

<Short Note>

충남 다사리 해안사구에 기록된 폭풍퇴적층

최광희¹ · 장태수^{2,*} · 최정현³ · 김윤미¹ · 이수용¹

¹국립환경과학원 자연환경연구과

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

³한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

모래가 쌓여 형성되는 해안사구 지형은 종종 과거의 해안 환경변화에 대한 결정적인 증거를 제공한다. 해안 침식과정에서 드러난 충남의 다사리 사구에는 모래층 사이에 1~2 매의 패각층이 협재되어 있다. 이 층은 모래 외에도 굴 껍데기(oyster), 이매패류(bivalve), 고둥류(snail), 원마도가 높은 잔자갈(pebble)로 구성되어 있다. 이 연구는 사구절벽에서 발견된 패각층 내의 퇴적물 특징을 조사하고 석영에 대한 광여기루미네선스연대측정과 방사성탄소연대측정을 통해 패각층의 퇴적시기 및 퇴적과정을 밝히고자 한다. 연구결과, 흑색층에 협재된 패각층은 지난 2,500년에서 200년 이전 사이에 퇴적되었을 가능성이 높으며, 그 퇴적과정은 폭풍에 의한 것으로 추정된다.

주요어: 극한기후사건, 폭풍퇴적층, 해안사구, 기후변화, OSL 연대측정

Kwang Hee Choi, Tae Soo Chang, Jeong-Heon Choi, Yoonmi Kim and Soo Yong Lee, 2014, Burial storm deposits recorded at the coastal dunes, Dasari, Chungnam Province. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 4, p. 539-549

ABSTRACT: Coastal sand dunes often provide crucial information on the paleo-environment and its changes in coastal areas. In the foredune, Dasari, Chungnam Province, a few shell layers are observed within sandy scarp, which was recently exposed by coastal erosion. The shell layers are composed of oysters, bivalves, snails and rounded gravels. In this study, we focus on the depositional processes and timing of the shell layer formation, based on their sedimentological characteristics as well as quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) and radiocarbon dates of the deposits. It is likely that the shell layers were deposited between 2.5~0.2 ka, by the storm events.

Key words: extreme weather event, storm deposits, coastal dune, climate change, OSL dating

(Kwang Hee Choi, Yoonmi Kim and Soo Yong Lee, Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Republic of Korea; Tae Soo Chang, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Jeong-Heon Choi, Division of Earth and Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, Ochang Center, Chungbuk 363-883, Republic of Korea)

1. 서 론

기후변화에 의한 해수면상승과 이상기상현상의 발생으로 자연재해의 빈도와 규모는 전지구적으로 점점 더 증가하고 있다(Holland and Webster, 2007; Grinsted *et al.*, 2013). 북대서양의 경우, 지난 100년

동안 약 0.7°C의 수온 상승으로 인하여 허리케인의 발생빈도가 두 배로 증가하였으며, 최근 6년 동안 대형 허리케인(풍속 ≥ 50 m/sec)의 발생빈도는 그 이전보다 약 2.5배 증가한 것으로 분석되었다(Goldenberg *et al.*, 2001; Holland and Webster, 2007). 만일 전 지구적으로 수온이 1°C 상승하면 카트리나 규모의

* Corresponding author: +82-42-868-3197, E-mail: tschang@kigam.re.kr

허리케인 빈도가 2~6배 증가할 것이라는 기후변화모델링 결과도 제시된 바 있다(Grinsted *et al.*, 2013). 우리나라의 경우에도 최근 최대 해일고의 증가추세가 신뢰할만한 수준에서 나타나고 있으며(Kwon *et al.*, 2008; Oh, 2010), 이로 인해, 슈퍼태풍이 내습할 경우에는 슈퍼폭풍의 발생과 더불어 막대한 피해가 예상된다(Hur *et al.*, 2008; Han *et al.*, 2009; Wendel, 2014). 이런 까닭에 미래 기후변화에 대한 예측과 자연재해의 저감은 최근 자연과학의 중요한 연구주제가 되고 있다.

기후변화와 결부된 자연재해의 문제점은 미래예측에 대한 불확실성에 기인한다. 여러 가지 시나리오를 바탕으로, 다양한 모델링 기법을 통해 미래를 예측하려는 시도들이 있으나(Turner *et al.*, 2012; Ziegler, 2012), 근대적 관측자료는 최근 100년에 불과하여 예측의 불확실성이 크다. 이런 점에서 '조선왕조실록'과 같은 과거 문헌에 대한 연구(예, An and Chun, 1985)는 하나의 대안이 될 수 있다. 또한 문헌에 기록되지 않은 사건이나 역사시대 이전에 대한 연구에 있어서는, 퇴적지형에 보존된 지질학적 기록들이 매우 중요한 단서를 제공할 수 있을 것이다. 이렇듯 미래의 자연재해에 대비하기 위해서는 과거에 발생했던 사건들을 찾아내고 그 과정에 대하여 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

바람에 날린 모래가 퇴적되어 형성된 해안사구는 빈제(beach-ridges)나 연안습지와 더불어 해안의 환경변화를 잘 반영하고 기록한다(Taylor and Stone, 1996; Wilson *et al.*, 2004; Hesp *et al.*, 2007). 해안사구는 기후나 해수면의 변동, 피복식생의 변화에 따라 퇴적양상이 변화하고 태풍이나 해일에 의해 전사구지대가 침식되는 지형이기 때문이다(Buynevich *et al.*, 2004; Froede, 2006; Clemmensen *et al.*, 2007). 국내에서도 사구내의 고토양(paleosoil) 기록을 비롯하여, 기후변화와 사구 발달과정의 관계가 활발하게 연구되어 왔다(Munyikwa *et al.*, 2005, 2008; Seo *et al.*, 2005; Park and Son, 2007; Choi *et al.*, 2008, 2014a). 하지만 아직까지 과거에 발생한 폭풍에 대한 증거는 일부 연구(Choi *et al.*, 2008) 이외에는 거의 보고되지 않고 있다. 이런 점에서 폭풍퇴적층으로 추정되는 패각층이 발견된 충남 다사리 해안사구는 연구가치가 크다. 미래 자연재해를 예측하는데 필요한, 과거 폭풍에 대한 중요한 단서가 될 수 있기 때문이다.

이 연구는 다사리 해안사구에 드러난 패각층을 중심으로 퇴적물의 특징을 조사하고 모래시료에 대한 광여기 루미네선스(Optically Stimulated Luminescence; OSL) 연대측정과 유기물에 대한 방사성탄소연대측정을 통해 그 퇴적시기 및 퇴적과정을 밝히고자 하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

다사리 해안사구는 충남 서천군에 위치하며, 다사항의 북쪽에 위치한 돌출부를 중심으로 북북서-남남동 방향으로 뻗은 사취(spit)를 따라 길게 형성되어 있다(그림 1). 사구의 규모는 길이 1 km, 폭 100~300 m에 이르고 사구열의 높이는 10 m를 넘는다. 1960년대 이후, 지속적으로 실시된 곰솔(*Pinus thunbergii*) 식재사업으로 인해 현재 대부분의 해안사구지대는 곰솔림으로 피복되어 있다. 하지만 1967년에 촬영된 항공사진에는 대부분이 나지(bared land)였으며 포물선 형태의 사구지형들(U-shaped dunes or parabolic dunes)이 잘 발달되어 있었다. 따라서 다사리 사구지대는 전반적으로 북쪽으로 뻗은 사취 위에 풍성사구사가 퇴적된 것으로 요약된다. 이와 같은 지형적 특징을 들어, Youn *et al.* (1977)은 다사리사구를 비롯하여 서해안 일대에 분포하는 다수의 해안사구들을 이른 바, 고사취군(古砂嘴群)으로 분류하였으며, 약 6,000~3,000년전에 형성되었을 것으로 추정한 바 있다.

곰솔림의 피복으로 인해, 현재 항공사진이나 지형도에서는 뚜렷하게 확인되지 않으나, 연구지역에는 아직도 열과 골로 분류 가능한 미기복들이 존재하며, 이러한 사구열들의 주향은 북서-남동방향이 대부분이다. 이러한 주향은 이 지역의 탁월풍인 북서풍의 방향과 일치하며, 약 20여 km 북쪽에 있는 소항사구지대의 풍향풍속자료(Choi *et al.*, 2013)에서도 확인된다. 다사리 사구의 퇴적층에 대해 연구한 Lee (1977)은 이 사구의 높이를 평균고조면을 기준으로 약 8 m로 기술하였으며, 해변의 평균입도는 2.52 Φ 로, 사구의 입도는 지점별로 1.96~2.50 Φ 로 제시하였다. 모래이동이 활발했던 남쪽 지역은 계속된 사방사업으로 인해, 현재 초본지대가 거의 남아 있지 않으며, 30~40년생의 곰솔들이 약 15 m 높이

로 수관을 형성하고 있어 사구의 과거 모습을 찾기도 어렵다.

사구지대의 전면에는 사빈과 사질조간대가 형성되어 있다. 사빈의 폭은 약 30 m 이내로 매우 좁은 반면에 조간대는 약 6 m의 조차로 인해 폭이 400~500 m에 이른다. 조간대의 경사는 2° 이하로 매우 완만하고 평평하다. 현재 사빈과 사구의 경계부에는 다양한 크기의 자갈들이 일부 드러나 있다. 이들은 사빈의 침식으로 드러난 과거의 자갈층으로 간주될 수 있으나, 현장조사 결과 자갈층이 사빈 위에 얇게 얹혀진 것으로 보아, 최근에 퇴적된 것으로 보이며, 그 기원지는 다산항 주변의 방파제 시설로 추정되고 있다. 하지만 이들이 어떤 사건에 의해 이동·퇴적되었는지는 아직까지 확인하기 어렵다.

다사리 지역은 수년 전부터 해안침식으로 인해 해안선의 후퇴가 발생하고 있다. 특히, 해안침식은 태풍 등 강한 폭풍이 통과할 때 더 증가되는 것으로

보고되었다(Choi *et al.*, 2012). 최근에도 침식이 계속 진행되어, 사구전면부에 높이 3~5 m의 사구절벽이 형성되어 있다. 이 연구에서 OSL 연대측정을 위한 시료를 채취한 지점은 다사리 전사구지대의 가장 남쪽에 해당하는 사구절벽으로 대조평균고조위면(Mean High Water Springs, MHWS)을 기준으로 약 5 m의 높이의 급애가 형성된 지점이다(그림 2). 이 절벽은 2012년 겨울폭풍으로 적황색 및 흑색 퇴적층이 드러났으며, 2013년 1월부터 2014년 3월까지 약 2.8 m가 후퇴된 곳이기도 하다.

2.2 연구방법

이 연구에서는 다사리 사구절벽에 드러난 사구퇴적물과 흑색층에 협재된 패각층의 특성 및 그 퇴적시기를 규명하고자 하였다. 이를 위하여, 노두 및 주변 지형에 대한 측량, 퇴적상 조사 및 주상도 작성, 토색에 대한 기술, 입도분석, 대자율측정, OSL 및 방

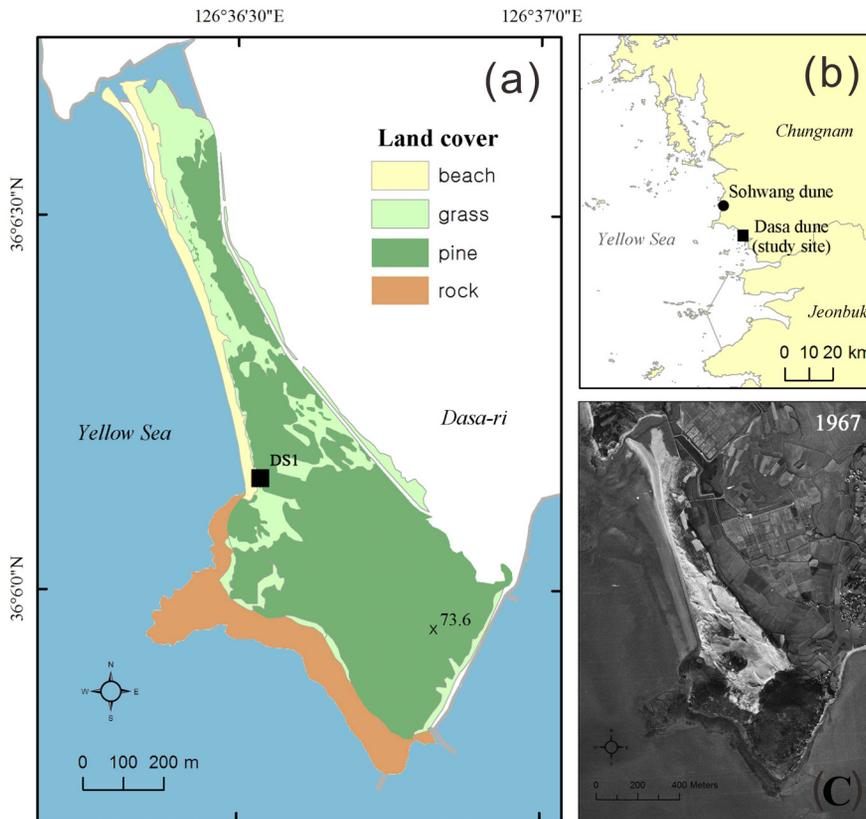


Fig. 1. (A) Dasa-ri coastal dune and land covers (year of 2013). (B) Location map of the Dasa-ri coastal dune, Chungnam Province. (C) Aerial photograph (year of 1967).

사성탄소 연대측정을 수행하였다.

2013년 1월, 겨울 폭풍에 의해 남쪽 사구해안이 후퇴하면서, 패각층이 포함된 고토양층 노두가 사구절벽에서 발견되었다. 이 노두에서 패각 및 각종 시료를 채취하고 South 사의 VRS-GPS (Virtual Reference Station GPS)를 사용하여 그 위치와 고도를 기록하였다. 이 때, 측량기준점은 국립지리정보원에서 제공하는 통합기준점(U0610)을 이용하였다. 또한 패각층의 분포범위와 횡단면의 형태를 파악하기 위하여, 이 GPS 기기와 광파측거기(Topcon GPT-3002N)를 활용하여 측량하였다(그림 3-a). 노두에 대한 관찰은 고토양 및 패각층이 잘 드러난 1월과 7월에 각각 수행하였다.

조사한 노두(DS1, 그림 2)의 퇴적층은 패각층을

중심으로 하부에서 상부까지 서로 다른 토색을 띠고 있다. 이 연구에서는 표준토색첩(Munsell soil color chart)을 이용하여 현장에서 토색을 기술하였다. 또한 휴대용 대자율측정기(ZH instruments사의 SM30)를 이용하여, 10 cm 간격으로 대자율의 변화를 측정하였다. 대자율값은 3회 측정한 것을 평균하여 사용하였으며 SI 단위계로 제시하였다. 이 기기는 표면에서 2 cm 깊이까지의 대자율을 측정하며 측정한계는 $10^{-7}SI (m^3/kg)$ 이다.

퇴적물에 대한 입도분석은 체분석법을 사용하였다. 시료는 패각층을 중심으로 매 5 cm 마다 채취하였으며, 직경 2 mm의 표준망체를 사용하여 모래시료를 분리하였다. 시료에 포함된 유기물과 탄산염을 제거하기 위해, 과산화수소와 염산을 이용하여 전처리를

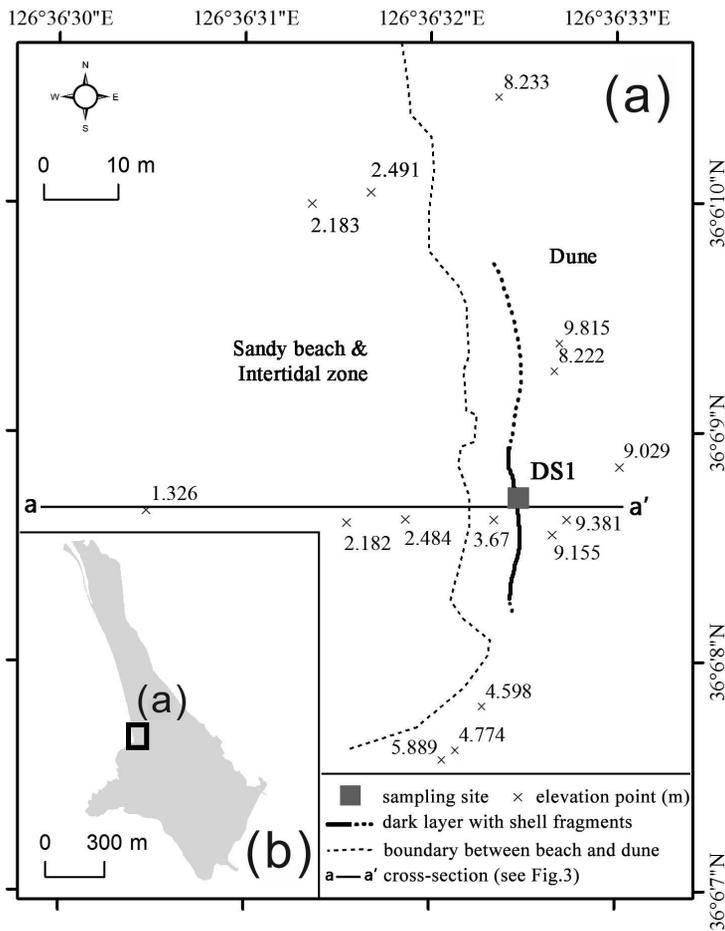


Fig. 2. Sampling site map showing the spatial distribution of dark shell layers. Sediment samples were collected from the trench section (DS1).

실시하였다. 이후 0.25 Φ 간격의 체를 이용하여 진탕기에서 10분간 체질 후 입도를 측정하였다. 입도의 통계적 분석에는 Folk and Ward (1957)의 모멘트 방법을 적용하였다. 입도분석 결과와 현장조사 자료를 바탕으로 퇴적 주상도를 작성하고 각 층의 형성 과정을 해석하였다.

풍성퇴적으로 형성되는 해안사구 퇴적물은 OSL 연대측정법에 매우 적합한 것으로 알려져 있으며 (Murray-Wallace *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2004; Duller, 2004), 최근 국내 해안사구의 연대측정에 활발하게 적용되고 있다(Munyikwa *et al.*, 2005, 2008; Park and Son, 2007; Choi *et al.*, 2008, 2014a). 이 연구에서는 OSL 연대측정을 위해 직경 3 cm, 길이 25 cm의 스테인레스강관을 패각층 상부와 하부의 모래층의 층리에 수평으로 삽입하여 2013년 1월 25일에 3점의 시료를 채취하여 분석하였다. OSL 연대 결정에

필요한 등가선량은 단일시료재현법(Single-Aliquot Regeneration, SAR)에 근거하여(Murray and Wintle, 2000), 90~250 μm 의 석영입자를 대상으로 한국기초과학지원연구원의 TL (Thermal Luminescence)/OSL 측정장비(모델명: RISØ TL/OSL-DA-20C/D)를 이용하여 측정하였으며, 연간선량은 저준위 고분해능 감마스펙트로미터(Low-level High-resolution Gamma Spectrometer)를 이용하여 산정하였다.

OSL 연대측정과 더불어, 흑색층에 협재된 패각층의 퇴적연대를 추정하기 위하여 방사성탄소연대 측정(Radiocarbon dating)을 적용하였다. 패각에 대한 연대측정은 패각시료의 재동문제로 인한 과대 추정 문제와 해양의 저수효과에 대한 보정자료 부족 등으로 인하여, 해안사구 연대측정에는 부적절하다 (Choi *et al.*, 2014b). 따라서, 이 연구에서는 흑색층에서 채취한 시료 5점을 서울대학교 기초과학공동

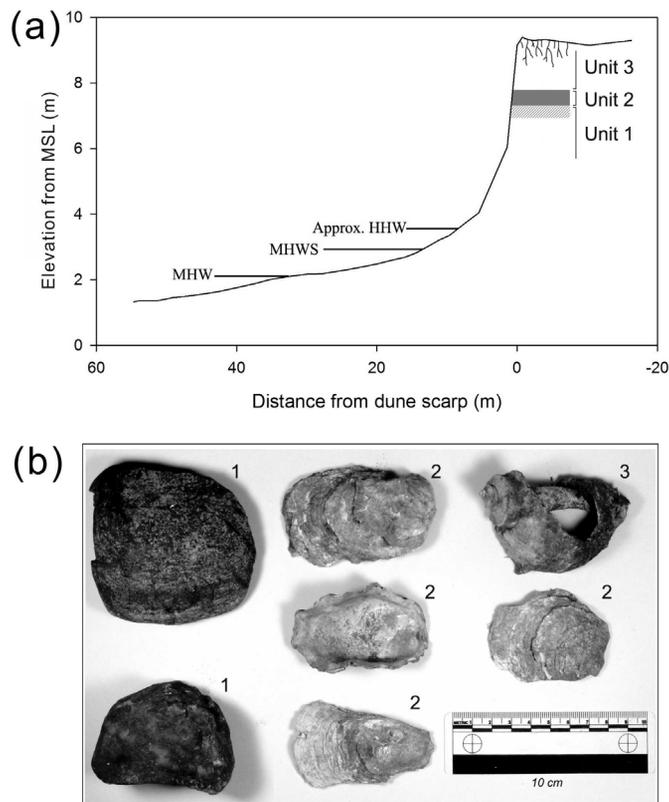


Fig. 3. (A) The topographic profile of studied beach-coastal dune system (MHW: mean high water, MHWS: mean high water spring, Approx. HHW: Approximately highest high water), (B) Gravels and shells collected from the dark layers in Unit 2 (1: gravel, 2: oyster, 3: conch).

기기에 의해 의뢰하여 유기물의 방사성탄소연대를 측정하였다. 획득된 방사성탄소연대는 IntCal13 곡선 (Reimer *et al.*, 2013)을 기반으로 CALIB (Stuiver and Reimer, 1993)을 통해 보정하였다.

3. 연구결과

3.1 패각층의 공간적 분포

연구지역인 다사리사구는 태풍 곤파스(2010년)로 인해 전면부가 침식된 이후, 계속적으로 해안침식에 노출되어 있다(Choi *et al.*, 2012). 특히, 2013년 1월과 7월에는 남쪽의 호안시설부터 북쪽으로 약 700 m 구간에 걸쳐 사구절벽이 형성되었다. 이 중 흑색층 또는 패각층이 발견된 구간은 가장 남쪽의 40 m 구간이다(그림 2). 패각층은 수평적으로 약 25 m 구간에 걸쳐 발견되고 출현 높이는 지점별로 수십 cm의 기복이 있으며 해발고도 7.2~7.8 m에 분포한다. 이는 대조평균고조위면(MHWS, 해발 2.92 m)에서 약 4.5 m 정도 높은 고도에 해당한다(그림 3).

패각층이 포함된 흑색층의 두께는 지점에 따라

10~60 cm로 변화되며, 수평적으로 약 40 m 에 이르는 산출 구간에서 최대 1.2 m 정도의 기복이 존재한다. 흑색층의 층후가 두꺼울수록 토색의 채도가 높게 나타나고 패각층이 더 두껍게 산출된다. 반대로 패각층이 산출되지 않는 곳은 흑색층의 층후가 얇아지고 토색이 열게 나타난다. 흑색층의 아래에는 적황색층이 발달해 있다. 이 층의 두께는 10~30 cm 정도로 나타나며, 대조평균고조위면에서 약 3.5~4.0 m 높이에 분포한다.

3.2 노두 DS1의 퇴적상

퇴적상과 입도 및 대자율 분석 결과를 기준으로 볼 때, 노두 DS1은 하부사구층(Unit 1), 흑색사질패각층(Unit 2), 상부사구층(Unit 3) 등 크게 세 개의 퇴적단위로 구분된다.

3.2.1 하부사구 퇴적상(Unit 1)

패각층을 기준으로 할 때, 하부사구 퇴적층은 평균입도 2.33 Φ 의 세립사로 이루어져 있으며, 적황색 계열의 토색(10YR 5/3)을 지닌 층이 약 20~30 cm

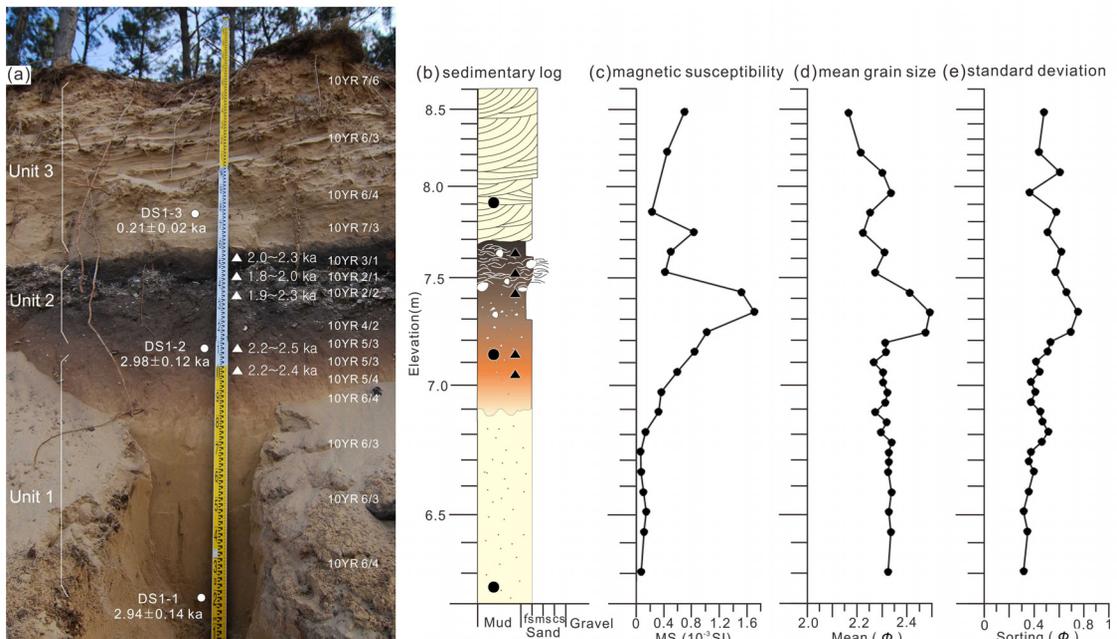


Fig. 4. (A) Trench section with shell horizons. The Unit 1, Unit 2, and Unit 3 indicate the lower dune section, dark and reddish layers, and upper dune section respectively. (B) Sedimentary column log. Black circles and triangles indicate the sampling locations for OSL and radiocarbon dating respectively. (C) Magnetic susceptibility. (D) Mean grain size. (E) Standard deviation of grain size.

Table 1. OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating results for 3 samples from the Dasari coastal dune deposits.

Sample Code	Depth (cm)	Dose Rate (Gy/ka)	Water content* (%)	Equivalent Dose (Gy)	Aliquots used** (n/N)	OSL age (ka, 1σ SE)
DS1-1	120	3.18 ± 0.08	5.7	9.33 ± 0.36	16/16	2.94 ± 0.14
DS1-2	190	2.46 ± 0.07	8.1	7.32 ± 0.20	16/16	2.98 ± 0.12
DS1-3	280	2.63 ± 0.07	7	0.54 ± 0.04	16/16	0.21 ± 0.02

* Present water content

** n/N refers to the ratio of (the number of aliquots used for data analysis)/(total number of aliquots loaded in the OSL measurement system)

정도 분포하고 하부로 갈수록 점점 밝은 색(10YR 6/3)으로 변화한다. 분급은 ~0.4 Φ로서 양호한 분급(well sorted)에 해당한다. 퇴적 당시의 구조는 거의 남아 있지 않아 층리를 확인하기 어렵지만, 입도의 분포특성으로 볼 때, 풍성작용으로 퇴적된 해안사구층으로 추정된다. 토색의 변화와 대자율의 변화로 볼 때(그림 4), 이 층은 일정기간 동안의 사구안정기(또는 휴지기)에 토양화작용을 받은 것으로 해석된다.

3.2.2 흑색사질 패각 퇴적상(Unit 2)

하부사구층(Unit 1)과 상부사구층(Unit 3) 사이에 끼어 있는 층으로 명도가 매우 낮은 흑색층이다. 굴 껍데기 등 조립질 퇴적물이 다량으로 포함되어 있어, 특정한 사건에 의해 퇴적되었을 것으로 추정된다. 층의 두께는 약 60 cm 이며, 하부사구층과는 점이적인 경계를, 상부사구층과는 뚜렷한 경계를 갖는다. 모래입자의 평균입도는 2.45 Φ로 조사단면에서 가장 세립질이며, 분급은 0.7~0.8 Φ로서 중간정도의 분급(moderately sorted)에 해당한다.

흑색층 내에 협재되어 산출되는 패각층의 두께는 10~40 cm 정도로 지점에 따라 1~2매가 관찰되고, 굴 껍데기(oyster), 이매패류(bivalve), 고동류(snail), 원마도가 높은 잔자갈(pebble) 등이 혼합되어 있다. 패각들은 잘게 부서진 것에서부터 직경 5 cm 이상의 굵은 것까지 다양하게 포함되어 있는데, 이 중 가장 흔하게 관찰되는 것은 굴 껍데기들로서 장경 7~10 cm, 단경 3~4 cm의 타원상의 조각들이 대부분이다(그림 3b). 각 껍데기의 두께는 약 3~4 mm이지만, 껍데기들이 10 cm 이상 겹쳐 있으며, 이들 사이의 기질(matrix)은 흑색의 모래이다. 패각들 사이에서 산출되는 원력 중에 일부는 왕자갈(cobble)에 해당한다.

3.2.3 상부사구 퇴적상(Unit 3)

흑색층의 상부에 놓이는 퇴적층은 평균입도 2.25~2.30 Φ로서 세립사로 구성되어 있으며, 조사 단면에서 가장 조립하다. 분급은 ~0.6 Φ 정도로서 비교적 양호한 분급(moderately well sorted)에 해당한다. 층의 두께는 1~2 m이다. 다양한 경사를 지닌 사층리가 발달되어 있으며, 퇴적구조가 풍성사구층에서 나타나는 것과 일치한다. 곰솔을 비롯한 식물의 뿌리에 의해 교란된 흔적이 일부 관찰되긴 하였으나, 퇴적구조가 대부분 잘 남아 있다.

3.3 OSL 연대

패각층이 산출되는 노두 DS1에서 측정한 OSL 연대는 표 1에 제시하였다. 등가선량(equivalent dose, D_e)은 모든 시료들에서 각각 16개씩의 부표품을 분석하여 결정하였으며, 각 시료들의 히스토그램과 확률밀도곡선을 그림 5에 도시하였다. 연간선량(Dose rate)의 결정에 영향을 주는 수분함량은 패각층의 약 20 cm 아래에서 채취한 DS1-2 시료가 8.1%로 가장 높으며, DS1-1 시료가 5.7%로 가장 낮으나, 그 차이는 크지 않다. 이러한 수분함량, 즉 현재수분함량과 중앙연대모델(central age model)로 결정된 등가선량을 기준으로 연대를 계산한 결과, 패각층의 아래에서 채취한 모래층은 각각 2.94±0.14 ka와 2.98±0.12 ka이며, 상부모래층은 0.21±0.02 ka이다.

3.4 방사성탄소연대

노두 DS1에서 채취한 유기물시료에 대한 방사성탄소연대 측정결과는 표 2와 같다. 분석된 시료 5점의 방사성탄소연대는 하부에서부터 2,220±50 ¹⁴C yr BP (DS1-200), 2,310±40 ¹⁴C yr BP (DS1-190), 2,060±60 ¹⁴C yr BP (DS1-160), 1,930±60 ¹⁴C yr BP (DS1-150),

Table 2. Radiocarbon dating results for 5 samples from the Dasari coastal dune deposits.

Sample Code	Depth (cm)	Type	LAB Code	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Radiocarbon age (^{14}C yr BP)	Calibrated range (yr BP)
DS1-140	140	sediment	SNU13-R055	-23.06	2,140 ± 40	1,999~2,305
DS1-150	150	sediment	SNU13-R056	-22.87	1,930 ± 60	1,719~1,997
DS1-160	160	sediment	SNU13-R057	-23.08	2,060 ± 60	1,882~2,294
DS1-190	190	sediment	SNU13-R058	-20.23	2,310 ± 40	2,159~2,428
DS1-200	200	sediment	SNU13-R059	-21.96	2,220 ± 50	2,124~2,342

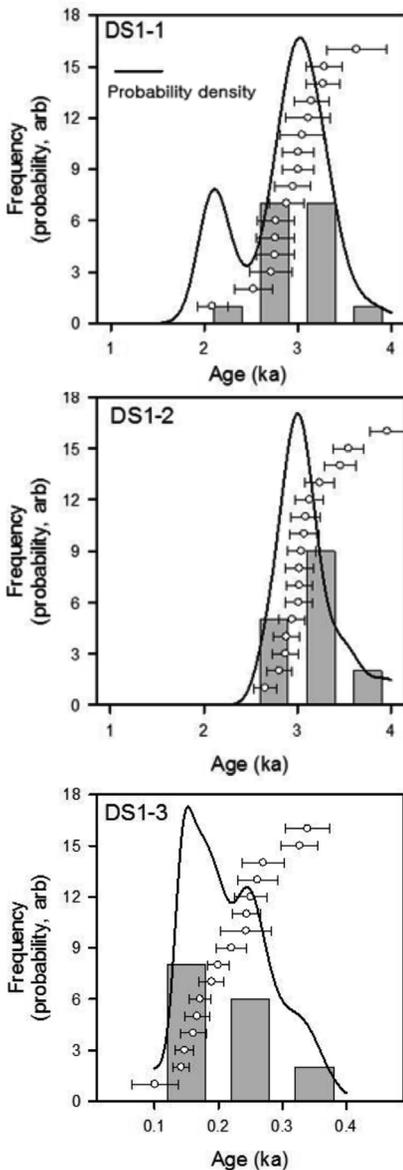


Fig. 5. Histograms and probability density plots of OSL ages of the samples.

2,140±40 ^{14}C yr BP (DS1-140)으로 측정되었다. 실제 연대로 보정한 결과, 이들의 보정연대는 1.8~2.5 ka에 걸쳐 분포하였다. 가장 상부에서 채취한 DS1-140을 제외하면, 채취지점의 깊이가 깊을수록 시료의 보정연대가 증가하는 것으로 나타났다.

4. 고찰

해안사구는 모래의 퇴적으로 형성된 지형으로, 퇴적 당시 해안의 환경변화를 잘 반영한다. 서해안의 운여지역에는 홀로세 중기 기후최적기(climatic optimum)의 사구지대가 잘 발달하고 있으며(Munyikwa *et al.*, 2008), 동해안의 안인-하시동에는 지난 7천년 동안의 해수면 승강과 더불어 형성된 사구지대가 분포한다(Choi *et al.*, 2014a). 해안사구 퇴적층은 과거의 해안환경 변화에 매우 중요한 단서를 제공하는데, 특히 사구층 내에 분포하는 침식면이나 조립질 퇴적층은 극한기후사건의 흔적으로 간주되곤 한다(Bryant *et al.*, 2001; Nott *et al.*, 2009; Nott, 2011). 하지만 국내의 보고 사례는 아직까지 매우 드물다(Choi *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013). 거제도 관포리 해안의 퇴적층이 과거 해일에 의한 흔적으로 추정되고 있으며(Lee *et al.*, 2013), 충남 보령의 원산도 사구층에서 자갈층이 보고되었다(Choi *et al.*, 2008). 또한 안인-하시동 사구지대에서 패각층과 조립질층이 발견된 바 있다(Choi *et al.*, 2007, 2014a). 그런 점에서 다사리 사구에 기록된 패각 및 자갈 혼합층은 앞으로 매우 중요한 연구자원이 될 것이다.

일반적으로 해안사구층에서 자갈을 포함하는 패각층은 폭풍퇴적층(storm deposit)으로 해석된다(Nichol *et al.*, 2003). 연구지역에서 관찰된 패각층도 크기가 큰 굴 껍데기들과 원마도가 높은 자갈들이 뒤섞여 있는 혼합퇴적물로서 폭풍해일에 의해 퇴

적되었을 가능성이 크다. 평상시의 경우에도 해변에 만조선을 중심으로 패각층이, 그리고 골(runnel or trough)을 중심으로 자갈이 퇴적되지만, 이들의 퇴적상과 산출양상은 이 연구에서 발견된 사구층 내의 폭풍층과는 다르다. 다사리의 폭풍퇴적층은 토양생성작용을 받은 고토양층 위에 퇴적되어 있으며, 산출높이와 층후도 지점에 따라 다르게 나타난다. 이는 과거 폭풍해일이 전사구를 따라 월파(越波)하면서 운반된 혼합물질들이 주변보다 고도가 낮은 부분에 더 많이 퇴적된 것으로 해석하는 것이 타당할 것이다. 다시 말해서 이들 패각층은 과거의 지형면 위를 따라 퇴적되었을 가능성이 높다.

대자울 측정 결과에 의하면, 하부사구층에서 흑색층까지의 변화가 점이적으로 나타난다. 이것은 폭풍층 주변과 하부에서 발견되는 흑색 및 적황색층이 휴지기를 거치면서 토양생성작용을 받았음을 보여주는 증거가 된다. 일반적으로 사구성장의 휴지기에 발달하는 흑색층은 종종 '흑색사질부식층'으로 표현되며 식생피복에 의해 유기물이 공급되어 생성되는 것으로 알려져 있다(Munyikwa *et al.*, 2008; Park and Park, 2009; Park and Choi, 2012). 적황색층은 보통 사구 토양생성과정에서 생성되는 집적층(B층)에 해당하는 것으로 보통 철산화물의 함량이 높아 대자울이 높게 나타난다(Munyikwa *et al.*, 2008; Park and Choi, 2009; Park and Park, 2009). 연구지역에서 폭풍퇴적층 위로도 흑색층이 존재한다는 것은 폭풍퇴적층이 형성된 후에도 식생이 상당기간 정착했음을 의미한다. 기후변화로 인해 습윤한 시기를 거쳤거나, 사구지대가 바다 쪽으로 확장되어 조사지점이 식생피복사구(vegetated dune)로 천이되었을 가능성도 존재한다.

해안사구에서 모래시료에 대한 OSL 연대측정은 퇴적시기를 직접적으로 지시하지만, 유기물에 대한 방사성탄소연대측정은 모래에 포함된 유기물의 형성시기를 가리킨다. 즉, 같은 고도에서 시료를 채취하더라도 측정대상이 다르기 때문에, 이들 두 기법의 연대측정결과가 서로 다르게 나타날 수 있다. 대개의 경우, 모래층의 형성 이후에 공극을 따라 유기물이 하부로 이동하기 때문에, 모래시료에 대한 OSL 연대가 동일 고도의 유기물 연대보다 오래된 것으로 나타난다. 이 연구의 경우, OSL시료를 채취한 DS1-2와 유기물 시료를 채취한 DS1-190 및

DS1-200의 고도가 거의 비슷하다. 하지만 OSL 연대 측정결과가 방사성탄소연대측정결과보다 조금 더 오래된 것으로 나타난다. 따라서 OSL 연대 측정결과와 방사성탄소연대측정 결과 모두 신뢰할 만하다.

연구지역의 DS1-1과 DS1-2의 OSL 연대로 볼 때, 다사리 해안사구는 ~3.0 ka 이전에 형성된 것으로 보인다. 이후 조사지점은 휴지기(hiatus)를 거치며 토양생성이 진행된 것으로 추정된다. DS-190 및 DS-200에 포함된 유기물은 이 기간에 해당하는 2.2~2.5 ka에 형성되었을 가능성이 높다. 따라서 이들의 상부에서 발견된 폭풍퇴적층은 ~2.5 ka 이후에 퇴적된 것으로 보인다. 폭풍퇴적층에 해당하는 DS-140, DS-150, DS-160 시료의 방사성탄소연대는 1.8~2.3 ka로 보정되었다. 이 중, 가장 상부에 해당하는 DS-140의 연대가 DS-150이나 DS-160보다 조금 더 오래된 것으로 나타났다. 방사성탄소연대측정 과정의 오류나 시료오염으로 간주할 수도 있겠으나, 이 결과를 신뢰한다면, 폭풍으로 인해 패각과 자갈 등이 유입되면서 기존퇴적층이 일부 교란된 증거로 해석할 수 있다. 가장 상부에서 채취된 DS1-3은 폭풍퇴적층의 퇴적연대에 대한 최소한계로 볼 수 있다. 즉 패각층이 형성된 시기는 적어도 200년 이전이다. 이상을 종합해 볼 때, 연구지역의 폭풍퇴적층의 형성시기는 지난 2,500년 전부터 최근 200년 이전의 어느 시기로 추정된다.

5. 결론

이 연구에서 발견된 충남 다사리 사구층에 협재된 패각층은 과거의 폭풍에 의해 형성된 퇴적층으로 해석된다. 토양화작용을 받은 사구모래층 위에 퇴적된 패각층은 지점에 따라 약 10~40 cm의 층후를 이루고 있으며, 굴 껍데기(oyster), 이매패류(bivalve), 고둥류(snail), 원마도가 높은 잔자갈(pebble)로 구성되어 있다. 패각층의 상하부에 분포하는 사구 모래층에서 채취한 시료에 대하여 OSL연대를 측정할 결과, 패각층의 퇴적시기는 약 200년 전부터 최대 2,500년 전 사이로 추정된다. 보다 정확한 퇴적시기를 규명하기 위해서는 더 많은 추가 연구가 필요하지만, 이 연구에서 발견된 패각층은 과거 폭풍에 의한 퇴적가능성을 높게 시사한다. 이는 해안사구 노두가 과거의 해안환경변화를 잘 기록하고 있으며,

특히 과거 폭풍에 대한 단서를 제공할 수 있음을 보여준다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원의 “기후변화에 의한 자연재해 위험 저감방안 연구”와 해양수산부/한국해양과학기술진흥원의 “지질·지화학 프록시를 이용한 연안 퇴적층 정밀 분석” 연구과제에서 지원을 받아 수행되었다. 연구지역의 현장조사와 시료채취에 도움을 준 전남대학교 하헌준과 김종관 학생에게 감사드린다. 논문심사에서 유익한 조언을 해준 익명의 심사위원과 편집위원장께 감사드린다.

REFERENCES

- An, H.S. and Chun, S.Y., 1985, An analysis of records of high tides along the Korean coast from 1392 to 1903. *Journal of Korean Earth Science Society*, 6(1), 27-31 (in Korean with English abstract).
- Bryant, E.A. and Nott, J., 2001, Geological indicators of large tsunami in Australia. *Natural Hazards*, 24, 231-249.
- Buynevich, I.V., FitzGerald, D.M. and van Heteren, S., 2004, Sedimentary records of intense storms in Holocene barrier sequences, Maine, USA. *Marine Geology*, 210, 135-148.
- Choi, J.-H., Cheong, C.-S. and Chang, H.-W., 2004, Principles of quartz OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating and its geological applications. *Journal of the Geological Society of Korea*, 40, 4, 567-583 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Choi, J.-H. and Kim, J.W., 2014a, Reconstruction of Holocene coastal progradation on the east coast of Korea based on OSL dating and GPR surveys of beach-foredune ridges. *The Holocene*, 24, 24-34.
- Choi, K.H., Jung, P.M., Kim, Y. and Lee, S.Y., 2014b, Radiocarbon dating and sedimentary environment of the coastal dunes, Shinyang-ri, Jeju Island. *Journal of the Korean Geomorphological association*, 21(2), 59-68 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Jung, P.M., Kim, Y. and Suh, M.H., 2012, Erosion and recovery of coastal dunes after tropical storms. *Journal of the Korean Geomorphological association*, 19(1), 17-27 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Kim, J.W., Choi, J.H., Byun, J.M., Hong, S.C., Shin, Y.K. and Lee, S.J., 2008, Luminescence dating of coastal dune sequences on Wonsan Island and its implications. *Journal of the Korea Geomorphological association*, 15(4), 39-51 (in Korean with English abstract).
- Choi, K.H., Kim, Y. and Jung, P.M., 2013, Adverse Effect of Planting pine on coastal dunes, Korea. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 65, 909-914.
- Choi, K.H., Yoon, K.S., Choi, J.H., Shin, Y.K., Lee, J.C., Suh, M.H., Munyikwa, K. and Oh, K.H., 2007, Anthropogenic geomorphological changes during the last century in the Kangneung area along the east coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 50, 1015-1022.
- Clemmensen, L.B., Bjørnsen, M., Murray, A. and Pedersen, K., 2007, Formation of aeolian dunes on Anholt, Denmark since AD 1560: A record of deforestation and increased storminess. *Sedimentary Geology*, 199, 171-187.
- Duller, G.A.T., 2004, Luminescence dating of Quaternary sediments: recent advances. *Journal of Quaternary Sciences*, 19, 183-192.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Froede, Jr. C.R., 2006, A Hurricane Frederic-generated storm-surge deposit exposed along a surf-zone fore-dune scarp on Dauphin Island, Alabama, USA. *Journal of Coastal Research*, 22, 371-376.
- Goldenberg, S.B., Landsea, C.W., Mestas-Nunez, A.M. and Gray, W.M., 2001, The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, 293, 474-479.
- Grinsted, A., Moore, J.C. and Jevrejeva, S., 2013, Projected Atlantic hurricane surge threat from rising temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 5369-5373.
- Han, J.-G., Kim, S.-P., Chang, D.-H. and Chang, T.-S., 2009, Estimation of inundation damages of urban area around Haeundae beach induced by super storm surge using airborne LiDAR data. *The Journal of GIS Association of Korea*, 17, 3, 341-350 (in Korean with English abstract).
- Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Clerot, L.C.P., Tomazelli, L.J. and Zouain, R.N.A., 2007, Morphology of the Itapeva to Tramandai transgressive dunefield barrier system and mid- to late Holocene sea level change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 407-414.
- Holland, G. and Webster, P., 2007, Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, 2695-2716.
- Hur, D.S., Lee, H.W., Lee, W.D. and Bae, K.S., 2008, Storm surge height on Busan and Gyeongnam coastal region

- by an attack of super-typhoon. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20, 1, 128-136 (in Korean with English abstract).
- Kwon, S.J., Moon, I.-J. and Lee, E., 2008, A study on the long-term variations of annual maximum surge heights at Sokcho and Mukho harbors. *International Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(6), 564-574 (in Korean with English abstract).
- Lee, C.B., 1977, Sedimentological properties of the recent coastal sand dunes, located in Biin area, west coast of Korea. MS.c. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 44 p (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-Y., Kim, J.C., Lim, J., Katsuki, 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, 6, 661-667 (in Korean with English abstract).
- Munyikwa, K., Choi, J.H., Choi, K.H., Byun, J.M., Kim, J.W. and Park, K., 2008, Coastal dune luminescence chronologies indicating a Mid-Holocene Highstand along the East coast of the Yellow Sea. *Journal of Coastal Research*, 24(2B), 92-103.
- Munyikwa, K., Choi, K.H., Choi, J.H., Park, K. and Kim, J.W., 2005, The sedimentology and luminescence chronology of a coastal dune sequence at Unyo Beach, Taean-Gun. *Journal of the Geomorphological Association of Korea*, 12(1), 167-178.
- Murray-Wallace, C.V., Banerjee, D., Bourman, R.P., Olley, J.M. and Brooke, B.P., 2002, Optically stimulated luminescence dating of Holocene relict fore-dunes, Guichen Bay, South Australia. *Quaternary Science Reviews*, 21, 1077-1086.
- Murray, A.S. and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Nichol, S.L., Lian, O.B. and Carter, C.H., 2003, Sheet-gravel evidence for a late Holocene tsunami run-up on beach dunes, Great Barrier Island, New Zealand. *Sedimentary Geology*, 155, 129-145.
- Nott, J., 2011, A 6000 year tropical cyclone record from Western Australia. *Quaternary Science Reviews*, 30, 713-722.
- Nott, J., Smithers, S., Walsh, K. and Rhodes, E., 2009, Sand beach ridges record 6000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia. *Quaternary Science Reviews*, 28, 15-16.
- Oh, S.M., 2010, A study for the intensity of typhoon and storm surge under future global warming environments around the Korean peninsula. MS.c. thesis, Jeju National University, Jeju, 84 p (in Korean with English abstract).
- Park, J.H. and Choi, K.H., 2009, Pollen analysis on daegwang dune in Imjado island, Jeollanam-do, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 25(2), 207-221 (in Korean with English abstract).
- Park, K. and Park, J.-H., 2009, A study on dune-building periods and soil-forming periods of Gimnyeong sand-dune area. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16(2), 111-122 (in Korean with English abstract).
- Park, K. and Son, I., 2007, Luminescence dating results from Kimnyong-Wolchung coastal sand-dune and their implications. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 14(2), 33-41 (in Korean with English abstract).
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L. and Friedrich, M., 2013, IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55, 1869-1887.
- Seo, J.C., 2005, A luminescence dating for a relict dune from the Sindu dunefield. *Journal of the Korean association of regional geographers*, 11(1), 114-122 (in Korean with English abstract).
- Stuiver, M. and Reimer, P. J., 1993, High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC and 2500-6000 BC. *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- Taylor, M. and Stone, G.W., 1996, Beach-ridges: a review. *Journal of Coastal Research*, 12, 612-621.
- Turner, R.E., Bautista, J.J., Swenson, E.M. and Spicer, J.S., 2012, Wetland sedimentation from Hurricane Katrina and Rita. *Science*, 314, 449-452.
- Wendel, J., 2014, Economic losses due to catastrophes. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 95(14), 120.
- Wilson, P., McGourty, J. and Bateman, M.D., 2004, Mid-to late-Holocene coastal dune event stratigraphy for the north coast of Northern Ireland. *The Holocene*, 14, 406-416.
- Youn, O.K., Park, B.K. and Han, S.J., 1977, Geomorphological evidences of post-glacial sea-level changes in Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 13(1), 15-22 (in Korean with English abstract).
- Ziegler, A.D., Lim, H.S. and Wasson, R.J., 2012, Reduce urban flood vulnerability. *Nature*, 481, 145.

투 고 일 : 2014년 6월 13일

심 사 일 : 2014년 6월 18일

심사완료일 : 2014년 7월 24일