

석회동굴의 환경과 서식생물의 특성

김 병 우
상지대학교 생명과학과

1. 동굴 환경

지상의 생태계는 광합성을 통해 광 Energy를 화학 Energy로 전환하는 생산자인 녹색식물들과 이들을 먹고사는 1차 소비자인 초식동물 또 이들을 먹고사는 육식동물인 2차 소비자와 동식물의 사체나 유기물을 분해하며 살아가는 미생물 같은 분해자로 구성되어 있다. 대부분의 생태계는 태양광선을 Energy원으로 하여 풍부한 물질생산과 먹이사슬을 통하여 안정적인 영양공급이 이루어지고 있다.

그러나 지하생태계인 동굴생태계의 주요특성은 첫째, 태양광선이 차단되어 빛이 없는 암흑상태이며 둘째, 온도가 내부로 들어갈 수록 안정성을 나타내며 년중 평균 기온은 10℃~13℃ 사이이며 연평균 기온이나 수온의 년중변화가 심하지 않다. 셋째로 상대습도는 80%이하로 내려가는 경우는 드물며 대부분의 깊은 동굴에서는 포화상태에 가깝다. 넷째로 생태계 구성의 필수조건인 영양공급원이 제한되어 있다. 대형 동물이나 초식동물은 생존이 어렵고 박쥐의 배설물인 구아노(Guano)가 주요한 영양공급원이며 기타 영양물질은 지하수를 통해 동굴에 공급되기도 한다.

우리나라에는 천연기념물 178호로 지정된 삼척 대이리 동굴지대 등 13개의 천연기념물 중 환선굴을 포함한 9개가 부분적으로 공개되고 있으며 시도지정기념물중 단양의 천동굴, 정선 화암굴, 태백 용연굴과 비지정 일반동굴인 동해시 천곡굴이 공개되고 있다.

미개방 동굴의 환경은

- ① 햇빛이 차단된 암흑상태
- ② 일정한 온도와 수온, 빛, 높은 내부습도 유지
- ③ 먹이사슬의 필수요소인 영양공급원의 제한

개방 동굴의 환경은

- ① 조명등에 의한 빛과 열의 발생
- ② 탐방객에 의한 온도 및 이산화탄소(CO₂) 농도의 상승 및 미생물의 유입
- ③ 빛과 열에 의한 녹색오염 발생

개방 동굴내에는 동굴내 환경조건 변화에 의해 각종 오염현상과 지하생태계 교란이 일어나고 있다.

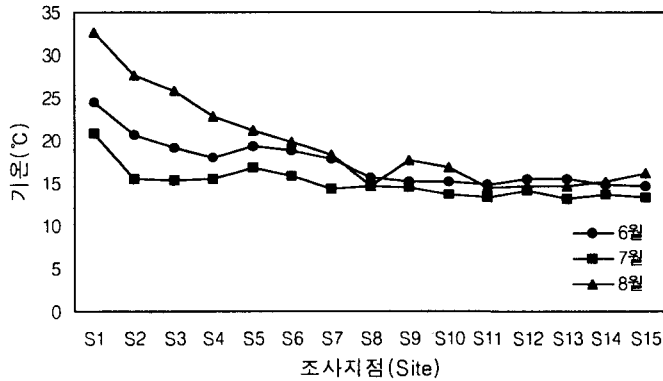
1) 동굴내 온도의 변화

동굴은 지하에 밀폐되어 있는 공간이므로 지상과는 다른 기상특성을 나타내고 있다. 즉 동굴은 햇빛의 유입이 거의 차단되어 있어 열 교환은 오로지 동굴입구를 통한 기류이거나 천정이나 벽면으로부터의 전도를 통하여 이루어진다.

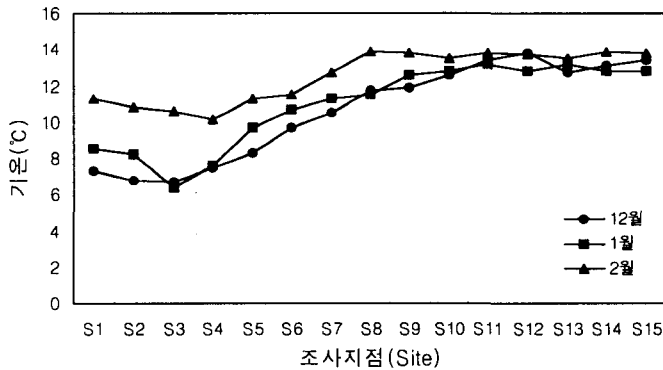
동굴내부의 기류의 이동은 계절에 따라 달라지는데, 동계의 경우 주야간 모두 외부기온이 내부보다 낮으므로 외부의 공기밀도가 높다, 그러므로 겨울철 기류는 항상 외부에서 동굴 내부로 유입된다. 여름의 경우 풍속은 외부 대기와의 온도차이가 큰 입구 부근에서 비교적 강하고 막장으로 갈수록 약해지지만 갑자기 폭이 좁아지는 경우에는 소용돌이 현상도 나타난다.

[그림 1]에서 양당리 동굴의 여름철에는 동굴외부가 20.9~32.6까지 높은 기온을 형성하고 있지만 동굴입구(S1)를 지나 동굴내에서는 점차 낮아져서 좀더 깊이 들어가면 14~16도로 안정된 상태가 된다. [그림 2]의 겨울철에는 7.3~11.3의 낮은 외부온도를 나타내고 있지만 좁은 동굴입구에서 잠시 기온이 하강하였다가 좀더 안으로 들어가면 다시 상승하여 12~14도의 안정된 상태가 된다. 동굴입구의 좁은 통로부분인 S2, S3지점 부분에서는 기류의 이동이 급격하여 기온은 하강하고 S5지점의 좁은 수로를 통해 진입한 후부터는 동굴내 기류의 이동이 적어 비교적 기온이 안정되는 양상을 나타내고 있다. 이곳부터 동굴통로 공간이 지하수에 의해서 약 80%가 차단되어 동굴내에서 기류이동이 급격한 상태를 벗어나 안정된 상태를 유지하게 된다.

즉, 동굴입구부근에서는 기온과 벽온도와 차이가 뚜렷하다. 그러나 점차 동굴안으로 진입하면서 벽의 온도와 내부의 기온이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 즉 동굴 깊은 곳에서는 열교환이 기류의 이동에 의한다기보다는 전도에 의해서 이루어지므로 일정한 기온을 유지하게 된다.



[그림 1] 여름철 양당리굴 내부의 온도변화



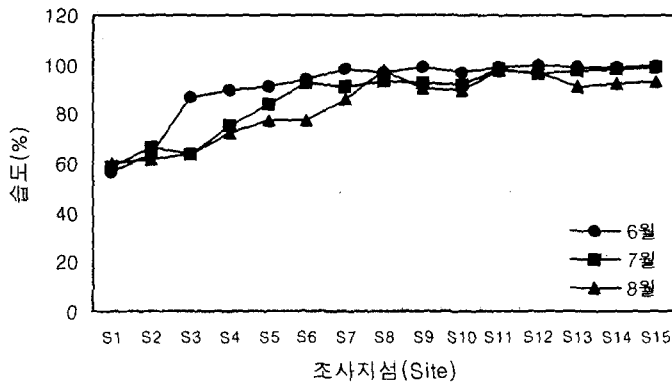
[그림 2] 겨울철 양당리굴 내부의 기온변화

2) 동굴내 습도의 변화

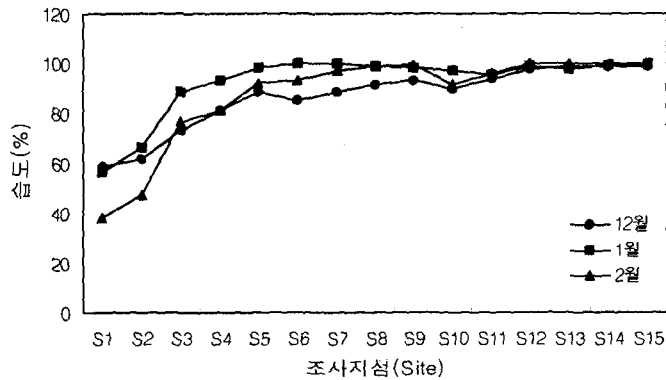
동굴은 강수의 직접적인 영향과도 차단되어 있어 내부의 습도는 주로 천정이나 벽면을 통해서 유입되는 지하수에 의해서 결정된다. 그러므로 동굴규모, 깊이, 길이, 입구, 수온 등에 의해서 습도가 영향을 받고 우리나라의 동굴은 평균적으로 동굴 습도가 높고 기온의 연중 변화가 적은 것이 특징이라고 볼 수 있다.

[그림 3]에서 양당리 동굴의 습도 변화는 외부 습도의 변화에 큰 영향없이 95~

100%상태를 유지하고 있다. 여름철의 외부습도는 55~60%정도를 보이고 완만한 증가세를 보이며 S7지점에 이르면 95~100%로 일정하게 유지된다. 겨울철의 습도는 40~60%의 외부습도를 보이고 있지만 S4지점부터 급격히 증가하여 95~100% 상태를 유지하고 있다.



[그림 3] 여름철 양당리굴 내부의 습도변화



[그림 4] 겨울철 양당리굴 내부의 습도변화

2. 동굴생물의 특성

동굴생물은 식물과 동물, 미생물로 크게 구분되지만 태양광선이 완전히 차단된 동굴내 환경에서는 동굴동물들이 주종을 이루고 있다.

동굴생물에 관한 연구는 육상생태계와 격리된 환경에서 생리, 생태적 적응을 통한 종의 분화나 유전, 진화문제를 연구하며 지하생태계와 육상생태계의 생물적인 유연관계를 규명하기 위한 중요한 분야로 인정된다.

동굴내에는 환경에 적응하는 종들만이 서식할 수 있고 이들은 생태계 특성에 따라 세가지로 구분할 수 있다. 환경적응 요인으로는 광도, 습도, 온도 영양공급원과 섭식장소, 수중생물의 경우는 특히 유속, 수온, 수량, 영양원이다.

1) 진동굴성 동물(眞洞窟性 動物, troglobites: Tb)

진동굴성 동물은 동굴 밖의 지상생태계에서는 존재하지 않으며 동굴속에서만 대를 이어 서식하는 대부분의 희귀종으로 전체의 약 15~20%를 차지한다. 각 동굴의 환경적 특성에 따라 오랜 세월을 거쳐 진화해온 종들이며 동굴생물로서의 특징을 잘 갖추고 있다. 화석동물도 포함된다. 대부분 암시야에서 서식하기 때문에 시각이 퇴화되었다. 갑각류의 경우 시각이 퇴화되어 체표면에 색소체가 분비되지 않아 체색은 백색이며 표피가 얇아 투명하다. 활동성이 제한적이고 날개가 퇴화되거나 없는 종들이 많다. 반면에 촉각이 감각기관으로서 발달되고 체모나 다리가 발달하여 감각기관의 보조기능을 하고 있다. 곤충류, 갑각류, 복족류에서 많이 나타난다.

진동굴성 생물에 관한 연구는 이들이 장구한 세월을 외부환경과 차단된 상태에서 적응해 왔으며 생물의 진화와 유전에 관한 연구에 중요한 단서가 된다.

(1) 배각강 노래기목

① 김띠노래기

석회동굴의 대표종으로 습기가 유지되는 토양층이나 벽면에 서식한다. 어린 것은 백색이고 성체가 되면 붉은색으로 변한다. 몸통은 18개의 마디로 되어 있다.

② 등줄굴노래기

김띠노래기와 더불어 석회동굴의 대표종으로 습기가 유지되는 곳에서 서식한다. 몸통은 43~46개의 마디가 있고 등 중앙에 세로의 융기선이 있다.

(2) 갑각강 단각목

① 장님굴새우

장님굴새우는 지질시대 전반기인 석탄기(약 3억년전)의 유존동물로 보는 옛 새우류에 속한다. 체장이 0.8~1.2mm 정도의 미소 갑각류로서 눈이 없고 백색 투명하며 동굴에서만 서식하기 때문에 살아있는 화석이라고 칭하며 장님나사조개도 같은류에 속한다.

(3) 곤충강 무시목

① 갈르와벌레

갈르와벌레는 동굴속 전석지나 썩은 나무, 낙옆밑에서 드물게 관찰되는 원시적인 곤충으로 화석곤충이라고도 한다. 어릴때는 유백색이나 성충이 되면 연한 갈색을 띄며 긴촉각과 가슴부위에 강한 3쌍의 다리와 몸통은 머리, 가슴, 배의 세부분으로 구분된다.

날개가 없는 무시목의 전형적인 Cambria형의 곤충으로 날개기관은 흔적조차 없으며 눈은 복안으로 흔적만 보인다. 유충기는 약 5년으로 처음 1년은 3회 탈피하고 그후 매년 1번씩 7~8회 탈피한다. 최종령 유충기에는 6개월간 암흑에서 생활한다. 난발생기간은 1년으로 일세대는 약 7년이고 성숙성충으로 1년간 더 생존하는데 일생을 통해 무변태인 것이 큰 특징이다. 무시, 무변태이므로 원시 곤충의 진화연구에 큰 단서가 되는 화석곤충이다.

2) 호동굴성 동물(好洞窟性 動物, troglaphiles: Tp)

호동굴성 동물은 동굴내에서 번식하며 적응이 잘되어 정상적인 동굴생활을 하는 것으로 지상 생태계에서도 비슷한 환경에서 살고 있는 종류로 전체의 25~30% 정도를 차지한다. 진동굴성 동물로의 변화과정에 있는 것들이다. 시각이 퇴화과정에 있고 색소는 부분적으로 남아있다. 생리, 생태적으로 동굴환경에 적응되어 있는 것이 대부분이다. 먹이사슬에 의해 서식지가 구분된다.

(1) 주형강 거미목

① 굴뚝거미

② 민자가게거미

③ 방패소경거미

(2) 곤충강 매뚜기목

① 알락곱등이

동굴 곤충중에 가장 쉽게 발견할 수 있는 종류로 전국에 고루 분포하고 있다. 동굴 입구부에 주로 담흑물결자방과 함께 주로 서식한다.

② 굴곱등이

알락곱등이는 동굴 입구부에 주로 서식하는 반면 굴곱등이는 동굴 환경에 잘 적응하여 동굴 내부 깊숙한 곳까지 서식한다.

③ 장님굴가시톡토기

3) 외래성 동물(外來性 動物, troglonexes: Tx)

동굴내에 우연한 기회에 들어온 동물로서 동굴내에서 계속 서식하기 어려운 것들이다. 동굴을 드나들며 살거나 동굴입구부근의 그늘진 곳에 산다. 동굴속에 유입된 들어온 미입성(迷入性)이거나 동굴에서 서식하면서 외부에서 일정기간 활동하는 내객성(來客性)으로 구분할 수 있다.

전체의 약 50~60%정도를 차지하며 이들 중 박쥐, 나방이, 곱등이처럼 야행성인 동물은 섭식활동을 위해 동굴밖으로 주기적으로 나가야하며 그들의 배설물과 사체는 동굴내 1차영양원이다. 미입성 생물들은 환경의 차이와 섭식활동의 불능으로 대부분 사멸되고 사체는 다른 동물들의 영양원이 된다.

(1) 배각강 각시노래기목

① 긴넓적다리삼당노래기

(2) 주형강 거미목

① 산유령거미

② 말꼬마거미

(3) 포유강 박쥐목

① 관박쥐

박쥐는 날 수 있는 포유동물이다. 곤충이나 새와는 달리 길게 늘어난 손가락 사이에 물갈퀴처럼 얇은 피부막이 연결되어 날개가 형성되었으므로 이를 날개막이라고 부른다. 박쥐는 야행성이며 시각보다 청각이 더 예민하고 발달하였다. 초음파

를 사용해서 물체의 위치를 파악하는 것이 특징이며 귀가 크고 이주라는 안테나 역할을 하는 기관이 있다. 밤하늘을 날아다니며 초음파를 사용하여 야행성 곤충인 나방이를 비롯한 작은 곤충들까지도 잡아먹는다. 먹이사냥의 방법이 특이하며 날개를 다양하게 이용하여 먹이를 포획한다.

우리나라의 박쥐는 대부분 작은박쥐류에 속하며 3과 10속 24종 6아종으로 알려져 있다(손, 2001). 관박쥐는 전국적으로 분포하며 우점종으로 알려져 있다. 개체별로 동면하기도 하고 때로는 집단으로 동면을 하기도 한다.

외래성(Trogloxenes)으로 알려진 동물이다. 산간지대의 도로개설, 동굴개방 등으로 활동영역, 번식지, 섭식지가 갈수록 줄어들고 있다. 더욱이 약재로 남획되어 감소경향이 현저한 상태이므로 보호대책이 필요하다.

(4) 곤충강 나비목

- ① 줄까마귀밤나방
- ② 담흑물결자나방

(5) 좁목

- ① 들좁

이와같이 분류되는 동굴동물은 육상생태계의 변천과 무관하게 유구한 세월을 통해 생리적 또는 생태적으로 어떻게 적응해 왔는가 하는 진화와 유전문제를 규명함과 아울러 육상에서는 멸종되었지만 동굴속에서 현존하는 동물들과는 유연관계를 추구하므로써 생물의 진화과정과 요인을 밝혀나가는데 큰 의의가 있다.

4) 동굴 적응동물의 일반적 특징

① 몸의 표피가 백색이거나 투명하다.

광선이 없는 동굴에서 나타나는 형태적 특성으로 진동굴성 동물들의 특징이기도 하다. 노래기류, 동굴옆새우류, 동굴성 패류, 장님플라나리아, 톡토기류에서 볼 수 있다.

② 눈과 시각이 퇴화되어 흔적만 남아 있다.

광선이 없는 동굴에서 기관과 기능이 동시에 퇴화된 것으로 본다.

③ 감각기관의 발달

시각이 퇴화한 반면에 촉각, 후각, 청각이 예민하다.
더듬이나 다리가 길게 다수 발달한 것들이 있고 몸에 털이 길게 밀생하여 감각기능을 강화시킨다.

④ 호흡기능의 변화

호흡기관의 퇴화되고 여러종이 피부로 호흡하며 호흡기능이 약하다.

⑤ 대사의 효율성

환경의 변화가 거의 없으므로 계절변화의 적응이 필요없으며 빈영양상태이므로 적은량의 먹이로도 오래 지탱이 가능하다. 육상생태계의 근연종보다 2배이상 오래 산다.

5) 동굴내의 영양원

동굴내의 영양원으로 박쥐의 배설물(Guano)이 일반적으로 중요하나 동굴생물 분포와 종다양성을 고려하여 아래의 순위로 구분할 수 있다.

- ① 점토나 토양이 동굴내로 유입된 지역(침투수나 지하수에 함유된 유기물 퇴적지)
- ② 박쥐 집단서식지(천정부) 아래 동굴 바닥에 배설물(Guano) 퇴적지
- ③ 입구부근의 유입된 낙엽, 나무토막, 동물의 사체, 배설물

박쥐배설물은 특히 수분이 함유되어 습윤한 상태일 때 부근에 생물상이 풍부하고 다양하며 건조상태이거나 곰팡이 등 미생물이 대 발생시와 물기가 배어 있는 상태에서는 종 및 개체수가 줄어든다.

6) 서식환경의 구분

① 입구

동굴입구는 빗물이나 눈의 영향을 받는 지역으로 햇빛이 부분적인 영향과 기온의 변화가 발생하는 지역이다. 생물들의 피난처이기도하며 녹조류와 선대류, 양치류식물의 서식지가 되기도 한다.

천정부, 벽면: 유령거미, 말꼬마거미, 가게거미류, 노래기류, 돌좀, 파리류
바닥유기물층: 쥐며느리, 지네, 갑충류, 툫토기류, 통거미류

수로변: 옆새우류, 수서곤충 유충, 플라나리아, 도롱뇽

② 입구 내부

햇빛의 영향권까지의 부분과 영향권을 벗어난 암대의 형성부로 구분될 수 있으며 동굴의 규모에 따라 내부 10m까지의 구간으로 빛의 영향권까지는 유기물의 유입이 많은 동굴도 있다.

천정부, 벽면: 달팽이류, 굴왕거미, 곱둥이, 박쥐, 유령거미, 농발거미, 밤나방류, 자나방류

바닥유기물층: 쥐며느리, 지네, 노래기류, 진드기, 갑충류, 양서류

암대에서는 야행성 동굴 생물인 나방류, 노래기류, 방패소경거미, 갑충류 등 호동굴성 동물이 많고 간혹 진동굴성 동물도 발견된다.

③ 동굴 내부

온도가 외부 기류의 영향으로 연중 변화가 있는 구간(변온암대)과 외부환경의 변화에 관계없이 동굴환경이 년중 유지되는 구간(항온암대)으로 구분된다.

변온암대는 나방이류가 동면이나 하면을 하는 구간이며 호동굴성과 진동굴성 동물이 발견된다.

항온암대에는 습한 벽면지역에 항상 습기가 유지되고 유기물이 있는 곳에는 노래기류와 톡토기류를 볼 수 있고 동굴성 패류도 볼 수 있다.

지면과 가까운 함몰 토양층에서는 드물게 발견되며 주로 지하수에 의한 퇴적 토양층에서 많이 발견된다. 앓은뱅이, 방패소경거미, 톡토기 등이 발견된다.

구아노 퇴적층에서는 구아노가 습한상태일 때 갑충류가 발견되고 노래기류와 톡토기류도 많이 발견된다.

동굴유수가 둔화되어 있는 곳중 모래나 점토가 퇴적된 곳에 작은 돌들이 바닥에 깔려 있는 물속에 진동굴성 장님굴새우를 볼 수 있다.

동굴 호수인 경우 가장자리의 점토층이나 돌 밑에서도 볼 수 있으며 휴식소에서도 발견된다.

동굴내부의 동굴생물들의 서식은 동굴의 수분공급 및 습도와 밀접하며 건조기에 이동하지 못한 진동굴성 생물들은 그 자리에 고사하여 건조되기도 한다. 곱둥이류는 대부분 동굴 상층부에 굴속에서 살며 박쥐는 적은 동굴에서는 동굴 벽면이나 천정부의 구멍속에서 동면이나 하면을 한다. 대부분의 박쥐군락은 동로내부 높은 천정부에 집단으로 서식한다.

[참고문헌]

- 김병우, 1990, 고수동굴의 환경 및 안전진단 조사연구보고서-동굴생물상-, (주)원천, pp. 28-33.
- 김병우, 1991, 천곡동굴의 동식물 소고, 한국동굴학회지 28:85-91.
- 김병우, 1993, 고수동굴 학술조사보고서-동굴생물상-, (주)유신, 135-150.
- 김병우, 1995, 화암동굴의 동굴생물에 관한 연구, 한국동굴학회지 42:27-40.
- 김병우, 1996, 천곡굴의 생태계 조사보고, 한국동굴학회지 45:29-40.
- 김병우 외, 2001, 동강유역 천연동굴 실태 및 보호방안, 원주지방환경관리청.
- 남궁준, 1981, 원시적 유존동물인 갈르와벌레, 자연보존, 33, 18-22.
- 남궁준, 1986, 한국의 주요 동굴동물의 모식산지의 보전문제, 한국동굴학회지 13:49-67.
- 남궁준, 1987, 강원도의 자연동굴과 동물상, 강원도의 희귀자원 조사보고서, 4:1-156.
- 단양군, 2000, 온달굴내의 일부지구 환경과 개보수 타당성조사 연구보고서.
- 단양군, 2002, 비지정 천연동굴(양당리굴,북상리굴) 학술조사보고서, p1143-197.
- 문화재청, 2001, 제2회 자연유산보존 세미나 및 자연문화재 담당자 대회, p77-92
- 백갑용, 1971, 특수환경의 곤충, 원색과학대사전 ⑤동물, 학원사, 217-222.
- 삼척시, 2002, The Sustainable Management of Cave: "Academic and Policy Implication", p212-231.
- 오영근, 1985, 동굴성 박쥐류의 생태, 자연보존, 52:8-11.
- 이병훈, 1985, 동굴생태계와 동굴생물의 진화, 자연보존, 52:4-7.
- 이영남,김상섭, 1978, 우리나라의 동굴생물, 한국동물학회지, 3:10-11.
- 임문순, 1975, 단양 고수동굴과 여천굴의 환경요인과 그 동물상에 관한 연구, 한국 동굴학회지, 1:17-22.
- 조규송, 남궁준, 1987, 대이리 동굴군 학술조사보고서, 평창군, pp. 30-151.
- 조규송,이우철,남궁준, 1989, 백룡굴 학술조사보고서, 평창군, pp. 34-151
- 한국의 동굴, 1987, 동굴생물, 아카데미서적, pp. 264-281.