

천연가스 계량배관 내·외의 온도차가 계량오차에 미치는 영향에 관한 연구

하영철 · 이철구 · 장승룡 · 이강진

한국가스공사 연구개발원 유체유동연구팀
(1998년 2월 28일 접수, 1998년 4월 16일 채택)

A Study on Effects of Temperature Difference between the Inside and Outside the Meter-Run on Natural Gas Flow Measurement Errors

Youngcheol Ha · Chulgu Lee · Seungyong Chang and Kangjin Lee

*Fluid Flow Research Team, R&D Training Center, KOGAS
Ansan, Korea*

(Received 28 February 1998; accepted 16 April 1998)

요 약

단열이 되어 있지 않은 천연가스 계량배관에서 배관 내·외의 온도차로 인한 오리피스 유량계 오차를 정성적으로 실험하였다. 고려된 주요 인자는 유속과 대기온도이며 태양복사 열도 일부 고려되었다. 실험결과 유량이 극히 작고, 배관 내·외의 온도차가 큰 하절기 유동조건에서도 그다지 큰 오차는 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

Abstract - Experiments had been conducted qualitatively regarding flow measurement errors of orifice flowmeter due to temperature difference between the inside and outside the natural gas meter-run in case of no pipe insulations. The primary factors considered in this study are fluid velocity and surrounding temperature. In addition, a portion of thermal radiation due to the sun was involved as a factor. The results showed that the considerable errors were not detected even in conditions of low flow rates and large temperature difference between the inside and outside the meter-run.

Key words : Orifice meter, Thermal insulation, Temperature profile

1. 서 론

오리피스를 이용한 가스유량측정에서 온도는 오리피스판 상·하류측에서 측정하는 것이 모두 허용된다. 그러나 온도 측정을 상류측에서 할 경우 센서나 온도계 well에 의해 유동교란이 발생할 수 있으므로 일반적으로 오리피스판 하류측에서 측정한다. 측정거리는 오리피스판에서 5~15D 이내이며, 배관 중심에 센서를 삽

입하여 유체 온도를 측정한다.

이렇게 온도를 측정하라는 표준규격서의 규정에는 한 가지 전제가 있다. 즉 배관 주위와 배관내 유체의 온도차가 크지 않다는 가정이다. 따라서 이 온도차가 클 경우 배관을 단열(보온)하여 표준규격서의 전제 조건을 만족시켜야한다.

그런데 이 온도차에 대한 표준규격서[1, 2]의 언급이 상당히 불확실하므로 단열이 필요한 온

도차를 산정하기가 매우 어렵다. 여기서, 단열이 필요한 온도차를 명확히 규정하지 않은 이유는 유속, 압력, 배관직경 등에 따라 배관내 온도 분포가 달라질 수 있기 때문이라고 판단된다.

이들 규격서의 내용을 정리해 보면 배관내·외의 온도차로 인한 계량오차 발생 요인은 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 온도측정이 이루어지는 지점의 배관단면에서 유체 온도 분포의 불균일로 인한 오차이다. 유체의 온도는 배관 중심에서 측정하는 것이 일반적인데 배관내·외의 온도차가 크다면 배관 중심부와 내벽 근방의 온도차가 적지 않게 날 수 있다. 이 경우 배관 중심에서 측정한 유체온도는 그 단면내 유체 온도를 대표한다고 볼 수 없다. 둘째는 유량계가 설치된 지점의 유체 온도와 측정이 이루어지는 지점의 온도차에서 비롯되는 오차이다. 실제로 필요한 유체의 온도는 유량계 설치 지점의 온도인데 이 두 지점의 온도차가 무시할 수 없는 크기라면 필연적으로 계량오차가 발생된다.

본 연구는 이러한 계량오차를 정성적으로 파악 위해 수행되었고, 실험은 당 공사의 계량기 지 한 곳을 선정하여 실시되었다. 그러나 이 공급기지의 유동 조건이 다른 공급기지의 조건과 크게 다르지 않아 여기서 도출된 결과가 당 공사 내에서는 어느 정도 일반성이 있을 것으로 판단한다.

2. 실험

배관 단면내 온도 분포 측정방법

배관 단면내 온도 분포 측정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 공급배관(24인치)의 well에 RTD (ASL F25, 불확도: $2U_c=25mK$) 또는 열전대(K형, 불확도¹⁾: $U_c=0.2K$)를 넣고 삽입깊이를 변화시키면서 측정하였다. 센서의 삽입깊이는 배관 내벽을 기준으로 5~6개의 지점을 선정하였으며 배관 벽면으로 갈 수록 조밀하게 하였다. 삽입되는 센서의 기준점은 RTD와 열전대(Thermocouple) 모두 센서 끝단이며 Table 1에는 시험 일자별 센서의 삽입 깊이가 표시되어 있다.

배관 단면내 온도 분포를 정확히 알기 위해서는 여러 개의 센서를 삽입 깊이 별로 설치하여 동시에 온도를 측정해야 하지만 계량배관에 설치된 온도 well이 한 개뿐이어서 이렇게 하

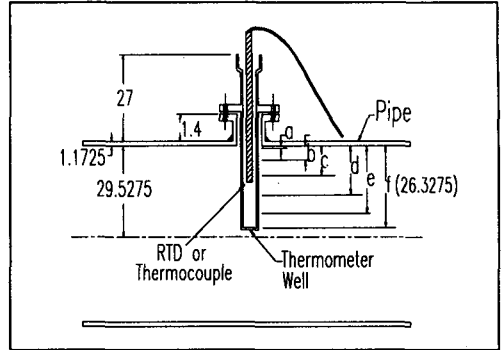


Fig. 1. A schematic diagram of temperature profile measurement at the metering pipe cross-section.

기가 매우 어려웠다. 대신 실험 전/후에 배관 중심(26cm)에서의 온도 변화를 충분한 시간동안 측정하고 이를 기준으로 하여 센서의 삽입 깊이에 따른 온도 변화를 추정하였다.

배관내 온도 분포 측정을 위해 사용된 센서 종류는 두 가지인데 하나는 RTD이고 다른 하나는 열전대이다. 열전대가 사용된 이유는 RTD로 측정된 well의 깊이 별 온도 즉, 국부 온도 측정이 비교적 정확히 되고있는 지 확인하기 위한 것이다. 금속관으로 보호되어 있는 RTD의 경우 금속관을 통해 주위 열이 센서로 전달되는데 이렇게 되면 국부적인 온도 측정에 오차가 발생하기 때문이다. 이러한 문제는 열전대의 경우에도 마찬가지로 발생하지만 열전대 비드(bead) 주위 도선을 여러 겹으로 감아 놓으면 도선을 통해 비드로 유입되는 전열량을 상당히 줄일 수 있게 된다. 여기서는 비드 밑 7.5cm의 도선을 말아서 1cm로 만들었다.

유량계와 well 위치의 온도차 측정방법

유량계와 온도 well 위치(온도 측정 지점)의 온도차는 센서를 배관내에 삽입하여 측정해야 하지만 계량라인의 여건상 이렇게 하기는 매우 어려우므로 배관 표면에 온도센서를 설치하여 이를 측정하였다. 이 방법에 다소의 문제가 제기될 수 있으나 배관 길이 방향에 따른 표면 온도차가 크지 않은 경우에는, 배관 표면의 온도차로 배관내 유체의 온도차를 유추하는 것에 큰 문제가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

본 실험에서는 유량계와 온도 well 위치의 온도차 측정을 위해 센서를 Fig. 2와 같이 설치하였다. 실제로 이를 측정하기 위해서는 상류측 L_{up} 지점에 설치된 RTD를 유량계 근방으로 옮겨야 하지만 유량계와 well 위치의 온도

1) 사용온도 5~20℃ 구간에 대해 표준저항온도계로 교정함

Table 1. Summary of inserting depths and types of thermal sensors.

삽입깊이 시험일자	a	b	c	d	e	f	측정기 종류
97. 5. 23	1(0)†	5(4)		10(9)	20(19)	26(25)††	RTD
97. 7. 29	0.5(-0.5)	2.5(1.5)	7.5(6.5)	12.5(11.5)		26(25)	RTD
97. 7. 30	1(0)	3(2)	5(4)	10(9)	15(14)	26(25)	RTD
97. 8. 20	1	3	5	10	15	26	열전대

† () 안의 수치는 실제 온도를 측정하는 RTD element의 삽입 위치를 나타낸다.

†† 이 삽입 깊이의 정확한 치수는 26.3275cm이나 편의상 26cm로 표기함

Table 2. Measuring locations separated from orifice plate for pipe surface temperature measurement

측정 위치 측정 일자	오리피스 상류측 L_{up}	오리피스 하류측 L_{down}	배관 내경	측정 센서
'97. 5. 27	36.0D(11m)	19.0D(5.9m)	D=307.08 mm	RTD
'97. 7. 29	13.5D(8m)	14.6D(8.6m)	D=590.55 mm	RTD
'97. 7. 30	13.5D(8m)	14.6D(8.6m)	D=590.55 mm	RTD
'97. 9. 4	13.5D(8m)	14.6D(8.6m)	D=590.55 mm	RTD

차를 확대해서 관찰하기 위해 유량계 상류측 L_{up} 지점에 대신 설치하였다. Table 2에는 실험 일자별 측정 위치가 표시되어 있다.

온도센서의 설치는 Fig. 2와 같이 배관 표면에 센서를 나란히 놓고 동일한 크기의 단열재를 각각의 센서에 덮은 다음 청테이프로 고정하였다. 두 센서에 입사되는 태양 복사열 차를 최소화하기 위해 입사각이 같도록 센서의 위치를 맞추었으며 바람에 의한 대류 열전달 효과도 줄이기 위해 단열재의 크기를 충분히 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3, 4, 5, 6에는 센서의 삽입 깊이를 달리 하여 측정한 배관내 온도 분포가 나타나 있다. Fig. 3, 4, 5에 나타낸 배관 표면 온도 상의 피크(peak)는 그 아래 나타낸 배관 내부 온도값에 해당되는 센서의 삽입 깊이를 나타내기 위한 편의상의 표시에 불과하며 실제 측정데이터는 아니다. 피크점 옆에 표기한 숫자는 배관내로 센서를 삽입한 깊이를 나타내며 다음 피크가 나타날 때까지 그 삽입 깊이에서 측정한 온도가 된다. Fig. 4에서 배관내 온도 곡선의 불연속 지점은 측정 데이터 문제로 인해 삭제한 부분으로 실험상의 조작 잘못에서 비롯된 것이다.

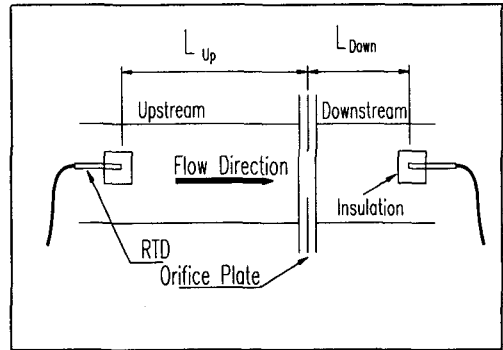


Fig. 2. A schematic diagram of RTD installation for measuring temperature difference between well and orifice plate.

Fig. 6은 열전대로 측정한 결과로 센서의 반응속도가 빨라서 RTD처럼 순차적으로 삽입 깊이를 달리하여 온도측정을 하지 못했다. 대신 배관 중심의 온도와 각 삽입깊이 별 온도를 교대로 측정하여 배관내 온도 분포를 알아내었다. 여기서는 센서의 삽입깊이를 산(peak)과 골(valley) 부분에 기입하였으며 온도 기울기가 급격히 변하기 전까지 이 수치가 적용된다. Fig. 3에서 배관표면 온도나 배관내 유체의 온도가 50분 주기로 사인곡선을 그리는 것은 히

Table 3. Flow conditions of Figs. 3 through 6.

측정일자	'97. 5. 23	'97. 7. 29	'97. 7. 30	'97. 8. 20
항목				
유속 (m/s)	2~2.55	~ 0.63	~ 0.56	~ 0.54
레이놀즈 수	$1.8 \times 10^6 \sim 2.3 \times 10^6$	$\approx 5.7 \times 10^5$	$\approx 5.1 \times 10^5$	$\sim 4.9 \times 10^5$
측정센서	RTD	RTD	RTD	열전대
날씨	흐림, 가끔 비	조금 흐림	맑음	맑음
압력	18 kg/cm ² (gage)			

터 가동으로 인한 것이며 반면 Fig. 4, 5, 6은 히터가 가동되지 않은 상태이다.

배관 단면내 유체 온도의 분포

RTD로 측정한 배관 단면내 온도 분포는 삽입 깊이 26cm(배관 중심) 위치의 온도 추세를 기준으로 파악할 수 있다. 즉, 이 온도 추세선과 각 삽입 깊이의 온도 추세선이 일치하지 않으면 온도차가 있는 것이고 그렇지 않으면 없는 것이다. 그리고 열전대로 측정된 온도 분포는 배관 중심 온도(삽입깊이 26cm)와 각 삽입 깊이 별 온도를 비교하면 된다.

Fig. 3은 유속이 2~2.55 m/s이고 대기와 배관 중심의 온도차가 14~20℃ 정도될 때 배관 단면내 온도 분포를 측정한 결과다. 배관 표면과 중심의 온도차는 히터 가동 유/무에 따라 0.1~2.5℃ 사이에서 진동하는데 이와 함께 센서의 삽입 깊이에 따른 온도차도 변하는 것을 알 수 있다. 즉 히터 가동시(상승곡선)에는 삽입깊이에 따른 온도 변화가 거의 없고 히터가 꺼졌을 때(하강곡선)에는 센서의 삽입 깊이가 1cm(0cm)지점에서 배관 중심과의 온도차가 0.6℃ 정도로 뚜렷해짐을 알 수 있다.

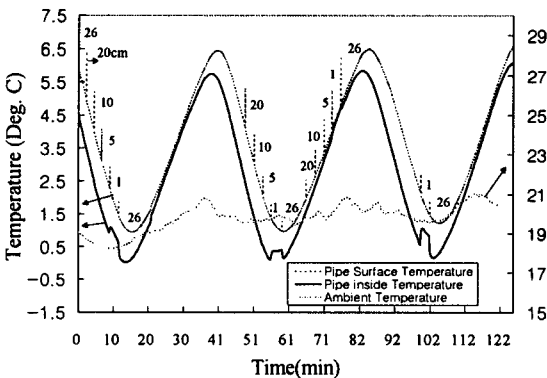


Fig. 3. Temperature profile at the pipe cross-section. ('97.5.23)

Fig. 4, 5는 유속이 0.63m/s이하이고 대기온도가 34℃안팎인 전형적인 여름 날씨에서 측정한 배관내 온도 분포이다. 여기서 Fig. 3과 달리 히터가 가동되지 않았으며 삽입 깊이에 따른 배관 중심과의 온도차를 뚜렷이 관찰할 수 있다. 이 온도차는 15cm에서부터 관찰할 수 있으며 (Fig. 5의 경우 이 위치의 온도가 측정되지 않았지만 온도 변화의 경향으로 보아 예측할 수 있음) 배관 벽면으로 갈수록 커지고 깊이가 1cm위치에서는 약 3℃정도차이가 발생함을 관찰할 수 있다.

그러나 열전대를 이용해 측정한 배관 단면내 온도 분포를 보면 실제로 이 만큼 큰 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5의 유동조건과 거의 유사한 조건에서 측정한 결과인데 삽입 깊이에 따른 온도 변화 경향은 RTD로 측정한 결과와 유사하지만 삽입 깊이에 따른 온도 변화는 Fig. 5와 비교해 전체적으로 거의 절반 크기이다.

이러한 판단을 기준으로 RTD로 측정한 온도 분포를 다시 살펴보면, 깊이가 1cm(실제 삽입깊이 0 cm)를 제외하고는 한여름 미소유량조건에서도 1.5℃이하의 온도 분포 차이가 나는 것을

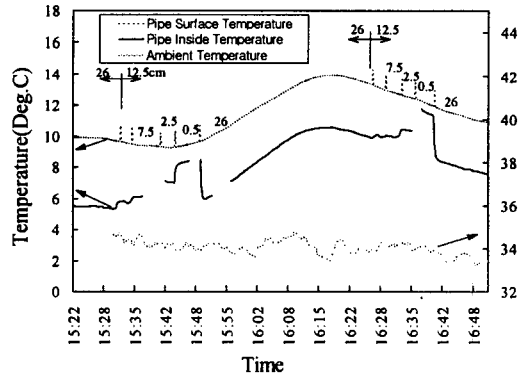


Fig. 4. Temperature profile at the pipe cross-section. ('97.7.29)

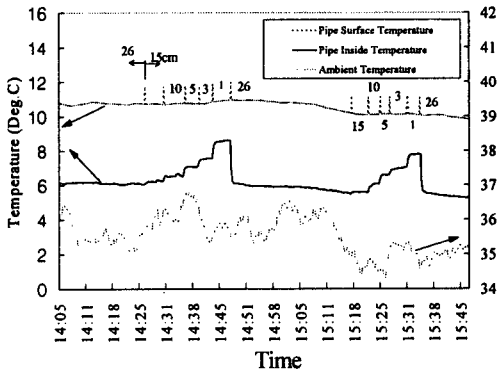


Fig. 5. Temperature profile at the pipe cross-section ('97.7.30).

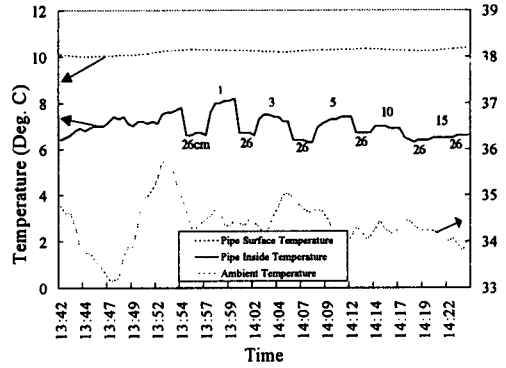


Fig. 6. Temperature profile at the pipe cross-section ('97.8.20).

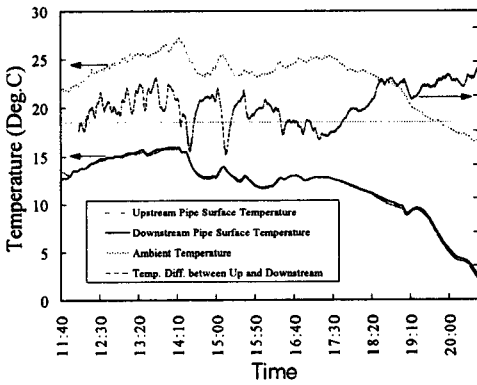


Fig. 7. Temperature difference between upstream and downstream measuring locations ('97. 5.27).

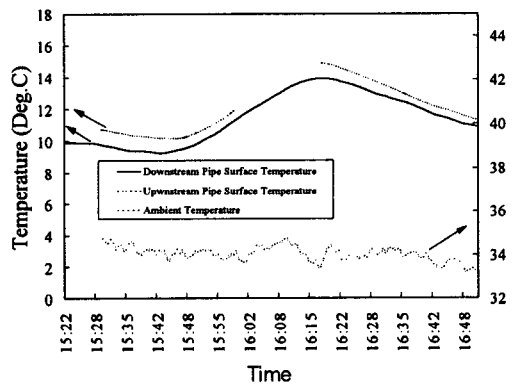


Fig. 8. Temperature difference between upstream and downstream measuring locations ('97. 7.29).

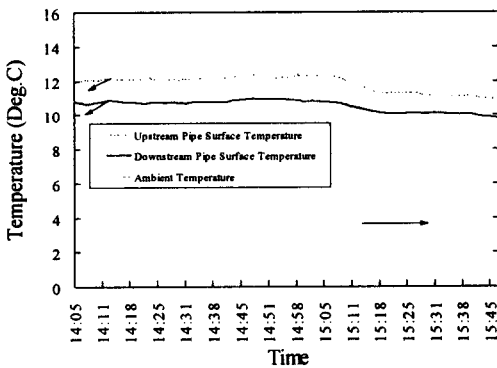


Fig. 9. Temperature difference between upstream and downstream measuring locations ('97.7.30).

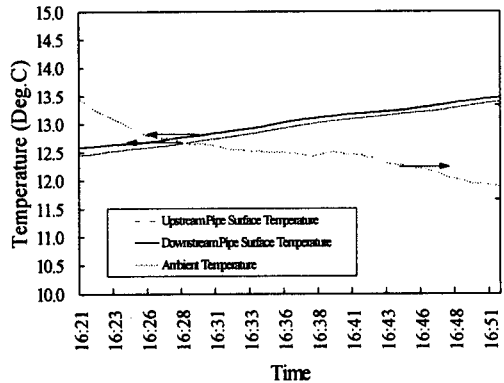


Fig.10. Temperature difference between upstream and downstream measuring locations ('97.9.4).

Table 4. Summary of Figs. 7 through 10.

측정일자	'97. 5. 27	'97. 7. 29	'97. 7. 30	'97. 9. 4
항목				
유동 방향	순방향	역류	역류	순방향
배관 표면과 대기온도 차(℃)	≈ 10 ~14	≈ 19~23	≈ 23	≈ 14.5
유속 (m/s)	2.68~2.77	≈0.63	≈0.56	4.15~4.37
레이놀즈 수	$1.1 \times 10^6 \sim 1.17 \times 10^6$	$\approx 5.7 \times 10^5$	$\approx 5.1 \times 10^5$	$3.6 \times 10^6 \sim 3.9 \times 10^6$
온도차 (℃)	0~0.4	0.5~ 1	1~1.6	0.09~0.14
상/하류측 길이 차를 15D로 환산했을 때 온도차(℃), ΔT_{15D}	0~0.11	0.27~0.53	0.53 ~ 0.84	0.05~0.07
압력	18 kg/cm ²			
날씨	흐림, 가끔 비	조금 흐림	맑음	맑음
ΔT_{15D} 에 대한 예상 계량오차	0~0.02 %	0.05~0.1%	0.1~0.15%	0.01%

알 수 있다. 그렇지만 유속이 2~2.55m/s일 때 (Fig. 3)와는 달리 온도 분포가 고르지 못하다.

이렇게 배관 단면내 온도 분포가 고르지 않은 조건에서 배관 중심의 온도로 계량을 하게 되면 오차가 발생하게 된다. 이를 정량화 하기는 매우 어렵지만 배관의 온도 분포 형태를 오리피스 보어에도 그대로 적용할 수 있다면 대략적인 유량오차를 산정할 수 있게된다. Fig. 8의 경우, 오리피스 유량계산식을 이용하여 오차를 구해보면 대략 0.1%가 된다.

유량계와 well 위치의 온도 차이

Fig. 7, 8, 9, 10에는 대기온도 및 유속에 따른 오리피스 상·하류측 온도차가 나타나 있다. Fig. 7에서 상류측 배관 표면 온도가 하류측보다 간혹 높게 나타나는 것은 상류측 RTD를 플랜지 이음부에 근접(약 5D 지점)하여 설치한 데서 비롯된 것으로 보인다. 그러나 Fig. 8, 9에서 상류측 표면온도가 하류측보다 높게 나타나는 것은 역류 (통상적인 계량라인에서는 오리피스 유량계 상류에서 하류로 흐르지만 여기서는 하류에서 상류로 유동 방향이 바뀌었다.)에 의한 것이지 RTD의 설치 문제로 발생한 것은 아니다. 이들 자료를 논의하기 위해 Fig. 7~10의 결과를 정리하면 Table 4와 같다.

이를 살펴보면 유량계와 well 위치의 온도 차이도 배관내 온도 분포처럼 유속에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 배관 표면 온도차의 측정거리를 15. Table의 ΔT_{15D} 는 유량계 상·하류측 D (표준규격서가 제시하는 온도 측정 최대거

리)로 환산했을 때의 온도차이다. 이 온도차를 살펴보면 유속 증가에 따라 배관 표면 온도차가 감소하는 것을 알 수 있으며 특히 유량이 작을 때는 약간의 유속 증가에 의해 이 온도차가 비교적 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. (7월29일과 30일자에 측정된 결과 비교)

Table 4의 전반적인 경향으로 볼 때 유속이 3~4m/s 이상이 되면 배관 외부와 유체의 온도차로 인한 계량오차는 거의 무시할 만한 것으로 판단된다. 그리고 배관 표면과 대기 온도차가 23℃정도되고 유속이 0.56m/s이하일 때도 유량계와 온도well 사이의 온도차 ΔT_{15D} 가 0.84℃ 정도에 불과하며 예상되는 오리피스 유량계 계량오차도 0.15%를 넘지 않는다.

4. 결 론

본 연구는 계량배관 내·외의 온도차로 인한 오리피스 유량계 오차를 정성적으로 분석하기 위해 수행되었다. 이를 위해 당공사 계량배관에서 유속 및 대기 온도에 따른 배관 단면내 온도 분포 및 유량계와 well사이의 온도차를 측정하여 분석하였다. 그러나 본 실험에 도입된 가정(온도 well 내부의 온도 분포가 배관 단면내 유체의 온도 분포와 일치한다고 가정)과 배관 표면 온도차로 배관내 유체의 온도차를 추론할 수 있다고 가정한 점)과 제한된 측정결과 그리고 계량배관 내·외의 온도차로 인한 다른 오차 요인이 존재할 수 있기 때문에

다. 측정 결과를 정량화 하는 데는 어려움이 따른다. 다만, 이러한 문제점을 제외하고 본 실험의 결과만을 토대로 계량배관 내·외의 온도차로 인한 계량오차를 정리하면 다음과 같다.

1. 하절기 미소 유량에서 (압력 18kg/cm^2 , 유속 0.54 m/s , 배관 내·외의 온도차 28°C 정도, 배관경 24인치, 강한 복사열 존재), 배관 단면 내 온도는 배관 중심에서 내벽으로 갈수록 상승하며 특히 내벽 근방(센서의 삽입 깊이 1cm)에서는 배관 중심에 비해 약 1.5°C 정도 높아진다. 내벽 근방을 제외하고는 배관 중심과 온도차가 1°C 이하로 관찰되었으며 측정된 배관내 온도 분포를 기준으로 계량오차를 산정하면 약 0.1% 정도된다.

2. 하절기 미소 유량에서 (유속 0.56 m/s , 배관 표면과 대기의 온도차 $\approx 23^\circ\text{C}$ 정도), 유량계와 온도 well 지점 간(여기서는 15D로 가정)의 온도차는 $0.8\sim 0.9^\circ\text{C}$ 정도를 넘지 않으며 이를 유량오차로 환산하면 0.15% 정도 된다.

3. 유속이 약 $3\sim 4\text{m/s}$ 이상이 되면 유량계와 well 지점의 온도차는 0.1°C 를 넘지 않을 것으로 보이며 이를 유량오차로 환산하면 0.01~0.02% 이하이다.

4. 유량계 하류의 배관 중심 온도가 계량에 적용될 경우, 배관 단면내 불균일 온도 분포 및 유량계와 well사이의 온도차에 의한 각각의 유량오차는 서로 반대 부호를 갖게되며 이에 따라 상당 부분이 상쇄된다. 따라서 배관 내·외 온도차로 인한 다른 오차요인이 크게 작용하지 않는다면 이로 인한 계량오차는 하절기 미소 유량조건에서도 전술한 두 가지 요인에 의한 계량오차보다 그다지 크게 발생되지는 않을 것으로 판단한다.

참고문헌

1. ISO 5167-1, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices", 1st ed., 1991
2. AGA Report No. 3: Part 2, "Orifice metering of natural gas", 3rd ed., 1991