

영산강유역 출토 철기유물의 미세조직 분석

이재성 | 김수기*

경기도박물관 보존과학실

*용인대학교 문화재보존학과

Metallurgical Analysis of Iron Artifacts Excavated from the Yeongsan River Basin

Lee Jae-sung | Kim Soo-ki*

Conservation Science Lab., Gyeonggi Provincial Museum, Yongin-si 446-905, Korea

*Dept. of Conservation of Cultural Properties, Yong-in University, Yongin-si 449-714, Korea

초 록 영산강유역이라는 지역적 연계성을 가진 영광 군동, 무안 인평고분군, 무안 구산리고분군, 함평 국산유적에서 출토된 유물 중 백색식 묘제인 황철식석실분 출현 이전으로 편년되는 철기유물 6점을 선정하여 미세조직을 분석하였다.

분석 결과, 고대 영산강유역에서는 저온환원법에 의해 괴련철을 생산하는 기술이 주를 이루고 있었으며, 아울러 탄소 제거시켜 강소재를 생산하는 기술체계가 이루어졌을 가능성도 확인되었다. 또한 강도를 필요로 하는 부위에만 담금질을 함으로써 높은 강도를 가짐과 동시에 담금질 조직이 가지는 취성을 담금질이 안 된 부위에 분산시켜 철기가 깨지는 것을 방지하고 인성을 부여하는 기술이 이루어지고 있었다고 생각된다. 이러한 기술은 2세기대로 편년되는 영광 군동 출토 철부 미세구조에서 확인되고 있어 높은 기술체계를 가진 집단이 2세기 이전에 존재하고 있었고 5세기 말까지 이어졌을 가능성이 높다고 판단된다. 낮은 탄소함량의 괴련철로 철기를 제작하는 경우 성형-침탄-열처리-단타를 반복적으로 행하는 제작 공정이 이루어진 것으로 보인다.

중심어 : 영산강유역, 철기, 미세구조, 철기제작 기술체계

Abstract Around Yeongsan river basin, there are Yeongkwang Gundong, Muan Inpyeong Tombs, Muan Gusan-ri Tombs and Hampyeong Guksan remain from which a lot of iron artifacts were excavated. Among them, 6 iron artifacts were chosen, and their microstructures were analyzed.

As a result, Iron artifacts were produced sponge iron by the low temperature reduction process and a part of microstructure have the possibility that steel made by decarburizing. And also, by tempering the parts which need high strength, the iron artifacts had high strength and by distributing the weakness of the tempered structure to the nearby untempered parts, their breaking was prevented and they had the durability. These skills were used then. Especially these skills were found to be used in the 2nd century by high skilled people because an iron axe excavated at Yeongkwang Gundong of 2nd century by the historical record showed that the skill was used. Also microstructures were found to show the possibility that the iron technology was inherited to the late 5th century. When producing iron artifacts made of sponge iron containing small amount of carbon, that was made by the production process repeating molding, carburizing, heat treatment and hammering.

Key word : yeongsan river basin, iron artifact, microstructure, iron technology

I. 서론

철은 고대로부터 생산활동과 일상생활에서 매우 중요한 금속의 하나로 여겨져 왔다. 특히 철기를 생산하기 위한 제철기술의 발달은 농업생산력 발전으로 이어져 계층 분화를 심화시켰고, 이러한 사회변동은 고대국가를 형성하는 중요한 요소가 되었다. 따라서 철기에 관한 연구는 변천과정과 사회변동에 주안점을 두는 형태 분석뿐만 아니라 제철기술에 주안점을 두는 금속학적 분석 모두 중요한 연구 대상이 된다. 하지만 출토되는 철기 대부분이 형태분석이 이루어지는 것에 반해 금속학적 분석은 여러 가지 여건상 미비한 실정이다.

최근 들어 두 가지 분석의 중요성이 부각되면서 각 지역별로 철기에 대한 금속학적 분석이 활발히 이루어졌고, 그 결과로 일부 지역 또는 문화권에서 행해진 철기 제작기술 체계를 파악할 수 있게 되었다. 하지만 영산강 유역의 경우, 넓은 평지와 완만한 구릉지대를 형성하는 평야지대에 古來로부터 독특한 문화를 형성해 왔지만 금속학적 분석은 미비한 실정이다. 분석이 부족한 이유로 다른 지역에 비해 수적으로 빈약한 유적과 薄葬의 형태를 나타내는 葬制의 풍습¹⁾을 들 수 있다. 이러한 수적 열세에도 불구하고 영산강유역은 다른 지역에서는 볼 수 없는 대규모 지식묘군과 일본과의 관련성에 끊임없이 문제가 제기되는 前方後圓形古墳, 그리고 대형옹관에 사체를 안장하여 매장하는 대형옹관고분에서 독창적이고 다양한 유물이 출토되고 있어 고고학적으로 매우 중요하다.

본고에서는 일반적으로 마한세력이라 일컬어지는 영산강유역 在地勢力이 가진 철기제작기술에 대해 다음과 같은 방법을 통해 접근하고자 한다.

첫째, 시기를 횡혈식석실고분 출현 이전으로 한정시킨다. 횡혈식석실고분은 백제의 영향에 의해 파생된 묘제로, 이 고분의 출현은 마한지역에 대한 백제의 직접적인 영향력 행사를 의미한다. 그러므로 백제 지배 이전의 在地勢力이 가진 철기제작기술을 이해하기 위해 횡혈식석실고분 출현 이전으로 한정시킨다.

둘째, 영광지역까지 범위를 확대시킨다. 일반적으로 영산강유역에 속하는 함평, 무안지역뿐만 아니라 옹관고분 이전단계인 주구토광묘가 나타나고 있는 영광지역까지 범위를 확대시켜 조사한다.

셋째, 연구대상유물은 시기가 분명하며 실제 사용했을 가능성이 큰 단조 유물로 하였다. 이유는 비교적 주조 유물보다 다양한 제작기법을 확인할 수 있고, 출토 양이 많아 분석결과와 상호비교가 가능하기 때문이다.

이상과 같은 접근 방식을 통해 철기가 가지는 미세조직을 분석하고, 분석 내용을 2~5세기대의 영산강유역 각 지역과 비교함으로써 당시 영산강유역 在地勢力의 철기제작기술을 파악하고자 한다.

II. 분석 방법

분석 유물은 철기 제작기술을 이해하고, 고고학적 성격을 이해하는데 도움이 될 만한 단조유물 6점을 Table 1과 같이 선정하였다²⁾³⁾⁴⁾. 특히 상태가 비교적 양호할 경우, 열처리 내지는 가공이 많이 되었을 것으로 추정되는 부분과 이에 상응하는 부분에서 시편을 채취함으로써 고대 유물의 미세조직 분석이 가지는 미량 채취분석의 한계를 보완하였다.

분석 대상유물로부터의 시편채취는 원형을 최대한 보존한다는 원칙 하에 micro-tool에 diamond 휠을 이용해 채취하였다. 채취한 시편은 에폭시수지로 마운팅한 후, 사포 400번에서부터 2000번까지 순차적으로 연마한 다음, 3 μ m와 1 μ m의 diamond suspension으로 기계적 미세 연마를 실시하였다. 연마된 시편은 3%의 Nital에 수초간 침적시키는 방법으로 에칭시킨 뒤, 몰카 에틸 알코올로 세척하고 건조함으로써 모든 전처리과정을 마쳤다. 미세 조직 관찰은 반사식 금속현미경(Metallurgical Microscope, Nikon Epipot)을 이용하여 조직전체를 50배로 확인하고 특징적인 부분을 100배, 200배, 400배로 확대하여 조사하였다. 경도에 따른 물성파악을 위해 미세경도시험기(Akashi, MVK-HVL)로 비커스 경도를

Table 1. 분석 대상 철기유물

지역	유적	유물 명칭	제작 방법	매장 유구	시기 편년
영광	군동	철부	단조	1호 토광묘	2C~3C
무안	인평고분군	철부	단조	1호 토광묘	3C중반이전
"	"	철착	단조	2호 토광묘	3C후반~4C전후
무안	구산리고분군	철제대도	단조	3호 옹관묘	5C후반~말
"	"	철모	단조	"	5C후반~말
함평	국산	철검	단조	2호 토광묘	4C전반~중엽

측정하였다. 측정하중은 기본적으로 100gf로 5초간 실시하였고, 특정부위에 따라 하중을 25gf, 10gf로 다르게 측정하였다. 경도값은 특징적인 부분에 5회 실시하여 평균값으로 구했다. 필요에 따라서는 주사전자현미경과 EDS로 미세조직의 구조와 비금속개재물의 성분을 분석하였다.

III. 분석 및 고찰

3. 1 영광 군동 출토 鐵斧

영광 군동 1호 토광묘에서 출토된 선형 철부로 공부 한쪽이 결실되어 있다. 날 끝에서 최대 폭을 형성하듯 넓게 벌어진 형태로 공부를 신부의 양쪽을 편 다음 말아 붙였다. 날의 끝 단면형태는 V자형이며 공부의 단면은 타원형이다. 시편은 날 부위 한 곳과 공부 한 곳에서 채취하였다.

1) 날 부위 횡면(Figure 1의 a)

Figure 2는 날 부위에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 시편의 하단을 제외한 전 부분에서 탄소함량이 높은 담금질 조직이 관찰되며, 비금속 개재물이 반복 단타에 의해 길게 연신되어 있다. Figure 3은 전체적으로 분포되어 있는 마르텐사이트와 펄라이트의 혼합 담금질 조직 확대사진이다. 이와 같은 담금질 조직은 조직 내에 펄라이트를 생성하지 않도록 냉각할 수 있는 가장 느린 속도

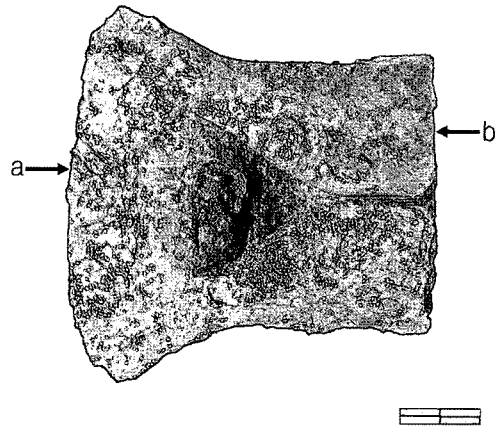


Figure 1. Iron axe.

인 임계냉각속도보다 느릴 경우 생성되며, 2단계로 변태가 일어났기 때문에 분할 변태(split transformation)⁵⁾라고도 한다. 이 부분의 마르텐사이트 경도값은 720Hv이며, 펄라이트의 경도값은 348Hv이다. 펄라이트의 경도값이 높은 이유는 급냉으로 인한 펄라이트 콜로니 내의 시멘타이트 간격의 미세화에 기인한 것으로 보인다. Figure 4는 Figure 2의 하단에 형성된 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 두 가지의 서로 다른 영역이 보인다. Figure 5, 6은 Figure 4의 1과 2로 표시된 부분의 EDS 분석 결과로 개재물의 구성 성분에 대한 정보를 제공한다. 1지점의 분석 결과인 Figure 5에서는 주로 철 산화물이 발견되며 2지점에 해당하는 Figure 6에서는 철과 더불어 Si, Ca, Al, K 등의 원소가 발견된다. 이와 같은 조성은 제련 과정에서 발생하는 슬



Figure 2. Microstructure of 'a' (vertical section) of Iron axe.

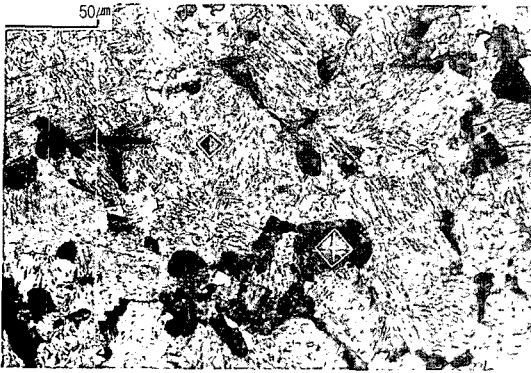


Figure 3. Microstructure of vertical section of Iron axe.

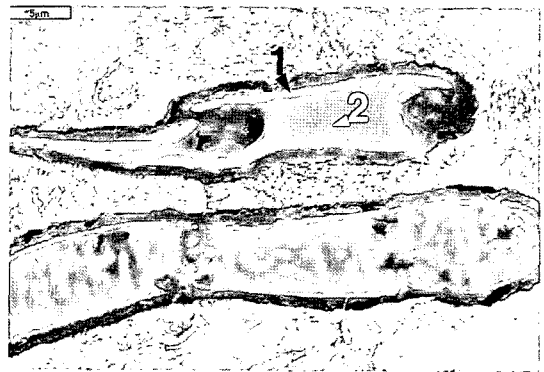


Figure 4. SEM image of non-metallic inclusion.

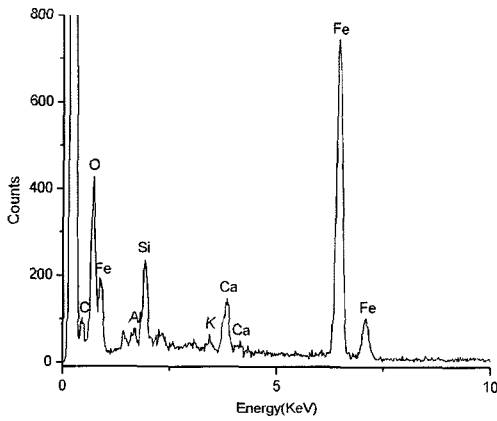


Figure 5. EDS analysis of '1' area of Fig 4.

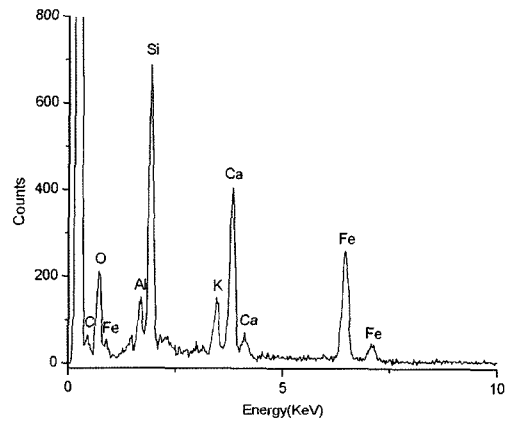


Figure 6. EDS analysis of '2' area of Fig 4.

래그에서 흔히 볼 수 있으며 제련 과정에서 제거되지 못한 슬래그의 일부가 철소재 내에 존재하고 있음을 알 수 있다.

2) 공부 횡면(Figure 1의 b)

Figure 7은 공부에서 취한 시편의 전체를 보여주는 미세조직 사진으로 좌측이 내부를 향하고 우측이 공부 끝 부분을 향하고 있다. 전체적으로 담금질 조직인 마르텐사이트로 구성되어 있으며, 개재물이 길이 방향을 따라 길게 연신되어 있다. 시편의 좌측에는 마르텐사이트와 펄라이트가 혼합양상으로 나타나지만, 우측에서는 펄라이트가 상당 부분 감소되어 있다. 이와 같은 현상은 온도의 영향을 크게 받을 수 있는 표면의 냉각속도가 가장 빠르고 내부의 담금질 속도가 느려지고 있음을 보여준다. 좌우로 늘어진 비금속 개재물층은 이 유물이 기열조

건에서 반복적인 단타에 의해 제작되었음을 보여준다. 또한 이 부분에 탈탄 흔적이 없는 점, 비금속 개재물이 단조방향으로 연신된 점, 그리고 Figure 8에서 관찰되는 것처럼 뷔스타이트 조직이 포함된 점으로 보아 이 유물의 제작에 사용된 철 소재가 저온환원법에 의해 생산된 피런철로 판단된다. 마르텐사이트의 경도값은 702Hv이며, 펄라이트의 경도값은 352Hv이다.

영광 군동유적 1호 토광묘에서 출토된 철부의 조직상 특징을 보면 전체적으로 탄소함량이 높은 열처리 조직으로 이루어져 있다. 비금속 개재물에 철을 포함하는 슬래그가 잔류하는 것으로 보아 사용된 소재가 저온환원법에 의해 생산된 피런철인 것으로 판단된다. 또한 가공흔적을 따라 탈탄이 되지 않은 점으로 미루어 순철에 가까운 소재로 성형을 한 후 침탄이 이루어졌음을 알 수 있다.

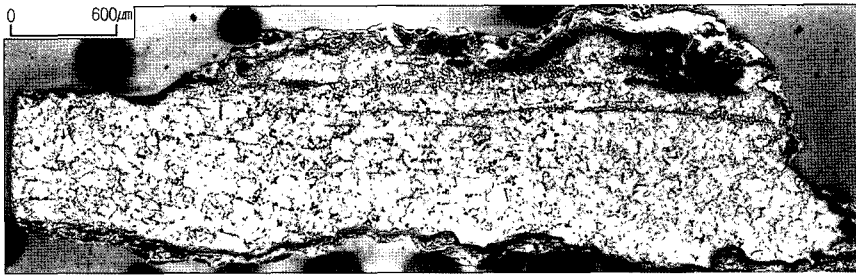


Figure 7. Microstructure of 'b' (vertical section) of Iron axe.

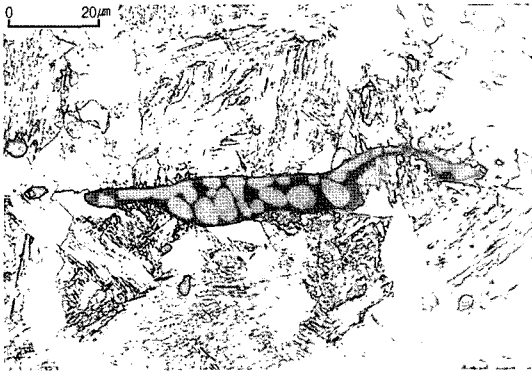


Figure 8. Microstructure of non-metallic inclusion.

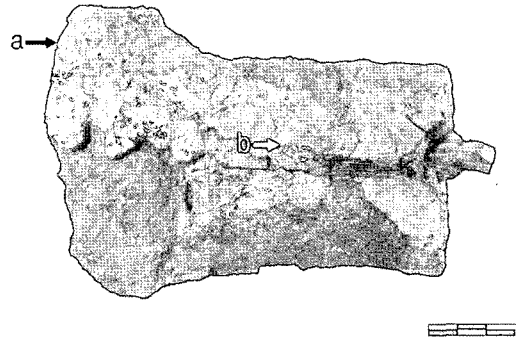


Figure 9. Iron axe.

침탄 후에는 철부 전체에 담금질 처리가 이루어져 침탄 처리에 이은 2차적인 강도 보강이 이루어졌다. 날 부위에서 보이는 분할 변태조직은 담금질시 냉각속도가 공부보다 충분치 못했음을 보여준다. 하지만 날 부위의 부식이 심한 점을 감안하면 공부와 비슷한 정도의 담금질 처리가 이루어진 것으로 추정된다. 이 철부는 날 부위뿐만 아니라 공부에서도 치밀한 담금질 조직을 보이고 있어 강한 강도를 필요로 하는데 사용된 것으로 추정된다.

3. 2 무안 인평고분군 출토 鐵斧

무안 인평고분군 토광묘에서 출토된 견상형 철부로 공부는 장방형에 가까우며 자루에 고정시키기 위해 박은 것으로 보이는 철심이 관찰된다. 身部는 유견형으로 인부 끝이 마모된 V자형이며 윗 부분 양쪽에는 완만한 단이져 공부로 이어진다. 견상형 철부는 견부가 있는 주조 철부를 모방한 것으로 단조기술의 발달을 보여주는 예라고 해석⁶⁾하고 있다. 부식이 심하여 공부에 해당하는 시



Figure 10. Microstructure of 'a' (vertical section) of Iron axe.



Figure 11. Microstructure of vertical section of Iron axe.

편은 채취할 수 없었으므로 공부에서 가장 가까운 身部 한 곳을 채취하였고, 날 부위도 날 끝에 가장 가까운 곳을 채취하였다.

1) 날 부위 횡면(Figure 9의 a)

Figure 10은 날 부위에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 시편의 외부 미세조직보다 내부 미세조직의 탄소량이 높으며, 내부 미세조직에서는 부분적으로 열처리 조직도 확인된다. 시편의 표면에 가까울수록 조밀한 페라이트와 펄라이트가 혼재되어 있으며, 부분적으로 미세한 과열 조직이 분포하고 있다. 중앙 하단을 확대한 Figure 11에서는 경도값이 413Hv인 마르텐사이트가 관찰되는데 날 부위의 강도 보강을 위한 열처리가 실시되었음을 알 수 있다. 길이 방향으로 연신되어 있는 비금속 개재물

은 원소재 내에 포함되어 있던 것들이 가공 도중 단조방향을 따라 변형된 것으로 보인다. 표면에 형성된 과열 조직의 경도값은 182Hv로 일반적인 수치를 나타낸다.

2) 身部 횡면(Figure 9의 b)

Figure 12는 身部에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 상단은 표면을 향하고 하단은 내부를 향하고 있다. 표면에 가장 가까운 상단에는 비교적 마르텐사이트가 단일상으로 나타나지만 하단으로 내려올수록 마르텐사이트에 펄라이트가 혼재되는 양상이 두드러진다. 또한 마르텐사이트와 펄라이트의 경계 부분에서는 과열조직인 비드만스웨튼이 보이며, 하단으로 내려올수록 페라이트의 분포가 많아진다. 마르텐사이트 조직은 분포 양상에 따라 경도값의 차이를 보이는데 최상단은 889~937Hv, 내부는 766~797Hv로 나타난다. 이처럼 내부와 외부의 경도값이 차이를 나타내는 것은 냉각속도에 의한 것으로 판단된다. Figure 13은 Figure 12의 우측 및 내부에서 관찰되는 마르텐사이트와 펄라이트의 분할변태 조직을 확대한 사진이다. 이 부분에서 측정되는 경도값은 마르텐사이트가 772Hv, 펄라이트가 368Hv이다. Figure 14에서 관찰되는 서로 다른 영역에 대한 성분 분석을 위해 SEM-EDS 분석을 하였으며, 그 결과는 Figure 15와 16으로 나타난다. Figure 14의 1지점에서는 대부분 산화물 상태의 철이 검출되며, Figure 14의 2지점에서는 Fe, Si, Ca가 산화물 상태로 검출되었다. 용해를 수반하지 않고 진행되는 저온환원 제련과정에서는 불순물의 완전제거가 불가능하므로 Figure 14와 같은 비금속 개재물이 잔류하게 된다.



Figure 12. Microstructure of 'b' (vertical section) of Iron axe.

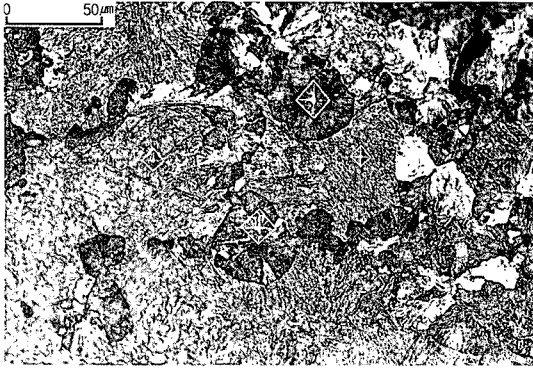


Figure 13. Microstructure of vertical section of iron axe.

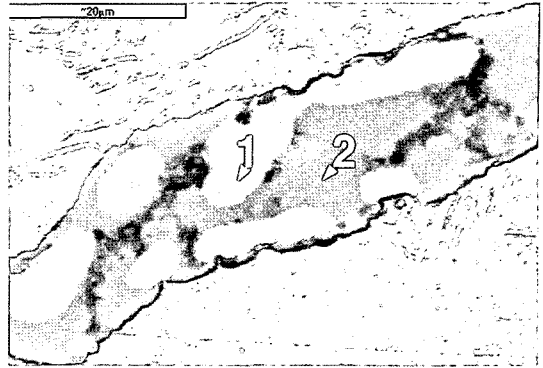


Figure 14. SEM image of non-metallic inclusion.

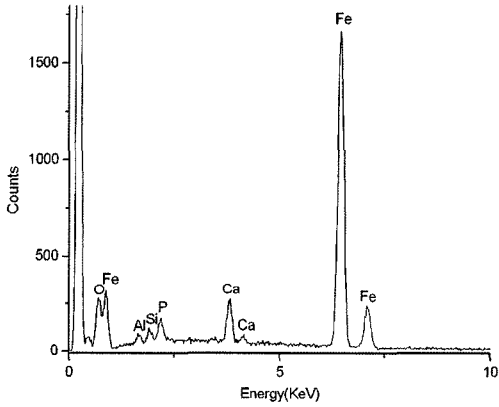


Figure 15. EDS analysis of '1' area of Fig 14.

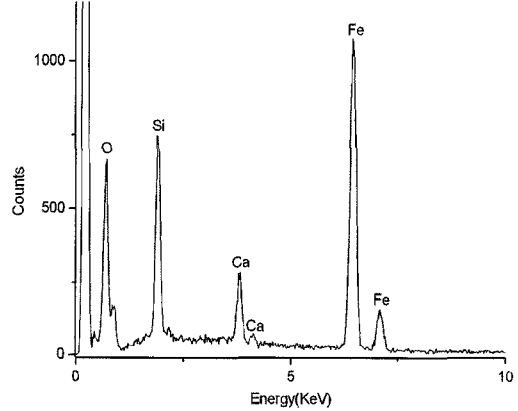


Figure 16. EDS analysis of '2' area of Fig 14.

무안 인평고분군 1호 토광묘에서 출토된 철부는 탄소 함량이 낮은 순철을 소재로 하여 반복단타로 성형을 한 후 탄소함량을 증가시키기 위한 침탄 처리가 행해졌다. 날 부위의 표면에서 보이는 조직의 미세화와 탈탄은 침탄 처리가 행해진 이후 날 부위에 대한 국부적인 재가공이 이루어졌음을 보여준다. 침탄 처리에 따른 1차적인 강도 보강 이후, 열처리를 실시함으로써 유물에 상당히 높은 강도를 부여하였다. 특히 身部에서 마르텐사이트 조직이 확인됨에 따라 유물전체에 열처리가 이루어진 것으로 보인다. 身部の 표면에 형성된 균일한 마르텐사이트 조직과 내부에 형성된 마르텐사이트와 펠라이트의 분할 변태조직은 내부로 갈수록 담금질 속도가 점점 느려지고 있음을 보여준다. 하지만 표면의 온도변화가 큼을 감안하면 당연한 결과라고 볼 수 있다. 또한 비금속 개재

물에서 분석되는 내용을 통해 철부 제작에 괴련철이 원 소재로 사용된 것으로 판단된다.

인평고분군 철부와 같은 '단조유전철부'를 견부가 있는 주조철부를 모방한 것으로 단조철부의 발달을 보여주는 예라고 해석하고 있는데, 이 철부에서 보인 미세조직들은 높은 수준의 단조기술을 보여 주고 있다.

3. 3 무안 인평고분군 출토 鐵鑿

무안 인평고분군 2호 옹관묘에서 출토된 단조품으로 평면형태는 날쪽으로 갈수록 약간 넓어지는 사다리꼴이다. 공부의 단면은 장방형이며 날은 삼각형에 가까우나 바깥쪽 부분이 굴곡을 이루는 점으로 보아 사용하던 것을 매납한 것으로 판단된다. 부식이 매우 심해 공부에 해

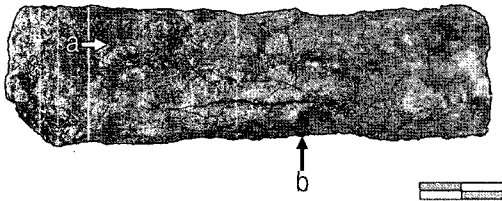


Figure 17. Iron chisel.

당하는 시편은 채취할 수 없었으므로 공부에서 가장 가까운 身部 한 곳을 채취하였고, 날 부위도 날 끝에 가장 가까운 곳을 채취하였다.

1) 身部 횡면(Figure 17의 a)

Figure 18은 날 부위에 가장 가까운 身部에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 시편의 상단에는 조대한 페라

이트와 함께 적은 양의 펄라이트가 존재하는 반면, 하단에서는 조밀한 페라이트와 함께 펄라이트의 양도 증가하였다. 상단의 조대한 페라이트 경도값은 102Hv이며, 하단의 조밀한 페라이트 경도값은 130Hv이다. 또한 하단에서 관찰되는 펄라이트의 경도값은 260Hv이다. 이와 같은 현상은 유물에 가해진 침탄과 가공에 의한 것으로 보인다. Figure 19는 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 서로 다른 영역을 1과 2지점으로 표시하였다. Figure 19에서 관찰되는 서로 다른 영역에 대한 성분 분석을 위해 SEM-EDS 분석을 하였으며, 그 결과는 Figure 20과 21로 나타난다. Figure 20의 1지점에서는 철과 산소가 주성분을 이루며, Figure 20의 2지점에서는 Fe, Si, Ca, Al가 주성분을 이루고 있다. 이와 같은 개재물은 파알라이트($2FeO \cdot SiO_2$)의 바탕에 수지상의 뷔스타이트(FeO)로 이루어진 것으로, 용해를 수반하지 않고 진행되는 저온환원 제련과정에서 흔히 나타난다.



Figure 18. Microstructure of 'a' (vertical section) of Iron chisel.

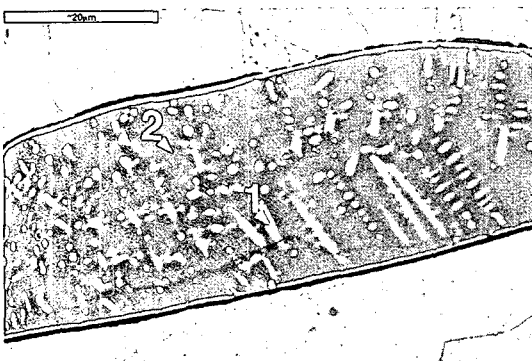


Figure 19. SEM image of non-metallic inclusion.

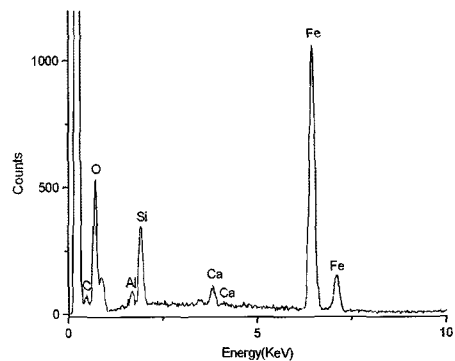


Figure 20. EDS analysis of '1' area of Fig 19.

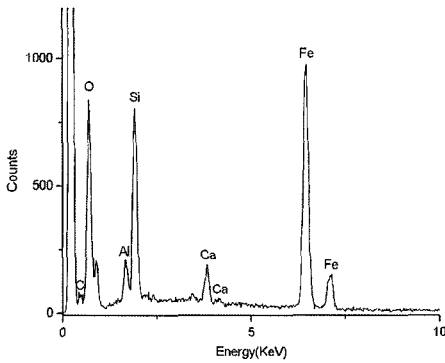


Figure 21. EDS analysis of '2' area of Fig 19.

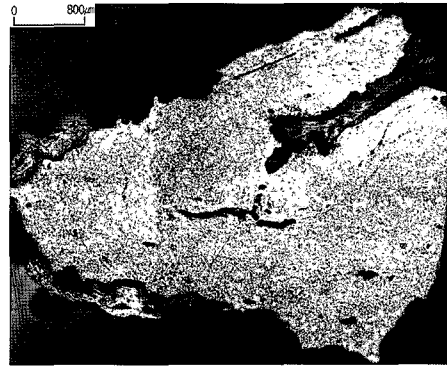


Figure 22. Microstructure of 'a' (cross section) of Iron chisel.

2) 身部 단면(Figure 17의 b)

Figure 22는 身部에서 공부로 연결되는 부분의 단면을 취한 시편으로 좌측이 표면을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 전체적으로 순철에 가까운 탄소함유량을 보이는 페라이트로 구성되어 있다. 우측 상단의 사진으로 부식된 부분은 공부를 접기 위해 가공한 부분이 선택적으로 부식된 것이다. 또한 부식선을 따라 등갈게 접충된 개재물들은 가열된 상태에서 반복적인 단타에 의해 제작되었음을 보여준다. 표면에 가까운 부분에서는 조밀한 조직이 관찰되는 반면 부식선을 중심으로한 내부에는 비교적 조대한 페라이트조직이 분포되어 있다. 조밀한 페라이트의 경도값은 135Hv, 조대한 페라이트의 경도값은 112Hv를 보인다. 이러한 경도값의 차이는 표면 부위의 결정 미세화에 의한 것으로 보인다.

철착에 사용된 소재는 저온환원법으로 생성된 괴련철로 탄소 함량이 낮은 순철이 사용되었다. 身部에서 채취된 시편 모두 내부보다 표면에 가까운 부분에서 조직이

미세화되고, 탄소 함량이 점진적으로 높아진다. 이것은 형태 가공을 위한 열간가공이 표면에 집중되었으며, 탄소 함량을 높여 강도를 보강하기 위한 작업이 동반되었음을 보여준다. 열처리 조직이 관찰되지 않는 것으로 보아 높은 강도를 필요로 하는 용도로는 사용되지 않은 것으로 추정된다. 낮은 탄소함량을 가진 괴련철을 원소재로 사용했다는 점에서 같은 유적의 1호 토광묘 출토 철부와 유사성을 가진다.

3. 4 무안 구산리고분군 출토 鐵製大刀

무안 구산리고분군 3호 옹관묘의 대용 바닥 중앙에서 출토된 단조품으로 신부와 경부가 완전하게 남아있다. 경부는 신부쪽으로 갈수록 약간 넓어지며, 신부와 이어지는 부분에서 등이 약간 부풀 후 일직선의 신부 등과 연결된다. 또한 날이 형성된 반대쪽은 병부에서 부드럽게 외반되다 신부의 날로 이어진다. 신부는 단면 삼각형으로 거의 ㄱ자형을 이루며 뺨어 올라가다 끝부분에서 약

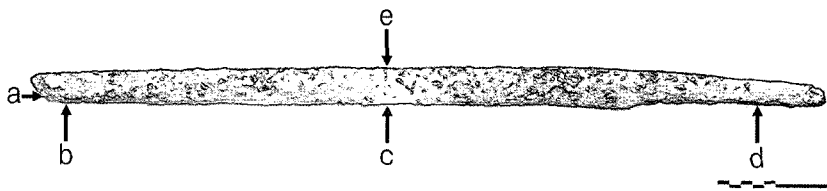


Figure 23. Iron sword.



Figure 24. Microstructure of 'a' (vertical section) of Iron sword.



Figure 25. Microstructure of vertical section of Iron sword.



Figure 26. SEM image of vertical Iron sword.

간 좁아져 날을 형성하였다. 병부에는 X선 투과 결과 직경 0.4cm 정도의 흠이 2개 관찰되었는데, 이는 철심과 목병을 고정시키기 위해 못을 박았던 구멍으로 판단된다. 유물의 상태가 양호하여 칼 제작기술에 대한 정보를 최대한 얻을 수 있는 봉부, 날 끝, 날 가운데, 병부, 등 부위에서 각각 한 곳씩 시편을 채취하였다.

1) 鋒部 횡면(Figure 23의 a)

Figure 24는 鋒部에서 채취한 시편의 전체 미세조직 사진으로 좌측이 鋒部 선단을 향하고 우측이 내부를 향한다. 높은 탄소량을 가진 조직이 내부에 형성되어 있으며, 표면에는 순철에 가까운 조직이 형성되어 있다. Figure 25는 내부에 존재하는 미세조직으로 분할변태된 마르텐사이트와 펄라이트 조직이 관찰된다. 탄소 함량이 높은 열처리 조직이 내부에 존재하고 탄소함량이 낮은 조직이 표면에 존재하는 이유는 열처리 후 행해진 국부적인 가열로 인해 표면이 탈탄된 것으로 보인다. 내부의

마르텐사이트의 경도값은 762Hv이며, 연결부분의 펄라이트 경도값은 330Hv, 표면의 페라이트 경도값은 173Hv이다. Figure 26은 Figure 24의 좌측 중앙에 불균일하게 형성된 검은 점들을 확대한 전자현미경 사진으로

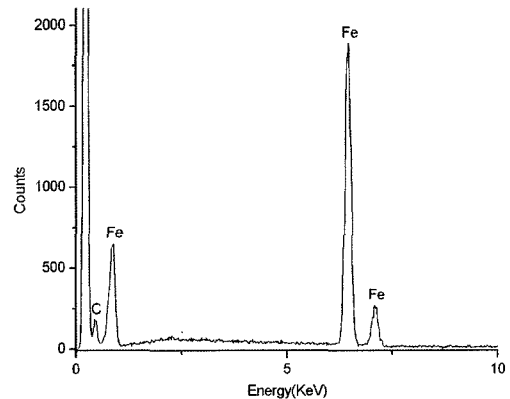


Figure 27. EDS analysis of '1' area of Fig 26.



Figure 28. Microstructure of 'b' (cross section) of Iron sword.



Figure 29. Microstructure of cross section of Iron sword.

로 검은 점들이 페라이트의 결정립계를 따라 형성된 조직이 아님을 알 수 있다. Figure 27은 검은 점에 대한 EDS분석 결과로 철과 탄소를 주성분으로 하는 원소가 검출되었다.

2) 날 끝 단면(Figure 23의 b)

Figure 28은 날 끝 부위에서 채취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향

하고 있다. 시편의 중앙에는 탄소함량이 높은 조직이 형성되어 있지만 나머지 부분에서는 탄소 함량이 낮은 순철에 가까운 조직이 형성되어 있다. 이것은 철제대도에 사용된 소재와 제작시 행해진 공정을 보여준다. 즉, 이 철제대도는 순철에 가까운 소재가 사용되었으며, 성형 후 침탄 처리가 이루어졌다. 또한 침탄에 의한 1차적인 강도 보강 이후 열처리가 실시되었고, 날 끝에 제한된 재가공이 이루어진 것으로 판단된다. Figure 29는 Figure 28의 내부에 형성된 열처리 조직 확대한 사진으로 마르텐사이트 조직과 함께 펄라이트 조직이 혼재되어 있다. 이와 같이 단일 마르텐사이트 조직이 형성되지 못한 이유는 담금질시 냉각 속도가 충분하지 못했기 때문으로 보인다. 마르텐사이트의 경도값은 554Hv이며, 펄라이트의 경도값은 314Hv이다.

3) 날 가운데 단면(Figure 24의 c)

Figure 30은 날 가운데 부위에서 채취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 순철에 가까운 탄소함량을 가진 페라이트



Figure 30. Microstructure of 'c' (cross section) of Iron sword(X50).

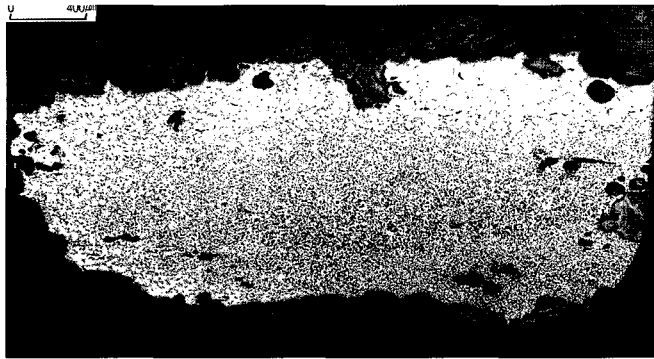


Figure 31. Microstructure of 'd' (cross section) of Iron sword.

조직이 전체적으로 분포되어 있고, 단타 방향으로 길게 연신된 개재물이 있다. 결정립 크기가 서로 다른 페라이트 조직이 날 선단에 층상 배열을 하고 있는데, 이는 날 끝에 집중적으로 가해진 가공에 의한 것으로 보인다. 내부에 해당하는 우측 미세조직에서는 조대한 페라이트 조직이 분포되어 있으나, 날 선단에 근접한 좌측 미세조직에서는 미세한 페라이트의 분포와 함께 탄소량도 증가되었다. 이와 같이 날 선단과 내부의 조직이 차이를 보이는 이유는 날 부위의 성형을 위한 가공이 많이 이루어졌기 때문으로 보인다. 날 선단의 경도값은 214Hv이며, 내부의 경도값은 168Hv로 가공도에 따른 일반적인 경도값을 나타낸다.

4) 병부 단면(Figure 23의 d)

Figure 31은 병부 가운데 부위에서 채취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 표면을 향하고, 우측이 내부를 향한다. 표면을 향하는 좌측상단이 내부를 향하는 우측상단보다 탄소함량이 높은 조직으로 구성되어 있다는 점에서 침탄 공정에 의해 탄소함량을 높였음을 알 수 있다. 탄소함량이 낮은 페라이트 조직이 형성된 Figure 31의 상단에서부터 하단으로 결정립의 미세화와 함께 탄소함량이 점진적으로 많아지고 있다. 또한 탄소함량이 높은 Figure 31의 하단에는 과열조직인 비드만스텝트 조직이 보이며, 그 아래로 0.3%정도의 탄소 함량을 가진 펄라이트조직이 균일하게 분포되어 있다. 조대한 페라이트의 경도값은 117Hv, 조밀한 페라이트 부분의 경도값은 166Hv, 비드만스텝트의 경도값은 200Hv, 펄라이트의 경도값은 229Hv이다.

5) 등 부위 단면(Figure 23의 e)

Figure 32는 등 부위에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 좌측이 표면을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 전체적으로 순철인 페라이트 조직으로 구성되어 있다. 시편의 좌측 상단과 우측 상단에서 결정립 크기의 차이를 약간 보이지만, 경도값에서 큰 차이를 보이지 않는다(151Hv). 시편 전체에 검게 보이는 부분들은 비금속 개재물과 그 주변의 철이 부식된 것들이다. Figure 33은 비금속 개재물을 확대한 전자현미경 사진으로 서로 다른 영역을 1과 2지점으로 표시하였다. Figure 34는 Figure 33의 1지점에 대한 EDS 분석 결과로 철과 산소만 검출되었으며, 2지점에 대한 EDS 분석 결과인 Figure 35에서는 Fe, Si, Ca, Al, K, P, O가 검출되었다. 이와 같은 조성은 제련 과정에서 발생하는 슬래그에서 흔히 볼 수 있는 것으로 저온환원법으로 괴련철을 생산하는 경우 철 소재 내에 잔류하게 된다.

무안 구산리고분군 3호 옹관묘에서 출토된 철제대도는 순철에 가까운 소재를 고온에서 반복적으로 단타하여 형태를 제작하였으며, 형태 제작 후 강도를 필요로 하는 부위에 침탄 처리를 가하여 적절한 강도를 부여하였다. 또한 침탄 처리에 의한 1차적인 강도 보강 이후 열처리를 함으로써 강도를 극대화시켰다. 특히 열처리를 날 부위에 국한시킴으로써 마르텐사이트의 단점인 취성을 개선함과 동시에 강도와 인성을 부여하였다. 한편 鋒部나 날 끝에 대해서는 열처리 후 형태가공이 더 이루어졌다. 이 유물의 등 부위에 존재하는 상당량의 비금속 개재물과 이에 대한 EDS 분석 결과는 저온환원법에 의해 생산된 괴련철을 원소재로 사용하였음을 보여준다. 철제대도

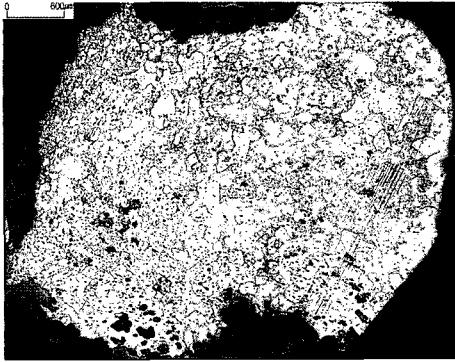


Figure 32. Microstructure of 'e' (cross section) of Iron sword.

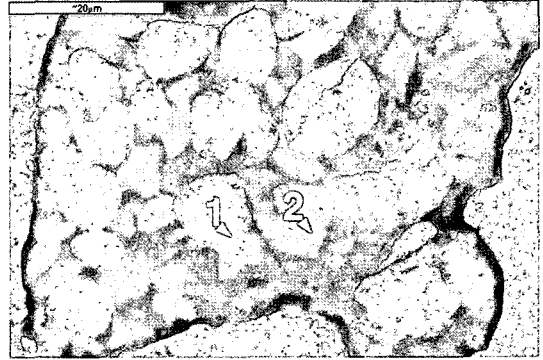


Figure 33. SEM image of non-metallic inclusion.

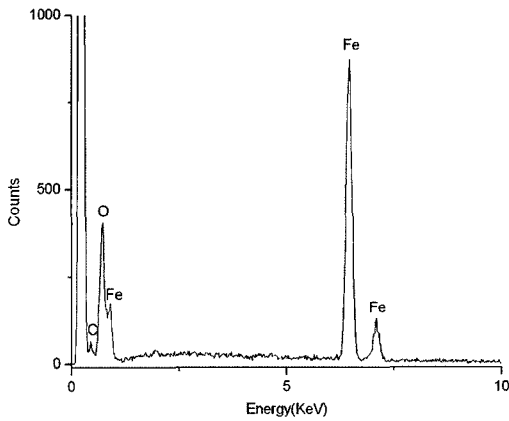


Figure 34. EDS analysis of '1' area of Fig 33.

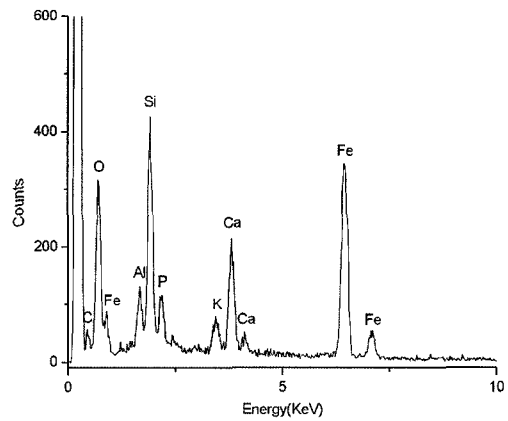


Figure 35. EDS analysis of '2' area of Fig 33.

의 제작공정에는 성형-침탄-열처리-단타가 반복적으로 이루어졌으며, 이러한 기술체계는 2세기대로 編年되는 영광 군동 출토 철부에서부터 보여지고 있다. 또한 철제 대도에서 관찰되는 침탄과 열처리 조직은 실생활에 사용이 가능하도록 제작되었음을 보여주는 것으로 피장자의 사용품이었을 가능성을 시사한다.

3. 5 무안 구산리고분군 출토 鐵鈔

3호 옹관묘에서 철제대도와 나란히 출토된 단조품으로 모신은 날끝으로 갈수록 좁아지는 형태이나 중앙부에 약간의 단을 이룬 흔적이 관찰된다. 날끝은 양쪽에서 만 들었으며, 공부의 접이 부분을 따라 양편에 능을 형성하였다. 부식이 심하여 시편 채취 부위가 身部로 한정되었다. 그러므로 봉부에 가장 가까운 부위와 공부에 가장 가

까운 부위를 횡 · 단면으로 채취하였다.

1) 身部 횡면(Figure 36의 a)

Figure 37은 봉부에 가장 가까운 身部를 횡면으로 채취한 시편의 미세조직 사진으로 좌측이 봉부를 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 봉부에 가까운 시편의 좌측은 미세한 페라이트에 펄라이트가 산재된 0.1%정도의 저탄소강이며, 내부를 향하는 시편의 우측은 조대한 페라이트로 이루어진 순철에 가까운 조직이다. 또한 경도 값에 있어서도 차이를 보이는데 조밀한 페라이트는 189Hv이고, 조대한 페라이트는 165Hv이다. 이처럼 다른 특징을 보이는 이유는 봉부에 행해진 가공과 침탄의 영향으로 판단된다. Figure 38은 시편의 중앙에 형성된 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 서로 다른 영역을 1과 2지점으로 표시하였다. Figure 39는

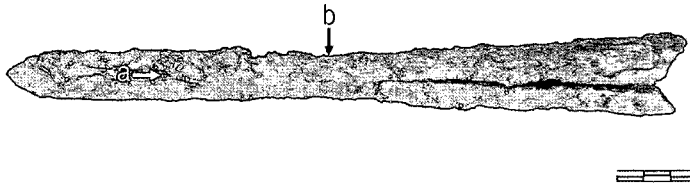


Figure 36. Iron spear.



Figure 37. Microstructure of 'a' (vertical section) of Iron spear.



Figure 38. SEM image of non-metallic inclusion.

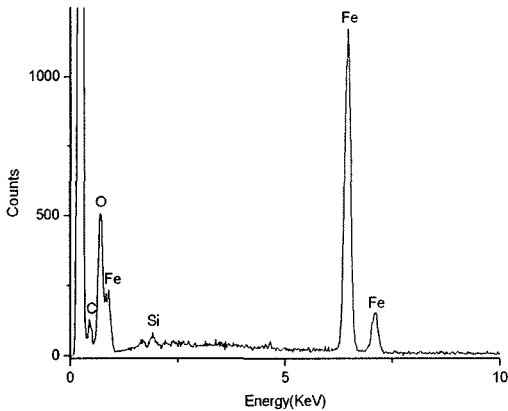


Figure 39. EDS analysis of '1' area of Fig 38.

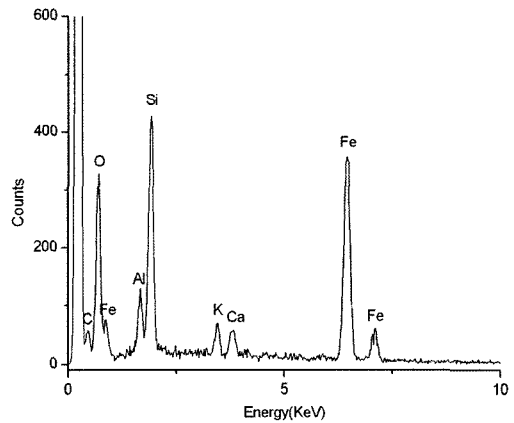


Figure 40. EDS analysis of '2' area of Fig 38.

Figure 38의 1지점에 대한 EDS 분석 결과로 주로 철 산화물이 발견되지만, 2지점에 대한 EDS 분석 결과인 Figure 40에서는 산화물 상태의 Si, Ca, Al, K이 발견 된다. 이러한 조성은 제련과정에서 발생하는 슬래그에서 흔히 볼수 있는 것으로 Figure 38에서 관찰되는 비금속 개재물은 제련과정에서 미처 제거되지 못한 슬래그의 일부가 철 소재 내에 잔류하고 있는 것임을 알 수 있다.⁷⁾

2) 身部 단면(Figure 36의 b)

Figure 41은 공부에 가장 가까운 身部를 단면으로 채취한 시편의 미세조직 사진으로 좌측이 표면을 향하고 우측이 내부를 향한다. 표면에 가까운 시편의 좌측에서는 페라이트 바탕에 이루어진 탄소함량 0.1%정도의 저탄소강이 관찰되며, 이 부분의 경도값은 147HV이다. Figure 42는 시편 우측에 다양하게 나타나는 과공석강,



Figure 41. Microstructure of 'a' (cross section) of Iron spear.

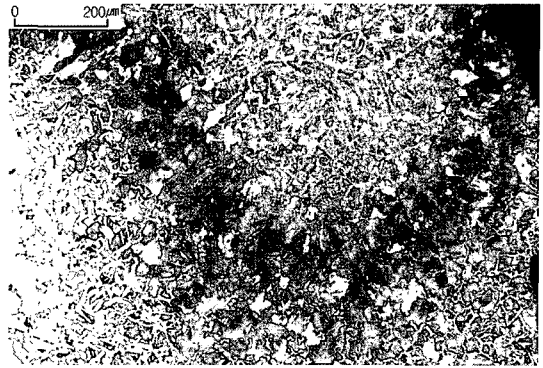


Figure 42. Microstructure of vertical section of Iron spear.



Figure 43. SEM image of vertical section of Iron spear.



Figure 44. Microstructure of vertical section of Iron spear.

공석강, 순철 등의 조직을 보여준다. Figure 43은 과공석강 부분을 확대한 전자현미경사진으로 펄라이트 바탕에 가지모양으로 길게 형성된 탄소함량 6.67%의 시멘타이트 조직이 보인다. Figure 44는 Figure 42의 좌측 상단에서 관찰되는 비금속 개재물을 확대한 사진으로 뷔스타이트가 관찰된다. Figure 41에서 관찰되는 과공석강의 경도값은 278Hv이며, 공석강의 경도값은 280Hv, 순철의 경도값은 90Hv이다.

무안 구산리고분군 3호 옹관묘에서 철모는 미세조직에서 나타나는 특징을 통해 제작에 행해진 두 가지 방법을 고려해 볼 수 있다. 첫 번째 방법은 강 소재를 사용하여 형태를 가공하는 방법이고, 두 번째 방법은 순철 소재를 사용하여 형태를 가공한 후 강도를 필요로 하는 부분에 침탄 처리를 가하여 그 부위를 강으로 만드는 방법이다. 두 가지 방법 중 이 철모는 두 번째 방법에 의해 제작

된 것으로 보인다. 그 이유로 Figure 37에서 보이는 바와 같이 내부에서 봉부 방향으로 점진적으로 탄소함량이 높아지고 있다는 점을 들 수 있다. 비금속 개재물에서 보이는 뷔스타이트 조직과 조성에 대한 EDS 분석 결과, 원소재는 저온환원법에 의해 생산된 피련철로 보인다. Figure 41에서 나타나는 과공석강 조직은 소재로 쓰인 피련철에 포함된 불균일한 탄소함량에 의한 것으로 추정된다. 부식으로 인해 身部에서만 시편이 채취되었기 때문에 담금질 처리가 실시되었는지에 대해서는 추정하기 어렵다. 3호 옹관묘에서 동반 출토된 철제대도와는 탄소함량이 낮은 피련철을 원소재를 사용했다는 점에서 공통점을 가진다. 경주 황성동 537-2호 유적에서 출토된⁹⁾ 중에도 Figure 41처럼 과공석강, 공석강, 아공석강, 순철 등이 불균일하게 조성된 미세조직을 가진 것이 있어 차후 지속적인 연구가 요구된다.

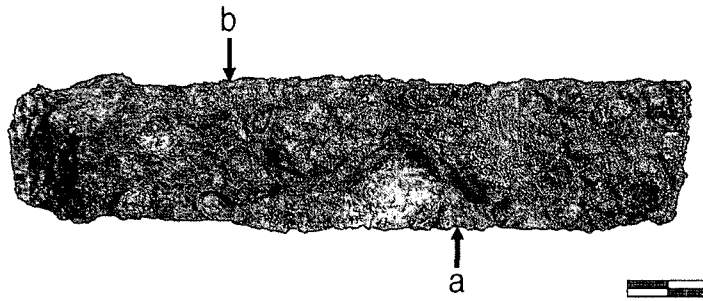


Figure 45. Iron sickle.



Figure 46. Microstructure of 'a' (cross section) of Iron sickle.



Figure 47. Microstructure of cross section of Iron sickle.

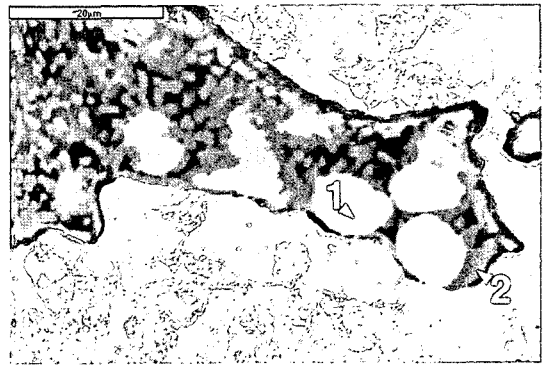


Figure 48. SEM image of non-metallic inclusion.

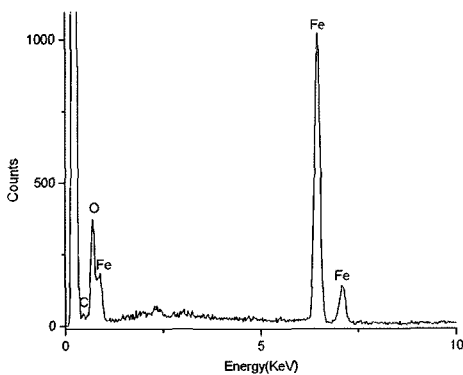


Figure 49. EDS analysis of '1' area of Fig 48.

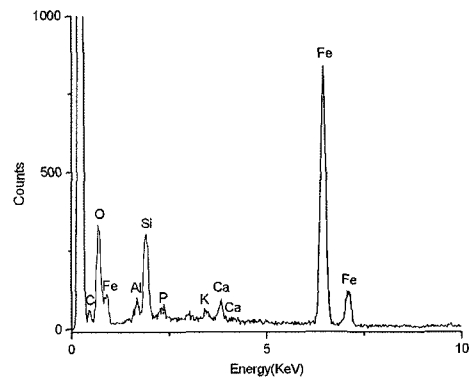


Figure 50. EDS analysis of '2' area of Fig 48.

3. 6 함평 국산 출토 鐵鎌

함평 국산 2호 토광묘에서 출토된 단조품으로 신부와 날 끝부분이 결실되어 있는 左鎌이다. 신부의 단면형태는 이등변삼각형이고 기부는 L자형으로 깎여 있다. 남아 있는 날과 등의 형태는 직선을 이루는 ||자형으로 되어 있다. 시편은 날 부위 한 곳과 등 부위 한 곳을 채취하였다.

1) 날 부위 단면(Figure 45의 a)

Figure 46은 날 부위에서 취한 시편의 전체 미세조직 사진으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 시편 전체에 길이 방향으로 연신된 개재물과 함께 불균일한 조직이 형성되어 있다. 이와 같은 형상은 고온에서 두드리고 접는 과정이 반복적으로 이루어졌음을 보여준다. 시편의 좌측을 확대한 Figure 47의 하단에서는 과열 조직인 비드만스튜텐이 관찰되며, 부분적으로 담금질 조직인 마르텐사이트가 보인다. 또한 좌측 끝부분에 형성된 마르텐사이트 조직(698Hv)을 통해 날 끝에 국부적인 열처리가 실시되었음을 알 수 있다. Figure 48은 Figure 47의 좌측하단에서 관찰되는 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 서로 다른 영역을 1과 2지점으로 표시하였다. Figure 49는 Figure 48의 1지점에 대한 EDS 분석 결과로 주로 철과 산소가 검출되지만, 2지점에 대한 EDS 분석 결과인 Figure 50에서는 Fe, Si, Ca, Al, K, O가 주성분을 이루고 있다.

2) 등 부위 단면(Figure 46의 b)

Figure 51은 등 부위에서 채취한 시편의 전체 미세조직 사진으로 우측이 등 표면을 향하고 좌측이 내부를 향하고 있다. 전체적으로 약 0.4%정도의 탄소함량을 가진 조직들이 분포되어 있다. 또한 길이 방향으로 형성된 비금속 개재물들이 여러 곳에 혼재되어 있으며, 이 층을 따라 일부 탈탄된 조직들도 관찰된다. Figure 52는 전체적으로 분포되어 있는 조직을 확대한 사진으로 미세한 결정립 크기의 페라이트에 펠라이트가 혼재되어 있다. 이 부분의 펠라이트 경도값은 301Hv이고, 페라이트의 경도값은 172Hv이다. 펠라이트 경도값이 높은 이유는 탄소량의 증가와 조직의 미세화에 의한 것으로 보인다. Figure 53은 Figure 51의 우측에 밝게 보이는 부분을

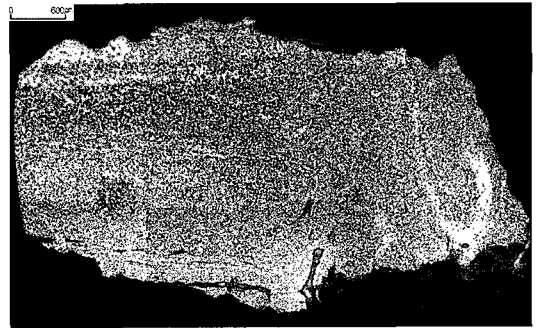


Figure 51. Microstructure of 'b' (cross section) of Iron sickle.

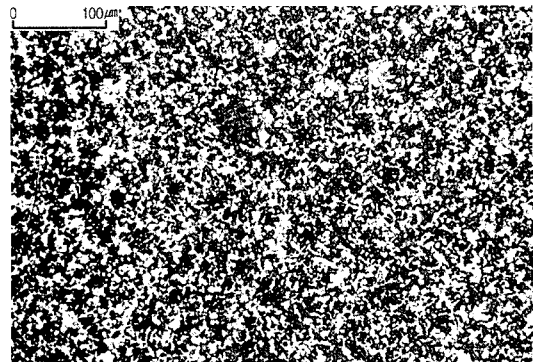


Figure 52. Microstructure of cross section of Iron spear.

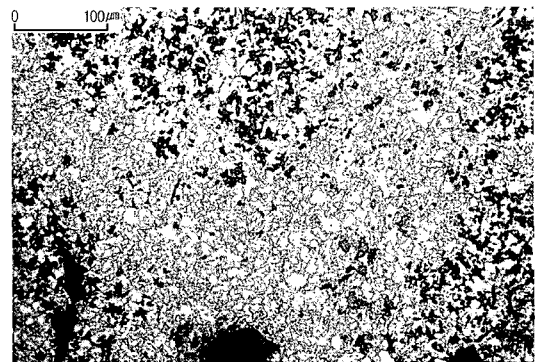


Figure 53. Microstructure of cross section of Iron spear.

확대한 사진으로 구상화된 시멘타이트상이 존재한다.

함평 국산유적 2호 토광묘에서 출토된 철검의 등 부위 미세조직에서 어느 정도 탄소함량을 가진 조직들이 길이

방향으로 탈탄되어 있어 강소재로 제작되었을 가능성을 보여 준다. 하지만 날 부위에 길이 방향을 따라 길게 늘어진 비금속 개재물은 원소재 내에 있던 비금속 개재물이 가공 도중 단조방향을 따라 변형된 것으로, 저온 환원법에 의해 생산된 피련철이 소재로 사용되었음을 시사한다. 또한 비금속 개재물의 성분에 대한 EDS 분석 결과는 소재가 피련철이었을 가능성을 뒷받침해준다. 등 부위에서 관찰되는 미세한 조직은 이 유물에 가해진 가공 정도를 보여주는 것으로, 공식온도인 727℃ 부근의 고온에서 상당히 많은 가공을 통해 형태가 제작되었음을 알 수 있다. 하지만 시멘타이트의 구상화가 완전히 이루어지지 않고 있어 공식온도에서 장시간 단조작업이 수행되지는 않은 것으로 판단된다. 등 부위에서는 페라이트와 펄라이트로 이루어진 균일한 조직이 관찰되며, 날 부위에서는 열처리 조직인 마르텐사이트가 관찰된다. 이와 같이 날 부위에만 열처리를 가하는 기술체계는 마르텐사이트의 장점인 높은 강도를 최대한 활용함과 동시에 쉽게 깨지는 단점을 보완하기 위한 수단으로 우수한 표면경화기술을 볼 수 있다.

IV. 결론

영산강유역에서 출토된 철기유물에 대한 미세조직 분석결과를 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고대 영산강유역에서는 저온환원법에 의해 생산된 피련철이 철기 제작에 공급되는 원소재의 주를 이루고 있었다.
- 2) 탄소함량이 낮은 피련철로 제작된 단조유물은 제작 공정이 성형-침탄-열처리-단타가 반복적으로 이루어졌다.
- 3) 필요로 하는 부위에만 열처리를 가하는 높은 기술체계를 가진 집단이 2세기 전부터 영산강유역에 있었으며, 이 지역의 기술체계가 5세기 말에도 유사하게 나타난다는 점은 철기제작기술이 전승되었을 가능성을 시사한다.
- 4) 형태상 건부가 달린 주조철부의 형상을 하고 있어 단조기술의 발달을 보여주는 것으로 해석되는 무안 인평고분군 출토 견상형 철부의 미세조직에서 높은 기술체계에 의해 제작되었음을 알 수 있는 미

세조직이 관찰됨으로써 고고학적으로 해석되는 기술발달이 과학적으로 입증되었다.

참고문헌

- 1) 이범기, *영산강유역 금속유물의 변천 연구 -고분 출토품을 중심으로-*, 목포대학교대학원 석사학위논문, p.2, (2002).
- 2) 목포대학교박물관 · 철도청, *무안 인평 고분군*, p.157, p.161, (1999).
- 3) 목포대학교박물관 · 한국도로공사, *영광 군동 유적*, p.293, (2001).
- 4) 목포대학교박물관 · 한국도로공사, *함평 성남 · 국산 유적*, p.188, (2001).
- 5) 한봉희 譯, *금속재료*, 반도출판사, p.51, (1997).
- 6) 주 1의 p.152.
- 7) 최종택, 장은정, 박장식, *삼국시대 철기연구*, 서울대학교박물관, p.82, (2001).
- 8) 박장식, "경주 황성동 537-2 유적 출토 철기제작 관련 유물에 대한 금속학적 분석", *경주시 황성동 537-2 임대아파트 신축부지보고서*, 한국문화재보호재단, p.15, (2001).