동굴 답사를 위한 지질 · 지형학적인 이해

김 주 환
동국대학교 지리교육과

1. 서 론

현재 우리 나라에는 고수동굴, 성유굴, 고씨굴 등의 석회동굴 이외에 제주도의 만장굴과 협재굴 등이 공개되고 있는 관광동굴의 대표적인 것들로 알려져 있다.

이들 동굴들은 계속 드나들고 있는 관광객들에게 자연의 신비로움과 오묘함을 보여주고 있을 뿐만 아니라 자연관찰의 현장으로 그리고 심신단련의 자연도장으로 커다란 몫을 하고 있는 것이 사실이다. 즉 이들 동굴 속에서 우리들은 우리 조상들의 숨결을 엿듣기도 하고 자연창조와 생태변화의 현실을 낱낱이 찾아 볼 수 있기 때문이다.

그러나 이와 같은 자연동굴이 점차 오염 또는 훼손되어가고 있음은 매우 안타까운 일이다. 이는 우리 관광객들의 부주의와 동굴관리자들의 무관심이 가져온 소치라 하겠다. 길이 보전 관리하여 자손만대에 자연의 원상 그대로 넘겨주어야 할 자연현장이 일부 몰지각한 사람들에 의하여 폐허화되어가고 있는 사실은 참으로 유감스러운 일이라 하겠다.

최근에는 국토관리의 차원이나 관광 등의 목적으로 동굴에 관한 관심이 많아졌다. 특히 동굴이 매장문화재로서의 의미를 갖기 시작하면서 더욱 그렇다. 따라서 지금은 어느 때보다도 동굴에 대한 이해와 관심이 필요할 때임을 자각하고 이 글로 말미암아 동굴 탐사를 위한 지질 · 지형학적인 이해에 미력이나마 도움이 되기를 바란다.

2. 동굴 성인 규명을 위한 구조지형학적 접근

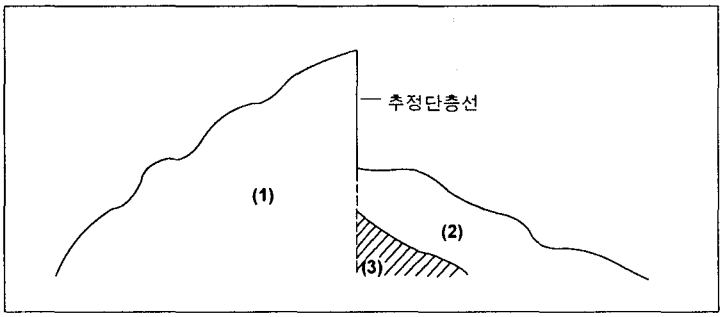
1) 동굴과 구조지형

동굴 형성 원인을 구명하는 일차적인 과제는 동굴 형성의 구조적인 입장이라고 생각한다. 특정 지역의 동굴은 주변의 지형과 지질을 바탕으로 한 구조 현상의 결과로 형성되었기 때문이다. 다만 동굴 내부의 미세지형이나 2차생성물들은 큰 골격을 수정하고 변형시키는 차원의 역할로 이해하면 좋을 것이다. 따라서 동굴 형성의 구조 지형학적인 접근방법에서 가장 먼저 정리하여야 할 부분은 동굴 형성과 단층과의 관계이며 그 다음이 동굴 형성과 절리와의 관계이다.

실제 예를 들면 충북 단양의 양당리굴과 북상리 굴의 경우 주변 지질과 지형과의 관계를 정리하는 과정에서 그 동굴의 성인을 쉽게 파악할 수 있다.

2) 동굴과 단층

보통 동굴의 길이는 그리 길지 않다. 짧은 것은 수십m에서 긴 것은 수㎞에 달하기도 한다. 동굴 형성을 단층과 관련하여 생각해 볼 수 있는 모식적인 형태는 그림 1과 같다.



<그림1> 구조와 단층과의 관계

위의 그림을 간단히 보충 설명하면

(ㄱ) ①과②의 층이 서로 어긋난다.

(ㄴ) 서로 어긋난 지층은 최대한의 안정성을 찾게 된다.

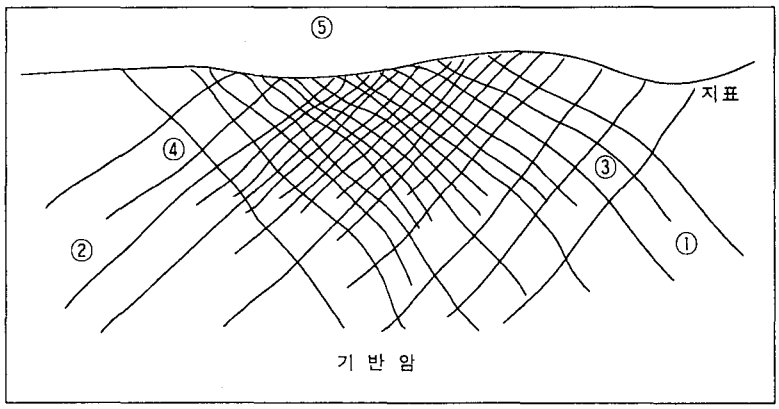
(ㄷ) 안정성을 찾아가는 과정에서 ③번과 같이 추정 단층선에 평행하지 않은 공간이 생긴다.

(ㄹ) ③번과 같은 공간이 동굴의 기본 골격을 형성하며 그 뒤에 2차적인 동굴 형성 작용(용식 등)이 가미되어 동굴의 2차 생성물이 만들어지고 동굴은 처음보다 미세한 지형으로 발달한다.

(ㅁ) 지층의 절리나 crack, fissure 등은 이러한 현상을 가중시켜 동굴 내부를 복잡하게 한다.

3) 동굴 형성에서 절리의 영향

절리가 지형형성에 미치는 영향은 매우 다양하다. 즉 절리는 외형으로는 화려한 것 같지 않으나 각종 지형형성에 직·간접적으로 작용한다. 예를 들면 절리는 기반암의 풍화나 각종 침식 영력에 작용할 뿐 아니라 동굴 형성에도 크게 관여한다. 아래 그림2는 석회암 지형이 형성되는데 관계되는 절리의 영향을 정리한 것이다.



<그림 2> 절리의 밀도와 침식과의 관계

그림 2에서는 절리의 밀도를 나타낸 것이다.

(ㄱ) ①②번 부분은 기반암에서의 절리 밀도가 작다.

(ㄴ) ③④는 ①②번보다는 밀도가 크다.

(ㄷ) ⑤번이 밀도가 가장 크면서 그 부근이 투수성이 가장 크다.

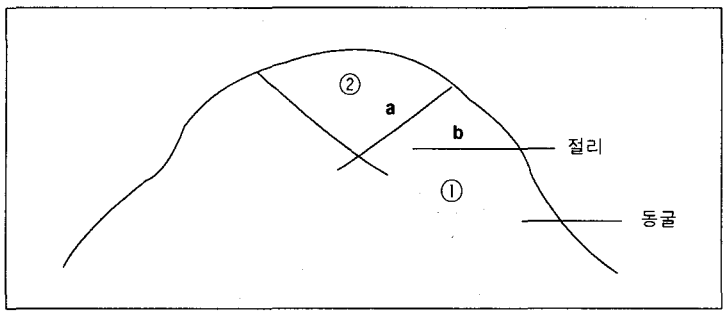
(ㄹ) 만약 기반이 석회암이라고 가정하면 ⑤번 부근에서 가장 큰 용식이 이루어질 것이다.

(ㅁ) ⑤를 통과한 물은 내부의 절리면을 따라 지하로 스며들어 계속적인 용식작용을 가속화 할 것이다.

4) 문제점

위와 같이 동굴성인을 구조지형학이나 구조지질학적인 입장에서 접근한다면 동굴의 성인을 밝히는데 큰 틀이 잡힐 것이고, 개발·유지·보수에서도 도움이 될 것이다. 그러나 그러한 구조적인 내용을 무시한다면 예상치 못한 위험이 발생할 수도 있을 것이다.

예를 들면 그림 3과 같이 동굴의 특정 단면을 관찰했을 때 동굴 내부에 동굴벽과 천장에 매달린 절리와의 관계를 보면 다음과 같다.



<그림 3 동굴의 일부>

(ㄱ) ①동굴벽은 동굴외부쪽으로 각종 fissure 나 crack, 절리 등이 발달해 있다.

(ㄴ) ②번 모양으로 천장에 매달린 부분은 천장에 연결된 절리 방향에 의지해있다.

(ㄷ) ②번은 힘을 어느 정도 받느냐에 따라 낙하할 가능성이 충분히 있다.

따라서 동굴 내부를 개발하고 유지 보수하는데는 이런 구조적인 점검이 매우 필요하다고 본다.

3. 동굴과 동굴 생성물

1) 석회동굴의 성인

모든 동굴은 그 종류에 따라 성인과 형성과정이 다르게 나타난다.

석회동굴의 경우 이는 석회암층으로 되는 지층 밑에서 이루어지게 되는데 동굴의 형성과정은 2차적 단계로 나뉘게 된다. 즉 땅 표면에서 스며든 지하수가 땅속의 석회암 층을 용해시키면서 땅속에 스며들어 지하수류를 이루게 되는데 이때 이 지하수류가 흘러 지나간 자리, 즉 공동이 이른바 석회동굴이다.

이 동굴은 1단계적으로 형성되었으나 지층속에서는 계속 석회암을 용해시킨 지하수가 동굴 천정으로 스며나오게 되는데 이때 천정에 고드름 같이 맺히는 경우 이것이 종유석이고 이를 통해 동굴바닥에 떨어져 자라는 것이 석순이다. 이와 같은 것은 2차적으로 형성되기 때문에 2차 생성물이라고 한다. 그런데 이들의 종유석과 석순들은 동굴속에 많이 발달하고 있는데 이들은 그 규모에 따라 다소 차이가 있기는 하나 우리나라에서는 대체로 1~3만년에 걸쳐 발달된 것으로 추정되고 있다. 그리고 우리나라 대부분의 석회동굴들은 그 생성연대가 4~8만년으로 추정되고 있다. 우리나라 석회암의 대부분은 고생대의 오르도비시기에 해당되는 지질시대에 해저에서 퇴적된 것으로 충북 단양 부근의 고수동굴 이외의 대부분의 동굴도 석회암층에서 형성되었다.

이와 같이 종유석과 석순들의 2차 생성물들은 오랜 세월을 두고 그 크기나 굵기에 따라 다르기는 하나 단양 고수동굴의 경우는 대체로 3만년 내외의 생성연대를 지니는 귀한 종유석과 석순이 많다. 그리고 동굴에 들어가 보면 천정에서 마치 국수발같이 내려뻗은 고드름 모양의 종유관, 굵게 또는 넓게 갖가지 형태를 이루며 내리뻗은 종유석이 신비롭게 이어져 있다. 이 종유관이나 종유석은 동굴을 덮고 있는 석회암 성분과 그 지역의 강수량에 따라 자라는 속도가 다를 수도 있다. 한편 종유석의 연령 측정, 즉 얼마나 오래 되어 있는지를 알아보려면, 앞서 지적한 조건을 생각하지 않으면 안된다.

선진국의 측정기준을 참고로 하여 우리나라 종유석의 나이를 환산해 보면, 직경 5㎜에 길이 1㎝ 정도면 약 15년의 세월이 필요한 것으로 알려져 있다. 이처럼 동굴속에 있는 종유석은 대부분 수만년 이상 된 지하박물관 전시품인 셈이다.

그리고 동굴 바닥에서 위로 향하여 자라는 퇴적물로는 '석순'과 '이순'을 들 수 있다. 종유석 끝인 종유관을 따라 떨어진 물방울이 바닥에 떨어지면서 방해석질로 조금씩 퇴적물로 쌓여져 올라오는 경우를 '석순'이라고 한다. 이때 바닥의 토질, 즉 맨 땅일 경우에는 물방울이 땅 속으로 흡수되어 자라나지 못하고 그냥 넓게 퍼지는 수가 있는데, 이 경우를 '이순'이라고 한다.

즉 이순은 올라오지 못하는데 비해 석순은 계속 올라간다. 그리고 마침내 종유관과 맞붙은 석순은 또 오랜 세월을 거치는 동안 점점 굵어져 '석주(돌기둥)'를 이루는 것이다.

구 분	침식지형	퇴적물과 침전물	물의 움직임
지표의 지형	카렌(라피에) 돌리네, 우발레 폴리에, 콕크피트 포노르	테라로사(홍점토) 화산재 산의 자갈, 흙	비, 용천 표류수, 복류(샘) 침투수
지하의 지형	동굴내 라피에 동굴내 놋치 침식붕(선반) 동굴내 폿트홀 수평굴←경사굴	종유석 석주 석순 석회화단구	열극수 동굴류 용천(샘)
협곡의 지형	천연교, 동문 폿트홀, 놋치 닛치, 협곡	애추 단구	용천 간헐천

[표 1] 석회암 대지와 지형관계

한편 동굴의 모양, 즉 형태를 바꾸는데 결정적인 역할을 하는 것은 다름아닌 '물'이다. 석순·이순·석주도 따지고 보면 물의 운동에 의해 생겨난 것이다. 더욱이 동

굴속을 흐르는 물(지하수) 혹은 고여 있는 물도 있다. 이 물에 의해 동굴의 모양은 끊임없이 변해간다. 이처럼 자연의 힘이란 위대하고도 놀라운 것이다.

2) 동굴의 발달과 형성

동굴이 어떻게 이루어졌는가 하는 문제는 우리들 누구나가 관심을 가지는 일이다. 그 동굴이 종유굴이건 용암동굴이건 또는 파식동굴이든간에 이들은 각기 제나름대로의 동굴 형성의 과정을 밟고 있는 것이다. 그 중 용암동굴은 화산의 분출과 관계 있지만 다른 것들은 모두가 물의 용해작용과 관련되어 있다.

즉, 석회암층 자체가 수평인 동굴에 있어서는 동굴의 통로가 수평이라는 것은 충분히 납득이 갈 것이다. 그리고 석회암층이 습곡되어 있다든지 급경사를 이루고 있는 것 같은 곳에서조차 동굴의 통로는 수평인 것이다. 더욱이 거의 수평에 가까운 석회암 중에 있는 거대한 동굴 계통에 관하여, 지난날의 연구자들은 가장 용해되기 쉬운 지층에 따라 통로가 생길 뿐이다라고 생각했는데, 최근의 연구에 의하면 그러한 경우에도 통로는 석회암의 층리와 근소하게 사교되어 있다는 것이 판명되게 되었다. 통로는 정확하게는 층리에 평행하는 것이 아니고 거의 수평한 면에 지배되고 있는 것이다. 그러므로 주류의 통로는 지하수면 바로 밑의 근소한 수평부분에 형성되기 쉬운 것이다. 주류 통로가 크게 됨에 따라 지하수면 밑의 거의 모든 물의 운동은 이 부분에서 일어난다. 용해하고 있는 탄산칼슘은 포화대 정면의 완만한 구배에 따라 때로는 수 마일까지도 골짜기 계류를 따라 유출구쪽으로 운반되는 것이다.

석회동굴(종유굴)	석회암의 물의 용식작용으로 생기는 공동
화산동굴(용암굴)	분출된 용암이 냉각되어 굳어지는 과정에서 생기는 공동
해 식 동 굴	파도작용으로 해안의 암벽에 생기는 공동
빙 하 동 굴	빙하가 용해되어 생기는 공동

[표 2] 동굴의 종류(성인상)

이상과 같은 동굴 형성의 과정은 수천년 동안이나 계속될지도 모른다. 그러나, 단

두 가지 요건만이 동굴형성을 정지시킬 수가 있다. 즉, 지하수면의 저하와 지표침식에 의한 동굴 입구의 형성이다. 지하수면의 저하는 동굴의 물을 배출한다. 이 사실은 용해작용이 정지되든지, 또는 그보다 낮은 레벨에서 저위의 동굴 계열이 형성될 때까지 계속됨을 의미하는 것이다.

동굴의 개구는 언제나 동굴 형성과정의 종말을 나타낸다. 동굴의 입이 열림으로서 환기가 행하여짐으로 이산화탄소의 높은 기압은 지하수면보다 위의 동굴에 있어서 이미 유지될 수가 없는 것이다. 과잉된 이산화탄소가 방산되고 물은 급속히 방해석으로 포화 또는 과포화의 상태가 되어, 결국은 용해의 과정이 끝난다. 사실 이상의 변화는 종유석 그 밖의 다른 특징적인 구성물을 형성하는 방해석 침적의 시작을 나타내는 것이다.

그러므로 동굴에 사람이 들어갈 수 있을 정도가 되면 관광객의 흥미를 끌만한 조작물 즉 종유석과 석순 등으로 장식되게 된다.

3) 동굴 생성물의 성장과정

(ㄱ) 동굴생성물의 성인

동굴내부에 생성되는 이른바 2차 생성물(즉 종유관, 종유석, 석순, 석주 등)은 주로 종유동굴의 동굴천정과 동굴벽면을 구성하고 있는 암석층을 이루고 있는 것과 같은 광물인 방해석에 의하여 이루어지는 것이다. 이 방해석은 토양 지층을 침투되어온 산성이 약한 약산성의 물(수분)에 의하여 동굴천정의 석회암층에서 용해된 광물이다. 이 용해된 방해석의 수분이 동굴속 공동의 천정이나 벽면에 맺혀질 때 이 물방울은 이에 섞여 있는 방해석을 침적시키게 되는 것이다.

이와 같은 침적된 생성물이 곧 2차생성물들이다. 이때에 동굴 내의 공기는 수증기로 포화 상태에 있기 때문에 동굴내부에 스며든 수분 즉 물방울은 전혀 증발할 수 없는 것이다. 물론 동굴의 입구가 좁거나 거의 동굴내가 외부로부터의 공기가 스며들지 않는 경우이다. 따라서 용해된 방해석의 물방울을 적출시키는 작용은 동굴천정이나 벽면에서 침투된 물방울에서 이산화탄소의 기체가 없어지는 전혀 다른 과정에 의하는 것이다.

즉 동굴표면지층의 토양층에서는 많은 식물의 유물들이 썩기 때문에 토양층에 내

포되어 있는 공기층에 섞여있는 이산화탄소는 10%를 넘게되는 것이 보통이다. 이때에 이 비율은 지표면의 대기층에서의 300배에 해당하는 작용력을 지니고 있는 것이다. 이때 이산화탄소는 토양속에 내포된 물방울과 결합하여 이른바 탄산을 이룬다. 그리고 이 이산화탄소는 그 지층을 구성하고 있는 석회암의 일부를 용해시키면서 동굴속으로 유동하게 된다.

즉 침투수는 동굴속에서 공기에 접하게 되면 이곳은 대체로 이산화탄소의 압력이 보다 낮기 때문에 이때에 이산화탄소는 물방울에서 배출되게 되는 것이다. 이 때문에 산성으로 된 토양의 물방울은 계속 동굴속에 스며들면서 석회암층을 용해시키게 된다. 이와 같은 과정은 동굴천정면에 이르기까지의 2차 생성물들이 형성되기 위하여 침투되는 과정이다. 즉 이와 같이 스며든 물방울은 매우 빠르게 이동하기 때문에 이동안 즉 동굴속으로 나타날 때까지는 아직 방해석질은 불포화상태에 있게 되는 것이다. 즉 동굴의 생성물의 밖에서는 용해된 물방울이 어느 정도의 이산화탄소를 소실하게 되므로써 이른바 방해석의 침적작용이 이루어지는 것이다.

순환하는 지하수의 용식형태	닛찌와 놋찌, 폿트홀, 도움핏드, 수직조흔, 펜단트, 천장용식구, 스카랖, 수평천정 등
포화상태 지하수의 용식형태	포켓, 캐비티, 스폰지워크, 천연교, 주석, 아나스토모시스, 용식관, 프레아틱 펜단트 등

[표 3] 석회동굴에서의 용식작용

그리고 종유석은 동굴속에서 공기가 잘 통하고 있는 곳에서 성장하게 된다. 즉 이산화탄소가 아직 많이 내포되고 있는 곳에서는 용해된 기체가 동굴속의 공기속으로 벗어나지 못하기 때문에 탄산칼슘의 침전작용은 이루어지지 않아 생성물의 형성이 어렵게 되는 것이다. 따라서 동굴의 깊은 곳에서는 방해석의 동굴생성물이 성장하지 못하게 되는 것이다.

즉 토양층에서 이산화탄소가 이루어지는 비율은 부패작용이 일어나는 미생물의 활동과 관계된다. 더구나 이 활동은 온도와 습도에 의존하고 있는 것이다. 즉 토양의 온도와 습도에 의존하고 있는 것이다. 토양의 온도와 습도가 높으면 부패는 급속하게 진행되기 때문에 동굴속 공기중의 이산화탄소 함유량에는 계절에 따라 주기적으

로 변화가 일어난다. 즉 이산화탄소의 생산은 위도와의 사이에 깊은 관계가 있다.

예를 든다면 보다 많은 이산화탄소가 기후가 춥게 나타나는 북쪽의 동굴위에서 보다는 따스한 남쪽의 동굴위에서 생산되는 것이다. 따라서 한대지역보다도 온대지역이 그리고 온대지역보다도 열대지역의 석회암지층지역에서 화려한 동굴 생성물들이 성장하게 된다.

(ㄴ) 동굴생성물의 구분

동굴 속에 형성되는 지형지물은 떨어지는 물방울에 의하여 성장하는 경우와 흐르는 물에서 형성되는 경우 그밖에도 복합적으로 이루어지는 지물로 나뉜다.

즉 낙하되는 물방울에 의하여 형성되는 것으로는 동굴천정면에서는 종유관, 종유석, 커어튼, 베이컨종유 등이 있고, 동굴바닥에는 석순, 이순, 석주 등이 그리고 동굴벽면에서는 동굴바닥에 플로우스톤 즉 유석이 그리고 석회화단구를 이루는 림스톤, 림푸울 이 있고 동굴벽면에는 종유폭포가 이루는 유석경관이 성장하여 수직조흔도 볼 수 있다.

	천 정	동굴바닥	동굴벽면	동굴호소(푸울)
떨어지는 물	종유관 종유석 커어틴 베이컨시이트 복스와아크	석순 이순 카누라이트 석주	커어틴	케이브퍼얼(동굴진주) 케이브피소라이트
흐르는 물		플로우스톤 림스톤	플로우스톤	케이브퍼얼 케이브피소라이트 방해석결정
기타의 원인	헬릭타이트(곡석) 견치상결정 집산플라워	헬리그마이트	헬릭타이트 안소다이트 케이브코랄 증공구상종유석	부유칼사이트 포상칼싸이트 케이브코랄 방해석대결정

[표 6] 주요 동굴 생성물

그 밖의 원인으로 성장하는 것으로는 천정면의 곡석, 견치상결정, 집삼플라워가 성장하고 동굴바닥에는 곡석이 동굴벽면에는 헬릭타이트(곡석), 안소다이트(석화), 케이브코랄(동굴산호)등이 성장한다. 물론 이들은 그 용해수 물방울의 크기와 동굴내의 증발정도, 동굴속의 통풍상태와 대기상태 그리고 물방울의 이동, 표면장력과 모관현상, 중력상태 그밖에도 동굴천정면의 석화암질의 여하가 퇴적물의 성장조건으로 커다란 몫을 하고 있는 것이다.

(ㄷ) 동굴생성물의 여러 가지

(1) 종유관(Straw)

동굴 천정면의 곳곳에서 내려 뻗는 투명체의 빨대 모양의 좁고 긴 관상의 생성물로 '소다스트로(soda - straw)'라고도 부른다. 직경 5㎜ 정도의 관 모양으로 침적된 방해석으로 그 관의 두께는 약 0.1~0.5㎜에 달한다. 동굴의 천정에 침출된 지하수의 물방울이 천정에 부착되고 있을 때 그 표면에서 이산화탄소가 발산되고 미세한 방해석의 결정은 물방울 크기의 반지 모양으로 둥글게 천정면에 침적한다. 이와 같은 과정이 계속되어 형성되는데 길이는 보통 20cm 내외가 많으며 이와 같은 종유관이 많은 동굴은 지금도 성장하고 있는 동굴이라고 말할 수 있다. 영월의 연하굴에서 매우 훌륭한 경관을 보여 주고 있다.

(2) 종유석(stractite)

보통 종유관이란 동굴의 천정이나 벽면에서 내려 뻗은 생성물을 가리키지만 넓은 뜻에서는 석순이나 석주까지 모든 동굴생성물을 총칭하는 경우도 있다.

1	물방울의 크기	4	동굴내의 온도와 습도
2	동굴내의 증발 정도	5	물방울이 미치는 물체
3	동굴내의 통풍 상태		

[표 7] 종유석이 성장속도에 미치는 조건

특히 고수굴에서는 만물상지역에서 많은 대규모의 종유석을 보게 되는데, 특히 석순과 석주 그리고 종유석 등은 매우 자랑스럽다. 이것은 이차생성물의 속도가 빠른 것을 나타낸다. 관광동굴로 알려진 우리 나라의 고수굴, 성류굴, 고씨굴 등 석회동굴에서 흔히 볼 수 있는 동굴 생성물이다.원래 종유석은 종유관의 발달과 밀접하게 관계되고 있으며 먼저 생긴 종유관이 나중에 방해석에 의하여 충진된 것이다. 천정에 침출한 지하수가 이미 발달하고 있는 종유관의 외벽을 따라 흐를 때, 이 외벽에 엷은 막으로 방해석을 침전시킨다. 그리고 이의 성장과정에 있어서 방해석에 점토 등의 불순물이 혼합되거나 그 성장이 중단되기도 하는데 이것은 종유석의 단면으로 판단할 수 있다.

(3) 석순(stalagamite)

천정에서 또는 벽면에서 떨어지는 지하수에 의하여 이루어지는 퇴적물을 '석순'이라고 한다. 이 생성물은 천정에서의 물방울이 굴 바닥에 떨어져 흩어지거나, 바닥에 막상으로 넓게 전개되기도 하는데, 이 때에 이산화탄소가 발산하여 방해석을 침조시켜서 이루어지는 생성물이다.

석순은 대부분이 종유석보다 크게 성장하며 반드시 종유석과 서로 마주보게 되는데 고수굴의 신개발지의 경우에는 종유석의 발달보다도 석순의 발달이 활발하다. 우리 나라 관광동굴에서 흔히 볼 수 있는 동굴 생성물이다.

석순의 성장은 아래 조건들에 의해서 달라질 수 있다.

즉 동물의 천정면의 석회암의 성분과 이들이 스며내린 지하수의 양 그리고 이들의 용해된 물발울이 천정에서 떨어지는 빈도, 그리고 그 당시의 동굴 내부의 온도와 습도, 그 밖에도 용해된 물방울의 농도 등이 서로 이 석순의 발달 규모를 좌우하게 된다. 사실상 석순이 종유석과 달리 나타나는 것은 종유석은 종유관과 같이 중공의 관이 종유석 속에 길게 내려뻗어 지하수의 물방울이 이를 따라 내려뻗어 발달하는데, 석순은 지하수의 물방울이 종유석을 따라 흘러 밑바닥에 떨어져서 점차 위로 성장하기 때문에 관상의 중공 현상은 볼 수 없고 윗부분의 끝머리는 둥굴게 발달하지만 물방울의 양과 낙차에 의하여 때로는 오목하게 패여진 모양을 보여주기도 한다.

고수굴에서는 급속도로 이차생성물들이 성장하여 그 물방울의 떨어지는 빈도가 크고 이 용해수의 농도가 짙어 그 퇴적 당시에 동굴 내부의 온도와 습도와 높아서 굵고 탑상의 석순이 발달한 것이다.

(4) 석주(Column)

천정에서 매달리는 물방울이 종유석을 만들고, 이들 중 일부가 떨어져서 동굴 바닥에 석순을 발달시키고 있는데 이들 종유석과 석순의 발달이 계속되어 서로 연결되었을 때 이것을 '석주'라고 한다. 따라서 이 석주는 처음에는 종유석의 끝머리의 가느다란 부분이 석순의 둥그스레한 굵은 꼭대기 부분과 연결되는데 이 연결부분은 나중에 계속 흘러내리는 지하수의 물방울에 의하여 종유석의 표면에 흘러내려 점차 굵다란 석주로 된다. 즉 종유석과 석순을 따라 흘러내리는 지하수는 석주의 주위에 방해석을 침적시켜 굵게 성장하는 것이다. 성류굴, 고씨굴 등지에서 흔히 보게 된다.

(5) 베이콘(Bacon)

동굴 천정면에 또는 느린 경사의 동굴 벽면에 깊고 엷게 막상을 이루면서 성장하는 2차생성물로 베이콘과 비슷하다고 하여 '베이콘 종유 또는 베이컨'이라고 한다 커어틴이 비교적 수직적으로 성장하는데 반하여 이 베이콘 종유는 수평 또는 경사진 곳에 발달한다. 그리고 밝은 색과 어두운 색으로 交互하는 줄무늬 모양을 이루는데 이는 불순물의 포함량에 따라 다르게 나타난다. 고수굴, 성류굴 등지에서 많이 보게 된다.

(6) 복스와아크(Boxwark)

동굴 천정면에서 바둑판 모양의 틈 사이로부터 커어틴같은 가늘고 엷은 종유석들이 줄지어 성장한 것을 말한다. 이것은 얼핏 보면 상자같은 모양을 이루기도 하는데 여러 개의 복스와아크가 있으면 벌집같이 보이기도 한다. 또한 석회암 속의 방해석 줄기가 그 주변의 모암과의 사이에서 차별적인 용식을 받아 남아있는 것도 '복스와아크'라한다.

(7) 커어튼(Curtain)

동굴 천정이나 벽면에서 떨어지는 물방울에 의하여 생성되는 종유석의 일종으로 그 모양이 커어튼을 걸어놓은 듯 엷고 길게 발달되는 것인데 고수굴에서는 만물상 지성에서 볼 수 있다. 이 커어튼 종유는 엷고 넓게 발달되기 때문에 반대측에서 빛을 비추면 밝게 빛이 투시되며 이를 두드리면 여러가지 음정의 소리가 난다. 많은 관광동굴에서 흔히 볼 수 있다.

(8) 동굴진주(Cave pearl)

동굴생성물 중에는 동굴의 천정이나 벽면에서 부착되지 않은 생성물의 하나로는 케이브퍼얼 즉 동굴진주가 있다. 이것은 그 직경이 수 ㎜~수 ㎝에 달하는 것도 있는데 그 모양은 난형이나 구형을 이룬다.

케이브피솔라이트와 달라서 이 케이브퍼얼은 표면이 매끈매끈한 상태로 콩알같은 두석을 이룬다. 이 '케이브퍼얼'은 그 콩알 속에 모래알이나 작은 자갈 등을 핵으로 한 것으로 이것이 방해석으로 엷게 몇 겹이나 씌워있는 것이며 동심원상의 단면구조를 이루고 있다. 그리고 이 방해석의 결정은 각 단층에 수직으로 되어있다.

또한 케이브퍼얼은 천정에서 계속 물방울이 떨어지는 극히 얕은 푸울이나 림스톤푸울을 속에서 형성된다. 즉 이와 같은 동굴호수나 석회화단구 속의 림스톤푸울 속에 있는 모래알이나 자갈이 물바울이 떨어지는 물결 속에 굴러다니면서 방해석으로 코오팅된 것이다. 고수굴, 고씨굴 등지에서 흔히 볼 수 있다.

(9) 케이브피솔라이트(Cave pisolite)

'케이브피솔라이트'는 케이브퍼얼과 같은 것이며 그 성인과 형성과정도 거의 비슷하다. 다만 케이브피솔라이트는 그 표면이 깔깔한 것이 특징인데, 큰것은 '케이브피소라이트' 또는 어란석이라고 부른다.

(10) 유석(Flowstone)

동굴 벽이나 동상의 표면을 지하수가 흘러내리면 이 때 평탄한 면 위에서는 엷고 넓게 번지면서 흘러내리게 된다. 이 때 지하수는 대기와 접하게 되는데 이산화탄소는 발산하기 쉽게 되어 방해석이 침적된다. 이와 같이 침적되어 형성된 생성물을 '플로우스톤'이라고 한다. 고수굴, 노동굴, 고씨굴, 성류굴 등지에서 흔히 볼 수 있다.

동굴의 벽면은 물론이고 그 밖에도 느린 경사면의 바닥 등에서 흔히 볼 수 있는데 보통 동굴 폭포와 같이 보이는 현수형 유석과 계단을 이루는 단층형 유석 그리고 느린 지면에서 석회화단구의 생성없이 계속 되어 발달된 동굴사면 등이 이에 속한다.

(11) 림스톤(Rimstone)과 림스톤푸울(Rimstone - pool)

지하수가 느린 경사를 이루는 동굴 바닥을 흘러내리면 이 때 그 유로 바닥에서 침적작용이 일어나 논두렁같은 작은 언덕이 생기는데 이것을 '림스톤'이라고 한다.

이 림스톤 안에는 흘러내린 동굴유가 고이게 되는데 이 푸울을 '림푸울(Rimpool) 또는 림스톤푸울'이라고 부른다. 이들을 총칭하여 석회화단구(Travertine terrace)라고도 한다.

고수굴의 선녀탕이 대규모적인 석회화단구의 지형이다. 또한 초당굴, 고씨굴 등지에서 흔히 볼 수 있다.

(12) 동굴산호(Cave coral)

흔히 어떤 동굴에서도 볼 수 있는 동굴생성물로 볼룩하게 된 돌기지물로 산호 모양을 이루는 것이 않아 이와 같은 이름이 붙었다.

이 케이브코랄(Cave coral)에는 그 형태로 보아 여러가지로 구분되는데 팝콘(Popcorn), 카울리플라워(Cauli flower), 그레이프(Grapes), 코오랄(coral) 등의 구분이 있다. 이들은 그 대부분이 동굴 내부의 푸울 속에서 생성되었으므로 구상의 군생된 생성물인데 일단 수면하인 체수층 지점에서 생성되었기 때문에 수벽에 의해 그 끝부분이 구상을 이루게 되는 것이다. 따라서 이들이 지하수면 위에 생성되었다면 이 부분은 그 옛날 과거에 수면하에 있었음을 말해주는 것이다. 특히 정선 여량에 있는 산호동굴 속은 커다란 공동에 동굴산호가 만발한 특색있는 동굴이어서 '산호동굴'이라 부르게 되었다. 동굴산호는 많은 동굴 벽면에서 보게 된다.

(13) 칼싸이트(Calcite)

동굴 속에 수유가 없을 때 동굴 속에 있는 늪, 연못의 수면에는 방해석의 미세한 결정이나 매우 엷은 막상의 결정물이 물 위에 떠있는 경우가 있다. 이것은 '부유칼싸이트'라고 한다.

그리고 부유칼싸이트가 떠 있는 수면에 물방울이 떨어져 그 때에 생긴 작은 기포의 주위에 방해석의 결정이 부착되면 구상의 엷은 막을 이루는 '포상칼싸이트(Calcite bubble)'이다.

(14) 포켓(Pocket)

석회동굴 속의 포화수대에서 생긴 미형태의 하나로 천정이나 벽면에 파여진 용식공을 말하며 반구상의 오목한 곳을 '포켓 혹은 벨홀'이라 한다.

이 포켓은 그 생성한 위치에 의하여 천정에서 생긴 씰링포켓(Ceiling pocket)과 벽

면에 생긴 월포켓(Wall pocket)으로 나누기도 하고 한편 단일포켓과 복합포켓 등으로 구분되기도 한다. 고수굴에는 곳곳에 많이 발달하고 있는데 그 중 작은 것은 직경이 10~20㎝에 달하고 있다.

(15) 캐비티(Cavity)

포켓과 같이 포화수대 속에서 생성된 용식 형태의 하나로 그 모양은 포켓과 같으나 절리에 따라 오목하게 패여진 것이다. 물론 그 달려있는 위치에 따라 쎄일링캐비티와 월캐비티로 나뉜다. 석회동굴에는 이와 같은 캐비티는 곳곳에 발달한다.

(16) 스폰지 워어크(Sponge work)

동굴 속의 벽면이나 천정부에서 보는 작은 구멍의 집합체이다. 이는 포화수대 속에 있는 석회암의 성분 중 칼슘과 마그네슘의 비율에 따른 차별용식의 결과이다. 고수동굴 속에서는 매우 미형태로 나타나고 있을 뿐이다.

(17) 아나스토모시스(Anastomoses)

주로 동굴의 천정면에서 많이 볼 수 있는데 구조선에 따라 용식에 의하여 생긴 작은 관상을 이룬 복수의 오목부분이 복잡하게 사행하는 형태인데 주로 그 크기는 수㎜~50㎝ 정도까지 나타나고 있다. 용식관과는 구별되는데 아나스토모시스는 망상으로 발달되고 용식관은 단일모양을 이루고 있다.

(18) 용식관(Solutional tube)

천정이나 동굴벽면에 반달모양의 단면을 이루는 도랑(오목한 곳)이 계속 구비치며 뻗고 있는 형태를 말한다. 아나스토모시스 보다는 그 규모가 크며 대부분은 반달모양의 오목한 도랑으로 되며 절리면에 따라 형성되는 경우도 있다. 이 용식관의 성인은 그 상태에서 이해되는 것과 같이 피압수에서 얻게 되는 생성물이다.

(19) 보아 팻세지(bore passage)

'프레아틱 터널 또는 튜브'라고도 하며 포화수대로 동굴이 되어 있을 때 그 포화수대 중의 지하수는 피압되고 있어 용식작용이 활발하게 되어 아나스토모시스나 용식관의 단계에서 다시 크게 원형의 횡단면을 이루는 통로로 발전하게 된다. 고수동굴

의 하층부에서 볼 수 있다.

(20) 프레아틱 펜단트(Phreatic pendants)

아나스토모시스의 발달에서 통로의 형성을 보게 되어 천정에 남겨진 아나스토모시스가 수하물로 안정되는 형태이다. 석회동굴의 천정에서 매달린 모암의 돌기물로 인정되며 종유석과 비슷하다. 크기는 수㎝에서 약 50㎝까지 있는데 같은 장소에서 수하물은 거의 크기가 비슷한데 고수굴의 "사자바위" 부근에서 볼 수 있다.

(21) 록크 스판(Rock span)

동굴을 구성하는 형태로 국부적으로 모암에 의하여 이루어진 천연교나 기둥 등을 총칭한다. 그 형태에 따라 천연교(Natural bridge), 주석(Pillar), 구분벽(partiton wall) 등으로 구분한다. 천연교에는 속칭 "개선문"으로 불리우고 있는 것과 같이 통로를 가로막고 있을 정도 대규모적인 것이 있고 주석은 이른 바, 석주(Column)와는 다르다. 즉 이는 용식에 의한 남은 부분들이다.

(22) 놋치(Notch)와 닛치(Nich)

동굴 내로 흘러간 하천의 흔적으로 유수에 의한 측방침식에 의하여 형성된 미지형인데 깊게 파고든 침식 보다는 높게 파고든 침식을 '놋치'라고 하며 깊은 것을 '닛찌'라고 하는데 고수동굴 속의 하층부는 계속 이와 같은 닛치와 놋치지형에 발달하고 있다. 이 지형은 순환수대에서 발달한다.

(23) 바도우즈 펜단트(Vadose pendants)

순환수대 속에서 잔존된 모암의 수하물을 말하며 포화수대에서 생긴 프레아틱 펜단트와는 구분짓고 있다.

이 바도우즈 펜단트의 성인으로는 동굴이 발달되고 있을 때에 粘土가 통로를 덮어 씌워 천정면과의 사이의 수류에 의하여 형성되는 경우와 지하수의 증수로 천정부까지 침입하여 용식 차에 의하여 생기는 경우 등이 있는데 고수굴의 "사자바위"는 이의 좋은 예이다.

(24) 메안다 트렌치(Meander trench)

석회동굴 내부를 흐르는 하천의 측방침식에 의하여 놋치, 닛치지형이 형성되는데 하방침식에 의하여 동상이 깊게 패여지게 되는 경우 이 하각작용으로 크게 사행으로 생긴 사행구를 '메안다트렌치'라고 한다. 고수동굴의 하층 통로는 모두 이 사행구에 의하여 통하고 있다. 평창 광천선굴 등에서 볼 수 있다.

(25) 수평천정(Flat ceiling)

석회동굴 속의 절리면에 따라 천정이 붕락되어 생긴 경우와 지하수면이 오랫동안 안정되어 측방확대가 크게 작용하여 수평천정을 이룬 경우의 두 가지 이론이 있다. 고수동굴은 하층 중간에서 많이 보게 되는데 두 가지 모두의 경우로 형성되었다고 판단된다.

(26) 천정구(Ceiling channel)

순환수대의 지하수에 의하여 동굴 내부의 천정면에 깊게 패여진 골(도랑)을 '천정구'라고 한다. 천정구는 천정면의 용식관과는 구별되는데 용식관은 포화수대 중에서 형성된 것이다.

(27) 수직조흔(Vertical groovings)

수직동굴의 벽면에서 흔히 볼 수 있는 수직으로 뻗어내린 줄기를 말하며, 그 줄기의 도랑 크기는 그 넓이가 1~30㎝이고 길이는 그 벽면을 따라 계속 내려뻗고 있어 다양하다.

이의 성인은 벽면을 흘러내리는 순환지하수에 의하여 생기는 것으로 고수동굴 내부에 있는 "만물상" 지구의 벽면에서 많이 볼 수 있다.

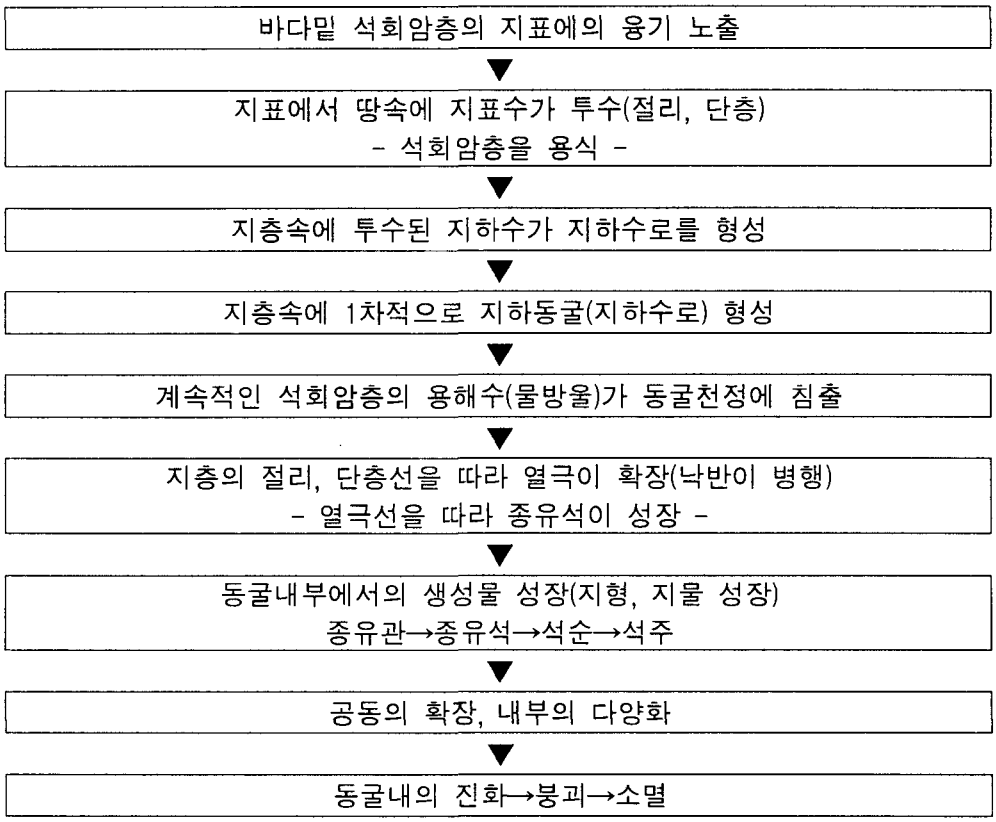
4. 동굴의 특성 분석

1) 석회 동굴의 특성

동굴은 자연경관이 아름답기 때문에 최근에는 관광자원으로 주민의 소득을 올리는

데 크게 이바지하고 있다. 단양의 고수동굴, 울진의 성류굴, 영월의 고씨굴 그리고 제주도의 만장굴과 협재굴 그 밖에 최근에 개발된 동해시의 천곡동굴, 삼척의 환선굴, 태백의 용연굴 그리고 단양의 온달굴 등은 이의 좋은 예이다.

옛부터 동굴은 혈거지로 이용되었고 전시에는 동굴이 작전기지나 대피소로도 이용되어왔다. 2차 대전 당시의 프랑스 지역에서는 많은 동굴이 게릴라의 작전기지로 이용되었으며 더구나 임진왜란 당시에 피난처로 이용됐던 울진의 성류굴 등은 너무나도 유명하다.



[그림 5] 석회암 지대와 동굴

원래 동굴은 기온과 습도가 연중 비슷한 암흑의 세계일 뿐만 아니라 견고한 암석 지층의 장벽으로 둘려 있는 천연의 요새이기도 하다. 따라서 동굴은 천연적인 냉장고이며 암실이고 지하댐이기도 하다. 그리고 천연의 창고이며 공동이고 동시에 실험

실이다. 한편 태평양 제도의 여러 곳에서는 시신을 모시는 동굴장터로도 이용되는 습관도 남아있다.

요컨대 동굴은 자연적인 조화의 극치를 이룬 지하세계일 뿐만 아니라 자연을 그대로 볼 수 있는 현지학습장이기도 하다.

동굴 속의 2차 생성물들의 신비로운 경관은 땅 표면에서의 투수 작용과 지질적인 암석구조를 그대로 볼 수 있는 학습현장이며 자연실험실이 되고 있다. 그리고 지표에서는 이미 없어져 버린 지질시대에서나 찾아볼 수 있었던 화석곤충 갈로와곤충들이 아직도 동굴 속에 살고 있으며, 눈이 없고 더듬이가 발달한 특이한 지하수생물 등에 대한 연구조사는 참으로 학술적인 측면에서 매우 중요한 것이다. 그리고 선사시대의 주거지로 사용되었던 유적들이 남아있기도 하는데 단양의 고수동굴에서는 타제석기가 발견되었고 중원의 두루봉동굴에서의 유적자료 발견, 미원 청석다리굴에서의 성혈과 노지 발견 등은 이의 좋은 예이다. 이밖에도 동굴내의 갖가지 동굴생성물들의 형성과정은 화학적 작용에 의한 것이고 동굴의 통로는 지하수류의 유로였으므로 이곳에서 지형 또는 물리적 작용의 학술적 현장을 볼 수도 있는 것이다.

2) 석회 동굴의 가치

동굴은 학술적 가치에서 뿐만 아니라 관광적인 면에서도 매우 중요한 몫을 하고 있다. 현재까지 우리나라에서 개발된 관광동굴로는 석회동굴로 울진의 성류굴과 영월의 고씨굴 그리고 단양의 고수굴과 노동굴, 천동굴, 온달굴, 동해의 천곡동굴, 환선굴, 용연동굴, 화암굴 등이고 화산동굴로는 제주도의 만장굴과 협재굴의 12개소 뿐이다.

천연기념물로 지정받고 있는 삼척의 대이리 동굴지대의 환선굴은 그 경관이 수려하고 관음굴은 동굴내에 커다란 폭포가 걸려있어 이름이 났다. 그리고 역시 삼척의 초당굴은 동굴내부의 경관도 이름이 났으나 특히 동굴류가 많이 흘러나오는 토출형 동굴로 유명하다.

또한 옥계의 석화동굴은 그 이름과 같이 돌꽃이 만발하여 이름났고 정선의 화암굴은 화려한 플로우스톤의 종유벽과 대형석순이 도사린 광장형 동굴이다. 그리고 같은 정선 여량의 산호동굴은 대형광장이 5개가 결합된 동굴산호의 전당으로 그야말로 동양 제일이고, 이 부근의 비룡굴은 대형 수평동굴이며, 영월의 용담굴 역시 수직광장

의 대형동굴로 이름나 있다. 또한 영월의 공기못굴은 수직의 동굴밑에 깊이 10m, 넓이 400㎡의 대형 동굴호수를 간직하고 있고 시루봉에도 동양 제일의 높이(18m)를 지니는 플로우스톤으로 이름난 시루봉동굴이 있다. 이 동굴은 규모는 작으나 연하에는 종유관이 즐비한 연하굴 즉 수정동굴이 있다. 이 밖에 평창땅에는 백운산 기슭에 화려한 백룡굴이 남한강 강가에 자리잡고 있다.

앞에서도 언급했지만 동굴속은 항상 어둡고 캄캄하여 기온이나 습도가 연중 거의 비슷한 환경을 이루고 있다. 이와 같은 항온·항습인 암흑 세계인 동굴환경 때문에 동굴속의 생태계는 바깥 세상과는 다른 특이한 양상을 나타내고 있다.

즉 동굴생물의 대부분은 눈이 퇴화되고 있다. 이와 반면에 동굴생물의 더듬이 즉 촉각은 발달해 지표면에 사는 같은 종류의 곤충보다도 훨씬 기어지고 있다. 그리고 생물의 색깔도 퇴색되어 대부분이 회색이나 흰색에 가까운 색채로 변한다.

이밖에도 동굴 속에는 동굴생물의 영양분이 적어서 발육이 나빠 동굴생물의 크기는 대부분 왜소하다. 그리고 동굴생물 중 지표면에서는 없고 동굴속에서만 찾아볼 수 있는 진동굴성 생물은 동굴의 규모가 크거나 일년 중 계속 흐리지 않고 고여있는 동굴호소 속에서 살고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 외기의 영향을 받지 않고 오랜 세월을 거쳐 온 환경적인 현상이라 하겠다.

3) 화산동굴의 특수성

석회동굴이 계속적으로 자라고 있는 동굴임에 반해 화산동굴은 생성 당시에 일단 형성된 이후에는 훼손되거나 오손되면 영원히 재생되지 못하는 것이 특징이다.

화산동굴은 화산활동 때에 흘러내린 용암류속에 동굴이 발달된 다음 일단 냉각되면 그대로 굳어지고 말기 때문에 더 이상 동굴속의 종유석이나 석순 등은 자랄 수가 없는 것이다. 다시 화산동굴이 계속되지 않는 한 영원히 동굴퇴적물들은 그대로 끝맺고 마는 것이므로 오손되면 재생이 불가능한 것이다.

즉 화산이 분출할 때에 유동성이 커다란 용암이 지표면을 흘러내리게 되면 이때 이 용암류속에서 동굴이 형성되게 된다. 이 때에 용암의 온도는 섭씨 1,200℃이상이 되며 화구에서 흘러내릴 때 지표면의 공기에 마찰되어 용암류의 윗부분은 냉각되어 굳어지므로 껍데기를 이루고 그 속을 계속 흘러 내려오는 용암은 연속적으로 낮은 지표면을 따라 흘러가게 된다.

따라서 원래의 지표면이 느린 경사면을 이루고 있을 때에는 이 유동성이 큰 용암류속에서는 장대한 화산동굴이 발달되게 마련이다. 유동성이 큰 흘거운 용암일수록 분출된 분화구의 산정 부근에 남아있지 않고 산기슭 밑으로 흘러내려가게 되는데 제주도의 경우에는 서북쪽과 동북쪽사면으로 흘러내려 멀리 해안지역까지 동굴이 계속되고 있다.

즉 마그마가 화도를 따라 올라와 용암이 되어 나올 때 용암의 점성이 크면 개스의 압력이 높아지게 되므로 폭발적인 화산분출이 있게 마련이다. 그러나 동굴속에서 흘러내려가는 용암은 점점 그 점성이 작아지기 때문에 이때에는 커다란 폭발은 없게 된다. 그 때문에 용암속에 수증기는 무더운 열기를 품고 있으면서 동굴속 천장부근에 상승집합하여 점점낮고 편평한 개스의 공동을 이루게 된다.

한편 동굴속 바닥면의 두텁고 무거운 용암은 계속 높은 온도를 지니면서 낮은 바닥을 찾아 흘러내려가게 된다. 이때 납작한 개스공동이 연속되어 동굴속 용안의 흐름에 따라 생기게 되나 이들이 계속되면 동굴은 계속된다. 즉 이와같은 개스공동이 연결, 화산동굴이 연속되게 되는데 만장굴은 약 51개의 공동이 연속되고 있는 것으로 계측되고 있다.

5. 요약 및 결론

이상의 내용에서 동굴이 가지고 있는 구조현상이 동굴의 1차적 형성에 미치는 영향은 매우 크다는 것과 다양한 형태의 동굴 내 2차 생성물을 파악할 수 있었다.

생각컨데 최근과 같이 동굴에 관한 관심이 많아지고 체계적인 연구가 요망되는 시기에 구조 현상의 파악은 매우 중요하다. 동굴은 그 종류도 다양하지만 대체로 종유굴이라 불리어온 석회동굴과 제주도의 화산동굴, 그리고 해안에서 보는 해식동굴 등이 주종을 이룬다. 각각의 동굴은 기후환경과 지질적 차이에 의해 그 발달과정이 상이하고, 2차 생성물 또한 다양한 형태로 나타남을 볼 수 있다. 그러나 이러한 동굴의 형성에 있어서 밑바탕이 되는 것은 동굴형성 초기의 구조적 환경에 대한 유사성이다. 종전의 동굴에 대한 관심과 연구는 신비롭기까지 한 동굴 내의 2차 생성물과 동굴이라는 극한 환경에 적응해 개체를 유지해 가는 동식물에 대한 것이 대부분이었다. 즉 이 부분에 대한 관심은 다양한 연구로 이어졌지만 상대적으로 동굴형성의 초기 모습에 대한 관심은 상대적으로 적은 편이었으며, 이 부분에 대한 연구 또한 미

비하다.

따라서 동굴의 성인을 종전의 2차 생성물 중심의 접근에서 단층이나 절리와 같은 구조적인 성격을 일차적으로 구명하는 일이 선행되어야 하리라고 생각되며 이러한 연구는 학문적 영역으로서 동굴에 대한 지식의 폭을 확대시켜줄 뿐만아니라, 일반인들의 동굴에 대한 관심과 이해를 더욱 확대시켜 주리라 생각된다.

[참고문헌]

김병우. 1990. 동굴의 생물상. 고수동굴의 환경 및 안전진단조사 연구보고서. 28-33. (주) 원천.

김병우. 1995. 화암동굴의 동굴생물에 관한 연구. 한국동굴학회지. 42 : 27-40.

김병우. 1996. 천곡굴의 생태계 조사보고. 한국동굴학회지. 45 : 29-40.

김주환, 1978, "Joint현상의 분석과 D-D Diagram 개발에 관한 연구", 지형학, 제17호, 대한지리학회, pp,1～10.

김주환, 1985, "한국동남지대에 발달한 선구조선에 관한 연구", 지형학연구, 제10집, pp.691～712.

김주환, 1994, "불암산 지역의 지형정보에 관한 연구", 지리학연구, 제23집, 한국지리교육학회,pp.1～20.

김주환, 1996, "사진을 통해서본 수락산 서사면의 절리분석", 지리학연구, 제27집, 한국지리교육학회, pp. 21～26.

김주환, 1997, "직탕폭포와 고석정 주변의 지형", 사진지리 제5호, 한국사진지리학회, pp.45～62.

김주환, 1997, 추가령 열곡내 의정부-동두천간에 발달한 단층구조의 구조지질학적 해석, 지리학연구, 제31집, 한국지리교육학회, pp.19-26

김주환, 1998, 의정부-포천간에 발달한 단층구조의 구조지형학적해석, 지리학 연구, 제 32집 2호, pp.29-38.

남궁준. 1987. 강원도의 자연동굴과 동물상. 한국자연보존협회 강원지부.

정창희. 김병우. 김추윤. 1994. 온달굴지대의 자연지리 환경. 한국동굴확회지. 37: 38-67.

한국의 동굴. 1987. 동굴생물. 아카데미서적. 264-281.

한국동굴학회 편집부. 1988. 한국의 천연기념물 동굴(만장굴). 한국동굴학회지. 18: 23-36.
야마우찌히로시. 1966. 동굴탐험. 쯔꾸마서점, 46-50.
이시아세이키치. 1923. 종유석과 석순의 형성, 응용물리 47.
카시마나루히꼬. 1969. 석회동굴산 피솔라이트, 에히메대학기요(지학) 6.
쿠라모토타다시. 1962. 박쥐동굴의 자연환경, 아끼요시다미박물관보고 (2).
코오노미찌히로. 1972. 아끼요시다이의 석회동굴 형성, 이와이 기념논문집, 319-331.
동굴학연구회. 1978. 석회동굴의 연구(2).
에히메대학 동굴연구회. 1972. 동굴학 초고(1-22), 에히메대학 동굴연구회
마쯔이도시하루. 1976. 석회동굴내의 용식형태에 대하여, 재팬케이빙 8.
Curl, R. L. 1972. Minimum diameter stalactites, Nat. Spel.(34).
Davies, W. E. 1960. Origin of caverns in folded limestone, Ditto.(22).
Sweeting, A. C. 1950. Erosion cycled and limestone caverns, Geogr. J.(115).
Sweeting, A. C. 1932. Origin of limestone caverns, Ditto(43).
Waltham, H. P. 1961. A stream piracy of cave formation, Natu. 23.
Moore, G. W. 1969. Limestone Caves, Encyclo-Geomolo. 652-653.
Moore, G. W. 1969. Speleothems, Ditto. (1040).
Moore, Nicholas. 1964. Speleology : The studyb of caves, 1-120.