

독도 주변해역에 대한 표층퇴적물 분포특성과 해저지형

현상민^{1,*} · 김창환² · 주형태¹ · 김진경³ · 박찬홍²

¹한국해양연구원 해양위성 · 관측기술연구부

²한국해양연구원 동해연구소 독도전문 연구센터

³한국해양연구원 동북아 · EEZ자원연구단

요 약

독도 주변해역 일대의 표층퇴적물 분포특성과 해저지형, 그리고 표층퇴적물과 지형특성의 관련성을 파악하기 위해 독도 주변해역에서 표층퇴적물을 채취했으며 다중빔 음향측심기를 이용하여 해저지형을 조사하였다. 독도 주변 표층퇴적물에 대한 퇴적학적 조사결과 퇴적물 특성은 수심과 관련되어 다양한 특성을 보인다. 퇴적물을 구성하는 성분상으로는 독도 주변해역 수심 200 m 이내에서는 쇄설성 퇴적물과 역질크기의 탄산염 퇴적물을 다량으로 함유하는 특징을 보인다. 유기탄소 함량은 수심증가에 따라 증가하는 경향을, 탄산염 함량은 수심증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 유기탄소 함량은 대체적으로 2% 이내의 범위에 있으며 탄산염 함량은 최대 약 50% 에서 최소 3% 까지 다양하게 나타난다. 유기물의 기원과 특성을 지시하는 C/N 비는 대체적으로 현장에서 생물활동에 의해 생성된 유기물임을 지시하고 있으며 수심증가에 따라 감소하는 탄산염 함량은 탄산염 생산과 용해(dissolution), 그리고 육성기원 물질의 유입에 의한 희석(dilution)효과로 해석된다. 입도분석에 의한 퇴적상은 수심에 따라 다양한 퇴적상을 보이나 전체적으로는 세 개의 퇴적상(sedimentary facies)으로 분류될 수 있었다. 퇴적물 입도는 수심증가에 따라 세립해지는 경향을 보이고 있으며 유기탄소의 함량간에는 양의 상관관계를 보이고 있다. 그러나 일부 몇몇 정점에서는 수심과는 무관한 퇴적상을 보이고 있어 독도 주변 해저지형 특성이나 이와 관련된 층층수의 이동 등과도 관련있는 것으로 판단된다. 다중빔 음향측심기에 의해 획득된 해저지형을 살펴보면, 독도 주변 해저지형은 계단형태의 해안단구(marine terrace)형태를 반복하면서 독도쪽으로 수심이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 해안단구의 출현은 과거 해수면이 상승하면서 자연스럽게 형성된 것으로 해석되었으며 수심에 따라 달라진 해안단구형 해저지형은 주변의 퇴적환경에도 영향을 미친 것으로 판단된다. 표층퇴적물에 대한 퇴적학적 연구결과 독도 주변해역의 표층퇴적물 특성과 분포는 수심 및 지형특성과 밀접한 관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

주요어: 독도, 표층퇴적물, 퇴적상, 해저지형

Sangmin Hyun, Chang Hwan Kim, Hyeong-Tae Jou, Jin Kyung Kim and Chan Hong Park, 2010, Characteristics of surface sediments distribution and submarine topography around Dokdo Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 46, no. 6, p. 647-660

ABSTRACT: To understand the characteristics of surface sediments distribution and submarine topography and their relationship around the Dokdo, surface sediments were collected and submarine topographic features were investigated using multibeam echo-sounder. Sedimentological study of surface sediments indicates that the composition of surface sediments are clearly associated with water depth and shows various characteristics. The sediments deposited shallower than 200 m in water depth contains pyroclastic components and gravel-sized carbonate constituents. Organic carbon contents tend to increase with water depth, whereas carbonate contents decrease. Organic carbon contents range within ~2%, and carbonate contents vary within 3~50%. C/N ratios of organic matters indicate that the organic matters were originated from *in situ* biological production. Decreasing carbonate contents with depth were interpreted as a result of carbonate dissolution and dilution by terrigenous supply. Sedimentary facies based on grain size can be divided into three facies even though they are variable with water depth. Sediment grain size becomes finer with water depth, and shows positive correlation with organic carbon content. However, some parts of sedimentary facies do not show any relationship with water depth, indicating that

* Corresponding author: +82-31-400-7838, E-mail: smhyun@kordi.re.kr

sedimentary facies was thought to be related with movement of intermediate water and with submarine topographic features around the Dokdo. Submarine topography obtained using multi-beam shows typical step-like terrace structure with gradually-decreasing water depth toward the Dokdo. Terrace type submarine topography is interpreted to have been formed with the sea level rise, and to affect the sedimentary environment around the Dokdo. Characteristics of surface sediments around Dokdo are closely associated with water depth and submarine topography.

Key words: Dokdo, surface sediment, sedimentary facies, submarine topography

(Sangmin Hyun and Hyeong-Tae Jou, Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI), Ansan, 426-744, Korea; Jin Kyung Kim, Marine Resources in the Korea EEZ and the Northeastern Asia Research Group, KORDI, Ansan 426-744, Korea; Chang Hwan Kim and Chan Hong Park, Dokdo Research Center, East Sea Research Institute, KORDI, Uljin 767-813, Korea)

1. 서 론

동북아시아의 대표적 지해역(marginal sea)인 동해(East Sea)는 울릉분지(Ulleung Basin), 일본분지(Japan Basin) 그리고 야마토분지(Yamato Basin)로 구성되어 있으며 이들 분지는 크고 작은 해저수로나 대지(plateau)로 서로 연결되어 있다(그림 1). 동해 울릉분지 북서쪽에는 울릉도(Ulleungdo)와 독도(Dokdo)가 있는데 위치적으로 울릉도와 독도는 울릉분지의 북단, 위도 약 37°선상에 위치하고 있으며 서쪽으로는 한국대지(Korea Plateau), 동남쪽으로는 Oki bank와 접하고 있다. 울릉분지 북단에 위치하는 독도가 있는 지점은 남쪽으로부터의 따뜻한 해류와 북쪽으로부터의 냉수괴가 만나서 전선(front)을 형성하는 곳으로 해양환경변화를 가장 민감하게 반영할 것으로 기대되는 지역이다. 이와 같이 울릉도와 독도는 지정학적인 중요성과 더불어 화산체 자체의 연구나 동해의 형성과정 등과 관련하여 매우 중요하게 여겨지고 있어 최근까지 비교적 많은 연구가 진행되어 왔다(손영관과 박기화, 1994; 송용선 외, 2006; 황상구와 전영권, 2003).

지금까지 독도, 독도해산 및 울릉도의 형성에 관한 연구결과는 울릉도와 독도가 여러번에 걸친 화성활동을 거치면서 진화했음을 시사하고 있다(송용선 외, 2006; Kim *et al.*, 2009). 형성시기로는 울릉도의 화산활동이 일어난 시기가 약 1.4~0.01 Ma로 독도의 화산활동 시기(2.7~2.1 Ma)보다 나중에 일어난 것으로 발표되었다(황상구와 전영권, 2003). 따라서 독도 화산이 열점으로부터 먼저 형성되었고 뒤이어 판이 동남쪽 방향으로 이동한 후 울릉도 화산이 후기 열점활동에 의해 형성된 것으로 해석되고 있다

(이종익 외, 2000). 다른 연구에서도 울릉도의 화성활동을 지시하는 쇄설성 퇴적물이 발견되는 것으로 판단했을 때 독도 및 울릉도 주변해역의 퇴적상은 울릉도, 독도의 진화와 밀접히 관련되는 것으로 판단할 수 있다. 주상시료 퇴적물에서 흔히 나타나는 화산분출의 결과물인 lapilli, 화산재(volcanic ash) 등은 이와 같은 사실을 증명하는 것이라 할 수 있다(e.g., Bahk *et al.*, 2000, 2001; Chun *et al.*, 2007). 또한 울릉분지 남단 동쪽끝에서 얻어진 주상시료에서는 울릉도, 독도 기원의 화산 쇄설물뿐만 아니라 약 8만8천년 전의 Aso-4 화산재와 약 2만 9천년 전의 AT화산재가 대표적으로 발견되고 있어(Arai *et al.*, 1981; Oba *et al.*, 1991) 퇴적환경에 영향을 끼쳤다고 할 수 있다. 최근에 동해에서 얻어진 주상시료를 분석한 결과에서도 울릉도의 경우 해수중이나 반 해수중에 있을 때 화산활동에 의해 형성된 화산재가 보고되고 있어(Chun *et al.*, 2007) 독도, 울릉도의 화산활동은 독도 및 울릉도 주변뿐만 아니라 울릉분지 전체의 퇴적환경과 해양환경에 영향을 미친 것으로 생각되고 있다.

지난 2000년과 2005년에 한국해양연구원에 의해 실시된 독도 주변 해저퇴적환경에 대한 연구를 시작으로 2006년부터는 “독도의 지속가능한 이용연구”가 수행되었다. 이로부터 독도 주변 해역의 퇴적환경에 대한 자료가 축적되기 시작했으며 그 동안의 연구결과 독도 해산의 지형적인 특성과 독도 주변 해역에 대한 퇴적물 분포 및 주변 퇴적물에 대한 저서동물 군집 등이 일부 보고되기 시작했다(박찬홍 외, 2005; 최진우 외, 2002; 한국해양연구원, 2005, 2008). 또한 최근에는 그 동안의 연구결과로 독도 주변 해역의 퇴적

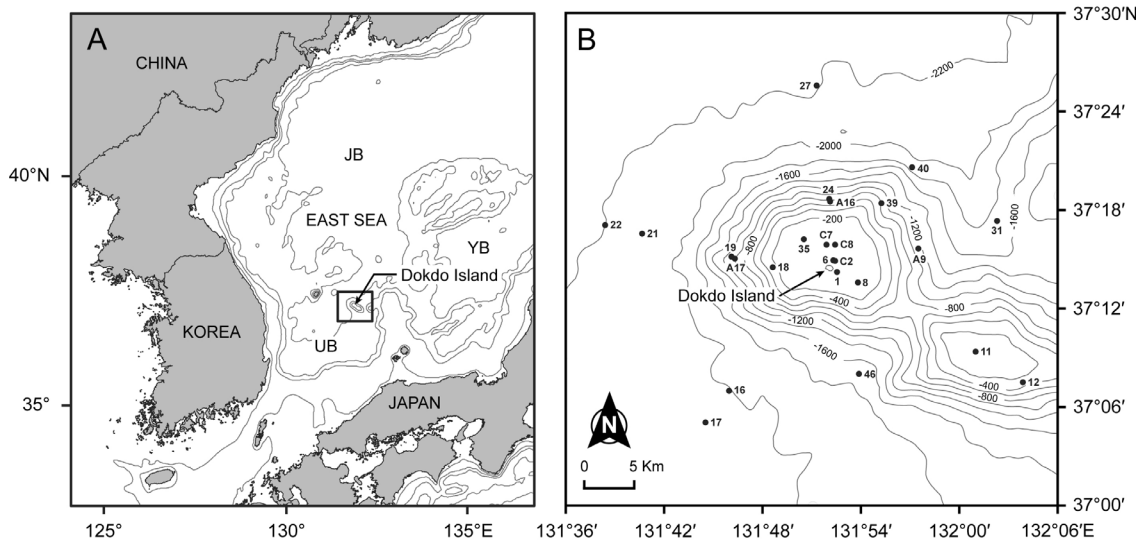


Fig. 1. Physiological map of the East Sea and surrounding continents (A) and enlargement of studied area (B). Location of the Dokdo and bathymetric contours are shown in B. Major sampling points are illustrated as numbers. An acronym UB, JB and YB indicate Ulleung Basin, Japan Basin and Yamato Basin, respectively.

물은 독도를 이루는 화산기원의 암편과 천해에서 서식하고 있는 여러 생물에 의해 생성된 탄산염퇴적물로 구성되는 것으로 밝혀졌으며, 특히 독도 주변의 퇴적물은 냉수성 탄산염퇴적물을 주로하는 성분으로 이루어져 있음이 밝혀졌다(우경식 외, 2009). 그러나 아직도 독도 주변 해역에 대한 자세한 퇴적물의 분포특성이나 퇴적환경, 천해역의 해저지형에 대한 자료와 그에 대한 이해는 상당히 부족한 실정이다.

이 연구는 최근 수 년 동안 수행된 독도관련 연구 중에서 독도 주변에서 얻어진 표층퇴적물에 대한 다양한 분석을 통해 표층퇴적물의 분포특성과 퇴적상에 대한 연구 결과이다. 또한 해저지형을 정밀히 파악하기 위한 다중빔(multibeam) 조사결과를 이용하여 독도주변의 해저지형 특성을 파악하고 지형특성과 퇴적물 특성 및 분포간의 관계를 살펴볼 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 연구방법 및 연구지역

2.1 연구지역

독도는 울릉분지 북단에 위치하며 울릉도에서 동남쪽 약 90 km지점에 위치해 있다(그림 1). 독도는 동도와 서도의 두 개의 섬으로 구성되지만 섬 주위에 30여개의 작은 암초들을 포함하고 있다. 해저 지

형적으로 독도는 거대한 화산체 위에 놓여 있으며 서쪽으로는 수심 2,000 m 가 넘는 한국해저간극(Ulleung Interplain Gap: UIP)이 있으며 동쪽으로는 두 개의 해산이 오끼 뱅크(Oki bank)쪽에 놓여있다.

독도는 울릉분지 북서단, 위도 약 37도 선상에 위치하고 있으며 계절에 따라 다소간의 변화는 있지만 북쪽으로는 subpolar front의 남쪽 경계가, 그리고 남쪽으로는 따뜻한 쿠로시오(Kuroshio) 난류의 지류인 Tsushima Warm Current (TWC)의 북쪽끝 경계(front)가 되는 지역으로 해양환경변화를 민감하게 반영 할 뿐만 아니라 동해전체 생물상과 동북아의 기후조절 역할을 하는 것으로 판단된다. 이와 관련하여 최근들어 동해나 울릉분지에 대한 연구는 비교적 활발하게 진행되고 있지만 독도나 독도와 관련된 동해전체의 비교연구 등은 극히 빈약한 편이라 할 수 있다 (e.g., 한국해양연구원, 2010).

독도주변 퇴적물에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않았으나 독도 주변 퇴적물을 이용한 연구결과 탄산염 퇴적물의 분포 등에 관한 연구(우경식 외, 2009)나, 독도 주변해에서 얻어진 표층퇴적물이나 짧은 pilot 코아 퇴적물을 이용한 연구결과가 보고된 바 있다(최진우 외, 2002). 그 결과 독도주변 표층퇴적물에는 천해성 생물종의 각을 함유하는 퇴적물과 쇄설성 퇴적물을 다량 함유하는 퇴적물이 보고되

었다. 이를 근거로 판단해 볼 때 동 연구지역에서도 이와 같은 퇴적물 분포가 예상된다. 생물기원 퇴적물인 경우에는 주변 해양환경과 밀접하게 관련되어 퇴적물이 구성되기 때문에 주변 해양환경을 파악하는데 중요하다고 할 수 있다. 특히 수온, 염분 등 물리해양학 조사결과에 따르면 독도를 중심으로 해수의 수직혼합이 강화되는 현상이 목격되고 있어(한국해양연구원, 2010) 난수성이나 냉수성 소용돌이와 전선 분포가 주변의 해양환경에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 파악되었다.

2.2 연구방법

2.2.1 표층퇴적물 채취 및 특성 분석

이 연구에 사용된 독도주변 퇴적물은 지난 2008~2010년 3년간에 걸쳐 채취된 표층퇴적물 27개 시료와 기존에 분석된 6개의 표층퇴적물 시료를 통합하여 총 33개 시료에 대한 분석결과를 다루었다(그림 1B). 표층퇴적물을 채취하기 위해서 한국해양연구원 연구선 이어도호를 이용하였으며 그랩(grab) 채니기를 이용하였다. 채취된 시료에 대해서는 일차적으로 입도분석(grain-size analysis)을 하였고 그 후 전처리 과정을 거친 후 유기물분석(유기탄소, 유기질소)과 탄산염 함량을 분석하였다. 일부 조립 탄산염 퇴적물을 다량 함유한 퇴적물은 시료의 구성성분을 알아보기 위해 실체현미경으로 관찰 조사하였다.

2.2.2 입도분석(grain-size analysis)

그랩 채니기로 채취한 표층퇴적물 시료는 입도분석을 위해 건조한 후 가법계 분쇄하여 잘 섞어준 후 약 10 g 내외의 시료를 채취하였다. 이중 습식체질을 통해 직경이 2 mm (-1 ϕ) 이상되는 조립질 퇴적물을 분리한 후 나머지 시료에 대해 30% 과산화수소(H₂O₂)와 0.1N 염산(HCl)을 차례로 가하여 유기물과 탄산염 성분을 제거한 후 건조시켜 무게를 측정하였다. 건조된 시료는 4 ϕ 체로 습식체질을 하여 4 ϕ 이하의 사질 퇴적물과 4 ϕ 이상의 니질 퇴적물 분리하였다. 분리된 사질 퇴적물은 건식체질로 1 ϕ 간격으로 구분하여 무게 백분율을 구하였고, 니질 퇴적물은 입도분석기(Sedigraph 5000D)로 입도분석을 수행했다. 입도분석 자료로부터 평균입도를 구하였고 퇴적상을 분류하였다. 일부 다량의 역질 퇴적물이나 역질 퇴적물에 산호로 피복된 퇴적물 등에 대

해서는 유기물, 탄산염 분석이 이루어지지 않았으며 퇴적상을 역질 퇴적상으로 단순 구분하였다. 입도분석 방법 및 분석 후 각종 자료에 대한 통계처리는 Folk (1966)의 방법을 따랐다.

2.2.3 유기물 및 탄산염 분석

함수를 측정용 건조 시료를 분말화 한 후 약 7~8 mg을 취하여 CHN 분석기(Thermo Electron, Flash EA-1112)를 사용하여 총 질소(TN)와 총 탄소(TC) 함량을 측정하였다. 총 유기탄소(TOC) 함량을 측정하기 위해서 분말 시료를 1N 염산으로 24시간 동안 반응시켜 탄산염 성분을 제거하고 증류수로 3번 세척한 후, 60℃의 건조기에서 24시간 이상 건조시켰다. 이를 다시 분말화하고, 약 10~7 mg을 취하여 CHN 분석기로 총 유기탄소 함량을 측정하였다. 탄산염 성분 함량(carbonate content)은 총 탄소와 총 유기탄소의 함량차이에 의해 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (\text{TC} - \text{TOC}) \times 8.33$$

유기물의 기원과 특성을 지시하는 C/N비는 유기탄소(TOC)와 전질소(TN)의 함량비로 계산하였다.

2.2.4 해저 지형 자료

연구지역에 대한 정밀 해저지형을 알아보기 위해 연구선으로부터 수직방향으로 해저면에 주사(swath)하여, 한번의 송수신(Ping)으로 수 십 개의 다중 음향 자료를 동시에 얻을 수 있는 다중빔 수심 측량기(multibeam echo sounder)를 이용하였다. 이 다중빔 수심 측량기는 연구선의 운동을 감지할 수 있는 모션센서와 정확한 위치 선정을 위한 DGPS, 수심별 음속을 측정하기 위한 Sound Velocity Profiler, 표층 음속을 측정하기 위한 Surface sound velocity probe 및 수심측정을 위해 음원을 발사하고 수신하는 트랜스듀서로 구성되어 있다. 이 다중빔 정밀 수심 측량기는 다중빔을 이용하여 수심의 2~3배에 해당하는 범위의 지형을 동시에 그리고 세밀하게 관측할 수 있다. 다중빔 수심 측량 시스템은 위치자료의 운용, 음파 신호의 제어, 센서로부터 수신된 heave, roll, pitch, heading 정보와 음속정보의 실시간 처리를 통해 현장 자료를 취득한다. 이러한 다중빔 시스템을 이용하여 독도 화산체 정상부에 대한 조사를 실시하여 현장 자료를 획득하였다. 이렇게 획득된 자료는 정확도와

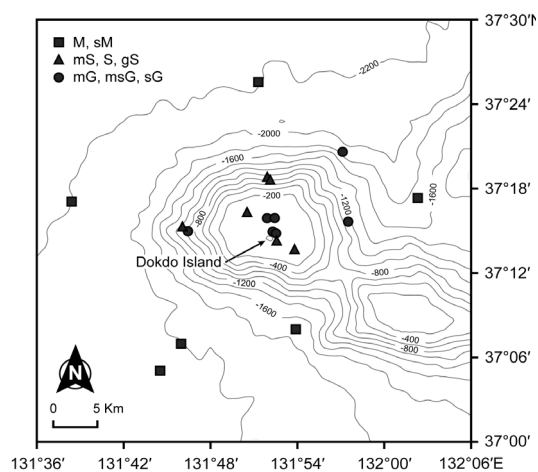


Fig. 2. Sedimentary types with respect to sampling points around the Dokdo. Eight sedimentary facies were recognized and they were classified into three types.

신뢰도를 높이기 위해 항해 자료 보정, 음속 보정, 빔 좌표 계산과 분리, 오측심 자료 제거, 조석 보정 등의 후처리 과정을 거쳐 최종 수심자료를 구한다.

3. 연구 결과 및 토의

3.1 표층퇴적물 구성 및 특성, 분포

연구지역 표층퇴적물에 대한 입도분석 결과와 퇴적물에 함유된 유기탄소, 탄산염 함량은 표 1에 표기하였다. 표층퇴적물의 입도를 분석하여 퇴적상을 분류한 결과에 의하며 독도 주변 해역에는 니(mud, M), 사질 니(sandy mud, sM), 니질 사(muddy sand, mS), 사(sand, S), 역질 사(gravelly sand, gS), 니질 역(muddy gravel, mG), 사질 역(sandy gravel, sG) 니질 사질 역(muddy sandy gravel, msG), 역(gravel, G) 등



(A) ST. 6. -61m water depth



(B) ST. 40. -1,932m water depth



(C) ST. 46. -1,691m water depth



(D) ST. 35. -126m water depth

Fig. 3. Various surface sediment types. 3A~3D including much volcanoclastic fragments (A), volcanoclastic gravel with mud matrix (B), mud and carbonate sediment occurred in 10~20 cm below the sea bottom (C) and coarse sand to gravel size biogenic carbonate sediment (D).

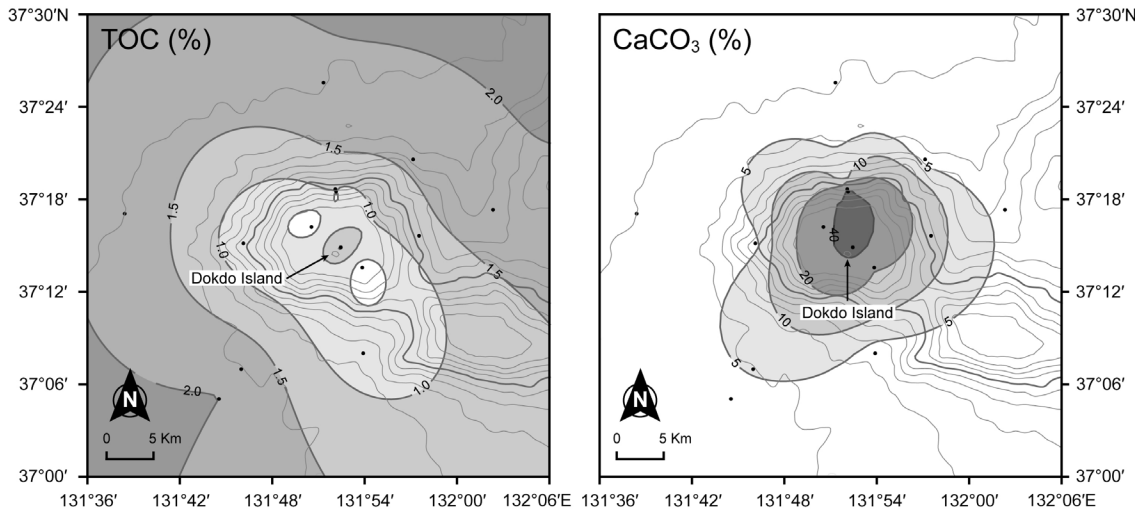


Fig. 4. Distribution of total organic carbon (TOC) and biogenic carbonates of surface sediments collected around the Dokdo.

의 다양한 퇴적상이 나타나고 있다. 그러나 이들 퇴적상은 수심의 변화와 밀접히 관계되는 것으로 판단된다. 예를 들어, 정점 40과 정점 A17를 제외한다면 gS, sG, gS, G 퇴적상은 수심이 1,000 m 이하인 곳에 나타나고 있으며, sM, M 퇴적상은 수심이 1,500 m 이상인 곳에 나타나고 있다(표 1). 그림 2에서 볼 수 있듯이 독도를 중심으로 외각 조사정점에서는 대체적으로 니질퇴적물(mud, M)이나 사질 니(sandy mud, sM) 퇴적물이 분포하고 있다. 이 분포대에서 독도쪽으로 사질을 주로하는 니질 사(muddy sand, mS), 사질(sand, S) 퇴적상이 나타나고 있으며 가장 안쪽의 수심 약 200 m 내에는 사질이나 니질 퇴적물이 소량 포함된 역질 퇴적물이 분포하고 있다(그림 2). 수심의 영향과 퇴적상과의 관계를 살펴본 결과 조사된 전 지점에 대한 8개의 퇴적상은 수심을 고려하여 독도에서 가까운 곳의 역질퇴적상(G, sG, mG), 그리고 수심이 깊어지는 전이대에서는 사질퇴적상(gS, mS, S), 수심이 1,500 m 이상인 지역에서는 니질퇴적상(M, sM) 으로 대별할 수 있었다(그림 2).

독도 주변에서 얻어진 표층퇴적물에 대해 상세한 육안 관찰결과 대부분의 표층퇴적물은 다양한 구성성분을 포함하고 있는 것으로 나타났다. 독도와 인접한 수심이 얇은 해역에서는 다량의 화산쇄설성 퇴적물과 탄산염 퇴적물을 포함하고 있으며 일부 수심이 깊은 지역은 니질퇴적물 표층에 화산쇄설물을 포함하는 퇴적물도 나타난다(그림 3B). 또한 독도를 중

심으로 수심 200 m 이내의 지역에서는 탄산염 입자들이 주로 역(gravel)내지 조립질 사(sand)의 크기로 이루어져 있다. 기존 연구결과에 의하면 독도 주변 해역의 표층퇴적물 내 탄산염입자는 연체동물(이매패류와 복족류), 뿔개상과 가지상 태선동물, 뿔개상과 마디상 홍조류, 유공충, 해면동물, 환형동물, 극피류(성게류), 절지동물(따개비류) 등의 각질로 이루어져 있음을 보고했다(우경식 외, 2009). 그러나 수심이 깊어지면서 점차 천해성 탄산염 입자들보다는 부유성 유공충(planktonic foraminifera)의 함량이 늘어나게 되고 수심이 700 m 보다 깊은 해역에서는 주로 부유성 유공충과 해면동물의 침이 점토퇴적물 내에 우세하게 분포하는 것으로 보고되었다(우경식 외, 2009). 표층퇴적물에 대한 현미경 관찰 결과 독도주변 표층퇴적물은 생물기원 퇴적물이 수~수십 %에 달하고 있으며 생물기원 퇴적물의 가장 많은 부분은 차지하는 구성성분은 탄산염 물질(carbonate material)과 규질 퇴적물(sponge spicules)로 나타났다. 이와 같은 결과는 기존에 연구된 우경식 외(2009)의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

조사해역 표층퇴적물에 대한 유기탄소와 탄산염 함량을 살펴본 결과 유기탄소 함량은 약 0.21~1.98% 정도인 것으로 나타났다. 유기탄소 함량은 독도의 북서쪽의 얇은 수심 지역과 울릉도 쪽 해역에서 총 유기탄소의 함량이 조금 낮게 나타나는 현상이 발견되었으나 전체적으로 수심과 밀접한 관계를 보이고

Table 1. Analytical results of surface sediment around the Dokdo Island.

Station	Depth (m)	Latitude	Longitude	Sample. ID	Facies	Gravel	Sand	Silt	Clay	MZ	TN	TC	TOC	CaCO ₃	C/N
St. 01	51	37°14'13.2"	131°52'32.6"	DD 08-01	gS	23.7	71.6	4.7	0.0	-0.2	0.0	6.6			
St. 06	61	37°14'56.1"	131°52'19.0"	DD 08-06	sG	76.9	23.1	0.0	0.0	-1.8		2.4			
St. 08	192	37°13'35.0"	131°53'49.0"	DD 08-08	gS	16.6	83.4	0.0	0.0	0.7		2.9	0.2	20.8	
St. 11	171	37°09'23.8"	132°01'19.2"	DD 10-11							0.1	3.4			
St. 12	216	37°07'36.1"	132°04'22.8"	DD 09-12							0.0	3.3			
St. 16	2009	37°06'50.3"	131°45'42.9"	DD 08-16	sM	0.0	17.7	13.2	69.1	8.2	0.4	2.8	1.9	5.3	5.3
St. 17	2087	37°04'34.1"	131°43'57.1"	DD 08-17	sM	0.6	13.2	11.6	74.6	8.3	0.3	2.5	2.0	3.9	6.0
St. 18	213	37°14'37.7"	131°48'36.0"	DD 08-18							0.2	1.5			
St. 19	1155	37°15'09.5"	131°46'06.2"	DD 08-19	mS	3.3	69.0	6.4	21.3	4.2	0.2	1.6	0.7	3.4	4.2
St. 21	2135	37°16'50.3"	131°40'34.9"	DD 09-21							0.2	1.6			
St. 22	2214	37°17'43.8"	131°37'32.5"	DD 08-22	M	0.0	3.9	13.9	82.3	9.4	0.4	2.8	1.9	4.9	5.3
St. 23	133	37°17'02.4"	131°52'01.2"	DD 10-23							0.0	4.9			
St. 24	902	37°18'40.2"	131°52'04.1"	DD 08-24	gmS	20.4	58.2	4.9	16.5	3.0	0.1	1.2	1.3	10.5	10.1
St. 25	1716	37°20'34.8"	131°51'54.0"	DD 10-25							0.3	2.0			
St. 26	2125	37°22'45.4"	131°51'44.2"	DD 10-26							0.3	2.3			
St. 27	2242	37°26'39.6"	131°51'09.0"	DD 08-27	M	0.0	8.3	12.7	79.1	8.9	0.4	2.7	1.9	4.2	5.3
St. 31	1753	37°17'20.0"	132°02'18.3"	DD 08-31	sM	0.0	24.1	23.3	52.7	7.4	0.3	2.6	1.9	3.9	5.4
St. 34	125	37°14'38.8"	131°50'02.4"	DD 09-34							0.1	4.3			
St. 35	126	37°16'13.1"	131°50'31.2"	DD 08-35	S	0.1	96.0	3.9	0.0	1.8	0.0	4.4	0.3	31.8	7.1
St. 39	818	37°18'09.7"	131°55'08.4"	DD 09-39							0.1	1.9			
St. 40	1932	37°20'36.2"	131°57'07.2"	DD 08-40	mG	60.8	9.8	3.4	26.0	1.1	0.3	2.0	1.6	2.9	6.0
St. 46	1691	37°08'01.3"	131°53'52.8"	DD 08-46	sM	0.0	37.4	18.6	44.0	6.3	0.2	2.0	0.7	2.8	2.9
St. 48	2252	37°22'08.0"	131°19'30.0"	DD 08-48	M	0.0	4.0	12.1	84.0	9.3	0.4	2.6	1.9	5.1	5.0
St. 49	2153	37°25'29.6"	131°07'19.2"	DD 08-49	gmS	7.5	49.7	0.0	42.8	5.3	0.2	1.7	1.0	3.1	4.0
St. 50	837	37°27'59.0"	130°56'24.0"	DD 08-50	gmS	5.8	81.5	5.3	7.4	2.7	0.1	1.3	0.7	4.4	5.7
St. buoy				DD 09-buoy							0.0	3.1			
St. A9	813	37°15'38.9"	131°57'30.2"	DD 05-A09	msG								1.3	13.2	
St. A16	396	37°18'30.9"	131°52'07.2"	DD 05-A16	mS								0.4	51.3	
St. A17	1214	37°15'04.2"	131°46'15.6"	DD 05-A17	G										
St. C2	55	37°14'54.0"	131°52'25.5"	DD 05-C02	sG								1.6	50.4	
St. C7	89	37°15'53.28"	131°51'54.0"	DD 05-C07	G										
St. C8	102	37°15'53.28"	131°52'25.5"	DD 05-C08	G										

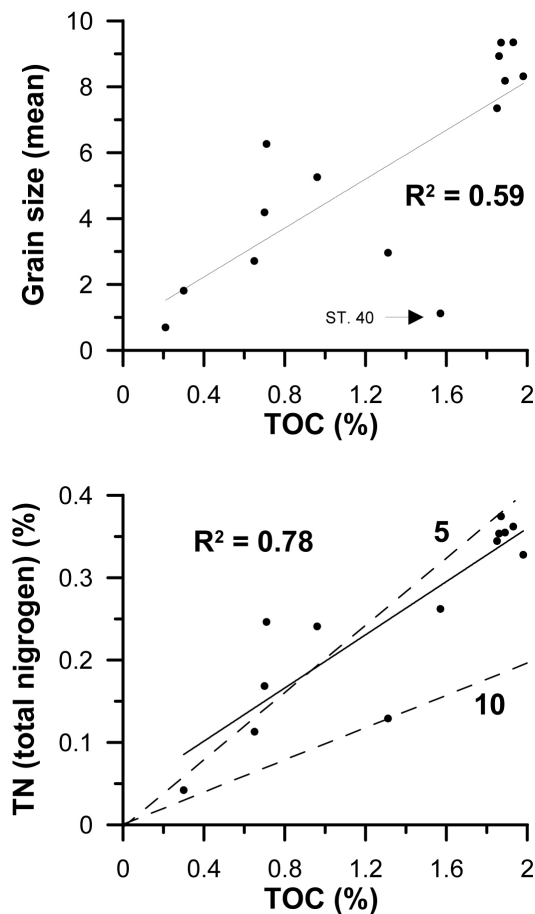


Fig. 5. Variations of mean grain size and total nitrogen contents with TOC contents. Broken lines indicate C/N ratio.

있다(그림 4). 탄산염 함량은 유기탄소 함량의 분포보다는 더욱 뚜렷한 경향성을 보인다. 독도를 중심으로 200 m 내외의 수심에서는 역질 크기의 탄산염 각을 다량 함유하고 있어 대체적으로 20% 이상의 탄산염 함량이 나타나고 있으며 바깥쪽으로 점차 탄산염 함량이 적어지는 경향을 보인다(그림 4).

일반적으로 퇴적물중 유기물 및 탄산염 함량은 퇴적물의 특성을 지시할 뿐만 아니라 이와 관련된 해양환경변화를 지시한다. 특히 생물생산이 많이 일어나는 연안의 해양환경에서는 활발한 생물생산의 결과 많은 유기물이 나타나 수심에 따라 퇴적물 중에 쉽게 보존된다(e.g., Stein, 1991). 또한 탄산염 함량도 해양에서 일어나는 생물생산과 보존, 이와 같은 탄산염과 유기물의 양적 변화는 장주기 해양변동

(빙기-간빙기 단위)이나 지역적인 해양환경에 따라 서로 달라질 수 있다(Bahk *et al.*, 2001; Hyun *et al.*, 2007). 특히 유기물이 공급이 과잉하게 되면 일시적으로 유기물 분해가 촉진되고 해수가 산성화되게 되어 탄산염을 용해를 촉진시키고 결과적으로 탄산염이 거의 없는 저서환경을 형성하기도 한다(현상민 외, 2003). 예를 들어, 동해의 경우는 탄산염 보상심도(CCD)의 영향으로 이보다 깊은 수심에서는 용해(dissolution)의 영향으로 탄산염 함량이 매우 적게 나타나거나 탄산염이 전혀 나타나지 않을 수 있다. 이와 같은 결과는 기존의 결과에서 다수 볼 수 있다(e.g., Hyun *et al.*, 2007). 이번 연구결과에서도 탄산염 함량변화는 생물생산이나 용해 등 여러 가지 요인에 의해 조절되는 것으로 판단된다.

기존의 많은 연구들에 의하면 퇴적물중 유기물 함량은 퇴적물 입도와 밀접히 관계되는 것으로 알려져 있다(Cho *et al.*, 1999). 이 연구에서도 입도와의 상관성을 살펴 본 결과 입도가 세립해짐에 따라 유기탄소의 함량이 증가하는 경향을 보이고 있어 유기탄소의 함량간에는 양의 상관(positive relationship)을 보이고 있다(그림 5). 이와 같은 입도와의 관련성은 일반 대양에서 나타나는 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 유기물중의 유기탄소와 전질소의 비(C/N 비)는 유기물의 기원을 지시하는 것으로 자주 이용된다(Stein, 1990, 1991). C/N비는 그 값이 10 이하인 경우는 현장에서 생물생산에 의해 생성된 유기물로 볼 수 있으며 육지에서 기원된 유기물의 경우는 탄소량이 많기 때문에 10 이상을 보이고 있다. 이 연구에서도 이와 같은 비를 조사한 결과 대체적으로 4~10 정도의 값을 보이고 있어 유기물을 많이 포함하는 시료는 외양환경에서 생물생산에 의해 형성된 유기물임을 지시하고 있는 것으로 해석된다(그림 5).

3.2 수심변화에 따른 퇴적상 및 퇴적물 구성 성분 변화

독도 주변에서 수심이 약 200 m 이하로 얕은 해역에서는 주로 역질 퇴적물에 사질, 니질 퇴적물이 혼합된 퇴적물이 나타나며 수심이 조금 깊어진 500~1,000 m 해역에서는 사질퇴적물에 니질 퇴적물이 혼합된 퇴적상이 분포함을 알 수 있다. 또한 수심이 1,500 m 이상으로 깊어지면 대부분 니질 퇴적상이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 퇴적상의 변화는 육

원성 물질을 구성하는 역질(gravel), 사질(sand), 실트질(silt) 및 니질(mud)의 함유량이 달라짐을 의미하는 것으로 입도분석 결과는 이들 함량비가 달라지고 있음을 지시하고 있다. 예를 들어 사질퇴적물은 정점 35인 수심 126 m에서 최대함유량 96%을 보이고 있으며 역질(gravel)을 가장 많이 포함하는 정점은 수심 61 m의 정점 6이다. 반면 정점 48은 니질(M) 함유량이 84%이며 수심이 2,252 m로 조사된 정점중 2,000 m 이상에서 조사된 다른 정점에서 나타난 니질(M) 퇴적상과 같은 양상을 보인다. 즉, 다양한 수심에서 얻어진 표층퇴적물에 대한 입도분석 결과 나타난 퇴적상은 수심과 밀접히 관계되는 것으로 나타났다(표 1).

그러나 수심이 비슷한 해역에서도 서로 다른 퇴적상을 보이거나 구성성분의 함량이 달라지는 지역이 몇 군데 나타난다. 즉 독도의 북동쪽 방향의 해저사면에 해당하는 정점 40은 수심이 1,932 m로 조사정점 중 상당히 깊은 편에 속하지만 니질퇴적물이 소량 포함된 역질 퇴적물이 나타나고 있다. 이 정점 40에서는 수심이 비슷한 다른 지역에 비해 평균 입도가 조립(평균입도, 1.1)한데 이는 상대적으로 이 지역에 조립질 퇴적물이 많이 공급되었음을 의미하는 것이다. 상세한 육안관찰과 입도분석결과 이 정점에서의 퇴적물(그림 3B)은 쇄설성 퇴적물 기저에 니질 퇴적물이 혼재된 형태로 나타났다. 이와 같이 전체적으로는 퇴적물 입도나 퇴적상이 수심과 밀접한 관계를 가지고 있지만 예외적인 경우도 발견된다. 이러한 현상은 표층퇴적물의 퇴적상 분포가 주로 수심에 의해 조절되지만 그 외에도 지형적인 특성이나 퇴적물 공급에 따른 차이 등과 같은 부수적인 요인에 의해서도 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

기존 연구에 의하면 이번 조사에서 수행된 입도분석 이외에도 퇴적물의 구성성분도 수심에 따라 달라지고 있음을 알 수 있다. 우경식 외(2009)는 독도 주변 해역에 대한 표층퇴적물을 조사한 결과 탄산염 퇴적물의 구성요소와 함량이 주로 수심에 의해 구분되는 것으로 보고하였으며, 이로부터 해안퇴적상(20 m 이내의 천해퇴적물), 천해퇴적상(20~100 m 구간의 천해퇴적물), 상부 전이퇴적상(100~200 m의 퇴적물), 하부 전이퇴적상(200~700 m 퇴적물), 그리고 반원양성퇴적상(700 m 이상의 반원양성 퇴적물)으로 퇴적상을 구분한 바 있다. 즉, 이번 결과와 기존의 결과를 고찰해 볼 때 퇴적물중 육원성 물질의 입도변화

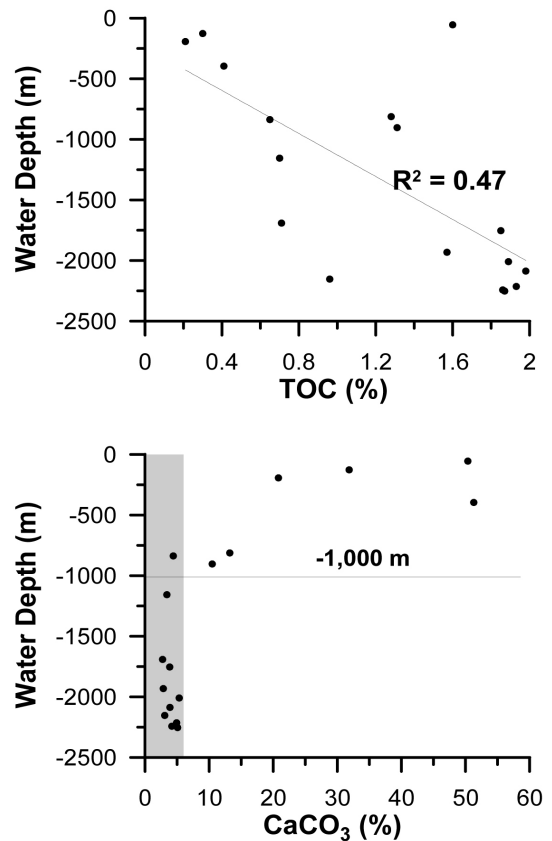


Fig. 6. TOC and CaCO_3 contents with water depth. TOC content decrease with water depth. Carbonate contents are less than about 5% below the depth of 1000 m.

뿐만 아니라 퇴적물을 구성하는 탄산염 함량 변화도 주변해역의 수심변화와 밀접히 관계되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 수심에 따라 입도 및 구성성분이 확실하게 달라지는 현상은 독도와 울릉도가 비교적 원양인 동해 중앙부에 있으며 이를 중심으로 수심변화가 비교적 짧은 거리에서 이루어지고 있기 때문인 것으로 해석되었다. 즉, 이 연구결과 독도주변 표층퇴적물은 수심변화에 따라 퇴적상이 뚜렷하게 구분될 뿐만 아니라 퇴적물 조성도 큰 차이를 보이고 있음을 지시하는 것이라 할 수 있다.

표층퇴적물에 대한 수심별 유기물과 탄산염 함량변화를 그림 6에 나타냈다. 유기탄소 함량은 수심증가에 따라 증가하지만 탄산염 함량은 수심증가에 따라 감소한다. 유기물의 함량변화는 입도와 양의 상관을 보이기 때문에 깊은 수심의 세립질 퇴적물은 높은 유기탄소함량의 원인으로 생각된다. 탄산염 함량의

경우 수심이 얇은 지역에서는 높은 탄산염 함량을 보이다가 수심이 깊어지면서 함량이 감소하는 경향이 뚜렷이 나타난다. 특히 수심이 200 m 보다 얇은 지역에서는 대체로 20~35%에 이르는 높은 탄산염 함량을 보인다. 수심이 55 m인 C2 정점에서는 탄산염 함량이 약 50%로 조사정점 중 가장 높은 함량을 나타내는데 이 정점은 천해성 탄산염 입자의 생산이 활발히 이루어지고 있는 지역에 속하며 퇴적물 내에 탄산염 패각편 등이 다량 포함되어 있기 때문인 것으로 생각된다. 수심 200~1,000 m 구간에서는 탄산염 함량이 수심증가에 따라 점차 줄어드는 현상이 나타나며 1,000 m 보다 깊은 구간에서는 5% 이하의 함량을 나타내고 있다. 수심이 1,000 m 보다 깊은 구간에서 탄산염 함량이 매우 적게 나타나는데 이와 같은 현상은 우경식 외(2009)에서 보고된 바와 같다.

퇴적물중 탄산염 함량은 생물활동에 의한 탄산염 생산(productivity), 용해(dissolution)의 정도, 그리고 육지로부터 육원성 물질의 공급정도에 따른 희석(dilution)에 의해 결정된다(Stein, 1990, 1991). 독도 인근 퇴적물에 대한 탄산염 함량 변화는 이러한 여러 가지 요인을 동시에 반영할 것으로 생각된다. 동해의 경우 탄산염 보상심도는 현재 약 1,500 m로 보고되고 있다(Ujiie and Ichikura, 1973). 따라서 수심 200 m 이하의 독도 인근 천해에서는 탄산염 생산이 공급되는 채설성 물질보다 많으며 상대적으로 용해를 덜 받은 결과로 다량이 탄산염 성분을 포함하는 것으로 생각된다. 그러나 탄산염 함량이 적어지는 전이대를 거쳐 수심 1,000 m 이상인 지역에서는 육원성 물질이 공급이 적고 상대적으로 강한 탄산염 용해를 받은 결과 소량의 탄산염함량을 포함하는 퇴적물이 퇴적되는 것으로 판단 할 수 있다. 특히 수심이 1,000 m 이상인 조사정점에서는 탄산염 함량이 5% 이하로 나타나고 있어 최소한 천해역에서 생산된 역질 탄산염 공급이 차단되었음을 지시한다. 반면, 기존에 밝혀진 바와 같이(우경식 외, 2009) 주로 1,000 m 이상인 정점에서의 탄산염 함량은 부유성 유공충 등에 의한 영향으로 판단된다.

3.3 해저지형 특성, 퇴적물 분포 및 해양환경

멀티빔 수심자료를 이용하여 독도의 육지부인 동도, 서도를 중심으로 독도 화산체 정상부 해역의 등수심 분포도와 3차원 지형도를 작성하였다(그림 7).

연구지역의 등수심도 및 3차원 지형도에서 수면 위 동도, 서도와 수면아래 약 20 m 까지의 연안지역은 육지부터 연안까지 경사면이 급하며 수심 약 20 m 부터 수심 약 80 m 까지는 경사가 점차 낮아지다가 수심 약 80 m 이하로 완만한 경사를 보이며 깊어진다. 동도, 서도 주변 연안에서 수심이 깊은 해저로 가면서 암반들이 북동쪽 및 북서쪽으로 연장성을 보이며 나타난다. 3차원 지형도에서는 육지부 독도와 수면아래 약 20 m 까지의 급경사면에서 흘러내린 테일러스 등이 잘 관찰된다. 동도와 서도 사이 해저 및 주변의 노출암 등이 존재하는 인접 해저는 수심 약 10 m 이내로 매우 얇은 수심을 보이며, 수중 돌출암 등이 불규칙하게 산재되어 분포하는 것으로 나타났다(그림 7). 독도 주변 연안에서부터 수심 약 80 m까지의 지형은 약 80 m 이상의 외해에 비하여 많은 기복을 가진 변화를 보이는데 차별 침식 및 자연붕괴 등에 의한 영향으로 판단된다. 연구지역의 연안에서 해저로 수심이 깊어지며 암반들이 북동쪽과 북서쪽으로 연장되는 모습을 보이는데 이 암반들과 수면 위 동도와 서도는 화산체 생성 후 자연붕괴 및 침식 등에 의해 소멸되고 남은 화구륜의 흔적일 가능성이 있다. 약 80 m 이상 외해의 해저 지형은 평탄한 기복과 완만한 경사를 가지고 외해로 깊어지며 북동쪽 및 북서쪽으로 연결되는 암반들의 형태가 미약하게 나타난다. 연구지역의 북서쪽 및 북동쪽 해역에는 작은 분화구 형태의 지형 기복들이 나타나는데 독도 화산체 생성 후 후기 화산활동에 의한 분출물의 영향으로 생각된다. 또한 이 분화구 형태의 지형 기복들은 독도에서 북동쪽 및 북서쪽으로 연장되는 해저 암반들과 연결성이 있는 것으로 판단된다.

그림 8은 독도 육지부 연안에서 수심 깊은 지역으로 연장되는 측선에 대한 지형단면을 나타낸 그림이다. 지형 단면에서는 암반돌출부 및 계단형의 경사면들이 잘 나타나는데 이 경사면들은 제 4기에 일어난 해침, 해퇴 현상에 의한 영향으로 만들어진 해안단구로 생각된다. 이 지형단면들에서 나타나는 해안단구는 대체적으로 약 25~38 m, 약 62~72 m, 약 83~94 m, 약 99~112 m, 약 130 m의 수심대에서 주로 분포하는 것으로 판단된다. 따라서 약 30 m, 약 70 m, 약 90 m, 약 100 m 및 약 130 m의 수심대를 위주로 4 단계 또는 5 단계 정도의 계단형 해안단구가 분포하고 있는 것으로 판단된다.

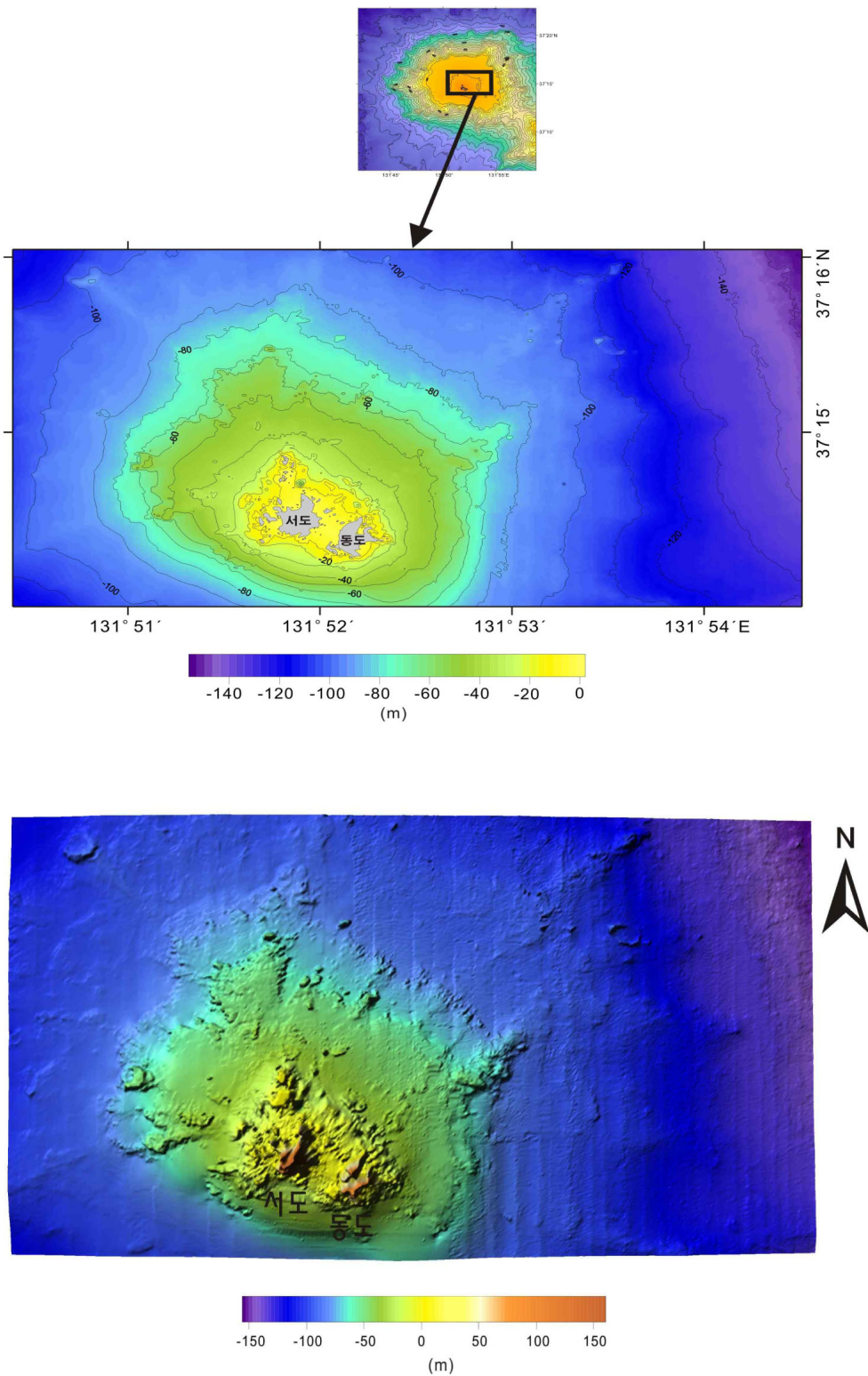


Fig. 7. Iso-depth bathymetry distribution around the Dokdo and submarine 3D topography.

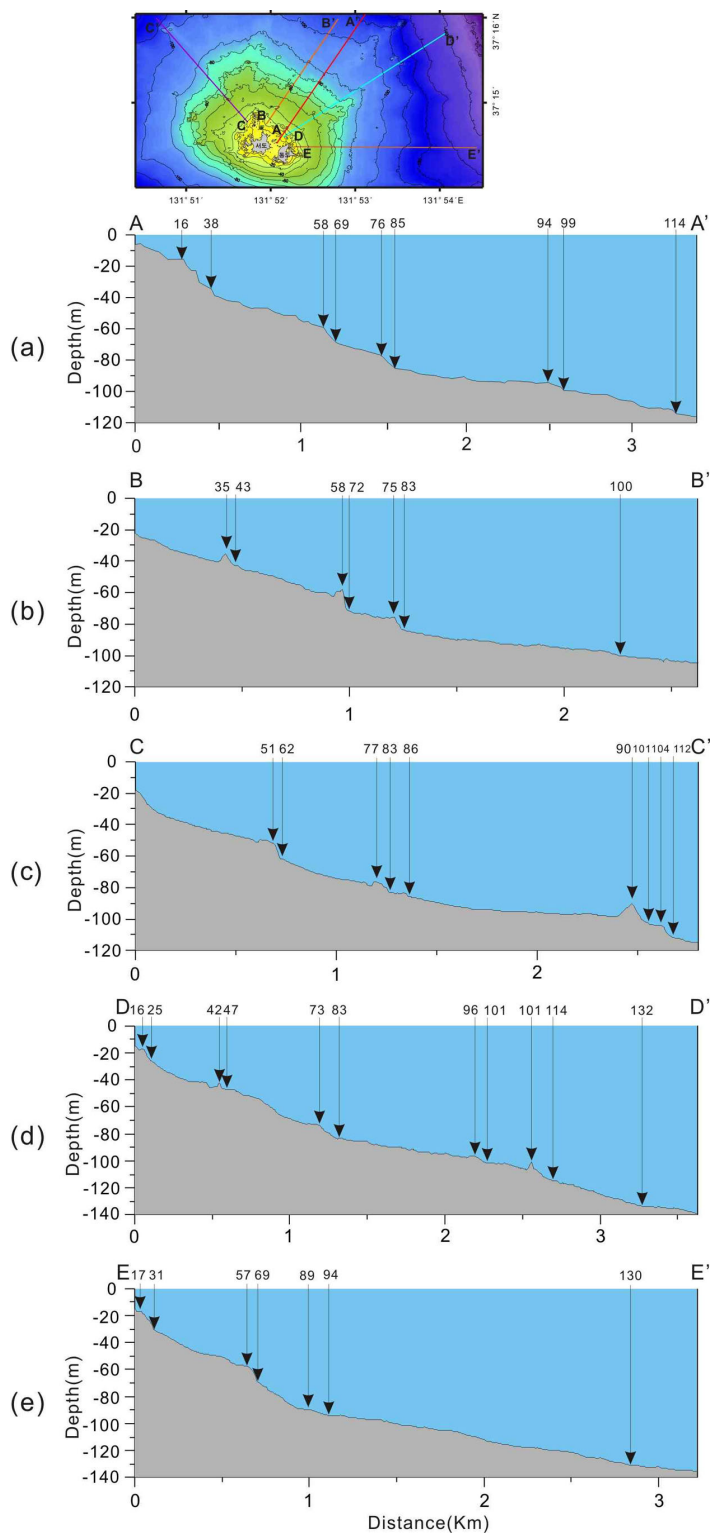


Fig. 8. Five topographic survey lines and there submarine bathymetry. Well developed terrace boundaries are indicated as arrows.

이미 언급한 계단형 해안단구의 안쪽에 분포하는 니질사 퇴적물이나 사질퇴적물은 일단 단구안쪽에서 안정적으로 퇴적된 것으로 해석되었다. 그림 채니기를 이용한 채취에 의하면 경우에 따라서는 표층이 아닌 표층하 수 십 cm에서 탄산염 퇴적물(그림 3C)이 나타나는 것으로 판단해 볼 때 해수면이 낮았던 빙기에 탄산염 퇴적물이 퇴적된 후 반원양성 퇴적물이 순차적으로 퇴적된 것으로 해석이 가능하다. 또한 경우에 따라서는 니질인 반원양성 퇴적층에 역질 퇴적물이 혼재되어 나타나는 것으로 판단해볼 때 이 역질 퇴적물은 이미 언급한 사면붕괴 등에 의해 일시적으로 퇴적된 것으로 판단된다(그림 3B). 실제로 기존 연구나 정밀 해저면 탐사결과에 의하면 대규모 사면붕괴를 지시하는 지형이 나타나고 있으며(Chough, 1983; 한국해양연구원, 2010), 정점 40과 같이 쇄설성 퇴적물이 니질퇴적물과 혼재되어 있는 것은 이와 같은 사실을 뒷받침한다.

독도 주변해역에 대해 대한 수온, 염분을 상세하게 조사한 결과 인접하는 다른 지역에 비해 수온이 낮아지는 현상이 관측되었으며, 이는 독도를 중심으로 저층수가 용승(upwelling)하는 것으로 해석되었다(한국해양연구원, 2010). 이 용승현상은 일반 대양에서의 용승현상과 비슷하며 독도효과(Dokdo effect)로 명명되어 이에 대한 원인과 그 결과를 알아보기 위해 현재 연구가 진행중에 있다. 일반 해양에서는 용승이 일어나면 저층에 있는 유기물이 공급되어 생물생산이 높아지는 결과를 초래한다(Hay and Brock, 1992). 장주기에 걸친 지속적인 용승은 결국 생물생산을 높이고 여장환경이 형성되기 쉬우며 따라서 동 지역의 생태계에도 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 독도주변 해역에서도 독도효과로 인한 생물생산의 변화 정도와 그로 인한 퇴적물 분포와의 관계, 사면 붕괴로 인한 퇴적물 분포와 저층수의 순환, 그리고 주변 생태계에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 조사가 더욱 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

독도 주변 해역의 여러 지역에서 채취한 표층퇴적물을 분석한 결과 다양한 구성성분을 보이고 있다. 200 m 보다 얕은 천해에서는 쇄설성물질과 탄산염이 주를 이루고 있으며 수심 증가에 따라 구성 성

분의 변화를 보인다. 수심 증가에 따라 탄산염 함량은 감소하지만 유기탄소 함량은 증가하는 경향을 보인다. 표층퇴적물의 탄산염 함량은 수심 200 m 이내의 지역에서는 대체로 20~35%의 높은 함량을 보이고, 수심이 깊어짐에 따라 차츰 감소하는 경향이 뚜렷이 관찰되며, 수심 1,000 m 이상의 지역에서는 5~10%의 함량을 보인다. 표층퇴적물 내 총 유기탄소의 함량은 수심이 깊어짐에 따라 대체로 증가하지만, 이러한 경향성이 뚜렷이 나타나지는 않는다. 그러나 전체적으로 수심 약 1,500 m를 기준으로 하여 육원성 물질을 주로하는 퇴적물과 그 보다 깊은 지역의 반원양성 퇴적물로 크게 대별할 수 있을 것 같다. 입도분석결과 독도 주변 해역에는 니, 사질 니, 니질 사, 사, 역질 니질 사, 역질 사, 니질 역, 사질 역, 니질 사질 역, 역 등의 다양한 퇴적상이 분포하고 있지만 전체적으로는 니질상, 사질상, 그리고 역질상의 3개의 퇴적상으로 구분이 가능하며 수심변화와 밀접한 관계를 보이고 있다. 전체적으로 탄산염이나 유기탄소와 같이 수심이 깊어짐에 따라 퇴적물의 평균 입도가 세립해지는 경향을 보인다. 그러나 일부 정점에서는 slump 등과 같은 일시적 이벤트에 의한 결과로 비슷한 수심 구간에서도 지역적으로 차이를 보이고 있어 지형의 영향을 받은 것으로 판단된다.

다중빔을 이용하여 독도 화산체 정상부를 기점으로 정밀 해저지형을 구하였다. 독도 화산체 정상부는 대부분 곳곳에 돌출 암반들이 산재하는 전형적인 암반 지형을 나타내며 육지부터 연안 약 20 m까지는 경사면이 급하고 수심 약 80 m까지는 경사가 점차 낮아지다가 수심 약 80 m 이하로 완만한 경사를 보이며 깊어진다. 이 화산체가 뚜렷하게 구분되는 수심은 약 120 m 정도이다. 수심 40 m에서 200 m 내에는 다수의 해안단구형 지형이 나타나고 있으며 이는 제 4기에 일어난 해침, 해퇴 현상에 의해서 형성된 것으로 생각된다. 해안단구내의 사질 퇴적물은 해수면이 낮았던 시기에 퇴적된 것으로 과거의 고해양, 고기후에 대한 정보를 제공할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원이 수행하는 “독도의 지속가능한 이용연구”의 일환으로 수행되었다(PM55861). 시료채취 및 분석에 도움을 준 관계자에 감사드린

다. 또한 이 논문의 여러 가지 부족한 면에 대해 세심한 심사를 해주신 강원대학교 우경식 교수님과 많은 지적과 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원께도 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 박찬홍, 이종익, 허식, 천종화, 김창환, 2005, 독도 주변 해저 지형 및 지질 특성. 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회 공동학술대회(초록), p. 1-3.
- 손영관, 박기화, 1994, 독도의 지질과 진화. 지질학회지, 30, 242-261.
- 송용선, 박맹언, 박계현, 2006, 울릉도와 독도 화산암의 생성연대 및 진화사. 암석학회지, 15, 72-80.
- 이종익, 허순도, 유찬민, 김예동, 박찬홍, 허식, 권문상, 박병권, Nagao, K., 2000, 독도 화산활동의 성인: 열점 기원에 대한 새로운 고찰. 대한지질학회 제55차 정기총회 및 추계공동학술발표회(초록), 대전 충남대학교, 10월 27-28 일, P. 96.
- 우경식, 지효선, 김련, 전진아, 박재석, 박홍식, 김동선, 박찬홍, 2009, 독도 주변 탄산염퇴적물의 분포와 성인: 예비 조사 결과. 한국해양학회지, 14, 171-180.
- 최진우, 현상민, 김동성, 김용서, 2002, 한국 동해 독도 주변 천해 및 사면해역의 대형 저서동물 군집. Ocean and Polar Research, 24(4), 429-442.
- 한국해양연구원, 2005, 독도 해양생태계조사 연구. 해양수산부, p. 107-119
- 한국해양연구원, 2008, 독도의 지속가능한 이용연구. 국토해양부, p. 409-484.
- 한국해양연구원, 2010, 독도의 지속가능한 이용연구, 국토해양부, 176 pp.
- 황상구, 전영권, 2003, 독도 화산의 불출유회와 화산형태. 자원환경지질, 36(6), 527-536.
- 현상민, 최진우, 최진성, 이태희, 2003, 진해만 입구해역의 표층 퇴적물 특성과 저서환경. 한국수산학회지, 36(6), 700-7-7.
- Arai, E., Oba, T., Kitazato, H., Horibe, Y., Machida, H., 1981, Late Quaternary tephrochronology and paleoceanography of the sediments of the Japan Sea. Quaternary Research (Japan), 20, 209-230.
- Bahk, J. J., S. K. Chough, K. S. Jeong, and S. J. Han, 2001, Sedimentary records of paleoenvironmental changes during the last deglaciation in the Ulleung Interplain Gap, East Sea (Sea of Japan). Global and Planetary Change, 28, 241-253.
- Bahk, J. J., S. K. Chough, and S. J. Han, 2000, Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). Marine Geology, 162, 459-477.
- Cho, Y-G, Lee, C-B, Choi, M-S., 1999, Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. Marine Geology, 159, 111-129.
- Chough, S. K., 1983, Marine Geology of Korean Seas. International Human Resources Development Corporation, Boston, 157 pp.
- Chun, J-H., Cheong, D., Ikehara, K., Han, S-J., 2007, Age of the SKP-I and SKP-II tephra from the southern East Sea/Japan Sea: Implications for interstadial events recorded in sediment from marine isotope stages 3 and 4. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 247, 100-114.
- Folk, R. L., 1966, A review of grain-size parameters. Sedimentology, 6, 73-93.
- Hay, W., Brock, J.C., 1992, Temporal variation in intensity of upwelling off southwest Africa. From Summerhayes, C.P., Prell, W.L., Emeis, K.C. (eds), *Upwelling Systems: Evolution since the early Miocene*. Geol. Soc. Spc. Publ, No. 63, 463-497.
- Hyun, S., Bahk, J.J., Suk, B-C., Park, B-K., 2007, Alternative modes of Quaternary pelagic biosiliceous and carbonate sedimentation: a perspective from the East Sea (Japan Sea). Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 247, 88-99.
- Kim, C.H., Park, C. H., Jeong, E. Y., Hwang, J. S., 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, 29, 161-169.
- Oba, T., Katon, M., Kitazato, H., Koizumi, I. Omura, A., Sakai, T., Takayama, T., 1991. Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. Paleoceanography, 6, 499-518.
- Stein, R., 1990, Organic carbon/sedimentation rate relationship and its paleoenvironmental significance for marine sediments. Geo-Mar Lett, 10, 37-44.
- Stein, R., 1991, Accumulation of organic carbon in marine sediments: lecture notes in Earth Science. Springer-Verlag, 217 pp.
- Ujiie, H., Ichikura, M., 1973, Holocene to uppermost Pleistocene planktonic foraminifera in a piston core from off San'in district, Sea of Japan. Trans. Proc. Paleontol. Soc. Japan, 91, 137-150.

투 고 일 : 2010년 10월 26일

심 사 일 : 2010년 11월 2일

심사완료일 : 2010년 12월 19일