

상주지역 화강암의 풍화 특성에 대한 평가

Evaluation about Weathering Characteristics of Granite at Sangju Area

강창우¹⁾ · 김봉수¹⁾ · 손광록²⁾ · 배우석[†]

Changwoo Kang · Bongsu Kim · Kwangrok Son · Wooseok Bae

Received: February 22nd, 2016; Revised: March 8th, 2016; Accepted: April 8th, 2016

ABSTRACT : The rocks exposed on the surface undergo expedite weathering process due to the effects of climatic process, etc. and the weathering process changes the properties of minerals, thereby lowering the stability of rocks. Therefore, it is important to examine the composition of minerals in order to investigate the resistance of rocks against weathering, which is performed by weathering sensitivity analysis. And microscopic flaking test was performed for the bored samples in this study and the composition of minerals that are vulnerable to weathering was measured through mode analysis. The lithological and mineralogical weathering factors were evaluated through this process. Furthermore, the degree of progress of weathering was identified by quantitatively measuring the actual mineral composition of rocks through X-Ray diffraction analysis and identifying the secondary minerals through observation with a scanning electron microscope. This analyzing the weathering sensitivity was analyzed to be capable of determining appropriate indicators that can determine weather resistance and predicting the weathering grade using chemical weathering speed.

Keywords : Weathering sensitivity, Mineral contents, X-Ray diffraction, Weathering grade

요지 : 지표에 노출되는 암석은 기상작용 등의 영향으로 풍화가 가속되며, 풍화작용은 광물의 성질을 변화시켜 암석의 안정성을 저하시키게 되므로 암석의 풍화에 대한 저항은 광물의 조성을 파악하는 것이 중요하며 이는 풍화 민감도 분석을 통해 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 시추된 시료에 대한 현미경 박편 시험을 실시하고 모드분석을 통해 풍화 취약광물의 구성비를 측정하였으며, 이를 통해 대상사면의 암석학적·광물학적 풍화요인을 평가하였다. 또한, X-Ray 회절분석을 이용하여 암석을 구성하는 실제적인 광물조성을 정량적으로 측정하고 주사현미경관찰을 통해 이차광물을 동정하여 풍화의 진행 정도를 파악하였다. 이러한 풍화 민감도 기법을 통하여 풍화 저항도를 판단할 수 있는 적절한 지시자를 결정할 수 있으며 화학적 풍화속도를 이용한 풍화등급의 예측이 가능할 것으로 분석되었다.

주요어 : 풍화 민감도, 광물성분, X-선 회절, 풍화등급

1. 서론

인공 또는 자연 비탈면의 형태로 지표에 노출되는 암석은 대기, 지하수, 강우 등의 영향에 의해 풍화작용이 가속되며 풍화작용은 암석을 구성하는 광물의 물리·화학적 성질을 변화시켜 암석의 안정성을 저하시킨다. 이와 같은 풍화나 변질에 의해 생성되는 변질 광물과 점토 광물은 풍화를 가속시키는 광물로서 팽윤 또는 용해의 특성을 가지며, 낮은 광물의 안정성을 나타낸다. 따라서 암석의 풍화상태나 풍화작용에 대한 저항을 평가하기 위해서는 광물 내에 포함되어 있는 광물의 조성을 파악하는 것이 중요하며, 이는 풍화 민감도 분석을 통해 이루어진다. 풍화 민감도 분석이란 인위적으로 노출된 암석들이 지표환경에서 강우, 강설과 같은 기상조건과 지하수, 대기오염물질 등의 여러 가지 영향

이 암석의 강도에 영향을 주는 정도를 정량적으로 예측하고 풍화에 대한 저항도를 평가하는 기법이다.

암석의 풍화나 풍화 민감도에 대한 연구로 Suh et al.(1994)은 경주지역의 응회암에 대한 실험결과를 통해 암석의 50% 이상이 점토광물로 구성되어 수분에 노출되어 쉽게 풍화될 수 있음을 지시한 바 있으며, Crosta(1998)는 풍화에 대한 저항성은 일종의 내구성으로 사면이나 지하굴착의 안정성을 평가하는 중요한 암반 물성 중 하나임을 강조하였다. Kang(2003)은 화강암 기반 사면에 대한 전암분석과 산침수 시험을 통해 풍화속도와 풍화등급을 산정하였으며, Park et al.(2006)은 화학적 풍화 민감도 분석을 퇴적암의 특성에 맞는 방법으로 개량하여 분석하고 강도변화 예측과의 비교자료로 활용하였다. 또한, Park(2006)은 풍화 민감도 분석을 노출된 암반사면에 적용할 계측장비 및 계측빈도 결정에 활

1) Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

2) NANO-GEO ENC Co. Ltd.

† NANO-GEO ENC Co. Ltd. (Corresponding Author : old1007@hanmail.net)

용하고 그 결과를 제시하였으며 Bae et al.(2010)은 경상북도 상주의 일부지역을 대상으로 풍화 민감도 분석을 수행하여 기초적인 자료를 획득한 바 있다. 그러나 아직까지 암반의 풍화 특성에 대한 연구는 미진한 상황이다.

이와 같이 노출된 암반의 장기적인 안정성을 확보하기 위해서는 풍화에 대한 내구성을 규명할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 풍화 민감도 분석을 통해 사면의 풍화등급을 예측하고 궁극적으로 풍화 민감성을 고려한 설계 정수를 확보하기 위한 기초 단계로 풍화 민감도 평가실험 및 분석을 수행하였다. 이를 위하여 연구 대상 사면에서 시추된 시료를 통해 현미경 박편 시험을 실시하고 모드분석을 통해 풍화 취약광물의 구성비를 측정하며 이를 통해 대상 사면의 암석학적·광물학적 풍화요인을 평가하였다. 풍화의 진행 정도를 파악하기 위해 X-Ray 회절분석을 이용하여 암석을 구성하는 실제적인 광물조성을 정량적으로 측정하고 이차광물을 동정하기 위해 주사현미경관찰을 수행하였다. 산성에 대한 풍화저항력을 평가하기 위해 산침수 시험을 실시하고 Profile Model을 적용하여 화학적 풍화속도를 예측하였다. 이를 통하여 풍화의 주원인과 특성변화를 규명하고 풍화 민감도 등급을 결정하기 위한 기초자료를 획득하였으며, 향후 노출면의 풍화양상을 정량적으로 평가하기 위한 자료를 축적하였다.

2. 연구지역의 현황

연구 대상 지역은 Fig. 1과 같이 경상북도 상주시 일원으로 선캠브리아기의 편마암류와 쥐라기 관입암류, 백악기의 퇴적층 및 암맥류, 이를 부정합으로 덮고 있는 충적층이 분포한다. 선캠브리아기의 화강암질 편마암은 연구 대상지의 중남부와 서부에 주로 분포하며, 쥐라기의 흑운모 화강암은 남서부에서 편마암 사이에 분포한다. 백악기 낙동층의 만경산층원과 금당리층원은 북서부에서 남동부에 걸쳐 광범위하게 분포하며, 하산동층의 다인층원은 북동부에서 금당리층원에 접촉하여 분포한다. 백악기의 석영섬록암과 암맥류는 이들 퇴적암 사이에 산재되어 분포하고 있다. 본 연구의 대상인 비탈면은 전반적으로 흑운모 화강암 지역에 포

함되어 있다.

본 연구에서는 대상사면의 현황을 평가하기 위해 기존자료 및 지표지질조사를 통하여 불연속면의 공학적 특성, 특히 기반암의 종류와 불연속면의 방향성을 고려하여 Table 1과 같이 파괴 가능성과 풍화특성을 파악하였다. 또한, 구성암석의 분포, 절리의 방향성, 강도, 거칠기 등 불연속면의 지질 공학적 자료를 수집하였다.

조사결과 연구 대상 지역은 주로 흑운모 화강암이 주종을 이루고 있으며 비교적 풍화가 발달되어 있는 지역인 것으로 나타났고, 고도는 100m 이하가 77%, 100~200m가 25%로 저고도의 지형이 대부분을 차지하고 있었으며 연구 대상 지역은 대부분 10~35°의 경사도로 10° 이하의 경사가 56%에 해당되는 것으로 분석되었다. 따라서 대부분의 영역이 풍화가 상당히 진행되어 있는 지역에 포함될 것으로 판단된다.

3. 풍화 민감도 분석

본 연구에서는 대상 지역의 풍화특성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 총 7개소의 시추공에 대해 심도별로 즉 풍화 정도에 따라 시추조사를 통해 확보된 시료와 지표조사 결과를 통하여 대상구간의 ‘풍화상태진단’을 시작으로 광물분석을 기초로 한 ‘풍화요인분석’을 수행하고 다양한 시험결과를 통하여 풍화속도와 특징을 분석하였다.

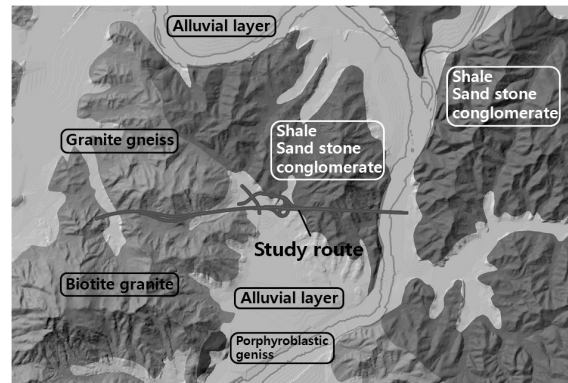


Fig. 1. Geologic map of study area

Table 1. Results of geological ground survey

Position	Rock type	Strike	Filling	Degree of aeration	Subsurface water	Strength
Zone 1	Biotite granite	240/80	Ferrite	MW~HW	Dry	Moderate
Zone 2	Biotite granite	260/70	Ferrite	MW~HW	Dry	Weak
Zone 3	Biotite granite	265/85	Clay	HW	Dry	Very weak
Zone 4	Sand stone	200/85	-	MW	Dry	Moderate

3.1 현미경 박편 시험

풍화의 진행으로 생성되는 점토 광물은 풍화를 가속시키는 요소이며, 특히 팽윤성 또는 용해성 광물은 풍화에 지대

한 영향을 미치게 되므로 존재 유무를 진단함으로써 대상 암석의 안전성을 예측할 수 있다.

풍화광물분석은 편광현미경 분석으로 통해 이루어지며 대

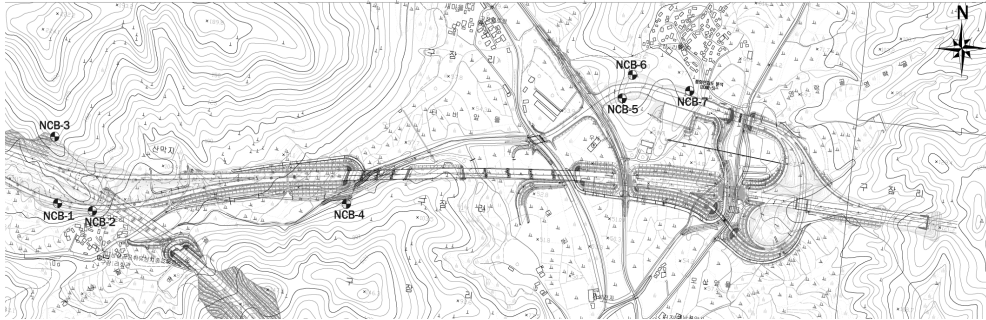
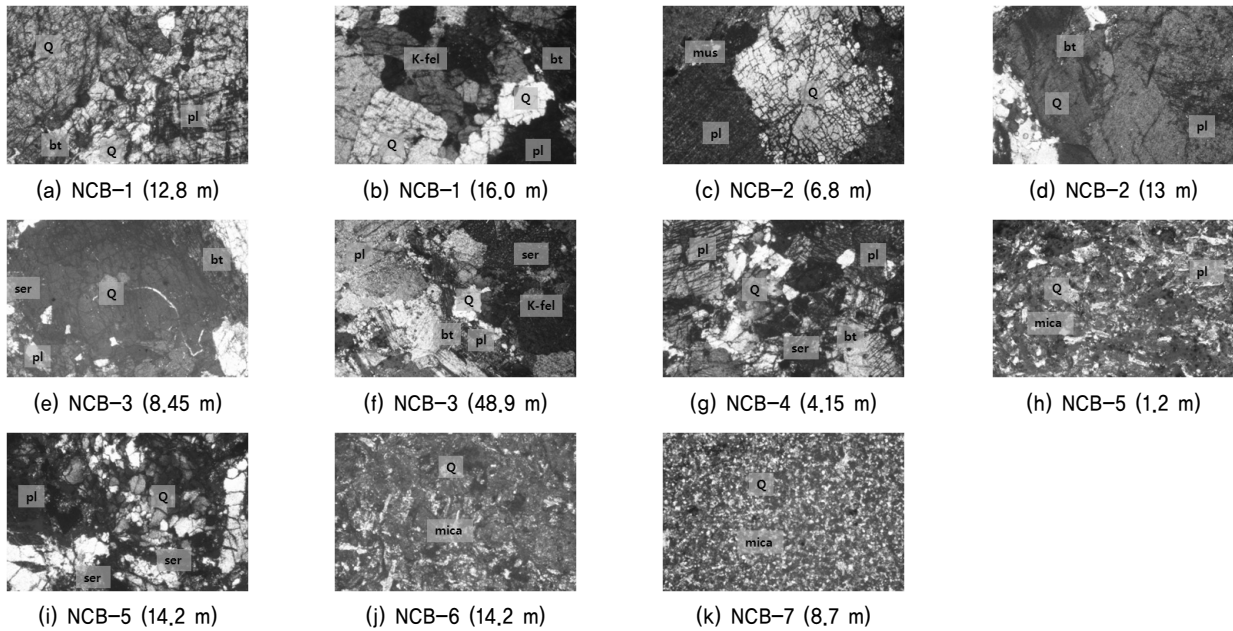


Fig. 2. Boring position to study area



where, Q: Quartz, pl: plagioclase, bt: biotite, mus: muscovite, K-fel: K-feldspar

Fig. 3. Thin section analysis results

Table 2. Mode analysis results

Borehole No.	Depth (m)	Rock type	Ratio of composition mineral (%)						
			Quartz	Orthoclase	Plagioclase	Biotite	Muscovite	Sericite	Groundmass
NCB-1	12.80 (SR)	Biotite granite	18	38	35	9	-	-	-
	15.8 ~ 16.0 (HR)		20.8	32.5	38.8	7.9	-	-	-
NCB-2	6.60 ~ 6.80 (SR)	Biotite granite	16	37.5	30.5	8.5	7.5	-	-
	12.8 ~ 13.0 (HR)		21.5	38.5	29.5	10.5	-	-	-
NCB-3	8.40 ~ 8.45 (SR)	Biotite granite	20	35.5	30.5	8.5	-	5.5	-
	48.7 ~ 48.9 (HR)		25.5	32.5	30.2	10.5	-	1.3	-
NCB-4	4.00 ~ 4.15 (SR)	Biotite granite	15.5	34.5	32.5	11	-	6.5	-
NCB-5	1.10 ~ 1.20 (SR)	Sedimentary rock	18.5	10.5	15.5	-	-	-	47
	14.1 ~ 14.2 (HR)	Biotite granite	20.5	31.5	28.5	10.5	-	9	-
NCB-6	17.7 ~ 17.8 (SR)	Siltstone	20.5	-	-	18.5	-	-	61
NCB-7	8.5 ~ 8.7 (SR)	Siltstone	7.5	-	-	5.5	-	-	87

where, WS: Weathered Soil, WR: Weathered Rock, SR: Soft Rock, HR: Hard Rock

상 시료를 대상으로 박편을 제작한 후 연마제를 이용하여 현미경으로 관찰이 가능한 0.03mm 정도 두께로 연마하였다. 광물 동정은 제작된 박편을 대상으로 정밀하게 관찰하였으며, 구성광물의 함량비는 일반적으로 암석의 구성광물의 비를 측정하는 모드분석(mode analysis)을 통하여 측정하였다. 박편 관찰 및 모드분석은 Nikon사의 Optiphot-2(287101) 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였고, 화산암의 경우 결정의 대부분이 비현정질 석기이므로 모드분석의 결과는 이를 제외한 현정질 광물 결정을 대상으로 실시하였으며 편광현미경에서 분석 결과는 Fig. 3, Table 2와 같다.

현미경 관찰 결과 NCB-1은 장석과 석영이 심한 변질을 받아 입자 내부에 다수의 미세균열이 발달해 있으며 NCB-2에서 장석류가 내부에서 견운모화된 양상이 관찰되나 고유 특성이 비교적 보존되어 있는 것으로 나타났다. NCB-3은 저심도에서 마그마 내에 포함된 유체에 의한 영향으로 사장석 내에서 주로 변질 산물인 견운모 등이 산출되었고, 고심도는 거의 풍화영향을 받지 않은 것으로 관찰되었다. NCB-4도 변질을 많이 받아 입자 형태만을 유지할 뿐 내부는 풍화 산물인 세리사이트로 변해 있으며, NCB-5는 고심도도 심한 풍화로 인해 입자 내부에 틈이 발달하고 심한 변질작용에 의해 세리사이트화 되어 있다. NCB-6, 7은 석영과 판상의 운모로 구성된 실트암인 것으로 나타났다.

모드분석에서는 분석 시료의 광물조성을 강도규제광물(석영), 풍화 취약광물(장석류), 층상광물(운모류, 녹니석)로 구분하여 비교하였으며 전체적으로 강도규제광물인 석영의 함량은 15~25%의 범위를 가지고, 풍화 취약광물인 장석류의 함량은 흑운모 화강암에서 60~70%의 범위를 보였다. 또한, 운모류인 층상광물은 흑운모 화강암에서 약 10~20%의 함량범위를 나타내어 지속적인 화학적 풍화작용이 진행됨에 따라 절취사면의 안정성에 취약한 특성을 가중시킬 것으로 판단된다.

3.2 풍화 취약광물 진단

점토광물은 결정학적으로 불규칙성을 띠며 양이온 결손으로 음전하를 띠게 된다. 한편 양성을 띠는 물 분자는 점토광물의 입자 표면에 흡착되어 수화층을 형성함으로써 가스성과 점성을 갖게 되며 이러한 특성으로 암석을 풍화시키는 원인이 될 수 있다(Grim, 1962). 본 절에서는 풍화의 진행 정도를 파악하기 위해 X-Ray 회절분석(XRD)을 이용하여 암석을 구성하는 실제적인 광물조성을 정량적으로 측정하였으며, 실제 암석 내에 포함된 탄산염이나 사장석 등 풍화 취약광물의 함량을 판단함으로써 암석의 전반적인 풍화 민감도를 판단하고 점토분리 및 분석을 통해 실제 풍화로

인해 생성된 2차 광물 및 팽윤성광물의 유·무를 확인하였다.

X선 분석은 전암 분말 시료 조제 후 정량시료를 제작하고 이를 통해 전암 대비 점토광물의 함량을 분석하는 기법으로 Table 3과 같이 전암에 대한 XRD 결과 시추공 NCB-1, 2, 3, 4 시료(풍화 잔류토)에서 장석의 풍화에 기인된 2차 변질광물인 Kaolinite가 산출되어 다른 구간에 비해 화학적 풍화에 취약한 지반특성을 나타내는 것으로 판단된다. 특히 NCB-1, 2의 경우 장석의 변질 및 풍화에 의해 형성된 점토광물인 Kaolinite의 함량이 높아 함수와 탈수에 의해 쉽게 분해되거나 파쇄될 수 있어 다른 구간에 비해 풍화진행 심도가 깊은 것으로 판단되어 절토사면 시공 시 풍화에 대한 민감도가 매우 높을 것으로 판단할 수 있다.

NCB-5, 6에 존재하는 단층점토에서는 점토광물인 Kaolinite, Chlorite, Vermiculite, Smectite와 같이 수분 흡수율이 높으며 수분과 접촉 시 부피의 팽창을 야기하는 광물이 다수 검출되었으며, 특히 NCB-6의 경우 시추구간 전체심도에서 Kaolinite와 Chlorite가 검출되어 풍화에 매우 민감하고 화학적 풍화작용에 대한 풍화 민감도가 높은 지역으로 판단된다. NCB-7 지역은 퇴적암(실트암) 지역으로 화학적 변질작용에 따른 2차 변질광물인 점토광물이 검출되지 않았으며, 풍화에 대한 저항성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

또한, 암석 내에서 자생하는 풍화생성물인 이차광물을 동정하기 위해 에너지 분산형 X-선 분석기(EDXA, PV 9100/60)를 사용하여 주사현미경관찰을 수행하였다. 분석결과 NCB-1의 풍화토 및 풍화암에서는 판상의 광물이 관찰되지만, 원래의 결정 상태를 잘 유지하고 있으며 광물표면의 박리현상이 현저하다. 또한, 화학적 풍화작용에 의한 원소용탈 현상에 의해 상부층에서는 K와 Na의 함량이 신선한 하부층에 비해 적은 함량을 나타냈으며, 하부심도의 장석은 녹니석화 작용에 의해 상부보다 Mg와 Fe의 함량이 증가된 것으로 나타났다.

NCB-2는 시추 심도가 얕을수록 기계적 및 화학적 풍화작용에 의해 판상의 미립자가 두드러지게 관찰되며, 화학적 풍화작용에 의한 원소의 용탈작용에 의하여 쉽게 용탈되는 Na, K의 함량이 감소함을 확인하였다. XRD 정량분석결과 모든 시추 심도에서 장석의 풍화 산물인 Kaolinite가 산출되었고, SEM 관찰 결과 또한 전 시추구간에 있어서 장석의 결정에서 현저한 박리현상이 진행되고 있으며, 표면이 거칠고 결정형이 파괴된 것도 관찰되고 있다.

NCB-3, 4, 5는 장석표면과 벽개면을 따라 풍화가 진행되어 많은 양의 박편(flake)이 형성되어 장석표면에 피복되어 있지만 대부분 K, Na 성분이 다량 용탈된 장석 파편인 것으로 판단된다. 일반적으로 SiO₂는 풍화에 대한 저항성이

Table 3. XRD analysis results

Borehole No.	Depth (m)		Ratio of composition mineral (%)										
			Quartz	Plagioclase	K-Feldspars	Micas	Hornblende	Kaolinite	Chlorite	Vermiculite	Smectite	Magnetite	Laumontite
NCB-1	4.0	WS	17.9	38.5	30.9	9.5		1.3	1.5			0.4	-
	5.0	WR	17.4	46	23.4	9.4	-	2	0.8	-	-	-	1.1
	12.8	SR	17	56.3	17.9	8.8							
	15.9	HR	20.5	35.2	38.8	3.6	-	1.9					
NCB-2	2	WS	14.6	53.3	11.4	12.8	-	4.1	1.9	1.5	-	0.4	
	2.8	WR	14.8	49.7	18.7	13.8	-	3.1					
	6.7	SR	18.3	42.8	21.6	16.3	-	1					
	12.9	HR	25.7	48.6	17.1	7.6	-	1					
NCB-3	1	WS	9.4	71.4	2.7	14.6	-	1.8					
	3	WR	22.1	49.4	15.7	12.8							
	8.4	SR	19.4	46.4	22.5	8.6	-	1.7	1.4				
	48.7	HR	25.8	37.7	30.1	6.5							
NCB-4	2	WS	15.3	32.1	24.9	22.2	-	0.8	1.7	1	1	-	1
	3	WR	15.4	36.8	21.9	19.8	-	2	-	1.4	1.1	-	1.5
	4	SR	16.6	37.4	31.1	12.8	-	-	-	1	1.1		
NCB-5	1.1	WS	23.3	47.3	9.2	18.8	-	-	1.5				
	14.1	WR	20.6	34.6	26.6	18.1							
	16.8	-	26.3	25.8	5.5	30.7	-	7.3	2.2	1.6	0.7		
NCB-6	1	WS	17.8	45.8	3.5	36	2.4	-	2.7	-	-	-	-
	2	WR	38.4	13.7	6.5	34.8	4.6	-	2.2				
	9.3	-	31.5	26.3	8.5	17.5	6.4	5.2	3	-	-	0.6	-
	17.7	SR	24.6	39.3	3.2	21.7	-	1.2					
NCB-7	1.1	WS	63.5			36.5							
	14.1	WR	67.4			32.6							
	16.8	-	34.3	36.4	16.6	12.7							

강한 원소이나 연구 대상지의 주 구성 암종인 흑운모 화강암에서는 풍화가 진행됨에 따라 기계적 풍화작용에 기인한 광물 입자의 탈락 및 풍화진전에 따른 장석과 같은 규산염광물의 함량 감소의 결과로 나타난 것으로 판단된다.

NCB-6, 7은 퇴적암(실트암)을 나타내며, 풍화가 진행됨에 따라 장석표면과 벽개면을 따른 많은 양의 박편(flake)이 형성되어 있으며 특히 모든 시추 심도에서 점토광물인 Kaolinite와 Chlorite가 발견되어 있어서 풍화에 민감한 구간임을 알 수 있다.

3.3 인공풍화 시험

인공풍화 시험은 산성수가 암석의 풍화에 미치는 영향과 어느 정도 풍화를 가속하는가를 예측하는 시험으로 지표로 노출되기 전 암석들은 pH 7~8의 중성 내지 염기성 지하수와 반응하지만, 지표에 노출되면 응력 압력의 개방에 의해 암석 및 광물의 조직이 손상을 받은 상태가 되고 노출된 암석들은 대기 오염에 의해 생성된 산성비(산성 안개, 산성 눈)와 직접 반응하여 암석의 풍화를 가속시키게 된다. 황을

포함한 광물(황철석, 섬아연석, 방연석 등)이 물속에 녹아 있는 용존산소와 결합하면 황화합물은 산화되어 황산이 되며, 황산은 광물에 포함된 각종 금속을 용해시키게 되고 산성비와 마찬가지로 황화광물의 산화에 의해 생성된 황산은 암석의 풍화를 촉진 시키는 역할을 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 산성비가 암석에 미치는 영향을 파악하기 위해 대상 지역 시료를 분말화한 후 pH가 5.5로 조정된 증류수에 넣고 일정한 시간 동안 반응시켜 만들어진 용액에 대하여 화학성분을 분석하였다. 산에 용출되는 화학 성분은 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively coupled plasma mass spectrometer)를 이용하여 정량분석을 하였으며 이를 통해 Table 4와 같이 풍화 정도를 예측하였다.

양이온의 용탈속도가 빠르다는 것은 물리적인 절리나 균열에 의해 풍화저항력이 약한 것을 지시하며, 풍화가 상당히 진행된 시료에서 양이온의 용탈속도가 느린 경우는 풍화에 의해 용탈되어 버릴 양이온이 이미 감소되어 버린 것을 의미한다. Baek & Kwak(2000)은 풍화등급별로 채취한 편마암에 대한 인공풍화 실험결과를 통해 풍화등급이 높을

Table 4. Artificial weathering test results

(unit: ppt)

Borehole No.	Depth (m)		Al ²⁺	SI	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ²⁺	K ⁺
NCB-1	4.0	WS	0.036	1.629	0.008	0.563	1.816	0.426	0.008
	5.0	WR	0.405	1.672	0.840	0.617	1.920	0.382	0.070
	12.8	SR	1.069	1.523	2.655	4.234	3.248	0.595	0.388
	15.9	HR	0.913	1.588	3.018	3.417	2.658	0.615	0.228
NCB-2	2	WS	1.436	2.123	6.632	4.078	3.229	0.623	0.199
	2.8	WR	0.499	1.442	1.861	0.872	4.979	0.456	0.098
	6.7	SR	0.388	1.176	1.557	0.482	2.258	0.592	1.129
	12.9	HR	0.498	1.053	1.314	1.403	2.447	0.437	0.135
NCB-3	1	WS	0.425	1.463	2.956	0.931	2.407	0.415	0.948
	3	WR	0.362	1.755	1.825	0.464	3.745	0.443	0.913
	8.4	SR	0.408	1.741	1.323	0.731	2.197	0.395	0.103
	48.7	HR	0.342	1.086	1.592	1.810	2.326	0.494	0.104
NCB-4	2	WS	0.462	1.512	2.707	0.997	4.228	0.304	0.084
	3	WR	0.515	1.673	3.329	1.212	6.093	0.456	0.105
	4	SR	0.752	1.307	2.018	1.852	3.114	0.849	0.234
NCB-5	1.1	SR	0.436	2.544	3.751	0.601	3.833	0.710	0.204
	14.1	HR	0.401	1.230	1.442	0.614	2.777	0.522	0.1191
NCB-6	1	WS	0.281	1.260	1.740	0.417	1.695	0.381	0.067
	2	WR	0.341	1.224	2.545	0.632	2.836	0.386	0.095
	17.7	SR	0.385	1.386	1.398	0.597	6.177	0.510	0.168
NCB-7	2	WS	0.446	1.389	0.911	0.578	2.686	0.598	0.095
	3	WR	4.343	1.346	1.102	0.761	4.364	0.782	0.952
	8.6	SR	0.289	1.457	0.592	0.341	1.402	0.384	0.107

수록 SiO₂의 함량은 증가하고 FeO₃, TiO₂, MnO, CaO, MgO 및 P₂O₅의 함량은 점차 감소함을 확인하였다.

NCB-1은 풍화 정도가 약할수록 양이온의 용탈속도가 빨라 물리적인 절리나 균열에 의해 풍화저항력이 약한 것을 지시하고 있다. 특히 흑운모 화강암의 장석을 구성하는 Ca, Na의 용출속도가 증가하는 것은 풍화 심도가 깊은 암반이 지표상에 노출되어 산성비의 영향을 받을 경우 급속히 화학적 풍화가 발생할 수 있음을 나타낸다.

NCB-2는 다량의 장석 입자와 소량의 유색광물인 흑운모를 함유한 흑운모 화강암으로 풍화에 의해 SiO₂, Na, K 및 Ca와 같은 화학성분들은 용해 및 용탈작용에 의한 용해공극을 형성하고 풍화가 상당히 된 표층 시료에서 용탈속도가 빠르므로 추가적인 풍화작용에 의해 빠른 풍화속도를 가지며 풍화가 진행될 것으로 판단된다.

NCB-3은 모든 시추 심도에서 이온 용탈속도의 변화양상이 뚜렷하지 않으나 신선한 암반일수록 이온 용탈속도가 점진적인 증가양상을 나타낸다. 이러한 현상은 표층구간에서 풍화에 의해 대부분의 양이온이 이미 용탈된 것을 의미하며, 시추 심도가 깊은 암반 또한 개착 후 산성비와 접촉할 경우 풍화속도가 빠를 것으로 판단된다.

NCB-4의 경우 풍화암 심도에서 Fe와 Ca의 이온 용탈속도가 높다. 흑운모와 같이 철을 함유하는 광물에서의 중요한 풍화지시자인 Fe는 풍화가 진행됨에 따라 선형적인 증가양상을 나타내고 있다. Fe²⁺의 산화작용 결과 FeO는 감소하고 Fe₂O₃는 증가하였기 때문에 판단된다. 또한, 풍화암에서 Fe의 용탈속도가 높은 것은 장석의 용탈 및 용해작용에 의한 공극의 형성 결과로 판단된다. NCB-5의 경우 풍화가 많이 진행된 암석일수록 양이온의 용탈속도는 증가하는 경향을 나타내어 추가적인 화학적 풍화작용이 발생할 경우 현재보다도 더욱더 빠른 속도로 풍화가 진행될 수 있음을 알 수 있다.

NCB-6은 시추 심도가 깊을수록 양이온의 용탈속도가 빠른 경향을 나타내어 물리적인 절리나 균열에 의해 풍화저항력이 약한 지반임을 알 수 있다. 특히 흑운모 화강암의 장석을 구성하는 Ca, Na의 용출속도가 증가하므로 풍화심도가 깊은 암반이 지표상에 노출되는 경우 급속한 화학적 풍화가 발생할 수 있을 것으로 예상된다. NCB-7의 경우 풍화암 심도에서 양이온의 용출속도가 빠르게 나타나 추가적인 풍화작용이 발생할 경우 풍화속도가 증가할 것으로 판단되며 풍화토의 양이온 용출속도가 느린 것은 양이온이 이미

용출된 것을 지시한다.

상대적으로 이동도가 낮은 원소인 AI은 풍화작용에 의해 형성된 용해공극 내에 잔류 및 집적에 의한 영향으로 대부분의 시추공에서 선형적인 증가양상을 보이는 것으로 나타났다. 풍화가 진행되면 풍화에 의해 용탈되어 버릴 양이온이 감소되어 용탈속도가 감소하는 경향을 보였으며, 풍화가 진행된 시료에서 용탈속도가 빠르다는 것은 빠른 속도의 풍화 진행을 지시하는 것으로 판단된다.

3.4 Profile Model

생지화학적(biogeochemical) 순환에서 암석을 구성하는 광물의 화학적 풍화로 부터 발생하는 염기성 양이온은 중요한 요소가 되며, 장기적으로 지역적인 생태계의 산성화에 대한 민감도는 광물로부터 방출되는 양이온에 의해 결정할 수 있다. 산성화를 만드는 물질에 대한 “임계부하량(critical loads)”의 계산을 위하여 풍화에 의해 방출되는 염기성 양이온은 중요한 입력 요소로 이용될 수 있다. 그러나 시추 시료에 의한 산침수 반응의 결과만으로 전체 비탈면의 화학적 풍화속도를 예측하는 것은 한계가 있다. 따라서 특정 지역의 자연환경 풍화요인과 산성비를 주된 요인으로 포함하는 화학적 풍화속도 예측을 위해 Profile Model을 적용하였다.

1980년대 이후 풍화의 진행 정도에 대한 연구가 시작되어 왔으며 여러 가지 방법 중 가장 구체적인 자료에 기반하고 정량적인 것으로 알려져 있는(Hudson & Langan, 1999) Profile Model은 수학적, 생지화학적 모델로 토양, 암석의 산 집적의 효과와 암석 및 토양화학의 여러 가지 요인을 계산하기 위해 제안된 것으로 특정지역의 자연적인 풍화환경과 대기오염물질에 의한 산성비를 주된 요인으로 하는 화학적 풍화속도를 예측하는 시뮬레이션 모델이다. Profile Model을 통한 분석에서 자연환경인자로는 강수량과 연평균기온, 분석대상체의 지화학적 자료를 입력하여 모델링에 필요한 자료를 구축한 후 정밀 광물성분 분석을 통하여 암석의 용출 특성을 파악하고 광물의 반응특성과 용출된 양이온들의 교환반응속도를 분석하여 화학적 풍화속도를 예측하였다.

Table 6은 풍화에 의한 이온 추출속도(Ion extraction rate)

를 나타낸 것으로 Profile Model을 이용한 풍화 민감도 평가 결과, 풍화토(풍화 잔류토) 등급의 시료는 0.662~0.909 Keq/ha/yr의 풍화속도를 가져 Class 3에 포함되며 풍화암 등급의 시료는 0.398~0.851Keq/ha/yr로 Class 3에 속한다. 또한, 연암 및 경암은 0.325~0.501Keq/ha/yr의 풍화속도 범위를 나타내어 Class 2에 해당되는 것으로 나타났다. Kang(2003)은 경상남도 창원시 부근의 화강암 비탈면에 대한 분석을 통하여 0.579Keq/ha/yr의 풍화속도를 산정하고 경주와 양평 지역의 화강암에 대해 각각 0.509, 0.847Keq/ha/yr의 풍화속도를 제시한 바 있다.

3.5 풍화 민감도 평가

연구 대상 지역에 대한 종합적인 평가 결과 대상 지역의 모암은 담회색 또는 회백색의 화강암으로 석영, 사장석, 미 사장석 및 흑운모 등이 주 구성광물로 NCB-2의 경우 석영 및 장석이 심한 변질을 받아 미세균열의 발달이 두드러지며, NCB-4는 암편의 내부가 장석류의 풍화 산물인 세리사이트로 변한 것으로 나타났다. 또한, 대상 시료의 광물조성은 전체적으로 강도규제광물인 석영의 함량은 15~25%의 범위를 가지고, 풍화 취약광물인 장석류의 함량은 흑운모 화강암에서 60~70%의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. 특히 운모류인 층상광물은 흑운모 화강암에서 약 10~20%의 함량범위를 나타내어 지속적인 화학적 풍화작용이 진행됨에 따라 절취사면의 안정성에 취약한 특성을 가중시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 특징은 X-선 회절분석 결과를 통해서도 확인할 수 있으며, NCB-1, 2, 3, 4 시료(풍화 잔류토)에서 장석의 풍화에 기인된 2차 변질광물인 Kaolinite가 산출되어 화학적 풍화에 취약한 지점인 것으로 나타났다.

이상의 실험 결과로부터 NCB-1은 Kaolinite가 전체 심도에서의 함량이 높으며 흑운모 화강암의 장석을 구성하는 Ca, Na의 용출속도가 증가하고 있어 풍화 심도가 깊고 개착 후 풍화에 대해 상대적으로 민감할 것으로 판단된다. NCB-2도 NCB-1과 유사한 경향을 보이고 있으며, NCB-3은 사장석의 변질과 연관된 Na₂O, K₂O 및 CaO가 풍화가 진행됨에 따라 선형적인 감소경향을 나타내므로 풍화 진행에 따라 사장석의 용탈 및 용해작용에 의한 공극의 형성을 예상할

Table 5. Chemical weathering classification (Nilsson, 1986)

Class	Weathering velocity (keq/ha/yr)	Representative mineral	Country rock
1	<0.20	Quartz, Zircon	Granite, Silica
2	0.21 ~ 0.50	K-feldspar, Muscovite	Granite gneiss
3	0.51 ~ 1.00	Plagioclase, Amphibole, Biotite	Granodiorite, Sandstone, Schist
4	1.01 ~ 2.00	Garnet, Olivine, Pyroxene, Dolomite	Gabbro, Basalt
5	>2.00	Calcite	Limestone, Marl

Table 6. Ion extraction rate by artificial weathering (keq/ha/yr)

Borehole No.	Depth (m)		BC+Na	Ca	Mg	K	Na	Al	Si	PO4
NCB-1	4.0	WS	0.895	0.000	0.024	0.190	0.681	2.647	10.500	0.000
	5.0	WR	0.851	0.000	0.013	0.237	0.601	2.552	10.110	0.000
	12.8	SR	0.461	0.121	0.054	0.077	0.209	1.134	3.911	0.016
	15.9	HR	0.436	0.114	0.052	0.069	0.200	1.070	3.685	0.015
NCB-2	2	WS	0.711	0.001	0.007	0.086	0.617	2.359	8.564	0.000
	2.8	WR	0.646	0.001	0.009	0.135	0.500	2.192	7.776	0.000
	6.7	SR	0.449	0.118	0.053	0.073	0.205	1.104	3.806	0.016
	12.9	HR	0.402	0.105	0.049	0.062	0.187	0.989	3.403	0.014
NCB-3	1	WS	0.627	0.001	0.016	0.088	0.522	5.372	19.554	0.001
	3	WR	0.492	0.131	0.061	0.076	0.224	1.195	4.115	0.019
	8.4	SR	0.398	0.104	0.049	0.057	0.187	0.978	3.357	0.013
	48.7	HR	0.325	0.084	0.039	0.047	0.156	0.811	2.780	0.006
NCB-4	2	WS	0.909	0.042	0.025	0.178	0.664	3.258	10.947	0.001
	3	WR	0.667	0.001	0.086	0.218	0.362	3.084	7.574	0.001
	4	SR	0.459	0.122	0.056	0.073	0.208	1.119	3.851	0.016
NCB-5	1.1	SR	0.415	0.165	0.052	0.062	0.191	1.012	3.479	0.015
	14.1	HR	0.347	0.090	0.042	0.050	0.165	0.858	2.946	0.011
NCB-6	1	WS	0.902	0.001	0.082	0.271	0.549	3.695	10.407	0.001
	2	WR	0.881	0.001	0.045	0.248	0.586	3.165	10.372	0.001
	17.7	SR	0.501	0.135	0.064	0.075	0.227	1.208	4.155	0.020
NCB-7	2	WS	0.662	0.081	0.051	0.530	0.001	5.297	7.946	0.001
	3	WR	0.585	0.158	0.073	0.097	0.257	1.412	4.867	0.023
	8.6	SR	0.318	0.080	0.036	0.048	0.154	0.802	2.755	0.008

where, BC: Ca, Mg and K, referred as BC, PO4: phosphate

수 있다. NCB-4는 풍화속도가 0.909keq/ha/yr로 가장 높은 지수 값을 나타내며, XRD 정량분석 결과 점토광물의 함량이 상대적으로 높으며 팽윤성 점토광물인 Kaolinite, 녹니석화 작용에 의한 Chlorite 및 Vermiculite, Smectite가 검출되어 상대적으로 화학적 풍화작용에 좀 더 민감한 것으로 판단된다.

NCB-5, 6, 7은 퇴적암이 노출되는 지역으로 구간에 따라 단층점토가 발견되었으며 이로 인해 수분 함유율이 높고 팽창성을 가지는 변질광물이 다량으로 검출되었다.

Um(2012)은 경남 김해지역 화강암에 대한 인공풍화 시험을 통해 광물의 용탈을 검증하고 풍화연구를 수행함에 있어서 같은 암종이라도 대상 현장의 지질특성에 부합하는 풍화해석이 필요하다고 주장하였다. 본 연구에서도 고심도의 경우 석영의 구성비가 다소 높으나 풍화를 지시하는 점토광물의 비율은 심도와 크게 연관되어 있지 않음을 알 수 있어, 동일한 설계기준에 의해 시공된 단면이라도 풍화에 대한 민감성에 따라 설계기준을 달리 적용하거나 풍화에 대한 억제 대책을 차등하여 반영시키는 대안이 요구된다.

이상의 실험결과로부터 풍화심도 및 지반의 종류에 따라

상이한 변질광물의 구성비를 가지며 상이한 유출속도를 나타내고 있어 기후 조건, 불연속면과 같은 지질구조, 지형, 광물조성, 지하수, 시간, 유기물의 작용 등의 다양한 원인에 의해 풍화속도가 차별적인 영향을 받을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 시공 후 노출되는 사면의 풍화 저항성을 예측하기 위해 경북 상주시 일원의 흑운모 화강암 지대를 대상으로 풍화에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 편광현미경 조사를 통한 모드분석 결과 풍화 발달 구간에서는 다수의 미세균열이 발달해 있으며 운모화되고 있음을 확인하였다. 또한, 풍화 취약광물인 장석류의 함량이 60~70%의 범위를 보였으며, 운모류인 층상광물이 약 10~20%의 함량범위를 나타내는 것으로 분석되

었다.

- (2) X-Ray 회절분석을 통해 점토광물의 함량을 확인한 결과 NCB-1, 2, 3, 4 시료에서 장석의 풍화에 기인된 2차 변질광물인 Kaolinite가 산출되었으며 풍화 시 쉽게 용탈되는 Na, K의 함량이 감소함을 확인하였다. 또한, SEM 관찰결과 NCB-1, 2 시료의 박리현상과 표면의 탈락이 현저하게 나타났다. NCB-6은 전체구간에서 Kaolinite와 Chlorite가 검출되어 풍화에 매우 민감한 구간인 것으로 관찰되었다.
- (3) 산침수시험을 통해 양이온의 용탈속도를 관찰한 결과 양이온의 용탈속도가 빠른 것은 풍화저항력이 약한 것을 지시하며 풍화 정도가 약할수록 두드러지며, 이는 저심도의 시료들이 풍화에 노출되어 이미 용탈이 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 특히 Fe가 풍화의 진행에 따라 선형적인 증가를 보여 흑운모가 주성분인 암종에서는 중요한 풍화지시자로 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한, Ca, Na의 용출속도가 증가하는 경우에도 장석성분이 많아 풍화에 민감한 것을 예상할 수 있다.
- (4) 경상북도 상주 부근 흑운모 화강암에 대해 Profile Model을 수행하고 화학적 풍화속도를 예측한 결과 대부분 Class 2~3의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 일반적인 화강암에 비해 빠른 풍화속도를 보이는 것으로 판단된다.
- (5) 이상의 결과로부터 설계 시점에서 노출되는 비탈면의 풍화 저항성을 평가하는 방법으로 편광현미경관찰과 XRD, SEM 등을 이용한 구성성분비 평가와 풍화 취약광물의 관찰이 유용한 방법임을 확인하였으며, 인공풍화시험이나 Profile Model을 통한 용탈속도의 검토도 풍화의 진행을 지시하는 인자로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. Bae, W. S., Kim, K. S., Sun, B. I., Lee, B. W. and Ann, B. C. (2010), A case study on weathering sensitivity analysis at sangju area, The proceeding of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2010, pp. 2200~2203 (in Korean).
2. Baek, H. J. and Kwak, J. C. (2000), Changes in the engineering geological properties of domestic gneisses due to weathering, Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 262~271 (in Korean).
3. Crosta, G. (1998), Slake durability vs ultrasonic treatment for rock durability determinations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35, No. 6, pp. 815~824.
4. Grim, R. E. (1962), Applied clay mineralogy, Mcgraw-hill, p. 422.
5. Hudson, M. E. and Langan, S. J. (1999), Considerations of uncertainty in setting critical loads of acidity of soils: the role of weathering rate determination, Environmental Pollution, Vol. 106, pp. 73~81.
6. Kang, M. K. (2003), Study on the property of rock slope in masan area based on weathering sensitivity, Chung-Ang University, Master of Science, pp. 1~56 (in Korean).
7. Nilsson, J. (1986), Critical loads for nitrogen and sulphur, Nordic Council of Ministers, Report 1986: 11, p. 232.
8. Park, J. Y., Lee, J. S., Bae, S. H., Yu, Y. I., Oh, J. B. and Lee, D. H. (2006), Weathering sensitivity characterization for rock slope, considering time dependent strength changes, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 16, No. 2, pp. 109~134 (in Korean).
9. Park, S. S. (2006), Study on the determination of instruments and measurement frequency for rock slope stability by analyzing the weathering sensitivity, Master's thesis, University of Kukmin, pp. 1~62 (in Korean).
10. Suh, M. C., Kim, M. K. and Choi, S. W. (1994), Weathering characteristics of rocks near churyong tunnel site, kyongbuk, using geophysical and geochemical methods, The journal of Engineering Geology, Vol. 4, No. 3, pp. 269~282 (in Korean).
11. Um, J. G. (2012), A study of weathering characteristics of cretaceous granite in kimhae area due to artificial weathering process, Tunnel & Underground Space, Vol. 22, No. 1, pp. 32~42 (in Korean).