

해안단구 연구를 위한 ^{10}Be 연대측정법의 적용과 한계점

신재열*

경북대학교 지리학과, 41566 대구광역시 북구 대학로 80

Application of ^{10}Be Dating Technique for Marine Terrace Studies and Its Limitations

Jae-Ryul Shin*

Department of Geography, Kyungpook National University, 41566 80 Daehak-ro, Bukgu, Daegu, Korea

Abstract: Although Quaternary marine terraces and onshore paleo-shoreline records provide clues to our understanding for the mode and nature of neotectonics in the Korean peninsula, it cannot be accomplished without knowledge on both independent information of the past sea level records and tectonic deformation field together with precise results of numerical dating for higher terraces. This study reported cosmogenic radionuclides (^{10}Be) dating results conducted in higher terraces in the eastern and western coasts of the Korean peninsula. As a result, the measured concentration ratio of $^9\text{Be}/^{10}\text{Be}$ and the exposure ages were much younger than expected. It implies that either there is possibility of error in experimental processes or the samples experienced a complex exposure history probably included a burial at some stage. Considering the past climatic conditions around the Korean peninsula and a possible complex exposure history after the emergence of marine terrace, the discovery of a suitable study area and a sampling site are an essential part of successful ^{10}Be dating technique.

Keywords: Quaternary marine terrace, cosmogenic radionuclides, ^{10}Be , exposure age

요약: 해안단구와 육상에 남아있는 고해수준에 관한 기록들은 한반도 지반운동의 형태와 속성을 구분해 낼 가장 직접적인 증거로 사용될 수 있음에도 불구하고 아직 고위 해안단구들의 형성시기에 관한 절대연대 측정이 현실적으로 어렵다는 점과 과거 해수면 변동과 지반운동 간의 상대적 변화에 관한 부족한 정보로 인해 명확한 해석과 과학적 논의는 불완전한 상태이다. 본 연구는 한반도 고위 해안단구 연구에서 ^{10}Be 을 대상으로 한 우주선 기원핵종 절대연대 측정법의 실험결과를 보고하고 있다. 실험 결과, 동해안의 강릉시 정동진 일대와 서해안 지역 서천군 비인면 일대에서 채취한 해발고도 80 m 내외의 고위 해안단구 상의 기반암과 거력 퇴적물의 $^9\text{Be}/^{10}\text{Be}$ 집적량비와 노출 연대는 상대적으로 매우 낮고 젊은 연대를 보이고 있다. 이러한 결과는 실험과정에서의 오류 가능성을 포함하여 고위 해안단구의 복잡한 노출 역사를 반영하는 것으로 판단된다. 특히 한반도의 기후환경과 해안단구가 육화된 뒤 겪을 것으로 추정되는 복잡한 노출 환경을 고려할 경우 앞으로 ^{10}Be 연대측정기술의 성공적인 적용을 위해서는 적합한 연구지역의 발굴과 시료채취가 가장 중요한 요인이 될 것으로 판단된다.

주요어: 제4기 해안단구, 우주선 기원핵종, ^{10}Be , 노출 연대

서론

한국의 제4기 지질학과 지형학 분야에서 절대연대 측정자료를 바탕으로 한 해안단구의 형성시기와 이에 근거한 한반도 지각운동의 속성과 변형률에 관한 논의는 오랫동안 지속되고 있다(Choi, 1993; Choi, 2004; Choi et al., 2003; Choi et al., 2009; Oh, 1981; Shin and Hwang, 2014; Yoon et al., 2003).

*Corresponding author: jaeryul.shin@gmail.com

Tel: +82-53-950-5227

Fax: +82-53-950-6227

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러나 여전히 제4기 해안단구 지층서의 완전한 수립은 아직 불완전한 상태로 남아 있으며 근본적인 한계점은 해안단구의 형성시기에 관한 절대연대 보고가 극히 제한적이라는 점에 크게 기인하고 있다. 지금까지 양적, 질적으로 발전하고 있는 해안단구의 연구 성과들과 해발고도 10 m 내외의 저위 해안단구로부터 얻어진 절대연대 측정자료들은 과학적 논의의 중요한 기초적 근거가 되고 있으나(Choi, 1993; Choi et al., 2003) 보다 종합적인 해석과 장기적 관점에서 한반도의 현생 지각운동을 이해하기 위해서는 고위 해안단구의 형성시기에 대한 명확한 근거가 필요하다. 그러나 고위 해안단구일수록 해성 퇴적물의 부존 문제와 적용가능한 절대연대 측정기술의 부재에 따라 여전히 그 성과는 매우 미비한 실정이다.

그럼에도 불구하고 해안단구는 전 세계적으로 가장 풍부하게 남아 있는 현생 지각운동의 가장 직접적인 육상 증거들이며(Johnson, 2001; McLaren and Rowe, 1996; Neumann and Macintyre, 1985; Nunn et al., 2002; Pedoja et al., 2008; Shin, 2012a; 2012b; Siddall et al., 2006) 한반도 내에서도 각 지역의 해안을 따라 해발고도가 각기 다른 다수의 단구면이 존재한다(Lee and Park, 2006; Shin and Sandiford, 2012). 이는 한반도에서 해안단구의 연구가 아직 불분명한 사실들로 인해 어렵지만 현생 지각운동의 양식과 변형률을 추정하는데 여전히 유용한 연구 주제임을 의미한다. 특히 한반도 동해안 지역에는 해발고도 160 m 내외에까지 다수의 해안단구가 연속적으로 잘 발달하고 있으며 지반운동 및 고해수준 상태를 보다 장기적 관점에서 복원하기 위해서는 반드시 고위 해안단구들의 형성 시기에 관한 절대연대가 제시되어야 한다. 본 연구는 우주선 기원핵종을 이용한 절대연대 측정기술(cosmogenic radionuclides dating, ¹⁰Be)을 한반도 동해안과 서해안의 해발고도 80 m 내외의 해안단구를 대상으로 적용한 측정 결과를 보고하는 한편 ¹⁰Be 연대측정기술의 적용에 있어 한반도 기후환경 조건 하에서의 한계점과 제언을 담고 있다.

연구 방법 및 시료 채취 지역

¹⁰Be 연대측정법

¹⁰Be은 대기 중의 질소와 산소가 우주선과 충돌하여 일어나는 파쇄반응으로 생성되거나 지표에 노출된 암석 표면에서 암석 중의 규소나 산소가 조사되는

우주선과 반응하여 생성된다. 이렇게 생성된 ¹⁰Be은 베타 방사성 붕괴로 B가 되며, 이 때 반감기는 1.51 ± 0.06 × 10⁶년이다(Hofmann et al., 1987). 대기 중의 ¹⁰Be은 생성 후 산화되어 ¹⁰BeO가 되며 강수와 함께 지표로 운반된다. 대기 중 ⁹Be 안정동위원소는 존재하지 않으며 위도와 해발고도에 따른 ¹⁰Be 생성률은 선행적 연구들에서 이미 정량화되어 있기 때문에 지표상 ¹⁰Be와 ⁹Be비는 지역별로 거의 일정하다(Bourles et al., 1989). 따라서 대기에 노출된 암석 시료의 경우 시료의 ¹⁰Be 집적량은 시료 채취 지역에서의 ¹⁰Be의 생성률에 근거해 암석의 노출 시간을 직접적으로 지시해주며, 퇴적물 시료의 경우 임의의 퇴적층 중 ¹⁰Be 집적량(¹⁰Be/⁹Be비)과 분석대상 시료의 ¹⁰Be의 집적량(¹⁰Be/⁹Be비)을 알고 있을 경우 반감기에 따른 퇴적 이후 연대를 얻을 수 있다. 특히 지역의 ¹⁰Be의 생성률을 알고 있을 경우 지표면에서 깊이에 따른 지수 감수적인 ¹⁰Be 집적량의 변화 상태를 통해서 암석(지각)의 침식률(삭박률)을 추정할 수 있다. 대상 시료의 ¹⁰Be의 집적량을 구하기 위한 기본적 방정식은 아래와 같으며 이로부터 다양한 유도식이 만들어질 수 있다.

$$N = \frac{P}{\lambda + E\rho A^{-1}}(1 - e^{-(\lambda + E\rho A^{-1})t})$$

N: ¹⁰Be 집적량, *λ*: ¹⁰Be 반감률, *E*: 침식률(steady-state erosion rate), *ρ*: 암석의 밀도, *P*: ¹⁰Be 생성률, *t*: 노출 시간

¹⁰Be 연대측정법은 가장 보편적 지각 구성물질인 석영을 대상으로 한다는 점에서 적용가능범위가 넓으며 침식률 및 노출 연대에 관한 연구는 시간적으로 제4기 전체를 대상으로 측정가능하다는 점에서 지형학을 포함한 제4기학 연구 분야에서 탄소 안정동위원소에 대한 연대측정기술이나 기타 방사성동위원소

Table 1. Production rates (*P_o*) of cosmogenic radionuclides in atoms/grams of quartz/year at sea level in mid to high latitudes. *λ* and *1/λ* are decay time scales and *t*_{1/2} is their half-lives in years (modified from Burbank and Anderson (2001))

	¹⁴ C	¹⁰ Be	²⁶ Al	³⁶ Cl
<i>P_o</i>	21.0	5.81	34.9	4-9
<i>λ</i>	1.2 × 10 ⁻⁴	4.62 × 10 ⁻⁷	9.9 × 10 ⁻⁷	4.81 × 10 ⁻⁷
<i>1/λ</i>	8276	2.16 × 10 ⁶	1.01 × 10 ⁶	2.1 × 10 ⁶
<i>t</i> _{1/2}	5735	1.51 × 10 ⁶	0.7 × 10 ⁶	0.3 × 10 ⁶

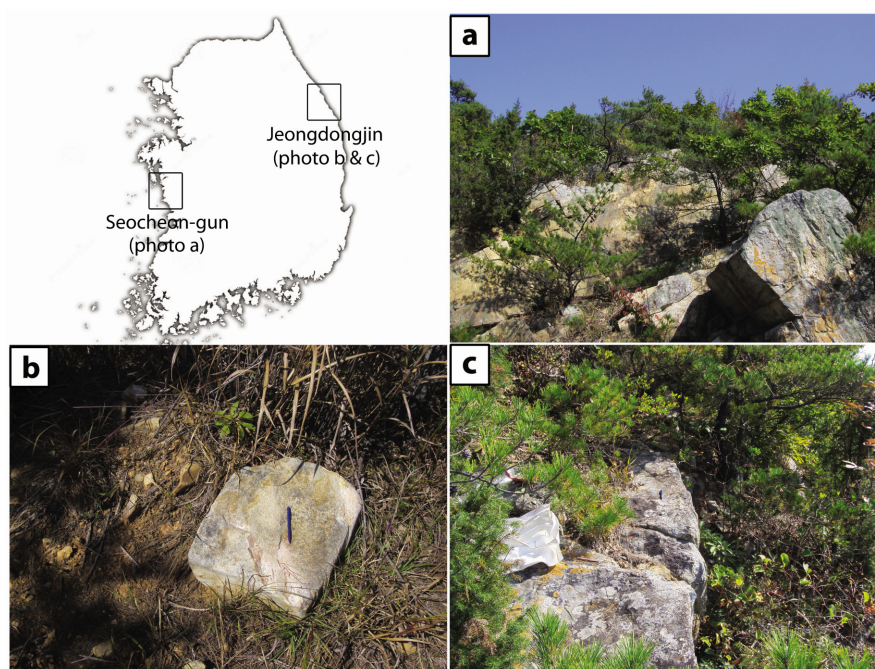


Fig. 1. Selected sampling sites. (a) BO-01, taken from an implanted boulder and exposed bedrocks (Biin-myeon, western coast). (b) and (c) JO-01 and JO-02, collected from an implanted boulder and a bedrock hillslope, respectively (Jeongdongjin, eastern coast).

연대측정법과는 차별적인 장점을 지니고 있다(Kim and Englert, 2004; Owen et al., 2011; Repka et al., 1997) (Table 1).

시료 채취

본 연구에서는 해안단구 상에 노출된 거력과 노출 기반암을 대상으로 하여 대상 시료의 노출 연대를 추정하는데 목표를 두고 있다. 이는 해안단구 상에 노출된 거력은 육화 이후 이동이 없었을 것이라는 전제 하에 암석의 노출 연대는 곧 해안단구의 육화 시기(형성 시기)에 근접한 시간일 것이라는 간접 추정에 근거를 두고 있다. 시료 채취 지역은 강릉시 강동면의 정동진 지역과 충남 서천군 비인면 일대이며, 두 지역의 네 지점에서 총 6개의 시료를 채취하였다(Fig. 1). 정동진 지역의 시료 채취 지점은 Yoon et al. (2003)에 의해 해안단구 분류 및 상대연대 추정에 근거한 형성시기가 보고된 지역이다(Table 2)¹⁾. 정동진 지역의 해안단구와 대비할 목적으로 서해안 지역의

서천군 비인면 일대에서 동일한 해발고도상의 지형면을 대상으로 노출 거력의 시료를 채취하였다(Table 3). 그러나 서해안 지역의 해안단구는 동해안 지역의 해안단구에 비해 발달 특징이 뚜렷하지 않으며 이는 두 지역 간의 해안환경 차이에 기인하는 특징인 것으로 판단된다(Choi, 1996; Chung et al., 2005; Yoon and Hwang, 2000). 지형학 및 제4기 지질학 분야에서 남해안과 서해안 지역에서의 해안단구의 존재 및 동해안 지역 해안단구와의 지층서 대비는 여전히 논쟁적이다(Choi, 1996; Oh, 1981; Shin and Hwang, 2014). 서천군 비인면 일대에서의 시료 채취 지점은 정동진 지역과 같이 단구면(terrace surface)과 단구에(terrace cliff)의 구분이 명확하지는 않으나 해안으로부터 2 km 이내에 위치하고 있는 점에서 고해수면 변동에 있어 영향을 받았을 가능성이 높은 지역이다. 최근에는 서천군에 인접한 보령군 일대에서 해안단구 퇴적물에 대한 보고가 있어 이러한 가능성을 더욱 뒷받침해주고 있다(Yoon et al., 2015).

1) 정동진 일대의 해안단구는 Oh (1981), Lee (1987) 등에 의해 보고된 바 있으며 Table 2의 Middle East Coast의 해안단구 분류는 Yoon et al. (2003)에 따르고 있다. 그러나 상기의 논문들에서 해발고도 80 m 내외의 고위 해안단구의 형성시기에 대한 절대연대자료는 제시된 바 없으며 다만 해안단구의 층서적 특징과 퇴적상에 근거해 Lee (1987)는 플라이오세(300~250만 년 BP), Yoon et al. (2003)은 플라이스토세 중후기(35만 년~45만 년, MIS 11 stage)로 형성 시기를 각각 추정하고 있다.

Table 2. Distribution and geochronology of marine terraces in the eastern and southern coast (modified from Shin and Sandiford, 2012)

Terrace Num.	Middle Eastern Coast			Southeastern Coast			Southern Coast		
	Elevation (m apsl)	Shoreline (m apsl)	Formation age (MIS stage)	Elevation	Shoreline	Formation age	Elevation	Shoreline	Formation age
T-1	5-6	5		5-6	5				
T-2	5-12	10	MIS 5a	7-10	10	MIS 5a (50-80 ka) ^{2) 3) 4)}	9.5-13	10	MIS 5a (70.1±4.6 ka) ⁵⁾
T-3	12-25	25	MIS 5e (124 ka) ¹⁾	18-25	25	MIS 5e (127±12 ka) ⁴⁾	18-22	22	MIS 5e
T-4	20-40	40		40-50	50		27-32	32	
T-5	65-75	70		75-80	80				
T-6	75-90	90		80-90	90				
T-7	97-110	110		110-115	115				
T-8	125-150	140		125-140	140				
T-9				155-160	160				

1) Choi (1993) 2) Choi et al. (2003) 3) Choi (2004) 4) Choi et al. (2009) 5) Lee and Park (2006)

분석 과정 및 결과

전처리 과정

야외에서 채취한 시료는 실험실로 옮겨 분쇄한 뒤 체 분석법으로 250~500 μm의 입자들만을 따로 분리해낸다. 분리된 대상 입자들은 다시 중액분리법과 자기력선별법을 통해 석영 입자만을 따로 추출하였다. 이렇게 분리된 석영으로부터 Be의 추출은 양이온 교환반응법에 따라 ⁹Be carrier를 더하는 방식으로 이루어졌다(Ditchburn and Whitehead, 1994; Stone, 2001). Be 안정동위원소에 대한 방사성동위원소의 존재비 (¹⁰Be/⁹Be) 측정은 호주국립대학(Australian National University)의 질량가속분석실에서 수행되었으며 측정 결과는 Balco (2001)에 따라 단위시료당(석영 1g) ¹⁰Be의 원자수로 표시하였다. 지역의 ¹⁰Be의 생성률은 시료 채취시 기록한 야외현장의 조건(위도, 해발고도, 노출의 정도, 시료 채취의 심도)과 암석 밀도(2.7 g/cm³) 등을 고려하여 계산하였다(CRNOUS calculator ver. 2.2) (Balco, 2001; 2009).

¹⁰Be 집적량과 단구면의 노출 연대

채취한 6개의 시료 중 3개의 시료에서는 ¹⁰Be 측정을 위한 적정량의 석영을 얻는데 실패하였으며 나머지 3개의 시료에 대해서만 각각 노출 연대와 침식률을 측정하였다(Table 3).

JO-01과 JO-02 시료는 해발고도 80 m 내외의 해안단구면 상에서 채취한 것으로 지금까지 형성 시기에 관한 절대연대는 보고된 바 없다. 다만 해발고도가

낮은 해안단구의 절대연대를 기준으로 추정된 해발고도 80 m 내외의 해안단구의 상대연대와는 상당한 차이를 보이는 낮은 연대를 나타내고 있다(Table 2와 Table 3). 특히 노출 기반암에서 채취한 JO-02의 경우 시료 채취가 이루어진 암석 표면은 침식 및 풍화 작용에 의해 최근 형성되었을 가능성을 높게 암시하고 있다. 동해안 지역 해발고도 20 m 내외의 해안단구 퇴적층에서 퇴적물 시료를 대상으로 얻은 절대연대는 공통적으로 최종간빙기(125 kyr BP, MIS 5e)를 나타내고 있다(Choi, 1993, Choi et al., 2009). 일반적으로 해안단구의 형성은 고해수면기에 대응하여 단구면이 형성되고 이후 빙기 동안 해수면 하강과 지반 융기에 의해 육화되어 현재와 같은 계단상 지형으로 남은 것으로 해석된다. 이 경우 현재 해발고도 80 m 내외의 해안단구의 형성 시기는 모든 해안단구가 각 간빙기에 대응해 하나씩 형성되었다는 전제 하에서 최소 40만 년 내외(MIS 11 stage)로 추정된다. 이와 같이 상대적으로 낮은 ¹⁰Be의 집적량(¹⁰Be/⁹Be비)은 우선 실험실 과정에서의 오류 발생 가능성을 고려해 볼 수 있다. 특히 이는 석영으로부터 양이온 교환반응에 따른 Be의 추출과정에서 첨가되는 ⁹Be에 의해 전체 ¹⁰Be/⁹Be비가 낮아졌을 가능성이 존재한다. 그러나 실험상의 오류 가능성 외에도 상대적으로 낮은 집적량과 젊은 노출 연대는 대상 시료의 복잡한 노출 과정과 그늘막 효과 등 육화 후 겪었을 복잡한 노출환경 조건에 따른 결과일 가능성이 높다²⁾.

Table 3. Erosion rates and exposure ages from ^{10}Be concentrations in bedrock samples

Sample name	Latitude (DD)	Longitude (DD)	Elevation (m a.p.s.l.)	^{10}Be atoms g^{-1}	^{10}Be ± atoms g^{-1}	Erosion rates (constant production rate model)			Exposure age (constant production rate model)		
						Erosion rate (m/Myr)	External uncertainty (m/Myr)	Production rate (spallation) (atoms/g/yr)	Exposure age (yr)	External uncertainty (yr)	Production rate (spallation) (atoms/g/yr)
BO-01	36.0916	126.6666	80	537000	75000	5.75	1.06	3.62	136986	23319	3.59
JO-01	37.6675	129.0599	82	727000	127000	4.69	1.06	4.33	157282	31923	4.29
JO-02	37.6583	129.0513	78	275000	78000	12.94	4.5	3.77	66685	20115	3.72

^{10}Be 연대측정법의 적용과 한계점

^{10}Be 연대측정법은 대상 암석의 과거 복잡한 노출과 퇴적물에 의한 재피복 과정, 환경적 조건에 따른 그늘막 효과 등에 의해 몇 가지 제한점을 가진다. 대기에 투과된 우주선(cosmic ray)은 지표로부터 수 cm에 한해 피복되는 특성을 보이며 깊이에 따라 그 피복량은 현격히 줄어들어 60-70 cm 깊이에서는 약 1/2, 수 m 이하에서는 현생 피복량이 0에 가까운 수준이다(Gosse et al., 1995). 또한 노출 환경 및 식생 피복에 따른 우주선 조사가 제한적일 경우에도 ^{10}Be 의 생성과 집적량은 적을 수 있다. 따라서 노출 암석을 대상으로 할 경우 시료는 지표 기복이 거의 없는 지역 중 식생에 의해 피복되지 않으며 단애와 같은 경사지 암석을 제외하여 암석 표면 수 cm 이내의 깊이에서 채취하는 것이 가장 바람직하다. 퇴적물 시료의 경우에 있어서는 측정 대상 시료가 현 노출 장소가 아닌 이전 장소에서의 고집적량(inheritance)을 가지고 있을 수 있으며, 이 경우 측정된 노출 연대는 실제 노출 시간보다 오래된 것으로 나타나는 문제점이 있다. 반대로 지표 노출 이후 퇴적층의 교란 혹은 노출 암석의 경우 다른 퇴적물에 의한 피복된 시간이 존재할 경우 실제 노출 시간보다 짧게 측정되는 결과를 보이기도 한다. 이와 같은 대상 시료의 현장성 및 고퇴적환경과 관련한 문제는 ^{10}Be 연대측정법의 적용한 이전 사례들에서 이미 다수가 보고되고 있으며(Kim and Englert, 2004; Owen et al., 2011; Quigley et al., 2007; Repka et al., 1997) ^{10}Be 연대측정기술의 성공

적인 사례가 건조 지역의 대규모적 침식 지형 연구에서 집중되어 보고되는 이유이기도 하다.

한반도의 온난습윤한 기후 조건과 특히 여름철 강수량이 집중되는 특징을 고려하면 해안단구 상에 존재하는 노출 암석이나 퇴적층은 산지 사면으로부터 공급되는 퇴적물에 의해 재피복될 가능성이 높다. 특히 과거 기후변화에 따른 퇴적환경의 변화는 해안단구가 육화된 후 반복적인 장기간의 매적과정이 있었을 가능성이 크며 이러한 과정은 측정 대상 암석의 ^{10}Be 집적량을 감소시킨다. 또한 한반도의 높은 식생 피복률 역시 그늘막 효과에 의해 집적량을 감소시켜 실제 노출 연대보다 낮은 값을 나타내는 이유가 된다. 이러한 점에서 한반도 고위 해안단구를 대상으로 ^{10}Be 을 포함한 CRNs 연대측정법의 성공적인 적용은 정량적인 시료 채취 과정이 가장 본질적인 부분인 것으로 판단된다. 만일 한 번의 사건으로 동시에 퇴적이 이루어진 해안단구 퇴적층이 존재할 경우, 퇴적 후 퇴적층의 수직적 교란 가능성은 매우 낮으며 시료 채취가 이루어진 퇴적층 최상부는 현재 혹은 가장 최근에까지 지표에 노출되었을 것이라는 전제 하에 퇴적층의 수직 단면상에서 다양한 깊이의 시료를 대상으로 전체 집적량에서 고집적량을 구분해 내는 방법으로 퇴적 이후의 현생 집적량만을 결정하는 것이 가능하다(Fig. 2). 그러나 현실적으로 한반도에 분포하는 고위 해안단구들은 형성 시기가 상대적으로 오래되며 단구 퇴적층은 대부분 침식·삭박되어 부존하는 경우가 대부분이며 따라서 조건에 부합하는 적합한 연구대상지와 시료 확보에 많은 어려움이 있다.

2) 암석시료를 대상으로 노출 시기를 추정한 ^{10}Be 연대측정 결과는 해안단구의 직접적 형성 시기가 아닌 육화 이후 시간을 의미한다. 이러한 점에서 본 연구의 결과는 해안단구의 형성 시기에 대한 최소 연대로서 의미는 가진다. 그러나 해발고도 20 m 내외의 해안단구 퇴적물에서 얻은 절대연대자료가 소수이기는 하지만 12만 년 내외(Choi, 1993; Choi et al., 2009)로 검증되고 있는 상황을 감안하면, 본 연구를 통해 동해안 정동진 일대의 해발고도 80 m 내외의 해안단구에서 얻은 13만 년과 15만 년 내외의 ^{10}Be 연대는 ^{10}Be 측정법의 특성상 환경적 요인과 시료의 복잡한 퇴적과정을 반영하는 것으로 판단된다.

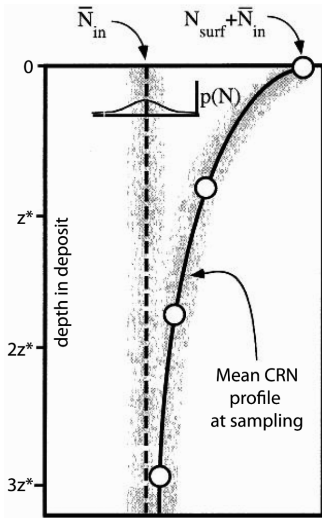


Fig. 2. Schematic of two mean CRN profiles in a deposit. Production rate decays exponentially depth below the instantaneous surface, z . An assumption is that the mean inheritance is equal throughout the deposit although inheritance among individual clasts is likely highly variable (the grey speckled region around the curves) (modified from Hancock et al., 1999).

결론

육상에서 확인되는 해안단구의 존재는 과거 해수면 변동 사실에 대비해 현생 지각운동의 명확한 속성을 반영하는 한편 각 해안단구의 구정선고도와 형성시기에 관한 사실로부터는 가장 직접적인 지각 변형률을 산출할 수 있는 지형학과 제4기 지질학에 있어 중요한 연구 대상이 된다. 특히 한반도에는 해발고도 160 m 내외에까지 해발고도를 달리하는 다수의 해안단구가 연속적으로 잘 발달하고 있으며 지반운동 및 고해수준 상태를 보다 장기적 관점에서 복원하기 위해서는 반드시 고위 해안단구의 형성 시기에 관한 절대연대가 제시되어야 한다. 그러나 고위 해안단구일수록 퇴적물의 침식·삭박 가능성이 높아지는 문제와 수 십 만년에서 수 백 만년의 시간대에서 적용가능한 절대연대 측정기술의 부재에 따라 지금까지의 연구 성과는 매우 미비한 실정이다.

본 연구는 강릉시 강동면의 정동진 지역과 충남 서천군 비인면 일대에서 각각 채취한 노출 기반암과 거력 퇴적물 시료를 대상으로 ¹⁰Be 집적량 측정하고 그에 따른 노출 연대를 추정하고 있다. 그러나 ¹⁰Be 연대측정 결과는 상대연대 추정으로 제시된 해안단구

의 형성 시기보다 훨씬 짧은 노출 역사를 지시하고 있으며 이러한 결과는 실험과정에서의 오류 가능성과 함께 해안단구의 육화 이후 겪었을 복잡한 노출 역사를 반영하는 결과물인 것으로 해석된다. 특히 고위 해안단구들은 형성 이후 지난 수 십 만년 동안 반복적인 기후 변화를 겪으며 퇴적층의 교란, 삭박, 재매적되었을 가능성이 높으며 한편으로 해안단구 기반암과 이동이 제한적이었을 것으로 추정되는 거력 퇴적물 역시 산지 퇴적물의 피복 등으로 인해 지속적인 노출을 가정할 만한 노출 환경에 놓여있지 못했을 가능성이 높다. 한반도의 온난습윤한 기후환경적 조건에서 높은 식생 피복률과 그에 따른 그늘막 효과 역시 ¹⁰Be의 지속적 생성과 집적을 저해하여 실제 대기 노출 시간에 비해 매우 적은 집적량과 짧은 노출 연대를 보이는 것으로 추정해 볼 수 있다. 이러한 점에서 한반도 고위 해안단구를 대상으로 한 ¹⁰Be 연대측정기술의 성공적인 적용을 위해서는 적합한 연구지역의 발굴과 시료 확보가 본질적인 문제인 것으로 판단되며 측정 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 다양한 연대측정기술을 통한 교차검증이 이루어져야 할 것이다.

정동진 일대의 해안단구는 Oh (1981), Lee (1987) 등에 의해 보고된 바 있으며 Table 2의 Middle East Coast의 해안단구 분류는 Yoon et al. (2003)에 따르고 있다. 그러나 상기의 논문들에서 해발고도 80 m 내외의 고위 해안단구의 형성시기에 대한 절대연대자료는 제시된 바 없으며 다만 해안단구의 층서적 특징과 퇴적상에 근거해 Lee (1987)는 플라이오세 (300~250만 년 BP), Yoon et al. (2003)은 플라이스토세 중후기(35만 년~45만 년, MIS 11 stage)로 형성 시기를 각각 추정하고 있다.

암석시료를 대상으로 노출 시기를 추정한 ¹⁰Be 연대측정 결과는 해안단구의 직접적 형성 시기가 아닌 육화 이후 시간을 의미한다, 이러한 점에서 본 연구의 결과는 해안단구의 형성 시기에 대한 최소 연대로서 의미는 가진다. 그러나 해발고도 20 m 내외의 해안단구 퇴적물에서 얻은 절대연대자료가 소수이기는 하지만 12만 년 내외(Choi, 1993; Choi et al., 2009)로 검증되고 있는 상황을 감안하면, 본 연구를 통해 동해안 정동진 일대의 해발고도 80 m 내외의 해안단구에서 얻은 13만 년과 15만 년 내외의 ¹⁰Be 연대는 ¹⁰Be 측정법의 특성상 환경적 요인과 시료의 복잡한 퇴적과정을 반영하는 것으로 판단된다.

References

- Bourles, D., Raisbeck, G.M., and Yiou, F., 1989, ^{10}Be and ^9Be in marine sediments and their potential for dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 443-452.
- Burbank, D.W., and Anderson, R.S., 2001, *Tectonic geomorphology*. Blackwell Science, Oxford, UK, 49 p.
- Balco, G., 2001, Age calculation and error propagation for cosmogenic isotopes. UW Cosmogenic Isotope Laboratory, WA, USA.
- Balco, G., 2009, CRONUS ^{10}Be - ^{26}Al exposure age calculator Version 2.2, WA, USA.
- Choi, J.H., Kim, J.W., Murray, A.S., Hong, D.G., Chang, H.W., and Cheong, C.S., 2009, OSL dating of marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea with implications for Quaternary tectonics. *Quaternary International*, 199, 3-14.
- Choi, J.H., Murray, A.S., Jain, M., Cheong, C.S., and Chang, H.W., 2003, Luminescence dating of well-sorted marine terrace sediments on the southeastern coast of Korea. *Quaternary Science Reviews*, 22, 407-421.
- Choi, S.G., 1993, The Last Interglacial sea levels estimated from the morphostratigraphic comparison of the Late Pleistocene fluvial terraces in the eastern coast of Korea. *Korean Journal of Quaternary Research*, 7(1), 1-26. (in Korean)
- Choi, S.G., 1996, Quaternary sea levels estimated from river terraces of the Ungcheon River, Midwestern coast of South Korea. *Journal of Korean Geography Society*, 31(3), 613-629. (in Korean)
- Choi, S.J., 2004, Marine terrace of Daebo-Guryongpo-Gampo, SE Korea (II). *Korean Journal of Economic and Environmental Geology*, 37, 245-253. (in Korean)
- Chung, G.S., Lee, J.Y., Yang, D.Y., and Kim, J.Y., 2005, Architectural elements of the fluvial deposits of meander bends in midstream of the Yeongsan River. *Journal of Korean Earth Science Society*, 26(8), 809-820. (in Korean)
- Ditchburn, R.G., and Whitehead, N.E., 1994, The separation of ^{10}Be from silicates. 3rd Workshop of the South Pacific Environmental Radioactivity Association, 4-7.
- Gosse, J.C., Klein, J., Evenson, E.B., Lawn, B., and Middleton, R., 1995, Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the last Pinedale glacial sequence. *Science*, 268 (5215), 1329-1333.
- Hancock, G.S., Anderson, R.S., Chadwick, O.A., and Finkel, R.C., 1999, Dating fluvial terraces with ^{10}Be and ^{26}Al profiles: application to the Wind River, Wyoming. *Geomorphology*, 27, 41-60.
- Hofmann, H.J., Beer, J., and Bonani, G., 1987, ^{10}Be half-life and AMS-standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 29, 32-36.
- Johnson, R.G., 2001, Last interglacial sea stands on Barbados and an early anomalous deglaciation timed by differential uplift. *Journal of Geophysical Research*, 106, 11543-11551.
- Kim, K.J., and Englert, P.A.J., 2004, In situ cosmogenic nuclide production of ^{10}Be and ^{26}Al in marine terraces, Fiordland, New Zealand. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 223-224, 639-644.
- Lee, D.Y., 1987, Stratigraphical research of the Quaternary deposits in the Korean peninsula. *The Korean Journal of Quaternary Research*, 1, 3-20. (in Korean)
- Lee, G.R., and Park, C.S., 2006, Properties of deposits and geomorphic formative ages on marine terraces in Gwangyang Bay, South sea of Korea, Korea. *Journal of Korean Geography Society*, 41, 346-360. (in Korean)
- McLaren, S.J. and Rowe, P.J., 1996, The reliability of uranium-series mollusc dates from the western Mediterranean basin. *Quaternary Science Reviews*, 15, 709-717.
- Neumann, A.C., and Macintyre, I.G., 1985, Reef response to sea level rise: keep-up, catch-up or give-up. *Proceedings of the Fifth International Coral Reef Congress*, 3, 105-110.
- Nunn, P.D., Ollier, C., Hope, G., Rodda, P., Omura, A., and Peltier, W.R., 2002, Late Quaternary sea-level and tectonic changes in northeast Fiji. *Marine Geology*, 187, 299-311.
- Oh, G.H., 1981, Marine terrace and their tectonic deformation on the coast of Southern part of the Korean peninsula. *Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo*, 13, 1-61.
- Owen, L.A., Frankel, K.L., Knott, J.R., Reynhout, S., Finkel, R.C., Dolan, J.F., and Lee, J., 2011, Beryllium-10 terrestrial cosmogenic nuclide surface exposure dating of Quaternary landforms in Death Valley. *Geomorphology*, 125, 541-557.
- Pedoja, K., Shen, J.W., Kershaw, S., and Tang, C., 2008, Coastal Quaternary morphologies on the northern coast of the South China Sea, China, and their implications for current tectonic models; a review and preliminary study. *Marine Geology*, 255, 103-117.
- Quigley, M., Sandiford, M., Fifield, K., and Alimanovic, A., 2007, Bedrock erosion and relief production in the northern Flinders Ranges, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 929-944.
- Repka, J.L., Anderson, R.S., and Finkel, R.C., 1997, Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah. *Earth and Planetary Science Letters*, 152, 59-73.
- Shin, J., 2012a, Late Neogene and Quaternary vertical motions in the Otway Coast, southeast Australia (I): Development and geochronology of Quaternary marine terraces. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33(6), 519-533.

- Shin, J., 2012b, Late Neogene and Quaternary vertical motions in the Otway Coast, southeast Australia (II): Epeirogenic uplift driven by lithospheric flexural deformation. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33(6), 534-543.
- Shin, J., and Hwang, S.I., 2014, A critical review on setting up the concept, timing and mechanism of Tertiary tilted flexural mode of the Korean peninsula: A new hypothesis derived from plate tectonics. *Journal of Korean Geography Society*, 49(2), 200-220. (in Korean)
- Shin, J., and Sandiford, M., 2012, Neogene uplift in the Korean peninsula linked to small-scaled mantle convection at sinking slab edge. *Journal of Korean Geography Society*, 47(3), 328-346.
- Siddall, M., Chappell, J., and Potter, E.K., 2006, Eustatic sea level during past interglacials. In Sirocko, F., Claussen, M., Sanchez Goi, M.F., and Litt, T. (eds.), *The climate of past interglacials*. Elsevier, Amsterdam, 75-92.
- Stone, J.O., 2001, Extraction of Al & Be from quartz for isotopic analysis. *UW Cosmogenic Isotopes Manual* 8.
- Yoon, S.O., and Hwang, S.I., 2000, Mechanism of the marine terraces formation on the Southeastern coast in Korea. *Journal of Korean Geography Society*, 35(1), 17-38 (in Korean)
- Yoon, S.O., Hwang, S.I., and Ban, H.K., 2003, Geomorphic development of marine terraces at Jeongdongjin-Daejin area on the East coast, Central part of Korean Peninsula. *Journal of Korean Geography Society*, 38, 156-172 (in Korean)
- Yoon, S.O., Park, C.S., and Hwang, S.I., 2015, Geomorphic development of marine terrace in the Nampo area, Boryeong-si, Chungnam Province. *Journal of the Korea Geomorphological Association*, 22(1), 75-87. (in Korean)

Manuscript received: October 5, 2015

Revised manuscript received: October 26, 2015

Manuscript accepted: October 27, 2015