



Tropical Pacific Observing System

1차 보고서

2016

한국어 요약본

TPOS 2020 1 차보고서

한국어 요약본

2016 년 12 월

조정 주저자: Sophie Cravatte, William Kessler, Neville Smith and Susan Wijffels

기여 저자: Lisan Yu, Kentaro Ando, Meghan Cronin, Tom Farrar, Eric Guilyardi, Arun Kumar, Tong Lee, Dean Roemmich, Yolande Serra, Janet Sprintall, Pete Strutton, Adrienne Sutton, Ken Takahashi, and Andrew Wittenberg

전체 저자, 기여자 및 검토자 목록은 보고서 부록 C 참조

표지 사진 제공: B. Kessler

본 보고서는 GOOS-215, PMEL 기여번호 4548 및 JISAO 기여번호 2016-03-58 임

한국어 요약본 번역 및 검토자: 김돌, 이재학, 전동철

한국어 번역은 KIOST(PE99461)의 지원을 받았음

보고서 전체 인용시 참고문헌 표시:

Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels, and Contributing Authors, 2016: First Report of TPOS 2020. GOOS-215, 200 pp. [Available online at [http://tpos2020.org/first-report/.](http://tpos2020.org/first-report/)]

요약만 인용시 참고문헌 표시:

Cravatte, S., W. S. Kessler, N. Smith, S. E. Wijffels, and Contributing Authors, 2016: Executive Summary. First Report of TPOS 2020. GOOS-215, pp. i-xii. [Available online at [http://tpos2020.org/first-report/.](http://tpos2020.org/first-report/)]

개요

TPOS 2020(Tropical Pacific Observing System 2020, 열대태평양관측체계 2020) 프로젝트는 열대 태평양에 대한 국제공조 관측체계를 개량하고 재설계할 수 있는 진귀한 기회를 제공한다. 밀접한 해양-대기 접합 체계의 변동성은 지구 전역의 기후에 크게 영향을 미치며, 경년 규모의 전 세계 기후 예측성을 좌우하는 주요 요소 중 하나이다.

본 프로젝트를 추진하게 된 주된 계기는 태평양의 열대계류부표체계(TMA, tropical moored buoy array)가 노후화됨에 따라 2012~2014년에 엘니뇨-남방진동(ENSO, El Niño – Southern Oscillation)의 예측 능력과 이에 관련된 서비스에 심각한 위험성이 있음이 확인된 것이다. TPOS 네트워크의 목표는 이와 같은 위험성을 완화하고, 열대 태평양의 변동성과 그러한 변동성이 지구의 농업, 해양생태계, 인류보건, 재해대비 등 다양한 영역에서 파급되는 효과를 이해하고 예측하는 데 있어서 진보를 이루는 것이다. TPOS 2020은 특히 기후에 관련된 그 밖의 과학적 도전에도 대응하여, 주요 관측 기록 활동을 계속하고, 상층 해양과 해수면 대기변수와 현상에 대한 감시를 심화하며, 해양생지화학을 새롭게 포함하고, 관측 범위를 동서 양안의 경계역까지 확대할 것이다.

이 보고서는 TPOS를 재설계하고 개량하기 위한 첫 단계를 착수하는 데 있어 그 근거와 계획을 소개한다. 이는 지속적이고 실험적인 열대 태평양 관측을 위한 현재와 미래의 투자에 대해 후원자들에게 합당한 이유를 제시하고 이를 변론하기 위한 것이다. 이 보고서는 지속적인 관측체계(이하, 'TPOS Backbone')를 위한 근본적이며 핵심적인 기여를 하는 활동들을 집중 조명하며, 다음과 같은 5개의 주요 기능을 중심으로 구성된다[1.3]¹.

- (1) ENSO와 그 밖의 기후 현상을 예보하는 다양한 체계를 지원하는 동시에 이들을 평가·검증·초기화할 수 있도록 하고, 이러한 체계들의 발전을 촉진시키기 위한 자료를 제공하며,
- (2) 해양 표층과 아표층의 상태 변화를 정량화하기 위한 관측자료를 제공하며,
- (3) 보정과 검증을 포함한 다양한 위성·현장 관측 방식의 통합에 도움을 주며,

¹ 주 보고서에 대한 참조 절에는 꺾쇠 괄호를 둘렀다.

- (4) 과정 연구를 위한 관측체계 인프라의 제공과 그 밖의 수단을 통해서 열대 태평양의 기후계에 대한 이해와 모델링 능력을 증진시키고,
- (5) 열대 태평양 기후에 관한 기록을 유지·확대한다.

TPOS의 재설계는 1985~1994년에 수행된 '열대해양과 지구대기'(TOGA, Tropical Ocean – Global Atmosphere) 프로그램과 그 후에 이루어진 많은 혁신과 개량을 토대로 한다[2.2, 2.3]. ENSO의 감시 및 예측 활동과 이를 지원하기 위한 과학 연구가 기여한 수많은 편익과 혜택은 여전히 TPOS의 기본적인 원동력이다. TPOS 네트워크는 또한 해양·기후환경 감시 서비스뿐만 아니라 날씨와 해양에 대한 예측 능력 개선을 위한 토대도 제공한다. 이러한 공익 서비스에는 안정적이고 효과적이며 지속적인 TPOS가 필요하다[2.1, 2.2, 2.4]. 본 보고서에서는 2020년 이후의 수요를 충족하기 위한 초기 권고사항과 조치들을 요약하였다[5, 7].

TPOS는 TOGA 이후 20년간 매우 좋은 성과를 거두었으며[2.5], 이 기간에 제시된 다양한 서비스의 개발과 이해를 증진시키는 데 그 토대가 되었다[2.4]. TPOS 2020은 과학적 이슈들, 전면으로 부상된 새로운 이해, 분석·모델링·예측체계의 세련화, 그리고 현재 시행되거나 개발 중인 서비스 등을 고려함으로써 어떠한 요구사항들이 있는지 재검토한다[3.1]. TPOS 설계는 향후 수십 년의 수요에 부응하도록 초점을 다시 맞추면서 위성 관측과 현장 관측 두 분야 모두에서 이루어진 신기술 발전을 활용하고 효율성·효과성·안정성을 증진할 수 있도록 재검토되었다. 앞서 언급한 요구사항들은 해양과 기후에 대한 핵심 변수들을 기준으로 삼아서 우선 개발하였으며, 시공간적 시료수집, 체제 의존성, 정확성, 품질, 연속성에 대한 필요 등의 측면에서 이들의 특성을 규정하였다[3.1.1, 3.1.2, 3.1.3]. 이러한 요구사항들이 제기된 또 다른 요인은 기후 기록의 유지·개선 필요성이었다[3.2].

이해 증진 및 모델 개발을 위한 새로운 관측 분야로는 해양 혼합층 및 이와 상호 작용하는 표층 교환량, 일변화, 적도해역의 해양-대기 접합 체계에 대한 물리학적 요소, 태평양 경계역, 생지화학(특히 대기와 해양 간의 대규모 탄소 플럭스) 등이 있다[3.3]. 이러한 요구사항들은 지속적이고 실험적인 여러 네트워크를 종합하는 방식으로 충족할 수 있을 것이다.

이와 같은 새로운 TPOS 2020 접근법은 단일 플랫폼에 대한 의존성을 완화하고, 최근의 기술 발전이 가져다 주는 효율화 방안 중 일부를 활용한다[7.6]. 주요 체제들에 관한 종합적인 관측을 최초로 실시함으로써, 접합 모델의 개발과 관측체

계 전역을 아우르는 격자화된 관측자료 산출물의 개선, 그리고 보다 일반적인 이해에 이바지할 것이다. TPOS의 개량은 그간 예측하기 어려웠던 수치모델의 운용 체계에 절실하게 필요한 개선들을 이룰 수 있게 할 것이다.

새로운 Backbone 설계와 그 이행 지침을 위한 원칙들이 개발되었다[4, 7.1]. 여기에는 위성·현장 관측 플랫폼에 대한 일관성 있는 공동 검토, 이 플랫폼들의 기능을 활용한 열대 태평양 기후 기록의 불확실성 감소[5], 본 프로젝트 기간과 2020년의 종료 이후에 TPOS를 더욱 정교화할 수 있도록 정보를 제공하는 각종 시범 프로젝트와 과정 연구의 도입 등이 포함된다.

본 요약서의 다음 장에서는 관측체계에 필요한 각종 해양 변수들에 대한 **요구사항**과 이와 관련한 **권고사항**에 관해 기술하고, 그 다음의 '이행' 장에서는 핵심 **조치**들을 다루었다. 본서에서 권고사항과 조치들이 수록된 순서는 우선순위와 무관하며 일부 경우에는 보고서 본문에 수록된 순서와도 다르다.

TPOS 2020의 현 단계에서 가능한 한도 내에서, 보고서에는 중요한 항목에 대한 비용 추산치도 수록하였다. 권고사항과 조치들은 모두 타당하며 이행 가능한 것들이지만, 정확한 비용 계산은 TPOS의 이행 담당자들과 심층적인 논의를 거친 후거나 가능할 것이다.

요구 및 권고사항

기후 변화 감시와 탐지에는 모든 핵심 기후 변수에 대한 엄밀한 수준의 정확성, 지속성, 연속성이 요구된다. 이러한 기후 기록을 산출하려면 손상 가능성이 있는 시스템 구성요소들의 오작동에 적절히 대비한 장치 이중화와 복원력이 요구된다 [3.2.1].

□ TPOS에는 다우 지역과 약풍·강풍 체제를 포함하여 시공간을 충분히 아우르는 편향되지 않고 정확한 **해상풍/바람 응력**²이 요구된다. 특히 적도 태평양과 대류가 강하고 강우량이 많은 지역에서 자료간 상호 보정을 실시하고 기후기록을 뒷받침할 수 있도록 현장 바람에 대한 장기간의 시계열을 유지하는 것이 중요하다[3.1.1.2, 3.2.1, 5.1]. 전선과 그 밖의 소규모 과정의 감시에는 바람 벡터장의 기울기 벡터들을 50 km 단위 이하의 세밀한 분해능으로 나타내는 것이 요구된다[3.3.2]. 표층해류 자료도 산란계와 현장 바람 사이의 차이를 보정하는 데 필요하다[권고사항 11 참조]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 1 다수의 다주파수산란계 관측소와 이를 보조하는 극초단파 센서 풍속 측정소를 배치함으로써, 열대 태평양의 90%가 넘는 지역에 대해 향후 10년 이상 매 6시간 간격으로 모든 기상 조건에서 대규모로 바람을 관측하되, 적도 경도차에 따른 상이한 시간대에서 일변화를 파악할 수 있도록 할 것.

권고사항 2 현장에서 바람 벡터를 측정하되, 현장 기반 기후 자료 기록을 확대하고 적도 태평양과 열대 다우 지역을 중심으로 여러 위성 바람 센서 간에 상호 보정을 하는 데 특히 역점을 둘 것.

□ 편향되지 않고 정확한 고분해능의 장기간 **해수면 온도**(SST, sea surface temperature) 관측이 요구되는데, 특히 계속 구름이 끼고 비가 오는 지역과 ‘cold tongue’ 지역(역주: 주변과 크게 대비되는 동태평양 저수온 구역)의 급격한 수평적 수온 변화에 각별히 유의해야 한다. 해수면 근처 과정의 이해 개선을 위해서는, 일변화가 큰 지역의 수면 부근의 온도 프로파일의 특징을 규명할 수 있도록 일변화 해석이 가능한 측정이 되어야 한다[3.1.1.1, 3.3.1, 3.3.2, 5.2]. TPOS 2020 권고사항:

² 기후/해양에 대한 핵심 변수들은 **굵은 기울임체**로 표시하였다.

권고사항 3 광범위한 시공간 시료채집을 위한 적외선 센서와 구름 아래의 사각지대를 감지하는 수동 극초단파 센서를 이용한 해수면 온도의 위성관측을 지속하고, 자료간 상호 보정에 유용한 다양한 위성·현장 관측 플랫폼을 사용하도록 할 것.

권고사항 4 현 수준의 현장 해수면 온도 관측 활동 유지와 뜰개(drifter)의 해수면 온도 자료 품질의 향상. 이러한 두 조치는 해수면 온도 관측 자료의 보정과 검증에 기여할 뿐만 아니라 해수면 온도 기후 기록을 위한 독립적인 기준 데이터 세트를 제공할 것이다. 특히 다우 대류해역에서 해수면 온도 실측자료를 얻을 수 있도록 하고, 계류장비를 이용한 적도 해역 해수면 온도에 대한 현장 측정을 지속한다.

□ 기후와 관련된 광역의 정밀한 **해면 고도**(SSH, sea surface height) 관측이 요구되며, 해양 예측 모델들의 초기화에 필요한 중규모 이하(아중규모까지, sub-mesoscale)의 관측도 요구된다. 해양 질량(중력 또는 해저 압력)에 대한 관측을 지속해야 한다[3.1.2.1, 3.1.2.2, 3.3.4, 5.3]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 5 광역의 해수면 고도 감시를 위하여 Jason 계열의 위성 고도계를 이용한 지속적인 해면 고도 정밀 관측 수행 및 서안 경계역을 포함한 핵심 해역에서 활발하게 발생하는 중규모·아중규모의 해면고도 변화를 측정할 수 있도록 주사 폭이 넓은 측고 기술의 지속적 개발.

권고사항 6 전지구위성항법시스템 참조를 통해 개선되고 지속적인 수온·염분 프로파일 측정으로 보완된 위성 해면 고도 자료의 보정과 검증을 위한 현장 검조기 측정의 유지(아래 참조).

권고사항 7 위성 관측 해수면 고도와 프로파일에서 추출한 열팽창 고도산출자료를 보완할 해양 질량 측정과 위성 측정치의 보정·검증을 위한 현장 해저압력계 측정의 지속.

□ 다양한 기후 체제에서 관측한 현장 자료와 대조 평가한 위성 **강수량** 측정이 요구된다. 강수율 및 풍속·풍향의 측정은 서태평양 적도 대류 해역과 열대수렴대 및 남태평양수렴대에서 특히 중요하다[3.1.1.2, 3.1.1.5, 5.4]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 8 열대 해역에서 시공간적 강수 측정 유지를 위하여 강수 측정용 위성 배치에 관한 국제 협력의 지속 및 강화.

권고사항 9 특히 장기적인 기후 기록을 제공하는 위성 측정 산출물을 평가하고 개선에 필요한 외해에서의 현장 강수 측정 지속 및 확대.

□ 적도 해역의 뚜렷한 염분 전선의 특성 규명에 충분한 분해능이 확보된 광역의 **해수면 염분**(SSS, sea surface salinity) 관측이 요구된다[3.1.1.6]. 서태평양 난수역(warm pool)과 전선역에서 주요 과정과 현상을 이해하기 위해서는, 고분해능의 염분 관측이 특히 중요하다[3.3.1, 3.3.2, 5.5]. 현장 관측과 위성 관측 결과를 함께 이용하면 해수면 염분에 대한 보완적 관측치를 제공함으로써 TPOS의 필요를 충족할 수 있다. 현장 관측은 해수면 부근의 정확한 염분 값을 제공한다. Argo는 넓은 공간 범위의 자료를 제공하고, 열대의 장비 계류는 높은 빈도의 측정 결과를 제공하며, 관측지원 선박(VOS, Voluntary Observing Ships)은 항적을 따른 높은 공간적 분해능의 관측치와 장기간의 기후 자료 기록을 제공한다. 위성은 거의 같은 간격으로 염분 구배를 결정할 수 있는 해수면 염분 값을 제공함과 아울러, 연해와 연안해에 대한 관측 범위도 넓다. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 10 위성 관측의 정확도 향상에 초점을 두고 해수면 염분에 대한 보완적인 위성 및 현장 관측망 유지.

□ 특히 적도 해역에서 위성 및 현장 바람 관측치의 동화와 합성을 원활하게 하기 위해서는 시공간적 분해능이 높은 **표층 해류**(유속과 방향) 자료가 요구된다[3.1.1.2]. 적도 **아표층 해류**의 시계열은 모델 검증과 개발에 널리 사용되며 향후 모델 자료 동화에도 계속 필요할 것이다[3.1.3.2]. 과정과 현상에 대한 이해의 증진을 위해, TPOS 2020은 표층 부근의 교환량 변화 해석을 위하여 수직적 분해능이 강화된 해류 관측, 해수 순환을 해석하기 위한 적도 부근 남북방향의 관측, 그리고 저위도 서안 경계류 및 중층 해류 등 기타 주요 순환요소에 대한 감시 개선을 위한 요구사항들을 열거한다[3.3.1, 3.3.3, 3.3.4.1, 3.3.4.2, 5.6]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 11 해양의 표층해류 원격 관측, 표층 및 아표층 해류 현장 관측(특히 적도 부근)의 개선, 바람과 표층해류의 병합측정자료 수집을 위한 기술 개발의 지속.

권고사항 19 적도 해역의 기존 계류관측망에서 산출되는 해류 프로파일의 관측 수심범위를 유지하거나 가능하면 확대하고, 적도 부근에 계류를 추가하여 대상 자오선의 유속에 대한 남북방향 분해능의 향상.

□ 대기-해양의 이산화탄소 교환량 요구사항에 대해서는 기존의 양질의 해수면의 이산화탄소의 분압($p\text{CO}_2$) 측정에 의해 부분적으로 다루어지고 있다. 이러한 관측들은 ENSO의 영향에 따른 이산화탄소 교환량의 계절별 내지 경년 단위 변동을 정량화하고 인류 기인 변화의 맥락에서 자연적 변동성에 대한 이해를 증진한다[3.1.1.4, 3.3.5]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 12 태평양 10°S~10°N 수역에 대해 진행 중인 해수면 $p\text{CO}_2$ 의 고빈도 계류 시계열 및 항행 관측의 지속.

□ 체제 경계들의 진단에 충분한 분해능과 계절 변화의 진단에 충분한 정확도를 갖는 대규모 표층 **해색** 관측이 요구된다. 원격 탐사에 의한 해색 관측을 검증하기 위한 엽록소-a의 현장 관측도 요구된다[3.1.1.4, 5.7]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 13 측정 일관성을 위한 자료간 상호 보정이 원활할 수 있도록 관측 범위가 적절히 중첩된 해색 위성 임무에 대한 지지를 지속. 위성 해색 자료를 검증하기 위한 엽록소-a 및 광학 특성의 현장 관측이 요구된다.

□ 계절별 생지화학적 과정을 이해하려면 반년 주기로 열대 태평양 10°S~10°N 수역에 대한 관측이 요구되며 선택된 몇몇 지점에 대해서는 관측 빈도를 높여야 한다[3.3.5]. 이산화탄소의 역학을 제대로 이해하기 위해서는, 표층에서 생산된 유기 물질(식물플랑크톤 등)의 재순환 과정 중 심층에서 소비되는 **산소**의 변화를 이해해야 한다. 산소극소대역의 확대는 해양생물에 근본적으로 함의하는 바가 있다. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 14 10°S~10°N 수역에서 아표층의 생지화학적 특성, 즉 엽록소 농도, 미립자 후방 산란(particulate backscatter), 산소 및 영양염 등에 대한 관측이 요구된다. 서태평양 난수역(warm pool)의 동안 경계역과 동태평양 저수온해역에서 더욱 집중할 필요가 있다.

□ 난류 **열속** 추산에 필요한 상태 변수들(해수면 온도, 기온, 습도, 바람 및 표층해류)과 **복사속** 추산에 필요한 상태 변수들(하향 태양열 복사, 하향 장파 복

사, 복사율)의 종합적 관측이 기후·기상 체제 및 주요 해양 체제 전반에 걸쳐 필요하다[3.1.1.3, 5.8]. 이들은 대기 재분석, 위성을 활용한 표층 교환량 산출 및 해양-대기 결합 자료동화 시스템들을 평가·개선하고 이러한 상이한 체제에서 대기와 해양 간의 열/복사 교환에 관한 우리의 이해를 증진하는 데 필수적이다. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 15 핵심 지역에서 해수면 열과 담수 교환량 산출에 필요한 상태 변수들의 현장 관측을 강화하여야 한다. 이들 해역은 서태평양 난수역, 적도상, 그리고 남태평양수렴대와 계절적 남반구 열대수렴대(ITCZ)로부터 적도를 가로질러 북반구 ITCZ에 이르는 여러 남북방향의 관측선이 포함된다.

□ TPOS 2020은 **해면기압**을 측정하는 표층 뜰개와 장비 계류의 수를 늘리고자 하는 노력을 지지한다[3.1.2.4, 7.4.1].

□ 해면 파도(**해황**)는 낮은 풍속에서 해면응력을 변화시키며 연안 해수면과 관련 영향들에 중요하다. 열대 태평양에 상시 배치된 몇몇 방향파 부표는 위성의 파랑자료를 보완·검증하는 데 사용될 것이다[3.1.2.3].

□ 열대 해역에서 강화된 분해능(약 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 분해능)과 적도 해역에서의 개선된 남북방향 관측 간격(100 km) 및 증대된 수직 분해능(10 m 이내)으로 **아표층 수온과 염분**에 대한 광역관측이 요구된다. 안정적이면서 정확한 심해 프로파일이 요구된다. 또 다른 목표는 특히 난수역의 동쪽 경계역과 상시 강우역에서 해수면 근처 염분 성층의 관측이다.

현상과 과정에 대한 이해 증진을 위해서는 수심 100 m 이내에 대한 수직 분해능의 증대가 요구된다. $2^{\circ}S \sim 2^{\circ}N$ 수역에서는 위도에 따른 구배의 해석이 가능하도록 관측이 이루어져야 한다. 중서부 적도 해역의 프로파일은 현상 해석이 5일 이내로 가능하도록 해야 한다[3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4.1].

물리 분야에 대한 분해능 개선은 생지화학적 과정에 대한 해석과 모델링에 도움이 될 것이다. 수온과 염분 관측을 위한 대부분의 플랫폼은 생지화학적 현장 관측을 수용할 수 있다[3.3.5].

ENSO의 다양성과 향후 변화를 알기 위해서는 ENSO의 시공간적 양상을 추적하고 개선된 ENSO 예측 및 모델 예측 기술을 뒷받침하기 위한 열대 태평양 환경에 대한 관측을 요구될 것이다.

TPOS 2020 권고사항[4, 5.9]:

권고사항 16 아표층 수온과 염분 관측에 대한 지속적인 요구사항을 충족하는 고정점 계류, 프로파일링 플로트 및 선박 관측 라인/구획의 조합. 격자형 관측망을 구성하기 위해서는 자료동화와 합성을 통한 통합이 필요하다.

권고사항 17 (a) 적도 부근에 추가된 계류와 (b) 적도 해역의 Argo 관측의 강화(약 두 배 증가)를 통한 적도 해역의 수온 및 염분에 대한 남북방향 관측 분해능 강화.

권고사항 18 계류선에 수온약층 상부에서 해수면까지의 범위를 탐지하는 해양 상층 센서를 추가하여 TMA의 수온과 염분의 수직적 분해능을 강화하고, 100 dbar에서 수면까지(또는 최대한 수면 가까이)의 범위에 대해 1 dbar 간격의 Argo 자료의 변환.

권고사항 20 서태평양과 적도해역을 필두로 주간 단위 신호대잡음비가 4:1 이상으로 개선되도록 열대 해역(10°N~10°S)의 Argo 수온 및 염분 프로파일 관측의 배증.

□ 기존에 수행되어 왔던 그 밖의 현장 구성요소들에 대한 지원은 계속한다. 여기에는 표층 뜰개 관측망, 관측지원선박(Voluntary Observing Ship, Ship of Opportunity)에서 항행 중 수집된 자료(서비스 제공 선박에서 측정된 보조 자료 포함), 고분해능 일회용 수온수심기록계(EXBT)의 선상 측정, 정기적인 심층 및 광역 선박 관측라인(일명 GO-SHIP), OceanSITES에 등록된 기준 고정 관측정점, 해수면 변화의 보정 및 감시를 위한 검조기 등이 포함된다[3.1.1.1, 3.1.1.3, 3.1.1.4, 3.1.1.6, 3.1.2.4, 3.1.3]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 21 뜰개, 선박, 검조기, 기준 계류정점의 현장 관측에 대한 지속적인 지원.

□ 모델링과 자료동화는 TPOS 설계의 근본적인 요소이며, 이해관계자들에게 예측 값과 통합된 격자망 자료 등 귀중한 통합 산출물을 제공하는 데 극히 중요

하다. TPOS 2020 설계에 관한 추가 지침을 제공하고, 접합 모델의 편차 원인을 규명하고, 관측 자료가 해양 분석 및 기타 산출물에 미치는 영향을 평가하기 위한 업무에 대한 개요를 수록하였다[3, 4, 6.1.6, 6.1.7, 7.5]. TPOS 2020 권고사항:

권고사항 22 (a) TPOS 2020 Backbone 설계의 효과를 평가하기 위한 자료동화 연구와 (b) 해양분석체계 일부 관측 자료의 활용과 영향 연구에 대한 공조 계획.

이행

이 보고서는 플랫폼과 그 밖의 기술적 측면과 관련하여 상기의 요구사항 및 권고사항과 부합하는 단기적 이행 조치에 관한 조언을 후원자들에게 제시한다. 가까운 시기에 초점을 둔 것은 일반적으로 인공위성과 관련된 구체적 조치를 배제한다(관련 지침에 대해서는 각 권고사항을 참조).

TPOS 2020의 모든 권고사항과 조치는 기존 이해관계자들의 약속·역량·능력을 고려하여 이행하기 전에 신중한 검토를 거쳐야 한다는 점에 유의해야 한다. TPOS를 현 상태에서 미래의 새로운 구성으로 전환하는 것은 예측 운용을 위한 자료의 연속성을 유지하고, 지속적인 기후 기록을 확보하며, 관측 방법의 변경을 고려할 수 있도록 효과적으로 관리·조정되어야 한다[3.2, 7.1 및 7.7 일부]. 전환에 관한 지속적인 평가를 통한 적절한 위험 관리가 요구된다.

이 과정을 추진하는 데 활용할 수 있는 몇몇 메커니즘이 있으며, TPOS 2020에 동참하는 파트너들은 조언과 지침을 제시할 수 있다. 지역적 메커니즘을 활용할 수 있는 기회도 있다[7.7.1, 7.7.2, 7.7.3].

조치 15 GOOS, JCOMM, WMO/WIGOS, GCOS 등 주요 이해관계자와의 협의를 통해, TPOS 2020 권고사항 및 조치의 이행을 감독하기 위한 'TPOS 2020 전환·이행그룹(Transition and Implementation Group)'의 창설 등의 전환 과정에 착수한다.

□ 가장 긴급한 조치는 서태평양의 TMA 축소 문제를 해결하는 것이다. 이에 대한 대응은 TMA의 핵심 기능을 복구하고 지속적인 투입을 강구하는 데 초점을 두고 있다[1.2, 7.2, 7.4.3].

조치 1 서태평양 2°S~2°N 해역의 TMA 6개 지점을 유지하거나 재설치한다.

조치 2 아표층 수온과 염분 관측을 유지하고 TMA의 기능 저하를 상쇄할 수 있도록 서태평양 남북 위도 10° 이내 적도 부근(특히 TMA 설치 구역 바깥)에 Argo 투하를 즉시 배증한다.

□ 전 열대 해역(10°S~10°N)에 걸쳐 Argo 관측 확대를 권장한다[권고사항 17, 20]. 목표 투하 밀도는 5일 주기로 위경도 3°x3° 면적당 1개 프로파일을 산출하거나, 아니면 이와 등가로서 10일 주기로 2.1°x2.1° 면적당 1개 프로파일을 산출하는 것이다. 이러한 증가는 서태평양에서의 경험에 비추어 단계적으로 이루어질

수도 있다. 적도 부근에서는 여전히 높은 빈도의 TMA 관측이 중요하며 이는 Argo가 제공하는 탁월한 수직 분해능을 보완한다[권고사항 18, 19; 7.4.3].

조치 3 Argo 플로트 투하를 열대 수역 10°S~10°N 전반에 걸쳐 배증시켜 해양 상층의 수직 관측 분해능을 강화한다.

□ 해양의 변동성 규모, 배경 잡음(와류 및 종합적인 기상 효과 등) 및 다양한 현상(열대성 불안정 파 및 장벽층)은 열대 태평양 전역에서 각기 다르다. 부표의 배치와 운용을 재정비하면 TPOS에 더 큰 이익이 될 것이다[3, 5.9].

조치 4 TPOS 2020 Backbone 실무팀과 Argo 운영팀을 통해 부표 배치 및 운용을 최적화하고 TPOS 목표에 부합하도록 하는 방법을 모색한다.

□ TPOS 2020은 TMA를 현재의 8°S~8°N 사이의 격자형 구조에서, 열대 태평양의 다양한 체제의 자료를 획득하고[3.1.1.3] 표층과 아표층 해역에서 대양 규모의 변동성을 포착하는[3.1] 기능이 향상된 계류장치를 가진 형태로 전환을 시작할 근거가 충분하다는 결론을 내린다. 이러한 변화는 기후 기록을 유지하도록 조심스럽게 이행되고 지구기후관측원칙에 따라 평가될 것이다. 조치 5~6은 이러한 변화의 시발점이 될 것이다.

적도 부근 해역에서 현재의 관측 용량은 적도 부근에서 위도에 따른 급격한 구배의 해석에 요구되는 규모에 미달한다[3.1.3, 3.3.3, 3.4, 5.9.1, 권장사항 17]. 가용 플랫폼의 용량을 감안할 때, 이렇게 하는 가장 효과적인 방법은 하나 이상의 경도를 선택한 후 각각의 경도를 기점으로 적도 부근에서의 개량식 고정점 관측을 위한 남북방향 분해능을 증대하는 것이다.

조치 5 선택한 경도에서 1°S~1°N 사이에 계류장치들을 추가함으로써 적도 부근의 변화에 대한 분해능을 증대한다. 이 경도상의 2°S~2°N 이내에 배치된 모든 계류장비에 대한 개선을 목표로 하되, 가능하다면 유속 프로파일의 산출도 개선 대상에 포함시킨다.

□ Argo의 고분해능 프로파일 제공 기능(조치 3)과 산란계와 모델들의 무역풍 포착 기능[3.1.1.2, 5.1]을 감안할 때, 우선순위를 다른 데에 두고 TMA를 재조정하는 것도 가능하다.

조치 6 TMA의 단계적 재구성은 주요 체제에서의 기능 향상에 중점을 둔다.

□ 각 개별 체제에서 보다 완전한 표층 교환량 측정을 실시하되, 혼합층에서 이에 상응하는 개량식 측정을 할 것을 권한다[3.1.1.3, 5.8; 권장사항 15]. 고정점(계류) 관측은 대상 체제를 결정한 후 높은 빈도(매일)로 측정하는 기능이 있으므로 이러한 작업에 특히 적합하다.

조치 10 적도 해역의 모든 계류 정점은 플렉스를 측정하는 계류장비로 개선한다.

□ 기존 TMA는 적도 남북위 8° 이내로 제한되어 주요 기후 체제의 일부에 대해서만 적용되며[3.1], 대체로 주요 플렉스 조건 모두를 결정하기에 충분한 자료를 획득하지 못한다.

조치 11 자오선상의 플렉스 관측 정점은 서태평양에서는 적도로부터 남태평양 수렴대(SPCZ)와 열대수렴대(ITCZ)를 가로질러 확대하고, 동태평양과 중태평양에서는 ITCZ를 가로지르고 저수온해역(cold tongue)과 계절적으로 발생하는 남태평양 수렴대에 걸치도록 확대한다.

□ 이러한 주요 체제를 벗어난 영역에 대한 수평적 관측 범위의 축소는 아표층(subsurface field), 해수면 플렉스(바람 응력 포함), 항행 및 보조자료 특히 pCO_2 자료 수집에 미치는 영향에 대한 평가와 함께 이루어지도록 한다[7.4.4.2, 7.4.6]. 서태평양에 대한 상기의 조치 1~2는 본 조치들에 대한 귀중한 참고가 될 것이다.

열대 해역 내의 해상풍과 플렉스 관측 결과물에 상당한 차이가 존재하며, 날씨 예측 및 관련 재분석 결과물과 접합 모델에서 TMA 해수면 기상 자료의 영향에 대한 조사가 부족하다는 점이 확인되었다[3.1, 4].

조치 7 운용과학적 분석·재분석과 전문적인 바람 응력 관측 결과물에 입력하는 바람 및 바람 벡터 자료에 대한 민감도 및 영향 조사를 추진·지원한다. 여기에는 이러한 결과물을 기후 변화 감지에 응용하는 것이 포함된다. 강우 메타데이터 플래그(flag) 및 산란계에 대한 다양한 상호보정 방법의 효과성도 고려해야 한다.

조치 8 관측의 영향에 초점을 둔 기존의 활동 등을 통해 기상 예측, 대기권 재분석 및 접합 모델에서 TMA 대기-해양 플렉스 변수의 민감도를 이해하고 그 영향을 규명하려는 노력을 새로이 하고 조율한다.

아래 조치 13도 함께 참조.

□ TMA 부표 파손행위는 특히 95°W TAO 계류정선에서 고질적인 문제였으며 이 때문에 최근 2015~16년에는 엘니뇨 기간 중 관측자료가 감소하였다. 이러한 중요한 체제의 시료채집을 유지하는 데는 지역적인 참여가 큰 가치가 있을 것이다.

조치 9 전환·이행그룹(7.7항 참조)은 TPOS 관계자와 동서태평양 해역에서 조치를 이행하는 데 발생하는 주요 문제에 대한 지속 가능한 해결책에 관한 논의에 착수하고, 특히 TMA 기부에 대한 필요와 관련하여 논의한다.

□ TMA에 다시 집중하는 데에는 현재 부표 측정을 대체할 수 없는 일부 해수면 플럭스 변수들과 관련하여 위험성을 내포한다. 이러한 위험성을 완화하기 위해서는 자발적 관측지원선박 및 그 밖의 현장 시스템들에게 촉구하여 이러한 변수들에 보다 집중하도록 해야 한다. 재분석 및 기상 관측 결과물의 검사 및 보정 분야의 신기술 도입과 개선은 해수면 플럭스 요구사항을 충족하는 또 다른 경로를 제시한다[7.4.6].

조치 13 TMA 변화와 관련된 해수면 플럭스 요구사항을 충족하는 데 따르는 위험을 완화하기 위해, TPOS 2020은 (a) 기후관측지원선단 및 기타 현장 체계를 통한 플럭스 변수들에 대한 개량식 관측 방안을 강구하고, (b) 관련 신기술 개발을 지원하며, (c) 결과물 보정/플럭스 조절 기법을 통해 재분석의 현실과 실시간 수치기상예보 플럭스 산출물을 개선하기 위한 노력을 장려한다.

□ 생지화학적·생태학적 요구사항, 권고사항 및 조치는 TPOS 2020의 차기 보고서의 최대 관심사가 될 것이다. 본서에서는 기존에 확립된 지속적이고 실험적인 생지화학적 체계의 사회적 연관성과 효용에 중점을 두었다[2.6.7, 3.3.5]. 계류장치, 부표, 연구선 및 서비스 제공 선박 등 기존 플랫폼을 적절히 활용하는 것이 핵심 전략이다. 특히 계류장치로서 서비스를 제공하는 여객선들을 최대한 활용하는 것은 Backbone 생지화학적 관측의 중요한 관건이다. 서비스 제공 선박들은 μCO_2 에 대한 항행관측을 계속함으로써 이산화탄소 플럭스 기록의 연속성을 확보하고 계류지 측정과 신기술을 검증하는 역할을 하며 계류 관측치 간의 공간적 변화에 대한 맥락을 제시하도록 한다. 동태평양 산소극소대역의 범위를 도시하는 것도 TPOS이 초기에 취할 수 있는 조치이다[3.3.5].

조치 12 계류 서비스를 제공하는 선박에서 ρCO_2 에 대한 항행관측을 지속·재개해야 하며 ρCO_2 에 대한 현재의 계류식 측정 네트워크를 유지하고 가능하면 확대한다. 해면에서 약 1,500 m 수심까지의 용존산소 측정은 가능하면 선상에서 하고 각 계류장치에 산소 센서를 부착하는 것을 고려한다.

□ 몇 가지 시범 연구 및 과정 연구와 아울러 TPOS 2020 실무팀이 진행 중인 작업에 대한 개요를 본서에 수록하였다. 이러한 조사 중 일부는 시료채집 전략을 지도하고, 지속적 이행을 위한 결과물, 비용, 적합성을 검사하고 개선하는데 필요한 선행작업이다. 나머지들은 현상과 과정에 대한 이해를 증진하는 것을 목표로 하며[3.3], 그 중 일부는 상기의 권고사항 및 조치에서 완전하게 또는 부분적으로 다루었다.

아래에 권고한 프로젝트 제안에 더하여, 태평양 전역에 소재한 몇몇 그룹은 TPOS 2020의 감시 기회 증대를 지향하는 최근의 기술적 발전을 활용하는 연구 사업에 이미 참여하고 있다[7.5.2].

신기술 또한 고려되었는데, 이는 TPOS 발전에 폭넓은 참여 기회와 관측체계의 효율화 방안을 도입하고 그 적합성 및 영향을 증대할 기회를 제공하기 때문이다.

권장 프로젝트와 지원 계획에는 다음이 포함된다[6.1, 6.2, 10].

Backbone에 대한 시범 연구/계획

- 서안경계류 시스템 관측: 시범 연구[6.1.1]
- 동태평양 적도연안의 도파 및 용승 체계[6.1.2]
- TPOS에서 생지화학적으로 중요한 시공간 규모 결정[6.1.3]
- 대기-해양 플럭스의 직접 관측, 파랑, 대기-해양 상호작용에서의 역할[6.1.4]
- 동태평양 열대수렴대 조사를 위한 클리퍼튼섬 시범 기후관측 정점[6.1.5]
- TPOS Backbone에서 변화의 영향 평가[6.1.6]
- TPOS 관측자료의 비교분석 및 활용[6.1.7]

과정 조사

- 태평양 용승 및 혼합의 물리학적 특성[6.2.1]
- 서태평양 난수역 북방 경계에서의 대기-해양 상호작용[6.2.2]
- 난수역 동방 경계에서의 대기-해양 상호작용[6.2.3]
- 동태평양 열대수렴대/난수역/저수온해역(cold tongue)/층운계[6.2.4]

신기술 프로젝트 자금지원 예

- 강우, 풍속, 생지화학 센서를 장착한 프로파일링 플로트 (NOAA)[10.2.1]
- 저비용 TPOS 플랫폼으로서의 무인 선박 (NOAA)[10.2.2]
- 해수면 플렉스 글라이더 실험 (JAMSTEC)[10.2.3]
- NDBC TAO 계류장치에서의 향상된 해양경계층 관측 (NOAA)[10.2.4]
- NDBC TAO 부표용 직접(에디 공분산) 난류속의 개발 및 시험 (NOAA)[10.2.5]

조치 14 TPOS 2020 자원포럼(Resources Forum), TPOS 2020 전환-이행그룹, 연구 프로그램, 자금 제공자 링크를 통해서, TPOS Backbone의 개선 및 발전에 기여할 시범연구 및 과정연구에 대한 지원을 촉구한다.

본서는 TPOS 2020의 보고서 시리즈 중 첫 번째 출간물이다. 초기의 권고사항과 조치는 보다 역량 있고 탄력적이며 효과적인 관측체계로 변모·변화하는 과정을 시작하기 위한 것이다. 통합형 설계는 단일 플랫폼에 대한 의존성을 완화하고 이러한 설계의 이행은 기술발전에 의해 가능해진 효율화 방안을 활용한다. 광범위한 해양 및 해수면의 상태를 보다 정확하게 추적할 것이다. 주요 체제들을 포괄적으로 관측함으로써 변화하는 열대 태평양 기후에 대해 보다 명료하고 지속적인 설명을 제시하고, 접합 모델 개발을 유도할 것이다. TPOS의 개량은 운용과학적 모델링 체계에 절실히 필요했던 개선들을 이룰 수 있게 함으로써, 향후 수십 년의 과학적 도전과제를 다룰 것이다.

이후 출간되는 보고서들은 기술의 진보와 더불어 시범 및 과정연구에서 얻은 통찰을 통해 더욱 정교화된 사항들을 수록할 것이다. 생지화학 및 생태계 관측을 실시하고 이를 개선된 물리계 관측의 맥락에서의 해석하는 것이 가장 큰 초점이 될 것이다. 모든 TPOS 관측자료는 동화와 합성을 통한 통합에 의해 그 가치가 더해지므로, 향후의 설계안들은 자료동화 체계의 효과를 증진하는 고급 모델의 모수화 과정과 변화에 필요한 사항들을 다룰 것이다.