

포항시 흥해읍 일대 해안단구 제1면의 구정선 고도와 형성 시기*

－ 한반도 제4기 후기 지각운동의 양식과 변형률 산출을 위한 연구(I)－

신재열** · 박경근***

The paleo-shoreline and formation age of the 1st marine terrace in Heunghae-eup Pohang City, South Korea : evaluation of the mode and rate of the late Quaternary tectonism (I)*

Shin, Jae Ryul** · Park, Kyung Geun***

요약 : 본 연구는 포항시 흥해읍 일대에 분포하는 해안단구 제1면의 구정선 고도를 밝히고 형성 시기에 관한 절대연대 자료를 제시하고 있다. 연구 결과, 구정선 고도 10 m의 해안단구 제1면은 10만 년 BP 내외의 MIS 5c 시기에 형성되었으며 이후 MIS 5a 해퇴 시기까지 파랑의 퇴적작용을 반복적으로 받은 것으로 해석된다. 이러한 연구 결과는 해안단구 제1면의 형성 시기에 관한 기존의 자료들을 교차 검증하는 한편 기존의 연구 결과들에 대한 종합적 검토를 바탕으로 이루어진 것으로 동해안 지역 해안단구 제1면에 대한 사실을 재확인시켜 주고 있다. 한편 본 연구에서는 지형 대비를 통한 제4기 후기(MIS 5c) 동해안 지역의 고해수준을 추론하고 있으며 보다 정교한 분석을 위해서는 우선적으로 해안단구 제2면의 구정선 고도에 관한 명확한 설정이 선결되어야 하겠다.

주요어 : 해안단구 제1면, 구정선 고도, OSL 연대측정, 고해수준, 제4기 후기 지각운동

Abstract : This study documents the altitude of paleo-shoreline and formation age of the 1st marine terrace emerged around Heunghae-eup Pohang City (South Korea). As a result, the 1st terrace representing 10m of the paleo-shoreline was formed at MIS 5c around 100,000 BP and was influenced repetitive sedimentation of sea-wave till regression of MIS 5a. The result is recognized as a definite truth for the 1st terrace in the eastern coast of the Korean peninsula based on synthetic reviews of previous studies and cross-validation of absolute age data. Furthermore, this study deduces a sea stand at MIS 5c from the geomorphological contrast method, but precise determination of paleo-shoreline of the 2nd terrace should be required to estimate that of MIS 5c.

Key Words : The 1st marine terrace, paleo-shoreline, OSL dating technique, past sea-level, the late Quaternary tectonism.

1. 서론

본 연구는 포항시 북구 흥해읍 우목리를 중심으로 죽천리, 용한리 일대의 현 해빈 직상위에 분포하는 해안단구 제1면의 구정선고도와 형성시기를 밝히고 있다¹⁾²⁾. 최종적으로 본 연구는 한반도 현생 지각운동의 양식과 변형률을 규명하기 위한 목적으로 동해안과 남해안, 서해안 지역의 최저위 해안단구의 대비와 형성시기에 관한 정량적인 분석을 진행하는 과정에 있어 일차적 연구 성과물에 해당한다.

한국의 현대 지형학 분야에서 특히 1970년대 이후 역동적인 생산력을 보여 왔던 해안단구 연구는 그 괄목할 만한 성과 이면에 여전히 불명확하고 혼란스러운 부분을 내재하고 있다. 무엇보다 현저한 문제는 해안단구 발달 상태 및 분포, 구정선 고도 설정 등에 있어 연구자간 심각한 수준의 견해차이다. 구정선 고도의 명확한 설정은 현장의 조건에 따라 매우 어려운 작업이기는 하나 지각운동의 변형률을 산출하기 위해 무엇보다 중요한 과정이다. 그럼에도 불구하고 개별 연구에서 각기 다양한 방식으로 설정된 구정선 고도

* 이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013S1A5B5A07 048014)

** 경상대학교 사범대학 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Gyeongsang National University)(jshin@gnu.ac.kr)

*** 경상북도 독도재단 연구원(Researcher, Gyeongsangbuk-do Dokdo Foundation)(dokdo@koreadokdo.or.kr)

표 1. 동해안 일대 해안단구 제1면(구정선 고도 10m)이 보고된 연구지역 사례

연구지역	연구자	비 고
강릉(남대천 유역)	최성길(1993)	해면변동성 하안단구
강릉(정동진리, 대진리)	윤순옥 등(2003)	
강릉(안인리, 묵호동)	최성길(1995)	
삼척(오십천 유역)	윤순옥 등(2002)	해면변동성 하안단구
울진(후정리, 죽변리)	김종욱 등(2007)	
포항(죽천리, 도구리, 강사리)	최성길(1996)	
포항(용한리), 경주(당사리)	Choi <i>et al.</i> (2009)	
포항(용한리)	김종욱 등(2005)	
포항(구룡포), 경주(감포)	최성자(2004)	
경주(읍천리, 수렴리)	황상일 등(2012)	
울산(진하리), 부산(일광면)	최성자(2003)	

는 연구자간 수 m의 차이를 보이고 있으며 이에 기준해 산출된 상이한 수준의 지각 융기율은 최종 결과물만을 사용하는 일반의 연구자들에게 있어서는 상당히 혼란한 상태로 이해된다(황상일 등, 2012)(표 1). 한편 해안단구 연구에 있어 형성 시기에 관한 절대연대자료 역시 필수적이다. 1990년대 초반부터 시작된 해안단구 퇴적물의 절대연대 측정 시도는 해안단구 발달이 모식적인 동해안의 여러 지역에서 보고되고 있으나(김종욱 등, 2005; 2007; 최성길, 1995; 1996; Choi *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2009) 현재 양적으로 더 많은 사례 지역을 확보하는 동시에 절대연대 자료들에 대한 상호간의 교차 검증이 필요한 시점이다. 최근에는 해발고도 100 m 이상의 해안단구에 관한 논의가 활발하기도 하였으나(신재열, 2015; 최성길 등, 2003; 황상일 등, 2012) 형성 시기에 관한 절대연대 자료의 부재와 낮은 해발고도에 분포하는 해안단구들에 관한 명확한 이해조차 부족한 상황에서 과학적 논의의 전개 조건 자체가 불충분한 상태이다. 이에 본 연구는 동해안 해안단구의 층서 수립을 위해 그 시작점이 될 수 있는 해안단구 제1면의 구정선 고도와 형성 시기를 규명하고 이를 바탕으로 동해안 지역 해안단구의 지층서 수립을 위한 토대를 마련하고자 하는데 목적이 있다.

2. 연구지역 및 연구방법

1) 연구지역

연구지역은 포항시 북구 홍해읍의 죽천리, 우목리, 용한리 일대이다. 연구지역 일대는 2009년 포항 영일신항만이 건설되며 최근 지형 변화가 급격히 진행되었으나 해발고도 50 m 이내 여러 단의 해안단구는 모식적으로 잘 발달하고 있다(그림 1). 특히 본 연구지역은 해안단구 제1면의 발달이 명확하고 절대연대측정을 위한 시료 확보가 용이한 곳인 한편 선행연구들을 통해 해안단구의 분류 및 형성 시기에 관한 보고가 있는 바(김종욱 등 2005; 최성길, 1996) 교차 검증을 통한 해안단구 제1면의 재확인이 가능한 연구지역이 될 것으로 판단하고 있다.

연구지역의 지질은 제3기 해성층인 연일층 내 두호층과 여남층의 세일 및 사질세일이 주를 이루며 이암이 일부 협재하고 있다(엄상호 등, 1964). 제3기 해성층으로부터 기원한 낮은 구릉지의 분포는 특히 해발고도가 낮은 제4기 후기 해안단구의 발달을 용이하게 한 것으로 이해된다. 포항분지 북부 해안 일대에서 형산강과 곡강천을 통해 해안으로 유입되는 육상 퇴적물은 불국사층에서 기원한 화강반암 및 석영반암을 일부 포함하여 포항분지의 형성 초기에 퇴적된 천북역암의 풍화물과 제3기 해성층에서 기원한 세일 및 이암이 주를 이루고 있다.

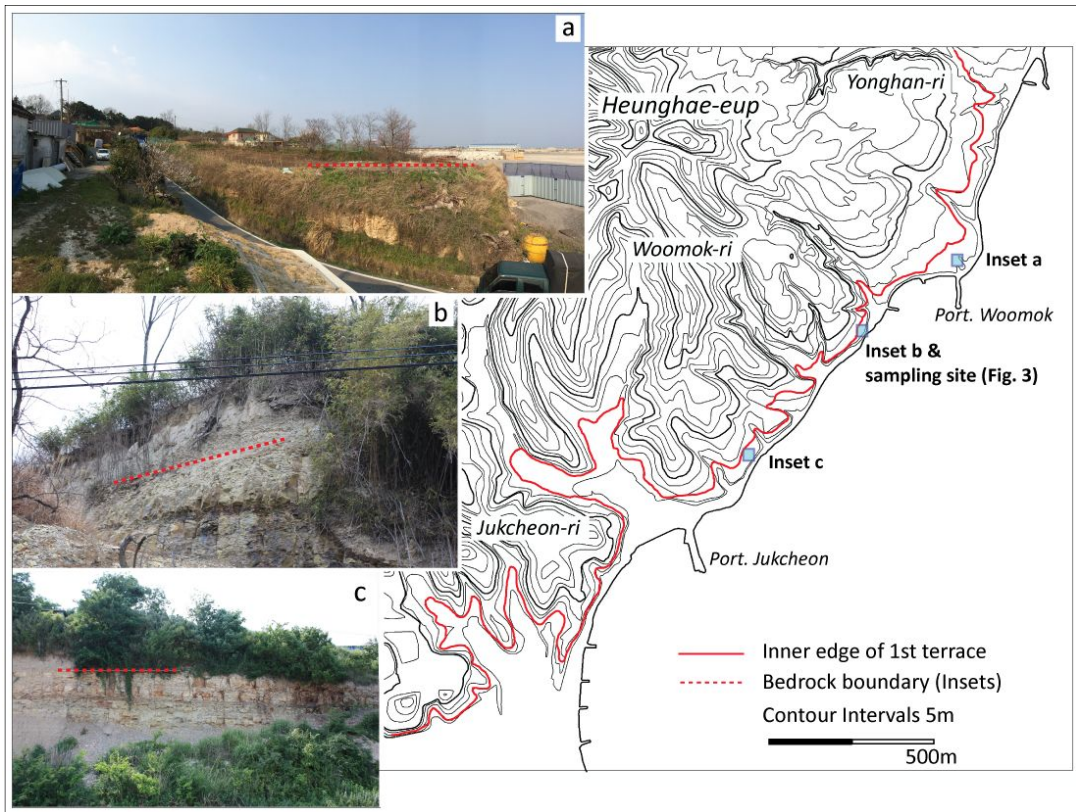


그림 1. 연구지역의 해안단구 분포

2) 연구방법

본 연구는 현 해빈 직상위에 분포하는 해안단구 제1면의 분포 및 구정선 고도, 형성 시기를 규명하는 일에 집중하고 있다. 이를 위해 네 차례의 현장조사가 실시되었으며 제시된 단구면의 규모와 추정 구정선 고도는 실측과 1:5000 지형도 판독 결과를 바탕으로 하고 있다. 단구면의 형성 시기를 규명하기 위한 절대연대측정은 OSL 연대측정법을 활용하였다. OSL(Optically Stimulated Luminescence) 연대측정 기술은 최근 지형학 분야에서 활발히 활용되는 절대연대측정법으로서 국내에서도 다양한 방법론 및 적용 사례에 대한 연구들이 다수 보고되고 있다(최정현 등, 2004; 신재열, 2012; Choi *et al.*, 2009; Shin, 2013). 무엇보다 OSL 연대측정법은 측정 가능한 시간 범위가 30만 년 내외까지 비교적 넓다는 점과 석영 또는 장석을 대상 물질로 한다는 점에서 시료 확보에

유리한 장점이 있다. 특히 퇴적층의 직접적인 퇴적시기를 추정할 수 있다는 점은 퇴적층 내 유기물을 대상으로 하는 탄소연대 측정이나 아미노산 연대측정과 대비되는 바가 뚜렷하여 상호간의 교차 검증에 활용하기 적합하다. 시료 채취 지점은 흥해읍 우목리 해안(39.094796N, 129.425921E)으로 수직으로 노출된 노두의 단면 정리 후 기반암과 퇴적층 경계부 직상부에서부터 약 70 cm 간격으로 세 개의 시료를 채취하였으며, 채취한 시료의 명칭은 노두 단면 상 상단에서부터 오름차순으로 부여하였다(그림 2). 상부 역층에서 채취한 PH-1은 잔자갈(pebble)과 왕모래가 주를 이루는 사력층으로 구성된 반면 PH-2와 PH-3은 잔자갈을 주로 하고 모래가 충전되어 있는 역층 중앙부와 기저부에서 각각 채취하였다. 현장에서는 직경 5 cm의 스테인리스강 파이프를 이용하여 시료가 햇빛에 노출되지 않도록 진행되었으며 운반용 불투명 비닐에 담아 실험실까지 운반하였다.

OSL 연대측정은 한국기초과학지원연구원 지구환경연구부에 의뢰하여 진행되었으며 단일시료재현법(Single-Aliquot Regenerative dose)에 따른 등가선량(Equivalent dose) 측정이 이루어졌다(Choi *et al.*, 2003). 연간선량(Dose rate)을 결정하기 위한 방사성 원소(K, U, Th)의 함량 분석은 한국기초과학연구원에서 고분해능 감마스펙트로미터를 사용해 측정되었다.

3. 퇴적상 및 연대측정 결과

1) 퇴적상

연구지역 일대에서 해안단구 제1면의 기저를 이루는 기반암은 평탄하게 침식되어 상위 피복된 해성 기원의 퇴적층과 뚜렷한 경계를 보인다(그림 2). 기반암으로부터 상위로 역층은 약 230 cm 층 후를 보이며 다시 역층 상위로는 모래와 점토로 구성된 고사구층이 약 120 cm 퇴적되어 있다. 최상부에는 현생 토양층이 약 70 cm 정도 발달하고 있다. 역층의 구성은 왕자갈(cobble)에서 왕모래(granule)까지 다양하며 전체적으로 퇴적층 하위에서 상위로 갈수록 입경이 작아지는 점이층리적 특징을 보이나 세부적으로는 분급이 양호한 각 층리가 교호하는 퇴적상을 함께 보이고 있다. 역의 원마도는 매우 높아 대부분 원력의 형태를 보이며

이러한 원력층은 과량의 진행 방향에 따라 장축 방향으로 배열된 외상중첩구조(imbrication)를 잘 나타내고 있다. 이와 같은 퇴적상은 전반적으로 퇴적층의 발달이 해안의 전면에서 과량의 에너지 분급에 따라 반복적으로 퇴적되었음을 시사하고 있다(Busconbe and Masselink, 2006). 기질 물질은 대체로 모래와 실트로 구성되어 있다. 역의 풍화 정도는 해머로 타격하여도 쉽게 깨지지 않을 정도이며 퇴적층 내 이차적 풍화의 진행 정도도 낮아 교결 물질의 발달도 적은 편이다. 다만 퇴적층 내 수분 함량은 높은 편이며 이는 지표로부터의 배수관계에 영향을 받는 것으로 추정된다. 역층의 색은 역의 기원 및 토양층의 수분 상태와 관련하여 대체적으로 백색이거나 일부 산화가 진행되어 갈색을 띄고 있다. 단구역층 상위에 퇴적되어 있는 고사구층은 유기물 함량이 비교적 많은 이토질 모래층(muddy sand)으로 일부에서 소규모의 사층리가 관찰되기도 한다. 박명호 등(2007)에 의하면 이 고사구층 내 유기물은 대체적으로 육상 식물 기원으로, 고사구층의 형성은 풍성 작용에 의한 것으로 보고하고 있다.

2) OSL 연대측정 결과

각 시료로부터 분리·추출한 90~250 μm의 석영 입자를 대상으로 16개의 측정 표본에 대한 등가선

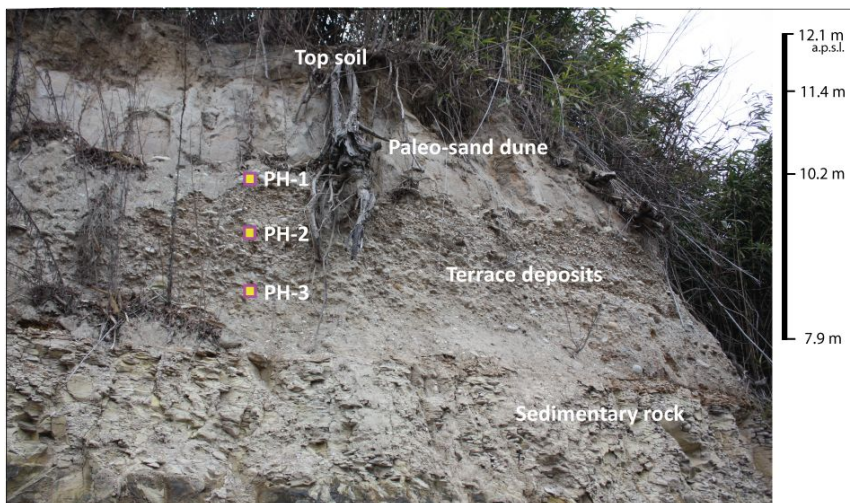


그림 2. 해안단구 제1면의 퇴적상 및 OSL 시료 채취 지점 (PH-1: 58 ± 3 ka, PH-2: 71 ± 6 ka, PH-3: 95 ± 13 ka)

표 2. 각 시료의 등가선량(Equivalent dose, D_e), 연간선량(dose rate, D_r) 및 OSL 연대

Sample name	Depth (m)	Water content (%)	Dose rate (Gy/ka^{-1})	Equivalent dose (Gy)	Optical age (ka)**
PH-1	2.1	16.9 (17.9)*	3.67 ± 0.10	213 ± 12	58 ± 3 (58 ± 4)***
PH-2	2.8	3.9 (11.3)	3.35 ± 0.09	257 ± 22	71 ± 6 (77 ± 7)
PH-3	3.5	7.7 (14.8)	2.40 ± 0.07	243 ± 32	95 ± 13 (102 ± 14)

* 괄호 안 숫자는 포화함수량(saturated water content)에 대한 %.

** 중앙값 모델($\pm 1\sigma$ 표준편차)에 따른 연대값.

*** 괄호 안 숫자는 포화함수량에 대한 OSL 연대.

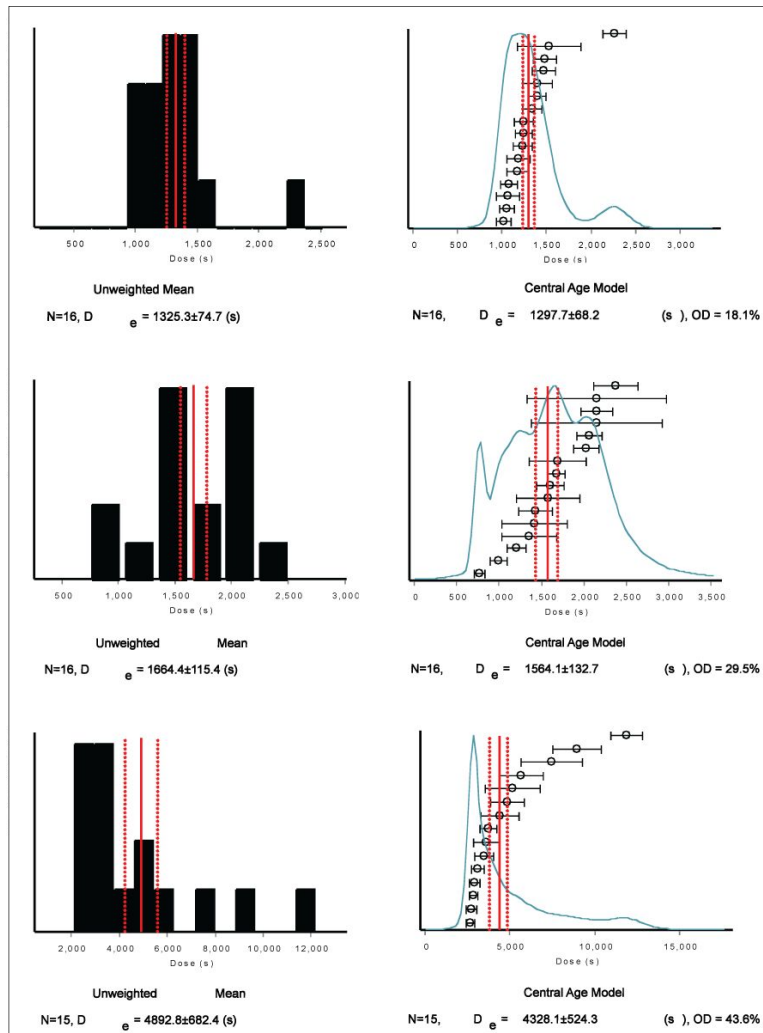


그림 3. 각 시료의 측정 등가선량(D_e)에 대한 히스토그램과 확률밀도 분포 (위로부터 PH-1, PH-2, PH-3)

량을 측정하였으며, 이에 대한 도수분포와 중앙값 모델에 따른 확률밀도 분포값은 <그림 3>에 도시되어 있다. 최종적인 각 시료의 OSL 연대값은 <표 2>과 같다. 세 개의 시료는 모두 수분 함량이 다소 높게 나타나는 특징을 보인다. 일반적으로 퇴적층 내 높은 수분 함량은 방사선 감쇠 효과를 발생시키며 이로 인해 석영 입자가 주변 퇴적물로부터 받은 방사선량은 주변 퇴적물이 방출한 방사선량 보다 적게 측정될 수 있다. 이는 곧 실험실에서 측정된 연간선량값이 퇴적 이후 석영 입자가 직접 받은 방사선량 보다 상대적으로 높게 평가되는 결과를 나타내며 최종적으로는 실제 퇴적 시기보다 짧은 OSL 연대값을 나타내는 원인이 될 수 있다(Aitken, 1998). 따라서 OSL 연대측정 결과를 보고할 때는 퇴적물의 포화수분함량에 대한 연대값과 현재 수분함량에 대한 연대값을 함께 보고하는 것이 바람직하다(최정현 등, 2004). 측정 연간선량(Dose rate, D_r)과 등가선량(Equivalent dose, D_e)을 바탕으로 OSL 연대를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{OSL 연대} = \text{등가선량}(D_e) / \text{연간선량}(D_r)$$

측정 결과 OSL 연대값은 PH-1가 58 ± 3 ka, PH-2는 71 ± 6 ka, PH-3은 95 ± 13 ka으로 각각 확인되며 각 연대값은 시료 채취 단면상에서의 층서적 관계와 잘 부합하고 있다.

4. 토 의

1) 해안단구 제1면의 구정선고도

연구지역의 해안단구 제1면은 김서운(1973)의 정자리단구, Oh(1981)의 저위단구(산하리단구) 등으로 일찍이 보고된 바 있으며 이후 최성길(1996)의 저위해성단구Ⅱ면(죽천단구Ⅱ면)으로 분류된 바 있다. 연구지역에 인접해서는 포항시 호미곶면에서 경주시 감포읍 일대를 대상으로 한 최성자(2004)의 2단구에 대비되며 경주시 양남면 수렴리와 읍천리 일대에서도 해발고도 10 m 내외의 해안단구는 모식적으로 잘 발달하고 있다(이호일 등, 2013; 황상일 등, 2012). 나아가 중부 동해안 지

역에서는 윤순옥 등(2003)의 저위Ⅱ면과 김종욱 등(2007)의 제2단구에 각각 대비된다. 각 연구에서 제시된 구정선 고도는 최성길(1996)에서 10 m, 최성자(2004)에서 10~12 m로 보고되었으며 중부 동해안 일대에서도 윤순옥 등(2003)에 의해 10 m로 보고된 바 있다.

연구지역 내 해안단구 제1면의 기반암과 퇴적층의 경계는 해발고도 8 m에서부터 10 m 부근에서 주로 관찰되며 단구면 상에서의 해발고도는 퇴적층을 층후에 따라 8 m에서 16 m까지 보다 다양하게 관찰된다. 단구면의 형태와 분포 고도는 퇴적층의 유무 내지는 층후의 차이, 육화 이후 육상에서의 침식과 퇴적작용, 인위적 요인까지 포함하여 다양한 요인들에 의해 동일한 시기 형성된 단구에 대해서도 서로 상이할 수 있다. 그러나 단구면의 분포 고도와 달리 과거 해수면 높이를 나타내는 구정선 고도는 지질 변화가 없는 한정된 지역 내에서는 일정하며 이 때 단구면 가장 내측의 기반암과 퇴적층의 경계 지점 또는 단구면과 단구애의 경계 지점이 명확한 구정선 고도가 된다. 현장조사 과정에서 해안단구 제1면의 구정선 고도를 직접 확인할 수 있는 표식 지점을 발견할 수는 없었다. 그러나 연구지역 내에서 해안단구 제1면은 40 m 내외의 비교적 좁은 폭과 5~10% 정도의 낮은 단구면 경사도를 고려할 경우 해발고도 8 m에서 10 m 부근에서 확인되는 기반암과 퇴적층의 경계 지점들 중 10 m 지점은 앞선 연구들에서 제시된 바와 같이(최성길, 1996; 윤순옥 등, 2003) 해안단구 제1면의 구정선 고도로 추정된다.

2) 해안단구 제1면의 형성 시기

본 연구에서는 단구역층 시료를 대상으로 퇴적층 하단에서부터 각각 95 ± 13 ka, 71 ± 6 ka, 58 ± 3 ka의 OSL 연대값을 얻을 수 있었다. 이 중 기반암과의 경계부로부터 약 70 cm 상위 지점에서 얻은 퇴적층 최하단부의 95 ± 13 ka의 퇴적 연대는 고파식면의 형성 및 해안 퇴적물의 퇴적 시기에 관한 가장 직접적인 연대값이 될 것으로 판단되며 노두 단면상 일정한 수직 간격을 두고 얻은 71 ± 6 ka과 58 ± 3 ka의 연대값은 이후 지각 융기와 함께 해진과 해퇴가 반복되는 해수면 변동 과정을 나타내는

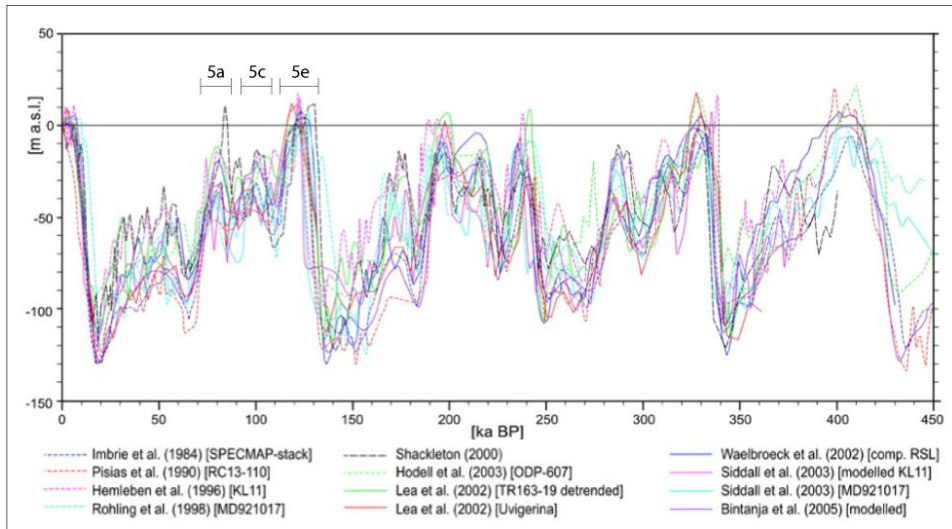


그림 4. 후기 플라이스토세 동안의 세계적 해수면 변동 곡선(Caputo(2007)로부터 일부 수정)

것으로 해석된다. 즉, 최종간빙기 중 두 번째 아간빙기(Marine Oxygen Isotope Stage; MIS 5c)에 형성된 해안단구 제1면은 이후 첫 번째 아간빙기(MIS 5a)의 해퇴 시기까지 파랑의 퇴적작용을 지속적으로 받은 것으로 판단된다(그림 4). 10만 년 BP를 전후한 MIS 5c와 8만 년 BP를 전후한 MIS 5a 시기는 유사한 수준의 고해수면 상태를 보였던 것으로 보고되고 있으며 특히 MIS 5a와 5c 시기의 해수준은 단일한 고점을 보인다기 보다 다변화적 상태를 보인다는 점과 각 아간빙기 간의 시간 간격이 2만 년 내외라는 점에서(Bard *et al.*, 1990; Hemleben *et al.*, 1996; Labeyrie *et al.*, 1987; Lambeck and Chappell, 2001; Siddall *et al.*, 2003) 지각의 융기속도가 빠르지 않은 지역에서는 육화과정 중 당시 전빈(foreshore) 지역은 해침과 해퇴작용을 반복적으로 받았을 가능성이 높다. 한편 본 연구지역의 해안단구 제1면에 대해서 최성길(1996)은 아미노산 연대측정법과 탄소 연대측정법을 통해 단구 퇴적층 내 토탄의 매몰 시기를 각각 77,000년 BP와 34,440년 BP로 보고한 바 있으며 이를 바탕으로 해안단구(저위II면)의 퇴적시기를 MIS 5a로 해석한 바 있다. 김중욱 등(2005)은 시료 채취 지점은 다르나 본 연구지역과 동일한 용한리와 우목리 일대의 해발고도 13m와 16m 지점에서 채취한 해안단구 퇴적물을 대상으로 한

OSL 연대측정에서 73~78 ka 시기의 퇴적연대를 얻은 바 있으며, 나아가 용한리 일대에서 해안단구 제1면의 역층 상위에 피복되어 있는 풍성 고사구층 내 유기물의 탄소 연대측정 결과는(박명호 등, 2007) 790년 BP와 23,000년 BP로 보고된 바 있다. 일반적으로 퇴적층 내 유기물 시료를 대상으로 하는 아미노산 연대측정과 탄소 연대측정법은 퇴적층의 퇴적 시기에 대한 최소값을 지시한다는 점(Murray-Wallace *et al.*, 2005)에서 포괄적으로 최성길(1996), 박명호 등(2007)의 절대연대자료들과 본 연구에서의 OSL 연대값과는 잘 부합하고 있으며, 무엇보다 단구퇴적층 최하단부에서 얻은 95±13 ka의 퇴적연대는 연구지역 해안단구 제1면의 가장 직접적인 형성시기(MIS 5c)를 지시해주는 것으로 판단된다.

3) MIS 5c 시기의 고해수준

해안단구 제1면의 구성선 고도와 형성 시기에 관한 본 연구 결과들은 당시 고해수준 자료와 함께 동해안 지역의 현생 지각 융기속도를 산출하는데 중요한 정보로 활용될 수 있다. 사실 MIS 5a와 5c 시기의 세계적 고해수준 기록에 대해서는 다양한 의견들이 제시된 상태이며(Ludwig *et al.*, 1996; Ota and Omura, 1992; Richards *et al.*,

1994; Stirling *et al.*, 1998)³⁾ 불행하게도 한반도 주변의 기록에 대해서는 아직 알려진 바가 없다.

지각의 변형률이 일정하다는 가정 하에 구정선 고도와 형성 시기, 당시 고해수준이 밝혀진 해안단구로부터 얻은 지각의 융기곡선은 상·하위 해안단구의 형성 과정에 대해 새로운 사실의 추론을 가능하게 한다. 예를 들어, 연구지역을 포함해 동해안을 따라서는 해발고도는 20~30m에서 해안단구 제2면이 폭넓게 발달하고 있다⁴⁾. 이 해안단구 제2면은 동해안 지역 여러 단의 해안단구 중 가장 모식적인 분포를 보이는 단구면으로서 본 연구지역 내에서는 최성길(1996)에 의해 구정선 고도 18 m의 저위해성단구(죽천단구) I 면으로 분류된 바 있으며 인접한 포항시와 경주시 일대에서도 최성자(2004)의 구정선 고도 20~22 m의 3단구, 황상일 등(2012)의 구정선 고도 25 m의 저위 I 면으로 각각 분류된 바 있다. 이 단구면의 형성 시기는 최종간빙기 극상기(MIS 5e, c. 125,000년 BP)로 알려져 있다(최성길, 1996; Choi *et al.*, 2009). 각

연구에서 제시한 구정선 고도는 다양하지만 단구면의 분포 고도에 대한 중간값(25m)을 임의적으로 선택하고 당시 고해수면을 0 m에서 +6 m까지 가정한다면(Hearty *et al.*, 2007; Neumann and Macintyre, 1985) 지난 125,000년 이후 동해안 지역의 평균 지각 융기 속도는 $1.76 \pm 0.24 \text{ m}/10,000$ 년이 된다. 이 융기 속도와 구정선 고도 10 m의 해안단구 제1면에서 추론한 융기 속도가 동일하기 위해서는 당시 고해수준은 $7.6 \pm 2.4 \text{ m}$ 가 되며 100,000년 BP를 전후한 MIS 5c 시기의 고해수준은 현 해수준 보다 -5.2 m에서 -10 m 수준에 머물렀을 것으로 추정된다(그림 5). 물론 이러한 추론은 해안단구 제2면의 구정선 고도가 아직 명확하지 않다는 점에서 정량적이지 못하지만 동해안 지역에 있어 MIS 5c 시기 고해수준은 세계적인 수준에 비해 상대적으로 해수면 하강의 정도가 크지 않았던 것으로 추정된다. 이러한 가설을 검증하기 위해서는 육상에서의 상대적 고해수준 기록들이 양적으로 축적되는 한편 해수 체적 변화에 따른 절대적 해수면 변동에 관한 정보가 반드시 필요하다.

5. 결론

본 연구는 동해안 지역의 해안단구 지층서 수립을 위해 시작점이 될 수 있는 해안단구 제1면의 구정선 고도와 절대연대자료를 제시하고 있다. 해안단구 제1면의 구정선 고도는 10 m이며 연구지역 일대에서 해안단구 제1면의 형성 시기는 10만 년 BP 내외의 MIS 5c 시기이며 MIS 5a의 해퇴 시기까지 파랑의 퇴적작용을 반복적으로 받은 것으로 판단된다. 이번 연구 결과는 기존에 보고된 연구 결과들과도 일치하는 것으로 동해안 지역 해안단구 제1면에 관한 사실들로 재확인된다. 앞서 언급하였듯 본 연구는 동해안 해안단구의 지층서 수립을 위한 일차적 작업으로 진행되었으며 최종적으로 한반도 남해안 및 서해안 지역에 발달하는 해안단구와 대비함으로써 한반도 현생 지각운동의 양식과 변형률을 정량적으로 산출하고자 하는 목적에 있다. 현재 남해안과 서해안 일대를 대상으로 한 연구는 진행 중에 있다.

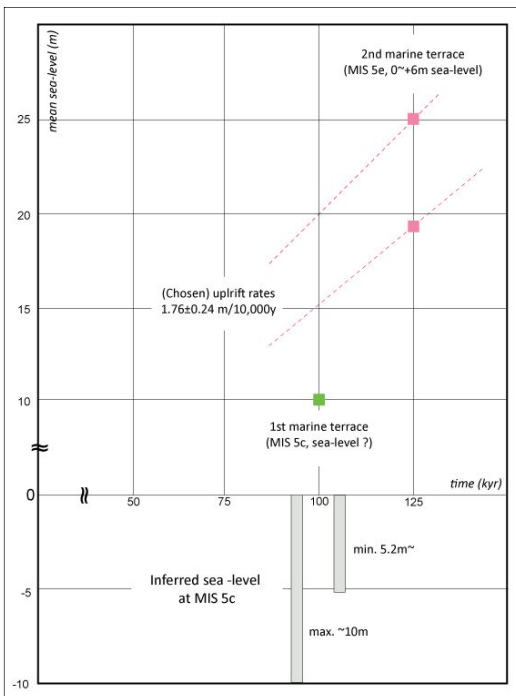


그림 5. 해안단구 제2면으로부터 추론한 지각의 융기속도와 이에 대비한 해안단구 제1면의 형성 당시(MIS 5c)의 추정 고해수준

주

- 1) 한 지역에 분포하는 해발고도를 달리하는 여러 단의 해안단구에 있어 지금까지 개별 연구자들에 의해 부여된 명칭들은 각 단구별 모식지의 지명을 사용하는 사례(김서운, 1973; Oh, 1981)에서부터 저위, 중위, 고위단구 등의 높이를 나타내는 명칭을 사용한 사례(윤순옥 등, 2003), 해발고도에 따른 오름차순과 내림차순(김종욱 등, 2007; 최성길, 1996; Lee, 1987) 등으로 명명한 사례까지 매우 다양하다. 이와 같은 혼란한 명칭들은 사회 일반에 뿐 만 아니라 학문의 후속세대들에게까지 단구면의 대비와 연구 내용의 종합적 이해를 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 본 연구에서는 각 지역에서 가장 높은 해발고도의 해안단구에 대한 정보는 여전히 불확실하다는 점에서 해안으로부터 오름차순으로 명명하고자 하며 따라서 현 해빈 직상위 최저위 해안단구를 제1단구로 이름을 부여하고 있다.
- 2) 보편적으로 동해안 지역 일대에는 해안에 인접해 해발고도 0.5~10m 이내 하나의 지형면이 발달하고 있다. 일찍이 이 지형면은 김서운(1973)에 의해 주전리면, Oh(1981)에 의해 홀로세단구면으로 분류된 바 있으며 최근까지 일부 연구자들에 있어서 최저위 해안단구면으로 분류되고 있다(김종욱 등, 2007; 최성자, 2004). 그러나 대부분 이 지형면은 해발고도를 기준으로 분포 고도만 알려져 있으며 구성선 고도를 직접 확인할 수 있는 지역은 드물다. 이 지형면 퇴적층의 퇴적상은 주로 사질 퇴적층이며 곳에 따라 토탄층과 역층이 협재하는 상태로 관찰된다. 사질층 내에는 사층리 구조가 확인되는 경우가 종종 있다. 퇴적 시기에 대한 절대연대측정 결과들은 1,000년 BP 이내로 보고된 것에서부터 수 1,000년 BP 내외 또는 일부 30,000년 BP까지 보고되고 있다(김종욱 등, 2007, Choi *et al.*, 2009). 이러한 퇴적상 특징과 함께 퇴적 시기에 관한 절대연대 결과들을 종합할 때, 이 지형면은 해성 기원이라기 보다 풍성기원의 퇴적층일 가능성이 높으며, 더욱이 만일 이 지형면이 30,000년 BP 내외에 형성된 해성 기원의 퇴적층이 육화된 것이라 가정할 경우 당시 고해수면 기록과 비교하여 상위 단구면들에서 산출되는 지각의 융기율과는 매우 상이한 결과를 보인다. 이러한 이유로 해발고도 10m 이내의 다양한 해발고도에서 발달하는 이 지형면은 최대 MIS 3 시기 이후 형성된 고사구층이거나 지역에 따라서는 후빈(backshore) 지역의 저습지 퇴적층 또는 홀로세 충적층일 가능성이 높으며 지역에 따라서는 현생 해빈 지형일 것으로 판단된다. 해안단구는 육화된 과거 해성 평탄면과 그 해성 퇴적층을 의미한다는 점에서 본 연구에서 이 지형면은 해안단구 분류에서 제외하고 있다. 이 지형면의 해발고도가 지역에 따라 상이한 것은 내만 또는 파식대 지역과 같은 형성 당시의 고지형 차이를 비롯하여 퇴적환경 차이에 기인한 것으로 판단된다.

- 3) MIS 5a와 5c 시기 고해수면에 대한 세계적 기록은 -20m 이상 낮았다는 보고에서부터 현재의 해수준과 유사했었다는 자료까지 상당히 다양하게 제시되고 있다. 당시 고해수면의 이러한 지역적 차이에 대해 일부 연구는 북반구 빙하 한계선에 위치한 일부 지역에서는 빙하 소멸 이후 나타난 평형보상에 따른 지각 융기현상이 해수면의 상대적 하강을 유발시킨 결과인 것으로 설명되기도 하지만(Muhs *et al.*, 2002) MIS 5e 시기 동안에는 해수면의 지역적 차이가 크지 않았다는 점에서 이와 같은 설명도 여전히 불완전한 상태이다.
- 4) 본 연구는 동해안 지역 해안단구의 지층서 수립과 한반도 각 해안의 해안단구 층서 대비를 목적으로 가장 명확한 기준이 될 수 있는 해안단구 제1면의 구성선 고도와 형성 시기에 대해서만 논의를 집중하고 있다. 사실 해안단구 제2면의 구성선 고도 설정은 여전히 중요한 문제로 남아있으며 본문에서와 같이 지각의 융기속도를 산출함에 있어서 불명확성을 가중시키는 요인이 되고 있다. 그러나 해안단구 제2면을 비롯하여 상위 단구들에 대한 다양한 논의들은 차후의 연구과제로 차치하도록 하는 한편 본 연구를 계기로 이와 관련한 새로운 논의와 방법론들이 다양하게 제기되기를 기대한다.

문헌

김서운, 1973, 한반도 남동단부(방어진-포항) 해안에 발달하는 단구에 관한 연구, 지질학회지, 9(2), 89-121.

김종욱·장호완·최정현·최광희·변종민, 2005, 포항 북부 홍해읍 일대의 해안단구 지형 특성과 단구 퇴적물 연대, 한국지형학회지, 12(1), 103-116.

김종욱·장호완·최정현·최광희·변종민, 2007, 울진 후정-죽변 일대의 해안단구 퇴적물에 대한 OSL 연대측정, 한국지형학회지, 14(1), 15-28.

박명호·김지훈·최성자·길영우·송윤구, 2007, 포항 용한리 지역의 퇴적지층에 대한 절대연대 측정 및 지화학 분석, 지질학회지, 43(1), 55-64.

신재열, 2012, 호주 남동부 Otway 해안의 후기 신세3기 및 제4기 융기 운동(I): 제4기 해안단구 발달 및 지층서, 한국지구과학회지, 33(6), 519-533.

신재열, 2015, 해안단구 연구를 위한 ¹⁰Be 연대측정법의 적용과 한계점, 한국지구과학회지, 36(6), 512-519.

엄상호·이동우·박봉순, 1964, 한국지질도(1:50,000) 포항도폭 설명서, 국립지질조사소.

- 이호일·백인성·강희철·천종화, 2013, 경북 경주시 양남면에 분포하는 제2 해안단구 퇴적층의 산상 및 형성과정, *지질학회지*, 49(4), 417-436.
- 윤순옥·황상일·정석교, 2002, 삼척 오십천 중·하류부의 하안단구 지형발달, *대한지리학회지*, 37(3), 222-236.
- 윤순옥·황상일·반학균, 2003, 한반도 중부 동해안 정동진, 대진지역의 해안단구 지형발달, *대한지리학회지*, 38(2), 156-172.
- 최성자, 2003, 진하-일광 지역의 해안단구, *자원환경지질*, 36(3), 233-242.
- 최성자, 2004, 대보-구룡포-감포 지역의 해안단구 (II), *자원환경지질*, 37(2), 245-253.
- 최성길, 1993, 한국 동해안에 있어서 최종간빙기의 구정선고도 연구: 후기 갯신세 하성단구의 지형층후적 대비의 관점에서, *대한지리학회지*, 7(1), 1-26.
- 최성길, 1995, 한반도 중부동해안 저위해성단구의 대비와 편년, *대한지리학회지*, 30(2), 103-109.
- 최성길, 1996, 한국 남동부해안 포항 주변지역 후기갯신세 해성단구의 대비와 편년, *한국지형학회지*, 3(1), 29-44.
- 최성길·장호·김주용, 2003, 한반도 남동부해안 고위해성단구의 신분류 시안, *한국지형학회지*, 10(1), 93-98.
- 최정현·정창식·장호완, 2004, 석영을 이용한 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용, *지질학회지*, 40(4), 567-583.
- 황상일·신재열·윤순옥, 2012, 한반도 남동부 경주시 수제리-수림리의 해안단구와 제4기 환경변화, *한국지형학회지*, 19(3), 97-108.
- Aitken, M. J., 1998, *An Introduction to Optical Dating: The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence*, Oxford University Press, Oxford.
- Bard, E., Hamelin, B., and Fairbanks, R. G., 1990, U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years, *Nature*, 346, 456-458.
- Buscombe, D. and Masselink, G., 2006, Concepts in gravelbeach dynamics. *Earth-Science Review*, 79, 33-52.
- Caputo, R., 2007, Sea-level curves: Perplexities of an end-user in morphotectonic applications, *Global and Planetary Change*, 57, 417-423.
- 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.
- Hearty, P. J., Hollin, J. T., Neumann, C., O'Leary, M. J., and McCulloch, M., 2007, Global sea level fluctuations during the Last Interglaciation (MIS 5e). *Quaternary Science Reviews*, 26, 2090-2112.
- Hemleben, Ch., Meischner, D., Zahn, R., Almogi-Labin, A., Erlenkeuser, H., and Hiller, B., 1996, Three hundred eighty thousand year long stable isotope and faunal records from the Red Sea: influence of global sea level change on hydrography, *Paleoceanography*, 11(2), 147-156.
- Labeyrie, L. D., Duplessy, J. C., and Blanc, P. L., 1987, Variations in mode of formation and temperature of oceanic deep waters over the past 125,000 years, *Nature*, 327, 477-481.
- Lambeck, K. and Chappell, J., 2001, Sea level change through the Last Glacial cycle, *Science*, 292, 679-686.
- Lee, D. Y., 1987, Stratigraphical research of the Quaternary deposits in the Korean peninsula, *The Korean Journal of Quaternary Research*, 1(1), 3-20.
- Ludwig, K. R., Muhs, D. R., Simmons, K. R., Halley, R. B., and Shinn, E. A., 1996, Sea-level records at ~80 ka from tectonically stable platforms: Florida and Bermuda, *Geology*,

- 24, 211-214.
- Muhs, D. R., Simmons, K. R., and Steinke, B., 2002, Timing and warmth of the Last Interglacial period: new U-series evidence from Hawaii and Bermuda and a new fossil compilation for North America, *Quaternary Science Reviews*, 21, 1355-1383.
- Murray-Wallace, C. V., Ferland, M. A., and Roy, P. S., 2005, Further amino acid racemisation evidence for glacial age, multiple lowstand deposition on the New South Wales outer continental shelf, southeastern Australia, *Marine Geology*, 214, 235-250.
- 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.
- Oh, G. H., 1981, Marine terraces and their tectonic deformation on the coast of the southern part of the Korean Peninsula, *Bull. Dept. Geography, Univ. of Tokyo*, 13, 1-16.
- Ota, Y. and Omura, O., 1992, Contrasting styles and rates of tectonic uplift of coral reef terraces in the Ryukyu and Daito Islands, southwestern Japan, *Quaternary International*, 15/16, 17-29.
- Richards, D. A., Smart, P. L., and Edwards, R. L., 1994, Maximum sea levels for the last glacial period from U-series ages of submerged speleothems, *Nature*, 367, 357-360.
- Shin, J., 2013, Stratigraphy and geochronology of Quaternary marine terraces of Tasmania, Southeastern Australia: implications on neotectonism, *Geosciences Journal*, 17(4), 429-443.
- Siddall, M., Rohling, E. J., Almogi-Labin, A., Hemleben, Ch., Melschner, D., Schmelzer, I., and Smeed, D. A., 2003, Sea-level fluctuations during the last glacial cycle, *Nature*, 423, 853-858.
- Stirling, C. H., Esat, T. M., Lambeck, K., and McCulloch, M. T., 1998, Timing and duration of the Last Interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral reef growth, *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 745-762.
- **교신** : 박경근(경상북도 독도재단, 41246, 대구광역시 동구 효신로 11)
- Correspondence : Park, Kyung Geun (Gyeongsangbuk-do Dokdo Foundation, 41246, 11 Hyosin-ro Dong-gu Daegu, Korea, dokdo@koreadokdo.or.kr, Tel: +82-53-742-8156, Fax: +82-53-742-8157)
- (접수: 2016.07.14, 수정: 2016.08.15, 채택: 2016.08.25)