

# 우주선유발 동위원소를 이용한 한반도 암석해안 발달과 침식에 대한 수치모형연구: 서해안 둔두리 파식대, 동해안 독도 파식대를 사례로

정아라<sup>1,\*</sup> · 성영배<sup>2</sup> · 최광희<sup>3</sup> · 이초희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 미래국토연구소

<sup>2</sup>고려대학교 지리교육과

<sup>3</sup>가톨릭관동대학교 지리교육과

## 요 약

기후변화와 인간 간섭으로 인해 해안의 범람과 침식 위험도가 증가하여 해안 침식 연구의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 서해안 둔두리 파식대와 동해안 독도 파식대를 따라 나타나는 우주선유발 동위원소의 농도 분포를 이용한 수치 모형을 통해 장기간 평균 해안 후퇴율을 모의하고, 해식에 후퇴-파식대 발달시기를 추정하고자 하였다. 이론적으로 지난 홀로세 해수면 상승시기 동안 형성된 파식대의 경우 파식대를 따라 동위원소 농도 분포가 후 형태로 나타나며, 현재 파식대 일부가 지난 간빙기로부터 유전되었을 경우, 과거 해식에 위치에서 농도가 급증하는 계단 형태를 보인다. 또한 해식에 후퇴율이 빠르면 동위원소 농도는 낮게, 후퇴율이 느리면 농도는 높게 나타난다. 모의 결과, 둔두리 파식대는 72-150 m 구간에서 동위원소 농도가 홀로세 구간 평균의 11배 높게 나타나 파식대의 일부가 지난 간빙기에 유전된 것이라고 추정되며, 산정된 해식에 후퇴율은 약 0.6-12 mm/yr이다. 반면, 독도 파식대의 경우 농도가 급증하는 구간이 없어, 홀로세 해수면 상승시기 동안에만 형성된 것으로 추정되며, 산정된 후퇴율은  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr이다.

**주요어:** 암석해안, 해안침식, 해안후퇴, 수치모형, 우주선유발 동위원소

**Ara Jeong, Yeong Bae Seong, Kwang Hee Choi and Cho Hee Lee, 2021, A numerical model study for simulation of rocky coast evolution and erosion using cosmogenic nuclides: A case study along the Dunduri and Dokdo shore platform in Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 195-207**

**ABSTRACT:** The current and future climate change and human interventions would increase flood and erosion risk in coastal areas, and thus more coastal erosion studies are needed. Here, we used cosmogenic nuclide concentrations along the Dunduri and Dokdo shore platform in Korea combined with numerical modelling to quantify cliff retreat rate and to reconstruct the timing of initial cliff retreat and the evolution of shore platform. Theoretically, the hump in nuclide concentrations is resulting from the interplay between cliff retreat and water shielding by rising sea level. If a portion of the platform inherited from last interglacial, a sharp increase in cosmogenic nuclide concentrations at the past cliff position is expected, reflecting the nuclide accumulation on exposed shelf during sea level lowstand in last glacial. Also, faster cliff retreat leads to lower nuclide concentrations. The results of our numerical modelling show that a portion of Dunduri platform inherited from last interglacial due to elevenfold increase in nuclide concentrations, and calculated cliff retreat rate is about 0.6-12 mm/yr. Dokdo platform, however, no abrupt change in nuclide concentrations is observed, thus the platform was entirely formed during the Holocene, and calculated cliff retreat rate is about  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr.

**Key words:** rocky shore, coastal erosion, coastal retreat, numerical model, cosmogenic nuclide

(Ara Jeong, Research Institute of Future Land, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea; Yeong Bae Seong, and Cho Hee Lee, Department of Geography Education, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea; Kwang Hee Choi, Department of Geography Education, Catholic Kwandong University, Gangneung 25601, Republic of Korea)

\* Corresponding author: +82-2-3290-2360, E-mail: [ara0408@korea.ac.kr](mailto:ara0408@korea.ac.kr)

## 1. 서 론

기후변화로 인한 한반도의 해수면 상승 속도는 세계 평균 상승 속도보다 빠르고(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2020), 한반도에 영향을 미치는 태풍의 강도 또한 증가하는 추세다(Korea Meteorological Administration, 2020). 이로 인해 해안의 범람과 침식 위험도가 증가할 것으로 예상되며, 이에 국토 손실 범위를 파악하고, 국민의 안전한 삶을 보장하기 위해 해안 침식 연구에 대한 필요성이 증대되고 있다.

우리나라 해안지역 연구는 주로 퇴적 해안을 중심으로 이루어져 왔다(Kim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2014; Yi *et al.*, 2015; Yoon and Chun, 2019). 퇴적 해안은 암석해안에 비해 그 변화속도가 빨라 짧은 기간 동안의 측정이 쉽고, 야외 연구환경 또한 접근이 용이하기 때문에, 해안 후퇴율 산정 또한 주로 사빈해안을 중심으로 수행되었다. 그 방법으로는 침식 기준목을 활용하거나(Kim and Song, 2012) 평형해빈단면이론으로 계산하거나(Son, 1999; Kang *et al.*, 2014) 항공사진을 통해 해안선 변화를 관찰하는 방식(Cho *et al.*, 2001; Jung *et al.*, 2004; Kim, 2013; Kim and Lee, 2015)이 흔히 사용되었다. 반면, 전세계 해안의 약 75%를 암석해안이 차지하고(Emery and Kuhn, 1982), 우리나라 또한 동·서·남해안 모두 암석해안이 잘 발달해 있음에도(Choi and Seong, 2014), 우리나라 암석 해안의 형태적 특징이나 발달 과정에 대한 연구는 많지 않으며(Hwang and Park, 2007; Choi *et al.*, 2013; Choi, 2015; Hwang *et al.*, 2019), 그 중 암석 해안의 후퇴율을 산

정한 연구는 매우 소수이다(Woo and Jang, 2010; Kim and Jang, 2011, 2013; Choi *et al.*, 2012; Kim, 2017, 2018; Choi and Seong, 2020). 암석해안 후퇴율 연구도 사빈해안에서와 마찬가지로 수개월-수년 정도의 짧은 시간 규모에서 침식기준목을 이용하거나(Kim and Jang, 2013), 무인항공기를 활용한 이미징 분석(Kim, 2017, 2018)을 통해 이루어졌다. 수십 년 정도의 시간 규모에서는 항공사진과 지도 분석이 활용되었다(Lim *et al.*, 2009; Woo and Jang, 2010). 그러나 같은 지역을 대상으로 하였더라도 관찰기간이나 방법에 따라 산정된 후퇴율은 상당히 큰 차이가 나타난다(표 1). 이것은 모암의 침식저항도가 국지적으로 다르고 관찰기간 동안 발생하는 태풍이나 악기상의 강도와 빈도에 따라 해식애의 침식이 불규칙하게 일어나기 때문이다(Kim, 2018). 이 경우, 일시적 사건의 영향이 짧은 관측 기간으로 과장되어 해안 후퇴율이 과대 추정되는 문제가 발생할 수 있다(Choi *et al.*, 2013; Swirad *et al.*, 2020). 따라서 미래 해수면 상승에 따른 해안 후퇴과정을 모의·예측할 때, 어떤 후퇴율을 입력 자료로 사용할 것인가에 대하여 주의 깊게 고려해야 한다. 정확한 기준 후퇴율이 마련되어야 현재의 기후변화와 인간 간섭에 의한 해안 후퇴가 가속화된 것인지 여부를 정확히 평가할 수 있다. 가장 이상적인 기준은 '인간의 간섭으로부터 자유로운', '장기간 평균' 후퇴율이 되어야 할 것이다. 예를 들어 Hurst *et al.* (2016)은 영국 서섹스 동부 지방의 해식애 후퇴율이 지난 홀로세 동안 2-6 cm/yr인 반면, 지난 150년 동안의 고지도 분석에서 획득한 후퇴율은 22-32 cm/yr로 현대로 올수록 후퇴율이 증가했다는 사실을 확인하였다. 위의

**Table 1.** Previously measured modern retreat rates of sea cliff in Dunduri on the west coast of Korea.

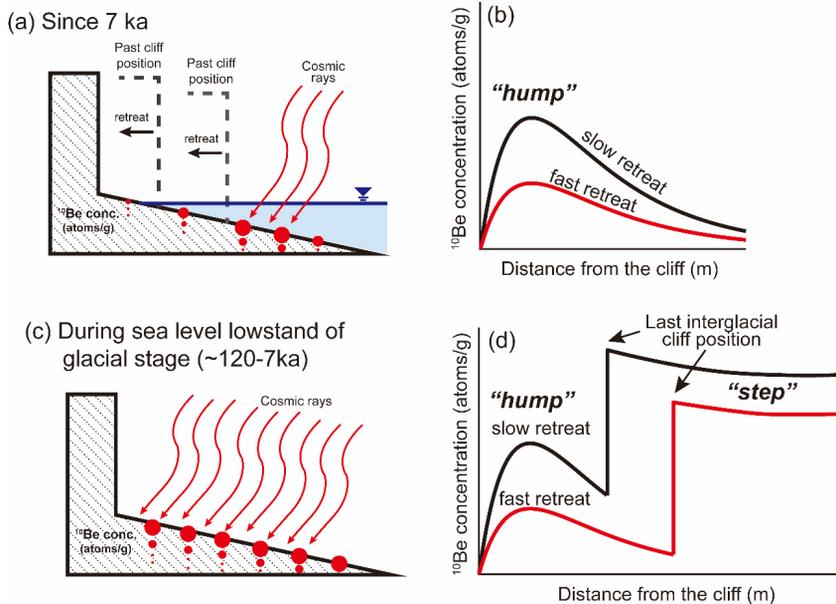
	Measurement period	Retreat rate (cm/yr)	Method
Woo and Jang (2010)	About 40 years (1967-2009)	26-36	Image analysis with multi-temporal aerial photograph data with field survey for recent years
Kim and Jang (2013)	About 3 years (2010-2013)	25-102	Field monitoring
Kim (2017)	About 5 months (2016-2017)	43.2	Monitoring with Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
Kim (2018)	About 18 months (2016-2018)	9.3	Monitoring with Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

이상적 기준을 충족시키는 것은 매우 어렵지만, 장 반감기를 가진 우주선유발 동위원소는 그 기록을 지니고 있기 때문에(Jeong *et al.*, 2018) 이를 활용한다면, ‘인간의 간섭으로부터 자유로운’, ‘장기간 평균’ 후퇴율을 구할 수 있다.

우주선유발 동위원소를 활용한 암석해안의 후퇴율 산정 연구는 Choi *et al.* (2012)과 Regard *et al.* (2012)이 처음 시도한 이후로, 많은 연구자들에 의해 발전되어 왔다(Hurst *et al.*, 2016, 2017; Choi and Seong, 2020; Swirad *et al.*, 2020; Dauget *et al.*, 2021). 그 원리를 살펴보면, 먼저 우주선유발 동위원소는 지표면이 무엇인가에 달리지 않고, 노출되어 있을 때 생성되어 축적된다. 해식애가 후퇴하면서 파식대가 확장되는 지형 시스템에서의 경우, 해식애가 지속적으로 후퇴하므로, 동위원소 농도는 바다 쪽 파식대 부분에서 가장 높아야 하며, 해식애에 가려져 있다가 해식애의 후퇴로 최근에 노출된 육지 쪽 파식대 부분의 농도는 낮게 나타난다(그림 1a). 그러나 바다 쪽 파식대는 확장과정에서 나타나는 침식으로 인해 표면이 깎이고, 해수면이 상승하면서 바닷물에 의해

우주선이 파식대 표면에 도달하는 것에 방해받기 때문에 최종적으로는 그림 1b에서와 같이 파식대를 따라 나타나는 동위원소 농도 분포가 가운데 부분이 불룩한 혹 형태로 나타난다(Regard *et al.*, 2012; Hurst *et al.*, 2017). 한편, 파식대의 일부가 지난 간빙기로부터 유전(inheritance)되었다면, 우주선 유발 동위원소 또한 유전되고, 빙기동안에도 동위원소가 파식대 표면에 축적되므로(그림 1c), 그림 1d에서와 같이 동위원소 농도 분포가 과거 빙기 때 해식애 위치에서 급증하는 계단 형태를 보인다(Regard *et al.*, 2012). 우주선유발 동위원소의 농도는 표면에서 가장 높고, 우주선이 매질을 통과하면서 감소하기 때문에, 깊이가 깊어질수록 우주선유발 동위원소의 농도는 감소한다(Lal, 1991; Seong and Yu, 2014). 해식애가 후퇴할 때 경사를 유지하며 후퇴율에 비례하여 하방침식(downwearing)이 발생하므로(Trenhaile, 1974), 우주선유발 동위원소 농도는 후퇴율이 빠르면 낮게, 후퇴율이 느리면 높게 나타난다.

우주선유발 동위원소를 활용한 국내 암석해안 연구는 Choi *et al.* (2012)의 서해안 둔두리 파식대, Choi

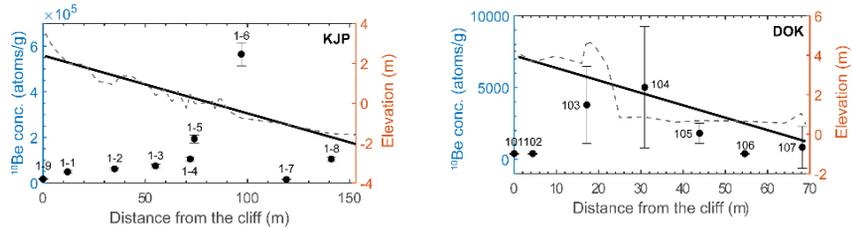


**Fig. 1.** Sea cliff-shore platform evolution and the distribution of  $^{10}\text{Be}$  concentration along the shore platform (Regard *et al.*, 2012). (a) Rapid retreat of sea cliff during slow sea level rise since 7-ka BP. (b) The hump in  $^{10}\text{Be}$  concentrations resulting from the interplay between cliff retreat and water shielding by rising sea level. (c) Minimal cliff retreat during sea level lowstand of glacial stage. (d) The sharp increase in  $^{10}\text{Be}$  concentrations reflecting the  $^{10}\text{Be}$  accumulation on exposed shelf during sea level lowstand in last glacial. Thus, the step section in  $^{10}\text{Be}$  concentrations shows a portion of the platform inherited from last interglacial.

**Table 2.** Basic information about the input variables of Dunduri and Dokdo platform.

	Dunduri platform (KJP1)	Dokdo platform (P3)
Reference	Choi <i>et al.</i> (2012)	Choi and Seong (2020)
Platform width	153 m	69 m
Platform gradient	1.8°	3.6°
Exposure ages	~148 ka	~1.27 ka
Bedrock density	2.7 g/cm <sup>3</sup>	2.8 g/cm <sup>3</sup>
Water density	1.024 g/cm <sup>3</sup>	
Attenuation factor	160 g/cm <sup>2</sup>	
P <sub>0</sub>	4.009 atoms/g (Lifton <i>et al.</i> , 2014)	

Platform profile<sup>a</sup>



<sup>a</sup> Dashed line represents real platform profile and solid line represents the least-squares regression line of the real platform profile.

and Seong (2020)의 동해안 독도 파식대 연구가 있다. Choi *et al.* (2012)은 <sup>10</sup>Be 노출연대를 통해 둔두리 파식대 일부가 지난 간빙기로부터 유전되었다고 보고하였고, Choi and Seong (2020)은 <sup>36</sup>Cl 노출연대를 통해 독도 파식대의 형성시기가 0.1 ka에서 4.0 ka임을 밝혔다. 본 연구에서는 Choi *et al.* (2012)와 Choi and Seong (2020)의 우주선유발 동위원소 자료를 바탕으로 파식대를 따라 나타날 수 있는 우주선유발 동위원소 농도 분포를 모의한 Regard *et al.* (2012)의 수치모형을 가지고, 1) 둔두리 파식대와 독도 파식대가 홀로세 해수면 상승기 동안에만 형성된 것인지, 지난 간빙기에 형성된 파식대가 유전되어 현재 파식대의 일부를 형성하고 있는지를 파악하고, 2) 지질학적 시간 범위를 대표하는 장기간 평균 후퇴율을 산정하고자 하였다.

**2. 연구방법**

본 연구에서는 Regard *et al.* (2012)의 수치모형을 바탕으로 둔두리와 독도 파식대를 따라 나타나는 우주선 유발 동위원소 <sup>10</sup>Be 농도를 모의하였다. 이 때, 전제조건은 다음과 같다. 1) 해식애의 후퇴율은 일정함, 2) 조수에 의한 영향은 고려하지 않음, 3) 파식

대 확장시 파식대 경사는 유지되며, 파식대의 하방 침식률은 해식에 후퇴율에 비례함(Trenhaile, 1974), 4) 파식대 프로파일은 최소제공회귀를 이용해 선형으로 단순화시킴(표 2), 5) 시간에 따른 <sup>10</sup>Be의 생성률은 일정함.

독도 파식대는 <sup>36</sup>Cl 농도를 바탕으로 노출연대와 파식대의 침식률이 보고된 반면(Choi and Seong, 2020), Regard *et al.* (2012)의 수치모형은 <sup>10</sup>Be 농도를 바탕으로 하기 때문에 <sup>10</sup>Be 농도로 환산하는 과정을 거쳐 모의하였다.

**2.1 파식대 침식률로부터 <sup>10</sup>Be 농도 환산**

Choi and Seong (2020)은 독도의 서도, 동도, 부속도서에 나타나는 파식대를 따라 <sup>36</sup>Cl 농도를 바탕으로 파식대의 침식률을 계산했다(표 3). 침식률을 알고 있다면, Lal (1991)의 식 11에 의해 아래와 같이 <sup>10</sup>Be 농도로 환산하는 것이 가능하다.

$$N_{10} = \frac{P_{10}}{\lambda \rho_r \epsilon_{36} + \lambda_{10}} \tag{1}$$

여기서  $N_{10}$ 은 <sup>10</sup>Be 농도(atoms/g),  $P_{10}$ 은 해당 시료 채취 지점의 <sup>10</sup>Be 생성률(atoms/g),  $\rho_r$ 은 기반암

**Table 3.** Results of calculated <sup>10</sup>Be concentration using erosion rate of Dokdo shore platform (Choi and Seong, 2020).

	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Distance from the cliff (m)	Erosion rate (cm/yr)	Total <sup>10</sup> Be Production <sup>a</sup> (atoms/g)	Calculated <sup>10</sup> Be concentrations <sup>b</sup> (atoms/g)
DOK101	37.239	131.864	0.79	0	0.26±0.46	4.079	832.8±1467.3
DOK102	37.239	131.864	0.36	4.4	0.55±0.05	4.059	394.2±39.4
DOK103	37.239	131.864	0.39	17.2	0.12±0.05	4.059	1812.0±709.1
DOK104	37.239	131.864	0.57	30.9	0.04±0.04	4.069	5022.3±4231.4
DOK105	37.239	131.864	4.23	43.9	0.06±0.04	4.07	3795.2±2688.3
DOK106	37.239	131.864	3.66	54.6	0.55±0.05	4.07	394.7±39.5
DOK107	37.239	131.864	3.95	68.2	0.55±0.05	4.06	393.8±39.4

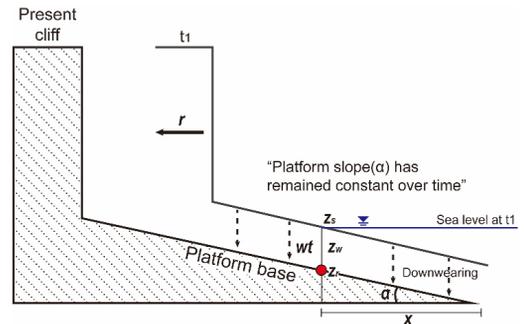
<sup>a</sup> The total <sup>10</sup>Be production rate was calculated with CRONUS Web calculator v2.2 (Balco *et al.*, 2008) using the geographic information about sampling points.

<sup>b</sup> The <sup>10</sup>Be concentrations were calculated using equation 1.

밀도(g/cm<sup>3</sup>),  $\lambda$ 는 감쇠계수(g/cm<sup>2</sup>),  $\epsilon_{36}$ 은 <sup>36</sup>Cl 농도로부터 계산된 시료 채취 지점의 침식률(Choi and Seong, 2020),  $\lambda_{10}$ 은 <sup>10</sup>Be의 붕괴상수( $4.997 \times 10^{-7}$  yr)이다. <sup>10</sup>Be 생성률은 시료 채취 지점의 경위도와 고도 자료(표 3)를 이용하여 CRONUS Web calculator v2.2 (Balco *et al.*, 2008)를 사용하여 계산하였다. 본 연구에서는 우주선유발 농도자료의 개수가 가장 많은 독도 부속도서 넙덕바위 파식대를 대상으로 식 1을 이용하여 <sup>10</sup>Be 농도를 환산하였으며, 환산 농도는 표 2에 나타나 있다. 한편, 넙덕바위 파식대의 현재 해석에는 본섬인 서도로부터라고 판단되지만, 이를 적용할 경우, 해석에 가까운 부분의 고도가 낮고, 바다 쪽의 고도가 높아 고도의 역전현상이 발생하여 모형을 적용할 수 없기 때문에, 넙덕바위 자체에 나타나는 해석예를 원점으로 잡고, 해석예로부터의 거리를 계산하였다. 즉, 본 논문의 모델링의 경우 넙덕바위 자체에 나타나는 해석예를 기준으로 모델링을 수행했다. 향후 모델링 기법이 개선되면 다시 적용할 수 있어야 할 것이다.

## 2.2 Regard *et al.* (2012) 모형

우주선 유발 동위원소는 우주선이 매질을 통과하면서 감쇠하기 때문에 지표로부터 깊이가 깊어질수록 농도는 감소한다(Lal, 1991; Seong and Yu, 2014). 파식대의 경우, 조석의 작용에 따라 해수가 파식대 위로 놓이기 때문에, 위에 쌓인 수층에 의한 우주선의 감쇠가 발생하므로 동위원소 생성량은 다음과 같이 식 2로 표현할 수 있다.



**Fig. 2.** A conceptual model of the platform evolution when cliff retreat rate ( $r$ ) is proportional to downwearing rate ( $w$ ). Red filled circle indicates a sampling point. The downwearing rate is vertically exaggerated.

$$P = P_0 \exp\left(-\left[\frac{z_r}{z_r^*} + \frac{z_w}{z_w^*}\right]\right) \quad (2)$$

여기서  $P$ 는 파식대 시료 채취 지점에서의 <sup>10</sup>Be 생성량(atoms/g),  $P_0$ 는 지표면에서의 <sup>10</sup>Be 생성량(atoms/g),  $z_r$ 은 파식대 표면으로부터 시료채취 지점의 깊이(cm),  $z_r^*$ 은 기반암 매질에 대한 우주선 통과길이(cm)로 감쇠계수  $\lambda$  (g/cm<sup>2</sup>)를 기반암 밀도  $\rho_r$  (g/cm<sup>3</sup>)로 나누어 계산할 수 있다.  $z_w$ 는 파식대 위 수층의 깊이(cm),  $z_w^*$ 는 해수에 대한 우주선 통과길이(cm)로 감쇠계수  $\lambda$  (g/cm<sup>2</sup>)를 해수 밀도  $\rho_w$  (g/cm<sup>3</sup>)로 나누어 계산할 수 있다.

이 모형에서는 해석예가 후퇴할 때 파식대의 경사( $\alpha$ )를 유지하면서, 해석예 후퇴율과 파식대의 하방 침식률이 비례하므로(그림 2), 다음과 같이 식 3으로

**Table 4.**  $^{10}\text{Be}$  concentrations used for modelling Dunduri shore platform (Choi *et al.*, 2012).

	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)	Distance from the cliff (m)	$^{10}\text{Be}$ concentrations (atoms/g)
KJP1-1	36.473	126.330	0.663	12	49012.8±4411.2
KJP1-2	36.473	126.330	-0.397	35	61970.7±5577.4
KJP1-3	36.474	126.330	-0.939	55	74905.6±6741.5
KJP1-4	36.474	126.330	-1.028	72	105138.5±9462.5
KJP1-5	36.474	126.330	-1.356	74	193770.0±17439.3
KJP1-6	36.474	126.330	-2.057	97	564839.2±50835.5
KJP1-7	36.474	126.330	-2.378	119	15463.6±1391.7
KJP1-8	36.474	126.330	-2.844	141	105074.3±9456.7
KJP1-9	36.473	126.330	5.281	0	17279.2±1555.1

표현할 수 있다.

$$w = r \tan \alpha \quad (3)$$

여기서  $w$ 는 파식대 하방침식률(m/yr),  $r$ 은 해식에 후퇴율(m/yr),  $\alpha$ 는 파식대의 평균 경사(rad)이다. 현재 시료채취 지점의 깊이인  $z_r$ 은 고파식대면으로부터 하방침식을 받은 깊이이므로, 파식대 기저부터 고파식대면까지의 높이인  $z_s$ 로부터 시간(t)에 따른 하방침식량  $wt$ 를 뺀 것과 같고, 따라서  $z_r = z_s - wt$ 라고 할 수 있다(그림 2). 파식대는 당시 해수면 수준에서 형성되므로 해당지점 파식대에 닿는 물의 높이는  $z_w = wt$ 로 치환 가능하다(그림 2).

파식대의 형성시기(~7 ka 혹은 ~125 ka)보다  $^{10}\text{Be}$ 의 반감기(1.36 Ma)가 훨씬 길기 때문에(Chmeleff *et al.*, 2010; Korschinek *et al.*, 2010), 방사성 붕괴를 무시할 수 있다고 가정한다면, 식 2는 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = P &= P_0 \exp\left(-\left[\frac{z_s - wt}{z_r} + \frac{wt}{z_w}\right]\right) \\ &= P_0 \exp\left(\frac{-z_s}{z_r}\right) \exp\left(wt \left[\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_w}\right]\right) \end{aligned} \quad (4)$$

위 식을 풀이하는 과정은 Regard *et al.* (2012)에 자세하게 나와 있으므로 본 연구에서는 생략한다. 위의 식을 풀면, 파식대를 따라 나타나는  $^{10}\text{Be}$  농도( $N$ )에 대한 결과를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$N = P_0 \exp\left(-x \tan \frac{\alpha}{z_r}\right) \frac{\beta}{r} \left(\exp\left(\frac{x}{\beta}\right) - 1\right) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\Lambda}{(\rho_r - \rho_w) \tan \alpha} \times 0.01 \quad (6)$$

여기서  $N$ 은  $^{10}\text{Be}$  농도(atoms/g),  $x$ 는 파식대 바다 쪽 끝에서부터 특정 지점까지의 거리(m)이다(그림 2). 둔두리와 독도 파식대를 모의하기 위한  $^{10}\text{Be}$  농도는 표 3과 표 4에서 확인할 수 있으며, 식 5와 6에 투입한 변수들은 표 2에 정리하였다. 최종적으로 MATLAB R2020a를 이용하여 후퇴율 값에 변화를 주며 각 20개의 시나리오를 모의하였다.

최종적으로 베릴륨 농도 측정치와 모의된 베릴륨 농도의 평균 제곱근 오차(RMSE)가 가장 작은 경우를 최량적합(best-fit) 결과로 선택하여 후퇴율을 산정하였다. 다만, Regard *et al.* (2012) 모형은 홀로세 동안 나타날 수 있는  $^{10}\text{Be}$  농도를 모의하므로, 지난 간빙기의 파식대가 유전된 것으로 추정되는 둔두리 파식대의 경우,  $^{10}\text{Be}$  농도 급증 구간을 과거 간빙기 때 해식에 위치로 보고(그림 1), 현재 해식에서부터 지난 간빙기 때 해식에 위치 사이의 구간만을 대상으로 최량 추정값(best estimate)을 후퇴율로 추정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 서해안 둔두리 파식대의 형성시기와 해안 후퇴율

둔두리 파식대의 중단면도에서 베릴륨 농도 분포는 해식에 기저에서부터 72-97 m 지점에서 약 11배의  $^{10}\text{Be}$  농도 급증 구간이 나타난다. 이것은 둔두리

**Table 5.** Result of numerical modelling. The grey shades represent best-fit results with the minimal RMSE.

Dunduri											
N <sub>meas</sub>	Retreat rate (mm/yr)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	RMSE	255182	101504	50970	26958	15426	13278	16176	19910	23306	26210
	Retreat rate (mm/yr)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
	RMSE	28673	30769	32569	34127	35487	36684	37745	38692	39542	40308
N <sub>meas_up</sub>	Retreat rate (mm/yr)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	RMSE	250435	96894	46678	23563	14665	15889	20213	24421	28008	31004
	Retreat rate (mm/yr)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
	RMSE	33517	35645	37464	39036	40406	41611	42677	43628	44481	45251
N <sub>meas_low</sub>	Retreat rate (mm/yr)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
	RMSE	259938	106144	55375	30781	17610	12222	12805	15674	18739	21493
	Retreat rate (mm/yr)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
	RMSE	23876	25926	27696	29235	30581	31768	32822	33763	34608	35371
Dokdo											
N <sub>meas</sub>	Retreat rate (mm/yr)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	RMSE	7771	3517	2384	2022	1921	1913	1936	1970	2005	2038
	Retreat rate (mm/yr)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	RMSE	2069	2096	2121	2144	2164	2182	2198	2213	2227	2239
N <sub>meas_up</sub>	Retreat rate (mm/yr)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	RMSE	7114	3784	3398	3451	3561	3665	3753	3826	3886	3936
	Retreat rate (mm/yr)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	RMSE	3979	4016	4047	4075	4099	4121	4140	4157	4173	4187
N <sub>meas_low</sub>	Retreat rate (mm/yr)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	RMSE	8838	4284	2785	2051	1624	1350	1164	1033	938	869
	Retreat rate (mm/yr)	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	RMSE	816	777	747	724	707	694	683	675	670	665

Note: N<sub>meas\_up</sub> represents the upper error bounds of measured <sup>10</sup>Be concentrations, and N<sub>meas\_low</sub> represents the lower error bounds of measured <sup>10</sup>Be concentrations.

파식대가 지난 간빙기에 형성되었음을 의미한다(그림 3). 즉, 지난 빙기 이전에 형성되었던 해식에 위치는 72-97 m 지점이며, 72-153 m는 지난 간빙기 또는 그 이전에 형성되어 유전된 부분이다. 홀로세에 형성된 파식대는 현재 해식의 기저로부터 72 m 지점 까지라고 할 수 있다. 홀로세 동안 형성된 부분이라고 추정되는 0-72 m 구간에 포함되는 0 m, 12 m, 35 m, 55 m 지점에서 측정된 <sup>10</sup>Be 농도와 수치모형 모의결과 최량 추정 후퇴율은 0.6<sup>+0</sup><sub>-0.1</sub> mm/yr로 나타났다(그림 3; 표 5).

### 3.2 동해안 독도 파식대의 형성시기와 해안 후퇴율

독도 파식대는 둔두리 파식대와 달리 <sup>10</sup>Be 농도 급증 구간이 나타나지 않으며(그림 4), <sup>10</sup>Be 농도 자체가 둔두리 파식대보다 최대 1,400배 낮은 것으로 보아 지난 간빙기로부터 유전되지 않고, 홀로세 동안 형성된 것으로 추정된다. 파식대 길이가 69 m로 짧기 때문에(표 2), 모의한 결과가 <sup>10</sup>Be가 증가하다 감소하는 후 형태가 아니라 증가하는 부분만 나타나는 것으로 보인다(그림 4). 전체 파식대가 홀로세 때 형성된 것으로 추정되므로 모든 지점의 측정된 <sup>10</sup>Be

농도와 수치모형 모의결과를 비교하였을 때, 최량 추정 후퇴율은  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr로 나타났다(그림 4; 표 5).

4. 토 의

4.1 수치모형 모의결과 평가

독도 파식대의 최량 추정 후퇴율은  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr

로, 이를 기준으로 했을 때, 69 m인 독도 파식대의 최대 노출연대를 계산하면,  $1.15^{+1.15}_{-0.81}$  ka로 Choi and Seong (2020)이 보고한  $^{36}\text{Cl}$  노출연대인  $1.27 \pm 1.07$  ka와 잘 일치한다. 한편, 둔두리 파식대의 최량 추정 후퇴율  $0.6^{+0}_{-0.1}$  mm/yr를 적용하여 과거 해식대의 위치로 추정되는 72 m의 형성시기를 계산하면 120 ka 때 도달하므로(그림 5a), 모순되는 결과를 보여준

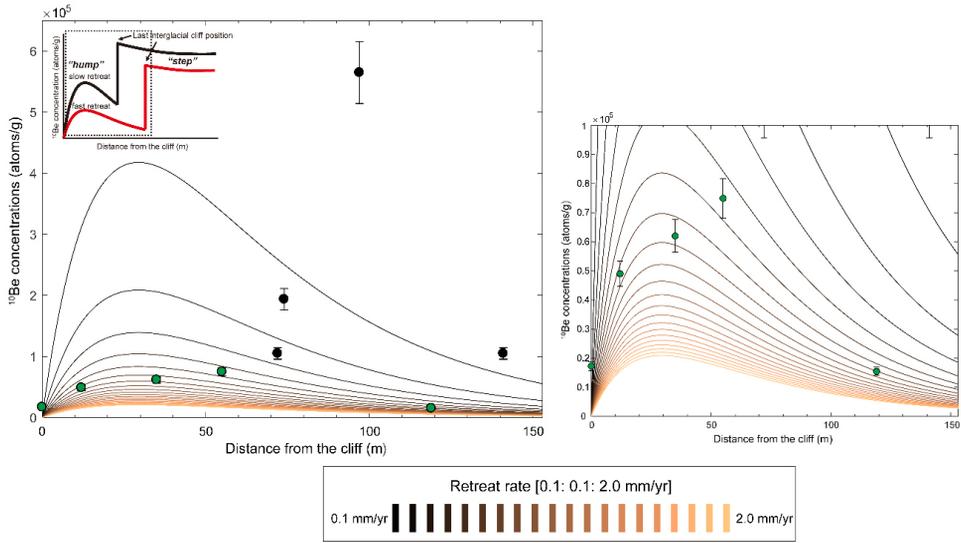


Fig. 3. The distribution of measured and modelled  $^{10}\text{Be}$  concentrations across Dunduri shore platform. Note for the scale of y axis.

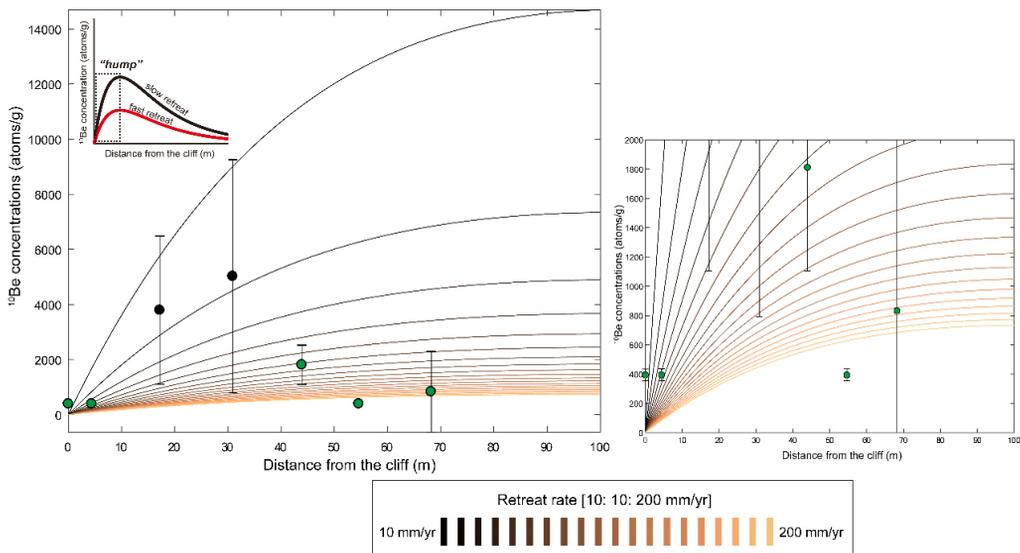


Fig. 4. The distribution of measured and modelled  $^{10}\text{Be}$  concentrations across Dokdo shore platform. Note for the scale of y axis.

다. 만약 0-72 m 구간이 현재 해수면 수준인 6-7 ka 동안 형성되었다는 가정에서, 후퇴율을 계산하면 10.3-12 mm/yr이 도출된다(그림 5b). 독도 파식대의 모의 결과가 기존 조사 결과와 잘 일치하는 반면, 둔두리 파식대의 경우 모의 결과는 이 파식대가 지난 간빙기로부터 유전되었음은 보여주지만(Choi *et al.*, 2012), 모의된 후퇴율은 논란의 여지가 있다. 즉, 산정된 후퇴율은 모의 결과 획득한 최량 추정 후퇴율과 과거 해식에 위치로부터 구한 후퇴율이 크게 다르다. 이러한 차이가 발생한 이유는 본 연구에서 사용된 수치 모형의 전제 조건 중 일부가 성립되지 않기 때문일 것이다. 예를 들어, 영국 서섹스 동부 지방 해식의 흘로세 동안 후퇴율보다 지난 150년 동안의 후퇴율이 빠른 것은(Hurst *et al.*, 2016) 후퇴율이 현재로 올수록 빨라질 수 있을 가능성을 암시한다(Swirad *et al.*, 2020). 또한 서해안은 동해안에 비해 조차가 크기 때문에 조수에 의한 차폐(shielding) 효과에 의해  $^{10}\text{Be}$  생성률 변화가 동해안보다 더 클 수 있다. 따라서 후속 연구에서는 조수에 의한 영향을 고려하여 모의한다면, 더 정확한 결과를 획득할 수 있을 것이다. 파식대 발달모형 또한 고려할 만한 사항이다. 본 모형에서는 해식대가 후퇴할 때 파식대 경

사는 유지되며 평행하게 후퇴하는 모형을 가정하였으나(Trenhaile, 1974), 바다 쪽 가장자리의 파식대가 침식으로부터 상대적으로 안정적이라면, 해식대가 후퇴할수록 파식대의 경사각이 감소하며 확장될 수 있다(Flemming, 1965). 후속 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 모형을 개발할 수 있어야 할 것이다.

#### 4.2 둔두리·독도 해안 후퇴율과 파식대 형성시기에 대한 논의

수치모형 모의를 통해 산정한 둔두리 파식대의 최량 추정 후퇴율은  $0.6^{+0}_{-0.1}$  mm/yr, 독도 파식대의 최량 추정 후퇴율은  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr로 약 100배 차이가 난다. 이렇게 두 파식대의 후퇴율이 큰 차이가 나는 이유에는 두 파식대의 기반암 특성과 환경이 다르기 때문으로 생각된다. 둔두리 해안은 꽃지해변의 남쪽 돌출부(headland)에 위치하여 지질학적으로 태안층에 속해 있으며, 약한 변성정도의 퇴적암류로 구성되어(Na, 1992; Choi *et al.*, 2008) 사암과 세일, 실트암 등이 관찰되며, 지층은 북북동 또는 북동 방향으로 발달해 있다. 둔두리 지역의 조차는 대조시 약 7 m 이상, 소조시 약 4 m 정도로, 대조차해안(macro-tidal coast)으로 분류된다(Choi *et al.*, 2013). Choi

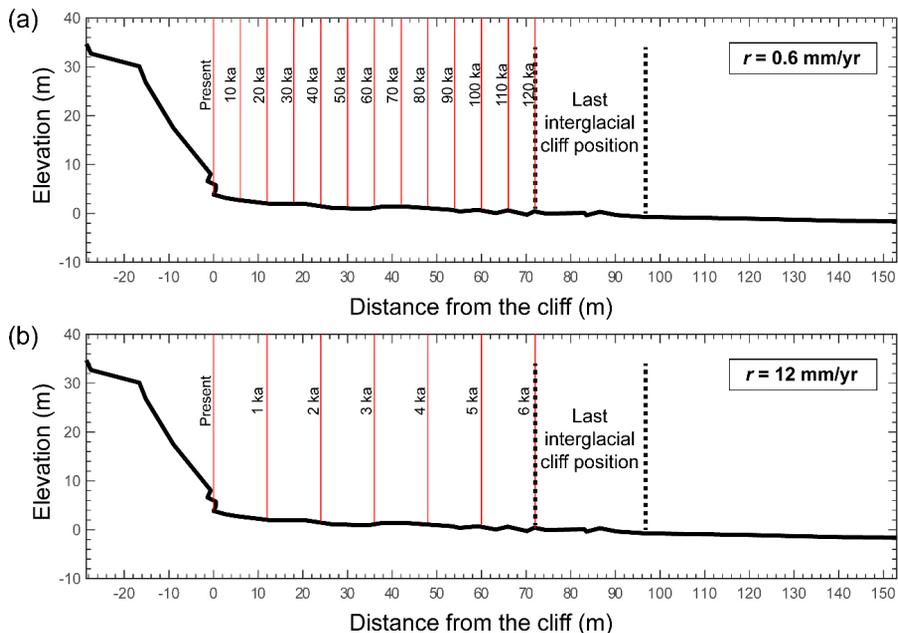


Fig. 5. The topographic profiles of Dunduri platform showing when the present cliff was at the last glacial cliff position, with the cliff retreat rate of (a) 0.7 mm/yr and (b) 12 mm/yr.

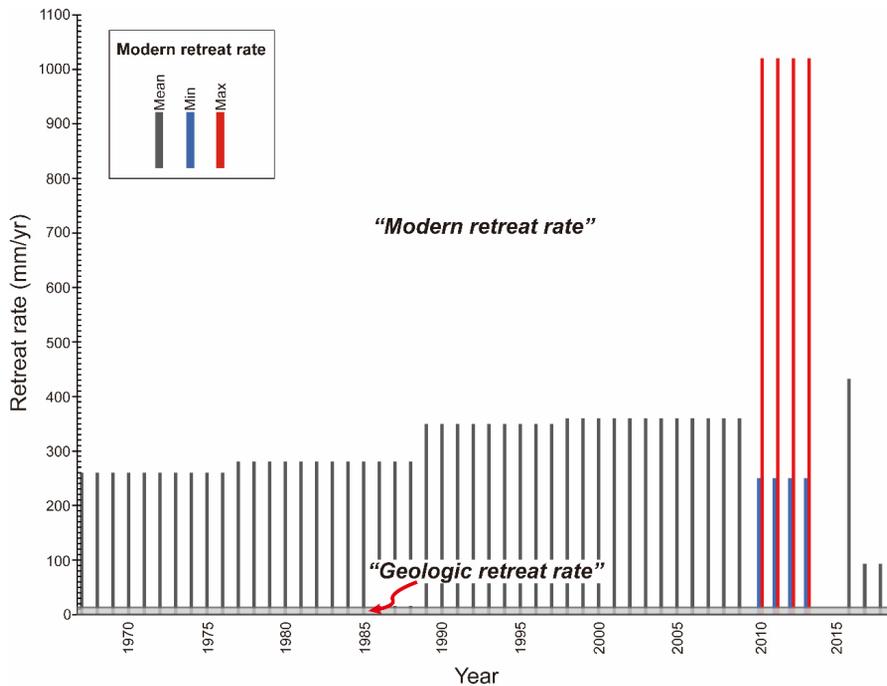
et al. (2013)은 둔두리 파식대와 해식애를 대상으로 슈미트 해머를 이용하여 암석의 반발도를 측정하여 암석의 강도를 측정하고자 하였다. 측정 결과, 둔두리 파식대와 해식애의 반발도가 기존에 보고된 호주와 뉴질랜드 남동부 해안의 파식대에서 측정된 반발도보다(Kennedy and Dickson, 2006; Thornton and Stephenson, 2006) 약 1.5배 정도 높게 나타나 침식에 상당히 강할 것으로 나타났다. 또한 둔두리 지역의 경우, 현장 조사 결과 약한 암석이 강한 사암들 사이에 끼어 있는 형태로 나타나 상대적으로 오래 살아남을 수 있었던 것으로 생각된다. 따라서 상대적으로 기반암 강도가 강했기 때문에 파식대가 넓게 발달할 수 있었고, 지난 간빙기에 형성된 파식대의 일부 구간이 현재까지 침식되지 않고 남아있을 수 있었을 것이라고 여겨진다.

약 2.7-2.1 Ma 용암의 분출로 형성된 독도의 경우, 조면암, 조면안산암, 각력암, 응회암 등으로 구성되어 있으며(Sohn and Park, 1994), 파식대는 주로 해식애의 기저부분부터 발달하거나 부속 도서 위에 발달해 있는 형태로 나타난다. 독도의 경우 파랑 작용이 우세하게 작용하는 환경이며, 소조차해안(micro-

tidal coast)으로 분류된다. 파랑의 작용은 겨울에 가장 강하게 나타난다(Choi and Seong, 2020). 본 연구에서 사용한 파식대의 경우 서도의 서쪽 편에 위치하며 고립된 부속도서인 넓덕바위에 형성되어 있다. 섬은 육지의 파식대와 다르게 전방위에서 침식과 풍화를 받는다. 이것은 파식대 발달과정이 육지와 다를 수 있음을 의미하며 더 정확한 수치모형을 개발하기 위해서는 반드시 고려해야할 점이다. 따라서 동·서 해안의 파식대 비교를 위해서는 같은 위상의 파식대를 선택해야 한다. 또한, 섬 파식대의 형성 과정을 밝히기 위해서는 본 연구에서 적용한 수치모형을 더 개선해야 할 것이다.

**4.3 둔두리 해안의 현대 후퇴율과 지질학적 시간 범위의 후퇴율 비교**

본 연구는 최초로 지질학적 시간 범위에서 서해안 둔두리 해안의 후퇴율을 0.6-12 mm/yr로 제시하였다. 현대에 측정된 짧은 시간의 후퇴율(Woo and Jang, 2010; Kim and Jang, 2013; Kim 2017, 2018)은 본 연구에서 제시한 지질학적 후퇴율보다 최소 8배에서 최대 1,457배 빠르다(그림 6). 이렇게 현대의



**Fig. 6.** The comparison between geologic retreat rates and modern retreat rates of Dunduri shore. Modern retreat rates were obtained from Woo and Jang (2010), Kim and Jang (2013) and Kim (2017, 2018).

후퇴율이 지질학적 후퇴율보다 아주 빠른 이유는 크게 두 가지로 생각해 볼 수 있다. 먼저 저해상도의 고지도나 과거 항공사진에서 해안선을 추출하는 과정에서 발생하는 부정확성과 단기간의 관측에서 오는 불확실성을 들 수 있다(Regard *et al.*, 2012). 특히, 해식애의 후퇴율은 그 기준을 어디에 두느냐에 따라 산정값에 차이가 발생하며, 지도에서 절벽면과 파식대가 이루는 정선각(shoreline angle)을 찾는 것은 매우 어렵다. 더구나 둔두리 해식애는 지점에 따라 암석의 반발 강도 차이가 매우 커서, 공간적 차별 후퇴를 겪은 곳으로 추정되는 곳이다(Choi *et al.*, 2013). 이 경우, 짧은 시간 범위에서 측정된 후퇴율은 과대 추정되기 쉽다. 하지만 만약 추정된 현대의 후퇴율이 정확하다면, 최근 기후변화 경향이 반영된 결과로도 해석할 수 있다. 즉, 과거에는 암석해안의 침식 속도가 느렸으나 최근 어떤 변화로 인해 후퇴속도가 증가했다고 볼 수 있다. 이렇게 볼 때, 그동안 해안 침식 연구에서 그 변화가 미미할 것이라 여겨져 소홀히 해왔던 암석 해안에서도 기후변화나 인간 간섭에 의한 해안 후퇴가 상당히 진행되고 있고, 암석 해안지역이 기후변화에 예상보다 더 취약할 수 있음을 의미한다. 어떻게 해석하던 간에 퇴적해안과 함께 암석해안의 경관변화나 침식문제에 좀 더 관심을 가질 필요가 있다. 특히 남해안의 경우, 기후변화로 강수량이 상대적으로 크게 증가하고 극한 기후가 나타날 가능성이 큰 것으로 전망되는데(Korea Meteorological Administration, 2020), 해안침식에 가장 취약할 수 있는 지역임에도 불구하고, 지질학적 시간 범위의 남해안 암석해안의 후퇴율 연구는 거의 전무하다. 동해나 서해안과 같이 남해안을 대상으로 한 후퇴율 연구가 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 파식대의 우주선유발 동위원소 농도 분포를 대상으로 한 수치 모형을 통해 서해안의 둔두리 파식대와 동해안의 독도 파식대의 형성시기를 규명하고, 해식애의 장기간 평균 후퇴율을 산정하였다. 모의 결과 둔두리 파식대의 바다쪽 부분(72-150 m 구간)은 지난 간빙기로부터 유전된 것으로 보이며, 해식애의 평균 후퇴율은 0.6-12 mm/yr로 산정되었다. 독도 파식대는 홀로세 해수면 상승시기 동

안 발달한 것으로 추정되며, 해식애의 평균 후퇴율은  $60^{+140}_{-30}$  mm/yr로 산정되었다. 본 연구는 파식대에 남겨진 우주선유발 동위원소가 지질학적 시간 동안 겪은 환경변화 역사를 잘 기록하고 있음을 보여주며 이를 활용하여 장기 시간규모에서 암석해안의 후퇴율을 산정할 수 있음을 제시하였다. 그리고 이런 과정을 통해, 최근 지구온난화와 기후변화로 인해 해안 후퇴가 어느 정도 가속화되었는지 정량적으로 평가할 수 있음을 보여준다.

## 감사의 글

이 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 학문후속세대(박사후국내연수) 지원사업(NRF-2020S1A5B5A01044533)의 지원을 받아 수행되었습니다. 논문의 질적향상을 위해 건설적인 토의를 해주신 Dr. Zuzanna Swirad에게 진심으로 감사드립니다. 또한, 보다 좋은 논문이 될 수 있도록 세심한 심사와 아낌없는 조언을 해주신 심사위원들에게 감사드립니다.

## REFERENCES

- Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N.A. and Dunai, T.J., 2008, A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  measurements. *Quaternary Geochronology*, 3, 174-195.
- Chmeleff, J., von Blanckenburg, F., Kossert, K. and Jakob, D., 2010, Determination of the  $^{10}\text{Be}$  half-life by multi-collector ICP-MS and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 192-199.
- Cho, J.-W., Lim, D.-I. and Kim, B.-O., 2001, Observation of Shoreline Change Using an Aerial Photograph in Hampyung Bay, Southwestern Coast of Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 22, 317-326 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Chang, T.S., Choi, J.-H., Kim, Y. and Lee, S.Y., 2014, Burial storm deposits recorded at the coastal dunes, Dasari, Chungnam Province. *Journal of the Geological Society of Korea*, 50, 539-549 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H. and Seong, Y.B., 2014, The rock coast of Korea. In: Kennedy, D.M., Stephenson, W.J. and Naylor, L.A.

- (eds.), *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis*. Geological Society, *Memoirs*, 40, 193-202.
- Choi, K.H. and Seong, Y.B., 2020, Constraining the long-term lowering rates of shore platforms on volcanic islands in the East Sea of the Korean Peninsula, using cosmogenic  $^{36}\text{Cl}$ . *Geosciences Journal*, 1-15.
- Choi, K.H., Seong, Y.B., Choi, J.-H., Jung, P.M. and Lee, S.Y., 2013, Investigations on Rock Cliff Development in Dunduri, West coast of Korea, Using Schmidt Hammer Rebound Values and OSL Chronology. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 20, 45-56 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Seong, Y.B., Jung, P.M. and Lee, S.Y., 2012, Using Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  Dating to Unravel the Antiquity of a Rocky Shore Platform on the West Coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 28, 641-657.
- Choi, P.Y., Rhee, C.W., Lim, S.B. and So, Y., 2008, Subdivision of the Upper Paleozoic Taean Formation in the Anmyeondo-Boryeong area, west Korea: a preliminary approach to the sedimentary organization and structural features. *Geosciences Journal*, 12, 373-384.
- Choi, S.G., 2015, The Old Notch of the Period of Postglacial High Sea Level in the Byeonsan Peninsula, Korea. *Journal of the Association of Korean Geographers*, 4, 61-68 (in Korean with English abstract).
- Duguet, T., Duperret, A., Costa, S., Regard, V. and Maillet, G., 2021, Coastal chalk cliff retreat rates during the Holocene, inferred from submarine platform morphology and cosmogenic exposure along the Normandy coast (NW France). *Marine Geology*, 433, 106405.
- Emery, K.O. and Kuhn, G.G., 1982, Sea cliffs: their processes, profiles and classification. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 644-654.
- Flemming, N.C., 1965, Form and Relation to Present Sea Level of Pleistocene Marine Erosion Features. *The Journal of Geology*, 73, 799-811.
- Hurst, M.D., Rood, D.H. and Ellis, M.A., 2017, Controls on the distribution of cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  across shore platforms. *Earth Surface Dynamics*, 5, 67-84.
- Hurst, M.D., Rood, D.H., Ellis, M.A., Anderson, R.S. and Dornbusch, U., 2016, Recent acceleration in coastal cliff retreat rates on the south coast of Great Britain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 13336-13341.
- Hwang, S.I., Kwon, Y.-W. and Yoon, S.-O., 2019, Geomorphological Development of Shore Platforms at Dongdo and Seodo in the Southern Coast of Dok-do Island. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 26, 33-45 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.I. and Park, K.G., 2007, Tafoni Geomorphic Development in the Western Coast of Dongdo of Dokdo, Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 13, 422-437 (in Korean with English abstract).
- Jeong, A., Lee, J.I., Seong, Y.B., Balco, G., Yoo, K.-C., Yoon, H.I., Domack, E., Rhee, H.H. and Yu, B.Y., 2018, Late Quaternary deglacial history across the Larsen B embayment, Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, 189, 134-148.
- Jung, S.J., Kim, K.H. and Pyun, C.K., 2004, Investigation of Long-Term Shoreline Changes Using Aerial Images. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 16, 10-17 (in Korean with English abstract).
- Kang, T.S., Cho, K., Lee, J.S. and Park, W.K., 2014, Evaluation of Shoreline Retreat Rate due to a Sea Level Rise using Theory of Equilibrium Beach Profile. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26, 197-206 (in Korean with English abstract).
- Kennedy, D.M. and Dickson, M.E., 2006, Lithological control on the elevation of shore platforms in a microtidal setting. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1575-1584.
- Kim, D.S., 2013, Long-term Changes of Shoreline at the East Coast in South Korea 2 - South East Coast. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 20, 27-39 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.S. and Lee, G.-R., 2015, Seasonal Changes of Shorelines and Beaches on East Sea Coast, South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 50, 147-164 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.H. and Song, D.S., 2012, Investigation of Coastal Erosion Status in Geojin Port Area. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 30, 67-73 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.C., Eum, C.H., Yang, D.Y., Kim, G.D., Cheong, D.K. and Choe, H.G., 2010, A preliminary study of paleoenvironments using OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating of coastal dune sequences on Manripo area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 207-219 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., 2017, Assessing the applicability of UAV for Sea Cliff Erosion-rate Monitoring. *Journal of the association of Korean Photo-Geographers*, 27, 1-13 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., 2018, Calculating Erosion Amount of Sea-cliff in Dundu-ri by Using UAV. *Journal of the association of Korean Photo-Geographers*, 28, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S. and Jang, D.-H., 2011, Time-series Analysis of Baramarae Beach in Anmyeondo Using Aerial Photographs and Field Measurement Data. *Journal of the Korean*

- Geomorphological Association, 18, 39-51 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S. and Jang, D.-H., 2013, Classification by Erosion Shapes and Estimation of Sea-cliff Erosion Rates through Field Survey in Dundu-ri, Anmyeondo in Korea's Western Coast. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 20, 41-53 (in Korean with English abstract).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, 2020, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=36580&boardKey=10&menuKey=971&currentPageNo=1> (April 2, 2021).
- Korea Meteorological Administration, 2020, [http://www.climate.go.kr/home/cc\\_data/2020/Korean\\_Climate\\_Change\\_Assessment\\_Report\\_2020\\_1\\_summary.pdf](http://www.climate.go.kr/home/cc_data/2020/Korean_Climate_Change_Assessment_Report_2020_1_summary.pdf) (April 2, 2021).
- Korschinek, G., Bergmaier, A., Faestermann, T., Gerstmann, U.C., Knie, K., Rugel, G., Wallner, A., Dillmann, I., Dollinger, G., von Gostomski, C.L., Kossert, K., Maiti, M., Poutivtsev, M. and Rimmert, A., 2010, A new value for the half-life of  $^{10}\text{Be}$  by Heavy-Ion Elastic Recoil Detection and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 187-191.
- Lal, D., 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 104, 424-439.
- Lee, J.-Y., Kim, J.C., Lim, J., Kota, K., Hong, S.S., Moon, J.A. and Kim, Y.E., 2013, Depositional environments and ages of coastal deposits in Gwanpo-ri, Geoje Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 661-667 (in Korean with English abstract).
- Lifton, N., Sato, T. and Dunai, T.J., 2014, Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 386, 149-160.
- Lim, D.I., Choi, J.Y. and Jung, H.S., 2009, Sea-cliff erosion and retreat in semi-enclosed macrotidal embayment: Hampyung Bay, West Coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 56, 732-736.
- Na, K.C., 1992, A study on the metamorphism in the south-western part of Gyeonggi Massif. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 1, 25-33.
- Regard, V., Dewez, T., Bourlès, D.L., Anderson, R.S., Duperret, A., Costa, S., Leanni, L., Lasseur, E., Pedoja, K. and Maillet, G.M., 2012, Late Holocene seacliff retreat recorded by  $^{10}\text{Be}$  profiles across a coastal platform: Theory and example from the English Channel. *Quaternary Geochronology*, 11, 87-97.
- Seong, Y.B. and Yu, B.Y., 2014, Cosmogenic Nuclides Dating of the Earth Surface: Focusing on Korean Cases. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 261-272 (in Korean with English abstract).
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 1994, Geology and Evolution of Tok Island, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 242-261 (in Korean with English abstract).
- Son, C.B., 1999, Prediction of Potential Shoreline Retreat by Sea Level Rise. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 11, 34-40 (in Korean with English abstract).
- Swirad, Z.M., Rosser, N.J., Brain, M.J., Rood, D.H., Hurst, M.D., Wilcken, K.M. and Barlow, J., 2020, Cosmogenic exposure dating reveals limited long-term variability in erosion of a rocky coastline. *Nature Communications*, 11, 3804.
- Thornton, L.E. and Stephenson, W.J., 2006, Rock strength: a control of shore platform elevation. *Journal of Coastal Research*, 22, 224-231.
- Trenhaile, A.S., 1974, The Geometry of Shore Platforms in England and Wales. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 62, 129-142.
- Woo, H.-B. and Jang, D.-H., 2010, A study on the erosion and retreat of seacliff through the multi-temporal aerial photograph data and field survey: the case study on Taean Peninsula, Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 17, 71-84 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., Chang, T.-S., Choi, J.-H. and Kim, J.C., 2015, Paleostorm deposits detection at the sand dune of west coast of South Korea based on palynomorphs. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 327-332 (in Korean with English abstract).
- Yoon, H.H. and Chun, S.S., 2019, Rapid shift of surface sedimentary facies and its depositional mechanism in the macrotidal wave-dominated Sinduri Bay, west coast of Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 55, 257-276 (in Korean with English abstract).

Received : April 6, 2021

Revised : April 19, 2021

Accepted : April 22, 2021