Adaptive TIN 필터링을 이용한 화성 계곡의 체적 추정

Estimating Volume of Martian Valleys using Adaptive TIN Filtering Algorithm

정재훈* · 허 준** · 김창재*** · 류웨이****

Jung, Jae Hoon · Heo, Joon · Kim, Chang Jae · Luo, Wei

要 旨

화성의 계곡망 추출 및 체적 분석은 과거 화성에 존재했을 지표수의 흐름을 규명할 수 있는 중요한 정보를 제공하고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 기존의 이미지 프로세싱 분석을 대체할 수 있는 포인트 클라우드 기반의 지형 필터링 알고리즘을 사용한 새로운 방법론을 제시하였다. 우선 추출하고자 하는 계곡을 지면으로부터 분류하기 위해 대상지역에서 취득한 포인트 클라우드 자료의 고도값을 역전한 뒤, Adaptive TIN 필터링을 적용하였다. 분류한 지면과 대상물의 포인트 클라우드로부터 각각 ground DEM과 object DEM을 생성하고, 격자 단위로 두 DEM 간의 고도차와 object DEM으로부터 취득한 계곡 면적을 곱함으로써 최종적으로 계곡의 체적을 추정하였다. 화성 Tuscaloosa 분화구에 인접한 두 계곡을 대상으로 추정된 체적의 총 합은 약 $1.41 \times 10^{11} \text{m}^3$ 으로 Tuscaloosa 분화구 내 퇴적물의 체적 및 기존의 이미지 프로세싱 기법인 BTH 결과와 각각 12% 및 16%의 차이를 나타내었다

핵심어 : 화성 계곡, 포인트 클라우드, TIN, 필터링, BTH, 수치표고모형

Abstract

The investigation of valley networks and their volume provide important information about past water activities on Mars. As an alternative of conventional image processing methods, terrain filtering algorithm using pointcloud data is suggested in this study. First, the topography of pointcloud is inverted so that the valleys become positive features and the algorithm is then applied to distinguish the valleys from the surface. Ground DEM and object DEM are generated from both the valleys and the surface pointcloud then the volume of valleys is estimated by multiplying the height difference between the surface with valleys and the area of valleys based on grid cellsize. In the test of valleys adjacent to Tuscaloosa crater, the total volume of valleys was estimated to be $1.41 \times 10^{11} \text{m}^3$ with the difference of 12% and 16% compared with the infill volume of Tuscaloosa crater and BTH result respectively.

Keywords : Martian valley, pointcloud, TIN, filtering, BTH, DEM

1. 서 론

지난 수십 년간 과학자들은 지구와 행성에서 생물체의 존재를 찾기 위한 노력을 지속해왔다. 특히 액체 상태의 물은 이러한 미생물의 존재를 증명할 수 있는 결정적인 증거가 될 수 있으나, 매우 좁은 범위의 온도와 압력 하에서만 존재할 수 있으므로 태양계 내에서 지구와 가장 비슷한 환경을 지닌 화성을 대상으로 물의 흔적을 찾기 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Jakosky and Mellon, 2004). 그리고 지난 1964년 미 항공우주

국(NASA)이 최초로 Mariner 4호를 화성 궤도에 근접 시키는데 성공한 이래 화성탐사를 위한 세계 각국의 노력이 이어져 왔으며, 그 결과 극지방에 분포하는 대규모 얼음 층을 비롯해서 유수의 흐름에 의해 형성된 것으로 판단되는 다수의 퇴적층과 계곡이 발견되었다(김경자, 2009).

그 중에서도 화성의 계곡은 과거 따뜻하고 습윤한 기후 하에 존재했을 화성의 지표수 흐름을 규명할 수 있는 중요한 정보를 제공해 주므로(Luo and Stepinski, 2009), 이를 분석하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있

2012년 5월 11일 접수, 2012년 9월 6일 채택

* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정(lionheart_kr@yonsei.ac.kr)

** 교신저자 · 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수(jheo@yonsei.ac.kr)

*** 정희원 · 상명대학교 건설시스템공학과 조교수(cjkim@smu.ac.kr)

**** Professor, Dept. of Geography, Northern Illinois University(wluo@niu.edu)

다(Baker and Milton, 1974; Carr, 1995; Jaumann et al., 2005; Molloy and Stepinski, 2006; Andrews-Hanna and Phillips, 2007). 특히 계곡의 체적(volume of valleys)은 계곡을 따라 흐른 유수의 근원(source) 및 체적(volume of water)을 유추할 수 있을 뿐만 아니라 주변 퇴적지와와의 체적 비교를 통해 궁극적으로 화성에 물이 존재했음을 증명할 수 있는 결정적인 증거가 될 수 있으며, 대표적으로 Sediment Transport Model을 활용한 연구(Goldspiel and Squyres, 1991)와 Viking 위성의 화성표면 영상을 이용한 체적 추정 연구(Gulick, 2001)가 보고되고 있다. 그러나 기존의 계곡 체적 추정 연구들은 데이터 취득의 한계로 인해 계곡의 깊이(depth)를 추정하기 위해서는 계곡 경사나 형태에 대한 가정이 필요했으며, 이로 인한 추정오차가 존재했었다(Gulick, 2001).

한편, NASA는 2000년도에 들어서면서 Mars Data Analysis Program의 일환으로 MGS(Mars Global Surveyor)와 MO(Mars Odyssey)와 같은 일련의 화성 매핑 위성들을 성공적으로 발사해 왔으며, 이들 위성들로부터 취득한 데이터를 이용해 화성 표면 분석을 위한 다양한 프로젝트를 진행해 오고 있다. 특히 MGS 위성은 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) 센서를 통해 화성 전역에 대한 3차원 포인트 클라우드 데이터를 취득하였으며, 최근 연구에서 Luo 등(2011)은 이러한 MOLA 자료로부터 생성된 DEM과 이미지 프로세싱 기법인 BTH(Black Top Hat) 알고리즘을 이용한 화성 Licus 지역의 계곡망 추출 및 체적 추정 연구를 제시하였다. BTH 알고리즘은 Closing function을 적용한 DEM을 Dilation DEM과 차분함으로써 계곡과 같은 함몰된 지형의 경계 및 부피를 추정하는 방법으로 1978년 Meyer에 의해 최초로 개발된 이래 최근까지 프랑스 및 칠레 등지의 분지를 대상으로 성공적인 연구 사례가 보고되고 있다(Rodriguez et al., 2002; Riquelme et al., 2008).

본 연구에서는 화성 계곡의 효과적인 추출 및 체적 계산을 위해 기존의 이미지 프로세싱 기법이 아닌 라이다 포인트 클라우드 데이터를 직접적으로 활용할 수 있는 지형 필터링 기법의 사용 방안을 제안하고자 한다. 다만, 본 연구에서는 데이터 취득의 한계로 MOLA 포인트 클라우드를 직접적으로 활용할 수 없었고, 간접적인 방법(DEM to point)을 통해 포인트 클라우드를 생성하여 실험을 수행하였다. 연구대상지역으로는 화성 Tuscaloosa 분화구 주변의 두 계곡을 대상으로 하였으며, 두 계곡을 대상물(object)로 분류하여 추출하기 위해 포인트 클라우드의 고도값(Z)을 역전하는 과정을 수

행하였다. 한편, 이러한 대상물과 지면(ground)을 분류하기 위한 지형 필터링 기법은 현재까지 매우 다양한 방법들이 개발되어 왔으며(Sithole 등, 2004), 본 연구에서는 그 중에서도 Axelsson(2000)이 개발한 Adaptive TIN 필터링 알고리즘을 사용하였다. 마지막으로 기존의 BTH 결과와 더불어 인접한 Tuscaloosa 분화구 내 퇴적물 체적과의 비교를 통해 본 연구결과의 효용성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 Adaptive TIN 필터링

항공라이다시스템의 활용성이 점차 높아짐에 따라 고밀도 포인트 클라우드 데이터를 이용한 지형모델링 연구 또한 점차 증가하고 있다. 이때, 라이다 데이터로부터 지형 정보만을 추출하기 위해 대상점과 지면점을 분류하는 과정을 지형 필터링이라고 하며, 황세란과 이임평(2011)은 이러한 필터링 기법의 원리를 다음과 같이 크게 세가지로 분류하여 제시하였다. 우선 TIN 기반 필터링은 초기 TIN으로부터 초기 지면을 추정하고 이로부터 지면점을 점진적으로 추가하면서 지면점의 밀도를 높여가는 방법이며, robust 추정법 기반 필터링은 근사표면에 대한 잔차를 고려한 반복적인 robust 추정을 통해 지면을 분류해 내는 방법이다. 마지막으로 morphology 필터링은 윈도우를 설정하여 검사점에 인접한 점들에 대해 지역적인 연산을 수행하여 지면점 여부를 판단하는 방법으로 지면점을 분류한다(황세란 등, 2011).

본 연구에서는 그중에서도 비교적 구현이 용이하고, Sithole와 Vosselman(2004)의 지형 필터링 비교 연구에서 안정적인 성능을 나타낸 TIN 기반 필터링 방법 중 하나인 Adaptive TIN 필터링 알고리즘을 화성 계곡 추출에 사용하였다. Figure 1은 Adaptive TIN 필터링을 이용한 지면과 대상물의 분류 과정을 나타내고 있다. 우선 입력한 전체 포인트 클라우드 영역을 포함할 수 있는 경계를 고려하여 가상격자를 생성한다. 이때, 가상 격자의 크기는 기본적으로 추출할 대상물의 크기보다 크게 설정해야 하며, 본 연구에서는 연구 대상 지역에 포함된 두 계곡의 폭을 고려하여 가상격자를 10,000m로 설정하였다. 이후, 격자 내에서 최소 높이 값을 갖는 지면점을 추출하여 최초의 TIN을 구성하면, 다음 단계로 각 TIN 내에 포함된 포인트만을 검사점으로 추출하고 TIN 면과의 수직 거리(H) 및 세 꼭지점과의 각도(α , β , γ)를 계산한다(Figure 2). 모든 검사점에 대해서 거리 및 각도의 계산이 끝나면 임계값 이하

Figure 1. Flowchart of Adaptive TIN filtering

Figure 2. Calculation of distance (H) and angle (α , β , γ) for a data point during TIN densification (Axelsson, 2000)

의 검사점을 지면, 임계값 이상의 검사점을 대상으로 분류하고, 지면으로 분류된 점을 이용하여 TIN을 재생성하게 된다. 보통 임계값은 모든 검사점의 수직 거리 및 세 각도의 히스토그램 상 중앙값(median)을 사용하나, 본 연구에서는 면적에 비해 상대적으로 고저 변화가 작은 연구대상지역에서 계곡을 대상으로 효과적으로 추출하기 위해 두 계곡 중 상대적으로 크기가 작은 소(小)계곡의 임계값을 1/6로, 크기가 큰 대(大)계곡의 임계값을 1/9로 보다 낮게 설정하였다. 또한 본 논문에서는 만약 검사점이 하나의 꼭지점에 근접할 경우 지면

에 가까운 점일 지라도 임계값 이상의 값을 나타내어 대상으로 분류되는 오류를 막기 위해 세 각도의 합을 임계값으로 설정하였다. 이러한 과정을 더 이상 지면으로 분류되는 검사점이 없을 때까지 반복하면서 TIN과 히스토그램을 갱신하고, 최종적으로 모든 포인트 클라우드를 지면점과 대상점으로 분류하게 된다(Axelsson, 2000).

이러한 Adaptive TIN 필터링 알고리즘을 이용한 화성 계곡의 체적 추정은 다음의 Figure 3과 같은 과정을 거치게 된다. 우선, 화성 계곡의 체적은 계곡을 대상으로 분류하기 위해 실제 지형의 고도값을 역전하고, 필터링 알고리즘을 적용시켜 분류한 대상물과 지면과의 높이차를 계곡 면적과 곱함으로써 추정된다. Figure 3(a)는 포인트 클라우드로부터 복원된 실제 화성계곡의 지형을 나타내며, 최저점과 최고점의 합(상수)에서 고도값($f(x)$)을 차분함으로써 Figure 3(b)와 같이 계곡이 대상으로 역전된 형상을 얻을 수 있다. 그리고 Adaptive TIN 필터링을 적용하여 포인트 클라우드를 지면과 대상으로 분류하고(Figure 3(c)), ground DEM과 object DEM을 생성한다. 이 때, ground DEM의 경우에는 보간법을 적용하여 대상으로 분류된 공백 지역의 고도값을 주변 점들을 통해 추정해야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 중심으로부터의 거리 역산에 의해 가중치를 부여하는 IDW(Inverse Distance Weighting) 보간법을 사용하였다. 최종적으로 Figure 3(d)와 같이 ground DEM과 object DEM의 높이차를 통해 계곡의 깊이(depth)를 구할 수 있으며, object DEM의 면적과 곱함으로써 계곡의 체적을 추정할 수 있다.

Figure 3. Estimation of valley volume

2.2 BTH 알고리즘

BTH 알고리즘은 이미지 프로세싱에서 사용되는 모폴로지 연산 기법 중 하나로써, 영상내에 존재하는 dark feature를 효과적으로 추출할 수 있다. 특히 Rodriguez(2002), Riquelme(2008), Luo(2011) 등은 이러한 BTH 알고리즘을 DEM에 적용하고 계곡 추출 및 체적 추정에 활용하여 그 효용성을 입증한 바 있다. 다음의 Figure 4는 이러한 BTH 알고리즘의 원리를 나타내고 있다. DEM은 일정 크기의 격자 기반으로 음영 기록을 통해 지형고도를 나타내는 영상이며, 고도가 높은 지형은 밝은색으로, 계곡과 같이 상대적으로 고도가 낮은 지형은 어두운색으로 대상영역을 표현한다. 다음의 Figure 4(a) 및 Eq. (1)에서는 각각 현재의 침식된 지형을 나타내는 present-day DEM을 위치(x)에 따른 고도의 함수 $f(x)$ 로 나타내고 있다. 한편, BTH는 모폴로지 기법 중 하나인 클로징(closing)을 통해 탐색영역(λ)에서 검색한 최고점과 최저점의 정보를 바탕으로 dilation 및 erosion을 수행하고 Figure 4(b)와 같은 침식 이전의 pre-incision DEM을 추정할 수 있다. 이러한 클로징 기법을 통해 추정된 지형은 Eq. (1)에서 위치(x)에 따른 새로운 고도의 함수 $C^\lambda(X)$ 로 나타낼 수 있으며, Figure 4(c)와 같이 $f(x)$ 와의 차분을 통해 계곡의 체적을 추정할 수 있다. 최종적으로, Eq. (1) 및 Figure 4(d)와 같이 임계치(t) 이내의 값은 노이즈로 판명하여 대상 영역에서 제거한다(Rodriguez et al., 2002; Riquelme et al., 2008; Luo et al., 2011).

$$BTH = \{x : C^\lambda(X) - f(X) \geq t\} \quad (1)$$

Figure 4. BTH algorithm

2.3 분화구 체적 추정

본 연구에서는 BTH 알고리즘 외에 Adaptive TIN 필터링을 통한 체적 추정 결과의 검증에 위한 또 다른 방법으로 인접한 분화구를 대상으로한 퇴적물 체적 추정 연구를 수행하였다. 유수의 흐름으로 형성된 계곡과 인접한 분화구 퇴적물간의 상관관계는 Fassett와 Head(2005)에 의해 연구된 바 있으며, 특히 본 연구의 대상지역인 Tuscaloosa 분화구는(Figure 5(a)) 인접한 두 계곡(Figure 5(b), 5(c))에 비해 저고도에 위치해 있는 반면, 분화구내에 모인 유수가 빠져나갈만한 출구는 존재하지 않는다. 이 경우 계곡의 침식물이 하구와 인접한 저고도 지형인 분화구에 퇴적됐을 가능성이 높으며, 이미 지난 1998년 Forsythe와 Blackwelder의 연구에서 이러한 분화구가 화성에서만 144개 이상 존재하는 것으로 확인되었다. Howard(2007)는 이러한 분화구 내 퇴적물로 인한 체적 변화를 추정하는 방법으로 Eq. (2)와 같은 멱함수를 이용한 방법론을 제시하였다.

$$\Delta H = (H_2 - H_1) + H_1 (2r/D)^m \quad (2)$$

Eq. (2)에서 H_1 은 분화구의 깊이, H_2 는 분화구 테두리 상의 최고점, r 은 분화구 중심으로부터의 거리, D 는 분화구의 직경, 그리고 m 은 상수로 2.5의 값을 가진다. Eq. (2)로부터 생성 초기 분화구(modeled fresh crater)의 고도값인 ΔH 를 추정할 수 있으며, 이를 침식물이 퇴적된 현재의 분화구(current filled crater)와 차분함으로써 최종적으로 분화구 내에 쌓인 퇴적물의 체적을 추정할 수 있다.

3. 자료 처리

3.1 연구대상지역 및 자료취득

본 연구에서는 화성 Tuscaloosa 분화구(중심점 위도 0° , 경도 28.75°)와 연결된 두 계곡을 대상으로 계곡 추출 및 체적 추정 연구를 수행하였다. 두 계곡은 소계곡과 대계곡으로 분류할 수 있으며, 데이터 처리의 효율성을 높이기 위해 Figure 5와 같이 소계곡(b)과 대계곡(c)에 해당하는 데이터만을 추출하여 연구를 진행하였다.

연구대상지역에 대한 포인트 클라우드 자료의 취득은 MGS 위성의 MOLA 센서로부터 취득한 DEM을 이용하였다. MGS 위성은 1996년 NASA에서 화성의 표면과 대기, 자기장 등에 대한 자료 수집을 목적으로 발사하였으며, 1997년 화성 궤도에 진입한 이래 지난 2007년까지 화성 표면에 대한 매핑 자료를 전송해왔다.

Figure 5. Study Area: (a) Tuscaloosa crater (b) Small valley, (c) Large valley

Table 1. MOLA Instrument Specifications (Smith et al., 2001)

Parameter	Specification
Mass	23.8 kg
Power consumption	34.2 W
<i>Transmitter</i>	
Laser type	diode pumped, Q-switched, Cr:Nd:YAG
Wavelength	1.064 μm
Pulse rate	10 Hz
Energy	48 mJ pulse ⁻¹
Laser divergence	420 μrad
Pulse length	8 ns
<i>Receiver</i>	
Mirror	50-cm parabolic
Detector	silicon avalanche photodiode
Field of view	850 μrad
<i>Electronics</i>	
Microprocessor	80C86
TIU frequency	99.996 MHz
Filter channel widths	20, 60, 180, 540 ns
Date rate	618 bits s ⁻¹ continuous
<i>Resolution</i>	
Maximum ranging distance	787 km
Range resolution	37.5 cm
Vertical accuracy	1 m
Surface spot size	168 m
Along-track shot spacing	300 m
Across-track shot spacing	4 km

MOLA 센서는 1.064 μm 의 레이저 신호를 전송하고 산란된 신호로부터 MGS와 화성표면의 거리를 측정하며, 절대수직 정확도는 1m 이내로 높은 정확도를 갖고 있지만 그 해상도는 along-track으로 300m, Across-track으로는 4km로 낮은 편이다. Table 1은 이러한 MOLA

(a) Pointcloud of Small valley

(b) Pointcloud of Large valley

(c) Inversed pointcloud of Small valley

(d) Inversed pointcloud of Small valley

Figure 6. Pointcloud data of study area

센서의 제원을 나타내고 있다(윤준희 등, 2010; Smith et al., 2001).

본 연구에서는 데이터 취득의 한계로 인해 대상지역의 라이다 원시데이터가 아닌 DEM 자료를 활용하였으며, 그 격자크기는 약 463m이다. 한편, Adaptive TIN 필터링 알고리즘의 적용을 위해서는 취득한 DEM을 포인트 클라우드 자료로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 위해 연구대상지역에 해당하는 DEM의 격자별 중심 좌표를 포인트정보(X , Y , Z)로 재변환하였고, Figure 3(b)와 같이 변환된 포인트의 고도값(Z)을 역전하는 처리를 수행하였다. 다음의 Figure 6(a)와 Figure 6(b)는 각각 DEM으로부터 추출한 소계곡과 대계곡의 포인트 클라우드 측면을 나타내고 있으며, Figure 6(c)와 Figure 6(d)는 각각 역전 후의 소계곡과 대계곡 포인트 클라우드 형태를 나타내고 있다. 역전된 포인트 클라우드에서는 기존 포인트 클라우드에서 움푹 파인 형상으로 나타난 계곡들이 높은 산맥으로 재형성된 것을 확인할 수 있으며, 이후 Adaptive TIN 필터링을 통

해 대상물과 지면을 분류하고 object DEM 및 ground DEM을 생성하였다. 본 연구에서 사용한 Adaptive TIN 필터링 알고리즘의 구현 및 DEM 생성에는 Microsoft Visual Studio 2010 C++를 이용하였다.

3.2 화성 계곡의 체적 산출

다음의 Figure 7은 소계곡과 대계곡의 ground DEM과 object DEM을 나타낸 것이다. Figure 7(a)와 7(b)에서 대상으로 분류된 공백 지역은 중심점으로부터 반경 20 픽셀을 포함한 IDW 보간법을 통해 추정하였으며, 고저 변화는 소계곡이 최소 608m에서 최대 1054m, 대계곡이 최소 473m에서 최대 1116m로 나타났다. 한편, object DEM으로 분류된 지역에는 계곡 이외에도 주변 분화구나 각종 노이즈가 포함되어 있으며, 이들을 제거하기 위해 상용 소프트웨어인 ERDAS에서 제공하는 Clump-Sieve 모델을 이용하였다. 우선 추출한 초기 object DEM을 이진영상으로 변환하고 Clump 처리를 통해 영상 내에서 연속된 픽셀 그룹들을 정의한다. 이

(a) Ground DEM of Small valley

(b) Ground DEM of Large valley

(c) Object DEM of Small valley

(d) Object DEM of Large valley

Figure 7. DEM results (unit: m)

후, Sieve 과정을 통해 Clump 처리를 거친 각 픽셀 그룹을 사용자가 설정한 픽셀 숫자의 임계값으로 필터링해서 임계값 이상의 픽셀 그룹만을 추출하게 된다. 본 연구에서는 각 대상지역내에서 소계곡과 대계곡만을 추출할 수 있도록 임계값을 조정하였고, 추출된 계곡의 이진영상을 초기 object DEM과 비교하여 고도값을 재입력하였다. 최종적으로 추출된 계곡은 각각 소계곡이 Figure 7(c), 대계곡이 Figure 7(d)와 같으며, 이때의 고저 변화는 소계곡의 경우 최소 584m에서 최대 1394m, 대계곡의 경우 최소 760m에서 최대 1406m로 나타났다. 이후, 각 연구대상지역의 ground DEM과 object DEM과의 차분을 통해 격자 단위로 고도차를 구한뒤, object DEM의 면적을 곱함으로써 두 계곡의 체적을 추정하였다. 그 결과, 소계곡의 체적은 약 $3.6 \times 10^{11} \text{m}^3$, 대계곡의 체적은 약 $1.05 \times 10^{11} \text{m}^3$ 으로 추정되었으며, 총 계곡의 체적은 $1.41 \times 10^{11} \text{m}^3$ 으로 나타났다.

한편, 추정한 계곡 체적의 정확도 분석을 위해서 BTH 알고리즘 및 Tuscaloosa 분화구 분석 결과와 체적 비교를 수행하였다. 과거 화성에 물이 흐를 당시, 각 계곡에서 침식된 토사는 하구에 인접한 분화구에 퇴적됐을 것으로 추정되고 있으며(Forsythe and Blackwelder, 1998; Fassett and Head, 2005), 대상지역인 Tuscaloosa 분화구 내 퇴적물의 체적은 약 $1.26 \times 10^{11} \text{m}^3$ 으로 본 연구를 통해 추정된 계곡의 체적과 12% 정도의 차이를 나타내었다. 또한 동일 지역을 대상으로 기존 BTH 알고리즘의 체적 추정 결과는 약 $1.22 \times 10^{11} \text{m}^3$ 로 본 연구 결과와의 차이는 16% 정도로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 과거 화성 표면에서의 유수 흐름을 증명하기 위해 MGS MOLA 센서로부터 취득한 포인트 클라우드 자료와 Adaptive TIN 필터링 알고리즘을 사용한 계곡 추출 및 체적 추정 방법을 제시하였다. 그 결과, 화성 Tuscaloosa 분화구와 인접한 두 계곡을 대상으로 추정된 체적은 약 $1.41 \times 10^{11} \text{m}^3$ 으로 정확도 분석을 위해 비교된 분화구 내 퇴적물의 체적 및 기존 BTH 결과에 비해 각각 12%에서 16% 정도 과대 추정된 결과를 나타내었다. 이러한 차이는 분화구에 인접한 계곡 입구의 경계구분이 모호하다는 점과 낮은 DEM 해상도(약 463m), 그리고 DEM을 포인트 클라우드 변환시 전파된 오차에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 고해상도 영상과의 비교를 통한 정확한 경계 설정과 고해상도의 포인트 클라우드 자료의 취득이 가능하다면

보다 효과적으로 계곡의 체적을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 우주핵심기술개발사업 “NASA의 GRACE, Envisat Altimeter, SAR 자료를 이용한 비접근 지역의 수위 측정 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김경자, 2009, 화성 우주 프로그램에 관한 현재까지 연구의 개요, 암석학회지, 한국암석학회, 제 18권, 제1호, pp. 49-65.
2. 윤준희, 박정환, 2010, MOC-NA 영상의 영역기준 영상 정합, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 4호, pp. 463-469.
3. 황세란, 이임평, 2011, 산림지형 모델링을 위한 항공 라이다 데이터의 지면점 필터링 비교분석과 정확도 개선, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 29권, 제 6호, pp. 641-650.
4. Andrews-Hanna, J.C. and Phillips, R.J., 2007, Hydrological modeling of outflow channels and chaos regions on Mars, Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union, Vol. 112, E08001, doi:10.1029/2006JE002881.
5. Axelsson, P., 2000, DEM Generation from laser scanner data using adaptive TIN models, Proc. of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol. 33-B4, pp. 110-117.
6. Baker, V.R. and Milton, D.J., 1974, Erosion by Catastrophic Floods on Mars and Earth, Icarus, Elsevier, Vol. 23, No.1, pp. 27-41.
7. Carr, M.H., 1995, The Martian drainage system and the origin of valley networks and fretted channels, Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union, Vol. 100, No. E4, pp. 7479-7507.
8. Fassett, C.I. and Head, J.W. 2005, Fluvial sedimentary deposits on Mars: Ancient deltas in a crater lake in the Nili Fossae region, Geophysical Research Letters, American Geophysical Union, Vol. 32, L14201, doi:10.1029/2005GL023456.
9. Forsythe, R.D. and Blackwelder, C.R., 1998, Closed drainage crater basins of the Martian highlands: Constraints on the early Martian hydrologic cycle,

- Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union, Vol. 103, No. E13, pp. 31,421-31,431.
10. Gulick, V.C., 2001, Origin of the valley networks on Mars: a hydrological perspective, *Geomorphology*, Elsevier, Vol. 37, No. 3, pp. 241-269.
 11. Goldspiel, J.M. and Squyres S.W., 1991, Ancient Aqueous Sedimentation on Mars, *Icarus*, Elsevier, Vol. 89, No. 2, pp. 392-410.
 12. Howard, A.D., 2007, Simulating the development of martian highland landscapes through the interaction of impact cratering, fluvial erosion, and variable hydrologic forcing, *Geomorphology*, Elsevier, Vol. 91, pp. 332-363.
 13. Jakosky, B.M. and Mellon, M.T., 2004, Water on Mars, *Physics Today*, American Institute of Physics, pp. 71-76.
 14. Jaumann R., Reiss, D., Frei, S., Neukum, G., Scholten, F., Gwinner, K., Roatsch, T., Matz, K.D., Mertens, V., Hauber, E., Hoffmann, H., Köhler, U., Head, J.W., Hiesinger, H. and Carr, M.H., 2005, Interior channels in Martian valleys: Constraints on fluvial erosion by measurements of the Mars Express High Resolution Stereo Camera, *Geophysical research letters*, American Geophysical Union, Vol. 32, L16203, doi:10.1029/2005GL023415.
 15. Luo, W., Howard, A.D. and Trischan J., 2011b, Estimating incision depth in Martian valleys: comparing two methods. 42nd Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1418.pdf>
 16. Luo, W. and Stepinski, T.F., 2009, Computer-generated global map of valley networks on Mars, American Geophysical Union, *Journal of Geophysical Research- Planets*, Vol. 114, doi:10.1029/2009JE003357.
 17. Molloy I. and Stepinski T.F., 2007, Automatic mapping of valley networks on Mars, *Computers & Geosciences*, Elsevier, Vol. 33, No. 6, pp. 728-738.
 18. Riquelme, R., Darrozes, J., Maire, E., Herail, G. and Soula, J.C., 2008, Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a digital elevation model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implication for the Neogene climate of the Atacama Desert, *Revista Geologica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería*, Vol. 35, No. 1, pp. 105-121.
 19. Rodriguez, F., Maire, E., Courjault-Rade, P. and Darrozes, J., 2002, The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous watershed (Estibere Watershed, Central Pyrenees), *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union, Vol. 29, No. 6.
 20. Sithole, G. and Vosselman, G., 2004, Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Elsevier, Vol. 59, pp. 85-101.
 21. Smith, D.E., Zuber, M.T., Frey, H.V., Garvin, J.B., Head, J.W., Muhleman, D.O., Pettengill, G.H., Phillips, R.J., Solomon, S.C., Zwally H.J., Banerdt, W.B., Duxbury, T.C., Golombek, M.P., Lemoine, F.G., Neumann, G.A., Rowlands, D.D., Aharonson, D., Ford, P.G., Ivanov, A.B., Johnson, C.L., McGovern, P.J., Abshire, J.B., Afzal, R.S. and Sun, X., 2001, Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars, *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, Vol. 106, No. E10, pp. 23, 689-23, 722.