

Review

<https://doi.org/10.7850/jkso.2023.28.1.051>
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

압력측정 전도음향측심기(PIES)를 활용한 해양관측의 현재와 전망

전찬형^{1*} · 이강녕² · 송하진² · 채정엽² · 박재훈³¹부산대학교 해양학과 및 해양연구소 조교수, ²인하대학교 해양학과 대학원생, ³인하대학교 해양학과 교수

Present and Prospect of Ocean Observation Using Pressure-recording Inverted Echo Sounder (PIES)

CHANHYUNG JEON^{1*}, KANG-NYEONG LEE², HAJIN SONG², JEONG-YEOB CHAE² AND JAE-HUN PARK³¹Assistant Professor, Department of Oceanography and Marine Research Institute, Pusan National University, Busan 46241, Korea²Graduate Student, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea³Professor, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

*Corresponding author: jeonc@pusan.ac.kr

Editor Hanna Na

Received 14 December 2022; Revised 27 January 2023; Accepted 31 January 2023

ABSTRACT

음향은 수중에서 원거리 전파가 가능하여 수심 측량, 수중 물체 탐지, 수중 통신, 유속 측정 등 다방면에서 해양관측에 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 해저면 계류형태의 압력측정 전도음향측심기(Pressure-recording Inverted Echo Sounder, PIES)를 활용하여 관측 가능한 해양물리현상(해류, 중규모 소용돌이, 내부파, 해면고도변화 등)에 대해 서술한다. 이어서 PIES장비 회수 없이 음향을 활용한 원격 자료획득법, 자동 자료전송 팝업 부표(Pop-up Data Shuttle, PDS)를 활용한 최신의 원격 자동자료획득법을 소개하고, 향후 실현 가능한 (준)실시간 원격 자동자료획득법을 덧붙인다.

Sound can travel a long distance in the ocean; hence, acoustic instruments have been widely used for ocean observations in various fields such as bathymetric survey, object detection, underwater communication, and current measurements. Herein we introduce a pressure-recording inverted echo sounder (PIES) which is one of the most powerful instruments, moored at seafloor for ocean observation in physical oceanography. The PIES can measure various kinds of oceanic phenomena (currents, mesoscale eddies, internal waves, and sea surface height variabilities) and support acoustic telemetry and pop-up data shuttle (PDS) system for remote data acquisition. In this paper, we review uses of PIES and describe present and prospective system of PIES including remote data acquisition toward (quasi) real-time data recovery.

Keywords: Pressure-recording Inverted Echo Sounder, PIES, Acoustics, Ocean observation, Remote data acquisition

1. 압력측정 전도음향측심기(Pressure-recording Inverted Echo Sounder, PIES)

선박의 음향측심기(echo sounder)는 선체 하부에 장착된 음향 변환기(acoustic transducer)에서 방사된 음파가 해저면을 맞고 선박까지 되돌아오는 왕복시간을 거리로 환산하여 수심을 알아낸다. 미국 로드아일랜드대학에서 개발된 전도음향측심기(inverted echo sounder)는 선박에 장착된 음향측심기와 원리는 동일하지만, 음향 변환기가 해저면에 계류된 채 해수면을 향해 음파를 방사한다는 점에서 차이가 있다(Fig. 1(a)). 언뜻 단순한 차이로 보일 수 있지만 선박 음향측심기는 파랑, 해류, 바람 등에 의한 선체의 위치 변화만큼 음향 변환기의 위치도 수시로 바뀌게 되고 이는 선체와 해저면 사이의 왕복음향시간에 오차를 야기한다. 반면 전도음향측심기는 해저면에 단단히 고정된 상태에서 음향을 송수신하기 때문에 왕복음향시간의 오차가 현저히 줄어들어 정밀도가 높아진다. 현재는 전도음향측심기에 압력센서를 추가한 압력측정 전도음향측심기(Pressure-

recording Inverted Echo Sounder, 이하 PIES로 서술)와 PIES에 단층유속센서를 장착하여 해저면 50 m 상층의 유속을 추가로 관측할 수 있는 해류-압력측정 전도음향측심기(Current-and-Pressure-recording Inverted Echo Sounder, 이하 CPIES로 서술)가 널리 쓰이고 있다(Kennelly *et al.*, 2007).

PIES는 해저면-해수면 간 왕복음향전파시간(τ)과 해저압력을 측정한다(Kennelly *et al.*, 2007). PIES는 τ 를 시간당 24~96번까지 집중표본추출(burst sampling) (매 10분마다 16초와 18초 간격으로 번갈아가며 4~16번 표본을 추출하는 방식)을 할 수 있고, τ 의 정밀도는 0.05 milisecond (ms)이다. τ 를 결정하는 수중음파속도(sound speed)는 수온과 염분의 영향을 받는다. 수온, 염분, 압력이 높을수록 음파속도는 빨라지고 그 결과 τ 는 짧아진다. 이러한 특성을 이용하여 해류, 중규모 소용돌이, 내부파 등 해양의 다양한 물리적 현상을 관측할 수 있다. PIES의 해저압력 측정에는 Paroscientific Digiquartz model 410K-101 센서(Paroscientific, Inc., Redmond Washington)가 쓰이고 있으며, 정확도는 0.001 dbar이다. 해저압력 측정 간격은 10분~1시간 사이에서 조정할 수 있고 조석이나 바람 등에 의한 해양의 순압 변동성을 관측할 수 있다(Park and Watts, 2005, 2006b; Na *et al.*, 2012, 2016; Zheng *et al.*, 2020).

PIES는 수심 500~6700 m 범위에서 사용 가능하고 최대 5년까지 연속관측을 수행할 수 있다(Donohue *et al.*, 2010). 또한 일반적으로 계류관측시스템(tall mooring)에 필요한 수십~수천 미터 길이의 계류선이 필요하지 않아 계류와 회수 작업이 상당히 용이하다(Fig. 1(b)). 이러한 장점으로 PIES는 저위도 및 중위도 해양에서 해류, 중규모 소용돌이, 내부파, 해면 고도변화, 증력변화 등 다양한 해양의 물리현상 관측에 활용되었고(Sun and Watts, 2001; Watts *et al.*, 2001b; Book *et al.*, 2002; Zhu *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2008; Andres *et al.*, 2008; Donohue *et al.*, 2010; Jeon *et al.*, 2018), 최근에는 해빙이나 빙하의 영향을 받는 고위도 해역까지 활용 해역이 확대되고 있다(Andres *et al.*, 2015; Jeon *et al.*, 2021). 본 논문에서는 PIES를 활용한 해양관측에 대해 되짚어보고 PIES 관측자료 원격 획득방법의 현재와 향후 전망에 대해 서술한다.

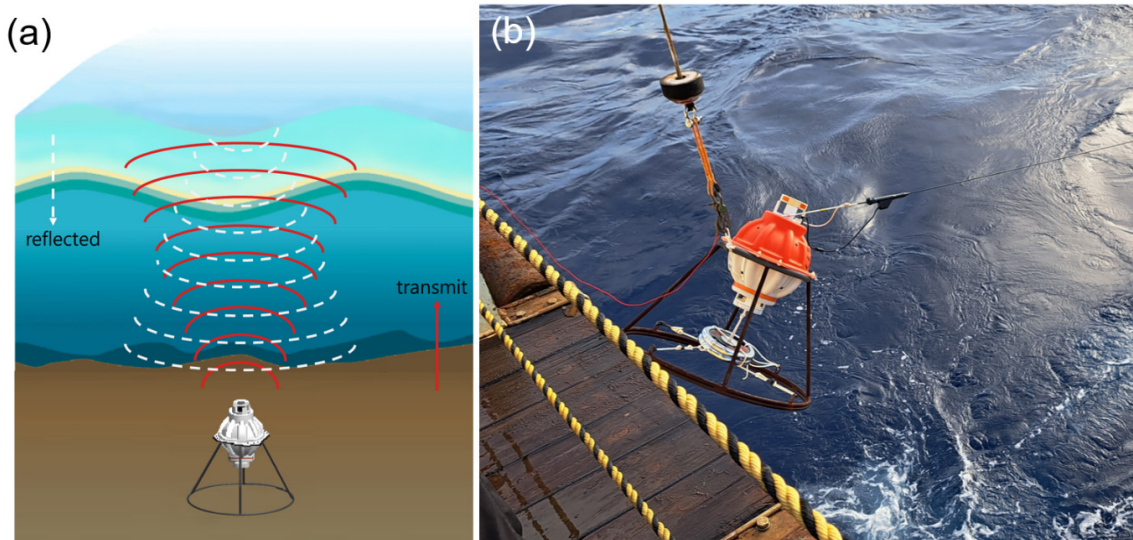


Fig. 1. (a) Concept of acoustic travel time measurements using PIES (Pressure-recording Inverted Echo Sounder). (b) Deployment of CPIES from a research vessel ISABU in October 2022.

2. PIES 활용 해양관측

2.1 해류, 중규모 소용돌이, 내부파

τ 는 수온과 염분 변화의 영향을 받는다. 저위도 및 중위도 해양에서는 수온이 τ 변화에 지배적인 영향을 주어, τ 를 수온 약층의 연직변위로 환산할 수 있다. Fig. 2의 시계열은 τ 를 수온약층 연직변위(m)로 환산한 값으로 동해 및 남중국해에서 관측된 수십분에서 수십시간 사이의 선형(Fig. 2(a)) 및 비선형(Fig. 2(b)) 내부파의 변동성을 보여준다. 이러한 단주기(high frequency)현상 외에도 배열(array)관측을 통해 중규모 소용돌이나 해류장을 파악할 수 있다. Fig. 3에서는 수온약층 깊이의 공간적 차이를 통해 동해 울릉분지의 PIES 배열(PIES array)에서 관측된 난수성 소용돌이를 보여준다. Fig. 3(a)에서 중심부가 울릉도에 위치한 난수성 소용돌이와 Fig. 3(b)에서 울릉도 남서쪽에 자리한 난수성 소용돌이를 확인할 수 있다. PIES에 유속센서가 추가된 CPIES를 활용하면 지형류 절대값(absolute geostrophic current)계산도 가능하다(Watts *et al.*, 2001b). 이

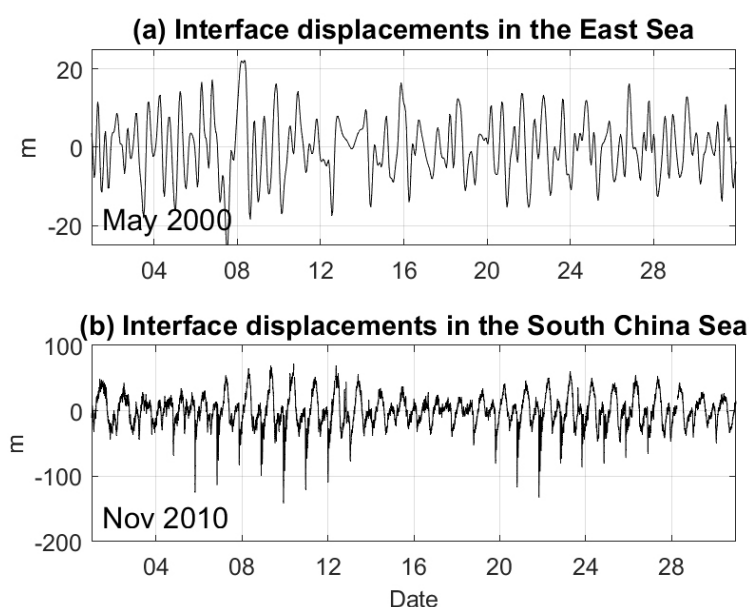


Fig. 2. Timeseries of vertical displacement of thermocline converted from PIES-measured acoustic travel time (τ). (a) Linear internal waves observed in the East Sea. (b) Nonlinear internal waves observed in the South China Sea.

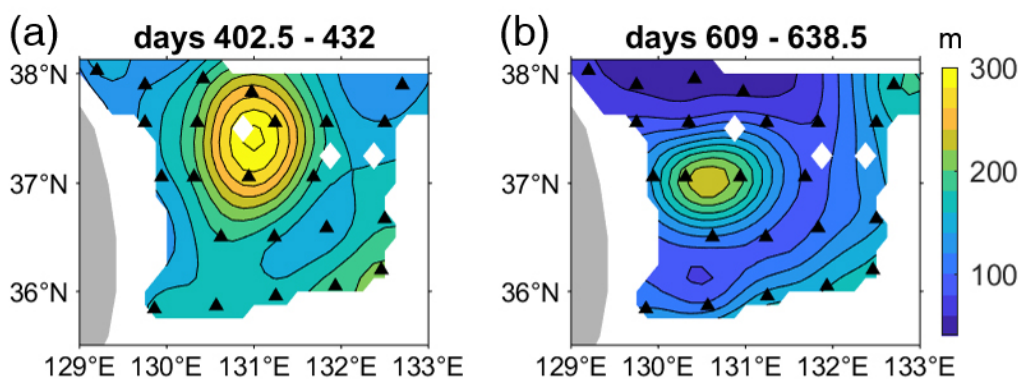


Fig. 3. Lunar monthly maps of mean 5°C depth (a) 402.5-432 and (b) 609-638.5 days. Contour intervals are 20 m. Dates are days since 00 hour UTC 1st January 1999. Solid triangles indicate PIES array (modified from Park and Watts, 2006a).

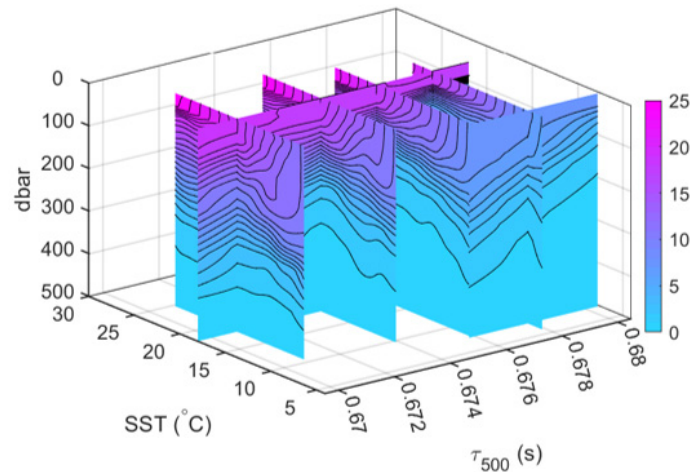


Fig. 4. Constructed temperature fields using multi-index GEM technique which includes sea surface temperature (modified from Park *et al.*, 2005). The color bar shows temperature ($^{\circ}\text{C}$).

에 더하여 PIES 배열 관측은 일정 해역에서 수시간의 단주기부터 장주기 변동성을 함께 관측할 수 있어서 단주기 물리현상(예, 내부파)과 중규모 소용돌이나 해류의 상호작용(e.g., Park and Watts, 2006a; Park *et al.*, 2010) 그리고 중규모 소용돌이와 해류의 상호작용도 살펴볼 수 있다(e.g., Na *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2020).

2.2 수온 및 염분 연직구조

수온, 염분, 압력을 측정된 연직 물성관측자료(hydrocast)를 이용하여 해수의 연직구조와 τ 의 관계식을 만드는 경험적 최적 연직구조 결정기술(Gravest Empirical Mode technique, GEM technique)이 개발되어 있다(Watts *et al.*, 2001a). PIES에서 측정된 τ 에 경험적 최적 연직구조 결정기술을 적용하면 1차원의 수온 및 염분 연직구조를 산출할 수 있다. 경험적 최적 연직구조 결정기술은 연직 물성관측자료가 풍부할수록 정밀한 연직구조 산출이 가능해지기 때문에 CTD, Argo 등 연직 물성관측자료가 풍부한 해역에서 한층 더 유용하다. 향상된 수온 및 염분 구조를 얻기 위하여 해수면 온도를 추가로 고려하는 다중지표 경험적 최적 연직구조 결정기술(Multi-index GEM technique)도 개발되어 있다(Fig. 4)(Park *et al.*, 2005). 이러한 경험적 최적 연직구조 결정기술을 PIES 배열 자료에 활용하면 2차원(배열이 동서남북방향 모든 방향으로 펼쳐져 있는 경우는 3차원)의 수온 및 염분 연직 단면(vertical section)을 얻을 수 있고, 시간에 따른 단면의 수온 및 염분의 변화를 볼 수 있다.

2.3 PIES 활용 해면고도 변화 산출 및 위성관측 해면고도의 비교

τ 는 주로 온도 변화에 민감하고 온도가 상승할수록 τ 가 줄어든다. 따라서 연직 물성관측자료를 활용하여 역학적 고도(dynamic height)의 변화와 τ 의 관계식을 만들 수 있고 PIES에서 측정된 τ 를 역학적 고도로 변환할 수 있다. 한편 PIES의 해저압력값에는 해저면에 가해지는 압력변화, 즉 수층의 질량변화(mass-loading)가 기록된다. 따라서 PIES의 τ 와 해저압력값을 이용하여 부피팽창 효과(steric effect)와 질량변화 효과(mass-loading effect)에 의한 해면고도변화를 계산할 수 있다(Fig. 5) (Park *et al.*, 2012; Donohue *et al.*, 2016; Jeon *et al.*, 2018).

해면고도를 관측하는 인공위성은 지정된 궤도를 일정한 주기로 돌면서 관측을 수행한다. 1992년 말부터 현재까지 같은 궤도를 약 10일 주기로 관측하는 Jason계열(TOPEX/POSEIDON, Jason-1, -2, -3)과 약 35일 주기의 ERS/Envisat 계열

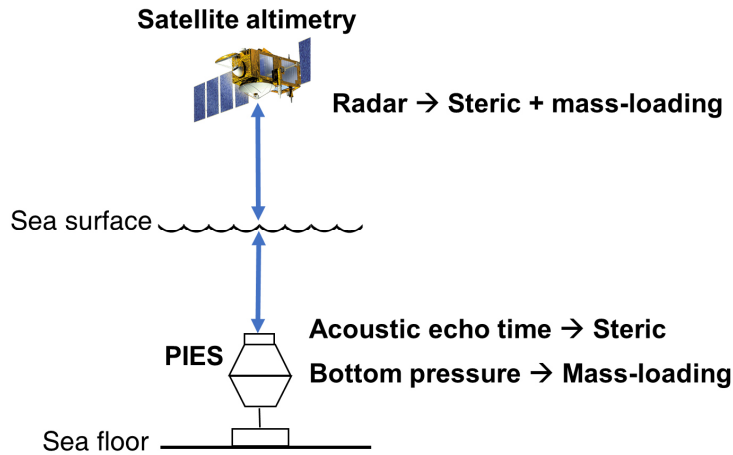


Fig. 5. Schematic of sea surface height measurement from satellite altimetry and PIES. PIES-derived sea surface height can be divided into steric and mass-loading components.

(ERS-1, -2, Envisat, Saral/Altika)가 있고, 그 외 17일 주기의 Geosat follow on, 29일 주기의 Cryosat-2, 14일 주기의 HaiYang-2A도 Jason과 ERS/Envisat계열의 궤도와 거리를 둔 지정된 궤도를 돌면서 2~10년간 과거에 관측을 수행하였거나 현재 수행하고 있다(Along-track Level-2+ (L2P), SLA Product Handbook, 2017). 이러한 위성관측 해면고도계는 일정한 주기로 연속관측을 수행하지만 획득되는 해면고도에는 부피팽창과 질량변화 효과가 더해져 있다(Fig. 5).

PIES 관측자료에 대기압에 의한 해수면반응(Inverted barometric response) 효과와 위성 해면고도자료에 적용되는 역학적 대기보정(Dynamic Atmospheric Correction)를 적용하면 PIES에서 산출한 해면고도와 위성관측 해면고도의 직접 비교가 가능하다(e.g., Park *et al.*, 2012; Donohue *et al.*, 2016; Jeon *et al.*, 2018; Hwang *et al.*, 2021). 더욱이 PIES에서 산출한 해면고도는 1시간 간격 자료 산출이 가능하여 위성관측 해면고도(최소 약 10일)보다 시간적으로 조밀하기 때문에 위성관측 해면고도자료의 한계 파악에 유용하다. Park *et al.*(2012)은 쿠로시오 확장역(Kuroshio Extension)에서 PIES 자료로부터 산출한 해면고도와 위성관측 해면고도를 비교하여 20일 이하의 단주기 변동성이 클 경우에는 위성관측 해면고도자료에 오차(error)가 발생할 수 있음을 보여줬고, Jeon *et al.*(2018)은 열대 서태평양에서는 위성궤도상(along-track)의 해면고도자료보다 여러 위성을 조합하여 생산되는 격자 해면고도자료의 성능이 더 좋지만 10 cm 이상의 큰 오차(hump artifact error)가 두 종류의 위성관측 해면고도자료 모두에 여전히 존재하는 것을 확인하였다. 이와 같이 PIES에서 산출한 해면고도와 위성관측 해면고도를 비교하여 위성관측 해면고도자료의 성능을 확인하고 한계를 확인할 수 있다.

2.4 그 외 PIES 활용 해양관측

위에서 언급한 것 외에도 PIES를 활용하여 해양의 물리 또는 생물에 의한 현상을 살펴보는 것이 가능하다. 우선 질량 변화(mass-loading)를 측정하는 해저압력값을 이용하여 쿠로시오 해류의 사행(Kuroshio large-meandering) (Nagano *et al.*, 2018; Nagano *et al.*, 2021)연구가 이뤄진 바 있다. 또한 해저압력은 해수량을 반영하기 때문에 중력장의 변화를 측정할 수 있는 인공위성 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)자료와 비교 및 검증에 활용되기도 하였다(Park *et al.*, 2008).

해저면-해수면 간 왕복음향전파시간 τ 에는 수중 또는 해수면 근처의 물체에 의한 음향 반사의 영향이 포함되기도 한다. 12 kHz 대역에서 크게 반응할 수 있는 오징어 크기의 해양생물 혹은 군집의 수직이동(vertical migration)이 관측된 바 있다

(Watts *et al.*, 2006). 해수면 근처에 존재하는 빙하, 빙산, 해빙 또한 τ 에 영향을 준다. 이런 해수면 근처의 물체는 음파 산란(acoustic scattering)에 영향을 주어 τ 를 변화시키고, 이를 통해 얼음의 두께와 이동 속도를 추정하였다(Andres *et al.*, 2015).

3. PIES 관측자료 원격 획득방법의 현재와 미래

계류된 관측장비에서 측정된 값을 획득하기 위한 보통의 방법은 선박 등을 통한 장비 회수를 우선 필요로 한다. 이 방법은 손실 없이 원시 자료를 획득하는 가장 확실한 수단이지만, 장비를 회수하지 못하면 관측자료 역시 영구히 획득할 수 없고 투입된 시간과 비용 손실이 막대하다. 또한 동일 정점 연속 관측을 목표로 할 경우에는 장비를 회수하더라도 자료획득과 장비 재계류에 많은 비용, 시간, 인력이 요구된다.

심해 해저면에 계류되는 PIES도 여타 계류장비와 마찬가지로 관측자료 획득을 위해서는 장비의 회수가 필수이지만, 장비 회수가 필요 없는 수중음향통신을 활용한 자료획득방법도 있다. 본 장에서는 장비 회수없이 음향을 활용한 전통적인 PIES 관측자료 획득방법과 최근 개발된 원격 자동 자료전송 팝업 부표(Pop-up Data Shuttle, 이하 PDS)를 활용한 원격 자료획득 방법 및 북극해에서 수행된 성공적 실험사례를 소개한다. 더불어 향후 기대되는 수중 글라이더, 파랑 글라이더, 무인관측선, 해빙고정형 프로파일러(Ice-Tethered Profiler, ITP), 그리고 타 계류관측시스템을 함께 활용한 준실시간 및 실시간 원격 자료획득방법에 대해서도 함께 덧붙인다.

3.1 수중음향통신을 활용한 PIES 관측자료 원격획득

PIES는 음향을 활용한 양방향통신과 자료전송시스템을 갖추고 있어서 음향 변환기를 갖춘 선박을 이용하면 언제든지 PIES와 통신할 수 있다. 우선 선박을 PIES 계류지점 근방에 위치시키고 선박의 음향 변환기에서 PIES로 명령어(acoustic command)를 전달하면 PIES는 음향 신호를 송신하고 이 음향 신호를 정보로 변환하여 관측자료 획득이 가능하다(이 방법을 음향 원격자료전송법(acoustic telemetry)이라 부른다) (Kennelly *et al.*, 2007). PIES는 최대 5년간 해저면에 계류된 채 관측을 수행할 수 있어서 음향 원격자료전송법을 활용하여 원격으로 자료를 획득하면 동일 정점과 조건하에서 PIES는 연속관측을 수행하고, 사용자는 데이터만 획득할 수 있어서 투입되는 비용, 시간, 인력이 크게 줄어든다.

음향 원격자료전송법을 통해 회수되는 자료는 PIES의 경우는 τ , 해저압력, 관측 시간이고, 유속센서가 추가된 CPIES의 경우에는 유속과 유향이 추가된다. τ 는 중앙값필터(median filter)가 적용된 1일 간격 자료, 해저압력과 유속자료는 저주파 통과 필터(low-pass filter)가 적용되어 조석의 조석이 제거된 1일 간격 자료가 얻어진다. 앞서 2장에 소개한 바와 같이 음향 원격자료전송법을 통해 획득된 자료로도 해류, 중규모 소용돌이, 수온 및 염분구조, 해면고도변화를 살펴보기에 충분하다. 음향 원격자료전송법을 활용한 자료획득의 장점에도 불구하고 유인 선박 운용에 따른 상당한 비용 소요는 단점이라 할 수 있다.

3.2 자동 자료전송 팝업 부표(PDS)를 활용한 PIES 관측자료 원격 자동획득

최근 개발된 PDS는 선박운용을 비롯한 막대한 비용과 인력의 투입 없이 원격 자동자료획득을 위해 개발된 자료 저장 및 자료 전송 장치이다(Fig. 6, PIES 주위에 배치된 노란색 부표). PDS는 PIES (또는 CPIES)와 수중에서 무선 통신할 수 있도록 설계되어 있는데 PIES (또는 CPIES)에서 PDS로의 단방향(one way) 통신(송신)만 가능하다(Popeye Data Shuttle User's Manual, 2021). PDS는 계류 전 각각의 PDS에 해수면 부상 일정을 설정할 수 있고, 계류 후 각각의 PDS는 PIES 데이터를 수

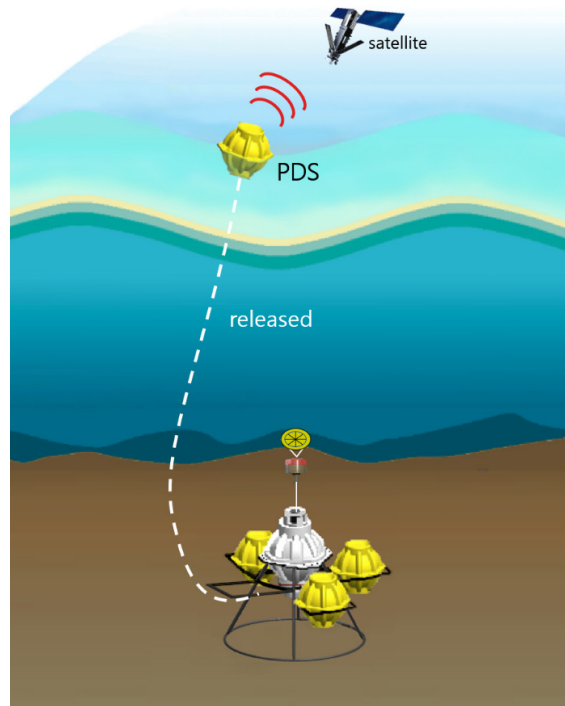


Fig. 6. Concept of data recovery using Pop-up Data Shuttle (PDS) attached to CIPES.

신 및 저장하고, 계류 전에 입력된 부상 일정에 따라 해수면으로 떠오른다. 해수면에 부상한 후에는 이리듐(Iridium)위성을 통해 자료를 전송한다. PDS를 통해 획득된 자료는 30분~1시간 간격 자료로 음향 원격자료전송법을 통해 획득한 자료(1일 간격)보다 시간적으로 고해상도이다. 따라서 일간격자료에서는 살펴보기 힘든 내부파 등과 같은 단주기 변동성을 살펴볼 수 있다(Jeon *et al.*, 2021).

PDS를 활용한 원격 자동자료획득방법은 막대한 비용절감과 시간적 고해상도 자료라는 장점 외에도 자료획득 과정이 음향 원격자료전송법보다 수월하다. PDS의 활용은 기상악화, 높은 파랑, 해빙이나 빙산 등과 같은 안전한 선박운항의 위협요인으로부터 자유롭고, 수중음향통신과정에서 섞일 수 있는 잡음(noise)에서도 자유롭다. 음향 원격자료전송법 운용 시 선박 현측에 설치 및 운용하는 음향장비의 망실 위험성이 없다는 점도 큰 이점이라 할 수 있다. 최근 남중국해와 극한환경의 북극해에서 PDS를 활용한 시험적 원격 자동자료전송 현장실험이 성공적으로 수행되어서(Jeon *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021) 향후 PDS를 활용한 자료전송방법이 널리 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

3.3 PIES 관측자료의 준실시간 및 실시간 자료획득방법 전망

PDS를 활용한 원격 자동자료획득방법은 고효율, 저비용, 높은 안정성의 기술임에도 불구하고 자료획득 횟수의 제한(PIES와 함께 계류한 PDS개수로 자료획득 횟수가 결정됨)과 시기의 제한(계류 시 설정한 PDS 부상일정에 자료 회수)이 있다. 다시 말해 위성관측자료와 같은 (준)실시간 자료획득이 어렵다는 한계가 있다. (준)실시간으로 PIES 관측자료가 획득된다면 (준)실시간 해양 모니터링이 가능해지고 해양 예보 성능의 향상을 꾀할 수 있을 것이다. 아직 PIES 관측에는 활용되고 있지 않지만 향후 활용가능성 높은 (준)실시간 PIES 관측자료획득방법에 대해 소개하고자 한다.

저위도 및 중위도 해양에서는 음향 변환기를 장착한 무인 관측선, 파랑 글라이더, 수중 글라이더를 활용한 준실시간 자료획득을 생각해 볼 수 있다. 이러한 플랫폼들이 현재보다 더 활성화된다면 자료 회수의 시기와 횟수 제한없이 PIES 계류 정점

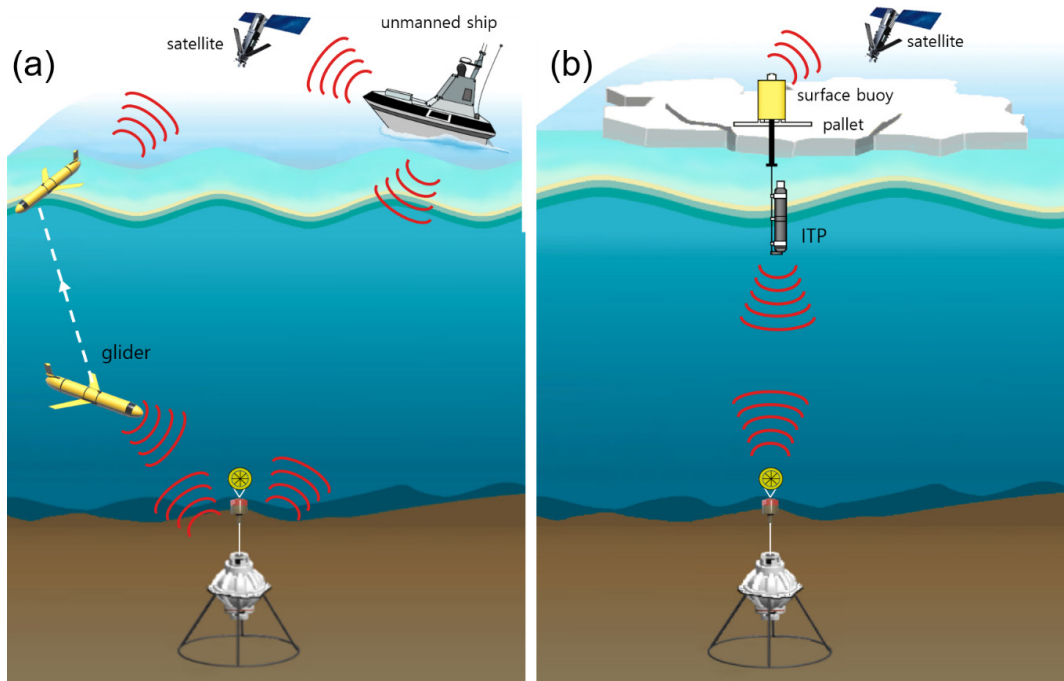


Fig. 7. Concept of future near-real-time CRIES data harvesting system using (a) underwater glider or unmanned ship and (b) drifting ice-tethered profiler (ITP) in polar ocean.

에서 음향 원격자료전송법을 이용한 관측자료수집(data harvesting) 및 위성통신을 통한 자료전송방식이 가능할 것이다(Fig. 7(a)). 한편 해빙이나 빙산 등이 존재하는 극해양에서는 얼음과 함께 표류하며 해양내부를 관측하는 부유식 관측장비인 해빙 고정형 프로파일러가 쓰이고 있다. 해빙고정형 프로파일러에 부착된 음향 변환기를 통해 계류된 PIES 관측자료를 수집하여 전송한다면 해빙이 해수면을 완전히 덮는 시기(결빙시기)에도 관측자료 회수가 가능할 것이다(Fig. 7(b)). 다만 이동경로 선택이 어려운 해빙고정형 프로파일러는 PIES 계류 정점에 근접하는 경우에 한하여 자료 회수가 가능하기 때문에 보다 준실시간 자료획득을 위해서는 PDS도 함께 활용하여 자료획득 기회를 높이는 방법이 있을 것이다.

온전한 실시간 자료획득을 위한 방법으로는 계류된 PIES에 실시간으로 전원을 공급하고 자료를 획득하는 시스템이 있을 수 있다. 효율성을 생각하면 상시관측을 수행하는 타 계류시스템과의 연계 방식도 생각해 볼 수 있다. 위성통신수단이 장착된 표층부표 혹은 계류선 중간에 음향 변환기를 장착한다면 음향 원격자료전송법을 활용한 자료획득과 위성통신을 이용한 실시간 자료획득이 가능할 것이다(Fig. 8).

음향 변환기가 장착된 무인 플랫폼에서 음향 원격자료전송법을 활용한 (준)실시간 자료획득시 음파가 도달가능한 유효수평반경(L)을 고려해야한다. 유효수평반경은 해수면을 향하는 PIES의 음향방사각도(acoustic radiation beam, θ)와 수심(D)으로 결정된다($L=D\tan\theta$). PIES 음향 변환기의 음향방사각도가 $\pm 45^\circ$ 이므로(Kennelly *et al.*, 2007) 사실상 유효수평반경은 수심과 동일하다. 예를 들어 수심 3,000 m에 계류된 PIES와 통신하는 해수면 상에 위치한 무인 플랫폼의 경우의 유효수평반경은 계류 지점으로부터 3,000 m가 된다. 하지만 PIES가 계류된 해저면 경사도(일반적으로 최대 5° 이하)나 무인 플랫폼에 장착된 음향 변환기의 음향방사각도를 고려하면 안정적으로 통신 가능한 유효수평반경은 줄어들 수 있다. 수중에서 PIES와 통신하는 플랫폼의 경우는 총 수심에서 플랫폼의 수심을 제외해야 하기 때문에 해수면에 위치한 음향 변환기보다 통신 가능한 수평반경이 보다 줄어들게 된다. 또한 해류나 파에 의한 영향으로부터 안정적인 자료획득을 위해서는 무인 플랫폼의 유효수평반경 내 선회 등의 운용도 필요하다.

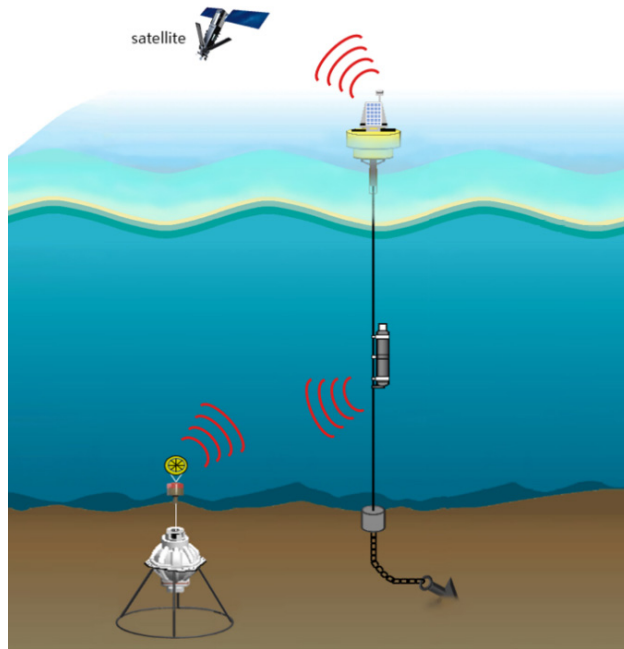


Fig. 8. Concept of future real-time C-PIES data acquisition system connected with tall mooring system.

4. 결론 및 요약

본 논문은 PIES를 이용하여 살펴볼 수 있는 해양학적 현상과 특징을 정리하고, 계류된 PIES 장비의 회수없이 관측자료를 원격으로 획득하는 방법의 현재와 전망에 대해 서술하였다. PIES는 해저면-해수면 간 왕복음향전파시간(τ)과 해저압력을 측정하고 단층 해류계가 추가된 C-PIES의 경우는 해저면 50 m 상층의 해류도 함께 측정한다. PIES 또는 C-PIES를 활용하여 해류, 중규모 소용돌이, 내부파, 해면고도변화 등을 관측할 수 있고, 통계적인 경험적 최적 연직구조 결정기술을 활용하면 수온 및 염분 연직구조 산출이 가능하다.

PIES 장비의 직접 회수없이 관측자료를 원격으로 획득하는 방법에는 음향 원격자료전송법과 PDS를 활용하는 방법이 있다. 이 방법들은 PIES 관측자료를 안정적이고 효율적으로 회수할 수 있지만, (준)실시간 자료획득에는 한계가 있다. 실현 가능한 (준)실시간 자료획득을 위한 방법은 음향 변환기가 장착된 무인 관측선, 파랑 글라이더, 수중 글라이더, 해빙고정형 프로파일러, 타 계류관측시스템 등을 활용하는 방법일 것이다. 음향을 활용하는 PIES를 여타의 음향 변환기를 장착한 무인 플랫폼과 융합 활용한다면 연안 및 원해에서 효율적인 해양관측과 원격 자동자료획득이 가능할 것으로 사료된다.

사 사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌(References)

- Along-track Level-2+ (L2P) SLA Product Handbook. 2017. Nomenclature: SALP-MU-P-EA-23150-CLS (September 2017).
 Andres, M., A. Silvano, F. Straneo and D.R. Watts, 2015. Icebergs and Sea Ice Detected with Inverted Echo Sounders.

- Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, **32**(5): 1042-1057. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00161.1>.
- Andres, M., M. Wimbush, J.-H. Park, K.-I. Chang, B.-H. Lim, D.R. Watts, H. Ichikawa and W.J. Teague, 2008. Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, **113**(C5): C05013. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JC004200>.
- Book, J.W., M. Wimbush, S. Imawaki, H. Ichikawa, H. Uchida and H. Kinoshita, 2002. Kuroshio temporal and spatial variations South of Japan determined from inverted echo sounder measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **107**(9). DOI: <https://doi.org/10.1029/2001jc000795>.
- Donohue, K.A., D.R. Watts, K.L. Tracey, A.D. Greene and M. Kennelly, 2010. Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of current and pressure recording inverted echo sounders. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **27**(3): 507-527. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JTECHO686.1>.
- Donohue, K.A., M.A. Kennelly and A. Cutting, 2016. Sea surface height variability in drake passage. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **33**(4): 669-683. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0249.1>.
- Hwang, C., H.S. Min, C. Jeon, D.G. Kim and J.-H. Park, 2021. Estimation of Sea Surface Height using Pressure-recording Inverted Echo Sounders Data in the Mindanao Current Region. *Ocean and Polar Research*, **43**(4): 219-227. DOI: <https://doi.org/10.4217/OPR.2021.43.4.219>.
- Jeon, C., J.-H. Park, D.G. Kim, E. Kim and D. Jeon, 2018. Comparison of Measurements from Pressure-recording Inverted Echo Sounders and Satellite Altimetry in the North Equatorial Current Region of the Western Pacific. *Ocean Science Journal*, **53**(2): 207-213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12601-018-0012-4>.
- Jeon, C., J.-H. Park, M. Kennelly, E. Sousa, D.R. Watts, E.-J. Lee, T. Park and T. Peacock, 2021. Advanced Remote Data Acquisition Using a Pop-Up Data Shuttle (PDS) to Report Data From Current- and Pressure-Recording Inverted Echo Sounders (CPIES). *Frontiers in Marine Science*, **8**(July): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.679534>.
- Kennelly, M., K.L. Tracey and D.R. Watts, 2007. Inverted echo sounder data processing manual. GSO Tech. Rep., University of Rhode Island
- Na, H., D.R. Watts, J.-H. Park, C. Jeon, H.J. Lee, M. Nonaka and A.D. Greene, 2016. August. Bottom pressure variability in the Kuroshio Extension driven by the atmosphere and ocean instabilities. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **121**(8): 6507-6519. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JC012097>.
- Na, H., J.-H. Park, D. Randolph Watts, K.A. Donohue and H.J. Lee, 2012. Near 13 day barotropic ocean response to the atmospheric forcing in the North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**(12): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JC008211>.
- Na, H., M. Wimbush, J.-H. Park, H. Nakamura and A. Nishina, 2014. Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. **119**(2): 689-703. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JC008899>.
- Nagano, A., T. Hasegawa, H. Matsumoto and K. Ariyoshi, 2018. Bottom pressure change associated with the 2004-2005 large meander of the Kuroshio south of Japan. *Ocean Dynamics*, **68**(7): 847-865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1169-1>.
- Nagano, A., Y. Yamashita, K. Ariyoshi, T. Hasegawa, H. Matsumoto and M. Shinohara, 2021. Seafloor Pressure Change Excited at the Northwest Corner of the Shikoku Basin by the Formation of the Kuroshio Large-Meander in September 2017. *Frontiers in Earth Science*, **8**(January): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.583481>.
- Park, J.-H. and D.R. Watts, 2005. Response of the southwestern Japan/East Sea to atmospheric pressure. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **52**(11-13): 1671-1683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.08.007>.
- Park, J.-H. and D.R. Watts, 2006a. Internal Tides in the Southwestern Japan/East Sea. *Journal of Physical Oceanography*, **36**(1): 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO2846.1>.
- Park, J.-H. and D.R. Watts, 2006b. Near 5-day nonisostatic response of the Atlantic Ocean to atmospheric surface pressure deduced from sub-surface and bottom pressure measurements. *Geophysical Research Letters*, **33**(12): 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL026304>.

- Park, J.-H., D.R. Watts, K.A. Donohue and K.L. Tracey, 2012. Comparisons of sea surface height variability observed by pressure-recording inverted echo sounders and satellite altimetry in the Kuroshio Extension. *Journal of Oceanography*, **68**(3): 401-416. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10872-012-0108-x>.
- Park, J.-H., D.R. Watts, K.A. Donohue and S.R. Jayne, 2008. A comparison of in situ bottom pressure array measurements with GRACE estimates in the Kuroshio Extension. *Geophysical Research Letters*, **35**(17): 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL034778>.
- Park, J.-H., D.R. Watts, K.L. Tracey and D.A. Mitchell, 2005. A multi-index GEM technique and its application to the southwestern Japan/East Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **22**(8): 1282-1293. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-1668.1>.
- Park, J.-H., K.A. Donohue, D.R. Watts and L. Rainville, 2010. Distribution of deep near-inertial waves observed in the Kuroshio Extension. *Journal of Oceanography*, **66**(5): 709-717. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0058-0>.
- Popeye Data Shuttle User's Manual. 2021. Graduate School of Oceanography. Narragansett, RI: University of Rhode Island.
- Sun, C. and D.R. Watts, 2001. A circumpolar gravest empirical mode for the Southern Ocean hydrography. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **106**(C2): 2833-2855. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000jc900112>.
- Watts, D.R., C. Sun and S. Rintoul, 2001a. A Two-Dimensional Gravest Empirical Mode Determined from Hydrographic Observations in the Subantarctic Front. *Journal of Physical Oceanography*, **31**(8): 2186-2209. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<2186:ATDGEM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<2186:ATDGEM>2.0.CO;2).
- Watts, D.R., X. Qian and K.L. Tracey, 2001b. Mapping Abyssal Current and Pressure Fields under the Meandering Gulf Stream. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**(6): 1052-1067. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1052:MACAPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1052:MACAPF>2.0.CO;2).
- Watts, D.R., M. Wimbush, K. Tracey, W. Teague, J.-H. Park, D. Mitchell, J.-H. Yoon, M.-S. Suk and K.-I. Chang, 2006. Currents, Eddies, and a "Fish Story" in the Southwestern Japan/East Sea. *Oceanography*, **19**(3): 64-75. DOI: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2006.44>.
- Zhao, R., H. Nakamura, X.-H. Zhu, J.-H. Park, A. Nishina, C. Zhang, H. Na, C. Jeon, Z.-N. Zhu and H.S. Min, 2020. Tempo-spatial variations of the Ryukyu Current southeast of Miyakojima Island determined from mooring observations. *Scientific Reports*, **10**(1): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63836-5>.
- Zhao, R., X.-H. Zhu, C. Zhang and H. Zheng, 2021. The first near real-time inverted echo sounder observation in the South China Sea, **40**(6): 129-130.
- Zheng, H., X.-H. Zhu, H. Nakamura, J.-H. Park, C. Jeon, R. Zhao, A. Nishina, C. Zhang, H. Na, Z.-N. Zhu and H.S. Min, 2020. Generation and propagation of 21-day bottom pressure variability driven by wind stress curl in the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, **39**(7): 91-106. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1603-3>.
- Zhu, X.-H., I.S. Han, J.-H. Park, H. Ichikawa, K. Murakami, A. Kaneko and A. Ostrovskii, 2003. The Northeastward current southeast of Okinawa Island observed during November 2000 to August 2001. *Geophysical Research Letters*, **30**(2): 3-6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002GL015867>.