Note

초음파 도플러 유속계 교정 시설 현황

이정한* · 황근춘 · 김은수

한국해양연구원 기기검교정·분석센터
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Analysis of Calibration Facilities for Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs)

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

*Oceanographic Measurement & Instrument Calibration Service Center (OMICS), KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Despite technological developments and application advances of Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs), no standard procedure has been adopted or accepted for calibration of ADCPs. Limitations of existing facilities for calibrating ADCPs, the complexity of ADCP instruments, and rapid changes in ADCP technology are some of the reasons why a standard procedure has not been adopted. However, there is increasing realization of the need for effective Quality Assurance (QA) and as part of that the importance of standardized calibration. In this study, the significance of calibration and QA plans for ADCPs is discussed and the calibration facilities for ADCPs at home and abroad are reported. Furthermore, the method for calibrating ADCPs using a towed car and its limitations are discussed. This study contributes to discussions surrounding the establishment of standard procedures for calibrating ADCPs and QA plans, and the construction of calibration facilities in the future.

Key words : ADCP, calibration, QA Plans, calibration facilities, verification

1. 서 론

과거 1980년대 까지만 해도 특정 지점(fixed point)의 물의 유속, 유량, 수심 등을 측정하는데 프로펠러 타입의 기계식 유속계(mechanical current meter)와 전자식 유속계(electromagnetic current meter)를 많이 사용하였으나 현재는 넓은 영역의 수평 및 수직 수층 정보를 얻을 수 있는 초음파 도플러 유속계(ADCP; Acoustic Doppler Current Profilers)가 물의 유속, 유량, 수심 등을 측정하는데 사용하는 장비로 최근 약 30년간 가장 널리 사용되어 왔다. 초음파 도플러 유속계의 수요가 많아짐에 따라 초음

파 도플러 유속계를 생산하는 해양장비 제조회사 또한 상당히 많이 늘어났다. 현재 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 초음파 도플러 유속계는 Teledyne RD Instruments 사의 ADCP, SonTek 사의 ADV와 ADP, Aanderaa Data Instruments 사의 RDCP가 있다. 본 논문에서 사용하는 용어 ADCP는 특정 제조회사의 초음파 도플러 유속계를 칭하는 것이 아니라, 도플러 쉬프트 효과(Doppler Shift effect)를 이용하여 물의 유속, 유량, 수심을 측정할 수 있는 장비를 총칭한다. 여러 해양장비 제조회사마다 서로 다른 ADCP를 생산하고 있으며 또 각 제조회사에서 사용하는 초음파 주파수 신호에 따라 다양한 종류의 ADCP가 있지만, 이들은 모두 공통적으로 물속에서 트랜스듀서에서 발생시킨 초음파 신호와 역측류, 요각류, 난

*Corresponding author. E-mail : jungddan@kordi.re.kr

Fig. 1. Doppler Shift effect. (a) Transmitted pulse, (b) a small amount of the sound energy is reflected back

바다곤쟁이류 등과 같이 크기가 아주 작은 산란체(scattering materials)에 의해 반사되어 트랜스듀서에서 수신된 초음파 신호간의 시간차이를 계산하여(도플러 쉬프트 효과) 유속을 측정한다(Fig. 1).

현재 ADCP는 얇고 좁은 범위의 하천 및 연안 그리고 깊고 넓은 범위의 해양 및 대양 등 광범위하게 유속, 유량, 수심 등을 측정하는데 사용되고 있으며 빠른 기술 발전 및 새로운 장비의 개발에 따라 앞으로 점차 사용범위 및 분야가 확대되며 그 수요가 더 많아질 것으로 예상된다. 하지만 이런 빠른 기술 발전 및 새로운 장비의 개발, 장비 제조사의 급증 그리고 ADCP의 사용 범위가 확장되었음에도 불구하고 현재 ADCP 표준교정절차(standard calibration procedure)가 확립되지 않았다. ADCP를 실내에서 교정하기 위한 시설의 부재 그리고 빠른 기술변화로 인해 교정을 위한 표준절차를 확립하는데 큰 어려움을 겪고 있다. 하지만 무엇보다도 ADCP의 교정 및 정도관리계획의 필요성에 대한 인식 개선이 더 시급한 실정이다.

본 논문에서는 국내 및 국외의 ADCP 교정 시설 현황에 대해 살펴보고 예인대차를 이용하여 ADCP를 교정한 결과를 바탕으로 예인대차를 이용한 ADCP 교정 방법과 그 한계점에 대한 논의를 통해 올바른 ADCP 표준교정절차와 정도관리계획의 수립 및 향후 교정 시설 구축에 이바지 하고자 한다.

2. ADCP 교정과 정도관리계획 수립의 필요성

교정의 필요성

거의 대부분의 ADCP 사용자들은, ADCP는 물속에서

초음파를 출력하는 전자 및 하드웨어 기계 장치로 이루어져있고 반사되어 돌아오는 신호를 처리하는 소프트웨어로 이루어져 있기 때문에, ADCP가 세월이 지남에 따라 변하는 물리적인 드리프트 특성을 갖고 있지 않아서 교정이 불필요하다고 생각하고 있다. 하지만 ADCP의 트랜스듀서가 구조적으로 야누스(Janus) 모습으로 구성되어 있기 때문에 beam misalignment에 의해 유속 측정 시 에러가 발생하며 이에 대한 교정이 필요하다.

ADCP 속도 에러

일반적으로 ADCP는 2개의 트랜스듀서가 앞뒤로 마주보아 1쌍을 이루고 있으며 총 2쌍으로(4개의 트랜스듀서) 구조적으로 야누스 모습으로 구성되어 있다. Fig. 2에 각 트랜스듀서의 번호가 T1부터 T4로 표시되어 있고 XYZ 좌표계가 ADCP 헤드에 표시되어 있다. 실제 유속에 해당되는 V_4 와 V_3 는 각각 T4와 T3 트랜스듀서 빔에 의한 라디얼 빔 속도 b_4 와 b_3 를 통해서 구할 수 있다. 각 트랜스듀서의 빔에 의해서 관측범위인 수직 수층을 분할할 수 있는데, 이 분할된 수직 수층을 bin 또는 cell이라 한다. 각 트랜스듀서에서는 이 cell 면적에 분포되어 있는 산란체로부터 반사되어 수신된 신호를 통해 평균 라디얼 빔 속도(average radial beam velocity)를 측정하고 이를 통해 각 수직 수층에서의 유속 프로파일을 얻는다. 예를 들어 각 트랜스듀서($i=1\sim4$)에서의 라디얼 빔 속도(b_i)는 각 빔에서 측정된 유속(V_i)을 통해서 수학적으로 다음과 같이 표기할 수 있다(Gilcoto et al. 2009).

Fig. 2. (left) Side and (right) top view of a four-beam of ADCP

$$\begin{aligned}
b_1 &= V_{1,X}\sin\beta + V_{1,Z}\cos\beta, \\
b_2 &= -V_{2,X}\sin\beta + V_{2,Z}\cos\beta, \\
b_3 &= -V_{3,Y}\sin\beta + V_{3,Z}\cos\beta, \\
b_4 &= V_{4,Y}\sin\beta + V_{4,Z}\cos\beta.
\end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $V_{i,X}$, $V_{i,Y}$, $V_{i,Z}$ 는 각 트랜스듀서 빔(i)에서의 각각 X, Y, Z 유속성분을 뜻하고 β 는 ADCP가 구조적으로 수직면으로부터 기울어진 각도이다. 같은 수평면에 위치한 cell의 수평 유속이 같다는 가정 하에, 아래의 식 (3)을 구할 수 있다.

$$V_X = V_{i,X}, V_Y = V_{i,Y}, V_Z = V_{i,Z} \quad (i=1\sim4) \quad (2)$$

$$b = \begin{pmatrix} \sin\beta & 0 & \cos\beta \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} = AV_{XYZ} \quad (3)$$

Teledyne RDI ADCP의 경우 XYZ 좌표시스템을 tilt에 따른 ENU(east/north/up) 좌표시스템으로 변환할 경우 아래와 같이 표현할 수 있다(TELEDYNE RD INSTRUMENTS 2010).

$$b = AV_{X,Y,Z} = AM \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = TV_{ENU} \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} -\cos\theta\cos\phi - \sin\theta\sin\phi\sin\psi & \sin\theta\cos\phi - \cos\theta\sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\psi \\ \sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi & \sin\phi \\ \sin\theta\sin\phi\cos\psi - \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\sin\phi\cos\psi + \sin\theta\sin\psi & -\cos\phi\cos\psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 θ 는 ADCP의 compass로부터 측정된 heading(Z축으로부터의 방위각)이고 ϕ 는 ADCP 내부의 roll sensor에 의해 측정된 roll(Y 축으로부터의 방위각)이고, ψ 는 실제 pitch 값으로(X 축으로부터의 방위각) ADCP 내부의 pitch 센서 ψ 의 값을 통해 $\phi = \arctan(\tan\psi\cos\theta)$ 식으로부터 구할 수 있다. 각 트랜스듀서 쌍의 유속은 균일하다는 가정 ($V_{12,X} = V_{1,X} = V_{2,X}$, $V_{12,Z} = V_{1,Z} = V_{2,Z}$, $V_{34,Y} = V_{3,Y} = V_{4,Y}$, $V_{34,Z} = V_{3,Z} = V_{4,Z}$) 하에

식 (1)에서 아래의 식 (6)을 얻을 수 있으며 이를 통해 수직 유속 에러를 식 (8)을 통해 구할 수 있다.

$$V_{12,X} = \frac{1}{2\sin\beta}(b_1 - b_2),$$

$$V_{12,Z} = \frac{1}{2\cos\beta}(b_1 + b_2),$$

$$V_{34,Y} = \frac{1}{2\sin\beta}(b_4 - b_3),$$

Fig. 3. Beam Spreading of ADCP

$$V_{34,Z} = \frac{1}{2\cos\beta}(b_3 + b_4). \quad (6)$$

$$V_Z = \frac{V_{12,Z} + V_{34,Z}}{2} = \frac{1}{4\cos\beta}(b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \quad (7)$$

$$e_{V_Z} = V_{12,Z} - V_{34,Z} = \frac{1}{2\cos\beta}(b_1 + b_2 - b_3 - b_4) \quad (8)$$

ADCP는 구조적으로 트랜스듀서가 모두 다른 방향으로 위치해 있고 트랜스듀서 빔의 분산 특성 때문에 서로 쌍을 이루고 있는 트랜스듀서가 모두 같은 cell의 면적으로부터 평균 라디얼 빔 속도를 측정하지 못한다(Fig. 3). 서로 쌍을 이루는 트랜스듀서는 $2d\tan\beta$ 의 거리만큼 떨어진 위치에서의 cell 면적으로부터 평균 라디얼 빔 속도를 얻는데, 이 빔 분산이 커질 경우, 즉 관측 범위가 넓어질 경우 식 (8)에서 구한 수직 유속 에러가 커질 수 있다(Marsden and Ingram 2004).

위에서 살펴본 ADCP 트랜스듀서의 beam misalignment가 아주 작은 경우에는 수직 유속 에러에 크게 영향을 주지 않는다(Marsden and Gratton 1997). 아래 식 (9)를 참고하여 예를 들어 1° misalignment일 경우 수직 유속이 0.4 m/s이면 약 0.007 m/s의 에러를 발생시키는데 대략 0.01 m/s 이하일 경우는 거의 노이즈 레벨로 보기 때문에 문제가 되지 않는다. 여기서 β 는 ADCP가 구조적으로 수직면으로부터 기울어진 각도이다. 그런데 ADCP를 선박에 장착하여 사용할 경우(VM ADCP: Vessel-Mounted ADCP)에 문제가 생기는데 VM ADCP의 경우 u , v , w 로 표현한 수직 유속은 식 (10)과 같이 표현된다. 여기서 U 는 배에 대한 물의 상대속도이고 pitch 방향으로 마이너스 사인을 댄다. $U\sin\beta$ 성분이 크기 때문에 pitch error에 의해서 수직 유속 성분에 영향을 미친다. 예를 들어 배의 속도가 4.0 m/s, pitch 방향으로 1° 의 에러가 있을 경우에 수직 유속 성분에 0.07 m/s에 해당하는 스푸리어스(spurious) 속도가 더해지게 된다. 이는 ADCP의 노이즈레벨을 훨씬 넘으며 수직 유속 에러의 요인이 된다.

$$w' = -u \sin \beta + w \cos \beta \quad (9)$$

$$\begin{aligned} w' &= -(u + U) \sin \beta + w \cos \beta \\ &= -u \sin \beta + w \cos \beta - U \sin \beta \end{aligned} \quad (10)$$

ADCP 표준교정절차 및 교정 시설의 부재

위에서 살펴본 수직 유속 에러 교정에 대한 연구가 과거부터 꾸준히 진행되어 왔으며(Joyce 1989; Pollard and Read 1989; Munchow et al. 1995) 최근에는 beam misalignment로 인한 수직 유속 에러 교정을 위해서 ADCP의 데이터 프로세싱 기법이 개발되었다(Marsden and Gratton 1997; Marsden and Ingram 2004). VM ADCP의 경우, 배의 gyrocompass의 에러가 유속 측정 결과에 영향을 주기 때문에 ADCP의 유속 및 내부 compass 교정뿐만 아니라 배의 gyrocompass 교정 또한 필수적이다(Trump and Marmorino 1997). ADCP의 유속 교정을 위해서 배에 ADCP를 장착하여 교정을 수행할 경우, 실제 ADCP를 쓰는 동일한 환경 하에서 교정을 수행하기 때문에 많은 장점이 있으나 배를 이용할 때 드는 비용과 시간적 측면에서 경제적 부담이 크다.

하지만 ADCP를 실내에서 교정하기 위해서는 어느 정도 큰 규모의 시설이 필요하고 현장 환경이 아닌 실내(수조)에서의 교정 시 후방산란 물질(backscattering material), 수조의 양쪽 벽과 바닥에서의 초음파 반사(side-lobe interference), 주변의 전자기장 필드에 의한 간섭(electromagnetic field interference) 등 여러 가지 고려해야 할 사항들이 많아서 교정 시설을 갖추는데 현실적으로 큰 어려움이 있다.

현재 국내에서는 프로펠러 유속계와 같은 기계식 유속계(mechanical current meter)와 전자식 유속계(electromagnetic current meter), 그리고 ADCP 등 유속계 자체를 교정할 수 있는 시설이나 교정기관이 없다. 단지 기계식 유속계와 전자식 유속계에 대한 검정업무를 건설교통부의 국립건설시험소가 수행하였으나 1998년 1월 국립건설시험소가 한국건설기술연구원에 통합된 이후 이곳에서 검정업무를 수행중에 있다. 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 산하 하천해양항만연구실에서는 720 m²(217평)의 유속계 검정 실험장을 유지관리하고 있으며, 유속계 국가검정기관으로 지정받아 유속계 검정업무를 수행중에 있다. 수문관측업무규정(국토해양부 2009)과 하천설계기준 및 해설(국토해양부 2006)에 따라 연 1회 이상 유속계를 검정 받아야 하며, 유속계를 고객에게 납품하는 자는 한국건설기술연구원에서 발급한 해당 유속계의 개별 검사성적서를 첨부해야 한다. 한국건설기술연구원에서는 0.05~5.0 m/sec의 측정범위에 대해 검정 서비스를 제공한다.

국토해양부 훈령에 따라 하천 및 수문관측 업무에 관한 범위 내에서만 유속계의 검정이 법제화 되어 있고 이외의 목적 및 관측범위로 유속계를 사용할 때에는 검정 혹은 교정이 법제화 되어 있지 않아 점차 사용 목적과 범위가 확대되고 있는 ADCP의 검정 및 교정에 대한 법제화 또한 시급한 문제로 대두되고 있다.

ADCP와 같은 도플러 쉬프트 효과를 이용하여 액체의 유량 및 유속을 측정하는 액체용 초음파 유량계(Flow Meter, Ultrasonic; liquid)의 경우, 국가교정기관지정제도 운영요령 제41조 관련 측정기기의 교정대상 및 주기에 교정대상으로 정해져있다(지식경제부 기술표준원 2004). 초음파 유량계의 경우 교정주기가 교정용 표준기는 18개월, 정밀계기(교정대상)는 12개월로 정해져 있다. 국가교정기관지정제도운영세칙 제6장 제4조(교정 주기)의 내용은 다음과 같다. 규정된 교정주기를 준용하나 다만 이는 가장 보편적인 상황 하에서 측정기의 정확도가 유지될 수 있는 기간을 추정한 교정주기일 뿐이다. 따라서 최적의 교정주기는 사용자가 요구되는 불확도, 측정기의 사용빈도, 사용방법, 장비의 안정도 등을 감안하여 설정하는 것이 기본이다. 따라서 측정기를 보유하거나 사용하는 자는 전후 교정 성적서의 데이터 비교, 점검 표준 등을 활용한 측정데이터의 경향분석(Trend Analysis) 등을 통해 최적주기를 결정하여 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 초음파 유량계의 경우 표준교정절차에 따라서 교정해야 하며, 교정성적서에 초음파 유량계의 불확도를 표현해야 한다.

산업계에서 많이 사용되고 있는 초음파 유량계의 교정이 법제화 되어 있음에도 불구하고 최근 광범위한 분야에서 많이 사용되고 있는 ADCP 경우는, 현재 국가측정표준이 확립되지 않았고 표준교정절차가 개발되지 않았기 때문에 교정을 못하고 있을 뿐이지, ADCP 교정의 필요성에 대해 의심할 여지가 없다.

정도관리계획 수립의 필요성

자료의 품질 향상 및 유지 등을 위해서 정도관리계획 수립은 필수적이다. ADCP는 일반적으로 특정 지점에 ADCP를 설치하여 유속측정을 하는 경우(Fixed-Mounted ADCP: FM ADCP)와 배에 ADCP를 장착하여 유속을 측정하는(Vessel-Mounted ADCP: VM ADCP) 경우 2가지가 있다. 2가지 경우에 따라서 정도관리계획이 세부적으로 달라지겠지만 기본적으로 유속 관측을 위한 ADCP의 정도관리계획 수립을 위한 가이드로써 현재 VM ADCP에 관해 발표된 문헌들을 참고할 수 있다(Firing 1991; Firing and Hummon 2010). 본 논문에서는 해외 기관의 ADCP 정도관리 현황을 살펴보고 국내 ADCP 정도관리계획 수립의 필요성에 대해 논의한다.

해외 ADCP 정도관리 현황

미국 USGS(U.S Geological Survey)는 ADCP 사용에 대한 여러 가지 정도관리계획(Quality-Assurance Plan) 문서를 발표했으며(USGS 2005), 이 문서들에 의해서 USGS 내 모든 ADCP는 정도관리를 받고 있다. 이 문서들은 USGS의 OSW(Office of Surface Water Hydroacoustics)에 의해서 개발되었으며 OSW는 ADCP 대한 정도관리 절차, 장비의 교정 및 자료의 검증, 장비 및 소프트웨어 개발, 장비 사용에 대한 교육 프로그램 개발 및 지원, 사용자 그룹 운영을 통한 정보 공유 뿐만 아니라 다른 기관 및 단체와의 ADCP에 관련된 업무에 있어서 USGS의 대표성을 띄고 있다. 정도관리계획 측면에서, 장비의 사용에 대한 표준운영절차서(SOP: Standard Operating Procedure)가 매우 중요하다. USGS 뿐만 아니라, Department of ecology state of washington에서는 ADCP 장비 사용에 대한 SOP(Albertson 2009) 뿐만 아니라 여러 가지 장비 사용에 대한 SOP를 잘 갖추고 있다.

최근 한국해양연구원 기기검교정·분석센터에서는 원내 기·장비 사용자 협의회를 구성하여 ADCP를 비롯해 원내에서 대표적으로 많이 사용되고 있는 장비에 대한 SOP 초안을 작성하였다. 현재 이 작성된 SOP 초안에 대한 수정 및 보완작업 중에 있으며 향후 원내 장비 사용자들에게 SOP를 배포하여 원내에서 생산되는 자료의 품질 향상 및 유지 등 정도관리계획 수립을 위한 가이드를 제시할 예정이다. 이런 정도관리계획 수립에 대한 움직임은 국내 해양자료의 품질 향상 및 유지를 위해서 필수적으로 국내 해양관련 기관, 대학 및 산업체 등에서 함께 이루어져야 한다.

3. ADCP 교정 시설 및 현황

국내

현재 국내에서는 프로펠러형 방식의 기계식 유속계(mechanical current meter)와 전자식 유속계(electromagnetic

current meter), 그리고 ADCP 등 모든 유속계를 교정할 수 있는 시설이나 교정기관이 없다. 단지 기계식 유속계와 전자식 유속계에 대한 검정업무를 한국건설기술연구원에서 수행중에 있다. 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 산하 하천해양항만연구실에서는 720 m^2 (217평)의 유속계 검정실험장을 유지관리하고 있으며(Fig. 4), 0.05~5.0 m/sec의 측정범위의 유속계에 대해 검정 서비스를 제공한다. 유속계 검정 처리기간은 7일, 시험기간은 동절기 결빙에 따른 업무 중단으로 인해 3월~11월에만 실시한다.

국외

일본의 유속계 교정 시설

일본은 PWRI(Public Works Research Institute)에 유속계 교정 시설을 갖추고 있다(Fig. 5와 Table 1). 이 PWRI 소속의 Hydrologic Engineering Research Team에서 기계식 유속계와 전자식 유속계에 대한 교정을 실시하고 있다.

일본은 1933년 처음으로 Akabane 지역에 위치한 PWRI에 유속계 교정시설을 설립하였다. 그 이후 1963년에 새로운 교정시설 개발을 하였고, 1979년에는 현재 PWRI가 위치한 Tsukuba로 이동하여 새롭게 교정시설을 구축하였으며, 2001년부터는 PWRI의 교정시설을 정부연구소 뿐만 아니라 민간 기업도 사용할 수 있게 되었다. 2004년 이후부터는 현재의 교정시설을 유지하고 있다. Fig. 6에 일본의 유속계 교정 시설의 변화 모습을 볼 수 있다.

일본에서 유속계 교정 시설이 구축된 이후 현재까지의 유속계 교정 현황을 살펴보면(Fig. 7), 기계식 유속계와 전자식 유속계가 많이 사용되었던 과거 1970년대에서 1980년대 말까지만 하더라도 연간 교정횟수가 평균 300대 정도였지만, ADCP의 사용이 급증함에 따라 연간 교정횟수가 1990년대 이후로 꾸준히 감소하는 경향을 보인다. 2000년대 이후로는 연간 교정횟수가 급격히 감소하였으며, 2008년에 이르러는 정부연구소의 경우 거의 연간

Fig. 4. Current meter verification facility of KICT (Korea Institute of construction technology)

Fig. 5. Outline drawing of PWRI current meter calibration facility

Table 1. Specification of PWRI current meter calibration facility

Dimension of a towing car	width 3 m, length 4.1 m, height 3.1 m
Weight of a towing car	4303 kg
Dimension of a towing tank	width 2 m, length 175 m, depth 1.6 m
Driving range of a towing car	155.5 m
Calibration speed (range)	0.01~6 m/s
Driving system	electromagnetic clutch
Control technique	vector Inverter
Electronic motor	At high speed : 0.5~6 m/s (inverter motor 22 kW) At low speed : 0.01~0.5 m/s (inverter motor 5.5 kW)
Speed detection method	speed control with encoder (0.01 mm/pulse)
Time correction method	frequency correction with criterion communicator

10대 미만의 유속계를 교정하고 있다. 일본에는 현재 ADCP를 교정하기 위한 시설이 구축되어 있지 않으며, ADCP 교정을 위해서는 전적으로 제조사에 의존하고 있는 실정이다.

미국의 유속계 교정 시설

US NAVY : DTMB(David Taylor Model Basin)

미국에서는 기계식 유속계, 전자식 유속계, ADCP 등의 모든 유속계를 교정할 수 있는 DTMB(David Taylor Model Basin)이라는 이름의 교정시설을 갖추고 있다(Fig. 8). 이 시설은 1938년 메릴랜드(Maryland) 주에 설립되었으며 미 해군 소속의 시설이다. 현재 미국 NOAA에서 사용되는 모든 ADCP를 이 시설에서 교정하고 있다(Shih et al. 2000). DTMB에는 Shallow Water Basin(1번 예인수레), Deep Water Basin(2번 예인수레), High Speed Basin(4, 5, 6번 예인수레) 총 3개의 예인 수조가 있다. 이 중 유속계 교정은 High Speed Basin을 제외한 Shallow Water Basin과 Deep Water Basin에서 실시하고 있다. Shallow Water

Fig. 6. History of PWRI current meters calibration facility

Fig. 7. Annual numbers of current meter calibration at PWRI

Fig. 8. US NAVY DTMB (David Talyor Model Basin) calibration facility

Table 2. Specification of DTMB current meter calibration facility

	Shallow Water Basin		Deep Water Basin
	Deep-Water	width 15.5 m, length 271 m, depth 6.7 m	
	Shallow-Water	width 15.5 m, length 92.3 m, depth 3 m	
	Turning Basin	average width 13.7 m, average radius 14.6 m	
Maximum towing speed	9.3 m/s		10.3 m/s
Uncertainty	± 0.15 cm/s

Fig. 9. Outline drawing of DTMB current meter calibration facility (a) Shallow Water Basin (b) Deep Water Basin

Fig. 10. USGS Hydrologic Instrumentation Facility (a) (left) Towing Tank (b) (right) Verification for the acoustic echo signal intensity

Basin은 Deep-Water, Shallow-Water, Turning Basin의 총 3가지 구역으로 나뉘어져 있다. 각 예인 수조의 규모는 Table 2와 Fig. 9에 나와 있다.

USGS (U.S Geological Survey) : Hydrologic Instrumentation Facility

미국 USGS에서는 Hydrologic Instrumentation Facility

라는 이름의 교정시설에서 자체적으로 ADCP를 교정하고 있다(Fig. 10a). 이 교정시설에서 기계식 유속계, 전자식 유속계, ADCP를 교정하고 있으며 교정시설의 규모는 폭 3.7 m, 길이 137 m, 깊이 3.7 m로 DTMB에 비해 폭이 좁고 깊이도 얕다. 이곳에서는 ADCP 유속 교정 뿐만 아니라 석회석 가루를 이용하여 ADCP의 초음파 에코 신호의 세기를 검정하고 있다(Fig. 10b).

4. 예인대차를 이용한 ADCP 교정

ADCP 교정시설의 부재 및 시설 설립의 어려움으로 인해 ADCP의 교정은 주로 제조사에 의해서 수행되고 있다. 2010년 11월 9일 한국해양연구원 기기검교정·분석센터에서 개최된 제16차 정례세미나(ADCP developments-Self Contained, Moored, Vessel Mounted, and Special Application)의 발표자인 Teledyne RD Instruments의 담당 이사 Ron Hippe와의 면담을 통해 현재 ADCP 제조사에서도 예인대차를 이용하여 ADCP 유속 교정을 하고 있음을 확인하였다.

교정의 어려움으로 인해, ADCP 사용자들은 주로 ADCP 자료의 검증을 위해서 기계식유속계와 ADCP를 상호비교해왔다(김과 최 2009; 해양수산부 2005). 이들 말고도 이 논문에서 인용하지 않은 다른 연구자들에 의해서 수행된 많은 상호비교 시험들이 있다. 하지만 이 현장 상호비교시험은 비용이 많이 들고 실험실에서처럼 좋은 신뢰성의 확보할 수 없을 뿐만 아니라 기계식유속계가 상대적으로 불확도가 클 경우 비교 기준으로써 적합하지 않다는 문제점이 있다.

수년 동안 기계식 유속계 및 전자식 유속계를 교정하는 방법으로 예인대차를 이용한 방법이 많이 사용되어왔다. 예인대차가 설치된 수조에서의 이들 유속계의 교정에 관한 실험 및 연구가 많이 진행되어 왔고 이 예인대차 시설의 사용에 관한 전문 지식과 경험들이 축적되었다(ISO/DIS 2007). 연구 결과 예인대차를 이용하여서 기계식 유속계를 교정하는 것이 매우 신뢰성 있는 교정 방법임을 알게 되었다(ISO/DIS 2007). 그러므로 ADCP의 교정에 있어서도 예인대차를 이용하는 방법이 시도되었다(Appell et al. 1988; Shih et al. 2000; Oberg 2002). 본 논문에서는 미국 US NAVY의 DTMB 시설을 이용하여 Teledyne RDI ADCP(600 kHz, 120 kHz)와 SonTek ADP(500 kHz, 1500 kHz)의 교정 결과(Shih et al. 2000)를 바탕으로 예인대차를 이용한 ADCP 교정 방법 및 그 한계점에 대해 살펴본다.

예인대차를 이용한 ADCP 교정 방법

- 교정항목: 속도
- 측정 범위: 5 cm/s~2 m/s
- 교정방법 및 교정기기: 예인수조에서 예인대차(기준) 속도와 비교교정
- 예인대차 불확도(속도): ± 0.15 cm/s(미국 NIST에서 소급)
- 교정 장소: DTMB의 Shallow Water Basin(Deep-Water), Deep Water Basin
- 교정 대상 : Teledyne RDI ADCP 11대(600 kHz 7대, 1200 kHz 4대)

SonTek ADP 17대(500 kHz 3대, 1500 kHz 14대)

세부 교정 절차

- 1) 컴퍼스 heading, pitch, roll 값을 일정한 값으로 고정한다.
- 2) 예인대차에 ADCP 장착, 트랜스듀서(transducer)를 약 0.5 m 입수시킨다.
- 3) 수조에 석회석 가루를 넣는다.
 - 석회석 가루 입자의 크기는 약 $55 \mu\text{m}$ 로 2 봉지(1 봉지에 22.68 kg)를 넣는다.
 - 석회석 가루가 예인영역(거리 150 m 정도)에 잘 분산되도록 넣는다.
- 4) 예인대차를 0.05 m/s~2 m/s로 앞쪽과 뒤쪽 방향으로 2번씩 움직여서 ADCP의 속도를 측정한다. 예인대차의 속도와 ADCP의 속도를 PC에 동시에 기록한다. 2번씩 움직이는 이유는 수조내에 존재할지도 모르는 유속을 없애주기 위해서이다.
- 5) 예인대차와 유속계의 평균속도 차이와 표준편차를 분석한다.
- 6) 불확도를 계산한다.

교정 결과

- 1) ADP 1500 kHz의 유속 측정 능력이 ADCP 600 kHz와 1200 kHz와 대등했다. ADP 1500 kHz, ADCP 600 kHz, 1200 kHz의 정확도와 표준 편차가 제조사에서 제공한 스펙과 흡사했다. 예인대차의 속도와 비교해 보았을 때, ADCP 1200 kHz의 표준 편차 값과 평균 속도의 차이가 가장 작게 나타난 반면, ADP 1500 kHz와 ADCP 600 kHz는 거의 비슷했다. ADP 500 kHz는 평균속도의 차이와 표준편차 값이 가장 크게 나타났지만 정확도와 표준편차는 제조사에서 제공하는 스펙과 비슷하게 가까웠다.
- 2) ADCP보다는 ADP간의 유속측정 결과가 차이가 컸다.
- 3) 모든 ADCP와 ADP가 저주파(600 kHz와 500 kHz)에서 bin간의 속도 변동이 심했다.
- 4) 반복성을 측정해 본 결과 교정환경이 안정적임을 밝혔으며 ADCP와 ADP의 반복성이 뛰어났다.
- 5) Bin 1과 2에서 유속 측정 시 큰 변동이 관찰되었다. 유속계 트랜스듀서의 헤더와 하우징에 의한 turbulence가 잠재적인 원인이다.
- 6) 수레의 견인 속도가 0일 때, ADCP 600 kHz와 1200 kHz는 대략 0.5 cm/s~1 cm/s를 ADP 1500 kHz의 경우는 1 cm/s~2 cm/s를 ADP 500 kHz의 경우는 6 cm/s를 나타냈다. 이 모두 제조사에서 제공하는 제로 오프셋(zero offset) 스펙보다 큰 값이었다.

불확도 및 에러 요인

1) 불확도 요인

- * 트랜스듀서 디자인 : 트랜스듀서 빔 각도(빔 각도가 크면 측정결과의 표준편차는 작아지며 정확도가 높아진다), 빔 폭, 전송 펄스 길이, 전송 파워와 주파수
- * 트랜스듀서 셋업 특성 : depth cell size, ping rate, number of ping per ensemble
- * 외부 요인 : flow turbulence, 염분 및 온도의 변화(수조안에서의 아주 큰 변화는 없다)
- * 데이터 프로세싱 기술 : narrowband & broadband processing 등

2) 에러 요인

- * ADCP 하드웨어 자체의 systematic error(bias) : 트랜스듀서 beam misalignment로 인한 bias는 약 $\pm 1\%$ 이다.
- * 교정 수행시 발생된 에러 : ADCP 설치 위치 에러, 예인대차 속도 에러, 트랜스듀서 헤드의 blockage와 ADCP 하우징으로부터 발생한 turbulence, 후방산란 물질의 불균일한 분포 등 외부로부터의 랜덤 에러

5. 예인대차를 이용한 ADCP 교정 방법의 한계점

예인대차를 이용한 교정방법은 매우 정확한 기준 속도를 제시할 수 있다는 장점이 있다. 또 예인대차 속도를 매우 정교하게 측정할 수 있으며, 미국 NIST(National Institute of Standards)로부터 소급성(traceability)을 유지하여 이 예인대차를 기준기로서 삼을 수 있다. 그리고 예인대차의 속도를 실제 현장에서 유속을 측정하는 범위에 아주 가깝게 설정하여 실험할 수 있다. 하지만 실제 현장이 아닌 실내 수조에서 ADCP가 유속을 측정하기 때문에 compass heading, pitch, roll을 일정한 값으로 고정시켜야 하는 단점이 있다. 실제 현장에서는 compass heading의 사용이 필수적이고 pitch와 roll의 값이 가변적이다. 그리고 후방산란 물질이 물속에 분포하고 있지 않아서 인공적으로 후방산란 물질을 필수적으로 넣어줘야 한다. 그런데 이렇게 인공적으로 후방산란 물질을 넣었을 경우, 이 물질이 물속에서 균일하게 분포되지 않을 수 있으며 교정 수행과정 동안 ADCP의 반사 에코 강도(backscattering echo intensity)가 실험실에서는 약 40-60 dB 정도 유지되어야 ADCP가 유속을 측정할 수 있는 환경이 된다. 이에 반해 현장에서는 약 60-90 dB 정도의 강한 에코 강도를 갖는 것으로 나타났다(Appell et al. 1988; Oberg 2002). 또 다른 단점으로는 수조 내 많은 금속 성분 및 양쪽 벽과 바닥에서의 초음파 반사(side-lobe interference)에 대한 고려가 필요하다. 그리고 주변의 전자기장 필드에 의한 간섭

(electromagnetic field interference)으로 인해 ADCP의 heading에 영향을 줄 수도 있다(Shih et al. 2000). 교정 과정 중에 예인대차의 속도가 0일 때, ADCP가 0이 아닌 어느 정도의 유속 값을 나타내는 제로 오프셋 문제도 추후 계속적으로 논의되어야 할 문제이다(Appell et al. 1988).

또한 교정결과 파장이 짧은 고주파(1200 kHz, 1500 kHz) ADCP와 ADP에 비해 상대적으로 파장이 긴 저주파(600 kHz와 500 kHz) ADCP와 ADP가 bin간의 속도 변동이 심한 것으로 보아서 현재 DTMB의 깊이 6.7 m 예인수조는 낮은 깊이로 인해 바닥에서의 초음파 반사 때문에 저주파(38, 75, 150, 300, 600 kHz)를 사용하는 심해용 ADCP의 교정 시설로는 부적합한 것으로 판단된다. 그런데 교정 수행 시 DTMB 예인 수조에 초음파 흡음제를 양쪽 벽과 바닥면에 설치하지 않았기 때문에 깊이가 얕은 수조 바닥에서의 초음파 반사가 교정결과에 가장 큰 영향을 주었을 것으로 생각되며 예인수조 양쪽 벽과 바닥에 초음파 흡음제를 설치하여 저주파 ADCP의 유속 교정을 위한 예인수조의 사용 가능성에 대해서 다시 한 번 논의해 봐야 한다. 흡음제의 경우 파장(주파수)에 따라 흡수율이 다르기 때문에 파장의 크기에 따른 흡음제의 종류 및 크기를 잘 고려해서 설계해야 한다. 그런데 폭 15.5 m, 깊이 6.7 m, 예인거리가 약 150 m 정도 되는 바닥면과 양쪽 벽면에 초음파 흡음제를 설치하는데 드는 비용과 노력 또한 상당히 만만치 않을 것으로 생각된다.

예인대차를 이용한 ADCP 교정은 파장이 짧은 고주파(1200 kHz, 1500 kHz) ADCP의 경우에 적합한 것으로 생각되지만, 관측 수심 깊이가 보통 약 0.6 m~150 m인 저주파(300, 600, 1200 kHz) ADCP 혹은 보통 약 300 m 이상인 심해용 ADCP의 경우에는 현실적으로 예인수조의 깊이가 제한으로 인해 깊은 수심에서의 유속 프로파일 데이터를 얻을 수 없기 때문에 ADCP의 유속 에러 교정은 현장에서 수행할 수 밖에 없다고 생각된다.

실내 수조에서 ADCP를 교정하기 위해서 고려해야 할 위의 여러 가지 어려움들로 인해, 실내가 아닌 필드에서 GPS가 장착된 배를 이용하여 ADCP를 교정하는 방법들이 꾸준히 제안되어 왔다(Joyce 1989; Munchow et al. 1995). 하지만 현장 교정의 경우, 실내의 안정된 환경에서 교정을 하는 것이 아니기 때문에 여러 가지 요인들로 인해 불확도가 커지는 문제점이 있으며, 특히 반복성 및 재현성에 대한 실험이 외부 환경에 의해 불가능 할 수도 있다. 최근 비용절감 차원에서 누구나 손쉽게 현장에서 DGPS를 이용하여 ADCP를 검정하는 방법(USGS 2005)이 제안되었다. 이 방법은 미국 USGS에서 제안한 방법인데 ADCP로 bottom-tracking을 하여 측정된 이동거리와 DGPS를 이용하여 측정된 배가 이동한 거리의 비율을 계산하여 beam alignment 에러를 계산한다. Teledyne RDI

ADCP의 경우, 이 비율이 0.995 이하인 경우는 negative bias(-0.5% 에러)를 나타내고 1.003 이상인 경우는 positive bias(+0.3% 에러)로 간주된다. 교정이 잘된 Teledyne RDI ADCP는 반드시 대략 0.998 또는 0.999의 비율을 나타낸다고 한다(Oberg 2002). 이 방법은 미국 USGS에서 ADCP의 정도관리계획을 위한 공식적인 프로토콜로 지정되었다. 하지만 이 방법은 단순히 ADCP 성능에 대한 검정일 뿐이지 교정이 아니며, 현장 교정을 위해서 유속이 상대적으로 작고 파동이 거의 없는 이상적인 작은 호수에서 수행되어야 하기 때문에 해양이나 대양에서는 현장 실험이 불가능하며, 해양이나 대양에서도 유속을 측정하는 ADCP의 full capability를 이런 현장 환경에서 모두 다 테스트할 수는 없다.

6. 결론 및 토의

본 논문에서는 현재 하천, 연안, 해양 등 넓은 범위에서 유속, 유량, 수심 관측에 널리 사용되고 있는 ADCP 교정 및 정도관리계획 수립의 필요성 그리고 국내 및 국외의 ADCP 교정 시설 및 현황에 대해 기술하였다. 현재 국가 측정표준이 확립되어 있지 않았고 표준교정절차가 개발되지 않았기 때문에 현재로서는 교정을 못하고 있을 뿐이지, ADCP 교정의 필요성에 대해 의심할 여지가 없으며 미국 USGS의 OSW(Office of Surface Water Hydroacoustics)와 Department of ecology state of washington의 사례에서 보듯이 해외에서는 이미 ADCP의 정도관리에 대한 노력이 끊임없이 이루어졌으며 국내에서도 정도관리계획 수립에 대한 필요성이 부각되고 있다.

한국의 경우 현재 기계식 유속계와 전자식 유속계에 대한 검정만이 가능하고 일본의 경우는 기계식 유속계와 전자식 유속계에 대한 검정과 교정을 할 수 있으나 한국과 일본 모두 ADCP는 교정할 수 없는 실정이며 교정시설 구축에 대한 노력이 필요하다. 미국의 경우 전 세계적으로 가장 유명한 ADCP 제조회사인 Teledyne RD Instruments 및 US NAVY, USGS와 같은 해양관련 연구기관에서 ADCP를 교정할 수 있는 교정시설을 갖추고 있으며 예인대차를 이용하여 ADCP를 교정하고 있다.

본 논문에서 살펴본 예인대차를 이용한 실내에서의 ADCP 교정은 파장이 짧은 고주파(1200 kHz, 1500 kHz) ADCP에 적합하며 저주파(300, 600, 1200 kHz) ADCP 혹은 심해용 ADCP 유속 교정은 현장에서 해야 한다. 그리고 예인수조 바닥과 양쪽 벽면에 초음파 흡음제를 설치하여 고주파에서 저주파 이르는 다양한 주파수를 사용하는 ADCP의 유속 교정의 가능성을 검증해 봐야 할 것이 추후 과제로 남았다. 그리고 예인대차를 이용한 ADCP 교정시설의 규격을 설계할 때에 기계식 유속계 교정시설 설계

시 고려해야 할 아래의 내용(ISO/DIS 3455)을 동일하게 고려하여 그 규격이 설계되어야 하며 무엇보다도 ADCP 장비 종류와 그 주파수 특성을 잘 고려하여 예인수조의 길이, 깊이, 폭을 설계해야 하기 때문에 규격 설계를 위한 다양한 실험과 연구가 필요하다. 그리고 무엇보다도 향후 ADCP 표준교정절차 수립 및 시설 구축에 관한 연구를 위해 제조사와의 긴밀한 협력이 필요하다.

예인대차의 가속, 안정, 측정, 브레이크 구간을 잘 고려하여 예인수조의 길이를 정해야 하며 가속구간과 브레이크 구간의 길이는 예인대차의 디자인에 따라 달라진다. 최대 가속과 감속 그리고 최대 속도는 최대 화물중량에서 가능하며 감속구간의 길이를 결정할 때 반드시 수레의 안전 요구사항이 고려되어야 한다. 측정 구간의 길이는 교정 에러(시간, 거리, 유속계의 부정확한 측정)가 어떠한 속도에서든 요구된 한계치를 넘어서지 않도록 정해져야 한다. 그러므로 요구되는 수조의 길이는 교정 대상 유속계의 유형과 수레의 유형 그리고 유속계가 신호를 출력 및 전송하는 방법에 따라서 달라진다. 예를 들어 기계식 유속계를 교정하는 경우, 신뢰도 95% 수준에서 시간 측정 상에 발생할 수 있는 에러를 0.1%로 제한하기 위해서는 수레가 움직인 거리와 카운트된 프로펠러의 회전수를 측정하는 시간은 0.01초로 정확해야 한다. 이 시간 측정은 수레의 최대 속도에서 최소 10초 동안 수행되어야 한다. 만약 최대 속도가 6 m/s라면, 수조의 측정 구간은 60 m가 되어야 한다. 이때 수조의 총 길이는 대략 100 m이고 이중 가속 및 안정화구간이 20 m 그리고 감속 구간이 20 m이다.

수조의 깊이가 실험 결과에 영향을 주는 것을 무시할 수 없는데, 특히 surface wave의 진행 속도와 수레를 이끄는 속도가 일치할 경우이다. 이 surface wave의 속도(critical velocity, V_c 는 아래의 식에서 주어진 수조의 깊이와 연관이 있다. g 는 중력에 의한 가속도 이고 d 는 물의 깊이이다($V_c = \sqrt{gd}$)). 유속계가 물 위를 지나가면서 그리고 유속계의 정지에 의해서 생성된 물마루는 유속계에 대한 물의 침수높이를 증가시켜서 유속계의 상대속도의 감소를 일으키는데 이는 연속방정식(continuity equation)과 연관이 있다. 이러한 현상을 Epper 효과라고 하며, $0.5V_c \sim 1.5V_c$ 속도 범위의 좁은 밴드에서 교정결과에 에러를 일으킨다. Epper 효과의 크기는 유속계의 크기와 정지 장치에 따라 달라지며 그리고 수조의 횡단면 영역과 관계가 있다. 이 Epper 효과는 한 교정 포인트의 측정 불확도의 상당한 에러요인이 된다. 이 에러는 우연오차(random error)가 아닌 계통오차(systematic error)이다. 이 에러는 크기가 작은 유속계를 교정할 때에는 무시가능하다. 그러므로 수조의 깊이는 교정대상 유속계의 크기와 최대 속도 제한치에 맞게 정해져야 한다. 좁은 수조의 경우 Epper 효과가 크게 발생하기 때문에 수조의 폭에 대한 고려는 매

우 중요하다. 수조의 폭에 따라 한꺼번에 동시에 교정할 수 있는 유속계의 숫자가 제한되며 여러 유속계가 물위를 지나간 후에 그 물이 안정되는 시간에 영향을 받는다. 예를 들어 폭 1.83 m, 깊이 1.83 m의 수조안에서 유속계를 교정할 경우 Epper 효과는 대략 4 m/s 이상에서 크게 발생하며 그 크기는 대략 0.3%이다. Epper 효과의 크기는 critical velocity 전과 후에서 감쇠효과를 나타내는데, 그러나 3~5 m/s 사이에서도 그 효과가 감지된다.

본 논문에서 살펴본 예인대차를 이용한 실내에서의 ADCP 교정 및 현장에서의 ADCP 검정 또는 교정은 여러 가지 장단점을 갖고 있으며 가장 합리적인 ADCP 교정 방법에 대한 연구가 지속되어야 한다. 향후 올바른 ADCP 표준교정절차 및 정도관리계획의 수립, 그리고 무엇보다도 간단하면서도 비용절감 효과가 뛰어난 교정 시설의 구축을 위한 논의와 연구가 많은 연구자와 엔지니어를 통해 계속적으로 이루어져야 하며 올바른 ADCP 표준교정절차 수립 및 시설 구축 후 ADCP의 정도관리계획 수립을 위한 제도적 차원의 법제화 또한 수반되어야 한다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본사업인 “해양관측·조사 표준화 확립사업(PE98630)”의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 논문의 심사를 맡아 주신 두 분의 심사 위원께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 국토해양부 (2006) 하천설계기준 및 해설 제 7장 7.4.2 유속계의 검정. <http://www.mltm.go.kr>. Accessed 28 Mar 2006
- 국토해양부 (2009) 수문관측업무규정 훈령 제47호 11조 3항. <http://www.mltm.go.kr>. Accessed 24 Aug 2009
- 김응석, 최현일 (2009) 회전식유속계와 ADCP를 이용한 유속측정의 검증 및 적용. *한국방재학회* 9(3):101-106
- 지식경제부 기술표준원 (2004) 국가교정기관지정제도운영요령 제 41조 측정기기의 교정대상 및 주기. <http://www.kats.go.kr>. Accessed 22 Jul 2004
- 해양수산부 (2005) 해양조사장비 성능검사방안 연구. 국립해양조사원, 11-1520290-000118-01, 93 p
- Albertson S (2009) Standard operating procedures for calibration, preparation, and deployment of teledyne RD instruments acoustic doppler current profilers (ADCPs) © (RDI). http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/qa/docs/ECY_EAP_SOP_050ADCP_v1_0.pdf. Accessed 6 Mar 2010
- Appell G, Gast J, Williams R, Bass PD (1988) Calibration of acoustic dopple current profiles. In: Oceans '88. A partnership of marine interest, baltimore, MD, 31 Oct-2 Nov 1988, pp 346-352
- Firing E (1991) Acoustic doppler current profiling measurements and navigation. WHP office report WHP091-1, WOCE Report, 24 p
- Firing E, Hummon JM (2010) Shipboard ADCP measurements. In: The go-ship repeat hydrography manual: a collection of expert reports and guidelines. IOCCP report no.14 ICPO publication series no.134, pp 1-11
- Gilcoto M, Jones E, Farina-Busto L (2009) Robust estimations of current velocities with four-beam broadband ADCPs. *J Atmos Ocean Tech* 26(12):2642-2654
- ISO/DIS (2007) Hydrometry-Calibration of current meters in straight open tanks. British standards Institute staff, UK, 22 p
- Joyce TM (1989) On in situ “calibration” of shipboard ADCPs*. *J Atmos Ocean Tech* 6:169-172. doi:10.1175/1520-0426(1989)006
- Marsden RF, Gratton Y (1997) A method for correcting vertical velocities measured from a vessel-mounted acoustic doppler current profiler. *J Atmos Ocean Tech* 14(6):1533-1538
- Marsden RF, Ingram RG (2004) Correcting for beam spread in acoustic doppler current profiler measurements. *J Atmos Ocean Tech* 21(9):1491-1498
- Munchow A, Coughran CS, Hendershott MC, Winant CD (1995) Performance and calibration of an acoustic doppler current profiler towed below the surface. *J Atmos Ocean Tech* 12(2):435-444
- Oberg K (2002) In search of easy-to-use methods for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements. In: Wahl TL, Pugh CA, Vermeyen TB (eds) Hydraulic measurements and experimental methods 2002, American Society of Civil Engineers, Estes Park, Colorado, 28 Jul-1 Aug 2002, pp 1-11
- Pollard R, Read J (1989) A method for calibrating shipmounted acoustic doppler profilers and the limitations of gyro compasses. *J Atmos Ocean Tech* 6(6):859-865
- Shih H, Payton C, Sprenke J, Mero T (2000) Towing basin speed calibration of acoustic doppler current profiling instruments. In: Joint conference on water resources engineering and water resources planning and management, ASCE, Reston, VA, 2000, pp 1-10
- TELEDYNE RD INSTRUMENTS (1993) Acoustic doppler current profilers principles of operation: a practical primer. TELEDYNE RD INSTRUMENTS, Technical manual, 56 p
- TELEDYNE RD INSTRUMENTS (2010) ADCP coordinate

transformation : formulas and calculations. TELEDYNE
RD INSTRUMENTS, Technical manual, 32 p

Trump CL, Marmorino GO (1997) Calibrating a gyrocompass
using ADCP and DGPS data. J Atmos Ocean Tech
14(1):211-214

USGS (2005) Quality-assurance plan for discharge measure-
ments using acoustic doppler current profilers. USGS,

U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report
2005-5183, 46 p

Received Feb. 14, 2011

Revised Mar. 7, 2011

Accepted Mar. 29, 2011