

# 조선시대 금속제 탄환의 특징과 제작기법 검토

An Examination of  
the Characteristics and  
Manufacturing Techniques of  
Joseon-era Metal Bullets

최보배<sup>1\*</sup>, 이혜진<sup>2</sup>, 김명훈<sup>1</sup>, 정현진<sup>1</sup>  
국립진주박물관<sup>1</sup>, 육군박물관<sup>2</sup>

Bo Bae Choi<sup>1\*</sup>, Hye Jin Lee<sup>2</sup>,  
Myung Hoon Kim<sup>1</sup>, Hyeon Jin Jeong<sup>1</sup>  
Jinju National Museum<sup>1</sup>,  
Korea Army Museum<sup>2</sup>

## 요약

탄환의 특성과 거동은 화기 성능과 직결되므로 매우 중요하다. 그러나 전통 탄환과 관련된 연구 성과는 사실상 적은 편이다. 본고에서는 육군박물관 소장 조선시대 금속제 탄환의 재료와 제작 공정을 알아보기 위해 과학적 분석을 실시했다. 또한 탄환 직경에 따라 사용 가능한 조선시대 화기 종류를 분류하여 정리했다. 그 결과 탄환은 철환, 납환 및 수철연의환으로 구분되었다. 대부분의 철환과 납환은 주조로 제작되었다. 일부 철환은 단조로 제작되었다. 수철연의환은 철환을 주형에 넣은 후 용융된 납을 부어 주조하여 제작된 것으로 추정된다. 한편 탄환은 재료에 따라 비중이 확연히 구분되는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 조사 대상 탄환은 소형 총통, 조총, 불랑기포, 현자총통, 대위원포, 소포, 홍이포 등에 사용 가능했다.

**주제어** : 탄환, 납, 철, 제작기법, 조선시대

## Abstract

The characteristics and behavior of bullets are important because they are directly related to the firearm performance. However, research related to bullets have been small. In this paper, scientific analysis was conducted to find out the materials and manufacturing process of metal bullets during the Joseon Dynasty, owned by Korea Army Museum, and the types of firearms available were classified and organized according to the bullet diameter. As a result, bullets were classified into iron bullets, lead bullets, and lead-coated iron bullets. Most of the iron bullets and lead bullets were made from casting. Some iron bullets were made from forging. And the lead-coated iron bullet was made by pouring molten lead after putting the iron bullet into the mold. Finally, the bullets could be used for Hand Cannon, Matchlock Musket, Frankish Cannon, Hyeon-ja Cannon, Dae-Wiwon Cannon, Small Cannon, and Hong-Yi Cannon.

**Keywords** : Bullets, Lead, Iron, Manufacturing techniques, Joseon Dynasty

\* Corresponding Author :  
Bo Bae Choi

## 1. 서론

화약무기는 표적의 파괴라는 분명한 목적을 가지고 사거리 증대 및 치명성을 최대화하는 방향으로 발전했다<sup>[1]</sup>. 발사기, 추진제(화약), 발사체(탄환) 사이에는 다양한 상호작용이 일어나며, 그중에서도 탄환은 화약에서 얻은 에너지를 최종적으로 표적에 전달한다. 또한 화기 설계자는 표적에 원하는 피해를 주기 위해 발사체 종류를 결정하기도 한다<sup>[2]</sup>.

현대 탄환은 표적에 최대 에너지를 전달하기 위해 형태, 크기, 재질, 약실 및 총열의 형태 등 다양한 요소를 고려하여 설계된다. 따라서 탄환의 특성과 거동은 화기 성능과 직결되므로 매우 중요하다.

국내 전통 화약무기는 이를 전문으로 연구하는 기관 및 연구자가 적었기 때문에 많은 연구가 축적되지 못한 상황이었다. 하지만 최근 과학적 분석을 통해 소형 총통의 제작 기술과 발달 과정을 규명하는 연구가 이루어진 바 있었다. 이 연구에서는 현전하는 소형 총통의 내부 구조를 파악하고, 총구 구경과 총열 길이에 따른 발사체의 변화를 밝혔으며, 문헌 기록과의 차이도 확인했다<sup>[3]</sup>. 또한, 전통 화약무기의 성능 검증을 위해 재현 실험이 이루어진 사례도 있었지만 조선 화약의 배합 비율과 순도, 탄환의 재질 및 크기 등 기초적인 정보가 부족했기 때문에 이를 검증하기에는 한계가 있었다<sup>[5],[6]</sup>.

이와 같이 현재까지 이루어진 전통 화약무기 연구는 총통·완구 등 발사기 또는 추진제에 집중되어 발사체와 관련된 연구 성과는 사실상 적은 편이다. 19세기의 훈련도감은 납환 180만 개를 보유했을 정도로 많은 탄환을 제작하였으며, 500여 점 이상의 금속제 탄환이 국립박물관을 포함한 여러 기관에 소장되어 있다. 그러나 많은 수량이 여러 소장처에 산재해 있어 전체 현황을 파악하기 어렵고, 제작 및 사용 시기도 불분명하다. 또한 발사기, 추진제에 비해 소모품적인 성격이 강한 탄환은 연구 대상으로서 상대적으로 주목받지 못했다.

이에 본고는 조선시대 금속제 탄환의 특성을 조사하여 재료와 제작기법을 검토하고, 조사 대상 탄환의 직경을 바탕으로 적용 가능한 조선시대 화기 종류를 검토하고자 한다. 본고에서 언급하는 탄환과 포탄은 다양한 크기의 모든 금속제 발사체를 포함한다.

### 1.1. 탄환의 시초와 전개 과정

화약무기의 발사체는 석환, 화살, 금속제 탄환으로 변화했다. 발사체의 시초는 화약무기의 기원으로 평가되는 13세기 중엽 남송의 돌화창에서 볼 수 있다. 돌화창은 ‘자과(子窠)’라는 탄환을 사용했다. 자과의 재질은 불분명하지만, 기록을 통해 구

(球)형이었음을 알 수 있다<sup>[표1(a)],[7]</sup>.

고려시대에 화약무기가 전래된 이후 주요 발사체는 화살이었다<sup>[8]</sup>. 조선 초기에는 석환도 함께 사용했으나 주요 발사체는 여전히 화살이었다<sup>[표1(b),(c),(d)],[9]</sup>. 화살은 대·중·소 장군전, 피령목전, 차대전 등이 있었고, 화살의 부속품 일부가 국립진주박물관·서울역사박물관·동아대학교 석당박물관·일본 가라쓰성 전시관에 현존한다.

이후 16세기에 승자총통의 등장을 기점으로 총구 내경이 줄어들고 총열이 길어지는 점으로 보아, 조선 중기 화약무기의 주요 발사체는 금속제 탄환으로 변화했다<sup>[표1(e)],[3]</sup>. 금속제 탄환 사용은 토격의 등장과 궤를 같이한다. 토격은 진흙을 뭉쳐서 만들기 때문에 총구의 구경에 크게 영향 받지 않았고, 화살-격목보다 호환성이 압도적으로 높았다. 또한 공성전(攻城戰)처럼 총구를 내려 사격하는 상황에서는 토격 덕분에 탄환이 흘러내리지 않고 큰 위력을 발휘한다는 장점이 있었다<sup>[10]</sup>. 또한 금속제 탄환은 부서지기 쉬운 석제 탄환에 비해 파괴력이 월등히 높았고, 대량생산이 가능했기 때문에 경제성이 뛰어났다.

『화포식언해』, 『용원필비』, 『신기비결』 등 문헌 기록에 따르면 조선시대 금속제 탄환은 철환(鐵丸), 납환(연환, 鉛丸), 수철연의환(水鐵鉛衣丸)이 확인되고, 크기에 따라 대·중·소로 분류된다. 또한 실물 자료로는 철환, 납환, 청동환(靑銅丸, 여천해저 출수품)이 확인되며, 수철연의환으로 확인된 실물 자료는 없었다. 즉, 탄환의 재질은 철(Fe), 납(Pb), 구리(Cu)이며, 발사기 종류에 따라 사용하는 탄환의 규격과 수량은 달라졌다. 특히 연의환 또는 수철연의환이라 명명하는 탄환은 수철로 주조한 탄환에 납을 씌워 만든다고 알려져 있다<sup>[11]</sup>. 다만 당시 명칭으로 알 수 있는 성분이 현대 금속 분류법과 동일한지는 명확하지 않다<sup>[12]</sup>.

한편 석환은 완구 등 중·대형 화약무기의 발사체로 꾸준히 사용되어왔으며, 현전하는 수량도 많다. 따라서 물자 부족 등의 이유로 조선 시대 전반에 걸쳐 계속 사용된 것으로 보인다<sup>[13]</sup>.

표 1. 발사체 전개 과정

		
(a) 돌화창	(b) 석제 탄환(광주10843)	(c) 단석(진주6329)

	
(d) 화살(대장군전, 일본 사가현 가라쓰시)	(e) 금속제 탄환(고적29541)

## 1.2. 국내 · 외 금속제 탄환 분석 사례

16~19세기 금속제 탄환 연구는 금속 조직 및 성분 분석을 활용한 재질, 제작기법을 주로 다뤘다<sup>[표2]</sup>. 영국 전함 메리로즈호에서는 다양한 종류의 발사기, 산탄통, 탄환 주형이 출수되었으며, 납 · 철 · 석환도 다수 발견되었다. 메리로즈호에서 출수된 금속제 탄환은 주조로 제작되었고, 일부 탄환은 철에 납을 씌우거나 돌에 납을 씌운 것도 있었다<sup>[14]</sup>. 이 외에도 1645년 영국 샌달성 포위 공격에 사용되었던 철 포탄의 미세조직 분석 결과 주조로 제작되었다<sup>[15]</sup>. 한편 이스라엘 북부에 위치한 아코시(The city of Akko)의 항구에서 19C 전반 해군 예비 전함으로 추정되는 난파선이 출수되었다. 난파선에서 발견된 대포 탄환의 외형 관찰 및 미세조직 분석 결과 주조로 제작된 것으로 밝혀졌다. 특히, 난파선 연구에서는 중 · 대형 탄환의 주형 구조가 언급되기도 했다<sup>[16]</sup>. 국내의 경우 탄환 자체에 집중한 연구는 드물며 무기류와 함께 출토된 탄환을 분석한 정도에 그쳤다<sup>[17],[18],[19],[20],[21]</sup>.

국내에서 조사된 탄환은 주조뿐 아니라 단조로 제작된 것도 있으며 중 · 대형 탄환 제작 공정에 다양한 방법이 적용될 가능성이 있음을 언급했다. 특히 직경 2cm 내외의 작은 탄환을 제작하는 경우 직경 1cm 정도의 긴 철근을 자른 후 둥근 형태로 만드는 단조 공정이 대량 생산에 효과적일 수 있음을 언급했다. 반면 직경이 큰 중 · 대형 철제 탄환을 대량으로 생산하기 위해서는 원형의 주형에 용해된 쇳물을 부어 여러 개를 동시에 제작하는 것이 훨씬 더 유리하다는 견해가 있었다<sup>[19]</sup>.

이와 같이 그동안 국내 · 외 탄환 연구는 금속 조직 분석에 따른 재질을 밝히는데 집중하여 탄환에 적용 가능한 발사기 종류와 성능 규명에는 이르지 못했다.

표2. 탄환 관련 국내·외 분석 사례

구분	연번	시기	대상	출토지	제작방법	조사방법
국외	1	16C 초반	납, 철, 석제 탄환 및 납-철 탄환	영국 (The Mary Rose)	주조	금속 조직 분석
	2	17C 중반	철제 포탄	영국 (Sandal Castle)	주조	금속 조직 분석
	3	19C 전반	철제 포탄	이스라엘 (Akko시 항구)	주조	금속 조직 분석
국내	4	15~16세기	철환	서울 군기시터	주조	금속 조직 분석
	5	16세기 중반	철환	용인 임진산성	단조	금속 조직 분석
	6	16세기 후반	납환	경기도 양평군 양근리	-	성분 분석
	7	16세기 후반	동환	여천 해저 인양	주조	성분 분석






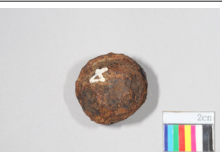
## 2. 조사 대상 및 방법

### 2.1. 조사 대상

조사 대상은 육군박물관 소장 조선시대 금속제 탄환 총 28점이다<sup>(표3)</sup>. 조사 대상 탄환은 입수 당시 작성된 기록을 바탕으로 제작시기와 입수경위를 파악할 수 있었다. 그러나 이외에 탄환의 재질과 관련된 정보는 없었다. 따라서 국립진주박물관에 탄환의 과학적 조사를 의뢰했고, 제작 기술과 성분 분석을 병행했다.

조사 대상 탄환은 시료 20, 21번을 제외하면 모두 구형이다. 또한 색상은 재료(철, 납)에 따라 적갈색, 흰색 또는 회색을 띤다. 시료 18~26 표면에는 일부 갈색 부식물이 관찰된다. 시료 27은 진한 회색을 띠는 금속 위에 적갈색 부식물이 관찰되었다. 시료 28은 철제로 추정되는 소지 금속이 진한 회색 금속으로 덮여있다.

표3. 조사 대상

			
시료 1	시료 2	시료 3	시료 4
			
시료 5	시료 6	시료 7	시료 8



## 2.2. 조사 방법

탄환의 특성을 확인하기 위해 제원 측정, 비파괴 성분 분석, 비중 측정, 사진 촬영 및 실체현미경 촬영, X선 촬영을 실시했다(표4).

캘리퍼스를 사용하여 직경을 측정하고, 정밀 전자 저울로 중량을 측정했다. 또한 성분 확인을 위해 이동형 X선 형광 분석기(이하 p-XRF)를 사용하여 표면 성분 분석을 실시했다. p-XRF는 부식, 풍화 및 이물질의 영향을 받을 가능성이 높고 원자 번호 21번(Sc, scandium)이하 낮은 에너지를 가진 경원소는 측정이 어렵다. 따라서 본 논문은 주성분 판별을 위한 방법으로써 p-XRF를 사용했다.

표면 성분 분석 결과는 교차검증을 위해 비중을 측정했다. 비중 측정은 알코올을 사용했으며 액체비중계를 이용했다. 탄환을 105℃에서 2시간 건조한 후의 무게와

알코올 용액에 침적한 상태에서의 무게를 측정한 뒤 비중을 구했다.

한편 표면 특징 관찰을 위해 고해상도 카메라와 실체현미경으로 촬영했고, 내부 결함 및 밀도 확인을 위해 X선 촬영을 실시했다. 이미지 분석에는 imagej를 사용했다.

표4. 조사 장비

연번	목적	기기명
1	외형 특징 관찰	실체현미경(LEICA社 M205A/Sony社 ILCE-7RM4) 고해상도 카메라(Cannon社 EOS 6D Mark II)
2	제원 측정	캘리퍼스, 정밀전자저울(OHAUS社 EOD120)
3	비중 측정	액체비중계(Alfa Mirage社 MD-300S)
4	표면 성분 분석	p-XRF(Bruker社 SI Titan800)
5	내부 결함 관찰	X선발생장치(Softex社 VIX-150/Viewworks社 VXTD-3543DCW)

3. 조사 결과

표5. 조사 결과

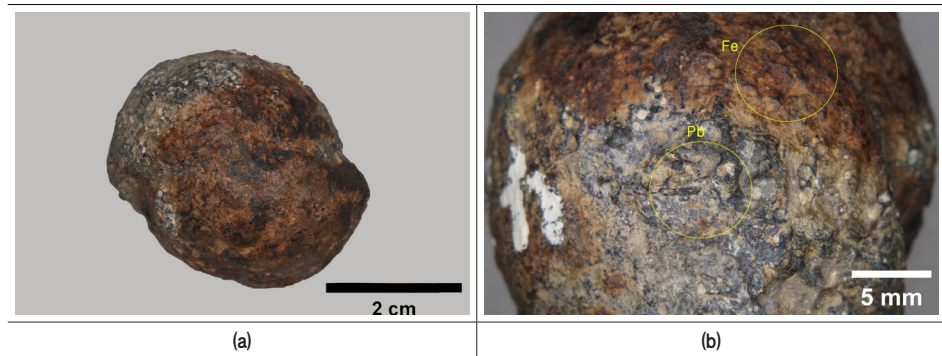
시료번호	직경(mm)	중량(g)	비중	주성분	비중에 따른 분류	직경에 따른 분류
1	61.20	916.60	7.173	Fe	Group 1	Group E
2	63.62	910.58	7.165	Fe		
3	25.60	62.27	7.343	Fe		
4	26.93	50.35	7.264	Fe		Group B
5	21.45	33.40	7.235	Fe		
6	25.53	36.35	6.400	Fe		
7	28.80	64.26	6.378	Fe		
8	27.65	66.18	6.734	Fe		
9	26.40	45.96	6.137	Fe		
10	28.02	74.04	6.928	Fe		
11	62.20	767.34	6.832	Fe		Group E
12	53.50	510.66	7.107	Fe		Group D
13	52.80	402.65	6.636	Fe		
14	50.05	403.22	6.787	Fe		
15	62.38	984.95	7.983	Fe		Group E
16	63.99	979.16	7.865	Fe		
17	121	668.28	-	Fe	-	Group F



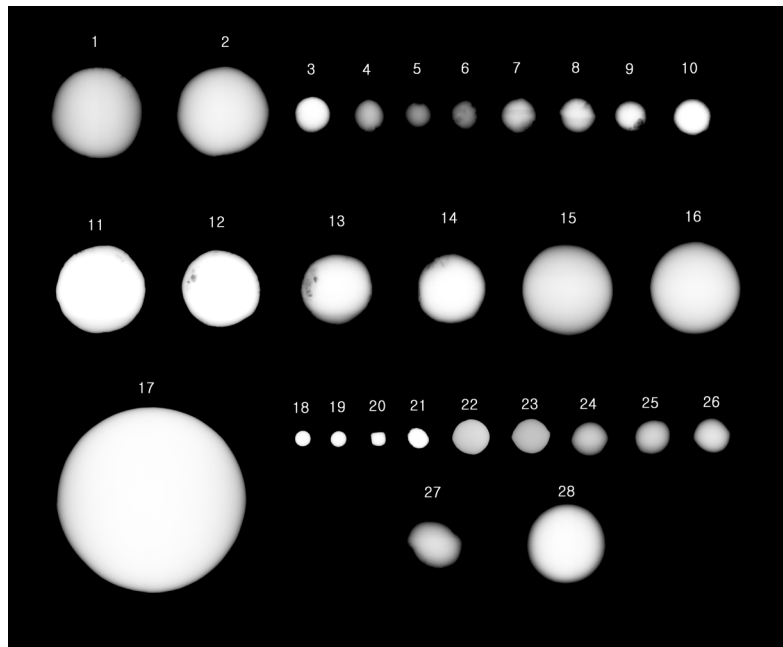
시료번호	직경(mm)	중량(g)	비중	주성분	비중에 따른 분류	직경에 따른 분류
18	11.27	7.51	11.251	Pb	Group 2	Group A
19	11.50	8.09	10.634	Pb		
20	10.51	7.66	10.750	Pb		
21	16.36	5.68	10.752	Pb		
22	26.28	91.55	10.845	Pb		Group B
23	27.59	92.49	11.205	Pb		
24	27.33	91.48	11.050	Pb		
25	26.75	88.58	11.026	Pb		
26	27.35	91.54	11.181	Pb		
27	38.32	159.60	7.033	Fe	Group 1	Group C
			Pb			
28	55.50	603.60	7.018	Pb		Group D
			Fe			

탄환 28점에 대한 주성분, 직경 및 비중 측정값은 표5에 정리했다. 직경과 중량은 다양하며, 비중값도 차이를 보인다. p-XRF 결과 시료 1~17의 주성분은 철(Fe)이었다. 시료 18~26의 주성분은 납(Pb)이었고, 표면에 관찰되는 갈색 물질은 철(Fe) 부식물이었다. 시료 27은 육안 관찰로 탄환의 재료를 알기 어려웠으나, p-XRF 결과 회색 부분은 납(Pb), 적갈색 부분은 철(Fe)이었다<sup>(표6)</sup>. 시료 28은 내·외부 재료가 달랐고, p-XRF 결과 회색 부분은 납(Pb), 적갈색 부분은 철(Fe)이었다. 따라서 철환을 납으로 감싼 수철연의환임을 알 수 있었다. 한편 X-ray 촬영 결과, 탄환의 직경, 재질, 밀도가 균일하지 않아 투과된 양상이 달랐다. 납환과 직경 52mm 이상 철환은 X선으로 투과하지 못했지만 시료 1~14 철환은 내부에서 기공이 확인되었다<sup>(표1)</sup>.

표6. 시료 27 표면 관찰 사진







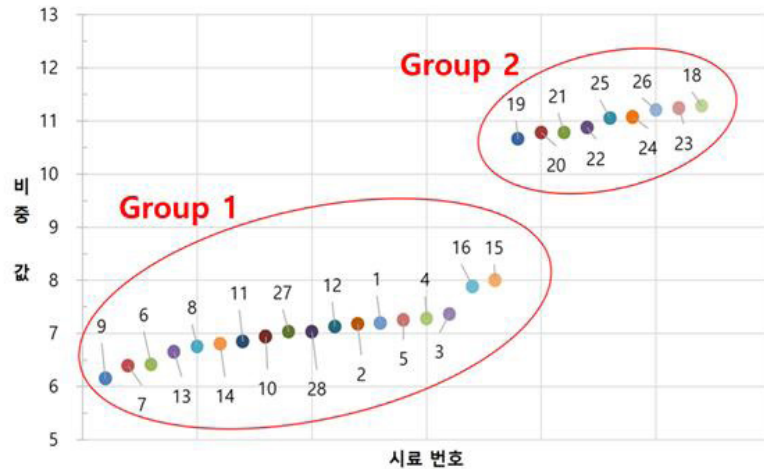
도1. X-ray 촬영 결과

#### 4. 고찰

##### 4.1. 탄환의 재료

p-XRF 결과 탄환은 크게 철환과 납환으로 구분된다<sup>(표5)</sup>. 특히 납환은 육군박물관 등록 명칭이 ‘연의환’이다. 이 경우 표면 성분 분석만으로 구분이 어렵기 때문에 비중을 측정하여 성분 분석 결과와 비교 검토했다.

비중은 유사한 범위를 나타내는 두 그룹으로 분류된다<sup>(도2)</sup>. 그룹 1(시료 1~16)의 비중값은 평균 6.998이며, 주성분 분석 결과 철환이었다. 그룹 2(시료 18~26)의 비중값은 평균 10.966이고, 주성분 분석 결과 납환이었다. 시료 3~10, 22~26과 같이 유사한 직경의 탄환(직경 평균 26.59mm)에서 나타나는 비중 차이를 통해 서로 다른 재료로 제작되었음을 확인할 수 있다. 한편 시료 27의 비중은 7.018이며, 그룹 1(철환)에 포함된다.

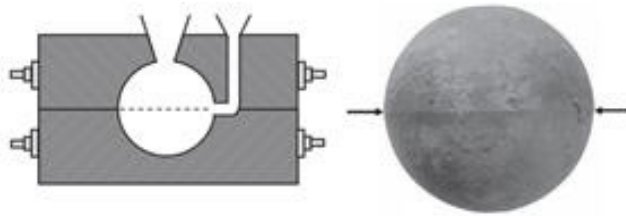


도2. 조사 대상 탄환의 비중

#### 4.2. 제작과정



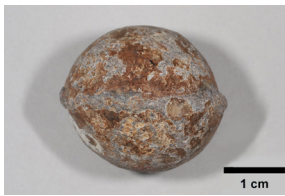



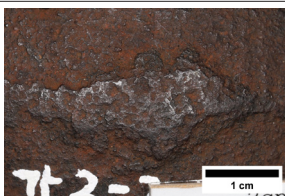
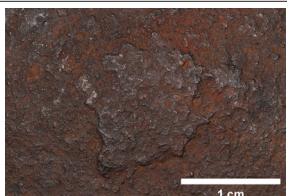
탄환을 주조로 제작하는 경우 주조분할선, 탕구(gate), 압탕(riser) 흔적이 남는다. 본고에서는 국제 주물 결함 도해집(International Atlas of Casting Defects)에 근거하여 탄환에 나타나는 주물 결함을 언급하고자 한다<sup>[21]</sup>. 실체현미경 및 X선 투과 사진 촬영 결과, 시료 1~14, 17~19, 22~28의 표면과 내부에서 주조 결함이 관찰되었다. 공통적으로 관찰되는 주조 결함은 주조 분할선과 형 어긋남(F221, Shift), 기공(B111, Blowholes), 표면 핀홀(B123, Surface pinholes)이다<sup>(표7)</sup>.

한편 시료 17은 탕구와 압탕으로 추정되는 흔적이 관찰되었다. 탕구는 용탕이 들어가는 입구이며, 압탕은 주물이 응고하는 마지막까지 용탕을 공급하는 역할을 한다. 압탕은 용탕 보급뿐만 아니라 혼입된 모래, 슬래그 또는 가스를 떠오르게 하는 목적이 있다. 북부 이스라엘에서 출수된 대형 철환 주조 기술 연구에서는 주조분할선의 수직방향에 탕구를 배치하고, 수평방향으로 압탕을 배치한 사례가 확인된다. 이들은 탄환 표면에 원형 또는 비정형 흔적을 남겼다<sup>(도3), [16]</sup>. 그러나 탕구와 압탕의 배치는 주물 형태, 작업자의 의도에 따라 달라질 수 있다. 따라서 표면에서 관찰한 흔적만으로 탕구인지 압탕인지 특정할 수는 없다. 다만 탕구, 압탕 흔적을 확인함으로써 시료 17 철환이 주조로 제작되었음을 알 수 있었다.



도3. 북부 이스라엘 대형 철환의 주형 모식도<sup>[16]</sup>

표7. 시료에서 관찰되는 주조 결함

(a)	주조분할선 (Parting line)		
		시료 1	시료 6
(b)	형 어긋남 (F221, Shift),		
		시료 23	시료 25
(c)	기공 (B111, Blowholes), 표면 핀홀 (B123, Surface pinholes)		
		시료 2	시료 13
(d)	탕구, 압탕 흔적		
		시료 17	


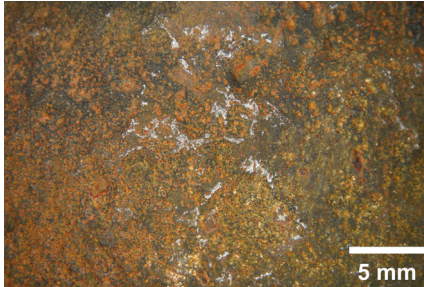

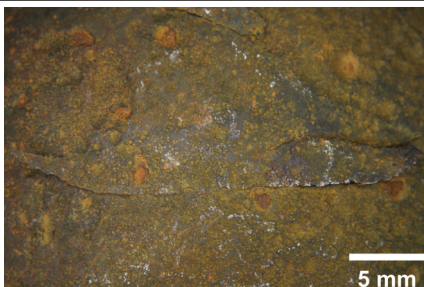
시료 15, 16은 직경이 62.38mm, 63.99mm로 X선으로 투과가 불가능했다. 또한 표면에서 주조결함이 확인되지 않으며, 울퉁불퉁한 표면, 찍힌 듯한 자국과 날카로운 얇은 층이 관찰되었다<sup>(표8)</sup>. 이는 현대 단조 연삭 볼(Forged grinding mill ball)의

표면 형상과 유사하다. 한편 시료 15, 16의 비중은 그룹 1 내에서도 다른 탄환과 편차가 나타난다<sup>(도2)</sup>. 이들의 비중값은 7.865, 7.983로, 표준재료 중 저탄소강과 유사하다. 이 밖에 시료 1~14 탄환의 비중값은 평균 6.866로 주철과 유사하거나 더 낮았다(저탄소강:7.85, 주철:7.30, 납:11.34, 표준밀도의 비중 환산값 사용)<sup>[23]</sup>. 금속은 단조, 압연, 인발 등 가공을 거치면 비중이 표준값보다 커지고, 주조품은 작아진다. 따라서 그룹 1 철환이 보이는 비중 차이는 주조 및 가공 여부의 차이로 볼 수 있다<sup>[24]</sup>.

탄환은 소모성을 떠는 만큼 단시간에 대량으로 생산해야 하기 때문에 주조로 제작하는 것이 적합하리라 생각된다. 그러나 임진산성 유적<sup>[25]</sup>과 군기시터 유적<sup>[26]</sup>에서 단조로 제작된 철환이 발굴된 사례가 있어 시료 15, 16 역시 단조로 제작되었다고 판단된다.

이 밖에 시료 20, 21은 표면이 마모되었거나 형태가 변형되어 주조 결함으로 보이는 특징을 관찰하지 못했고, 밀도가 높은 납으로 이루어져 있어 투과상을 얻지 못해 제작 공정을 알 수 없었다.

표8. 시료 15, 16의 표면 흔적

(a)		
	시료 15	시료 15(표면 확대)
(b)		
	시료 16	시료 16(표면 확대)

## 4.3. 수철연의환

시료 28은 외부 납 층의 두께가 일정하지 않고 일부 결실된 부분도 있다(표9). 비중 값은 7.018로 측정되었으며, 철과 납 혼합물임에도 불구하고 그룹 1 철제 탄환과 비중이 유사했다. 따라서 이를 검토하기 위해 시료 28의 반지름과 외부 납층의 두께를 기준으로 어떠한 결합과 부식도 없는 완전한 구체일 때 수철연의환의 무게, 밀도, 비중을 산출하여 비교했다.

먼저, 외부 납 층의 두께 측정 결과 평균 2.49mm였다(표10). 평균 두께를 기준으로 산출한 결과, 내부 철환 부피(X)는  $67.51\text{cm}^3$ , 외부 납 층 부피(Y)는  $22.00\text{cm}^3$ 이다. 이후 산출한 부피와 표준재료의 밀도를 이용하여 내부 철환과 외부 납 층의 중량을 구한 뒤, 비중으로 환산했다. 내부 철환 밀도는 주철과 저탄소강의 표준밀도 두 가지 모두 적용하였으며, 철-납 혼합물 밀도를 구하는 공식은 다음과 같다.

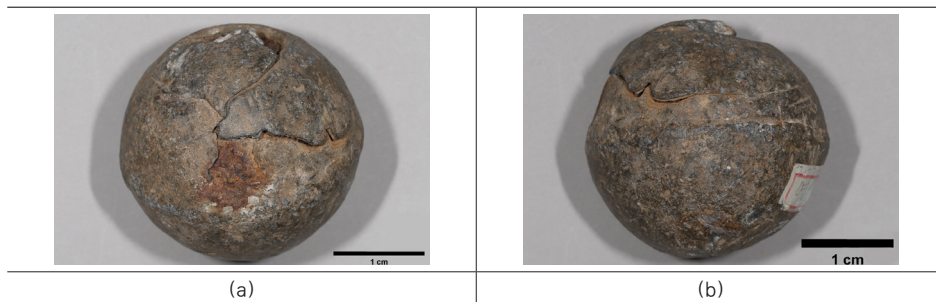
$$\text{혼합밀도} = [(A\text{부피} \times A\text{밀도}) + (B\text{부피} \times B\text{밀도})] / (A\text{부피} + B\text{부피})$$

비중 = 물질의 밀도 / 물의 밀도  
※ 물의 밀도(4℃ 기준),  $1\text{g/cm}^3$

위 공식으로 산출한 수철연의환 비중값은 8.29(주철), 8.71(저탄소강)이며, 동일 규격일 때 비중은 납환(11.34) > 수철연의환(8.29, 8.71) > 철환(7.30, 7.85) 순서였다(표11, 표12). 주조 철제 유물은 비중값이 2.32까지도 측정된 바 있어[27] 부식 정도에 따라 감소폭이 매우 큼을 알 수 있다. 따라서 대부분의 철환이 표준 주철 비중인 7.30보다 낮은 비중값을 보이는 것도 같은 맥락으로 이해될 수 있다.

또한 시료 28이 완전한 구형일 때 수철연의환 비중 산출값보다 적은 비중을 가지는 이유는 이것이 완전한 구형이 아닌 점, 금속에 함유된 불순물 성분 및 함량[28], [29], 내부 철환의 부식 정도, 결합(기공) 등 여러 요인이 복합적으로 작용했으리라 생각된다.

표9. 시료 28 실체현미경 사진





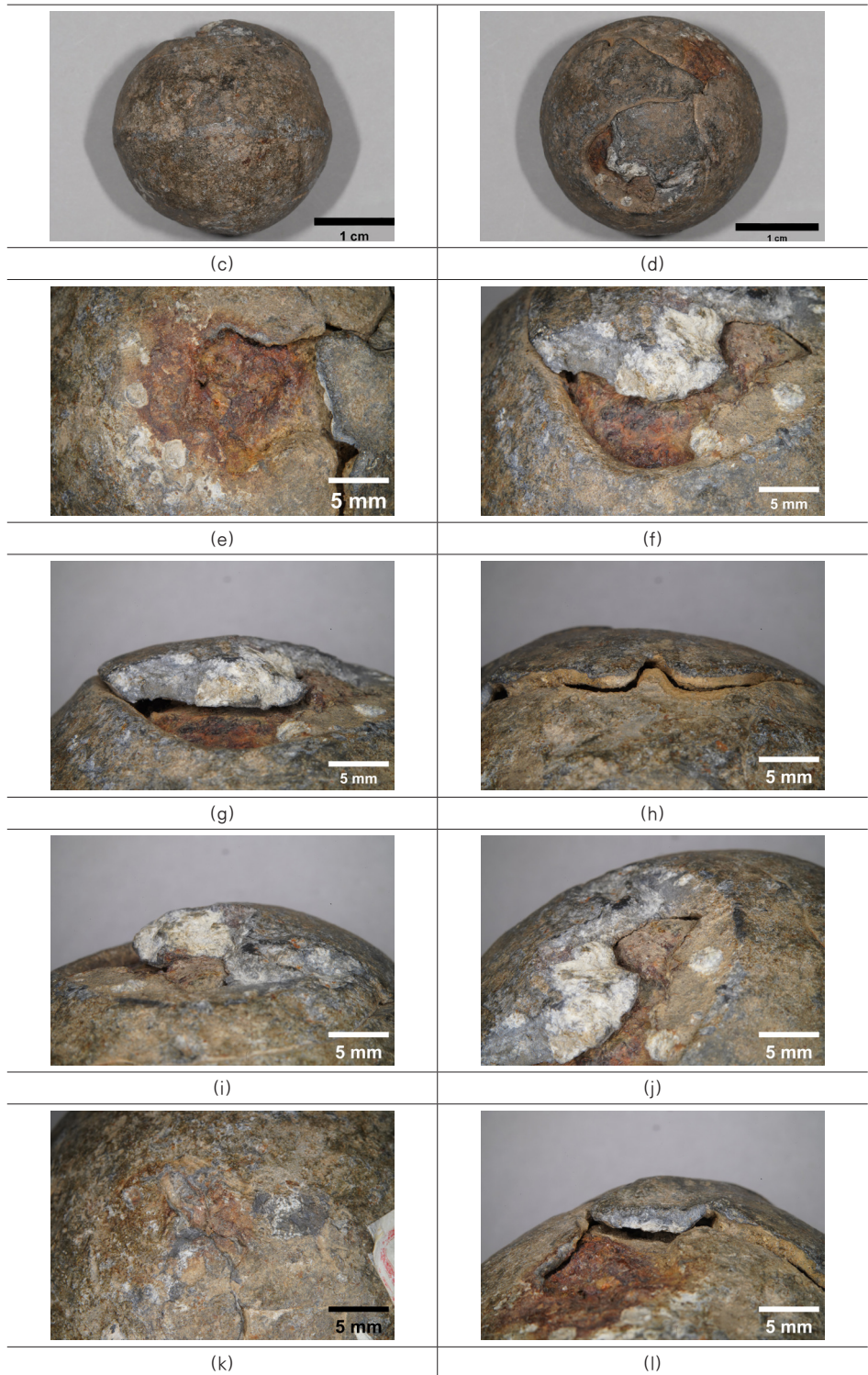


표10. 외부 납 층 두께

구분	1	2	3	4	5	6	평균	표준편차
두께(mm)	0.44	1.21	2.32	3.10	3.74	4.13	2.49	1.64

표11. 수철연의환 비중 비교(시료 28, 표준재료)

시료 28	산출 비중값(표준재료 기준)		
수철연의환*	수철연의환(납25%**)	철환(철100%)	납환(납100%)
7.018	8.29 / 8.71	7.30 / 7.85	11.34

\*측정값, \*\*부피비

표12. 시료 28이 완전한 구(球)형일 때의 산출값

시료 28	전체 반지름(mm)*		27.75	
	외부 납 층 두께(mm)*		2.49	여섯 지점 측정 평균
	내부 철환 반지름(mm)		25.26	전체 반지름-외부 납 층 두께
	중량(g)*		603.60	
	비중*		7.018	
	부피( $cm^3$ )	전체(X+Y)	89.51	$\text{구의 부피} = \frac{4}{3}\pi r^3$ ※반지름, 두께값(mm)을 cm로 환산하여 계산
		내부 철환(X)	67.51	
외부 납 층(Y)		22.00		
부피비(X:Y)		75 : 25		
표준재료	밀도( $g/cm^3$ )	주철	7.30	
		저탄소강	7.85	
		납	11.34	
산출값(동일 규격의 표준재료)				
수철연의환	중량(g) (밀도×부피)	전체(X+Y)	742.30 / 779.43	주철 / 저탄소강
		내부 철환(X)	492.82 / 529.95	주철 / 저탄소강
		외부 납 층(Y)	249.48	
철환		철100%	653.42 / 779.72	주철 / 저탄소강
납환		납100%	1015.04	

\*측정값

한편 시료 28은 표면에서 주조분할선, 형 어긋남 등 주조 결함이 관찰되었다. 외부 납 층은 내부 철환을 감싸며 흘러내린 듯한 형상이다. 따라서 시료 28 수철연의 환은 철환을 거푸집에 넣고 용융 납을 붓는 방법으로 만들었을 가능성이 높다. 표면이 납으로 덮여있어 일반 X-ray 촬영으로 내부 구조를 확인하기 어려웠으나 유사 연구 사례가 있어 내부 구조를 짐작할 수 있었다<sup>[표13(a)]</sup>.

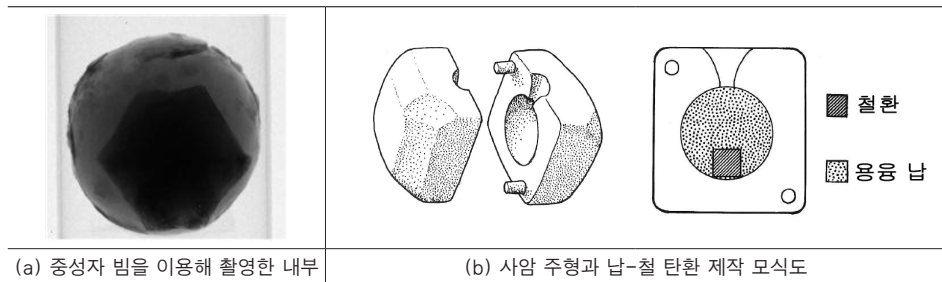
철환에 납을 씌우는 방법은 ①주형 안에 철환을 넣은 상태에서 용융된 납을 붓는



방법<sup>[14]</sup>, ②철환 표면에 납판을 감싸는 방법, ③용융침지법 등을 생각할 수 있다.

①, ②번 방법은 메리로즈호에서 발견된 탄환 분석으로 확인된 바 있다. 메리로즈호의 납-철 탄환(smaller lead-iron shot) 단면 미세조직 분석 결과, 납과 철의 경계면 및 주형과 가까운 경계면(탄환 외곽)에서 기동 구조가 관찰되었다. 반면 경계면에서 멀어질수록 조직이 거칠고 불규칙했으며 표면에서 주조분할선이 관찰되어 주조로 제작된 것으로 추정되었다<sup>[13(b)]</sup>. 한편, 또 다른 납-철 탄환(larger lead-iron shot)은 납에서 등축 미세구조가 관찰되었다. 이에 따라 구형 철환(spherical piece of iron) 주위를 단단한 납판으로 감싸서 제작한 것으로 추정했다. 탄환 내부의 철은 슬래그와 기공이 많은 저품질 금속 조각을 사용한 것이 확인되었다<sup>[14]</sup>. ③용융침지법(hot-dip coating)은 저융점 금속을 용융하고 그 속에 피복해야 할 금속을 침적시키는 방법이다<sup>[30]</sup>.

표 13. 메리로즈호에서 발견된 납철 탄환 내부 및 제작 모식도



수철연의환은 조선시대에 실제로 사용되었음에도 불구하고 만들어진 이유에 대해서는 밝혀진 바가 없다. 그 이유를 현대 탄도학 및 재료공학적인 관점과 함께 추정하자면 다음과 같다.

에너지는 속도와 질량에 비례하므로 탄환의 질량과 속도가 증가할수록 충격력이 증가한다<sup>[31]</sup>. 따라서 탄환은 무거울수록, 빠른 속도를 가질수록 표적에 큰 영향을 미칠 수 있다.

그러나 무거운 중·대형 납환을 발사하려면 보다 큰 폭발에너지가 필요했을 것이고, 이는 곧 더 많은 양의 화약이 필요함을 의미한다. 또한 직경 55.50mm 납환 1개의 무게가 1kg 정도인 것을 감안하면 신속한 이동, 보급에도 무리가 있었을 것이다.

즉, 수철연의환의 장점은 철환보다 파괴력이 높고, 납환보다 이동과 보급에 용이하며, 화약을 절약할 수 있다는 것이다. 또한 납은 방식성이 뛰어나기 때문에 철환에 납을 씌움으로써 방식 효과를 기대할 수 있고, 이미 부식됐거나 파손된 철환을 재사용(recycle)하기에도 적합한 방법이었을 것이다<sup>[14]</sup>.

수철연의환의 분석 사례는 본고에서 언급된 한 점에 국한되므로 향후 개체수를 늘려 면밀히 조사 분석하여 보완될 필요가 있다.

#### 4.4. 사용 가능한 조선시대 화기 종류

화기 설계자는 발사기 형태, 두께, 재질과 추진제를 고려하여 발사체 종류를 결정한다. 조선시대 탄환은 대부분 구형이며, 총열 내경과 딱 맞는 탄환을 사용하거나 작은 탄환을 여러 개 장전하는 산탄으로 사용하기도 했다. 『용원필비』, 『신기비결』에 따르면 대부분 화약무기에서 조란환을 사용한 기록이 있어, 화약무기에 들어갈 수 있는 크기라면 가리지 않고 사용했을 것이라 생각된다.

즉, 같은 탄환이라도 발사기와 탄환 장전 개수에 따라 비행 거동과 표적의 피해 양상이 달라질 수 있다. 따라서 탄환 직경을 기준으로 사용 가능한 조선시대 유통식 화기 종류를 역추적하여 조선시대 화약무기와 관련된 기초 연구 자료로 활용하고자 했다.

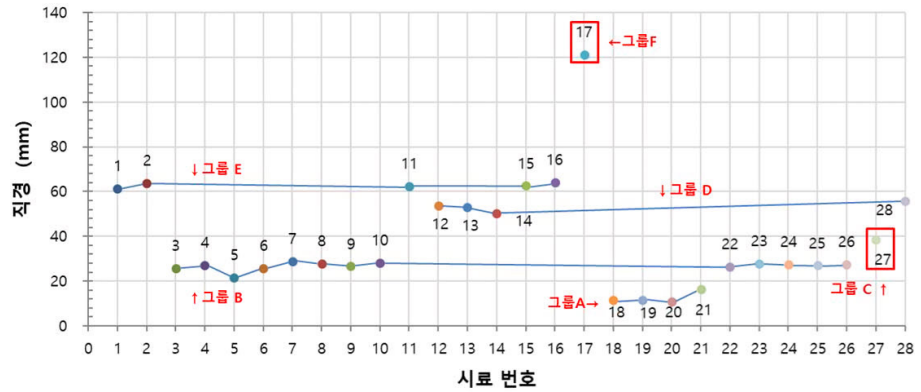
이를 위해 조사 대상 탄환을 직경에 따라 분류하고, 현존하는 조선시대 유통식 화기 내경과 비교했다.

본고에서는 탄환 직경과 가장 유사한 총열 및 포열 내경을 가진 조선시대 화기를 대응시켰다. 또한 화기 중에서도 내경 실측값 혹은 기록이 있는 것을 대상으로 했다.

탄환은 직경에 따라 6개 그룹으로 분류했다<sup>(도4)</sup>. 그룹 A는 10.51~11.50mm, 그룹 B는 21.45~28.80mm, 그룹 C는 38.32mm, 그룹 D는 50.05~55.50mm, 그룹 E는 62.38~63.99mm, 그룹 F는 121mm이다. 그룹 C, D는 표본이 1점에 불과하였으며, 이 외에는 그룹 내에서 탄환 직경의 편차가 크지 않았다.

그룹 A는 대형총통의 단일탄환으로 사용되기에는 직경이 너무 작기 때문에 소형 총통 및 조총의 탄환이었을 가능성이 높다. 비정형인 시료 21을 제외하면 직경 평균이 11.09mm로, 현존하는 소승자총통(진주22439, 철제)의 탄환 크기(약 11mm)와 유사하다<sup>[표14(a)]</sup>. 또한 조총의 평균 내경이 14mm인 것으로 보아 조총에도 적용이 가능하다. 승자총통은 총열 내경이 약 20~30mm이고, 탄환을 최대 15개 장전한다<sup>[3]</sup>. 승자총통과 비슷한 시기에 사용된 쌍자총통 역시 하나의 총열에 탄환을 총 6개씩 장전한다. 현존하는 쌍자총통(신수480)은 총열 한쪽의 내경이 약 15mm이며, 내부에서 발견된 탄환은 직경이 약 7mm로 확인된다. 즉 승자총통계 총통은 장전 시 탄환이 여러 개 들어가기 때문에 총열 내경보다 작은 탄환을 사용했으리라 추정된다<sup>[표</sup>

14(b)]

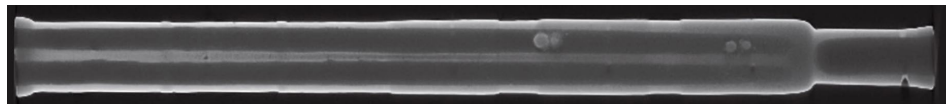


도4. 조사 대상 탄환의 직경에 따른 분류

표14. 소승자총통 및 쌍자총통 내 탄환 CT사진



(a) 소승자총통(진주22439) CT 사진



(b) 쌍자총통(신수480) CT 사진

한편 일본은 탄환 무게에 따라 조총의 종류를 나누는데, 직경 8.5~18.3mm(1~10몬메, 3.75~37.5g)의 탄환을 쏘는 것이 가장 일반적인 조총(코즈츠, 小筒)이었다<sup>[32]</sup>. 그룹 A는 탄환 무게가 평균 8g으로 일반적인 조총의 탄환 크기 및 무게와 유사했다. 또한 조총은 소형총통류와 달리 격목이나 토격이 없고, 탄환이 총열에 꽂혔을 때 문에 철환을 발사하면 총열 내부에 손상이 갈 가능성이 있다<sup>[33]</sup>. 따라서 조총의 발사체로는 납환이 더 유리했다. 또한 『신기비결』에 따르면 “조총은 소연환(小鉛丸)을 사용한다”고 기록되어 있고, 조총이 주력 무기로 사용되었던 19세기 『만기요람』에도 “575만개에 달하는 연환(鉛丸)이 삼군영 등에 보관되어 있다”고 기록하고 있다. 따라서 그룹 A는 조선시대 승자총통의 최후 단계인 소승자총통 또는 조총에 사용 가능한 탄환이었을 가능성이 높다.

그룹 B는 평균 직경 26.59mm로 대형총통의 단일탄환으로 사용되기에는 너무 작고, 조총에 사용하기에는 너무 크다. 현존하는 조선시대 화약무기에 그룹 B의

직경을 대입하면 불랑기 5호포(본관5), 소위원포(본관26)에 활용 가능하다. 불랑기 5호의 제원을 확인한 결과 포열 내경은 35.46mm이고, 소위원포의 포열 내경은 34.36mm이다. 또한 그룹 B는 다른 그룹과 달리 철환과 납환이 공존하고, 무게는 차이가 있으나 직경은 유의미한 차이가 없었다.

그룹 C는 표본이 단 1점에 불과하여 화기를 특정하기 어려우나 직경이 38.32mm인 것으로 보아 황자총통, 중위원포에 대입된다. 황자총통(본관14537)은 내경이 39.9mm, 중위원포(본관26)는 내경이 42.1mm로 그룹 C 탄환을 사용할 수 있다.

현자총통(진주52, M384, 신수14739, 신수17263, 동아대학교 석당박물관<sup>[34]</sup>)은 내경이 42.5~72.6mm로 다양하기 때문에 그룹 C와 D, E까지 모두 사용할 수 있다. 현자총통의 내경 편차가 큰 이유는, 현존하는 현자총통의 제작시기가 가경 연간(1522~1566, 광주박물관 소장품)부터 강희7년(1668, 동아대학교 소장품)까지 100여년 이상 차이 있기 때문이다. 따라서 대형화약무기의 정밀한 규격화가 이뤄지지 않았을 가능성도 있다. 『응원필비』에 따르면 현자총통의 내경(격목의 직경)은 2치6푼(주척 기준 55.4mm)이고, 발사체는 1치 7푼(주척 기준 35.7mm)으로, 사용하는 탄환의 재질은 납환이라 언급했기 때문에 현존하는 유물과 차이가 크다는 점도 이를 뒷받침한다.

그룹 D는 평균 직경이 52.96mm로, 포열 내경이 약 54.10mm인 대위원포(본관26)와 현자총통에 사용할 수 있다.

그룹 E는 평균 직경이 62.68mm로, 현자총통과 소포 탄환이었을 가능성이 있다. 광주박물관 소장 현자총통(광주2460)의 내경은 약 63.3mm이고, 임진산성 출토 현자총통(신수14739, 신수17263)의 내경은 약 65.4~66.7mm로, 그룹 E의 탄환을 쏘기에 적합한 크기이다. 또한 임진산성 출토 탄환 직경은 58.0mm로, 그룹 D, E 탄환 직경과 유사하다. 한편 그룹 E에 속하는 시료 1, 2의 관리명칭은 ‘소포 탄환’이다. 현존하는 소포(신수10265)는 1874년 대원군이 제작한 것으로 내경이 약 84mm이므로, 그룹 E가 실제로 소포 발사체로 사용되었을 가능성이 있다.

그룹 F는 직경 121mm로, 조사 대상 탄환 중 직경이 가장 크며 관리 명칭은 ‘홍이포 탄’이다. 육군박물관 소장 홍이포의 직경은 135mm이기 때문에 그룹 F 탄환 역시 홍이포 발사체로 사용되었을 가능성이 있다.

표 15. 탄환 직경에 따라 사용 가능한 화기 종류

직경에 따른 분류	시료 번호	직경 (mm)	사용 가능한 화기										
Group A	18	11.27	승자총통계 조총	불량기5호포 소위원포	중위원포 황자총통 현자총통	대위원포 현자총통	소포 현자총통	홍이포					
	19	11.50											
	20	10.51											
	21	16.36											
Group B	3	25.60											
	4	26.93											
	5	21.45											
	6	25.53											
	7	28.80											
	8	27.65											
	9	26.40											
	10	28.02											
	22	26.28											
	23	27.59											
	24	27.33											
	25	26.75											
	26	27.35											
Group C	27	38.32											
Group D	12	53.50											
	13	52.80											
	14	50.05											
	28	55.50											
Group E	1	61.20											
	2	63.62											
	11	62.20											
	15	62.38											
	16	63.99											
Group F	17	121											

## 5. 결론

본고에서는 육군박물관 소장 조선시대 금속제 탄환 28점에 대하여 비중 측정, 주 성분 분석, 표면 관찰 및 X선 투과 촬영을 실시하여 탄환의 특성을 확인했다. 분석 결과와 국내외 문헌 내용을 바탕으로, 조선시대 철환, 납환 및 수철연의환에 대한 제작 공정과 사용 가능한 조선시대 유통식 화기 종류를 고찰하여 종합했다.

탄환은 비중값에 따라 크게 두 그룹으로 구분되었다. 그룹 1은 비중 평균값이 6.998이며, 적갈색을 띠는 철환이다. 그룹 2는 비중 평균값이 10.966이며, 백색의 납환이다. X-ray 촬영 결과 재질, 밀도에 따른 투과도 차이를 확인했다.

또한 탄환 재료에 따라 비중이 명확히 구분되는 것을 확인했고, 향후 성분 분석 결과의 검증에 위한 방법으로 비중 측정의 실효성을 확인했다.

철환과 납환 대부분은 주조 분할선, 형 어긋남, 표면 핀홀 등 주조 결함이 관찰되었다. 시료 17 철환은 탕구와 압탕으로 추정되는 흔적이 발견되어 주조로 제작되었음을 확인할 수 있었다. 시료 15, 16 철환의 표면은 현대 단조 연삭 볼과 유사한 형상을 보이며, 다른 철환에 비해 비중값이 7.925로 다소 높다. 이는 저탄소강의 밀도와 유사하여 단조하여 제작된 것으로 판단된다.

시료 28은 육안 관찰 및 주성분 분석 결과 철환에 납을 섞은 수철연의환임을 확인했다. 또한 표면에서 주조분할선, 형 어긋남 및 흘러내림 등의 형상이 관찰되어 주조로 제작되었을 것으로 추정되었다. 수철연의환의 제작 목적은 ①철환보다 높은 파괴력, ②납환보다 높은 기동성, ③철환 부식 방지, ④저품질 철환 재활용 측면으로 해석할 수 있다.

다만 조선시대 수철연의환은 본고의 시료 한 점이 유일한 분석 연구 사례이므로, 향후 분석 대상을 추가 확보하여 성분, 비중, 제작 공정 등 위 조사 결과에 대한 보완이 필요하다.

탄환은 직경에 따라 6개 그룹으로 구분했다. 직경이 작은 순서부터, 그룹 A는 승자총통계 소형 총통, 조총, 그룹 B는 불랑기 5호포 및 소위원포, 그룹 C는 중위원포 및 황자총통, 현자총통, 그룹 D는 대위원포, 현자총통, 그룹 E는 현자총통 및 소포, 마지막으로 그룹 F는 홍이포 내경과 유사한 것으로 확인되었다. 전통 화약무기 내경을 기준으로, 직경이 작은 탄환은 한 번에 다량 장전되어 사용되기도 했으므로 상위 그룹에 해당하는 화포에서는 하위그룹의 탄환이 혼재되어 사용되었을 수 있다.

본고는 조선시대 탄환과 관련된 기초적인 조사 연구로 시료 수량이 적어 비교 검토하는 데 한계가 있었다. 그러나 향후 현존하는 조선시대 탄환의 종합적인 조사가 이루어진다면 전통 화약무기의 성능을 파악하는 기초 자료로 활용될 수 있으리라 기대한다.



## 참고문헌

1. 노우주, 신봉균, 신광선, 김수영, 장치별로 알아보는 대포(大砲)의 발달과정, *국방과 기술* **411**, p146-177, (2015).
2. 조필균, *총포, 탄약의 과학적 원리와 응용*, p173-176, 도서출판신화전산기획, 서울, (2015).
3. 국립진주박물관, *전통무기 조사연구보고서1-소형화약무기*, 국립진주박물관, 진주, (2020).
4. 『萬機要覽』「軍政篇」「訓練都監」, 서영보(2019).
5. KBS, KBS 역사스페셜 행주대첩과 첨단 무기, [https://vod.kbs.co.kr/index.html?source=episode&sname=vod&stype=vod&program\\_code=T2000-0107&program\\_id=PS-0000442577-01-000&broadcast\\_complete\\_yn=&local\\_station\\_code=00](https://vod.kbs.co.kr/index.html?source=episode&sname=vod&stype=vod&program_code=T2000-0107&program_id=PS-0000442577-01-000&broadcast_complete_yn=&local_station_code=00), (2022).
6. KBS, UHD 역사스페셜 화력전쟁 1592, [https://vod.kbs.co.kr/index.html?source=episode&sname=vod&stype=vod&program\\_code=T2021-0284&program\\_id=PS-2021108394-01-000&broadcast\\_complete\\_yn=Y&local\\_station\\_code=00&section\\_code=05&section\\_sub\\_code=08](https://vod.kbs.co.kr/index.html?source=episode&sname=vod&stype=vod&program_code=T2021-0284&program_id=PS-2021108394-01-000&broadcast_complete_yn=Y&local_station_code=00&section_code=05&section_sub_code=08), (2022).
7. 王兆春, 1998, 『中國科學技術史: 軍事技術卷』, 科學出版社.
8. 『고려사』 권81, 지35, 병1, 병제.
9. 『세종실록』72권, 세종 18년 6월 6일(신축).
10. 『선조실록』17권, 선조 16년 5월 17일(무술).
11. 훈련도감, *훈군신조군기도설·훈군신조기계도설*, 육군박물관, 서울, (2020).
12. 송응성, 최주, *천공개물*, 전통문화사, 고양, (1997).
13. 국립진주박물관, *동아시아 7년 전쟁, 임진왜란*, 국립진주박물관, 진주, (2018).
14. Robert Walker and Alexandra Hildred, MANUFACTURE AND CORROSION OF LEAD SHOT FROM THE FLAGSHIP MARY ROSE, *studies in Conservation Studies in Conservation* **45(4)**, p217-225, (2000).
15. David A. Scott, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*, p128, Getty Conservation Institute in association with Archetype Books, 미국, LA, (1991).

16. D.Cvikel, E.D.Mentovich, D.Ashkenazi, Y.Kahanov, CASTING TECHNIQUES OF CANNONBALLS FROM THE AKKO 1 SHIPWRECK: ARCHAEOLOGICAL INVESTIGATION, *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy* **49(1) B**, p107-119, (2013).
17. 강대일 외, 여천 해저 인양 총통의 과학적 연구, *보존과학연구* **15**, p47-54, (1994)
18. 이재성 외, 승자총통에 대한 과학적 연구, *학예지* **12**, p151-153, (2005)
19. 이재성, 백승희, 임진왜란기 화약 무기의 제작기술 검토- 성분분석 및 미세조직 분석 사례를 중심으로 -, *고문화* **82**, p135-155, (2013)
20. 국방군사연구소, *한국무기발달사*, p225-226, 국방부 군사편찬연구소, 서울, (1994).
21. 이재성 외, 군기시터 유적 출토 금속 화기류 제작기술 분석, *서울 군기시터 유적*, p460, 한강문화재연구원, 부천, (2011).
22. 한국주조공학회, *국제 주물결합 도해집*, 원창출판사, 인천, (2001).
23. 박인규, 이재갑, 김용석, 김형준, *재료과학과 공학 제8판*, p1034-1035, 시그마프레스, 서울, (2011).
24. 기계재료학 교재편찬위원회, *기계재료학*, p84, 북스힐, 서울, (2006).
25. 경기도박물관, *용인 임진산성*, 경기도박물관, 경기도, (2000).
26. 한강문화재연구원, *서울 군기시터 유적*, 한강문화재연구원, 서울, (2011).
27. 이혜연, 조주혜, 에틸알코올 용매를 이용한 주조철제유물의 탈염 실험 연구, *보존과학회지* **31**, p95-104, (2015).
28. 한우림, 김소진, 이은우, 황진주, 김수기, 한민수, 방연석 제련실험을 통한 납 추출과정 및 물리화학적 거동변화 연구, *보존과학회지* **29**, p69-79, (2013).
29. 조수미, *완주 갈동 유적 출토 재현 세형동검의 금속학적 특성 평가*, 공주대학교 석사학위논문, (2012).
30. 임우조, 양학희, 인현만, 이진열, *부식과 방식*, p289, 원창출판사, 인천, (2000).
31. THE DIAGRAM GROUP, 조필균, 노우주, *무기의 세계사 : 역사속의 신무기*, 노드미디어, 서울, (2009).
32. 도다 도세이, 유준칠, *무기와 방어구 일본편*, p210, 들녘, 파주, (2004).
33. 민승기, *조선의 무기와 갑옷*, p269, 가람기획, 서울, (2019).
34. 동아대학교석당박물관, *민속유물*, 동아대학교석당박물관, 부산, (2019).