

수심측량자료를 사용한 해양수치모델 전용 수심 데이터 제작: BADA Ver.1

Development of Bathymetric Data for Ocean Numerical Model Using Sea-Floor Topography Data: BADA Ver.1

유상철* · 문종윤** · 박웅** · 서광호*** · 권석재*** · 허룡***
Sang Cheol Yoo*, Jong Yoon Mun**, Woong Park**, Gwang Ho Seo***,
Seok Jae Gwon*** and Ryong Heo***

요지 : 최근 해양예보/재해 등의 주요 분야에서 해양수치모델의 수행 및 연구결과에 대한 활용도가 증가함에 따라 정확도 높은 수심자료의 중요성이 크게 부각되고 있다. 해양수치모델에 주로 활용되는 국내 수심자료는 Choi et al. (2002), Seo(2008)의 자료가 있지만, 제작년도가 오래되고 해도를 기반으로 작성했다는 제한사항이 있다. 해도는 항해를 목적으로 제작되어 수심 측량자료 중 최천소 자료를 사용하므로 실제 해저지형을 재현하는데 한계가 있다. 국립해양조사원은 매년 지속적인 수심측량을 통하여 해도를 생산하고 있지만, 수치모델을 목적으로 한 수심자료는 생산하지 않았다. 본 연구에서는 원시 수심측량자료를 이용하여 수치모델을 위한 해양수치모델 전용 수심 데이터셋(BADA Ver.1)을 구축하고, 공개된 해양 수심자료와 비교하였다.

핵심용어 : 수심측량, 해저지형, 수치모델, 해도

Abstract : Recently, the importance of highly accurate bathymetric data is greatly emphasized by the increased use of the ocean numerical models and research results in major areas such as ocean forecasting and natural disaster. There are domestic bathymetric data mainly used in ocean numerical models of Choi et al.(2002) and Seo (2008), but the production year is old and the data was created on the basis of nautical charts. Nautical charts are made for the purpose of navigation and based on the minimum depth from bathymetric data, so there is a limitation to reproduce the actual submarine topography. Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA) produces nautical charts every year through continuous bathymetric survey, but no bathymetric data for numerical models have been produced. In this study, using the raw bathymetric survey data, we built an exclusive bathymetric dataset (BADA Ver.1) for ocean numerical models and compared it with published bathymetric data.

Keywords : bathymetry, sea-floor topography, numerical model, nautical chart

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 악기상 및 해양 기인성 자연재해의 발생 빈도가 증가하고 해난사고 및 오염사고에 의한 피해가 급증하고 있다. 또한, 어항 및 항만의 개발, 해양레저, 해양자원·에너지 개발 등 해양 공간의 활용범위가 확대되면서 해양수치모델 연구결과에 대한 활용도가 증가하고 있으며, 이에 따른 모델의 정확도 및 정밀도 등의 성능개선을 위해 연안 및 외해역의 해양관측자료의 수요가 증대되고 있는 추세이다. 해양수치모델의 정밀도 향상을 위해서는 수심자료 및 해안선 자료가 매우 중요하다. 국립해양조사원에서는 매년 우리나라 관할해역에 대해 수심측량 및 해안선 변동 조사를 실시하고 있다. 하

지만 고해상도 대용량 원시 수심측량자료 및 국가안보와 관련된 연안의 해저지형정보는 보안상 접근이 쉽지 않아 고해상도의 원시 수심측량자료 활용에 대한 연구는 미약한 실정이다.

Kantha(1995)는 연안 부근 해역과 대륙붕역의 수심자료가 조석 재현율에 큰 영향이 있음을 언급하였다. Lefevre et al. (2000)은 수심조정이 황해와 동·중국해의 조석 모델링 결과의 정확도를 크게 향상 시킨다고 하였다. Lee et al.(2007)도 동북아시아 조석 모델의 최소 수심에 대한 민감도 분석을 통해 연안해역의 수심에 따른 조석 재현율을 평가하였다. 이와 같이 해양수치모델 연구진들은 수심입력에 대한 중요성을 인식하고 있다. 또한, 최근의 해안수치모델은 국민의 생명과 재산에 직접적인 영향을 미치는 지역에 대해 매우 정밀한 재현을

*(주)더해본(The sea-born experts)

***(주)해양정보기술(Corresponding author, Jong Yoon Mun, Marine Information Technology Corp., Rm, 1311, 14, Gasan digital 2-ro, Geumcheon-Gu, Seoul, 08592, Korea, Tel: +82-2-2029-7871, Fax: +82-2-2029-7875, perz@chol.com)

***국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency)

추구하고 있고, 이러한 방법으로 연안/항만 지역에서 작게는 수 미터의 격자구성으로 매우 상세한 결과를 도출하고 있다. 따라서 상세 해양수치모델의 구축 방향과 부합되는 상세 해저지형자료가 필요하다.

현재 해양수치모델에서 주로 사용되는 수심자료는 수치지도 또는 전자해도에 기록된 수심자료와 국외의 해저지형 정보 그리고 국내에서 선행된 해양수치모델을 위한 수심자료이다. 해양수치모델을 위해 작성된 수심자료는 국내의 경우 한반도 인근 해역과 황해와 동해 전역에 대하여 수평방향으로 1분 및 1초 간격으로 구축한 SKKU 1m, SKKU 1s(Choi et al., 2002)와 수평방향으로 30초 간격의 KorBathy 30s(Seo, 2008)가 있다. 국외의 수심자료는 전지구 지형자료를 수평방향으로 30초 간격으로 구축한 GEBCO_2014(GEBCO, 2015)와 전지구 지형자료를 수평방향으로 1분 간격으로 구축한 ETOPO1(NOAA, 2008)이 있다. 이와 같이 해양수치모델에 사용되는 수심은 해도자료를 직접 사용하거나, 해도자료를 기초자료로 활용하여 구축된 수심자료이다. 하지만 해도는 “선박의 안전과 경제적인 항해에 필요한 사항을 표기한 항해용 지도”로 정의되므로, 수심측량 자료 중 최천소(最泉所) 위주의 D.L.(Datum Level) 기준으로 작성되었다. 따라서 해도에 입력된 수심은 해저지형의 왜곡이 존재하고, 해양수치모델에 입력할 경우 수괴 부피에 오차가 발생할 수 있다(Fig. 1). 미소체 이론에 근거한 3차원 해양수치모델의 지배방정식은 연속방정식, 미분방정식, 운동방정식, 수송방정식이 사용된다. 이러한 모델의 지배방정식들은 수평적 성분(x, y)과 수직적 성분(z)를 사용해 미소체의 질량보존 법칙과 에너지보존 법칙에 근거하여 수치적으로 해석한다(Blumberg and Mellor, 1987; Blumberg, 1994; Chen et al., 2003; Chen et al., 2004;

Haidvogel et al., 2000; Hamrick, 1996). 해양수치모델에서 수직적 성분에 해당하는 수심의 오차는 크게 해수순환 변동에 영향을 주며 수온과 염분 등 물질의 이송과 확산 등 전방위적으로 영향을 미친다. 따라서 수심의 오차는 기본적으로 유속과 지형적으로 발생하는 조류와 와류 그리고 밀도성층 등 해양특성 재현에 전반적인 오차를 유발시킬 수 있다.

우리나라 서해와 남해 그리고 동해의 지형변화 특성이 적절히 반영되어 있는 제주도 구좌읍 한동리 전면 해상의 원시 수심측량자료를 사용하여 최천소, 평균, 최심소(最深所)에 따른 수심차이를 비교 하였다. 비교 방법은 원시 수심측량자료에서 수평방향으로 30 m 격자간격으로 최천소, 평균, 최심소 자료를 추출하여 공간적 차이를 분석하였다(Fig. 2). 대상 해역의 넓이는 5.0 km²이며, 각 격자에서 평균으로 수심 추출시 수심의 범위는 15.9 m~57.9 m이고 평균수심은 35.6 m이다. 최심소로 추출시 수심의 범위는 18.1 m~58.1 m이고 평균수심은 36.0 m이다. 최천소로 추출시 수심의 범위는 14.7 m~7.6 m이고 평균 수심은 35.0 m이다. 각 격자에서 평균수심과 최심소의 수심차이 범위는 0.0 m~4.6 m이고, 평균 수심과 최천소의 수심차이 범위는 -5.2 m~0.0 m이다. 해도에서 대상해역의 수심을 1포인트만 제공할 경우 최천소인 14.7 m로 제공되어 평균수심인 35.6 m와 2배 이상의 수체적의 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 해양수치모델을 주목적으로 하는 해저지형 정보의 필요성을 파악하고 대표수심 알고리즘을 사용해 원시 수심측량자료에서 대표수심을 제작하였다. 대표수심 추출 알고리즘은 대용량의 원시 수심측량자료의 경량화 및 수심 추출기준을 최천소, 평균, 최심소 선택하여 사용자가 원하는 목적의 수심자료로 구축할 수 있다. 연구에 사용된 해저지형 자료는 우리나라 관할해역을 대상으로 정밀수심측량이 수행된 국립해양조사원(국가해양기본조사, 연안해역정밀조사, 항만해역정밀조사)의 원시 수심데이터 자료이다.

2. 기존 격자수심자료

2.1 SKKU 1m, SKKU 1s

Choi et al.(2002)은 한국 근해인 황해, 동중국해 및 동해 전역의 1분 수평격자 간격의 표고와 수심자료, 한반도 주변

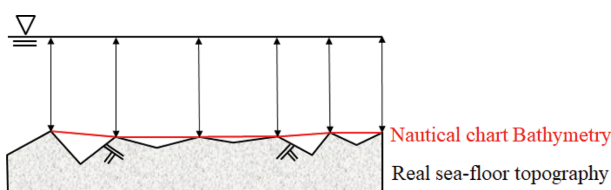


Fig. 1. The difference between Real sea-floor topography and Nautical chart bathymetry.

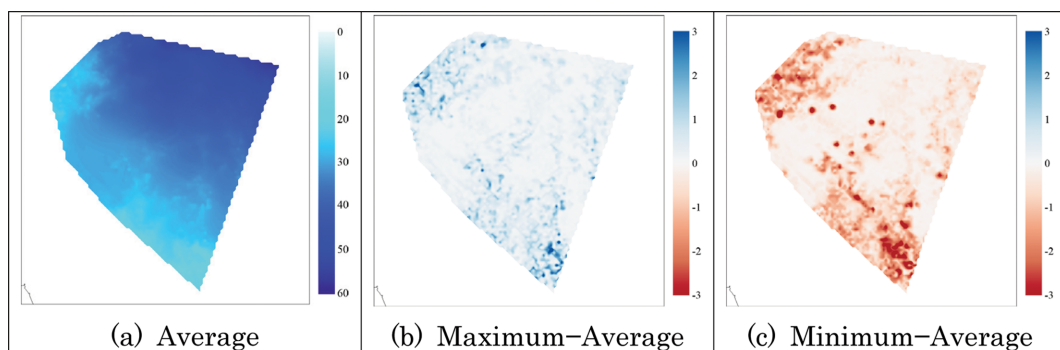


Fig. 2. Bathymetry comparison when extracting raw Bathymetry data to minimum, average, maximum.

해역인 동·서·남해안 해역의 1초 수평격자 간격의 표고와 수심자료를 결합하여 수심 데이터셋을 구축하였다. 수심 구축에 사용한 국내 자료는 국토지리정보원의 연안해역기본도, 국립해양조사원의 디지털 연안선 자료와 해도(한국근해)를 사용하였고, 국외 자료는 일본 지도센터의 50 m, 250 m 표고자료, 일본 해양자료센터의 수치지도정보, 중국 국가해양국의 해도(중국근해), 미국의 GTOPO30(U.S. Geological Survey) 자료를 사용하였다. 육상표고와 해양수심자료의 기준면으로 인천평균해면(I.M.S.L.)을 기준으로 자료를 결합하였다. 편집된 1분 격자 수심은 심해인 동해와 대륙붕해인 황해 및 동중국해의 조석, 해일, 순환과정을 상세하게 해상하는 중규모적 해양과정과 연안범람 수치모델을 수행할 수 있는 기초자료로 구축되었다. 1초 간격 수심의 경우, 우리나라 경기만의 수로 중앙천퇴 연안해역의 복잡한 지형이 재현되어있지만, 범위가 타 수심들에 비해 한정되고, 제작년도가 현재보다 15년 이상 경과되어 최신의 해저지형 재현에 한계가 있다.

2.2 Korbathy 30s

Seo(2008)는 한국 주변해역(30°N~44°N, 117°E~143°E)에 대한 30초 간격의 수심 데이터셋을 구축하였다. 수심 데이터셋 구축을 위해 1분 격자 수심 최신자료와 2007년 간행된 국립해양조사원의 모든 수치해도의 측심과 등심선 자료를 추출하고 WGS84 좌표로 변환하는 프로그램을 개발하여 사용하였다. 대상해역에서 37만 5천개의 취득한 측심자료, 등수심선 자료, 격자 수심자료와 DTED(2004)의 육상표고자료를 내삽하여 격자 수심을 산출하고 이를 기존자료와 비교하여 수정하였다. 격자 수심의 기준면은 약최저저조면이고 육상표고는 평균해면을 적용하였다. 한반도 주변 해역의 수심은 기존 격자 수심이 나타내지 못한 상세한 지형을 제시하였으며, 국립해양조사원의 최신 자료를 사용하여 자료의 질을 높였다. 측심 자료가 충분한 해안은 3초 간격의 격자 수심을 산출하여 이를 바탕으로 30초 자료를 구축함으로써 신뢰도 높은 자료를 생산하였다. KorBathy 30s는 우리나라 연안 인근의 지형 중 대형 해저 수로 중앙천퇴 등이 표현되었고 황해 내측과 동해 등 외해쪽의 수심은 평탄화되어 지형변화가 매우 작게 나타난다. 하지만 수평방향으로 30초 간격의 격자수심은 연안역의 상세재현 수치모델 입력자료로 사용하기에는 지형 재현율이 떨어지고, 제작년도가 10년 이상 경과되어서 최신의 해저지형 재현에 한계가 있고 최천소의 해도 수심기반으로 제작되어 지형재현에 왜곡이 발생할 수 있다.

2.3 전자해도 수심

전자해도란 전자해도표시시스템(ECDIS)에서 사용하기 위해 종이 해도 상에 나타나는 해안선, 등심선, 수심, 항로표지(등대, 등부표), 위험물, 항로 등 선박의 항해와 관련된 모든 해도정보를 국제수로기구(IHO)의 표준규격(S-57)에 따라 제작된 디지털해도를 말한다. 20세기 후반 국제 물동량 증가와

항해기술의 발달로 선박은 대형화·고속화 되었으며, 이로 인한 대형 해난사고가 빈번하게 발생하게 됨에 따라 북부 유럽의 해운국가를 중심으로 1980년대 중반부터 항해 안전을 향상시킬 수 있는 획기적 방법의 하나로 전자해도에 대한 연구를 시작하였다. 우리나라는 1995년 남해안 소리도 부근에서 발생한 유조선 씨-프린스 호의 해난사고를 계기로 새로운 항해 안전 시스템의 필요성이 대두되면서 본격적으로 전자해도 개발에 착수하게 되었다. 국립해양조사원은 1995년부터 1999년까지 우리나라 전 연안의 전자해도 개발을 완료하여 2000년 7월부터 공급하고 있으며 최신의 항해안전정보 유지를 위해 매년 신·개정판 전자해도를 제작하여 현재 272 cell을 유지 관리하고 있다. 이와 같이 해도는 기본적으로 항해·항만 안전 운행을 목적으로 제작되었기 때문에, 해도 수심을 그대로 해양수치모델에 입력하는 것은 제약사항이 따른다. 항박도(6단계, 1:7,500 미만)와 항만도(5단계, 1:7,500~29,999)로 제작된 연안지역은 높은 해상도로 복잡한 지형변화가 잘 재현되었지만, 중국해와 동해지역은 수심이 상당히 평탄화되어 지형 재현율이 떨어진다. 또한, 항해 목적의 최천소 자료는 지형재현에 왜곡이 발생할 수 있다.

2.4 GEBCO_2014

GEBCO(GEneal Bathymetric Cart of the Oceans)는 19세기 유럽의 해도제작을 시작으로 출발하였으며, 1982년 SCOR(Scientific Committee on Oceanic Research)에 의해 전지구 해도를 완성하였다. 아날로그 자료는 1994년 GDA(GEBCO Digital Atlas, 1994)를 통해 디지털 자료로 구축하였다. 이를 기반으로 1997년 디지털 자료 업데이트 등 지속적인 업데이트 환경이 가능한 자료로 구축되었다. 최신 버전인 GEBCO_2014(2015)는 30초, 1분 수평격자 간격의 수심데이터가 제공되며, IHO(International Hydrographic Organization)와 IOC(Intergovernmental Oceanographic Commission)에 의해 지정된 해저지명의 표준화 지침서를 함께 제공한다. 2008년 11월 배포된 1분 간격 버전 2.0에 한반도 주변 300 m 이내 수심자료는 국립해양조사원의 전자해도 96,061 지점의 수심이 반영되어 우리나라 연안역의 수로 등 복잡한 지형이 재현되었지만 수평방향으로 30초 간격의 격자수심은 연안역의 상세한 지형재현에 한계가 있다.

2.5 ETOPO1

2008년 8월 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하 NGDC(National Geophysical Data Center)에서는 전지구 고도자료인 ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)을 개발하였다. ETOPO1은 다양한 글로벌 및 여러 나라의 디지털 데이터셋을 사용하여 생성되었으며, Ice Surface, Bedrock의 2가지 버전으로 제공된다. 해안선, 수심, 지형 등의 자료는 미국 정부기관과 국제기관 및 학술기관으

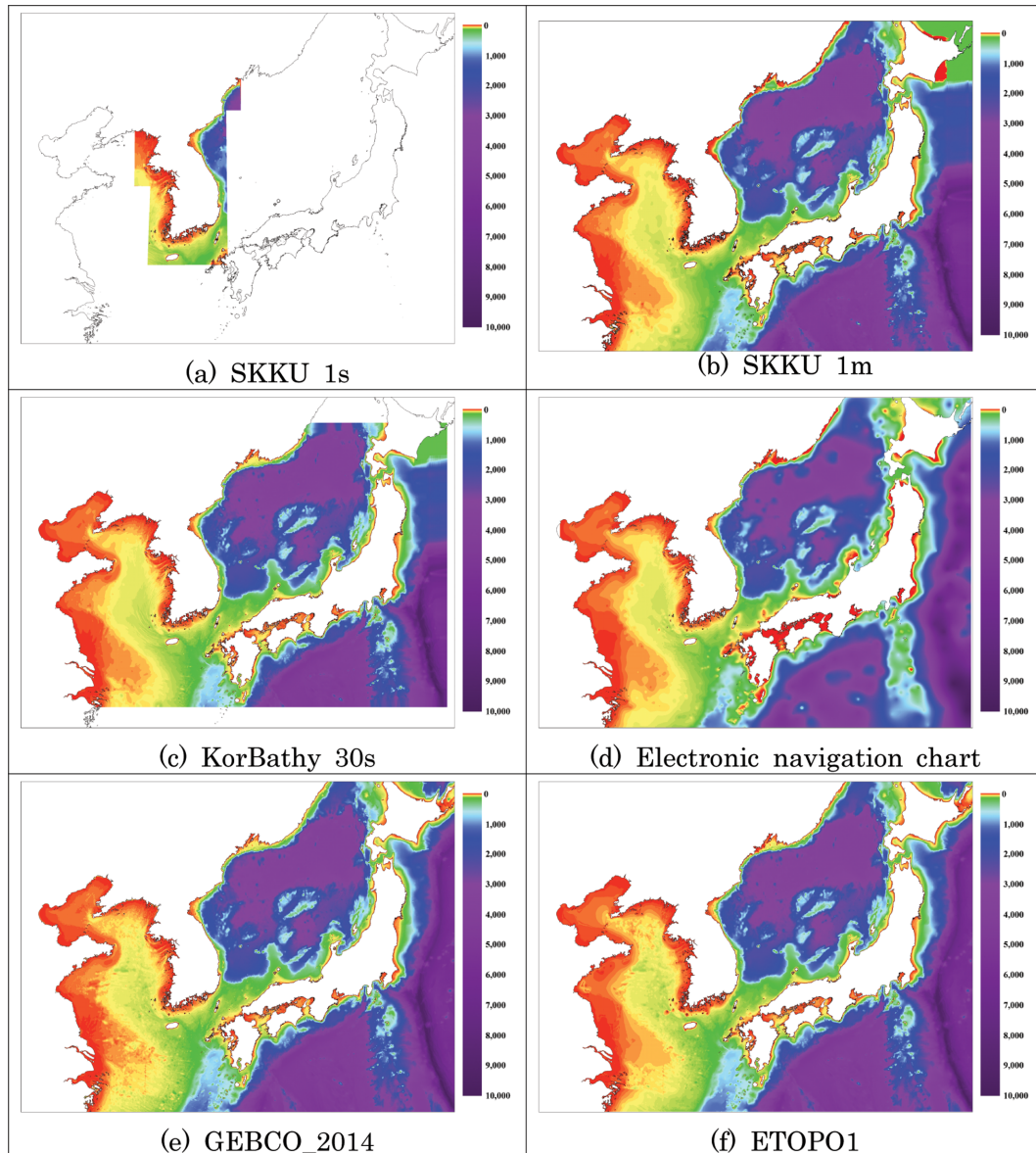


Fig. 3. Domestic and overseas water depth data.

로부터 데이터를 입수하였다. FME(Feature Manipulation Engine) 툴(<http://www.safe.com/>)을 사용하여 수평 및 수직 기준점을 WGS84로 적용하고 이를 ESRI(<http://www.esri.com/>)로 변환하였다. 변환된 파일은 ArcGIS를 이용하여 데이터셋을 보정하고 검증하였다. 우리나라 인근 자료의 수심은 기본적으로 GEBCO의 1분 간격 초기자료를 사용하였기 때문에 GEBCO_2014와 비슷한 양상을 보이지만, 연안에서 지형재현이 매우 미흡하다.

3. 해양수치모델 전용 수심 데이터(BADA Ver.1) 제작

3.1 개요

해양수치모델링은 격자간의 이송과 확산을 계산하는 것이 주된 원리이므로, 정확한 수심의 부피와 질량을 필요로 한다.

그러나 대부분의 해양수치모델링 연구에 사용되고 있는 해도 수심은 항해 안전을 위해 최천소 수심자료를 선택하였기 때문에 해저지형을 정확하게 반영하지 못하는 문제점이 있다. 해양수치모델 전용 수심 데이터(BADA Ver.1)는 기존의 해양수치모델에 사용된 수심 데이터의 한계를 극복하기 위해 원시 수심측량자료로부터 대표수심 추출 시스템(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2012)을 사용하여 해양수치모델 목적의 수심 데이터를 제작한 것이다. 대표수심 추출 시스템은 대용량의 원시 수심측량자료를 TIN 모델 기반으로 제작하여, 해저지형은 최대한 재현하고, 저장공간은 최소화할 수 있도록 지형 굴곡이 많은 부분은 높은 밀도로, 굴곡이 없고 평탄한 지역은 낮은 밀도로 수심을 추출하여 경량화 하는 시스템이다. 본 연구에서는 우리나라 관할해역의 원시 수심측량자료를 대표수심 추출 프로그램을 사용하여 1차 경량화를 수행하고, 수평방향으로 150 m 간격의 해양수치모델 전용 수심 데

이터로 2차 경량화하여 최소한의 저장공간을 사용하며 지형 재현률을 극대화 하였다. 최종적으로 해양수치모델 전용 수심 데이터를 NetCDF 형식으로 재차 경량화하여 자료 배포의 효율성과 연구자들이 쉽게 사용할 수 있는 범용성을 확보하였다.

본 장에서는 국내에서 수행된 정밀 원시 수심측량자료를 사용하여 해양수치모델 전용 수심 제작과정을 소개하고, 원시 수심측량자료와의 지형 재현을 비교하였다. 또한, 우리나라 주요 연안해역에서 해양수치모델 전용 수심과 SKKU 1s, KorBathy 30s, 전자해도, GEBCO_2014, ETOPO1과 해저지형 재현을 비교 · 분석하였다.

3.2 수심측량자료

국립해양조사원에서는 우리나라 관할해역에 대한 기초자료 확보를 위해 1996년부터 2011년까지 1단계 국가해양기본조사를 수행하고, 2008년부터 2018년까지 2단계 정밀 해양수심측량을 수행하였다. 또한, 우리의 실생활과 밀접한 관계를 가지며 사회 · 경제적으로 직접적인 영향을 주는 연안과 항만해역에 대하여 연안해역정밀조사 및 항만해역정밀조사를 지

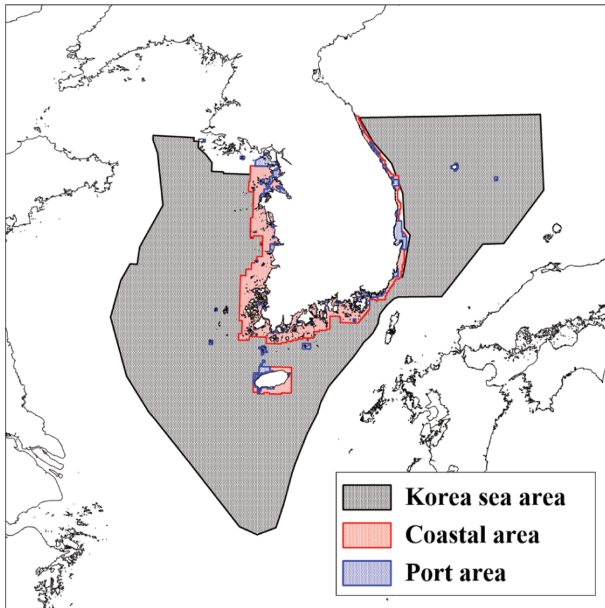


Fig. 4. Area of Bathymetric survey.

속적으로 수행하고 있다(Fig. 4). 수로측량으로 수집된 수심 자료 성과는 수로측량기술이 발전함에 따라 조사방법 및 조사장비가 지속적으로 발달하였고 그에 따른 다양한 성과 포맷과 용량 또한 기하급수적으로 증가하였다. 축적된 원시 수심측량자료의 통합적 · 연속적 해양 공간정보 확립을 위해 다목적 수심자료 관리체계(이하 다목적 DB)를 진행하였다. 다목적 DB는 다년간 구축된 데이터를 이용하여 항해안전에 위한 해도제작에 국한되어 제한적으로 사용되던 수심측량데이터를 새로운 패러다임에 따라 수심자료를 사용자 목적에 맞는 자료로 구축하였다.

본 연구에서는 다목적 DB에 탑재된 자료를 기준으로 2015년까지 완료된 전체 273개 사업 중 DB 구축이 완료된 230건을 사용하였고, 미 구축 43건은 국립해양조사원의 종합해양정보시스템 공통베이스(1~3단계)자료를 사용하였다.

3.3 대표수심 제작

일반적으로 해저지형데이터를 표현하는 방법은 DEM(Digital Elevation Model)이다. DEM은 그리드를 사용하여 지리적 사상(Geographic Feature)에 대한 위치와 높이 값의 속성 정보를 기록하고, 벡터 모델처럼 모든 객체를 점, 선, 면의 세가지 유형의 기하학적 공간 객체(Spatial Objects)로 단순화하여 표현한다. 이러한 레스터 자료는 구조가 간단하고 접근이 쉬워서 지형데이터 표현에 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 레스터 모델의 단점은 수심 정보가 정규화된 그리드에 모두 입력되어 큰 저장 공간을 요구한다. 1차원적인 저장기법의 문제를 해결하기 위해서 TIN(Triangulated Irregular Network)이 개발되었다(Fowler and Little, 1979). TIN 모델은 해상도가 고정되어 있지 않고 주변 지형에 의해 높이 값을 유동적으로 채택할 수 있다. 또한 TIN 모델은 좀 더 높은 해상도로 지형을 표현하기 위한 적절한 지형정보를 저장할 수 있다. Fig. 5에 제시한 바와 같이 DEM으로 저장시 80개의 저장공간이 필요하지만 TIN으로 저장시에는 11개의 저장공간을 사용하여 대용량 데이터의 운용 효율을 높일 수 있다.

3.3.1 대표수심 추출 알고리즘

대표수심 제작 목적은 실제 해저지형의 재현과 저장 용량

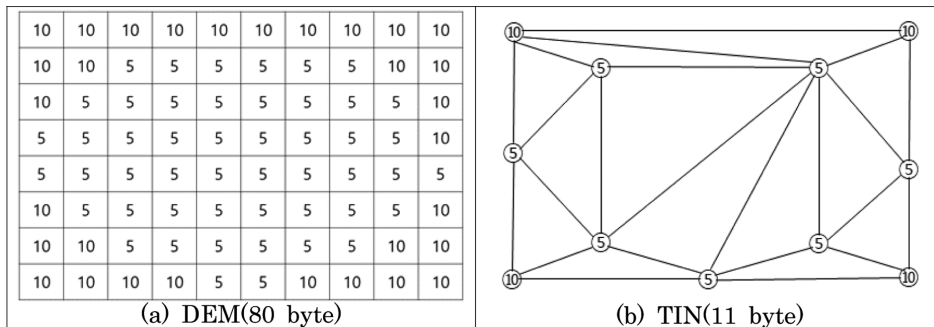


Fig. 5. Conceptual diagram of DEM and TIN.

을 줄이는 것이지만 이에 앞서 ASCII형태의 대용량 데이터를 벡터데이터로 변경을 하여야 공간분석을 통한 데이터 분석이 가능하다. 하지만 일반적으로 사용되는 3D Point, Line, Contours 등의 벡터데이터로 TIN 및 Grid를 제작할 경우 벡터데이터 용량의 한계가 있어 대용량 데이터 제작이 불가능하며 벡터데이터로 제작하기 위해서는 대용량의 수심데이터를 여러 개로 나누는 번거로운 작업을 수행하여야 한다. 이러한 대용량 데이터의 처리를 가능하게 하기 위해서 Terrain dataset을 사용하게 되었다. Terrain Dataset은 Point, Line, Polygon 등 Feature를 완벽하게 지원하며 측정 데이터로부터 영역을 세분화하여 다중 해상도의 TIN기반 지형표현 구조로 만들어지고 데이터베이스관리시스템(DBMS) 기반의 Geodatabase에 저장된다. 대표수심 추출 프로세스는 1) 대용량데이터 처리, 2) 수심 추출 순서로 진행된다.

3.3.1.1 대용량 데이터 처리

측량 원시수심데이터는 수십억의 포인트로 이루어진 단일 행의 속성데이터로 저장되어지는데 이는 실제 저장이 불가능한 수준까지 이르게 된다. 이를 해결하기 위해 수심 데이터는 내부적으로 타일형태로 구조화하였다. 타일형태는 각 타일 별로 수심 데이터는 테이블과 해당 데이터 요소를 만들고 수정 및 쿼리 가능한 Geodatabase의 강점을 이용하여 관리가 가능한 만큼의 데이터를 처리하므로 대용량 데이터 처리에 적합하다. 타일기법을 사용하면 일반적으로 인접에 대한 문제가 발생하는데, Geodatabase는 쿼리를 통해 Terrain Dataset의 각 타일 주변에 가장 가까운 포인트에 대한 참조를 포함하여 완벽한 표면의 정의가 가능하다. 하지만 타일화 작업은 수심 데이터의 수정 및 쿼리가 가능하게 한 것 일뿐 실제적인 데이터 용량을 줄이지 못한다. 이는 타일화된 수심 데이터가 테이블에서 포인트 당 하나의 행을 가지게 되기 때문이다. 타일화된 데이터는 포인트 클러스터링을 작업을 통해 다중 포인트 행으로 클러스터링하면 Geodatabase에서 고도로 압축되어 스토리지 및 I/O 요구 사항을 줄일 수 있도록 처리하였다.

3.3.1.2 수심 추출

대용량 데이터 처리에도 불구하고 수심 데이터는 여전히 상

당한 양의 저장 공간이 필요하다. 대표수심은 적은양의 데이터로 실제지형을 재현하는 것이 목적이므로 수심 데이터의 추출 과정을 진행하였다. 수심 데이터는 Terrain pyramid를 이루게 되며 Pyramid 레이어의 특성을 이용하여 수심을 추출하였다. Terrain pyramid는 Raster pyramid 레이어와 비슷한 개념이지만 격자의 해상도 단위가 아닌 데이터양에 의해 구성되고 분석뿐만 아니라 디스플레이를 위해 사용된다. Pyramid 레이어는 각 단계별로 사용자 정의 임계값을 가지며 수평적 분석(Window Size)과 수직적 분석(Z-Tolerance)을 통해 수심을 추출한다.

수평적 분석을 통해 입력된 원시데이터에 바이닝 기능을 수행 후 각각의 그리드내에서 하나의 포인트를 추출하였다. 이때, 포인트 추출 기준은 지형재현이 가장 잘 이루어지는 평균을 선택하였다. 추출은 한 Window 내에 있는 포인트들의 수심범위가 사용자가 입력한 Threshold보다 작으면 평탄지역으로 간주하여 더 많은 수심을 걸러준다. 수직적 분석은 입력된 각각의 타일의 TIN에서 사용자가 입력한 Z-Tolerance보다 작은 인접 수심을 제외하고 추출된 수심으로 TIN을 생성한다. Z-Tolerance가 클수록 최소값과 최대값 사이의 포인트 양이 적어져 지형의 재현성이 떨어지게 되어 사용목적에 맞는 최적의 Z-Tolerance를 입력하여야한다. 대표수심 제작에서는 각각의 사업별 수심데이터에 대한 평균 Z-Tolerance를 산출하여 수심을 추출하였다.

3.3.2 대표수심 추출 및 지형 재현 비교

본 연구에서는 대표수심 추출 알고리즘을 사용해 20 TB (Tera Byte)에 달하는 초대용량의 원시 수심측량자료를 18 GB (Giga Byte)로 경량화 하고, 해양 예보 및 해양 재난 안전사고 등의 대처에 널리 이용되는 해양수치모델링을 목적으로 하는 대표수심을 추출 하였다. 추출된 대표수심의 지형재현을 검증하기 위해 전라남도 여수시에 위치한 연도항의 원시 수심측량자료와 대표수심을 검증평가 하였다. 연도항의 원시 수심측량자료는 13.5 GB(수심 포인트 수: 228,077,500개)로 구축되어 있으며, 대표수심으로 추출한 결과 원시 자료에서

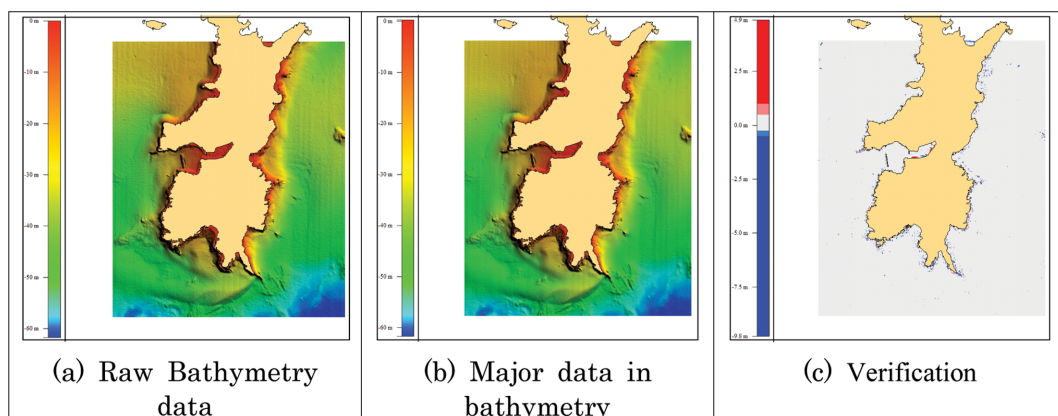


Fig. 6. Verification of major data in bathymetry.

1% 정도로 경량화 되어 14.8 MB(Mega Byte)(수심 포인트 수: 182,462개)로 구축하였다. 경량화된 대표수심의 지형재현율을 검증한 결과 국부적으로 지형차이가 발생하긴 하지만 매우 미미한 수준이며, 전반적으로 원시자료와 대표수심은 지형이 거의 유사하게 나타난다(Fig. 6).

3.4 수심기준면 및 해안선 설정

기본 수준면(D.L.)은 해도의 수심과 조석표 조고의 기준면이며 약최저저조위(Approx. L.L.W.)라고도 불리고, 항만시설의 계획, 설계 등 항만공사의 수심 기준이 되는 수준면으로 국제수로회의에서 “수심의 기준면은 조위가 그 이하로는 거의 떨어지지 않는 낮은 면이어야 한다”라고 규정하고 있다. 우리나라에서는 조위의 기준면으로 해당지역의 약최저저조위를 채택하고 있다. 본 연구에서 개발된 해양수치모델 전용 수심의 기준면도 약최저저조위를 채택하여 공용성을 높이고자 하였다.

우리나라 서해와 같이 조수간만의 차가 큰 지역은 대조차가 최대 9 m 이상 나타나고, 조간대가 크게 발달하여 서해 연안의 유동장에 큰 영향을 준다. 약최저저조위로 제작된 수심은 조간대 표현이 불가능하고, 해안선과 불연속이 발생하는 문제가 있다. 국립해양조사원의 종합해양정보시스템에서는 약최고고조위 기준의 해안선 자료와 조간대의 수심자료를 제공하고 있다. 본 연구에서 제작된 해양수치모델 전용 수심은 수심측량 자료와 종합해양정보시스템의 해안선자료와 조간대 수심을 결합하여 이러한 제약사항을 극복하였다. 또한, 수치모델 연구진들의 다양한 요구사항을 대비하기 위해 국립해양조사원의 TideBed DB를 이용하여 평균해수면(M.S.L.) 기준의 수심자료도 제작중이다.

Table 1. Lightweight data size

Data name	Raw DATA	Represent	BADA (ASCII)	BADA (NetCDF)
File size (%)	20 TB (100%)	40 GB (20%)	566 MB (0.0028%)	351 MB (0.0017%)

3.5 해양수치모델 전용 수심 데이터(BADA Ver.1)구축

국가공간정보 기본법과 해양수산부 국가공간정보 보안관리 규정에서 해양공간정보 중 공개될 경우 국가안보에 유해한 결과를 초래할 우려가 있는 해양공간정보는 비공개를 원칙으로 하고 있으며, 좌표가 포함된 해상도 120 m보다 정밀한 수심 자료는 공개제한으로 지정되어 있다. 본 연구에서는 모든 사용자를 대상으로 한 해양수치모델 전용 수심 제작을 목적으로 하였기 때문에 “3.3 대표수심 제작”에서 제작된 해양수치모델 목적의 대표수심을 이용하여 우리나라 관할해역을 대상으로 수평방향으로 150 m 간격의 해양수치모델 전용 수심 데이터(BADA Ver.1)를 구축하였다. 해양수치모델 전용 수심 데이터는 556 MB로 대표수심에서 재차 경량화 되었고, 사용자 배포를 위해 NetCDF 형식으로 변환하고 최종적으로 351 MB 까지 경량화하여 웹 배포성과 수심의 활용의 범용성을 높였다(Table 1).

해양수치모델 전용 수심 데이터셋은 수평방향으로 150 m 간격으로 추출되었기 때문에, 30초 또는 1분 간격 등의 기존 수심자료(전자해도, SKKU 1s, KorBathy 30s, GEBCO_2014, ETOPO1)에 비해 경기만의 수로, 중앙천퇴, 장안천퇴 등 연안 해역의 복잡한 해저 지형이 상세히 재현되었고, 원시 수심측량자료에서 평균 수심을 사용하였기 때문에 해양수치모델의 기초자료로서 사용가치가 증대되었다.

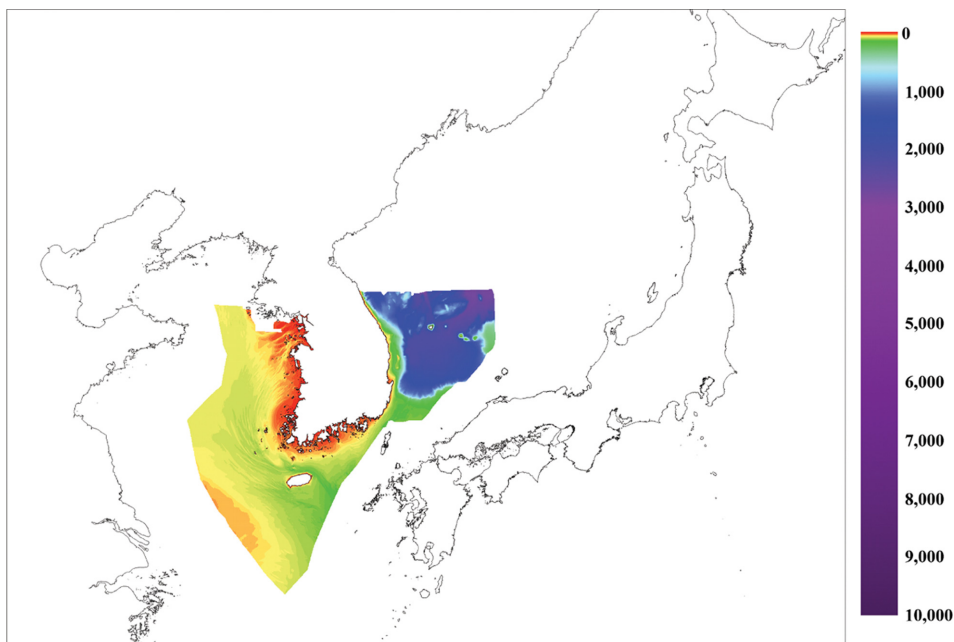


Fig. 7. Bathymetry data for ocean numerical models (BADA Ver.1).

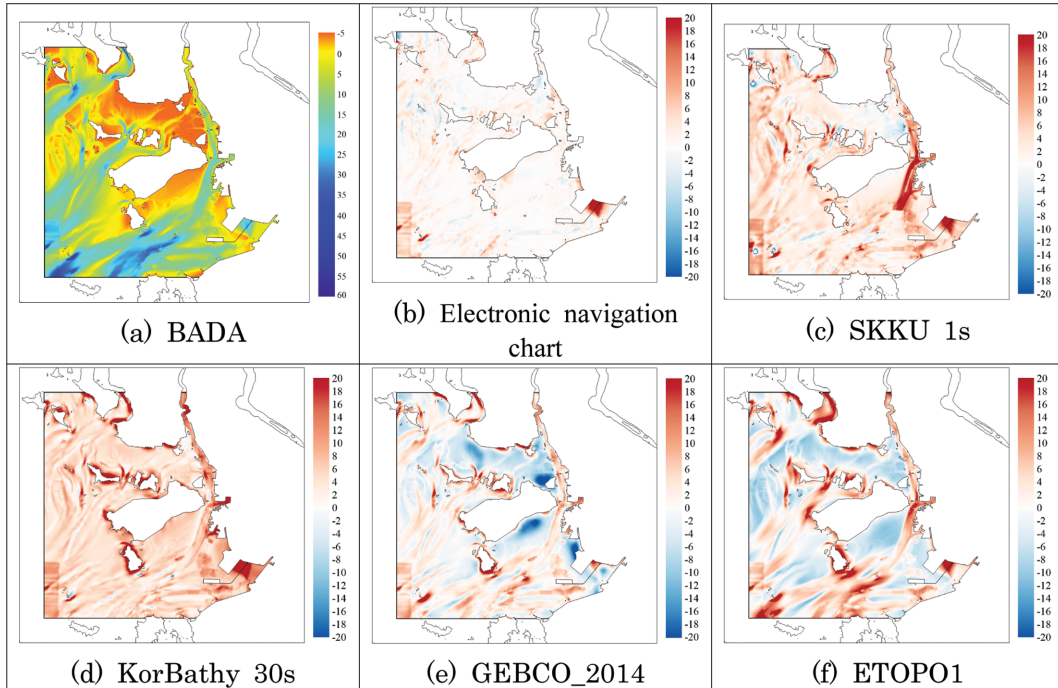


Fig. 8. Differences of bathymetric data on Incheon.

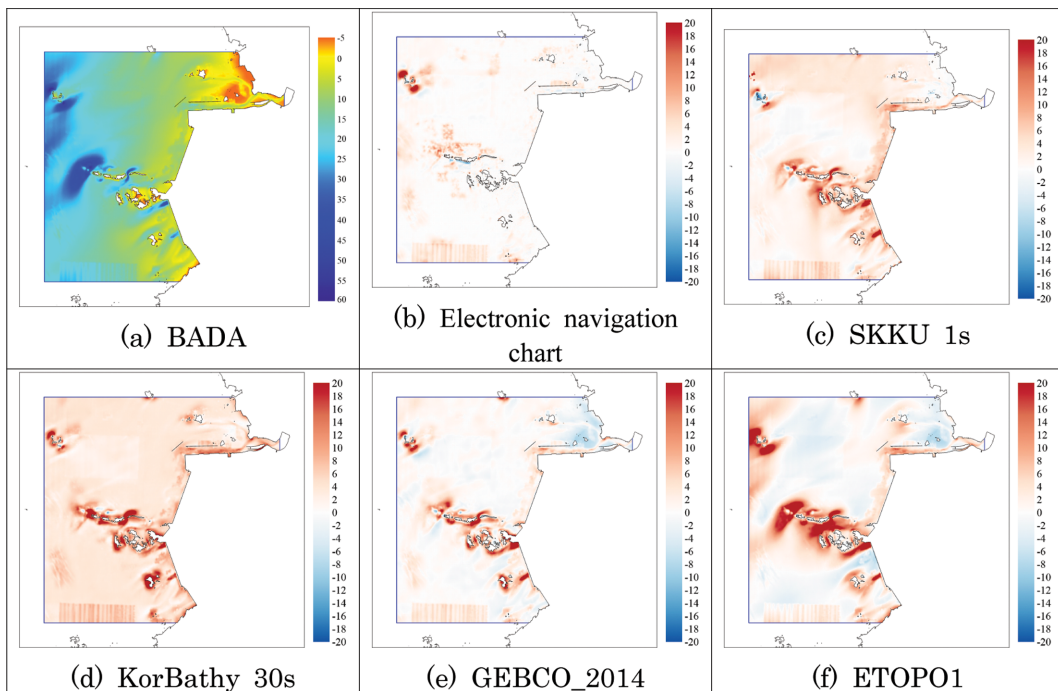


Fig. 9. Differences of bathymetric data on Gunsan.

3.6 우리나라 주요해역 수심 비교·분석

본 연구를 통해 구축된 해양수치모델 전용 수심 데이터셋을 인천, 군산, 목포, 광양, 부산, 제주도 인근 해역을 대상으로 기존 수심자료들과 비교·분석 하였다(Fig. 8~13). 해양수치모델 전용 수심은 인천해역의 염하수로 석문수로의 상세한 수심변화가 잘 재현되었다. 특히 강화도와 영종도 사이의 조간대에서 염하수로서 경기만 서측으로 이어지는 수로가 상

세히 재현되었다. 전자 해도는 대부분의 영역에서 $-10 \sim -10$ m 사이의 수심차이가 교호하게 나타났으며, 염하수로와 석문수로의 지형변화는 어느 정도 재현되었으나 강화도와 영종도 사이의 조간대에 발달한 수로재현은 미비하다. SKKU 1s는 전반적으로 수심이 얇게 재현되었으며, 염하수로부터 영종도 남쪽의 조간대와 인천항 항로의 수로부분의 지형이 잘 재현되지 못하였다. KorBathy 30s는 수심이 가장 얇게 재현되었

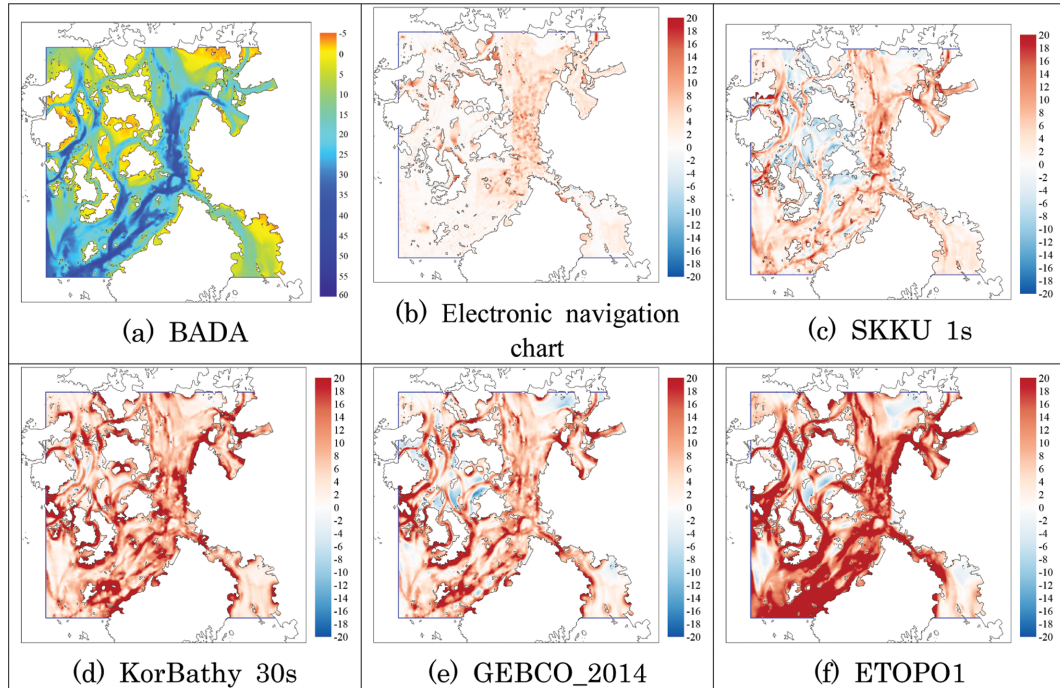


Fig. 10. Differences of bathymetric data on Mokpo.

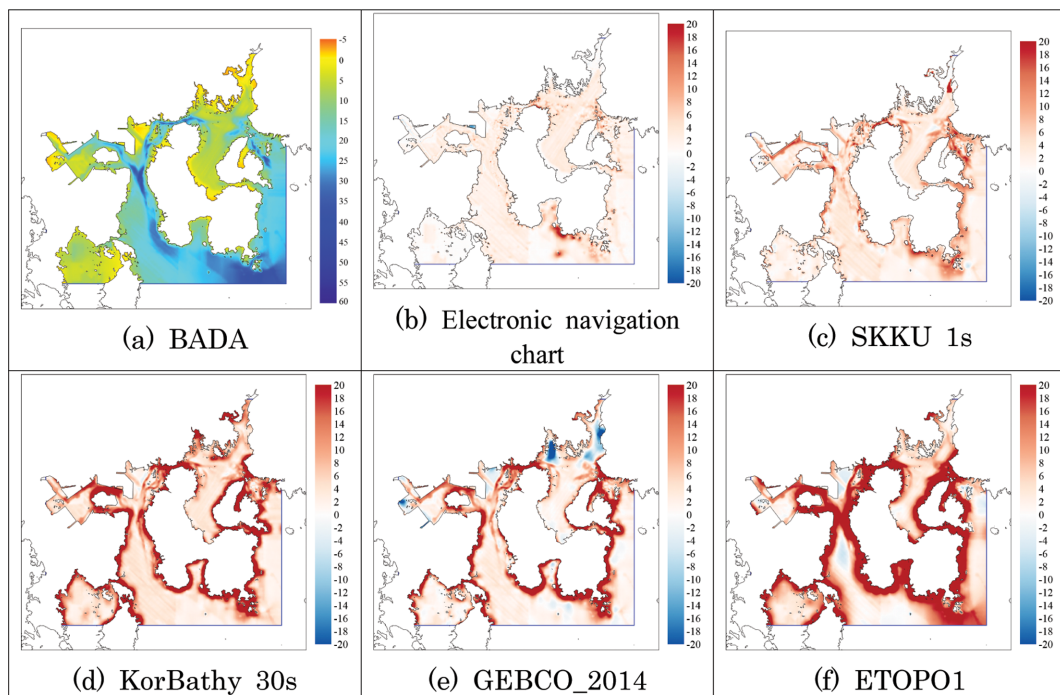


Fig. 11. Differences of bathymetric data on Gwangyang.

며, 수심 간격의 영향으로 염하수로와 석모수로와 같은 작은 지역의 수심은 잘 재현되지 못하였다. GEBCO_2014는 염하수로는 조간대 지형으로 재현되었고, 염하수로 남측의 넓은 조간대 지역은 재현되지 못하고 얕은 수심의 지형으로 재현되었다. ETOPO1도 GEBCO_2014와 유사한 경향을 보이며 석모수로의 재현율은 가장 안 좋았다. 인천 해역 수심 비교 지역 남서측은 모든 수심에서 블록형태의 수심차이가 나타났

는데, 이는 원시 수심측량자료가 1990년대에 수행된 과거의 자료라서 발생한 오차로 판단된다. 해양수치모델 전용 수심 데이터의 이후 버전에서는 최신의 수심측량자료를 사용하여 과거 수심측량자료로부터 발생한 오차를 최소화할 예정이다.

군산 해역은 금강 하구둑부터 개야수로까지 이어는 수로와 조간대 지역의 지형변화가 잘 재현되었고, 고군산군도의 복잡한 지형과 새만금호 신시 배수갑문 전면의 깊은 수로와 4

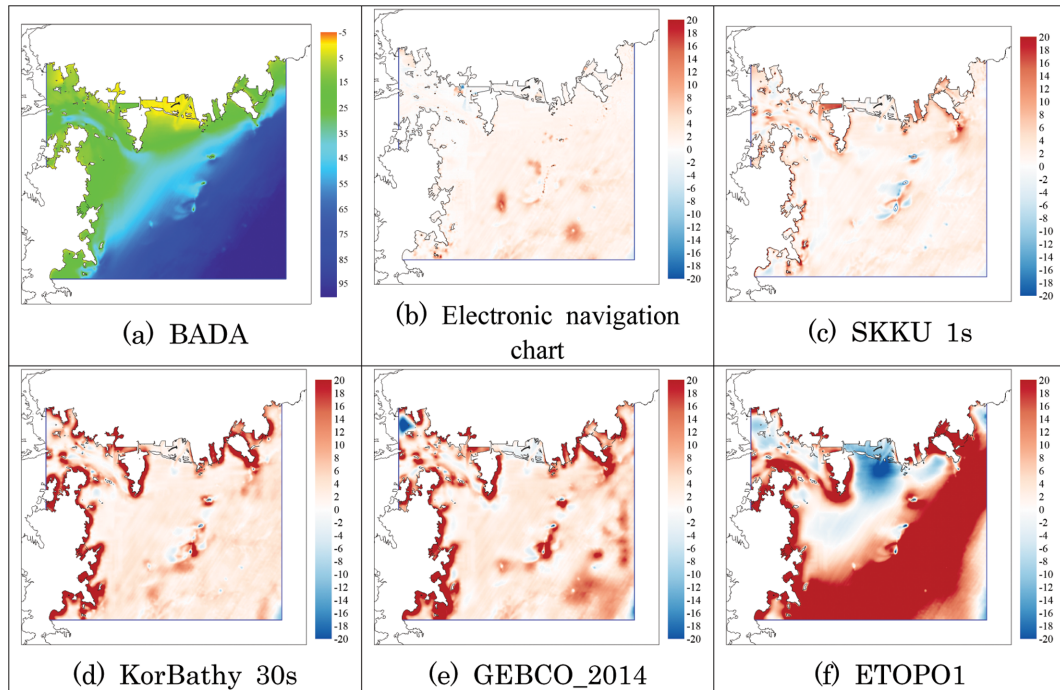


Fig. 12. Differences of bathymetric data on Busan.

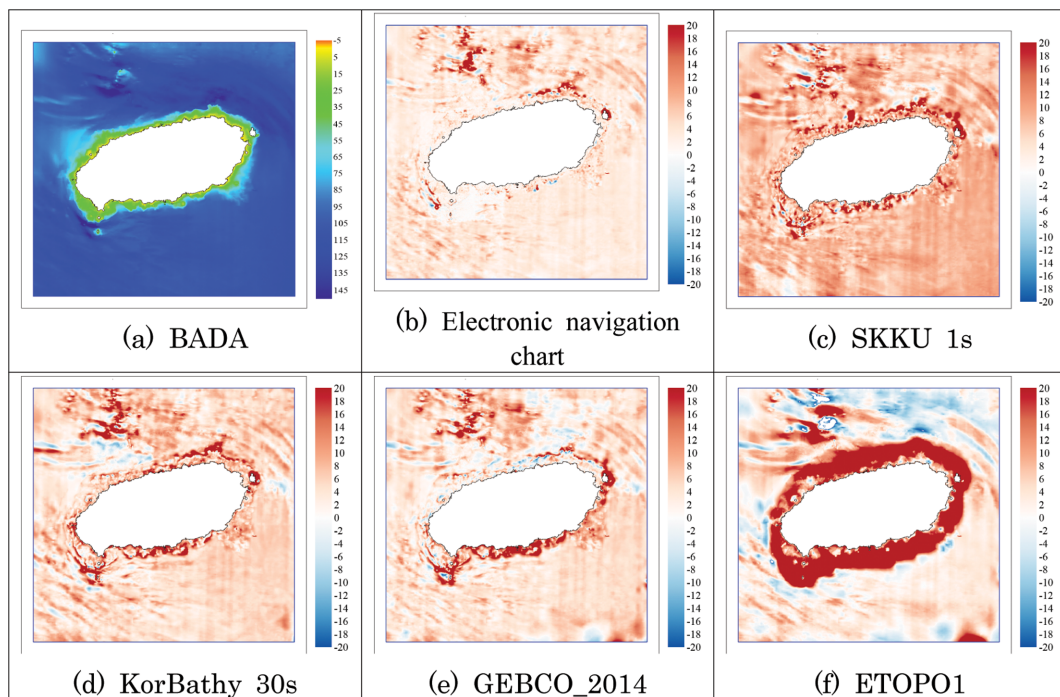


Fig. 13. Differences of bathymetric data on Jeju.

호 방조제 끝물막이 구간의 깊은 수심도 잘 재현되었다. 전자 해도에서도 개야수로 인근과 고군산군도 인근의 지형은 재현되었으나, 최천소 수심을 사용하였기 때문에 전반적으로 수심이 얕게 나타났다. 수심 간격이 큰 KorBathy 30s, GEBCO_2014, ETOPO1은 개야수로 인근과 고군산군도의 복잡한 지형의 재현율이 크게 떨어졌다. 군산 해역 수심 비교 지역 남측은 모든 수심에서 블록형태의 수심차이가 나타났는데, 이

는 인천 해역에서 발생된 수심차이와 동일한 원인으로 판단된다.

다도해 지역인 목포 해역은 섬 사이의 수로와 영산강과 섬진강으로 이어지는 수로도 잘 재현되었다. 전자해도 수심은 영산강과 섬진강으로부터 나오는 수로의 수심이 잘 재현되지 않아 얼룩무늬 형태의 수심차이를 나타내고 있다. SKKU 1s도 수로의 복잡한 지형변화를 잘 반영하지 못하는 경향을 보

이고 있다. 수평방향으로 30초 간격의 KorBathy 30s와 GEBCO_2014도 복잡한 수로지형의 재현율이 크게 떨어졌고, ETOPO1은 수로 재현이 안되고 크게 평탄화 된 지형으로 나타났다.

광양 인근해역은 광양만으로 이어지는 해저 수로와 육지와 남해도 사이의 수로가 잘 재현되었다. 전자해도 수심은 전반적으로 얕게 평가 되었고, 노도 인근에서 수심이 20 m 정도 얕게 나타났다. SKKU 1s도 전반적으로 수심이 얕게 나타났으며, 남해도와 육지사이의 수로와 광양만 내측에서 재현율이 크게 떨어졌다. 사천대교 부근에서는 이상 수심데이터의 영향으로 수심차가 크게 나타났다. KorBathy 30s는 해안선 부근에서 수심차이가 크게 나타나고 이러한 영향으로 좁은 수로구역은 재현되지 못하였다. GEBCO_2014도 KorBathy 30s과 유사한 경향을 보이며, 사천대교, 중평항, 광양만 내측에서 뒤는 수심의 영향으로 크게 깊은 골이 나타난다. ETOPO1은 해안선에서 외해쪽으로 약 1 km까지 재현율이 크게 떨어지고 다른 수심들에 비하여 크게 평탄화된 지형으로 나타났다.

부산 인근 해역은 진해만으로 이어지는 해저수로와 낙동강 하구에 위치한 사주지역도 재현되었으며, 대한해협으로 이어지는 대륙붕과 그 사이에 있는 섬 지역도 잘 재현된 것으로 나타났다. 전자 해도와 SKKU 1s도 해양수치모델 전용 수심과 유사한 경향을 보이지만, 전반적으로 수심이 얕게 나타났다. KorBathy 30s와 GEBCO_2014는 해안선 부근에서 수심 차이가 크게 나타났고, 외해측의 섬은 재현되었다. ETOPO1은 전반적으로 수심이 크게 평탄화 되어 낙동강 하구역의 사주는 재현되지 못해 수심이 깊게 나타났고, 대한해협으로 이어지는 대륙붕 지역은 20 m 이상 얕게 나타났다.

제주 인근 해역은 제주도 북측의 깊은 수로와 인근 섬 지역이 잘 재현되었다. 전자 해도와 SKKU 1s, KorBathy 30s, GEBCO_2014, ETOPO1도 해양수치모델 전용 수심과 유사한 형태로 재현되었으나, 공통적으로 해도 수심을 기반으로 제작되었기 때문에 지형이 왜곡 되었을 수 있고 자료가 오래 되었거나 수심 간격이 커질수록 재현율이 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 ETOPO1은 다른 지역과 마찬가지로 크게 평탄화 되어 해안선 인근은 수심이 낮게 나타나고, 북측 수로에서는 수심이 깊게 나타났다.

4. 결 론

대부분의 해양수치모델 연구진은 국내 · 외에서 공개된 수심자료의 제한사항을 인지하고 있지만, 이를 극복할 수 있는 마땅한 대안이 없어 해도 수심을 사용하거나 해도 기반의 수심자료를 사용해왔다. 본 연구에서는 해양수치모델 전용 수심자료의 필요성을 느끼고, 이를 위해 원시 수심측량자료를 사용하여 해양수치모델 전용 수심 데이터(BADA Ver.1)을 구축하였다. 20 TB에 달하는 대용량의 원시 수심측량자료는 자료 운용이 거의 불가능하기 때문에, 대표수심 추출 프로그램

을 이용하여 해저지형을 재현하면서 용 351 MB로 경량화 하여 사용자들의 접근과 운용성을 크게 높였다.

우리나라 주요 해역인 인천, 군산, 목포, 광양, 부산, 제주 해역을 대상으로 해양수치모델 전용 수심과 전자 해도, SKKU 1s, KorBathy 30s, GEBCO_2014, ETOPO1과 수심을 비교 · 분석하였다. 수평방향으로 150 m 간격의 해양수치모델 전용 수심은 주요 해역의 수로 및 복잡한 해역 등을 기존 수심들에 비해 상세히 재현하였고, 최천소 수심을 사용한 전자 해도와 해도 수심을 기반으로 작성된 기존 수심들이 해양수치 예측 전용 수심에 비해 얕게 나타났다. 또한 해상도가 커질 수록 지형이 평탄화 되어 연안 해역에서 적용성은 해양수치 예측모델이 월등히 우수할 것으로 판단된다. 하지만, 1990년대에 측량된 원시 수심측량자료 중 일부는 주변 지역과 블록형태의 오차를 발생하고 있는데, 이는 2016년 이후 수심측량이 이루어진 최신의 원시 수심측량자료를 사용하여 2019년 말까지 보완할 예정이다. 본 연구를 통해 개발된 해양수치모델 전용 수심 데이터는 국립해양조사원 해양예보과를 통해 공개 배포할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립해양조사원의 “수치예측자료 성능향상을 위한 기초자료 생산 기반 마련” 지원으로 수행되었습니다.

References

- Blumberg, A.F. and Mellor, G.L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In Three-dimensional Coastal Ocean Model, N.S. Heaps, Ed., Coastal. Estuar. Sci., 4, 1-6.
- Blumberg, A.F. (1994). A primer for Ecom-si. Technical Report of HydroQual, Inc., 66 p.
- Chen, C., Liu, H. and Beardsley, R.C. (2003). An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J. Atm. and Oceanic Tech., 20, 159-186.
- Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G. (2004). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM User Manual. SMAST/UMASSD Technical Report-04-0601, 183 p.
- Choi, B.H., Kim, K.O. and Eum, H.M. (2002). Digital Bathymetric Topographic Data for Neighboring Seas of Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 14(1), 41-50 (in Korean).
- DTED (2004). Level 1 Data, <http://edcuscgs.gov/products/elevation/srtmdted.html/>.
- ESRI, <https://www.esri.com/>.
- FME, <https://www.safe.com/>.
- GEBCO, <https://www.gebco.net/>.
- Haidvogel, D.B., Arango, H.G., Hedstrom, K., Beckmann, A., Rizzoli, P.M. and Schepetkin, A.F. (2000). Model evaluation exper-

- iments in the North Atlantic Basin, Simulation in nonlinear terrain-following coordinates. *Dyn. Atmo.Oceans.*, 32, 239-281.
- Hamrick, J.M. (1996). User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code. Special Reports in Applied Marine Science and Ocean Engineering (SRAMSOE) No. 331, Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, Virginia 23062, USA.
- Kantha, L.H. (1995). Barotropic tides in the global oceans from a nonlinear tidal model assimilating altimetric tide 1. model description and results. *Journal of Geophysical Research*, 100(C12), 25283-25308.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2012). Establishment of a submarine topography management system for natural science for marine forecasting (in Korean).
- Lee, H.J., Seo, H.J. and Kang, H.W. (2007). A Sensitivity Test on the Minimum Depth of the Tide Model in the Northeast Asian Marginal Seas. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 19(5), 457-466 (in Korean).
- Lefevre, F., Frovost, C.L. and Lyard, F.H. (2000). How can we improve a global ocean tidal model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105(C4), 8707-8725.
- NOAA, <https://www.noaa.gov/>.
- Fowler, R.J. and Little, J.J. (1979). Automatic extraction of Irregular Network digital terrain models. *Comput. Graph.*, 13(2), 199-207.
- Seo, S.N. (2008). Digital 30sec Gridded Bathymetric Data of Korean Marginal Seas - KorBathy30s. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(1), 110-120 (in Korean).
- U.S. Geological Survey (2002). GTOPO30 Documentation.

Received 29 April, 2019

Revised 20 June, 2019

Accepted 24 June, 2019