HWAHAK KONGHAK Vol. 40, No. 6, December, 2002, pp. 676-680

기준 밀도계의 측정 오차 분석에 관한 연구

이강진† · 허재영 · 하영철 · 안승희 · 이승준 · 이철구

한국가스공사 연구개발원 유체계량연구실
(2001년 7월 2일 접수, 2002년 8월 5일 채택)

A Study on the Analysis of Measurement Errors of Specific Gravity Meter

Kang-Jin Lee†, Jae-Young Her, Young-Cheol Ha, Seung-Hee An, Seung-Jun Lee and Cheol-Gu Lee

Fluid Measurement Research Division, R & D Training Center, KOGAS, Ansan 425-790, Korea
(Received 2 July 2001; accepted 5 August 2002)

요 약

기준 밀도계는 기준 조건하에서 밀도를 측정하는 기기로서, 산업계에서 특히 대유량 천연가스 계량에 폭 넓게 사용된다. 본 연구에서는 기준 밀도계의 적정 설치 및 운영방안을 제시하여 천연가스 유량 측정 정확도를 향상시키고자 현장 실험을 수행하였다. 실험 결과, 교정가스로 메탄과 질소가스 대신 메탄과 표준가스로 교정한 실험결과가 작은 밀도오차를 발생하고, 정확한 밀도 측정을 위해서는 정기적인 교정이 필수적이며, 또한 기준 밀도계는 주위 조건에 민감하게 반응하여, 주위 온도가 높으면 오차가 증가하는 것도 확인되었다.

Abstract – The specific gravity meter is the instrument used to measure the density of fluids under the reference conditions and it can be widely used in industrial areas, especially in massive flow rate natural gas industry. This study has been carried out in an attempt to improve measurement accuracy of natural gas flow rate calculation, providing the adequate installation and proper operation conditions of specific gravity meter. The test results are 1) the density measurement errors in case of using methane and standard gas as calibration gases are smaller than using methane and nitrogen gas, 2) the periodical calibration to maintain accurate density measurements is essential, and 3) the specific gravity meter is sensitive to changes of environmental conditions, especially environmental temperature surrounding the specific gravity meter.

Key words: Natural Gas, Base Density, Specific Gravity Meter, Gas Chromatograph, Calibration

1. 서 론

고압 대유량의 천연가스 계량에 있어서 정확한 유량 측정을 위해 질량유량을 주로 이용하는데 이때 필요한 것이 유동 조건이나 기준 조건에서의 가스의 밀도이다. 밀도 결정은 가능한 정확하여야 하며 특히, 천연가스 공급물량의 급격한 증가와 함께 대유량의 물량이송에 있어서 밀도 결정의 부정확한 오차는 거래 손익에 막대한 영향을 끼치므로 밀도 수치를 정밀하게 구하는 절차를 확립하는 것이 중요하다. 천연가스 산업에 있어서 밀도 결정에는 크게 2가지 다른 시스템이 사용된다[1-3].

첫 번째는 실밀도계(일반적으로 밀도계라 하지만 여기서는 기준 조건에서 유체의 밀도를 측정하는 기준 밀도계와 구별하기 위해 실밀도계로 칭하기로 한다)를 사용하여 직접 유동밀도를 측정하는 방법이고[4, 5], 두 번째는 계량할 유체의 P-V-T 관계를 이용하는 것이다. 즉 압력과 온도는 계량라인에서 압력계와 온도계로 측정되고, 기준조건에서의 밀도를 가스 분석기 또는 기준 밀도계를 이용하여 구한 후 계산밀도 식을 이용하여 간접적으로 유동밀도를 구한다. 위와 같은 2가지 시스템에 있어서 실밀도계에 의한 직접적인 밀도 측정 방법이 더 선호되지만 실밀도계가 매우 민감한 계측기이고 교정 절차가 복잡해서 운영시에 매우 주의를 기울여야만 원하는 정확도를 얻을 수 있는 어려움이 있다[6, 7].

따라서 점차적으로 밀도 측정에 있어 실밀도계보다 계산에 의한 밀도 결정 방식을 적용하려고 하는데 주요 이유는 기본적으로 계산에 의한 밀도 결정시 관련되는 오차가 줄어들었고[8, 9], 실밀도계의 유지 관리가 매우 어렵기 때문이다.

본 연구는 가스 분석기가 기 설치되어 운영중인 KOGAS(한국가스공사)의 한 공급관리소에 기준 밀도계를 추가로 설치하여, 기준 밀도계와 가스 분석기에 의한 기준 밀도값을 현장 실험을 통해 비교 분석하며, 운영상 발생할 수 있는 문제점 및 교정 방안을 검토하여 적정 운영체계를 확립하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

기준 밀도계의 특성 및 교정 방안을 검토하고자 구성된 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 기준 밀도계는 KOGAS에서 사용되는 모델(Solartron NT 3096)과 동일한 것으로 정확도는 최고 ±0.1% of reading이다[10].

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kjlee@kogas.re.kr

현장의 실제 천연가스가 공급되는 조건에서 기준 밀도계 운영 방법 및 특성을 파악하기 위해 KOGAS의 한 공급관리소에서 실험을 수행하였고 기준 밀도계는 비교 대상으로 삼은 가스 분석기(HP 5890 series II)의 설치위치를 고려하여 공급라인 후단에 있는 가스 분석기실 안에 설치하였으며, 기준 밀도계로 유입되는 샘플가스 취출부는 기 설치되어 운영되고 있는 가스 분석기의 샘플가스 취출부와 가능한 동일 부위에서 추출하였다.

본 실험에서는 기존 운영 설비에 영향을 안 끼치도록 방출용으로 사용되는 배관을 기준 밀도계로 유입되는 샘플라인과 연결되도록 하였고, 압력 조절기를 사용하여 유입압력을 일정하게 유지하였다. 압력조절기와 연결된 샘플라인을 통해 공급배관에서 추출된 샘플가스는 가스 분석기실 안에 설치된 기준 밀도계로 유입된다. 또한 기준 밀도계 인입 전에는 재차 압력 조절을 위해 압력조절기가 설치되어 있으며, 정성적으로 유체 흐름 및 유량을 확인하기 위해 플로트 타입 유량계를 설치하였다. 기준 밀도계의 측정 센서부위를 지나면서 적정 밀도 신호를 출력한 후 샘플가스는 인출라인을 통해서 가스 분석기실 지붕으로 연결된 방출라인과 연결된다. 기준 밀도계 전 후단의 가스 라인은 316L 스텐레스 스틸 튜빙을 사용하였으며 밸브를 포함한 피팅류는 외부 누설이 없는 제품을 사용하였다.

Fig. 2는 측정 장비의 계통도이다. 기준 밀도계로부터 출력되는 신호는 RS-232 케이블을 이용하여, 현장 실험실에 설치된 신호 변환기(signal converter)에 연결되며 데이터는 산업용 586 컴퓨터로 입력된다. 현장 조건은 일반 실험실보다 기온 및 외부 조건이 열악한 상태이므로 보다 안정적으로 실험을 수행하기 위해 일반 PC가 아닌 안정적인 산업용 컴퓨터를 채택하였다. 신호 변환기는 직류 전원 공급기로부터 전원을 공급받고 RS-232 케이블을 이용하여 controller인 산업용 586 컴퓨터로 제어 받는다. 또한 기준 밀도계의 주위온도 변화에 의한 특성 파악을 위해 2개의 저항온도계(RTD)도 설치하였다.

기준 밀도계로부터 출력되는 기준밀도의 정확도를 검증하기 위해 비교 대상으로 삼은 것은 공급관리소에서 거래용으로 사용되는 가스 분석기이며, 1시간 주기로 가스 성분을 분석하고 그 분석값을 출력한다. 이 가스 성분으로부터 기준 밀도는 가스 분석기에 부착되는 인테그레이터(혹은 프로세서라고도 함)에서 계산되어지며 내부에는 GPA(Gas Processors Association) 2172 밀도 계산 프로그램이 내장되어 있다[11, 12].

Fig. 3은 본 실험을 수행시 데이터의 저장과 실험의 효율성을 높이기 위해 작성된 프로그램을 실행시킨 화면이다. 24시간 실시간으로 매일 데이터를 저장하기 위해 매 1분 간격으로 하드디스크에 저장되도록 하였고 신호 변환기에서 출력된 측정 기준밀도, 비중과 주기 값은 모니터에도 동시에 표시되도록 하였다. 또한 비교 대상으로 삼은 현장의 가스 분석기로부터 출력된 기준밀도 및 비중도 나타내었으며, 이 값과 기준밀도의 측정값과의 오차도 동시에 나타나도록 하여 실험을 수행하는 동안에도 오차 변화를 확인할 수 있도록 하였다. 그리고 기준 밀도계 주위온도 측정용으로 설치된 저항 온도계의 온도도 지시되도록 하였다.

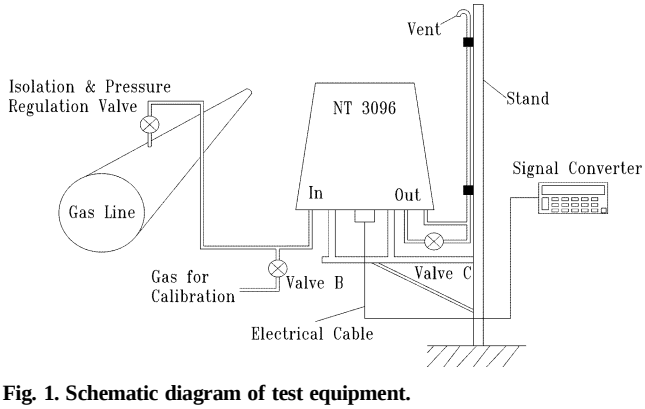

Fig. 1. Schematic diagram of test equipment.

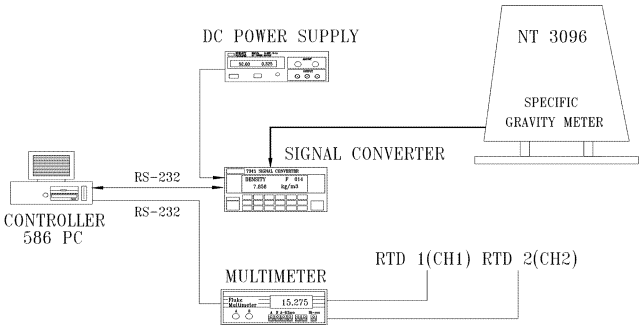

Fig. 2. Schematic diagram of measurement equipment system.

Specific Gravity Meter, 3096, Interface Program

Time : 16:21:34
Elasped Time : 600.14 Min

Base Density	: 0.8053	kg/m3
Specific Gravity	: 0.62286	
Period Time	: 2.19680E+02	us
Cal. Base Density	: 0.8060	kg/m3
Cal. Relative Density	: 0.623501	
Temp. in Densitometer	: 24.37708	deg.C
Temp. Gas Line	: 22.58155	deg.C
(Mea.Base/Cal.Base-1)*100	: -0.0868	
(Mea.Rela/Cal.Rela-1)*100	: -0.1028	

Fig. 3. Example of density calculation program.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 교정가스 종류에 따른 기준 밀도계 특성

3-1-1. 교정가스로 메탄과 표준가스를 사용할 때 기준 밀도계의 반응

기준 밀도계의 정확도는 주로 기준 챔버(reference chamber) 압력의 선택, 측정될 기준밀도 범위, 교정 자체의 정확도에 좌우된다. 특히 교정 정확도가 큰 영향을 끼치는데 이러한 교정 정확도는 적절한 교정가스를 선택하고 정해진 절차로 교정을 해야만 원하는 정확도를 얻을 수 있다. 여기서 적절한 교정가스란 측정하고자 하는 샘플가스의 특성을 대표해야 한다.

현장 실험시 사용된 기준 밀도계는 고순도 메탄과 표준가스를 이용하여 교정을 실시하였다. 표준가스는 한국표준과학연구원에서 제조한 일차표준가스로서, 실험이 수행될 때 현장에서 공급되는 가스의 성분 및 기준밀도와 유사한 가스이다. Fig. 4는 메탄과 표준가스로 교정시 20분 동안 출력되는 주기 값을 정리한 것이다. 이 주기 값은 기준 밀도계의 기준 챔버안에 실제 공급가스를 0.6 MPa로 채운 상태에서, 기준밀도를 이미 알고 있는 메탄 및 표준가스를 이용하여 0.64 MPa의 압력으로 기준 밀도계로 흘려 보낼시 출력되는 값을 의미한다. 어느 정도 주기 값

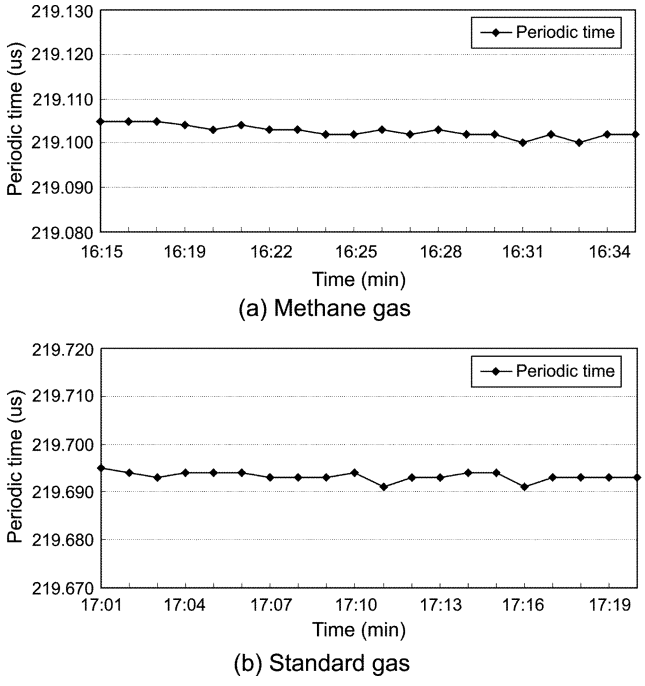

Fig. 4. Periodic time of calibration gases.

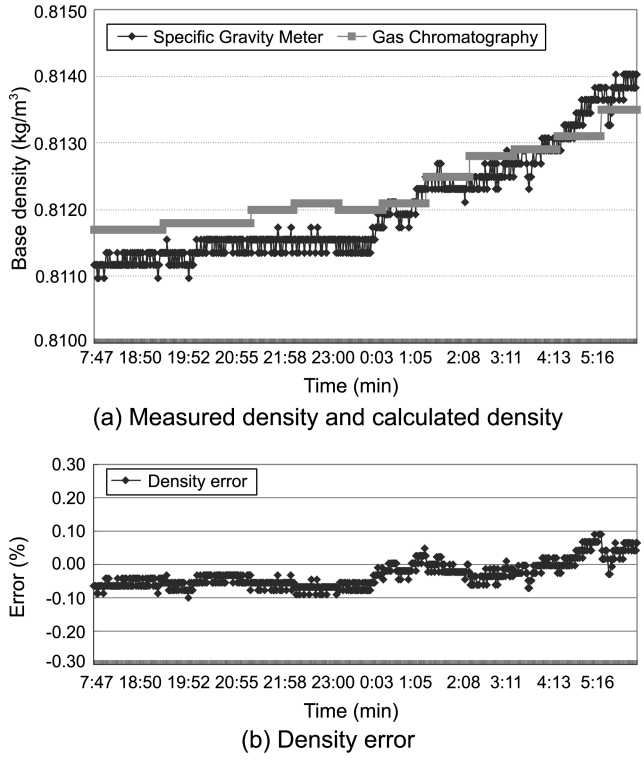

Fig. 5. Density errors due to changes of calibration gases.

이 안정된 후 20분간의 출력 주기값을 정리한 것으로서 X축은 시간(분)이고 Y축은 기준 밀도계로부터 출력되는 주기 값(μs)이다. 교정이 끝난 후 관련 계산식에 의해 교정 상수를 구한 후 이 수치를 신호변환기(signal converter)에 입력한다.

이렇게 교정이 끝난 후 기준 쳄버안에 일정한 공급가스가 채워진 상태에서, 공급가스로부터 분기된 샘플가스를 흘려 보낼시 기준 밀도계의 특성을 검토해 보기로 하였다. 이러한 실험의 목적은 수시로 그 조성이 변하는 공급가스의 기준밀도를, 기준 밀도계가 얼마나 정확히 측정하는지, 또한 교정가스 종류에 따라 기준 밀도계의 특성 및 측정 정확도를 알아보고자 함이다.

이제 공급배관의 샘플가스 취출부에 설치된 압력조절기 압력을 0.68 MPa로 고정시킨 후, 기준 밀도계 전단의 압력조절기를 이용하여 기준 쳄버안의 가스 압력보다 조금 높은 0.64 MPa로 샘플가스의 공급압력을 유지하도록 조절한다.

Fig. 5(a)는 기준 밀도계로부터 출력되는 기준밀도와, 비교 대상으로 삼은 현장의 거래용 가스 분석기로부터 출력된 계산 기준밀도를 비교한 것이다.

X축은 실험시간으로서 총 12시간 동안 출력되는 데이터를 1분 간격으로 정리한 것이다. 이 두 기준밀도의 오차를 나타낸 것이 Fig. 5(b)이다. Y축은 기준밀도 오차를 나타낸 것으로(측정 기준밀도/계산 기준밀도 −1)×100으로 계산된 것이다. 그림에서도 보듯이 실험시간 동안 ±0.1 %내에서 오차가 변하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림에서는 가스 분석기의 특성에 따른 밀도오차도 알 수 있는데, 비교 대상으로 삼은 현장의 가스 분석기는 기본적으로 1시간 간격으로 가스 성분을 분석하기 때문에, 중간에 가스 성분 변화시 감지하지 못하는 단점이 있다. 즉 22:22부터 23:22분까지, 4:22부터 5:22분까지 데이터를 보면 기준밀도계는 공급가스의 기준밀도변화를 바로 감지하지만, 가스 분석기로부터 출력된 계산밀도는 매 정각의 순시가스 성분으로부터 계산된 수치이고 이 수치가 동일하게 1시간 동안 계속 적용이 되기 때문에 전반적으로 다른 시간대보다 차이가 더 나는 것을 알 수 있다. 이러한 오차는 가스 분석기의 분석주기를 가능한 짧게 하면 줄어들 수 있는 문제이다.

3-1-2. 교정가스로 메탄과 질소를 사용할 때 기준 밀도계의 반응

다음에는 교정가스로 고순도 메탄과 질소가스를 사용했을 경우이다. 메탄과 질소가스를 선택한 이유는 제작사 매뉴얼상에 명시된 것처럼 공인된 순수 메탄과 대표적 혼합가스를 교정가스로 사용하면 이상적이지만, 실제로 공인된 혼합가스를 얻기 어렵고 몇몇 혼합가스는 용기 안에서 층이 쌓여지므로 신뢰할 수 없는 가스 성질이 되므로 그 대안으로 순수 메탄과 순수 질소가스 사용을 추천하고 있기 때문이다. 앞에서의 조건처럼 일정한 공급가스를 기준 쳄버안에 0.6 MPa로 채운 상태에서 기준밀도를 이미 알고 있는 메탄 및 질소가스를 이용하여 기준밀도계로 흘려 보낼시 출력되는 주기 값을 정리한다. 어느 정도 주기값이 안정된 후 20분간의 출력 주기값을 정리한 후 관련 계산식에 의해 교정 상수를 구한 후 이 수치를 신호변환기(signal converter)에 입력한다.

이렇게 교정이 끝난 후 기준 쳄버안에 일정한 공급가스가 채워진 상태에서 공급가스로부터 분기된 샘플가스를 흘려 보낼시 기준 밀도계의 특성을 검토해 보았다. Fig. 6은 이렇게 메탄과 질소가스로 교정하기 전 · 후의 밀도오차를 분석한 것으로서 교정 전에는 −2%대의 오차를 보이다가 교정후의 오차를 보면 0.6% 대로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 교정전의 오차가 −2%대까지 증가한 이유는 재교정 일자가 초기 교정 일로부터 4개월이 지난 후에 이루어진 것이 원인이라고 생각된다. 즉 정기적으로 교정을 해주어야 하는 기준 밀도계가 적정 교정주기를 지나 오차가 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 7은 메탄과 질소가스로 교정을 실시한 후 공급가스를 흘려보낼시 기준 밀도계의 밀도오차를 분석한 것으로 총 18시간에 걸친 데이터이다. 전반적으로 0.6% 대에 오차가 존재하는 것을 볼 수 있으며 일부 시간대에 오차가 급격히 감소하거나 증가한 것은 앞에서도 설명했듯이 가스 분석기의 분석 주기 때문이다. 그림에서 보듯이 메탄과 표준가스로 교정하여 실험한 결과와 비교시 전반적으로 오차가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 실험결과는 이전의 기준밀도 오차와 비교시 현격한 차이를 보이는데 교정가스의 종류를 메탄과 표준가스에서 메탄과 질

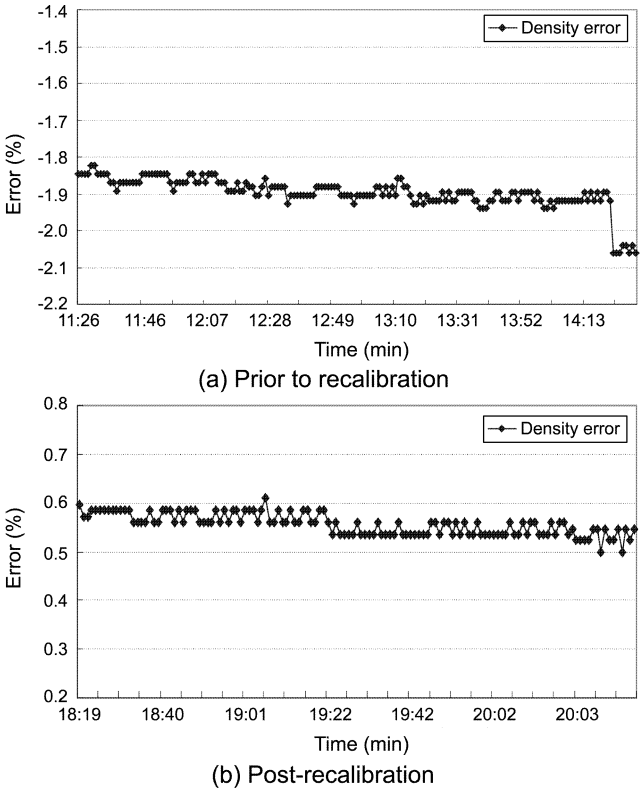

Fig. 6. Density errors due to recalibration.

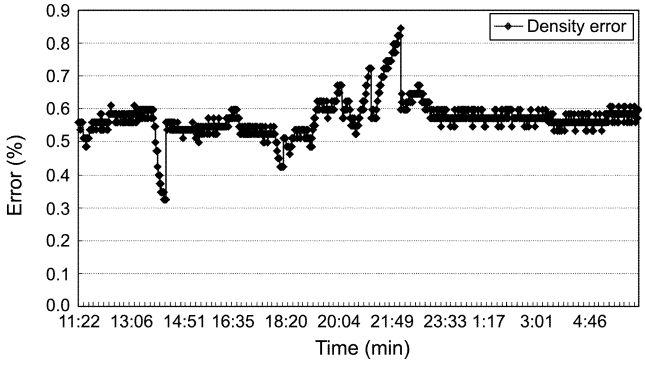

Fig. 7. Density errors due to changes of calibration gases.

소로 교체한 것 외에는 다른 모든 조건이 동일한 것으로 보았을 때 교정가스 종류에 따른 기준 밀도계의 특성변화라 생각된다.

위와 같은 실험결과를 종합해 볼 때 기준 밀도계의 교정가스는 메탄과 질소보다는, 메탄과 공급가스와 유사한 표준가스가 적절한 것으로 보이며, 교정가스를 측정하고자 하는 유동가스와 가능한 동일 가스를 이용하도록 권고하는 제작사의 제시조건과도 일치한다.

3-2. 주위 온도 변화에 따른 기준 밀도계 특성

기준 밀도계는 동등한 온도 및 압력조건에서 기준 쳄버안에 있는 가스와 측정가스가 다이아프램(diaphragm)을 사이에 두고 상호작용에 의해 기준밀도 또는 비중을 산출하는 측정계기이다. 따라서 주위조건에 민감하게 반응하는데, Fig. 8은 이러한 주위조건, 특히 주위온도 변화에 기준 밀도계가 어떻게 반응하는 가를 실험한 결과이다. Fig. 8(a)에서 채널 1, 채널 2는 기준 밀도계 주위에 설치된 저항 온도계(RTD)를 나타내며, 채널 1은 기준 밀도계의 보온커버(thermal insulating cover)안에

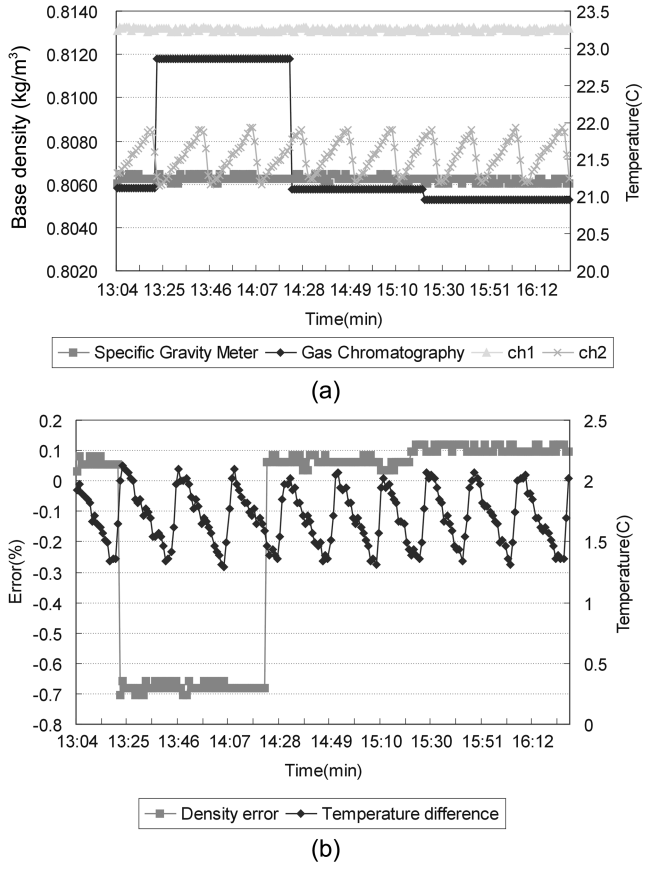

Fig. 8. Density errors due to environmental temperature variations.

설치된 온도계이며 채널 2는 기준 밀도계 주위의 온도, 즉 가스 분석기실의 온도를 측정한 온도계이다. 실험시간 동안 채널 1의 온도는 23.21-23.28 °C까지, 채널 2의 온도는 21.13-21.92 °C까지 변하여 온도차는 1.4-2.1 °C사이였으며 이러한 온도차는 Fig. 8(b)에서 보듯이 편향적으로 증가하거나 감소하지 않고 일정 주기로 증가와 감소를 반복하는 것을 볼 수 있다.

이러한 온도 변화에 대해 밀도오차는 뚜렷하게 반응을 보이지 않는 것을 알 수 있으며 단지 13:22분에서 14:22분까지 밀도오차가 –0.7%까지 일시적으로 증가한 것을 볼 수 있는데, 이것은 가스 분석기의 기준밀도가 비정상인 수치인 것으로 추정된다. 실지로 실험 당일 날 가스 분석기의 기준밀도 일 평균이 0.8059 kg/m^3 인데 반해, 13:22분 데이터만이 0.8118 kg/m^{3}로 평균을 훨씬 초과하는 수치였다. 가스 분석기도 역시 민감한 계측기로서 외부 소음 및 영향에 의해서 성분 분석시 에러를 발생할 수 있으며 이렇게 잘못 분석된 가스 성분으로 계산되어진 기준밀도로 인해 큰 밀도오차를 발생한 것으로 보인다.

Fig. 9는 역시 주위 온도에 따른 기준 밀도계 특성을 나타낸 것으로서 이전의 실험결과와 달리 주위온도가 기준 밀도계에 영향을 끼치는 것을 볼 수 있다. 즉 채널 1과 채널 2의 온도는 각각 27-29 °C, 27-36 °C까지 변하며 온도차도 0.1-7 °C까지 변화 폭이 큰 것을 알 수 있다. 이전의 실험결과와 달리, 기준 밀도계 주위 온도가 높아진 이유는, 가스 분석기실 안의 대기온도가 높아졌기 때문이다. 원래 가스 분석기실 안에는 냉난방 장치가 갖추어져 있어 일정온도가 유지되도록 하였는데 실험 전후일 동안 냉난방장치의 가동을 중단하여 가스 분석기실 안의 온도가 증가한 것이다. 또한 이전의 실험결과와 달리 주위온도가 기준 밀도계의 보온 커버안의 온도보다 높은 것을 알 수 있으며 이러한 높은 주위온도로 인하여 밀도오차가 증가한 것으로 보인다.

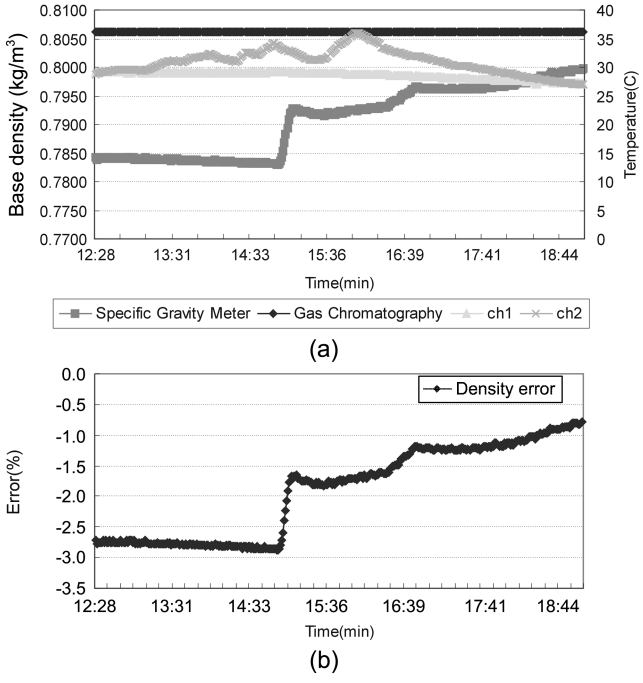

Fig. 9. Density errors due to environmental temperature variations.

4. 결 론

본 연구는 KOGAS의 한 공급관리소에 기준 밀도계를 설치하여 측정 밀도값과 가스 분석기에 의한 계산 밀도값을 현장 실험을 통해 비교 분석한 것으로 실험결과에 대한 결론은 다음과 같다.

기준 밀도계는 교정가스로 메탄과 질소 대신 메탄과 표준가스로 교정한 실험결과가 작은 밀도오차를 발생하는 것을 알 수 있었으며 이러한 실험결과는, 교정가스를 측정하고자 하는 가스와 가능한 동일 가스를 이용하도록 권고하는 제작사의 제시조건과도 일치한다. 또한 기준 밀도계는 기준 챔버안에 있는 가스와 측정가스가 동일한 성분의 천연가스라면, 그 몰분율이 같거나 다소 다르더라도 정확하게 그 기준밀도를 측정하는 것을 볼 수 있었다.

또한 기준 밀도계는 일정 교정주기를 지나면 오차가 적정 범위 이상으로 증가하여 정기적으로 교정이 필요한 것도 확인하였으며, 기준 밀도계는 주위 조건에 민감하게 반응하여, 주위온도가 높으면 오차가 증가하는 것도 알 수 있어, 향후 실제 계량설비로 운영할 경우, 실내 설치를 원칙으로 하고, 주위온도도 일정 온도가 유지되도록 해야 한다.

참고문헌

1. Alan T., Hayward, J.: "Flowmeters, A Basic Guide and Source-Book for Users," 111(1979).
2. Wilson. C. W.: "Gas Density and Specific Gravity," 47(1987).
3. The Basic Principles and Practice of Flow Measurements, National Engineering Laboratory, 23(1988).
4. Jaeschke. M., Hinze. H. M.: "Using Densitometers in Gas Metering," Hydrocarbon Processing, June, 37(1987).
5. John, H. Day.: "Application of Densitometer to Orifice Meters," A.G.A Operating Section Transmission Conference, 67(1968).
6. IGU Sub-Committee C2 Report, International Gas Union(1993).
7. Lee, K. J. and Her, J. Y.: "A Study and Analyzing Error Sources and Establishing Normal Operational Schemes of Gas Densitometer," KOGAS Report(1996).
8. ISO 6976: "Natural Gas-Calculation of Calorific Values, Density, Relative Density and Wobbe index from Composition," International Organization for Standardization(1995).
9. AGA Report No. 8, "Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases," American Gas Association(1992).
10. 3096 Specific Gravity Transducer-Technical Manual, Schlumberger(1992).
11. GPA Standards 2145, "Table of Physical Constants of Paraffin Hydrocarbon and Other Components of Natural Gas," Gas Processors Association(1993).
12. GPA Standards 2172, "Calculation of Gross Heating Value, Relative Density and Compressibility Factor for Natural Gas Mixtures from Compositional Analysis," Gas Processors Association(1986).