

## 공간통계기법을 이용한 하논화산의 화구호 복원

최광희\* · 윤광성\*\* · 김종욱\*\*\*

### Reconstruction of the Volcanic Lake in Hanon Volcano Using the Spatial Statistical Techniques

Kwang Hee Choi\*, Kwang Sung Yoon\*\*, Jong Wook Kim\*\*\*

**요약** : 제주도 남쪽에 위치한 하논화산은 분화구에 경작지로 이용되고 있는 습지가 있다. 이 습지퇴적층을 조사한 선행 연구자들은 과거에는 이 퇴적층이 마르호였을 것이라 추정하였다. 습지퇴적층의 심도는 굴절법 탄성과 탐사를 통해 5~14m로 추정되었으며, 이는 선행 연구결과와 대체로 일치한다. 그러나 이러한 자료들은 특정구간에 대한 정보일 뿐으로, 분화구내 퇴적층의 공간적 특성을 파악하기는 어렵다. 본 연구에서는 탄성과 탐사를 통해 확보한 습지퇴적층의 심도를 바탕으로, 공간통계기법을 이용하여 화구호를 가상적으로 복원하였다. 화구호의 복원과정은 다음과 같다. 우선, 선행 연구자료와 본 연구의 탐사자료를 바탕으로 기본 데이터를 구축하고, 이를 IDW와 크리깅을 이용하여 내삽하였다. 이렇게 내삽된 자료를 다시 현재의 지형면과 연산하여 고지형면을 복원하였으며, 여기에 시추자료에 근거한 수문의 고도를 이용하여 화구호의 경계를 추출하였다. 복원된 화구호는 중앙 분석구의 북쪽에 반달 형태로 존재하였으며, 평균 수심은 약 5m, 최대 수심은 약 13m에 이르렀을 것으로 추정되었다. 아울러, 내삽기법에 따라 미세한 차이는 있으나, 화구호의 면적은 184,000~190,000m<sup>2</sup>, 부피는 약 869,760m<sup>3</sup>로 추정되었다. 분화구 생성직후부터 지속적인 퇴적작용이 있었기 때문에, 복원된 화구호가 특정 시기의 호수를 직접 가리키지는 않지만, 분화구의 내부 형태와 마르호의 퇴적 및 변화과정을 밝히는 데 중요한 단서가 된다.

**주요어** : 하논분화구, 응회환, 마르, 탄성과 탐사, IDW, 크리깅

**Abstract** : The Hanon volcano located in the southern part of Cheju Island, Korea has a wetland in its crater being used as a farmland. Previous researchers presumed this wetland was a maar lake in the past. Based on the seismic refraction method, the wetland sediment layer was estimated between 5 to 14 m deep, which is mostly in accordance with previous researches. However, this shows only the depths at some sites, not representing the whole spatial distribution. This study is an attempt to reconstruct the volcanic lake in Hanon crater by applying the spatial statistical techniques based on the depth information from the seismic survey and known data. The procedure of reconstruction is as follows: First, the depth information from the seismic survey and known data were collected, and it was interpolated by IDW and Ordinary Kriging method. Next, with the interpolation map and the present DEM, the paleo DEM was constructed. Finally, using the paleo lake level on core data, the boundary of volcanic lake was extracted from the paleo DEM. The reconstructed lake resembles a half-moon in the north of the central scoria cone. It is

\* 국립환경과학원 경관생태과 연구사(Researcher, Landscape and Ecology Division, National Institute of Environmental Research), geoist@me.go.kr

\*\* 국립환경과학원 경관생태과 연구원(Researcher, Landscape and Ecology Division, National Institute of Environmental Research)

\*\*\* 서울대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Seoul National University), kimjwk@snu.ac.kr

estimated that the lake was 5 m deep on average and 13 m deep at the deepest point. Although there are slight differences according to the interpolation techniques, it is calculated that the area of the lake was between 184,000 and 190,000 m<sup>2</sup>, and its volume approximately 869,760 m<sup>3</sup>. Because of the continuous deposition processes after the crater formation, the reconstructed volcanic lake would not indicate an actual lake at a specific time. Nevertheless, it offers a significant clue regarding the inner morphology and evolution of the crater.

Key Words : Hanon crater, tuff ring, maar, refraction seismics, IDW, kriging

## 1. 서론

하논화산은 제주도 서귀포시 호근동과 서홍동의 경계에 위치한 마르형 응회환(tuff ring with a maar crater)으로(윤석훈, 2006), 분화구 내에는 현재 경작지로 이용되고 있는 습지가 있다. 이 화산체는 최근 들어 습지의 존재가 알려지면서 습지 복원계획이 수립되는 등 관련단체와 학계를 비롯하여 국가적인 관심을 끌고 있다(서귀포시, 2004; 한국해양연구원, 2004). 특히, 습지퇴적층이 잘 보존되어 있고(정철환, 2004), 국내 최초로 남철석이 발견되었다는 보고가 있으며(이승현 등, 2003), 국내 최대의 마르형 분화구로 알려지는 등(윤석훈, 2004) 다방면으로 연구 가치가 높게 평가되고 있는 지역이다. 지리학계에서는 이미 박승필(1985, 2003)에 의해 '호근동 화구'로 소개된 적이 있다.

지금까지 하논화산에 대해서는 분화구의 형성과정 에 대한 연구를 비롯, 분화구의 지질 및 분화구 형성 연대를 밝히려는 연구, 습지퇴적층에 대한 연대측정, 고기후 및 고생물 연구, 테프라 연구, 습지 복원에 관한 연구들이 수행되어 왔다(박승필, 1985; Yatagai *et al.*, 2002; 이승현 등, 2003; Lee, S.H., 2004; 한국해양연구원, 2004; Fukusawa, 2004; 윤석훈 등, 2006). 한편, 전기비저항탐사(electrical resistivity survey)와 시추 등에 의해서 퇴적층의 심도가 일부 밝혀졌으며, 습지로서의 가치를 평가하기 위해 분화구내에 서식하는 생물상 및 지형·지질에 대해서도 여러 학자들에 의해 수행된 바 있다(서귀포시, 2004).

위와 같이 하논화산에 대해서는 국내외적으로, 민관 차원과 학문분야를 넘어 다각적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직까지 화산체의 형성과정과 분출시기는 여전히 논란의 여지가 있으며, 습지의 형성과정과 형성시기에 대해서도 일치된 결론은 없다. 또한 대부분

의 연구가 시추 조사를 통한 물질의 해석에 의존하고 있어, 분화구 내부의 공간적 특성은 거의 밝혀지지 않았다. 이는 각 연구자들이 수행한 시추지점의 좌표가 거의 비슷하기 때문에 그 범위가 제한적이며, 물리탐사 결과에 대한 해석도 특정구간에 한정되었기 때문이다.

현재 경작지로 이용되고 있는 습지는 과거 어느 시기에는 하논분화구의 화구호로 존재했을 것이며, 이에 대해 대부분의 연구자들이 동의하고 있다(이승현 등, 2003; 한국해양연구원, 2004; 윤석훈 등, 2006). 그러나 아직까지 이 호수의 규모가 어느 정도였으며 어떤 형태였는지는 밝혀내지 못했다. 그러나, 시추 조사와 물리탐사자료를 종합적으로 해석하고 이를 보완한다면 분화구와 습지에 대한 전체적인 조망이 가능하며, 분화구 내부의 공간적 특성을 밝힐 수 있으며, 화구호의 복원도 가능할 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 분화구 및 습지 형성과정 규명에 단서를 제공할 수 있도록 기존 데이터와 본 연구에서 수행한 탄성과 탐사자료를 기반으로 분화구내에 존재했을 화구호의 복원을 연구목적으로 정하였다. 다만, 여기서 화구호 복원의 의미는 공간통계기법을 이용한 가장 그럴듯한 추정으로, 특정시기의 실제 호수를 가리키는 것은 아님을 밝혀둔다.

## 2. 연구 지역 및 연구 방법

### 1) 연구 지역

제주도의 단성화산은 수백 개에 달하는데 그중 수십 개만이 수성화산체(hydromagmatic volcano)이며, 이중 홀로세에 형성된 것들은 대부분 응회환(tuff ring)

또는 응회구(tuff cone)에 속하고, 초기 또는 중기 플라이스토세에 형성된 것들은 일반적으로 그 형태가 복잡한 것으로 알려져 있다(박승필, 1985; Sohn and Park, 2005). 하논화산은 플라이스토세 후기에 형성된 마르형 응회환으로 알려져 있으며(윤석훈 등, 2006), 동경 126° 32' 40", 북위 33° 15' 00"를 중심으로, 직경이 약 1.1km인 원형에 가까운 화구가 형성되어 있다. 화구의 둘레는 약 3,800m이며 면적은 약 1,052,000m<sup>2</sup>에 이른다. 지질은 주로 조면안산암류와 응회암, 스킨아(scoria) 등으로 구성되어 있으며, 외륜구릉과 내부, 분석구 등 지형에 따라 다르게 분포한다. 하논화산은 일반적으로 응회환 또는 마르, 마르형 응회환 등으로 분류되어 왔다(박승필, 1985, 2003; 윤석훈, 2004; Sohn and Park, 2005; 윤석훈 등, 2006). 이는 원래 마르와 응회환의 개념이 명확히 구분되지 않고 서로 혼용되어 왔기 때문이다. 예를 들어, Wohletz and Sheridan(1983)은 응회환과 응회구를 구분하여 설명하

면서 응회환으로 둘러싸여 있는 화구를 마르로 표현하였다. Goër(2000)도 같은 개념을 사용하여 분화구는 마르로, 분화구 주변을 응회환으로 표현하였다. Ollier(1988)는 마르와 응회환을 거의 구별 없이 사용하고 있다.<sup>1)</sup>

하논화산의 외륜구릉은 대부분 응회암으로 덮여 있으며, 고도는 대체로 서쪽 구릉이 동쪽구릉에 비해 높아 서쪽의 최고점이 143m인데 비해, 동쪽의 최고점은 약 80m에 불과하다. 서쪽의 외륜구릉은 대략 해발 120~140m인데, 소로 주변에 드러난 노두를 보면 낮은 곳에서는 분화 이전의 기반암으로 추정되는 화산암이 관찰되는 반면, 높은 곳에서는 주로 세립질 화산재들이 쌓여 있어 화구 형성 시 생겨난 외륜구릉임을 확인할 수 있다. 북쪽의 외륜구릉은 대략 해발 80~100m 정도인데 동쪽으로 가면서 점차 낮아진다. 동쪽의 외륜구릉은 이들에 비해 매우 낮은 편으로 50~80m에 불과하며, 그 중 가장 낮은 안부에는 화구의 소하천이 빠

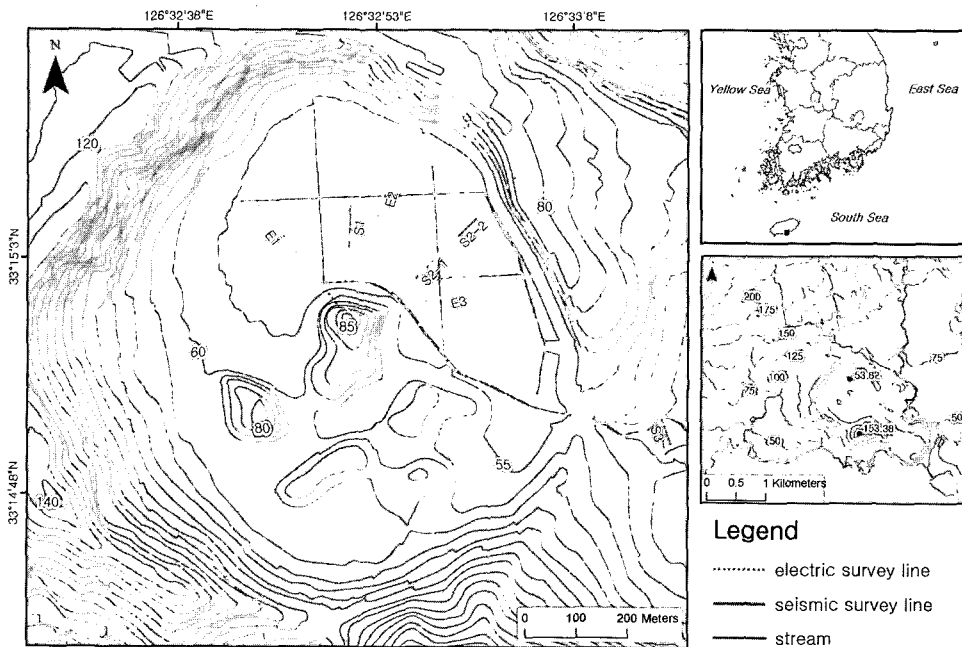


그림 1. 연구지역

주: 하논분화구는 직경 1.1km의 원형에 가까운 화산체로 서귀포시의 서쪽에 위치하고 있으며 화산체 내부에는 장방형 화구가 있으며 중앙에서부터 남쪽으로 여러 개의 분석구가 있음. E1, E2, E3는 선행연구의 전기탐사측선이며, S1, S2-1, S2-2, S3는 본 연구의 탐사측선임.

져나가는 출구가 형성되어 있다. 남쪽의 삼매봉은 천지연조면안산암 위에 놓인 흑갈색의 분석들로 이루어진 분석구인데(윤석훈 등, 2006), 해발 약 153m로 외륜의 일부를 포함하는 것은 사실이지만 외륜구릉으로만 보기에는 비고가 높으며 마치 별개의 산지처럼 솟아 있다. 이런 점에서 삼매봉이 화구 형성과 동시에 생긴 외륜구릉인지는 의문의 여지가 있다.

분화구 내부의 경사는 대체로 북동쪽이 남서쪽에 비해 급하다. 북동쪽구릉의 경우 분화구내부에서부터 급경사를 이루어 사면경사가 20~40° 정도로 나타나는데 비해, 남서쪽구릉은 분화구내부에서부터 서서히 급해져서 외륜에 이르러서야 10~20° 정도의 경사를 보인다(그림 2). 한편, 분화구 외부 경사는 대체로 3~9°로 완만하게 나타나지만, 남서쪽구릉의 외부는 10~20°로 급한 편이다. 다시 말해서, 분화구 내부는 급사면을, 외부는 완사면을 이루고 있으나, 예외적으로 남서쪽구릉은 분화구 내외부의 경사가 거의 비슷하여 좌우대칭인 산체를 이루고 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 분화구 내부의 사면경사가 외부의 사면경사에 비해 매우 급하게 나타나는 전형적인 응회환을 이루고 있다.

화구 내부에는 현재 경작지와 목초지로 이용되고 있는 평지가 있는데 해발고도 약 53~60m에 분포한다. 이 화구는 동서 길이가 약 750m 그리고 남북 길이가 약 850m로 남북으로 다소 길쭉한 타원체를 이루고 있다. 그러나 화구의 남쪽에 분석구가 분포하기 때문에 야외 관찰 시에는 화구가 오히려 동서 방향으로 길쭉하게 형성된 것처럼 보인다. 이 곳을 구성하는 습지퇴

적층의 심도는 시추조사와 전기탐사를 통해 추정되었는데, 평균 8m, 최대 15m로 추정되었다(서귀포시, 2004; 한국해양연구원, 2004). 이 습지는 조선시대부터 논으로 사용되었다고 하는데, ‘하논’이라는 지명도 큰 논이라는 뜻에서 유래했다고 하며(서귀포시, 2004), 1915년 지형도에도 “大畚”이라는 지명과 함께 논으로 표시되어 있다. 이러한 토지이용은 분화구 내부에 ‘물망수’라고 불리는 용천이 있기 때문에 가능한데, 용출량은 하루 1000~5,000m<sup>3</sup>에 이른다고 한다(서귀포시, 1999). 용출된 물은 소규모 농수로로 통해 농업용수로 쓰이고, 동쪽 출구를 통해 ‘숫발내’로 유입된다.

## 2) 연구 방법

분화구 생성 직후의 지형면은 분화구에 습지가 형성되어 퇴적되기 이전 상태를 지칭하며, 이를 추정하기 위해서는 습지퇴적층의 심도와 분포를 조사해야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구된 전기비저항탐사자료와 시추자료를 지도화하고 굴절법 탄성파 탐사를 이용하여 심도자료를 추가로 생성한 후, GIS를 이용하여 심도를 내삽하여 공간적 분포를 추정하였다.

전기비저항탐사는 한 쌍의 전류전극을 통하여 직류 전류 또는 저주파수 교류 전류를 흘려보내어 다른 한 쌍의 전위전극에서 전위차를 측정함으로써 지하의 전기비저항 분포를 파악하는 전기 탐사법이다(현병구, 1995). 서귀포시(2004)는 중앙 분석구로부터 방사상으로 3개 축선의 전기비저항탐사를 실시하고 시추자료를

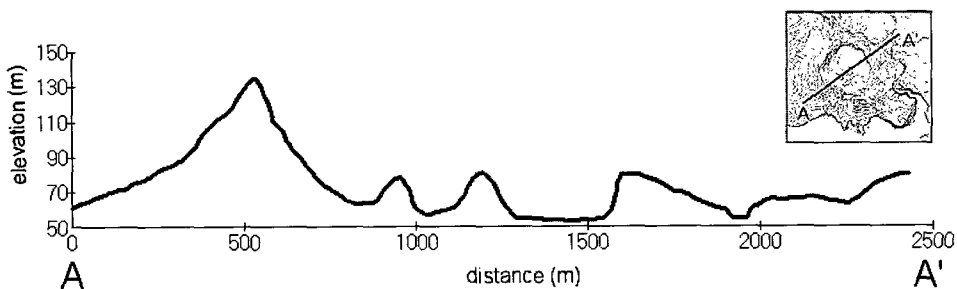


그림 2. 분화구 단면도(높이는 5배 과장)

주 : NE-SW 방향의 단면도는 하논분화구의 형태를 가장 잘 나타내는데, 외륜구릉은 남서쪽이 높고 북동쪽이 낮으며, 내측 사면경사는 북동쪽이 남서쪽에 비해 매우 급함. 분화구내에는 수 개의 분석구가 있으며 이들의 북쪽으로는 평지가 발달함.

통해 이를 검증하였다. 이를 통해 개략적인 퇴적층의 층후는 파악할 수 있으나, 분화구내 습지퇴적층의 공간적 분포를 추정하기에는 부족하다. 따라서 퇴적층의 공간적 분포를 효과적으로 추정할 수 있도록 탄성파 탐사측선을 기존 전기탐사측선들의 사이에 배치하였다(그림 1). 따라서 측선들의 방향은 분석구를 중심으로 부채꼴로 펼쳐진 형태를 이룬다. 굴절법탄성파탐사(seismic refraction method)는 탄성파의 전파과정에서 발생하는 굴절파를 이용하여 지하구조를 탐사하는 방법으로, 퇴적층과 기반암의 매질 차이가 큰 지형에서 비교적 명확하게 기반암까지의 깊이와 기반암의 형태를 추정할 수 있다(Milsom, 2003; 최광희 등, 2005; 최광희 · 김종욱, 2005). 연구지역은 선행 연구에 의해 기반암과 퇴적층에 대한 정보가 이미 확보되어 있었기 때문에, 굴절법탄성파탐사를 적용하기에 적합하였다. 그러나 화구내의 남쪽 지역은 분석구가 많고 감굴나무밭으로 이용되고 있어 탐사를 하기에는 부적합하였다. 따라서 이들과 분화구 내측 사면의 퇴적심도는 소로를 따라 이동하며 노두 관찰을 통해서 파악하였다. 그러나 대부분 화산쇄설물로 덮여 있어 습지퇴적층은 거의 찾을 수 없었다.

이렇게 얻어진 자료는 GIS를 이용하여 공간적으로 내삽하여 퇴적층의 분포를 추정하였다. 연속적인 속성을 갖는 공간 자료의 내삽에는 많은 기법이 있지만, 일반적으로 크리깅(Kriging)과 IDW(Inverse distance weighting method)가 많이 쓰이며, 여러 연구자들에 의해 그 유용성이 증명되어 왔다(Robinson and Metternicht, 2005, 2006; Wu *et al.*, 2006; Valley *et al.*, 2005; 김선우 등, 2005). 일반적으로 크리깅은 최소분산에 근거한 비편향오차(unbiased estimate)를 제공하므로 통계적으로 더 우수하지만, 표본의 수가 증가하면 표본간의 거리 역수에 가중치를 부여하는 IDW가 더 간단하면서도 시각적으로 보다 향상된 지도를 만들 수 있다는 연구도 있다(Thylén and Murphy, 1996; Blackmore and Moore, 1999). 따라서 본 연구에서는 IDW를 주된 분석기법으로 선택하여 공간분석을 수행하고 정규 크리깅(Ordinary Kriging)을 통해 추정 결과를 비교하였다.

### 3. 탄성파 탐사

#### 1) 탐사 방법

탄성파를 이용하여 퇴적층의 층후를 조사하는 것은 매질간의 밀도차가 클수록 좋다(최광희 등 2005; 최광희 · 김종욱, 2005). 특히, 암석의 형성연대가 짧고 신선한 경우 탐사의 정확성이 높는데, 본 연구지역의 기반암은 제4기 후기에 형성된 것으로 추정되는 조면안산암(윤석훈 등, 2006)으로 굴절법 탐사에 매우 적합하였다. 특히, 선행연구인 전기비저항탐사와 시추자료를 통해 퇴적층후와 기반암에 대한 정보를 확보하여 자료의 검증이 가능하였다(서귀포시, 2004; 해양연구원, 2004). 탐사장비는 12채널 방식인 Geometrics사의 Smartseis-S12를 사용하였으며, 총 3개 구간에서 굴절법 탐사를 수행하였다.

탐사지점의 선정은 기존 정보를 최대한 활용하고 공간적 분포를 추정할 수 있도록 표본수를 증가시키는데 초점을 맞추었다. 이를 위해 시추 및 전기비저항탐사 지점을 고려하여 2개의 측선을 분화구내에 배치하였다. 용출수가 빠져 나가는 출구 주변은 퇴적층이 분포할 가능성이 높고 분화구 내·외부 비교에 적합하기 때문에 1개의 측선을 배치하였다. 측선 배치의 정밀성을 높이기 위하여 Garmin사의 GPS를 사용하였으며, 측선의 시작점과 끝점의 좌표를 입력하여 지도화하였다.

탐사구간의 길이와 수진기의 배치간격은 파형에너지의 감쇄와 국지적인 지형을 고려하여 탐사지점에 따라 다르게 설정하였는데, 길이는 약 55~81m, 수진기(geophone) 간격은 2.5~3m씩 이격하였다(표 1). 측선의 전개는 발파지점과 수진기가 일직선상으로 배치되는 동일선 전개방식(in-line spread)을 따랐다(Gadallah and Fisher, 2005). 탄성파 에너지원은 약 5.8kg의 해머를 사용하였으며, 신호를 증폭하기 위해 5회 연속발파(stacking)를 하였고, 발파 간격(shot interval)은 측선에 따라 5m 또는 10m로 고정하였다. 탐사결과는 OYO사의 탄성파해석프로그램인 SeisImager2D을 이용하여 처리하고 Time-term 기법을 이용하여 역산(inversion)하였다. 한편, 구간 S2는

표 1. 하논분화구의 탄성파 탐사결과

line no.	distance(m)	geophone interval(m)	Velocity(m/s)			depth to bedrock(m)	bedrock elevation(m)
			surface	2nd layer	3rd layer		
01	81	3	234	1239	3376	8~11	43~46
02-1	81	3	235	1251	2550	7~14	40~47
02-2	55	3	200	926	1990	5~6	48~49
03	57.5	2.5	232	954	2323	6~9	38~42
mean	-	-	227	1120	2634	-	-

동일 방향으로 연속해서 측선을 설치한 후 속도분포를 통해 해석하였다(그림 3).

### 2) 탐사 결과

연구지역을 상층부터 토양층, 퇴적층, 기반암 등 3개의 층으로 분석한 결과는 표 1과 같다. 먼저 표층의 탄성파속도는 약 227m/s로 조사되었는데, 이는 표층에서 흔히 나타나는 토양층의 속도분포와 일치한다(최

광희 등, 2005). 제 2층인 퇴적층의 탄성파속도는 약 1,120m/s로 조사되었는데, 이러한 속도분포는 분화구 퇴적층이 점토나 실트의 비율이 상당히 높다는 것을 의미한다(Sjögren, 1984; Milsom, 2003; 최광희 등, 2005). 실제 시추조사결과 이 퇴적층은 대부분 점토와 실트, 토탄 등으로 구성되어 있음이 밝혀졌다(윤석훈 등, 2006; Fukusawa, 2004). 한편, 기반암의 탄성파속도는 평균 2,634m/s로 측정되어, 다른 화산지대의 연구결과(최광희 등, 2005; 최광희 · 김종욱, 2005)에 비

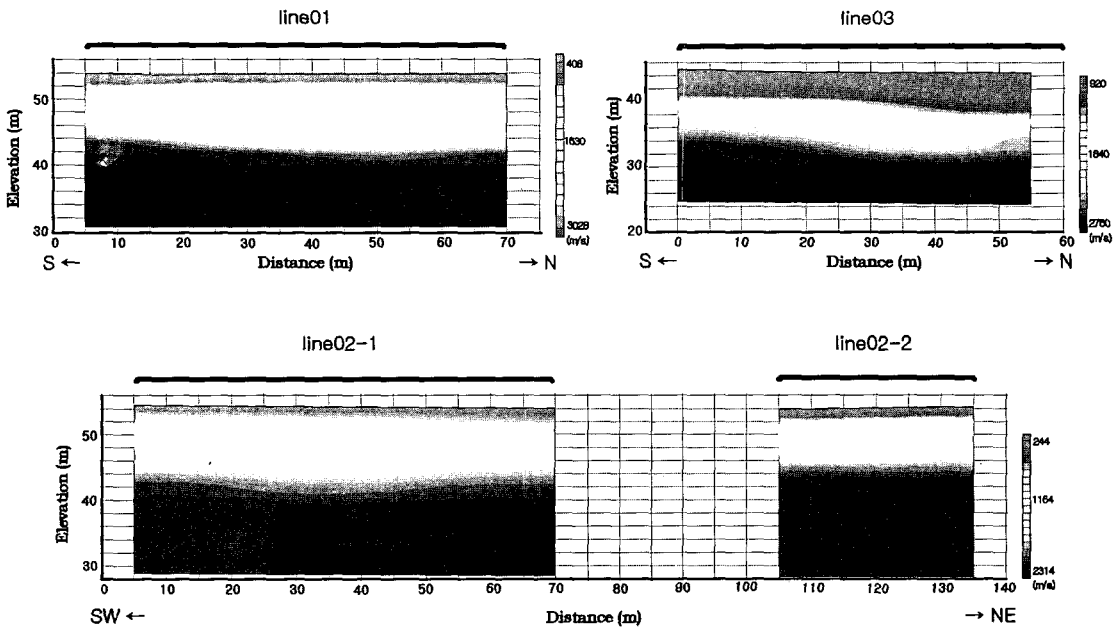


그림 3. 구간별 탄성파 속도분포

주 : line01과 line02는 중앙분석구로부터 각각 북쪽과 북동쪽으로 전개한 측선을, line03은 분화구 밖에서 남북으로 전개한 측선을 의미함.

해 비교적 느리게 나타났다. 이것은 다공질인 하논용암류의 특성에 기인한 것으로 용암류내의 공극에 의해 탄성파의 전파속도가 저하된 것으로 보인다.

표면에서 기반암까지의 깊이는 탄성파의 도달거리와 도달시간을 통해 분석할 수 있다(Sjögren, 1984; 최광희 등, 2005). 이렇게 얻어진 기반암까지의 깊이는 최소 5m, 최대 14m로, 선행 연구(서귀포시, 2004)의 조사결과와 거의 일치한다. 따라서 분화구 퇴적층이 중앙 분석구의 북쪽을 중심으로 10m이상 퇴적되어 있음을 확인할 수 있으며, 원지형면인 용암류의 고도는 약 45m내외에 분포하는 것으로 추정된다.

#### 4. 고지형면의 추정

##### 1) 복원 과정

분화구 생성 직후의 지형면을 복원하기 위하여 본 연구에서 실시한 탄성파 탐사 자료와 선행 연구의 전기비저항탐사자료 및 시추자료를 기반으로 고지형면의 공간적 분포를 분석하였다. IDW는 표본지점 간의 거리가 가까울수록 가중치를 높이고 거리가 멀어질수록 낮은 가중치를 부여하는 공간적 내삽방법이다. 그러나 이 기법은 표본의 수가 극히 적거나 매우 불균등할 경우에는 정확성이 매우 떨어진다(Robinson and Metternicht, 2005). 습지퇴적층의 심도는 기본적으로 전기비저항 탐사와 탄성파 탐사 결과를 이용하여 추출하였으나 이러한 자료는 공간적 범위가 분화구내에 한정되어 있었다. 공간통계분석기법을 이용하여 분화구 전체에 대한, 보다 실제에 가까운 자료를 얻기 위해서는 표본의 수를 증가시켜야 한다. 이를 위해 분화구 내 측 사면을 조사하여 노두에 드러난 퇴적심도를 입력하고, 분석구의 정상부와 외륜구릉을 이루는 봉우리에 '0' 값을 입력하였다. 외륜구릉이나 분석구의 정상부는 퇴적층이 형성되기 어렵기 때문이다.

이렇게 입력된 점데이터에 대해 IDW 내삽법을 적용하여 퇴적심도를 'z' 값으로 갖는 '퇴적층 DEM'을 생성하였으며, 이를 다시 '지형 DEM'과 연산하여 습지

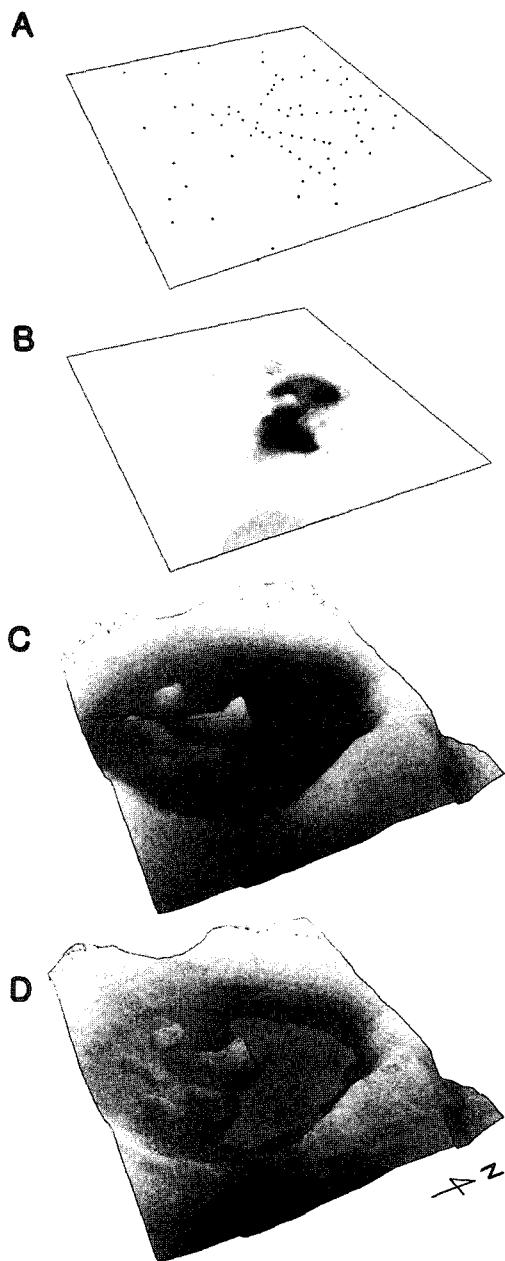


그림 4. GIS를 이용한 화구호 복원과정

주 : A는 퇴적심도 입력지점, B는 IDW 내삽 결과, C는 현재 지형, D는 C와 B를 연산하여 얻은 화구호의 모습.

퇴적층을 제거한 모습, 즉 과거 지형면을 구축하였다(그림 4). 이렇게 구축된 '고지형 DEM'으로부터 1m 간격의 등고선을 추출하여 마르호의 등심선을 구하였

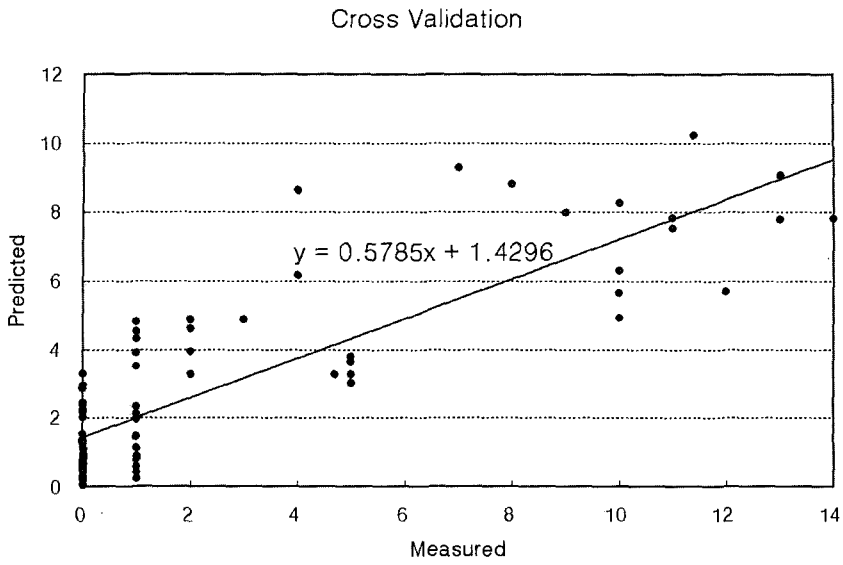


그림 5. 측정값과 예측값의 교차타당성 검사.

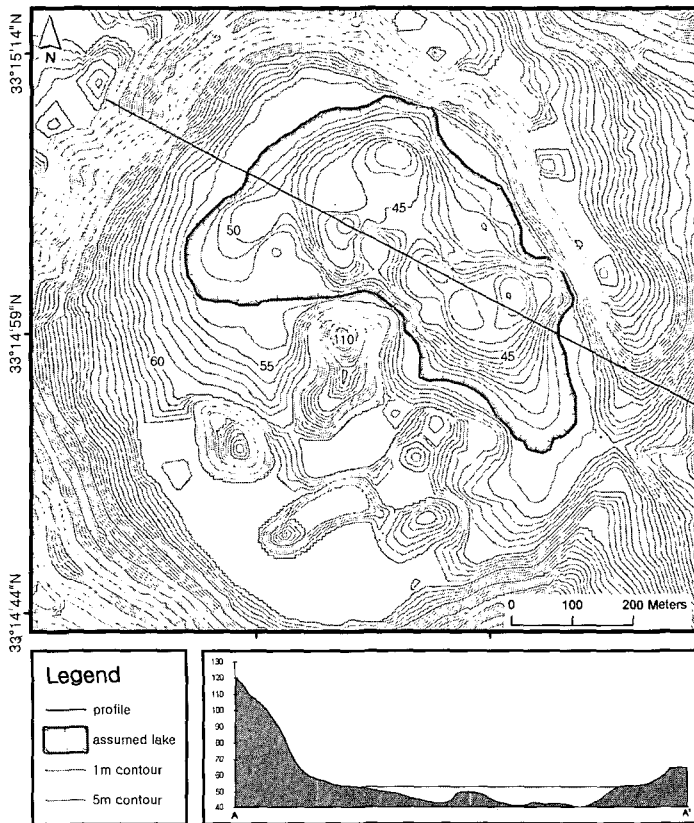


그림 6. 복원된 화구호의 경계와 단면도.

주 : 화구호는 중앙 분석구의 북동쪽에 NW-SE 방향으로 형성되었으며, 평균수심은 약 5m, 최대수심은 약 13m에 이를 것으로 추정됨



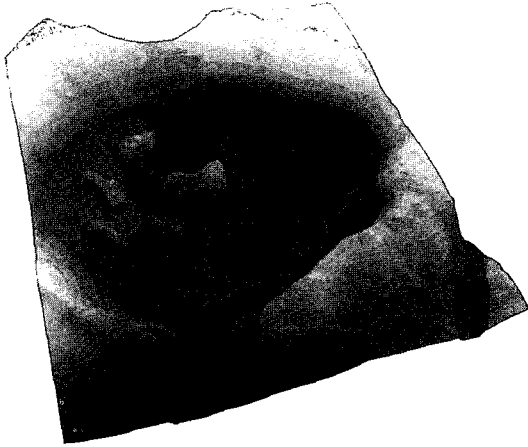


그림 7. 하논분화구의 마르호 복원 모습(3D).

주: 분화구의 동남쪽 상공에서 조망한 모습으로 높이를 3배 과장함.

다. 한편, 추정값에 대한 오차검증을 위해 측정값 82개에 대한 교차타당성을 검사하였는데(그림 5), IDW의 RMS(Root Mean Square)는 2.016, 크리깅은 1.759로 나타났다. 따라서 추정치는 크리깅을 이용한 내삽이 보다 정확할 가능성이 있다. 하지만, 1m 간격의 등고선을 추출한 결과, 크리깅보다는 IDW로 얻은 등고선의 연결성이 보다 자연스러웠다. 이런 이유로 호수의 복원에는 IDW를 이용하여 얻은 DEM을 적용하였다.

## 2) 복원 결과

분화구 시추자료로 볼 때, 맨 위의 경작층은 1m 이내로 추정되며, 그 하부에는 토탄층이 나타난다(한국해양연구원, 2004; 서귀포시, 2004). 이를 고려하면, 현재 화구의 고도가 약 54m이므로 가장 최근 호수면의 해발고도는 약 53m로 추정할 수 있다. 이를 고지형 DEM에 적용시키면 하논분화구에 있었을 화구호의 모

습을 복원할 수 있다(그림6, 그림7). 복원된 화구호는 NW-SE 방향으로 길쭉한 반달과 같은 형태이며, 호수의 면적은 내삽방법에 따라 다소 차이가 있지만, 약 184,000~190,500m<sup>2</sup>, 평균수심은 약 5m 정도로 추정된다.(표 2). 호수의 장축을 따라 횡단면을 분석해 보면 호수 가장자리로부터 수심 약 7m지점, 즉, 해발고도 약 46m까지는 비교적 경사가 급하지만, 46m 고도에서부터는 평탄한 호수의 바닥이 나타남을 알 수 있다. 외륜구릉 주변, 즉 분화구 밖 지면의 고도분포가 60~100m인 점을 고려하면, 호수 바닥은 분화구 외부와 약 15~50m의 고도차가 있음을 알 수 있다. 이러한 고도차는 지하수가 분화구내로 쉽게 유입될 수 있는 조건이 되었을 것이며, 일정량의 물이 화구내에 저장되었을 것이다. 한편, 이러한 지형적 조건은 외륜구릉으로부터 화구호에 유입된 물질이 밖으로 유출되는 데 장애가 되었을 것이므로, 마르호가 빠른 속도로 퇴적되었을 것으로 추정된다. 그리고 이러한 퇴적은 분화구 내부가 동쪽 유출구의 고도와 거의 비슷한 수준에 이를 때까지 계속되었을 것이다.

## 5. 논의

### 1) 내삽기법에 따른 화구호 복원의 차이

분화구의 고지형면을 GIS를 이용하여 복원하는 것은 어쩌면 단지 시뮬레이션에 불과할 지도 모른다. 그러나 이러한 가상의 복원작업은 분화구의 형성과 변화를 추적하는 또 하나의 단서가 된다. 여기에는 분명 내삽방법에 따라 추정 결과가 달라지는 문제가 있다. 본 연구에서는 IDW와 크리깅을 사용하여 그 결과를 비교하였다. 그러나 두 가지 방법을 적용한 결과는 호수의

표 2. 화구호 복원 결과 비교

Interpolation method	Mean Elevation	Lowest Elevation	Area	Water Volume
IDW	48.28 m	39.99 m	184,008.5 m <sup>2</sup>	869,763.7 m <sup>3</sup>
Ordinary Kriging	48.44 m	40.14 m	190,534.1 m <sup>2</sup>	868,480.0 m <sup>3</sup>

면적에서만 약 3%의 차이가 날 뿐, 평균 고도는 0.3%, 체적의 차이는 0.15%에 불과하였다. 따라서 기본 자료로 사용한 시추조사자료, 전기비저항탐사자료, 탄성파탐사자료, 노두조사자료가 정확하다면 화구호의 복원은 상당히 정확하다고 할 수 있다.

한편, IDW와 크리깅을 이용하여 고지형 DEM을 구축한 후, 1m 간격의 등고선을 추출한 결과, IDW를 적용한 고지형 DEM의 등고선이 미세하긴 하지만, 보다 자연스러웠다. 이러한 결과는 선행연구(Thylen and Murphy, 1996; Blackmore and Moore, 1999)에 어느 정도 부합되는 결과라 하겠으나, 어느 방법이 더 실제계에 부합하는가 하는 것과는 다른 문제이며, 본 연구의 논의 대상은 아니다. 단지, 두 가지 방법의 결과에서 큰 차이가 없었기 때문에, 복원결과가 조금 더 자연스러운 IDW를 주로 적용하였다는 것이다.

이러한 공간통계기법은 점 조사나 선 조사와 같은 단편적인 자료에 비해, 화구호라는 입체적 공간을 다각도로, 전체적으로 분석할 수 있는 이점이 있다. 예를 들어, 전기비저항탐사 결과에서 퇴적층의 깊이가 평균 8m에 이를 것으로 추정되었으나(서귀포시, 2004), 본 연구에서 퇴적층의 평균 깊이는 약 6m로 추정되었다. 그리고 과거 화구호의 저장량 또는 퇴적층의 부피가 약 869,760m<sup>3</sup>일 것이라는 것을 제시하였다.

## 2) 분화구 및 습지 형성

한편, 본 연구의 주요 주제는 아니지만, 분화구 형성 시기에 대해서는 이전의 여지가 많다. 윤석훈 등(2006)은 하논 화산의 분출시기를 분화구 하부의 각수바위조면안산암의 연대와 퇴적층에 대한 C-14연대를 근거로 약 76,000~34,000년전인 것으로 추정하였는데, Yatagai *et al.*(2002)이 깊이 11.5m 지점에서 얻은 C-14 연대인 약 34,000년전에 더 무게를 두고 있다. 결론적으로 이들은 분출시기를 MIS 3a정도로 추정하고 있다. 그러나 Yatagai *et al.*(2002)이 제시한 연대는 일반적으로 C-14의 연대한계에 해당하여 신뢰성이 상당히 떨어진다. 하논분화구와 같은 응회환은 마그마와 지하수의 접촉이 필수적이다. 그렇다면, 오히려 MIS 3a보다는 해수면이 보다 높았던 MIS 3c 시기, 즉 약 50,000

yr BP가 더 가능성이 있을 것이다. 또한, 만약 각수바위조면안산암의 연대가 76,000년경이 아니라면 형성 시기에 대한 논란은 훨씬 복잡해진다. 지형적인 증거로 볼 때 응회환의 동쪽 구릉과 솟발내 사이에는 하안 단구가 존재한다. 지면경사가 완만하고 그 위에는 단구퇴적물로 보이는 원력내지 아원력이 관찰되기 때문이다. 그런데, 이러한 단구의 해발고도가 거의 40~50m에 이르고 그 분포범위가 상당히 넓기 때문에 형성시기에 대한 논란이 야기될 수 있다. 이 경우, 분화구의 분출시기는 MIS 5e 또는 그 이전 시기일 가능성이 높다. 따라서 분화구의 형성시기를 밝히기 위해서는 보다 다양한 연대측정방법이 필요하며 이에 따른 많은 자료가 축적되어야 한다.

하논분화구에 대해 여러 분야에서 관심을 갖게 된 이유는 특이한 경관과 더불어 습지퇴적층이 잘 보존되어 있었기 때문이다. 화구호의 습지퇴적층은 과거의 기후와 환경을 밝히는데 중요한 단서가 되며, 특히 마르형 분화구에 대한 연구 사례는 상당히 많다(Ramrath *et al.*, 1999; Muhs *et al.*, 2003; Disnar *et al.*, 2005; Garcin *et al.*, 2006). 하논화산의 화구에 습지퇴적층이 깊게 남아있는 이유는 화구호가 외륜구릉으로 거의 완벽히 둘러싸여 있어서 용출수가 빠져나가기 어려웠기 때문이다. 특히, 해발 46m정도에서 나타나는 화구호의 바닥이 최소 60m이상인 분화구 외부와 단절되어 있었을 것이다. 이러한 조건은 분화구 외부에서부터 유입된 수분이 저장되는 것은 가능케 하더라도, 분화구 외부로 빠져나가는 것은 어렵게 만들었을 것이다. 수분의 유입경로는 용천수인 '몰망수'와 더불어 외륜구릉의 내측사면을 따라 흘렀을 지표수가 있다. 이들에 의해 공급된 퇴적물에 의해 화구호가 점차 메워졌을 것이며 어느 시기엔가 수분의 유입과 유출이 같아지는 평형상태가 지속되었을 것이다. 한편, '몰망수'가 지하수에 의한 것인지, 복류수에 의한 것인지는 더 연구해볼 필요가 있다. 지하수 유출일 가능성이 높지만, 지형적으로는 분화구 북쪽에 서흥천과 호근천이 흐르고 있어 이들에 의한 복류수 유출일 가능성도 있기 때문이다.

## 6. 요약 및 결론

하논화산은 제주도 서귀포시에 위치한 마르형 응회환으로 분화구 및 습지의 형성과정에 대해 비교적 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 선행연구가 주로 몇 개의 시추공에서 얻은 정보에 의존하여 습지퇴적층의 공간적 분포를 제시하지는 못하였다. 본 연구는 분화구 및 습지 형성과정 규명에 단서를 제공할 수 있도록 기존 데이터와 탄성파 탐사자료를 기반으로 분화구내에 존재했을 화구호의 가상적 복원을 목표로 하였다.

이를 위해 먼저, 기존 전기비저항탐사 축선의 사이에서 굴절법탄성파탐사를 실시하여, 습지퇴적층에 대한 부채꼴 형태의 자료를 구축하였다. 탄성파탐사결과, 습지퇴적층의 탄성파속도는 약 1,120m/s로 측정되었으며, 깊이는 지점에 따라 5~14m로 조사되었다. 그리고 습지퇴적층 하부 기반암의 탄성파속도는 평균 2,634m/s로 조사되었으며 경계면의 굴곡이 상당한 것으로 추정되었다. 다음으로, 이러한 물리탐사자료에 외륜구름과 분석구의 노두조사결과를 더하여 GIS를 이용한 내삽을 실시하였다. 내삽기법은 IDW를 기본으로 하였으며, 크리깅을 통해 결과를 비교하였다. 마지막으로, 퇴적심도의 공간적 내삽 결과를 기존 DEM에 연산하여 고지형 DEM을 구축하였으며, 시추자료에서 추정된 습지의 고도를 적용하여 최종적으로 화구호, 즉 응회환으로 둘러싸여 있었을 마르호를 복원하였다.

복원된 화구호는 중앙 분석구의 북쪽에 반달 형태로 존재하였으며, 평균 수심은 약 5m, 최대 수심은 약 13m에 이를 것으로 추정되었다. 두 가지 내삽기법에 따라 화구호의 면적은 약 3% 정도의 차이를 보였지만, 수심이나 부피는 그 차이가 약 0.3%에 불과하였다. 복원된 화구호의 수면의 면적은 184,000~190,000m<sup>2</sup>, 부피는 869,760m<sup>3</sup>로 추정되었다. 이와 같은 결과가 분화구나 습지의 형성시기에 대한 직접적인 정보를 제공하지는 않으며, 분화구 생성직후부터 지속적인 퇴적작용이 있었기 때문에, 복원된 화구호가 특정 시기의 호수를 지시할 가능성은 거의 없다. 그러나 화구호에 대한 가상적인 복원은 분화구 지형에 대한 입체적인 접근을 가능케 하며, 분화구와 습지의 형성 및 변화과정을 추정할 수 있는 단서로서의 의의가 있다.

## 謝辭

탄성파 탐사를 도와주신 생태조사단의 윤희남 연구원과 여러 조언을 해주신 신영규 박사님, 초록 교정에 도움을 주신 이종천 박사님에게 감사드리며, 논문의 향상에 도움을 주신 제주대학교 윤석훈 교수님과 익명의 심사위원들에게도 감사드립니다.

## 註

- 1) 일부 학자들은 마르와 응회환을 구별하여 사용하기도 하는데, 자세한 사항은 윤석훈 등(2006)을 참조.

## 文獻

- 김선우·정애란·이성덕, 2005, “공간자료에 대한 지리적 가중회귀 모형과 크리깅의 비교,” 응용통계연구, 18(2), 271-280.
- 박승필, 1985, “제주도 측화산에 관한 연구: 지형과 분포를 중심으로,” 전남대학교 논문집[자연과학편], 30, 159-166.
- 박승필, 2003, “원격탐사에 의한 제주도 화산지형의 판독과 분류: 항공사진 판독을 중심으로,” 한국지형학회지, 10(3), 389-399.
- 서귀포시, 1999, 생명의 젖줄-우리시의 용천수.
- 서귀포시, 2004, 하논 생태습지 자원복원사업 기본계획.
- 윤석훈, 2004, “서귀포 하논분화구 및 습지퇴적층의 지질학적 특성,” 하논분화구 습지 보전·복원을 위한 국제 심포지엄, 19-25.
- 윤석훈·이병걸·손영관, 2006, “제주도 서귀포 하논 화산의 지형·지질학적 특성과 형성과정,” 지질학회지, 42(1), 19-30.
- 이승현·이용일·윤호일·강청운·김예동, 2003, “제주도 서귀포 지역 후기 플라이스토세 호수 퇴적물에서 남철석 산출,” 지질학회지, 39(1), 133-142.
- 정철환, 2004, “서귀포 습지퇴적층에서 산출된 화분·포자가 지시하는 고식생,” 하논분화구 습지 보전·복원을 위한 국제 심포지엄, 26-28.
- 최광희·김종욱, 2005, “탄성파 굴절법을 이용한 해안단구의 고파식대면 탐사,” 한국지형학회지, 12(3), 89-

- 97.
- 최광희 · 김종욱 · 케네디 무니크와, 2005, "탄성파 탐사를 이용한 전곡리 퇴적층 조사," 한국지형학회지, 12(2), 1-10.
- 한국해양연구원, 2004, 북동아시아 지역에서의 지구환경변화 기술개발에 관한 연구, 과학기술부.
- 현병구(대표집필), 1995, 물리탐사용어사전, 선일문화사, 서울.
- Blackmore, S. and Moore, M., 1999, Remedial Correction of Yield Map Data, *Precision agriculture*, 1(1), 53-66.
- Disnar, J. R., Stefanova, M., Bourdon, S. and Laggoun-Defarge, F., 2005, Sequential fatty acid analysis of a peat core covering the last two millennia (Tritrivakely lake, Madagascar) : Diagenesis appraisal and consequences for palaeoenvironmental reconstruction, *Organic Geochemistry*, 36(10), 1391-1404.
- Fukusawa, 2004, Maar sediments as high-resolution archives of paleo-climatic and environmental changes : A case study from the Sogwipo Maar of the Cheju Island, Korea, *하논분화구 습지 보전 · 복원을 위한 국제 심포지엄*, 17-18.
- Gadallah, M. R. and Fisher, R. L., 2005, *Applied Seismology : A comprehensive guide to seismic theory and application*, PennWell, Tulsa.
- Garcin, Y., Williamson, D., Taieb, M., Vincens, A., Mathe, P., and Majule, A., 2006, Centennial to millennial changes in maar-lake deposition during the last 45,000 years in tropical Southern Africa (Lake Masoko, Tanzania), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 239(3-4), 334-354.
- Goër, A. H., 2000, Peperites from the limagne trench: a distinctive faces of phreatomagmatic pyroclastics. History of a semantic drift, in Leyrit, H. and Montenat, C.(eds.), *Volcaniclastic rocks from magmas to sediments*, Gordan and Breach Science Publishers, 91-110.
- Lee, S. H., 2004, *East Asia monsoon variation during the pleistocene to holocene : paleoclimate changes indicated by proxy records from Jeju island, Korea*, M.Sc. Thesis, Seoul national university.
- Milsom, J., 2003, *Field Geophysics*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Muhs, D., Ager, T., Been, J., Bradbury, J. and Dean, W., 2003, A late quaternary record of eolian silt deposition in a maar lake, St. Michael Island, western Alaska, *Quaternary Research*, 60(1), 110-122.
- Ollier, C., 1988, *Volcanoes*, Basil Blackwell, Oxford.
- Ramrath, A., Zolitschka, B., Wulf, S., and Negendank, J., 1999, Late Pleistocene climatic variations as recorded in two Italian maar lakes, *Quaternary Science Reviews*, 18, 977-992.
- Robinson, T. and Metternicht, G., 2005, Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. *Agricultural Systems*, 85, 19-41.
- Robinson, T. and Metternicht, G., 2006, Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties, *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(2), 97-108.
- Sjögren, 1984, *Sballow Refraction Seismics*, Chapman and Hall, New York.
- Sohn, Y. K. and Park, K. H., 2005, Composite tuff ring/cone complexes in Jeju Island, Korea: possible consequences of substrate collapse and vent migration, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 141, 157-175.
- Thylén, L. and Murphy, 1996, D., The Control of Errors in Momentary Yield Data from Combine Harvesters, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(4), 271-278.
- Valley, R.D. Drake, M.T. and Anderson, C.S., 2005, Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance, *Aquatic Botany*, 81(1), 13-25.
- Wohletz, K. H. and Sheridan, M. F., 1983, Hydrovolcanic explorations II. Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones, *American Journal of Science*, 283, 385-413.

- Wu, J., Winer, A., and Delfino, R., 2006, Exposure assessment of particulate matter air pollution before, during, and after the 2003 Southern California wildfires, *Atmospheric Environment*, 40(18), 3333-3348.
- Yatagai, S., Takemura, K., Naruse, T., Kitagawa, H., Fukusawa, H., Kim, M.H., and Yasuda, Y., 2002, Monsoon changes and eolian dust deposition over the past 30,000 years in Cheju Island, Korea, *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 23, 821-831.

교신 : 최광희, 404-708, 인천시 서구 경서동 종합환경연구단지내 국립환경과학원 경관생태과(이메일 : geoist@me.go.kr, 전화 : 032-560-7413)

Correspondence : Kwang-Hee Choi, Landscape and Ecology Division, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Gyongseo-dong, Seo-gu, Incheon, 404-708, Republic of Korea (e-mail : geoist@me.go.kr, phone : +82-32-560-7413)

최초투고일 06. 8. 14.

최종접수일 06. 9. 19.