



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

LabVIEW를 이용한 CTD용 해양물리센서의
정밀도 검정 시스템 개발에 관한 연구

A Study on Development of Accuracy Verification System of
Marine Physical Sensors on CTD using LabVIEW



2017年 2月

韓國海洋大學校 大學院

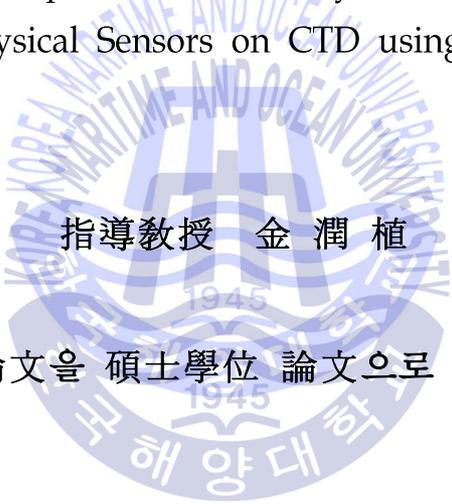
電氣電子工學科

鄭 昌 珉

工學碩士 學位論文

LabVIEW를 이용한 CTD용 해양물리센서의 정밀도 검정 시스템 개발에 관한 연구

A Study on Development of Accuracy Verification System of
Marine Physical Sensors on CTD using LabVIEW



指導教授 金潤植

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

2017年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

鄭 昌 珪

本 論 文 을 鄭 昌 珪 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

審 查 委 員

主 審 金 潤 植 印

副 審 李 成 根 印

副 審 徐 東 煥 印

國 立 韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 氣 電 子 工 學 科

鄭 昌 珪

목 차

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 목 차 | i |
| 표 목차 | iii |
| 그림 목차 | iv |
| Abstract | vi |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| | |
| 제 2 장 연구 배경 | 4 |
| 2.1 CTD 장비 | 4 |
| 2.2 LabVIEW 프로그램 | 8 |
| | |
| 제 3 장 시스템 하드웨어 구성 | 16 |
| 3.1 시스템 주요 하드웨어 구성 및 각 기능 | 16 |
| 3.2 CTD sensor | 18 |
| 3.3 NI PXI 모듈 | 21 |
| 3.4 광학 산소센서 | 23 |
| 3.5 시리얼 - 이더넷 신호 변환장치 | 29 |
| | |
| 제 4 장 시스템 소프트웨어 구성 | 31 |
| 4.1 소프트웨어 설계 | 31 |
| 4.2 수온 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계 | 33 |
| 4.3 전도도 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계 | 37 |
| 4.4 산소 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계 | 41 |
| 4.5 계측데이터의 활용 및 저장 | 47 |

| | |
|----------------------------|----|
| 제 5 장 센서 검정 시스템 성능실험 | 49 |
| 5.1 수온센서 데이터 계측결과 | 49 |
| 5.2 전도도센서 데이터 계측결과 | 52 |
| 5.3 산소센서 데이터 계측결과 | 55 |
| | |
| 제 6 장 결론 및 고찰 | 60 |
| 참고 문헌 | 64 |
| | |
| 연구논문 발표실적 | 66 |
| | |
| 감사의 글 | 67 |



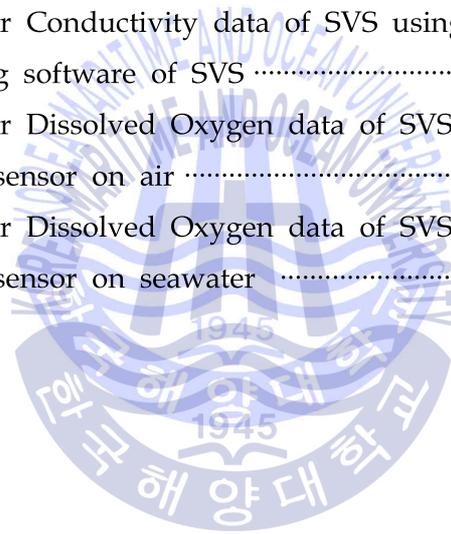
표 목 차

| | |
|--|----|
| Table 1. Specification of CTD system | 6 |
| Table 2. Specification of CTD sensors | 19 |
| Table 3. Specification of NI PXI module | 22 |
| Table 4. Test result of Temperature data on each sampling frequency using SVS | 49 |
| Table 5. Test result for Temperature data of SVS using 2 sensors and CTD | 51 |
| Table 6. Test result of Conductivity data on each sampling frequency using SVS | 52 |
| Table 7. Test result for Conductivity data of SVS using 2 sensors and CTD | 53 |
| Table 8. Standard deviation for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor | 57 |
| Table 9. Average value and Average error value for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on air test | 57 |
| Table 10. Average value and Average error value for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater test | 59 |
| Table 11. Standard deviation for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater test | 59 |

그림 목 차

| | |
|--|----|
| Figure 1. Construction of CTD system | 5 |
| Figure 2. Front Panel | 12 |
| Figure 3. Construction of Block Diagram | 13 |
| Figure 4. Detailed picture of Sub VI(User-generated function) | 14 |
| Figure 5. Diagram of SVS system | 17 |
| Figure 6. Construction of SVS system | 18 |
| Figure 7. Principle diagram of Clark-type sensor | 20 |
| Figure 8. PXI module | 21 |
| Figure 9. Oxygen Optode 4531 sensor | 23 |
| Figure 10. Symbol of Photodiode | 25 |
| Figure 11. Optical design of Optode sensor | 25 |
| Figure 12. Intensity Curve Radiation of Quenching phenomenon | 26 |
| Figure 13. Data Broadcasting by serial Device server | 30 |
| Figure 14. Algorithm for control of SVS system | 32 |
| Figure 15. Implementation of algorithm for Temperature data using LabVIEW | 33 |
| Figure 16. Sensor verification system for two Temperature sensors | 34 |
| Figure 17. Temperature sensor verification system comparing with CTD | 37 |
| Figure 18. Implementation of algorithm for Conductivity data using LabVIEW | 38 |
| Figure 19. Sensor verification system for two Conductivity sensors | 39 |
| Figure 20. Conductivity sensor verification system comparing with CTD | 40 |
| Figure 21. Implementation of algorithm for Oxygen data using LabVIEW | 43 |
| Figure 22. Implementation of algorithm for Oxygen saturation concentration (Oxsol) data using LabVIEW | 44 |

| | |
|--|----|
| Figure 23. Sensor verification system for two oxygen sensors | 45 |
| Figure 24. Receiving loop for data of CTD, Optical oxygen sensor | 46 |
| Figure 25. Saving & utilization for output data | 47 |
| Figure 26. Graph for Temperature data of SVS, CTD on each sampling frequency | 50 |
| Figure 27. Graph for Temperature data of SVS using 2 sensors | 51 |
| Figure 28. Graph for Conductivity data of SVS and CTD on each sampling frequency | 53 |
| Figure 29. Graph for Conductivity data of SVS using 2 sensors | 54 |
| Figure 30. Operating software of SVS | 55 |
| Figure 31. Graph for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on air | 56 |
| Figure 32. Graph for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater | 58 |



A Study on Development of Accuracy Verification System of Marine Physical Sensors on CTD using LabVIEW

Jeong, Chang Heon

Department of Electrical & Electronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University
Busan, Republic of Korea

Supervised by Professor Yoon-Sik, Kim

Abstract

In this paper, "Sensor Verification System(SVS)" which is used to check the status of Temperature, Conductivity, Oxygen sensors using with CTD(Conductivity Temperature Depth) system has been designed and performance test was done, CTD is the most famous equipment in the world using universally in ocean exploration. SVS has been designed with CTD sensors and "LabVIEW" software, NI PXI system, DAQ board, and more. To share the measured data of CTD system, local network system has been installed with CTD and SVS. Also, Optical oxygen sensor has been installed to compare with original electrochemical oxygen sensor using in the CTD. The Software of the SVS was designed three types programs for test each sensors of CTD system. The result of test for each sensors using SVS is as follows.

Temperature sensor and Conductivity sensor use magnitude of analog output frequency as the source of sensors data. The performance test of SVS is implemented using 500kHz frequency which is maximum sampling frequency of NI DAQ board. The standard deviation of temperature sensor was 0.1~0.2°C, this is 10 times greater than CTD system. In the case of Conductivity sensor, standard deviation was 0.01~0.02 S/m, this is 50 times greater than CTD system.

Assuming that the CTD data is standard data of this test, the average data error of temperature sensor from SVS was -0.0176°C and average of the absolute error value was 0.1473. The average data error of conductivity sensor from SVS was -0.0011 S/m and average of the absolute error value was 0.0133 S/m.

Temperature sensor and Conductivity sensor have high accuracy in the test of average data error, but, when we check the average of the absolute error value, this value is similar with standard deviation and it appears that, the precision is slightly lowered. this means, SVS has a lower stability compared to the CTD system. To solve this problem, we can make the system to produce a output data by averaging acquired data for 1~10 minutes, then we can have

high accuracy and reduce the data errors. But, radical method to improve the accuracy of data is that, upgrade NI DAQ board to the better one which has more high quality of sampling frequency than we can reduce standard deviation of the data.

In the case of test SVS with oxygen sensor, we have to make test environment because, electrochemical oxygen sensor measure the data with consuming real oxygen so, we have to supply

oxygen at the hall where the membrane is located continuously on the speed higher than certain level. So that, performance test of SVS was implemented in the air first, and second test was implemented in the seawater located in the plastic water tank.

The two electrochemical oxygen sensor was installed on the SVS system. In the first test, electrochemical oxygen sensor doesn't use frequency as a resource of oxygen data but, DC output voltage so, we can measure the high accuracy data even though SVS doesn't have high frequency of sampling data.

The standard deviation of each sensor data of the CTD was 0.0013 mL , and in the case of SVS, first oxygen sensor was 0.0018 mL , second was 0.0017 mL . this looks, Difference of Standard deviation between CTD and SVS is very small. And the standard deviation of data acquired from optical oxygen sensor was 0.0043 mL , this was 3 times greater than CTD system.

Assuming that the CTD data was standard data of this test, average of data error was 0.0581 mL , 0.016 mL . optical oxygen sensor was 0.2834 mL . Average of the absolute error value was same with average of data error. The tendency of this test was that, the stability of the SVS system was similar with CTD system but, there are some data errors which is not small. The main cause of this errors are follows, first is measuring environment of oxygen sensor is not flat. and the oxygen of the air consist not equally. second is correction error of own sensor.

Second test is implemented in the seawater. Average of error data from SVS was 0.0909 mL , -0.0223 mL , Optical oxygen sensor was 2.9503 mL . Average of the absolute error value from SVS was 0.0912 mL , 0.0444 mL . Optical oxygen sensor was 2.9503 mL . The

data of optical oxygen sensor was 2 times greater than data of CTD, SVS. So, If we acquire the oxygen sensor data in the seawater, it is impossible to compare oxygen data with optical oxygen sensor, in this case we have to prepare the special equipment which supply equal oxygen to compare the data of oxygen sensor more precisely.



제 1장 서론

연구조사선박의 가장 기본적인 구성 장비라 할 수 있는 수층별 수온염분 측정기(CTD, Conductivity Temperature Depth)는 해양환경변화 및 해양자원에 대한 개발 등에 대한 지속적인 필요성 증대로, 과거에서부터 현재까지 꾸준히 활용되어왔다.

수층별 수온염분 측정기는 여러 가지의 해양물리센서들이 하나의 장비로 결합된 장비로, 해양 탐사 수행 시 장비를 수중에 투하하여 탐사 현장의 수층별 수중 환경에 대한 물리적인 파라미터 정보를 제공하며, 해당 데이터들은 탐사에서 사용되는 대부분의 해양장비의 사전 정밀보정을 위해 활용된다.

그러나 실제 탐사현장에서 센서의 해풍, 해수에 대한 잦은 노출 및 사용이 장기화 될 경우 센서의 측정 오차범위가 증가하게 되며, 전자기기라는 특성상 예상치 못한 고장이 발생하는 경우가 적지 않게 발생하며, 바다라는 불규칙한 변화가 항상 존재하는 현장의 특성을 인지하고 있음에도 불구하고 센서로부터 얻어진 다양한 결과 데이터는 현장에서 얻어진 정확한 데이터로 여겨지는 반면 센서의 고장 또는 불확도 증가발생에 따른 신뢰하기 힘든 데이터로 여겨지기도 한다. 그에 따라 사용 중인 센서의 정상상태여부 및 정밀도에 대한 객관적인 확인이 필요한 경우가 발생하게 된다.

CTD 장비의 특성상 사용 중인 센서의 객관적인 성능 테스트를 위해서는 장비로부터 센서를 분리하거나 또는 새로운 센서를 다시 설치해야하는 과정이 필요하며 이는 흔들리는 선박에서의 경우 위험하

고 적지 않은 시간이 소요된다는 단점이 있으며, 센서가 아닌 다른 부분에서 발생한 문제인지에 대한 확인도 간과 할 수 없는 부분이다.

이런 발생 가능한 모든 고장원인을 가장 쉽게 확인 할 수 있는 효율적인 방안은 동일 선박 내부에 또 다른 CTD 장비의 전체 시스템을 구축해두어 기존의 시스템의 경우와 비교분석하는 것이 가장 정확하고 빠른 방법이라 할 수 있다. 하지만 예비시스템 전체를 구축하는데 드는 비용과 사용되는 공간은 목적대비 실용적이지 못하다는 것이 일반적인 견해일 것이다.

이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 탐사현장에서 적시적소에 간단하게 활용될 수 있는 소규모의 센서 검정시스템의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 CTD 센서 검정시스템의 개발에 대한 설계 및 제작에 관하여 기술하였으며, 시스템 개발에는 최근 국내외에서 산업현장, 연구개발 분야 등 폭넓은 분야에서 사용 되고 있는 그래픽 언어 기반 프로그래밍 소프트웨어인 LabVIEW를 이용하였다.

본 논문의 구성은 총 6장으로 구성되어있다. 제 1장은 연구의 배경으로 해양탐사에서 CTD 장비의 실제 사용 시 발생하는 문제해결을 위한 센서 검정시스템의 연구에 관한 배경과 제작 필요성에 대하여 서술하였다. 제 2장은 시스템 설계에 이용되는 소프트웨어인 LabVIEW와 CTD 장비에 대한 특징과 구성 등에 대하여 하였다. 제 3장은 센서 검정시스템 설계를 위한 하드웨어 구성 및 구성별 기능에 대하여 기술하였다. 제 4장은 시스템 설계를 위한 소프트웨어 설계의 기본방향과 이를 위한 각각의 제어 알고리즘에 대하여 설명하

였다. 제 5장에서는 구성 완료된 센서 검정시스템을 통해 측정된 결과를 기존의 CTD 시스템 및 광학 산소센서에서 측정된 결과값과 비교하여 센서 검정시스템의 성능을 확인하였고 결과에 대하여 고찰하였다. 제 6장에서는 결과를 바탕으로 결론과 앞으로의 연구방향에 대해 기술한다.



제 2장 연구 배경

2.1 CTD 장비

해양관측·조사는 해양과학연구를 통해 해양의 현상을 정확히 이해하고 현황을 파악하기 위해 필수적으로 수반되는 행위로서, 수중 환경의 다양한 물리적 현상을 규명하고 예측하기 위해서 해수의 물리적 파라미터에 대한 관측 또는 직접적인 채취 후 분석을 위해 CTD 장비의 활용은 과거에서부터 현재까지 꾸준히 이어져 오고 있으며 CTD로부터 생산된 자료의 품질 또한 매우 중요한 항목으로 대두되고 있다.

CTD란 Conductivity Temperature Depth라는 이름의 약자로, 해석했을 때의 의미 그대로 수층별 해수의 수온과 전도도를 측정하는 것이 주목적인 장비이다. 국내외 대부분의 해양연구조사선에서 공통적으로 사용하고 있는 장비중 하나로 세계적으로 많은 종류의 CTD 모델이 생산되어 공급되고 있다. 본 논문에서는 연구조사선에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 미국 Seabird사의 SBE 911plus 모델을 표준모델로 정하여 장비의 이론적 배경을 설명코자 한다.

CTD는 Figure 1에서와 같이 수중으로 투하되는 수중운영 장비(Underwater unit), 두 번째는 수중운영 장비에 대한 전기적 신호 및 데이터의 송수신, 데이터 A/D 컨버팅을 담당하는 데크 유닛(Deck Unit), 장비의 컨트롤, 데이터 출력 및 저장, 장비용 소프트웨어 운영 및 데이터 후처리

를 담당하는 장비 운영 컴퓨터, 수중운영 장비의 진수 및 인양에 사용되는 CTD Winch로 크게 총 4가지 부분으로 구성되어 있다.

Figure 1에서 볼 수 있듯이 수중운영 장비는 해수채취를 위한 채수용기 및 채수용기 장착용 프레임 내부에 설치되어 운영되며, 수중운영 장비는 수온과 전도도센서 외, 수중압력, 용존산소량, 탁도, 클로로필, 수중광량, 이산화탄소량, 수중 고도, 수중 산성도(PH) 센서로 구성된다. CTD 장비의 주요 사양과 성능은 Table 1과 같다.

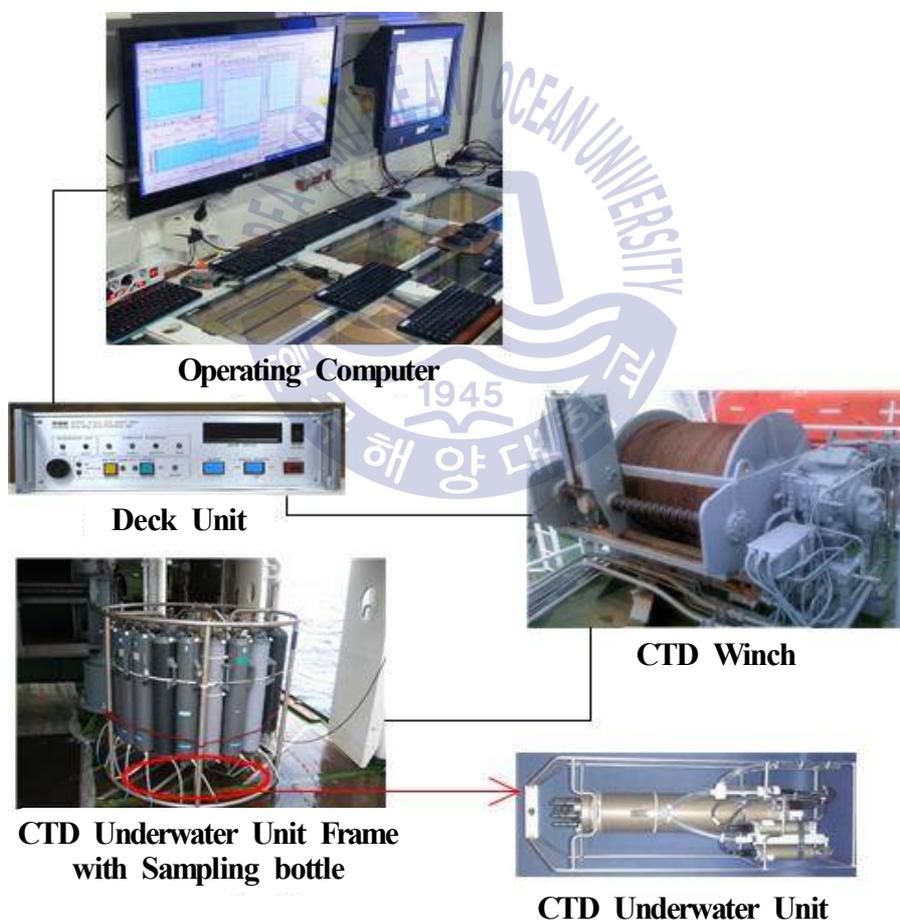


Figure 1. Construction of CTD system

Table 1. Specification of CTD system

| 구분 | 온도(°C) | 전도도(S/m) | 압력 | A/D 입력 |
|------------|---|------------------------|---|----------|
| 측정범위 | -5 ~ 35 | 0 ~ 7 | 0 ~ F.S. : 1400/ 2000/4200/6800/10500m | 0 ~ +5 V |
| 정확도 | 0.001 | 0.003 | 0.015% F.S. | 0.005 V |
| 안정계수 | 0.0002/달 | 0.0003/달 | 0.018% F.S. / 년 | 0.001V/달 |
| 분해능 | 0.0002 | 0.00004 | 0.001% F.S. | 0.0012V |
| 센서 교정 | -1.4 ~ 32.5 | 2.6 ~ 6 S/m 공기 중 0값 | Paroscientific사 교정 + Sea-bird사 온도 보정 | - |
| 응답시간 | 0.065초 | 0.065초 | 0.015 초 | 5.5Hz |
| 메인시간 에러 | 0.00016°C | 0.00005 S/m | 0.03 dbar (68000m 압력센서) | - |
| 센서 운영채널 | Voltage sensor channel 8개 Frequency sensor channel 5개 | | | |
| 하우징 재질 | 0 ~ 6800m - 알루미늄 0~10500m - 티타늄 | | | |
| 무게 | 알루미늄 - 25kg(air) / 16 kg(water) 티타늄 - 29kg(air) / 20 kg(water) | | | |

Table 1에서 볼 수 있듯이, 주 활용센서인 수온과 전도도센서의 소수점 셋째자리 까지 정확도를 확보하고 있으며, 운영되는 선박의 규모와 구축되어 있는 보조 인프라 환경에 따라 천해에서부터 심해 6000m 이상 깊이의 수중환경에서 원하는 수심에서의 해수채취 및 데이터 취득이 가능하여 대부분의 해양탐사에서 범용으로 활용되고 있다.^[1]

CTD 장비에서 생산된 자료는 과학적인 연구뿐만 아니라 정책 의 사결정, 해양예보 등 다양한 분야에 사용될 수 있으므로 불량자료 생산 시에는 막대한 비용과 노력의 손실을 초래할 수 있기 때문에 사전 예방적 차원에서 센서의 검정 및 교정이 필수적으로 권고되는 사항이다. 과거에는 외국 제조사로의 센서반출을 통하여 센서의 검·교정을 시행하였으나, 국외기술에 의존한 검·교정과정에서 예산 및 시간소요의 부담이 큰 문제점이 대두되어, 이를 해결하기 위해 국내 해양연구기관인 한국해양과학기술원은 2010년 CTD 센서 교정실을 설립하였고, 2013년 기술 표준원 한국인정기구(KOLAS)로부터 국내 최초로 해양 관측장비의 온도(수온)와 압력(수심) 분야에서 국제공인 교정기관으로 인정받아 현재까지 활발히 운영 중에 있다.^[2]

실제로 수온, 전도도, 산소센서의 경우, 교정기관인 한국해양과학기술원에서는 CTD장비의 제작사 권고사항에 따라 센서의 사용기간이 최소 6개월에서 최대 1년이 지난경우 교정기관으로부터 센서의 검·교정을 받아 탐사에서 사용하고 있다.

CTD 센서는 모델별로 디지털 전기신호의 수신 값을 연구자가 사

용할 수 있는 가공된 최종 데이터로 변환하는 고유 알고리즘을 가지며, 알고리즘의 구성은 각종 파라미터들로 이루어진 계산식과, 데이터 정확도를 결정하는 핵심요소인 교정상수들로 이루어진다. 교정기관에서는 교정상수 값에 변화를 주었을 때 출력되는 최종 데이터가 교정용 표준기의 데이터에 가장 근접한 경우의 교정상수 값을 최종 교정상수로 지정하고 교정상수 값이 포함된 교정 리포트를 배포함으로써 연구자는 새 교정상수의 입력을 통해 교정된 센서를 사용할 수 있게 된다.

2.2 LabVIEW 프로그램

LabVIEW는 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench의 약자로, 텍스트가 아닌 그래픽을 기반으로 한 프로그래밍 소프트웨어로서 그림으로 만들어진 함수 아이콘, 점, 선을 주로 사용하여 시스템을 설계하도록 만들어진 프로그램이다. 특히 데이터의 측정 및 분석 표현에 적절하도록 특별히 고안되었기 때문에, 실험장비의 제어 프로그램에 LabVIEW를 이용하면 수 일 내에 완성 할 수 있는 장점이 있다. 또한 매우 다양한 GUI(Graphical User Interface, 그래픽 사용자 인터페이스)를 갖고 있기 때문에 쉽게 프로그램을 이해할 수 있고, 더불어 설계 중인 시스템을 직접 눈으로 확인할 수 있기 때문에 기존의 텍스트를 기반으로 운영되는 프로그래밍 소프트웨어

들에 비하여 프로그래밍에 대한 설계, 해석이 용이하여 소프트웨어 제작 시간을 단축시킬 수 있으며, 사용자에게 조금 더 친숙하게 이용될 수 있다는 장점이 있기 때문에, 프로그램의 용도가 연구개발 뿐만 아니라, 장비의 제어, 데이터 처리, 산업 공정설계 등 여러 분야에서 두루 활용된다.^[3]

PC를 사용한 산업자동화(PC-based industrial automation)은 최근에 개인용 컴퓨터의 성능과 호환성이 발달함에 따라 프로세서 자동화, 공장자동화, MMI(Man-Machine Interface), 실험실 자동화 등 자동화 영역에서도 사용되고 있다. 이를 효과적으로 구현하기 위해 LabVIEW는 VI(Virtual Instrument, 가상 장치)라는 독특한 방법을 사용하는데, VI는 1개 이상의 컴퓨터와 네트워크 인터페이스, UUT(Unit Under Test), 소프트웨어, 입·출력 장치(GPIB, PXI, Serial port, Plug-in, DAQ board)들로 구성된다. VI를 사용하면 컴퓨터와 하드웨어 부분으로 자신만의 경제적인 측정시스템을 구현할 수 있다. 소프트웨어가 중심이 된 이들 시스템은 일반적인 컴퓨터의 처리과정, 디스플레이 연결성을 경감하므로 자신의 측정시스템을 작성할 때 강력한 파워와 유연성을 첨가할 수 있다.

LabVIEW 소프트웨어를 계측기 제어 및 모니터링에 사용하면, VI를 신속하게 작성할 수 있고, LabVIEW의 광범위한 라이브러리를 어플리케이션에 쉽게 적용할 수 있다. 또한, LabVIEW는 프로그램을 통해서 라인단위의 실행이나 디버깅을 할 수 있는 일반적인 설계 프로그램 도구들도 포함하고 있으며 실행과정에서 데이터의 흐름을 역

동적으로 관찰 할 수 있도록 되어있다. VI의 장점은 그 구입비용이 상대적으로 저렴하고, 개방적인 구조로 되어있고, 최신의 개발환경 및 툴을 사용할 수 있으며, 재사용 가능한 모듈로 구성되므로 개발 및 유지보수가 용이하다.

VI는 다음과 같은 3개의 중요한 요소인 “Acquisition & Control”, “Analysis”, “Presentation”으로 구성된다. Acquisition & Control이란 전압, 전류, 압력, 온도 등의 물리적인 신호를 컴퓨터가 입·출력 할 수 있는 디지털 신호로의 변환을 의미한다. Analysis는 주파수의 반응, 평균, 편차 등을 소프트웨어 자체적으로 처리하는 것을 말한다. Presentation은 측정하고 분석한 데이터를 그래프, 차트 등에 표시하는 과정을 말한다. 특히 LabVIEW는 광범위한 함수와 서브루틴 라이브러리를 가지고 있기 때문에 이미 만들어진 VI들의 사용법만 익히게 되면 초보자도 충분히 시스템을 원하는 대로 설계할 수 있다.

LabVIEW는 크게 여섯 가지의 특징을 갖고 있다.^[5] 첫 번째는 “Construct the Graphical Block Diagram”으로, 일반 텍스트 기반 프로그래밍에서 자주 발생될 수 있는 구문오류를 방지하고, 그래픽 언어를 통해 시스템을 직관적으로 이해하기 쉬우며 다양한 모듈을 제공하므로 다양한 분야에 적용될 수 있다. 두 번째는 “Data flow programming”이다. 설계회로의 시작점에서 종료지점까지의 흐름이 Data flow의 순서에 따라 결정되며 멀티태스킹(Multi-tasking)과 멀티스레드(Multi-thread)를 지원한다. 세 번째는 “Modularity and Hierarchy”으로 소프트웨어 상에 많은 모듈이 지원되지만, 사용자가

원하는 형태의 모듈(SubVI) 자체를 생성할 수 있으며, 고유의 기능으로 활용할 수 있다. 네 번째는 "Graphical Compiler"이다. 많은 어플리케이션에서 실행속도 문제가 결정적인 요소인데 최적화된 코드를 가지고 실행 속도를 개선하였다. 다섯 번째는 "Instrument Control"로 소프트웨어에서 제공되는 모듈은 산업 표준디바이스와 동일한 규격을 제공한다. 마지막인 여섯 번째는 "DAQ(Data Acquisition and Control)"이다. 컴퓨터 자체의 포트를 통해 외부기기와 연결하여 데이터를 얻거나 조절할 수 있다. 다양한 종류의 DAQ가 PC에 장착할 수 있는 형태로 제공되며 강력한 기능 및 성능을 지니고 있다.

LabVIEW는 크게 세 부분으로 구성된다. 첫 번째는 데이터를 입력하고 분석한 결과를 연구자가 눈으로 확인하는 프론트 패널과 어떤 시스템에 대한 실질적인 회로 및 구성할 수 있는 블록 다이어그램, 그리고 회로의 구성에 사용되는 각종 컨트롤러와 함수로 구성된 아이콘과 커넥터로 구성되어 있다.

프론트 패널은 앞서 기술한 바와 같이 VI의 결과출력(Display)을 담당하는 대화식 사용자 인터페이스로, 구성요소들은 실제의 계측장치의 패널과 유사한 형태로 묘사되어 있다. 그래서 각종 그래프 및 차트 등을 구성하여 데이터를 오실로스코프, 멀티 테스터처럼 구현할 수 있으며, 회로의 동작 중에도 각종 연구자가 원하는 옵션 사항들을 스위치, 노브(Knob)등을 이용하여 설정할 수 있으며, 여러 가지 다른 컨트롤(Control, 사용자입력)과 인디케이터(Indicator, 데이터 출력)를 포함하고 있다. 아래의 Figure 2를 참조한다.

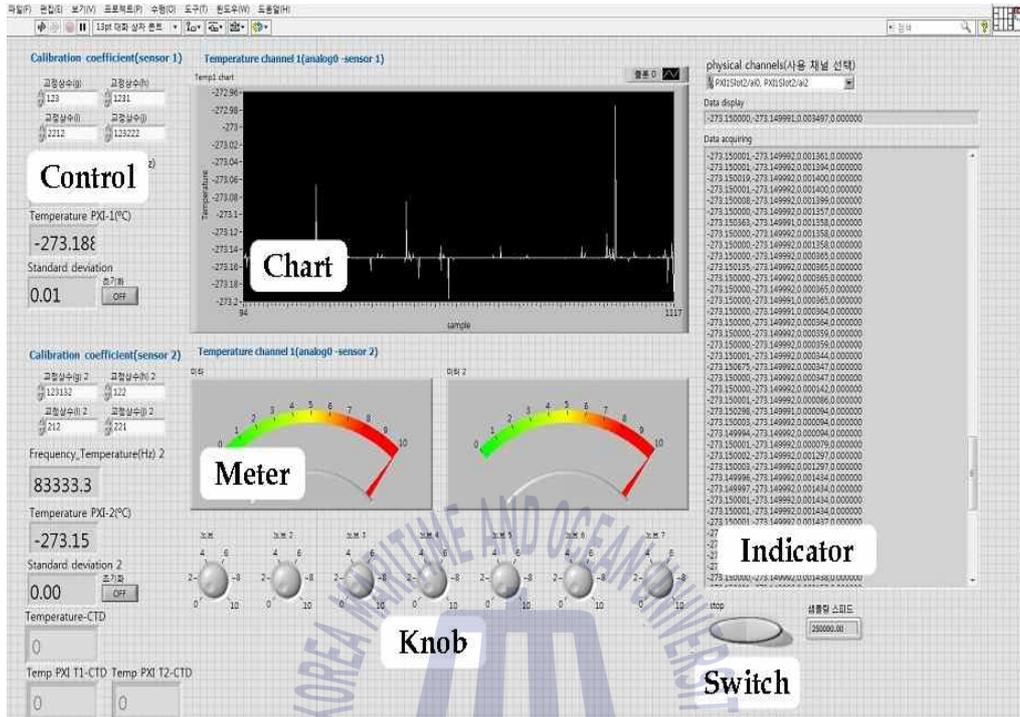


Figure 2. Front Panel

블록 다이어그램은 LabVIEW로 작성한 소스 코드가 있는 곳이며, 실제 프로그램의 루프가 동작되는 곳이다. 블록 다이어그램의 주요 구성요소는 루프(Loop), 함수(Function) 등으로 구성(Figure 3 참조)되며 데이터의 흐름을 정의하기 위해 와이어로 연결된다. 따라서 실제 프로그램이 실행되면 데이터는 기본적으로 와이어를 통해 연결된 순서대로 진행된다. 블록다이어그램의 특성상, 육안으로 구성회로를 볼 수 있기 때문에 별도의 설명이 없더라도 프로그램을 쉽게 이해할 수 있어서 호환성과 유연성은 물론 프로그램의 유지보수가 매우 편리하다.

아이콘과 커넥터는 블록다이어그램에서 실질적인 회로를 구성하는 핵심요소들로서, 아이콘은 함수, 컨트롤로 분류된다. 각 아이콘마다 고유의 특수한 기능 또는 수학적 함수체계가 내장되어 있으며, Figure 3에서 볼 수 있듯이 아이콘은 자체가 가진 역할을 상징하는 그림으로 이루어진 것을 알 수 있다.

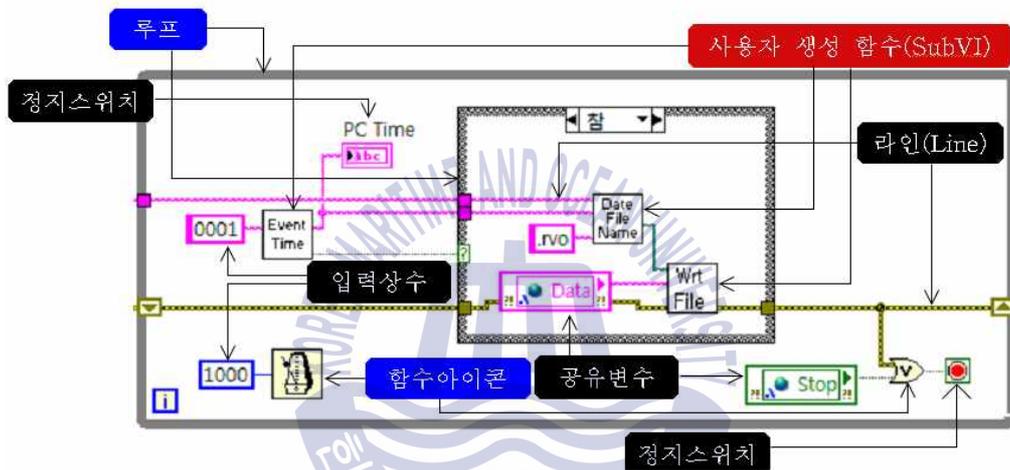


Figure 3. Construction of Block Diagram

아이콘, 루프 등 블록다이어그램 내부의 구성요소들은 선으로 연결되며 모든 항목들은 다양한 기능의 커넥터(데이터 입·출력, 설정 기능)를 가지며, 커넥터를 통해 데이터의 송수신이 가능하다. 프로그램에서 사용자 생성 함수를 더블클릭하게 되면 Figure 4와 같이 사용자가 직접 정의한 함수의 구성을 확인할 수 있으며, 구성된 커넥터의 구조를 쉽게 파악 할 수 있다. 아이콘 또한 사용자의 의도에 따라 원하는 그림과 텍스트를 구성하여 만들 수 있다. Figure 4에 삽입된 사용자 생성 함수 아이콘 또한 직접 사용자에게 의해 디자인된 아이콘이다.

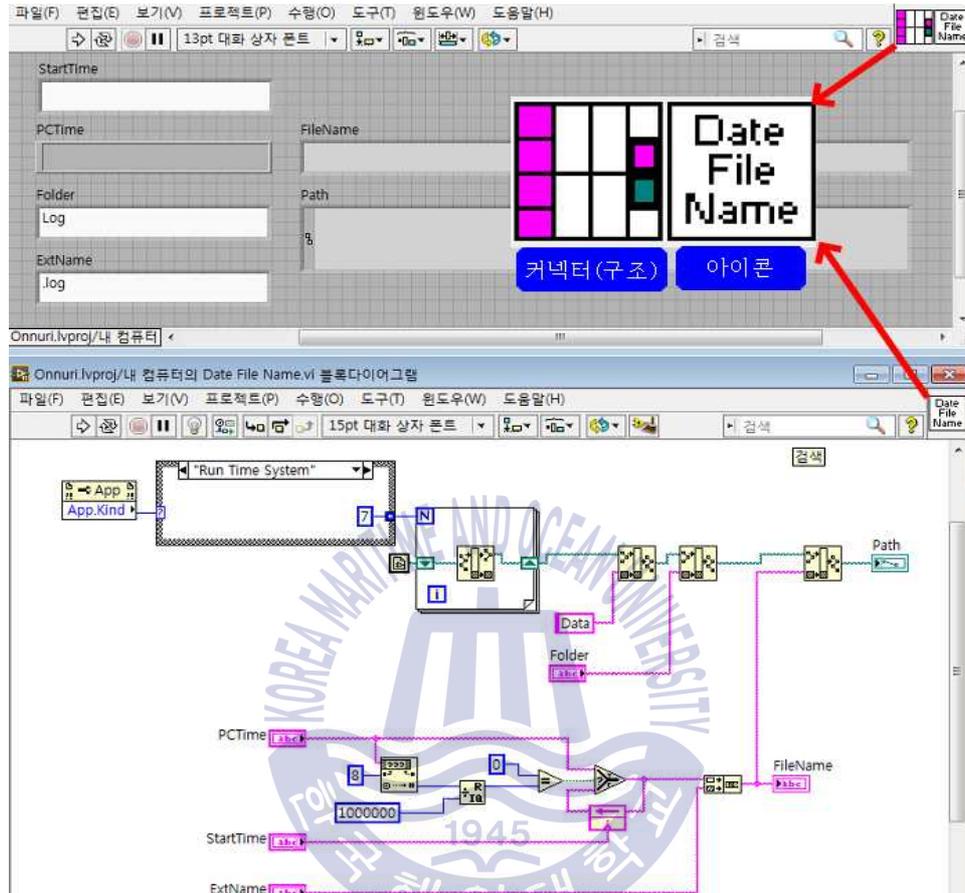


Figure 4. Detailed picture of Sub VI(User-generated function)

LabVIEW의 그래픽 기반의 설계방식을 통한 데이터 표현은 기능적으로 완벽한 프로그램이라 할 수 있으며, 여러 종류의 컴퓨터 OS (Operation System)에서 호환 사용이 가능하고, 기존의 방법으로는 제공하기 어려운 인터랙티브(Interactive)한 사용자 인터페이스를 제공하여 고급 설계 및 해석 기능을 가능하게 한다. 프로그램에 탑재된 인터넷 기반 원격실험은 공학교육에 있어서 큰 변화를 가져다 줄

수 있을 것으로 기대된다. LabVIEW의 제작사인 National Instruments (NI)에서 제공하는 광범위한 모든 툴(Tool)들은 LabVIEW 프로그램과의 호환이 가능하도록 설계되어 있으며 사용자에게 친숙한 형태로 구성되어 있다. 이들을 활용 하면 연구사용자의 어플리케이션 설계 영역을 무한대로 확장이 가능하다.



제 3장 시스템 하드웨어 구성

3.1 시스템 주요 하드웨어 구성 및 각 기능

LabVIEW software에 의해 구성된 CTD 센서 검정시스템(이하 “센서 검정시스템” 또는 “검정시스템”)은 시스템의 제작 의도인 편의성에 맞도록 단순히 2가지 모듈로 구성되며, 직접적인 물리 데이터의 측정을 하는 측정 모듈(Measuring module)과, 측정 모듈을 직접 컨트롤하고 데이터를 기록하고 저장하는 컨트롤 모듈(Control module)로 구성된다.

측정 모듈은 수온, 전도도, 산소 센서와 센서의 직류 전원공급 장치인 DC 12V용 SMPS(Switched Mode Power Supply)로 구성된다. 컨트롤 모듈은 검정시스템의 전반적인 운영과 데이터 관리를 담당하는 PXI 장비와, 센서에서 출력되는 데이터의 수신 및 PXI로의 데이터 전달을 담당하는 커넥터 블록(Connector block)으로 구성된다.

또한, 실제 CTD 장비를 운영하는 환경에서 사용되어야 하므로, 장비의 운영 및 실험환경을 CTD 사용 환경과 동일하게 구성하였다. CTD 장비에서 생성되는 데이터가 동시에 검정시스템에서 측정 및 비교분석 될 수 있도록 네트워크 공유를 통해 CTD 장비의 데이터가 검정시스템에 실시간으로 입력될 수 있도록 구성하였다.

동일한 방법으로 CTD에서 사용하는 산소센서의 경우 멤브레인(Membrane, 얇은 막) 타입으로 사용 환경의 변화에 따른 막의 손상

에 의한 데이터 이상이 발생할 가능성이 적지 않은 것을 감안하여 외부 환경변화에 대한 내구성이 뛰어난 광학산소센서를 네트워크 공유를 통해 검정시스템과 연결하여 센서 데이터를 추가 입력하여 시스템의 신뢰성을 높이고자 하였다.

네트워크 공유를 위해 이더넷 전용 네트워크 허브(Hub)와 장비에서 입력되는 시리얼 타입 데이터를 네트워크에 입력시키기 위해 시리얼 to 이더넷 신호 변환장치를 사용하였다. 시스템의 구성도는 Figure 5와 같다.

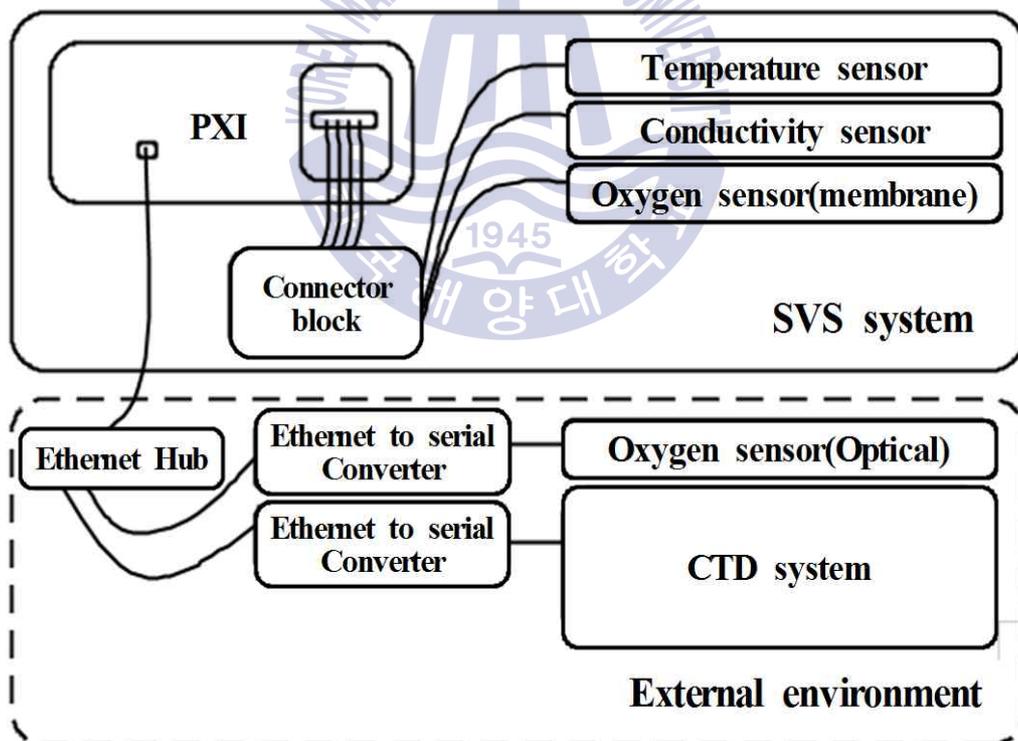


Figure 5. Diagram of SVS system

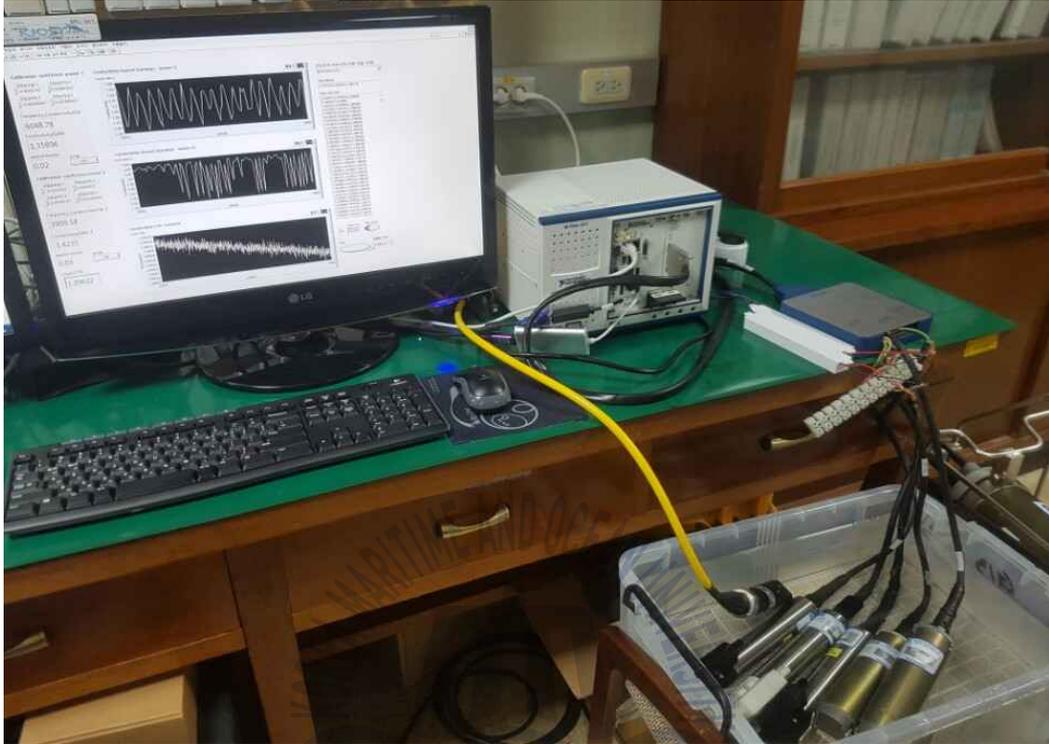


Figure 6. Construction of SVS system

3.2 CTD sensor

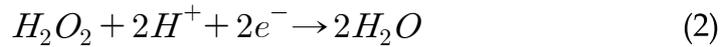
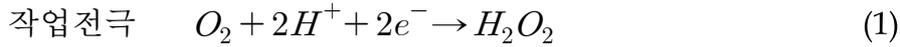
CTD 장비를 구성하는 가장 기본적인 센서로, 실제 CTD 운영 시 활용도 및 데이터의 정밀도에 대한 관심도가 가장 높으며, 주기적인 검·교정 및 유지보수를 필요로 하는 수온센서, 전도도센서, 산소센서를 검정시스템의 측정모듈을 구성하는 센서로 정하였다. 이들 중 수온센서와 전도도센서는 출력 신호의 주파수 값을 데이터의 소스로 활용하며, 산소센서는 출력 전압 값을 데이터 소스로 활용한다. 센서들의 성능과 특징 등 세부사항을 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Specification of CTD sensors

| 구분 \ 센서(모델) | 수온센서 (SBE 3) | 전도도센서 (SBE 4) | 산소센서 (SBE 43) |
|-------------|-------------------|------------------|--|
| 입력 전압 | 11 ~ 16 Volt(DC) | 6 ~ 24 Volt(DC) | 6 ~ 24 Volt(DC) |
| 데이터 범위 | -5.0 ~ 35 °C | 0 ~ 7.0 Siemens/ | 120% of Surface saturation in all natural waters |
| 출력 신호 유형 | 주파수 카운팅 | 주파수 카운팅 | DC 전압출력 |
| 신호출력 범위 | 2.5~6 kHz | 2.5~7.5 kHz | 0 ~ 5 Volt(DC) |
| 정밀도 | ±0.001 °C | 0.0003 S/m | 2% of saturation |
| 신호 샘플링 주파수 | 6,912 MHz | 6,912 MHz | - |
| 출력 신호 파형 | ±0.5V square wave | ±1V square wave | 0~5V square wave |
| 응답 시간(초) | 0.065 ±0.010 | 0.060 | - |

위 세 가지 센서들 중 시스템 구성에 추가될 광학산소센서와의 비교를 위해 SBE 43 산소센서의 구동원리를 설명코자한다. SBE 43 모델은 전기화학식 측정기술을 이용한 센서로 1956년 Leland C. Clark에 의해 처음 발명되어서 Clark-type 센서로 분류된다.^[4] Clark-type 센서는 전기화학적 센서로 응답속도가 빠르고, 높은 분해능, 데이터간 편차가 적은 장점이 있어 바이오센서로 수질분석용, 임상 진단용 및 실시간 모니터링용으로 응용 및 활용되고 있다. Clark-type 센서는 Figure 7과 같이 전기화학적 측정을 위한 전해질 전극이 존재하는 부분 및 샘플 용액을 담을 수 있는 저장소와 산소를 선택적으로 투과하는 막(Membrane)으로 구성되어 있다. 측정 용액 내의 용존 산소는 막을 투과하여 내부 전해질로 이동하고, 이동한 산소는 음전위가 인가된 작업 전극에서 식 (1),(2)의 반응으로 환원

되고, 이 환원 전류를 측정함으로써 용존 산소의 농도를 분석할 수 있다.



$$I(t) = nFAP_m \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3)$$

여기서 환원 전류의 크기는 확산 방정식으로 예측할 수 있으며 작업 전극 표면에서의 산소 농도에 비례함을 식 (3)에서 알 수 있다. n , F , A , P_m , C 은 각각 전자의 수, Faraday 상수, 작업 전극의 면적, 멤브레인 막의 산소 투과율, 산소의 농도를 나타낸다. 전기화학식 측정기술의 가장 큰 특징으로는 용존산소를 측정하는 동안에 전해질의 소모와 음극의 파손이 발생하는 점이다. 이 두 가지의 영향 때문에 측정신호 편차가 발생할 수밖에 없으며, 잦은 교정에 의해서 이러한 편차는 방지될 수 있다.

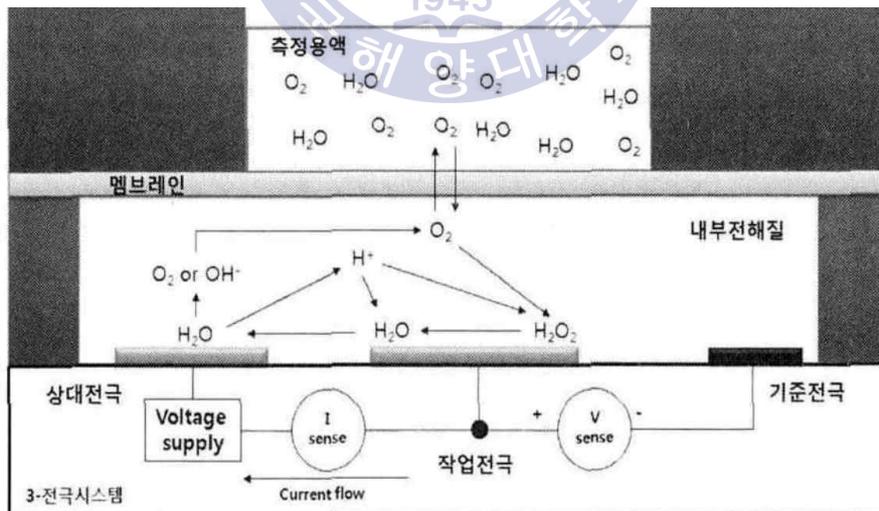


Figure 7. Principle diagram of Clark-type sensor

3.3 NI PXI 모듈

PXI(PCI eXtensions for Instrumentation)는 PCI를 확장한 것으로서 Figure 8과 같이 PC역할을 하는 컨트롤러를 비롯하여 고유의 기능을 지닌 각 DAQ 보드들이 PXI Chassis를 통하여 물리적으로 함께 설치되어, 기능적으로 동기화가 되도록 설계된 장치이다. 일반적인 Desktop PC의 절반정도의 크기로 장비의 이동 및 보관이 용이한 장점이 있다. 기능적으로는 일반적으로 사용되는 PC와는 달리 계측과 제어에 중점을 두었기 때문에, 시스템 컨트롤러가 다른 여러 작업을 하고 있더라도 정확한 시간으로 데이터를 취득할 수 있도록 설계되어 있다. PXI Chassis로는 모델 NI PXIe-1071을 사용하였으며, NI PXIe-8135 Controller, NI PXIe-6341 DAQ board, SCB-68A, Connector block으로 구성된다. PXI module의 부분별 성능과 특징 등 세부사양을 Table 3에 정리하였다.



Figure 8. PXI module

Table 3. Specification of NI PXI module

| 모델 | 항목 | 세부사양 |
|---|--|--------------------------------------|
| NI PXIe-1071 chassis (BUS) | AC input | 100 to 240 VAC |
| | Operating Voltage range | 90 to 264 VAC |
| | Input current rating | 4 - 2 A |
| | Ling regulation (3V, 5V, 12V) | <±0.2%, <±0.1%, <±0.1% |
| | DC current capacity(I _{MP}) (3.3V, 5V, 12V, -12V, 5V AUX) | 18A, 17A, 17A, 1A, 0.75A |
| | Dimension (Height, Width, Depth) (Weight) | 177mm×257mm×214.2mm 5.94kg |
| | CPU | Intel Core i7 3610 QE |
| | Ethernet | 10/100/1000 Base TX 2 port |
| | GPIB(IEEE 488 Controller) | Yes |
| | Serial port | Yes |
| NI PXIe-8135 Controller (운영PC) | Parallel port | Yes |
| | Hi-speed USB 2.0 port | Yes |
| | Hi-speed USB 3.0 port | Yes |
| | Operating system | Windows 7 Professional |
| | PXI Express Trigger Bus input/output | Yes |
| | PXI Express 4 Link Configuration | x4, x4, x4, x4, |
| | PXI Express 2 Link Configuration | x8, x8, |
| NI PXIe-6341 DAQ board | Number of channels | 8 differential or 16 single ended |
| | ADC resolution | 16 bits |
| | Sample rate | 500 kS/s |
| | Timing resolution | 10 ns |
| | Input range | ±0.2 V, ±1 V, ±5 V, ±10 V |
| | Maximum working voltage for analog inputs | ±11 V of AI GND |
| SCB-68A (Connector block) | Operating voltage(Maximum) | 30 Vrms/42 Vpk/60 VDC |
| | Power consumption | (at +5 VDC, ±5%) |

3.4 광학 산소센서

광학산소센서는 광신호의 송수신을 통해서 대기 또는 수중의 용존 산소량을 측정하는 센서이다. 시스템 구성에 사용된 센서 모델은 Oxygen Optode 4531이며 센서의 외관 및 구성은 Figure 9에서 확인할 수 있듯이 긴 원통모양의 단일 센서이며 빛의 송수신을 담당하는 센싱포일(Sensing foil), 수온센서(Temperature sensor), 케이블 커넥터, 센서 하우징으로 크게 네 가지 부분으로 구성되어 있다.

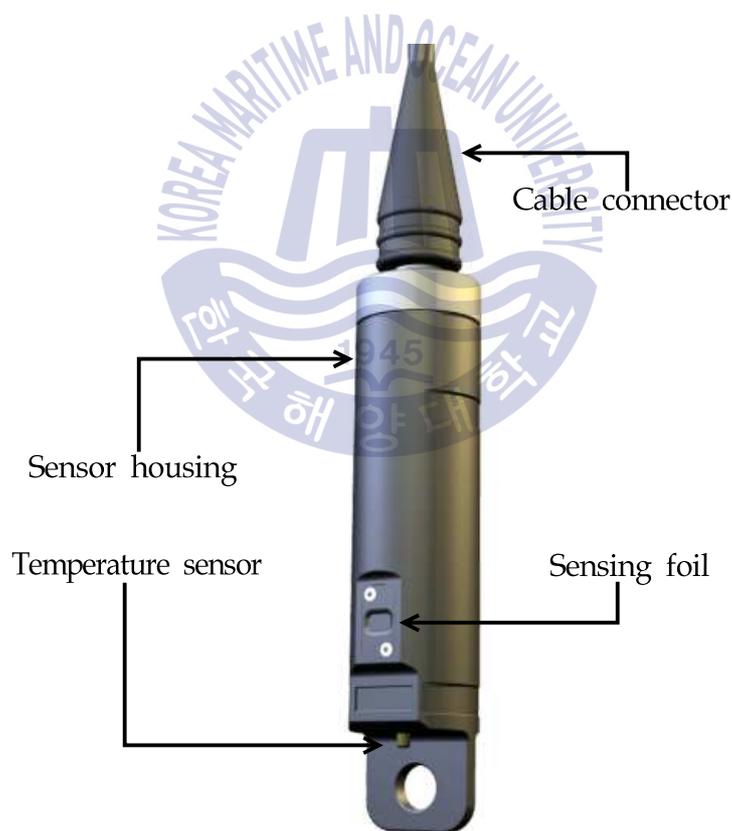


Figure 9. Oxygen Optode 4531 sensor

Oxygen Optode 4531은 LDO(Luminescent Dissolved Oxygen) 원리에 기반을 둔 센서로, 발광의 물리적인 현상(Physical appearance of luminescence)에 기초한다.^[7] 이것은 열 때문이 아닌 여기(勵起, Excitation, 가장 낮은 준위의 에너지 상태에 있는 원자, 전자, 혹은 분자에 외부로부터의 자극을 통해 에너지를 가하면 높은 에너지 상태로 변화하여 여기 상태, 즉 들뜬 상태가 된다)의 다른 형태로 빛이 발하는 특정금속(Luminophore)의 특징으로 정의된다. LDO원리에서, 여기는 빛을 이용한다. 적합한 발광체(Luminophore)의 선택과 여기를 만들어내는 빛의 파장으로, 시간이 흐를수록 발광 방사선의강도와 감쇄는 물질 주위의 산소농도에 의존하게 된다.

Optode 센서는 Figure 9에서 볼 수 있듯이, 센싱포일(sensing foil)이 센서외부에 장착되어 수중에 노출되어 있다. 센싱포일이란 LDO 원리에서 정의된 Luminophore를 의미한다. 센서의 내부에는 Figure 11에서와 같이 파란색과 붉은색인 두 개의 발광다이오드(LED)와 한 개의 광전다이오드(Photodiode)가 내부에 장착되어 있다. 광전다이오드는 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 광센서의 한 종류라 할 수 있다. 이것은 반도체의 PN 접합부에 광검출 기능을 추가한 것으로 회로기호는 다음의 Figure 10와 같다. 빛이 다이오드에 닿으면 전자와 양의 전하 정공이 생겨서 전류가 흐르며, 전압의 크기는 빛의 강도에 거의 비례한다. 이처럼 광전 효과의 결과 반도체의 접합부에 전압이 나타나는 현상을 광기전력 효과라고 한다.

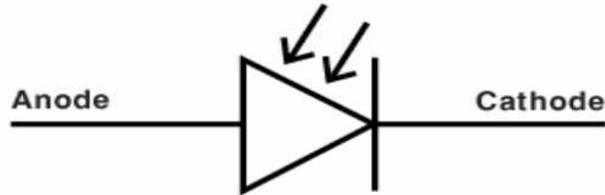


Figure 10. Symbol of Photodiode

Blue 다이오드는 빛의 발광을 통해 센싱포일에 자극을 주는 역할을 하며, 본 센서에서는 광전다이오드에 장파장 필터를 장착하여 푸른색을 띄는 단파장 계열의 빛은 차단시키도록 설계되어 있다. 반대로, Blue 다이오드는 단파장 필터를 장착하여 붉은색을 띄는 장파장 계열의 빛을 차단하도록 설계되어 있다.^[6] Red 다이오드는 센서 내부 회로에서 발생하는 전기적 노이즈에 의해 발생하는 오차를 보상하기 위해 사용된다. Blue 다이오드에서 방사된 빛은 필터를 통과하여 지나가고, 방사에너지 일부는 전달 물질로 이동된다.

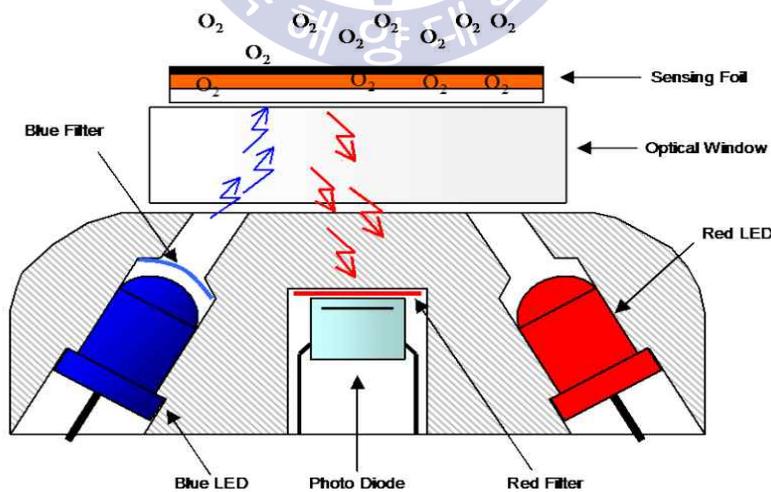


Figure 11. Optical design of Optode sensor

발광체의 전자는 이런 방식으로 초기 에너지를 높은 에너지 상태로 끌어올린다. 이 단계는 중간의 여러 단계를 통해 남겨진다(ms 이내). 여기에서 에너지 차이가 붉은 방사선의 형태로 방출된다. 만약 산소분자가 발광체와 접촉이 되어 있을 경우 발광체와 접촉된 산소분자는 전자의 높은 에너지를 흡수하며, 전자가 빛의 방사 없이 초기 에너지 상태로 돌아갈 수 있도록 한다. 산소농도가 증가할수록 이과정은 방사되는 붉은 빛의 강도를 낮춘다. 이것은 발광체에 전자가 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 돌아가는 것을 빠르게 하는 진동을 일으키며 붉은 빛의 방사시간이 짧아진다. 위에서 설명한 현상은 "Quenching(소멸)"이라는 용어로 대변될 수 있다. Figure 12는 위 현상에 대한 효과를 그래프로 나타낸 것으로, T=0일 때 Blue 다이오드로부터 방사되는 빛의 파동은 빛을 받으면 즉시 붉은 빛을 방사하는 발광체표면에 도달하며, 붉은 빛의 최대강도와 소멸시간은 주변의 산소농도에 따라 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

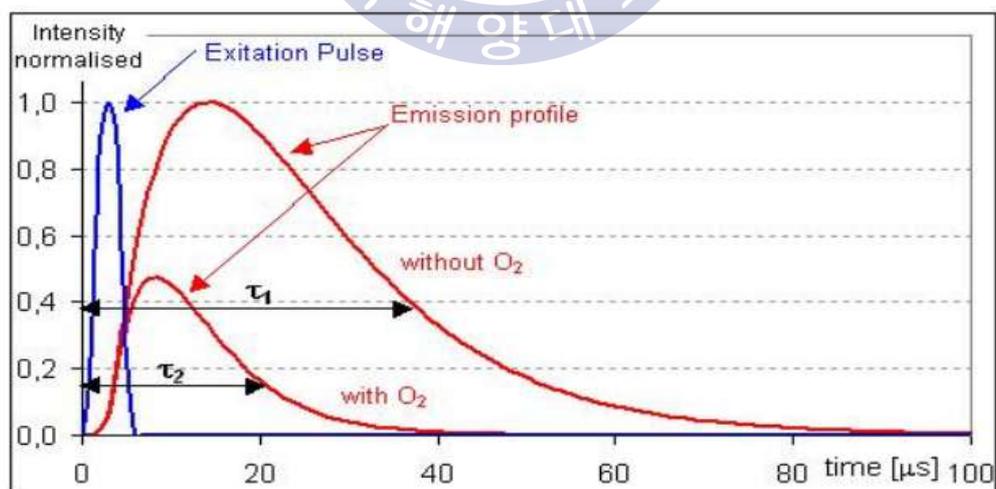


Figure 12. Intensity Curve Radiation of Quenching phenomenon

산소의 농도를 결정하기 위해서, 붉은 방사선의 수명(τ)이 분석되어야 하며, 이 방법으로 산소측정이 시간의 순수하고 물리적인 측정으로도 가능해지게 된다.

현재 개발되고 사용되어 오고 있는 전기화학식 산소 측정기술은 사용자의 정기적인 교정이 요구되며 세척, 교정, 막과 전해질의 교체와 같은 이러한 일들이 현재에는 필요하고 피할 수 없는 일이라고 여겨지고 있다. 하지만, 이러한 문제점들은 새로운 광학 기술로서 어느 정도의 해결이 가능해졌다. 전기화학식 측정기술과 비교해서 광학기술은 측정의 품질과 유지 및 보수에 있어서 중요한 이점들이 여섯 가지가 있다. 첫 번째는, 광학 LDO 기술은 산소 농도의 측정을 시간의 편차 없는 측정으로 간단하게 나타낸 것으로, 운영 중 센서 캡에 무언가 씌어 지거나 발광물질이 약해져서 강도에 영향이 있다 하더라도, 방출된 붉은 방사선의 수명에는 영향이 없다. 단지, 시료의 산소 농도에 의해 결정된다. 모든 광학 구성물들은 붉은색 기준 LED로부터 나오는 빛의 펄스에 의해서 측정하기 전에 조정이 된다. 따라서 사용자에게 의한 잘못된 교정이 발생할 수 없다. 두 번째는 전기화학식 센서와 같이 막과 전해질의 교체가 불필요하다는 점이다. 세 번째는 기존 사용 중인 SBE 43 센서의 경우 해수펌프를 통한 센싱 부분에서의 연속적인 해수의 공급이 필요하다는 점이다. 기존 CTD 시스템의 경우 전용 해수펌프를 사용하여 초당 약 28 ml의 양으로 해수를 산소센서와 전도도센서에 공급해주도록 되어있다. 공급 SBE 43 모델의 전기화학식 측정기술은 양극에서 산소가 수산화물로

환원될 때 발생하는 전압이나 전류를 측정하여 값을 구한다. 이 “산소의 소비”를 맞추기 위해 전해질로의 연속적인 산소 분자의 확산이 필요하다. 센서 전면에서의 산소 분자 확산으로 인한 산소 농도의 감소는 센서 전면에서의 일정한 유속에 의해 방지될 수 있다. LDO 기술에서는 산소 소비가 없고 단지 산소 분자는 산소에 민감한 센서 캡 발광 물질에 접촉되어지는 것만을 요구한다. 따라서 인위적인 시료의 흐름을 만들 필요가 없다. 네 번째는 광학산소센서의 데이터는 수 중 이물질에 대한 영향을 받지 않는다는 점이다. 만약 전기화학식 측정 셀에서 산소의 확산이 이물질로 인한 막의 오염에 의해 방해가 된다면, 산소 데이터 값이 작게 측정될 것이다. 광학산소센서는 측정 시 산소를 소비하지 않으므로 산소 소비가 없는 상태에서 이물질에 의한 막의 오염은 결과 값을 작게 측정하는 것이 아니라 측정시간이 길어지는 것이라 할 수 있다. 다섯 번째는 반응시간의 감소(Low response times)이다. 광학기술로 인해, 산소 분자가 단지 발광체와 접촉되는 것만이 요구되므로 광학 기술의 반응시간은 수 초 내이다. 만약 느린 반응시간이 요구된다면, 적절한 신호 감소가 제어기에서 설정될 수 있다.

여섯 번째는 저 농도에서의 높은 민감도(High sensitivity to low oxygen concentration)이다. 측정의 민감도는 산소 농도가 감소할수록 증가한다. 따라서 측정원리상 낮은 농도에서 뛰어난 해상도를 나타낸다.

일곱 번째는 LDO에 사용된 센서 캡은 전기화학식 측정 셀을 덮고 있는 막에 비해 외부의 물리적인 충격에 영향을 받지 않는다. 사용 중 또는 세척 시 사용자에게 의한 막의 손상이 발생할 수 없다.

3.5 시리얼 - 이더넷 신호 변환장치

센서 검정시스템의 구성에는 3.1장에서 거론한 바와 같이 DAQ board 및 LabVIEW software의 프로그램 설계를 통하여 입력될 CTD 센서 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 실제 현장에서 사용되는 CTD장비의 데이터와 광학산소센서의 데이터를 센서 검정시스템에 입력될 수 있도록 구성하였다. CTD 장비와, 광학산소센서의 데이터 출력(Output data) 프로토콜(Protocol)은 일반적으로 연구조사선 또는 실습선에 탑재된 대부분의 연구장비에서 사용되는 "직렬통신(Serial)"과 "전송 제어 및 인터넷 프로토콜(TCP-IP ,Transfer Control Protocol - Internet Protocol)"으로 구성되어 있는데, TCP-IP의 경우 CTD에서 실제 출력되는 데이터의 속도에 비해 네트워크로의 데이터 전송속도가 현저히 떨어지는 문제점이 확인되어 네트워크 환경에 영향을 받지 않는 직렬통신을 사용하였다. 그러나 연구조사선 현장에서는 대부분의 연구데이터를 네트워크상에서 공유하여 승선중인 모든 연구자가 자유롭게 데이터를 사용할 수 있도록 구축하는 것이 일반적인 형태로, 장비 데이터를 직렬통신을 사용하여 특정기기에서만 사용하는 것에 국한하지 않고 "시리얼 디바이스 서버(Serial Device Server)"를 사용하여 네트워크상에 존재하는 모든 호스트에게 데이터를 전송하도록 구성하였다. 사용된 서버장치는 EZL-200F 모델로, 직렬통신 프로토콜에서 주로 사용되는 RS-232, RS-422, RS-485 통신이 모두 가능하며, 통신형태는 TCP서버(양방향 수동접속), TCP 클라이언트(양방향 능동접속), UDP(단방향 통신), AT명령 모드(양방향 수

동, 능동 선택)로 총 네 가지 모드 중 선택사용이 가능하다. 특별한 조작 없이 연구장비 데이터 호스트에 접속하면 자동으로 데이터를 수신할 수 있도록 UDP 모드를 사용하였다. 결과적으로 Figure 13과 같이, CTD 장비와 광학산소센서에서 출력되는 직렬통신 데이터는 시리얼 디바이스 서버를 통해 직렬통신 데이터에서 이더넷(Ethernet) 형태의 데이터로 전환되고, 전환된 데이터는 복제되어 시리얼 디바이스 서버가 접속된 네트워크에서 모든 호스트에게 전송(Broadcast) 된다.^[8]

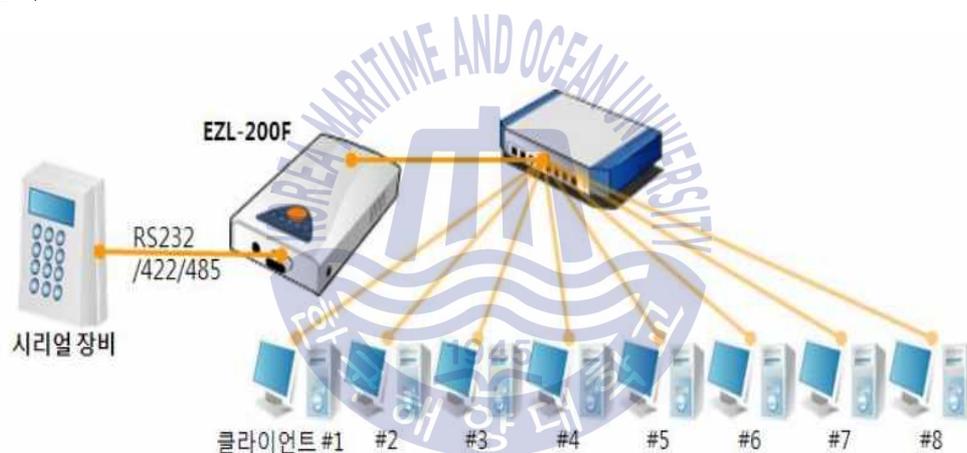


Figure 13. Data Broadcasting by serial Device server

Figure 13의 구성에 센서 검정시스템을 접속하였으며, LabVIEW 프로그램에 포함되어있는 UDP 접속 기능을 활용하여 CTD와 광학산소센서의 데이터를 검정시스템에서 사용할 수 있도록 설계하였다. 시리얼 디바이스를 통한 장비데이터에서는 데이터 전송 지연이나 오류는 전혀 발생하지 않았다.

제 4장 시스템 소프트웨어 구성

4.1 소프트웨어 설계

센서 검정시스템은 센서 데이터 측정과 동시에 외부 장비에서 입력되는 데이터와의 실시간 비교 및 분석을 목표로 설계하였다. 센서 검정시스템은 전원인가를 통한 센서의 구동으로부터 시작된다. 구동된 센서로부터 전기 신호를 DAQ 보드가 수신한다. 수신신호는 PXI 장비에서 운영되는 센서 검정시스템의 소프트웨어 동작버튼을 누른 이후부터 검정 시스템에 인가되며, 설정된 신호 측정 주파수에 따라 신호를 측정한다. 단, 신호 측정 주파수가 시스템의 사양에 비해 높게 설정되었을 경우, 소프트웨어에서 에러신호를 반환하여 측정이 정지된다. 적절한 신호 측정 주파수로 설정된 경우 정상적으로 신호를 수신한다. 신호의 수신이 시작되면, 소프트웨어에서 데이터 저장 경로를 지정하도록 팝업을 생성하며, 이후에도 신호는 지속적으로 수신되는데 이때 사용자의 판단에 의해 수신된 신호의 정상여부를 판단하며, 비정상이라 판단될 경우 팝업창을 닫고 시스템을 정지시킬 수 있다. 사용자의 설정에 의해 파일 저장경로 및 위치가 정해지게 되면, 이후부터 텍스트파일 형태로 데이터가 1초주기로 저장된다. 수신된 신호는 센서 데이터 계산 알고리즘에 의해 연산과정을 거쳐 최종 데이터로 출력된다. 추가적으로 외부에서 입력되는 타 장비 데이터를 네트워크 공유를 통해 센서 검정시스템에서 활용하도록 설계하였다. 사용자의 판단에 의하여, 외부에서 측정된 데이터와 검정시스템에서 측정된 데이터의 오차를 확인하고 센서의 정상여부를 판단

할 수 있다. 센서 검정시스템은 소프트웨어 동작버튼을 다시 클릭하거나, STOP 버튼을 클릭 할 때까지 지속된다. 시스템의 일반적인 운영 알고리즘을 Figure 14에서 정리하였으며 이 알고리즘을 토대로, 실험하고자하는 센서의 종류에 따라 소프트웨어를 선택하여 사용할 수 있도록 설계하였다. 다음의 4.2장에서 수온센서 검정 프로그램, 4.3장에서는 전도도센서 검정 프로그램, 4.4장에서는 산소센서 검정 프로그램으로 크게 세 가지로 분류하여 사용할 수 있도록 하였다. 추가적으로 4.5장에서는 LabVIEW를 통한 계측 데이터의 활용 및 저장법에 대하여 기술하였다.

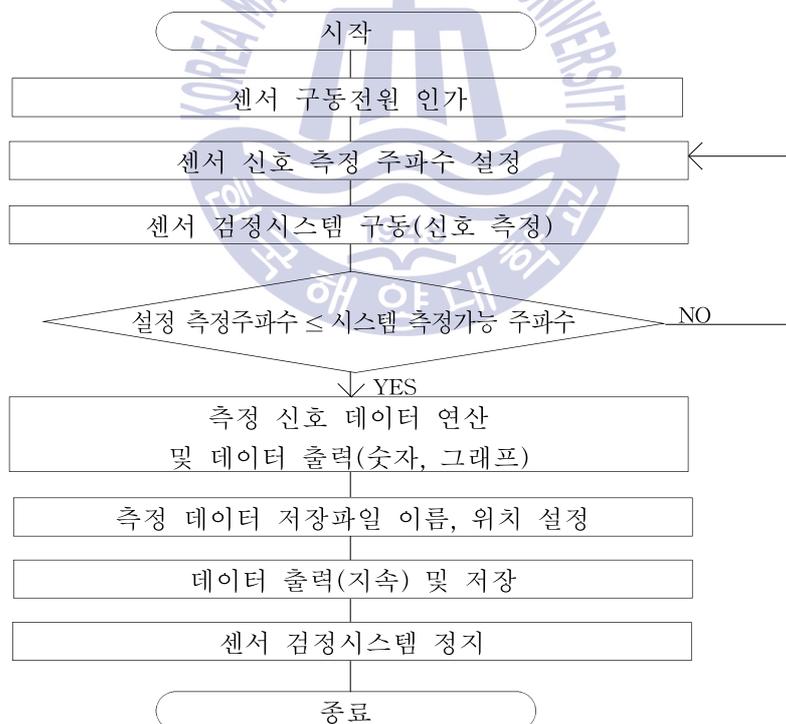


Figure 14. Algorithm for control of SVS system

4.2 수온 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계

수온센서는 전원인가 시 주파수 신호가 출력되며, 출력 주파수는 수온센서의 최종 데이터 형태로 계산되기 위한 공식의 파라미터로 사용된다. 수온센서의 수온 데이터 계산식은 아래의 식 (4)과 같다.

$$T = \frac{1}{g + h \ln(f_0/f) + i \ln^2(f_0/f) + j \ln^3(f_0/f)} - 273.15 [^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

식 (4)에서 f 는 센서의 출력 주파수 값이며, g, h, i, j 는 센서 교정상수이다. f_0 는 1000으로 고정 값을 사용한다. 교정상수는 사용되는 센서의 가장 최근에 교정된 교정시트에서 제공되는 상수 값을 사용한다. LabVIEW의 프로그래밍을 통하여 식 (4)을 Figure 15와 같이 구현하였다.

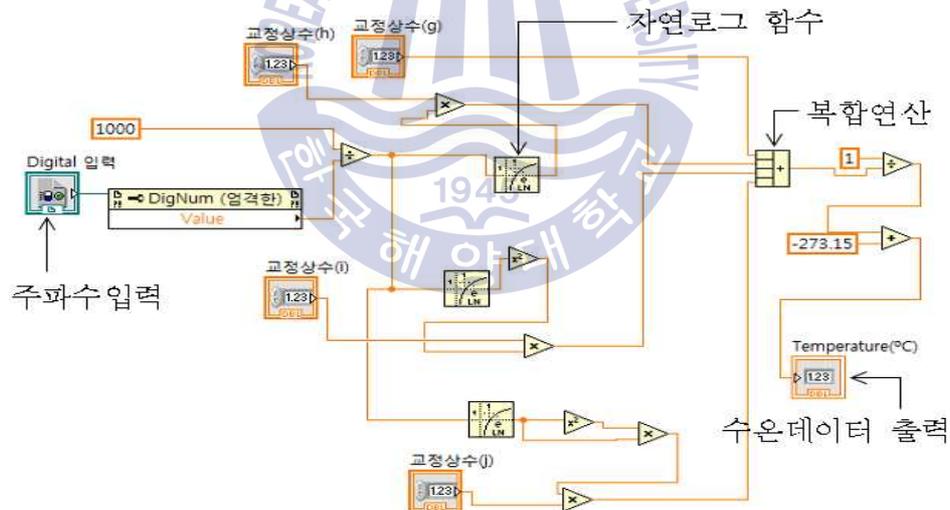


Figure 15. Implementation of algorithm for Temperature data using LabVIEW

위 설계 디자인은 사용자 생성함수(SubVI)로 압축전환 하여 활용되며, 수온센서 검정시스템의 전체적인 프로그램 설계 디자인에 삽입되어 사용되었다. 시스템 전체의 설계 디자인은 Figure 16와 같다.

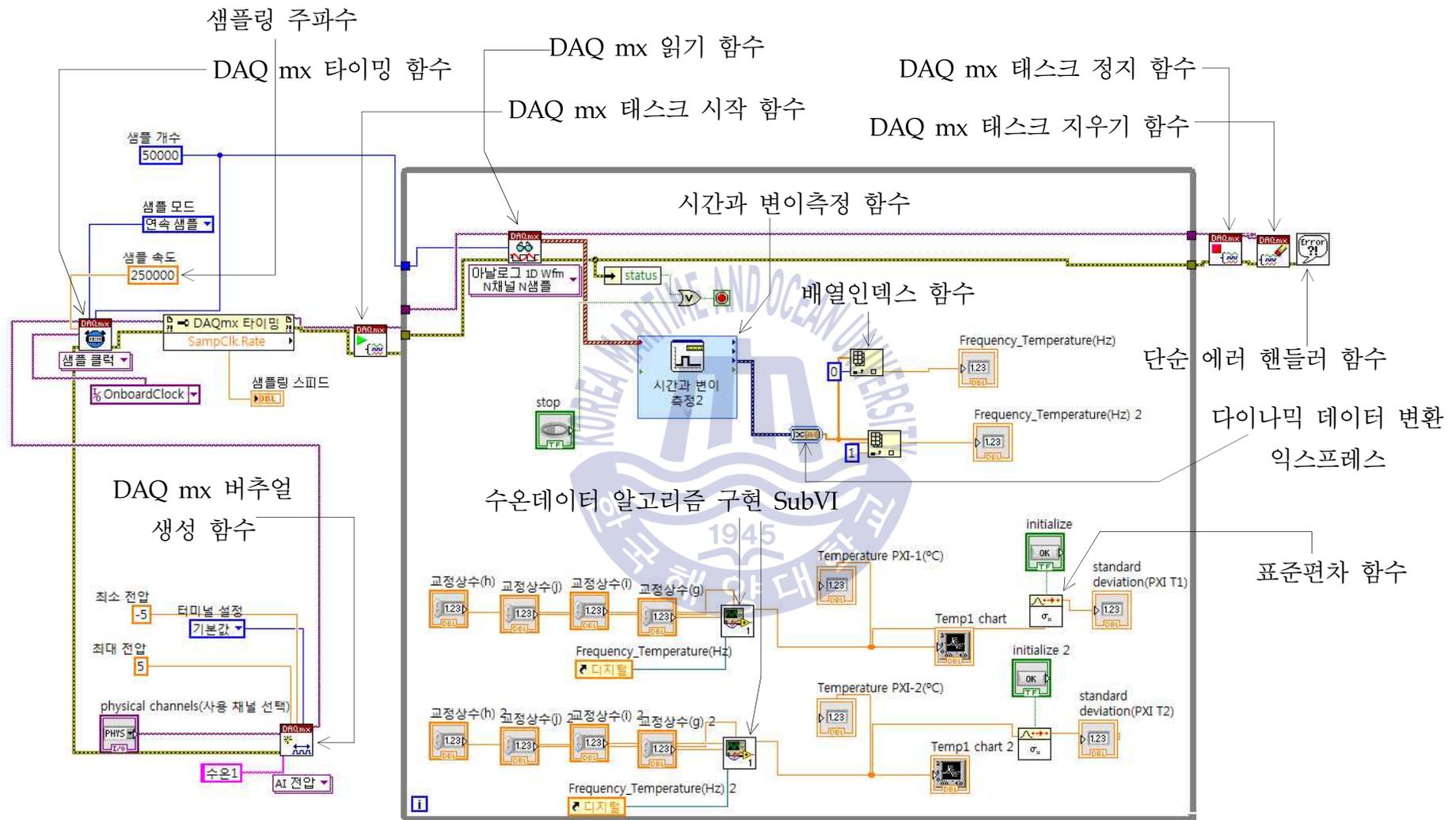


Figure 16. Sensor verification system for two Temperature sensors

Figure 16에서 함수이름에 “DAQ mx”가 포함된 함수들은, DAQ board 및 SCB-68A Connector block으로부터 전송되는 아날로그 신호데이터를 수신하기 위한 기본적인 소프트웨어 설계 알고리즘 구성이며, “시간과 변이 측정함수”는 최종적으로 수신된 전압파형을 분석하여 주파수를 찾아내어 숫자 값으로 출력하는 함수이다. Connector block에는 실제로 2대의 센서를 연결하여 테스트 하였고, Connector block으로부터 전송되는 2개의 전압신호를 DAQ mx 함수 및, 시간과 변이 측정함수에서 동시에 수신하며 주파수 데이터 출력 단에서 “다이나믹 데이터 변환 익스프레스”를 사용하여 수온센서 1과 수온센서 2의 출력 주파수 신호를 분리하여 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

Figure 16의 좌측 상단에 위치한 “샘플링 속도”는 DAQ board를 통해 수신되는 아날로그 전압신호에 대한 샘플링 주파수를 의미하며 “나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 법칙”에 따라, 데이터 수신용 DAQ board에서 사용가능한 최대의 샘플링 주파수를 적용하여 회로를 구성하였다. Table 3에서 언급된 NI PXIe-6341 DAQ board의 Sampling rate 사양 부분에서 500kS/s로 표현된 것은 초당 500000번의 데이터 샘플링이 이루어진 다는 의미이므로, DAQ board 샘플링 주파수가 500kHz 라 할 수 있다. Figure 15에서는 수온센서 2대를 동시 측정 하였으므로 DAQ board의 샘플링 성능을 양분하여 250kHz로 설정 하였다.

또한 최종 출력 데이터를 표준편차 함수에 입력하여 각 센서 데이

터의 실시간 표준편차를 구할 수 있도록 하였다. 표준편차는 한 표본에서 전체 개체가 가지는 값들의 차이가 얼마나 큰지를 나타낸 계수를 의미하며 다음 식 (5)와 같이 정의된다.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 x_i 는 i 번째 개체의 측정값, \bar{x} 는 측정값 집단의 평균을 의미한다. 분산의 제곱근인 표준편차 S 는 어떤 변수에 관하여 그 평균값을 중심으로 보았을 때 각 관측 값이 평균적으로 어느 정도 평균값에서 벗어나 있는지를 계산한 값이라 할 수 있다.

Figure 16의 수온센서 검정 시스템은 두 개의 수온센서를 비교하기 위한 회로나 실질적으로 탐사장비인 CTD에서 측정되는 수온센서 데이터와의 비교분석이 요구될 수 있으므로 CTD 운영시스템과 PXI 시스템의 네트워크 공유를 통해 검정시스템에서 두 시스템의 데이터를 동시에 수집할 수 있도록 변경하여 Figure 17과 같이 설계하였으며, Figure 16의 시스템과 달리 1대의 수온센서로 구성하여, CTD 시스템과 비교할 수 있도록 설계하였다. 이 경우 측정 대상이 2대에서 1대로 줄었으므로, 샘플링 주파수를 최고 성능인 500kHz로 사용하였다. 그러므로 Figure 16의 시스템과 비교할 경우, 샘플링 주파수가 증가되어 데이터의 질은 향상되는 장점이 있으나 CTD 시스템과 유·무선 형태로의 네트워크가 항상 연결되어 있어야 한다는 단점이 있다.

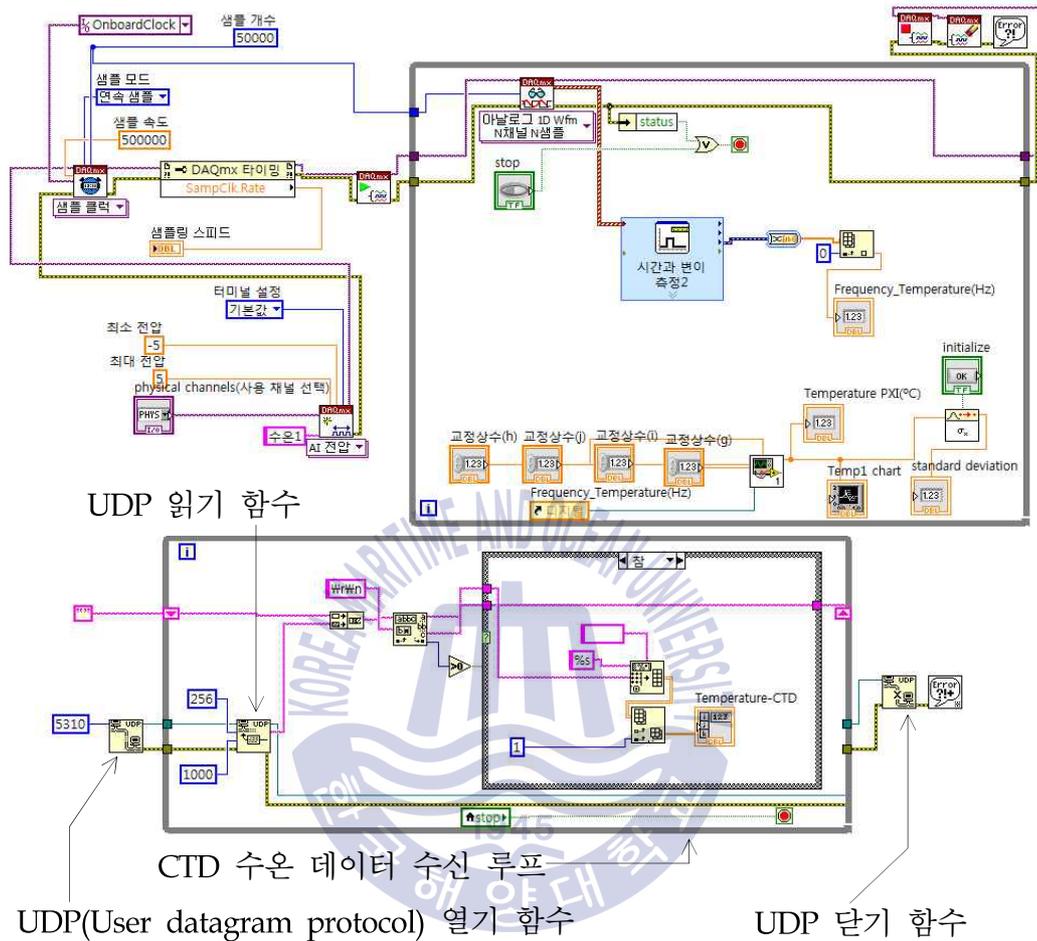


Figure 17. Temperature sensor verification system comparing with CTD

4.3 전도도 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계

전도도 센서는 수온 센서와 동일한 형태로 전원인가 시 자동으로 주파수 신호가 출력되도록 구성되어 있으며, 출력 주파수 데이터는 전도도 센서의 최종 데이터 공식에 포함된다. SBE 4 전도도 센서의 전도도(C, Conductivity) 데이터 계산식은 아래의 식 (6)과 같다.

$$C = \frac{g + hf^2 + if^3 + jf^4}{10(1 + \delta t + \varepsilon p)} \quad [S/m] \quad (6)$$

식 (6)에서 f 는 센서에서 출력되는 주파수 값이며, g, h, I, j 는 교정상수이다. δ 는 열팽창 계수(Thermal coefficient of expansion)이며 고정 값인 3.25×10^{-6} 으로 사용한다. ε 는 붕규산염 셀의 압축성 계수(Bulk compressibility of the borosilicate cell)로 전도도 센서에 탑재된 붕규산 유리셀(borosilicate glass cell)이 가지는 고유의 계수 값을 의미하며 고정 값 -9.57×10^{-8} 을 사용한다. t 는 수온($^{\circ}\text{C}$), p 는 압력(decibars)이다. LabVIEW를 통해 식 (6)을 Figure 18과 같이 구현하였다.

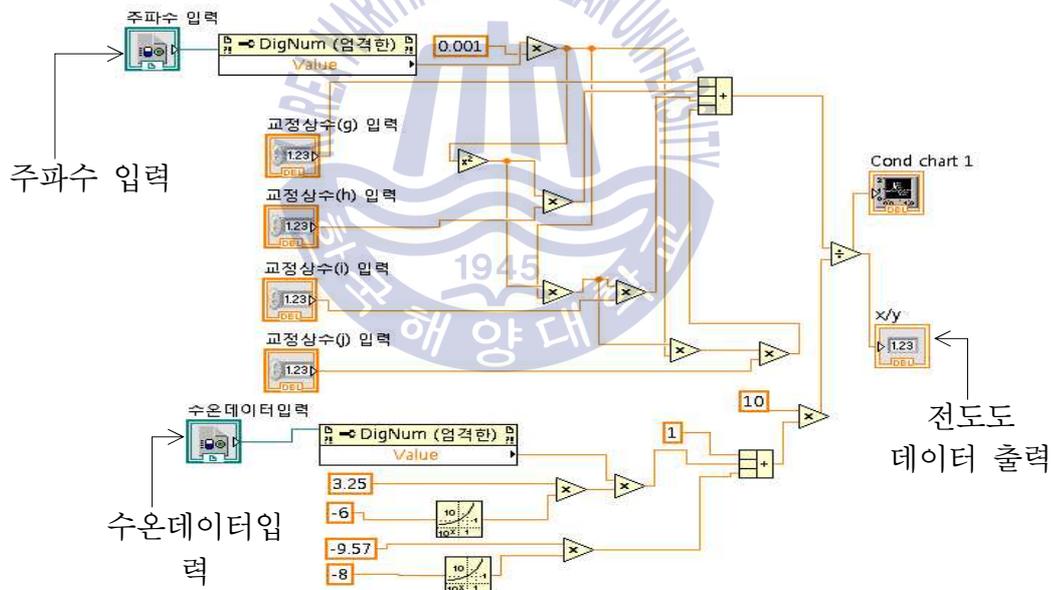


Figure 18. Implementation of algorithm for Conductivity data using LabVIEW

위 설계 디자인은 사용자 생성함수(SubVI)로 압축전환 하여 활용되며, 수온센서 검정시스템의 전체적인 프로그램 설계 디자인에 삽입되어 사용되었다. 시스템 전체의 설계 디자인은 Figure 19와 같다.

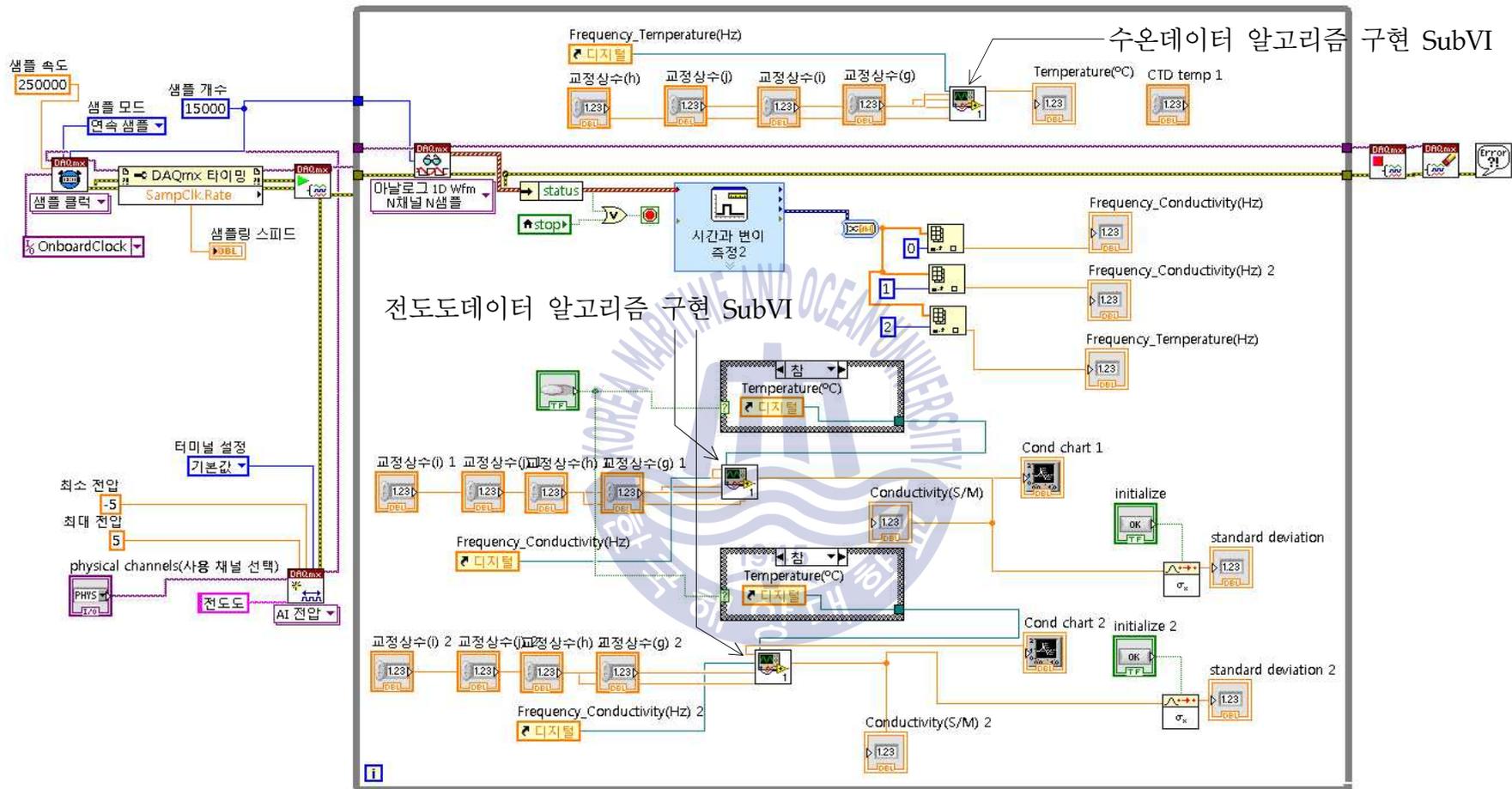


Figure 19. Sensor verification system for two Conductivity sensors

Figure 19의 구성 회로는 전도도 데이터 알고리즘을 구현한 SubVI 함수를 제외하고, 수온센서 검정시스템과 대부분 같은 구성으로 구성되어 있으며, 전도도 센서 데이터 알고리즘에는 수온 데이터가 포함되어야 하므로, SBE 3 수온센서도 함께 측정하여 수온 데이터를 전도도 알고리즘의 파라미터로 활용할 수 있도록 설계하였다. 단, 수온센서도 활용할 경우 센서가 동시에 3대로 운영되므로 샘플링 주파수를 약 167000($500/3 \text{ kHz} \approx 167\text{kHz}$)으로 입력해야 한다.

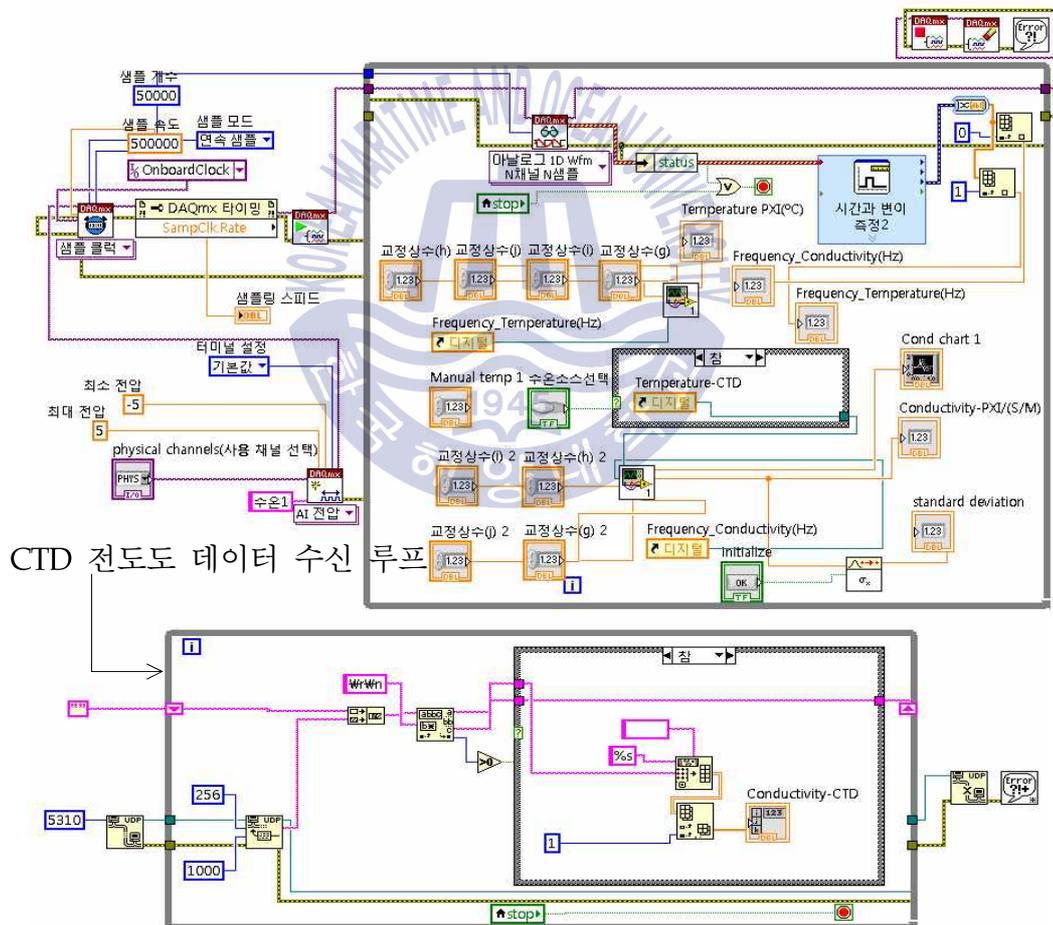


Figure 20. Conductivity sensor verification system comparing with CTD

Figure 20의 구성 회로에서는 Figure 17과 동일한 목적으로 현장 탐사장비인 CTD에서 측정되는 전도도센서 데이터를 검정시스템에 추가 구성하여 CTD 시스템과 PXI 검정 시스템의 전도도센서 데이터를 비교할 수 있도록 설계하였다.

4.4 산소 센서 정밀 계측 및 검정 프로그램 설계

산소센서는 전원인가 시 자동으로 아날로그 전압 신호가 출력되며, 출력 전압 데이터는 산소센서의 최종 데이터 형태로 계산되기 위한 공식의 파라미터로 사용된다. SBE 43 산소센서의 수온(DO, Dissolved Oxygen) 데이터 계산식은 아래의 식 (7)과 같다.^[9]

$$Soc(V + V_{offset})(1 + AT + BT^2 + CT^3)Oxsol(T, S)\exp(EP/K) \text{ [ml/l]} \quad (7)$$

식 (7)에서 Soc, A, B, C, E, V_{offset} 은 SBE 43 센서의 교정 상수 및 고유 상수로, 제작사에서 제공하는 센서 교정에서 제공되는 값이며 V는 센서 출력 전압(Volts), T는 Temperature($^{\circ}\text{C}$, 섭씨온도), S는 Salinity(PSU, 염분도), K는 Temperature($^{\circ}\text{K}$, 절대온도), P는 Pressure(dbar, 압력)를 의미한다. 여기서 Oxsol(T,S)는 산소포화농도(Oxygen saturation concentrations in fresh and ocean water, ml/l)를 간단히 줄여서 표현한 값으로 아래 식 (8), 식(9)과 같이 다시 정의된다.

$$Oxsol(T, S) = \exp\{A0 + A1(Ts) + A2(Ts)^2 + A3(Ts)^3 + A4(Ts)^4 + A5(Ts)^5 + S[B0 + B1(Ts) + B2(Ts)^2 + B3(Ts)^3] + C0(S)^2\} \quad (8)$$

$$T_s = \ln [(298.15 - T)/(273.15 + T)] \quad (9)$$

식 (8)에서 A0~A5, B0~B3, C0는 고정 상수로 A0 = 2.00907, A1 = 3.22014, A2 = 4.0501, A3 = 4.94457, A4 = -0.256847, A5 = 3.88767, B0 = -0.00624523, B1 = -0.00737614, B2 = -0.010341, B3 = -0.00817083, C0 = -0.000000488682 로 정해진 값을 사용한다. 염분도인 S[S/m]는 아래의 식 (10)로 정의된다.^[10]

$$S = a_0 + a_1 R_t^{1/2} + a_2 R_t + a_3 R_t^{3/2} + a_4 R_t^{5/2} + \Delta S \quad (10)$$

식 (10)에서 ΔS 는 아래의 식 (11)으로 나타낸다.

$$\Delta S = \left[\frac{t - 15}{1 + 0.0162(t - 15)} \right] (b_0 + b_1 R_t^{1/2} + b_2 R_t + b_3 R_t^{3/2} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{5/2}) \quad (11)$$

식 (10), (11)에서 $a_0 = 0.0080$, $a_1 = -0.1692$, $a_2 = 25.3851$, $a_3 = 14.0941$, $a_4 = -7.0261$, $a_5 = 2.7081$, $b_0 = 0.0005$, $b_1 = -0.0056$, $b_2 = -0.0066$, $b_3 = -0.00375$, $b_4 = 0.0636$, $b_5 = -0.0144$ 로 고정 값을 사용한다. R_t 는 전도성 비율로, 아래의 식 (12)으로 나타낼 수 있다.

$$R_t = \frac{C(\text{sample at } T)}{C(\text{KCl solution at } T)} \quad (12)$$

식 (12)에서 C는 Conductivity(전도도, $\mu\text{S/cm}$), T는 Temperature(수온, $^{\circ}\text{C}$)이며, 분모의 C(KCl solution at T)는 아래의 식 (13)로 나타낼 수 있다.

$$C(KCI\ solution\ at\ T) = -0.0267243t^3 + 4.6636947t^2 + 861.3027640t + 29035.1640851 \quad (13)$$

식 (13)에서 KCI는 염화칼륨을 의미하며, 안정성이 뛰어난 물질로 전도성 측정기기 교정을 위한 표준물질로 주로 사용되어, 전도성 비율의 측정기준 값으로 적용된다.

LabVIEW의 프로그래밍을 통하여 식 (7)을 Figure 21과 같이 구현하였다. 단, 산소포화농도(Oxsol)의 구현 회로는 식 (8) ~ 식 (13)에 따라, Figure 21의 회로이외 별도로 회로로 Figure 22과 같이 설계하여 식 (7)의 입력 파라미터로 사용할 수 있도록 하였다.

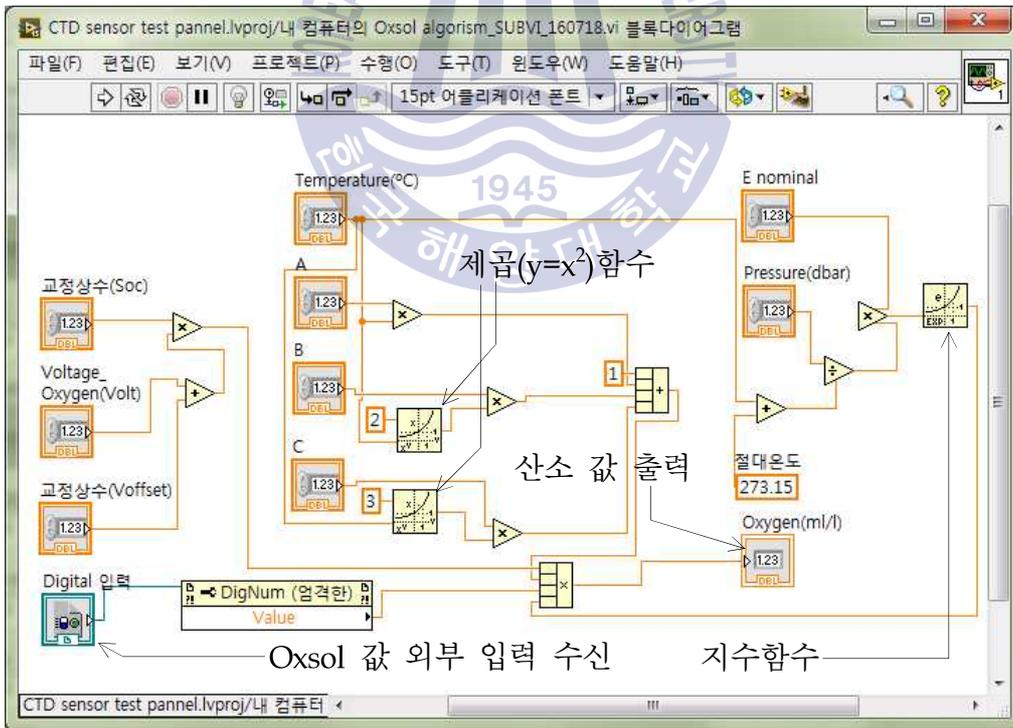


Figure 21. Implementation of algorithm for Oxygen data using LabVIEW

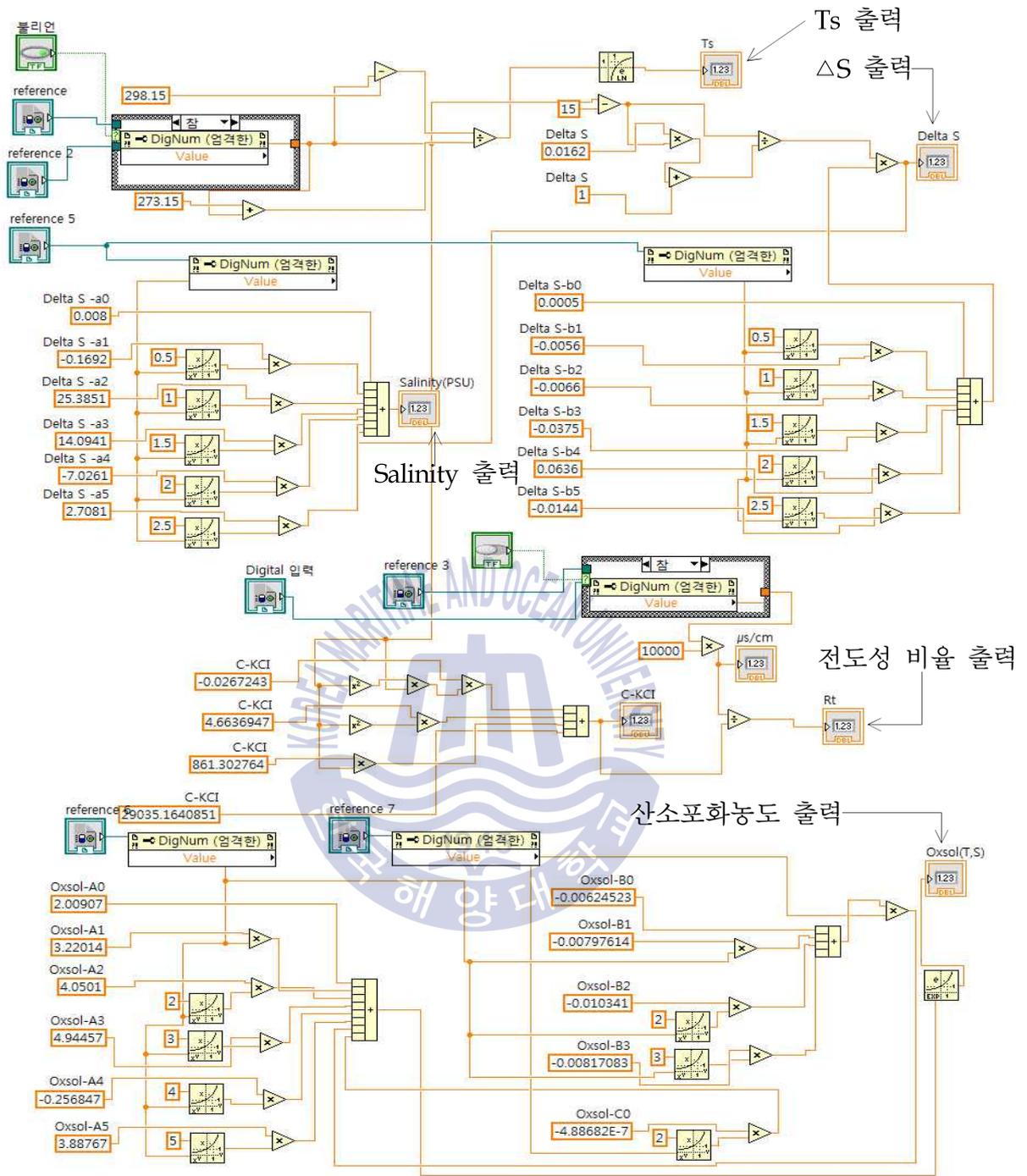


Figure 22. Implementation of algorithm for Oxygen saturation concentration(Oxsol) data using LabVIEW

LabVIEW를 통한 시스템 전체의 설계 디자인은 Figure 23와 같다.

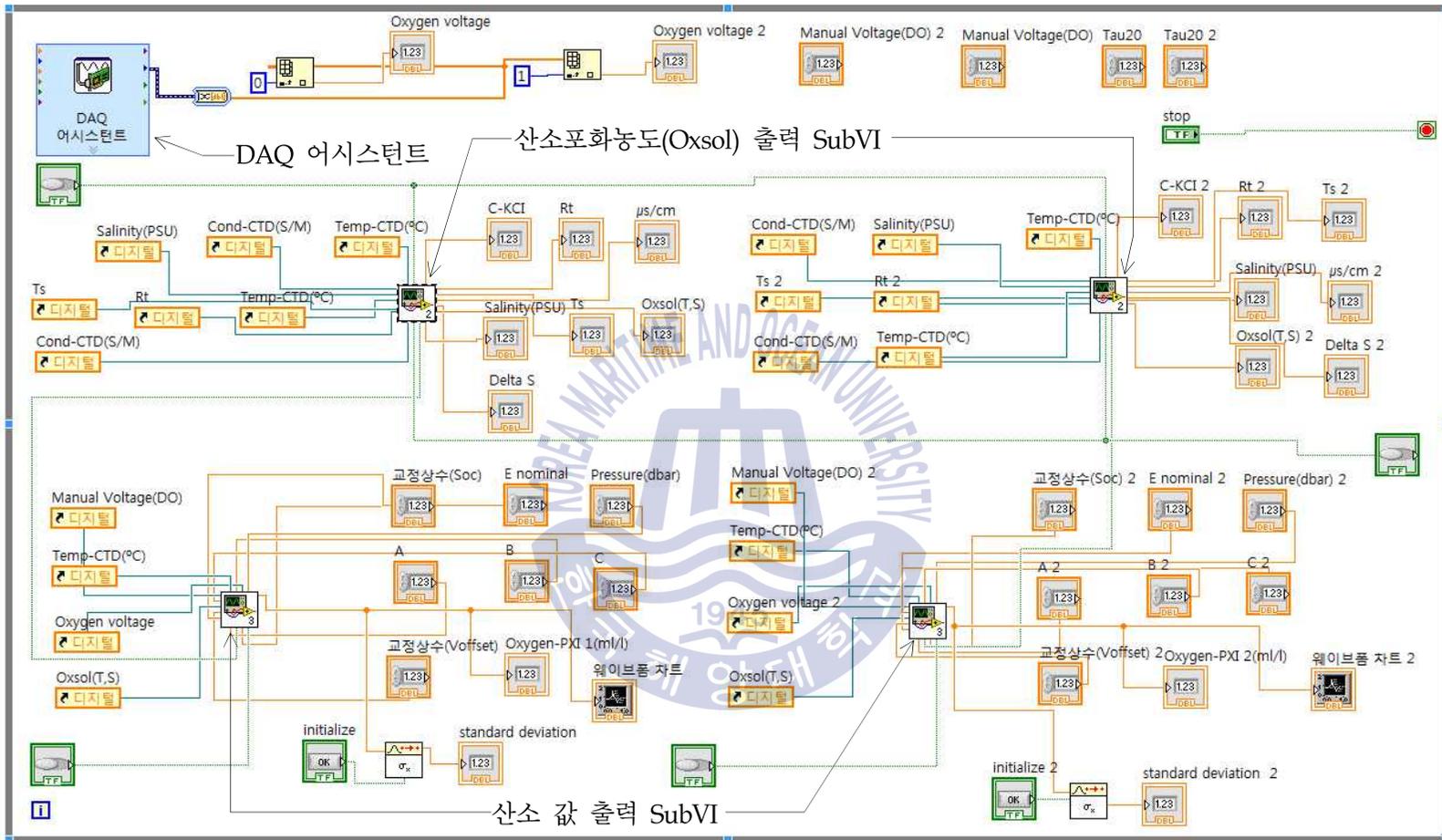


Figure 23. Sensor verification system for two oxygen sensors

Figure 23의 설계 디자인은 2대의 산소센서를 동시에 측정하기 위한 회로로 구성되었다. 센서의 특성상 수온과 전도도 데이터 값을 모두 산소 데이터의 계산식에 입력해야 하나, 4대의 센서를 운영하게 될 경우, 샘플링 주파수를 1/4로 나누어 사용해야하므로, 모든 센서들의 데이터의 정확도가 낮아지는 문제가 발생하게 된다. 이를 해결코자, 수온과 전도도 데이터는 CTD에서 측정되는 데이터를 수신하여 산소센서의 데이터 계산식에 입력되도록 설계하였다. 수온과 전도도 센서가 없을 경우 수동으로 값을 입력할 수 있도록 설계할 수 있다. 또한, CTD에서 측정되는 산소 값을 검정시스템에 추가하여 최종 산소 센서의 데이터 정확도를 CTD에서의 산소 값과 비교할 수 있게 하였으며, 내구성이 뛰어난 광학산소 센서의 산소 데이터 수신 루프를 추가하여 기존의 산소센서와 비교할 수 있도록 Figure 24와 같이 하였다.

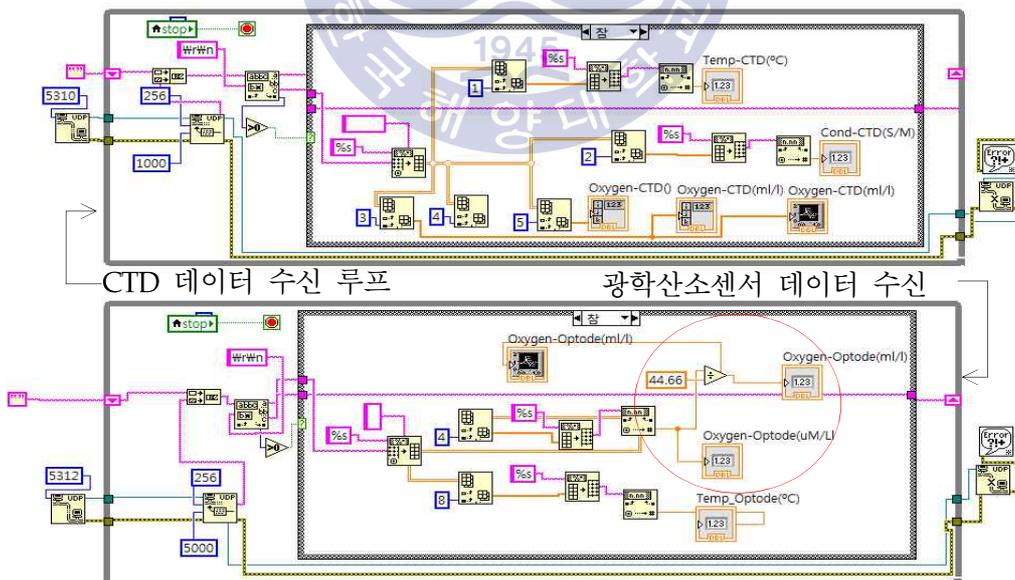


Figure 24. Receiving loop for data of CTD, Optical oxygen sensor

광학산소센서의 산소 데이터 출력 단위는 " $\mu M/l$ (마이크로 몰/리터)"로, SBE 43에서의 산소데이터 출력 값과의 오차비교를 위해 단위를 " ml/l "로 통일하도록 광학산소데이터의 출력 데이터에 44.66을 나눈 값을 최종 출력 데이터로 사용하도록 하였다. 아래의 식 (14)을 참조하여 단위 변환의 원리를 이해할 수 있다.^[11]

$$\mu M/l = ml/l \times 44.66 \quad (14)$$

4.5 계측 데이터의 활용 및 저장

시스템에서 측정된 모든 데이터는 LabVIEW의 특수기능을 사용하여 데이터를 직접 활용하고, 저장할 수 있도록 Figure 25와 같이 설계하였다.

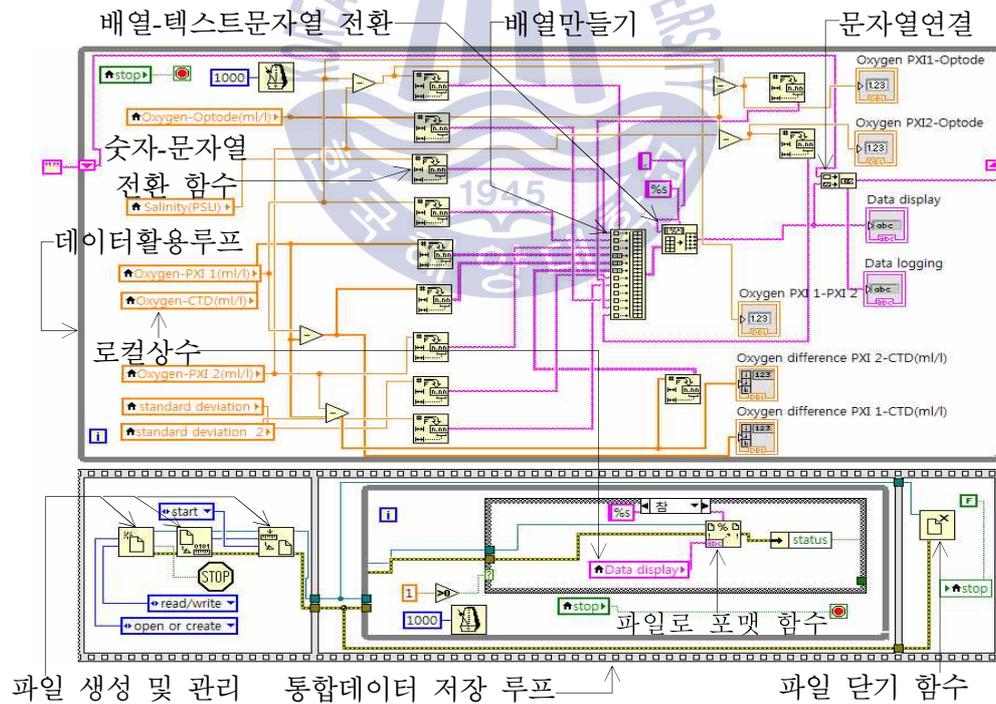


Figure 25. Saving & utilization for output data

Figure 25에서 로컬상수는 출력된 데이터를 복제 및 입력데이터 형태로 전환하여 다른 시스템에서 활용할 수 있도록 하기 위해 만들어진 유용한 기능으로, 출력 데이터를 실시간으로 전환하여 사용할 수 있기 때문에 시간차가 발생하지 않는다. 로컬상수를 활용하여 각 센서에서 출력되는 데이터간의 실시간 연산, 숫자-문자열 전환 및 활용이 가능하며, 특히 전환된 문자열은 배열 만들기과 배열-텍스트 문자열 전환 함수 등을 사용하여 데이터 통합이 가능해지며, Figure 25 하단의 데이터 저장루프에서는 통합된 데이터를 파일생성함수 및 기타 파일 관련 함수를 사용하여 원하는 파일이름으로 저장 및 후처리가 가능하게 된다.



제 5장 센서 검정 시스템 성능 실험

5.1 수온센서 데이터 계측결과

LabVIEW로 구현한 수온 센서 검정시스템의 성능을 평가하기 위하여 실제 측정을 실행하기 전, 4장에서 언급한 나이퀴스트 이론을 증명코자, 샘플링 주파수를 변경하여 주파수별 발생하는 수온 값의 표준편차와 CTD에서 측정되는 수온 값과 오차를 확인하였다. 두 시스템에서 사용되는 수온센서는 동일한 모델을 사용하였으며, 교정기관에서 정밀 교정된 센서로 정밀도는 동일하다. CTD장비 샘플링 주파수는 Table 2에서 제시한 바와 같이, 6.912MHz로 검정시스템의 최대 주파수인 500kHz에 비해 10배 이상 빠르다. 실험은 설정된 측정 주파수별로 측정환경의 변화를 최소화하기 위해 약 5분 간격으로 순차적으로 빠르게 진행되었으며, 측정 결과는 아래의 Table 4와 같다.

Table 4. Test result of Temperature data on each sampling frequency using SVS

| 구분 | 샘플링 주파수(검정시스템) | 62.5kHz | 125kHz | 250kHz | 500kHz |
|--|----------------|---------|---------|---------|---------|
| 수온 데이터 표준편차(검정시스템)(°C) | | 1.9481 | 0.9166 | 0.3476 | 0.1475 |
| 수온 데이터 표준편차(CTD)(°C) 샘플링 주파수(6912kHz) | | 0.0114 | 0.0093 | 0.0115 | 0.0125 |
| 수온 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](°C) | | 0.3770 | -0.0489 | -0.0539 | -0.0176 |
| 수온 데이터(절대값) 평균 오차 [검정시스템-CTD](°C) | | 1.7464 | 0.9110 | 0.2976 | 0.1473 |

Table 4의 데이터는 측정샘플 130개의 결과 값으로부터 작성되었다. 샘플링 주파수의 수치가 높아질수록 측정되는 수온데이터의 자체 표

준편차와 CTD의 수온데이터와의 오차가 현저하게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 검정 시스템의 최저 표준편차인 0.1475는 CTD 시스템에서 측정된 수온데이터의 편차에 비해 약 10배 이상 높게 나타났다.

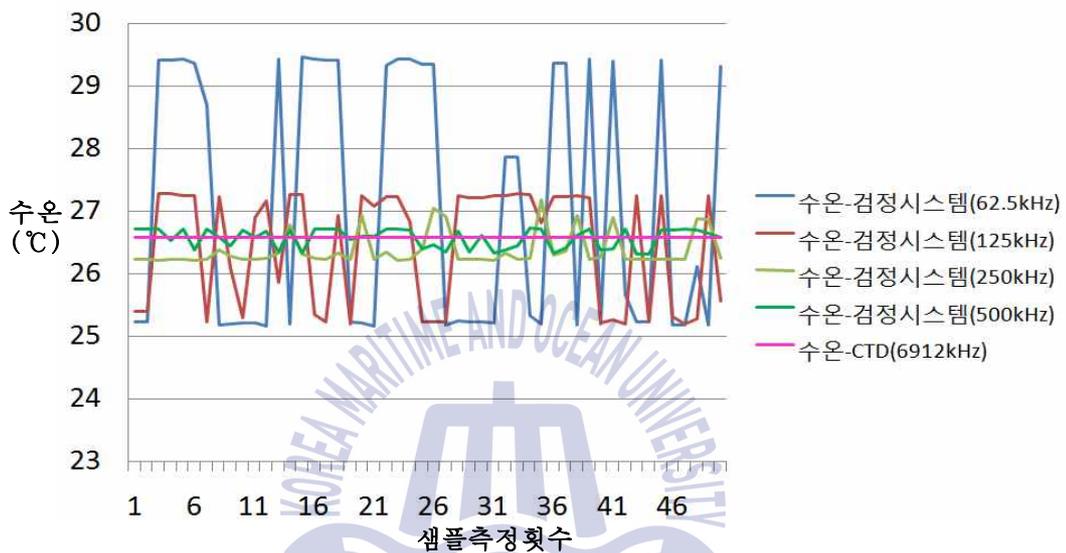


Figure 26. Graph for Temperature data of SVS, CTD on each sampling frequency

Figure 26은 Table 4 의 실험에서 측정된 130개의 샘플 중 일부 50개 샘플의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 측정 주파수가 낮아질수록 수온 편차가 심하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 수온 센서 2개를 동시에 테스트 할 경우에는 최대 샘플링 주파수인 500kHz로 두 대의 센서를 나누어 측정해야하므로 250kHz로 설정해야하며 Table 4의 결과 값으로부터 발생될 표준편차와, 평균오차를 예상할 수 있다. 아래의 Table 5은 동일한 모델의 수온센서 2대를 검정시스템을 통해 실험한 결과이며 샘플링 주파수는 250kHz이다.

Table 5. Test result for Temperature data of SVS using 2 sensors and CTD

| 항목 센서구분 | 평균 수온 (°C) | 표준 편차 (°C) | 수온 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](°C) | 수온(절대값) 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](°C) |
|------------|------------------|------------------|------------------------------------|---|
| 수온1(검정시스템) | 19.7059 | 0.3450 | 0.0069 | 0.3177 |
| 수온2(검정시스템) | 19.6995 | 0.3895 | 0.0005 | 0.3669 |
| 수온(CTD) | 19.6989 | 0.010 | - | - |

Table 5의 데이터는 측정샘플 1000개의 데이터 결과 값으로부터 작성되었다. 센서 3대의 각 평균 수온데이터는 소수점 셋째, 넷째자리 단위의 비교적 매우 적은 오차를 보였다. 그러나 이는 Figure 27에서 확인할 수 있듯이, 고르게 발생된 마이너스 및 플러스 단위의 오차들이 상쇄되어 나타난 현상으로, 오차 데이터를 절대값으로 환산하여 마이너스 오차를 플러스 단위로 바꿔주면 오차의 평균값이 표준편차와 유사한 값으로 나타난다. CTD와 검정시스템의 표준편차를 비교해보면 CTD 시스템에 비해, 검정시스템의 편차가 약 30배 이상 높아 안정도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

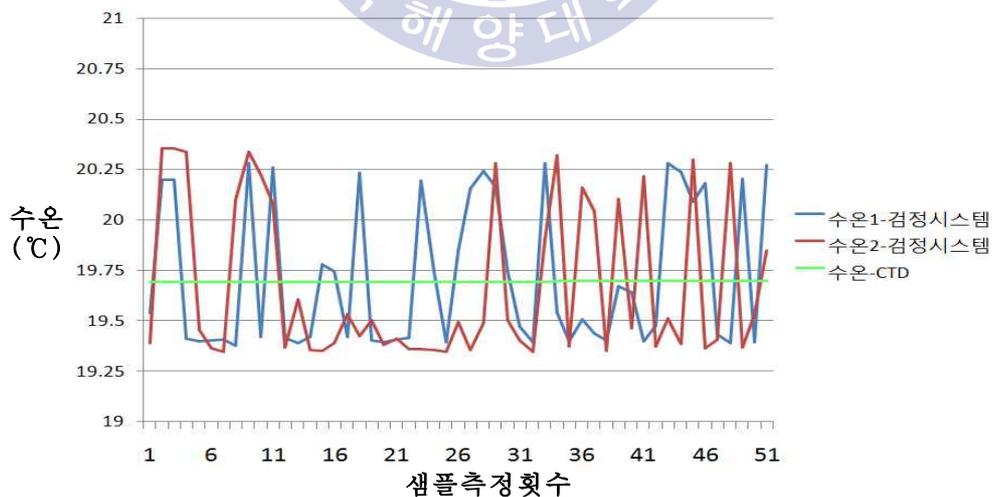


Figure 27. Graph for Temperature data of SVS using 2 sensors

5.2 전도도센서 데이터 계측결과

LabVIEW로 구현한 전도도 센서 검정시스템의 성능을 평가하기 위하여 수온센서와 동일한 방식으로 샘플링 주파수의 크기를 변경하며 5분 간격으로 순차적으로 진행하였으며, 샘플링 주파수별 발생하는 전도도 값의 표준편차와 CTD에서 측정되는 전도도 값의 차이를 비교하였다. CTD장비 자체의 샘플링 주파수는 수온센서와 동일하게 6.912MHz 이며 측정된 데이터의 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Test result of Conductivity data on each sampling frequency using SVS

| 구분 \ 샘플링 주파수(PXI) | 62.5kHz | 125kHz | 250kHz | 500kHz |
|--|---------|--------|--------|---------|
| 전도도 데이터 표준편차(검정시스템)(S/m) | 0.0599 | 0.0398 | 0.0300 | 0.0149 |
| 전도도 데이터 표준편차(CTD)(°C) 샘플링 주파수(6912kHz) | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 전도도 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](S/m) | 0.0005 | 0.0014 | 0.0000 | -0.0011 |
| 전도도 데이터(절대값) 평균 오차 [검정시스템-CTD](S/m) | 0.0351 | 0.0284 | 0.0221 | 0.0133 |

Table 6의 데이터는 측정샘플 130개의 결과 값으로부터 작성되었다. 수온센서의 실험과 비슷한 양상으로, 샘플링 주파수의 수치가 높아질수록 측정되는 전도도 데이터의 자체 표준편차와 CTD의 전도도 데이터와의 오차가 현저하게 감소되는 것을 확인 할 수 있다. CTD 장비로부터 측정된 전도도 데이터의 표준편차는 0.0003 정도로 매우 적은 수치로 측정되었다. 수온센서의 실험에서는 검정시스템과 CTD 장비의 수온 데이터 표준편차가 약 10배 정도 검정시스템이 높게 나타났으나, 전도

도 센서의 경우 검정시스템의 표준편차가 약 50배정도 높게 나타났다.

Figure 28은 Table 6의 실험에서 측정된 130개의 샘플 중 일부 50개 샘플의 전도도 데이터 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 측정 주파수가 낮아질수록 수온 편차가 심하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

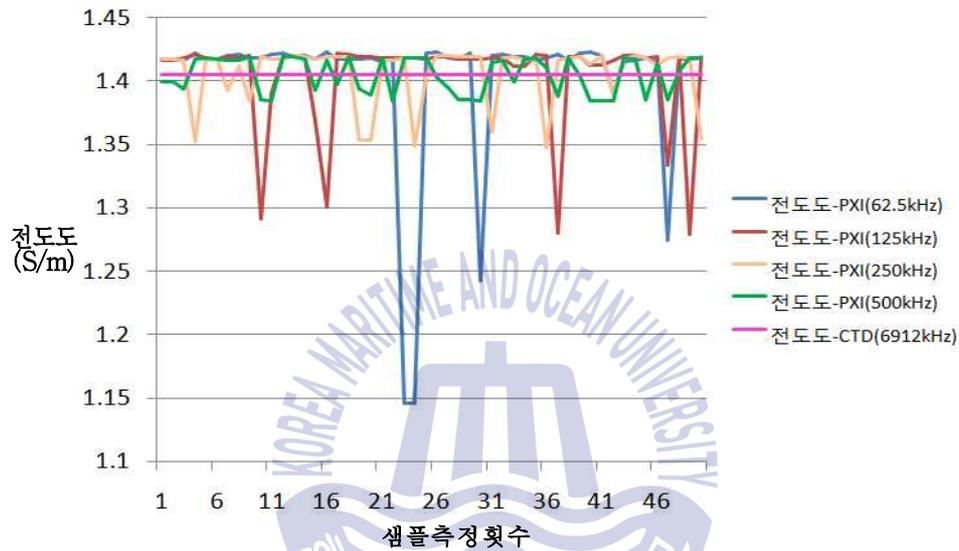


Figure 28. Graph for Conductivity data of SVS and CTD on each sampling frequency

아래의 Table 7은 동일한 모델의 전도도 센서 2대를 검정시스템을 통해 실험한 결과이며 샘플링 주파수는 250kHz이다.

Table 7. Test result for Conductivity data of SVS using 2 sensors and CTD

| 항목 센서구분 | 평균 전도도 (S/m) | 표준 편차 (S/m) | 전도도 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](S/m) | 전도도(절대값) 데이터 평균 오차 [검정시스템-CTD](S/m) |
|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------------------------|---|
| 전도도1 (검정시스템) | 1.3950 | 0.0218 | -0.0021 | 0.0193 |
| 전도도2 (검정시스템) | 1.3994 | 0.0292 | 0.0022 | 0.0264 |
| 전도도(CTD) | 1.3972 | 0.0001 | - | - |

Table 7의 데이터는 측정샘플 500개의 데이터 결과 값으로부터 작성되었다. 센서 3대의 각 평균 전도도 데이터는 소수점 셋째자리 단위의 오차가 발생하였으나, 수온센서와 마찬가지로 발생한 마이너스 단위의 오차와, 플러스 단위의 오차들이 서로 상쇄되어 전체적인 오차 값들이 제거되어 나타난 값이다. 전체 오차 데이터의 절대값 평균과 표준편차는 소수점 둘째자리 단위로 나타난다. 전도도 센서의 경우에는 CTD 시스템에 비하여, 검정시스템의 편차가 약 200배 이상 높아 안정도가 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Table 7의 실험 데이터의 일부를 Figure 29에 그래프로 나타내었다.

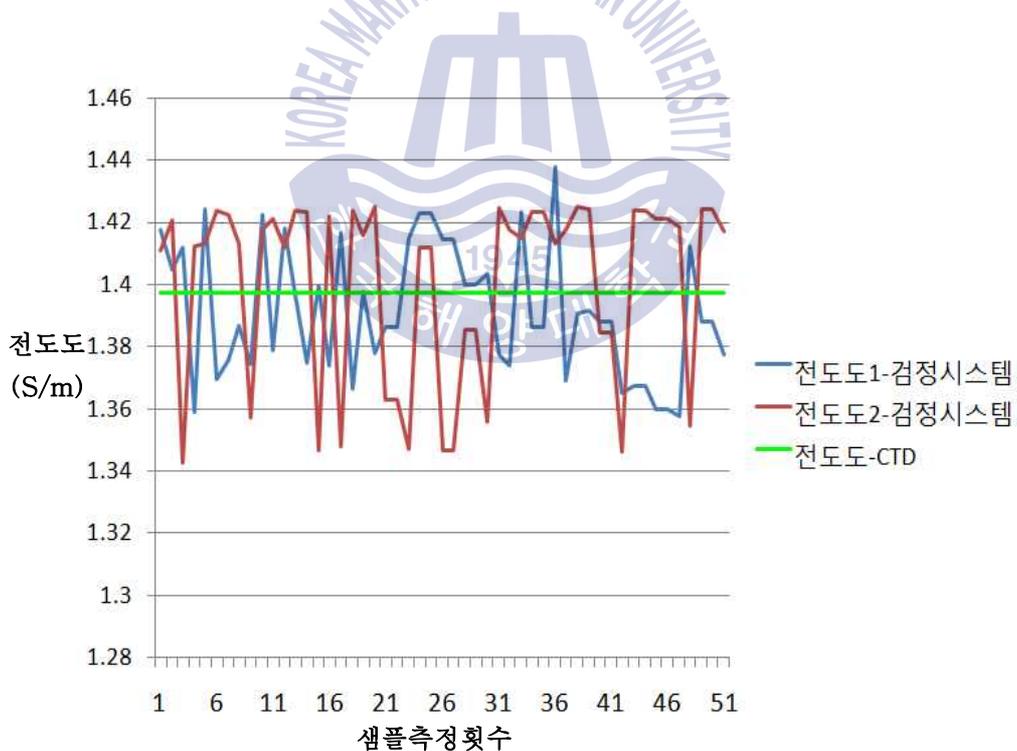


Figure 29. Graph for Conductivity data of SVS using 2 sensors

5.3 산소센서 데이터 계측결과

LabVIEW로 구현한 산소 센서 검정시스템의 성능을 평가하기 위하여, 검정시스템에 구성된 산소센서(SBE 43) 2대, 광학산소센서 1대(Optode) 그리고 CTD 장비에 구성된 산소센서(SBE 43) 까지 총 4대의 산소센서 데이터를 동시에 수집하도록 Figure 30과 같이 운영 프로그램을 설계하여 데이터를 측정하였으며, 초당 1회씩 데이터를 기록하였다.

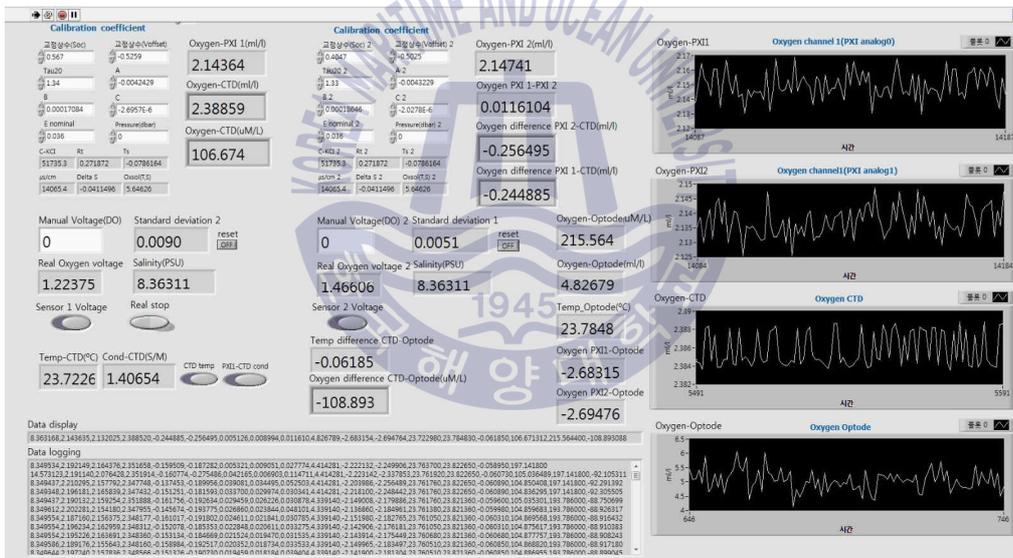


Figure 30. Operating software of SVS

전기화학식 산소센서인 SBE 43의 경우 산소의 일정한 소비를 통해 산소량을 측정하기 때문에 센서 내부의 멤브레인이 위치한 공간에 연속적인 산소의 공급이 이루어져야 하나 센서 검정시스템의 경우 산소 공급을 위한 펌프 시스템이 구축되어 있지 않아, 연속적인

공급이 가능한 공기 중에서의 테스트로 대체하여 진행하였다. 그러나 장시간 테스트가 지속될 경우 멤브레인 단의 전해질이 모두 증발하여 센서가 정상기능을 하지 못할 수 있으므로 주의해야하며, 테스트가 종료되면, 센서의 멤브레인 단에 공기가 들어가지 않도록 처리해야하며, 센서 매뉴얼 상에 명시된 절차에 따라 보관이 이루어져야한다. 측정된 4대의 산소데이터의 그래프는 Figure 31과 같다.

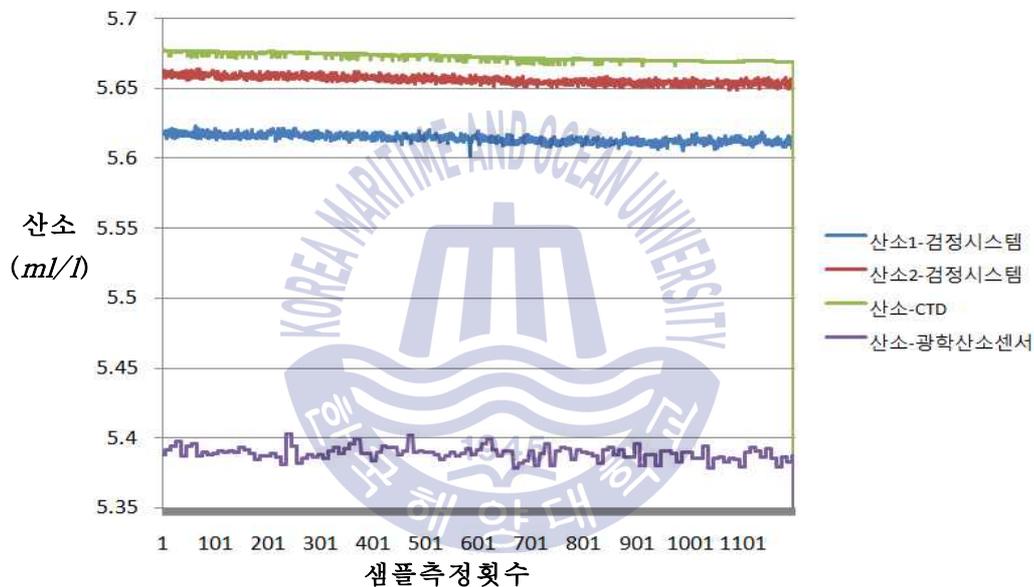


Figure 31. Graph for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on air

Figure 31의 실험에서 설정한 검정시스템의 샘플링 주파수는 2대의 센서를 사용하였으므로, 250kHz로 설정하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, SBE 43 모델로 측정된 산소 1, 산소 2, 산소-CTD 총 세 가지 항목의 그래프는 데이터의 변화폭이 산소-광학산소센서 항목에 비해 매우 작고 안정적인 양상으로 나타났다.

사용된 네 가지 센서의 데이터를 비교하기 위해, 각 센서별 산소 데이터의 평균과 표준편차를 샘플 200개 간격으로 총 6회로 구분하여 Table 8, Table 9에 정리하였다.

Table 8. Standard deviation for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor

| 측정회차 | 표준편차(ml/l) | | | | | | |
|------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1차 | 2차 | 3차 | 4차 | 5차 | 6차 | 평균 |
| 산소1(검정시스템) | 0.0017 | 0.0017 | 0.0020 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0020 | 0.0018 |
| 산소2(검정시스템) | 0.0017 | 0.0017 | 0.0017 | 0.0016 | 0.0017 | 0.0018 | 0.0017 |
| 산소(CTD) | 0.0012 | 0.0010 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0005 | 0.0027 | 0.0013 |
| 산소(광학산소센서) | 0.0030 | 0.0055 | 0.0036 | 0.0051 | 0.0042 | 0.0044 | 0.0043 |

Table 9. Average value and Average error value for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on air test

| 측정회차 | 데이터 평균(ml/l) | | | | | | 오차(ml/l) | | |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|---------|-----------|
| | 1차 | 2차 | 3차 | 4차 | 5차 | 6차 | 평균 | 평균 | 절대값 평균 |
| 산소1 (검정시스템) | 5.6173 | 5.6168 | 5.6150 | 5.6129 | 5.6117 | 5.6124 | 5.6143 | -0.0581 | 0.0581 |
| 산소2 (검정시스템) | 5.6596 | 5.6587 | 5.6570 | 5.6550 | 5.6543 | 5.6539 | 5.6564 | -0.0160 | 0.0160 |
| 산소(CTD) | 5.6758 | 5.6750 | 5.6732 | 5.6711 | 5.6702 | 5.6695 | 5.6724 | - | - |
| 산소 (광학산소센서) | 5.3905 | 5.3897 | 5.3904 | 5.3891 | 5.3882 | 5.3862 | 5.3890 | -0.2834 | 0.2834 |

Table 8에서도 SBE 43 센서를 사용한 검정시스템과 CTD 시스템의 데이터 표준편차는 비교적 고르게 나타났으며, 주파수 출력방식인 수온센서와 전도도센서의 성능실험과는 달리, 두 시스템에서 측

정된 산소 데이터의 표준편차에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 광학산소센서의 데이터 표준편차는 센서 검정시스템과 CTD시스템에 비해 비교적 크게 나타났으나, 표준편차의 수치는 높지 않은 것으로 판단된다. 센서의 기능적 차이를 확인하기 위해, 2차 실험은 플라스틱 수조를 활용하여 수중에서 실시하였다. 전기화학식 센서인 SBE 43의 경우 Page 28에서 언급한 바와 같이 멤브레인 관로에 연속적인 해수의 흐름을 적용해주어야 하나, 해수의 공급이 없을 시 측정값이 어떻게 나타나는지 확인코자 하였다. Figure 32에서 확인할 수 있듯이, SBE 43 센서로 측정된 산소 1, 산소 2, 산소 - CTD 의 데이터는 비교적 편차가 적으며 안정적인 데이터 값을 출력하였으나 광학산소센서의 데이터에 비해 산소량이 50% 이하로 적게 측정되는 것을 확인할 수 있다.

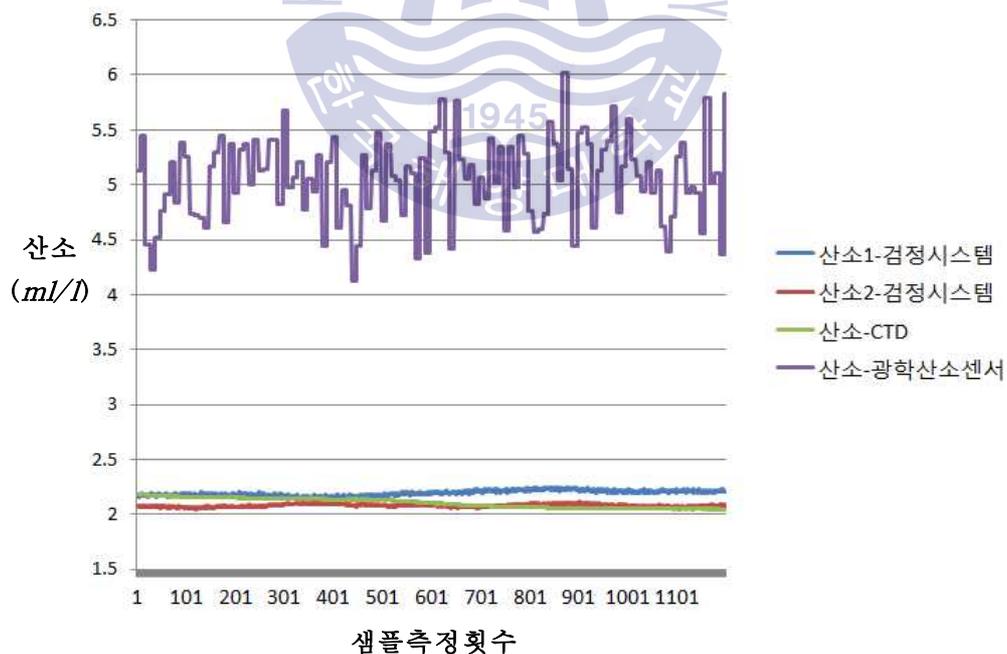


Figure 32. Graph for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater

Table 10. Average value and Average error value for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater test

| 구분 센서 항목 | 데이터 평균(ml/l) | 오차(ml/l) | |
|-------------|------------------|--------------|--------|
| | | 평균 | 절대값평균 |
| 산소1(검정시스템) | 2.1941 | 0.0909 | 0.0912 |
| 산소2(검정시스템) | 2.0809 | -0.0223 | 0.0444 |
| 산소(CTD) | 2.1032 | - | - |
| 산소(광학산소센서) | 5.0535 | 2.9503 | 2.9503 |

Table 10에서 나타난 센서별 평균데이터에서는 동일한 양상으로 광학산소센서에서 측정된 산소량이 두 배 이상 높게 나타난다. 그러나 Figure 32와 Table 10에서 나타난 산소 1, 산소 2, 산소-CTD의 데이터는 해수의 연속적인 흐름을 제공하지 않았으므로 정상적으로 측정된 데이터라 볼 수 없다.

Table 11. Standard deviation for Dissolved Oxygen data of SVS, CTD, Optical Oxygen sensor on seawater test

| 구분 센서 항목 | 표준편차(ml/l) |
|-------------|----------------|
| 산소1(검정시스템) | 0.0240 |
| 산소2(검정시스템) | 0.0121 |
| 산소(CTD) | 0.0435 |
| 산소(광학산소센서) | 0.3763 |

Table 11에서는 각 센서별 수중에서의 데이터 표준편차를 기록하였다. 광학산소센서에서 측정된 데이터의 표준편차는 나머지 센서들에 비해 10배 이상 크게 나타났으며, Figure 32에서와 같이 시간에 따라 산소의 측정값이 매우 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

제 6장 결론 및 고찰

본 논문에서는 해양탐사에서 보편적으로 활용되는 CTD 장비의 주요 구성인 수온, 전도도, 산소센서에 대한 정상상태 여부, 센서 데이터의 정밀도 등을 탐사 현장에서 쉽게 확인할 수 있도록 센서 검정시스템을 제작하고 성능시험을 수행하였다. 제작에는 CTD 센서와 LabVIEW 소프트웨어, NI PXI 시스템, DAQ board 등이 사용되었다. 탐사 현장과 동일한 환경을 조성하기 위해 CTD 장비와 장비데이터의 공유 및 활용이 가능하도록 로컬 네트워크를 구성하였으며, 광학산소센서를 로컬 네트워크에 추가 구성하여 기존의 전기화학식 산소센서와의 데이터 비교가 가능하도록 하였다. 센서 검정시스템은 센서의 종류별로 테스트가 가능토록 각 센서별로 구분하여 운영 소프트웨어를 제작하였다. 제작된 센서 검정시스템과 테스트 센서를 연결하여 측정된 데이터의 결과는 다음과 같다.

출력 아날로그 전압과형으로부터 분석된 주파수 값을 데이터 소스로 활용하는 수온센서와 전도도센서는 DAQ board의 최대 샘플링 주파수인 500kHz를 사용하여 1대의 센서를 검정시스템에 장착하여 시스템의 성능을 테스트 하였으며 자체 데이터의 표준편차는 수온센서는 약 0.1~0.2℃로 CTD 장비 보다 약 10배, 전도도 센서는 약 0.01~0.02 S/m로 약 50배 정도 높게 나타났으며, 오차 비교 시 기준 데이터를 CTD 장비에서 측정된 데이터라 할 때 검정시스템의 수온데이터 평균 오차는 -0.0176℃, 오차의 절대값 평균은 0.1473으로 나타났다. 전도도 데이터의 평균 오차는 -0.0011 S/m, 오차의 절대값 평균은 0.0133 S/m으로

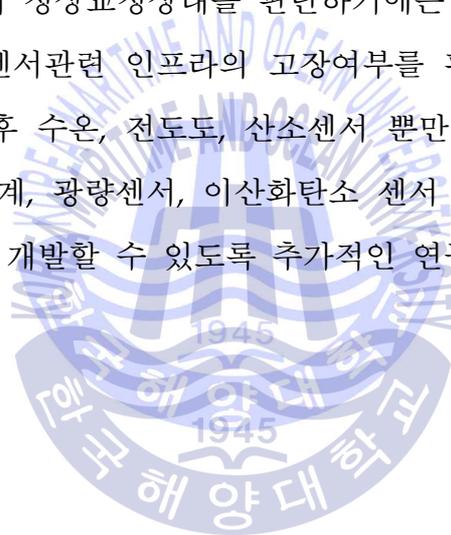
나타났다. 오차의 평균은 CTD 장비와 대등한 소수점 셋째, 넷째자리의 오차를 보였으나 오차의 절대값 평균은 첫째, 둘째자리의 오차를 보였다.

수온센서와 전도도센서 모두 평균 오차에서는 높은 정밀도를 보였으나 오차의 절대값 평균에서는 표준편차와 유사한 값을 보였으며 다소 정밀도가 떨어졌다. 이는 CTD 시스템에 비해 전체적인 안정도가 떨어지는 것으로 볼 수 있다. 운영 프로그램을 개선하여 짧게는 1분 길게는 10분 정도의 평균데이터를 검정시스템의 최종 데이터로 활용하도록 시스템을 구성하면 오차를 대폭 줄일 수 있으며 신뢰도가 높은 장비로 기능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 전체 데이터의 오차를 줄여 CTD 장비와 동등한 수준으로 정밀도를 높이는 것이 근본적인 시스템의 개선책이라 할 수 있다. 정밀도를 높이는 방법은 DAQ board를 기존에 사용된 모델에 비해 데이터 샘플링 성능(샘플링 주파수)이 향상된 모델로 변경하여 주파수 출력데이터의 편차를 낮추는 것이다.

산소센서의 테스트 환경은, 전기화학식 산소센서의 경우 산소를 소모하며 측정하여 측정이 이루어지기 때문에 멤브레인이 위치한 관로 속에 일정량 이상으로 산소의 연속공급이 필요한 방식이며 광학센서의 경우 소모성이 아닌 방식으로, 연속적인 산소의 공급이 가능한 공기 중에서 1차 테스트를 진행하였으며, 수중에서와의 현상비교를 위해 2차 테스트를 수중에서 진행하였다. 2대의 산소센서를 검정시스템에 장착하여 실험하였다. 전기화학식 산소센서는 주파수가 아닌 DC 전압 출력 값을 데이터 소스로 활용하여, 검정 시스템의 샘플링 주파수로도 충분히 높은 수준의 정밀한 데이터 획득할 수 있었으며 각 데이터의

자체 표준편차는 CTD의 경우 0.0013 ml/l, 검정시스템에서는 0.0018 ml/l, 0.0017 ml/l 로 편차의 크기가 거의 대등하게 나타났다. 동시 측정된 광학산소센서는 0.0043 ml/l 로 기준 데이터인 CTD에 비해 3배 이상 높은 편차를 나타내었다. CTD의 데이터를 기준으로 할 때, 평균 오차는 검정시스템의 경우 0.0581 ml/l, 0.016 ml/l이며, 광학산소센서의 경우 0.2834 ml/l 로 나타났다. 오차의 절대값 평균은 절대값이 아닌 경우와 동일한 크기의 결과 값이 나타났다. 결과의 전체적인 양상은 검정시스템의 안정성은 CTD와 대등하였으나, 센서 간의 교정 값 오차와 공기 중의 산소가 완전히 균일하게 분포되어있지 않아 발생된 오차로 판단된다. 2차 수중 실험에서는 검정시스템의 경우 평균오차가 약 0.0909 ml/l, -0.0223 ml/l, 광학산소센서의 경우 약 2.9503 ml/l로 나타났다. 오차의 절대값 평균은 0.0912 ml/l, 0.0444 ml/l, 광학산소센서는 2.9503 ml/l 로, 일반 오차의 평균값과 같았다. 광학산소센서의 경우 수중에서 산소의 측정값이 기존 전기화학식 산소센서에 비해 약 2배 이상 높게 나타나 수중에서의 데이터 비교는 어려운 것으로 확인되었다. 수중 실험의 경우 전기화학식 산소센서에 일정량 이상의 해수를 지속적으로 공급하도록 시스템을 구성하지 않았기 때문에 산소의 측정량이 광학식 센서에 비해 현저히 낮게 나타났다고 판단되며, 또한 산소의 분포가 균일하게 제공되는 특수설비를 사용하여 데이터의 객관성 및 신뢰성을 높여야 할 것으로 사료된다. 하지만 공기 중 실험의 결과로 미루어볼 때, 산소센서 검정시스템은 실험대상 센서 데이터의 정상여부를 판단하기에는 충분한 정밀도를 보여주었다고 판단된다.

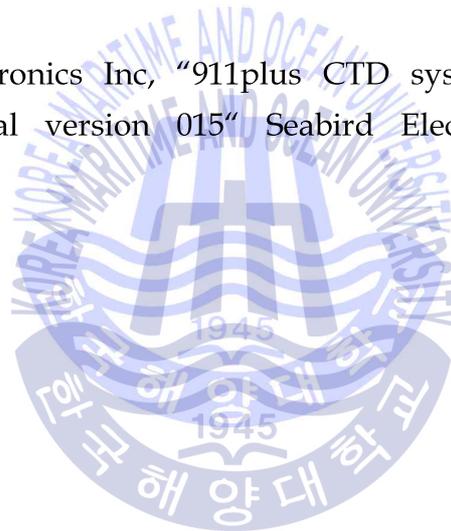
이번 실험을 통하여 LabVIEW와 NI PXI, NI DAQ board의 기능성과 범용성 그리고 설계의 용이성을 경험할 수 있었으며, 주파수 특성을 활용한 수온센서와 전도도 센서의 특성을 이해할 수 있었다. 또한 전기화학식 산소센서와 광학산소센서의 측정원리와 측정환경에 따른 출력 데이터의 경향차를 확인 할 수 있었다. 실험을 위해 개발된 센서 검정시스템은 전반적으로 CTD 장비 시스템에 비해 낮은 정밀도와 안정성을 보여 센서의 정상교정상태를 판단하기에는 부족한 부분이 존재하였으나 센서와 센서관련 인프라의 고장여부를 판단하기에는 충분한 성능을 보였다. 향후 수온, 전도도, 산소센서 뿐만 아니라, 플랑크톤센서, 탁도센서, 고도계, 광량센서, 이산화탄소 센서 등 각종 해양물리센서의 검정시스템을 개발할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다.



참고문헌

- [1] Seabird Electronics Inc, "911plus CTD system operating and repair manual version 015" Seabird Electronics Inc, p.19, 2012.
- [2] 이정환 외, "CTD 교정 시스템 구축 및 불확도 평가", 한국해양과학기술원, 2014.
- [3] 최명기, "LabVIEW를 이용한 멀티산소센서의 온도 측정 및 제어와 효율적 산소농도 측정을 위한 시스템 연구", p.3, 고려대학교, 2008.
- [4] 박정일 외, "용존산소 측정용 초소형 Clark-type 센서에 대한 연구", 대한전기학회, 2007.
- [5] 최명기, "LabVIEW를 이용한 멀티산소센서의 온도 측정 및 제어와 효율적 산소농도 측정을 위한 시스템 연구", p.5, 고려대학교, 2008.
- [6] AANDERAA, "TD 296 Operating Manual Oxygen Optode 4531" AANDERAA, pp. 44-48, 2014.
- [7] Michael Häck, "Application report - Optical measurement of oxygen concentration in water" HACH LANGE, 2006.
- [8] 솔내시스템(주), "다기능 시리얼 디바이스 서버 - EZL200F 사용자 설명서" 솔내시스템(주), P.6, 2013.

- [9] Seabird Electronics Inc, "911plus CTD system operating and repair manual version 015" Seabird Electronics Inc, p.105, p.195 2012.
- [10] American Public Health Association, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition" American Public Health Association, p.203, 2012.
- [11] Seabird Electronics Inc, "911plus CTD system operating and repair manual version 015" Seabird Electronics Inc, p.193, 2012.



연구논문 발표실적

◎ 국내전문학술대회

- [1] 정창현, 이성근, 서동환, 김덕진, 김영준, 박건태, 강한구, 김윤식
“LabVIEW를 이용한 CTD용 해양물리센서의 정밀도 검정시스템
개발에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회 논문집, 제40회, p.68

◎ 국제학술회의

- [1] D,J Kim, D,W Park, C,H Jeong, H,G Kang “An introduction to
survey equipment of R/V ISABU”, The Proceedings of
KIS(KIOST International Seminar) 2016, Nov 30 - Dec 2. 2016.



감사의 글

대학원 과정을 통해 자신의 역량이 얼마나 뛰어난지 가능성을 엿볼 수 있었고 그 역량 또한 충분하다는 것을 느낄 수 있었습니다. 또한 조금이나마 연구자의 길을 걷고 있는 동료 연구원들의 고충을 이해할 수 있었던 뜻깊은 시간이었다고 생각합니다.

본 논문이 마무리되기까지 세심한 지도와 가르침을 주신 김윤식 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문심사를 맡아 주신 이성근 교수님과 서동환 교수님께도 감사드립니다.

대학원 과정 중에 LabVIEW의 프로그램 설계에 있어서 많은 조언을 해주신 직장의 대선배이자 멘토이신 박건태 선생님. 대학원에 대한 전반적인 가르침과 일과 학업을 병행할 수 있도록 이해와 격려를 아끼지 않으신 김덕진 박사님, CTD 장비의 전반적인 운영과 개념, 장비를 대하는 마인드에 대해 아낌없이 가르쳐주신 김영준 선생님께도 감사의 인사를 드립니다. 대학원 생활에 대해 많은 조언을 해주시고, 항상 곁에서 응원해주시는 김현석 해무감독님, 김경년 기관사님, 그리고 항상 꼼꼼히 저의 일에 관심 가져주시어 업무의 완성도를 높여주는 손영우 공무감독에게도 감사의 인사를 전합니다.

지금의 이 자리까지 올 수 있도록 낳아주시고, 키워주신 부모님께 진심으로 감사드립니다. 부모님 못지않게 항상 동생의 미래를 위해 아낌없이 조언해주고 격려해주는 누나 그리고 자형에게도 진심으로 감사의 인사를 전합니다. 묵묵히 지켜봐주시며 걱정해주시는 시골에

계신 장인어른, 장모님께도 감사드립니다. 퇴근하고 나면 지친 아빠에게 미소로 힘을 북돋워주는 아들 시운이 고맙고 항상 건강하고 예쁘고 바른 아이로 성장하길 바랄게. 끝으로 무엇보다 일과 학업에 열중할 수 있도록 가정에서 든든히 자신의 역할을 다해준 예쁜 우리 아내에게 가장 감사하다는 말을 드리고 싶습니다.

감사드릴 분이 너무 많지만 글로써 다 언급하지 못하여 송구합니다. 항상 주변에 보탬이 되고 즐거움을 줄 수 있는 사람이 될 수 있도록 초심을 잃지 않고 노력하고 정진하겠습니다.



2017년 2월
정 창 헌