

사진측정법을 이용한 해빈단면의 추정

김백운·박용안¹·오임상¹·김부근·최경식¹
서울대학교 해양연구소, ¹서울대학교 해양학과

Beach Profile Estimation Using a Photogrammetry

BAECK OON KIM, YONG AHN PARK¹, IM SANG OH¹
BOO-KEUN KHIM AND KYUNG SIK CHOI¹

Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
¹Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

본 연구는 비측량용 사진기를 이용한 근거리 사진측정법을 적용하여 해빈단면을 추정하는 방법을 제시한다. 수평면 위에 고정된 비디오로부터 획득한 경사비디오영상을 해석하는 방법을 기초로 다음 두 가지 관점을 고려하여 경사사진 해석에 적합한 방정식을 유도하였다. (1) 사진기가 광축에 대하여 회전되는 것을 허용하였다. (2) 정확도를 향상시키기 위하여 렌즈왜곡을 비롯한 사진 계통상의 오차를 보정하는 단순한 오차모형을 도입하였다. 수정된 방정식을 검증하기 위하여 1998년 2월에 동해시 해변에서 사진촬영과 정밀한 수준측량을 수행하였다. 그 결과 근거리 사진측정을 통한 해빈단면 추정값과 실제 측량값 사이의 수직거리에 대한 RMS 오차는 10 cm 이내였다.

This study presents a close-range photogrammetry that is applicable to beach profile estimation using a non-metric camera. Based on the analysis of oblique video image in which the video camera was installed on a horizontal plane and the field of view was fixed, a new equation to analyze a photograph was developed considering the following aspects: (1) camera is allowed to be rotated about its optical axis and (2) a simple error model is adopted to correct lens distortion and other systematic errors associated with the non-metric camera, which improves accuracy of non-metric imageries. To test the modified technique, photographs of the beach were taken near the Donghae City in February, 1998. In addition, beach profiles were surveyed with conventional dumpy level and surveying staff. RMS error between the estimated and measured beach profiles is less than 10 cm in elevation.

서 론

해빈은 인간의 주거와 휴식공간을 제공하는 지역으로서 그 경제적인 가치는 매우 크다. 또한 시·공간적으로 지형 변화가 가장 심한 환경 중의 하나이기 때문에 퇴적물 이동 및 지형변동 특성을 밝히는 연구의 중요한 대상이다. 따라서 지난 수 십년 동안 해빈 침식의 문제를 비롯하여 장기적인 해빈 지형의 변화를 밝히는 수많은 연구가 수행되었다(Aubrey *et al.*, 1980; Wright and Short, 1984; Seymour, 1989).

이러한 연구들의 대부분은 해빈 지형의 변동을 정량화하기 위하여 일반적으로 수준측량을 수행하였다(Plant and Griggs, 1992). 최근에 Holman *et al.*(1991), Plant and Holman(1997) 등은 자동화된 비디오 관측시스템을 이용하여 해빈단면을 추정하는 방법을 제안하였다. 이들이 제안한 비디오 관측방법은 해빈을 횡단하는 표시선(영상에 뚜렷하게 나타날 수 있는 소방호스와 같은 선형의 물체로 정의함) 또는 해빈사면과 수면이 만나는 선과 같은 정보를 추가하여 2차원 영상으로부터 3차원 지형을 추정하는 근거리 사진측정법(촬영범위 300 m 이내)의 원리를

적용하는 것이다. 이러한 비디오 측정 방법은 수준측량보다 비교적 쉽게 상세한 해빈단면을 취득하게 해주며, 시간적으로 연속적인 관측을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 이들의 방법에는 다음과 같이 몇가지 문제점이 있다. 비디오 관측시스템은 장비 설치와 자료 처리의 과정이 복잡할 뿐만 아니라 많은 비용이 요구된다. 또한 비디오는 일정한 방향으로 고정되어 설치되기 때문에 비디오의 시계(field of view)와 초점거리의 변경이 어렵다. 더욱이 비디오 관측시스템에 사용된 비디오가 비측량용이었음에도 불구하고 이에 관련된 오차 보정을 시도하지 않은 점이다.

이러한 문제점들을 해결하는 대안으로 본 연구에서는 비측량용 사진기(non-metric camera)를 사용하며, 사진 해석에 적합한 사진측정법의 원리를 제시한다. 이를 위하여 Holman *et al.* (1991)이 적용한 사진측정법을 수정하고 비측량용 사진기의 오차 보정을 고려한다. 따라서 현장실험으로 수정된 방법의 효용성을 입증함으로써 비용이 적게 들고 간편하며, 초점거리와 촬영방향의 변화가 자유로운 사진 측정의 실용적인 면을 부각하는데 목적이 있다.

경사비디오영상 해석의 이론

경사비디오영상(oblique video image)으로부터 해빈단면을 추정하는 원리(Holman *et al.*, 1991)는 다음과 같다. 해빈의 경사비디오영상은 높은 위치(예를 들면, 탑의 20 m 또는 40 m 지점)에서 해빈과 평행하게 하향 촬영하여 획득되었다. 일반적으로 영상은 2차원으로서 실제로 3차원인 해빈 지형으로 직접 변환되지 못한다. 따라서 2차원 영상으로부터 해빈단면을 추정하기 위해서는 추가적인 정보가 주어져야만 한다. 이러한 정보로서 해빈을 횡단하는 표시선과 이 표시선의 종적 좌표가 사용되었다. 해빈에 표시선을 배치하는 방법으로는 선형의 그림자 또는 야간에 좁은 폭의 광선 등이 고려되었으나, 현장에 쉽게 적용할 수 있는 소방호스(폭 15 cm)가 사용되었다.

경사비디오영상은 기준 수평면으로부터 높이 Z_c 에 위치한 비디오 투영점(perspective center)에서 수직축(z -axis)에 대하여 각 τ 만큼 경사진 방향으로 촬영하여 획득된다(Lippman and Holman, 1989). 이러한 경사비디오영상의 표정(orientation)은 주점(principal point)이 지상 좌표계(X 축은 해빈을 횡단하는 방향, Y 축은 해빈에 평행한 방향)의 Y 축과 교차하도록 정의된 것이다. 즉, 광축이 Y 축과 교차한다. 보다 좋은 영상을 얻기 위하여 비디오를 수직축에 대하여 각 ϕ 만큼 회전시킬 경우, 다음과 같이 지상좌표(X, Y, Z)와 영상좌표(x, y)의 관계가 성립한다(Holman *et al.*, 1991).

$$\begin{aligned} X &= (Z_c - Z) [\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \cos \phi + \tan(\tau + \alpha) \sin \phi] \\ Y &= (Z_c - Z) [-\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \sin \phi + \tan(\tau + \alpha) \cos \phi] \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 α 와 γ 는 투영점에서 영상좌표와 지상좌표가 공선으로 연결될 때 이 공선을 정의하는 각이며 영상좌표 x, y 및 초점거리 f_c 로 주어진다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y}{f_c} \right), \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + f_c^2}} \right) \quad (2)$$

앞에서 언급했듯이 (1)에서 미지수의 갯수는 3이고 방정식의 갯수는 2이므로 지상좌표를 구할 수 없다.

해빈을 횡단하는 표시선을 배치할 경우, 이 표시선은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Y_L = Y_{ol} + X_L \tan \mu \quad (3)$$

여기에서 Y_{ol} 은 Y 축과 표시선의 교점, μ 는 표시선과 해빈을 횡단하는 방향(X 축 방향) 사이의 각이며 표시선은 반드시 X 축에 평행할 필요가 없다. (3)에서 아래첨자 L 은 표시선과 관련된 좌표라는 것을 지시하며, Y_{ol} 과 μ 는 측량을 통해 결정되는 변수이다. (3)을 (1)에 대입하면 미지수가 두 개로 감소되어 문제가 해결된다. 이를 정리하면, 다음 방정식으로 X_L 과 Z_L 을 풀고 (3)에서 Y_L 을 구한다.

$$X_L = Y_{ol} \left[\frac{F_2(\alpha_L, \gamma_L)}{F_1(\alpha_L, \gamma_L)} - \tan \mu \right]^{-1}$$

$$Z_L = Z_c - \frac{X_L}{F_1(\alpha_L, \gamma_L)} \quad (4)$$

여기에서

$$\begin{aligned} F_1(\alpha_L, \gamma_L) &= \sec(\tau + \alpha_L) \tan \gamma_L \cos \phi + \tan(\tau + \alpha_L) \sin \phi \\ F_2(\alpha_L, \gamma_L) &= -\sec(\tau + \alpha_L) \tan \gamma_L \sin \phi + \tan(\tau + \alpha_L) \cos \phi \end{aligned} \quad (5)$$

이고, α_L, γ_L 은 표시선의 영상좌표이다. 따라서 표시선의 영상좌표로부터 해빈단면의 지상좌표를 추정할 수 있다.

경사사진 해석을 위한 수정

경사비디오영상의 해석 방법을 손으로 잡고 촬영하는 사진기(hand-held camera)에 적용하려면 비디오가 수평면에 설치된 것과 달리 사진기는 수평상태가 아닌 점을 고려해야 한다. 이를 위하여 사진기가 투영점에서 광축에 대하여 회전된 각을 계산할 수 있는 방정식이 요구된다.

비측량용 사진기는 측량용 사진기에 비하여 사진기와 필름의 구입이 용이하고 값이 저렴하다. 또한 고해상도를 얻기 위한 초점거리의 조정과 원하는 방향으로의 촬영이 자유롭기 때문에 근거리 사진측정에 비측량용 사진기의 이용이 증대하고 있는 추세이다(Karara, 1985). 그러나 측량용으로 사용하기 위하여 특별히 설계되지 않은 비측량용 사진기는 렌즈왜곡(lens distortion)과 필름변형이 크고 내부표정(interior orientation)이 불안정하기 때문에 구조적인 오차가 크다. 이러한 오차를 보정하여 측량용 사진기에 근접할 정도로 정확도를 향상시키는 방법이 Karara and Abdel-Aziz(1974) 등에 의하여 개발되었다. 따라서 비측량용 사진기로 인하여 발생하는 오차를 보정하기 위하여 경사비디오영상을 해석하는 식 (1)에 오차모형(error model)이 적용되어야 한다.

사진기의 표정(orientation)

사진기가 수평면을 유지하지 않은 상태란 사진기가 x 축 또는 광축(y 축)에 대하여 회전되거나 두 회전요소의 합으로서 회전된 것을 말한다. 사진기가 x 축에 대하여 회전된 각을 θ , 광축에 대하여 회전된 각을 ω 로 표시하자. 경사사진 촬영에서 z 축에 대한 경사도 τ 와 x 축에 대하여 회전된 각 θ 는 동일한 회전으로 형성된 각이므로, θ 는 τ 에 포함된다. 따라서 사진 촬영시 광축에 대한 회전(ω)만이 비수평면과 관련되며, 이는 경사사진 표정의 특성이라 할 수 있다.

수평면을 유지하기 어려운 사진기의 회전을 고려할 경우에 경사사진의 영상좌표와 지상좌표계는 Fig. 1에 도시한 기하학적 관계가 있다. 사진기가 회전되기 전에 경사사진과 지상좌표계(X, Y, Z)의 기하학적 관계를 보면 사진기의 천저점은 기준 수평면의 N 에서 교차하며, 광축은 Y 축에 놓인 P 에서 교차한다. 사진기의 투영점 O 와 N 사이의 거리는 Z_c 이며, O 와 P 사이의 각 τ 는 사진촬영의 경사도이다. O 에서 사진기가 광축과 z 축에 대하여 각각 ω 와 ϕ 만큼 연속적으로 회전된 결과 지상좌표계는 (X', Y', Z')로 변환된다. 이때 사진기의 경사도 τ' 은 비수평면에 의한 회전각 θ 가 포함된 것이며, 회전된 지상좌표계의 N 은

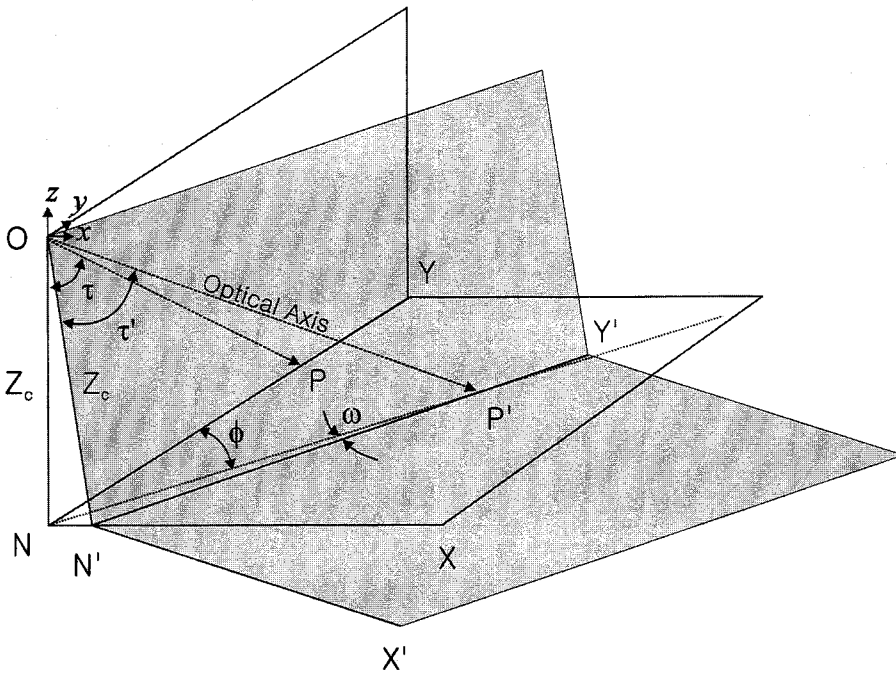


Fig. 1. Geometrical relationship between the ground coordinate systems of (X, Y, Z) and (X', Y', Z') , the second of which is transformed from the first (X, Y, Z) by the rotation of camera. O is the location of perspective center of camera. The camera is tilted at an angle of τ with respect to z -axis. Coordinates of camera, (x, y, z) , are rotated through an angle of ω about optical axis and successively through an angle of ϕ about z -axis.

회전 전의 N 과 일치하지 않는다. 이러한 회전 후의 지상좌표계에 근거하여 획득된 경사사진은 회전 전의 지상좌표계에서 사진기를 연속적으로 회전하여 촬영한 경사사진과 동일하다. 따라서 지상좌표 (X, Y, Z) 와 영상좌표 (x, y) 의 기하학적 관계는 회전 후의 지상좌표 (X', Y', Z') 와 영상좌표 (x, y) 의 관계로부터 지상좌표계의 연속적인 회전을 고려한 것과 같다.

(1)과 마찬가지로 경사사진에서 회전 후의 지상좌표와 영상좌표의 기하학적 관계는 (2)와 함께 다음 식으로써 결정된다.

$$\begin{aligned} X' &= (Z_c - Z') \sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \\ Y' &= (Z_c - Z') \tan(\tau + \alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)에서 식을 간편하게 표현하기 위하여 τ' 대신에 τ 를 사용하였다. 투영점을 중심으로 지상좌표계 (X', Y', Z') 와 (X, Y, Z) 의 회전변환 관계식은

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z_c - Z \end{bmatrix} = R_z(\phi) R_y(\omega) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z_c - Z' \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 주어지며, 이식에서 $R_y(\omega)$ 는 광축(y 축)에 대하여 각 ω 만큼 회전하는 행렬이고, $R_z(\phi)$ 는 z 축에 대하여 각 ϕ 만큼 회전하는 행렬이다. 연속적인 회전 행렬 R_y 는 다음 식과 같다.

$$R_y = R_z(\phi) R_y(\omega) = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \omega & \sin \phi & -\cos \phi \sin \omega \\ -\sin \phi \cos \omega & \cos \phi & \sin \phi \sin \omega \\ \sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

(7)과 (8)을 (6)에 대입하면

$$X = \left[\frac{Z_c - Z}{\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \sin \omega + \cos \omega} \right]$$

$$\left\{ [\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \cos \omega - \sin \omega] \cos \phi + \tan(\tau + \alpha) \sin \phi \right\} \quad (9)$$

$$Y = \left[\frac{Z_c - Z}{\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \sin \omega + \cos \omega} \right]$$

$$\left\{ -[\sec(\tau + \alpha) \tan \gamma \cos \omega - \sin \omega] \sin \phi + \tan(\tau + \alpha) \cos \phi \right\}$$

로 정리되며, 이는 경사사진에서 사진기의 수평상태를 유지하기 어려운 경우 지상좌표와 영상좌표의 기하학적 관계를 나타낸다. 참고로 $\omega=0$ 일 때, (9)는 (1)과 같다.

비측량용 사진기의 오차모형

렌즈왜곡은 주점에 대해 방사적이고 대칭인 방사방향의 왜곡과 주점에 대해 비대칭인 편심왜곡으로 나누어진다. 일반적으로 편심왜곡은 방사방향 왜곡의 1/10 정도로 미소한 양이므로 매우 정밀한 관측을 요구하지 않는 경우에 무시된다(유, 1998). Karara and Abdel-Aziz(1974)는 사진의 오차를 보정하는 여러 오차모형을 비교한 결과 매우 간단한 오차모형으로도 만족할 만한 성과를 거둘 수 있음을 보였다. 이때 사용된 간단한 오차모형은 렌즈왜곡과 필름변형의 선형적인 성분과 1 개항의 방사방향 왜곡으로 구성되며, 다음 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - \hat{x} = a_0 + a_1 x + a_2 y + k \bar{x} r^2 \\ \Delta y &= y - \hat{y} = b_0 + b_1 x + b_2 y + k \bar{y} r^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서 $\Delta x, \Delta y$ 는 영상좌표의 오차 보정값, x, y 는 영상좌표, \hat{x}, \hat{y} 는 지상좌표로부터 계산된 영상좌표, $\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0, r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2, x_0, y_0$ 는 주점의 좌표이다. (10)의 우변에서 계수 a 와 b 가 포함된 x, y 의 다항식은 렌즈왜곡과 필름변형의 선형적인 오차를 보정하는 식이며, 이러한 오차의 x, y 성분은 서로 다를 수 있다. 마지막 항은 방사방향의 렌즈왜곡을 보정하는 식이므로서 k 는 x, y 성분의 공통 변수이다.

(10)에서 영상좌표(x, y)의 추정값(\hat{x} , \hat{y})를 지상좌표(X, Y, Z)로부터 계산하기 위하여 지상좌표와 영상좌표의 기하학적 관계식에 대한 역변환을 필요로 한다. (6)에서 역변환 관계식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{y} = f_c \tan \left[\tan^{-1} \left(\frac{Y'}{Z_c - Z'} \right) - \tau \right]$$

$$\hat{x} = \left[\frac{y_2 + f_c^2}{(Z_c - Z')^2 + Y'^2} \right]^{1/2} X' \quad (11)$$

여기에서(X', Y', Z')는 (7)의 역변환을 통하여 다음식으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z_c - Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cos \phi \cos \omega - Y \sin \phi \sin \omega + (Z_c - Z) \sin \omega \\ X \sin \phi + Y \cos \phi \\ -X \cos \phi \sin \omega + Y \sin \phi \sin \omega + (Z_c - Z) \cos \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

오차모형 (10)에 의한 영상좌표의 보정은 $x + \Delta x$, $y + \Delta y$ 로 표시되며 이를 (2)에 대입하면

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y + \Delta y}{f_c} \right), \quad \gamma = \tan^{-1} \left[\frac{x + \Delta x}{\sqrt{(y + \Delta y)^2 + f_c^2}} \right] \quad (13)$$

로 주어진다. 따라서 (9)와 (13)은 비측량용 사진기에 의한 비수평면과 오차모형을 고려하여 (1)과 (2)로부터 수정된 방정식이다.

해빈단면의 계산

사진기의 회전각 τ , ϕ 및 ω 와 내부표정요소인 f_c , x_0 및 y_0 그리고 오차모형의 계수 a , b 및 k 등은 미지의 변수이다. 이들 미지수를 결정하기 위하여 사진기의 기울기, 회전방향 그리고 렌즈의 초점거리를 직접 측정하는 것은 매우 어려운 작업일 뿐만 아니라 부정확한 결과를 초래할 만큼 큰 오차를 발생시킨다 (Lippmann and Holman, 1989). 대신에 기준점(control point)들을 설정하고 기준점좌표를 측정하는 기준점 측량으로 미지수가 결정될 수 있다. 본 연구에서 수정된 방정식은 적어도 4 점의 기준점들을 필요로 하며, 기준점들의 영상좌표와 지상좌표를 (9), (10), (11), (12) 및 (13)에 대입하여 반복계산(iteration)함으로써 미지수들을 구할 수 있다. 해의 정확도를 향상시키기 위하여 4 점 이상의 기준점들을 사용할 수 있으며 이때에는 최소자승법으로 해를 결정한다.

기준점의 영상좌표를 읽는 작업은 일반적으로 확대된 사진 또는 수치영상에서 수행된다. 확대된 영상의 초점거리는 원래 영상의 초점거리 보다 증가하게 되며, 증가된 초점거리 f'_c 는 다음 식으로 결정될 수 있다(Lippmann and Holman, 1989).

$$f'_c = \frac{x_e}{\tan \left(\frac{\delta}{2} \right)} \quad (14)$$

여기에서 x_e 는 확대된 영상에서 주점으로부터 우변(right margin)까지 측정거리이며 δ 는 렌즈의 수평적인 시계(horizontal field of view)이다. 따라서 1:1 사진의 좌표 대신에 확대된 영상

에서 읽은 좌표를 반복계산 프로그램에 입력하면 증가된 초점거리가 계산된다.

사진해석에 필요한 모든 미지수가 결정되면, 표시선의 영상좌표로부터 해빈단면의 3차원 좌표를 계산할 수 있다. 앞에서 기술한 방법과 마찬가지로 (3)을 (9)에 대입하여 정리하면,

$$X_L = Y_{0L} \left[\frac{F_2(\alpha_L, \gamma_L)}{F_1(\alpha_L, \gamma_L)} - \tan \mu \right]^{-1}$$

$$Y_L = Y_{0L} + X_L \tan \mu \quad (15)$$

$$Z_L = Z_c - \frac{X_L}{F_1(\alpha_L, \gamma_L)} [\sec(\tau + \alpha_L) \tan \gamma_L \sin \omega + \cos \omega]$$

여기에서

$$F_1(\alpha_L, \gamma_L) = [\sec(\tau + \alpha_L) \tan \gamma_L \cos \omega - \sin \omega] \cos \phi + \tan(\tau + \alpha_L) \sin \phi$$

$$F_2(\alpha_L, \gamma_L) = -[\sec(\tau + \alpha_L) \tan \gamma_L \cos \omega - \sin \omega] \sin \phi + \tan(\tau + \alpha_L) \cos \phi \quad (16)$$

이고 α_L , γ_L 은 표시선의 영상좌표로서 (13)을 사용하여 구한다.

현장 실험

본 연구에서 제안된 사진측정법을 검증하기 위하여 1998년 2월에 동해시 인근 서울대학교 부설 동해해양연구센터(East Sea Ocean Research Center) 전방의 해빈에서 현장실험을 수행하였다. 동해해양연구센터는 건물의 높이(해빈으로부터 약 20 m)가 경사사진을 획득하기에 적당하며, 특히 해빈에 인접하여 위치하고 있기 때문에 해빈단면 추정을 위한 근거리 사진측정에 적합한 장소이다.

본 연구지역에서 해빈의 주향은 북서 방향이며 그 폭은 대략 30~50 m 범위이고 육지쪽에 사구가 발달해 있다(Fig. 2). 현장 실험 기간동안 해빈사면에 기반암의 일부가 노출될 정도로 해빈은 침식된 상태였다. 또한 소규모 하천이 북서쪽에서 본 연구 지역으로 유입하였다. 이 하천은 동해해양연구센터 부근까지 해빈에 평행하게 흐르다가 연구소 전방에서 급격히 굴곡되어 쇄파대로 유출되었다. 이러한 하천의 영향으로 해빈은 동해해양연구센터 전방에서 북측과 남측으로 분리되었으며 북측 연안은 하천을 경계로 해빈과 사구가 분리되었다. 북측 해빈은 동해해양연구센터 육상에서 볼 때 보다 좋은 시계를 제공하였기 때문에 사진측정의 대상으로 선정되었다.

연구 대상으로 선정된 북측 해빈에서 4 점 이상의 기준점을 선정할 수 없었다. 기준점이 될 수 있는 다수의 지형지물과 구조물은 사구와 그 육지쪽에 분포하고 있으며 사진기의 시계에는 포함되지 않았다. 이를 극복하기 위하여 기준점을 위한 사각형 나무 막대(길이 1.5 m, 두께 4 cm)를 Fig. 2와 같이 약 20 m 간격으로 해빈에 설치하였다. 막대기 설치의 장점은 하나의 막대기에서 2 점의 기준점을 설정할 수 있다는 것이다. 즉, 막대기와 지면이 만나는 점과 막대기의 정점을 기준점으로 사용할 수 있다.

막대기 설치 후 Sokkia 사의 수준측량기(모델 B1C)로 기준점

측량과 사진기 투영점 측량을 수행하였다. 국지적 측량기준점(local datum)으로 동해해양연구센터 마당에 있는 맨홀을 사용하였다(Fig. 2). 사진기의 투영점은 Fig. 3a와 같이 연구소 건물 외부에 설치된 나선형 계단을 지지하는 기둥의 정점으로 설정하였다.

각 막대기가 설치된 지점에서 해변을 횡단하는 방향으로 표시선을 배치한 다음 Canon 사의 자동사진기(38~60 mm 줌렌즈)로 사진촬영을 하였다. 표시선은 Holman *et al.*(1991)이 사용했던 소방호스의 대용으로 폭 15 cm, 길이 30 m의 청색 비닐 띠를 사용하였다. 사진촬영시 최소 4 개의 막대기가 시계에 포함되도록 하였다. 이러한 작업을 모든 막대기에서 수행한 후 2 개의 해변횡단선을 선정하여 약 2 m 간격으로 수준측량을 실시하였다(Fig. 2).

해빈단면을 촬영한 사진(Fig. 3b)을 스캐너를 통하여 980×700 픽셀의 수치영상으로 변환한 후 컴퓨터 화면에서 기준점과 표시선의 영상좌표를 읽었다. 기준점의 영상좌표와 측량 자료를 이용하여 사진기의 표정을 결정한 다음 표시선의 영상좌표를 (15), (16)에 입력하여 표시선의 지상좌표를 구하였다.

결과 및 토의

Fig. 2에 표시된 두 해변횡단선(Transects A and B)에서 사진 측정으로 추정된 해빈단면과 수준측량으로 측정된 해빈단면을

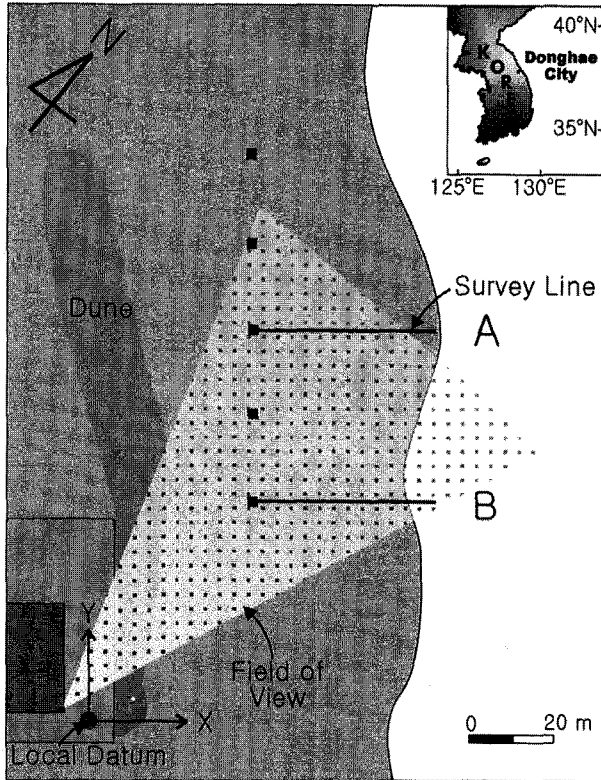


Fig. 2. Schematic diagram of the field site. The stippled area indicates the ground coverage in the field of view of camera. Filled rectangles represent the location of poles planted at 20-m intervals in the alongshore direction. Two cross-shore transects (A and B) were surveyed.

비교한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 횡단선 A와 횡단선 B에서 해빈단면의 추정값과 측량값 사이의 수직거리에 대한 RMS (root mean square) 오차는 각각 16.1 cm와 5.5 cm였다. 특히 횡단선 A에 대한 해빈단면에서 수평거리 $X < 50$ m인 경우에 RMS 오차는 4.2 cm였다.

횡단선 A에서 추정된 해빈단면은 수평거리 50 m에서부터 수직거리 오차가 일정하게 증가하는 경향이 있다(Fig. 4a). 이는 50 m 지점에서부터 표시선이 직선에서 벗어났기 때문에 발생한 것으로 해석된다. 실제로 본 연구에서 사용된 비닐 띠는 강한 바람이 빈번한 해변에서 정확하게 직선을 유지하며 배치하기가 어려울 정도로 가벼운 물체였으며, 이 후의 현장실험에서는 무거운 플라스틱 호스를 사용하였다.

표시선이 직선에서 벗어난 것에 의한 오차를 제외하면, 전체적으로 두 해빈단면의 추정 오차는 5 cm 정도로서 Holman *et al.*(1991)에서 비디오 관측 방법의 이론적인 오차인 10 cm 보다 작은 값으로 나타났다. 이는 비측량용 사진기와 연관된 오차의 보정과 사진이 비디오 수치영상의 픽셀(512×480)보다 해상력이 높은 영상으로 처리된 결과로 해석된다. 일반적으로 비디오의 영상은 사진에 비하여 고해상도를 얻는데 한계가 있으며, 고해상도의 자료를 처리하는데 많은 비용이 요구된다.

횡단선 A에서 추정된 해빈단면 중 $X < 50$ m에 해당하는 부

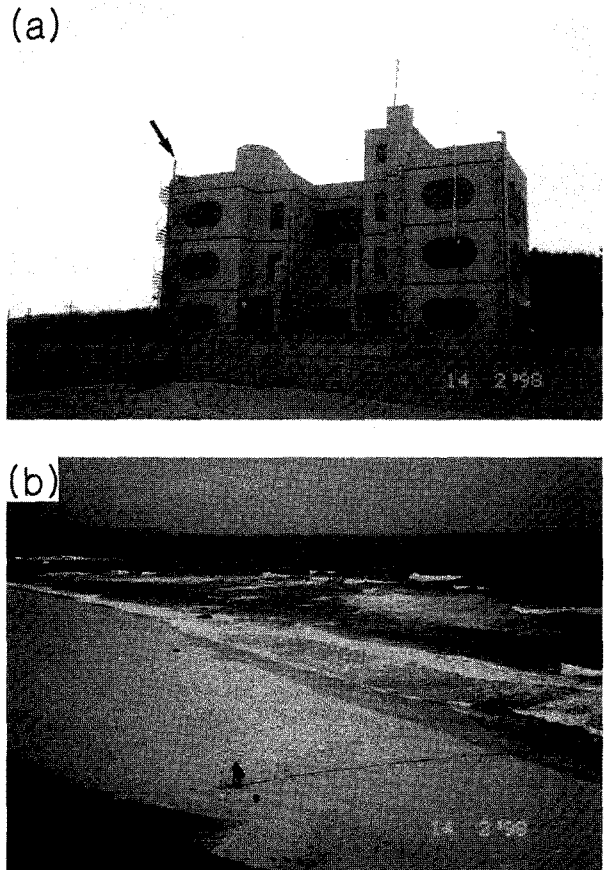


Fig. 3. (a) Photograph of the East Sea Ocean Research Center near the Donghae City. Arrow indicates the position of camera shot. (b) Photograph of the beach showing one line and planted poles.

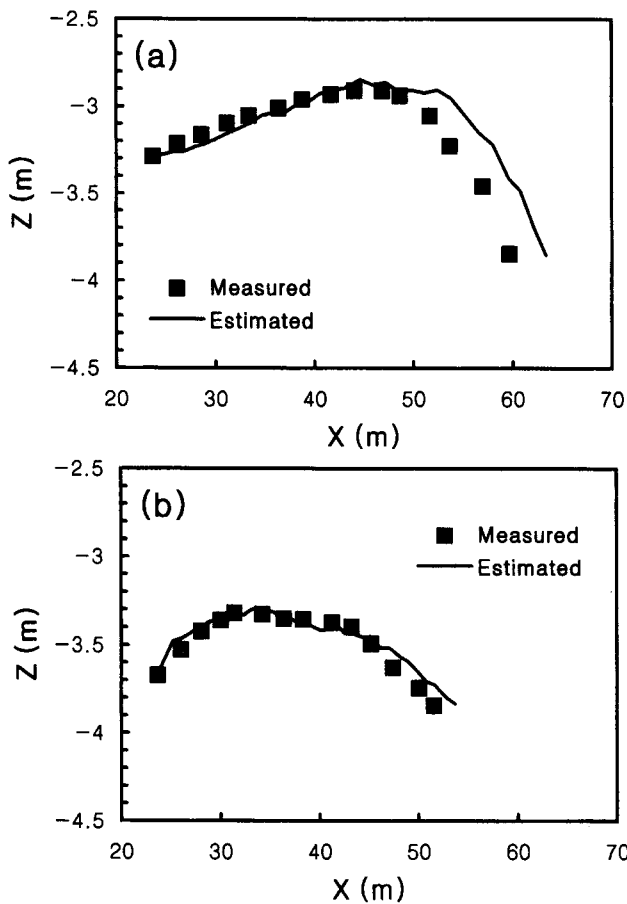


Fig. 4. (a) Comparison between the surveyed profile of Transect A and the estimated profile based on the digitized photograph image. (b) Comparison between the surveyed and estimated profiles of Transect B.

본은 횡단선 B의 해빈단면 보다 원거리의 측정 결과임에도 불구하고 작은 오차를 보였다. 이러한 정확도의 향상은 사진기의 표정에 사용된 기준점의 수와 관련된 것으로 해석되는 바, 횡단선 A에 대해서는 10 점의 기준점이 사용되었고(즉, 5 개의 막대기), 횡단선 B에 대해서는 4 개의 막대기 중에 과대오차를 발생한 1 점의 기준점이 제외된 7 점의 기준점이 사용되었다. 이는 각각의 사진에 포함된 기준점의 수가 다르게 나타난 결과이며 기준점을 위한 막대기의 설치 방법에 좌우된다.

사진기를 이용한 해빈단면의 추정방법은 비디오를 이용하는 방법과는 달리 연속적인 자료를 얻을 수 없다. 그러나 Holman et al.(1991)의 방법에서 비디오로 연속적인 관측은 가능하다 하더라도 표시선의 배치는 연속적인 것이 아니기 때문에 연속적인 시계열 자료를 얻을 수 없다. 또한 Plant and Holman(1997)의 방법은 조간대에 해당하는 해빈단면에만 적용되는 것으로서 전체적인 해빈 지형을 관측하는데 제한적이다. 한편 사진기를 사용함으로써 초점거리의 변화가 자유롭고 원하는 방향으로 사진을 촬영할 수 있다. 따라서 해변에 표시선을 어느 일정한 장소에 제한받지 않고 배치할 수 있으며, 본 연구와 같이 표시선을 종적으로 배치하면서 사진 촬영을 수행할 경우 3차원의 해빈지형을 얻을 수 있는 이점이 있다.

결론

본 연구는 비측량용 사진기로 획득한 해빈단면 사진의 해석 방법을 제시하는 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 경사사진 해석을 위하여 경사비디오영상을 해석하는 방정식을 수정하였으며, 그 결과 해빈단면의 측량값과 추정값 사이의 수직거리에 대한 RMS 오차는 10 cm 이내로서 수정된 방정식은 만족할 만한 성과를 보였다.

둘째, 일반적으로 사진기를 이용한 사진측정법은 비디오 관측시스템에 비하여 간편하고 비용이 적게 들며 비교적 정확도가 높다.

셋째, 해변에 평행한 방향으로 해빈단면을 추정하는 일련의 사진측정을 수행함으로써 3차원의 해빈지형 연구의 가능성을 제시한다.

사사

본 논문의 원고를 세밀하게 심사해 주신 해양대학교 강효진 교수와 익명의 심사자께 감사사를 드립니다. 본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 수행되었습니다. 제 1 저자는 한국과학재단의 1998년 전반기 국내 박사후 연수과정의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 유복모, 1998. 사진측정학. 문운당, 서울, 425 pp.
- Aubrey, D.G., D.L. Inman and C.D. Winant, 1980. The statistical prediction of beach changes in southern California. *J. Geophys. Res.*, **85**: 3264-3276.
- Holman, R.A., T.C. Lippmann, P.V. O'Neill and K. Hathaway, 1991. Video estimation of subaerial beach profiles. *Mar. Geol.*, **97**: 225-231.
- Karara, H.M. and Y.I. Abdel-Aziz, 1974. Accuracy aspects of non-metric imageries. *Photogram. Eng.*, **40**: 1107-1117.
- Karara, H.M., 1985. Close-range photogrammetry: where are we and where are we heading? *Photogram. Eng. Remote Sens.*, **51**: 537-544.
- Lippmann, T.C. and R.A. Holman, 1989. Quantification of sand bar morphology: a video technique based on wave dissipation. *J. Geophys. Res.*, **94**: 995-1011.
- Plant, N.G. and G.B. Griggs, 1992. Interactions between nearshore processes and beach morphology near a seawall. *J. Coast. Res.*, **8**: 183-200.
- Plant, N.G. and R.A. Holman, 1997. Intertidal beach profile estimation using video images. *Mar. Geol.*, **140**: 1-24.
- Seymour, R.J., 1989. Nearshore Sediment Transport. Plenum Press, New York, 418 pp.
- Wright, L.D. and A.D. Short, 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.*, **56**: 93-118.

1998년 5월 29일 원고 접수

1998년 6월 30일 수정본 채택