

화강암 분포 지역에서 화학적 풍화변질지수와 풍화등급의 비교

김성욱, 이선갑, 류호정*, 김춘식**, 김인수***

지반정보연구소, 611-828 부산시 부산진구 양정2동 333-6

*부경대학교 공동실험실습관, 608-737 부산시 남구 대연3동 599-1

*주식회사 한길지오텍, 137-010 서울시 강남구 논현동 126-7

***부산대학교 지질학과, 609-735 부산시 금정구 장전동 신30

(suwokim@chol.com)

<요약문>

지리적으로 이격된 마산과 서부산 지역의 불국사 화강암 분포지에서 정량적인 풍화도를 판별하기 위해 화학적 풍화지수와 등급을 산정하였다. 연구를 위해 채취된 시료에 대해 풍화 생성광물 동정, 전암 분석, 산침수에 의한 이온용출 시험을 실시하였으며, 풍화지수와 지형적인 요소와 풍화속도를 고려하여 풍화등급을 산정하였다. 분석 결과 동일한 물리적, 광물학적 특성을 가지고 있으나 풍화에 따라 생성되는 점토광물의 종류와 함량에서 차이를 보여주며, 풍화의 진행 경로와 범위는 매우 상이한 결과를 보여 준다. 이러한 결과는 암석의 풍화가 모암의 조건 외에 지형, 지질구조, 기온, 강수량과 같은 환경적인 요소에 밀접하게 관련되어 있는 것을 의미할 뿐만 아니라 풍화도 산정에서 환경적인 요소에 대한 해석이 반드시 요구된다.

Key word : 풍화지수, 산침수, 풍화등급

1. 서론

암석의 풍화에서 기계적 풍화로 세립화된 암석은 표면적이 증대하여 수분과 접하는 면이 증가하기 때문에 화학적 풍화를 다시 촉진 시킨다. 풍화가 진행되면 암석의 고결도가 떨어지고 공극율 및 흡수율이 증대되며 따라서 암석의 역학적 성질도 약화된다.

암석의 풍화도는 지반의 지지력, 절토사면 안정, 터널굴착공법 선정, 토공작업에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 F(신선암), SW(약한 풍화), MW(중간 풍화), HW(심한 풍화), CW(완전 풍화) 등으로 구분되는 암석의 풍화도는 RMR분류, Q분류, RQD, 코아회수율(TCR), 탄성파속도, 일축압축강도, 암편의 내압강도, 탄성계수비, 변질지수, 균열계수 등과 함께 암반분류방법 중의 하나로 많이 이용된다. 따라서 암석의 풍화도 파악은 구조물기초, 비탈면, 그리고 터널 설계를 위한 지반조사 또는 막장조사에서 중요한 항목을 차지한다. 암석의 풍화도는 일반적으로 현장에서 암석을 육안관찰하고 지질햄머 등을 이용하여 관능적으로 파악하며 드물게는 실내에서 측정된 암석시료의 흡수율 또는 화학적 변질지수를 이용하

여 평가한다. 따라서 좁은 지역에 있는 암석의 풍화도 판정은 용이하나, 산사태예측 연구 등을 위해 넓은 지역에 대한 암석의 풍화도를 밝히는 일은 많은 시간과 노력을 필요로 한다.

암석의 풍화에 대한 민감도분석은 인위적으로 노출된 암석들이 지표환경에서 지하수, 강우(산성비), 대기오염물질 등의 여러 가지 영향이 암석의 강도에 영향을 주는 정도를 정량적으로 예측하는 방법으로 이용된다.

이 연구는 풍화에 의한 암석의 지화학적 특성을 분석하여 화학적 풍화에 대한 정량적인 표현 방법을 마련하고 고려되어야 할 위험요인을 판별하기 위한 목적으로 수행되었다.

연구지역은 경남 마산시 가포동의 산지 일대(그림 1의 A)와 부산광역시 강서구 송정동에 위치한 견마도(그림 1의 B)에 해당하며, 지질은 백악기말-3기초에 형성된 불국사 화강암으로 구성되어 있다. 분석을 위한 시료는 비탈면에 노출된 노두와 시추코어로부터 획득하였다(표 1, 표 2, 그림 4, 5 참조).

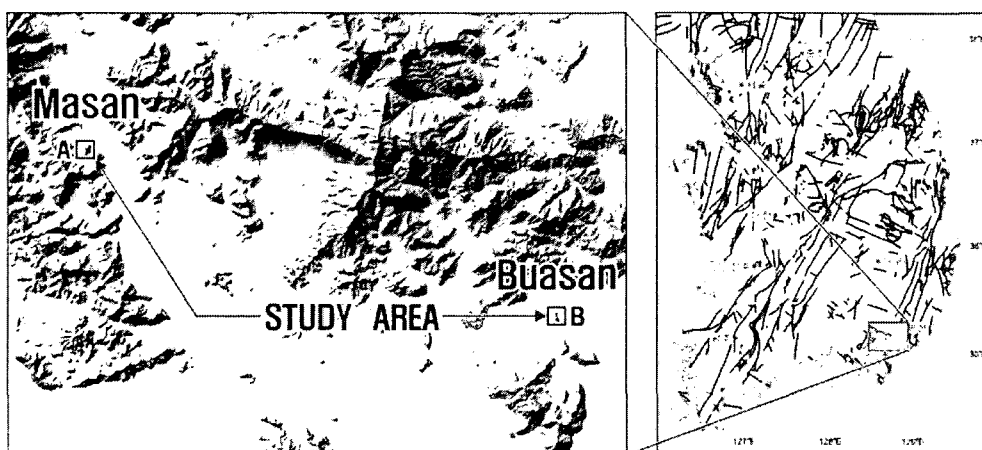


그림 1. 연구지역의 위치

표 1. 마산 가포동 비탈면의 시료 채취 위치

시료	좌표		비고	시료	좌표		비고
	X	Y			X	Y	
MK-1	161640	184851	노두시료	MK-6	161559	184548	노두시료
MK-2	161635	184872		MK-7	161588	184554	
MK-3	161644	184892		MK-8	161622	184557	
MK-4	161671	184789		MK-9	161645	184576	
MK-5	161698	184748		MK-10	161633	184605	
NCB-5	161664	184831	코어시료	MK-11	161538	184637	

표 2. 서부산 송정동 비탈면의 시료 채취 위치

시료	좌표		비고	시료	좌표		비고
	X	Y			X	Y	
GY-1	184850	176242	노두시료	GY-9	184848	176165	노두시료
GY-2	184835	176285		GY-10	184799	176067	
GY-3	184820	176338		GY-11	184850	176224	
GY-4	184825	176369		GY-12	184713	176169	
GY-5	184825	176070		GY-13	184837	176094	
GY-6	184840	176091		CB-1	184823	176192	코어시료
GY-7	184835	176119		CB-3	184897	176017	
GY-8	184848	176125					

2. 연구방법

2.1. 풍화 광물

풍화가 진행됨에 따라 점토 광물이 생성되며, 이렇게 형성된 점토광물은 풍화를 더욱 가속시키게 된다(그림 1). 특히 점토광물 중에서 팽윤성 광물의 진단은 풍화 정도와 인공물의 안전성을 예측하는 자료가 된다. 특히 점토광물에 대한 분석은 산성비의 영향을 고려하여 산침수 시험 이전과 이후 시료를 구분하여 실시하였다. 산침수 시험을 위한 분석방법은 채취한 암석 시료를 분말로 만들고 이를 강산 용액에 넣은 후, 일정 시간동안 반응시켜 만들어진 용액에 대하여 화학성분을 분석하여, 산에 용출되는 화학성분의 정도를 파악함으로써 풍화 정도를 예측하였다.

2.2. 화학적 변질지수(Chemical Index of Alteration; CIA)

화학적 풍화에 의해 암석과 광물중의 원소는 천천히 용탈되며, 용탈되는 양과 속도는 원소에 따라 달라진다. 이를 이용해서 이동성이 큰 화학종(알칼리금속, 알칼리토금속)과 이동성이 작은 화학종(TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)과의 비를 측정함으로써 풍화의 정도를 지시할 수 있다. XRF분석을 이용한 전암분석은 주로 암석의 화학적 특성을 검증 대비해 보기 위해 암석의 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5 의 함량을 측정하고 동일 암석에서 구성 성분의 변화를 분석 비교함으로써 화학적 풍화가 어느 정도 진행되었는가를 예측할 수 있다. 연구에서는 식(1)과 같이 화학적 변질지수(Chemical Index of Alteration; CIA; Nesbitt and Young, 1982)를 계산하여 분석 대상 시료가 화학적 풍화의 최종 단계에 이르는 경로와 현재의 풍화 단계를 제시하고 CIA의 변화에 따른 산화물의 변화를 비교하였다.

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

Minerals and Rocks	Values of CIA
Unaltered albite	50
Unaltered anorthite	50
Unaltered K-feldspar	50
Diopside	0
Fresh basalts	30-45
Fresh granites	45-55
Fresh granodiorite	45-55
Idealized muscovite	75
Illite	75-85
Smectite	75-87
Kaolinite, Gibbsite, Chlorite	100
Shale	70-75

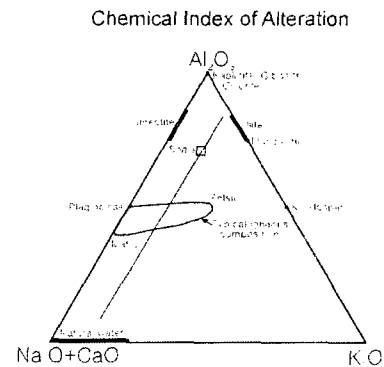


그림 2. 암석과 광물의 화학적 변질지수(CIA)

3. 연구결과

산침수 반응 전후의 X-선 회절분석에서 마산 가포동의 시료 중 에서 풍화생성물로 일라이트, 녹니석, 카올린 등의 점토광물과 팽윤성광물인 스멕타이트가 나타난다. 산침수반응 이후 각섬석의 강도가 감소하거나 사라지는데, 각섬석은 지표 노출시 산성비에 의해 매우 빠른 풍화가 예상되며, 이들의 풍화는

점토광물 중 스멕타이트와 같은 팽윤성 점토의 생성을 유발할 것으로 예상된다 (그림 3의 a, b).

서부산 송정동의 시료는 산침수 시험 이전 석영, 장석, 흑운모 등의 결정광물과 소량의 점토 포함하며, 지표에서 심도가 증가함에 따라 점토 함량비는 감소한다. 산침수 반응 이후 녹니석의 피크가 현저히 줄어들며, 이는 녹니석 층간을 구성하는 수산화물 층의 원소인 Mg와 K가 용탈되는 것에 의해 콜로이드화되어 녹니석의 결정이 붕괴되었던 것으로 추정된다. 카올린은 산침수반응 후 증가하는데 장석류 및 운모류와 같은 결정광물이 Mg와 K의 용출에 의해 카올린으로 상변화가 일어난 것을 지시한다.

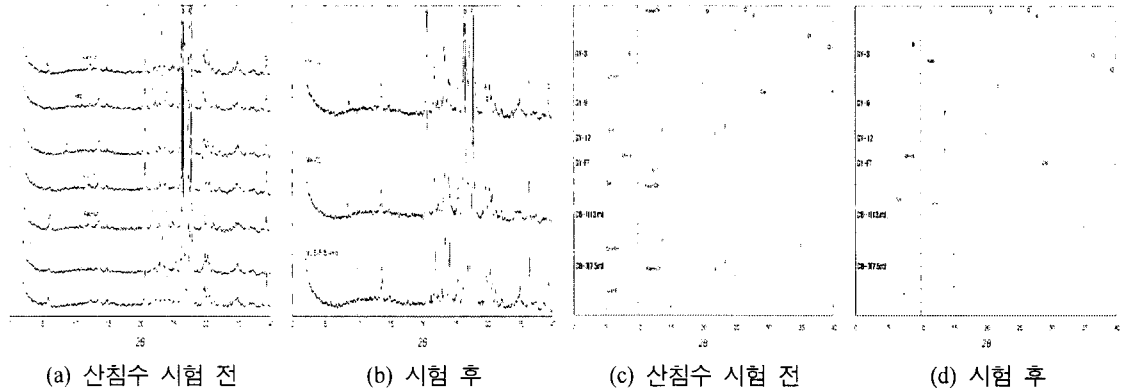


그림 3. 마산 가포동(a, b)과 서부산 송정동(c, d) 시료의 산침수시험에 따른 광물변화

표 3. 마산 가포동 시료의 풍화지수

Sample	MK-1	MK-2	MK-3	MK-4	MK-5	NCB-5	MK-6	MK-7	MK-8	MK-9	MK-10	MK-11
CIA	62.28	61.56	62.46	62.64	62.79	60.37	63.57	61.30	61.54	62.86	62.36	63.33
CIW	76.43	75.05	76.63	77.88	76.04	71.10	78.50	75.00	76.20	78.37	76.91	77.66
PI	80.26	81.01	81.29	81.51	78.93	81.84	80.92	81.61	81.30	80.76	81.22	81.81
SA	4.72	4.94	4.96	5.10	4.59	5.20	4.91	5.11	5.10	4.95	5.02	5.01
V	3.89	3.65	4.11	4.32	3.53	2.94	4.45	3.68	3.97	4.45	4.04	4.23
Si-Ti Index	81.09	81.72	81.82	82.08	80.25	82.42	81.64	82.21	82.15	81.63	81.91	81.98
MWPI	9.93	9.82	9.30	9.18	10.27	9.82	9.09	9.62	9.54	9.30	9.42	9.03

표 4. 서부산 송정동 시료의 풍화지수

Sample	GY-1	GY-2	GY-3	GY-4	GY-5	GY-6	GY-7	GY-8	GY-9	GY-10	GY-11	GY-12	GY-13
CIA	67.35	69.45	74.13	66.70	60.18	61.99	62.59	64.06	70.42	60.87	65.43	71.47	52.45
CIW	76.89	76.65	90.07	76.11	76.20	72.97	69.38	73.38	72.43	79.75	72.75	77.12	56.95
PI	77.41	80.18	76.94	76.11	85.65	80.46	78.05	78.45	59.30	86.84	75.57	71.95	65.97
SA	4.56	5.07	5.05	4.29	6.46	5.07	4.59	4.59	2.80	6.97	4.27	3.21	2.89
V	2.66	2.78	5.85	2.55	4.25	2.67	2.14	2.65	1.15	5.40	2.14	3.25	1.18
Si-Ti Index	80.19	81.05	81.58	79.27	86.25	81.99	80.19	80.52	70.64	87.18	78.58	74.78	72.05
MWPI	10.17	8.22	6.92	10.93	8.21	10.45	11.08	10.41	19.96	7.50	11.61	9.50	22.40

각 시료로부터 표 3, 표 4와 같이 화학적 풍화지수를 산정하였으며, 화학적 변질지수(CIA)는 각 풍화지수들과 좋은 상관관계를 보인다. 마산 가포동의 시료의 풍화지수는 신선한 암석에 비해 상당 부분 풍화가 이루어졌음을 보여주며, 북측비탈면에 비해 남측비탈면에서 다소 높은 지수를 가진다. 풍화는 기반암-->일라이트(illite)-->고령석(Kaolinite)의 경로를 따라 진행이 예상된다(그림 4). 송정동 시료의 화학적 변질지수(CIA)에서 북측 비탈면이 남쪽에 비해 더 많은 풍화를 받은 것으로 나타난다. 코어시료의

경우, 화학적 변질지수가 심도가 증가함에 따라 감소한다. 송정동의 시료는 풍화가 진행될 수록 CaO, K₂O, Na₂O, SiO₂의 양은 용탈에 의해 감소하고, Al₂O₃, Fe₂O₃*, TiO₂, L.O.I(loss on ignition)의 침적물로서 양이 증가한다. 풍화는 넓은 범위로 나타나며, 기반암-->스멕타이트(Smectite)-->고령석(Kaolinite)의 경로를 따라 풍화가 예상된다(그림 5). 마산과 서부산 지역은 동일한 화강암으로 구성되어 있으나 풍화지수에서 다소의 차이를 보이며, 특히 예상되는 풍화경로는 상이한 형태로 나타난다.

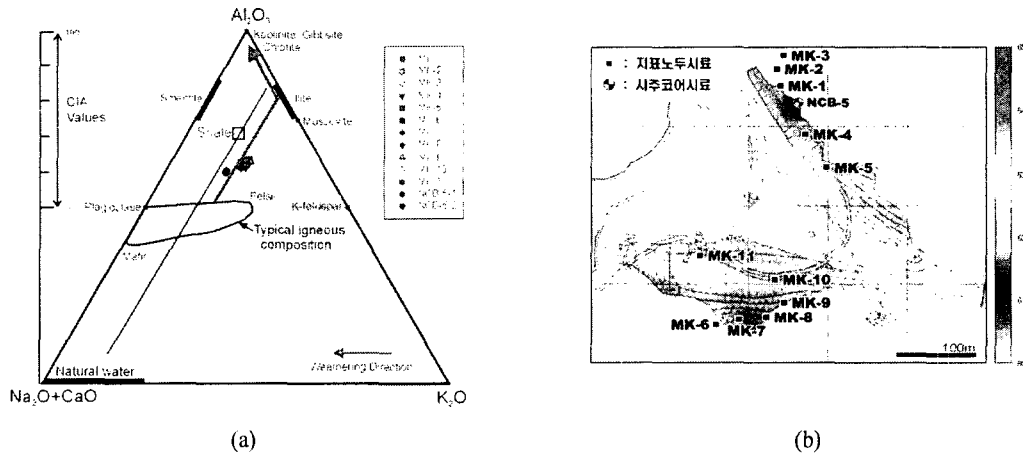


그림 4. 마산 가포동 시료의 화학적 변질지수와 풍화 예상 경로

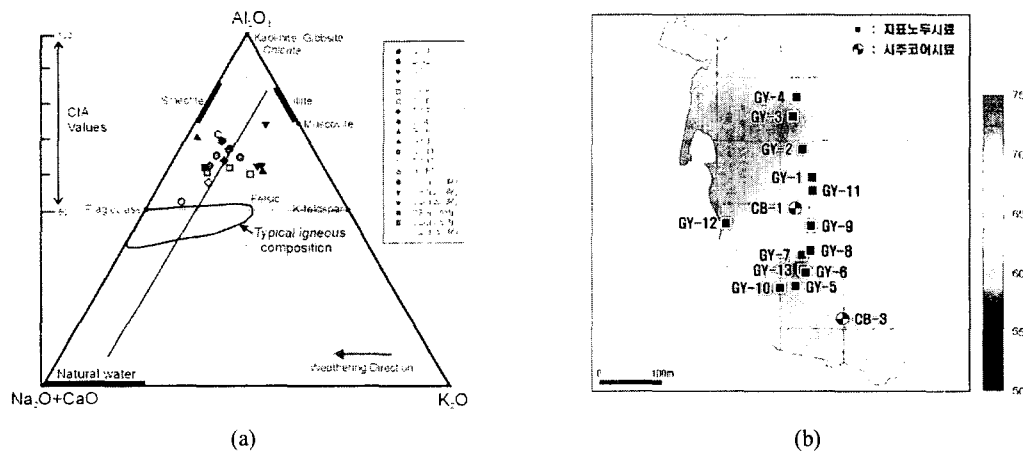


그림 5. 서부산 송정동 시료의 화학적 변질지수 분포와 풍화 예상 경로

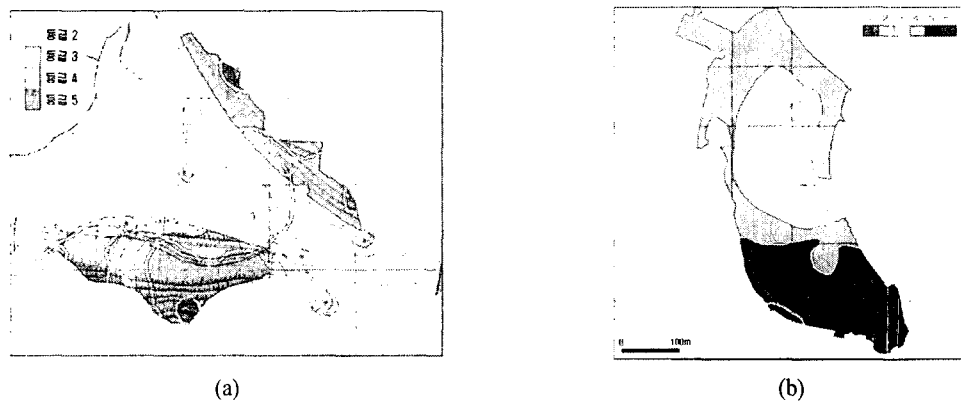


그림 6. 마산 가포동(a)과 서부산 송정동(b)의 비탈면의 풍화 등급

그림 6은 연구 대상비탈면의 습윤지수, 임계부하량, 화학적 변질지수, 산침수 반응에서 이온의 용출량을 이용하여 작성한 풍화등급을 표현한 것이다. 각 요인의 가중치는 동등하게 산정하였다. 마산 가포동 비탈면은 풍화 등급은 북측비탈면은 등급 4에 해당하며, 남측비탈면(등급 3)보다 높게 산정되었으며, 집수지역과 단열이 발달하는 부분은 수분의 포화도가 높아 빠른 풍화가 예상된다. 서부산 송정동은 2~5등급의 넓은 범위로 나타나며, 북쪽 비탈면이 남쪽에 비해 더 높은 등급으로 나타나 매우 속도의 풍화가 예상된다.

4. 결 론

화학적 풍화 정도를 정량적으로 표현하는 방법으로 다양한 형태의 풍화지수가 제안되어 있으나, 사용되는 자료가 제한적이며, 매우 좁은 적용 범위의 문제점이 있다. 우리나라 속한 온대지방은 화학적 풍화가 우세하며, 화학적 풍화에 대한 정량적인 풍화도의 판정이 절실히 요구된다. 특히 산사태예측 연구와 같이 지질재해와 관련된 분야에서 광역적인 풍화도의 산정은 필수적이라 할 수 있다.

이상의 연구결과와 같이 연구지역은 같은 지질시대에 형성된 화강암으로 구성된 지역으로 유사한 물리적, 광물학적 특성을 가지고 있으나 풍화생성물과 풍화의 진행 경로, 풍화 등급에서 모두 상이한 결과를 보여준다. 이것은 풍화가 모암의 조건 뿐 아니라 지형, 불연속면, 강수량 등의 환경적인 요소에 의해 지배되고 있음을 보여준다. 따라서 풍화지수의 산정 뿐아니라 습윤지수와 같은 지형 요소와 지질 요소를 포함하여 지속적인 풍화도 산정에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

1. 한지영, 김성욱, 강문기, 김상현, 김인수(2003) “경남 상북면 양산단층 서부지역에 대한 습윤지수 특성 연구” 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회.
2. 김성욱, 김국락, 한지영, 윤원섭, 김춘식, 김인수(2004) “고흥군 우각산 일대의 습윤지수와 암석의 풍화정도와의 상관관계” 한국지반공학회 20주년 기념 학술발표회.
3. Nesbitt and Young(1982), Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature Vol. 299, pp.715-717.