

카르스트(KARST)의 지표지형과 동굴지형

오종우 (동굴학회 부회장)

I. 카르스트의 정의와 분류

1. 용어의 기원

카르스트라는 용어는 고대 인도-유럽어로 그 기원은 거슬러 올라간다. 암석을 뜻하는 칼라(Karra)로 부터 그 근원을 찾을 수 있고, 그것의 파생어는 유럽과 중동의 많은 언어에서도 발견된다. 북부의 유고슬라비아에서 그 단어는 칼스(kars)를 거쳐 카라(Kra)로 발전했다. 또한 유고슬라비아와 이태리의 국경지대인 트리에스트(Trieste)지방에서 그지역에 대한 지역적인 명칭으로 이것이 '불모의 땅'이라는 뜻이기도 하다. 이 지역은 종종 이 지역의 자연적인 특징이 최초로 광범위하고 과학적인 연구로 받아들여진 지역으로 '고전적인 카르스트'로 언급된다.

로마시대에 지역적인 명칭은 '칼스서 혹은 칼소'(Carsus & Carso)였고, 그것이 오스트리아-헝가리(Austro-Hungarian)제국의 일부분이 되고나서, '카르스트'(karst)라는 독일말로 정착되어졌다. 뵘엔나(Vienna)의 지리학 또는 지질학술대회에서 국제적인 과학적 용어로서 그 단어가 정식으로 사용되었고, 그 용어의 기술적인 사용은 19세기 중반경에 확립되었다.

2. 카르스트의 정의

카르스트는 특이한 수문학적 용식지형이며, 암석의 높은 용식성으로 인해 발달된 암석의 공극(1차적 삼투)과 암석의 구조적 변형인 절리면, 균열면, 단층면, 층리면 등(2차적삼투)의 확장으로 인하여 발생되어진 경관을 총칭한 것이다. 암석의 용식성만으로 카르스트가 형성된다는 것을 설명하기는 쉽지가 않다. 왜냐하면 암석의 구조적인 특성이 중요한 인자가되기 때문이다.

카르스트를 대변하는 대표적인 현상으로서 카르스트의 특이한 지하수문학적 발달을 들 수 있으며, 지하수문학적인 순환에 의해 자연적인 카르스트의 형성을 이루게 되는 수도 있다. 지표위와 지하에 구혈이나 동공을 지닌 특이한 경관은 결국 용식작용에 의해 형성된 통로구조의 확장에서 기인된 것이다.

카르스트에 관련된 수문학적이며, 화학적인 형성과정을 통하여 카르스트 시스템을 이해하는 것이 좋은 방법이된다. 왜냐하면 카르스트는 용식성 암석에 영향을 미치는 지표수나 지하수의 수문학적인 영향이 결국 화학적인 작용에 의하여 변형되기 때문이다. 카르스트경관은 이러한 상하부 시스템으로 연계된 용식지형의 형성과정상에서 각종인자의 상호작용에 의한 산물인 것이다.

3. 카르스트의 분류

A. 카르스트는 수문학적으로 비활성화된 부문으로 분리 되어지는데 이러한 현상을 고카르스트(Paleokarst)라고 한다. 이러한 현상은 대개 구조적인 함몰의 형상 나타내고 있으며, 쇄설암하부에 남겨져 고립된 지형이 형성되는데 이 현상은 침식기준면의 승강작용에 따라 활성적인 현 카르스트 시스템과 연계되어지는 경우도있다. 이렇게 카르스트의 발달이 다시 시작 되어진것은 수만년이라는 시간적인 발달의 단절을 암시하고있는 것이다.

B. 과거 범람원으로 대표되는 하안단구가 형성된 강으로부터 멀리 떨어져 있으며, 현 시스템으로 작용하기는 하지만 발달되는 상태로부터는 격리되어 있는 현상을 잔존 카르스트(Relict karst)라고한다. 잔존카르스트는 기준면상에서의 급격한 변화를 자주 겪어 왔고, 현재의 해수면위에서 멀리 떨어져 위치한 잔여분의 언덕과 같은 높은 고도에서의 표면침식이 그러한 한 예가 된다.

C. 해안가에 있는 카르스트는 또 다른 예로 그것은 빈공간이 기준면에서의 변화를 전개시키는데는 필수적으로 필요하지 않음에도 불구하고 보다 확실한 실례가 되어진다.

D. 위종카르스트(Pseudo karst)로 알려진 카르스트 경관등은 비석회암지대에서 용식 또는 함몰에 의한것으로 추정되는 형성과정에 의해 야기된다. 이는 발달이 과거에 얼음속에서 변화가 전개된 것이지 용식은 아니기 때문에 빙하상태에 있는 함몰지형이나 동공등을 위종 카르스트라한다. 암석적으로 카르스트의 발견은 전통적인 용식암석과 비교할때 낮은 용식의 정도를 나타내지만, 화강암과 현무암의 노두에서 나타나는 카렌(Karren)과 같은 용식의 형태가 카르스트의 특징으로 나타난다.

E. 열 카르스트(Thermo karst)는 지표방하의 해빙의 결과로 지형적인 침하에 관련된 형상을 나타낸다.

F. 화산카르스트(Volcano karst)는 용암의 흐름중에 관모양의 동공과 관련된 지형으로서 지부의 구조적인 붕괴 동도 포함된다.

G. 도관(Piping)은 열 구조적인 붕괴와 연관된 동굴속의 자갈, 토양 등을 일시에 제거해 버리는 구조적인 작용으로서 주로 사면지형의 토층 등지에서 유발되는 수분작용과 밀접한 연관성이있다.

유고슬라비아의 칼스(Kars)지역의 특이한 자연적 특징은 카르스트현상으로 광범위하게 잘 알려지게 되었고 세계의 또다른 지역들에서도 유사한 특징들이 발견되었다. 전통적으로 이입천굴(Sinking streams caves), 폐쇄된 지반의 함몰(Enclosed depression), 세로로 흠이 파인 바위(Fluted rock outcrops), 대규모 용천(large springs) 등으로 특징지워지는 지역을 포함하는 카르스트의 전반적인 양상에 대한 것은 다음의 그림으로 요약되어진다.

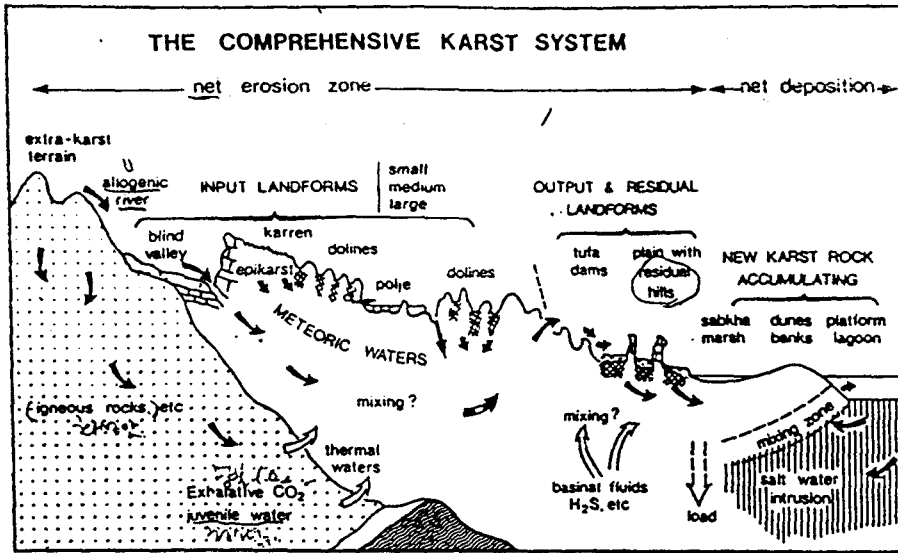


그림 1. 종합적인 카르스트 시스템
(Ford/Williams, 1989: Karst Geomorphology and Hydrology)

II. 한국의 카르스트

1. 지형개요

남한의 석회암洞窟은 대부분이 산지지역에 형성되어있는 일명 山岳카르스트 (Alpine karst)이다. 동굴은 주로 태백산맥과 소백산맥의 산지사면부에 위치하고 있으며, 도별로 보면 강원도, 충청북도, 경상북도, 전라북도에 분포하고있다. 산지의 형상은 데이비스(Davis)의 지형윤회설에 의하면 침식에 의한 산지의 개석이 진전되고 계곡이 깊고 경사가 비교적 급준한 만장년기 지형에 속한다.

동굴주변부에는 河岸段丘形의 평면지형이 있는데 이주변동지에서 窪地(원형의 함몰형상) 지형이 형성되어있다. 이는 동굴의 해면고도와 밀접한 지형발달사적인 연관성이 내포하고있다. 왜냐하면 현 동굴입구의 해발고도와 와지의 해발고도간의 상관관계는 거의 일치하기 때문에 침식기준면이 河床面까지 하강하기전의 水文의 인 활동에 의해 카르스트지형(동굴과 와지지형)의 성인적인 요인을 인정할 수 있다.

동굴의 형성이 지하수와 하천수의 이입과 배수작용에 의한 河成侵蝕地形의 결과인 만큼, 현 하천의 발달과정중에서 어느 한 시점과 그 관련성을 유추해 볼 수 있겠다. 특히 지형의 발달과정중 외인적인 작용과 내인적인 작용을 동굴의 성인과 연관시켜 볼 때, 外因的인 해수면의 乘降作用과 內因的인 지반의 隆起作用이 대표적이다. 이들 작용은 각기 동굴의 형성에 영향을 미칠 수도있지만 내인적인 것과 외인적인 작용이 동시에 이루어질 경우도 있겠다.

해수면의 승강운동은 新生代 제 4기 동안 (약 1600-2000만년) 수 차례의 변동에 의해 지표면의 침식과 퇴적운동을 유발시켰으며, 카르스트지형의 형성을 지표(돌리네)나 지하(동굴)에 형성시켰다. 태백산맥의 대부분이 용기작용에 의한 지괴인 만큼 대부분의 암석계가 퇴적암으로 형성되어 있으며, 카르스트지형의 모양

인 石灰岩과 白雲岩이 본 지역에 넓게 분포하고 있다. 석회동굴지역의 基盤岩은 대부분이 古生代의 오도비스기(Ordovician)의 석회암(약 4억년)으로서 회백색에서 암회색 혹은 연분홍일 수도 있으며, 원생대의 석회암(경기 군자면의 일부)이 있으나 매우 희소하다. 유라기(Jurassic)의 지각운동에 의한 습곡의 흔적이 동굴의 외부와 내부지형에 탁월하게 나타나있고, 向斜(Sincline) 보다 背斜(Anticline)구조의 노출이 현저하다.

기반암층을 덮고있는 토양은 석회암 風化土(Carbonate residual soil)로서 적갈색을 띄며, 대부분의 암층상에 분포되어 被複카르스트(Overburden karst)의 특질을 가진다.

피복카르스트는 대개 한국과 같은 온대지방 석회암지대에서 형성되는 특징이 있으며, 열대지방에서는 주로 露出카르스트(Exposed karst: Karren field) 지형이 탁월하다.

카르스트 수문학적인 측면에서 볼 때 카르스트 湧泉水(Karst spring)가 동굴입구의 하부지에 연하여 출현하거나 주변 斷崖지역 등지에 그 흔적이 나타나기도 한다. 용천수의 위치가 동굴입구로 부터 30m 아래에 위치한 것으로 보아 동굴내의 主窟의 하부에는 다수의 支窟체계가 형성되었다고 단정할 수 있다. 이는 결국 산지에서 지표수가 지하로 스며들거나 삼투되어 동굴체계의 지하수로를 거쳐서, 侵蝕基準面인 하천의 하안으로 용천하는 현상인것이다. 따라서 산지지표면에는 乾谷(Dry valley)이 형성되어있기 때문에 지상의 수계망이 노출되지않는 전형적인 카르스트 지표지형을 유지하고 있는것이다.

지표지형의 형상으로서 가장 대표적인것이 지표면의 함몰에 의해 나타난 지형을 돌리네(Doline)라고 하며, 구미 등지에서는 이를 싱트홀(Sinkhole)이라고 칭한다. 한국에서는 함몰지를 '窪地' 혹은 '가메'라고 칭한다. 각 지방의 방언에 따른 명칭도 많지만 이들의 형성과정을 통한 지형에 따라 용식가메인지 지하동공에 의한 함몰가메인지 아니면 지하수의 이입으로 연결된 이입가메인지를 구분해야 된다.

2. 동굴지형

1) 동굴의 특수지형

- 背斜構造(Anticline sturcture): 동굴의 형성은 습곡구조에서 나타나는 배사와 향사구조와 밀접한 관련성이 있다. 특히 동굴이 위치한 주변부의 하안단애상에 나타난 배사구조 이외, 동굴의 좌우측 그리고 입구 주변부에도 다수의 배사와 향사구조가 露頭(Outcrop)에 나타나 있다. 배사핵(Anticline core)구조가 동굴내외부에 노출되어 있으며, 배사두부에서 약 70-90도의 급경사로 층리가 좌우측 날개를 유지하고 있기도 하고 간혹 이들이 역전되어 출현된다. 이들 날개 사이의 층리에 생긴 균렬면(2차적 삼투: Secondary permeability) 등이 지하수의

배출을 허용하게 되어, 결국 동공의 확장과 동굴의 발달을 유발시키게 된 주요한 지질구조적인 인자라고 할 수 있다.

- 乾燥洞空(Vadose tubes): 동굴의 상부동공이나 이에 연결된 주변부 지굴등지에 동굴의 형상이 건조하여, 동굴생성물의 흔적이 전혀없는 공동(空洞)의 형상을 나타낸다. 이는 균열면의 발달이 전무하여 지하수의 滲透현상도 없을뿐만 아니라 연결된 주굴의 굴하천과도 전혀 현재로서는 연관성이 없는 일명 殘存洞空(Relict tube)인 것이다.

- 鐘穴(Bellholls): 동굴의 최초생성과 매우 연관이 깊은 동굴 천정지형으로서 종모양의 구멍 동굴의 천정에 독립적으로나 아니면 복합적으로 형성되어 있는 현상이다. 규모는 폭약 50-90m, 깊이 약 60-80m의 유형으로서 상부의 절리면을 따르거나 대체적으로 규칙적이다. 형성과정은 균열면이나 층리면에 지하수의 흐름이 上蝕化(Upward corrosion)현상에 의한 현상이라 할 수 있다.

- 岩床段丘(Rock terraces): 동굴의 벽면에 주로 나타나는 현상으로서 벽면의 양안이거나 혹은 한 측면만이 움푹 패인 형상을 말한다. 본 현상은 주로 窟河川の 유수작용에 의한 침식현상으로서 대개 직류인 굴하천의 경우는 段狀이 양안에 나타나며, 곡인 경우는 측방침식작용에 의한 한 측면에서만 나타나는 경우가 있다. 이는 기후적인 현상의 강수의 증가나 혹은 지반의 용기작용에 의한 굴하천의 침식기준면이 급격히 하락하는 과정에서 나타난 결과이기 때문에 동굴의 형성과 관련된 기후적인 또는 용기적인 기록 등을 제공해주는 주요한 地史的인 단위이다. 동굴에서는 다수 있으나 단독적이거나 복합적으로 형성되어 있다. 크기는 대개 폭이 약 50-100cm이며 깊이가 약 80-120cm이다.

- 旋盤(Canopies): 동굴의 벽면에 선반같은 형상으로 붙어있는 古堆積物의 잔형지형이다. 이는 굴하천에 의한 퇴적과 침식지형으로서 동굴의 발달과정을 추정하는데 매우 중요한 지형자료를 제공한다. 특히 퇴적물의 구성물질이 동굴내부의 암석의 쇄설물이 아닌 동굴외부에서 유입된 변성암류, 화성암류 및 다른 종류의 퇴적안 등으로 구성되어 있으며, 퇴적물의 력의 圓形度(Roundness)가 아각력에서 아원력 등 하천유수의 작용 흔적이 확인되었다. 이런 현상으로 볼때, 본 동굴은 외부의 하천이 동굴의 내부로 일시적으로 유입된 河川性 洞窟인 것으로 판명되었다.

선반지형의 형성요인은 암상단구의 것과 밀접한 관련이 있다. 왜냐면 두 지형공히 용기작용과 같은 내인적이거나 혹은 해수면의 하강작용과 같은 외인적인 영향에 의해 굴하천의 침식기준면이 강하할 때 下刻作用(Degradation)에 의해 형성된 잔형지형이기 때문이다. 두 지형간의 상이점이라면 암상단구지형은 퇴적물이 단구주변에 없으나, 선반지형은 퇴적물이 탄산칼슘(CaCo3)을 함유한 유수의 영향으로 고화되어 남은 石灰殼化物(Calich)의 차이점이 있다.

선반지형을 통하여 동굴의 퇴적현상과 침식현상에 의한 지형을 동시에 관찰할 수 있는 매우 중요한 지형단위 일뿐만 아니라, 퇴적지형지들의 분석여하에 따라서 동굴의 형성 이후에 발생되었던 기후변동에 의한 수문환경과 수문작용에 의한 지형환경 그리고 지형작용에 의한 동굴환경을 유추할 수 있는 종합적인 자료를 제공한다. 더군다나 선반퇴적물의 분석을 통하여 주변지역의 지형적인 발달과정의 규명에 용이한 地域地形的(Regional geology)인 기록단위인것을 알 수 있다.

- 二段 洞空(Double level passages): 동굴의 발달과정이 수직으로 연결된 2단의 동굴형과 같이 수평으로 연장된 지류는 동굴의 일반적인 지형이지만, 2단의 동공지형은 동굴의 형성과정적인 측면에서 규명할 수 있다. 동굴의 형성시 퇴적암의 층리면이나 균열면을 따라 시작된 싹핏줄 같은 시초의 형상은 시간적인 경과와 지하수량에 증가라는 중요한 인자의 영향으로 확대되지만, 결국 상하단의 분리현상은 지하수면(Water table)의 하강현상에 의한 잔존지형(Relict topography)이라 할 수 있다. 하단동공의 형성과정은 암상단구와 선반지형의 형성에서 나타나는 침식기준면의 하락이라는 인자와 밀접한 관련이 있다.

- 石灰化댐(Rimstone dam): 방해석의 광물이 하상에 집적되어져 마치 산간지의 계단농지와 같은 지형으로서, 굴하천의 유속이 매우 느릴때 소규모의 지굴에 형성된다.

- 垂直洞空(Vertical shaft): 대하천의 작용이 동굴의 형성에 가장 대표적으로 남겨는 지형으로서 굴하천 사행(Meandering)과 단구와 함께 수직원통모양의 동공이 동굴의 지류와 연결된 지형을 뜻한다. 이는 외부하천이 내부의 굴천으로 유입된 증거로서 상부 혹은 꼭대기 측면에 층리면을 따라 유입된 통로와 연결된 것을 발견할 수 있는 것이다. 이는 동공의 확장과 밀접한 영향이 있다.

- 流石沈積岩(Speleothem): 유석침적암은 동굴내외에서 탄산칼슘에 의한 집적 현상으로서 다양한 형상을 가지지만, 지하동공의 발달이 활발적일 때 보다 일단 동공이 확장된 후에 유석침적암지형이 다량형성되며, 굴하천에 의한 하각작용이 재발되는 과정주에서도 또한 그후에도 형성될 수 있다. 특히 그 발달은 동공이 沈水상태(Phreatic zone) 보다 乾水상태(Vadose zone)에서 주로 형성되며, 다량의 침적이 동공내에 이루어지면 결과적으로 동공은 오히려 매립되어 축소되는 것이다. 유석침적암지형의 종류를 보면 종류석, 석순, 석주, 유석, 석회화단구, 동굴진주, 석화, 침석(tufa) 등이 있다.

a. 鍾流石(Stalactite)은 동굴내의 균열면을 따라 탄산칼슘의 침전수의 응집으로 주로 천정에서부터 형성된 고드림과 같은 형상으로서 쥘모양으로부터 큰기둥 같은것 등의 규모가 다양하다.

b. 石筍(Stalgnite)는 종류석에서 탄산칼슘이 응기고난 이후, 잔존 칼슘함량의 물방울이 동굴바닥에 낙지하여 상향으로 성장하는 형상으로서, 상부의 종류석과 하부의 석순이 연결되면 결국 기둥모양의 석주(Column)가 된다.

c. 流石(Flowstone)은 탄산칼슘을 함유한 물방울이 균렬면으로 나와 벽면을 따라서 흘러 침적된 현상을 말한다. 우선적으로 2차삼투에 해당되는 단층면, 습곡면, 층리면, 균렬면 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 형상으로서 커텐과 같은 'Drapery' 혹은 'Bacon' 등이 있다.

d. 石灰化段丘(Rimstone dam)는 동굴의 바닥에 형성되는 현상으로서 주로, 주굴의 굴하천에서 연결된 지굴의 소규모 하천에서 유량이 매우 소량 일때, 탄산칼슘이 바닥에 모여져서 마치 산간지의 계단농토와 같은모양의 단구가 생성된다.

e. 洞窟鎮珠(Cave pearl)는 세 가지종류로 구분된다: 개별형상의 구경이 2mm 이하 일때 이를 卵石(Oolites)이라 하고, 2mm이상 일때를 漸岩(Pisolites)이라 하며, 동굴진주는 2mm 이상이며 대체로 8-15cm에 약 1kg인 경우의 규모를 나타낸다. 형성과정은 박쥐의 뼈같은 미량의 유기물 조각이나 모래와 같은 무기물 등(핵)이 주변에서 이입되는 탄산칼슘수가 조금씩 겹쳐져서 점차 커지는 단계에서 그 형상이나 규모에 따라 상기와 같이 구분된다.

f. 石花(Cave flower: Helectite)는 동굴의 천정이나 벽 또는 바닥에서 형성된 각종 모양으로서 주로 꽃모양이 많으며, 나선형의 형상도 벽 등지에서 그리고 수정화된 삼기형상 등이 천정에 혹은 바닥에 출현되는 매우 다양하게 나타난다.

g. 沈石(Tufa)은 유일하게 동굴에서 벗어나 동굴에서 유출되는 폭포(Fall)나 동굴용천(Spring) 등의 외벽이나 그 하단부에 형성침적된 현상을 말한다. 이는 용해된 탄산칼슘이 동굴내에서 응집된후 나머지의 분량이 동굴의 외벽이나 동굴에서 연결되어 형성된 외부의 하천 바닥면에 침적되어 형성된 침석담(Tufa dam)등의 지형을 말한다. 그 규모는 수 십 센티미터에서 수 십 미터에 이르기 까지 매우 다양하다.

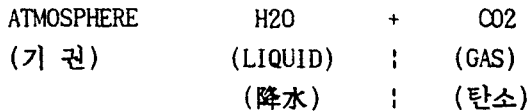
2) 동굴의 특성과 형성과정

석회동굴은 동굴의 고도와 주변 카르스트지형간의 밀접한 지형발달사적인 연관성이 내포하고있다. 왜냐면 현 동굴입구의 해발고도와 와지의 해발고도의 상관관계는 거의 일치하기 때문에 침식기준면이 현 하상면까지 하강하기전의 수문적인 활동에 의해 카르스트지형의 성인적인 요인을 인정할 수 있다. 특히 동굴의 형성이 지하수와 하천수의 이입과 배수작용에 의한 하성침식지형의 결과인 만큼, 현하천의 발달과정중에서 어느한 시점과 그 관련성을 유추해 볼 수 있겠다. 특히 지형의 발달과정중 외인적인 작용과 내인적인 작용을 동굴의 성인과 연관시켜 볼 때, 외인적인 해수면의 승강작용과 내인적인 지반의 응기작용이 대표적이다. 이들 작용은 각기 동굴의 형성에 영향을 미칠 수도있지만 내인적인 것과 외인적인 작용이 동시에 이루어질 경우도 있겠다. 해수면의 승강운동은 신생대 제 4기 동

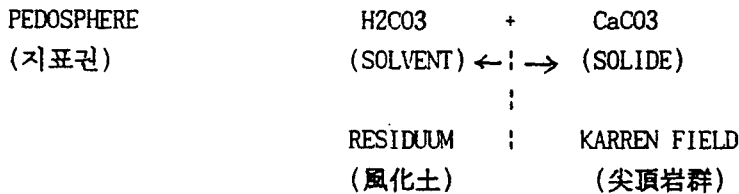
안 (약 1600-2000만년) 수 차례의 변동에 의해 지표면의 침식과 퇴적운동을 유발시켰으며, 카르스트지형의 형성을 지표(와지, 침정암, 복합와지, 폴리에, 용천수, 침석, 침석담 등)나 지하(동굴: 각종 동굴지형)에 형성시켰다.

그림 2. Karst의 발달과정 (Genetic Karst Cycles) 4단계

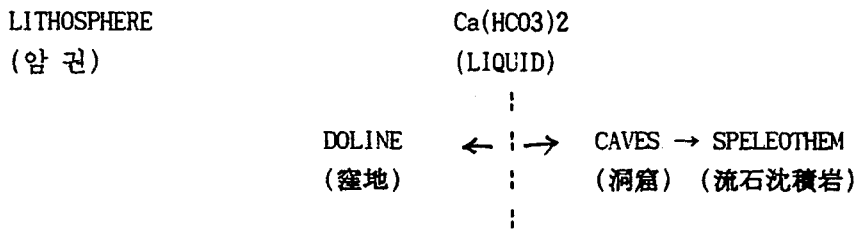
1 단계:



2 단계:



3 단계:



4 단계:



- 1단계 : 대기중에서 빗방울이 CO₂의 용합으로 산성비가 되어 석회암에 溶地하여 용식작용의 조건을 제공해 준다.

- 2단계 : 가용성 화합물과 植生腐植에 의한 토양(Humic acidic soil)에 의해 기반암의 용식이 촉진 되며, 풍화토(Residuum)를 생산하고 침정암대(Karren Field)를 남긴다.

- 3단계 : 용식작용에 의해 지상에는 모암의 균열이 확대되어 와지를 형성하고, 지하의 공간이 지하수의 유입과 유출에 의해 확대되어 동굴(Conduites: Voids: Shaft)이 형성된 후 탄산염의 지속적인 분해 공급에 의한 종류석, 석순, 유착석 등의 새로운 동굴지형 (Speleoscape)을 조성한다.

- 4단계 : 동굴을 통한 지하수는 외부로 잔여 CaCO₃를 함유한 채로 유출(Spring) 된다. 잔여 CaCO₃는 하천유역에 침전시켜서 동굴 외의 석회화 단구형의 집적지형(Tufa Formation)을 최종적으로 형성한다.