 점도의 변화는 최대 8%까지 감소한다. 따라서, 이러한 기계적 퇴화현상으

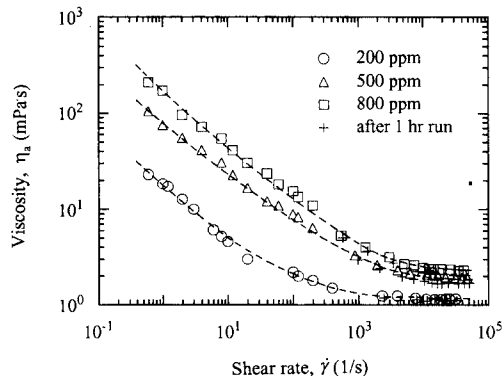


Fig. 3 Viscosity curves of Separan AP-273 solutions

로 인한 점도변화를 고려하기 위하여 실험중에 매 20분마다 재순환중인 용액을 채취하여 측정한 점도값을 사용하였으며, 한시간 이후에는 새로운 수용액을 다시 만들어 실험에 사용하였다.

4.2 오리피스 미터

Fig. 4는 오리피스 전·후에서 유동방향에 따른 압력분포를 보여주고 있으며, 질량유량이 0.695 kg/s, 조임비가 0.4 인 경우이다. 단 여기서 P_1 , P_2 는 오리피스 전방의 3D지점과 관내 임의의 지점의 압력을 각각 나타내며, U 는 관내에서 평균유속이다. 손실계수를 결정하기 위하여 압력측정은 오리피스 후방의 30D 지점까지 측정하였으나, 이 그림에서는 오리피스관 전·후의 좁은 영역만을 보여주고 있다. 유체가 오리피스를 통과할 때 오리피스 직전에서는 정체영역에 의한 정압의 증가가 이루어지고, 직후에서는 경계층의 박리 및 와류형성에 의한 급격한 압력강하가 일어나며 이후 정압은 빠른 속도로 회복이 이루어진다. 이 압력회복 (pressure recovery)은 뉴턴 유체의 경우 5-6D 부근에서 완전히 이루어지는 반면에 Separan AP-273 수용액과 같은 점탄성유체는 압력회복이 20D 지점까지 계속되는데, 이는 점탄성유체의 경우 오리피스관 뒤에 형성되는 재순환 영역이 물보다 현저히 크다는 것을 알 수 있으며, 이는 급 확대관내에서 기존의 연구결과와도 유사한 경향을 보여준다.^(11,12) 또한 일정 질량유량에서 오리피스의 전후에서 압력강하가 200 ppm 이상에서는 농도의 영향은 거의 없으나 물에 비하여 약 25%까지 감소하며, 이는 오리피스관 후방의 난류유동에서 작은 소용돌이

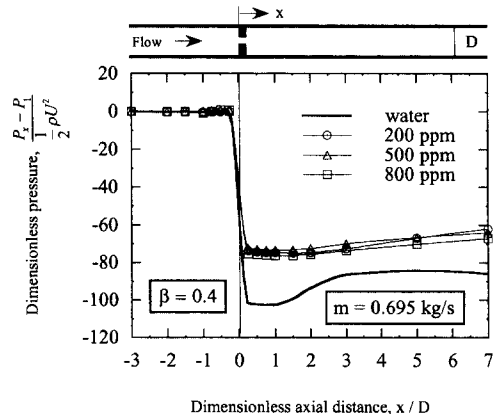


Fig. 4 Pressure distribution along an orifice meter

(eddy vortex)의 발생이 물에 용해되어 있는 고분자 체인에 의해서 억제되어 에너지 손실이 감소하기 때문에 여겨진다. 이는 결과적으로 점탄성유체의 유출계수는 현저한 증가로, 손실계수는 감소로 나타내짐을 의미한다.

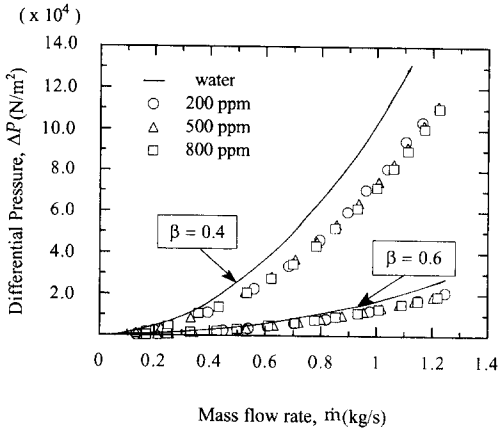


Fig. 5 Calibration runs of an orifice with water

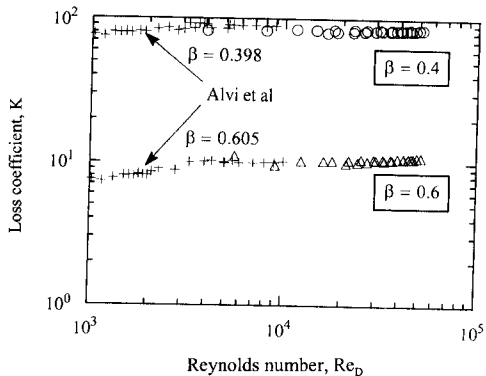
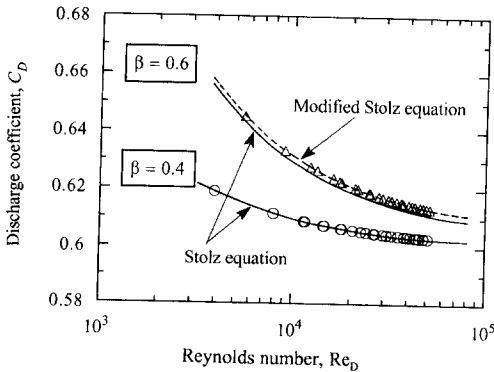


Fig. 6 Differential pressure of D and $D/2$ tapping in an orifice

Fig. 5는 오리피스에서 조임비가 0.4와 0.6인 경우 D and $D/2$ 탭핑에 의한 유출계수와 압력분포 곡선으로부터 식 (3)에 의하여 계산된 손실계수를 보여주고 있다. 유출계수는 조임비가 0.4인 경우는 Stoltz 식과 비교할 때 $\pm 0.5\%$ 이내에 오차를 나타내며, 이는 KS규격에 제시된 유출계수의 불확도인 $\pm 0.6\%$ 의 범위 안에 들어간다. 반면에, 0.6인 경우 실험 데이터는 규격에 주어진 Stoltz 식보다 크지만 규격에 주어진 불확도인 $\pm 0.6\%$ 의 범위 안에 들어가며, 이는 Stoltz 식의 상수인 0.5959를 0.35% 증가시킨 0.5980으로 수정된 Stoltz 식으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾ 또한, 손실계수는 레이놀즈수 및 조임비의 함수로서 조임비가 클수록 감소하며, 레이놀즈수가 증가 할수록 증가하여 점근값에 도달하는 경향을 나타낸다. 본 실험 결과와 기존의 Alvi 등⁽¹⁵⁾의 결과와 비교할 때 약 2%의 차이를 나타내는 것은 조임비의 영향으로 생각되어지며, 이와 같이 뉴턴 유체의 유출계수 및 손실계수에 관한 본 실험결과는 문헌의 데이터나 기존의 실험결과와

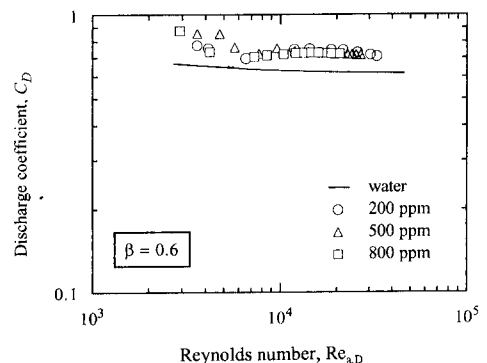
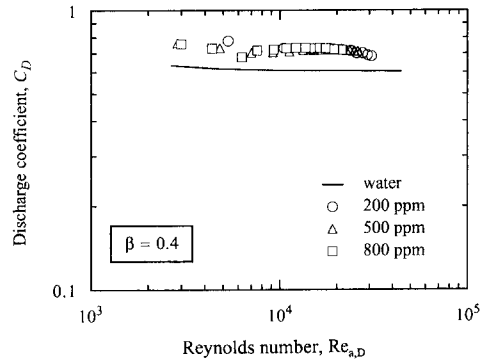


Fig. 7 Discharge coefficient of an orifice for Separan AP-273 solutions

잘 일치한다.

Fig. 6은 오리피스에서 유량의 변화에 따라 D and $D/2$ 탭핑 차압의 변화를 보여주는 것으로, 실선은 물에 대한 데이터를 곡선적합(curve fitting)한 것이다. 점탄성유체인 Separan 수용액의 경우 유량의 증가에 따라 차압의 변화는 물에 비하여 현저히 낮아지며, 조임비가 작아질수록 그 정도는 더 커짐을 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 최저 농도는 200 ppm으로 그 보다 큰 농도범위에서는 그 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나, 200 ppm 이하의 저농도의 수용액에서는 농도의 영향이 있을 것으로 기대되며, 결과적으로 유량의 증가에 따른 차압변화는 농도가 낮아질수록 물의 차압곡선인 실선으로 접근하게 될 것으로 예상된다.

Fig. 7은 Fig. 6의 데이터로부터 식 (1)에 의하여 계산된 Separan 수용액의 레이놀즈수 변화에 따른 유출계수를 보여주고 있으며, 상하단의 그림은 조임비가 각각 0.4와 0.6인 경우이다. 단 여기서 점탄성유체의 레이놀즈수는 겉보기 점도(apparent viscosity) η_a 와 관 직경 (D)으로 정의되었다. 조임비에 따라 다소 차이는 있으나, 예상된 바와 같이 Separan 수용액의 유출계수는 물의 유출계수에 비하여 전반적으로 매우 크며, 조임비가 0.4일 때 약 20%, 0.6일 때 약 15% 정도 증가했다. 또한, Fig.6에서 알 수 있듯이 200 ppm 이상에서는 유출계수에 대한 농도의 영향은 별로 없으며, 이는 점탄성 유체의 마찰저항 감소에 있어 어느 농도 이상에서는 변화가 없는 한계치가 존재(식 (5)참조)하는 현상과 유사한 경향을 보인다. 여기서 레이놀즈수가 비교적 높은 범위에서 유출계수가 다소 감소

하는 현상은 유량이 매우 클 경우 관벽에서 높은 전단응력과 펌프에 의해서 점탄성유체의 기계적 퇴화현상이 심화되기 때문으로 해석된다.

Fig. 8은 오리피스에서 Separan AP-273 수용액의 손실계수를 보여주고 있으며, 물의 손실계수에 비하여 조임비가 0.4인 경우는 약 25%, 0.6인 경우는 약 10% 정도 작은 값을 나타낸다. 데이터의 산란정도가 다소 심하나, 그 이유는 압력 탭의 위치가 오리피스로부터 $10D$ 이후에서는 $5D$ 마다 설치되었기 때문에 압력회복이 완전히 이루어지는 위치를 결정함에 있어 다소 오차가 있기 때문으로 생각된다. 유출계수와 마찬가지로 손실계수의 농도에 대한 영향은 200 ppm 이상에서는 별 영향이 없는 것으로 나타났다.

4.3 벤투리 미터

벤투리미터는 수렴부와 발산부가 완만한 경사각을 가지므로 오리피스미터와는 달리 에너지손실이 적어 유출계수는 매우 크며 손실계수는 상대적으로 낮다. Fig. 9는 일정 질량유량 (=0.695 kg)에서 조임비가 0.6인 표준형 벤투리미터의 Separan수용액의 농도변화에 따른 압력분포를 보여주고 있다. 압력변화는 벤투리목 중앙부로부터 상류방향으로 3D 지점의 정압을 기준으로 무차원으로 표현하였으며, 최대 압력강하점은 벤투리 목후분 보다 발산부에서 나타났다. 최대압력강하는 Separan 수용액이 물보다 약 10% 크며, 200 ppm 이상에서는 농도의 변화에 관계 없이 거의 일정하였다. 또한, 발산부에서 압력회복은 물의 경우는 오리피스에서와 같이 5D 부근에서 완전히 이루어지나, Separan AP

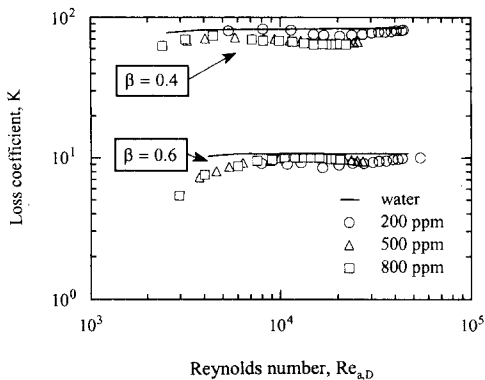


Fig. 8 Loss coefficient of an orifice for Separan AP-273 solutions

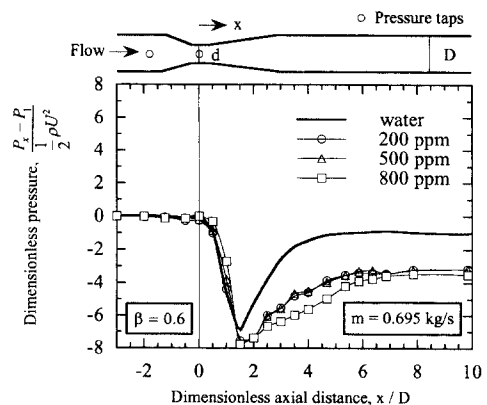


Fig. 9 Pressure distribution along the Venturi meter

-273 수용액은 다소 길어져 9-10D 부근까지 계속 되었다. 이는 본 실험에서 사용한 벤투리튜브의 출구원추관부의 각도가 8°로, 점탄성유체의 경우 출구확장부에서 유동의 재순환 영역(recirculating zone)이 존재할 가능성을 내포하고 있다. 유출계수 측정을 위한 압력 탭의 위치는 Fig. 9의 상단에 표시된 바와 같이 ISO-5167-1⁽⁶⁾에 따랐으며, Fig. 10은 식 (1)에 의하여 계산된 물과 Separan수용액의 유출계수를 보여주고 있다. ISO 규격에 의하면 벤투리에서 뉴턴 유체의 유출계수는 레이놀즈수가 10⁵ 이상에서는 레이놀즈수가 증가함에 따라 증가하나, 본 연구에서는 레이놀즈수의 범위가 그 이하로 유출계수는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. Separan 수용액의 유출계수는 200 ppm 이상에서는 농도의 증가에 따른 변화는 없으며, 레이놀즈수 증가에 따라 점점 증가하는 강한 의존성을 보인다. 그러나, 레이놀즈수가 6×10⁴ 이상에서는 물의 유출계수와 거의 같은 값을 가진다.

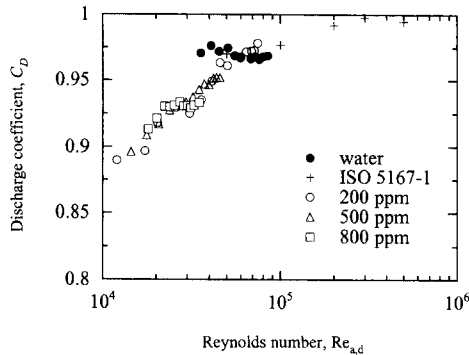


Fig. 10 Discharge coefficient of Venturi meter for water and Separan AP-273 solutions

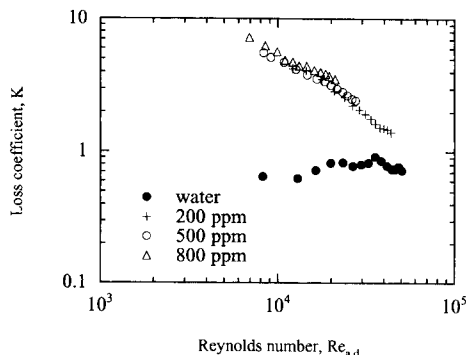


Fig. 11 Loss coefficient of Venturi for water and Separan AP-273 solutions

Fig. 11은 벤투리튜브에서 점탄성유체의 손실계수를 보여주고 있으며, 물의 경우는 데이터의 산란은 다소 심하나 레이놀즈수에 관계 없이 거의 일정한 값인 반면에 Separan 수용액의 경우는 레이놀즈수 증가에 따라 감소하는 매우 강한 레이놀즈수의존성을 나타낸다. 또한, Separan 수용액의 손실계수는 물의 손실계수에 비하여 매우 크게 나타나는데, 이는 식 (3)의 손실계수의 정의에서 보는 바와 같이 마찰저항 감소현상으로 마찰계수가 낮아져 상대적으로 K값이 증가하는 것으로 해석된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 현재 산업전반에 주종을 이루고 있는 오리피스미터나 벤투리미터와 같은 차압식 유량계에 의한 유량측정시 유체의 점탄성효과를 고찰하였다. 오리피스판은 동심원상의 표준형으로 조임비는 0.4와 0.6이며, 표준형 벤투리의 조임비는 0.4이다. 점탄성유체로는 Separan 수용액을 사용하였으며, 실험결과로부터 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

- ① 뉴턴 유체인 물의 경우 오리피스 및 벤투리미터의 유출계수는 KS 및 국제규격의 허용오차 범위 내에 들며, 손실계수 또한 기존의 실험결과와 잘 일치하고 있다.
- ② 오리피스 및 벤투리미터의 후류에서 압력회복은 뉴턴 유체의 경우 5-6D 지점에서 완전히 이루어지는 반면에, 점탄성유체는 10-20D 지점까지 계속된다. 이는 점탄성유체의 경우 재순환영역이 물보다 현저히 크게 형성된다는 것을 의미한다.
- ③ 오리피스에서 Separan AP-273 수용액의 유출계수는 물의 유출계수에 비하여 조임비가 0.4와 0.6인 경우 각각 20%, 15% 증가한 반면에, 손실계수(K)는 약 25%, 10% 정도 감소했다. 또한 200 ppm 이상에서는 농도의 영향은 없는 것으로 나타났다.
- ④ 벤투리튜브에서 유출계수 및 손실계수는 물의 경우는 레이놀즈수에 관계 없이 거의 일정한 값인 반면에, AP-273 수용액의 경우 유출계수는 레이놀즈수가 증가함에 따라 증가하고, 손실계수는 감소하는 매우 강한 레이놀즈수 의존성을 나타낸다. 오리피스미터에서와 마찬가지로 농도의 영향은 200 ppm 이상에서는 농도의 영향은 없는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로부터 알 수 있듯이, 오리피스 미터나 벤투리미터의 유출계수 및 손실계수는 점탄성유체의 경우는 뉴턴 유체에 비하여 다른 양상을 나타내며, 이는 특히 점탄성유체의 유량측정으로 오리피스미터나 벤투리미터를 사용할 경우 반드시 주의 깊은 검증실험을 요구함을 의미한다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME94-B-07)에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- (1) Brain, T. J. S. and Scott, R. W. W., 1982, "Survey of Pipeline Flowmeter," *J. Phys. E. : Instrum.*, Vol. 15, pp. 967~980.
- (2) 백종승, 1989, "유량측정과 표준," 공기조화·냉동공학회지, 제18권, 제4호, pp. 255~270.
- (3) Bean, H. S., 1971, *Fluid Meters, Their Theory and Application*, 6th ed., ASME, New York.
- (4) Hayward, A. T. J., 1981, *Flowmeters*, The Macmillian Press Ltd., London.
- (5) KS A 0612-1992, 1992, 조임 기구에 의한 유량 측정 방법, 공업표준 심의회 심의, 한국공업표준 협회 발행.
- (6) ISO 5167-1, 1991, "Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices," International Standards Organization.
- (7) Mottram, R. C. and Rawat M. S., 1986, "The Swirl Damping Properties of Pipe Roughness and the Implications for Orifice Meter Installation," *Proceedings of International Conference of Flow Measurement in the Mid 80's*, Vol. 2, paper 6-1.
- (8) Mattingly, G. E. and Yeh T. T., 1991, "Effects of Pipe Elbows and Tube Bundles on Selected Types of Flow Meters," *Flow Measurement and Installation*, Vol. 2, No. 1, pp. 4~13.
- (9) 이광복, 박경암, 윤병로, 이생희, 1993, "두 개의 엘보 사이 각도가 오리피스 유량계의 유출 계수에 미치는 영향," 대한기계학회 '93년도 춘계학술대회논문집 (II), pp. 377~380.
- (10) Morrison, G. L., DeOtte, R. E., Moen, M., Hall, K. R. and Holste, J. C., 1990, "Beta ratio, Swirl and Reynolds Number Dependence of Wall Pressure in Orifice Flow Meters," *Flow Measurement and Installation*, Vol. 1, No. 5, pp. 269~277.
- (11) Bock Choon Pak and Cho, Young I. Stephen U. Choi, S., 1990, "Separation and Reattachment of Non-Newtonian Fluid Flows in a Sudden Expansion Pipe", *J. of non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 37, pp. 175~199.
- (12) Bock Choon Pak and Cho, Young I. Stephen U. Choi, S., 1991, "Turbulent Hydrodynamic Behavior of a Drag-Reducing Viscoelastic Fluid in a Sudden Expansion Pipe", *J. of non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 39, pp. 353~373.
- (13) Stoltz, J., 1975, "An Approach Towards a General Correlation of Discharge Coefficients of Orifice Plate Meters", *Conference on Fluid Flow Measurement in the Mid 1970s*, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, U. K., April.
- (14) Cho, Y. I. and Hartnett, J. P., 1982, "Non-Newtonian Fluids in a Circular Pipe Flow", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 59~141.
- (15) Alvi, U. S., Sridharan, K. and Lakshmana Rao, N. S., 1978, "Loss Characteristics of Orifices and Nozzles", *Trans. of the ASME, J. of Fluid Eng.*, Vol. 100, pp. 299~307.