

## 독도 화산군 주변 퇴적층의 고해상 탄성파상 분석

윤석훈\* · 이용국<sup>1</sup> · 한상준<sup>1</sup>

제주대학교 해양학과, <sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경 · 기후연구본부

### High-resolution Echo Facies Analysis of Sedimentary Deposits around Dok-Island Volcanoes

SEOK-HOON YOON\*, YONG-KUK LEE<sup>1</sup>, SANG-JOON HAN<sup>1</sup>

\*Department of Oceanography, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea  
<sup>1</sup>Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-600, Korea

본 연구에서는 독도 화산군(독도화산체 및 독도해저산)과 그 인근 해저에서 일어났던 제4기 퇴적양상을 밝히고자, chirp 방식 지층탐사자료를 분석하여 5개의 탄성파상을 분류하고 이를 해석하였다. 뚜렷한 표층반사파가 특징인 탄성파상 IA는 천해 해양작용에 의한 사질 또는 역질의 조립 퇴적물을 지시하는데, 화산체의 평탄한 정상부에 분포한다. 다소 확산된 표층반사파와 평행한 저층반사파로 구성되는 탄성파상 IIA는 화산체 사면 말단부와 오키뱅크 사면 및 인근 울릉분지 평원에서 기록되는데, 간헐적인 저탁류 퇴적층이 협재하는 반원양성 퇴적층에서 특징적으로 관찰되는 것이다. 탄성파적으로 투명한 렌즈형태의 탄성파상 IIC는 암설류 퇴적체를 반영하는 음파특성으로서, 주로 화산체 사면의 말단부와 오키뱅크 사면 등에서 관찰된다. 단독 또는 중첩되어 있는 불규칙한 회절 쌍곡선 반사파가 특징인 탄성파상 IIIA는 퇴적물 피복이 적은 평탄 또는 기록이 심한 화산암반 지역을 나타내는 것으로서, 화산체 사면 대부분의 지역에서 관찰된다. 규칙적으로 중첩하는 쌍곡선 표층 반사파가 나타나는 탄성파상 IIIC는 암석낙하에 의한 해저 테일러스(talus)를 지시하며 화산체 사면에 국지적으로 분포한다. 이러한 탄성파상의 분포와 해저지형은, 천해 침식작용에 의해 정상부가 평탄하게 되어 낮아졌고, 이로부터 생성된 퇴적물은 주로 화산체 사면에 발달된 해저협곡이나 계곡을 따라 암설류 및 저탁류의 형태로 사면의 말단부와 울릉분지 평원으로 이동되었음을 지시한다.

This study presents Quaternary sedimentation pattern around Dok-Island volcanoes (Dok Island and Dok Seamount), based on analysis of high-resolution (chirp) echo characters. Echo facies IA, showing sharp, continuous bottom echo without subbottom reflectors, is recorded mainly from the flat tops of the volcanoes. This facies indicates sands and gravels (re) deposited by shallow marine processes. Echo facies IIA in the basin floor and basal slopes of the volcanoes and Oki Bank is characterized by semi-prolonged bottom and several parallel sub-bottom echoes. This facies reflects hemipelagic settling with intermittent influences of turbidity currents in the slope areas. Echo facies IIC is recorded from acoustically-transparent debrite masses on the basal slopes of the volcanoes and Oki Bank. Echo facies IIIA is characterized by irregular hyperbolic echoes in the slope areas of the volcanoes. It suggests hard rock basement or irregular volcanic edifices. Echo facies IIIC shows regularly-overlapping hyperbolic bottom echoes. It is interpreted to represent rock-fall deposits (talus) accumulated in the mid-slope area. Echo characters and topography suggest that the tops of Dok-Island volcanoes were flattened and lowered by shallow-marine erosional processes. The eroded sediments were transported to and deposited in the base of slope and basin plain mainly by debris flows and turbidity currents along submarine canyons and valleys.

#### 서 언

지난 30여 년 간 고주파(1~12 kHz)의 음원을 이용하는 천부 지층탐사기는 다양한 해저 환경에서 일어나는 퇴적작용을 연구하는 데 중요한 장비로 활용되어 왔다(Damuth, 1975, 1978; Nardin

et al., 1979; Chough et al., 1985a, 1985b; Pratson and Laine, 1989). 고주파의 음파를 이용한 이러한 탐사방법은 해상도가 뛰어나서 수 m 규모의 매우 상세한 퇴적층 형태 및 구조까지 파악할 수 있다. 또한 퇴적층에서 반사된 음파신호는 해저표층과 심층 퇴적물의 구조 및 조직(입도, 굳기, 밀도 등)과 같은 물리적 특성에 따라 다양한 반사특성(echo character)으로 기록되기 때문에(Damuth, 1975, 1978; Damuth and Hayes, 1977), 최근에는 이러한 음파의

\*Corresponding author: shyoon@cheju.cheju.ac.kr

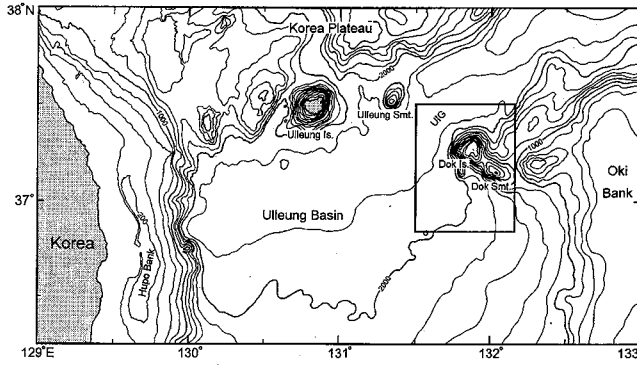


Fig. 1. Physiography of the Ulleung Basin and its margins. The box indicates the study area. Contour interval is 200 m. Is. = Island; Smt. = Seamount; UIG = Ulleung Interplain Gap.

반사특성과 해저 퇴적물의 물성과의 관계를 찾기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다(Schock *et al.*, 1989; LeBlanc *et al.*, 1992; Panda *et al.*, 1994).

궁극적으로 천부 지층탐사기를 이용한 연구의 장점은 해저 음향 반사파의 특성과 퇴적층의 물성 및 구조와의 상관관계를 이용하여 직접 퇴적물을 채취하여 관찰하지 않더라도 단기간에 넓은 지역 퇴적물의 물리적 특성과 퇴적양상을 파악할 수 있다는 것이다. 천부 지층탐사기에서 방출되는 고주파 음파는 통상 해저면 하수 십 m까지 투과되는데, 이 깊이에 해당하는 두께의 퇴적층은 평균적인 퇴적속도(1~10 cm/천년)를 가정한다면 수 십만 년에 걸쳐 형성된 것으로서, 지질시대로는 플라이스토세(Pleistocene) 후기에서부터 현재까지의 퇴적사를 파악하는데 필요한 정보를 제공할 수 있다.

동해 울릉분지는 한반도, 한국대지(Korea Plateau), 오키뱅크(Oki Bank) 및 남서 일본열도로 둘러싸인 최대수심 2,300여 m의 후열도 분지로서(Fig. 1), 1980년대 이래 고해상 탄성파탐사기를 이용하여 분지주변부는 물론 분지평원까지 광범위한 지역에 걸쳐 해양지질학적 연구가 수행되어 현재 제4기 후반기의 퇴적작용에 관한 많은 정보가 축적되어 있다(Chough *et al.*, 1985a, 1997; Lee *et al.*, 1991, 1993; 최 등, 1989; 윤 등, 1996). 특히 한국해양연구원은 1990년대 초반부터 고해상 천부 지층탐사기를 이용하여 동해 대륙붕과 대륙사면, 그리고 지난 1996년부터는 BASAPES(Basin Structures and Past Changes in the East Sea, Korea)와 MECBES(Marine Environment Changes and Basin Evolution in the East Sea of Korea) 프로그램을 통하여 동해 울릉분지 심해저에서 많은 자료를 취득하였다(한국해양연구소, 1996, 1997). 본 연구에서는 지난 1997년 독도 해역에서 취득된 고해상 탄성파 탐사자료(Fig. 2)를 분석함으로써, 이 해역에 분포하는 특징적인 탄성파상(echo facies)을 분류하고 이를 바탕으로 제4기 플라이스토세에 일어났던 독도 화산군 및 그 주변 해저의 퇴적작용을 밝히고자 한다.

### 지형 및 지질 개요

독도 화산군은 울릉분지의 북동부인 오키뱅크 북서 사면에 접해 있는 화산체로서 독도(Dok Island)와 독도해저산(Dok Seamount)

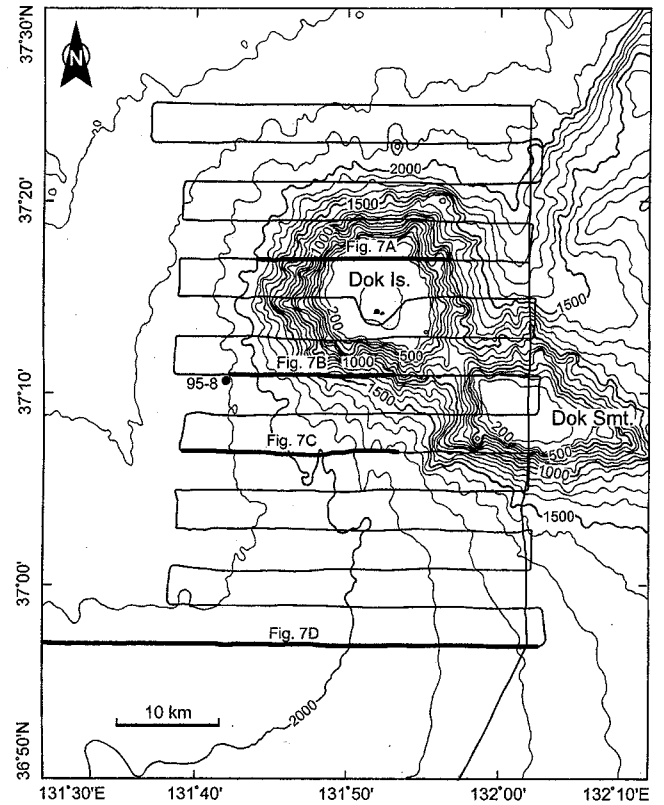


Fig. 2. Bathymetric map of the study area showing chirp-profiling tracklines and coring site (dot). Bold lines indicate the locations of profiles shown in Fig. 7. Contour interval is 100 m. Is.= Island; Smt. = Seamount. Bathymetry modified from KORDI (1997). See figure 1 for location.

등 2개의 해저화산으로 구성되어 있으며, 한국대지와는 수심 2,200~2,600 m의 울릉분지간통로(Ulleung Interplain Gap)에 의해 분리되어 있다(Fig. 1). 독도가 위치한 북서 화산체는 수심 2,200 m의 해저 위에 약 2,000 m 높이로 솟아 있다. 평정해산(guyot) 형태의 화산체 정상부는 지름이 약 10 km인 비교적 평탄한 원형대지로 나타나며, 대부분 해수면 하 100~200 m에 놓여 있다(Figs. 2, 3). 독도 자체는 돌출된 정상부 남서쪽 일부만이 해수면 위로 노출된 것이다. 독도 남동쪽의 독도해저산은 북서-남동 방향으로 다소 신장되어 있으며, 독도화산체와 마찬가지로 정상부가 평탄하며 수심 약 200~2,000 m 사이에 위치한다(Fig. 2). 이들 두 개의 화산체는 수심 700 m 내외의 골짜기에 의해 분리되어 있으며, 두 화산체의 중심은 약 17 km 떨어져 있다. 두 화산체의 사면에는 모두 다양한 규모의 해저계곡과 돌출지형들이 사면 말단까지 특징적으로 나타나며 이들은 매우 기복이 심한 화산지형을 반영한다(Fig. 3).

독도 화산군 북쪽의 울릉분지간통로는 울릉분지와 일본분지를 연결하는 심해저 지형으로서, 북동쪽으로 매우 완만하게 경사져 있는, 수심 2,000~2,600 m의 비교적 평탄한 부분이다(Fig. 1). 이 지역에는 다수의 해저수로(submarine channel)들이 발달되어 있는 것으로 SeaBeam 탐사에 의해 보고되었다(Fig. 3; 한국해양연구소, 1996, 1997). 특히 울릉해저산(Ulleung Seamount)의 동쪽을 지나

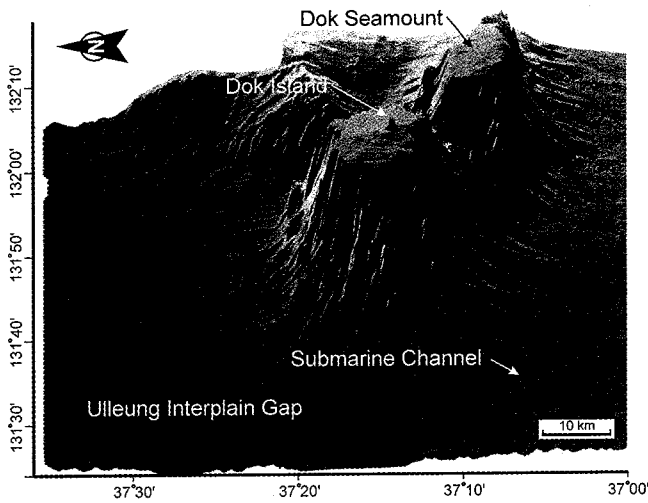


Fig. 3. 3D seafloor image around the Dok-Island volcanoes based on SeaBeam data. Modified from KORDI (1997).

는 해저수로는 2,300 m 등수심선과 평행하게 발달되어 한국대지의 남쪽 경계지역을 따라 수심 2,500 m까지 이어진다. 이들 해저수로들은 자연제방의 유무를 포함한 형태에 따라 침식형 및 퇴적형으로 구분되며, 주로 저탁류(turbidity current)나 해저류(bottom current)에 의해 형성된 것으로 제안된 바 있다(한 등, 1997a). 한편 울릉도 동쪽의 분지간통로 중앙에 형성되어 있는 울릉해저산(850~2,200 m)은 남북으로 다소 신장된 형태를 보이며, 퇴적물의 집적이 많지 않고 비교적 불규칙한 돌출지형과 계곡들로 이루어진 사면이 특징이다(Fig. 1).

독도 화산군의 지질은 독도에 노출되어 있는 화산암을 통해 추정해볼 수 있는데, 주로 알칼리 현무암질 마그마로부터 분화되어 분출된 알칼리 현무암, 조면암질 현무암, 조면암질 안산암, 조면암 등으로 구성되어 있다(김 등, 1987). 이들 암석들은 K-Ar 연대측정 결과, 전기 플라이오세(Pliocene)인  $4.6 \pm 0.4$  Ma에서부터 후기 플라이오세인  $2.5 \pm 0.1$  Ma까지의 연령을 갖는 것으로 보고되었다(Sohn, 1995). 절대연령 분포와 암상 분석에 의거하여 Sohn(1995)은 독도화산체가 전기 플라이오세 이후 약 2백만 년에 걸쳐 3단계의 화산분출로 형성되었다고 제안하였다. 독도 형성 초기의 화산분출은 해저면 하 얁은 부분(해파기저 이내의 천해)에서 수중분출의 형태로 일어났으며, 후기 플라이오세인 약 2.7 Ma에 점차 화산체가 커지면서 수중분출에서 대기중 분출로 전환되었다. 그 이후 독도화산체의 분화구가 붕괴되어 주화도가 차단되었고 분화구가 가장자리의 구조선을 따라 마그마가 국지적으로 분출 또는 관입하여 현재의 독도가 형성되었다. 그러나 독도 인근에서 취득된 다중채널 심부 탄성파 자료에 따르면(Lee, 1992), 독도의 기저 화산체는 해저면 위로 드러난 것 보다 훨씬 깊고 광범위하게 분포하고 있어서, 최초 분출이 플라이오세 보다 훨씬 이전에 심해 분출의 형태로 일어났을 가능성도 배제할 수 없다.

### 연구 자료 및 분석방법

본 연구의 기본자료인 고해상 지층단면도는 한국해양연구원 연

구선 은누리호에 장착된 'Bathy 2000P 시스템'을 이용하여 취득된 것이다. 이 시스템은 3~11 kHz 주파수 대역의 chirp 방식 지층탐사기로서, 수심 6,000 m까지 운영이 가능하며, 투과깊이는 해저면으로부터 최대 75 m에 이른다. 각 신호에 대한 해상도는 최대 8 cm까지 유지할 수 있는 신호처리 특성을 갖고 있다. 분석에 사용된 탄성파단면은 독도화산체와 독도해저산을 동-서로 가로지르는 15개의 측선과 남북 및 북동-남서 방향의 2개 측선을 따라 얻어진 것이다(Fig. 2).

고해상 탄성파탐사에 의해 기록되는 반사파의 음향학적 특성은 일반적으로 해저 표층(bottom)과 그 하부의 심층(subbottom)에서 오는 반사파로 구분되는데, 이들 반사파들의 명확성(또는 반사강도), 측면연속성, 형태, 그리고 해저지형 등을 기준으로 하여 탄성파상이 분류된다. 이미 1970년대 이후 표준화된 고해상 탄성파상의 특징들이 여러 연구자에 의해 제안되어(예, Damuth and Hayes, 1977; Damuth, 1978, 1980; Chough *et al.*, 1985) 고해상 탄성파 자료 분석에 이용되고 있다. 이렇게 분류된 탄성파상은 기존 연구결과와 현장에서 채취된 시추퇴적물 시료의 분석결과와 비교함으로써 퇴적물 조직, 퇴적작용, 퇴적환경 등이 해석된다.

### 탄성파상의 분류 및 특성

고해상 지층탐사단면에 기록되는 탄성파상의 주된 분류요소는 해저 표층과 심층 반사파의 명확성, 측면 연속성, 그리고 형태 등이다. 이러한 요소에 따른 분류는 일반적으로 로마숫자와 영문 알파벳으로 구성된 두 자리의 코드로 표시된다. 연구자나 연구지역에 따라 이러한 코드가 통일화되어 있지 않고 조금씩 다르게 사용되는데, 본 연구에서는 기본적으로 Damuth(1978, 1980)의 기준과 코드를 따랐다. Damuth(1978, 1980)의 분류에서는 표층 반사파의 명확성과 형태에 따라 로마숫자로 표시되는 3개의 그룹으로 나뉜다. 즉 표면반사파가 뚜렷한 경우(I), 다소 확산(diffuse)되어 두껍게 나타나는 불명확한 경우(II), 그리고 증첩하는 쌍곡선 반사파(hyperbolic echo)로 나타나는 경우(III)이다. 다시 이러한 세 그룹은 심층 반사파의 유무, 명확성, 측면연속성, 형태 등에 따라 구분되어 영문 알파벳 대문자 코드가 뒤에 붙여진다. 본 연구에서는 5개의 특징적인 탄성파상이 독도 화산군과 그 주변에서 분류되었다(Table 1).

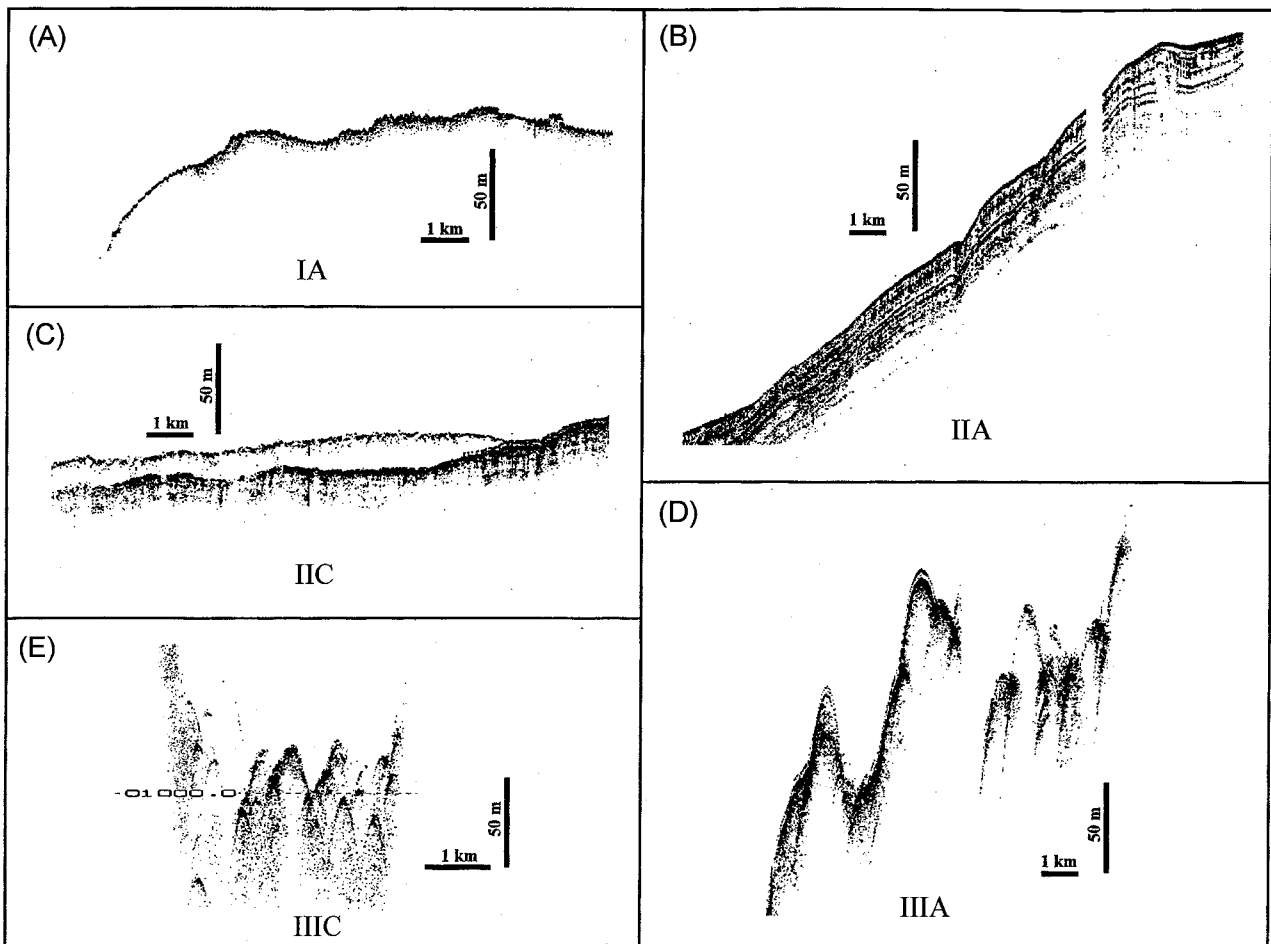
#### 탄성파상 IA

탄성파상 IA는 비교적 뚜렷하고 측면연속성이 매우 양호한 해저표층 반사파를 보이나, 해저면 아래의 심층 반사파는 나타나지 않는 특성을 갖는다(Fig. 4A). 표층 반사파의 형태는 대체로 기폭이 작은 매끈한 해저지형을 반영하지만, 부분적으로 높이가 수 m 이하의 작은 기폭들로 이루어져 있으며, 이 기폭들은 비교적 규칙적으로 발달되어 있다. 이러한 해저면 기복의 하부에서는 반사파가 다소 확산되어 나타나기도 한다.

일반적으로 심층 반사파를 동반하지 않는 뚜렷한 해저표층 반사파는 해수층과 음향 음피던스(impedance) 차가 크게 나타나는 암반 해저나 모래, 자갈과 같은 조립퇴적물이 분포하는 대륙붕과 같은 천해저에 나타나는 것으로 알려져 있다(Damuth and Hayes, 1977; Pratson and Laine, 1989; Chough *et al.*, 1997; Reddy and Rao, 1997). 이 경우, 대부분의 음향신호는 해저표층에서 반사되

**Table 1.** Description and interpretation of echo facies.

Echo facies	Description	Occurrence	Interpretation
IA	Sharp, continuous bottom echoes with no subbottom reflectors; flat or low-relief irregular surface topography	Tops of Dok Island and Dok Seamount	Sands and gravels (re)deposited by shallow marine processes (Damuth, and Hayes, 1977; Pratson and Laine, 1989; Chough <i>et al.</i> , 1997)
IIA	Semi-prolonged bottom echoes with several intermittent subbottom reflectors; smooth, undulatory, or irregularly eroded topography	Basin floor and basal slope areas of Dok-Island and Dok Seamount	Composite deposits consisting of hemipelagites and turbidites (Damuth, 1978, Mullins <i>et al.</i> , 1979)
IIC	Acoustically transparent (i.e. no internal reflection) sediment masses with variable surface echoes, such as seafloor-tangential hyperbolae to weak or very prolonged reflectors; lens-shaped or lobate form	Basin floor and lower slope areas of Dok Island and Oki Bank	Debrisites (Embley, 1976; Chough <i>et al.</i> , 1985; Yoon <i>et al.</i> , 1991)
IIIA	Distinct bottom echoes with very prolonged subbottom reflectors; irregular or flat surface topography sometimes showing irregular, overlapping hyperbolae with significantly varying vertex elevations (tens to hundreds of meters)	Slopes of Dok Island and Dok Seamount	Hard rock basement or irregular volcanic edifices (Damuth, 1978; Pratson and Laine, 1989)
IIIC	Clusters of relatively regularly-overlapping hyperbolae with varying vertex elevations (generally tens of meters); very prolonged subbottom reflection	Mid-slope areas of Dok Island and Dok Seamount	Deposits of slump/slide, debris flow and rock fall (Embley and Jacobi, 1977; Pratson and Laine, 1989)

**Fig. 4.** Typical features of echo facies around Dok-Island Volcanoes.

어 버리기 때문에 심층의 음향 특성은 기록되지 않고 해저 표층의 특성만 기록되게 된다. 한편, 높이 수 m 이하의 비교적 규칙적인 해저표면의 기록들은 조립질 퇴적물에 의해 형성된 거대연흔, 모래파 등의 다양한 퇴적면 구조를 나타내는 것으로 해석된다. 한편, 이러한 퇴적구조 발달 지역에서는 표층 반사파가 다소 확산되어 나타나는데, 이는 소규모 지형 기록에 의한 음파의 산란효과에 기인한 것으로 알려져 있다. 해저면 퇴적구조의 규모가 고해상 탄성파 탐사기의 해상도 이하인 경우 여기서 반사되어 나온 음파들은 대부분 산란되어, 하나의 반사면으로 기록되지 않고 확산된 반사파로 나타난다(Ewing *et al.*, 1973; Damuth, 1980). 따라서, chirp 방식 지층탐사기의 해상도(약 10 cm)를 감안한다면, 퇴적구조 발달지역의 확산반사파는 거대연흔이나 모래파에 중첩되어 있는 연흔이나 자갈 해저와 같은 소규모 기록에 의한 것으로 생각된다.

**탄성파상 IIA**

탄성파상 IIA의 해저표층 반사파는 측면연속성은 양호하지만 다소 확산(semi-prolonged)되어 다소 두꺼운 반사면으로 나타나며, 그 하부 수 십 m에 걸쳐 나타나는 심층 반사파는 다수의 평행 반사면으로 기록된다(Fig. 4B). 심층 반사파의 형태는 표층 반사파와 거의 동일하며 반사면은 대부분 뚜렷하지 않고 다소 확산되어 있다. 심층 반사면의 측면연속성은 다소 불량하여 불연속적으로 나타나는 부분도 있다. 이러한 탄성파상이 나타나는 해저표면의 지형은 일반적으로 매끈하거나 약간의 굴곡(undulation)을 보이며, 부분적으로는 침식되어 불규칙하게 나타나기도 한다.

서로 평행한 표층 및 내부 반사파는 측면 두께변화가 비교적 작은 정합적 관계의 세립질 퇴적층을 지시하는데, 주로 수층 내 부유퇴적물이 지속적으로 침전하면서 해저지형을 반복하는 원양성(pelagic) 또는 반원양성(hemipelagic) 퇴적이나 세립질 퇴적물이 판상류(sheet flow) 형태로 넓은 지역으로 확산되는 간헐적인 저밀도 저탁류의 퇴적작용에 의해 형성될 수 있다(Damuth, 1975, 1978, 1980; Mullins *et al.*, 1979). 탄성파상 IIA 지역에서 채취된 코아의 퇴적상 분석결과(Fig. 5)도 이러한 해석을 뒷받침하는데, 전체 코아의 약 10%정도가 저탁류에 의해 집적된 니질 퇴적층이고 그 나머지는 반원양성 퇴적에 의해 집적된 생물교란 퇴적물이다(한국해양연구소, 1996).

탄성파상 IIA의 분리된 다수의 평행한 심층 반사면은 입도, 밀도, 굳기 등 물리적 특성이 서로 다른 퇴적층이 교호하고 있음을 반영하는 것으로서 세립질(니, 점토)의 반원양성 퇴적층과 상대적으로 조립질인 저탁류 퇴적층의 경계면이 탄성파 반사면과 대비될 수 있다. 그러나 많은 경우, 단순히 암상변화에 의한 지층경계면이 바로 탄성파 반사면과 대비되지는 않는다. 즉 실트/모래층이 전혀 포함되어 있지 않은, 비교적 균질한 입도나 점진적 입도변화를 보이는 반원양성 퇴적층이나 탄산염 퇴적층에서도 다수의 평행한 탄성파 반사면이 기록되는데, 이 경우에는 반원양성 퇴적층 내에서의 탄산염(CaCO<sub>3</sub>) 함량이나 차등압밀(differential compaction)에 의한 밀도차와 같은 다른 물리적인 요인들에 기인한다(Embley, 1975; Mayer, 1979, 1980; Tucholke, 1980).

**탄성파상 IIC**

탄성파상 IIC는 심층 반사파가 없는 탄성파적으로 투명한

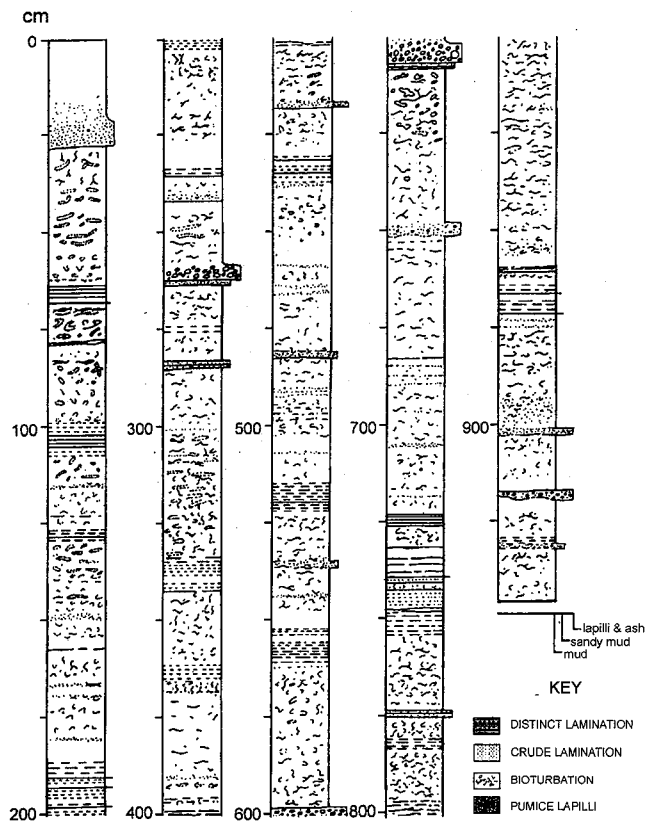


Fig. 5. Columnar section of piston core 95-8 recovered from the seafloor of Echo facies IIA. Core sediments are characterized by abundant hemipelagites (bioturbated and crudely laminated muds) and interlayered turbidites (distinctly laminated muds). See figure 2 for core location. After KORDI (1996).

(acoustically transparent) 퇴적체를 나타내는데, 일반적으로 위로 불룩한 썩기 또는 렌즈 형태를 보이며, 불규칙한 침식면 위에 놓여 있다(Fig. 4C). 표층 반사파는 명확하나 형태에 있어서 비교적 다양한 특성을 보이는데, 다소 확산되고 불연속적인 반사파 또는 비교적 규칙적으로 중첩하는 수 m에서 십 수 m 높이의 쌍곡선 반사파(hyperbolic echo)로 나타난다. 탄성파상 IIC를 보이는 퇴적체는 탄성파상 IIA 지층 내에 협재되어 나타나기도 하며, 2개 이상의 퇴적체가 누적(stack)되어 있는 경우도 있다. 퇴적체의 두께는 보통 20~50 m이며, 수평 분포 범위는 수 km에서 수 십 km까지 변화한다.

분포가 한정되어 있고 탄성파적으로 투명한 렌즈형태의 퇴적체는 일반적으로 암설류(debris flow)에 의해 집적된 것으로 해석된다(Embley, 1976; Chough *et al.*, 1985; Piper *et al.*, 1985). 탄성파적 투명성은 주로 퇴적체 내부의 불량한 층리발달에 기인하는데, 암설류는 층리가 잘 발달된 퇴적층을 집적시키는 저탁류에 비해 함유 퇴적물 농도와 점성이 크고 퇴적이 짧은 시간 안에 이루어지기 때문에 운반되던 퇴적물들은 대부분 규칙적인 층리를 이루지 못한다. 한편, 탄성파상 IIC의 소규모 쌍곡선 형태의 표층반사파와 확산 반사파는 암설류 퇴적물이 집적되는 동안 퇴적체의 표면에 발달한 다양한 퇴적면 구조나 불규칙한 표면을 반영하는 것으로 추정된다(Embley, 1976; Damuth, 1980; Yoon *et al.*, 1991).

**Table 2.** Echo characters and depositional processes around Dok-Island volcanoes.

Physiographic provinces	Echo facies	Topography and sediments	Depositional processes
Top	Type IA	Flat and smooth, guyot-like top with coarse-grained sediment cap	Shallow marine processes (i.e., waves, currents and storms) (re)depositing sands and gravels eroded from volcanics
Slope	Type IIIA, Type IIIC	Irregular volcanic edifices with various-scale gulleys and canyons; exposed rocky basement locally with thin sediment layers and patches of talus	Gravity fall of rocky blocks; bypassed mass flows through submarine canyons and gulleys
Base of slope and basin floor	Type IIA, Type IIC	Relatively smooth topography with local reliefs of erosional (submarine channels) and depositional features (debrite lenses) by mass flows; fine-grained sediments fringing the slope and thickening downslope	Hemipelagic settling, turbidity currents and debris flows

**탄성파상 IIIA**

탄성파상 IIIA는 대규모의 불규칙한 회절 쌍곡선 반사파(diffraction hyperbolic echo)가 단독 또는 여러 개 중첩되어 나타나는 것으로서, 쌍곡선 반사파는 해저표층에서 매우 확산되어 있어서 심층 반사파가 따로 구분되지 않으며, 높이와 폭은 수 m에서 수 km로 매우 폭넓게 변화된다(Fig. 4D).

불규칙하게 중첩하는 쌍곡선 반사파는 기복이 매우 심한 불규칙한 해저지형을 반영하는데, 대서양 중앙해령의 해저산, 단구대(fracture zone) 등 주로 화산암 기반의 불규칙한 해저나 침식이 활발하게 일어나는 대륙사면의 해저협곡이나 대륙대 등에서 보고되고 있다(Damuth, 1978; Pratson and Laine, 1989). 한편 단단한 기반암의 경우에는 일반적으로 탄성파상 IA에서와 같은 심층 반사면이 없는 확산되지 않는 뚜렷한 표층 반사파만이 기록된다. 하지만 기반암 표면에 소규모 불규칙한 기복, 예를 들면 현무암질 화산암인 경우 불규칙한 다공질 특성, 로피구조(ropy structure)와 같은 용암의 흐름구조, 자생각력암(autobreccia) 등에 의한 기복들이 흔히 발견되며, 이들은 음파를 산란시켜 매우 확산된 표층 반사파를 기록하는 주원인이 될 수 있다(Ewing et al., 1973; Damuth, 1980).

**탄성파상 IIIC**

탄성파상 IIIC에서는 비교적 규칙적으로 중첩하는 쌍곡선 표층 반사파가 특징적으로 나타난다(Fig. 4E). 쌍곡선 반사파의 높이는 대부분 수 십 m 이내로 변화범위가 탄성파상 IIIA보다는 작으나, 탄성파상 IIIA에서와 같이 표층 반사파가 매우 확산되어 있고 분리된 심층 반사면이 나타나지 않는 특성이 있다.

탄성파상 IIIC는 다수의 침식 또는 퇴적 구조가 일정한 간격으로 두고 근접하여 발달되어 있는 해저에서 특징적으로 기록된다(Damuth, 1978). 이러한 지형과 구조는 일반적으로 대륙대나 심해저 선상지에 발달하는 해저수로(Damth, 1975)나 해저사태 및 암설류 퇴적체(Embley and Jacobi, 1977; Pratson and Laine, 1989)와 관련있는 것으로 보고되었다. 따라서 이러한 탄성파상은 대부분 중력에 의한 퇴적물 질량류에 기인한 것으로 해석된다.

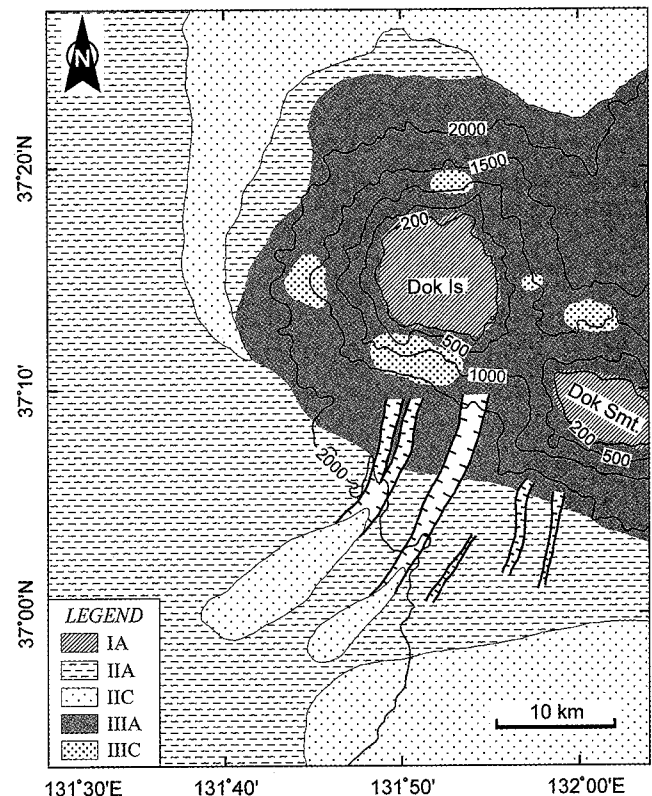
**탄성파상의 분포**

독도 화산군 및 주변의 해저의 탄성파상 분포는 해저지형과 밀

접한 관계를 갖고 있는데, 독도화산체 및 독도해저산의 정상부와 급경사의 사면, 그리고 오키뱅크 사면 및 독도주변 울릉분지 평원이 각기 특징적인 탄성파상 분포를 보인다(Table 2; Fig. 6).

**해저산 정상부**

수심 160~200 m에 위치한 독도해저산의 정상부는 다소의 기복을 갖고 있지만 거의 경사가 없는 평탄한 지역이다. 이 지역에서는 뚜렷하고 측면연속성이 매우 양호한 해저표층 반사파를 갖으나 대신 해저면 아래의 심층 반사파는 나타나지 않는 탄성파상 IA의 특성이 주로 분포한다(Fig. 6). 또한 표층 반사파는



**Fig. 6.** Distribution of echo facies. Contour interval is 500 m. Is. = Island; Smt = Seamount.

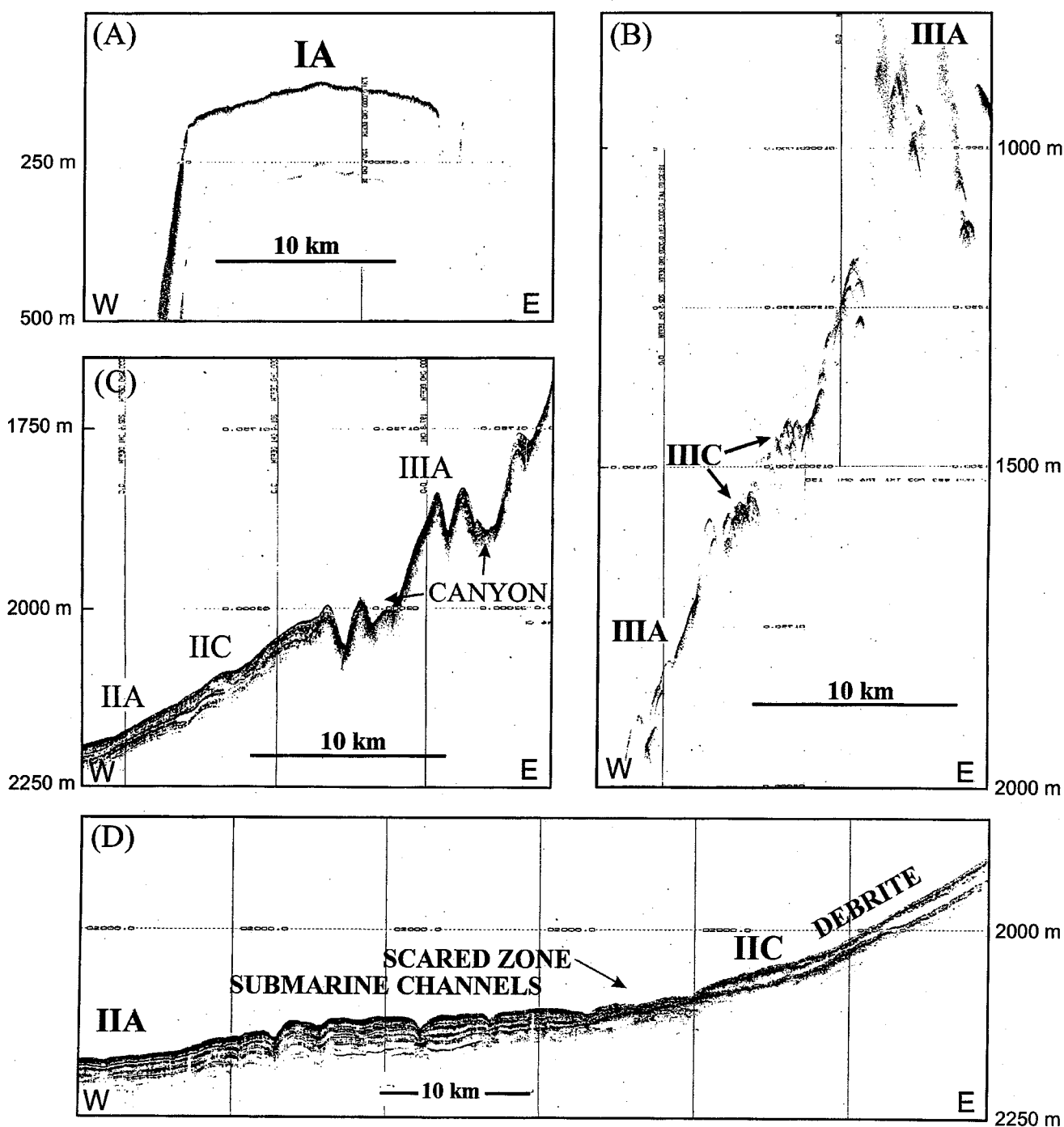


Fig. 7. Seismic profiles with codes of echo facies. For locations see figure 2.

높이 수 m 이하의 비교적 형태가 일정한 작은 기복들로 이루어져 있다.

한편 독도가 위치한 독도화산체 정상부는 수심 100~200 m에 위치하고 있으며, 남동쪽 독도해저산의 정상부에서와 마찬가지로 해저면 아래의 심층 반사파가 나타나지 않고, 비교적 뚜렷하고 높이 수 m 이하의 작은 기복들로 이루어진 해저표층 반사파를 보이는 탄성파상 IA의 특성이 관찰된다(Fig. 7A).

#### 해저산 사면

수심 200~2,150 m 사이의 화산체 사면은 7~10° 급경사를 이루고 있는데, 주로 탄성파상 IIIA가 분포하며 국지적으로 탄성파상 IIC가 상부 및 중부 사면에서 관찰된다(Fig. 6). 특히, 수 십~수 백 m 높이의 불규칙한 화산돌출지형들이 발달되어 있는 독도 화산체의 북쪽과 남쪽 사면에서는 쌍곡선 반사파나 침예한 표면 반사파로서 나타나며, 사면의 말단부를 제외하고는 이들 화산돌출

지형들은 거의 퇴적물로 피복되어 있지 않다(Fig. 7B).

한편, 화산돌출지형 사이나 경사가 비교적 낮은 사면 부분에는 탄성파상 IIC가 국지적으로 분포한다. 탄성파상 IIC는 비교적 불규칙하게 중첩하는 쌍곡선 표면반사파가 특징으로서, 쌍곡선 반사파의 높이는 대부분 수 십 m 이내이지만 크기에 다소의 변화가 있다(Fig. 7B).

독도화산체 남쪽 하부사면(수심 1,500~2,100 m)에는 최대 180 m 높이의 불규칙한 화산 돌출지형 사이로 적어도 4개 이상의 소규모 해저협곡들이 남쪽 오키뱅크사면과 울릉분지평원으로 발달되어 있다(Fig. 6). 이들 협곡들은 폭이 1~2.5 km, 깊이가 50 m 이하이다. 독도화산체의 북쪽 하부사면(수심 1,750~2,250 m)에도 화산돌출지형 사이에 폭 1 km, 깊이 수 십 m의 해저계곡들이 다수 발달되어 있다(Fig. 3).

수심 2,100 m 이상의 사면말단에는 비교적 매끈한 해저표면과 다수의 확산된 평형 심층반사면이 특징인 탄성파상 IIA가 나타나며(Fig. 5), 부분적으로 침식된 흔적을 포함한 다수의 기복이 관찰된다. 탄성파적으로 평행한 층리를 보이는 이들 퇴적층의 사이에는 부분적으로 탄성파상 IIC를 보이는 렌즈상의 소규모 암설류 퇴적층들이 협제된 양상이 관찰된다(Fig. 7C). 화산돌출지형들은 사면말단에서 수 십 m 두께의 퇴적층으로 피복되어 있으며, 해저계곡들은 대체적으로 폭이 넓어지고 부분적으로는 퇴적물로 충전되어 나타난다. 이들 해저계곡들은 침식에 의한 것으로 추정되는 불규칙한 기복이 나타나며, 심층반사파도 평행하지 않고 불규칙하게 기록된다.

### 오키뱅크 사면

독도 화산군 남쪽의 오키뱅크 사면은 축선을 따라 평균 0.5° 내외의 매우 완만한 경사를 갖는 비교적 기복이 없는 사면의 특징을 보인다. 다만 사면의 말단부에 암설류에 의한 것으로 보이는 퇴적체가 낮은 언덕지형을 나타내고 있다(Fig. 7D). 대부분 두꺼운 퇴적물로 덮혀 있는데, 탄성파상 IIA가 우세하게 관찰되며, 탄성파적으로 투명한 렌즈 형태의 퇴적체(탄성파상 IIC)가 구분된다(Fig. 6). 단일 암설류 퇴적체의 두께는 10 m 이하에서 25 m까지이며, 수평분포범위는 수 km에서 수 십 km까지 다양하게 나타난다. 독도 화산군 남쪽 사면 말단에는 비교적 얇은 두께의 퇴적체 6개 이상이 누적되어 있다. 탄성파상 IIA에서 관찰되는 심층 반사파의 특징은 사면의 상부에서부터 암설류 퇴적체가 발달하는 하부사면으로 가면서 확산의 정도가 증가하고 있다. 심층반사파는 비교적 평행하지만 해저협곡의 주변에서는 협곡벽의 침식으로 인해 층리가 얇아지는 경향이 있다.

암설류 퇴적체의 두께는 화산체 사면과 울릉분지평원으로 가면서 점차 얇아진다. 표층반사파는 매우 확산되어 있어서 두껍게 나타나며, 층의 두께도 10~30 m로 일정하지 않다. 이러한 암설류 퇴적체의 말단에는 약 7 km 폭의 침식대(scared zone)가 발달되어 있으며(Fig. 7D), 암설류 퇴적체의 표층에는 다시 탄성파상 IIA로 분류되는 퇴적층이 10~20 m 두께로 쌓여 있다.

독도화산체 사면에서 시작된 해저협곡의 아래에서는 대부분 하부 층리들이 절단되어 있어서 침식형의 사면협곡으로 해석되며, 이를 통해 운반되던 퇴적물들이 집적되어 계곡을 충전한 양상을 보이기도 하지만 대부분 퇴적물 충전이 매우 빈약하게 나타난다

(Fig. 7C). 사면 말단의 협곡은 폭이 2 km 이상이며, 깊이도 50여 m에 이른다.

### 울릉분지평원

독도 화산군 서쪽의 해저지형은 울릉분지의 중심이 위치한 서쪽에서 동쪽의 분지주변부(오키뱅크)로 가면서 수심이 점차 감소하는 비교적 매끈한 해저양상을 보인다(Fig. 2). 탄성파상은 분지평원과 해저수로 발달 지역에서는 주로 타입 IIA가 분포하며, 암설류 퇴적체가 집적되어 있는 화산체 사면말단의 경사지역에는 타입 IIC가 나타나기도 한다(Fig. 6). 이 지역에서 탄성파상 IIA는 약간 확산되어 두껍게 나타나는 측면연속성이 양호한 해저표층 반사파와 그 하부 50여 m에 걸쳐 나타나는 다수의 평행한 심층 반사파를 특징적으로 보인다. 심층 반사파의 형태는 표층 반사파와 동일하며 반사면은 뚜렷하지 않고 약간 확산되어 있고 측면 연속성은 다소 불량하여 불연속적으로 나타나는 부분도 있다. 한편 해저수로의 하부에 보이는 심층 반사면은 일부 단절된 부분도 보이지만 대부분 해저수로의 표면지형과 평행하게 나타난다.

## 토 의

독도 화산군을 구성하고 있는 2개의 해저산은 모두 평탄한 정상부를 갖는 평정해산의 형태를 보이고 있다(Fig. 3). 이러한 지형적 특징은 장기간에 걸친 해파나 해류의 작용으로 정상부가 침식되어 평탄하게 되었음을 지시한다. 그러나 화산체 정상부는 이러한 천해 해양작용의 영향 범위에서 다소 벗어난 수심 100~200 m에 위치하고 있다. 일반적으로 파도와 같은 천해 해양작용은 폭풍 시에도 최대 영향권이 수심 100 m를 넘는 경우가 드물다. 따라서 화산체 정상부에서의 주된 침식작용은 과거 해수면이 현재보다 100~150 m 이상 낮았을 때 이루어진 것이라고 볼 수 있다. Haq *et al.*(1988)이 제안한 범세계적 해수면 변동 곡선에 따르면, 독도 화산체의 분출이 완결된 시기인 2.5 Ma 이후 현재까지 대규모(100 m 이상) 해수면 하강기는 3회 정도 있었다. 특히 한반도 주변에서는 지금으로부터 약 15,000년 전 빙하기에 현재의 해수면보다도 135~150 m 낮았던 것으로 보고되고 있다(대한지질학회, 1999). 아울러 독도 화산군의 정상부와 유사하게 동해 대륙사면의 후포뱅크의 정상부도 저해수면기의 침식작용으로 평탄하게 되어 있으며 대부분 100~200 m의 수심 범위에 놓여 있다(Fig. 1)(Chough *et al.*, 2000). 한편, 독도 인근 울릉도 화산체와 울릉해저산은 정상부가 평탄하게 침식되어 있지는 않다(Fig. 1). 울릉도 화산체의 경우에는 독도보다 최근인 0.23 Ma까지 분출이 있었기 때문에(민 등, 1982; 윤, 1986) 아직 침식이 충분히 진행되지 않았고, 울릉해저산의 경우에는 해파나 해류의 영향이 미치지 않는 850 m의 깊은 수심에 위치하기 때문인 것으로 추정된다.

평정해산 형태의 독도 화산군 정상부를 야기한 또 다른 요인으로 독도 화산군을 포함하고 있는 지각침강의 가능성을 제안할 수 있다. 즉, 화산군이 형성된 후 오래지 않아 상당부분의 정상부가 침식되었고, 그 이후 화산군 출현에 따른 지각 하중의 증가로 인해 화산체 주변의 지각이 점차 침강하여 현재의 수심까지 가라앉았을 가능성도 있다. 하지만 독도화산체의 형성이 플라이오세 전기인 4.6 Ma에서부터 후기인 2.5 Ma까지 비교적 오랜 기간에 걸



쳐 점진적으로 이루어졌고(Sohn, 1995), 비교적 안정된 대륙지각으로 알려진 오키벡크(Tamaki, 1988) 가장자리에 위치한다는 점 때문에, 형성 이후의 급격한 지각 침강의 가능성은 다소 희박하다고 볼 수 있다.

독도 화산군의 정상부에는 탄성파상 IA가 주로 분포한다(Table 2; Fig. 6). 이러한 탄성파상은 천해의 해양작용에 의해 형성된 모래나 자갈과 같은 조립질 퇴적물로 덮여 있음을 지시한다. 이러한 조립질 퇴적물은 화산체가 형성된 후, 해파나 해류 등 천해 해양작용에 장기간 노출되어 정상부가 침식, 파쇄되는 과정에서 산출된 퇴적물 중, 세립질은 재동되어 화산체의 사면을 따라 울릉분지 평원까지 이동되고, 조립질 퇴적물은 잔류되거나 근거리로 이동되어 화산체 정상부를 덮고 있는 것으로 해석된다. 높이 수 m 이하의 해저표면의 기복들은 이러한 조립질 퇴적물에 의해 형성된 거대 연흔, 모래과 등의 다양한 퇴적면 구조에 의한 것으로 보인다.

독도와 독도해저산의 사면 지역에서는 주로 탄성파상 IIIA와 국지적으로 탄성파상 IIIC가 분포한다(Table 2; Fig. 6). 사면의 상부(수심 <math><1,500\text{ m}</math>)는 기복이 비교적 적고 축선을 따라 경사가  $7\sim 8^\circ$ 로 급경사의 특성을 보인다. 반면에 수심  $1,500\sim 2,100\text{ m}$  사이의 하부사면은 최대  $180\text{ m}$  높이의 불규칙한 화산돌출지형들이 쌍곡선 반사파나 첨예한 표면반사파로서 나타나며, 이들 화산지형 사이에는 다양한 규모의 해저협곡이 발달되어 있다(Fig. 3). 이들 화산돌출지형들은 급경사의 특성 때문에 퇴적물이 집적되지 않고 그냥 통과되어 거의 암반으로 노출되어 있지만, 사면의 말단부에서는 점차 경사가 완만해지면서 퇴적물에 의해 피복되어 있는 경우가 많다. 화산체 정상부에서 공급되는 퇴적물은 사면에 돌출지형들이 많기 때문에 주로 해저협곡이나 계곡을 따라 이동되었을 것으로 보인다. 이들 퇴적물 통로에서는 암설류나 저탁류 같은 퇴적물 증력류들이 빈번하게 발생했을 것으로 해석되며, 실제 해저협곡의 말단에는 암설류 퇴적체가 관찰된다(Fig. 6).

한편, 화산체 사면의 일부 지역에서는 암석낙하(rock fall)가 빈번히 일어났던 것으로 보인다. 즉, 화산체 사면에 부분적으로 관찰되는 탄성파상 IIIC(Fig. 6, 7B)가 이를 반영한다. 탄성파상 IIIC의 쌍곡선반사파는 화산돌출지형에 의한 탄성파상 IIIA의 쌍곡선 반사파와 내부가 확산되어 나타난다는 점에서 유사하므로, 퇴적층이 아닌 암반 또는 암석에 의한 불규칙한 돌출지형에 의한 것으로 추정된다. 탄성파상 IIIC는 일반적으로 해저사태나 암설류와 같은 퇴적물 질량류와 관계 있는 것으로 알려져 있으나, 독도 화산군에서는 그 분포범위가 좁고 국지적이며 해저협곡이나 수로와는 무관하게 발달되며 하부사면으로의 연장성이 좋지 않기 때문에 이와는 다른 퇴적체로 해석된다. 특히, 높이와 분포양상이 화산돌출지형보다는 작고, 분포가 화산체 사면의 일부로 제한되어 있어서 암석낙하에 의한 것으로 해석된다(Chough *et al.*, 1985). 즉, 화산체를 이루고 있는 화산암들의 일부가 붕괴되면서 경사면을 따라 굴러 떨어지다가 사면의 안정된 부분에 집중적으로 모여 있는 테일러스로 추정된다.

독도 화산군의 사면말단에는 탄성파상 IIC로 대표되는 대규모의 암설류 퇴적체가 여러 곳에서 관찰된다(Fig. 6). 이들 퇴적체들은 여러 개의 퇴적단위로 구분되며, 누적된 암설류 퇴적체 사이에는 탄성파상 IIA로 분류되는 반원양성 퇴적물이 우세한 퇴적층이 협제되어 있다. 이는 암설류 퇴적체의 집적이 연속적이지 않고 상당기간의 휴지기가 있음을 반영한다. 암설류 퇴적체의 표층에는

다시 탄성파상 IIA로 분류되는 퇴적층이  $10\sim 20\text{ m}$  두께로 쌓여 있다. 탄성파상 IIA는 반원양성퇴적물과 간헐적인 저탁류 퇴적물이 교호함을 반영하는 것으로서, 암설류 퇴적체가 집적된 후, 상당기간 통상적인 반원양성 퇴적상태가 유지되었고, 아울러 가장 표층의 암설류 퇴적체도 집적된 후 상당기간이 경과되었음을 지시한다. 한편, 독도해저산 남쪽의 대규모 암설류 퇴적체는 단일 퇴적체의 두께가 남쪽으로 갈수록 더 두꺼워지는 경향이 있는데, 암설류의 근원지는 독도해저산이 아닌 남동쪽의 오키벡크로 추정된다.

화산체 사면의 말단에는 탄성파상 IIC를 보이는 암설류 퇴적체가 나타나기도 하지만 전체적으로는 탄성파상 IIA가 우세하게 발달하여(Figs. 6, 7C, 7D) 반원양성 퇴적물과 저탁류 퇴적물이 교호하는 지층양상을 지시한다. 다만 탄성파상 IIA의 특성이 울릉분지 중심부에서는 내부반사파가 비교적 평행하게 나타나는데 비해, 이곳 사면에서는 평행하지 않고 퇴적층리의 두께가 변화되고 있음을 보여준다. 이러한 퇴적층리 두께 변화는 사면에서의 사태 등에 의한 침식이나 소규모 질량류 퇴적층이 부분적으로 협제되는 데에 기인한 것으로 추정된다.

울릉분지 평원과 해저수로 발달 지역에서는 탄성파상 IIA가 우세하게 분포한다(Table 2; Fig. 6). 이러한 탄성파상은 간헐적인 저탁류 퇴적물을 포함하는 반원양성 퇴적물이 우세하게 집적되어 있음을 지시한다. 따라서 해저수로를 통한 저탁류의 퇴적물 운반활동은 그다지 왕성하지 않으며, 수로 내 퇴적물의 집적량도 수로 주변지역에 비해 크지 않은 것으로 추정된다.

## 결론

본 연구에서 분석된 고해상 탄성파 특성은 해저표층과 그 하부의 저층에서 오는 반사파들의 명확성 또는 반사강도, 축면연속성, 형태, 그리고 해저지형 등을 기준으로 하여 그 특성이 서로 다른 5개의 탄성파상으로 분류된다. 화산체의 지형과 탄성파상의 분포는 상대적 해수면이 낮았던 시기에 해수면 가까이에서 해파나 해류 등의 천해 해양작용에 의해 화산체 정상부가 침식되어 평탄하게 되었고, 이로부터 생성된 퇴적물은 주로 화산체 사면에 발달된 해저협곡이나 계곡을 따라 암설류 및 저탁류의 형태로 사면의 말단부와 울릉분지 평원으로 이동되었음을 지시한다. 그리고 일부 화산암반은 붕괴되면서 사면의 일부에 테일러스로서 집적되었다. 그러나 전체적으로는 독도 자체에서 발생하는 퇴적물의 양이 그리 많지 않았고 사면의 경사가 비교적 급하며 퇴적물 이동이 주로 협곡이나 화산돌출부 사이의 계곡 등 제한된 통로를 따라 이루어졌기 때문에 대부분의 화산체 사면은 퇴적물 피복이 매우 적은 것으로 보인다. 한편 오키벡크로부터도 대규모의 암설류에 의해 빈번하게 퇴적물이 공급되어 독도해저산 남쪽에 두꺼운 퇴적체를 집적시켰다. 울릉분지평원에는 다수의 해저수로 발달에도 불구하고, 간헐적인 저탁류의 영향을 받는 통상적인 반원양성 퇴적이 우세하게 일어났던 것으로 보인다.

## 사사

본 연구는 1998년 한국해양연구원 '동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구(2차년도)' 사업(BSPE 98709-00-1136-5)의

일환으로 수행되었습니다. 탄성과 자료 취득에 도움을 주신 은누리호 승무원 여러분과 한국해양연구원 해양환경·기후연구본부 관계자들에 감사 드립니다. 아울러 본 논문을 심사해주시고 유익한 조언을 주신 두 분 심사위원께도 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 김윤규, 이대성, 이경호, 1987. 독도 화산암의 분별결정작용. 대한지질학회지, **23**: 67-82.
- 대한지질학회, 1999. 한국의 지질. 시그마프레스, 802 pp.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환, 1982. 한국 남부의 백악기말 이후 화성활동과 광화작용의 판구조론 적용성 연구. 대한지질학회지, **24**(특): 11-40.
- 윤석훈, 이희준, 한상준, 김성렬, 1996. 동해 대륙사면(삼척-양양)에서의 제 4기 퇴적작용. 대한지질학회지, **32**: 250-266.
- 윤형대, 1986. 한국 울릉도의 알칼리 마그마의 기원과 지화학적 특징. 서울대학교 대학원, 박사학위논문, 172 pp.
- 최동립, 김성렬, 유해수, 석봉출, 한상준, 최진혁, 1989. 동해 대륙연변부의 천부탄성과 특성. 해양연구, **11**: 15-27.
- 한국해양연구소, 1996. 한국 대수심 해역의 지구조적 해저환경 연구(2-3차년도). 한국해양연구소, BSPN00321-950-5, 548 pp.
- 한국해양연구소, 1997. 동해분지의 해양환경 변화와 지구조 진화 연구(1차년도). 한국해양연구소, BSPE97605-00-1037-5, 657 pp.
- 한상준, 김한준, 허식, 박찬홍, 김성렬, 이용국, 유해수, 최동립, 박병권, 1997a. 동해 울릉분지 북동부(울릉도와 독도 주변) 해역의 분지구조. 대한지질학회지, **33**: 127-138.
- 한상준, 허식, 박장준, 천종화, 김석현, 우한준, 이희준, 홍기훈, 신동혁, 이희일, 1997b. 동해 울릉도와 독도 주변 울릉분지 북동해역의 고해양환경 연구. 해양연구, **19**: 71-90.
- Chough, S.K., K.S. Jeong and E. Honza, 1985a. Zoned facies of mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, **65**: 113-125.
- Chough, S.K., H.J. Lee and S.H. Yoon, 2000. Marine Geology of Korean Seas. Elsevier, Amsterdam, 313 pp.
- Chough, S.K., D.C. Mosher and S.P. Srivastava, 1985. Ocean Drilling Program (ODP) site survey (Hudson 84-30) in the Labrador Sea: 3.5 kHz profiles. Geological Survey of Canada, Paper, **85-1B**: 33-41.
- Chough, S.K., S.H. Lee, J.W. Kim, S.C. Park, D.J. Yoo, H.S. Han, S.H. Yoon, S.B. Oh, Y.B. Kim and G.G. Back, 1997. Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geosciences Journal*, **1**: 143-153.
- Damuth, J.E., 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Mar. Geol.*, **18**: 17-45.
- Damuth, J.E., 1978. Echo character of the Norwegian-Greenland Sea: relationship to Quaternary sedimentation. *Mar. Geol.*, **28**: 1-36.
- Damuth, J.E., 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar. Geol.*, **38**: 51-75.
- Damuth, J.E. and D.E. Hayes, 1977. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Mar. Geol.*, **24**: 73-95.
- Embley, R.W., 1976. New evidence for occurrence of debris flow deposits in the deep sea. *Geology*, **4**: 371-374.
- Embley, R.W. and R.D. Jacobi, 1977. Distribution and morphology of large submarine sediment slides and slumps on Atlantic continental margins. *Mar. Geotech.*, **2**: 205-228.
- Ewing, M., R.W. Embley and T.H. Shipley, 1973. Observations of shallow layering utilizing the pinger-probe echo sounding system. *Mar. Geol.*, **14**: 55-63.
- Haq, B.U., J. Hardenbol and P.R. Vail, 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*, edited by Wilgus, C.K., B.S. Hastings, C.G. St. C. Kendall, H.W. Posamentier, C.A. Ross and J.C. Van Wagoner, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, **42**: 71-108.
- KORDI, 1996. Basin Structures and Past Changes in the East Sea, Korea (BASAPES-95/96). *Korea Ocean Research and Development Institute Report*, BSPN00321-950-5, 548 pp.
- KORDI, 1997. Marine Environment Changes and Basin Evolution in the East Sea, Korea (MECBES-97). *Korea Ocean Research and Development Institute Report*, BSPE97605-00-1037-5, 657 pp.
- LeBlanc, L.R., L.A. Mayer, M. Rufino, S.G. Schock and J. King, 1992. Marine sediment classification using the chirp sonar. *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**: 107-115.
- Lee, H.J., S.K. Chough, S.S. Chun and S.J. Han, 1991. Sediment failure on the Korea Plateau slope, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, **97**: 363-377.
- Lee, H.J., S.S. Chun, S.H. Yoon and S.R. Kim, 1993. Slope stability and geotechnical properties of sediment of the southern margin of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Mar. Geol.*, **110**: 31-45.
- Lee, K.E., 1992. Geological Structure of Ulleung Back-Arc Basin, East Sea. MS Thesis, Seoul National University, Seoul, 121 pp.
- Mayer, L., 1979. The origin of fine-scale acoustic stratigraphy in deep-sea carbonates. *J. Geophys. Res.*, **84**: 6177-6184.
- Mayer, L., 1980. Deep-sea carbonates, physical-property relationships, and the origin of high-frequency acoustic reflectors. *Mar. Geol.*, **38**: 165-183.
- Mullins, H.T., M.R. Bordman and A.C. Neumann, 1979. Echo character of off-platform carbonates. *Mar. Geol.*, **32**: 251-268.
- Nardin, T.R., F.J. Hein, D.S. Gorsline and B.D. Edwards, 1979. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basin floor systems. In: *Geology of Continental Slopes*, edited by Doyle, L.J. and O.H. Pilkey, *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, **27**: 61-73.
- Panda, S., L.R. LeBlanc and S.G. Schock, 1994. Sediment classification based on impedance and attenuation estimation. *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**: 3022-3035.
- Piper, D.J.W., J.A. Farre and A. Shor, 1985. Late Quaternary slumps and debris flows on the Scotian slope. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **96**: 1508-1517.
- Pratson, L.F. and E.P. Laine, 1989. The relative importance of gravity-induced versus current-controlled sedimentation during the Quaternary along the mid-east United-States outer continental-margin revealed by 3.5 kHz echo character. *Mar. Geol.*, **89**: 87-126.

- Reddy, D.R. and T.S. Rao, 1997. Echo characters of the continental margin, western Bay of Bengal, India. *Mar. Geol.*, **140**: 201–217.
- Schock, S.G., LeBlanc, L.R. and Mayer, L.A., 1989. Chirp subbottom profiler for quantitative sediment analysis. *Geophysics*, **54**: 445–450.
- Sohn, Y.K., 1995. Geology of Tok Island, Korea: eruptive and depositional processes of a shoaling to emergent island volcano. *Bull. Volcanol.*, **56**: 660–674.
- Tamaki, K., 1988. Geologic structure of the Japan Sea and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **39**: 269–365.
- Tucholke, B.E., 1980. Acoustic environment of the Hatteras and Nares abyssal plains, western North Atlantic Ocean, determined from velocities and physical properties of sediment cores. *J. Acoust. Soc. Am.*, **68**: 1376–1390.
- Yoon, S.H., S.K. Chough, J. Thiede and F. Werner, 1991. Late Pleistocene sedimentation on the Norwegian continental slope between 67°N and 71°N. *Mar. Geol.*, **99**: 187–207.

---

2001년 4월 4일 원고접수

2001년 5월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 김대철

신속게재