

Wetness Index와 Profile Model을 이용한 암석의 화학적 풍화연구

김성욱, 한지영, 윤운상*, 김상현**, 김인수***

지반정보연구소 611-828 부산시 부산진구 양정2동 333-6

*주식회사 넥스지오 137-070 서울시 서초구 서초동 1485-3

**부산대학교 환경공학과 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

***부산대학교 지질학과 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

(suwokim@chol.com)

<요약문>

화강암에 대한 화학적 풍화특성과 풍화 정도의 정량적으로 표현하기 위한 방법으로 조사지역의 지형 자료에 기초한 습윤지수(wetness index)를 산정하였으며, 풍화속도 및 등급을 산정하였다. 습윤지수는 지형 고도를 이용하여 2-5m 크기의 격자로 구성 된 수치고도모형을 작성하여 계산하였으며 풍화속도와 등급은 Profile model을 이용하였다.

연구대상지역은 마산지역과 서부산지역으로 집수지형을 지시하는 습윤지수의 분포는 마산지역에서 다소 높은 지수 값을 보인다. 임계부하량(critical loads)에 의한 풍화등급은 마산 가포동 지역과 서부산 견마도 지역은 각각 3등급과 4등급에 해당하여 견마도 일원에서 높은 풍화 정도를 지시한다. 이와 같은 결과는 동일한 화강암 분포지의 경우에도 구성 광물의 비율과 기온과 강수량과 같은 지역적인 특성에 따라 상이한 풍화 경향이 나타남을 지시한다.

Key word : 습윤지수, Profile model, 임계부하량

1. 서론

암석의 풍화는 화학조성의 변화 없이 물리적으로 분리되는 물리적 풍화작용과 수분이나 그 속에 포함된 다른 화학성분의 화학적인 반응에 의하여 광물이 분해되는 화학적 풍화작용으로 구분된다. 지표에서 수분의 포화 정도는 암석의 풍화 정도를 예측하는 자료가 되며, 우리나라와 같이 물리적 풍화보다는 화학적 풍화가 우세한 지역에서 수분의 포화 정도는 토양과 암석의 풍화 정도를 예측하는 자료가 된다.

비탈면과 같이 지표에 노출된 암석은 대기, 지하수, 강우 등의 영향에 의하여 풍화작용이 가속되며, 풍화작용은 암석을 구성하는 광물의 화학적 성질을 변화시켜, 암석의 안정성을 저하시키게 된다. 지표에서 국소지역의 포화정도를 지시하는 습윤지수(wetness index)는 강우 시 형성되는 수계와 집수지형의 공간적인 분포를 나타내며, 토양 및 암석의 화학조성을 규명함으로써 풍화 정도와 풍화속도를 예측할 수 있다. 이러한 자료는 암석의 풍화정도를 고려한 재해 예방을 위한 시설물의 설계 및 시공에 활용될

수 있다.

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.

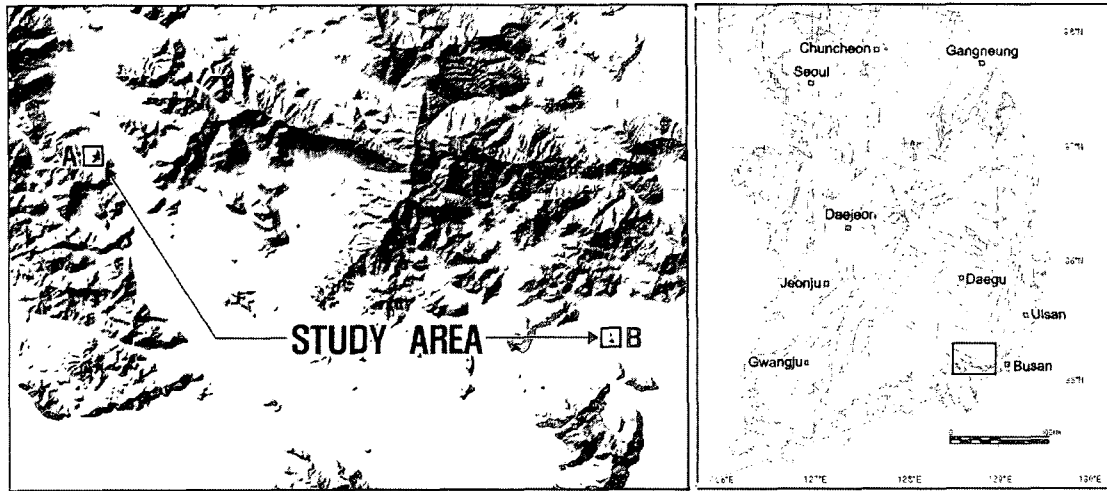


그림 1. 연구지역의 위치

2. 연구방법

2.1. 국소지역의 습윤지수(wetness) 산정

암석의 안정성은 풍화작용과 직접적인 상관성이 있으며, 암석의 균열과 같이 불연속면을 따라 분포하는 수분의 포화 정도는 암석의 물리적, 화학적 풍화와 비례한다. 습윤지수를 이용한 수문해석은 강우시, 한시적으로 형성되는 수계의 포화정도를 산정하고, 지형도상에 표현되지 않는 미세한 수계와 집수지형을 표현한다. 수치지형자료를 이용하여 고도모형을 작성하고 흐름분배 알고리즘인 DEMON(Digital Elevation Model Networks) 알고리즘을 적용하여 상부지역으로부터 받을 수 있는 잠재 흐름량의 측정치인 상부사면 기여면적과 구축한 수치고도모형을 이용하여 유한차분 방법을 이용하여 경사도를 계산한다.

$$s = \sqrt{z_x^2 + z_y^2} \quad (z_x, z_y : \text{미분계수}) \quad (1)$$

상부사면 기여면적과 경사도 자료를 이용하여 국소지역의 습윤지수를 산정하며(Beven과 Kirkby, 1979) 자연적인 지형 특성을 반영하는 인자로서 수문 현상의 모의에 사용한다.

$$\text{습윤지수 (Wetness Index)} = \ln(a / \tan \beta) \quad (2)$$

(a : 상부사면 기여면적을 단위 격자 크기로 나눈 비 상부사면 기여면적, $\tan \beta$: 경사)

2.2. Profile model을 이용한 풍화속도 산정

Profile model은 임계부하량(critical loads)에 기초한 수학적, 생지화학적 모델로써, 토양, 암석의 산집적의 효과와 암석 및 토양화학의 여러 가지 요인을 계산하기 위해 제안되었다(Werner와 Spranger (1996)). 이 모델은 특정지역의 자연적인 풍화환경과 대기오염물질에 의한 산성비를 주된 요인으로 하는 화학적 풍화속도를 예측한다.

Profile에는 토양의 자연적인 성층에 따른 토양단면의 특성을 반영하기 위해서 층서가 구분되어야하며

동일 층서에서 토양특성들이 균질하다고 가정한다. 과정들은 산성중화능력(ANC), 염기성 이온들, 질산염과 암모니아에 대한 질량 평형식과 화학적 풍화, 질산화에 대한 동역학적 식에 의해 나타난다. 또한 Profile model은 자연 상태를 정적평형상태로 가정한 질량균형(mass balance)에 기초하였으며, 주요 조암광물의 화학적 풍화속도 및 실내 풍화시험 자료를 database로 활용하고, 전체 분석 대상체가 단위 시간(연)당 배출하는 양이온의 당량으로 계산한다. 산침전(acid deposition)에 대한 토양의 산성중화능력을 지지하는 임계부하량 (Critical loads)은 장기적으로 생태계 구조와 기능에 대해 유해한 효과와 같은 화학적 변화를 발생시키지 않는 산성화 성분(acidify compounds)의 최대 침전으로 정의되며(Nilsson and Grennfelt, 1988), critical load을 계산하기 위해, 염기성 이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} 등)과 산성이온(SO_4^{2-} , NO_3^- 등), 그리고 pH가 이용된다.

$$CL_{acidity} = BC_{deposition} + BC_{weathering} - BC_{uptake} - ANC_{leaching} \quad (3)$$

CL_{acidity} : Critical loads

BC_{deposition} : deposition input, 생태계에 영향을 주지 않고 지형학적 위치와 관련

BC_{weathering} : 광물의 풍화로부터 방출되는 염기성 이온

BC_{uptake} : 식생에 의해 소모되는 염기성 양이온

ANC_{leaching} : 용탈에 의한 Acid neutralising capacity, 예로 pH, Ca:Al criteria

현장의 풍화속도는 토양수문학, 토양의 물리적 특성, 토양 광물학, 광물 조성을 고려하여 각각의 광물의 분해율을 사용하여 계산된다. 풍화속도의 총괄율은 용해된 광물들의 반응율의 합으로 나타나며 수소이온, 물, 이산화탄소와 유기산의 분해 반응도 고려된다. 풍화 속도는 광물의 노출된 표면면적과 토양 수분 포화도에 비례하여 처리된다. 또한 Arrhenium 함수를 사용하여 온도에 따른 풍화 반응이 고려된다. 계산된 풍화속도에 따른 풍화등급과 예측인자는 표 1, 표 2와 같다.

표 1. 화학적 풍화속도 등급(Nilsson과 Grenfeld)

등급 (class)	풍화지배광물	모암	임계부하량 (Keq H ⁻ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	
1	most	Quartz, K-feldspar	Granite, Quartzite	< 0.2
2	sensitive	Muscovite, Plagioclase, Biotite(<5%)	Granite, Gneiss	0.2 ~ 0.5
3	↓	Biotite, Ampibolite(<5%)	Granodiorite, Greywacke, Schist, Gabbro	0.5 ~ 1.0
4	least	Pyroxene, Epidote, Olivine(<5%)	Gabbro, Basalt	1.0 ~ 2.0
5	sensitive	Carbonates	Limestone, Marl	> 2

표 2. 화학적 풍화속도의 예측인자와 계산

자연환경 인자분석	화학적 풍화속도 예측 계산
<ul style="list-style-type: none"> 모델링에 필요한 자료 구축 (강수량, 연평균 기온 등) 강하물의 양이온, 음이온 등 분석대상체의 지화학적 자료 구축 Input card의 각 해당 자료를 기입 	<ul style="list-style-type: none"> 암석의 화학종 용출 특성 파악 용출된 화학종들의 광물과의 반응 특성 분석 용출된 양이온들의 양이온 교환반응 속도분석

3. 연구결과

연구지역의 지형 자료는 1:5,000 축척의 수치지형도로부터 고도값을 갖는 자료층을 추출한 후 마산 가포동 지역은 5m×5m 격자 크기의 DEM으로 변환하였으며, 서부산 견마도 지역은 2m×2m 크기의

DEM을 구축하였다. DEM으로부터 음영도 (그림 2a, 그림 3a)와 상부사면 기여면적, 경사도를 산정하고 습윤지수 (그림 2b, 그림 3b)를 계산하였다.

마산지역에서 습윤지수의 분포는 지형에서 관측되지 않는 미세한 수계를 잘 표현하고 있으며, 계곡이 발달한 부분에서 최대치를 가진다. 비탈면에서 6이상의 높은 습윤지수를 나타내는 부분은 선형으로 발달하며, 습윤지수의 이러한 분포는 단열대와 같이 물리적 풍화 정도가 큰 지역에서 수분에 의한 화학적 풍화가 집중됨을 의미한다(그림 2).

서부산 지역은 해안에서 최대의 습윤지수를 가지며, 높은 습윤지수 영역은 연구지역의 서쪽 비탈면에서 선형으로 관찰된다. 반면 동쪽 비탈면은 습윤지수가 5이하로 집수가 되는 부분이 관찰되지 않는다(그림 3).

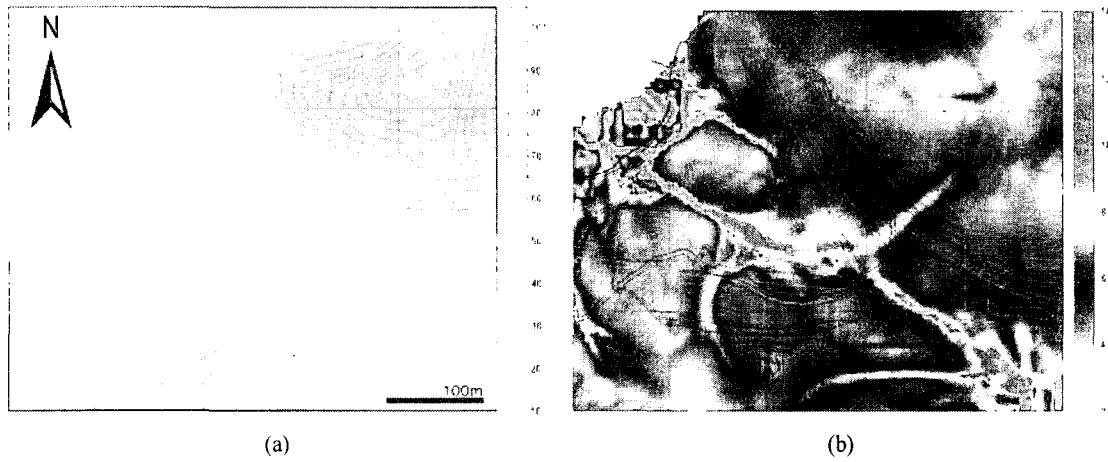


그림 2. 마산시 가포동 비탈면의 음영도(a)와 습윤지수(b)

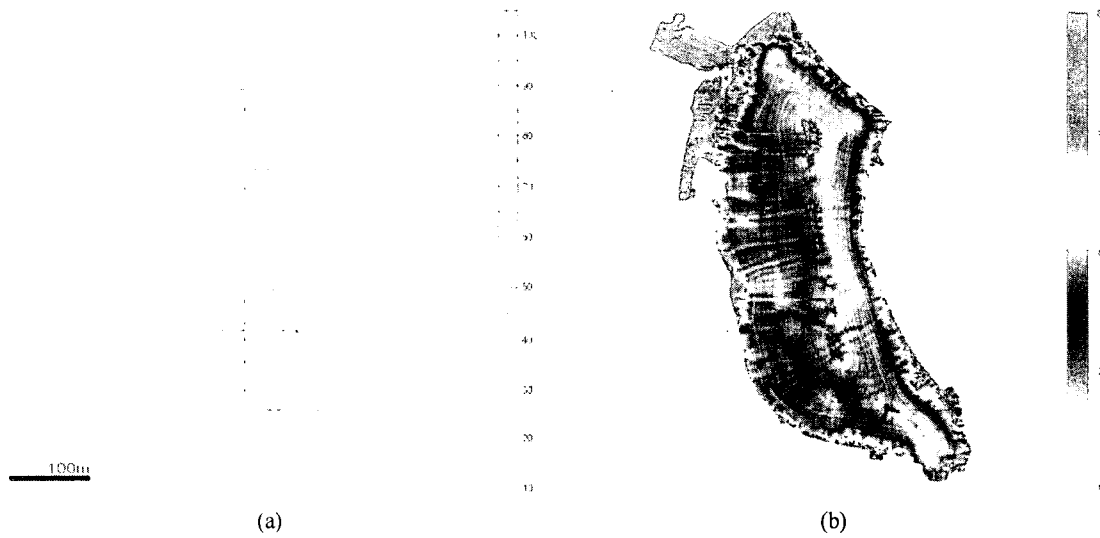


그림 3. 서부산 견마도 비탈면의 음영도(a)와 습윤지수(b)

Profile model에 의한 마산 지역 비탈면의 풍화 속도(임계부하량)는 0.579 kEq/ha/yr로 3등급(표 1)에 해당하며, 서부산지역의 1.152 kEq/ha/yr의 풍화속도로 4등급에 속한다(표 3). 연구에서 분석된 풍화속도는 3-4등급으로 일반적인 화강암의 풍화속도에 해당하는 2등급보다 빠른 풍화를 지시한다. 이것은 이 지역의 암석이 이미 상당 부분 풍화가 진행되었음을 의미한다. 또한 서부산의 경우에서 1.0kEq/ha/yr이상의 풍화속도는 염기성 암석에서 나타나는 풍화 정도로 양산단층의 발달에 위치하고 있어 단층과 같

은 불연속면의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 표 4는 구성광물의 함량에 따른 풍화속도를 산정한 것으로 3등급에 해당하며, 마산지역과 서부산 지역은 유사한 속도를 나타낸다. Profile model과 광물 조성에 의한 풍화속도 차이는 유사한 암석의 경우라도 주변 환경과 산성비에 반응, 용출되는 특성에 따라 풍화 정도가 달라질 수 있음을 보여준다.

표 3. Profile model에 의한 풍화 속도(단위 :kEq/ha/yr)

지역	Ca	Mg	K	Na	Al	Si	PO ₄	임계부하량
마산	0.001	0.012	0.006	0.027	0.106	0.427	0	0.579 kEq/ha/yr
서부산	0.177	0.037	0.003	0.047	0.179	0.708	0.001	1.152 kEq/ha/yr

표 4. Mode 분석에 의한 풍화 속도(단위 :kEq/ha/yr)

지역	사장석	K-장석	석영	흑운모	각섬석	점토광물 외	임계부하량
마산	0.38	0.18	0.00	0.17	0.03	0.02	0.780 kEq/ha/yr
서부산	0.35	0.05	0.00	0.04	0.16	0.12	0.720 kEq/ha/yr

4. 토의 및 결론

지형도에 표현되는 수계는 연구지역과 같이 비탈면이나 국소적인 지역의 수계 분포를 표현하지 못하며, 음영도만으로 수분의 집수지역과 흐름 방향을 인지하기는 매우 어렵다. 반면 수치지형으로부터 산정된 습윤지수는 강우 시 형성되는 물의 흐름과 수렴, 분산의 정도를 인지하는 좋은 방법이 된다. 비탈면과 같이 국소지역에서 높은 습윤지수로 표현되는 집수지역은 연구지역과 같이 대부분 선형으로 발달하며 이들의 방향은 단열계의 방향과 거의 동일하게 발달한다(한지영 외, 2003; 김성욱 외, 2004). 이러한 특성은 관찰이 용이하지 않는 암석의 단열대를 인지하는 수단이 된다. 한편, 수분과 관련되는 화학적 풍화는 단열과 직접 연관되어 있으므로 습윤지수는 토양이나 암석의 풍화정도를 예측하는 요소로 이용될 수 있다.

풍화의 진행속도는 강수량, 기온, 구성 광물, 암석의 종류, 강하물의 양이온 등과 같이 다양한 요인에 따라 달라지며, 동일한 종류의 암석의 경우에도 양이온의 용출 특성과 용출된 양이온의 반응이 상이하게 나타난다. 지금까지 풍화속도의 예측은 광물의 종류와 함량에 따라 결정하였으며 환경적인 요소와 용출된 이온의 거동에 대해 고려되지 못하였다. 이 연구의 결과와 같이 동일한 화강암 분포지의 경우에도 풍화속도와 용출되는 이온들은 상당한 차이를 보인다. 또한 습윤지수와 Profile model에 의한 풍화속도는 화학적변질지수(CIA)나, 화학적풍화지수(CIW)와 더불어 토양이나 암석의 풍화민감도 특성 및 지질재해를 정량적인 예측하는데 있어 중요한 정보를 제공한다.

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. Beven(1982) "On subsurface stormflow an analysis of response times." Hydrological Science Journal, Vol. 27, pp. 505-521.