

우리나라 동굴의 성인에 관한 연구

홍시환*

A Study on the Origin of Korean Cave

Shi Hwan Hong*

I. 서론

동굴에는 자연동굴과 인공동굴이 있다. 그리고 이 자연동굴은 그 성인에 따라 석회동굴과 용암동굴과 그리고 절리굴과 파식굴 등으로 구분되고 있다.

이들의 동굴은 각각 그 자체의 성인에 의하여 형성되어 왔으나, 그러나 이 동굴을 이루고 있는 구조암석이나 그 석질 및 성분여하에 따라 그 동굴의 형성과정도 달리 나타나고 있는 것이다.

필자는 여기에 우리나라 자연동굴들을 크게 분류하여 석회동굴, 용암굴, 해식굴별로 그 성인을 고찰하기로 한다.

II. 우리나라 석회동굴의 성인

1. 석회동굴의 일반적 성인

20세기의 초기까지 석회동굴은 지하수면보다도 높은 위치, 즉 풍화대 중에서 지표로부터 투수된 지하수의 작용에 의하여 이루어지며, 용해작용보다도 물의 기계적인 침식작용이 보다 주요한 역할을 하고 있다고 생각하였었다.

그러나, 지형윤회설의 제창자인 미국의 W. M. Davis는 “석회동굴의 성인”(1930)에서 이윤회설이라는 석회동굴 성인론을 제창했다. 즉 동굴의 대부분은 지하수면보다도 아래쪽에서 지

하수에 의한 용해작용으로 생긴다고 하였다. 이것이 그의 일차유회이다. 다음에 지하수면이 어떤 다른 이유로서 저하하면 지금까지 동굴속에 있던 지하수는 아래쪽으로 빠지고 동굴속에는 대신 공기가 채워지며, 동굴 내 수분은 지표에서 스며든 빗물만으로 된다. 이것이 그의 이차유회로서 이 시기에 석회분의 침전이 이루어진다고 보았다.¹⁾ 사실, Davis가 이 학설을 발표하기 전인 1903년에 유럽인인 Grund가 같은 의견을 제시하였다고 하나 그 논문이 사람들의 눈에 띄지 못하여 애석하게도 Davis에게 명성을 빼앗기게 된 것이다.

한편 Bretz(1953)는 미국의 Ozarks의 석회동굴을 연구하여 다음과 같이 요약하고 있다.

- ① 동굴의 대부분은 지하수면 이하에서 생긴다.
- ② 그 형성되는 시기는 Ozark 돔이 준평원화되는 것보다 이전인 장년기 시대이다.
- ③ 지형이 노년기로 되면 동굴은 형성되지 못한다.
- ④ 다음에는 그 지역이 융기하여 계곡이 생기며 동굴은 지하수면 보다도 위쪽으로 나타난다.
- ⑤ 동굴은 우선 지하수면 이하부터 생기기 시작하나, 이것이 점차 넓어지는 것은 대개 지하수면 보다도 위쪽 부분이다.

동굴연구가의 일파에서는 동굴 중에서도 지표의 하천과 같은 작용을 하는 물의 흐름이 있

* 전 동굴학회장, 전 건국대 지리과 교수 겸 이과대학장

다고 주장하는 사람들도 있다. Davis와 그 일파에서는 일반적으로 동굴 내에서 물의 흐름에 의한 기계적인 침식작용을 부정하고 있으나, 동굴 내에 진흙이나 모래, 자갈 등이 있으며 소규모의 사행을 이루는 경우도 있어 이것을 전혀 인정하지 않는 것도 아니다.

동굴형성에 용해가 주역인지 기계적 침식이 주역인지는 각기 동굴마다 다를 것이다. 후자의 경우는 지표의 강물이 빨아들이는 구멍으로 많은 양의 물이 땅속으로 흘러들어 갔을 때 생길 것이다. 우리나라에서는 아직 이의 좋은 예가 없으나 미국의 문헌에 의하면 그 실례가 있다.

그것은 미국 Indiana주의 Lost River로서 그 이름이 말해 주는 것과 같이 이 강의 중부에서 8마일 사이나 강물이 빨아들이는 구멍으로 땅속으로 들어가 사라졌다가 하류에서 다시 솟아나 강을 이루고 있는 것이다. 이때 8마일에 걸친 땅속의 강은 거의 직선상으로 흐르고 있는데, 그 위의 지표에서는 22마일에 걸쳐 평상시에는 강물이 없는 사행을 한 하도가 있다.

지질상의 입장에서 보아 가장 흥미있는 것은 각각의 석회동굴이 생기게 된 시대이다. Lost River는 후기 제 3기 이후 경신세 초기부터 시작하여 오늘날까지도 아직 넓혀져 가고 있는 중이라는 사실이다. 이것은 Lost River가 용기된 침식평탄면에 그 자국이 새겨져 있는데, 이 침식면은 후기제3기에 형성된 것이라는 것을 알고 있기 때문이다.

Sweeting(1950)이 영국의 Ingeborough 지방에서 실시한 조사연구에 의하면 석회동굴은 높이 1,200~1,300 피트, 900~1,000피트, 700~900 피트의 셋으로 구분되며, 이 고도에 집중되어 있다고 한다. 이들 고도는 각기의 침식기준면으로서 지하수면의 위치에도 해당되며 또한 지표에는 이들 높이에 상당하는 평탄면이 분포하고

있다는 것을 뜻한다.

이들 동굴은 Wisconsin기의 빙하퇴적물이 있는 것으로 보아 동굴형성은 Wisconsin기 이후의 것이며, 그 중에서 가장 높은 1,300 피트 급의 것은 아마 선신세 내지 Wisconsin기에 생겼을 것이라고 말하고 있다.

Appalachia 산맥에서는 원래의 지하수면을 나타내는 석회동굴의 밑바닥 높이와 하안단구의 높이가 서로 대비할 수 있다고 Davis는 말한다.

이와 같이 지하수면이 저하하면, 이전의 지하수면 높이에 동굴을 남기고, 또한 새로운 지하수면에서는 새로운 동굴이 만들어진다는 것은 이상으로서 명확해졌다.

그렇다면 지하수면의 저하는 어떻게 하여 일어나는 것일까? 해수면의 저하인가, 지반의 융기인가? 어떠한 침식의 기준면이 저하되면 하천의 침식력이 왕성해져서 골짜기에 깊게 새겨지며 이것과 함께 지하수면도 저하하게 된다.

2. 우리나라 석회동굴의 성인

우리 나라에서 보는 대부분의 석회동굴은 주지하는 바와 같이 북한지역인 평안남도, 황해도, 강원도북부, 그리고 남한 지역인 강원도 남부와 경상북도 북부, 그리고 충청북도 동부지역에만 분포하고 있다.

이들의 동굴은 크기도 그러하거나와 그 길이에 있어서도 세계적인 면에서 볼 때 작다고는 할 수 없으며, 특히 북한의 동룡굴이나 남한 삼척의 초당굴, 울진의 성류굴, 영월의 고씨굴 등은 규모면에서 볼 때에 손색이 없다고 본다.

뿐만 아니라 그 규모가 작은 수많은 동굴들 가운데에는 그 특성면에서 가치있는 동굴도 적지 않은 것이다.

대체로 이들 동굴들의 형성된 원인을 볼 것 같으면, 어느 동굴이건 그 지질시대가 달리 나

타나 있다고 하더라도, 그 성인과정과 내용은 대부분 유사한 것이다.

물론 동굴을 피복하고 있는 토층의 성인과 그 지역의 투수량, 석회암의 질들이 크게 작용한다고 하겠으며, 특히 그 지역의 지반운동에도 크게 관계되고 있는 것이다.

더욱이 동굴의 길이와 크기는 이 지질구조와 직접관계가 있으며 대체로 우리나라 동굴에는 Garoll 즉, 공동이라고 하는 공동이 발달한다.

유명한 것으로는 강원도 정선에 있는 화암굴의 광장이 직경 100m가 넘고, 높이는 30m 이상이며 초당굴의 공동도 매우 넓은 것이다.

이들 공동의 형성에는 용식작용도 크게 기여하고 있으나 자체중량으로 인한 낙반에 의하여 보다 넓은 공동이 형성된 것이다.

또한 우리나라 동굴들 중에는 직장 길이 1km가 넘는 영월의 고씨동굴도 있다.

그러고 보면 충분한 시간만 부여한다면 지하를 뚫는다는 점에 있어서, 자연의 힘은 어떠한 것이라도 해낼 수 있다는 것을 알 수가 있다.

인간은 tunnel을 뚫는다가 갱도를 파 나갈 경우, 고성능폭약의 힘을 빌리고, 고막을 찢는 듯한 기계의 소음 속에서 가능한 한 빠른 속도로 작업을 진행시킨다. 그러나 자연은 전혀 정숙한 가운데, 천천히 움직이는 약산성의 물 이외에는 별다른 도구도 사용하지 않고 중유굴을 뚫어 버리고 만다. 그런데 자연은 이 세상의 모든 시간을 가지고 있다고도 할 수 있다. 아마 큰 동굴은 거의 적어도 백만년의 세월을 경과했을 것이다. 자연은 인간과는 달리, 그 방법이 완만한 탓으로, 그와 같이 오랜 시간이 필요했을 것은 당연하다.

우리 나라의 석회암이나 조립의 결정질 석회암인 대리석은 방해석(CaCO)으로 되어 있다. 오늘날 동굴을 배태하고 있는 석회암과 대리석은

해수로부터 탄산칼슘을 끌어내는 해서의 동식물에 의하여 몇 백만년 이전에 바다 속에서 형성된 것이다. 이러한 유기체의 골격 조각으로 되어있는 모래는, 미생물에 의하여 만들어진 미립자와 함께 압착되어 단단한 암석으로 된다.

우리 나라의 동굴은 그 대부분이 Cambro-Ordovician System에 해당되는 조선계의 대석회암통에 속한다고 하겠으나 다른 시대의 여러 석회암층 속에서도 형성되고 있다. 우리 나라 지질학자들은 오랫동안 다른 퇴적암과 마찬가지로 화석에 의하여 석회암층의 상대연대를 결정해 왔다. 지금은 암석의 절대연대를 수천년~수만년의 범위에서 계산할 수도 있게 되었다. 즉, uranium의 방사성 붕괴에 의하여 축적되어 온 연의 양에서 uranium광을 지닌 화석층의 연대를 산정하고 있는 것이다. 그리하여 uranium광은 지니고 있지 않지만 같은 화석이 포함되어 있는 암석은 동일연령이라고 추론하고 있다. 이 방법에 의하여, 예컨대 동룡굴, 고씨동굴을 형성하고 있는 석회암층은 약 4억 내지 5억년전, 황해도 신막의 지영굴은 Pre Cambrian의 원생대 상원계에 속하는 석탄암층으로 약 6억 내지 7억년전으로 추산하고 있다. 우리 나라 동굴은 물론 모든 동굴의 형성연령은 그것을 배태하고 있는 암석의 연대와는 거의 관계가 없다. 대부분의 동굴은 그것을 배태한 암석보다는 상당히 젊은 것이다. 사실, 수억년전에 퇴적된 암석중에 배태하고 있는 우리 나라의 주된 중유굴은 십만년보다도 훨씬 젊은 것들이다.2)

동굴이 생기는 과정에서 소멸되어 가는 석회암은 물 속에서 간단히 녹질 않는다. 실제 석회암은 순수 속에 있어서는 사암의 주요광물인 석영보다 거의 약간 녹기 쉬울 뿐이고, 또 화강암이든가 현무암처럼 용해굴을 만들지 않는 암석에 포함되는 많은 광물보다도 녹기 힘들다. 다

지형 동굴이 지각변동의 결과로 생긴 것처럼 용해작용의 산물인 것이다.

즉, 중유굴은 산이 방해석을 용해시킴으로써 형성되는 것이다. 지하수와 같이 매우 약한 산일지라도, 충분한 시간만 있다면, 동굴을 만들 수가 있는 것이다. 우리들이 연구실에서 약한 산을 넣은 글라스컵에 석회암이나 대리석 조각을 떨어뜨려, 산과 방해석과의 사이의 반응을 보면 다음과 같다. 즉, 그 조각은 세차게 흔들리며, 움직이고, 발포한다. 그리고 강한 산이라면, 이 방해석은 드디어는 소멸되고 만다.

석회암을 용해시키기 위하여 주로 작용하는 것은 탄산(HCO)이다. 그것은 자연계의 식물이 부식하거나, 동물이 호흡하거나 할 때에 생기는 이산화탄소가 물과 결합하여 생긴 것이다. 탄산은 최대 농축시킨 것이라도 약산이다. 외기는 0.03%의 이산화탄소를 포함하고 있는데, 이것에서 만들어지는 탄산은 동굴형성에 효력을 나타내기에는 희박하다. 중유암을 보다 더 용식하기 위하여 필요한 이산화탄소의 대부분은 토양에서 얻어지는 것인데, 거기서는 부식토의 분해가 다량의 이산화탄소를 만들어 내고 있는 것이다. 이산화탄소와 물과는 다음의 이중반응에 의하여 석회암을 녹인다. 이산화탄소는 물과 결합하여 탄산을 만들고, 다음 탄산은 방해석에 작용하여, 그것을 용해성이온으로 분리시킨다. 석회암과 이산화탄소 10%를 포함한 공기에 접하게 하는 물 1ft는 반응이 끝날 때까지에 약 4분의 1 온스의 석회암을 용해시킨다.

Ⅲ. 우리 나라 용암동굴의 성인

우리 나라의 용암동굴은 주로 화산지역인 제주도 분포한다.

이 화산지역에서는, 화산이 분출할 때에 유동성있는 현무암 용암에 의하여 이른바, lava tunnel이 형성되는 것이다. 즉, 지하에 깊이 잠겨 있던 magma(암장)가 그 분출의 위력에 부수되어 화구에서 지표로 밀려나오는 용융된 것을 용암 또는 lava라고 한다.

이 용암이 굳을 때에는 화구에서 넘쳐 흘러 산지사면을 따라 정상에서 산 밑으로 흘러 내리기 전에 냉각되어 이른바 용암류지대를 이루게 된다. 이와 반대로 굳지 않고 매우 부드러운 용암이 화구에서 산 밑으로 흘러 내릴 때에는 이 용암은 멀리 산 밑까지 흘러 내려가 이른바 aspite식 화산을 형성하게 되는 것이다. 우리나라 제주도의 한라산은 세계에서 모식적인 aspite식 화산으로 알려져 있는 좋은 보기이다.

이와 같이 용암이 지표면에 흘러 내릴 때, 그 용암 속에 용암구 즉, 도랑을 만들게 되는데 이것이 이른 바 lava tunnel이라고 부르게 된다.

대체로 magma의 지표분출 때의 온도는 900~1,200°C의 고온상태이나 이 표면은 외기에 접하자 점차 냉각되고 말지만, 내부에서는 외부와 같이 냉각하지 않고 계속 고열을 유지한 채로 계속 산밑으로 산사면을 따라 흘러 내려가는 관계로 이 용암의 지층내부는 텅 비어버린 용암구가 형성되게 된다. 따라서 마치 사람의 장자 내부와 같은 이른바 lava tunnel을 이루게 된다.

이 화산활동은 대체로 유동성이 많은 용암일수록 화구에서 분출된 산정부근에 퇴적되지 않고 산록으로 흘러 내려가게 되는데, 제주도의 경우는 서북과 동북 사면지역의 연안지역에 까지 흘러내린 용암류에 의하여 여기에 lava tunnel이 형성된 것이다.

즉, 한라산정의 급경사지에서는 지각중에서 분출구를 통하여 화구로 배출된 magma가 급경사면을 흘러 내렸기 때문에 이 산정부에는 하등

의 용암퇴적을 남기지 않고 있는데, 이 용암류가 연안저지까지 흘러내려 임해지역에 퇴적시킨 관계로 이 연안, 즉 서북산록지인 협재, 금릉, 한림지역과 동북산록지인 김녕지역에 있어서는 두터운 용암지대로 되어, 이곳 지층저면에 오늘날의 수많은 lava tunnel의 발달을 보게 되었다.

이들 용암굴 중에서 오늘날 널리 알려져 있는 것으로는 1974년에 크게 보도되었던 애월면의 빌레못 동굴을 비롯하여 김녕의 만장굴, 그 밖에 와홀굴, 협재굴, 김녕사굴, 구린굴, 소천굴, 미천굴 등 수많은 용암동굴들이 다 같은 성인과정을 거쳐 형성되었다.

이들의 제주도 용암굴들은 그 천정의 높이가 통상 3~5m에 달하고 있으며 그 폭도 6~10m의 대규모적인 넓이를 이룰 뿐만 아니라 길이도 실로 수 10m에서 수 km에 달하고 있다. 오늘날 세계적으로 인정을 받고 있는 만장굴은 그 길이가 6.8km로 세계제일의 용암동굴로 기록되고 있는데, 그 내부형성이 전반적으로 단조로우나 중간에는 몇 개의 함몰구가 있다. 이것은 흔히 용암굴에서 볼 수 있는 특징의 하나인 것이다.

물론 종합적으로 lava tunnel을 다시 생성요인으로 분류한다면 gas tunnel과 lava tube, lava tunnel등의 셋으로 구분된다.

즉, 입구가 천연적인 그대로이고 함몰된 것이 아닌, 끝이 막힌 동굴인 경우를 gas tunnel이라고 하는데, 용암중에 함유되고 있는 gas가 폭발하면서 뚫고 나간 구멍이다.

그리고 lava tunnel 즉, 용암굴은 입구와 끝, 이 땅 표면에 나타나 있는 것을 말하는데, 용암이 분출된 이후에 그 속의 유동성 용암이 지표에 빠져나가 버리고 공동을 이루고 있다가 지각변동에 의하여 함몰되어 입구가 생기는 경우이다.

그리고 용암관 즉, lava tube는 입구가 함몰되거나 또는 천연 그대로 있거나에 관계없이 용암

의 뚫고 나간 통로가 좁고 길다란 것을 말한다.

제주도의 용암굴들은 그 대부분이 lava tunnel의 경우이고 산지북사면의 몇 개만이 lava tunnel 뿐인데 gas tunnel과 흡사한 것이 군산정상에서 볼 수 있었다고 원종관 교수는 발표하고 있다.³⁾

IV. 우리 나라 해식동굴의 성인

우리 나라의 제주도 남안과 동해안 지역에는 이른바 해식동굴이 많다.

해식동굴이란 바다에서 일어나는 파도의 침식에 의해서 만들어지는 동굴이다. 파도가 해식굴을 만들 때 절벽의 일부에 단층이나 균열면 등의 약한 부분이 있으면, 물은 심하게 그 부분을 삭마한다. 일단 삭마되면 파도는 그 곳에 집중적으로 침식을 심하게 가하여 깊은 동굴을 만들게 되는 것이다.⁴⁾ 우리나라 여수의 오동도굴, 제주도의 산방굴, 정방굴 등은 대표적이다.

바다의 침식작용은 주로 파도에 의해서 일어나는 물리적인 것도 있으나, 화학적인 용식작용이나 그 밖에 침식작용도 들 수 있다.

해식굴의 기부에 형성된 해식동굴은 파도와 이에 자갈이나 모래가 함께 섞여서 깎아 내리는 것과, 해수가 넓은 해면에서 좁은 균열로 밀려들어 갈 때의 압력, 그리고 해수가 빠질 때, 암석을 깎는 영력으로 생기는 것이다.

이들의 작용은 태풍, 계절풍, 무역풍 이든가 지방풍랑에 의해서 더욱 증대된다.

해식동굴의 형성은 암석의 종류에는 관계없이 이루어지는데, 그 가운데 많은 것은 단층, 절리, 지층면, 편리면 또는 이들이 혼성된 암석의 약한 부분에서 이루어지고 있다.

해식동굴이 형성되는 수직적인 범위는 일반적으로 거센 파도가 도달할 수 있는 상한지점에

서 해면 밑 수m의 하한지점까지로 생각되는데, 절리가 잘 발달된 암석 등에서는 붕괴 등에 의한 침식으로 상층침식까지도 일어나게 되므로 간단하게 이것을 정할 수는 없다.

해면 밑에 있어서 침식작용의 한계로는 강원도 동해안에서 1~2m의 수치를 나타내고 있다.

우리 나라 해식동굴의 형태에 대한 특징은 동굴의 폭에 비해 동굴의 천정이 높다는 것을 들 수 있다. 해안선에 대해서 직각방향으로 형성되므로 거의 평행으로 형성되는 것 등 여러 가지가 있으며, 파도의 전파작용과 해안지형 및 암석 등의 조건에 관계된다고 생각된다.

우리나라 해식동굴의 또다른 특징으로서는 석회동굴로 인정되는 것 같은 2차생성물의 발달을 거의 볼 수 없다는 점이다. 그러나 여기에는 예외도 있다고는 하나 극히 드문 현상이다.

한편, 우리나라 동해안과 같이 해안이 융기하면 해식동굴의 물이 빠지고 이수해식 동굴로 되는 경우가 있다. 그 예로서는 북 Vietnam, Haiong만의 경우, 평균 해수면보다 25m 위에 위치하는 Lehman동굴이 있는데, 우리 나라 여수의 오동도의 해식동굴은 해발 4m 위에 있다.

그리고 해안이 침강하여 해식동굴의 일부가 침수되면 해식동굴의 밑바닥 부분은 해면하로 가라앉아 해식작용의 하한지점보다 낮은 깊이를 한 해식동굴로 된다. Italy Capri섬의 Azure 동굴은 그 표지적인 실례로 알려져 있다. 우리나라의 경우에는 전남의 여러 섬들에 있는 소규모적 동굴에서 볼 수 있는데 입구의 수심이 2~3m로 침수해식동굴이라고 할 수 있겠다. 그리고 제주도 남해안 곳곳에 산재하고 있는 해식동굴도 이와 비슷한 경우이다.

이렇게 보면, 해식동굴의 위치는 지각운동 즉, 육지의 융기나 침강이라는 특별한 지형적인 정

거가 있는 경우를 제외하고는 상대적으로 해수면의 수위와 일치한다고 할 수 있다. 또한 해식동굴이 완전 침수하면 해중동굴이 된다. 해중동굴에는 다른 성인으로 이루어진 동굴도 포함되는데 해식동굴의 경우에는 석회동굴과는 달리 2차 생성물이 적고 또 해식태나 해저파식으로 된 구멍의 존재 등으로 식별이 가능한 것이다.

해중동굴로는 Yugoslavia의 Adriatic해의 것이 유명하다. 이것은 점진세에서 경신세 이전의 Karst지형이 빙하시대의 종말과 함께 해수면이 상승하여 그 해저에 가라앉은 것으로서 바닷속에서는 해수담수와 염수용천을 볼 수 있다.

한편, 석회암분포지역의 해안에서는, 염수의 용출이 인정되는 경우도 있는데 Yugoslavia나 미국의 Florida반도 등지에서 볼 수 있는 것이다. 그 구조는 담수의 지하수로가 바다속으로 입을 벌리고 있으며, 그 중간에서 양자의 혼합수가 육상에의 용출로로 연속되어 해수와 담수의 비중에서 오는 차이와 각기 유입로의 용출로의 높이의 차이에서 생겨난다고 생각되고 있다. 이런 것은 해중동굴과 지하동굴의 연속으로 인한 재미있는 현상이라 하겠다.

해식동굴이 맞닿리어 양쪽에 입구를 가진 것을 해식통 동굴 또는 해식 tunnel이라고 부르며 그 길이가 짧은 것을 해식동굴문이라고 부른다.

註

- 1) G. W. Moore (1965) "Speleology : The study of caves" p. 18~19
- 2) 원종관(1975) "동굴연구교상의 지질학적 문제점", 한국동굴학회지, No.1 -p.26
- 3) 원종관(1975) "동굴연구교상의 지질학적 문제점", 한국동굴학회지, No.1 -p.24
- 4) 홍시환(1975) "우리나라 동굴의 유형과 특색", 한국동굴학회지, No.1 ~p.6