

유물분석 자료를 통한 백제지역의 제철과 철기 제작기술 연구

김수기¹
용인대학교 문화재학과

A Study on Iron Manufacturing and Technology through Analysis Reports of Iron artifacts in the Baekje Area

Soo-Ki Kim¹

Department of Cultural Properties, Yongin University, Yongin, 449-714, Korea

¹Corresponding Author: skkim@yongin.ac.kr, +82-31-8020-2680

초록 현재까지 분석된 백제지역 출토 철기 유물의 금속미세조직과 비금속개재물 분석 자료들을 한강, 금강, 영산강 유역권으로 분류하여 조업 온도를 추정하고 제강 및 열처리 기술을 지역적 시대별 특성을 조사하였다. 세 지역 모두 시대에 관계없이 고체재온환원으로 괴련철이나 해면철이 주 제철 방법으로 판단된다. 비금속개재물의 산화물 삼원상 태도로 재해석한 결과 로내 온도는 1,100~1,300°C 정도에서 조업하였던 것으로 추정된다. 철광석은 자철광석이 주원료이며, TiO₂가 높은 것들은 사철을 사용하였던 것으로 보인다. CaO/SiO₂의 비율이 0.4 이상인 유물들은 석회질의 용제를 인위적으로 넣었던 것으로 판단된다. 제강은 저탄소강을 단야로에서 숯으로 가열할 때 나오는 CO, CO₂ gas로 침탄시키는 고체 침탄강임을 알 수 있었다. 또한 의도적으로 필요 부분의 강도를 높이는 침탄작업과 담금질을 하였던 것으로 보아 3세기에는 백제지역의 철기제작자들은 열처리 기술을 인지하고 있었다.

중심어: 제철, 비금속개재물, 조업온도, 제강, 열처리조직

ABSTRACT This study classified the result of non-metallic inclusion analysis and result of microstructure investigation on the ironware excavated in the Baekje region into Han River, Geum River, and Yeongsan River to estimate the iron making temperature and study the characteristics of regional and temporal characteristics of the heat treatment technology and steel making technology. Regardless of era, bloom iron and sponge iron are judged to be the major method for making as a directreduction process in all three regions. The result of the reinterpretation of the non-metallic inclusion by the oxide ternary constitutional diagram suggest that the temperature inside of the furnace is estimated to be between 1,100~1,300°C while making the steel. The magnetic iron ores are the major raw material of steel ore and irons with high TiO₂ are estimated to use iron sands. Ironware with CaO/SiO₂ rate higher than 0.4% are considered to have artificially added the flux of calcareous materials. It was found that the iron making method is the solid carburizing-steel which carburizes low-carbon steels by the CO gas and CO₂ gas created when heating the forging furnace with charcoal. Also, the ironware manufacturers in the Baekje during 3rd century recognized the heat treatment technology as they performed carburizing process and quenching to intentionally increase the strength of necessary parts.

Key Words: Iron making, Nonmetallic inclusion, Phase equilibria diagrams, Iron making temperature, Steel making, Carburizing, Heat treatment structure

1. 서론

고대에서의 청동, 철기 등 금속의 생산 능력과 기술의 변화는 정치, 군사, 농경문화 등 고대사회의 발전에 영향을 주었다. 따라서 제철기술과 제철능력이 한반도의 고대사회의 시작과 전개과정에서 영향을 주고받은 중요한 요소 중의 하나이다(Noh, 2000). 한반도로 전해진 철은 당시 중국의 제철기술과 같이 연철과 주철을 생산한 것으로 보아 중국에서 야철기술을 발전시킨 집단의 이주로 인해 전해졌다고 알려져 있다. 또한 한반도의 제철기술은 중국에서 받아들여지고 이를 우리의 것으로 발전시켜 일본으로 전파하였다는 것이 고고학자나 역사가들의 일반적인 견해이다. 이와 같이 제철기술의 보유여부와 그 수준에 따라 국가의 흥망성쇠가 좌우되던 고대국가에서 한반도 내의 백제지역은 중국으로부터 철기제작기술이 전파되는 중요한 요지였을 것으로 추정되고 있다.

1.1. 연구 목적

고대의 백제지역에서의 철광석을 제련하여 주조와 단조 등의 가공을 통하여 유용한 금속제품을 만드는 활동이 어떻게 변화하였는가 하는 문제를 현대의 금속학적인 방법으로 고찰함으로써 고대 백제 지역에서의 철기제작기술 발달과정을 파악해 보는 것이 우리나라 고대사회를 이해하는데 도움이 될 것이다. 지금까지 백제지역에서 출토된 철제유물의 금속학적인 연구는 대부분 출토 지역에 한정되어 있어 한성백제시기와 마한지역의 철기 제작기술과 용진 사비기 백제의 철기 제작기술 등을 전체적으로 파악하기에는 한계가 있었다.

본 연구는 금속학적인 방법으로 지금까지 연구되어진 백제지역 출토 단조철기 유물 연구 결과들에서 현대 금속학적으로 미세조직과 비금속개재물을 시대별, 지역별로 체계적인 정리를 통하여 철제유물 제작에 수행된 작업의 성격을 추정하고 기술의 수준을 파악하여 백제지역 철기 생산기술의 유입단계와 발달과정을 밝히는 기초 자료로 정리하였다. 또한 정리된 데이터를 통하여 단조철제유물의 제련방법과 단조 성형 시의 침탄과 탈탄을 포함하는 열

처리 기술의 시대적, 지역적 제작기법이나 제작기술의 특성에 관하여 연구하였다.

1.2. 금속학적 연구 현황

철제 유물의 본격적인 금속학적인 연구조사는 1980년대에 금속학자인 고 윤동석 박사와 신경환, 고고학자인 이남규가 공동으로 철제 유물과 당시의 제철 기술에 대한 연관성을 연구하였으며(Yu, 2002), 백제지역 출토 철제유물은 고 윤동석박사에 의해 1985년 ‘한국 초기철기의 발견과 금속학적 해석에서 처음으로 현대금속학적인 연구가 시작되었다. 백제지역 출토 철기 유물은 90년대 후반부터 금속 유물의 미세조직 분석을 시작하여 단조 철기의 용도와 부위별 제작기술과 단조 철기 내의 비금속개재물을 화학적 분석을 통한 제철방법 등이 2000년 이후부터 체계적으로 연구되어 27편의 연구 결과들이 발표되었으나, 대부분으로 백제의 시대적 지역적인 연관성을 찾기 어렵다. Figure 1은 27편의 연구 결과들에서 금속학적인 조사와 비금속개재물을 분석한 지역과 시대별 유물들의 수량이다.

2. 고대의 제철제강과 열처리

2.1. 제철

철을 제련하는 기술은 처음에는 단순하게 철광석 위에

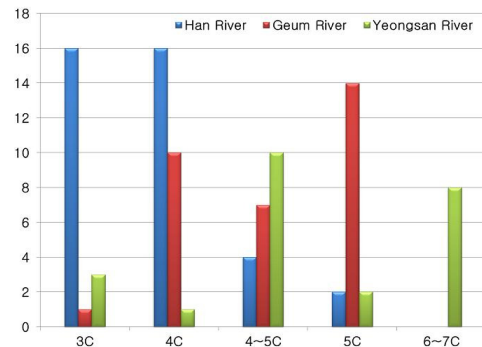


Figure 1. Metallurgical investigation analyzes the status of ironware excavated from Baekje area.

장작을 쌓아 태운 열로 철을 얻는 방법으로부터 시작되었다. 그 후 보다 효율적인 열원을 이용하기 위하여 목탄을 사용하게 되었으며, 로에 철광석과 목탄을 적층하고 풀무를 이용하여 풍구로 공기를 주입하여 목탄을 고온으로 연소시켜 높은 열을 얻는 방식으로 제철을 시작하게 되었다. 이러한 고대의 제철방법은 환원온도가 낮기 때문에 탄소를 거의 함유하지 않고 slag를 많이 함유한 철을 생산하는 직접제철법이었다.

직접제철법으로 생산하는 고대제철방법은 slag를 많이 함유한 다공질의 해면철이나 괴련철 덩어리를 얻는 방법으로 알려져 있다. 이렇게 얻은 철괴를 적층 가열 단조하는 작업을 통해 내재된 slag를 제거할 수 있으며, 이러한 가열 단조 과정을 통해 철제품을 만들기 위한 중간소재를 제작하였다. 중간소재를 노내의 목탄 속에서 가열하면 철 표면에 탄소가 침투되는데 이를 적층 단접하여 가열하는 작업을 반복하여 필요에 요구되는 높은 탄소함량을 가진 단단한 침탄강을 만들었던 것으로 보인다(Choi, 2000).

직접제철법으로 제련된 괴련철이나 해면철을 적층하여 가열하고 두드리면 탄소량과 조직은 탄소량이 불균일하고 표면의 커다란 slag는 제거되나 내부의 미세한 slag는 제거되지 않고 철괴 내부에 남게 되는데 이것이 비금속개재물(Yun, 1986)이라 하는데 이러한 slag형 비금속개재물은 제철에 사용된 철광석의 화학적 조성이나 연료나 용제(flux), 노벽의 화학적 조성, 용융된 산화물의 온도 등 다양한 정보를 내포하고 있다. Figure 2는 탄소량이 다른 괴련철을 적층 단접하여 생긴 유물조직이다. 일반적으로 비금속개재물에는 철광석에 들어 있는 광물원소들을 내포하고 있으므로 비금속개재물을 분석하면 원광석을 어느 정도 추론할 수 있으나 원광석의 화학적 조성이 자철광이나 갈철광

및 사철들이 비슷하기 때문에 단정하여 판단하는 것은 어렵다. 그러나 사철에는 TiO_2 가 들어 있는 것으로 보고되어 있어 TiO_2 가 없으면 자철광이나 갈철광을 사용한 것으로 보면 무리가 없을 것이다. 또한 비금속개재물 내의 산화물인 CaO/SiO_2 의 비율이 국내에서 채광되는 철광석 중 0.2에서 0.6까지 다양하나 일반적으로 0.4 이상이면 인위적으로 로 내에 석회질을 용제로 장입한 것으로 판단하는데 국내의 철광석 중에는 울산 철광석같은 경우는 CaO/SiO_2 의 비율이 0.6 정도인 것도 있으므로 용제 첨가 여부를 판단하는 것은 한 유물을 기준으로 여러 부분의 시편에서 CaO/SiO_2 의 비율이 일정할 경우, 용제를 첨가한 것으로 판단하여야 한다. 제련된 철을 열간 가공하는 과정에서 slag형 비금속개재물 내의 철산화물이 환원되어 Figure 3의 화살표 부분과 같이 비금속개재물 입계에 도열되는 경우도 있으며, 이를 EDS로 분석을 하면 Figure 3의 a와 같이 둥근 입자모양의 FeO가 주성분인 wüstite가 분석되는데 이 wüstite는 직접환원법인 고체저온환원 제련 시 생산되는 괴련철이나 해면철의 지표 조직으로 보고되어 있다. 이와 같이 비금속개재물은 환원 정도와 주변의 미세조직의 종류에 따라 매우 다양하고 복잡한 양상을 보인다.

제련 작업에서 불순원소가 산화하여 일부는 가스로 방출되나 대부분은 산화물이 되어 용융된 철로부터 분리되므로 적당한 용제를 첨가하여 유동성이 좋은 용융 slag를 만든다. 용융 slag는 황(S), 인(P) 등의 유해성분을 제거함과 동시에 Fe 및 기타의 유용원소의 유실을 적게 하며, 산소를 운반하는 매개로서 산화철을 보유한다. 또한 노 내 분위기로부터 산소나 가스 등에 의한 오염을 방지하는 기능을 한다. 이러한 기능을 가지기 위해서 철재는 적당한 조성 과 점성을 가져야 한다. Slag의 조성은 제철과 제강의 조업

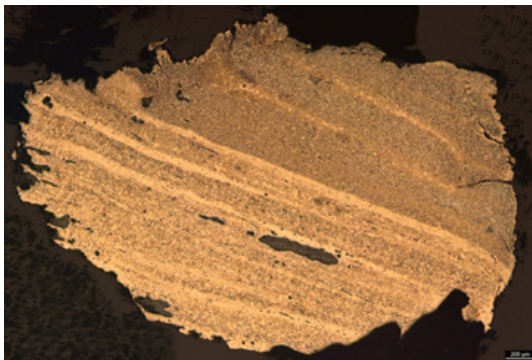


Figure 2. Laminating microstructure of bloom iron.

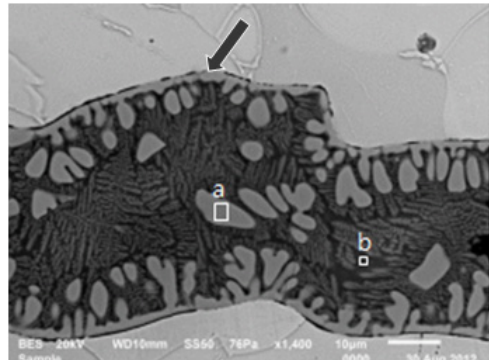


Figure 3. Form a lined with nonmetallic inclusion.

방법과 원료나 용제 및 노벽과 연료의 종류에 따라 변동이 심하며, 염기성 제강에서는 FeO-CaO-(MgO)-SiO₂, 산성 제강에서는 FeO-MnO-(MgO)-SiO₂를 주성분으로 하고 있다. 적정 slag 영역에서 가능한 한 용융온도가 낮은 고대 직접제철로의 fayalite(Fe₂SiO₄, Figure 3의 b부분) slag의 경우를 고려하면서 고대 직접제철로에서 유출된 slag는 주요 산화물이 FeO, CaO, SiO₂, Al₂O₃로 Figure 4의 FeO-CaO-SiO₂(이하 FCS로 표기)의 상태도와 Figure 5의 FeO-Al₂O₃-SiO₂(이하 FAS로 표기)상태도에 분석된 데이터를 대입하면 로 내의 온도를 추정하는 것이 가능하다.

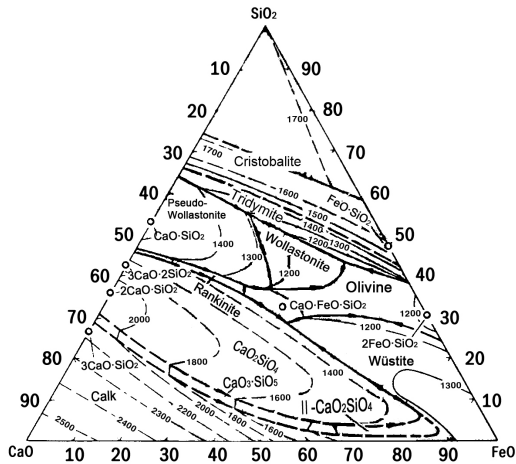


Figure 4. Phase diagram of FeO-CaO-SiO₂ (Engell, 1991).

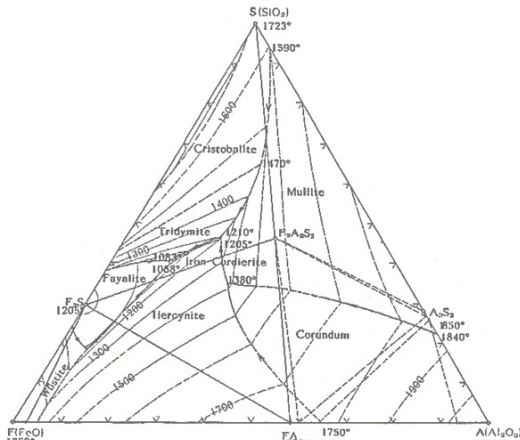


Figure 5. Phase diagram of FeO-Al₂O₃-SiO₂ (Yamaguchi, 2001).

2.2. 제 강

철광석을 제련하여 1차적으로 얻어진 괴련철 및 주철은 기계적 성질의 한계로 인하여 필요에 따라 그대로 사용하기에 부적합한 경우가 많기 때문에 탄소량을 조절하는 과정이 필요하다. 고대 유물에서 볼 수 있는 대표적인 제강법으로는 침탄과 탈탄 법이다. 침탄은 탄소 함량이 낮은 순철 및 강을 가열하여 austenite 상태에서 탄소 원자를 확산·고용시키는 것이다. 고대에는 순철이나 저탄소강을 목탄과 함께 가열하여 목탄에서 나오는 CO 또는 CO₂ gas가 철의 표면에 침투하여 확산 고용되도록 하는 고체침탄법이 주로 사용되었으며, 이 과정에서 반복적인 단조를 하거나 온도를 높여 줄수록 침탄은 빠르게 진행된다. 침탄의 일반적인 미세조직학적 판단은 철기유물의 외부로부터 내부로 갈수록 탄소량이 감소하면 침탄조직으로 판단한다.

탈탄은 강의 열처리에 있어 표면에 고온산화층을 형성시키는 조건하에서 일어나게 된다. 금속 표면의 탄소는 산화되어 CO 및 CO₂ 가스를 형성하고, 이것은 산화층을 통과하여 방출된다. 이러한 현상으로 인하여 강 표면에서 탄소의 농도가 감소하게 되면, 탄소가 확산되고 금속 중심부와 표면 사이에 탄소함량 차이가 발생하고 이러한 구역을 탈탄층이라고 부른다. 이러한 탈탄층은 단조 및 각종 열처리에 의해 제작된 고대 철기유물 표면의 미세조직에서 주로 관찰된다. 탄소함량이 높은 주철은 강도 및 경도는 매우 높지만 취성이 강하기 때문에 주철을 이용하여 제강할 경우 높은 탄소 함량을 낮추는 공정이 필요하다. 고대에 주철을 탈탄하는 방법에는 고체탈탄법과 초강법 등이 대표적으로 고체탈탄법은 주철을 거푸집에서 응고시켜 만든 고체상태의 철기를 단야로에서 목탄에서 나오는 CO 또는 CO₂ gas를 차단하고 높은 온도로 장시간 열처리하여 철기 표면으로부터 탈탄을 유도해 강을 생산하는 방법이다. 괴련철을 침탄시켜 강을 만드는 고체침탄 제강기술은 시간과 힘이 많이 들고 생산량도 매우 낮으며 질도 쉽게 보증할 수 없는 결점이 있었고, 생철을 사용하여 고체의 형태에서 탈탄시켜 제강하는 고체탈탄 제강기술도 한계가 많아서 비교적 크고 두꺼운 강제품을 제조할 수 없었으며, 두 방법 모두 강 제품속의 탄소함량을 제대로 통제하기도 힘들었다. 철기를 고체상태에서 탈탄한 미세조직학적 일반적인 판단은 철기유물의 외부로부터 내부로 갈수록 탄소량이 증가하면 탈탄조직으로 판단한다.

초강기술은 철광석을 환원시켜 용융상태의 선철을 만들고 slag에서 분리시켜 로의 외부로 꺼낸 후 용융된 상태

를 유지시키면서 대기 속에서 휘저어 용융된 주철 속의 탄소를 산화시켜 강으로 만드는 방법이다. 이러한 초강기술은 생산효율이 매우 높은 생철(용융선철)을 사용하여 강제품을 만드는 기술로서 강의 대량생산이 가능하였다. 초강 제강법에서 용탕을 교반하는 것은 대기 중의 산소를 용탕 내의 탄소와 쉽게 접촉하게 만들어 산화반응을 촉진시키기 위함이었다. 이 과정에서 황토가루를 뿌려 주면 주철 용탕 내에 존재하는 불순물 및 산화물이 황토가루와 반응하여 유동성이 좋은 slag를 생성하기 때문에 불순물 제거와 탈탄 및 철의 산화방지에 효과가 있다(Lee, 2000). 따라서 초강으로 제강한 철기를 판단하는 기준은 미세조직과 탄소량은 철기 전체가 비교적 균일하고 비금속개재물은 매우 작고 유리질이며, 비금속개재물을 분석하면 SiO₂의 양이 매우 높게 분석되는 것으로 알려져 있다.

2.3. 성형과 열처리

성형은 제련방법에 따라 고온용융법을 통해 탄소함량이 높은 주철을 이용한 방법과 고체저온환원법을 이용하여 철광석을 환원하여 탄소량이 낮은 괴련철을 이용한 방법으로 크게 두 가지로 나뉜다.

고온용융환원으로 얻은 주철은 주로 거푸집에 용탕을 부어 그 형태를 제작하는 방법으로 거푸집의 그 형태에 따라 단범, 합범 등으로 구분된다. 주로 충격이나 타격을 가하기 위한 용도가 아닌 농기구나 생활용기 또는 복잡한 형태를 가진 형태를 제작할 경우 이용되는 방법으로 이렇게 제작된 철기를 주조철기라 부른다.

고체저온환원법으로 제련된 해면철이나 괴련철인 경우 두드러 불순물을 제거하는 정련과정을 거친 후 침탄하는 제강작업이 시행되거나 성형작업이 시행되며, 두 작업이 동시에 실시되는 경우도 있다. 고대 철기 제작에 있어 성형작업이나 제강작업에서 금속과 금속의 접합부위를 고온으로 가열한 후 압력이나 단조하여 접합하는 단점이 주로 사용되었으며, 열간 단점된 부분은 탈탄이 되어 ferrite 조직으로 되며, 단점부분의 미세조직은 비금속개재물이 열을 지어 도열하고 그 주변 조직은 조대한 ferrite으로 되어있다. 일반적으로 고체저온 환원에 의한 단조 철기는 단순한 형태의 철기를 주로 제작하였다.

이렇게 가열 단조하여 제작된 철기는 단야로의 목탄에 직접 접촉한 부분에는 침탄되어 탄소량이 높아지는 성형과 침탄이 동시에 수행되기도 한다. 용도에 따라 필요부위

의 기계적·물리적 성질을 개선하기 위하여 담금질, 뜨임, 풀림, 불림 등을 시행하였다. 담금질은 고대 철기 제작에 있어 대표적인 표면경화 열처리로 austenite의 무확산 변태에 의해 일어나며, 이때 약 2초 이내에 400~600℃가량의 온도를 상실해야 martensite조직이 성공적으로 생성된다. 냉각이 충분히 일어나는 부분은 강의 표면부근에 국한되기 때문에 강의 단면이 7~10mm이내일 경우에만 고르게 강화시킬 수 있다(W. Rostoker & B. Bronson, 1990). 담금질을 통해 우수한 기계적 성능을 얻을 수 있지만 급속 냉각 과정에서 담금질 균열을 일으키기 쉽고 취성이 증가하여 인성도 감소한다(Han, 1988). 이러한 기계적 성질을 보완하기 위해 변태점 이하의 온도로 가열하여 불안정한 조직을 안정한 조직으로 변화시키고 냉각시켜 강에 양호한 인성을 부여하는 뜨임이나 냉간가공이나 담금질에 의한 응력을 제거하기 위해 적절한 온도로 가열하고 일정한 시간을 유지한 후 노중에서 서서히 냉각하여 내부 조직을 고르게 하고 응력을 제거하는 풀림과 같은 추가적인 열처리를 수행함으로써 강도와 인성을 개선할 수 있다. 뜨임은 주로 무확산 변태로 생긴 martensite의 탄화물을 분해 석출하는 과정에서 탄소를 과포화한 martensite가 ferrite와 cementite로 분해되는 과정에서 일어나며, 풀림은 그 목적에 따라 확산, 연화, 응력제거, 저온 풀림 등이 있다. 불림은 과열조직을 미세화하고 냉간가공 및 단조 등으로 발생한 내부 응력을 제거하며, 미세조직을 고르게 만들기 위한 열처리로 강을 단련한 후, austenite화 온도로 가열하여 대기 중에서 냉각시키는 방법이다(Han, 1988).

일반적으로 철제유물의 금속조직으로 고대의 열처리 기법을 단순히 비교하기란 쉽지가 않다. 담금질이나 침탄으로 미세조직은 비교적 인위적으로 시행한 것을 알 수 있으나 고체저온환원법으로 생산한 괴련철을 단야로에서 적층 단점하는 철기 생산 공정상 가열과 단조를 반복하는 과정이 필연적이므로 풀림, 뜨임, 침탄, 탈탄 등과 같은 열처리 조직은 이 과정에서 의도하지 않게 출현할 수 있다. 때문에 단순히 미세조직 양상만으로 철기 제작기술을 단정할 수 없으며, 그 해석에 주의를 기울여야 한다.

3. 백제지역의 제철과 열처리

백제지역에서 출토된 철기들의 미세조직 조사를 통하여 제강기술이 조사된 것을 보면 대부분의 유적에서 출토된 철기들은 wüstite가 생성되어 있고 표면이나 날부분 쪽

이 탄소량이 더 많은 것으로 보아 직접제련법인 고체저온 환원으로 철을 생산하여 가열 단조하며 특정 부위에 탄소량을 높여 필요한 강도를 얻었던 것으로 추정된다.

백제의 각 지역과 시대에 따라 조금씩 다르기는 하나 철광석으로는 갈철광석이 조금 내포하는 자철광석을 주 원료로 사용하였으나 TiO_2 가 높게 나오는 유적의 유물들은 사철을 원료로 하였을 가능성도 배제할 수 없다. Figure 6은 사철을 사용했을 가능성이 있는 유물의 시대별 세 지역의 유물 수량으로 분석된 유물 수량 차이가 지역과 시대별로 많은 차이가 있기 때문에 단순히 Figure 6으로 비교하기는 어려우나 한강유역과 금강유역에서는 사철을 사용한 것으로 판단된다.

CaO/SiO_2 의 비율이 0.4 이상인 유물들은 철광석에 섞여있는 조성비와는 차이가 있는 것으로 인위적으로 Ca가

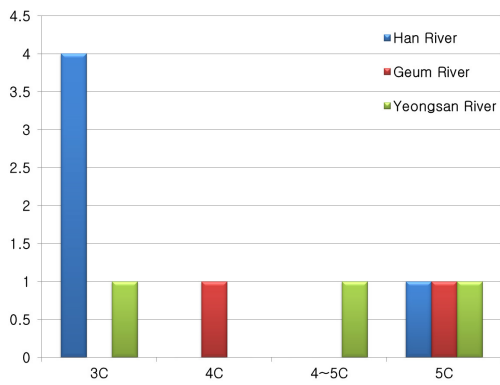


Figure 6. Available area in iron sands and ironware by century according to the analysis of TiO_2 .

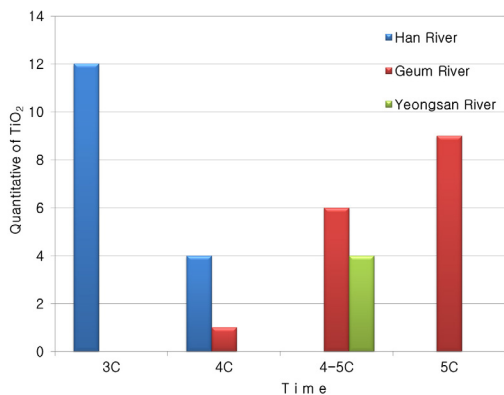


Figure 7. Possible addition of area of artificial fluxes and ironware by century according to the CaO/SiO_2 rate.

많은 조개껍질과 같은 석회질이 높은 물질을 용제로 넣었던 것으로 판단된다. Figure 7은 인위적 용제 첨가 가능 유물의 지역과 시대별 분포도로 분석된 유물에 비하여 적은 유물에서 CaO/SiO_2 의 비율이 0.4 이상으로 분석되었으며, 이 유물들은 Ca가 많은 석회질 물질을 용제를 사용한 것으로 보인다. 또한 P_2O_5 가 높게 나오는 철기는 제철로에 철광석을 장입하기 전에 400~600°C 정도로 구워주는 배소를 하지 않은 철광석을 로에 장입하여 slag에 혼입되었거나 용제로 사용한 석회물질이 뼈와 같은 동물성 석회질을 사용한 것을 배제할 수 없다.

3.1. 한강유역

Figure 8은 한강유역 출토 철기의 미세조직 시기별 분포도로 3~4세기에 wüstite와 열처리 조직이 많은 것으로 볼 수 있으나 분석된 유물이 3~4세기 유물이 많아 편중된 것으로 보이나 비교적 고르게 담금질 조직인 martensite가 조사된 철기들은 대부분 날이 있는 유물들이며, 침탄조직은 무기류 및 농공구류의 유물에서도 조사되었다.

3세기대의 유적으로 알려진 김포 양촌유적에서 출토된 철기들의 비금속개재물을 분석한 산화물들의 특징으로 FeO인 wüstite는 대부분의 유물에서 조사 분석되었으며, 7점의 유물에서 TiO_2 가 0.6%이하로 검출되었고 산화물의 삼원상태도에 의한 양촌 유적출토 철기들은 제철 시로 내의 최고온도는 1,300°C 정도에서 제련한 것으로 추정된다. CaO/SiO_2 는 2-3 나 1호 분구묘에서 출토된 환두대도의 배부 시편 한곳에서 1.4로 매우 높게 분석되고 다른 부분에서

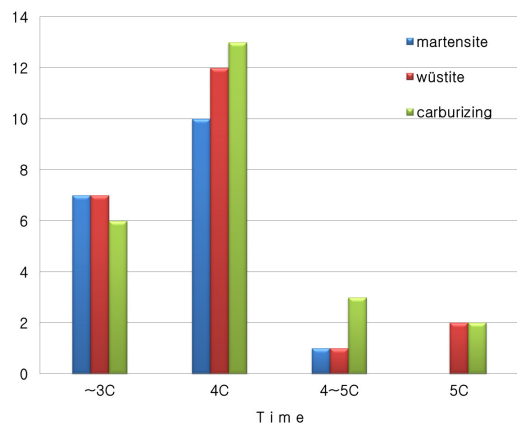


Figure 8. Han River ironware microstructure by century distribution.

는 0.6이하로 분석되는데 이는 EDS로 분석할 때 부분적으로 CaO가 SiO₂ 보다 조금 많은 부분을 분석하여 검출된 것으로 추정된다. 가평 대성리 유적도 3세기대의 유적으로 분석된 단조철기는 CaO/SiO₂는 0.8이상으로 나오며 유리질 비금속개재물은 1,250℃로 추정된다. 인천 연희동 유적도 3세기대의 유적으로 wüstite는 대부분의 유물에서 조사 분석되었으며, TiO₂가 분석된 유물에서는 0.45~0.8%로 3-1지점 10호 분구묘에서 출토된 철모2에서는 시편 채취 위치에 따라 1.2~1.5%가 분석되었다.

오산 수청동 유적은 4세기 전반에서 5세기 후반의 유적으로 분석된 유물들의 미세조직으로 보아 탄소량이 대부분 높은 편이나 매우 불균일하며, 삼원상태도의 로 내 온도는 1,100~1,300℃ 정도의 로에서 제련한 것으로 추정된다. 비금속개재물은 대부분 유리질이고 4세기 전반의 4지점 1호묘 출토 환두대도에서만 TiO₂가 1% 정도 분석되었다. 또한 5세기 전반의 5-1지점 40호 주구묘에서 출토된 환두도의 시편들에선 모든 시편에서 CaO/SiO₂가 적게는 약 0.9에서 많게는 5.5정도로 매우 많이 검출되었다. 3세기 유적의 김포 양촌, 가평 대성리 출토 철기들과 오산 수청동 출토 4세기 후반 철기 1점과 5세기 전반 철기들의 비금속개재물에서 P₂O₅가 분석되었다.

오산 수청동 유적에서 출토된 철기들에서 탄소량이 많은 부분에는 wüstite가 없는 것도 있으나 본 연구자가 미세조직 사진을 확인한 결과 탄소량이 낮은 부분에서는 대부분 fayalite와 wüstite로 추정되는 bead type 알갱이들이 확인되었다. 이와 같이 시편 전체 탄소량이 매우 불균일하고 wüstite로 추정되는 bead type 알갱이들이 혼재하는 것은 고체저온환원에 의한 제철을 하여 매우 불균일한 철을 소재로 칼을 만든 결과로 보여진다. 또한 과열조직인 망상의 widmanstätten조직이 나타나는 것으로 보아 침탄에 의한 조직으로 추정된다. 이 망상의 widmanstätten조직은 순철이 910℃ 이상으로 과열되어 상온에서 비교적 빠르게 냉각될 때 생성된 widmanstätten조직이 침탄되며 침상의 ferrite가 pearlite로 되고 widmanstätten조직의 굵은 가지만 남아 냉각되면 망상으로 된다. 이와 같이 철기 내부에 pearlite조직과 망상의 widmanstätten조직이 생성되어 있으면 가열 침탄된 것으로 판단할 수 있다. 부분적으로 탈탄된 조직도 관찰되는데 이는 침탄 조업으로 탄소량을 높인 뒤 단조 성형하는 과정에서 표면의 탄소가 CO 또는 CO₂ gas로 빠져 나온 것으로 판단된다.

3.2. 금강유역

서천 봉선리 유적은 4세기대의 유적으로 석곽 1호와 16호에서 출토된 대도에서 wüstite가 조사되었으며, FCS에서 로내 최고온도는 1,200℃ 전후에서 정도로 제련한 것으로 분석되었다. 석곽16호에서 출토된 무형대도에서는 비금속개재물에서 TiO₂가 1% 정도 분석되었으며, 석곽 9호 출토 무형대도에서는 CaO/SiO₂가 0.8이상 분석되었다. 서산 부장리 유적은 4~5세기대의 유적으로 5세기대의 12호 분 1호 토광묘출토 환두대도에서만 wüstite가 조사 분석되었다. 삼원상태도에서 로내 최고온도는 1,050~1300℃ 정도로 제련한 것으로 분석되었으며, 3점에서 CaO/SiO₂가 0.6이상 분석되었다.

5세기대의 연기 송담리 유적에서는 대부분 wüstite가 조사 분석되었으며, 로내 온도는 1,100~1,300℃ 정도에서 제련한 것으로 분석되었다. KM-018호에서 출토된 철부에서만 TiO₂가 0.5%정도 분석되었다. KM-054와 KM-055에서 출토된 철모에서 CaO/SiO₂의 비율이 0.6%이상으로 분석되었다.

4세기 유적인 서천 봉선리와 4~5세기 유적인 서산 부장리 유적 출토 철기들의 비금속개재물에서 P₂O₅가 분석되었으며, 연기 송담리 출토 철기들에서는 P₂O₅가 전혀 분석되지 않았다.

금강 유역권에서는 3세기 이전 시기의 출토유물이 조사되지 않았으며 4세기대의 용원리 유적에서 많이 조사되었고 서천 봉선리, 서산부장리 등에서 4세기 대의 유적 출토 철기들에서 조사되었으며 그 이후 시기의 유물들에서도 연기 송원리, 금산 수당리 등에서 조사되었다. 또한 물과

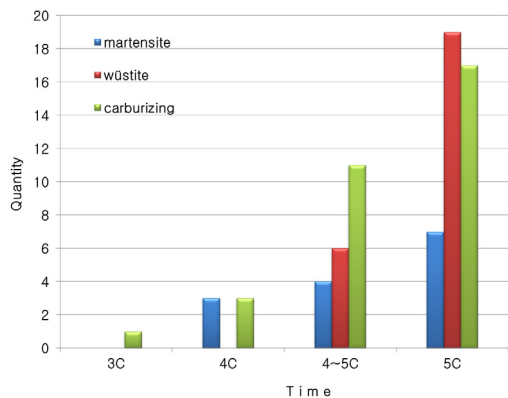


Figure 9. Geum River ironware micro-structure by century distribution.

같은 액체에서 급냉시키는 담금질 작업 시 생성되는 martensite조직이 Figure 9에서와 같이 조사된 철기들은 대부분 날이 있는 무기나 농·공구류들로 시대와 지역에 관계없이 대부분 날이 있는 부분에서 채취한 시편들에서 집중적으로 생성되어 있는 것을 확인하였다.

3.3. 영산강유역

영산강유역에서 출토된 철기들의 미세조직과 비금속개재물을 분석한 수량이 한간이나 금강유역보다 상대적으로 적게 분석되었으나 Figure 10에서와 같이 wüstite와 열처리 조직이 2~3세기 유물에서 출현하고 있다.

고고학적으로 영광 공동출토 철부는 2~3세기대의 유물로 wüstite가 조사 분석되었으며, FCS의 로 내 온도는 1,300°C 정도에서 제련한 것으로 추정된다. 날 시편 한곳에서 CaO/SiO₂가 1.3정도 분석되었으며, 3~4세기대의 유적인 무안 인평 유적에서 출토된 철작에서는 분석된 시편 전체에서 wüstite가 조사 분석되었다. 로 내의 온도는 1,250°C 전후에서 제련한 것으로 추정되며, 또한 4세기 유적인 함평 국산 출토 철검의 날에서는 wüstite가 조사 분석되었으며, FCS는 1,150°C 부근에서 제련되었다.

완주 상운리유적은 4~5세기대 유적으로 대부분의 유물에서 wüstite가 조사 분석되었으며, 13점의 철기중 6점에서 TiO₂가 0.5~0.8% 정도 분석되었으며, CaO/SiO₂의 비율은 나지구 토광묘 6에서 출토된 철모의 인부 시편에서 0.6~1.5 정도 분석되었다. 영산강 유역 유적 출토 철기들의 비금속개재물에서 대부분 P₂O₅가 분석되었으나, 완주 상운리 유적출토 철기 중 나지구 지표 수습 철검의 인부 시편

1점에서만 P₂O₅가 분석되었다.

열처리되는 2~3세기대의 전남 영광 공동유적과 무안 인평유적에서 출토된 철부의 미세조직과 비슷한 시기의 3세기대 거리가 멀리 떨어져 있는 서울 풍납토성에서 출토된 유물들에서도 같은 담금질 조직인 martensite조직이 조사되었고 그 이후 시기에도 여러 지역에서 조사되었다.

4. 고찰 및 맺음말

백제지역에서 출토된 단조철제유물들의 시대별 지역적인 제철과 제작기술의 특성을 규명하기 위하여 지금까지 백제지역 출토 철기 유물을 금속학적인 조사와 분석 자료들을 한강, 금강, 영산강 유역권으로 구분하여 금속조직 내에 혼입되어 있는 비금속개재물을 조사하였다. 그 결과들을 산화물 삼원상태도로 재해석하여 조업 온도를 비교하였다. 또한 금속미세조직 조사를 통하여 제강 및 열처리 기술을 시대별 지역적인 특성을 금속학적으로 해석을 한 결과는 다음과 같다.

제철 : 세 지역 모두에서 직접환원법인 고체저온환원으로 제작한 철기의 지표 조직인 wüstite(FeO)가 비금속개재물 내에 정출되어 있는 것으로 보아 고체저온환원법으로 괴련철(해면철)을 생산 후 단조하여 철기를 제작하였던 것으로 판단된다. 제철 시 시대와 지역에 관계없이 wüstite가 정출하는 온도는 1,050°C 정도에서 정출되기 시작한 것을 알 수 있었으며, 비금속개재물의 삼원상태도로 보아 제철 조업 온도는 1,100~1,300°C 정도에서 고체저온환원으로 제철하였던 것으로 추정되었다. 또한 백제의 각 지역과 시대에 따라 조금씩 다르기는 하나 철광석으로 갈철광이 조금 내포된 자철광석을 주 원료로 사용하였으나 TiO₂가 높게 나오는 유적의 유물들은 사철을 원료로 하였을 가능성도 배제할 수 없다.

CaO/SiO₂의 비율이 0.4 이상인 유물들은 철광석에 섞여 있는 조성비와는 차이가 있는 것으로 인위적으로 Ca가 많은 조개껍질과 같은 석회질이 높은 물질을 용제로 넣었던 것으로 판단된다. 또한 P₂O₅가 높게 나오는 철기는 제철로에 철광석을 장입하기 전에 400~600°C 정도로 구워주는 배소를 하지 않은 철광석을 로에 장입하여 slag에 혼입되었거나 용제로 사용한 석회물질이 빠져 같은 동물성 석회질을 사용한 것을 배제할 수 없다.

제강 : 순철에 가까운 괴련철을 단야로에서 가열할 때 숯에서 나오는 CO, CO₂ gas로 침탄시키는 고체 침탄장이

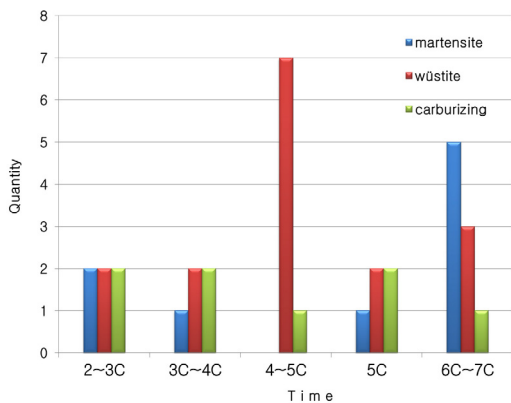


Figure 10. Yeongsan River ironware microstructure by century distribution.

주 제강법임을 알 수 있었으며, 철기의 날부분과 투겁이나 스페부분의 탄소량이 확연히 다른 유물들이 많이 조사되는 것으로 보아 의도적으로 필요한 부분의 강도를 높이는 침탄작업을 한 것으로 판단된다. 탈탄은 대부분 부분적으로 표면만 탄소량이 낮은 것으로 보아 의도적인 탈탄으로 보기는 어려우며, 이러한 현상은 단야로에서 가열하여 침탄이나 단조하는 과정에서 숯에서 멀리 떨어진 일부만이 탈탄된 것으로 판단된다.

또한 과열되어 상온에서 비교적 빠르게 냉각될 때 생성되는 widmanstätten 조직이 pearlite 조직과 망상의 widmanstätten 조직으로 침탄되어 있는 것으로 보아 시기와 지역 유물의 용도에 관계없이 나타나는 것으로 보아 900℃ 이상으로 가열하여 단조하는 과정에서 의도되지 않은 부분적인 침탄과 탈탄이 되었던 것으로 판단된다.

열처리: 날이 있는 유물들에서 날부분에서는 급냉시키는 담금질 시 생성되는 martensite조직이 조사되고 스페, 병부, 투겁과 같은 부분에서는 단순한 ferrite에 pearlite가 조금 있는 조직이 조사되는 것은 유물의 용도에 따라 필요 부분만 열처리를 하였던 것으로 보인다. 따라서 3세기대에는 백제지역의 철기제작자들은 열처리 기술을 인지하고 용도에 따른 열처리 기술이 가능했던 것으로 보이며, 이미 한반도의 서쪽 지역은 담금질 열처리가 지역에 관계없이 성행하였던 것으로 추정된다.

본 연구를 통하여 2~3세기부터 6~7세기대의 백제지역 제철 및 철기제작 기술은 시대와 지역에 관계없이 비슷한 양상으로 철기의 용도에 따라 열처리 방법이 다른 것으로 확인되었다. 기존에 현대의 금속학적으로 조사 연구된 철기들이 각 지역과 시기별로 많지 않아 본 연구로 명확히 백제지역의 철기 특성을 밝힐 수 없는 것이 매우 아쉬웠으며, 철제유물은 부식되지 않은 금속시편 채취가 어려운 유물이라는 특수성으로 연구된 유물 수량이 적어 연구 결과와 시대와 지역을 대표할 수는 없다고 사료된다. 그러나 본 조사연구 성과가 백제지역의 시대와 지역 간 제철과 철기제작기술 체계의 특성을 연구하는데 기여할 것으로 사료되

며, 고대 백제지역의 철기 생산에 관하여 시기와 지역적으로 연구된 결과들을 모두 수집하여 비교한 것에 큰 의미가 있었다.

REFERENCE

- Lee, G.G., 2000, Ojuserjongbacmulgobein(五洲書種博物考辨, Choi Ju, trans.), Hakyoun, Seoul. (Original work published in 1834) (in Korean)
- Choi, Ju., 2000, History of Metallurgical Technology in Korea, Trends in Metals & Materials Engineering, Seoul. (in Korean)
- Han, S.W., 1988, Explanation of heat treatment structure, Gold, Seoul. (in Korean)
- Noh, T.C., 2000, A Study on the Ancient Metallurgical Technology in Korea. Hakyoun, Seoul. (in Korean)
- Engell, H.J., 1991, Schlacken in der Metallurgie(Shim J.D. et al, trans.), Daekwang, Seoul. (Original work published in 1984) (in Korean)
- Rostoker, W., and Bronson, B., 1990, Pre-Industrial Iron Its Technology and Ethnology, Archeomaterials monograph No.1, Philadelphia. Pennsylvania. (in English)
- Yamaguchi, 2001, Understanding and application of phase equilibrium diagram of ceramics(相平衡狀態圖の讀み外, Lee Y.B. et al, trans.), Dasung, Seoul. (Original work published in 1997), (in Korean)
- Yu, J.E., 2002, Ancient iron technologies as observed in the microstructure of iron artifacts excavated from fortresses in Gyeonggi-do Province. Ph.D thesis, Dankook University, Seoul. (in Korean with English abstract)
- Yun, D.S., 1986, About slag on Ancient iron manufacture process. The National Academy of Science Republic of Korea 25, Seoul. (in Korean)