

## 항공사진을 이용한 서남해 함평만의 해안선 변화 관측

조주환<sup>1</sup> · 임동일<sup>2,\*</sup> · 김백운<sup>2</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 지구과학과, 501-759 광주광역시 동구 서석동 375  
<sup>2</sup>한국해양연구원, 425-600 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

### Observation of Shoreline Change Using an Aerial Photograph in Hampyung Bay, Southwestern Coast of Korea

Ju-Whan Cho<sup>1</sup> · Dhong-Il Lim<sup>2,\*</sup> · Baeck-Oon Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea  
<sup>2</sup>Korean Ocean Research and Development Institute,  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract:** The coastline of semi-enclosed Hampyung Bay, southwestern coast of Korea, consists largely of erosional sea-cliffs characterized by steep face slope, low in height (less than 3 m), and composition of soft reddish soil. Recession rates of the sea-cliffs in the Haeunri coast of Hampyung Bay, which were quantified by a photogrammetry using single aerial photographs taken 1976 and 1990, respectively, were approximately 1 ~ 2 m/yr. This value is in good agreement with the field measurement conducted by Chang *et al.* (1999). Subsequently, the photogrammetry seems to be a very useful method to measure easily long-term coastline change. This severe erosion of sea-cliff in the semi-enclosed bay environment, furthermore, is probably due to combined effects of typhoon or/and storm surges and weak resistance of soil cliff itself.

Key words: sea-cliffs, aerial photographs, photogrammetry, recession rate, typhoon or/and storm surge, Hampyung Bay

**요약:** 한국 서남해안에 위치한 반폐쇄형 함평만 해안선은 대부분 높이 3m 미만의 급한 경사면을 가진 해안절벽으로 이루어져 있다. 해안절벽은 주로 연약한 풍화암 또는 적색 토양층으로 구성되어 있어 매우 불안정하며, 활발한 침식활동이 진행되고 있다. 1976년과 1990년에 촬영된 항공사진을 이용한 단사진 측정법(photogrammetry)을 통하여 이들 해안절벽 침식에 따른 해안선 변화(후퇴)를 정량적으로 계산한 결과, 함평만 해운리 해안선의 침식율(후퇴율)은 매년 1~2m 정도로 계산되었으며, 이는 장 외(1999)에 의하여 현장에서 직접 관측·측정된 침식율과 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 단사진 측정법은 앞으로 해안선의 장기적 변화를 정량화하고 해석하는데 매우 유용한 방법으로 평가된다. 또한, 함평만에서의 활발한 해안침식은 간헐적으로 발생하는 고에너지의 태풍 및 폭풍에 의한 이상고조와 매우 불안정한 토양으로 구성된 해안절벽의 지질 특성 등의 복합적인 상호작용에 의한 것으로 해석된다.

주요어: 해안절벽, 항공사진, 단사진 측정법, 후퇴율, 태풍 및 폭풍 해일, 함평만

## 서론

연안역(coastal zone)은 해양과 육지가 연결되는 접이지대로서 항상 역동적이고 끊임없이 변화하는 해양 환경이다. 또한 바다로부터 육지를 보호하는 완충지역으로서 연안역은 환경변화에 민감하게 반응하며, 지형학적, 지질학적 및 생물·생태학적 측면에서 뿐만 아니라 공간자원 측면에서도 그 중요성이 크게 증가

하고 있다. 최근에는 인간의 경제적 활동에 따른 대규모 간척사업이 한반도 서해 연안의 여러 곳에서 진행되고 있으며, 이러한 인위적 개발은 연안역의 환경변화를 일으키는 주요 요인 중 하나로 인식되고 있다. 특히 자연현상(natural forces and processes)에 역행하는 방조제 건설 및 골재 채취(sand mining)와 같은 인위적 개발들은 염습지, 갯벌 그리고 해변과 같은 연안 환경의 파괴와 함께 예측 불가능한 많은 환경 변화를 유발시키고 있다(Gerritsen and Jeon, 1991). 그러나 지금까지 한반도 서남해의 연안역에

대한 효율적 관리는 미흡한 실정이며, 연안역에서 일어나는 자연적 환경변화 현상을 정확히 이해하지 못하고 있다. 따라서 이들 연안역에 대한 보존과 체계적 관리의 필요성이 강조된다.

한반도 서남해안에 위치한 함평만은 만의 입구가 매우 좁은 반폐쇄된(semi-enclosed) 지형적 특성을 보이며, 해안선은 해안절벽(sea cliff)의 침식으로 인하여 육지쪽으로 계속 후퇴하고 있다(류상욱 외, 1999; 장진호 외, 1999). 일반적으로 해안절벽 침식과 해안선 후퇴는 해빈 유실, 구조물 파괴 그리고 농작물에 막대한 피해를 끼치는 해수 침투 및 농경지 파괴 등 자연재해에 속하는 다양한 환경변화를 유발시킨다(권혁재, 1981, 1993). 이러한 자연재해를 방재하기 위해서는 우선적으로 자연현상에 의해 일어나는 해안선 변화를 장기적으로 관찰하고 모니터링하는 일련의 연구들이 필요하다. 다행스럽게도 최근에 해침으로 인하여 침식·침수된 연안영역(포락지)을 체계적으로 조사하기 시작함으로써 해안침식의 정도와 방지책을 서두르고 있는 실정이다. 그러나 이러한 해안침식에 의한 해안선 후퇴 현상이 지구온난화에 따른 해수면 상승에 의한 것인지 아니면 폭풍과 같은 간헐적인 기상현상에 의한 것인지를 이해하는 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 이러한 측면에서 해안선의 변화를 관찰하고 기록하는 것은 연안역에서 해양환경을 연구하는 학문적 측면에서 뿐만 아니라 공간 및 관광자원의 확보와 보호 측면에서도 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 함평만 해운리 해안에서 활발히 진행되고 있는 해안절벽 침식에 따른 해안선 변화(후퇴)를 정량적으로 계산하고, 그 원인을 파악하고자 한다. 함평만 해안선의 장기적인 후퇴 변화를 정량화하기 위해 1976년과 1990년에 촬영된 항공사진을 이용하는 사진 측정법(photogrammetry)을 이용하였다. 일반적으로 장기적인 해안선 변화에 대한 연구에서 해안선 위치의 시간적인 변동을 정량화하기 위해서는 일정 지역이 중복 촬영된 두 장의 항공사진을 이용하는 복사진 방법이 이용된다. 그러나 본 연구지역인 함평만 해운리 해안은 협소하고(길이 1km 미만), 국가 기본도 작성에 요구되는 광범위한 항공사진 해석 방법을 적용하기에는 비용과 시간이 있어 비경제적이다. 따라서, 본 연구에서는 전문광학 장비를 갖추지 못한 일반 연구실에서 이용할 수 있는 DLT(Direct Linear Transformation) 방법을 통한 단사진 측정법을 이용하여 해안선 변화를 해석하고자 한다.

## 연구 지역

한국 서남해안에 위치하고 있는 함평만은 북서 방향으로 길게 만입한 반폐쇄된 지형 특성을 나타내며, 최대 길이 약 17km, 폭이 12km에 달한다(Fig. 1). 만 입구와 외만 봉남리쪽에 두우리 갯벌이 넓게 발달되어 있어 겨울철 북서 계절풍에 의한 파랑 에너지가 함평만내로 들어오기 전에 상당량 감소할 것으로 사료된다. 대부분의 만은 니질 퇴적물로 구성된 조간대(muddy tidal flat)로 이루어져 있으며, 조간대 곳곳에는 사주 및 세너어(chenier) 그리고 조류로 등이 발달하고 있다. 조간대의 육지쪽으로 기복이 작은 층적층과 수 m 높이의 해안절벽이 발달하고 있으며, 이들 해안선을 따라 폭이 좁은 해빈들이 평균 고조선 부근에 부분적으로 발달하고 있다. 대부분 풍화토와 토양으로 구성된 해안절벽들은 현재 활발한 침식에 의해 무너져 내리고 있으며, 그 결과 매년 해안선이 육지 쪽으로 뚜렷이 후퇴하고 있다(장진호 외, 1999). 현재 함평만에는 해수에 의한 해안 침식과 농경지 및 구조물 파괴를 막기 위한 많은 방조제들이 건설되어 있고, 건설 중에 있다. 특징적으로 함평만 유일리 해안의 해안절벽 최상부에는 강한 태풍에 의하여 날려 퇴적된 패각층이 존재한다(Park, 1996). 이 폭풍 퇴적층은 평균 만조선보다 약 8.0m 높이에 존재하며, 대부분 5~6cm 크기의 굴(oyster)로 구성되어 있다.

함평만의 조석은 반일주조(semidiurnal tide)로 일조부등(diurnal inequality)이 뚜렷하며, 소조차는 2.5m, 대조차는 4.9m, 평균조차는 3.7m로서 중조차 환경(mesotidal environment)에 속한다(국립해양조사원, 2001). 만 입구에서 관측된 유속측정 자료에 의하면, 창조류와 낙조류는 각각 남동 방향과 북서 방향으로 흐르며, 표층에서의 최대 유속은 각각 125cm/sec와 138cm/sec로서 창조류가 다소 강하게 나타난다(국립지리원, 1983). 함평만 주변의 육상 지질은 만의 중앙을 경계로 하여 북서부 일대는 주라기 편마상 화강암이 분포하고 남동부 일대는 시대미상의 화강암질 편마암이, 그리고 이들 사이에는 좁은 폭의 반상변정 편마암이 대상으로 협재되어 있으며, 이들의 주 구성 광물은 석영, 장석, 운모 등이다.

함평만에 근접한 목포 기상대에서 관측된 최근 12년간의 기상관측 자료에 의하면, 함평만 주변의 풍속은 평균 4.2m/sec이며 겨울에는 북서풍이, 여름에는

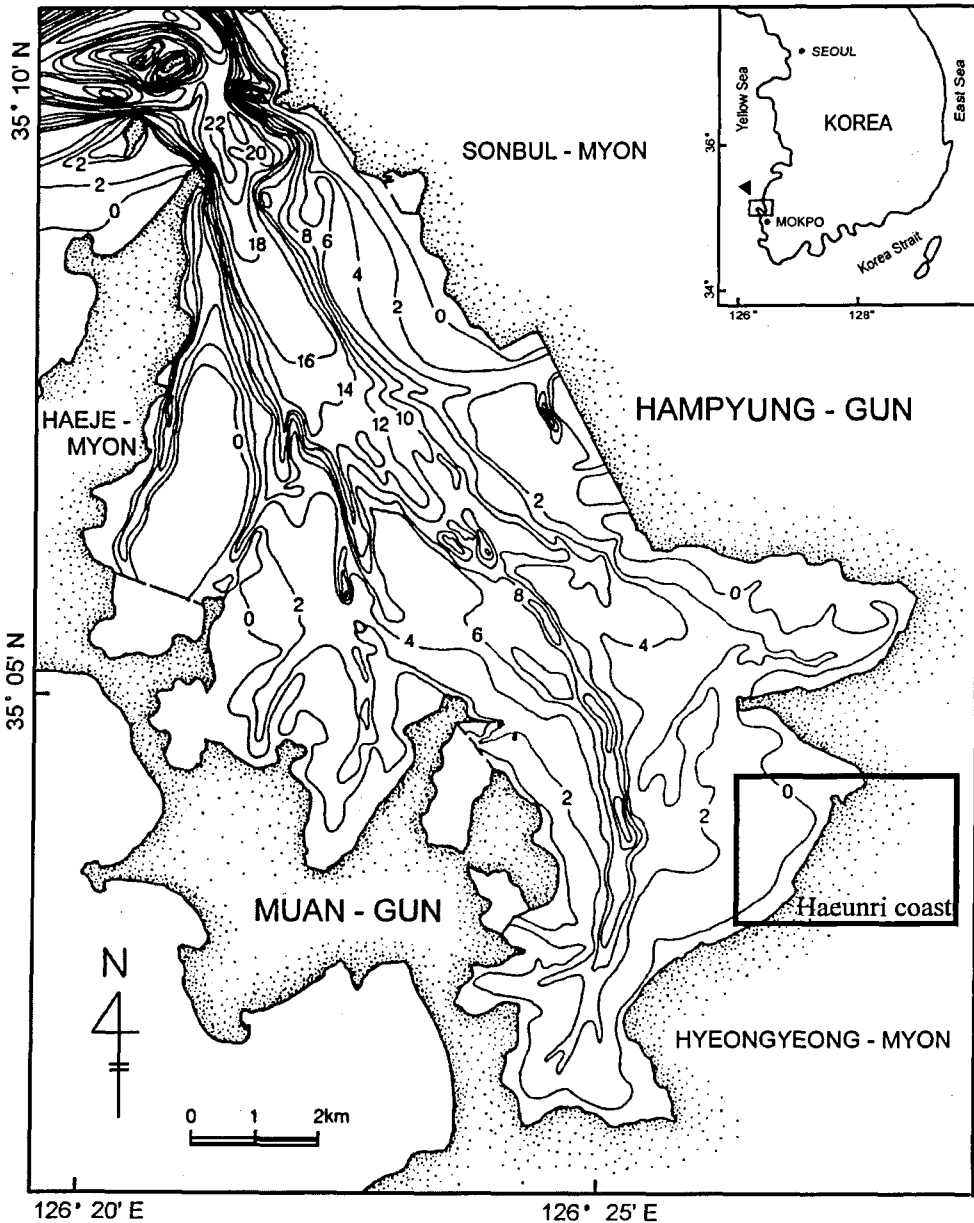


Fig. 1. Map showing geographic location (insert) and bathymetry of Hampyung Bay.

남풍이 상대적으로 우세하게 나타난다. 겨울철 월평균 폭풍일수(풍속 13.9m/sec 이상)는 3일 이상인 반면, 여름철에는 1일 미만으로 낮다(류상욱, 1998). 따라서 겨울에는 빈번한 폭풍에 의해 쉽게 고에너지 상태가 야기되고, 여름에는 저에너지 상태가 유지된다. 한편, 17m/sec 이상의 태풍은 연평균 4회 정도 발생하고 주로 7월과 9월 사이의 여름에 집중되며, 그 중 한반도 서해안을 통과하여 지나가는 태풍은 약 2개

다(Park, 1996). 폭풍 및 태풍 등의 강한 바람은 연평균 2~3회 정도 함평만 주변 지역에 영향을 미친다.

### 항공사진 분석

#### 항공사진 분석의 원리(DLT 해법)

본 연구에서는 1976년과 1990년에 국립지리원에서 촬영한 1:20,000 항공사진을 이용하였다(Fig. 2). 일

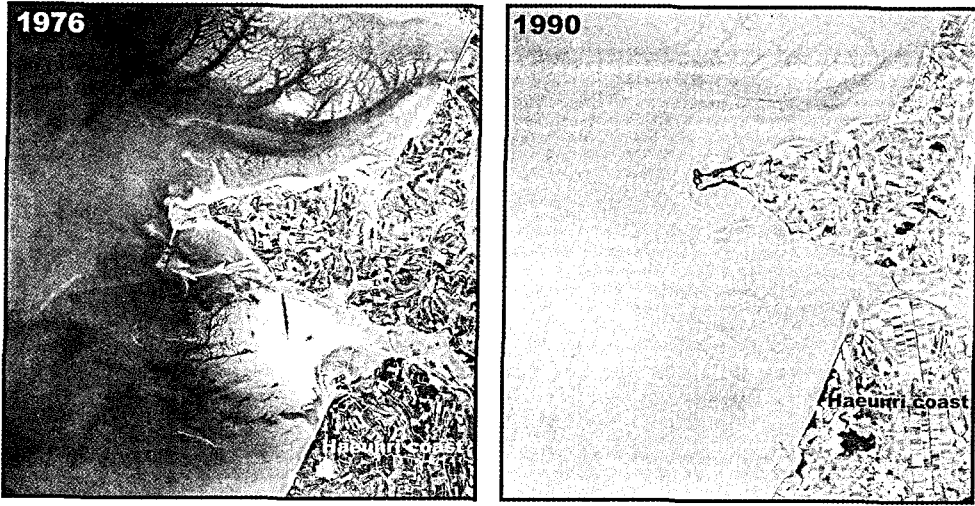


Fig. 2. Two aerial photographs used in this study. The shoreline indicator is the black/white line, which is identifiable in each photo by the tonal difference between cliff and beach.

반적으로 항공사진은 수직사진이 아니므로 경사변위 (tilt displacement)가 존재하며, 지형의 고저차이로 비롯되는 기복변위(relief displacement)를 가지고 있다 (Fig. 3). 이들 변위는 경사사진을 평면으로 투영시키는 과정인 편위수정(rectification)을 통하여 수정될 수 있다. 편위수정은 일반적으로 해석사진측량에서 이용되는 공선조건(collinearity condition)의 원리를 적용한다. Abdel-Aziz and Karara(1971)는 공선조건식의 해를 구하는데 필요한 내부표정요소 및 외부표정요소들의 초기 근사값을 구하지 않고, 콤퍼레이터의 좌표에서 직접 공간좌표로 변환되는 DLT 해법을 제안하였다.

콤퍼레이터의 좌표에서 영상좌표로의 변환은 일반적으로 다음 식으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= a_1 + a_2x + a_3y \\ \bar{y} &= a_4 + a_5x + a_6y \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ 는 영상좌표,  $x$ ,  $y$ 는 콤퍼레이터의 좌표이다. 이러한 변환식은 콤퍼레이터  $x$ 와  $y$ 축 사이의 직교성과 각 축의 선형왜곡(differential linear distortion)에 의한 오차를 고려한다.

영상좌표에서 공간좌표로의 변환식은 보통 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ 는 대상물의 영상좌표,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ 는 대상물의 공간좌표,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ 는 카메라 노출점의 공간좌표,  $c$ 는 카메라 고유상수,  $\lambda$ 는 축척 및  $a_{ij}$ 는 회전행렬요소이다. 이 식에서  $Z$ 항을 소거하여 정리하면 다음 연립방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{x} + c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} &= 0 \\ \bar{y} + c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식(1)을 (3)에 대입한 후, 각 식에서  $x$  또는  $y$  변수를 제거하고 정리하면 11개의 DLT 계수( $L_1$ 부터  $L_{11}$ 까지)를 가지는 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

항공사진은 3차원의 공간이 사진기의 투영점(perspective center)을 통하여 2차원 평면으로 투사된 것으로서 이로부터 3차원의 공간좌표로 직접 변환될 수 없다. 특히 본 연구와 같이 단사진을 이용하여 항공사진을 해석하는 경우에는 부가적인 정보가 요구된다(e.g., Holman et al., 1991; 김백운 외, 1998). 일반적인 해안선의 변화 연구에서 고조선(High Water

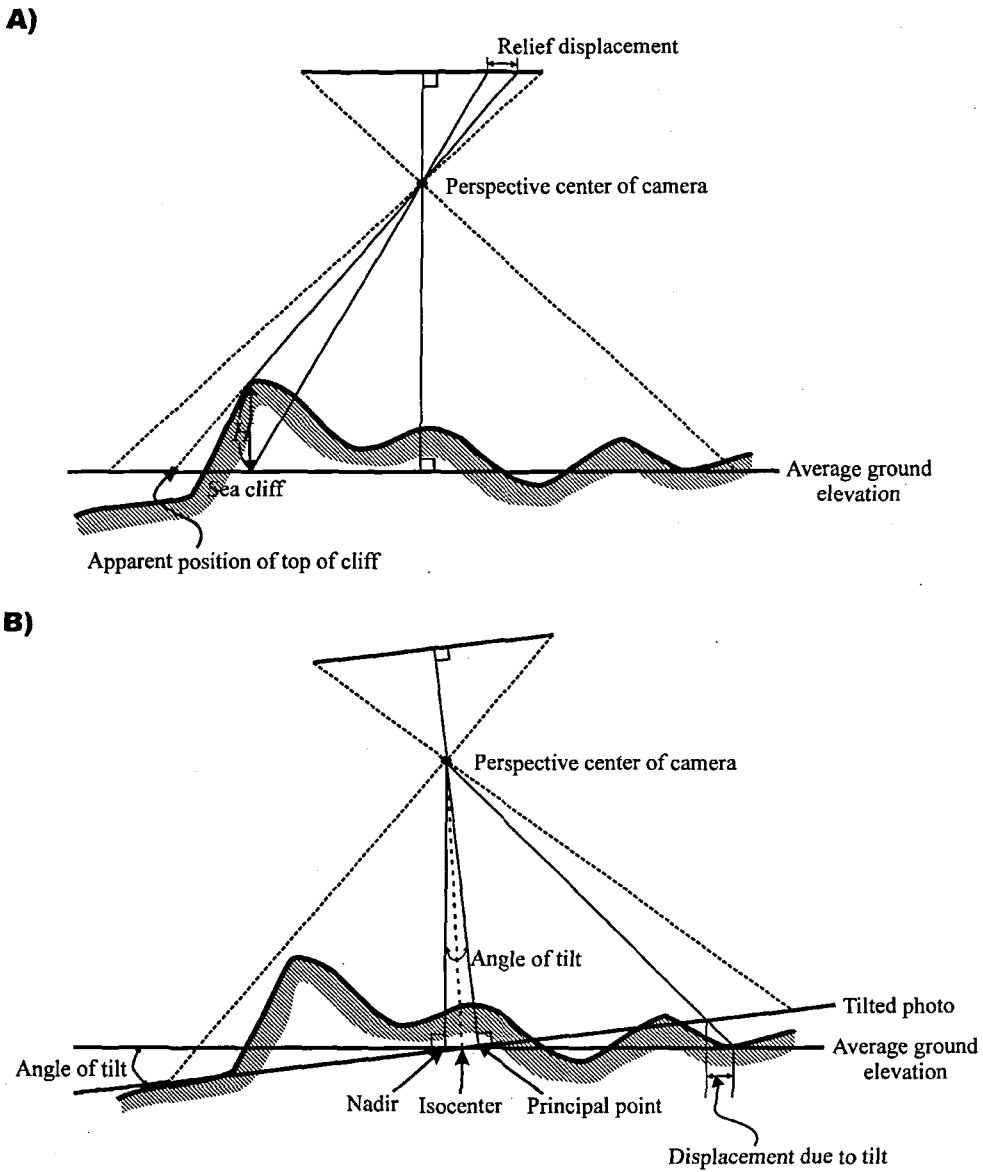


Fig. 3. (A) Relief displacement causes objects above the ground to be displaced toward the edges of an aerial photograph. (B) Some degree of tilt is always present in an aerial photograph, which causes image points to be displaced from the true position.

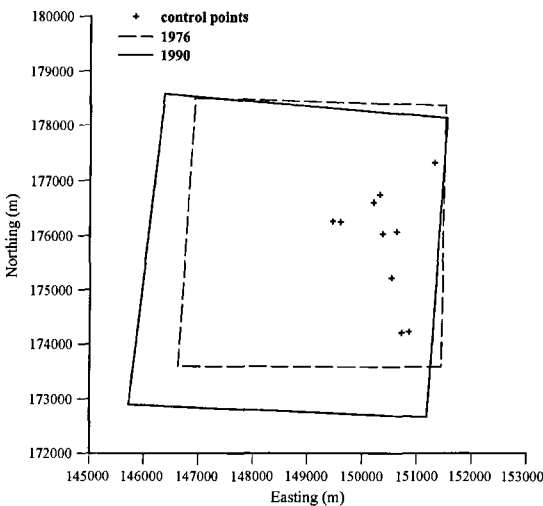
Line)으로 규정되는(Dolan *et al.*, 1978; Shoshany and Degani, 1992) 해안선의 Z좌표는 해수면 고도와 동일한 값(예를 들어,  $Z=0$ )으로 취할 수 있으며 이로써 부가적인 정보가 해결된다. 반면 해안절벽으로 이루어진 해안선의 경우 해안절벽의 고도가 공간적으로 변하기 때문에 해안선 고도의 좌표는 일정한 값이 될 수 없다. 게다가 고조선에 의한 해안선과 달리 과거의 항공사진은 이미 침식되어 사라진 해안절벽 지형을 촬영한 것으로서, 만일 당시의 지형 정보를 가

지고 있는 지형도가 없다면 해안선 고도의 좌표는 미지수가 되는 문제점이 있다. 그런데 합평만에서 해안선을 이루는 해안절벽의 고도는 평균고조선으로부터 3m 미만이며, 이를 해수면 고도로 간주하더라도 이에 의한 오차는 크지 않을 것으로 평가된다. 따라서 해안절벽 해안선의 추가적인 정보는 고조선으로 이루어진 해안선과 마찬가지로 해수면 고도로 주어짐으로써 2차원의 사진영상으로부터 3차원의 공간좌표가 구해진다.

**항공사진 분석 결과**

위에서 언급된 것처럼 촬영시기가 다른 두 장의 항공사진을 서로 비교·분석할 때 일차적으로 정확한 편위 수정이 필요하다. DLT 방법에 의한 항공사진의 편위 수정은 먼저 식(4)에서 요구되는 11개의 계수를 구해야 하며, 이를 위해 최소 6개 이상의 고정 기준점(control points)을 필요로 한다. 연도가 다른 항공사진들 사이에 공통의 기준점을 사용하기 위해서는 시간적으로 변하지 않은 여러 기준점을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 항공사진으로부터 기준점 및 해안선별로 이루어진 해안선의 영상수치좌표를 얻기 위하여 23×23cm 크기의 항공사진(축척 1:20,000)을 PC용 스캐너를 이용하여 600dpi 해상도로서 수치영상으로 변환하였다. 이 경우 수치영상화소 1개의 크기가 42 $\mu$ m이고, 실제 지상에서의 거리는 0.85m이다. 이렇게 수치화된 두 장(1976년과 1990년)의 항공사진으로부터 동일지점에 위치한 10개의 기준점(control point)을 설정하였으며, 이들 기준점에 대한 영상수치좌표 값을 획득하였다. 한편, 두 장의 항공사진에서 선정한 10개의 기준점들에 대한 절대좌표 값은 국립지리원 발행 1:5,000 전자수치지도로부터 획득하였으며, 고도값은 등고선간 내삽법을 이용하였다.

따라서 항공사진의 변위 수정은 기준점에 대한 수치화된 항공사진의 영상좌표와 전자수치지도의 절대좌표 값들을 식(4)에 대입하고 최소자승법으로 11개



**Fig. 4.** Frames of aerial photographs are transformed into non-square field of view on the base map due to tilt displacements. Cross points denote location of control points common to both photographs.

**Table 1.** Errors between observed and calculated ground coordinates of control points.

Control points	Year	1976		1990	
		Ex (m)	Ey (m)	Ex (m)	Ey (m)
1		-1.49	-0.35	-3.28	1.14
2		0.57	-1.38	1.90	-2.91
3		-2.64	0.10	-1.31	0.24
4		1.65	-4.01	1.93	-4.08
5		-0.07	1.17	1.15	0.45
6		1.01	1.55	-0.46	2.22
7		0.93	1.76	0.45	2.00
8		-0.43	1.39	-1.68	0.72
9		2.81	-2.38	3.03	-1.09
10		-2.35	2.15	-1.74	1.32
RMS Error (m)		1.67	1.93	1.91	1.98
$(E_x^2 + E_y^2)^{1/2}$ (m)		2.55		2.75	

의 DLT 계수를 구하는 것으로 완료된다. 이 과정은 본 연구에서 사용된 1976년과 1990년의 두 장의 사진에서 각각 2회 반복 계산되었다. Fig. 4는 본 연구에서 얻어진 편위 수정된 결과를 도시한 것으로, 항공사진의 프레임을 기준이 되는 전자수치지도의 절대좌표계에 투영한 것이다. 그 결과, 정사각형의 항공사진 영상이 비정방형으로 변환되었으며, 이는 각 항공사진의 경사변위와 관련된 사진왜곡의 정도를 보이는 것이다. Table 1에서 보는 바와 같이 기준점 좌표의 수치지도의 절대값과 항공사진으로부터 계산된 값 사이의 X좌표와 Y좌표에 대한 RMS(root mean square) 오차는 1976년에는 1.7m와 1.9m, 그리고 1990년에는 1.9m와 2.0m이다. 즉, 10개의 기준점들에 대한 절대좌표와 항공사진에서 계산된 영상좌표 사이의 평균적인 거리 오차는 1976년에는 2.6m, 그리고 1990년에는 2.8m 내외로서 매우 양호한 결과를 보이고 있다(Table 1). 이러한 수준의 오차는 사진영상에서 3화소의 오차에 불과한 것으로서 본 연구에서 수치지도를 이용한 기준점 측정의 성과는 만족할 만한 수준임을 보여준다. 결과적으로 이러한 일련의 순차적 과정을 수행함으로써 두 장의 항공사진을 서로 직접 비교 할 수 있다.

다음으로 11개의 미지수가 결정된 식(4)를 이용하여 함평만의 남동쪽에 위치한 해운리 해안의 약 1km에서 얻어진 해안선의 영상수치좌표값(절대고도값=0)을 전자수치지도에 투영될 수 있도록 절대좌표값으로 변환하였다. Fig. 5는 1976년과 1990년에 획득된 항공사진으로부터 추출·계산된 해운리 해안선을 전자

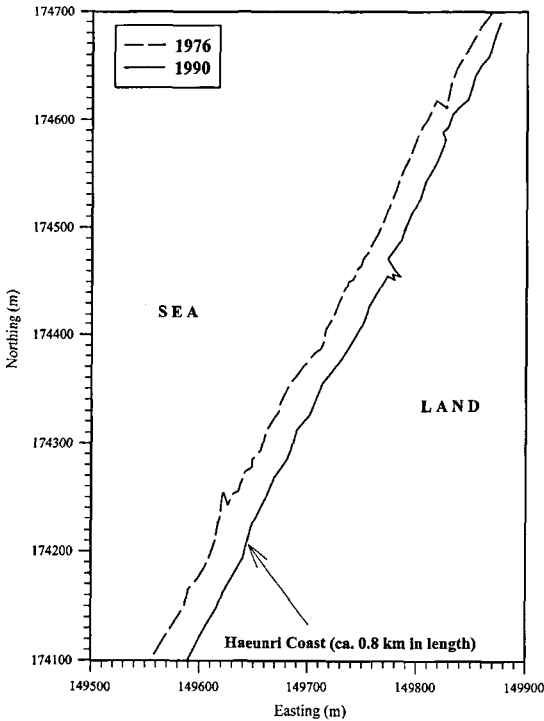


Fig. 5. Map showing the 1976 and 1990 shoreline positions calculated by a photogrammetry using single aerial photograph.

수치지도 위에 도시한 결과이다. 1990년의 해안선은 1976년에 비하여 육지쪽으로 크게 후퇴한 변화를 보이며, 후퇴 변화량은 지난 14년 동안 약 17~28m(평균 24.9m)이다. 이는 기준점 좌표의 오차범위를 고려해 볼 때 충분히 그 의미가 있는 값이라 할 수 있다. 결론적으로 함평만 유월리 해안선은 연평균 약 1~2m 범위로 육지방향으로 후퇴한 것으로 계산된다.

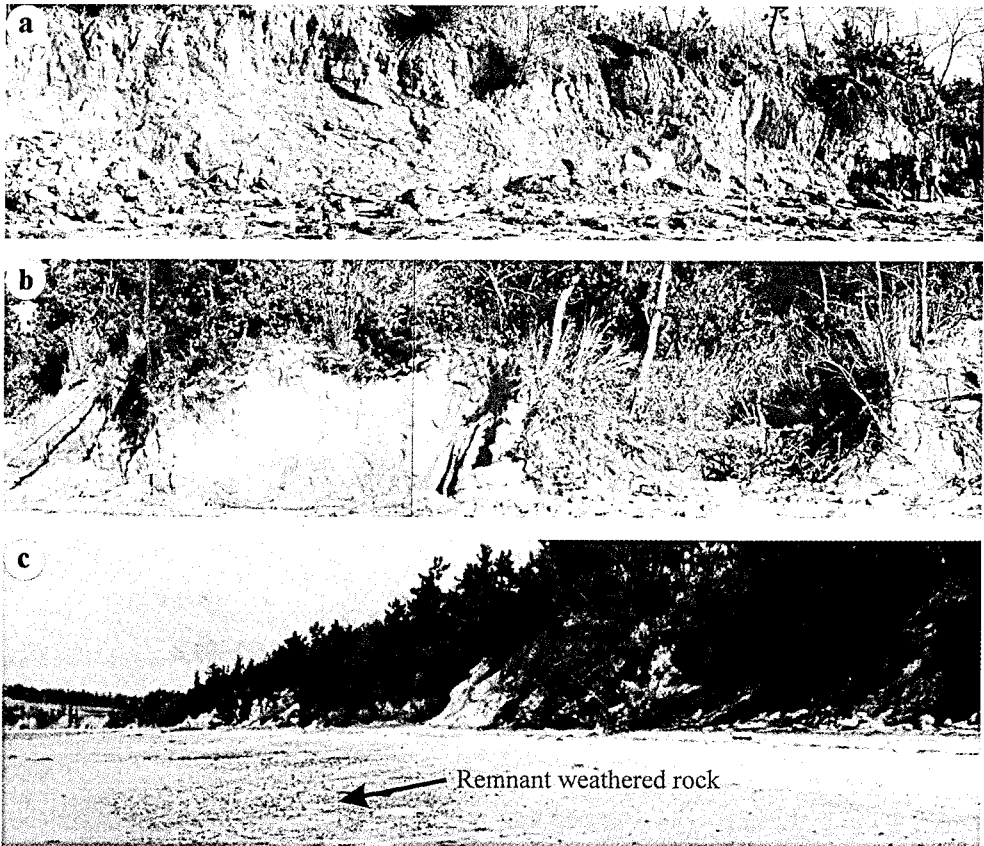
### 토 의

전형적인 리아형(ria-type)에 속하는 함평만은 전반적으로 툽날모양 형태의 해안선을 보이며, 이러한 해안선 지형 굴곡은 암석의 풍화상태에 따라 지역적으로 나타나는 큰 차별침식때문인 것으로 사료된다. 함평만 해안선은 대부분 높이 2~3m의 해안절벽(sea-cliff)과 조간대에서 농경지로 완만하게 연결되는 평탄 지형으로 구성된 자연상태의 해안선과 농경지 침수 방지와 구조물 보호를 위하여 해안선 곳곳에 건설되어 있는 크고 작은 수십 개의 방조제로 구성된 인공상태의

해안선으로 이루어져 있다. 현재 함평만내에는 해안선을 따라 총 53곳에 크고 작은 방조(파)제가 건설되어 있으며, 총 연장 길이는 해안선의 60% 이상에 달하는 것으로 평가된다. 이러한 많은 방조제의 존재는 과거 수 백년 동안 해안절벽의 침식으로 인한 해안선 후퇴가 계속되어 왔음을 보여준다.

함평만 해운리 해안선은 주로 높이 약 3m 미만의 해안절벽으로 구성되어 있으며, 절벽 기저부에 인접하여 넓이 20m 내외의 소규모 해변과 그 전면에 간석지가 넓게 펼쳐져 있다(Fig. 6a). 해안절벽은 하부의 풍화암과 상부의 적색 토양층으로 구성되어 있으며, 활발한 침식작용으로 인하여 육지 방향으로 후퇴할 정도로 매우 불안정한 상태에 있다. 해안절벽 면(face)의 경사는 거의 수직이며, 지역적 특성에 따라 전체가 무너져 내려 만들어진 매끄러운 면(face)을 보이거나 침식차이에 따라 울퉁불퉁한 툽날 모양의 절벽 면(sea-cliff face)을 보이기도 한다. 특징적으로, 해안절벽 면(face)과 기저부에는 길이 약 2m 크기의 큰 나무들이 해안 침식과 함께 절벽의 경사면에 쓰러져 있다(Fig. 6a). 이와 함께 해변의 표면에서 해안절벽의 침식 흔적을 뚜렷이 확인할 수 있다. 해변의 표면에는 해안절벽이 후퇴하면서 완전히 침식되지 못하고 상대적으로 풍화에 강한 암석들이 노출되어 나타난다(Fig. 6b). 이러한 잔류 기반암들은 최근의 해안선 위치를 지시하는 중요한 해안 특성 중 하나이다. 더욱이 해변에는 상대적으로 풍화에 강한 부분들이 바위 모양의 섬처럼 해안절벽으로부터 고립되어 존재하기도 한다. Pethick(1984)은 이러한 지형을 "island stack"이라고 명명하였으며, 이는 해안침식을 지시하는 중요한 지형 특성 중 하나이다. 이러한 여러 가지 현장 관측 자료들은 함평만의 해안선이 크게 침식·후퇴하고 있음을 보여준다.

항공사진 분석 결과에 의하면, 함평만 해운리 해안은 1976년부터 1990년까지 14년 동안 평균적으로 매년 약 1~2m씩 육지방향으로 후퇴한 것으로 분석된다. 이는 장진호 외(1999)에 의해 이 지역에서 실제로 관측된 값(0.6~2.1m/yr)과 잘 일치하며, 이는 본 연구에서 적용된 항공사진의 단사진 분석 방법이 장기간의 해안선 변화를 관측하고 모니터링 하는데 있어서 매우 효과적임을 보여준다. 더욱이 고성능 컴퓨터와 주변기기의 보편화로 인하여 고가의 광학적 장비를 이용하는 광학적인 방법 대신 수치적인 방법으로 항공사진을 해석하는 연구가 소규모의 연구실에서



**Fig. 6.** Photographs showing the sea-cliffs of Haeunri coast, Hampyung Bay. (A) and (B) Sea-cliffs is actively eroding by wave action. (C) Remnant weathered rocks indicating a past coastline are found on the present beach and tidal flat.

도 가능한 것으로 평가된다. 이에 DLT(Direct Linear Transformation)에 의한 사진 측정법은 앞으로 해안선의 장기적 변화를 정량화하고 해석하는데 매우 유용한 것으로 사료된다.

해안절벽 침식의 정도는 해안절벽의 기저부에 도달되는 파랑의 침식력(erosive force of wave)과 노출된 암석의 저항력(resistibility of rock)에 의해 크게 좌우된다(Horikawa and Sunamura, 1967; Alveirinho Dias and Neal, 1992). 파랑의 침식력은 외해로부터 전파되는 파랑에너지와 관계되며, 이는 파랑이 해안절벽의 기저(cliff base)에 도달하는 동안 해저지형 특성(characteristics of submarine topography), 해빈의 넓이와 경사, 해빈 퇴적물의 입자 크기 및 조차 등 수많은 요소들에 의해 영향을 받는다. 침식에 대한 암석의 저항력(resistibility of rocks)은 암석의 기계적 특성(e.g. compressive strength, tensile strength, abrasive hardness)과 암석의 구조(stratification, joints, faults

etc)에 의하여 결정된다. 이외에도 해안절벽의 침식은 절벽의 높이 등과 같은 다양한 요소들에 의해 조절되며, 복합적으로 작용하여 나타난다. 따라서 토양으로 구성된 불안정한 해안절벽과 파랑(wave)의 영향이 빈번한 해안에서 해안침식은 매우 우세하게 나타날 것이다. 한반도 서해안은 수심이 얇고 해저지형의 경사가 완만하며, 육지쪽으로 깊게 만입된 지형 그리고 주변에 많은 섬들로 보호되어 있기 때문에 외해에서 발생된 파랑이 해안선에 도달하기까지 그 에너지가 쉽게 감쇄된다. 더구나 대조차 환경으로서 파랑의 영향이 고조선 보다 높은 해안선까지 미치는 경우에도 해안침식이 일어나는 기간이 짧을 수밖에 없다. 특히 함평만은 북서 방향으로 길게 만입된 지형이므로 북서 방향으로 작용하는 외력을 제외한 다른 방향성을 가지는 외력의 영향은 매우 적을 것이다. 따라서 서해안에서의 파랑에너지 수준은 전반적으로 낮다고 할 수 있다. 이와는 대조적으로 동해안은 수심이 깊고 해저



지형의 경사가 심하며, 외해의 영향을 차단하는 지형이 없기 때문에 파랑의 에너지 수준이 언제나 높다고 할 수 있다. 이러한 관점에서 해안침식 정도가 파랑에 의해서만 결정된다고 한다면, 동해안에 비하여 서해안에서는 해안침식이 저조할 것으로 판단된다. 그러나 실제로는 서해안에서 해안침식이 보다 우세하게 일어나는 것으로 보고되고 있다(권혁재, 1981, 1993).

이러한 결과에 근거할 때 함평만에서 해안절벽의 침식이 활발하다는 사실은 침식작용이 평상시 파랑에너지 수준에 좌우되기보다는 간헐적으로 발생하는 폭풍 및 태풍과 밀접한 연관이 있음을 지시한다. 한반도 서해안은 북서 계절풍의 영향이 우세하게 작용하는 겨울철에 폭풍일수가 월평균 3일 이상이므로(한국해양연구소, 1982; Park, 1996), 연구 지역을 포함한 서해 연근해역은 겨울철 폭풍에 의하여 고에너지 환경이 조성될 수 있다. 특히, 폭풍은 해수면을 상승시키는 이상고조 현상을 일으키기 때문에 강한 파랑이 해안절벽의 기저부까지 쉽게 작용할 수 있다(Sunamura, 1982). 따라서 해안절벽은 이러한 폭풍 해일(storm surge)과 같은 일시적인 외력에 의하여 주로 침식될 것으로 사료되며, 더욱이 함평만의 해안절벽은 대부분 토양으로 구성되어 있기 때문에 이러한 짧은 시간 규모의 외력에 의해서도 효과적으로 침식될 수 있다고 해석된다. 즉, 함평만 해안절벽은 파랑의 공격에 쉽게 무너져 내리는 지질구조의 특성으로 인하여 해안침식이 활발하게 일어나는 것으로 해석될 수 있다. 특히 일년에 2회 나타나는 최고조의 백중사리 시기에 폭풍 및 태풍이 겹쳐 발생될 경우에 해안침식은 더욱 크게 일어날 것으로 예측된다.

함평만에서의 이러한 해안절벽의 침식현상은 간헐적인 큰 외력에 의하여 생성되는 파랑에 의해 침식 과정이 세분됨으로써 시간적으로 구분되는 후퇴과정을 보인다. 즉, 최초의 파랑에 의해 해안절벽의 기저부가 파인 후, 풍화 토양층이 무너져 내리고, 무너져 내린 토양층이 다음에 도달하는 파랑에 의해 제거되며, 또 다시 발생한 파랑에 의해 해안절벽의 기저부가 다시 침식을 받는 순환 과정이 존재한다. 이러한 과정이 반복되면서 해안선은 계속 육지쪽으로 후퇴하는 것으로 해석된다. 장진호 외(1999)에 의하면 내만역의 해안절벽은 주로 5~6월에 가장 크게 후퇴한다고 보고하였으며, 이는 조간대의 침식 시기보다 1~2개월이 지연되는 특징을 보인다. 이러한 사실은 주로 겨울에 해안절벽의 기저부가 침식되어 무너지고, 침

식된 퇴적물은 1~2개월 후인 봄에 주로 제거되는 것으로 해석된다. 그러나 해안선 후퇴 메커니즘을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 장기적인 침식 모니터링 연구를 통한 자료의 축적이 요구되며, 이를 뒷받침해줄 기상학적 및 수리 역학적 자료가 획득될 필요가 있다.

결론적으로 함평만은 전형적인 반폐쇄적 환경임에도 불구하고 해안선은 매우 역동적으로 반응하는 불안정한 환경임이 밝혀졌다. 특히 대조차 환경의 강한 조류와 함께 간헐적으로 나타나는 태풍 및 폭풍 해일에 의한 강한 파랑 에너지와 더불어 함평만 해안절벽의 연약한 지층구조가 함평만 해안선 후퇴의 주요 원인으로 사료된다.

## 결론

한반도 서남해안에 위치한 함평만의 해안선은 전반적으로 톱날 모양의 울퉁불퉁한 지형적 특성을 보이며, 이는 지역적인 차별 침식에 의한 것으로 해석된다. 함평만의 해안선은 대부분 풍화토와 토양 등으로 이루어진 연약한 지층의 해안절벽으로 구성되어 있으며, 현재 침식 활동이 활발히 진행되고 있다. 항공사진 분석결과, 함평만 해운리 해안의 해안절벽은 매년 1~2m 정도 육지 방향으로 후퇴하고 있으며, 실제로 관측된 값(0.6~2.04m/yr)과 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서 적용한 단사진 측정법은 앞으로 해안선의 장기적 변화를 정량화하고 해석하는데 매우 유용한 방법으로 평가된다. 또한, 함평만에서의 활발한 해안침식은 태풍 및 폭풍 해일에 의한 고에너지와 해안선의 지질 및 지형학적 특성 등의 복합적인 상호작용에 의한 것으로 해석된다.

## 사사

본 연구는 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 연구를 지원해 준 관계자에게 감사를 드립니다. 또한 항공사진을 제공해 주신 전남대학교 전승수 교수님과 류상욱 박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

김백운·박용안·오임상·김부근·최경식, 1998, 사진측정

- 법을 이용한 해빈단면의 추정. 한국해양학회지 “바다”, 3, 228-233.
- 국립지리원, 1983, 연안해역 기본조사 보고서(법성포 지역). 60 p.
- 국립해양조사원, 2001, 조석표(한국연안). 서지 제 510호, 인천, 263 p.
- 권혁재, 1981, 태안반도와 안면도의 해안지형. 고려대학교 사대논문집 6호, 261-287.
- 권혁재, 1993, 서해안의 해안침식. 고려대학교 사대논문집 18호, 137-155.
- 류상옥, 1998, 한국 서남해안 함평만의 퇴적환경과 층서. 전남대학교 박사학위논문, 248 p.
- 류상옥 · 유환수 · 이종덕, 1999, 함평만 조간대의 표층 퇴적물과 집적률의 계절변화. 한국해양학회지 “바다”, 4, 127-135.
- 장진호 · 김여상 · 조영길, 1999, 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용: 한국 서해안 함평만. 한국해양학회지 “바다”, 4, 117-126.
- 한국해양연구소, 1982, 만리포 해빈변화 및 침식방지대책에 관한 연구. 200 p.
- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M., 1971, Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the ASP/UI symposium on close-range photogrammetry, Urbana, Illinois, 1-18.
- Alveirinho Dias, J.M. and Neal, W.J., 1992, Sea Cliff Retreat in Southern Portugal: Profiles, Processes, and Problems. Journal of Coastal Research, 8, 641-654.
- Dolan, R., Hayden, B., and Heywood, J., 1978, A new photogrammetric methods for determining shoreline erosion. Coastal Engineering, 2, 21-39.
- Gerritsen, F. and Jeon, D., 1991, Nearshore processes and littoral drifts (unpublished manuscript). Dept. of Ocean Eng. Univ. of Hawaii.
- Holman, R.A., Lippmann, T.C., O'Neill, P.V. and Hathaway, K., 1991, Video estimation of subaerial beach profile. Marine Geology, 97, 225-231.
- Horikawa, K. and Sunamura, T., 1967, A study on erosion of coastal cliffs by using aerial photographs. Coastal Engineering in Japan, 10, 67-84.
- Pethick, J., 1984, An Introduction to Coastal Geomorphology. Routledge, Chapman and Hall, INC, 260 p.
- Park, Y.A., 1996, Coastal Typhoon Deposit in Hampyung Bay, Southwest Coast of Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 31, 32-36.
- Shoshany, M. and Degani, A., 1992, Shoreline detection by digital image processing of aerial photography. Journal of Coastal Research, 8, 29-34.
- Sunamura, T., 1982, A predictive model for wave-induced cliff erosion with application to Pacific coasts of Japan. Journal of Geology, 90, 167-181.

---

2001년 6월 25일 원고 접수  
 2001년 8월 3일 수정원고 접수  
 2001년 8월 4일 원고 채택