자원환경지질, 제42권, 제1호, 073-084, 2009
Econ. Environ. Geol., 42(1), 073-084, 2009

화순 운주사 석조불감의 보존환경 및 미기상 분석

박성미[1] · 이찬희[1]* · 이명성[1] · 김사덕[2]
[1]공주대학교 문화재보존과학과, [2]국립문화재연구소 보존과학연구실

Analysis of Microclimate and Conservation Environment of the Stone Buddha and Shrine in Unjusa Temple, Hwasun, Korea

Sung-mi Park[1], Chan Hee Lee[1]*, Myeong Seong Lee[1] and Sa Dug Kim[2]
[1]Department of Cultural Heritage Conservation Sciences, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea
[2]Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

The stone Buddha and Shrine of Unjusa temple (Korean Treasure No. 797) at Hwasun formed in Koryo Dynasty is unique style which faces each other the back parts of south and north within the stone Shrine. The stone Buddha and Shrine is highly evaluated in historical, artistic and academic respects. But, the stone properties have been exposed in the open system various aspects of degradations weathered for a long time without specific protective facilities. To inquire into relative deterioration and environmental factor, air temperature and relative humidity of the stone Buddha and Shrine were monitored for a year of the indoor and outdoor, respectively. As a result, the temperature shows increase and decrease according to the seasons in the tendency to clear. While the relative humidity is high to keep all four seasons. Highly relative humidity environment induces dew condensation on the interior of stone Buddha and Shrine. The dew condensation is recorded at the spring, summer and winter season. The summer season is double the total of spring and winter season. In the case of summer, dew condensation is long time continued due to high temperature and relative humidity that is kept by more than nearly 100%. There is progress towards chemical weathering throughout dissolve rock properties and alteration on the rock surface. In the case of winter, dew condensation is not kept for a long time as summer. In the winter, which showing a below zero may add physical weathering throughout moisture that happen by dew condensation to repeat freezing and thawing. Therefore, the reduction plan of the relative humidity effect on dew condensation should be prepared.

Key words : Stone Buddha and Shrine, Unjusa temple, air temperature, relative humidity, dew condensation

화순 운주사 석조불감(보물 제797호)은 고려시대 양식을 갖추고 있는 석조문화재로서 우리나라에서 유래를 찾아볼 수 없는 거대한 석조불감이다. 남쪽과 북쪽의 감실 내부에는 각각의 불상이 등을 맞대고 있는 쌍배 좌상의 독특한 양식을 보이고 있어 역사적, 미술사적 및 학술적으로 높은 평가를 받고 있다. 그러나 이 석조불감은 특별한 보호시설 없이 옥외에 노출되어 장기간 풍화를 받아 다양한 훼손양상이 복합적으로 나타나고 있다. 따라서 상대적인 훼손 및 환경적 요인을 분석하기 위해 석조불감 내부와 외부의 온도분포와 상대습도를 일년간 모니터링 하였다. 이 결과, 석조불감의 기온 및 상대습도 연중변화는 일정한 변동률의 폭으로 증감을 반복하며 기온은 계절에 따라 상승과 감소의 경향을 뚜렷이 보이는 반면, 상대습도는 사계절 모두 높은 습도를 유지하는 것으로 나타났다. 석조불감의 내부는 높은 상대습도로 인해 표면 결로현상이 나타나고 있으며 이는 봄, 여름 및 겨울철에 관찰된다. 특히 여름철은 봄과 겨울철의 합보다도 2배정도 높게 나타나며, 기온이 높고 상대습도가 거의 100%에서 일정하게 유지되므로 결로현상이 오랫동안 암석 표면에 지속되어 구성광물을 용해시키고 표면을 변질시켜 화학적 풍화를 촉진시킬 것으로 판단된다. 따라서 이 석조불감의 보존을 위해 결로현상에 영향을 미치는 상대습도의 저감방안이 필요한 것으로 나타났다.

주요어 : 석조불감, 운주사, 기온, 상대습도, 결로현상

*Corresponding author: chanlee@kongju.ac.kr

1. 서 론

석조문화재의 대부분은 자연환경에 노출된 상태로 전해져 오면서 자연적 및 인위적인 요인으로 인해 원형이 손상된 경우가 아주 많다. 따라서 석조문화재의 체계적인 보존방안을 확립하기 위해서는 구성암석의 재질특성을 바탕으로 풍화훼손도 진단을 통해 손상요인을 규명하는 보존과학적 연구가 수행되어야 한다. 석조문화재의 사이트 환경에 대한 미기상 환경과 변화 및 전반적인 대기환경에 관한 영향평가 등의 연구도 필요하다. 최근에는 이 결과들을 바탕으로 손상된 문화재를 원형 복원하는 연구가 보고되고 있다(Camuffo, 1998; Baggio *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2003; 2005; 2006; Lee and Yi, 2007).

석조문화재는 자연적 및 인위적 요인에 의한 미기상 조건의 변화에 따라 풍화산물과 광물의 종류가 달라지는 등 훼손양상과 정도에 차이를 보인다. 따라서 미기상요소를 분석하고 제어하여 최적의 보존환경을 유지시켜야 한다. 이는 문화재의 훼손을 저지하고 지속적인 보존을 위해 필수적이다. 그러나 국내에서 석조문화재의 미기상에 관한 과학적 조사를 기초로 보존환경이 문화재에 미치는 영향을 검토한 연구는 아직 초기 단계로서 앞으로 다각적인 많은 검토를 필요로 한다(Hong and Eom, 2003; Hong *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2007).

운주사 석조불감은 야외에 노출되어 오랜 기간 기상환경 변화에 의한 풍화작용을 받아 외부로는 부재의 균열 및 박리박락과 같은 물리적 훼손과 강수의 유동 흔적을 따라 발생한 화학적 풍화현상이 중첩되어 있다. 석조불감의 지붕과 북서쪽 면석 등에는 지의류 및 선태류의 생물학적 오염과 이차적 무기오염물로 피복되어 있다. 또한 내부는 높은 상대습도와 온도차로 인해 결로현상이 빈번하게 발생되었던 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서는 운주사 석조불감을 대상으로 구성암석의 종류와 재질특성을 밝히고 보존환경을 검토하고자, 정밀조사와 함께 1년 동안의 미기상 변화를 측정하여 보존에 필요한 환경적 요인을 분석하였다. 이 결과는 운주사 석조불감의 안정적이고 장기적인 보존관리를 위해 중요한 자료가 될 것이며, 나아가 석조문화재의 보존관리 체제를 수립하는데 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 현황 및 기상환경

2.1. 현황 및 연구방법

운주사 석조불감은 사찰 경내에서 북측의 7층 석탑과 남측의 원반형 연화탑 사이에 일직선상으로 배치되어 있다. 이 석조불감은 목조 건축의 모양을 본떠 만든 형태로 측면에서 보았을 때 팔작지붕 아래 직사각형의 감실을 만들었다(Figs. 1A, 1B). 이 운주사 석조불감의 현황과 역사적 의미에 관하여는 Park *et al.*

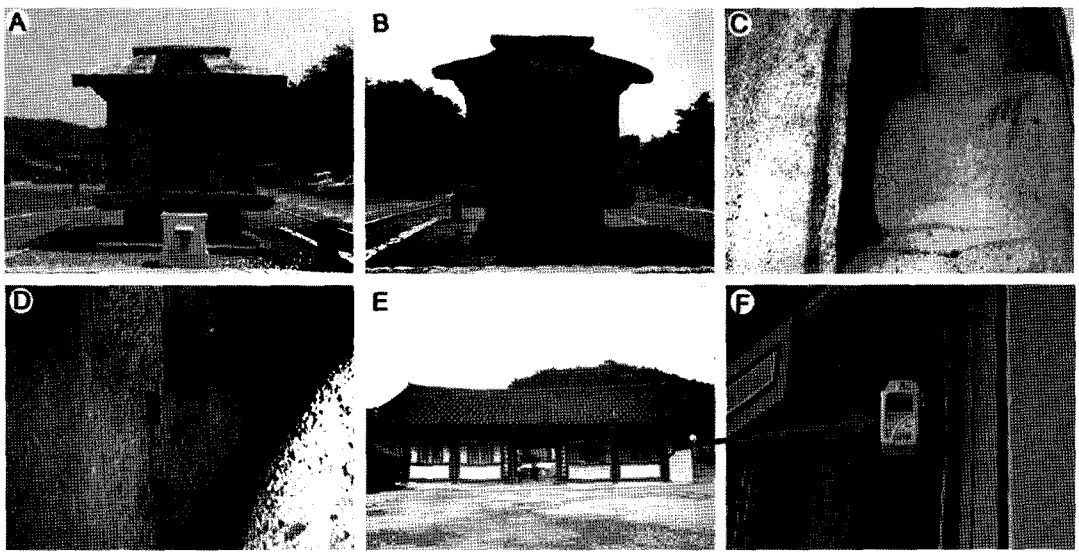

Fig. 1. Appearance of the stone Buddha and Shrine in Unjusa temple. (A) South and (B) north view of the stone Shrine. (C) TESTO set up near the Buddha statue within the stone Shrine for the microclimatic monitering. (D) Thermo couple contact with stone surface for the dew condensation temperature. (E) TESTO set up the outside pillar of the temple office.

(2008)에 의해 비교적 상세히 보고되어 있다.

이 연구에서는 석조불감의 전반적인 보존환경 평가를 위해 기온과 상대습도를 측정하였다. 측정기기는 석조불감 내부의 남측불상(Figs. 1C, 1D)과 종무소 기둥에 부착하였다(Figs. 1E, 1F). 측정에 이용된 기기는 TESTO사의 자동 온습도 로거인 Testo 175-H2와 Testo 177-H1으로서 이들은 모두 NTC(Negative Temperature Coefficient) 서미스터와 전기저항식 습도센서가 장착된 제품이다.

2.2. 기상환경

운주사 일대의 기상환경을 정확히 파악하여 운주사 석조불감에 미치는 훼손양상을 규명하기 위해 화순지역 기상청 관측 자료를 이용하여 주요 기상 요소(기온, 강수량, 상대습도, 풍속)를 분석하였다(KMA, 2007; JDC, 2007). 이 기상자료는 과거 30년 동안의 평균자료와 최근 5년간 기상변화에 따른 것이다(Fig. 2).

운주사가 위치한 화순지역의 30년간 연평균 기온은 13.7℃로 인근 내륙지방에 비하여 비교적 기온이 높아 따뜻한 특징을 보인다. 연평균 강수량은 1387.5 mm로서 북태평양 고기압의 영향을 받는 여름철에 강우량이 집중되며 8월에 최고 584 mm까지 기록한 것을 볼 수 있다(KMA, 2007).

연평균 습도는 70.4%이며 3월이 52.2%로 가장 낮고, 7월이 84.1%로 가장 높은 값을 보인다. 이는 강수량과 마찬가지로 여름철에 가장 높게 나타난다. 연평균 풍속은 2.1 m/s로 계절풍에 의한 봄과 여름철에 풍속이 높다. 겨울철에도 증가하는 모습을 보여 최저 1.7 m/s에서 최고 2.5 m/s로 비교적 큰 차이는 없으며, 연중 서풍 내지 북서풍이 가장 빈번한 것으로 나타났다.

3. 암석 및 풍화특성

3.1. 암석학적 특징

운주사 경내에 분포하는 석조문화재의 일반적 현황과 보존과학적 특징은 Kim *et al.*(2004)에 의해 보고되어 있으며, 석조불감의 재질과 풍화훼손도에 대한 연구 결과도 보고되어 있다(Park *et al.*, 2008). 운주사 석조불감을 구성하는 암석은 운주사 일대에 분포하는 라필리(lapilli) 응회암류로 이 석조불감의 지대석부터 상단의 용마루에 이르기까지 사면의 대부분이 이 암석으로 구성되어 있으며, 일부에서 유문암질 응회각력암이 혼재한다. 또한 사면의 지붕면석과 서측 일부는 보수하면서 대체석으로 흑운모 화강암이 사용되었다. 석조불감 안의 두 불상은 유문암질 응회각력암으로 구성되어 있으며 남측 불상에는 일부 라필리응회암이 혼재한다.

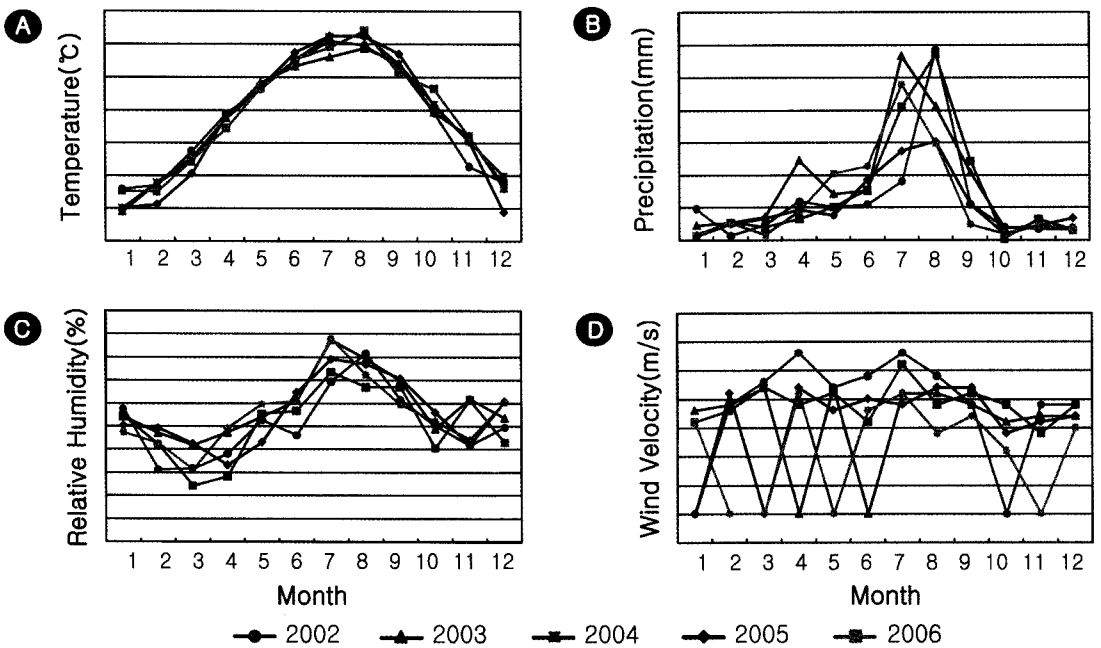

Fig. 2. Statistical atmospheric date of the Hwasun region from 2002 to 2006. (A) Monthly average temperature. (B) Monthly average precipitation. (C) Monthly average relative humidity. (D) Monthly average wind velocity.

석조불감 구성부재의 전암대자율 값은 라필리응회암이 평균 0.16($\times10^{-3}$ SI unit), 유문암질 응회각력암이 평균 0.15($\times10^{-3}$ SI unit)로 동일한 분포를 보이는 티탄철석계열에 해당한다. 흑운모 화강암은 평균 6.90($\times10^{3}$ SI unit)으로 자철석계열에 속한다. 석조불감 구성암석의 화학분석 결과, K-부화 영역에 속하는 비알칼리 계열의 특징을 보여주며, 과알루미나암질(peraluminous) 화성암의 영역에 도시된다. 또한 칼크-알칼리 계열 마그마의 분화 특징을 보인다(Park *et al.*, 2008).

석조불감 구성암석의 암편을 대상으로 박편을 제작하여 편광현미경으로 관찰한 결과, 라필리응회암 및 유문암질 응회각력암에서는 석영과 사장석, 정장석, 흑운모 등의 조암광물은 미정질 조직을 갖는다. 라필리응회암은 유리질의 장석과 석영이 용결구조를 잘 보여주며 선상배열한다. 유문암질 응회각력암은 석영과 장석의 반정이 드물며 장석은 풍화되어 견운모화 작용을 받았고 흑운모는 녹니석화 되어있다. 대체석인 흑운모 화강암은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 각섬석 및 자철석 등으로 구성되어 있으며 중립질 조직을 보인다. 장석은 풍화되어 견운모 및 점토광물화 작용을 받았으며 흑운모는 벽개면을 따라 녹니석화 되었다.

3.2. 풍화특성

운주사 석조불감의 사면에서는 전체적으로 표면마모 및 박리박락, 균열 및 이격 현상들이 관찰되며(Figs. 3A), 그 사이에는 철편고임 및 잡석이 끼워져 있다. 문설주와 지붕면석 사이의 이격에는 황토 충전이, 동측과 서측의 지붕면석에는 시멘트 몰탈이 채워져 있다. 석조불감 남측과 북측의 지붕면석은 선태류에 의해 피복되어 있으며, 사면의 면석에서는 남조류가 강수의 흐름을 따라 수직방향으로 나타나고 있다(Fig. 3B). 또한 지표와 기단 사이에서는 초본식물이 자생하기도 한다.

벽면석에는 수직방향으로 황갈색 변색이 관찰되는데, 이는 부재 사이의 균형을 맞추기 위해 삽입된 철편이 강수와의 반응에 의해 산화되면서 생긴 것이다. 또한 지붕면석 중앙의 시멘트 몰탈이 충전된 부분에서는 백화현상이 나타나며, 강수와 함께 미세토양과 먼지 등의 흡착에 의한 오염물도 관찰된다. 특히 북서쪽 면석에서는 흑색변색이 두드러지게 나타나는데 이는 지의류 및 조류의 고사체에 의한 것과 산화철 및 산화망간에 의해 침착된 것이다(Fig. 3C).

이와 같은 전체적인 풍화특성과 훼손지도 및 각 부재별 손상요인에 따른 훼손률은 Park *et al.*(2008)에 의해 상세히 보고되어 있다. 이를 간단히 요약하면 물리적 풍화로서 석조불감의 사면에서 표면마모와 박리박락이 발달되고 일부분은 탈락되어 있다. 또한 부재와 부재 사이에는 균열 및 이격이 발생되어 이를 수지접합, 잡석 채움, 철편고임, 시멘트 및 황토로 충전하였다. 화학적 풍화는 불감의 사면에 산화철 또는 수산화철에 의한 적갈색 변색, 산화철과 산화망간에 의한 흑색 변색과 백화현상이 나타난다. 생물학적 풍화로는 조류에서 지의류 및 선태류와 고등식물에 이르기까지 다양하게 생장하며 상대적으로 내부보다는 석감 외벽 면석에서 두드러지게 나타난다.

4. 미기상 환경분석

이 석조불감의 훼손에 영향을 미치고 있는 미기상 요인과 환경변화에 따른 훼손상태의 변화를 규명하기 위해 석조불감 내부와 외부(종무소 외벽)에 온습도를 자동으로 측정할 수 있는 기기를 장착하여 2006년 6월 16일부터 2007년 7월 16일까지 매 1시간 간격으로 내부와 외부의 기온과 상대습도를 측정하였다. 또한 내부의 불상에는 표면온도와 습도를 자동으로 기록할 수 있는 접촉식 센서를 부착하였다. 여기에서 획득한 자료와 화순지역의 기상자료를 종합하여 석조불감의 보

Fig. 3. Representative weathering of host rocks for the stone Buddha and Shrine. (A) Physical weathering by irregular shaped cracks of the roof rock in southern basement. (B) Biological weathering by lichen and algae of the face rock in western basement. (C) Chemical weathering by surface oxidation of the face rock in western basement.

존환경을 검토하였다.

4.1. 연중변화

석조불감 내외부와 화순지역의 연중 기온변화를 도시한 결과, 전반적으로 비슷한 변동폭과 경향성을 보인다(Fig. 4A). 기온은 8월 중순까지 서서히 증가하다가 점차 겨울철로 갈수록 변동폭이 증가하면서 감소하는 양상을 보인다. 이후 다시 여름철로 가면서 변동폭이 감소하면서 상승하였다. 측정위치에 따른 미세한 차이는 계절변화에서 설명될 것이다.

석조불감 내부와 화순지역은 2006년 8월 15일에 각각 28.7°C와 29.5°C의 최고기온을 기록하였으나, 석감 외부는 2006년 8월 17일에 30.6°C를 보였다. 최저기온은 석감 내외부 및 화순지역 모두 2006년 12월 29일에 각각 -5.1°C, -0.2°C, -3.9°C로 기록되었으며, 석감 내부에서 가장 낮은 온도가 나타났다. 이는 석조불감 내부가 외부나 화순지역의 대기에 비해 빛의 영향을 적게 받아 저온을 유지하고 있던 것으로 해석된다.

상대습도를 살펴보면 석조불감 내외부는 전반적으로 비슷한 변동폭과 경향성을 보이다가 겨울철이 되면서 석감의 내부에서 변동폭과 수치가 높아지기 시작하여 최고 99.9%를 기록하였다. 화순지역의 상대습도는 석조불감 내외부보다 변동폭이 더 크며, 특히 겨울철로 갈수록 변동폭이 커지고, 여름철로 가면서 다시 작아지는 경향을 보인다(Fig. 4B).

석조불감 내부와 외부 및 화순지역의 상대습도는 내부가 가장 넓은 분포 범위를 보였으며, 최고 상대습도는 2007년 3월 3일부터 7월 16일까지 봄철에서 여름철까지 오랜 기간동안 지속되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 석감의 외부는 2007년 6월 22일에 화순지역은 2006년 7월 20일에 최고값을 기록하였다. 석조불감 내부와 외부의 상대습도 차는 평균 12.2% 정도로 나타나며, 내부와 화순지역의 차는 평균 5.8% 정도로 석조불감 내부와 외부의 상대습도 차이가 가장 큰 것을 알 수 있다. 특히 강수 후에 가장 큰 차이를 보이는 것으로 보아 강수가 석감 내부의 수분 유지에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

4.2. 월별변화

월별 기온변화를 살펴본 결과, 석조불감 내외부 및

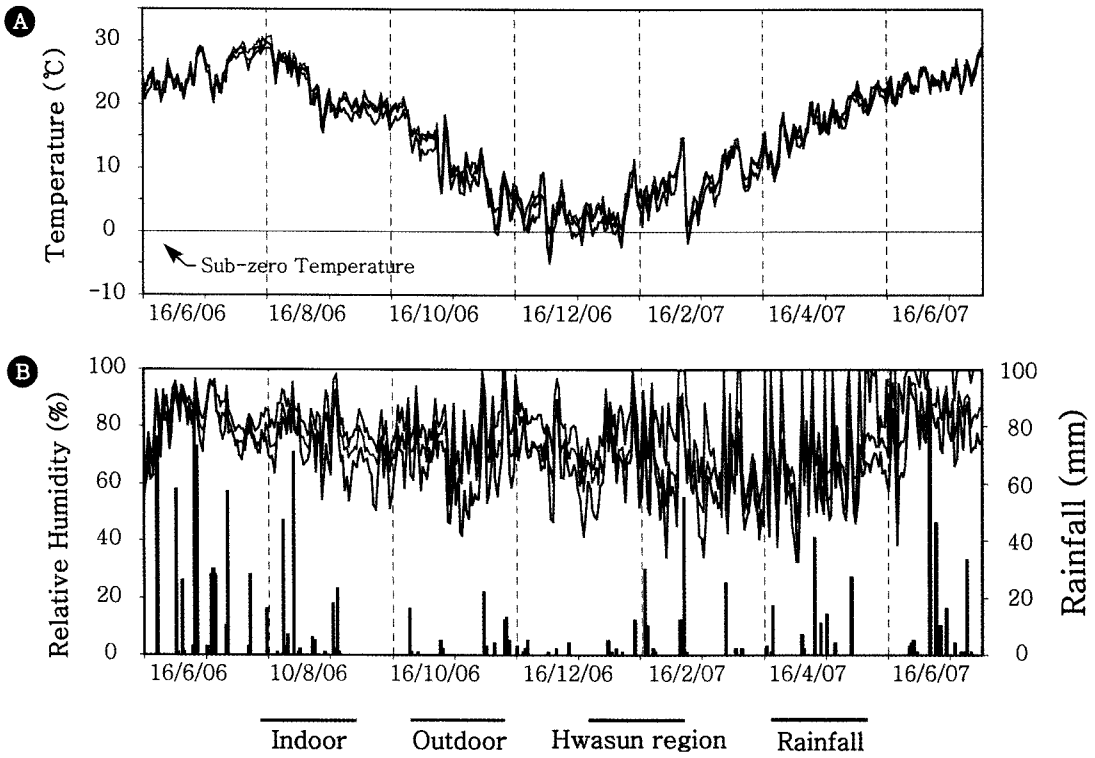

Fig. 4. Diagrams showing microclimatic variation of the Buddha, Shrine and the Hwasun region in daily mean from June 16, 2006 to July 16, 2007.

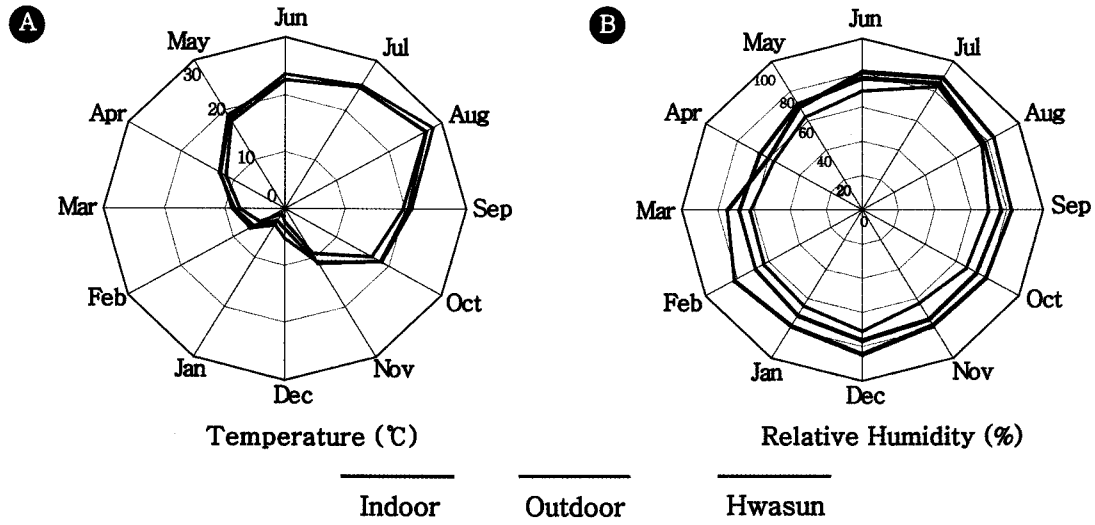

Fig. 5. Monthly air temperature and relative humidity of the stone Buddha, Shrine and Hawsun region.

화순지역은 모두 6월부터 온도가 서서히 증가하여 8월에 외부에서 최고 28℃가 넘는 높은 온도를 기록하였다. 8월 이후에는 다음해 1월까지 현저히 감소하기 시작하였으며, 특히 11월에서 12월 사이에 온도가 급격히 낮아져 내부는 영하권까지 하강한다(Fig. 5A).

12월에서 1월 사이는 내외부의 기온차가 2°C 이상으로 다른 시기에 비해 높게 나타났다. 1월 이후부터는 다시 상승하여 5월 이후에는 20°C가 넘는 온도를 보였다. 특히 1월에서 2월 사이에 온도가 급격히 상승하여 내부는 4°C, 외부 및 화순지역은 3°C 정도의 온도차가 나타난다.

월별 상대습도를 살펴본 결과, 내외부 및 화순지역은 모두 6월에서 7월 사이 상대습도가 상승하여 내부는 7월에 이르러 90% 정도의 높은 습도환경을 보였다. 이후부터 11월까지는 서서히 감소하다 12월에 이르러 다시 증가하였다. 12월에서 이듬해 1월에는 또다시 서서히 감소하다 2월에 다시 증가하여 내부는 7월과 비슷한 정도의 높은 상대습도 값을 보였다.

2월은 내부와 외부의 습도 차가 가장 큰 시기로 10% 이상의 차이를 보였으며, 이후 서서히 감소하였다. 특히 3월에서 4월 사이 내부의 상대습도는 급격히 감소하여 이 시기에만 외부의 상대습도가 더 높은 경향을 보였다(Fig. 5B).

4.3. 계절변화

석조불감 내외부와 화순지역의 기온 및 상대습도를 3개월 단위로 나누어 3월~5월은 봄철, 6월~8월은 여름철, 9월~11월은 가을철, 12월~2월은 겨울철로 세분하여 계절에 따른 상대적 변화를 검토하였다.

봄철의 석조불감 내외부 및 화순지역의 기온은 상승과 하강을 반복하면서 전체적인 기온의 분포양상은 시간이 지날수록 점차 상승하는 것을 알 수 있다. 석조불감 내부, 외부 및 화순지역의 기온 차이는 2007년 3월 5일 이전에는 거의 동일하다가 이후에는 석조불감 내부와 외부에서 1~2°C 정도의 미약한 기온차가 있었다(Fig. 6A). 봄철 기온분포를 보면, 내부는 -1.8~21.1°C (평균 12.1), 외부는 0.9~22.1°C(평균 13.1), 화순지역은 -1.6~23.5°C(평균 13.3)로 외부와 화순지역의 기온분포가 거의 동일하게 나타나며, 석감의 내부는 1°C 정도 낮았다. 이는 직달 일사량의 영향일 것으로 판단된다.

여름철은 상승과 하강을 반복하며 6월에서 8월로 갈수록 상승하는 추세로 전형적인 여름철 기후를 보인다. 또한 전체적으로 높은 온도 범위에서 석조불감 내외부 및 화순지역이 거의 동일한 분포양상과 변동폭을 나타내나, 변동폭은 다른 계절에 비해 가장 적게 나타난다(Fig. 6B). 기온 분포를 보면, 내부는 20.3~28.7°C(평균 25.0), 외부는 20.5~30.6°C(평균 26.0), 화순지역은 20.1~29.5°C(평균 25.3)로 외부는 내부에 비해 1°C 정도 높은 것을 알 수 있다.

가을철 기온은 상승과 하강을 반복하면서 초기에는 높은 온도의 적은 변동률을 보이다 2006년 11월 5일 이후부터 겨울철로 갈수록 변동률이 커지면서 전체적인 기온의 분포양상은 점차 하강하는 것을 알 수 있다. 가을철 기온 그래프의 변화양상은 봄철과 상반되는 것을 알

수 있다(Fig. 6C). 가을철 석조불감 내부는 3.9~24.6°C(평균 15.0), 외부는 6.1~26.2°C(평균 16.7), 화순지역은 5.2~25.5°C(평균 16.6)로 석감의 외부와 화순지역의 기온분포가 거의 동일하게 나타났으나, 석감 내부는 외부에 비해 평균 1.7°C 정도 낮았다.

겨울철 기온 분포를 보면, 내부는 -5.1~11.2°C(평균 2.5), 외부는 -0.2~10.8°C(평균 4.9), 화순지역은 -3.9~10.3°C(평균 3.9)로 외부가 상대적으로 높은 온도분포를 보인다. 그러나 겨울철 기온은 다른 계절과는 달리 석조불감 내외부 및 화순지역 모두 차이를 보인다(Fig. 6D). 변동률은 다른 계절들에 비해 가장 심하여 온도차가 최대 17.3°C까지 나타난다. 이러한 온도차는 석조불감 에도 영향을 미치게 되어 내부와 외부는 평균 2.3°C의 온도 차이를 보인다. 이는 결국 석조불감 내부의 상대습도 변화를 야기하여 결로발생을 촉진한다.

봄철 상대습도는 다른 계절에 비해 변동폭과 측정값

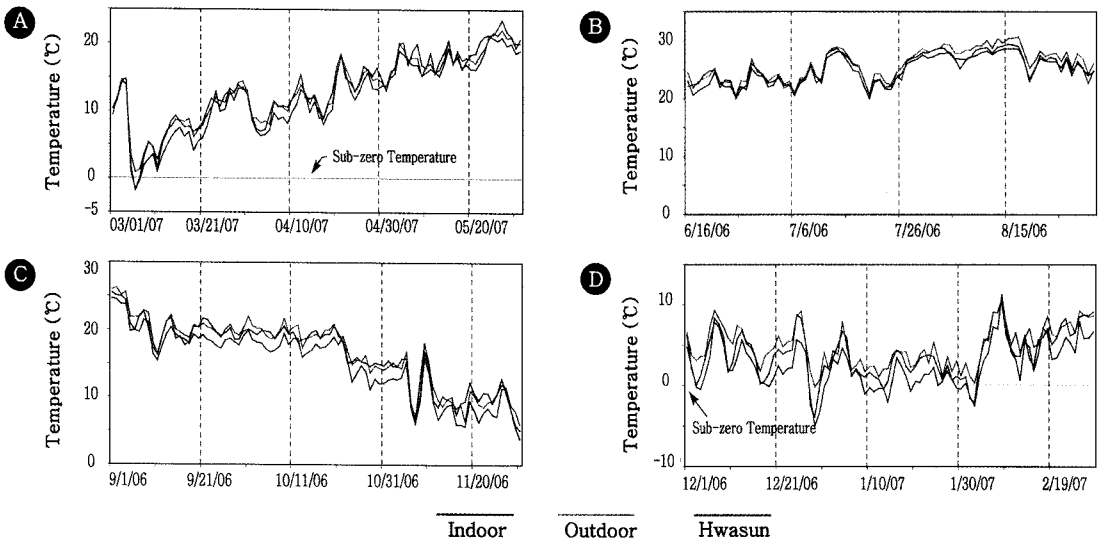

Fig. 6. Seasonal variation of air temperature in the stone Buddha, Shrine and Hwasun region. (A) Spring, (B) Summer, (C) Fall and (D) Winter seasons, respectively.

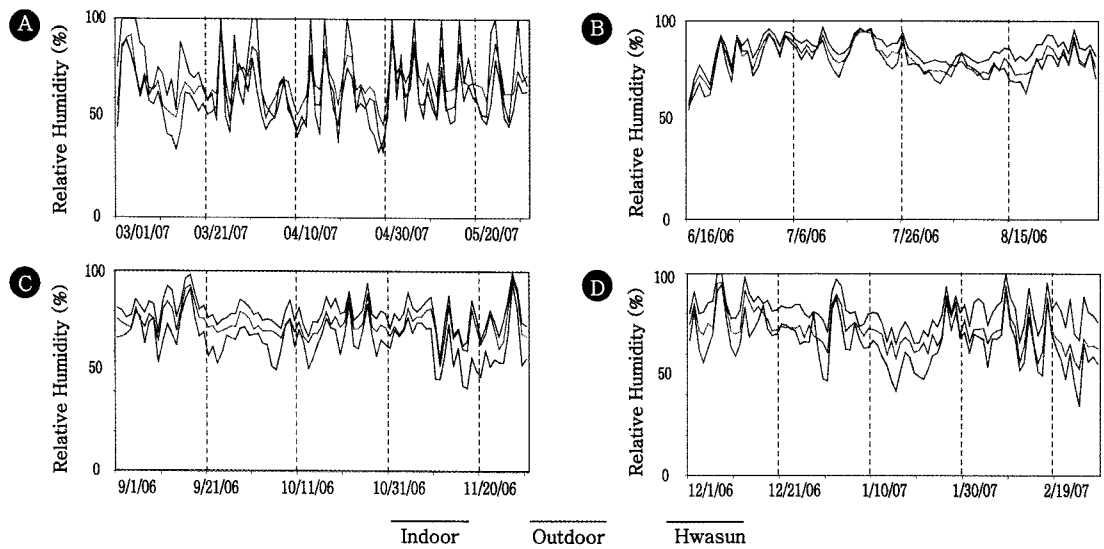

Fig. 7. Seasonal variation of relative humidity in the stone Buddha, Shrine and Hwasun region. (A) Spring, (B) Summer, (C) Fall and (D) Winter, respectively.

이 크게 나타났으며 증가와 감소를 빈번히 반복하였다. 특히 내부는 100%에 가까운 상태를 자주 유지하였다(Fig. 7A). 석감의 내부는 33.0~99.0%(평균 68.3), 외부는 47.1~96.3%(평균 68.6), 화순지역은 32.9~96.0%(평균 60.7)로 화순지역이 석조불감 내외부보다 상대적으로 낮았으나 불감의 내부와 외부는 평균 0.24%로 거의 차이가 없었다. 석감 내부에서 100%에 달하는 높은 상대습도가 빈번하게 나타남에도 불구하고 외부보다도 평균에서 적은 값을 보였다. 이는 석감 내부의 변동률은 크게 나타나는 반면에 외부 변동률은 적고 균일한 분포를 보이기 때문으로 판단된다.

여름철은 석조불감의 내부가 외부와 화순지역보다 상대습도 값은 높으나, 이들의 분포양상과 변동폭은 거의 동일하게 나타났다(Fig. 7B). 여름철은 다른 계절에 비해 변동폭이 가장 적어 안정적이기는 하나, 내부 상대습도는 58.2~96.9%(평균 85.6), 외부 55.3~94.4%(평균 81.0)로 내부가 외부에 비해 평균 4.6% 지속적으로 높은 습도를 유지하고 있다. 한편 화순지역은 57.6~96.5%(평균 79.2)으로 석조불감 내외부의 상대습도 변화에 비해 낮은 분포를 보이며 평균 6.4% 정도 낮았다.

가을철은 석조불감 내부와 외부, 화순지역은 기온차가 나타날 뿐 분포양상과 변동폭은 거의 동일하게 나타났다. 변동폭과 상대습도 값은 석조불감 내부와 외부의 경우 11월 14일 이전에는 변동폭이 여름철에 비

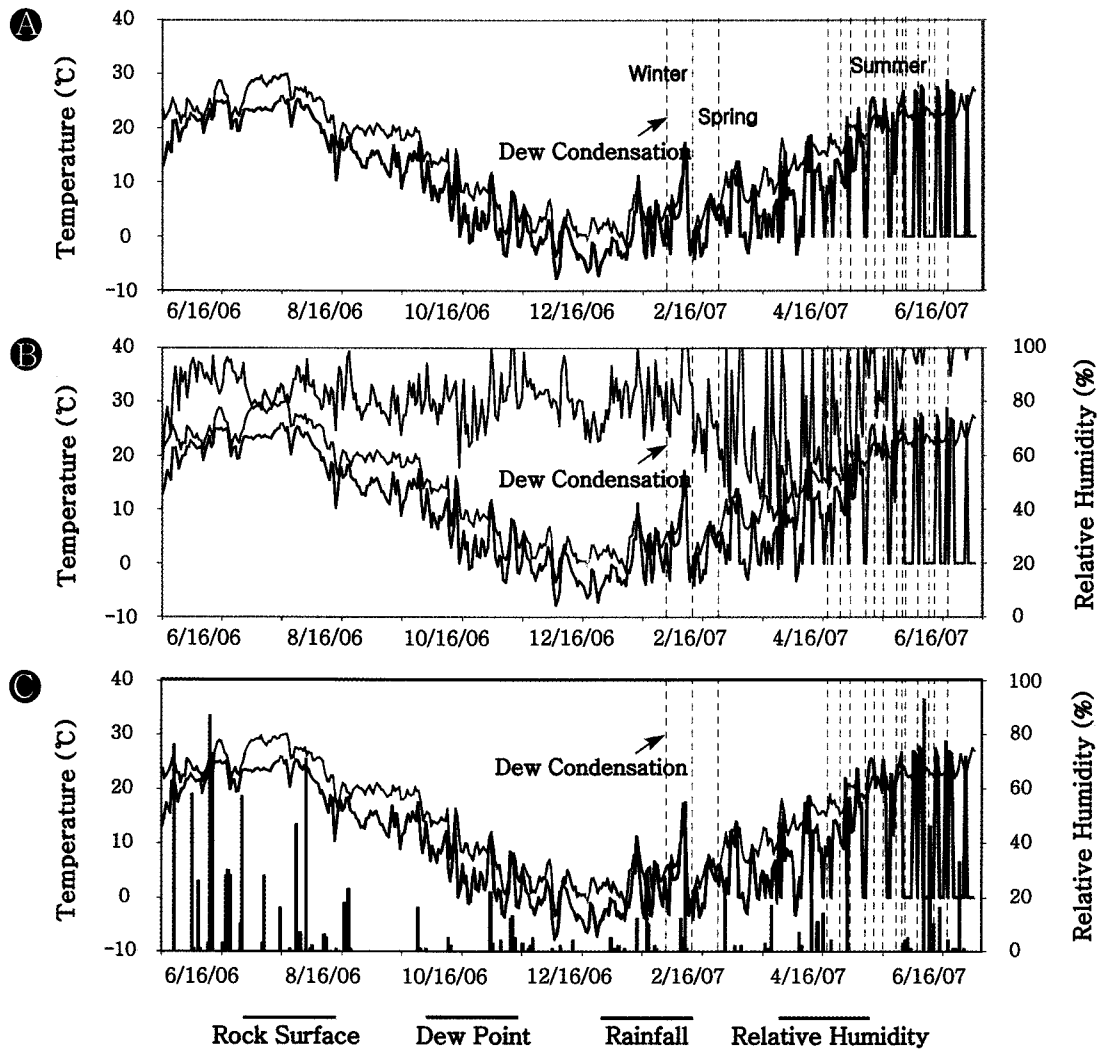

Fig. 8. Occurrence of dew condensation by microclimatic variation of relative humidity and rainfall of the Buddha, Shrine and Hwasun region.

해 조금 더 커지고 70% 이상의 상대습도를 유지하다가 이후부터 겨울로 가며 상승과 하강의 변동폭이 커지고 상대습도 값도 하강하였다(Fig. 7C). 석조불감의 내부는 55.5~99.4%(평균 79.7), 외부는 53.0~97.2%(평균 74.3)로 내부가 외부에 비해 평균 5.4% 정도 높은 습도분포를 보였다. 이는 42.0~94.9%(평균 66.0)의 화순지역 상대습도 분포에 비해 평균 8.3~13.7%정도의 차이가 나는 높은 수치이다.

겨울철은 석조불감 내외부 및 화순지역이 모두 변동하는 경향과 간격이 같으나 내부가 상대적으로 가장 높고 외부가 화순지역보다 높은 상대습도를 나타냈다(Fig. 7D). 석조불감 내부의 상대습도는 65.1~99.9%(평균 81.2), 외부는 52.8~95.7%(평균 71.8)로 내부가 외부에 비해 평균 9.4% 정도 차이를 보이며 높은 습도분포를 보였다. 이는 34.5~94.8%(평균 65.8)의 화순지역 상대습도 분포에 비해 평균 6.0~15.4% 정도 높은 값이다. 그러나 석조불감 내외부의 변화율은 화순지역에 비해 작게 나타났다.

4.4. 결로현상

석조불감 내부에서 측정한 암석의 표면온도와 이슬점 온도를 통해 결로현상의 발생특성을 검토하였다(Fig. 8). 이 결과, 2007년 2월 8일을 시작으로 2월 17일인 겨울철과 3월 2일부터 4일, 5월 23일과 29일의 봄철, 6~7월의 여름철에 이슬점이 표면온도보다 상승하는 현상이 관찰되었다. 이는 이론적으로 표면의 결로 발생을 의미하는 것이다. 석조불감 내부의 결로현상은 가을철을 제외하고는 모든 계절에서 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다.

석조불감 내부의 상대습도에 따른 결로현상을 측정한 결과, 결로현상이 일어난 시기는 전반적으로 상대습도가 100%에 달하는 높은 습도를 유지한 시기에 집중된다. 이때 석조불감의 내부가 높은 상대습도를 유지하게 되고 포화수증기에 의해 암석 표면의 온도가 낮아져 수증기가 표면에서 응결되는 것으로 보인다. 특히 석조불감 내부의 결로현상은 여름철과 겨울철에 높은 발생률을 보였다. 여름철의 경우 상대습도가 거의 100%인 높은 습도 환경을 유지하는 날이 많아 결로현상이 빈번히 발생하여 오랫동안 유지된 것으로 나타났다.

겨울철 역시 상대습도가 100%되는 시기에 결로현상이 발생되었으며 여름철에 비해 낮은 빈도를 보였다. 겨울철은 영하권의 기온으로 결로 발생으로 인한 표면의 수분이 암석의 공극과 균열 및 이격 사이를 채우고 있다가 동결되면서 부피가 팽창하면서 그 틈을 더 벌어지게 하는 등의 물리적 풍화를 야기할 것으로 판단된다. 일반적으로 강수와 강설이 있는 시기는 상대습도가 높으며, 앞에서 설명한 바와 같이 상대습도가 높으면 결로 발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

이를 규명하기 위해 석조불감 내부의 결로현상이 발생된 시기와 강수를 비교해 보았다. 이 결과, 겨울철의 결로현상은 강수의 기록이 보이는 경우에 주로 관찰되었으나 여름철은 강수의 기록이 없어도 빈번하게 발생하였다. 따라서 겨울철 결로현상은 강수의 영향으로 상대습도가 높아져 발생된 것으로 보이며, 여름철은 강수도 중요한 역할을 하나 기온의 변화에 따른 일교차가 가장 중요한 요인인 것으로 판단된다.

석조불감 내부에서 결로발생 시간대를 알아보고자, 일년간 발생한 결로와 계절별 발생한 결로의 시간대별 발생 빈도수를 검토하였다. 결로현상이 일어난 시간대는 오전 8시부터 급격히 증가하기 시작하면서부터 오후 5시 사이의 넓은 시간대에서 발생되었으나, 특히 오전 9시에서 11시 사이에 높은 발생빈도를 보였다(Fig. 9). 이는 석조불감 내부가 새벽에 높은 상대습도를 유지할 때 암석이 포화수증기에 의해 젖어있는 상태에서 점차적으로 대기 온도가 상승하면서 수분이 증발하게 되고 암석의 온도는 유지되면서 표면에 수증기가 응결되어 결로가 발생되는 것이다.

계절별 결로발생 시간대를 살펴보면, 여름철은 상대습도가 100%에 달하는 시기에 10시부터 발생하기 시작하여 오후 5시에 걸쳐 넓게 시간대에 나타나며 다른 시간대에는 결로현상이 일어나지 않았다. 한편 겨울철은 강수의 영향으로 내부의 상대습도가 상승한 시기에 발생되며, 시간대는 24시간 발생되나 특히 기온이 상승하는 오전 9시에서 12시 사이에 높은 발생률을 나타

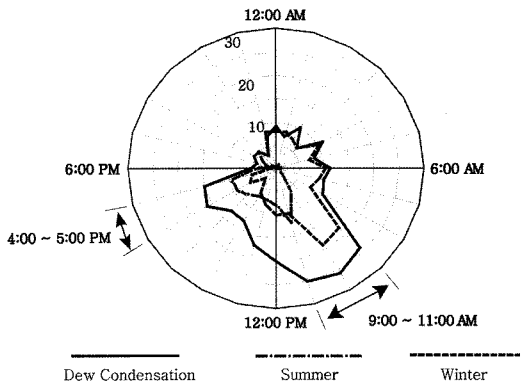

Fig. 9. Time frequency for dew condensation occurrence on the surface of the stone Buddha and Shrine.

냈고, 이중에서도 오전 9시에서 10시 사이에 높은 발생빈도를 보였다. 이는 일년동안 결로가 발생된 시간대와 동일한 경향을 보이는 것이다.

이를 종합하면 결로현상은 여름철을 제외한 높은 상대습도가 유지되는 환경에서 기온이 점차 상승하는 오전 중으로 9시에서 11시 사이에 높은 발생빈도를 나타낸다. 이는 석조불감 내부의 암석이 높은 습도환경에서 포화되어 있다가 새벽부터 점차 기온이 상승하고 밤 동안 차가웠던 대기온도가 햇빛의 영향으로 상승되면서 상대적으로 암석의 표면온도가 더디게 상승하게 될 때 암석 표면에서 수분의 응결이 일어나 표면에 결로현상이 발생하는 것으로 해석할 수 있다.

5. 보존과학적 고찰

운주사 일대는 내륙 산간지방에 위치하여 한서 차가 심하고 기온의 연교차가 큰 대륙성 기후의 특성이 나타난다. 또한 산지와 습지가 많아 안개가 자주 발생하며 여름에는 고온다습하고, 겨울에는 저온건조한 기후를 보여 암석의 풍화에 큰 영향력을 가지고 있다. 과거 30년간의 기상자료를 참고로 기후와 풍화와의 관계모식도에 적용한 결과, 운주사 일대는 연평균 기온 13.7℃와 연평균 강수량 1387.5 mm를 기록하여 Fookes *et al.* (1971)이 제시한 석조문화재에 대한 기후와 풍화와의 관계모식도에 적용할 때 중간 풍화 영역에 해당하는 것으로 나타났다.

이는 운주사 석조불감이 극심한 풍화대에 속하지는 않았지만 풍화를 받기 쉬운 지역에 노출되어 있음을 지시하는 것이다. 이중에서 최근 5년의 자료를 제시하면 Fig. 10에서와 같이 동결과 융해의 지속적인 반복에 의해 암석의 분해가 발생할 수 있는 환경조건에 해당하는 것임을 알 수 있다. 이는 아래와 같은 석재의 종합적 손상을 야기할 수 있는 중요한 원인이 된다.

운주사 석조불감은 내외부 모두 표면마모와 박리박락이 발달되어 있으며, 남측 갑석 일부분은 탈락되어 있다. 또한 부재와 부재 사이에는 균열 및 이격이 발생되어 그 사이를 수지접합, 잡석 채움, 철편고임, 시멘트 및 황토로 충전하였다. 거의 모든 외면 부재는 적갈색 및 흑색 변색과 백화현상이 나타난다. 석조불감의 표면에는 조류에서 지의류, 선태류 및 고등식물에 이르기까지 다양하며, 상대적으로 내부보다는 외벽 면석에서 두드러지게 나타난다. 이들의 종합적인 현상과 보존처리 방안에 대하여는 Park *et al.*(2008)에 의해 연구된 바 있다. 또한 석조문화재의 기본적인 보존

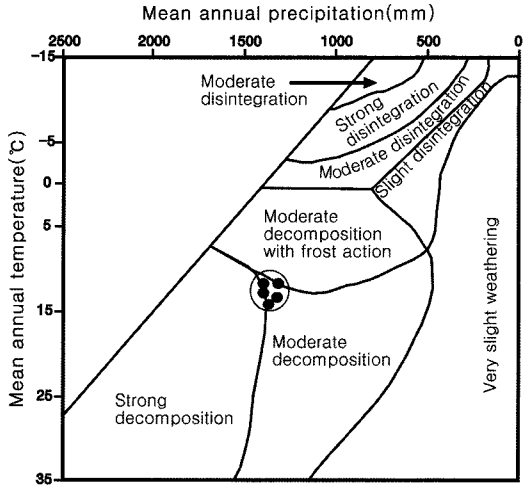

Fig. 10. Relationship between climate and weathering for the study area (after Fookes *et al.*, 1971).

처리와 원형복원 과정에 대하여도 Lee *et al.*(2003; 2006)에 의해 상세히 보고된 바 있다.

이 연구에서는 석조불감 내외부에 자동온습도 로거를 설치하고 기상환경 모니터링을 수행하여 획득된 자료를 근거로 내부와 외부의 미기상 환경을 분석하여 석조불감에 미치는 영향을 살펴보았다. 석조불감 내외부 및 화순일대의 기온은 한반도 남부의 전형적인 사계절 기온 분포를 보이나 석조불감 내부의 상대습도는 연중 높은 습도환경을 유지하고 있다. 특히 여름철에 높은 강수량과 기온의 영향으로 100%에 달하는 고습도가 유지되었다. 또한 겨울철에도 강수량에 의한 영향으로 높은 습도 환경을 나타냈다.

이러한 높은 습도환경과 기온차에 영향을 받아 석재의 표면은 결로현상을 야기한다. 결로는 표면의 변색뿐만 아니라 암석의 화학적 분해와 재결정작용에 따른 재질의 손상에도 큰 영향을 미치므로 빠른 시일 안에 제거할 수 있는 방안을 모색해야 한다. 이와 같은 결로현상과 석재의 화학적 변질은 상대습도와 온도의 열역학적인 상관관계에 의해 제어될 수 있다(Baggio *et al.*, 2004; Camuffo and Sturaro; 2001; Watt and Colston, 2000; Kim *et al.* 2006; Lee *et al.*; 2007).

이를 방지하기 위해서는 석조불감 내부의 습기를 근본적으로 저감하는 방안이 필요하며 우선적으로 천정과 벽면석에서 발생하는 누수를 차단하기 위한 시설이 설치되어야 한다. 또한 환경변화에 대한 장기적인 모니터링과 함께 표면의 수분 유지 시간을 단축할 수 있는 보존환경의 조성의 필수적이다.

6. 결 론

1. 운주사 석조불감은 암석으로 구성된 감실 내부에 등을 맞대고 각각 남측과 북측을 바라보며 두 좌불이 안치되어 있는 독특한 구조를 가지고 있다. 구성암석은 주로 라필리응회암, 유문암질 응회각력암과 보수시 사용된 흑운모 화강암이다. 석조불감 구성부재의 라필리응회암과 유문암질 응회각력암은 티탄철석계열에 해당하며, 흑운모 화강암은 자철석계열에 속한다.

2. 이 석조불감은 탈락, 표면마모와 박리박락 등으로 손상되어 있으며, 부재 사이는 균열 및 이격이 발생되어 이를 수지접합, 잡석 채움, 철편고임, 시멘트 및 황토로 충전하였다. 또한 불감의 사면에는 적갈색 및 흑색 변색과 백화현상이 나타나며, 표면에는 조류에서 지의류 및 선태류와 고등식물에 이르기까지 다양하게 생장하며 내부보다는 석감의 외벽면석에서 두드러지게 나타난다.

3. 2006년 6월 16일부터 2007년 7월 16일까지 석조불감 내외부의 미기상 환경 모니터링 결과, 석조불감의 기온과 상대습도의 연중변화는 일정한 변동률의 폭으로 증감을 반복하였다. 기온은 계절에 따라 상승과 감소의 경향을 뚜렷히 보이는 반면 상대습도는 모두 높은 습도환경이 나타났다. 이를 화순지역의 기상환경과 비교해 보았을 때 서로 유사한 경향을 보였다.

4. 계절별 기온은 내부가 외부보다 봄철, 여름철 및 겨울철에 낮은 온도 분포를 보이며 가을철만 내부가 높은 온도 분포를 나타냈다. 내부와 외부의 온도 차이는 1~2°C 정도로 나타난다. 상대습도는 내부가 외부보다 넓은 분포범위를 가지고 높은 습도 값에서 높은 빈도수를 나타낸다. 특히 여름철은 가장 높고 좁은 범위를 보이며, 봄철은 99~100%의 높은 습도 값에서 높은 빈도수를 보였다.

5. 석조불감 내부는 높은 습도환경으로 인해 암석 표면에서 결로현상이 나타난다. 이는 봄, 여름 및 겨울철에 관찰되며, 여름철이 봄과 겨울철의 합보다도 2배정도 높다. 여름철의 결로는 100%의 높은 습도환경에서 나타나며, 겨울철은 강수가 보이는 시기에 상대습도가 높아져 결로가 나타난다. 결로현상의 발생 시간대는 오전 8시부터 오후 5시까지 넓은 분포를 보이나 특히 오전 9시에서 11시 사이에 높은 발생빈도를 보였다.

사 사

이 연구는 2007년도 국립문화재연구소 연구개발사업인 "석조문화재 손상평가 기술 연구"의 지원을 받아 수행되었으며, 일부는 2007년도 교육인적자원부 학술연구조성사업비로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2007-551-C00001)을 받았다. 원고의 심사와 건설적인 비평을 가해주신 안동대학교 황상구 교수님과 한국지질자원연구원의 홍세선 박사님께 깊이 감사드린다.

참고문헌

Baggio, B., Bonacina, C., Romagnoni, P. and Steven, A.G. (2004) Microclimate analysis of the Scrovegni Chapel in Padua. Studies in Conservation, v. 49, p. 161-176.

Camuffo, D. (1998) Microclimate for culture heritage. Elsevier, Amsterdam, p. 1-415.

Camuffo, D. and Sturaro, G. (2001) The climate of Rome and its action on monument decay. Climate Research, v. 16, p. 145-155.

Fookes, P.G., Dearman, W.R. and Franklin, J.A. (1971) Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology, v. 4, p. 139-185.

Hong, J.K and Eom, D.S. (2003) Investigation on Conservation Environment of the Seokguram Grotto (National Treasure No. 24). Conservation Studies, National Research Institute of Cultural Properties in Korea, v. 24, p. 169-186.

Hong, J.K, Eom, D.S., Ching, Y.J and Masayuki Morii. (2005) Investigation on the Conservation Environment for the Shelter of Stone Cultural Properties (I) - Focused on the Standing Stone Buddhist Triad in Bae-ri, Gyeongju and Rock-carved Triad Buddha in Seosan. Conservation Studies, National Research Institute of Cultural Properties in Korea, v. 26, p. 141-164.

Jeollanamdo Disaster Center (JDC), (2007) http://www.u-safe.jeonnam.go.kr/

Kim, J.Y., Lee, C.H. and Lee, M.S. (2006) Evaluation of the conservation environments in the Gyeongju Seokbinggo (ice-storing stone warehouse), Republic of Korea. Proceedings for the 7th International Conference of Korea Traditional Cultures, Beijing University, Oct. 19-22, 2006, Beijing, China, p. 185-186.

Kim, S.D., Lee, C.H., Choi, S.W and Shin, E.J. (2004) A study on the conservation state and plans for stone culture properties in the Unjusa temple, Korea. Annual Review in Cultural Heritage Studies, National Research Institute of Cultural Properties in Korea, v. 37, p. 286-305.

Korea Meteorological Administration (KMA), (2007) http://www.kma.go.kr/

Lee, C.H., Choi, S.W. and Suh, M. (2003) Natural deterioration and conservation treatment for the granite standing Buddha of Daejosa temple, Republic of Korea. Geotechnical and Engineering Geology, v. 21, p. 63-77.

Lee, C.H., Lee, M.S., Kim, Y.T. and Kim, J.Y. (2006) Deterioration assessment and conservation of a

heavily degraded Korean stone Buddha from the 9th Century. Studies in Conservation, v. 51, p. 305-316.
Lee, C.H., Lee, M.S., Suh, M. and Choi, S.W. (2005) Weathering and deterioration of rock properties of the Dabotap pagoda (World Cultural Heritage), Republic of Korea. Environmental Geology, v. 47, p. 547-557.
Lee, C.H., Lee, S.M. and Kim, J. (2007) Detailed deterioration diagnosis and microclimatic analysis of the Seosanmaaesamjonbulsang (rock-carved triad Buddha in Seosan), Korea. Proceedings for the 2007 Korea-Japan Conference of Stone Cultural Heritages, Tokyo Research Institute of Cultural Heritages in Japan, Oct. 18-19, 2007, Tokyo, Japan, p. 33-53.
Lee, C.H. and Yi, J.E. (2007) Weathering damage evaluation of rock properties in the Bunhwangsa temple stone pagoda, Gyeongju, Republic of Korea. Environmental Geology, v. 52, p. 1193-1205.
Park, S.M., Lee, M.S., Choi, S.W and Lee, C.H. (2008) Petrological characteristics and deterioration assessment of the stone Buddhas and Shrine in Unjusa temple, Hwasun, Korea. Journal of Conservation Science, v. 24, p. 31-45.
Watt, D. and Colston, B. (2000) Investigating the effects of humidity and salt crystallization on medieval masonry. Building and Environment, v. 35, p. 737-749.

2009년 1월 8일 원고접수, 2009년 2월 16일 게재승인.