

논문 2003-12-6-04

영상처리 기법을 이용한 부액계 자동 교정 시스템 구현

이용재*, 장경호*, 오재윤**, 정상덕**

Implementation on the Portable Blood Gas Analyzer and Performance Estimation/A Study on the Hydrometer Calibration System using Image Processing

Yong Jae Lee*, Kyung Ho Chang*, Chae Youn Oh** and Sang Duk Jung**

요 약

본 연구에서는 영상처리를 통한 부액계의 교정방법을 연구한다. 이 방법은 부액계를 교정하기 위해 선정된 부액계의 측정눈금과 기준액체의 수평면을 교정자의 조작 없이 자동으로 일치시킨다. 이 시스템은 CCD카메라, frame grabber, 스텝모터, 영상처리를 포함한 시스템프로그램으로 구성된다. 영상처리프로그램은 부액계의 측정눈금부위와 기준액체의 수평면사이에서 발생하는 메니스커스를 검색하여 눈금을 일치시키는 부분과 스텝모터를 제어하는 부분으로 구성한다. 본 연구에서 개발한 시스템의 성능을 검증하기 위하여 교정자의 눈으로 직접 메니스커스와 측정눈금을 관측한 수동교정방법의 교정결과와 비교한다. 각각의 교정값의 차이가 0.004 kg/m^3 이하로서 교정값의 측정 불확도 0.6 kg/m^3 을 고려하면 두 방법의 교정결과가 거의 같은 연구결과를 얻었다.

Abstract

The present paper studies how to calibrate hydrometer using image process. The method aligns particular scales of hydrometer selected for calibrating the hydrometer with the horizontal plane of the reference liquid automatically without man's operation. Major parts composing the system are CCD camera, frame grabber, stepping motor and image process program. The image process program is composed of a part that locates the meniscus and aligns it with a scale and a part that controls the step motor. To verify the performance of the developed method, this study compares the meniscus and scale observed directly with the naked eye with the result of calibration by the manual calibration method. The differences between the corrections were less than 0.004 kg/m^3 with uncertainty of 0.06 kg/m^3 . These showed that the calibration results of the developed hydrometer calibration using image process nearly equal to manual method.

Key Words : scale alignment, hydrometer calibration, least-scale, uncertainty

1. 서 론

* 한국표준과학연구원 물리표준부 질량힘그룹
(Mass and Force Group, Division of
Physical Metrology, Korea Research Institute
of Standards and Science)

** 전북대학교 기계항공시스템공학부 정밀기계
공학과 (School of Mechanical & Aerospace
System Engineering, MRC, ChonBuk Univ.)

<접수일자 : 2003년 10월 8일>

부액계는 액체의 비중과 밀도, 당도, 염도, 알콜도, 황산도 등을 측정하는 재래식 계측기로서 유리를 주요 재료로 만들어져 쉽게 파손할 우려가 있으나 디지털식 계측기에 비하여 가격이 극히 저렴하고 사용법이 용이하여 일반

및 첨단 산업체에서 현재까지도 많이 사용되고 있다. 이와 더불어 부액계의 눈금의 정확도를 측정하는 교정(calibration)의 수요가 증가 추세에 있다. 대부분의 국가표준연구기관에서 부액계의 교정은 밀도를 알고 있는 하나의 기준액체에 부액계를 띄워 부액계에 표시된 측정 눈금과 기준액체의 수평면을 일치시켜 여기서 발생하는 부력을 측정하여 수행하고 있다. 일반적으로 산업현장에서 많이 사용되는 부액계의 한 세트는 $0.760 \text{ g/cm}^3 \sim 1.850 \text{ g/cm}^3$ 의 범위의 액체밀도를 검사할 수 있도록 19개의 부액계로서 구성되어 있다. 하나의 부액계의 측정눈금 교정은 ISO의 규정에 의하면 최소눈금의 정확도에 따라 3 점에서 5점을 교정하도록 되어 있다. 이로 인하여 한 세트의 부액계 교정에 있어서 눈금일치작업이 반복적으로 수행되어야 한다. 현재 대부분의 국가표준연구기관에서 눈금일치 작업은 확대경이나 CCD카메라를 통하여 컴퓨터 모니터로 단순히 작업자의 눈으로 판단하여 수동으로 수행하고 있다. 따라서 교정작업자의 시차 및 숙련도에 따라 정확도의 편차가 발생할 수 있고, 작업이 매우 지루하여 교정 생산성이 떨어지고 있다. 본 연구에서는 이런 문제점들을 해결하기 위하여 CCD카메라로 얻어진 영상을 프로그램 처리하여 자동으로 눈금일치작업을 수행하는 부액계교정시스템을 구축하였다.

본 시스템은 액체의 표면장력과 부액계와의 접촉력에 의하여 액체 표면이 부액계 외벽에 수직방향으로 형성된 곡면인 메니스커스를 추출하여 기준액체의 수평면을 검색하는 프로그램과 설정된 부액계의 측정눈금을 수평면에 일치시키는 프로그램 및 교정을 위한 기준액체의 온도, 공기의 온도, 대기압, 공기습도 등의 환경측정데이터와 부력질량을 취득 처리하는 프로그램으로 구성되었다.

II. 부액계교정장치

2.1 시스템의 구성

부액계교정시스템은 기준액체가 들어 있는 용기를 눈금일치작업을 위하여 올리고 내릴 수 있는 승강기, 이를 위한 스텝모터 컨트롤러, CCD카메라, 부력측정을 위한 저울, 기준액체의 항온을 위한 자동온도조절기, 온도계, 공기

밀도측정을 위해 온도, 기압, 습도를 측정하기 위한 계측기, 눈금일치작업 및 부액계 교정을 위한 시스템프로그램, 그리고 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. CCD카메라(Sony, VCC-870)와 컴퓨터는 메니스커스와 측정눈금의 흑백영상을 1초에 12 frame 정도 획득할 수 있다. CCD의 크기는 1/2 inch이고 사용된 렌즈의 초점거리는 12 mm, 구경비는 1:1.2이다. Frame grabber(Matrox, Meteor-II)는 CCD 카메라의 영상을 컴퓨터에서 처리 가능한 디지털 정보로 변환하는 장치이다. 시스템프로그램은 메니스커스와 측정눈금을 검색하는 영상처리프로그램과 측정눈금과 수평면을 일치시키기 위해 스텝모터를 제어하는 제어 프로그램으로 구성되어 있다.

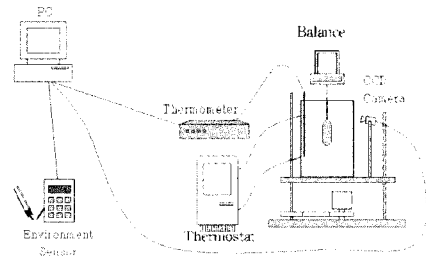


그림 1. 부액계교정장치의 구성

Fig. 1. Schematic of hydrometer calibration system.

2.2 부액계 교정원리

부액계교정원리는 Cukow의 측정방법에 따라 수행된다⁽¹⁻²⁾. 이 방법은 교정하려는 부액계를 정밀저울에 매달아 설정된 측정눈금마다 기준액체의 수평면에 각각 승강기를 이용하여 일치시켜 잠기게 한다. 이때 기준액체의 밀도보다 작은 측정눈금의 부액계는 가라앉지 않고 뜨게 되어 교정할 수 없어 강제로 가라앉게 되도록 보조분동을 사용하게 된다. 측정눈금까지의 부력과 기준액체의 밀도를 이용하여 부액계의 측정눈금의 교정값(d_0)이 식(1)으로 계산된다.

$$d_0 = \frac{(M_1 + K_1)(A_2 dr - A_1 \rho_1)}{M_1 - M_2 + K_2 + W - V_w d_r} + A_1 \rho_1 \quad (1)$$

여기서

$$K_1 = \frac{\pi D \gamma_1}{980.665}, \quad K_2 = \frac{\pi D \gamma_2}{980.665}$$

$$A_1 = 1 + \beta(t_1 - t_0), \quad A_2 = 1 + \beta(t_2 - t_0)$$

- M_1 : 공기중에서 부액계의 질량 (g)
 M_2 : 교정될 부액계의 측정눈금까지 기준액체에 잠길 때 질량 (g)
 γ_1 : 측정대상용액의 표면장력 (mN/m)
 γ_2 : 기준용액의 표면장력 (mN/m)
 D : 부액계 눈금부의 직경 (cm)
 β : 부액계의 체팽창계수
 t_1 : M_1 측정시 공기온도(°C)
 t_2 : M_2 측정시 공기온도(°C)
 t_0 : 기준온도(°C)
 d_r : 기준액체의 밀도(g/cm³)
 ρ_1 : 공기밀도(g/cm³)
 W : 보조분동의 질량 (g)
 V_w : 보조분동의 부피 (cm³)

III. 영상처리

카메라로부터 얻은 영상은 교정중인 부액계가 설치된 그림2에서 부액계의 측정눈금들이 표시되어 있는 눈금대, 눈금대와 기준액체로부터 발생하는 메니스커스 그리고 주변의 물체들을 포함하고 있다.



그림 2. 기준액체 안에 잠기어 교정중인 부액계
 Fig. 2. Hydrometer in reference liquid for calibration.

그러나 부액계의 교정에 필요한 영상은 메니스커스의 밑면 즉, 기준액체의 수평면과 부액계의 측정눈금이다. 카메라에서 얻는 전체영상에서 필요한 물체만을 추출하는 작업은 매우 복잡하고 어려운 처리가 요구된다. 따라서 전체영상을 처리하여 필요한 영상만을 추출하는 대신에 전체영상에서 메니스커스와 부액계의 측정눈금을 포함하는 최소 영역을 조작자가 선택하고 이 영역에 대하여 기준액체의 기준면의 위치와 측정눈금의 위치를 검색하였다.

3.1 기준액체의 수평면의 위치 검색

기준액체는 무색투명하고 빛이 여러 방향에서 비치기 때문에 기준액체의 수평면과 부액계의 눈금대에 발생하는 메니스커스를 카메라에서 얻어진 영상에서 구분하기가 어렵다. 따라서 광원과 부액계사이에 빛을 부분적으로 막을 수 있는 차단막을 기준액체의 용기 외면에 부착하여 메니스커스의 모양과 수평면의 위치를 용이하게 구별하여 볼 수 있도록 하였다. 메니스커스는 수평 방향으로 길쭉한 형상으로 메니스커스와 수면의 수평방향 경계(edge)를 찾아 수평면의 위치를 결정하였다.

에지는 영상의 명암도가 급격히 변화하는 부분이기 때문에 주어진 영상에서 메니스커스 영역 $f(x,y)$ 의 각각의 화소(pixel)의 밝기를 미분하면 에지를 추출할 수 있다⁽³⁻⁴⁾.

영상 $f(x,y)$ 의 위치 (x,y) 에서 영상의 기울기는 식(2) 같이 나타낼 수 있고,

$$\Delta F = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} \\ \frac{\partial f_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

위치 (x,y) 에서 기울기의 방향은 식(3)와 같다.

$$\alpha(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (3)$$

$\alpha(x,y)$: 영상의 (x,y) 위치에서의 기울기

G_x : 영상의 (x,y) 위치에서 x방향 기울기

G_y : 영상의 (x,y) 위치에서 y방향 기울기

메니스커스는 중력에 의해 항상 수평을 유지하고 있고, 수직 위치를 알기 위해서는 수평방향의 에지만 검출하면 된다. 따라서 그림 3과

같은 sobel 미분연산자를 영상에 적용하여 에지 강도가 일정 값 이상인 경우를 에지로 판단하고 메니스커스의 위치로 결정하였다.

1	2	1
0	0	0
1	2	1

그림 3. Sobel 미분연산자

Fig. 3. Sobel operator.

이때 3×3 마스크 $w(x,y)$ 의 원 영상 $f(x,y)$ 에 대한 convolution은 식(4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 a &= w * f \\
 &= w_1z_1 + w_2z_2 + w_3z_3 + \dots + w_9z_9 \\
 &= \sum_{n=1}^9 w_n z_n \quad (4)
 \end{aligned}$$

그런데 메니스커스가 면적을 가진 2차원 형태로 나타나기 때문에 위의 방법으로 영상을 미분하면 메니스커스의 윗 부분과 아랫부분 두 개의 에지가 검출된다. 이 중에서 윗 부분의 에지를 수평면의 위치로 결정하였다.

3.2 부액계 눈금의 위치 검색

메니스커스의 위치가 결정되면 부액계의 눈금이 있을 것으로 예상되는 지역을 검색하여 부액계의 눈금을 검색한다. 부액계 눈금의 검색방법은 메니스커스 위치 검색과 같은 방법을 적용한다. 이렇게 찾은 눈금 중 메니스커스에 가장 가까운 눈금을 기준으로 각각의 눈금과 메니스커스와의 거리가 0이 되도록 부액계를 이동하면 메니스커스와 눈금을 일치시킬 수 있게 된다.

그런데 메니스커스 위의 눈금은 메니스커스에 의해서 가려지게 되므로 실제로 검색 가능한 눈금은 메니스커스 아래에 있는 눈금이다. 그리고 메니스커스 아래에 있던 눈금이 메니스커스 위로 올라간다면 위에 있던 눈금이 메니스커스 아래로 내려오는 경우 새로운 눈금이 나타나거나 눈금이 사라지게 되는데 이것을 판별하기 위해서 눈금을 추적하여야 한

다. 그렇지 않으면 메니스커스와 눈금이 일치했는지는 알 수 있으나 어느 눈금이 메니스커스와 일치했는지 알 수 없다. 그러므로 부액계 전 구간의 눈금에 대해서 특정 눈금의 메니스커스와의 일치 여부를 판단하기 위해서는 각각의 눈금의 값을 알아야 한다. 즉, 처음에 메니스커스를 찾고 눈금을 검색하여 메니스커스와 가장 가까운 눈금을 기준으로, 부액계가 메니스커스 위 또는 아래로 움직임에 따라 메니스커스 위로 사라지거나 메니스커스 아래로 새로 나타난 눈금의 수를 계산하여 현재 눈금의 값을 계산한다. 눈금의 추적방법은 다음과 같다. 부액계의 교정에서 부액계가 저울에 고정되어 있으나 기준액체가 담긴 용기를 실은 송강기가 상하로 움직임에 따라 카메라측면에서는 부액계의 눈금이 이동하는 것처럼 보이게 된다. 이때 메니스커스와 가장 가까운 눈금의 메니스커스와의 거리를 이전 영상과 비교하면 눈금의 이동방향과 이동 정도를 알 수 있다. 그림4-a와 같이 눈금이 메니스커스 위로 사라지거나 그림4-b처럼 메니스커스 아래로 내려온 경우 눈금과 메니스커스 사이의 거리에 급격한 변화 생기고 이것을 이용하여 눈금의 변화를 정확히 알 수 있게 된다.

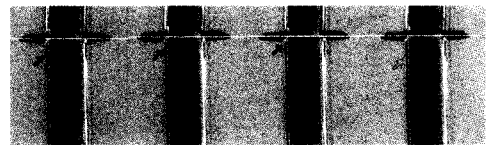


그림 4-a. 메니스커스 부근의 눈금 상승
Fig. 4-a. Disappearance of a scale-mark near meniscus.



그림 4-b. 메니스커스 부근의 눈금 하강
Fig. 4-b. Appearance of a scale-mark near meniscus.

기준액체 용기의 받침대 측면에 카메라 지지대를 부착하였고 카메라는 수평면 아래에서 수평면과 5° 이내에 각도를 이루면서 메니스커스

를 바라보게 설치하였다. 카메라 지지대를 기준 액체의 용기에 부착하였으므로 카메라는 기준 액체의 용기와 함께 움직인다. 메니스커스의 폭이 1~2 픽셀, 약 0.1 ~ 0.2 mm 정도가 되도록 카메라의 높이와 각도를 조절하였다. 따라서 메니스커스가 육안으로 거의 직선처럼 보이게 된다. 이것은 카메라가 수평면으로부터 아래에 위치할수록 즉, 카메라와 수평면과의 각도가 커져서 수평면과 카메라의 정렬오차가 크기 때문에 이 오차를 줄이기 위함이다.

3.3 시스템의 작동

부액계교정장치는 1 축의 linear motion (LM) guide를 사용하여 구동하였다. LM guide는 스텝핑모터(setpping motor)를 액츄에이터(actuator)로 사용하여 PC로 구동하였다. LM guide의 위치를 제어하기 위해서 메니스커스와 눈금사이의 거리에 따라 스텝핑모터의 제어입력을 계산하는 비례제어 알고리즘을 사용하였다.

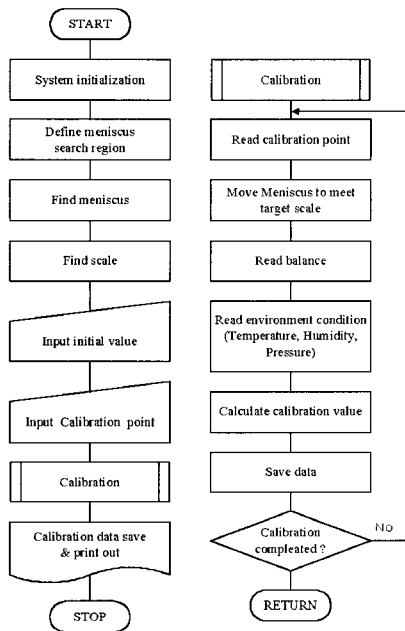


그림 5. 시스템 프로그램의 흐름도
Fig 5. Flow chart of system program.

기준액체의 표면의 움직임이 없게 하기 위해 시스템의 구동을 매우 느리게 해야 되기 때문

에 비례제어만으로도 원하는 성능을 얻을 수 있었다. 눈금과 메니스커스는 1 픽셀의 정밀도로 일치하도록 제어하였다. 교정하고자하는 측정눈금의 밑면과 수평면이 일치하게되면 저울에 나타난 질량값이 안정될 때까지 일정시간 기다린 후 저울을 읽어서 교정값을 계산한다. 그림 4는 시스템이 작동하는 순서를 보여주는 흐름도 이다.

IV. 성능실험 및 고찰

본 연구에서 개발된 영상처리를 통한 부액계의 교정방법의 성능평가는 기존의 수동교정에 의한 교정결과와 비교하여 수행하였다. 본 실험에 사용된 부액계는 측정범위 980-1000 kg/m³, 최소눈금 0.2 kg/m³, 눈금대의 직경 5.62 mm으로서 두 방법의 정확한 비교를 위하여 기준액체의 온도를 20 °C로 일정하게 유지하여 기준액체의 밀도를 일정하게 한 후 실험에 사용된 부액계를 영상처리방법과 수동방법으로 각각 교정하여 그 결과 값들을 비교하였다. 수동방법은 교정할 측정눈금들을 기준액체의 수평면과 수동으로 일치시켜 교정하고 영상처리방법은 교정할 측정눈금들을 컴퓨터에 모두 입력하여 자동으로 교정하였다. 실험결과로서 수동방법의 보정값과 영상처리 방법의 보정값이 그림 6과 같이 나타났다.

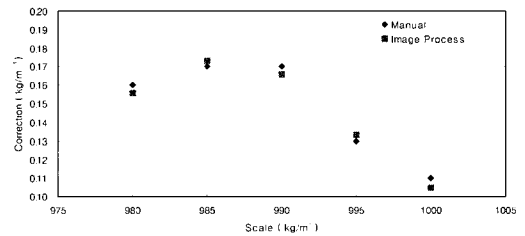


그림 6. 수동법과 영상처리법의 교정결과의 비교
Fig. 6. Comparison of calibration results of manual method and image process method.

보정값(보정값=교정값-측정눈금)에 대한 측정 불확도는 수동교정에서는 0.064 kg/m³, 영상처리교정에서는 0.062 kg/m³로 평가되었

다. 두 방법의 보정값의 차이는 교정된 5 point의 측정눈금에서 즉, 980 kg/m^3 , 985 kg/m^3 , 990 kg/m^3 , 995 kg/m^3 , 1000 kg/m^3 에서 각각 -0.004 kg/m^3 , $+0.003 \text{ kg/m}^3$, -0.004 kg/m^3 , $+0.003 \text{ kg/m}^3$, -0.004 kg/m^3 를 얻었다. 이 값은 측정 불확도를 고려하면 극히 적은 값으로서 두 방법의 교정결과가 거의 일치함을 보였다.

자동교정시 교정눈금간의 이동시간은 20초 이내로 수동교정시와 비슷한 시간이 필요하였다.

본 연구에서는 영상처리방법을 적용하여 부액계의 교정작업을 자동화하여 기존의 교정자의 반복적인 교정작업으로 인한 지루함과 숙련도 정도에 따른 개인오차를 줄일 수 있는 효과적인 방법을 제안하였다. 이 방법은 부액계를 교정하기 위해 선정된 부액계의 측정눈금들과 기준액체의 수평면을 교정자의 조작 없이 자동으로 일치시켰다. 이와 같은 영상처리방법을 구현하기 위해 CCD 카메라, frame grabber, 스텝모터, 영상처리 프로그램 등을 기존의 수동시스템에 부가하였다. CCD카메라를 이용하여 영상을 획득한 후에 영상처리프로그램을 이용하여 메니스커스의 위치와 측정눈금의 위치를 검색하였다. 수평면과 측정눈금의 위치를 정확히 일치시키기 위해 기준액체 표면의 움직임이 발생하지 않도록 하였다. 이를 위해 LM guide를 장착하여 매우 느리게 승강장치를 작동시켰다.

V. 결론

본 논문에서 제안하는 영상처리방법을 통한 부액계의 교정의 성능을 검증하기 위해 교정자의 눈으로 직접 메니스커스와 측정눈금을 관측하는 수동방법에 의한 교정결과와 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 실험결과 교정값의 차이가 0.004 kg/m^3 이하로서 교정값의 측정 불확도 0.6 kg/m^3 을 고려하면 두 방법의 교정결과가 거의 같은 연구결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 개발된 영상처리를 이용한 부액계의 교정방법을 활용하여 교정 정확도 및 교정의 생산성향상을 도모하게 되었다.

VI. 참고 문헌

- [1] Cuckow F. W., J. Soc. Chem. Ind., vol. 68, pp. 44-49, 1949.
- [2] Loreface S., Heinonen M., and Madec T., Metrologia, vol. 37, pp. 141-147, 2000.
- [3] Gonzalez R. C., and Woods R. E., Digital Image Processing, Boston, Addison-Wesley, 2000.
- [4] Myler H. R., Weeks A. R., The Pocket Handbook of Imaging Processing Algorithms in C, Upper Saddle River, Prentice Hall, pp. 30-31, 157-159, 239-240, 1993.
- [5] 장경호, 이용재, 질량 측정에 의한 부피계의 표준 교정 절차, 한국 계량 측정 협회, KASTO 00-05-1040-026.

著 者 紹 介

이 용 재(Y. J. Lee)

『센서학회지 제4권 제3호』 논문 95-4-3-02 p.9 참조

2002년 전북대학교 정밀기계공학과 (공학석사)

현 한국표준과학연구원 질량팀 그룹

주 관심분야 : 부피/밀도 표준, 질량응용연구

장 경 호(K. H. Chang)

『센서학회지 제4권 제3호』 논문 95-4-3-02 p.9 참조

1980년 한남대학교 물리학과 (이학석사)

현 한국표준과학연구원 질량팀 그룹

주 관심분야 : 밀도표준

정 상 덕(S. D. Jung)

1999년 전북대학교 정밀기계공학과 (공학사)

2001년 전북대학교 정밀기계공학과(공학석사)

현재 시스템 연구원

주 관심분야 : 영상처리, 제어계측

오 재 윤(C. Y. Oh)

1982년 전북대학교 기계공학과 (학사)

1987년 Iowa State Univ. 기계공학과 (석사)

1990년 Iowa State Univ. 기계공학(박사)

1990년 Iowa State Univ. 기계공학 Post-Doc.

1991년 전북대학교 부교수

현재 전북대학교 지능기계시스템 공학부 교수