

국보 제24호 석굴암(石窟庵)의 보존환경

Investigation on Conservation Environment
of the Seokguram Grotto (National Treasure No. 24)

洪正基 · 嚴斗成

Jung Ki Hong and Doo Sung Eom

ABSTRACT

Yearly mean temperature and relative-humidity of the Seokguram Grotto was measured 19~23℃, 40~44% from May, 1998 to December, 2002. The measurement has little differences comparing to the optimum guideline (temperature : $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$, relative-humidity : $50^{\circ} \pm 5\%$). It is necessary to increase humidity in the Seokguram Grotto during winter because of heating and decrease the temperature during summer because of a higher temperature of outside. In addition, the diurnal range keep in 4℃ of temperature and in 10% of relative-humidity.

Yearly mean concentration of CO₂(carbon dioxide) was measured 538~658ppm that is higher than concentration of normal atmosphere(360 ppm). The CO₂ has an cumulative effect on the surface of stone cultural properties as a form of carbonic acid(H₂CO₃) after reaction with water.

HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) system should be operated to maintain ideal state for the preservation according to the optimum guideline. Also, the entrance into the Seokguram Grotto should be controlled to prevent a sudden fluctuation of humidity and temperature. Human could carry small particles like a microdust, microbe, etc., into the Seokguram Grotto and also could damage the surface by a direct touch.

I. 머리말

석굴암의 행정상 주소는 경상북도 경주시 진현동 891번지로서 토함산 중턱에 위치하며, 신라 경덕왕 10년(751)에 당시 재상(宰相)이었던 김대성(金大城)이 국왕의 뜻을 받들어 창건을 시작하여 혜공왕 10년(774)에 완성하여 석불사(石佛寺)라 불렀다¹⁾²⁾. 건립 당시에는 본래 독립된 사찰이었지만 조선시대에 이르러 불국사에 속한 하나의 암자로서 석굴암(石窟庵)이라고 불리게 되었다³⁾.

석굴암은 이미 앞서 이 세상을 떠난 역대 김씨 왕가의 선조들이 사후 극락세계에 왕생하기를 기원하여 건립된 것으로 비록 그 위치는 습기가 많은 지역이지만 신라의 동해구를 바라보는 아름다운 경관을 가지고 있다. 하지만 이러한 아름다운 경관은 때로는 무서운 태풍과 폭우에 폭로되는 위험을 안고 있으며, 동시에 화강암이란 견고한 석재로 이룩되었으나 이 석재의 생명은 결코 무한한 것이 아니다⁴⁾.

석굴암의 축조방법은 1708년 『불국사사적기(佛國寺事蹟記)』를 보면 “직조석감(織造石龕)”이라 표현하고 있듯이 돌로써 비단을 짠 것과 같이 감실을 조성하였다는 것이다. 즉, 이 말은 건축상의 큰 특징을 표현한 것이며 크고 작은 제각각 다른 모양의 화강암을 재료로 아름답게 석굴을 조성한 것으로 이러한 예는 전세계적으로 거의 없다. 인도나 중국의 석굴은 모두 자연의 암벽을 뚫어서 내부공간을 만들었고, 또 긴 세월이 걸쳐서 같은 장소에 여러개의 석굴을 완성한 것들이다. 이와 반대로 석굴암은 자연암벽을 직접 뚫은 것이 아니라 크고 작은 석재로써 차례로 쌓아올려 인공적으로 석굴을 조립하였다.

석굴암은 전실, 통로, 주실로 이루어져 있고, 내부공간에 본존불을 중심으로 총 39체의 불상을 조각하였다. 방형 공간인 전실에는 팔부중상(八部衆像)과 금강역사상(金剛力士像)이 있고, 사천왕상(四天王像)이 있는 좁은 통로를 지나면 궁륭천정(穹窿天井, Dome)으로 짜여진 원형 공간의 주실이 나온다. 주실의 입구에는 팔각석주(八角石柱)를 세웠고, 중앙에는 석가모니 대불이 있고, 벽면에는 입구에서부터 범천상(梵天像)과 제석천상(帝釋天像), 보현(普賢)·문수(文殊)보살상, 십대제자상

(十代弟子像)이 대칭을 이루고 있으며, 본존불 정후면에는 십일면관음보살상(十一面觀音菩薩像)이 조각되어 있다¹⁾²⁾.

석굴암 석굴은 신라 불교예술의 전성기에 이룩된 최고 걸작으로 건축, 수리, 기하학, 종교, 예술 등이 유기적으로 결합되어 있어 더욱 돋보인다. 현재 석굴암 석굴은 국보 제24호로 지정되어 있으며, 1995년 12월 불국사와 함께 유네스코(UNESCO)의 세계문화유산으로 등록되어 관리되고 있다.

이렇게 조상들의 혼이 담겨있고 최고의 걸작으로 인정받고 있는 석굴암 석굴의 보존을 위해서는 과거의 수리공사 현황 및 문제점을 정확하게 파악한 후, 현재의 보존상태, 보존에 영향을 줄 수 있는 환경요인의 변화에 관심을 가지고 정기적으로 모니터링을 실시해야 한다.

따라서 본고는 석굴암의 보존을 위한 과거 보수공사 현황, 온·습도 등 측정을 통한 현재의 관리 및 보존상태에 대해 기술하고자 한다.

II. 석굴암 보존을 위한 과거 보수공사 현황

석굴암 석굴의 손상은 20C초 수많은 역사적 사건으로 석굴 전당(前堂)이 붕괴되고 석굴 천정의 일부가 파손되어 제1차 공사가 있었으며, 그후 여러 번의 보수공사가 시행되었다.

1. 제1차 공사(1913년~1915년)

보수전 석굴암은 천정의 석재가 약 1/3정도 떨어져 있었고, 나머지 천정도 떨어질 위험이 있었다. 또한 중앙불상을 파손할 염려가 있었으며, 토사가 내부에 흘러내

려 석굴암이 크게 망가져 있었다. 이 공사에서는 석굴암이 다시는 허물어지지 않도록 튼튼하게 보수하는데 너무 중점을 두었기 때문에 석굴암 전체를 콘크리트를 사용하여 한 덩어리로 만들어 놓았다.

2. 제2차 공사(1917년)

제1차 공사 이후부터 석굴내에 빗물에 의한 누수현상으로 불상이 오염되어 석굴 외부의 흙을 걷어내고 석탄 모르타르와 점토층 등으로 방수처리한 후 다시 성토(盛土)하였다.

3. 제3차 공사(1920년~1923년)

제2차 공사 이후에도 누수현상은 계속 발생되어 방수층을 신설하고, 배수시설을 개선하는 누수방지공사를 재실시하였다.

4. 일제시대 후기의 관리 및 보수공사 현황

1923년 공사 이후에도 결로 및 누수 현상이 계속되어 석굴내 청태(靑苔)가 발생되어 1934년과 1941년에 수증기를 이용하여 제거(steam cleaning)하였다는 기록이 있다.

5. 해방 이후의 관리 및 보수공사 현황

1945년 이후 사회적 혼란과 전란이 뒤따라 석굴암에 대한 보존대책이 거의 없이 그대로 방치되었고, 석굴내 오염이 심하여 1947년, 1953년, 1957년에 수증기를 이용한 세척작업이 진행되었다. 또한 석굴암을 보존해야 된다는 관심과 우려가 점차

높아지면서 1958년부터 1961년까지 보수공사 조사심의회를 설치 보수를 위한 각종 조사를 실시하여 1961년부터 1964년까지 전실을 확장하여 목조 건물을 설치, 석굴의 벽을 이중돔으로 하여 방수처리, 온수(溫水)를 이용한 석재표면 세척 등의 제4차 공사가 대대적으로 실시되었다.

그러나 제4차 공사 이후에도 결로현상이 발생되어 전실출입문을 설치하고 공기조화기기를 설치하였다, 1976년에서 1977년까지는 유리벽 설치, 내부 조명 개선, 전면 기단 확장 등의 부분보수와 관람객 통제가 있었으며, 1998년에는 목조전실 기와 교체, 상부 수목제거, 공기조화기기 수리 및 교체 등이 실시되었다.

또한 1996년에는 석굴 내부 콘크리트 돔의 균열, 진동문제 및 석굴암 원형 훼손으로 인한 보존환경의 문제가 제기되었으며, 이에 따라 석굴암 구조의 안전여부에 대한 객관적 검토의 필요성이 대두되어 문화재관리국(현 문화재청)에서는 1997년 사단법인 대한건축학회에 정밀 구조안전진단을 의뢰하였다. 그 결과, 구조적으로 안전하다는 결론을 얻었으며, 향후 주기적으로 전문기관에 의한 정밀구조안전진단을 실시하여 석굴의 장기적 보존대책을 강구해야 할 것이다.

Ⅲ. 석굴암 석굴의 보존관리현황

석굴암 석굴의 보존관리 여부는 석굴내 적정 온·습도 유지, 공기조화기 정상 가동, 콘크리트 돔의 안정성, 돔내 백화현상 및 누수 발생, 석굴내 본존불 좌대 등 석재의 균열부분 진행성, 석굴내 석면의 색상변화, 목조전실 상부의 관리상태 등이 중요한 사항일 것이다.

1. 석굴암 석굴 및 주변 보존현황

1961년부터 1964년까지 보수공사로 이중돔 및 전실 설치로 누수는 방지할 수 있

었지만 표면에 결로현상이 발생하여 1966년에 공기조화기를 설치하여 석굴내 온·습도를 일정하게 유지하고 있다. 그간 10년 주기로 기기를 교체하였으며, 1998년에 소음과 진동이 문제가 되어 공기조화기기의 교체 및 수리, 배관 및 덕트 세척을 실시하였다.

석굴암 석굴 내부 온·습도 측정은 1983년 4월부터 시작하였으며, 자기온습도계 (Model : SATO R-704, 일본)를 본존불 후면 좌대밑에 설치하여 공조기기 관리기사가 기록한 자료(일5회 측정 : 6시, 10시, 14시, 18시, 22시)를 정리 분석하였다. 그러나 측정값에 대한 신뢰도를 향상시키기 위하여 1998년 3월 자동연속으로 측정, 저장되는 자동기상관측장비(Model : RainWise S-10RM, 미국)를 석굴 내부, 이중돔 내부 그리고 외부에 설치하였으며, 매분기별로 측정자료를 회수하여 일·월·년 평균으로 정리, 분석하고 있다. 각 센서의 측정 항목 및 위치는 Table 1, Photo 1, 2와 같다.

Table 1. 센서의 측정 항목 및 위치

	측 정 위 치		측 정 항 목				비 고
	지점	위 치	온도	습도	CO ₂	풍향 풍속	
석굴 내부	내1	팔각주 위(지상 5m)	○	○	×	×	
	내2	본존불 좌대밑(지상 0.5m)	○	○	○	×	
	내3	감실 안(지상 4m)	○	○	×	×	
이중돔 내부	돔1	돔내 중앙(지상 2m)	○	○	×	×	
	돔2	돔내(지상 2m)	○	○	×	×	
외부	외1	요사채 뒷편	○	○	×	○	

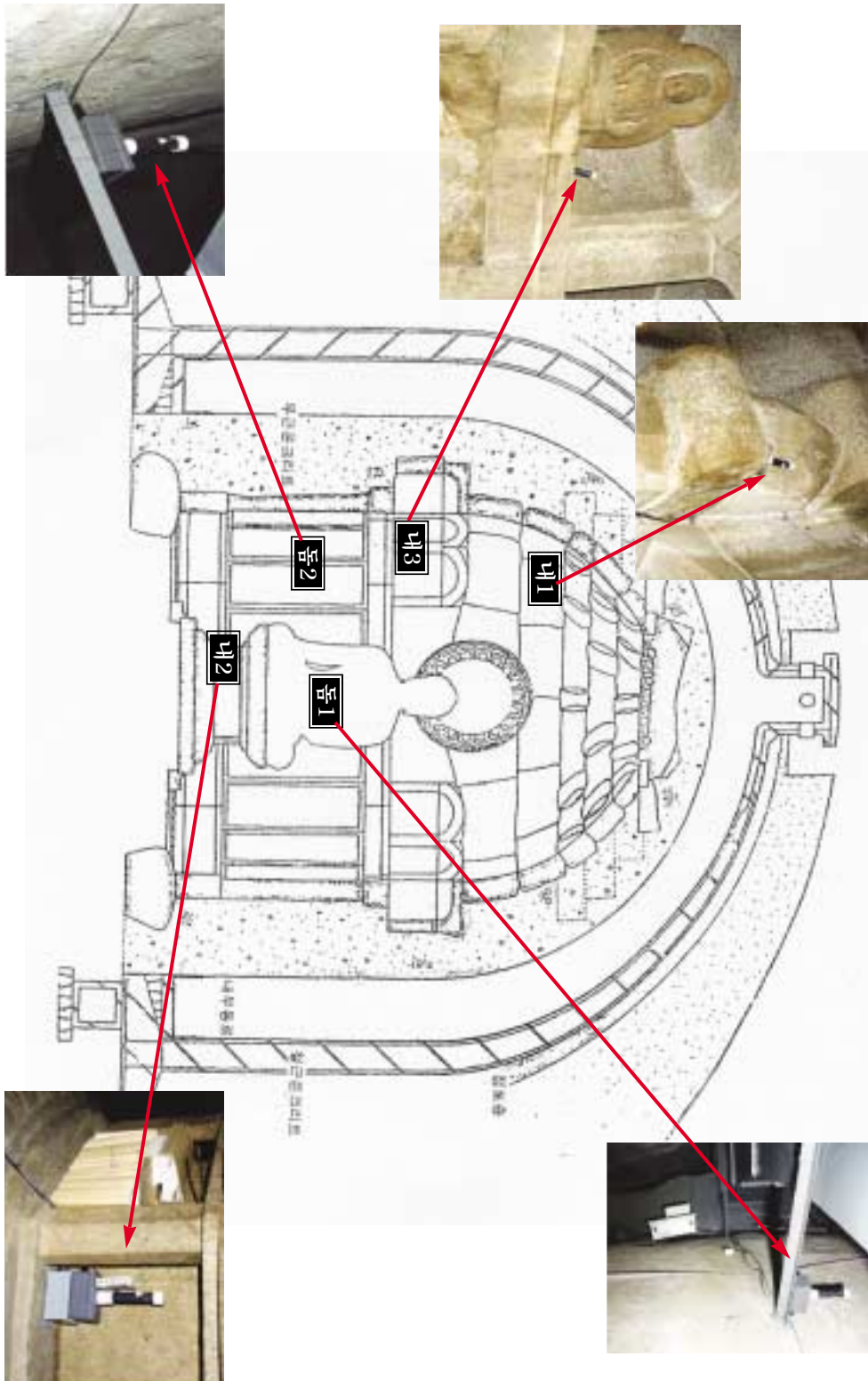
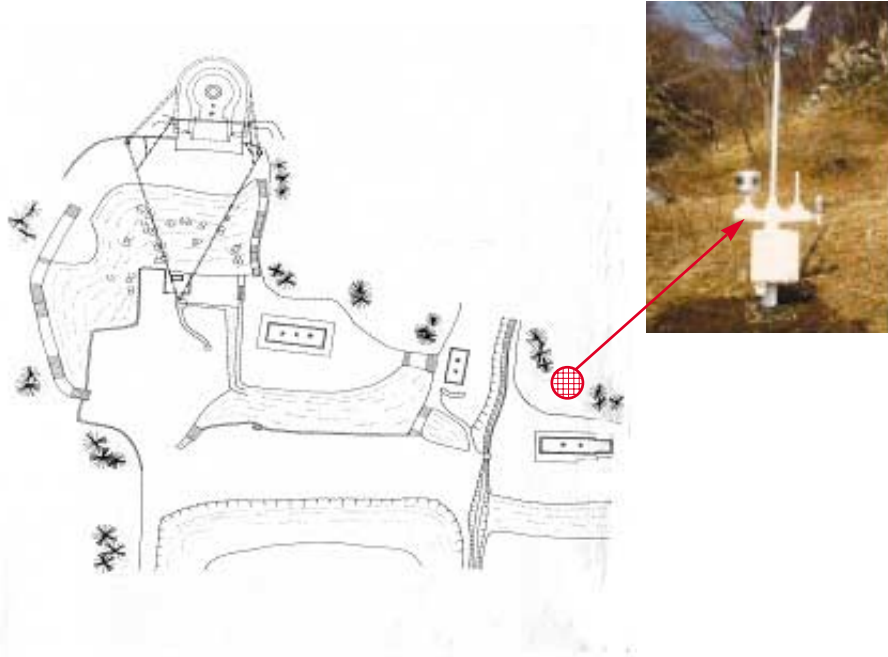


Photo 1.
석굴암 석굴 내부
측정센서 설치 지점

Photo 2.
석굴암 외부 자동기상
관측기기 설치지점



2. 석굴암 주변의 기상

1998년 5월부터 2002년 12월까지의 온·습도 측정자료는 Table 2와 같다. 월평균

Table 2. 석굴암 주변 기상 측정자료 (1998년 5월 ~ 2002년 12월)

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1998년	온도(℃)	-	-	-	-	15	15	19	21	19	14	-	1
	습도(%)	-	-	-	-	72	90	96	90	85	79	-	55
1999년	온도(℃)	-2	0	4	10	15	18	19	20	18	12	6	-1
	습도(%)	54	53	65	68	66	79	90	91	88	76	66	57
2000년	온도(℃)	-2	-3	4	9	15	18	22	22	16	12	5	0
	습도(%)	69	50	52	57	67	76	85	87	85	75	71	56
2001년	온도(℃)	-4	-1	3	10	15	18	21	20	17	12	5	-2
	습도(%)	66	60	54	54	70	79	83	82	83	79	60	57
2002년	온도(℃)	-2	0	5	10	13	17	20	20	16	11	2	0
	습도(%)	69	52	58	61	75	71	87	88	84	72	59	71
평균	온도(℃)	-3	-1	4	10	15	17	20	21	17	12	5	0
	습도(%)	65	54	57	60	70	79	88	88	85	76	64	59

균 습도는 5월부터 10월까지 70 % 이상을 나타내었으며, 특히 6월~9월(여름철)에는 90 % 이상 매우 습한 날씨로 유지되는 경우가 많이 나타났다. 또한 짙은 안개 속에 잠기는 경우도 많아 대체적으로 쾌청한 날이 별로 없는 습기가 많은 이상지대로서 이러한 외부의 환경이 석굴 내부에 바로 영향을 주기도 한다.

1998년 3월부터 2001년 8월까지의 바람의 방향과 세기를 조사한 결과는 Fig. 1의 바람장미도와 같다. 석굴암 주변 바람의 방향은 모든 방향에서 골고루 나타나고 있으며, 특히 서·서북서·동풍, 즉 산위에서 불어오는 산악풍(서풍, 서북서풍)과 요사채 방향에서 불어오는 계곡풍(동풍)이 주로 나타나고 있다. 또한 바람의 세기는 1.5 m/s 이하인 실바람이 대부분을 차지하고 있다.

계절별 풍향을 보면, 봄과 가을은 서풍 > 서북서풍 > 동풍, 여름은 동풍 > 서풍 > 북동풍, 겨울은 서북서풍 > 서풍 > 동풍 순으로 나타나 계절별로 약간의 차이를 나타내고 있다. 즉, 봄·가을·겨울은 산악풍인 서풍 계열, 여름은 계곡풍인 동풍 계열이 주로 나타나고 있다.

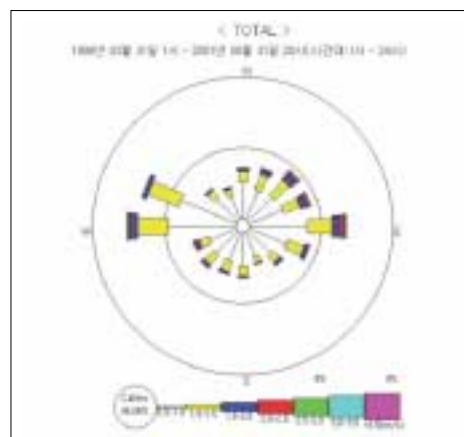


Fig. 1-1.
석굴암 주변 바람장미도

터를 분석한 결과이다.

1) 온도(Temperature)

석굴암의 온도를 측정한 결과는 Table 3, Fig. 2, 3과 같다. 기간중 석굴내 평균 온도는 21 ℃ (적정환경 20±2 ℃) 이었고, 연평균 온도는 19~23 ℃, 월평균 온도는 14~27 ℃ 로 유지되고 있다. 또한 계절별로 보면, 봄 15~21 ℃, 여름 21~27 ℃, 가을 18~25 ℃, 겨울 14~21 ℃ 로 다소 차이를 나타내고 있다.

Fig. 2에서 보면, 월평균 온도의 최소값과 최대값의 차이(즉 월평균 일교차)는 1~2 ℃ 로서 매우 일정하게 나타나고 있으며, Fig. 3에서 나타나듯이 온도변화폭은 석굴내부가 이중돔 내부 및 외부보다 작은 것을 알 수 있다.

Table 3. 석굴암 석굴 온도 측정결과

[℃]

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1998년	ave.	-	-	-	-	20	21	24	25	25	24	21	21
	max.	-	-	-	-	21	22	24	25	25	24	21	22
	min.	-	-	-	-	19	21	23	25	24	23	20	21
1999년	ave.	20	20	21	20	20	22	22	25	24	22	18	19
	max.	21	20	22	21	20	22	23	25	25	22	19	19
	min.	20	19	20	20	19	21	22	24	24	21	18	18
2000년	ave.	19	16	17	19	20	20	25	26	25	22	19	18
	max.	21	17	18	19	20	21	25	27	25	22	20	19
	min.	18	15	17	18	19	20	24	26	24	22	18	17
2001년	ave.	16	14	15	16	18	21	24	27	24	22	19	16
	max.	17	15	15	16	19	21	25	27	25	22	20	16
	min.	16	14	14	15	17	20	24	26	24	21	19	15
2002년	ave.	15	20	21	20	19	20	24	25	25	23	20	19
	max.	15	20	21	20	20	21	25	26	26	23	20	20
	min.	14	19	20	19	18	20	23	25	25	22	19	18

Fig. 2.
석굴암 석굴 월평균 온도

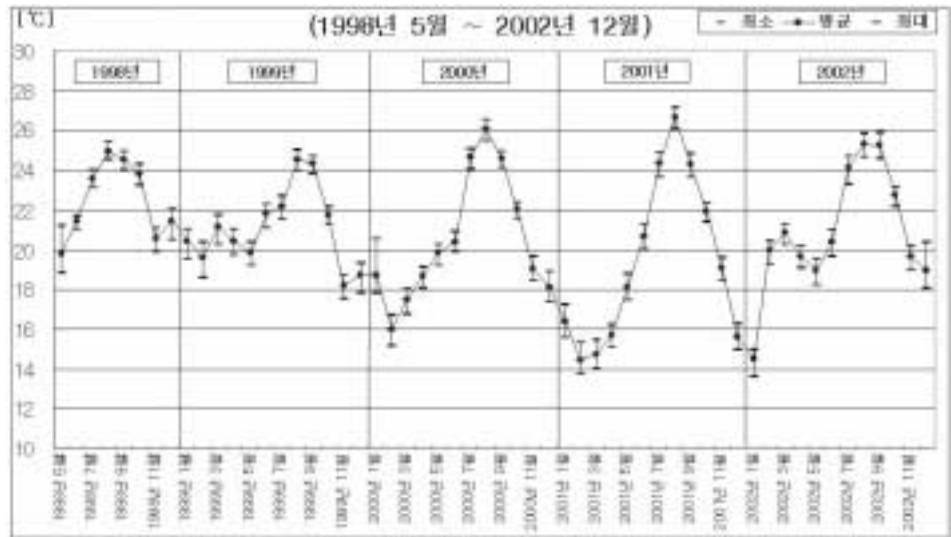
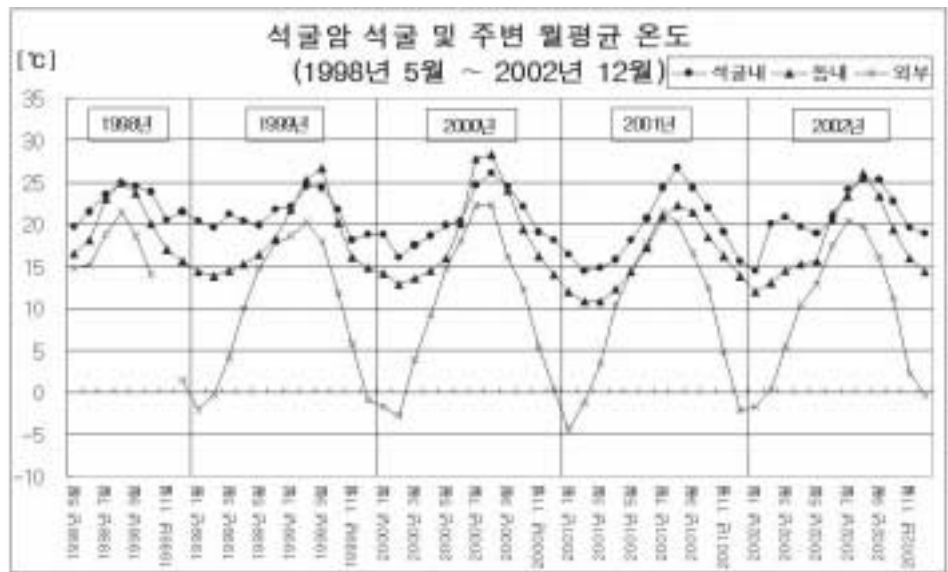


Fig. 3.
석굴암 석굴 및 주변 월평균 온도



2) 습도(Relative-Humidity)

석굴암의 습도를 측정한 결과는 Table 4, Fig. 4, 5와 같다. 기간중 석굴내 평균 온도는 42 % (적정환경 50 ± 5 %) 이었고, 연평균 습도는 40~44 %, 월평균 습도는 23~58 % 로 유지되고 있다. 또한 계절별로 보면, 봄 36~54 %, 여름 44~58 %, 가을 29~51 %, 겨울 25~39 % 로서 다소 차이를 나타내고 있다.

또한 Fig. 4에 나타나듯이 월평균 습도의 최소값과 최대값의 차이(즉 월평균 일교차)가 7~22 % 로서 다소 큰 차이를 나타내고 있다.

Table 4. 석굴암 석굴 습도 측정결과

[%]

		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1998년	ave.	-	-	-	-	47	44	50	51	51	45	36	27
	max.	-	-	-	-	54	47	61	59	57	52	41	32
	min.	-	-	-	-	39	38	39	42	44	38	31	23
1999년	ave.	23	33	38	46	48	52	58	52	51	44	37	36
	max.	28	41	46	52	55	61	68	60	57	49	43	44
	min.	19	25	29	40	42	41	49	46	47	39	32	27
2000년	ave.	36	33	37	41	48	56	52	50	49	48	40	29
	max.	43	41	45	49	54	62	60	57	54	53	44	36
	min.	28	25	30	34	43	50	43	43	46	44	35	25
2001년	ave.	26	33	36	44	53	52	55	50	48	48	32	25
	max.	33	42	42	49	58	58	61	55	52	52	38	31
	min.	22	28	31	40	47	46	49	45	43	45	28	21
2002년	ave.	34	34	38	41	54	44	46	44	44	40	29	34
	max.	40	40	42	46	57	51	52	51	48	44	35	42
	min.	28	28	32	36	50	39	41	40	39	36	25	28

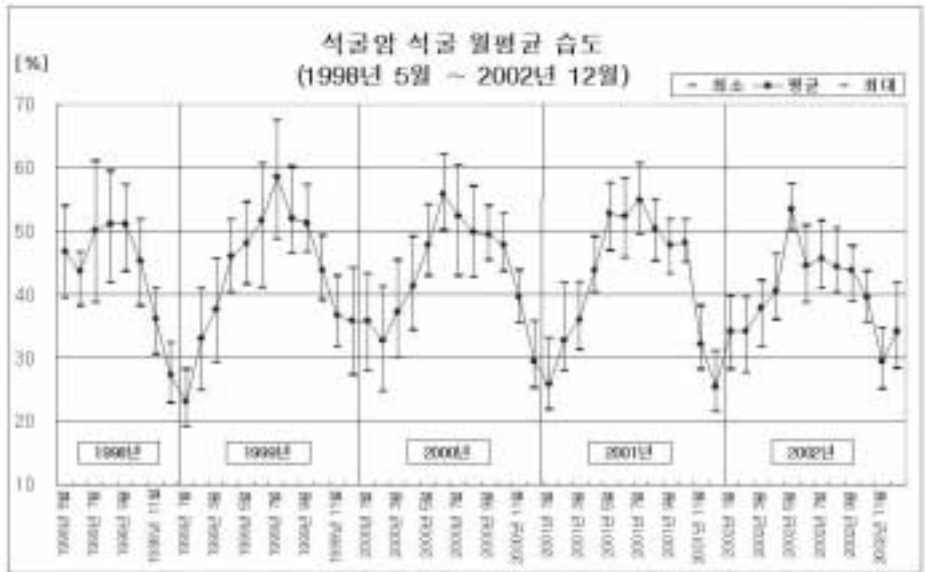


Fig. 4.
석굴암 석굴 월평균 습도

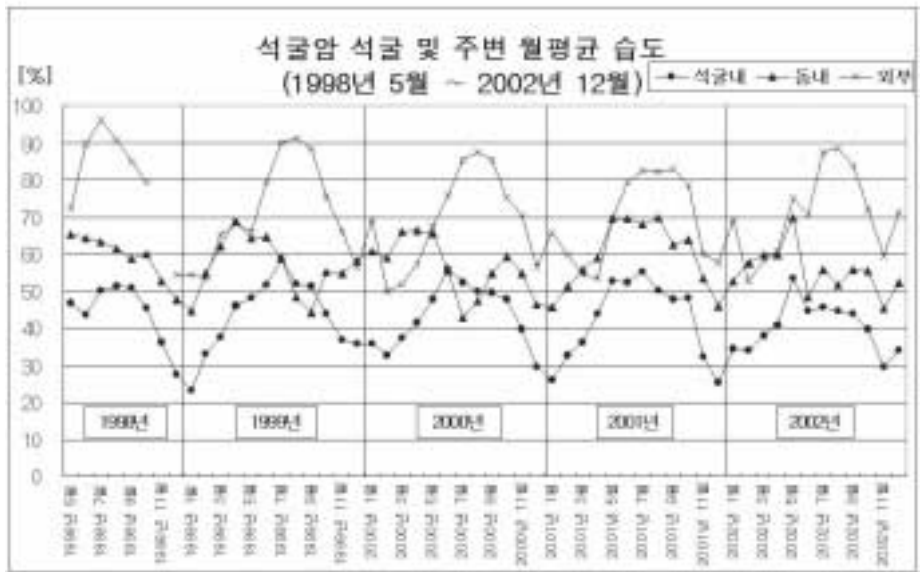


Fig. 5.
석굴암 석굴 및 주변
월평균 습도

3) 이산화탄소(CO₂ ; Carbon Dioxide)

석굴암 석굴의 이산화탄소 농도를 측정한 결과는 Table 5, Fig. 6, 7과 같다. 기간중 석굴암 내부의 평균 이산화탄소 농도는 588 ppm 으로 대기중의 농도인 360 ppm 보다 높았고, 연평균 농도는 538~658 ppm, 월평균 농도는 487~746 ppm 으로 측정되었다. 일평균 농도는 310~1618 ppm 이었고, 주로 음력 1일과 15일, 특히 석가탄신일에는 평일보다 높게 측정되고 있으며, Fig. 7에 나타나듯이 501~550 ppm의 범위에서 가장 많은 분포를 나타내고 있다.

Table 5. 석굴암 석굴 이산화탄소 농도 측정결과 [ppm]

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1998년	-	-	-	-	681	623	687	746	694	627	624	584
1999년	588	-	-	628	698	666	663	-	-	633	600	584
2000년	608	588	538	577	621	612	604	640	571	687	590	529
2001년	555	583	562	559	622	-	655	606	533	553	547	487
2002년	497	571	518	533	582	550	553	551	519	546	516	525



Fig. 6. 석굴암 석굴 월평균 이산화탄소 농도

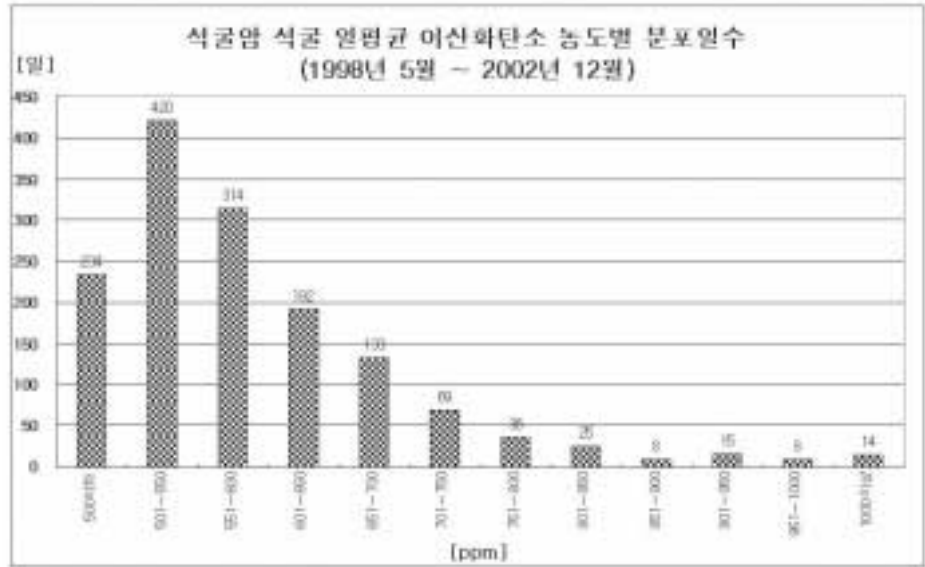


Fig. 7. 석굴암 석굴 일평균 이산화탄소 농도별 분포일수

IV. 결론

1998년 5월부터 2002년 12월까지 석굴암 석굴의 연평균 온도는 19~23 ℃, 습도는 40~44 % 로서 적정 온·습도기준인 20±2 ℃, 50±5 % 와 큰 차이없이 보존되고 있다. 석굴암 석굴의 온·습도가 동절기에는 난방으로 인한 내부온도 상승으로 습도가 낮아지므로 가습이 필요하며, 하절기에는 적정온도보다 다소 높으므로 냉방이 필요하고, 일교차는 온도 4 ℃, 습도 10 % 이내에서 유지되어야 한다.

일반적으로 사람의 호흡에 의해 이산화탄소 및 수분이 발생되는데, 분석결과 연평균 농도는 538~658 ppm 으로 대기중의 배경농도(360 ppm)보다 높게 측정되었다. 이산화탄소는 습기와 결합하여 약산인 탄산(H₂CO₃)으로서 석재 표면에 영향을 줄 수 있으므로 석굴 내부로의 사람출입을 최대한 억제하는 것이 바람직하다.

또한 사람의 출입은 먼지, 미생물 등의 오염물질이 유입될 수 있으며, 석재 표면의 직접적인 접촉으로 인위적인 손상의 원인이 될 수도 있다.

외부 공기에 맞추어 공기조화기를 가동하고 있어 계절별 또는 주·야별로 온·습도가 차이를 나타내고 있으므로 공기조화기를 정확하게 운용하여 급격한 변화없이 일정하게 적정환경을 유지하기 위해서는 공기조화기의 센서 교정 및 교체, 필터 및 덕트의 청결 유지 등 정기적인 정밀 점검과 관리자의 교육 등이 수반되어야 한다.

참고문헌

1. 한국의 세계유산, 1998, 문화재관리국 : 26.
2. 한국의 세계유산, 2002, 문화재청 : 6-8.
3. 박찬홍, 2000, 석굴암에 대한 연구사 검토, 석굴암의 신연구, *신라문화재학술 발표회논문집*, 21 : 199-234.
4. 황수영, 1989, 석굴암, 열화당.
5. 석굴암의 과학적 보존(자료편), 1990, 문화재관리국 문화재연구소.
6. ICOMOS 한국위원회, 2001, 세계유산정책 및 모니터링 제도에 관한 연구 보고서, 문화재청.
7. 김사덕, 1998, 석굴암의 보존환경, *한국문화재보존과학회*, 제9회 정기추계학술대회 개요집 : 14-18.
8. 성낙주, 2000, 석굴암 그 이념과 미학, 개마고원.
9. 석굴암수리공사보고서, 1967, 문화재관리국.
10. 석굴암·다보탑 및 석가탑의 세척과 보존에 관한 연구, 1971, 한국과학기술연구소.
11. 석굴암의 과학적 보존을 위한 연구, 1974, 한국과학기술연구소.