

실내인공풍화가속실험을 통한 해수와 산성증류수에 대한 유천층군 화산암의 풍화 특성 연구

우 익*

군산대학교 해양건설공학과 교수

Accelerated Laboratory Experiments Investigating Weathering of Volcanic Rocks from Yuchon Group Exposed to Seawater and Acidified Distilled Water

Ik Woo*

Professor, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University

Abstract

Laboratory tests of accelerated artificial weathering compared the effects of seawater and acidified distilled water on rock weathering. The experiments simulated chemical and physical weathering of five different types of volcanic rock by applying 45 freeze-thaw cycles using seawater and acidified distilled water (pH 3), both at 70°C. The physical properties and uniaxial compressive strength (UCS) of the rocks were measured after 15 and 45 cycles of artificial weathering. Most of degradation of physical properties appeared within the first 15 cycles, and acidified distilled water had a greater effect than seawater. Analysis of variance (ANOVA) statistically evaluated the differences in UCS of the different rock types during the tests. The rate of UCS reduction after 45 cycles was similar across the samples, being independent of the rock type and the trend of changes in physical properties. In contrast to the changes in the physical properties, the UCS was more affected by seawater than by acidified distilled water.

Keywords: accelerated artificial weathering, seawater, acidified distilled water, volcanic rock, physical properties, UCS, ANOVA

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Ik Woo
E-mail: woo@kunsan.ac.kr

Received: 24 January, 2024
Accepted: 29 February, 2024

© 2024 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 연구에서는 해수와 산성증류수가 암석 풍화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내인공풍화가속실험을 수행하였다. 70°C의 해수와 산성증류수(pH 3)를 이용하여 총 45회의 동결-융해 실험을 통하여 5종의 유천층군 화산암에 대하여 화학적·물리적 풍화를 모사하였다. 실내인공풍화가속실험 15회와 45회에 각각 물리적 물성과 일축압축강도를 측정하여 풍화 진행에 따른 물성 변화를 추적한 결과, 물리적 물성의 열화는 대부분은 초기 15회 실험에서 발현되었으며, 산성증류수가 해수보다 물리적 물성 변화에 더 많은 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 실내인공풍화가속실험에 따른 암종별 일축압축강도의 차이를 통계적으로 평가하기 위하여 분산분석법을 사용하였다. 45회 실험 이후의 대조군에 대한 실험군 시료의 일축압축강도의 감소율은 암종과 물리적 물성 변화 추이와 상관없이 유사하게 나타났지만, 물리적 물성 변화와는 달리, 산성증류수보다 해수가 일축압축강도 변화에 더 많은 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

주요어: 실내인공풍화가속실험, 해수, 산성증류수, 화산암, 물리적 물성, 일축압축강도, 분산분석

서론

해안에 위치한 암석이 지속적으로 해수와 해수면 변동에 영향을 받을 때, 해수에 의해 화학적·물리적 풍화 작용이 발생하여 타포니와 같은 염풍화 구조가 생성되기도 한다. 암석의 주요 조성광물의 해수에 대한 화학적 풍화 속도는 담수에 의한 화학적 풍화 속도보다 빠르다고 알려져 있다(Gruber et al., 2019). 화학적 풍화는 암석의 조성광물뿐만 아니라 용매의 특성인 pH와 온도가 암석 풍화속도에 큰 영향을 미친다(Knauss and Wolery, 1986; Hellmann, 1994; Blum and Stillings, 1995; Cama et al., 2002; Gudbrandsson et al., 2014; Gruber et al., 2016). 여러 연구자들은 용매의 pH가 산성 혹은 염기성일수록 풍화속도가 증가한다고 실험적으로 증명하였다(Burch et al., 1993; Hellmann, 1994; Blum and Stillings, 1995; Alekseyev et al., 1997). 또한, 용매 온도가 증가함에 따라 화학적 풍화 속도가 증가함을 이론적·실험적 연구로 밝혀내었다(Blum and Stillings, 1995). 자연 풍화 과정에서는 화학적 풍화와 물리적 풍화가 서로 간섭하면서 발생한다. 특히, 국내 기후 조건을 고려하면 동절기 및 해빙기 동안 동결-용해 과정이 주된 풍화 과정으로 작용한다.

본 연구에서는 항만 건설로 해수에 노출될 수 있는 해안가에 인접한 암석의 열화 정도를 육상 조건과 비교하여 평가하기 위하여 동결-용해 실험을 이용한 실내인공풍화가속실험을 수행하였다. 실내인공풍화가속실험을 위하여 70°C의 해수와 pH 3, 70°C의 산성증류수를 용매로 사용하였다.

연구 지역

본 연구는 경상남도 창원시 진해구에 위치한 지역에 분포하는 백악기 경상계에 속하는 상부 유천층군의 화산암을 대상으로 수행되었다(Fig. 1). 이 지역에 분포하는 유천층군은 하부로부터 다대포층, 안산암질화산각력암, 안산암류, 암회색 응회질퇴적암, 유문석영안산암질화산각력암, 유문석영안산암, 유문암질암으로 구분된다(KIGAM, 1983).

지질도(Fig. 1) 상으로 연구 지역은 안산암질 각력암만 분포하지만, 연구 지역에는 안산암질 각력암뿐만 아니라 인근에 분포하는 다양한 종류의 화산암이 분포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 지역에 분포하는 5종의 화산암—안산암질 각력암, 각섬석 화강섬록암, 안산암, 유문암질 응회암, 유문암—에 대하여 실내인공풍화가속실험을 수행하였다.

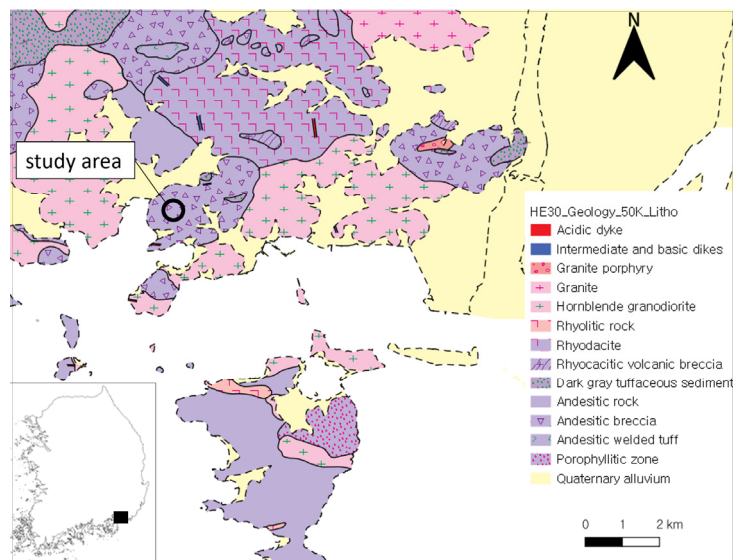


Fig. 1. Geological map of the study area (KIGAM, 1983).

암석 시료 특성

암석학적·광물학적 특징

본 연구에서는 연구 지역에 분포하는 5종의 화산암에 대한 암석학적·광물학적 특징을 박편 관찰을 통하여 규명하였다. 각섬석 화강섬록암은 중생대 백악기 불국사 관입암류에 해당하며, 조성광물은 석영, 사장석, 백운모, 견운모, 녹니석, 각섬석, 불투명광물이 관찰된다(Fig. 2a). 각섬석 화강섬록암에는 석영, 사장석의 함량이 우세하게 관찰되며 대부분 중립~조립질의 반자형의 결정을 나타내고 있다(Table 1). 안산암질 화산각력암은 중생대 백악기 불국사 관입암류에 해당하며, Fig. 2b와 Table 1에 나타난 것과 같이, 대부분 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모, 견운모, 녹니석으로 이루어져 있다. 그중 반정과 석기로 이루어진 석영 및 장석의 함량이 우세하게 관찰된다. 중생대 백악기 불국사 관입암류에 해당하는 안산암은 석영, 사장석, 백운모, 견운모, 녹니석, 각섬석으로 구성되어 있다(Fig. 2c, Table 1). 특히, 석영, 사장석, 각섬석의 함량이 우세하고, 석영의 함량이 10% 이상이다. 결정은 자형 내지 반자형을 이루며, 비교적 등립상을 이룬다. 박편에서 관찰되는 사장석은 주로 세립으로 이루어져 있어 쌍정의 발달이 미약한 편이며, 또한 결정 내에 세립의 견운모가 발달해 있다. 유문암질 응회암은 중생대 백악기 불국사 관입암류에 해당하며, 박편 분석에서는 조성광물로 석영, 사장석, 백운모, 견운모, 녹니석, 방해석 등이 관찰된다(Fig. 2d). Table 1에 나타난 것과 같이, 석영, 사장석의 함량이 우세하고 조성 광물들은 반정과 석기로 이루어져 있다. 반정은 대부분 사장석으로 확인되며, 풍화 변질을 받아 쌍정의 관찰이 비교적 어렵다. 사장석 반정은 자형 내지 반자형을 보이며, 결정 내에 세립의 견운모가 발달해 있다. 석기는 주로 석영과 사장석으로 확인되며, 대부분 세립질로 관찰된다. 유문암 또한 중생대 백악기 불국사 관입암류에 해당하며, 석영, 사장석, 견운모, 녹니석, 방해석 등의 조성광물로 이루어져 있다(Fig. 2e). 모달 분석 결과(Table 1)에서와 같이, 석영과 사장석이 우세하게 관찰되며, 박편상에서 유상구조가 관찰된다(Fig. 2e). 대부분 0.3 mm 이내의 결정 크기를 보이고, 일부 사장석은 래쓰(lath)상으로 관찰되고 녹니석이 산점상으로 발달해 있다.

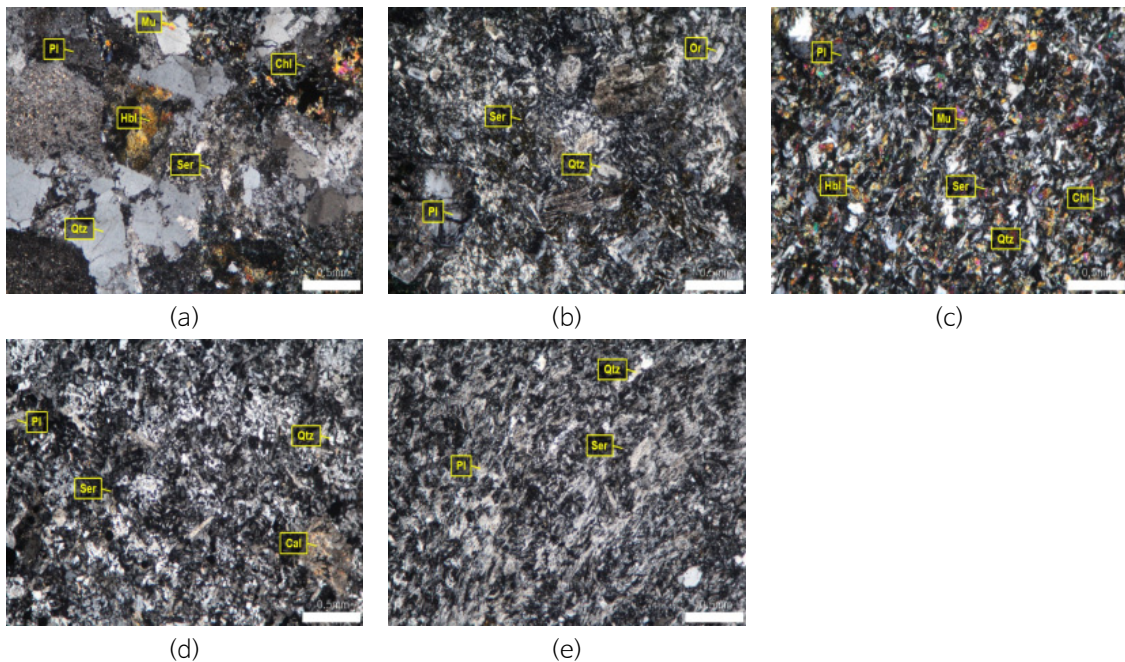


Fig. 2. Thin section photomicrographs of (a) hornblende granodiorite, (b) andesitic breccia, (c) andesite, (d) rhyolitic tuff, and (e) rhyolite.

Table 1. Modal analysis results for thin sections

Rock type	Qtz	Pl	Or	Mu	Bi	Ser	Chl	Hbl	Cal
Hornblende granodiorite	32.9	43.2	-	2.1	-	3.9	8.9	6.4	-
Andesic breccia	11.3	56.8	16.5	1.9	2.2	3.5	4.2	-	-
Andesite	10.2	51.2	-	7.9	-	2.8	4.2	20.5	-
Rhyolitic tuff	27.8	54.6	-	2.7	-	3.1	3.6	-	4.5
Rhyolite	62.4	27.2	-	-	-	2.4	3.6	-	3.1

*Qtz: quartz, Pl: plagioclase, Or: orthoclase, Mu: muscovite, Bi: biotite, Ser: sericite, Chl: chlorite, Hbl: hornblende, Cal: calcite.

암석 시료의 물리적 특성

실내인공풍화가속실험을 위하여 암석 시료는 지름 1인치, 길이 50 mm의 원통형 시료로 성형하였다. 각 암종에 대하여 15개의 시료를 확보하고, 실내인공풍화가속실험 이전의 물리적 특성—흡수율, P 및 S파 속도, 경도—을 측정하였다. 물리적 물성에 따라 시료를 대조군과 실험군(해수 및 증류수 풍화 실험군)으로 구분하였으며, 실내인공풍화가속실험에 따라 물리적 특성의 변화를 분석하였다. 흡수율은 암석 내의 공극 분포와 밀접한 관계를 보이고, P 및 S파 속도는 암석의 역학적 특성을 반영하므로 풍화 지표로 사용될 수 있다(Woo and Park, 2004; Woo et al., 2009, 2013; Celik, 2017; Gomez-Heras et al., 2020; Benavente et al., 2021). 암석의 경도는 암석의 강도와 밀접한 관계를 지니는 지표로 일반적으로 Schmidt hammer를 이용하여 측정하지만, 반발 에너지가 커서 가끔 시료에 균열을 일으킬 수 있으므로, 본 연구에서는 이보다 반발 에너지가 작은 Equotip 경도측정기를 사용하였다. Equotip 경도측정기는 Schmidt hammer와 더불어 표면에서 반발되는 정도로 경도를 측정하고, 이 경도 값은 암석 강도와 매우 밀접한 상관관계를 지니기 때문에, 암석 강도를 비교할 수 있는 지표로 사용할 수 있다(Aoki and Matsukura, 2007a, 2007b; Coombes et al., 2013; Smart et al., 2023). 따라서 본 연구에서는 실험 전후의 흡수율과 탄성파 속도 및 경도를 비교하여 풍화실험에 따른 물리적 특성의 변화를 고찰하였다.

초기 흡수율은 암종에 따른 차이를 보인다. 화강섬록암과 안산암질 각력암 및 안산암의 흡수율은 유문암질 응회암과 유문암보다 낮게 측정되었다(Fig. 3). 그중 안산암 시료의 흡수율은 가장 낮은 0.11~0.17%를, 각섬석 화강섬록암은 0.22~

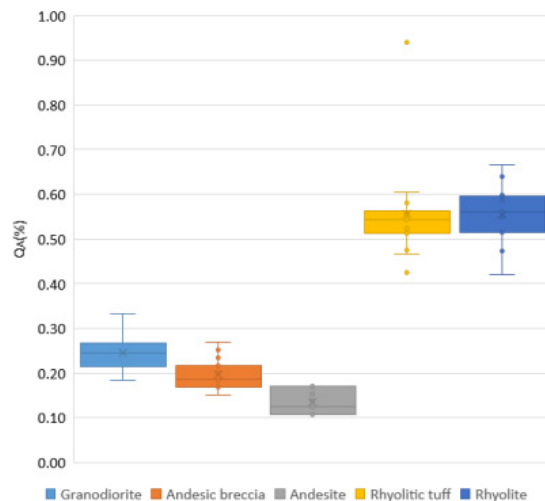


Fig. 3. Initial quick absorption ratios. Box in the box-and-whisker plot is drawn from 25th percentile to 75th percentile and has a horizontal line inside to denote the median. The horizontal line at the top and the bottom of the whiskers represent 100th and 0th percentile, respectively.

0.27%를, 안산암질 응회암은 0.17~0.22%를 나타내고 있다. 반면, 유문암 및 유문암질 응회암의 흡수율은 0.5~0.6%로 다른 암석보다 높다.

P파 속도는 안산암이 가장 빠르며, 유문암질 응회암과 유문암이 다른 시료보다 느린 값을 보인다(Fig. 4). S파 속도 또한 암석 종류에 따른 P파 속도 경향과 유사한 양상을 나타낸다. 즉, 안산암이 가장 빠른 S파 속도를 나타내고, 유문암과 유문암질 응회암이 다른 암석보다 느린 S파 속도를 나타낸다. 암종에 따라 나타나는 물리적 물성의 차이는 암종의 특성보다는 채취된 시료의 풍화 특성에 의한 것으로 판단된다.

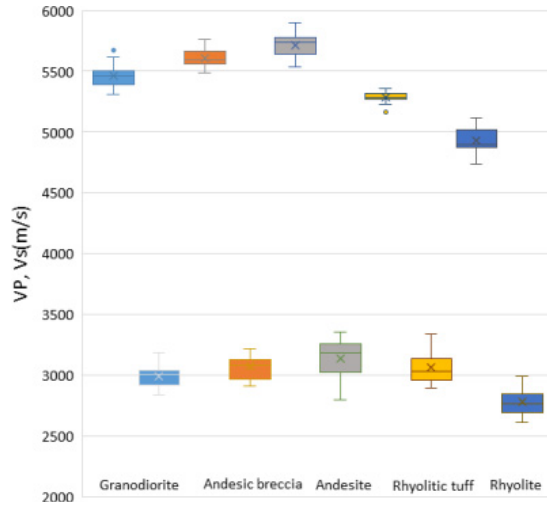


Fig. 4. Initial P- and S-wave propagation velocities.

Equotip 경도기를 사용하여 측정된 쇼어경도는 조성 광물의 특성과 풍화 상태의 영향을 많이 받기 때문에, Fig. 5와 같이 쇼어경도의 편차가 크게 나타난다. 풍화에 민감한 장석류와 운모류를 포함하고 있는 각섬석 화강섬록암과 안산암이 다른 암종에 비하여 낮은 값을 보이지만, 석영 함량이 많은 유문암질 응회암과 유문암 및 정장석 함량이 다른 암종보다 많은 안산암질 응회암은 높은 쇼어경도 값을 보인다(Fig. 5).

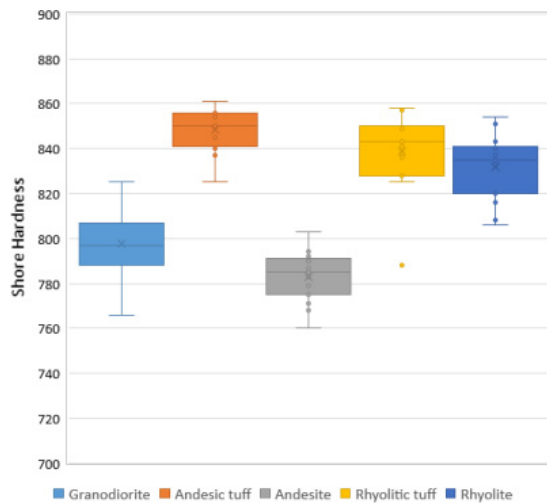


Fig. 5. Initial Shore hardness.

실내인공풍화가속실험 결과

본 연구에서는 화학적·물리적 풍화 과정을 모사할 수 있는 동결-융해 실험을 기반으로 한 실내인공풍화가속실험을 수행하였다. 해수 및 산성증류수에 침수 용해시켜 화학적 풍화를 모사하였고, 포화된 상태의 암석 시료를 동결시켜 물리적 풍화 과정을 모사하였다.

실내인공풍화가속실험을 위하여 증류수에 황산(H_2SO_4)과 염산(HCl)을 1:1의 비율로 첨가하여 만든 pH 3의 산성증류수와 균산 비응도항에서 채취한 해수의 불순물을 제거한 pH 8.2의 해수를 용매로 사용하였다. 산성증류수와 해수를 $70^\circ C$ 로 가열하여 각 용매에 암석 시료를 12시간 침수시킨 후 꺼내어, 영하 $25^\circ C$ 에서 12시간 동결시키는 동결-융해 실험을 총 45회 수행하였다(Fig. 6). 동결-융해 실험 횟수에 따른 암석 시료의 물리적·역학적 특성의 변화를 관찰하기 위하여 15회 실험 이후 실험군 시료의 물리적 특성을 측정하고 일부 시료에 대해서는 일축압축강도를 측정하였다. 나머지 시료에 대해서는 동결-융해 실험 45회까지 수행한 후 물리적 특성과 일축압축강도를 측정하였다.

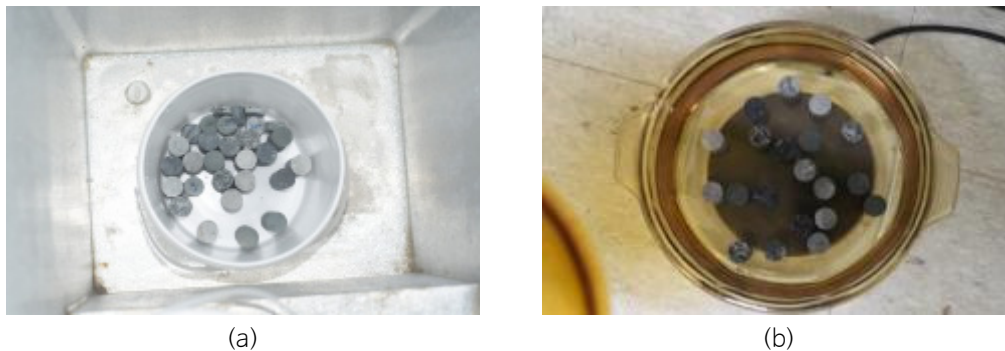


Fig. 6. Accelerated weathering cycles (a) freezing for 12 h followed by (b) thawing for 12 h.

실험을 위하여 암석 시료의 물리적 특성을 바탕으로 유사한 물리적 특성을 지닌 암석 시료를 각 암종 별로 11개 선별하였다. 이 중 3개의 시료는 실내인공풍화가속실험을 수행하지 않는 대조군 시료로 구분하였고, 4개의 시료는 산성증류수 풍화 시료로, 나머지 4개의 시료는 해수 풍화실험 시료로 구분하였다. 산성증류수 풍화 시료와 해수 풍화실험 시료 중 각각 2개는 실내인공풍화가속실험 15회 이후 물리적 특성과 일축압축강도를 측정을 하였고, 나머지 2개는 실내인공풍화가속실험 45회 종료 후 물리적 특성과 일축압축강도를 측정을 하였다.

외관 변화

실험군 암석 시료들은 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 것과 같이, 풍화가 진행됨에 따라 암석 외관상의 색상이 변화가 있었다. 산성증류수로 풍화실험을 한 경우, 풍화실험이 진행됨에 따라, Fig. 7과 같이, 대부분 시료의 변색은 용매의 산 성분에 의한 착색으로 나타나지만, 조립질의 각섬석 화강섬록암은 실내인공풍화가속실험이 진행됨에 따라 장석의 변색이 두드러지게 나타났다(Fig. 7a).

해수로 풍화실험을 한 경우, Fig. 8에서 보여주는 바와 같이, 풍화실험이 진행됨에 따라 암석 시료의 변색은 발생하지 않았지만, 장석 풍화가 다른 유색광물의 풍화보다 더욱 두드러지게 나타났으며, 유문암질 응회암에서는 풍화가 진행됨에 따라 미세질리가 점차적으로 뚜렷하게 나타났다(Fig. 8d).

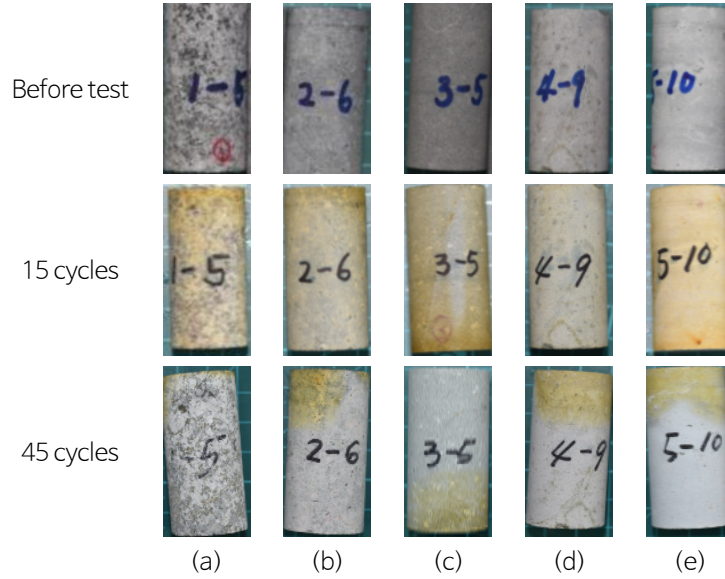


Fig. 7. Rock samples treated with acidified distilled water before the weathering test, and after 15 and 45 cycles: (a) hornblende granodiorite, (b) andesitic tuff, (c) andesite, (d) rhyolitic tuff, and (e) rhyolite.

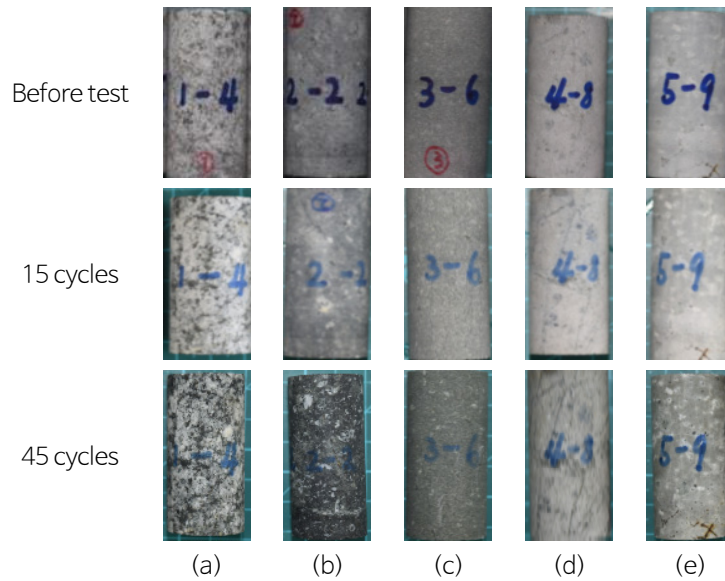


Fig. 8. Rock samples treated with seawater before the weathering test, and after 15 and 45 cycles: (a) hornblende granodiorite, (b) andesitic breccia, (c) andesite, (d) rhyolitic tuff, and (e) rhyolite.

물리적 물성 변화

산성증류수 풍화에 의해 발생한 흡수율 증가는, Fig. 9a에 나타난 것과 같이, 풍화 횟수에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, Fig. 9b와 같이 해수 풍화에서는 15회 풍화실험 후의 흡수율 증가가 전체 흡수율 증가의 대부분을 차지하고 있다. Table 2에 표시된 것과 같이, 산성증류수 풍화에 의해 발생한 흡수율 증가율이 해수 풍화보다 더 크게 발생하였다 (Table 2). 특히, 흡수율의 증가가 가장 두드러진 암종은 안산암으로 산성증류수 45회 풍화로 365%의 증가율을 보이며, 해수 15회 풍화실험으로 약 220%의 증가율을 보인다.

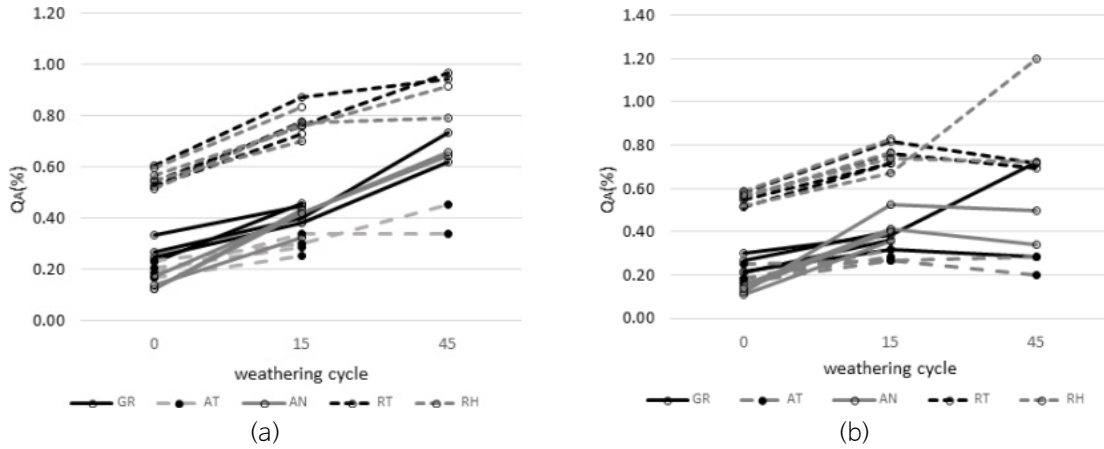


Fig. 9. Progression of the quick absorption ratio during 45 cycles of accelerated weathering by (a) acidified distilled water and (b) seawater. *GR: hornblende granodiorite, AT: andesic breccia, AN: andesite, RT: rhyolitic tuff, RH: rhyolite.

Table 2. Average change of quick absorption ratio during accelerated weathering tests

Rock type	Acidified distilled water		Seawater	
	15 cycles	45 cycles	15 cycles	45 cycles
Hornblende granodiorite	+57%	+152%	+47%	+101%
Andesitic breccia	+49%	+100%	+45%	+23%
Andesite	+187%	+365%	+224%	+219%
Rhyolitic tuff	+43%	+74%	+37%	+28%
Rhyolite	+38%	+53%	+34%	+72%

Fig. 10의 풍화 횟수에 따른 P파와 S파의 속도 변화가 보여주는 바와 같이, 45회 산성증류수 풍화로 대부분의 시료에서 P파 속도가 10% 내외의 감소가, S파 속도는 5% 내외의 감소가 발생하였다. 특히, 안산암질 화산각력암에 대한 해수 풍화에 의해 P파 및 S파 속도 감소율이 다른 암종에 비하여 두드러지게 큰 경향을 보여준다(Fig. 10b, Table 3, Table 4). 전반적으로 P파와 S파 감소의 대부분은 최초 15회 풍화 후에 나타났다(Fig. 10, Table 3, Table 4).

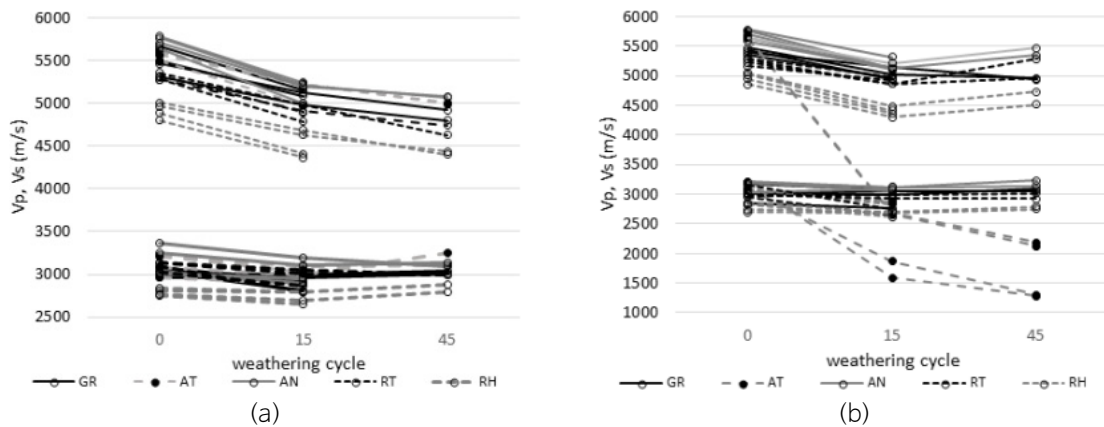


Fig. 10. Changes of P- and S-wave propagation velocity during 45 cycles of accelerated weathering by (a) acidified distilled water and (b) seawater. *GR: hornblende granodiorite, AT: andesic breccia, AN: andesite, RT: rhyolitic tuff, RH: rhyolite.

Table 3. Average change of P-wave propagation velocity during accelerated weathering tests

Rock type	Acidified distilled water		Seawater	
	15 cycles	45 cycles	15 cycles	45 cycles
Hornblende granodiorite	-7%	-11%	-7%	-9%
Andesitic breccia	-7%	-10%	-31%	-62%
Andesite	-10%	-11%	-8%	-4%
Rhyolitic ruff	-8%	-12%	-6%	-2%
Rhyolite	-8%	-10%	-12%	-7%

Table 4. Average change of S-wave propagation velocity during accelerated weathering tests

Rock type	Acidified distilled Water		Seawater	
	15 cycles	45 cycles	15 cycles	45 cycles
Hornblende granodiorite	-3%	0	-1%	+2%
Andesitic breccia	-4%	+2%	-27%	-59%
Andesite	-4%	-2%	-2%	-1%
Rhyolitic tuff	-5%	-3%	-7%	-2%
Rhyolite	-2%	+2%	-4%	0

Fig. 11은 산성증류수와 해수 풍화 횟수에 따른 쇼어경도의 변화를 보여주고 있다. 산성증류수 풍화 15회 후에 측정된 쇼어경도는 초깃값과 비교하여 거의 변화를 보이지 않았지만, 45회 후의 쇼어경도는 10% 내외의 감소를 보였다(Table 5). 해수 풍화에서는 풍화 횟수에 상관없이 쇼어경도 감소가 1~2%로 거의 쇼어경도의 변화가 측정되지 않았다(Table 5). Table 5에 표시된 것과 같이, 산성증류수 풍화에 의한 쇼어경도의 감소율이 해수 풍화에 의한 감소율보다 전반적으로 크게 발현되었다.

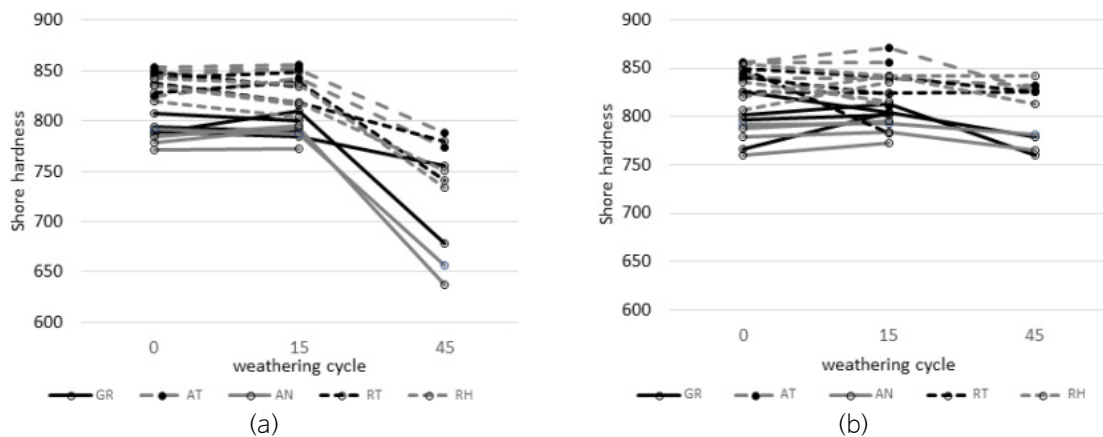


Fig. 11. Progression of Shore hardness during 45 cycles of accelerated weathering by (a) acidified distilled water and (b) seawater. *GR: hornblende granodiorite, AT: andesic breccia, AN: andesite, RT: rhyolitic tuff, RH: rhyolite.

Table 5. Average change of Shore hardness during accelerated weathering tests

Rock type	Acidified distilled water		Seawater	
	15 cycles	45 cycles	15 cycles	45 cycles
Hornblende granodiorite	0%	-10%	+1%	-3%
Andesitic breccia	+1%	-7%	-1%	-2%
Andesite	+1%	-17%	+1%	-1%
Rhyolitic tuff	-1%	-9%	-3%	-2%
Rhyolite	-2%	-11%	+1%	0

일축압축강도 변화

실내인공풍화가속실험 종료 후, 건조 시료에 대한 물리적 물성을 측정하고 후 실온 상태에서 24시간 지난 후 일축압축강도를 측정하였다. 실험 조건에 따른 편차를 줄이기 위하여 대조군에 대해서도 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 산성 증류수와 해수를 이용한 실내인공풍화가속실험을 각각 15회 및 45회 수행한 후, 각 실험군에 대하여 2개의 시료와 3개의 대조군 시료에 대한 일축압축강도를 측정하여 실내인공풍화가속실험 횟수와 암종에 따른 일축압축강도 변화를 비교하였다(Fig. 12).

Fig. 12에 나타난 것과 같이, 산성증류수와 해수를 이용한 실내인공풍화가속실험을 진행한 결과, 풍화실험 횟수가 증가함에 따라 일축압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 특히, 산성증류수보다 해수 풍화로 일축압축강도의 감소가 더 크게 발견되었다(Fig. 12).

각섬석 화강섬록암의 대조군과 실험군은 Fig. 12a에 나타난 것과 같이, 풍화 횟수가 증가함에 따라 산성증류수와 해수 풍화에 의해 일축압축강도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보인다. 그러나 일축압축강도의 편차가 24~65 MPa로 매우 크므로 통계적으로 감소 경향이 유의미한지 분석하여야 한다. 본 연구에서는 일원배치 분산분석법(ANOVA)을 이용하여 각섬석 화강섬록암의 각 대조군과 풍화실험군 사이의 일축압축강도 표본평균의 차이가 통계적으로 유의미한지 분석하였다(Table 6과 Table 7). 각섬석 화강섬록암 대조군과 15회 산성증류수 풍화실험 후 측정된 일축압축강도를 유의수준 0.05으로 분산분석으로 분석한 결과, p값이 약 0.3으로 두 그룹 간의 평균 차이는 통계적으로 유의미하지 않다고 평가되었다(Table 6). 15회 및 45회 풍화실험 후 측정된 일축압축강도의 평균 또한 p값이 0.97로 통계적으로는 차이가 없는 것으로, 대조군과 45회 실험 후 측정된 일축압축강도 평균에 대한 p값은 0.159로 나타나 실험에 의한 일축압축강도의 차이가 발생하지 않은 것으로 분석되었다(Table 6). 또한, 해수 풍화에 의한 일축압축강도 평균의 차이를 유의수준 0.05로 일원배치 분산분석법으로 검정한 결과, 대조군과 15회 해수 풍화에 의한 일축압축강도 평균에 대한 p값은 약 0.13이고, 15회 및 45회 해수 풍화에 의한 일축압축강도에 대한 p값은 약 0.14로 일축압축강도의 변화는 통계적으로 유의미하지 않다고 평가되지만, 대조군과 45회 해수 풍화 후 일축압축강도의 평균 차이는 유의미한 것으로 평가된다(Table 7). 따라서 산성증류수 풍화에 의한 각섬석 화강섬록암의 일축압축강도의 변화는 유의미하지 않고, 45회 해수 풍화에 의한 각섬석 화강섬록암의 일축압축강도의 변화는 유의미하다고 판단된다.

Fig. 12b에 나타난 것과 같이, 안산암질 각력암의 일축압축강도의 편차는 큰 값을 나타내지 않고 그룹 간의 명확한 차이를 보여준다. 즉, 대조군과 15회 풍화실험 후 일축압축강도 평균 차이와 15회와 45회 풍화실험 후 일축압축강도를 분석분석에 의해 산정한 p값은 산성증류수가 각각 0.027과 0.037이고, 해수는 0.0097과 0.021로 유의수준 0.05에서는 유의미한 차이를 가진다고 평가된다. 따라서 안산암질 각력암에 대한 산성증류수 15회 풍화실험 후의 일축압축강도는 대조군보다 약 16%의 감소가, 45회 풍화실험 후의 일축압축강도는 약 41%의 감소가 발생한 것으로 평가할 수 있다. 또한, 해수 15회

와 45회 풍화실험 후 대조군보다 각각 24%와 55%의 일축압축강도의 감소가 안산암질 각력암에서 나타난 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 12c의 안산암 일축압축강도는 풍화실험 횟수에 따라 감소하는 경향을 나타내지만, 분산분석에 의하면 산성증류수 풍화실험에 의한 일축압축강도의 차이는 유의미하지 않은 것으로 평가되며, 45회 해수 풍화실험에 의해서만 유의미한 일축압축강도의 차이가 있는 것으로 분석된다.

Fig. 12d에 나타난 유문암질 응회암의 일축압축강도는 풍화실험 횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 대조군 일축압축강도에 대한 산성증류수와 해수를 이용한 15회 풍화실험 이후의 일축압축강도의 변화는 분산분석에 의하면 유의미하지만, 45회 풍화실험 이후의 일축압축강도는 15회 풍화실험과 비교하였을 때 통계적으로 유의미하지 않은 변화를 보이는 것으로 평가된다. 따라서, 산성증류수 15회 풍화실험 이후의 일축압축강도 감소는 약 30%, 해수 15회



Fig. 12. Uniaxial compressive strength of control samples and those tested after 15 and 45 cycles of weathering with either acidified distilled water or seawater: (a) hornblende granodiorite, (b) andesitic breccia, (c) andesite, (d) rhyolitic tuff, and (e) rhyolite.

풍화실험 이후는 약 58%가 발생한 것으로 산정할 수 있다. 45회 풍화실험 이후 나타난 일축압축강도의 감소는 통계적으로 유의미하지 않으므로, 15회 풍화실험 이후 일축압축강도의 변화가 없다고 평가할 수 있다.

Fig. 12e에서 대조군과 각 실험군의 유문암 일축압축강도를 분산분석으로 평균 차이를 통계적으로 분석한 결과, 15회 및 45회 산성증류수 풍화에 의해서 유의미한 일축압축강도의 변화가 발생하지 않은 것으로 평가된다. 반면 해수 풍화에 의해서 15회 풍화 실험 이후에는 유의미한 일축압축강도의 변화가 없지만, 45회 풍화 실험 이후에는 유의미한 일축압축강도의 감소가 있는 것으로 평가된다.

Table 6. ANOVA results of granodiorite UCS between the control and acidified distilled water test groups

Group	Source of variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Control vs. 15 cycles	Between groups	3205.442	1	3205.442	1.444	0.315	10
	Within groups	6659.016	3	2219.672	-	-	-
15 cycles vs. 45 cycles	Between groups	5.954	1	5.954	0.0024	0.964	19
	Within groups	4776.945	2	2388.472	-	-	-
Control vs. 45 cycles	Between groups	3515.246	1	3515.246	3.471	0.159	10.128
	Within groups	3038.071	3	1012.690	-	-	-

*SS: sum of squares, df: degree of freedom, MS: mean square, F: $MS_{\text{betweengroups}}/MS_{\text{withingroups}}$.

Table 7. ANOVA results of granodiorite UCS between the control and seawater test groups

Group	Source of variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Control vs. 15 cycles	Between groups	5883.893	1	5883.893	4.183	0.133	10.128
	Within groups	4219.562	3	1406.521	-	-	-
15 cycles vs. 45 cycles	Between groups	5212.912	1	5212.912	5.722	0.139	18.513
	Within groups	1822.211	2	911.105	-	-	-
Control vs. 45 cycles	Between groups	24273.086	1	24273.086	28.865	0.013	10.128
	Within groups	2522.791	3	840.930	-	-	-

*SS: sum of squares, df: degree of freedom, MS: mean square, F: $MS_{\text{betweengroups}}/MS_{\text{withingroups}}$.

Table 8은 분산분석을 이용하여 산성증류수와 해수 인공풍화가속실험에서 발생한 일축압축강도의 감소율을 암종과 풍화실험 횟수 등으로 구분하여 보여주고 있다.

Table 8. Average change rate of UCS statistically analyzed using ANOVA

Rock type	Acidified distilled water		Seawater	
	15 cycles	45 cycles	15 cycles	45 cycles
Hornblende granodiorite	-	-	-	-64%
Andesitic breccia	-16%	-41%	-24%	-55%
Andesite	-	-	-	-58%
Rhyolitic tuff	-30%	-30%	-58%	-58%
Rhyolite	-	-	-	-52%

결론 및 토의

본 연구에서는 5종의 유천층군 화산암 암석 시료에 대하여 산성증류수와 해수를 이용하여 동결-융해과정을 모사한 실내인공풍화가속실험을 수행하였다. 실내인공풍화가속실험을 15회와 45회 끝난 후, 각각 물리적·역학적 물성을 측정하여 초깃값에 대한 물성 변화를 산정하였다.

실내인공풍화가속실험에 따른 물리적 특성을 측정된 결과, 대부분의 물리적 특성 열화—흡수율 증가와 P파 속도 감소, 쇼어경도 감소—는 초기 15회 풍화실험에서 나타났다. 또한, 산성증류수 풍화실험보다 해수 풍화실험에서 물리적 특성의 열화가 전반적으로 더 크게 발현되었다. 특히, 사장석과 각섬석의 함량이 약 71.7%로 다른 암종보다 매우 높아 화학적 풍화에 취약한 특성을 지닌 안산암에서는 산성증류수 풍화실험과 해수 풍화실험 모두에서 매우 큰 흡수율의 증가를 보였다. 안산암질 각력암에서는 해수 풍화실험에 의한 P파 및 S파 속도 감소율이 산성증류수 풍화실험에서보다 3~6배 높게 발생하였다. 풍화 횟수에 따른 물리적 풍화 특성 측정 결과를 바탕으로 풍화 시간에 따른 암석의 풍화를 고려하면, 암석이 풍화 환경에 노출되는 초기에 풍화에 의한 물성 열화가 가장 많이 발현된다는 것을 예상할 수 있다.

실내인공풍화가속실험 15회와 45회 종료된 후 측정된 일축압축강도를 대조군 시료의 일축압축강도와 비교하여 통계적으로 유의미한 일축압축강도 감소는 주로 해수 풍화에서 나타나며, 산성증류수 풍화에서는 대조군의 일축압축강도와 차이를 보이지 않는 시료가 다수 측정되었다(Table 8).

산성증류수 풍화에 의해서 발현된 물리적 물성 변화가 해수 풍화에 의한 것보다 더 큰 결과와는 달리, 일축압축강도에서는 해수 풍화에서 더 큰 일축압축강도 감소율을 보였다. 이는 담수 풍화보다 해수 풍화에 의해 백악의 일축압축강도가 더 감소한다는 연구(Duperret et al., 2005) 결과와 해수 풍화에 의해 시멘트 모르타르의 일축압축강도가 더 감소한다는 연구(Noor-E-Khuda, 2021) 결과와도 일치한다. 해수의 풍화 작용으로 암석 시료의 공극에 염 결정성장이 이루어질 수 있다(Gruber et al., 2019). 이러한 염 결정성장은 물리적 물성 감소를 둔화시키는 요소로 작용할 수는 있지만, 역학적 물성 감소는 더 크게 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 풍화에 따른 물리적 특성의 변화는 암종에 따라 차이는 있지만, 암석 물성 열화는 풍화에 노출된 초기에 대부분 발현된다는 것을 보여주었다. 또한, 산성증류수보다 해수에 의한 풍화로 일축압축강도 감소가 더 크게 발현되고, 암석 종류와는 상관없이 거의 유사한 일축압축강도 감소율을 보여주었다.

사사

본 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 이공분야기초연구사업(NRF-2020 R1F1A107576412)입니다.

References

- Alekseyev, V.A., Medvedeva, L.S., Prisyagina, N.I., Meshalkin, S.S., Balabin, A.I., 1997, Change in the dissolution rates of alkali feldspars as a result of secondary mineral precipitation and approach to equilibrium, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(6), 1125-1142.
- Aoki, H., Matsukura, Y., 2007a, A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: An application of the Equotip hardness tester to weathering studies, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(12), 1759-1769.

- Aoki, H., Matsukura, Y., 2007b, Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 23-29.
- Benavente, D., Fort, R., Gomez-Gera, M., 2021, Improving uniaxial compressive strength estimation of carbonate sedimentary rocks by combining minimally invasive and non-destructive techniques, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104915.
- Blum, A.E., Stillings, L.L., 1995, Feldspar dissolution kinetics, in: White, A.F., Brantley, S.L. (Eds.), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, Mineralogical Society of America, Washington DC, 291-352.
- Burch, T.E., Nagy, K.L., Lasaga, A.C., 1993, Free energy dependence of albite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8, *Chemical Geology*, 105(1-3), 137-162.
- Cama, J., Metz, V., Ganor, J., 2002, The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(22), 3913-3926.
- Celik, M., 2017, Water absorption and P-wave velocity changes during freeze-thaw weathering process of crosscut travertine rocks, *Environmental Earth Sciences*, 76, 409.
- Coombes, M.A., Feal-Pérez, A., Naylor, L.A., Wilhelm, K., 2013, A non-destructive tool for detecting changes in the hardness of engineering materials: Application of the Equotip durometer in the coastal zone, *Engineering Geology*, 167, 14-19.
- Duperret, A., Taibi, S., Mortimore, R.N., Daigneault, M., 2005, Effect of groundwater and sea weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France, *Engineering Geology*, 78(3-4), 321-343.
- Gomez-Heras, M., Benavente, D., Pla, C., Martinez-Martinez, J., Fort, R., Brotons, V., 2020, Ultrasonic pulse velocity as a way of improving uniaxial compressive strength estimations from Leeb hardness measurements, *Construction and Building Materials*, 261, 119996.
- Gruber, C., Harlavan, Y., Pousty, D., Winkler, D., Ganor, J., 2019, Enhanced chemical weathering of albite under seawater conditions and its potential effect on the Sr ocean budget, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 261, 20-34.
- Gruber, C., Kutuzov, I., Ganor, J., 2016, The combined effect of temperature and pH on albite dissolution rate under far-from-equilibrium conditions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 186, 154-167.
- Gudbrandsson, S., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., Oelkers, E.H., 2014, Experimental determination of plagioclase dissolution rates as a function of its composition and pH at 22°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 139, 154-172.
- Hellmann, R., 1994, The albite-water system: Part I. The kinetics of dissolution as a function of pH at 100, 200 and 300°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(2), 595-611.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 1983, Explanatory text of the geological map of Busan-Gadeog sheet: scale 1:50,000, 53p.
- Knauss, K.G., Wolery, T.J., 1986, Dependence of albite dissolution kinetics on pH and time at 25°C and 70°C, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(11), 2481-2497.
- Noor-E-Khuda, S., 2021, Influence of wetting-drying cycles on compressive and flexural strength of cement mortar and CFRP-mortar bond strength, *Construction and Building Materials*, 271, 121513.
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., McKeighan, C.A., Chester, F.M., 2023, Estimating rock mechanical properties from micro-rebound measurements, *Engineering Geology*, 312, 106954.
- Woo, I., Kim, J.G., Lee, G.H., Park, H.J., Um, J.G., 2013, Evaluation of the impact of pyrite oxidation on rock characteristics and environment by laboratory tests, *Environmental Earth Sciences*, 69, 1821-1829.
- Woo, I., Park, H.J., 2004, Classification of weathering for the granite and granite gneiss in Okcheon Belt-Jecheon · Geum-san · Gimcheon in Korea, *Economic and Environment Geology*, 37(3), 355-364 (in Korean with English abstract).
- Woo, I., Um, J.G., Park, H.J., 2009, Variation of geomechanical characteristics of granite and orthogneiss in Wonju area due to accelerated artificial chemical weathering tests, *Tunnel and Underground Space*, 19(3), 213-225 (in Korean with English abstract).