

Segmental Wedge를 이용한 차압식 유량측정 방법

윤준용* · 성낙원**

Flow rate Measurement Using Segmental Wedge as a Restriction Device for Differential Pressure

J. Y. Yoon*, N. W. Sung**

Key Words: Segmental Wedge, Discharge coefficient(유출계수), Flow rate(유량), Differential producer(차압 발생기구), Restriction device(조임기구)

ABSTRACT

The discharge coefficient in segmental wedge having ninety degrees vertex angle for the five kinds of opening ratio with differential pressure taps located at both upstream and downstream of one diameter of pipe was measured. Main purpose of this work is placed on specifying the characteristic of discharge coefficient of a segmental wedge used as a primary element of flow metering devices, and suggestion for the fixed location of pressure taps useful. Although the range of the opening ratio over this work is more expanded than previous studies. The opening ratios of segmental wedge, namely 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7 were investigated. The Reynolds number based on the spool inside diameter ranges from 12,000 to 380,000.

1. 서론

정확한 유량의 측정은 석유화학 공정이나 반도체 공정, 플랜트 및 발전 설비 등 유체의 이송을 필요로 하는 거의 모든 분야에서 필요로 하며, 각각의 용도에 따라 다양한 측정 방법이 존재한다. 차압(differential pressure)을 이용한 유량 측정 방법은 순쉬우면서도 경제적인 방법 중의 하나이며, 오랜 역사를 지닌 이유로 인하여 방대한 양의 데이터가 제공되고 있다.⁽¹⁾ 특히 오리피스(orifice)나 벤츨리(venturi), 노즐(nozzle) 등의 대표적인 조임기구(restriction device)에 대하여는 국제적 표준이 정립되었으므로 측정의 정확도에 충분한 객관성을 부여할 수 있는 방

법이기도 하다.^{(2),(3)}

차압에 의하여 유량을 측정하는 기본적인 원리를 벗어나지 않는 범위 내에서 산업 현장의 특별한 수요를 수용하기 위한 조임기구의 다양한 변형에 대한 연구가 수행되고 있다. Morrison⁽⁴⁾ 등은 기체와 액체가 공존하는 이상유체(two phase flow)의 유량을 차압식으로 측정하는 방법을 제안하였고, Sondh⁽⁵⁾ 등은 작동 중에 조임비(restriction ratio)의 변경이 가능한 방법을 제안함으로써 유량에 대한 차압변화의 선형성을 확보할 수 있는 방법을 제안하였다. 이와 유사한 시도는 Hayward⁽⁶⁾나 Singh⁽⁷⁾ 등에 의하여도 수행되었다.

특히, 각종 공정의 후처리 과정에서 생성되는 유체나 하수처리장 등에서 이송하고자 하는 유체의 경우, 측정하고자 하는 유체 중에 부유물이나 침전물이 존재하는 경우가 발생하며, 이러한 경우 적용할 수 있는

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

책임저자 E-mail : sungnw7@naver.com

측정 방법은 매우 제한된다. 따라서 유체의 조건을 고려한 방법이 선정되어야 하는데, 이 경우 segmental 오리피스나 wedge와 같은 segment 형태의 차압 발생소자를 이용하는 방법이 고려될 수 있다. 이 중 segmental 오리피스는 오리피스 판과 같은 평면 형태를 취하고 있으므로, 이물질의 축적 가능성이 존재하며, wedge 형태의 조임기구가 본래의 목적에 보다 충실히 부합한다고 볼 수 있다.

조임기구를 이용함으로써 유량을 측정하기 위해서는 유출계수 (discharge coefficient)의 파악이 반드시 수반되어야 하는데, segment 형태의 조임기구에 대하여 현재까지는 산업 현장의 필요에 비하여 많은 관심을 받지 못한 이유로 연구 결과 또한 매우 미비하다. 이전의 몇몇 연구 결과를 살펴보면, Oguri⁽⁸⁾는 3가지 종류의 조임비와 2가지 종류의 wedge 각도에 대한 유출계수의 거동을 고찰하여 차압 탭 (differential pressure tap) 위치의 몇 가지 조합을 시도하였고, 전단과 후단의 차압 탭 위치의 적당한 조합으로 넓은 범위의 레이놀즈 수 (Reynolds number)에서 비교적 일정한 유출계수가 존재함을 제안하였다. Buhidma⁽⁹⁾ 등은 오일 (oil)과 물 (water)의 혼합상태인 유체를 시험유체로 하여 Oguri⁽⁸⁾와 같은 조임비의 segmental 오리피스와 wedge의 유출계수를 비교하였는데, 조임비의 고찰 범위가 확장된 것은 아니며, 단지 시험유체의 종류를 비교한 것에 그 의미를 부여할 수 있다.

이전의 연구 대상이나 결과를 살펴보면, 차압을 취출하기 위한 위치의 선정에 있어서 wedge의 중심면을 기준으로 할 것인지, wedge의 전후단 가장자리면을 기준으로 할 것인지와, 취하는 거리의 산정이 wedge의 크기에 따른 상대거리 (relative distance)인지 wedge의 크기와 무관한 절대거리 (absolute distance)인지에 대한 고려가 요구된다. 이전의 연구자들은 공통적으로 wedge의 전후단 가장자리면을 기준으로 한 상대거리를 취하고 있는데, 이러한 방법은 설비에 설치된 경우 계절적 요인이나, 또는 기타 설계 및 운전상의 이유로 측정이 요구되는 유량의 범위가 변화하는 경우에 대해 조임비의 변화를 위하여 wedge는 물론 차압 탭을 포함하는 단관 전체를 교체해야 하는 문제를 내포한다. 이러한 경우 오히려 차압 탭의 위치를 일정한 기준에 의하여 고정하고 wedge만을 교체하는 것이 더욱 경제적이 될 수 있는데, 상기의 과정을 수행하기 위해서는 차압 탭과 wedge의 이격

거리를 일정하게 고정한 상태에서 조임비의 변화에 따른 유출계수의 파악이 필요하다. 또한, 기존에 고려된 조임비의 범위가 실용적인 범위에 부합하고, 산정된 유출계수로부터 향후 필요한 유출계수 방정식을 유도하여 일반화하기에는 충분치 않으며, 이를 보완하기 위해서는 확장된 범위의 조임비에 대한 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 조임비의 범위를 확장하고, wedge의 중심면을 기준으로 한 일정한 절대위치에서의 차압 취출과, 이 때의 유출계수를 파악함으로써 wedge의 크기와 무관한 차압 탭 위치의 선정이 가능함을 확인하였다.

2. Segmental wedge

파이프의 일부가 잘려져 나간 segment 형태를 취하는 조임기구는 Fig. 1과 같은 개략도를 갖는다. Fig. 1(a)에 표현된 segmental 오리피스는 사실상 Fig. 1(b)에 표현된 segmental wedge의 한 가지 형태로서 wedge의 각도가 0°인 평판으로 볼 수 있다. 동심의 오리피스와 유사하게 유출계수와 차압 측정 위치 등에 대한 데이터가 일부 제공되고 있으나⁽¹⁾, 오리피스에서 적용하는 플랜지 탭 (flange tap)이나 코너 탭 (corner tap), D-D/2 탭 등의 동일한 적용은 wedge의 형상이 평판이 아닌 이유로 인하여 용이하지 않다. 같은 이유로 wedge가 보유하고 있는 각도를 고려해야 하므로, wedge의 크기에 따라 차압 탭이 wedge에 가려지는 조건을 지양하는 적절한 선정이 요구된다. 본 연구에서는 90°의 각도를 갖는

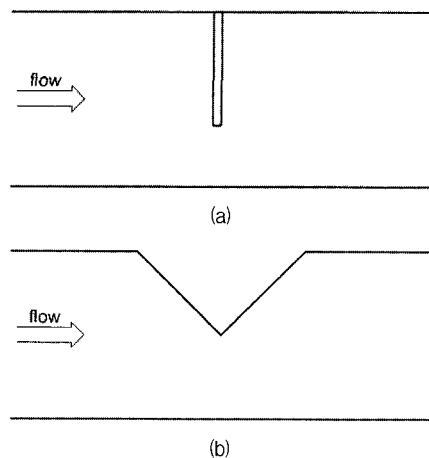


Fig. 1 Schematic diagram of segmental elements

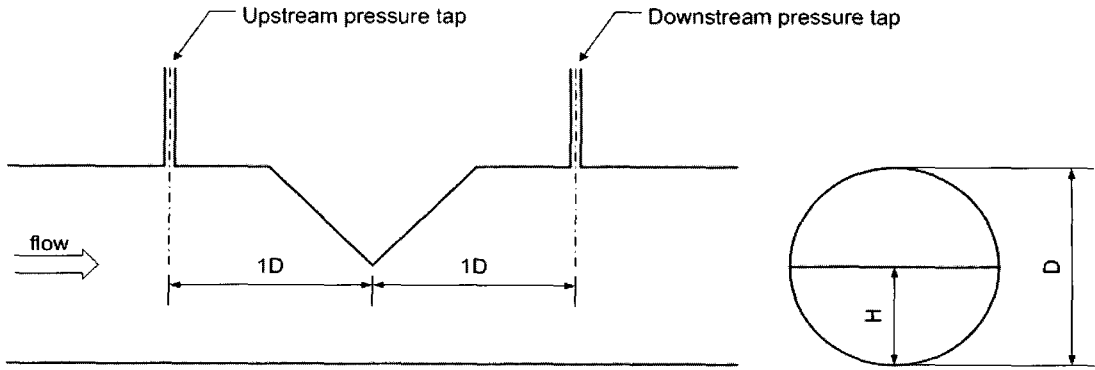


Fig. 2 Spool of segmental wedge

wedge에 대하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 전후단 각각 1D의 위치에 차압 탭을 위치 시켰으며, 거리의 기준은 wedge의 중심면으로 선정하였고, wedge의 조임비 범위는 0.3에서 0.7까지의 5가지로 하였다. 차압 측정 위치에 대한 이전 연구와의 비교를 Table 1에 수록하였다.

유출계수의 고찰은 다른 조임기구에서와 유사하게 베르누이 (Bernoulli) 방정식과 연속 방정식에 의하여 식 (1) 및 식 (2)와 같이 접근한다.

$$C_d = \frac{Q_{actual}}{Q_{theoretical}} \quad (1)$$

$$Q_{theoretical} = \frac{\epsilon A_c}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

여기에서, Q_{actual} 은 실제 유량, $Q_{theoretical}$ 은 식 (2)에 의하여 계산된 이론 유량, ϵ 은 팽창계수, A_c

은 wedge에 의하여 축소된 유로 면적, m 은 유로의 축소 면적비, ΔP 는 wedge 전후단의 차압이며 ρ 는 유체의 밀도이다. Wedge에 의하여 축소된 면적 A_c 와 유로의 축소 면적비 m 은 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현된다.

$$A_c = \frac{\pi m D^2}{4} \quad (3)$$

$$m = \frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1}(1-2Z) - 2(1-2Z)\sqrt{Z(1-Z)} \right\} \quad (4)$$

여기에서, Z 는 유로의 내경에 대한 wedge에 의하여 축소된 유로의 높이 비이다.

3. 실험 장치 및 방법

Segmental wedge의 유출계수를 파악하기 위하여 내경 154 mm (ANSI 150A STD)의 파이프를 시험관로로 사용하여 5가지 조임비의 wedge에 대한 차압 데이터와 함께 실제 유량, 관내의 온도 및 압력 등을 측정하였다. 실제 유량은 Fig. 3에 개략화한 바와 같이 중량식 유량 시험장치에 의하여 일정한 시간 동안 탱크에 수집된 유체의 중량으로부터 산정하였으며, 펌프로부터 공급되는 유체는 필터와 완충 챔버 (damping chamber), 콘트롤 밸브 등을 지난 후 1톤 또는 8톤의 수집 탱크에 수집된다. 시험부위는 수평 설치된 관로에 위치하며, wedge 전후의 차압 취출을 위한 차압 탭과 함께 wedge의 후단에 관로 내

Table 1 Geometric characteristics of segmental wedge and pressure tapping location

Element	Z	Wedge angle	Differential pressure tapping locations from the center line of wedge element		
			Present work	Oguri [1]	Oguri [2]
Wedge 1	0.3	90°	1D-1D	none	none
Wedge 2	0.4			none	none
Wedge 3	0.5			0.5D-0.5D	0.75D-0.75D
Wedge 4	0.6			0.4D-0.4D	0.65D-0.65D
Wedge 5	0.7			0.3D-0.3D	0.55D-0.55D

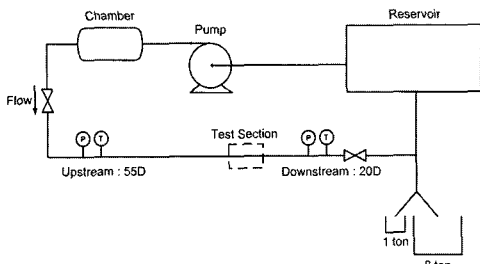


Fig. 3 Schematic diagram of flow rate test apparatus

정압 측정을 위한 압력공을 0.1D 간격으로 별도 설치하였다. 본 연구의 유량 범위에 해당하는 레이놀즈수는 12,000에서 380,000이고, 이때의 유량 범위는 $6.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 에서 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 이다. 사용된 시스템의 유량 측정 불확도는 1톤 수집 탱크를 사용할 경우의 최소유량 부근에서 최대값을 나타내며, 이 때의 측정 불확도는 $\pm 0.27\%$ (95% confidence level)이고, 8톤 수집 탱크의 최대 측정 불확도는 $\pm 0.15\%$ (95% confidence level)이다. 또한, 사용된 차압계 및 압력계의 불확도는 각각 $\pm 0.023\%$ (95% confidence level)와 $\pm 0.025\%$ (95% confidence level)이다. 측정하고자 하는 데이터는 각 계측기에서 송출되는 전기적 신호를 PC로 수신하여 통계처리 하였다. 충분히 발달된 유동을 구현하기 위하여 확보된 wedge 전단의 직관부는 50D이며 후단 직관부는 25D이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 조임비에 따른 유출계수의 변화

5가지의 조임비와 레이놀즈수의 변화에 따른 전후단 1D-1D 차압 탭에 의하여 감지되는 차압으로부터 유출계수를 고찰하고 그 거동을 Fig. 3에 나타내었다. 실험에서 구현한 레이놀즈수의 범위 내에서는 이전의 연구 결과와 유사하게 유출계수의 거동이 비교적 일정한 범위 내에서 구현됨을 확인할 수 있다. 이전 연구 결과와의 차이는 각각 위치가 다른 차압 탭에 가해지는 유동 형태가 다른 이유로 인한 것이며, 이전의 연구에서 고찰하였던 조임비의 범위에서는 비교적 선형적 관계를 가지고 있으나, 본 연구에서 고찰하고자 하는 범위에서는 조임비의 변화에 따른 유출계수의 변화는, Fig. 4에 나타난 바와 같이 조임비 변화에 따른 유출계수의 변화가 선형적 관계를 가지고 있지는 않은

것으로 보인다. 즉, 조임비 0.5의 경우 도출된 0.786의 유출계수는 고찰된 조임비의 범위에 있어서 최소 수치이므로 0.5의 조임비 부근에서 유출계수의 최소값이 존재할 것으로 예상되며, 조임비가 이보다 크면 작건 변화되는 정도에 따라 유출계수의 변화는 증가하는 것으로 보인다. 특히, 0.5 이상의 조임비에서는 이하의 조임비에서보다 다소 급격한 유출계수의 증가가 나타난다. 유출계수의 증가는 가해지는 차압의 감소를 의미하므로 segmental wedge의 크기가 일정한 크기 이하로 작아질 경우 감소된 비율이 비례 큰 차압 감소의 효과가 있는 것으로 판단된다.

4.2. 관로내 정압의 최소 위치

Segmental wedge 후단의 일정한 영역에서 구현되는 관로 내 정압을 측정함으로써 vena-contracta의 위치와 wedge 후단의 압력 감소 및 회복 추이를 고찰하였다. 정압의 측정은 관로의 윗면에서 수행되었는데, 이는 segmental wedge의 형상이 동심이 아니므로 원주방향에 따라 구현되는 정압이 다를 것으로 예상되나, 실험의 편의성과 차압 데이터의 연관성을 고려하여 차압 탭이 위치한 면을 선정하였다. 최소 정압이 감지된 위치에 대한 정보를 Fig. 5에 표현하였다.

정압공 사이의 간격에 0.1D의 공간을 부여하였으므로, 위치 선정의 분해능에 대한 한계는 있으나, Fig. 5에 보이는 바와 같이 압력 분포의 고찰에 대한 충분한 분별력은 있는 것으로 판단된다. 조임비가 0.3이나 0.4인 경우 후단의 차압 탭이 vena-contracta의 전단에 위치함으로써 감소중인 압력이 가해지고 있는 것으로 판단되며, 반대로 0.6이나 0.7의 조임비에서는 차압 탭의 후단이 vena-contracta의 후단에 위치함으로써 회복중인 압력이 가해지고 있는 것으로 판단된다. 따라서 조임비가 0.5일 경우 차압 탭의 후단이 vena-contracta 부근에 위치하고 있을 것으로 예상할 수 있으며, 이때의 유출계수가 최소 수치를 나타내는 것으로서 간접적인 확인을 할 수 있다. 이 같은 현상은 segmental wedge의 조임비는 변하나 차압 탭의 절대 위치는 관로 내경에 대하여 일정한 위치를 고수하고 있는 조건에 의한 것으로 나타나는 결과로 판단되며, 만일 wedge 크기의 변화에 비례하여 차압 탭의 위치를 변화시킨다면 유출계수 거동에 있어서 다른 추이를 보일 것으로 예상된다.

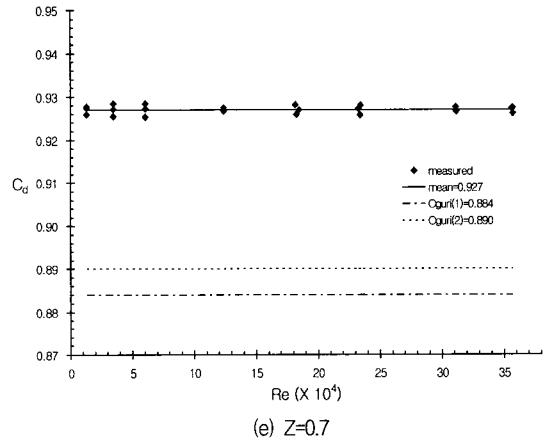
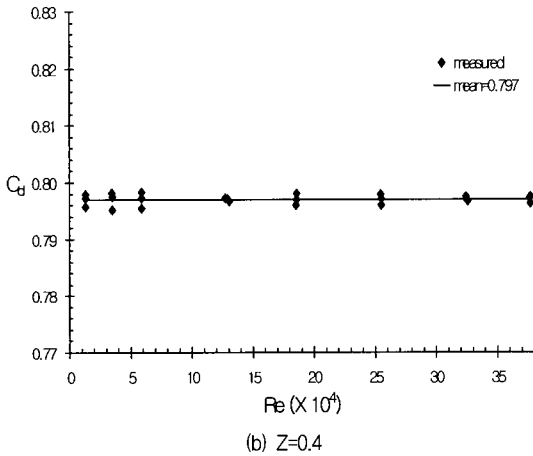
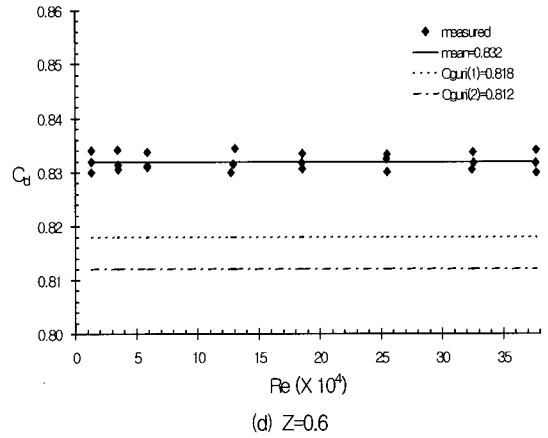
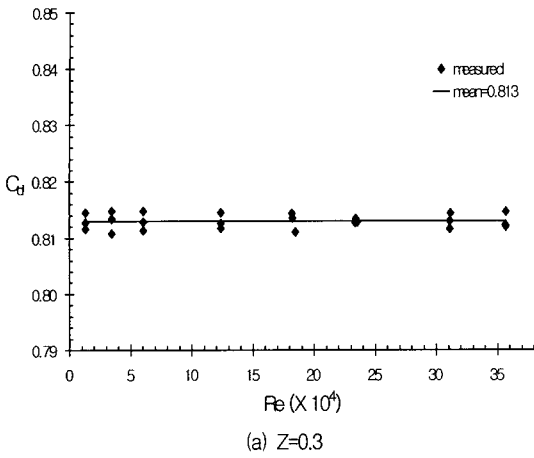
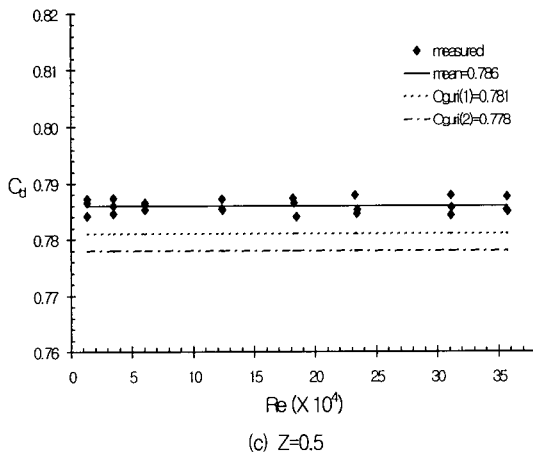


Fig. 4 Discharge coefficients of segmental wedge with opening ratio (a) 0.3, (b) 0.4, (c) 0.5, (d) 0.6 and (e) 0.7 as Reynolds number



5. 결론

동심의 면적 축소를 이루지 않는 segmental wedge를 조임기구로 사용하여 차압을 발생시키고, 차압 탭의 위치를 관로 내경에 대하여 일정한 위치에 고정함으로써 이 때 발생하는 차압으로부터 유량을 산정하기 위해 요구되는 유출계수의 거동을 고찰하였다. 이전의 연구 결과는 조임비의 변화에 따라 차압 탭의 절대 위치가 변하는 조건에서의 유출계수의 거동에 대한 접근이었고, 관심 대상이었던 조임비의 범위가 충분한 실용적 범위를 보유하기에 다소 좁다고 판단되는 바, 확장된 조임비에서의 유출계수를 제시하였다. 차

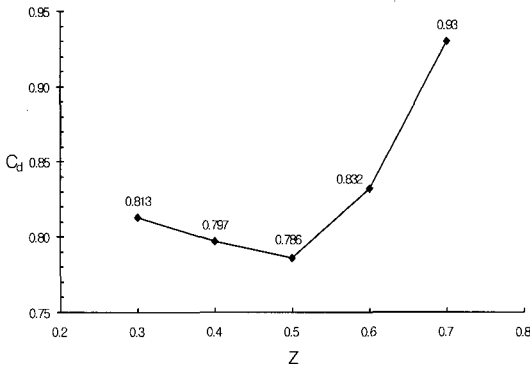


Fig. 5 Performance characteristics of discharge coefficients at various opening ratio.

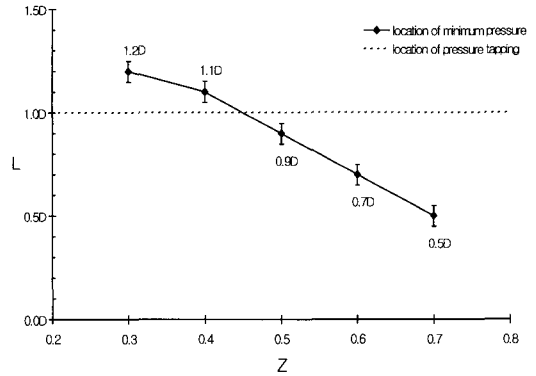


Fig. 6 Locations of the minimum static pressure at downstream of wedge element.

압 탭의 절대위치를 고정함으로써 wedge의 크기 변화에 따른 후단의 차압 탭이 최소 압력이 형성되는 vena-contracta의 전후단에 걸쳐 위치하고 있는 것으로 판단되며, 특히 조임비 0.5의 경우 차압탭의 위치가 최대 차압이 형성되는 위치에 걸쳐 있음을 예상할 수 있고, 이로 인하여 최소 수치를 보유한 유출계수의 거동을 확인하였다. 이는 유량 측정소자로서의 설계 시 차압 측정의 범위를 고려한 조임비의 선정에 필요한 데이터가 제공될 수 있을 것으로 판단되며, 유출계수의 크기는 이전의 연구결과와 비교하여 과도한 압력변화를 보이지 않음과 동시에 용이한 조임비의 변화를 지원함으로써 실용적인 적용이 가능할 것으로 판단된다. 오리피스나 노즐, 벤츄리 튜브 등의 조임기구와 같이 유출계수 방정식의 정립이나 표준화를 이루어지기 위해서는 본 연구를 포함한 이전의 연구에서 고찰한 조건보다 다양한 유동 조건에서의 결과가 요구된다.

참고문헌

- (1) R. W. Miller, 1996, "Flow Measurement Engineering Handbook," 3rd ed., McGraw-Hill Press.
- (2) ISO 5167-1, 1991, "Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plate, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross Sectional Conduits Running Full," International Organization of Standardization.
- (3) ISO/TR 12767, 1998, "Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure-Differential Devices - Guidelines to the Effect of Departure from the Specifications and Operating Conditions given in ISO 5167-1," International Organization of Standardization.
- (4) G. L. Morrison, D. Terracina, C. Brewer and K. R. Hall, 2001, "Response of a Slotted Orifice Flow Meter to an Air/Water Mixture," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 12, pp. 175~180.
- (5) H. S. Sondh, S. N. Singh, V. Seshadri and B. K. Gandhi, 2002, "Design and Development of Variable Area Orifice Meter," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 13, pp. 69~73.
- (6) A. T. J. Hayward, 1976, "A Linear Orifice-plate Flowmeter," Journal of Physics E : Scientific Instruments, Vol. 9, pp. 440~442.
- (7) S. N. Singh, B. K. Gandhi, V. Seshadri and V. S. Chauhan, 2004, "Design of a Bluff Body for Development of Variable Area Orifice-meter," Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 15, pp. 97~103.
- (8) Y. Oguri, 1987, "Wedge Flowmeter," JSME Part B, Vol. 53, pp. 3257~3261.

- (9) A. Buhidma and R. Pal, 1996, "Flow Measurement of Two-phase Oil-in-water Emulsions using Wedge Meters and Segmental Orifice Meters," Chemical Engineering Journal, Vol. 63, pp. 59~64.