

# 洞窟 堆積物의 形成過程에 관한 研究

오 종 우\*

## A Process Study on the Cave Deposits: Speleothems

Jongwoo Oh

**국문요약** : 동굴 퇴적물의 형성과정은 1단계 기권 (Atmosphere): 빗방울 (H<sub>2</sub>O) 이 대기중에서 CO<sub>2</sub>의 혼합으로 산성비 (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)가 되어 석회암 (CaCO<sub>3</sub>)에 떨어져서 최초의 용식작용이 시작된다. 2단계 토양권 (Pedosphere): 산성비와 석회암성분이 합쳐 형성된 가용성 화합물 (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)은 植生腐植에 의한 토양 (Humic acidic soils) 에 의해 기반암의 용식이 촉진 되어 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 암권 (Lithosphere): 용식작용에 의해 지상에서 지하로 확대되어진 모양의 균열을 타고, 지하의 공간이 지하수의 유입과 유출에 의해 점차 확대되어 동공형의 Conduites; Voids; Shaft 이라는 특수지형을 형성시키고, 동굴의 천정으로부터 나온 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 는 탄산염의 지속적인 분해 공급에 의해 동굴내에는 종류석, 석순, 유착석 (Speleothem)등의 새로운 동굴지형 (Speleospace)을 조성하게 된다. 4단계 수권 (Hydrosphere): 동굴의 형성작용을 거친 물은 동굴지하수로 잔여 Calcite를 함유한 채로 유출 (Spring) 된다. 동굴을 떠난 잔여 Calcite는 또다시 하천유역에 침전시켜서 석회화 단구형의 집적지형 (Tufa Formation: Tufa Dam, Tufa Flowstone)을 최종적으로 동굴을 나와 외벽이나 하천의 바닥에 형성하는 과정을 거치면서 카르스트 지형의 발달과정이 1차적인 순환을 마치게 된다.

### I. 서론

동굴퇴적물은 주로 기반암으로부터 침식되는 많은 공간을 차지한다. 즉 그것들은 그러한 공간을 확대하는 과정들에 영향을 주고 동굴역사의 침식기록을 보충해주며, 절대적 연대표의 의미와 지역적인 환경변화의 증거를 제시해 준다. 최근 10년간 그것들에 대한 많은 연구들로 인하여 카르스트와 동굴과학에 있어 그 중요성이 증가되었다. 이러한 퇴적물들은 암석학과 발생학적으로 매우 현저한 다양성을 보이는데 동굴벽의 환경에서 얻어진 성질의 유전과 복잡한 층서학은 그것들의 분류와 연구를 어렵게 만든다. 카일은 동굴 안에서 형성된 재료들과 침전의 장소로 이용된 재료들 사이의 구분을 시도하였

다. 이러한 것들은 kukla와 lozek에 의한 외부 발생적 퇴적물과 내부발생적 퇴적물의 분류와는 정확히 일치하지 않는데 예를 들면 동굴의 지류는 두 가지 원천에 의해서 침전물을 쌓아놓게 된다. 침전물들은 초기의 작용에 의한 특성을 계속 보유하여 하천작용에 의해 빙하에 의한 경사로 재퇴적 됨에도 불구하고 다른것들은 주로 동굴의 퇴적물에 영향을 주는 경과들의 분류에 의해 연관된다.

동굴퇴적물은 기후적인 구분과 관계없이 세계적으로 공히 비슷한 형태의 고품질 형상을 나타내고 있다. 이러한 카르스트의 발달과정과 관련된 학자들의 이론을 검토하고 상호 비교하여 구득한 사례를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

\* 남서울대학교 교수

## II. 동굴 퇴적물(Speleothem)

많은 광물들은 화학적 침전물로서 동굴안에 퇴적되는데 이러한 것들은 다양한 형태를 이루고 있어서 유전학적인 기간동안 speleothem은 현재 초기의 모호한 명칭을 대신하고 있다. 방해석은 매우 중요한 광물이며 그것은 물로부터 CO<sub>2</sub>의 확산에 의해 침전된다. 침전물은 매우 다양하다. 포드와 드레이크는 0.1 - 10.0 cm의 범위를 제시하였는데 이는 보수적인 것이다.

슬로베니아의 Postjna 동굴의 경우 그 성장은 동굴공기의 PCO<sub>2</sub>의 다양성보다도 물의 양과 정도에 더욱 민감하다. 방해석은 물방울이 천정으로부터 떨어지기 전에 형성되는데 벽을 따라 흐르며 아래로 늘어진 형태의 종유석을 이룬다. 대롱모양의 종유석을 가진 물방울은 원형모양으로 침전되는데 이는 직경 5mm 정도의 구멍난 관을 형성한다. 그것들의 평균성장률은 0.2mm-1이며 그 길이는 서부 오스트리아와 프랑스의 여러 동굴의 경우 6m에 이르는 것도 있다. 그러나 그것들은 매우 약하여 파괴된 파편들이 바닥에 많이 보여진다. 그것들은 상당한 길이가 되어 홍수처럼 바깥으로 흘러가기 전에 원형의 결정을 퇴적시키며 내부적으로 차단되며 원추형의 형태를 이루어 돌담의 모양을 띄게 된다. 매우 큰 종유석은 이러한 방법으로 형성되며 프랑스의 Aven Armand에 있는 것은 30cm에 이른다.

speleothems은 그것이 손상되고 이끼로 덮히기 쉬운 유동하는 동굴의 강에서도 이루어질 수 있는 반면 그것들은 완전히 통로를 가로막는 위치를 선점하게 된다. 완전히 물로 채워진 동굴에 있어 거의 모든 표면의 결정화는 일반적으로 물의 온도와 물의 화학적 조건에 의해서라고 생각된다. 이것의 기후적 조건의 창시자인 corbel

은 speleothem이 빙점 가까운 온도에 의한것은 적으며, 차가운 온도에서 종유석이 석순보다 많으며 석순과 두꺼운 형태는 특히 열대 동굴의 특성이라고 주장했다. 이러한 첫 번째 주장은 폭넓은 지지를 받았다.

### 1. 빙굴(Cave Ice)

위도나 정도에 관계없이 겨울이 길어지는 기후에 있어서 동굴 안에는 다양한 방법으로 얼음을 형성한다. 눈은 owen 얼음동굴처럼 동굴의 틈이나 아래로 기울어진 동굴입구로 들어오게 된다. 만약 높이 그것들을 막으면 따뜻한 공기는 여름에 완전히 녹힐 때까지 차단되며 흐름들은 반영구적인 얼음으로 변한다. 눈이 녹아 생긴 물은 또한 바닥에 얇은 얼음막을 형성하게 된다.

캐나다의 동굴에서처럼 차가운 공기가 들어가는 기후적으로 동적인 동굴의 낮은 부분에서 크고 다양한 형태의 얼음체 형태가 보여지며 침출수는 고드름, 석순과 석주의 형태로 결빙된다. 웅덩이는 얼음으로 채워지며 부드러운 빙폭이 이루어진다. 또한 동굴공기로부터 승화된 백색의 서리는 천정과 벽에서 다양한 형태로 존재한다. 캐나다의 록키산맥에 있는 50cm 정도의 6각형의 판형이 있으며 응결된 물은 모여서 결빙한다.

### 2. 쇄설성 퇴적물(Clastic Sediments)

쇄설성 침전물은 크기와 모양, 구조에 있어 다양하며 암석학은 다른 환경들보다도 더욱 우세하다. 이것은 동굴침전물이 정리되지 않은 파편의 전체범위로 나타내는 경제적 내부적 분열에 기인한 것과 동굴내부에 있어서 중력적이고 열에 의해 침전되어지는 외부적 요인에 의해 기인된다. 동굴은 표면의 원료로서 모여진 거대한 양의 먼지로서 활동하는 것뿐만이 아닌 모든 동

굴에서 보여지지는 않았지만 일정하지 않은 침식체계를 보여준다. 점차로 침전물은 지형학자들과 고고학자들에 의해서 연구되어지는데 그들은 동굴환경이 hitherto의 ‘불모의 침전층’으로부터 재 구축된 동굴환경의 세부역사로 이름 부치거나 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 준 것에 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 두 가지의 형태를 띠게 된다.

동굴 각력암은 오랜 관심의 대상이 되어왔다. 이것은 점토층에서 거대한 기반암위에 혼합된 형태로 퇴적된다. 기둥과 스펀레오템들은 형성되어 옮겨지며 공회한다. 침식과 홍수에 의한 대량이동(mass movement)는 기반암 쇄설물, 잔해물, 토양, 2차적인 강수와 동물의 잔해물을 서로 모이게 하여 녹지 않는다. 때때로 쇄설물은 모난 퇴석(debris)지점이 구멍을 포함하며 위로 진화하는 반면 굳은 부분에 있어서 그 결과는 상당히 아래로 형성된 균열의 형태로 가까워지기 때문에 하부 토양용해에 의해 둘러쌓이게 된다. 또한 가끔씩 침전된 덩어리는 일정한 비율에 의하지 않게 표면에서는 그곳에서 기인된 원료의 침입가능성과 관계된 것처럼 보인다. 이러한 동굴에서는 균열을 채우는 것의 위치 때문에 동굴이 확대된다는 제안과 같은 각력암의 몸체

또한 존재한다. 위에서 기술된 동굴각력암에서 단층각력암, 각력암과 다른 동시대의 각력암을 구별하는 데는 많은 관심이 필요로 되어진다.

### 3. 지류와 소 퇴적물(Stream and Pond Deposits)

동굴안의 물에 의한 쇄설성 침전물은 거친 기반암으로부터 깨끗하게 범위를 이루며 양호한 마모가 일반적이며 카르스트 기반암에서 기인된 점토 때문에 그 크기는 매우 미세하다. 그러나 최근 학자들은 외부기원에 대한 중요성을 강조하고 있는데 이것은 암석과 거친 조각들의 광물 조합의 다양성을 확신하고 있다. 모해와 실트는 주암과 주변의 불투성 암석에서 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 통로에서 발견되는데 강화된 해엽과 굴곡된 밤람원, 우각호, 교차침전 등의 경우를 포함한다. 기반암의 침전주기는 특징적이며 경사진 사면은 특히 일반적이어서 큰 홍수의 영향으로 동굴구조의 지형에 영향을 주게 된다.

동굴침전물의 이러한 범주안에서 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 색깔 원인은 철분함유의 산소 때문이다. 기원적으로 불용성의 석회석 잔존물로 간주되는 그들은 Bretz에 의하면 표면토양으로부터 기인되며 침식면 아래의 완만한 발전과 계곡사면 동굴의 동화사이의 단속적인 형태 동안 동굴안으

로 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 오래 된것 위에 새것이 쌓이는 위치를 보이게 되지만 침전물의 분리된 몸체는 통로 안이나 밖에 수직적으로 위치하며 동굴은 원래의 것에 거꾸로 위치하게 되어 나중 것 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.

#### 4. 식생기원적 퇴적물(Biogenic Deposits)

동굴에서의 식물성장은 매우 빈약해서 그들의 퇴적물은 박테리아가 방해석 침전에 영향을 줌에도 불구하고 무시된다. 표류물은 홍수시 동굴로 쓸려 들어가고 때로 강의 퇴적에 작용한다. 알프스의 검은 동굴의 양토는 Humic기원으로 여겨진다. 동물들과 마찬가지로 완전히 동굴에서만 생활하는 것들은 너무나 작은 생체량을 만들어서 눈에 뵈만한 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. 해 밀 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.

#### 5. 입구양태(Entrance Facies)

어떤 외부의 요인은 동굴들에서 더 효과적인 일 수 있다. 감수하는 강은 특히 이런 면에서 눈에 띈다. 공기 순환의 온도와 습도가 많은 동굴 깊숙히 침투함에도 불구하고 다른 요인들은 동굴의 입구나 그 근처의 효과만으로 제한된다. 이

것 때문에 침전물들의 분광과 이점에서 더 복잡한 층서학이 생기고 또 많은 수의 고고학적 관련들이 있게 되었다. 또한 접근용이성과 함께 이면들은 이곳에서 침전학적 조사에 더 중요하게 된다.

KUKLA 와 LOZEC(1958)은 이들 입구면들을 동굴 침전의 나머지면 즉 내부 면들과 구별짓는다. 여기서 표면 물질들이 떨어지고 구르고 미끄러지고 흘러내리고 동굴로 흘러 들어가며, 내부의 하상을 이루거나 원주 토착물과 섞이게 된다. 이것은 특히 빙하 주변에서 현재와 과거에 나타난다. 왜냐하면 표토는 지극히 유동적이고 썩기 작용은 더욱 모난 돌을 만들기 때문이다. 처음에 동굴이 이들 종류의 물질을 포함하고 있다고 여겨지던 곳은 홍적세로 접어들면 유럽의 온난한 지역에서 였다. 그러나 후에 이것은 더 넓은 분포로 발견되었고 예를 들면 Cyrenaican 동굴입구의 애추와 타스마니안 동굴입구의 암설로 혼합된 물질로 이 두 경우는 최근의 빙하의 극대기 동안이었다.

홍적세 빙하는 빙하 표적토를 Ailwee 동굴이나 Clare 처럼 아래 기둥으로 만들었다. 그러나 대부분 동굴의 표적토로 여겨지는 침전물들은 아마도 개작되었고 더 안쪽에서 진흙이 되었을 것이다. 추운 기후는 동굴로 침투하는 움직임에 그리 필요하지는 않지는 않다. 세 주요 진흙의 흐름은 입구면의 유지되는 것보다 Selminum tel, Hindenburg Range, PNG 쪽으로 더 발전 되어왔다.

추운기후에서 표면의 노출과 함께 풍화와 바람의 이동은 현실적인 중요성을 갖고 빙하의 움직임으로 형성된 북미와 유럽의 평야 주변의 동굴들을 많은 양의 퇴스를 받는데 이것은 내부로 불어 들어가거나 대부분 물론 재조작 되거나 내부 면의 부분으로 되어진다. 덥고 습한 기후에

서 바람에 날린 모래는 알제리의 Daoura Hamada 에서 처럼 동굴을 채우거나 기둥이 되기 쉽다. Bostswana의 동부 Kalahari의 Drotskys 동굴은 몇 번의 모래 사구의 침입을 받았고, 붉은 석영 사구는 Nullarbor 평야의 동굴들에서 발견되었다.

야생동물의 동굴 점유는 동굴 입구면에 배설물과 뼈의 함유를 가져온다. 인간은 도구나 날카로운 도끼같은 것으로 그들의 존재를 물리적 기록으로 남겼다. 붉은 모래 결 표문을 분명하게 수정하였고 이것은 전자현미경으로 감지될 수 있었다. 인간의 거주는 이미 입구면의 복잡한 층서를 가진 침전물의 혼합의 방해물 가져왔고 여기서 강력한 침전의 강하는 보통이다. 사암동굴에서 인간거주는 지붕이 떨어져 내리는 것을 가속화시키고 물리적 접촉이나 불에 의해 풍화되어짐이 보여진다. 비슷한 효과가 프롬스랜딩에 있는 얇은 석회암동굴에서도 나타난다. 남 아프리카의 불순한 백운석질 석회암에서 고고학적 동굴의 분포를 연구하면서 Brain(1958)은 많은 양의 토양이 입구면의 크기를 결정하는데 공헌하였고 기반암으로부터 나온 석영의 모양에 변화가 있었으며 그것은 습한 기후를 제외하고 동굴 기반암으로부터 직접 나온 것보다 둥근 모양을 갖고 있다고 하였다.

보통의 경로에서 순수하게 부서진 산물은 다양한 종류의 allocthonous 침전물과 삼입되거나 그들과 혼합된다. 주빙하기(Periglacial)는 얼음썩기 작용이 동굴에서 10미터에 이르기 때문에 이것을 강조한다. 덧붙여 방해석 바닥은 조건이 허락하고 초기 침전물에서 동굴 광물이 빈 공간을 채울 때 입구 지역을 형성하기 쉽다. 중부 유럽에서 어떤 시대에는 포말탕화, 특이한 탄산석회는 벽에 생성되고, 연속되는 입구면에서 층을 형성하며 떨어지기도 한다. 이것은 결코 입구면에서의 많은 형태의 구성요소의 목록은 아

니며, 침전물 구조의 목록은 더욱 아니며 이것은 그들이 가지는 관심을 타나내는 것으로 족하다.

## 6. 편년(Dating)

동굴 침전물의 연대는 단지 퇴적물 자체의 연구에 중요한 것은 아니다. 주인격의 암석의 나이는 보통 그안의 동굴 형성시기보다 선행하고 동굴 침전물은 많은 침전물의 연대가 그것보다 먼저 발굴되어지는 통로일 뿐임에도 불구하고 동굴 생성시의 나이와 더욱 관련이 있다.

다른 침전물은 그 안에 놓여진 후 생성된 통로의 부분들의 최대 연대를 제공할 것이다. 그것보다 더 나아가 만일 수직적으로 연속된 동굴이나 통로에 있는 가장 오래된 침전물이 시간적으로 연속되고 밑으로 내려갈수록 생성된 지 얼마 안된다면 통로의 형성간의 연대를 말할 수 있을 것이다. 결과적으로 이런 과정으로 어떤 지역에서 발전된 큰 동굴의 연대측정 과정은 그 지역의 지형학적 역사를 말해준다. 형식적으로 동굴 침전물의 연대는 시대 구분적 층서학적 증거에는 부적당함에도 불구하고 대부분 화석을 포함한 특히 척추동물의 뼈와 이빨의 층서학적 지정에 의존한다. 아마도 가장 유명한 것은 중기 홍적세의 기반암으로 베이징 주변의 조쿠디안의 지붕없는 동굴에서는 베이징인이 발견되었다. 중국 4기(Quratemary) 연대학은 최근까지 동굴 퇴적물에서 추출된 포유류에 의존했다. 작은 포유류의 뼈와 달팽이 껍질은 폴란드의 Kozi Grzbiet의 동굴퇴적물에 자리잡고 있다.

중기 제 3기 신생대와 점진세의 포유류의 뼈가 박힌 각력암은 프랑스의 큐레이의 동굴유적에서 발견되어졌고 이곳은 재 치굴되고 부분적으로 포유류의 뼈가 소개되어진 초기 홍적세로 채워졌다. 후기 유리기의 포유류의 이빨은 중기 유리기의 해안동굴에서 다시 개작된다. 동물

뼈에 의한 육지동굴의 연대측정의 기회는 예전에는 더 빈약했다. 꽃화석은 불행히도 육지 동굴의 내부면이 화분이나 흩씨가 부족함에도 동굴 연대측정에 오랜 방법이 되어왔다. 입구면은 빙하기 후의 연대측정에 유용하다. 뉴질랜드의 Kairimu역사의 한 장에서 깊은 해양의 침니(실트)와 진흙은 마이크로화분으로 선신세 후기나 초기 홍적세에서 그 단계의 위치를 알린다.

타스마니아의 Eugenana의 채석장에서 드러난 완벽히 채워진 동굴은 내부면 퇴적물의 흩씨로부터 연대가 측정되어 데본기의 것으로 알려졌다. 데본기에는 광범위한 육지식물의 발달로 화석으로 초기 동굴의 연대측정 가능성은 보잘 것없고, 동굴 침전에 의한 연대측정전의 시간동안은 암석학적 연관성에 의존해야만 했다. 이런 기초위에서 오래된 동굴침전물들은 아마도 Transval로부터 원생대 초기의 것으로 알려졌다. 기껏해야 10년 쯤 지나 동굴 침전물의 연구는 복사계와 지구물리학적 연대측정 기술의 소개로 발전되었다. 방사성탄소는 이들 중 최초였고 동굴 입구면의 연속적 탄화와 조직적 탄소원천의 적용에 의해 가장 많이 사용되었다. 탄소 14는 동굴학에서 그것의 사용이 착안되었을 때 동굴 지형학에서 보다 일반적으로 사용된다. 이것은 석회암이 새로 형성된 방해석으로 될 때 죽은 탄소 때문에 +3,500에서 -5,000년의 큰 오차가 생겨날 수 있음을 보여준다. 어쨌거나 많은 상황에서 이것은 그것의 4,000년이라는 효과적인 범위가 대부분의 동굴역사의 작은 부분만을 다룰 수 있다는 점보다 유리하다.

NSW의 Abercrombin동굴의 발달은 탄소 14에 의해 다른 호주 동굴보다 오래되어 3400bp로 추정되었으나 그들 양의 반도 못되는 수가 표면 자유사행천의 지하 단절이 그보다 이미 먼전 형성된 이후에 채굴 되었다. 동굴발달에 연대기적

으로 더 중요한 것은 우라늄 방사활동 부패시리  
드로 발견된 것으로 석순과 유석바닥에 영향을  
미치는 동굴방해석의 비율이다.

그 이유는 그 범위가 350,000 - 40,000년이  
기 때문이다. 몇몇 상황들은 만족스러워야만 한  
다. 왜냐하면 아주 적은 용해되지 않은 요소가  
있기 마련이고 그것은 손실된 토륨을 포함할 수  
도 있고 230Th/232U의 비율은 적은 양의 손실된  
토륨의 측정처럼 높다. 여기에는 강수와 재용해  
가 없으면 방해석의 재 수정화는 없고 마지막으  
로 바닥에서 꼭대기까지의 석순의 증가하는 나  
이의 측정이나 탄소 14와 같이 독립된 연대측정  
법을 인정하는 시험은 적용되어야만 한다.

NZ의 Westport의 Metro동굴에서 다른 통로  
의 단계로 측정된 230Th/234U 은  
20,000-120,000bp간의 증가하는 나이를 보여주나  
가장 윗쪽의 단계로부터의 만족할 만한 견본은  
구할 수 없었다. 이 방법의 제약은 Kenturky의  
Mammoth동굴에서 보여진다. 부분적으로 통하는  
연대측정방법은 분명히 필요하면 지금까지 성공  
적으로 적용된 것 중 하나는 Paleomagnetism의  
것이다. 섬세하게 결이 있는 쇄철성의 퇴적물을  
고요한 물에서 불규칙적으로 축적된 표면위에  
마지막 입지의 움직임 때문에 30도 정도 기울어  
졌음에도 불구하고 동시대의 지구자장과 일치되  
어 자리 잡는다.

중부 폴란드의 홀리크로스산의 결이 있는  
침전물의 모래양토에 가까운 진흙은 이방법에  
의해 연대측정 되고 초기 홍적세에 속한 동굴로  
보여졌다. 슈미트(1982)는 성공적으로 이 방법을  
Flint Ridge-Mammoth 동굴에 적용하였다. 일어난  
일들은 기록될 만큼 분명하지는 않고 1만년 혹  
은 2만년 이상 된 것으로 양자택일적인 해석이  
될 수 있다. 여기에는 후자를 더 선호하는 지형  
학적 논쟁이 있다. NSW의 Wee Jssper의

Dogleg-Punchbowl-

Signature동굴은 같은 맥락이다. 실트나 진흙  
이 거대한 캔터키 시스템과 반대로 작은 체계로  
됨에도 불구하고 캔터키 시스템은 잔존의 자력  
화를 가진 퇴적물로 된 그린장으로부터 나오는  
샘의 역범람이다. 동굴이 얻는것은 화학적 잔존  
자력화이고 이것은 현대에 겹쳐짐에도 불구하고  
결정적이다. 이것은 캐나다 록키의 동굴로 부터  
측정된 우라늄과 토륨의 공급이 되어왔다.

10,000,000년 넘는 방해석 나이를 결정하  
는 잠재적 다른 방법은 thermoluminescence과  
electron spin resonance (ESR)과 관련된된다. 둘에서  
수정의 격자무늬의 결점은 덧과 같이 작용한다.  
TL에서 그들은 자연상태의 반사로부터 자유로  
운 전자를 잡는다. 그리고 TL은 방해석 추락으  
로 잡힌 자연반사의 측정이라고 할 수 있다.  
ESR로 덧은 자기장에서 전자파의 흡수로 측정  
될 수 있다. 둘로 인해 동굴에서 자연반사의 연  
비율을 측정하는 것 또한 필요하게 되었다. 후자  
방법은 Tasmania의 Lynds동굴의 석순으로부터  
현 시기의 자세한 시간대를 형성하는데 쓰여졌  
고 방사탄소 연대측정법과 대조되어 측정되었  
다. 광자기와 같이 ESR의 잇점은 방사탄소나 우  
라늄-토륨시리즈에 의한 연대측정법보다 더 단  
순한 방법이라는 점이다.

7. 환경사(PALAEOENVIRONMENTAL HISTORY)

동굴들은 오랫동안 지역적 환경의 역사를  
재건설하는데 공헌해왔다. 고전적 예로는 코벨  
소와 하마를 포함한 동물의 뼈 집단의 발견과  
지금보다 더 따뜻했던 기후의 지적이다. 이것은  
크레이븐의 빅토리아 동굴입구 면에서 지난 세  
기에 대규모로 재굴되었다. 그러나 우라늄-토륨

연대측정은 120,000bp 부근 간빙기 후기 따뜻했던 시기의 동물군의 할당에 의해 정확도를 부여 받게 되었다. 비슷한 과정이 이전의 추운 기후의 동물군상적인 침전학상 증거로 만들어진다. 이것은 동굴의 존재나 부재나의 문제이다. 만일 기후가 심하게 춥다면 침투된 물은 얼고 결과적으로 탄산칼슘과 홍수돌은 형성되기를 멈출 것이다. 따라서 동굴의 연대구분의 빈도는 침투된 물이 말랐을 때 추운 시대의 연대를 드러나게 할 것이다. 북미와 영구과 타스마니아에서 동굴의 연대분포는 빙하기와 간빙기의 연속으로서 해석되는 구별되는 그룹으로 나누어짐을 보여준다. 이것은 또한 180/160의 안정된 산소 동위원소 비율에 의한 온도의 가치있는 원천을 윤곽잡는데 도움이 된다. 방해석의 수정화에는 동위원소의 분별이 있고 이것은 온도에 따라 증가하고 또 이것은 석순이나 플로우스톤 바닥 밑에서 꼭대기까지의 견본에 의한 동굴에서의 온도기록을 얻는데 쓰여질 수 있다. 이것은 증발에 의해서가 아니라 CO<sub>2</sub>를 처리함에 의해서 서서히 그리고 끊임없이 강수가 일어나는 것에 의존한다. 이것은 동위원소 비율이 주어진 성장층을 통해 같으나 그렇지 않느냐와 산소 비율이 증발은 이런 상호관계를 일으킴으로 12C/12C의 안정된 탄소 비율로 변하지 않느냐 변하느냐를 조사함으로써 실험될 수 있다. 이들 상태가 만족된다 해도 여기에는 수정화에 의한 것보다 다른 원소에 의해 얻어진 180/160기록의 해석에는 어려움이 남아 있고 이것은 상태의 모든 변화가 분별을 가져오기 때문이다.

추운시대에 빙하와 얼음판들이 쌓여짐은 간빙기 시대보다 바닷물이 낮아지게 만들었고 이것은 궁극적인 동굴의 물이 떨어지는 원인이 되었다. 다행히 이 복잡한 요소들의 효과를 설명하기 위해 동굴에서 존재는 우리에게 수정화시

에 물의 동위원소 비율을 알려준다. 이것은 안정된 산소 동위원소 비율과 상호관련 있는 중수소/수소 비율의 중간에 의해 이루어진다. 이 방법으로 현세에서 뉴질랜드와 독일, 후기 간빙기에서 북미의 온도 기록이 얻어졌다.

어떤 카르스트지형, 주로 해안에서 동굴 발달은 빙기에도 계속되어졌고 캐나다의 밴쿠버에서와 같이 이들 시대에서의 기온 기록도 얻어질 수 있었다. 계속적으로 북미에서 지난 200,000년의 온도 기록은 190-165, 20-100, 60, 10Ka로 낮은 온도로 기록된다. 13c/12c의 안정된 탄소 동위원소 비의 결과는 측정목적을 위한 안정된 산소 비율 또한 성공하게 한다. 그러나 이것은 식생에 의해 변할 수 있기 때문에 더 좋다고 이해될 수 있을 때고 환경 기록은 나타날 수도 있다. 동굴은 또한 더 습하거나 더 건조한 기후 진동에 빛을 던진다. 이것은 동굴이 지금은 사구의 이동이 없는 곳인 동굴안으로 바람에 날린 모래를 소개하는 것과 같다. 이것은 아마도 그 의미로는 명백한 것이다 습한 시대가 특정시대에서 방해석 침전물의 우세로 논쟁되어질 때의 경우가 항상은 아니다. 보통 기간에는 의심의 여지없이 동굴에서의 방해석 침전물은 물의 공급을 의미하고 석회석 용해를 위한 탄소 제2산화물을 가진 토양수를 풍부하게 하는데 충분한 식물성장을 의미한다.

Nullarbor평야에서 지금과 더 습한 시대에 그것으로부터 언급될 수 있는 것보다 방해석 동굴형성이 실질적인 적어도 한 시대는 있다는 것이 분명하다. 특히 많은 동굴에서는 암염과 석고 동굴의 부산물은 건조한 기후인 현재의 특징이라고 할 수 있다. 더우기 습한 기후에서는 무거운 방해석의 발들은 쇄설성 하천작용과 외부로부터의 토양을 포함한 대량의 퇴적물 이동으로 내부층을 이루 것이다. 그리고 포함된 것은 반대



일 것이고 더 습한 시기는 경사나 강의 작용이 동굴 지붕으로부터 누출수의 효과를 증가할 때의 것이다.

NSW의 Borenore에 있는 동굴에서 30,000-25,000bp의 건조기에 동굴강은 완전히 말라버렸고 플로우스톤은 동굴을 관통하는 통로에 전체폭을 가로질러 놓여졌다. 수중의 방해석조차 용덩이가 쇄설성 암설로 가득차지 않았기 때문에 건조기를 나타낼 수 있다. 특히 동굴안의 물과 관련된 증거로 주어진 침전물의 결과가 그 위치의 요소의 결과가 될 수 있는 범위를 고려하는 것은 필수적이다.

그 마지막으로 해수면의 변화 문제가 있다. 해안지방에서 카르스트동굴의 침전물은 더 흔한 증거의 원천으로부터 얻어지는 그림을 완성한다. 이것은 11장에서 더 넓고 더 편리하게 고려될 수 있다. 카르스트 면역은 동육에 수명을 이어주고 이것은 동굴환경이 그들안의 퇴적물을 공급하는 안정성을 포함한다. 동굴이 경관의 역사에 공헌하는 잠재력은 분명히 아직은 완전히 평가되지 못하고 있다.

### III. 침전 및 구조적 카르스트

#### 특징

##### 1. 나트륨 (Calcrete)

탄산염이 풍부한 물이 증발량이 강수량을 초과하는 지역의 토양이나 층적토 또는 풍화암으로 유입 될 때, 화학적 침전물이 측면에 나타날 수 있다. 이것은 퇴적물 하부와 침전물 상부 근처에서 탄산 쇄설암의 용해를 함유하기도 한다. 가루 상태에서 경화된 결정에 이르는 여러 상태에서 탄산칼슘으로 구성된 물질이 생성되는데 Calcrete (또는 Caliche 혹은 Kunkur)라고 불리

어진다. Goudie (1983)은 나트륨의 기원과 분류에서 토양, tufa (다공질 탄산석회의 침전물, 응회암) 용천, 폭포, 석회화된 층적토, 범람원의 침전물과 관련되어 나트륨으로부터 변화가 생긴다고 설명하였다.

##### 2. 탄산석회 침전물 (Tufa deposits)

카르스트에서의 용천, 폭포와 범람하는 하천은 tufa 또는 travertine (석회화)로 알려진 침전물과 종종 관련이 있다. 석회화된 응회암은 식물성 잔류물과 혼합되어 있고, 그 침전물에서의 유기적, 무기적 과정의 중요성은 지난 수년동안 논쟁 중에 있다. 최근의 연구는 무기적, 유기적, 침전물이 모두 생기지만 유기적인 과정이 무기적 과정에서 나타난 것 보다 중요하다고 설명하고 있다.

Casanova(1981)는 남서부 프랑스의 응회암 - 퇴적환경을 대륙의 Stromatolitic(녹조류의 화석을 포함한 층상 석회석)으로 정의하고 광화작용은 해조류의 섬유세포(filaments)주위에 위치하고 있다는 것을 보여주고 있다. chafets와 Folk (1984)는 세균적으로 침전된 방해석은 이탈리아와 미국에서 많은 tufa 퇴적물에 탄산염의 많은 부분을 형성하고 있다는 확실한 증거를 제공하고 있다.

그들이 군사는 개별적인 퇴적물이 85m 두께에 달하고 수백km<sup>2</sup>에 달한다는 것을 발견했다. 그들은 불리한 환경상태(예, 뜨거운 온도의 물)는 무기적 퇴적물을 좋아하고 보다 더 온화한 상태는 유기적 퇴적물을 좋아하는 것으로 결론지었다.

##### 3. 응회암 둑(tufa dams), 단구(terraces), 폭포(waterfalls), 용천(mound springs)

지표에 나타나는 응회암 퇴적물의 지형학적 변형물은 Chafetz와 Folk(1984)에 의해 (a)폭포 (b)호수 (c)경사진 제방 또는 선상지 (d)해안 제방 (e)균열능선 등 5개로 알려졌다. 폭포 또는 폭포 퇴적물은 증가된 운동과 해조류와 이끼가 빨리 달라붙고 성장할 수 있는 위치에 쌓인다. 그런 곳에서의 응회암 퇴적물은 댐과 호수를 형성시킨다. 세계에서 가장 잘 알려진 응회암 댐에 의해 물이 채워진 지형의 하나가 유고슬라비아의 Plitvice 호수이다(Roglic, 1981). 그곳에는 14개의 호수가 상부 Korana 계곡을 따라 6.5km에 걸쳐 형성되어 있다. 그것들은 백운암으로부터 흘러나와서 이미 응회암을 함유하고 있는 것과 석회암으로부터 흘러나와서 칼슘퇴적물이 없는 두개의 주요 지류가 합류하는 지점의 바로 하류부분의 골짜기에 놓여 있다.

이미 탄산수에 포화된 마그네슘의 증가는 일반적인 이온효과와 포화를 일으킨다고 알려져 있다. 이와 같이 이들 두 흐름으로부터 물의 혼합은 비록 생태계가 중요하지만 이끼가 중요한 역할을 하는 많은 퇴적물이 원인이 될 수도 있다. 응회암 방벽은 46m정도 깊이의 후면 호수를 가진 복합 댐을 가지며, 높이 30m에 달한다. 가장 큰 호수에서 (kazjak, 98km<sup>2</sup>), 물에 잠긴 댐은 물 표면으로부터 4.6m아래에서 발견되는데 이것은 아마 큰 비율로 위로 자라는 하류 부분 응회암 댐의 결과일 것이다.

광합성의 황산화 박테리아가 그런 호수에 있어서의 얇은 탄산염 퇴적물의 원인이 될 수도 있다. 용천은 동굴안에 rimston웅덩이와 비슷한 응회암 방벽으로 막혀진 방사상으로 배열된 웅덩이를 통해 흐르는 물과 계단 모양의 제방 퇴적물을 만들어 낼 수 있다. 황산염과 탄산염 퇴적물은 가끔 건조한 지역에서 지하 물줄기까지 깊이 파 들어간 우물의 주위에서 보이고, 용천수

는 그 자신의 구조물의 제방 꼭대기에서 솟아 나온다. 여기서 제방 용천(mound springs)이란 용어가 나왔다.

균열능선은 용천수가 제방 꼭대기를 따라 이어진 균열을 통해 솟아나는 곳에 형성된다. 그에 비해 석회질 폭포 퇴적물은 떨어지는 물의 궤도로부터 형성된 tapered dome(점차 작아지는 돔) 형태를 가지게 된다(Weisrock 1981).

많은 응회암 퇴적물이 용천과 관련이 있기 때문에 그들의 발생은 국지적 또는 지역적인 Water table levels과 관련이 있을 수 있다. 그러한 응회암 퇴적물이 가끔 방사에너지 측정법 또는 화석동물과 식물 집합물에 의해 데이터화 될 수 있기 때문에 하안에서 그들의 발견은 비록 해석하는데 어려움이 있지만 연대기(학)와 고기후학의 입장에서 아주 중요하게 생각된다. 위에서 논의된 많은 퇴적물과 형태들은 침식작용 형태로 생기는 것과 마찬가지로 생물학적 활동을 통해서도 부분적으로 생성된다. 그러한 특징들은 Viles(1984)에 의해 biokarst라고 규정되었고, 유형학(typology)으로 표현되어 있다.

#### IV. 퇴적물의 형성과정

동굴은 인류가 최초로 지구상에서 생활하면서 가장 요긴하게 사용하였던 거주공간의 하나이다. 이러한 고대 인류의 동굴생활을 통한 거주공간 그 자체를 혈거(穴居)생활이라고 하며, 유사이전의 기록들이 그림 형태로 남겨져 그 시대의 생활상과 제반 환경을 규명할 수 있는 중요한 자료를 제공하고 있다. 이렇게 동굴의 이용은 인류뿐만 아니라 동물들의 안식공간이기도 하며, 근대에 이르러 동굴은 생산, 가공, 저장에서 군사, 교육, 휴식 등의 공간으로서 일반목적에서 특수목적으로 다양하게 사용되고 있다. 또

한 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 차원에서 중요한 역할을 한다(오종우, 2003).

이와 같이 동굴의 활용이 다양한 것은 동굴이 지하내부에 형성된 동공(洞空)이라는 단순한 공간개념 차원의 대상으로 인간들에게 인식되어 지고 있지만, 동굴이 가지는 특수한 형태의 동굴 내부의 지형을 가지고 있다는 것 그 자체가 더욱 신기한 대상으로 각인되어지고 있기 때문이다. 왜냐하면 그 속에는 고드름 같이 생긴 종류석이 있는가 하면 이것들이 아래로 떨어져서 사라난 석순이 있고 이들이 서로 만나서 기둥과 같은 석주가 생겨나거나 이들과 비슷한 형태의 천대만상이 공존하고 있는 곳이 바로 동굴인 것이다. 이러한 동굴의 내부에 형성된 자연현상의 형성과정을 구명하여 보다 구체적인 현상을 이해할 수 있는 그 자체가 본 연구의 중요성으로 되어있다.

캐나다의 동굴학자인 Ford(1989)는 이러한 동굴의 형성과정에서 유발되는 자연적인 현상은 동굴내부에 형성되어 있는 동굴생성물질(Speleothem)인 종류성과 석순, 석주 등의 발달과정(Karst geomorphic process)이 일정한 규칙의 발달과정을 거치면서 형성되는 동굴수문학적(Speleo-hydrology)인 속성을 가지고 있다고 하였다. 동굴생성물은 주로 기반암으로부터 침식되는 용해물질에 의하여 다양한 생성물을 제공하거나 외부 하천의 유입에 따른 외래 산 퇴적물질 등이 상호 교차되어 집적되어있다.

동굴내부에 퇴적된 동굴생성물질의 이화적인 특성을 분석하여 여타 동굴의 경우와 비교하여 우로굴 특유의 지질적이고 지형적인 성인

과 수문학적인 영향에 의한 생성물의 발달기원과 발달과정을 통한 인자를 규명할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 또한 이러한 생성물들은 동굴역사의 침식기록을 보충해주며, 절대적 연대표의 의미와 지역적인 환경변화의 지시자의 역할을 해 주기도 한다.

아래의 그림에서 카르스트의 발달과정은 4 단계로 분류되어 대기권과 토양권 그리고 암석권과 수역권 등으로 형성되는 일련의 과정은 다음과 같이 분류 설명될 수 있다(오종우, 1994).

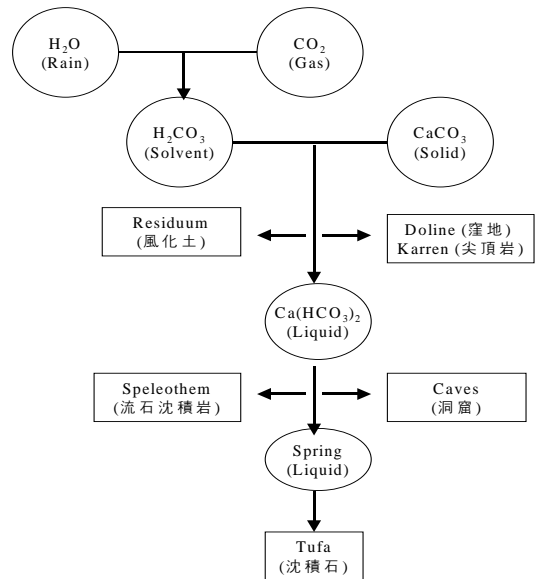


그림 2. Karst의 발달과정 (Genetic Karst Process) (오종우, 1994)

## V. 결론

동굴내 2차생성물(Speleothem)의 분포 및 특성은 동굴생성물의 분류과정에서 볼 때 석회동굴 내에는 다양한 동굴생성물이 발견되며, 각 생성물의 이름은 생성물의 성장형태에 따라 다르다. 동굴생성물의 분류는 생성물이 동굴내에서

존재하는 위치(천장, 벽, 바닥으로 구분)와 생성 작용에 따라 다음과 같이 분류된다.

가) 천장으로부터 떨어지는 물에 의하여 형성되는 것(dripstone); 종유관(鐘乳管; soda straw), 종유석(鐘乳石; stalactite), 석순(石筍; stalagmite), 석주(石柱; column), 동굴진주(cave pearl 혹은 pisolites), 베이컨시트(bacon sheet 혹은 curtain).

나) 벽면 혹은 경사면을 흐르는 물에 의하여 형성되는 것; 유석(流石; flowstone).

다) 동굴바닥이나 편평한 경사면에 흐르는 물에 의하여 형성되는 것; 휴석(畦石; rimstone) (오종우, 1994).

카르스트 지형의 발달과정 (Geomorphic Process)은 그림에서 요약되어 있듯이 일정한 규칙의 발달과정을 거치면서 형성되는 속성을 가지고 있다. 특히 동굴지형은 지하수의 작용만으로 지하세계에 남겨 놓은 지구최상의 걸작품이라 할 수 있으리 만큼 그 형상과 조형은 빼어나기 때문에, 지구과학적인 학습의 장으로서 널리 이용되고 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. 동굴34(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). 북제주군. 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