

流水에 의한 Karst의 類型에 관한 研究

오 종 우*

A Study on the Karst Formation by Water Flows

Jongwoo Oh

국문요약 : 카르스트는 자연수의 용식작용에 의하여 형성되는 지형이다. 용식은 카르스트 지형에 있어 가장 우세한 과정이 아니며, 또한 지배적인 과정도 아니지만, 그것은 다른 유형의 지형에서 형성되는 결과보다 용해될 암석에서 더 다양한 역할을 하기 때문이다. 용식의 가장 중요한 역할은 바위의 침투성을 증가시키면서 지하의 공간을 확대시키는 데 있다. 이는 지하수에 의해 지표면의 점진적인 용식적인 변화인 카렌, 석문, 용천, cockpit 및 mogote, sinkholes, hum 등의 카르스트 지형을 창출한다. 수문학의 대표적인 이론인 Darcy's Law가 용식지형에서는 전혀 적용되지 않는다는 검증 결과만 하더라도 카르스트가 얼마나 다양하고 복잡한 수문학적인 형성과정을 가지고 있는가를 알 수 있을 것이다. 특히 Darcy의 법칙은 비등방성과 비균질적인 투수층에는 적용되지 않는다. 왜냐하면 카르스트 지역에서는 1차삼투율(primary transmissivity)의 공극율에 따른 투과율이 적용되는 일반적인 암석에서의 결과보다 2차삼투율(secondly transmissivity인 단층선, 균열, 절리면 등에 의한 투과율이 훨씬 증대되기 때문이다. 따라서 카르스트수문학은 자연수의 용식작용에 의하여 형성되는 지형이지만 투수성, 지하수의 유속, 동공속의 소지류의 구배, 입수율과 배출율 등이 일반적인 수문학과 다른 결과를 나타내고 있다.

I. 서론

유수의 량이 증대되어 석회암석의 균열 및 단층면 등을 통과할수록, 지하의 공간은 동굴을 만들만큼 점점 확대되어 진다. 다른 지형들에서 보다 카르스트 지형에서 동굴은 더 크고 다양하다. 그러나 이것 또한 정의를 내리는 데 있어 기준일 수 없다. 왜냐하면, England의 Chalk Down과 같은 어떤 카르스트 지형은 동굴이 없다. 그런데, 꽤 다른 기원을 가진 동굴들은 어린 화산지대 같은 다른 영역에서 중요한 지형이다.

정상적인 지세에서 작은 계곡의 작은 개울은 명백히 통합된 방법으로 물을 가져가며 큰 계곡의 큰 강으로 합류된다. 이 조화스런 패턴은 구심상(求心狀)패턴과 지형을 다양하게 하는 밀

폐된 함몰과 같은 작은 발달과정에 의해 카르스트 지형에서는 파괴된다. 표면상으로, 이것은 지하에서 발견되는 조직과 배수체계가 부족하다. 또한 카르스트에 대한 정의는 만약 완전히 부재하지 않는다면 그것들이 드물 수 있기 때문에 밀폐된 함몰 혹은 침하에 달려있다. 반대로 그것들은 모두 다른 기상(起狀)유형의 특징들을 동등하게 가지고 있다.

건조지역에는 지구의 운동과 바람의 대조적 효과들에 맞선 하계(河係)망을 형성하는 충분한 물이 없다. 침식은 물론 바람은 함몰을 일으킨다. 게다가 남부 호주의 남동부에서처럼 석회질 모래가 해변에서 내륙으로 불어오고 그런 다음 석회암 자체를 변화시키는 사구의 구멍과 카르스트의 함몰구멍과의 구분은 매우 어렵다.

수문학에서 카르스트 수문지형학은 여타 수

* 남서울대 교수

문지형과 상당한 차별성이 있다. 수문학의 대표적인 이론인 Darcy's Law가 용식지형에서는 전혀 적용되지 않는다는 검증 결과만 하더라도 카르스트가 얼마나 다양하고 복잡한 수문학적인 형성과정을 가지고 있는가를 알 수 있다. 따라서 카르스트는 자연수의 용식작용에 의하여 형성되는 지형이지만 투수성, 지하수의 유속, 동공속의 소지류의 구배, 입수율과 배출율 등이 일반적인 수문형태와 다른 결과를 나타내므로 이에 대한 기존 이론을 검토하고 비교하여 용식지형에 대한 수문지형의 특질을 분류하는데 본 연구의 목적이 있다.

II. Darcy의 법칙

수문학에서 카르스트 수문지형학은 여타 수문지형과 상당한 차별성이 있다. 수문학의 대표적인 이론인 Darcy's Law가 용식지형에서는 전혀 적용되지 않는다는 검증 결과만 하더라도 카르스트가 얼마나 다양하고 복잡한 수문학적인 형성과정을 가지고 있는가를 알 수 있다. 본 연구는 Darcy의 법칙에 대한 분석을 통하여 카르스트 수문의 속성과 원리를 이해하고 어떠한 특질을 나타내고 있는가를 아래의 이론분석에 의하여 현상을 제시한다.

Darcy의 관점에서 카르스트 대수층(지하수를 품은 다공질의 침투성 지층)을 침투 매개체로써 다루는 것이 정당한 것인가를 설정하는 것은 근본적으로 중요한 일이다. Darcy의 실험에서는 침투성 매개체의 십자구획 "a"로 부터 지역 단위당 유출량이 측정의 대상이며, 반응식 Q/a 는 단위 지역에 의한 유출량을 나타낸다. 특정의 유출(여과속도 또는 Darcy의 흐름)은 단순히 "u"로 표시되기도 하는데 그것은 속도의 크기를 갖는다. 그러나 그 유출의 흐름은 십자구획의 전

체 지역으로부터 나오지는 않으며, 단지 단단한 입자와 입자들 사이의 빈틈으로부터 나온다. 이 같은 흐름은 미세한 속력을 가지며 "u"로 표시되며, 갈라진 틈의 공간은 보통 보다 상당히 크게 나타난다. 따라서 Darcian식 접근을 받아들이는 것은 암석이 비어있고 단단한 연속체로 여겨질 때이고 이 때문에 일반화된 미세한 매개변수 (such as K)가 설정될 수 있다.

카르스트는 수관(conduits)에 의해 침투되어 용해된 암석이며, 수관은 개념상 대표적인 연속체로 나타나는데 이는 수문학적 으로 중요한 미세한 매개 변수를 결정 지을 수 있다. 미리 실험의 근거를 살펴보면 Bocker(1973)는 만약 특정한 입자의 크기가 3mm이고 수압의 기울기가 0.01이상 이라면 Darcy의 법칙은 근거가 없다고 결론지었다. 일련의 광범위한 실험에서 Ewers(1972, 1982)는 Darcy의 법칙은 용해된 최초의 수관 (proto-Conduits)이 직경 1mm 이상 일 때 바로 적용되며 갈라진 틈을 통해 처음으로 확장된다는 것을 보여 주었다.

Darcy에 기초를 둔 대수층(aquite) 분석기술에서 택한 것은 anisotropic과 카르스트 대수층의 서로 다른 특징을 받아들이는 것이며, 그것을 다공질의 모암 (또는 갈라진 틈)에서 서로 연결된 수관 구조를 다루는 것이다. 이 분석 방법은 활발한 유입과 유출 작용에 대한 예상과 수문의 유량도 (spring hydrograph) 에 촛점이 맞추어진다. Darcy의 법칙을 카르스트에 적용과 관련된 또 다른 문제는 유출량 조직의 문제이다. 왜냐하면 그 법칙은 유출량이 같을 때만 유효하기 때문이다.

Freeze & Cherry(1979)는 Darcy의 법칙이 일반적인 법칙으로서 국제적으로 유효하려면 수압의 기울기에 대한 특정의 유출도면이 모든 수압 기울기에서 직선 기울기를 나타내야 한다고 지

적했다. Reynold's Number Re 는 폭류(turbulent flow)에 의해 없어지는 얇은 흐름(lamina flow)의 임계속도를 확인하는 것을 도와준다(Vennard & street). 그것은 Darcy 법칙의 상한선을 정해주는 데 유용하며 Reynold의 Number는 $Re = Pvd/\mu$ 로 표시되는데 “V”는 지름 “d”의 pipe를 통하는 유동적인 흐름의 평균 속도이다. 공극이나 갈라진 틈의 매체에서 미세한 속력 “ μ ”는 “V” 대신에 쓰이며 “d”는 공극의 직경이나 갈라진 틈의 넓이를 나타낸다.

베아(Bear, 1972)는 이 실험에서 Re 가 1에서 10을 넘지 않는다면 Darcy의 법칙은 유효하다고 보았다. 특정의 유출 ($\mu=Q/a$)이 매개체를 통해 미세한 속력을 전하기 때문에 미세한 평균속력 μ 는 흐름이 일어나는 곳을 따라 빈속의 실제 십자구획 지역을 계산하여 결정되는데 이것은 다공성 n 에 의존한다.

$$\mu = Q/na \quad (5.12)$$

만약 물이 흐르는 공극이 암석의 20%를 차지한다면 ($n=0.2$), μ 는 Darcy 흐름의 약 5배가 된다. 어떠한 바위를 통하여 긴 통로를 따라 물이 흐르기 때문에 실제적인 속도는 보다 클 것이다. 얇은 층 모양 흐름(laminar flow)의 상태 하에서 파이프를 통한 분출은 수압의 기울기가 직선으로 변경된 특별한 분출을 보여주는 수압의 기울기가 직선으로 변경된 특별한 분출을 보여주는 Poiseuille의 법칙에 의해 측정할 수 있다. 그러나 반대로 튜브의 길이와 액체의 유동성, 또는 Hagen-Poiseuille 방정식(Vennard & Street 1976)은 다음과 같다.

$$Q = \pi d^4 P g / 128 \mu \cdot dh/dl \quad (5.13)$$

여기서 dh/dl 는 파이프 단위 길이에 대한 head loss이다. 따라서 분출은 직경의 4배 힘 (fourth power)으로 비례하기 때문에 큰 모세관 튜브는 작은 것보다 훨씬 더 전도성이 있다. 직경 2mm의 튜브는 같은 수압의 기울기하에서 직경 0.2mm의 모세관 10,000개에 의해 통과되는 물을 처리할 수 있다. 속력의 증가와 굴곡, 그리고 마모상태는 결국 흐름에 영향을 주어 튜브가 거칠게 되도록 한다. 이렇게 되면 Darcy-Weisbach 방정식을 이용하여 특정한 유출량을 계산할 수 있다(Thraillkill 1968).

$$\mu^2 = (2dg/f) \cdot (dh/dl) = Q^2/a^2 \quad (5.14)$$

따라서 $Q = (2dga^2/f)^{1/2} \cdot (dh/dl)^{1/2}$ 이 된다. 여기서 f 는 마찰요소 또는 계수(係數)이다. Lauritzen의 연구(1985)는 노르웨이에서 진행 중인 침수(phreatic) 수로는 f 와 Q 의 관계에 대해 입증해 주고 있다. 외견상 마찰은 일정한 값을 얻을 때까지 유출량의 상당한 감소를 나타낸다. 마찰은 튜브의 크기, 벽의 마모상태, 붕괴의 정도 등 수관구조의 복잡성에 의해 영향을 받는다. Darcy-Weisbach의 f 값은 카르스트 조사에서 0.039에서 340의 범위가 있다고 확인되었고 얼음에서 동굴을 만들기 위해서는 0.25가 적합하다는 것이 증명되었다(Spring & Hutter 1981).

가. 복합적 등급에서의 유입

이것은 카르스트 시스템에서 가장 빈번하게 볼 수 있는 상황이다. 그러므로 분석은 clint와 grike 지형학에 적용되며 규모는 아주 작다. 그리고 그것은 이미 알려진 동굴 시스템에 적용된다. 이 상황에서 소개되는 새로운 요소는 쉽게 이해된다. 보다 많은 유입등급의 흐름들은 방출 경계선에서 closest에 의해 방해받는다. 더 큰

등급의 초기동굴(proto-caves)는 몇몇 가까운 유입이 방출에 연결될 때까지 그들의 저항을 감소시키고 수압의 경사도를 가파르게 하면서 평면의 절리를 지나서 가까스로 연결된다. 가까운 등급과 보다 더 큰 등급으로부터 중추공동(principal tubes)을 측면으로 연결하는 것은 그때 동시에 진행된다. 높거나 낮은 저항의 규칙이 위에서 논의된 하나의 등급상태에 적용된다.

동굴 시스템은 모든 카르스트 암석지역이 합성되어 있거나 몇몇 최소한의 수압기울기(시스템의 남아있는 저항을 위하여)가 있을 때까지 전면과 측면으로 연결될 것이다. 시스템이 들어갈 수 있거나 보다 큰 규모로 확장됨에 따라 그들의 저항은 매우 낮아져서 충분한 시간과 물이 주어지면 대부분의 순수한 카르스트 지역에서는 동굴에 의해 배수된다. 지질학, 지형학 그리고 수문학의 변화는 항상 그것을 사실과 다르게 만든다. 그럼에도 불구하고 많은 동굴 시스템은 체계적인 headward의 패턴과 같은 병렬 연결을 보여준다.

Hortonian Stream Channel nets의 형성에는 명백한 유사점들이 있으나 Horton의 법칙은 동굴에서 시험되었을 때 지질학적인 왜곡과 정보의 미비성으로 인해 성공적이지 못했다. 용천점(Spring Point)는 Green River에 의한 침식에 대응하여 아래와 옆으로 여러 번 이동하였다. 결과적으로 동굴 통로의 패턴은 아주 복잡하게 이루어지는데 그 이유는 지금 남아있는 것과 빠르게 변화하는 면이 조화를 이루고 있기 때문이다. 어떻게 그것은 Spring Point에 연결되어 있는 가깝거나 먼 등급의 불완전한 유형들을 구분하는 것을 가능하게 한다. 특히 뚜렷한 특징은 먼 등급의 주향(Strike)을 따라 최근에 합류한 것으로(Procter와 Ropper Caves) 맘모스 동굴 배수로를 없애는 것이며, Mommoth-Flint

Ridge-Roppel-Procter 시스템을 상세하게 분석한 것은 Palmer(1981)에 의해서이다.

III. 카르스트 수문학

1. 카르스트의 공극률 강화

카르스트의 가장 중요한 특징은 다른 암석들의 수문학적으로부터 분리해 내는 것이며, 카르스트 내의 삼투압은 시간에 따라 변화되는 것이다(Cvijic, 1918). 탄화 침전이 형성 될때 石里의 선택적 공극률이 생기며, 대개 물질들의 혼합사이의 빈 공간으로부터 25 - 80%쯤이 최초의 공극 용어로 쓰이는데, 최초의 공극이 시멘트에 의해서 속성 작용이 되는 동안 또는 촘촘하게 되는 동안 감소하게 된다. 실제로 심층 매물 상황에서 효과적인 최초의 공극 보존은 법칙(Moore 1979)보다는 예외적이다. 광물질 결정 사이에서 발생하는 내부 결정암은 총 공극이 1%까지 설명되어 진다.

어떻든 백운석화된 화학적 속성과정후에 2차 공극의 획득 결과에 따른 지각운도의 단구뒤에, 지하수 순환에 의해 관통하는 열극을 따라 카르스트 용식 작용에 의해 강화되어 진다. 이러한 기공은 선택적 석리(石里)가 아니며 지하수가 순환이 지속되는 동안 계속 확대되는 것이다. 이 확대는 최초의 공극을 무시하며 다른 상태의 암석 밀도내에서 3.5%쯤 두번째 공극으로 나누어 질 수 있다.

구분은 암석의 공극 n 과 효과적 공극 n 사이에서 만들어진다. 공극률은 암석 표본의 총부피 V 에서 총기공의 부피 V' 의 비율로 정의된다. 즉, $n = V' / V$ (5.5), 효과적 공극률은 수문학적으로 내부에서 연결된 단지 이러한 공극에 대한 언급이다. 완전히 젖어있는 동안 그것은 암석의 총 부피 V 에서 V' 까지 배수된 침수 총량의 비

율로서 표시될 수 있다. $n = V/V$ (5.6) 부투수층에서 수량의 총계는 투수층의 한층 단위로 중력하에서 자유롭게 배수된다.

Castany(1984b)는 기술적인 측정을 묘사한다. 효과적 공극률은 기공의 크기에 의해 영향을 준다. 그래서 점토는 30 - 60 % 의 공극으로 되어 있으나, 넓이의 있어서 10 mm에서 1 x 10⁶의 공극은 중력하의 자유롭게 배수 될 수 있을 때 산출하게 된다. 이것은 점토내의 물 흡수를 포함하는 분자의 마찰력 때문에 중력을 극복하기에 충분하다. 카르스트화는 석회암은 공극률이 단지 2% 이나, 반경이 1 - 10mm이거나 그이상의 기공 측정이 되며, 자유롭게 배수된다면 저장된 모든 물이 노출될 것이다.

2. 균질 및 등방성 투수층

잘 분급된 사암과 역암 투수층은 근본적으로 변함없이 완전한 크기의 삼투압과 공극률 가치를 가지고 있다. 그런 수압력 하에서는 층내의 위치와 관계가 없다. 투수층은 등질로 사려된다. 그러나 그것은 층내 위치가 다양하다면 비균질성이다. 수압력이 투수층이 측정방향과 상관없이 같다면 등방성이다. 균열이 다양한 방향이라면 그것은 비등방성이다. 카르스트 투수층은 시간이 경과함에 따라 비균질성과 비등방성으로 된다. 카르스트 투수층의 균질성 측정 및 한계는 Yuan(1985b)에 의해 논의된다.

Kiraly(1975)와 Castany(1984a)는 평균 총 공극율은 암석의 부피를 고려한 보조작용이며, 세함목의 크기는 균질성에 대해 정의를 내릴수 있다: 대배수구(1함목, 즉 지역적 범위), 중배수구(2함목, 양수시험범위), 그리고 수배수구(3함목, 즉 암석현미경 범위). Darcy의 법칙은 비등방성과 비균질적인 투수층에는 적용되지 않는다. 그것을 적용할 지역적 범위가 충분히 넓지 않다면

종종 아닐 수도 있으나, 전형적인 카르스트 비등방적 투수층이 수직으로 관통하는 암석이나 수평적 모세관처럼 수문학적 움직임으로 개념화 한다면, 층류의 가정하에 관의 방향내의 수압력에 영향을 주는 공극률 % 이나 관의 반경에 대해 보여 줄 수 있을 것이다. 2차 삼투압 효과의 강화 역시 설명되어질 수 있다. 매우 낮은 최초의 공극률을 갖는 전형적인 석회암피의 경우, 2차 열극 확대는 수압력내의 10 만배 될 수 있다는 것이다(Smith et al.1976).

IV. 카르스트 수문의 유형

1. 유입 조절(INPUT CONTROL)

카르스트 대수층(aquifer)는 저수한계에 의해 경계층이 결정되는 유입과 처리량 유출흐름, 장치와 제어를 가진 오픈 시스템으로 생각할 수 있다. 가장 간단한 경우로 조직 카르스트 암석들이 발견되는 곳은 자생함양이라고 불려지는 낙수가 카르스트 암석에 직접 떨어지는 저수와 함양의 근처이다. 그러나 일반적으로 더 복잡한 지리적 환경이 외부발생유입수(allogenic recharge)라는 카르스트 aquifer에서 물이 빠져 비 카르스트 암석의 인접이나 겹쳐진 곳에서 발생한다.

반면에 자생함양은 매우 다양한데, 카르스트 노출부를 가로질러 여러 틈으로 내려가고, allogenic 함양은 일반적으로 하강흐름의 유입 지점으로 집중되는 곳에서 볼 수 있다. 수화학(水化學)과 단위면적당 함양 부피는 이 두 함양 부피의 스타양식 일에 있어서 상당한 차이가 있는데 이는 크기나 2차 침투성 발달의 분산에 상당한 중요함을 차지하는 것이다.

수층의 산호암초는 자생시스템의 간단한 자연적인 예이다. 함양은 공간적으로 동일하고 노

출부를 가로지른 표면의 수많은 기공과 균열을 가지고 있다. 두터운 토양이 기반암을 덮고 있는 곳에서는 함양상태가 변화된다. 만약 토양이 밑에 있는 암반보다 침투성이 덜 적으면 토양은 토양의 침투력에 대하여 제한하는 함양의 조정자 역할을 한다.

카르스트 위에 깔리는 침투성 암석의 생성은 “조정기”와 같은 개념의 여과기 역할을 한다. 수직 포화된 수압의 전도성은 주요한 제어 역할을 한다. 흡수성의 토양으로부터 여과된 입력은 내부발생(*autogenic*)으로 간주되지만 흡수성의 비카르스트 *cap rock*은 생성에 있어서 산만한 *allogenic*으로 간주되어 진다.

비교적 집중된 함양은 용액 돌리네가 잘 발달된 *autogenic* 시스템에서 잘 발생한다. 이는 용액 돌리네가 밑에있는 공간의 불균일 상태에서 수직의 수압전도 상태에 영향을 주고 이는 더욱 견고해진 여과기 경로나 지역의 발달을 초래한다.

둘러 싸여진 구렁(저지: 低地)에 의해 빗물이 좁은 통로로 흐르는 것은 자축 과정에 의한 땅 밑의 여과 과정이 얼마나 중요한가를 보여 주는 것이다. 그러나 유입함양 지점의 부피는 (반층)으로부터 파생된 것과 비교하여 작는데, 이는 각각의 돌리네 표면적이 비교적 작기 때문이다. *allogenic*의 근원지로부터 물의 집중된 유입은 함락공(*swallow holes*)에 있는 지면을 가라앉게 하는데 여기에는 위층에서 구멍이 생겨 수직적으로 유입되는 것과 인접한 곳의 물이 스며들지 않는 바위의 측면에서 유입되는 거의 두 가지 유형이 있다.

물이 스며들지 않은 공극이 있는 *cap rock*은 용액 돌리네와 같은 방법으로 카르스트 안으로 물을 흐르게 할 것이다. 단 함양 지점은 엄밀히 정해져 있고 유입되는 끝은 더 크다. 이러한 유

입은 아래에 큰 기둥을 형성하는데 좋게 한다. 측면 유입은 일반적으로 부피에 있어서 더 크고 이는 종종 큰 저수지에서 파생되고 있으며 주요 강 동굴과도 연관이 있다.

(1)움푹 패인 위에 놓인 *cap rock*

(2)층위적으로 기울어지고 낮은 불침투성 조직의 가장자리를 *up-dip*함으로써

(3)단층경계를 가로지른 불침투성 바위로부터 기인한다.

유입 수송능력은 함양 부피의 최후 조정자이다. 그러므로 표면 흐름으로부터 유입이 너무 많으면 못(늪)이 발생하고 표면수위가 넘치거나 *blind valleys*와 *poljes*에서 표면홍수가 일어난다. 유입 제어의 더 드문 형태는 홍수에 의하여 발생하는 상단 파동에 의하여 설명되어진다. 이는 유입수송이 가능하게 하기 위하여 그들의 작용을 순간적으로 뒤집어 도랑으로 방출 하는 결과를 야기 시킨다.

유출 근원은 물을 뱉어내는 곳에서나 카르스트를 경유하여 흐르는 대부분의 하천 수위 아래에서 발생한다. 만약 홍수 파동의 대부분이 하천으로 흐르는 웅덩이의 상류 부근에서 폭우에 의해 생성된다면, 특히 지류의 카르스트 저수지가 파동에 영향을 받지 않는다면 그 근원은 더 깊게 될 것이며, 카르스트 안의 수압의 기울기는 역전될 것이다.

카르스트의 유입은 저수지에서 저장하는 형태와 같이 그때 발생할 것이다. 배후범람(*back flooding*)에 의해 관입된 물은 후에 주로 강 경로와 유입의 기울기가 정상으로 바뀔 때 저장지에서 빠져나갈 것이다. 함몰지점과 같이 순간적인 작용을 하는 이러한 부류의 역전 균열은 *estavelles*라 알려져 있다. 이러한 예를 켄터기의 *Green River*를 따라 많은 곳에서 볼수 있다. 어떤 *stream-sinks*는 지하수면이 오르는 것과 같이

순간적인 근원지가 되며 이것을 estavalles라 한다.

2. 유출 조절(OUTPUT CONTROL)

세계적으로 가장 규모가 큰 용천의 대부분은 카르스트 근원지이다. 화성암으로 부터의 용천인 것들만이 카르스트의 용천들과 필적할 수 있다. 용천들은 지하 하천 시스템의 종료를 의미하고, 표면하천 과정들이 우세해지는 지점을 표시한다. 용천의 수직적 위치는 수분을 함유하는 수분 분출의 지하수면 상승을 제어한다.

반면에 수압 전도도와 처리 배출은 분출하는 지하수면의 기울기와 다른 분출 상태 하에서 수압 전도도와 처리 배출의 변화를 제어한다. 용천과 분출하는 지하수면 사이의 높이 차이는 시스템에 있어서 상단으로 확정하고 그림으로써 심오한 순환을 유도하기 위하여 이용 가능한 에너지를 확정한다. 따라서 용천은 카르스트 지하수 체계의 작용을 제어하는데 상당히 중요한 역할을 한다. 게다가 그 통제는 현저히 변화시킬 수 있는데 이는 용천이 빙하-공용 해수면 파동, 계곡경사, 빙하일소(마소)에 의한 계곡의 깊어짐과 같은 지형적 사태에 가장 영향을 받기 쉽기 때문이다. 용천이 배출되어 대수층에 작용하는 효과는 주로 용천의 지형학과 구조상의 정황에 영향을 미친다. 용천은 여러 방법에 의해서 분류되어 진다.

3. 자유배수 용천(FREE DRAINING SPRINGS)

이러한 경우에 카르스트 암석은 위쪽으로 기울고 계곡 근처위에 위치한다. 그리고 이 카르스트 암석은 중력하에서 물이 잘 빠진다. 카르스트 체계는 완전히 혹은 우세하게 비침수(vadose)하고, 때때로 얇은 카르스트라고 칭하기

도 한다. 복잡화는 밑에 잇는 불침투성의 바위가 포개질 때나 불규칙적인 표면을 하고 있을 때 발생하는데, 이는 고립된 침수대(phreatic)의 발달로써 지하 샘이 생길 수 있기 때문이다.

4. DAMMED SPRINGS(막힌 용천)

이는 카르스트 용천의 가장 전형적인 형태이다. 막힌 용천은 지하 배수 경로에 있어서 많은 보빙의 위치 발생한다. 저수는 단층이나 정합의 접촉, 계곡의 확정에 기인한 빙하하천의 퇴적과 같은 다른 암석에 의해서 만들어지는 것 같다. 바다의 짙은 염수는 보빙을 담수로 유출하기 위하여 빙벽을 방벽을 형성한다. 각각의 경우에 순간적 유출 용천은 높은 지하수와 반응하여 형성된다.

용천 상류 동굴의 형태는 지하수 근처에서 발달된 편평한 수로로부터 용천이 배출되어 흘러나왔는지 아니면 침수대 안의 상당히 깊은 곳에서부터 발달되었는지에 따라 결정된다. 그러므로 막힌 카르스트 유출 장소는 전형적이거나 혹은 여러 관련된 고수위의 용천을 가진 주요 저수의 용천으로 구성되어 있다. 스마트는 이러한 유출을 저류 시스템이라고 표현했다.

5. 한정된 용천(CONFINED SPRINGS)

artesian 상태는 카르스트 암석들 위에 불침투성의 층에 의해 한정된 곳에 널리 퍼져 있다. 단층면은 때때로 물의 출구통로를 제공한다. 그 밖에 지역에서 물은 침식에 의해 갈라진 cap rock에서 흘러나온다. (입수는 일반적으로 정력학적 압력 하에 있기 때문에, 윗면의 반구형의 폭류는 이러한 부류에서 용천층은 특히 특별하다.

비록 막힌 용천이 특히 두꺼운 지층에 의해서 반정도 밖에 정의되어 있지만, 이도 특히 홍수

동안에는 “비등”이다. 남 프랑스의 La Fontaine de Vaucluse에 의한 Artesian 용천들은 때때로 다음 예에 따라 Vauclusian이라 하는데, artesiann 용천의 배출 능력은 수증상과 Artesian 용천들은 홍수 경감 용천과 관련되어 있다. 다른 특징들은 Bogli가 기술한 카르스트 용천을 분류하기 위하여 사용되어 진다.

(A) 유출에 따라

- 영구적인 용천 - 간헐적인 용천 - 주기적인 용천 - 우연적인 용천

(B) 가정된 물의 기원에 따라

- 발생 (기원의 증거 없음)
- 재기 (이름난 저습지 강의 재출현)
- 가동적 침출수(exsurgence)

때때로 조수 간만의 근원지로 언급된 간헐적, 주기적 용천들은 특히, 자연적 현상들과 관련이 많다. 간헐적, 주기적 용천들은 때때로 그들의 유출을 조절하는 흡수 저장 시스템을 사용하여 용천을 막는다. 이러한 간헐적, 주기적 용천은 Trombe, Mangin, Gavric에 의해 연구되어 졌다.

V. 카르스트 수문원리에 의한

카르스트의 발달과정

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

-1단계 기권 (Atmosphere): 빗방울 (H2O) 이 대기중에서 CO2의 혼합으로 산성비 (H2CO2)가 되어 석회암 (CaCO3)에 떨어져서 최초의 용식 작용이 시작된다.

-2단계 토양권 (Pedosphere): 산성비와 석회암

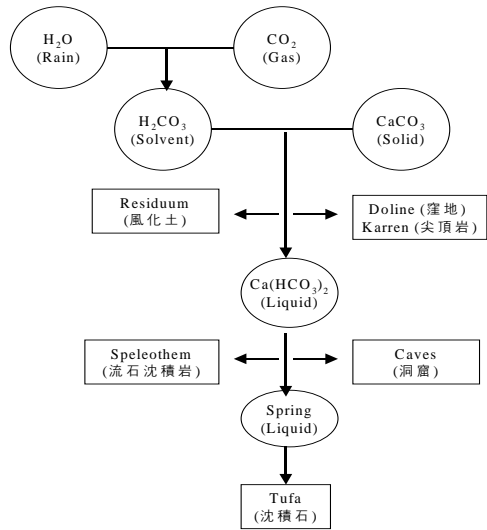


그림 2. Karst의 발달과정 (Genetic Karst Process) (오종우, 1994)

성분이 합쳐 형성된 가용성 화합물 (Ca(HCO3)2)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 적석풍화토 (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(HCO3)2는 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 하천구역에 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.

VI. 결론

용식의 가장 중요한 역할은 바위의 침투성을 증가시키면서 지하의 공간을 확대시키는 데 있다. 이는 지하수에 의해 지표면의 점진적인 용식적인 변화인 카렌, 석문, 용천, cockpit 및 mogote, sinkholes, hum 등의 카르스트 지형을 창출한다. 수문학의 대표적인 이론인 Darcy's Law가 용식지형에서는 전혀 적용되지 않는다는 검증 결과만 하더라도 카르스트가 얼마나 다양하고 복잡한 수문학적인 형성과정을 가지고 있는가를 알 수 있을 것이다.

특히 Darcy의 법칙은 비등방성과 비균질적인 투수층에는 적용되지 않는다. 왜냐하면 카르스트 지역에서는 1차삼투율(primary transmissivity)의 공극율에 따른 투과율이 적용되는 일반적인 암석에서의 결과보다 2차삼투율(secondly transmissivity)인 단층선, 균열, 절리면 등에 의한 투과율이 훨씬 증대되기 때문이다. 따라서 카르스트수문학은 자연수의 용식작용에 의하여 형성되는 지형이지만 투수성, 지하수의 유속, 동공속의 소지류의 구배, 입수율과 배출율 등이 일반적인 수문학과 다른 결과를 나타내고 있다.

카르스트는 자연수의 용식작용에 의하여 형성되는 지형이므로 용식은 카르스트 지형에 있어 가장 우세한 과정이 아니며, 또한 지배적인 과정도 아니지만, 그것은 다른 유형의 지형에서 형성되는 결과보다 용해질 암석에서 다양한 지형을 제공한다.

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, 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). 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 환경보전 및 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 환경보전 및 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