

동적인 온도 보정 방법에 의한 전기 전도도의 측정

차용대 · 윤길원[†]

Measurement of electrical conductivity by a dynamic temperature compensation method

Yong-Dae Cha and Gilwon Yoon[†]

Abstract

A more accurate method of measuring the electrical conductivity (L) of solutions was developed by applying dynamic temperature compensation for measurement of L . Temperature changes of a sample were induced by a heater probe and the changes in L per unit temperature were measured. An equation for L with respect to temperature change was developed and L at the standard temperature (25 °C) was computed. Based on our proposed method, it is possible to have temperature compensation without having the temperature coefficients in advance.

Key Words : electrical conductivity, temperature compensation, temperature coefficient

1. 서 론

연안지역에서의 해수 침투에 관한 연구^[1]와 육류와 생선 등에 대한 신선도를 측정하기 위한 연구^[2], 환경 오염원의 측정^[3,4] 등 전기 전도도 측정에 대한 활용도가 점차 커지고 있다. 또한 건강에 대한 관심도가 높아지고 있어 체질 및 건강 상태를 진단하는 방법에 체액의 전기 전도도를 이용하는 방안이 연구되고 있다^[5]. 환경 오염 물질의 양을 정확히 산출한다거나 또는 건강의 지표로 판단될 수 있는 사람의 체액의 정확한 분석을 위해서는 보다 정확하고 손쉬운 전기 전도도의 측정이 필요하게 되었다.

전기 전도도는 용액 내에서 하전 입자를 이동(전도)시킬 수 있는 용액의 능력으로 정의할 수 있으며, 용액 중의 이온의 농도 등 전기 화학적 성질을 신속하게 측정할 수 있는 시험 항목 중의 하나이다. 전기 전도도는 측정온도에 대한 영향은 같은 물질이라 하더라도 측정시의 온도에 따라 온도 1 °C 변화 당 약 2% 내외의 변화가 있을 정도로 많은 편차를 보인다^[6,7]. 물질의 온

도가 변화됨에 따라 물질 속 이온의 움직임 속도가 변화되어 전기 전도도가 변하게 되는 것이다.

전기 전도도의 측정은 해당 물질의 전기 화학적 성질을 간접적으로 파악하고자함일 것이다. 전기 전도도가 해당 물질의 대표성을 갖기 위해서는 측정된 값이 온도의 변화에 무관해야 하며, 특정 온도에서 측정된 전기 전도도 값은 표준온도인 섭씨 25 °C상에서의 전기 전도도 값으로 환산하여 나타내어야 비교 및 대표성을 갖는 척도로서 사용될 수 있다.

온도 보정을 하기 위한 기존의 방법은 사전 실험을 통하여 단위 온도 변화에 대한 전기 전도도의 변화율인 온도 계수를 확보한 후 온도 보정 하였다. 온도 계수가 이미 알려져 있는 단순 물질의 경우에는 비교적 보상하기가 쉬웠으나 현장에서의 측정이나, 의학이나 수의학에서 사용하는 체액을 통한 임상검사 등에서처럼 시료의 양이 적어 사전 실험을 할 수 없는 경우에는 적용하기 어려웠으며, 이때는 주로 주된 구성 물질의 표준 온도 계수를 대입함으로써 온도 보정 하였다. 이런 경우 정확한 온도 보정이 이루어지지 않았으며 대략적인 온도 보정만을 기대할 수밖에 없었다. 따라서 정확하고 손쉬운 온도 보정 방법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 사전 실험을 통하지 않고, 온도 계수를 미리 확보하지 않아도 동적으로 온도 보정 할 수 있

서울산업대학교 의료전자연구소(Institute for Biomedical Electronics, Seoul National University of Technology)

[†]Corresponding author: gyoony@snut.ac.kr

(Received : February 27, 2008, Revised : April 28, 2008,

Accepted : April 30, 2008)

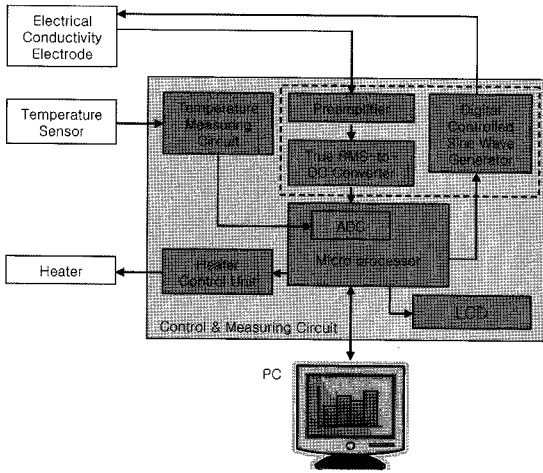


그림 1. 전체 시스템 구조
Fig. 1. Overall system structure.

는 방법을 제안한다. 제안하는 동적인 온도 보정 방법에 의하여 용액의 전기 전도도를 측정하기 위해서는 보다 정확하고 정밀한 전기 전도도 측정기가 필요하였다. 그에 따라 정밀성과 안정도를 높인 전기 전도도 측정기를 제작하였으며, 제작된 전기 전도도 측정기를 사용하여 전기 전도도의 측정과 동시에 온도의 변화를 측정하여 온도변화에 대한 전기 전도도의 변화율을 계산하였다. 또한 적절한 온도 보정식을 수립하여 동적인 온도 보정을 하고 이를 검증하였다.

2. 전기 전도도 측정기의 설계

2.1. 전체시스템 구조

본 연구에서 제안하는 온도 계수가 필요하지 않은 동적인 온도 보정 방법에 의한 전기 전도도 측정기의 전체 시스템 구조는 그림 1과 같다. 전기 전도도 측정 셀, 온도 측정 회로, 정밀 정현파 발생 회로, 전치 증폭기, RMS (Root-Mean-Square) to DC Converter 등으로 구성하였으며, 마이크로 콘트롤러를 통하여 전체 시스템을 제어하고 처리하도록 하였다. 그 결과는 LCD (Liquid Crystal Display) 모듈을 통하여 표시하고 데이터 처리를 위하여 RS-232C 포트를 사용하여 PC (Personal Computer)에 전송하였다.

2.2. 전기 전도도 측정 셀의 선택

본 연구에서는 0.1 mS/cm에서 50 mS/cm의 범위를 갖는 전기 전도도 측정기를 개발하고자 하며, 주로 측정하고자 하는 시료는 10 mS/cm에서 25 mS/cm의 범위 내에 있는 것으로 판단되어 진다. 해당 범위를 측정

하고자 할 때 독일 JUMO GmbH & Co. KG 사의 전기 전도도 측정 셀(모델명:Lf-GT)이 적합한 것으로 판단되어 선정하였다. 해당 모델의 셀 상수는 1.0 cm^{-1} 이며 100 mS/cm까지의 측정 범위를 갖는다^[8]. 해당 셀은 온도 측정 소자로 백금 온도센서(Pt100 Ω)를 내장하고 있어 정확한 온도 측정이 가능하고 그에 따른 온도 보정이 용이하다.

2.3. 정현파 발생기의 제작

일반적으로 전기 전도도의 측정은 측정하고자 하는 용액에 일정한 전압을 가하고 용액 속에 녹아 있는 전해질이나 이온의 양에 따라 변화되는 저항 값의 변화를 측정하여 전기 전도도를 계산하는 방법을 사용한다. 이때 직류를 공급한다면 용액 속에 녹아있는 이온들이 전기분해 되어 전기 전도도가 변화되게 될 것이다. 따라서 용액의 전기 전도도 측정에는 교류를 인가하는 것이 일반적인 방법이다. 교류 시스템에서는 인가되는 주파수에 따라 임피던스가 변화하게 되므로 주파수와 진폭이 안정된 정현파를 인가하는 것이 관건이다. 기존 전기 전도도 측정기는 정현파를 발생하기 위해 윈 브리지(Wien-Bridge)발진기와 같은 아날로그 방식의 발진기를 사용하였으며, 발진 회로를 구성하는 주요 소자인 저항과 커패시터의 용량은 온도에 따라 조금씩 변화되기 때문에 온도에 따라 발진 주파수와 진폭이 흔들리는 문제점을 가지고 있을 뿐 아니라 구성하는 회로마다 동일한 저항 값과 커패시터 값으로 구성할 수 없어 제작되는 회로마다 그 출력 주파수 및 진폭이 일정할 수 없었다. 이는 측정기에 따라 오차가 있음을 의미하는 것이다. 본 논문에서는 기존 시스템에서의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 Digital Controlled Sine Wave Generator (DDS; Direct Digital Synthesizer)를 사용하였다. 사용된 IC (Integrated Circuit)로는 Analog Devices Inc. 사의 AD5934를 사용하였다. 본 논문에서는 AD5934의 외부에 16 MHz의 수정 발진기를 장착한 후 Texas Instruments Incorporated(TI) 사의 저전력 마이크로 콘트롤러인 MSP430F1610을 사용하여 AD5934의 내부 제어 레지스터를 설정하여 4,000 Hz를 생성하였다. 제작된 정현파 발진기의 출력 주파수는 4,000 Hz로 정확하고 안정된 출력을 보였으며 진폭 또한 안정적이었다. 출력 주파수 4,000 Hz는 위에서 선택한 독일 JUMO GmbH & Co. KG 사의 전기 전도도 측정 셀(모델명:Lf-GT)에서 권장하는 주파수이다^[8].

2.4. True RMS to DC Converter의 제작

용액의 전기 전도도를 측정하기 위해서는 전기 전도

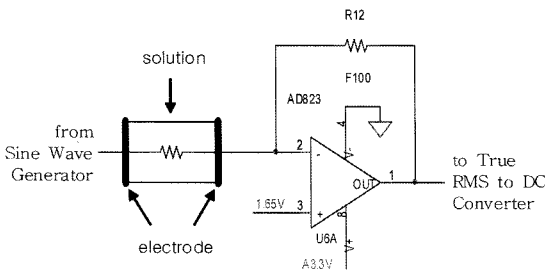


그림 2. RMS to DC Converter 구동을 위한 전치 증폭기
Fig. 2. The preamplifier for RMS to DC conversion.

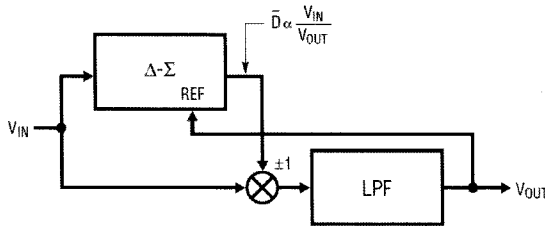


그림 3. LTC1966의 토폴로지
Fig. 3. Topology of LTC1966.

도 측정 셀의 전극을 통하여 인가된 정현파가 용액내의 전해질과 이온의 양에 따라 저항 값이 달라짐을 회로를 통하여 검출해 내어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 그림 2와 같이 측정 시료의 전기 전도도에 따라 공급되는 정현파를 감쇄 또는 증폭하는 전치 증폭 회로를 구성하였다.

두 전극 사이의 저항 값이 100 Ω 보다 작은 경우에는 입력되는 전압 330 mV_{p-p}가 증폭이 되며 100 Ω 보다 큰 경우에는 감쇄가 일어난다. 시료의 전기 전도도에 따라 그 크기가 변화된 정현파를 이후에 연결된 RMS to DC Converter에 입력하여 DC로 변환하도록 설계하였다. True RMS to DC Converter로는 Linear Technology사의 LTC1966을 사용하였다. LTC1966은 True RMS-to-DC Converter로서 0.02%의 선형성(linearity)을 갖는 높은 정밀도를 가지고 있다^[9]. 그림 3은 LTC1966의 토폴로지 구성에 대한 것이며, 그림 4는 입력되어진 RMS 전압이 DC 전압으로 변환되는 내부 연산식을 나타낸 것이다. LTC1966은 내부 연산식에 의해 RMS값이 DC 전압으로 변환된다.

2.5. 제작된 전기 전도도 측정기의 교정

실험을 위해 제작되어진 전기 전도도 측정기와 전기 전도도 측정 셀을 사용하여 전기 전도도 표준용액의 전기 전도도를 측정 한 후 측정되는 값이 표준용액의 값과 일치하는지 확인 할 필요가 있다. 만일 일치되지

표 1. 표준 용액에 대한 ADC 카운트 값
Table 1. ADC Count Values of the Standard Buffer Solutions

No.	Standard Buffer Solutions	ADC Count Value
1	0	0
2	5.00	443
3	12.88	1102
4	36.00	2850
5	53.80	4003

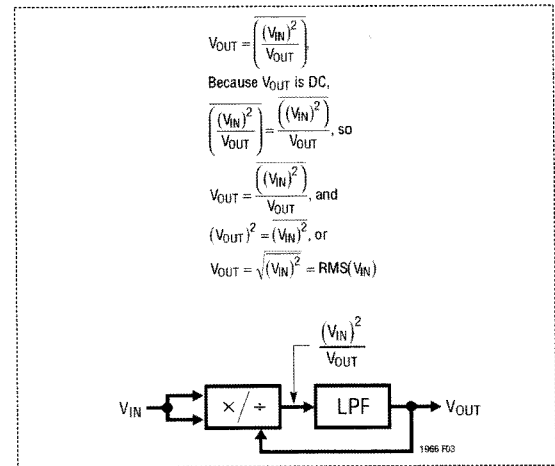


그림 4. RMS to DC converter와 내부 연산식
Fig. 4. RMS to DC converter with implicit computation.

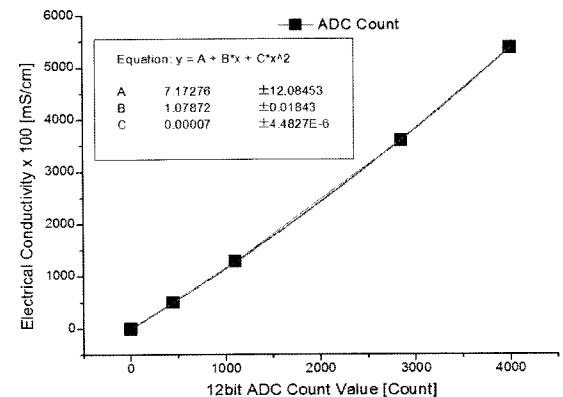


그림 5. ADC값과 교정을 위한 함수
Fig. 5. ADC count value with a calibration equation.

않을 경우에는 교정이 필요하게 된다. 그 측정된 데이터를 표 1에 나타내었다. 표 1에 보인바와 같이 제작되어진 전기 전도도 측정기는 비선형임을 확인하였으며, 정확한 전기 전도도의 측정을 위해 교정이 필요했다.

표 1은 교정 전 측정된 표준 용액에 대한 ADC의 카

표 2. 측정된 전기 전도도 값의 Orion 4-Star와 비교
Table 2. Measured Electrical Conductivities in Comparison with those by the Orion 4-Star™

No.	Orion 4-Star	본 연구에서 개발된 측정기	편차
1	0.5	0.5	0.0
2	1.1	1.1	0.0
3	2.0	1.9	0.1
4	2.9	2.9	0.0
5	5.0	5.0	0.0
6	12.9	13.0	0.1
7	18.5	18.4	0.1
8	25.3	25.4	0.1
9	32.1	32.1	0.0
10	38.0	38.2	0.2

유효 값이다. 그림 5는 측정된 값들을 OriginLab Corporation사의 OriginPro 7.5 프로그램을 사용하여 그래프로 나타내고 교정을 위한 함수를 산출하였다. 교정을 위한 함수를 식 (1)에 나타내었다.

$$L = 0.00007C^2 + 1.07872C + 7.17276 \quad (1)$$

여기에서 L 은 전기 전도도이며, C 는 ADC에 의해 출력된 Count 값이다. 이 C 값에 교정함수를 적용하여 최종적인 전기 전도도(L) 값을 구할 수 있다. 또한 이렇게 교정된 측정기를 사용하여 실제 시료를 측정 한 후 미국 Thermo Electron Corporation사의 Orion 4-Star™ pH/전도도 측정기와 비교 측정 한 비교표를 표 2에 나타내었다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

본 논문에서 제안하는 동적인 온도 보정에 의한 전기 전도도의 측정법의 기본 개념은 그림 6과 같다. 미소구간에서의 온도 변화량에 대한 전기 전도도의 변화량을 측정하여 표준 온도인 25°C까지 연장선을 그어

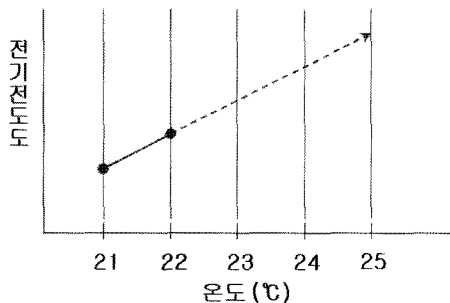


그림 6. 본 연구에서 제안하는 기본 개념
Fig. 6. Basic concept of this study.

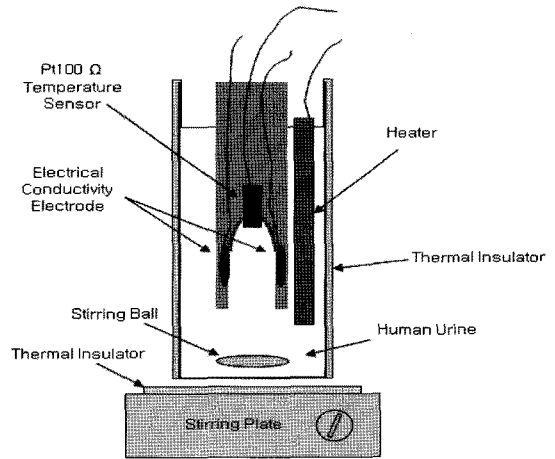


그림 7. 실험에 사용된 전기 전도도 센싱부
Fig. 7. The sensing part of measuring the electrical conductivity.

서 표준온도에서의 전기 전도도 값으로 환산하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법을 구현하기 위해서는 시료의 온도를 변화시켜야 하며, 시료 온도를 변화시키기 위해서는 측정용기에 전기 전도도 측정 셀과 발열체를 함께 넣어야 한다. 동적인 온도 보정에 의한 전기 전도도의 측정을 위한 전기 전도도 센싱부의 구조는 그림 7과 같다. 실험을 위해 단열재로 덮힌 Stirring Plate 위에 외부의 온도영향을 받지 않도록 단열재로 감싼 50 mL의 측정 용기에 온도센서가 내장된 전기 전도도 측정 셀, 히터, Stirring Ball을 설치한 후 약 35 mL의 시료를 넣었다.

발열체로는 절연된 세라믹 히터를 사용하였으며 용기내의 온도가 균일하게 변화되도록 교반시키면서 발

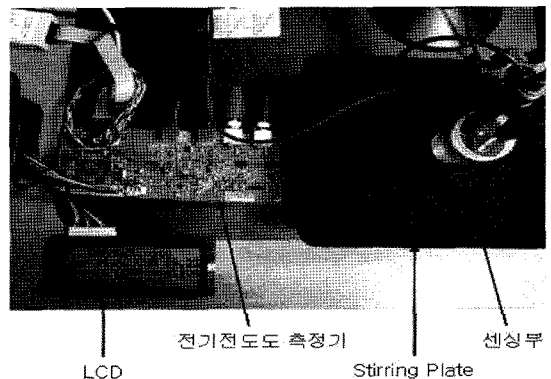


그림 8. 전기 전도도 측정기와 센싱부
Fig. 8. Picture of the electrical conductivity measurement circuit and the sensing part.

열시켜 시료의 온도를 변화시켰다. 이때 온도와 전기 전도도 값을 동시에 측정하면서 각 측정값을 마이크로 프로세서 내부에 저장하고 동시에 PC에 전송하였다. 발열체에 전원을 인가하고 5초가 경과된 후 발열체의 전원을 차단하였다. 그 후 측정 용기 내의 온도와 전기 전도도 값이 안정된 후 온도의 총 변화량과 전기 전도도의 총 변화량을 계산한 후 온도 보정식을 수립하여 표준 온도에서의 전기 전도도 값으로 온도 보정 하였다. 또한 동일한 시료의 온도를 25 °C로 변화시킨 후 전기 전도도를 측정하여 본 논문에서 제안된 방법으로 온도 보정 한 전기 전도도 값과 비교하고 결과에 대하여 고찰하였다. 그림 8은 본 연구에서 제작한 전기 전도도 측정기와 센싱부의 사진이다. 본래 센싱부는 외기를 차단하기 위해 단열재로 싸여 있어야 하나 촬영을 위해 단열재가 제거된 상태에서 촬영하였다.

4. 실험결과 및 고찰

발열체의 작동시간에 따른 온도의 변화 및 전기 전도도의 변화를 그림 9에 나타내었다. 발열체에 전원을 인가하고 5초 후에 전원을 차단하였다. 발열체에 전기를 공급한 이후 서서히 온도가 변화되기 시작 하고 2 초에서 5초까지 거의 직선에 가까운 온도 변화를 보이고 있으며 5초경과 후 발열체의 전원을 차단한 이후에는 온도의 변화가 거의 일어나지 않았다. 온도 변화가 안정되었을 때까지 0.9 °C의 온도가 상승하였으며, 전기 전도도는 0.35 mS/cm의 증가를 보였다.

실험을 통하여 얻어진 미지의 측정시료에 대하여 단위 온도 변화에 따른 전기 전도도의 변화를 측정하였으

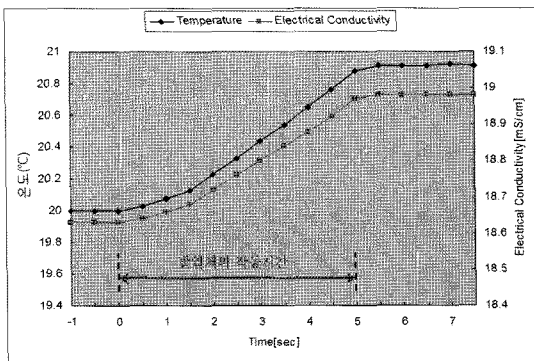


그림 9. 발열체의 작동 시간에 따른 온도 및 전기 전도도의 변화

Fig. 9. Temperature and electrical conductivity changes with respect to the time duration of the heater probe activation.

표 3. 동적인 온도 보정 결과와 표준 온도에서 측정된 전기 전도도

Table 3. Comparison of the Electrical Conductivities Obtained from the Dynamic Compensation Method and those Measured at the Standard Temperature

No.	Dynamic compensation	Measurement at 25 °C	Error (%)
1	20.55	20.62	-0.34
2	18.43	18.23	1.10
3	21.10	20.97	0.62
4	23.34	23.32	0.09
5	17.85	18.27	-2.30

며 이를 이용하여 25 °C에서의 전기 전도도로 보상하는 식 (2)을 수립하였다.

$$L_{(25^{\circ}\text{C})} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \times (25 - T_0) + L_0 \tag{2}$$

여기에서 T_0 는 온도의 변화를 가하기 직전의 온도이며 L_0 는 이때 측정된 전기 전도도 값이다. 그림 9에 표시된 실험의 25 °C에서의 온도 보정 전기 전도도를 구하면 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$L_{(25^{\circ}\text{C})} = \frac{0.35 \text{ [mS/cm]}}{0.91 \text{ [}^{\circ}\text{C]}} \times (25 \text{ [}^{\circ}\text{C]} - 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]}) + 18.63 \text{ [mS/cm]} = 20.55 \text{ [mS/cm]} \tag{3}$$

동일한 측정 시료를 표준 온도인 25 °C로 유지한 상태에서 전기 전도도를 측정한 결과 20.62 mS/cm이었으며 본 연구에서 제안하는 온도 보정 방법에 따른 값과 표준 온도에서의 측정값이 0.3%의 오차가 발생하였다. 표 3은 본 논문에서 제안하는 동적으로 온도 보정한 결과와 동일 시료를 표준 온도에서 측정된 전기 전도도 값과의 오차를 정리한 것이다. 표 3에 보이는 바와 같이 서로 다른 5개의 시료를 본 논문에서 제안하는 동적인 온도 보정 방법에 의해 온도 보정 하였고 동일한 시료를 핫플레이트를 이용하여 25 °C로 변화시킨 후 측정된 전기 전도도 값과 비교하였을 때 최대 2.3% 미만의 오차를 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 Digital Controlled Sine Wave Generator (DDS; Direct Digital Synthesizer)와 True RMS to DC Convert를 이용하여 전기 전도도 측정기를 제작하였다.

제작된 측정기에서 발생하는 정현파는 외부 온도에 대한 영향 없는 주파수 안정도를 보였으며 시료의 전기 전도도 또한 표준용액을 이용하여 측정된 결과 0.2 mS/cm 미만의 편차로 측정됨을 확인하였다. 또한 측정용기에 내장시킨 발열체를 5초간 동작시켜 시료의 온도를 상승시키면서 전기 전도도 값의 변화를 측정하였다. 이때 측정된 온도의 변화량과 전기 전도도의 변화량을 이용하여 표준 온도에서의 전기 전도도 값으로 보정하는 간단한 수식을 세우고 표준 온도에서의 전기 전도도 값으로 온도 보정 하였다. 동일한 방법으로 여러 실험을 한 결과 최대 2.30% 미만의 편차를 보였으며, 사전에 온도 계수가 마련되어 있지 않은 용액의 전기 전도도를 측정하고자 할 때 동적인 온도 보정 방법을 통하여 표준 온도에서의 전기 전도도 값으로 보정 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2007년 보건 의료 기술진흥사업(기반개발)의 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

- [1] 황세호, 박윤성, 신제현, 박권규, “공내수 치환 전기 전도도 검증을 이용한 연안지역 대수층의 탐지”, 물리탐사, 제9권, 제3호, pp. 225-234, 2006.
- [2] 이병호, “전기 전도도를 이용한 어육의 선도판정”,

- 한국수산학회지, 제22권, 제5호, pp. 219-227, 1989.
- [3] 김재철, 이재윤, 박종식, 권우현, 김승호, 이찬원, “온라인 수질 감시 시스템의 개발”, 센서학회지, 제5권, 제3호, pp. 75-85, 1996.
- [4] 송낙천, 조용수, 최시영, “수위, 온도, 전도도 측정을 위한 다기능 One-Chip 센서의 제조”, 센서학회지, 제15권, 제1호, pp. 2-17, 2006.
- [5] S. B. Baumann, D. R. Wozny, S. K. Kelly, and F. M. Meno, “The electrical conductivity of human cerebrospinal fluid at body temperature”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 220-223, 1997.
- [6] J. J. Barron and C. Ashton, “The effect of temperature on conductivity measurement”, <http://www.fisher.co.uk/phpfiles/techzone/pdfs/reagecon-temp.pdf>, 2005.
- [7] R.G. Jones, “Measurements of the electrical conductivity of water”, *IEE Proc. Sci., Measurement and Technology*, vol. 149, no. 6, pp. 320-322, 2002.
- [8] “Analytical Measurement”, JUMO GmbH & Co. KG, 2006.
- [9] “LTC1966 Datasheet”, Linear Technology Corporation, 2001.
- [10] 박찬우, 김정환, 강용대, “전기 전도도를 이용한 H₂O/LiBr 용액의 실시간 농도의 측정”, 설비공학논문집, 제14권, 제12호, pp. 1078-1083, 2002.
- [11] Y. Sano and T. Kaneko, “A study of the temperature coefficient of constriction resistance”, *Electronics and Communications in Japan, Part2*, vol. 80, no. 4, pp. 546-553, 1997.



차 용 대

- 2002년 서울산업대학교 전자공학과(복수 전공:컴퓨터공학) 졸업(공학사)
- 2008년 서울산업대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
- 현재 서울산업대학교 NID융합기술대학원 전자정보융합공학 박사과정
- 현재 서울산업대학교 의료전자연구소 u-Health Lab. 연구실장
- 주관심분야 : Ubiquitous Health Monitoring, 센서 네트워크, 계측시스템



윤 길 원

- 1988년 5월 University of Texas at Austin의 Department of Electrical & Computer Engineering에서 박사학위 취득
- 1989년~1989년 INSERM (France)의 research fellow.
- 1990년~1992년 Utah Laser Institute (USA)의 Research engineer
- 1992년~2003년 삼성종합기술원 의료전자랩장 역임
- 현재 서울산업대학교 전자정보공학과 교수