석조문화재 모니터링을 위한 하이퍼스펙트럴 이미지분석의 활용

전유근 | 이명성¹ | 김유리 | 이미혜 | 최명주 | 최기현*
국립문화재연구소 보존과학연구실, *(주)아세아항공

Utilization of Hyperspectral Image Analysis for Monitoring of Stone Cultural Heritages

Yu Gun Chun | Myeong Seong Lee¹ | Yu Ri Kim | Mi Hye Lee | Myoung Ju Choi | Ki Hyun Choi*
Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea
*Asia Aero Survey CO. Ltd, Seoul, 157-779, Korea

¹Corresponding Author: mslee75@korea.kr, +82-42-860-9261

초록 이 연구에서는 하이퍼스펙트럴 이미지를 활용하여 석조문화재의 훼손상태 모니터링에 대한 활용성을 검토하였다. 이를 위해 하이퍼스펙트럴 데이터의 보정방법, 영상분류 및 정규화 식생지수 산출방법을 석조문화재에 적용하였다. 이 결과 각 물질의 분광정보를 기반으로 한 객관적인 훼손지도 작성, 정밀도 높은 훼손율의 산출 및 식생들의 활력도 모델작성 등 다양한 분석이 가능하였다. 따라서 하이퍼스펙트럴 이미지 분석을 활용하여 석조문화재를 모니터링 한다면 효율적으로 훼손상태 변화를 파악할 수 있을 것이다.

중심어: 석조문화재, 초분광 이미지, 모니터링, 영상분류, 정규화식생지수

ABSTRACT This study was considered utilization of hyperspectral image analysis for monitoring. Accordingly we applied to stone cultural properties to data correction methods, image classification techniques, NDVI computation techniques using hyperspectral image. As the results, hyperspectral image analysis was possible making detailed deterioration map, accurate calculation of deterioration rate, mapping of normalized difference vegetation index on the basis of reflectance of each materials. Therefore, hyperspectral image analysis will be used for effective monitoring techniques of stone cultural heritages.

Key Words: Stone Cultural Heritage, Hyperspectral image, Monitoring, Classification, NDVI

1. 서 론

우리나라의 석조문화재는 건조물 문화재 중 국보의 76%, 보물의 42%의 점유율을 차지하고 있다. 이와 같이 석조문화재가 국가지정 건조물 문화재 중에서 높은 비율을 나타내는 이유는 암석이 다른 재질에 비해 내구성이 강

하여 현재까지 잔존해 있기 때문이다(Lee and Lee, 2005). 그러나 각각의 석조문화재는 구성암석의 종류, 보존환경, 풍화기간 등에 따라 다양한 훼손이 발생되어 있다. 따라서 석조문화재를 장기적으로 보존하기 위해서는 훼손원인 및 상태를 체계적으로 검토하여 보존관리 방안을 수립해야 한다.

최근 비파괴 측정기술이 발달하면서 석조문화재의 훼손도 평가방법도 다양화 되고 있다. 석조문화재의 훼손도를 정밀하게 평가하기 위해 훼손지도 작성법, 초음파탐사, 적외선열화상분석 등 많은 평가방법 등이 활용되고 있으며, 측정결과의 신뢰도를 높이기 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다(Chun *et al.*, 2008; Jo *et al.*, 2013; Jo and Lee, 2011; Lee *et al.*, 2009; 2012). 또한 최근 실시되고 있는 석조문화재의 보존처리는 훼손도 진단 결과들을 바탕으로 실시되고 있는 추세이다.

그러나 현실점에서 모든 석조문화재의 훼손도를 평가하는 것은 많은 어려움이 따른다. 또한 보존처리가 실시된 이후 석조문화재에 대한 지속적인 모니터링은 일부 문화재를 대상으로만 시행되고 있다. 이는 하나의 석조문화재를 정밀하게 진단하기 위해서는 많은 전문인력과 연구기간이 필요하기 때문이다. 따라서 체계적인 석조문화재의 보존관리를 위해서는 효율적으로 훼손상태 변화를 모니터링 할 수 있는 시스템이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 석조문화재의 훼손상태 변화를 모니터링하기 위한 방법으로 하이퍼스펙트럴 이미지분석을 제안하고자 한다. 이 분석기법은 촬영된 이미지의 분광정보를 분류하여 측정대상의 성질을 판별하는 방법으로 주로 원격탐사에서 활용되고 있다. 국외에서는 이미지분석을 활용하여 일부 문화재를 대상으로 비파괴 진단을 실시된 바 있으나(Neta *et al.*, 2010; Raimondi *et al.*, 2009) 국내에서는 전무한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 석조문화재의 모니터링을 위한 하이퍼스펙트럴 이미지분석의 활용성에 대한 고찰을 실시하였다.

2. 하이퍼스펙트럴 이미지의 특징

화학, 천문학, 지질학 등 다양한 분야에서는 물질의 특성을 규명하기 위한 수단으로 분광계를 사용하고 있다. 일반적인 분광계는 물질에서 나오는 분광반사곡선을 측정하는 방식으로 하나의 물체에서 단일 분광곡선을 획득할 수 있다. 그러나 하이퍼스펙트럴 이미지는 영상을 구성하는 모든 화소(pixel)마다 분광반사곡선을 얻을 수 있으며, 이를 활용하여 각 화소마다 해당하는 물질과 관련된 정보를 분석할 수 있다(Kim *et al.*, 2005; Goetz *et al.*, 1985; Karaska *et al.*, 2004).

디지털이미지에는 흑백, 칼라, 멀티스펙트럴, 하이퍼스펙트럴 이미지 등이 있으며 각각의 이미지는 획득한 파장

의 범위 및 밴드의 수에서 차이를 보인다. 흑백 및 칼라 이미지는 가시광선 영역에서 획득된 1개 또는 3개의 밴드로 구성되며, 멀티스펙트럴 이미지는 센서의 종류에 따라 가시광선에서 적외선 영역의 5~7개의 밴드로 구성된다. 반면 하이퍼스펙트럴 이미지는 가시광선에서 적외선 영역의 파장범위에서 수 백 여개의 밴드로 구성되어 있는 이미지이다. 따라서 하이퍼스펙트럴 이미지는 분광폭이 좁은 많은 수의 밴드를 가지고 있어 분광반사곡선(spectral reflectance curve)이 연속적이며 분광해상도(spectral resolution)가 매우 높은 이미지로 정의된다.

하이퍼스펙트럴 이미지에서 획득되는 파장의 범위는 센서의 종류에 따라 VNIR(Visible and Near-Infrared), SWIR(Short-Wave Infrared), LWIR(Long-Wave Infrared) 등으로 구분된다. VNIR은 350~1,000nm, SWIR은 1,000~2,500nm, LWIR은 8,000~14,000nm의 파장범위에서 측정되며, 각각의 센서들은 연구목적에 맞게 선정하여 사용되고 있다(Yu, 2012). 이와 같이 다양한 분광 센서들은 항공기 또는 인공위성에 장착하여 주로 원격탐사에 활용되어 왔으나 최근에는 지상에서 활용할 수 있는 장비들이 개발되어 사용되고 있다.

3. 하이퍼스펙트럴 이미지의 데이터 분석

3.1. 데이터 보정

하이퍼스펙트럴 카메라는 태양광이 물질에 조사된 후 반사되어 나오는 빛을 스캔미러 또는 슬롯으로 받아들여 분광데이터를 획득한다. Figure 1은 SPECIM사의 VNIR Spectral Camera PS모델로 부여 무량사 오층석탑의 하이퍼스펙트럴 이미지를 촬영한 것이다. 이 하이퍼스펙트럴 이미지는 486×696의 크기로 약 338,000여개의 화소(pixels)로 구성되어 있으며, 각 화소마다 가시광선과 근적외선 영역인 350~1000nm의 파장영역대의 분광정보를 포함하고 있다.

하이퍼스펙트럴 이미지에서 획득할 수 있는 가장 중요한 정보는 각 화소에 해당하는 물질의 연속적인 분광반사값(spectral reflectance)이라 할 수 있다. 그러나 일반적으로 하이퍼스펙트럴 카메라는 측정대상의 분광반사값이 아닌 복사량(radiance)으로 분광정보를 획득한다(Kim *et al.*, 2005). 또한 촬영 당시의 시간, 날씨, 일조량 등 기상환경에 따라 분광정보가 달라질 수 있다. 이외에도 하이퍼스펙트

Figure 1. Hyperspectral image and correction process of hyperspectral data.

릴 카메라를 작동시키기 위해 필요한 압전류에 의해서도 데이터의 오차가 발생하기도 한다. 따라서 측정대상의 정확한 분광반사곡선을 확보하기 위해서는 체계적인 데이터 보정이 필요하다.

하이퍼스펙트럴 이미지의 데이터 보정은 크게 방사보정(radiometric correction)과 대기보정(atmospheric correction)으로 구분된다. 방사보정은 지표면에서 방사되는 에너지가 산란, 흡수, 굴절되면서 발생하는 오차를 제거하는 것으로 하이퍼스펙트럴 분광데이터의 노이즈를 줄여주는 역할을 한다. 대기보정은 빛이 대기를 통과하는 동안 대기입자에 의해 산란 및 흡수되는 현상으로 발생하는 영향을 제거하는 것을 말한다.

항공기나 인공위성에서 촬영된 이미지를 활용하는 원격탐사 분야에서는 대기복사전달모델을 기반으로 대기입자에 의한 효과를 추정하여 센서에서 감지된 복사량을 직접 가감하는 대기보정 방법을 주로 사용하고 있다(Kim *et al.*, 2005). 그러나 지상에서 촬영할 경우, 주변 지형 및 환경에 의한 영향을 많이 받기 때문에 표준 백판(white reference panel)을 기준으로 보정할 수 있다. Figure 1에 제시되어 있는 분광정보는 표준 백판을 사용하여 데이터 보정을 한 것으로 하이퍼스펙트럴 카메라에서 획득된 복사량 데이터가 방사보정 및 대기보정을 통해 변화하는 분광데이터를 보여주고 있다. 이와 같은 데이터 보정을 마친 하이퍼스펙트럴 이미지는 각 화소마다 물질의 분광반사곡

선에 대한 정보를 지니게 된다.

3.2. 영상분류

대부분의 국가지정 석조문화재는 조성 이후 오랜 기간 동안 물리적, 화학적, 생물학적 요인 등에 의해 손상되어져 왔다. 석조문화재의 표면은 물리화학적 요인들에 의해 균열, 박리박락, 탈락 등이 발생할 수 있으며, 암석과 물의 반응에 의해 광물에 함유되어 있던 철, 망간 등이 용출되어 표면변색을 유발하기도 한다(Lee *et al.*, 2007). 또한 조류, 지의류, 선태류 및 초본식물 등에 의해 표면 손상이 일어나기도 한다(Kim *et al.*, 2010; 2011). 각각의 손상요인들은 독립적으로 작용하기도 하지만 복합적으로 발생하여 석조문화재의 표면에 다양한 훼손현상들이 나타나고 있다.

이와 같은 원인에 의해 발생하는 석조문화재의 훼손상태를 정량적으로 파악하기 위해 훼손지도 작성, 휴대용 XRF분석, 초음파속도 측정, 적외선 열화상촬영 등 다양한 비파괴 진단기술이 활용되고 있다(Chun *et al.*, 2013; 2014; Lee *et al.*, 2012; Yoo *et al.*, 2014). 이 중에서 훼손지도는 국내·외에서 가장 보편적으로 사용하는 방법으로 육안관찰을 통해 석조문화재에 발생되어 있는 훼손현상들을 도면으로 표현하여 훼손영역 및 정도를 효과적으로 파악할 수 있다. 그러나 훼손지도는 각 연구자에 따라 훼손상태의 기준 및 작성법이 달라 다양한 형태로 작성되고 있으며

현장조사, 도면작성, 사진맵핑, 훼손영역 설정, 훼손율 산출 등 다양한 작업과정으로 인해 객관적인 도면을 작성하기 위해서는 많은 시간이 필요하다. 따라서 다수의 석조문화재에 발생되어 있는 훼손현상들을 효과적으로 판단하기 위한 진단기법이 필요한 실정이다.

석조문화재에 훼손이 발생하게 되면 암석의 표면은 다양한 무기·유기 오염물에 의해 변질되며 각각의 표면오염물들은 종류마다 서로 다른 분광반사곡선을 나타낸다. 따라서 석조문화재를 대상으로 측정한 분광데이터를 종합하고 각 물질의 분광반사곡선을 분류하여 훼손상태를 파악할 수 있다. 영상분류 방법은 크게 무감독분류와 감독분류로 구분된다. 무감독분류는 하이퍼스펙트럴 이미지에 있는 모든 화소의 분광반사곡선을 K-means, Isodata와 같은 알고리즘을 통해 컴퓨터 자체적으로 영상을 분류하는 방법(Filho *et al.*, 2003; Tou and Gonzalez, 1974)이고 감독분류는 연구자가 특정 분광반사곡선을 군집화하여 통계 처리하는 방법이 사용되고 있다. 일반적으로 무감독분류 기법보다는 감독분류를 적용한 영상분류 기법이 활용되고 있다.

감독분류 기법에 사용되고 있는 알고리즘은 최소거리법, 최대우도법, SAM법 등이 있다(Benediktsson *et al.*, 1995; Kruse *et al.*, 1993; Richards, 1999). 최소거리법, 최대우도법은 광학이미지 또는 멀티스펙트럴 이미지에 적용

하는데 용이한 분류방법이지만 하이퍼스펙트럴 이미지를 분석하는데 적합하지 않다. 하이퍼스펙트럴 이미지를 영상분류하기 위한 방법으로는 SAM(Spectral Angle Mapper)법이 일반적으로 활용되고 있다. 이 알고리즘은 파장별 스펙트럼의 각도를 계산하여 유사성이 높은 스펙트럼을 분류하는 방법이며, 산출식은 아래와 같다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nd} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nd} t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{nd} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

t : unknown spectrum, r : reference spectrum

Figure 2는 하이퍼스펙트럴 카메라를 사용하여 부여 무량사 오층석탑의 하부영역을 촬영한 결과이다. 이 영상은 각 화소마다 350~1000nm의 분광반사곡선을 가지고 있으며 250여개의 밴드로 조합되어 있다. 하이퍼스펙트럴 영상 중에서 640nm, 550nm, 460nm 밴드를 조합하여 칼라이미지를 만들어 석탑의 훼손상태를 파악하였다. 무량사 오층석탑의 주요 훼손현상은 황색 및 갈색변색, 유무기 오염물에 의한 흑색변색 등으로 분류되며 각각의 훼손유형들은 특정한 분광반사곡선을 나타내고 있다.

이와 같은 훼손현상에 따라 다르게 나타내는 분광반사

Figure 2. Image classification of Five-story Stone Pagoda of Muryangsa Temple.

곡선을 기준으로 SAM법을 활용하여 영상분류를 실시하였다. 영상분류를 마친 이미지는 훼손영역에 해당하는 부분을 도면화하고 각 화소수를 계산하여 훼손율을 산출하였다. 분석결과, 신선한 화강암의 영역은 30.7%, 지의류에 의한 흑색변색은 19.0%, 무기오염물에 의한 흑색변색은 3.4%, 갈색변색은 42.1%, 황색변색은 4.8%로 계산되었다(Figure 2). 이러한 하이퍼스펙트럴 영상분류 기법은 육안 관찰을 바탕으로 산출하는 일반적인 훼손지도 작성법과 달리 각 물질의 분광반사곡선을 분류함으로써 석조문화재의 훼손상태를 객관적으로 파악할 수 있다.

3.3. 정규화식생지수

석조문화재는 생물에 의한 훼손발생 빈도가 가장 높으며 또한 훼손영역이 광범위하게 나타나는 경향이 있다. 또한 생물학적 풍화요인은 균열확장, 표면착색, 구성광물의 조직이완 등과 같은 이차적 훼손을 가속화시킬 수 있다. 따라서 석조문화재에 서식하는 식생의 변화양상을 모니터링하여 지속적으로 관리할 필요가 있다.

식물은 엽록소(Chlorophyll)라는 녹색의 화합물을 가지고 있으며, 이는 광합성 작용에 있어 중요한 구성요소이다. 식물의 잎은 가시광선 영역 내 적색 파장대에서 높은 흡수율을, 녹색 파장대에서 높은 반사율을 나타낸다. 또한 근적외선 영역에서는 식생의 생육 정도에 따라 다양한 반사율을 나타내는 특성을 가지고 있다(Gates and David, 1980). 따라서 하이퍼스펙트럴 이미지 조사에서 획득한 광학정보는 식생의 활동상태 및 활력도를 나타내어 다양한 시점에서 동일 석조문화재 내 식생지수를 산출한다면 식생의 분포 및 활동성의 변화를 모니터링 할 수 있다.

하이퍼스펙트럴 이미지를 활용하여 식생의 활력도를 파악하기 위한 다양한 식생지수(VIs, Vegetation Indices)들이 개발되고 있다(Sellers, 1985; Myneni *et al.*, 1995). 식생지수는 단위가 없는 복사값으로 식물의 활동성, 엽면적 지수, 엽록소 함량, 엽량 및 광합성 흡수 복사량 등과 관련된 지표이다. 최근에는 지구온난화에 의한 툰드라지역 식생변화 모니터링(NOAA), 광역 증발산량(Shin and An, 2007), 지역 내 순일차생산량(Shin and Kwon, 2007), 식생피복지수(Choi *et al.*, 2014) 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

식생지수 중 광합성에 의한 각 파장대별 빛의 흡수 및 복사량과 관련된 식생지수에는 정규화식생지수(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)가 있다. 이 지수

는 가장 보편적으로 쓰이는 식생지수이며, 조사를 통해 획득한 광학데이터 중 근적외선과 적색 파장대의 밴드를 계산식에 적용하여 산출한다. NDVI는 -1에서 1까지의 범위 내에서 식생의 활동성을 나타낸다. 일반적으로 암석, 토양은 -1 ~ 0의 값을 가지고, 식물은 그 종류 및 활동량에 따라 0 ~ 1의 값을 보인다. 정규화식생지수 산출식은 아래와 같다.

$$NDVI = \frac{NIR_{800} - Red_{680}}{NIR_{800} + Red_{680}}$$

Figure 3은 서울 송례문의 육측과 보존관리 범위내에 분포하는 식생의 분광반사곡선을 나타낸 것이다. 송례문을 복원하기 위해 사용된 신선한 화강암의 분광반사곡선은 파장이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 반면 지의류의 경우, 680nm까지는 반사도의 변화가 거의 없지만 근적외선 영역인 700nm이상에서는 상대적으로 높은 반사도를 나타낸다. 또한 송례문 주변에 분포하는 잔디와 수목의 반사도 값은 근적외선 영역에서 급격하게 증가하는 양상을 보이고 있다.

송례문 육측의 하이퍼스펙트럴 이미지를 대상으로 각 화소별 NDVI를 산출하고 도면화 하였다(Figure 4). 각 영역별 NDVI 값은 신선한 화강암의 경우 -0.03~0.12, 구부재에 서식하는 지의류는 0.10~0.22의 범위를 나타냈으며, 송례문 주변에 서식하는 잔디는 0.31~0.53, 수목은 0.60 이상의 식생지수 값을 보였다. 이와 같이 식생의 반사도 값

Figure 3. Reflectance of vegetation inhabiting Sungnyemun Gate, Seoul.

Figure 4. RGB color combination image(A) and modeling of NDVI(B) of Sungnyemun Gate, Seoul.

을 활용하여 NDVI 값을 산출함으로써 석조문화재에 서식하고 있는 식생의 발생영역 및 활력도를 정량적으로 파악할 수 있다.

4. 고찰 및 결론

석조문화재의 장기적인 보존관리 계획을 수립하기 위해서는 정기적인 모니터링을 수행하여 훼손상태 변화를 파악해야 한다. 현재 석조문화재는 안전진단, 보존처리, 모니터링 등의 단계로 구분되어 관리되고 있으며 각 보존관리 단계마다 정밀조사를 실시하여 석조문화재의 훼손상태를 파악하고 있다. 석조문화재의 다양한 조사기법 중 훼손지도 작성법은 국내·외의 석조문화재 연구자들에 의해 가장 활용도가 높다. 이 방법은 석조문화재에 발생되어 있는 훼손현상을 기호화하고 손상범위를 표면화함(Jo and Lee, 2011)으로서 훼손영역을 시각적으로 확인할 수 있는 장점이 있다.

국내에서는 Jo and Lee(2011)에 의해 정밀한 훼손지도를 작성하기 위한 기준안이 보고된 바 있다. 그러나 각 연구자들마다 훼손지도 작성법이 차이를 보이고 있으며 정밀한 훼손지도를 작성하기 위해서는 전문성과 많은 시간이 요구된다. 또한 육안관찰을 통해 작성되는 훼손지도는 석조문화재의 훼손양상이 복합적으로 발생하거나 점이적으로 발생되어 훼손경계가 불명확한 경우 각 연구자들의 훼손유형에 대한 기준에 따라 결과가 달라질 수 있는 단점

이 있다. 따라서 석조문화재의 체계적인 모니터링을 수행하기 위해서는 객관적인 기준값을 토대로 훼손상태를 파악해야 한다.

하이퍼스펙트럴 이미지분석은 대부분 항공기 또는 인공위성에 장착된 초분광 센서에서 측정된 자료가 활용되고 있다. 하이퍼스펙트럴 이미지는 화소마다 넓은 파장대역, 높은 분광해상도의 분광데이터를 지니고 있어 탐사영역에 대한 각 물질의 정보를 파악할 수 있다. 이 기법은 대상물이 가지는 고유의 분광특성을 이용하여 탐사영역의 공간을 분류할 수 있기 때문에 특정물질의 분포변화 탐지 및 장기 모니터링 측면에서도 적합하다. 또한 광범위한 지역의 모니터링에 매우 효과적이기 때문에 자원원격탐사, 토지피복정보 획득, 녹지변화 관찰 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

이 연구에서는 지상용 하이퍼스펙트럴 카메라를 활용하여 석조문화재의 훼손상태 모니터링에 대한 활용성을 검토하였다. 이를 위해 석조문화재를 대상으로 하이퍼스펙트럴 이미지를 촬영하고 방사보정 및 대기보정을 실시한 후 훼손원인 물질에 대한 분광반사곡선을 획득하였다. 또한 각 화소별 분광데이터를 분류하여 훼손상태를 파악하였다. 이 결과, 각 물질의 분광정보를 기반으로 한 객관적인 훼손지도 작성, 정밀도 높은 훼손율의 산출 및 식생들의 활력도 모델작성 등 다양한 분석이 가능하였다. 또한 하이퍼스펙트럴 이미지는 원거리에서 획득되기 때문에 대형 석조문화재라 할지라도 빠른 시간에 훼손상태를 파악할

수 있었다.

이와 같이 하이퍼스펙트럴 이미지분석은 기존 모니터링 방법의 단점들을 보완할 수 있을 것이라 판단된다. 그러나 지금까지 하이퍼스펙트럴 이미지분석 기법은 문화재 분야에 적용된 사례가 없어 훼손유형별 분광반사곡선에 대한 데이터베이스가 없는 실정이다. 따라서 지속적인 연구를 통해 석조문화재 모니터링을 위한 데이터 보정방법, 영상분류 방법에 대한 체계적인 알고리즘 선정 또는 개발이 필요하며, 문화재 재질 및 표면오염물에 대한 라이브러리가 구축되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 문화재청 국립문화재연구소 “문화유산 융복합연구(R&D)”의 지원을 받아 수행된 연구임을 명기하며, 위 기관의 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Benediktsson, J.I., J.R., Sveinsson, K. Arnason, 1995, Classification and Feature Extraction of AVIRIS Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33, 1194-1205.
- Choi, S.K., Lee S.K., Wang, B., 2014, Analysis of Vegetation Cover Fraction on Landsat OLI using NDVI. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 32, 9-17. (in Korean with English abstract)
- Chun, Y.G., Lee, C.H., Jo, S.N., Jo, Y.H., Park, G.J., Yang, P.S., 2008, Measurement of Crack Depth and Weathering Degree Using Ultrasonic Velocity and Deterioration Evaluation of the Unhyungung Stone Water Container. Journal of Conservation Science, 24, 1-11. (in Korean with English abstract)
- Chun, Y.G., Lee, J.M., Lee, M.H., Park, S.M., Lee, S.M., Lee, M.S., 2014, Long Term Monitoring of Deterioration Condition for the Rock-carved Buddha Triad in Seosan, Korea. Journal of Conservation Science, 30, 439-446. (in Korean with English abstract)
- Chun, Y.G., Lee, M.S., Lee, J.M., Lee, J.J., 2013, Conservation Treatment and Deterioration Evaluation of the Namwon Singyeri Maeyeoraewasang (Rock-Carved Seated Buddha Statue), Korea. Journal of Conservation Science, 29, 321-332. (in Korean with English abstract)
- Filho, A.G.S., Frery, A.C., Araujo, C.C., Alice, H., Cerqueira, J., Loureiro, J.A., Lima, M.E., Oliveira, Mdas.G.S., Horta, M.M., 2003, Hyperspectral images clustering on reconfigurable hardware using the k-means algorithm. 16th Symposium on Integrated Circuits and Systems Design, SBCCI 2003, 99-104.
- Gates, David M., 1980, Biophysical Ecology. Springer-Verlag, New York, 611.
- Goetz, A.F.H., G. Vane, J. Solomon, B.N. Rock, 1985. Imaging spectrometry for Earth remote sensing, Science, 228, 1147-1153.
- Jo. Y.H. and Lee, C.H., 2011, Making Method of Deterioration Map and Evaluation Techniques of Surface and Three-dimensional Deterioration Rate for Stone Cultural Heritage. Journal of Conservation Science, 27, 251-260. (in Korean with English abstract)
- Jo. Y.H., Lee, C.H., Yoo, J.H., 2013, Study on Applicability of Passive Infrared Thermography Analysis for Blistering Detection of Stone Cultural Heritage. Journal of Conservation Science, 29, 55-67. (in Korean with English abstract)
- Karaska, M.A., R.L. Huguenin, J.L. Beacham, M.H. Wang, J.R. Jensen, R.S. Kaufmann, 2004. AVIRIS measurements of chlorophyll, suspended minerals, dissolved organic carbon, and turbidity in the Neuse river, North Carolina, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70, 125-133.
- Kim, S.H., Lee, K.S., Ma, J.R., Kook, M.J., 2005, Current Status of Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Data Processing Techniques, and Applications. Korean Journal of Remote Sensing, 21, 341-369. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H., Lee, K.S., Ma, J.R., Kook, M.J., 2005, Current Status of Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Data Processing Techniques, and Applications. Korean Journal of Remote Sensing, 21, 341-369. (in Korean with English abstract)
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H., 1993, The

Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. Remote Sensing of Environment, 44, 145-163.

Lee, C.H. and Lee, M.S., 2005, The State of the Art and Conservation Method for the Masonry Cultural Heritages in Korea. Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 9, 13-21. (in Korean with English abstract)

Lee, C.H., Chun, Y.G., Jo, Y.H., Suh, M., 2012, Evaluation of Slope Stability and Deterioration Degree for Bangudae Petroglyphs in Ulsan, Korea. Journal of Conservation Science, 28, 153-164. (in Korean with English abstract)

Lee, C.H., Jo, Y.H., Chun, Y.G., 2009, Establishment of Ultrasonic Measurement and Correlations of Direct-Indirect Method for Weathering Evaluation of Stone Cultural Heritage. Journal of Conservation Science, 25, 233-244. (in Korean with English abstract)

Lee, S.M., Lee, M.S., Chun, Y.G., Lee, J.M., Morii, M., 2012, Weathering Characteristics according to Seawater Immersion of the Magai Wareishi Jizo (Buddhist Statue Carved on Rock Surface) in Hiroshima, Japan. Journal of Conservation Science, 28, 329-341. (in Korean with English abstract)

Myneni, R.B., F.G. Hall, P.J., Sellers, A.L., Marshak, 1995, The interpretation of spectral vegetation indexes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33, 481-486.

Neta, T., Cheng, Q., Bello, R.L. and Hu, B. 2010, Upscaling reflectance information of lichens and mosses using a singularity index: A case study of the Hudson Bay Lowlands, Canada. Biogeoscience, 7, 2557-2565.

NOAA, <http://www.noaa.gov>

Raimondi, V., Cecchi, G., Lognoli, D., Palombi, L., 2009, The fluorescence lidar technique for the remote sensing of photoautotrophic biodeteriogens in the outdoor cultural heritage: A decade of in situ experiments. International Biodeterioration & Biodegradation, 63, 823-835.

Richards, J.A., 1999, Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, Berlin, 240.

Sellers, P.J., 1985, Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. International Journal of Remote Sensing, 6, 1335-1372.

Shin, S.C., An, T.Y., 2007, Development of Estimating Method for Areal Evapotranspiration using Satellite Data. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 10, 70-80 (in Korean with English abstract)

Shin, S.C., Kwon, G.Y., 2014, Estimation of Net Primary Production for Nakdong River Basin using Vegetation Index. Korean Geo-Environmental Society, 15, 35-42. (in Korean with English abstract)

Tou, J.T. and Gonzalez, R.C., 1974. Pattern Recognition Principles, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

Yoo, J.H., Lee, C.H., Chun, Y.G., 2014, Material Characteristics, Deterioration Evaluation and Crack Depth Estimation for Mulgyeseowon Stele in Changnyeong, Korea. Journal of Conservation Science, 30, 427-438. (in Korean with English abstract)

Yu, J., 2012, Mineral Exploration using VIS-IR spectroscopy. Mineral science and industry, 25, 63-73. (in Korean)