

Article

해류 수직구조를 파악하기 위한 LADCP Casting 및 자료처리 방법

김 응 · 전동철* · 신창웅 · 김동국

한국해양연구원 기후·연안재해연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Casting Lowered-ADCP and Data Processing Methods for Configuring Vertical Current Structure

Eung Kim, Dongchull Jeon*, Chang Woong Shin, and Dong Guk Kim

*Climate Change & Coastal Disaster Reserach Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : To understand the vertical structure of ocean currents from raw data observed by lowered-ADCP (LADCP), these data require post-processing. Data were processed using Krahan's version 10.8 processing software based on Matlab. It is estimated the influence of auxiliary data affecting the processed current structure. The bottom-tracked velocities and the GPS information significantly contribute the offset on reference velocities in the bottom layer and barotropic ones in the middle layer, respectively. Good quality data can be obtained when LADCP is least tilted in pitch and roll during observation. *In situ* application of LADCP to the (northward) volume transports of Kuroshio in the East China Sea proved to be 24.8 Sv ($= 1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) in October 2007, and 28.2 Sv in June 2008, respectively. The volume transport is relatively large over the continental slope when compared to the shelf or the deep sea.

Key words : Lowered-ADCP, post data processing, vertical current structure, Kuroshio, East China Sea

1. 서 론

해류의 구조와 변화를 이해하기 위하여 전통적으로 라그랑지 및 오일러 방법으로 해양을 관측하고 있다. 라그랑지 방법은 정확한 좌표 결정을 위한 GPS 기술과 관측 자료를 전송하기 위한 통신 기술의 발달로 인하여 전 세계의 표층 해류 구조를 이해하는데 많은 기술적인 진보가 있었으나, 관측 뜰개가 대부분 해류를 따라 움직이고 해양의 심층에서는 운영하기 어려운 단점이 있다. 오일러 방법은 해류 구조를 파악하고자 하는 대상 역에 고정적으로 장비를 계류하는 것으로, 계류점에 대한 장기 관측을 통하여 해류의 시간적인 변동을 관측할 수 있는 장점은

있으나, 소수의 계류 관측점으로는 공간 해류 구조를 이해하기 어렵고 계류점 구축에 많은 경비가 소요되는 단점이 있다. 이 문제로 인하여 표층을 제외한 중·저층의 수직적인 해류 구조를 정확히 파악하는 것은 현재까지 기술적인 한계가 있다.

최근에 중·저층 해류 관측의 한계를 극복하기 위하여 Lowered-Acoustic Doppler Current Profiler(LADCP)를 사용하여 전 수층에 대한 수직 유속구조를 파악할 수 있는 기술이 개발되었다. LADCP를 이용한 최초의 관측은 1989년 세계대양순환실험(WOCE)의 'Hawaii Ocean Time series' 프로그램에서 이루어졌으며(Firing 1998), LADCP 관측과 자료 분석에 관한 다양한 연구들이 진행되면서(Fisher and Visbeck 1993; Torres et al. 2000; Polzin et al. 2002; Visbeck 2002) 자료처리 과정이 점차

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

체계화 되었다. Komaki and Kawabe (2008)는 자료처리 과정 중에서 유속의 수직전단(shear)를 보정하기 위하여 음과강도와 유속전단 오차 사이의 상관성을 활용하여 Visbeck (2002)의 자료 처리법과 비교해 사실적인 해류 구조를 얻는 방법을 제안하였다. LADCP 활용을 통하여 북대서양심층수 및 남대서양수의 수송량에 대한 직접관측 (Rhein et al. 2005; Casal et al. 2006)과 전 지구적 대양심층수 혼합(Kune et al. 2006) 및 해산 주변의 해수순환 (Thurnherr et al. 2008)에 관한 연구가 진행되었으며, 고정점 연속 관측에 의해 내부조석파 및 수직혼합 연구(Park et al. 2008) 등이 이루어 졌다.

우리나라에서도 LADCP 활용이 점차 증가하고 있으나, LADCP 자료처리의 어려움 때문에 관측 자료를 분석하여 해류구조를 이해하는데 한계가 있어 실질적으로 이를 활용한 연구 결과는 거의 전무하다. 따라서 본 논문에서는 LADCP 자료의 획득 및 자료처리 프로그램과 LADCP 자료처리시 보조 자료가 최종 유속구조에 미치는

영향을 평가 기술하고, LADCP를 현장관측에 활용하여 동중국해에서 쿠로시오를 관측한 결과를 기술하고, 관측 경험으로부터 얻은 LADCP 현장 운용시 고려할 사항을 기술하고자 한다.

2. 자료 및 방법

현장관측 자료

현장관측 사례는 동중국해 쿠로시오 단면에서 2007년 10월 13일~14일, 그리고 2008년 6월 8일~10일 사이에 300 kHz LADCP 2대를 CTD와 함께 관측한 정점 자료를 이용하였다(Fig. 1). LADCP 중 1대(master LADCP)는 관측부가 아래로 향하도록 채수기 틀에 장착하고, 다른 1대(slave LADCP)는 위로 향하도록 장착하였다. LADCP 2대의 관측 간격은 10 m로 하고, 총 관측 수층 갯수는 LADCP 당 20개 층으로 설정하여 총 400 m(상·하방 각 200 m)의 범위 내에서 실제 관측 최대 범위인 약 320 m

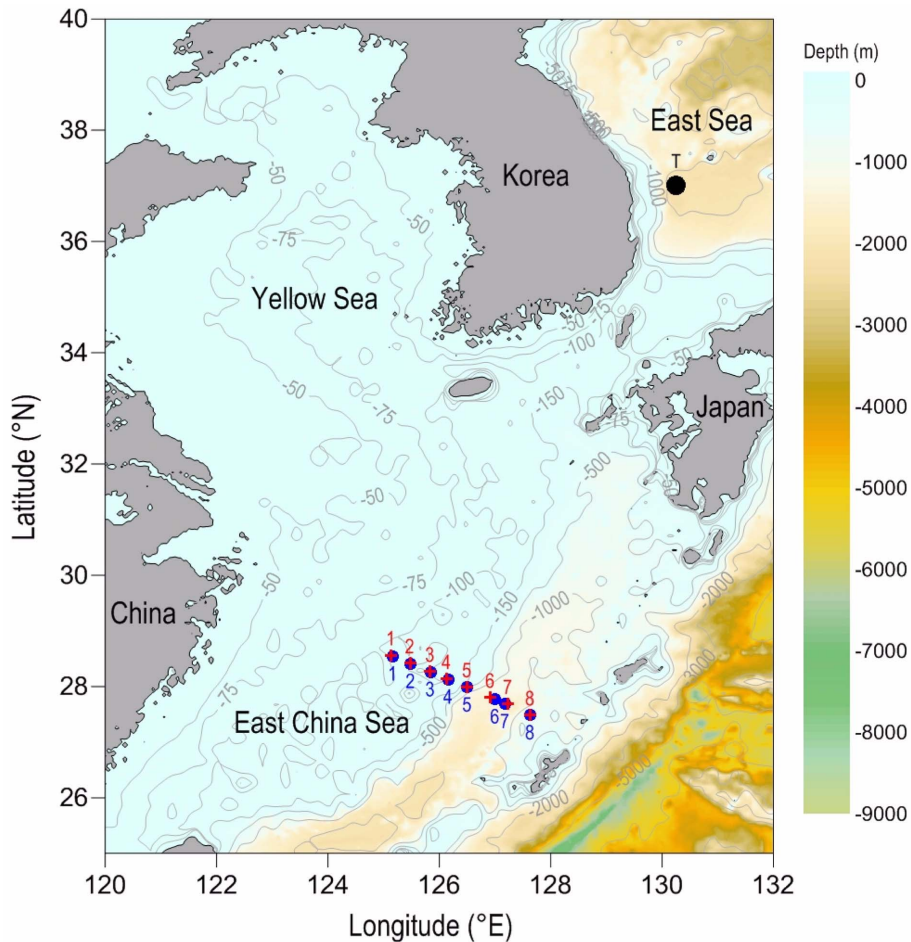


Fig. 1. Survey area and bottom topography in the Korea marginal seas. The black circle in the East Sea represents the test station at October 30, 2008. The blue circles represent the CTD/LADCP stations in October 2007, and the red crosses represent the stations in October 2008

이내를 관측할 수 있도록 구성하였다.

LADCP 자료처리를 이용되는 보조 자료가 자료처리 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2008년 10월 30일에 동해(130°15'E, 36°59'N)에서 동일 장비로 전 층을 관측한 자료를 분석하였다(Fig. 1).

LADCP 자료처리 프로그램

LADCP 자료처리 프로그램은 인터넷에 공개된 콜롬비아 대학교의 Andreas Thurnherr 팀의 버전 IX-6(Thurnherr 2005) 또는 수직 유속구조를 계산하기 위하여 하와이대학교의 Eric Firing이 개발한 전단방법(shear method)을 추가한 Gerd Krahnman 버전 10.8(Krahmann 2009)을 각각 다운받아 사용할 수 있다. 본 연구에서는 Gerd Krahnman 버전 10.8을 사용하였다. Krahnman LADCP 자료처리 프로그램은 기본적으로 자료처리 프로시저들이 포함된 'm' 폴더와 작업 폴더를 생성하기 위한 'create_cruise.m' 파일로 이루어져 있다(Fig. 2). 사용자들은 프로그램에 포함된

'create_cruise.m'을 실행하여 Fig. 2의 'Work' 및 하위 디렉터리를 생성하게 된다. 폴더 'm'에 있는 각종 자료처리 프로시저는 해양 관련 수식 또는 자료를 읽기 위한 프로그램들로 구성되어 있으며, 사용자가 특별한 경우를 제외하고는 이 폴더내의 프로시저들을 수정할 필요는 없다.

LADCP 자료처리 과정을 수행하기 전, 현장관측 자료들은 Fig. 2의 'Work'-'data'의 하위 폴더인 'raw_ctdprof'에 CTD 관측 수온 · 염분 · 압력 자료, 'raw_ctdtime'에 CTD 관측 시간, 'raw_nav'에 GPS 위치 정보, 'raw_sadcp'에 선박 장착 ADCP(ship-mounted ADCP; SADCP) 자료, 그리고 'raw_ladcp'에 LADCP 관측 자료를 각각 복사한다. 이때, 폴더 'raw_ctdprof', 'raw_ctdtime' 그리고 'raw_nav' 내의 자료는 모두 CTD deck unit 장치로부터 하나의 CTD 자료로 취합되어 생산된 것이기 때문에 세 개의 자료 폴더중 하나만 사용해도 된다. 이 경우에는 CTD 자료, GPS 정보, 그리고 관측시간과 관련된 'prep*.m' 내의 모든 자료 위치를 하나로 같게 설정하면 된다. CTD 자료는

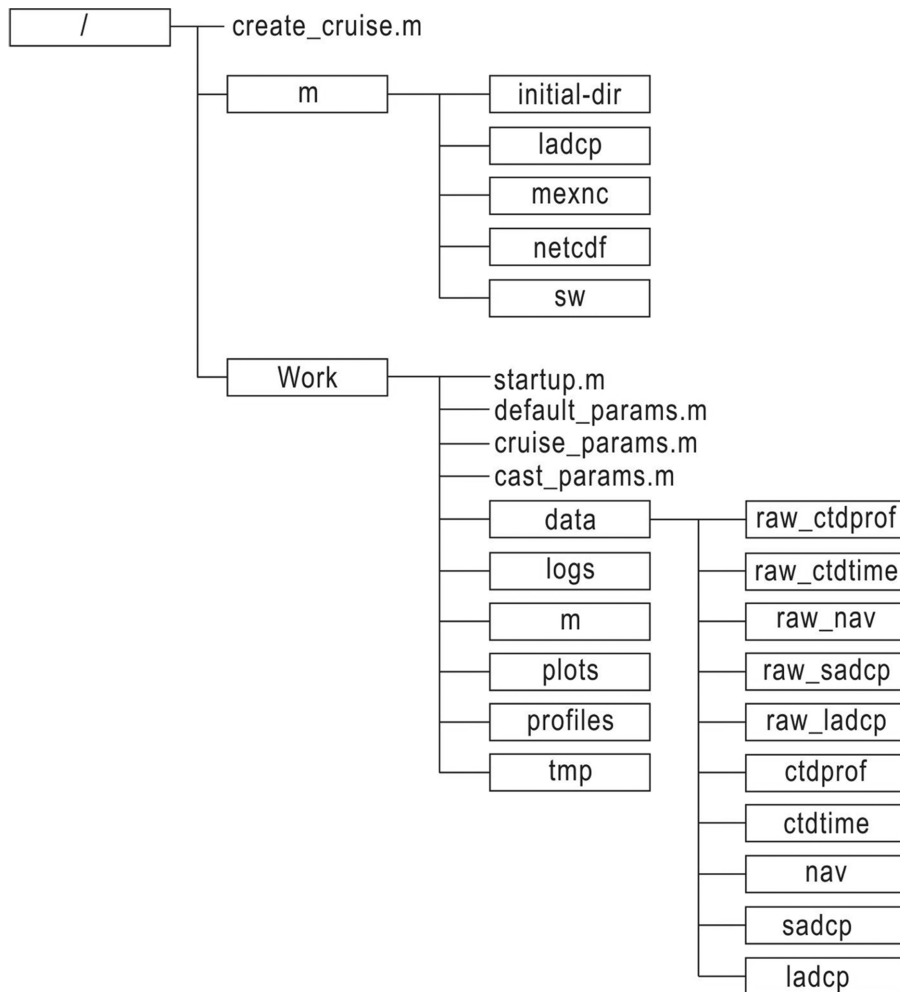


Fig. 2. Directory structure of the data processing software, based on Matlab. Each box represents a separate folder

Sea-Bird Electronics, Inc의 ‘SBE Data processing’ 소프트웨어를 사용하여 LADCP의 관측 시간과 함께 1초 간격으로 샘플하고, 자료의 헤더(header)가 반드시 포함되게 한다. 자료 헤더의 정보는 LADCP 자료 분석에 필요한 CTD 자료 내의 각각의 변수(시간, 위치, 수온, 염분, 압력) 위치에 대한 열(column) 정보를 가지고 있기 때문이다. 그리고 구버전의 ‘SBE Data processing’ 소프트웨어로 처리한 CTD 자료 헤더부는 GPS 위치를 수신한 시간부분(NMEA UTC (Time))이 연월일이 표시 되지 않는 문제점

이 있다. 이 경우에는 연월일을 분석자가 인위적으로 추가해 주어야 한다.

SADCP와 LADCP에 대한 초기 자료를 읽어 들이기 위해서 ‘Work’-‘m’ 폴더에 위치한 ‘prepsadcp.m’와 ‘prepladcp.m’의 파일 위치 변수를 수정한다. LADCP 자료는 관측된 원자료를 그대로 사용하며, SADCP 자료는 파일의 양이 크기 때문에 Teledyne RD Instruments의 ‘WinAdcp’ 소프트웨어를 사용하여 각 정점별로 샘플링하는 것이 좋다. 이때, 자료를 matlab 포맷으로 저장할 하

Table 1. Main parameters in the LADCP data processing used in this study

Parameter	Content	Value
params.time_start	set start time of data	[]
params.time_end	set end time of data	[]
params.poss	set position of the start point	[0 0 0 0]*nan
params.pose	set position of the end point	[0 0 0 0]*nan
params.cut	restrict time range to profile and disregard data close to surface	0
params.avdz	set the depth interval between adjacent super-ensembles	-1
params.btrk_mode	option to get bottom track data	3
params.btrk_used	set to be used params.btrk_mode	1 or 0
params.btrk_ts	dB to detect bottom above bin1 level	30
params.btrk_wlim	maximum allowed difference between reference layer W and W bottom track	0.05
params.magdev	magnetic deviation in degree	0
params.fix_compass	compass manipulation	0
params.up2down	resample the uplooker onto the downlooker	0
params.rotup2down	adjust compass to best match	0
params.offsetup2down	offset correction, 1 remove velocity offset between up and down looking ADCP	1 or 0
params.elim	maximum value for abs(V-error) velocity	0.1
params.vlim	maximum value for horizontal velocity	1.5
params.pglim	minimum value for %-good	0
params.wlim	maximum value for w difference between the mean w and actual	0.1
params.tiltmax	flag data with large tilt or tilt differences as bad	[30 4]
params.timoff	fix time of the adcp in days	0
params.trusted_i	set bin number for the best W to compute depth of the ADCP	[2 3]
params.ambiguity	set ambiguity velocity used (m/s)	1.5
ps.shear	process data using shear based method	1
ps.std_weight	decide how to weigh data	0
ps.barofac	weight for the barotropic constraint	1
ps.botfac	weight for the bottom track constraint	1
ps.sadcpfac	weight for sadcp data	1
ps.down_up	process up and down cast separately	1
ps.smooofac	smoothing of the final profile	0.05
params.use_sadcp	use SADCP data	1 or 0
ps.shear_std	average over data within how many standard deviations	2
ps.shear_weightmin	minimum weight for shear	0.1
ps.up_dn_looker	restrict inversion to one instrument	1
ps.velerr	super ensemble velocity error	0.02
ps.solve	solve the inverse	1
params.edit_mask_dn_bins	set list of bins to always remove from master data	[1]
params.edit_mask_up_bins	set list of bins to always remove from slave data	[1]

고, 각각의 자료 변수명을 SADCPC 자료를 읽는 프로시저 내의 변수명과 일치시키는 것이 중요하다. 이 경우는 SADCPC 자료를 'Work'-'data'의 하위 폴더인 'SADCPC' 폴더에 저장하여 바로 사용할 수 있다.

주프로그램 내에서 사용되는 각종 변수에 대한 설정 값은 'default_params.m'에서 제어를 하며, 특정한 관측시간 및 정점에서 일시적으로 필요한 설정 값은 'cruise_params.m'과 'cast_params.m'에서 각각 설정한다. 설정된 변수 값들은 'default_params.m', 'cruise_params.m', 그리고 'cast_params.m' 순서로 주프로그램 스크립트에 의해 실행된다. 자료처리를 위하여 프로그램에서 사용되는 주요 변수들과 그에 따라 본 연구에서 사용한 설정 값은 Table 1과 같고, 사용자는 관측 환경에 맞게 변수들의 설정 값을 조정하여 최적의 결과를 얻을 수 있다. 기타 모든 변수에 대한 설명들은 'default_params.m' 내에 주석으로 기술되어 있으므로 변수값 조정시 참조할 수 있다.

LADCP 자료처리 프로그램의 주스크립트 파일은 'process_cast.m'이다. 이 스크립트 파일은 앞에서 기술한 각종 변수 설정 값들을 읽어 들이는 '***_params.m'과 자료를 준비하는 'prep*.m'이 실행된 후, 자료를 처리하기 위한 프로시저들이 실행되고, 그 결과를 저장하는 부분들로 구성되어 있다. 이 주스크립트 파일을 matlab에서 실행하면, 자료처리 프로그램이 수행되는 동안 현장관측 결과의 matlab 포맷의 자료가 작업 폴더 내에 각각 저장되어지고, 자료처리 프로그램을 통하여 계산된 결과는 'plot'과 'profiles'에 최종적으로 저장된다. 폴더 'plot'에는 자료처리 과정 동안의 순차적 결과들이 이미지로 저장되며, 이 결과를 가지고 자료처리 동안의 특성을 파악할 수 있다. 계산된 유속의 수직구조는 폴더 'profiles'에 전 층 유속 결과가 텍스트 형태로 '***.lad' 파일에 저장되고 바닥케적 자료는 '***.bot' 파일로 저장된다. 주스크립트 파일을 수행하기 전에 'work'에 있는 'startup.m'을 실행하여 matlab의 경로를 먼저 설정한다.

3. 결과 및 토의

LADCP 자료처리를 위한 보조 자료 영향 평가

LADCP로부터 관측된 자료를 효과적으로 분석하여 최적의 결과를 얻기 위해서는 다양한 정보가 추가적으로 요구된다. 정보들은 자료들 간의 동기화된 시간, 해수 물성(수온, 염분, 압력), 선박 위치 정보, 참조 유속(SADCPC) 자료 등이다. 보조 자료들의 필요성에 대해서 Thurnherr (2008)의 사용자 매뉴얼을 참조하였다.

LADCP는 장착된 압력센서를 이용하여 수심을 관측할 수 있으나, 보다 정확한 유속 계산을 위하여 CTD로부터 관측된 해수 물성으로부터 수심을 계산하여 사용한다. 선

박 위치 정보는 LADCP를 관측하는 동안의 순압성분의 흐름, 정점의 자기 편차(magnetic declination), 그리고 해수 물성으로부터의 수심 등을 산출하는데 이용된다. 또한 견인 모델(drag model)을 이용하여 관측 시간 동안의 CTD의 움직임을 알아낼 수 있다. 따라서 GPS에 의한 선박 위치 관측 시간과 CTD의 관측 시간을 정확히 일치시키는 것이 중요하다. 이를 위하여 CTD 관측시 자료수집 장치(deck unit)에서 GPS 자료를 수신하여 하나의 CTD 자료로 통합하여 저장한다.

관측된 LADCP 유속 자료는 공간적으로 보조 유속 자료를 사용하여 유속의 정확성을 향상시킬 수 있다. 해저면에 가까운 저층의 유속 구조는 참조 유속인 바닥케적(bottom tracking) 유속을 기준으로 저층의 수직 구조를 상계하는 방법으로 보정 하며(bottom tracking; BTK), 중층은 GPS의 자료로부터 수심에 대하여 적분된 유속 자료를 사용하여 중층의 수직 구조를 상계하는 방법으로 보정하고(barotropic; BAR), 상층의 유속 구조는 선박 장착 ADCP 자료를 기준으로 LADCP 관측 유속 구조를 보정(ship-mounted ADCP; SADCPC) 한다. 이때 각각의 보조 자료에 가중치를 설정할 수 있다.

LADCP 자료처리 결과는 각각의 변수 값의 설정에 따라서도 차이가 발생하나, 근본적으로 CTD 자료, GPS 정보, SADCPC 보조 자료의 사용 유무에 따라 큰 차이를 갖게 된다. 보조 자료에 종속되는 최종 유속의 수직구조를 평가하기 위하여 2008년 10월 30일에 동해(130°15'E, 36°59'N)의 수심 2150 m에서 CTD와 LADCP 장비를 가지고 동시에 전 층을 관측한 현장 자료를 처리하였다. 이때, 사용한 LADCP 자료처리 방법은 전 층을 하강(down-casting)과 상승(up-casting) 동안의 관측 결과에 대하여 독립적으로 분석한 후에 평균 수직구조를 계산하는 것이다. 이 LADCP 자료 처리 방법에 대하여 해저면 유속(BTK), 순압성분 유속(BAR), 표층유속(SADCPC)에 대한 각각의 보정을 수행하였다(Fig. 3). 본 연구에서는 보조 자료의 영향 평가를 위하여 각각의 가중치를 '1'로 설정하였다.

LADCP 자료처리 프로그램 실행 결과, 동서성분(u)과 남북성분(v)에 대한 수직적인 유속구조는 각 보조 자료의 사용에 따라 최종 결과의 차이는 매우 컸다(Fig. 3). 원자료에 전단해법(shear solution)만을 적용하여 계산한 결과(Fig. 3의 none)는 해저면(수심 2140 m)의 u와 v 성분 속도가 각각 5 cm/s와 -5 cm/s이고, 이때 해저면을 탐지한 바닥케적(bottom tracking) 자료로부터 계산된 이 수층의 u와 v 성분 속도는 각각 약 -3 cm/s와 1 cm/s로 나타났다. 자료처리 과정에서 해저면 유속에만 가중치 '1'을 주고 자료처리를 실행하면(BTK), 각 유속 성분의 수직구조가 앞에서 계산된 해저면 유속세기 만큼 상계(offset)되는 것으로 나타났다(Fig. 3의 BTK). 그리고 관측시간 동안의

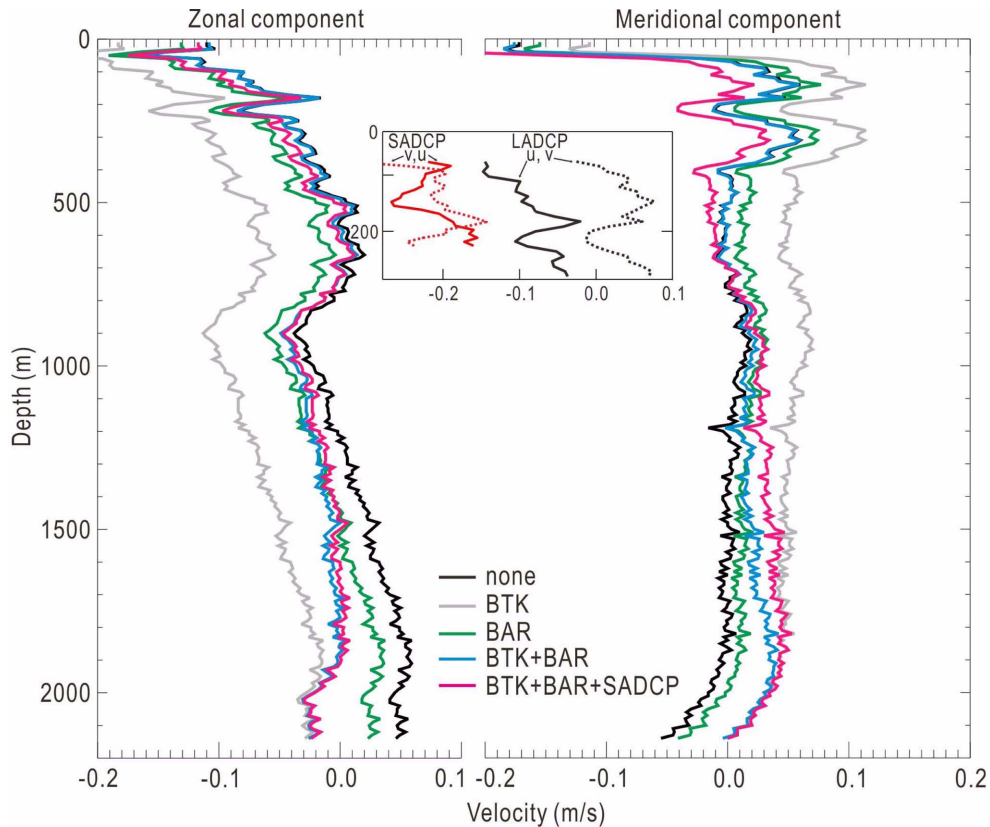


Fig. 3. Vertical profiles of the post-processed current profiles obtained from the processing software. ‘None’ (black curve) means the velocity is not calibrated with auxiliary data, ‘BTK’ (gray) is calibrated with bottom tracking data, ‘BAR’ (green) is calibrated with GPS information for the barotropic velocity, ‘BTK+BAR’ (blue) is calibrated with bottom tracking data and GPS information, and ‘BTK+BAR+SADCP’ (red) is calibrated with bottom tracking data, GPS information, and ship-ADCP data. The curves in the upper small box represent velocities observed from LADCP (black) and SADCP (red) in the upper layer

GPS 정보만을 사용하여 순압성분 보정을 실행하면 (BAR), 해저면을 기준으로 u 와 v 성분 유속이 각각 약 2 cm/s 와 -1 cm/s 로 상계되고, 전 층 수직구조에도 같은 크기만큼 상계된다(Fig. 3의 BAR). 이 두 가지 방법(BTK와 BAR)은 전 층의 유속구조 변화 없이 해저면 유속 또는 중층의 순압성분 유속만큼 전단해법으로 계산된 유속 구조를 상계하는 계산 기법이다.

LADCP 자료처리 과정에 해저면 유속, 순압성분 유속, 그리고 표층 유속 보정 과정을 모두 포함하면, 단일 자료 처리 결과와 비교해 수층별로 각각의 보정법이 적용되는 것으로 나타났다. Fig. 3의 BTK+BAR 결과를 보면, 해저층에 대해서는 BTK 결과만큼 상계되고, 중층에서는 BAR 결과에 의해 순압성분이 제거되며, 상층은 초기의 전단해법(shear solution)에 의해 계산된 결과와 거의 유사하다. 여기에 선박에서 관측한 상층 유속을 추가하여 LADCP에서 관측된 정점의 상층 유속을 보정할 수 있다(Fig. 3의 BTK+BAR+SADCP). 그러나 본 결과와 같이

SADCP로부터 관측된 유속과 LADCP 유속 사이에 편차가 큰 경우(Fig. 3의 box), 상층 유속구조 내에 오히려 오차는 증가할 수 있다.

LADCP 자료처리 평가를 통하여, 해저면 유속과 위치 정보는 정확한 수직적인 유속구조를 얻기 위하여 매우 중요하며, SADCP 자료는 관측치의 질을 고려하여 사용유무를 판단해야 한다.

동중국해 쿠로시오 단면의 유속 관측

동중국해 쿠로시오 단면에서 LADCP를 사용하여 해류를 2007년 10월과 2008년 6월에 각각 관측하였다(Fig. 4). 관측 정선내의 쿠로시오의 지배적인 흐름은 대륙사면으로부터 대양저에 해당하는 정점 4~7 사이에 존재하는 북동향류이다. 쿠로시오의 최대 유속은 표층에서 나타났고, 2007년은 1.1 m/s , 2008년은 0.9 m/s 로 추계에 강하게 나타났다. 대륙붕내의 정점 2와 정점 3은 $0.2\sim 0.4 \text{ m/s}$ 의 크기를 갖는 북서향류와 서향류가 존재한다. 이것은 Guo et

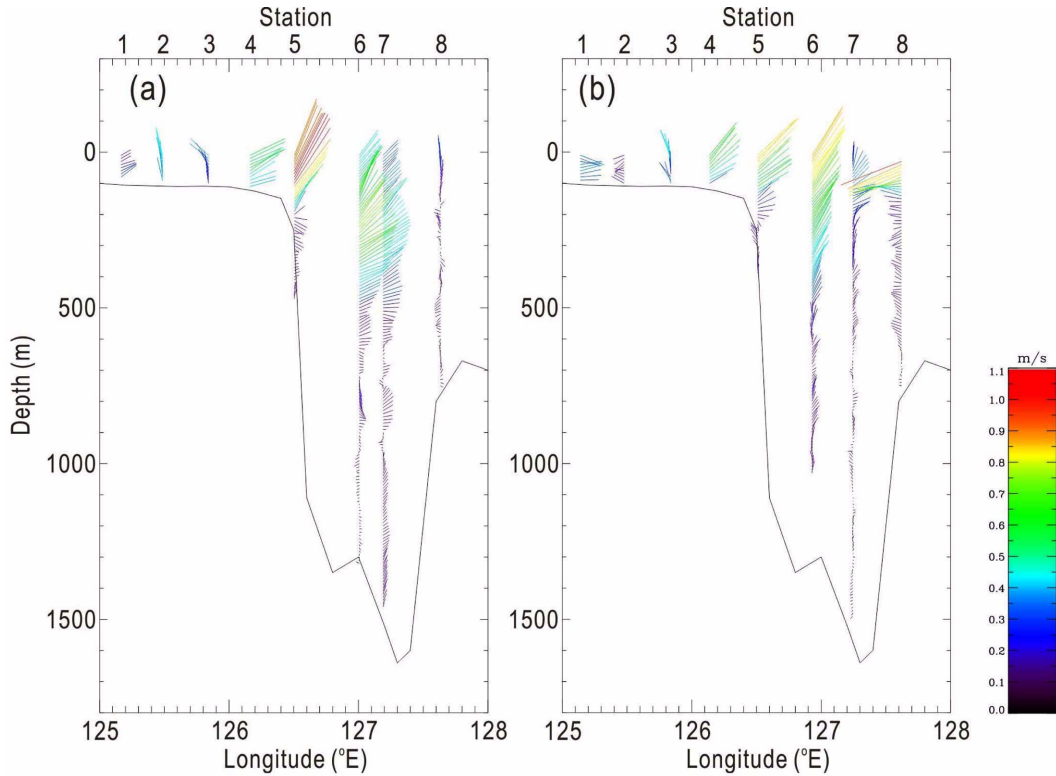


Fig. 4. Vertical distributions of ocean current velocities observed by the LADCP in the East China Sea (a) October 2007, and (b) June 2008

al. (2006)과 Song et al. (2011)의 연구에 나타난 것처럼, 연구 해역에서 쿠로시오 해류가 동중국해 대륙붕으로 유입되는 결과로 판단된다. 동중국해 대륙붕 가장 안쪽의 정점 1은 2007년과 2008년에 각각 0.2 m/s와 0.3 m/s 크기의 동향류가 존재하는데, 이는 Beardsley et al. (1985)이 제시한 동중국해 해류 순환도와 같이 대만해협을 통과하여 대륙붕 내에서 북동쪽으로 흐르는 해류의 영향으로 볼 수 있다. 류큐열도에 인접한 정점 8의 100 m 상층부는 약 0.3 m/s의 북향류가 2007년도에 관측되었으나, 2008년도에는 쿠로시오와 류큐열도 사이에 존재하는 쿠로시오 반

류의 흐름이 0.9 m/s의 남서향류로 관측되었다.

동중국해의 관측 단면 700 m 상층으로 유·출입하는 해수 수송량은 Table 2와 같다. 전체 관측 단면의 남북으로 유·출입한 총 수송량은 2007년 10월과 2008년 6월이 약 36 Sv으로 유사하나, 순수수송량은 2007년 10월이 약 31.3 Sv이고, 2008년 6월이 약 24.3 Sv이다. 또한, 쿠로시오 주축에 해당하는 정점 4와 정점 7 사이의 순수수송량은 2007년과 2008년에 각각 27.0 Sv과 24.5 Sv이다. 단면을 통하여 북쪽으로 유입되는 해수 수송량은 Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 쿠로시오 주축역의 정점 6에서 2007년

Table 2. Volume transports estimated from LADCP observation across the Kuroshio section in the East China Sea. A and B mean whole section (station 1 to station 8) and axis of Kuroshio (station 4 to station 7), respectively. A-B means outside of axis of Kuroshio. Total transport is calculated as the absolute sum of positive and negative transport for upper 700 m

(unit : Sv)

	October 2007			June 2008		
	Section (A)	Axis of Kuroshio (B)	A-B	Section (A)	Axis of Kuroshio (B)	A-B
Net transport	31.3	27.0	4.3	24.3	24.5	-0.2
Positive transport	33.8	28.2	5.4	30.0	24.8	5.2
Negative transport	-2.4	-1.2	-1.2	-5.7	-0.3	-5.5
Total transport	36.1	29.5	6.6	35.7	25.0	10.7

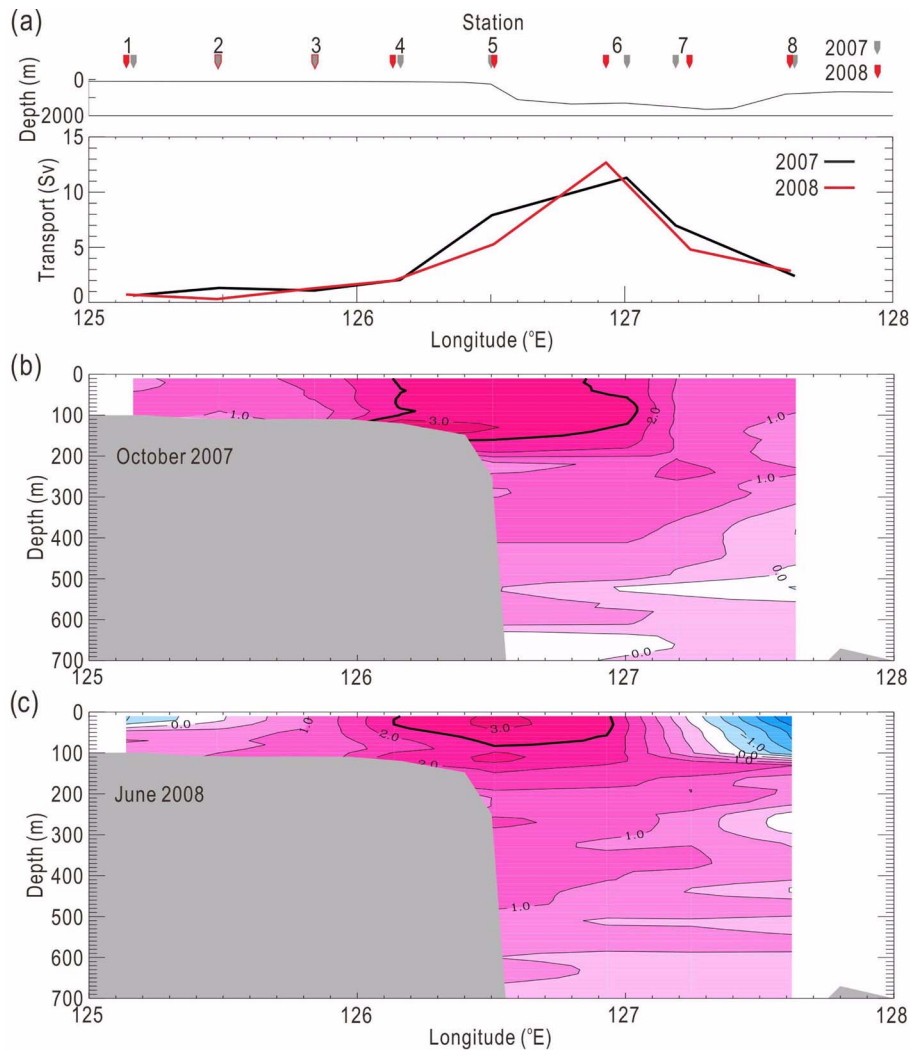


Fig. 5. Transports across the Kuroshio section in the East China Sea. The integrated transport is calculated as the sum of positive transport through upper 700 m (a). The black curve indicates the transport during October 2007, and the red curve indicates June 2008, respectively. The thin gray curve in the upper plot represents the bathymetry across the section (the numbers on top are CTD/LADCP stations). Vertical distribution of transports are indicated by (b) October 2007, and (c) June 2008. The black thick curves in (b), and (c) indicate the isolines of 2.5 Sv; red shadings are positive transports, and blue shadings are negative transports, respectively

10월과 2008년 6월에 각각 11.3 Sv와 12.7 Sv으로 최대를 보이며, 쿠로시오 주축 해역을 통하여 각각 28.2 Sv와 24.8 Sv이 유입되었다.

해수수송량 변동의 원인은 Fig. 5(b)와 5(c)에 나타난 것처럼, 2008년 6월에 쿠로시오가 정점 B6의 상층부를 중심으로 한 좁은 단면으로 유입된 반면, 2007년 10월은 쿠로시오가 강한 북향 유속 성분을 가지고 넓게 동중국해로 유입되었기 때문이다.

LADCP 운용시 고려사항

LADCP를 활용하여 유속을 관측할 때에는 보조적으로

GPS, CTD, SADC가 동시에 운용된다. 이 각각의 장비들은 필수적으로 모두 시간 동기화를 시켜야 한다. 시간 동기화가 정확할수록 최종 유속 결과물을 산출하기 위한 보조 자료와 LADCP 자료간 상관성이 높아진다. 자료간 짧은 시간차가 발생한 것은 자료처리 프로그램에서 후처리로 가능하나, LADCP에 대한 시간차가 너무 큰 보조 자료를 사용하기 위해서는 분석자가 원자료를 인위적으로 시간 교정을 해야 하는 어려움이 있다.

LADCP는 기본적으로 채수기 틀에 장착하여 CTD와 동시에 운영한다. LADCP를 효율적으로 운용하려면 기본적으로 2대를 한 세트로 설치하는데, 1대(master)는 해저

면을 향하도록 설치하고, 나머지 1대(slave)는 표층을 향하도록 설치한다. LADCP 2대를 동시에 운영할 수 없을 때는 1대를 해저면을 향하도록 설치하여 해저면 유속(BTK)을 얻는 것이 자료처리상 바람직하다.

LADCP는 크게 전원의 장착 방법에 따라 외장형과 내장형으로 구분된다. 외장형은 전원팩의 교환 후에 LADCP의 교정이 필요 없으나, 내장형은 반드시 교정을 해야 한다. 해저면 및 지지대에 계류되어 있는 장비와는 달리, LADCP는 유동형으로 운용이 되기 때문에 관측된 유향에 직접적으로 영향을 주는 자이로 센서의 정확한 교정이 필수적이다. 교정 작업은 LADCP에 영향을 주는 자기장이 최소인 환경에서 수행해야 하며, 교정 작업이 적절히 이루어지지 않는 경우 초기 값(default)으로 설정하여 운용한다.

LADCP는 음파의 도플러 효과를 이용하여 해수중의 음파 산란체로부터 반사되어 돌아오는 파를 가지고 해수의 유동을 관측하는 장비다. 이 음파 산란체의 농도가 LADCP의 관측 범위와 자료의 질을 결정하게 된다. 산란체의 농도는 수직적으로 수심 1000 m 근처에서 급격한 감소가 발생하고, 열대 및 아열대 해역의 이 수층 농도는 더욱 낮다(Firing 1998). 수심 1200 m에서 ADCP의 관측 범위는 정상 범위의 약 1/3로 감소하는 것으로 알려져 있다(RDI 1996). 경험적으로 우리나라의 동해 및 대륙 주변부 해역은 산란체의 높은 농도로 인하여 전 층 관측이

가능하지만, 열대태평양과 같이 산란체의 농도가 낮은 해역에서는 수심이 1000 m 이상되면 관측 범위가 20~30 m로 매우 좁아지고 자료의 질이 저하되는 것으로 나타났다.

순수 해류 관측 탐사를 제외한 대부분의 해양 조사에서는 LADCP가 장착된 채수기를 이용한 채수가 동시에 이루어진다. 채수는 일반적으로 관측 장비를 올리면서(up-casting) 채수기 틀에 장착된 채수통을 순차적으로 사용하여 이루어진다. 이러한 동시 작업으로 인하여, LADCP가 장착된 관측 장비는 하강하는 동안에는 중력에 의하여 본체가 크게 기울어지지 않고 거의 수직인 상태로 내려가나, 상승하는 동안 CTD 케이블에 의해 견인되면서 기울어지고, 채수를 하면서 발생하는 물에 의한 무게의 불균형으로 인하여 더욱 기울어지는 문제가 있다. 회전(roll)과 경사(pitch)에 의한 편향(tilting) 각도는 기본적으로 자료 처리 프로그램에서 22°로 설정되어 있으며, 이 한계치를 초과하는 편향 각도에서 관측된 자료는 오차로 인해 사용할 수 없다. 본 연구에서는 자료처리시 편향 각도를 30°로 설정(Fig. 6b) 하였음에도 이상불 번호 1000에서 1400 사이에서 사용할 수 없는 자료가 많이 나타난 것이 그 사례이다(Fig. 6c). 따라서 가급적 LADCP를 운용할 때에는 채수기와 별도로 운용하는 것이 바람직하고, 채수기를 사용할 경우에는 서로 마주보는 채수통 순서로 운용하는 것이 기울임을 방지하는 대안이 될 수 있다.

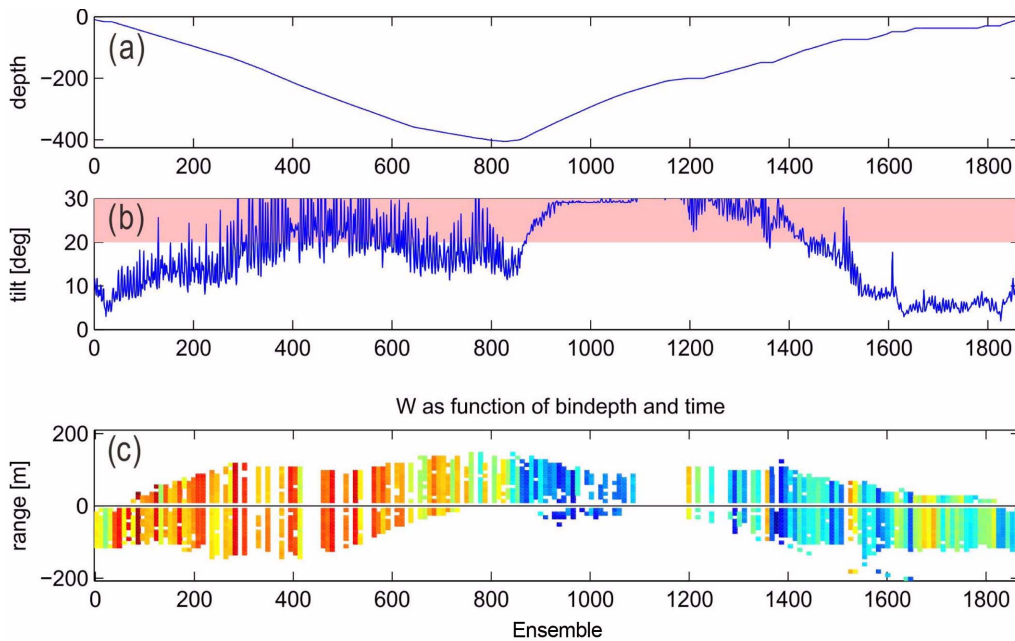


Fig. 6. An example of acceptable LADCP data, depending on the tilting angle during observation. (a) time versus depth (m), (b) time versus tilting angle ($\sqrt{pitch^2 + roll^2}$), where the pink band indicates over 22° of tilting angle (manufacturer's default), and (c) time versus acceptable data, the critical tilting angle is arbitrarily chosen as 30° in this study

4. 결론 및 요약

LADCP를 이용하여 해류의 수직구조를 관측한 자료의 후처리 과정은 아직도 표준화된 방법이 정착되지 않은 첨단기법(state of the art)이다. 장비를 제작 판매하는 회사에서도 아직까지 관측 자료를 처리하는 표준 소프트웨어를 제공하지 못하고 있다. 따라서 현재까지 관측 자료의 사후처리 및 분석을 위하여 사용 가능한 프로그램은 Andreas Thurnherr와 Gerd Krahnman 등이 Matlab 기반의 자료처리 프로그램으로 개발하여 공개한 것이 전부이다. 두 소프트웨어는 자료처리 방법이 상당히 유사하며, Gerd Krahnman 프로그램에는 수직 유속 프로파일을 계산하기 위하여 Eric Firing의 진단방법(shear method)를 추가한 것이 특징이다. LADCP 관측 결과로부터 정확한 수직 유속구조를 얻기 위해서는 관측 시간 동안의 정확한 선박의 위치 정보 자료가 반드시 필요하고, 추가적으로 해저면의 유속 관측 자료가 요구된다. 그러나 SADCP에 의한 해류 자료는 LADCP 관측으로부터 정확한 관측이 이루어진 경우에는 선택적인 자료이다.

동중국해 쿠로시오 해역에서 LADCP 자료를 분석한 결과, 수심이 깊은 해저골 해역의 표층에서 0.9~1.1 m/s 이상의 북동향류가 존재하고, 쿠로시오의 주축 해역에서 순수송량은 24.5~27.0 Sv, 북향하는 수송량은 약 24.8~28.2 Sv이다. 이 결과는 700 m 상층으로 북상하는 수송량의 변동 범위가 1973년부터 2000년까지 28년간의 자료 분석을 통하여 23.9~27.0 Sv(평균=25.8 Sv)으로 가을과 여름에 각각 최소와 최대가 되며, 최대 수송량은 대륙붕의 수심 500~1,000 m 해역에 존재한다고 보고한 Ichikawa and Beardsley (2002) 연구 결과의 변동폭 및 쿠로시오 주축과 유사하다. 그러나 본 연구에서는 쿠로시오 주축역의 해수수송량의 최대는 2007년 10월이고, 정점 6 주변 해역은 2008년 6월이 더 컸다. 이는 2008년 6월의 관측 시기에 정점 6의 일부 상층에서만 강한 북동향류가 존재하였기 때문이다. 이것은 Andres et al. (2008)의 2004년 6월과 9월의 남북 방향의 해류 단면도에서 9월에 강한 북동향류가 넓게 존재한 것과 시기적으로 유사하다. 동중국해 쿠로시오 역에서 LADCP를 통하여 얻은 결과는 기존의 연구 결과와 비교하여 LADCP의 유용성을 입증해주는 바람직한 사례다.

LADCP는 음파의 도플러 효과를 사용하여 해류를 관측하기 때문에, 해수중의 부유물질의 농도에 의해 관측된 자료의 질과 관측 가능 범위가 결정된다. 질 좋은 자료를 얻기 위해서는 해수중의 부유물질량이 음파를 반사시킬 수 있는 최소 농도 이상이면서 음파의 감쇄와 산란을 최소화하는 농도 이하의 해역에서 운영하는 것이 바람직하다. 또한, LADCP 관측시에는 장비의 경사각이 크게 발생하지

않고, 급격한 장비의 움직임이 발생하지 않게 운영함으로써 질 좋은 유속 자료를 얻을 수 있다. LADCP에 대한 관측 및 자료 후처리 기법이 앞으로 보다 정교하게 개선될 것이며, CTD와 동시 관측 횟수가 증가함에 따라 해수의 물리적 성질 및 수직적인 유속구조 파악에 대한 이해에 크게 기여할 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 “북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(PE98563)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문이 만들어지기까지 세심한 배려를 아끼지 않은 두 분의 심사 위원에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- Andres M, Wimbush M, Park JH, Chang KI, Lim BH, Watts DR, Ichikawa H, Teague WJ (2008) Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea. *J Geophys Res* **113**:C05013. doi:10.1029/2007JC004200
- Beardsley RC, Limeburner R, Yu H, Cannon GA (1985) Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont Shelf Res* **4**(1/2):57-76
- Casal TGD, Beal LM, Lumpkin R (2006) A North Atlantic deep-water eddy in the Agulhas Current system. *Deep-Sea Res II* **53**:1718-1728
- Firing E (1998) Lowered ADCP Developments and Use in WOCE. *WOCE Newsletter* **30**:10-14
- Fisher J, Visbeck M (1993) Deep Velocity Profiling with Self-contained ADCPs. *J Atmos Ocean Tech* **10**:764-773
- Guo X, Miyazawa Y, Yamagata T (2006) The Kuroshio Onshore Intrusion along the Shelf Break of the East China Sea: The Origin of the Tsushima Warm Current. *J Phys Oceanogr* **36**:2205-2231
- Ichikawa H, Beardsley RC (2002) The current system in the Yellow and East China Sea. *J Oceanogr* **58**:77-92
- Komaki K, Kawabe M (2008) Correction method for full-depth current velocity with lowered acoustic Doppler current profiler (LADCP). *J Oceanogr* **63**:995-1007
- Krahmann G (2009) Lowered ADCP users group. <http://tech.groups.yahoo.com/group/ladcp/>. Accessed 14 Jul 2011
- Kune E, Firing E, Hukkon JM, Chereskin TK, Thurnherr AM (2006) Global Abyssal Mixing Inferred from Lowered ADCP Shear and CTD Strain Profiles. *J Phys Oceanogr* **36**:1553-1576
- Park YH, Fuda JL, Durand I, Garabato ACN (2008) Internal

- tides and vertical mixing over the Kerguelen Plateau. *Deep-Sea Res II* **55**:582-593
- Polzin K, Kunze E, Hummon J, Firing E (2002) The Finescale Response of Lowered ADCP Velocity Profiles. *J Atmos Ocean Tech* **19**:205-224
- RDI (1996) Acoustic Doppler Current Profiler: principles of operation a practical primer. RDI Instruments, 52 p
- Rhein M, Kirchner K, Mertens C, Steinfeldt R, Walter M, Wischnath UF (2005) Transport of South Atlantic water through the passages south of Guadeloupe and across 16°N 2000-2004. *Deep-Sea Res I* **52**:2234-2249
- Song J, Xue H, Bao X, Wu D, Chai F, Shi L, Yao Z, Wang Y, Nan F, Wan K (2011) A spectral mixture model analysis of the Kuroshio variability and the water exchange between the Kuroshio and the East China Sea. *Chinese J Ocean Limnol* **29**(2):446-459
- Thurnherr AM (2005) LADCP Processing. <http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/LADCP/>. Accessed 14 Jul 2011
- Thurnherr AM (2008) How To Process LADCP Data With the LDEO Software. <ftp://ftp.ldeo.columbia.edu/pub/LADCP/HOWTO/how-to.pdf>. Accessed 14 Jul 2011
- Thurnherr AM, Reverdin G, Aubertot PB, Laurent LCS, Vangriesheim A, Ballu V (2008) Hydrography and flow in the Lucky Strike segment of the Mid-Atlantic Ridge. *J Marine Res* **66**:347-372
- Torres DJ, Millard RC, Swartz HM, Toole JM (2000) A Comparison of LADCP and CTD Performance on a Slide-Down-Wire Frame Versus a Standard CTD Frame. In: OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Rhode Island, USA 11-14 September 2000, pp 359-366
- Visbeck M (2002) Deep velocity profiling using lowered Acoustic Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions. *J Atmos Ocean Tech* **19**:794-807

Received Jul. 15, 2011

Revised Aug. 22, 2011

Accepted Sep. 9, 2011