

인공풍화과정에 의한 김해지역 백악기 화강암의 풍화특성에 관한 연구

엄정기^{1)*}

A Study of Weathering Characteristics of Cretaceous Granite in Kimhae Area due to Artificial Weathering Processes

Jeong-Gi Um

Abstract It is very difficult to capture the weathering characteristics of rock because of limitation caused by time and space. A new scheme of experiment that includes physical and chemical weathering processes was implemented on Cretaceous granitic rock samples from Kimhae area to investigate the variations of geomechanical properties of deteriorated rocks due to artificial weathering processes. The seismic velocity was found to decrease with increasing artificial weathering cycle. Effective porosity and absorption tend to increase with artificial weathering processes. The amount of deterioration of rock samples depend on pre-test degree of weathering. Effective porosity, absorption and seismic velocity can be used as the measure of weathering characteristics of granite in the study area. Weathering is accelerated by combined effect of physical and chemical weathering processes. The new experimental methodology conducted in this study has strong capability to analyze the weathering characteristics of rocks.

Key words Weathered rocks, Freeze-thaw, Chemical weathering, Cretaceous granite

초 록 암석에 대한 풍화특성 연구는 시공간적 제약으로 인한 어려움이 따른다. 이 연구는 경상남도 김해시 일대에 분포하는 백악기 화강암에 대하여 물리적 및 화학적 풍화과정을 인공적으로 재현하고 풍화진행에 따른 암석의 지질공학적 특성변화를 고찰하였다. 인공풍화과정에 의하여 시료의 탄성파속도는 현저하게 감소하였으며 공극률 및 흡수율은 뚜렷하게 증가하였다. 초기 풍화등급이 높은 암석일수록 인공풍화과정에 따른 물성변화의 폭이 크며 풍화에 취약한 것으로 나타났다. 공극률, 흡수율 및 탄성파속도는 연구지역의 화강암에 대한 풍화 지수로 유용하게 사용할 수 있다. 물리적 및 화학적 풍화과정이 복합적으로 일어나는 조건에서 암석풍화는 더욱 촉진된다. 이 연구에서 복합적인 풍화과정을 재현한 연구방법은 암석의 풍화특성을 규명하고 예측하는 데에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 풍화암, 동결-융해, 화학적 풍화, 백악기 화강암

1. 서 론

암석은 물리적 및 화학적 특성변화를 수반하는 풍화과정을 통하여 분해된다. 토양은 암석풍화의 최종 산물이며, 풍화암은 암석과 토양 사이에서 광범위한 물성 및 지화학적 특성을 나타낸다. 상당한 풍화이력을 겪은 현장의 암석물질을 암반역학적 특성에 따라 분류할 때

이를 암석으로 취급할 것인지 아니면 토양으로 취급할 것인지에 대한 어려움이 있는데, 이에 는 암석물질에 대한 과대평가 내지 과소평가의 논란이 야기될 수 있기 때문이다.

풍화과정은 일반적으로 기후조건과 온도, 습도 및 강우에 의해 제어된다. 이와 같은 요소들은 지표 근처의 암석에 작용하는 물리적 및 화학적 변화의 정도 및 유형을 결정한다. 물리적인 작용은 암석에서 역학적 균열을 형성한다. 또한, 물이 존재하는 경우 온도에 의해서 제어되는 화학적 작용이 일어날 수 있다. 대부분의 풍화과정은 이러한 두 작용이 복합적으로 진행되지만 물리적 풍화는 주로 지표면 근처에서 발생하며 화학적 풍

¹⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 교수

* 교신저자 : jum@pknu.ac.kr

접수일 : 2012년 2월 7일

심사 완료일 : 2012년 2월 23일

게재 확정일 : 2012년 2월 23일

화는 지표면에서 수십 혹은 수백 미터 아래까지도 발생 하는 것으로 알려져 있다(Chorley, 1969). 동절기에 일교차가 심하고 하절기에 강우강도가 높은 우리나라는 지표 근처의 복합적인 풍화작용이 암석의 풍화를 제어 하는 경우가 대부분이다.

공학적 관점에서 암석의 풍화에 대한 연구는 풍화 정도에 따른 등급분류 및 지질공학적 특성과의 연관성을 규명하는 데에 주안점을 두었던 초창기 연구 결과(Ruxton and Berry, 1957, Dearman, 1974, Fookes et al., 1988)를 바탕으로 현재까지 국내외적으로 많은 연구가 수행되었다. 최근 국내에서 수행된 연구는 동결-융해에 의한 물리적 풍화특성에 관한 연구(박연준 외, 2003, 장현식 외, 2004, 우와 한, 2007, 엄과 신, 2009, 엄정기 외, 2009, 강성승 외, 2011)와 화학풍화실험 및 지화학분석을 통한 화학적 풍화특성에 관한 연구(우와 박, 2004, 이창섭 외, 2007, 우익 외, 2009, 송원경 외, 2009)가 주를 이룬다. 기존에 수행된 국내의 풍화연구 결과에 의하면, 암석은 침수·건조의 영향에 따른 암석 물성의 변화를 뚜렷하게 나타내며, 동결-융해에 의해서도 미세균열의 발현·확장 및 암석강도의 저하를 나타낸다. 그러나 이러한 연구들은 물리적 또는 화학적 고려에 기초한 특정한 풍화실험에 따른 지질공학적인 특성에 대한 분석연구에 치중할 면이 있다. 최근까지 국내외적으로도 물리적 및 화학적 풍화가 복합적으로 진행됨에 따라 발생하는 암석의 지질공학적 특성 변화에 대한 고찰은 매우 미흡한 실정이다.

이 연구는 최근 많은 암반공학적 결함이 제기되었던 경상남도 김해시 일대에 분포하는 백악기 화강암에 대하여 동결-융해 및 화학풍화실험을 복합적으로 수행하고 동결-융해와 침수-건조의 주기적인 반복에 따른 암석물성의 변화를 분석하였다. 또한, 이 연구는 도출된 연구결과를 기존에 수행된 타 암종에 대한 연구결과(엄과 신, 2009) 및 타 지역의 동일 암종에 대한 연구결과(엄정기 외, 2009)와 비교하여 중·장기적 풍화예측의 가능성을 고찰하였다.

2. 연구지역의 지질특성

연구지역은 경상분지 백악기 화강암이 분포하는 경상남도 김해시 일대이며 풍화 단계별 시료 확보가 가능한 암반을 선정하였다. 또한, 풍화작용에 의하여 암반의 안정성이 심각한 문제로 인식되고 있는 지역이 고려되었다. 경상남도 김해시를 포함하는 경상남도 동남부 지역은 백악기의 하양층군을 기반암으로 하여 관입·분출한 안산질암류와 이후 관입한 화강암이 주를 이룬다. 하양

층군 상부의 유천층군은 백악기 후기의 안산질암류로 주로 안산암과 안산암질 응회암이 분포한다. 이들을 관입하는 불국사화강암류는 지역에 따라 마산화강암, 김해화강암, 진해화강암으로 분류할 수 있다. 연구지역에서 대규모 단층은 보고되어 있지 않으며 북서-남동 방향의 소단층이 분포하는 것으로 조사되었다.

연구대상 암종인 진해 및 김해 화강암은 2 mm 이상의 조립질로 유색광물 함량이 적으며 등립·균질 조직으로 등방성의 특징을 갖는다. 현미경 하에서 신선한 진해화강암(Fig. 1(a))은 사장석(Pl), 석영(Qz), 정장석(Kf) 순으로 주구성광물을 이루며 흑운모(Bio)와 각섬석(Hb)이 부구성광물을 이루고 있다. 사장석 결정이 크지 않은 점과 다량의 사장석이 누대구조(zoning)를 보이는 것으로 보아 반심성암에 해당될 것으로 판단된다. 흑운모와 각섬석은 약간 변질되어 나타남을 알 수 있다. 김해화강암(Fig. 2(b))은 석영, 정장석, 사장석 순으로 주구성광물이 함유되며 흑운모, 각섬석, 녹니석(Chl) 등이 부구성광물로 구성된다. 정장석은 퍼사이트(perthite)로 나타나며 정장석, 사장석 모두 변질되어 견운모화된 부분이 특징적으로 나타난다. 또한, 흑운모와 각섬석이 녹니석으로 변질되어 나타난 것이 특징이다. 결정의 크기가 대부분 1 mm 내외로 크지 않으며, 일부 장석이 5 mm 내외의 큰 결정으로 나타난다.

3. 인공풍화실험

3.1 풍화등급에 따른 시료분류

풍화실험을 위한 암석시료는 진해화강암 및 김해화강암이 분포하는 현장에서 시추공으로부터 회수된 코어 시료이다. 모든 시료는 물성측정 시 크기와 형태에 따라 발생될 수 있는 효과를 제거하기 위해 지름 54 mm, 길이 110 mm 이상의 기본 원주형으로 제작하였다. 성형된 암석시료에 대하여 공극율, 탄성파속도 등의 비파괴물성이 측정되었다. 비파괴물성이 비슷한 암석시료는 서로 유사한 공학적 특성을 가질 수 있다는 가정 하에 동일한 풍화그룹으로 분류하였다.

이 연구에서 사용한 시료의 초기 풍화등급은 기존에 발표된 분류기준(Dearman, 1974, IAEG, 1979, ISRM, 1981)을 적용하였으며 시료의 변색, 변질 등 외관상의 풍화상태를 종합적으로 검토하여 일차적으로 분류하였다. 측정된 물성치를 바탕으로 이차적인 풍화등급이 분류되었으며, 이에 따른 각 물성치의 범위가 결정되었다. Table 1은 암석시료의 초기 비파괴물성 및 풍화등급을 수록하고 있다. 연구지역의 화강암은 암상 및 비파괴물성에 따라 I등급(F: fresh), II등급(SW: slightly weathered),

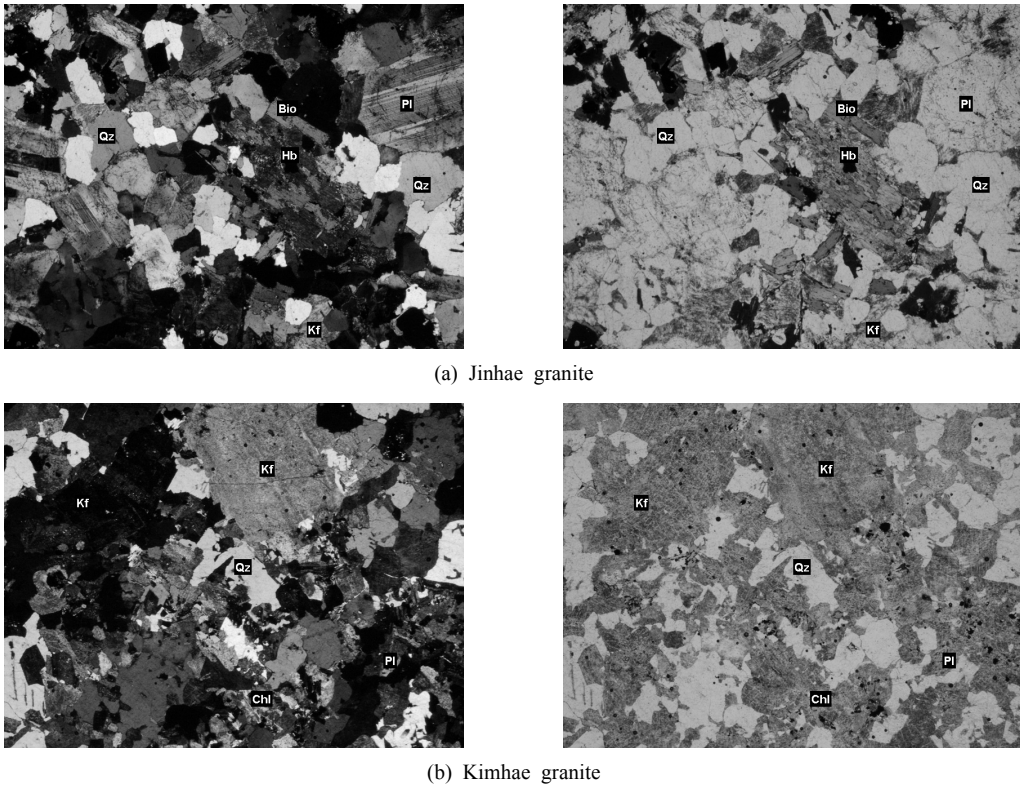


Fig. 1. Photographs, in cross and open polarized light, showing minerals in Jinhae and Kimhae granite.

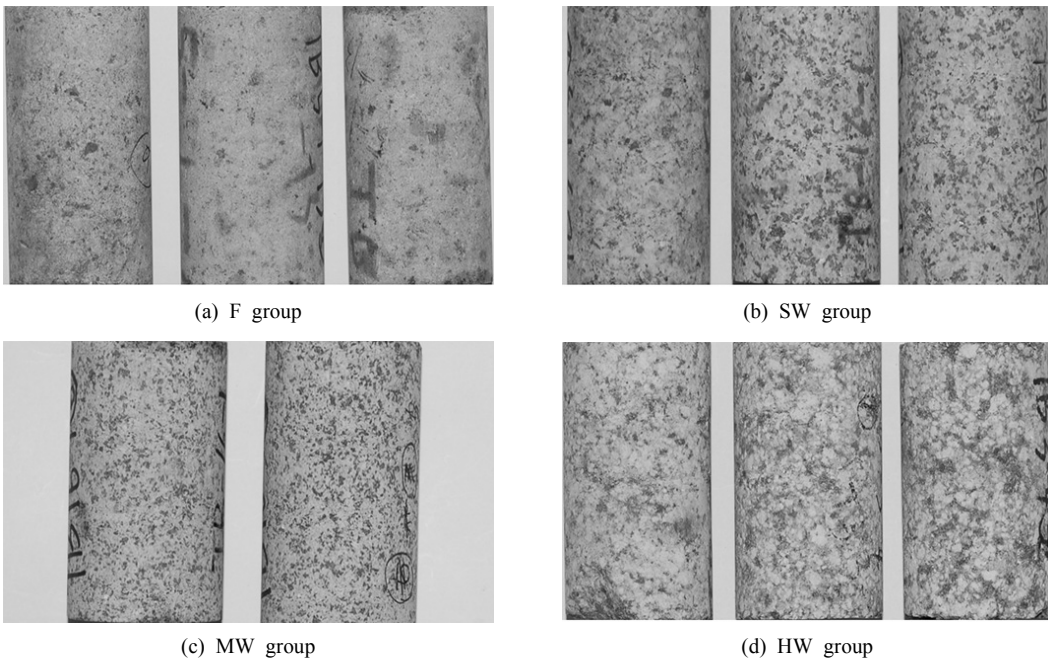


Fig. 2. Photographs of selected rock specimens

Table 1. Pre-test sample index properties

Location	Specimen ID	n(%)	Seismic velocity(m/s)		Degree of weathering
			Vp	Vs	
Jinhae	TB5-1-13(1)	0.587	5035	2582	F
	TB5-1-13(2)	0.532	5035	2653	
	TB16-1(1)	0.318	4650	2842	
	BH1-1(2)	0.347	4960	2682	
	BH1-1(3)	0.759	4500	2583	
Jinhae	TB5-1-5(1)	1.252	2937	1685	SW
	TB5-1-11(6)	1.124	4168	2484	
	TB16-1(3)	1.934	3496	1998	
	TB16-1(4)	1.608	3996	2361	
	TB16-1(7)	0.863	4522	2539	
	NBB32-1	0.957	4426	2483	
Gimhae	NBB14-1(1)	0.970	4718	2414	MW
	NBB14-1(3)	1.443	4582	2400	
	NBB14-1(4)	1.100	4666	2621	
	BH1-1(1)	0.998	4805	2147	
Jinhae	TB16-1(6)	3.615	2100	1295	MW
	TB16-1(8)	3.606	1926	1042	
Gimhae	NBB16-1(1)	9.562	1973	1080	MW
	NBB16-1(2)	3.772	2367	1529	
Jinhae	TB2-3	5.391	1342	969	HW
	TB3-4(1)	6.561	972	678	
	TB3-4(3)	7.088	1031	615	
	TB3-4(4)	8.848	827	477	
	TB3-4(6)	6.277	1391	778	
	TB3-4(8)	7.080	1080	649	
Gimhae	NBB40-1(1)	6.976	1242	695	

n: effective porosity, Vp: P-wave velocity, Vs: S-wave velocity

III등급(MW: moderately weathered), IV등급(HW: highly weathered) 등 4개의 풍화그룹으로 분류할 수 있다. 각각의 풍화등급에 해당하는 대표적인 암석시료가 Fig. 2에 나타나 있다.

3.2 연구방법

인공풍화실험은 기존의 동결-융해 방법(엄과 신, 2009, 엄정기 외, 2009)에 따라 수행하였다. 또한, 이 연구에서는 일부 암석시료에 대하여 동결-융해 과정을 재현한 물리풍화실험과 주기적인 침수-건조에 의한 화학풍화 실험(Woo et al., 2008, 우익 외, 2009)을 결합하여 복합적인 풍화진행에 따른 암석물성의 변화를 고찰하기

위한 새로운 인공풍화실험이 시도되었다.

동결-융해는 암석의 균열이나 공극 내에 물이 충분히 침투되어 있어야 효과적이므로 진공챔버를 이용한 수침을 실시하여 시료가 충분히 포화된 상태에서 수행하였다. 동결온도는 연구지역의 최근 10년간 동절기 평균 기온의 약 3배에 해당하는 $-15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 물리적 풍화가 가속될 수 있는 조건을 부여하였다.

진공챔버에서 2시간동안 증류수에 포화된 시료는 플라스틱랩으로 밀봉하여 8시간동안 냉동기에서 동결시킨 후 상온에서 14시간동안 융해하였다. 이와 같이 포화-동결-융해 순서로 정해진 사이클은 24시간동안 연속적으로 수행되어 한 사이클을 이룬다. 이 연구에서는



Fig. 3. Photographs of double soxhlet extractors

사이클을 반복하면서 주기적으로 공극률, 흡수율, 탄성파속도 등의 비파괴물성을 측정하는 방식으로 140사이클의 동결-용해가 수행되었다. 다만 HW로 분류된 시료는 대부분 10사이클 이후 시료가 해체되고 부서져 물성측정이 불가능하였다.

화학풍화실험은 이중속실텐추출장치(double soxhlet extractor; Fig. 3)를 이용한 용탈실험이며, 사용된 용매는 약 70°C 정도의 증류수이다. 각 풍화등급을 대표하는 암석시료는 약 90분의 주기로 용매에 침수와 건조가 반복되도록 고안된 이중속실텐추출장치 내에서 용해, 가수 분해, 수화 작용, 산화·환원 작용 등의 화학적 풍화가 촉진된다. 암석시료에서 용탈작용이 지속적으로 발생됨에 따라 하부에 위치한 플라스크에는 암석에서 용해된 이온들이 축적되며 침전물도 생성된다. 이와 같은 용탈실험은 초기풍화등급이 F, SW, MW, HW인 코어시료에 대하여 20사이클의 동결-용해 반복 후에 10일 동안 주기적인 침수-건조를 수행하는 방식으로 3회 반복하여 총 30일 동안 실시하였으며 4회째 동결-용해 20사이클 이후에는 23일 동안 실시하였다. 즉, 전체 인공 풍화실험 절차는 <동결-용해: 20사이클 + 용탈: 10일 + 동결-용해: 20사이클 + 용탈: 10일 + 동결-용해: 20사이클 + 용탈: 10일 + 동결-용해: 20사이클 + 용탈: 23일>이다. 4회째 용탈실험의 기간은 23일로 이전보다 두 배 이상인데, 이는 용실시험에 의해서만 나타나는 화학적 풍화에 대한 효과를 고찰하기 위함이다.

동결-용해 과정만 수행한 시료와 마찬가지로 동결-용해에 용탈실험이 결합되어 수행되는 동안 암석물성의 변화를 평가하기 위하여 공극률, 흡수율, 탄성파속도가 측정되었다. 또한, 용탈실험을 수행함에 따라 시료에서 용탈된 이온 및 침전물이 집적된 하부플라스크의 용매에 대하여 pH가 측정되었으며 정량적인 평가를 위하여

ICP(Inductively Coupled Plasma)분석이 수행되었다.

4. 인공풍화과정에 따른 물성변화

4.1 동결-용해 과정에 따른 물성변화

무결암은 얼음의 썩기작용과 같은 물리적 풍화메커니즘으로 인하여 온도와 함수비의 변화에 따른 체적변화를 수반하며 궁극적으로 미세균열의 발현·확장에 의하여 해체된다. 따라서 물리적 풍화가 진행됨에 따라 상응하는 암석물성은 무결암의 물성과 비교하여 암석의 풍화정도를 정량화하는데 이용될 수 있다.

엄과 신(2009)은 경상분지 백악기 이암에 대한 동결-용해 시험을 통하여 점토질 암석이 물리적 풍화기작에 매우 민감하다고 보고한 바 있다. 그러나 광물학적 견지에서 대부분의 퇴적암류는 풍화에 따른 변화를 보이지 않는데, 이에 는 퇴적암류가 지표와 유사한 온도, 압력 조건에서 형성되므로 화학적 풍화에 민감하지 않기 때문이다. 이에 반하여 화성암류는 지표와 매우 다른 온도, 압력 조건에서 형성되므로, 지표 근처의 암석은 화학적으로 불안정할 수 있으며 이에 따른 광물화학적 변화가 일어나기 쉽다. 화성암류는 일반적으로 광물학적 특성에 따라 풍화민감도가 결정되며 퇴적암류에 비하여 물리적 풍화에 잘 견디는 것으로 알려져 있다(Gonzales de Vallejo and Ferrer, 2011). 엄정기 외(2009)는 원주 지역의 주라기 화강암에 대한 물리적 풍화 특성을 연구하여 HW 등급의 암석은 동결-용해 풍화에 취약하지만 F, SW, MW 등급의 암석은 동결-용해에 의한 물성변화가 상대적으로 매우 작다고 보고하였다.

이 연구에서는 물리적 풍화기작이 경상분지 백악기 화강암의 물성변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내에서 동결-용해 풍화과정을 재현하고 주기적으로 공극률, 흡수율, 탄성파속도 등의 물성을 측정하였다. 각각의 물성에 대한 측정법은 한국암반공학회 표준암석시험법(2005, 2006a, 2006b)을 사용하였다. Figs. 4-7은 동결-용해 반복에 따른 공극률, 흡수율, P파 및 S파속도 등의 물성변화이다.

Fig. 4는 동결-용해 사이클에 따른 공극률의 변화를 도시한 것이다. 모든 풍화등급의 시료에서 공극률은 동결-용해 사이클이 진행함에 따라 뚜렷하게 증가하는 양상을 보인다. 시험 전과 140사이클 이후 공극률의 변화를 살펴보면 F 등급은 평균 1.37%, SW 등급은 평균 1.29%, MW 등급은 1.79% 정도 증가한 것으로 나타났다. HW 등급의 경우에는 10사이클 이후 시료가 부서져 물성측정이 불가하였지만 10사이클에서 이미 평균 2.7%의 높은 공극률의 증가가 나타났다. F, SW, MW

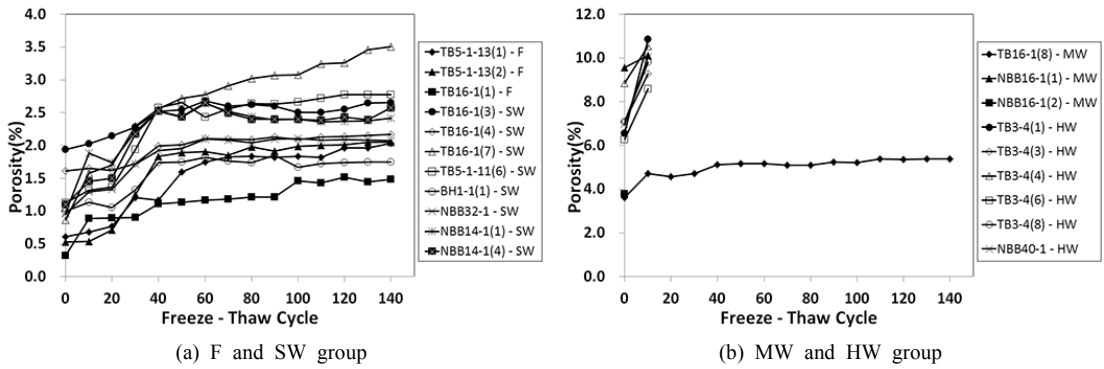


Fig. 4. Plots between effective porosity and freeze-thaw cycles

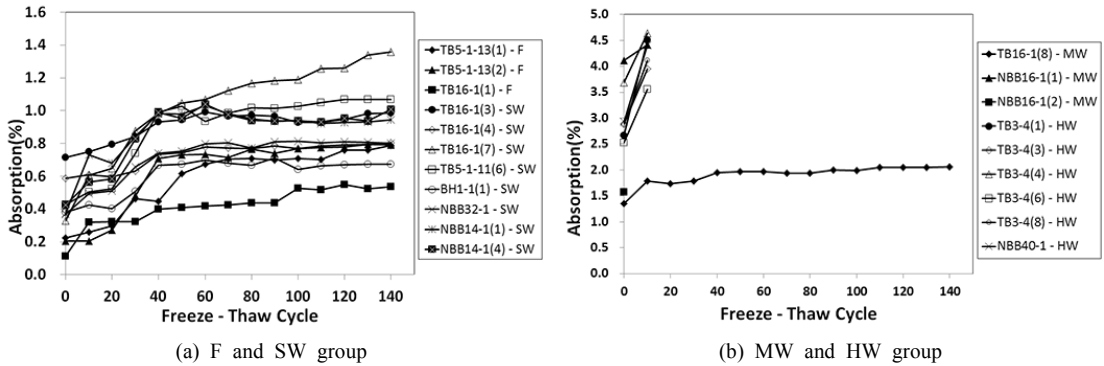


Fig. 5. Plots between absorption and freeze-thaw cycles

등급의 시료는 전반적으로 초기 40사이클 까지 비교적 높은 공극률의 증가가 나타났다.

Fig. 5는 동결-융해 사이클에 따른 흡수율의 변화를 보여준다. 흡수율은 공극률의 경우와 비슷하게 동결-융해 사이클이 반복됨에 따라 모든 시료에서 증가하였다. F 등급은 초기 0.11~0.22%에서 140사이클 이후 0.54~0.79%로, SW 등급은 초기 0.33~0.71%에서 140사이클 이후 0.67~1.36%로, MW 등급은 초기 1.36%에서 140사이클 이후 2.06%로, HW 등급은 초기 2.53~3.67%에서 10사이클 이후 3.56~4.64%로 증가하였다. 특히, MW 및 HW 등급의 시료는 10사이클에서 이미 높은 흡수율의 증가를 보이는데, 이는 연구지역의 화강암에서 초기 풍화 등급이 높을수록 동결-융해 작용이 암석풍화에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다는 점을 지시한다. 이와 같은 결과는 원주지역의 류라기 화강암에 대한 연구결과(엄정기 외, 2009)와 다른 양상인데, 연구지역의 백악기 화강암은 물리적 풍화과정에 더욱 민감하게 반응한다. 이는 풍화연구를 수행함에 있어서 같은 암종이라도 지역에 따른 지질특성을 고려하는 것이 매우 중요함을 시사한다.

암석의 탄성파속도는 보편적으로 사용되는 공학적 풍화 지수이다. 탄성파속도는 일반적으로 암석이 치밀·견고하고 신선할수록 빠르다(엄과 신, 2009, 엄정기 외, 2009). 신선한 화강암과 같이 풍화에 영향을 받지 않은 암석은 5,000 m/s 정도의 P파속도를 갖지만, 풍화의 진전됨에 따라 P파속도가 1,000 m/s 이하로 떨어질 수도 있다.

연구지역의 화강암에 대한 동결-융해 사이클에 따른 P파 및 S파속도가 각각 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타나 있다. 동결-융해 과정 중에 시료가 붕괴되어 탄성파속도 측정이 불가능한 시료는 측정 가능한 사이클까지만 고려하였다. F 등급의 시료에서 측정된 P파속도는 시험 전 평균 4,907 m/s에서 140사이클 이후 평균 4,407 m/s로 10% 정도 감소하였다. SW 등급의 시료는 평균 4,350 m/s에서 평균 3,475 m/s로 20% 정도 감소하였으며, 또한, MW 등급의 시료는 1,926 m/s에서 1,205 m/s로 37% 정도 감소하였다. HW 등급의 시료는 시험 전 평균 1,090 m/s에서 10사이클 이후 평균 582 m/s로 약 50%의 현저한 감소를 나타냈다. S파속도는 F, SW, MW 시료에서 140사이클 이후 각각 약 42%, 43%, 49%의 현저한

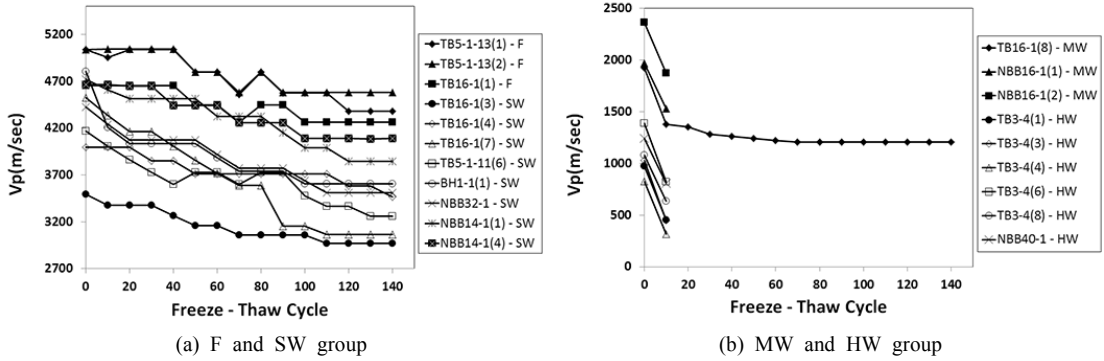


Fig. 6. Plots between P-wave velocity and freeze-thaw cycles

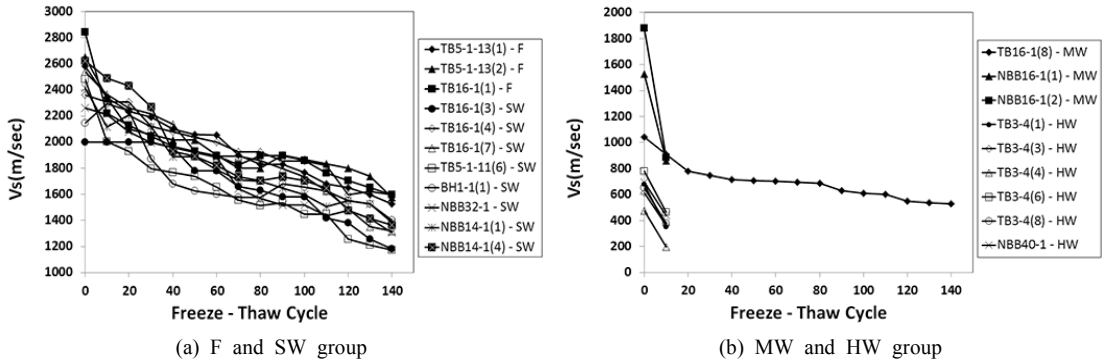


Fig. 7. Plots between S-wave velocity and freeze-thaw cycles

감소로, 또한, HW 시료는 10사이클 이후 56%의 급격한 감소를 보인다. 전반적으로 S파속도는 P파보다 높은 비율의 감소가 일어나는 것으로 측정되었다. 이와 같은 결과는 기존에 수행된 경상분지 백악기 이암과 원주지역 주라기 화강암에 대한 풍화특성 연구(엄과 신, 2009, 엄정기 외, 2009)에서 보고한 바와 같이 탄성파속도의 변화가 동결-융해에 따른 미세균열의 발현·확장과 연관성이 있음을 지시한다.

이 연구에서 고려한 공극률, 흡수율, 탄성파속도 등의 비파괴물성은 동결-융해 사이클에 따른 뚜렷한 변화를 나타내며 연구지역의 화강암에 대한 중·장기적 풍화에 측을 위한 풍화지수로 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 동결-융해 사이클에 따른 공극률, 흡수율 등의 물성변화가 뚜렷하지 않은 원주지역 주라기 화강암의 경우를 감안할 때, 같은 암종이라도 현장의 지질특성에 부합하는 풍화민감도 해석이 수행되어야 한다.

4.2 용탈실험이 추가된 경우의 물성변화

화학적 풍화는 수용성 광물을 용해하고 산화·환원작

용과 수화작용을 통하여 새로운 광물을 생성한다. 화학적 풍화의 효과는 암석의 변색 및 광물의 분해 등의 다양한 형태로 나타난다. 용해과정은 암석의 화학적 변질에 있어서 매우 큰 역할을 담당한다. 이와 같이 화학적 풍화가 광물학적 변화 및 암석의 분해에 직접적인 영향을 미치지만 물리적 풍화도 광물입자간의 접촉조직을 약화시키고 공기와 물의 침투를 허용할 수 있는 면적을 확대하여 암석의 분해를 더욱 가속시킬 수 있다.

이 연구에서 동결-융해 사이클 사이에 추가된 용탈실험은 암석시료에 대한 주기적인 침수 건조에 따른 광물의 용탈을 관찰하고 복합적인 풍화가 암석에 미치는 영향을 고찰하기 위함이다. 기존의 용탈실험(Woo et al., 2008, 우익 외, 2009)은 화학적 풍화현상만을 고려하기 위하여 수개월 정도의 기간 동안 지속적으로 용탈실험을 수행하였다. 이 연구에서는 화학적 풍화가 물리적 풍화와 복합적으로 일어나는 자연 현상을 재현하기 위하여 동결-융해 과정 중에 용탈실험을 추가하는 방식으로 동결기와 하절기를 반복하는 조건을 부여하였다.

Fig. 8은 전체 실험기간 동안 주기적으로 측정된 공극

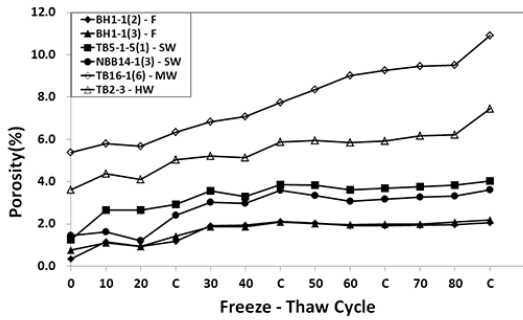


Fig. 8. Plot between effective porosity and freeze-thaw cycles with leaching experiments (C: 10 days of leaching)

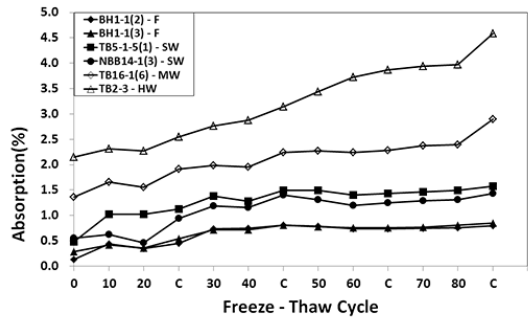
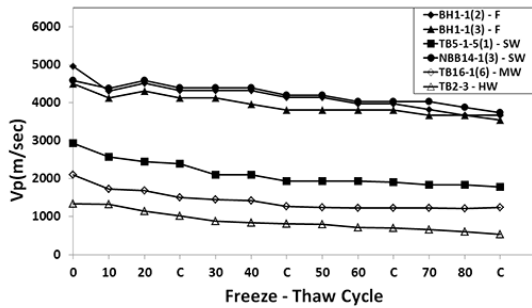
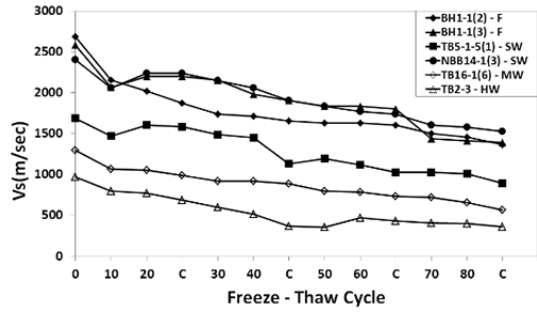


Fig. 9. Plot between absorption and freeze-thaw cycles with leaching experiments



(a) P-wave



(b) S-wave

Fig. 10. Plots between seismic velocity and freeze-thaw cycles with leaching experiments

률의 변화를 보여주며, 동결-융해 과정과 더불어 용탈 실험에 의해서도 공극률이 증가하는 것을 알 수 있다. F 등급에서 HW 등급으로 갈수록 공극률의 증가폭은 높아진다. F 와 SW 등급의 시료는 실험초기에 뚜렷한 공극률의 증가를 보이며, 동결-융해 30사이클 이후에는 변화가 미소한 것으로 나타났다. 반면에 MW 및 HW 등급의 시료는 전 과정동안 지속적인 공극률의 증가가 관찰되는데, 특히, 용탈실험이 끝난 후 공극률의 증가가 뚜렷하게 관찰된다. 용탈실험 기간이 상대적으로 긴 마지막 용탈실험 후의 공극률은 급격한 증가가 관찰된다.

Fig. 9는 동결-융해 및 용탈실험 진행에 따른 흡수율 변화이다. 흡수율은 동결-융해 및 용탈실험 과정이 반복됨에 따라 전체적으로 증가하는 양상을 뚜렷하게 나타낸다. F 등급은 초기 0.13~0.29%에서 실험종료 후 0.80~0.85%로, SW 등급은 초기 0.48~0.56%에서 1.43~1.57%로, MW 등급은 초기 1.36%에서 2.89%로, HW 등급은 초기 2.15%에서 4.59%로 증가하였다. SW 및 MW 등급의 시료에 대하여 동결-융해만 수행한 경우의 흡수율 변화(Fig. 5)와 동결-융해에 용탈실험을 추가한

경우의 흡수율 변화(Fig. 9)를 비교해 보면 동결-융해 30사이클에서 동결-융해 과정 중에 용탈실험을 추가한 시료의 흡수율이 더욱 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 용탈실험과 결합하여 총 80사이클의 동결-융해 과정을 수행한 시료가 동결-융해만 140사이클을 수행한 시료보다 더욱 풍화가 진행된 것으로 나타난 결과는 자연계에서 복합적인 요인에 의해서 일어나는 풍화에 대한 연구방법을 수립하는 데에 있어서 시사하는 바가 크다.

연구지역의 화강암에 대한 동결-융해와 용탈실험이 결합된 풍화과정에 따른 P파 및 S파속도의 변화가 Fig. 10에 나타나 있다. F 등급의 시료에서 측정된 P파속도는 실험 전 평균 4,755 m/s에서 실험종료 후 평균 3,605 m/s로 25% 정도 감소하였다. SW 등급의 시료는 평균 3,760 m/s에서 2,760 m/s로 27% 정도 감소하였다. 또한, MW 등급의 시료는 2,100 m/s에서 1,246 m/s로 41% 정도 감소하였으며, HW 등급의 시료는 실험 전 1,342 m/s에서 529 m/s로 61%의 현저한 감소를 나타냈다. S파속도의 경우에도 F, SW, MW, HW 시료에서

실험종료 후 각각 약 48%, 49%, 56%, 63%의 감소를 나타내며 P파보다 높은 비율의 속도 감소가 측정되었다. 이와 같은 결과는 앞에서 언급한 140사이클의 동결-융해만을 수행하여 얻어진 결과와 비교할 때 매우 큰 차이임을 알 수 있다. 특히, Fig. 10에 나타난 결과가 총 80사이클의 동결-융해 과정에서 도출된 점을 상기하면 화학적 풍화가 연구지역 화강암의 풍화에 미치는 영향이 매우 클 수 있으며 동결-융해 과정과 결합하여 일어날 때 풍화작용이 더욱 빠르게 진행 될 수 있다는 것을 의미한다.

우익 외(2009)는 원주지역 화강암에서 화학풍화실험에 따른 물성변화가 뚜렷하지 못하다고 보고하였다. 이 연구 결과는 화강암의 풍화특성을 연구함에 있어 화학적 및 물리적 요인을 동시에 고려해야 한다는 것을 제시한다. 실제 현장에서 풍화력을 가진 암석은 오랜 기간 동안 자연 상의 조건에 반응하여 평형을 이루고 현재에 이르렀다는 것을 의미한다. 이와 같은 암석이 실험실 조건에서 풍화가 더욱 가속되기 위해서는 공극이나 미세균열과 같은 암석의 결함이 더욱 발현·확장되어 외적 요인과 반응할 수 있는 여건이 조성되어야 하나 주기적인 침수-건조에 의한 광물의 용탈만으로는 그 효과를 기대하기 어려운 감이 있다. 따라서 풍화에 의한 암석의 풍화특성을 파악하고 중·장기적인 풍화예측을 위해서는 복합적인 풍화과정이 지속적으로 반복되는 조건에서 풍화연구가 수행되어야 한다.

용탈실험에 따른 용매내 집적물에 대한 화학분석은 주기적인 침수에 의한 광물의 용탈 가능성과 양에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이 연구에서는 용탈실험 기간이 비교적 긴 마지막 4회째 용탈실험 동안 주기적으로 pH가 측정되었다. 또한, 실험종료 후 광물의 용해정도를 파악하기 위하여 이중속실험장치(하부플라스크 용매에 대한 이온농도 측정이 실시되었다).

Fig. 11은 용탈실험 중에 측정된 pH값을 도시한 것인데, pH의 증가는 주기적인 침수가 반복됨에 따라 장석류가 용해되어 양이온농도의 증가에 기인한 것으로 판단된다. Table 2는 이중속실험장치(하부플라스크)에서 확보된 용매에 대한 ICP/OES(Perkinelmer Optima 3300XL)분석 결과이다. 규산염광물이 주를 이루고 있는 연구지역의 화강암 시료에서 용탈된 원소들은 사장석과 정장석 등의 풍화반응에 민감한 규산염광물에서 용탈된 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 등의 양이온이다. Na^+ , Ca^{2+} , K^+ 는 비교적 높은 농도로 측정되었으며, Mg^{2+} 는 상대적으로 낮게 측정되었다. 이는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 사장석과 정장석이 연구지역 화강암의 주구성 광물을 이루고 흑운모는 상대적으로 소량 함유되었음

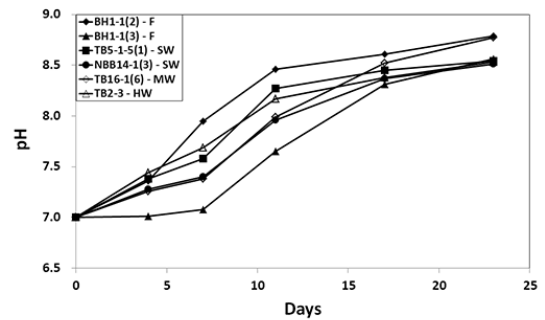


Fig. 11. Variation of pH at the lower flask during leaching experiments

Table 2. Results obtained from ICP analysis

Specimen ID and degree of weathering	Na^+ (ppm)	Mg^{2+} (ppm)	K^+ (ppm)	Ca^{2+} (ppm)
BH1-1(2) F	21.71	0.57	45.91	8.20
BH1-1(3) SW	35.20	0.39	34.89	9.99
NBB14-1(3) SW	38.31	0.36	33.89	5.27
TB5-1-5(1) SW	37.64	2.51	45.89	64.18
TB16-1(6) MW	54.50	0.00	77.33	47.04
TB 2-3 HW	83.98	2.28	71.14	38.43

을 의미하며, 또한, 사장석과 정장석이 화학적 풍화에 민감한 광물로 작용하였다는 것을 지시한다.

5. 결론

이 연구는 경상남도 김해시 일대에 분포하는 백악기 화강암에 대한 물리적 및 화학적 인공풍화실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 연구지역의 백악기 화강암은 석영, 정장석, 사장석 등이 주구성광물로 구성되며 풍화가 진행된 암석일수록 화학적 풍화과정에 의해 사장석 및 정장석 등의 광물용탈이 쉽게 일어날 수 있다.
2. 공극률, 흡수율, 탄성파속도 등의 비파괴물성은 물리적 및 화학적 풍화에 따른 뚜렷한 변화를 나타내며 연구지역의 화강암에 대한 중·장기적 풍화예측을 위한 풍화지수로 유용하게 활용할 수 있다.
3. 연구지역의 화강암은 기존에 연구된 타지역 화강암과 비교할 때 물리적 및 화학적 풍화과정에 반응하는 양상 및 정도가 상이하다. 따라서 풍화연구를 수행함에 있어서 같은 암종이라도 현장의 지질특성에 부합하는 풍화해석이 이루어져야 한다.

4. 물리적 및 화학적 풍화과정이 복합적으로 일어나는 조건에서 암석풍화가 더욱 빠르게 진행된다. 따라서 동절기에 일교차가 심하고 하절기에 강우강도가 높은 우리나라에서 암석의 풍화특성을 파악하고 중·장기적인 풍화에측을 위해서는 복합적인 풍화과정이 지속적으로 반복되는 조건에서 풍화연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(구 한국과학재단)의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-0072776)

참고문헌

1. 강성승, 김종인, 오바라 유조, 히라타 아츠오, 2011, 동결융해시험에 의한 사암 및 안산암의 풍화특성 평가, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 21.2, 145-150.
2. 박연준, 유광호, 양광용, 우익, 박찬, 송원경, 2003, 동결-융해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 13.3, 215-224.
3. 송원경, 우익, 김복철, 2009, 풍화가속실험을 통한 독도 암체의 풍화특성 분석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 19.4, 318-327.
4. 엄정기, 신미경, 2009, 경남 함안군 백악기 이암의 동결-융해에 따른 물성변화 및 미세균열 발현특성, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 19.2, 146-157.
5. 엄정기, 우익, 박혁진, 2009, 동결-융해 풍화에 의한 원주지역 주라기 화강암의 지질공학적 특성변화, 자원환경지질(대한자원환경지질학회지), 42.3, 261-272.
6. 우익, 박혁진, 2004, 옥천대지역 -제천·금산·김천 - 에 분포하는 화강암 및 화강 편마암의 풍화분류에 관한 고찰, 자원환경지질(대한자원환경지질학회지), 37.3, 355-364.
7. 우익, 한병현, 2007, 춘천시 신북지역에 분포하는 운모편암의 물리적 풍화특성, 자원환경지질(대한자원환경지질학회지), 40.6, 771-784.
8. 우익, 엄정기, 박혁진, 2009, 강원도 원주일대에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 화학풍화실험에 의한 물성 변화 연구, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 19.3, 213-225.
9. 이창섭, 조태진, 이상배, 원경식, 2007, 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구, 지질공학(대한지질공학회지), 17.2, 235-251.
10. 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 세일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 지질공학(대한지질공학회지), 14.4, 401-416.
11. 한국암반공학회, 2005, 암석의 탄성파속도 측정 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 15.4, 239-242.
12. 한국암반공학회, 2006a, 암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 16.2, 95-98.
13. 한국암반공학회, 2006b, 암석의 흡수율 및 비중 측정 표준시험법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 16.2, 99-101.
14. Chorley, R. J., 1969, The role of water in rock disintegration, Introduction to Fluvial Processes, Methuen, 53-73.
15. de Vallejo, L. I. G. and M. Ferrer, 2011, Geological engineering, CRC Press/Balkema, Netherlands, pp. 678.
16. Dearman, W. R., 1974, Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice, Int. Ass. Eng. Geol. Bull. 9, 33-42.
17. Fookes, P. G., C. S. Gourley and Ohikerec, 1988, Rock weathering in engineering time, Quarterly Journal of Engineering Geology 21, 33-58.
18. IAEG (International Association of Engineering Geology), 1979, Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, Part 1: Rock and soil materials, Int. Ass. Eng. Geol. Bull. 19, 364-371.
19. ISRM (International Society for Rock Mechanics), 1981, Basic geotechnical description of rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 22, 51-60.
20. Ruxton, B. P. and L. Berry, 1957, Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong, Bulletin of the Geological Society of America 68, 1263-1291.
21. Woo, I., J. A. Fleurisson, Y. J. Park, K. C. Han, W. K. Song, H. J. Park, I. S. Kim, 2008, Essai d'alteration chimique acceleree au laboratoire par le double extracteur Soxhlet. Application a des roches granitique de Coree du Sud., Bulletin of Engineering Geology and the Environment 67, 443-452.

**엄 정 기**

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과
이학사

1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이
학석사

1997년 University of Arizona 자원지질
공학과 공학박사

Tel: 051-629-6559

E-mail: jum@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수
