

용해성 암석의 용식 진전에 대한 암석-광물학적 특성 연구 Petro-mineralogical and Solubility Characterization in Soluble Rocks

정의진¹⁾, Uijin Jeong, 윤운상²⁾, Un-Sang Yoon, 여상진¹⁾, Sang-Jin Yeo, 김정환³⁾, Jeong-Hwan Kim, 이근병⁴⁾, K-B Lee, 노영욱⁴⁾, Young-Wook No

¹⁾ 서울대학교 지구환경과학부 박사과정, Graduate Student, SEES, Seoul National University

²⁾ 주식회사 넥스지오 대표이사, CEO of NexGeo Inc.

³⁾ 서울대학교 지구환경과학부 교수, Professor, SEES, Seoul National University

⁴⁾ (주) 유신코어퍼레이션 지반공학부 이사, Director, Yooshin Eng. Corporation

⁴⁾ (주) 유신코어퍼레이션 지반공학부 과장, Manager, Yooshin Eng. Corporation

SYNOPSIS : Chemical weathering processes related with mineralogical characters and ground water condition are very essential engineering problems in soluble rock masses. Detailed geological mapping were performed and 8 samples were collected from the 2 formations including various rock faces to deduce the possibility of the limestone cavity formation and their mechanism. Petrological descriptions and various petro-mineralogical experiments such as XRD analysis, clay mineral analysis, absorptivity test, impurity analysis were conducted to evaluate the cavity making processes. Laboratory solubility test for rock specimen were also carried out under the strong acid (pH=1) condition. From the experimental data and geological mapping data, it is found that the formation of limestone cavities in limestones are strongly related with geological structures such as beddings, cleavages and the contents of impurities rather than CaCO₃ contents. In case of dolomites, rock textures, grain size, amounts and types of clay minerals as well as geological structures are major controlling factors of cavity forming processes

Key words : soluble rocks, limestone cavity, weathering, solubility test, geological structures

1. 서 론

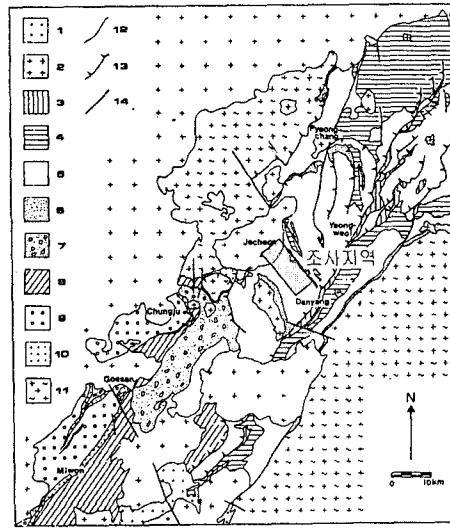
석회암 등 용해성 암석들은 지각을 구성하는 다른 암석들과 달리 지하수나 강우 등의 영향에 민감하게 반응하여 다양한 카르스트 지형을 형성시킨다. 이러한 용식 작용에 의해 형성된 석회 공동이나 싱크홀 등은 각종 재해를 유발시킬 뿐만 아니라 대규모 토목 공사에 있어 설계변경이나 공기 지연 등 많은 어려움을 일으키고 있다.

이번 연구는 다양한 지질학적 특성을 갖는 석회암과 백운암에 대한 암석학적, 광물학적 조사 및 분석을 포함하는 다양한 지구화학적 시험을 통해 화학적 풍화에 취약한 용해성 암석에 대한 지질공학적 특성을 분석하는데 일차적인 목적이 있다. 또한 실내 용해 시험을 통해 상대적인 용해 특성을 파악하고 대규모 건설 공사에 따른 암반의 노출이나 지하수위의 변동 등 주변 환경의 변화에 따른 암반의 풍화가 속화 및 이로 인한 물성 저하, 추가적인 석회 공동의 형성 가능성 및 그 규모 등에 대한 예측의 일환으로 수행되었으며, 암석의 지구화학적인 특성이 석회 공동 형성에 미치는 역할을 규명하고자 하였다.

2 지질 특성

연구 지역은 최근 철도 복선화 건설 공사의 일환으로 정밀 지반 조사가 이루어진 제천-매포 지역으로 지체구조상 한반도를 북동-남서 방향으로 관통하는 옥천습곡대의 북동부에 해당한다(그림 1). 옥천습곡대의 남서부 지역은 시대가 확실치 않은 쇠설성 퇴적암으로 주로 구성된 반면, 연구 지역인 북동부의 경우는 주로 캄브로-오로도비스기의 석회암류로 주로 구성되어 있다. 연구 지역은 비교적 층서가 잘 정립된 영월이나 태백 지역의 하부 고생대 층과는 달리 단순히 백운암층(홍월리층)과 석회암층(삼태산층)으로만 구분되어 왔다(태백산지구 지하자원 조사단, 1962).

연구 지역 일대에 대한 정밀 지표 지질 조사 결과 이 지역에 분포하는 탄산염암류는 하부로부터 신리층(A), 고명리층(B, C, D) 및 단리층(E)으로 구성되어 있으며, 연구 지역 전체에서 서쪽으로 경사하고 있어 전체적인 층서가 역전된 형태를 보여주고 있다(그림 2). 이 외에도 연구지역에서는 평안누층군의 만항층에 대비되는 갑산층이 분포하고 있으며, 중생대 쥐라기에 관입한 제천화강암이 연구지역의 북서쪽에 저반형으로 관입되어 있다.



- 1, 백악기 화산암류
- 2, 중생대 화강암
- 3, 대동층군
- 4, 평안누층군
- 5, 대석회암층군
- 6, 양덕층군
- 7-10, 옥천누층군
- 7, 함력층
- 8, pelite 우세층
- 9, psammite 우세층
- 10, 규암
- 11, 선캠브리아 기반암류
- 12, 지질경계
- 13, 드러스트단층
- 14, 단층




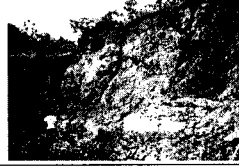

그림 1. 연구 지역을 포함하는 옥천습곡대 북동부 일대의 지질도



그림 1. 연구지역의 지질도 및 샘플 위치(화살표)

이번 연구의 주된 대상이 되는 탄산염암류는 앞서 언급한 것처럼 크게 3개 층으로 구분할 수 있으며, 이 가운데 고명리층의 경우는 다시 3개의 멤버(member)로 세분하였다. 이들에 대한 암상적인 특징은 표1과 같이 정리할 수 있다.

표 1. 연구 지역에 분포하는 탄산염암의 암석학적 특징

층명	암상 및 특징	노두 사진	
신리층 (A층)	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 두꺼운 세일 분할 석회암으로 구성 • 하부에는 세일이 우세하며, 일부 리본암(ribbon rock)도 관찰됨 • 최상부에는 소량의 처트층이 협재 		
고명리층	하부 멤버 (B층)	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 층상 내지 괴상의 백운암으로 구성 • 하부는 연회색과 암회색 백운암이 1 m에서 수 십 cm 단위로 호층을 이룸 • 신리층과 동일한 암상의 석회암층이 2-3매 협재 	
	중부 멤버 (C층)	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 조적을 갖는 백운암으로 구성 • “B”층과 달리 석회암의 협재가 관찰되지 않음 • 하부로부터 층리상 백운암-괴상 백운암-합쳐트 백운암-리본 백운암-층상 백운암-올리틱 백운암의 순으로 발달 	
	상부 멤버 (D층)	<ul style="list-style-type: none"> • 연회색 내지 백색의 백운암이 우세 • 얇은 세일 분할 석회암이 2-3매 협재 • 협재하는 석회암층을 따른 용식지형 발달 • 최상부 백운암층의 경우 주 백운석 채광장으로 가행 	
단리층 (E층)	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 청회색 괴상 석회암이나 얇은 세일 분할 석회암 • 부분적으로 리본암의 형태를 띠기도 함 • 고명리층과 인접한 곳에서는 수 m 두께의 백운암이 협재 • 성신양회, 현대시멘트, 한일시멘트의 주 채광층 		

3 지구화학적 특성 분석

3.1 시료 채취

본 연구를 위해 각 층의 암상을 대표할 수 있는 지역에서 8개의 시료를 채취하였다(그림 2), 각 시료는 풍화의 영향 정도가 적은 비교적 신선한 것을 대상으로 하였다. 연구 지역 내에 분포하는 신리층의 경우는 고명리층 하부 멤버에서 관찰되는 석회암층(SP-6과7)과 동일한 암상을 갖고 있어 별도의 시료를 분석하지 않았으며, 고명리층 상부 멤버 역시 중부 멤버에서 나타나는 괴상 백운암(SP-3)으로 대체하여 분석을 실시 하였다. 표 2는 각 시료에 해당하는 지층명과 암석학적 특성을 정리한 것이다.

표 2. 각 시료에 대한 지층명과 암석학적 특징

시료 번호	지층명	암상
SP-1	단리층	얇은 세일 분할 석회암(세일 두께 1.0 mm 미만)
SP-2	고명리층 중부 멤버	암회색 괴상 올리틱 백운암(oolitic dolomite)
SP-3	고명리층 중부 멤버	회색 내지 연회색의 괴상-층상 백운암
SP-4	고명리층 중부 멤버	세일과 백운암층이 수 mm 두께로 교호하는 리본백운암
SP-5	고명리층 중부 멤버	1-2cm 두께의 처트 노들을 함유한 괴상 백운암
SP-6	고명리층 하부 멤버	리본암(ribbon rock)
SP-7	고명리층 하부 멤버	엽상 내지 두꺼운 세일 분할 석회암(세일 두께 1mm 이상)
SP-8	고명리층 중부 멤버	회색 내지 암회색의 괴상-미약한 층상 백운암

3.2 광물-암석학적 분석 결과

연구 지역에 분포하는 용해성 암석에 대한 광물-암석학적 특징을 파악하고 용해에 대한 취약 정도를 알아보기 위해 먼저 각 시료에 대한 연마편 및 박편을 제작하여 암석학적인 특징을 살펴보았다. 그 후 X-선 회절분석기를 사용하여 각 시료의 점토 광물에 대한 분석과 광물 함량 분석을 실시하였으며, 이외에도 불순물 분석, 흡수율 분석, 가혹용해시험 등을 실시하였다.

3.2.1 광물 박편 분석

각 시료에 대해 박편 제작을 실시하고 편광 현미경 관찰을 통해 시료를 구성하고 있는 광물 조성과 조직, 입도, 변형 정도 등을 파악하였다(표 3, 그림 3)

표 3. 편광 현미경 관찰을 통한 각 시료의 암석-광물학적 특징

시료 번호	구성 광물	산출 상태 및 특징
SP-1	주: 방해석 부: 점토 광물	<ul style="list-style-type: none"> • 방해석은 실트 크기 정도의 입자(60μm)로 구성되며, 벽개면을 따른 미약한 정향배열이 관찰됨 • 점토광물은 입자 크기가 매우 작아 편광 현미경 상에서 동정 불가
SP-2	주: 백운석	<ul style="list-style-type: none"> • 동심원 구조를 갖는 크기 2~4mm의 올라이트와 기질로 구성 • 전체적으로 기질이 30% 이상을 점유
SP-3	주: 백운석	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5mm 정도의 입자 크기를 가지며, 모자이크상 결정 조직을 가짐 • 주로 반자형(hypidiotopic) 조직을 보여주며 미약한 쌍정구조 관찰
SP-4	주: 방해석, 백운석 석영	<ul style="list-style-type: none"> • 방해석과 백운석은 입자가 비교적 크며, rhombohedral 형태를 띠 • 석영 입자는 크기가 다양하고 층리면을 따른 정향 배열을 하며, 미약한 파동소광을 보여주기도 함
SP-5	주: 백운석, 석영	<ul style="list-style-type: none"> • 백운석은 0.5mm 내외의 입자 크기를 가지며, 타형조직을 띠 • 석영은 대부분 미정질로 편광 현미경하에서 관찰하기 매우 어려움
SP-6	주: 방해석, 석영	<ul style="list-style-type: none"> • 방해석은 rhombohedral 형태의 조직을 보여주며, 실트 크기의 입자 크기를 가짐 • 석영 역시 실트의 입자 크기를 보여주며, 미약한 파동소광을 띠
SP-7	주: 방해석 부: 점토 광물	<ul style="list-style-type: none"> • 방해석의 경우 불규칙한 입자 크기를 가지며, 벽개면을 따른 정향 배열을 함 • 점토 광물의 경우 편광 현미경 하에서 black seam의 형태를 띠
SP-8	주: 백운석 부: 방해석	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5-1.5mm 내외의 비교적 일정한 입자 분포를 보이며, 타형 조직(xenotopic texture)를 보여줌

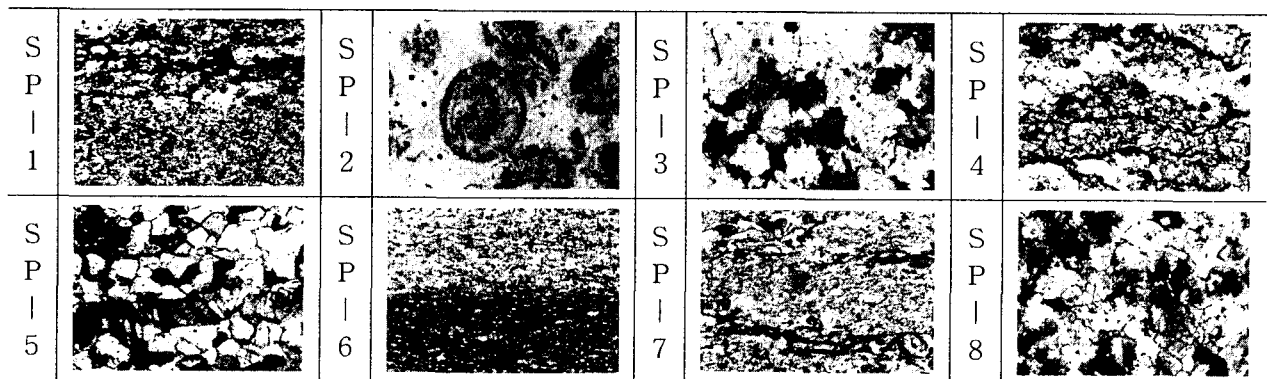


그림 3. 각 시료에 대한 대표적인 편광 현미경 사진 (cross-nicol, $\times 40$)

3.2.2 X-선 회절 분석 및 광물 함량 분석

쇄설성 퇴적암류나 탄산염암류 등은 그 조직에 따라 암석을 구성하는 입자 크기가 작고 변질 등에 의해 2차적으로 형성된 광물들의 경우 편광 현미경 하에서 그 동정이 힘든 경우가 많아 X-선 회절분석기를 이용하여 추가적인 광물 감정을 실시하였다. 또한 X-선 회절분석 결과에 대해 SIROQUANT ver2.5 프로그램(CSIRO)을 사용하여 감정된 광물 조성에 대한 함량 분석을 실시하였다(그림 4, 표 4).

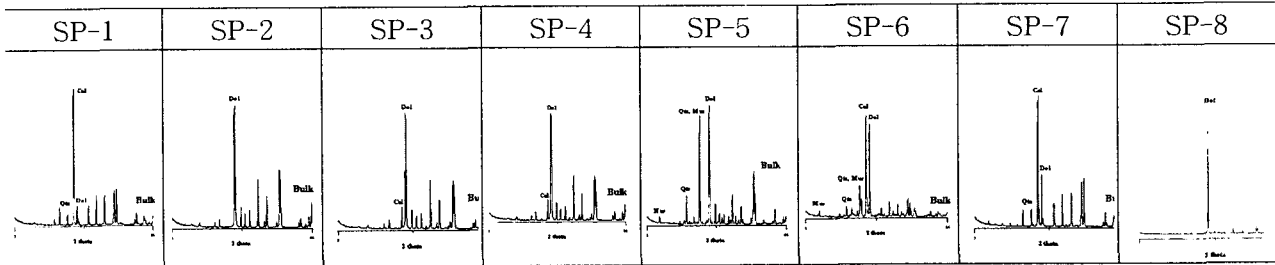
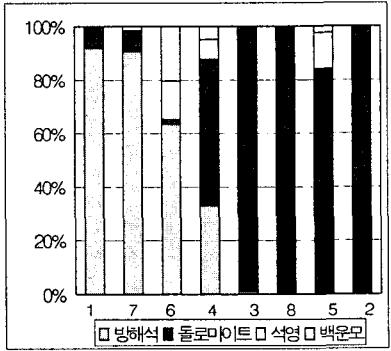


그림 4. 각 시료에 대한 X-선 회절 분석 결과

표 4. SIROQUANT 프로그램을 이용한 각 시료의 광물 함량 분석 결과

시료	함 량 비 (오 차 율)				
	방해석	돌로마이트	석영	백운모	계
SP-1	91.9 (0.38)	8.1 (0.38)	-	-	100.0
SP-2	0.0 (0.53)	100.0 (1.18)	-	-	100.0
SP-3	1.1 (0.48)	98.9 (1.06)	-	-	100.0
SP-4	33.0 (0.58)	54.7 (0.83)	7.4 (0.30)	4.9 (1.07)	100.0
SP-5	0.6 (0.35)	83.4 (1.24)	13.6 (0.32)	2.4 (1.17)	100.0
SP-6	63.5 (0.82)	1.7 (0.6)	14.4 (0.40)	20.4 (1.33)	100.0
SP-7	90.6 (1.60)	7.8 (0.55)	1.6 (0.30)	0.0 (1.37)	100.0
SP-8	0.9 (0.50)	99.1(0.50)	-	-	100.0



광물 정량 분석 결과를 살펴보면, 세일 분할 석회암과 엽상 석회암에서 방해석의 성분이 가장 높은 것으로 나타났으며, 울리틱 백운암(SP-2), 괴상 백운암(SP-8), 층상 백운암(SP-3)에서는 95% 이상이 백운석으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 야외 조사 및 박편 관찰에서도 나타난 것처럼 석영의 경우는 리본 석회암(SP-6)과 리본 백운암(SP-4) 및 함쳐트 백운암(SP-5)에서 산출됨을 알 수 있다.

3.2.3 불순물 분석

탄산염암이 형성되는 천해 환경은 육상 퇴적물의 유입이 필연적이며, 따라서 다양한 규산염 광물들이 불순물로 존재하고 있다. 이러한 규산염 광물들은 석회암의 지질공학적 특성을 파악하는데 하나의 기준으로 사용될 수 있으며, 그 종류와 산출 상태 등에 따라 석회 공동을 형성의 초기작용에 있어 연관성이 있다. 본 연구에서는 분말 시료를 작성하여 HCl:HNO₃ (1:3) 혼합 용액에 분말시료를 녹여 탄산염을 제거한 후 원심 분리 및 중액 분리 과정을 거쳐 잔류 불순물을 분리한 후 분리된 불순물의 함량을 분석하였다.

분석 결과를 살펴보면 괴상 및 층상 백운암으로 구성된 SP-8, SP-3과 울리틱 백운암으로 구성된 SP-2에서 4% 미만의 낮은 불순물 함량을 보여주고 있으며, 엽상이나 괴상의 석회암의 경우(SP-1과 SP-7)는 4.2% 내외의 불순물을 포함하는 것으로 나타났다. 그러나 리본 구조를 갖는 암석과 함쳐트질 백운암(SP-5)에서는 매우 높은 불순물 함량을 갖는 것으로 분석되었다.

표 5. 불순물 함량 분석 결과 및 그래프

시료 번호	분석 전	분석 후	불순물 (%)
SP-1	0.212	0.009	4.25%
SP-2	0.219	0.008	3.65%
SP-3	0.225	0.008	3.56%
SP-4	0.254	0.098	38.58%
SP-5	0.24	0.067	27.92%
SP-6	0.279	0.129	46.24%
SP-7	0.238	0.014	5.88%
SP-8	0.211	0.006	2.84%

3.2.4 점토 광물 분석

시료 내에 존재하는 2 μm 미만의 점토 성분을 분석하기 위해 Stoke's law에 따라 암석 분말 시료에서 2 μm 이하의 입자를 분리하고 열처리 과정을 거쳐 X-선 회절분석을 실시하였다. 이 과정을 통해 각 시료를 구성하고 있는 점토광물의 종류에 대해 알아 보았다 (표 6).

표 6. 점토 광물 분석 결과

시 료	분석 결과	시 료	분석 결과
SP-1	방해석, 돌로마이트	SP-5	돌로마이트, 일라이트, 석영, 캐올리나이트
SP-2	돌로마이트	SP-6	방해석, 돌로마이트, 일라이트
SP-3	돌로마이트	SP-7	방해석, 돌로마이트
SP-4	일라이트, 방해석	SP-8	돌로마이트, 일라이트

리본암의 형태를 띠는 SP-4, 6 및 함쳐트 백운암(SP-5)과 층상 백운암(SP-3)에서는 규산염 점토광물인 일라이트가 검출되었으며, 특히 SP-5의 경우 처트층의 산물로 보이는 캐올리나이트와 석영이 점토광물로 검출되었다. 이 외에 대부분 방해석이나 백운석의 함량이 높았던 시료에서는 대체로 백운석과 방해석이 점토광물로 산출되는 형태를 보여준다.

3.2.5 흡수율 측정

암석 내에 발달하는 1, 2차 공극은 강우 및 지하수의 유동 통로로 작용하여 용해성 암석 내에 소규모 공동(vug)을 형성하는데 1차적인 역할을 한다. 따라서 암석 종류와 조직 및 입자 크기에 따른 시료의 공극 발달 정도를 확인하기 위해 흡수율 시험을 실시하였다(표 7).

표 7. 흡수율 분석 시험 결과

시료	암 상	건조질량(B)	포화질량(A)	B-A	void ratio
SP-1	세일 분할 석회암	13.492	13.528	0.036	0.267%
SP-2	괴상 올리텍 백운암	22.677	22.836	0.159	0.701%
SP-3	층상 백운암	24.146	24.226	0.080	0.331%
SP-4	리본 백운암	26.844	26.877	0.033	0.123%
SP-5	함쳐트 백운암	33.310	33.630	0.320	0.961%
SP-7	엽상 석회암	13.308	13.353	0.045	0.338%
SP-8	괴상 백운암	22.238	22.322	0.084	0.378%

분석 결과는 함처트 백운암(SP-5)과 울리틱 백운암에서 비교적 높은 공극율을 갖는 것으로 나타났으며, 입자가 크고 균질할수록 높은 값을 갖는 것으로 분석되었다(표 7). 그러나 암석을 구성하고 있는 광물 성분에 따라서는 별다른 상관 관계가 없는 것으로 나타났으며, 리본 백운암인 SP-4의 경우는 다른 시료에 비해 풍화 상태가 심함에도 불구하고 비교적 치밀한 조직을 갖는 것으로 나타났다.

3.3 가혹 용해 시험

연구 지역 내에 분포하는 다양한 암상의 암석들에 대해 지하수나 지표수 및 강우에 의한 풍화 취약도 및 용해 정도를 파악하기 위해 HCl과 HNO₃ (1:3) 혼합 용액으로 pH1의 산성 용액을 제작한 후 2×2 cm의 정방형 시료를 용해시키면서 그 질량 변화를 기록하였으며, 실험 전과 실험 후 시료의 표면을 실체 현미경으로 관찰하였다. 시험 결과는 그림 5와 표 8과 같다.

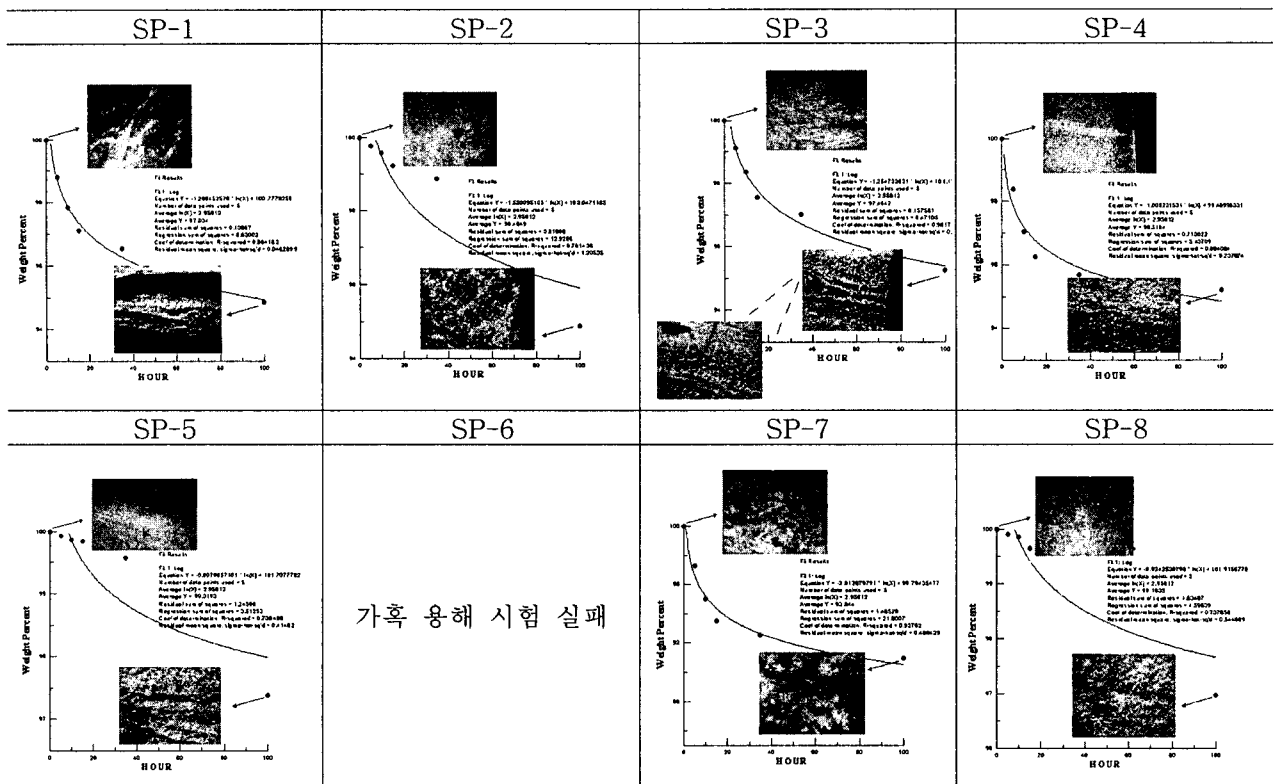


그림 5. 각 시료에 대한 가혹 용해 시험 결과

표 8. 가혹 용해 시험 결과 분석

시료	분석 결과	용해도 추세 곡선
SP-1	<ul style="list-style-type: none"> 초기 급격한 용해도 증가 현상이 관찰 광물 성분에 따른 차별적인 용해 진행 	$Y = -1.87\ln(x) + 100.12(2)$
SP-2	<ul style="list-style-type: none"> 초기에는 산에 대한 급격한 반응이 관찰되지 않음 시험 후 시료 표면은 전체적으로 고르게 용식된 양상을 띠 다른 백운암 시료에 비해 높은 용해도를 보임 	$Y = -1.55\ln(x) + 100.05(3)$
SP-3	<ul style="list-style-type: none"> 초기 용해속도가 높음 시험 후 시료 표면은 불규칙한 용식 형태를 보여줌 	$Y = -1.26\ln(x) + 101.17(4)$
SP-4	<ul style="list-style-type: none"> 백운암 가운데 초기 반응 속도가 가장 높음 함철 광물의 집적 부위에서 급격한 용식 진행 	$Y = -1.01\ln(x) + 99.49(5)$

표 8. 가혹 용해 시험 결과 분석(계속)

시료	분석 결과	용해도 추세 곡선
SP-5	<ul style="list-style-type: none"> 백운석과 미정질 처트로 구성되어 초기 반응속도가 가장 낮음 층상의 용식 구조가 관찰됨 	$Y=-0.81\ln(x)+107.71(7)$
SP-7	<ul style="list-style-type: none"> 초기 가장 급격한 용식 반응을 보임 전체적으로 고른 용식이 진행 	$Y=-2.01\ln(x)+99.79(1)$
SP-8	<ul style="list-style-type: none"> 시험 초기 가장 낮은 초기 반응 속도를 보임 시간 경과에 따라 소량 분포하는 탄산염 광물의 용해가 진행되면서 규산염 광물 전체가 한꺼번에 이탈하는 형태를 보여줌 	$Y=-0.92n(x)+101.92(6)$

4. 결론 및 토의

연구 지역에 분포하는 용해성 암석의 용해 특성을 파악하기 위한 암석-광물학적 특성 분석 및 가혹 용해 시험 결과 용해성 암석 내에 형성되는 석회 공동 및 이와 수반되는 다양한 카르스트 지형은 복잡한 요인들의 상호 연관성에 의해 제어되는 것으로 나타났다.

일차적으로 암석을 구성하는 방해석 성분의 함량에 따라 기본적인 용해 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 석회암과 백운암의 실내 용해 시험 결과 초기 단계에서 약 3 승 이상의 용해도 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 전반적으로 백운암에 비해 석회암의 용해 정도가 우수한 것으로 판명되었다. 그러나 용해 정도의 차이는 시간이 갈수록 줄어드는 경향을 보이는데 이는 백운암 내에 존재하는 탄산염 광물들의 용식이 진행됨에 따라 불순물로 존재하는 규산염 광물이나 백운석 집합체가 급격하게 이탈하는 형태를 띠기 때문이다. 하지만 이러한 결과는 실내에서 제한된 조건에서 수행한 결과로 물질의 이동이 상대적으로 자유롭지 못한 자연계에서 적합성을 따지기 위해서는 추가적인 정밀한 시험이 요구된다.

석회암의 경우는 조직이 유사한 두 시료(SP-1과 SP-7) 가운데 방해석의 성분이 낮지만 불순물의 함량이 높은 SP-7이 약간 높은 용해도를 갖는 것으로 나타났다. 다양한 입자 크기와 조직을 갖는 백운암은 공극이 비교적 크고 입자와 기질간의 결합력이 취약한 울리틱 백운암(SP-2)이 가장 용해에 취약한 것으로 나타났으며, 비교적 층리면의 발달이 양호한 층상 백운암(SP-3)의 경우 용식 초기 층리가 결점(defect)로 작용함에 따라 석회암과 유사한 용식 과정을 거치는 것으로 나타났다. 이에 반해 상대적으로 불순물의 함량도 높고 공극율도 가장 큰 함처트 백운암(SP-5)의 경우 이번 시험에서 가장 낮은 용해 정도를 갖는 것으로 나타났는데 이는 다른 백운암들에 비해 층리 등 일차 구조의 발달이 상대적으로 취약한 결과인 것으로 해석된다.

앞으로 각 시료에 대한 보다 정밀한 암석학적 기재와 현미경 하에서의 입자 분포 특성이나 미세 균열 정도, 용해 시험 과정 중 시험 용액에 대한 이온 분석 등 보다 정교한 시험이 수반된다면 석회 공동 형성 및 예측에 있어서 정량적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각되며, 이러한 자료들은 석회암 지역의 재해 등급도 작성이나 화학적 풍화에 의한 암반의 강도 정수 저감 정도를 예측하는데 있어 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 참고 문헌

1. Goodman, R. E., 1993, *Engineering Geology*, John Wiley & Sons, INC., New York, pp.143-193
2. Beck, B. F., 1996, Karst geohazards: engineering and environmental problems in karst terrane. *Proceedings of the 5th multidisciplinary conference*, Gatlinburg, April, 1995, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol 33, Issue 2, 49A.
3. Gabrovdsda, F., & Dreybrodt, W., 2000, Role of mixing corrosion in calcite-aggressive H₂O-CO₂-CaCO₃ solutions in the early evolution of karst aquifers in limestone, *Water Resources Research*, Vol. 36, Issue 5, 1179-1188.