



&lt;연구논문&gt;

한국표면공학회지  
J. Kor. Inst. Surf. Eng.  
Vol. 45, No. 3, 2012.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2012.45.3.136>

## 고대 금속활자의 복제를 위한 성분분석과 열역학적 주의 점

김기호\*

충북대학교 신소재공학과

### Composition Analysis and Thermodynamic Care for Replication of Ancient Metallic Type

Kiho Kim\*

Department of New Materials Eng., Chungbuk National University, Cheungju 361-763, Korea

(Received May 18, 2012 ; revised June 28, 2012 ; accepted June 28, 2012)

#### Abstract

'Jikjisimcheyocheal (Jikji afterwards)' is known as a first book printed by the metal type in the world.. The metal type used for printing this book has not been found yet. To help for replicating the original metal type, it is required to investigate the composition analysis of the copied metal type. In this study, the composition analysis and thermodynamic care for replicating of ancient metal type was performed on the basis of an analytical reports concerned with the ancient metal type which made after Jikji printing. Metal types were made by remelting and casting of the mother alloy which came from a cast of a mixed metals in accordance with the composition revealed in the literatures. Change of composition during remelting of mother alloy and casting of metal was detected by the EDS analysis. The reasons for variation in composition were discussed by metallurgical and thermodynamic point of view, and a mixing ratio of metals to get the original composition of ancient metal type is suggested. Some attention should be paid on mixing, melting and casting of metals to get an objected composition for copy of ancient metal type.

*Keywords: Jikjisimcheyocheal, Metal type, Composition, Replication, Remelting, Casting, Metallurgical and thermodynamic base, Mixing ratio*

## 1. 서 론

‘직지심체요절(直指心體要節)’은 인류가 만든 최초의 금속활자로 인쇄된 책으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 그런데, 이렇게 훌륭한 문화유산이 있음에도 불구하고 이를 증명할 충분한 증거물들이 없는 것이 현실이다. 즉 직지심체요절의 인쇄본이나 이를 인쇄한 금속활자를 발견할 수 없다는 것이다. 다만 다른 문헌에 약간의 기록만이 남아 있다. 한 가지 다행스러운 것은 얼마 전 청주시 흥덕사지로 추정되는 장소에서 ‘흥덕사’라고 새겨져 있는 금구가 발굴되어 관련학계의 비상한 관심을 모았었다. 그러나 추가적인 유물들이 발견되지 않아 애태우고 있는 실정

이다. 따라서 우리나라에서 인류 최초의 금속활자가 만들어진 사실을 기념하고 이를 홍보하기 위한 사업의 일환으로 직지 금속활자를 복제해 보는 일은 뜻있는 일일 것이다. 본 연구에서는 직지가 만들어진 유사 시대의 금속활자의 성분분석 보고서를 토대로 유사한 금속활자를 만들어 이를 분석하고 그 결과를 통하여 직지 활자 성분을 유추하고 이를 토대로 직지 금속활자 복제에 도움을 주고자 하는 것이다.

구리는 인류가 사용한 최초의 금속이며 청동은 구리를 다른 금속들과 혼합해 만든 합금 중 최초의 것이다. 가장 초기에 만들어진 청동은 구리와 비소의 혼합물이었다. 그 후 비소 대신 주석을 사용하게 되었다. 청동야금술은 BC 3100년 무렵 메소포타미아 북부나 시리아 방면에서 발명된 것으로 알

\*Corresponding author. E-mail : kimkh@cbu.ac.kr

려져 왔는데 메소포타미아 우르 제1왕조 무덤에서 청동제품이 발견된 것을 보면 이 지역도 BC 3000년 무렵부터 청동기시대로 들어갔음을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 이 새로운 기술은 여러 경로를 거쳐 여러 지방으로 전파되었을 것으로 추정되고 있다. 한국 청동기시대의 연대 설정에는 정설이 없고, 대체로 BC 10세기 무렵에 시작되어 BC 4세기 무렵까지 계속되었을 것으로 보고 있다<sup>3)</sup>. 주석 청동은 그 이후 예술, 건축, 무기의 유용한 재료가 되었고, 교회 및 사찰의 종 등 종교적 종을 통해 인류의 역사를 관통하는 메아리가 되었다. 오늘날에도 청동 합금은 여러 가지 합금 중 가장 많이 사용되는 합금의 하나이다.

옛 금속 활자에 관해 연구한 보고서들은 주로 기존 문화재의 보존에 관한 내용이 많고, 분석한 결과를 바탕으로 제조 과정에 대한 추정을 하고 있다<sup>4,8)</sup>. 그렇지만 현대 금속공학적인 관점에서 보면 제조 방법과 조건에 따라서 만들어지는 금속 주물의 조성이나 조직에는 큰 차이가 날 수 있음을 알 수 있다. 더군다나 현대 금속 공학의 발전은 철강이 다량으로 생산되어 사용되기 시작한 18세기 이후에 이루어진 것이기 때문이다. 예를 들어 광석으로부터 금속을 얻는 제련공학에 관련된 체계적인 제반 지식들과 이에 관련된 열역학적 함수들 간의 상관관계는 18세기 이후에 정립되었다고 볼 수 있다. 따라서 옛 선현들이 만들었던 금속 유물들을 복제하는 데에는 현대 금속 공학적인 관점에서 고찰하여 주의를 기울여 만들어야 복제할 수 있을 것이다. 그렇게 하지 않는다면 외형적인 모양만을 복제하게 되는 것으로 조성도 고대금속활자에 걸 맞는 진정한 의미의 복제라고 할 수 없을 것이다. 여기서는 금속 활자에 관련된 유물들을 복제하는데 관련 있었던 내용들을 참고로 하여 복제에서 주의해야 할 사항들을 밝히고자 하였다.

## 2. 실 험

금속활자의 성분분석에 사용된 금속활자들은 다른 연구자들에 의하여 그 조성이 밝혀진 유사한 시대의 금속활자들로서 문헌<sup>9)</sup>에 의한 조성에 따라서 성분 금속들을 배합하고 용해시켜 모합금(모금속활자합금)을 만들었으며, 이를 필요량만큼 도가니에 재용해시켜 금속활자로 주조하였다. 모금속의 용해에는 10번 흑연도가니(약 10 kg의 용해 용량)를 사용하여 우선 동을 용해시킨 후 주입하기 전에 다른 금속들을 첨가 용해하여 합금시킨 후 가열 건조된 강철제의 주형에 모합금 한 덩어리가 약 500 g의 주피가 되도록 주조 응고시켜 모합금으로 하였

다. 이렇게 만들어진 모합금을 필요에 따라 2번 흑연도가니(약 2 kg의 용해 용량)를 사용하여 용해시킨 후 밀납, 주물사, 도토를 이용하는 각종 주형에 부어 금속활자를 주조하고, 이것을 분석하여 활자합금의 조성으로 하였다.

따라서 모합금 및 주조된 금속활자의 조성을 분석하여 용해 전의 배합 조성으로부터의 성분 변화를 알아내었고, 그 원인을 밝히고자 하였으며, 이를 토대로 다른 연구자들에 의하여 밝혀진 본래의 금속활자 조성비를 갖도록 하기 위한 배합비율을 제안하였다.

금속활자의 성분 분석은 EDS(Energy Dispersive Electron Spectroscopy) 법으로 하였으며, 전자현미경 내에 약 5×5×5 mm의 시편을 넣고 전자선을 조사하여 시편 표면의 각 원소들로부터 발산되는 특성 X-선의 강도를 측정하여 조성을 구하는 방법으로 Hitachi S-2500C 모델을 이용하여 X1000의 배율에서 분석하였다. 분석 오차는 주성분에서 약 ±2.5%, 미량 원소에서 약 ±5% 정도이다. 따라서 조성의 정확도를 높이기 위하여 위치를 달리한 세 곳을 분석하여 평균값을 취하였다.

## 3. 결과 및 고찰

‘임진자(壬辰字)’로 알려진 고 활자합금은 문헌<sup>9)</sup>에 의하여 그 중량백분율은 Cu: 80.5 Zn: 1.2 Sn: 9.8 Pb: 3.6 Fe: 1.9의 합금으로 분석 보고되어 있다. 동일한 비율로 배합된 금속들을 용해시켜 만들어진 모합금의 분석결과는 다음 표 1과 같았고 그림 1은 EDS 분석 결과의 한 예이다.

한편 위 조성의 모합금을 재용해시켜 활자로 만들었을 때 금속활자의 조성은 다음 표 2와 같이 변화되었고 그림 2는 EDS 분석 결과의 한 예이다.

이와 같이 모합금의 제조 및 이를 이용한 금속활자의 제조 과정에서 합금의 조성에 상당한 변화가 생기는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 방법으로 기존에 다른 연구자들에 의하여 보고된 문헌상의 고대 금속활자들의 조성<sup>9)</sup>으로 배합한 금속의 용해에

Table 1. Composition of mother alloy for metal type 'Imjinja'

Element	Line	Weight (%)	Cnts (s)	Atomic (%)
Si	Ka	1.41	15.64	3.21
Fe	Ka	1.94	9.75	2.22
Cu	Ka	91.33	186.62	91.71
Sn	La	5.32	27.45	2.86
Total		100.00		

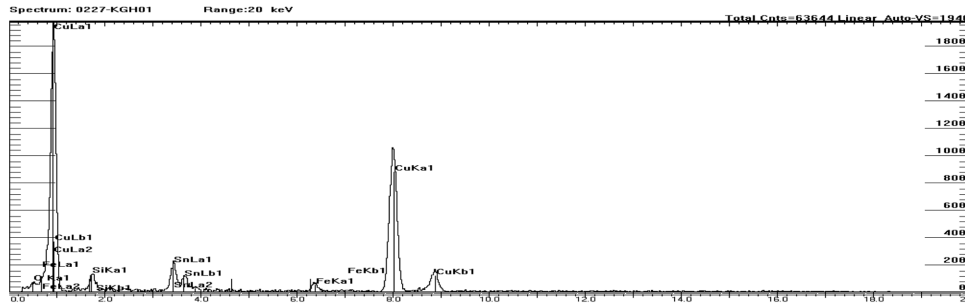


Fig. 1. Result of EDS analysis of mother alloy for metal type 'Imjinja'.

Table 2. Composition of metal type 'Imjinja' made of remelted mother alloy

Element	Line	Weight (%)	Cnts (s)	Atomic (%)
Si	Ka	0.36	3.25	0.82
Fe	Ka	1.78	7.50	2.06
Cu	Ka	93.04	158.49	94.50
Sn	La	4.82	20.75	2.62
Total		100.00		

의하여 모합금을 만들고 금속활자를 만들 때 성분의 변화를 표 3에 나타내었다. 표에서 Cu90 Sn10 합금은 다른 고대 금속 활자들과의 조성 변화의 비교를 위하여 만든 것이다.

표 3에서 알 수 있듯이, 모든 시료에서 원래의 배합 조성보다 구리, 비소는 증가되었으나 철은 변화가 적었고, 아연, 주석, 납 등의 감소되는 것으로 나타났다. 이를 근거로 변화율을 계산하면 표 4의 결

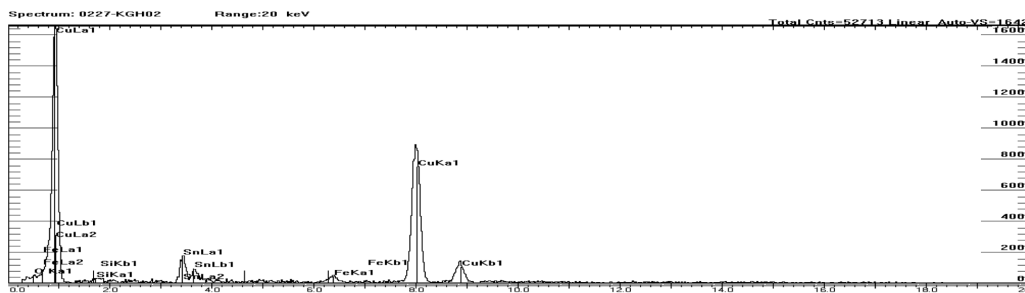


Fig. 2. Result of EDS analysis for metal type 'Imjinja' made of remelted mother alloy.

Table 3. Result of quantitative analysis for ancient type metals of mixing and casting composition

unit: wt.%

Element		Cu	Sn	Fe	Al	Zn	Pb	As	Si	S	Cl	Tc	Remarks
Imjinza (MA)	Mixing	80.5	9.8	1.9		1.2	3.6						
	Casting	91.3	5.3	1.9					1.4				
Imjinza (TA)	Mixing	91.3	5.3	1.9					1.4				
	Casting	93.0	4.8	1.8					0.4				
Koreabokza (MA)	Mixing	50.9	28.5	2.2		0.7	10.2						
	Casting	78.2	19.3	1.3					0.3				
Koreabokza (TA)	Mixing	78.2	19.3	1.3					0.3				
	Casting	96.0	3.5						0.5				
Tsuruga (MA)	Mixing	69.9	9.2	1.4	0.9	0.8	12.5	0.48	2.5	1.2	0.9		
	Casting	81.6	3.5	3.8				8.3	1.8			1.1	
Tsuruga (TA)	Mixing	81.6	3.5	3.8				8.3	1.8			1.1	
	Casting	76.1	3.9	1.5				14.1	1.5			2.9	
Cu90 Sn10 (MA)	Mixing	90	10										
	Casting	92.3	6.3		1.4								
Cu90 Sn10 (TA)	Mixing	92.3	6.3		1.4								
	Casting	95.3	4.7										

MA: Mother Alloy, TA: Type Alloy

Table 4. Variation of composition at mother alloy and type alloy

unit: wt.%

Element		Cu	Sn	Fe	Al	Zn	Pb	As	Si	S	Cl	Tc	Remarks
Imjinza	MA	+11.3	-4.5	0.0		-1.2	-3.6		+1.4				
	TA	+1.7	-0.5	-0.1					-1.0				
Koreabokza	MA	+27.3	-9.2	-0.9		-0.7	-10.2		+0.3				
	TA	+17.8	-15.8	-1.3					+0.2				
Tsuruga	MA	+11.7	-5.7	+2.4	-0.9	-0.8	-12.5	+7.8	-0.7	-1.2	-0.9	+1.1	
	TA	-5.5	+0.4	-2.3				+5.8	-0.3			+1.8	
Cu90 Sn10	MA	+2.3	-3.7		+1.4								
	TA	+3.0	-1.6		-1.4								

과를 얻을 수 있다.

표 4에서 알 수 있는 바와 같이 구리는 대체로 증가되는 경향을 나타내었고 그 원인은 구리가 귀 금속에 속하는 산화되기 어려운 금속원소이기 때문이라고 생각된다. 실제로 동광석의 제련과정에서도 제련된 동의 정련할 때 폴링(poling)이라 하여 생나무 막대로 용융 동을 휘저어 탈산 시키는 과정이 있으며 이 과정에서도 동은 산화되지 않는다<sup>10)</sup>. 철은 조성 변화가 적었으며, 기타 성분 금속들은 산화 및 휘발(특히 아연, 납)에 의해 농도가 감소된 것으로 판단된다. 비소도 화학적 물성으로는 산화되기 쉬운 금속이나 구리와 쉽게 합금을 이루어 남게 되어 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다. 다른 고대활자와 비교를 위하여 일부러 만든 Cu 90 Sn 10 조성의 청동합금에서도 동은 모합금 주조 후 +2.3%, 활자합금 주조 후 +3%의 조성 증가를 나타내었으며, 주석은 노합금 주조에서 -3.7%, 활자합금 주조에서 -1.6%의 조성 감소를 나타내었다.

실제로 다른 연구자들에 의하여 보고된 문헌<sup>9)</sup>상의 활자합금의 조성이 12세기 당시의 금속활자를 만들 때의 의도된 합금 조성이라고 판단되지는 않는다. 원래 구리광석은 주로 황화물로 산출되고 여러 가지 비철금속 원소들이 섞여 있으며 이를 제련하는 과정에서 같이 제련되어 구리의 합금을 이루게 된다. 이것은 현대의 제련과정에서도 마찬가지이며, 구리와 합금을 이루고 있는 불순물 금속들은 용해된 상태에서 공기와의 접촉에 의한 산소와의 친화력의 차이에 의한 건식정련이나 황산동 수용액 중에서의 전기분해 과정을 통한 전해정련 과정에서 이러한 불순 성분들을 분리 제거한다<sup>10)</sup>.

한 가지 예로, 쓰루가 활자에 포함된 유황은 황동광의 제련과정에서 잔류하는 성분으로 정련이 충분히 이루어지지 않아 남아있게 되며, 현대적인 동 제련과정에서도 0.02% 정도 잔류하도록 하여 동의 과도한 산화를 방지하도록 한다, 염소는 건식정련

과정에서 용탕에 뿌려진 소금으로부터 들어간 것으로 판단된다. 그리고 현재 중금속 장애를 일으키는 원소로 알려진 비소 등을 일부러 합금했다고 볼 수는 없으며, 그 당시에 비소를 별도로 제련하는 기술은 없었다고 판단된다. 특히 철과 비소는 고온의 강한 환원성 분위기에서만 환원되는 성분들로서 그들로 이루어지는 2원계 상태도에는  $As_2Fe$ ,  $AsFe$  및  $AsFe_2$  조성의 금속간 화합물이 형성되는 것으로 알려져 있다. 쓰루가 금속활자에 포함된 철과 비소 성분은 이와 같은 이유 때문으로 추정된다. 고대 활자의 종류에 따라서 철과 비소가 함유된 활자도 있고 그렇지 않은 경우를 볼 수 있다. 이것은 광석의 제련 과정이 높은 온도의 강한 환원성이었거나 그렇지 않았을 경우의 차이로 판단되며 이것으로 그 금속이 만들어진 제련 시기나 지역 혹은 사용한 광석을 구분하는 표지 역할을 할 수도 있을 것이다. 실제로 이 등<sup>9)</sup>에 의한 국립중앙박물관 소장 금속활자의 과학적 분석 자료에 따르면 같은 고대금속활자 중 인진자의 경우 30개를 분석한 결과 동의 함량이 최대 93.5%에서 최소 66.2%까지 변동 폭을 나타내었고, 주석은 최대 14.6%에서 최소 2.5%까지의 변동 폭을 나타내었고, 또한 비중 차이도 최대 8.8에서 최소 7.7로서 10% 이상의 큰 변화 폭을 나타내었고 그 원인으로서 제조과정의 조성차이나 가스 함량 등에 의한 것으로 추정하였다. 다만, 이 인용 문헌에 의하면 성분 원소 중 비소의 존재가 철의 강도 증가를 위하여 일부러 첨가되었다고 주장하였는데 그것은 잘못된 추정으로, 그 당시에 비소를 별도로 제련하여 첨가할 수 있는 제련학적 기술이 없었을 것으로 판단되며, 우리나라에는 동광석 중 비소를 함유한 유비철광의 산지가 중복 보은, 충남 청양, 전북 남원, 경북 달성 및 울진 등으로 널리 분포하고 있음을 알 수 있다<sup>11)</sup>. 따라서 고대 금속활자 분석에 포함된 철, 알루미늄, 아연 등의 성분들은 그 당시의 제련 과정에서 혼입된 불순

물 성분들이고, 이러한 현상이 본 연구의 합금 제조 과정에서도 일어나서 실리콘, 테크네슘 등의 성분이 혼입되어 나타난 것으로 판단된다.

다만 이러한 배합과 용해 및 주조 과정에서의 성분 변화율은 본 연구에서 사용된 12세기 당시를 모사한 용해 및 주조 과정에 한정되는 값이며, 동일한 시설에서도 용해 온도나 시간과 같은 용해 조건을 달리하던지 주조 온도와 주입 방법, 거푸집 재료 및 온도 등의 주조 조건이 달라지면 성분과 조성이 달라질 수 있다고 본다. 조성에 따른 주조된 금속의 조직의 변화에 관한 개략도를 참고문헌에서 확인할 수 있다<sup>12)</sup>. 또한, 현대의 불활성 가스 분위기와 전기 유도용해로 등을 이용하는 다른 용해 조건 및 주조 조건에 따라서도 조성은 크게 달라질 수 있음에 주의해야 한다.

아연이나, 납 등의 성분이 용해 및 주조 과정에서 감소가 심한 것은 앞서서도 설명한 바와 같이 산화와 휘발에 의한 것으로 판단되며, 참고적으로 열역학적 자료<sup>13)</sup>에 근거하여 동합금의 주입 온도인 약 1250°C에서의 각 성분 금속들의 증기압은 다음과 같다.

표 5로부터 알 수 있는 바와 같이 구리, 실리콘, 철의 증기압은  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  mmHg로 매우 적고, 반면 납, 유황, 아연, 비소, 인의 증기압은  $10^1 \sim 10^7$  mmHg로 매우 큰 값을 나타내어 그 차이는 무려  $10^4 \sim 10^{12}$ 을 나타낸다. 단 비소에 대하여는 증기압은 크지만 구리에 쉽게 용해되므로 농도의 증가를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 합금의 용해 및 주조에 관련된 많은 조건들 중에서 특히 온도나 분위기, 가스 함량 등에 주의를 기울여야 일정한 물성의 주조된 금속 활자들을 만들 수 있으며, 그 중에서 위와

같은 산화 및 증발에 의한 손실을 방지하는 방안으로는 합금 용해로 및 용해 방법의 개선과 산화 및 휘발 감량을 고려한 장입량 계산에 따른 장입, 용해 분위기의 개선, 산화 방지 방안이 고려된 주입 조건의 설정, 용융 금속 중 용해된 가스 함량의 조절, 적절한 용탕 온도와 밀폐형 주형 사용 등을 들 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 우리나라에서 인류 최초의 금속활자를 사용하여 인쇄된 책인 ‘직지(白雲和尚抄錄佛祖直指心體要節)’을 기념하고 이를 홍보하기 위한 사업의 일환으로 충청북도 청주시에서 직지 금속활자를 복제하려는 시도에 대하여, 유사 시대에 만들어진 금속활자의 성분분석 보고서를 토대로 유사한 금속활자를 만들어 이를 분석하고 그 결과를 통하여 직지 활자 성분을 유추하고 이를 토대로 위 시도에 도움을 주고자 한 것이다.

금속활자를 제조하기 위한 각 성분 금속들의 배합과 용해 및 주조의 과정에서 조성의 변화로서 구리는 대체로 증가되었고, 철은 변화가 적었으며, 기타 성분 금속들은 산화 및 휘발에 의해 농도가 감소된 것으로 판단된다. 다른 연구자의 문헌에서 인용한 조성이 12세기 당시의 금속활자를 만들 때의 의도된 조성이라고 판단되지는 않는다. 유황은 광석의 제련과정에서 잔류된 성분이고, 염소는 건식 정련 과정에서 뿌려진 소금으로부터 들어간 것으로 판단되며, 비소 등은 산화되기 쉽고 휘발성이 큰 원소임에도 고대 금속활자 성분을 이루는 것은 일부러 합금했다고 볼 수는 없으며, 상태도 상으로 불

Table 5. Vapour pressure based on thermodynamic of elements for type alloy

$$\text{Equation for vapour pressure : } \log P = AT^{-1} + B \log T + CT + D (\text{mmHg})$$

Element	A	B	C	D	P at T=1250°C
Cu	-17,770	-0.86		12.29	$7.7 \times 10^{-3}$
Pb	-10,130	-0.985		11.16	$2.4 \times 10^1$
Sn	-15,500			8.23	$1.1 \times 10^{-2}$
Si	-20,900	-0.565		10.78	$1.8 \times 10^{-5}$
Fe	-19,710	-1.27		13.27	$1.9 \times 10^{-4}$
Al	-16,380	-1.0		12.32	$2.4 \times 10^{-2}$
S	-6,975			11.32	$5.6 \times 10^3$
Zn	-6,620	-1.255		12.34	$9.8 \times 10^7$
Cl					
As	-6,160			9.82	$6.0 \times 10^5$
P	-2,740			7.84	$1.1 \times 10^6$
Mn	-14,520	-3.02		19.24	$1.2 \times 10^0$

때 철과 금속간화합물을 용이하게 형성하기 때문이라고 판단된다. 구리의 주입 온도인 약 1250°C에서 각 성분 금속들의 증기압을 열역학적으로 계산하여 휘발의 용이성을 비교하였다.

이와 같은 일련의 원료금속의 배합과 용해 및 주조 과정에서의 조성 변화율을 계산하였으며, 목표된 조성의 고대 금속 활자를 얻기 위해서는 이러한 변화율을 감안해야 고대 금속활자를 복제할 수 있을 것이다. 그렇게 하지 않는다면 외형적인 모양만을 복제하게 되는 것으로 조성도 고대금속활자에 걸 맞는 진정한 의미의 복제라고 할 수 없을 것이다. 다만, 문헌에 나타난 동일한 고대 금속활자들의 분석 내용에서도 상당한 조성의 변동 폭이 있으므로 복제에서도 어느 정도 조성의 변동 폭이 허용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. 淸州古印刷博物館, 금속활자 주조 및 인쇄기술사 복원 연구 결과보고서, 청주, 129 (2006).
2. M. Kranzberg and C. W. Pursell, "Technology in Western Civilization (2 Volumes)", Oxford University Press (1967).
3. 노태천, 한국 고대 야금기술사 연구, 학연문화사 (2000).
4. G. T. Shim et al., J. Kor. Inst. Met. & Mater., 652-659 (2009).
5. K. H. Cho, J. Corros. Sci. Soc. of Korea, 27,262 (1998).
6. J. S. Lee, W. S. Kim, J. S. Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 46.26 (2008).
7. 印刷史研究會 編, 本と活字歴史事典, 東京, 柏書房 (2000).
8. S. K. Lim, S. G. Kang, J. Conservation Science, 1,1,60 (1992).
9. 淸州古印刷博物館, "금속활자 주조 및 인쇄기술사 복원 연구 결과보고서", 청주, 539 (2006).
10. 日本金屬學會, 非鐵金屬製鍊新版製鍊篇-, 101-120, 日本金屬學會, 仙臺 (1964).
11. 朝鮮總督府地質照查所 編, "朝鮮鑛物地", 45, 삼성당, 서울 (1940).
12. 洪鍾徽, 金屬材料-理論과 應用-, 367, 普成文化社, 서울 (1977).
13. O. Kubaschewski, C. B. Alcock, Metallurgical Thermochemistry, 5th ed., 358, Pergamon Press, NewYork (1979).

1. 淸州古印刷博物館, 금속활자 주조 및 인쇄기술사 복