테라헤르츠 이미징기법을 이용한 유화의 상태분석 및 진단

Study of Condition Analysis and Diagnosis on Oil Paintings with Terahertz Imaging

백나연¹, 송유나¹, 김문정², 정용재³, 이한형^{4,*}

¹한국전통문화대학교 학교기업 컨테크, ²A&A 예술과 미래 보존, ³한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리 기술학과, ⁴한국전통문화대학교 전통기술소재은행

Na Yeon Baek¹, You Na Song¹, Moon Jeong Kim², Yong Jae Chung³, Han Hyoung Lee^{4,*}

¹School Based Enterprise Con-Tech, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

²Art et Avenir Conservation, Seoul 08589, Korea

³Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural heritage, Buyeo 33115, Korea

⁴Traditional Technique and Material Bank, Korea National University of Cultural Heritage, Buyeo 33115, Korea

Received May 15, 2019

Revised June 11, 2019

Accepted June 17, 2019

*Corresponding author

E-mail: lhh1025@hanmail.net

Phone: +82-41-830-4763

Journal of Conservation Science
2019;35(3):237-244

<https://doi.org/10.12654/JCS.2019.35.3.06>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 본 연구에서는 우리나라 근대시기 유화 작품 3점(‘소년’, ‘소녀’, ‘혜화동풍경’)에 테라헤르츠 이미징 기법을 활용하여 추출 가능한 작품 내부 정보의 종류와 이를 추출하기 위한 분석 조건을 연구하였다. 또한 테라헤르츠 스캔 적용 시 대상 작품의 굴곡에 따라 분석 대상 표면과 검출부 사이의 거리가 변화되어 발생하는 이미지 왜곡이 주된 문제점임을 파악하고, 이를 보완하기 위한 방법으로 ‘작동 거리 유지 장치’를 고안하였다. 연구 결과, 테라헤르츠 이미징 기법을 이용하여 유화의 바탕재 특성과 내부의 손상형태를 파악할 수 있음을 확인하였고 각 특성을 확인할 수 있는 최적의 조건을 제시하였다. 바탕재의 특성과 하부층 확인에는 테라헤르츠 주파수 분해 이미지를 활용하는 것이 유용하였으며 붓터치 등 채색기법을 파악하는 것에는 최대 반사피크 이미지와 단면 이미지가 효과적이었다. 또한 표면에서 관찰할 수 없는 작품 내부 손상 정보는 단면 이미지와 주파수 분해 이미지를 비교하는 것이 유용하였다. 회화작품에 적용한 결과, ‘소년’과 ‘소녀’에서는 내부의 구조적 손상 자국을, ‘혜화동풍경’에서는 작가의 채색 방식을 확인하였다. 이상의 결과는 우리나라 근대기 유화의 예방보존 및 보존처리를 위한 상태분석 및 진단에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

중심어 테라헤르츠, 비접촉, 이미지분석, 진단, 유화

ABSTRACT In this study, we applied terahertz imaging technology to three Korean modern oil paintings (‘Boy,’ ‘Girl,’ and ‘Hyehwadong Landscape’); investigated the types of inner layer information in the pictures that can be extracted with terahertz imaging technology; and analyzed the conditions for extracting them. The biggest problem in the terahertz imaging analysis we encountered was the image distortion caused by the change of the distance between the target surface and the terahertz detector, depending on the surface curvature of the target paintings. We then developed a ‘working distance maintaining device’ to solve this problem. As a result, the terahertz imaging technique was used to identify the base material characteristics and any patterns of damage inside, and presented the optimal conditions for identifying each characteristic. In addition, it was useful to employ the terahertz frequency-division image to check the characteristics of the background materials. To confirm coloring techniques such as brush strokes, it is effective to compare the maximum reflection peak image with the cross-section image; and to detect damage information inside the paintings that cannot be observed on the surface, to compare the cross-section image with the frequency-division image. On the other hand, according to the terahertz imaging analysis of the oil paintings, the internal structural damage marks of ‘Boy’ and ‘Girl’ were confirmed, and the artist’s painting style was confirmed in ‘Hyehwadong Landscape.’ The above results are expected to be useful for the analysis and diagnosis of Korean modern oil paintings for their preservation.

Key Words Terahertz wave, Noncontact analysis, Imaging analysis, Diagnosis, Oil painting

1. 서론

유화는 안료에 오일을 개어 만든 물감으로 그린 서양화의 한 종류이다. 한국에서는 19세기 말에 청나라 사신들에 의하여 처음 유럽의 서양화가 알려지기 시작하였고, 그 이후 1910년대에 서양의 양식을 수용하고 1920~1930년대를 지나며 근대적 양식이 정착하였다(Kim, 2009). 이후 국내 작가들의 활발한 활동으로 현재 다수의 근대 유화 작품들이 존재하고 있다.

유화 작품은 온습도·빛 등의 환경적 요인 및 재료 자체의 결함이나 물감 사용기법 등에 의하여 시간의 흐름에 따라 손상이 발생한다. 이러한 열화는 계속해서 진행되므로 최대한 적절한 보존환경을 유지하는 예방보존 관리가 필요하다(Ahn, 2016). 이를 위해서는 작품의 상태에 대한 정확한 정보를 파악하여 손상을 예측하고 방어할 수 있어야 한다. 겉으로 확인하기 어려운 회화 작품의 내부 구조와 상태에 대하여 데이터를 획득하는 것은 손상과 관련한 보존의 목적 및 작품의 회화적, 재료적 특성에 대한 더 많은 정보 확인의 목적에도 유용하게 활용될 수 있다. 이러한 이유로 적외선·X선 이미지 등이 회화의 밑그림 및 내부 구조 진단에 적용되어 왔으나 적외선의 경우 침투 깊이가 수십 μm 에 불과하고 X선의 경우 물질을 투과하기 때문에

(Fukunaga *et al.*, 2007) 두께가 수 mm에 이르는 회화 작품의 내부 상태를 확인하는 데는 한계가 있었다(Figure 1). 최근 이에 대한 대안으로서 테라헤르츠 이미징 기법이 주목받고 있다.

테라헤르츠파의 주요 진동수는 10^{12} 이며 파수로는 33 cm^{-1} 이다. 이 영역은 일종의 원적외선(far infrared) 영역으로 자유전자와 격자진동 등의 물리적인 특징을 확인할 수 있다. 또한 약 4 meV 정도의 낮은 에너지를 가지고 있기 때문에 시편이나 사람에 손상 및 위험을 가하지 않아, 현재 공항 보안 검색 등 다양한 분야에서 적용되고 있다(Rhee, 2008). 또한 대상의 표면에 직접 접촉하지 않고 내부 구조 정보와 재질의 특성을 반영한 스펙트럼을 획득할 수 있기 때문에 문화재 조사에도 활용되고 있다(Fukunaga and Picollo, 2014). 특히, 테라헤르츠파는 물체의 층위 사이에서 반사되어 층간의 거리에 따라 반사 신호에 미세한 시간 지연(time delay) 현상이 발생하게 되고(Figure 2), 이러한 시간 지연 효과를 이용하면 표면 스캔만으로도 대상에 대한 3차원 정보를 획득할 수 있는 장점이 있다.

테라헤르츠(THz) 이미징 기법은 2000년대부터 국외에서 유화(oil painting) 분석 및 진단에 적용되기 시작하였으며(Köhler *et al.*, 2006), 현재는 프레스코화나 패널화 등 다양한 회화분야로 확대 적용이 시도되고 있는 추세이다(Science Daily, 2019). 그러나 기존 회화에 대한 테라헤르츠

Figure 1. Penetration depth of each rays.

Figure 2. Principle of time-domain terahertz reflection.

이미징 연구에서는 매우 국소적인 부분에 대한 정밀 분석을 통한 층위 해석만이 이루어지거나 그림 전반적 이미지를 획득하더라도 선명한 형태를 얻어내기에 제한적인 상황 등 아직까지는 작품의 재질과 특성에 따라 데이터의 왜곡이 발생할 수 있어 세부적인 분석 조건 등에 대한 연구가 지속적으로 필요한 상황이다. 국내에서도 테라헤르츠 분석 기술이 적용된 바 있는데, 전통 안료에 대한 테라헤르츠 흡광피크 분석 사례(Hong *et al.*, 2014)와 불화를 대상으로 한 상태 진단 적용 사례(Baek *et al.*, 2016)가 있으나 아직은 기초적인 단계이다.

본 연구에서는 테라헤르츠 이미징 기법을 우리나라 근대시기 유화 작품에 적용하여 기존 테라헤르츠 이미지 분석 데이터의 한계 및 주된 문제점을 찾아내고 이를 보완하기 위한 방법을 고안하였으며, 추출 가능한 내부 상태 정보의 종류와 이를 추출하기 위한 분석 조건을 연구하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1. 연구 대상

우리나라의 근대기 회화는 서양으로부터 유입된 새로운 재료들과 회화 유형들로 인하여 재료와 회화분야가 급격하게 다양화하는 시기이다. 본 연구에서는 한국의 근대시기 중에서도 1930~1950년대의 유화 작품인 배운성(1901-1978년)의 ‘소년’과 김형구(1922-2015년)의 ‘혜화동 풍경’ 및 이동훈(1903-1984년)의 ‘소녀’ 총 3점의 유화를 분석 대상으로 하였다(Table 1). 채색특성 및 내부구조 확인에 있어서 획득되는 데이터의 범위를 넓히고자 인물화와 풍경화를 분석 대상으로 하였으며 주로 바탕재로 사용되는 캔버스 외에도 종이보드 작품을 포함시켰다.

Table 1. List of oil paintings

Painting	Information	Painting image	
		Visible image	Terahertz image (peak to peak)
Boy	Pai, Un-soung Oil painting on canvas before 1950's 24 × 19 cm private collection
Hyehwadong landscape	Kim, Hyung-koo Oil painting on canvas 1959 38 × 45 cm Daejeon museum of art
Girl	Lee, Dong-hoon Oil painting on paper board 1950's 33 × 24 cm Daejeon museum of art

2.2. 테라헤르츠 이미징 분석

테라헤르츠 장치는 테라헤르츠 파를 대상에 조사한 후 반사되는 신호를 검출하는 방식의 분광분석기(TeraPulse 4000, TeraView, GBR)를 이용하였다. 이 분석 장비는 본체부와 테라헤르츠 파를 조사하고 측정하는 헤드(검출부)로 구성되어 있으며 본 연구에서는 갠트리(Gantry)에 헤드를 거치하여 2차원 스캔을 수행하였다.

작품의 두께에 따라 검출부의 초점심도를 적절히 조정하여야 하부 층위까지의 원하는 정보를 얻을 수 있으며 초점 심도와 스캔 간격에 따라 분석 및 진단에 적절한 이미지 분해능을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 조사 대상인 유화 작품의 두께와 표면 요철 등의 특성을 고려하여 초점 심도를 1 cm로 조정하였으며 이미지의 분해능을 높이기 위하여 0.5 mm 간격으로 레스터 스캔을 실시하였다(Table 2). 또한, 작품의 두께와 특성에 따라 스캔 지점별 최대 반사 신호를 매치시켜 구성한 이미지(peak to peak image)와 주파수 분해 이미지들을 추출하여 작품의 내부 상태에 대한 분석과 진단을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분석 기술 적용의 문제와 보완 방법

캔버스 형태의 유화 작품은 캔버스 중앙의 처짐 현상으로 인해 테라헤르츠 검출부와 작품 표면 사이의 거리가 일정하게 유지되지 못하는 문제가 있으며, 종이보드의 경우에도 울퉁불퉁해진 부분이나 수평이 맞지 않는 현상으로 인해 동일한 문제가 발생할 수 있다. 따라서 시간 지연 현상을 활용한 층위 분석에 어려움이 따르게 되는데, 이를 보완하기 위해서는 작품 표면과 검출부의 거리를 일정하게 유지할 수 있는 방법을 고안하는 것이 중요할 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 검출부와 작품 표면 사이의 거리를 일정하게 유지할 수 있는 Z축 거리 유지 장치를 고안하고, 이를 테라헤르츠 검출부에 장착하여 스캔을 수행함으로써 표면 굴곡이나 기울어짐에 따른 시간 지연 이미지의 왜곡을 보정하였다(Figure 3~5).

Table 2. Terahertz imaging conditions

Terahertz source	Laser gated photo-conductive semiconductor emitter
Terahertz detector	Laser gated photo-conductive semiconductor receiver
Laser	Ultra short pulse fibre laser
Spectral range	0.06-4 THz (2-133 cm^{-1})
Operating temperature	20-23 $^{\circ}\text{C}$
Operating humidity	50-60%
Focal length of lens	18 mm
Step size	0.5 mm

Figure 3. Processing of THz image. (a): Spectrum of reflected pulse on a spot, (b): Line scan, (c): 2D image, (d): Image scan route.

Figure 4. Z-axis working distance maintaining device and applied on painting.

Figure 5. A correction results of cross section and time sliced image using Z-axis working distance maintaining device.

3.2. 바탕재별 특성 추출

유화의 바탕재는 기본적으로 캔버스 천이 많이 사용되나 종이 보드 및 판넬과 같은 다양한 재료들도 사용된다. 테라헤르츠 이미징 기법을 대상 작품들에 적용한 결과, 바탕재의 구조적 특징을 확인하는 데는 시간 지연 특성을 이용한 단면 이미지나 시간 분해 이미지 보다는 주파수를 조정하여 관찰하는 주파수 분해 이미지가 더 효과적임을 알 수 있었다. 이는 바탕재의 물질에 따라 테라헤르츠파의 흡수·반사 대역이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 캔버스 천의 경우 ‘소년’과 ‘혜화동풍경’에서 확인할 수 있는 바와 같이 약 0.2~0.3 THz의 주파수 대역에서 씨줄과 날줄의 구조적 특징이 가장 잘 관찰되었다. ‘소녀’의 바탕재로 사용된 종이 보드의 경우에는 0.4~0.5 THz의 이미지에서 보드의 형태가 감지되었으며, 펄프를 압축하여 만든 종이의 특성상 조직의 불균질한 형태가 확인되었다. 그러나 종이 보드의 두께와 표면특성으로 인해 이미지의 명확성이 떨어지는 것을 알 수 있었다(Table 3).

3.3. 채색 특징 추출

유화 물감을 사용하여 채색하는 경우, 작품의 중요한 정보 중 하나인 붓터치는 그림의 질감이나 분위기 및 작가의 채색 특성까지도 내포할 수 있기 때문에 시기에 따른 작가들의 기법 변화 등을 연구하는데 유용하게 이용될 수 있다. 테라헤르츠 이미지에서 붓터치의 특성은 최대 반사 신호를 매치시켜 구성한 이미지(peak to peak image)와 시간 지연 효과를 이용한 단면이미지에서 가장 잘 관찰할 수 있었다. ‘소년’의 붓자국 특성을 관찰한 결과, 짧은 붓터치가 다수 반복되는 패턴으로 채색하였음을 확인하였다(Figure 6).

Figure 6. Terahertz image(peak to peak) of brush stroke on ‘Boy’.

Table 3. Terahertz image of support layer on oil paintings

Boy(canvas)	Hyehwadong landscape(canvas)	Girl(paper board)
0.2 THz image	0.3 THz image	0.45 THz image

Table 4. Terahertz cross section image of ‘Boy’

Terahertz imaging area	Terahertz cross section image
<p>↑ Painting layer was thickened <- Forehead</p>
	<p>Canvas was weaken ↑ Painting layer was thickened <- Nose</p>
	<p>↑ Painting layer was thickened - Cheek ↑</p>

특히 양 볼과 눈, 관자놀이 근처에서 일정한 패턴을 그리며 붓자국이 반복되었는데 이는 여러 번 붓질을 하여 겹쳐 칠하였기 때문으로 보인다. 시간 지연 효과를 이용한 테라헤르츠 단면 이미지를 통해서도 붓자국이 반복된 위치인 이마, 콧대, 양 볼의 단면 이미지에서 물감 층위가 두터워진 것을 볼 수 있으며 부위별로 물감 층위의 변화를 파악할 수 있었다(Table 4).

‘혜화동풍경’은 소년에서와는 반대로 비교적 굵고 단순한 붓터치 패턴을 보이고 있다. 채색된 물감층은 캔버스 천에 밀착되어 육안관찰 상으로는 패턴이 명확하게 분별하기는 어려운 지점들이 있었으나, 테라헤르츠 이미지에서는 거의 대부분의 붓자국 특성들이 관찰되었다. Figure 7

의 ③ 지점은 육안 관찰로는 가로로 채색한 듯 보이며 그 이상의 정보 파악이 어려웠으나, 테라헤르츠 이미지에서는 표면의 붓자국만이 아니라 하부층에 세로로 여러 번 채색해나간 흔적을 관찰할 수 있었다. 이는 테라헤르츠 이미징 기법으로 얇은 채색층의 형태까지도 구분하여 관찰할 수 있음을 보여준다. 또한 ① 지점에서는 이 작품이 그려지기 전 밑그림의 흔적이 감지되었는데 Lee *et al.*(2018)의 연구 결과에서 ‘혜화동풍경’의 밑그림이 존재함을 밝힌 것과 일치함을 확인하였다.

3.4. 내부 손상형태 및 구조적 특징 확인

표면에서 관찰할 수 없는 회화 내부 층위의 손상형태나 구조적 특징을 확인할 수 있다면 작품에 대한 정보 파악 범위가 늘어나 다각도로 활용할 수 있을 것이다. 이는 시간 지연 효과를 이용한 단면 이미지와 주파수 분해 이미지를 비교하여 확인할 수 있었다. ‘소년’의 경우 가시광이나 적외선 이미지에서는 관찰할 수 없었던 내부의 요철들이 확인되었는데, 0.28 THz 이미지에서는 인물의 이마 부분에서 원형의 자국이 확인되었으며, 0.35 THz 이미지에서는 뺨 부분에서 물음표 기호와 유사한 형태의 자국이 확인되었다(Table 5). ‘소녀’의 경우에는 눈 사이의 콧대 부분에서 다른 부분과는 구분되는 특징이 0.1 THz 이미지에서 확인되었는데 이 부분에 대한 단면 이미지로 볼 때 내부에 한 차례의 보강이 있었을 것으로 추정된다(Table 6). 또한 인물의 입 부분에서 바탕재인 종이보드의 요철 상태를 정확하게 관찰할 수 있었다.

Figure 7. Terahertz image(peak to peak) of brush stroke and part of hidden image on ‘Hyechwadong landscape’.

Table 5. Uneven parts in the inside of ‘Boy’

Visible image	Infrared image	0.28 THz image	0.35 THz image

Table 6. Uneven parts in the inside of ‘Girl’

Visible image	Infrared image	0.1 THz image	1.5 THz image

Terahertz cross section image(X-axis)

4. 결 론

우리나라 근대기 회화 작품 중 유화는 상당한 비중을 차지하고 있으며, 일부는 근대 문화재로 지정되기도 하였다. 이 시기의 작품들은 50년 이상의 세월이 흐름에 따라 서서히 열화로 인한 손상이 발생하고 있어 보존 처리가 필요해지고 있다. 그러나 보존 처리를 위해서는 현재의 상태를 분석하고 진단하는 것이 우선되어야 한다. 그간 유화작품의 상태 조사에 적외선, 자외선 및 X선 촬영 기법이 이용되어 왔으나 표면에서 드러나지 않는 내부 층위의 들뜸이나 균열 등의 상태 진단에는 한계가 있었다. 근대기의 유화는 바탕재의 종류(캔버스, 종이, 판넬 등)에 따라 차이는 있을 수 있으나 대체로 수 mm의 두께 범위를 가지며, 이는 테라헤르츠파가 침투할 수 있는 재료와 깊이 범위(수 mm~cm)에 해당한다. 이에 본 연구는 테라헤르츠 이미징 기법을 이용하여 우리나라 근대시기 유화 작품의 내부 상태를 분석·

진단하기 위한 접근 방법을 연구하였고 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 유화 작품들의 캔버스 처짐 또는 종이 보드의 휘어짐 현상으로 인한 굴곡은 층위 분석에 활용할 수 있는 테라헤르츠 시간 지연 이미지에 심각한 왜곡을 발생하게 한다. 본 연구에서는 분석 대상 표면과 검출부의 거리를 일정하게 유지할 수 있는 보완 장치를 개발하여 이미지 왜곡을 방지함으로써 작품 내부의 층위 특성을 확인할 수 있었다.
2. 유화의 바탕재 특성과 그림의 하부층위 확인에는 테라헤르츠 시간분해 이미지보다 주파수분해 이미지에서 관찰이 용이하다. 이는 바탕재나 물감과 같은 물질의 종류에 따라 테라헤르츠파의 흡수·반사 대역이 다르기 때문으로 판단된다.
3. 붓터치 등 작가의 채색 기법 확인에는 최대 반사 신호

를 매치시켜 구성한 이미지(peak to peak image)와 시간 지연 효과를 이용한 단면 이미지를 활용하는 것이 효과적이다.

4. 표면에서 관찰할 수 없는 작품 내부 층위의 손상 형태나 구조적 특징 확인에는 시간 지연 효과를 이용한 단면 이미지와 주파수 분해 이미지를 비교하여 판단하는 것이 유용하다.
5. 3점의 작품에 대한 테라헤르츠 이미지 분석 결과, ‘소년’과 ‘소녀’에서는 시간 지연 효과를 이용한 단면 이미지와 주파수 분해 이미지를 통하여 내부의 구조적 손상 자국을 확인할 수 있었고 ‘해화동풍경’에서는 peak to peak 이미지를 통하여 작가의 붓터치 방식을 확인할 수 있었다.

이러한 연구 결과는 향후 우리나라 근대기 유화의 예방 보존 및 보존처리를 위한 상태 분석과 진단의 한 방법으로 유용할 것으로 보이며, 회화작품의 과학적 감정분야에서도 활용 가능할 것으로 기대한다. 그러나 테라헤르츠 이미지 분석이 만능은 아니므로 타 분석기법과 교차하여 최대한의 정보를 확보해야 할 것이다. 또한 본 결과는 캔버스와 종이 보드를 바탕재로 한 유화 작품에 국한하여 적용한 것이므로 앞으로 더 다양한 바탕재와 재료가 사용된 작품에 지속적으로 적용을 시도하는 연구를 진행하여 세밀한 분석 툴을 확립해나가는 것이 필요하다.

사 사

본 연구는 한국콘텐츠진흥원 문화기술연구개발사업 ‘근대 회화작품 보존·인증·확인을 위한 진단·분석 기술 개발’의 지원을 받아 수행되었으며, 작품을 대여해주신 대전시립미술관과 전창곤 선생님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, J.W., 2016, A study on the damage types of the oil paintings. Master's thesis, Konkuk University, Cheongju, 1-22. (in Korean with English abstract)
- Baek, N.Y., Kang, D.I., Ha, T.W., Sim, K.I., Lee, H.W., Kim, J.H. and Lee, H.H., 2016, Study of noncontact condition diagnosis on painting with terahertz waves. *Journal of Conservation Science*, 32(2), 235-247. (in Korean with English abstract)
- Fukunaga, K., Ogawa, Y., Hayashi, S. and Hosako, I., 2007, Terahertz spectroscopy for art conservation. *IEICE Electronics Express*, 4(8), 258-263.
- Fukunaga, K. and Picollo, M., 2014, Terahertz time domain imaging for cultural heritage. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 56(3), 142-146.
- Hong, T.Y., Choi, K.J., Ha, T.W., Park, B.C., Sim, K.I., Kim, J.H., Kwon, J.E., Lee, S.H., Kang, D.I. and Lee, H.H., 2014, Terahertz time-domain and fourier-transform infrared spectroscopy of traditional Korean pigments. *Journal of the Korea Physical Society*, 64(5), 727-731.
- Kim, E.J., 2009, Formation of Korean western painting and painting style of 1930s. Master's thesis, Chungbuk National University, Cheongju, 1-8. (in Korean with English abstract)
- Köhler, W., Panzer, M.J., Klotzbach, U., Beyer, E., Winnerl, S., Helm, M., Rutz, F., Jördens, C., Koch, M. and Leitner, H., 2006, Non-destructive investigation of paintings with THz-radiation. 9th European Conference of NDT, Berlin, September 25-29, 181.
- Lee, H.H., Jung, C.H., Baek, N.Y., Song, Y.N., Kim, M.J. and Chung, Y.J., 2018, Feature detection of paintings using hyperspectral imaging technique. *The Korean Society of Conservation Science for Cultural Heritage*, Cheongju, November 2-3, 43-44. (in Korean)
- Rhee, C.H., 2008, Terahertz pulsed imaging and its applications. *New Physics: Sae Mulli*, 56(2), 51-62. (in Korean with English abstract)
- Science Daily, 2019, Ancient Roman man hidden beneath famous painting at the Louvre. <https://www.sciencedaily.com> (May 1, 2019)