등록문화재 제255호 영양 구 용화광산 선광장의 비파괴 훼손도 진단

전유근 | 이찬희^{*,1}

국립문화재연구소 보존과학연구실, *공주대학교 문화재보존과학과

Nondestructive Deterioration Diagnosis for the Former Ore Dressing Plant in the Yongwha Mine of Registered Cultural Property No. 255

Yu Gun Chun | Chan Hee Lee^{*,1}

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author: chanlee@kongju.ac.kr, +82-41-850-8543

초 록 이 연구에서는 경북 영양 용화광산 선광장(등록문화재 제255호)을 대상으로 비파괴 훼손도 진단을 실시하였다. 훼손지도를 작성하여 구조물에 대한 훼손상태를 파악한 결과, 6열과 7열 구조물을 기점으로 하여 용화광산 선광장 상부(7~13열)에서는 생물, 토사에 의한 훼손율이 높은 반면 하부(1~6열)에서는 탈락, 균열, 표면변색의 훼손율이 매우 높게 나타났다. 이는 기계적인 공정과 화학적인 공정이 동시에 진행되는 하부 구조물에서 화학용액들이 구조물의 콘크리트와 반응하면서 물리화학적 풍화작용을 촉진시켰기 때문으로 판단된다. 선광장 구조물의 물성을 파악하기 위해 초음파속도를 측정된 결과, 평균 초음파속도는 2,462m/s(압축강도 529kgf/cm²)로 측정되었다. P-XRF를 활용한 표면변색 오염물질의 분석에서는 용화광산에서 채굴하였던 광석들의 주요성분(Cu, Zn, Pb, Fe, As)과 동일한 것으로 나타났다. 선광장 주변 토양에는 Cu, Zn, Pb, As와 같은 중금속의 함량이 상당히 높았다. 이와 같은 성분들은 선광장 구조물뿐만 아니라 자연환경에도 영향을 줄 수 있기 때문에 구조물의 보존처리와 함께 토양의 정화도 병행해야 할 것이다.

중심어: 용화광산, 선광장, 훼손지도, 초음파속도, P-XRF

ABSTRACT Nondestructive deterioration diagnosis has been carried out for the former ore dressing plant of the Yongwha mine in Yeongyang (Registered Cultural Property No. 255). Deterioration rates about organic contaminant and soil of the upper part (7 to 13 layer) indicate higher than the lower part (1 to 6 layer) of the ore dressing plants. By contrast, deterioration rates such as crack, break out and discoloration of the lower part indicate very higher than the upper part. It is estimated that the plants of the lower part that mechanical and chemical process had been done for flotation were damaged severely by physicochemical weathering with reaction of concrete and chemical solution. As results of ultrasonic velocity measurement, average p-wave velocity of plants were measured 2,462m/s (compressive strength 529 kgf/cm²). As for the analytical results of surface contaminants and soil compositions using P-XRF, they were identical with major elements (Cu, Zn, Pb, Fe and As) of ore minerals from the Yongwha mine. Therefore, the ore dressing plant should be

treated by phytoremediation with conservation because heavy metals could impinged upon plants and natural environment.

Key Words: Yongwha mine, Ore dressing plant, Deterioration map, Ultrasonic velocity, P-XRF

1. 서 론

2001년 7월 근대문화유산에 대한 ‘등록문화재’ 제도가 문화재보호법에 도입됨으로써 근대 문화예술과 산업시설 등 모든 분야의 유산들이 법적인 테두리 안에서 보호 받을 수 있게 되었다. 이에 따라 문화재 전반에 대한 보존·복원 및 활용에 대한 많은 논의들과 함께 문화재의 개념을 확대 적용하고 역사적으로 가치가 있는 것들을 보존하기 위한 노력들이 수행되고 있다¹⁾.

이 연구의 대상인 용화광산(일월광산) 선광장은 1930년대에 나카가와광업주식회사에서 건설한 광산 시설이며 일월산에서 채굴한 광석을 이곳 선광장으로 운반하여 유용광물인 금, 은, 동, 아연 등을 생산한 산업시설이다. 부지 전체에 광업에 관한 유기적인 시설물이 잘 보존되어 있으며 각 시설물이 일월산 자락을 따라 계단식으로 배치되어 있다. 이 선광장은 광산시설 중 흔치 않게 원형을 보존하고 있어 당시 선광공정을 알 수 있는 자료로 가치가 인정되어 2006년 6월 19일 등록문화재 제255호로 등재되어 관리되고 있다²⁾.

그러나 다른 근대건축물과 같이 이 선광장 역시 성립시기가 오래되지 않았다는 인식으로 인해 보호가치에 대한 견해 및 보존하려는 노력은 국보 및 보물급 지정문화재에 비해 상대적으로 미흡한 실정이다. 또한 이 선광장은 균열, 탈락 및 표면변색이 심각하게 발생되었음에도 보존을 위한 훼손도 평가와 보수에 대한 선행연구가 없었으며 장기적인 보존대책을 수립하는데 많은 어려움을 겪어왔다.

따라서 이 연구에서는 경상북도 영양군 일월면 용화광산 선광장에 대한 관리방안의 수립과 보존처리에 필요한 자료를 제공하기 위해 다양한 비파괴진단 방법을 활용하여 손상유형에 따른 정밀진단을 실시하였다. 또한 비파괴 분석에서 나타나는 문제점을 보완하기 위해 분석결과들을 상호 비교함으로써 정밀도를 높이는 작업을 수행하였다. 이 결과는 근대문화유산으로 지정된 산업시설의 가치창출과 보존방안에 수립에 기여할 수 있을 것이다.

2. 연구방법

이 연구에서는 다양한 비파괴 분석방법들을 활용하여 용

화광산 선광장의 정밀훼손도 진단을 실시하였다. 선광장에 발생한 손상유형 및 훼손분포를 살펴보기 위해 훼손지도를 작성하였다. 또한 작성된 훼손지도를 바탕으로 물리적 훼손도를 평가하기 위해 초음파측정을 실시하였으며, 화학적 훼손도를 평가하기 위해 이동식 X-선 형광분석기를 활용하여 표면변색 오염물과 토양의 성분분석을 실시하였다.

훼손지도 작성은 현장조사 및 고해상도의 사진자료를 바탕으로 물리적 훼손, 화학적 훼손, 생물학적 훼손 상태로 세분하여 작성하였다. 각 요인별 훼손상태 조사결과를 종합하여 종합 훼손지도를 작성하고 각 손상유형별 훼손율을 산출하였다. 훼손도면 작성에 사용된 프로그램은 2D그래픽 전문응용 프로그램을 이용하였으며, 훼손율 산출은 AUTO CAD프로그램을 이용하였다.

용화광산 선광장에 남아있는 구조물의 강도 및 물리적 손상도를 평가하기 위해 초음파속도를 측정하였다. 초음파속도 측정에 사용된 기기는 CNS FARNELL사의 Model PUNDIT PLUS이며, 탐촉자는 UTREXTXRX(54kHz)를 사용하였다. 측정값은 WINDOWS용 SURFER 프로그램을 이용하여 각각의 입면도에 투영하여 전체적인 손상도를 파악하였다.

구조물 표면에 발생되어 있는 오염물과 토양의 성분을 분석하기 위해 사용한 P-XRF 분석기는 Innov-X System사의 Portable XRF Analyzer를 이용하였으며, 토양 및 경원 소분석 모드를 적용하여 각각 60초씩 원자번호 15번 이상의 원소에 대해서 분석을 실시하였다. 분석 과정에서 X-선이 얇은 오염물 층을 투과하여 구조물을 이루는 성분까지 분석되는 점을 감안하여 신선한 면에 대해서도 측정하였으며 오염물의 성분과 비교분석 하였다.

3. 현황 및 선광공정

3.1. 연혁 및 현황

용화광산 선광장은 경상북도 영양군 일월면 용화 2리에 있다. 이 지역의 지형은 전체적으로 태백산맥 준령에 놓여 있어 일월산(1,218m), 울련산(938m), 독경산(683m) 등 해발 600m 이상의 고지로 험준한 지형을 이루고 있다. 선광장 앞으로는 일월산 일대의 계곡이 합쳐져 형성한 낙동강

수제인 반변천이 흐르고 있다(Figure 1A). 현재의 명칭인 용화광산은 일월산 자락에 위치하고 있어 과거에는 일월광산으로 통용되기도 하였다.

일반적으로 선광장은 효율적인 선광작업을 위해 사면에 건설되며 약 15~28도의 경사를 가진 계단형태로 조성된다. 용화광산의 선광시설은 산자락을 따라 여러 단계의 공정을 각 계단에 설치한 근대에 조성된 얼마 안 남은 선광장 중의 하나로 현재 13열의 시설물들이 분포한다. 각 계단에는 당시 작업공정을 잘 알 수 있는 시설의 흔적이 남아있어 중요한 자료를 제공한다(Figure 1B, 1C).

1939년부터 약 40여 년간에 걸쳐 일월산에서 채광한 광

석을 선광장으로 운반하여 아연, 연, 동, 금, 은을 선광하였다. 특히 1943년 11월에 하루 100M/T의 부선설비가 완성된 후 본격적인 선광작업이 이루어졌으며, 1948년 8월까지 약 4만 5천M/T의 원광을 이곳에서 처리하였다. 이 광산에서는 동 28톤, 연 18.5톤, 아연 4.5톤 정도가 생산되었다.

일월산에서 채굴한 금, 은, 동, 연, 아연 등의 선광 및 제련은 해방 후에도 우리나라 사람에게 의하여 계속 운영되었으나 채산성 악화로 1976년도에 폐광되었다. 이후 금속 제련과정에서 사용한 비소(As), 청화소다(NaCn) 등 화학성 독성물질로 오염된 광미와 폐광석 등에 의해 토양이 오염되고, 오염된 침출수가 하천으로 흘러들어 환경오염이 심

Figure 1. Occurrences of the ore dressing plant for Yongwha mine. Location and topography of the mine area (A), Panoramic view (B) and simplified map of the dressing plant (C).

Figure 2. Ore dressing system of the ore dressing plant in the Yongwha mine.

각한 채 30년 동안 방치되어 있었다.

영양군에서는 2001년도에 폐광지역 토양오염방지사업의 일환으로 오염원을 완전 밀봉하고 매립한 후 공원부지로 조성하였다. 또한 2004년도에는 각종 편의시설을 설치하고 일월산에서 자생하는 야생화 113,000본(64종), 수생 식물 6,000본(11종)을 식재하여 전국 최대 규모의 야생화 공원을 조성하여 관광자원으로 관리하고 있다².

3.2. 선광공정

광석의 선별조작은 비중의 차를 이용하여 광물을 선별하는 비중선광, 광물 표면의 계면화학적 성질의 차를 이용하는 부유선광, 광물의 자기적 성질의 차를 이용하는 자력선광, 광물의 전기적 성질의 차를 이용하는 정전선광 등이 있다. 넓은 뜻의 선광기술은 선별조작을 주체로 하고, 여기에는 파쇄, 체질, 분쇄, 분교, 농축, 여과 등 여러 단위조작을 가한 처리기술의 유기적 조합에 의해서 이루어진다. 가행당시 용화광산 선광장의 선광공정은 Figure 2와 같다.

광산에서 채굴된 광석이 받는 선광처리의 일반적인 과정은 다음과 같다. 벨트 컨베이어, 광차, 덤프트럭 등에 의해서 운반되어온 조광은 파쇄기로 공급되어 파쇄된다. 파쇄과정에서는 각종 파쇄기 외에 진동체와 같은 체질기계가 파쇄공정을 돕는다. 조광의 입도는 수십 cm에 이르지만, 파

쇄공정에서 10mm 이하의 입도까지 파쇄된 다음 저광사에 저장된다. 이후 조광은 분쇄기 및 분급기 등에 의해 지속적으로 파쇄되어 200 μ m 정도로까지 분쇄된다.

200 μ m 이하 정도로 분쇄된 펄프는 부유선광회로로 운반된다. 부유선광회로는 여러 대의 부유선광기로 이루어지며, 중간산물의 순환과 재선별에 의해서 한층 높은 효과를 낼 수 있도록 고안되어 있다. 부유선광기는 펄프를 휘저으면서 동시에 공기를 펄프에 제공함으로써 미세한 기포를 만드는 구조로 되어 있다³.

부유선광기에서는 광석과 부선제가 반응하면서 특정 광물만이 기포와 함께 떠오르는데, 이때 펄프 표면에 생긴 거품을 회수하여 광물을 선별하는 과정이 진행된다. 이러한 방법으로 조건을 달리하면서 여러 종류의 광물을 분리시킬 수 있다. 또한 습식처리를 받은 선광산물은 필요에 따라 농축, 여과 등의 탈수공정을 거치면서 조광은 정광과 미광으로 분리된다. 이렇게 여러 단계를 거치며 분리된 정광을 모아 제련과정을 거쳐 각종 금속의 원료로 생산된다.

4. 비파괴 훼손도 진단

4.1. 훼손지도 작성 및 훼손율 산출

용화광산 선광장 시설물의 손상정도를 파악하기 위해

Figure 3. Deterioration types of the ore dressing plant in the Yongwha mine. (A, B, C) Cracks, (D, E) Break out, (F) Organic contaminant and soil, (G) Black discoloration, (H) White discoloration, (I) Green discoloration, (J) White brown, brown, reddish brown discoloration.

훼손지도를 작성하였다. 석조문화재를 대상으로 훼손지도의 작성방법은 석조문화재 연구자들에 의해 많은 진전을 보이고 있다^{4,8}. 이 용화광산 선광시설의 훼손도를 정량적으로 평가하고 향후 보존처리에 이용할 수 있도록 하기 위해 고해상도 사진과 도면을 바탕으로 제작된 실측도면에 훼손지도를 작성하였다. 훼손지도를 작성하기 위해 현장조사시 훼손유형별로 균열, 탈락, 생물, 토사물, 변색으로 분류하고 변색은 색상별로 백색, 흑색, 황색, 갈색, 적갈색, 녹색으로 세분화하여 표기하였다. 또한 조영훈과 이찬희(2011)⁸가 제시한 방법을 바탕으로 종합훼손지도 작성 및 훼손율을 산출하였다.

이 선광광의 물리적 훼손양상은 주로 균열과 탈락이다. 이중 13열의 구조물과 3열의 농축조에 발생한 수직 균열은 선광장 구조물의 안정성을 크게 위협하고 있다(Figure 3A, 3B, 3C). 13열 구조물에 수직으로 발달한 균열들은 ‘ㄷ’모양의 구조적 형태를 감안할 때 강수로 인해 일월산 상부에서 흘러내린 토사가 내부를 채우면서 생긴 전단응력으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

또한 대부분의 구조물에서는 수평 및 사선방향의 크고

작은 균열들이 발생되어있다. 각 구조물에 발생한 균열의 빈도수를 살펴보면 2열의 구조물은 63개로 균열이 가장 많이 발생한 것으로 나타났다. 다음으로는 5열(57개)의 구조물로 확인되었으며 1열, 3열, 4열, 6열, 8열의 구조물은 30여개의 균열이 발생한 것으로 나타났다. 반면 선광장의 상부에 있는 9열~13열의 구조물에 발생한 균열은 대부분 15개 미만으로 하부에 있는 구조물보다 상대적으로 적은 발생빈도를 보였다(Figure 4, 5).

용화광산 선광장 구조물에 발생한 훼손유형 중 탈락은 주로 균열을 따라 사선 및 수평방향으로 발생되어 있다(Figure 3D, 3E). 각 열에 남아있는 구조물에서 확인되는 탈락은 2열의 구조물에서 14.3%로 가장 높은 발생율을 나타냈다. 전반적으로 선광장 하부의 구조물(1~6열)은 10% 내외의 발생율을 보이는 반면 선광장 상부 구조물(7~13열)의 탈락 발생율은 5% 이하로 상대적으로 낮게 나타났다(Figure 4, 5).

선광광 구조물의 표면에 서식하고 있는 생물은 대부분 흑색을 띠는 지의류들이다(Figure 3F). 이 지의류들은 1열에서 7열까지의 구조물 표면에서는 거의 관찰되지 않지만 8열에서 13열까지 상당히 왕성한 것으로 나타났다. 8열에서

Figure 4. Deterioration rate (%) according to the deterioration types and level of the plant.

Figure 5. Comprehensive deterioration map of the ore dressing plant in the Yongwha mine.

13월까지의 생물피도는 47.1~90.8%로 상당히 많은 영역에서 발생되었다. 또한 구조물 표면에 피복된 토사물의 내부에서도 생물이 서식하고 있을 가능성이 높기 때문에 생물의 발생율은 계속 증가할 것으로 판단된다(Figure 4, 5).

이 선광장 구조물의 표면은 황색, 갈색, 적갈색, 백색, 흑색, 녹색 등 다양한 색상으로 변색되어 있다(Figure 3G, 3H, 3I, 3J). 이 중에서 가장 높은 점유율을 차지하는 색상은 황색 변색이다. 각 열에 발생한 황색변색의 발생율을 살펴보면 7열의 구조물에서 91.5%로 가장 높게 나타났다. 그 다음으로는 1열(75.6%), 3열(68.2%), 6열(49.4%), 2열(42.4%) 구조물 순으로 높은 발생율을 보였다. 그러나 8열에서 13열까지는 15% 이하로 상대적으로 낮은 발생율을 나타냈다(Figure 4, 5).

갈색변색, 적갈색변색 및 흑색변색은 황색변색과 마찬가지로 7열을 기점으로 1열에서 6열의 구조물에서는 10~20% 정도의 발생율을 나타내는 반면 8열에서 13열의 구조물에서는 거의 발생하지 않았다. 녹색 및 백색변색은 3열, 6열, 9열, 10열에서 2% 내외로 국부적으로 발생해 있는 것으로 나타났다(Figure 4, 5).

이상의 결과를 종합해보면, 전반적으로 6열과 7열을 기점으로 하여 용화광산 선광장 상부(7~13열)에서는 생물, 토사물의 훼손율이 높은 반면 하부(1~6열)에서는 탈락, 균열, 표면변색의 훼손율이 매우 높게 나타났다. 이와 같이 선광장의 중간 지점을 중심으로 각 유형별 손상율이 급격한 차이를 보이는 이유는 가행당시 선광과정과 많은 연관성이 있을 것으로 판단된다.

광석의 선광과정은 크게 기계적인 과정과 화학적인 과정으로 분류된다. 기계적인 공정은 채광된 광석을 낮은 입도로 분쇄하는 과정으로 이와 같은 공정은 선광장의 상부에서 주로 이루어진다. 화학적인 공정은 특정 화학용액을 사용하여 광물별로 분류하는 과정으로 선광장의 하부에서 주로 이루어진다. 따라서 이 선광장에 사용되었던 화학용액들이 구조물의 콘크리트와 반응하면서 하부에서 물리화학적 풍화작용이 활발히 일어나 탈락 및 변색의 훼손율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 하부 구조물에서 생물이 거의 관찰되지 않는 점 역시 중금속에 의한 토양오염으로 인해 생물이 서식하기 어려운 환경을 조성했기 때문인 것으로 판단된다.

4.2. 초음파 속도

용화광산 선광장과 같은 콘크리트 구조물의 물성을 파

악하기 위해 초음파 측정을 실시하였다. 초음파 탐사는 구조물의 물성 및 안전진단을 실시하기 위한 비파괴 분석방법으로 근대 건축물 및 교량의 안정성을 평가하기 위해 널리 사용되고 있다. 또한 최근에는 석조문화재를 대상으로 초음파를 활용한 안전진단 연구가 활발히 진행되고 있다^{9,12}.

초음파속도 측정은 선광장 구조물의 형태를 고려하여 간접전달 방식으로 측정하였다. 초음파의 속도를 측정할 경우 발진자와 수신자 사이의 거리에 따라 속도가 달라진다. 이는 초음파의 속도가 매질의 표면보다 내부에서 더 빨리 전달되기 때문이다. 따라서 간접법에 의한 측정위치별 초음파속도와 진자간 측정거리별 직접법속도/간접법속도의 비를 고려할 때 최소 20cm 이상의 측정거리를 가져야 한다¹³.

선광장 구조물의 초음파속도 측정은 파장의 전달이 안정적으로 전달되는 탐사거리인 20cm 간격으로 측정하였다. 또한 측정의 신뢰도를 높이기 위하여 한 구조물에 대하여 여러 지점을 측정하였고, 동일지점에 발진자와 수신자를 교대로 측정하여 그 평균값을 초음파시험 속도로 하였다. 탐측자는 불균질한 암석 내에서 초음파의 투과성이 높고, 감쇄가 적은 54kHz의 주파수를 가진 접촉부위가 뽕족한 탐측자를 이용하였다. 또한 현장에서 측정된 직접법속도/간접법속도의 비를 고려하여 보정하였다.

이와 같은 방법을 통해 실시한 초음파탐사는 물리적 및 화학적 훼손이 가장 심각한 것으로 나타난 1열, 2열, 3열 구조물을 대상으로 정밀조사 하였다. 측정지점은 1열이 100지점, 2열은 177지점, 3열은 93지점으로 총 370지점에 대하여 초음파탐사를 실시하였다.

이 선광장의 콘크리트 구조물 1열에 대한 초음파속도는 1,787~2,440%(평균: 2,440%, 표준편차: 219)의 분포를 나타냈으며, 2열에 있는 정광탱크 출구와 동일선상에 있는 지점에서 낮은 초음파속도 분포를 보인다. 2열 콘크리트 구조물의 초음파속도는 1,278~3,111%(평균: 2,506%, 표준편차: 293)의 분포를 보인다. 정광탱크 출구지역과 3번 농축조를 기점으로 우측부분에 저속도대가 집중적으로 분포하고 있다. 3열 농축조의 초음파속도는 1,720~3,057%(평균: 2,409%, 표준편차: 234)로 나타났다(Figure 6, 7).

용화광산 선광장 콘크리트 구조물의 초음파속도 분포를 종합해보면 농축조와 정광탱크 출구를 축으로 일직선상에 위치한 지점들에서 낮은 초음파속도 분포를 나타냈다. 또한 1열과 2열에서는 농축조 우측면 영역에서도 저속도대가 분포하고 있다. 이와 같이 낮은 초음파속도 분포를 나타

내는 영역을 훼손지도와 비교해 본 결과, 적갈색변색 및 흑색변색, 탈락 및 균열과 같은 물리화학적인 훼손이 집중적으로 발생한 지점들이었으므로 나타났다.

이상의 초음파속도 측정결과를 토대로 기존에 연구된 압축강도 추정식에 적용하여 용화광산 선광장 콘크리트 구조물의 압축강도를 추정하였다. 초음파속도를 이용한 콘크리트의 압축강도 산출은 아래의 식(1)¹⁴과 같다. 식에서 F_c 는 압축강도(kgf/cm^2)이며, V_p 는 초음파속도($\%$)이다.

$$F_c = 215V_p - 620 \quad (1)$$

이 선광장 콘크리트 구조물 중 물리적 및 화학적 훼손도가 높은 1열, 2열, 3열 구조물을 대상으로 압축강도를 산출하였다. 이 결과, 콘크리트 구조물의 평균 압축강도는 529kgf/cm^2 로 나타났으며, 최대압축강도는 668kgf/cm^2 , 최소압축강도는 274kgf/cm^2 로 계산되었다(Figure 7). 현재 용화광산 선광장은 운행이 중지된 상태로 구조물의 상부 및

외부로부터 받는 압력이 매우 낮은 상태이다. 따라서 구조물의 강도는 전반적으로 안정한 것으로 판단된다. 그러나 구조적 불안정을 유발하는 균열이 발생한 영역(3열, 13열)에 대해서는 보강이 실시되어야 할 것이다.

4.3. 표면오염물 분석

용화광산 선광장은 균열 및 탈락과 같은 물리적 훼손이 외에도 표면변색이 심각한 것으로 나타났다. 이 선광장 구조물 표면에 발생한 변색은 백색, 녹색, 흑색 및 갈색계통으로 나뉘고 갈색계통은 세분화되어 황갈색, 갈색, 적갈색 등 다양한 색상을 나타낸다. 변색을 유발하는 원인물질의 화학적 특성을 살펴보기 위해 P-XRF를 이용하여 성분분석을 실시하였다.

분석을 위해 P-XRF에서 발생한 X-선의 투과 깊이는 분석대상의 재질특성에 따라 달라진다. 일반적으로 X-선이 얇은 오염물층을 투과하여 구조물 내부까지 분석되기 때문

Figure 6. Results showing the ultrasonic velocity measurement of the ore dressing plant.

Figure 7. Diagrams showing the ultrasonic velocity measurement and calculating compressive strength of the ore dressing plant.

에 분석결과는 오염물과 구조물의 성분을 동시에 분석하게 된다. 따라서 오염물의 성분만을 검출하기 위해 구조물의 함량을 기준으로 표준화하였다^{15,16}.

용화광산 선광장 구조물 표면에 발생한 백색오염물을 대상으로 성분분석을 실시한 결과, 구조물의 성분에 비해 S, Fe, Zn, Pb가 높은 반면 K, Ca는 상대적으로 낮은 함량을 보였다(Figure 8). 따라서 이 백색오염물은 일반 석조건도물에서 백화를 유발시키는 석고가 아닌 다른 물질인 것으로 판단된다. 강한 외(2008)¹⁷는 용화광산에 침전된 백색 물질은 석영 혹은 Al-수산화물이라 추정한 바 있다.

구조물 표면의 녹색오염물은 구조물 성분에 비해 S, Cu, Zn의 함량이 100,000ppm 이상 높게 측정되었다(Figure 8). 일반적으로 동 광석이 부식하게 되면 녹색의 공작석(malachite)이 생성되며, 아연은 일반적으로 청색을 띠는 금속광물이다. 과거 용화광산은 동을 약 28톤, 아연은 약 4.5톤 정도의 많은 양을 생산하였던 것으로 볼 때, 토양 속에 잔류해있는 광석의 잔해들에서 Cu, Zn이 용출되어 재침전된 것으로 판단된다.

흑색오염물을 대상으로 성분분석을 실시한 결과, 전반적으로 선광장 구조물보다 S, Fe의 함량이 100,000~600,000ppm 정도로 매우 높은 것으로 나타났으며 Cu, Zn, Pb 등이 약 100,000~200,000ppm 정도 높은 함량을 보였다. 이와 같이

함량이 높은 원소들이 산화되면서 흑색오염물을 발생시킨 것으로 판단된다. 또한 분석지점 중 1곳에서는 다른 측정지점들에서 나타나지 않는 흑색을 띠는 Mn이 약 100,000ppm 정도 높게 측정되었다(Figure 8).

갈색계통의 오염물질은 공통적으로 S, Fe의 함량이 높게 나타났다. S의 함량은 색상의 차이에 따라 약간의 차이가 있지만 대부분의 측정지점에서 선광장 구조물 보다 100,000~300,000ppm 정도 높게 나타나는 경향을 보인다. 반면 Fe는 각 색상에 따라 함량의 차이가 있는 것으로 나타났다. 황갈색 오염물질의 평균 Fe 함량은 60,578ppm을 나타내는 반면 갈색은 181,874ppm, 적갈색은 251,371ppm으로 색상이 짙어질수록 Fe의 함량이 높아지는 경향을 보였다(Figure 8). 따라서 구조물 표면에 침전된 산화철의 함량 차이에 따라 갈색계통의 변색정도가 달라지는 것으로 나타났다.

4.4. 토양의 성분분석

용화광산 선광장 구조물 표면에 발생한 변색오염물의 P-XRF 분석결과를 종합해보면 변색을 유발시키는 주요원소는 S, Fe, Zn, Cu, Pb로 나타났다. 이 원소들은 용화광산에서 생산되었던 광석의 주요 성분들이다. 가행당시 채광

Figure 8. Representative results of the P-XRF analysis for surface contaminants.

되었던 광석의 잔해들이 선풍장 토양에 포함되어 있는 양을 조사하기 위해 각 열의 토양을 대상으로 성분분석을 실시하였다. 또한 선풍장 내의 토양과 광석의 잔해들로부터 오염이 되지 않은 토양의 성분을 비교하기 위해 13열로부터 사면의 상부로 20m 지점의 토양도 같이 분석하였다.

토양의 성분분석 결과, 선풍장 정상의 상부토양은 구조물 표면을 오염시키는 주요원소인 S, Fe, Zn, Cu, Pb가 거의 검출되지 않았다. 그러나 선풍장 최상부에 위치한 13열의 구조물 근처의 토양에서부터 2열에 있는 토양에서는 표면변색을 유발시키는 원소들이 다량 검출되었다(Figure 9).

각 열에 따른 토양의 원소함량을 살펴보면 S, Cr, Zn, As는 함량의 정도는 다르지만 선풍장 상부의 토양에서는 거의 검출되지 않았으나, 13열부터 검출되기 시작하여 12열, 11열까지 증가하고 10열에서는 감소하는 경향을 보인다. 또한 8열부터 증가하기 시작하여 6열, 5열에서 최대함량을 보이다가 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 선풍장 내 토양의 Fe 함량 역시 비슷한 경향을 나타내지만 전반적으로는 상부에서 하부로 내려올수록 증가하는 경향을 보인다. Cu, Ti, Pb와 같

은 원소들의 함량은 13열에서 7열까지는 동일하거나 서서히 증가하다가 6열에서 가장 높은 함량값을 나타내고 선풍장 하부로 내려올수록 서서히 감소하는 경향을 보인다(Figure 9).

5. 고찰 및 결론

용화광산 선풍장의 훼손도 진단 위해 훼손지도를 작성하고 각 열에 따른 물리적 및 화학적 손상에 대한 훼손율을 산출하였다. 이 선풍장을 구성하고 있는 구조물들은 균열, 박리박락과 같은 물리적인 훼손과 다양한 색상의 표면변색에 의한 화학적 훼손이 발생한 것으로 나타났다. 구조물에 발생한 훼손율을 각 열별로 비교해본 결과, 6열과 7열을 기준으로 하여 상부에 있는 구조물보다 하부에 있는 구조물들의 물리적 및 화학적 훼손이 더 많이 발생한 것으로 나타났다.

선풍장의 중간 지점을 중심으로 각 유형별 훼손율이 급격한 차이를 보이는 이유는 가행당시 선풍공정과 많은 연관성이 있는 것으로 판단된다. 광석의 선풍과정은 크게 기계적인 공정과 화학적인 공정으로 분류되는데 기계적인 공

Figure 9. Representative results of the P-XRF analysis for soil according to level of the plant.

정은 채광된 광석을 낮은 입도로 파쇄하는 공정으로 선광장의 상부에서 주로 이루어지며 화학적인 공정은 특정 화학용액을 사용하여 광물별로 분류하는 공정으로 광석의 분쇄하는 과정과 함께 선광장의 하부에서 이루어진다. 이와 같은 공정으로 인해 하부에 있는 구조물들은 선광장의 가행당시 물리적 및 화학적 영향으로 인해 훼손이 더욱 진행된 것으로 판단된다. 따라서 선광장 구조물의 보존처리 및 모니터링은 하부에서 상부쪽으로 순차적으로 진행한다면 보다 효율적으로 보존관리 할 수 있을 것이다.

구조물의 물성을 평가하기 위해 초음파속도를 측정한 결과, 평균 초음파속도는 2,462%로 나타났다. 이를 초음파속도와 압축강도와의 경험식에 대입하여 강도를 산출해보면 529kgf/cm²로 현재상태의 구조적 강도는 비교적 안정한 것으로 나타났다. 그러나 가행당시 선광작업에 주로 사용되었던 농축초와 정광탱크 부분에서 저속도대가 확인되었다. 이는 구조물에 발생한 균열 및 탈락에 의한 것이다. 운행이 중단된 현시점에서 구조물의 전반적인 강도는 안정적 일지라도 균열 및 탈락이 발생한 영역을 대상으로 보강이 실시되어야 할 것이다.

선광장 구조물 표면에는 다양한 색상의 변색이 발생되어 있다. 표면변색 오염물질을 대상으로 한 P-XRF 분석결과에 의하면 오염물질의 주요성분은 용화광산에서 채굴하였던 광석들의 주요성분과 동일한 것으로 나타났다. 또한 각 열의 토양에 대한 성분결과에서도 표면변색을 유발하는 중금속 원소들이 상당량 검출되었다. 따라서 우천시 물의 흐름에 따라 이동하는 토사가 구조물 표면에 침착하게 되면 토양 속의 원소들과 구조물들이 반응하여 2차 훼손이 발생할 수 있다. 이러한 점은 선광장 구조물만이 아니라 자연환경에도 영향을 줄 수 있기 때문에 토양의 정화를 병행해야 할 것이다.

참고문헌

1. 김정신, “근대문화유산의 보존현황과 법제도 개선방안”. *건축역사연구*, **13**, p181-188, (2004).
2. 문화재청 근대문화재과, “*한국의 근대문화유산*”. 문화재청, (2007).
3. 이강문, “광물처리공학”. 반도출판사, (1995).
4. Lee, C.H., Jo, Y.H., Kim, J., “Damage evaluation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statues”. *Environmental Earth Science*, **64**, p1-14, (2011).
5. 김지영, 이찬희, 이명성, “경주 석빙고의 정량적 훼손도 평가 및 미기후환경 분석”. *보존과학회지*, **25**, p25-38, (2009).
6. 이선명, 이찬희, 김지영, “서산마애삼존불상의 정밀 손상도 평가와 보존환경 분석”. *보존과학회지*, **26**, p277-294, (2010).
7. Jo, Y.H., Lee, C.H., Chun, Y.G., “Material characteristics and deterioration evaluation for the 13th century Korean stone pagoda of Magoksa temple”. *Environmental Earth Sciences*, **66**, p915-922, (2012).
8. 조영훈, 이찬희, “석조문화유산의 손상지도 제작방법과 표면 및 3차원 손상을 평가기법”. *보존과학회지*, **27**, p251-260, (2011).
9. 서만철, 송인선, 최희수, “암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조안전 진단”. *지구물리*, **4**, p57-69, (2001).
10. 서만철, 송인선, 최희수, “초음파 속도 분석을 통한 불국사 다보탑 구조안전 진단”. *지구물리*, **5**, p199-209, (2002).
11. 전유근, 이찬희, 조성남, 조영훈, 박기정, 양필승, “운현궁 수조의 손상평가와 초음파 속도를 이용한 풍화도 및 균열 심도 측정”. *보존과학회지*, **24**, p1-12, (2008).
12. 이명성, 이재만, 김재환, “의성 탑리리 오층석탑의 재질특성과 초음파 물성진단”. *문화재*, **45**, p70-85, (2012).
13. 오병환, 김광수, 김세훈, “초음파 속도법을 이용한 콘크리트 구조물의 균열깊이 측정”. *한국구조물진단유지관리학회 학술발표 논문집*, **10**, p61-66, (1999).
14. 日本建築學會, *コンクリート強度推定のための非破壊試験法マニュアル*. (1983).
15. 전유근, 김원국, 조영훈, 한두루, 김선덕, 이찬희, “창녕 관룡사 약사전 벽화의 안료분석 및 비파괴 훼손도 진단”. *보존과학회지*, **25**, p383-398, (2009).
16. 전유근, 이찬희, “X-선 투과깊이 검증에 따른 벽화안료의 정밀분석: 논산 쌍계사 대웅전”. *보존과학회지*, **27**, p269-276, (2011).
17. 강한, 최승원, 류충석, 김준영, 장운득, 김정진, “영양 용화광산의 광미 및 폐석과 침출수 침전물에 대한 광물학적 특성연구”. *2008년도 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집*, p148, (2008).