

인공풍화시험을 이용한 암종별 풍화특성 평가

Evaluation on Weathering Characterization on Rock Types Using Artificial Weathering Test

허 열¹⁾ · 강창우¹⁾ · 권영철²⁾ · 배우석[†]

Yeul Heo · Changwoo Kang · Youngcheul Kwon · Wooseok Bae

Received: June 27th, 2017; Revised: July 5th, 2017; Accepted: July 26th, 2017

ABSTRACT : For exposed slopes, the weathering degree over time has a major effect on the engineering properties of rocks and the slope stability. Rocks are gradually changed by weathering into soil over time, and the resulting physical, chemical and mechanical changes of rocks affect the engineering stability of the slope. However, there are not many ways to objectively evaluate the weathering degree of a slope. In this study, therefore, to investigate the weathering characteristics of rocks, granite, gneiss and shale distributed in the Chungbuk region were sampled by weathering stage and changes in their component minerals and tissues were investigated. Furthermore, artificial weathering was induced using the freezing and thawing test and quantitatively investigated through porosity and absorption rate. In addition, the changes of microcracks due to artificial weathering were evaluated through box fractal dimension (D_B). Through mineralogical study the phase change of constituting minerals, the growth of secondary minerals, the development of micro-cracks and the fabric changes due to weathering were observed. The mineralogical, chemical and engineering evaluations of the weathering degree through the experimental results in this study are expected to be useful for analyzing the weathering characteristics and causes by rock type and for proposing a methodology to evaluate the degradation of physical properties comparatively and quantitatively.

Keywords : Weathering degree, Artificial weathering, Box fractal dimension, Rock type

요 지 : 노출된 비탈면은 시간에 따른 풍화도가 암반의 공학적인 성질과 비탈면의 안정성에 주요한 영향을 미치게 된다. 풍화는 시간의 경과에 따라 암석을 토양으로 점진적으로 변화시키며, 이로 인한 암석의 물리적, 화학적, 역학적인 변화는 비탈면의 공학적인 안정성에 영향을 미친다. 그러나 비탈면의 풍화도를 객관적으로 평가할 수 있는 방법은 많지 않은 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 암석의 풍화특성을 규명하기 위해 충북지역에 분포하고 있는 화강암과 편마암, 세일을 대상으로 풍화 단계별로 시료를 채취하고 조성광물과 조직의 변화 등을 조사하였으며, 이들 암석에 대해 동결융해시험을 이용하여 인공풍화를 유발시켜 공극률, 흡수율 등의 변화를 정량적으로 고찰하였다. 또한 박스프랙탈차원(D_B)을 통해 인공풍화에 따른 미세균열의 변화를 평가하였다. 광물학적분석을 통해 풍화에 기인한 구성광물의 변화상과 2차광물의 생성, 미세균열의 발달을 관찰하였다. 실험결과를 통하여 풍화도에 대한 광물학적, 화학적, 공학적 평가는 암종에 따른 풍화특성과 원인을 분석하고 물성의 저하를 비교적 정량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시하고 규명하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 풍화도, 인공풍화, 박스프랙탈차원, 암종

1. 서 론

풍화작용은 지표근처의 암석이 파괴되고 변질되어 기권(atmosphere), 수권(hydrosphere), 생물권(biosphere)과 평형을 이루는 산물을 형성하는 과정이라고 정의된다(Reiche, 1950). 풍화는 암석을 원래의 단단한 상태에서 토양으로 점진적으로 변화시키며, 이로 인해 유발되는 암석의 물리적, 화학적, 역학적인 변화는 공학적인 성질을 변화시키게 된다. 국내의 경우 전 국토의 2/3 이상이 산악지로 구성되어 건설에 따른

절개면의 발달은 필연적이고 노출암반의 풍화도가 암반의 공학적인 성질과 절개면의 안정성에 주요한 영향을 미치고 굴착지반의 풍화도 역시 굴착 대상 암반의 공학적인 평가에 영향을 미치게 된다.

풍화와 관련된 연구는 조암광물의 풍화에 대한 안정도를 나타내는 광물안정계열의 연구(Goldich, 1938)를 시작으로 하여 암석의 화학조성 변화에 대한 연구, 광물의 변화에 대한 연구와 역학적 성질의 변화에 대한 연구 등이 수행되어 왔으며, 암석의 풍화나 풍화민감도에 대한 연구로 Crosta(1998)

1) Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

2) Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology

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

는 풍화에 대한 저항성은 일종의 내구성으로 사면이나 지하 굴착의 안정성을 판가름하는 중요한 암반 물성 중 하나임을 강조하였다. 국내에서도 화강암의 풍화에 따른 각종 지질공학적 특성변화 연구(Kim & Hong, 1990)와 중생대화강암의 풍화에 따른 지질공학적 특성과 기존의 풍화등급분류의 적용에 관한 연구(Lee, 1993)가 수행되었다. 최근에는 Bae et al.(2010)이 경상북도 상주의 일부지역을 대상으로 풍화민감도 분석을 수행하여 기초적인 자료를 획득한 바 있다. 또한 Choi(2011)가 화성암을 대상으로 암종과 풍화별로 화학적 변질지수와 지반정수의 변화를 고찰한 바 있으며, Ryu & Song(2012)은 6개 암종에 대한 동결-융해 실험을 통하여 공극률과 인장강도의 상호작용에 의해 공극수가 동결되면서 발생하는 팽창압이 인장강도보다 클 경우 공극에 균열이 발생하고 동결-융해 사이클이 반복됨에 따라 균열이 누적되어 전체적인 물성변화를 야기한다고 주장하였다. 또한 Park (2015)는 포항지역의 이암을 대상으로 매립재나 성토재료 사용할 경우 발생될 수 있는 문제점을 파악하기 위해 풍화민감도 시험과 물리·역학 실험을 수행하였다. Kang et al.(2016)은 노출된 암석의 풍화저항도를 평가하기 위해 풍화민감도 분석이 유효함을 확인한 바 있다. 이와 같이 풍화현상에 관한 분석자료는 지질공학분야, 폐기물처리장 건설, 석재의 개발 및 평가, 지구환경문제 등에 광범위하게 이용될 수 있어 풍화단계에 따른 암반의 공학적 특성을 추정할 수 있는 효과적이고 정량적인 방법을 수립할 필요성이 대두되고 있다. 그러나 아직까지 토목공학적 관점에서 풍화를 연구하고자 하는 시도는 미진하여 이에 대한 연구가 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 암석의 풍화특성을 규명하기 위해 충북지역에 분포하고 있는 화성암, 변성암, 퇴적암의 대표적인 암종인 화강암과 편마암, 세일을 대상으로 풍화 단계별로 SW(약한풍화), MW(중간풍화), HW(심한풍화)로 대분하여 시료를 채취하고 암석기재, 현미경 관찰, X ray 회절 분석, 전자현미경 관찰·분석을 통한 조성광물과 조직의 변화, fabric의 발달상태 등을 조사하였다. 또한 지표에 노출되거나 저심도에 위치한 암반의 풍화진행과 공학적인 특성 변화를 고찰하기 위해 인위적인 풍화를 발생시켰다. 인공풍화(artificial weathering)는 동결융해시험(freezing-thawing test)을 이용하여 동결과 융해를 반복·진행하여 모사하였으며, 풍화양상은 공극률, 흡수율, 탄성파속도를 통해 정량적으로 고찰하였고 실험 전의 조건과 비교하여 평가하였다. 또한 암종과 풍화등급별로 실험 사이클마다 미세균열의 평면빈도수와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스프랙탈차원(D_B)을 산정하여 비교하였다.

2. 암석학적 특성분석

우리나라의 지질은 선캄브리아대의 변성암류가 약 40%이며 중생대와 그 후에 관입한 화성암류가 약 35%, 고생대 이후의 퇴적암류가 약 25%를 차지하며 분포하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 분포 경향을 고려하여 화성암과 변성암, 퇴적암을 대표하는 화강암, 편마암, 세일을 대상으로 풍화등급 별로 시료를 채취하여 다양한 물리·역학적, 광물학적 실험을 수행하여 암석의 종류에 따른 풍화특성을 규명하였다.

연구 대상 암석은 지역적인 특성을 평가하기 위해 화성암을 대표할 수 있는 충북 청주시 옥산읍 지역의 흑운모화강암을 선택하였으며, 변성암은 충북 청주시 오창읍 지역의 흑운모편마암을 선정하였고 퇴적암으로는 충북 영동군 영동읍 지역의 세일을 대상으로 선정하였다.

암종 별로 현장에서 채취된 시료 중에서 풍화단계별로 SW, MW, HW 등급의 시추시료를 선택하고 1개 암종에서 9개씩 총 27개의 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 대상으로 암석의 공학적인 물성변화를 파악하기 위하여 ISRM 및 KS 규정에 의거 물성시험을 실시하였다(ISRM, 1981; Lee, 2008).

2.1 암석의 물리·역학적 특성

풍화등급별로 채취된 총 9개의 시료에 대하여 KS E 3031과 ASTM D 4543에 의거하여 시편을 성형하였으며, 성형된 시료를 이용하여 Table 1과 같이 암석의 물리적 특성을 산정하였다.

밀도값은 풍화가 진행됨에 따라 SW 시료에 비해 MW 시료는 0.2~4.47%, HW 시료는 5.4~6.1%로 유사한 감소율로 감소하는 경향을 보였으며, 암종에 따른 변화는 크지 않은 것으로 분석되었다.

흡수율 및 공극률은 SW 시료에 비해 MW, HW 시료일수록 123.5~3,800%에 이르도록 기하급수적으로 증가하는 경향을 나타내며, 화강암에 비해 변성암과 퇴적암의 변화가 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 퇴적환경에 비해 변성작용을 크게 받은 변성암의 조직변화가 풍화에 따라 급격하게 변하고 있음을 알 수 있다. 탄성파속도는 풍화의 진행에 따라 14~50.4%까지 비교적 선형적인 감소현상을 보이는 것으로 분석되었고 이러한 경향은 암종과는 비교적 무관한 것으로 나타났다. 이와 같은 암석의 풍화에 따른 물성변화는 풍화의 진전에 의해 암석 내 균열면이 확장되거나 암석을 구성하는 광물의 탈락에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다.

또한 일축압축실험결과, Fig. 1과 같이 암종 별로 풍화가 진행됨에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 보이고 있으며,

Table 1. Physical properties of 3 type rocks

Rock type	Grade	Specimen No.	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Void ratio (%)	Seismin velocity	
						P-Wave (m/sec)	S-Wave (m/sec)
Gneiss	SW	GNS-01	2.656	0.049	0.131	4,485	2,618
	MW	GNM-01	2.651	0.247	0.653	3,615	2,159
	HW	GNH-01	2.497	2.060	5.109	2,419	1,615
Granite	SW	GRS-01	2.662	0.127	0.337	4,657	2,695
	MW	GRM-01	2.543	1.279	3.227	3,811	2,272
	HW	GRH-01	2.501	1.760	4.379	2,311	1,429
Shale	SW	SHS-01	2.660	0.196	0.520	4,185	2,349
	MW	SHM-01	2.548	0.439	1.162	3,579	2,015
	HW	SHH-01	2.517	1.236	3.227	2,159	1,318

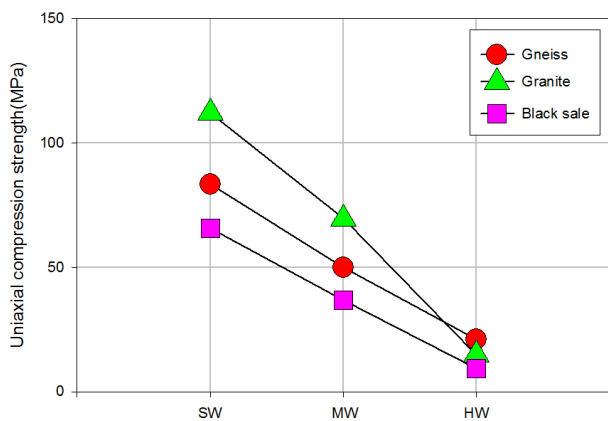


Fig. 1. Variation of uniaxial compressive strength with degree of weathering

편마암의 경우는 SW에 비해 MW, HW 시료일수록 압축강도가 각각 40, 75%까지 감소되었으며, 화강암은 각각 38, 87%, 셰일의 경우에는 각각 44, 86%까지 감소되는 경향을 보여 암종과 무관한 감소율을 보이는 것으로 나타났다. 풍화의 진행이 크지 않은 경우 화강암의 강도가 다른 암종에 비해 편마암 26%, 셰일보다는 41% 정도 더 큰 것으로 나타났으나 풍화가 진행됨에 따라 타 암종이 선형적으로 감소함에 비해 화강암은 감소율이 78%까지 급격한 변화를 보이는 것으로 나타나 풍화에 취약할 수 있음을 확인하였다. 현미경관찰 결과, 풍화로 인한 편마암의 강도 감소는 절리구조인 엽리에 따른 파괴인 것으로 판단되며, 셰일은 층리구조에 의한 점진적인 파괴가 주된 원인인 것으로 판단된다.

2.2 암석의 광물암석학적 특성

본 연구에서는 연구지역에 분포하는 편마암, 화강암, 셰일에 대한 광물암석학적 특성을 분석하기 위하여 풍화광물 분석과 풍화취약광물분석을 수행하였다.

2.2.1 풍화광물분석

조암광물의 광물조성과 상대적인 함량비를 측정하기 위해 시추공에서 회수한 암석의 시험편을 대상으로 광현미경으로 관찰이 가능한 0.03mm 정도 두께로 연마하여 박편을 제작한 후 현미경 관찰을 통하여 수행하였다. 박편관찰 및 모드분석은 Nikon사 모델의 Optiphot-2 편광/반사 겸용 현미경을 이용하였다. 암석시료는 편마암, 화강암, 셰일 분포 지역의 시추코어에서 각각 3개씩, 총 9개의 시료를 채취하였으며, 시료의 풍화 정도에 따라 약간풍화(S), 보통풍화(M), 심한풍화(H)로 나누어 편마암(GNS, GNM, GNH), 화강암(GRS, GRM, GRH), 셰일(SHS, SHM, SHH)로 구분하여 실험을 수행하였다.

분석결과, 편마암은 우백질에 가까우며 석영(quartz), 장석류(feldspar)와 같은 알루미늄 규산염과 같은 우백색 광물이 주를 이루며, 흑운모(biotite), 각섬석(hornblende)과 같은 유색광물이 소량으로 함유되어 있다. 입자의 크기는 중립질에 가까우며, GNS와 GNM에서 석영은 비교적 풍화에 강하여 입자의 형태를 잘 유지하고 있고 장석류는 연회색, 미색 등을 띠며 풍화 정도에 따라서 상이한 조직을 보였다. 풍화를 많이 받은 GNH는 갈색, 적갈색의 철광물이 암석을 피복하거나 불연속면의 틈새를 채우고 있으나, 전반적으로 편마암질의 조직을 잘 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 이와같이 편마암은 주로 석영, 장석, 백운모, 흑운모 등의 광물들로 구성되어 있고, 기존의 조암광물이 풍화변질되어 형성된 극미립의 견운모(sericite)질 점토광물과 유색광물인 흑운모와 각섬석이 풍화변질되어 형성된 녹니석(chlorite), 비정질의 철산화광물들이 관찰되었으며, 풍화에 취약한 광물군이 약 70%에 달하고 생성된 2차 광물은 7~10%로 풍화가 촉진됨에 따라 약 20% 이상 증가된 것으로 평가되었다.

편마암은 조암 광물 입자가 불규칙하게 배열되어 있으며 공극률이 매우 낮아 신선한 상태에서는 물리적 충격에 매우

견고하지만 일단 화학적으로 약한 운모나 사장석(plagioclase) 등이 풍화되어 약간의 점토 생성과 함께 부피가 팽창하면 암석조직이 빠르게 이완된다. 이때 불규칙하게 배열된 입자와 입자 사이의 벌어진 틈을 따라 풍화에 필요한 수분이 깊은 곳까지 침투할 수 있어 풍화가 가속화되는 것으로 판단된다. Table 2에 나타난 바와 같이 강도규제광물인 석영의 경우 풍화도에 따른 변화가 크지 않은 것으로 나타났으며, 풍화취약광물의 경우 풍화가 발달한 경우 6% 정도 감소한 것으로 나타났다. 이는 풍화로 인해 취약광물이 충상광물이나 점토광물로 전환되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 점토광물의 구성비는 풍화가 발달함에 따라 명확히 증가되는 양상을 나타내어 풍화로 인한 2차 광물(점토류)의 생성을 확인할 수 있다.

화강암은 풍화등급에 따라 서로 다른 풍화특성을 보이는데, 약간풍화가 진행된 암석인 GRS와 보통풍화가 진행된 암석인 GRM의 경우 조립질의 석영, 장석, 운모, 각섬석으로 구성되어 있으며, 화강암의 조직특성인 반자형입상조직을 보여준다. 반면에 풍화가 심하게 진행된 GRH의 경우, 장석의 대부분은 유백색의 점토광물로 변질되어 있으며, 흑운모와 각섬석과 같은 유색광물 들은 적갈색의 철산화광물로 변질되어 원래 입자의 형태를 관찰하기 어렵고, 부분적으로 쉽게 부스러질 수 있는 구조를 보이고 있다.

GRS는 미사장석, 사장석, 석영, 운모 등으로 이루어져 있으며, 미사장석은 격자 또는 창살 무늬 쌍정이 나타나는 것이 특징이다. 또한 입자의 접촉면이 비교적 잘 유지되어 있으나 입자 내부와 접촉부에서는 미세균열이 발달하고 사장석의 내부에는 점토광물이 불규칙하게 형성되어 있는 것으로 나타났다. GRM은 광물 결정의 중심과 가장자리 사이의 복굴절률의 차이, 소광각의 변화, 색깔의 차이 등으로 알 수 있는 사장석의 누대구조가 관찰되었다. 누대구조(zonal structure)는 화학성분의 변화가 있음을 의미하는 것으로 풍화로 인한 변화를 지시하고 있다. 또한 사장석 내부에 미세질리나 균열이 발달하고 장석의 내부는 화학적 풍화작용에 의해 변질

을 받아 개방 니콜 하에서 흐리고 옅은 갈색을 띠고 있는 것으로 관찰되었다. 풍화가 심한 GRH는 사장석에서 점토광물이 산점상으로 형성되어 있으며, 장석류와 석영은 파쇄되어 다수의 미세균열이 발달한다. 철산화물은 흑운모와 같은 철함유 광물로부터 철이 용해, 인근에 침전하여 형성되므로 불규칙한 형태를 보이는 것이 특징이다. 이와같이 화강암은 풍화에 취약한 광물군이 약 40%를 차지하고 생성된 2차 광물은 13~20%로 풍화가 촉진됨에 따라 약 200% 이상 증가된 것으로 평가되었다.

세일인 SHS, SHM, SHH는 회색 또는 담갈회색에 가까우며, 암색과 강도가 신선한 원암과 크게 다르지 않아서 풍화에 의한 영향이 크지 않을 것으로 생각된다. 현미경분석 결과, 퇴적암 시료인 SHS, SHM, SHH는 1% 미만의 세립모래 입자가 점토기질에 함유되어 있으며, 입자의 성분은 석영, 사장석, 자생석 광물인 방해석과 불투명 광물로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. 기질의 대부분은 점토로 주성분은 미립 석영으로 보이며 간혹 녹니석도 관찰되고 엽상구조를 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 풍화에 의해 미세균열이 발달한 것을 제외할 경우, 암색이나 강도는 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다.

2.2.2 풍화취약광물진단

본 연구에서는 구성광물의 종류를 확인하기 위해서 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였으며, Philips사의 모노크로미터가 장착된 XPert-MPD 모델을 이용하였다.

X-선 회절분석은 암석을 구성하는 실제적인 광물조성을 정량적으로 측정할 수 있는 시험으로 실제 암석 내에 포함된 탄산염이나 사장석 등 풍화취약광물의 함량을 확인하여 풍화민감도를 판단할 수 있다. 풍화취약광물의 진단은 점토 분리 및 분석을 통해 실제 풍화에 의한 2차 광물의 형성양상을 판단하거나 팽윤성광물의 유무를 확인하는 목적으로 수행하였다.

실험결과 Fig. 2(a)와 같이 편마암(GNS, GNM, GNH)의

Table 2. Mineral composition by polarized microscope observation (%)

Mineral \ Rock type	GNS	GNM	GNH	GRS	GRM	GRH
Quartz	18.5	19.2	20.2	17.5	21.0	22.5
Plagioclase	54.5	55.5	48.5	22.0	27.5	28.5
Micas	15.2	12.2	13.2	15.3	11.5	8.9
Microcline	-	-	-	32.5	21.4	15.2
Hornblende	-	-	-	4.2	5.0	4.5
Chlorite	7.8	8.1	9.5	6.0	8.5	9.0
Clay minerals	4.0	5.0	8.6	2.5	5.1	6.0
Hydrous ferric iron oxide	-	-	-	-	-	5.4

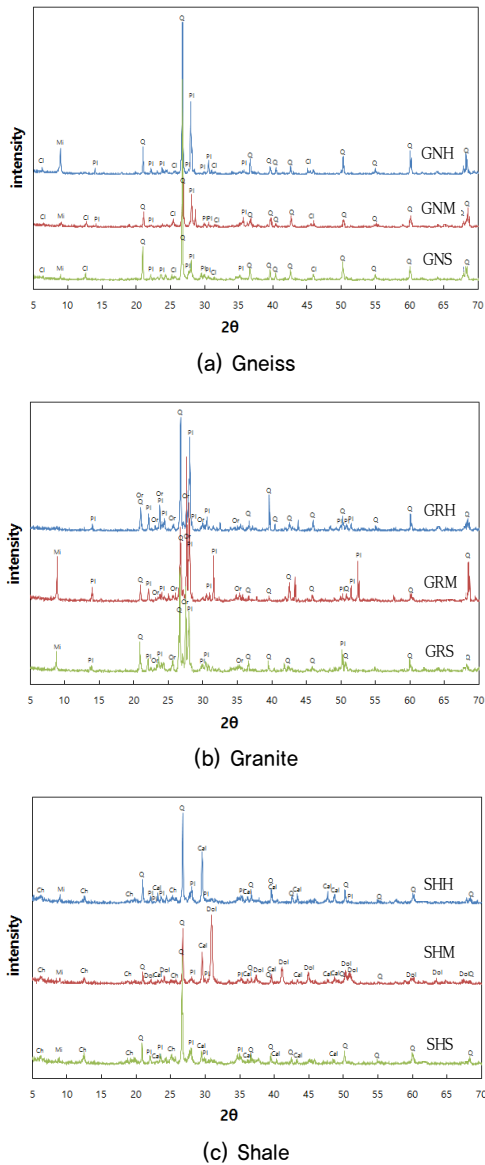


Fig. 2. XRD analysis results

광물조성은 풍화등급에 관계없이 석영(Q:quartz), 사장석(Pl: plagioclase), 운모(Mi:mica) 등의 결정질 광물과 소량의 점토 광물인 녹니석(clinocllore)으로 구성되어 있는 것으로 분석되었다. 분석결과 풍화광물인 녹니석이 산출됨에 따라 풍화암의 시료는 함수와 탈수에 의해 쉽게 분해되거나 파쇄될 수 있을 것으로 나타났으며 장기적으로 공학적인 위해요인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 2(b)와 같이 화강암(GRS, GRM, GRH)의 광물조성은 석영, K-장석(orthoclase), 사장석, 운모로 구성되어 전형적인 화강암질의 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다. 분석결과, 풍화취약광물인 장석과 층상광물인 운모의 함량이 높아 지표에 노출되었을 경우 대기, 지하수, 강우 등의 영향에 의해 풍화작용이 가속되며, 궁극적으로 암석을 구성하는 광물의 화학적 성질을 변화시켜 암석의 안정성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단

된다. Fig. 2(c)와 같이 셰일(SH) 중 SHS와 SHH는 녹니석(chlorite), 운모, 방해석(calcite), 장석, 석영 등의 광물로 이루어져 있고, SHM에는 백운석(dolomite), 녹니석, 운모, 방해석, 장석, 석영 등의 광물이 함유되어 있는 것으로 분석되었다. 분석결과, 셰일은 풍화취약광물인 장석과 층상광물인 운모의 함량이 높아 풍화에 취약할 것으로 나타났다.

이상과 같은 풍화취약광물진단을 통해 암중에 관계없이 풍화취약광물인 장석과 층상광물인 운모의 구성이 확인되었으며, 특히 셰일의 경우 함량이 높아 지표에 노출되었을 경우 대기, 지하수, 강우 등의 영향에 의해 풍화작용이 가속되고 장기적으로 암석을 구성하는 광물의 화학적 성질을 변화시켜, 암석의 안정성을 저하, 암반 자체 결정체의 열팽창, 건습의 반복, Slaking 현상에 의한 물리적풍화작용에 의해 암석 내부의 결함이나 광물 입자 간 공극, 광물의 벽개면, 광물 내 미세균열의 증가 및 공학적 특성 저하를 유발할 것으로 판단된다.

3. 인공풍화시험

본 연구에서는 풍화로 인한 암종별 변화양상을 검증하기 위해 편마암, 화강암 및 셰일에 대하여 동결·융해시험 및 산성비침수시험(화학적풍화작용)을 수행하고 인공풍화에 따른 암석의 물리적특성 변화와 미세균열 발현현상을 고찰하였다.

3.1 동결융해시험 결과

본 연구에서는 연구지역에 적합한 온도 범위와 동결-융해 반복 주기를 설정하고 동결-융해시험을 실시하였다. 시험에 적용된 동결-융해 시험의 온도 범위는 $-20 \pm 2^\circ\text{C} \sim 20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 설정하였으며, 진공챔버 내의 증류수에 포화된 시료를 플라스틱 랩으로 밀봉한 후 12시간 동결하고 8시간 융해, 진공챔버에서 4시간 동안 수침을 통한 포화를 1 cycle로 설정하고 일련의 포화-동결-융해의 한 사이클을 24시간 동안 수행하여 시험을 수행하였다.

동결-융해시험은 총 100 cycle에 대하여 시험 시작 후 10 cycle마다 비중, 흡수율, 공극률을 측정하였으며, 20 cycle마다 탄성파속도를 측정하였다. 암종별 광물암석학적특성(박편분석), 물리역학특성(일축압축강도)은 초기 측정치와 최종 cycle에 대해서만 측정하여 비교하였다.

편마암에 대한 동결융해시험 결과, Fig. 3과 같이 cycle이 증가하면서 풍화도가 SW, MW, HW로 변화함에 따라 공극률은 74.1, 70.0, 4.18%의 증가율을 보였으며 흡수율은 67.7,

64.0, 56.3%의 증가율을 나타냈다. 탄성파속도의 경우 P파와 S파 속도가 각각 4.98, 6.11%에서 풍화가 진행됨에 따라 5.8, 5.61%로 감소하는 양상을 나타내었다.

반면 화강암은 cycle이 증가하면서 풍화도가 SW, MW, HW로 변화함에 따라 공극률은 Fig. 3과 같이 56.5, 50.0, 46.7%의 증가율을 보였으며 흡수율은 56.5, 52.4, 47.1%의 증가율을 나타냈다. 탄성파속도의 경우 P파와 S파 속도가

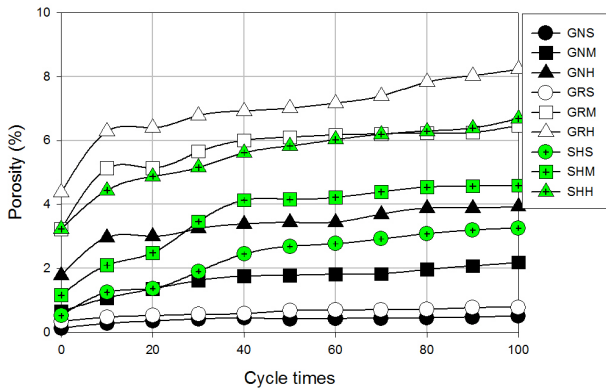


Fig. 3. Variation of porosity with cycle times

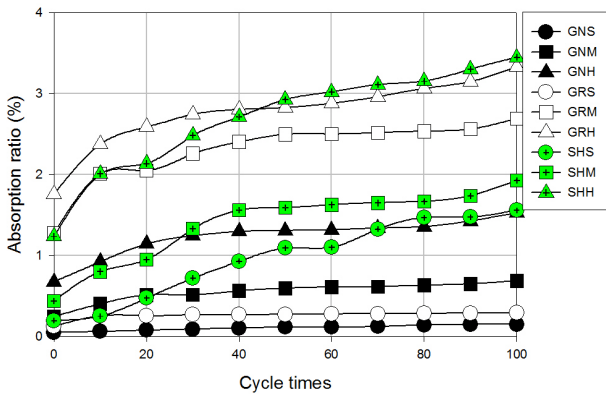


Fig. 4. Variation of absorption ratio with cycle times

각각 5.48, 7.26%에서 풍화가 진행됨에 따라 10.2, 13.7%로 감소하는 양상을 나타내었다.

마지막으로 세일은 cycle이 증가하면서 풍화도가 SW, MW, HW로 변화함에 따라 공극률은 84.0, 74.6, 51.6%의 증가율을 보였으며 흡수율은 Fig. 4와 같이 87.4, 77.1, 64.1%의 증가율을 나타내 상대적으로 다른 암석에 비해 높은 증가율로 풍화에 취약한 성질을 정량적으로 평가할 수 있다. 탄성파속도의 경우 P파와 S파 속도가 각각 3.76, 4.31%에서 풍화가 진행됨에 따라 6.15, 2.03%로 감소하는 양상을 나타내었다.

동결-융해 시험에 따른 암종별 탄성파속도의 변화양상은 Table 3과 같다.

또한 동결융해의 반복에 따른 공극률과 흡수율의 상관성을 평가한 결과 Fig. 5와 같이 SW의 경우 $y=-0.061x+0.457$, MW의 경우 $y=-0.137x+0.425$, HW의 경우 $y=-0.186x+0.459$ 를 보여 풍화 정도 별로 유사한 상관성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 암종별로 분석한 결과 Fig. 6과 같이 편마암의 경우 $y=-0.049x+0.379$, 화강암은 $y=0.015x+0.399$, 세일인 경우 $y=-0.352x+0.532$ 를 보여 암종에 따라 상이한 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

이상과 같이 공극률은 실험 초기의 증가율이 크게 나타나며, 이후로는 선형적인 증가양상을 나타내어 연구지역에 분포하는 편마암, 화강암 및 세일이 반복적인 동결과 융해에 의해 광물입자 간의 결합력이 약화되고 입자 경계의 개방과 광물의 팽창에 의한 미세균열의 빈도 증가 등의 원인으로 증가된 것으로 판단된다. 특히 실험 초기의 증가율이 증가하는 현상은 풍화가 진행됨에 따라 광물의 용해, 재결정화 작용, 이온의 용탈과 치환 등에 의한 것으로 판단되며, 동결융해에 의해 야기되는 내부유체 압력은 균열의 성장을 일으키는데 유효하드로(Pollard & Aydin, 1988) 균열 면의 확장과

Table 3. Physical property index with freezing–thawing cycle

Cycle	P-wave velocity (m/sec)									S-wave velocity (m/sec)								
	GNS	GNM	GNH	GRS	GRM	GRH	SHS	SHM	SHH	GNS	GNM	GNH	GRS	GRM	GRH	SHS	SHM	SHH
0	4,755	4,016	3,515	4,418	3,319	2,619	4,218	3,918	3,572	2,715	2,316	2,138	2,519	2,119	1,595	2,641	2,359	2,217
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	4,721	3,966	3,471	4,375	3,295	2,586	4,195	3,862	3,528	2,702	2,278	2,105	2,486	2,083	1,561	2,618	2,321	2,186
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	4,705	3,915	3,432	4,334	3,266	2,508	4,176	3,829	3,495	2,692	2,238	2,088	2,448	2,027	1,519	2,597	2,286	2,154
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	4,675	3,878	3,395	4,289	3,250	2,467	4,153	3,769	3,467	2,665	2,196	2,064	2,415	1,987	1,467	2,573	2,254	2,118
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	4,622	3,825	3,354	4,241	3,219	2,411	4,119	3,738	3,418	2,605	2,165	2,051	2,372	1,963	1,428	2,549	2,237	2,078
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	4,518	3,766	3,311	4,176	3,150	2,351	4,059	3,695	3,352	2,549	2,115	2,018	2,336	1,945	1,376	2,527	2,195	2,033

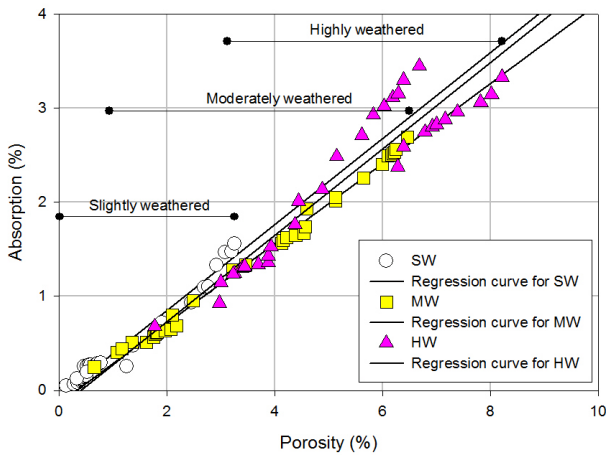


Fig. 5. Relationship of absorption ratio and porosity with weathering grade

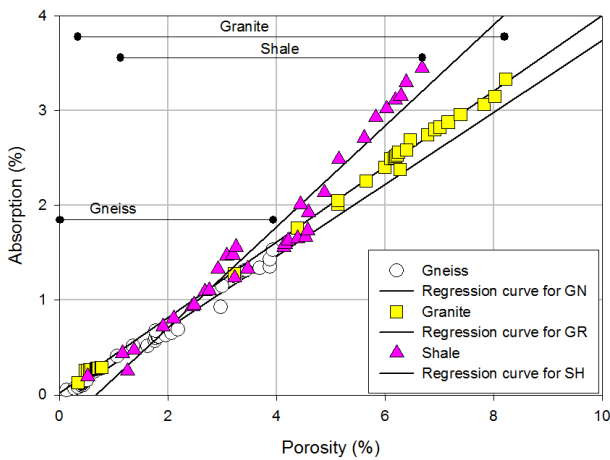


Fig. 6. Relationship of absorption ratio and porosity with rock types

미세균열의 증가를 반영하는 흡수율은 풍화지수로써 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

탄성파속도는 풍화가 진행됨에 따라 암종에 관계없이 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 동결-융해에 따른 새로운 균열 면의 발현과 광물입자가 탈락함으로써 발생하는 결과로 판단된다.

또한 동결-융해시험에 따른 암석의 강도특성 변화를 분석한 결과, Fig. 7과 같이 편마암은 동결-융해가 진행됨에 따라 일축압축강도가 22.6~55.7%까지 선형적인 감소양상을 나타내고 있으며, 광물입자 간의 결합력 약화 및 미세균열의 발현에 의한 강도특성이 약화가 주된 원인인 것으로 판단된다. 화강암은 일축압축강도가 14.6~39.5%까지 선형적인 감소양상을 나타냈으나 편마암에 비하여 풍화에 대한 저항성이 강한 것으로 나타나 편마암의 엇리나 편리구조가 균열 면의 발달에 더욱 영향을 미치고 있음을 예상할 수 있다. 셰일의 경우도 마찬가지로 일축압축강도가 선형적으로

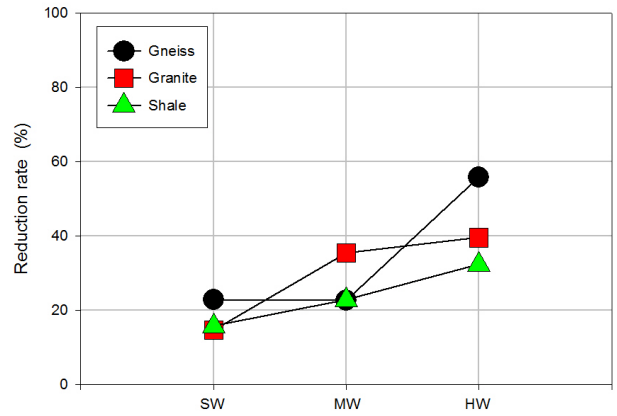


Fig. 7. Variation of uniaxial compression strength with degree of weathering

감소하는 것으로 나타났으나 편마암 및 화강암에 비하여 동결-융해에 의한 풍화의 저항성은 강한 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 변성암은 구조적인 절리인 엇리나 편리구조가 균열 면의 발달을 유발시키고 화강암은 풍화 진행으로 광물입자의 탈락 및 입자 탈락을 통한 균열 면의 발현이 뚜렷하기 때문인 것으로 판단된다. 모든 암석에서 풍화등급이 낮은 암석일수록 일축압축강도의 감소율이 크게 나타나 급속한 풍화 진행을 예상할 수 있다.

3.2 균열발현도 평가

암종별 균열발현양상을 통한 D_B 값 산출은 시험 시작 후 10 cycle마다 측정하여 총 100 cycle까지 산정하였으며, 초기치와 최종 결과값의 비교 분석을 통하여 암종별 균열발현양상을 고찰하였다. 시험을 위해 연구지역에 분포하는 암종별 slab 시험편(3×3cm)을 제작하여 균열생성 및 균열전파양상을 관찰하고, 풍화미세구조와 풍화양상을 고찰하였고, 10 cycle마다 50mm macro 렌즈의 DSLR 카메라와 접사대를 사용하여 6백만 화소의 영상이미지를 획득한 후 획득된 이미지의 평면좌표를 화상분석을 통하여 10 cycle마다 100 cycle까지 산정하고 초기치와 최종 결과값의 비교 분석을 통하여 암종별 균열발현양상을 고찰하였다.

화상분석결과, 대표적인 미세균열의 발현양상은 Fig. 8과 같이 cycle이 증가함에 따라 미세균열이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 풍화의 진행에 따른 차이를 확인할 수 있으나 암종에 따른 특징은 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

Fig. 8과 같은 화상분석을 통하여 미세균열에 대한 통계적 모수인 빈도수와 크기를 동시에 고려할 수 있는 박스프랙탈차원(D_B)을 산정하였으며, 산정된 결과는 Fig. 9와 같다. 박스 집계법은 분할 단계별로 생성된 총 사각요소의 수

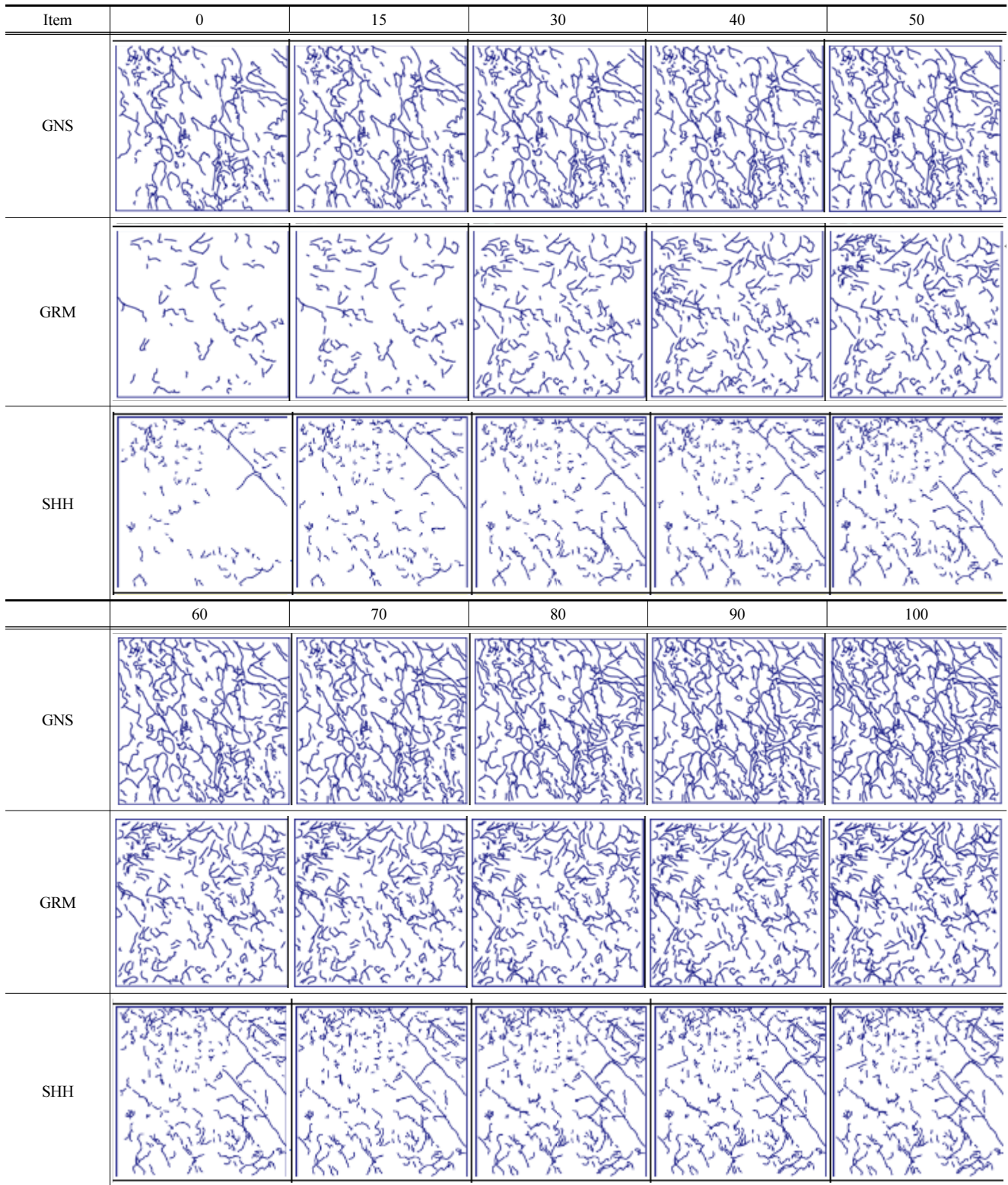


Fig. 8. Variation of micro crack with freezing–thawing cycle

중 불연속면을 포함하는 사각요소의 수를 기재하여 D_B 를 산정하는 방법이다.

균열발현양상을 분석한 결과, 편마암은 풍화등급에 따라 각각 20.8, 8.5, 6.7%의 균열 증가를 보였으며 화강암은 28.9, 25.2, 18.7%, 세일은 31.3, 22.6, 17.6%의 증가율을 나타내

었다. 이와같이 풍화가 진행된 암석일수록 동결융해 반복에 따른 균열의 증가율이 낮아지는 것으로 나타났으며, 풍화의 진행에 따른 연화가 기 발생되어 있기 때문인 것으로 판단 된다.

분석결과, 동결-융해가 진행됨에 따라 D_B 값은 선형적인

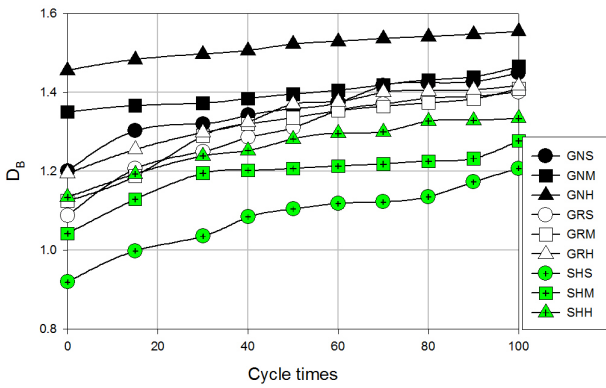


Fig. 9. Variation of box fractal (D_B) with weathering grade and rock type

증가양상을 보이고, 풍화등급이 낮을수록 즉, 풍화가 많이 진행된 암석일수록 기계적 풍화작용에 민감하여 미세균열의 발현을 유발하고 궁극적으로 기계적 풍화작용을 가속화시키는 메커니즘이 반복적으로 발생되고 있는 것으로 판단된다. 암종 별로는 큰 차이를 보이지는 않으나 화강암의 균열 발현이 타암종에 비해 작은 것으로 나타나 기계적풍화에 대한 저항이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 향후 다양한 조건하에 놓여진 많은 암종에 대한 D_B 값이 축적된다면 대상암석의 풍화 정도를 판단할 수 있는 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 암석의 풍화특성을 규명하기 위해 충북지역에 분포하고 있는 화강암과 편마암, 세일을 대상으로 풍화 단계별로 대분하여 시료를 채취하고 암석기재, 현미경 관찰, X ray 회절분석, 전자현미경 관찰·분석을 통한 조성광물과 조직의 변화, fabric의 발달상태 등을 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 풍화등급별 시료에 대한 실험결과, 공극률과 흡수율이 풍화의 등급에 따라 6배~42배까지 기하급수적으로 증가하고 일축압축강도는 암종과 무관하게 38~87%까지 감소되었으며, 화강암은 상대적으로 강도감소율이 큰 것으로 나타나 암종과 풍화에 따른 공학적인 취약성의 변화를 확인하였다.
- (2) 편마암은 극미립의 견운모질 점토광물과 녹니석이 관찰되는 등 풍화에 취약한 광물군이 약 70%에 달하고 생성된 2차 광물은 7~10%로, 풍화의 진행에 따라 약 20% 이상 증가된 것으로 평가되었다. 화강암은 풍화에 취약한 광물군이 약 40%를 차지하고 생성된 2차 광물은

13~20%로 풍화가 촉진됨에 따라 약 200% 이상 증가된 것으로 평가되었고, 세일은 기질의 대부분인 점토는 엽상구조를 보이고 풍화에 의해 미세 균열이 발달한 것을 제외할 경우, 풍화등급에 따른 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났다.

- (3) 인공풍화시험결과 암종에 관계없이 동결-융해가 반복됨에 따라 공극률과 흡수율이 약 46~87% 정도 증가하는 양상을 나타냈으며, 풍화등급이 높을수록 초기값에 대한 증가율은 감소하였다. 또한 풍화등급에 따른 일축 압축강도의 감소율이 편마암 22.8~55.7%, 화강암 14.6~39.5%, 세일 15.7~32.3%로 풍화가 진행될수록 감소율이 명확히 증가되는 경향을 보였으며, 편마암의 감소 경향이 뚜렷하여 변성암의 편리나 엽리 구조가 물리적 풍화로 인해 균열면의 빠른 발현을 촉진함을 확인할 수 있다.
- (4) 또한 동결-융해의 반복에 따른 미세균열의 발현양상을 고찰한 결과, 동결-융해가 진행됨에 따라 D_B 값은 선형적으로 증가하며 약한풍화 시료의 발현된 균열의 증가율이 약 20~30%로 가장 크고 초기에 집중되는 것으로 분석되었다.

이상과 같은 광물학적, 화학적, 공학적 연구결과는 암종에 따른 풍화특성과 원인을 분석하고 인공적 또는 자연적으로 노출된 암반의 풍화메커니즘과 물성의 저하를 비교적 정량적으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하고 규명하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

“이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내 연구비지원에 의하여 연구되었습니다(This work was supported by the intramural research grant of Chungbuk National University in 2015)”.

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 sang-ju area, The proceeding of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2010, pp. 2200~2203 (in Korean).
2. Choi, E. K. (2011), A study on the chemical index of alteration (CIA) and geotechnical properties of igneous rocks by weathering, PhD. dissertation, Pusan University, pp. 1~199 (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. Goldich, S. S. (1938), A study in rock weathering, *Journal of Geology*, Vol. 46, pp. 17~58.
 5. ISRM (1981), *Rock characterization, Testing and Monitoring*. In: Brown ET(ed) Suggested methods. Pergamon Press, Oxford, 211p.
 6. Kang, C. W., Kim, B. S., Son, K. R. and Bae, W. S. (2016), Evaluation about weathering characteristics of granite at sangju area, *The Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 17~25 (in Korean).
 7. Kim, Y. H. and Hong, S. H. (1990), A quantitative study on the variational features of rock properties followed by weathering in granites, *Journal of Korean Instruction mining Geology*, Vol. 23, No. 2, pp. 221~232 (in Korean).
 8. Lee, S. B. (2008), Weathering mechanism and degradation of physical property of hallasan trachyte in Jeju island, PhD. dissertation, Pukyung University, pp. 1~205 (in Korean).
 9. Lee, S. G. (1993), Weathering of granite, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 29, No. 4, pp. 396~413 (in Korean).
 10. Park, J. J. (2015), Mechanical characteristics of pohang area mudstone as material for reclamation material, PhD. dissertation, Joongbu University, pp. 1~143 (in Korean).
 11. Pollard, D. D. and Aydin, A. (1988), Progress in understanding jointing over the past century, *Geol. Soc. of Am. Bull.*, 100, pp. 1181~1204.
 12. Reiche, P. (1950), A survey of weathering processes and products, University of new mexico press, Albuquerque, pp. 1~95.
 13. Ryu, S. H. and Song, J. J. (2012), Weathering of rock specimens exposed to recurrent freezing and thawing cycles, Vol. 22 No. 4, pp. 276~283 (in Korean).