

원추형 벤투리 유량계에 대한 동하중 평가

The Evaluation of Dynamic Load for the Cone Type Venturi Flow meter

김중권(한양대학교 대학원), 장경영(한양대학교), 조남오, 지대성((주)하이트롤)

Jung-Kwon Kim(HanYang Graduate School), Kyung-Young Jhang(HanYang Univ.), Nam-O Cho, Dae-Sung Chi(Hitrol. Co.)

ABSTRACT

Although the cone type venturi flow meter is superior to another differential pressure type flow meter in precision, the venturi is installed at the pipe as an L beam, so that the dynamic load due to drag force and flow-induced force is generated in the flow meter. In this paper we propose a methodology to evaluate this dynamic load directly by using strain-gages attached on the venturi and we discuss about the dynamic characteristics on the basis of flow-induced vibration theory.

Key Words : Dynamic load(동하중), Cone type venturi flow meter(원추형 벤투리 유량계), Drag force(항력), Flow-induced vibration(유체 유발 진동), Vortex-induced vibration(소용돌이 유발 진동), Pressure fluctuation - induced vibration(맥동 유발 진동), Strain-gage(스트레인 게이지)

1. 서 론

원추형 벤투리 유량계는 기존의 벤투리관 유량계와 달리 원추형의 차압 발생소자가(이하 벤투리) 배관에 용접으로 고정되어 있는 유량계이다. 이 유량계도 타 차압식 유량계와 마찬가지로 벤투리 상하류측에 발생하는 차압을 측정하여 유량을 측정하게 되는데, 정밀도면에서 기존의 차압식 유량계보다 우수한 것으로 알려져 있다.

그러나 그 구조상 벤투리에 작용하는 동하중이 벤투리와 배관 사이의 고정점에 집중되게 된다. 여기서 동하중에는 정적 성분으로 볼 수 있는 항력(Drag force)과 동적 성분으로 볼 수 있는 유체 유발 진동(Flow-induced vibration)이 모두 포함된다. 특히 유체 유발 진동은 주기성이 있으며, 벤투리 고정점에는 피로 하중을 유발시키게 되므로 이에 대한 평가는 내구성 설계를 위하여 꼭 필요한 절차이다.

한편, 항력은 CFD 등에 의해 차압을 평가하여 예측할 수 있으나[5], 파하중이 걸리는 경우 차압과 항력이 비례하지 않는 등 예측치 못한 요인에 의한 오차가 발생할 가능성이 높기 때문에 실험적 검증이 필요하다. 또한 유체의 유동장에 유체의 흐름을 바꾸어주는 물체가 존재하는 경우 난류 요동과 물체 뒤에 생성되는 소용돌이는 벤투리에 진동을 유

발하게 되고, 이 진동 현상을 유체 유발 진동이라 한다. 그런데 이러한 진동 현상에 대해서는 구나 실린더 등 단순한 형태의 물체가 있는 경우 이외의 복잡한 형상에 대한 해석적 연구는 되어 있지 않다.[1,2] 따라서 원추형 벤투리와 같은 복잡한 형상에 대하여 실제로 얼마나 진동이 유발되는지에 대하여는 실험적 평가가 유일한 수단이 될 것이다.

원자력 플랜트 등 사용 환경이 까다로운 곳에서는 제품에 대한 신뢰도를 요구하는데, 이 유량계는 비교적 최근에 개발되었기 때문에 동하중을 평가한 사례가 전무한 실정이다. 본 논문에서는 스트레인 게이지를 이용하여 동하중을 실험적으로 측정하고 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 원추형 벤투리 유량계

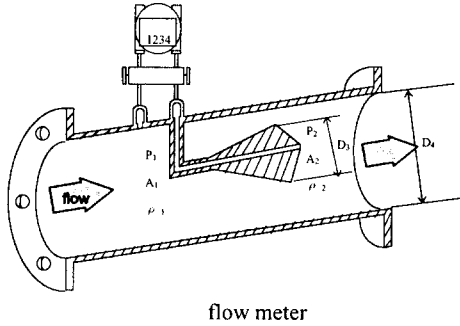
2.1 원추형 벤투리 유량계의 구조

차압식 유량계에는, 오리피스, 유동노즐, 벤투리관 유량계 등이 있으나 유량오차가 큰 점이 단점으로 지적되고 있다. 오리피스와 벤투리 유량계의 장점만을 이용한 원추형 벤투리 유량계는 기존의 차압식 유량계의 측정오차를 크게 개선시켰다.

이 유량계는 Fig1.에 보이는 바와 같이 기존의 벤

튜리 유량계에서 유체가 벤투리의 내측을 통과하도록 되어 있는데 반해, 유체가 바깥쪽을 통과하도록 유로 내에 원추형 벤투리를 설치한 것이 다르다.

Fig1. The structure of the cone type venturi



2.2 유량계에 작용하는 동하중

유체가 흐르고 있을 때, 흐르는 유체에 물체를 놓아두면 이 물체에 항력이 작용함과 동시에, 유동장을 변화시켜 물체 표면 주위에 분포하는 압력장을 요동시키고, 물체 뒤에 소용돌이(Vortex)를 발생시킨다. 이러한 압력장 요동(맥동)과 소용돌이는 물체에 진동을 유발하게 된다. 따라서 본 유량계의 벤투리에 작용하는 힘을 크게 다음과 같은 세가지 형태로 구분할 수 있다.

(i) 항력, F_D

$$F_D(t) = \frac{1}{2} C_D \rho A \bar{U}^2 \quad (1)$$

여기서, C_D : 항력 계수

ρ : 유체 밀도.

A : 유동 방향으로의 투영 면적

\bar{U} : 평균 유속

(ii) Pressure fluctuation-induced force, F_T

$$F_T(t) = \int_A \bar{p} \cdot d\bar{A} \quad (2)$$

여기서, \bar{p} : 요동 압력

\bar{A} : 면적 벡터

맥동에 의하여 발생하는 힘을 Pressure fluctuation-induced force 라 하며, 이러한 힘은 유체가 난류인 경우 광대역의 주파수 특성을 갖는 불규칙한 형태로 발생하는 것이 특징이다. 이 힘에 의하여 나타나는 진동을 Pressure fluctuation-induced vibration 이라 한다.

(iii) Vortex Shedding Force, F_V

$$F_V = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_L \sin(2\pi f_s t) \quad (3)$$

$$f_s = \frac{SU}{D} \quad (4)$$

여기서, U : 평균 유속.

D : 직경.

C_L : 양력 계수.

f_s : Shedding frequency

S : Strouhal number

물체의 뒤 부분에 형성되는 소용돌이는 다소 주기적인 형태로 생성된다[3]. 이 현상을 Vortex shedding 이라 하는데, 이러한 Vortex Shedding 에 의하여 힘이 형성되고[1], 이로 인하여 발생하는 진동을 Vortex-induced vibration 이라 한다. 이 진동은 매우 협대역의 주파수 성분을 갖는 것이 특징이다.

한편, 본 논문에서는 (ii)와 (iii)에 의해 발생하는 진동을 총칭하여 유체 유발 진동이라 하였다.

3. 동하중 평가

3.1 동하중 평가 방법 및 교정

원추형 벤투리 유량계의 동하중 평가를 위하여 Fig2.에 보이는 바와 같이 벤투리에 유체가 흐르는 방향과 수직하게 스트레인 게이지를 부착하여 이용하였다. 또 정량적 평가를 위하여 수평(유체가 흐르는 방향), 수직(유체 흐름과 수직인 방향)방향으로 하중을 가했을 때의 스트레인 게이지 출력을 조사하는 교정(Calibration)을 선행하였다. 물속에서 측정할 수 있도록 방수 스트레인 게이지를 사용하였으며, 4-gage 법을 이용하여 온도보상을 하였다. Fig3.은 수평 방향 교정 결과를, Fig4.는 수직 방향 유체 유발 진동 계측을 위한 교정 결과를 나타낸다.

하중의 변화에 따른 스트레인 게이지의 출력값이 선형적으로 나타남을 확인 할 수 있다. 여기서 수평 하중은 주로 항력 F_D 에 의해 가해지고 수직 하중은 주로 유체 유발 진동 $F_L (=F_T + F_V)$ 에 의해 가해진다.

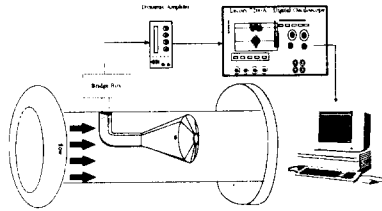


Fig2. The experimental setup for the evaluation of flow-induced vibration and drag force

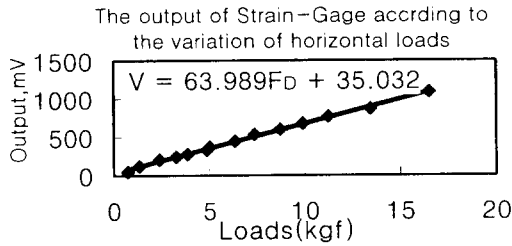


Fig3. The calibration result of measurement for the horizontal loads

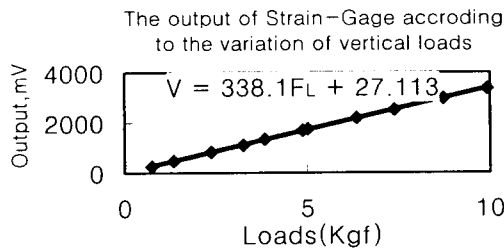


Fig4. The calibration result of measurement for vertical loads.

실험은 Fig2.와 같이 수행하였으며, 유체는 물과 공기를 사용하였다..

3.2 액체 유동시 동하중 평가 결과

유량계 내에 물이 흐르는 경우에 대한 계측 결과의 예를 Fig5.와 Fig6.에 나타내었다. Fig5.는 평균 유속 2.5m/sec, Fig6.은 3.0m/sec의 경우이며, 여기서는 동적 성분만을 나타내었다. 유속의 증가에 따라 진폭이 증가하고 주파수 대역이 상승함을 알 수 있다.

한편, 유체가 액체인 경우에는 이러한 동적 성분이 맥동보다는 vortex shedding에 지배적일 것으로

예상되므로, 여러 유속에서의 동적 성분의 크기와 주파수를 (3),(4)식의 이론 계산값과 비교하여 Table1.에 나타내었다. 주파수와 크기 모두 약간의 차이는 존재하지만, 비슷한 경향을 가지고 있음을 알 수 있고, 따라서 측정된 동적 성분은 주로 Vortex shedding force에 의한 것으로 판단된다.

Table1.에서의 이론값과 실험값의 차이는 맥동 성분의 존재와 vortex shedding force 계산에 사용된 모델이 단순화 모델인 것에 기인한다고 생각된다. 그럼에도 불구하고, 주파수 성분이 유속의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가해 가는 것은 (4)식과 일치하는 경향이다.

Fig7.은 동하중의 정량적 평가 결과를 나타낸 것이며, 여기서 항력은 스트레인 게이지 출력 신호의 정적 성분으로부터 추정되었다. 동적 성분 크기와 비교를 위하여 실제 항력값의 1/10을 나타내었다. 결과를 살펴보면 항력이 유체 유발 진동의 힘보다 매우 크고, 유속의 2승 형태로 증가함을 알 수 있는데 이는 식(1)의 경향과 일치한다.

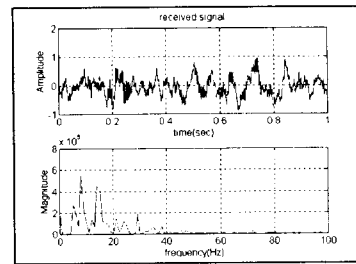


Fig5. The measured voltage of the strain-gage and its power spectrum when velocity of water is 2.5 m/s

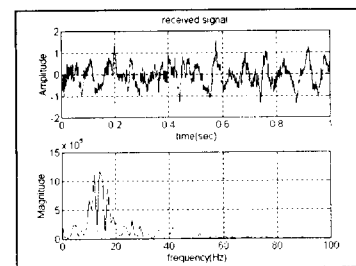


Fig6. The measured voltage of the strain-gage and its power spectrum when velocity of water is 3.0 m/s

Table1. The comparison of theoretical and measurement value(In case of water)

Free Stream Velocity	Vortex-induced vibration (이론값)		유체 유발 진동 (실험값)	
	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency
0.5 m/s	0.14 kg _f	1.167 Hz	0.0381 kg _f	0 - 8 (Hz)
1.0 m/s	0.56 kg _f	3.56 Hz	0.216 kg _f	6 - 15 (Hz)
1.5 m/s	1.26 kg _f	7.57 Hz	1.04 kg _f	8 - 9 (Hz)
2.0 m/s	2.24 kg _f	10.45 Hz	1.7 kg _f	6 - 18 (Hz)
2.5 m/s	3.52 kg _f	13.67 Hz	2.87 kg _f	8 - 18 (Hz)
3.0 m/s	5.49 kg _f	16.67 Hz	4.8 kg _f	8 - 21 (Hz)

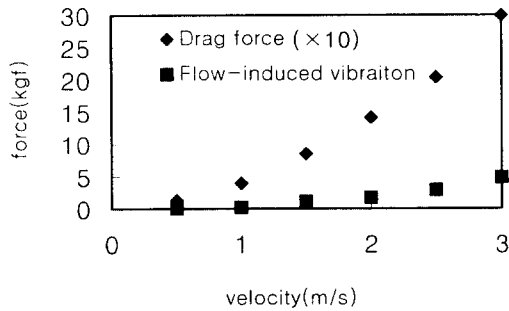


Fig7. The comparison between the drag force and amplitude of flow-induced vibration

3.4 기체 유동시 동하중 평가

공기가 유량계를 흐르는 경우 계측 결과의 예를 동적 성분만의 진폭과 스펙트럼에 대하여 Fig8.과 Fig9.에 나타내었다. 스펙트럼은 200Hz 범위와 이를 확대한 100Hz 범위의 두가지를 나타내었다.

유속의 증가에 따라 진폭이 증가함을 알 수 있고 100Hz 이하의 주파수 성분은 고주파 방향으로 이동함을 알 수 있다. 이는 앞의 물의 경우와 유사한 경향이냐, 진폭은 매우 작고 주파수 대역이 고주파 인점이 다르다. 따라서 공기 유동의 경우에도 항력과 Vortex-induced vibration 이 나타남을 알 수 있는데, 단 150-160Hz의 성분이 다른 주파수 성분에 비하여 그 크기가 매우 크게 나타났다.

이는 물이 흐르는 경우와는 달리 광대역의 주파수 성분을 갖는 힘이 발생하여, 유량계 자체의 고유진동수와 공진하기 때문으로 생각된다. 이를 확인하기 위하여, 유량계 자체의 고유진동수에 대하여 충격가진실험을 이용하여 측정하였다. 측정된 결과를 Fig10.에 나타내었으며, 150-160Hz에서 고유진동수를 갖고 있음이 확인되었다. 어로부터 공기가 유량계를 흐를 때 발생하는 진동은 Vortex

shedding force와 Pressure fluctuation-induced force가 주된 원인으로 나타남을 알 수 있고, 특히 광대역 성분인 맥동 성분은 유량계와 공진을 유발할 수 있으므로 내구성 평가시 특히 주의가 필요하다고 알 수 있다.

Fig8.과 Fig9.를 고찰하여 보면 유속이 증가함에 따라 대역폭 역시 증가하고 따라서 이 역시 공진을 유발할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 유속의 변화에 따른 동적 성분의 크기와 주파수 대역 측정값을 (3),(4)식의 이론값과 비교하여 보았다. 그 결과를 Table2.에 나타내었다. 유속의 증가에 따라 크기가 증가함을 알 수 있는데 이론값보다 측정값이 매우 크게 나타나는 것은 맥동 성분이 크게 존재하기 때문으로 사료된다. 그러나 주파수 대역은 이론값과 유사하게 증가하고 있으며 특히 25m/sec의 유속에서는 유량계의 고유진동수에 근접함을 알 수 있다. Fig11.은 동하중의 정량적 평가 결과를 나타낸다. 앞서서와 마찬가지로 항력은 그 1/10을 표시하였다. 여기서 25m/sec인 경우가 23m/sec에 비하여 상대적으로 큰 힘이 발생되고 있음을 알 수 있는데 이는 Vortex shedding 주파수가 공진 주파수에 근접하기 때문으로 사료된다. 물의 경우에서와 같이 항력이 유체 유발 진동보다 크게 나타나지만 그 크기는 물에 비하여 매우 작고, 반면 유체 유발 진동은 고주파 성분의 반복하중이 작용하므로 내구성 설계시 주요 인자로 고려해야 한다.

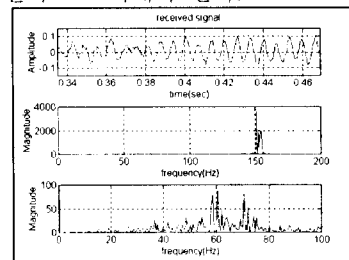


Fig8. The measured voltage of the strain-gage and its power spectrum when velocity of air is 15 m/s

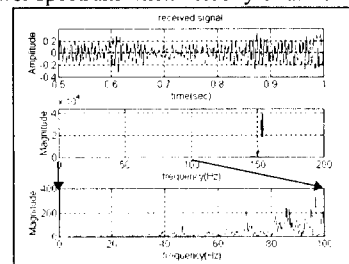


Fig9. The measured voltage of the strain-gage and its power spectrum when velocity of air is 21 m/s

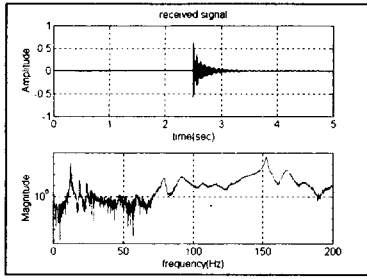


Fig10. Frequency response function of cone type venturi flow meter

Table2. The comparison of theoretical and measurement value(In case of air)

Free Stream Velocity	Vortex-induced vibration (이론값)		유체 유발 진동 (실험값)	
	Amplitude	Frequency	Amplitude	Frequency
5 m/s	0.0142 kgf	10.846 Hz	0.1032 kgf	10-20 Hz
9 m/s	0.0461 kgf	21.47 Hz	0.1712 kgf	32-42 Hz
13 m/s	0.0962 kgf	29.61 Hz	0.2984 kgf	42-58 Hz
17 m/s	0.1645 kgf	47.94 Hz	0.5705 kgf	64-74 Hz
21 m/s	0.2510 kgf	88.82 Hz	1.2804 kgf	80-100 Hz
25 m/s	0.3557 kgf	122.08 Hz	2.1736 kgf	120-140 Hz

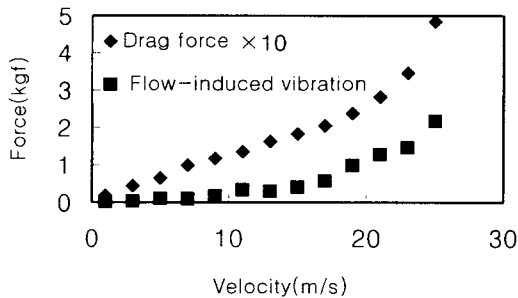


Fig11. The comparison between the drag force and amplitude of flow-induced vibration

4. 결론

본 연구에서는 원추형 벤츄리 유량계에 물 및 공기가 유동할 때, 발생하는 동하중에 대하여 스트레인 게이지를 원추형 벤츄리에 직접 부착하여 실험적으로 계측하고, 평가하고자 하였다.

원추형 벤츄리 유량계의 동하중을 평가한 결론을

요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 원추형 벤츄리 유량계에 유체가 흐를 때 발생하는 동하중을 스트레인 게이지를 이용하여 평가할 수 있었다.
- (2) 동하중의 크기와 주파수를 정량적으로 측정할 수 있었다.
- (3) 유량계 내에 물이 유동할 때, 발생하는 유체 유발 진동은 주로 vortex-induced vibration 이 지배적으로 나타났다. 동하중 크기의 경우 항력이 유체 유발 진동보다 매우 크게 나타났으며, 측정 유량 영역에서 주파수는 20Hz 이하의 저주파이었다. 이로부터 액체 유량계로 사용할 경우에는 항력에 의한 하중이 유량계 설계 제작시 중점적으로 고려되어야 할 것으로 사료된다.
- (4) 유량계 내에 공기가 유동할 때, 발생하는 유체 유발 진동은 Pressure fluctuation-induced vibration 과 Vortex-induced vibration 이 모두 나타났으며, 이들은 유량계와 공진을 유발할 수 있다. 따라서 기체 유량계로 사용할 경우에는 유체 유발 진동도 유량계 설계시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. W. D. Iwan, 1981, "The vortex Induced Oscillation of Non-Uniform Structural System," Journal of Sound and Vibration, 79, 291-301
2. J. E. Cermak, 1987, "Advances in Physical Modeling for Wind Engineering," ASCE Journal of Engineering Mechanics, 113, 737-755
3. Robert D. Blevins, "Flow-induced Vibration " Van Nostrand Reinhold publishers, 2nd ed.
4. N.C. Nigam and S. Narayanan, "Applications of Random Vibrations " Spring-Verlag publishers, 1994
5. 한양대학교 기계 기술 연구소, " 벤츄리 Cone 유량계의 내구성 평가 및 최적 형상 설계 " 기술 보고서, 1996,
6. 한 응 교, 장 경 영, " 정밀계측공학 " 반도 출판사, 1993,