Vol. 36(1):77-85
http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2014.36.1.077

Ocean and Polar Research

March 2014

Note

CTD 교정 시스템 구축 및 불확도 평가

이정한* · 황근춘 · 김은수 · 이승훈

한국해양과학기술원 기기검교정·분석센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Establishment of CTD Calibration System and Uncertainty Estimation

Jung-Han Lee*, Keun-Choon Hwang, Eun-Soo Kim, and Seung-Hun Lee

Oceanographic Measurement & Instrument Calibration Service Center, KIOST
Ansan 426-744, Korea

Abstract : The quality control of ocean observations data is becoming a major issue as real-time observational data and information services have increased recently. Therefore, it is necessary for oceanographic instruments to calibrate. In this paper, we first introduce the CTD calibration system and traceability. Next, CTD calibration procedures and estimation of uncertainty of measurement are described. The expanded uncertainty ($k = 2$) of the temperature, pressure and conductivity are 0.003°C, 6.0×10^{-5} and 0.006 mS/cm respectively. Finally, the excellence of CTD calibration and its measurement capability has been proven by comparing the inter-calibration result of KIOST and Sea-Bird Electronics (SBE). CTD calibration residuals are less than ±0.0001°C, ±0.001 MPa, ±0.0001 S/m for SBE 3plus temperature sensor, SBE 19plus pressure sensor and SBE 4C conductivity sensor respectively.

Key words : CTD (Conductivity-Temperature-Depth), calibration, uncertainty, KOLAS, ISO/IEC 17025

1. 서 론

해양관측·조사는 해양과학연구를 통해 해양의 현상을 정확히 이해하고 현황을 파악하기 위해 필수적으로 수반되는 행위로서, 분야별로 많은 항목에 대해 현장 관측이 이루어지거나 시료 채취 후 분석이 수행되고 있다. 현장에서부터 실험실까지 해양자료가 생산되는 전 과정에서 사람, 장비, 방법, 시약, 자재, 환경 등 수많은 불확도 요인들이 자료의 품질에 영향을 미친다(Fig. 1). 해양관측·조사를 통해 생산되는 자료는 과학적인 연구, 정책 의사결정, 해양예보 등 다양한 분야에 사용되므로, 불량자료 생산 시에는 막대한 비용과 노력의 손실을 초래하며, 잘못된 의사결정을 유발하게 되므로 사전 예방적 품질관리체계 구축이 필수적이다. 정부기관, 연구소, 대학, 기업에서는 해양분야의 연구·조사사업을 통해 정기, 부정기적으로 해양자료를 획득하고 있으며, 조사선 사용료, 인건비, 출장비, 관측 장비 구입, 설치 및 유지관리비, 시료분석비 등에 막대한 관측·조사비용이 투입되고 있다. 불량 자료가 생산, 유통될 경우 해양관측·조사에 소요되는 직접 비용의 손실도 막대하지만, 불량 자료의 활용에 따른 경제·사회적 간접 피해는 직접 피해보다 훨씬 막대하다.

국립수산과학원 한국해양자료센터(국립수산과학원 2010)에 따르면 2005년부터 2010년까지 국가해양조사계획으로 기록된 항해수는 총 764건으로, 조사 항목 별 항해수로는 기상조사(해양기상관측) 124건(16%), 물리·화학적조사(수온, 수심, 염분, 산소) 618건(81%), 해양오염조사 284건(37%), 지질·지구물리조사 165건(22%), 해수유동조사(유속계, 측류 등) 158건(21%), 생물조사(부유생물조사)

*Corresponding author. E-mail : jungddan@kiost.ac

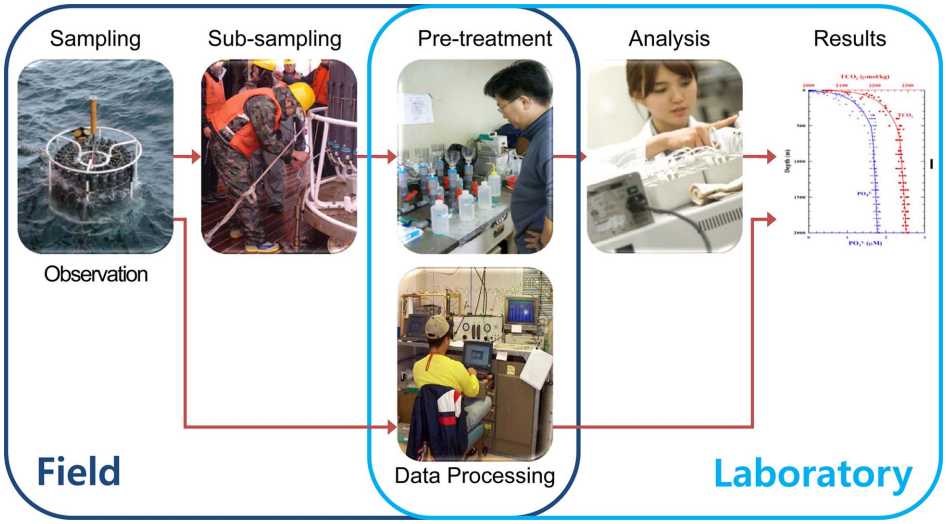

Fig. 1. Uncertainty factor in the field and the laboratory

429건(56%)이었다. 이처럼 수온, 수심, 염분은 해양 정보를 제공하는데 있어 가장 기본적인 파라미터로 최근 들어 실시간 해양 관측자료 및 정보 제공 서비스가 증가함에 따라 CTD로부터 생산된 자료의 품질이 매우 중요한 항목으로 대두되고 있다. 따라서 해양 관측자료의 신뢰성 향상 및 사전 예방적 품질관리를 위해 해양관측장비 CTD의 교정은 필수적이다. 그러나 그 동안 국내에는 교정시설의 부재로 인해 교정을 위해서는 외국 제조사에 다시 장비를 보내야 했으며 고가의 교정 비용과 시간소요에 따른 부담 때문에 연구자들이 빈번하게 장비를 교정하지 못하고 있으며 이는 해양자료의 품질 저하의 원인이 되었다. 차선책으로 CTD 상호비교시험(이와 박 1991)이나 CTD 데이터 후처리 과정(Kim et al. 2000; 최 등 2009)을 통해서 해양관측자료의 신뢰성 검증 및 품질개선을 시도하고 있으나, 자료가 생산되기 이전에 사전 예방적 품질관리를 위한 CTD의 교정이 이루어지지 않은 상태에서 실시하는 사후 품질관리만으로는 완전한 품질관리체계를 구축할 수가 없다. 그에 따라 해양관측·조사기관간 또는 연구자에 따라서 측정결과가 상이하게 제시되어 기관의 관측·분석 능력에 문제점이 제시되곤 하며, 자료의 신뢰성에 의문이 제기되기도 한다. 잘못된 자료는 해양현상의 규명을 어렵게 하거나 현황 및 추세에 대한 왜곡을 초래할 수 있으며, 잘못된 정책결정을 유발할 수 있다. 결국 신뢰도가 높은 해양관측·조사 자료가 확보되어야만 기후변화 예측과 대응, 연안 이용계획 수립, 해양오염 저감대책 마련, 생태계 복원계획 수립, 수산식품 안전성 평가, 생태계 위해도 평가 등 각 분야에서 정확한 예측을 통해 합리적인 의사결정과 정보제공이 가능하다.

이를 위해 한국해양과학기술원은 2010년에 CTD 교정실을 설립하였고 2011년부터 2012년까지 교정 시스템의 성능 최적화를 위한 실험 데이터의 축적 및 측정불확도 산출을 통해 2013년에 기술표준원 한국인정기구(KOLAS)로부터 국내 최초로 해양 관측 장비의 온도(수온)와 압력(수심) 분야 국제공인 교정기관 인정을 받았다. 본 논문에서는 먼저 한국해양과학기술원의 CTD 교정시스템에 대해 소개하고 CTD의 수온, 수심, 전기전도도 각 분야별 교정 방법에 대해 기술하며 불확도를 추정한다. 불확도는 한국표준과학연구원에서 발간한 측정불확도 표현 지침(한국표준과학연구원 1999)과 한국계량측정협회에서 발간한 온도 지시/기록/제어장치의 표준교정절차(한국계량측정협회 2008)와 아날로그 및 디지털 압력계의 표준교정절차(한국계량측정협회 2003b)를 토대로 추정하였다. 전기전도도 분야의 경우는 KOLAS에서 정의한 측정분야 및 교정 항목에 포함되지 않지만, 온도와 압력 분야와 동일한 방법으로 측정불확도를 산출하였다. 그리고 미국 Sea-Bird CTD 제조사와의 상호비교교정 결과를 분석하여 한국인정기구(KOLAS)로부터 국내 최초로 해양 관측 장비의 국제공인 교정기관으로 ISO/IEC 17025를 인정받은 한국해양과학기술원의 CTD 교정·측정능력의 우수성을 대내·외로 입증하였다.

본 논문에서 사용한 교정 및 측정 관련 용어(교정, 검정 및 검증, 보정, 불확도, 정확도, 정밀도, 오차 등)의 정의는 국제 측정학 용어집(한국표준과학연구원 2002)에 기술되어 있다. 교정(calibration)이란, 명시된 조건 하에서 첫 번째 단계로 측정표준에 의해 제공된 양의 값(측정불확도 포함)과 대응되는 지시값(연계된 측정불확도 포함) 사이의 관계를 확립하고, 두 번째 단계로 지시값에서 측정결과를 얻는 관계를 확립하기 위해 첫 번째 단계의 정보를 이용하는 작업으로 정의된다. 교정은 설명서, 교정함수, 교정도표, 교정곡선, 또는 교정 표에 의해 표현될 수

있다. 경우에 따라서는, 교정은 연계된 측정불확도를 가지는 지시값에 더하거나 곱하는 보정으로 구성될 수 있다. 교정의 개념이 종종 검정, 검증 또는 보정과 혼용되어 잘못 사용되는 경우가 많다. 검정 또는 검증(verification)이란, 주어진 품목이 명시된 요건을 충족한다는 객관적인 증거의 제공으로 성능 및 법적 요구에 대한 충족여부를 확인하는 행위이다. 보정(correction)이란 추정된 계통효과에 대한 보상이다. 불확도(uncertainty) 또는 측정불확도(measurement uncertainty)란 사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터이다. 일반적으로 측정불확도는 여러 성분으로 구성되어 있다. 이들 중 일부는 일련의 측정으로부터 얻은 양의 값의 통계분포를 이용한 측정불확도의 A형 평가에 의해 평가되며 표준편차에 의해 특성을 나타낼 수 있다. 측정불확도의 B형 평가에 의해 평가되는 그 나머지도 표준편차로 특성을 나타낼 수 있지만, 이들은 경험이나 기타 정보(매뉴얼, 교정 성적서 등)에 근거한 확률밀도함수로부터 그 값을 구할 수 있다. 불확도는 정확도, 정밀도, 오차와 다른 개념이다. 정확도(accuracy)란 측정값과 측정량의 참값이 일치하는 정도이다. 정밀도(precision)란 명시된 조건하에서, 같거나 비슷한 대상에 대해서 반복 측정하여 얻어진 지시값들 또는 측정값들이 일치하는 정도이다. 오차(error)는 측정값에서 기준값을 뺀 값이다.

2. CTD 교정 시스템

CTD 교정시스템이 설치된 교정실에는 항온항습시스템이 구축되어 있으며 온도는 (23.0 ± 0.5)ºC, 상대습도는 (50 ± 5)%R.H.를 유지하고 있다(Fig. 2). CTD 교정실은 국가교정기관지정제도운영세칙 제5장(환경평가 수행을 위한 지침)에 따라 측정에 영향을 미치는 온도, 습도, 먼지, 전기장의 세기에 대한 차폐시설, 접지저항, 진동, 소음, 전원안정화, 중력가속도 및 교정실의 격리 등 총 11개 항목에 대한 교정실의 환경기준을 관리하고 있다. CTD 교정시스템은 크게 온도(수온), 압력(수심), 전기전도도 교정시스템으로 구성되어 있으며(Fig. 3), KOLAS 체계안에서 온도와 압력 교정시스템은 한국표준과학연구원으로부터 소급성(traceability)을 유지하고 있다. 전기전도도는 KOLAS에서 정의한 측정분야 및 교정 항목에 포함되지 않기 때문에 전기전도도 교정시스템은 국제해양과학협회(International Association for the Physical Sciences of the Oceans; IAPSO)가 인정한 영국 OSIL 사로부터 소급성을 유지하고 있다.

온도 교정 시스템은 국제온도눈금(Preston-Thomas H 1990)에서 정의한 고정점 셀(수은 삼중점, 갈륨 용융점, 물의 삼중점) 및 실현을 위한 유지 장치와 정밀 온도 측정

Fig. 2. CTD calibration lab

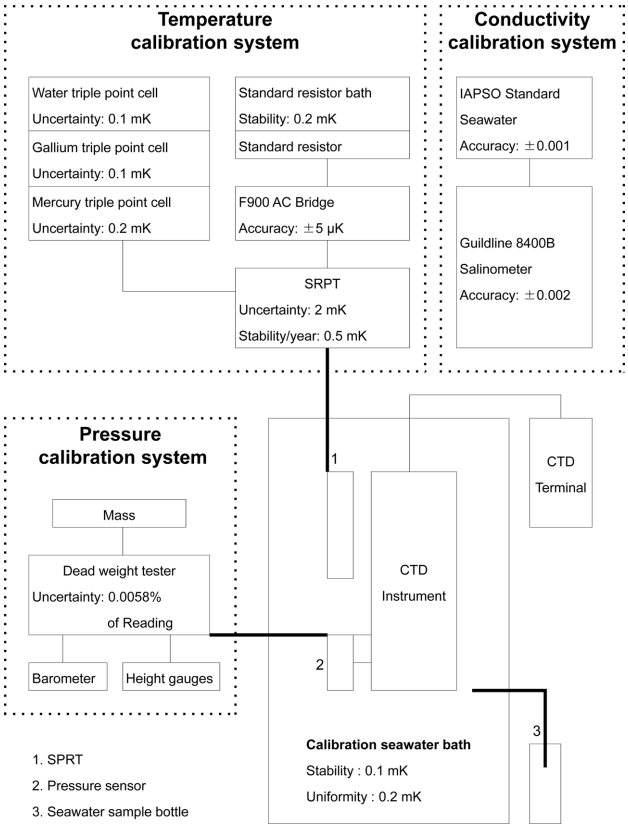

Fig. 3. CTD calibration system

장치(표준백금저항온도계, AC 저항브릿지, 표준저항, 표준저항보관용 항온조 등)로 구성되어 있다. 해양관측장비 온도 센서의 측정범위는 −5~35ºC로, 해양장비 온도 센서 교정을 위해 기준온도계로 사용되는 표준백금저항온도계(SPRT)는 수은 삼중점(−38.8344ºC) 셀, 물의 삼중점(0.01ºC) 셀, 갈륨 용융점(29.7646ºC) 셀의 총 3개의 고정점 셀을 실현하여 표준백금저항온도계의 표준교정절차(한국계량측정협회 2003a)에 따라 교정한다. CTD의 수온 및 전기

전도도 교정은 정밀교정용 항온조에서 이루어지며 항온조의 안정도는 0.0001ºC, 수직 균일도는 0.0002ºC, 수평 균일도는 0.0001ºC이다. 이 항온조의 안정도 및 균일도는 한국표준과학연구원에서 실시한 시험 결과이다.

압력 교정 시스템은 분동식 압력 표준기(oil-dead weight tester), 정밀 분동(mass), 대기압계(Barometer), 높이게이지(Height gauges)로 구성되어 있다. 압력 기준기는 분동식 압력 표준기에 정밀 분동을 올려 표준 압력을 발생시켜 해양장비의 압력 센서를 교정하는 장비이다. 대기압계는 정밀 대기압을 측정해서 수심, 조위 및 파고 등 교정 시 보정용으로 사용하는 장비이다. 높이게이지는 압력 기준기와 교정 대상기기의 높이를 측정해서 수두 보정용으로 사용하는 장비이다.

전기전도도 교정 시스템은 염분측정기(Autosal), IAPSO 표준해수(Standard Seawater; SSW)로 구성되어 있다. 염분측정기는 전기전도도 센서 교정 시 샘플한 해수의 기준 염분 및 전기전도도를 측정하는 시스템이다.

3. CTD 교정과 불확도 추정

온도 교정 절차

CTD 온도 센서 교정은 보통 −5~35ºC에서 7~11개 교정점에서 실시하나, 각 장비의 제조사에서 정한 최적의 교정점에서 교정하는 것이 가장 바람직하다. 일반적인 CTD 온도 센서의 교정 절차는 다음과 같다.

해수가 담긴 교정용 액체항온조의 안정도 및 구배도가 가장 좋은 영역에 기준온도계와 CTD 온도 센서를 최대한 가장 가깝게 설치한다. 해당 교정점에서 항온조의 온도가 충분히 안정되었을 때(시간 당 ±0.001ºC 이내), 기준온도계와 CTD 온도 센서의 온도 값을 동시에 연속적으로 측정한다. 해당 교정점에서 측정이 완료되면, 다음 번 교정점으로 항온조의 온도를 변경하여 위 과정을 모든 교정점에서 반복한다. 모든 교정점에서 측정이 완료되면, 측정 데이터를 근거로 통계(t-분포) 및 확률에 기초하여 교정데이터를 처리하고 측정불확도를 추정한다. 최종적으로 확장불확도, 보정값 그리고 교정 곡선 및 교정 계수를 제시한다. 교정 곡선은 제조사에서 정한 모델식을 사용한다.

온도 교정 불확도

불확도 모델

불확도의 수학적 모델식은 식 (1)~(3)에 나와 있다(한국계량측정협회 2008). $u_c(\Delta t)$는 CTD 온도 센서 교정에 대한 합성표준불확도로, CTD 온도 센서의 온도 측정에 의한 표준불확도 $u(t_x)$와 기준온도계의 온도측정에 의한 표준불확도 $u(t_r)$를 합성하여 구한다. CTD 온도 센서의 온도 측정에 의한 표준불확도는 식 (2)의 3가지 요인을 합성하여 구하고 기준온도계의 온도 측정에 의한 표준불확도는 식 (3)의 9가지 요인을 합성하여 구한다. 측정불확도 평가는 측정으로부터 얻은 양의 값의 통계분포를 이용한 A형 평가와 기타 정보(제조사 매뉴얼, 교정 및 시험 성적서 등)에 근거한 B형 평가로 나누어 실시하였다. A형 평가 시 정규분포로 불확도를 추정하였다. B형 평가 시 제조사의 매뉴얼에 근거하였을 때는 직사각형 분포에 의한 확률밀도함수로 불확도를 추정하였고 교정 및 시험 성적서에 근거하였을 때는 정규분포로 불확도를 추정하였다.

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{u^2(t_x) + u^2(t_r)} \tag{1}$$

$$u(t_x) = \sqrt{u^2(t_{x,Re}) + u^2(\delta t_{x,r}) + u^2(\delta t_{x,ls})} \tag{2}$$

$u(t_{x,Re})$: CTD 온도 센서의 온도 반복 측정에 따른 불확도(A형 평가)

$u(\delta t_{x,r})$: CTD 온도 센서의 분해능에 따른 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{x,ls})$: CTD 온도 센서의 장기안정도에 따른 불확도(B형 평가)

$$u(t_r) = \sqrt{\begin{aligned} &u^2(t_{r,Re}) + u^2(\delta t_{r,rc}) + u^2(\delta t_{r,ls}) + u^2(\delta t_{r,B}) + u^2(\delta t_{r,sr}) \\ &+ u^2(\delta t_{r,src}) + u^2(\delta t_{r,bs}) + u^2(\delta t_{r,bu}) + u^2(\delta t_{r,bd}) \end{aligned}} \tag{3}$$

$u(t_{r,Re})$: 기준온도계의 온도 반복 측정에 따른 불확도(A형 평가)

$u(\delta t_{r,rc})$: 기준온도계의 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,ls})$: 기준온도계의 장기안정도에 따른 불확도(B형 평가)

$u(t_{r,B})$: 저항 브릿지에 의한 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,sr})$: 표준저항에 의한 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,src})$: 표준저항 보관용 액체항온조에 의한 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,bs})$: 교정용 액체항온조의 시간변화(안정도)에 의한 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,bu})$: 교정용 액체항온조의 위치변화(수평균일도)에 의한 불확도(B형 평가)

$u(\delta t_{r,bd})$: 교정용 액체항온조의 깊이변화(수직균일도)에 의한 불확도(B형 평가)

압력 교정 절차

CTD 압력 센서의 교정절차는 히스테리시스, 선형성, 반복성 평가 등을 반영해야 하며 압력 센서의 압력 측정 확장불확도에 따라 교정점의 개수와 측정 수행 횟수가 결정된다. 보통 압력 센서의 측정범위 내에서 6~10개의 교정점에서 압력 교정을 실시하나, 각 장비의 제조사에

서 정한 최적의 교정점 온도에서 교정하는 것이 역시 가장 바람직하다. 일반적인 CTD 압력 센서의 교정 절차는 다음과 같다.

압력 표준기인 분동식 압력계와 CTD 압력 센서를 최대한 가까이 설치한다. 두 장비의 기준 높이를 가급적 비슷하게 하고 기준 높이차를 기록하여 보정할 수 있도록 한다. 압력 센서의 측정범위 내에서 측정점에 대해 압력을 증가 및 감소시키면서 반복 측정한다. 모든 교정점에서 측정이 완료되면, 측정 데이터를 근거로 통계(t-분포) 및 확률에 기초하여 교정데이터를 처리하고 측정불확도를 추정한다. 최종적으로 확장불확도, 보정값 그리고 교정 곡선 및 교정 계수를 제시한다. 교정 곡선은 제조사에서 정한 모델식을 사용한다.

압력 교정 불확도 추정

불확도 모델

불확도의 수학적 모델식은 식 (4)~(5)에 나와 있다(한국계량측정협회 2003b). $u_c(\Delta p)$는 CTD 압력 센서 교정에 대한 합성표준불확도로, CTD 압력 센서의 압력 측정에 의한 표준불확도 $u(p_{ind})$와 기준기의 압력 측정에 의한 표준불확도 $u(p_{std})$를 합성하여 구한다. CTD 압력 센서의 압력 측정에 의한 표준불확도는 식 (5)의 4가지 요인을 합성하여 구한다.

$$u_c(\Delta p) = \sqrt{u^2(p_{ind}) + u^2(p_{std})} \tag{4}$$

$$u(p_{ind}) = \sqrt{\begin{aligned} &u^2(p_{resolution}) + u^2(\delta p_{zero-error}) \\ &+ u^2(\delta p_{repeatability}) + u^2(\delta p_{hysteressis}) \end{aligned}} \tag{5}$$

$u(p_{resolution})$: CTD 압력 센서의 분해능에 따른 불확도(B형 평가)

$u(\delta p_{zero-error})$: CTD 압력 센서의 영점오차에 따른 불확도(A형 평가)

$u(\delta p_{repeatability})$: CTD 압력 센서의 반복측정에 따른 불확도(A형 평가)

$u(\delta p_{hysteressis})$: CTD 압력 센서의 히스테리시스에 따른 불확도(A형 평가)

전기전도도 교정 절차

CTD 전기전도도 센서 교정은 보통 측정 범위내에서 5개의 온도 교정점에서 실시하나, 각 장비의 제조사에서 정한 최적의 교정점 온도에서 전기전도도를 교정하는 것이 역시 가장 바람직하다. 일반적인 CTD 전기전도도 센서의 교정 절차는 다음과 같다.

해수(≃35 PSU)가 담긴 교정용 액체항온조의 안정도 및 구배도가 가장 좋은 영역에 기준온도계와 CTD 전기전도도 센서를 최대한 가장 가깝게 설치한다. 전기전도도 교정 시, 항온조 내의 버블이 전기전도도 측정 불확도에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 최소화하기 위하여 높은 온도에서 낮은 온도로 순서로 온도 교정점을 변경하여 전기전도도 교정을 실시한다. 해당 교정점에서 항온조의 온도가 충분히 안정되었을 때(시간 당 ±0.001ºC 이내), 기준온도계의 온도 값과 CTD 전기전도도 센서의 전기전도도 값을 동시에 연속적으로 측정한다. 해당 교정점에서 측정이 완료되면, 항온조의 해수를 샘플병에 샘플한다. 다음 번 교정점으로 항온조의 온도를 변경하여 위 과정을 모든 교정점에서 반복한다. 최종적으로 교정이 완료 된 후 샘플한 해수를 정밀 염분측정기로 측정하기 전까지 샘플 해수가 증발하지 않도록 미리 조치를 잘 취해야 한다. 모든 교정점에서 측정이 완료되면, 측정 데이터를 근거로 통계(t-분포) 및 확률에 기초하여 교정데이터를 처리하고 측정불확도를 추정한다. 표준해수를 사용하여 표준화시킨 정밀 염분측정기로 샘플병의 해수를 측정하여 염분값을 구하고 기준온도계의 온도 측정값을 이용하여 PSS-78 함수(Lewis EL 1980)로부터 기준 전기전도도 값을 계산한다. 최종적으로 확장불확도, 보정값 그리고 교정 곡선 및 교정 계수를 제시한다. 교정 곡선은 제조사에서 정한 모델식을 사용한다.

전기전도도 교정 불확도 추정

불확도 모델

불확도의 수학적 모델은 식 (6)~(8)에 나와 있다. 전기전도도 교정 불확도의 수학적 모델식은 온도 교정 불확도 모델식에 근거하였다. $u_c(\Delta C)$는 CTD 전기전도도 센서 교정에 대한 합성표준불확도로, CTD 전기전도도 센서의 전기전도도 측정에 의한 표준불확도 $u(C_x)$와 기준 전기전도도 측정에 의한 표준불확도 $u(C_r)$를 합성하여 구한다. CTD 전기전도도 센서의 전기전도도 측정에 의한 표준불확도는 식 (7)의 3가지 요인을 합성하여 구하고 기준 전기전도도 측정에 의한 표준불확도는 식 (8)의 4가지 요인을 합성하여 구한다.

$$u_c(\Delta C) = \sqrt{u^2(C_x) + u^2(C_r)} \tag{6}$$

$$u(C_x) = \sqrt{u^2(C_{x,Re}) + u^2(\delta C_{x,r}) + u^2(\delta C_{x,ls})} \tag{7}$$

$u(C_{x,Re})$: CTD 전기전도도 센서의 전기전도도 반복 측정에 따른 불확도(A형 평가)

$u(\delta C_{x,r})$: CTD 전기전도도 센서의 분해능에 따른 불확도(B형 평가)

$u(\delta C_{x,ls})$: CTD 전기전도도 센서의 장기안정도에 따른 불확도(B형 평가)

$$u(C_r) = \sqrt{u^2(C_{r,Re}) + u^2(\delta C_{r,SSW}) + u^2(\delta C_{r,rc}) + u^2(\delta t_r)} \quad (8)$$

$u(C_{r,Re})$: 염분측정기의 전기전도도 반복 측정에 따른 불확도(A형 평가)
$u(\delta C_{r,SSW})$: 표준해수의 불확도(B형 평가)
$u(\delta C_{r,rc})$: 염분측정기에 의한 불확도(B형 평가)
$u(\delta t_r)$: 기준 온도계의 온도 측정에 의한 불확도 (A형 및 B형 평가)

CTD 교정 확장불확도

CTD 온도, 압력, 전기전도도 센서 교정에 대한 불확도 항목이 상당히 많고 복잡하기 때문에 본 논문에서는 불확도 산출 과정에 대한 세부적인 계산 내용은 기술하지 않고, KOLAS로부터 온도와 압력 분야의 국제공인 교정기관으로 인정받은 최종 확장불확도를 보고하였다(Table 1). 전기전도도 분야의 경우는 KOLAS에서 정의한 측정분야 및 교정 항목에 포함되지 않지만, 온도와 압력 분야와 동일한 방법으로 측정불확도를 산출하였다. CTD 온도, 압력, 전기전도도 센서 교정에 대한 확장불확도는 식 (1), (4), (6)의 합성표준불확도를 계산한 후 포함인자(coverage factor, k)를 곱하여 구한다. 이때 표함인자 k는 약 95% 신뢰수준에서 유효자유도가 10 이상으로 충분히 크므로 2를 택한다. 최종적으로 산출된 CTD 교정에 대한 확장불확도는 각 분야별로 온도는 0.003°C, 압력은 6.0×10^{-5}, 전기전도도는 0.006 mS/cm이다.

4. CTD 상호비교교정

한국해양과학기술원은 CTD 교정 · 측정능력 평가 및 향상을 위해, CTD 장비 중에서 전 세계적으로 가장 좋은 성능으로 평가받고 있는 미국 Sea-Bird사의 CTD를 제조사와 상호비교교정을 실시하였다. 온도 센서와 전기전도도 센서의 상호비교교정 대상 장비로는 연구선 장착장비로 사용중인 현존하는 CTD 중에서 가장 최고의 성능을 갖고 있는 SBE 911plus CTD를 선정하였고 압력 센서의 상호비교교정을 위해서는 SBE 19plus CTD를 선정하였다. SBE 3plus 온도 센서, SBE 19plus 압력 센서 그리고 SBE 4C 전기전도도의 센서의 사양은 Table 2에 나와 있다. 먼저 Sea-Bird사에서 SBE 3plus(SN:5654) 온도 센서, SBE 19plus(SN:6153) 압력센서 그리고 SBE 4C(SN:3327) 전기전도도 센서를 교정한 후 한국해양과학기술원에서 재교정하여 CTD 상호비교교정을 실시하였으며, 실험실마다 측정불확도의 요인이 다르기 때문에 본 논문에서는 교정잔차(calibration residual)에 대한 비교평가만을 실시하고 불확도 산출에 대한 내용은 기술하지 않는다. 잔차(Residual)란, CTD와 기준장비의 측정값을 토대로 최소자승법으로 구한 교정 계수를 이용하여 각 교정점에서 새롭게 계산한 CTD 측정값과 기준장비 측정값간의 차이를 뜻한다. 이 잔차가 0에 가까울수록 이상적인 교정이 수행된 것이나, 측정에 있어서 수많은 불확도 요인이 존재하기 때문에 잔차가 0이 되는 것은 불가능하다. 따라서 해당 장비의 사양에 따라 잔차의 목표값을 설정해야 하며 본 논문에서는 해당 장비의 정확도를 잔차의 목표값으로 설정하여 이 목표값의 만족여부를 비교평가하였다.

Table 1. Expanded uncertainty of CTD calibration

Field	Range	Expanded uncertainty (k = 2)
Temperature	-5~35°C	0.003°C
Pressure	0.03~70 MPa	6.0×10^{-5}
Conductivity	1~65 mS/cm	0.006 mS/cm

상호비교교정 결과

SBE 3plus 온도 센서의 각 교정점에서의 잔차를 비교해보면, 한국해양과학기술원과 제조사의 잔차가 모든 교정점에서 정확도(±0.001°C)의 0.1배(±0.0001°C) 이내였으며 잔차의 최소값, 최대값 및 잔차의 절대값의 평균을 비교해본 결과 한국해양과학기술원의 교정결과와 제조사의 결과가 동등한 수준으로 평가되었다(Fig. 4). 온도, 압력 그리고 전기전도도 센서의 교정 후 산출된 계수는 Table 3에 나와 있다. 온도 센서 교정 계수 g, h, i, j는 총 11개 온도 교정점에서의 교정데이터(SBE 3plus 주파수 출력 측정값과 기준온도계의 온도 측정값)를 토대로 제조사에서 제공한 온도 센서 교정식 식 (9)을 이용하여 최소자승법으로 구하였다(Sea-Bird Electronic 2013). f_0는 제조사에서 제시한 값으로 1000 Hz이고 f는 SBE 3plus의 주파수 출력 값(Hz)이다. 산출된 한국해양과학기술원과 제조사의 교정 계수 비교를 위해 주파수 출력 값을 고정시키고, 교정계수를 사용하여 식 (9)으로부터 계산된 온도를

Table 2. Specification of CTD sensors for the inter-calibration

Sensor	Model	Range	Accuracy	Resolution	Stability
Temperature sensor	SBE 3plus	−5~35°C	±0.001°C	0.0003°C	0.001°C per 6 months
Pressure sensor	SBE 19plus	0~6 MPa	±0.006 MPa	0.0001 MPa	0.006 MPa per a year
Conductivity sensor	SBE 4C	0~7 S/m	±0.0003 S/m	0.00004 S/m	0.0003 S/m per a month

Table 3. Calibration coefficients of CTD sensors

Field	Model	Serial number	Coefficient	Value	
				KIOST	Sea-Bird
Temperature	SBE 3plus	5654	g	$4.30553853 \times 10^{-3}$	$4.30528468 \times 10^{-3}$
			h	$6.25869157 \times 10^{-4}$	$6.25363491 \times 10^{-4}$
			i	$1.96839266 \times 10^{-5}$	$1.93709410 \times 10^{-5}$
			j	$1.53287110 \times 10^{-6}$	$1.47245874 \times 10^{-6}$
Pressure	SBE 19plus	6153	$PA0$	1.761122	1.818364
			$PA1$	2.636639×10^{-3}	2.637810×10^{-3}
			$PA2$	2.291018×10^{-11}	1.966544×10^{-11}
Conductivity	SBE 4C	3327	g	−9.97591600	−9.95920571
			h	1.55137165	1.54517073
			i	$-1.16197854 \times 10^{-3}$	$6.31985804 \times 10^{-4}$
			j	$1.78174346 \times 10^{-4}$	$3.80577516 \times 10^{-5}$

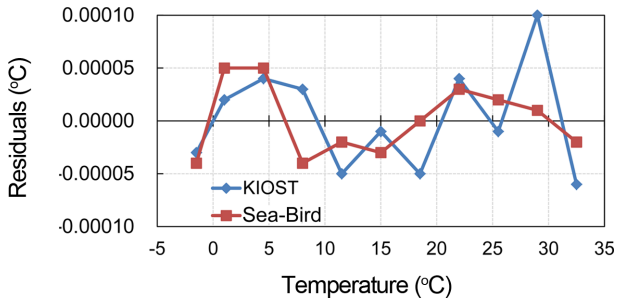

Fig. 4. SBE 3plus temperature sensor calibration residuals

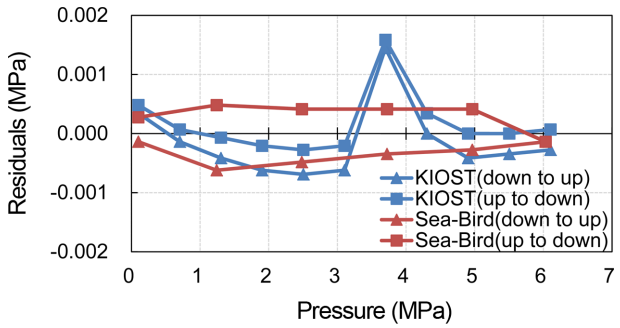

Fig. 5. SBE 19plus pressure sensor calibration residuals

비교해본 결과, 한국해양과학기술원과 제조사간에 약 0.0003°C 차이를 확인하였다. 이 차이는 두 기관의 측정불확도에 기인한 것으로서, 본 논문에서 측정불확도를 산출하여 비교분석하지 않았지만, 두 기관의 측정불확도에 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.

$$T(^{\circ}\mathrm{C}) = \frac{1}{g + h \times \ln(f_0/f) + i \times [\ln(f_0/f)]^2 + j \times [\ln(f_0/f)]^3} - 273.15 \quad (9)$$

SBE 19plus 장비는 비 SI 단위인 psia로 출력되지만, 본 논문에서는 압력 센서 상호비교교정 결과에 대한 평가를 위해 SI 단위인 MPa로 변환하여 기술하였다. SBE 19plus 압력 센서의 각 교정점에서의 잔차를 비교해보면, 한국해양과학기술원의 4 MPa 교정점을 제외한 나머지 가압(down to up)과 감압(up to down)의 모든 교정점에서 정확도(0.006 MPa)의 약 0.1배(±0.001 MPa) 이내였으며 잔차의 최소값, 최대값 및 잔차의 절대값의 평균을 비교해본 결과 한국해양과학기술원의 교정결과와 제조사의 결과가 동등한 수준으로 평가되었다(Fig. 5). 압력 센서 교정 시 수행했던 가압과 감압에서의 잔차값이 서로 차이가 적을수록 반복 측정에 의한 불확도가 작아 정밀 교정이 이루어진 것으로 볼 수 있는데, 한국해양과학기술원의 가압과 감압간의 잔차의 차이가 모든 교정점에서 제조사보다 작아 더 정밀 측정이 이루어진 것으로 평가되었다. 다만 한국해양과학기술원의 4 MPa 교정점에서의 잔차값이 제조사와 다소 차이가 나타나는데, 이는 6개의 압력 교정점에서 교정을 실시했던 제조사와 달리 11개의 압력 교정점에서 교정을 수행했던 한국해양과학기술원에서 4 MPa 교정점에서 SBE 19plus 압력 센서의 압력 측정 대표값에 영향을 준 외부의 불확도가 작용했던 것으로 분석된다. 압력 센서 교정 계수 $PA0$, $PA1$, $PA2$는 총 11개 압력 교정점에서의 교정데이터(SBE 19plus 측정값과 기준기의 압력 측정값)를 토대로 제조사에서 제공한 압력 센서 교정식 식 (10)을 이용하여 마찬가지로 최소자승법으로 구하였다 (Sea-Bird Electronic 2007). N는 SBE 19plus의 raw frequency output 값이다. 산출된 한국해양과학기술원과 제조사의 교정 계수 비교를 위해 주파수 출력 값을 고정시키고, 교정계수를 사용하여 식 (10)으로부터 계산된 압력을 비교해본 결과, 한국해양과학기술원과 제조사간에 약 0.001 MPa 차이를 확인하였다. 이 차이는 두 기관의

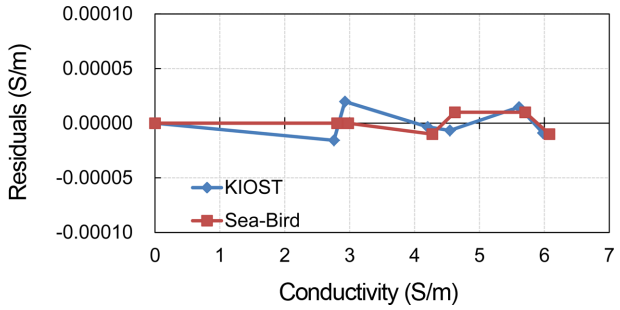

Fig. 6. SBE 4C conductivity sensor calibration residuals

측정불확도에 기인한 것으로서, 본 논문에서 측정불확도를 산출하여 비교분석하지 않았지만, 두 기관의 측정불확도에 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.

$$P\ (\text{psia}) = PA0 + PA1 \times N + PA2 \times N^2 \quad (10)$$

SBE 4C 전기전도도 센서의 각 교정점에서의 잔차를 비교해보면, 한국해양과학기술원과 제조사가 모든 교정점에서 정확도(±0.0003 S/m)의 약 0.3배(±0.0001 S/m) 이내로 잔차의 최소값, 최대값 및 잔차의 절대값의 평균을 비교해 본 결과 한국해양과학기술원의 교정결과가 제조사와 동등한 수준으로 평가되었다(Fig. 6). 전기전도도 센서 교정 계수 g, h, i, j는 총 6개의 온도 교정점에서의 교정데이터(SBE 4C 주파수 출력 측정값과 기준온도계의 온도 측정값 및 염분측정기로부터 구한 표준전기전도도 값)를 토대로 제조사에서 제공한 전기전도도 센서 교정식 식 (11)을 이용하여 마찬가지로 최소자승법으로 구하였다(Sea-Bird Electronic 2013). ε과 δ는 수심과 온도에 대한 전기전도도의 보정값이며 제조사에서 제시한 값은 각각 -9.57×10^{-8}과 3.25×10^{-6}이다. t는 교정점의 IPTS-68 기준온도값으로, PSS-78 함수가 IPTS-68 온도를 사용하여 전기전도도를 계산하기 때문에 ITS-90 기준온도값에 1.00024를 곱하여 IPTS-68 기준온도값을 구한다. f는 SBE 4C의 주파수 출력 값(kHz)이다. p는 압력값(dbar)으로 교정용 항온조의 수심이 전기전도도 측정값에 영향을 줄 정도로 깊지 않기 때문에 0 dbar 로 간주해도 무방하다. 산출된 한국해양과학기술원과 제조사의 교정 계수 비교를 위해 주파수 출력값을 고정시키고, 교정계수를 사용하여 식 (11)으로부터 계산된 전기전도도를 비교해본 결과, 한국해양과학기술원과 제조사간에 약 0.0002 S/m 차이를 확인하였다. 이 차이는 두 기관의 측정불확도에 기인한 것으로서, 본 논문에서 측정불확도를 산출하여 비교분석하지 않았지만, 두 기관의 측정불확도에 큰 차이가 없는 것으로 평가되었다.

$$\text{Conductivity (S/m)} = \frac{(g + h \times f^2 + i \times f^3 + j \times f^4)}{10(1 + \delta \times t + \varepsilon \times p)} \quad (11)$$

5. 토의 및 결론

서론에서도 해양관측장비 교정의 필요성에 대해 언급하였지만, 여전히 해양관련 연구 분야의 연구자들조차도 해양관측장비 교정의 필요성에 대해 의문을 제기하고 있는 현실이다. 가령, 수온 0.1°C의 관측품질목표가 요구될 때 0.001°C 정확도를 갖는 해양관측장비를 사용하기 때문에 전혀 교정의 필요성을 느끼지 않는 경우가 그 대표적인 예이다. 이는 해양 물리, 화학, 생물, 지구물리 등 해양관련 여러 연구 분야에 종사하고 있는 연구자들마다 해당 연구 분야에서 요구되는 관측품질목표에 따라 해양자료를 생산하고 처리하기 때문에 발생된 의견차이다. 교정은 어느 분야에서 장비가 사용되든 간에 그 장비 자체가 낼 수 있는 본연의 성능을 보장하여 해양자료의 초기 생산 단계에서부터 품질향상에 기여하는 품질관리의 가장 기본적인 첫 걸음인 것이다. 서로 다른 연구 분야에서 생산된 해양관측자료를 공유하고 가치 있는 연구 자료로 활용할 수 있는지의 여부를 평가하는 신뢰성 판단의 근거인 셈이다. 따라서 교정은 어느 특정 연구 분야에서 사용되고 있는 장비에만 국한되는 것이 아니다. 해양관측장비 교정의 필요성을 판단하는데 있어서, 특정 연구 분야와 연결시키기보다는 해양 관측자료의 신뢰성 향상 및 사전 예방적 품질관리체계 구축의 측면에서 교정의 필요성에 대한 인식 개선이 상당히 필요하다. 최근 들어 실시간 해양 관측자료 및 정보 제공 서비스가 증가함에 따라 해양 관측 장비로부터 생산된 자료의 품질이 매우 중요한 항목으로 대두되고 있는 시점에서 본 연구는 해양관측에 있어서 가장 기본적인 관측 장비인 CTD 교정에 대한 중요한 정보를 제공하는 연구로서의 가치가 있다고 판단된다.

현재 한국해양과학기술원은 기술표준원 한국인정기구(KOLAS) 체계 안에서 국제공인 교정기관으로서 교정측정능력을 꾸준히 향상 시켜가고 있다. 또한 이를 바탕으로 Sea-Bird, Idronaut, Aanderaa, RBR 등 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 국외 해양장비 제조사의 CTD를 교정하고 있다. 본 논문에서는 국외 해양장비 제조사와의 CTD 상호비교교정 결과를 모두 다 기재할 수 없었기 때문에 가장 최고 성능으로 평가받고 있는 Sea-Brid사의 CTD 상호비교교정 결과를 평가하였으며 이를 통해 한국해양과학기술원의 CTD 교정 · 측정능력의 우수성을 대내외로 입증하였다. 이로써 한국해양과학기술원은 해양관측 · 조사자료의 품질을 보증하는 사전 예방적 해양자료 정도관리(Quality Assurance/Quality Control) 체계를 구축하여 불량자료 생산에 따르는 해양관측조사 노력과 비용을 절감하고, 세계 최고 수준의 신뢰도를 가진 해양자료 · 정보를 서비스 할 수 있는 제공기반을 마련하였다. 또한 기술적인 노력뿐만 아니라 정책적인 부분에 있어서도 중국, 일본,

미국 등 국외 사례를 토대로 우리나라의 실정에 맞는 해양관측·조사 품질관리 체계 정립 및 해양 표준화 구축을 위한 관련 법률의 개·제정을 위해 노력하고 있다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 연구인프라운영사업인 “해양관측조사 표준화 확립사업(PO01050)”의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

국립수산과학원 (2010) KODC NEWSLETTER. 국립수산과학원, SP-2010-ME-046, 40 p

이하웅, 박동원 (1991) CTD 시스템의 특성분석 및 비교. 해양연구 **13**(2):87-93

최아라, 박영규, 민홍식, 김경홍 (2009) 후처리과정을 통한 CTD 관측 자료 품질 개선에 대하여. Ocean and Polar Res **31**(4):339-347

한국계량측정협회 (2003a) 표준백금저항온도계의 표준교정절차. 한국계량측정협회, KASTO 03-18-2040-117, 27 p

한국계량측정협회 (2003b) 아날로그 및 디지털 압력계의 표준교정절차. 한국계량측정협회, KASTO 03-09-1030-011, 26 p

한국계량측정협회 (2008) 온도 지시/기록/제어장치의 표준교정절차. 한국계량측정협회, KASTO 07-50103-116, 19 p

한국표준과학연구원 (1999) 측정불확도 표현 지침. 한국표준과학연구원, KRISS-99-070-SP, 19 p

한국표준과학연구원 (2002) 국제 측정학 용어집. 한국표준과학연구원, KRISS-SP-2008-022, 126 p

Kim Y-G, Kim K, Cho Y-K, Ossi H (2000) CTD data processing for CREAMS expeditions: thermal-lag correction of Sea-Bird CTD. J Korean Society of Oceanography **35**(4):192-199

Lewis EL (1980) The practical salinity scale 1978 and its antecedents. IEEE J Oceanic Eng **5**(1):3-8

Preston-Thomas H (1990) The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia **27**(1):3-10

Sea-Bird Electronic (2007) SBE 19plus SEACAT Profiler User's Manual. Sea-Bird Electronic, Washington, 99 p

Sea-Bird Electronic (2013) SBE 9plus CTD User's manual. Sea-Bird Electronic, Washington, 73 p

국문 참고자료의 영어 표기

English translation / romanization of references originally written in Korean

Choi A-R, Park Y-G, Min HS, Kim KH (2009) The Improvement of CTD Data through Post Processing. Ocean and Polar Res **31**(4):339-347 (in Korean)

KASTO (2003a) Standard Calibration Procedure of Standard Platinum Resistance Thermometers. Korea Association of Standards & Testing Organizations, KASTO 03-18-2040-117, 27 p (in Korean)

KASTO (2003b) Standard Calibration Procedure of Analog or Digital Pressure Gauges. Korea Association of Standards & Testing Organization, KASTO 03-09-1030-011, 26 p (in Korean)

KASTO (2008) Standard Calibration Procedure of Temperature Indicators/Recorders/Controllers. Korea Association of Standards & Testing Organizations, KASTO 07-50103-116, 19 p (in Korean)

KRISS (1999) Guide to the expression of uncertainty in measurement. Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS-99-070-SP, 19 p (in Korean)

KRISS (2002) Internal vocabulary of basic and general terms in metrology. Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS-SP-2008-022, 126 p (in Korean)

Lee HW, Park DW (1991) A comparison and analysis of characteristics of Two CTD Systems. Ocean Res **13**(2): 87-93 (in Korean)

NFRDI (2010) KODC Newsletter. National Fisheries Research and Development Institute, SP-2010-ME-046, 40 p (in Korean)

Received Sep. 23, 2013
Revised Nov. 18, 2013
Accepted Feb. 11, 2014