

한국 서해 남부 함평만의 해안선 변화 연구 I. 해안절벽의 침식과 후퇴

임동일^{1*} · 정희수¹ · 추용식¹ · 박광순² · 강시환² · S-Y YANG³

¹한국해양연구원 해양환경기후연구본부

²한국해양연구원 연안 · 항만공학연구본부

³중국 동지대학교 해양지질학부

A Study on Shoreline Change in Hampyung Bay, Southwestern Coast of Korea I. Sea-Cliff Erosion and Retreat

DHONG-IL LIM^{1*}, HOI-SOO JUNG¹, YONG-SHIK CHU¹, KWANG-SOON PARK²,
SEE-WHAN KANG² AND SHOU-YE YANG³

¹Marine Environment and Climate Change Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Coastal and Harbor Engineering Research Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

³Department of Marine Geology and Geophysics, Lab. of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, PR. China

서해 남부 함평만에서 해안선의 지형 특성과 해안절벽의 침식과정을 조사하기 위해 야외관찰과 정밀 측량을 실시하였다. 함평만 해안선은 급경사면 그리고 불안정한 토양층이나 연약한 풍화암층으로 이루어진 높이 10 m 미만의 해안절벽(sea-cliff) 들로 대부분 구성되며, 매우 활발한 침식을 받고있다. 툭날모양의 해안선 형태, 해변 표면에 노출된 잔류풍화기반암 및 “Island Stack”등 독특한 해안선 지형 특징들이 활발한 해안침식 증거들로 나타난다. 함평만에서의 해안선 후퇴는 해안절벽 기저부의 침식, 사태(landslide or mass wasting), 테일러스(talus) 형성 그리고 테일러스의 침식(소멸)의 순차적 과정이 반복되어 나타난 결과로 해석된다. 본 연구에서 테일러스가 여름철에 침식·제거되는 현상은 정상적인 해양조건에서 일어나는 계절적 해수면 상승에 의한 것으로 판단된다. 이는 겨울철 폭풍과 함께 해안 침식의 또 다른 중요 요인으로 제시된다.

The coastline of Hampyung Bay, southwestern coast of Korea, was examined and measured in the field for the understanding of geomorphic changes and sea-cliff erosion processes. The Hampyung-Bay coastline is characterized by steep-face slope and soft soil and/or intensively weathered rock composition. Saw teeth-shaped coastline, and relict weathered basement-rock and “Island Stack” exposed on the beach surface are peculiar geomorphic features indicating active sea-cliff erosion. The coastline in the study area is continuously retreating with the following cyclic process: erosion of cliff base, gravitational landslide or mass wasting, formation of talus, and then erosion and removal of talus. In this study, sea-level rise during summer in the west coast of Korea is suggested as one of the key factors for the removal of soil taluses and, thereby, accelerating sea-cliff erosion.

Key words: Coast line, Sea-cliff erosion, Soil talus, Gravitational land slide, Hampyung Bay

서 론

한반도 서해안은 북서 계절풍의 영향을 받으며, 겨울철에는 폭풍 일수가 월 평균 3일 이상, 여름철 태풍 발생 수는 평균 2.3개로 매우 역동적인 해양환경이다(한국해양연구소, 1982; Park, 1996; 현 등, 2001). 태풍 및 폭풍 해일은 해안선의 지질 및 지형학적 특성에 따라 만, 조간대, 해변(백사장) 등의 다양한 연안 환경을 침식시키고, 해안선 후퇴를 야기한다. 이러한 연안침식은 농경지 및 백사장 유실, 구조물 파괴 그리고 해수침투 등의 많은 공간 및 경

제적 자원 손실을 초래하고 있다. 서해안 남양만 궁평리 해안의 경우, 변성암의 풍화층으로 구성된 10 m 높이의 해안절벽들이 폭풍시 발생하는 강한 파랑에너지에 의해 매년 크게 침식·후퇴하고 있다(권, 1981, 1993). 이러한 해안절벽의 침식은 경기만, 아산만 그리고 천리포 해안 등 서해와 동해의 여러 연안 지역에서 관찰된다. 더욱이 최근에 빈번히 행해지고 있는 무분별한 연안역 골재 채취나 방조제 건설 등은 연안환경의 심각한 변화를 초래할 뿐만 아니라 해안침식 현상을 더욱 가속화시키고 있다. 따라서 태풍 및 폭풍 해일 등의 기상재해나 연안역의 인위적 난개발 그리고 전 지구적 해수면 상승 등의 복합적 현상에 의해 일어나는 다양한 환경변화(자연재해)를 막기 위해서는 해안역의 변화를 체계적으로

*Corresponding author: oceanlim@kordi.re.kr

관찰하고, 장기적으로 모니터링하는 일련의 연구들이 필요하다.

한국 서남해안에 위치하고 있는 함평만의 조간대는 다른 조간대와 다르게 만의 입구가 매우 좁고, 육지쪽으로 길게 만입된 반폐쇄된 지형 특성을 보이며, 해안선은 대부분 해안절벽으로 구성되어 있다. 함평만의 해안절벽은 매년 크게 침식·후퇴하고 있으며(장 등, 1999; 조 등, 2001), 침식에 의해 생성된 사질 퇴적물이 직접 조간대로 공급·퇴적되고 있다(김, 1996; 박 등, 1997; 류, 1998; 류 등, 1999). 그 결과 고조선(high-tide water line)으로 갈수록 세립한 퇴적물이 퇴적되는 일반적인 조간대 퇴적작용과는 달리 고조선 방향으로 조립해지는 반대의 경향을 보인다(류 등, 1999). 이러한 해안절벽의 침식은 조간대의 퇴적작용 뿐만 아니라 해안선 변화의 주요 요인으로 작용하고 있다. 따라서 함평만은 단기적인 해안선 변화 연구를 위한 좋은 모델 지역으로 평가된다.

최근 함평만 해운리 해안에서 야외에서의 실측과 항공사진을 이용한 해안선 변화 연구에 따르면, 함평만 해안선은 1~2 m/yr의 후퇴율을 나타내며, 겨울철 폭풍 해일이 해안침식의 주요 요인으로 제시되고 있다(장 등, 1999; 조 등, 2001). 그러나 폭풍 및 태풍 해일 등 비정상적인 해양조건에서 해안침식의 정도 및 과정 등에 대한 연구는 미흡하며, 더욱이 정상적인 해양조건에서의 해안절벽 침식에 대한 연구는 아직 찾아보기 힘든 바 이에 관한 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다. 본 연구의 목적은 반폐쇄형 함평만 해안선 및 해안절벽의 지형 특성과 침식 현황을 파악하고, 정밀 단면 조사를 통하여 정상적인 해양조건에서 해안절벽의 침식과정을 이해하는데 있다.

연구지역

한국 서남해안에 위치하고 있는 함평만은 육지쪽으로 길게 만입된 반폐쇄된 지형 특성을 보이며, 길이 약 17 km, 폭이 12 km에 달한다(Fig. 1). 함평만의 해안선은 총적층과 풍화토 및 토양으로 구성된 수 m 높이의 해안절벽이 발달하고 있다. 이들 해안절벽들은 현재 활발한 침식에 의해 무너져 내리고 있으며, 그 결과 해안선이 육지 쪽으로 후퇴하고 있는 것으로 보고되고 있다(장 등, 1999; 조 등, 2001). 해안절벽이 발달하고 있는 해안선을 따라 폭이 좁은 해변들이 평균 고조선 부근에 부분적으로 발달하고 있으며, 때때로 해안절벽 최상부에는 강한 태풍에 의해 운반·퇴적된 패각층이 존재한다(Park, 1996). 또한 조간대 표면과 조류로에는 특징적으로 많은 사주(sand bar)들이 독립적으로 또는 해변과 연결되어 수십 m에서 수백 m의 크기로 발달하고 있으며(Fig. 1), 평균 입도 0 φ 내외의 조립질 모래 퇴적물로 구성되어 있다(Flemming and Park, 2000). 함평만 주변의 육상 지질은 만의 중앙을 경계로 북서부 일대는 슈라기 편마상 화강암이 남동부 일대는 시대 미상의 화강암질 편마암이 분포하고 이들 사이에는 좁은 폭의 반상변정 편마암이 대상으로 협재되어 있으며, 이들의 주 구성 광물은 석영, 장석, 운모 등이다(한국자원연구소, 1971).

조석은 반일주조(semidiurnal tide)로 일주부등(diurnal inequality)이 뚜렷하며, 소조차는 2.5 m, 대조차는 4.9 m, 평균조차는 3.7 m로서 중조차 환경(meso-tidal environment)에 속한다(국립지리원, 1983). 만 입구에서 관측된 유속측정 자료에 의하면, 창조류와 낙조류는 각각 남동 방향과 북서 방향으로 흐르며, 표층에서의 최대 유속은 각각 138 cm/sec와 125 cm/sec로서 창조류가 다소 강하게

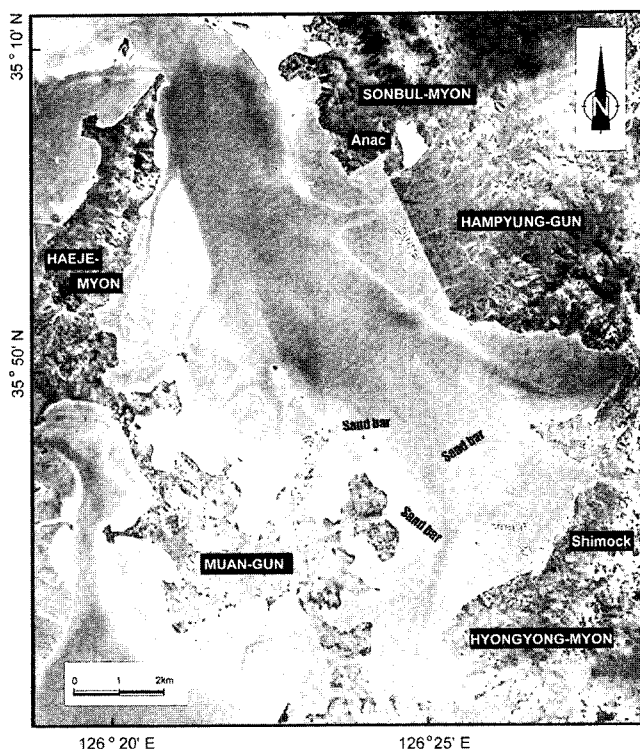


Fig. 1. Aerial photograph of the entire Hampyeong Bay (after Ryu, 1998). Note that its morphology is characterized by saw teeth-shaped coastline indicating the active sea-cliff erosion and retreat. Also, several small beaches and sand bars develop along the coastline and on the tidal flats, respectively.

나타난다(국립지리원, 1983). 함평만의 남쪽에 위치한 목포 기상대에서 관측된 최근 12년간의 기상관측 자료에 의하면, 함평만 주변의 풍속은 평균 4.2 m/sec이며, 겨울철에는 북서풍, 여름철에는 남풍이 상대적으로 우세하게 나타난다(류 등, 1999). 겨울철 월평균 폭풍일수(풍속 13.9 m/sec 이상)는 3일 이상인 반면, 여름철에는 1일 미만으로 낮다(류, 1998). 한편, 풍속 17 m/sec 이상의 태풍은 연평균 4회 정도 발생하고 주로 7월과 9월 사이의 여름철에 집중되며, 그 진로를 고려할 때 연평균 2회 정도 서해 연안을 통과하는 것으로 사료된다(Park, 1996).

연구방법

함평만 해안에 발달한 해안절벽의 수직 단면(profile)의 계절별 변화 특성과 후퇴 변화량을 정량적으로 파악하기 위해 총 4곳(Fig. 2)의 해안절벽에서 2001년 4월부터 2002년 3월까지 4회(2001년 6월, 9월, 12월 그리고 2002년 3월)에 걸쳐 사진 촬영과 함께 정밀 측량을 실시하였다. 한 계절동안 나타나는 해안절벽의 변화를 파악하기 위해 봄철의 변화는 6월, 여름철의 변화는 9월, 그리고 가을철과 겨울철에 나타난 변화는 12월과 다음해 3월에 각각 관찰·조사하였다. 해안절벽의 단면 측량과 후퇴 변화량 조사는 ±5 mm 내외의 정확도를 가지는 SOKKIA SET2110R 모델의 정밀측량기를 이용하여 절벽으로부터 일정거리에 설치된 고정 기준점(datum point)으로부터 절벽까지의 거리를 반복 측정함으로써 이루어졌다.

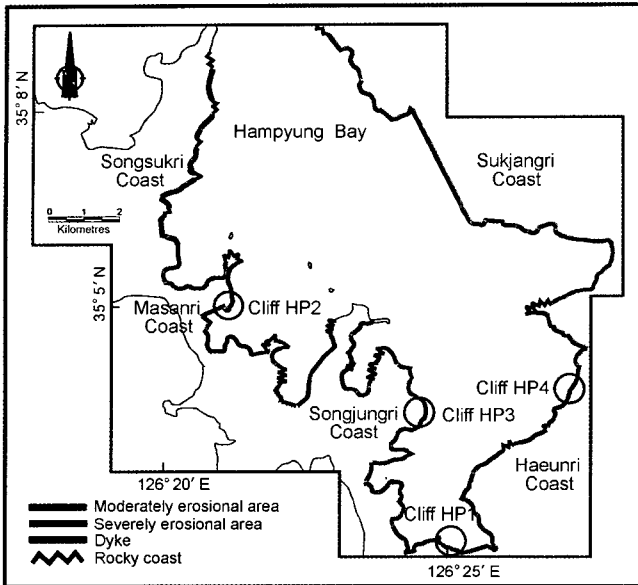


Fig. 2. Map showing the area where coastal erosion is severe. Most of coastline is suffering from active erosion. Four circles (Cliff HP1 to 4) indicate locations of monitored sea-cliff.

결 과

함평만 해안선 침식 현황과 해안절벽의 지형 특성

함평만 해안역은 몇몇 암석 지역인 낮은 산을 제외하고 전반적으로 고도 20 m 미만의 낮은 평지로 구성되며, 대부분 농경지로 활용되고 있다. 함평만의 해안선 형태는 굴곡이 매우 심하고, 울퉁불퉁한 톱날모양의 지형(saw teeth-shaped geomorphology) 특성을 보이는 바(Fig. 1), 이는 해안선을 구성하고 있는 지질의 특성에 따라 나타나는 차별 침식 때문인 것으로 해석된다. Fig. 2는 함평만 해안선의 침식 현황과 지형 특성을 조사한 결과이다. 함평만의 해안선은 암반, 해안절벽(높이 1~15 m, 대부분 10 m 미만), 평탄한 구릉 지역(높이 1 m 미만), 그리고 방조제(dyke) 지역 등으로 구분될 수 있다. 암반은 해안선의 돌출 부분을 부분적으로 구성하고 있으며, 침식 활동은 매우 미미한 것으로 사료된다(Fig. 3a). 적색 또는 적갈색의 풍화도와 토양층으로 이루어진 해안절벽은 함평만 해안선의 대부분을 구성하며, 해안절벽의 경사면에 쓰러진 나무들은 매우 활발한 침식활동을 지시한다(Figs. 3b, c, d). 해안절벽의 경사는 수직에 가까우며, 지역에 따라 전체가 무너져 내려 급한 경사의 매끄러운 절벽면(cliff face)을 보이거나 침식 정도와 암석의 절개면(joints)의 발달 정도에 따라 울퉁불퉁한 면을 보이기도 한다(Fig. 3e). 해안절벽은 폭 20~40 m의 소규모 해빈과 수직으로 경계하여 발달하며(Fig. 3f), 해빈 퇴적물은 토양절벽의 침식 잔류물로부터 공급된 자갈(평균입도 -3ϕ)에서 굵은 모래 크기(평균입도 1ϕ)의 원마도가 불량한 석영과 암편들로 구성되어 있다(류 등, 1999; Hwang, 1998). 해빈 퇴적물에는 지름 0.5 m 이상의 각진 역돌 또는 암석 덩어리들이 포함되기도 하는데, 이들은 해안절벽의 침식 과정에서 단단한 부분이 풍화·침식되지 못하고 큰 암편으로 남아있는 잔류 퇴적물로 해석된다.

해빈에서는 해안절벽의 침식을 지시하는 특징적인 여러 지형적 증거들이 관찰되는 바, 본 연구에서는 해안절벽이 후퇴하면서 완전히 침식되지 못하고 남은 풍화에 강한 잔류 암맥들(Figs. 3g, h)과 바위섬 모양의 "Island Stack"(Fig. 3i; Pethick, 1984) 등이 대표적인 예로 제시된다. 해빈에서 관찰되는 잔류풍화기반암들의 흔적은 해빈으로부터 해안절벽까지 수 십 m 거리에서 연속적으로 연결되어 나타나며, "Island Stack"은 해안절벽으로부터 수 m에서 수 십 m 떨어진 곳에 고립되어 존재한다. 이는 해안절벽의 활발한 해안침식 활동과 과거 해안선의 위치 및 후퇴량을 추정할 수 있는 중요한 해안선 지형 특성으로 해안 침식이 지속적으로 활발히 진행되어 왔으며, 그 결과 해안선이 육지방향으로 크게 후퇴하고 있음을 보여주는 좋은 "잔류 흔적"(residual fingerprint)들로 제시된다. 한편, 높이 1 m 미만의 낮은 구릉으로 서술된 해안선 지형은 조간대 또는 해빈이 육지와 평탄하게 연결되는 지역으로 침식 현상은 미미하며, 해수의 침수 현상이 더 우세하게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 해안절벽 사이사이에는 해안침식으로부터 농경지와 구조물 등을 보호하기 위해 크고 작은 방조(파)제가 곳곳에 건설되어 있으며(Figs. 3j, k), 총 연장 길이는 함평만 해안선의 60% 이상에 달하는 것으로 평가된다(Fig. 2).

해안절벽 단면(cliff profile)의 계절 변화 모니터링

계절에 따른 해안절벽의 단면 변화를 관찰하고, 침식과정을 이해하기 위해 4곳(see Fig. 2)의 해안절벽에서 2001년 4월부터 2002년 3월까지 총 4회(2001년 6월, 9월, 12월 그리고 2002년 3월)에 걸쳐 사진촬영과 함께 절벽의 단면을 정밀하게 반복 측량하였다.

해안절벽-HP1: 함평만의 가장 안쪽에 위치하는 해안절벽-HP1은 높이와 폭이 각각 약 13 m와 약 50 m에 달한다. 부분적으로 풍화암이 존재하나, 해안절벽 전체는 적색 또는 적갈색의 부드러운 토양층으로 구성되어 있다(Figs. 4a). 절벽의 기저부(cliff base)는 모래와 자갈로 구성된 폭 21 m의 소규모 해빈과 수직으로 연결되며, 이들 해빈은 다시 조간대 영역과 뚜렷한 경계를 이루며 발달하고 있다. 해안절벽의 토양층은 30~50%의 굵은 모래를 포함하고 있으며, 해빈을 구성하고 있는 모래의 크기와 비슷하다. 각 계절별 단면 조사 결과에 의하면, 2001년 4월에는 관찰되지 않았던 토양 테일러스(soil talus)가 6월 조사시 절벽의 기저부에서 특징적으로 관찰된다(Fig. 4a). 그 후, 9월에는 토양 테일러스가 관찰되지 않았으며, 12월과 2001년 3월 조사에서는 큰 변화 없이 9월의 관측결과와 유사하였다. 이러한 사실은 측량된 절벽의 단면 자료에서도 뚜렷하게 나타난다. 봄철에 형성된 토양 테일러스가 여름철에 뚜렷이 침식되어 사라졌으며, 그 결과 절벽의 기저부가 봄철에 비하여 더욱 수직으로 변화하였다(Fig. 5a). 한편, 여름철 이후의 가을철과 겨울철 조사에서는 여름철의 단면을 그대로 유지하고 있다. 이러한 관측과 측량 자료는 봄철 동안(2001년 5월에서 6월 사이) 절벽의 불안정한 부분의 토양 덩어리(soil block)들이 붕괴되어 절벽의 기저부에 크고 작은 토양 테일러스를 형성하고, 여름철 동안 테일러스의 대부분이 침식에 의해 제거되는 것으로 보인다. 여름철 테일러스의 침식으로 인한 해안절벽의 수평적 침식 후퇴 거리는 0.3~1.5 m 범위(평균 0.8 m)로 변화 폭이 크며, 이는 테일러스의 규모에 따라 침식의 정도가 다르기 때문인 것으로 사료된다.

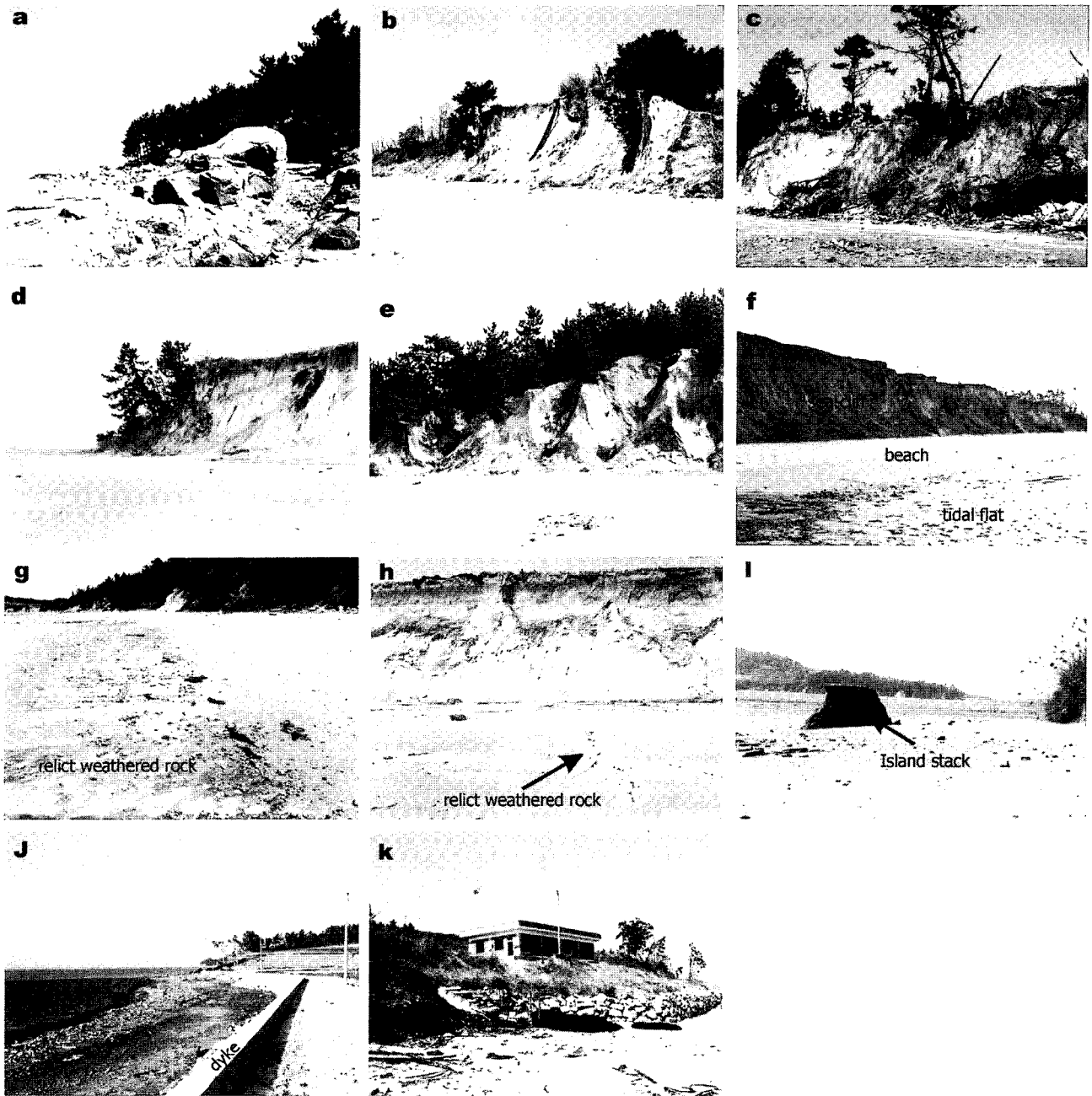


Fig. 3. Field photographs showing various geomorphic features from the Hampyung-Bay coastline.

해안절벽-HP2: 함평만의 마산리 해안에 위치한 HP2의 해안절벽은 높이 약 7 m, 길이 약 30 m로 HP1과 비교할 때 상대적으로 높이가 낮으며, 해안절벽의 최상부 표층은 농경지로 이용되고 있다. 절벽의 하부는 암석의 조석이 희미하게 관찰되는 풍화암이 발달하고 있으며, 상부로 갈수록 적갈색의 부드러운 토양층으로 변화하여 토양의 발달과정을 잘 보여준다(Fig. 4b). 절벽의 하부 곳곳에는 작은 침식 동굴이 존재하며, HP1과 비교할 때 절벽 면은 매우 울퉁불퉁하여 “prismatic blocks” 형태를 보인다. 이러한 절벽면의 형태는 부분적으로 암석의 풍화 발달 정도와 차별적으로 나타나는 사태(landslide) 때문인 것으로 해석된다. 절벽의 기저부

에는 폭 15~20 m의 모래 해변이 발달하며, 이들 해변 표면에서는 절벽 기저부까지 연결된 잔류풍화기반암들이 노출되어 발견되며, 해안절벽으로부터 약 13 m 떨어진 곳에 특징적인 “Island Stack”이 존재한다. 그림 4b와 5b는 현장 관측과 측량에 의한 절벽 HP-2의 계절별 단면 변화를 보여주는 것으로, 절벽 HP1과 유사하게 봄철에 대규모의 테일러스들이 절벽 기저부에 형성되고, 여름철에 침식되어 사라진다. 이로 인한 침식 후퇴거리는 1.5~2 m에 달하며, 절벽 위에 위치한 농경지의 유실이 심각한 것으로 평가된다.

해안절벽-HP4: 해안절벽-HP4는 함평만의 북쪽에 위치한 해운리 해안에 발달하고 있으며, 절벽의 높이는 약 6 m에 달한다. 부

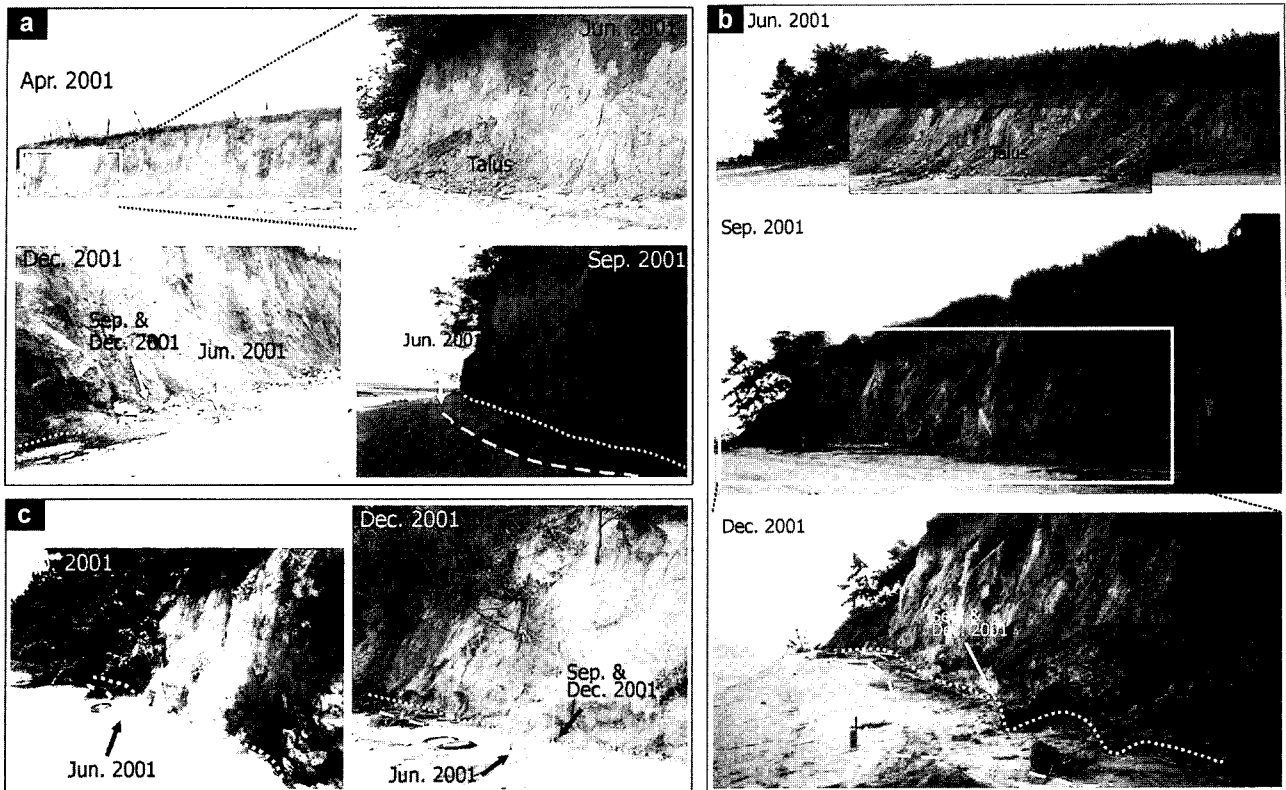


Fig. 4. Field photographs showing seasonal change of sea-cliff face in the monitored sites. a) Cliff HP1, b) Cliff HP2, c) Cliff HP4. Note the formation and disappearance of soil talus in the cliff base.

분적으로 풍화암과 단단한 기반암이 존재하나, 대부분의 절벽은 잘 발달된 토양층으로 구성되어 있다(Fig. 4c). 절벽은 해빈과 거의 수직으로 발달하고 있으며, 최상부 절벽 표면에는 높이 1~3 m의 나무들이 자라고 있다. 해빈에는 잔류풍화기반암들이 수 십 m 길이로 해안절벽까지 연결되어 나타난다. 관측 결과에 의하면, 다른 조사지역과 유사하게 봄철에는 절벽의 불안정한 부분의 토양 덩어리들이 붕괴에 의해 절벽 기저부에 새로운 토양 테일러스를 형성하는 것으로 보인다. 테일러스의 수직 높이는 대부분 1.5 m 내외이며, 여름철 동안 침식에 의해 모두 제거되었다(Figs. 4c, 5c). 그 후 가을철과 겨울철에는 여름철의 단면을 그대로 유지하거나 소규모의 침식만이 관찰된다. HP4의 절벽에서 나타난 1년 동안의 해안절벽의 수평적 침식 후퇴 거리는 약 1.5 m 정도이다(Fig. 5c).

한편, 해안절벽-HP3의 경우, 해안절벽은 높이 5 m 미만으로 다른 조사 절벽에 비해 상대적으로 낮고, 기저부로부터 절벽높이의 1/2 지점까지 대규모의 테일러스가 발달하여 전체적으로 안정된 완만한 단면 지형을 갖추고 있다(Fig. 6). 이 조사 지역에서 절벽 높이의 절반에 이르는 대규모의 테일러스들은 조사가 시작되는 2001년 4월 이전부터 존재하였으며, 조사기간동안 변화를 보이지 않았다.

토의 및 결론

일반적으로 해안절벽 침식의 정도는 해수면의 높이, 해안절벽의 기저부에 도달되는 파랑의 침식력, 해안절벽을 구성하고 있는

암석의 풍화정도(토양의 발달 여부) 및 안정도(경사) 그리고 해빈의 규모 등에 의해 크게 좌우된다(Horikawa and Sunamura, 1967; Davidson-Arnott and Ollerhead, 1995; Moon and Healy, 1994). 함평만의 경우 해안선의 대부분이 연약한 토양 절벽으로 구성되어 있어 작은 외력에도 쉽게 무너져 내릴 것으로 판단된다. 1976년과 1990년에 촬영된 항공사진 분석 결과에 의하면, 함평만의 해운리 해안선의 침식·후퇴율이 1~2 m/yr 범위로 매우 크며, 14년 동안 평균 25m가 후퇴한 것으로 나타났다(장 등, 1999; 조 등, 2001). 또한 장 등(1999)은 함평만에서 해안절벽의 기저부가 3~5월에 침식되고, 이후 5월과 6월 사이에 중력에 의해 절벽이 붕괴·후퇴한다고 보고한 바 있다. 본 연구에서 조사 기간동안 얻어진 단면 모니터링과 야외관측 자료결과에 근거하여 해석된 함평만 해안절벽의 후퇴 과정을 순차적으로 도시하였다(Fig. 7).

Profile-I은 해안절벽의 기저부가 침식됨으로써 나타나는 불안정한 단면을 보인다. 이 단면은 조사가 시작된 2001년 4월 이전의 해안절벽 단면을 대표하는 것으로서, 절벽의 경사는 기저부의 침식 정도와 절벽의 높이에 따라 좌우된다(Dias and Neal, 1992). 기존 연구에 따르면, 절벽의 높이가 8 m 미만인 경우 절벽 면이 완전히 무너져 내려 절벽의 경사는 완만하나 절벽의 후퇴율은 빠르게 나타나며, 높이가 15 m 이상인 경우에도 절벽 기저부에 “notch”가 형성되어 불안정한 경사면을 보인다. 그러나 높이가 8~15 m인 경우 “nothch”의 형성이 어렵고, 완만한 절벽 경사면을 갖는 것으로 조사되었다. 2001년 6월 단면 조사결과(Figs. 4, 5)에 근거

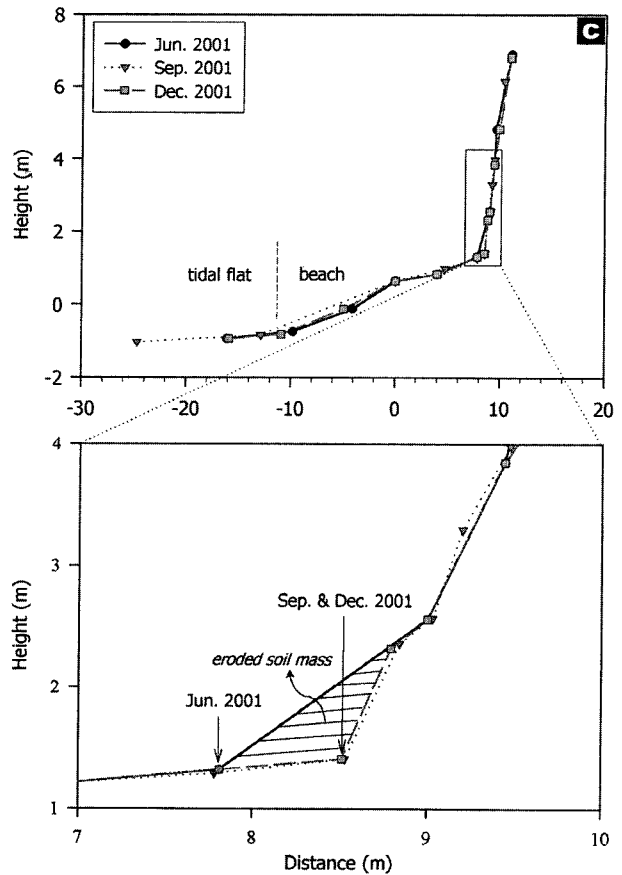
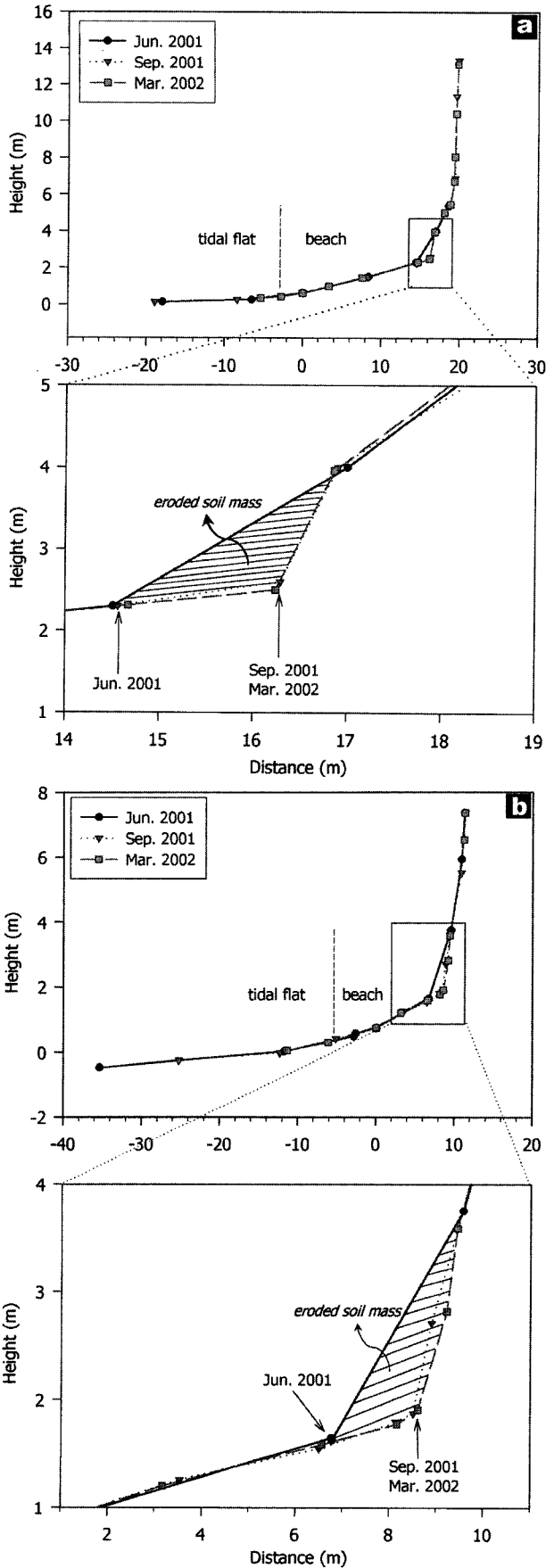


Fig. 5. Seasonal variation of sea-cliff profile in each monitored sites. a) Cliff HP1, b) Cliff HP2, c) Cliff HP4. Zero points in X- and Y-axis signify a datum point installed around sea-cliff.

할 때, 기존의 불안정한 해안절벽은 2001년 4~5월 동안 중력사태(landslide or mass wasting)에 의해 무너져 내리고, 토양 덩어리들이 해안절벽의 기저부에 테일러스를 형성함으로써 절벽하부는 안정적인 S-형(sigmoidal shape) Profile-II의 단면을 유지하게 된다. 따라서 Profile-II는 해안절벽의 토양들이 사태에 의해 무너져 내려 부분적으로 또는 전체적으로 절벽 기저부에 크고 작은 테일러스들이 형성되는 과정을 보여준다. 이러한 결과는 5~6월 사이에 해안절벽이 붕괴되는 사실을 보고한 장 등(1999)의 연구결과와 시기적으로 일치하며, 실질적인 해안절벽의 후퇴는 해안절벽의 붕괴와 함께 이 시기동안 일어나는 것으로 해석된다. 한편, Emery and Kuhn(1982)는 일반적으로 이러한 S-형 단면이 해안침식보다는 대기중 침식(subaerial erosion)이 우세한 절벽조건에서 만들어지는 것으로 보고하였으나, 이러한 해석은 본 연구지역의 해안절벽에서 해석된 결과와 일치하지 않는 것으로 보인다. 특히 절벽 상부의 수직에 가까운 각(sharp angle)은 절벽 기저부의 강한 해양 침식에 의한 사태나 토양 덩어리들의 낙하에 의한 것으로 해석된다.

Profile-III는 9월 관측 결과를 토대로 작성한 2001년 여름철 해안절벽의 단면이다(Fig. 7). 특징적으로 봄철에 절벽의 기저부에 형성되었던 토양 테일러스가 침식으로 인하여 완전히 사라졌으며,

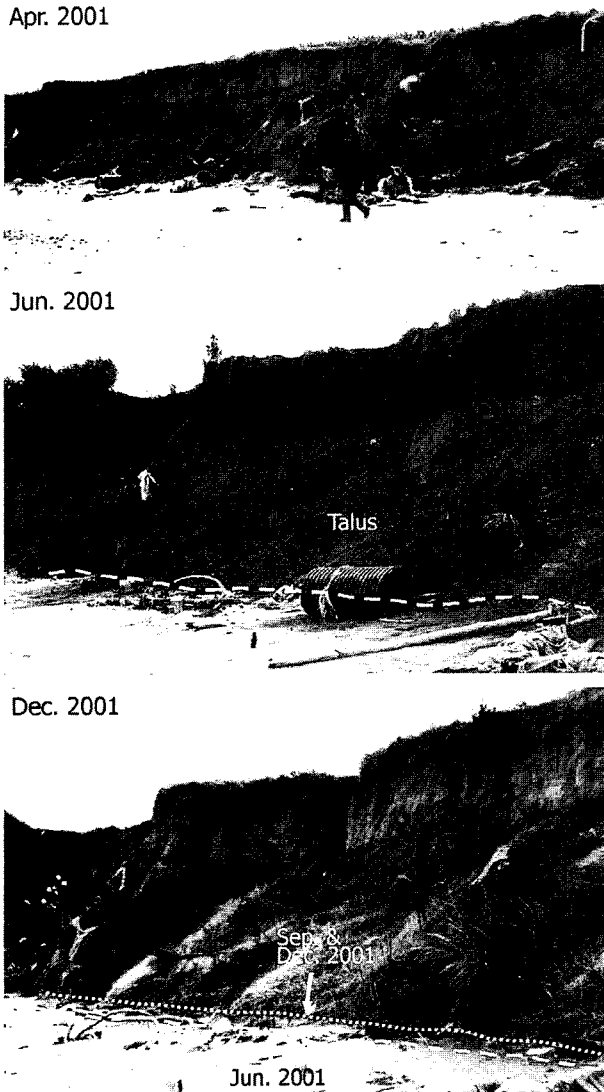


Fig. 6. Field photographs showing the seasonal change of cliff profile in the Cliff-HP3.

다시 전체적으로 수직 단면을 유지한다. 즉, Profile-II의 단면이 여름철의 시작과 함께 다시 절벽 전체가 수직으로 변화되었음을 알 수 있다(Figs. 4, 5). 조사기간동안 태풍의 발생이 없었던 것을 고려할 때(기상청, 2001), 절벽 기저부에 놓인 테일러스의 침식은 큰 외력에 의한 일시적 해수면 상승보다는 정상적인 기상 조건하에서 상대적으로 높아진 해수면 변화 때문으로 해석된다. 일반적으로 서해안에서 월평균 해수면의 평균치는 계절에 따라 20~40 cm 차이를 보이는 바, 겨울철에 최저 그리고 여름철에 최고 값을 보인다(이, 1992). 또한 대조시 봄철대비 여름철에는 해수면 평균 높이가 50 cm 이상 상승하며(Fig. 8), 이러한 높은 해수면 상승과 파랑작용에 의해 점진적으로 테일러스가 침식·소멸된 것으로 판단된다. 따라서 테일러스가 여름철에 제거되는 현상은 정상적인 해양조건에서 일어나는 계절적 현상으로 판단되며, 겨울철 폭풍은 물론 여름철 해수면 상승 또한 침식의 중요 요인으로 생각된다.

한편, 측량 결과에 의하면, 테일러스의 침식에 따른 수평적 해

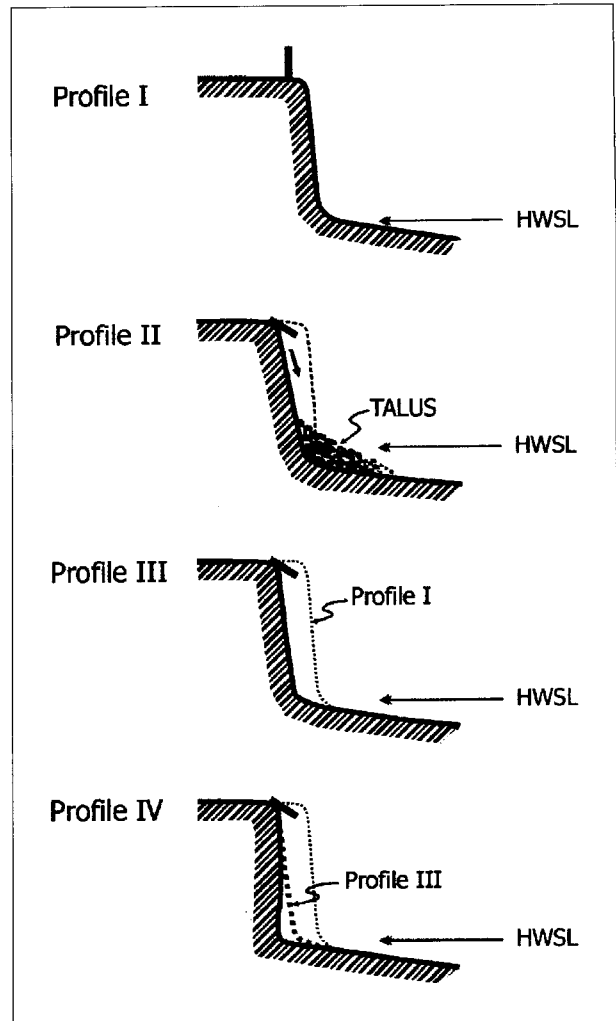


Fig. 7. Schematic diagram showing the evolution of sea-cliff profile in the coastline of Hampyung Bay. The coastline seems to be retreated by a repetitive pattern of these profiles (sequential erosion processes) controlled by the creation and disappearance of soil talus.

안선 후퇴거리는 절벽의 지질 특성과 테일러스의 크기에 따라 전반적으로 0.5~2.0 m 범위이다(Fig. 5). 그러나 해안절벽-HP3의 경우처럼 절벽높이가 낮고, 대규모의 테일러스의 발달로 안정된 해안절벽에서는 침식 거리가 0.2 m 미만으로 미미하게 나타났으며, 봄철의 S-형 단면은 여름철에도 그대로 유지되고 있다. 이러한 경우 테일러스의 지속시간(duration time)은 1년 이상에서 수년 이상에 달할 것으로 추정되며, 특히 여름철 태풍에 의한 일시적인 해수면 상승과 함께 큰 파랑의 발생이 없다면 수직적 단면의 형태는 더욱 S-형으로 진화될 것이고, 테일러스의 지속시간 또한 더욱 길어질 것으로 예측된다.

여름철에 침식되어 만들어진 절벽의 수직 단면은 가을철과 겨울철에도 계속 유지되며, 절벽 기저부에서의 큰 침식현상이나 "notch" 등은 관찰되지 않았다(Figs. 4, 5). 따라서 본 연구의 결과에 따르면, 조사기간동안 가을철과 겨울철의 해안절벽의 단면 형태는 다시 Profile-I로 대표될 수 있다(Fig. 7). 만약 겨울에 높은

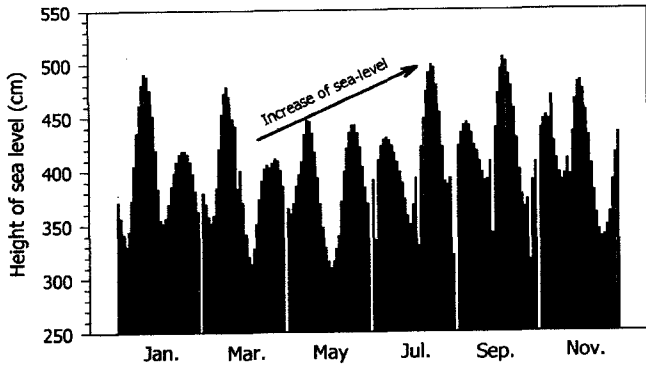


Fig. 8. Monthly and daily variations of sea level observed in Mockpo tide station near Hampyung Bay (after NORI, 2001).

해수면 상승과 함께 강한 파랑이 해안절벽의 기저부에 대조의 만조와 함께 복합적으로 발생한다면, 절벽의 단면은 절벽기저부의 강한 침식과 함께 Profile-III에서 Profile-IV로 빠르게 변화 될 것이다. 그 후 계속적인 기저부 침식과 함께 침식지점의 바로 윗 부분이 부분적으로 무너져 내려 결국 다시 새로운 후퇴 순환과정의 시작인 Profile-I과 II의 단면으로 순차적 변화를 보일 것으로 예측된다. 결론적으로 조사 기간동안 겨울철 폭풍이 없었던 것을 고려할 때, 토양의 해빙에 따라 토양의 조직 및 구조 그리고 지반 공학적 특성 등이 변화·약화되고, 그 결과 해안절벽의 불안정한 토양 덩어리들이 급한 경사면을 따라 무너져 내려 기저부에 테일러스를 형성하였고, 그 후 계절적 조차의 증가에 따른 여름철의 높은 해수면 상승으로 테일러스가 침식·소멸되는 순차적 해안선 침식·후퇴 과정이 본 연구에서 제시된다.

요약하면, 함평만에서의 해안선 후퇴는 해안절벽 기저부의 침식, 사태, 테일러스 형성 그리고 테일러스의 침식(소멸)의 순차적인 순환에 의해 반복적으로 이루어지는 것으로 해석된다. 이러한 과정이 주기적인 계절적 변화인지 또는 수년 단위의 변화과정인지에 대해서는 좀 더 자세한 관찰과 연구가 필요하다. 해안절벽 후퇴에 대한 순환 주기는 해수면 상승 정도와 파랑의 크기에 의존하여 다양하게 나타날 것이며, 때때로 완전한 한번의 주기가 여름철 또는 겨울철의 한 계절내에서도 나타날 수 있고, 반대로 같은 절벽 단면을 1년 이상 유지할 수도 있을 것이다. 특히 태풍 및 폭풍 등의 강한 외력이 작용한다면 기저부의 침식과 후퇴를 그리고 순환의 주기는 크게 달라질 것으로 예측된다(Bokuniewica and Tanski, 1980; Sunamura, 1982; Phillips, 1999; 전, 1995). 특히, Phillips(1999)는 폭풍 이후 해안절벽이 최대 12 m나 후퇴함을 관찰하였으며, 이는 절벽 후퇴량의 대부분이 폭풍의 크기(magnitude)와 횡수(frequence)에 의해 조절됨을 보여준다. 그러나 본 연구에서 테일러스의 형성과 침식이 해안선 후퇴과정에 중요한 역할을 하며, 특히 해안침식이 주로 폭풍 해일에 의해 겨울철에 집중되어 나타날 것으로 기대한 것과 달리 여름철 높은 해수면 상승 또한 해안침식의 중요 요인으로 나타나는 것은 의미 있는 결과로 사료된다. 향후, 1) 해안절벽의 경사를 조절하는 해안절벽 기저부의 정확한 침식의 원인, 2) 큰 외력에 의하여 비정기적으로 나타나는 후퇴순환과정 이해 그리고 3) 토양 해안절벽에 대한 지반공학적인 것들의 특성 및 해수의 수력학적 특성 등에 관한 연구가 더 필요

하다. 또한 해안선(해안절벽) 후퇴 메커니즘을 보다 더 정확하게 규명하기 위해서는 장기적인 침식 모니터링 연구를 통한 자료의 축적이 필수적이다.

사 사

본 연구는 “자연재해방재기술개발사업(기상재해분야)”의 지원을 받아 수행되었으며, 연구를 지원해준 기상청 관계자 여러분께 감사 드립니다. 야외조사를 도와준 배종필 대학원생에게 감사 드립니다.

참고문헌

국립지리원, 1983. 연안해역 기본조사 보고서(법성포 지역). 60 pp.
 권혁재, 1981. 태안반도와 안면도의 해안지형. 고려대학교 사대논문집 6호, 261-287.
 권혁재, 1993. 서해안의 해안침식. 고려대학교 사대논문집 18호, 137-155.
 기상청, 2001. 기상연보.
 김진호, 1996. 한국 서해 함평만 현세 조수퇴적층과 선현세 퇴적층의 층서적연구. 서울대학교 석사학위논문, 143 pp.
 류상욱, 1998. 한국 서남해안 함평만의 퇴적환경과 층서. 전남대학교 박사학위논문, 248 pp.
 류상욱, 유환수, 이종덕, 1999. 함평만 조간대의 표층 퇴적물과 집적물의 계절변화. 한국해양학회지·바다, 4: 127-135.
 박용안, 임동일, 최진용, 이영길, 1997. 한국 서남해 함평만 조간대 퇴적층의 제4기 층서 연구. 한국해양학회지·바다, 2: 138-150.
 이석우, 1992. 한국근해해상지, 334 pp.
 장진호, 김여상, 조영길, 1999. 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용: 한국 서해안 함평만. 한국해양학회지·바다, 4: 117-126.
 전동철, 1995. 해양으로부터 가해지는 힘에 대한 장기적인 해안 침식 모델의 고찰. 해양연구, 17: 41-58.
 조주환, 임동일, 김백운, 2001. 항공사진을 이용한 서남해 함평만의 해안선 변화 관측. 한국지구과학회지, 22: 317-236.
 한국자원연구소, 1971. 한국지질도 (망운도폭), 1:50,000, 25 pp.
 한국해양연구소, 1982. 만리포 해변변화 및 침식방지대책에 관한 연구. 200 pp.
 현상권, 2001. 1951-2000년까지 한반도에 영향을 미친 태풍의 통계적 특성. 자연재해방재기술개발사업(기상재해)워크샵(초록). 87 pp.
 Bokuniewica, H. and J. Tanski, 1980. Managing localized erosion of coastal bluffs. In: Proceedings of Coastal Zone '80, edited by American Society of Coastal Engineering, 3: 1883-1898.
 Dias, J.M.A and W.J. Neal, 1992. Sea cliff retreat in southern Portugal: Profiles, Processes, and Problems. J. Cos. Res., 8: 641-654.
 Davidson-Arnott, R.G.D and J. Ollerhead, 1995. Nearshore erosion on a cohesive shoreline. Mar. Geol. 122: 349-456.
 Emery, K.O. and G.G. Kuhn, 1982. Sea cliffs: their processes, profiles and classification. Bull. Geol. Soc. Am., 93: 644-654.
 Flemming, K.E. and Y.A. Park, 2000. Dynamics and stratigraphic expression of a sandy point bar in the macrotidal mud flats of Hampyung Bay, Korea. In: Tidalites 2000(abstract), International

- Conference on Tidal Sedimentology, Seoul, Korea, 188 pp.
- Horikawa, K. and T. Sunamura, 1967. A study on erosion of coastal cliffs by using aerial photographs. *Coastal Engineering in Japan*, **10**: 67–84.
- Hwang, N.S., 1998. Mineralogy and provenance of tidal-flat deposits in Hampyung Bay, southwestern coast of Korea. Ms Thesis, Kunsan National University, 58 p.
- Moon, V.G and T. Healy, 1994. Mechanisms of coastal cliff retreat and hazard zone delineation in soft flysch deposits. *J. Coastal Res.*, **10**: 663–680.
- NORI, 2001. Tide Tables-2001 (Coast of Korea). 263 pp.
- Park, Y.A., 1996. Coastal Typhoon Deposit in Hampyung Bay, South-west Coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 32–36.
- Pethick, J., 1984. An Introduction to Coastal Geomorphology. Routledge, Chapman and Hall, INC. 260 pp.
- Phillips, J.D., 1999. Event timing and sequence in coastal shoreline erosion: Hurricanes Bertha and Fran and the Neuse Estuary. *J. Coastal Res.*, **15**: 616–623.
- Sunamura, T., 1982. A predictive model for wave-induced cliff erosion with application to Pacific coasts of Japan. *J. Geol.*, **90**: 167–181.

2002년 5월 21일 원고접수

2002년 8월 7일 수정본 채택

담당편집위원: 강효진