

원형 석굴암 상부구조의 장마철 결로 및 열전달 현상의 실험적 연구

Experimental investigation of dew formation and heat transfer in the original upper structure of Sokkuram grotto

이진기, 송태호
J. K. Lee, T. H. Song

Key words: Sokkuram(석굴암), Dew(이슬), Dew formation(결로), Porous media(다공성 물질), Natural convection(자연대류)

ABSTRACT

Sokkuram grotto, a UNESCO cultural heritage in Kyongju Korea, was originally covered with crushed rocks over its dome with ventilating holes. The grotto was perfectly preserved for more than 12 centuries until the upper structure was replaced with a concrete dome in the early 20th century to protect from total collapse. Since then, heavy dew formed on the granite surface to seriously damage the sculptures until it was further remodeled with air-conditioning facilities in the 60s. It is considered that the original upper porous structure had a dehumidifying capability. This research is made to unveil the dehumidifying mechanism of the rock layer during the rainy season in that area. A rock layer and a concrete layer are tested in a temperature/humidity-controlled room. No dew formation is observed for the two specimen for continued sunny days or continued rainy days. However, heavy dew formed on the concrete surface for a sunny day after long rainy days. It is thought that the sun evaporates water on the ground and dew is formed at the surface as the highly humid air touches the yet cold concrete. On the contrary, no dew formation is observed for the rock layer at any time. Even in the above worst situation, air flows downward through the cool rock layer and moisture is removed before reaching inside. Temperature measurement, flow visualization, observation of dew formation and measurement of air velocity are made to verify the mechanisms.

기 호 설 명

A : 시편의 열교환면적 [m^2]
 c_p : 비열 [J/kgK]

h : 열전달계수 [W/m^2K]
 k : 열전도도 [W/mK]
 L : 콘크리트 및 다공성 구조물의 두께 [m]
 t_1 : 집중열용량계로 다룬 시정수 [s]
 t_2 : 전도에 따른 열확산시간 [s]
 U : 공기의 유속 [m/s]
 V : 시편의 부피 [m^3]

* 한국과학기술원 대학원
** 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

그리스 문자

α : 열확산계수, $\frac{k}{\rho c_p}$ [m²/s]

ρ : 밀도 [kg/m³]

1. 서론

본 연구는 다공매질내의 자연대류현상에 관심을 가지고 연구하던 중 석굴암 상부 구조의 원형이 직경 수십 센티미터 가량의 암석들로 이루어진 일종의 다공매질이었으며 그 내부의 석조물의 원형 보존능력이 매우 뛰어났었다는 사실에 주목하며 착수한 것이다.

다공성 매질의 특성에 관하여는 최근 많은 연구가 수행되고 있는데 초기 Darcy에 의해 제안된 단순한 저유속 유동의 압력강하식으로부터 브린크만-폴시하이머-달시의 확장 모델의 유속과 압력강하 모델이 발달되어왔다. 또한 열전달 현상과 그 응용에 대해서 20세기 후반에 많은 연구가 이루어졌다. 그 예로 다공성 매질을 이용한 단열과 PCB(Printed circuit board)에서 칩의 열전달 촉진, 히트 파이프에서 심지(wick)의 설계 등이 있다.⁽¹⁻³⁾

이러한 다공성 매질에 대한 연구가 활발히 행해지고 있는 이유는 물론 공학적인 응용성이 뛰어난 장점이 다공성 매질에 있기 때문이다. 과거 통일신라시대에 이미 다공매질이 석굴암에 쓰인 것은 당시에 벌써 이러한 장점들을 파악하였기 때문으로 추측되는데 석굴암 본래의 천개구조의 특성을 현대에 이르러서도 제대로 알고 있지 못함을 생각해 보면 본 연구와 같은 과학적 접근이 매우 절실하다고 하겠다.

석굴암의 본래구조는 전면이 석조 아아치로 이루어져 있어서 전실로 유도되고 그 안 쪽에 원형의 본실이 있는 형태였던 것으로 알려져 있다 (Fig. 1 참조). 상부는 커다란 돌과 잔 돌이 약 1 m 두께로 덮여 있는 구조였으며 그 위에 잔디가 자라고 있었다. 그리고 전면으로부터 들어온 공기가 쉬이 본실까지 들어와 천개석 사이에 일부러 만든 통풍구(Fig. 1의 A)를 타고 돌 틈을 지나 상부의 외기까지 통풍이 되는 구조였다. 또한 바닥에는 차가운 지하수가 흘러 전실 앞으로

흘러나가도록 되어있었다. 이러한 구조가 구한말까지 계속되었는데, 내부의 석조물들은 원형이 놀랍도록 잘 보존되어 있었다고 한다.⁽⁴⁾

그러던 것을 일제가 1913년부터 1923년까지 3차례의 걸친 보수공사를 통해 천개부분을 모두 두께 1 m 가량의 하나의 콘크리트 돔으로 덮어버렸고, 또한 바닥을 흐르던 지하수는 밖으로 들러서 더 이상 내부에 차가운 물이 지나가지 않게 하였다. 다만 이때까지도 전실의 입구는 개방되어 있었다.

이후 내부 석조물들이 급속히 풍화 및 백화 현상을 보이게 되었다. 풍화현상이란 화강암은 장석, 석영, 흑운모로 구성되어있는데 이 중에 장석이 물에 녹아 고령토로 변하면서 화강암 표면이 거칠게 변화하는 것이고 백화현상이란 화강암 표면이 하얀 색으로 변화하는 것을 말한다. 이러한 현상은 화강암 표면에 결로가 됨으로써 발생하는데, 아마도 고온 다습한 장마철에 콘크리트 돔으로 인하여 밀폐된 본실내의 화강암 석조물들이 이슬점 이하로 유지되는 경우가 발생하기 때문으로 생각된다.

해방이후 1961년 9월부터 1964년 6월까지 석굴암에 대한 전면적인 보수공사가 진행되었는데 풍화를 방지하기 위하여 콘크리트 돔 위에 약간의 간격을 두고 또 하나의 콘크리트 돔을 씌우는 한편 전실의 앞에 전각을 짓고 유리창으로 완전히 공기 흐름을 차단하였으며 내부의 공기를 냉각제습하기 위한 공조기를 가동하게 되었다.⁽⁵⁾ 이로써 풍화 및 백화의 속도가 늦추어 지기는 하였으나 공조기의 진동으로 인한 크랙의 전파 등 여전히 많은 문제점을 드러내고 있다.

그러한 석굴암의 과학적 보존을 위하여 1971년에 한국과학기술연구원에서는 석굴 내부의 석벽에 결로가 일어나게 되는 열전달 현상 및 증발불상의 열손실등의 해석해를 구하였고 콘크리트 이중 돔의 가열, 석굴암 밀면에서의 가열 등에 대한 해석해를 구하여 석벽에 결로가 생기지 않게 하는 방법을 제시하였다.⁽⁶⁾

그렇다면 본래의 석굴암의 구조에 있어서는 무엇이 결로현상을 방지하는 데에 결정적으로 기여하였을까? 그 첫 번째로는 석굴암 초기 축조부터 구한말까지 석굴암 상부 천개구조의 암석 및 자갈에 의한 두께 1 m 가량의 다공층이 장마철의 습기 제거와 결로 방지에 결정적인 역할을 하였

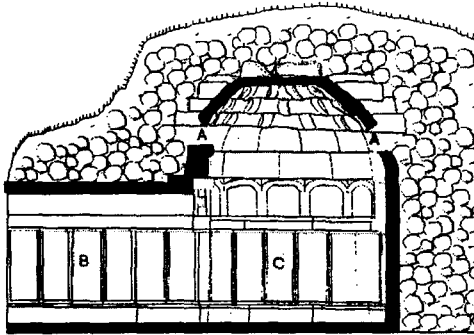


Fig. 1 Estimated original structure of Sokkukuram. (A : ventilating holes, B : entry, C : main hall)

을 것으로 추측된다. 그리고 두 번째로는 바닥에 흐르던 차가운 지하수가 제습을 도왔을 것으로 본다. 이 두 가지 중에서 첫 번째 다공층의 기능이 특히 관심의 대상이 되어 본 연구를 하게 되었다.

본 연구를 수행함으로써 석굴암 내부의 통풍 및 제습구조를 밝힘으로써 과거의 석굴암에서 풍화의 제일 원인인 결로현상이 어떻게 방지될 수 있었는지를 알아내고자 한다. 본 연구에서는 석굴암 본래의 암석층 구조물과 과거 일제시대의 지붕 구조인 두께 1 m 가량의 콘크리트 구조물을 서로 비교하여 결로의 특성을 살펴보았다. 후자의 구조물은 현재 쓰이지 않고 있는 것이므로 향후의 적용을 감안하여서 실험한 것은 물론 아니다. 다만, 실험적으로 일제 당시의 석굴암의 결로현상을 규명하고자 하는 목적으로 이 시편을 택한 것이며, 전자, 즉 본래의 암석층 구조물이 결로에 관하여 어떤 장점이 있었는지를 중점적으로 알고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구는 전술한 2종의 천개구조, 즉 암석층에 의한 다공매질 층과 콘크리트 층에 대하여 적절한 두께의 실험 대상물을 모델로 구축하고 이를 항온항습실에 넣고 실험적으로 결로현상을 관찰하는 연구이다. 이 두 가지 모델에 대하여 적절한 수치해석을 적용할 수도 있었으나, 이 경우 경험적인 수치들, 예를 들어 Ergun의 상수, 대류 열전달계수 등에 대하여 오류가 개입되어 현상을

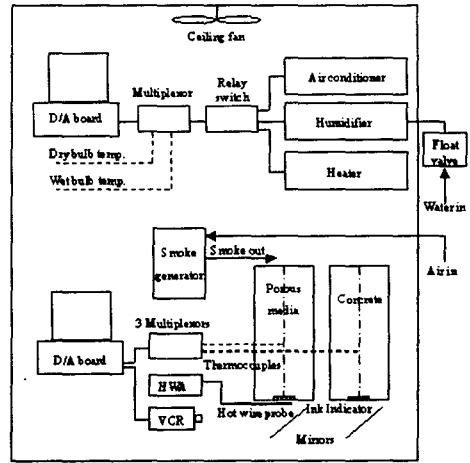


Fig. 2 Schematic view of THC room and experimental system.

왜곡할 가능성이 있으므로 순수하게 실험적인 방법을 택하였다. 실험에 사용된 장치들을 설명하면 다음과 같다.

2.1 항온항습실 (THC room)

항온항습실(Temperature/humidity-controlled room : THC room)은 석굴암 주위의 여름날씨를 모사하기 위한 실험장치로서 Fig. 2와 같고 크기는 가로 3 m, 세로 5 m, 높이 2.3 m이다. 이 방에 온도와 습도를 제어하기 위해 히터 2대, 에어컨디셔너, 가습기 2대를 설치하였다. 히터는 자연대류형 오일 전기히터로서 2 kW용량이고 에어컨디셔너는 분리형 가정용 에어컨으로서 2,700 kcal/hr의 냉각능력을 가지고 있다. 또한 가습기는 가습 능력이 시간당 1 kg가량 되는 가정용 가습기이다.

이들을 설치한 후에, 원하는 온도와 습도를 시간에 따라 맞출 수 있도록 하기 위하여 건습구 온도계와 제어장치를 설치하였다. 실내의 건구온도와 습구온도를 측정하기 위하여 K형 열전대를 두 개 설치하였는데 하나는 건구로 사용하고, 다른 하나는 작은 비이커에 담가둔 거즈에 비드를 덮어서 습구온도를 읽도록 하였다. 열전대에서 발생하는 열기전력(thermal e.m.f)은 열전대용 데이터 보드를 통하여 PC로 전송이 되는데 데이터 보드는 ADVANTECH사의 PCLD-789D를 사용하였다.

펜티엄칩과 윈도우 95시스템이 탑재되어 있는 PC의 내부에는 데이터 처리용 보드가 장착되어 있는데, 데이터 처리용 마더 보드로는 역시 ADVANTECH사의 PCL-812PG를 사용하였다. 일단 이 마더 보드를 통하여 들어온 디지털 신호는 C언어로 작성된 프로그램에 의하여 마음대로 읽거나 온도로 변환하거나 각 시간별 적용 온도, 습도와 비교되는 등의 일을 할 수가 있다.

다음으로는 이 항온항습실의 외부를 단열 하였다. 이 방이 밤낮의 냉난방 여부에 따라 심한 온도변화를 겪고 있어서 단열의 필요성이 부각되었다. 그리고 실험조건이 습도가 높기 때문에 상당한 양의 가습이 필요하게 된다. 그리하여 가습기에 플루오트 밸브(float valve)를 이용하여 외부에서 물을 공급하였다.

또한, 항온항습실의 온도 성층화, 즉 실내의 높은 부분의 기온이 낮은 부분보다 높아지는 정도가 심하기 때문에 바닥면을 카페트로 단열하고 천장에 실링팬(ceiling fan)을 부착하였다. 그리하여 실내온도 20℃에서는 실내온도의 편차가 1℃ 이내로 성층화가 줄기는 하였으나 실내 온도가 30℃이상으로 높아지면 바닥 근처에서 4℃내지 5℃의 온도차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 성층화를 피하기 위하여 본 실험에서는 실내온도를 측정하는 열전대의 위치를 실험실 바닥으로부터 30 cm위치에 놓았다. 또한 비오는 날의 실측 온도는 최저 16℃정도까지 낮아지게 되

는데, 실제로 항온항습장치에서는 에어 컨디셔너의 성능 때문에 19℃아래로는 온도가 내려가지 않았다.

2.2 콘크리트 및 다공성 구조물 시편의 제작

실험에 사용된 콘크리트 및 다공성 구조물의 열 물성치는 Table 1에 보인 바와 같다. 또한 실험에 사용된 두 개의 시편을 Table 2와 같이 축조하였다. 시편의 크기는 석굴암의 크기와 온도의 침투시간 그리고 실험실내에서의 이동성 등을 고려하여 제작하였다. 또한 각 시편의 온도분포를 알기 위해서 수직 중심축상에 K형 열전대를 외경 30 mm, 내경 24 mm의 PVC 파이프에 3 cm 간격으로 비드 구멍을 내어 일렬로 설치하고 상하면은 노출시켰으며 측벽을 50 mm의 스티로폼(styrofoam)으로 단열 하였다. 각각의 열전대에서 측정온도의 오차는 ±0.5℃이며 주로 아날로그신호를 디지털로 바꾸어 줄 때 생기는 것이다. 이 오차값은 얼음물을 기준온도로 정하여 PCLD-789보드의 각 채널별로 보정을 했다. 여기에서 시편의 아랫면이 외기에 노출되었다고 하는 것은 석굴암의 입구가 개방되어 있어서 외기가 자유롭게 석굴암 내부로 흘러 들어올 수 있는 조건을 의미하는 것이다.

또한 열전대의 설치 상황으로 보아, 콘크리트에서는 물론 콘크리트의 온도를 측정하지만, 다

Table 1 Thermophysical properties of materials

Materials	Temperature (K)	Density, ρ (kg/m ³)	Thermal conductivity, k (W/mK)	Specific heat, c_p (J/kgK)
Concrete (stone mixed)	300	2,300	1.4	880
Granite	300	2,630	2.79	775

Table 2 Properties of concrete structure and porous media structure

	Concrete structure	Porous media structure
Material	Cement, water, sand, gravel	Granite (diameter : 5~15 cm)
Volume	90×52×40 cm ³	90×52×40 cm ³
Weight	416 kg	265 kg
Porosity	0	0.47

공층에서는 비드가 돌 틈에 노출되어 있으므로 내부공기의 온도를 측정하였다.

2.3 열선형 유속계

이 실험에서 사용된 열선형 유속계는 KANO MAX사의 I형 프로브이다. 또한 감지부는 직경이 5 μm 인 텅스텐 선이고 길이는 2 mm이다. 그리고 HWA(hot wire anemometer)는 서울대학교에서 제작한 장비를 사용하였다. 이 HWA는 정온도형 열선 유속계로서 유동조건에 맞는 전압신호를 발생시킨다. 이 열선형 유속계의 전압과 속도 그리고 온도의 관계식을 구하여 사용하였는데 그 속도범위는 수 cm/s 에서 수 m/s이다.

2.4 연 발생기 및 저속 촬영기

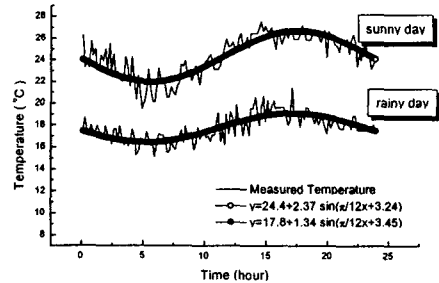
연 발생기는 직접 제작하였는데 전원공급기에 의해서 달구어진 열선에 등유를 태우고 외부에서 공기를 주입하여 연기가 생성되게 하였다.

또한 결로현상을 실제로 관찰하기 위해 SONY사의 DCR-VX700 디지털 캠코더를 사용하여 촬영을 하였다. 이 캠코더는 일정시간마다 촬영을 하는 저속 촬영이 가능하여 5~10 분마다 촬영을 하였다. 시편하부의 결로현상을 촬영하기 위해 아래면 과 실험실 바닥사이의 틈에 비스듬하게 거울을 대고 틈의 외부에서 캠코더로 저속 촬영을 하였다. 또한 거울 면에 생기는 결로를 방지하기 위해 면적이 20×20 cm^2 이고 열량이 5 W 인 열선 판을 거울 면 뒤에 부착하였다. 그리고 아래면 촬영을 위한 조명문제가 대두되었는데, 이것은 절전전구를 사용함으로써 해결하였다.

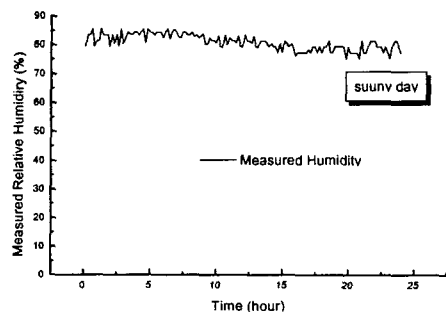
3. 실험의 결과

3.1 석굴암 주변의 장마철 온도 및 습도 측정

항온항습실에서 결로현상 모사실험의 기초자료를 구성하기 위해 1998년 6월 7일부터 1998년 7월 25일까지 석굴암 주변의 장마철 온도 및 습도를 측정하였다. K형 열전대 및 습도계의 전기적 신호를 데이터 보드를 이용하여 받은 다음 컴퓨터에 저장하는 방법을 사용하였고 습도계는 Lee-Integer사의 FCH60T를 썼다.



(a) Air temperature and fitted graph



(b) Relative humidity

Fig. 3 Air temperature and relative humidity near Sokkuram.

저장된 값 중에서 온도분포를 대표하는 날의 온도를 피팅하여 항온항습장치 모사의 입력데이터로 사용하였다.(Fig. 3(a))

또한 Fig. 3(b)에서 보듯이 석굴암 주변의 맑은 날 평균상대습도는 83%임을 알 수 있다. 비가 오는 날에는 상대습도는 거의 100%가 되었다. 절대수증기압은 약 2.1 kPa이고 이보다 8°C 높은 26°C 습도를 생각하여 보자. 비오는 날 18°C에서 포화에서 포화 수증기압이 약 3.4 kPa임을 생각해 보면, 18°C, 100% 상대습도는 26°C, 83% 상대습도 시보다 수증기압에 있어서는 오히려 0.7 kPa가량 낮음을 습도도표를 참고하여 알 수 있다.⁽⁷⁾ 따라서 절대습도량에서는 맑은 날이 대략 0.005 kg of H₂O/kg of air 만큼 더 높다. 이것은 해가 나면서 지표면의 수분이 증발하여 주위의 절대습도가 증가하게 된 것으로 생각된다. 그리하여 26°C, 83% 상대습도시 이슬점은 23°C가 되어 비오는 날의 18°C보다 상승하게 된다.

비가 계속적으로 오는 경우 실제온도가 16℃까지 내려가는 데 반하여 실험실 온도가 19℃까지 밖에 내려가지 않으므로 비오는 날의 온도는 외기온도 19℃, 상대습도 100%로 정하여 실험하였다.

3.2 콘크리트 구조물 및 다공성 구조물의 온도 분포

항온항습실 내부를 석굴암 주변의 장마철 온도 및 습도 측정치로 모사 시켜 가면서 그 안의 콘크리트 구조물 및 다공성 구조물에서의 현상을 실험하였다.

연속적으로 맑은 날이 계속되는 경우에는 콘크리트 및 다공성 구조물 시편의 중심온도가 Fig. 4와 같이 변화한다. 외기온도의 일교차가 4.8℃가량이 되는데 다공 구조물내의 공기온도는 몇 시간의 지연시간을 가지고 최고 및 최저 온도차가 4℃가량으로 비교적 충실히 따라가는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 콘크리트 시편은 최고 및 최저 온도차가 불과 2℃이내로 외기와외의 위상차도 10시간 가량에 달한다. 다공매질이 콘크리트보다 외기온도변화를 신속히 따라가는 것은 외기가 내부로 쉽게 통과할 수 있기 때문으로 판단된다. 즉, 약간의 온도차에도 부력에 의하여 외기가 쉽게 침투하므로 열전달이 신속히 일어나는 것이다. 또한 여기에 보이지는 않았으나 연속하여 비오는 날의 경우에는 일교차가 극히 작고 습도가 거의 100%가 된다. 이 경우 다공매질과 콘크리트

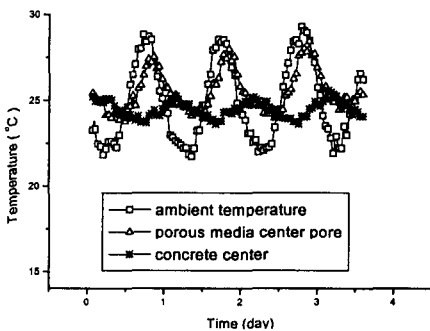
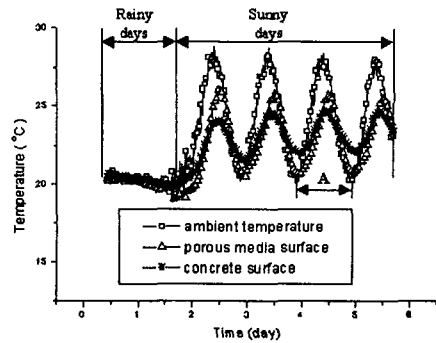


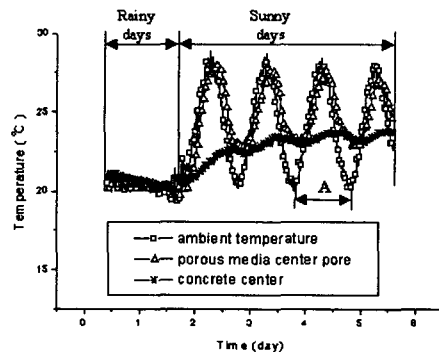
Fig. 4 Temperature variation on continued sunny days.

의 정성적 특성은 연속하여 맑은 날과 같으나, 그 변화 폭은 거의 무시할 만하다. 다음절에서 언급하겠거니와 연속하여 맑은 날이 계속되거나 비가 오는 경우에는 두 시편 모두에서 결로가 관찰되지 않았으나 비가 며칠 온 뒤에 맑은 날이 되는 경우에는 콘크리트 시편에서 심한 결로가 관찰되었고 반면 다공매질에서는 전혀 결로가 관찰되지 않았다.

Fig. 5는 최악의 결로조건으로서 비오는 날이 계속된 이후에 맑은 날로 날씨가 바뀐다면 콘크리트 및 다공성 구조물 시편의 중심온도가 어떻게 변하는가를 보여준다. 이때 외기온도의 변화는 실측된 것으로 쓴 것이며, 상대습도는 비오는 날에는 100%, 맑은 날에는 83%를 주었는데, 비오는 날에서 맑은 날의 날씨로 바뀌는 시점은 맑



(a) Surface of specimens



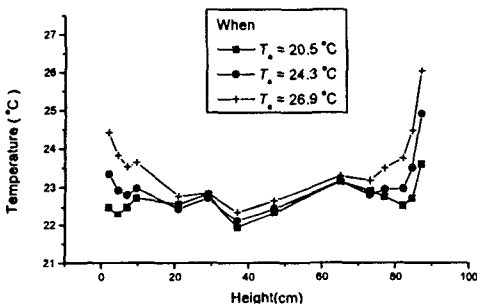
(b) Center of specimens

Fig. 5 Temperature variation on sunny days after long rainy days.

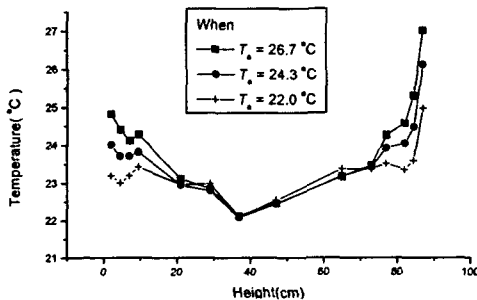
은 날의 최저온도가 나타나는 새벽 5시 30분 경으로 주었다. Fig. 5(a)는 각 구조물 시편의 표면의 온도 변화이고 Fig. 5(b)는 각 구조물 시편의 중심에서의 온도 변화이다. Fig. 4에서와 마찬가지로 콘크리트 구조물은 비교적 느린 속도로, 외기온도와 큰 온도차를 가지고 뒤따라가는데 반하여 다공성 구조물은 항상 이보다 작은 외기온도와와의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5의 A 기간동안 콘크리트 구조물 및 다공성구조물의 높이에 따른 온도분포이다. (a)는 외기온도가 상승하는 부분, (b)는 외기온도가 하강하는 부분이다. 시편의 표면과 중심 모두에서 다공성 구조물의 온도는 콘크리트보다 훨씬 순발력 있게 외기온도에 따라 변화한다. 또한 높

이에 따라서 콘크리트의 경우는 내부온도의 변화가 거의 없고 벽면 가까이에서만 온도변화가 있어서 U자 형태의 온도분포를 나타낸다.

콘크리트에서의 현상을 다음과 같은 두 가지 측면에서 설명할 수 있다. 첫째 콘크리트의 온도 변화가 느린 이유는 공기와와의 접촉 표면적이 그 열용량에 비하여 매우 작기 때문으로 판단된다. 즉, 콘크리트를 집중열용량계로 보고⁽⁸⁾, 그 시정수(time constant) t_1 을 계산하여 보기로 하자. 대류 열전달계수 $h=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 가정하고 Table 1의 물성치를 이용하여 계산하면 외기의 온도가 1 m 두께의 콘크리트 구조물에 영향을 미치게 되는 시간 $t_1 = \frac{\rho V C_p}{hA} \approx 2.3$ 일 정도가 된다. 여기

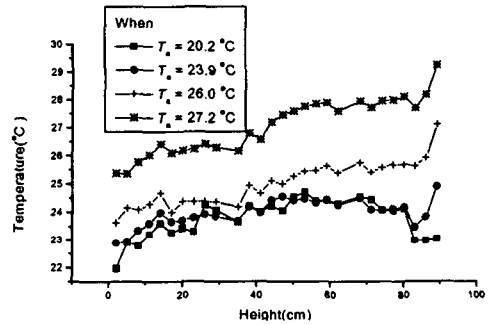


(a) When T_a increases

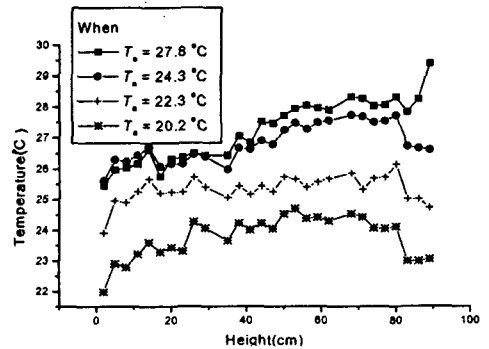


(b) When T_a decreases

Fig. 6 Dependence of the concrete temperature distribution along the height for different ambient temperatures for period 'A' of Fig. 5. (Error of temperature measurement $\leq 0.5^\circ\text{C}$)



(a) When T_a increases



(b) When T_a decreases

Fig. 7 Dependence of the porous media pore temperature distribution along the height for different ambient temperatures for period 'A' of Fig. 5. (Error of temperature measurement $\leq 0.5^\circ\text{C}$)

서 V 는 체적이고 A 는 표면적이다. 따라서 일교차를 무시하고 일 평균온도가 상승하는데 에 2~3일 걸린다는 것을 알 수 있다. 두 번째로 U자형 온도분포를 보이는 것은 시편의 표면으로부터 내부까지 열전도가 되는 시간이 매우 크기 때문으로 판단된다. 즉 콘크리트 내부의 온도가 표면 온도를 따라가는데 걸리는 시간 t_2 를 푸리에수가 1이 되는 시점 $\left(\frac{at_2}{L^2} = 1\right)$ 으로 취하면 t_2 는 무려 8.5일 이나 된다. 따라서 콘크리트의 경우에는 자체의 열용량도 크고 표면과 내부간의 열확산도 느려서 외기온도의 변화를 잘 따라가지 못하는 것을 알 수 있다. 이로부터 콘크리트 표면의 결로를 예측할 수 있다.

한편 다공성 구조물의 경우는 자연대류의 영향으로 대체로 직선형태의 온도분포가 나타나게 된다. 어느 시점에서나 시편의 상단이 더 높은 온도를 나타내는데 그 이유는 다음처럼 생각된다. 시편보다 외기온도가 더 높은 경우 외기는 시편 내에서 냉각되며 천천히 하강할 것이다. 외기는 시편의 상부에서는 아직 덮고 습한데, 시편으로 열을 전달하고 과도한 수분을 응축시키며 제습이 된다. 시편을 따라서 상단부터 더워지기 시작하고 하부는 이보다 낮은 온도가 된다. 이와 반대로 시편보다 외기온도가 낮은 경우에는 외기의 상승기류가 시편 내에서 발생한다. 따라서 시편의 하단부는 외기를 데우느라고 열을 빼앗겨서 상단부 보다 낮아지게 된다. 따라서 외기의 온도가 시편보다 높거나 낮거나에 관계없이 시편의 온도분포는 늘 상단이 하단보다 높게 된다. 단, 이 두 가지 과정에 있어서 서로 다른 점은 외기가 시편보다 덮고 습한 경우 시편 내에서 제습이 되는데 반하여, 반대의 경우에는 절대습도의 변화가 없다는 것이다. 전자의 과정이 바로, 비 온 뒤에 해가 난 경우 덮고 습한 외기가 석굴암 내부로 흘러 들어오더라도 다공층내에서 제습이 되는 과정으로 판단된다. 전술한 바와 같이 여기에서 실측된 온도는 다공층 내의 공기의 온도인데 사용하면 집중열용량계로 본 시정수 t_1 이 약 2시간, 그리고 안팎의 전도에 소요되는 지연시간이 약 1시간 정도로서 다공층의 공기의 온도보다 돌의 온도 변화가 불과 2~3시간 가량 지연되는 것을 알 수 있다.

또한 다공성 구조물의 경우 외기온도가 최저 혹은 최고온도에서 완만하게 변할 때에는 구조물 내부의 온도가 별로 변화하지 않다가 후에 주위 온도변화가 클 때에는 구조물의 온도는 훨씬 더 빠르게 변화하는 것을 볼 수가 있다. 그 이유는 구조물 내부의 온도와 외기온도간의 차이가 작을 때에는 부력이 작아서 내부 유속이 작고 따라서 공기와 구조물간의 열교환량이 많지가 않지만, 어느 정도 시간이 지나서 온도차이가 상당량 생기게 되면 자연대류가 증가하여 열전달량이 늘어나기 때문으로 생각된다.

3.3 콘크리트 구조물 및 다공성 구조물에서의 결로 관찰

모사실험의 결과 콘크리트 표면의 경우, 비오는 날이나 맑은 날이 계속되는 경우에는 결로량이 아주 없거나 매우 적어서 어떤 방법으로도 확인할 수가 없었다. 하지만 비가 내린 후 날씨가 개이는 경우에는 계속적인 결로가 관찰되었다 이 결로현상은 육안이나 저속촬영 결과로는 구분하기가 힘들어서 표면에 잉크젯프린터(Ink-jet printer)로 검은색 네모를 그린 종이를 붙였다. 그 결과 비오고 난 뒤의 맑은 날에서는 결로로 인해 잉크가 번지는 것을 확인할 수 있다. 반면 계속적으로 비가 오는 경우에는 실제로 있어서 국부적인 결로가 있을 수도 있다고 추측되는데 이 현상이 실험에서는 발견되지 않았다. 이유는 앞서 언급하였듯이, 에어 컨디셔너의 성능 때문으로 생각된다. 즉, 온도가 19℃아래로는 내려가지 않아서 외기온도가 싸인함수꼴로 변화하지 않고 일정하게 유지되기 때문이다.

반면 다공성 구조물의 표면에서는, 비오는 날이나 맑은 날이 지속되든지 혹은 비가 내린 뒤에 날씨가 맑아지든 지에 상관없이 결로현상이 관찰되지 않았다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 비가 오다가 해가 날 때에 고온 다습한 외기가 다공성 구조물 내부로 하강하면서 내부에서 결로가 될 수 있다고 보는데 본 실험에서는 다공성 구조물 내부를 들여다 볼 수가 없어서 이 현상은 확인되지 않았다.

3.4 다공성 구조물에서의 자연대류 유속 및 유동의 방향

다공성 구조물에서는 자연대류가 일어나게 되는데, 외기온도가 변화함에 따라 위에서 아래로 내려오는 유동, 그리고 아래에서 위로 올라가는 유동이 비정상적으로 일어나게 된다. 이것을 가시화하기 위하여 다공성 구조물 윗면에 연 발생기로부터 나오는 연기를 넣어주었다. 그 결과 밤에는 연기가 위로 올라오는데 이는 공기의 유동이 위 방향임을 보여준다. 그 이유는 밤에 외기온도가 낮아지고 낮에 더운 날씨에 의해 다공성 구조물이 데워졌기 때문이다. 반대로 낮에는 공기가 아래 방향으로 들어가는 것을 볼 수가 있는데 이것은 낮에 외기온도는 높고 다공성 구조물의 온도는 낮기 때문이다. 따라서 외기온도가 낮은 아침의 경우, 석굴암의 내부에서 외부로의 유동이 생기게 되는 것이다. 반대로 외기온도가 높은 낮의 경우에는, 석굴암 외부에서 석굴암 내부로의 유동이 생기게 된다는 것을 확인하였다.

공기의 속도를 앞서 언급한 I형 열선형 유속계를 이용하여 측정하였는데, 유속이 너무 작고 유속계에 수평한 속도 성분도 있어서 속도의 대략적이 크기만 구할 수 있었다. 그 결과 맑은 날만 계속될 때는 유속 $U \approx 2$ cm/s 정도인 공기가 밤에는 아래면에서 윗면으로 그리고 낮에는 윗면에서 아래면으로 이동하게 되고 비가 온 후에 맑은 날로 변화하게 되면 낮에 유속 $U \approx 5$ cm/s 정도인 공기가 아래로 나오게 됨을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 석굴암 주변의 장마철 온도를 향한습실에서 모사하여 석굴암 상부구조의 공기 통풍구조를 밝히기 위한 실험을 수행하였다.

일제에 의해 수리된 형태인 하나의 콘크리트 돔으로 덮여있는 석굴암 구조의 경우 날씨가 내부 구조물의 결로 및 훼손에 많은 영향을 끼치게 된다. 특히 집중적인 결로는 지속적인 강우나 맑은 날 보다도, 여러 날 비가 온 후 잠시 해가 나는 동안에 일어나는 것으로 모사실험의 결과 판단되었다. 이것은 비가 오는 동안에 차갑게 식은 석굴암 내부의 석상면에 날씨가 맑아지면서 주위의 수분이 증발하여 절대습도가 크게 증가하고 이 수분이 아직 차가워져 있는 벽면에 응축하여 결로가 심하게 되는 것으로 추론된다.

초기의 원형 석굴암의 경우, 석굴암의 외부가

다공성 암석층으로 덮여있다고 알려져 있다. 실험실내에서의 모사실험의 결과 다공층은 외기온도 변화를 빠르게 따라가는데 외기온도가 높을 때에는 하방의 유동이 생기고 반대의 경우에는 유동방향도 반대가 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 최악의 결로조건으로서 장마철에 잠시 해가 날 때의 현상이 다음과 같다고 추론된다. 비오는 날 동안 다공층은 차게 식게 된다. 날씨가 개이면서 낮 동안에 외부의 고온다습한 공기가 내부로 들어올 때 다공층 내에서 제습이 되어 차고 매마른 공기가 석실로 유입되고, 밤에는 석실내의 찬 공기가 이보다 더운 다공층을 따라 상승하면서 어디서도 결로가 생기지 않는다.

본 실험 결과는 위와 같은 추론을 관찰된 모든 면에서 뒷받침하고 있다. 이와 같이 밝혀진 다공층의 제습기능을 제2석굴암의 축조나 건축에 응용하는 것도 의미 있다고 판단되며, 다공층의 해석 및 바닥면의 지하수의 역할을 규명하는 것도 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Doermann, D., Sacadura, J.F., 1996, Heat transfer in open cell foam insulation, ASME J. Heat Transfer, Vol. 118, pp. 88-93.
2. Hwang, G.J., Wu, C.C., Chao, C.H., 1995, Investigation of non-darcian forced convection in an asymmetrically heated sintered porous channel, ASME J. Heat Transfer, Vol. 117, pp. 725-732.
3. Kim, B.H., Peterson, G.P., 1995, Analysis of the critical Weber number at the onset of liquid entrainment in capillary-driven heat pipes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, pp. 1427-1442.
4. 황수영, 1990, 석굴암, 열화당.
5. 황수영, 류해종, 손용문, 김정기, 신영훈, 정명호, 박무수, 1967, 석굴암 수리 공사 보고서, 문화재관리국.
6. 양재현, 김형만, 이경서, 문탁진, 김훈철, 홍승민, 어용선, 김원조, 1971, 석굴암, 다보탑 및 석가탑의 세척과 보존에 관한 연구, 한국과학기술연구소.
7. Stoecker, W.F., Jones, J.W., 1982, Refriger-

ation & Air Conditioning, 2nd edition, McGraw-Hill, Auckland.

8. Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 1990, Funda-

mentals of Heat and Mass Transfer, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York.