

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.2.329

JCCT 2022-3-42

고문서 거란문자의 능동형 적외선 열영상 가시화

Visualization of Khitan Scripts in Ancient Documents using Active Infrared Thermography

김노유*, 정재영**

Nohyu Kim*, Jaeyoung Chung**

요약 양피지로 만들어진 고문서에 필사된 후 오랜 시간동안 부식되고 자연 훼손되어 해독하기 어려운 거란문자를 문서를 손상시키지 않으면서 비접촉방식으로 가시화하기 위해 능동형 적외선 열화상 기술을 개발하였다. 문서 표면에 할로겐 램프를 이용하여 광대역 적외선을 정현파 형태로 변조/입사시키면서 서체 부분과 기록용지 표면으로부터 차별적으로 방사되는 적외선을 영상화함으로써 훼손되어 잘 보이지 않는 고대 글자를 가시화 하였다. 능동형 적외선 영상으로부터 거란 문자로 추정되는 문자들을 기존의 광학영상이나 적외선 영상보다 명확하게 관독할 수 있었으며 그 결과로서 영어 알파벳의 ‘d’ 음가를 가지는 거란문자인 ‘ᄃ’나 ‘ri’ 발음의 거란문자인 ‘夫’를 포함하여 다양한 거란문자를 확인할 수 있었다. 이로써 본 연구를 통해 개발된 능동형 적외선 기술이 향후 고문서 자료의 디지털 복원과 보존에 능동형 적외선 열화상기술이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 고문서, 거란문자, 열화상, 디지털 복원, 능동형 적외선 기술

Abstract Unreadable Khitan scripts of ancient documents written by indian ink on parchment(sheepskin) are visualized by active infrared thermography without contacting and damaging the document which are deteriorated and aged presumably over many years. Sinusoidal infrared thermal wave using Halogen lamp is applied to the surface of the document in order to selectively magnify and record the thermal response of indian ink. The infrared image of the document captured in real time by infrared camera under the active external excitation shows the better sharpness and readability of Khitan characters than the optical image, from which many Khitan letters like ‘ᄃ’ and ‘夫’ sounding as ‘d’ and ‘ri’ in English alphabet are detected and deciphered. It is concluded from the experiment that the active infrared thermography can be used as a promising method for digital reconstruction and preservation of ancient documents in the future.

Key words : Ancient Documents, Khitan Script, Thermal Image, Digital Reconstruction, Active Infrared Thermography

1. 서론

거란 문자(契丹文字, Khitan scripts)는 거란어를 표기하기 위해 요(遼)나라 황실에서 만든 문자이다. 10세기

초 건국된 거란(契丹)은 중국을 침략할 정도로 동북아의 절대 강자로 부상했으며 926년 발해를 멸망시키고 고려시대에는 200년간 고려와 활발한 교류와 함께 거란이 멸망한 후에는 상당수의 거란인들이 고려에 복속한

*정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수 (제1저자)

**정회원, 한국기술교육대학교 교양학부 교수 (참여저자)

접수일: 2022년 1월 4일, 수정완료일: 2022년 3월 1일

게재확정일: 2022년 3월 8일

Received: January 4, 2022 / Revised: March 1, 2022

Accepted: March 8, 2022

*Corresponding Author: nykim@koreatech.ac.kr

Dept. of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, Korea

것으로 알려지고 있다. 거란 문자는 한자의 모양과 원리를 참고하여 만든 거란의 고유 문자로서, 당시 거란이 고유의 거란 문자를 만들어 200년 동안 사용했음은 잘 알려지지 않은 부분이며 한글 수준에는 못 미치지만 거의 완벽한 표음문자라는 점에서 지금도 연구할 가치가 큰 것으로 평가되고 있는데 역사 자료로서도 중요하지만 우리말과의 관련성 연구를 위해서도 매우 필요한 언어이다. 그러나 1125년 거란이 멸망하면서 사용이 쇠퇴해갔고, 금에 의해 공식적으로 사용이 금지되어서 현재 남겨진 자료가 적어서 거란문자를 제대로 해독하기는 어려운 실정이다. 국내에 현존하는 거란문자의 예로서 국립중앙박물관에 “거란소자 칠언절구 동경(契丹小字七言絶句銅鏡)”이 보관되어 있는데, 시문으로서 거란 언어의 특색을 잘 구현하고 있어 거란 문자 연구에 중요한 사료가 되고 있지만 남겨진 자료가 한정되어 있고 학자마다 해석이 달라 해독에는 이르지 못하고 있다[1].

거란 문자를 해독하기 위해서는 거란 문자로 기록된 자료가 다수 필요한데 국내에는 이러한 자료가 부족하고 우리말과 상당한 접촉과 관련이 있었음에도 불구하고 국내에서는 연구의 필요성은 제기되었지만 실제 연구가 이루어진 것은 별로 없다. 최근 들어 몽골이나 중국과의 국제적인 공동연구가 시작되고 교육과학기술부 한국학진흥사업단의 지원으로 요사(遼史) 번역과 관련하여 국제학술대회를 개최하면서 국내에서도 중국과 몽골등지로부터 거란 고문서가 소개되고 연구되기 시작하였다[2]. 그러나 거란문자를 포함하는 고문서들이 오랜 시간 동안의 부식과 오염등으로 글자들이 훼손되어 판독이 불가능한 부분들이 많아 기존에도 부족한 거란유물들이 그 문화적 유산으로의 가치를 다하지 못하고 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 양피지로 만들어진 고문서에 기록된 거란문자(Khitan scripts)의 판독성(legibility)을 높이기 위해 능동형 적외선 열화상 기술을 개발하고 이를 사용하여 고문서를 전혀 손상시키지 않으면서도 오염이나 부식, 변색등으로 인해 잘 보이지 않는 문자들을 적외선 영상으로 가시화하였다. 고문서 표면에 할로겐 램프를 이용해 광대역 적외선을 정현파의 형태로 주기적인 에너지를 인가하면서 기록문자와 양피지로부터 방사되는 적외선 에너지를 가진 함수와 동기시켜 취득함으로써 위상잠금 적외선(Phased lock-in Infrared Image) 영상을 생성하였는데 종래의 광학이미지나 적외선 이미지에

비해 개선된 영상을 획득할 수 있었다.

II. 능동형 적외선 열화상 장치개발

전통적인 적외선 검사기술은 검사대상체가 자체적으로 생성하는 볼츠만 복사열(Boltzman thermal radiation)을 적외선 센서로 영상화하는 수동적인 측정 방법(passive method)으로서 간편하고 넓은 면적을 실시간으로 검사할 수 있어서 그림 1과 같이 의료진단이나 소방안전, 군사 및 비파괴검사분야에 널리 이용되고 있다[3-5].

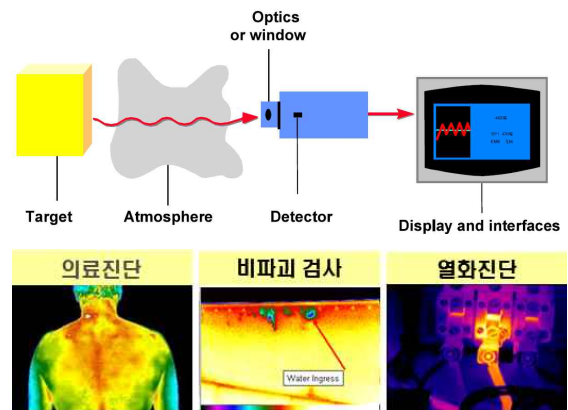


그림 1. 적외선 검사기술의 원리와 적용분야
Figure 1. Principle and Applications of Infrared Thermography

그러나 종이가 개발되기 이전에 목간이나 양피지등과 같은 얇은 재료에 먹물(chinese ink)로 필사된 고문서의 문자는 오랜 시간 동안 글자가 퇴색하고 없어질 뿐만 아니라 대나무나 양피지 자체가 변질되어 기록된 글자를 해독하기 어렵게 만든다. 더구나 고대 거란 문자나 이두(吏讀)와 같은 고어체에서 사용되는 방점이나 획의 유무가 문자의 뜻을 전혀 달리하는 경우가 있어 고대문자의 해석에 더욱 혼선을 주고 있다. 이러한 고문서의 정밀 판독을 위해서 그동안 적외선 기술이 활용되어 고고학이나 문화재 복원 분야에서 널리 활용되었는데 단순한 현미경이나 광학영상에 비해 대체적으로 양호한 영상품질을 제공하고 있다. 하지만 본 연구에서의 대상 문서와 같이 동물의 가죽으로 만들어진 경우, 자체 재질의 변색과 변형, 그리고 표면에 곰팡이나 석출물, 오염 물질등이 부착되어 종래의 적외선 방법으로는 해독 가능한 영상을 얻는데 한계가 있다. 이러한 점을 개선하기 위해 본 연구에서는 기존의 수동적인 (passive) 적외선 기술(그림 2(a) 참고)과는 달리 그림

2(b)와 같이 별도의 에너지원을 사용하여 외부에서 시험체에 정현파로 변조된 파동 에너지를 인가한 후에 시험체로부터 발생하는 적외선 응답 특성을 영상화하는 능동형 적외선 열화상 기술(active infrared thermography)을 개발하였다. 이 기술은 영상 감도가 우수하여 미세한 표면상태의 변화를 정확하게 검사할 수 있어서 최근 그 활용도와 적용범위가 확대되고 있다[6-9].

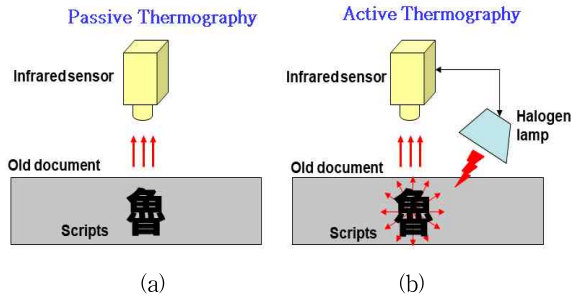


그림 2. 수동형 적외선 기술(a)과 능동형 적외선 기술(b)
 Figure 2. Passive(a) and active(b) infrared Thermography

개발된 적외선 장치에서는 외부의 에너지원으로 할로겐 램프(Halogen lamp)를 사용하였는데 그림 2(b)에서 보여주는 것과 같이 시험체에 광대역 적외선을 만들어 주는 할로겐 램프를 근거리 위치시키고, 정현파 형태로 할로겐 램프의 에너지를 입사시키면서 문서 표면의 글씨부분과 기록용지(양피지)가 동일한 에너지를 흡수한 후 방사하는 적외선(赤外線, infrared field)을 카메라로 영상화하여 문자를 가시화하였다.

이 능동형 적외선 열화상 기술의 구체적인 내용과 장치를 그림 3에서 설명하고 있는데 크게 다섯 부분으로 구성된다. 첫째로는 검사 대상체로부터 방사되는 열 에너지를 감지하여 열화상 이미지를 획득하는 적외선 열화상 카메라이며, 둘째는 검사 대상체에 능동적으로 적외선 에너지를 입사시키기 위한 할로겐 램프, 세 번째는 할로겐 램프에 대전류 교류 전력을 공급하고 증폭/변조/제어하는 전력제어장치, 네 번째는 할로겐 램프와 적외선 카메라를 동기 제어하고 데이터를 수집하는 인터페이스 장치, 그리고 마지막으로 열화상 이미지 신호로부터 위상신호(phase)나 정보를 추출하고 이로부터 문자 영상을 생성하는 Labview기반의 운영 소프트웨어 부로 나누어진다. 이 다섯 부분은 전체적으로 컴퓨터에서 통제되고 운영되는데 IEEE-1394를 통하여 가진원(할로겐 램프)의 가진 주기와 에너지를 조절함과 동시에

적외선 카메라의 이미징 타임(frame grabbing)을 동기시켜 대상체로부터의 신호를 실시간으로 수집하도록 설계/제작되었다[10].

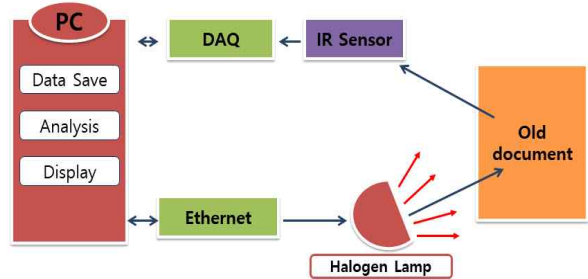


그림 3. 능동형 광기반 적외선 검사 장치
 Figure 3. Active Optical Infrared Thermography

그림 3의 할로겐 램프는 디지털 전력제어장치(power controller)에서 위상 제어를 통해 조화함수 형태로 전류가 공급되는데 이 에너지 신호와 동기되어 작동하는 적외선 카메라로부터 한 주기에 4번 이상의 열영상(thermal image)을 취득하여 위상이미지를 생성할 수 있도록 그림 4와 같은 위상잠금 영상화 기술을 사용하였다[11,12].

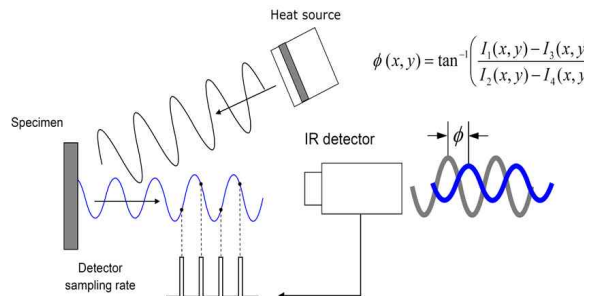


그림 4. 능동형 적외선 검사기술의 위상잠금 영상화 방법
 Figure 4. Lock-in Imaging of Active Infrared Thermography

시험에서 사용된 적외선 카메라는 FLIR사의 Thermovision A20인데 마이크로 볼로미터(micro-bolometer) 타입의 검출기(FPA)로서 스펙트럼 범위가 7.5~13μm이며 분해능(FOV)이 2.1 mrad인 렌즈가 장착되어 0.1℃의 온도 민감도와 160×120 pixel의 공간 해상도를 가진다. 컴퓨터와 Labview로 연동되어 적외선 열화상 이미지를 16-bit 색으로 표시하면서 60Hz의 실시간 이미지 획득이 가능하고 이미지 전송은 firewire/ethernet으로 이루어지는데 IEEE 1394를 이용하여 PC와 통신이 가능해서 디지털 입출력단자를 통해 기능을 제어하거나 이미지를

실시간으로 전송받을 수 있다. 전체적으로 완성된 능동형 광기반 적외선 열화상 장치를 그림 5에서 보여주고 있다.

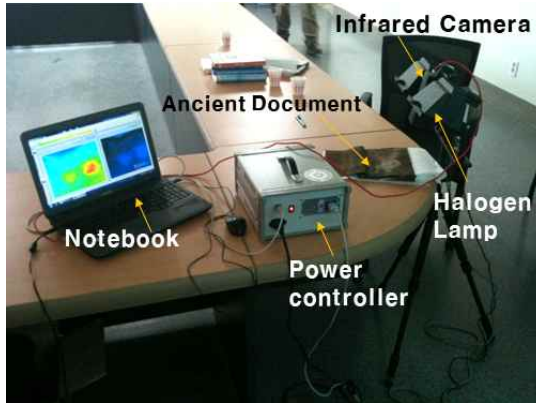


그림 5. 개발된 능동형 광기반 적외선 검사장치
Figure 5. Equipment for Active Infrared Thermography

III. 거란 고문서

본 연구에서 시험한 고문서는 고대 거란문자로 추정되는 글자(script)가 양피지 표면에 기록된 무술서(martial arts book)이다. 이 무술서의 표지를 그림 6에서 보여주고 있는데 문서의 표제(表題, title)를 보면 문자의 형태는 중국 한자와 비슷하지만 이제는 사용하지 않는 고대 거란문자로 추정되며 해독할 수 없는 관계로 표제의 뜻을 알 수 없지만 문서내의 그림을 통해 고대 거란병사들의 무술을 훈련하기 위해 만들어진 훈련서라고 판단된다. 이 문서는 전체적으로 맨 손을 사용해 격투하는 동작이나 자세를 서술하는 부분과 칼과 같은 무기를 사용해 격투하는 방법을 설명하는 부분으로 나뉘는데, 두 개의 부분에서 공통적으로 그림을 통해 우선 무술동작을 나타낸 후 그림 주변이나 전후 페이지에 동작 자세에 대한 설명이 부기되어 있는 형태로 구성되었다. 그림 7은 이러한 구성의 예를 보여주고 있는데 그림 7(a)는 병사의 칼 동작을 그림으로 보여주고 있으며 그림 7(b)는 이 그림에 대한 상세한 설명을 연결된 페이지에서 기술하고 있다. 이 문서는 전체적으로 약 20개의 무술 동작을 설명하고 있으며 모든 페이지는 표지와 같은 재질인 양피지로 제작된 것으로 추정된다. 그림 8(a)는 맨손 동작을 보여주고 있는 한 예로서 그림 주변에 동작을 설명하는 거란문자들이 적게는 3-4개에서 많게는 20-30개정도로 나타나는데 그림 8(b)은

이러한 설명부분을 크게 확대하여 보여주고 있다.



그림 6. 고대 거란 무술서 표지, (a) 전체, (b) 표제부 확대
Figure 6. Cover page of Ancient Martial Arts book, (a) entire view, (b) enlarged view of title



그림 7. 거란 무술서의 내용(무기), (a)동작그림, (b) 설명부분
Figure 7. Content of Khitan Martial Arts book(armed), (a) motion drawing, (b) description



그림 8. 거란 무술서의 내용(맨손), (a)동작그림, (b) 설명부분
Figure 8. Content of Khitan Martial Arts book(unarmed), (a) motion drawing, (b) description

그림 8(b)를 보면 글자의 형태가 있어 설명의 존재는 확인할 수 있지만 육안으로 판독할 만큼 구체적인 형태나

획, 부수들을 확인하기는 어려웠다. 문서의 페이지에 따라서 거란문자임을 추정하게 하는 선명한 글자도 있지만 많은 경우에는 글자를 해독하기 어려울 정도로 표면이 손상되거나 오염되었다.

IV. 실험 및 결과

본 연구에서 개발한 능동형 적외선 영상장치는 휴대용으로 개발되었기 때문에 부피가 작고 가벼워서 박물관이나 고문서가 보존되어 있는 장소로 이동하여 적외선 검사가 가능하였다(그림 5 참고). 이번 연구를 위해서 적외선 장비를 이동하여 경북대학교에서 소장하고 있는 거란 무술지(추정)를 검사하였는데 일반적인 세미나실에서 적외선 촬영 작업을 수행할 수 있었다. 적외선 영상작업을 위해 테이블위에 고문서를 위치시키고 이 문서에 수직으로 두 개의 동일한 할로겐 램프로 대칭으로 설치한 후에 고문서에서 약 30cm정도 떨어진 위치(높이)에서 할로겐 램프로 광대역 적외선을 입사시키면서 고문서에서 방사되는 적외선 분포를 가시화하였는데 그 과정을 그림 9에서 보여주고 있다. 그림 9(a)는 테이블의 측면에서 고문서를 두 개의 할로겐 램프로 가진하면서 그 사이에 위치한 적외선 카메라로부터 문서의 적외선 이미지를 취득하는 모습이며 그림 9(b)는 같은 과정을 테이블 위에서 바라본 평면도로 보여주고 있다.

할로겐 램프(1kW)의 동작조건은 최대 1A의 전류를 0.5Hz의 주파수로 SCR회로를 이용해 정현파 형태로 전력을 변화시키면서 고문서에 광대역 적외선을 입사시켰으며 이 할로겐 램프 신호와 동기된 적외선 카메라에서의 영상 샘플링 속도는 8Hz로 작동되었다. 이 속도는 적외선 영상으로부터 위상 이미지(phase image)나 진폭이미지(amplitude image)를 얻기 위해서 필요한 것으로서 앞 절에서 기술한 위상잠금 영상을 얻기 위해서 할로겐 램프가 한 번의 주기를 반복할 때마다 16개의 적외선 영상을 취득하였다. 본 실험에서는 적외선 이미징 속도를 할로겐 램프 가진 주파수의 16배에 해당하는 8Hz로 사용하여 충분한 영상을 확보하였으며, 실험에서 사용된 할로겐 램프의 적외선 에너지는 약 30cm의 거리에서 대상물체의 표면온도를 최대 2-3 °C 높이는 정도에 불과하여 수 초 동안의 짧은 시간에 이루어지는 적외선 검사시험에서는 고문서에 손상을 주지는 않을

것으로 판단된다. 이러한 기진 조건에서 고문서의 문자들을 영상화하였는데 문자들이 검은 먹물(black chinese ink)로 기록된 관계로 적외선 흡수 계수가 높아서 글자들은 온도가 급격히 높아지므로 붉은 색으로 나타나고 기록용지(양피지)는 적외선 흡수계수가 상대적으로 낮아 온도가 낮기 때문에 녹색으로 나타났다. 따라서 순간적인 적외선 가진을 통해 문자부와 기록용지(양피지)의 발열과 방사특성의 차이를 극대화함으로써 문자의 형태를 선명하게 가시화 할 수 있었으며 이 적외선 열화상으로부터 고문서에 기록된 대부분의 문자들을 성공적으로 가시화할 수 있었다.

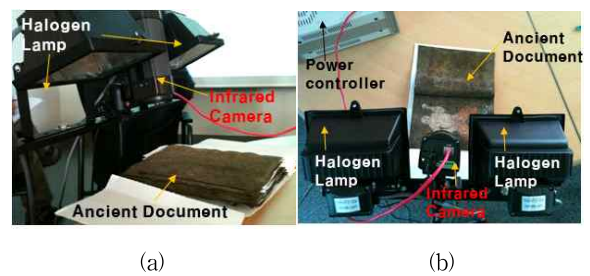
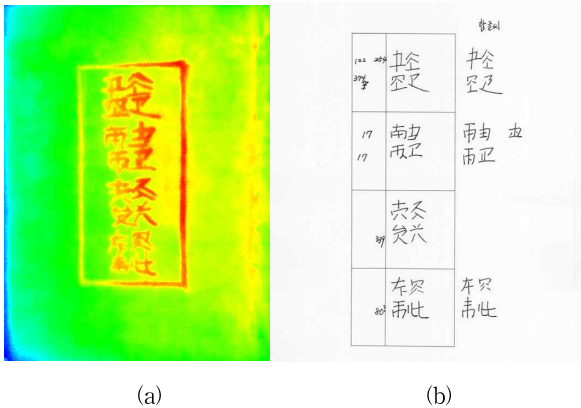


그림 9. 거란문서의 능동형 적외선 검사, (a)측면도, (b)평면도
Figure 9. Infrared Imaging of old Khitan document, (a) side view, (b) top view

첫 번째로 수행한 능동형 적외선 시험에서는 그림 6에 나타난 거란 고문서의 표지를 영상화하였는데 그 결과를 그림 10에서 보여주고 있다. 그림 10(a)는 문서 표지를 광학 카메라로 촬영한 결과로서 기록용지(양피지) 전반에 얼룩이나 오염된 부분들이 널리 퍼져있어 문자를 읽기 어렵거나 부분적으로는 불가능하였지만 그림 10(b)에 나타난 능동형 적외선 이미지에서는 먹물로 필사된 부분이 문서 재질인 양피지와 크게 대비되어 나타났다. 특히 오염부이나 얼룩 등은 억제되고 글자만이 차별화되어 나타나기 때문에 문자를 판독하기 용이해진 것을 확인할 수 있다. 이 적외선 영상을 토대로 고문서 표지에 나타난 거란문자를 판독한 결과를 그림 11(b)에서 보여주고 있는데 적외선 이미지가 해독문자를 잘 표시하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 판독된 거란문자들의 뜻을 파악하기에는 아직 세계적으로 자료가 크게 부족해 무슨 의미인지를 알 수는 없었다. 다만 개발된 적외선 기술이 거란문자를 인지하고 해독하는데 큰 도움이 될 수 있음을 확인하였다.



(a) (b)
 그림 10. 고문서 표지 영상, (a)광학영상,(b)능동형 적외선 영상
 Figure 10. Image of the book cover, (a) optical image, (b) Infrared image



(a) (b)
 그림 11. 능동형 적외선 영상(a)에 의한 문자해독 결과(b)
 Figure 11. Infrared Image(a) and deciphered characters(b)

다음으로는 종래의 수동형 적외선 기술과 본 논문에서 개발된 능동형 적외선 기술을 비교하기 위해 동일한 문서를 두 가지 방법으로 적외선 영상을 촬영하였다. 그 결과를 그림 12에 나타내었는데 그림 12(a)는 외부에서 가진 에너지를 사용하지 않고 촬영한 종래의 적외선 이미지이고 그림 12(b)는 능동형 적외선 이미지인데 종래의 방법에 비해 능동형 적외선 방법이 먹물로 필사된 문자만을 기록지(양피지)의 상태나 오염물질과 차별화해서 선택적으로 잘 보여주는 것을 알 수 있으며 이를 통해 문서의 가독성(可讀性, legibility)이 개선될 수 있음을 확인하였다.

또한 문서내부의 문자들 중에서 흥미있는 사례를 적외선으로 영상화한 결과를 그림 13에서 보여주고 있는데 이 영상은 병사의 무술 동작 옆에 기술된 간단한 문자 두 개를 나타낸다. 그림 13의 적외선 이미지에서 글자의 부수과 모양이 선명하게 보이는 것을 알 수 있으며,

이 결과를 이용해 영상내의 글자들을 기준에 알려진 거란문자로 판독할 수 있었는데 판독 결과를 그림 14에서 보여주고 있어서 적외선 영상이 판독의 정확성과 편리성에 기여하는 것으로 생각된다. 마지막으로 격투 동작에 대한 설명이 기록된 페이지들 중의 한 예를 그림 15에서 제시하였는데 앞선 결과들과 마찬가지로 다수의 문자들이 기록용지와 차별화되어 선명하게 나타나는 것을 알 수 있다.

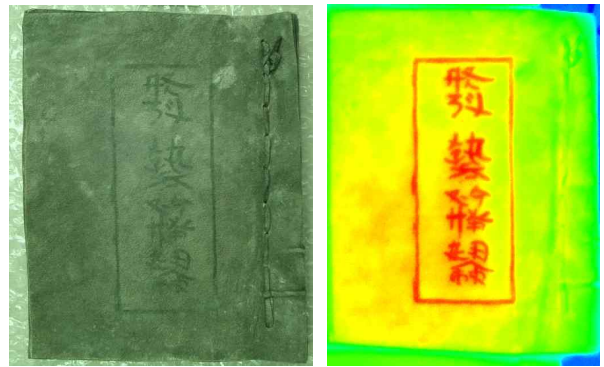


그림 12. 거란 고문서 표지의 영상, (a)수동형 적외선 영상, (b)능동형 적외선 영상
 Figure 12. Image of Khitan book cover, (a) passive infrared image, (b) active Infrared image

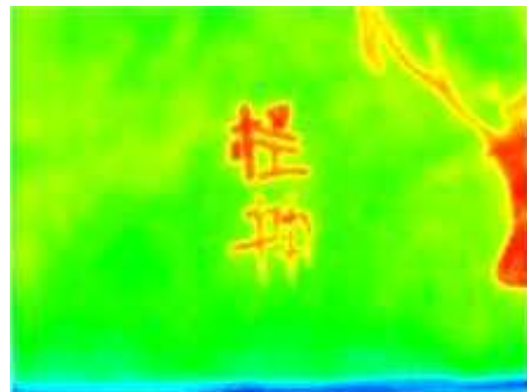


그림 13. 동작 그림과 병기된 두 글자의 적외선 영상
 Figure 13. Infrared image of two letters in the document

조사된 문서내의 다른 페이지들에서도 앞선 결과들과 비슷한 적외선 영상을 얻을 수 있었으며 이 시험 결과들로부터 본 연구에서 개발한 능동형 적외선 기술이 기록문자의 적외선 방사율을 선택적으로 증폭시킴으로써 오염물질이나 부패, 훼손으로부터 문자를 효과적으로 가시화할 수 있었으며 추후 이를 활용한다면 필사된 고대 문자의 가독성(legibility)을 증대시키는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.



그림 14. 동작 그림과 병기된 두 글자의 판독결과
 Figure 14. Deciphered image of two letters in the document

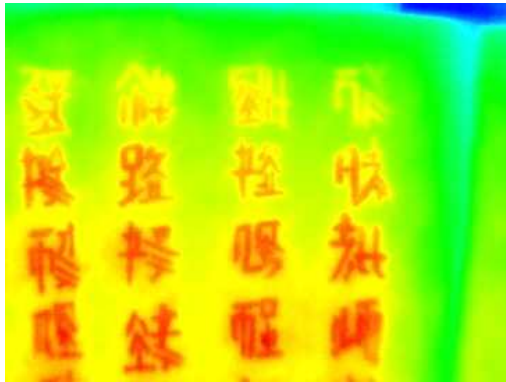


그림 15. 문서 내부의 설명문에 대한 적외선 영상
 Figure 15. Infrared image of Khitan characters in the document

V. 결 론

오랜 시간에 걸쳐 오염되고 변색된 고문서에 기록된 문자들의 판독성(readability)을 높이기 위해 종래의 수동적인 적외선 영상방법을 개선하여 능동적으로 외부에서 적외선을 조사한 후 시험체에서 방출되는 적외선을 영상화하는 능동형 적외선 열화상 시스템을 개발하고 이를 이용하여 거란 문자로 기록된 고문서의 문자들을 성공적으로 가시화하였다. 휴대용으로 개발된 능동형 적외선 장치를 이용해 비접촉 방식으로 거란 고문서에 대한 선명한 적외선 영상을 실시간으로 취득할 수 있었으며 일반 광학영상이나 수동형 적외선 영상과 비교해 비해 우수한 것으로 나타났다. 특히 표면의 오염 물질이나 변색으로 인해 인식하기 어려운 글자들이 기록 용지와 차별화되어 상대적으로 잘 나타나는 것을 확인

할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 능동형 적외선 열화상 장치와 기술을 통해 고문서의 손상된 기록문자들을 실시간으로 영상화 할 수 있음을 실험적으로 검증하였으며 향후 고대 문자가 기록된 문화재의 디지털 복원과 보존에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. G. Ulhicun and Y. Michimasa, "The Khitais and Jurchens as Seen from the Korea Peninsula", *Kyoto University Press*, 2011
- [2] S. G. Lee, "A Study of Khitan Language on the Vocabulary Explanation in the History of Liao" *Mongolian Studies*, Vol. 32, pp. 163-186, 2012
- [3] M. Choi and W. Kim, "The Utilization of Nondestructive Testing and Defect Diagnosis using Infrared thermography" *The Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531, 2004
- [4] Y. Chung, R. Shrestha, S. Lee and W. Kim, "Thermographic Inspection of Internal Defects in Steel Structures: Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography" *Sensors*, Vol. 21, No. 6015, pp. 01-27, 2020
- [5] N. Kim and Z. Lim, "Thermographic Detection of Surface Crack Using Holomorphic Function of Thermal Field," *The Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 3, pp. 296-301, 2012
- [6] M. Choi, J. Park, K. Kang, W. Kim and K. Kim, "Defect sizing and Location by Lock-in Photo-infrared thermography," *The Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 322-327, 2007
- [7] S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber, D. Dantz, U. Lambert, F. Altmann, "Lock-in IR-thermography -A novel tool for material and device characterization", *Solid State Phenomena*, Vol. 82-84, pp. 741-746, 2002
- [8] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in thermography: basics and use for functional diagnostics of electric components", *Springer, ISBN 3-540-43439-9*, pp. 18-23, 2003
- [9] S. Y.. Pyo, Se Young and K. H. Kim, "A Study on Remote Fault Diagnosis System of Special-purposed Vehicle," *The Journal of Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 4 No. 3, pp. 221-226, 2018.

- [10]N. Kim and S. Y. Yang, “Thermographic Inspection of Fatigue Crack by Using Contact Thermal Resistance,” *The Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 2, pp. 187-192, 2013.
- [11]T. Min, H. Na and N. Kim, “Development of LABVIEW program for Lock-in infrared Thermography,” *The Journal of the Korean Society of Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 3, pp. 296-301, 2011.
- [12]N. Phanthuna and F. cheevasuwit “Contrast Image Enhancement Using Multi-Histogram Equalization”, *The International Journal of Advanced Culture Technology (IJACT)*, Vol. 3, No. 2, pp. 161-170, 2015.

※ 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2021 M2E6A1084689)과 2021년도 한국기술교육대학교 교수교육연구진흥과제 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.