Article

열대 태평양에서 운영되는 TRITON 부이와 비교를 통한 KORDI 부이 시스템 개선 연구

김동국¹ · 전동철^{1*} · 김 응¹ · 황근춘² · 황상철¹

¹한국해양연구원 기후·연안 재해 연구부

²한국해양연구원 기기검교정·분석센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

A Study for Improving the KORDI Buoy System in Comparison with TRITON Buoys in the Tropical Pacific Ocean

Dong Guk Kim¹, Dongchull Jeon^{1*}, Eung Kim¹, Keun-Choon Hwang², and Sang-Chul Hwang¹

¹Climate Change & Coastal Disaster Reserach Department, KORDI

²Oceanographic Measurement & Instrument Calibration Service Center, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : This study documents KORDI's experience of successfully deploying a deep ocean buoy for monitoring oceanic and atmospheric variabilities in the tropical western Pacific Ocean since May 2010. The primary focus of this study was to compare TRITON (big and old type) with m-TRITON (smaller and new type) buoys within the JAMSTEC's buoy management system. The objective of operating a KORDI buoy is to ascertain oceanic variability in the tropical western Pacific. We adopted a slack-line mooring type to observe water temperatures at six layers from surface to 400 m depth. However, we could not acquire satisfactory results due to lack of expertise in buoy management system. A new KORDI buoy has been developing, which has been modified from both buoys, and ARGOS-3 satellite system and a slack-type mooring line.

Key words : oceanic and atmospheric variabilities, TRITON buoy, KORDI buoy, ARGOS-3 satellite system, slack-line mooring

1. 서 론

열대 태평양에서 발생하는 대기·해양의 변화는 전지구적인 기후 시스템에 중요한 역할을 한다. 특히 1982-83년과 1997-98년에 발생한 엘니뇨 남방진동(El Niño-Southern Oscillation : ENSO) 현상으로 인하여 열대 태평양의 변동이 중위도인 한국에도 직·간접적으로 영향을 미치는 것을 알게 되었고, 우리에게도 열대 태평양의 실시간

관측 모니터링 시스템 구축의 필요성이 대두되었다. 미국 해양대기청(NOAA)은 1984년 말에 ENSO 현상 연구를 위해 ATLAS(Autonomous Temperature Line Acquisition System) 부이를 정선 110°W에 처음 설치한 이후, 미국, 일본, 프랑스 등 여러 나라가 10년간 TOGA(Tropical Ocean Global Atmosphere) 프로그램을 통해 정선 95°W부터 165°E까지 8개 정선 55개 정점에서 TAO(Tropical Atmosphere Ocean) 관측망을 구축하였다(Hayes et al. 1991; McPhaden et al. 1998). 우리나라도 TOGA 국제 공동연구사업의 일환으로 1992년에 NOAA의 ATLAS 부이

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

교체 탐사에 참여하여 부이 운영 시스템에 대한 필요성과 중요성에 대하여 인식한 바 있다(이와 김 1993).

일본해양연구개발기구(JAMSTEC)는 서태평양과 인도양의 워풀(warm pool)의 생성과 소멸을 이해하기 위해 1998년 서태평양 정선 156°E의 4개 정점(8°N, 5°N, 2°N와 적도)에 TRITON(Triangle Trans Ocean Buoy Network) 부이를 운영하기 시작하여 현재는 서태평양과 인도양 해역에 18개의 부이를 운영하고 있다. 1999년 JAMSTEC은 NOAA에서 운영 중이던 정선 156°E, 147°E와 137°E의 12개 ATLAS 부이 정점에 TRITON 부이를 독자적으로 운영하기 시작하면서 NOAA와 JAMSTEC이 열대 태평양에서 운영하는 67개의 부이 모니터링 프로그램을 2000년 1월부터는 흔히 'TAO-TRITON Array'로 부르기도 한다(http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/triton.html). 열대 부이 프로그램의 가장 큰 의미는 육지에 한정적이던 실시간 관측 시스템을 해양에 구축하였다는 것이다. TAO-TRITON Array에서 수집된 자료는 수치 모델링의 기초 자료로 활용되면서 ENSO 현상의 발생 시기 및 그에 따른 기후 변동에 대한 예측을 가능하게 하였고, 대기와 해양의 매커니즘을 밝힐 수 있는 연구 자료로 활용되었다(McPhaden et al. 1998; Kuroda and Amitani 2001).

한국해양연구원(KORDI)은 '북서태평양이 한반도 주변 해에 미치는 영향 연구(POSEIDON)'의 일환으로 2010년 5월부터 마이크로네시아(FSM) 축섬 북방 약 250 km 지

점(151°34.49'E, 9°50.63'N)에 표면 부이를 설치하여 ARGOS-2 위성 통신 시스템을 이용한 실시간 시험 관측을 수행하였다. 이 시스템은 우리나라에서 열대 태평양 해역 상의 표면 부이에 ARGOS 위성 통신 시스템을 이용한 첫 번째 시도로, 대양 표면 부이를 운영하기 위한 계류·회수·유지·자료 전송 등에 대한 초기 단계의 시스템을 구축하였다.

한국해양연구원에서는 체계적인 표면 부이의 개발과 운영을 위하여 JAMSTEC에서 운영 중인 정선 157°E와 147°E의 9개 정점에 대한 부이 교체 탐사인 MIRAI 10-07(Fig. 1)에 엔지니어를 파견하여 부이 운영 방법과 하드웨어 시스템에 관한 현장 운용 지식을 습득하였다. 본 연구에서는 이 경험과 지식을 바탕으로 한국해양연구원의 표면 부이 시스템의 개선 사항에 대하여 알아보았다.

2. JAMSTEC의 열대 해역 표면 부이 시스템

TRITON 부이와 m-TRITON 부이의 구조적 특성

JAMSTEC은 대양에서 표면 부이를 운영하기 위하여 1992-94년 동안 TRITON 부이의 설계와 부이 움직임에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 1995년 이후, 오가사와라 섬 근방 수심 4000 m에서 실질적인 운영 점검을 수행하였고, 1998년 초 정선 156°E의 8°N, 5°N, 2°N와 적도에 표면 부이를 계류하기 시작하였다(http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON/real_time/overview.php/po-s1.php).

Fig. 1. TAO (■)/TRITON (■) buoy locations in the western Pacific and sea surface temperatures along the MIRAI 10-07 cruise track

Fig. 2. TRITON (left) and m-TRITON (right) buoys

2005년부터 TRITON 부이의 단점을 보완하기 위해 자료 전송률이 높은 ARGOS-3 위성 통신 시스템을 기반으로 하는, 부피가 작고 조작성 간편한 m-TRITON(mini-TRITON) 부이를 개발하기 시작하여 2009년에 처음으로 인도양에 설치하였다. 현재 서태평양 해역 15개 정점에는 초기의 TRITON 부이를, 인도양 3개 정점에는 새로 개발된 m-TRITON 부이를 운영 중에 있다.

TRITON 부이는 직경 2.4 m, 높이 2.13 m의 염화비닐(vinyl chloride) 폼(foam)으로 만들어진 원통 모형의 선체(hull)와 높이 2.2 m의 알루미늄 타워로 구성된다(Fig. 2, left). 부력계 역할을 하는 선체 내부에는 4개의 튜브가 있으며, 튜브 1개는 자료 처리 장치(data processing unit)용이고 나머지 3개는 배터리팩용으로 사용된다. 자료 전송용 위성 안테나는 튜브가 들어가는 선체 상부의 홀 덮개에 장착된다. 각종 기상 관측 장비가 장착되는 타워는 알루미늄 재질이나, 파손이 빈번히 발생하는 곳에서는 강도가 높은 스테인리스 강철을 사용한다. 조립된 부이의 무게는 2.4톤으로 ATLAS 부이나 m-TRITON 부이 보다 3배 가량 무겁다.

m-TRITON 부이의 선체는 얇은 폴리에틸렌(polyethylene) 폼을 겹쳐 만든 구조로 외부는 우레탄(urethane)으로 코팅한 직경 1.8 m, 높이 0.8 m의 선체 2개로 구성되어 있다. 선체 하나의 무게는 80 kg으로 선박에서 크레인 없이 쉽게 조립이 가능하다. TRITON 부이의 선체 내부에 들어갔던 4개의 튜브는 선체 밑에 장착되고, 부이의 균형을 잡아주기 위해 기둥의 하단에는 추(ballast)가 달려 있다. 일자형 기둥으로 이루어진 부이 타워의 상부에는 TRITON 부

이와 동일한 기상 관측 장비가 장착된다. 조립된 부이의 높이는 5.32 m, 무게는 800 kg이고 부이의 부력은 2.4톤이다(Fig. 2, right). m-TRITON 부이는 쉽게 분리할 수 있는 장점 때문에 소형 선박에서도 계류·회수가 가능하고, 부이 가격과 유지관리비가 TRITON 부이보다 저렴하다.

현재 TAO-TRITON array에서 사용하는 위성 통신 시스템은 80 kHz 대역폭의 8채널 ARGOS-2 위성 통신 시스템으로 단방향 방식(single way)이고, 자료 전송 용량의 한계(200 bps×256 bit)로 인하여 전송 주기가 많고 관측 인자의 개수가 한정되어 있다. 전송 주기와 용량을 줄이기 위해 10분 간격으로 관측한 원시자료(raw data)는 1시간 평균하여 전송하기 때문에 원시자료는 부이를 회수해야만 얻을 수 있다. NOAA는 이러한 문제를 해결하기 위해서 이리듐(Iridium)을 이용한 위성 통신을 현재 실험 중이고, JAMSTEC은 2009년 80 kHz와 110 kHz 대역폭의 12채널을 사용하는 ARGOS-3 위성 통신 시스템을 이용한 부이 관측 자료 통신 실험에 성공하였다. ARGOS-3 위성 통신 시스템을 사용하는 부이는 현재보다 10배 가량 많은 자료를 전송할 수 있고, 단방향 방식이 아닌 반이중 방식(half duplex)의 통신으로 수신 오류에 대한 점검이 가능하다(http://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20090413/). 자료 전송 방법에 따라 전원 사용량이 기존 대비 약 1/3로 적어져, 배터리팩이 작아지고 위성 통신비가 절감되는 장점이 있다.

TRITON 부이에는 기상센서로 풍향(wind direction), 풍속(wind speed), 기온(air temperature), 상대습도(relative humidity), 강우량(precipitation), 단파 복사(short-wave solar radiation)와 기압(barometric pressure) 센서들이 기본적으로 장착되고, 해양 센서는 Sea-Bird사의 SBE37-IM을 수심 750 m까지 총 12개를 장착한다. 해양 센서들의 관측 수심을 보정하기 위해 수심 300 m와 750 m에는 압력 센서가 있는 CTD(Conductivity Temperature Depth)를 장착한다. 각각의 수온·염분(CT) 센서의 관측 수심은 혼합층과 수온약층의 변동을 잘 설명해 주어야 하기 때문에 NOAA에서 운영하는 대서양과 동태평양 140°W~95°W 해역은 표면, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180, 300, 500 m 수심에 수온센서가 장착되고, NOAA와 JAMSTEC에서 운영하는 137°E~155°W 해역은 표면, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 500 m 수심에서 수온 관측을 하고 있다. 해역에 따라 수온센서가 장착되는 수심이 다른 것은 각 해역의 수온약층 특성이 다르기 때문이다(Freitag et al. 2005). 대서양과 동태평양은 수온약층이 강하게 나타나기 때문에 상층에서 20 m 간격으로 관측을 하게 되고, 서태평양 해역은 대서양과 동태평양보다 수온약층이 약하기 때문에 25 m 간격으로 관측한다(Table 1).

Table 1. Standard depths (meters below sea surface) for temperature modules in TAO and TRITON moored arrays

Western Pacific (165°E to 155°W) : NOAA	1	25	50	75	100	125	150	200	250	300	500	
Western Pacific (130°E to 156°E) : JAMSTEC	1	25	50	75	100	125	150	200	250	300	500	750
Eastern and Central Pacific (140°W to 95°W)	1	20	40	60	80	100	120	140	180	300	500

Fig. 3. Schematic mooring configuration of a TRITON buoy

TRITON 부이 계류 시스템

TRITON 부이의 계류 시스템은 부이 본체, 와이어 케이블, 20 mm 나일론 로프, 회수 부이, 24 mm 나일론 로프, 음향 분리기와 앵커 순으로 구성된다(Fig. 3). 부이를 계류하기 전에 선상 갑판에서 부이에 장착되는 모든 센서들을 연결하여 센서 작동과 위성 통신의 이상 유무를 확인한다. 부이 조립과 점검이 끝나면, 부이는 갑판에 설치된 레일을 이용하여 선미 갑판으로 옮겨지고, 대형 TRITON 부이를 안전하게 내리기 위해 특별 제작된 A-프레임을 이용하여 계류를 한다(Fig. 4a). 이때 선수를 부이의 계류 및 회수시에 해류의 역방향으로 위치하게 하여 부이와 선박이 충돌하지 않도록 해준다. 정점의 수심에 따라 나일론 로프의 길이가 달라지기 때문에 사전에 미리 정해진 순서대로 두 개의 윈치를 사용하여 나일론 로프를 풀어준 후, 계류선의 하단에 앵커와 계류선을 분리하기 위한 회수 부이와 음향분리기를 연결한다.

와이어 케이블은, 전기유도 모뎀케이블(Inductive modem cable)이라고 하며 길이 750 m 폴리에틸렌으로 코팅된 직경 16 mm(10.3 mm: 코팅 전 와이어 직경) 케이블로 전기유도를 통하여 37IM(장비명)에서 관측한 수온·염분값을

전기유도 모뎀커플러(inductive modem coupler)까지 전달하는 역할을 한다. 와이어 케이블의 폴리에틸렌 코팅이 파손되어 케이블에 해수가 유입되면, 전류가 순환되지 않아 전기 신호가 끊어져 관측 자료가 부이 내부에 있는 자료 처리장치로 전달되지 않는다. 따라서 계류시 와이어 케이블의 파손 여부를 확인하면서 계류 작업이 이루어진다. TRITON 부이 계류에 사용되는 와이어 케이블은 물고기에 의한 케이블 파손과 해류에 의한 케이블 떨림을 방지하기 위해 폴리에틸렌 재질의 나선형 밴드(spiral wrapping band)를 씌워 사용하고 있다(Fig. 4b).

와이어 케이블에 센서를 장착할 때, 선박은 이동을 멈추고 선박에 고정된 와이어 케이블에 센서를 안전하게 장착시켜 주고, 케이블에는 센서의 파손이나 그물 걸림을 막기 위해 보호케이스를 씌워준다(Fig. 4c). 와이어 케이블에 센서 장착이 끝나면, 갑판에 있는 두 개의 계류용 윈치(winch)를 이용하여 나일론 로프를 순차적으로 풀어준다. 계류선에 나일론 로프를 사용하는 이유는 20%의 신축성이 있는 나일론 로프를 수심보다 85% 짧게 주어 계류선이 기울어지지 않고 수직으로 반듯하게 세워 와이어 케이블에 장착된 센서를 정해진 수심에 위치시키기 위함이다. 계류선을 수심보다 짧게 주기 때문에 신축성이 있는 나일론 로프는 많은 장력을 받게 된다. 굵은 나일론 로프를 사용할 경우 해류에 대한 저항이 커지기 때문에 회수 부이를 기준으로 상부에는 직경 20 mm, 하부에는 직경 24 mm 나일론 로프를 사용하여 계류선 상부의 저항을 줄여준다. 각각 8톤과 10톤의 장력까지 견딜 수 있다. 나일론 로프의 연결부는 샤클과의 쓸림에 의한 절단을 막기 위해 플라스틱판으로 된 연결고리에 샤클을 끼워 연결한다(Fig. 4d). 나일론 로프의 끊어짐을 방지하기 위해서 한번 사용하여 노후화된 나일론 로프는 재사용하지 않는다(Yamaguchi et al. 2004). 계류선에 사용되는 강철 샤클과 체인은 표면에 아연도금을 하여 해수에 의한 부식을 막고, 부식방지용 아연 덩어리를 샤클핀에 끼워주어 금속 부식에 의한 계류선 파손을 최대한 막아준다(Fig. 4e). 해류와 바람에 의해 표면 부이가 회전하여 계류선이 꼬이는 것을 방지하기 위해 와이어 케이블 하단, 회수 부이 하단과 음향분리기 상단에 각각 5톤의 장력을 견딜 수 있는 베어링 스윙블(bearing swivel)을 사용한다(Fig. 4f).

붉은색의 직사각형 모형(0.6 m×0.6 m×1.5 m)으로 된 회수 부이(1개의 부력: 237 kg)는 계류선의 수심 1500~2000 m 사이에 5개가 연결된다(Fig. 4g). 회수 부이는 앵

Fig. 4. Deployment of a TRITON buoy (a: TRITON buoy, b: wire rope, c: CTD sensor, d: Nylon rope, e: shackle and chain, f: bearing swivel, g: recovery buoy, h: anchor)

커에서 분리된 계류선을 해수면까지 끌어올리는 역할을 한다. 표면 부이 회수를 위해 계류선과 앵커는 수중 음향 통신을 통해 작동하는 음향 분리기를 사용하여 분리시켜 준다. 계류선에는 음향 분리기 오작동으로 인한 회수 실패를 방지하기 위해 2개의 음향 분리를 수직으로 하나씩 연결한다. 앵커의 무게는 부이의 부력에서 부이의 무게를 뺀 것보다 무겁게 설계해야만 해수면에서 움직이는 부이를 앵커가 고정시킬 수 있다. TRITON 부이의 무게를 제외한 부이의 부력은 3.3톤으로 부력보다 무거운 4톤의 앵커를 사용한다(Fig. 4h).

m-TRITON 부이 계류 시스템

TRITON 부이는 서태평양과 인도양에서 대기과 해양의 자료 관측을 성공적으로 수행하였지만, 직경 2.4 m, 무게 2.4톤인 대형 부이를 운영하기 위해서는 대형 선박이 꼭 필요하고 부이 운영 자금이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 JAMSTEC은 소형 선박에서도 쉽게 계류할 수 있는 새로운 형태의 부이인 m-TRITON 부이를 개발하였다(Ueki et al. 2010).

소형 선박에서도 계류·회수를 하기 위해 제작된 m-TRITON 부이는 크기와 계류선 구성에서 TRITON 부이

와 큰 차이가 있다. TRITON 부이는 나일론 로프의 길이를 수심의 85% 주어 팽팽한 계류선을 유지하여 와이어 케이블에 장착된 센서의 수심 변동은 최소화 시켰다. 하지만 이 팽팽한 계류선은 선박과의 충돌시 부이 파손 가능성의 증가 문제, 4톤의 앵커에도 불구하고 부이 부력으로 인한 앵커의 끌림 문제, 그리고 부이가 물에 잠겨 선체 내부에 해수가 유입되어 부이 시스템이 작동되지 않는 문제 등의 원인이 되기도 한다.

m-TRITON 부이의 계류선은 TRITON 부이 계류선의 단점을 보완하기 위해서 수심보다 130% 정도 길다. 수심보다 긴 계류선의 장점은 장력을 적게 받아 계류선의 굽기가 얹어져 저항을 적게 받고, 작은 크기의 샤클이나 앵커를 사용하게 되어 계류 유지비용이 절약된다. 긴 계류선을 사용하게 될 경우, 와이어 케이블이 기울어져 센서의

상하 이동이 커지는 문제로 인하여 모든 센서에 수압 (pressure) 센서를 설치하여야 하고, Akima spline method (Akima 1970)와 같은 보간법을 이용하여 수심에 대한 1차적인 자료 보정을 해주어야 한다(Ueki et al. 2010). 해류에 의한 와이어 케이블 저항을 줄이기 위해 m-TRITON 부이의 와이어 케이블에 나선형 홈을 내어 해류의 영향을 줄이고, 케이블 하단에 100 kg의 추를 달아 센서의 수심 변동폭을 줄였다. 나선 형태의 와이어 케이블은 계류 중 발생하는 케이블의 뒤틀림(kink) 현상을 방지하는 역할을 한다(Yusuke et al. 2006).

JAMSTEC 열대 해역 표면 부이 관측 결과

현재의 부이 시스템은 위성 통신의 전송 용량 한계로 인하여 한정된 수심에서만 자료 관측이 이루어지고 있다.

Fig. 5. Comparison of sea temperatures between TRITON buoys (red spot and blue line) and CTD (black line) at the mooring sites along 147°E and 156°E

Fig. 6. Comparison of temperatures obtained from the CTD castings and from the moored buoys

JAMSTEC의 부이 시스템은 12개 층의 수온·염분 값을 이용하여 그 해역의 특성을 제시하기 때문에 관측된 자료의 검·보정은 매우 중요하다.

MIRAI 10-07 탐사는 부이의 센서 보정을 위해 계류 정점과 회수 정점에서 SBE 9-11 CTD를 이용하여 수심 800m까지 수온과 염분을 관측하였다. Fig. 5는 선박에서 관측한 표면 부이 계류선 9개 정점의 수온 자료(검은색 선)와 표면 부이 계류선에서 관측한 12개 수심에서의 자료(빨간색 점)를 이용하여 1m 간격으로 내삽하여 구한 수온 자료(파란색 선)로 각 정점의 해역 특성을 잘 보여 준다. 선박에서 관측한 CTD 관측 자료와 부이에서 관측한 동일한 수심에서의 수온 관계를 보면 결정계수(R-squared)가 0.998로 혼합층과 심층의 수온 차이는 없었다. 수심별 수온 차이가 큰 층은 12~25°C의 수온분포가 나타나는 수온 약층으로 정점에 따라 최대 1°C 이상 온도차가 있다 (Fig. 6).

표면 부이의 계류선에 장착되는 CT 센서는 1년 6개월 동안 장기간 해수에 노출되어 센서의 드리프트(drift)가 발생할 수 있다. 수온 센서의 경우 계류와 회수시 센서의 드리프트는 전층에서 0.003 mK/yr 정도로 큰 오차는 나타나지 않는다. 염분 센서의 경우 표층에서 수심 100m까지 0.065 psu/yr 정도로 센서의 드리프트가 크게 나타나지만 수심 250m 이하의 수심은 센서의 기본 오차 범위보다 작은 값의 센서 드리프트가 나타난다(Matsumoto et al. 2001; Ando et al. 2005). 수온약층에서 나타나는 수온 차이는 기계적인 원인보다는 계류선의 상하 이동으로 인한 차이로 보인다.

3. KORDI 열대 해역 표면 부이

KORDI 표면 부이 계류 시스템

한국해양연구원은 북서태평양 해역에 대형 원반부이를 개조하여 실시간 위성 통신 표면 부이 시스템을 구축하였다. 알루미늄 재질의 타워는 기상 관측을 위한 풍향·풍속, 기온, 상대습도, 기압, 단파복사, 강수량 센서와 태양전지판, 그리고 ARGOS 전송기가 장착되어 있다. 풍향·풍속 센서는 도난과 파손을 방지하기 위하여 기존의 프로펠러식이 아닌 음파 도플러식의 센서를 사용하였다. 선체는 직경 3m의 알루미늄으로 내부에는 자료저장장치(data logger)와 배터리가 들어가고, 계류선과 연결되는 선체의 하부는 해수에 의해 부식되는 것을 막아주기 위해서 스테인리스 강철로 되어 있다.

표면 부이 하부에서부터 수심 400m까지는 Sea-Bird사의 MicroCAT(SBE-37IM)을 사용하여 관측된 수온·염분 자료의 실시간 통신을 위해 폴리에틸렌으로 코팅된 16mm 전기유도 모뎀케이블을 계류선으로 사용하였다. 전기유도 모뎀케이블 상단에 장착된 전기유도 모뎀케이블러는 관측된 자료를 선체 내부에 설치된 자료저장장치로 전송하는 역할을 한다. CT 센서는 수심 5, 20, 50과 100m에 장착하였고, 관측 자료의 수심 보정을 위해 수심 150m와 400m에는 압력센서가 추가된 CTD 센서를 장착하였다.

전기유도 모뎀케이블 하단에는 케이블의 꼬임을 방지하고 장착된 센서를 수직으로 세우기 위해 5톤 베어링 스윙블과 60kg의 추를 연결하였다. 계류선은 400m의 전기유도 모뎀케이블과 6500m의 슈퍼맥스 로프로 구성되어 있다. 슈퍼맥스 로프는 와이어로프 보다 강도가 훨씬 우수한 고강력 섬유 로프로 직경 12mm를 사용하여 해류에 의한 저항을 최소화하였다. 그리고 와이어로프의 1/8 정도로 무게가 가볍고 비중은 0.97로 물에 뜨는 장점이 있다. 부이 회수를 위해 슈퍼맥스 로프의 하단에 부력 25.4kg의 17인치 글라스(glass) 부이 10개와 865-A 음향 분리기 2대를 연결하였다. 계류선의 총길이는 수심(~5270m)보다 약 1.3배를 더 주어 부이와 계류선이 장력을 덜 받도록 설계하였다(Fig. 7).

KORDI 표면 부이 관측 자료 분석

부이에 장착된 모든 센서로부터 관측된 자료들은 10분 간격으로 자료저장장치에 기록되며, 위성으로 전송되는 자료는 1시간 평균된 것을 ARGOS-2 위성 통신 시스템을 통해 전송한다.

Fig. 8a는 표면 부이에서 관측한 6개의 센서와 온누리호에서 같은 시기 관측한 CTD 자료를 비교한 결과로 수심

Fig. 7. Schematic diagram of the KORDI buoy which were moored at 151°34.49'E, 9°50.63'N for one year (from May 24, 2010 to May 25, 2011)

150 m에서 1°C 가량 수온 차이가 나고 다른 수심에서 관측한 자료는 0.1°C 이하의 수온 차이를 보였다. Fig. 8b는 표면 부이 계류선에서 관측한 6개 수심의 수온을 1 m 간격으로 내삽한 수온 분포(파란색 선)로 수심 150 m와

400 m의 두 층의 수온으로는 수온약층을 설명하기에는 부족하였다. 온누리호에서 관측한 200 m, 250 m와 300 m (노란 점)의 수온 자료를 포함하여 1 m 간격으로 내삽한 수온 분포(보라색 점선)는 연구선에서 관측한 수온 분포

Fig. 8. (a) Comparison of sea temperatures obtained from the POSEIDON buoy and from CTD at the mooring site. (b) The CTD temperature profile(black line), the buoy temperature profile (blue line) interpolated using only temperature measured at the instrument depths (red dots) and purple dotted line is added three CTD data (yellow dots) at the 200 m, 250 m and 300 m

Fig. 9. Depth fluctuations from the pressure sensors at the nominal depths of 150 m (upper) and 400 m (lower) for the first three months of mooring (from May 24 to August 24, 2010)

(검은색 선)와 유사한 분포를 보였다. 향후 표면 부이가 계류된 해역의 특성을 잘 규명하기 위해서는 수심별 수온 변동이 큰 수심 150~400 m 사이에 최소 3개 이상의 CT 센서를 추가하여야 할 것이다.

10분 간격으로 관측된 원시자료에 나타난 CTD의 평균 관측 수심은 151 m와 405 m로 센서의 수심 변동은 151 m에서 ± 3 m, 405 m에서 ± 17 m로 하층에서 센서의 수심 변동이 5배 이상 컸다(Fig. 9). 이 원인은 계류선이 수심보다 길어 바람과 해류에 의한 부이의 움직임에 따라 전기유도 모뎀케이블이 기울어지면서 센서의 상하 움직임이 발생했기 때문이다. 전기유도 모뎀케이블의 상하 움직임을 줄이

기 위하여 케이블 하단에 60 kg의 추를 달아 주었지만 큰 효과는 없었다. 센서의 수심 변동을 최소화하기 위해서 나일론 로프를 사용하여 수심보다 계류선의 길이가 짧은 팽팽한 계류선 형태로 만들어야 하지만, 이번에 사용한 표면 부이 시스템에 적합하지 않아 수심보다 긴 계류선을 사용하였다. 수심보다 긴 계류선 방법을 사용할 경우, 모든 CT 센서는 CTD로 교체해야 정확한 수심 보정이 훨씬 쉽게 이루어질 것이다. 하지만 모든 센서를 CTD로 사용하게 될 경우 위성으로 전송해야 할 자료의 양이 늘어나 관측되는 수심의 개수를 줄여야 하는 경우가 발생할 수도 있다. 이와 같은 단점을 개선하기 위해서 ARGOS-2 위성 통신 시스템은 ARGOS-3 위성 통신 시스템으로 변경되어야 한다.

4. 요약 및 토의

한국해양연구원은 2010년 5월 '북서태평양이 한반도 주변 해역에 미치는 영향 연구(POSEIDON)'를 위해 최초로 서태평양 마이크로네시아 축섬 북방 약 250 km 지점 (10°N, 152°E)에 위성 통신을 이용한 표면 부이를 설치하여 실시간 서태평양 해역에서의 대기와 해양의 변화에 대하여 연구하였다. 초보 단계의 시스템 운영으로 인하여 해양 자료 획득과 대형 부이 계류·회수에 대한 어려움이 많아 개선된 부이 시스템의 필요성이 절실했다. 한국해양연구원은 1998년부터 서태평양 해역에서 표면 부이를 운영하고 있는 JAMSTEC의 TRITON 부이 교체 탐사에 엔지니어를 파견하여 TRITON 부이 운영 기술을 습득하였고, 이 기술을 바탕으로 한국해양연구원의 열대 해역 표면 부이 시스템의 개선 사항에 대하여 분석하였다.

JAMSTEC은 TRITON 부이로 태평양과 인도양에서 대

기와 해양 관측을 수행하였지만, 직경 2.4 m, 무게 2.4톤의 부이를 운영하기 위해서는 대형 선박이 필요하였고, ARGOS-2 위성 통신 시스템의 전송 용량 한계로 인한 통신 주기가 잦아짐으로써 통신비와 배터리 소모량이 많아 부이 제작과 운영비용이 늘어나는 어려움이 있었다. JAMSTEC은 보다 효과적인 표면 부이의 운영을 위해 새로운 형태의 m-TRITON 부이와 운영 시스템을 개발하였다. m-TRITON 부이는 부피가 작아 소형 선박에서도 운영이 가능하고, 기존의 계류선 구조를 변경하여 표면 부이 파손과 분실에 대한 가능성을 줄였다. 그리고 높은 자료 전송률을 갖는 ARGOS-3 위성 통신 시스템을 개발하여 기존의 ARGOS-2 위성 통신 시스템의 운영에 따른 비용 문제와 자료 전송 손실 문제를 해결하였다.

JAMSTEC에서 운영 중인 표면 부이 시스템과 새로 개발되는 시스템 비교를 통해 한국해양연구원의 표면 부이 시스템이 향후 개선되어야 할 사항들은 다음과 같다. 한국해양연구원이 2010년에 계류한 표면 부이의 경우 기존의 3 m 부이를 개조한 것으로 온누리호에서 계류하기에는 부이가 너무 커서 작업에 어려움이 있었고, 발포제 형태의 선체가 아닌 알루미늄 재질의 선체로 내부가 비어 있어 적재 공간은 많았으나 선박과의 충돌에 취약한 단점이 있었다. 따라서 연구선의 공간 확보와 부이 계류·회수의 효율성을 높이기 위해서라도 소형 부이 개발이 이루어져야 한다. 부이의 크기가 작아지게 되면 부력이 작아지는 문제가 생기게 되므로 금속 재질의 선체보다는 폴리에틸렌 폼 재질의 선체로 제작하는 것이 좋다. 소형 부이 개발을 위해서는 부가적으로 부이 운영에 필요한 새로운 시스템 개발과 배터리 사용량을 줄이기 위한 소프트웨어 개발도 동반되어야 한다.

ARGOS-2 위성 통신 시스템의 자료 전송은 용량 제한으로 많은 자료 전송이 불가능하고, 단방향 방식의 전송으로 자료 수신 여부 확인이 어려워 전송 빈도수를 늘리면서 배터리 소모량이 늘어나고 통신비용이 증가하는 단점이 있다. ARGOS-3 위성 통신 시스템으로 개선될 경우 기존의 ARGOS-2보다 10배 많은 자료 전송으로 인하여 현재보다 많은 양의 자료 전송이 가능해지고 관측 자료의 전송 여부를 확인함으로써 전송 횟수가 줄어드는 효과로 배터리 양과 통신비용이 절약된다.

계류선은 수직적으로 팽팽하게 당기는 형태(taut type)와 느슨하게 선을 늘어뜨린 형태(slack type)가 있다. 각각의 방법에는 장단점이 있어 어떠한 형태의 계류선을 사용할 것인지 결정하여야 한다. 느슨한 형태의 계류선을 사용할 경우, 센서의 수심 변동이 커져 모든 관측 수심에 수압 센서를 장착하여 관측한 후 수심에 대한 보간법을 사용하여 수온·염분 값을 보정하여야 한다. 그리고 수집하는 관측 자료 개수가 많아져 다른 관측 변수를 줄여야 하는 단

점이 있다. 팽팽한 계류선을 사용 할 경우 센서의 수심 변동폭은 작아지지만 부이 파손의 위험이 커지고 굵은 계류선과 무거운 앵커를 사용하여야 하기 때문에 운영비용이 증가한다. 더불어, 해양생물(어류, 포유류)에 의한 케이블과 로프 파손을 막기 위한 계류선 보호와 케이블 떨림 방지를 위한 장비 개발과 전기유도 모뎀케이블에 장착되는 센서가 그물에 걸려 파손되지 않도록 하는 보호 케이스의 제작도 필요하다.

앞에서 기술한 사항들이 개선될 경우, 한국해양연구원은 보다 효과적인 열대 해역 표면 부이 운영이 가능해 질 것이다. 이 부이 시스템을 통하여 열대 태평양에서 실시간으로 획득한 연속 자료는 대기·해양 상호간의 메커니즘 연구, 그리고 동아시아 지역과 열대 해역의 변동 연구에 중요한 연구 자료로 활용될 수 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 ‘북서태평양이 한반도 주변해에 미치는 영향 연구(PE98563)’의 지원을 받아 수행되었습니다. MIRAI 10-07 탐사에 같이 참여한 일본해양지구과학기술기구(JAMSTEC) 소속의 연구원분들과 MIRAI 연구선의 승조원 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 이하웅, 김영규 (1993) 국제 TOGA 연구사업 현장관측 (1992) 참가보고. *Ocean Res* **15**(1):78-89
- Akima H (1970) A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *J ACM* **17**:589-602
- Ando K, Matsumoto T, Nagahama T, Ueki I, Takatsuki Y, Kuroda Y (2005) Drift characteristics of moored conductivity-temperature-depth sensor and correction of salinity data. *J Atmos Oceanic Technol* **22**:282-291
- Freitag HP, Sawatzky TA, Ronnholm KB, McPhaden MJ (2005) Calibration procedures and instrumental accuracy estimates of next generation ATLAS water temperature and pressure measurements. NOAA, NOAA Tech Memo OAR PMEL-128
- Hayes SP, Mangum LJ, Picaut J, Sumi A, Takeuchi K (1991) TOGA—TAO: a moored array for real-time measurements in the tropical Pacific Ocean. *Bull Amer Meteor Soc* **72**:339-347
- Kuroda Y, Amitani Y (2001) New Ocean and Atmosphere observing Buoy Network for Monitoring ENSO. *Umi no Kenkyu* **10**:157-172

- Matsumoto T, Nagahama T, Ando K, Ueki I, Kuroda Y, Takatsuki Y (2001) The Time Drift of Temperature and Conductivity Sensors of TRITON Buoy and the Correction of Conductivity Data. JAMSTECR 44:139-151
- McPhaden MJ, Coauthors (1998) The tropical ocean-global atmosphere observing system: a decade of progress. J Geophys Res 103(14):169-240
- Ueki I, Fujii N, Masumoto Y, Mizuno K (2010) Data evaluation for a newly developed slack-line mooring buoy deployed in the eastern Indian Ocean. J Atmos Oceanic Technol 27:1195-1214
- Yamaguchi M, Kakuta S, Ito A, Ishihara Y, Matsumoto T, Tanaka T (2004) Criterion of reusability of nylon ropes in the TRITON buoy system. MTTs/IEEE Techno Ocean 4:1923-1926
- Yusuke Y, Takagawa S, Kazuhiko T, Takato N (2006) Design Method of Non-Rotational Torque Balance Cable For Deep-Sea Research Equipment. http://ecadigitallibrary.com/pdf/IWCS06/3_6kfdb.pdf. Accessed 11 June 2011
- JAMSTEC (2009) JAMSTEC Achieves World's First High Data Rate Transmission via ARGOS-3~Opens New Avenues for Science including Climate Research~ http://www.jamstec.go.jp/e/about/press_release/20090413/. Accessed 15 June 2011

Received Jul. 18, 2011

Revised Aug. 10, 2011

Accepted Sep. 2, 2011