

X선 형광분광분석을 통한 보물 『남명천화상송증도가(南明泉和尚頌證道歌)』 공인본의
금속성분 검출과 인쇄 방법 추정

Detecting Metal Elements and Estimating the Printing Method of the Korean
Treasure the Gongin version of *The Song of Enlightenment*
(南明泉和尚頌證道歌) through X-ray Fluorescence Spectroscopy

유우식^{1,2,4*}, 원서영³, 김형진³

¹웨이퍼마스터스

²국민대학교 산림과학연구소

³국민대학교 문화재보존학과

⁴경북대학교 인문학술원

Woo Sik Yoo^{1,2,4*}, Seo Young Won³ and Hyoung Jin Kim³

¹WaferMasters, Inc., Dublin, CA 94568, U.S.A.

²Institute for Forest Science Research, Kookmin University, Seoul 02707,
Korea

³Department of Conservation of Cultural Heritage, Kookmin University,
Seoul 02707, Korea

⁴Institute of Humanities Studies, Kyungpook National University, Daegu
41566, Korea

*Corresponding author

E-mails: woosik.yoo@wafermasters.com

Phone: +1-650-796-8396

초록

『남명천화상송증도가(南明泉和尚頌證道歌)』의 유사 판본 중에서 2012년에 보물로 지정된 고서(1239년 금속활자 인쇄본으로 추정)를 X선 형광분광분석(XRF)으로 종이와 인쇄된 글자에 함유된 미량 금속 성분의 검출을 시도하였다. X선

형광분광분석은 휴대용 측정 장치를 사용하였으며 측정영역은 직경 3 mm의 공간 분해능을 얻을 수 있도록 조정하였다. 먹으로 인쇄되지 않은 영역에서는 Ca, Si, Mg, K, Al, S, P, Fe의 순서로 1.7%에서 800 ppm으로 성분비가 낮아졌다. 먹으로 인쇄된 영역에서는 인쇄되지 않은 영역의 기준치보다 S와 Fe 성분이 각각 최대 약 4.3배와 1.3배 높게 검출되었다. 인쇄 당시에 금속활자에 묻은 먹이 금속 표면과 화학 반응을 일으켜 종이에 전사되어 남아있던 것이 검출된 것으로 추정된다. 고려시대 금속활자는 구리(Cu) 성분을 많이 포함하는 동활자로 알려져 있으나 예상과는 다르게 Cu 성분은 종이와 인쇄된 영역에서 통계적으로 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 측정이 이루어진 모든 페이지에서 먹으로 인쇄된 글자에서 Al, S와 Fe 성분이 높게 측정되는 것으로 보아 조사 대상 『남명천화상송증도가』 판본은 금속활자로 인쇄된 것으로 판정된다. 고서의 인쇄영역과 종이 부분의 구성 원소를 X선 형광 스펙트럼을 체계적으로 측정하고 분석하여 신뢰성 있는 데이터를 얻게 된다면 정량화된 분석데이터를 바탕으로 분석 대상 고서의 인쇄 방법을 간편하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

중심어: 『남명천화상송증도가(南明泉和尚頌證道歌)』, 금속활자본, X선 형광 분광분석, 금속 성분 검출, 인쇄 방법 판별

ABSTRACT

Among the very similar editions of *The Song of Enlightenment* (南明泉和尚頌證道歌), an old book designated as a Korean treasure in 2012, which is believed to have been printed with metal type in 1239. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) signals were measured to detect traceable amounts of metallic residue in printed characters and blank area of papers. A portable XRF device with a spatial resolution of 3 mm in diameter was used. In blank area of paper with no carbon-based ancient ink, the detected elements decreased from 1.7% percent to 800 ppm in the following order: Ca, Si, Mg, K, Al, S, P, and Fe. In printed areas with carbon-based ancient ink, higher S and Fe signals were detected up to 4.3 and 1.3 times, respectively. It is presumed that a substance that caused a chemical reaction with the metal surface of the metal type was transferred and remained on the paper as residues. Metal type from the Goryeo Dynasty is known to contain a large amount of copper. Contrary to expectations, no statistically significant difference in Cu content was found between blank paper and printed areas. The difference between Cu signals was not as significant as expected. As the Al, S and Fe concentrations

were measured to be higher in the characters printed with the ancient carbon-based ink on all pages. It is reasonable to conclude that the examined version of *The Song of Enlightenment* was printed with metal type in 1239 as stated in the postscript. By systematic measurement and careful analysis of X-ray fluorescence signals from the printing areas and blank paper areas of old books, the printing method can be easily estimated with high level of confidence.

Keywords: *The Song of Enlightenment* (南明泉和尚頌證道歌), metal movable type printed book, X-ray fluorescence (XRF) spectroscopic analysis, detection of metallic elements, printing method determination

1. 서론

금속활자의 발명은 고려에서 이루어졌다. 독일의 구텐베르크의 인쇄술만큼 세계적인 주목과 평가를 받지는 못했지만, 고려의 기술자들이 이루어낸 인류사에서 큰 의미를 갖는 위대한 발명이다. 1377년 청주 흥덕사에서 금속활자로 인쇄된 『백운화상초록 불조직지심체요절(白雲和尚抄錄佛祖直指心體要節)』(또는 『직지(直指)』)은 현존하는 세계 최고의 금속활자본으로 널리 알려져 있으며, 1455년경에 서양에서 최초로 금속활자로 인쇄된 구텐베르크의 43행 성서와 함께 2001년 9월 4일 유네스코 세계기록유산으로 등재되었다(Cheongju Early Printing Museum, 2026; UNESCO, 2026).

고려시대의 문신 이규보(李奎報, 1168-1241)의 『동국이상국집(東國李相國集)』에 따르면 1234년에 『상정고금예문(詳定古今禮文)』 28부가 인쇄되었다고 기록된 것으로 보아 『직지』보다 이른 시기에도 금속활자로 인쇄된 책이 있었음을 알 수 있다(Sohn, 1959; Sohn, 1971; Cheon, 1993a; Cheon, 1993b; Ok, 2013). 1920년대부터 금속활자로 인쇄된 것이 존재했다는 주장이 끊임없이 제기되었던 『남명천화상송증도가(南明泉和尚頌證道歌)』도 많은 논란을 일으켰다 (Park, 1988; Park, 2020a; 2020b). 그러나 그 책의 말미(末尾)에 고려 중기의 권신이었던 진양공(晉陽公) 최이(崔怡, 1166-1249)가 적은 발문(跋文)에 1239년 9월 상순에 금속활자로 인쇄했다는 내용이 적혀 있음에도 불구하고 그동안 발견된 판본 대부분이 번각 목판본임이 밝혀졌다 (Sohn, 1959; 1971; Cheon, 1993a; 1993b; Ok, 2013). 1980년대에도 여러 가지 판본 중에서 한 권(구 안동본(安東本), 현 공인본(空印本))은 1239년에 인쇄된 금속활자본일 가능성이 꾸준히 제기되어 왔다 (Park, 1988; Oh, 1988). 여러 가지 판본의 이미지 비교·분석, 먹 색상분석, 인쇄 상태의 차이 등에 관한 최근의 디지털 이미지의 정량 해석에 관한 연구로 2012년에 대한민국 보물로 지정된 『남명천화상송증도가』 공인본 (Korea Heritage Service, 2026)이 1239년에 인쇄된 금속활자본임을 세계적으로 인정받기에 이르렀다 (Yoo and Kim, 2021; Yoo, 2022a; 2022b;

2022c; 2022d; 2022e; 2023a; 2023b; Yoo and Yun, 2024; American Printing History Association, 2026). 그러나 지금도 국내 서지학계에서는 금속활자본은 전해지지 않고 목판본만 남아있다는 것이 정설이다. 『남명천화상송증도가』 공인본 또한 금속활자본을 저본(底本)으로 번각(飜刻)한 목판으로 인쇄된 판본이라는 견해를 유지하고 있다. 논란이 되는 고서 판본의 인쇄 방법을 규명하기 위한 추가적인 과학적 조사가 필요하다.

동서양 고서의 인쇄 방법 조사에 X선 형광분광분석법 (XRF, X-ray Fluorescence Spectroscopy) 또는 고에너지 X선인 싱크로트론 X선 형광분광분석법이 활용되고 있다 (Obregón *et al.*, 2021; Edwards *et al.*, 2022, Wagner *et al.*, 2023). 조선시대 금속활자본의 측정에서 고서에 인쇄된 글자의 위치에 잔류하는 미량의 금속 성분을 검출하여 이미지화하는 방법으로 측정 대상 고서가 금속활자 인쇄본임을 확인한 사례가 보고되었다 (Wenz, 2022; Berkowitz, 2023). 전통적인 안목 감정에 의한 고서 판본의 인쇄 방법의 주관적인 판정보다는 조사 대상 고서의 과학적인 분석 자료에 근거한 객관적인 판단이 불필요한 논란을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 XRF 신호를 이미지화하여 인쇄된 글자의 모양을 확인하기 위해서는 측정 면적이 직경 1 mm보다 훨씬 작아야 가능하므로 측정 장비의 성능과 구조에 많은 현실적인 제약이 따른다.

본 연구에서는 최소 측정 면적의 직경을 약 3 mm 정도까지 좁혀 측정이 가능한 휴대용 XRF 장비를 사용하여 금속활자본 논란이 되는 『남명천화상송증도가』 공인본의 종이와 인쇄된 글자 상의 원소분석을 시도하였다. 특히 인쇄된 글자 상에서 금속활자 인쇄 흔적의 근거가 될 수 있는 미량의 금속원소 검출 여부를 조사하여 인쇄 방법판정에 활용 가능성을 조사하였다.

2. 연구 대상 및 연구 방법

2.1. 연구 대상: 『남명천화상송증도가』 공인본

문화재청(현 국가유산청)은 2012년 6월 29일에 『남명천화상송증도가』 공인본을 고려시대 목판본으로 판정하고 보물로 지정하였다. 국가유산청에서는 보물로 지정하면서 다음과 같은 국가유산 설명을 누리집에 소개하고 있다 (Korea Heritage Service, 2026a).

“이 판본은 본문에 구결토(口訣吐)가 묵서되어 있으며, 광곽 중 판면의 세로 높이가 서로 다른 부분도 있고, 각 장의 글자를 보면 크기, 굵기, 길이 등에 차이가 있다. 글자 배열도 전체의 각 장은 8행이나 39장의 후면만은 7행으로 되어 있다. 그리고 총 44장 판심 하단에는 그 판을 새긴 11명의 각수가 나누어 새겼음을 표시하고 있다. 또한 글자 획에 나무 결이 나타난 것이 있는가 하면 어떤 글자는 획이 끊어지거나 일부를 잃은 것도 자주 나타나고 있어 주자판(鑄字版)을 중조(重雕)한 번각본의 후쇄본임을 알 수 있게 한다.”

2012년 문화재 지정 당시에 문화재위원회 심사위원으로 참여했던 박상국은 1988년에 전 소장자인 고 박동섭 (Park, 1988), 초대 금속활자장 고 오국진 (Oh, 1988)의 주장을 답습하여 2020년에 『남명천화상송증도가』 공인본이 금속활자본이라는 주장의 책을 두 권 출판하였다 (Park, 2020a; 2020b). 『남명천화상송증도가』 공인본의 인쇄 방법에 관해서는 학자들 사이에서 아직도 논란이 많은 상태이지만 다양한 방법의 과학적인 분석을 통하여 누구나 수긍할 수 있는 명쾌한 결론을 얻어야 오랜 소모적 논쟁을 불식시킬 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서 시도하는 과학적 분석 장치를 통한 정량분석이 한가지 해결책이 될 수 있을 것으로 기대된다.

『남명천화상송증도가』 공인본은 크기가 세로 24.1 cm, 가로 15.0 cm의 책자로 칠침안정법(七針眼訂法)으로 제책(製冊)되어 있다 (Figure 1). 내용은 44장이 판심(版心)에서 반으로 접혀 앞 장의 후엽과 뒷장의 전엽이 마주 보는 형태로 제책되어 있다. 전체는 88면으로 구성되어 있으나 마지막 44장 후엽은 아무것도 인쇄되어 있지 않아 책 전체의 인쇄된 면은 87면이다. 44장 전엽에는 책을 발행하게 된 경위와 인쇄 방법과 시기에 관해서 적어 놓은 진양공 최이의 발문이 인쇄되어 있다.



Figure 1. A photograph of cover page of *The Song of Enlightenment* (南明

泉和尚頌證道歌) book, a presumably the world's oldest extant metal-type printed book from 1239.

2.2. 연구 방법: X선 형광분광분석 (XRF)

휴대형, 탁상형 및 침단 실험시설에서 다양한 형태의 XRF 장비가 종이, 잉크, 문화유산, 고고 유물, 범죄 수사 분야에서 비파괴 성분분석 수단으로 널리 활용되고 있다 (Manso *et al.*, 2008; Frahm, 2017; Barrett *et al.*, 2023; Wagner *et al.*, 2023; Bezur *et al.*, 2020; Ridolfi 2012; Gomes *et al.*, 2013; Kobylarz *et al.*, 2023). 국내에서도 X선 형광분광분석 장비는 금속활자의 성분분석 등에 적극적으로 활용되고 있다 (Lee and Yu, 2006; Yun *et al.*, 2009; Yoo, 2019; Cho and Lee, 2021).

본 연구에서는 XRF를 이용한 휴대용 성분분석기(Olympus Evident Vanta C Series, Massachusetts, USA)를 사용하였다. Evident Vanta C Series 휴대형 XRF 분석기는 가속 전압 8-40 kV의 범위에서 로듐(Rh, rhodium)과 텅스텐(W, tungsten)을 사용한 정격 4W의 X선 관을 광원으로 사용하며 실리콘 드리프트 검출기 (Silicon drift detector)로 신호를 검출할 수 있다. 마그네슘(Mg, magnesium)부터 우라늄(U, uranium)까지 성분분석이 가능하다. 측정 원리상 마그네슘(Mg)보다 가벼운 원소의 성분분석은 불가능하다 (Evident, 2026). XRF 분석기의 제조사에서 권장하는 GeoChem2 모드로 측정하였으며 측정 기간에는 매일 여러 차례씩 제조사가 권장하는 표준 시료를 사용한 교정용 측정을 반복하여 측정의 신뢰도를 확보하였다. 측정은 저가속에너지(0.5 ~ 8 kV)와 고가속에너지(0.5 ~ 40 kV)에서 20 초씩 측정하였다. 측정 장소별로 40 초간 적산된 신호를 역연산(deconvolution)과 곡선 접합(curve fitting)으로 분석하는 방법을 채용한 제조사가 제공한 자동 분석 기능을 이용하여 원소 농도를 계산하였다.

휴대형 XRF 원소 분석기를 사용한 문화유산 분석에 관해서는 미국 캘리포니아주의 Getty Institute에서 발행한 책자에도 본 연구에서 원소분석에 사용한 모델의 성능과 표준 측정조건이 제시되어 있다 (Bezur *et al.*, 2020). 2016년에 출시된 Evident Vanta C Series 휴대형 XRF 분석기는 미국 예일대학교 고고학 및 인류학 연구진에 의해서 미국 미주리대학교 연구소의 에너지 분산 (Energy Dispersive) XRF 측정 장비와 미국 미네소타대학교의 전자 빔(electron beam)을 이용한 X선 마이크로 분석으로 40여 종류의 샘플로 실험 결과를 검증하였다. 보고서에 따르면 기기 간 측정 결과의 선형성이 우수하고 휴대용 XRF 원소 분석기의 측정치가 정확하다는 결과가 국제 흑요석 연구 협회 (International Association for Obsidian Studies) 회보에 상세하게 소개되었다 (Frahm, 2017).

연구 대상 고서가 금속활자로 인쇄된 것이라면 금속활자가 인쇄에 사용한 먹과 금속활자 표면의 화학 반응으로 금속활자에서 분리된 미량의 금속 성분을 포함한 액상 물질이 한지에 전사되어 고착되었을 가능성이 있다. 또한, 한지가 금속활자 표면과 접

촉한 상태에서 한지 뒷면을 문지르면서 금속활자 표면의 금속 성분이 한지에 옮겨졌을 가능성도 있다. 고서에 먹으로 인쇄된 글자 부분에 금속 성분이 남아있다면 미량의 금속 성분이 검출될 가능성은 충분하다. 금속 성분 검출의 여부로 과학적 데이터를 기반으로 한 고서의 인쇄 방법 판정도 가능할 것이다. 어떤 종류의 금속 성분이 검출되느냐에 따라서 금속활자 주조에 사용된 금속 재료에 관한 추가적인 정보도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. Figure 2는 휴대용 XRF 장치로 『남명천화상송증도가』 공인본 제1장 전엽을 측정하는 모습이다.

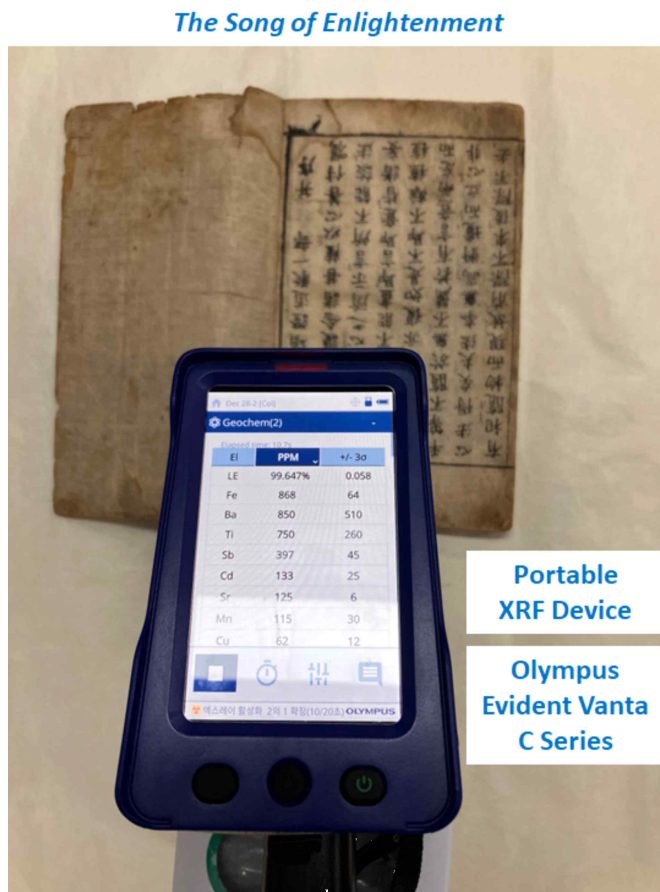


Figure 2. X-ray florescence measurement on the front side of the 1st leaf of *The Song of Enlightenment* (南明泉和尚頌證道歌). The GeoChem2 mode provided the manufacturer was used throughout the XRF measurement.

『남명천화상송증도가』 공인본의 여러 인쇄 면에서 아무것도 인쇄되지 않는 한지와 먹물로 글자가 인쇄된 부분에서 성분을 분석하여 비교하고 인쇄에 의한 각 원소의 농도 차이를 면밀하게 조사하였다. 측정은 XRF 성분분석에서 측정할 수 있는 최소면적인 직경 약 3 mm 영역의 성분을 측정하도록 조정하여 사용하였다. 에너지 영역

이 다른 2종류의 X선 빔을 신호 대 잡음 비 (S/N, signal-to-noise ratio)를 개선하기 위하여 고서상의 특징적인 영역을 각각 20초씩 조사하면서 형광 신호를 적산하여 원소분석에 사용하였다. 원소분석은 X선 스펙트럼을 바탕으로 Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Hg, Pb, Bi, Th, U의 34종 원소의 농도를 얻을 수 있다.

고서에 인쇄된 한자의 일반적인 크기가 가로, 세로 10-11 mm 정도의 사각형 모양이고 획의 굵기가 0.5-1.0 mm 전후로 직경 3 mm의 영역 전체가 인쇄된 예는 없다. 따라서 인쇄된 글자영역을 XRF 측정한 경우라도 측정 장소에 따라서 측정 면적 중에서 먹이 묻어있는 부분이 측정 면적 전체를 차지하는 예는 없었으며 때에 따라서는 먹이 묻은 영역이 측정 면적의 30% 전후인 경우도 있다. 인쇄된 글자영역의 측정치는 먹이 묻은 부분의 신호와 먹이 묻지 않은 종이 부분의 신호 평균치에 해당한다. 따라서 인쇄된 영역과 인쇄되지 않은 영역의 차이는 실제보다 작게 측정될 수밖에 없다. XRF 측정의 공간분해능이 3 mm 정도로 제약되어 변별력이 부족하지만 손쉽게 활용할 수 있는 일반적인 측정 기기로 금속활자 인쇄 여부를 판단하기 위한 실험이라는 점에서 그 의미가 크다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. XRF 측정의 재현성과 안정성

휴대용 XRF에 의한 종이 측정에 있어서 측정의 재현성과 안정성을 확인하기 위하여 전통 한지를 비롯하여 많은 종류의 종이를 측정하였다. 측정의 재현성과 안정성은 선행연구에서 보고된 바와 같이 원소의 정량분석에 적합한 수준이었다 (Frahm, 2017; Bezur *et. al.*, 2020).

Figure 3에 『남명천화상송증도가』 공인본 제1장부터 제5장 전엽 상단의 광곽 밖에서 측정한 XRF 스펙트럼을 분석하여 종이를 구성하는 원소의 농도를 구하여 그래프로 정리하였다. 막대그래프가 원소별로 다섯 개의 세트로 되어 있는 것은 제1장부터 제5장까지의 종이에서 측정한 결과를 왼쪽부터 오른쪽으로 순차적으로 나열했기 때문이다. Mg보다 가벼운 원소는 XRF로 측정되지 않기 때문에 종이에서 측정된 결과가 종이의 구성 성분은 아니지만 종이에 혼입된 다른 원소에 관한 정보는 얻을 수 있다. XRF로 가까스로 측정이 가능한 Mg의 경우를 제외하고 모든 원소 농도의 측정 결과가 비슷하다. XRF 측정의 재현성과 안정성을 가늠할 수 있다. 측정된 데이터의 신빙성을 가늠할 수 있도록 각 원소의 검출한계 (LOD: Limit of Detection)을 ppm 단위로 표시해 두었다. 검출한계보다 높은 값이 측정되었거나 측정치 간의 차이가 검출한계보다 높다면 개별 측정치의 신뢰성과 측정치 간의 유의차가 있는 것으로 판단할 수 있다.

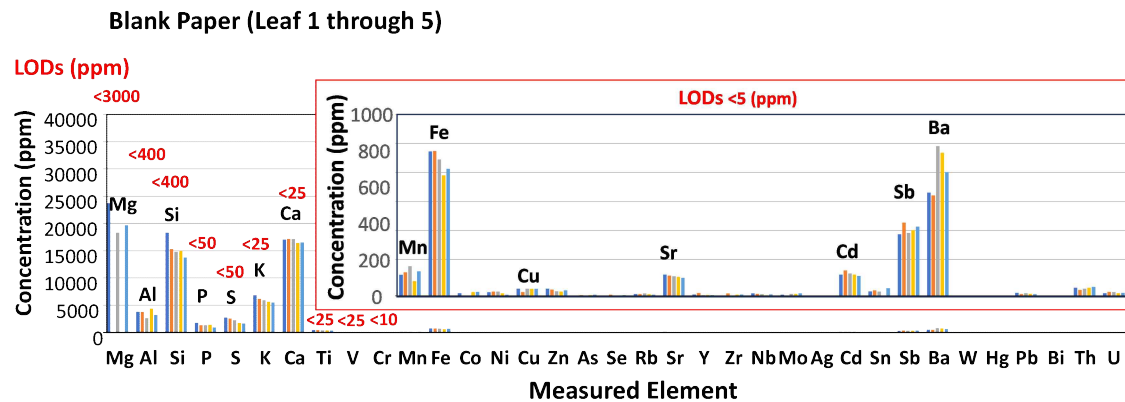


Figure 3. Summary of XRF measurement results on 34 elements from blank areas of the first five leaves of *The Song of Enlightenment*(南明泉和尚頌證道歌). For elements with less content, different vertical scales were used to make them easier to recognize. Each color bar represents XRF measurement values from a different leaf of the book.

3.2. 인쇄된 글자와 종이의 성분분석

전체 44장으로 구성된 『남명천화상송증도가』 공인본의 모든 장에서 XRF에 의한 원소분석을 하였다. 본 논문에서는 상징적인 의미로 제1장부터 제5장 전엽에서 고서 상단에 인쇄되지 않은 영역과 제2행 첫 번째 글자에서 측정한 결과를 중심으로 정리하였다. Figure 4에 제1장 전엽에서 XRF 신호를 측정한 위치를 표시하였다. 빨간 원으로 표시된 부분이 측정된 장소이고 빨간 원의 크기는 직경 3 mm로 측정 면적을 실제의 측정 대상 고서의 크기와 축척에 맞도록 조정한 것이다. 빨간 원의 안쪽이 측정영역의 크기에 해당한다.

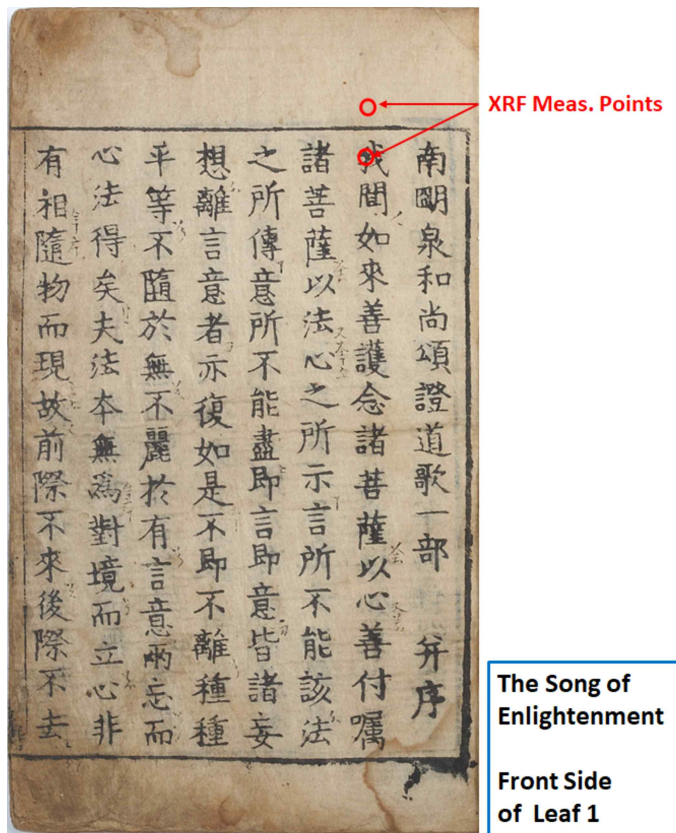


Figure 4. Two X-ray florescence measurement sites on the front side of the 1st leaf of *The Song of Enlightenment* (南明泉和尚頌證道歌). The size of XRF measurement area is approximately 3 mm in diameter as indicated with the area within small red circles.

같은 방법으로 제1장부터 제5장까지 5장 전엽의 제2행 윗부분의 인쇄되어 있지 않은 광곽 밖과 제2행 첫 글자의 먹 부분에서 XRF 신호를 측정하여 Al, P, S, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Sb의 10종류 원소의 농도 측정 결과를 Figure 5에 막대그래프로 정리하였다. 10종류의 원소 중에서 Al, S, Fe 세 종류의 농도가 인쇄되지 않은 영역과 인쇄된 영역에서의 차이가 일관되게 발생하였다. 이 세종류 모두 금속활자에 의해서 영향을 받을 수 있는 것이나 황(S)은 먹을 만드는 과정에서 혼입될 수 있는 성분이며 금속활자의 철(Fe) 또는 동(Cu)과 화학 반응을 일으킬 수 있는 성분으로 주목할 필요가 있다.

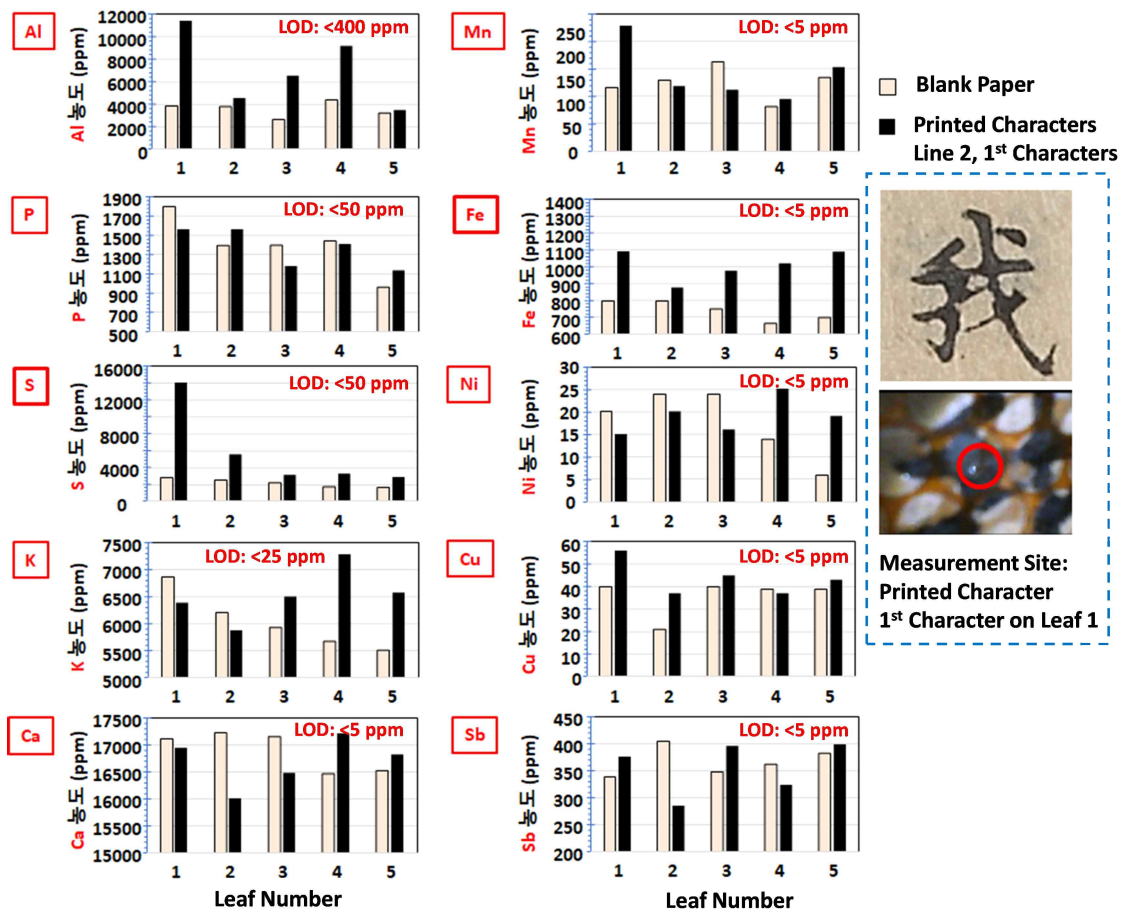


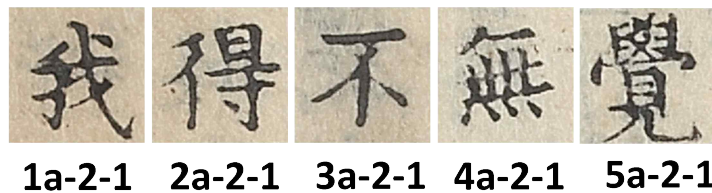
Figure 4. Summary of XRF measurement results from blank areas and printed characters (1st printed character of the 2nd vertical line from the book binding side) of the first five leaves. Significant S and Fe concentration increase measured from printed characters compared to blank paper next to them, indicating that the book was printed using metal type.

Figure 5에 제1장부터 제5장까지의 XRF 측정 결과를 막대그래프로 정리하였다. 제1장부터 제5장까지의 제2행에 인쇄된 첫 번째 글자는 『我』(아), 『得』(득), 『不』(불), 『無』(무), 『覺』(각)이다. 모든 장에서 먹으로 인쇄된 부분의 황(S)과 철(Fe)의 농도가 먹으로 인쇄되어 있지 않고 수분에 의한 오염이 관찰되지 않는 장소에서의 측정 결과보다 현저하게 높은 결과가 확인되었다. 휴대용 XRF 분석기의 최소 측정 면적이 직경 3 mm 정도로 인쇄기의 화질을 비교할 때 사용하는 해상도 값으로 환산하면 8.46 dpi (dots per inch)에 지나지 않는다. 인쇄된 한자 한 글자의 크기가 가로세로 10-11 mm 정도이고 획의 굵기가 최대 2 mm를 넘지 않는 점을 고려하면 측정영역 전체에 먹이 인쇄된 곳은 없으므로 인쇄영역 측정 결과에는 먹이 묻지 않은 종이 부

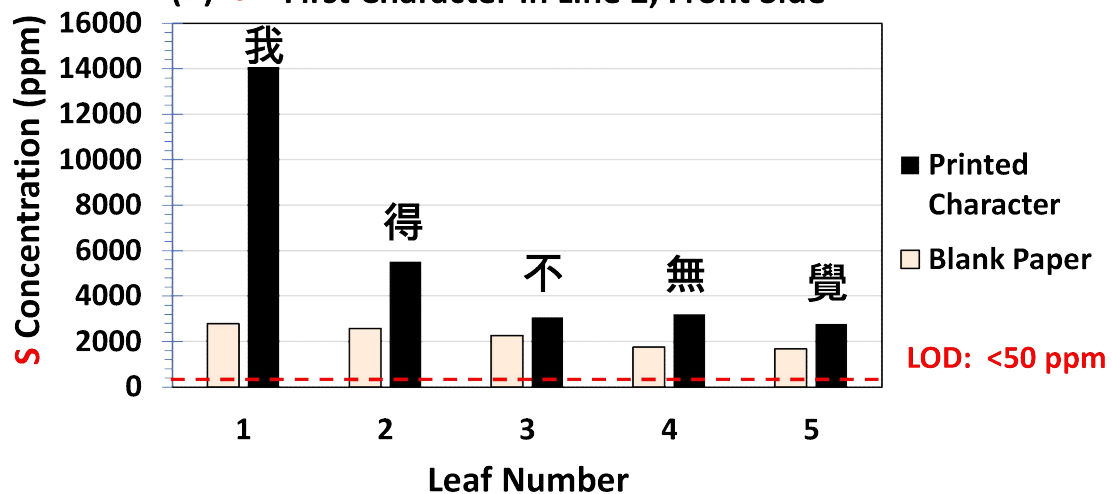
분의 정보도 포함되어 있다. 인쇄된 부분과 인쇄되어 있지 않은 부분의 성분분석 결과를 단순히 비교하면 인쇄의 영향이 과소평가 될 수밖에 없다. 따라서 실제로 인쇄된 부분과 인쇄되지 않은 부분의 금속성분의 농도차이는 훨씬 큰 것으로 추정된다. 공간분해능이 높은 XRF 이미징 측정장치를 활용하게 되면 이런 문제는 손쉽게 해결 될 수 있을 것으로 기대된다.

(A) XRF Measurement Sites

First Character in Line 2, Front Side of Leaf 1 to 5



(B) S First Character in Line 2, Front Side



(C) Fe First Character in Line 2, Front Side

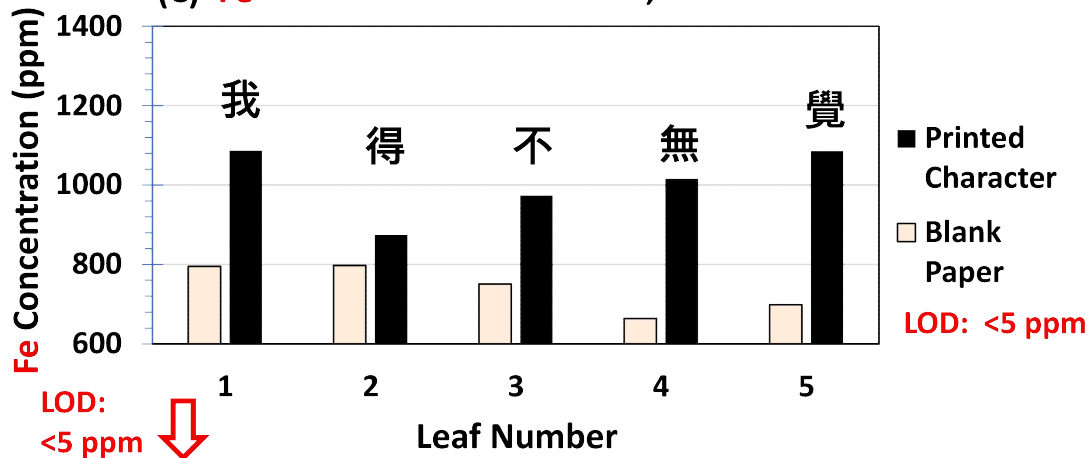


Figure 5. (A) XRF measurement site on five printed characters (the first character in the line 2 of the front side of first five leaves), (B) S concentration and (C) Fe concentration measured from blank paper and printed character on the first five leaves. Significant S and Fe concentration increase measured from printed characters compared to blank paper next to them, indicating that the book was printed using metal type. Limits of detection (LODs) for S and Fe and are indicated on the graph for reference.

3.3. 각 장 간의 측정 결과의 재현성

앞의 기초실험 데이터를 바탕으로 『남명천화상송증도가』 공인본 제1장부터 제23장 전엽 제1행 상단 광곽 밖의 인쇄되지 않은 종지와 제1행 첫 번째 글자의 먹이 묻은 부분에서 XRF 스펙트럼을 측정하였다. 먹으로 인쇄된 부분의 Fe성분이 모든 장에서 인쇄되지 않은 부분에 비해서 차이가 있는지 확인하였다(Figure 6). 제18장에서의 측정 결과를 제외하고 나머지 모든 장에서 먹으로 인쇄된 부분에서 Fe 성분이 높게 측정되었다. 종이 부분에서의 Fe의 평균 농도는 713 ppm이고 먹 부분에서의 평균 농도는 897 ppm으로 약 26% 높은 값이다. 제18장의 측정치를 제외하고 Fe의 평균 농도를 구하면 종이 부분에서는 690 ppm, 먹 부분에서는 897 ppm이 되며 먹 부분에서의 Fe의 평균 농도가 30% 높은 값으로 유의차가 확인된다.

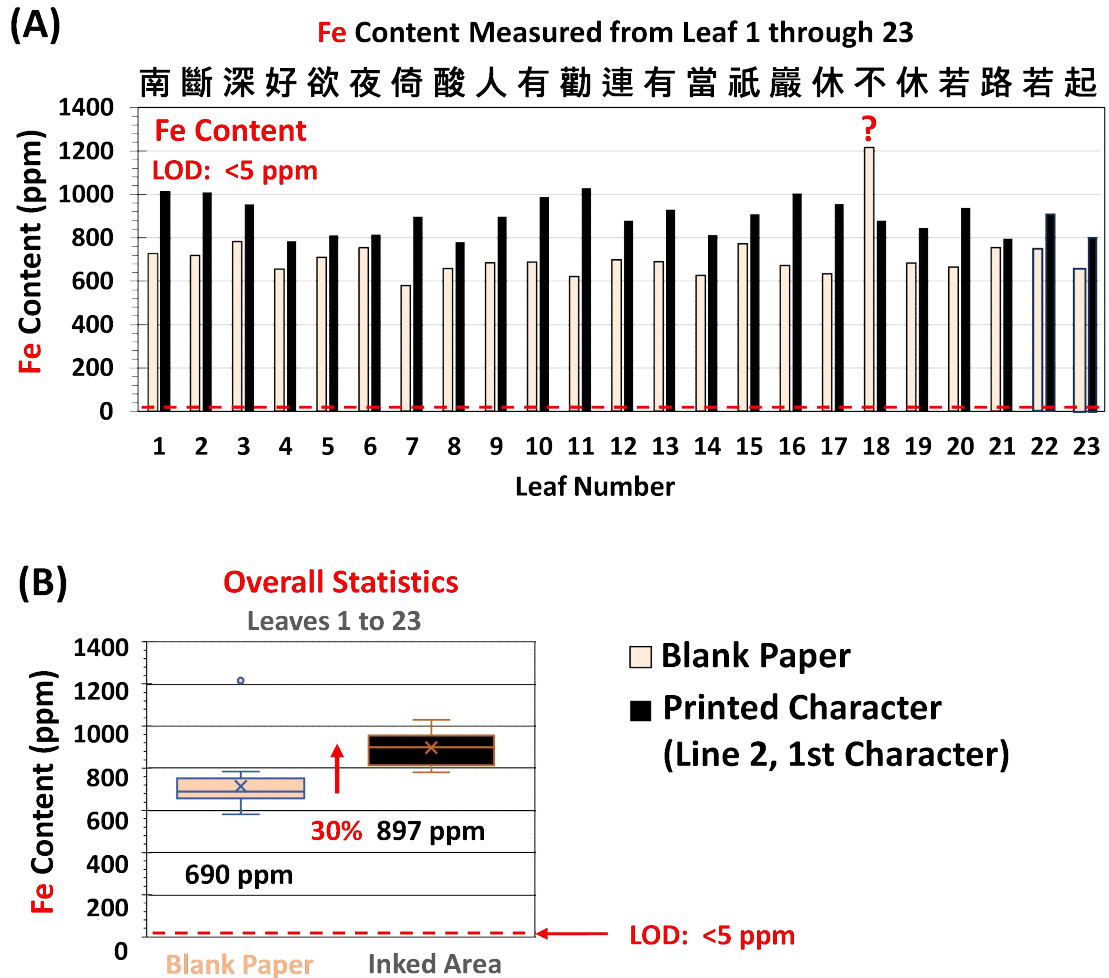


Figure 6. (A) XRF measurement site on 23 printed characters (the first character in the line 1 of the front side of first 23 leaves), (B) Fe concentration measured from blank papers and printed characters on the first 23 leaves. Significant Fe concentration increase measured from printed characters compared to blank papers next to them, indicating that the book was printed using metal type. Limit of detection (LOD) for Fe is indicated on the graph for reference.

3.4. 고찰

우리 선조들은 13세기 초에 이미 금속활자 인쇄술을 발명하고 이를 실용화하였다. 지금까지 고려시대의 금속활자 중에서 실물이 전해지는 것은 개성의 개인 무덤에서 출토된 것으로 알려진 국립중앙박물관 소장의 고려 『複』(덧을 복) 활자와 고려의 왕궁이 있었던 개성 만월대(滿月臺)에서 1956년 수습된 것으로 알려진 『顯』(이마 전)

자가 북한에 있다. 2015년 말 남북이 공동으로 개성 만월대 신봉문(神鳳門)에서 발굴한 고려 『婁』(오로지 전, 아름다울 단)자 활자 개성박물관에 소장되어 있다. 2016년 5월에 북한은 조선중앙력사박물관 발굴단이 만월대 단독 발굴에서 『名』(이름 명), 『汧』(물굽이 측), 『明』(밝을 명), 『糟』(지게미 조) 4점의 금속활자를 새롭게 찾았다고 발표하였다. 남북한을 합하여 고려시대 금속활자는 『複』, 『顚』, 『婁』, 『名』, 『汧』, 『明』, 『糟』의 일곱 자가 전해질 뿐이다. 2010년에는 『남명천화상송증도가』를 인쇄하는데 사용되었다는 고려시대 금속활자 증도가자(證道歌字)가 발견되었다는 소식이 전해 졌으나 국립과학수사연구소에서의 검증을 포함하여 약 7년간의 수많은 진위논쟁 끝에 문화재 지정이 무산되었다 (Lee and Kim, 2023).

고려시대의 금속활자 인쇄술은 세계 최초로 창안된 것으로 금속활자의 주조 기술과 조판 기술이 미숙한 상태로 완성도를 높여가는 단계였다. 금속활자로 인쇄된 판본을 조사해 보면 금속활자의 주조 기술 면에서는 활자의 크기와 모양이 고르지 않고 활자 획의 굵기가 일정하지 않았으며, 주조결함과 활자 면의 평탄도가 고르지 못하여 부분적으로 획이 나타나지 않거나 인쇄 상태가 깨끗하지 못하였다. 조판 기술 면에서도 사주(四周)와 계선(界線)까지 인판 틀에 크기, 모양, 두께, 높낮이가 일정하지 않은 활자를 무리하게 배열하였기 때문에 옆줄이 맞지 않고 위아래 글자끼리 획이 엇물리거나 각 행의 글자의 위치가 가지런하지 못한 경우가 많았다 (Cheon, 1993a; 1993b).

고려시대 실물 활자는 거의 남아있지 않다. 국립중앙박물관에 소장된 국내 유일의 고려 금속활자 『複』(덮을 복)자는 가로 1.07 cm, 세로 1.17 cm, 높이 0.7 cm이고 무게는 4.1 g으로 측정되었다. 활자의 금속 성분은 구리(Cu) 50.9%, 아연(Zn) 0.7%, 주석(Sn) 28.5%, 납(Pb) 10.2%, 철(Fe) 2.2% 등으로 조사되었다 (Cheon, 1993a). 이 성분 비율은 고려시대인 1102년 (숙종 7)에 주조, 유통된 동전(銅錢)인 ‘해동통보(海東通寶)’의 금속 성분과 거의 같다고 한다. 우연히 고려 『複』활자와 ‘해동통보’의 금속 성분이 거의 비슷하다는 것을 바탕으로 높은 온도에서 녹인 금속을 거푸집에 부은 후 식혀 기물을 만드는 방법인 주전(鑄錢)의 고주법(鼓鑄法)을 임의로 금속활자의 고주법과 같다고 보고 금속활자의 주조연대의 기원을 추정하기도 하였다 (Korea Heritage Service, 2025b). 『고려사절요』의 1102년 (숙종 7) 12월의 ‘해동통보’ 주조, 유통에 관한 기사 내용에 근거한 것이다.

금속활자는 활자를 주조하는 데 사용된 금속의 종류에 따라 주석으로 만든 석활자(錫活字), 납으로 만든 연활자(鉛活字), 구리를 주성분으로 하는 동활자(銅活字), 무쇠를 주성분으로 하는 철활자(鐵活字) 등으로 구분된다. 동활자는 놋쇠 활자라고도 하며 가장 많이 사용되었다. 동활자의 주조에 사용된 합금 성분은 구리, 아연, 주석, 납, 철 등으로 되어 있는데, 활자마다 그 구성 비율이 일정하지 않다. 철활자는 무쇠 활자라고도 하며 관서와 민간에서 만든 것이 여러 종류 전해지고 있다 (Cheon, 1993a; Lee and Yu, 2006; Yoo, 2019). 조선시대에 만들어진 활자는 합금의 성분에 차이는 있으나 대부분 동활자로 고려시대의 활자도 동활자였을 것으로 추정되고 있다. 국내

유일의 국립중앙박물관 소장 고려 금속활자 『覆』의 금속 성분도 구리(Cu)가 50.9% 함유된 것으로 측정되었으므로 고려시대에도 동활자가 사용되었을 개연성이 높지만 다른 금속의 합금도 사용되었을 가능성을 배제할 수는 없다.

조선시대의 동활자의 구리 성분은 1772년(영조 48) 주조 임진자(壬辰字): 74.8%-93.5%, 1795년(정조 19)과 1858년(철종 9)에 주조한 정리자(整理字): 69.9%-80.5%, 1677 무렵(숙종 원년)부터 1858년(철종 9) 사이에 세 차례 주조된 한구자(韓構字): 76.7%-81.1%로 고려 금속활자 『覆』의 50.9%보다 19.0%-42.6% 높은 것으로 조사되었다. 1798 무렵(정조 말기)부터 조선 말기인 고종 때까지 주로 민간이 주조한 철활자(鐵活字)의 경우, 원소분석 결과 철(Fe): 50.1%-67.6%, 구리(Cu): 5.2%-13.3%, 비소(As): 25.5%-38.7%의 범위의 합금으로 조사되었다 (Lee and Yu, 2006).

본 연구의 연구 대상인 『남명천화상송증도가』 공인본의 XRF에 의한 원소분석에서는 구리 성분은 수분 오염에 의한 변색이 발견되지 않은 모든 측정영역에서는 수십 ppm 수준의 미량의 구리(Cu) 성분이 검출되었다. 철(Fe) 성분은 먹으로 인쇄된 영역이 오염되지 않은 종이 영역에 비해서 300-500 ppm 높게 검출되었다. 이것은 인쇄된 영역의 Fe 성분이 인쇄되지 않은 영역의 종이보다 약 30% 정도 높은 Fe 성분 값이다. 이번 연구를 통해서 『남명천화상송증도가』 공인본의 인쇄된 영역에서 금속 성분이 재현성 있게 검출된 점으로 보아 금속활자로 인쇄되었을 개연성이 매우 높다. 인쇄에 사용한 금속활자가 동활자였는지 철활자였는지를 단정할 수는 없으나 인쇄과정에서 철이 먹과 반응하여 한지에 전사되어 먹의 아교 성분으로 한지에 고착된 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 사용한 실험장비에 의한 측정의 공간분해능과 최소 검출 농도의 한계를 극복하기 위해서는 X선 빔의 크기가 직경 0.1 mm (100 μ m) 이하이며 신호 대 잡음비(S/N)가 큰 고감도의 실험설비와 자동화된 맵핑 시스템이 필요하다. 이러한 실험 여건의 한계에도 불구하고 종이, 먹으로 인쇄된 글자, 수분으로 오염된 영역의 계통적인 구성 원소의 농도 차이를 확인한 것은 매우 의미 있는 일이다.

고해상도의 XRF 이미지를 얻기 위해서는 X선 빔의 직경을 더 작게 하여 측정의 공간분해능을 높여야 한다. 이러한 설비는 미국 스탠포드대학교(Stanford University, California, USA)의 싱크로트론 방사광 연구시설 (Stanford Synchrotron Radiation Lightsource)이 운영하는 고에너지 XRF 실험설비 Beam line 6-2a (SLAC, 2026)와 프랑스 그레노블 (Grenoble, France)에 있는 유럽 싱크로트론 방사광 연구시설 (ESRF: European Synchrotron Radiation Facility) 가 ID16B Beam line (ESRF, 2026)을 갖추고 있다. 스탠포드대학교의 실험시설에서는 X선 빔의 직경을 100, 50, 35, 25 μ m로 조정할 수 있고 250 $\times$ 200 mm²의 영역을 자동으로 스캔할 수 있다. 공간분해능을 바탕으로 해상도로 환산하면 254 dpi, 508 dpi, 726 dpi, 1,016 dpi에 해당하며 가로세로 10-11 mm 정도의 인쇄된 글자 상의 원소 농도 분포를 원소별로 맵핑(mapping)하는 것이 가능하다 (Wenz, 2022;

Berkowitz, 2023). ESRF의 실험설비는 X선 빔의 크기가 최소 50 x 50 nm²에서 최대 0.1 x 0.1 μm² 사이에서 조절이 가능하여 더욱 세밀한 원소별 맵핑이 가능하다 (ESRF, 2025).

본 연구에서 휴대형 XRF를 사용한 기초실험 결과에서 『남명천화상송증도가』 공인본이 금속활자로 인쇄되었을 개연성을 확인하는 매우 의미 있는 결과를 얻었다. 앞으로 스탠포드대학교 또는 유럽 싱크로트론 방사광 연구시설의 장비를 활용해서 후속 실험을 추진해 볼 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 오랫동안 인쇄 방법에 관해서 많은 논란이 되었던 매우 유사한 『남명천화상송증도가』 판본 중에서 1239년에 금속활자로 인쇄된 것으로 추정되는 판본(2012년에 보물로 지정된 판본)을 휴대용 X선 형광분광분석(XRF) 장치로 원소분석에 관한 실험을 체계적으로 진행하였다. 고서의 종지와 인쇄된 글자에 포함된 미량의 금속 성분의 검출을 시도하여 먹으로 인쇄된 영역에서 예상보다 높은 농도의 철(Fe)과 황(S) 성분을 확인하였다. 휴대용 X선 형광분광분석 장치의 최소 측정영역인 직경 3 mm 까지 좁혀서 사용하였다. 만족스러운 공간 분해능은 아니었지만 1,000회 이상의 많은 측정을 통하여 측정의 재현성과 신뢰성을 확보할 수 있었다.

먹으로 인쇄되어 있지 않은 종이 영역에서는 Ca, Si, Mg, K, Al, S, P, Fe의 순서로 1.7 %에서 800 ppm으로 성분비가 낮아졌다. 먹으로 인쇄된 영역에서는 Fe와 S 성분이 종이 영역에 비해서 30%에서 100% 이상 높게 검출되었다. 인쇄된 글자영역은 금속활자에 묻은 먹이 금속 표면과 화학 반응을 일으킨 물질이 인쇄과정에서 종지에 전사되어 종지에 고착되어있던 것이 검출된 것으로 추정된다. 고려시대 금속활자는 구리 성분을 많이 포함하는 동활자로 알려져 있으나 예상과는 다르게 Cu 성분의 농도 측정에서는 종지와 인쇄된 영역에서 통계적으로 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 측정이 이루어진 모든 페이지에서 먹으로 인쇄된 글자에서 Fe와 S 성분이 재현성 있게 높게 측정되었다. X선 형광분광분석의 모든 결과는 본 연구의 조사 대상인 『남명천화상송증도가』 판본(공인본)은 금속활자로 인쇄된 것임을 시사하고 있다. 인쇄방법이 불명확한 고서의 인쇄영역과 종이 부분을 휴대용 XRF로 구성 원소 농도를 체계적으로 측정하면 정량적인 구성 원소의 측정데이터를 바탕으로 인쇄 방법을 합리적으로 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- American Printing History Association, 2025, History of Printing Timeline. <https://printinghistory.org/timeline/> (July 8, 2026).
- Barrett, T., Shannon, R., Wade, J. and Lang, J., 2012, XRF analysis of historical paper in open books. In Shugar, A. N. and Mass, J. L. (Eds.),

- Handheld XRF for Art and Archaeology (pp. 191-214). Leuven University Press, Chapter 6, 191-214.
- Berkowitz, R., 2023, The History of the Printing Press under an X-Ray Microscope, *Physics* 16, 154. DOI: 10.1103/Physics.16.154
- Bezur, A., Lee, L., Loubser, M. and Trentelman, K., 2020, - A Practical Workbook for Conservators, The Getty Conservation Institute, J. Paul Getty Trust and Yale University.
- Cheon, H.B., 1993a, Korean metal print. Beomwoosa.
- Cheon, H.B., 1993b, Korean woodblock print. Beomwoosa.
- Cheongju Early Printing Museum, 2026, What is Jikji? <https://www.cheongju.go.kr/jikjiworld/contents.do?key=17509> (July 8, 2026).
- Cho, J. and Lee, E.W., 2021, Development of Bronze Alloy Technology in the Korean Bronze Age and Early Iron Age, *Hanguk Kogo-Hakbo*, 2021(4), 445-474. (in Korean with English Abstract)
- Edwards, N.P., Bargar, J.R., van Campen, D., van Veelen, A., Sokaras, D., Bergmann, U., Webb, S.M.. A new μ -high energy resolution fluorescence detection microprobe imaging spectrometer at the Stanford Synchrotron Radiation Lightsource beamline 6-2. *Rev Sci Instrum.* 2022 Aug 1;93(8):083101. doi: 10.1063/5.0095229. PMID: 36050052; PMCID: PMC9392580.
- ESRF, 2026, ID16B, <https://www.esrf.fr/home/UsersAndScience/Experiments/XNP/beamline-snapshots/content/content-list/id16b.html> (July 8, 2026).
- Evident, 2026, Portable and Handheld XRF Analyzers, <https://ims.evidentscientific.com/en/xrf-analyzers/handheld> (July 8, 2026).
- Frahm, E., 2017, First hands-on tests of an Olympus Vanta portable XRF analyzer to source Armenian obsidian artifacts, *IAOS Bulletin* No. 58, Winter 2017, pp. 8-23.
- Gomes, R.A.M.P., Santos, A.L. and Catarino, L., 2024, Elemental analysis using portable X-ray fluorescence: Guidelines for the study of dry human bone, *International Journal of Paleopathology*, 44, 85-89.
- Kobylarz, D., Michalska, A. and Jurowski, K., 2023, Field portable X-ray fluorescence (FP-XRF) as powerful, rapid, non-destructive and 'white analytical tool' for forensic sciences - State of the art, *Trends in Analytical Chemistry*, 169, 117355.

- Korea Heritage Service, 2026a, 남명천화상송증도가(2012) (南明泉和尚頌證道歌(2012)) Nammyeong Cheon hwasangsong jeungdoga (Song of Enlightenment with Commentaries by Buddhist Monk Nammyeong) (https://www.heritage.go.kr/heri/cul/culSelectDetail.do?pageNo=1_1_1_0&cbaKdcd=12&ccbaAsno=07580200&ccbaCtcd=38&ccbaCpno=1123807580200) (July 8, 2026)
- Korea Heritage Service, 2026b, 금속활자의 역사 (History of Metal Type), <https://www.heritage.go.kr/heri/html/HtmlPage.do?pg=/hwalja/hwalja01.jsp#:~:text=%EC%9D%B4%EB%A5%BC%20%EA%B7%BC%EA%B1%B0%EB%A1%9C%20%ED%95%98%EC%97%AC%20%EA%B5%AD%EB%A6%BD,%EA%B7%B8%20%EC%A6%9D%EA%B1%B0%EB%A1%9C%20%EB%93%A4%EA%B3%A0%20%EC%9E%88%EB%8B%A4.> (July 8, 2026).
- Lee, J.J. and Yu, H.S., 2006, A Scientific Analysis of Metal Types in the Collection of the National Museum of Korea, Journal of Studies in Bibliography, 33, 145-166. (in Korean with English Abstract)
- Lee, K.T. and Kim, S., 2023, A reflection on the controversy over the designation of Jeungdogaja as a treasure, Journal of Region & Culture, 10(4), 93-112. (in Korean with English abstract)
- Manso, M., Costa, M. and Carvalho, M.L., 2008, X-ray fluorescence spectrometry on paper characterization: A case study on XVIII and XIX century documents, Spectrochimica Acta Part B, 63, 1320-1323.
- Obregón, C. L., Jara, M. A. G., Arizapana, F. L. R., Huayllani, Y. J. C., Bellido, J. F. G., and Olivera, J. O., 2021, XRF elemental analysis of inks in South American manuscripts from 1779 to 1825, Heritage Science, 9, 147.
- Oh, K.J., 1988, Investigation of Kanghwa version of metal type printed Nammyeongcheonhwasangsongjeungdoga, Donglim Seogwan, Cheongju, Korea. 1- 60. (in Korean)
- Ok, Y.J., 2013, Early Printings in Korea. The Academy of Korean Studies Press, Korea.
- Park, D.S., 1988, Goryeo metal-type printing, 'Nammyeongcheon Hwasangsong Jeungdoga'. Hyangto Andong, 1, 15-192. (in Korean)
- Park, S.K., 2020a, Nammyeongcheon Hwasangsong Jeungdoga, birth of the world's first metal type print. Gymmyoung Publishers, Seoul. (in Korean)
- Park, S.K., 2020b, Nammyeong Jeungdoga, the world's first metal type print. Gymmyoung Publishers, Seoul. (in Korean)

- Ridolfi, S., 2012, Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the analyses of Cultural Heritage, IOP Conf.Series:Materials Science and Engineering 37, 012001.
- SLAC, 2026, Experimental Station 6-2a, <https://www-ssrl.slac.stanford.edu/content/beam-lines/bl6-2a> (July 8, 2025).
- Sohn, P.K., 1959, Early Korean printing. Journal of the American Oriental Society, 79(2), 96-103.
- Sohn, P.K., 1971, Early Korean typography. Korean Library Studies Association.
- UNESCO, 2026, Baegun hwasang chorok buljo jikji simche yojeol (vol.II), the second volume of “Anthology of Great Buddhist Priests' Zen Teachings”. <https://webarchive.unesco.org/20180708072600/http://www.unesco.org/new/en/communication-and-information/memory-of-the-world/register/full-list-of-registered-heritage/registered-heritage-page-1/baegun-hwasang-chorok-buljo-jikji-simche-yojeol-volii-the-second-volume-of-anthology-of-great-buddhist-priests-zen-teachings/> (July 8, 2026).
- Wagner, B., Bulska, E., Tomaszewski, T., Długosz-Jasińska, D. and Kulig, M., 2023, Elemental imaging approach to comparative analysis of historical inks. Proof of concept based on non-invasive examinations of the Chopin manuscript as a case study, Talanta, 263, 124683.
- Wenz, J., 2022, X-rays could reveal the secrets hidden in Gutenberg's first Bibles, <https://www.inverse.com/innovation/confucius-gutenberg-xrays> (July 8, 2026).
- Yoo, B. H., 2019, A Study on the Metal Composition and Metal Tissue of a Genuine (Assumption) and Counterfeit (Assumption) of Goryeo Metal Movable Type, Journal of Studies in Bibliography, 77, 125-144. (Korean with English Abstract)
- Yoo, W.S. and Kim, J.G., 2021, Comparative study on very similar jeungdoga scripts through image analysis - fundamental difference between Treasure No. 758-1 and Treasure No. 758-2 -. Journal of Conservation Science, 37(6), 791-800. (in Korean with English Abstract)
- Yoo, W.S., 2022a, The world's oldest book printed by movable metal type in Korea in 1239: the song of enlightenment. Heritage, 5, 1089-1119.
- Yoo, W.S., 2022b, How was the world's oldest metal-type-printed book (the song of enlightenment, Korea, 1239) misidentified for nearly 50 years? Heritage, 5, 1779-1804.

- Yoo, W.S., 2022c, Direct Evidence of Metal Type Printing in The Song of Enlightenment, Korea, 1239. Heritage, 5, 3329-3358.
- Yoo, W.S., 2022d, Identification of Metal Type Prints, Recarved Woodblock Prints and Woodblock Recarving Sequences through Image Analyses: Comparisons among Six Versions of Jeungdoga Scripts, Journal of Conservation Science, 38(5), 404-414. (in Korean with English abstract)
- Yoo, W.S., 2022e, Quantification of Characteristics of Metal Type and Woodblock Prints through Image Analysis and Its Application to Four Versions of Jeungdoga Scripts, Journal for the study of Buddhist Philosophy, 11, 327-361. (in Korean with English abstract)
- Yoo, W.S., 2023a, Ink tone analysis of printed character images towards identification of medieval Korean printing technique: the song of enlightenment (1239), the Jikji (1377), and the Gutenberg Bible (~1455). Heritage, 6(3), 2559-2581.
- Yoo, W.S., 2023b, A comparative study on various printed versions of Nammyeong cheon hwasangsong jeungdoga (南明泉和尚頌證道歌) – Identification of the world's oldest metal movable type printed book in 1239 –, Journal for the Study of Korean Buddhist History, 23, 321-354. (in Korean with English abstract)
- Yoo, W.S. and Yun, J.S., 2024, Discovery of the New World's Oldest Extant Metal-Type-Printed Book in Korea through Image Acquisition, Comparison, and Analysis. Digital Studies/Le champ numérique, 14(1), 1-22. <https://doi.org/10.16995/dscn.10946>.
- Yun, Y.H., Cho, N. C. and Lee, S.H., 2009, Restoration and Scientific Analysis of Casting Bronze Type in Joseon Dynasty, Journal of Conservation Science, 25(2), 207-217. (in Korean with English Abstract)