

오리피스 유량계의 유동헌팅 영향인자에 관한 전산유체역학적 연구

신 창 훈*

* 한국가스공사 연구개발원

A Numerical Study on the Factors of the Flow Hunting in a Orifice Meter

Chang Hoon Shin**

* R&D Division, Korea Gas Corporation (KOGAS)

(Received August 18, 2010 ; Revised February 2, 2012 ; Accepted February 11, 2012)

Key Words: Orifice Meter(오리피스 유량계), Flow Hunting(유동난조), Pressure Difference(차압)

초록: 천연가스와 같은 기체유동의 계량에 있어서, 유동헌팅현상은 대부분의 오리피스 유량계에서 관찰되나 유동헌팅의 크기는 각 계량 시스템에 따라 다르다. 이러한 차이가 발생하는 원인과 이것이 과연 유동의 불안정성이나 계량오차와 실제로 연관되는지에 대한 검토를 위해, 선행연구에서 유동헌팅이 발생하는 근본적인 원인과 헌팅을 지배하는 관련인자에 대한 배관망해석 연구를 시행하였다. 이에 연계하여, 본 연구에서는 실제 유동의 불안정성과 헌팅률 간의 상관관계를 규명하고자 전산유체역학적 해석방법을 도입하여 오리피스 유량계를 대상으로 입구 압력변동의 크기, 발생 시간 및 유량에 따른 영향을 검토하고자 하였다. 결과적으로, 압력헌팅이 오리피스 전후방 차압비의 함수임을 증명하였고 3차원 CFD 해석을 통하여 유동헌팅에 영향을 주는 주요인자를 분석하고 상관관계를 규명하였다.

Abstract: During the measurement of the flow rate of gases such as natural gas, flow hunting is observed in most orifice meters but the intensity of flow hunting at each metering system shows different characteristics. In order to investigate why such a difference occurs and whether the difference actually influences metering error, pipeline network analysis on the main factors and characteristics of flow hunting was carried out in a previous study. Following this, in this study, computational fluid dynamics (CFD) analysis was carried out to clarify the relation between flow instability and flow hunting and determine the factors influencing the orifice meter depending on the intensity of upward pressure fluctuation, time interval, and flow rate. Finally, we showed that the pressure hunting rate is a function of the ratio of the pressure difference before and after an orifice meter. On the basis of CFD analysis results, we also presented some major factors and relations influencing flow hunting.

- 기호설명 -

- f : 함수
- H' : 헌팅(난조)율 [%]
- P : 압력 [bar]
- Q : 체적유량 [Stm^3/h]
- x : 거리 (공간좌표)

1. 서론

천연가스 수송과 같은 고속 고압 기체의 계량은 계량의 정확도 유지가 쉽지 않다. 특히 수

량의 급격한 변화와 유량계 주변 배관시스템 내 유체기계의 작동에 따른 불안정성에 직접적인 영향을 받을 가능성이 높다. 실제로 현장에서는 이러한 천연가스 계량과 관련하여, 유동의 불안정성(변동성)은 유동헌팅(Hunting, 난조)현상으로 나타나며, 직·간접적으로 계량오차를 유발하는 것으로 알려져 있어, 유동 헌팅률을 0.5% 범위 이내로 유지하는 노력이 요구되고 있다. 여기서, 유동헌팅률은 유동의 불안정성을 계량하는 표지자로서 사용되고 있으며, 이를 통하여 계량오차의 경향을 간접적으로 추정하거나, 가늠하는데 사용하고 있다.^(1,2) 실제로 유동헌팅현상은 대부분의 오리피스 유량계에서 관찰되나 유동헌팅의 강도는 각 계량 시스템에 따라 다르다. 현장에서 측

† Corresponding Author, chshin@kogas.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

결과를 보면 대부분의 정압시스템 관리소에서는 유동 헌팅률이 0.5% 이하로 관리되는 양호한 결과를 보이고 있으나, Fig. 1과 같이 일부 관리소에서는 유량과 압력의 헌팅률 모두가 관리기준인 0.5%를 벗어나는 경우가 있음을 볼 수 있다. 이러한 유동 헌팅률 차이가 발생하는 원인에 대한 규명과, 유동헌팅률이 유동 불안정성 또는 계량 오차의 표지자로서 적절성을 검토하고자, 천연가스 유량계의 현상운영시 발생하는 문제점으로 유량헌팅에 대하여 실험적 연구를 수행한 바 있고, 배관망 해석방법을 통하여 유동헌팅 영향인자에 관한 해석적 연구가 선행된 바 있다.⁽³⁻⁶⁾

특히 선행 해석적 연구에서, 유동헌팅 관계식을 검토하고, 헌팅률과의 관련인자를 도출하였으며, 유량계 배관경과 전후단 배관경의 변화에 따른 영향인자에 대한 검토를 우선 시행한 바 있다. 그러나 입구 압력변동의 크기, 발생 시간 및 유량에 따른 영향 등 유동헌팅의 근본적인 영향에 대한 검토는 미흡하였다.

이에 본 연구에서는, 선행연구에서 검토된 배관계통 영향의 검토에 부가하여, 실제 유동의 불안정성(변동량)과 헌팅률간의 상관관계를 규명하고자 전산유체역학(CFD) 해석방법을 도입하여 오리피스 유량계를 대상으로 3차원 CFD 해석모형을 구축하여, 입구 압력변동의 크기, 발생 시간 및 유량에 따른 영향을 검토하고자 하였다. 궁극적으로 이러한 방법들을 통하여, 유동 헌팅의 근본적인 원인과 영향인자를 규명하고, 천연가스 배관계통에서 계량오차를 유발하는 유동 불안정성과의 유동 헌팅률의 관련성과 관련 표지자로서의 적절성을 검토하고자 시도하였다.

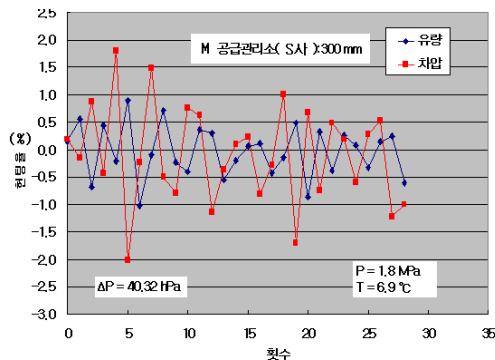


Fig. 1 Flow hunting at M-governor station

2. 유량 헌팅 관계식 검토

전산유체역학적 해석방법을 통한 유동의 불안정성(변동량)과 헌팅률간의 상관관계를 규명에 앞서, 유동헌팅의 근본적 영향인자에 대한 검토가 필요하다. 이를 위해, 선행된 해석적 연구에서의 관계식 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.^(5,6)

천연가스 계량에서 일반적으로 사용되는 오리피스 유량계의 유량헌팅 관계식은 식 (1)과 같고, 압력헌팅 관계식은 식 (2)와 같다.^(5,6) 여기서, 오리피스 전후방 압력 탭핑(Pressure Tapping)의 위치는 ISO-5167-1을 준용하여, 전후방 D-D/2 탭을 적용하였다. 즉, 기호 'a'는 오리피스 전단면(Upstream Face)에서 전방 8"(1D)로 하였고 기호 'b', 즉 후방 압력 탭핑의 위치는 후방 4"(0.5D) 지점으로 하였다.^(7,8) 또한 기호 '1'은 어떤 기준시점을 의미하고, 기호 '2'는 기준시점으로부터 일정 시간간격이 경과한 후의 경과시점을 의미한다.

$$H_Q' = \frac{(Q_a - Q_b)_1 - (Q_a - Q_b)_2}{(Q_a - Q_b)_1} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{\Delta Q_1 - \Delta Q_2}{\Delta Q_1} \times 100$$

$$H_P' = \frac{(P_a - P_b)_1 - (P_a - P_b)_2}{(P_a - P_b)_1} \times 100 \quad (2)$$

$$= \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} \times 100$$

$$= 1 - \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \times 100$$

$$= f\left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)$$

$$H_P' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(1 - \frac{\frac{\Delta P_2}{\Delta x}}{\frac{\Delta P_1}{\Delta x}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$= \left(1 - \frac{P_2'}{P_1'} \right) \times 100$$

$$= f\left(\frac{P_2'}{P_1'}\right)$$

$$\begin{aligned}
 H_p' &= \frac{(P_a - P_b)_1 - (P_a - P_b)_2}{(P_a - P_b)_1} \times 100 \quad (4) \\
 &= \frac{(P_2 - P_1)_b - (P_2 - P_1)_a}{(P_a - P_b)_1} \times 100 \\
 &= \frac{\delta P_b - \delta P_a}{\Delta P_1} \times 100 \\
 &= f(\delta P_b - \delta P_a, \frac{1}{\Delta P_1})
 \end{aligned}$$

식 (2)를 살펴보면, 압력현상은 근본적으로 어떤 기준시점 '1'에서의 기준차압(기저차압, ΔP_1)에 대한 경과시점 '2'에서의 차압변화량($\Delta P_1 - \Delta P_2$)의 비를 표현한 것으로, 압력현상은 결과적으로 기준시점과 경과시점에서의 차압비($\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$)의 함수가 되는 것을 알 수 있었다.

또, 식 (2)를 차압항 분모와 분자에 Δx 를 나누고, Δx 가 무한히 작아지는 것을 가정하면, 다음 식 (3)을 얻을 수 있다. 이는 일정한 유량이 균일하게 흐르는 경우, 기준시점의 압력변화와 경과시점의 압력변화가 같아져야 함을, 즉 $P_1' = P_2'$ 임을 의미하는 것으로, 시간의 경과에 무관하게 오리피스 전후방 차압변화가 일정하게 유지되는 경우 압력현상이 '0' 즉, 안정된 유동상태로 평가되는 것을 의미하는 것이다. 따라서 현장에서 일반적으로 사용되는 압력현상식은 유동 불안정성(변동성)을 간접적으로 표시하는 관계식으로 적절함을 확인하였다. 여기서 x 는 오리피스 전후차압이 발생하는 지점간의 거리를 의미한다.

오리피스 전후방의 각 계측 지점에서의 압력의 영향과 기준압력의 영향에 대한 검토를 위하여 위 식 (2)는 다시 식 (4)와 같이 변형이 가능하다.

앞선 식 (2)에서, 압력현상은 차압비($\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$)의 함수임을 이미 확인하였고, 식 (4)를 통하여, 압력현상은 오리피스 전후방 압력의 시간변화량($\delta P_b - \delta P_a$)에 비례하고 기준차압(ΔP_1)에 반비례하는 관계를 가짐을 확인할 수 있다.

결과적으로 압력현상, 오리피스를 통과하는 유동의 불안정성은 근본적으로 차압비의 함수이고, 오리피스 전후방 압력의 시간변화율에 비례하고 기준차압에 반비례하는 관계를 가짐을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 이러한 관계식 검토 결과를 전

산유체역학적 해석방법을 통하여 검증하고 검토된 각 인자의 영향을 확인하고자 오리피스 유량계를 통과하는 유동에 대하여 3차원 CFD 해석방법을 도입하여 해석적 검토를 진행하였다. 또한, 관계식에서 오리피스 전후방 압력의 시간변화량은 실제 기준시간과 경과시간의 간격에 따라 변화될 수 있으며, 이러한 시간간격의 영향에 대한 검토도 아울러 수행하고자 하였다.

3. 유동특성의 전산유체역학적 해석

3.1 전산해석 기법

본 장에서는 오리피스 유량계를 통과하는 유동을 해석하여 오리피스를 통과하는 유동의 특성을 검토하고, 산출된 유동 정보를 이용하여 유량 현상과 관련된 각 유동상태량을 산출하여 유동 특성과 현상과의 관계를 규명하고자 하였다.

이를 위하여 가상의 8" 계량 배관을 구성하고 4" 보어(Bore)를 갖는 오리피스 유량계를 모사하고자 3차원의 CFD 전산해석모델을 구성하였다. Fig. 2는 해석을 위해 구성한 오리피스 판과 계량 배관의 3차원 격자계이다. 해석은 상용 CFD 소프트웨어인 Gambit과 Fluent를 사용하였다.⁽⁹⁾

3.2 유동장 해석

Fig. 3과 4는 앞 절에서 구축된 해석모델에 대하여, 입구 압력 9 bar, 유량 16 kg/s의 정상상태 해석결과를 도시한 것이다. Fig. 3은 오리피스 유량계 주위의 속도분포를 도시한 것으로, 각 화살표의 색상은 마하수의 크기를 나타내고 있다. Fig. 4는 오리피스 유량계 주위에서 각 상태량 분포를 유선을 따라서 도시한 것으로, 오리피스 유량계 후방에서의 유동분포를 관찰할 수 있다. (a)와 (b)에서 유동은 예측된 바와 같이 오리피스의 보어 영역을 통과하면서, 단면 축소에 따른 급격한 가속이 발생되었다가 이후 유동 영역의 확장에 따라 구배가 점차 줄어들어 가고 있음을 보여주고 있다. 특히, 보어홀을 통과한 후방에서 유속의 증가와 압력의 감소 및 주위로 강한 대칭의 와류군, 즉 Vena-Contracta의 형성이 적절히 해상되고 있음을 확인할 수 있다.

3.3 유량현상 영향 검토

본 연구에서 구성된 3차원 오리피스 유량계

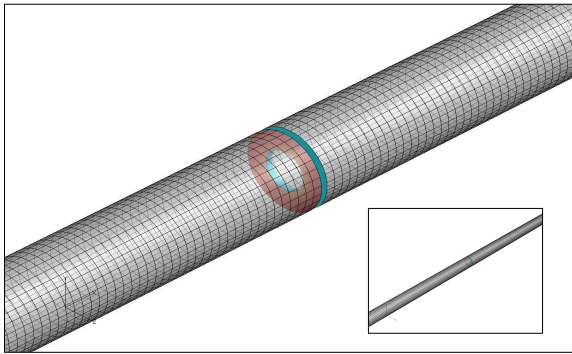


Fig. 2 3D grid system of an orifice meter

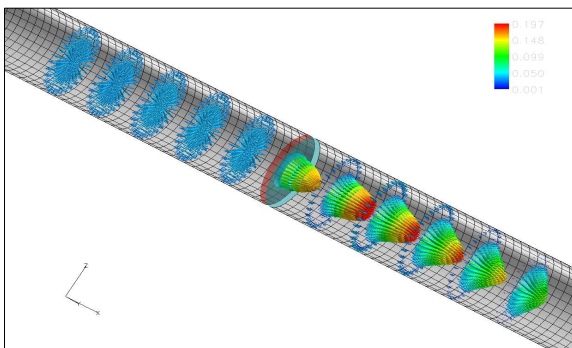
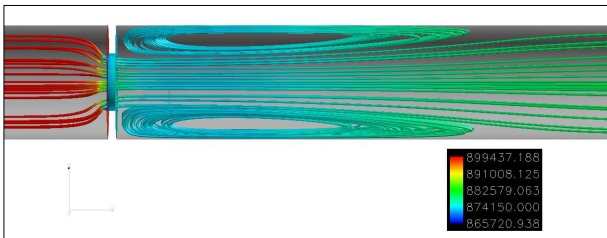
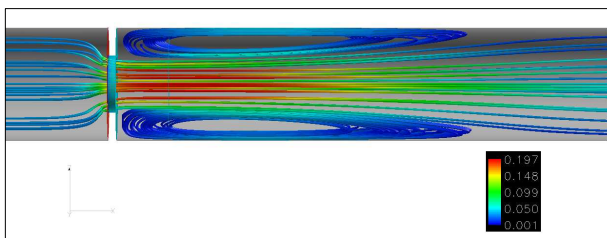


Fig. 3 Oblique view of Mach profiles



(a) Static pressure [Pa]



(b) Mach number

Fig. 4 Streamlines colored by pressure & velocity

CFD 해석모델은 입구 압력변동 크기, 발생 시간 영향 및 유량에 따른 영향을 검토하기 위하여 다음의 세 가지 경우로 구분하여, 해석을 수행하였다. 단, 모든 경우에 입구 압력변동은 각각 1, 2, 4 kPa 세 가지를 공통적으로 적용하였다.

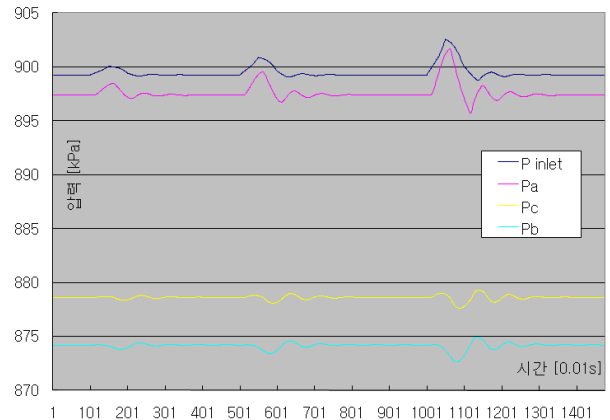


Fig. 5 Comparison of the pressure variation

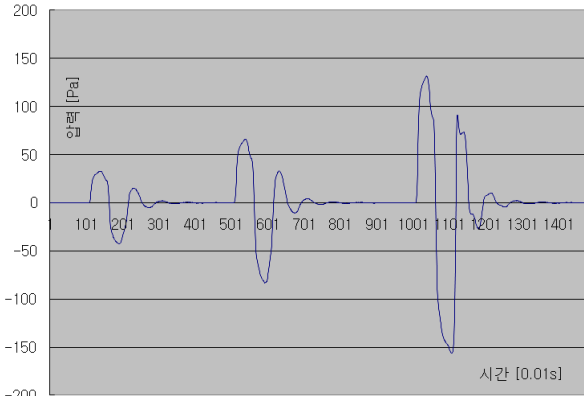
- ① 입구 압력 9 bar, 유량 16 kg/s (약 10.5 m/s)
: 입구 압력변동 1초간 발생
- ② 입구 압력 9 bar, 유량 16 kg/s (약 10.5 m/s)
: 입구 압력변동 0.2초간 발생
- ③ 입구 압력 9 bar, 유량 25 kg/s (약 17.5 m/s)
: 입구 압력변동 1초간 발생

Fig. 5는 Case ①의 각 위치에서의 압력변화를 도시한 그림이다. 그래프에서 약 1초 경, 처음 발생하는 압력변동은 1 kPa의 입구 압력 변동이 있는 경우이고, 다음은 중간의 약 4초 경 2 kPa, 마지막은 7초 경 4 kPa의 변동이 있는 경우이다. 입구에서 발생한 압력의 변동이 후방으로 전달되는 양상을 관찰할 수 있다. 이때 Pa는 오리피스 전방 압력탭핑 위치에서의 압력이고, Pb는 오리피스 후방탭핑, Pc는 보어 중심에서의 압력이다.

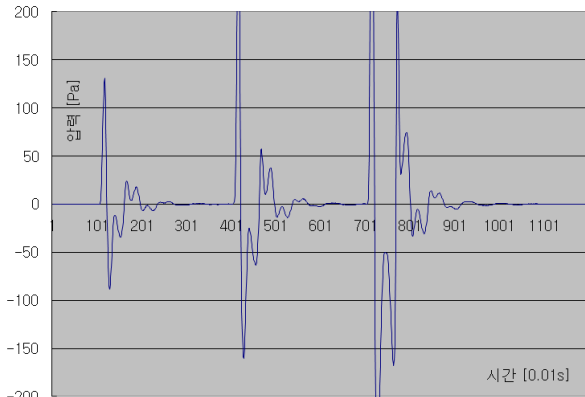
3.3.1 차압변화량 비교 검토

Fig. 6(a)-(c)는 Case ①~Case ③의 각 경우에서, 입구 압력변동에 따라 발생하는 오리피스 전후방 압력차(차압)의 변화량($\Delta P_1 - \Delta P_2$)을 도시한 것이다. 즉, 어떤 시점의 전후방 차압에서 다음 시점(0.01초 후)의 차압 변화량을 도시한 것이다. 모든 경우의 결과 그래프에서, 입구에서의 압력변동의 크기에 따라 차압의 변화량도 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

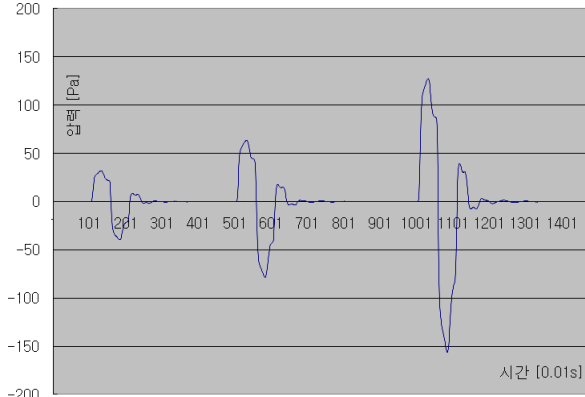
Fig. 6(a)와 (b), 입구 압력변화의 시간이 각각 1초와 0.2초로 다른 두 경우인 Case ①과 ②를 비교하면, 입구 압력변화 시간 차이에 따라, 차압 변화량의 양상도 크게 달라지고 있음을 알 수 있다. 이는 짧은 시간에 어떤 물리량의 변화가 발생하는 경우, 시간에 반비례하여 상대적으로 훨씬



(a) Case ①



(b) Case ②



(c) Case ③

Fig. 6 Pressure-difference of all analysis cases

큰 전후방의 압력차이, 즉 전방과 후방 각 지점에서의 큰 압력의 시간변화($\delta P_b - \delta P_a$)가 발생하는 것을 확인할 수 있는 결과이다. 그러므로 전방의 동일한 크기의 압력변동에 대하여서도, 압력의 변동 시간이 다를 경우, 그 영향은 전후방 각 지점의 압력변화율 차이로 나타남을 확인할 수 있다. 이에 비해, 기준유량의 차이가 있는 경우인 Case ①과 ③의 비교는, Fig. 6(a)와 (c)에

서, 두 경우에서 차압변화량에 거의 차이가 발생하고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 기준유량은 차압변화량에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있는 결과로, 차압의 변화량은 기준유량과는 무관함을 확인할 수 있는 결과이다.

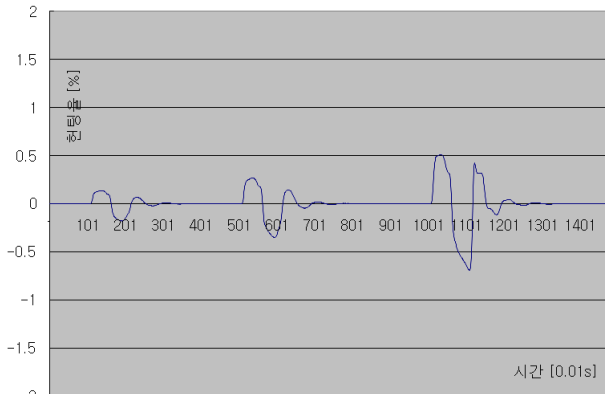
3.3.2 압력현탕을 비교 검토

Fig. 7(a)~(c)는 각 Case ①~Case ③의 입구 압력변동에 따른 압력 현탕률을 식 (2)를 사용하여 계산한 후 도시한 것이다.

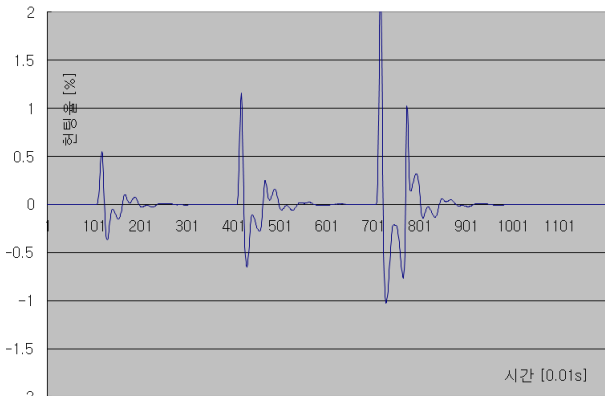
Fig. 7(a), 즉 Case ①에서 발생하는 현탕은 최대 약 0.5 % 수준으로 양호하게 나타나고 있다. 이에 반하여 Case ②에서 발생하는 현탕은 크게 증가하고 있음을 Fig. 7(b)에서 볼 수 있다. 이것은 Fig. 6(b)에서의 차압변화량의 증가가 식 (2)의 계산을 통해서 압력 현탕률의 증가로 직접 연계된 결과로, 앞 절에서, 압력의 변동 시간이 다를 경우, 그 영향은 전후방 각 지점 압력의 시간변화량의 차이로 나타난 것이다. 결과적으로 압력 현탕률은 전후방 압력의 시간변화량의 차에 비례함을 다시 확인하였다.

다음으로 Case ③에 대한 결과를 Fig. 7(c)에 도시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 압력 현탕률은 매우 작으며, 동일한 량의 압력차와 차압의 변화율을 보였던 Case ①에 비하여서도 절반 수준의 매우 작은 값으로 나타났다. 앞선 관계식의 검토에서 압력현탕은 기준차압(ΔP_1)에 반비례하는 관계를 가지는 것으로 검토된 결과에 기인된 것으로, 상대적으로 많은 유량이 흐르는 경우, 동일한 수준의 압력변동에 대하여 그 영향이 희석되어 상대적으로 작은 현탕률로 평가된다. 이는 실제 동일한 유동 교란(불안정성)에 대하여 상대적으로 작게 평가함으로써 현탕률이 유동 불안정성을 객관적으로 평가하는데 한계가 있음을 보이는 결과이다. 즉, 식 (2)를 통한 압력현탕률의 평가는 기준유량에 대한 상대적인 척도로써 활용될 수는 있으나, 유량범위의 차이가 있는 경우 객관적인 유동 불안정성을 평가하기에는 한계가 있음을 보여주는 것이다.

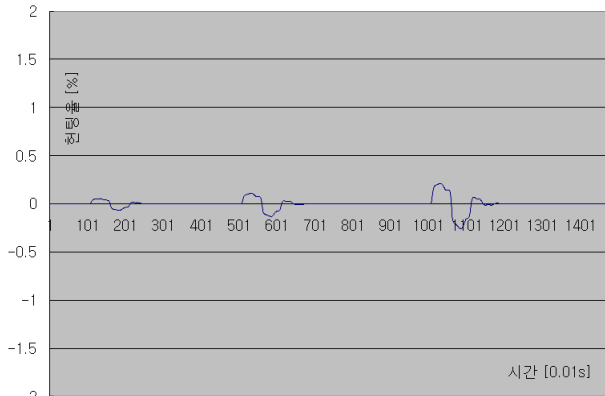
따라서 본 연구의 연구배경 중의 하나인 Fig. 1 관리소의 과도한 압력현탕률의 문제는 기준유량을 고려하지 않고, 단순히 해당 관리소 배관계통의 유동불안정성이 크거나 계량오차가 크다고 단정할 수는 없으며, 기준 기준유량의 범위를 검토



(a) Case ①



(b) Case ②



(c) Case ③

Fig. 7 Hunting rate of all analysis cases

하여 타 관리소의 경우와 비교됨이 적절하다고 사료된다.

3.3.3 샘플링 간격에 따른 헌팅률 비교 검토

Fig. 8은 Case ①에 대한 차압의 변화량을 앞의 검토에서와 같이 시간간격을 0.01 초를 기준으로 수행한 경우(헌팅)와 이보다 10배 큰 0.1 초로 둔 경우(헌팅 10)를 기준으로 헌팅률을 산출하여 도

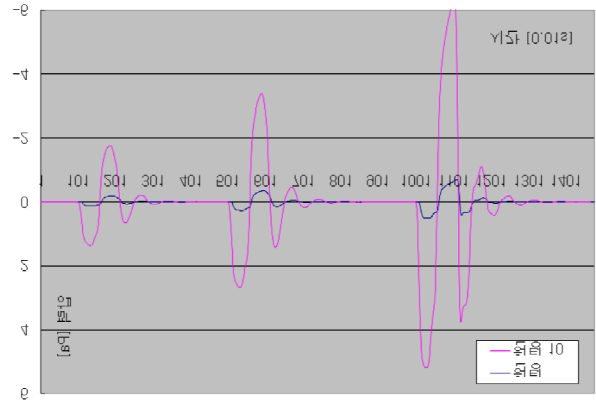


Fig. 8 Hunting rate comparison by Δt

시한 것이다. 다시 말해, 임의 기준시점에서 0.01 초 후의 차압을 기준으로 헌팅률의 평가한 것과 0.1초 후의 차압을 기준으로 헌팅률의 평가한 것을 상호 비교하여 도시한 것이다.

그림에서 보듯이 시간간격(Δt)을 10배 크게 한 경우에 헌팅률이 급격히 증가하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 동일한 기준차압과 차압의 변화율에도 불구하고, 단지 차압을 측정하는 시간간격의 증가에 따라 헌팅률이 급격히 증가하는 것으로 평가되고 있음을 보여주고 있다.

이는 앞의 식 (5)에서 압력헌팅은 오리피스 전후방 압력의 시간변화량($\delta P_b - \delta P_a$)에 비례함을 확인하였다. 이때, 오리피스 전후방 압력의 시간 변화량은 실제 기준시간과 경과시간간의 시간간격에 따라 $\delta P_b - \delta P_a$ 의 값이 변화될 수 있음을 보여주는 결과를 제시하는 것이다. 즉, 시간간격의 증가는 차압변화량의 증가로 연계되고 결과적으로 압력헌팅의 증가로 귀결된다. 따라서 압력헌팅의 산정에 있어서, 동일한 제원의 시스템에서 동일한 시간 간격을 기준으로 헌팅을 비교, 평가하는 것이 필수적임을 확인할 수 있는 결과이다. 또한 이러한 조건이 충분히 만족되지 않을 경우 헌팅률의 평가는 오류를 포함할 수 있음을 보여주는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 유동 헌팅의 근본적인 원인과 영향인자를 규명하고, 천연가스 배관계통에서 계량오차를 유발하는 유동 불안정성과의 유동 헌팅률의 관련성 및 관련 표지자로서의 적절성을 검

토하고자 오리피스 유량계를 대상으로 3차원 CFD 해석을 수행하였다. 이를 통하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 오리피스를 통과하는 유동의 불안정성(압력 현탕)은 차압비의 함수이며, 오리피스 전후방 압력의 시간변화율에 비례하고 기준차압에 반비례하는 관계를 가짐을 CFD 해석을 통해 검증하고, 압력현탕은 유동 불안정성(변동성)과 계량오차의 추정을 위한 간접지표로 적절함을 확인하였다.

(2) 전방의 동일한 크기의 압력변동에 대하여서도, 압력의 변동 시간이 다를 경우, 그 영향은 전후방 각 지점의 압력변화율 차이로 나타나며 결과적으로 압력 현탕률은 전후방 압력의 시간변화량의 차에 비례함을 다시 확인하였다.

(3) 차압 변화량은 기준유량과는 무관하나 압력 현탕률은 기준유량에 반비례관계를 가짐을 확인하였다. 따라서 압력 현탕률은 기준유량에 대한 상대적인 척도로써 활용될 수는 있으나, 유량범위의 차이가 있는 경우 객관적인 유동 불안정성을 평가하기에는 한계가 있음을 확인하였다.

(4) 시간간격의 증가는 차압변화량의 증가로 연계되고 결과적으로 압력현탕의 증가로 귀결되므로, 압력현탕은 동일한 제원의 시스템에서 동일한 시간 간격을 기준으로 현탕을 비교, 평가하는 것이 필수적임을 확인하였다.

참고문헌

(1) Ahn, S. H. and Her, J. H., 1999, An Experimental

Study of the Accuracy Comparison by the Installation Condition, KOGAS R&D Report

(2) Ahn, S. H. and Her, J. H., 1999, An Field Study on the Accuracy Comparison of the Meter, KOGAS R&D Report

(3) Ahn, S. H., Chung, J. T., Shin, C. H. and Dong, J. H., 2005, "The Effect of Metering Error Due to the Flow Fluctuation," *KFMA*, Vol. 9, No. 3, pp. 73~79.

(4) Ahn, S. H. and Her, J. H., 2006, "An Introduction about the Flow Hunting on the Field Operation Problems of Natural Gas Meters," KOGAS R&D Report

(5) Shin C. H., Ahn S. H., Chung J. T., Her J. Y. and Kim W. S., 2005, "The Numerical Analysis about the Flow-Hunting Characteristics of the Orifice Meter," *Proceedings of the KSME 2005 Fall Annual Meeting*, pp. 247~252.

(6) Shin, C. H., 2011, "A Pipeline Network Analysis on the Source and the Relation with Pipe Diameter of the Flow Hunting in a Orifice Meter," *KIGAS*, Vol. 15, No. 1, pp. 54~59.

(7) ISO, 1991, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, ISO 5167-1.

(8) AGA, 1991, Orifice Metering of Natural Gas, A.G.A Report No. 3.

(9) Fluent Inc., 2003, "FLUENT 6.1 User's Guide"