

# 洞窟内部의 地形變形에 의한 洞空의 發達過程 研究

吳宗祐\*

## A Process Study on the Cavities by Cave landform Deformation

Jongwoo Oh

국문요약 : 동굴내부의 지형변형은 동굴내의 외인적인 요인과 내인적인 요인에 의하여 발달된다. 외인적인 요인으로서 기후변동에 의한 기온의 변화와 침출수의 증감 및 외부 이입물질 등을 들 수 있으며, 내인적인 요인으로서 암석의 공극율, 지질환경, 단층 및 습곡면의 형상, 절리 및 균열면의 유무, 동굴지천의 구배 및 유속, 층리간의 이중의 암석계재 여부 등을 들 수 있다. 동굴 시스템은 수문 물리화학적 요소에 의해 형성되며 외부 기준면 통제에 의해서 암석학, 구조학, 기후학, 생물학, 토양학 등과 밀접한 상태에서 의존적인 발달 과정을 가진다. 동굴 내부의 침식은 유수의 입력 경우 유출과정에서 형성되며, 또한 유수의 비 입력 경우 유출 및 액체용액의 분출에 의해서 형성된다. 다수의 동굴학자들은 동굴은 계절마다 침수되거나 빨리 흐르는 홍수에 의한 폭우에 의해 epiphreatic 상태에서 간헐적으로 포화되는 과정을 거치며 선택적으로 발달한다고 주장하고 있다. 혼합지대 동굴의 가장 좋은 예는 현재의 카르스트 지역에서 나타나는 것이 아니라 과거 제4기의 200만년전 동안보다 해수면이 더 안정적이었던 때에 이루어진 고 카르스트(Paleo Karst)에서 발견되고 있다.

### I. 동굴 시스템의 분류

동굴 시스템의 용해는 대부분 모든 지형 형성에서 매우 복잡하다. 이것은 그들의 기원, 크기, 형상에 많은 다른 영향을 준 암체 내에서 3차원의 형태로 매우 다양하게 세분되기 때문이다. 동굴 시스템은 수문 화학적 요소에 의해 한층 더 영향을 받으며 외부 기준면 통제에 의해서, 암석학, 구조학, 기후학, 생물학, 토양학 상태에 의존한다. 그들은 암석 내에서 활동하며 생존하거나 적용하지 못하는 상태에서 지형 흔적이 있으며, 근본적으로 다른 상태 하에서 변한다.

매우 다양한 것으로 동굴 용해를 설명과 묘사하는 데는 많은 다른 방법들이 있다. 발생학적 기원에서 그들 통칭하여 설명할 기준을 제외하고 그들 모든 것을 포함한 단 하나의 이론은 없으며 지형학자와 수문지질학자, 경제지질학

등의 필요를 수용하는 단 하나의 분류 또한 없다. 이러한 문제점에 대한 문헌상의 쟁점을 대상으로 본 연구에서는 이를 비교 분석하여 동굴지형의 이론적인 방향을 정립하는데 그 목적이 있다.

#### 1. 동굴의 정의

정의의 대부분은 사전에 의해 채택되며 국제 동굴(洞穴)연합에 의하면 동굴이란 암석이 드러난 자연적 지하를 의미하며 인간이 들어갈 수 있는 충분히 넓은 곳이다. 이것의 정의는 연구자가 그런 동굴로부터 단지 직접적 정보를 얻기 때문에 장점이 되나, 발생학적 정의라 할 수는 없다. 고립된 동굴은 이런 최소한 크기의 수로에 의한 유출, 유입 지점의 물이 연결되었고 그렇지 않더라도 공극이라 할 수 있다. 그러한 각각의 동굴은 종종 채굴과 구멍 뚫기에 의해 우

\* 남서울대학교 교수

연히 접하게 되는 큰 공간을 가능한 포함하여 작은 공동(空洞)에 이르는 범위이다. 원시의 동굴은 유입 유출로부터 확장되며 그것들이 연결되어 있으나, 동굴크기는 확장 시키지는 못한다. 수로의 반지름이 5-15mm에 서는 카르스트 암석의 유입과 유출지점 사이에서 계속적으로 확장되며 그것은 완전한 동굴로 구성된다. 대부분의 출구가 있는 동굴은 그런 시스템 부분이다. 이 장에서는 단순히 '동굴'로서 간단하게 언급할 것이 아니라 먼저 통합된 동굴 시스템의 구조로서 관심을 가져야 한다.

## 2. 동굴과 동굴 분류

수 만개의 용식 동굴들이 조사되었는데, 최소한 이 부분에서, 그리고 그들 중 수 천개들은 정확히 지도화 되었다. 대부분의 동굴들은 1Km 미만이나 깊이 100m미만을 통하여 조사되었다. 매년 수십 내지 수백의 동굴들로 증가하나 배치의 형태의 굴곡은 같이 남기게 된다. 캔터기의 Mammoth-Flint Ridge-Roppel-Procter System은 약 25km로 알려진, 1840년 이후에도 매년동안 통로가 연결된 세계에서 가장 긴 동굴로서 지위를 차지하고 있다. 그것은 단지 석회암 100m 정도로 발달해 있으나 석회암들은 근처에 평평하게 되어 있고, 동굴은 여러 기준점 아래 그들을 보존하는 사암 분수령의 다상 지점으로서 확장된다.

Optimisticeskaya와 소련 연합의 다른 큰 동굴들은 석고 지층들이 두께 12~30m의 미로형의 직선으로 나아가다가 다시 저평한 고원이 된다. Holloch 은 석회암이 가파르게 침하한 산지동굴이며, Jewel Cave 와 Wind Cave 은 원형형 석회암 언덕내에 세 갈래-크기의 미로가 있다. Friar's Hole 은 석회암은 전부 노출되어 있고 혈암과 사암의 깊은 골짜기 아래 놓여 있다. 이런 긴 동

굴들은 물리적 형태로 광범위하게 나타난다. 그것들은 탐구자들의 공통적인 인내심을 요하게 한다. 가장 큰 동굴들 가운데에서 가장 다양성이 적다. 그것은 현재 물로 가득차서 200m이하까지 잠수하여야 하므로 불가능하다. 그러므로 가장 깊은 동굴로 알려진 것들은 깊게 배수되어 커진 중앙산괴의 산지에서 발생된다. 최근에는 멕시코의 고산지역 탐사가 열대지역의 논의를 추가하고 있다. 모든 수갱의 시스템은 거의 한결 같은데 수관의 끝이나 경계의 와해가 있는 경사진 하천 골짜기에서 한결같다.

실제로 대부분 지하동굴 과학자들은 그들이 보여준 지하, 포화, 붕괴 형태에 의해 분류하거나, 침전에 의한 것으로 분류한다. 그러나 광범위한 동굴 시스템은 형성이 다른 모든 동굴들을 나타내고 있으며 침전의 폭넓은 다양성, 그래서 이런 특성은 일반적인 분류에 적합하지는 않다.

대다수의 연구자들은 지표 지형 형성이나 수문학적 연구에 관심이 있고, 알려지지 않은 수관을 내부요소로 사용하여 용입 분류하는데 관심이 있다. 지형과의 관련 및 하천 시스템과의 관계는 지형학자들에게 특별히 관련이 된다. 어떤 동굴들은 지하배수 골짜기로서 단순하나, 다른 것들은 지형적 분배를 넘어 수로를 추출하게 된다. 매우 일반적인 카테고리리는 지하의 침식 작용인데 해각이나 천이점을 통해, 감입 사행의 목을 건너는 지름길을 형성하는 것이다. 이런 것들의 몇몇은 '이상적 수관'이며, 하나의 직선 수관이 있으므로 비교적 지하의 짧은 통로가 있는 동안 물의 양을 현저하게 얻을 수도 있다.

동굴은 대부분 종종 가장 습윤한 기후에 있다. 어쨌든, 큰 동굴들은 호주의 Nullarbor 평원 사막에서 발생된다. 그것은 기후와 동굴 형성의 측면과 거의 관련이 없으나 가장 큰 강의 동굴

통로는 가장 큰 강에 의해 만들어진다. 이런 것들은 발생기원이 다른 것으로 장대한 Nonxu 동굴의 경우나 Nare 동굴이나 New Britain 에서 최근 발견된 다른 동굴들은 아마도 자연 발생일 것이다. Carlsbad 동굴과 같이 매우 큰 통로들은 현대 지형학, 하천수계나 최대 활동중인 지하수계 시스템과는 전혀 관계가 없다. 지표 침식이 그것들을 사이에서 가로막은 것으로 알려졌다.

이런 외부적 요소에 의한 동굴 분류는 그들의 구성요소 형성이나 시스템을 채택하는 구조를 설명할 수 없다. 3/4이상의 동굴들은 첫째 등급으로 정하여 충분히 지도화 되고 표현 되어져 왔다. 이런 동굴들은 수중 지층하의 간혀있는 예외적인 압력이 아니라 카르스트 암석내의 대기수계 순환에 의해서 형성된다. 이런 것들은 '일반동굴'이라 불리운다. 다른 분류는 예외적인 지질학적 압력하에 형성 되거나 보기드문 물이 있는 장소의 그 동굴들을 포함한다. 그것들은 이 장의 후반부에서 논의된다.

많은 동굴들은 다중적 형상으로 발전하여 나타난다. 동굴의 한 양상의 끝과 다른 것들의 시작: (1)수로의 위치가 새로운 통로를 폭넓게 창출하면서 충분히 위를 향하거나 아래로 향하여 바꿀 수 있을때 (2)침식망 우세하기 전 이거나 vice versa가 망으로 가득찬 결과 외부적 발생으로 수질이나 수량에 변화가 있다.

### 3. 정보체계

동굴 시스템은 하천 지형학의 하계망과 같은 기능이 있다. 후반부의 연구는 수로 및 분지 특성의 외형적 측정 분석으로부터 지난 35년 동안 중요한 학문적 진척이 있었다. 이것은 동물학에서는 거의 보이지 않으며 현상학적 홍미의 발생기원적 설명의 구조를 제공하지는 못한다. 이것은 대부분의 모든 경우에 동굴 시스템

정보의 이해 부족으로 기인된다. 많은 통로들은 들어가기에 너무 작다. 다른 것들은 붕괴, 사암들에 의해 막혀있다. 그것들이 시작되거나 끝난 장소 등 역시 알려지지 않고 있다. 큰 시스템의 대부분 많은 통로들은 물로 가득차 있다. 동굴 잠수는 위협하며 단지 몇몇 활동적인 침윤수(浸潤水) 동굴은 지도화가 잘 되어져 있다. 지금까지 대부분 외형적인 발달은 동굴의 일부 지역에서의 활동, 충적지의 표본들과 조개침식 등과 같은 작은 특성들로 얻어질 수 있다. 이것들은 이 장의 끝과 다음에서 요약된다. 이것은 상기에서 논의된 수위계 분석과 침투 흔적으로부터 얻어지는 일반화된 시스템 표현들이 작은 규모를 발견하여 연결할 수 있는 실제적인 량의 결과라 적기 때문이다. 그것은 중요한 하나의 미래 동굴 연구의 도전이다.

## II. 깊이에 따른 동굴의 발달

이 분야에서는 다각적인 조사에 의해서 동굴의 구조적인 분석을 하게 된다. 우리는 일반적 표본들의 단계안에 있는 수관 및 번식 진동을 고려하고 기하학적인 구조적 배열속에서 동등하게 갈라진 지형의 결과를 고려하는 것이다. 이러한 결과는 형태적인 면을 형성하고 또한 그것들은 치수적 표면위에 발달되어 나타난다. 모든 경우 주요한 수관속의 입구는 출력통로와 연결되어 있다. 이 시작되는 지점은 안정적이다.

균열된 지역의 빈번함은 거대하고 다른 어떤 카르스트 지형속에서부터 변함이 없는 모습으로 나타난다. 이러한 변화는 4개의 독특한 침수(phreatic)효과를 제외하고 발생하는 기하학적 지하수동굴에 연속적으로 나타난다. 영구침수(bathypheatic)동굴은 단지 균열된 지형의 다수가 너무 낮아서 지하수층의 하단부가 낮게 형성

된다. 그리고 이것은 높은 수압의 저항력을 지니고 있다. 이 지형에서는 복잡하고 급한 만곡이 이루어지고 계속되는 수관이 A B C 라는 층을 형성한다. 이 밖의 다른 것들이 작게 혹은 소규모 이상으로 확대되기 전에 이러한 수(水)층은 결과적으로 소모되고 또한 단독으로 넓게 확대된다.

자생적 즉 능동적인 bathyphreatic 동굴의 본보기는 체계적인 정보가 불완전하다는 것을 알아야한다. 자생적이고 능동적인 bathyphre 동굴은 조사하기가 어렵고 불가능하다. 이러한 측정이 표기된다면 그러한 만곡의 기본구조를 측정하는데 방해받을 것이다. 형성된 깊이는 대략 300m 이상 정도로 추정되며, 여러가지 수층구조로 형성된 지형은 3,000m 깊이 이상의 물로 채워져 있다 어떤 것은 하층 구조로 이루어져 있다. 그러나 수층의 하부는 지형적 활동에 의해서 더욱더 낮아지고 있다.

다단계 침수굴(loop phreatic cave)는 상당히 높은 균열된 구조의 지형에서 형성된다. 상층구조에 있어서 표면의 변화적인 단계는 낮은 지역의 표면이 더욱더 안정적이라고 단정 짓는다. 이 단계가 확대 될 때까지 하부표면은 더욱 높아진다. 그리고 이것이 표면위의 끝부분에 위치 할 때까지 수층은 확대된다. Holloch는 phreatic loops가 불규칙적으로 발달하여 지형적인 면이 이루어진 훌륭한 본보기이다. looping의 수직적 고도는 거대한 시류속의 180에서 100까지 이른다. 또 다른 동굴은 원초적인 지역성이 이루어지는 모델들은 40m 이상의 높은 고도가 나타나지 않은 지형의 썩어지른 썩고플렌의 형태로 포함시킨다. 짧고 수평의 혼합체인 동굴 및 수층구조는 높은 수층구조의 하부가 형성되면서 저항력이 감소되어진다. 번식적인 모습들이 나타나는 이 지형적 특성은 Mendip Hills of England에 두

드러지게 나타난다. 적어도 8단계의 시류는 하부구조의 막다른 물줄기를 넘나들고 거기에서는 80m이상의 구조가 혹은 거대한 loop이 형성된다. 균열된 지형의 다수는 너무 높고 또한 저항력이 낮아서 용천지점의 뒤에 물줄기의 시류가 계속되는 구역이 지속적으로 발달하게 된다. 그리고 충분히 확대 되었을때 그러한 것들은 흡수되어지고 소모되어진다. 사실상 그것들 속에서 피에조믹트릭 표면은 낮아지고 그것들은 이상적인 지하수 동굴이 된다. 걸어서 건널 수 있거나 수영할 수 있는 낮은 지붕을 가진 수로 통로인 이상적 지하 동굴은 매우 많다. 잔류성 석회석 탐을 관통하는 수 십개의 짧은 동굴들이 남중국, 베트남, 말레이시아, 쿠바의 층적 평야에 널려있다. 사실 더 긴 동굴들도 알려져 있다. 항 예로 벨리세에 있는 동굴 지류 체계로서 전체가 각력암(角礫岩)으로 구성되어 있는 10km의 강 수로를 가지고 있다. 이상적 지하수로는 국부적으로 지리적 상태가 변하는 얇은 phreatic loops에 의해 방해받는 지점까지 1km도 채 못되는 곳까지 발달되어 있다. 많은 동굴학자들은 동굴은 계절마다 침수되거나 빨리 흐르는 홍수에 의한 폭우에 의해 epiphreatic 하거나 간헐적으로 포화되는 지점에서 선택적으로 발달한다고 주장하였다.

## 1. 분열 빈도의 측정

분열빈도의 4가지 지형적 형세에서의 측정은 분열적 저항이 다르기 때문에 단순하지 않다. 낮은 영구적 분열빈도는 3지형적 진화 혹은 4지형적 분열속의 단절된 부분에 나타난다. 높은 영구적 빈도나 높은 분열적 저항은 캐나다의 밴쿠버 섬에서 약한 모습이 나타나고 분열적 빈도 천연적인 지면 또는 암석 <지반>위에서 측정된다. 영국의 Mendip hills 에서는 분열 빈도가 침투성과 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은

앞에서 말한 4가지의 지형적 면이 침투성이 1% 저하되는 부분에 발전되었다고 볼 수 있다. 이러한 측정은 여러가지 목적을 위한 효과적인 구별이 되지는 못한다.

## 2. 분열 빈도의 증가

카르스트 지형 중의 한 면에서는 내부적이고 영구적인 분열의 빈도는 구조 형태를 다양화시킨다. 시간의 흐름과 더불어서 이것은 증가되어 가는 경향이 있다. 요컨대 시간이 다소 흐른 지형은 복잡하고 높은 지리적 요건을 지닌다. 이러한 면은 일반적 지리요건의

Mendip Hills가 하나의 기준이 된다. 이러한 6단계 지형의 표본의 분열은 깊이에 따라 감소된다. 시초적인 상황하에서 이것은 표면에 가까워지고 또한 높은 고도로 구성되는 phreatic을 발전시킨다. 이러한 시대동안 원시적인 수관은 그것들 아래로 낮아지고 있고 또한 높은 저항은 처음으로 증가되는 분열 빈도와 여러 지형면에서 연결되어 있다. 시작 즉 시초가 낮아질때 2단계로 구성된 낮은 고도의 분열성이 형성된다. 점차적인 변화의 과정에서는 체계를 생성하고 초기단계의 40m이하의 loops는 15m까지 하강되며 세번째인 10m이하까지 분열이 이루어진다. 이러한 발전의 패턴은 하나의 높은 카르스트를 형성하는데 기여한다.

대형층리(massive beadding)은 낮은 분열의 빈도로 지닌 수직의 지형을 유지하는데 필요하다. 고대의 동굴은 state 2의 표본이고 현대의 동굴면은 산마루와 같은 state 4단계의 지형과 흡사하다. 파푸아 뉴기니아에서와 같이 거대한 남북회기선의 하천지형화는 동일한 과정을 가졌다. 그러나 Holloch는 그것의 원초적 고도와 형태를 유지하고 있다. 그래서 하나의 일반화가 언제나 옳은 것은 아니다.

## 3. 지질구조의 영향

층이 가파르게 기울어진 곳에서 층리면은 지하수 깊은 곳까지 들어가는 경향이 있다. Glennic가 주장한 quasi-atesian trapping 효과와 같이 그 기울기는 초기 수역학의 기울기보다 더 가파르다. 결과적으로 phreatic 동굴의 더 깊은 형태가 형성된다. 층이 準수평인 곳에서 층리면은 카르스트의 주변에 널려져 있다. 그리고 층리면은 많은 잠재 분출점을 제공하기 위하여 노출되어 있다. 물을 깊은 곳까지 유도하는 것은 절리와 단층이다. 게다가, 이러한 상태들은 지하수 맥이 백운암 층, 두꺼운 혈암 일대와 같은 aquitards의 자리를 차지하기 알맞은 상태이다.

오스트리아에 있는 Nullarbor plain의 매우 큰 저수 수면 수로는 Cockleiddy 동굴과 같은 훌륭한 예를 보여준다. 그러나 깊은 phreatic 시스템은 영국에 있는 Yorkshire Dales 와 같이 강하게 갈라진 곳에 발달할 수 있다. 촘촘히 겹쳐진 암석에 있어서 균열 횡수는 높은 응력 때문에 일반적으로 높다.

지하수면 동굴은 미국에 있는 겹쳐진 애팔라치아 산맥과 같이 일반적으로 널리 분포한다. 침투할 수 있는 균열층의 빈도는 층이 하중을 받는 곳에서 잘 일어난다. 이는 왜 많은 동굴들이 복잡한 지류의 그물망 형태로 분리 했는가를 설명하는데 도움을 주고, 왜 상태3 또는 4동굴이 계곡 측면에서 잘 발달되는 지를 설명해 주고 있다. 수화작용은 깊은 phreatic loops를 억제하는 투수석고에 영향을 준다. 그러므로 석고 동굴은 층이 한정되지 않은 3또는 4상태로 되는 경향이 있다.

## III. 출구 횡단면과 소지형의

### 침식구조

동혈의 침식은 입력하에 유출, 혹은 비 입력하에 유출, 액체용액의 분출하에 의해서 형성된다. 이러한 많은 내용들이 직선적 침식, 자유로운 침식을 이루는 형태가 나타난다. 모든 종류의 형태가 지형 및 지면의 붕괴로 인해서 형성되는 것은 아니다. 붕괴의 과정에 대해서는 다음 단계에서 알게 될 것이다. 그러면 여기에서는 동혈 벽들의 침식형태의 다양성을 알아보겠다. 많은 카르스트의 형태 및 지형에는 다양한 유류가 있다. 그리고 이것들 중에서 어떤것들은 지면 아래에서 발생한다.

### 1. 프리에딕 출구 횡단면

지면아래가 수평면으로 연결되었다면 프리에딕 출구는 횡단면을 근거 또한 어떤 한계가 낮아진다면 지형은 느슨해지는 면이 나타날 것이다. 원형의 지름 혹은 폭이 몇 미터정도 밖에 되지 않는다. 용해에 의한 공격은 주변의 모든 부분을 가하게 된다. 발달된 형태는 수동적인 지형<지형구조>과의 사이에서 상호작용 하는 기능을 지니고 활동적인 지형의 요소는 다양한 면을 전달한다<유동체, 속도, 잠재가능성, 유형>. 지형에 있어서 굴곡은 지속적인이고 또한 지형적인 원 형태에서는 평범하며 심지어 큰 싸이즈 형태로 나타난다.

La Hoya de Zimapan의 지하 깊이는 30m이고 또한 여기에서는 지속적인 지형형태가 나타나는데 이것은 평탄한 편이다. 서서히 전달되는 동위지질 지형은 대지형으로 확대되는 면에서 동등함을 보여주고 있다. 변하기 쉽지 않은 성층면은 회기선과 일치하지 않는다. 그리고 불규칙적인 형태의 측면이 전개되는 것을 주목하고 또한 이러한 과정의 시간은 침식의 시간과 동등함을 알 수 있다. 프리에딕 횡단면의 다양성은 거대하고 또한 모든 지형은 시간에 의하여 다양하

게 변화된다.

### 2. 선반형과 반관(Anstomose, pendants and half tubes)

혈관류(Anastomose)는 독립적인 형태이고 돌출지형 및 구혈은 가파른 자형적 구조물에서 구성된다. 독립적인 Anastomoses는 원초적인 구혈의 기초이고 이것들은 구혈의 생성과정을 통해 지속적인 면을 만든다. 그리고 이들의 분기. 이탈 및 집중의 빈번함은 지형적 조직의 특성, 지형의 경사도를 결정짓는다. 영구적인요소 <steeply-dipping, bedding planes>는 지형의 형태와 밀접하게 연관되어 있다. 적절한 Anastomoses는 지금까지 꿰뚫을 수 없는 성층면 또는 단구면의 지형적인 과정을 형성하는데 기초적인 면이 된다. 이러한 지형의 조직적 요소의 빈번함은 점점 증가된다. 이것은 또한 지형의 경사가 낮은 것을 보여주는데 종종 물의 흐름에 의해서 침투가 이루어진다.

돌출 지형은 침식 지형에 있어서 나머지 부분의 기둥이다. 그리고 그것들은 Anastomoses 지형에서 표출되는 부분들이다. 이들은 또한 지형화가 덜 진행된 형식적 표면 즉 구혈이 마모된 부분에서 아직 덜 영구적인 구조적 지형과 연관되어 나타난다. 그것들은 물에의한 침식에 의해서 굴 형태가 이루어지고 또한 지형의 위치가 낮아진다. 여기에서 다양하고 복잡한 형태가 나타남을 볼 수 있다.

반관 천장부는 다소 반발적인 성격을 제외하고는 동한면이 나타난다. 그리고 어떤것은 다소간의 제약성을 띠면서 발전적 성격을 지닌다. 또한 지형적인 변화의 주요소는 침전화의 과정으로 볼 수 있다. 이러한 정점에서 그것들은 폭이 넓은 지형의 형태를 형성하고 또한 수평적 지형은 그것들과 더불어 재형성화 된다.

### 3. 용해된 웅덩이와 종형(Slution pockets or Capolas, and bell holes )

Solution pockets은 프리에딕 동굴지역의 지질학적인 특색을 나타내는 요소중에 하나이다. 그것들은 대부분 동굴의 바닥이나 벽면에서 나타나며 최고로 발달된 곳은 천정부분이다. 그것들은 30m이상인 굴의 지형형성화를 하는데 요소가 되기도 한다. 그리고 그것들은 확대 지속되어오는 동안 단단하거나 작은 절리를 형성 하는데 이는 단독으로 혹은 여러가지 요인과 더불어서 복합적으로 나타난다. 어떤 지형은 별집 구조와 같은 밀집된 형태의 지형으로 구조가 이루어지기도 한다. 이러한 밀집된 지형 외에 다른 지형들도 나타난다. 아마도 대부분의 Solution pockets은 복합적인 부식의 효과로 보면 적절할 것이다. 여기에서 혼합적인 것은 어떤 또 다른 형태의 지형 및 구조물을 구성하는데 기여할 것이다. 그러나 그것들이 공격적이고 화학적인 효과를 받았을 때는 지질학적인 면들의 구성에 큰 효과를 가져오게 될 것이다.

활동적인 전도 및 대류는 아마 다른 지형의 형성에 또 다른 역할을 하게 될 것이다. 고도의 복잡한 포켓은 온도의 변화에 의해서 다시 만들어지는 것으로 알고 있다. 이 돛형 양식은 동굴이 열에 의해 만들어진 지형을 가리킨다. Bell holes는 불가사의한 지형구조를 지니고 있다. 그것들은 영구적인 원기둥으로 1m 혹은 지하 5-20cm에 위치해 있다. 어떤것은 아주 낮은 지형에서 형성되고 발달되어 왔다. 그것들은 너무 작아서 대류의 형태로 나타나지 못한다. Bell holes는 습기있는 지역에서 형성화 된다.

## IV. 지하에서 형성된 동굴

### 1. CO<sub>2</sub>와 결합된 열수동굴

이 부분에서는 열이나, 아마도 가스나 광물질로 넓게 분해되고 대부분의 경우 지표 밖으로 흘러나오는 깊은물에 의해 형성된 용해동굴을 다루게 된다. 정의에 의하면, 온천수는 용천에서 그 지역보다 평균 40C이상 높은 온도를 의미한다 (Scholler, 1962). 카르스트 암석내의 온천의 온도는 대부분 종종 20-80C이다. 더 높은 온도는 깊은 곳에서 발생하게 된다. 지열구배 160Ckm-1는 열수동굴이 많은 지역인 헝가리의 Transdanubian 산지의 탄화암에서 잘 생긴다.

지나친 열암에서는 40-600Ckm-1만큼 경사가 지며, 이와 대비하여 카르스트암석을 통과하여 열 이동이 있는 지하수의 역할을 강조하게 된다. 그물(화산에 기원된)들은 유년기의 물이거나(침전물 스스로 자분하는)선천적인 물이거나, 깊은 대기 대순환의 물, 비례에 의한 이런 형태의 혼합에 의한 것이다. 대기수의 물(보통 카르스트 수)는 그들이 지표에 접근된 것처럼 그것들의 혼합으로 이루어진다. 대부분 보고된 바에 의하면 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>S는 가스이다. 하나 혹은 둘다 주어진 물내에서 중요하다. 여기, 우리는 이러한 동굴들의 한가지 분류는 CO<sub>2</sub>용해 과정에서 두드러지게 창출되는 반면 두번째 분류는 H<sub>2</sub>S의 역할이 더욱 중요하게 여겨지는 사실로서 단순화하게 된다.

카르스트 암석내의 더운 탄산수가 상승하거나 내려갈 때, 낮은 대기수가 혼합되었거나 그렇지 않을 때, 그것은 분리망이 되거나 분리망이 일치되지 않거나 침저망을 이루게 된다. 한 동굴은 서로 다른 과정의 범위(예를들면 기반암에서 분해, 정상에서 수용성 침전물 수용)에서 여러번 변화하거나 완전히 하나로써 변화하게 된다. 그 범위는 한번(용식->침전)을 통해 이동되거나 여러 번에 걸쳐 진동하게 된다. 많은 의구심이 가지는 열수동굴들은 온수에 의해 단지 용해되어 나

타난다. 다른 기반암벽은 열수작용의 침전 후에 덮힌 것으로서 전혀 보여지지 않을 수 있다.

## 2. 열수 기원이나 부분 기원의 기준

가장 확실한 기준은 동굴로부터 온수의 유이다. 그러나 일부 보편적인 동굴은 온수에 의해 침식되었는데 왜냐하면 이것이 가능하다면 예전엔 존재했던 수로로 이동될 것이다. 그들은 가장 편한 출구를 제공한다. 대부분의 탐험할 수 있는 열수성 동굴은 배수되고 잔존이 된다. 근처의 온천이 그 근원에 대해 강한 힌트를 주나 결정적이진 못하다. 확실한 용식특징은 두드러지지만 그들 중 어느것도 결정적이 되지는 못한다.

첫째는 완전한 형성이다. 뚜렷하게 나무형성으로 흘러나오는 직선의 다층미로가 특징적이다 (Muller & Sarvary 1977): 그것들을 다음과 같이 요약할 수 있다. 전체에서 뚜렷하게 지침이 필만한 특징은 깊고 둥근모양의 다중-Cuspate용해 Pockets이다(Dublyansky). 이들은 'Cupolas'라고 불리워지며 보통 동굴에 나타나는 더 단순한 Pockets와는 구별된다. 그들은 대류용해의 원인이 된다. 몇 가지 예를 통하면 더운 웅덩이 위에 증기가 밀집되어 있는 벽에 흘러가게 되거나 높게 침식된 실개천이 있다. 석회암벽이 백운석화 되었다는 보고도 있었다. 일부 소련동굴에서 석회암속에 있는 규질암이 크게 부식되어 뜨거운 알칼리성 물임이 증명되기도 했다. 대기수 동굴에서 발견되는 물의 흐름을 보통으로 만드는데 대한 증거는 그 중요성만큼이나 부족하다.

더 눈에 띄는 지표는 외부침전물이 제공된다. 특별한 모양이나 풍부한 방해석과 아라고나이트는 가장 중요하지만, 널리 분포된 희귀한 광물질등이 정동(晶洞:작은 수정들로 덮인 암석 속의 공동(空洞)각력암등에 존재한다. nailhead 모양으로 층을 이룬 표면이나 아이슬랜드 spar

방해석은 보편적이며, 두께가 2m에 이른다. 이것들은 이들 모든 표면(바닥, 벽, 천정)을 밑에 수용성 침전물이 있음을 가르키며 덮고 있다. 세립질 각력암이 흔히 중정석이나 규토와 섞여 있거나 그렇지 않은 상태로 spar밑에 있는 것으로 보고된다. 때때로 큰 석영의 크리스탈이 발견되어 더운 환경을 식혀주고 있다.

수로에서는 두껍게 포도상이나 울타리 모양으로 증대되거나 방해석이 지느러미 모양으로 성장된 모습이 두드러진다. 동굴로부터 퍼석퍼석한 많은 암석이 나오고 방해석 침전물이 웅덩이 표면에 흠먼지임자로 응결되었다. 방해석 간헐천 석순이 뒤늦게 건조한 동굴바닥에 온수가 미약하게나마 유입되었음을 말해준다. 몇몇의 예에서 수증기 유출로 위쪽의 더 많은 침전이 생기게 된다. 몇몇 속빈 석순은 수용성이다 (White Smokers).

큰 크리스탈 같은 석고나 "꽃" 모양이나: 구렛나루"모양의 돌출된 석고는 갓 건조된 열수동굴에서 흔히 볼 수 있다. 이 모든 방해석, 아라고나이트와 특징적인 것은 그것들이 보통이 넘을 정도로 풍부하고 서로 결합되어 있다는 것이다 (Hill & Forti, 1986). 과거의 열수에서 침전됐다는 확실한 증거가 12C와 18O의 동위원소가 많이 측정된다는 사실로 나타난다.

## 3. 단일생성 열수성 동굴

부다페스트에는 다뉴브강이 내려다보이는 언덕에 온천동굴이 모여 있다. 그래서 열수동굴 연구가가 헝가리에 가장 많다는 사실은 전혀 놀랄 일이 아니다(Muller & Sarvary(1977). 그리고 그들은 2개의 주요 카테고리 나뉘어져 있다. 첫번째 모델의 Satorkopuszta 동굴은 두드러진 공동 바닥의 방(탐험의 한계)으로 구성되어 있으며, 이들은 마그마방으로 연결되어있고, 이 방들

은 돌출한 통로의 가지형태로 그들 대부분을 제한하고 있는 대류 Cupolas로 크게 변화되어진다. 모두가 표면을 돌아 온수를 유출시킨다. 이런 형태의 동굴은 자주 낮은 틈이 생기는 탄산암 바다의 한 지점에 온수의 유입으로 생겨난다. 그것은 지형학의 또 다른 형태의 침식지형 보다 더 "Dendritic=수지형" 하다. 왜냐하면 그것을 위쪽으로 자라서 가지를 뺀고 끝이 나기 때문이다. 헝가리 동혈학자들은 이것을 하나의 열수 동굴형태로 확실히, 단지 온수로만(단일생성된것)형성된 것으로 간주하며, 그런 것은 드물다.

#### 4. 증기로 된 미로동굴

이것은 열수성의 두 번째 목록이다. 2차원적 직선미로가 물이 솟아나서 비교적 물이 스미지 못하는 표층에 대항하여 탄화 암석내에 틈이 만들어진 곳에 생겨났으며, 헝가리에 (Serszegtomajikut)동굴이 좋은 예가 된다. 고도의 절리가 반드시 생겨나며 아마도 대가수의 혼합물에 의해 차갑게 식혀준다. 젖어있는 암석내의 견고한 열지층 또한 이런 효과를 낳는다. 단 한번에 생성된 다층의 직선미로가 더 자주 나타난다. 모든 작가들은 밀도 높은 구조의 필요성을 강조하며(지각구조의 힘으로 생성되어 열과 물을 공급해준다.) 다수가 중간에 투입되어온 대기수 침투나 때때로 발견되는 혼합에대한 증거를 중요하게 여긴다(Muller & Sarrary 1977, Dublyansky 1980, Bakalowicz et al. 1987 참조). 미로의 범위는 온수의 지역적 유입(한 지점 유입보다 오히려)이 출구가 되는 한점에서 합쳐진다는 것을 암시한다. 이러한 미로의 대부분이 Satorkopuzta형과 같은 본래부터 완전 열수성이었던 것은 아닐지도 모른다.

Buda 언덕에 있는 동굴들은 3차원의 미로들이다. 다뉴브강 구면의 동굴들은 섭씨42도씨

-48도씨 에 이르는 고품질의 광천수를 방출한다. 침전물들은 아래쪽으로 감소되어 저류층바닥에서 형성된다.

거리에서는 잔존중 동굴처럼 더 높은 고도에서 강한 수직적 침전물들이 있다. 시신세 시계에 지층은 주 점토 열극을 따라 암석으로 환원된 뜨거운 화산수에 의해 침투하게 된다(Kovace & Muller 1980). 현재 열수는 그 열극의 요해통로를 따라 측면에서 침식하여 점토를 무너뜨리고 여분의 점토 지분을 가진 커다란 열극을 만들고 있다. StariTrg 광산은 수직과 수평의 개도와 방이 복합되어 600m깊이까지 확산되어 있다. 그것은 Zinc(아연)/lead 광산식기에 발견되었다. 400m 보다 더 아래는 떠올릴 때 까지도 온수를 차 있었다(Petrovic, 1986).

#### 5. 남 다코타의 보석동굴과 바람동굴

모석동굴과 바람동굴은 가장 잘 알려진 이런 종류의 미로동굴이며, 가장 큰 동굴주의 하나이기도 하다 (Bakalowicz et al., 1987). 그들은 시신세에 의해 틈이 생기게 되었고 용기한 90에서 140m에 이르는 층을 잘 이룬 석회암과 칼슘이 풍부한 백운석내에서 발견되었다. 현재 해수면보다 더 낮은 지역에 온천이 있다.

보석동굴은 전적으로 잔존중이다. 그것은 표면 지형과 아무 관계가 없으며 협곡 용식에 의해 침입되어 입구가 생겨났다. 가장 큰 특징은 (높이 20m에 이르는) 큰 통로와 대개 또는 전적으로 nailhead 모양의 spar로 덮여있다. 가장 높은 지역에 있는 spar 는 후에 응축 용식 단계에서 부분적으로 제거되어졌다. 그밖에 다른 곳에서 그것은 일반적으로 6-15m 두께로 존재하고 지나치게 자란 규산을 지니고 있다.(Deal 1986).

바람동굴은 더 낮은 온천근처에 있다. 그 형태가 보석동굴과 비슷하나 겉 표면에 작은

spar가 있다. 그것은 또한 수문학적 잔종종이나 가장 낮은 접근 지역이 밑에서 솟아나는 반쯤 응고된 물로 차있다. 그들은 열수, -대기 구성물과 혼합된 역수로 시원하다. 그들 위에는 방해석 부유물이 형성된다. 바람동굴에만 Boxwork가 잘 발달되어 있다. 그것은 열극이 방해석으로 가득차 있는 미세-열극화된 백운석내에서 나타난다. 일치하지 않는 용해 조건하에서 백운석은 용해되나 방해석은 보존된다. 후에 더 넓은 범위의 방해석이 맥으로 응축되어 이제는 지붕에서 벽까지 100m두께 만큼 많이 생성된다.

## V. 해안 혼합지대의 동굴들(Sea Coast Mixing Zone Cavities)

남부플로리다 지하에 용해에 의한 다공질 Boulder Zone이 있으며 그곳에서 백운암화(dolimitization)가 이루어진다. 플로리다 북부에 있는 몇몇 큰 동굴(cavities)들은 해저 200~600m에서 이루어졌다. 이 동굴들은 위에서 논의된 모든 유형의 동굴들과는 다르다. 암석들에서 동굴이 형성될 때 처음부터 완성되는 것은 아니다. 거기에는 흡수공(pores)을 통과하는 아주 효과적인 공극(porosity)들이 발달한다. 혼합지대(mixing zone)를 따라 해면 미로(spongework maze)동굴이 펼쳐진다. 만약, 규모가 큰 동굴이 형성되었다면 그 동굴은 부분적으로 붕괴될 것이다. 조밀한 암석지역이나 혼합지대에서 동굴의 배치는 joints와 bedding planes를 따라서 이루어진다.

Back et al(1984)은 멕시코 유카탄 해안에서

근래에 혼합되는 것을 'swiss cheese zone'으로 묘사하고 있다. 영국의 서인도 제도와 뉴기니아의 Trobriand 섬의 단조로운 해안 지대(linear zone)에서 조밀한 벌집 모양의 동굴발달은 Ollier(1975)와 Gragor (1981)에 의해 설명되고 있다. 매우 높은 동굴의 다공성이 여러 메카니즘에 의해 형성될 때 동굴이 수평선 아래에 형성되기 위해서 혼합지대에서는 해안에서 해수면 가까이 윗쪽으로 이동한다(Palmer, 1986). 근래 혼합지대에서도 그 가까이에 나타나는 대부분의 동굴들은 복잡한 구조를 갖는데 그 이유는 다원 발생적이기 때문이다.

제 4기 동안의 단기간내에 지구의 해수면이 최소한 +5에서 -80m 정도 변동되었다. 혼합지대의 동굴은 만약 해수면이 하강한다면 대기에 의해 용해된 Vadose와 Phreatic에 의해 변경된다. 그때 Meteoric Water Caves는 해수면이 상승함에 따라 혼합지대의 용해에 의해 변결될 수 있다. Conditions의 급격한 변화는 암석의 붕괴를 가져온다.

혼합지대 동굴의 가장 좋은 예는 현재의 카르스트 지역에서 나타나는 것이 아니라 과거 제 4기의 200만년전 동안보다 해수면이 더 안정적이었던 때에 이루어진 고 카르스트(Paleo Karst)에서 발견되고 있다. 하나의 실례가 수십억 배럴의 매장량을 갖는 유전의 주요 원천이 되는 높이 45m에서 형성된 이첩기 말기의 혼합지대의 동굴이 서부 텍사스 지역에서 나타난다(Craig, 1987).

## VI. 결론

동굴시스템은 수면의 변동에 따라서 언제나 형성될 수 있는 물 의존형 지형(Water dependent landform)이다. 동굴내부의 지형변형은

동굴내의 외인적인 요인과 내인적인 요인에 의하여 발달된다. 외인적인 요인으로서 기후변동에 의한 기온의 변화와 침출수의 증감 및 외부 이입물질 등을 들 수 있으며, 내인적인 요인으로서 암석의 공극율, 지질환경, 단층 및 습곡면의 형상, 절리 및 균열면의 유무, 동굴지천의 구배 및 유속, 층리간의 이중의 암석계재 여부 등을 들 수 있다. 이러한 내외인적인 요인들에 의하여 동굴지형은 용식지형으로서 지속가능한 조건에 따라 형성되고 변형되며, 화석지형으로도 잔류하게 되는 특징을 가지고 지구상에 분포하고 있다.

### 참고문헌

- 서무송, 1969, 한국의 karst 지형, -삼척일대의 지형 발달을 중심으로-, 경희대학교 석사학위논문
- 서무송, 1977, 한국의 석회암 동굴산 Pisolite에 관한 연구, 지리학, 16
- 오종우, 1989, Wisconsin 남서부 Karst의 Loess 토양 및 퇴적토, 지역개발 논문집, 15, 29-43
- Oh Jongwoo, 1990, Sinkhole Sediment Sequences in the Southwestern Wisconsin Karst, 1990년도 세계한민족과학기술자 종합학술대회 논문집 -지구과학분과, 한국과학기술단체총연합회, 199
- Oh, Jongwoo, M. Day, B. Gladfelter, G. Huppert, G. Fludland, and M. Kolb. 1991. Potential sources of the sinkhole sediments in the Wisconsin Driftless Area. 지리학총 19호. 31-58.
- Oh J. 외 1인. 1991. Sediments of the Seneca Sinkhole in the southwestern Wisconsin. The Wisconsin Geographer 7. 25-39.
- Oh JONGWOO. 1992. Sinkhole Sediments in the Wisconsin Driftless Area Karst. University of Wisconsin Ph.D Dissertation. 201p.
- 오종우, 1993, 지역개발에 수반되는 동굴지역의 지형조사, 동굴, 36, 32-36
- 오종우, 1993, 북한지역의 Karst 지형, In, 북한지역의 지형연구, 한국과학기술단체총연합회, 107p
- J. Oh 외 2인, Geomorphic Environmental Reconstruction of the Holocene Sinkhole Sediments in the Wisconsin Driftless Area. 1993년도 세계한민족과학기술자 종합학술대회 논문집 -기초과학분과(지구과학)-. 한국과학기술단체 총연합회. 390-397.
- 오종우. 1993, Karstic Sinkhole Sediments of Dolostone in the Upper Midwest's Driftless Area, USA. 동굴4(35). 78-104.
- 오종우, 1993. Blacks' Economic Activities in Chicagoland Using Geographic Information System (GIS). 지역개발논문집 43-52.
- 오종우, 1993. 시카고 부분지역의 사회경제적 특성에 대한 지형공간정보체계(GSIS)의 이용. 지형공간정보 1(2). 223-235.
- 오종우 외 8인, 1993. 용연동굴 내부 개발기본구상 및 실시계획 (지형분야). 강원도 태백시. 254p.
- 오종우 외 12인, 1993. 만장굴 학술조사 보고서 (환경분야). 복제주군. 236p.
- 오종우 외 1인, 1994. 북한의 카르스트지형과 동굴 분포와 상관성. 동굴 36(37). 13-32.
- 오종우, 1994. 북한의 화산지형 소고. 동굴 36(37). 33-37.
- 오종우외1인, 1994. 태백시 용연동굴 지대의 지리환경. 동굴 36(37). 81-102.
- 오종우, 1994. Soils and landforms on the loess mantled karst uplands in southwestern Wisconsin. 동굴 36(37). 103-113.
- 오종우외 1994. 고씨동굴의 환경보전및 안전진단 학술조사연구보고서. . 영월군. 155p.
- 오종우. 1994. 카르스트(KARST)의 지표지형과 동굴 지형. 동굴37(38)P.89-96.

- 오종우, 1994. 고씨동굴의 발달과 특성. 동굴 38호  
오종우 외, 1994, 고수동굴의 환경보전 및 안전진단 학술조사 연구보고서, (주)유신, 169p
- 오종우, 1994, 고씨동굴의 내부지형에 관한 특성과 형성과정에 관한 연구, 동굴, 39, 14-33
- 오종우, 1994, 지리정보체계(GIS)를 이용한 Karst 연구의 가능성, 동굴, 40, 13-29
- 오종우외.1994. 고수동굴의 환경보전및 안전진단 학술조사연구보고서. (주)유신. 169p.
- 오종우. 1995. 카르스트지형에 관한 기초공간 정보. 동굴 40호. 97-116
- 오종우. 1995. A Geoarchaeological Review of the Fan Sites in the Lower Illinois Valleys, USA. 환동해권의 시간과 공간의 교감-목지 오홍석박사 회갑기념논문집 I. 753-768.
- 우경식, 원종관, 1988. 삼척군 대이리 동굴군의 관음굴과 화선굴내에 발달한 동굴생성물의 초기 광물성분과 탄산염 속성작용에 관한 연구, 지질학회지, 25(1), p. 90-97.
- 우경식, 1987~1989, 강원도 조선누층군 탄산염암에서 발견되는 화석 및 비화석 구성요수의 초기광물 성분과 탄산염 속성작용, 과학재단, 연구책임자
- 우경식, 1999, 석회동굴의 지질학적 의미와 연구방향, 99 Samchok International Cave Symposium & Festival, Samchok, Korea.
- 홍시환, 1981, 제주도 만장동굴계 학술조사보고, 동굴, 6, 7
- 홍시환, 1996, 석회암과 석회동굴의 상관성 연구, 동굴, 48, 9-16
- Cvijic, J., 1918, Hydrographie souterraine et evolution morphologique de karst, Rec. trav. Inst. Geog. Alpine, 6, 375-426
- Ford, D., 1987, Effects of Glaciations and Permafrost upon the Development of Karst in Canada, Earth Surface Resources and Landforms, 12, 507-521
- Ford, D. and Williams, P., 1989, Karst Geomorphology and Hydrology, Unwin and Hyman, 601p
- Jennings, J., 1978, Karst Geomorphology, Blackwell, 293p
- Moore, G., 1962, The Growth of Stalactite, Bull. Nat. Spel. Soc., 24, 95.