

ARTICLE

10

천연기념물
고씨굴과 고수동굴의
환경변화에
대한 연구

최돈원 국립문화재연구소 자연문화재연구실
김 련 사단법인 한국동굴연구소

ANNUAL REVIEW IN

CULTURAL HERITAGE STUDIES VOL. 42 NO. 1, 2009



- 161 서론
- 161 연구방법
- 163 연구지역의 특징
- 164 연구결과
 - 1. 고씨굴의 환경
 - 2. 고수동굴의 환경
- 176 토의
- 185 결론

천연기념물 고씨굴과 고수동굴의 환경변화에 대한 연구

최돈원^a · 김 련^b

^a국립문화재연구소 자연문화재연구실 ^b사단법인 한국동굴연구소

투고일자 : 2008. 12. 01 | 심사일자 : 2009. 03. 09 | 게재확정일자 : 2009. 03. 20

국문초록

천연기념물 제219호인 고씨굴은 1974년 일반인에게 개방되었으며 총길이는 3,388m로 이중 620m만 공개되고 있다. 충북 단양에 위치한 고수동굴은 천연기념물 제256호로 총길이는 약 1,700m이며 이중 685m가 1976년 개방되었다. 이들 동굴들은 30여 년 전에 일반인에게 개방되어 활용되고 있으나 이들 동굴 내에 성장하는 동굴생성물들은 오염물에 그대로 노출되어 있다. 이들 동굴의 동굴환경 변화에 대한 연구를 수행한 결과, 동굴 내의 온도와 습도 그리고 이산화탄소의 분압은 계절적 변화가 뚜렷하게 나타난다. 전반적인 이산화탄소 분압은 여름철 성수기가 대체적으로 높은 경향을 보이고 있다. 또한 여름철을 제외한 계절의 경우 관람 후 다음날 개장하기 전까지 동굴 내 대기의 순환에 의한 자정능력이 있으나 여름철의 경우 자정능력을 넘어서게 되어 계속적으로 축적되는 경향을 보이고 있다. 특히, 두 동굴의 이산화탄소 분압은 관람객의 수에 의해 조절되는 것으로 나타난다. 따라서 이들 동굴의 환경을 유지하기 위해서는 일일 관람객의 수를 조절하여야 할 것으로 판단된다.

서론

동굴이 대기에 노출될 경우, 동굴 내에 노출된 암석과 광물들은 서서히 화학적인 풍화를 받게 된다. 이들 화학적 풍화는 동굴환경과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 몇몇 학자들(e.g. Wigley and Brown, 1976; Cigna and Forti, 1986; Cigna, 2004)에 의해 동굴환경에 대한 연구는 수행되었으나 동굴의 성인, 광물 등과 같은 분야에 비해 상대적으로 소홀히 이루어졌다.

동굴의 대기는 입구와 암석 내의 작은 틈들을 통해 공기의 순환이 일어나므로 외부의 대기 조성과 거의 유사한 값을 보인다. 그러나 가장 큰 차이점은 이산화탄소(CO₂)의 값으로 외부의 대기에 비해 약 10배 정도 높은 값을 보이고, 토양에 비해 10배 정도 낮은 CO₂의 값을 보인다. 동굴생성물은 토양을 통과하여 지하로 침투한 빗물이 동굴환경에 도달하면서, 동굴수로부터 주로 증발작용과 이산화탄소의 유리작용을 통해 성장하는 것으로 알려져 있다(Hill and Forti, 1997). 동굴생성물의 형태와 광물성분은 동굴수의 성분을 조절하는 모암의 성분과 동굴수의 공급량, 그리고 증발량과 이산화탄소의 유리 정도를 조절하는 동굴환경에 따라 달라질 수 있다(Gonzalez and Lohmann, 1988; Hill and Forti, 1997; 우경식, 2002; 최돈원, 2006; Woo and Choi, 2006; 최돈원과 우경식, 2008).

우리나라에 분포하는 자연동굴은 약 1,000 여개의 자연동굴이 존재하는 것으로 알려져 있다(Woo et al., 2005). 이 중 16개 동굴이 천연기념물로 지정 보호되고 있으며, 20개 동굴이 지방문화재로 보호 관리되고 있다. 2008년 현재 13개 동굴(천연기념물 중 8개 동굴과 지방문화재 3개 동굴, 기타 2개 동굴)이 일반인에게 개방되어 활용되고 있다. 이들 동굴들은 관광지로서 이용되고 있지만, 개방동굴을 관리하는 개인이나 단체에서는 환경친화적인 방법으로 동굴을 관리하지 못하고 있는 실정이다. 그 결과, 대부분의 개방동굴이 훼손되는 관광객의 무분별한 출입으로 훼손되고 있는 것이 현실이다.

이 논문은 1년동안 천연기념물 제219호인 영월 고씨굴과 천연기념물 제256호인 단양 고수동굴의 동굴

환경을 측정하여 동굴환경의 변화와 특징을 파악하는데 그 목적이 있다.

연구방법

동굴 대기환경을 알아보기 위해 강원도 영월군에 위치한 고씨굴과 충청북도 단양에 위치한 고수동굴에서 이루어졌다(Fig. 1). 동굴 대기의 변화를 파악하기 위해 온도, 습도, 이산화탄소 분압을 동굴외부, 동굴입구, 동굴내부에서 각각 측정하였다. 동굴내부의 대기환경 측정은 주로 공개구간에서 이루어졌으며 관람객에 대한 영향 정도를 파악하기 위하여 일부 비공개구간에서도 측정하였다.

고씨굴의 대기환경은 동굴 외부와 입구를 포함하여 총 11개 지점은 측정하였으며 이중 7개 지점은 공개구간이며 2개 지점의 비공개구간에서 이루어졌다(Fig. 2). 고수동굴은 동굴외부와 입구를 포함하여 총 15개 지점에서 온도, 습도, 이산화탄소의 분압을 측정하였다. 이중 동굴외부와 입구를 제외하고 동굴내부에서는 12개 지점의 공개구간과 1개 지점의 비공개구간에서 이루어졌다(Fig. 3).



Fig 1 A map showing the location of Gossi and Gosu Caves

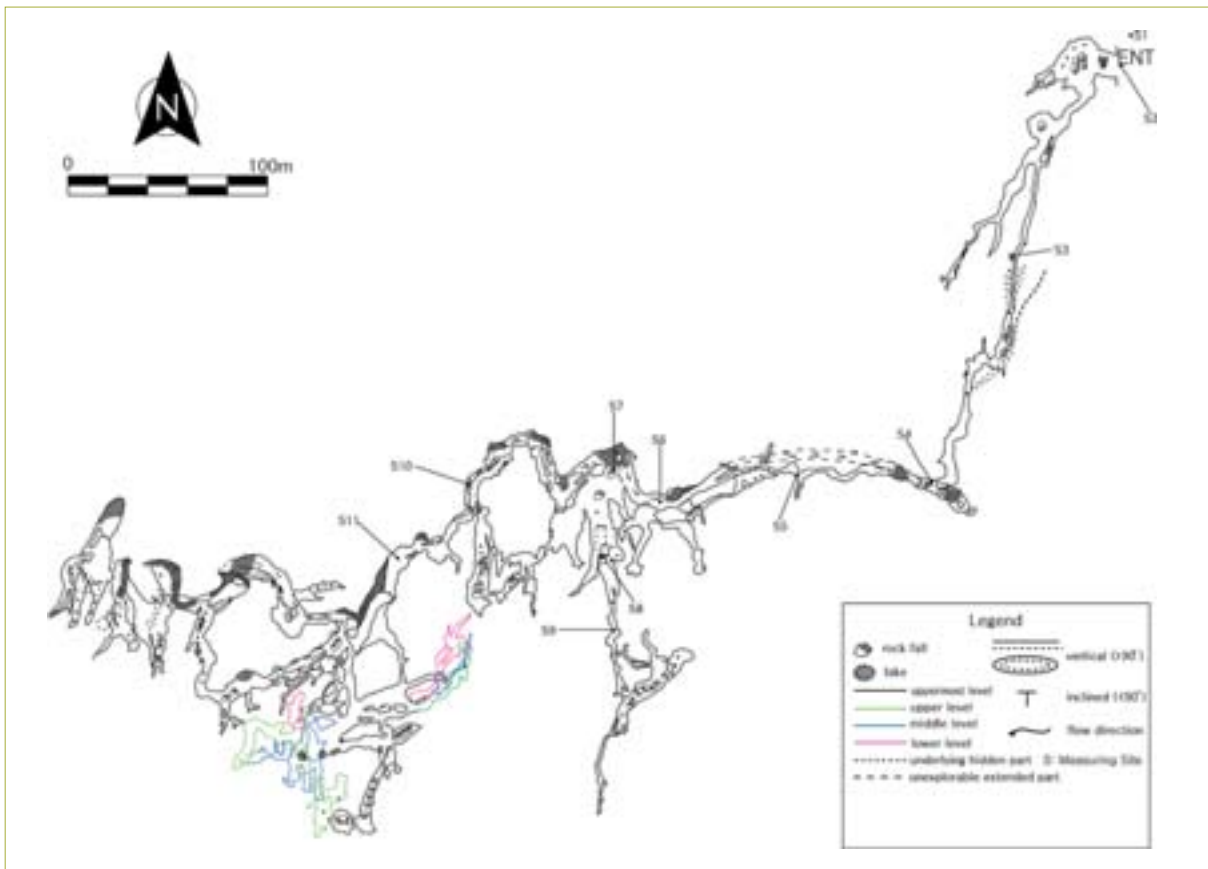


Fig 2 Survey of the Gossi Cave. Measuring sites(numbers) of temperature, humidity, pCO2 are indicated

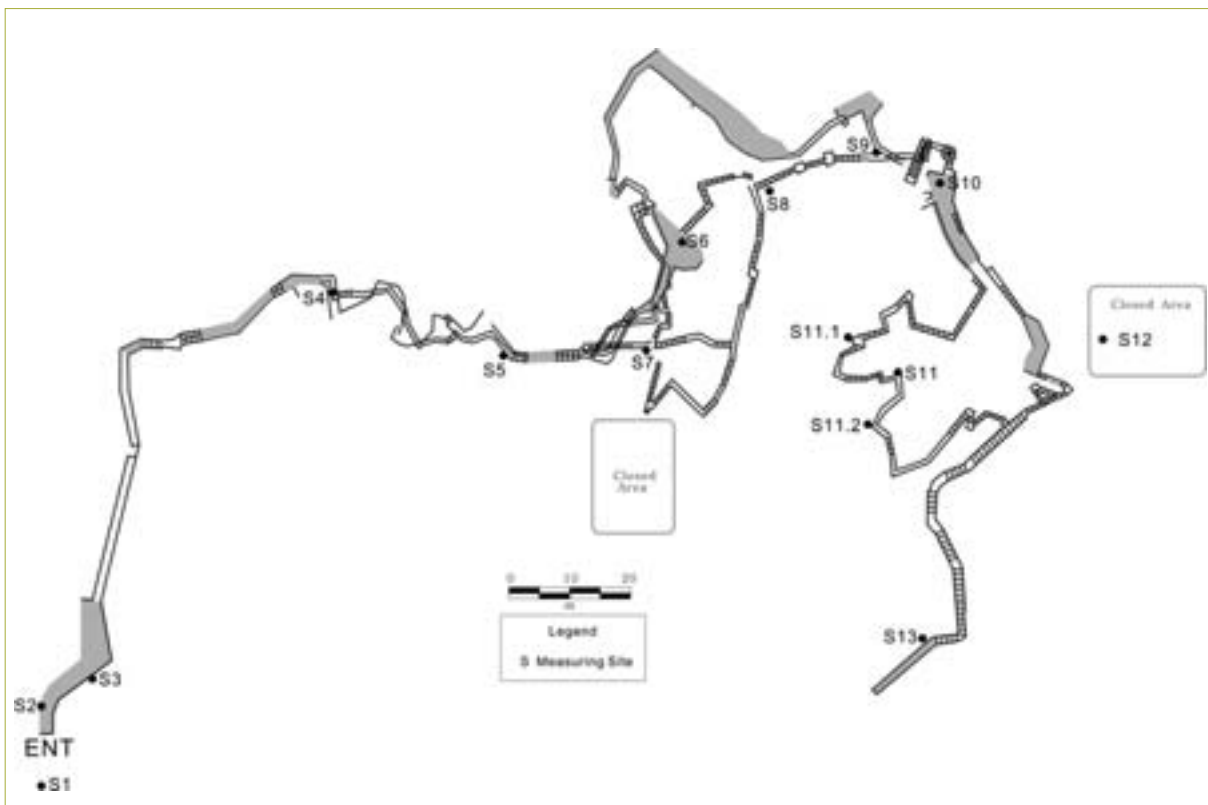


Fig 3 Survey of the Gosu Cave. Measuring sites(numbers) of temperature, humidity, pCO2 are indicated

동굴 내의 온도와 습도를 측정하기 위해 자동 온도·습도 측정기(핀란드, Vaisala CARBOCAP Hand Held Carbon Dioxide Meter GM70)를 사용하였으며, 이산화탄소의 분압은 이산화탄소 분압측정기(핀란드, Vaisala CARBOCAP Indicator HMI41, probes HMP41)를 이용하여 측정하였다.

온도, 습도, 이산화탄소 분압의 계절적인 변화를 파악하기 위해 계절별로 측정하였으며 특히, 관람객이 많은 여름철 성수기 동안에는 동굴 내 환경변화와 관람객의 연관성을 위해 7월말~8월초에 걸쳐 비교적 장기간에 걸친 지속적인 모니터링을 실시하여 그 자료를 분석하였다.

연구지역의 특징

연구지역은 한반도 남중부를 북동-남서 방향으로 가로지르는 옥천대 동북부의 남동쪽 경계의 연장선에

위치한다. 고씨굴과 고수동굴의 주변에는 조선누층군의 태백층군에 대비되는 장산층, 묘봉층, 대기층, 화절층, 동점층, 두무골층, 막골층, 직운산층, 두위봉층이 분포하고 있으며, 상부고생대의 석탄기(Carboniferous)에 퇴적된 만항층과 부정합으로 접하고 있다. 이들 퇴적암류들은 대체로 N30°E 내지 N40°E의 주향을 가지나 경사는 15°~35°NW 범위 내에서 다양하게 나타난다. 특히, 고씨굴과 고수동굴은 하부 고생대 조선누층군 퇴적암류 중에서 막골층에 해당되는 탄산염암 내에 발달하고 있다. 이들 동굴을 배태하고 있는 막골층은 두무골층 위에 정합적으로 놓이며, 직운산층에 의해 정합적으로 덮혀있다. 막골층의 두께는 250~400m이며 스트로마톨라이트(stromatolite), 물결자국, 건열구조, rhythmic 층리, 새눈구조, 생란구조와 같이 다양한 퇴적구조 나타나므로 이 층이 조간대 퇴적층이라 제안하였다(Woo, 1999; Paik, 1987). 이 층은 주로 암회색의 석회암으로 구성되어 있으며 엽층리(lamination)와 생교란작용(bioturbation)을 포함하는 암회색의 석회암이 우세

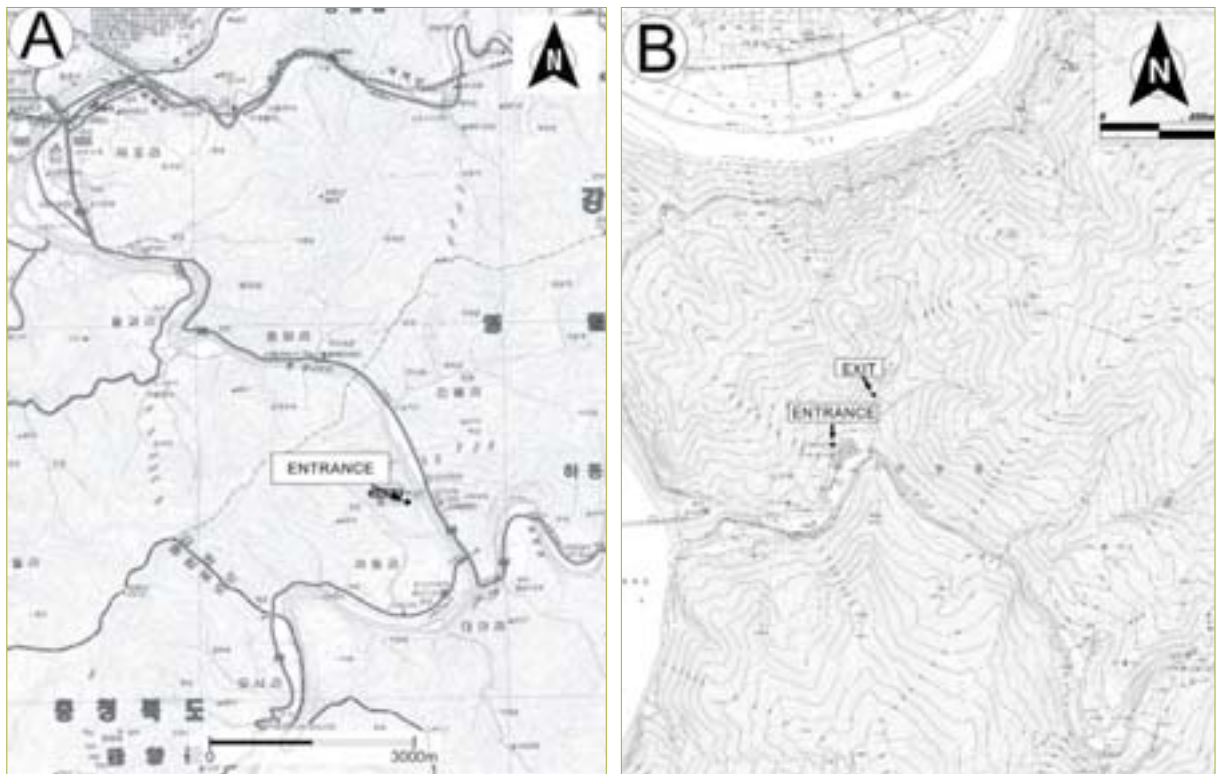


Fig 4 Location of the Gossi (A) and Gosu (B) Caves

하게 나타나며, 중부에는 담회색의 돌로마이트층이 나타나며 상부에는 용해붕락각력암(solution-collapsed breccia)이 관찰된다.

천연기념물 제219호로 지정된 고씨굴은 영월읍으로부터 88번 지방도를 따라 남동쪽으로 약 20분 정도 소요되는 9.5km 지점인 진별마을의 강 건너편에 위치한다. 행정구역상 강원도 영월군 하동면 진별리 산262번지에 해당한다(Fig. 4A).

고씨굴의 입구는 강 건너편의 암벽 중간인 해발고도 215m지점(N37°07'35", E128°32'04")에 위치하며 S83°W 방향으로 입구가 발달한다. 예전에는 나룻배를 타고 폭 130m인 남한강을 건너 입구에 이르렀으나, 지금은 동구입구까지 다리로 연결되어 있다. 고씨굴의 총길이는 3,388m이며 이 중 620m 정도가 일반인에게 공개되어 있다.

천연기념물 제256호인 고수동굴은 단양읍과 인접한 충청북도 단양군 단양읍 고수리에 위치한다. 총길이는 약 1,400m로 이중 685m 정도가 개방되었으며 입구와 출구는 각각 구분되어 있다. 동굴의 입구는 단양읍을 경유하는 남한강으로 유입되는 금곡천 하천변의 동우봉(해발 430m)의 남사면 해발 약 160m에 발달하며, 출구는 설미기골 상류 해발 약 210m 지점에 위치하고 있다(Fig. 4B).

연구결과

1. 고씨굴의 환경

(1) 온도

온도의 경우, 외부는 계절적인 영향에 의해 2006년 8월(8월1일~8월5일)의 온도는 22.2~36.7°C, 11월은 0.2~11.2°C, 2007년 1월은 -7.4~2.9°C로 -7.4~36.7°C의 범위를 나타내고 있다(Fig. 5; Table 1). 동굴 입구는 동굴 내부와 외부의 환경변화에 영향을 받아 2006년 8월은 14.9~26.3°C, 11월은 0.7~11°C, 2007년 1월은 -6.3~5.1°C, 4월은 8.9~14.2°C의 범위를 보여 주고 있다

(Table 1). 동굴 내부의 경우는 동굴의 형태와 입구의 크기, 방향, 그리고 외부의 계절 변화에 의해 2006년 8월은 13.4~22.2°C, 11월은 7.2~14.4°C, 2007년 1월은 -0.9~12.9°C, 4월은 8.5~15.2°C의 범위를 나타내고 있다(Fig. 5). 동굴 내부 온도의 변화는 가을에서 겨울과 봄까지는 대체적으로 약 11~13°C 정도의 범위 내에서 변화를 하고 있으며 여름에는 14~16°C의 범위를 보인다(Figs. 6, 7, 8).

(2) 습도

습도의 경우도 외부의 환경 변화, 즉 건기와 우기의 강우량의 차이에 따라 38~91.9%의 범위를 나타내고 있다(Table 2). 외부의 습도가 높은 2006년 8월에는 48.4~90.7%, 겨울철인 2007년 1월에는 42.4~88.5%를 보이며 우기(8월)의 습도가 건기(1월)보다 전체적으로 더 높게 나타나는 것이다(Fig. 5). 동굴 입구의 경우, 외부와 동굴 내부의 영향을 받는 구간으로 2006년 8월과 11월, 그리고 2007년 1월, 4월 각각 48.8~96.8%, 42.4~83%, 53.4~86.2%, 46.9~93.5%의 범위를 나타내며(Table 2), 동굴내부의 경우는 2006년 8월에 57.7~100%, 11월의 경우 70.5~100%, 2007년 1월은 53.3~100%, 4월은 76.4~93.4%로서 53.3~100%의 범위를 나타내고 있다(Figs. 6, 7, 8; Table 2).

(3) 이산화탄소 분압

동굴 내 7개 지점의 개방구간과 2개 지점의 비공개 구간에서 이산화탄소 분압을 측정 한 결과 동굴 외부의 이산화탄소 분압은 2006년 8월에 430~550ppmv, 11월에 500~560ppmv, 2007년 1월에 520~580ppmv, 4월에 375~475ppmv의 범위를 나타내고 있으며(Fig. 5), 동굴 입구의 경우는 2006년 8월에 1480~2,600ppmv, 11월에 520~660ppmv, 2007년 1월, 4월에 각각 530~610ppmv, 470~840ppmv의 범위를 보인다(Table 3). 동굴 내부의 이산화탄소 분압은 2006년 8월에 1,860~4,060ppmv, 11월에 550~1,200ppmv, 2007년 1월에 510~1,100ppmv, 4월은 350~1,935ppmv의 범위를 보인다(Figs. 6, 7, 8; Table 3).

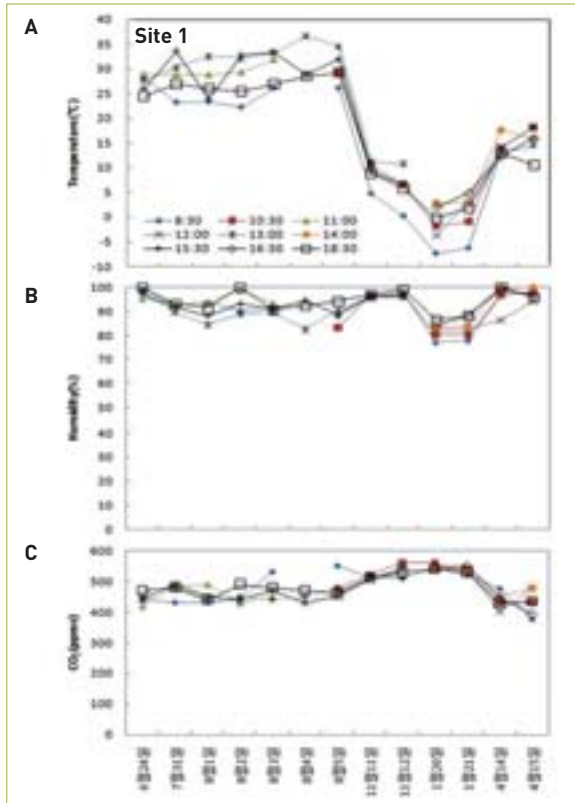


Fig 5 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 1 in Gossi Cave

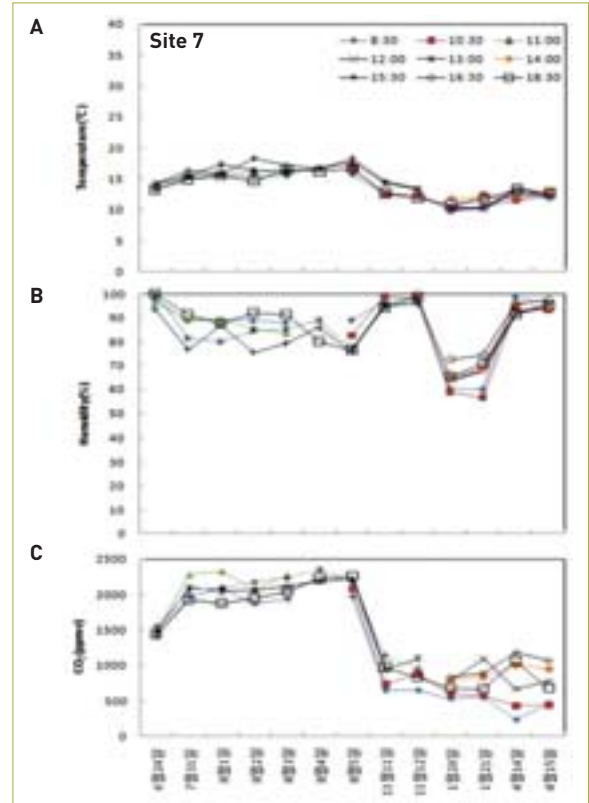


Fig 6 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 7 in Gossi Cave

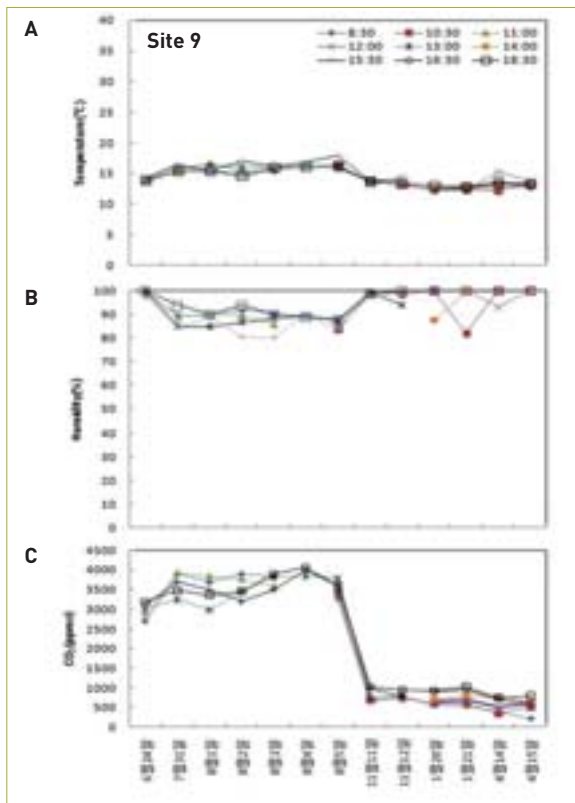


Fig 7 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 9 in Gossi Cave

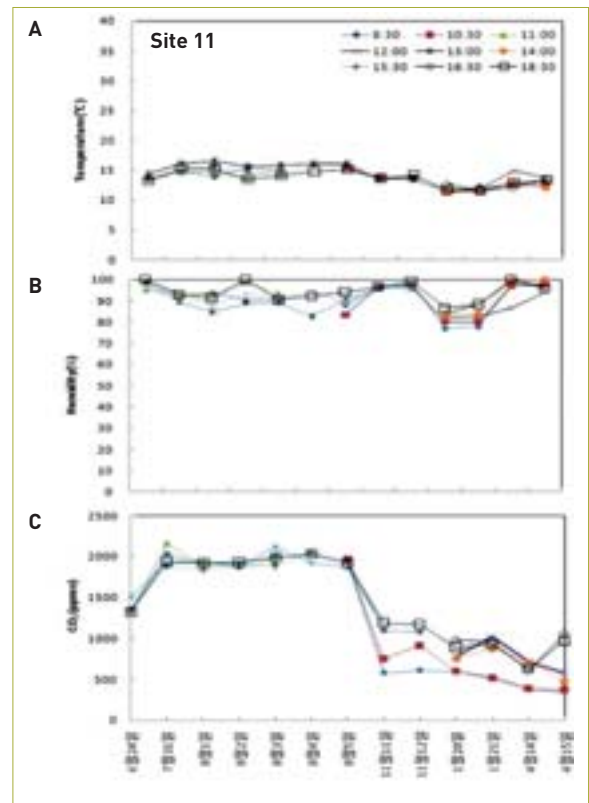


Fig 8 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 11 in Gossi Cave

Table 1 Air temperature in Gossi Cave

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
2006/6/23-24											
1(Outside)	30,9	28,3		29,0		27,7		26,0		24,4	
2(Ent.)	14,6	12,7		18,2		18,2		18,3		17,3	
3	10,9	10,8		11,9		11,6		13,4		11,1	
4	11,9	12,1		14,1		13,6		14,4		12,1	
5	12,7	12,7		14,1		13,7		14,3		13,3	
6	12,8	12,8		13,8		13,4		14,2		13,3	
7	13,4	13,3		13,8		14,3		14,1		13,3	
8	13,6	13,1		14,0		15,0		14,3		13,7	
9	13,7	13,6		13,8		14,2		14,2		13,9	
10	13,2	13,4		13,9		14,4		13,6		13,1	
11	13,3	13,4		13,9		14,4		13,8		13,2	
2006/7/30-31											
1(Outside)	26,4	23,2		28,9		30,2		33,6		26,9	
2(Ent.)	15,7	21,8		20,4		20,1		21,3		15,6	
3	13,4	19,4		17,1		18,3		18,2		16,7	
4	13,7	17,9		16,5		19,7		19,0		15,3	
5	15,2	16,8		16,4		18,8		18,3		15,7	
6	14,5	15,8		15,7		16,3		18,1		15,1	
7	14,5	15,3		15,5		15,5		16,4		14,9	
8	14,7	15,4		15,4		16,7		16,1		14,9	
9	14,6	15,4		15,4		16,1		16,4		15,4	
10	14,7	15,4		15,4		16,5		16,2		15,2	
11	14,3	14,8		14,7		16,1		16,0		15,2	
2006/8/1											
1(Outside)		23,3		28,9		32,5		23,9		26,0	
2(Ent.)		22,5		20,1		22,8		23,3		21,8	
3		18,3		16,8		21,4		15,9		16,7	
4		17,5		16,3		18,7		15,9		14,8	
5		15,9		16,4		18,6		16,1		15,9	
6		15,4		15,9		18,0		15,8		15,6	
7		15,7		15,9		17,4		15,8		15,6	
8		15,8		16,5		16,9		15,7		15,7	
9		15,4		16,7		16,3		15,4		15,4	
10		15,9		15,3		16,7		15,9		15,8	
11		13,9		14,7		16,6		15,6		15,2	
2006/8/2											
1(Outside)		22,2		29,4		32,1		32,8		25,4	
2(Ent.)		19,5		20,2		21,6		24,0		15,4	
3		16,5		17,1		19,1		21,0		15,1	
4		15,4		15,9		16,9		19,4		14,4	
5		15,9		16,8		17,6		19,4		14,7	
6		15,5		16,3		16,6		18,5		14,6	
7		15,4		16,3		16,4		18,3		14,7	
8		15,5		16,2		16,6		17,8		14,7	
9		15,1		15,4		16,1		17,0		14,6	
10		15,6		15,4		16,3		16,9		14,8	
11		15,4		13,7		15,7		14,7		13,5	
2006/8/3											
1(Outside)		26,1		31,9		33,2		33,5		26,9	
2(Ent.)		21,4		19,8		20,4		20,1		23,3	
3		16,2		18,7		17,5		18,3		17,8	
4		15,2		16,5		17,1		17,4		17,2	
5		15,6		16,9		16,5		16,2		17,0	
6		15,6		16,3		17,0		16,7		17,3	
7		15,6		16,2		16,8		16,3		16,2	
8		15,5		16,7		16,1		17,2		16,5	
9		15,4		16,3		15,8		16,1		15,9	
10		16,1		17,2		16,0		15,8		15,9	
11		15,1		15,4		15,9		14,3		14,1	
2006/8/4											
1(Outside)						36,7		28,8		28,5	
2(Ent.)						26,3		21,5		17,1	
3						22,2		13,4		16,5	
4						19,8		14,6		16,3	
5						18,9		14,9		15,9	
6						17,6		15,3		15,7	
7						16,7		16,7		16,2	
8						16,6		16,4		16,8	
9						16,4		16,9		16,1	
10						16,9		15,8		15,9	
11						16,1		15,9		14,7	
2006/8/5											
1(Outside)		26,1	29,3			34,5		32,0		29,2	
2(Ent.)		18,1	19,8			22,5		22,0		14,9	
3		14,3	19,3			18,3		18,0		13,4	
4		16,1	18,4			18,5		19,2		15,7	
5		16,3	18,1			18,7		19,4		16,0	

Table 1 (continued)

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
6		15.5	17.7			18.2		18.9		16.3	
7		15.7	16.8			17.7		18.3		16.7	
8		15.2	16.8			16.5		17.9		16.3	
9		15.7	16.3			16.3		17.9		16.2	
10		15.2	15.9			16.4		16.7		15.7	
11		15.3	15.4			16.1		15.9		15.1	
2006/11/10-11											
1(Outside)	10.4	4.7	10.4			11.2		9.2		8.8	
2(Ent.)	9.6	5.4	10.3			10.8		10.2		9.4	
3	9.7	8.9	9.8			9.9		10.2		10.0	
4	11.1	10.4	10.6			11.3		13.2		10.7	
5	11.7	11.6	11.6			12.6		13.2		11.6	
6	12.4	12.8	12.3			13.3		13.9		12.2	
7	13.0	12.6	12.6			14.3		14.6		12.7	
8	13.6	13.3	13.5			14.6		14.1		13.6	
9	13.6	13.7	13.8			13.7		13.8		13.7	
10	13.7	13.5	14.2			14.4		14.8		13.4	
11	13.7	13.7	13.8			13.5		13.4		13.6	
2006/11/12-13											
1(Outside)		0.2	6.6			10.7		6.6		5.7	0.9
2(Ent.)		0.7	5.3			9.4		11.0		6.8	2.2
3		7.4	7.8			10.2		11.3		7.9	7.2
4		9.5	9.1			10.5		13.6		9.2	9.3
5		10.7	10.2			11.4		13.2		11.3	10.5
6		11.8	11.4			12.1		13.8		11.8	11.6
7		12.4	12.4			13.3		13.4		11.9	12.0
8		12.8	12.6			14.2		13.8		13.2	12.8
9		13.2	13.1			14.2		14.1		13.3	13.3
10		13.7	13.1			14.4		13.7		13.4	13.3
11		13.4	13.6			13.8		13.4		14.2	13.2
2007/1/19-20											
1(Outside)	-1.2	-7.4	-1.9		-3.8		2.8		1.9	-0.3	
2(Ent.)	0	-6.3	2.6		0.7		5.1		2.6	4.3	
3	3.5	-0.9	3.3		3.7		5.5		3.7	10.8	
4	5.8	5.6	5.2		6.3		8.7		6.1	6.5	
5	8	7.7	8.1		8.7		10.0		8.3	10.3	
6	9.6	9.3	9.5		9.8		11.4		9.6	10.2	
7	10	9.8	10.2		10.4		11.9		10.0	10.9	
8	11.1	10.8	11.2		11.3		13.0		11.0	12.2	
9	12.9	12.4	12.3		12.7		12.3		12.4	13.0	
10	11.7	11.4	11.3		11.4		11.4		11.4	11.8	
11	11.9	11.7	11.3		11.6		11.4		12.6	11.7	
2007/1/21-22											
1(Outside)		-6.3	-0.9		3.1		2.9		4.8	1.7	-2.3
2(Ent.)		-6	1.1		2.4		5.0		4.7	3.6	-2.3
3		1.9	5.1		4.1		5.6		5.1	6.1	1.6
4		5.5	9.5		6.3		9.8		6.5	9.2	4.9
5		8	10.6		8.3		11.0		9.0	10.7	6.6
6		9.6	11.6		9.3		11.4		9.5	11.3	9.1
7		10.5	12.4		10.2		12.0		10.4	11.8	9.5
8		11.7	13.1		11.8		12.3		11.8	11.9	10.6
9		12.6	12.2		12.3		13.0		12.5	12.9	11.7
10		12.1	11.9		11.5		11.9		11.4	11.6	10.5
11		12.2	11.6		11.9		11.6		11.5	11.6	11.1
2007/4/14											
1(Outside)		13.2	13.9		14.3		17.7		12.4	12.9	
2(Ent.)		10.8	10.1		11.3		14.2		8.9	11.9	
3		8.6	9.5		8.5		13.3		10.0	9.9	
4		9.6	9.1		9.7		11.4		12.4	11.4	
5		10.2	11.1		10.5		12.5		12.9	11.9	
6		11.4	11.1		11.8		12.7		13.2	12.4	
7		11.5	11.6		13.5		12.3		12.7	13.4	
8		11.9	11.8		13.7		12.8		12.9	13.3	
9		12.6	12.1		15.2		13.4		13.4	13.5	
10		12.9	12.8		13.8		13.4		12.7	13.2	
11		12.6	12.7		14.9		12.9		12.1	12.9	
2007/4/15-16											
1(Outside)		14.4	18.1		18.2		15.9		15.9	10.5	12.5
2(Ent.)		10.4	9.3		14.1		10.5		13.5	9.2	9.9
3		8.8	9.3		11.2		11.2		11.7	10.6	11.5
4		12.3	11.1		12.0		12.0		11.6	11.4	11.3
5		11.5	11.5		12.7		12.2		11.8	12.6	11.6
6		11.2	11.7		12.8		12.7		12.0	12.4	12.4
7		12.1	12.8		12.4		12.9		12.1	12.8	11.9
8		12.1	13.1		13.1		12.9		12.6	13.1	12.6
9		12.7	13.4		13.8		13.5		13.1	13.3	11.8
10		11.8	12.3		13.4		12.5		13.4	13.6	12.3
11		12.3	12.7		13.7		12.0		13.4	13.3	11.2

Table 2 Humidity in Gossi Cave.

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
2006/6/23-24											
1(Outside)	57.5	63.7		56.6		68.6		77.0		83.8	
2(Ent.)	86.6	95.0		75.0		77.1		79.8		87.6	
3	100.0	100.0		96.0		96.9		89.3		100.0	
4	100.0	98.3		88.0		91.7		88.1		100.0	
5	97.4	98.0		91.7		94.1		91.3		100.0	
6	97.2	97.3		93.5		96.4		92.7		99.9	
7	96.9	97.7		96.3		100.0		93.5		100.0	
8	96.7	99.1		94.6		100.0		94.7		97.5	
9	98.8	99.5		98.3		100.0		97.4		100.0	
10	100.0	97.7		94.4		100.0		97.6		100.0	
11	99.0	98.9		95.5		98.3		97.1		100.0	
2006/7/30-31											
1(Outside)	71.5	82.1		83.0		77.6		69.1		91.1	
2(Ent.)	87.8	63.8		75.2		60.3		55.4		83.7	
3	92.0	68.4		79.1		72.5		69.0		71.9	
4	93.5	76.2		83.9		80.6		68.1		81.4	
5	87.2	81.0		84.7		79.3		70.3		90.3	
6	92.0	84.6		87.4		81.0		73.4		92.1	
7	92.5	88.8		89.4		81.5		76.9		91.2	
8	93.0	89.8		89.6		82.1		72.4		91.3	
9	94.6	89.6		88.9		84.9		84.4		93.7	
10	91.8	88.5		90.1		83.7		82.1		89.5	
11	95.1	92.5		93.0		89.6		92.0		93.1	
2006/8/1											
1(Outside)		83.4		79.0		65.5		71.0		83.0	
2(Ent.)		68.8		75.6		61.9		65.9		69.6	
3		73.2		80.3		62.4		81.5		79.0	
4		74.3		81.9		74.2		84.6		89.6	
5		79.9		88.8		75.2		84.3		58.2	
6		80.3		87.7		78.0		86.2		87.0	
7		89.3		89.3		79.9		86.8		87.5	
8		88.7		88.7		82.4		87.7		87.9	
9		89.1		90.1		85.0		89.1		89.9	
10		90.2		90.1		83.7		87.0		87.2	
11		93.9		93.5		84.6		88.2		91.4	
2006/8/2											
1(Outside)		76.5		78.6		62.6		61.2		90.7	
2(Ent.)		77.7		74.6		66.8		48.8		91.7	
3		76.9		77.3		69.9		57.7		85.8	
4		86.3		84.1		80.6		70.0		91.4	
5		84.9		84.6		78.2		70.1		90.6	
6		87.5		84.2		82.9		74.9		91.5	
7		88.9		85.6		84.7		75.6		92.0	
8		88.2		85.5		84.5		77.6		92.4	
9		91.8		89.8		86.9		80.4		93.9	
10		87.8		88.1		84.4		80.9		92.3	
11		90.2		98.8		88.9		93.1		100.0	
2006/8/3											
1(Outside)		82.6		62.4		69.3		71.0		83.4	
2(Ent.)		68.5		72.7		65.7		64.2		63.0	
3		80.2		68.0		75.6		65.1		69.7	
4		87.9		78.2		82.1		73.4		82.1	
5		86.4		82.3		80.4		82.1		83.4	
6		87.8		84.5		84.7		84.9		90.2	
7		88.1		83.4		85.2		79.4		91.3	
8		88.7		81.2		87.7		82.7		87.2	
9		90.3		85.8		88.3		80.2		89.9	
10		86.5		88.8		84.1		86.4		88.8	
11		90.6		93.4		89.3		91.4		90.7	
2006/8/4											
1(Outside)						48.4		71.9		81.4	
2(Ent.)						52.5		69.6		84.8	
3						59.7		92.8		78.2	
4						68.1		90.2		83.9	
5						73.3		88.3		82.4	
6						78.1		87.5		86.2	
7						89.1		85.9		79.9	
8						88.4		88.8		87.7	
9						89.5		90.1		88.9	
10						87.7		92.1		90.1	
11						82.5		94.5		92.4	
2006/8/5											
1(Outside)		82.5	74.0			58.9		64.2		72.0	
2(Ent.)		80.3	74.8			65.1		70.8		96.8	
3		89.6	70.3			73.1		75.9		95.2	
4		85.4	75.8			73.4		72.4		86.6	
5		84.4	78.4			73.7		72.2		86.2	

Table 2 (continued)

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
6		89.0	79.1			74.7		73.2		82.7	
7		89.1	82.5			77.0		75.8		76.4	
8		90.8	84.2			82.2		76.2		84.5	
9		86.2	83.5			87.6		83.4		87.7	
10		90.3	87.3			84.3		82.5		90.3	
11		88.0	83.4			90.3		88.9		94.2	
2006/11/10-11											
1(Outside)	46.7	83.6	60.1			44.9		58.2		59.5	
2(Ent.)	56.5	83.0	64.5			42.4		57.8		54.2	
3	83.2	82.9	79.7			82.6		83.6		78.0	
4	93.1	93.9	92.6			92.7		88.2		95.1	
5	98.3	97.7	98.5			97.0		97.8		97.2	
6	99.0	97.0	99.6			96.8		95.4		96.6	
7	97.8	96.7	99.0			94.5		95.3		94.2	
8	97.1	98.3	98.9			93.2		98.3		98.2	
9	97.1	98.0	98.5			99.2		98.6		98.8	
10	97.4	98.5	94.9			96.3		94.8		96.2	
11	95.9	95.8	96.5			96.2		96.5		96.8	
2006/11/12-13											
1(Outside)		73.5	48.0			38.0		62.5		63.0	76.6
2(Ent.)		73.1	50.8			48.9		44.8		56.5	72.7
3		70.5	67.0			63.0		66.5		75.8	73.0
4		88.0	88.1			83.7		78.5		96.3	87.3
5		98.2	97.5			95.5		97.8		98.2	98.6
6		99.9	98.5			97.0		93.2		96.7	99.5
7		98.7	98.2			96.5		95.8		98.8	99.9
8		98.2	98.3			93.8		98.0		100.0	100.0
9		99.8	98.4			94.0		98.5		100.0	100.0
10		97.7	96.7			94.0		97.5		100.0	99.2
11		98.0	97.0			95.8		96.5		99.2	100.0
2007/1/19-20	18:30	7:30	10:00		12:00		14:00		16:00	18:30	
1(Outside)	72.1	75.8	71.3		42.4		68.7		70.5	70.7	
2(Ent.)	53.7	73.6	66.5		56.3		55.3		59.4	53.4	
3	56.0	57.1	59.2		54.3		61.8		65.2	66.4	
4	60.0	54.5	58.4		56.8		59.1		69.3	53.6	
5	62.8	55.0	55.7		55.9		60.8		66.9	54.5	
6	61.3	56.5	56.5		59.3		61.4		71.3	61.3	
7	64.5	60.3	58.9		63.9		65.1		72.5	65.3	
8	82.5	90.6	92.3		83.0		100.0		89.4	89.6	
9	100.0	100.0	100.0		100.0		87.6		100.0	100.0	
10	80.6	75.5	74.7		80.7		78.2		83.8	87.7	
11	81.0	77.1	80.3		82.2		82.8		83.7	86.6	
2007/1/21-22											
1(Outside)		79.5	71.5		54.1		75.4		67.4	75.0	
2(Ent.)		81.9	69.9		63.3		64.4		67.9	66.1	
3		58.7	53.3		63.7		67.4		72.4	65.0	
4		57.5	49.9		64.9		58.6		74.9	61.7	
5		57.5	50.1		65.4		62.1		75.2	65.5	
6		57.0	53.6		67.2		63.0		73.9	67.5	
7		59.9	56.5		68.1		68.5		74.5	70.5	
8		89.5	100.0		84.4		87.0		86.2	88.2	
9		100.0	82.0		100.0		100.0		100.0	100.0	
10		76.2	74.7		80.9		79.4		85.8	85.2	
11		77.8	80.2		82.5		84.1		88.3	88.3	
2007/4/14											
1(Outside)		59.2	58.5		59.2		34.5		53.5	59.5	
2(Ent.)		68.5	77.4		64.8		46.9		93.5	76.1	
3		90.8	90.2		90.4		98.8		92.1	89.5	
4		93.3	86.6		99.1		89.1		89.6	94.5	
5		99.0	99.2		100.0		99.3		94.2	99.2	
6		97.2	94.3		100.0		93.0		93.5	96.2	
7		98.9	93.7		91.8		95.9		95.9	91.6	
8		99.5	99.7		95.8		99.8		99.7	96.1	
9		100.0	100.0		93.1		100.0		100.0	100.0	
10		96.0	95.0		87.8		96.5		97.8	97.9	
11		97.1	97.0		86.6		99.5		99.5	100.0	
2007/4/15-16											
1(Outside)		56.9	35.2		35.8		42.7		47.5	67.3	73.2
2(Ent.)		78.4	88.2		55.8		81.3		65.6	90.2	79.5
3		91.2	90.0		79.2		85.3		76.4	86.6	95.4
4		95.8	91.8		86.2		92.0		87.8	88.2	97.2
5		99.2	99.3		92.0		98.6		95.9	93.1	98.0
6		98.1	97.5		89.7		95.1		95.1	94.9	95.4
7		95.9	93.2		95.4		94.4		97.6	94.9	99.7
8		99.6	95.9		95.6		99.1		99.4	97.2	98.9
9		100.0	100.0		100.0		100.0		100.0	100.0	100.0
10		98.1	99.1		96.5		100.0		95.7	93.8	99.5
11		97.7	98.1		94.2		100.0		96.9	95.9	99.7

Table 3 pCO₂ in Gossi Cave.

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
2006/6/23-24											
1(Outside)	400	440		420		440		450		470	
2(Ent.)	1340	1170		1340		1380		1530		1350	
3	1510	1480		1690		1640		1820		1670	
4	1460	1450		1670		1680		1710		1610	
5	1440	1430		1610		1660		1800		1530	
6	1460	1400		1520		1540		1650		1530	
7	1430	1410		1490		1480		1550		1450	
8	1630	1500		1760		1780		1850		1480	
9	3030	2700		2890		3020		3120		3190	
10	1520	1500		1520		1510		1650		1520	
11	1340	1320		1330		1510		1360		1320	
2006/7/30-31											
1(Outside)	1270	430		480		490		480		480	
2(Ent.)	1840	1760		1880		1960		1670		1730	
3	2170	2100		2230		2340		2490		2060	
4	2180	2170		2420		2270		2220		2300	
5	2180	2130		2660		2390		2430		2120	
6	2120	1980		2220		2150		2340		2000	
7	2090	1980		2280		2100		2060		1930	
8	2290	2180		2540		2510		2390		2240	
9	4500	3890		3930		3250		3690		3480	
10	2120	1980		2010		1940		1980		1910	
11	2110	2030		2160		1910		1880		1940	
2006/8/1											
1(Outside)		430		490		450		440		440	
2(Ent.)		1990		1930		2290		2190		1840	
3		2200		2010		2500		2650		2270	
4		2360		2340		2500		2570		2280	
5		2110		2670		2780		2930		2060	
6		2060		2140		2360		2340		2010	
7		2090		2330		2040		2100		1880	
8		1990		2570		2270		2530		1920	
9		3690		3840		2980		3490		3350	
10		1910		2000		1930		1900		1890	
11		1920		1910		1930		1840		1920	
2006/8/2											
1(Outside)		440		430		440		450		490	
2(Ent.)		1560		2000		2020		1960		1840	
3		1940		2240		2420		2540		2220	
4		1970		2210		2360		2570		2220	
5		1990		2600		2550		2750		2040	
6		1890		2140		2150		2440		1990	
7		1880		2080		2060		2170		1950	
8		1970		2510		2590		2550		2190	
9		3900		3760		3460		3200		3450	
10		1900		1870		1890		1900		2050	
11		1920		1880		1890		1880		1930	
2006/8/3											
1(Outside)		530		450		470		440		480	
2(Ent.)		1480		1940		2090		2120		2150	
3		1950		2280		2340		2360		2770	
4		2000		2350		2050		2210		2240	
5		2070		2730		2520		2650		2350	
6		2140		2430		2310		2040		2070	
7		1940		2270		2110		2230		2050	
8		2270		2690		2790		2530		2630	
9		3840		3590		3820		3490		3900	
10		1950		1890		2020		1980		2010	
11		2000		1930		2120		1890		1990	
2006/8/4											
1(Outside)						430		450		470	
2(Ent.)						2090		2320		2310	
3						2770		2760		2670	
4						2560		2650		2530	
5						2650		2730		2360	
6						2390		2460		2430	
7						2190		2350		2230	
8						2680		2470		2520	
9						3850		3990		4060	
10						2230		2180		1980	
11						1920		2050		2030	
2006/8/5											
1(Outside)		550	470			450		480		460	
2(Ent.)		1700	1870			2120		2410		2600	
3		2230	2300			2670		2820		2730	
4		2170	2270			2570		2590		2620	
5		2280	2530			2950		3090		2590	

Table 3 (continued)

	17:00	8:30	10:30	11:00	12:00	13:00	14:00	15:30	16:30	18:30	7:30
6		2000	2250			2510		2390		2330	
7		1980	2090			2210		2170		2260	
8		2350	2630			2490		2560		2490	
9		3280	3430			3780		3610		3600	
10		1970	1990			2030		2010		1920	
11		1960	1970			1860		1950		1920	
2006/11/10-11											
1(Outside)	510	510	520			510		520		510	500
2(Ent.)	520	530	560			720		660		540	530
3	820	550	740			770		840		720	550
4	750	570	720			880		1130		810	570
5	790	540	810			850		1020		880	780
6	740	570	720			940		1240		920	620
7	780	650	740			950		1140		980	640
8	800	880	670			970		1180		1200	840
9	790	650	700			780		980		1020	590
10	940	580	740			1040		1140		1010	560
11	800	580	750			1100		1100		1190	520
2006/11/12-13											
1(Outside)		510	560			540		510		530	
2(Ent.)		540	570			630		570		840	
3		560	640			800		680		640	
4		570	780			950		690		710	
5		750	920			1010		860		900	
6		590	830			1040		860		840	
7		650	880			1100		960		840	
8		1150	1000			1200		1000		1180	
9		800	740			800		800		950	
10		630	790			1080		1140		940	
11		610	910			1080		1080		1170	
2007/1/19-20											
1(Outside)	560	540	560		540		540		540	540	580
2(Ent.)	570	560	540		540		610		540	570	580
3	640	590	570		680		700		700	580	590
4	570	570	610		720		1000		800	620	590
5	720	570	620		770		830		780	650	650
6	690	550	590		810		850		820	670	570
7	710	530	600		790		790		840	680	580
8	640	600	600		750		840		990	980	580
9	670	560	600		640		730		910	930	600
10	630	530	620		780		750		890	980	550
11	630	600	600		780		750		980	890	590
2007/1/21-22											
1(Outside)		520	530		540		540		550	530	
2(Ent.)		530	540		560		570		540	570	
3		560	630		770		770		740	570	
4		590	600		900		730		860	620	
5		570	590		920		810		920	660	
6		560	570		900		870		890	620	
7		560	570		1100		840		890	670	
8		540	530		1040		930		1040	950	
9		540	600		690		820		960	1030	
10		530	520		900		830		940	850	
11		530	510		1020		870		960	930	
2007/4/14		8:30	10:00		12:00		14:00		16:00	18:00	7:30
1(Outside)		475	430		400		450		445	428	450
2(Ent.)		419	240		470		520		840	730	420
3		437	480		830		1330		1935	818	450
4		253	406		863		1210		733	636	510
5		290	310		780		1380		1590	1150	320
6		288	388		750		930		1218	1050	421
7		233	433		670		1005		1187	1063	347
8		310	280		740		1110		1015	1066	215
9		394	350		520		740		700	752	324
10		185	288		611		820		630	585	338
11		380	383		710		712		610	630	401
2007/4/15-16		7:30	10:00		12:00		14:00		16:00		
1(Outside)		375	430		480		478		394	433	
2(Ent.)		448	396		548		648		540	387	
3		455	465		905		1720		720	430	
4		407	466		915		810		970	455	
5		305	493		990		1305		1150	780	
6		287	474		830		966		1070	680	
7		465	451		779		957		1070	685	
8		325	420		790		850		1051	1055	
9		217	510		610		654		605	800	
10		249	413		808		726		990	1033	
11		342	372		576		466		1060	967	

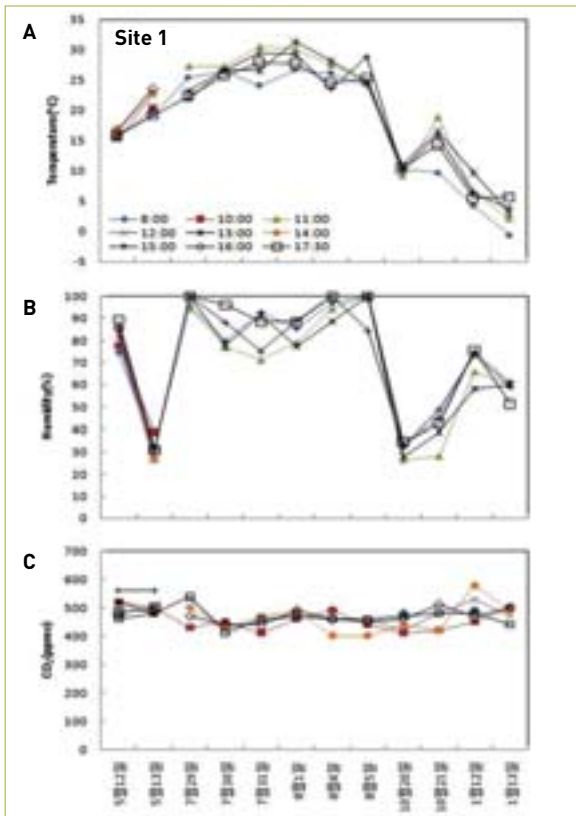


Fig 9 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 1 in Gosu Cave

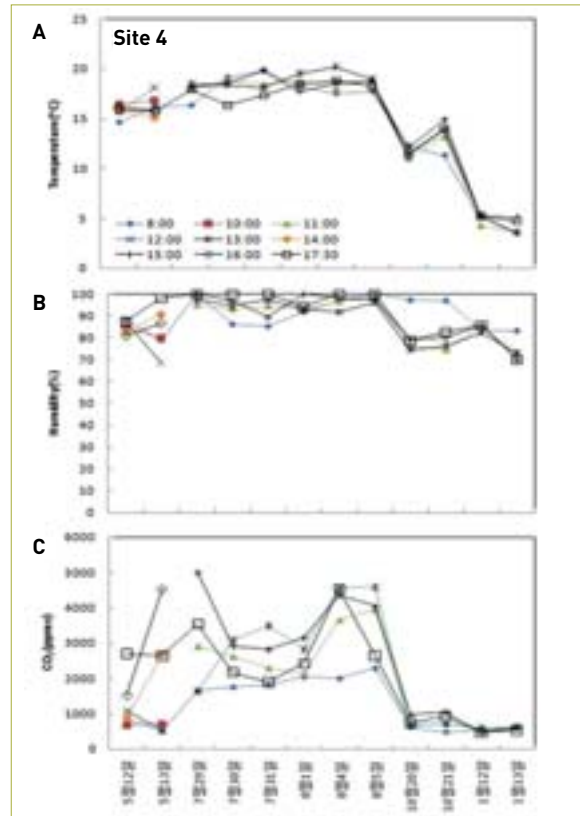


Fig 10 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 4 in Gosu Cave

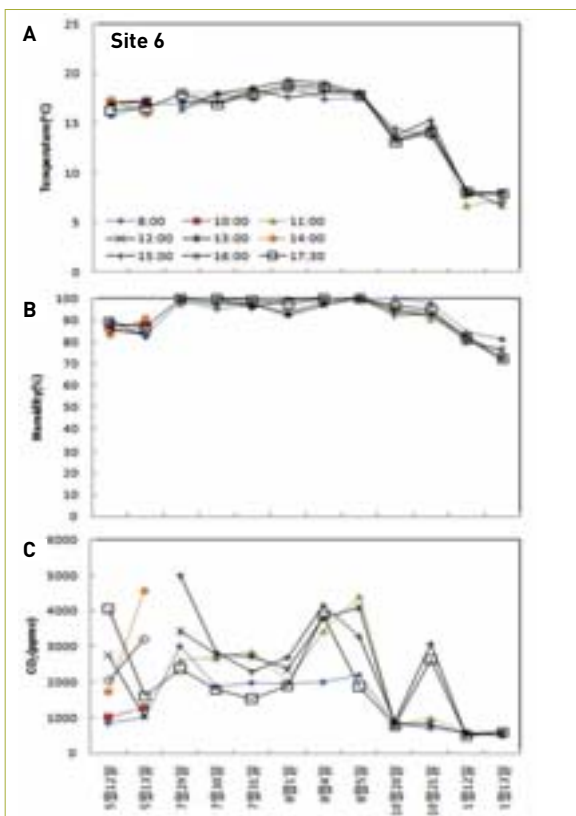


Fig 11 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 6 in Gosu Cave

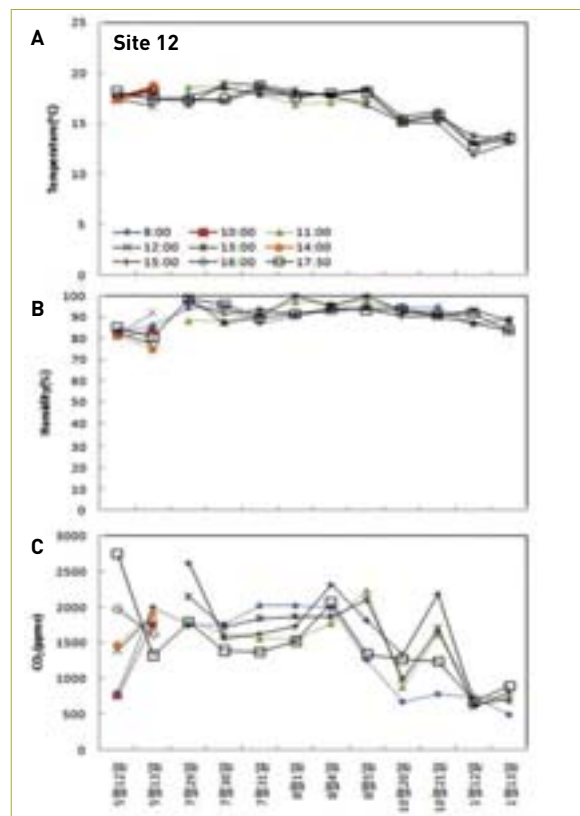


Fig 12 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 12 in Gosu Cave

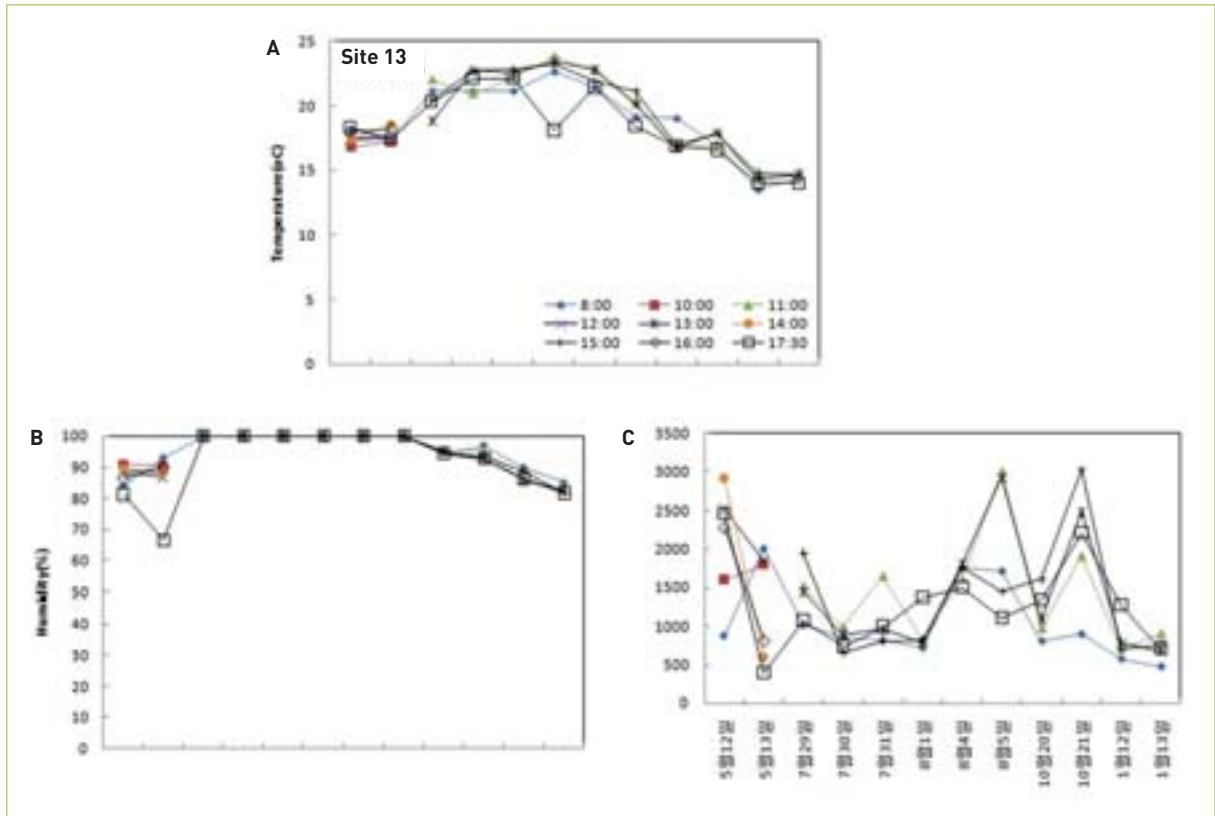


Fig 13 Variations of temperature (A), Humidity (B) and partial pressure of CO2 (C) at site 13 in Gosu Cave

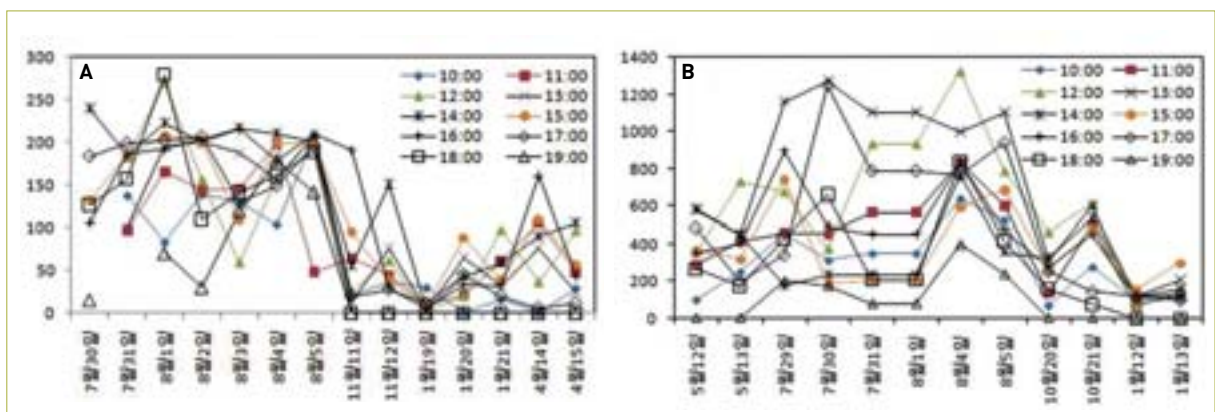


Fig 14 Variations of visitors in Gossi (A) and Gosu (B) Caves

Table 4 Temperature in Gosu Cave

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2007/5/11-12											
1(Outside)	23,1	15,7	15,4		15,3		16,5		16,7	15,8	
2(Ent.)	19,4	15,8	15,8		15,6		16,3		16,8	16	
3	16,8	14,2	15,2		15,1		16,1		16,9	16,1	
4	16,2	14,6	16,4		15,7		15,7		16,1	15,9	
5	16,7	15,9	16,2		16,7		15,6		15,8	16,4	
6	15,4	15,7	17,1		17		17,4		17	16,3	
7	18,8	17,2	17,4		17,9		17,8		17,7	17	
8	18,9	17,4	18,1		18,2		18		17,6	17,6	
9	18,3	18,5	18,8		19,2		18,5		18,8	18,5	
10	18,6	17	17		17,5		17,5		18	18,2	
11	18,4	17,3	17,5		17,8		17,8		18,2	18,2	
12	18,4	17,9	17,5		17,5		17,5		17,7	18,1	
13	19,2	18,1	16,8		17,4		17,4		18	18,3	
2007/5/13											
1(Outside)		19,4	20,3		22,5		22,8		23,6	19,2	
2(Ent.)		15,7	18,8		21,8		17,9		16,5	16,7	
3		14,5	16,5		18,6		15,4		14,9	14,9	
4		16,2	16,8		18,1		15,1		15,9	15,7	
5		16,1	16,6		16,7		16		16,6	15,1	
6		16,8	17,3		17,1		15,9		17,1	16,5	
7		17,3	18		18,3		17,5		17,8	17,5	
8		17,6	18,4		18,8		18,8		18,6	17,9	
9		18	19,7		20		19,2		19,6	18,2	
10		18,1	16,9		15,6		18,5		18,7	16,9	
11		17,3	17,7		16		18,2		17,5	15,7	
12		17,5	18,2		16,7		18,7		18,4	17,4	
13		17,3	17,2		17,5		18,5		18,2	17,4	
2007/7/29											
1(Outside)		25,4		27,3		23,1		21,8		22,3	
2(Ent.)		24,2		19,3		21,6		20,8		18,8	
3		18,5		17,8		18,7		18,1		17,7	
4		16,3		18,1		18,5		18,1		17,9	
5		17,5		18,2		17,3		17,3		17,9	
6		17		18,2		16,4		17,2		17,9	
7		17,9		18,7		16,9		17,5		17,3	
8		17,9		19,2		17,6		17,8		17,4	
9		18,1		19,3		17,9		18,2		17,5	
10		17,7		18,8		17,2		17,4		18,8	
11		19,2		19,7		18,8		18,3		17,8	
11,1		19,2		19,8		18,8		18,4		17,5	
11,2								19,3		18,8	
12		17,5		18,6		16,9		17,8		17,3	
13		21,1		22		18,8		20,4		20,3	
2007/7/30											
1(Outside)		26,6		27,3		26,6		26,6		25,7	
2(Ent.)		25,3		24,2		19,8		19,6		20,3	
3		20,9		18,8		18,1		18		16,7	
4		19,1		18,8		18,4		18,6		16,3	
5		17,8		17,6		17,7		17,8		16,7	
6		17,8		18		18		17,1		16,9	
7		18		18,6		18,4		18,4		17,6	
8		18,7		18,9		18,7		19,2		17,8	
9		18,1		18,8		18,8		19,2		18	
10		18,6		18,1		17,7		17,4		17	
11		18,1		19,3		18,8		18,4		18,2	
11,1		17,5		19		18,8		18,4		18,2	
11,2		18,5		19,3		19,2		17,4		18,9	
12		17,2		18,6		19		18,5		17,4	
13		21,1		20,9		22,7		22,7		22,1	
2007/7/31											
1(Outside)		24,1		30,5		26,6		29,4		27,9	
2(Ent.)		23,8		20,7		19,3		24,7		20,7	
3		20,2		18,3		18		20,5		17,3	
4		19,8		18,4		18,1		19,8		17,3	
5		18,2		17,7		18,4		18,2		17,4	
6		17,4		17,9		18,5		18,4		17,9	
7		18,2		18,2		18,9		19,6		18,3	
8		18,6		19,1		19,2		20,1		19	
9		18,7		19,2		19,2		19,6		18,8	
10		16,8		18,5		17,7		17,7		17,1	
11		18,3		19		18,7		19,1		18,7	
11,1		17,9		19,1		18,4		18,9		18,3	
11,2		18,8		19,4		19		19,5		19,2	
12		18,3		17,9		18,8		17,9		18,7	
13		21,1		22,2		22,5		22,8		22,1	
2007/8/1-2											
1(Outside)		26,7		30,1		31,3		29,2		27,7	27,4

Table 4 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2(Ent.)		26.2		22.8		24.8		19.7		21.9	25.9
3		19.8		18.3		18.8		17.3		18	17.4
4		18.3		18.8		19.5		17.7		18.4	17.4
5		18.7		18.7		19.1		17.7		18.6	17.9
6		18.6		18.4		19.3		17.6		18.8	17.4
7		18.6		19.2		19.3		17.9		19	17.4
8		18.9		19.7		19.8		18.3		19.2	17.3
9		18.8		19.6		19.3		18.5		19.2	17.7
10		17.1		17.4		18.1		17.8		16.9	17.6
11		18.3		18.8		19.5		18.7		17.8	16.7
11,1		18.4		18.3		19.4		18.8		17.5	17.4
11,2		18.9		19.1		19.9		19		19.6	16.7
12		18		16.9		18.3		17.8		17.6	17.1
13		22.6		23.8		23.4		23.2		18.1	20.3
2007/8/3-4											
1(Outside)	26.6	26.1		27.5		28.2		23.5		24.5	
2(Ent.)	23.9	24.8		21.9		22.5		19.8		21.3	
3	18.9	16.8		17.6		19.2		18.2		18.9	
4	18.2	17.5		18.1		20.2		18.6		18.8	
5	18.2	17.4		18.3		19.5		18.3		18.8	
6	18.3	17.4		18.4		19		18.1		18.6	
7	18.4	17.7		18.8		18.9		18.5		18.9	
8	19.1	17.8		19.6		19.5		18.8		19.2	
9	19.4	18.1		19.9		19.8		18.9		19.2	
10	17.8	17.4		17.7		18.3		18.2		17.7	
11	19.1	18.3		19.6		20		19.3		18.7	
11,1	18.7	18		19.4		19.5		19.1		18.5	
11,2	19.4	18.6		20.2		20.3		19.8		19.2	
12	18.2	17.7		17.1		17.8		17.9		18	
13	22.3	21.4		22.7		22.8		21.9		21.4	
2007/8/5-6											
1(Outside)		24.2		24.5		24.7		28.8		25.3	24.8
2(Ent.)		22.8		22		21.9		21.3		22.2	23.2
3		17.6		19		19.3		19.3		17.2	16.9
4		17.7		18.8		19		18.8		18.2	17.2
5		17.3		19.2		18.3		17.5		17.3	17.5
6		17.6		18		18.1		18.1		17.8	17.2
7		18.6		18.8		18.3		18.8		18.4	17.4
8		19.2		18.7		18.3		19.6		18.4	17.6
9		19.5		19.8		18.8		19.8		18.8	18
10		17.9		17.2		17.1		17.7		17.4	17.7
11		18.8		18.4		18.3		18.9		19.3	18.3
11,1		18.6		18.8		18		18.4		18.2	17.9
11,2		19.4		19.7		18.7		19.4		18.8	18.7
12		18.3		17.5		16.9		18.4		18.1	17.9
13		19.1		20.4		20.1		21.1		18.4	21.1
2007/10/19-20											
1(Outside)	12.3	10.3		9.3		10.9		10.1		10.4	
2(Ent.)	11.7	9.6		10.2		11.3		10.4		10.4	
3	12.2	8.5		9.5		11.2		10.5		10.5	
4	13.5	12.3		11		11.4		12		11.4	
5	14.4	13.8		12.5		12.4		12.6		12.2	
6	14.8	14.4		13.5		13.3		13.8		13.1	
7	15.8	15.6		15.3		16		16.9		15.5	
8	16.5	15.9		15.7		16.6		17.1		16.4	
9	16.7	17		16.2		17.3		17.5		16.7	
10	15.3	15.4		15.4		15.5		15		15.1	
11	16.8	17.1		16.2		16.3		16.4		16.6	
11,1	16.1	17.3		15.7		15.7		15.9		16.1	
11,2	17	17		16.7		16.6		16.6		16.8	
12	15.4	15.1		15.2		15.2		15.7		15.2	
13	17	19		16.7		16.7		17		16.9	
2007/10/21-22											
1(Outside)		9.7		18.9		16.4		15.9		14.3	12
2(Ent.)		7.6		16.3		15.2		15.2		14.2	11.7
3		7.1		12.9		14.2		14.7		14	11.5
4		11.3		13.2		13.8		14.9		14	12
5		13		13.6		13.9		14.4		13.2	12.8
6		13.6		14.7		14.4		15.3		14.1	13.5
7		15.3		17.8		16.7		17.1		16.7	14.5
8		16.2		18.2		19.1		18.6		18.2	15.5
9		16.7		18		18.7		18.8		17.9	16.4
10		15		15.7		15.6		16.3		15.6	16.1
11		16.6		17.1		17.5		16.9		16.1	17
11,1		16.2		17.4		17.4		16.5		16.4	16.4
11,2		16.8		17.5		17.6		17.1		16.3	16.5
12		15.1		15.6		15.8		16.2		15.8	15.4
13		16.9		17.1		17.9		17.8		16.6	16.7

Table 4 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2008/1/11-12											
1(Outside)	2.8	4.3		6.6		9.7		6.4		5.5	
2(Ent.)	2.3	4.5		4.7		6.1		5.4		3.9	
3	2.4	3.6		3.4		3.8		3.3		2.6	
4	4.5	5.1		4.3		5.3		5.3		5.2	
5	6.3	7.2		6.5		6.5		6.7		7	
6	7.6	8.1		6.7		8.2		7.8		8.1	
7	10.5	15.8		13.8		13.4		14		14.3	
8	13	15.1		15.6		14.3		15.1		15	
9	13.5	15.6		15.5		15.1		15.3		15.6	
10	11.7	9.9		11.7		12.5		11.8		11.2	
11	15.3	15.7		14.3		13.8		13.8		12.4	
11.1	15.3	14.1		13.1		12.6		13.8		13.5	
11.2	15.5	14		14.5		14.1		14.4		13.7	
12	12.3	11.9		13.1		13.8		13		12.8	
13	14.1	13.5		14.6		14.3		14.8		14	
2008/1/13-14											
1(Outside)		-0.6		2.2		3		3.9		5.6	-0.8
2(Ent.)		0.3		3.8		3.5		5.8		5.7	1.2
3		0.3		1.4		1.6		3.1		2.7	1
4		3.5		3.7		3.6		5.1		4.7	2
5		6.3		5.4		5.1		6.3		6.9	5.2
6		8		7.3		6.7		7.9		7.9	7.4
7		13.5		11		11.3		12.7		11.9	12
8		15.4		13.9		14.5		14.8		13.5	14.5
9		15.5		15.1		15.1		15.3		13.5	15.1
10		12.6		15.1		12		14.4		11.9	13.2
11		13.8		14.2		14		14		14.4	15.1
11.1		12.9		13.4		13		14.4		13.6	13.7
11.2		14.4		14.9		14.4		14.4		15	14.1
12		13.1		13.4		13.5		14		13.5	13.3
13		14.3		14.5		14.7		14.7		14	14.1

2. 고수동굴의 환경

(1) 온도

온도의 경우, 외부는 계절적인 영향에 의해 2007년 5월의 온도는 15.3~23.6℃, 7~8월은 15.9~31.3℃, 10월은 9.3~18.9℃로 나타나며 2008년 1월은 -0.8~9.7℃의 범위를 나타내고 있다(Fig. 9). 동굴 입구는 동굴 내부와 외부의 환경변화에 영향을 받아 2007년 5월은 15.6~21.8℃, 7~8월은 18.8~26.2℃, 10월은 7.6~16.3℃, 2008년 1월은 0.3~6.1℃의 범위를 보여 주고 있다(Table 4). 동굴 내부의 경우는 동굴의 형태와 입구의 크기, 방향, 그리고 외부의 계절 변화에 의해 2007년 5월은 14.9~20℃, 7~8월은 16.3~20.5℃, 10월은 7.1~19.1℃, 2008년 1월은 0.3~15.8℃의 범위를 나타내고 있다(Figs. 10, 11, 12; Table 4). 출구의 2007년 5월 온도는 16.8~19.2℃, 7~8월은 18.1~23.8℃, 10월은 16.6~19.0℃로 나타나며 2008년 1월은 13.5~14.8℃의 범위를 나타내고 있다(Fig. 13; Table 4).

(2) 습도

습도의 경우도 외부의 환경 변화, 즉 건기와 우기의

강우량의 차이에 따라 다양한 범위를 나타내고 있다. 외부의 습도가 높은 2007년 7~8월에는 71.2~100%, 봄, 가을의 경우 26.5~89.3%, 겨울철인 2008년 1월에는 51.2~79.0%로 상대적으로 낮은 값을 보인다(Fig. 9). 동굴입구의 경우, 외부와 동굴내부의 영향을 받는 구간으로 2007년 5월과 7~8월, 10월, 그리고 2008년 1월에 각각 33.8~85.6%, 77.4~100%, 24.5~66.8%, 50.3~83.3%의 범위를 나타내며(Table 5), 동굴내부의 경우는 2007년 5월에 60.9~98.4%, 7~8월의 경우 81.8~100%, 10월은 44.9~100%, 2008년 1월은 55.9~100%로서 44.9~100%의 범위를 나타내고 있다(Figs. 10, 11, 12; Table 5). 출구의 경우는 2007년 5월에 64.2~93%, 7~8월의 경우 100%, 10월은 92.5~97.1%, 2008년 1월은 81.6~89.8%로서 64.2~100%의 범위를 나타내고 있다(Fig. 13; Table 5).

(3) 이산화탄소 분압

동굴 외부의 이산화탄소 분압은 2007년 5월에 460~560ppmv, 7~8월에 400~540ppmv, 10월에 410~510ppmv, 2008년 1월에 440~580ppmv로서

Table 5 Humidity in Gosu Cave

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2007/5/11-12											
1(Outside)	43.5	74.5	77.9		82.7		85.4		85.8	89.3	
2(Ent.)	71.9	71.5	82.4		85.6		85.5		83.9	83.8	
3	89.2	83.5	88.6		83.8		83.5		76.8	78.3	
4	86.8	88.5	85		87.6		82.7		81.1	87.4	
5	93.8	88.5	87.2		86.6		90.8		90.5	87.5	
6	82.9	89.5	87.1		85.1		83.4		85.6	89	
7	84.8	91.3	91.5		90.3		90.9		91.7	92.9	
8	82.8	92.2	89.7		89.4		89.4		90.9	92.3	
9	86.2	88.5	88.2		86.3		89.2		88.6	90.3	
10	78.4	86	86.6		85.8		84.2		82.4	79.5	
11	77	90.1	88.4		86.9		86.9		79.8	77.8	
12	72.4	83.4	81		81.8		81.4		82.8	85.1	
13	64.2	83.9	90.9		88.2		89.4		86.5	81.2	
2007/5/13											
1(Outside)		31.6	38.7		27.3		26.5		31.6	30.9	
2(Ent.)		52.5	48.8		33.8		44.5		66.9	72.5	
3		74.6	72.2		60.9		85.1		89.2	93.9	
4		78.9	79.9		68.3		90.9		86.7	98.4	
5		85.6	86		83.9		88.7		88.8	95.6	
6		82.4	88.2		84.4		90.7		83.7	86.8	
7		90.1	86.3		87.5		91.8		91.9	91.7	
8		89.3	87.2		86.7		85		83.3	88.1	
9		87.9	83.7		84.5		86.8		85.9	90.1	
10		79.6	86.2		94.4		76.7		82.6	91.6	
11		80.5	79.2		87.2		82.1		87.6	86.6	
12		86.1	83.6		92.3		74.6		77.4	80.8	
13		93	90.4		86.7		88.2		90	66.5	
2007/7/29											
1(Outside)		95.5		94.7		100		100		100	
2(Ent.)		100		100		100		100		100	
3		87.6		98.1		100		96.3		100	
4		100		95.1		97.3		99.8		100	
5		97.5		98.9		100		100		100	
6		99.1		97.5		100		100		100	
7		100		99		100		100		100	
8		100		97.3		100		100		100	
9		100		99.9		100		100		100	
10		100		97.5		100		100		100	
11		100		100		100		100		100	
11,1		100		100		100		100		100	
11,2								100		100	
12		94.3		88.6		99.1		96.8		98.6	
13		100		100		100		100		100	
2007/7/30											
1(Outside)		79.7		76.9		77.7		88.1		96.2	
2(Ent.)		81.9		85.3		94		96.5		92.2	
3		86.2		93.7		96.7		97.6		100	
4		86.2		93.3		94.8		96.9		100	
5		98.2		99.9		100		100		100	
6		95.3		97.9		98		100		100	
7		100		100		100		100		100	
8		97.4		98.3		100		98.7		100	
9		100		100		100		100		100	
10		100		100		100		100		100	
11		100		100		100		100		100	
11,1		100		100		100		100		100	
11,2		100		100		100		100		100	
12		96		88.2		87.4		91.7		96	
13		100		100		100		100		100	
2007/7/31											
1(Outside)		8:30		11:00		13:00		15:00		17:30	
2(Ent.)		92.6		71.2		91.4		75		88.6	
3		87.2		89.8		98.3		77.4		92.9	
4		81.8		95.9		97.5		86.1		100	
5		85.2		94.6		97.5		89.4		100	
6		91.8		100		98.2		100		100	
7		96.8		98.3		97.4		95.5		99.1	
8		98.5		99.2		97.7		95.9		100	
9		97.3		98.9		97.5		93.4		98.2	
10		100		100		100		100		100	
11		100		100		100		100		100	
11,1		100		100		100		100		100	
11,2		100		100		100		100		100	
12		87.4		92.5		90.5		93.9		89.8	
13		100		100		100		100		100	
2007/8/1-2											
1(Outside)		85.5		79		77.4		89		88.5	99.4

Table 5 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2(Ent.)		81.4		91.4		84		95		92.2	98.2
3		85.8		95.5		95.1		100		93.5	100
4		91.8		93.5		93.1		100		94.5	100
5		92.6		95.8		95.1		100		95.8	100
6		92.8		94.6		92.4		99.7		97.4	100
7		92.8		95.9		95.5		100		98.7	100
8		97.7		94.2		95.9		100		99.5	100
9		100		100		100		100		100	100
10		100		100		91.3		100		100	100
11		100		100		100		100		100	100
11,1		100		100		100		100		100	100
11,2		100		100		100		100		100	100
12		90.6		97.5		100		91.7		91.5	100
13		100		100		100		100		100	100
2007/8/3-4											
1(Outside)	100	97.1		94.3		88.5		100		100	
2(Ent.)	86.6	95.7		92.5		95.5		100		100	
3	100	100		100		100		100		97.3	
4	100	97.1		96.7		92		98.4		100	
5	100	100		100		97.5		100		100	
6	100	98.7		97.8		97.1		100		100	
7	100	100		99.7		100		100		100	
8	100	100		96		98.8		100		100	
9	100	100		99.5		99.6		100		100	
10	100	100		100		100		100		100	
11	100	100		100		100		100		100	
11,1	100	100		100		100		100		100	
11,2	100	100		100		100		100		100	
12	93.3	94.6		96.7		95.4		93.1		93.9	
13	100	100		100		100		100		100	
2007/8/5-6											
1(Outside)		100		100		100		84.5		100	99.5
2(Ent.)		100		98.2		98.5		91.4		92.3	95.2
3		100		100		94.5		94.6		100	100
4		100		98.6		96.3		97.2		100	100
5		100		100		100		100		100	100
6		100		100		100		100		100	100
7		100		100		100		100		100	100
8		98		100		100		100		100	100
9		100		100		100		100		100	100
10		100		100		100		100		100	100
11		100		100		100		100		100	100
11,1		100		100		100		100		100	100
11,2		100		100		100		100		100	100
12		95.4		97.9		100		94.3		93.4	93.3
13		100		100		100		100		100	100
2007/10/19-20											
1(Outside)	52	33		26.5		27.8		32.3		34.7	
2(Ent.)	54.4	32.5		24.5		28.7		33.4		38.4	
3	63.1	50.7		38.3		36.6		39.1		43.5	
4	93.4	97.3		76.3		74.5		79.2		78.7	
5	97.9	100		96.2		93.6		92.7		93	
6	96.5	100		95.7		94.5		92.1		96.6	
7	96.4	100		96.8		95.7		91.5		100	
8	94.8	100		94		90.7		90.9		97	
9	94.8	100		96		91.7		92.3		96.4	
10	95.1	100		91.9		90.1		93.2		93.7	
11	96.5	95.4		96.7		97		96.9		96.8	
11,1	96.3	92		96.2		96.7		96.3		96	
11,2	93.7	93.5		96.7		96.8		96.6		96.5	
12	92.1	95.1		93.2		93.1		90.5		93.6	
13	95.7	94.8		95.3		95.3		94.7		94.3	
2007/10/21-22											
1(Outside)		44.8		28.2		39		48.7		42.3	64.5
2(Ent.)		57.7		38.1		43.9		50.6		49.5	66.8
3		66.4		44.9		48.3		54.7		53.2	68.1
4		97.1		74.6		76.4		80.2		82.6	95.7
5		97.5		92.3		91.5		94		94.7	98.1
6		97.7		90.5		92.6		92.9		94.9	95.3
7		100		100		93.9		92.5		98.9	97.4
8		100		100		80.9		80.4		81.1	99.1
9		96.8		93.3		89.1		89.2		91.2	97
10		95.1		93.7		92.3		86.9		88.7	98.1
11		97.4		98.4		93.7		96.5		97.1	97.4
11,1		97.4		98.9		93.8		95.6		96.8	98.3
11,2		99.2		98.5		93.7		96.4		97.3	96.9
12		94.7		92.3		90.8		90.6		91.2	97.4
13		96.9		95.4		92.5		93.5		92.8	97.1

Table 5 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2008/1/11-12											
1(Outside)		74.7		65.8		58.1		73.5		75.5	
2(Ent.)		72.8		78.8		74.1		77.1		83.3	
3		80.4		84.5		83.5		97		90.7	
4		83.8		85.6		82.5		85.5		85.7	
5		78.8		84.9		79.6		81.4		82.2	
6		84.4		83.3		79.9		82.1		81.6	
7		100		100		100		100		100	
8		100		100		100		100		100	
9		100		100		100		100		100	
10		84.8		77.5		75.4		77.4		79.5	
11		87		91.8		93.3		91		92.4	
11,1		86.1		83.2		88.7		91		94.5	
11,2		92.8		92.2		92.8		96.3		94.5	
12		87.3		87.1		93.3		87.3		91.8	
13		89.8		85.4		86.1		88.5		86.3	
2008/1/13-14											
1(Outside)		61		59.7		60		59.2		51.2	72.6
2(Ent.)		60.4		50.8		56.1		51.5		50.3	64.7
3		66.3		66.2		64.6		62.4		55.9	75.6
4		83.2		73.3		72.8		70.1		70.2	81.3
5		78.1		68.5		72.3		72.3		67.3	72.2
6		81.2		73.7		76.2		71.9		72	78.7
7		97.5		97.4		100		100		97.3	100
8		100		100		100		100		100	100
9		96.3		100		100		100		100	100
10		75.9		100		71.6		70.7		73.2	67.2
11		92		88.4		98.1		83.1		87.7	85.2
11,1		89.2		82.1		82.7		78.9		84.1	82.6
11,2		91.8		87.2		90.1		86.9		86.7	86.2
12		89.2		88.9		88.4		83.9		84	89.5
13		85		83		82.5		81.6		81.6	84.1

400~580ppmv의 범위를 나타내고 있으며(Fig. 9; Table 6), 동굴입구의 경우는 2007년 5월에 480~800ppmv, 7~8월에 500~600ppmv, 10월에 410~550ppmv, 2008년 1월에 470~670ppmv로서 470~800ppmv의 범위를 보인다(Table 6). 동굴 내부의 이산화탄소 분압은 2007년 5월에 480~6,460ppmv, 7~8월에 550~5,000ppmv, 10월에 420~6,010ppmv, 2008년 1월에 420~1,950ppmv로서 420~6,010ppmv의 범위를 보인다(Figs. 10, 11, 12; Table 6). 출구의 경우 2007년 5월에 400~2,920ppmv, 7~8월에 660~3,010ppmv, 10월에 810~3,030ppmv, 2008년 1월에 420~1,270ppmv로서 420~3,030ppmv의 범위를 나타낸다(Fig. 13; Table 6).

토의

고씨굴 내의 온도, 습도, 이산화탄소의 분압을 측정 한 결과 뚜렷한 계절적 변화를 보이고 있으며, 관광객에 의한 영향도 어느 정도 있는 것으로 판단된다. 온도의 경우, 여름철의 온도가 겨울보다 약 1°C정도 상승하

는 것을 보이며, 습도의 경우도 강우량이 많은 여름철이 더 높게 나타나고 있다. 하지만 온도와 습도의 계절별 변화는 동굴환경의 자연적인 변화에 의한 것으로 판단된다. 하지만 고씨굴 내 이산화탄소의 분압은 계절별 변화가 매우 크게 나타난다(Fig. 15).

일반적으로 자연동굴(비공개동굴)의 내부에서 보여주는 이산화탄소의 분압은 동굴 위를 덮고 있는 토양 내 유기물의 양과 강우량에 의해 차이를 보일 수 있다. 대부분의 자연동굴의 내부는 외부 대기의 이산화탄소 분압과 거의 같거나 약간 높은 360~550ppmv의 범위를 보이지만, 일부 특정 동굴 내에서는 토양지대와 거리가 가까워서 동굴 대기가 영향을 받거나, 유기물이 많은 퇴적물이나 박쥐의 배설물(구아노) 등이 있는 경우에 이산화탄소의 분압이 높게 나타날 수도 있다.

고씨굴의 경우는 안정적인 동굴환경은 와룡소(S4) 지점부터 동굴내부로 들어가면서 시작되고 있다(Table 1). 그러나 성수기인 여름철에 외부의 온도변화와 관광객의 숫자가 늘어나면서 약 1~1.5°C 정도 상승하는 것으로 판단된다. 따라서 고씨굴 내부의 대기환경은 관광객과 기후에 의해 어느 정도 영향을 받고 있다는 것을 의

Table 6 pCO₂ in Gosu Cave

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2007/5/11-12											
1(Outside)	480	520	500		520		560		480	460	
2(Ent.)	720	520	500		520		560		480	580	
3	740	800	540		520		600		800	1000	
4	760	880	680		1080		880		1520	2700	
5	620	840	1000		1400		1160		1080	3500	
6	480	840	1000		2760		1720		2040	4060	
7	760	840	1800		3320		4520		4360	5700	
8	620	840	1840		4440		4860		5340	6260	
9	480	1640	4000		5280		4000		4980	4660	
10	480	880	1040		2800		2640		3180	4380	
11	620	880	1040		3040		3200		2320	1380	
12	520	800	760		1400		1480		1980	2740	
13	520	880	1600		2520		2920		2280	2460	
2007/5/13		8:00	10:00		12:00		14:00		16:00	17:30	
1(Outside)		500	480		480		560		500	480	
2(Ent.)		500	480		480		800		640	640	
3		500	480		520		1080		5340	3400	
4		500	720		520		2680		4540	2640	
5		1020	1240		880		3240		4300	1840	
6		1020	1280		1060		4560		3220	1600	
7		2820	3360		3240		5000		6460	4040	
8		2540	3780		4800		5640		4020	1840	
9		2340	5160		5520		4560		2940	1600	
10		1300	1520		2480		3760		1580	760	
11		2240	1520		2920		2720		1340	760	
12		2000	1760		1880		1920		1620	1320	
13		2000	1800		1840		600		820	400	
2007/7/29											
1(Outside)		430		530		500		470		540	
2(Ent.)		580		550		510		500		550	
3		600		610		820		5000		3770	
4		1650		2910		1620		5000		3540	
5		1680		2700		3230		5000		2770	
6		3010		2620		3440		5000		2380	
7		2720		3590		4590		5000		4010	
8		2590		3200		4180		5000		2870	
9		2630		2720		4000		4230		2530	
10		2430		2070		2480		3400		1520	
11		1520		2980		1640		3610		1420	
11.1		1100		2860		1570		3840		1300	
11.2								3700		1250	
12		1740		1800		2150		2620		1790	
13		1020		1520		1440		1950		1080	
2007/7/30											
1(Outside)		450		430		430		440		410	
2(Ent.)		600		540		550		510		560	
3		1530		2530		3120		2990		2280	
4		1750		2620		3080		2910		2170	
5		1780		2230		2670		2460		1830	
6		1870		2690		2770		2830		1790	
7		1830		3700		3860		4190		2620	
8		1980		3370		3460		4560		2120	
9		2480		2710		2950		2730		1590	
10		1640		1760		1680		1390		1190	
11		1420		1480		1440		1360		910	
11.1		2160		1600		1610		1540		990	
11.2		1190		2450		1370		1260		970	
12		1760		1630		1720		1570		1390	
13		850		990		890		660		740	
2007/7/31											
1(Outside)		410		450		470		440		460	
2(Ent.)		560		550		580		530		560	
3		1660		2400		3600		2830		2010	
4		1820		2290		3490		2820		1890	
5		1980		2440		3030		2260		1630	
6		1980		2850		2730		2290		1530	
7		1970		3340		4070		3490		2370	
8		1730		3410		3630		3040		2000	
9		2110		2800		3060		2250		1630	
10		1960		2040		1760		1560		1090	
11		1750		2330		1650		1550		1060	
11.1		1790		2630		2780		1650		1000	
11.2		1590		2010		1720		1320		1030	
12		2020		1570		1840		1630		1370	
13		820		1650		960		810		1000	
2007/8/1-2											
1(Outside)		460		470		490		490		470	410

Table 6 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2(Ent.)		590		560		500		520		500	540
3		1880		2280		3040		3370		2380	1960
4		2040		2140		2820		3150		2420	2000
5		1950		1920		2550		2820		1960	2120
6		1960		2020		2370		2690		1890	2040
7		1880		2790		3630		4030		3100	1890
8		1890		2600		2670		3140		2250	1880
9		2280		2260		2480		2790		2340	2030
10		1640		1320		1560		1770		1310	2010
11		1380		1270		1720		1650		2010	1850
11,1		1050		1090		2160		1970		2000	1910
11,2		1350		1110		1560		1440		1040	1570
12		2020		1550		1870		1730		1520	2040
13		720		820		780		830		1370	1050
2007/8/3-4											
1(Outside)	490	490		460		400		460		460	
2(Ent.)	550	560		550		580		520		560	
3	3770	1900		3740		4450		4390		4550	
4	3560	2000		3660		4570		4350		4520	
5	3600	1990		3570		4160		4390		4330	
6	3800	2000		3440		3810		4160		3870	
7	3530	2090		3710		4330		4700		4330	
8	4000	2010		3960		3910		4000		4920	
9	3740	2050		3640		3520		4300		3820	
10	1710	2150		1930		2010		2250		1840	
11	1370	2030		2780		3590		2470		1400	
11,1	1630	1930		2640		2590		2480		1700	
11,2	1330	1910		2120		2750		2710		1480	
12	1980	1990		1780		1870		2320		2060	
13	1330	1750		1610		1800		1760		1500	
2007/8/5-6											
1(Outside)		440		460		400		450		460	460
2(Ent.)		500		500		580		500		500	540
3		2140		4010		4210		4120		2780	1910
4		2290		3950		4600		4050		2640	1980
5		2400		4200		4500		3190		2130	2140
6		2200		4410		4100		3270		1880	2080
7		2200		3950		4180		4520		3020	2050
8		2400		4030		4150		4180		2560	1940
9		2570		2960		3870		3740		1850	1910
10		2060		3010		2710		1790		1300	2190
11		1680		3950		4480		1850		1070	1990
11,1		1850		2950		4100		1820		1240	2120
11,2		1700		3600		4010		1510		1550	1940
12		1260		2240		2110		1820		1340	2010
13		1710		3010		2930		1450		1110	1860
2007/10/19-20											
1(Outside)	480	410		420		440		460		470	
2(Ent.)	440	470		440		480		490		460	
3	680	690		800		420		790		470	
4	750	620		690		650		970		730	
5	750	840		700		730		910		730	
6	880	830		770		830		900		770	
7	2650	1260		800		1500		1450		2810	
8	3310	1280		710		1060		2680		3110	
9	1940	1080		960		2100		3930		3830	
10	1020	660		850		730		860		1040	
11	1300	830		970		1010		1380		1150	
11,1	1290	760		980		1050		1370		1090	
11,2	1020	630		1070		1060		1310		1160	
12	1180	670		890		990		1340		1270	
13	1250	810		980		1090		1610		1340	
2007/10/21-22											
1(Outside)		420		480		420		510		480	410
2(Ent.)		430		410		490		480		550	420
3		450		660		460		860		840	760
4		480		710		710		1040		930	790
5		450		790		880		1210		990	750
6		700		990		830		3080		2640	750
7		1160		2610		3370		4430		3010	910
8		1140		3100		4570		6010		4860	1010
9		840		4870		4420		5360		3010	900
10		760		1580		1600		2300		1920	940
11		920		2630		2410		2420		1640	950
11,1		1020		2740		2510		2470		1580	1010
11,2		930		2690		2400		2650		1610	910
12		780		1630		1700		2190		1240	850
13		900		1910		2480		3030		2210	950

Table 6 (continued)

	17:30	8:30	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:30	8:30
2008/1/11-12											
1(Outside)	490	450		530		580		470		480	
2(Ent.)	490	470		540		560		500		470	
3	480	490		520		510		480		470	
4	500	520		580		580		470		470	
5	490	530		590		570		500		480	
6	480	590		570		560		500		490	
7	1260	900		1440		1310		1360		1530	
8	740	760		1150		1570		1590		1500	
9	1370	830		850		920		1250		1360	
10	520	670		570		540		480		470	
11	610	590		700		770		670		630	
11.1	550	550		620		600		610		700	
11.2	610	750		730		660		630		650	
12	550	740		770		610		640		670	
13	550	580		710		780		710		1270	
2008/1/13-14											
1(Outside)		500		470		490		500		440	440
2(Ent.)		520		670		540		570		500	530
3		520		600		510		610		580	540
4		580		620		630		610		530	550
5		480		610		620		590		570	600
6		470		600		580		590		590	650
7		520		1100		1900		1760		1490	620
8		620		990		1770		1950		1650	600
9		420		890		1780		1950		1650	490
10		350		890		530		500		530	440
11		440		640		730		820		870	610
11.1		430		850		670		800		870	670
11.2		480		670		680		660		720	430
12		490		700		810		720		890	790
13		480		910		670		760		720	420

미한다. 습도는 외부의 환경적인 변화에 의해 영향을 받고 있으나, 대부분 동굴 내부의 습도는 80% 이상이며, 지점 9와 같이 일부 동굴의 지형적인 위치에 의해 주변의 환경적인 변화와 관계없이 평균 90%를 유지하고 있는 지역도 있다(Fig. 7, Table 2). 이는 더운 공기가 위로 올라가기 때문에 지형적으로 상부에 있는 지점 9에서 습도가 높은 것으로 추정된다.

또한 동굴 내 7개 지점의 개방구간과 2개 지점의 비공개구간에서 이산화탄소 분압을 측정한 결과 외부 대기의 이산화탄소는 거의 일정한 값을 가지고 있으나 동굴입구는 내부의 이산화탄소 분압의 영향으로 변화 폭이 크게 나타난다(Fig. 15). 특히 사람들의 왕래가 있는 공개구간의 이산화탄소 분압이 비공개 구간보다 높게 나타난다. 고씨굴은 외부의 토양과 거리가 매우 멀어서 토양의 영향을 받을 가능성은 매우 낮다. 또한 동굴 내부에는 유기물이 많은 퇴적층이나 구아노가 발견되지 않는다. 이와 같이 관람객의 수가 많은 성수기에 높은 이산화탄소 분압을 보이는 것은 관람객으로부터 배출되는 이산화탄소의 영향이 동굴환경을 조절하기 때문인 것으로 판단된다(Figs. 14A, 15). 따라서 고씨굴의

경우 강우량이 높은 우기 때에 토양으로부터 공급된 이산화탄소 공급량의 증가는 상당히 적은 것으로 추정된다. 고씨굴 공개구간 전반에 걸쳐 성수기인 8월이 비수기인 1월에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 하지만 지점 9번(s9; 천왕전 비공개구역)의 경우, 상대적으로 다른 공개구간보다 매우 높은 지점에 위치함에도 불구하고 높은 이산화탄소의 값을 보인다(Fig. 15). 일반적으로 이산화탄소는 다른 공기의 성분보다 무겁기 때문에 높은 광장의 경우, 하부로 갈수록 이산화탄소의 값이 증가할 것으로 예측할 수 있다. 즉 고도가 낮은 지점인 은하수 광장(s7)이 천왕전보다 더 높은 값을 보여 주어야 함에도 불구하고, 상대적으로 s9의 이산화탄소 분압이 높은 값을 나타내는 것은 이 구역만은 관람객의 영향 이외에 다른 원인이 있다는 것을 의미한다(Figs. 6, 7). 이 구간은 좁고, 바닥에 퇴적층이 존재하며, 퇴적층에는 박쥐의 배설물인 구아노가 퇴적되어 있으므로 이산화탄소가 좁은 구간 내에 빠져나가지 못하고 축적되어 이산화탄소 분압이 높은 것으로 판단된다. 동굴 내 이산화탄소 분압은 외부와 동굴 내 대기의 순환에 의한 자정능력이 있으나 자정능력을 넘어서게 되면 계속해서

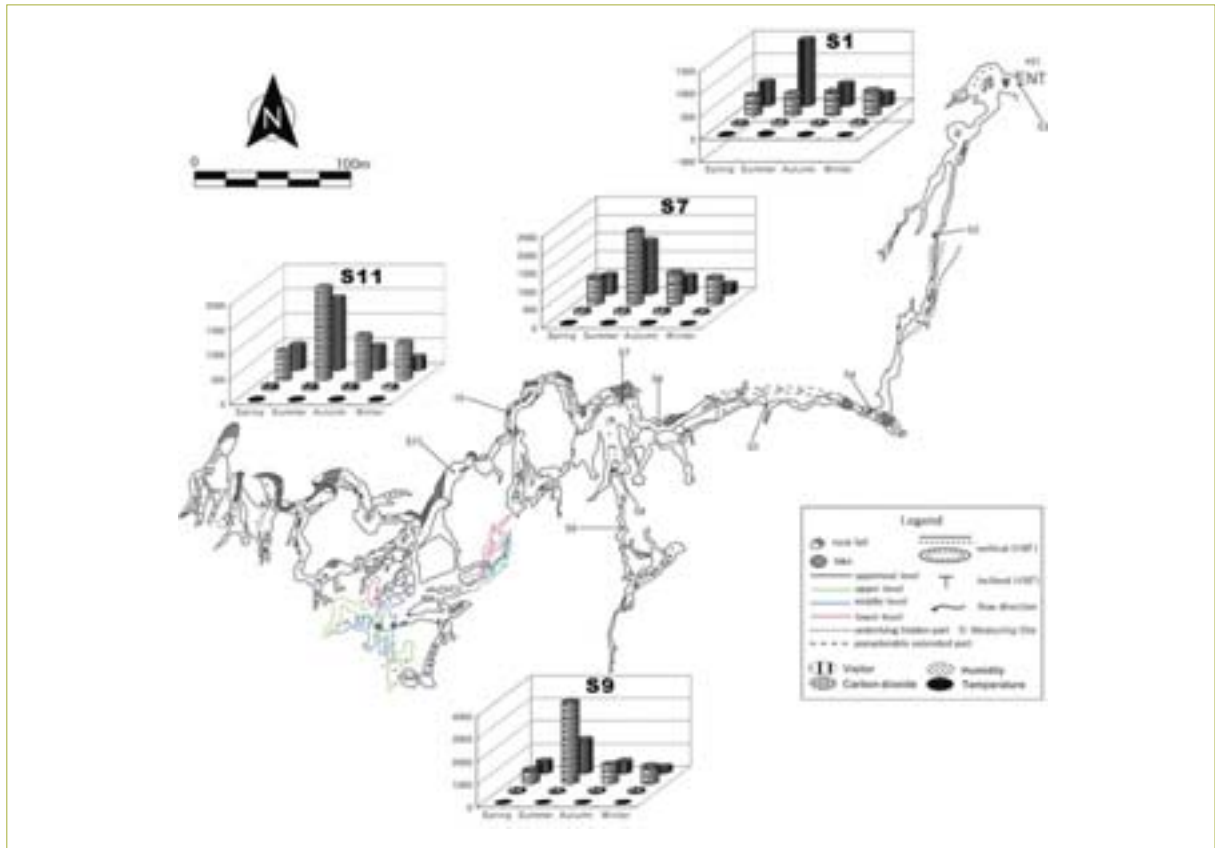


Fig 15 Seasonal variations of cave environment in Gossi Cave

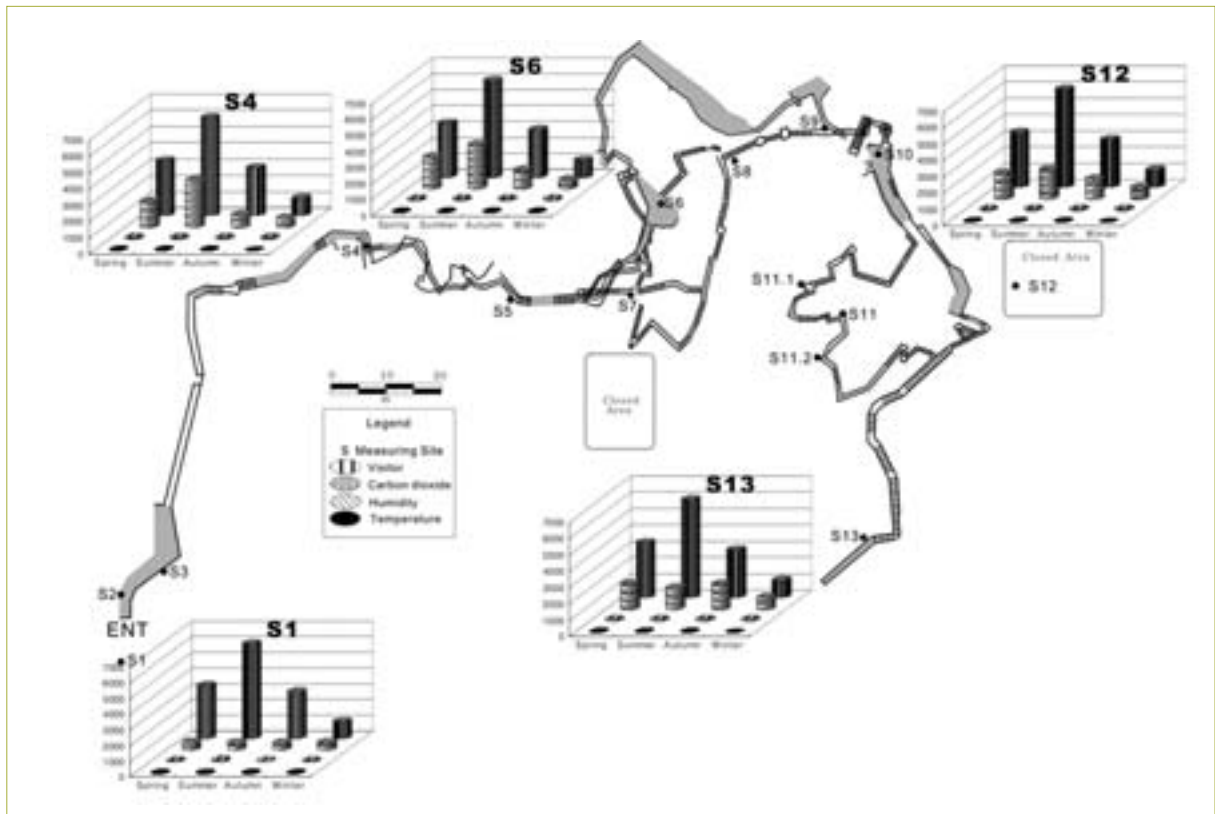


Fig 16 Seasonal variations of cave environment in Gosu Cave

동굴 내에 축적이 될 수 있다. 이러한 경향은 고씨굴의 자료에서 관람객의 숫자가 증가하면 동굴 내 이산화탄소 분압도 증가하는 것으로 알 수 있다(Fig. 15).

여름철이 겨울철에 비해 대기 중의 이산화탄소의 분압이 수천 ppmv 정도 높게 나타나는 것은 성수기인 여름철에 많은 관람객에 의해 발생하는 이산화탄소 증가의 결과라고 할 수 있다. 따라서 동굴환경을 유지하기 위해서, 즉 고씨굴의 이산화탄소 분압의 자정능력을 해결하기 위해서는 고씨굴의 일일 관람객 수를 대폭 줄여야 할 것으로 판단된다.

고수동굴의 외부 온도는 계절적인 영향에 의해 $-0.8\sim 31.3^{\circ}\text{C}$ 까지 다양하게 나타나며(Fig. 9; Table 4), 동굴 입구도 동굴 내부와 외부의 환경변화에 영향을 받아 $0.3\sim 26.2^{\circ}\text{C}$ 까지 다양한 값을 보인다(Table 4). 동굴 내부의 경우는 동굴의 형태와 입구의 크기, 방향, 그리고 외부의 계절 변화에 의해 $0.3\sim 20.5^{\circ}\text{C}$ 까지 상대적으로 적은 변화를 보인다(Figs. 10, 11, 12; Table 4). 출구는 외부에서 암반을 인위적으로 뚫어서 만든 것으로서 동굴입구에서부터 상향으로 통행로가 발달해 있으며 마지막 구간에서 상부계단을 따라 출구로 나아가게 되어 있다. 출구의 온도변화($13.5\sim 23.8^{\circ}\text{C}$)는 입구의 온도변화($0.3\sim 26.2^{\circ}\text{C}$)에 비해 안정적인 값의 변화를 보이고 있다(Fig. 13; Table 4). 따라서 고수동굴의 입구와 출구는 고도차이가 있으며 내부와 외부의 기온 차에 의한 대류현상이 활발히 일어나고 있다고 판단된다. 내부 통로가 어느 정도 수평구간을 형성하고 있는 입구와는 달리 수직형태로 상부로 연결되는 인공출구 형태이기 때문에 내부의 안정적인 온도의 영향을 더 많이 받기 때문이다.

여름의 경우 일반적인 천연동굴의 내부온도는 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 정도의 일정한 값을 보이지만 고수동굴의 경우는 상대적으로 $13\sim 19^{\circ}\text{C}$ 의 높은 값을 보이고 있다. 여름철은 성수기로서 관람객이 많은 시기이다. 고수동굴은 내부통로의 고도 차이에 의한 온도성층구간이 발생하여 지점별로 온도의 변화가 발생하고 있는 특징이 있다(Table 4). 고수동굴은 입구(S2)에서부터 내부로 고도차이가 거의 없이 수평적으로 통행로가 첫 번째 안내원이 있는 S6(사거리; S6-S5, S6-S7, S6-S8, S6-S10) 지

점과 S6 지점에서 S10 지점으로 직접 연결되는 구간까지이다. S10에서 S13(출구)까지는 수직과 경사면을 따라 상부로 이동하는 구간이며 S7-S9, S11-S11.2 지점은 상층 구간에 위치하고 있다(Fig. 3). S6과 S10 지점에서 수직통로로 S7과 S9 지점으로 각각 연결되어 있기 때문에 밀도가 낮은 더운 공기가 상부로 올라가게 되어 S7-S9 지점이 상대적으로 높은 값을 보이는 것으로 판단된다. S12는 S10과 높이차가 거의 없으며 미공개 구간으로 고수동굴의 동굴수가 공급되는 곳이다. S12와 S10은 온도의 변화가 같은 경향성을 보이고 있으며 상부층에 위치하고 있는 구간은 하층의 수평통로에 비해 높은 값을 보이고 있다(Table 4).

따라서 고수동굴의 내부온도가 상대적으로 높은 이유는 고도 차이에 의한 온도 성층구간, 관람객과 동굴 내에 6곳(안내원 3곳, 사진촬영 3곳)에 설치되어 있는 전기난로의 영향이 복합적으로 작용하고 있다는 것을 나타내고 있다. 즉 성수기인 5월, 8월, 10월에 외부의 온도변화와 관람객의 숫자가 늘어나면서 약 $1.5\sim 3^{\circ}\text{C}$ 정도 상승하는 것으로 판단된다(Figs. 10, 11, 13). 이 중에서 여름 휴가철의 경우가 가장 큰 영향을 미치고 있으며 관람객뿐만 아니라 6곳에 설치된 전기난로도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 대부분 안정적인 동굴환경은 비수기(관람객 수 감소와 안내원 및 사진사의 감소) 기간인 1월의 자료를 토대로 S7 지점부터 동굴내부로 들어가면서 시작되고 있다(Fig. 12).

단양지역의 기상자료에 의하면 단양지역의 연평균 온도는 10.5°C 로서 우리나라의 연평균 기온보다 다소 낮게 나타난다. 천연동굴의 동굴내부 대기환경의 온도는 동굴이 분포하는 지역의 연평균 온도와 유사한 것으로 알려져 있다(최돈원, 2006). 하지만 고수동굴의 경우는 조사기간 동안 측정된 자료를 토대로 분석한 결과 약 15.4°C 로 외부의 연평균 기온보다 약 4.9°C 높은 값을 보여주고 있다. 이는 두 가지 원인이 있는 것으로 판단된다. 첫 번째는 고수동굴이 일반인들에게 개방되면서 관람객에 의한 영향과 두 번째 동굴내부에 설치되어 있는 전열기 등에 의한 영향으로 추정할 수 있다.

습도의 경우도 외부의 환경 변화, 즉 건기와 우기의

강우량의 차이로 인해 우기(8월)의 습도가 건기(5, 10, 1월)보다 전체적으로 더 높게 나타난다(Fig. 9; Table 5). 또한 측정 당일의 날씨의 영향(비 또는 눈이 내리는 중이거나 내린 후)을 받을 수 있으며 겨울철의 경우 폭설이 온 뒤이기 때문에 상대적으로 높은 값을 보이고 있다. 그러나 동굴 내부의 습도는 80% 이상이며, 지점 7~9, 11~11.2와 같이 일부 동굴의 지형적인 위치에 의해 주변의 환경적인 변화와 관계없이 평균 95%(5월의 평균 약 85%를 제외)를 유지하고 있는 구간도 있다. 또한 7~9 구간 중 지점 8의 경우는 다른 지점(7, 9)에 비해 상대적으로 낮은 값을 보이는데 이는 지점 7, 9 보다 낮은 위치에 있기 때문이다. 따라서 더운 공기가 위로 올라가기 때문에 지형적으로 상부에 있는 지점인 7~9, 11~11.2의 습도가 높은 것으로 판단된다(Table 5).

5월과 10월의 이산화탄소 분압이 여름철 성수기 기간 보다 높은 값을 나타내는 것은 측정기의 오차(측정기 교체에 따른 변화)와 측정당시의 관람객이 측정기 주변에 미치는 영향 정도에 의한 것으로 판단된다. 전반적인 이산화탄소 분압은 여름철 성수기가 대체적으로 높은 경향을 보이고 있다(Fig. 15). 또한 다른 계절의 경우 관람 후 다음날 개장하기 전까지 동굴 내 대기의 순환에 의한 자정능력이 있으나 여름철의 경우 자정능력을 넘어서게 되어 계속적으로 축적되는 경향을 보이고 있다. 8월 초순부터 중순까지의 관람객이 가장 많으며 관람객에 의한 고수동굴 내 이산화탄소 분압과 일치하는 경향을 보인다(Figs. 14B, 16). 또한 7~9 지점이 상대적으로 높은 값을 보이고 있으며 이는 6 지점에서 계단을 따라 수직통로를 올라가면 상층 구간인 7~9 지점이 위치하고 있으며 통로가 좁아지면서 이산화탄소 분압이 축적되면서 높아지기 때문이다(Table 6).

따라서 400~6, 460ppmv의 이산화탄소 분압을 보이는 고수동굴은 일반 천연동굴의 대기환경(400~600ppmv)과 비교하면 상당히 높은 값을 보이고 있다. 또한 비수기인 1월의 경우 전반적으로 낮은 값을 보이고 있으나 7~9 지점은 지형적인 특성(이산화탄소의 축적)에 의해 높은 값을 보이고 있다(Table 6). 그러므로 고수동굴에서도 관람객에 의한 이산화탄소 분압의 영향이 가장 큰

것으로 판단된다.

결론

제219호인 영월 고씨굴과 천연기념물 제256호인 단양 고수동굴의 동굴 환경을 측정하여 동굴 환경의 변화와 특징을 파악한 결과, 동굴 내의 온도와 습도 그리고 이산화탄소의 분압은 계절적 변화가 뚜렷하게 나타난다. 특히 이산화탄소 분압의 경우, 사람들의 왕래가 있는 공개구간의 이산화탄소 분압이 비공개 구간보다 높게 나타난다. 이와 같이 관람객의 수가 많은 성수기에 높은 이산화탄소 분압을 보이는 것은 관람객으로부터 배출되는 이산화탄소의 영향이 동굴환경을 조절하기 때문인 것으로 판단된다(Figs. 15, 16). 하지만 고씨굴의 일부구간(Fig. 7)의 높은 이산화탄소 분압은 관람객의 영향 외에 좁은 구간의 퇴적층 내에 퇴적된 토양과 박쥐의 배설물인 구아노로부터 발생한 이산화탄소가 좁은 구간 내에 빠져나가지 못하고 축적되기 때문이다(Fig. 15의 S9).

고수동굴의 입구와 출구는 고도차이가 있으며 내부와 외부의 기온 차이에 의한 대류현상이 활발히 일어나고 있다. 따라서 고수동굴의 내부온도가 상대적으로 높은 이유는 고도 차이에 의한 온도 성층구간, 일반인들에게 개방되면서 관람객에 의한 것 그리고 동굴 내에 6곳(안내원 3곳, 사진촬영 3곳)에 설치되어 있는 전기난로의 영향이 복합적으로 작용하고 있다는 것을 나타내고 있다.

전반적인 이산화탄소 분압은 여름철 성수기가 대체적으로 높은 경향을 보이고 있다(Figs. 15, 16). 또한 여름철을 제외한 계절의 경우 관람 후 다음날 개장하기 전까지 동굴 내 대기의 순환에 의한 자정능력이 있으나 여름철의 경우 자정능력을 넘어서게 되어 계속적으로 축적되는 경향을 보이고 있다.

두 동굴의 이산화탄소 분압은 관람객의 수에 의해 조절되는 것으로 나타난다. 따라서 이산화탄소 분압의 자정능력과 동굴의 환경을 유지하기 위해서는 일일 관람객의 수를 조절하여야 할 필요가 있다.

참 / 고 / 문 / 헌

- 우경식, 2002, 동굴. 지성사 서울, p. 231
- 이동진, 2000, 구문소지역 태백층군 상부에서 산출된 오르도비스기 Calathid 화석. 고생물학회지, v. 16, pp. 37-44
- 정혜정, 우승현, 우경식, 2007, 경상북도 울진군 근남면 구산리와 평해읍 후포리 일대 변성퇴적암류의 층서적 연구. 강원대학교 학사논문
- 최돈원, 2006, 강원도 및 제주도의 천연동굴에서 발달하는 동굴생성물의 암석학적 연구. 강원대학교 박사학위논문, p. 178
- 최돈원, 우경식, 2008, 강원도 환선굴에서 발견되는 한 중유석의 조직과 성장단계. 지질학회지, v. 44, pp. 141-148
- Cigna, A.A., 2004, climate of caves, in J. Gunn (ed.), Encyclopedia of caves and karst science, New York, Fitzroy Dearborn, pp. 228-230
- Cigna, A.A., and P. Forti, 1986, The speleogenetic role of airflow caused by convection, International Journal of Speleology, v. 15, pp. 31-52
- Gonzalez, L.A., and Lohmann, K.C., 1988, Controls on mineralogy and composition of spelean carbonates: Carlsbad Caverns, New Mexico. In: James, N.P., and Choquette, P.W.(eds.), Paleokarst, Mew York, Springer-Verlag, pp. 81-101
- Hill, C.A., and P. Forti, 1997, Cave minerals of the world(2nd ed.), Huntsville, Ala., Natonal Speleological Society, p. 463
- Wigley, T.M.L., and M.C. Brown, 1976, The physics of caves, in T.D. Ford and C.H.D. Cullingford (eds.), The science of speleology. London, Academic Press, pp. 329-358
- Woo, K.S., and Choi, D.W., 2006, Calcitization of aragonite speleothems in limestone caves in Korea: Diagenetic process in semi-closed system. In: Harmon, R.S. and Wicks, C.M. (eds.), Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology, and Geochemistry-A Tribute Volume to Derek C. Ford and William B. White, Geological Society of America, Boulder, pp. 297-306
- Woo, K.S., Hong, G.H., Choi, D.W., Jo, K.N., Baskaran, M., and Lee, H.M., 2005, A reconnaissance on the use of the speleothems in Korean limestone caves to retrospective study on the reginal climate change for the recent and geologic past. Geosciences Journal, v. 9, pp. 243-247

Mun Hwa Jae Vol 42, No. 01, May 2009, pp. 158-187

Copyright ©2009, National Research Institute of Cultural Heritage

Environmental Variation in Gossi and Gosu Caves, Korea

Choi, Don Won^a · Kim, Lyeon^b

^aNational Research Institute of Cultural Heritage

^bCave Research Institute of Korea, Kangwon National University

Received : 1 December 2008 | Revised : 9 March 2009 | Accepted : 20 March 2009

Abstract

The Gossi Cave, Natural Monument 219, extends horizontally for 3,388m with 215m elevation. 620m of the horizontal cave length was opened to the public in 1974. The Gosu Cave, Natural Monument 256, also was opened to the public for only 685m of the horizontal cave length, 1,700m, in 1976 in order to preserve its ecological cave environment. The surface of the speleothems in two caves have been turning black due to pollutants after the caves were opened to the public. The degrees of temperature, humidity and partial pressure of carbon dioxide in the caves were related the seasonal variation. Specially, the value of partial pressure of carbon dioxide(CO₂) in the cave higher in the summer than any other seasons. The partial pressure of CO₂ continues to build in the summer because of exceed the self-purification limit in the caves. The value of CO₂ variation in the caves was mainly controlled by the amount of visitors. As a result, we have to controlled the amount of visitors to preserve the cave environment.

Keywords | Gossi Cave, Gosu Cave, cave environment, partial pressure of CO₂, visitors