

UAS 기반 DEM 분석을 통한 단기간의 파도리 해변 지형변화 분석: 태풍 솔릭 통과 전후를 중심으로*

유재진** · 김동우*** · 윤정호**** · 손승우*****

A Study on the Short-term Morphological Beach Changes of Pado-ri Using UAS-based DEM: Focusing on before and after Typhoon Soulik*

Jae Jin Yu** · Dongwoo Kim*** · Jeong ho Yoon**** · Seung Woo Son*****

요약 : 본 연구에서는 UAS(Unmanned Aerial System) 기반 DEM을 구축한 뒤 차연산(DEM of Difference, 이하 DoD)하여 태풍 솔릭 전후에 해변이 어떻게 변화하는지 알아보고자 하였다. 해변 지형변화는 DoD 결과와 기상 및 해양 자료를 기반으로 해석하였다. 연구결과, 체적은 약 60m³이 감소되어 체적 변화는 미미했다. 연구기간 동안 파고가 높고 풍속이 강한 날이 있었지만 해당 시기에 낮은 조위로 인해 파도리 해변에 큰 지형변화를 유발하지 못했다. 연구기간 동안은 저파랑 환경이 우세하여 해발고도 약 3m 부근에서 범(berm)이 성장하고 커스(cusp)이 발달하였다. 결과적으로 태풍 솔릭으로 인한 파도리 해변 지형변화는 미미한 것으로 판단되었다.

주요어 : UAS(Unmanned Aerial System), DEM(Digital Elevation Model), DoD(DEM of Difference), 태풍, 해변

Abstract : In this study, we analyzed the morphological changes on beach before and after the Typhoon Soulik using UAS (Unmanned Aerial System) based DoD (DEM of Difference). The morphological changes of beach were explained using DoD results, weather and marine data. As a result, a slight volume reduction of about 60 m³ were detected. Even with days of high wave height and wind speed, low tidal height during the period caused slight morphological changes on beach. Berm and cusp were developed around 3 m above mean sea level, under low wave height environment during the study period. In conclusion, morphological changes of Pado-ri beach by Typhoon Soulik were insignificant.

Key Words : UAS (Unmanned Aerial System), DEM (Digital Elevation Model), DoD (DEM of Difference), Typhoon, Beach

I. 서론

해안지역은 해양과 육상생태계가 만나는 전이지역으

로 여러 형태의 지형이 분포하며 생태적·지형적으로 다양한 가치와 독특한 자연경관을 제공한다(장동호·김만규, 2009). 해안지역을 구성하는 여러 지형 중 해변은

*본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업(과제번호: 2016000200009)에서 지원받아 한국환경정책·평가연구원에서 수행하였음.

**한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute, jjyu@kei.re.kr)

***한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute, dwkim@kei.re.kr)

****한국환경정책·평가연구원 선임연구위원(Senior Research Fellow, Korea Environment Institute, jhyoon@kei.re.kr)

*****한국환경정책·평가연구원 연구원(Researcher, Korea Environment Institute, swson@kei.re.kr)

해수욕장으로 활용되는 중요한 관광자원일 뿐만 아니라 해안의 자연환경 유지기능과 높은 파도로부터 해안 주변을 보호해주는 방재기능까지도 보유하고 있는 귀중한 재산이다(유형석 등, 2008).

해빈은 미고결물질로 이루어진 해안지역을 지칭하는데, 보통 구성물질에 따라서 모래해빈(사빈)과 자갈해빈(역빈) 또는 혼성해빈으로 구분된다. 해빈에 대한 국내의 초기 연구는 1970년대에 이루어졌으며 이후 주로 해빈을 구성하는 물질의 특성과 기원에 관한 연구가 이루어졌다(김성환, 2012).

김성환(2012)은 해안침식의 주요 대상으로 해빈이 주목받고 있다는 현실을 고려할 때 해빈 연구가 미비한 측면이 있다고 주장하면서, 그 이유로 해빈이 미고결 물질로 이루어지고 파랑과 폭풍과 같은 비교적 강한 에너지 환경에 노출되어 형태변화가 매우 유동적인 해빈환경의 특성상 단기간의 변화를 추적해내기 위해 지형학자들이 사용하는 방법론상의 한계를 지목하였다. 이러한 방법론상의 한계로 인해 기존 해빈 관련 연구는 모니터링의 시간 간격(interval)이 상대적으로 길었다. 홍현정 등(2006)은 태풍 나비 전·후 해운대 해빈지형의 변화 탐지를 약 한 달 간격으로 실시하였다. 박정원 등(2012)은 태안해안국립공원 내 학암포의 해빈과 해안사구의 지형변화를 약 석 달 간격으로 모니터링하였다. Bertoni and Sarti(2011)은 2008년 4월부터 약 1년 동안 총 5회 모니터링을 실시하여 이탈리아 피사에 위치한 역빈을 모니터링하였다. 전술한 해빈 연구의 연구자료는 대부분 GNSS(Global Navigation Satellite System) 또는 토탈스테이션과 같은 측량기기를 사용했다. GNSS나 토탈스테이션은 측량 성과가 점으로 표현되기 때문에 면상(面像)인 해빈을 모니터링하는데 한계가 있다.

우한별 · 장동호(2010)는 약 10년 간격의 다중시기 항공사진을 이용하여 태안반도의 해안침식을 연구하였고, Pye and Blott(2016)는 겨울철 발생한 수 회의 폭풍이 영국 Sefton 해안에 어떤 지형변화를 일으켰는지 2회(2013년 10월과 2014년 5월)의 LiDAR(Light Detection And Ranging) 측량을 통해 분석하였다. 이와 같이 항공사진이나 LiDAR 자료를 이용한 연구도 수행되었으나, 이를 이용한 연구는 높은 빈도로 모니터링이 시도되기 어렵다는 단점이 있다.

해빈 모니터링을 위한 기존의 연구자료는 위와 같이 GNSS, 토탈스테이션, LiDAR 등 다양하게 사용되어왔다.

그러나 대부분의 연구에서 비용과 시·공간해상도, 기기 운영 등의 문제로 인해 모니터링의 시간 간격이 태풍과 같은 일시적인 기상학적 이벤트에 의한 해빈 지형변화를 분석하기에는 너무 길었다.

최근에는 UAS 기반의 3차원 모니터링 기법이 발전하면서 GNSS나 토탈스테이션, LiDAR, 항공사진, 위성영상자료 등의 기존 연구자료의 한계를 보완할 수 있게 되었다. UAS 기반의 3차원 모니터링은 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 이용하여 항공사진을 촬영하고 이를 SfM(Structure from Motion) 기법을 통해 대상지역의 3차원 모델을 구축하여 연구를 수행한다(유재진 등, 2016). 이는 기존의 방법에 비해 매우 시간·비용 효율적인 방법이기 때문에 해빈 모니터링 연구(유재진 등, 2016; 최광희 등, 2016; Long *et al.*, 2016; Turner *et al.*, 2016)에서도 매우 활용도가 높다.

UAS 기반의 3차원 모니터링이 매우 시간·비용 효율적임에도 불구하고 국내에서 단기간의 해빈 모니터링에는 적용된 바 없다. 해빈은 파랑과 조석에 의해 매일 역동적으로 변화하는 해안 환경이며, 특히 태풍과 같은 기상학적 이벤트에 의해 크게 변화되는데 UAS 기반의 3차원 모니터링은 단기간의 모니터링에 매우 적합한 연구자료이다. 따라서 본 연구에서는 태풍 전후의 UAS 기반 DEM을 구축한 뒤 차연산하여 단기간의 해빈 변화를 파악하고 이를 통해 해빈이 어떻게 변화했는지 알아보고자 하였다.

II. 연구지역과 연구방법

1. 연구지역

연구지역인 파도리 해빈은 행정구역상 충청남도 태안군 소원면에 속해 있으며 태안반도의 가장 서쪽에 위치해 있다. 태안반도의 서쪽 끝인 연구지역 주변에서 파도리 해빈 남쪽으로는 뚜렷하게 관찰될만한 규모의 해빈이 발달해 있지 않으나 북쪽으로는 어은돌과 만리포, 천리포, 백리포가 서해를 바라보며 남-북으로 늘어서 있다. 파도리 해빈의 수리적 위치는 36°44'27"N, 126°8'3"E에 해당한다(그림 1).

본 연구에서 파도리 전체 해빈은 어은돌 남쪽의 큰 곳과 파도리 해빈 남쪽의 큰 곳 사이의 해빈을 의미한다.



그림 1. 연구지역

* ArcGIS Online basemap(World Imagery)을 활용.

이들 곳의 전·측면에는 파식대가 매우 넓게 나타난다. 파도리 전체 해변은 북쪽의 포켓 비치와 그 아래의 상대적으로 규모가 큰 해변(이하 파도리 해변)으로 구분된다. 포켓 비치를 제외한 파도리 해변의 길이는 900m에 이르며 해변이 약퇴저조면에 달했을 때 해변의 최대 폭은 약 100m에 달한다.

파도리 해변은 약 5~7m의 대조차 환경에 노출되어 있으며, 서해로 돌출된 부분에 위치하여 파랑의 영향을 직접적으로 받는 지역이다. 특히 한국 서해안의 해변은 일반적으로 비치페이스로만 이루어져 있는 반면 파도리 해변은 범이 뚜렷하게 관찰된다(이원영·성효현, 2009). 해변의 배후에는 사구가 존재하였으나 현재는 캠핑장, 주차장 등으로 이용되어 원형이 훼손되어 있다.

파도리 지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 서산층군인 변성퇴적암류와 이에 관입한 중생대 화성암류로 이루어져 있다. 서산층군은 운모편암과 호상편마암으로 구성되며, 운모편암에는 함철규암이 협재되어 있다(한국동력자원연구소, 1982). 파도리 해변은 1978년 10월 20일에 우리나라에서 제13호로 지정된 서산해안국립공원(현 태안해안국립공원)에 속해 있다.

2 연구방법

본 연구에서는 태풍 통과 전(Campaign 1: 2018년 8월 16일)과 후(Campaign 2: 2018년 9월 1일)의 파도리 해변 지형변화를 살펴보기 위해 두 시기의 DEM을 구축한 후 DoD 방법을 이용하여 차연산하였다. DEM은 UAS와 SfM을 기반으로 제작되었다. 연구방법을 두 개로 구분해 보면 사전 비행 계획과 GCP(Ground Control Point) 및 CP(Check Point) 측량, UAV 비행·촬영 순으로 진행된 현장조사와 SfM 기반의 영상처리와 결과물의 정확도 검증, 기상 및 해양 데이터 그리고 GIS(Geographic Information System) 분석과 지형분석이 실시된 실내분석으로 구분된다(그림 2).

1) 현장조사

현장조사는 2018년 8월 16일과 동년 9월 1일로 16일 간격으로 총 2회 실시되었다. 태풍이 지나기 직전과 직후에 현장조사를 실시하려고 하였으나 기상상황 및 제반 여건으로 인하여 직전과 직후에 현장조사를 할 수 없었다.

현장조사는 UAV 비행·촬영과 GNSS를 활용한 지상 측량 계획으로 구분된다. 사용한 UAV와 카메라는 DJI의 Inspire 1 Pro와 Zenmuse X5이다. UAV 비행은 균일한 중·횡중복도(85%)와 비행고도(80m)를 유지하기 위해 Pix4D Capture 어플리케이션을 활용하여 실시하였다. 기 설정된 중복도와 고도로 연구지역 전체를 한 회에 촬영할 수 없기 때문에 UAV 비행을 총 4개의 미션으로 나누어 수행하였다.

지상측량은 트림블 VRS-RTK R8s 모델로 실시했다. 영상처리 과정에서 절대표정을 위한 GCP는 두 시기 모두 14점을 측량하여 연구지역 전체에 골고루 분포시켰다. 제작된 결과물의 정확도를 판단하기 위한 CP는 총 세 개의 측선으로 구성하여 측량하였으며 Campaign 1 시기에는 40점, 2 시기에는 51점을 각각 획득하였다(그림 3의 a), b).

2) 실내분석

실내분석은 UAV를 통해 촬영된 영상을 SfM 알고리즘에 기반하여 3차원 모델(이하 point cloud)과 DEM을 구축하는 영상처리 과정과 제작된 결과물의 정확도를 검증하는 과정, 제작된 두 시기의 DEM을 활용하여 해변의

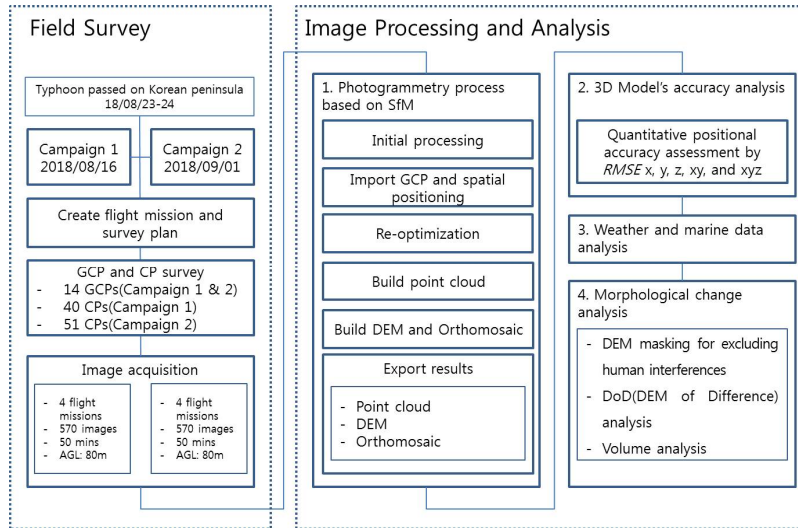


그림 2. 연구방법

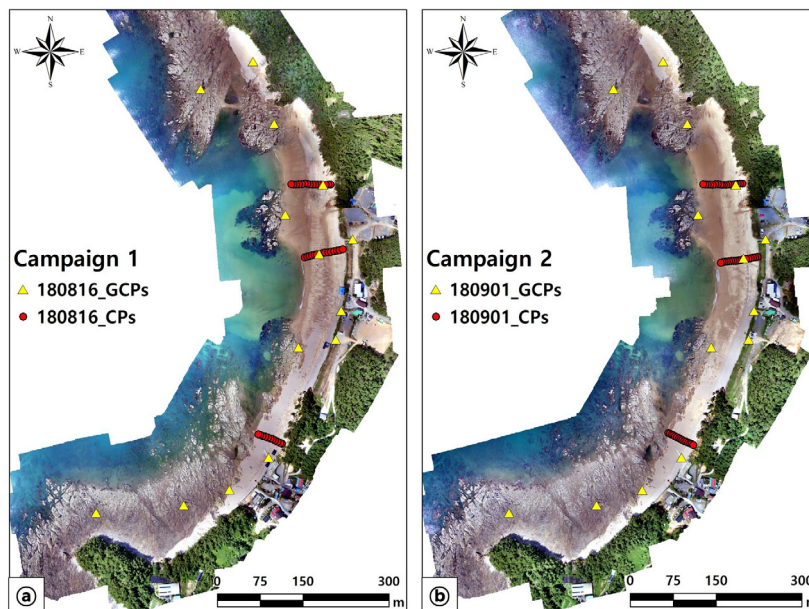


그림 3. GCP와 CP의 배치

* ㉠는 Campaign 1의 GCP와 CP(Profiles); ㉡는 Campaign 2의 GCP와 CP(Profiles).

지형변화를 기상 및 해양자료 등과 함께 분석하는 과정으로 구분된다. 실내분석에 사용된 소프트웨어는 Agisoft의 Photoscan v1.4.6과 Esri의 ArcMap v10.1 그리고 Cloudcompare v1.1이 사용되었다.

(1) SfM 기반의 3차원 모델 영상처리

SfM은 다중 촬영된 2차원 영상으로부터 촬영된 카메라의 위치와 방향을 재구성하고 피사체와 장면을 3차원으로 복원시키는 기술이다. 컴퓨터 비전을 기반으로 한 이 기술은 1990년대에 개발되어 2000년대 이후 다양한

클라우드 처리 프로그램을 통해 대중화되기 시작하였다 (Snively *et al.*, 2008; Westoby *et al.*, 2012).

본 연구에서는 UAV를 통해 파도리 해빈을 촬영(2차원 영상 획득)하였고 이를 SfM 알고리즘에 기반한 소프트웨어인 포토스캔을 이용하여 point cloud와 DEM을 구축하였다. 포토스캔은 2차원 영상으로부터 최종 결과물인 3차원 point cloud 및 DEM을 제작하기까지 ‘카메라 검정 - 정렬 - 절대표정 - 카메라 정렬 최적화 - point cloud 제작 - DEM과 정사영상 제작’의 과정을 거친다.

(2) 3차원 모델의 정확도 평가

제작된 point cloud는 다양한 방법으로 정확도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 절대표정에 이용된 GCP의 *RMSE*를 이용하여 각각 x, y, z, xy, xyz의 정확도를 평가하였다. *RMSE*는 일반적으로 사용되는 위치 정확도에 대한 기준 중 하나이다(Tomaščík *et al.*, 2017).

GCP의 *RMSE*는 포토스캔에서 입력된 GCP와 제작된 point cloud 간의 관계를 통해 계산된다. 그러나 CP의 경우 GCP와 달리 GNSS로 측량된 지점을 촬영된 항공 및 지상사진 상에서 판독할 수 없기 때문에 포토스캔에서 CP의 *RMSE* 산출이 불가능하다. 따라서 CP의 *RMSE* 산출을 위해 point cloud 처리에 특화된 소프트웨어인 Cloudcompare를 이용했다. Cloudcompare에서는 3차원 모델과 CP 사이의 평균 거리오차와 표준편차를 계산할 수 있고, 이를 통해서 *RMSE* 산출이 가능하다.

(3) 기상 및 해양 자료 분석

2회의 현장조사 기간 동안 해빈의 지형변화에 영향을 주었을 것이라고 판단되는 기상 및 해양 인자의 자료를 분석하였다. 해당 인자는 풍향과 풍속, 조석(조위), 파고(최대파고와 유의파고) 자료이며 자료수집 대상 기간은 현장조사 기간과 동일하다.

사용한 자료는 국립해양조사원 안흥 조위관측소의 조위, 풍향, 풍속 관측자료와 기상청 신진도 파고부이의 최대파고와 유의파고이다. 안흥 조위관측소는 파도리에서 정남 방향으로 약 7km 떨어져 있는 신진항의 남쪽에 위치한다. 신진도 파고부이는 파도리에서 남쪽으로 약 14km 떨어져 있는 해상에 위치한다(그림 1).

(4) 해빈 지형변화 분석

UAV 비행은 연구 대상지 전체에 대해 적절한 중복도를 확보하기 위해 대상지보다 더 넓게 비행·촬영한다.

따라서 point cloud와 DEM은 대상지보다 크게 제작되기 때문에 불필요한 부분을 제외할 필요가 있다. 또한 현장 조사 시기가 해빈에 관광객이 몰리는 여름이기 때문에 텐트나 파라솔 설치 등의 인위적 간섭이 빈번하게 발생하였으므로 영상처리 결과물에 이러한 간섭이 표현됐을 경우 해당 지역을 제외했다. 인위적 간섭으로 어느 한 시기에 일정 부분을 제거했을 경우엔 차연산을 위해 다른 시기에도 동일한 부분을 제외하였다.

차연산을 위한 사전 작업으로 마스킹 처리가 끝난 후 해빈 지형변화 분석을 위해 ArcMap에서 래스터 연산 툴로 Campaign 2 시기의 DEM에서 1 시기의 DEM을 차연산하였고, 각각 DEM 별 체적을 산출하였다. 차연산된 DEM을 활용하여 해빈 지형변화 분석을 실시하였다.

III. 연구결과

1. 현장조사 결과

2018년 8월 16일 현장조사(Campaign 1) 시 UAV 비행은 전체 면적을 1회에 비행할 수 없는 배터리의 한계로 인해 총 4회로 나누어 실시하였다. 비행시간은 총 50분, 촬영 중횡중복도는 85%, 촬영 매수는 총 570매였다. 동년 9월 1일 현장조사(Campaign 2) 시에도 비행을 총 4회로 나누어 실시하였으며, 비행시간과 중횡중복도, 촬영 매수는 1 시기와 동일하였다.

영상처리 시 절대표정을 위한 GCP는 두 시기 모두 14개로 설정하였다. 제작된 point cloud의 정확도 평가를 위한 CP는 Campaign 1 시기에 40개, 2시기에 51개를 설정하였다(표 1, 그림 3의 (a), (b)). 시기별로 CP의 개수가 차이나는 이유는 개별 측선에서의 간격을 대략적인 발걸음으로 설정했고, 현장조사를 바다가 가장 많이 후퇴한 최간조 시로 잡았음에도 불구하고 물때 차로 인해 조

표 1. 현장조사 결과

	Campaign 1	Campaign 2
Total pictures	570	570
Front and Side overlap	85 %	←
Flight time	50 min	←
No. of GCPs	14	←
No. of CPs	40	51

표 2. 영상처리 결과

	Campaign 1	Campaign 2
No. of point cloud	679,345,651	691,631,553
Point density	20.6 points / cm ²	21.6 points / cm ²
Resolution of DEM and Orthomosaic	2.21 cm / pix	2.15 cm / pix

위가 시기별로 달라서 측량할 수 있는 범위가 다소 달랐기 때문이다.

2. 실내분석 결과

1) SfM 기반의 3차원 모델 영상처리 결과

2018년 8월 16일에 촬영된 총 570매의 항공사진과

GCP를 이용하여 Campaign 1의 point cloud를 제작하였다. 제작된 point cloud의 총 포인트는 679,345,651개이다. 점밀도는 20.6points/cm²이다. point cloud를 보간하여 제작한 DEM과 정사영상의 공간해상도는 2.21cm이다(표 2, 그림 4의 ㉠, 그림 5).

Campaign 2는 2018년 9월 1일에 촬영된 총 570매의 항공사진과 GCP를 이용하여 제작되었으며, 제작된 point cloud의 총 포인트는 691,631,553개이다. 점밀도는 21.6points/cm²이다. point cloud를 보간하여 제작한 DEM과 정사영상의 공간해상도는 2.15cm이다(표 2, 그림 4의 ㉡, 그림 6).

2) 3차원 모델의 정확도 평가

SfM 기반의 point cloud의 정확도를 검증하기 위해 절

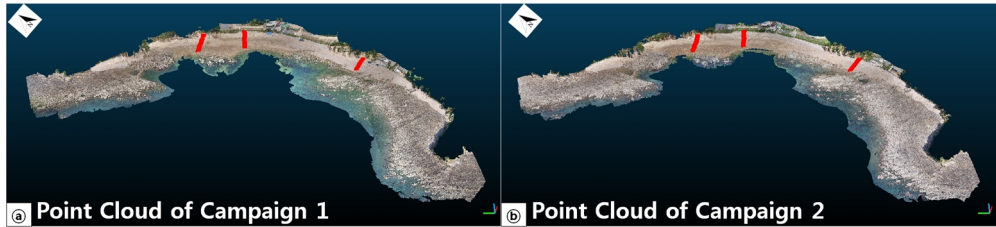


그림 4. 각 Campaign 의 3차원 모델(point cloud)과 CP(Profiles; red lines)

* ㉠는 Campaign 1; ㉡는 Campaign 2.

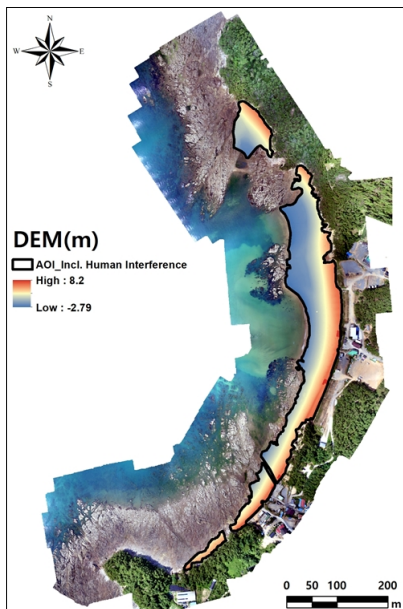


그림 5. Campaign 1의 DEM

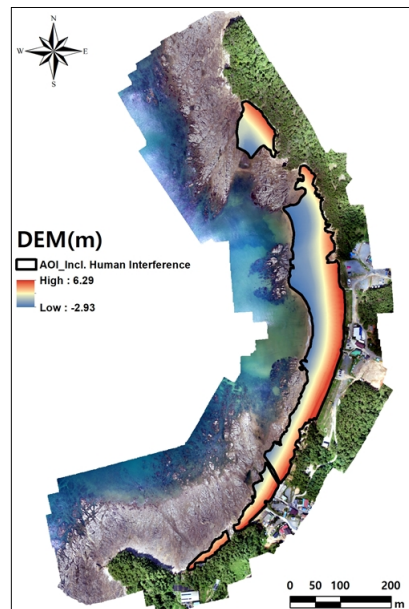


그림 6. Campaign 2의 DEM

표 3. GCP의 RMSE

(단위: cm)

	X error	Y error	Z error	XY error	Total error
Campaign 1	3.25	2.11	0.61	3.87	3.92
Campaign 2	2.68	2.17	0.88	3.45	3.56

표 4. CP의 RMSE

(단위: cm)

	X error	Y error	Z error	XY error	Total error
Campaign 1	1.01	0.71	2.71	1.27	3.22
Campaign 2	1.11	0.08	2.43	1.45	2.82

표 5. 최대풍속 출현 시기의 기상 환경

Date and Time	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)	Tidal height (cm)	Maximum wave height (m)	Significant wave height (m)
08-23 22:00	8.4	40.4	267.9	0.7	0.5
08-24 00:00	8.2	35.9	461.1	1	0.7
08-24 01:00	8.0	34.4	536.7	1.1	0.7
08-24 02:00	7.9	37.8	584.1	1.1	0.8
08-24 03:00	7.4	32.9	589.7	1.1	0.7

* 상위 5 시간의 측정값을 제시.

대표정에 이용된 GCP의 RMSE를 이용하여 수평적(x, y), 수직적(z), 복합적(xy, xyz) 정확도를 평가하였다(표 3).

Campaign 1 시기의 GCP RMSE는 0.61cm(z)부터 3.25 cm(x)의 범위로 나타났으며, xy RMSE는 3.87cm, xyz RMSE는 3.92cm로 나타났다. Campaign 2 시기의 GCP RMSE는 0.88cm(z)부터 2.68cm(x)의 범위로 나타났으며, xy RMSE는 3.45cm, xyz RMSE는 3.56cm로 나타났다.

Campaign 1 시기에 비해 2 시기의 RMSE가 다소 낮은 것으로 나타났으나, 유의미한 차이로 판단되지는 않는다. 야외조사에서 측량을 수행한 VRS-RTK GNSS의 수직 및 수평 오차의 범위에 해당하기 때문이다. 특이한 점은 수직 오차가 수평 오차에 비해 더 낮게 나타난 것인데 이는 토의 부분에서 다루기로 한다.

CP의 RMSE 산출은 제작된 3차원 모델에 CP를 오버레이 시킨 후(그림 4의 a, b) 이 둘 사이의 평균 오차와 표준편차를 이용하여 RMSE를 산출하였다(표 4). Campaign 1 시기의 CP RMSE는 0.71cm(y)부터 2.71cm(z)의 범위로 나타났으며, xy RMSE는 1.27cm, xyz RMSE는 3.22cm로 나타났다. Campaign 2 시기의 CP RMSE는 0.08cm(y)부터 2.43cm(z)의 범위로 나타났으며, xy RMSE는 1.45cm, xyz RMSE는 2.82cm로 나타났다.

3) 기상 및 해양 자료 분석

2회의 현장조사 기간 동안의 기상 및 해양자료를 분석

하였다(국립해양조사원 안홍 조위관측소, 기상청 신진도 파고부이). 해당 자료는 풍향과 풍속, 조석(조위), 파고(최대파고와 유의파고)자료이며 자료 수집 대상 기간은 현장조사 기간과 동일하다.

연구기간 전체의 평균 풍속은 2.46m/s이다. 가장 풍속이 강했던 시기는 태풍 솔릭이 통과했던 시기로 8월 23일 22시에 8.4m/s를 기록했다. 연구기간 중 이 시기를 전후해서 가장 강한 바람이 기록되었으며, 당시의 주 풍향은 북동풍 계열에 해당되었다(표 5, 그림 7).

연구기간 중 최대파고와 최대유의파고를 기록했던 일

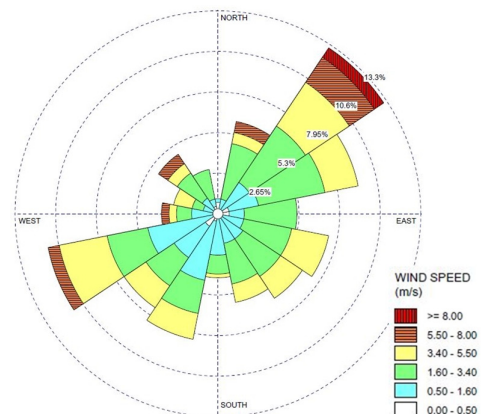


그림 7. 연구기간 동안의 바람장미

출처 : 국립해양조사원 안홍 조위관측소.

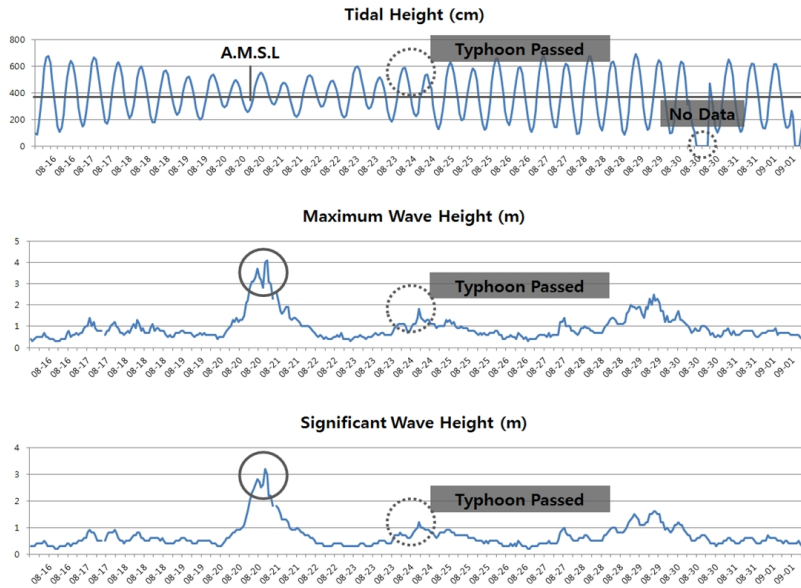


그림 8. 연구기간 동안의 해양자료

출처 : 국립해양조사원 안흥 조위관측소, 기상청 기상자료개방포털 신진도 파고부이.

* 위로부터 조위, 최대파고, 최대유의파고.

표 6. 최대파고 출현 시기의 기상 환경

Date	Maximum wave height (m)	Significant wave height (m)	Tidal height (cm)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)
08-21 04:00	4.1	3.0	357.5	1.9	311.8
08-21 03:00	4.0	3.2	408.9	5.4	260.2
08-20 23:00	3.7	2.8	552.7	5.6	257.8
08-21 00:00	3.3	2.7	540.7	6.0	262.0
08-20 22:00	3.3	2.6	533.5	5.3	249.7

* 상위 5 시간의 측정값을 제시.

표 7. 최대유의파고 출현 시기의 기상 환경

Date	Significant wave height (m)	Maximum wave height (m)	Tidal height (cm)	Wind speed (m/s)	Wind direction (°)
08-21 03:00	3.2	4.0	408.9	5.4	260.2
08-21 04:00	3.0	4.1	357.5	1.9	311.8
08-20 23:00	2.8	3.7	552.7	5.6	257.8
08-21 00:00	2.7	3.3	540.7	6.0	262.0
08-20 22:00	2.6	3.3	533.5	5.3	249.7

* 상위 5 시간의 측정값을 제시.

시는 8월 20일 저녁부터 21일 새벽까지이다. 최대파고는 8월 21일 04시에 4.1m가 기록되었으며, 최대유의파고는 동월 동일 03시에 3m가 기록되었다(그림 8, 표 6, 표 7).

서해안의 해빈 지형변화를 분석하기 위해 조위를 파

악하는 것은 매우 중요하다. 그런데 우리나라는 수직기준체가 육상과 해상이 이원화되어 있어 불부합이 발생하므로 이를 고려해야한다. 측량에 사용된 VRS-RTK GNSS와 이를 이용하여 제작된 DEM은 인천의 평균해면 (IMSL)을 수직기준으로 이용하고 있지만 조위는 지역 평

균해면(LMSL)을 기준으로 하여 서로 편차가 발생한다. 또한 조위는 조위관측소가 위치한 지역(안흥)과 그렇지 않은 지역(파도리) 간 차이도 발생하기 때문에 이를 고려해야한다.

국토지리정보원에서 제공하는 수직기준 변환 서비스의 육해상 높이값 연계 서비스를 이용하면 다음과 같은 식 (1)을 통해 연구지역인 파도리와 조위관측소가 위치한 안흥의 편차를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} I.M.S.L.(\text{Incheon Mean Sea Level}) - P.M.S.L.(\text{Padori} \\ \text{Mean Sea Level}) &= -0.003 \text{ m} \\ I.M.S.L.(\text{Incheon Mean Sea Level}) - A.M.S.L.(\text{Anheung} \\ \text{Mean Sea Level}) &= -0.030 \text{ m} \end{aligned} \quad (1)$$

본 수직기준 변환 서비스의 오차 범위는 $\pm 6\text{cm}$ 이므로 파도리 평균해면 높이와 안흥 평균해면 높이가 인천 평균해면 높이와 같다고 볼 수 있다. 여기에 각 지점의 수심 기준(조위의 기준면)을 알아보기 위해 수심기준면(Datum Level, 이하 D.L.) 또는 약최저저조면(Approximate Lowest Low Water, 이하 A.L.L.W.)을 확인해야 한다(식 (2)).

$$\begin{aligned} P.M.S.L.(\text{Padori Mean Sea Level}) - L.D.L.(\text{Local} \\ \text{Datum Level}) &= 3.662 \text{ m} \\ A.M.S.L.(\text{Anheung Mean Sea Level}) - L.D.L.(\text{Local} \\ \text{Datum Level}) &= 3.546 \text{ m} \end{aligned} \quad (2)$$

파도리와 안흥 지역의 수심기준면의 오차가 약 12cm에 불과하기 때문에 이를 편의상 모두 약 3.6m 라고 했을 때, 조위의 기준이 되는 수심은 I.M.S.L 기준으로 -3.6m가 된다. 즉 VRS-RTK GNSS 기준으로 -3.6m 지점이 파도리와 안흥의 수심기준면(D.L. 또는 A.L.L.W.)이라고 할 수 있으며, 따라서 안흥의 조위가 360cm 일 때 실제 해수면은 VRS-RTK GNSS 기준 0m 지점에 해당한다고 할 수 있다.

4) 해변 지형변화 분석

UAS 기반 영상처리 과정을 통해 제작된 두 시기의 DEM 중 순수한 해변 부분만 다루기 위해 수역과 사구, 도로 등을 마스킹했다. Campaign 1 시기의 DEM은 -2.79m에서 8.2m의 고도 범위를 나타냈다. 2 시기의 DEM은 -2.93m에서 6.29m의 고도 범위를 나타냈다(그

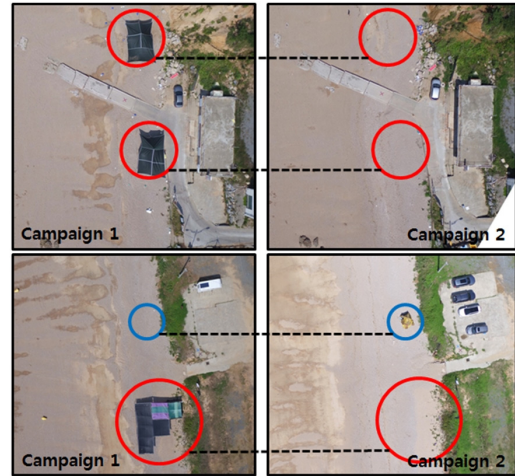


그림 9. 해변 위에서 발생한 인위적 간섭 사례

림 5, 그림 6). Campaign 2 시기보다 1 시기에 과도하게 높은 지역을 정사영상으로 분석해 본 결과 텐트와 같은 인위적 구조물이었다(그림 9).

따라서 해변 지형변화만 분석하기 위해 인위적으로 개입된 부분을 마스킹 처리하였다. 인위적 개입을 마스킹한 DEM의 고도는 Campaign 1 시기에 -2.79m에서 5.16m로 나타났고(그림 10), 2 시기에는 -2.93m에서 5.09m 범위로 나타났다(그림 11). 체적은 Campaign 1 시기에 179,064m³이었고 2 시기에는 179,004m³으로 나타나 연구기간 동안 체적은 1 시기에 비해 약 60m³ 감소했다.

인위적 개입 부분이 마스킹 된 Campaign 2 시기의 DEM에서 1 시기의 그것을 차연산(DoD)한 결과는 그림 12, 표 8과 같다. RMSE가 약 0.03m 이므로 -0.03m에서 0.03m 구간은 오차범위로 설정하여 지형변화가 나타나지 않은 것으로 판단하였다. 이 부분의 셀 개수는 26,478,113개로 환산면적은 12,880m²이고, 전체 면적에 27.6%에 해당한다.

퇴적된 셀(고도가 높아진 셀)은 33,157,967개로 면적으로 환산했을 시 16,130m²이며, 면적비로는 34.5%를 차지했다. 퇴적된 셀의 대부분은 0.03m에서 0.2m의 범위에 해당하며 이 셀의 개수는 28,691,384개로 전체 셀 중 29.9%를 차지했다.

침식된 것으로 나타난 셀(고도가 낮아진 셀)은 36,340,034개로 전체 셀 중 37.9%를 차지했다. 침식된 셀의 대부분도 -0.03m에서 -0.2m의 범위에 해당하며 이 셀의 개수

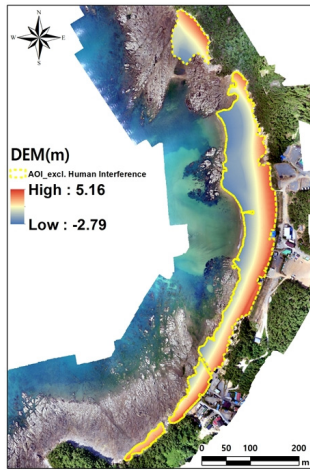


그림 10. 인위적 간섭 부분을 제외한 Campaign 1 DEM

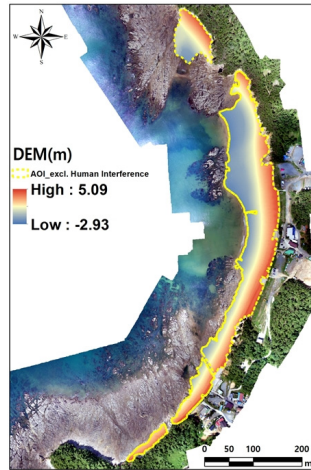


그림 11. 인위적 간섭 부분을 제외한 Campaign 2 DEM

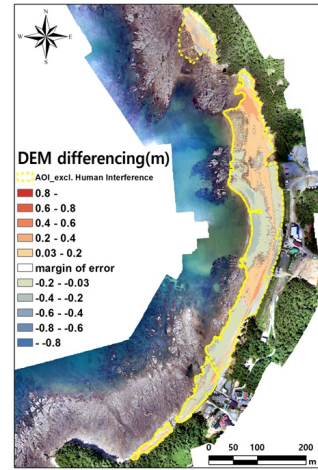


그림 12. DoD(DEM of Difference) 결과

표 8. DoD(DEM of Difference) 결과

	Classes (m)	No. of Cells	Area (m ²)	Ratio (%)
Deposition range	0.8 ~	29	0	0.0
	0.6 ~ 0.8	17	0	0.0
	0.4 ~ 0.6	123,052	60	0.1
	0.2 ~ 0.4	4,343,485	2,113	4.5
	0.03 ~ 0.2	28,691,384	13,957	29.9
Margin of error	-0.03 ~ 0.03	26,478,113	12,880	27.6
Erosion range	-0.2 ~ -0.03	31,821,212	15,480	33.2
	-0.4 ~ -0.2	4,443,189	2,161	4.6
	-0.6 ~ -0.4	68,000	33	0.1
	-0.8 ~ -0.6	6,291	3	0.0
	~ -0.8	1,342	1	0.0
	Total	95,976,114	46,688	100.0

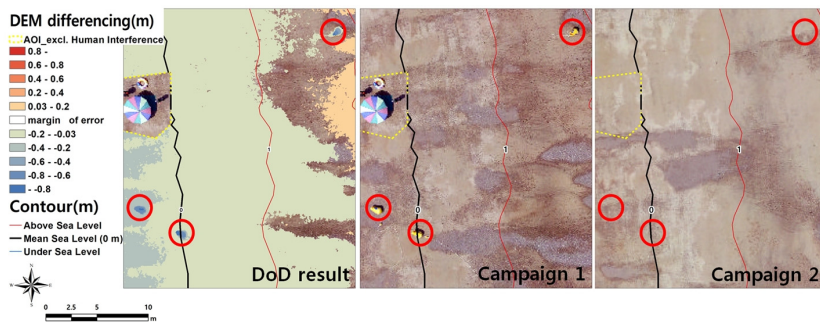


그림 13. 인위적 간섭에 의해 나타난 침식 부분

는 31,821,212 개로 전체 셀 중 33.2%를 차지했다.

0.6m의 범위를 초과하는 셀이 퇴적 부분에서는 46개에 불과하여 유의미한 수치로 보이지 않는데 반해, 침식

부분에서는 7,633개에 해당하고 면적도 4m²에 달하여 실제 침식이 라면 매우 큰 침식이라고 볼 수 있다. 그러나 이러한 부분들은 정사영상에서 판독했을 때, Campaign

1 시기에 있었던 부표가 2 시기에 없어진 곳으로 볼 수 있다(그림 13). 인위적 간섭을 일차적으로 마스킹했음에도 불구하고 항공사진 또는 DEM 상에서 크게 눈에 띄지 않아 제거가 미처 되지 않았던 곳이다. 이 부표들은 해수욕장 운영 기간에 태안군에서 관광객의 안전을 위해 설치해 놓고 9월 이후 해수욕장 운영 기간이 끝나자 철거하였다.

IV. 토의

1. 영상처리 결과의 해석

본 연구에서는 제작된 point cloud의 정확도를 두 가지(GCP와 CP)로 구분하여 분석하였다. GCP의 경우 Campaign 1 시기의 xyz $RMSE$ 가 3.92cm이며, 2 시기의 경우 3.56cm로 나타났다. 특이한 점은 x와 y 오차에 비해 z 오차가 더 낮은 결과를 보인 점이다. 두 시기 모두 z 오차가 1cm 미만인 반면 x, y 오차는 약 2~3cm의 오차 범위를 보였다.

GCP는 실제 측량된 지점을 UAV로 찍은 항공사진에서 판독하여 서로 정위치한 뒤 산출되는 정확도를 의미한다. 일반적으로 GCP 지점은 UAV로 촬영 시 잘 보이기 위해 주변에 방해물이 없는 평평하고 단단한 지점(인공구조물 또는 파식대 등)을 선택한다. 본 연구에서 촬영한 항공사진의 해상도가 약 2cm이므로 GCP를 정위치할 때 필연적인 오차가 나타나기 때문에 이러한 x, y 오차가 발생한 것으로 보인다. 반면, z 오차가 상대적으로 낮은 이유는 정위치에서 수평 방향으로 2cm 이동한 지점이어도 주변이 평평하여 고도 변화가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

CP로 정확도를 검증하는 것은 point cloud가 제작된 모든 구역을 검증할 수 없으므로 임의의 지점(본 연구에서는 세 개의 측선)을 선정하여 VRS-RTK GNSS 측량을 실시한 후 제작된 point cloud와 측량된 지점들 간 정확도를 평가하는 방법이다. CP로 평가한 point cloud의 정확도는 Campaign 1 시기에 xyz $RMSE$ 가 3.22cm이며, 2 시기에 xyz $RMSE$ 가 2.82cm였다.

CP는 x나 y 오차에 비해 z 오차가 상대적으로 더 크게 나타났다. 두 시기 모두 x, y 오차가 1cm 내외였던 반면, z 오차는 시기별로 2.71cm, 2.43cm였다. 이렇게 z 오차가 크게 나타나는 이유를 다음과 같이 유추해볼 수 있다.

우선 기계적으로 수직 오차가 수평 오차에 비해 크기 때문이다. 본 연구에서 사용한 VRS-RTK GNSS인 R8s의 수평 정확도는 8mm+0.5ppm인데 반해 수직 정확도는 15mm+0.5ppm이다. 또 다른 이유는 측량 시 현장에서 발생할 수 있는 문제점에서 기인한다. 측선으로 설정한 지점은 GCP가 설정된 지역과는 달리 바닥이 무른 해변이다. 따라서 측량 시 GNSS의 폴을 바닥에 고정하기가 어렵기 때문에 측량 시 높이가 상대적으로 불안정해졌을 것이다.

제작된 point cloud의 정확도를 GCP와 CP를 통해 평가해 본 결과, 약 3cm급으로 나타나 기존의 연구결과와 유사하거나 다소 높은 것으로 보인다(최경아·이임평, 2016; Long *et al.*, 2016; 김장수, 2017; 유재진 등, 2017). 따라서 UAS 기반으로 제작된 point cloud의 정확도를 확보한 것으로 판단하여 이를 DEM으로 제작한 뒤 DoD 기법을 통해 해빈 지형변화를 설명하였다.

2. 해빈 지형변화 해석

해안의 지형변화를 파악하기 위해서 파랑과 조석, 조류, 풍향, 풍속 그리고 태풍과 같은 극한기후사상 등 다양한 인자를 고려해야 한다. 서해안의 해빈 지형변화를 다룬 연구(김찬웅 등, 2015; 한민, 2018)에서 조석과 파랑, 바람 등의 영향을 고려하였고, 본 연구와 같은 연구 지역을 다룬 이원영·성효현(2009)의 연구에서도 이들 인자를 고려하였다. 본 연구 또한 파도리 해빈의 지형형성인자로 조석과 바람(풍향과 풍속), 파랑(최대파고 및 유의파고)를 고려했다.

해빈 단면 형성에 직접적으로 영향을 주는 부분은 파랑 에너지에 의한 퇴적물 분포 변화라고 볼 수 있다(이원영·성효현, 2009). 또한 파도리와 같이 조차가 큰 지역에서는 동시에 고려되어야 할 것이 조위이다. 파고가 매우 높아도 저조위라면 비치페이스와 배후의 범에는 영향이 적을 것이기 때문이다. 파도리 지역은 반일주조가 나타나므로 하루에 약 2회 만조 현상이 나타난다. 현장조사의 간격이 16일이었으므로 그동안 만조가 약 32회 출현하였다. 이때 당시의 파고를 파악하는 것이 중요하며, 이는 반대로 파고가 높을 때의 조위를 파악하는 것을 대변한다.

파도리 지역에서 태풍 전과 후의 체적이 크게 변화했을 것이라고 예상하였으나 DEM을 통한 체적 분석 결과 단지 60m³만 감소했을 뿐 큰 변화는 나타나지 않았다.

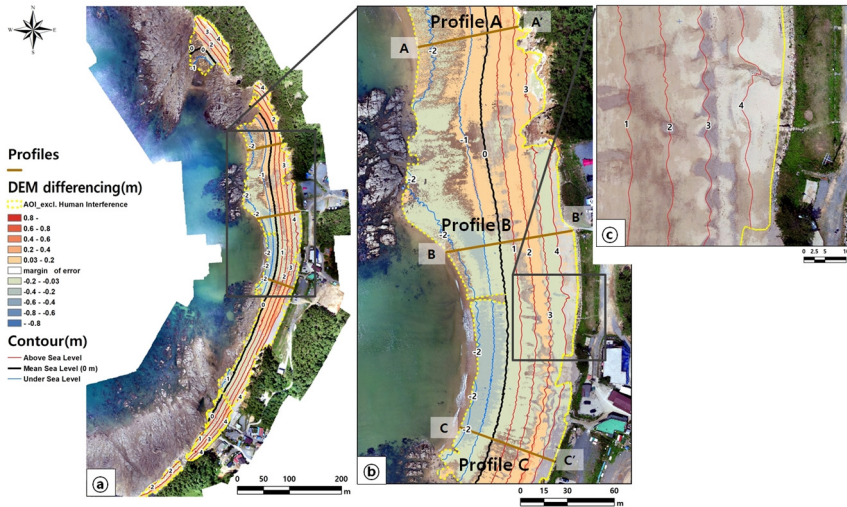


그림 14. DoD 결과에서 보이는 지형변화

* ①는 DoD 결과와 등고선 ②는 측선 부분 확대(정사영상과 등고선은 9월 1일 DEM을 기반으로 제작); ③는 소규모의 커스프 해발고도 3m 선을 따라 뚜렷이 관찰됨을 보여주는 영상.

이러한 이유로는 다음과 같은 설명이 가능하다.

태풍 솔릭은 매우 강한 바람을 동반하면서 한반도를 통과할 것으로 예상되었지만 목포 부근에 접근하면서 세력이 크게 약해졌다. 이에 따라 21일 저녁과 22일 새벽에 태풍이 통과할 때 파도리 주변의 최대 풍속이 8.4m/s에 불과하였다. 최대풍속이 관찰될 때 조위도 267cm에 지나지 않았다. 또한 태풍이 목포 부근을 통과함에 따라 태풍 중심의 북쪽에 위치한 파도리 해변 주변은 저기압 중심으로 수렴하는 북동풍 계열의 풍향이 형성되어 풍향이 파고를 오히려 억제하는 결과를 낳은 것으로 보인다. 따라서 풍속이 상대적으로 강했던 반면, 낮은 조위와 파고가 파도리 해변에 큰 영향을 미치지 못했다.

오히려 최대파고와 최대유속파고는 태풍 솔릭이 지나기 전인 8월 20일 저녁과 21일 새벽 사이에 나타났다. 당시 풍속은 최대 6.0m/s로 태풍 때에 비해 다소 약했지만 풍향이 육지 방향인 북서풍 또는 서풍 계열이었기 때문에 파고가 높았다. 그러나 당시는 조차가 가장 작은 시기인 1물과 2물때였던 관계로 비치페이스나 상부 범에는 큰 영향이 없었을 것으로 보인다.

따라서 DoD 결과에서 보이는 지형변화는 태풍 솔릭에 의한 지형변화 또는 이전 시기의 높은 파도에 의해서 나타난 변화가 아닌 일반적인 환경 하에서 나타나는 지

형변화라고 판단할 수 있다. DoD와 정사영상 판독 결과, 해발고도 3m 미만에 분포해 있던 역질이 상부로 이동하면서 3m 높이에 범(berm)이 성장하고 소규모 커스프(cusp)이 관찰되었다(그림 14). 이는 기존의 파도리 해변 연구에서 저파랑 에너지 환경에서 범의 규모가 커지고 상부 비치페이스에 커스프가 나타난다고 한 연구 결과와 일치한다(Sherman *et al.*, 1993; 이원영 · 성효현, 2009).

파도리 해안에서 해발고도 3m는 조위로 환산했을 때 약 660cm이다. DoD 결과(그림 14의 ①)와 9월 1일의 정사영상(그림 14의 ③)을 판독했을 때 해발고도 3m 전후의 등고선에서 육안으로 확연히 구분되는 범과 커스프가 관찰되었고 3m와 4m 사이에 고조위의 흔적이 일부 있었다. 3m 전후 등고선에서 관찰되는 범과 커스프는 가장 최근(8월 31일 또는 9월 1일)에 형성된 것으로 보이며 이보다 상부의 커스프는 8월 29일 고조위 때의 영향이라고 볼 수 있다(표 9).

29일 이전에는 태풍이 통과할 때 최고풍속이 출현했고, 이보다 이틀 전인 20일과 21일 사이에 최대파고가 나타났지만 해당 시기에는 조위가 낮아 비치페이스에 미친 영향이 적었다. 따라서 태풍 통과 이후부터 29일이 되어감에 따라 지속적인 조석의 승강, 저파랑 환경에의 노출로 인해 이전 비치페이스의 형태가 단순화되었을 것이다.

표 9. 연구기간 동안의 최고조위와 육지 기준 환산 고도

Date	Tidal height (cm)	Elevation (m)	Tide times	Remarks
08-16	674	3.1	12물	
08-17	664	3.0	13물	
08-18	597	2.4	조금	
08-19	536	1.8	무시	
08-20	552	1.9	1물	최대파고
08-21	540	1.8	2물	최대파고
08-22	520	1.6	3물	
08-23	599	2.4	4물	최대풍속(태풍)
08-24	590	2.3	5물	최대풍속(태풍)
08-25	626	2.7	6물	
08-26	657	3.0	7물	
08-27	679	3.2	8물	
08-28	674	3.1	9물	
08-29	689	3.3	10물	연구기간 내 최고조위
08-30	632	2.7	11물	
08-31	646	2.9	12물	
09-01	615	2.6	13물	

* 해발고도 기준.

면상으로 표현되는 DoD 결과보다 측선을 따라 나타낸 고도가 범의 성장을 더욱 잘 표현할 수 있다. 그림 15는 시기별 DEM에서 추출한 측선(그림 14 ㉔)의 Profile A, B, C)이다. x 축은 측선의 길이, y 축은 측선의 높이를 나타낸다. 측선 A-A'는 -1m 이하에서 변동이 거의 나타나지 않았으며, -1m 부근에서 다소 퇴적된 것으로 나타났다, 그 이상의 높이에서는 미세한 퇴적 경향을 보인다. 측선 B-B'는 저조간석지 부근에서 침식이 되고 2~3m 부근에서 퇴적, 이후엔 미세하게 침식되었거나 미변동된 양상을 보인다. 측선 C-C'는 저조간석지 부근에서 침식되고 2~3m 부근에서 퇴적 그리고 이후 미변동된 양상을 보였다. 세 측선 모두 2~3m 부근에서 퇴적된 것으로 나타났는데, 이는 곧 범의 성장을 의미한다.

3. 연구의 한계와 발전 방안

본 연구는 태풍 솔릭이 통과하면서 파도리 해빈에 어떠한 변화를 일으키는지 알아보기 위해 SfM 기반 영상 처리 과정을 거쳐 두 시기의 DEM과 정사영상을 제작하여 비교하였다. 그러나 태풍이 통과하기 직전·후에는

강풍과 강우 등 기상상황으로 인해 현장조사를 실시하지 못했다. 현장조사를 한 시기는 8월 16일과 9월 1일이며 태풍 솔릭이 한반도를 통과한 23일 저녁과 24일 새벽을 기준으로 앞으로 7일, 뒤로 8일 정도의 공백이 발생하였다. 이 사이에 조석과 파랑은 지속적으로 지형형성 작용을 진행했다.

Campaign 1 시기와 2 시기의 DEM 차연산 결과 전체적으로 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 그러나 Campaign 1 시기와 2 시기 DEM 차연산 결과가 이러한 것이며, 연구기간인 16일 사이에 매일의 변화가 어땠는지는 알 수 없다. 왜냐하면 연구기간 사이에 조위가 낮았지만 파고가 매우 높은 날이 출현한 적이 있었고, 강한 바람을 동반한 태풍이 통과하였기 때문에 이로 인한 해빈의 지형변화가 나타났을 것으로 예상되지만 그 이후 조석의 승강과 파랑의 작용에 의해 평형작용이 진행되면서 당시 일어난 지형변화를 완화시켰을 것이기 때문이다. 따라서 매일의 DEM을 구축하여 변화양상을 파악한다면 해당 이벤트로 인한 해안 지형변화를 파악할 수 있지만 모니터링 간격을 이렇듯 짧게 유지하는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

본 연구의 또 다른 한계점은 태풍 전후의 지형변화를 정사영상과 DEM으로만 해석했다는 점이다. 해빈 지형 변화는 현장조사를 통해 어떠한 입도의 퇴적물이 어떻게 이동·침식·퇴적되었는지 분석할 필요가 있지만 본 연구에서는 이를 시간과 인력의 한계로 인해 수행할 수 없었다. UAS 기반의 해빈 모니터링은 시간적·투입되는 인원 측면에서 매우 효율적인 연구방법이지만 실제 해빈 상의 퇴적물 분석을 하기에는 여전히 해상도가 만족스럽지 못하다. 향후 퇴적물의 입도 분석을 동시에 수행한다면 해빈 지형변화를 설명하는데 있어 매우 중요한 자료가 될 것이다.

V. 결론

본 연구에서는 태풍 솔릭이 파도리를 통과하기 전·후의 DEM을 UAS 기반으로 구축했다. 우선 SfM 알고리즘을 활용하여 2차원 드론 항공사진을 point cloud로 제작하였다. 3차원 모델(point cloud)의 정확도는 두 시기 모두 약 3cm급으로 제작되어 매우 높은 정확도를 보였다. point cloud를 DEM으로 보간하여 제작하였고 이를 차연산(DoD)한 결과를 해빈 지형변화 분석에 활용하였다.

두 시기의 DEM을 차연산한 결과, 체적은 약 60m³이 감소되어 매우 미미한 체적 변화를 보였다. 전체적인 체적은 변화량이 극소했지만 DoD 결과 해빈 내에서는 침식과 퇴적된 부분이 구분되었다. 인위적 간섭이 나타난 일부분을 제외하면 침식과 퇴적은 대부분 -0.4m~0.4m 구간에서 발생했다.

연구기간 내에 태풍 솔릭이 한반도를 통과했으며, 태풍 솔릭 전 시기에도 강풍이 불어 파도가 높은 기간이 있었으나 해당 기간에 조위가 낮아 파도리 해빈의 지형변화 양상은 크지 않았다. 결과적으로 연구기간 동안은 저파랑 환경이 우세하여 해발고도 약 3m 부근에서 범이 성장하고 커습이 발달하였다.

기존 해빈 지형변화 모니터링은 LiDAR나 GNSS, 토탈 스테이션을 통해 획득한 자료를 활용하였다. 반면, 본 연구는 기존 연구방법에 비해 상대적으로 저렴하고 시공간 해상도를 탄력적으로 운용할 수 있다는 장점을 이용하여 UAS 기반의 DEM 분석을 통해 단기간의 해빈 지형변화를 모니터링하였다. 본 연구는 연구자가 원하는 시기의 자료를 만들 수 있다는 점에서 의의가 크다고 생

각되며, 이러한 연구방법이 다른 해빈 모니터링에도 사용될 수 있다면 기존 연구방법에 비해 시간과 비용, 노력을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김성환, 2012, “한국의 지형학 연구 -해안지형 일반,” 한국지형학회지, 19(1), 1-15.
- 김장수, 2017, “해식에 침식률 모니터링을 위한 무인항공기 활용 가능성 평가,” 한국사진지리학회지, 27(2), 1-13.
- 김찬웅·신영호·유근배, 2015, “겨울철 서해안 사취형 해빈의 지형과 퇴적물 특성의 변화 -안면도 백사장 해빈을 중심으로-,” 국토지리학회지, 49(1), 117-131.
- 박정원·오선관·서승직·서종철, 2012, “VRS/RTK GPS 측량을 통한 태안해안국립공원 해빈과 해안사구의 지형변화 -학암포와 안면 해안을 사례로-,” 한국지형학회지, 19(2), 161-172.
- 신대섭·서종철, 2011, “지상 라이다를 이용한 단기간 해빈과 해안사구의 지형변화 연구,” 한국지형학회지, 18(4), 283-296.
- 우한별·장동호, 2010, “다중시기 항공사진과 현장조사를 통한 해안침식 변화 연구: 태안반도를 사례로,” 한국지형학회지, 17(4), 71-83.
- 유재진·박현수·김동우·윤정호·손승우, 2018, “멀티 카메라와 SfM 기법을 활용한 해식에 모니터링 적용가능성 평가,” 한국지형학회지, 25(1), 67-80.
- 유재진·박현수·양윤정·장동호, 2016, “해안지역의 시계열 지형변화분석을 위한 UAS 활용가능성 평가,” 한국지형학회지, 23(4), 113-126.
- 유재진·손승우·박현수·전형진·윤정호, 2017, “카메라 검정 방법과 내부표정 요소 적용에 따른 UAS 기반의 DSM 정확도 평가,” 대한원격탐사학회지, 33(5-3), 787-798.
- 유형석·김규한·정의진, 2008, “전촌-나정해안의 해안침식 원인분석,” 한국해양해양공학학회논문집, 20(6), 611-620.
- 이원영·성효현, 2009, “혼합해빈의 퇴적물 분포 특성과 미지형 경관변화 -태안해안국립공원 파도리 해빈을 중심으로-,” 한국지형학회지, 20(4), 1-13.

- 장동호·김만규, 2009, “안면도 해안지형의 생태보존권역 설정에 관한 연구,” *한국사진지리학회지*, 19(2), 49-67.
- 최경아·이임평, 2016, “무인항공측량을 통한 해안 지형 모델링의 정확도 분석,” *대한원격탐사학회지*, 32(6), 657-672.
- 최광희·공학양·정성혁·박성민·이수용, 2016, “드론 기반 측량을 활용한 강릉 하사동 사빈지형 변화 탐지,” *한국지형학회지*, 23(4), 101-112.
- 한국동력자원연구소, 1982, 「지질도폭 설명서 -서산·모항- 1:50,000, 한국동력자원연구소.
- 한민, 2018, “한반도 자갈 해빈의 지형 특성 및 퇴적물 이동 추적 연구,” 서울대학교 박사학위논문.
- 홍현정·최철웅·전성우, 2006, “GPS, GIS 기법을 활용한 태풍 후 해안대 해빈지형의 3차원 변화 탐지 및 분석,” *한국지리정보학회지*, 9(3), 82-92.
- Bertoni, D. and Sarti, G., 2011, On the profile evolution of three artificial pebble beaches at Marina di Pisa, Italy, *Geomorphology*, 130(3-4), 244-254.
- Long, N., Millescamp, B., Guillot, B., Pouget, F., and Bertin, X., 2016, Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery, *Remote Sensing*, 8(5), 387 (doi: 10.3390/rs8050387).
- Pye, K. and Blott, S.J., 2016, Assessment of beach and dune erosion and accretion using LiDAR: Impact of the stormy 2013-14 winter and longer term trends on the Sefton Coast, UK, *Geomorphology*, 266, 146-167.
- Sherman, D.J., Orford, J.D., and Carter, R.W.G., 1993, Development of cusp-related, gravel size and shape facies at Malin Head, Ireland, *Sedimentology*, 40(6), 1139-1152.
- Snavey, N., Seitz, S., and Szeliski, R., 2008, Modeling the world from internet photo collections, *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210.
- Tomašů, J., Mokroš, M., Saloň, Š., Chudý, F., and Tunák, D., 2017, Accuracy of photogrammetric UAV-based point clouds under conditions of partially-open forest canopy, *Forest*, 8(5), 151 (doi: 10.3390/f8050151).
- Turner, I.L., Harley, M.D., and Drummond, C.D., 2016, UAVs for coastal surveying, *Coastal Engineering*, 114, 19-24.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M., 2012, ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, 300-314.
- 국립해양조사원 안흥 조위관측소, http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do
- 기상청 기상자료개방포털 신진도 파고부이, <https://data.kma.go.kr/cmnn/main.do>
- 교신 : 손승우, 30147, 세종특별자치시 시청대로 370, 세종특별자치시 연구단지 B동 8-11층, 한국환경정책·평가연구원 (이메일: swson@kei.re.kr)
- Correspondence : Seung Woo Son, 30147, 8-11F, Bldg. B, 370 Sicheong-daero, Sejong Special Self-Governing City, Korea, Korea Environment Institute (Email: swson@kei.re.kr)
- 투 고 일: 2018년 11월 25일
심사완료일: 2018년 12월 6일
투고확정일: 2018년 12월 12일

