碩士學位 請求論文

Laser를 이용한 石造文化財 汚染物의 除去에 關한 研究

- 경천사십층석탑에 발생된 오염물 중심으로 -

慶州大學校 大學院

文化財學科

金 振 亨

指導敎授 韓 京 淳

2003年 7月

Laser를 이용한 石造文化財 汚染物의 除去에 關한 研究

- 경천사십층석탑에 발생된 오염물 중심으로 -

慶州大學校 大學院

文化財學科

金 振 亨

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

指導教授 韓 京 淳

2003年 7月

金振亨의 碩士學位論文을 認准함

委 員 長 ______________ 인

審査委員 ______________ 인

審査委員 ______________ 인

慶州大學校大學院

2003年 7月

碩士學位 請求論文

- 목 차 -

Ⅰ. 서 론 ········· 1
1. 연구배경 ········· 1
1) 역사적 배경 ········· 1
2) 사이트 환경 ········· 2
3) 석조문화재에 형성된 오염물의 세정 ········· 3
2. 연구목적 ········· 10

Ⅱ. 연구 방법 ········· 12
1. 구성암석과 오염물의 동정 ········· 12
2. 오염물 제거법 ········· 13
1) 레이저를 이용한 제거법 ········· 13
⑴ 레이저광의 특성 및 세정원리 ········· 13
⑵ 시편제작 ········· 16
⑶ 시험기기 ········· 16
⑷ 흡수능(Absorptivity) 시험 ········· 17
⑸ 노출거리와 노출횟수 시험 ········· 17
⑹ 재질별 반응 비교 시험 ········· 18
⑺ 오염물 정도에 제거 시험 ········· 18
2) 미소마모법 ········· 18
⑴ 세정원리 및 투사체의 성질 ········· 18
⑵ 시편제작 ········· 20
⑶ 시험기기 ········· 20
⑷ 제거시험 ········· 20

Ⅲ. 연구 결과 ·21
1. 경천사십층석탑의 구성 암석 분석결과 · · · · · · · ·21
2. 경천사십층석탑의 발생 오염물 분석결과 · · · · · ·25
1) 오염물 현황 조사 결과 · · · · · · · · · · · · · ·25
2) 석재표면에 형성된 오염물 분석결과 · · · · · · ·40
3. 오염물 제거법을 이용한 결과 · · · · · · · · · · ·52
1) 레이저를 이용한 결과 · · · · · · · · · · · · · ·52
⑴ 흡수능 시험 · · · · · · · · · · · · · · · · ·52
⑵ 노출횟수와 노출거리 시험 · · · · · · · · · · ·54
⑶ 재질별 반응 비교 시험 · · · · · · · · · · · · ·55
⑷ 오염물 정도별 제거 시간 · · · · · · · · · · · ·59
2) 미소마모법에 의한 제거 · · · · · · · · · · · · ·60

Ⅳ. 레이저를 이용한 오염물의 제거방안 및 고찰 · · · ·64
1. 보존처리실태 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·64
2. 레이저를 이용한 오염물의 제거 방안 · · · · · · ·65
1) 오염물 정도에 따른 제거 방안 · · · · · · · · · ·65
2) 오염물 진행단계에 따른 제거 방안 · · · · · · · ·68
3) 세부 조각면에 대한 제거 방안 · · · · · · · · · ·71

Ⅴ. 종 합 ·74

<참고문헌>
<요 약>
<Abstract>

Ⅰ. 서 론

1. 연구배경

1) 역사적 배경

경천사십층석탑은 경기도 개풍군 광덕면 부소산에 위치한 경천사에 있던 탑으로 1906년 12월 방한했던 일본의 궁내대신宮內大臣 다나카田中光顯에 의해 1907년 3월에 일본으로 밀반출 되었다. 대한매일신보는 1907년 3월부터 6월까지 석탑의 밀반출 사실을 보도하였고 일본과 미국의 언론도 이를 비난하는 기사를 실었다(이구열, 1996년). 1919년경 반환된 석탑은 1959년에 복원을 시작하여 1960년 경복궁 동쪽 건춘문建春門 안에 세워졌고 이후 1995년 해체하여 보존처리 중에 있다.

이 석탑의 건립연대는 초층 탑신 '이맛돌'에 조탑명이 새겨져 있어 알 수 있는데 <至正八年戊子三月 日(지정팔년무자삼월 일)>이라는 기명에 의하여 그 연대가 고려 제 29년 충목왕 4년(1348년)으로 추정되고 있다. 이 석탑의 각 부에서는 원나라의 라마적인 수법을 엿볼 수 있는데, 당시의 정치적인 상황으로 보아 원나라의 영향이 다분히 작용하였을 것이라 짐작된다. 또한 고려 당대에는 보기 드문 형식적인 특징을 지니고 있다.

이 석탑은 조선 초기 건립된 원각사지십층석탑(국보 제2호)과 더불어 이러한 특이한 양식은 우리나라 석조물에선 유례를 찾기 힘든데, 그 대표적인 특징을 살펴보면 전체의 부재가 고려시대 말기까지 유례가 없었던 석회암으로 조성되어 있으며 기단부와 3층탑신부까지가 아(亞)자형의 평면을 이루어 널찍한 기저基底를 이루고 있다. 탑신부의 3층까지는 기단부과 동일한 넓이로 되어 있어 조형적 안정감을 주고 있고, 기단부가 3층으로 된 것과 연화대의 갑석을 조성한 것, 상층기단 갑석 상단부에서 난간을 돌려 탑신부를 받고 있는 형식은 더욱 특징적인 부분이다. 탑신부에 목조건축의 각 부분을 모방한 형태와 옥개석의 다포집에 두공형식, 팔작지붕, 기왓골 등의 목조건축 형태를 나타내고 있어 그 특징을 더하고 있다. 이 석탑은 건축적인 면은 물론 각 부재의 조각이 건축과 조식의 양면을 다 갖춰 특수

한 유례로 주목된다. 또한 앞에서 언급했듯이 건조연대가 14세기 중엽으로 뚜렷하여 당시의 시대적 특수성을 연구할 수 있는 중요한 자료이다(정영호, 1998년).

2) 사이트 환경

1919년경 반환된 석탑은 경복궁 회랑에 방치되어 있다가 1960년에 역사적 수난으로 인해서 많은 부재들이 파괴와 조각면의 훼손이 이루어진 상태를 복원 과정에서 시멘트 모르타르를 이용하여 부분적인 보완을 하였다(김사덕, 1996년). 1960년 복원된 이후, 부재들의 원형 보존 상태가 양호한 상태였으나 도심 중심에 위치한 지리적 환경에 의해 경천사십층석탑은 직접적인 영향을 받게 되었다. 특히, 문화재의 손상요인인 온도, 습도, 광 및 공기오염물질 등의 환경 인자에 노출된 상태로 있었다(강대일, 2003년). 그 중 SO_2, NO_2, O_3 및 분진 등의 공기오염물질은 석탑에 치명적인 영향을 주었는데, 그 원인은 대도시의 대기 상태가 급속한 산업 발전과 폭발적인 자동차 보유 대수의 증가, 대도시로의 인구 밀집 그리고 전반적인 주거 환경의 변화와 소비 증대로 인한 연료 사용량의 증가로 악화 되고 있기 때문이다(서기수 등, 1997년). 현대의 에너지원은 대부분 석유, 석탄 및 천연가스 같은 화석연료를 사용하고 있는데, 이 화석연료는 연소시 분진뿐만 아니라 대기오염물질인 SO_2, NO_x 및 HC 등이 다량 배출되어 도시 대기오염의 주범인 광화학스모그 및 산성비의 원인이 되고 있다(김희강 등, 1988년). 이러한 대기오염물질 중 SO_2는 수분과 함께 작용하여 금속재료, 대리석, 석회석 등에 부식을 야기 시키고(EPA, 1969년), 석탑과 같은 대기 중에 노출되어 있는 문화재는 대기오염물질의 침식으로 급속도로 훼손되어 흑색으로 탈바꿈하고 있다(노재식, 1980년).

1996년 1월부터 1997년 6월까지 원각사지십층석탑과 유사한 대리석 시편을 탑골공원(종로)과 광화문에서 옥외 노출 여부에 따른 산성비가 시편에 미치는 영향에 대해 실험한 결과에 의하면 옥외에 노출된 시편이 실내보다 7.7배 정도의 부식감량이 높게 나타났고 색변화 또한 노출된 시편이 옥내의 시편보다 1.2배 정도 변색도가 높게 나타났다. 또한 산성비에 대한 용해 실험 결과, 산성비는 대리석의 부식감량에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났는데(김사덕, 1997년), 이와 같은 산성비는 대기 중의 일산화

탄소, 이산화황, 질소산화물 등이 빗물과 합쳐져 산酸으로써 되어 경천사십층석탑과 같은 석회암이나 대리석 재질의 노출된 구조물의 표면을 용해시켜 물에 녹기 쉬운 물질로 변화시킨다.

이러한 이유에서 도시 근교에 위치한 석조문화재들은 보호각 설치와 같은 기본적인 대책을 세우고 있는데 대기오염에 치명적인 석회암질의 석조문화재의 경우, 그 대처 방안의 대표적인 예로 원각사지십층석탑(국보 제2호)을 들 수 있다. 이 탑은 경천사십층석탑과 위치적 환경 조건이나 조성암석 재질의 특성이 유사하여 좋은 예가 되고 있는데, 1993년 실측조사 및 상태조사를 실시한 결과, 산성비에 대한 피해가 심하여 산성비에 대한 보존 보호대책으로 빗물과의 직접적인 접촉을 차단하기 위해 보호각을 세워 빗물뿐만 아니라 눈에 덮이는 것까지 방지하고 보호각 설치 이후에도 습기가 차지 않도록 통풍에도 유의해야 한다(문화재관리국, 1993년)는 조사결과가 나온바가 있어 1999년 12월경 원각사지십층석탑에 대한 보호각 신축이 결정되어 현재 보호각 내부에 보존되고 있는 상태이며 비슷한 위치의 유사암질인 원각사비(보물 제3호)도 보호각이 설치된 상태로 보존되고 있다. 이렇듯 대기 중에 노출된 석탑에 대한 보존방안이 진행되는 가운데 경천사십층석탑 또한 이러한 외부환경에 의해 재질의 풍화와 접착면의 손상으로 인해 국립문화재연구소 보존과학연구실 주관으로 1995년 6월에 해체하여 보존처리를 진행 중에 있다.

3) 석조문화재에 형성된 오염물의 세정

⑴ 우리나라에서의 석조문화재 오염물 제거 역사

석조문화재의 오염물 제거에 관한 역사는 석굴암(국보 제24호)에 발생된 청태의 제거에 관한 기록이 최초의 사례로 들 수 있다. 석굴암은 1923년 보수공사 이후, 석굴 내의 불상과 석상 면에 청태가 발생되어 1934년에 수증기 세척(steam cleaning)방법으로 청태와 오염물을 제거하였다. 그 후 동일한 종류의 오염이 다시 심하게 생겨 1941년에도 이것을 사용하여 다시 세척하였다. 광복이후에는 1947년, 1953년, 1957년에 세척을 실시하였다. 이와 같이 5회에 걸쳐 수증기 세척을 하였으나 그때의 자세한 방법에

대한 기록이 전혀 남아 있지 않아 청태로 인한 오염물 제거하였다고 하나 이것이 어떠한 상태로 어느 곳에 얼마나 있었는지, 그 외에 무엇을 제거 한지는 알 수 없다.

1953년 수증기 세척 후, 국립박물관 경주분관장이 문교부에 1954년 6월 4일부로 제출한 보고서에 오염물의 상태에 대하여 보고하였으나 세척에 대한 자세한 방법은 없었다. 1957년 9월에 시행한 수증기 세척 때에도 그 방법 등 상세한 기록은 없다.

세척한 후인 1958년 1월 14일에 석굴암조사위원단에 의하여 세척한 결과가 조사되어 석상 면을 가열한 결과, 풍화가 상당히 촉진되었으리라는 정성적인 결과와 받침석 위에 잔가루들이 떨어진 것을 화강암이 풍화된 것이라고 보고한 것이 있다. 그리하여 그 후에는 수증기 세척방법은 사용하지 않았던 것 같으나 1967년에 발간된 『석굴암 수리공사 보고서』를 보면 1963년 3월에 온수로 오염물을 세척하였다는 짤막한 내용이 있다. 그 후 1970년 9월 먼지와 흙과 이끼류, 지의류, 오래된 먼지와 손때, 낙서, 탄산칼슘 그리고 쇠녹 등의 발생 오염물들을 진공청소기, 시트르산나트륨, 옥살산, 염화암모늄용액과 스트론튬용액 등의 약품으로 제거하였고 물리적인 방법은 지양하였다고 기록되어 있다. 그리고 석굴암 세척과 함께 다보탑과 석가탑도 같은 해에 세척을 실시하였다는 기록이 남아 있다(한국과학기술연구소, 1970, 1971년).

1977년부터 문화재관리국에서 실시한 석조문화재 보존상태 조사 실적기록을 살펴보면 대부분 암석 풍화로 인한 구조적 문제의 발생으로 부재가 균열과 박락되어 처리한 사례와 과거 처리이후, 처리재료의 내구연한으로 인한 재처리 사례가 대부분이다. 세척에 관한 기록은 보수를 위한 전前처리 과정이기 때문에 기록으로는 많이 남아 있지 않았으나, 부분적인 오염물의 제거가 이루어졌음을 알 수 있다. 그리고 90년대 중반부로 접어들면서 오염물의 피해요인에 대한 처리기록은 많이 남아있다(Table 1).

Table 1. 석조문화재 보존처리 실적

대상	처리내용	비고
사적 제195호 여주 영릉 석조물	석재표면의 지의류 세척	1977년
사적 제194호 헌인릉 태종비	비신, 비수, 비좌의 균열부분 접착 및 표면 세척	1980년
국보 제10호 실상사 백장암 삼층석탑	파손된 부분의 접착복원	1980년
보물 제197호 청양 석조삼존불상	석재표면 이물질 제거 및 파손부위 접착 복원	1981년
보물 제33호 실상사 수철화상 능가보월탑	파손된 석탑의 접착 복원	1983년
보물 제37호 실상사 삼층석탑	기단부 후면 파손부위 접착 복원	1983년
보물 제87호 신복사지삼층석탑	파손부위 접착 복원	1983년
보물 제73호 단속사지 삼층석탑외	파손부위 접착 복원	1983년
보물 제137호 봉암사지층대사 적조탑	파손부위 접착 복원	1984년
보물 제581호 월성 골굴암 마애여래좌상	보호각 제작 설치	1985년
보물 제846호 창경궁 풍기대	균열부 접착 복원	1985년
보물 제7호 고달사 원종대사 혜진탑	파손부분 접착 복원	1986년
보물 제581호 골굴암 마애여래좌상	균열부 및 균열박락부위 접착 복원	1986년
보물 제386호 창경궁 옥천교	균열부 접착 복원 및 파손부위 원형 복원	1986년
보물 제395호 선암사 삼층석탑	파손부위 접착 복원	1986년
국보 제59호 법천사 지광국사 현묘탑비	석재표면 세척 및 비신하부의 파손부위 경화처리	1987년

대상	처리내용	비고
국보 제12호 화엄사 각황전앞 석등	에폭시 수지를 이용한 접착 후 고색처리	1988년
보물 제830호 강진 금곡사 삼층석탑	옥개석, 옥신, 갑석, 기단석의 파손이탈 부위를 에폭시 수지로 접착	1988년
보물 제465호 영천 신월동 삼층석탑	에폭시 수지를 이용한 접착후 수지모르타르로 충진보강	1988년
보물 제43호 남원 만복사지 석불입상	절단부위 접착 복원 및 좌대 손실부위 충진보강	1988년
보물 제219호 논산 개태사지 석불입상	불두를 에폭시 수지를 사용 원상태로 접착후 수지모르타르로 충진보강	1988년
보물 제84호 신복사지 석불좌상	좌대 및 좌상을 에폭시 수지를 사용하여 접착 보강	1989년
보물 제45호 익산 연동리석불좌상	광배의 절단면에 에폭시 수지를 배합 충진접합	1989년
보물 제219호 논산 개타사지 석불입상	시멘트 모르타르면 제거후 합성수지로 충진보강 및 철 녹제거	1989년
국보 제64호 법주사 석연지	균열부 및 파손부위를 에폭시 수지로 충진보강후 고색처리하고 현위치로부터 이전함	1989년
보물 제679호 금릉광덕동 석조보살입상	좌대 및 균열부위 접착	1991년
보물 제111호 개선사지석등	석등 보존처리	1991년
보물 제122호 경주 두대리마애석불입상	균열부위 접착복원 고색처리	1992년
국보 제53호 연곡사 동부도외4건	파손부위 접착복원 및 이탈부위 정위치로 고정	1992년
국보 제53호 연곡사 동부도	가해하등식물제거 및 오염물 세척	1992년
국보 제54호 연곡사 북부도	〃	〃
보물 제151호 연곡사 삼층석탑	〃	〃

대상	처리내용	비고
보물 제152호 연곡사 현사탑비	〃	〃
보물 제153호 연곡사 동부도비	〃	〃
보물 제154호 연곡사 서부도비	〃	〃
보물 제981호 하남 태평 이년명 마애약사불	균열부위 접착복원 및 이탈부분 충진 보강후 고색처리	1993년
보물 제116호 영주석교리석불상	절단된 불두부분 접착복원	1993년
보물 제136호 경주미륵곡석불좌상	절단된 광배 접합 및 석불좌상 해체복원	1994년
보물 제432호 태안 마애삼존불	파손결손 부위 접착복원 및 빈공간 수지충진	1995년
국보 제112호 감은사지삼층석탑(동탑)	완전해체 후 균열부위 충진 파손 부위 수지모르타르 충진보강 및 파손되어 없어진 부재 신재로 접착복원	1996년
국보 제39호 월성나원리오층석탑	완전해체 후 균열부위 충진 파손 부위 수지모르타르 충진 보강 및 파손되어 없어진 부재 신재로 접착복원	1996년
보물 제200호 경주칠불암마애석불	파손부위 수지모르타르 충진보강 및 균열부위 수지충진	1996년
보물 제297호 청암사수도암삼층석탑	완전해체 후 균열부위 충진 파손 부위 수지모르타르 충진보강 및 파손되어 없어진 부재 신재로 접착복원	1996년
보물 제126호 무장사지삼층석탑	해체복원 및 접착복원	1996년
보물 제674호 유금사삼층석탑	절단부위 접착 및 파손부위 수지모르타르 충진 보강	1996년
보물 제387호 회암사지선각왕사비	산불로 비신, 좌대가 파손, 접합복원	1997년
보물 제139호 월정사석조보살좌상	부재를 해체하여 시멘트 제거후 합성수지를 이용 접착	1997년
보물 제658호 청룡사 보각국사정혜원융탑비	해체보수	1998년
국보 제39호 경주 나원리오층석탑	합성수지처리면 재처리 실시와 신재 균열부위 접착후 상태관찰	1998년

대상	처리내용	비고
국보 제112호 감은사지삼층석탑(동탑)	합성수지처리면 재처리 및 신재 균열부위 보수	1998년
보물 제132호 구례 화엄사동오층석탑	해체보수 실시	1999년
국보 제187호 영양 봉감모전오층석탑	석탑 표면의 백화현상 제거 및 경화처리	2000년
보물 제139호 월정사 석조보살좌상	보존처리 실시	2000년
보물 제312호 소태리오층석탑	삼층옥개석 접착복원	2001년
보물 제35호 실상사 석등	훼손된 보주에 대한 긴급보존처리	2001년
보물 제84호 신복사지 석불좌상	시멘트모르타르 제거 및 표면 오염물 제거처리	2001년
국보 제54호 연곡사 북부도	북부도 복원에 대한 긴급보존처리	2001년
보물 제84호 신복사지 석불좌상	석탑표면 오염물 제거방안, 시멘트모르타르 제거 등 보존처리	2001년
보물 제97호 원풍리 마애불좌상	석불좌상 주변 그을음제거 등 보존처리	2001년
국보 제242호 울산 봉평신라비	오염된 비신 보존처리(세척)	2001년

자료출처: 문화재연감(1977~2002년까지)

⑵ 일반적인 석조문화재 오염물 제거 방법

석조문화재의 오염물 제거에 방법적 부분은 크게 물리적인 방법, 즉 압축공기를 이용한 세척, 스팀을 이용한 세척 및 블라스팅(Blasting) 기법 등을 들 수 있으며, 계면활성제나 산성계열의 용제, 알카리계열의 용제 및 유기용제 등의 화학용제를 이용한 화학적 방법을 들 수 있다(김은영, 1998년). 물리적 방법에서 압축공기를 이용한 방법은 석재표면에 발생된 고착 기생생물의 제거 방법으로서 압축된 공기를 직경 2㎜ 이하의 노즐을 통해 제거대상에 분사하는 방식이다. 그러나 풍화의 진행도가 덜 되었거나 박리, 박락이 될 염려가 없는 석조 표면에만 사용할 수 있다. 또한 흡착력이 다소 떨어지는 회백색 조류나 남조류 같은 부착생물에는 효과를 얻을 수 있

지만, 흡착력이 강한 검은색의 변색된 오염부나 지의류에는 효과적이지 못한 한계성을 가지고 있다. 이러한 압축 공기를 이용한 방법의 한계점을 보완하기 위해 병행 실시되는 스팀을 이용한 방법은 스팀의 뜨거운 열기를 이용하여 이끼류처럼 암석표면에 뿌리를 내리며 기생하는 생물의 고사를 유도하고 균사까지 제거가 가능하기 때문에 스팀을 이용한 생물학적인 손상원인의 제거에는 용이하다(공주대학교, 2002년). 그러나 그 외의 복합적인 요인으로 발생되는 오염물의 제거에는 효과적이지 못하며 스팀의 높은 온도에 의해서 발생될 수 있는 위험적 요소를 완전히 배제할 수 없어 석재표면의 풍화정도나 상태에 따른 부분적인 적용방법으로 사용된다. 또 다른 방법으로는 미소마모법(블라스팅 기법)을 들 수 있는데 이 방법은 압축공기를 이용한 방법과 유사한 방법으로서 압축된 공기와 함께 투사체를 분사하여 제거하는 기계적 마모법으로 미세한 유리 또는 모래 입자를 적절한 공기압과 함께 분사시켜 표면의 오염 물질과 충돌시킴으로써 물리적 힘에 의해 오염물질의 제거를 유도하는 방법이다. 그러나 오염물의 제거 과정에서 제어가 어려워 제거대상물뿐만 아니라 석조물의 표면에 직접적인 손상을 일으킬 수 있는 위험요소를 내재하고 있어 제거에 있어 주의를 요하는 방법이기도 하다(이종명, 2001년).

그리고 화학적 방법에는 계면활성제, 염산, 불산, 산성불화암모늄염 등의 화학용제를 사용하여 오염물을 녹이는 방식이다. 그러나 불산의 경우 화강암에 사용시 화학 반응을 일으켜 오히려 손상을 일으킨다. 알칼리 계열의 화학용제는 오일 성분 제거시 소듐헥사메타포스페이트, 암모늄포메이트, 침투제와 에탄올 아민의 혼합제가 사용된다. 이끼와 같은 미생물 제거에는 유기용제인 펜타클로로페놀을 메탄올에 녹이고 알킬벤젠설포네이트 용액을 혼합하여 사용한다. 이외의 화학적인 방법으로 세척시 화학용재의 내부 침투를 막고 용해염을 흡수하기 위해 페이스트 상태로 만든 마그네슘, 알미늄의 하이드레이티드 필로실리케이트(Hydrated phyllosilicat-es)를 사용하여 1~2개월 동안 오염물이 발생된 표면에 도포하여 용해염을 흡수하는 방식도 있고, 팩 형태로 제거 대상에 도포하여 일정시간 경과 후 떼어내는 방식도 있다(김은영, 1998년). 그러나 앞에서와 같은 오염물질의 제거 방법은 연마제나 화학약품을 사용하는 방법으로 경우에 따라서는 표면에 영구적인 손상을 입히거나 색상을 변질시키기도 하여 문화재에 대한

적용에 있어서 주의해야 될 문제점이 많다. 또한 석조문화재에 발생된 오염물 외피층의 두께는 그 주변 환경 여건에 따라 달라지지만 보통 수㎛에서 수㎜까지 되고 석회암이나 대리석 재질의 구조물의 경우 대기 중에 생성된 오염물질과 화학적으로 반응하여 물성이 변질된 상태로 존재하기 때문에 일반적인 방법으로는 제거가 어렵다(이종명, 2001년).

⑶ 레이저를 이용한 오염물 제거방법

석조문화재에 발생된 오염물의 제거에 있어 일반적인 방법 외에 서구에서 선행된 레이저를 이용한 오염물 제거 방법에 관한 적용 사례가 있다. 레이저는 레이저 개발의 선두자인 Arthur Schwlow에 의해 레이저의 특징인 단색성에 기인된 다른 물질간의 흡수능 차이에서 발생되는 검정물질을 선택적으로 증발시키는 과정을 보고 '레이저 지우개(laser eraser)'라 명명하기도 하였는데, 1972년 John Asmus와 어느 석재 복원가에 의해 기존의 화학적 및 마모적 방법의 세척방안을 레이저로 실제적용 가능성에 대한 대처방법이라는 동의를 하고 곧 바로 시험시편을 이용한 테스트를 하게 되었다. 홀로그래픽에 사용된 펄스파 루비레이저를 이용해 표면 세정을 수행하였는데 그 결과는 대성공을 거두었다. 그리하여 모암 표면에 아무런 손상 없이 표면 오염층만의 제거가 선택적으로 이루어짐을 알게 되었다(Asmus, J. F., 1987, 1999년). 곧이어 영국 런던의 Victoria & Albert 박물관 지붕 위에서는 기존의 기계적 및 화학적 세정 처리를 한 석재 시편과 레이저 세정을 통해 얻은 시편과의 실제 환경영향 실험이 약 2년간 실시하였으며, 이 결과 레이저 세정을 한 시편이 자연 풍화작용에 훨씬 강하다는 사실을 알게 되었다. 그 이후 1970년에 유네스코의 인증 하에 최초의 실제 적용사례가 있다. 이후 1990년대 들어 꾸준한 레이저 및 광학기술의 발전 그리고 시스템의 신뢰성 확보로 인해 레이저 세정 기술은 문화재 복원을 위한 중요한 공정 기술로 현재 유럽을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다.

레이저 세정기기의 가장 큰 특징은 기존의 대표적인 방법인 미소마모법(micro-abrasive) 및 화학적 용제(chemical flux)를 이용한 기계적 혹은 화학적 방법과는 달리 레이저의 단색성을 이용한 오염물질만의 선택적 제

거가 가능하며, 아주 짧은 레이저 펄스(보통 Q-sw laser 사용)를 사용하므로 정밀한 오염층 제거가 가능하다. 그리고 외부로부터 기계적 부하를 모암 표면에 가하지 않는 표면릴리프(surface relief) 공정이다. 그리하여 접촉 마모가 발생하지 않는 동시에 레이저에 의한 고온 효과로 표면 위에 존재하는 유기물 박멸에 의한 표면살균 효과가 있으며 오염물질도 배출하지 않는 건식 세정공정이기 때문에 환경 친화적인 방법이다(이종명, 2001년).

2. 연구목적

경천사십층석탑에서 나타나는 여러 손상 형태 중에 주된 손상형태는 석재의 표면에 형성된 흑색층으로 이는 미관뿐만 아니라 암석 자체에도 큰 손상을 주는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 이런 흑색 물질들은 비나 눈과 같은 수분과 직접적인 접촉이 없고 농축된 오염물질이 쉽게 쌓일 수 있는 곳에서 찾아볼 수 있다. 이러한 흑색 물질은 화학적으로 복잡한 체계를 갖고 있어, 그 생성원인과 메커니즘을 규명하는 것은 매우 어렵다(Hoecher, 1988). 이 흑색층은 일반적으로 공기오염물질, 철과 망간 등의 유색광물의 이동과 침착의 현상에서 생성될 수 있다(Leysin *et al.*, 1989). 이러한 여러 가지 이유에 의해 생성된 경천사십층석탑의 표면오염층은 제거가 불가피하다 할 수 있다.

그리하여, 본고에서는 레이저 세정방식을 경천사십층석탑 표면에 생성된 오염층 제거에 적용하였다. 이 방식은 우리나라 석조문화재에 대한 최초 적용으로써 우선 경천사십층석탑의 구성암석과 제거대상인 발생오염물의 성분 분석을 실시하여 그 성질을 알아본 후, 레이저광의 특성을 이용한 예비실험을 실시하였다. 이후 기존의 제거방법인 미소마모법의 문제점을 알아보고, 레이저 세정방식을 적용함에 있어 유의해야 할 부분과 레이저 세정방식에 효율성의 극대화를 연구하여 경천사십층석탑에 발생된 오염층의 제거방법을 연구하고자 한다.

Ⅱ. 연구방법

1. 구성암석과 오염물의 동정

1) 분석방법

⑴ 현미경 분석

현미경 관찰은 탑으로부터 원석과 함께 박락된 파편을 수지에 마운팅 한 후 가공하여 단면을 광학현미경(Optical Microscope, Carl Zeiss, Axiotech/Progress 3012, Germany)으로 관찰하였다. 또한 관찰에 사용된 현미경의 배율을 50X 이다.

⑵ X-선 회절분석

석재의 광물 성분을 알아보기 위해 박락된 파편의 일부를 미소부 X-선 회절분석기(Micro-area X-ray diffraction system, MAC Science, MXP18VA, Japan)를 이용하여 분석을 실시하였다. 미소부 X-선 회절분석시 Target은 Cu를 사용하였다. 계측 후 분석데이타는 피이크 매칭(peak matching) 프로그램을 이용하여 각 피이크를 동정하였다. 또한 흑색오염물의 경우 광물 조성분석을 위하여 시료를 아게이트 유발에서 분쇄한 후, 분말 X선회절분석을 실시하였다. XRD 분석은 Rigaku RINT2200 모델의 X선회절기를, 분석조건은 40kV/30mA의 CuK$_\alpha$선을 이용하였다.

⑶ 형광 X-선 분석(EDXRF)

분말 상태가 아닌 일정크기의 오염물을 취하여 chamber에 넣고, 분석하고자 하는 위치를 선정하여 각 부분의 성분을 정성분석 하였다. 분석시 오차를 줄이기 위해 동일시료에 대해 5회 분석하였으며, 분석시 조건은 20 kV, 0.5mA, 300micro collimator를 사용하였고, 분위기는 Vacuum상태에서 100sec간 분석하였다.

⑷ 유도결합플라즈마발광분석(ICP-AES)

오염물을 분말화하여 시료 약 50㎎을 칭량하고 100㎖ 테프론 비이커에 넣은 다음 질산(HNO_3)과 불산(HF)을 각각 5㎖씩 가해 가열판에서 200℃로 용해 후 건조시켰다. 건조된 시료에 질산(HNO_3) 3㎖ + 과염소산($HClO_4$) 5㎖를 가해 과염소산에서 흰 증기가 날 때까지 가열한 후 증류수로 희석, 100g의 시료를 제작하여 주성분과 미량성분을 분석하였다. 분석에는 유도결합플라즈마발광분석기(SPS 1500R, Japan)를 이용하였고, 출력 1.31kW, 냉각가스 유량 18ℓ/min, 보조가스 0.5ℓ/min, 캐리어가스 1.0ℓ/min, 측정높이 12.4㎜로, 다만 K, Na의 출력은 1.7kW로 분석하였다.

⑸ 전자현미경 분석

석재 및 오염물의 양상을 알아보기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope, Jeol, JSM-5910LV, Japan)을 이용하였고, 성분분석은 여기에 부착된 EDS(Energy Dispersive Spectroscope, Oxford 7324, England)를 사용하여 분석하였으며, 분석조건은 20kV, spotsize는 50으로 실시하였다. 또한 원소별 mapping을 실시하여 성분별 분포도를 알아보았다.

2. 오염물 제거법

1) 레이저를 이용한 제거법

⑴ 레이저광의 특성 및 세정원리

① 레이저광의 원리

램프 혹은 가스방전과 같은 펌핑소스에서 강력한 에너지를 발생시키면, 활성매질(Maiman은 활성매질로 루비를 사용하였음)은 발생된 에너지를 흡수하여 매질 내 원자들이 들뜨게 한다. 들뜬 상태의 원자(전자)는 매우 불안전하여 약간의 시간이 경과 후 저절로 바닥상태로 되돌아온다. 이때 들뜸 준위와 바닥 준위사이의 에너지차이 만큼을 빛으로 방출하는데, 이를 자연방출(spontaneous emission)이라 부르며, 이때 방출되는 빛은 파장이

나 위상이 고르지 않은 일반 자연광이다. 그러나 들뜬 상태의 원자에 외부에서 광원이 조사되면 이것이 자극되어 들뜬 상태의 원자가 바닥상태로 천이하며 빛을 방출하는데, 이때 방출되는 빛은 입사 된 빛과 파장(진동수), 위상 및 편광이 동일한 빛이 방출된다. 이와 같은 과정을 유도방출(stimulated emission)이라 부르며, 이때 발생하는 빛이 레이저이다. 유도방출로 발생되는 레이저광은 그 에너지가 충분하지 않아 광증폭이라는 과정을 거치는데, 이는 두개의 거울로 구성되어 있는 광공진기에 의해 이루어진다. 빛의 증폭은 전기 신호의 증폭과 달리, 빛을 거울 사이에서 지속적으로 반사시킴으로써 실현된다. 잘 연마된 거울을 마주 놓고, 그 사이에서 발생된 유도 방출광을 왕복운동 시킴으로써 들뜬 원자의 수를 증폭하고 지속적인 들뜬 원자의 자극을 통해 새로운 레이저 광을 방출시켜 증폭해 간다. 이를 광증폭(light amplification)이라 하며, 이렇게 증폭된 레이저광은 한쪽의 부분투과 거울을 통해 강력한 레이저광으로 방출된다.

레이저의 종류는 유도방출광이 발생하는 활성매질의 상태에 따라 크게 고체레이저, 기체레이저 및 액체레이저로 구분된다. 대표적인 고체레이저로는 활성매질을 루비로 사용한 인류 최초의 레이저인 루비레이저(694nm)를 비롯해 Nd:YAG레이저(1064nm), 반도체레이저(780-1600nm)등이 있으며, 기체레이저로는 이산화탄소(CO_2)레이저(10.6㎛), 엑시머(excimer)레이저(자외선 영역의 파장)와 He-Ne레이저(633nm) 등이 있으며, 대표적인 액체레이저로는 물이나 알콜 같은 용매에 유기 색소를 녹여 활성 매질로 사용하는 색소레이저(300-1000nm)가 있다.

② 레이저광의 특성

레이저광은 일반적인 자연광과 달리 크게 단색성(Monochromaticity), 간섭성(Coherence), 직진성(Directionality)의 특징을 가지고 있다. 단색성의 특성이 일반광과는 달리 특정 진동수의 광자만을 발생시킨다. 이러한 단일파장은 레이저광이 집속될 시, 색수차(Chromatic aberration) 현상이 발생하지 않아 작은 폭의 파장을 만들 수 있어 높은 에너지 밀도(W/㎠)를 얻을 수 있다. 그리고 레이저광의 간섭성 특징은 위상(位相)이 시간적, 공간적으로 같아 에너지의 상쇄 없이 에너지를 유지할 수 있으며, 또한 특정 시간

및 공간에서 상을 정확히 예측할 수 있다. 그리고 또 하나의 특징인 직진성은 최초 방출된 빛의 에너지가 거리에 관계없이 에너지를 유지하는데 1m의 거리에서 측정한 에너지나 100m에서 측정한 에너지가 변함없는 특성을 가지고 있다.

③ 세정원리

레이저의 세정원리는 레이저광의 특징인 단색성에 기인하는데 예를 들어 모암과 오염층의 물성 차이가 크지 않고 레이저빔의 흡수능이 모암보다 오염층에서 크다면 레이저빔 방사 시 오염층 표면은 효과적인 레이저 에너지의 흡수로 빠른 온도 증가가 발생하며, 오염물질의 증발온도 이상으로 온도가 상승하면 오염층의 제거가 이루어진다(Figure 1).

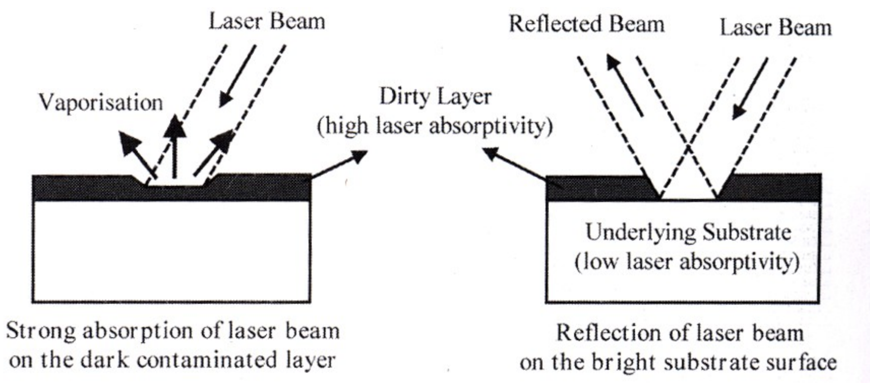


Figure 1. 레이저 기기의 세정원리

표면 오염층의 제거후 재인입되는 레이저빔은 모암이 갖는 작은 흡수능으로 인해 대부분의 레이저 에너지는 단순히 표면으로부터 반사되며, 흡수된 레이저 에너지는 모암 표면에서 미약한 온도의 증가를 가져온다. 결과적으로 레이저광은 모암의 손상없이 선택적으로 오염층만의 제거가 가능하다. 이렇게 레이저빔에 의한 광열적 효과는 레이저세정의 가장 기본적인 원리이다. 그러나 레이저의 종류 및 반응 재료에 따라 다양한 메커니즘을 가지고 있는데 광열효과 외에 기계적 효과 및 광화학적 효과가 경우에 따라서 주요한 세정 메커니즘으로 작동하며 보통의 경우 이러한 효과들이 복합적

으로 일어나면서 세정이 이루어진다. 여기서 광열작용을 이용하는 경우 YAG레이저가 주로 이용되고 있는데, 그 이유는 탄산가스레이저에 비해 제어가 쉽고 빔 직경이 대략 5㎜, 출력이 0.5~2J/㎠의 펄스를 초당 20번 정도까지 발생 가능하기 때문이다. 그러나 광열작용은 제거대상인 흑색의 오염층이 조각이나 건축물이 빛을 잘 흡수하지 않는 색을 가지고 있어야 하는 단점이 있다.

⑵ 시편제작

경천사십층석탑의 담회색 세립질 석회암[1]과 유사한 암석인 묘봉층 석회암[2], 원각사지십층석탑[3]과 유사한 암석으로 조사된 주천면 판운리 일대에 분포하고 있는 결정질 석회암[4] 그리고 중원 미륵리사지 석불입상 주변 화강암의 일부 시편을 선정하였다. 그리고 선정한 시편은 각각 40㎜×40㎜×20㎜ 크기로 제작하였다.

⑶ 시험기기

본 시험기기는 Q-Switched Nd-YAG(Neodymium-Yttrium Aluminum Garnet) Laser(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)를 이용한 세정기이다(日本赤外線株式會社, Japan). 재원은 출력파장(Output Wavelength): 1064nm, 출력에너지(Energy Output):

---

1 담회색의 세립질 석회암은 해백합 줄기, 유공충, 방추충, 산호 등 많은 생물 껍데기 또는 파편으로 구성되어 있으며, 산출된 화석에 의하면 중기 석탄기이다. 분류는 팩스톤(packstone)에 해당하며 기질은 limemud(직경 0.004mm 이하의 석회질 물질)로 이루어져있다.

2 담회색의 세립질 석회암이며 중기 석탄기 시대로 경천사십층석탑의 조성 암석과 비슷한 암질의 암석이며, 강원도 평창군의 평창-미탄 사이에 분포하는 암석으로 밝혀졌다. 입자의 크기는 0.1 2.5mm로 다양하다.

3 석재는 담회색, 백색 또는 담갈색의 결정질 석회암 또는 대리석으로 이루어져 있으며 부분적으로 편암이 얇게 협재되어 있다. 이 석탑의 대리석은 대부분 방해석으로 이루어져 있으며 부구성광물로 백운모가 관찰되었다.

4 백색 내지 담갈색을 띠며 입자는 세립질이다. 이 석회암은 대부분 재결정된 방해석으로 이루어져 있으며, 방해석 세맥을 이루고 있는 방해석에는 방해석 특유의 벽개가 발달되어 있다. 부구성광물로는 석영, 불투명광물 및 백운모 등이 관찰된다.

0-300mJ, 반복율(Repetition Rates): 1-10Hz, 지속파장(Pulse Duration): 6ns 이다.

⑷ 흡수능(Absorptivity) 시험

일반광은 넓은 파장 영역의 스펙트럼을 가지고 있으나 레이저광은 거의 단일파장의 매우 작은 밴드 폭을 가지고 있다. 이는 레이저광이 유도방출에 의한 특정 진동수의 광자만을 발생시키기 때문인데 이러한 레이저빔의 특징인 단색성(Monochromaticity)을 이용한 흡수능이 높은 반응 대상을 찾고자 하는데 이를 위해 각각의 선정 시편에 흑색과 적색, 녹색 및 회색의 4가지색을 각각 도포를 하였으며, 도포시 같은 횟수로 각각 실시하였다. 앞의 색(色)들은 각각 석조물의 표면에서 발생되는 흑화현상으로 인한 생성오염물의 색은 흑색으로 석탑이나 석재 구조물에 사용되었던 철편(鐵片)으로 인한 오염생성물은 적색, 석조물의 피해 요인 중 생물학적 요인이라 할 수 있는 이끼류나 선태류의 색인 녹색, 그리고 지의류의 색은 회색으로 하였다. 앞의 4가지 조건적인 색은 현재 석조문화재에서 많이 생길 수 있는 대표적인 오염물을 색채화 함으로써 레이저의 단색성 특징에 대한 시험을 하기 위함이다. 이렇게 각각 도포한 시편에 고체레이저를 이용한 세정기로 같은 조건으로 일정량 방사하였다. 방사 후 각 선정 시편의 반응정도를 방사전후를 비교하여 레이저빔의 색色반응 정도를 알아보았다.

⑸ 노출횟수와 노출거리 시험

렌즈를 통한 레이저광의 집속시, 색수차(chromatic aberration) 현상이 발생하지 않아 아주 작은 사이즈(레이저 파장 크기)로 빔을 모을 수가 있어 매우 큰 에너지 밀도(W/㎠)를 얻을 수 있는데 이는 레이저빔의 특징인 응집성이다. 이러한 특징은 렌즈를 통한 레이저빔의 에너지 밀도 차이에서 발생되는 반응 대상의 반응정도를 알아보기 위함인데 이를 위해 흡수능이 높은 흑색의 먹물을 이용하여 시험을 실시하였다. 가假오염물(먹물)이 도포된 시편에 장착된 렌즈를 통한 최대 반응점을 기점으로 안쪽거리와 바깥쪽거리 간격별 및 단계별 반응정도를 10㎜ 간격의 단위으로 전후 10단계로 시험하였다.

⑹ 재질별 반응 비교 시험

암석의 재질별 특성상 레이저빔에 대한 반응차이를 알아보기 위한 시험으로서 석회암질의 묘봉층 석회암, 결정질 석회암 그리고 비교대상 암질은 화강암으로 정하였다. 이는 현존하는 우리나라의 석조문화재의 대부분이 화강암질의 암석으로 조성되어 레이저빔의 적용에 있어 가假발생 오염물의 재질별로 비교하기 위함이다. 시험에서는 레이저빔의 같은 조건에서의 출력과 최적의 적정거리로 시험을 실시하여 재질별 반응 결과를 확대 촬영하여 표면상태를 알아보았다.

⑺ 오염물 정도별 제거 시간

실제 처리에 있어 오염층 제거 대상인 경천사십층석탑의 레이저빔에 대한 반응정도를 알아본 후 오염층의 발생정도에 따른 대략적 제거 시간을 파악해 효율적이고 능률적인 제거를 알 수 있다. 레이저 세정기기의 통일된 매뉴얼, 즉 출력부분의 5단계 중에서, 그리고 방사속도의 4단계 중에서 적절한 환경을 설정하여 고정시킨 다음에 발생된 오염층의 두께별로 분류하고 이 분류된 각각의 부분에 정해진 일정단위 면적당 제거 시간을 측정하여 실제 적용에 있어서의 효율적 환경을 알아보았다.

2) 미소마모법

⑴ 세정원리 및 투사체의 성질

① 세정원리

기계적 마모법으로 미세한 유리 또는 모래 입자 같은 투사체를 적절한 공기압과 함께 분사시켜 표면의 오염 물질과 충돌을 시킴으로써 물리적 힘에 의해 오염층의 제거를 유도하는 원리이다(Figure 2).

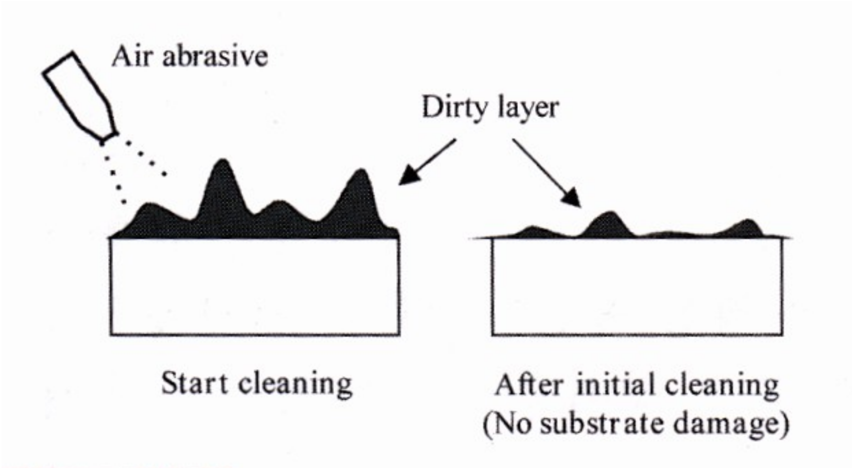


Figure 2. 미소마모법의 세정원리

② 투사체의 특징 및 종류

shape	: spherical
colour	: transparent, white
hardness	: rockwell C 46
	: Mohs 6 - 7
specific density	: 2.5 kgs/㎥
loose bulk density	: 1.5 kgs/㎥

③ 투사체의 성분 분석

SiO_2	: min.	65.0%
Na_2O	: min.	14.0%
CaO	: min.	8.0%
MgO	: min.	2.5%
Al_2O_3		2.0%
Fe_2O_3	: max.	0.15%
Other	: max.	2.0%

④ 제거 대상에 따른 투사체의 크기와 종류

제거 대상물에 따라 투사체의 크기를 설정하여 제거를 하는데 투사체의 크기가 클수록 제거 대상물질이 빨리 제거되며 작을수록 미세한 제거가 이루어진다.

1 ~ 50 micron	150 ~ 250 micron
40~ 70 micron	200 ~ 300 micron
50 ~ 105 micron	200 ~ 400 micron
70 ~ 110 micron	300 ~ 400 micron
90 ~ 150 micron	400 ~ 600 micron
100 ~ 200 micron	400 ~ 800 micron

⑵ 시편제작

레이저 세정기기 시험에서 적용된 동일한 네종류의 암석을 선정하였으며, 선정한 시편은 각각 40㎜×40㎜×20㎜ 크기로 제작하였다. 제작된 시편의 표면은 정확한 시험을 위하여 샌드페이퍼로 연마를 실시하였다. 미소마모법의 경우 기존에 사용된 방법으로써 레이저 세정기기와의 비교를 하기 위한 시험이다.

⑶ 시험기기

이동식 여재선택형 Sand Blaster(IBIX, Norway)로 사용공기 압력은 2~7 bars이며 압축공기 소모량은 250Liters/min 이다. 사용된 투사체는 Plastic종으로 1.4㎜(∅)이하의 크기를 사용하였다.

⑷ 제거시험

투사체의 크기와 제거대상의 제거 정도는 비례하기 때문이다. 준비된 각각의 시편에 제거 시험을 하는데 있어서 피사체와의 거리는 대략 2~3㎝의 근접한 거리와 약 50㎝의 거리에서, 투사 압력은 4bars로 제거를 실시하였다. 투사체 방사 시간은 도포된 가오염물의 제거가 완전히 이루어져 가오염물의 도포 전 상태의 표면이 나타날 때까지 제거를 하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 경천사십층석탑의 구성 암석 분석결과

1) 현미경분석

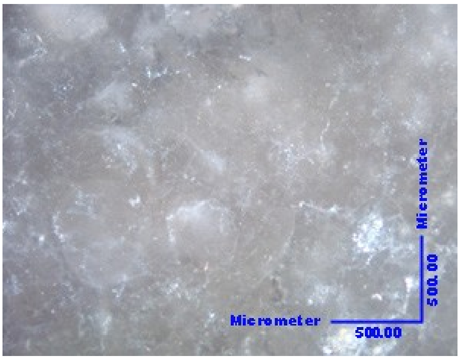


Photo 4. 원암-남서-대물렌즈 5X

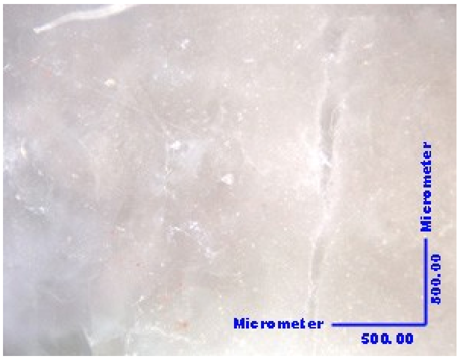


Photo 5. 원암-남동-대물렌즈 5X

원암의 단면에 대한 현미경 관찰 결과, 전형적이 대리석으로 대부분 투명하거나 유백색을 나타냈으며, 특히 남서쪽의 원암의 경우 남동쪽에 비해 내부에 불균질한 부분이 상당히 존재하였다. 그러나 이는 경천사 석탑의 전체적인 부재를 관찰한 결과가 아니므로 대략적인 단면 형태이며, 다른 부분도 이와 유사한 형태를 가질 것으로 예상된다.

2) X선회절분석

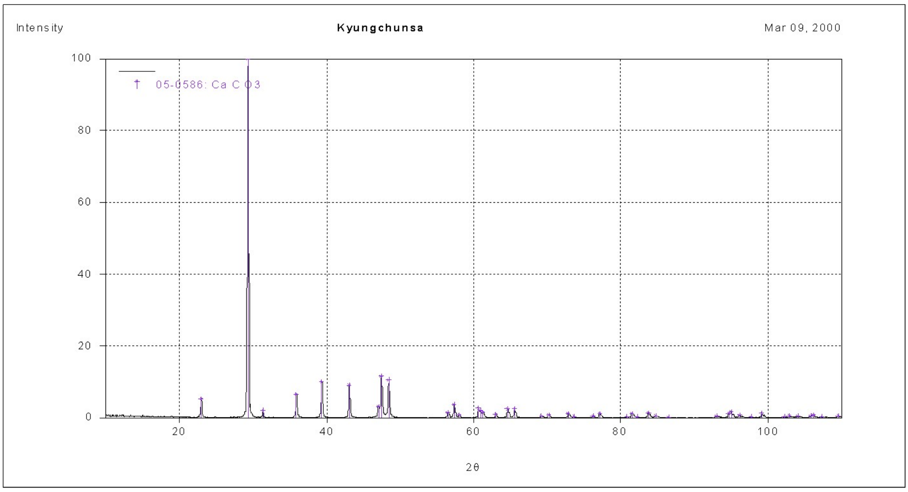


Figure 3. 경천사십층석탑 석재 시편 XRD 분석결과 - No. 1(Calcite)

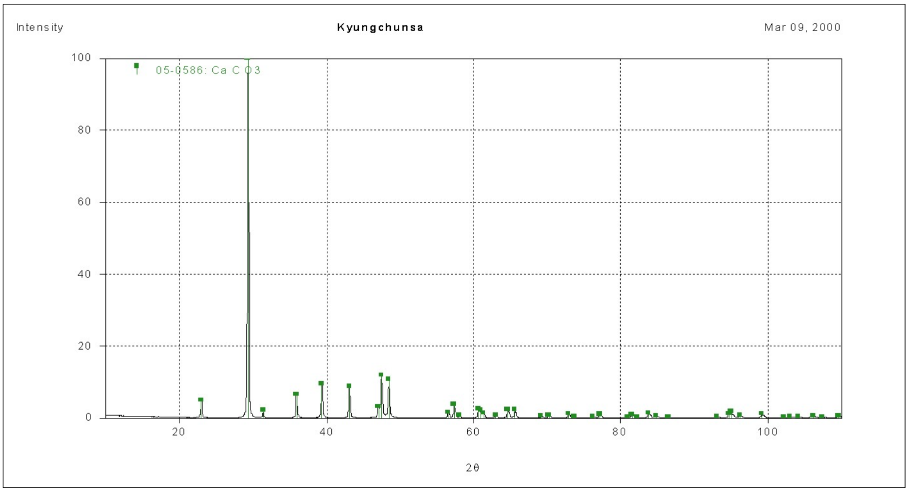


Figure 4. 경천사십층석탑 석재 시편 XRD 분석결과 - No. 2(Calcite)

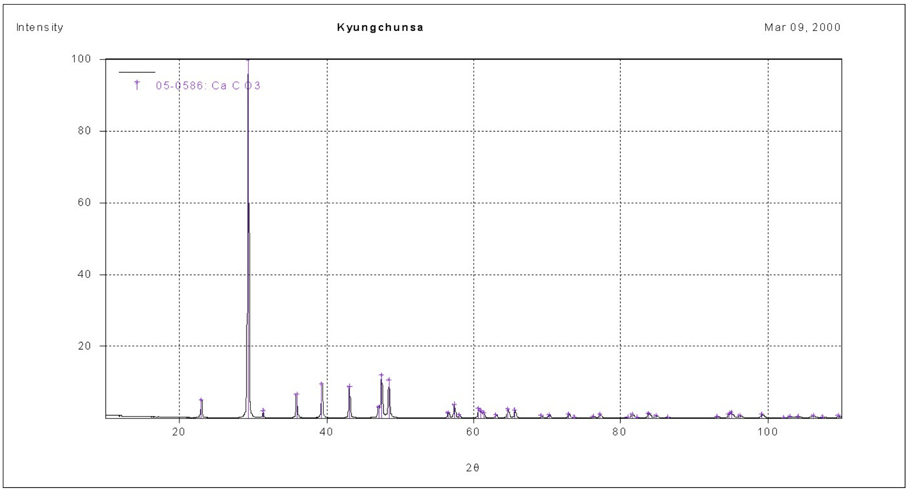


Figure 5. 경천사십층석탑 석재 시편 XRD 분석결과 - No. 3(Calcite)

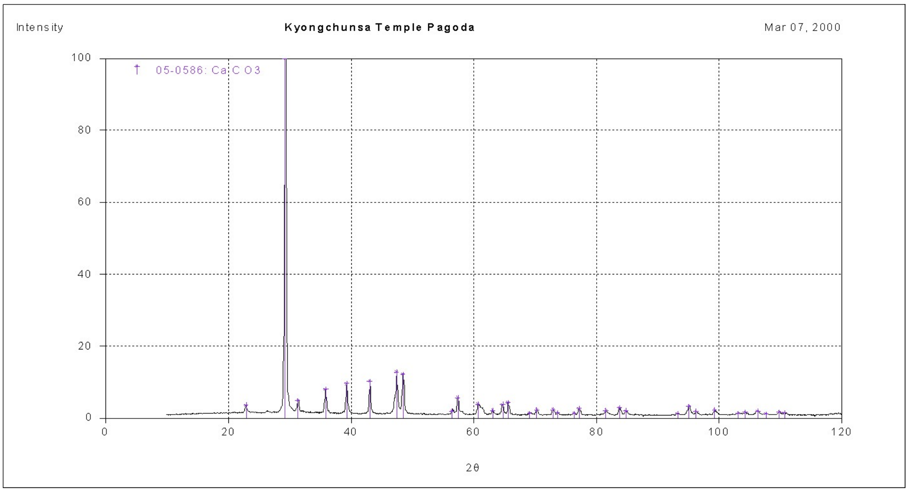


Figure 6. 경천사십층석탑 석재 시편 MXRD 분석결과(Calcite)

경천사십층석탑에 대해 각각 상이한 3곳의 탈락 시료를 수집하여 Wide Angle XRD를 이용하여 광물을 동정해 본 결과(Figure 3, 4, 5) 대리석의 주성분인 전형적인 Calcite가 모두 동정되었다. 이를 보다 정밀하게 분석하고자 Micro Area XRD를 이용하였으나 Wide Angle XRD에서와 같이 Calcite만이 동정(Figure 6)되어 경천사십층석탑이 대리석임을 확인할 수 있었다.

3) 전자현미경분석

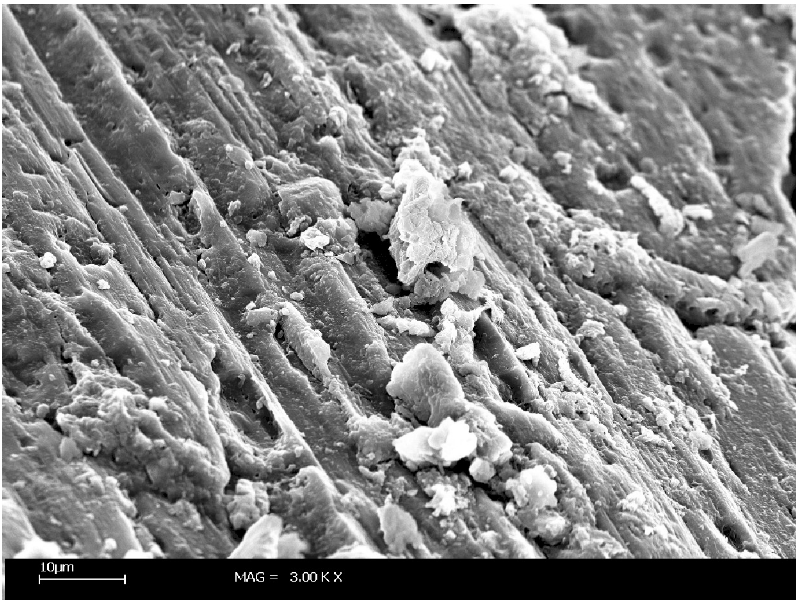


Photo 1. 경천사십층석탑 원석의 표면 전자현미경사진(3,000배)

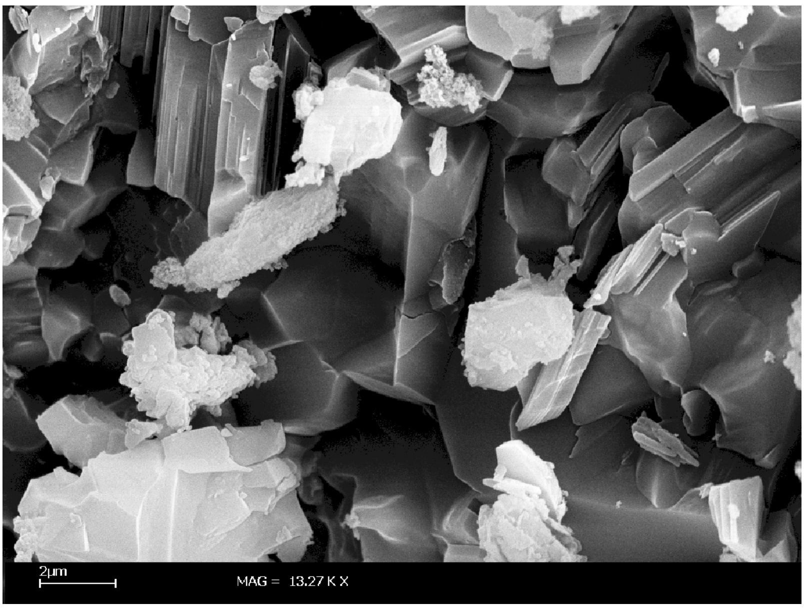


Photo 2. 경천사십층석탑 원석의 표면 전자현미경사진(13,270배)

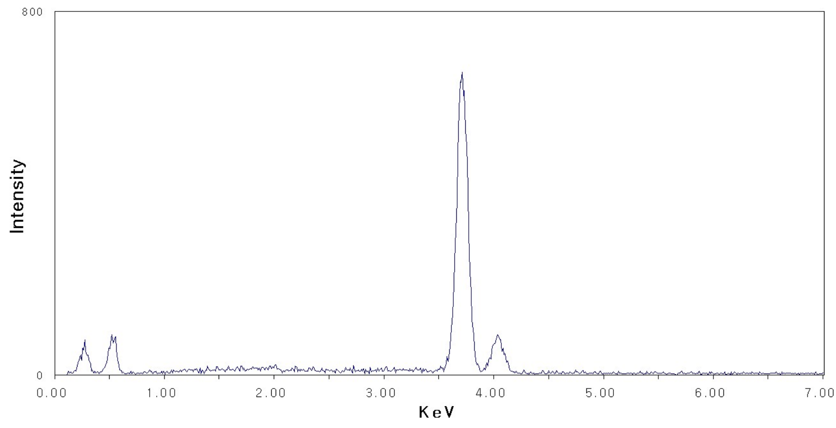


Figure 7. 경천사십층석탑 원석의 표면부위의 EDX 피크

Photo 1, 2에서 보여지듯이 원석의 표면은 방해석결정이 뚜렷하게 관찰되며, 그 부위의 EDX 피크(Figure 7)에서 Ca가 주피크로 검출되었다. 이는 구성 주성분이 방해석(Calcite, $CaCO_3$)임을 추정케한다.

2. 경천사십층석탑의 발생 오염물 분석결과

1) 오염물 현황 조사 결과

경천사십층석탑의 오염물은 주로 흑색을 띄며 오염층의 형성부위는 노출된 탑부재의 표면에 주를 이루고 있는데 석탑의 드잡이 공사에 사용되었던 층과층 사이의 균형이나 요동을 막기 위해 철편에 의해 발생된 수평적인 공간에도 흑색 오염물이 생성되어 있다. 그리고 오염물의 현황(Table 4)에서와 같이 흑색오염물의 발생은 석탑의 북쪽 부재들의 오염현황이 대체적으로 심한 편이며 남측면의 부재는 북측면의 부재보다 오염물의 진행 상태나 오염물의 넓이에서 차이를 보이며 분포된 것을 알 수 있다. 그리고 서측면과 동측면의 부재는 오염물의 발생 상태나 표면의 훼손진행 상태가 두드러진 차이를 보이고 있진 않지만 북측면 부재의 상태보다는 양호하였다.

그리고 남쪽 부재들의 오염상태에 있어서 오염물의 분포를 살펴보면 한 부재의 조각면 안에서도 수직적인 면에 비해 안쪽으로 경사면을 이루는 부재면 일수록 오염부위가 넓고 두꺼운 층으로 형성되어 있다. 그에 반해 바깥쪽으로 완만한 각이 형성된 조각면 일수록 오염물의 면적이나 두께에서 현격한 차이를 보이고 있으며, 대체적으로 오염층의 형성이 이루어지지 것을 볼 수 있다.

그러나 석탑의 옥개석 밑면의 경우 방향성에 상관없이 오염층이 큰 두께로 발생된 것을 조사되었는데 이와 같은 현상이 일어날 수 있는 이유는 대기오염으로 인한 대기 중의 오염물질이 빗물과 함께 석재에 내부로 침투되었다가 외부로 방출되는 과정에서 석회암 재질인 석탑이 화학적인 반응과 결부되면서 내부의 석출물이 석재표면에 생성된 것이다. 옥개석 밑면에 오염층의 심화는 앞에서와 같은 현상이 반복되면서 수분에 의한 옥개석 밑면으로의 집중현상이 일어난 것으로 추정된다. 그리하여 빗물이나 채광에 직접 접촉되는 면인 옥개석의 낙수면에선 대조적으로 오염물질의 생성이 이루어지지 않은 것이다. 또한 오염이 심화된 일부 탑신석을 살펴보면 오염물 형성의 일정한 패턴을 찾아 볼 수 있는데 부재표면에 오염물이 발생한 부분에 마치 물길 같은 모양의 부분에는 오염물이 생성되지 않은 것을 볼 수 있다(Photo 3). 이같은 현상은 주변과 같이 오염층이 생성되었거나 과정 중에 2차적으로 우기와 같은 다량의 빗물이 연속적으로 유입되면서 조각에 의해 자연스럽게 형성된 굴곡으로 배수되면서 조각부분이 배수로 역할을 하여 생성되었거나 생성중인 오염층과 직접적인 접촉이 이루어지면서 자연 제거가 이루어진 것이다. 이러한 부분은 오염층만 없을 뿐이고 풍화정도는 주변 면과 같았다.

그리고 석탑의 방향성과 관계하여 오염물의 정도가 차이가 나는 것은 주변 환경적인 상황, 즉 수분이나 채광에 의한 직접적인 영향권에 속해 있는지, 구조적인 조건에 의하여 유입된 수분의 배출이 원활히 이루어지는지에 따라 오염층의 발생 빈도가 차이를 보이고 있다.

Photo 3과 같이 경천사십층석탑의 표면에 생성된 오염물 제거에 있어 오염정도나 오염물의 진행단계별, 그리고 조각이나 문양 위에 생성된 오염층의 제거 등의 각기 다른 조건과 상황에 맞는 적절한 처리가 필요할 수 있다.

Photo 3. 경천사십층석탑(3층탑신석)에 발생된 오염물의 현황

Table 2. 경천사십층석탑 오염층 정도별 기준표

	단계별 세부사진	비고
A		오염정도가 심화된 상태이고 표면에 형성된 오염층 뒤의 조각 면은 부식이 심화되어 원형조각을 알아 볼 수 없을 정도의 단계(퇴화층 형성)
B		오염층의 형성되어 있지만 조각의 원형의 손상이 이루어지지 않아 오염층 안쪽의 조각은 상태가 양호한 상태이며 오염층의 두께는 1㎜이상 형성된 단계
C		오염층이 1㎜이내로 형성된 단계로서 제거가 용이하며 내부조각 상태도 양호한 단계

D		미세한 오염층으로서 조각 표면에 얇게 도포 되듯이 형성된 단계

Table 3. 오염물 면적 단위표

단계 / 단위	1	2	3	4	5	계속	비고
10㎜X10㎜	100㎟	200㎟	300㎟	400㎟	500㎟	계속	

※ 단위산출근거: 가시험을 통해 적외선레이저로 일반적 오염층의 시간당 제거면적

Table 4. 부재별 오염물 분포현황

번 호	부재명	오염유무	오염정도별	오염층단위	비고
1	하대 저석(북)	X	-	-	A type
2	하대 저석(북동)	X	-	-	
3	하대 저석(동)	X	-	-	
4	하대 저석(남동)	X	-	-	
5	하대 저석(남)	X	-	-	
6	하대 저석(남서)	X	-	-	
7	하대 저석(서)	X	-	-	
8	하대 저석(북서)	X	-	-	
9	하대 중석(북)	O	C	2	A type
10	하대 중석(북동)	O	D	1	
11	하대 중석(동)	O	B	8	
12	하대 중석(남동)	O	B	10	
13	하대 중석(남)	O	B	8	
14	하대 중석(남서)	O	C	8	
15	하대 중석(서)	O	C	4	
16	하대 중석(북서)	O	C	1	
17	하대 갑석(북)	X	-	-	A type
18	하대 갑석(북동)	X	-	-	
19	하대 갑석(동)	O	D	1	
20	하대 갑석(남동)	X	-	-	
21	하대 갑석(남)	X	-	-	
22	하대 갑석(남서)	X	-	-	
23	하대 갑석(서)	O	D	2	
24	하대 갑석(북서)	X	-	-	
25	중대 중석(북)	O	C	10	A type
26	중대 중석(북동)	O	C	3	
27	중대 중석(동)	O	B	16	
28	중대 중석(남동)	O	C	5	
29	중대 중석(남)	O	B	7	
30	중대 중석(남서)	O	B	5	
31	중대 중석(서)	O	B	14	
32	중대 중석(북서)	O	B	3	
33	중대 갑석(북)	O	D	3	A type
34	중대 갑석(북동)	X	-	-	
35	중대 갑석(동)	O	D	1	
36	중대 갑석(남동)	X	-	-	
37	중대 갑석(남)	O	D	2	
38	중대 갑석(남서)	X	-	-	
39	중대 갑석(서)	O	D	2	

40	중대 갑석(북서)	X	-	-	A
41	상대 중석(북)	O	B	1	
42	상대 중석(북동)	O	B	2	
43	상대 중석(동)	O	B	1	
44	상대 중석(남동)	O	B	4	A type
45	상대 중석(남)	O	C	3	
46	상대 중석(남서)	O	C	4	
47	상대 중석(서)	O	B	3	
48	상대 중석(북서)	O	B	2	
49	1층 난간석(북)	O	C	5	
50	1층 난간석(북동)	X	-	-	
51	1층 난간석(동)	O	C	8	
52	1층 난간석(남동)	X	-	-	A type
53	1층 난간석(남)	O	B	15	
54	1층 난간석(남서)	O	B	5	
55	1층 난간석(서)	O	B	8	
56	1층 난간석(북서)	O	B	8	
57	1층 탑신석(북)	O	B	8	
58	1층 탑신석(북동)	O	C	8	
59	1층 탑신석(동)	O	C	10	
60	1층 탑신석(남동)	O	C	6	A type
61	1층 탑신석(남)	O	B	12	
62	1층 탑신석(남서)	O	C	14	
63	1층 탑신석(서)	O	C	8	
64	1층 탑신석(북서)	O	B	10	
65	1층 옥개석(북)	O	B	20	
66	1층 옥개석(북동)	O	B	10	
67	1층 옥개석(동)	O	B	20	
68	1층 옥개석(남동)	O	B	10	A type
69	1층 옥개석(남)	O	B	20	
70	1층 옥개석(남서)	O	B	10	
71	1층 옥개석(서)	O	B	20	
72	1층 옥개석(북서)	O	B	10	
73	2층 난간석(남)	O	B	16	
74	2층 난간석(북)	O	B	6	
75	2층 난간석(북동)	O	B	3	A type
76	2층 난간석(동)	O	B	5	
77	2층 난간석(서)	O	B	5	
78	2층 난간석(북서)	O	B	3	
79	2층 탑신석(북)	O	B	15	
80	2층 탑신석(북동)	O	B	5	A type
81	2층 탑신석(동)	O	B	10	

82	2층 탑신석(남동)	O	B	2	A type
83	2층 탑신석(남)	O	B	8	
84	2층 탑신석(남서)	O	B	6	
85	2층 탑신석(서)	O	B	8	
86	2층 탑신석(북서)	O	B	6	
87	2층 옥개석(북)	O	B	25	A type
88	2층 옥개석(북동)	O	B	10	
89	2층 옥개석(동)	O	B	25	
90	2층 옥개석(남동)	O	B	10	
91	2층 옥개석(남)	O	B	25	
92	2층 옥개석(남서)	O	B	10	
93	2층 옥개석(서)	O	B	25	
94	2층 옥개석(북서)	O	B	10	
95	3층 난간석(북)	O	B	10	B type
96	3층 난간석(동)	O	B	8	
97	3층 난간석(남)	O	B	10	
98	3층 난간석(서)	O	B	7	
99	3층 탑신석(북)	O	A	8	A type
100	3층 탑신석(북동)	O	A	2	
101	3층 탑신석(동)	O	A	5	
102	3층 탑신석(남동)	O	B	8	
103	3층 탑신석(남)	O	B	5	
104	3층 탑신석(남서)	O	B	5	
105	3층 탑신석(서)	O	B	8	
106	3층 탑신석(북서)	O	B	6	
107	3층 옥개석 下(북)	O	A	25	A type
108	3층 옥개석 下(북동)	O	A	5	
109	3층 옥개석 下(동)	O	B	32	
110	3층 옥개석 下(남동)	O	A	5	
111	3층 옥개석 下(남)	O	B	32	
112	3층 옥개석 下(남서)	O	B	5	
113	3층 옥개석 下(서)	O	B	32	
114	3층 옥개석 下(북서)	O	B	5	
115	3층 옥개석 上(북)	O	B	7	B type
116	3층 옥개석 上(동)	O	B	7	
117	3층 옥개석 上(남)	O	B	8	
118	3층 옥개석 上(서)	O	B	8	
119	4층 난간석 (북)	X	-	-	B type
120	4층 난간석 (동)	X	-	-	
121	4층 난간석 (남)	O	B	3	
122	4층 난간석 (서)	X	-	-	

123	4층 탑신석 (북)	O	B	20	B type
124	4층 탑신석 (동)	O	B	10	
125	4층 탑신석 (남)	O	B	15	
126	4층 탑신석 (서)	O	B	5	
127	4층 옥개석 (북)	X	-	-	B type
128	4층 옥개석 (동)	O	B	10	
129	4층 옥개석 (남)	O	B	20	
130	4층 옥개석 (서)	O	B	10	
131	5층 난간석 (북)	X	-	-	B type
132	5층 난간석 (동)	X	-	-	
133	5층 난간석 (남)	X	-	-	
134	5층 난간석 (서)	X	-	-	
135	5층 탑신석 (북)	O	B	5	B type
136	5층 탑신석 (동)	O	B	3	
137	5층 탑신석 (남)	O	B	5	
138	5층 탑신석 (서)	O	B	3	
139	5층 옥개석 (북)	O	B	15	B type
140	5층 옥개석 (동)	O	B	15	
141	5층 옥개석 (남)	O	B	15	
142	5층 옥개석 (서)	O	B	15	
143	6층 난간석 (북)	O	C	3	B type
144	6층 난간석 (동)	X	-	-	
145	6층 난간석 (남)	O	B	5	
146	6층 난간석 (서)	X	-	-	
147	6층 탑신석 (북)	O	A	5	B type
148	6층 탑신석 (동)	O	B	8	
149	6층 탑신석 (남)	O	B	10	
150	6층 탑신석 (서)	O	B	5	
151	6층 옥개석 (북)	O	B	15	B type
152	6층 옥개석 (동)	O	B	15	
153	6층 옥개석 (남)	O	B	15	
154	6층 옥개석 (서)	O	B	15	
155	7층 난간석 (북)	O	C	1	B type
156	7층 난간석 (동)	O	B	2	
157	7층 난간석 (남)	O	B	3	
158	7층 난간석 (서)	O	C	1	
159	7층 탑신석 (북)	O	B	3	
160	7층 탑신석 (동)	O	B	3	B type
161	7층 탑신석 (남)	O	C	3	
162	7층 탑신석 (서)	O	B	3	
163	7층 옥개석 (북)	O	B	15	

164	7층 옥개석 (동)	O	B	15	B type
165	7층 옥개석 (남)	O	B	15	
166	7층 옥개석 (서)	O	B	15	
167	8층 난간석 (북)	O	B	3	B type
168	8층 난간석 (동)	X	-	-	
169	8층 난간석 (남)	O	B	3	
170	8층 난간석 (서)	X	-	-	
171	8층 탑신석 (북)	O	B	3	B type
172	8층 탑신석 (동)	O	B	2	
173	8층 탑신석 (남)	O	C	3	
174	8층 탑신석 (서)	O	B	1	
175	8층 옥개석 (북)	O	C	10	B type
176	8층 옥개석 (동)	O	B	10	
177	8층 옥개석 (남)	O	C	10	
178	8층 옥개석 (서)	O	B	10	
179	9층 난간석 (북)	O	B	1	B type
180	9층 난간석 (동)	O	B	1	
181	9층 난간석 (남)	O	B	3	
182	9층 난간석 (서)	X	-	-	
183	9층 탑신석 (북)	O	B	5	B type
184	9층 탑신석 (동)	O	C	2	
185	9층 탑신석 (남)	O	C	5	
186	9층 탑신석 (서)	O	B	2	
187	9층 옥개석 (북)	O	B	10	B type
188	9층 옥개석 (동)	O	C	10	
189	9층 옥개석 (남)	O	C	10	
190	9층 옥개석 (서)	O	B	10	
191	10층 난간석 (북)	O	A	3	B type
192	10층 난간석 (동)	O	B	1	
193	10층 난간석 (남)	O	B	3	
194	10층 난간석 (서)	O	B	1	
195	10층 탑신석 (북)	O	B	2	B type
196	10층 탑신석 (동)	O	B	3	
197	10층 탑신석 (남)	O	C	3	
198	10층 탑신석 (서)	X	-	-	
199	10층 옥개석 (북)	O	B	10	B type
200	10층 옥개석 (동)	O	B	12	
201	10층 옥개석 (남)	O	B	12	
202	10층 옥개석 (서)	O	B	10	

※ A-type: 각부재 방향별 조사, B-type: 단일부재 방향별 조사

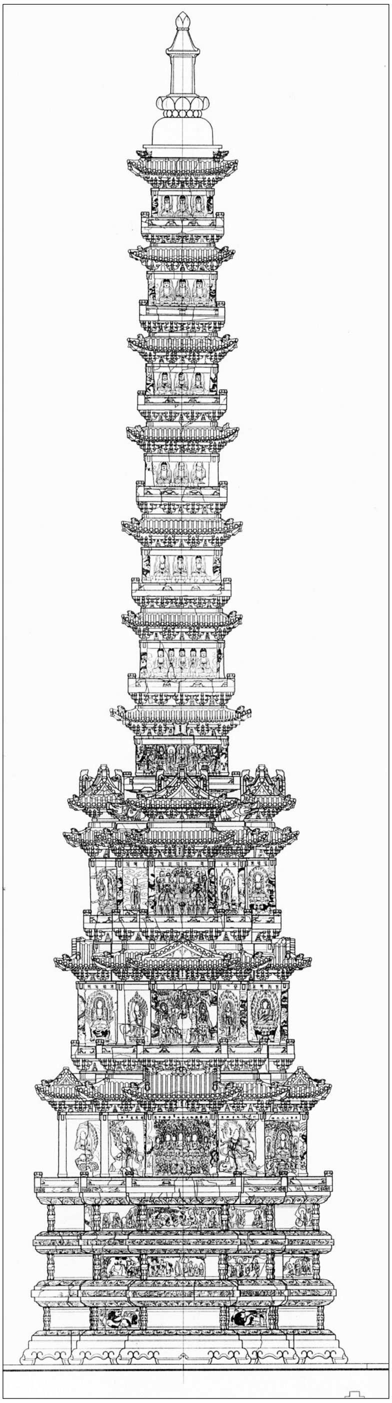


Photo 4. 경천사십층석탑의 실측도면

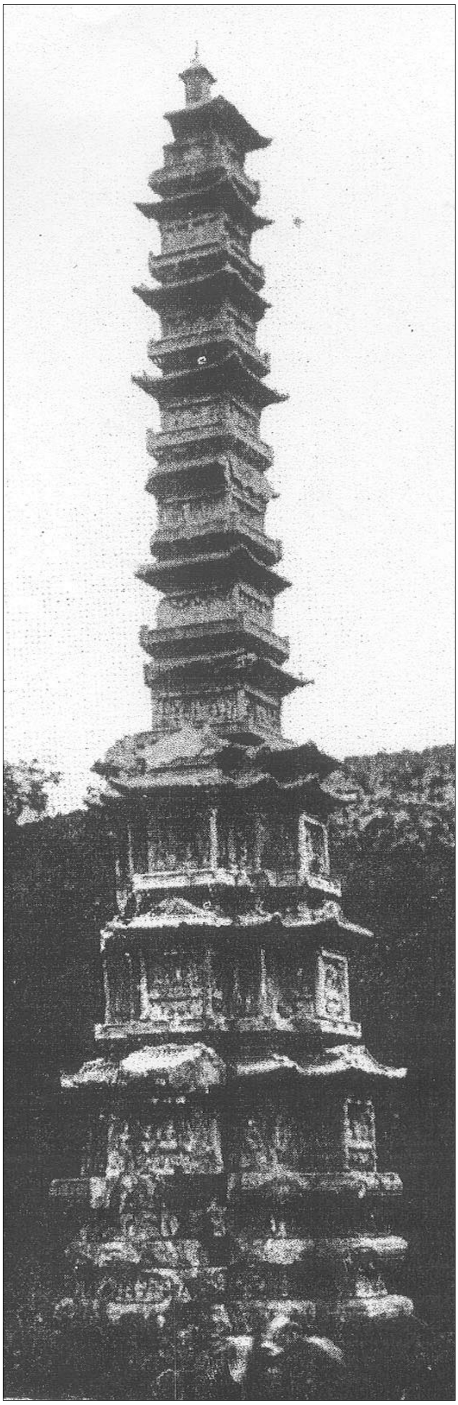


Photo 5. 1902년 당시 전경

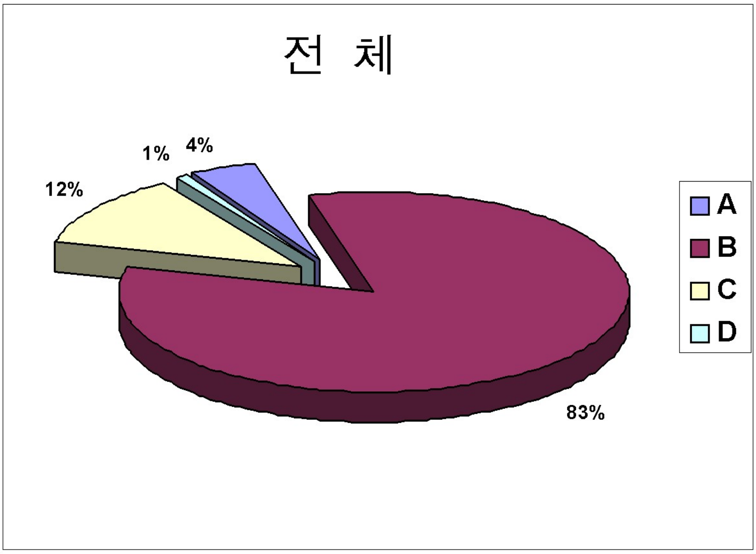


Figure 8 . 경천사십층석탑 오염 단계별 면적 분포도

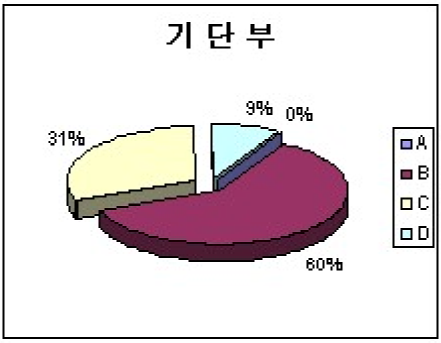


Figure 9. 오염단계별 면적분포도(기단부)

Figure 10. 오염단계별 면적분포도(1층~상륜부)

경천사십층석탑의 오염층에 대한 단계별 면적을 조사한 결과는 Figure 8~10과 같다. 먼저 Figure 8의 오염층 단계별 오염면적 비율을 보면, 전체적으로는 B(83%) 〉C(12%) 〉A(4%) 〉D(1%) 의 순서로 오염면적의 대부분이 B단계임을 알 수 있다. 그리고 전체를 기단부와 탑신(1층~상륜부)으로 나누어 분석한 결과, 기단부에서는 B(60%) 〉C(31%) 〉D(9%) 〉A(0%), 탑신(1층~상륜부)에서는 B(85%) 〉C(10%) 〉A(5%) 〉D(0%)

로 기단부[(A+B):(C+D)=60:40]보다 탑신[(A+B):(C+D)=90:10]의 오염단계가 높게 나타났다.

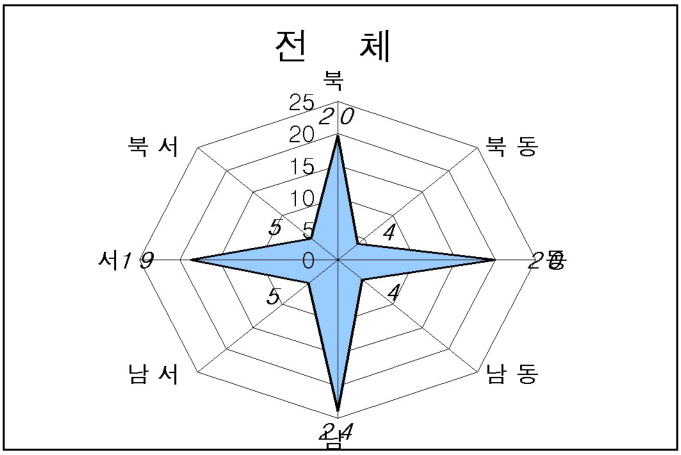


Figure 11. 경천사십층석탑 오염물의 방위별 분포도(전체)

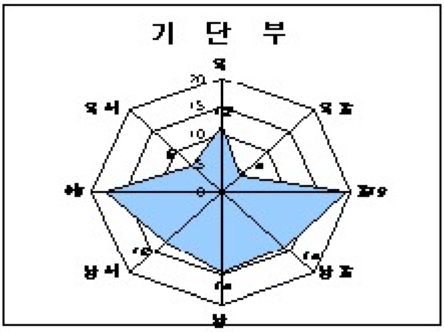


Figure 12. 기단부 오염층 분포

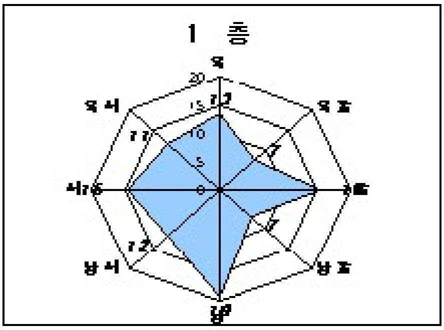


Figure 13. 1층 오염층 분포

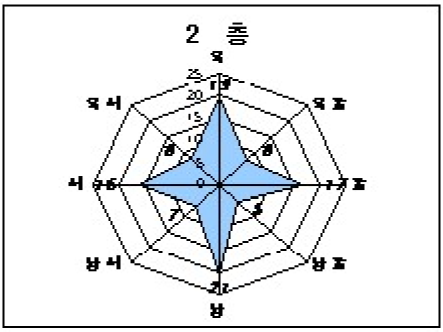


Figure 14. 2층 오염층 분포

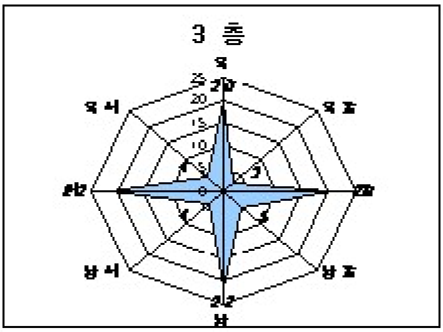


Figure 15. 3층 오염층 분포

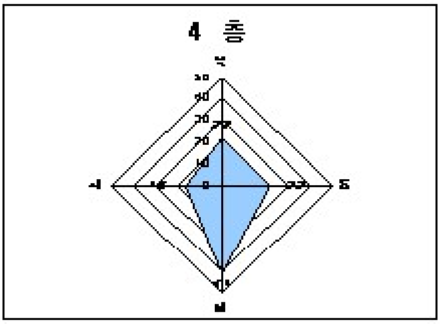


Figure 16. 4층 오염층 분포

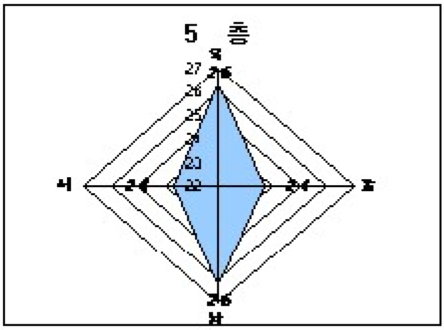


Figure 17. 5층 오염층 분포

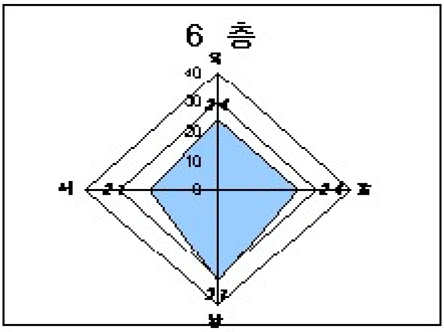


Figure 18. 6층 오염층 분포

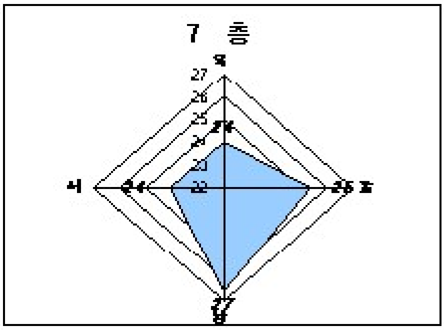


Figure 19. 7층 오염층 분포

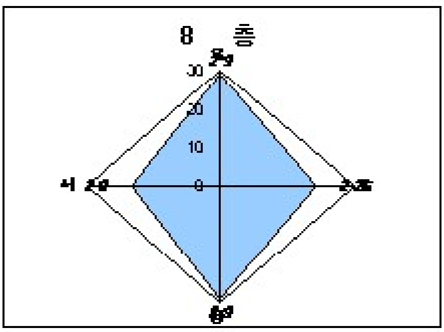


Figure 20. 8층 오염층 분포

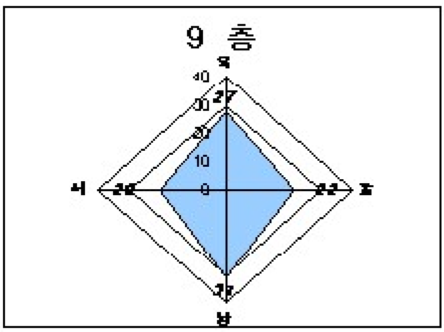


Figure 21. 9층 오염층 분포

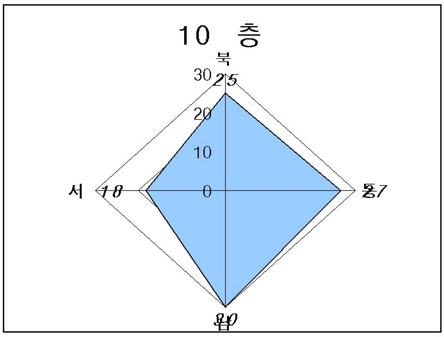


Figure 22. 10층 오염층 분포

또한 Figure 11을 보면, 전체적으로는 남쪽이 24%로 가장 넓었고, 다음으로 북쪽과 동쪽이 각각 20%, 서쪽이 19% 그리고 북서쪽과 남서쪽이 각각 5%, 북동쪽과 남동쪽이 각각 4%로 나타났다.

각 층별로 나누어 보면, 8방향으로 부재가 있는 기단부~3층까지 중 기단부는 서→남→동쪽면, 1층은 북→서→남쪽면의 오염면적이 넓게 있었고, 2층과 3층은 동 서 남 북쪽면이 넓게 나타났다. 또한 4방향으로만 부재가 있는 4층~10층은 남(31%) 〉 북(25%) 〉 동(24%) 〉 서(20%)로 나타났지만, 4층은 남쪽면이 41%로 다른 면과의 오염면적 비율 차이가 다른 층보다 컸고, 5층과 7층은 모든 방향으로 별 차이 없이 비슷하게 나타났다.

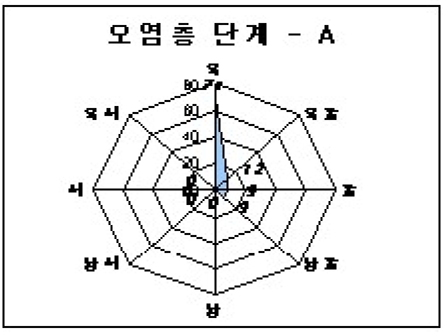


Figure 23. A단계오염층분포

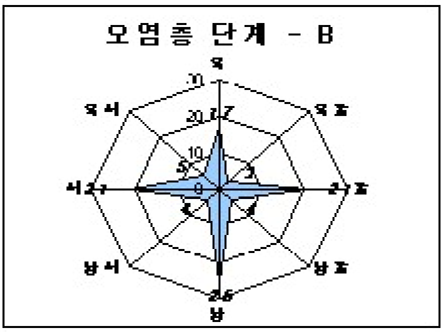


Figure 24. B단계오염층분포

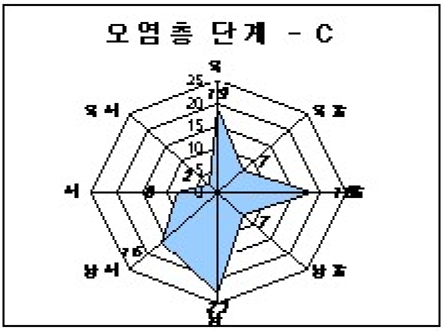


Figure 25. C단계오염층분포

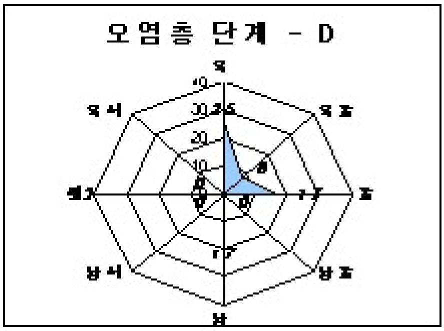


Figure 26. D단계오염층분포

Figure 23~26을 보면, 표면의 오염정도가 심화되어 조각면도 부식되어 조각원형을 알아볼 수 없는 단계인 A단계는 북(71%) 〉 북동(12%) 〉 동 = 남동(9%) 로 존재하고 있었으며, 남→서→북서쪽면은 A단계가 없었다. 또한 표면의 오염층은 형성되어 있으나 조각원형은 부식되지 않은 단계인 B단계는 남(25%) 〉 동 = 서(21%) 〉 북(17%)로서 84%를 차지하고 있는데, 이는 4층~10층까지는 4방향으로만 부재가 존재하며 각 옥개석받침 부분의 오염정도가 심하기 때문이다. 그리고 오염층의 제거가 용이한 단계인 C단계는 남(23%) 〉 북(19%) 〉 동(18%) 〉 남서(16%), 미세한 오염층만이 존재하는 D단계는 서(33%) 〉 북(25%) 〉 동 = 남동(17%) 로 조사되었다.

즉, 전체적으로 표면의 오염층은 형성되어 있으나 조각원형은 부식되지 않은 단계인 B단계가 오염면적 중 83%를 차지하고 있으며, 남쪽면이 가장 넓은 오염면적을 차지하고 있었다. 하지만 오염단계가 가장 심한 단계인 A단계는 남쪽면에서는 나타나지 않았고, 북쪽면이 71%를 차지하고 있었다. 이것으로서 경천사십층석탑의 오염면적은 남쪽이 가장 넓지만, 북쪽의 오염정도가 심한 것을 알 수 있었다.

2) 석재표면에 형성된 오염물 분석결과

⑴ 현미경 분석

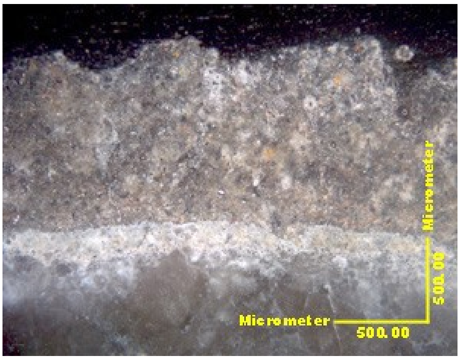


Photo 6. 오염물-남동-대물렌즈 5X

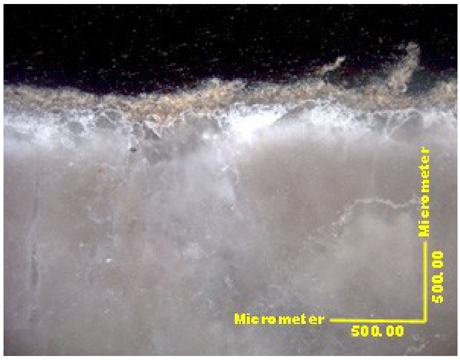


Photo 7. 오염물-남서-대물렌즈 5X

현미경분석 결과 박락층은 원석층과 유백색의 중간층, 그리고 검회색의 오염물층 등 크게 세부분으로 나누어졌으며, 이들 층의 두께는 오염물의 위치와 방향에 따라 다르게 나타났다. 특히 photo 6에서 보는 것과 같이 남동쪽의 오염층의 경우 유백색의 중간층이 거의 존재하지 않았으며, 오염층의 경우도 약 100㎛로 매우 얇게 존재하였고, 오염층 자신도 박락이 일어나고 있는 것이 관찰되었다. 하지만, photo 7과 같이 남서쪽의 오염물의 경우 중간층이 약 100㎛, 오염층이 약 600㎛정도로 매우 두꺼운 것을 알 수 있다. 이들 층은 층별 구성원소가 다를 것으로 예상되는데 이는 SEM-EDX 분석에서 잘 알 수 있었다.

⑵ X선회절분석

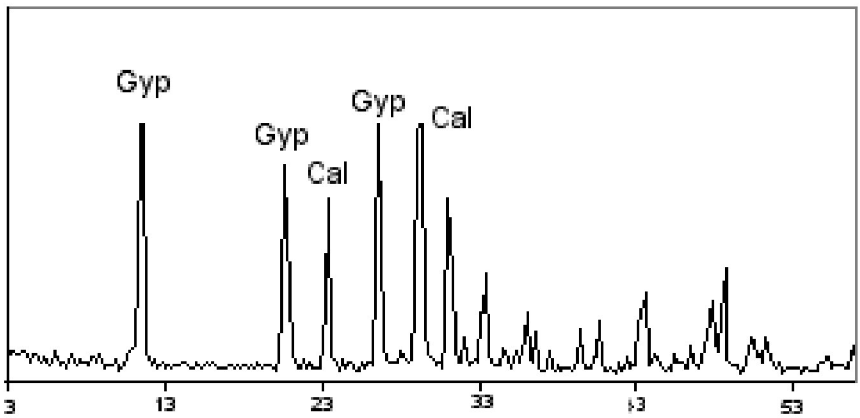


Figure 27. XRD Pattern - 흑색오염층 부위

XRD 분석에 의한 흑색오염층의 주광물성분은 방해석(Calcite)과 석고(Gypsum)로 부분에 따라서는 석고결정이 원석의 방해석보다 훨씬 더 많이 형성되어 있는 곳도 관찰된다.

⑶ X선형광분석(EDXRF)

Figure 28~33은 경천사십층석탑의 오염물을 X-선 형광분석에 의한 성분을 분석한 그래프로 부재의 방향과 오염색에 따라 측정된 결과이다.

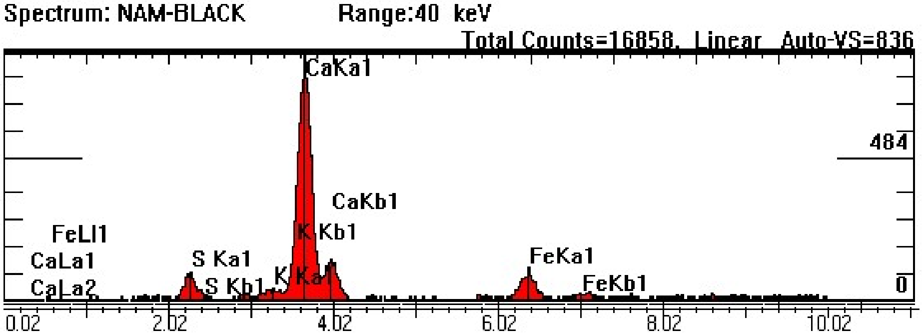


Figure 28. 남쪽 오염물 - 검정색 - Ca, Fe, S, K

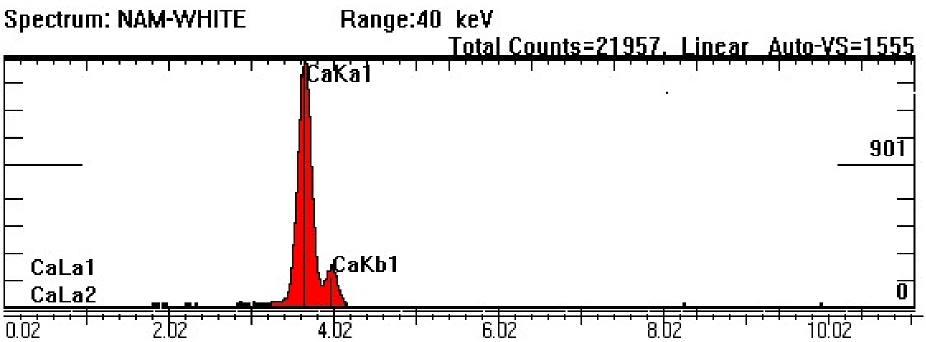


Figure 29. 남쪽 오염물 - 흰색(안쪽) - Ca

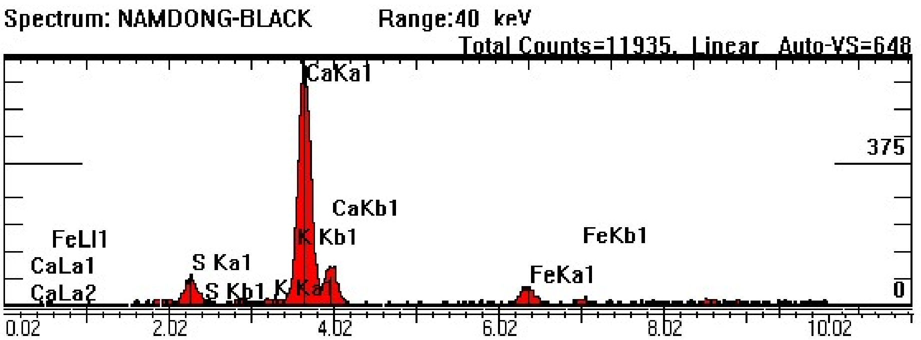


Figure 30. 남동쪽 오염물 - 검정색 - Ca, Fe, S, K

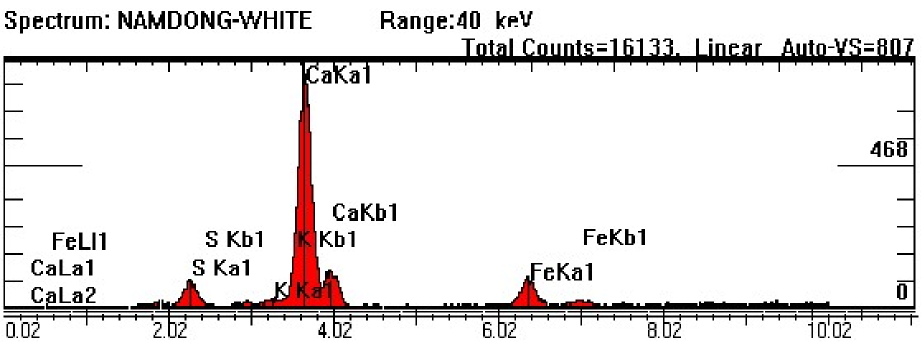


Figure 31. 남동쪽 오염물 - 흰색 - Ca, Fe, S, K

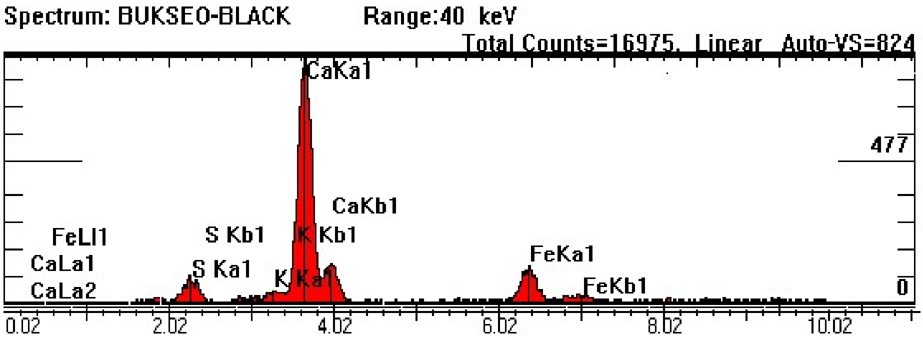


Figure 32. 북서쪽 오염물 - 검정색 - Ca, Fe, S, K

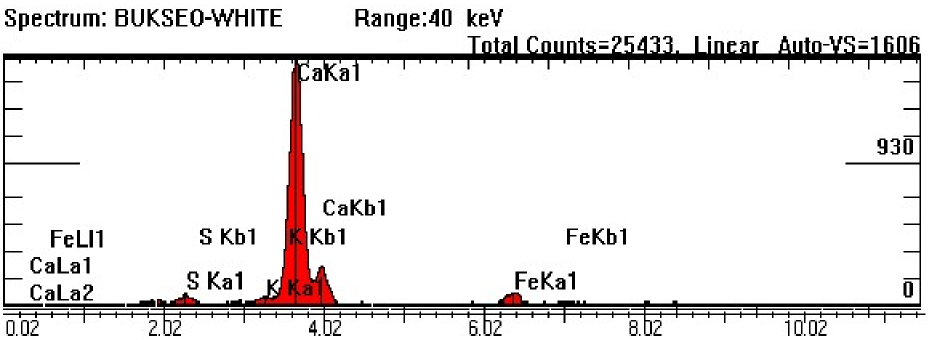


Figure 33. 북서쪽 오염물 - 흰색 - Ca, Fe, S, K

남쪽 오염물의 검은색 부분은 X선 형광분석 결과 주성분은 Ca, Fe, S 및 K peak가 동정되었다. 검정색 오염물의 안쪽인 흰색 부분의 경우 주로 Ca 피크였으며, Fe, K 및 S의 경우 작은 피크로 검출되었다.

남동쪽 오염물의 검정색 부분에서는 Ca, Fe 및 S가 주성분으로 나타났으며 K peak도 검출되었고, 남쪽 오염물과 같은 성분이었다. 남동쪽 오염물의 검정색 오염물 안쪽인 흰색 부분의 경우 주성분이 Ca 이었으나, Fe, K, S도 검정색 오염물에서와 비슷하게 나타났다.

북서쪽 검정색 오염물의 경우 Ca, Fe, S이 주성분으로 나타났으며, K peak가 검출되었고, 북서쪽 검정색 오염물의 안쪽인 흰색 부분의 경우 주성분은 Ca였고, Fe, K, S의 경우 검정색 오염물에서보다 낮게 검출되었다.

오염물의 검정색 부분을 정성 분석한 결과 북서, 남, 남동에서 모두 Ca, Fe, S, K의 peak가 검출되었고, 흰색 부분의 경우 주로 Ca으로 이루어졌

으며, K는 거의 검출되지 않았고, Fe와 S의 경우도 모두 적게 검출되었다. Ca가 높게 나타나는 이유는 원암의 재질에서 기인한 것으로 사료되며, 검은색 오염물의 대부분은 대기 중 먼지의 흡착으로부터 경화된 물질로 추정된다.

⑷ 유도결합플라즈마발광분석(ICP-AES)

ICP 분석결과 이물질의 성분은 Table 5와 같이 대부분 원석의 주성분인 Ca가 19~20wt%로 높게 나타났으며, 특이하게 2층 북쪽 옥개석에서는 15wt%로 다른 곳에 비해 낮은 함량치를 보였다. 이밖에 Al과 Fe, K 등이 약 0.3~0.8wt%로 나타났다. 이는 오염물의 주성분이 주로 원석에서 기인한 것으로 볼 수 있으며, 나머지 원소의 경우 대기의 이물질들에서 나타날 수 있는 성분들로 대기 분진 등이 고착된 것으로 추측할 수 있다. 하지만 이는 오염물 층의 두께가 매우 얇아 시료의 채취에서 나타날 수 있는 오차일 수도 있으며, 이를 보정하기 위해서 SEM-EDX를 통한 층별 원소 함량을 측정하였다.

Table 5. 경천사석탑 옥개석 이물질의 조성비

위치 / 원소	2층 옥계석 동쪽	2층 옥계석 서쪽	2층 옥계석 남쪽	2층 옥계석 북쪽	2층 난간석 남쪽
Ca	19.3	20.3	19.8	15.2	20.1
Al	1.80	1.02	1.27	0.84	1.07
Fe	0.79	0.48	0.59	0.36	0.49
K	0.57	0.27	0.36	0.31	0.30
Na	0.29	0.17	0.21	0.17	0.18
Mg	0.33	0.17	0.22	0.10	0.11
Mn	0.011	0.007	0.009	0.005	0.008
Zn	0.010	0.008	0.017	0.007	0.011
Cu	0.011	0.018	0.008	0.007	0.010
Ti	0.068	0.043	0.050	0.036	0.040
계	23.18	22.486	22.534	17.035	22.319

단위 : wt%

⑸ 전자현미경 분석(SEM-EDX)

현미경에서 관찰된 박락층에 대해 SEM-EDX를 이용하여 분석한 결과 Photo 8, 9에서와 같이 판상의 석고(Gypsum) 결정이 관찰되며 그 외에 다양한 크기의 이물질이 관찰된다. 이 부위에 대한 EDX 피크(Figure 34)와 그 정량분석 결과(Table 6)에서 Ca, S, K가 주피크로 나타났고, 이외에 Si와 Al이 검출되었다. Ca는 Calcite와 $CaSO_4\ 2H_2O$의 석고(Gypsum) 구성성분으로, S는 $CaSO_4\ 2H_2O$의 집섬의 구성성분으로 추정되며, K, Si, Al은 외부의 먼지의 침착에서 기인된 토양성분이나 원석에 소량 존재하는 사장석(Albite)의 구성성분에서 기인한 것으로 사료된다.

이에 대한 원소의 층별 존재분포도를 보기 위해 mapping을 실시하였는데 (Figure 35~38), 이러한 결과는 Al, Si, S, C 등이 오염층에서 집중적으로 분포한다는 것을 알 수 있었다.

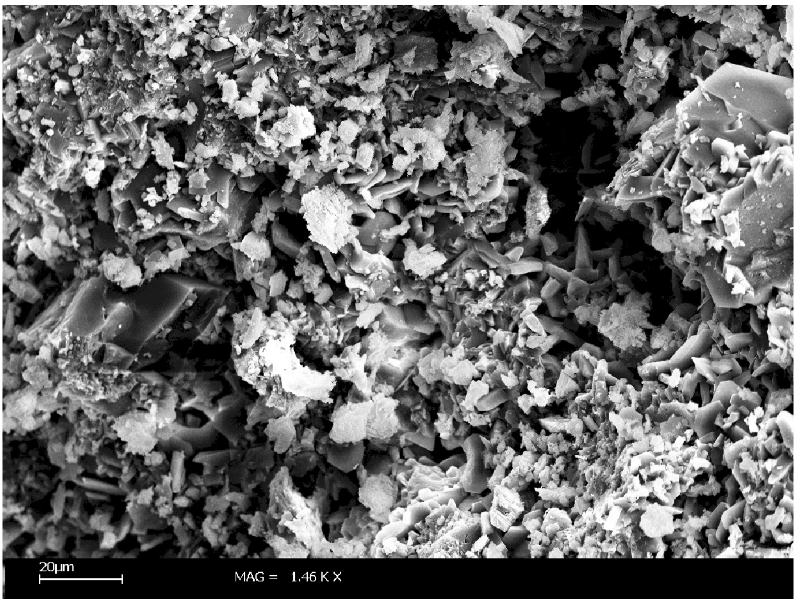


Photo 8. 경천사십층석탑 흑색오염층의 표면 전자현미경사진(1,000배)

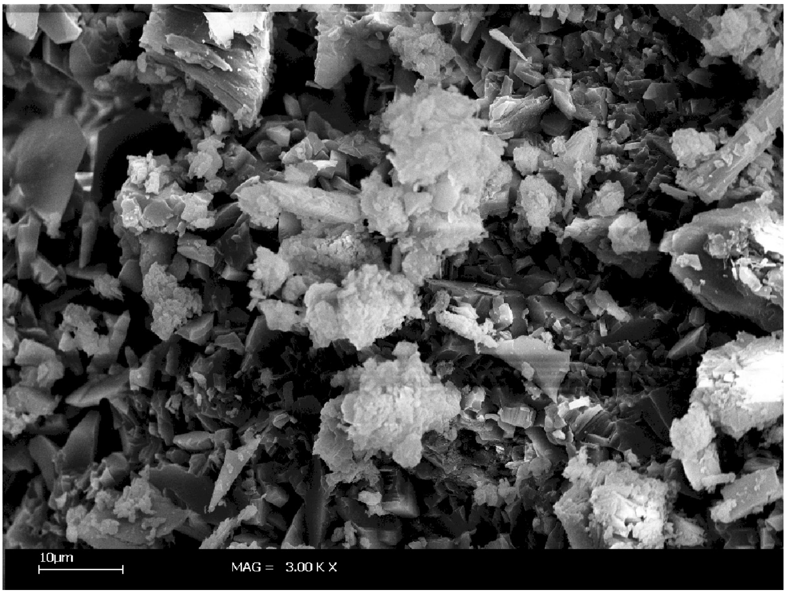


Photo 9. 경천사십층석탑 흑색오염층의 표면 전자현미경사진(3,000배)

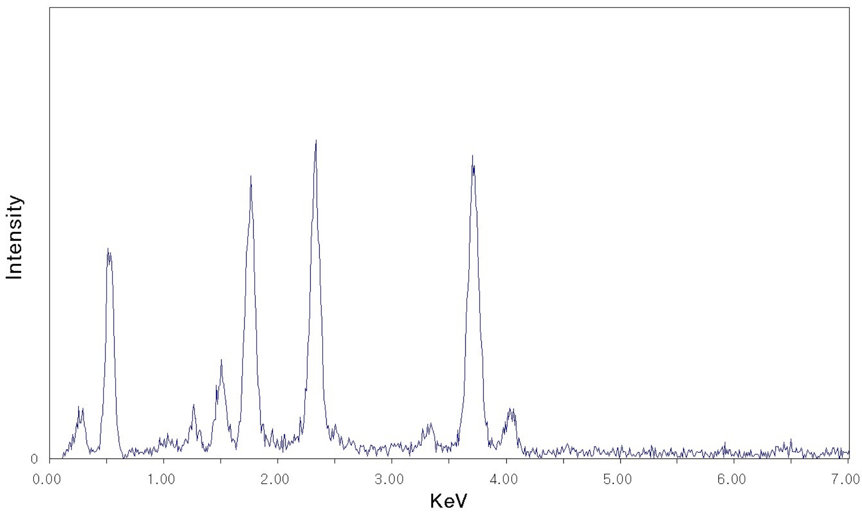
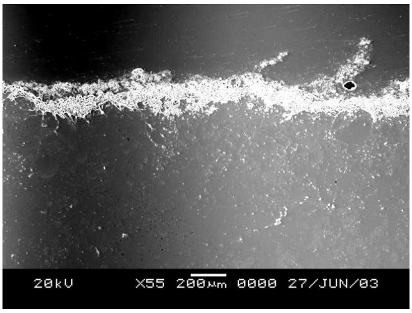


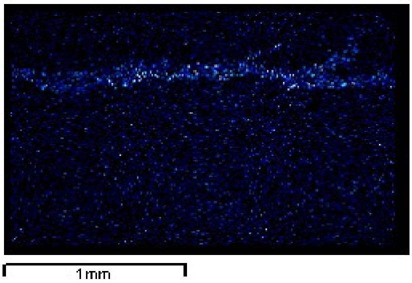
Figure 34. 경천사십층석탑 흑색오염층 표면부위의 EDX 피크

Table 6. 경천사십층석탑 흑색오염층 표면부위의 EDX 정량분석값

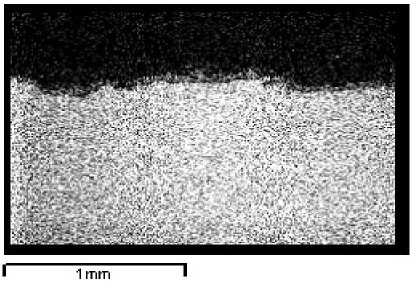
Element	Element Wt.%
Al	2.90
Si	8.06
S	29.18
K	29.77
Ca	30.08
Total	100.00



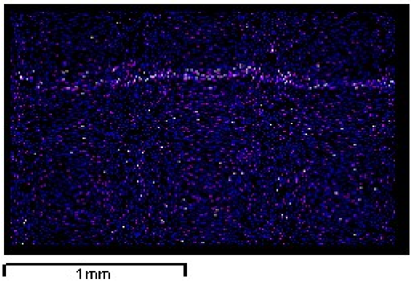
SEM Image



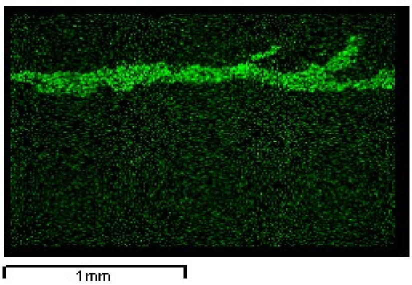
Al



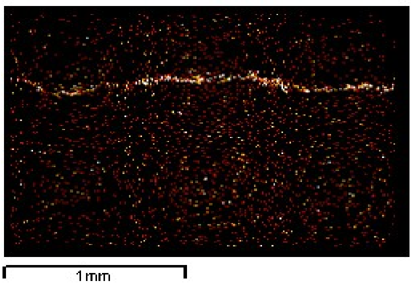
Ca



O



Si



S

Figure 35. 남서쪽 오염물 박락층 - 55배 - SEM-EDX mapping 결과

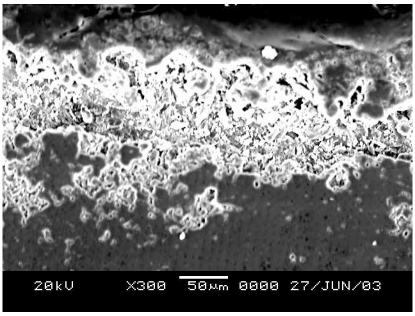
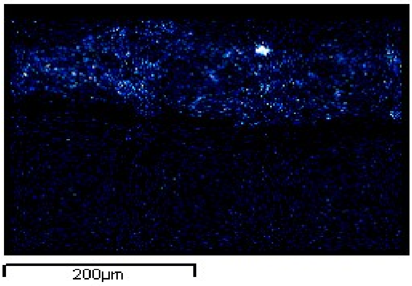
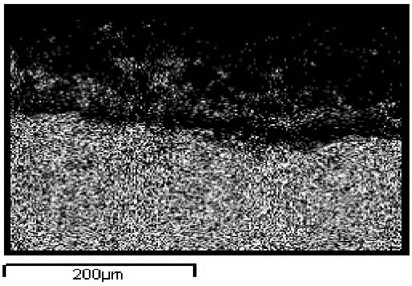
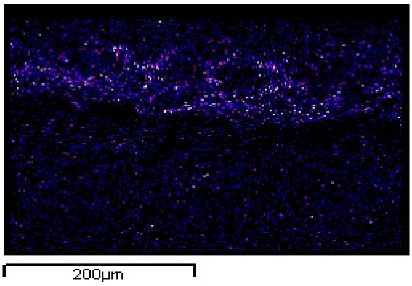
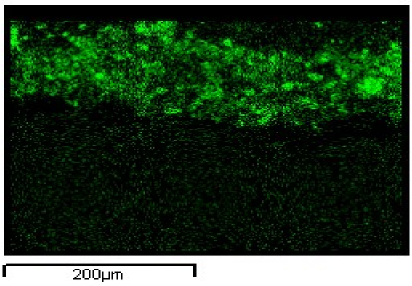
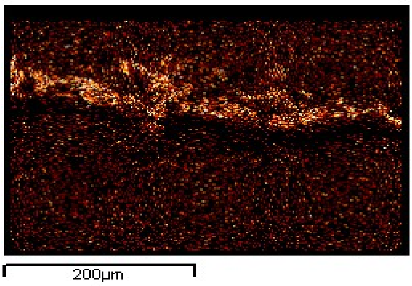
	
SEM Image	Al
	
Ca	O
	
Si	S

Figure 36. 남서쪽 오염물 박락층 - 300배 - SEM-EDX mapping 결과

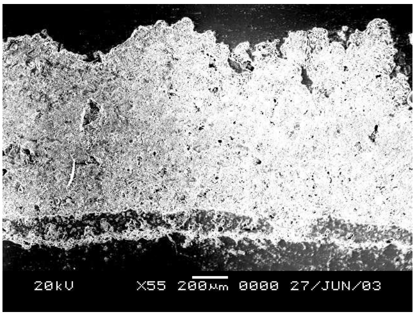
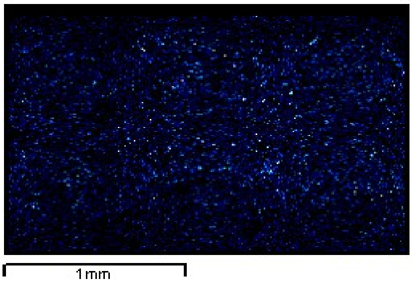
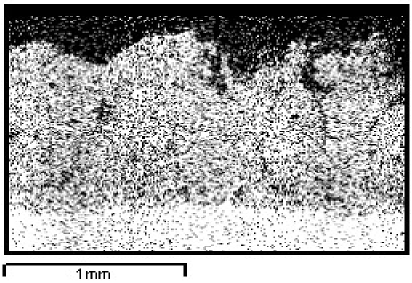
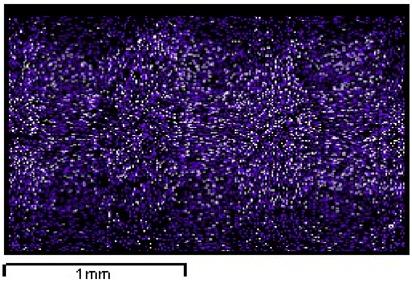
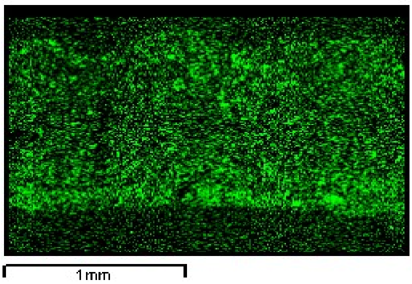
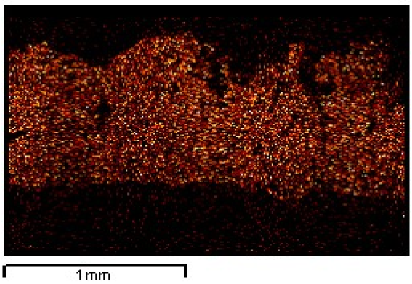
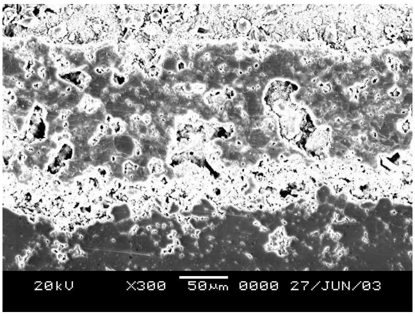
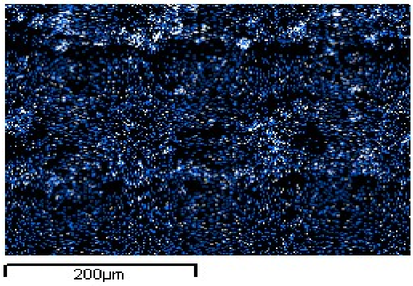
	
SEM Image	Al
	
Ca	O
	
Si	S

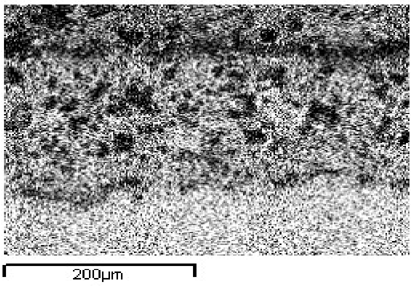
Figure 37. 남동쪽 오염물 박락층 - 55배 - SEM-EDX mapping 결과



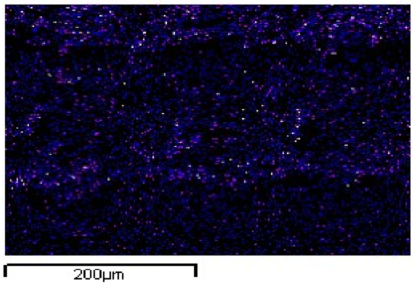
SEM Image



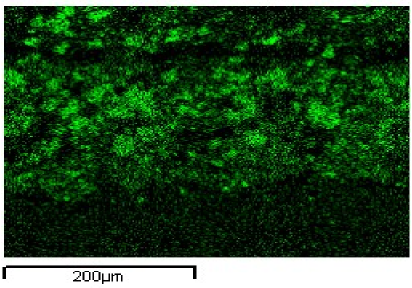
Al



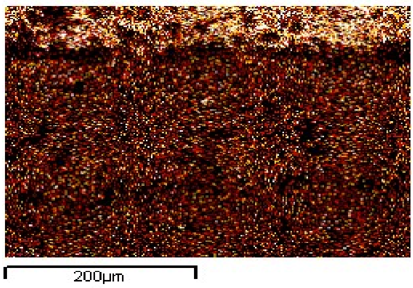
Ca



O



Si



S

Figure 38. 남동쪽 오염물 박락층 - 300배 - SEM-EDX mapping 결과

3. 오염물 제거법을 이용한 결과

1) 레이저를 이용한 방법

⑴ 흡수능 시험

흑색과 적색, 녹색, 회색의 4가지색, 흑화현상으로 인한 생성오염물의 색은 흑색, 철편(鐵片)으로 인한 오염생성물은 적색, 이끼류나 선태류의 색인 녹색, 지의류의 색은 회색으로 각각 도포한 시편을 세정기기에 같은 설정조건의 레이저빔으로 고정시킨 후 방사를 하였다. 레이저빔이 방사된 후 각 선정 시편의 반응 정도를 방사전과 방사 후를 비교하여 레이저빔의 색色반응 정도를 알아본 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. 방사횟수에 따른 반응(○ - 무반응 ● - 반응시작점)

	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회
흑색	○	●							
적색	○	○	○	○	○	●			
녹색	○	○	○	○	○	○	●		
회색	○	○	○	○	○	○	○	○	●

흑색으로 도포된 시편은 POWER 0.4[5]와 Q-SW[6] ON 상태에서 2회의 방사로 시편의 흑색 도포 전 원래의 상태로 돌아오면서 반응을 시작하였다. 1회의 레이저빔이 방사된 상태에서는 흑색의 가오염물이 미세한 반응을 보이기 시작하였으나 제거상태의 반응정도는 아니었으나 2회 방사로 완전제거가 이루어졌다. 그리고 적색과 녹색, 그리고 회색의 순으로 각각의 시편에 방사 횟수를 늘려가면서 레이저빔의 상태를 알아보았다. 적색의 경우 5회의 방사 후부터 시편이 반응을 보이기 시작하였고, 녹색의 경우 8회

5 레이저 시험기기 제어기의 출력레벨.
6 Q-SW(스위치)는 광학 캐비티의 공명특성을 바꾸는 효과를 가지고 있다. 플래쉬 램프 사이클 동안 캐비티가 최대 에너지 포인트에서 공명하도록 허용하면서 Q-SW가 작동되면 강력한 펄스, 소위 자이언트 펄스를 얻을 수 있다.

방사 후 반응을 보였다. 마지막으로 회색의 경우 9회부터 반응을 보이기 시작하였다. 흑색 시편의 반응 실험에서는 반응과 동시에 완전제거가 이루어졌고 적색, 녹색 그리고 회색은 반응정도에서 조금의 차이는 있었지만 흑색의 레이저 반응과는 많은 차이를 보였음을 알 수 있다.

Table 7의 레이저빔의 색별 반응을 토대로 상대적인 레이저빔에 대한 색반응 시험을 실시하였다. Photo 10의 흑색으로 도포된 시편의 흑색이 완전제거가 이루어지는 시간을 조사해본 결과 소요시간이 약 40sec 정도 였다. 그리하여 흑색의 대략적 제거 시간인 40sec를 기준으로 하여 레이저빔의 같은 레벨에서 적색, 녹색 그리고 회색시편에 차례로 균등하게 레이저빔을 방사시켰다.

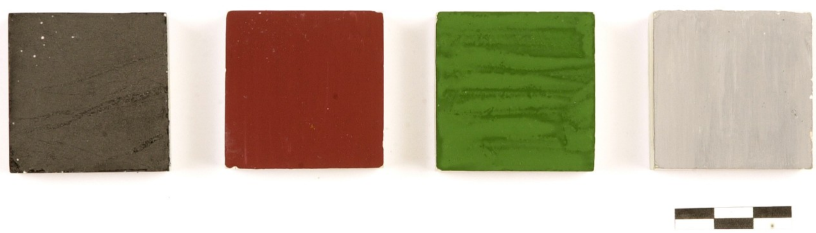


Photo 10. 레이저빔의 방사전 상태

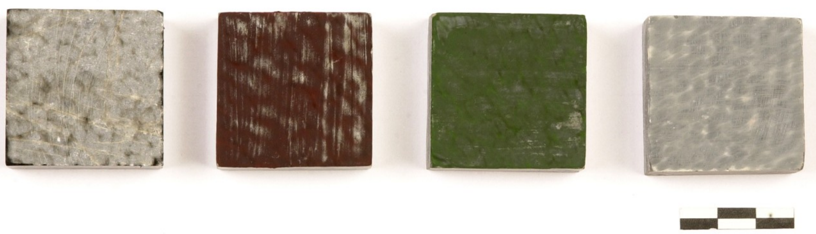


Photo 11. 레이저빔의 방사후 상태

흑색시편을 기준으로 한 다른 색 시편의 시간적인 반응정도와 방사횟수에 대한 결과를 얻었다. Photo 11의 적색과 녹색의 경우 거의 제거가 이루어

지지 않았으며 회색 또한 반응을 보이지 않았다. 이는 레이저빔의 특성인 단색성에 기인된 다른 물질간의 흡수능(Absorptivity)의 차이에 의한 결과라고 할 수 있는데 흑색시편의 경우 방사된 레이저광의 에너지를 완전 흡수하여 광열적 효과를 100% 볼 수 있었던 반면 여타의 다른 색이 도포된 시편은 방출된 레이저광이 일부만 흡수되고 나머지의 에너지는 반사되어 부분적인 반응만 보여 효과적인 광열적 효과를 거둘 수 없었다. 이로써 레이저광선에 대한 효과적인 결과를 얻을 수 있는 색은 흑색이라는 것을 알 수가 있었다.

⑵ 노출거리와 노출횟수 시험

시험의 효율성을 위해 레이저빔 에너지의 흡수가 높은 흑색의 먹물을 이용한 가(假)오염물을 시편 표면에 도포한 후, Figure 39의 레이저빔이 렌즈를 통해 반응하는 최대반응점(Focus)을 기점으로 하여 렌즈의 초점안쪽거리(Focus in)와 초점바깥쪽거리(Focus out)을 일정간격으로 나눈 단계별 피사체(가오염물)의 반응정도를 보는데 Focusing 방식(Figure 39)인 레이저기기의 렌즈는 F=150 렌즈와 F=300 렌즈를 사용되고 있으나 시험에서 사용된 렌즈는 F=150 렌즈를 장착하여 실시하였다. 이 렌즈의 경우 렌즈에서 150㎜에 거리에서 레이저빔의 초점을 형성하게 되는데 이 초점을 기준으로 10㎜ 단위로 전후 10단계로 각 단계별 반응시험을 실시하여 효과적인 제거가 이루어지는 방사 거리와 강도를 보았다.

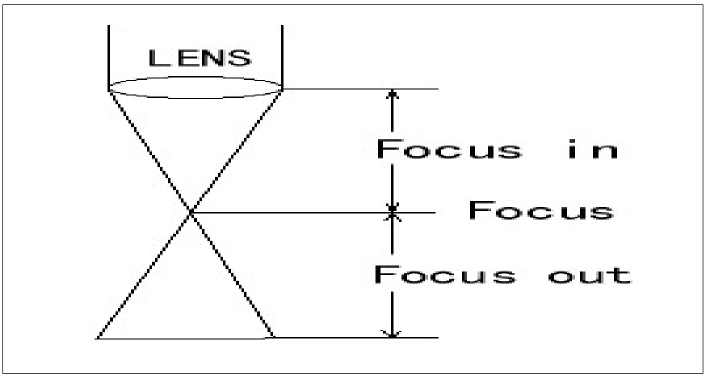


Figure 39. 레이저빔의 렌즈

Table 8. 레이저 방사 거리와 강도에 따른 반응 TEST

단위:cm

	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
0.1	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	측정불가 (렌즈보호대)				
0.2	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C					
0.3	D	D	D	C	A	A	A	A	A	B	B	B	C	C	A	A					
0.4	D	D	D	C	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A					
0.5	D	D	D	C	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	A					

□ 반응지수 단계별(기준: 흑색제거정도에 따른)

A. 흑색의 완전제거　B. 과제거상태　C. 반응　D. 무반응

Table 8의 결과를 살펴보면 F=150 렌즈의 경우 0(초점)에서 약 5㎝ 정도의 거리를 두고 방사한 결과물이 가장 효과적으로 밝혀졌으면 레이저빔의 강도에서도 0.3에서 0.5 정도가 가장 적정한 강도라 할 수 있다. 그러나 초점부위에서는 오히려 시편에 영향을 주어서 초점에서의 제거는 용의하지 못한 것으로 나타났다. 그리고 빔의 강도도 0.1, 0.2에서는 반응을 보이긴 하였으나 효과적인 빔의 강도는 아닌 것으로 나타났다. 그리하여 레이저빔의 가장 효과적인 강도와 거리는 각각 0.4의 빔 강도에서 초점에서 약 ±5㎝정도의 거리란 결과를 도출할 수 있다.

⑶ 재질별 반응 비교 시험

재질별로 가군, 나군, 다군으로 분류하는데 가군은 묘봉층 석회암, 나군은 결정질 석회암 그리고 다군은 화강암으로 정하였다. 가假오염물은 흡수능이 좋은 흑색인 먹물로 도포를 하였다.

이 실험에서는 시험기기의 환경설정을 선행된 앞의 시험인 출력정도와 거리시험에서 도출한 결과를 토대로 실시하였는데 효과적인 기기설정환경은 레이저빔의 0.4 출력으로 최대 반응점에서 5㎝의 간격이 가장 효과적인 적정거리였다.

Table 9. 재질별 레이저 방사횟수에 대한 반응

	1회	3회	5회	8회
묘봉층 석회암	반응시작	완전제거	과도한 제거	손상
결정질 석회암	반응시작	과도한 제거	손상	심한손상
화강암	반응시작	완전제거	결정 손상	결정 손상

Table 9에서 결정질 석회암의 경우 1회 방사함과 동시에 반응과 함께 흑색의 가오염물이 제거가 이루어졌다. 이는 제거의 효율성은 높지만 3회의 방사횟수를 늘려 갈수록 시편에 직접적인 반응을 보이면서 손상이 이루어졌다. 그리고 묘봉층 석회암은 3회 정도의 방사가 적정함을 나타내고 있으며 횟수를 늘려 갈수록 결정질 석회암과 같은 반응을 보이면서 시편에 영향을 주었으나 결정질 석회암과는 차이를 보이는데 이는 결정질 석회암과 묘봉층 석회암의 경도 차이로 인해 나타난 현상이라 할 수 있다. Photo 112의 경우에는 석회암질과 확연한 차이를 보이는데 이는 레이저빔의 흑색 가오염물과 반응을 하는데 있어 가오염물로 설정된 먹물이 결정이 큰 화강암의 내부 침투로 인하여 결정 사이로 침투한 먹물이 반응함과 동시에 결정과 함께 떨어져 나가는 현상이 이루어져서 효과적 세정에 있어 효율적인 면이나 안전성에 있어서 비교 암석들 보다 효과적이지 않다.

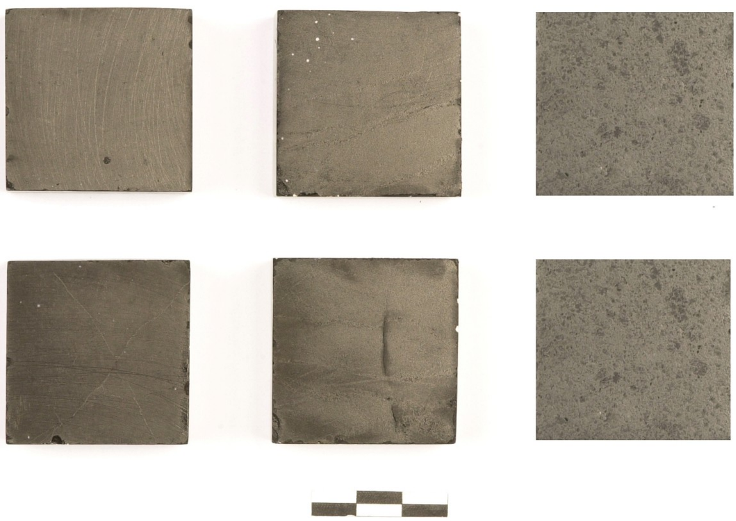


Photo 12. 레이저빔의 방사전 가(假)오염물 도포상태(가,나,다군순)

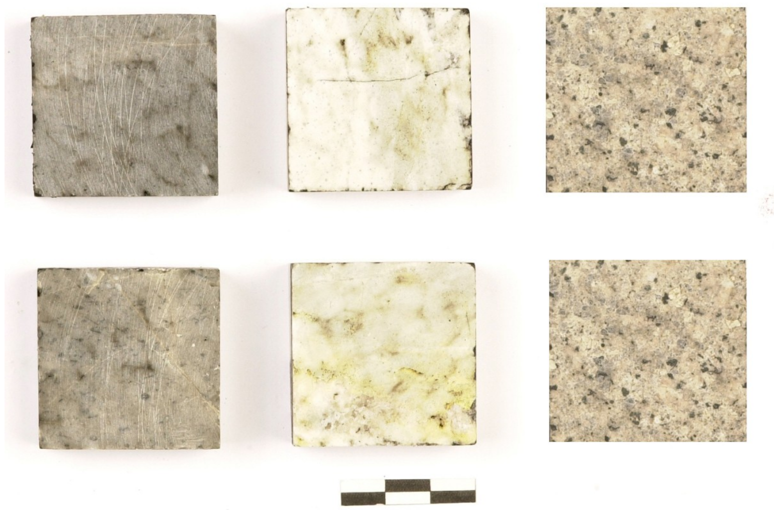


Photo 13. 레이저빔의 방사후 가(假)오염물 제거상태(가,나,다군순)

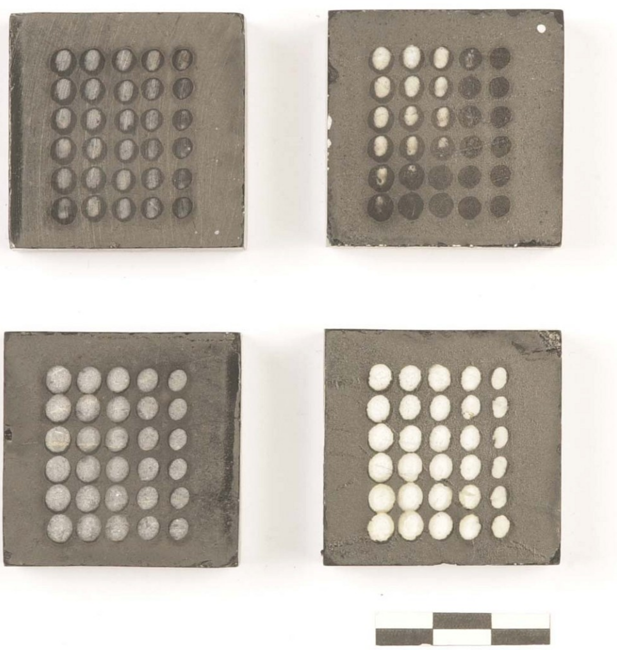


Photo 14. 레이저빔 방사 횟수에 따른 제거 상태

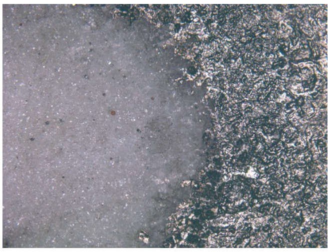
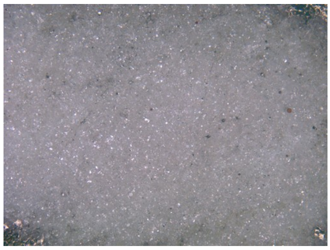
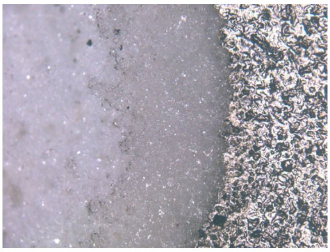
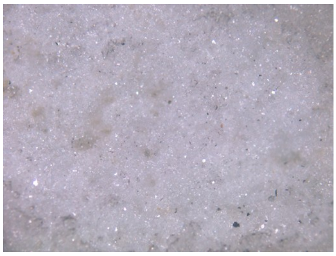
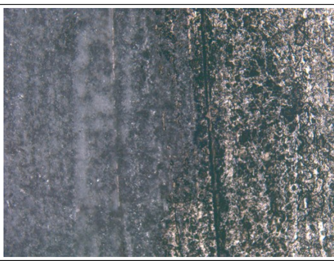
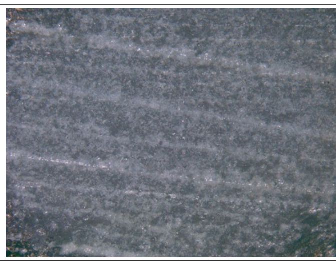
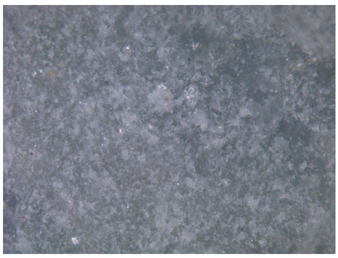
<table>
<tr><td rowspan="4">결정질 석회암</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>A.2회방사 (50X, 경계부위)</td><td>B.2회방사 (50X, 중앙부위)</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>C.10회방사 (50X, 경계부위)</td><td>D.10회방사 (50X, 중앙부위)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">묘봉층 석회암</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>E.2회방사 (50X, 경계부위)</td><td>F.2회방사 (50X, 중앙부위)</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>G.10회방사 (50X, 경계부위)</td><td>H.10회방사 (50X, 중앙부위)</td></tr>
</table>

Figure 40. 방사 스폿부분의 현미경 촬영상태

Figure 40은 재질별 반응 시험을 통한 레이저빔의 방사 결과(Photo 14)를 50배율로 촬영한 상태이다. 결정질 석회암군인 'A, B'는 안정적인 제거가 이루어진 관찰 할 수 있다. 그러나 'C'의 경우 제거상태를 보면 세부분의 층을 나눌 수 있는데 화면 오른쪽 부분의 흑색 부분과 안전적인 제거가 이루어진 중간 부분, 그리고 'C'의 맨 왼쪽 부분을 촬영한 'D'처럼 제거가 이루어진 이후 재 인입되는 레이저빔에 의해 시편표면의 손상부위가 관찰된다.

그리고 묘봉층 석회암군인 'E'는 결정질 석회암군의 'A'와 같이 비교적 제거상태가 안정적으로 이루어진 것을 'F'에서 관찰을 할 수가 있다. 그리고 10회의 레이저빔의 방사가 진행된 'G'와 'H'의 경우 손상의 정도가 보이고 있지만 결정질 석회암의 'D'와 같은 심화된 손상은 없었다. 이와 같은 현상을 보이는 것은 최초 방사되는 레이저빔의 의하여 광열적 효과로 인한 흑색의 가오염물 제거가 이루어진 이후, 재인입되는 레이저빔이 시편표면에 손상을 주는데 결정질 석회암의 경우 묘봉층 석회암에 비해 경도의 차이로 레이저빔의 세정원리 중에 하나인 기계적 효과로 인하여 표면의 박리현상이 일어났다고 볼 수 있는 것이다.

⑷ 오염물 정도별 제거 시간

이 시험은 레이저빔을 이용한 오염물의 제거에 있어서 진행 중인 경천사 십층석탑의 오염물의 발생정도에 따른 대략적 제거 속도를 조사하여 실제 처리에 있어 효율적인 제거시간을 알기 위함에 목적을 둔다. 아래의 Table 8은 사용된 시험기기의 매뉴얼 위주로 실험을 실시한 결과이다. 먼저 오염정도에 따라 오염물이 덩어리를 지어 1㎜ 이상의 두께를 형성하고 있는 부분과 0.5㎜이하의 얇은 층으로 표면에 형성되어 있는 부분, 그리고 0.5㎜~1㎜사이의 오염물들을 각각 정도에 따라 상, 중, 하로 구분하였다.

시험기기의 POWER부분에서는 단계가 0.1부터 0.5의 5단계로 나뉘어져 있으나 선행된 시험결과를 보아 적절한 제거정도와 제거에 있어서의 운용자의 제어가 용이한 0.4에서 이루어졌다. 그리고 속도(P.R.R)는 총 4단계로 구분되어 있는데 SINGLE단계와 2㎐, 5㎐, 10㎐단계이다. 그중 운용자

의 제어가 용이한 속도는 5Hz로써 안정적인 속도로 제거가 가능하다.

Table 10. 20㎜×20㎜단위 면적당 제거시간

	Q-SW	POWER	P.R.R	M/SEC
상	○	0.4(4/5)	5Hz/5Level	1'19"
중	○	0.4(4/5)	5Hz/5Level	1'6"
하	○	0.4(4/5)	5Hz/5Level	36"
상	×	0.4(4/5)	5Hz/5Level	-
중	×	0.4(4/5)	5Hz/5Level	-
하	×	0.4(4/5)	5Hz/5Level	-

Table 10에서와 같이 Q-SW의 ON/OFF에 따라 제거되는 시간의 차이가 현저히 나는데 Q-SW가 OFF상태인 경우 대상 제거물의 반응은 있지만 효율적인 면에서 시간이 많이 걸려서 오염물의 제거 방법에 있어 적절치 않다. 그러나 Q-SW의 ON상태에서는 오염물의 제거는 효과적이라 효율성 면에서 탁월하였다. 결과를 살펴보면 오염물의 정도별 단위(20㎜×20㎜) 면적의 제거 시간은 1㎜ 이상의 오염물은 1분19초 정도가 소요되며 얇은 층의 오염물은 36초 정도의 시간이 경과되었다.

2) 미소마모법에 의한 제거

⑴ 가오염물 제거 실험결과

재질별로 가, 나, 다으로 분류하는데 '가'는 묘봉층 석회암, '나'는 결정질 석회암 그리고 '다'는 화강암 정하였다. 각각의 준비된 40㎜×40㎜×20㎜의 시편에 샌드블라스팅(미소마모법) 처리전후 과정의 비교를 위하여 시편를 촬영하였다(Photo 15). 이후 일정량의 가오염물(먹물)을 시편 표면에 붓을 이용하여 2회 정도 도포를 하였다. 그 후 샌드블라스터(Sand Braster)로 준비된 시편의 가오염물층에 방사를 실시하였다. 사용공기 압력은 2~7bars으로 설정하고 투사체(Glass beads)의 크기는 #90~150 (ø:0.16~0.10㎜, Eurogrit/네덜란드)를 적용하였다.

Photo 15. 블라스팅 기법을 이용한 투사체 방사전 상태(시편 가,나,다순)

Photo 16. 블라스팅 기법을 이용한 투사체 방사후 상태(시편 가,나,다순)

먼저 미소 마모법을 사용하는데 있어 가오염물의 완전제거가 되도록 하였다. 이는 완전 제거 후, 촬영하여 시편의 마모정도를 비교하였다. 각각의 시편은 가오염물이 투사체로 인하여 완전히 제거가 된 것을 알 수 있다. 하지만 Photo 16의 '가' 와 '나'시편인 석회암의 시편들과 '다' 시편인 화강암은 재질의 물성에 상관없이 사진 상에서는 구분할 수 없지만 일률적인 마모가 이루어졌다. 또한 시편의 마모가 심화되었는데 최초 방사 전 샌드페이퍼(Sand Paper) 작업의 상태와는 대조적으로 심한 요철이 형성이 되었다.

⑵ 실제적용사례

미소마모법은 기존에 적용되던 방법으로서 실제 적용사례를 예를 들자면 고달사지쌍사자석등[7] 표면에 발생된 오염물질의 제거를 위한 세척을 실시

한 최근 예가 있는데, 이 석조물은 과거에 도심으로 이전해 온 것으로서 일반적 화강암 재질에서 볼 수 있는 지의류에 의한 생물학적 피해는 없는 상태지만 도심의 먼지 같은 오염물질로 인하여 본래의 색을 잃고 검게 오염된 상태이다. 이 검은 오염물은 암석자체의 노후로 인한 표면의 풍화가 진척된 상태라 빗물 같은 수분의 유입으로 오염물질과 함께 표면의 결정질 사이로 깊숙이 침투하여 흡착되어 있다. 이러한 상태에서 검은 오염물의 완전제거는 불가능한 하다 할 수 있다. Photo 17, 19는 석등에 발생된 오염물중에서 가장 심각한 부위로서 짙은 검은 색은 띄고 있다. 오염물은 부재의 결손으로 형성된 경사면에 집중적으로 오염이 진행되었는데 이는 빗물의 유입시 결손부에 경사면이 배수면 역할을 하여 빗물과 함께 흘러내리던 오염물질이 누적되면서 형성된 것이다. 이 오염층과 일부분의 오염층을 미소마모법으로 제거를 실시하였는데 석재 표면 상태를 고려하여 완전 제거는 배제한 상태에서 세척을 실시하였다.

Photo 17. 제거 전 상태

Photo 18. 제거 후 비교 상태

처리과정 후 Photo 18, 20을 보면 투사체에 의해 검은 오염물이 부분적으로 제거가 이루어진 것을 볼 수 있다. 미소마모법의 원리인 미세 유리입자 또는 모래입자의 투사체가 공기압에 의해 분사되면서 표면의 오염물질과 충돌을 일으켜 물리적 제거방식이기 때문에 어느 정도의 투사체 분사로

7 보물 제282호 고달사지쌍사자석등(高達寺址雙獅子石燈)은 경기도(京畿道) 여주군(驪州郡) 북내면 상교리 고달사터(高達寺址)에서 1959년 경복궁으로 옮겨졌고 조성 암석은 화강암이다. 조성시기는 10세기경으로 추정.

오염층의 제거가 이루어진 후, 이후 방사되는 투사체는 모암에 영향을 주어 표면 손상을 일으킨다.

Photo 19. 블라스팅 처리 이전 상태

Photo 20. 투사체가 방사된 후 표면 상태

Ⅳ. 레이저를 이용한 오염물의 제거방안 및 고찰

1. 보존처리실태

경천사십층석탑은 1990년 이후 시멘트 접착면이 탈락되는 등 구조 안전에 문제점이 발생되어 매년 진단을 실시하였고 1994년 문화재위원들의 조사와 관계전문가의 정밀진단 결과 1995년 상반기 문화재위원회 심의로 해체를 착수하게 되었다. 경천사십층석탑은 문화재위원회 결정으로 국립문화재연구소 보존과학연구실에서 보존처리를 실시하게 되었다. 1995년 4월 20월부터 해체를 위한 비계목 가설작업을 시작하였으며 5월 9일 오전 해체를 착수하여 6월 24일 완료하였다. 해체 방법은 탑 부재들이 균열 이탈될 위험성이 있는 부재들은 고무 로프로 견고하게 고정시키면서 착수하였고, 6층 이상의 중심부(찰주)는 철근과 콘크리트 모르타르로 고정되어 있어 절단작업을 병행하면서 해체하였다. 3층 이하는 적심부분에 콘크리트 모르타르로 채워져 있어 제거하는데 어려움이 있었다. 해체된 부재는 보호상자내 우레탄 폼으로 충진 보강하여 크레인을 사용하여 지상으로 내려 탑 주변에 보관하였다가 보존처리실로 이전되었다(8월, 148개 부재이송).

보존처리를 위한 성분분석, 사용재료에 대한 내구성 등 물성시험을 1995년에 실시하였고 본 석탑의 암석 및 유사암석 조사는 1995년 7월에 실시하였다. 이 결과 경천사십층석탑의 조성암석은 담회색의 세립질 석회암이고 복원을 위한 유사 암석은 강원도 평창군 미탄면에서 채석되는 묘봉층 석회암으로 결정되었다.

경천사십층석탑의 보존처리는 실내보존을 원칙으로 함에 있어 세부처리방안은 균열된 부분의 접착 및 충진 보강, 그리고 결실된 부분은 유사한 암석으로 조각하여 접착복원을 하고 미세 결실부분은 에폭시수지 모르타르로 복원하는 것을 원칙으로 하였다. 시멘트로 복원된 부분은 풍화가 심한 부분만 제거하고 나머지 부분은 경화 처리를 하는 것으로 하였다. 기단부의 경우 콘크리트가 50% 이상인 부재는 구조안전을 위해 신석으로 제작하였고 석재 표면의 생성된 오염물은 제거하는 것을 원칙으로 하였다. 경천사십층석탑의 보존처리 과정 중 표면 생성 오염층의 제거에 사용될 레이저

세정기기는 예비시험에 사용되었던 기기로써 Q-Switch를 적용한 Nd-YAG Laser 세정기기이다(日本赤外線株式會社, Japan). 예비시험의 결과를 통해 흑색오염층의 제거가 용이하고 효율적인 면에서도 우수함이 검증되었고 모암의 손상 또한 없었다. 그리고 렌즈를 통한 Focusing[8)] 방식이여서 운용자의 제어가 용이하였다. 레이저빔의 강도는 피사체와의 거리로 조절할 수 있는 등등의 레이저 세정기기의 특성을 예비시험을 통해 알 수 있었다.

2. 레이저를 이용한 오염물의 제거방안

1) 오염물 정도에 따른 제거 방안

경천사십층석탑의 표면에 생성된 오염물은 채광의 정도나 부재의 방향, 그리고 외적인 상황에 의해 발생정도의 차이를 보이고 있는데 각각의 처리에 있어 정도에 맞는 제거를 실시하여야 한다. 먼저 생성오염물의 두께가 1~3㎜ 정도나 그 이상을 형성하고 있는 부분이 있는데 이는 주로 부재사이 즉, 층과 층 사이의 철편에 의해 형성된 미세한 틈에 발생한 오염물인데 특히 옥개석과 탑신석 층을 위주로 발생되어 있다. 이 오염층의 발생경위는 채광조건 뿐만 아니라 수분의 유입시 원활한 배출이 상대적으로 잘 이루어지지 않는 옥개석 밑면에 생성된 오염물의 일부가 배수면을 타고 흘러내리면서 철편에 의해 형성된 층으로 유입되어 적채積債되는 현상이 반복적으로 일어나면서 큰 두께를 형성하게 되었다. 이렇게 생성된 오염층은 큰 두께를 형성하므로 해체작업이 이루어진 시점에서 재조립 시, 오염층의 두께로 인해 야기될 수 있는 층과 층 사이의 균형 문제를 미연에 방지하기 위한 제거가 필수라 할 수 있다. 이를 제거하는데 있어서는 특정한 미세조각부분이 없으므로 메스와 같은 도구를 이용하여 물리적인 방법으로 일정량을 제거한 후에 부재의 원암에 가까워지면 레이저를 이용하여 원암을 상하지 않는 선에서 제거를 한다. 그러나 물리적인 방법으로 제거직후에는 오염층은 회색을 띄고 있어 레이저의 특징인 흡수능 효과를 백퍼센트 기대

8 정해진 레이저빔의 출력에서 렌즈를 통해 방사되는 레이저빔이 모암의 노출면적을 넓히거나 좁혀서 반응 출력을 조절하는 방식

하기 어렵기 때문에 증류수를 이용하여 오염물에 표면에 반복적으로 도포를 한다. 이는 수분으로 인해 오염물이 가지는 레이저빔에 대한 흡수능을 높여 제거가 용이하도록 하는 역할을 하기 때문이다.

Photo 21. 생성된 오염물

Photo 22.부분적 제거상태

부재의 조각 면에 형성된 오염물은 두 가지로 나눌 수 있는데 먼저 조각이 남아 있는 부분에 형성된 오염층과 Photo 21과 같이 이미 외적인 요인으로 인하여 박락된 면에 형성된 오염층이 있다. 이미 형태가 없어진 부분에 오염층의 제거는 문제가 되진 않지만 조각이 남아 있는 부위의 제거에 있어서는 신중을 기해야 한다. 그러나 앞의 사진과 같이 오염층의 두께가 심각할 정도로 두꺼운 상태로 오염층이 존재하고 있어 오염층으로 속에 조각이 남아 있는지를 알 수가 없어 오염층이 심화된 부분의 제거는 주의해야 한다. 또한 많은 부분이 이러한 상태로 존재하고 있다.

오염물 제거에 사용된 레이저기기 방식이 Focusing 방식이기 때문에 조각 면이 존재하는 부위에서는 Focusing out을 시켜서 레이저빔의 흡수면적의 넓이를 조절하면서 점진적인 제거가 이루어져야 하는데 오염물의 정도가 미약한 부분의 제거는 레이저빔의 초점을 조절하면서 처리를 한다. 특히 발생 정도가 미약한 부분에서는 1~2회 방사정도로 제거가 이루어지

는 만큼 오염층이 얇아 레이저빔의 방사부위가 겹쳐짐에 따라 제거부분 안에서도 제거 정도의 차이를 보이고 있어 얼룩을 형성하게 되는 경우가 있다. 그리하여 제거에 있어서 방사 거리의 조정으로 레이저빔에 노출면적, 즉 흡수면적을 넓게 하여 약한 광열적 효과를 발생시켜 부분적으로 생길 수 있는 오염부분의 얼룩현상을 미연에 방지한다.

Photo 23. 탑신부의 오염정도가 약한 부위의 제거 비교면

Photo 24. 비교부분의 세부 상태

2) 오염물 진행단계에 따른 제거 방안

레이저를 이용한 오염층의 제거 방법에는 선별적인 제거가 이루어져야 하는데 이는 오염물의 단계별 진행에 있어 각기 다른 정도의 차이를 보이고 있기 때문이다. 오염층의 생성시기가 오래되지 않았거나, 부재의 위치나 주변적 환경에 의하여 오염층의 최초 생성된 이후에 전이과정 없이 그대로 남아 있어 오염정도가 심화되지 않은 경우가 있다. 그와 반대로 오염층의 최초 생성이후 반복적 생성 메커니즘이 진행되면서 파티나(Patina)[9)]층이 형성된 경우의 오염부위가 있다.

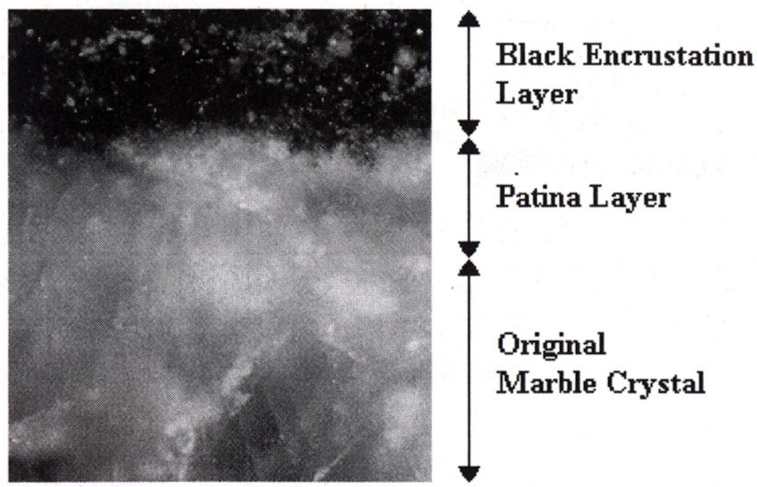


Photo 25. 생성된 오염물의 단층구조

파티나는 Photo 25에서처럼 흑색 오염층의 아래층에 형성된 부위로서 퇴화층이라 할 수 있는데 이는 오랜 세월동안 대기오염물질과 암석 표면층과의 반응으로 인하여 형성된 층으로서 조각부분의 형태를 그대로 유지하고 있기 때문에 오염물의 제거처리에 있어 보존되어야 하는 층이다. 이처럼

---

9 일반적으로 청동녹을 지칭하나 대리석 표면에 생성된 퇴화층을 지칭하기도 한다. Lee, J. M., and Watkins, *et al.,* 2001, Journal of Laser Application 13(1), pp19-25

생성된 오염층은 각기 다른 진행 단계를 보이고 있으므로 제거에 있어서 정확한 오염물의 단계를 진단하여야 한다. 반면 생성시기가 오래되지 않은 오염층은 Photo 26, 27과 같이 육안으로 보아도 큰 두께를 형성하지 않으며 부재표면에 생성된 것을 관찰할 수 있는데,

Photo 26. 세부조각부분의 처리

Photo 27. 세부조각부분의 처리

이러한 부분의 제거에 있어서는 얼룩이 생성되지 않도록 기기제어에 주의만 요하면 큰 어려움은 없으나, 앞에서 언급했듯이 파티나층은 퇴화층으로서 경도가 약화된 상태지만, 섬세한 조각의 형태가 그대로 존재해 오염층만의 선택적인 제거가 필요하기 때문에 레이저빔의 운용에 주의를 요한다.

Photo 28. 경천사십층석탑의 조각면의 풍화상태(3층탑신부)

Photo 28은 경천사십층석탑에서 볼 수 있는 대표적인 파티나층이 형성된 부분이라 할 수 있는데 이러한 부분은 흡수능에 의한 선택적인 흑색 오염물층만의 제거가 이루어져야 한다. 제거에 있어서는 제거정도의 수위 조절을 위한 정확한 진단이 필요한데 경천사십층석탑 표면에 발생된 오염물중 파티나층이 형성된 부분은 육안으로도 알 수 있을 정도로 진행이 이루진 상황이라서 상태진단의 어려움은 없었다.

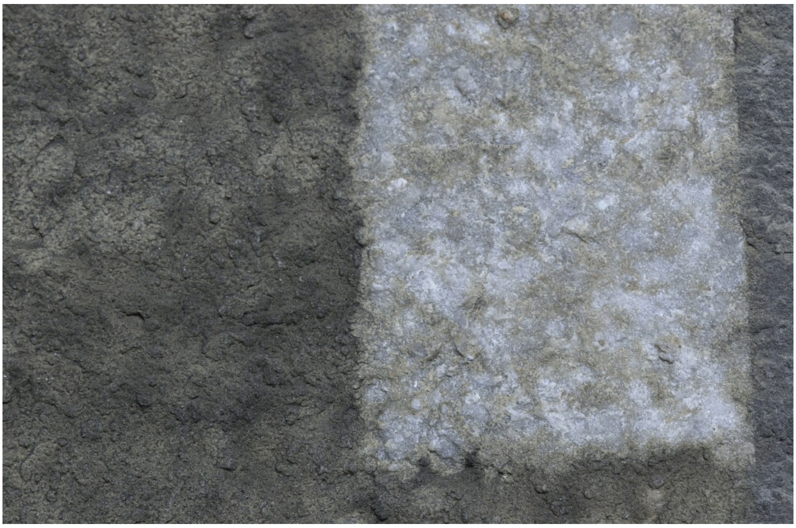


Photo 29. 미세한 퇴화층이 형성된 상태

Photo 29는 오염물의 진행단계에 있어서 파티나층이 미세하게 형성된 부분으로서 흑색의 오염물의 완전제거 이후에 비교 면을 볼 수가 있다. 이는 파티나층이 형성된 조각부분에서의 흑색오염물의 제거 방법을 알아보기 위함이다. 흑색 오염층이 완전제거가 이루어진 부분에서 얼룩을 관찰할 수 있는데 이는 밝은 부분이 원래의 부재 표면색이고 불투명한 회색빛을 띄는 부분이 파티나층인데 이렇게 얼룩이 형성 된 이유는 파티나층의 두께가 미세하여 흑색 오염층과 함께 제거가 된 경우라고 할 수 있다. 미세한 조각부분이 있는 실제처리에서도 일어날 수 있는 상황이라 운용자의 섬세한 주의가 필요하지만, 파티나층의 두께가 두꺼운 상황에서는 흑색오염물의 제거와 동시에 제거되는 경우가 잘 일어나지 않는데 이는 흑색 오염물에 비해 파티나층과 원석이 레이저빔에 대한 반사도가 높기 때문이다.

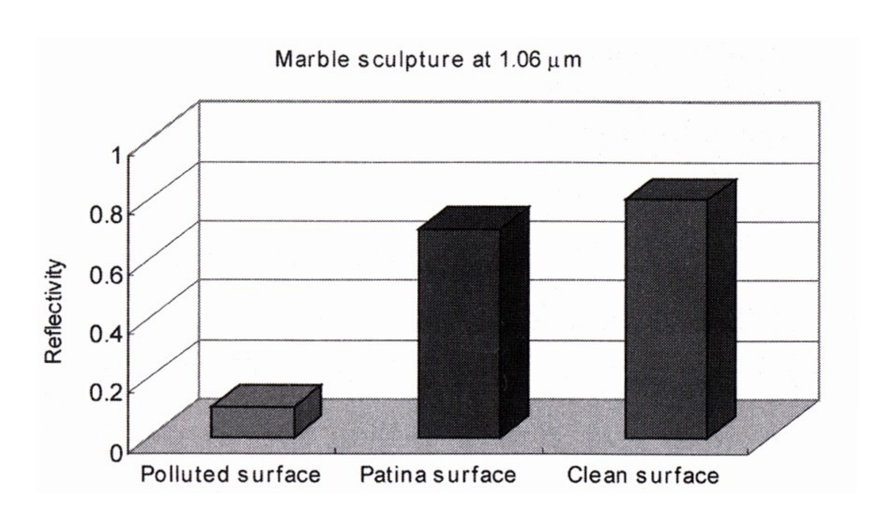


Figure 41. 레이저빔에 대한 반사도

Figure 41은 각각의 영역에서 레이저빔의 반사 정도를 보여준다. 파장이 1.06μm인 Nd:YAG 레이저빔의 반사도(Reflectivity)는 흑색 오염층에서 약 0.1, 파티나층에서는 약 0.7, 원석층에서는 약 0.8 정도이다. 결과적으로 오염층은 레이저 에너지의 대부분을 표면에서 흡수함으로써 효과적인 온도 증가를 꾀할 수 있으나, 반사도가 작은 에너지가 파티나층과 원석층에서는 대부분의 레이저에너지가 표면으로부터 반사됨으로써 상대적으로 미소한 온도증가만이 이루어진다. 결과적으로, 이러한 큰 반사도의 차이는 원부재(파티나층 포함)의 손상 없이 선택적으로 표면 오염층을 증발시켜 제거할 수 있게 된다.

3) 세부 조각면에 대한 제거 방안

경천사십층석탑의 부재 조각에서는 대부분이 부조형식의 조각들이 조성되어 있는데 이러한 조각은 형상에 따라 섬세한 옷주름과 인물형상으로 표현되어져 있다. 각층의 옥개석에서 볼 수 있는 조각은 옥개석 밑면의 포(包) 사이에 조각된 포벽 좌불이다(Photo 30). 이 조각들은 위치상 오염물의 분포가 가장 심화된 곳에 조각되어 있어 대부분의 조각들이 오염물에 의해

완전 덮여 있는 상태로 있다.

Photo 30, 31, 31-1. 석탑표면에 생성된 오염층의 생성 종류(좌측부터)

이러한 조각부분은 앞에서 선행된 방안을 적용하여 오염물의 상태에 따라 선택적인 제거가 필요한데 옥개석 밑면의 경우 오염물의 정도가 심화되어 형태를 알아볼 수 없어 흑색층의 제거가 선별적으로 행해져야 한다. 그리고 Photo 31의 옥개석 밑면 현판에 각자(刻字)의 경우는 옥개석 밑면 안에서도 예외적으로 엷은 오염층이 존재하고 있어 각자의 원형 복원이 가능하다. Photo 32는 1층에서 3층까지의 탑신석 표면에 각자된 라마문자는 위치적으로 오염물이 많이 발생된 부분이라 일부 오염물이 심화된 부재의 경우, 새겨진 문자가 나타나지 않아 인식이 거의 불가능하며 또한 일부 부재에서는 오염층이 심화되어 새겨진 문자가 표면 박리로 이어지는 것을 관찰할 수 있다. 그리하여 새겨진 문자나 문양위에 형성된 오염층의 제거는 제거에 있어 특히 유의를 해야 하는데, 이는 문자부분은 음각으로 형성되어 있어 레이저빔의 일반적인 표면 흡수도와 같지만 음각에 의해서 미세하게 형성된 모서리 부분이 자칫 레이저빔에 반응하여 미세하게나마 새겨진 문자가 손상될 수 있기 때문이다.


Photo 32, 32-1. 탑신부의 미세조각부분의 생성오염물의 제거 비교상태

V. 종합

경천사십층석탑의 표면에 생성된 오염물은 대기 중에 발생된 오염물을 대기오염으로 인한 물질의 이동과 침착의 현상으로 생성되었다 할 수 있으나 화학적으로 매우 복잡한 체계를 갖고 있고 그 생성원인과 메커니즘을 규명하는 것이 굉장히 어려운 일이다. 그리고 생성된 흑색오염층은 산성비와 복합적인 작용으로 녹아내리게 되면서 암석의 표면에 얼룩을 형성하게 되어 시각적으로도 좋지 결과를 초래한다. 이 흑색오염층은 암석 자체에도 큰 손상을 끼치게 된다. 그러나 일부 다행스런 것은 산업 구조의 변화로 인한 오염물 배출이 점차 감소를 보이고 있어 대기오염 진행이 다소 둔화되었다. 그리하여 석조문화재에 대한 영향은 과거에 반해 진정되는 기미를 보이고 있으나 오염층의 발생원인이 화학적으로 복잡한 체계를 갖고 있는 만큼 이전에 생성된 오염물은 미학적인 면이나 석조물의 보존측면에서도 대책이 시급한 시점에 있다.

이 발생된 오염물질은 흑색을 띄며 석탑 표면에 넓게 분포하고 있다. 오염물의 발생분포에 있어서 방위별 분포와 같이 옥개석 밑면과 탑신석에 주로 오염물이 생성되어 있었다. 옥개석 밑면의 경우 방위와 상관없이 오염층이 심화된 상태이나 탑신석의 발생 오염층은 발생 면적에서는 남>북,동>서 순으로 분포현황을 나타내고 있었으며 오염층의 두께나 심화정도는 발생 면적과는 다소 다른 경향을 나타나고 있었다. 이렇게 발생된 오염층은 일반적인 오염물의 제거 방법으로는 불가능하다 할 수 있는데, 이는 석탑 표면의 풍화가 심화된 상태여서 일반적인 방법을 적용할 경우 섬세하게 조각이 되어진 부분의 훼손이 이루어 질수 있으며 화학적인 방법 또한, 이미 대기오염으로 인한 암석의 화학반응이 일어난 상태여서 2차적인 훼손을 완전 배제가 어렵기 때문에 적용이 불가하다.

그리하여 유럽에서 선행된 레이저를 이용한 세정의 효율성에 대한 사례가 있는데, 일반적인 제거 방법에서 발생될 수 있는 위험요소를 최소화한 방법이다. 이는 레이저 특성에 따른 예비시험을 통해 보았듯 검은색에 대한 레이저광의 에너지 흡수능이 높아 광열적 반응을 유도할 수 있어 흑색오염물의 순간적인 발화가 됨에 따라 제거가 이루어지기 때문이다. 또한

경천사십층석탑의 오염물의 세정방법에 있어 레이저 세정방법과 기계적 세정방법인 블라스팅 기법의 비교 시험결과 경천사십층석탑과 같이 퇴화층이 형성된 부분이 많고 오염물의 발생 정도의 차이가 심화되어 있으며 조각과 문양이 섬세한 상황에서 기계적인 세정방법을 적용할 경우 퇴화층의 결손과 조각부분의 유실과 같은 원형 손상의 위험요소를 배제하기 어렵다. 그 반면 레이저 세정기법의 경우 광열적 반응을 유도하는 비접촉 제거 방식이기 때문에 퇴화층과 같이 원형 조각의 섬세한 조각이나 문양의 형태를 그대로 유지하고 있는 특수한 부분의 오염물질만의 선택적인 제거가 가능하기 때문이다. 결과적으로 기계적인 방법은 경천사십층석탑의 발생오염물의 제거 방안으로는 적합하지 않으며 한계를 가지고 있으나 레이저를 이용한 세정방법은 기계적인 제거방법의 문제점을 완벽하게 보완하고 있는 방법이라 할 수 있다. 그러나 레이저광의 특성상 에너지의 흡수능이 낮은 석회암이나 대리석에 흡수능이 높은 흑색오염물이 발생된 조건에서는 흡수능 차이에 의한 성과물을 얻을 수 있지만 화강암과 같이 조성광물 중에 흡수능이 높은 검은색을 띄고 있는 운모가 존재하고 있어 레이저빔에 대한 반응을 한다. 그리하여 화강암질의 석조문화재 표면에 흑색의 오염물이 발생된 상황에서는 오염층의 제거에 있어 레이저광이 운모에 반응하여 화강암으로 조성된 원형에 결정 손상을 일으켜 표면박리가 이루어진다. 이처럼 적외선 레이저빔을 이용한 세정방법은 화강암 재질의 문화재에 발생된 오염층에 대한 적용은 불가한 것으로 나타났다.(Photo 35)

이에 현존하는 대부분의 석조문화재가 화강암질의 암석인 것을 고려한다면 Nd:YAG 적외선 레이저의 석조문화재 일률적인 적용에는 한계가 있다. 적외선 영역의 레이저는 경천사십층석탑이나 비슷한 재질의 원각사지십층석탑과 같이 석회암 재질의 석조문화재에 대한 적용은 효율적이지만 화강암 재질의 석조문화재에 대한 적용은 불가하기 때문에 Nd:YAG 레이저 외에 엑시머(excimer)레이저와 같은 자외선 영역의 레이저빔에 대한 연구가 진행 중에 있다. 또한 레이저광 파장에 따른 문화재의 재질별 적용 연구도 진행되어야 하며 나아가 이러한 연구 성과를 통하여 오염물에 의한 문화재의 피해에 대한 대책방안으로, 그리고 문화재보존에 있어 또 하나의 대책방안으로 연구되어지길 기대한다.


Photo 33, 34. 레이저 세정기기와 블라스팅 기기의 제거 비교 상태

Photo 35. 화강암 표면에 생성된 오염물의 레이저를 이용한 제거

Photo 36. 화강암 표면에 생성된 오염물의 블라스팅 기법을 이용한 제거

Photo 37. 고사된 이끼류의 제거 (좌측-레이저, 우측-블라스팅)

<참고문헌>

고유섭, 『한국탑파의 연구』, 동화출판사,1975.

_____, 『松都古蹟』,1946, 『松都古蹟』,열화당,1977.

강대일, 「문화재와 보존환경, 보존과학기초연수교육」, 국립문화재연구소, 2003.

김사덕, 『산성비에 의한 대리석 문화재의 부식에 관한 연구』,1996.

김도훈, 「레이저가공학」, 경문사, 1990.

김윤신, 「국내 대기오염의 부식영향에 관한 연구」, 『환경운동연합 녹색생명 대기오염 토론회 자료집』, 1999

김희강 외, 「대기오염과 제어」, 『동화기술』, 1988

국립환경연구원, 『대기오염과 산성비에 대한 피해조사 및 평가에 관한 연구 (II)』, 1992.

노재식, 「대기환경이 문화재에 미치는 영향 연구」, 『보존과학연구』제1집, 1980

문화재관리국, 『원각사지십층석탑 실측조사보고서』,1993.

문화재관리국, 『석굴암수리공사보고서』,1967

서기수 외, 「국지 기상 특성에 따른 군산, 대구 및 포항의 대기질의 일변화」, 『한국환경과학회지』, 제6권(제6호), 1997.

이구열, 『한국의 문화재 수난사』, 돌베개, 1996

이규식 외, 「원각사지 십층석탑 오염물의 유기산 분석」, 『보존과학연구』제16집, 1995.

이은희 외, 「경천사십층석탑 복원에 관한 연구」, 『문화재』35, 1992.

이종명, 「문화재 복원을 위한 레이저 세정 기술」, 『보존과학회』 10, 2001.

이종명, 「레이저 세정기구」, 『월간레이저기술(한국산업정보센타)』6월호, 2001.

『에너지 통계연보』,동력자원부, 1991.

정영호, 『한국의 석조미술』, 서울대학교출판부, 1998.

한국건설안전기술원, 「중원미륵리사지 석불입상 보호석실 구조안전진단」, 『안전진단보고서』,1998.

한국미술사학회, 『경천사십층석탑- 한국국보수중사건 미국에서 문제되다」,
『고고미술자료』20, 1968.
_____, 「그 당시의 추억(경천사석탑)」, 『고고미술자료』20, 1968.
한국과학기술연구소, 『다보탑의 과학적 보존에 관한 연구』, 1970.
_____, 『석굴암· 다보탑 및 석가탑의 세척과 보존에 관한 연구』,1971.
Asmus, J, F., 「Light for art conservation」, 『Interdisciplinary Science Reviews』, 1987.
_____, 「Laser restoration of the medieval sculpture of the Cremona cathedral」, 『Proceedings of ICALEO'99』, Section F, 1999.
Cooper, M., 「Recent developments in laser cleaning」, 『The Building Conservation Directory』, 1997.
EPA, 「Air Quality Criteria for Sulphur Oxides」, 『Environmental Protection Agency Publ』, No. AP-50, 1969
Lu, Y. F. *et al.,*. 「Laser surface cleaning in air: mechamisms and applications」, 『Japanese Journal of Applied Physics 33』, 1994.
Lee, J. M. *et al.,*. 「Laser removal of oxides and particles from cooper surface for microelectronic」 fabrication」, 『Optics Express 7(2)』, 2000.
_____, 「Removal of small particles on silicon wafer by laser-induced airborne plasma shock wave」, 『Journal of Applied Physics 89(11)』, 2001.
_____, 「In-process and intelligent monitoring systems for laser cleaning process」, 『Ph.D. Thesis』, The University of Liverpool, 1999.

Lee, J. M. *et al.,*. 「Laser cleaning for electronic device fabrication」, 『The Industrial Laser User 18』, 2000.
_____. 「Laser cleaning: Introduction and Applications」, 『한국레이저가공학회3(1)』, 2000.
_____. 「In-process chromatic monitoring in the laser cleaning of

marble」, 『Journal of Laser Application 13(1)』, 2001.

Schyocker, D., 「Handbook of the EuroLaser Academy」, Chapman & Hall, 1998.

Steen, W. M., 「Laser Materials Processing」, Springer-Verlag, 1991.

<요 약>

현재 우리나라 석조문화재의 보존상태는 시간 경과에 따른 암석 자체의 노후에 의한 손상도 있지만, 주변 환경적 요인에 의한 피해도 심각하다. 이러한 외부적인 요인은 훗날 문화재의 존립과 관계되었다고 해도 과장된 표현이 아닐 것이다. 특히 대기오염에 의한 영향은 심각하다 할 수 있는데 특히, 대기오염물질에 의한 외부노출 문화재에 피해이다. 노출문화재는 대부분 석조문화재로써 대기오염물질과 직접적인 반응을 일으키는데, 표면에 고착된 대기 먼지나 오염물이 빗물에 의한 석조문화재의 재질적인 물성 변이를 일으켜 표면의 박리나 토양화를 촉진시킨다. 또한 석회암질의 석조문화재의 경우 그 피해는 치명적이라 할 수 있는데, 그 대표적인 예로 경천사십층석탑과 원각사지십층석탑을 들 수 있다. 현재 이 석탑들은 지질적인 위치가 도심 한가운데에 있어 매연이나 산성비에 의한 훼손이 심화된 상태이다. 석탑표면에 생성된 오염물은 화학적으로 매우 복잡한 체계를 갖고 있고 그 생성원인과 메커니즘을 규명하는 것이 굉장히 어려운 일이다. 그리고 생성된 흑색오염층은 산성비와 복합적인 작용으로 녹아내리게 되면서 암석의 표면에 얼룩을 형성하게 되어 시각적으로도 좋지 결과를 초래한다. 이 흑색오염층은 암석 자체에도 큰 손상을 끼치게 된다. 그리고 향우 장기적인 문화재 보존의 관점에서는 본다면 심각한 문제라 할 수 있다. 그리고 문화재의 미학적인 관점에서도 석조문화재가 가지는 아름다움이나 역사성의 가치를 고려한다면, 오염물에 대한 연구는 진행되어야 할 것이다.

현대의 기술적 ·과학적 발전은 문화재 보존에 관한 연구에도 많은 영향을 주어, 기존의 문화재 보존방안에서 진보된 방안을 제시하고 있다. 오염물 제거방법에는 물리적, 화학적방법이 보편적인 방법으로 시행되고 있으나 안전한 방법이 할 수 없어 처리에 있어 많은 어려움이 따르고 있다. 그러나 유럽 지역에 선행되고 있는 레이저를 이용한 세척방법은 실효성을 거두면서 많은 성공 사례를 거두었다. 그리하여 이러한 사례를 통하여 레이저 세정방법의 국내최초 적용사례인 만큼 경천사십층석탑 표면에 발생된 오염물 제거에 있어 레이저를 이용한 오염물제거 방법을 연구하였는데, 레이저를 이용한 방법의 효과적인 방법과 제거과정 중에 발생될 수 있는 문제점을 최소화는 방법을 연구하였다.

<Abstract>

A study on elimination of contaminants used by the laser for the 10 storied-pagoda in the temple of Kyoungchunsa

Submitted by Kim Jinhyung
Department of Cultural Properties
Graduate School Gyeongju University
Supervised by Professor Han Gyongsoon
July 2003

It has been proved that pollutants stuck on surfaces of stone architecture have significant direct and indirect harmful effects on them, Among them some do not look evidently harmful, but they have potentials to ruin stone architecture as time goes on. Since the cultural assets have magnificent meanings as historical aspects, their future states should be considered seriously as well as the presence.

The past method to get rid of the pollutants from the surface of cultural properties has been changed a lot till the present along with scientific development of technology on this field. Existing method to eliminating pollutants are based on physical and chemical

processing, which can make damages on them too. Recently cleansing using LASER has been developed in Europe and proved as effective and relatively less harmful to remove pollutants, and it has been adopted widely.

After the success of the way by LASER, there are several trials to adopt the way to our cultural properties which have similar materials. Those showed satisfactory results and studies for developing the securer and more dependable ways to apply.

From now on the report will show the effective ways to apply the method using LASER on to the similar materials and different materials as well and discuss about the pros and cons about the method.