

양단굴 생성물의 이화학적 특성에 관한 연구

오 종 우* · 오 승 훈** · 신 대 봉***

A Geochemistry Experiments Study of the Yangdan Cave Speleothem in Korea

Oh, Jong-Woo* · Oh, Sung-Hoon** · Shin, Dae-Bong***

Abstract Yangdan Cave displays as a Vadose Cave rather than a Phreatic Cave due to its fluvial activated remnants of the cave beds and walls. Geochemistry experiments of the speleothem (stalactite and stalagmite) were generated in order to find out the cave material characteristics using XRD. The results present that the composition of the cave materials consists of Calcite, Dolomite, Quartz, K, K-Feldspar, Plagioclase, Illite, and Kaolinite. These materials commonly exhibited less mineral composition than other caves. In terms of calcite composition of the cave the upper cave materials (d=3.049) contain less than lower cave materials (d=3.055). Finally the calcite composition of the cave materials between stalactite (d=3.055) and stalagmite (d=3.054) displays similar values.

I. 서론

1. 연구목적

카르스트 지형과 관련된 동굴생성물질 (Speleothems)의 발달과정(Karst Geomorphologic Process)은 그림에서 요약되어 있듯이 일정한 규칙의 발달과정을 거치면서 형성되는 동굴수문학적(Speleo-hydrology)인 속성을 가지고 있다 (Ford, 1989). 특히 동굴은 지하수의 작용으로 지하세계에 남겨 놓은 지하최고의 걸작품이라 할 수 있으리 만큼 그 형상과 조형은 빼어나기 때문에, 지구과학적인 학습의 장으로서 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라 관광적인 차원에서도 중요한 역할을 한다.

동굴생성물은 주로 기반암으로부터 침식되는 용해물질에 의하여 다양한 생성물을 제공하거나 외부 하천의 유입에 따른 외래산 퇴적물질

등이 상호 교차되어 집적되어 있다. 특히 동굴생성물질의 이화학적 특성을 분석하여 여타 동굴의 경우와 비교하여 양단굴 특유의 지질적인 지형적인 성인과 수문학적인 영향에 의한 생성물의 발달기원과 발달과정을 통한 인자를 규명할 수 있는 기회를 제공 하게 된다. 또한 이러한 생성물들은 동굴역사의 침식기록을 보충해주며, 절대적 연대표의 의미와 지역적인 환경변화의 증거를 제시해 주기도 한다.

본 연구의 목적은 동굴의 생성물에 대한 지형 분석과 광물시료에 대한 광학분석으로 동굴생성물의 이화학적 특성을 규명하는데 있다.

2. 연구방법

본 연구조사에서는 동굴생성물의 이화학적 (Geochemistry)인 특성을 규명하기 위하여 광물 조성(XRD)분석을 하였다. 광물조성을 확인하기

* 남서울대학교 교수
** 한중대학교 교수
*** 본학회 부회장

위하여 동굴내부에 형성된 2차생성물인 종유석(2), 종유관(1), 석순(1)에 대한 4개의 시료를 채취하여 분석하였다. 석회동굴의 2차생성물(Speleothem) 샘플 중 임의로 선정한 종유석은 상단동굴(01)에서 한 표본 그리고 하단동굴(02)에서 두 번째 표본을 선정하였으며, 종유관(03)은 대량군집에서 한 표본을, 그리고 석순(04)은 하단동굴에서 형성된 샘플을 선정하여 상호 비교의 대상이 될 수 있도록 하였다.

이상의 샘플은 본 동굴의 성인상 상단과 하단으로 형성된 암석간의 2차생성물의 차이를 파악하기 위하여 종유석을 채취하였으며, 그 중에서 동일 용해물의 종유석과 석순의 광물조성 차이를 비교분석 하였다. 그리고 종유관은 종유석과 동굴천장에서 유착된 동일성을 가지나 유형이 상이하기 때문에 상호간의 미네랄 등의 함량차이를 비교 제시하여 相異性(heterogeneity)을 통한 분류의 기준을 가질 수 있도록 하였다.

II. 결 과

1. 동굴내 2차생성물(Speleothems)의 분포 및 특성

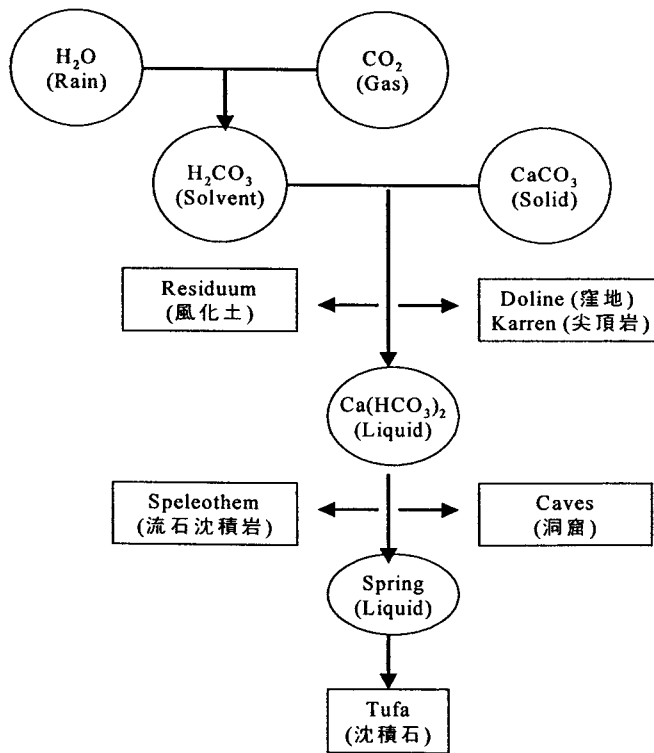
양단굴의 생성물은 전체적으로 볼 때 군집형(Clustered)으로 한꺼번에 여러형식의 생성물들이 묶여져 여러 군데 분포되어져 있는 것이 특징이다. 즉 동굴의 천장부분에 모암의 균열면이 많이 발달된 곳 중심으로 집중적인 용해물질이 흘러나와 2차생성물로 형성되어있다. 규모나 형상이 미세한 소규모 종류관 등으로 노출된 것으로부터 대형 종유석이나 석순 그리고 유석암(Flowstone) 등으로 벽면을 뒤덮은 밀집생성물지형으로 특징 지워지고 있다.

석회암의 많은 광물들은 화학적 침전물로서 동굴안에 퇴적되는데 동굴생성물(Speleothems)

들은 다양한 형태를 이루고 있다. 특히 양단굴 내에는 점토성분의 암석인 이암 등이 석회암과 혼재되어 넓게 분포되어 용해물이 이들 중심으로 형성되고 있으며, 이들 선을 따라 길게 커튼형이나 베이컨형으로 생성되어져 있다. 특히 몇 군데에 불과하지만 모식적인 1-1.5m의 대형 종유석과 석순의 형상과 분포는 한국동굴의 생성물중에서도 손색이 없을 정도로 수준급이라고 할 수 있다.

많은 광물들을 포함한 다양한 종류의 스펠레오템(Speleothems)이 있는데 그 색깔은 순수한 방해석의 흰색과 투명한 색으로 부터 시작된다. 격자모양의 결정안의 불순물 내부결정을 따라서 보여지며 표면은 색깔의 다양한 형태를 보인다. 금속은 붉은새과 주황색을 띄며 마그네슘은 검은색, 구리는 초록색을 띤다. 그러나 조적내의 불순물은 다양한 색깔에서 기인하며 노란색으로부터 갈색, 검은색에 까지 이른다.

speleothems은 그것이 손상되고 이끼로 덮히기 쉬운 유동하는 동굴의 강에서도 이루어질 수 있는 반면 그것은 완전히 통로를 가로막는 위치를 선점하게 된다. 완전히 물로 채워진 동굴에 있어 거의 모든 표면의 결정화는 일반적으로 물의 온도와 물의 화학적조건에 의해서라고 생각된다. 이것의 기후적 조건의 창시자인 Corbel은 speleothem이 빙점 가까운 온도에 의한것은 적으며, 차가운 온도에서 종유석이 석순보다 많으며 석순과 두꺼운 형태는 특히 열대 동굴의 특성이라고 주장했다. 이러한 첫번째 주장은 폭 넓은 지지를 받았다. 온대지역에 속한 양단굴의 종유석과 석순의 분포는 거의 동일한 형태로 형성되고 있어서 Corbel의 논리가 타당함을 입증할 수 있다.



출처: 오종우, 1994

그림 1. karst의 발달과정(Genetic Karst Process)

그림 1에서 카르스트의 발달과정은 4 단계로 분류되어 대기권과 토양권 그리고 암석권과 수권역 등으로 형성되는 일련의 과정은 다음과 같이 분류 설명될 수 있다.

-1단계 기권 (Atmosphere): 빗방울 (H₂O) 이 대기 중에서 CO₂의 혼합으로 산성비 (H₂CO₃) 가 되어 석회암 (CaCO₃)에 떨어져서 최초의 용식작용이 시작된다.

-2단계 토양권 (Pedosphere): 산성비와 석회암 성분이 합쳐 형성된 가용성 화합물 (Ca(HCO₃)₂) 은 植生腐植에 의한 토양 (Humic acidic soils) 에 의해 기반암의 용식이 촉진되어 지표에는 Karren과 석문 (石門 Natural Bridge), 와지 (Dolines, Sinkholes) 지형을 형성시키고, 암석의

분순물은 지표에 남겨져서 결국 적색풍화토 (Residuum, Residual Redish Soils) 를 만든다.

-3단계 암석권 (Lithosphere): 용식작용에 의해 지상에서 지하로 확대되어진 모암의 균열을 타고, 지하의 공간이 지하수의 유입과 유출에 의해 점차 확대되어 동공형의 Conduites; Voids; Shaft 이라는 동굴지형을 형성시키고, 동굴의 천정으로부터 나온 Ca(HCO₃)₂ 는 탄산염의 지속적인 분해 공급에 의해 동굴내에는 종류석, 석순, 유착석 (Speleothem)등의 새로운 동굴지형 (Speleoscope)을 조성하게 된다.

-4단계 수권 (Hydrosphere): 동굴의 형성작용을 거친 물은 동굴지하수로 잔여 Calcite를 함유한 채로 유출 (Spring) 된다. 동굴을 떠난 잔여

Calcite는 또다시 동굴입구나 하천유역에 침전시켜서 유착석 형태이거나 석회화 단구형의 집적지형 (Tufa Formation: Tufa Dam, Tufa Flowstone)을 최종적으로 형성하는 과정을 거치면서 카르스트 지형의 발달에 따른 순환의 과정을 마치게 된다.

2. 동굴생성물의 발달과정

동굴생성물은 공기와 물 그리고 암석이라는 3원소의 조화에 의하여 형성되는 특수한 현상이다. 이러한 특수현상을 도해로 분류하여 설명하면 다음 그림 2와 같다.

가* 鍾乳石 (Stalactite): 동굴여지승람의 기록에 의하면 종류석이 옛날에는 石鐘流라 하여 진상품의 일종으로 취급되었을 정도로 종류석은 특이한 형상을 가지고 있다. 이는 동굴내부의 균열면을 따라 탄산칼슘이 침전수의 응집으로 주로 천정에서부터 형성된 고드름과 같은 형상으로서 쥘 모양으로부터 큰기둥 같은 것 등의 규모가 다양하다. 동굴환경에 따라 종류석 성장속도의 차이는 있지만 대개 1년에 0.2 mm 정도로 매우 느리게 성장하는 것으로 알려져 있다 (Moore, 1962).

방해석은 물방울이 천정으로부터 떨어지기 전에 형성되는데 벽을 따라 흐르며 아래로 늘어난 형태의 종유석을 이룬다. 대롱모양의 종유석을 가진 물방울은 원형모양으로 침전되는데 이는 직경 5mm 정도의 구멍난 관을 형성한다. 침전물중 대부분을 이루고 있는 방해석은 매우 중요한 광물이며 그것은 물로부터 CO₂의 확산에 의해 침전된다. 양단굴의 경우 침전물의 고화가 상당한 길이가 되어 홍수처럼 바깥으로 흘러가기 전에 원형의 결정을 퇴적시키며 내부적으로 차단되며 원추형의 형태를 이루어 돌담의 모양을 띄고 있는 경우도 있다.

궁극적으로 그것들은 그 자신에 무게에 의해서 떨어지는데, 주로 결합에 의한 선의 형태나 물의 침투에 의한 평면의 형태이며 물방울지점의 작은 흐름은 복잡한 형태를 띤다. 바닥으로 떨어진 물방울은 튀기면서 위쪽으로 석순을 이루게 되는데 작은 경우 반경이 3cm정도이다. 물방울의 응결성은 비율과 경도, 동굴환경에 의해 퇴적비율의 감소에 기인되는 반면 층모양은 다양한 비율에 의해 이루어진다. 성장되는 층은 각각의 정상에 석순으로 덮히게 되며 양측면은 두터워진다. 물방울이 떨어지는 높이는 석순의 모양을 설명함에 있어서 또다른 요소이며 이것은 부피가 크고 높은 형태로 성장하게 된다.

나* 종유관: 동굴의 천장에서 형성된 아주 가늘고 긴 형태의 생성물을 종유관이라고 한다. 종유관의 형성은 암석으로부터 형성된 용해물질이 칼사이트의 함양리 물의 비중보다 적을 때 형성된다. 본 양단굴에 군집형으로 종유관의 형상이 다양하게 구성되어져 있다.

다* 石筍 (Stalagmite): 석순은 종류석의 반대현상으로서 천정에서 탄산칼슘이 응키고 난 이후, 殘存 칼슘함양의 물방울이 동굴바닥에 떨어져 위로 성장하는 현상으로서, 상부의 종류석과 하부의 석순이 연결되면 결국 기둥모양의 石柱 (Column)가 된다.

라* 流石 (Flowstone): 유석은 탄산칼슘을 함유한 물방울이 균열면으로 나와 벽면을 따라서 흘러 침적된 현상을 말한다. 우선적으로 2차적 삼투작용에 해당되는 단층면, 습곡면, 층리면, 균열면 등이 동굴내부에 형성된 상태에서 얼마나 많은 함양의 탄산칼슘이 유입되어 나오느냐에 따라서 유석의 형상이 단순할 수도 있고 반대로 매우 다양한 온갖 형상을 창출해낼 수 있다. 그 종류로는 유석에서 연결된 현상으로서 커튼과 같은 'Drapery' 혹은 'Bacon' 형상 등이

있다.

중유석과 석순은 계속 성장하며 석순을 이루게 되는데 벽을 따라서 흐르면서 얇은 막을 이루는 반면 넓어지고 얇은 막이 바닥에서 더욱 현저하게 보여진다. 바닥과 사면에는 돌로된 댐이 생기고 지류들은 다양한 크기와 깊이의 웅덩이가 생긴다. 방출과 속도는 낮은 부분에서 현저하며 계속적으로 진행된다.

마* 石花 (Cave flower; Helictite): 석화는 동굴의 천정이나 벽 또는 바닥에서 형성된 각종 모양으로서 주로 꽃 모양이 많으며, 나선형의 형상도 벽 등지에서 그리고 水晶화된 삼각형상 등이 천정에 혹은 바닥에 출현되는 등 매우 다양하게 나타난다. 이는 주로 동굴이 탄산칼슘을 포함한 기체나 액체가 기권이나 수권의 유동 상태에서 형성된 것이다.

Helictites는 부드러운 표면에 형성되며 중력에 상관없이 성장이 계속된다. 다시말해 그것들은 모세관으로부터 물의 분출에서 기인된 물의 압력의 결과라고 생각될 수 있다. 모난 helictites는 그것의 격자모양 결정의 방향에 있어 뜻밖의 변화를 보인다. 곡선과 원주모양의 형태는 결정축의 방향이 점차로 변하는 것에 기인하며 아마도 격자모양을 변형시키고 썩기모양 형태의 원인은 불순물 때문일 것이다.

바* 洞窟鎮珠 (Cave Pearl): 동굴진주는 세 가지 종류로 구분된다. 개별형상의 구경이 2mm 이하 일 때 이를 卵石 (Oolites)이라 하고, 2mm 이상 일 때를 漸岩 (Pisolites)이라 하며, 동굴진주는 2mm 이상이며 대체로 8-15cm에 약 1kg인 경우의 규모로 분류된다. 형성과정은 박쥐의 배 같은 미량의 有機物 조각이나 모래와 같은 無機物 등(핵)이 주변에서 移入되는 탄산칼슘수가 조금씩 겹쳐져서 점차 커지는 단계에서 그 형상이나 규모가 구성된다.

사* 旋盤 (Canopies): 선반은 동굴의 벽면에 선반 같은 형상으로 붙어있는 古堆積物의 잔형 지형이다. 이는 굴하천에 의한 퇴적작용 이후 Vadose 활성화에 의한 下刻작용으로 동굴바닥(舊河床)의 일부가 벽면에 남겨진 지형으로서 동굴의 초기발달과정을 추정하는데 매우 중요한 자료를 제공한다. 특히 동굴의 형성이후에 발생되었던 기후변동에 의한 수문환경과 하천작용에 의한 지형현상 그리고 동굴지형에 의한 동굴환경 등을 유추할 수 있는 종합적인 자료를 제공한다. 충청도의 여러 동굴의 경우 퇴적물의 구성물질이 동굴외부에서 유입된 다른 종류의 암석 등으로 구성되어 있으며, 퇴적물 중에서 자갈(礫)의 圓形度 (Roundness)가 아각력에서 아원력 등으로 하천수의 유입혼탁이 확인되었다 (오종우, 1994).

아* 流着石 (Speleothem): 유착석은 동굴내부에서 탄산칼슘에 의한 집적현상으로서 다양한 형상을 가진다. 이것은 지하동공의 발달이 활성화될 때 보다 일단 동공이 확장된 후에 유석침적암 지형이 다량 형성되며, 굴하천에 의한 하각작용이 재활동되는 과정중에서도 또한 그 후에도 형성될 수 있다. 특히 그 발달은 동공이 沈水 상태 (Phreatic zone) 보다 移水 상태 (Vadose zone)에서 주로 형성되며, 다량의 침적이 동공내에 이루어지면 결과적으로 동공은 오히려 매립되어 축소되어 동굴확장의 역작용이 나타나기도 한다.

3. 동굴 퇴적물 분석

가. 쇄설성 퇴적물(Clastic Sediments)

쇄설성 침전물은 크기와 모양, 구조에 있어 다양하며 암석은 다른 환경들보다도 더욱 우세하다. 이것은 동굴침전물이 정리되지 않은 파편의 전체범위로 나타내는 경계적 내부적 분열에

기인한 것과 동굴내부에 있어서 증력적이고 열에 의해 침전되어지는 외부적 요인에 의해 기인된다. 동굴은 표면의 원료로서 모여진 거대한 양의 먼지로서 활동하는 것 뿐만이 아닌 모든 동굴에서 보여지지는 않았지만 일정하지 않은 침식체계를 보여준다.

점차로 침전물은 지형학자들과 고고학자들에 의해서 연구되어지는데 그들은 동굴환경이 hihterto의 ‘불모의 침전층’으로부터 재구축된 동굴환경의 세부역사로 이름부치거나 동굴 침전학의 이해로 귀결되는 최근의 진보적 사고를 이용한다. 천정과 벽의 파열은 평탄하지 않은 축적물을 이루며 모난 방어물, 원형천정 아래에 원추형모양으로 벽과 근처의 한정된 통로로 넓혀지게 된다. 이러한 퇴적물의 안쪽에는 방어물의 파열이 더욱 현저하게 이루어진다. 다른 어떠한 움직임이 위로부터의 추가적인 진행으로부터 분리된 이러한 퇴적물에 영향을 준것에 대해서도 연구가 이루어지지 않았다.

미세한 집괴암은 동굴표면의 풍화에서 기인하는데, 특히 건조한 경로에 의한 소금결정에 결과이다. 조직상의 집적은 빈약하며 원래의 구조가 파열된 구조위에 부과되기 때문에 크기에 있어 두가지의 형태를 띄게 된다.

동굴 각력암은 오랜 관심의 대상이 되어왔다. 이것은 점토층에서 거대한 기반암위에 혼합된 형태로 퇴적된다. 기동과 스펠레오템들은 형성되어 옮겨지며 공헌한다. 침식과 홍수에 의한 mass movement 는 기반암 쇄설물, 잔해물, 토양, 2차적인 강수와 동물의 잔해물을 서로 모이게 하여 녹지 않는다. 때때로 clasts는 모난 debris지 점이 구멍을 포함하며 위로 진화하는 반면 굳은 부분에 있어서 그 결과는 상당히 아래로 형성된 균열의 형태로 가까와지기 때문에 하부 토양 용해에 의해 둘러 쌓이게 된다.

또한 가끔씩 침전된 덩어리는 일정한 비율에 의하지 않게 표면에서는 그곳에서 기인된 원료의 침입가능성과 관계된 것처럼 보인다. 이러한 동굴에서는 균열을 채우는 것의 위치때문에 동굴이 확대된다는 제안과 같은 각력암의 몸체 또한 존재한다. 위에서 기술된 동굴각력암에서 fault각력암, stylo각력암과 다른 동시대의 각력암을 구별하는데는 많은 관심이 필요로 되어진다.

나. 하천과 연못 퇴적(Stream and Pond Deposits)

동굴안의 물에 의한 쇄설성 침전물은 거친 기반암으로 부터 깨끗하게 범위를 이루며 양호한 마모가 일반적이며 카르스트 기반암에서 기인된 점토때문에 그 크기는 매우 미세하다. 그러나 최근 학자들은 외부기원에 대한 중요성을 강조하고 있는데 이것은 암석과 거친조각들의 광물조합의 다양성을 확신하고 있다.

동굴 웅덩이 속의 수중침전은 내부의 격자모양과 일치하는 결정모양이 될것이며 얇은 층모양의 부빙하는 방해석은 그것이 부서져 바닥에 쌓일 때까지 웅덩이 표면에 떠있게 된다. 이전의 증력에 의한 성장으로 이루어진 형태와는 대조적으로 기묘한 스펠레오템은 다른것에 종속된 힘에 의해 형성되는데 결정의 성장력은 지역적으로 기류나 주광성의 해조류에 의해 기인된다.

모래와 실트는 주암과 주변의 불투성암석에서 기인된다. 방해석 모래는 드물지만 돌로마이트 모래는 그렇지 않고 교착이 일반적이며 카본이 풍부한 물의 영향으로 빠르게 진행된다.

압력에 의한 분출을 통한 극도로 평탄화된 자갈들은 기반암의 얇은 층을 이루게 된다. 대부분의 하천에 의한 침전물의 형태와 구조는 통로

에서 발견되는데 강화된 해엽과 꼬아진 밤람원, 포인트바아. 교차침전등의 경우를 포함한다. 기반암의 침전주기는 특징적이며 경사진 사면은 특히 일반적이어서 큰 홍수의 영향으로 동굴구조의 지형에 영향을 주게 된다.

동굴침전물의 이러한 범주 안에서 미세하게 마모된 침전물에 대해 많은 논쟁이 발생하였다. 붉은색과 황토색의 점토는 카르스트 동굴에서 그것들은 때로는 거대한 규모지만 또한 실트성분이 있을 경우 미세한 얇은 판자층을 이룬다. 암석의 색상 원인은 철분함유의 산소 때문이다. 기원적으로 불용성의 석회석 잔존물로 간주되는 그들은 Bretz에 의하면 표면토양으로 부터 기인되며 침식면 아래의 완만한 발전과 계곡사면 동굴의 동화사이의 단속적인 형태 동안 동굴안으로 유입되게 된다. 그러나 Reams에 의하면 미세한 침전물은 ozark계곡의 지류에 의해 절삭되며 동굴은 표면의 자유곡류하천에 의해 점유된다고 하였다.

또한 Reams는 ozark의 실트성 점토가 일반적으로 그 각이 비록 수직일지라도 기반암 표면에 정확히 수평이 되는 특이한 경향을 보이며 얇은 층을 이루게 됨을 밝혔다. 이러한 급격한 침전성 침액은 많은 동굴의 경우에서 보여졌으나 그들은 1981년 Bull에 의해 거의 완전히 연구되었다. 다른 개별적인 특징들은 얇은 층이 일정한 두께를 가지며 상당한 길이로 마모되며 그것들이 지붕에 쌓이게 된다는 것이다.

그는 기후요소가 개입되면 침전물이 많은 물이 순환적인 흐름체계에 의해 틈새로 주입된다고 하였으며 빙하의 녹은물은 동굴을 통과하여 기존의 물에 호상점토를 쌓는다. 플라이스토세의 호상점토는 빙하기의 추운 날씨에 관계없이 동굴안에 침전된 얇은층의 실트점토와는 구별할 필요가 있다.

동굴퇴적물의 통계적 처리에 관해서 다른 양상이 보이는데 특별한 경로에 있어 침전물이 오래된것 위에 새것이 쌓이는 위치를 보이게 되지만 침전물의 분리된 몸체는 통로안이나 밖에 수직적으로 위치하며 동굴은 원래의 것에 거꾸로 위치하게 되어 나중것 보다 더 낮게 자리잡는다.

동굴벽 위에 위치한 침전물의 작은 조각들은 두껍거나 평평한 동굴 내용물의 잔존물이라고 여겨져 왔다. 그것들은 완만한 경사의 사면 침전물에 지나지 않는데 이것은 형태적 수준으로 생각되는 지금의 것에 비해 결코 크지 않다. 더우기 홍수는 미세한 침전물의 퇴적막을 동시에 많은 층으로 쌓을 수가 있다. 이러한 형태는 green river의 홍수에 의해 13m의 높이 이상으로 보여지고 있다.

다. 동식물성 퇴적(Biogenic Deposits)

동굴에서의 식물성장은 매우 빈약해서 그들의 퇴적물은 박테리아가 방해석 침전에 영향을 줌에도 불구하고 무시된다. 표류물은 홍수시 동굴로 쓸려들어가고 때로 강의 퇴적에 작용한다. 알프스의 검은 동굴의 양토는 Humic기원으로 여겨진다. 동물들과 마찬가지로 완전히 동굴에서만 생활하는 것들은 너무나 작은 생체량을 만들어서 눈에 떨만한 양의 퇴적물은 될 수가 없고 반면 어떤 동굴에서는 외부의 영향을 받은 것들이 상당한 양의 퇴적물을 남기는 경우도 있다.

큰 배설물 덩어리들은 동굴을 휴식과 양육의 안식처로 사용하는 더 큰 동물들에서 유래한다. 왜 및 원추형 더미 속의 새와 박쥐들의 배설물은 이것의 주된 표현으로 기반암의 부식을 이끌고 접촉부분에서 특이한 광물의 기초가 된다. 동물의 뼈 또한 축적된다.

동물의 트랩이나 뼈와 같이 작용하는 개방된 shafts는 바닥에 축적된다. 동굴에 사는 동물들의 사냥이나 유상은 또한 올빼미 알이나 인간의 음식찌꺼기를 포함한 뼈가 쌓이게 만든다.

이들 유기적 물질의 광물화는 인산염이나 질산염을 형성하는데 이것들은 또한 쇄설성 침전에서 상호교환 작용을 하는데 자유롭다. 이들 광물의 다수는 경제적 목적 - 비료, 화약, 최음제 - 으로 채취되었고 침전물의 제거와 방해를 가져온다.

4. 동굴 퇴적물의 광물조성과 성분

동굴내부에 형성된 2차생성물인 중유석(2), 중유관(1), 석순(1)에 대한 시료를 채취하여 광물조성을 확인하기 위하여 4개의 샘플을 분석하였다(표 1). 석회동굴의 2차생성물(Speleothem) 샘플은 임의로 선정한 중유석은 상단동굴(01)에서 한 표본 그리고 하단동굴(02)에서 두 번째 표본을 선정하였으며, 중유관(03)은 대량군집에서 한 표본을, 그리고 석순(04)은 하단동굴에서 형성된 샘플을 선정하여 상호 비교의 대상으로 삼았다.

이상의 샘플은 본 동굴의 성인상 상단과 하단으로 형성된 암석간의 2차생성물의 차이를 파악하기 위하여 중유석을 채취하였으며, 그 중에서 동일 용해물의 중유석과 석순의 광물조성 차이를 파악하기 위하여 비교분석 자료를 대상으로 하였다. 그리고 중유관은 중유석과 동굴천장에서 유착된 동일성을 가지나 Calcite 함량의 차이를 비교하기 위하여 분석대상으로 선정하였다. 따라서 각각의 시료명은 양단-1, 양단-2, 양단-3, 양단-4로 하였다.

광물조성 분석 결과는 표 1에서 제시된 바와 같이 구성광물의 양적인 차이가 있을 뿐 대부분 거의 동일한 구성광물의 분포를 나타내고 있다.

일반적인 구성광물은 방해석(Calcite), 돌로마이트(Dolomite), 석영(Quartz), 장석류(K장석: K-Feldspar, 사장석: Plagioclase), 점토광물(Illite, Kaolinite)로 구성되어 있다. 공통적으로 돌로마이트(Dolomite), 석영(Quartz), 장석류(K장석: K-Feldspar, 사장석: Plagioclase), 점토광물(Illite, Kaolinite)의 함량이 매우 적으며, 상하단 동굴의 비교분석의 결과 하단동굴의 방해석(Calcite) 함량($d=3.055$)이 상단동굴의 것($d=3.049$) 보다 상대적으로 높은 것으로 나타났으며, 종류석과 석순의 방해석 함양분석을 해본 결과 거의 동일한 결과(중유석: $d=3.055$, 석순: $d=3.054$)로 상호 변화가 없음이 증명되었다. 결과적으로 양단굴 내부의 2차생성물의 광물조성 분석에 의한 비교분석의 결과는 상대적인 차이가 없는 것으로 나타났기 때문에 모암의 구성비가 비교적 동일한 성분으로 구성된 분포에 의한 영향으로 암시된다.

표 1. 양단굴 2차 생성물의 XRD 분석결과(2-Theta)

Type	Start	End	Step	Step time	Temp.
2Th, Th/Th locked	5.000	60.000	0.020	0.7s	25.c

III. 결론

양단굴은 浸水河成작용에 의한 동굴로서 발달과정은 빠른 지하수의 확장작용에 의한 定形化된 동공의 형상인 프리에틱 동굴 (Phreatic Caves) 보다 지하수면 (water table)의 상하작용으로 동굴의 河床이나 벽면에 주로 침식흔적이 나타나는 현상인 베이도스 동굴 (Vadose Caves)에 가까운 동굴이다. 일반적인 형태로서 동공의 기저부가 밑으로 길게 열쇠고리 같이 하각작용에 의한 지형과 측방침식의 작용인 굴하천의 蛇行 (Meandering)에 의한 벽면의 양안이나 한 쪽

면만이 움푹 패인 형상 등이 있다.

본 현상은 주로 窟河川의 우수작용에 의한 침식현상으로서 대개 직류인 경우는 段狀이 양안에 岩床段丘 (Rock terraces)로 나타나며, 곡류천인 경우는 측방침식작용에 의한 한 쪽 면에서만 나타나는 경우가 있기 때문에 벽면의 요철이 매우 심한 경우가 이에 속한다. 이것은 기후적인 현상으로 강수의 증가나 혹은 지반의 용기작용에 의한 굴하천의 侵蝕基準面이 급격히 하락하는 과정에서 나타난 결과이기 때문에, 동굴의 형성과 관련된 기후적인 또는 용기적인 기록 등을 제공해주는 주요한 地域的 地史 자료가 될 수 있다.

양단굴의 경우 다단동굴<多段 洞空 (Multi-level passages)>의 발달과정이 2단 이상의 수직과 수평으로 연장된 지류를 가지는 지형상에 2차생성물이 발달되어있다. 동굴의 형성과정에서 지하수면의 昇降작용에 따른 현상과 석회암 층리의 硬岩과 軟巖간의 차별침식 결과로서 지하동공의 복잡한 支窟의 발달과정을 유추할 수 있다. 하단동공의 형성과정은 巖床단구와 旋盤지형의 형성에서 나타나는 침식기준면의 하락이라는 인자와 밀접한 관련이 있다. 이러한 수평적인 다단계 동굴지형은 습곡작용을 받지 않은 미국 중부지방의 캔터키, 인디애나, 위스컨신주 등지에서 흔한 현상이다. 습곡에 의한 한국의 동굴은 암석의 주향을 따라 동굴이 급사면적인 복잡한 형태가 주종을 이루고 있다.

결론적으로 2차 생성물이 발달된 양단굴의 발달은 공동 (空洞)의 형상인 원형에서 지하수면의 하강에 의한 下刻作用이나 側方침식이나 하천작용에 의한 지형으로 변형되게 된다. 이러한 현상이 거듭되는 과정에서 층리면의 崩壞와 陷沒作用에 의한 확장의 결과에 의하여 양단동굴의 형상이 확장되어 형성된 것이다.

文 獻

서무송, 1969, 한국의 karst 지형, -삼척일대의 지형 발달을 중심으로-, 경희대학교 석사논문
 서무송, 1977, 한국의 석회암 동굴산 Pisolite에 관한 연구, 지리학, 16
 오종우, 1989, Wisconsin 남서부 Karst의 Loess 토양 및 퇴적토, 지역개발논문집, 15, 29-43
 Oh Jongwoo, 1990, Sinkhole Sediment Sequences in the Southwestern Wisconsin Karst, 1990년도 세계한민족과학기술자 종합학술대회 논문집 -지구과학분과, 한국과학기술단체총연합회, 199
 오종우 외, 1991, Potential Sources of the Sinkhole Sediments in the Wisconsin Driftless Area, 지리학총, 19, 31-58
 오종우, 1993, Karstic Sinkhole Sediments of Dolostone in the Upper Midwest's Driftless Area USA, 동굴, 35, 78-104
 Oh, J., Day, M. and Gladfelter, B., 1993, Geomorphic Environmental Reconstruction of the Holocene Sinkhole Sediments in the Wisconsin Driftless Area, 1993년도 세계한민족과학기술자 종합학술대회 논문집 -지구과학분과, 한국과학기술단체총연합회, 390-397.
 오종우, 1993, 지역개발에 수반되는 동굴지역의 지형조사, 동굴, 36, 32-36
 오종우, 1993, 북한지역의 Karst 지형, In, 북한지역의 지형연구, 한국과학기술단체총연합회, 107p
 오종우, 1994, Karst 지형과 동굴지형, 동굴, 38, 89-96
 오종우, 1994, Soils and Landforms on the Loess Mantled Karst Uplands in Southwestern Wisconsin, USA, 동굴, 37, 103-113
 오종우 외, 1994, 고수동굴의 환경보전 및 안전진단 학술조사 연구보고서, (주)유신, 169p
 오종우, 1994, 고수동굴의 내부지형에 관한 특성과 형성과정에 관한 연구, 동굴, 39, 14-33

오종우, 1994, 지리정보체계(GIS)를 이용한 Karst 연구의 가능성, 동굴, 40, 13-29

오종우 외, 1994, 태백시 용연동굴 지대의 지리환경, 동굴, 37, 81-102

오종우, 1994, 카르스트(KARST)의 지표지형과 동굴지형, 동굴, 38, 89-96

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, 95-106

Oh, J., Day, M. and Reeder, P., 1989. Dolostone Karst in Southwestern Wisconsin. The Wisconsin Geographer, 5, 29-40

Oh, Jongwoo, 1990, Alpine Karst in Korea, A Brown Bag Lecture in Geog. Dep. Univ. of Wisconsin-Milwaukee

Oh, Jongwoo, 1990, Alpine Karst in South Korea, Wisconsin Geographical Soc. Annual Meeting Abs., 6

Oh, J. and Day, M., 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

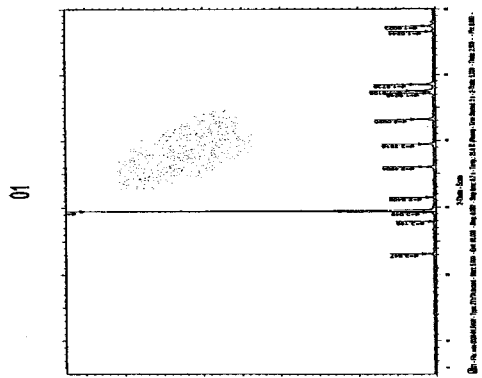
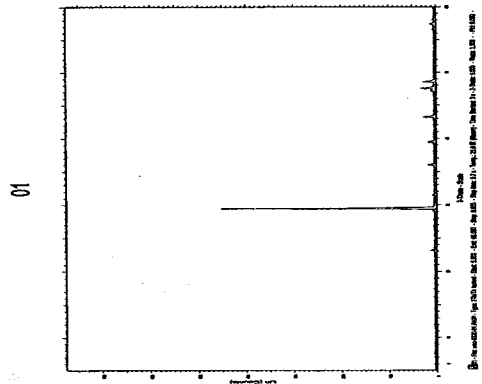
Oh, Jongwoo, 1994, Alpine Karst in East-central Korea, Journal of the Speleological Society of Korea, 41(Eng. ed. 1), 15-25

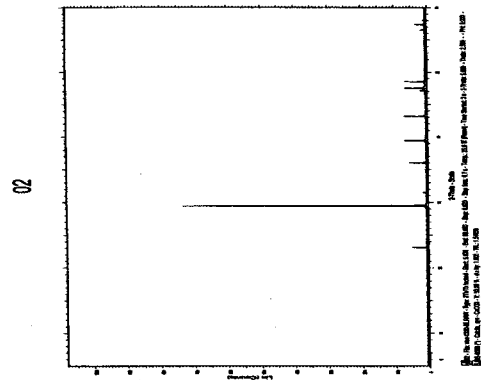
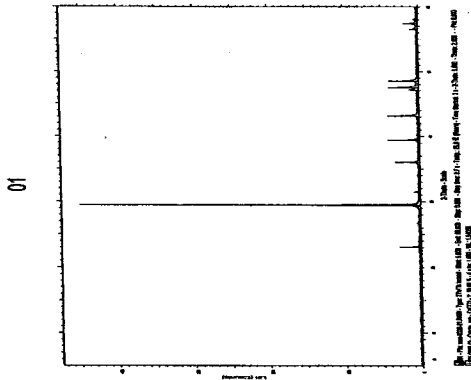
Oh, Jongwoo, 1995, Arctic and Subarctic Karst Landforms on North America, Journal of the Speleological Society of Korea, 43(Eng. ed. 2), 7-16.

Oh, Jongwoo, 1996, Karst Geomorphology in South Korea, Journal of the Speleological Society of Korea, 46(Eng. ed. 3), 11-42.

Oh, Jongwoo, 1996, Karrens and their Morphologies of the Alpine Karst in South Korea, In, KARREN LANDFORMS, Fornos, Joan J. and Gines, Angel(Ed.), Universitat de les Illes Galears, Palma de Mallorca, 363-378.

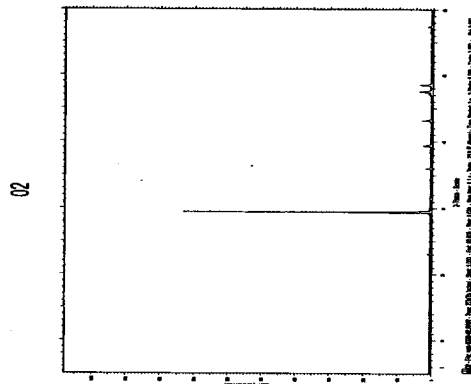
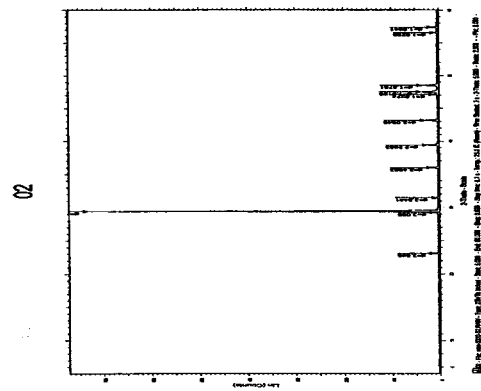
부록: XRD 분석 결과





01

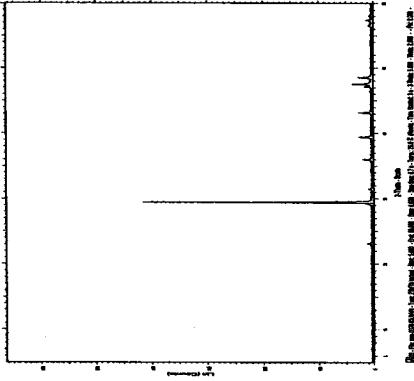
Caption	Legend 2-Theta	Angle Angstrom	d value	Intensity Count	Intensity %
d=3.847	23.100	3.847	10.2	2.2	
d=3.195	27.903	3.195	2.30	0.5	
d=3.049	29.266	3.049	8.53	1.9	
d=3.031	29.448	3.031	453	100.0	
d=2.8408	31.465	2.8408	5.76	1.3	
d=2.4904	36.034	2.4904	14.7	3.3	
d=2.2816	39.462	2.2816	14.7	3.3	
d=2.0920	43.210	2.0920	24.1	5.3	
d=1.9248	47.178	1.9248	8.34	1.8	
d=1.9105	47.553	1.9105	30.1	6.6	
d=1.8736	48.550	1.8736	24.7	5.5	
d=1.6244	56.615	1.6244	5.28	1.2	
d=1.6023	57.465	1.6023	9.58	2.1	



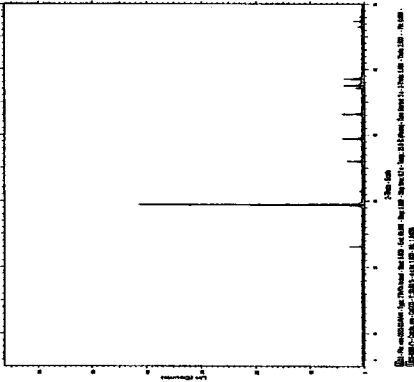
02

Caption	Legend 2-Theta	Angle Angstrom	d value	Intensity Count	Intensity %
d=3.856	23.046	3.856	9.56	1.3	
d=3.055	29.211	3.055	8.48	1.2	
d=3.036	29.394	3.036	734	100.0	
d=2.8441	31.428	2.8441	4.55	0.6	
d=2.4953	35.960	2.4953	15.1	2.1	
d=2.2853	39.396	2.2853	24.1	3.3	
d=2.0946	43.154	2.0946	28.1	3.8	
d=1.9274	47.111	1.9274	9.02	1.2	
d=1.9126	47.498	1.9126	36.3	4.9	
d=1.8751	48.508	1.8751	34.4	4.7	
d=1.6258	56.560	1.6258	5.98	0.8	
d=1.6041	57.397	1.6041	12.3	1.7	

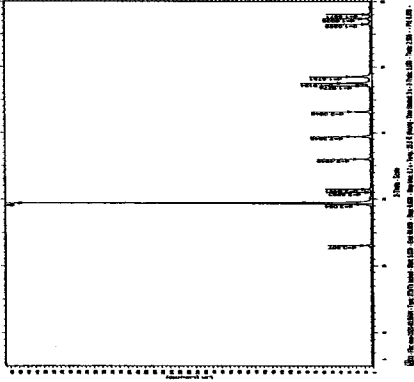
03



03



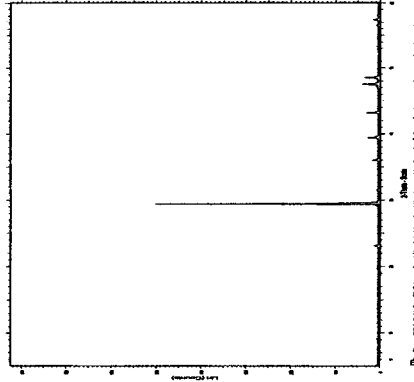
03



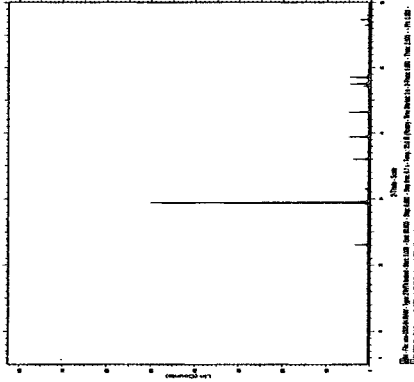
03

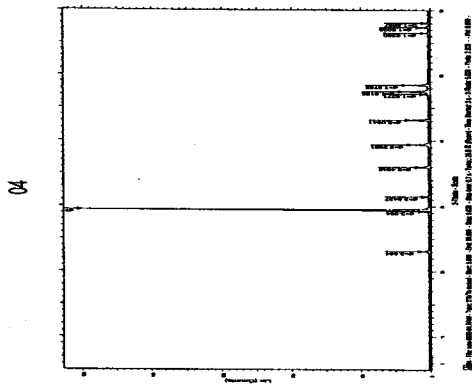
Caption	Legend 2-Theta	Angle Angstrom	d value	Intensity Count %	Intensity %
d=3.857	23.039	3.857	9.01	2.2	
d=3.054	29.217	3.054	12.9	3.1	
d=3.036	29.399	3.036	416	100.0	
d=2.8863	30.956	2.8863	3.27	0.8	
d=2.8441	31.428	2.8441	7.09	1.7	
d=2.4949	35.968	2.4949	16.8	4.0	
d=2.2848	39.405	2.2848	24.4	5.9	
d=2.0946	43.153	2.0946	23.2	5.6	
d=1.9274	47.113	1.9274	13.2	3.2	
d=1.9124	47.505	1.9124	35.8	8.6	
d=1.8751	48.510	1.8751	25.1	6.0	
d=1.6259	56.557	1.6259	5.80	1.4	
d=1.6039	57.405	1.6039	9.17	2.2	
d=1.5871	58.070	1.5871	5.27	1.3	

04



04





04

Caption	Legend 2-Theta	Angle 2-Theta	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity %
d=3.854	23.056	3.854	10.6	2.1	
d=3.054	29.220	3.054	9.51	1.9	
d=3.035	29.405	3.035	502	100.0	
d=2.8427	31.443	2.8427	4.93	1.0	
d=2.4945	35.973	2.4945	14.0	2.8	
d=2.2851	39.399	2.2851	25.2	5.0	
d=2.0941	43.164	2.0941	27.7	5.5	
d=1.9271	47.121	1.9271	6.74	1.3	
d=1.9125	47.502	1.9125	37.6	7.5	
d=1.8752	48.507	1.8752	32.3	6.4	
d=1.6260	56.554	1.6260	5.92	1.2	
d=1.6035	57.419	1.6035	12.0	2.4	
d=1.5867	58.085	1.5867	4.64	0.9	

본 연구는 국립환경연구원에서 지원한 2002년도 전국자연환경기초조사(전국자연동굴조사)에서 제작된 결과물임을 밝혀둠.