

석사학위논문

지도교수 김 수 기

제주 용담동 출토 철기유물에 대한
금속학적 연구

Metallurgical study of Iron Artifacts Excavated
from *Yongdam-Dong*, Jeju

용인대학교 예술대학원

문화재보존학과 문화재보존학전공

강 창 구

2004년 6월

제주 용담동 출토 철기유물에 대한
금속학적 연구

Metallurgical study of Iron Artifacts Excavated
from *Yongdam-Dong*, Jeju

이 논문을 문화재보존학 석사학위 논문으로 제출함

2004년 6월

용인대학교 예술대학원

문화재보존학과 문화재보존학전공

강 창 구

제주 용담동 출토 철기유물에 대한 금속학적 연구

지도교수 김 수 기

이 논문을 강창구의 석사학위 논문으로 인준함

심사위원장 배진달

심사위원 김수기

심사위원 최기영



2004년 6월

용인대학교 예술대학원

국 문 초 록

제주 용담동 출토 철기유물에 대한 금속학적 연구

강 창 구

용인대학교 예술대학원

문화재보존학과 문화재보존학전공

기원 전후의 제주도 역사 여명기에 있었던 문화변천을 밝히는데 있어 매우 중요한 역할을 하는 제주 용담동 유적에서 출토된 철기유물에서 9점을 선정하여 미세조직을 분석하였다. 선정된 철기유물 중 철제단검 등 8점은 단조로, 철부 1점은 주조로 제작된 것이다. 본 연구에서는 제작방법을 달리 하는 유물을 금속학적으로 조사하여 미세조직상의 차이에 따른 당시의 철기제작기술을 밝혀내고자 하였다. 연구방법은 직접 시료를 조사하는 직접적인 방법과 이미 조사된 자료를 비교분석하는 간접적인 방법을 병행하였다.

철제단검 등 9점에서 채취한 시편은 표면이 박락된 부분 내부에 남아 있던 금속으로, 원형을 최대한 보존한다는 원칙 하에 채취하였다. 채취한 시편은 먼저 에폭시 수지로 마운팅 하여 표면을 미세연마한 후 금속조직

을 관찰하기 위해 표면을 Nital 3%용액으로 수 초간 부식시켜 전 처리 과정을 완료하였다. 전 처리 후 광학현미경을 이용한 육안관찰, 금속현미경을 이용한 미세조직 촬영, SEM-EDS 이용한 비금속 개재물 분석을 통하여 각 시편에 대한 연구를 진행하였다.

미세조직분석 결과, 제주 용담동 출토 단조유물 8점은 고체저온환원법으로 생산된 탄소함량이 적은 괴련철을 원료로 사용하여 철기를 생산하는 기술체계로 이루어졌다. 열처리의 흔적은 날 부위와 같이 강도를 필요로 하는 부위에 나타났으며, 침탄과 동시에 담금질이 이루어졌다. 또한 담금질 조직이 가지는 취성을 보완하고 강에 인성을 부여하는 열처리도 이루어졌다. 낮은 탄소함량의 괴련철로 철기를 제작할 경우 가열단타에 의한 성형-침탄-열처리-가열단타를 반복적으로 행하는 제작 공정이 이루어졌다. 비교 대상으로 선정한 2세기대로 편년되는 영광 군동 출토 철부에서도 같은 제작기법과 열처리 기술이 확인되고 있어, 2~3세기경 한반도에 이와 같은 기술이 널리 존재하고 있었음을 추정할 수 있다.

주조철부 1점은 외형과 X-ray 필름상으로 볼 때 주조로 제작된 것이 확실하나, 미세조직 관찰 결과 주조조직이 아닌 페라이트 기지에 약간의 펄라이트가 혼재된 탄소강조직으로 밝혀졌다. 이 조직은 주조법으로 제작된 철기를 고온에서 장시간 열처리할 때 표면에서 탈탄현상이 일어나 조직이 변태한 것으로, 주철의 취성을 보완하고 인성을 부여하기 위해 실시한 것으로 보인다. 주조철부에서 관찰된 미세조직은 당대의 철기제작 기술체계를 보여주는 것으로, 지금까지 관찰된 예가 드물다.

따라서 이번 연구를 통해 밝혀진 용담 출토 철기유물의 금속학적 결과는 한반도 원삼국시대의 철기제작기술을 추정할 수 있는 좋은 자료가 될 것으로 본다.

목 차

국문초록	i
1. 연구 목적과 방법	1
1. 1 연구 목적	1
1. 2 연구 방법	2
2. 유적의 고고학적 배경	5
2. 1 지리적 배경	5
2. 2 유적 개관	6
3. 연구의 이론적 배경	9
3. 1 Fe와 C의 합금	9
3. 2 탄소강의 상태변화	10
3. 3 탄소강의 미세조직	13
4. 미세조직 분석 및 고찰	14
4. 1 제주 용담동 유적	14
4. 2 영광 군동 유적	48
4. 3 무순 동문 외 고구려 산성출토	53
4. 4 결과 및 고찰	54

5. 결론	57
주	59
참고문헌	60
ABSTRACT	64

표 목차

표 1. 분석대상 철기유물	4
표 2. 각 시편의 미세조직 분석결과	56

그림 목차

그림 1. 0.5% C인 탄소강의 냉각에 따른 조직변화	9
그림 2. 펄라이트 생성과정	11
그림 3. 탄소량에 따른 조직의 변화	11
그림 4. 사진 6의 1지점 EDS분석	17
그림 5. 사진 6의 2지점 EDS분석	17
그림 6. 사진 11의 1지점 EDS분석	19
그림 7. 사진 11의 2지점 EDS분석	19
그림 8. 사진 17의 1지점 EDS분석	22
그림 9. 사진17의 2지점 EDS분석	22
그림 10. 사진 22의 1지점 EDS분석	24
그림 11. 사진 22의 2지점 EDS분석	24
그림 12. 사진 22의 3지점 EDS분석	24
그림 13. 사진 27의 1지점 EDS분석	26
그림 14. 사진 35의 1지점 EDS분석	29
그림 15. 사진 35의 2지점 EDS분석	29
그림 16. 사진 40의 1지점 EDS분석	31

그림 17. 사진 40의 2지점 EDS분석	31
그림 18. 사진 50의 1지점 EDS분석	34
그림 19. 사진 56의 1지점 EDS분석	37
그림 20. 사진 61의 1지점 EDS분석	39
그림 21. 사진 83의 1지점 EDS분석	47
그림 22. 사진 83의 2지점 EDS분석	47
그림 23. 사진 87의 1지점 EDS분석	49
그림 24. 사진 93의 1지점 EDS분석	52
그림 25. 사진 93의 2지점 EDS분석	52

사진 목차

사진 1. 철제단검	15
사진 2. 사진 1의 a 날 부위 횡면 미세조직(50×)	16
사진 3. 사진 2의 상단 일부(200×)	17
사진 4. 사진 3의 일부(400×)	17
사진 5. 사진 2의 일부(200×)	17
사진 6. 비금속 개재물 SEM상(2000×)	17
사진 7. 사진 1의 b 날 부위 횡면 미세조직(50×)	18
사진 8. 사진 7의 우측(200×)	19
사진 9. 사진 8의 확대(400×)	19
사진 10. 사진 7의 일부(200×)	19
사진 11. 비금속 개재물 SEM상(2000×)	19
사진 12. 철제장검(1)	20

사진 13. 사진 12의 a 스페 부위 횡면 미세조직(50×)	21
사진 14. 사진 13의 일부(100×)	21
사진 15. 사진 13의 일부(200×)	21
사진 16. 사진 13의 비금속 개재물(400×)	21
사진 17. 비금속 개재물 SEM상(2000×)	21
사진 18. 사진 12의 b 등 부위 횡면 미세조직(50×)	23
사진 19. 사진 18의 일부(100×)	23
사진 20. 사진 18의 일부(200×)	23
사진 21. 사진 18의 비금속개재물	23
사진 22. 비금속 개재물 SEM상(2000×)	23
사진 23. 사진 12의 c 날 안쪽 횡면 미세조직(50×)	25
사진 24. 사진 23의 일부(200×)	25
사진 25. 사진 24의 일부(400×)	25
사진 26. 사진 23의 일부(100×)	26
사진 27. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	26
사진 28. 철제장점(2)	27
사진 29. 사진 28의 a 날 부위 단면 미세조직(50×)	28
사진 30. 사진 29의 좌측(200×)	28
사진 31. 사진 30의 일부(400×)	28
사진 32. 사진 29의 우측(200×)	28
사진 33. 사진 32의 일부(400×)	28
사진 34. 사진 29의 중간(100×)	29
사진 35. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	29
사진 36. 사진 28의 b 스페부위 단면(50×)	30
사진 37. 사진 36의 일부(100×)	30

사진 38. 사진 36의 하단(400×)	30
사진 39. 사진 36의 상단(400×)	31
사진 40. 비금속 개재물 SEM상(2000×)	31
사진 41. 사진 28의 c 날 안쪽부위 단면(50×)	32
사진 42. 사진 41의 일부(200×)	32
사진 43. 사진 41의 일부(400×)	32
사진 44. 사진 41의 중간 일부 (100×)	32
사진 45. 사진 41의 일부(200×)	32
사진 46. 첼모(1)	33
사진 47. 사진 46의 모신 안쪽부위 횡면(50×)	34
사진 48. 사진 47의 일부(200×)	34
사진 49. 사진 47의 일부(400×)	34
사진 50. 비금속 개재물 SEM상(1000×)	34
사진 51. 첼모(2)	35
사진 52. 사진 51의 날 부분 단면 미세조직(50×)	36
사진 53. 사진 52의 좌측(200×)	36
사진 54. 사진 52의 중간(400×)	36
사진 55. 사진 52의 우측(200×)	36
사진 56. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	36
사진 57. 사진 52의 날 부위 종단면 미세조직(50×)	38
사진 58. 사진 57의 일부(200×)	38
사진 59. 사진 57의 우하단 일부(200×)	38
사진 60. 사진 57의 비금속 개재물(200×)	38
사진 61. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	38
사진 62. 첼모(3)	39

사진 63. 사진 62의 모신 끝부분 단면 미세조직(50×)	40
사진 64. 사진 63의 일부(200×)	40
사진 65. 사진 63의 일부(400×)	40
사진 66. 소형철부	41
사진 67. 사진 66의 날 부분 횡면 미세조직(50×)	42
사진 68. 사진 67의 일부(200×)	42
사진 69. 사진 68의 일부(400×)	42
사진 70. 사진 67의 일부(200×)	42
사진 71. 비금속 개재물 SEM상(500×)	42
사진 72. 주조철부	43
사진 73. X-ray 필름	43
사진 74. 사진 72의 공부 끝 부위 횡면 미세조직(50×)	44
사진 75. 사진 74의 일부(100×)	44
사진 76. 사진 74의 일부(200×)	44
사진 77. 사진 74의 일부(400×)	45
사진 78. 나선형철기	45
사진 79. 사진 78의 a 단면 미세조직(50×)	46
사진 80. 사진 79의 일부(200×)	47
사진 81. 사진 80의 확대(400×)	47
사진 82. 사진 79의 일부(200×)	47
사진 83. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	47
사진 84. 사진 79의 종단면 미세조직(50×)	48
사진 85. 사진 84의 일부(200×)	48
사진 86. 사진 84의 일부(400×)	49
사진 87. 비금속 개재물 SEM상(1500×)	49

사진 88. 영광 군동 철부	49
사진 89. 사진 88의 a 날 부위 횡면 미세조직(50×)	51
사진 90. 사진 89의 우측 하단(200×)	51
사진 91. 사진 90의 일부(400×)	51
사진 92. 사진 90의 일부(200×)	51
사진 93. 비금속 개재물 SEM상(3500×)	51
사진 94. 사진 88의 b 공부 횡면 미세조직(50×)	53
사진 95. 사진 94의 좌측(200×)	53
사진 96. 사진 94의 우측(200×)	53
사진 97. 비금속 개재물 SEM상(1000×)	53
사진 98. 무순 동문 외 고구려 산성출토 철촉	54
사진 99. 철촉 촉두 미세조직(50×)	54

1. 연구 목적과 방법

1. 1 연구 목적

철의 발견과 사용은 고대부터 현재까지 인류의 문화발전을 가속화시켰으며, 미래에도 모든 산업의 생산 활동과 일상생활에 없어서는 안 될 매우 중요한 금속으로 여겨지고 있다. 현재 철의 생산과 이를 이용한 철기의 제작은 사회 운영에서 가장 중심이 된 기술력의 하나로 인식되고 있다. 이러한 철이 우리나라에 들어온 것은 기원전 3세기로 북부지방을 중심으로 처음 보급되기 시작하였다. 그리고 기원전 1세기경 한의 철기문화가 본격적으로 전해지면서 단조기술이 낙동강 하류지역을 중심으로 급격히 발전하게 된다(김원룡, 1981).

초기의 철 소재는 목탄 등에 포함된 탄소를 이용하여 철의 용융점인 1,539℃보다 훨씬 낮은 1,000℃부근의 온도에서 철광석을 환원시켜 얻었다. 이렇게 생산되는 철은 일반적으로 탄소함량이 낮아 순철에 가까우며 이를 괴련철(혹은 해면철: sponge iron)이라 불렀다(윤동석, 1984). 이러한 고체저온환원법으로 생산된 괴련철은 탄소함량이 낮아 높은 강도가 요구되는 도구나 무기로 사용될 수 없었다. 하지만 사회적, 경제적, 군사적인 이유로 많은 철기가 제작됨에 따라 제작 기술도 비약적으로 발전하게 되었다. 활발한 정복사업으로 인한 무기제작의 증가와 상업 및 농업 생산력의 증가로 인해 차츰 철기를 생산하기 위한 제철기술이 발전하게 되었고, 이는 고대국가를 형성하는 중요한 요소가 되었다. 따라서 고대철기에 관한 연구는 변천과정과 사회변동에 주안점을 두는 형태 분석뿐만 아니라, 제철·제강 및 열처리기술에 주안점을 두는 금속학적 분석 모두 중요한 연구 대상이 된다. 금속학적 분석의 중심이 되는 연구는 기술적

인 측면으로 자료의 축적을 통해 한반도 전체의 철기제작기술의 발전과정을 규명함과 아울러 유통경로도 파악할 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구에서는 위와 같은 내용을 근거로 제주 용담동에서 출토된 철기 유물의 미세조직 및 비금속 개재물을 분석하여 1~3세기에 행해지던 철제련 및 철기제작 기술을 밝히고자 한다. 그리고 제작방법에 따른 미세조직의 차이를 조사하여 열처리 방법을 밝혀냄으로서 그 당시의 제강기술도 파악할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 타 지역 철기 제작기술과 비교 분석을 통해 동시대 한반도에서 행해졌던 철기제작 기술체계를 알아보고자 한다. 이와 아울러 한반도 문화권에 속하면서 육지에서 떨어져 있던 제주도로 철기가 유입된 경로도 추정해 보고자 한다.

1. 2 연구 방법

본 연구에서는 유물에서 시편을 직접 채취하여 조사하는 직접적인 방법과 선행된 연구결과를 비교하는 간접적인 방법을 병행하였다.

직접적인 방법은 제주대학교박물관에서 의뢰한 제주 용담동 출토 유물로 호암미술관 문화재보존연구소에서 보존처리를 실시한 유물 중 철기 유물 9점을 선정하여 시편을 채취하였다. 철기의 제작기술을 이해하는데 도움이 될만한 부위를 선정하였으며, 그 내용은 표 1과 같다. 선정한 철기유물은 미세 조직을 분석할 수 있는 금속이 남아있고, 외형상 유물에 피해를 주지 않는 박락된 부위에서 채취하였다. 제주도에서 출토된 철제 유물에 대한 금속학적 조사가 처음 행해지는 것으로 유물의 미세조직을 분석하면 그 당시의 철기제작기술을 폭넓게 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 분석 대상 유물에 대한 시기 편년은 발굴조사보고서의 내용을 따랐다.

표 1. 분석 대상 철기유물

지역	유적	유물 명칭	제작 방법	매장 유구	시기 편년
제주	용담동	철제단검	단조	북쪽 석곽묘	기원후 1~3C
		철제장검(1)	단조		
		철제장검(2)	단조		
		철모(1)	단조		
		철모(2)	단조		
		철모(3)	단조		
		소형철부	단조		
		주조철부	주조		
		나선형철기	단조		

분석 대상 유물의 시편은 원형을 최대한 보존한다는 원칙 하에 소형 드릴에 지름 3cm 다이아몬드 휠을 부착하여 채취하였는데, 이때 열처리 내지는 가공이 많이 되었을 것으로 추정되는 날 부분과 이에 상응하는 등 부위, 신부 등에서 채취하였다. 부식이 심해 정확한 날 부분의 연구가 어려운 경우 날 부분에서 가장 가까운 부분을 채취하였다. 시료 채취 후 빈 공간을 에폭시계 수지에 충전제인 마이크로 바륨과 안료를 혼합하여 메우고, 채취부분의 표면과 맞는 편을 접합·복원함으로써 출토당시의 유물 외형을 최대한 손상시키지 않았다.

각각의 시편을 에폭시수지로 마운팅한 후, 사포 #200부터 #1200까지 순차적으로 연마한 다음, 3 μ m와 1 μ m의 알루미나로 기계적 미세 연마를 실시하였다. 연마된 시편은 3%의 Nital에 수 초간 침적하여 부식시킨 후, 물과 에틸알코올로 세척하고 건조하여 전처리 과정을 마쳤다.

시편의 미세조직 관찰은 반사식 광학현미경(metallurgical microscope, nikon OPTIPHOT-2)을 이용하여 조직전체를 50배로 확인하고, 특징적인 부분을 100배, 200배, 400배로 확대하여 결정립의 대소, 열처리 조직,

침탄층과 탈탄층 등을 조사하였다. 열처리로 인해 나타나는 각 조직의 정도에 따른 물성과약을 위해 미세경도시험기(akashi, MVK-HVL)로 비키스 경도를 측정하였다. 측정하중은 기본적으로 100gf로 5초간 실시하였으며, 각 부분을 5회 측정하여 평균값으로 구했다. 그리고 시편에 존재하는 비금속 개재물의 성분은 EDS(energy dispersive x-ray spectroscopy, OXFORD, ISIS) 로 분석하였다.

간접적인 방법은 출토된 철기유물에 대해 선행된 연구결과를 참조하는 것으로 영광 군동 출토 철부(이재성, 2003), 무순 동문 외 고구려 산성 출토 철촉(최종택 외, 2001)의 분석내용을 비교 검토하여 본 연구의 연구 결과에 포함시켰다.

2. 유적의 고고학적 배경

2. 1 지리적 배경

고고학적 자료를 통하여 접근되는 제주도의 문화는 이 지방의 지리적 환경과 연결지어 설명되지 않으면 안 된다. 지리적 조건의 분석단위로 제시될 수 있는 것은 제주도, 한반도 남부의 제주도, 동지나해 상의 제주도 그리고 동아시아상의 제주도가 있다.

제주도는 동서 길이 73km, 남북 길이 31km, 총 면적 1,820km²로 우리나라에서 가장 큰 섬이다. 한가운데 높이 1,950m의 한라산이 있으며, 그 남북으로 급경사를 이루고 동서쪽으로 완경사를 이룬다. 기본 지형은 신생대 3기말 4기초의 완만한 화산활동으로 형성되었기 때문에 암반의 대부분은 기공이 많은 현무암으로 되어 있고, 토양의 풍화정도가 미약하다. 선사시대부터 근대 이전까지 제주도에서의 마을 발달은 일정한 방향성을 제시하였다. 해산물자원이 풍부한 반면 토양의 풍화도가 낮아 농경에 불리하므로, 식량의 상당한 부분은 해산물에 의존했었다. 따라서 자연히 마을은 해안지역에 집중되고, 지금까지 확인된 신석기시대 이후 대부분의 유적의 분포양상도 그에 부합된다.

한반도 남부에서의 제주도라는 관점은 다시 말해 제주도를 한반도 문화권 속의 하위 문화영역이라는 관점으로 볼 수 있는 것은 무엇보다도 다른 지역보다 가깝기 때문이다. 하지만 제주도는 한반도 문화권에 속한 대부분의 섬 지역 보다 한반도에서 바다를 두고 멀리 떨어져 있다. 그래서 제주도는 한반도 남부지방으로부터의 문화의 영향을 받으면서 일정한 독자성을 유지하는 것이 확인된다.

제주도를 동지나해의 섬이라는 관점에서 보면, 제주도가 한반도 남부, 중국 화남지방 그리고 일본 구주지방에 둘러싸인 점이 주목된다. 그러므로 앞서 보듯이 한반도 문화권에 속하면서 동시에 지리적으로 그 가장자리에 있으므로 해서 한반도 중심문화의 영향이 덜 한 것과 관련하여 상대적으로 한반도 이외의 다른 지역의 문화가 미약하나마 제주도에 유입될 가능성이 얼마든지 있다.

동아시아상의 제주도라는 관점에서 보면, 제주도를 중심으로 반경 1,000km의 범위에 바다를 끼고, 중국의 산둥과 요동지방, 소련의 연해주와 일본열도 북동부 그리고 대만과 류우큐우 열도 동부가 있게 된다. 이 지역과의 관계 긴밀도는 거리상 앞서 한반도 및 동지나해의 다른 지역과의 관계보다는 훨씬 덜한 것으로 기대된다. 그렇지만 육상로와는 달리 아무런 지형상 장애가 없고, 해류, 일기가 적당하면 오히려 교통이 편한 해상통로가 있음이 주목된다.

2. 2 유적 개관

유적은 제주시 용담동 741번지의 밭에 위치한다. 이 일대는 원래 그린벨트 지역으로, 1979년 제주 국제공항의 부지가 인접 신사수동까지 확대되면서, 제주시 당국이 마을 주민을 이주토록 하여 주택신축을 허가한 곳이다. 땅 주인이 블록 담장을 만들 자리를 정리하다가 독무덤을 발견하여, 1984년 12월 발굴조사가 이루어졌는데 제주도에서 긴급 구제발굴로는 처음이었다. 확인된 전체 묘역의 크기는 동서 15.6m, 남북 10.2m로 총 면적이 100m²이다. 양쪽 묘역은 다 크고 작은 활석을 몇 겹깔아 조성되었고, 크게 남쪽 묘역과 북쪽 묘역으로 구분된다.

남쪽묘역은 동서 길이 8m, 남북 5.6m, 대략 40m²의 넓이를 가지고 있

다. 무덤은 3기가 확인되었는데, 적석묘역으로 서로 연결된 것으로 보아 피장자간의 유대관계가 강한 것으로 짐작된다. 출토유물은 무문토기 편과 마제 대팻날 석기 1점이 있다. 북쪽묘역은 남쪽 묘역과 마찬가지로 활석들을 깔아놓아 묘역을 확보하였는데, 대체로 묘역 전체가 동서로 긴 장방형을 하고 있다. 확인된 묘역은 동서 길이 15.6m 남북 폭 3.5~5m로, 총 면적은 대략 60m²가 된다. 무덤은 장방형의 공간을 돌로 둘러싸서 만든 일종의 석곽묘 1기와 적갈색토기 항아리를 이용한 독무덤 6기로 모두 합하여 7기가 있다. 출토된 유물은 토기편과 철제유물, 유리구슬, 대롱옥 등 50여점 그리고 2점의 마제석기편이 있다.

출토된 철기는 비슷한 수준의 일본 및 남한지방 유적 등을 비교해 볼 때 기원 1~3세기의 원삼국시대로 기본적으로 중국 후한시대에 속하는 것으로 이해된다. 이 사실은 유적에서 출토된 유리의 성분분석 자료가 후한대의 것과 일치한다는 사실에서도 뒷받침 된다. 이처럼 철기와 유리 제품이 중국 후한대 및 남한지방 출토품과 통하는 사실은, 삼국지 위지동이전 한조에 마한 서해 한가운데 큰 섬에 주호(당시 제주도의 별칭)가 있어 배를 타고 중한과 교역을 한다는 기록을 고고학적으로 입증해 주는 것으로 이해된다.

용담동 유적은 기원 전후의 제주도 역사 여명기에 있었던 문화변천을 밝히는데 있어서 매우 중요하다. 탐라 상고시대에 공렬토기를 사용하는 무문토기 문화집단으로부터 중국 한대 철기를 사용하는 토기문화의 집단으로의 이행이 이루어졌다는 것을 밝혀주었고, 변동의 원인과 과정을 밝히는데 중요한 자료를 제공해 주고 있다. 그뿐만 아니라 제주도에서의 초기 금속문화의 실상을 밝혀주는 풍부한 철제유물이 출토됨으로써, 제주도는 물론 우리나라 전체의 철기문화의 전개과정을 밝히는데 큰 보탬이 되고 있다.

3. 연구의 이론적 배경

초기 철기시대부터 삼국시대까지 무기나 생활도구로 사용된 철기유물의 미세조직을 살펴보면 고체저온환원법으로 생산된 괴련철을 원료로 사용하여 제작한 것이 대부분을 차지하고 있다. 지금까지 발표된 고대 철기유물에 대한 분석 자료를 살펴보면 단조로 제작된 철기유물은 대부분 탄소함량이 0.1~1.2%인 탄소강을 소재로 사용하여 제작된 것을 알 수 있다. 탄소강은 모든 철 계통의 합금 중에서 가장 기본이 되는 중요한 강으로 현재도 많은 용도로 사용되고 있다. 탄소강은 탄소 함량, 열처리 방법, 냉각속도에 따라 다양한 형태의 미세조직으로 변화한다. 이러한 미세조직은 현재 생산되고 있는 철제품뿐만 아니라 고대 철기유물에서도 쉽게 찾아볼 수 있다. 따라서 이러한 미세조직을 조사하면 고대 철기제작기술을 추정할 수 있는 좋은 자료가 된다. 현재 금속을 전공하는 보존과학자와 금속공학자가 중심이 되어 고대의 재련기술, 제강기술, 열처리기술 등을 추정하여 고대 철기제작 방법의 체계를 세우는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 아울러 제작방법에 따른 부식유형과 보존방법에 대한 연구도 이루어지고 있다.

3.1 Fe와 C의 합금

일반적으로 합금이라 함은 어떠한 소요성질을 얻기 위해서 한 금속에 다른 금속 또는 비금속을 첨가하여 얻는 금속적 성질을 갖는 물질을 말한다. 철에 탄소가 침입하는 것도 하나의 합금이라 할 수 있으며, 침입형 고용체 형태로 이루어진다. 침입형 고용체는 용질원자의 원자반지름이

용매원자의 원자반지름 보다 훨씬 적을 때 용질원자가 용매금속의 결정 격자 공극에 침입하여 형성한다.(大韓金屬學會 編, 1991.)

순철에 탄소가 합금될 때 철의 온도에 따라 결정구조가 다르므로 공간에 들어갈 탄소의 양도 다르다. 상온에서의 철 구조인 α 철은 체심입방격자로 0.005%의 탄소만을 고용하고 거의 순철 상태로 존재한다. 온도가 점점 증가함에 따라 고용도가 증가하여 723℃에서 최대 0.025%의 탄소를 고용한다. 이와 같이 α 철은 매우 적은 양의 탄소를 고용하며, 이름을 페라이트(ferrite)라고 부른다. 그러나 면심입방격자인 γ 철에는 탄소원자가 들어갈 수 있는 공간이 많이 있다. 그러므로 1150℃에서는 최대 2.0%의 탄소까지 고용할 수 있다. 이 고용체의 이름은 오스테나이트(austenite)라고 부른다.

순철에 탄소가 합금되어 탄생한 탄소강은 탄소량에 따라 3종류로 분류되는데 0.8%이하를 아공석강, 0.8%를 공석강, 0.8~2.0%를 과공석강이라 한다.

3. 2 탄소강의 상태변화

3. 2. 1. 탄소량 0.5%의 아공석강

일반적으로 실시하는 담금질과 같은 열처리 온도는 약 900℃정도로 이 때의 미세조직은 γ 고용체인 오스테나이트 상태이다. 이 온도에서 열처리한 후 냉각시키면 먼저 그림 2와 같이 결정입계에서 α 고용체가 먼저 생성된다. 냉각이 계속 진행되어 723℃에서 완전히 변태(A_1 점 변태)가 일어나면 그림 1과 같은 α 고용체와 펄라이트(pearlite)의 혼합조직이 탄생하게 된다. 이 때 생성되는 펄라이트의 양은 탄소함량에 따라 달라진다.

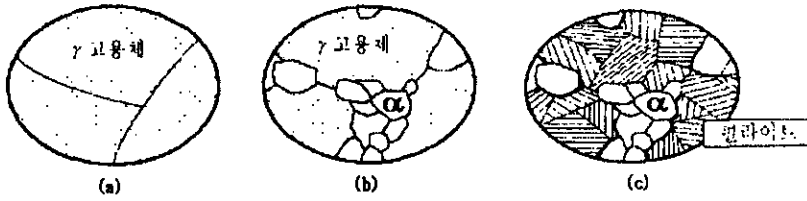


그림 1 0.5% C인 탄소강의 냉각에 따른 조직변화(이승평, 2003.)

3. 2. 2. 탄소량 0.8%의 공석강

탄소함량이 0.8%인 강을 공석강이라 한다. 공석강은 아공석강과 달리 900℃ 이상 가열한 후 냉각시키면 723℃에서 α 고용체와 시멘타이트가 동시에 석출한다. 이 때 생성되는 조직을 펄라이트라고 한다. 펄라이트 생성과정은 그림 3과 같다. 먼저 결정립계에서 Fe₃C(cementite)가 먼저 생성된 후 α 고용체가 나타난다. 그림 2의 (b)와 같이 탄소원자가 이동하는 것은 723℃ 부근에서 결정구조(B.C.C → F.C.C)의 변화로 탄소가 존재할 공간이 줄어들기 때문에 한쪽으로 모이는 것이다. 반면 탄소가 빠져나간 부분에서는 α 고용체가 생성된다. 냉각이 진행되는 동안 이러한 과정이 반복적으로 일어나면 총상구조인 펄라이트가 생성된다.

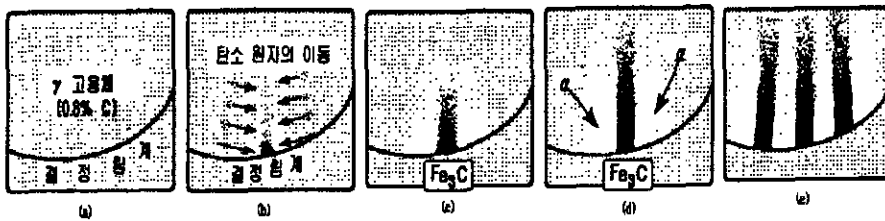


그림 2 펄라이트 생성과정

3. 2. 2. 탄소량 1.0%의 과공석강

탄소량이 0.8% 이상인 강을 과공석강이라 한다. 과공석강을 γ 고용체인

오스테나이트 상태로 가열(723~1150℃)한 후 냉각시키면 많은 양의 탄소가 존재하는 부분에서 과잉의 탄소가 γ 고용체에서 시멘타이트(Fe_3C)의 형태로 석출한다. 반면 탄소량이 감소된 γ 고용체에서는 α 고용체와 시멘타이트가 동시에 석출하여 펄라이트가 생성된다. 다시 말해 시멘타이트(Fe_3C)가 결정립계에 가늘게 석출되고, 나머지 부분은 펄라이트로 채워지는 조직이 된다.

위에서 살펴 본 아공석강, 공석강, 과공석강의 미세조직을 정리하면 그림 3과 같다. 그림 3에서와 같이 아공석강일 때는 페라이트와 펄라이트의 혼합조직이 나타나며, 공석강은 100% 펄라이트 조직이 나타나는 데 이 조직은 페라이트와 시멘타이트의 층상구조이다. 과공석강에서는 시멘타이트와 펄라이트의 혼합조직이 생성되는데, 펄라이트의 양은 탄소함량에 따라 달라진다.

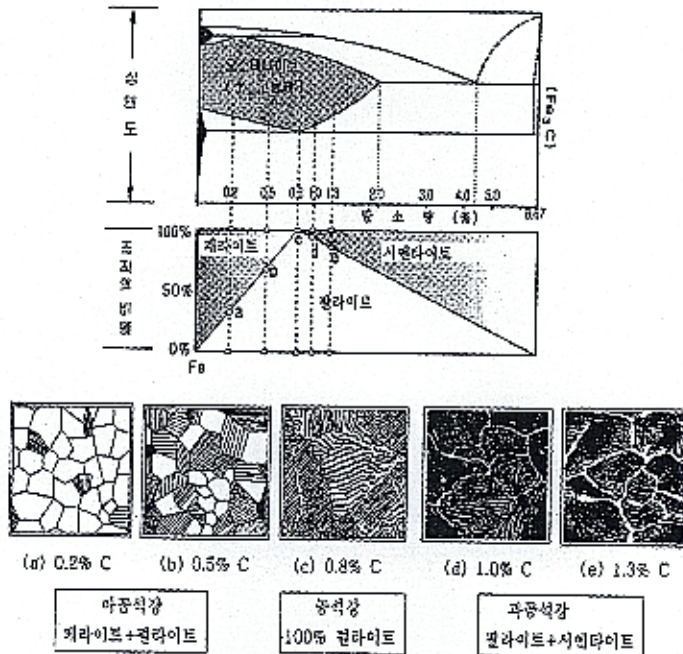


그림 3. 탄소량에 따른 조직의 변화

3. 3 탄소강의 미세조직

1) 페라이트(ferrite)

순철에 대단히 적은 양의 탄소(723℃에서는 0.025%, 상온에서는 0.008%)가 고용된 고용체로 α 철 또는 지철이라고 한다. 금속현미경으로 보면 다각형의 결정립을 나타내며 백색으로 보인다. 상온에서 723℃까지는 강자성체로서 극히 연하며, 경도는 90~100HB정도이다.

2) 시멘타이트(cementite)

일명 탄화철이라고 하며 백색침상의 금속간화합물을 시멘타이트(Fe_3C)라 한다. 매우 단단하고 취성이 있으며 상온에서 강자성체이지만 230℃에서 자기정도가 약해진다(박준규, 1991). 경도는 820HB정도이다.

3) 오스테나이트(austenite)

γ 철에 탄소가 최대 2.0% 고용된 γ 고용체를 말한다. 인성이 크고 비자성체이며 경도는 155HB정도이다. 탄소강을 723℃이상으로 가열할 때 나타나는 조직으로 온도의 상승과 가열시간이 길면 길수록 결정입자가 조대해진다. 강의 담금질 후 저탄소강에서는 잔류 오스테나이트가 거의 없지만 고탄소강에서 잔류 오스테나이트가 존재하면 기계적 성질에 영향을 미친다. 오스테나이트는 탄소함량에 따라, 냉각속도에 따라 여러 가지 조직으로 변태한다.

4) 펄라이트(pearlite)

펄라이트 조직은 탄소 0.8%, 723℃지점에서 페라이트와 시멘타이트가 총상을 이루며 석출되는 혼합 총상조직으로, 경도는 220HB정도이다. 금

속현미경으로 관찰하면 페라이트는 회계, 시멘타이트는 검게 보인다. 성질은 페라이트와 시멘타이트의 중간정도로 볼 수 있다. 펄라이트의 냉각 변태는 탄소함량에 따라 다르게 나타나는데, 탄소함량이 0.8%인 경우 723℃에서 공석반응이 일어나 펄라이트로만 이루어진 공석강으로 변태한다. 탄소량이 0.8%이하인 아공석강의 경우 페라이트와 펄라이트가 공존하는 변태가 일어나고, 0.8%이상인 과공석강인 경우 시멘타이트와 펄라이트가 공존하는 변태가 일어난다.

5) 마르텐사이트(martensite)

강을 723℃이상의 오스테나이트 상태에서 급냉시킬 경우 펄라이트로 변태하지 못한 탄소가 과포화되어 체심입방 고용체인 마르텐사이트를 얻게 된다. 조직은 침상으로 부식저항이 크고 인장강도 및 경도가 대단히 크며 강자성체이다. 경도를 높이려는 목적으로 담금질하여 마르텐사이트를 생성시키는데, 포함된 탄소량과 경도는 어느 수준까지 비례하고, 탄소량에 따라 온도가 정해진다. 마르텐사이트는 미세한 가지상(late)과 판상(plate)의 형태로 나타난다. 미세한 가지상이라는 말은 저·중탄소강의 마르텐사이트 조직의 기본단위 모양을 설명하는 것이며, 판상이라는 말은 고 탄소강의 마르텐사이트 조직의 기본단위 모양을 설명하는 것이다 (韓俊熙 외 共譯, 2001.).

4. 미세조직 분석 및 고찰

4. 1. 제주 용담동 출토유물

4. 1. 1. 철제단검

석곽묘에서 일괄출토된 것으로 길이만 다를 뿐 전체적인 형태와 횡단면의 모습은 장검과 같다. 스페부분의 폭은 일정하나 날 부분은 끝으로 갈수록 폭이 조금씩 좁아지며, 단면은 마름모 형태를 나타내고 있다. 전체길이 44cm, 스페길이 12.5cm, 신부 폭 4cm이다(제주대학교박물관, 1989). 시편은 금속이 남아 있는 날 부위에서 채취하였다.

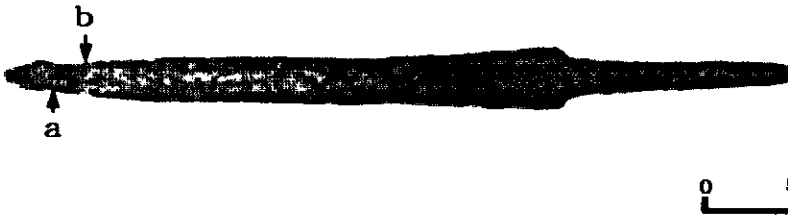


사진 1. 철제단검

1) 사진 1의 a 날 부위 횡면

사진 2는 날 부위에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 상단이 날 선단을 향하고 우하측이 내부를 향하고 있다. 시편의 전체적인 부위에서 열처리로 인한 침탄이 이루어져 있으며, 탄소함량이 높은 담금질 조직이 보인다. 관찰되는 미세조직은 마르텐사이트, 펄라이트, 페라이트로 담금질 조직인 마르텐사이트는 723℃ 이상의 온도로 가열하여 반복단타 한

후 급속냉각 하였을 때 나타나는 조직이다. 담금질은 강의 강도를 부여하기 위해 실시하는 열처리로 급냉하는 과정에서 페라이트 기지 내에 마르텐사이트 조직이 생성된다. 사진 3은 담금질 조직인 마르텐사이트 조직을 가장 잘 보여주는 부분으로, 사진 4는 확대사진이다. 이 부분의 경도값은 691Hv이다. 사진 5를 보면 펄라이트 바탕에 침상의 페라이트 조직이 존재하고 있으며, 펄라이트 경도값은 325Hv이고, 페라이트 경도값은 162Hv이다. 사진 6은 사진 2의 상부에 있는 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 두 가지의 서로 다른 영역이 보인다. 1지점의 분석 결과는 그림 4에서와 같이 주로 철 산화물과 함께 Si, Mg가 발견되며, 2지점에서는 그림 5에서와 같이 철 산화물과 더불어 Si, Ca, P, Al, K 등의 원소가 발견된다. 결과를 통해 사진 6의 1지점은 페이얼라이트(Fe_3SiO_4) 입자이며, 2지점은 유리질 슬래그임을 알 수 있다. 이러한 성분은 철광석이 1,100°C 부근에서 급속철로 유리하는 과정에서 생성된 페이얼라이트(Fe_3SiO_4)가 유리질 슬래그 내에 혼재되어 나타나는 것이다. 페이얼라이트는 우스타이트와 함께 철광석을 제련할 때 생성되는 것으로 고체저온환원법의 지표가 되는 광물질이다(高塚 秀治, 2002).



사진 2. 사진 1의 a 달 부위 횡면 미세조직(50×)

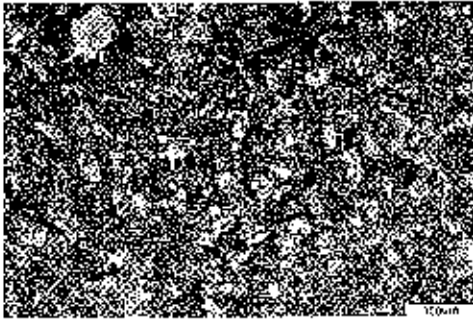


사진 3. 사진 2의 상단 일부(200×) 사진 4. 사진 3의 일부(400×)

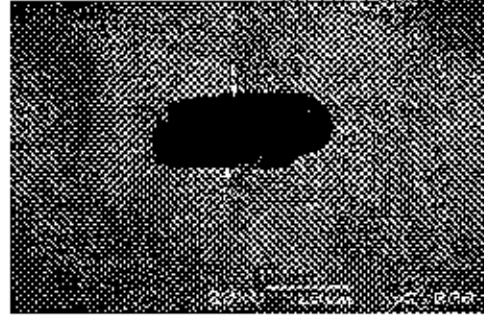


사진 5. 사진 2의 일부(200×) 사진 6. 비금속 계체물 SEM상(2000×)

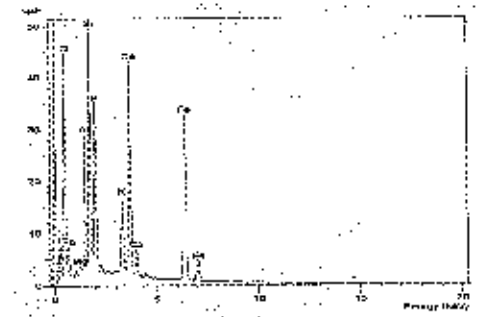
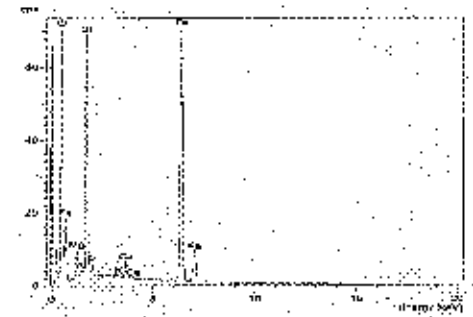


그림 4. 사진 6의 1지점 EDS분석 그림 5. 사진 6의 2지점 EDS분석

2) 사진 1의 b 날 부위 횡면

사진 7은 날 부위에서 취한 시편의 전체 조직사진으로 우상측이 날 선단을 향하고 좌하측이 내부를 향하고 있다. 날 부위에는 마르텐사이트 조직이 많이 분포되어 있으며, 침상 페라이트도 관찰된다. 내측으로 갈수록 결정립이 조대해지고 탄소함량도 줄어드는 것으로 보아, 날 부위에 열처리로 인한 침탄이 이루어진 뒤 담금질이 행해진 것을 알 수 있다. 사진 8은 펄라이트와 마르텐사이트 혼합조직을 보여주는 부분으로, 사진 9는 확대사진이다. 이러한 조직은 공석온도(723℃)로 가열한 후 서냉하였을 때 생기는 것으로 강의 인성을 부여하기 위해 실시한 것으로 보여진다. 이 부분에서 마르텐사이트와 펄라이트의 경도값은 각각 518Hv, 315Hv이다. 사진 10은 탄소량에 따른 조직의 변화를 보여주는 것으로 펄라이트와 페라이트가 공존하고 있다. 펄라이트 경도값은 251Hv이고, 페라이트 경도값은 132Hv이다. 이와 같이 내부와 날 부위에서 펄라이트 경도값이 차이를 보이는 것은 탄소함량, 결정립의 크기, 냉각속도의 차이 때문이다. 사진 12는 사진 8에 있는 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 두 가지의 서로 다른 영역이 보인다. 1지점의 등근 입자는 분석 결과 그림 6에서와 같이 주로 철 산화물인 우스타이트(FeO) 입자이며, 2지점에서는 그림 7에서와 같이 Si, Ca, Al, P 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다. 사진 8에서 볼 수 있는 개재물은 페라이트가 혼합된 우스타이트 조직으로, 단점은 고체저온환원법으로 제련한 괴련철을 철소재로 사용한 것을 알 수 있다. 우스타이트는 주로 철이 산화할 때 만들어지며 철재의 종류를 판정할 경우 지표가 되는 화합물의 하나이다. 우스타이트가 많을 때에는 단야재인 경우가 많고, 고대 철에서는 저온환원법으로 제련할 때 생기는 조직으로 알려져 있다.



사진 7. 사진 1의 b 날 부위 횡면 미세조직(50×)



사진 8. 사진 7의 우측 (200×)



사진 9. 사진 8의 확대(400×)



사진 10. 사진 7의 일부(200×)

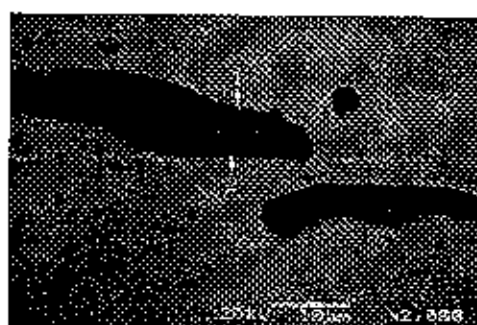


사진 11. 비금속 기재물 SEM상(2000×)

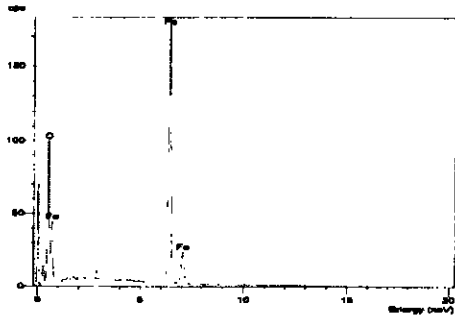


그림 6. 사진 11의 1지점 EDS분석

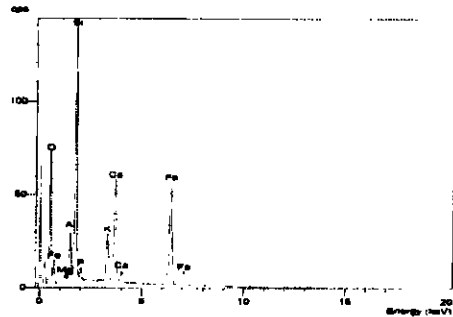


그림 7. 사진 11의 2지점 EDS분석

4. 1. 2. 철제장검(1)

석곽묘에서 일괄출토된 것으로 거의 완형으로 단면형태는 볼록렌즈 모양이고, 습베는 장방형을 이루고 있다. 검신에는 칼집흔적으로 보이는 목질이 약간 부착되어 있으며, X-ray 조사결과 습베에 자루를 묶기 위한 구멍이 나 있다. 전체길이 85cm, 습베길이 21.5cm, 검신 폭 3.4cm이다(제주대학교박물관, 1989.). 시편은 금속이 남아있는 습베와 검신 그리고 날 안쪽부위에서 채취하였다.



사진 12. 철제장검(1)

1) 사진 12의 a 습베 부위 단면

습베부분에서 채취한 시편으로 조직상으로 관찰한 결과 탄소량은 0.1%미만으로 보이는 페라이트 조직(사진 14, 15)이다. 미세조직이 사진 13과 같이 매우 불균일하고 비금속 개재물이 좌우로 길게 늘어서 열을 이루고 있다. 장검의 손잡이 부분으로 습베부분은 날 부분과 달리 강도

를 크게 요하지 않는 곳으로 특정한 열처리가 필요하지 않는 부분이다. 따라서 공석온도이하에서 반복단타한 후 서서히 냉각된 조직으로 보이며, 페라이트의 경도값은 124Hv로 낮은 편이다. 사진 16은 비금속 개재물을 400배로 촬영한 것이고, 사진 17은 전자현미경으로 확대한 사진이다. 사진 18과 같이 개재물 속의 작은 알갱이는 우스타이트 조직으로 제련과정에서 유리질 슬래그에 산화철이 혼합된 것이다. 1지점의 등근 입자는 분석 결과 그림 8에서와 같이 주로 철 산화물인 우스타이트 입자이며, 2지점에서는 그림 9에서와 같이 Si, Ca, P, K 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다.



사진 13. 사진 12의 a 습배 부위 미세조직(50×)



사진 14. 사진 13의 일부(100×)



사진 15. 사진 13의 일부(200×)



사진 16. 사진 13의 비금속 개재물(400×)

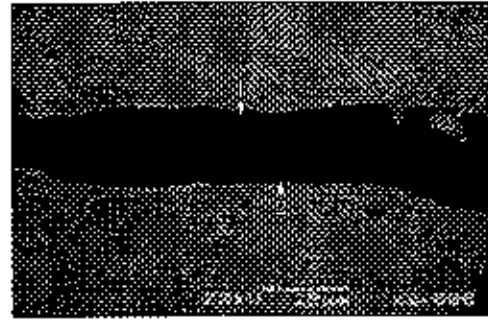


사진 17. 비금속 개재물 SEM상(2000×)

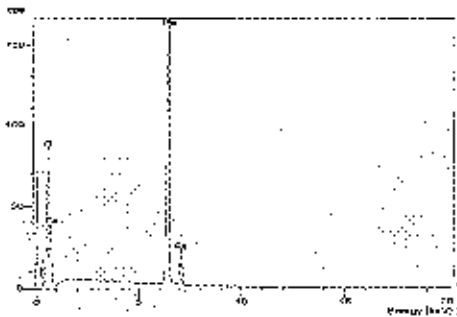


그림 8. 사진 17의 1지점 EDS분석

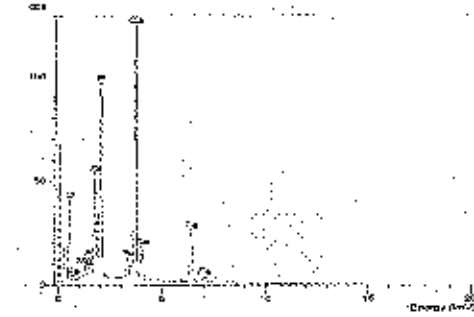


그림 9. 사진 17의 2지점 EDS분석

2) 사진 12 b 부위 단면

절단된 부분에서 채취한 시편으로 검의 중심 부분이다. 사진 18에서 유물의 미세조직을 살펴보면 결정의 크기가 매우 불균일하고 비금속 개재물이 불규칙하게 분포되어 있다. 이 조직도 사진 13의 승배부분과 같이 탄소량이 0.1%미만인 순철에 가까운 저탄소강으로 전체적으로 페라이트 조직을 나타내고 있으며, 경도값은 123HV이다. 비금속 개재물이 많이 분포되어 있는 것으로 보아 열처리가 거의 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 또한, 사진 19, 20에서와 같이 결정립이 조대한 것으로 보아 가열한 후 서냉한 것으로 보인다. 사진 21는 사진 18에 있는 비금속 개재물 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 세 가지의 서로 다른 영역이

보인다. 그림 10, 11, 12은 사진 21의 1, 2와 3으로 표시된 부분의 EDS 분석 결과로 개재물의 구성 성분에 대한 정보를 제공한다. 1지점의 등극 입자는 분석 결과 그림 10서와 같이 주로 철 산화물인 우스타이트 입자이며, 2지점에서는 그림 11에서와 같이 Si, Ca, Mg, Al 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다. 3지점은 그림 12과 같이 페라이트와 잔존하고 있는 Cl이 검출되었다. Cl은 철계장점이 부식되는 과정에서 외부로부터 유입되었을 가능성이 있다. 비금속 개재물은 페라이트가 혼합된 우스타이트 조직으로 이 장점은 퍼런칠을 철소재로 하였음을 알 수 있다.

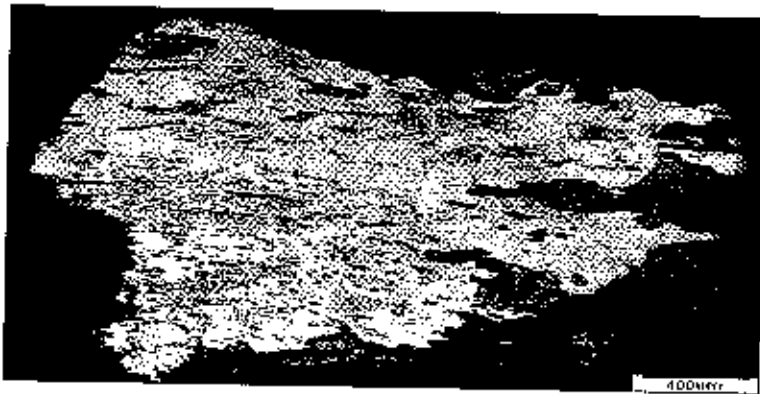


사진 18. 사진 12의 b 등 부위 미세조직(50×)



사진 19. 사진 18의 일부(100×)

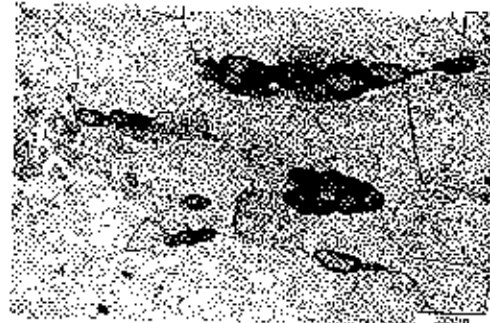


사진 20. 사진 18의 일부(200×)

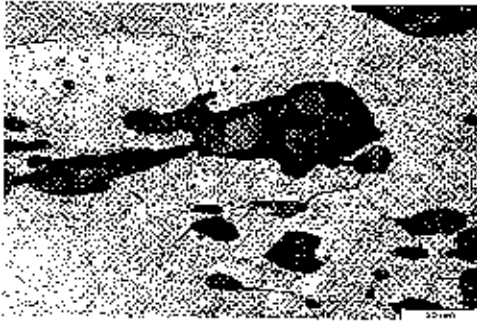


사진 21. 사진 18의 비금속 개체물(400×)

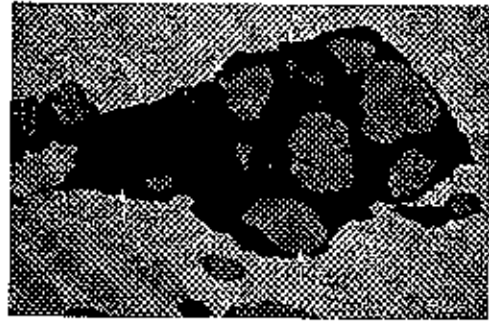


사진 22. 비금속 개체물 SEM상(2000×)

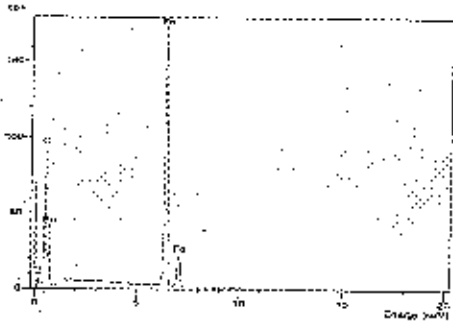


그림 10. 사진 22의 1지점 EDS분석

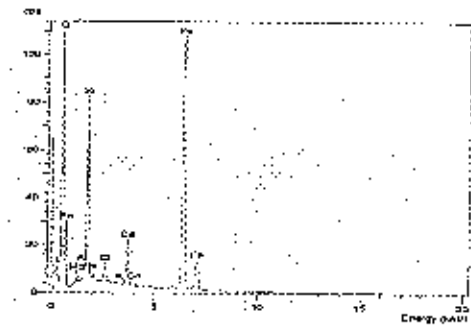


그림 11. 사진 22의 2지점 EDS분석

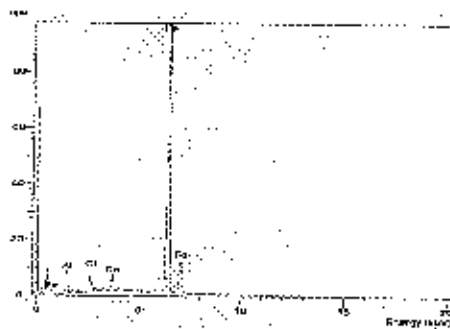


그림 12. 사진 22의 3지점 EDS분석

3) 사진 12의 c 날 부위 단면

절단된 부분에서 채취한 시편으로 날 끝부분이 아니라 내부로 약간 들어간 부분이다. 사진 23에서와 같이 미세조직 내의 결정립의 크기가 미세하고 비교적 균일하며, 중앙부분에 비해 좌, 우측부분의 탄소량이 많음을 알 수 있다. 이것은 반복단타 과정에서 부분적으로 침탄이 이루어진 것으로 보이며, 담금질 처리로 인해 결정립이 미세화된 것으로 보인다. 사진 24는 페라이트와 펄라이트가 공존하는 부분을 촬영한 것으로, 사진 25는 확대사진이다. 사진 26은 침탄이 일어난 부분과 일어나지 않은 부분의 비교사진이다. 날 부분의 미세조직으로 보아 탄소량이 적은 저탄소강으로 페라이트 조직을 나타내고 있으며, 결정립계를 따라 부분적으로 펄라이트가 생성되어 있다. 경도값은 페라이트 부분 186Hv, 펄라이트 부분은 332Hv로, 탄소함량에 비해 높은 경도값을 나타내는 이유는 결정립이 미세화 되면서 경도가 상승한 것으로 보인다. 사진 27은 사진 23에 있는 비금속 개체물 부위를 확대한 전자현미경 사진이다. 그림 13은 사진 27의 1로 표시된 부분의 EDS 분석 결과로, 1지점은 Si, Ca, Al, Mg 등이 함유된 유리질 슬레그임을 알 수 있다.

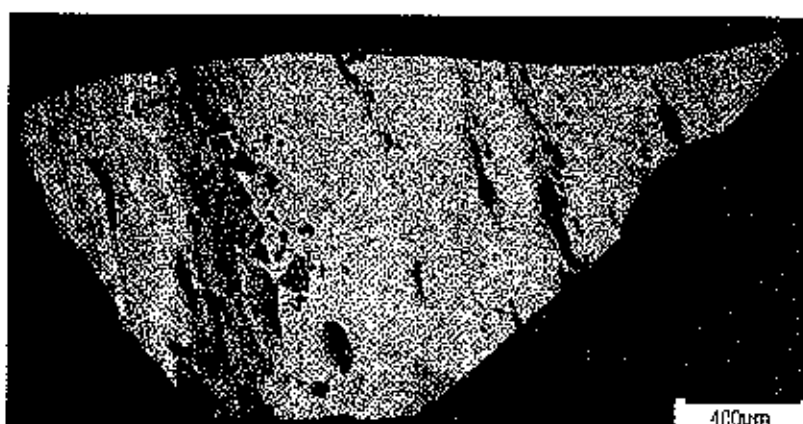


사진 23. 사진 12의 c 날 안쪽 횡면 미세조직(50×)

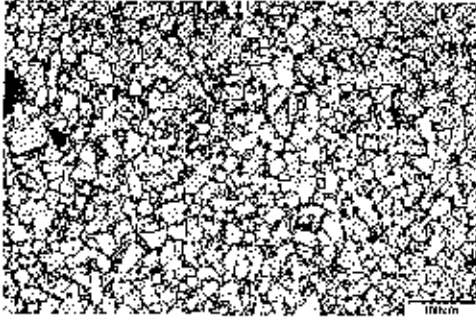


사진 24. 사진 23의 일부(200×)

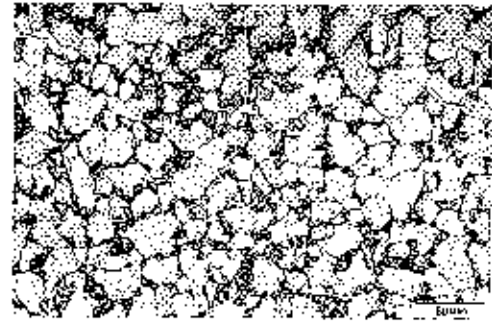


사진 25. 사진 24의 일부(400×)

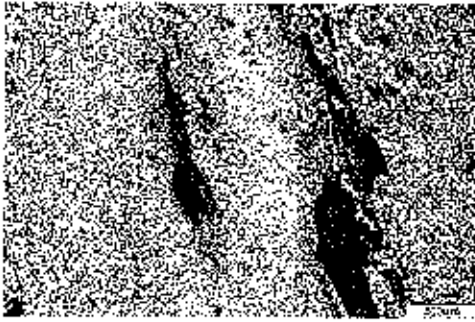


사진 26. 사진 23의 일부(100×)

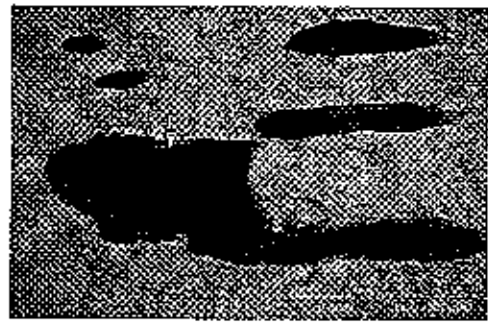


사진 27. 비금속 개재물 SEM상(1500×)

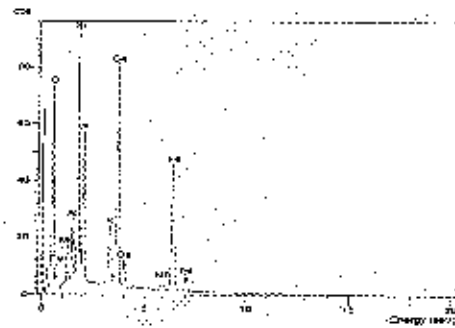


그림 13. 사진 27의 1지점 EDS분석

4. 1. 3. 철제장검(2)

석곽묘에서 일괄출토된 것으로 거의 완형으로 출토되었다. 검신의 단면형태는 볼록렌즈 모양이고, 습베는 장방형을 이루고 있다. 전체길이 85cm, 습베길이 16.5cm, 검신 폭 3.2cm이다(제주대학교박물관, 1989.). 시편은 금속이 남아있는 습베와 날 안쪽 그리고 날 부위에서 채취하였다.



사진 28. 철제장검(2)

1) 사진 28의 a 날 부위 횡면

날 부위에서 취한 시편으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 사진 29에서는 시편의 전체조직을 촬영한 것으로 날 쪽으로 갈수록 탄소량이 증가하며, 결정립의 크기도 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 미세조직을 살펴보면, 날 부위는 침탄으로 인한 탄소량의 증가로 사진 30, 31과 같은 펄라이트 조직을 나타내고 있는데, 이는 공석조직으로 탄소량이 0.77%일 때 주로 나타난다. 내부로 갈수록 사진 32, 33과 같이 순철조직인 페라이트와 적은 양의 펄라이트 조직이 공존하고 있다. 이것으로 보아 이 유물은 순철에 가까운 재료를 사용하여 제작한 후, 날 부분에 강도를 부여하기 위한 열처리 과정에서 침탄이 이루어진 것으로 보인다. 사진 34는 침탄의 정도를 보여주는 사진이다. 경도측정 결과 페라이트는 135Hv이고, 탄소량이 적은 부분의 펄라이트는 230Hv, 침탄부분의 펄라이트는 332Hv이다. 같은 펄라이트 조직이지만 경도값이 다르게 나타나는 이유로 침탄에 따른 탄소량의 차이, 열처리로 인한 조직의

강도 차이, 결정립의 크기 등을 볼 수 있다. 사진 35은 사진 2의 상부에 있는 비금속 개체를 부위를 확대한 전자현미경 사진으로 두 가지의 서로 다른 영역이 보인다. 1지점의 분석 결과는 그림 14에서와 같이 주로 철 산화물이 발견되며, 2지점에서는 그림 15에서와 같이 Si, Ca, Mg, K 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다. 따라서 비금속 개체물은 우스타이트 조직으로, 이 장점은 저온환원법으로 생산된 퍼런철을 철소제로 하였음을 알 수 있다.



사진 29. 사진 28의 a 날 횡면미세조직(50×)



사진 30. 사진 29의 좌측(200×)



사진 31. 사진 30의 일부(400×)

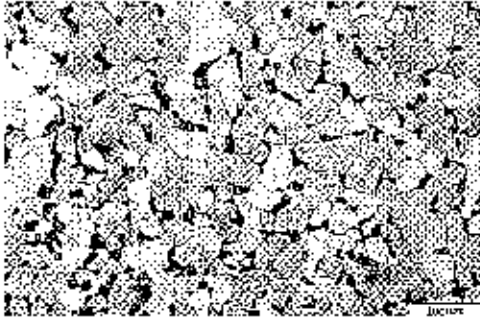


사진 32. 사진 29의 우측(200×)



사진 33. 사진 32의 확대(400×)

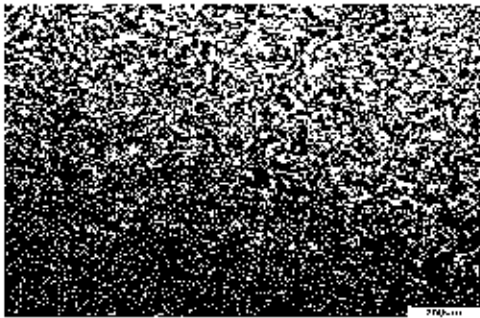


사진 34. 사진 29의 중간(100×)



사진 35. 비금속 개체물 SEM상(2000×)

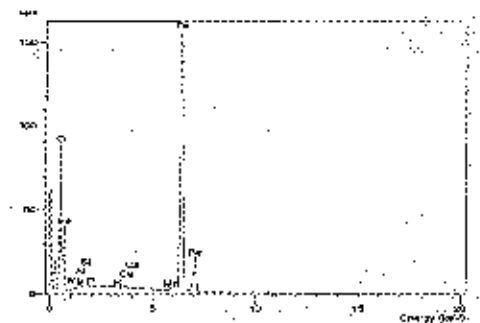


그림 14. 사진 35의 1지점 EDS분석

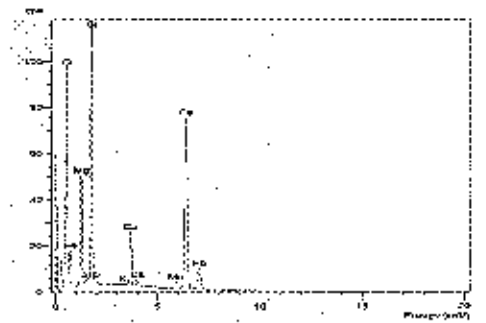


그림 15. 사진 35의 2지점 EDS분석

2) 사진 28의 b 승배 부위 횡면

사진 36은 시편의 전체적인 미세조직을 나타내며, 페라이트 조직이 주를 이루고 있다. 상하로 결정립의 차이가 있고, 좌우로 길게 늘어선 개재물이 존재한다. 사진 37은 개재물과 조직이 반복적으로 나타나는 부분을 촬영한 것으로 찍고 두드리는 작업과정에서 형성된 것으로 보인다. 사진 38은 시편 하부에 나타난 조직으로 약간의 펄라이트 조직이 공존하고 있는 것을 볼 수 있다. 사진 39는 상부의 조대한 페라이트를 촬영한 것이다. 이 조직으로 보아 거의 순철에 가까운 철 소재를 사용하였다는 것을 알 수 있다. 경도값이 페라이트 156Hv, 펄라이트 268Hv로 낮게 나오는 것으로 보아 열처리에 의한 가공이 없었던 것으로 보인다. 사진 40은 조직 내에 존재하는 비금속 개재물을 전자현미경으로 촬영한 것으로 서로 다른 영역을 1과 2지점으로 표시하였다. 그림 16은 1지점에 대한 EDS 분석결과로 주로 철산화물이 발견되지만, 2지점에 대한 EDS 분석결과인 그림 17에서는 산화물 상태의 Si, Ca, Mg, P 등이 함유된 것을 알 수 있다. 따라서 1지점의 산화철 입자가 2지점의 유리질 슬래그에 혼입되어 나타나는 우스타이트 조직이다.



사진 36. 사진 28의 b 승배 부위 단면(50×)



사진 37. 사진 36의 일부(100×)

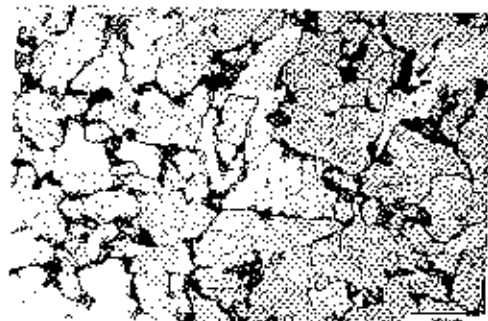


사진 38. 사진 36의 하단(400×)



사진 39. 사진 36의 상단(400×)

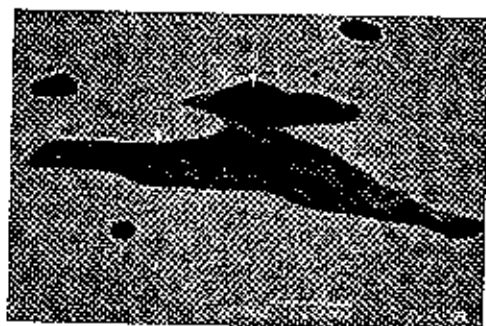


사진 40. 비금속 개계물 SEM상(2000×)

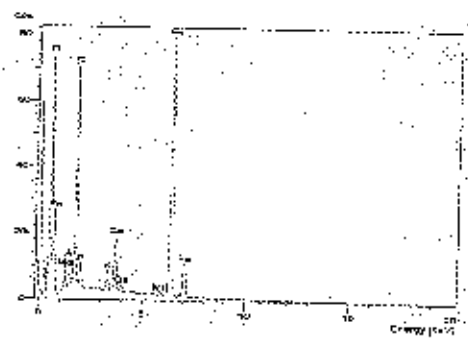


그림 16. 사진 40의 1지점 EDS분석

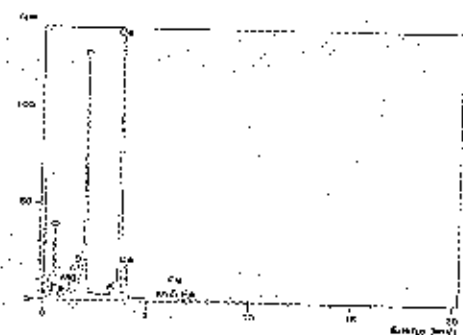


그림 17. 사진 40의 2지점 EDS분석

3) 사진 28의 c 날 안쪽 부위 단면

날 안쪽부위에서 채취한 시편으로 조직상으로 보면 전체적으로 사진 41과 같이 탄소량이 적은 페라이트 조직이다. 사진 42, 43에서는 페라이트가 오스테나이트 입계를 따라 침상으로 석출되는 비드만스태텐 조직을 나타내고 있다. 이는 1,100℃이상의 고온에서 단조를 완료한 후 서냉할 경우 결정립이 성장하여 나타나는 과열조직이다. 사진 44는 결정립의 차이를 보여주는 것으로 탄소량이 많은 부분은 결정립이 미세하고, 탄소량이 적은 부분은 결정립이 조대하다. 사진 45는 펄라이트가 생성된 부분을 보여주고 있다. 정도는 각각 138Hv, 192Hv로 측정되었는데, 이는 과열 서냉된 미세조직에서 흔히 볼 수 있는 낮은 정도값이다.



사진 41. 사진 28의 c 날 안쪽 부위 단면(50×)



사진 42. 사진 41의 일부(200×)



사진 43. 사진 41의 일부(400×)

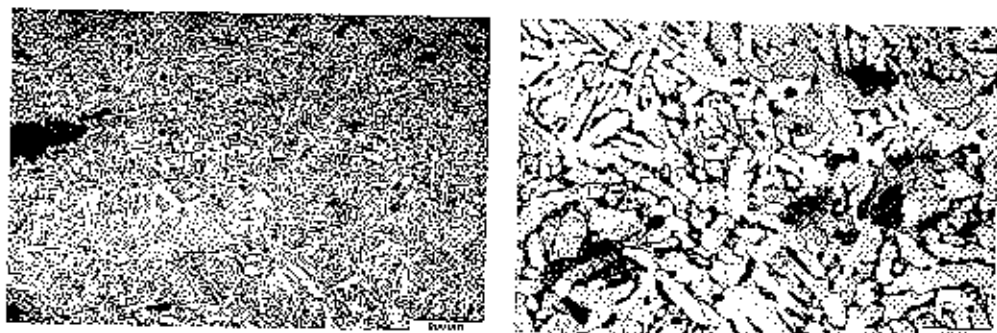


사진 44. 사진 41의 중간일부(100×) 사진 45. 사진 41의 일부(200×)

4. 1. 4. 철모 (1)

직석사이에서 발견된 것으로, 모신은 세형동모처럼 유연형을 하고 있으며 황남닌은 블록 렌즈형이다. 두점부분은 일부 결손 되어 있으며, 단면은 타원형이다. 전체길이는 18cm, 모신 길이 10cm, 모신 폭 3.7cm이고, 두점 끝의 지름은 2.8×2.2cm이다(濟州大學校博物館, 1989). 시료는 금속이 남아 있는 모신 안쪽부위에서 채취하였다.



사진 46. 철모 (1)

사진 47은 모신 a 지점에서 채취한 시편의 미세조직을 촬영한 사진이다. 전체적으로 결정립이 미세한 페라이트 조직이 주를 이루고 있고, 적은 양의 펄라이트가 부분적으로 생성되어 있다. 미세조직으로 볼 때 탄소 함량 0.2% 정도의 저탄소강을 소재로 사용한 것으로 보인다. 사진

48, 49에서와 같이 결정이 미세한 것은 공석온도로 가열하여 반복탄타하는 과정에서 이루어진 것으로 보인다. 경도 측정 결과 페라이트와 펄라이트의 경도값은 각각 183Hv, 313Hv이다. 각각의 경도값이 높게 나오는 것은 앞에서 말한 바와 같이 결정립이 미세하기 때문이다. 그림 18은 사진 50의 1로 표시된 부분의 EDS 분석 결과로, 1지점은 Si, Ca, Al 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다.



사진 47. 사진 46의 보신 안쪽부위 횡면(50×)

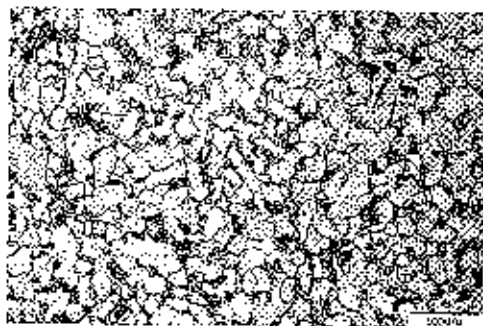


사진 48. 사진 47의 일부(200×)

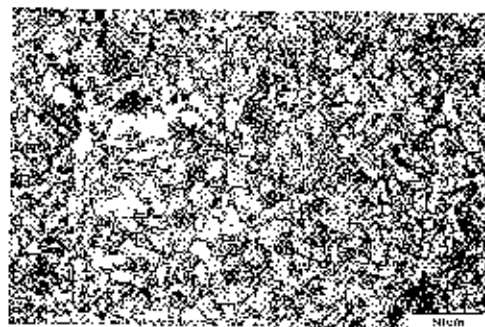


사진 49. 사진 47의 일부(400×)

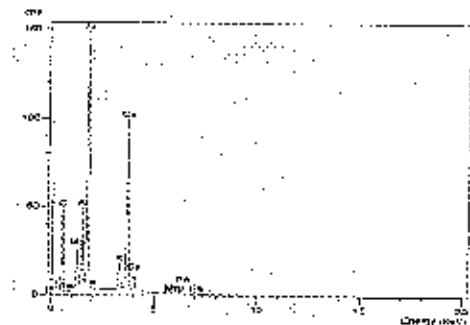
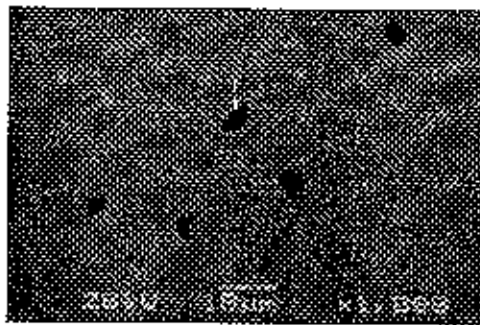


사진 50. 비금속 개재물 SEM상(1000×) 그림 18. 사진 50의 1지점 EDS분석

4. 1. 5. 첼모 (2)

석과부딪 출토품으로 모신의 단면은 광형이고, 자루끝 끼울 수 있는 단면이 원형인 투검이 있다. 전체길이는 21.7cm, 신부중앙의 횡단면은 1.7×1.2cm이다(제주대학교박물관, 1989). 시료는 날 안쪽 부위에서 채취하였다.



사진 51. 첼모(2)

1) 첼모(2)의 날 부위 단면

사진 52는 날 부분의 미세조직을 촬영한 것으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 미세조직상에서 볼 때 우측에서 좌측으로 갈수록 탄소 함량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 날 부분에 강도를 부여하기 위한 열처리과정에서 침탄이 이루어진 뒤 반복단타 한

것으로 보인다. 따라서 날 선단으로 갈수록 결정립이 미세해지고, 필라이트의 생성정도가 증가하는 것을 알 수 있다. 경도값은 페라이트 136Hv, 필라이트 215Hv이다. 사진 53, 54, 55는 탄소량에 따른 조직의 변화를 촬영한 사진이다. 그림 19는 사진 56의 1로 표시된 부분의 EDS 분석 결과로, 철산화물과 함께 Si, Ca 등이 함유된 유리질 슬래그임을 알 수 있다. 이 철 슬래그를 페이얼라이트(Fe_2SiO_4)라 하며, 철광석을 1100~1300°C부근에서 환원할 때 생성되는 결정광물로 반복단타 과정에서 혼입된 것으로 보인다. 미세조직과 비금속개재물을 통해 제작과정을 살펴보면 순철에 가까운 괴련철을 원료로 사용하여 성형한 후, 날 부분을 강화하기 위한 열처리 과정에서 침탄과 반복단타가 진행된 것으로 보인다.

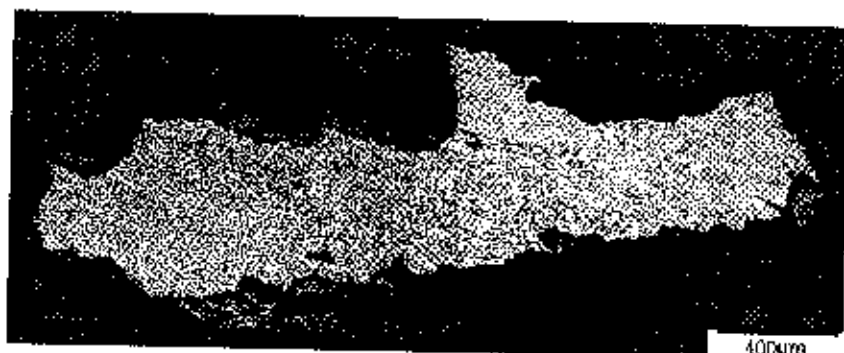


사진 52. 사진 51의 날 부분 단면 미세조직(50×)

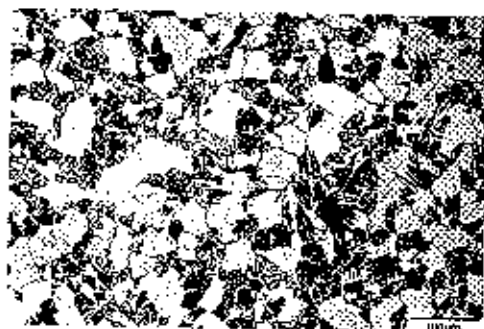


사진 53. 사진 52의 좌측(200×)

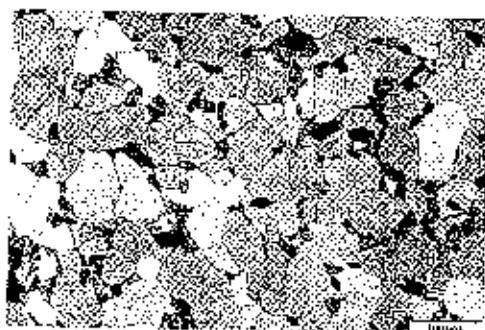


사진 54. 사진 52의 중간(400×)



사진 55. 사진 52의 우측(200×)

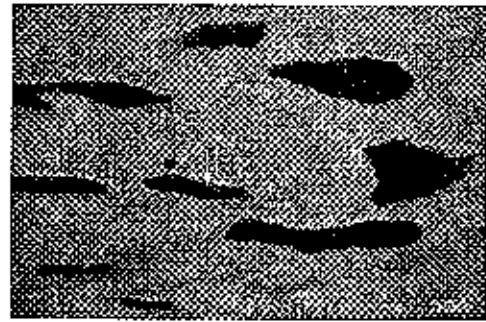


사진 56. 비금속 개재물 SEM상(1500×)

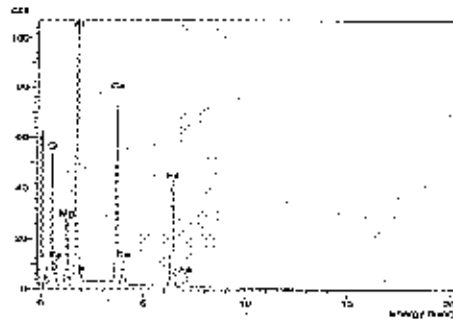


그림 19. 사진 56의 1지점 EDS분석

2) 철평 (2)의 날 부위 종단면

날 부분에서 채취한 시편의 종단면을 조직상으로 관찰한 결과 탄소량은 0.1% 미만으로 보이는 순철에 가까운 저탄소강이다. 미세조직이 사진 57과 같이 매우 불균일하고 비금속 개재물이 부분적으로 남아있으며, 우측 하단부에 약간의 펄라이트 조직이 보인다. 사진 58, 59의 배율이 동일함에도 결정립의 크기에 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이는 단조과정에서 부위에 따른 온도차가 있었음을 뜻하는 것이다. 경도값은 펄라이트 133Hv, 펄라이트 216Hv이다. 사진 60은 조직 내에 존재하는 비금속 개재물을 광학현미경으로 촬영한 것이며, 길이방향으로 길게 늘리나 있는 것은 반복단타에 의한 것으로 보인다. 그림 20은 사진 61의 1로 표시된

부분의 EDS 분석 결과로 철산화물에 Si, Ca, Mg 등이 함유된 페이얼라이트(Fe_2SiO_4)로 판단된다.

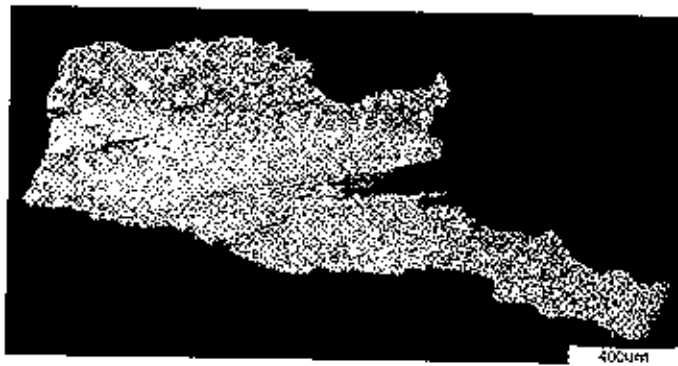


사진 57. 사진 52의 날 부분 종단면 미세조직(50×)



사진 58. 사진 57의 일부(200×)

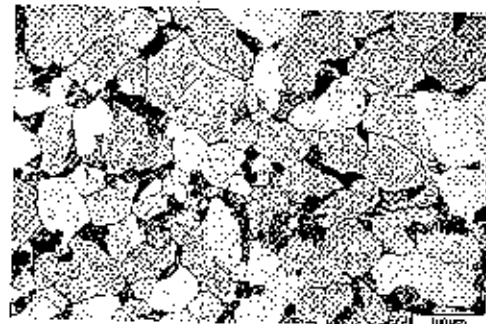


사진 59. 사진 57의 우하단 일부(200×)

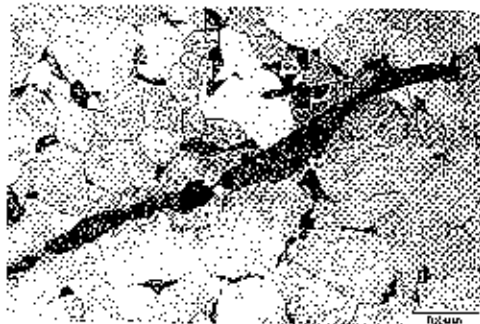


사진 60. 사진 57의 비금속 개체물(200×)

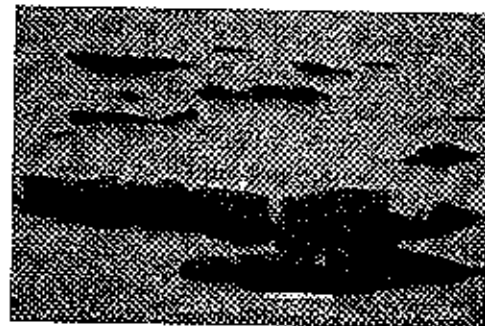


사진 61. 비금속 개체물 SEM상(1500×)

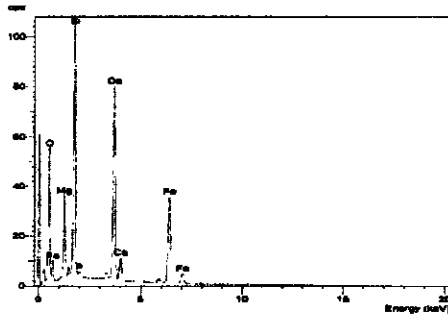


그림 20. 사진 61의 1지점 EDS분석

4. 1. 6. 철모 (3)

철모로 되어 있으나 모신부분이 장방형이고, 자루 끝부분이 ㄷ 자형으로 구부러진 것으로 보아 끌 종류로 판단된다. 전체길이는 25.2cm이고, 신부의 횡단면은 1.3×1.3cm이다(제주대학교박물관, 1989.). 시료는 신부 끝 안쪽부위에서 채취하였다.

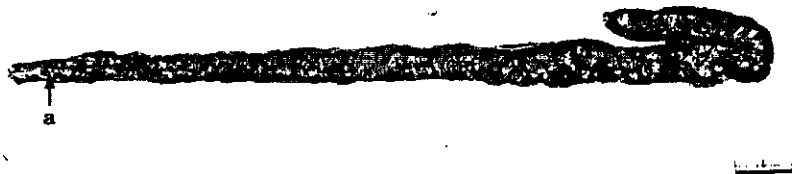


사진 62. 철모(3)

사진 63은 시편의 전체적인 미세조직을 나타내는 것으로, 탄소량이 극히 적은 페라이트 조직이 주를 이루고 있으며 미량의 펄라이트가 결정립계를 따라 생성되어 있다. 따라서 탄소 함량이 0.1%이하인 저탄소강으로 제작한 것을 알 수 있다. 사진 64, 65에서와 같이 페라이트 결정립이 비교적 미세하고 불균일한 것으로 보아, 반복단타 과정에서 결정립을 미

세하게 한 후 서냉한 것으로 보인다. 페라이트 정도값은 126HV로 낮은 편이다.



사진 63. 사진 62의 모신 끝부분 단면 미세조직(50×)

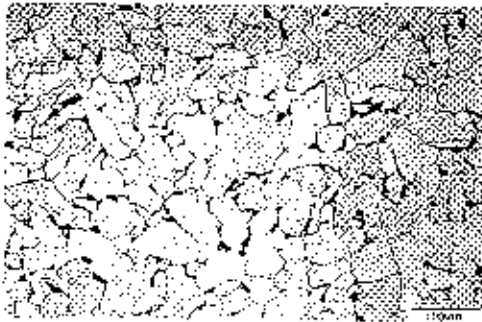


사진 64. 사진 63의 일부(200×)

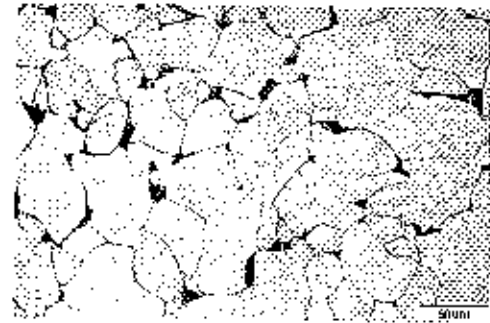


사진 65. 사진 63의 일부(400×)

4. 1. 7. 소형철부

석박묘 내에서 출토된 것으로 공부의 횡단면은 장방형이고 공부와 날 부분의 폭이 거의 비슷하며, 외날이다. 철부의 크기는 길이 6.5cm, 폭 3.3cm, 두께 1.5cm이다(제주대학교박물관, 1989). 시료는 날 끝에서 약간 들어간 부분에서 채취하였다.

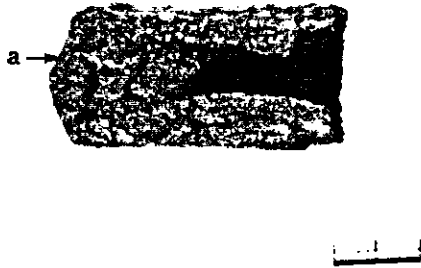


사진 66. 소형철부

사진 67은 사진 66의 a 지점에서 채취한 시편의 전체 조직사진으로 상부가 날 선단을 향하고 하부가 내부를 향하고 있다. 미세조직을 살펴보면 날 부위에는 주로 펄라이트가 생성되어 있으며, 부분적으로 마르텐사이트 조직이 관찰된다. 내부는 펄라이트와 페라이트의 혼합조직이다. 사진 68은 펄라이트와 마르텐사이트 혼합조직을 가장 잘 보여주는 부분으로, 사진 69은 확대사진이다. 이러한 조직은 담금질한 강을 공석온도이하로(600~700℃)로 가열한 후 서냉 하였을 때 생기는 것으로, 강의 인성을 부여하기 위해 실시한 것으로 보인다. 이 부분의 경도값은 마르텐사이트 539Hv, 펄라이트 352Hv이다. 펄라이트 경도값이 높은 이유는 마르텐사이트의 영향으로 보인다. 내부는 사진 70과 같이 날 부분에 비해 탄소 함량이 적은 펄라이트와 페라이트의 혼합조직을 보여주고 있다. 이 부분의 경도값은 펄라이트 270Hv, 페라이트 160Hv이다. 사진 71은 비금속 개재물을 전자현미경으로 촬영한 사진이다. 비금속 개재물의 모양이 길이 방향으로 연신되며 끊어져 있는 것은 반복단타에 의한 것으로 보인다.



사진 67. 사진 66의 날 부위 횡면 미세조직(50×)

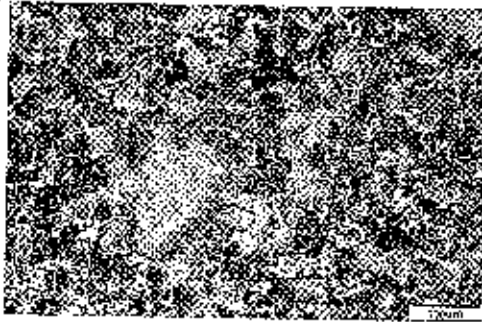


사진 68. 사진 67의 일부(200×)



사진 69. 사진 68의 일부(400×)



사진 70. 사진 67의 일부(200×)

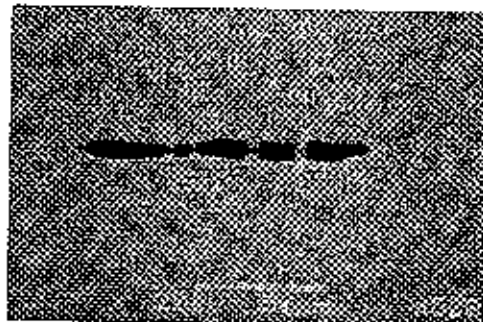


사진 71. 비금속 개재물 SEM상(500×)

4. 1. 8. 주조철부

석각묘 내에서 출토된 것으로 주조로 제작된 철부이다. 공부의 횡단면을 볼 때 양 측면에 주조접합선이 돌출되어 긴 육각형을 이루고 있고, 끝부분에 2층 둔대가 형성되어 있다. 날은 공부 보다 폭이 넓으며, 부채꼴 형식으로 크기는 길이 11.7cm, 날 폭 9.2cm, 두께 3.7cm이다(제주대학교박물관, 1989). 사진 73은 철부를 X-ray로 촬영한 것으로 주조시 생성된 기포와 투습 끝부분의 2층 둔대가 관찰되며, 투습접합선이 없는 것으로 보아 주조로 제작되었다는 것을 알 수 있다. 시료는 공부 끝에서 채취하였다.

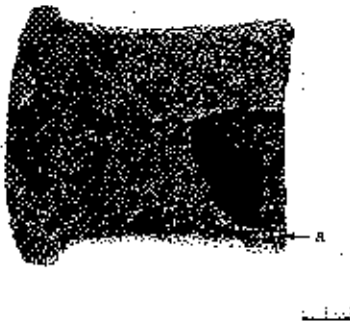


사진 72. 주조철부

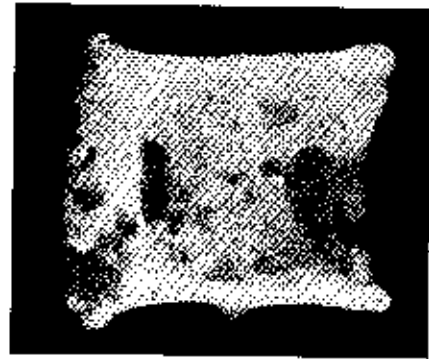


사진 73. X-ray 필름

사진 74은 a 부위에서 채취한 시료의 전체적인 미세조직을 보여주고 있다. 주조된 경우 미세조직이 보통 탄소함량 4.3%의 주철 조직으로 냉각속도에 따라 백주철, 회주철로 나타나지만, 이 시료는 저탄소강에서 관찰되는 페라이트 조직을 보이고 있다. 이 조직은 주철을 900~950℃ 온도에서 장시간 밀폐 가열하는 과정에서 주철 내에 존재하던 탄소가 산소와 반응하여 일산화탄소 가스로 빠져나가는 탈탄이 진행되어 나타난다

(崔鍾澤 외 2001). 이러한 열처리 는 주철의 취성을 보완하고 인성을 부여하기 위해 실시한 것으로, 강의 조직을 인기 위해서는 900℃이상의 온도에서 장시간 열처리가 필요하므로 철을 다루는 기술수준이 매우 높았다는 것을 짐작할 수 있다. 사진 75에 나타난 검게 보이는 부분은 용해된 주철 내에 존재하던 기포로 부식된 마그네사이트가 기포내벽에 생성되어 있다. 사진 76에서도 여러 형상의 작은 기포 흔적들을 볼 수 있다. 사진 77은 탄탄 후 생성된 페라이트 조직과 권정립계에 생성된 극히 적은 양의 펄라이트를 확대하여 촬영한 것이다.



사진 74. 사진 72의 a 단면 미세조직(50×)



사진 75. 사진 74의 일부(100×)



사진 76. 사진 74의 일부(200×)

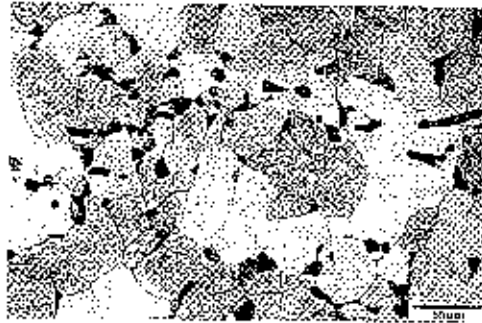


사진 77. 사진 74의 일부(400×)

4. 1. 9. 나선형철기

석곽묘 출토품으로 용도를 알 수 없는 철기이다. 크기는 지름 5.7cm, 두께 0.7cm 이다(제주대학교박물관, 1989). 시료는 금속심이 남아 있는 나선형의 외부에서 세 번째 원에서 채취하였다.

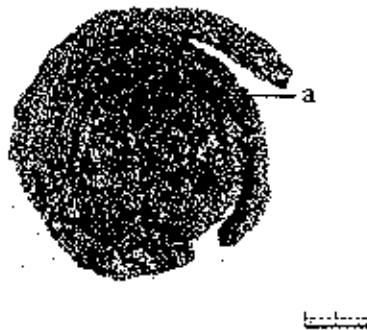


사진 78. 나선형철기

1) 사진 78의 a 부위 단면

사진 79에서와 같이 탄소 함량이 적은 페라이트와 필라이트의 혼합조직으로, 미세조직 내의 결정립 크기가 미세하고 비교적 균일하다. 사진 80은 페라이트 기지 내에 필라이트가 생성된 부분을 잘 보여주는 것으로

로, 사진 81는 확대사진이다. 사진 82은 페라이트 조직 바탕에 드분드문 구상화된 조직이 보이는데, 이는 담금질로 생성된 마르텐사이트 조직을 재가열하여 서서히 냉각시키면 일종의 템퍼링이 일어나 페라이트 기지 내에 마르텐사이트가 구상화되어 나타난 것이다. 미세조직의 정도값은 페라이트 142Hv, 펄라이트 241Hv이다. 사진 83은 조직 내에 존재하는 비금속 개재물을 전자현미경으로 촬영한 것으로 서로 다른 영역을 1과 2 지점으로 표시하였다. 그림 21, 22는 사진 84의 1과 2로 표시된 부분의 EDS분석 결과로, 그림 21은 1지점에 대한 EDS 분석결과로 주로 철산화물이 발견되지만, 2지점에 대한 EDS 분석결과인 그림 22에서는 산화물 상태의 Si, Ca, Mg, K 등이 높은 함량으로 발견된다. 이러한 결과를 통해 1지점은 산화철 입자가, 2지점은 유리질 슬래그가 혼합된 우스타이트 조직임을 알 수 있다. 이러한 비금속 개재물 분석결과로 보아 교체저온 환원법으로 생산된 피련철을 소재로 단조작업을 거쳐 제작된 것으로 보인다.

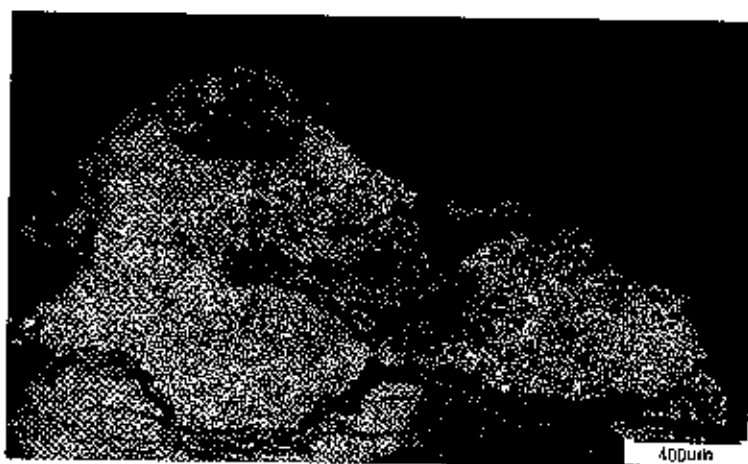


사진 79. 사진 78의 a 단면미세조직(50×)

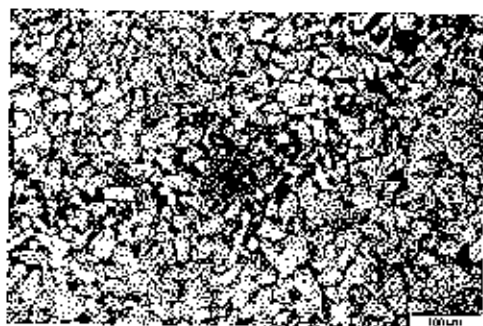


사진 80. 사진 79의 일부(200×)

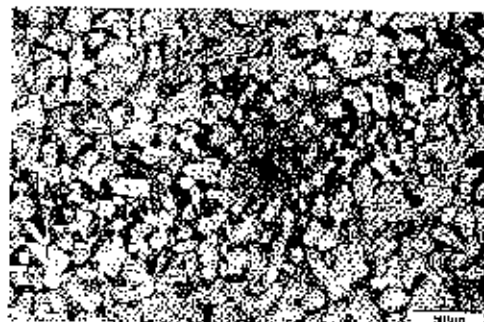


사진 81. 사진 80의 확대(400×)

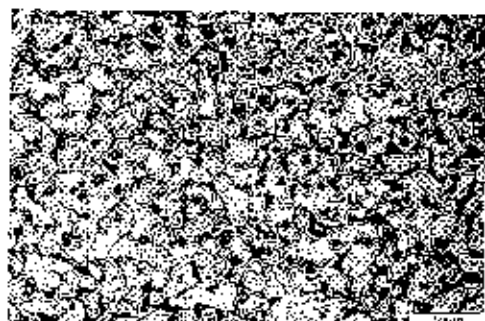


사진 82. 사진 79의 일부(200×)

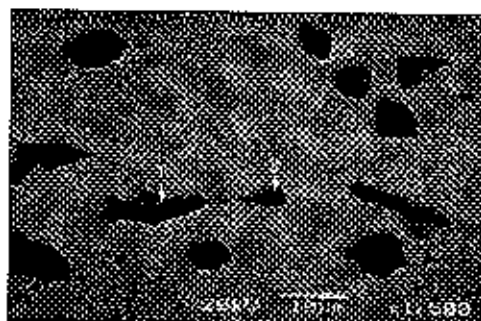


사진 83. 비금속 개재물 SEM상(1,500×)

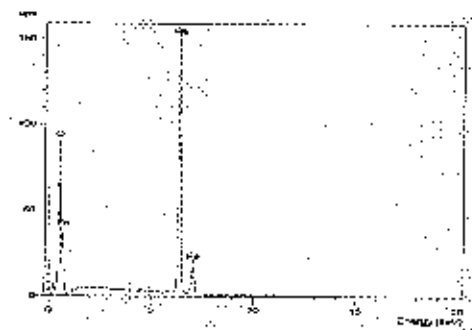


그림 21. 사진 83의 1지점 EDS분석

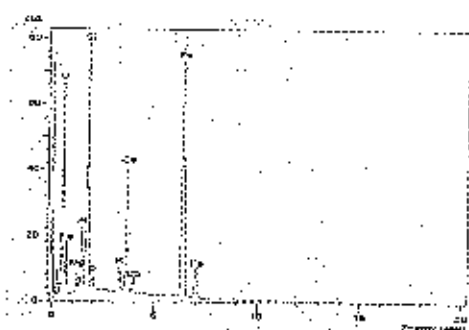


그림 22. 사진 83의 2지점 EDS분석

2) 사진 79의 종단면

종단면은 단면의 미세조직과 같은 양상을 보이고 있다. 사진 84는 페라이트와 펄라이트의 혼합조직으로, 미세조직 내의 결정립의 크기가 미세하고 비교적 균일하다. 사진 85는 페라이트 기지 내에 드문드문 구상화된 조직을 촬영한 것이다. 사진 86은 페라이트 기지 내에 펄라이트가 생성된 부분을 보여주는 것이다. 경도값은 페라이트 154HV, 펄라이트 252HV로, 페라이트 경도값이 비교적 높게 나타나는 것은 담금질시 생성된 마르텐사이트가 재가열되어 페라이트 내부에 구상화된 결과로 보인다. 사진 87는 조직 내에 존재하는 비금속 개재물을 전자현미경으로 촬영한 것이다. 1지점에 대한 EDS 분석결과로 산화철과 Si, Ca, Mg, P 등이 높은 함량으로 검출되어 유리질 슬레그임을 알 수 있다.



사진 84. 사진 79의 종단면 미세조직(50×)

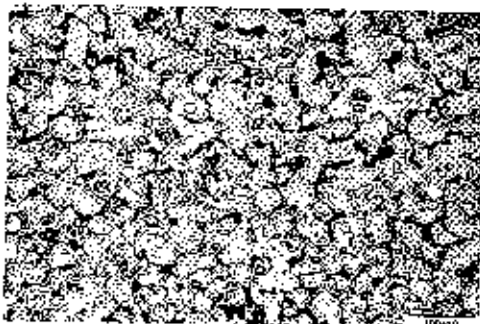


사진 85. 사진 84의 일부(200×)



사진 86. 사진 84의 일부(400×)

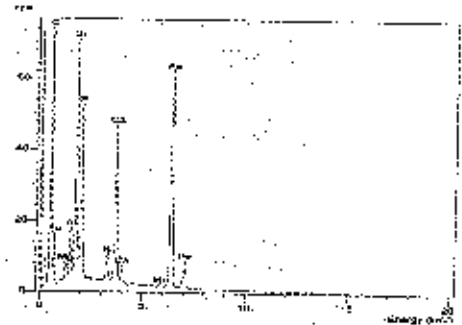
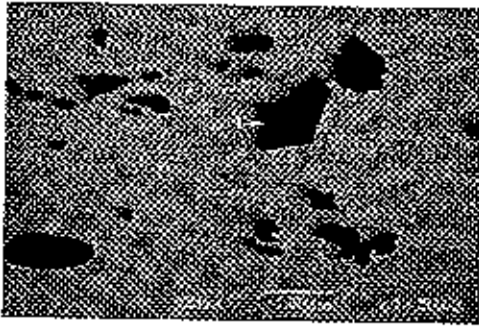


사진 87. 비금속 개재물 SEM상(1,500×) 그림 23. 사진 87의 1지점 EDS분석

4. 2 영광 군동 유적출토 철부

1호 토광묘에서 출토된 선형철부로 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. 길이 8.7cm, 신부 폭 6cm이다. 시편은 날 부위 한 곳과 공부 한 곳에서 채취하였다.

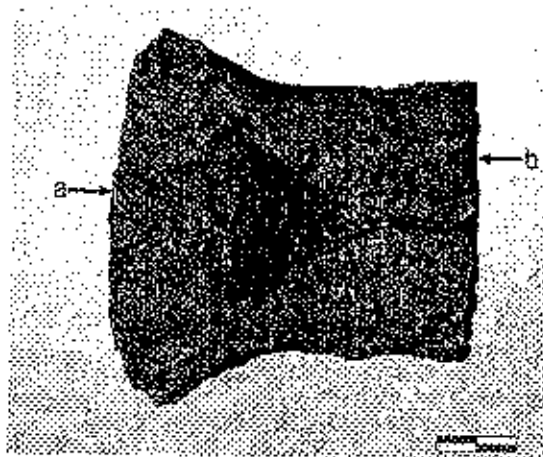


사진 88. 영광 군동 철부

1) 사진 88의 a 날 부위 횡면

사진 89는 날 부위에서 취한 시편의 전체 조직으로 좌측이 날 선단을 향하고 우측이 내부를 향하고 있다. 시편의 하단을 제외한 전 부분에서 탄소함량이 높은 담금질조직이 관찰되며, 비금속 개재물이 반복단타에 의해 길게 연신되어 있다. 사진 90은 담금질조직과 담금질 안 된 조직을 가장 잘 보여주는 사진으로 사진 91, 92은 두 부분의 확대사진이다. 사진 92을 보면 펄라이트 바탕에 침상의 페라이트 조직이 존재하고 있음이 확인되며, 펄라이트 경도값은 340Hv이다. 사진 92은 전체적으로 분포되어 있는 마르텐사이트와 펄라이트의 혼합 담금질조직 확대사진이다. 이와 같은 담금질조직은 조직 내에 펄라이트를 생성하지 않도록 생각할 수 있는 가장 느린 속도인 임계냉각속도보다 느릴 경우 생성되며 2단계에서 변태가 일어났기 때문에 분할변태라고도 한다. 이 부분의 마르텐사이트 경도값은 720Hv이며, 펄라이트 경도값은 348Hv로 펄라이트 경도값이 높은 이유는 마르텐사이트의 영향으로 보인다. 사진 93은 비금속 개재물의 전자현미경 사진으로 두 가지의 서로 다른 영역이 보인다. 1지점의 분석 결과인 그림 24에서는 주로 철산화물이 발견되며 2지점에 해당되는 그림 25에서는 철산화물과 더불어 Si, Al, K 등의 원소가 발견된다. 이러한 결과를 통해 사진 93의 1지점은 산화철 입자이며, 2지점은 유리질임을 알 수 있다. 이와 같은 조성은 제련과정에서 발생하는 슬래그에서 흔히 볼 수 있으며 제련과정에서 제거되지 못한 슬래그의 일부가 철 소재 내에 존재하고 있음을 알 수 있다.

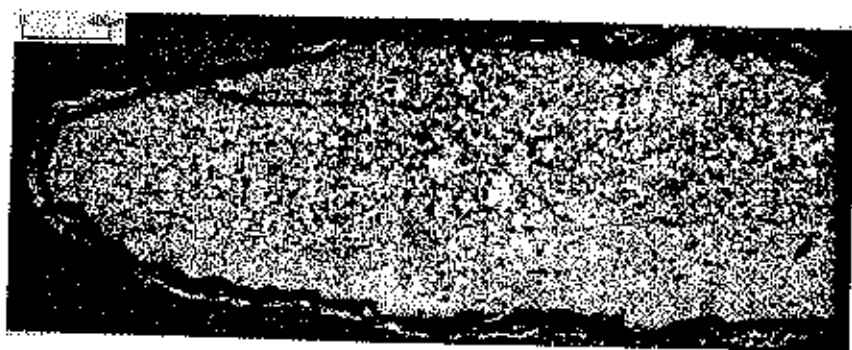


사진 89. 사진 88의 a 날 부위 횡면 미세조직(50×)



사진 90. 사진 89의 우측하단(200×)

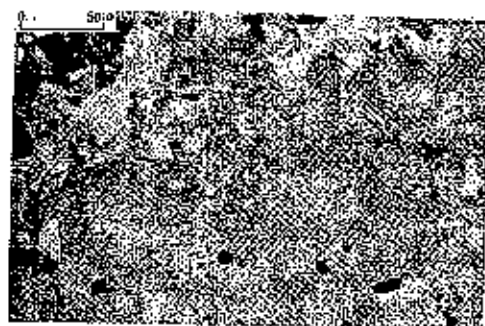


사진 91. 사진 90의 일부(400×)



사진 92. 사진 90의 일부(200×)

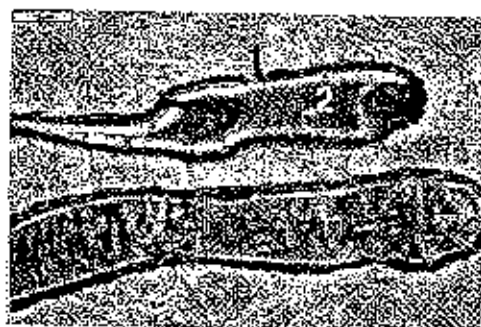


사진 93. 미금속 개재물 SEM상(3500×)

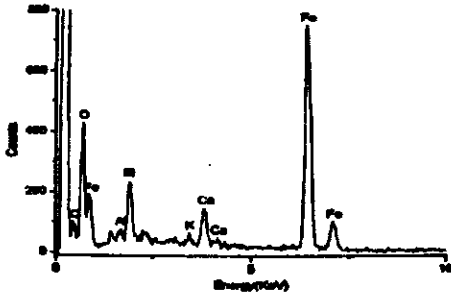


그림 24. 사진 93의 1지점 EDS분석

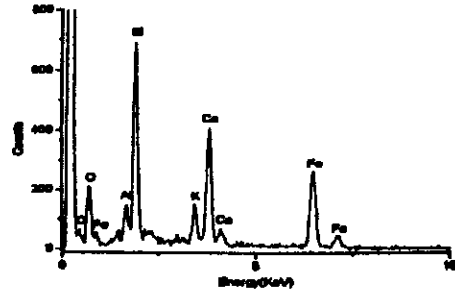


그림 25. 사진 93의 2지점 EDS분석

2) 사진 88의 b 공부 횡면

사진 94는 공부에서 취한 시편의 전체를 보여주는 미세조직 사진으로 좌측이 내부를, 우측이 공부 끝을 향하고 있다. 전체적으로 담금질 조직인 마르텐사이트로 구성되어 있으며, 개재물이 길이 방향으로 길게 연신되어 있다. 사진 95에서는 마르텐사이트와 펄라이트의 혼합양상으로 나타나지만 사진 96에서는 펄라이트가 상당부분 감소되어 있다. 이와 같은 현상은 온도의 영향을 크게 받을 수 있는 표면의 냉각속도가 가장 빠르고 내부로 갈수록 느려지고 있음을 보여준다. 사진 94에 좌우로 늘어선 개재물층은 이 유물이 가열조건에서 반복적인 단타에 의해 제작되었음을 보여준다. 또한 이 부분에서 탈탄흔적이 없는 점, 비금속 개재물이 단조방향으로 연신된 점, 그리고 사진 97에서 관찰되는 것처럼 우스타이트 조직이 포함된 점으로 보아 이 유물의 제작에 사용된 철 소재가 저온환원법에 의해 생산된 피련철로 판단된다. 마르텐사이트 경도값은 702Hv이며, 펄라이트 경도값은 352Hv이다.



사진 94. 사진 88의 b 공부 횡면 미세조직(50×)

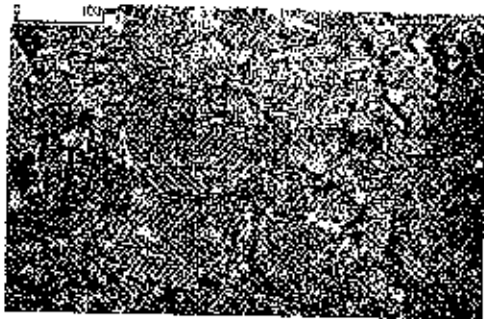


사진 95. 사진 94의 좌측(200×)

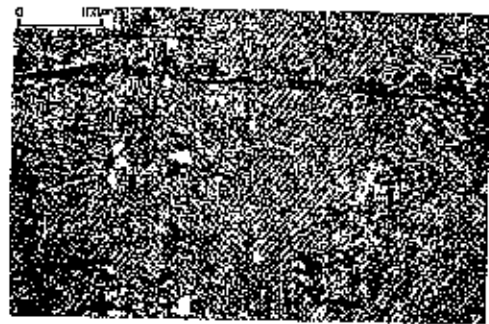


사진 96. 사진 94의 우측(200×)



사진 97. 비금속 개재물(1000×)

4.3 무순 동문 외 고구려 산성출토 철촉

고구려 혹은 발해의 추정되는 유연형 철촉으로 비교적 큰 촉두와 약간 의 촉신만 남아 있다. 촉두의 가운데에 뚜렷하게 능이 세워져 있어서 횡 단면이 마름모이며, 이 형태가 촉신까지 계속되었던 것으로 보인다. 길이 3.6cm, 촉두 길이 2.7cm, 최대 폭 1.1cm, 최대두께 0.9cm이다.

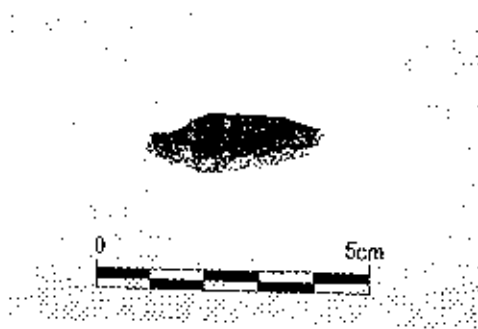


사진 98. 철촉



사진 99. 철촉 촉두 미세조직(50×)

사진 99은 촉두에서 취한 시편의 전체조직으로 지금까지 살펴 본 철촉과는 매우 다른 미세조직이 관찰된다. 우측단에서 하단으로 연결되어 있는 검은 부분은 탄소함량이 0.77% 정도인 강철조직이며 이 어두운 부위 좌측으로 보이는 밝은 부분은 탄소함량이 4.3% 가량인 백주철 조직이다. 여기에서 어둡게 보이는 강 부위는 원래 철촉의 표빈 가까이 위치하였던 것이며 밝게 보이는 백주철 부위는 내부에 위치하였던 것이다. 검게 보이는 몇몇 원형 부위는 용해된 주철 내에 존재하던 기포에 해당하는 것으로 지금은 빈 공간이거나 녹으로 채워져 있다. 주조제품인 이 철촉의 표빈에서 확인되는 강 조직은 백주철을 높은 온도에서 오랫동안 열처리 할 경우 표면에서 탈탄현상이 발생하여 생성될 수 있는 것으로 이 유물이 그러한 처리를 거쳐 생산되었음을 알려준다.

4. 4 결과 및 고찰

제주 용담동 유적은 기원 후 1~3세기로 편년되어 지는 것으로 철제유물 9점 모두 북쪽 석곽묘에서 출토된 것이다. 분석대상 철기유물 중 철제단검 등 8점은 단조로, 철부 1점은 주조로 제작된 것이다. 철제단검을 비롯한 8점의 조직상의 특징을 살펴보면 대부분 순철에 가까운 소재가 사용되었다는 것을 알 수 있었고, 날 부분과 같이 강도를 요하는 부위는 침탄이 이루어진 후 담금질한 것으로 보인다. 각각의 시편 중 날 부위로 추정되는 부위에서는 마르텐사이트와 펄라이트 조직이 관찰되었고, 신부에서는 페라이트 기지내에 약간의 펄라이트가 존재하고 있다. 미세조직과 더불어 분석 조사한 비금속 개재물은 산화철입자와 유리질 슬래그가 혼재되어 있어 고체저온환원법으로 생산된 괴련철을 철 소재로 사용한 것을 알 수 있었다. 이와 같이 조사 분석된 제주 용담동 출토 철제유물의 미세 조직과 비금속 개재물의 성분은 2~3세기대로 편년되어지는 영광 군동 유적 1호 토광묘 출토 철부에서도 찾아볼 수 있다. 따라서 이 시기에 한반도에서는 괴련철을 소재로 성형한 후 강도를 필요로 하는 부분에 담금질과 같은 열처리를 가해 제작한 것으로 보인다.

철부 1점은 외형과 X-ray 조사로 볼 때 주조로 제작된 것이 확실하나 미세조직 관찰 결과 주철 조직이 아닌 페라이트 바탕에 미량의 펄라이트가 혼재된 저탄소강 조직으로 밝혀졌다. 이 조직은 주철을 900℃ 이상의 온도에서 장시간 열처리할 경우 산화에 의해 탄소가 빠져나가는 탈탄작용에 의해 나타난 것이다. 즉, 거푸집에 용융된 주철을 부어 다량의 제품을 만든 후 거푸집을 제거하지 않은 상태에서 900℃ 이상 재가열하는 열처리를 통해 필요한 인성을 얻는 철기의 제작공정이다. 이러한 제작기술은 삼국시대 유물인 무순 동문 외 고구려 산성 출토 철촉에서도 비슷한

예를 찾아볼 수 있다. 이와 같이 주철을 탈탄하여 주철탈탄강을 얻는 기술은 중국의 경우 서한시대(기원전 2~1)때부터 나타나고 있다(윤동석, 1984). 본 연구를 통해 기원 후 1~3세기로 편년되는 제주도 유적에서 주철탈탄강의 존재가 밝혀짐으로서, 철기제작기술이 중국으로부터 한반도 문화권으로 유입된 사실을 입증하는 것이라 할 수 있다. 이와 아울러 1~3세기경 한반도 문화권에서도 주철탈탄강으로 철기를 제작하는 기술 체계가 상용되었을 것으로 보이나, 지금까지 확인된 바가 매우 드물다. 따라서 용담동 출토 철기유물은 철광산이 존재하지 않는 제주도에서 출토되었고, 앞서 유적개관에서 기술한 바와 같이 유물성격이 중국 후한대와 통하는 것으로 보아 해상교역을 통해 직접 유입되었을 가능성도 있다.

용담 출토 철기유물의 각 시편별 미세조직분석 결과는 표 2와 같고, 가공방법에 있어서 가열 후 성형과정 등 모든 공정에서 반복단타에 의한 단조는 주조유물을 제외하고 모두 이루어진 것으로 보인다.

표 2. 각 시편의 미세조직분석결과

출토유적	유물명	시편명	미세조직	경도(Hv)	개재물	소재	가공방법
제주 용담동	철제 단검	날	마르텐사이트 펠라이트 페라이트	691 325 162	순철 혼입 wustite	피련철	성형→침탄 →담금질
		날 안쪽	마르텐사이트 펠라이트 페라이트	518 315 132			
	철제 장검(1)	슴배	페라이트	124	순철 혼입 wustite	피련철	성형→침탄
		등	페라이트	123			
		날	페라이트 펠라이트	186 332			
	철제 장검(2)	날	페라이트 펠라이트	135 334	순철 혼입 wustite	피련철	성형→침탄
		슴배	페라이트 펠라이트	156 268			
		날 안쪽	페라이트 펠라이트	138 192			
	철모(1)	신부	페라이트 펠라이트	183 313	유리질	피련철	성형→침탄
	철모(2)	날 횡면	페라이트 펠라이트	136 215	fayalite	피련철	성형→침탄
		날 단면	페라이트 펠라이트	133 216			
	철모(3)	신부	페라이트	127	유리질	피련철	성형→담금질
	소형 철부	날	마르텐사이트 펠라이트 페라이트	539 352 164	유리질	피련철	성형→침탄 →담금질
	주조 철부	공부 끝	페라이트 펠라이트	158 247	유리질	주철	주조→탈탄
나선형 철기	신부 횡면 신부 단면	페라이트 펠라이트	142 241	순철 혼입 wustite	피련철	성형→담금질 →재가열처리	
		페라이트 펠라이트	154 252				
		페라이트 펠라이트	154 252				
영광 군동	철부	날	펠라이트 마르텐사이트	348 720	순철 혼입	피련철	성형→침탄 →담금질
		공부	펠라이트 마르텐사이트	352 702			
무순 동문 외 고구려	철촉	촉두	펠라이트 백주철			주철	주조→탈탄

4. 결 론

1~3세기로 편년되어지는 용담동 유적에서 출토된 철기유물 중 9점을 선정하여 금속학적 조사를 실시하여 제주도에서 행해지던 철기제작기술을 살펴볼 수 있었다. 그리고 타 지역에서 출토된 철기유물과 비교분석함으로써 그 당시 한반도 문화권내에서 행해지던 철기제작 기술체계를 추정할 수 있었다.

첫째, 제주 용담동 출토 단조 철기유물의 미세조직과 비금속 개재물을 다른 지역과 비교분석한 결과 제련방법과 철기제작기술이 서로 유사한 것을 알 수 있었다.

둘째, 철기유물 중 단조로 제작된 철제단검 등 8점의 미세조직을 분석한 결과 철광석을 고체저온환원법으로 제련하여 얻은 괴련철을 원료로 제작한 것으로, 대부분 탄소함량이 적게 나타났다.

셋째, 날 부위 미세조직에 침탄과 담금질 흔적이 남아 있는 것으로 보아 강도를 필요로 하는 특정부위에 열처리를 가하는 기술을 가진 것으로 판단된다.

넷째, 탄소함량이 적은 저탄소강으로 제작된 단조유물은 제련-성형-침탄-열처리-제품 공정으로 제작되었으며, 각 공정마다 반복단타가 이루어진 것으로 보인다.

다섯째, 주조철부의 미세조직을 조사한 결과 고온에서 장시간 열처리할 때 표면에서 탈탄현상이 일어나 조직이 변화한 주철탈탄강으로 밝혀졌다. 이러한 제강기술은 대량으로 생산된 주철의 취성을 보완하고, 인성을 부여하기 위해 실시한 것으로, 시기적으로 볼 때 중국의 영향을 받은 것으로 보인다.

이와 같은 결론을 토대로 볼 때 제주 용담동 출토 철기유물은 동시대 한반도에서 행해졌던 철기제작기술을 적용하여 제작되었으며, 주조철부와 같이 주철탈탄강으로 철기를 제작하는 제강기술은 중국에서 유입된 것을 알 수 있다. 또한 철광석이 존재하지 않는 제주도에서 출토된 철기유물은 중국 또는 한반도와의 해상무역을 통해 유입되었을 가능성이 있으며, 이와 아울러 철을 다루는 기술도 함께 전파된 것으로 보인다. 이번 연구로 드러난 주조철부의 제강기술은 한반도에서 조사된 것 중 가장 이른 시기에 해당되는 것으로, 원삼국시대 철기제작 기술을 제시하는 중요한 자료라 할 수 있다. 앞으로 한반도 문화권에서 출토되는 철기유물에 대한 지속적인 연구가 이루어져 많은 자료가 축적되면 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 생각한다.

주

- 1) 김원룡(1981). 한국사연구입문. 지식산업사. pp. 62~69.
- 2) 윤동석(1984). 한국초기 철기유물의 금속학적연구. 고려대학교 출판부. pp. 6~15
- 3) 이재성(2003). 영산강유역 출토 철기유물에 대한 금속학적 분석. 용인대학교 예술대학원 석사학위논문. pp. 14~19.
- 4) 崔鍾澤·張恩晶·朴長植(2001). 三國時代 鐵器研究. 서울大學校博物館學術叢書 10. 서울대학교박물관. pp. 279~281. p. 325.
- 5) 濟州大學校博物館(1989). 龍潭洞 古墳. 濟州大學校博物館遺跡調查報告 第5輯. pp. 12. pp. 14~16. pp. 55~61. pp. 68~77.
- 6) 대한금속학회 편(1991). 금속조직학. 희중당. pp. 80.
- 7) 이승평(2003). 그림으로 설명하는 금속재료. 도서출판 청호. pp. 174~197.
- 8) 金水泳 감수, 朴俊奎 저(1991). 鐵鋼熱處理. 圖書出版 世進社. pp. 47.
- 9) 韓俊熙·方建雄·黃農文·金昌洙·趙陽九 共譯(2001). 철강열처리의 기본원리. (주)피어슨 에듀케이션 코리아. pp. 54.
- 10) 高塚秀治(2002). 古代韓日 製鐵技術의 比較-古代製鐵技術의 科學的研究-. 충남대학교 백제학교육연구단. pp.1~28.

참고문헌

· 논문

金壽起(1993). 中山里 出土 鐵斧의 金屬學的 研究. 한양대학교 석사학위논문

俞在恩(2002). 古代 鐵器의 微細組織 分析과 製作技術 研究 -京畿地域 山城出土 遺物을 중심으로-. 단국대학교 박사학위논문.

鄭光龍(2001). 三國時代의 鐵器製作技術 研究-微細組織分析을 通하여. 홍익대학교 대학원 박사학위논문.

이재성(2003). 영산강유역 출토 철기유물에 대한 금속학적 분석. 용인대학교 석사학위논문

고형순(2002). 고대 철기유물의 침탄과 열처리에 대한 연구. 강릉대학교 석사학위논문.

김동원(1998). 김해 양동리 고분군 출토 철제유물의 금속학적 연구. 동아대학교 석사학위논문.

張恩晶(2002). 5~6世紀 高句麗 鐵器製作技法에 對한 一考察 -漢江下流域 資料를 中心으로-. 서울대학교 석사학위논문.

濟州大學校博物館(1989). 龍潭洞 古墳. 濟州大學校博物館遺跡調查報告 第5輯.

崔鍾澤·張恩晶·朴長植(2001). 三國時代 鐵器研究. 서울大學校博物館學術叢書 10. 서울대학교박물관.

尹東錫(1984). 韓國初期 鐵器遺物의 金屬學의 研究. 고려대학교 출판부.

_____ (1987). 韓國의 古代鐵滓에 대하여. 三佛金元龍教授停年退任紀念論叢. 일지사.

_____ (1989). 三國時代 鐵器遺物의 金屬學의 研究. 고려대학교 출판부.

- 윤동석·신경환(1981). 韓國封建社會 前期鋼鐵冶鍊技術發展의 探究에 대한 金屬學的 解釋. 韓國考古學報 10·11. 한국고고학연구회.
- 윤동석·이남규(1982). 한국초기철기시대에 토광묘에서 출토된 철기유물의 금속학적 고찰. 韓國考古學報 13. 한국고고학연구회.
- _____ (1985). 한국고대철기의 CMA 와 EPMA에 의한 연구 - 구의동 철부·철촉을 중심으로-. 韓國考古學報 17·18.
- 尹東錫·大澤正己(2000). 隍城洞遺蹟 製鐵關聯遺物の 金屬學的 調査. 慶州隍城洞 遺蹟Ⅱ. 國立慶州博物館.
- 이남규(1982). 남한 초기철기 문화의 일고찰 -특히 철기의 금속학적 분석을 중심으로-. 韓國考古學報 13.
- 유재은·고형순·황진주(2000). 경남 하동군 발견 철제 무구류의 금속학적 연구. 보존과학연구 21.
- 김수기·박장식(2003). 함평 중랑 유적 출토 철기유물의 금속학적 분석. 목포대학교박물관
- 허우영, 「철제금속유물의 미세구조 관찰」, 『湖巖美術館 研究論文集』 5. 湖巖美術館. 2000.
- 박장식·정광용(2000). 황남대총 출토 철기 분석결과, 皇南大塚의 諸照明. 國立慶州文化財研究所.
- _____. 철제 단조철부의 제작기법 연구. 호서고고학 3. 호서고고학회.
- 박장식(2000). 철기유물의 미세조직에 나타난 고신라 철기술체계에 관한 연구-황남대총 출토 철봉의 금속조직학적 분석결과를 중심으로. 慶州文化研究 3. 경주대학교 경주문화연구소.
- _____. (2001). 경주 황성동 537-2 유적 출토 철기제작 관련 유물에 대한 금속학적분석. 慶州市 隍城洞 537-2 賃貸아파트 新築敷地報告書. 韓

國文化財保護財團.

강승남(1994). 유적, 유물을 통하여 본 발해 제철, 제강기술에 대하여. 조선고고연구 94-2호.

世淵鐵博物館(2003). 忠北 陰城郡의 冶鐵址·忠州市 仰城面의 冶鐵址. 世淵鐵博物館 調查報告書 第1권

世淵鐵博物館(2003). 古代製鐵 復元實驗 報告書.

신경환(2001). 나주 복암리 3호분 출토 철제유물의 금속학적 조사. 보존과학연구 22.

유재은·고형순(2001). 대모산성 출토 철제유물의 금속학적 조사. 양주 대모산성. 한림대학교박물관.

최주·이인숙·김수철·도정만(1989). 경북 월성군 내남면 덕천리 출토의 철 슬래그에 대한 연구. 문화재 22.

유재은·고형순·이재성(2002). 수원시 꽃뚝 유적 출토 철제유물의 미세조직 분석. 보존과학연구 23.

임선기·강대일·문환석·박동규·강성군(1992). 대모산성 출토 고대 철기유물에 대한 금속학적 연구. 보존과학연구 14. 국립문화재연구소.

_____ (1993). 부소산성 출토 고대 철기유물에 대한 금속학적 연구. 보존과학연구 15. 국립문화재연구소.

정광용·최광진·박장식·백종오·김용신(2000). 용인 임진산성 출토 철제유물의 금속조직학적 관찰. 龍仁 壬辰山城. 京畿道博物館.

정영동·박장식(2001). 황남대총 출토 철제 창 의 미세조직에 나타난 고 신라의 철기기술체계. 慶州文化研究 5. 경주대학교 문화재연구소.

최성락(1991). 한국 철기문화의 형성과정 -남부지방을 중심으로-. 한국상고사학보 7. 한국상고사학회.

· 단행본

- 송계현(1997). 삼국의 철기문화. 철의 역사. 국립청주박물관.
- 신경환(2000). 역사에 나타난 철이야기. 한국철강신문.
- 金元龍(1981). 鐵器文化. 韓國史研究入門. 知識産業社.
- 심제동·반봉찬 共譯(1997). 金屬工學에서의 슬래그. 대광문화사.
- 韓俊熙·方建雄·黃農文·金昌洙·趙陽九 共譯(2001). 철강열처리의 기본원리. (주)피어슨 에듀케이션 코리아.
- 이승평(2003). 그림으로 설명하는 금속재료. 도서출판 청호.
- 김정근·김기영·박해웅(1999). 금속현미경조직학. 도서출판 골드.
- 金水泳 監수, 朴俊奎 著(1991). 鐵鋼熱處理. 圖書出版 世進社.
- 韓相旭 編著(1988). 金屬熱處理組織解說. 골드技術社
- 姜樂園(1991). 金屬材料. 螢雪出版社.
- 大韓金屬學會 編(1991). 金屬組織學. 喜重堂.
- 한봉희 譯(1997). 금속재료. 반도출판사.
- 金政根 著(1994). 金屬機械 材料工學. 學文社
- 盧泰天(2000). 韓國古代 冶金技術史 研究. 學研文化社.
- 崔柱 譯 (宋應星 著)(1997). 天工開物. 傳統文化社.
- 盧泰天·金英洙 共譯 (楊寬 著)(1992). 中國古代冶鐵技術發展史. 대한교과서주식회사.

ABSTRACT

Metallurgical study of Iron Artifacts Excavated from *Yongdam-Dong*, Jeju

Kang Chang Gu

Dept. of Conservation of Culture Properties
Graduate School of Arts Yong-in University

This research is about a minute structure of ironware objects from the relics at Yongdam-dong, Jeju which plays an important role clarifying culture change in the dawning of history of Jeju Island before and after the Christian era. Ironware relics were 9 pieces. Then, 8 pieces such as small iron sword etc. were manufactured by forging, and 1 piece of iron part was manufactured through casting. This study was executed so as to know then technique of iron ware manufacture system, based on the difference in minute structure by examining the relics to metallicity vary the manufacture method. As for study method, both of the direct and indirect method were used. As a direct way, sample ore was examined and as an indirect method the data which were already examined in parallel was compared and analyzed.

Test piece from 9 pieces of relics such as small iron sword was extracted under the principle to conserve its original form to the

utmost as the metal which remained inside the part that surface was exfoliated. As for extracted test piece, whole treatment course was completed by corroding the surface with Nital 3% liquid for few seconds so as to observe its minute structure after grinding surface in full detail by mounting it with epoxy resin first. After whole treatment, all the observation for the research was done with the naked eye using optical microscope, minute structure photography using metal microscope, and nonmetallic medium analysis with SEM-EDS.

As the result of analysis, 8 pieces of relics through forging which were excavated at Yongdam-dong, Jeju were made with technique system to produce ironware by using low carbon content iron which was produced with low temperature recution judging from metal structure. The trace of heat treatment appeared on the part like blade where needs strength, quenching was made simultaneously with precipitation. In addition, heat treatment was done also to supplement brittleness that quenching structure has and to give tenacity to iron. In case of manufacturing ironware with iron of low carbon content, manufacture processing to perform molding by heating chopping -precipitation-heat treatment-heating chopping repeatedly was made. From the iron part excavated at Goon-dong, Youngkwang which was chosen as a comparison subject and which is chronicled as the 2nd century also, same manufacture technique and heat treatment technique are found. Accordingly, it may be presumed that this technique exists widely in Korean peninsula around the 2nd to 3rd

century.

Judging from its outward form and X-ray film, it is certain that the 1 piece of casting iron part was manufactured through casting. But, as a result of minute structure observation, it was proved as carbon iron structure in which some pearlite was mixed in pearlite base which is not a casting structure. This structure is that structure changed because of the phenomenon that carbon is shed appears on surface in making the heat treatment of ironware manufactured with casting method for long time at high temperature. Then, it is deemed that it was executed so as to supplement the brittleness of cast iron and give tenacity. Minute structure observed at casting iron part is what shows the technique system of ironware manufacture during that era. Then, examples observed up to now are rare.

Thus, metallic result clarified through this study may be regarded as a good data to presume the manufacture technique of ironware in the Period of the Three States.