

# 氣候變化에 의한 韓半島 Karst의 發達過程 研究

吳宗祐\*

## A Process Study on Korean Peninsula Karst by Climatic Alterations

Jong-Woo, Oh

국문요약 : 오늘날 기후지형학은 지형학자들에게 가장 큰 논점이 되고 있다. 기후적인 외인적인 요인이 제1차적인 형성요인이며, 2차적으로 육수와 해수에 의한 내인적인 발달요인이 된다. 카르스트의 기후적 접근은 1950년대부터 활발하게 주장되어 현대 진화의 광대한 연구에 가담하였다. 기후적인 작용에 의한 카르스트의 발달은 지대한 영향을 가져오지만 기온에 대한 카르스트의 발달에 대한 논쟁은 기존의 우 열대 저 한대 편향에서 많은 논쟁을 야기시키고 있다. 왜냐하면 한대와 온대, 열대와 중위도 카르스트 간에 어떠한 차이가 있지 않다고 규정짓고 있기 때문이다. 이에 따라 한반도에서도 제4기 동안에 형성된 해수면의 승강작용과 태백산맥의 융기작용에 따른 카르스트의 발달은 지형발달에 지대한 영향을 미친 결과 다수의 지표면 카르스트(카렌)와 지하 동공(동굴)의 발달이 형성되었다.

### I. 서론

세계적인 카르스트 연구의 대가인 Williams, Jennings, Ford, Sweeting, and Day에 의한 카르스트의 발달에 대한 일반적인 견해에 의하면 기후적인 외인적인 요인이 제1차적인 형성요인이며, 2차적으로 육수와 해수에 의한 내인적인 발달요인이 된다고 하였다. 본 연구는 이러한 실증적인 연구 성과에 의한 다양한 사례들을 종합 정리하여 제시한 자료를 참고로 하여 발달과정과 조건 및 형성과정 등을 문헌에 근거하여 한반도의 카르스트의 발달과정을 유추하여 제시한다.

오늘날 기후지형학은 지형학자들에게 가장 큰 논점이 되고 있다. 왜냐하면 지구표면의 대부분의 형태는 태양에너지에 의한 외적작용에 의해 이루어졌고, 앞으로 지구 곳곳의 다양한 기후변화에 따른 지형의 차이가 일어날 것이기 때문이다. 20세기 중반쯤에 지형학에 대한 이러한 접근은 특히 지형학을 단지 지리학의 한

분야로 접해 온 이들에게 큰 주목을 받았고, 태생적체계(morphogenetic system)는 모든 주변기후 형태에서 실제적인 독특한 반응과 함께 일어나는 것으로 여겨졌다. 그러나 지난 10년 동안에는 이러한 견해에 대한 반대 입장이 나타나고 있다.

기후지형학에 대항하는 논의 중의 하나는 신생대 기후변화의 빈도와 그 정도에 대한 인식, 각기 다른 과정으로 초래될 수 있는 유사한 형태에 대한 인식, 기후는 단지 지형에 영향을 주는 많은 인자들 중의 하나이고 그 기후작용의 비율에 대한 인식, 총체적 규모의 일반화와 지역화에 대한 불만이라 할 수 있다. 과정과 형성에 관한 매우 자세한 지역적 규모의 양적인 연구는 그 이전의 기후 지형학자들에 의해 제시되어 온 양식을 밝히는데 주안점을 두었다.

카르스트에 대한 개념은 일찌기 발전되었으나, 기후는 Dinaric 지역의 카르스트에 비해 중앙유럽의 카르스트의 비율이 더 높은것과 같

\* 남서울대학교 교수

은 카르스트간의 차이점을 설명하기 위해 요구 되어져왔다. 오스트리아 알프스의 고도에 따른 띠 모양의 카르스트 형태는 Legmann에 의해 고 안되어졌다. 그리고 그것은 현대적인 기후 지 형학의 시초로 여길 수 있는 기후대에 따른 지 형에 관한 독일 회의의 회지 간행과 동시에 일 어났다. 그럼에도 불구하고 중앙 자바의 카르 스트를 다습한 열대기후로 인해 전개된 카르스트 형태로 본 Lehmann의 견해는 참신했다.

그 이후로 불충분한 증거를 가지고 있는 카르 스트 형태를 기후적 원인으로 여기는 것에 관해 비판이 일어났다. Lemann이 지리적 구조를 더 직접적으로 표현함으로써 더 간단히 설명된 이래, Panos와 Steclc은 쿠바의 카르스트의 많은 면 들을 다습한 열대 상태와 특별한 진화과정으로 나타냄으로써 그 논쟁을 했다. 카르스트의 가 장자리는 쉽게 젖을 수 있는 석회석이 아니라 불침투성의 바위에 의해 둘러싸여 있다는 것을 발견했다. 비교하여 보건대, Brood와 Ford는 특 유의 열대의 다습한 카르스트 형태로 여겨지는 tower 카르스트는 Naganni karst, North West Territories, 캐나다의 북극 기후에서 최근 형성되 었다고 생각했다. tower 카르스트의 분포 때문 에 구조적인 면에서는 성과를 얻었다고 할 수 있다. Williams는 따뜻한 기온인 뉴질랜드에서 Waitomo 카르스트를 발견했다. 이것은 다습한 열대의 전형적인 것을 고려하지 않고, 원추형 카르스트에 가까이 접근한 것이었다. 1962년 Jennings와 Bik는 Papua New Guinea 카르스트의 사진 답사는 고도에 따른 카르스트 형태의 다양 함을 보여주었다고 생각했고 1977년 Loffoer는 구조적 설명을 위해 그들의 견해와 크게 달리한 것을 기초로 하였다. 지금 구조는 north-east Queensland의 tower 카르스트 지형에서 명백하 게 제시되고 있다.

## II. 기후 변화에 대한 논쟁

Jennings와 Sweeting은 석회암 산맥의 카르스 트의 기후 지형학적 장애에 직면하는 중요한 어 려움을 깨닫게 되었다. 이는 거대한 활동적인 침식의 카르스트 형태지만 강수량은 미약하다.

이 논쟁은 Birot에 의한 주장처럼 어떤 것에 대한 그들의 견해가 불가능하게 받아들여진다. Birot은 브라질의 아열대 사바나 기후 지역에서 Lapa karst의 Boom Jesus에 대한 Tricar da Silva 에서 그랬던 것처럼 더 습한 열대성 기후의 이전 시기로부터의 잔존 지형을 주로 다뤘다.

사실 알려진 것은 적다. 고정된 사막의 사구 들은 아마도 마지막 빙하기 최대기 동안에 움직 였을 것이고, 남동 방 향으로 200Km에 이르는 그레고리 호는 BP 30000년 이전에 더욱 커졌다. 그렇지만, 열대 기후의 지속은 Middle Miocene 에 영향을 끼쳤고, 관련된 침식 윤희가 그 시기 까지 거슬러 올라가는지는 알 수 없다. 만약 그 령다면, 폭우지만 연속적인 계절적 강우는 전수 된 지형을 침체하게 유지시키는데 기여해 왔을 런지 모른다.

중부 유럽에서 기후에 의한 퇴적물의 증거는 현재 기후와 관련되지는 않지만, 카르스트 지형 의 전수에 유용하다. 남부 독일 Suabian Jura의 Kuppenalb는 열대성 원추형 카르스트를 닮았고, 제 3기 중신세 중기에 생성된 해안 절벽가 남쪽 에서 두드러진다. 더욱 유사한 것이 유고슬라비아의 Baljanica산의 서측면에 위치하는데, 이곳 에는 열대 습윤 기후에 아열대의 특징이 남아있 는 식물을 함유하고 있는 모래와 점토를 함유한 흙 사이에 밀폐된 부분적인 함몰부가 있다. 체 코슬로바키아의 모라비아 카르스트에서 탐과 더욱 유사한 더 오래된 카르스트가 라테라이트 성 광물들을 포함하는 침식 생성물과 함께 부분

적으로 매장되어 있고, 그런 다음 윗층의 백악기의 해양 침전물에 의해 후에 더욱 충족해진다. 주라기 후기와 백악기 초기 기후는 여기서는 열대 기후를 가지는 것으로 한다. Franconian Alb은 Suabian Jura와 모라비아의 그것들 사이에 연관된 역사를 제공한다. 여기서 가파른 열대 잔존물들의 카르스트는 부분적으로 윗층의 백악기 해안의 모래에 의해 매장되었고 그 다음 제 3기 저지대에서 구릉들은 아래로 가라 앉았다. 연속적으로 매장된 부분들은 어느 정도 다시 노출되었다.

기후 변화에 대한 의견들이 동아시아에서도 또한 일고 있다. 이곳의 저지대에서 다양한 열대성 카르스트가 현재 과정들과 밀접하게 여겨지고 있다. 그러나 그것들은 Glazek가 베트남에 대해 기술한 대로 긴 역사를 가짐에는 의심의 여지가 없다. Gellert는 제 3기 중신세 중기의 하천과 Guangxi에 있는 탐 카르스트에서의 몇몇 평원들위에 놓인 침전물들을 기술하고 있다. Guizhou와 Yunnan에서 고지대쪽 북서 방향으로, 유사한 형태의 카르스트들이 더 서늘한 기후 지역에서 발견되며 제 3기의 더 따뜻한 기후로부터의 전수물에 대한 의문이 제기되고 있다. 이는 티벳과 관련되어 더 두드러지게 나타나는 용기와 관련있다. 탐 카르스트는 5,200m의 고도에서 발견되었다. 그것들이 열대성 카르스트의 완전한 발달 과정을 나타내는가 하는 문제는 출판된 사진으로는 명백히 드러나지는 않는다. 그럼에도 불구하고, 히말라야의 양측 사면으로부터 높은 산맥들과 티벳 고원의 상승이 대부분 늦어지고 아시아 내륙으로부터의 남서 몬순의 습하고 따뜻한 공기에 대한 배제가 플라이스토세 전까지는 일어나지 않았다는 증거들로부터 의심의 여지는 없다.

열대 지역에서 침식 분지에 대한 원인으로 여

겨진 용식의 지하 단절이 유고슬라비아의 폴리에 형성에도 또한 적용되었기 때문에, 후에 신세 아열대 습윤 기후로부터의 산물이라고 몇몇에 의해 제기되어 왔다. Melik은 플라이스토세의 추운 기간이 폴리에의 발달을 멈춰 3기 지형이 재생되었다고 주장했다. 이 시기에 경사는 더 가파르게 되고 얼음췌기로 인한 솔리플럭션이 증가되었고, 지형의 사면들은 모지(母地)를 하부로 이동시켰고 강들은 폴리에 분지를 더욱 풍부히 퇴적시켰다. 퇴적된 작은 자갈, 모래, 점토의 얇은 층들과 지하 통로의 얇은 층들이 장애를 받았다.

빙하에 의한 적평형작용(積平衡作用)면과 조빙하 구조는 폴리에에 대한 토론이 위에 제시된 것처럼 간섭의 상반된 종류를 보인다. 빙하가 녹아서 된 거대 하천들과 조빙하 조건에서의 여름 홍수는 예전에 형성된 계곡들과 일시적으로 회복된 표면의 배수 분지를 다른 종류의 카르스트에서도 또한, 추운 시기에 형성한다. 이것은 최후 빙기에 형성된 타스마니아의 Mount Field 고원의 하천 카르스트 남쪽에서 실제로 나타난다. 조빙하 조건들은 또한 불안정한 사면과 거대한 운동을 촉진시켰고, NSW의 Coolleman평원에서 지표 배수지의 일시적 회복 상태 같은 잠깐 동안의 현상은 작은 blind valley를 시작점까지 채우는 흙탕물로 생겨난다. 즉, 빙하 하천과 조빙하 하천 지대로부터 석회암 지역까지의 물의 이동은 북부 타스마니아에서 추운 시기에 동굴의 형성을 촉진시켰다고 여겨져 왔다. Glazek은 타스마니아의 몇몇 예들과 형태에서 유사한 몇 가지를 포함하는 폴란드의 지형들로부터 일련의 빙하에 의한 동굴을 서술하였다.

추운 기후의 간격은 여러 면에서 카르스트에 영향을 끼쳤다. 빙하 침식은 지표를 침식시켜 벗겨냈고, 대부분의 빙하기 이전의 용해성 미세

입자들을 제거시켜 버렸다. 지층과 육지가 수평하고 이들이 크고 평평한 통로층들은 경사를 능가하는 곳에서 나타난다. 모두 빙하의 운동에 의해 뚜렷하게 나타나는 구조적 형태이다.

그러나 빙하 침식과 카르스트 침식이 항상 반대는 아니다. 빙하와 빙하 내부의 변화는 지형을 더욱 두드러지게 한다. 그리하여, 카르스트 용식이 크고 낮은 분지를 형성하는 것처럼 빙하로 인한 홍수도 그러하다. 그래서 권곡들과 빙하에 의해 패여 생긴 분지들은 이런 방식으로 확대된다. 이것은 스페인에서는 Picos de Europa에서, 이태리의 돌로마이트와 우고슬라비아의 Durmitor 그리고 NZ의 Owen산맥에서 실제로 나타난다. Ford의 분류에서 이것들은 빙하에 의한 카르스트 혹은 혼합된 특징들이다. 카르스트에서 다른 권곡들은 오로지 karstiglacial이다. 형태는 프랑스 알프스에 있는 Valdu Lauzon의 봉우리처럼 분지를 차지하는 빙하호의 지하 배수로에서 혹은 함몰된 침식 분지가 호수를 형성하는 것을 방해하면서 실제로는 전체는 빙하지만 카르스트 분지의 특성들이 두드러진다.

준건조 지역과 건조 기후 지역에서 카르스트 지형은 흔히 지표가 침식되고 동굴이 깎여 나갈 때 지난 더 습한 기후에 대한 생각으로 이끌어 왔다. Waltham과 Ede에 의하면, 지금은 빙하 작용으로 파괴된 이란의 건조한 Zagros산의 Kuh-e-Parau카르스트 표면이 Ghar Parau의 750m 깊이에서 생성되었다고 한다. 카르스트 지형의 발달은 조사할 수는 없으나 이전의 더 습한 기후 때문이다. 유사한 발달 역사가 뉴 멕시코와 북서 텍사스의 준건조 기후지역인 Guadalipe산맥에 대해 더 이전에 주장되었는데, 이 곳에서 Carlsbad동굴과 다른 동굴들이 Bretz와 Horberg에 의해 더 습한 선신세에서 기인되었다고 한다. 그것들은 현재의 지세와는 관련 없고 평원

의 표면 사이에서의 초기작용에 의해 형성되었다고 여겨져 왔다. 후에 Moore는 활동적인 초기 작용의 3단계가 지금보다 더 습했을 선신세 후기와 플라이스토세 초기에 발달하고 융기한 고원이 분리된 것과 관련된다고 생각했다. 동굴 발달의 나중 단계에 속하는 거친 하천의 퇴적물들은 현재의 수리학과 비교될 수 없다.

Nullarbor 평원의 산재된 큰 동굴들은 플라이스토세의 수면 진동뿐만 아니라 습한 시기와 연결되지 않는다. 최저 해수면이 이전에 이용할 수 있는 대량의 물의 수 배로 언급되었지만, 적어도 동굴에서의 꽃가루의 증거로부터 지금 이것은 최후 빙하기 동안 그 경우로 여겨지지 않는다. 그럼에도 불구하고, 현재 북쪽으로 향한 사구를 통과하여 지금은 어느 정도의 거리로 강이 없는 평원까지 뻗어있는 하로(河路) 형태로 지표에서 그리고 지금은 거의 조금도 형성되지 않는 이전의 풍부한 방해석 스펠레오템의 지하에서, 습윤 증가 단계의 Nullarbor 평원으로부터 증거가 있다. 그런데, 이 현상들을 연대 측정하기란 매우 불가능해 보인다.

남부 아프리카에서 단순한 보편적 해석이 없는 몇 가지 예들이 기술되어 있지만, 동굴 분지는 더 습하고 더 건조한 과거의 기후라는 단어로 해석된 많은 증거들을 만들어 왔다. 그리하여, King의 초기 연구는 Transvaal 동굴에서 붉은 모래의 대체와 스펠레오템 분지에 중점을 두었다. 붉은 모래는 잘 분급되고 둥근 석영 알갱이와 작은 광물 구성 원소들을 이웃에 잘 병합시킨다. 이것들은 건조층으로부터의 바람에 날린 구성 물질로 해석되었다. 건조 지역인 보츠와나의 칼라하리 사막 동쪽 지역 사이에, 바람에 의한 붉은 모래와 방해석 분지들이 계곡 바깥쪽에서 사구가 퍼져 나가듯이 Drotsky 동굴에서 연속적으로 되풀이되었다. 이 현상들 중 일

부는 방사성 탄소와 관련되어 있다.

King에 의해 연구된 다른 어느 것보다 Transvaal 동굴들에서, 스펬레오뎀 형성 시기는 붉은 토양의 내부 세탈로 변화하고, 후자는 여기서 습한 단계를 계산하는 것으로 간주된다.

### III. 카르스트 노출의 비율

카르스트의 기후적 접근은 1950년대부터 활발하게 주장되어 현대 진화의 광대한 연구에 가담하였다. 특히, 어떠한 과정에 의한 카르스트 지형의 노출 측정은 그 논제에 중심이 되었고, 카르스트 지형의 분해는 축축한 열대에서 가장 빨리 이루어진다는 잘 알려진 견해에 대해 Corbel은 상반된 의견을 제시하면서 활동적인 에증을 펼치기 시작했으며, 1959년 Corbel이 고안한 공식은 다음과 같다.

$$\text{석회암노출 비율 (in } m^3 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)} = 2.5 \text{ E.t.n./1000}$$

\* 장소 E = 지면위에 흐르는 빗물 (in decimeters),

\* t = CaCo<sub>3</sub> concentration (liter 당 milligrams)

\* 1/n = 석회석과 석회석 총척층에 있는 담수량의 비율

그러나 카르스트에 있어서 지면상에 흐르는 빗물의 기록은 대개 불가능하다. 그래서 Corbel과 다른 사람들이 종종 물의 1년의 잉여분으로 대신했다(강수량 - 증발량). 그러나 다양화된 표면에 포함된 현실의 증발량에 대한 측정은 신뢰할 수 없는 부분이 많다. 그러므로 어떤 연구자들은 그들 자시니 변화를 기록하기도 했다. Corbel의 공식에 있어서 다른 부족한 것들은 일찍 수정되었다. 2.5라고 가정된 밀도의 크기는 명확한 카르스트로부터 바위의 크기들을 확실히 측정함으로써 대신하였고, 마그네슘 탄산염

과 탄산칼슘의 농축은 동등의 탄산칼슘으로 훨씬 단순화시키기도 하였다. Corbel은 1년 동안에 땅위에 흐르는 빗물의 공급되어지는 중간 정도의 농축을 얻기 위해서 매우 드문 견본들을 사용하였다. 연구자들의 연구는 몇 년을 통하여 계속되었고, 연구하고 있는 것들의 변화에 저항해서 역행했다. 그러므로써 그 변화에 대한 결점은 한 해의 견본을 통하여 발생하였다. 켄터키의 그린강 처럼 오래 연구된 강들은 힘의 기능을 위하여 다른 해설자들이 각각의 해마다 산출하고 있다. 변화의 결점의 다른 요인은 카르스트 바위들 보다 다른 것으로부터 삼입된 탄산염이다.- 담수에서 흘러내려오는 먼지가 있는 빗물, 카르스트가 없는 지형의 바위와 카르스트가 토대를 이룬 지형의 풍화 등이 그것이다. 땅 아래 있는 담수를 결정짓는 어려움이 있다는 것이 바로 앞으로의 문제로 제시되고 있다. 그것은 지세도와는 일치하지 않는다. 이러한 고찰은 발표된 카르스트 노출의 비율에 있어서 신뢰성과 의미성에 다양함을 함축하고 있다.

Atkinson과 Smith는 한층 더 나아간 결과의 첨가 즉, 더 믿을 수 있는 기록의 변화에 기초를 두었고 많은 양의 물을 분석함으로써 모형 67을 수정한다. 이 편찬은 카르스트 노출에 있어서 두 가지 방법으로 중요한 기후적 조절을 증명한다. 상당히 중요한 결과는 땅 위의 빗물이 증가함으로써 석회석 제거의 분해의 비율도 증가하고 있다는 것이다. 보다 중요하지 않은 결과는 높은 산악지대와 북극의 추운 날씨 때문에 노출된 암석 지형에 있어서 식물생장을 덮고 있는 지형은 토양을 통과함으로써 분해의 감소에 있다. 토양을 덮고 있는 바위와의 접촉이 길면 길수록 또 이산화탄소의 양이 많으면 많을수록 토양의 양은 낮아진다. 많은 것을 기대했던 기후의 결과는 이 이야기에서는 잘 나타나지는 않

았지만, 땅 위에 있는 빗물이 거의 같게 되는 (낮은 데에서부터 높은 데까지 그 구조를 따라서 함께 섞일지도 모르는) 중위도의 카르스트 지역에 있어서보다 열대의 분해의 비율이 더 높다는 것이 알려졌다. 비록 여기에 포함되지 않더라도, Corbel은 비교적 거의 없는 물을 기본으로 하여 Svatisen, Norway에서는 500mm ka-1과 4,000mm의 지표면의 빗물과 같이 산악의 카르스트 지형은 더 높은 비율을 여전히 유지하고 있다고 주장했다. 그러나 이것은 New Britain으로부터 430mm ka-1 with 6,400mm의 지표면의 물이라는 똑같이 커다란 측정에 의해 조화되어진다. Ford와 Drake는 이러한 목적을 위한 비교는 수면아래의 방해석을 원천의 수단으로 하여 만들어진 것이라고 주장했다.

그러므로 비록 물의 이용 요소가 침식된 바위의 노출에 대한 명확한 기록과 온도에 대해 독립적으로 증발량을 통한 광대한 결과가 간접적으로 나타난다고 할지라도 그것은 오로지 짧고 조용한 방식에서만 나타난다. WHITE는 물-이산화탄산칼슘 체제에서 그 온도의 최근 분석을 기초로 하여 침투 평형의 노출 비율을 계산했다. 그리고 그들은 바위의 노출과 땅위의 빗물 사이의 관계가 어느 정도 지배하고 있다는 사실을 발견했다. 첨가해서 말하자면, 이산화탄소의 입방근의 비율은 다양하며 그래서 5개의 요소를 범위 내에서 만들 수 있다. 덮여져 있는 땅과 걸로 드러난 카르스트 사이에 양분을 제공하는 이것은, Smith와 Atkinson에 의해 제안되었다. 그러나 이론적으로 표면의 노출 비율은 기온이 5도에서 25도로 상승할 때마다 오직 30% 상승한다. 그래서 이 요소의 결과는 경험적인 측정의 분산에서 쉽게 잃어버리게 될 수도 있다.

단일한 카르스트지형은 주어진 기후의 상황 안에서 공간적인 분배의 해결을 다양한 모양으

로 연구한다. 확실히 기후적 요소의 작용에 대한 조사가 확실한 해설을 이끈다는 주장은 구조와 같은 다른 요소와 복잡한 상호작용을 한다는 것을 정당화시켰다. 그러므로 기후에서부터 카르스트의 기원을 더듬어 변화를 초래한다는 사실을 극건조와 극한 기후환경에 의한 카르스트 발달과정을 제시한다.

### 1. 극심한 건조기후 환경

식물식생과 땅의 탄소 제 2산화물에 있어서의 물의 부족이 거의 가망 없는 이론적 기대를 끌게 된 것은, 건조한 기후 특히 낮은 강수량에서 높은 증발량을 보이는 더운 지역에서 카르스트 지형을 발전시켰기 때문이다. 건조 공기로 거의 나무가 없는 Nullarbor Plain은 부서지지 않은 채로 있는 낮은 고원이다.

Miocen시기 이후 바다가 나타난 후에 점점 낮아지고 있으며 3~5m크기의 산등성이에서는 회랑(回廊)지대, 그리고 원형의 침하로 이루어진 시대와 같은 커다란 창조에 의해서 약간의 변화가 이루어지고 있다. 몇 개의 붕괴된 돌리네는 오랜 시간 동안 유지되어오면서 예리한 무엇 때문에 그 무 변화를 깨뜨렸다.

고리의 침해 또는 불 침투성의 내층 주위의 '호'는 제한된 경우를 제외하고는 구별이 있다. 용해의 마이크로폼은 거의 발전되지 않았고 또한 구분에도 제한이 있다. 다른 말로 하면, 경직(calcrete)을 가진 표면의 경화가 넓게 이루어진다는 것이다. 또한 지난 시간에서부터 땅의 풍화 작용도 이루어진다.

깊이의 수치보다는 크기의 동굴은 연장된 호수에 이르는 몇 킬로미터의 길이로, 해안 쪽으로 서서히 움직이는 염수로 수평지층을 이루어지는 것으로 알려져 있다. 아주 얇은 동굴은 더 많다. 그러나 기본적으로 지면 아래 발전된 지

역은 표면의 본보기로써는 늦추어지게 된다. 늦은 용해는 여기에 중요성을 더 부과할지도 모른다. 비교하여 보면, 아래로 내려가 있는 동굴은 넓게 분포되어있고 공식적으로 발표된 것처럼 보인다.

암염 결정체는 암석에 있는 기반암을 부순다. 이것은 많은 양으로도 발생할 수 있다. 여기는 동굴의 부족한 수증기의 일상의 부동에 예외이다. 방해석은 지금 거의 형성되고 있지 않다. 비록 남중앙부분의 동굴에 활발하지 않은 형성이 있다고 할지라도 암염과 석고는 특별한 양과 다양성에서 발생하기 때문에 방해석이 깨어졌다.

Williams는 Nuooarbor의 석회석이 대부분의 특징에서 가장 중요한 부분이 기계적인 힘에 약하며, 침투성이 좋다는 것을 지적했다. 그럼에도 불구하고 표면에서의 경화는 물이 그것에 미치는 충분한 분석이 있다면 정말 발전된 모습을 제시할 수 있다. 비록 그것의 개별적 특성이 독특한 형태보다는 더 넓게 발견되는 형태에서 더 많이 의존하고 있다고 할지라도 Jennings는 이 카르스트를 아열대 지방의 덥고 건조한 기후의 형태로 간주하였다.

Tofoni는 Hadgramaut, Arabia, Negev, 북서 Saharan hamadas 에서 넓게 나타났고, 암염결정체는 이러한 어떤 지역에 속해 있다. Rillensteine는 Band-I-Amir Lakes, Afghanistan같은 석회화담과, 사막 카르스트에서의 안개와 먼지에, 또 그것은 기후에서의 이산화탄소뿐만 아니라 증발량에도 큰 기여를 하고 있다.

북아프리카와 중동부의 건조한 곳에서의 석회석 표면은 'dayas'라고 불리우는 움푹패인 곳이 있다. Bahrain에서의 이러한 다른 한정된 형태들은 Doornkamp에 의해 나타내어졌다. 그러나 이러한 지역에서의 석회석과 백운석 표면의

많은 부분들이 바람에 의해 마멸된 곳은 용해 형태보다 더 중요하다.

협오스러운 탄산염 카르스트지역인 건조한 땅은 증발 잔류암 카르스트의 표면에 잔존해 있다. 다습한 기후에서의 그러한 카르스트는 더 많은 용해성 때문에 토대를 이루는 상태를 강력하게 제한한다. 석고 카르스트는 이 기후를 제한하지 않더라도 Gypsum Plain in Texas와 New Mexico와 같은 반 건조성 땅에서 아마 가장 잘 발달될 것이다. 암염 카르스트는 사막지역의 카르스트의 특징이라고 할 수 있다.

## 2. 극심한 한냉 기후환경

물이 어는 것은 용해의 비활동적인 과정을 초래한다. 그래서 지리적으로 북극의 빙하와 빙하의 영구동토층은 빙하의 주변 지역의 진화를 양도받고, 만약 충분한 시간이 있다면 카르스트 지역의 지표면 형태의 종류에 따라 대신할지도 모른다. 다른 문맥에서는 빙하는 이러한 파괴적이고 억제하는 것뿐만 아니라 보존하고 자극을 주는 것도 할 수 있다고 되어 있다.

영구동토층 구역에서, 용해에 의해 점점 낮아지는 표면은 여름에 액체상의 물의 작은 양 때문이다. 그리고 Somerset Island, North West Territories, Canada와 같은 지역의 식물의 생장에 있어서의 이산화탄소의 낮은 생산성 때문에 서서히 땅의 표면이 진화하고 있다. Corbel이 Spitzbergen으로부터 묘사했던 것과 같이 이것은 동결 고정시키는 것을 파괴하고 또는 용해의 마이크로폰에 위협을 제시하고, 각도가 있는 석회석의 지층 노두를 뒤죽박죽으로 만든다. 비록 용해가 위치상 작은 구멍들 안에서 눈이 더 활동적이라 할지라도 표면은 구조적 형태에서 나타나 그 자체를 낮추어 감으로써 평행을 이룬다. Shallow 동굴은 동결, 고정을 통해서 적벽으

로 발전한다.

영구동토층 아래에서 급속도로 녹은 내용물은 지면 아래 물에서 발견될 수도 있다. 그 예로 알래스카와 시베리아 중앙에서 지역적 파괴를 표시하거나 영구동토층에서의 'talik'는 깊이에서 지속되는 순환을 지시한다. Ford는 그러한 순환은 먼저 더 따뜻한 기후에서부터 완전히 이어받은 것이 아니라 물의 커다란 줄기 형태의 동굴들과 영구 동결층을 통한 루트방식으로 유지하고 창조할 수 있다고 생각하였다. 부분적으로 캐나다 북서쪽에 있는 영구 동결된 North Nahanni 카르스트는 많은 돌리네와 용해된 회랑(回廊)지대로 논의된다. 그것은 적어도 오늘날 같이 혹독한 시기에 전개되어진 증거가 된다. 계속하여 영구동결층에 도달하는 Maobenzie의 낮은 땅에 있는 Farth North는 증발되는 용해가 낮기 때문에 빙하의 흐름에서 돌리네로 나뉘어진다. 여기에 있는 카르스트는 암석학적으로 특별히 중요 할 뿐만 아니라 더 따뜻한 시기로부터 이어받은 것으로 추정된다. 비록 수평의 지층과 얇은 층의 지역에서의 기복이 또한 없다는 것을 알고 있다고는 할지라도 계속되는 영구 동결층의 캐나다 군도에서 석회석의 카르스트 지형의 고저는 일반적으로 존재하지 않거나 높은 길이로 발전하기가 부족하다. 어떤 지역에서는 성토의 깊이를 직접 측정하지는 않았으나 1km의 길이에서 30m의 바람과 12m의 깊이의 최대한 치수를 가진 용해의 회랑(回廊)지대로 세분화된다. Ford는 이러한 것은 빙하 밑의 눈 녹은 물에 의해 형성되었으며 거대한 Laureutide 대빙원은 카르스트지형을 고립시키고, 이러한 지역에서는 지구열학의 열을 보고하고 있다고 제안했다. 여지껏 연구되었고 형식적인 형태발생의 구조 사이를 구별하기 위하여 불리워지는 USSR과 North America의 북부지방의 카르스트

지형에 관한 더 많은 연구가 되어지고 있다.

빙하는 거의 녹는 온도에 있고 땅이 주기적으로 어는 바다 반대의 추운 기후와 중위도의 높은 산의 기후에서는 기반암 속으로의 침투가 쉬우며, 눈과 얼음이 녹아 주기적으로 물이 풍부해진다. 이런 점에서 카르스트가 곳곳에서 발달할 수 있다. 작은 용액 돌리네 근처와 open shaft에서는 그리스의 Astraka와 같이 식물의 한계를 넘어선다. 노출위에서의 용액의 미세한 형성은 결빙작용에도 불구하고 이루어질 수 있다. 용해 돌출(solution heelsteps)과 같은 종류는 비록 이러한 환경에서는 예외적으로 나타나지 않지만, 눈 녹음과 기원적으로 연결되어져 있다.

때로는 동굴의 발달이 많이 이루어지며, 기후가 다양한 높은 산에서는 유럽의 알프스와 피레네와 같이 매우 깊은 구조가 이루어지는 것이 특징이다. 이것이 단지 다른 고기후로부터 생겨난 것이 아니라는 것은 캐나다 록키의 Castleguard 카르스트에서 쉽게 설명되어질 수 있다.

Castleguard Care는 캐나다의 큰 빙원에 도달하는 Mt. Castleguard 밑으로 지나가는 길고 휴 동굴이다. 그 동굴의 표식점토의 주사는 그곳을 걸러내고, 동굴의 앞부분에 마디를 형성하는 나머지 결정을 운송함으로써 이루어졌다. 그러한 동굴은 빙하계곡 측면의 높은 곳에서 나타나지만, 250m 밑의 몇몇 것은 그 계곡 밑바닥에 큰 샘플을 이루는 최근의 것이다. 이러한 샘플은 빙하로부터 그 물의 대부분이 끌어 올려진다. 빙하 밑의 녹은 물의 화학적, 기계적 작용은 기후가 매우 혹독하지 않은 곳에서는 한 원인으로서 고려되어진다.

Corbel은 카르스트는 특별히 차가운 물에서의 높은 CO<sub>2</sub>삼투평형과 눈과 얼음이 있는 공간에서의 높은 CO<sub>2</sub>양 때문에 이러한 환경에서는 부

분적으로 발달된다고 주장했다. 그러나 프랑스 산맥의 높은 물 위에서의 EK의 관찰에서는 Corbel이 주장했던 것 보다 더 높은 pH와 더 낮은 탄산염이 나타난다. 결국 노르웨이 남부의 Svartisen이나 프랑스 알프스의 Vercors와 같은 지역에서 높은 응결율과 낮은 증발율은 Corbel이 석회암의 높은 침식율을 추정할 것을 부인할 수 없게 한다. 심지어 알래스카의 타나나 강의 Taiga-tundra 카르스트에서도 Corbel은 화학 자료로부터 용액의 실제비율을 얻었다. 그러나 이것은 탄산염의 집중이 가장 낮은 유량이 가장 많은 짧은 여름동안에만 해당한다. 매우 빠른 흐름에서의 순전한 물의 양은 용액을 좌우한다.

### 3. 온상적 극열지(Botanic Hothouse)

온상적 극열지는 카르스트 지형의 다양성과 카르스트 지형의 가장 눈여겨 볼만한 발현이 발견되어져 온 다습한 열대기후에 있다. 온상적 극열지는 활동적인 카르스트 과정의 기준으로써 여겨져 왔다. 대단히 많은 이름들이 카르스트의 여러 가지 형태를 동일시하도록 소개되어져 왔다. 단지 동의어뿐만 아니라, 함축적 의미가 가진 특별히 사용되지 않는 말을 후기의 학자들이 사용함으로써 혼동이 일어났다. 여기서는 그 모든 이름들을 그대로 옮기고자 하는 어떤 시도도 하지 않을 것이다. 또한 그러한 문제는 어떤 조사자들이 부분적으로 이 언어적 혼동을 분명하게 하기 위해 추구해 온 형태를 통해서 접근되어질 것이다.

Williams의 구조는 모든 종류의 열대 카르스트에는 적용되어질 수 없다. 그것은 세 개의 영역을 의미한다.

1) 돌리네 카르스트: 돌리네가 어떤 종류의 지질적 표면에 침식 또는 구조적 원인으로 구멍은 장소로 다른 것으로부터 명백히 구분되어진

다.

2) 다면형 카르스트: 이전의 지형의 함몰의 발전과정에서 소비된 지형이므로 모든 표면은 그들의 부분이 된다. 침몰을 규정하는 다각형의 경계를 따르는 잉여의 언덕들은 비록 함몰이 실제로 지형을 변화시키는 주요한 과정일지라도 여기서는 주요한 경관적 특징이 된다.

3) 평원 카르스트: 잉여언덕이 시각적으로 우세하게 분포하고 닫힌 함몰이 부수의 역할을 담당 할지라도 평평한 표면의 대부분을 차지하는 것이 plain 카르스트이다.

Williams의 지형학 주제는 측면의 요각구조에 기초한 다면형의 저수지를 가지는 카르스트이다. O형태는 안을 향하여 둥근 지형선을 갖는 요면형태의 돌리네이다. 반면에 많은 형태를 가진 또 다른 형태들은 매우 다양한 cockpit을 나타낸다. 파푸아 뉴 기니아에서 Williams는 통계적으로 다면형의 카르스트를 세 개의 집합 (cone karst, pinnack karst, aligned karst)으로 구분했다. aligned 카르스트에서 잉여언덕은 그 선이 수평을 형성하는 경향이 강하며, 함몰은 자메이카의 'Glade'와 같이 연쇄적이다. 또 다른 종류의 aligned 카르스트는 잉여언덕의 형태에 의해 서로 구분되어진다.

이와는 대조적으로 Balazs는 잉여언덕의 직경(a)과 그것의 기반의 고도(d)에 대한 비율(d/a)의 분석에 중점을 두었다. 이러한 기준에 따라 산맥들은 언덕의 높이와 지역적 빈도에 따라 연관되어진다. 이러한 기초 위에서 그는 통계적 분석 없이 네 개의 주요한 형태를 제시하였다.

1) Yangzbou: d/a가 1.5이하 일 때. 이것은 측면에 가파른 잉여물이 있는 towers 카르스트 안에 폭포를 가진 중국 Guangxi의 Yangzbou 주변의 카르스트에 기초를 두고 있다.

2) Organos: d/a가 1.5-3일 때. 이것은 50-200m

의 높이와 평방킬로미터 당 10-20개의 tower가 있는 쿠바의 Sierra de los Oraganos로부터 이름 지어졌다.

3) Sewu: d/a가 3-8일 때. 이것은 반구와 만곡 형태의 언덕과 별모양의 함몰이 있는 Java의 남부 중앙 Tousand Hills의 Gunung Sewu로부터 이름 지어졌다. Lehmann은 원래 이러한 conekarst를 표시했으나, 이것은 또한 자메이카의 cockpit country와 Puerto Rico와도 상당히 일치한다.

Sewu는 30-120m의 상대적인 기복과 평방 킬로미터 당 15-30개의 밀도를 가진다. conekarst는 틀린 이름이라고 할 수 있다. 왜냐하면 비록 중국남부와 같은 몇몇 지역에서 원뿔형태의 잉여 카르스트 언덕이 발견되기는 하지만, 그 지역의 가장 특징적인 형태가 아니기 때문이다.

4) Tual: d/a가 8이상 일 때. 이것은 돌리네 카르스트로부터 멀리 떨어져 있지 않은 인도네시아 Kai-Ketjil섬의 낮은 기복에 의해 대표되어지며, 10-50m의 기복과 평방 킬로미터 당 50개의 언덕을 가진다.

이러한 것에 대해서는 사이사이의 높낮이에 기초를 둔 두 가지의 부분 유형들로 구분되어지는 Balaz들에 의해서 고려되는데, 그 한가지는 함몰된 부분들이 밀접하게 서로 연결된 언덕들이고 다른 경우는 평면위에 독립된 언덕들이다. 이러한 고저에 대한 양상은 중국의 길에 집중되어 나타나게 되는데, 이 해석은 중국 남쪽에 있는 회귀선을 걸치고 남쪽에 있는 4개의 인접 국가들에 대해서 확장되어지는 거대한 Karst로서 간주된다. 그들은 이 Karst를 다음과 같이 구분한다.

a) Fengcong: 일반적인 경우로서 기본적으로 연결되어지고 인접되어진 함몰된 부분들이 모여있는 언덕.

b) Fenglin: 일반적으로 더 낮은 높낮이와 계

곡들을 가지며 언덕들을 나누는 경우.

c) Kufeng: 언덕들이 평원위에서 분열되어 아주 낮아지는 경우. 어떠한 환경내에서는 변화가 a에서 c로 이루어졌으리라 생각되지만 항상 이 경우로서만 생각되어지지 않는다. 이러한 상황들은 무덥고 습기가 많은 기후, 어떤 변화, 특별히 여러 형태의 잔재물 등에 의존되는데 위의 것들은 광범위한 지형학적 관점에서 볼때 구조적 요인들에 의해서 발생되어진다고 생각되어지기 때문이다.

이런 유형속에서 사람이 많이 사는 Karst 영역에 있어서, 극소의 노출된 바위가 충돌을 하여 인접된 함몰 부분들로서 충적지를 이루고 이 Karst를 뒤덮는 퇴적 평원으로 연속적으로 나타나게 된다. 천연 열대 우림이 유지되는 지역(예를 들면 몇몇 New Guinean 과 중앙아메리카의 Karst)에서 어떻게 식물 식생들이 덮여 있을까에 대한 문제는 놀라운 사실이다. 바위의 수직면에서조차도 식물들의 성장이 가리워져 있는데 더 높은 식물들의 뿌리들은 아주 적은 약한 부분에 뿌리를 내리고 이끼, 우산이끼 등 더 작은 식물들이 넓게 덮여있다. 숲의 잡동사니(예: 썩은 낙엽)들은 모든 종류의 골짜기, 깊은 속이나 심지어는 깊은 균열된 곳이나 광산의 수갱에서조차도 축적된다. 건조될 수 있는 돌출 부위에서도 기반암은 크게 확장될 수 있으며, 그 공간에서는 여기저기서 speleothem의 발달할 가능성이 크다.

생물기후학적 이해는 4분의 1이상으로부터 이의가 제기되어져 왔다. Corbel은 이론적으로는 높은 온도에서 CO2와 탄산염은 낮은 삼투의 평형상태를 이루며, 경험적으로는 열대의 카르스트 물은 탄산염의 측정치가 더 낮다고 믿었다. 게다가 완전한 침전물은 열대의 더 큰 증발로 인해 보다 효과적으로 감소한다. 이 장에서

이미 언급되어졌던 것처럼 석회암의 제거율은 열대와 중위도의 카르스트가 다르지 않다. 열대 카르스트에서 석회암 제거율이 높게 나타나는 것은 그러한 결정들이 완전히 손실되었고, 카르스트 지대의 변화가 동굴과 표면의 석회수천을 형성하는 침전으로 인해 열대에서 더 크게 일어날 수 있다는 것을 가르킨다.

Corbel은 또한 열대기후에서의 대단히 정교한 카르스트 요소를 설명하기 위한 역사적인 주장을 내세웠다. 그는 열대의 카르스트 형태를 더욱 오래된 시대의 것으로 가정했으나, 지각구조상으로는 어떠한 기후의 한계도 겪지 않았고, 오래되거나 그렇지 않은 카르스트가 모든 고도에서 발견되어 진다. Caribbean과 남동부아시아에 전형적인 열대 카르스트의 대부분은 Alpine 조산운동 지대에 속한다. 마찬가지로 Corbel의 주장은 중위도 카르스트가 발달된 Pleistocene 빙하기와 주빙하는 같은 시대에 열대는 더욱 건조하였다는 현재의 지식과 일치한다는 것이다. 그리고 그 열대에서는 비록 낮아진 온도와 적어진 생물자원 때문에 증발 또한 줄어들었으나, 용해의 비율은 물의 이용도가 감소됨에 의해 낮아져왔다. 이러한 요소는 북동부의 Queensland 카르스트를 예로들면, 작용되어 왔음에 틀림없다. 왜냐하면 Atherton Tableland 카르스트 가까이 있는 다양성 증거는 1,000-8,000사이에는 어느 때보다 적게 열성 식물이 퍼져 있었다는 것을 보여주기 때문이다.

Corbel 이후에 열대를 대신해 온 고환경 연구가 대량으로 이루어졌고, 그러한 연구는 낮은 위도의 기후는 Pleistocene에서 결국 고정되어 온 것이 아니라는 것을 증명해 왔다. 기후와 식물에는 주요한 두 가지의 변화, 고도와 위도에 따른 변화가 있으며, 건조의 표시인 고대의 ergs는 사바나의 야외 조사와 비가 예견되는 환경을

희미하게 감지함으로써 인식되어 왔다. 반대로 어떤 시대의 강과 호수의 활동은 오늘날보다 오히려 왕성했던 것으로 설명되어져 왔다. 대부분의 지형은 심지어 적도의 높은 강수량의 중심부에서조차도 오래 지속 되어온 고정된 기후 하에서 진화되지 않고 있다.

많은 열대의 카르스트 형태가 생물기후학적인 환경에 달려있다는 것을 상쇄시키기 위해서는 형태학상의 증거가 보다 필요하다. 캐나다 북서부의 taiga-tundra 경계에 있는 Nahanni 카르스트는 카르스트 Corridors, 가파른 cenotes와 절벽의 poljes, 그리고 몇 개의 towers에 의해 분할된다. Jennings는 결국 이러한 카르스트는 Broak와 Ford는 우세하게 여겼던 오스트레일리아 북서부의 석회암 산맥들과는 사실상 다르다고 주장한다. towers 지대는 드물며, 보통의 towers는 예를들면 고원의 외면에서처럼 많은 카르스트 지대에서 나타난다. 또한 오스트레일리아의 열대 카르스트의 전형적인 페디먼트는 Nahanni에서는 나타나지 않는다. 게다가 그러한 페디먼트의 형성은 이들 학자들이 주장한 것보다 더 오랜 시간이 걸릴 수도 있으며, 빙하 덩어리가 이들 지지층을 부식시키지 않을 가능성도 있다. 반면에 다변형의 카르스트는 높은 물의 유용성과 높은 강수가 그러한 상태에 충분하며, 높은 온도는 필수적으로 요구되지 않는다는 Willams의 연구의 충분한 증거가 된다. 그것은 최소한 과거에 여겨졌던 것처럼 열대와 중위도 카르스트 간에 어떠한 차이가 있지 않다는 것을 나타내준다.

전체적인 침식율은 이러한 문제를 해결하지는 못할 것이며, Ford와 Drake는 카르스트 안의 용해를 문제의 실마리로써 주장한다. W.B.White는 이것을 수학에 기초하여 연구하여 왔다. 열대의 높은 강수량의 특성이 주어진다

면, 보다 무른 곳에서의 토양이 쓸려 내려가는 경향이 있다고 여길 수 있으며 따라서 암석을 깎는 PCO<sub>2</sub>의 물에서는 더욱 다양성이 촉진된 다도 할 수 있다. 강수의 집중과 빠른 물의 이동 또한 그러한 저돌성을 늘인다. 이러한 환경에서 불충분하게 포화된 solution kinetics는 현저히 구별되는 용액을 의미하며, 따라서 매우 기하학적인 열대의 카르스트를 형성한다.

#### IV. 한반도의 카르스트

북한지역의 동굴 분포는 대부분이 산지지역에 형성되어 있는 일명 山岳동굴(Alpine Caves)로서 석회암이 넓게 분포되어 있는 황해도 지역에 밀집 (10 여개) 되어 있다. 함경남도에는 관음굴과 백석굴이 해발 600-700 미터에 분포하고, 평안남도에는 단군굴 (150-350 미터)과 미송굴 (70 미터)이 있으며, 평안남도에서는 개천중류동 (100 미터)과 아난굴 (500-550 미터), 그리고 황해도에서는 동굴의 위치가 대개 20-100 미터로 저고도상에 분포하고 있다. 특히 동국여지승람에서 소개된 36개소의 동굴중 11개소에 대하여 위치와 특성을 기록하여 전하고 있다.

남한지역에 등록된 洞窟은 현재까지 276개로써 그 분포는 주로 태백산맥과 소백산맥의 산지 사면부에 위치하고 있으며, 주로 강원도 (300-500 미터), 충청북도 (160-350 미터), 경상북도 (250-350 미터)에 있으며, 소규모로 전라북도 (150 미터)에 산재되고 있다. 동굴의 내부에는 다양한 형상의 동공지형이 지층의 습곡과 단층을 따라 급사면적인 단단계 동굴로 발달되어 있으며, 동굴내부에는 2차적인 광물의 재퇴적작용으로 다양한 형상의 침적지형으로 구성되어 있는 특성을 갖고 있다.

남한에 분포된 동굴의 형성과정에 관한 연구

결과에 의하면, 태백산맥의 융기와 신생대 제 4기 (약 1600-2000만년) 빙하기 동안에 발생된 기후적인 영향에 의한 수 차례 해수면의 승강운동과 태백산맥의 융기작용에 의한 하천의 하각작용 등이 상호 발생된 것으로 간주 하고 있다. 이것은 한반도 지형의 성인적인 문제를 해결하기 위한 중요한 대상이 될 수 있으며, 동굴 퇴적물의 편년에 관한 연구와 동굴입구 주변의 고하천의 분포를 연관시켜 이를 규명 하였을 경우, 한반도의 융기적인 발달과정에 대한 동굴형성에 관한 해석을 할 수 있을 것으로 본다.

#### V. 결론

근대의 기후지형학은 지형학자들에게 가장 큰 논점이 되고 있다. 기후적인 외인적인 요인이 제1차적인 형성요인이며, 2차적으로 육수와 해수에 의한 내인적인 발달요인이 된다. 카르스트의 기후적 접근은 1950년대부터 활발하게 주장되어 현대 진화의 광대한 연구에 가담하였다. 기후적인 작용에 의한 카르스트의 발달은 지대한 영향을 가져오지만 기온에 대한 카르스트의 발달에 대한 논쟁은 기존의 우 열대 저 한대 편향에서 많은 논쟁을 야기 시키고 있다. 왜냐하면 한대와 온대, 열대와 중위도 카르스트 간에 어떠한 차이가 있지 않다고 규정짓고 있기 때문이다. 이에 따라 한반도에서도 제4기 동안에 형성된 기후변동에 의한 해수면의 승강작용과 태백산맥의 융기작용에 따른 카르스트발달은 지형 발달에 지대한 영향을 미친결과 다수의 지표면 카르스트(카렌)와 지하동공(동굴)의 발달이 형성되었다.

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. Huppurt, 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, Geomorphc 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 오흥석박사 회갑기념논문집 I. 753-768.

- 우경식, 원종관, 1988. 삼척군 대이리 동굴군의 관음굴과 화선굴내에 발달한생성물의 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, BNat. Spel. Soc., 24, 95