

디지털 사진측량에 의한 해안사구의 고도값 측정

김민호* · 유근배** · 조봉환***

The Measurement of Coastal Sand Dune's Height using Digital Photogrammetry

Min-Ho Kim* · Keun-Bae Yu** · Bong-Whan Cho***

요 약

인간의 삶에 많은 영향을 끼치고 있는 해변, 해안사구 등과 같은 해안지형은 역동적으로 변화하고 있고, 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 해안지형의 변화량을 측정하기 위해 기존에는 측량기기에 의한 수준측량방법을 주로 이용해왔다. 이 연구에서는 기존에 고려되지 않았던 근거리 사진측량기법으로 해안사구 단면에 대한 고도값을 계산하였다. 즉 번들조정과 공선조건식의 역변환을 통해 비측량용 디지털 사진기로 촬영된 지상사진의 입체쌍으로부터 미지점의 고도값을 계산하였다. 6개의 기준점을 이용하여 번들조정을 수행하였고, 미지점 고도값의 계산값과 실측값을 비교한 결과 10cm 이내의 오차가 나타났다. 일반적으로 해안사구 지형은 모래질의 연약지반으로 실측시 수준척이 견고하게 고정되지 않고, 좁은 지역을 측량할 경우 인접지점에 교란현상을 발생시켜 측정오차가 크게 나타날 수 있다. 해안사구의 고도값을 측정하는 연구에서 디지털 사진측량방법은 기존의 수준측량이 갖는 문제점을 극복하면서 이를 대체할 수 있을 것이다.

주요어 : 해안사구, 비측량용 디지털 사진기, 번들조정, 입체쌍, 디지털 사진측량

ABSTRACT : Coastal landforms such as sand beach and coastal sand dune are changing dynamically, and the research about them is being conducted. Conventionally the leveling method

* 서울대학교 대학원 지리학과 석사졸업 / 국토문제연구소 연구원(Researcher, The Institutes for Korean Regional Studies, Seoul National University)

** 한국GIS학회 회장, 서울대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Seoul National University)

*** 서울대학교 국토문제연구소 책임연구원(Research Assistant, The Institutes for Korean Regional Studies, Seoul National University)

has been applied to measuring heights of dynamic morphological surface in coastal landforms.

We applied the photogrammetric method which was not considered to measure the heights on coastal sand dune's profile to calculating the heights of coastal sand dune; that is, the heights of unknown points on coastal sand dune's profile was reckoned from the digital photographs' stereo pairs through bundle adjustment and backward transform of collinearity condition equation. we used six GCPs to perform bundle adjustment. After backward transform the error of heights between surveyed value and computed value was estimated around 10cm. In general, the pole is not adamantly fixed on the surface of coastal sand dune because of its softness, and then the disturbance of coastal sand dune adjoining surveyed area can be made in small area. Digital photogrammetry can solve the problem which conventional leveling method has, and be replaced it.

Keywords : Coastal Sand Dune, Non Metric Digital Camera, Bundle Adjustment, Stereo Pairs, Digital Photogrammetry

1. 서 론

1.1 연구배경

폭풍이나 해일 등의 자연재해로부터 육지부를 보호하는 해안사구는 해안지역에 거주하는 인간의 삶에 많은 영향을 주고 있다. 최근 환경오염과 기후변화에 의한 해수면 상승과 이에 따른 해안침식의 우려가 나타나고 있어, 해빈이나 해안사구 등 해안지역의 변화량에 대한 연구가 진행되고 있다.

기존에는 해빈 변화량을 측정하기 위해 측량기기에 의한 수준측량이 일반적으로 이용되었다(Plant and Griggs, 1992). 최근 국외에서는 사진측량을 이용하여 해빈의 단면상 특정 지점에 대한 고도값을 측정하는 연구가 진행되고 있다. Holman 등(1991)과 Plant와 Holman(1997)은 단일 비

디오 영상(single video image)으로부터 경사비디오해석기법을 통해 단면의 고도값을 측정하였다. Eleveld(1999)는 사진측량을 통해 항공기에서 촬영한 비디오 영상의 입체쌍으로부터 해안지형의 3차원 위치를 계산하였다. 그리고 김백운 등(1998)은 해빈 단면을 측정하기 위해 비측량용 아날로그 사진기로 촬영된 단일 사진(single photo)으로부터 단면의 고도값을 측정하기 위해 방사방향의 렌즈 왜곡을 보정하는 비측량용 사진기의 오차모형을 사진측량 기법에 적용하였다.

해빈과 더불어 해안지역을 구성하는 해안사구에 관한 연구가 일찍이 있었고(박동원 · 유근배, 1979), 최근에는 고도값 측정에 의해 해안사구의 변화량을 조사하고 있다(서종철, 2001; 류호상, 2001). 이러한 연구에서는 해안사구 변화량을 조사하기 위해 Total Station을 이용하여 특정 측선에 대한 수준측량을 실시하였다. Total Station

을 통해 해안사구지역의 고도값을 측정할 경우, 최소 2인 이상의 연구자와 여러 기사가 필요하다. 사진측량기법은 특정 지점에 대한 3차원 위치 측정을 가능하게 하므로, 이를 이용하여 해안사구의 변화량을 측정하면 수준측량에 비해 좀더 효율적으로 연구를 수행할 수 있을 것이다¹⁾. 특히, 디지털 지상사진을 이용하는 근거리 사진측량(close range photogrammetry)에 의해 해안사구의 고도값을 측정할 경우, 고해상도의 영상자료를 이용할 수 있고, 비교적 낮은 비용으로 연구를 수행할 수 있다. 또한 연구자가 직접 촬영 계획을 수립하여 특정 시점에 대한 자료를 얻을 수 있다. 이와 같은 장점을 지닌 디지털 사진측량은 기존의 수준측량 방법보다 효율적인 고도값 측정이 가능하여 해안사구의 변화량 분석에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

1.2 연구목적

사진측량에 이용되던 기존의 사진기는 필름에 대상물을 촬영하는 아날로그 방식이었다. 필름 기반의 아날로그 사진기를 사진측량에 이용할 경우, 필름의 변형으로 인한 왜곡이 발생할 수 있다. 또한 필름 또는 인화된 사진을 스캐닝하여 디지털 자료화하는 과정에서 사진의 X, Y 수평축에 대한 비직교성으로 인해 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 왜곡은 영상점의 위치를 변화시켜 부정확한 결과를 초래할

수도 있다. 따라서 최근에는 디지털 지상사진을 자료로 하여 근거리 사진측량을 수행하고 있고(Bösemann, 1998; Macklin 등, 1998, 이효성, 2000), 비측량용 디지털 사진기의 효용성을 검증하고자 하는 연구도 진행되고 있다(Ahmad and Chandler, 1999). 이와 같은 연구에서는 주로 측량용 사진기나 이에 준하는 디지털 사진기를 사용하고 있다. 그러나 위의 연구에서 사용되는 사진기는 고가의 장비로서 사진측량을 주로 하지 않는 일반 연구자들이 주변에서 쉽게 획득할 수 없다.

이 연구에서는 근거리 사진측량기법을 통해 저가의 비측량용 디지털 사진기로 촬영된 지상사진의 입체쌍으로부터 해안사구의 고도값을 측정하고자 한다. 이러한 방법에 의해 계산된 고도값과 Total Station에 의해 실측된 고도값을 비교하여 디지털 사진측량을 이용하여 해안사구의 고도값을 측정하는 연구의 효용성을 검토하고자 한다.

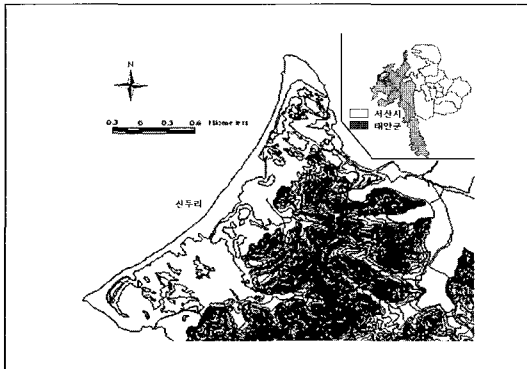
2. 연구지역

해안사구의 디지털 지상사진은 충청남도 태안군에 위치한 신두리 지역에서 촬영되었다. 신두리 지역은 겨울철 북서계절풍의 영향과 완만한 경사로 인해 해빈과 해안사구가 잘 발달되어 있는 지역이다. 이 지역은 서·남해안의 섬 지역에

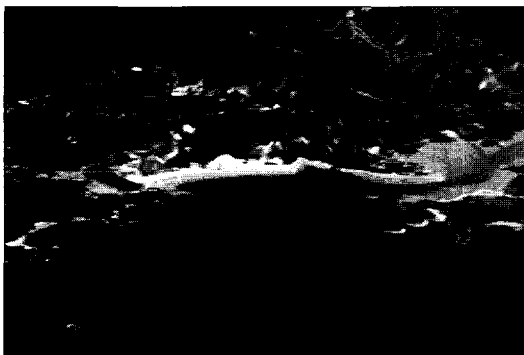
1) 이 연구에서 말하는 해안사구의 변화량은 특정 측선에 대한 고도값의 변화량을 의미한다. 일반적으로 번들조정과 영상정합(image matching)의 과정 이후, 중복된 영역 전체의 DEM을 생성할 수 있다. 그러나 해안사구는 모래로 구성된 지형으로서 각 화소의 반사값이 유사하게 나타나므로, 영상정합과정에서 좌측과 우측 화소의 매칭에 오류가 발생하여 전체 DEM의 오차가 크게 나타날 수 있다(Eleveld, 1999). 이에 본 연구에서는 기존의 수준측량을 대체할 수 있는 방법으로서 디지털 사진측량을 통해 해안사구 단면의 특정 지점에 대한 고도값을 계산하였다.

비해 보존 상태가 떨어지나, 육지부에 형성된 사구 중에서는 보존 상태가 비교적 좋은 상태이다(서종철, 2001). 따라서 이 연구에서는 비교적 교통의 접근성이 용이하고 보존 상태가 양호한 신두리 지역을 대상으로 연구를 수행하였다.

연구지역인 신두리의 지리적 위치는 [그림 1]과 같고, 이 지역의 3차원 영상은 [그림 2]와 같다.



[그림 1] 신두리 해안사구 지역



[그림 2] 연구지역의 3차원 영상

[그림 1]의 우상단에 있는 작은 지도에서 타원으로 표시된 부분이 연구지역인 신두리 해안사구 지역이다.

3. 연구방법과 실험장비

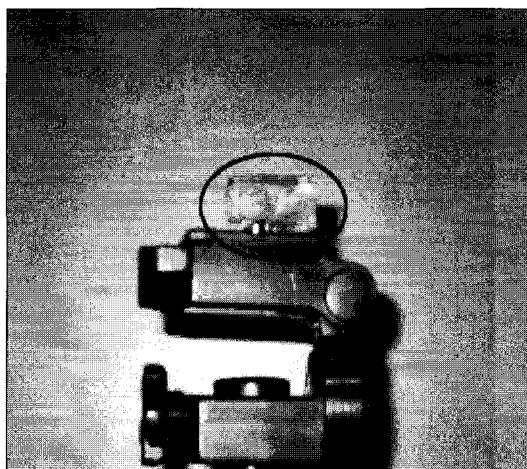
이 연구에서는 근거리 사진측량기법에 의해 해안사구의 고도값을 측정하기 위해 번들조정(bundle adjustment)과 공선조건식의 역변환(backward transform of collinearity condition equation)을 이용하였다²⁾. 즉 번들조정으로 대상지역을 촬영한 좌측과 우측의 영상에 대한 외부표정요소 최확값(most probable value)을 계산하였다. 번들조정에 의해 외부표정요소가 결정된 이후, 공선조건식으로 미지점의 3차원 위치를 계산할 수 있다(Ghosh, 1984).

이에 따라, 번들조정에 의해 계산된 각 사진의 외부표정요소와 미지점의 좌측과 우측 사진좌표를 역변환된 공선조건식에 대입하여 미지점의 3차원 좌표를 계산하였다³⁾.

번들조정에 의해 외부표정요소 최확값을 계산하기 위해서는 기준점(GCPs)과 각 사진 외부표정요소에 대한 초기값을 필요로 한다. 이 연구에서는 Total Station(SOKKIA SET5FS)으로 번들조정에 필요한 기준점과 미지점(unknown points)의 3차원 좌표를 측정하였다. 신두리 해안사구 지역의 입체쌍을 촬영하기 위해 Canon Digital

2) 일반적으로 번들조정을 통해 사진의 외부표정요소와 미지점의 3차원 좌표를 동시에 계산할 수 있다. 본 연구에서 이용된 프로그램은 DEM 생성을 목표로 구현되었으나, 자동매칭 모듈의 구현문제에 의해 번들조정과 공간교차를 통해 미지점의 3차원 좌표를 계산하였다.
3) 사진측량에 의한 미지점의 3차원 위치정보 계산은 실험을 위해 C/C++, 비주얼 C++로 구현된 좌표확인 모듈과 번들조정 모듈을 통해 이루어졌다.

IXUS 300 사진기가 이용되었다. 그리고 사진촬영시 필요한 자료의 획득을 쉽게 하기 위해 사진기를 삼각대에 위치시켰고, 기포관을 사진기에 부착하여 사진기의 수평과 수직을 대략 0°로 조정하였다. 연구에 이용된 기포관은 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 실험에 이용된 기포관

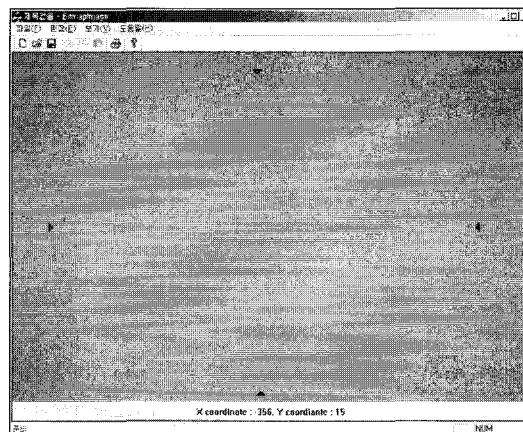
[그림 3]에서 검정색 원의 내부에 위치한 것이 실험에 이용된 기포관이다.

4. 화소의 크기측정

대상물에 대한 사진좌표는 화소단위(pixel unit)로 측정된다. 번들조정에 입력되는 사진좌표는 단위를 일치시키기 위해 미터단위로 변환되어야 한다.

연구에 사용된 비측량용 디지털 사진기의 화소 크기(pixel dimension)를 측정하기 위해 이와 관련한 실험을 수행하였다. 즉 [그림 4]와 같이 실내의 벽면에 가로

방향과 세로 방향으로 각각 2개의 표정점(target points)을 설치하여 촬영한 이후, 하나의 화소에 대한 물리적인 크기를 측정하였다. 실험결과, 한 화소의 크기는 대략 $2.1 \times 10^{-5}m$ 로 나타났다.



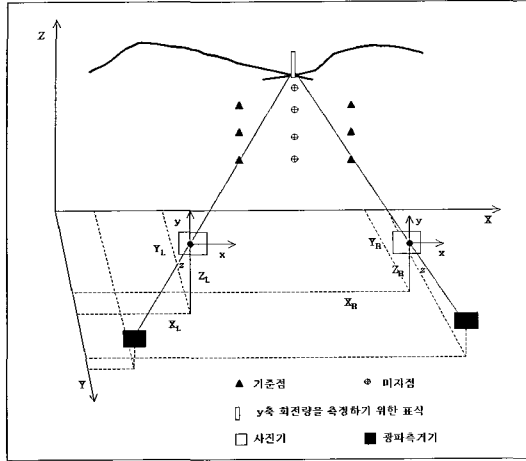
[그림 4] 화소크기 측정실험

5. 해안사구 고도측정 실험

5.1 디지털 지상사진 촬영

근거리 사진측량으로 해안사구의 고도값을 측정하는 이 연구는 디지털 지상사진의 입체쌍을 기초자료로 하였다. 디지털 방식은 컴퓨터로 전송하기 쉽고, 필름을 이용하는 아날로그 방식에 비해 왜곡이 적게 나타난다.

[그림 5]에서 보는 바와 같이, 해안사구의 입체쌍을 촬영하기 위해 삼각대와 기포관으로 사진기의 수평과 수직 방향의 평형을 유지하여 외부표정요소의 회전량 중, ω , κ 를 0°가 되도록 조정하였다.



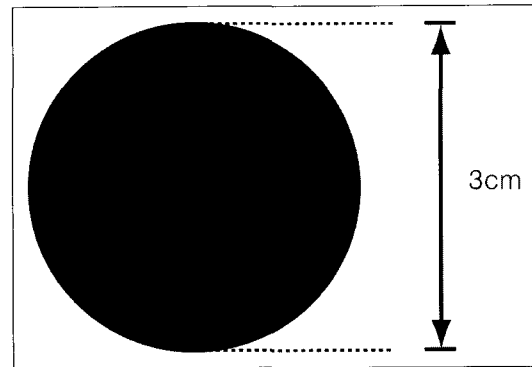
[그림 5] 사진촬영을 위한 환경설정

촬영 지역에 측량핀(survey pin)을 설치하고 Total Station으로 방위각을 측정하였다. 그리고 측량핀과 Total Station을 잇는 가상의 연장선상에 사진기를 설치하여 ρ 의 회전량을 측정하였다. 수직사진이나 광축을 평행하게 하여 사진을 촬영하는 경우, 대략적으로 사진기 회전량을 0° 로 조정할 수 있다. 한편 사진기의 광축이 수렴하도록 촬영한 사진의 경우, ω 와 κ 의 회전량이 거의 없도록 즉, 사진기의 수직과 수평이 0° 가 되도록 삼각대와 기포관을 이용하여 조정하였다. 그리고 y 축의 회전량은 광축의 방위각이므로 Total Station을 이용하여 측정하였다. 번들조정과정에는 각 관측값의 초기값을 입력해야하는데, 이러한 초기값의 오차가 클수록 조정을 위한 반복횟수가 많아진다. 따라서 본 연구에서는 삼각대와 기포관을 이용하여 x 축과 y 축의 회전량을 0°

로 조정하였고, Total Station을 이용하여 y 축 회전량인 방위각을 측정하였다⁴⁾.

사진촬영지점과 대상물간 거리는 대략 10m이고, 사진기의 초점거리는 촬영 당시 35mm로 고정하였다. 좌측과 우측의 지상사진이 중첩될 수 있도록 수렴촬영하였다. 디지털 지상사진은 1600×1200 의 크기로 기록한 이후 영상파일의 형태로 저장하였다.

대상지역의 사진을 촬영할 때, 기준점과 미지점 각각의 사진좌표를 확인하기 위해 표정점을 설치하였다. 실험에 사용된 표정점은 [그림 6]에서 보는 바와 같이 지름이 3cm인 원형으로 제작하였다.



[그림 6] 실험에 사용된 표정점

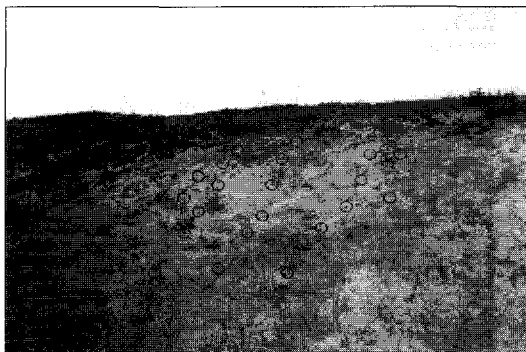
이 연구에서는 대상지역에 22개의 표정점을 분포시켜 지상사진의 입체쌍을 촬영하였다. 신두리 해안사구 지역의 사진은 [그림 7]과 [그림 8]과 같다. [그림 7]과 [그림 8]에서 원으로 표시된 내부에 표정점이 위치한다. 각 사진에 촬영된 기준점과 미지점을 구분하기 위해 각 표정점에 번호를

4) 일반적으로 번들조정의 반복횟수는 10회 이내가 되어야 한다. 본 연구에서 이용한 번들조정 프로그램은 3회의 반복으로 외부표정요소의 최확값을 계산하였다.

부여하였다. 표정점의 번호는 좌측에서 두 번째 열이 1~6번이고, 세 번째 열이 7~12번, 네 번째 열이 12~18번이다. 첫 번째 열에는 19, 20의 번호를 부여하였고, 다섯 번째 열에는 21, 22의 번호를 부여하였다.



[그림 7] 신두리 지역의 좌측사진



[그림 8] 신두리 지역의 우측사진

5.2 사진좌표

본 연구에서 이용된 사진기는 비측량용이므로, 사진기 검정자료를 제공하지 않

는다. 따라서 사진기의 주점 이동량, 검정된 초점거리(calibrated focal length), 렌즈 왜곡량 등의 정보가 없다. 사진좌표는 디지털 사진의 중앙 화소를 원점으로 하여 가로축이 x , 세로축이 y 가 된다. 그리고 원점을 기준으로 x 축 오른쪽이 (+)부호, y 축 위쪽이 (+)부호가 되도록 하였다⁵⁾.

대상지역에 설치된 22개의 표정점 중에서 1, 4, 6, 13, 16, 18번 표정점을 기준으로 선정하였고, 8, 9, 10, 11, 12번 표정점을 미지점으로 선정하였다. 좌측사진과 우측사진에 나타난 기준점과 미지점의 사진좌표는 <표 1>, <표 2>와 같다.

<표 1> 기준점의 화소단위 사진좌표

번호	좌측 사진		우측 사진	
	x	y	x	y
1	140	-199	-343	-315
4	-245	69	-151	-11
6	-325	180	-96	104
13	569	-172	48	-324
16	251	88	276	7
18	153	220	341	160

<표 2> 미지점의 화소단위 사진좌표

번호	좌측 사진		우측 사진	
	x	y	x	y
8	203	-78	-64	-187
9	89	-21	-18	-116
10	-32	66	10	-16
11	-93	146	45	71
12	-102	207	97	137

5) 미지점의 사진좌표는 렌즈의 왜곡에 대한 보정량을 포함하지 않았다. 렌즈의 왜곡량 보정은 실내에서 collimator 등을 통해 이루어지거나, 부가변들조정 등과 같은 보정식을 통해서 이루어질 수 있다. 그러나 일반적인 디지털 사진기를 이용할 경우, 보정식에 사용된 주점 이동량과 방사왜곡량 보정계수, 접선왜곡량 보정계수사이에 상관관계가 발생할 수 있고(Clarke, Wang and Fryer, 1998), 많은 수의 기준점을 필요로 한다.

<표 1>과 <표 2>의 사진좌표는 화소단위로 측정되었다. 그러나 번들조정을 위해 단위를 일치시켜 주어야 하므로, 기준점과 미지점의 화소단위 사진좌표를 미터단위로 변환하였다. <표 3>과 <표 4>에서 보는 바와 같이, 각 기준점과 미지점의

미터단위 사진좌표를 구하기 위해 화소단위 사진좌표 각각에 한 화소의 물리적인 크기인 $2.1 \times 10^{-5}m$ 를 곱하였다.

5.3 외부표정요소와 지상좌표

사진의 외부표정요소는 촬영 지점의 지상좌표인 X_L, Y_L, Z_L 과 회전량 요소인 ω, ρ, κ 로 구성된다. 촬영 지점의 지상좌표는 Total Station으로 측정하였고, [표 5]⁶⁾에서 보는 바와 같이 회전량 중 ω, κ 의 초기값으로는 0° 의 값을 입력하였다. ρ 의 초기값은 Total Station으로 측정된 방위각을 입력하였다. 번들조정에 입력된 외부표정요소의 초기값은 <표 5>와 같다.

<표 3> 기준점의 미터단위 사진좌표

번호	좌측 사진	
	x	y
1	0.00294	-0.00417
4	-0.00514	0.00144
6	-0.00682	0.00378
13	0.01194	-0.00361
16	0.00527	0.00184
18	0.00321	0.00462
번호	우측 사진	
	x	y
1	-0.00720	-0.00661
4	-0.00317	-0.00023
6	-0.00201	0.00218
13	0.00100	-0.00680
16	0.00579	0.00014
18	0.00716	0.00336

<표 5> 외부표정요소

번호	좌측 사진	우측 사진
ω	0°	0°
φ	19°	353.1°
κ	0°	0°
X_L	128367.900	128371.343
Y_L	372030.736	372030.559
Z_L	5.259	5.602

<표 4> 미지점의 미터단위 사진좌표

번호	좌측 사진	
	x	y
8	0.00426	-0.00163
9	0.00186	-0.00044
10	-0.00067	0.00138
11	-0.00195	0.00306
12	-0.00214	0.00434
번호	우측 사진	
	x	y
8	-0.00134	-0.00392
9	-0.00037	-0.00243
10	0.00021	-0.00033
11	0.00094	0.00149
12	0.00203	0.00287

기준점의 지상좌표는 번들조정에 초기값으로서 입력되고, 미지점의 지상좌표는 대상지점의 고도값을 계산한 이후 실측값과 비교하기 위해 필요하다. Total Station으로 측정한 기준점과 미지점의 지상좌표는 각각 <표 6>, <표 7>과 같다.

6) [표 5]이후의 표에서, 회전량의 단위는 라디안이고 3차원 좌표의 단위는 미터이다.

<표 6> 기준점 지상좌표

번호	X	Y	Z
1	128369.685	372035.207	4.718
4	128369.449	372039.222	5.501
6	128369.327	372041.552	6.220
79	128371.118	372034.726	4.799
16	128371.617	372038.096	5.602
18	128372.057	372040.343	6.463

<표 7> 미지점 지상좌표

번호	X	Y	Z
8	128370.528	372036.059	4.994
9	128370.562	372037.210	5.154
10	128370.368	372038.650	5.495
11	128370.469	372039.936	5.947
12	128370.663	372040.913	6.395

5.4 해안사구의 고도값 측정

실험을 통해 얻어진 외부표정요소 초기값, 기준점관련 자료는 번들조정에 입력되었다. 최소제곱법을 이용하는 번들조정으로 외부표정요소의 최확값을 결정하였고, 이를 공선조건식을 역변환한 식에 입력하여 미지점의 3차원 좌표를 계산하였다.

번들조정 과정에는 외부표정요소의 초기값과 기준점 측정값 이외에 각 측정값의

가중치가 필요하다. 따라서 사진의 외부표정요소, 기준점의 사진좌표와 지상좌표에 대한 가중치를 입력해야 한다. 이 연구에서는 기준점 사진좌표의 가중치를 2화소(pixel), ω , φ , κ 의 가중치를 1°로 부여하였다. 렌즈 중심과 기준점 지상좌표 측정값에 대한 가중치에는 0.05m를 입력하였고, 수렴을 위한 임계치로서 $0.01\sigma^{27}$ 를 입력하였다.

위와 같은 자료로 구성된 번들조정 입력파일 포맷은 [그림 9]와 같다.

[그림 9]에서 보는 바와 같이, 본 연구에서 이용된 번들조정 프로그램은 사진기 초점거리, 주점 이동량, 한 화소의 크기, 외부표정요소, 기준점 사진좌표와 지상좌표, 가중치를 위한 각 측정값의 분산을 필요로 한다. 그리고 미지점의 3차원 좌표를 계산하기 위한 미지점의 사진좌표와 실제 측정에 의한 미지점의 3차원 좌표를 입력자료로 구성하였다.

번들조정이후 결정된 외부표정요소의 계산값과 오차는 <표 8>과 같다.

번들조정에 의해 결정된 외부표정요소 최확값 중에서 ω , κ 의 오차를 살펴보면, 좌측사진의 x축 회전량 오차는 0.0024, z축 회전량 오차는 0.0029 라디안으로 나타났다. 우측사진에서는 x축 회전량 오차가 0.0012, z축 회전량 오차가 0.00001 라디안으로 나타났다. x축과 z축의 회전량은 기포관과 삼각대 기포를 이용하여 0°가 되도록 대략 조정하였으나, 사진 촬영시 셔터를 누를 때의 압력으로 인해 해당 오차만큼의 회전량이 발생한 것으로 보인다.

7) 수렴을 위한 임계치는 요구되는 정확도에 따라 $0.01\sigma^2$ 또는 $0.01\sigma^2$ 중 하나를 선택하여 적용할 수 있다(Wong, 1980). 이 연구에서는 보다 정밀한 결과값을 계산하기 위해 $0.01\sigma^2$ 의 임계치를 이용하였다. 그리고 참조분산에는 일반적으로 입력되는 1의 값을 부여하였다(Wolf and Dewitt, 2000).

f 35.0 0.0 0.0 2.1e-5 2.1e-5 #	초점거리 / 주점 이동량 / 화소크기
00 113 -179 10 -446 -168 . 05 120 -49 15 -178 -37 #	기준점 사진좌표
0 0 42 0 195516.921 440381.007 67.895 1 0 -14.8 0 195525.470 440379.636 67.995 #	사진 외부표정요소
0 195521.737 440385.956 67.262 . 5 195522.663 440386.842 67.767 #	기준점 지상좌표
00 1 1 10 1 1 . 05 1 1 15 1 1 #	기준점 사진좌표의 분산
0 1 1 1 0.1 0.1 0.1 1 1 1 1 0.1 0.1 0.1 #	사진 외부표정요소의 분산
0 0.1 0.1 0.1 . 5 0.1 0.1 0.1 #	기준점 지상좌표의 분산
00 159 -168 10 -390 -163 . 03 5 15 13 -161 -33 #	검사점 사진좌표
0 195522.063 440385.965 67.276 . 3 195522.620 440387.473 68.076 #	검사점 지상좌표
00 159 -168 10 -390 -163 . 03 5 15 13 -161 -33 #	미지점 사진좌표
0 195522.063 440385.965 67.276 . 3 195522.620 440387.473 68.076	미지점 지상좌표

[그림 9] 번들조정 입력파일 포맷

<표 8> 외부표정요소 계산값과 오차

	좌측 사진		
	실측값	계산값	오 차
ω	0	-0.0024	-0.0024
φ	0.3316	0.3290	-0.0022
κ	0	0.002967	0.0029
X_L	128367.900	128367.906	0.0060
Y_L	372030.736	372030.734	-0.0019
Z_L	5.259	5.259	0.0004
	우측 사진		
	실측값	계산값	오 차
ω	0	-0.0012	-0.0012
φ	-0.120427	-0.1207	-0.0002
κ	0	-0.00001	-0.00001
X_L	128371.343	128371.346	0.003
Y_L	372030.559	372030.561	0.002
Z_L	5.602	5.602	0.0006

<표 9> 기준점 계산값과 오차

번호	X		
	실측값	계산값	오차
1	128369.685	128369.670	-0.014
4	128369.449	128369.447	-0.001
6	128369.327	128369.325	-0.001
13	128371.118	128371.133	0.015
16	128371.617	128371.613	-0.003
18	128369.685	128372.054	-0.002
번호	Y		
	실측값	계산값	오차
1	372035.207	372035.208	0.001
4	372039.222	372039.221	-0.000
6	372041.552	372041.552	0.0002
13	372034.726	372034.722	-0.003
16	372038.096	372038.097	0.001
18	372035.207	372040.344	0.001
번호	Z		
	실측값	계산값	오차
1	4.718	4.721	0.003
4	5.501	5.498	-0.002
6	6.220	6.216	-0.003
13	4.799	4.801	0.002
16	5.602	5.599	-0.002
18	4.718	6.459	-0.003

번들조정이 완료된 이후에는 외부표정 요소의 최확값 뿐만 아니라, 조정에 이용된 기준점의 최확값이 결정된다. 번들조정 이후 결정된 기준점과 오차는 <표 9>와 같다.

공선조건식의 역변환을 통해 계산된 미지점의 3차원 좌표와 실측값과 비교한 오차는 <표 10>과 같다.

<표 10> 미지점 계산값과 오차

번호	X		
	실측값	계산값	오차
8	128370.528	128370.463	-0.064
9	128370.562	128370.472	-0.089
10	128370.368	128370.415	0.047
11	128370.469	128370.467	-0.001
12	128370.663	128370.668	0.025
번호	Y		
	실측값	계산값	오차
8	372036.059	372036.037	-0.021
9	372037.210	372037.128	-0.089
10	372038.650	372038.586	-0.063
11	372039.936	372039.935	-0.000
12	372040.913	372040.893	-0.019
번호	Z		
	실측값	계산값	오차
8	4.994	4.973	-0.020
9	5.154	5.145	-0.008
10	5.495	5.540	0.045
11	5.947	6.042	0.095
12	6.395	6.488	0.093

6. 결 론

<표 10>에서 보는 바와 같이, 근거리 사진측량으로 해안사구의 고도값을 측정하는 실험에서는 최소 0.8cm에서 최대

9.5cm의 오차가 나타났다. 6개의 미지점 중에서 8, 9, 10번은 5cm 이내로 나타나고 있지만, 11번과 12번 미지점의 오차는 5cm 보다 크게 나타나고 있다. 번들조정 에 입력되는 기준점의 사진좌표에 적정 오차가 포함되어 있더라도, 가중치와 반복적인 연산과정을 거쳐 보정이 이루어진다. 그러나 미지점의 3차원 좌표를 계산하기 위한 역변환된 공선조건식은 1회의 연산을 수행하므로, 미지점의 사진좌표에 포함된 오차가 보정되지 않는다. 이러한 연산의 특성을 고려해 보면, 11번과 12번 미지점의 사진좌표에는 8, 9, 10번 미지점의 사진좌표에 비해 큰 측정오차가 포함되었을 것으로 여겨진다. 즉 일반적으로 렌즈에 의한 사진좌표의 왜곡은 사진의 주변부로 갈수록 크게 나타나는데, 8, 9, 10번에 비해 11번과 12번 미지점에는 렌즈에 의한 사진좌표 왜곡량이 크게 작용한 것으로 보인다.

이 연구를 통해 나타난 해안사구 단면의 미지점 8, 9, 10, 11, 12번에 대한 계산값과 실측값 오차는 10cm 이내로 나타났다. 이러한 연구 결과는 해빈의 단면을 측정할 선형연구에서 보이는 결과값과 유사하거나 낮게 나타난 것이다. 해안사구는 모래질로서 지반이 견고하지 않으므로, 실측시 수준척의 고정이 제대로 이루어지지 않아 측정값의 오차가 크게 나타날 수 있다. 그리고 좁은 지역을 대상으로 측정하는 경우, 측정지점 이외의 인접지점을 교란시키는 결과가 발생할 수 있으므로 원활한 측량이 이루어지기 어렵다. 이 연구에서와 같이 디지털 사진측량에 의해 해안사구의 고도값을 측정하면

수준측량시 나타나는 위와 같은 문제점을 해결할 수 있고, 수준측량에 비해 효율적인 연구수행을 가능하게 할 것이다.

참고문헌

- 김백운 외, 1998, "사진측정법을 이용한 해빈단면의 추정", 한국해양학회지 바다, vol. 3, pp. 228-233.
- 박동원, 유근배, 1979, "우리나라 서해안의 사구지형", 지리학논총, 제6호, pp. 1-10.
- 류호상, 2001, "겨울철 모래 이동과 전사구의 지형변화 : 신두리 해안사구 지대를 사례로", 서울대학교 대학원 석사학위 논문.
- 서종철, 2001, "서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지", 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 이효성, 2000, "수치근접사진측량에 의한 조경석의 표면 거칠기 정밀측정", 경상대학교 대학원 박사학위논문.
- Ahmad, A. and Chandler, J.H., 1999, "Photogrammetric Capabilities of The KODAK DC40, DCS420, DCS460 Digital Cameras", Photogrammetric Record, vol. 16(94), pp. 601-615.
- Bösemann, W., 1998, "Photogrammetric Solutions for Industrial Automation and Process Control", Photogrammetric Record, vol. 16(92), pp. 187-197.
- Clarke, T. A., Wang, X. and Fryer, J. G., 1998, "The Principal Point and CCD Camera", Photogrammetric Record, vol. 16(92), pp. 293-312.

- Eleveld, M.A., 1999, "Exploring Coastal Morphodynamics of Ameland(the Netherlands) with Remote Sensing Monitoring Techniques and Dynamic Modeling in GIS", PH.D. Dissertation, University of Amsterdam, pp. 45-56.
- Ghosh, S. K., 1988, Analytical Photogrammetry : 2nd ed., Pergamon Press, New York, U.S.A., pp. 141-158.
- Holman, R. A., Lippmann, T. C., O'Neil, P. V. and Hatchaway, K., 1991, "Video Estimation of Subaerial Beach Profiles," Marine Geology, vol. 97, pp. 225-231.
- Macklin, B., etc., 1998, "Engineering a Remote Survey of Jet's Divertor Structure under Conditions of Restricted Access using Digital Photogrammetry", Photogrammetric Record, vol.16(92), pp. 213-223.
- Plant, N. G. and Griggs, G. B., 1992, "Interaction Between Nearshore Processes and Beach Morphology near a Seawall," Journal of Coast Research, vol. 8, pp. 183-200.
- Plant, N. G. and Holman, R. A., 1997, "Intertidal Beach Profile Estimation using Video Images," Marine Geology, vol. 140, pp. 1-24.
- Wolf, P.R. and Dewitt, B.A., 2000, Elements of Photogrammetry : with Applications in GIS 3rd ed., McGraw-Hill Companies, Inc., Seoul, p. 387.
- Wong, K. W., 1980, Basic Mathematics of Photogrammetry in Manual of Photogrammetry 4th ed, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, U.S.A., pp. 37-102.