

독도 화산체 정상부해역의 정밀해저지형 및 지구물리학적 특성 연구

김창환^{1*} · 박찬홍² · 이명훈¹ · 최순영¹ · 주형태³

¹한국해양과학기술원 동해연구소 독도전문연구센터

²한국해양과학기술원 동해연구소, ³한국해양과학기술원 해양방위센터

A Study on Detailed Bathymetry and Geophysical Characteristics of the Summit of the Dokdo Volcano

Chang Hwan Kim^{1*}, Chan Hong Park², Myoung Hoon Lee¹, Soon Young Choi¹ and Hyeong Tae Jou³

¹Dokdo research center, East Sea Research Institute, Korea institute of Ocean Science and Technology, Uljin, Korea

²East Sea Research Institute, Korea institute of Ocean Science and Technology, Uljin, Korea

³Maritime Security Research Center, Korea institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

We studied the detailed bathymetry and the geophysical characteristics of the summit of the Dokdo volcano using multibeam echosounding and geophysical survey data. The bathymetry around the main east and west islets of the Dokdo volcano shows very shallow within about 10 m water depth. From near islets to about 30 m b.s.l., the shallow water area has very steep slope and many irregular sunken rocks. The area from about 30 m to about 80 m b.s.l. shows gentle rises and falls, and less steep slope. The area from 80 m b.s.l. has gradually flat undulation and smooth slope seabed and is extended to offshore. The main islets of the Dokdo volcano and the rocky sea bottom elongated from the islets might be the residual part of the eroded and collapsed main crater of the Dokdo volcano. The bathymetry and the seafloor image(from backscattering) data show small craters, assumed to be formed by the eruption of later volcanism. The seafloor images propose that, except some areas with shallow sand sedimentary deposits, there are typical rocky bottom such as rocky protrusions and lack of sediments in the main morphology of the survey area. The stepped slopes of the seabed are deduced to be submarine terraces. The several prominent submarine terraces are found at the summit of the Dokdo volcano, suggesting repetition of sea level changes(transgressions and regressions) in the Quaternary. The results of the magnetic anomaly and the analytic signal have a good coherence with other geophysical consequences regarding to the location of the residual crater.

Key words : bathymetry, Dokdo, crater, submarine terrace, sea level change

본 연구는 현재까지 수행된 독도 화산체 정상부 해역의 정밀수심 및 지구물리 조사 자료를 종합하고 분석하여 정상부 해역의 정밀해저지형 및 지구물리학적 특성을 연구하였다. 독도 연안역 동도와 서도 사이 연결 수로는 약 10 m 이내의 얇은 수심을 이루고 있다. 독도 화산체 정상부해역의 전체적인 수심은 동도와 서도의 육지부부터 수면 아래 약 30 m 까지는 불규칙하며 급한 경사면을 가지고, 그 후 수심 약 30 m부터 수심 약 80 m 까지는 경사가 점차 낮아지다가 수심 약 80 m 이하로 완만한 경사를 보이면서 외해역으로 깊어진다. 독도 육지부와 그 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 암반들은 독도를 생성시킨 화구륜의 잔해로 판단되며 동도와 서도는 화구륜의 남쪽 한부분일 가능성이 큰 것으로 생각된다. 또한 정상부 해역의 해저지형에서는 소규모의 움푹 패인 지형들이 나타나는데 이는 독도 형성 후 나중에 생성된 소규모 분화구의 흔적들로 추정된다. 독도 정상부 해역은 주로 암반이 많이 분포하지만 곳곳에서는 모래 퇴적층들도 나타나는 것을 볼 수 있다. 독도 화산체 정상부에는 계단형의 경사면들이 나타나는데 이는 제 4 기에 나타난 해침, 해퇴 등 해수면변화에 의해 만들어진 해저단구로 유추되며, 지역별로 차이가 있기는 하지만 주로 약 30 m, 60 m, 80 m 및 약 100 m의 수심대를 위주로 하여 몇 개의 주요 해저단구가 나타나는 것으로 판단된다. 자기이상도 및 아날니틱신호도를 살펴보면 수면 위 독도에서 연장되는 북동 및 북서쪽의 이상대들은 화구륜의 잔해로 예상되는 암반들의 위치와 유사하게 나타난다.

주요어 : 독도, 해저지형, 분화구, 해수면변화, 해저단구

*Corresponding author: kimch@kiost.ac

1. 서 론

동해는 태평양판이 유라시아판과 접한 해구(trench)를 따라 하강 섭입(subduction)하면서 후열개 확장(back-arc spreading)이 일어나 유라시아 대륙의 동쪽 대륙지각 일부가 떨어져 나가면서 형성된 배호상분지로 해석된다. 그리고, 동해는 서태평양 주변해(marginal sea) 중의 하나이며, 활발한 지각변형이 일어나고 있는 환태평양 화산 및 지진대에 접하고 있다. 동해는 대부분 수심이 2,000 m 이상인 해역으로서 한국, 일본, 그리고 러시아로 둘러싸여 있으며 울릉분지, 일본분지, 그리고 야마토분지로 구분된다. 이들 분지는 해령(ridge)과 한국대지(Korea Plateau) 등의 해저대지들로 경계 분리되면서 각각 독립적으로 발달해 있고, 한국대지나 해령들은 일본 열도가 유라시아 대륙으로부터 분리될 때 동해에 남아있는 대륙지각의 조각들이다(Jolivet *et al.*, 1991). 동해의 남서부에 위치하는 울릉분지는 한국대지에 의해 북쪽의 일본분지와 그리고 오키뱅크에 의해 동쪽의 야마토분지와 각각 분리된다.

동해 울릉분지의 북동쪽에 위치하고 있는 독도는 한 반도에서 동쪽으로 약 216.8 km 정도 떨어져 있으며 인근의 울릉도에서 약 87.4 km 떨어져 있다. 독도는

울릉분지의 수심 약 2,000 m인 해저면으로부터 솟아 있으며 한국대지의 기저부에 인접하여 분포하는 울릉도와는 달리 동쪽의 오키뱅크 쪽에 근접해 있다(Song *et al.*, 2000). 울릉분지 북동쪽에는 울릉도 및 독도를 포함하여 5개의 화산체가 동서 방향으로 거의 일직선 형태로 존재하고 있고, 이 중 울릉도와 독도를 제외한 다른 세 화산체는 해수면 하에 존재하고 있는 해산(seamount)이다(Fig. 1). 서쪽에서 동쪽으로 가면서 울릉도, 안용북해산, 독도, 심흥택해산, 이사부해산이 분포하고 독도와 안용북해산 사이를 가로지르며 한국해저간극(Korea Gap)이 위치하고 있다.

수면위의 독도는 동쪽과 서쪽 두 개의 작은 섬과 수십개의 암석군으로 이루어졌는데 동쪽의 섬은 동도, 서쪽의 섬은 서도라고 부른다. 동도는 높이가 98.6 m, 지름이 약 450 m이며 서도는 높이가 약 168.5 m, 지름은 약 500 m이다. 이 두 섬은 가파른 암반의 경사면으로 둘러싸여 있다(Sohn and Park, 1994). 독도는 울릉도 화산암류와 비슷한 알칼리 현무암, 조면 현무암, 조면 안산암 및 조면암으로 구성되어있다고 알려져 있다(Kim *et al.*, 1987). 해수면 상에 노출된 독도의 암석 샘플에서 유추된 독도의 생성 시기는 신생대 제 3 기 플라이오세 전기부터 후기로 즉 약 460만년

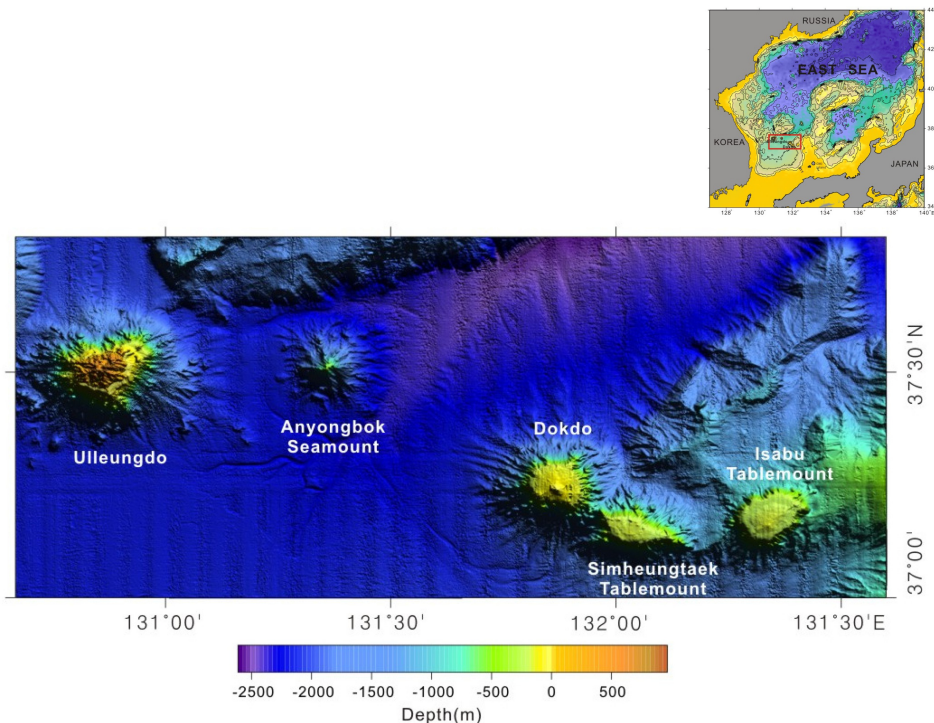


Fig. 1. 3D bathymetry around Ulleungdo and Dokdo(vertical viewing).

전부터 약 250만년 전 사이로 밝혀져 있다(Shon and Park, 1994).

동해의 울릉분지 북단에 있는 독도-울릉도 주변해역은 한-일 간의 해역설정 문제뿐 아니라, 해양수산자원의 보고라는 측면에서도 그 중요성이 크게 인식되고 있다. 대륙붕의 경계 획정과 독도의 친환경적 개발을 위해서도 독도 육역부 연구뿐만 아니라 독도 주변의 해저지형 및 지질구조에 대한 연구가 필요하다.

현재까지 독도의 지형 및 지질에 관한 연구들을 살펴보면 육지의 암석에 관한 연구, 육지 지형/지질 연구 및 독도와 주변 구조들/퇴적물에 대한 연구가 아래와 같이 주로 수행되었다. 수면 위 독도의 암석들을 이용한 K-Ar 절대연령측정으로 독도는 전기 및 후기 플라이오세에 걸쳐 형성되었음이 주장되었고(Sohn and Park, 1994), 또한 조면암질 현무암과 조면암의 K-Ar 전암연대 측정결과와 후기플라이오세에 해당한다는 연구결과도 나타나고 있다(Kim, 2000). 새로운 K-Ar 연대 측정 결과로부터 독도는 $3.67 \pm 0.40 \sim 1.89 \pm 0.29$ Ma의 형성시기가 보고되기도 하였다(Song *et al.*, 2006). Kim *et al.*(1987), Sohn and Park(1994), Kim(2000), Shim *et al.*(2010) 등은 수면 위 독도의 화산암류의 관한 연구를 수행하여 독도의 암석분류 및 독도의 알칼리화산암류와 울릉도의 암석조성의 유사성 등 암석학적 연구를 수행하고 분석하여 독도 알칼리화산암류의 생성환경을 연구하였다. Hwang *et al.*(2003)은 독도 화산의 분출유평 및 화산형태를 연구하였으며, Jeon(2005)과 Hwang *et al.*(2007) 등은 독도 육역부의 사면경사, 화산지형, 타포니 지형 등 독도의 여러 지형 발달에 관한 연구를 수행하였다. Kang *et al.*(2008)은 해저지형자료를 이용하여 독도 화산체 해저부분의 지형 변화를 연구하였다. 또한 Song *et al.*(2007), Kim *et al.*(2008), Park *et al.*(2008) 등은 독도의 토질특성 및 산사태 가능성, 지반의 풍화/침식 특성 및 독도암석의 역학적 특성을 연구하였다. 광역적인 독도 주변 지구조 및 퇴적특성연구로는 Huh *et al.*(2005), Kwon(2005) 등이 울릉분지 및 독도 주변 해역의 탄성과 탐사자료와 석유탄사시추자료로부터 지체구조 및 퇴적층서 등에 관한 연구를 수행하였다. 또한 독도주변 탄산염퇴적물의 분포와 퇴적물 특성에 관한 연구도 수행되었다(Jeong *et al.*, 2009; Woo *et al.*, 2009; Hyun *et al.*, 2010). 독도 및 주변 해산들에 대한 지구물리학적 연구로는 Kang *et al.*(2002), Kang *et al.*(2007), Kim *et al.*(2005), Kim *et al.*(2009a, b) 등이 중력 및 자력 자료 등을 이용하여 독도 및 주변 해산들에 대한 지구조 및 진화

특성 등을 연구하였다.

이렇듯이 독도에 대한 연구는 바다 위 육지의 지형, 지질에 대한 연구와 광역적인 독도 화산체 및 주변 구조들과 퇴적환경에 대한 연구가 과거부터 현재까지 수행되어 오고 있다. 초기의 연구들은 수면 위 독도 암체에 집중되어 그에 대한 지질학적 조사가 실시되어왔다. 독도 및 주변의 지구물리탐사로는 독도의 외곽해역에 대하여 1995, 1996, 1998년 한국해양연구원의 조사선박인 온누리호를 이용하여 다중빔 음향측심자료를 획득하였으며, 1997년에는 한국해양연구원, 한국지질자원연구원 및 국립해양조사원에서 조사선과 관측장비를 이용하여 독도 주변 해역에 대한 지형, 탄성과, 중력, 지자기 탐사를 각각 실시한 바 있다. 1999년과 2000년에 걸쳐 한국해양연구원에서는 울릉도와 독도 해산들을 잇는 광역 지구물리조사를 실시하였다. 그러나 기존 수행된 이러한 연구들은 비교적 정밀한 지구물리조사가 실시되었지만 주로 단발성 연구에 그쳤으며 독도 연안 해저에 대한 지구물리조사 연구 등은 거의 없는 실정이 있다. 그러다가 2006년 “독도의지속가능한이용연구”가 국가계획에 의해 수행되면서 그 연구의 일환으로 독도 해저에 대한 체계적인 해저지형, 해저면영상 등 지구물리 탐사가 2006년부터 2011년까지 지속적으로 실시되어 오고 있다.

본 연구는 “독도의지속가능한이용연구”사업에서 지속적으로 수행된 독도에서 현재 개발 및 이용이 가장 많이 일어나고 있는 연안 및 화산체 정상부 해저에 대한 다중빔 측심조사, 해저면영상 조사, 지자기 조사 등 지구물리조사의 수행결과를 분석하여 독도 화산체 정상부의 정밀해저지형 및 지구물리학적 특성을 연구하고자 한다.

2. 자료획득 및 처리

2.1. 정밀해저지형 및 해저면영상 조사

정밀해저지형조사 시 수심 30 m 이내 연안은 이어도호 같은 대형조사선이 접근할 수 없어 3톤 이하의 소형 선박(독도호, 물마루호)을 이용하였으며 수심 30 m 이상의 외해역은 이어도호를 이용하여 조사를 수행하였다. 조사장비로는 한국해양과학기술원의 조사선박인 이어도호에 장착되어 있는 KONGSBERG사의 EM 710 다중빔 음향측심기와 소형 선박에 장착하여 사용할 수 있는 휴대용 다중빔 음향측심기인 KONGSBERG사의 EM 3001을 사용하였다. 다중빔 음향측심기는 음파를 송수신하여 수심과 후방산란자료(backscattering data)

를 이용한 해저면영상자료를 동시에 관측/기록이 가능
한데, 더욱 정확하고 정밀한 조사를 위해 조사 선박의
운동을 감지하여 보정하여 주는 모션센서와 정확한 선
위 측정을 위한 DGPS 장비를 다중빔 음향 측심기와
함께 연동시켜 탐사를 수행하였다. 조사 수단의 기본
이 되는 음파는 그 특성상 해수의 온도 및 압력, 염분
등에 의해 진행방향 및 속도가 영향을 받게 되는데,
이러한 오차를 극복하기 위해 수심별 음속측정 장비인
SVP(Sound Velocity Profiler)를 이용해 음속을 측정
하여 현장 및 후처리 보정 작업을 수행하였다.

본 현장조사에서 획득한 정밀해저지형자료에 대해
최종 결과물을 얻기 위해서는 선박의 움직임으로 인한
롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw) 및 음속의 변화, 조위
편차 등 다양한 원인으로 부터 발생하는 오측심자료를
제거하고 자료의 질을 향상시키기 위해 원본자료에 대
하여 자료처리 및 보정을 수행하였다. 지형자료에 대
한 자료처리는 수심자료 보정, 음속 보정, 조석 보정,
오측심자료 제거 등의 여러 자료 처리 및 보정 과정을
수행하게 되는데, 이는 CARIS사의 HIPS & SIPS 프
로그래를 활용하였다. 조석 보정은 시간의 흐름에 따
라 변화하는 조위에 대한 편차로부터 유발되는 수심을
보정하기 위한 작업으로, 국립해양조사원의 실시간 관
측 자료 중에서 해당 조사 기간과 구역에 맞는 데이터
를 획득하여 사용하였다. 오측심자료 제거 작업은 각
라인별로 조사 수행했던 진행 경로에 따라 일일이 빔
을 확인하여 오측이라고 확신되는 빔들에 대해 제거/
보정을 실시하였다. 이와 같은 여러 보정 및 제거 작
업을 통하여 정밀해저지형자료의 질을 향상시켜 최종
결과 자료를 산출하였다.

해저면영상자료 역시 KONGSBERG사의 다중빔 음
향측심기를 통해 자료를 획득하게 되는데, 해저지형(수
심)을 측정하기 위해 송수신되는 빔을 통해 해저면영
상자료가 기록된다. 해저면영상은 빔이 송수신될 때 빔
의 강도에 의해 그 해저면의 상황을 나타내게 된다.
즉 빔이 해저면에 다다랐을 때 빔이 다시 반사 또는
산란 되는 정도를 계산하여 현재 지형이 모래, 자갈,
암초 등 어떤 성질의 바닥인지를 표현하게 되는 것이
다. 그래서 이를 해저면영상자료 또는 후방산란자료라
고 표현하기도 한다. 이들 자료에 대한 후 처리는 IVS
사의 Fledermaus 프로그램을 통해 작업을 수행하였다.
Fledermaus 프로그램 상에서 전체 영상에 대한 신호
강도(dB)를 보정하여 영상의 해상도를 높여 분석가능
한 해저면영상자료를 작성하였다. 이 해저면영상자료를
정밀해저지형자료 및 타 지구물리자료와 비교/분석을

실시하여 해저면 상황을 해석할 수 있으며 퇴적물 시
료와의 상호보완을 가능하게 한다.

2.2. 해상지자기 조사

해상지자기 조사는 연안에서 조사선박의 크기 및 위
험한 돌출 지형으로 인하여 지자기 조사 수행이 어려
워 이어도호를 이용한 외해역에서만 조사를 수행하였
다. 지자기 조사를 위하여 Marine Magnetism사의
SeaSPY 자력탐사장비를 사용하였으며, 이 장비는 자력
을 측정하는 수중 예인체 센서와 센서에서 발생하는
자료들의 송수신을 위한 컴퓨터 인터페이스 모듈, 그
리고 실제 자료를 기록하기 위한 Logging 프로그램인
Sealink, 자력계 케이블 윈치 등으로 구성되어 있다. 자
력계는 자력 탐사 중에 자성물체에 의한 간섭이 발생
하지 않도록 해야 하는데, 이를 위해 선체로부터 간섭
을 최소화하기 위해 선미로부터 선체 길이의 3배 이상
인 약 200 m를 이격하여 예인하였다. 200 m 이격되
어 있는 자력계의 정확한 위치 측정을 위해 이어도호
의 DGPS의 데이터를 활용하여 위치 보정을 하였으며
1초 단위로 자료를 기록하였다. 그리고 해상에서 측정
한 지자기 데이터로부터 전지구적 외부자기장의 시간
적 변화인 일변화량을 계산하여 소거하기 위하여 한국
해양과학기술원 동해연구소(경북 울진군 죽변면 후정
리)에 Marine Magnetism사의 육상 자력계인 Sentinel을
설치하여 지자기 일변화 자료를 획득하고 활용하였다.
육상자력계의 설치 및 운용의 수월성을 위하여 독도에
서 가까운 울릉도보다는 한국해양과학기술원 동해연구
소에 설치하여 안정적인 전원공급 및 장비의 안정성을
확보하였다. 평상시에는 하루에 수십 nT 정도(평균 약
25 nT)의 주기적인 변화를 보이며 밤에는 안정적인 변
화량을 보이지만 낮에는 밤보다 낮아지는 주기성을 보
인다. 고정관측소 일변화 자료로부터 지자기 변화가 안
정된 주기성을 가지는 평균 지자기 값을 이용하여 일
변화량을 산출한 다음 각 시간에 해당하는 해상관측
지자기장 값을 소거하였다. 또한 독도 화산체 정상부
의 지자기자료는 한 번에 모두 획득한 자료가 아니라
구역별, 연차별로 획득하여 종합한 자료이므로 이에 대
한 오차보정을 위하여 보정측선을 활용한 교차점보정
및 레벨조정을 실시하여 지자기 자료에 통합하여 사용
하였다.

국제참고지자기(IGRF : International Geomagnetic
Reference Field)값은 지구를 균일하게 자화된 회전 타
원체로 근사시키고 그것으로부터 생성된 자기장을 구
면조화함수로 표시한 것이며, 지구 내부의 주요 지자

기장과 영년변화를 모두 포함하는 수학적 표현이다. IAGA에서는 매 5 년마다 IGRF계수를 발표하고 있으며 본 조사에서는 IGRF2010 개정계수를 이용하여 국제참고지자기(IGRF)를 구하였다. 이 값을 일변화 보정을 실시한 해상관측 자기장에서 소거함으로써 자기이상을 산출하였다. 이와 같이 획득하고 처리된 자기이상을 이용하여 독도 화산체 정상부의 자기적 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 정밀해저지형

독도 연안 정밀지형도는 연구지역인 독도 화산체 정상부 해역의 정밀해저지형 중 동도와 서도를 중심으로 하는 연안 지역의 정밀해저지형과 국립지리원의 기존 항공 LiDAR(Light Detection And Ranging) 고도자료를 통합하여 제작하였다(Fig. 2). 동도와 서도를 중심으로 인접 해저는 약 10 m 이내로 매우 얇은 수심을 보이며 수중 돌출암 등이 불규칙하게 산재되어 있다

(Fig. 2). 이러한 노출암 및 수중 돌출암은 특히 서도의 인접 해저에서 가장 빈번히 발달하고 있다. 동도 부두와 서도 어민숙소 사이를 중심으로 하는 동도와 서도 사이 남쪽 지역은 대부분이 수심이 약 10 m 이하의 아주 낮은 수심을 보이며, 남서쪽으로 가면서 깊어지면 외해와 만나고 북동쪽으로 가면서 아주 얇아진다. 동도 부두 인접지역은 수심이 대부분 약 5 m 이내이고 접안부두와 동도 사이는 약 2 m 이하의 매우 얇은 수심을 보인다. 접안부두 인접 남쪽 해역은 약 10 m 이상의 수심을 보이며 점점 깊어진다. 서도 최인접 남동쪽으로는 돌출암반과 사이에는 수심 약 10 m 이상이 되는 깊고 좁은 물골이 지나간다 (Fig. 2). 동도와 서도 사이를 연결하는 수로는 약 10 m 이내의 얇은 수심을 이루고 있다. 또한 동도와 서도 사이 해역은 약 2 m 이하의 아주 얇은 수심대가 나타나기도 하여 소형 선박만 통행이 가능하고 큰 규모의 연구선 등은 지나다닐 수 없다. 동도와 서도 사이의 얇은 수심을 중심으로 남서쪽으로 가면서 수심이 평평하고 완만한 기울기를 가지며 깊어져서 외해역과 연결되지만

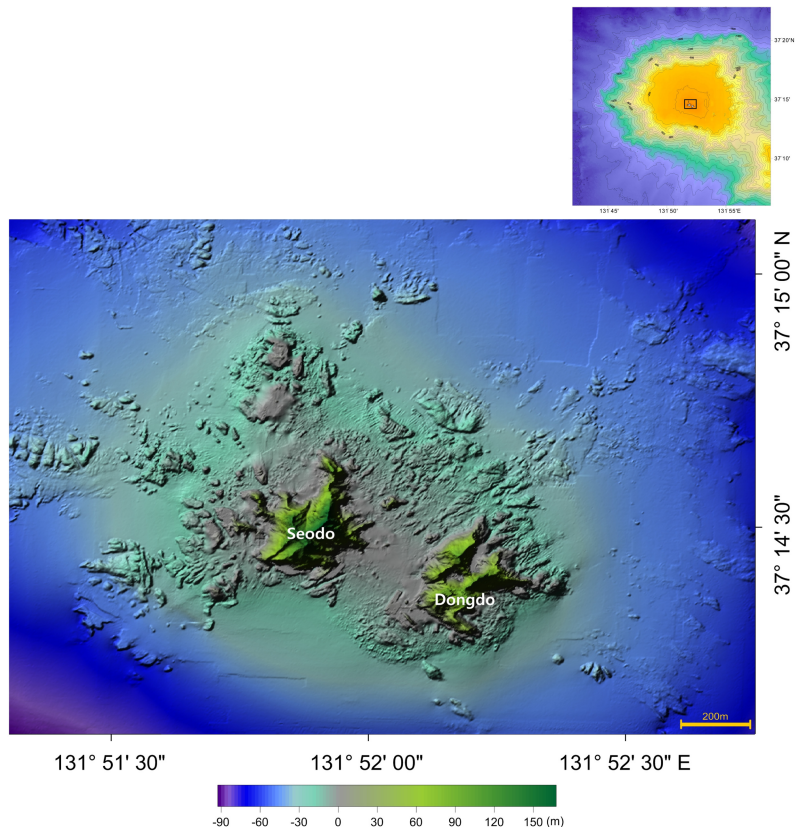


Fig. 2. 3D detailed bathymetry of the coastal area of Dokdo(vertical viewing).

북동쪽으로는 불규칙한 암반들이 산재하고 해저지형의 기복도 많이 나타나며 외해와 이어지는 특징을 보인다. 북쪽 연안은 돌출된 바위들의 북쪽과 동쪽으로 소규모의 암초군들이 나타나고 있으며 급격히 수심이 변화한다(Fig. 2). 서도 서측연안에는 큰 규모의 암초군들이 존재하며, 이 암초군들은 주변 해저지형보다 약 10 m 이상의 높은 지형 기복을 보인다. 또한 서도 서측 연안은 약 10 m 이내의 얇은 수심을 보이며 소규모의 지형 기복들이 많이 나타나고 있다. 전반적으로 수심

약 30 m 이내의 연안 쪽 해저지형은 수중의 암초군도 많이 존재하며 불규칙한 해저지형 기복이 나타나면서 매우 복잡한 형태를 보인다. 이와 같은 연안의 해저지형은 외해에 비해 파도 및 빠른 조류에 의한 차별 침식 등에 의한 불규칙한 풍화 및 연안에서 떨어져 나간 암석들에 의해 불규칙하고 복잡한 해저지형의 모습을 보인다고 판단된다. 동도와 서도 사이의 천해는 수심이 아주 얇고 조류가 센 지역이 많아 소형선박으로도 접근이 어려워 자료획득 불가 지역들이 있어 그 지역

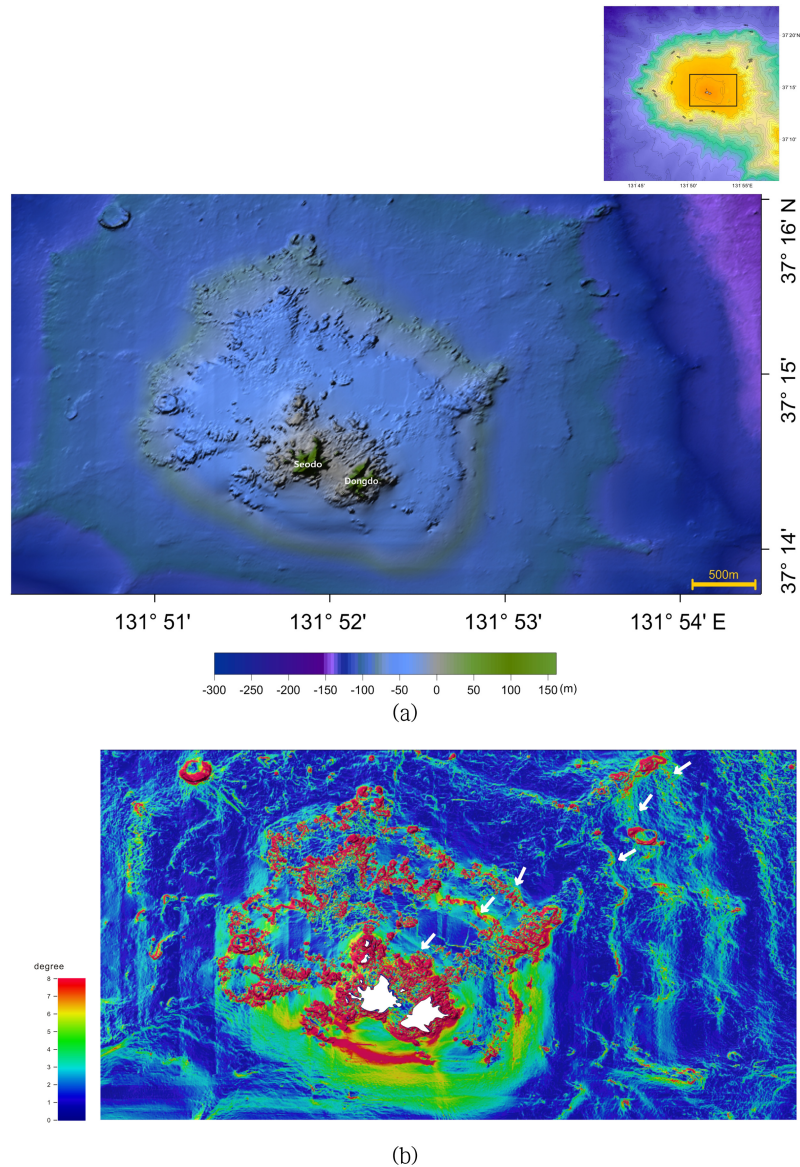


Fig. 3. (a) 3D bathymetry map of the summit of the Dokdo volcano(vertical viewing) and (b) slope analysis of the study area. White arrows represent steep slopes.

들은 해저지형 자료가 부족하여 부정확하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그 외 지역은 기존에 볼 수 없었던 동도와 서도 주변의 아주 정밀한 지형이 잘 나타난다 (Fig. 2).

독도 화산체 정상부의 통합 정밀해저지형도는 천해역 정밀해저지형자료, 외해역 정밀해저지형자료 및 항공 LiDAR 고도자료를 이용하여 작성하였다(Fig. 3). 전체적인 경향을 보면 동도와 서도의 육지부분부터 수면 아래 약 30 m 까지는 불규칙하며 급한 경사면을 가지고, 그 후 수심 약 30 m부터 수심 약 80 m 까지는 경사가 점차 낮아지다가 수심 약 80 m 이하로 완만한 경사를 보이면서 외해역으로 깊어진다. 수면 위 독도(동도, 서도)를 중심으로 북동쪽 및 북서쪽으로 연결되는 해저 암반들의 형태가 나타나는데 이 암반들과 수면 위 독도는 화산체 생성 후 자연붕괴 및 침식 등에 의해 소멸되고 남은 화구륜의 흔적일 가능성이 있다. 또는 이 해저지형들은 화구륜과 연관되어 그 주위에 발달한 단층 또는 균열을 따라 용암이 분출하여 만들어진 지형일 가능성도 있을 것으로 판단된다(Fig. 3). 수심 약 100 m 이상 해역에서 북동방향, 남동방향 및 남서방향의 긴 선형형태의 지형기복이 나타나는데 이는 동도 및 서도를 중심으로 뻗어나가는 형태의 모습을 보인다. 이는 연안에서 나타나는 선형형태의 지형기복들처럼 독도 생성 후 단층 또는 균열을 따라 용암이 많이 분출하거나 관입하여 생성된 지형이지만 생성 시기가 오래되어 풍화/침식을 받아 미약한 형태의 지형만이 남아 있는 것으로 판단된다. 또한 정상부 해역에서 소규모의 움푹 패인 해저 지형들이 나타나는데 이는 독도 형성 후 나중에 생성된 소규모 분화구의 흔적들로 추정된다. 이러한 소형 분화구의 흔적은 해저면영상에서도 잘 나타나며 이 소형 분화구 형태의 지형기복들은 독도 화구륜의 잔류체로 추정되는 해저지형들의 위치와 연장선상에 있는 것으로 판단되며 그 화구륜과 연관되어 소규모 분화구들이 생성된 것으로 생각된다. Fig. 4는 독도 화산체 정상부 북쪽에서 나타나는 침선의 형태를 보여주는 해저지형의 모습이다. 약 10 여년전(1999~2000 년경) 경상북도에서 독도에 어초 역할을 목적으로 어선 2대를 침몰시켰다고 한다. 이 해저지형에서 나타난 침선의 형태가 경상북도에서 침몰시킨 어선 2척일 것으로 생각되며 그 크기는 약 4~5 m 높이에 약 40 m 정도의 선체 길이를 보이고, 현재 어초 역할을 하고 있는 상태로 생각된다(Fig. 4). 유럽 해역의 침몰선들에서 해양생물이 다양하게 나타나고 해양생물의 이동통로가 되고 있는 것처럼(Zintzen, 2007)

이 독도의 침몰선들은 연안과 외해를 연결하는 해양생물 이동에 있어서 중요한 가교 역할을 하고 있을 것으로 판단된다. 3차원 해저지형에서 계단형의 경사면들이 잘 나타나는데 이 계단과 같이 층을 이루는 경사면들은 제 4 기에 나타난 해침, 해퇴 현상에 의한 영향

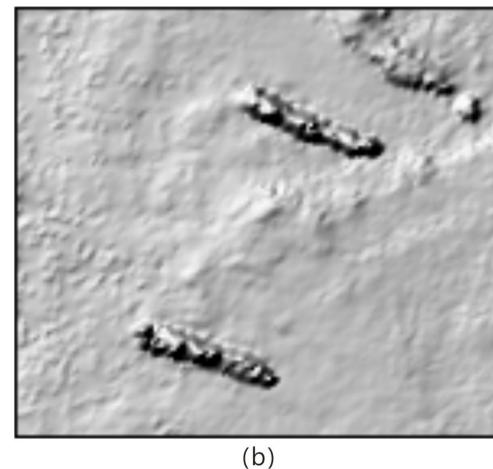
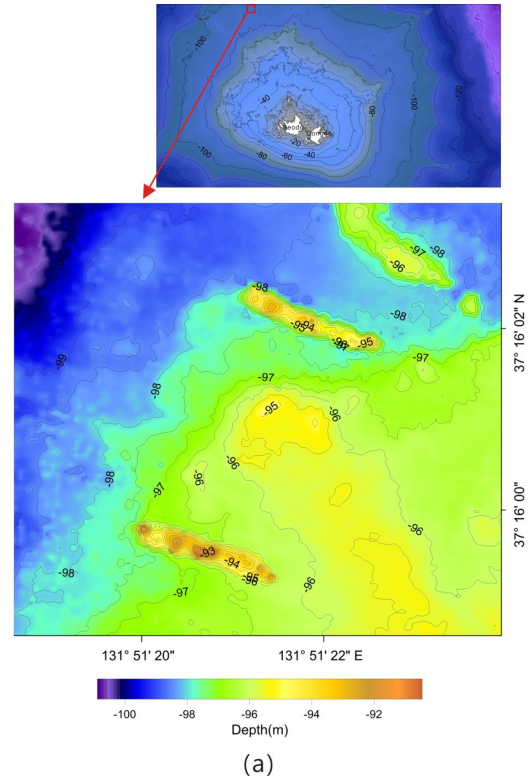


Fig. 4. (a) Bathymetry around sunken vessels in the summit of the Dokdo volcano and (b) shade relief map.

으로 만들어진 해저단구로 추정된다(Fig. 3). 이 해안단구들은 지역별로 차이를 보이지만 해저지형도에서 잘 나타나는 주요 해저단구들은 대체적으로 약 30 m, 약 60 m, 약 80 m, 및 약 100 m의 수심대에서 급격한 경사면을 보이며 몇 개의 계단형 해저단구로 분리되어 나타나고 있으며, 남쪽해역보다 북쪽해역에서 더 잘 나타나고 있다. Fig. 3(b)는 해저지형에 대한 경사도를 나타낸 그림인데 빨간색으로 나타나는 급경사면이 해저단구의 경계들을 잘 나타내고 있어 해저지형에서 보다 그 경계를 명확히 구분할 수 있다. 또한 해저지형에서는 구별이 어렵던 100 m 이상의 해역에서도 경사도 그림에서는 해저단구의 경계가 나타나고 있다(Fig. 3). 이 해안단구는 뒤에 나오는 정밀해저지형과 해저면영상의 통합 자료에서도 그 흔적을 찾아 볼 수 있다. 좀 더 정확한 연구를 위해서는 암석시료/퇴적물시료 분석 및 연대 측정 등을 통한 해저단구의 생성 연대 및 그 수 등에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 해저면영상 결과

이러도호를 이용한 외해역의 멀티빔 음향측심기 후 방산란 자료를 이용하여 독도 화산체 정상부 해역의 해저면영상을 획득 및 처리하고 하나의 영상으로 통합하였다. 그리고 이 자료를 이용하여 3차원 정밀해저지형과 중첩 이미지화하였다(Fig. 5). 3차원 정밀해저지형 위에 해저면영상자료가 덮여지는 형태로 평면의 해저면영상자료에 비해 지형의 굴곡이 잘 표현되어 영상을 더욱 입체적으로 분석할 수 있다. 이 영상은 독도 정상부 해저의 복잡한 암반 및 퇴적 분포 등의 모습을 잘 보여 주고 있다(Fig. 5). 이 해저면중첩영상에서는 해저지형에서 나타나는 소형 분화구 등이 더욱 잘 나타나고 있다. 전체적인 경향을 살펴보면 독도 정상부 해역은 주로 암반이 많이 분포하지만 곳곳에서는 모래 퇴적층들도 나타나는 것을 볼 수 있다. 해저면중첩영상에서 나타난 동도 남동쪽에 분포하는 모래 퇴적층의 경우에는 밝은 타원형의 구역이 나타나는데 이곳은 주변지역보다 지역적으로 낮아 모래 등의 퇴적물이 집적되고 쌓여서 평평한 지형을 나타내는 것으로 생각된다. 천부탄성파조사 결과 단면에서도 모래퇴적층이 확인되었으며 그 깊이는 약 2~3 m 정도로 나타나고 있다(Fig. 6). 또한 서도 북서쪽, 남서쪽 및 동도 남쪽 해역 등으로도 밝은 해저면영상이 나타나는데 이 지역도 모래퇴적층이 존재할 것으로 판단된다. 독도 화산체 정상부는 육지쪽에서의 퇴적물 유입이 적어 모래 등의 퇴적층보다는 돌출암반 등의 암반층이 주를 이루고 있

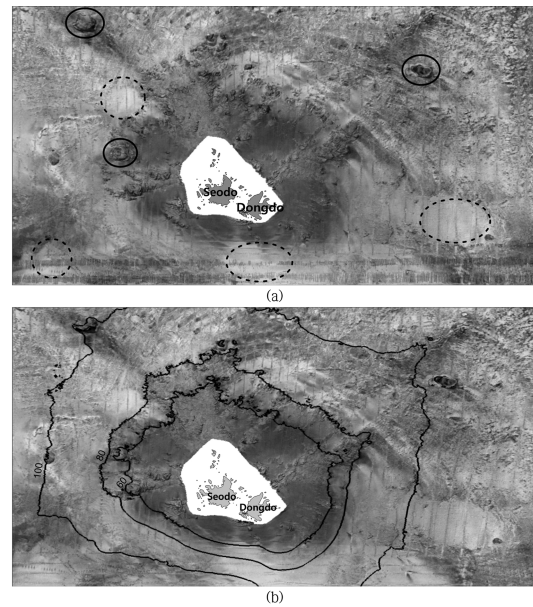


Fig. 5. (a) Integration map of the detailed bathymetry and seafloor image. Black line circles represent the topographic features of small craters. Black dashed line circles are seemed to be sand sediments. (b) Integration map with water depth contour lines.

으며 독도 연안에서는 암반들의 경계가 명확히 나타나고 있다. 독도화산체 정상부의 북동쪽, 북서쪽 해저 및 서쪽으로 소형 분화구 형태의 지형기복이 해저지형자료에서와 마찬가지로 잘 나타난다. 이들은 독도 육지부에서 이어진 북동 및 북서쪽 방향 해저암반들의 연장선상에 존재하는데 이 후기 분출 가능성의 소규모 지형형태는 화구륜의 위치와 연관성을 가질 가능성이 있는 것으로 생각된다(Fig. 5). 해저지형과 같이 육지로부터 연장되는 암반의 연장선이 해저면중첩영상에서도 잘 나타나는데 이는 수면 위 독도와 더불어 유실되고 남은 화구륜의 잔류체일 가능성이 높을 것으로 판단된다. 또한 해저면중첩영상자료에서도 해저단구의 형태가 뚜렷이 나타나며 이 해저단구들과 수심등고선을 중첩시키면 60 m, 80 m, 100 m 등고선에서 좋은 일치를 보이는 것을 알 수 있다(Fig. 5). 앞서 해저지형에서도 설명하였듯이 이 계단형의 해저단구들은 제 4기에 나타난 해침, 해퇴 현상에 의한 영향으로 만들어진 것으로 생각된다.

3.3. 해상지자기 결과

독도 화산체 정상부의 지자기 자료를 통합·처리하

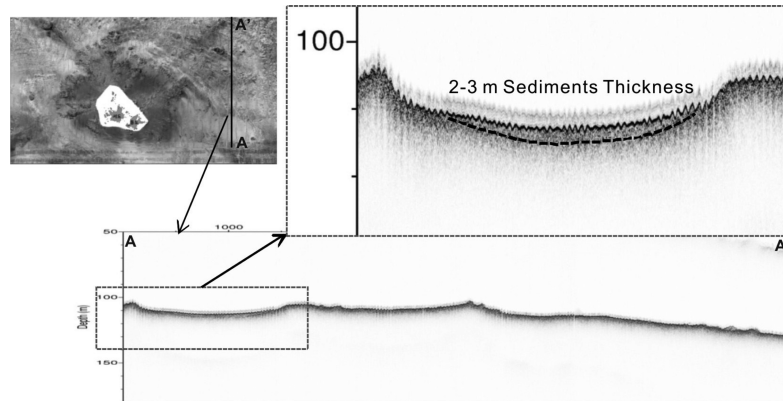


Fig. 6. Section of sub-bottom profiling survey.

여 지자기 분포 특성을 연구하였다. 한국해양과학기술원 동해연구소에 설치된 육상 지자기 관측소로부터 획득한 지자기 데이터를 이용하여 일변화 보정을 수행한 해상 자력탐사 자료를 이용하여 전자력도를 작성하였다(Fig. 7(a)). 전자력분포는 약 48500 ~ 50800 nT 범위를 가지며 독도 주변에는 전체적으로 낮은 분포 양상을 보이나, 독도를 기준으로 북서쪽과 남동쪽에 50000 nT 이상의 증가 값을 보인다(Fig. 7(a)).

Fig. 7(b)는 IGRF2010을 이용하여 독도 조사지역의 전자력도에서 전 지구적인 자기장의 영향(IGRF)을 소거해준 자기이상도이다. 자기이상도는 전자력분포도와 비슷한 경향을 보이는데 이는 독도 화산체 정상부가 작아 전지구적인 자기장의 영향이 독도 화산체에 의한 자기장의 영향에 비하여 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 이 자기이상도의 범위는 -1000 ~ 1000 nT이며, 독도 육지를 기준으로 북서부에서 큰 규모의 양의 이상대가 나타나며, 독도를 중심으로 하는 해역은 음의 이상대가 주로 나타난다. 또한 남동쪽으로 북서쪽보다 소규모의 양의 이상대가 관찰된다. 독도 육지 주변으로는 복잡하게 소규모의 이상대가 산재하여 나타난다. 자기이상 자료의 정확한 해석을 위하여 고속 푸리에변환을 이용하여 아날니틱 신호를 산출하였다(Fig. 7(c)). 이 방법은 천부구조의 독립적인 이상대 구분이 뚜렷이 나타나 해석에 더욱 용이하다. 아날니틱 신호도에서는 자기이상도에서 구별되어 나타나지 않았던 소규모의 이상대들이 동도와 서도를 중심으로 복잡하게 나타나고 이 이상대들이 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 모습을 보인다. 이 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 이상대는 통합 정밀해저지형과 해저면영상에서도 나타난 화구륜의 잔해로 예상되는 암반들 및 후기

분출의 소형 분화구 위치와 유사하게 나타난다. 이 이상대들은 독도 화산체가 생성된 후 화구륜 주위의 단층 및 균열대를 중심으로 후기 분출이나 관입 등의 영향으로 나타났을 가능성이 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 “독도의지속가능하이용연구” 사업의 일환으로 수행된 정밀수심측량, 해저면영상, 해상지자기 등 지구물리 조사 자료를 분석하여 독도 화산체 정상부 해역의 정밀해저지형 및 지구물리학적 특성을 분석하였다. 독도 화산체 정상부 연안의 천해역은 대형 연구선의 접근이 어려워 소형 선박을 이용하였으며 연안을 제외한 해역은 한국해양과학기술원의 연구선 이어도호를 이용하여 조사를 실시하였다.

정밀해저지형을 살펴보면 수심 약 30 m 이내의 연안 쪽 해저지형은 수중의 암초군도 많이 존재하며 복잡하며 불규칙한 해저지형 형태를 보인다. 동도와 서도 사이 연결 수로는 약 10 m 이내의 얇은 수심을 이루고 있으며 남서쪽으로 가면서 수심이 평평하고 완만한 기울기를 보이는 반면 북동쪽으로 가면서 불규칙한 암반들이 산재하고 해저지형의 기복도 많이 나타나며 외해로 깊어진다. 독도 화산체 정상부해역은 전체적으로 동도와 서도의 연안에서 수면 아래 약 30 m까지는 불규칙하며 급한 경사면을 가지고, 그 후 수심 약 30 m부터 수심 약 80 m까지는 경사가 점차 낮아지다가 수심 약 80 m 이하로 완만한 경사를 보이면서 외해역으로 깊어진다. 독도 정상부 해역의 해저지형에서는 소규모의 움푹 패인 지형들이 나타나는데 이는 독도 생성 후 나중에 생성된 소규모 분화구의 흔적들로

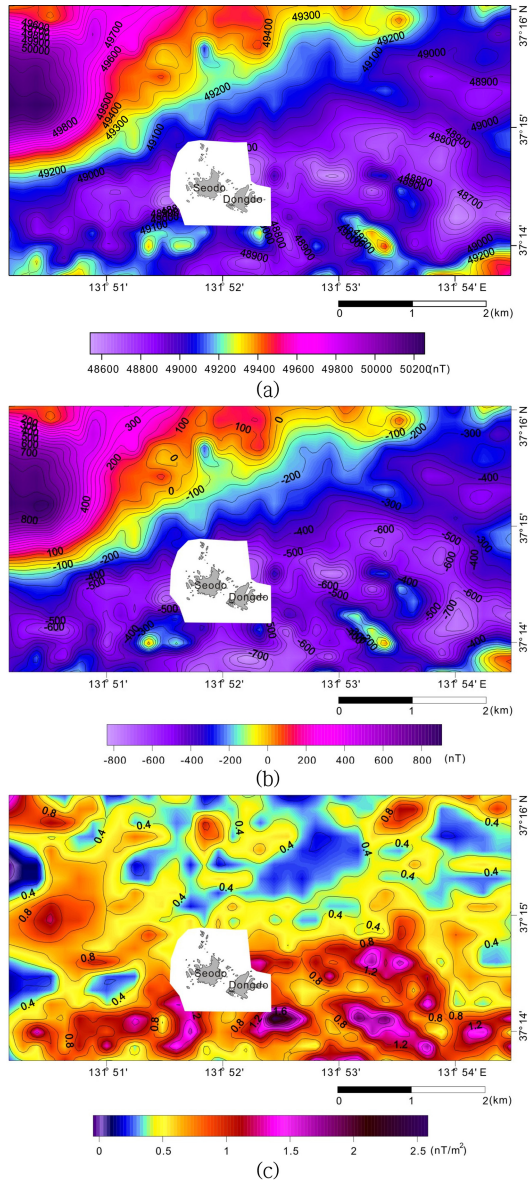


Fig. 7. (a) Total magnetic intensity map, (b) magnetic anomaly map and (c) analytic signal map of the study area.

추정된다. 3차원 정밀해저지형과 해저면영상을 통합한 해저면중첩영상을 살펴보면 독도 정상부 해역은 주로 암반이 많이 분포하지만 곳곳에서는 모래 퇴적층들도 나타나는 것을 볼 수 있다. 정밀해저지형과 해저면중첩영상에서 나타나는 계단형의 경사면들은 지역별로 차이가 있기는 하지만 주로 약 30 m, 60 m, 80 m 및 약 100 m의 수심대를 위주로 하여 몇 단계 정도의 계단형 해저단구가 나타나는 것으로 판단된다. 이 해

저단구들은 제 4 기에 나타난 해침, 해퇴 현상에 의한 영향으로 만들어진 것으로 판단된다. 자기이상 및 아날니틱신호 분포에서는 동도와 서도를 중심으로 소규모의 이상대들이 복잡하게 나타나며 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 모습을 보인다. 이 연장되는 이상대들은 통합 정밀해저지형과 해저면영상에서도 나타나는 화구륜의 잔해로 예상되는 암반들 및 후기 분출의 소형 분화구 위치와 유사하게 나타난다. 해저지형, 해저면영상 및 자력자료들을 종합 분석하면 독도 육지부와 그 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 암반들은 화구륜의 잔해이고 독도 육지부는 화구륜의 남쪽 한 부분일 가능성이 큰 것으로 생각되지만 좀 더 명확한 분석을 위해서는 해저에 대한 암석학적 연구 등 추가 연구가 필요하다. 정밀해저지형, 해저면영상 등의 결과들을 기반으로 분석해보면 독도의 육지부가 작기 때문에 육지에서 오는 퇴적물이 적어 독도에서는 퇴적해지면 보다는 암반해저면이 주를 이루고 퇴적에 의한 해저단구보다는 해수면변화로 야기된 침식에 의한 해저단구가 나타나는 것으로 판단된다. 이를 고려해 볼 때 독도는 해양 환경에 지배를 받는 환경적 특성을 보이는 것으로 사료된다. 그리고 독도의 복잡한 지자기 환경 및 후기 소형 분화구 지형들은 독도가 한번 분출에 의해 생성된 것이 아니라 여러 번 분출에 의해 생성된 복잡한 형성과정을 가지고 있는 것으로 유추해볼 수 있다.

현재까지 조사되고 있는 지형 및 지구조 자료들은 독도 미래공간 활용을 위한 기반 자료 및 연안 생태환경과 연결지어 분석할 수 있는 중요자료로 활용될 수 있다. 또한 독도 교과서 등 교육자료 제작 및 향후 독도 해저 한글지명의 국제화에도 중요자료로 이용될 수 있을 것으로 판단되며 이는 독도에 대한 국제 인식 제고 등에 매우 효과적으로 이용될 수 있으리라 생각된다. 그리고 점점 개발이 가속화되어가는 독도 연안 극천해 지역에 대해서도 항공레이저 수심측량(SHOALS : Scanning Hydrography Operational Airborne LiDAR Survey) 등을 이용한 정밀해저지형조사 및 지질환경 연구조사 등의 추가적 연구가 필수적 수행되어야 할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 2012년 국토해양부의 ‘독도의지속가능한 이용연구(PM56900)’ 및 2012년 한국해양과학기술원의 ‘동해해양환경및생태계변동감시체계구축(PE98742)’ 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이 연구를 수행

할 수 있도록 도와주신 한국해양과학기술원 및 국토해양부 관계자분들께 깊은 감사를 드립니다. 독도 연구에 여러 가지 조언을 주신 경상대학교의 손영관 교수님께 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 논문을 향상시킬 수 있도록 심사해주신 황종선박사님과 익명의 심사위원님께도 감사를 드립니다.

참고문헌

- Huh, S., Park, C.H., Yoo, H.S. and Han, S.J. (2005) Geological Structure and Depositional Environments in the Dok Island, East Sea. *Jour. Korean Geophy. Soc.*, v.8, p.131-135.
- Hwang, S.I. and Park, K.G. (2007) Tafoni Geomorphic Developmnet in the Western Coast of Dongdo of Dokdo, Korea. *Jour. Korean assoc. reg. geogr.*, v.13, p.422-437.
- Hwang, S.K. and Jeon, Y.G. (2003) Eruption Cycles and Volcanic Form of the Dokdo Volcano. *Korea Econ. Environ. Geol.*, v.36, p.527-536.
- Hyun, S.M., Kim, C.H., Jou, H.T., Kim, J.K. and Park, C.H. (2010) Characteristics of surface sediments distribution and sub marine topography around Dokdo Island, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.46, p.647-660.
- Jeon, Y.G. (2005) The Regional geomorphology of Dokdo(Volcanic Island), *Jour. Korean assoc. reg. geogr.*, v.11, p.19-28.
- Jeong, J.H., Kim, D.S., Lee, T.H. and An, S.M. (2009) High Remineralization and Denitrification Activity in the Shelf Sediments of Dok Island, East Sea. *Jour. Korean Soc. Ocean*, v.14, p.80-89.
- Jolivet, L., Huchon, P., Lepichon, X., Chamot-Rooke, N. and Thomas, J.C. (1991) Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Jour. Geophys. Res.*, v.96, p.4367-4384.
- Kang, J.H., Sung, H.H., Park, C.H., Kim, C.H. and Jeong, E.Y. (2008) The Morphological Change by Slope Erosional Process in the Dokdo Seamount. *Jour. Korean Geogr. Soc.*, v.43, p.791-807.
- Kang, M.H., Han, H.C., Yun, H.S. and Lee, C.W. (2002) Geophysical characteristics of seamounts around Dok Island. *Jour. Kor. Soc. Ocean*, v.7, p.267-285.
- Kang, M.H., Han, H.C., Yun, H.S., Kong, G.S., Kim, K.O. and Lee, Y.S. (2007) 3D gravity modelling for Anyong-bok Seamount in the East Sea. *Mar. Geophys. Res.*, v.28, p.257-269.
- Kim, C.H., Park, C.H., Yoo, S.H., Min, K.D., Shim, J.S. (2005) The study of Dok seamounts in the north-eastern part of the Ulleung Basin using gravity data. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.41, p.523-531.
- Kim, C.H., Park, C.H., Jeong, E.Y., Hwang J.S. and Ko, Y.T. (2009) Evolution of the Dok Do seamounts, Ulleung Basin, East Sea: constraints based on the reconstruction of virtual geomagnetic poles using paleomagnetic data. *Geo-Mar. Lett.*, v.29, p.161-169.
- Kim, C.H., Park, C.H., Jeong, E.Y., Ko, Y.T., Hwang, J.S. and Shim, T.M. (2009) Flexural isostasy and loading sequence of the Dokdo seamounts on the Ulleung Basin in the East Sea (Sea of Japan). *Jour. Asian Ear. Sci.*, v.35, p.459-468.
- Kim, C.Y., Park, S.G., Bang, E.S. and Kim, B.C. (2008) Subsurface Investigation of Dokdo Island using Geophysical Methods. *Geophysics Geophy. Exp.*, v.11, p.335-342.
- Kim, K.H. (2000) K-Ar ages and Nd-Sr isotopes of Dokdo alkali volcanic rocks in the East Sea, South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.36, p.313-324.
- Kim, Y.K., Lee, D.S. and Lee, K.H. (1987) Fractional Crystallization of the Volcanic Rocks From Dog Island, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.23, p.67-82.
- Kwon, I.K. (2005) I. Sequence stratigraphy of the Taebaek Group (Cambrian-Ordovician), mideast Korea. II. Seismic stratigraphy of the western South Korea Plateau, East Sea. Ph.D. Dissertation, Seoul National University, 205p.
- Park, C., Cheon, D.S., Jung, Y.B., Song, W.K., Sunwoo, C. and Kim, B.C. (2008) Mechanical Properties of Rocks in Dokdo. *Jour. Kor. Soc. for Rock Mech.*, v.18, p.69-79.
- Shim, S.H., Im, J.H., Jang, Y.D., Choo, C.O., Park, B.J. and Kim, J.H. (2010) Petrological Characteristics and Origin of Volcaniclasts within the Massive Tuff Breccia Formation from Dokdo Island, Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.19, p.141-156.
- Song, W.O., Kwon, M.S., Kim, E.S., Myung, J.G. and Park, C.H. *et al.* (2000) The study of on land and marine environments and ecosystems of Dokdo. Korea Ocean Research and Development Institute, Seoul, p.385-600.
- Song, Y.S., Chae, B.G., Cho, Y.C. and Lee, C.O. (2007) Investigation of Soil Characteristics and Landslides Probability in East Island of Dok-Do. *Jour. Eng. Geol.*, v.17, p.657-663.
- Song, Y.S., Park, M.E. and Park, K.H. (2006) Ages and evolutions of the volcanic rocks from Ulleung-do and Dok-do. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.15, p.72-80.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H. (1994) Geology and evolution of Tok Island, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.242-261.
- Woo, K.S., Ji, H.S., Kim, L., Jeon, J.A., Park, J.S., Park, H.S., Kim, D.S. and Park, C.H. (2009) Distribution and Origin of Carbonate Sediments near Dok Island: Preliminary Study. *Jour. Kor. Soc. Ocean*, v.14, p.171-180.
- Zintzen, V. (2007) Biodiversity of shipwrecks from the Southern Bight of the North Sea. Ph.D. Dissertation, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique/ UniversitCatholique de Louvain: Louvain-la-Neuve, 343p.