

동결융해에 의한 화강풍화토의 강도저하에 관한 연구

A Study on the Strength Degradation of Weathered Granite Soil by Freezing and Thawing

김 용 수^{1*} Kim, Yong-Soo

정 수 정² Jung, Soo-Jung

ABSTRACT

The property of weathered soil cannot but have a possibility of having a limit when its precise approaching due to the various weathering environment, and the peculiarity of its conduct affected by the weathering degree and effect factors. Especially most domestic or international researches are concentrated on the sedimentary soil, trying to analyze the mechanical behavior of weathered soil from the viewpoint of sedimentary soil. Therefore, it's difficult to judge if those results meet the actual conduct of weathered soil. This study suggested a way of weathering degree changing experiment as an early stage in an experiment of artificially changing weathering degree. In order to find out the property of strength change by the change of weathering degree, indoor mechanical experiment was made using soil sample after freezing and thawing. Under the weathering degree, characteristic change is watched by country rock and region of weathered granite soil.

요 지

풍화토의 특성은 다양한 풍화환경, 풍화도 및 영향인자에 따른 거동의 특이성 때문에 정밀한 접근에 있어서 한계를 가진다. 특히 국내·외의 연구는 퇴적도에 집중되어 있고 풍화토의 역학적 거동을 퇴적도의 관점에서 분석하려 하기 때문에 이러한 결과가 풍화토의 실제 거동과 일치하는지 판단하는데 무리가 있다. 본 연구에서는 인공적으로 풍화도를 변화시키는 실험의 초보단계로서 온도 변화에 따른 강도변화 특성을 규명하고자 한다. 이를 위하여 동결·융해 반복작용 후의 시료를 대상으로 실내시험을 실시하여 풍화도에 대한 화강풍화토의 모암별, 지역별, 특성변화를 살펴보았다.

Keywords : Weathered granite soil, Weathering degree, Freezing, Thawing, Unconfined compression strength

1. 서 론

화강풍화토는 대부분 석영, 장석, 운모, 기타 유색광물 등의 1차광물과 일라이트, 카올리나이트, 깁사이트, 할로이사이트, 베키쿨라이트 등의 2차광물로 구성되어 있으며 모암의 분포지역이나 채취장소 및 심도에 따라 각 광물성분의 함유량이 다르다. 일반적으로 석영은 풍화에 대해 안정성이 높으나 그 외의 장석류나 2차광물은 쉽게 변질되어 점성토화과정을 밟는다. 그러므로 화강풍화토는 풍화정도에 따라 여러 가지 다양한 흙의 성질을 나타

내며 한마디로 정의하기에는 어려움이 있다(김세은, 2000).

현실적으로 흙은 풍화가 진행중인 상태이기 때문에 현재 시점에서의 물리·역학적인 특성만으로 화강풍화토의 특성을 결정하는 것은 오판의 여지가 있다. 다시 말하면, 풍화도에 따라 변화하는 흙 구조에 의해 점착력이나 토립자의 맞물림 효과가 나타나고 응력이력과 무관하게 겉보기 선행압밀하중이 발생하는 등 다양한 성질을 나타내기 때문에 획일적으로 정의하기가 어렵다. 그러므로 풍화 이전의 모암 특성과 함께 현재까지의 풍화 경로와 풍화 환경 및 공학적 목적에 맞는 고찰이 이루어져야 한다. 또한 실제

1* 정회원, 한국시설안전기술공단 시설안전네트워크연구단 팀장 (Member, Team Chief, KISTEC, E-mail: yskim@kistec.or.kr)

2 정회원, 한국시설안전기술공단 시설안전네트워크연구단 연구원 (Member, Researcher, KISTEC)

자연환경에서의 풍화는 매우 더딘 속도로 발생되고 여러 가지 풍화인자가 복합적으로 작용하고 있기 때문에 이를 체계적으로 연구하기 위해서는 특정 풍화요인에 대한 영향을 확인하고 인위적으로 환경을 조성하여 풍화요인과 풍화속도를 제어하는 풍화도 변화실험이 필수적이다.

실제 자연환경에서 발생하는 풍화는 여러 요인이 복합적으로 작용하고 시간 스케일이 크다. 따라서 흙의 풍화에 관한 연구에서는 인공적으로 환경을 조성하여 풍화의 속도와 요인을 인위적으로 제어하는 시험의 제안 및 이를 통한 흙의 정량적 변화특성 분석이 필요하다.

본 연구에서는 자연계에 존재하는 다양한 풍화요인 중에서 발생빈도와 영향의 측면에서 중요하다고 판단되는 온도변화에 따른 강도특성을 규명하기 위하여 동결·융해 반복 작용 전·후의 시료를 대상으로 일축압축시험을 실시하여 강도의 변화 및 모암별, 지역별 변화특성을 분석하고자 한다.

2. 동결·융해 반복시험 조건

동결·융해가 발생하면 토-수계 내의 구조변화로 인하여 지반상태도 수시로 변화하게 된다. 이러한 동결·융해 과정의 정확한 메카니즘은 규명되지 않았지만 가장 큰 문제는 흙의 강도저하이다.

동결·융해에 관한 시험법은 ASTM C-666(Concrete), JIS A 6204(Concrete), JSSMFE, 이탈리아의 동결압축강도시험규정 등이 있다. 이중 이탈리아 규정은 $-15\sim+35^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위로 되어 있는데 이는 이탈리아의 평균온도에 의해 산출된 것이다. 본 연구에서는 실제 기후를 바탕으로 최소 및 최대 온도를 설정하는 이탈리아 규정이 적절하다고 판단하고 이를 실험에 적용하였다.

국내 기상조건에 맞는 적절한 온도범위를 결정하기 위



그림 1. 냉동고 전경

하여 서울, 이천, 청주, 전주, 대구, 밀양, 영주, 영월, 원주, 제천, 태백의 10년간 기상자료를 비교한 결과 $-21.1\sim+26.5^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 나타내었으며 이를 기준으로 동결·융해의 온도를 설정하였다. 또한 응결을 유도하는 온도 유지시간을 약 3시간 정도로 설정하였을 때 충분한 동결과 융해가 발생된다(김성수, 1999)는 기존 연구를 바탕으로 본 연구에서는 동결·융해 온도는 -20°C 와 $+20^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고 온도 유지시간을 4시간으로 하여 최대 200회까지 반복실험을 실시하였다.

수분의 공급방법은 침수방식을 사용하지 않고 상대습도 유지에 의한 응결현상 유도방식을 사용하였는데 이는 강우나 지하수의 공급 등 특별한 상황이 아닌 빙점 이하의 온도에서 발생하는 일반적인 영향을 재현하기 위함이다. 이를 위하여 온도조정이 영하 25°C 까지 가능하며 정밀도 0.1°C 인 시판되는 냉동고를 이용하였다.

3. 시험 방법

3.1 시료준비

그림 2는 대상시료의 채취위치를 나타낸 것으로 전국을 모암에 따라 크게 화성암, 변성암, 퇴적암으로 구분하고 식생의 영향을 배제하기 위하여 1.0m 정도의 표층을 제거한 후 지중에 존재하는 흙을 채취하였다. 화성암 지역은 서울, 유성, 전주이고 변성암 지역은 사북, 문경이며 퇴적암 지역은 경기도 광주, 청도, 고령으로 선정하였다.

원지반에서 교란된 상태로 채취한 시료는 용기에 담아 실험실로 운반하였고 이물질 및 입경이 큰 자갈 등을 제거한 후 상온에서 보관하였다. 대상시료는 육안으로 볼 때 암회색, 적갈색, 갈색 등 다양한 색상으로 나타났으며 일반적으로 국내의 산지에서 볼 수 있는 사질토이다. 표 2와

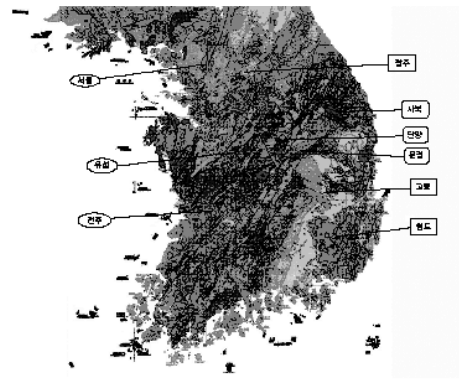


그림 2. 대상시료의 채취 위치도

표 1. 실험코드

인공풍화 조건	모 압 추정	시료 종류	분류 코드	Cycle Times
동결·융해 (F)	화성암 (G)	서울	FGS	0
		유성	FGY	10
		전주	FGJ	25
	퇴적암 (S)	청도	FSC	40
		고령	FSG	60
		광주	FSK	80
	변성암 (M)	사북	FMS	100
		문경	FMM	120
				150
				190

표 2. 대상시료의 기본적인 물성시험 결과

모암 추정	채취 위치	Gs	#200 통과율 (%)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	0.95 x ①	부식율 (%)	U.S.C.S
화성암	서울	2.41	0.1	16.5	1.79	1.61	19.8	SW
	유성	2.32	0.01	17.2	1.71	1.54	16.2	SW
	전주	2.43	0.01	17.7	1.73	1.56	21.8	SW
퇴적암	청도	2.51	0.01	22.0	1.63	1.47	20.4	SW
	고령	2.54	0.02	21.5	1.62	1.46	26.4	SW
	광주	2.49	0.02	19.5	1.69	1.61	21.2	SW
변성암	사북	2.74	0.01	11.7	1.86	1.67	15.8	SW
	문경	2.72	0.02	12.0	1.92	1.73	14.6	SW

그림 3은 KS F에 의거하여 수행한 기본적인 물성시험 결과를 나타낸 것이다.

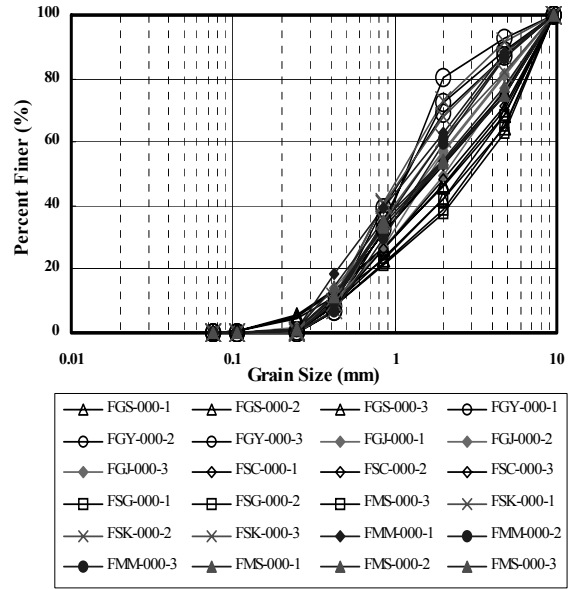


그림 3. 대상시료의 입도분포곡선

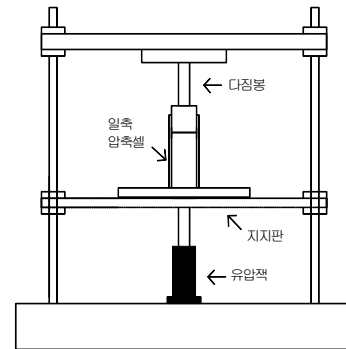


그림 4. 정적 시료성형장치 개략도

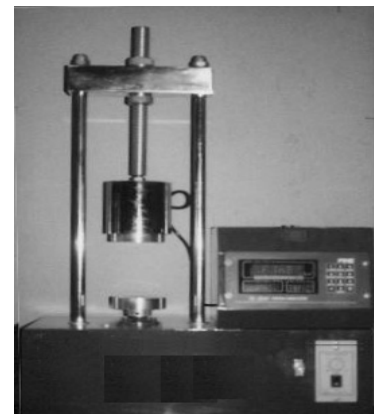


그림 5. 일축압축시험기 전경

3.2 공시체 제작

인위적으로 풍화도를 변화시킨 시료를 대상으로 일축 압축시험을 수행하기 위해 그림 4와 같은 정적 시료성형 장치를 이용하여 공시체를 제작하였다. 정적 압축 다짐법은 부피를 정확히 알고 있는 성형몰드를 이용하여 소요 다짐도에 해당하는 공시체의 제작이 용이하며 트리밍으로 인한 공시체의 교란요인을 제거할 수 있다.

3.3 일축압축시험

본 연구에서는 풍화도 변화에 따른 강도변화를 신속하고 간편하게 파악하기 위하여 일축압축시험(KS F 2314)을 실시하였다. 시료는 동결·융해를 반복하여 ϕ 50mm×100mm의 원주형 공시체를 재성형한 후 15 Cycle 주기별로 각각 3회씩 실시하였다. 시험기기는 그림 5에 나타낸 바와 같으며 압축방식은 변형제어형으로 속도는 0.1%/min로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 일축압축강도 변화

동결·융해 횟수의 변화에 따른 일축압축시험결과는 부록

에 나타난 바와 같다. 부록 중 동결·융해에 대한 강도변화가 가장 명확히 나타난 그림 6(고령지역)을 살펴보면, 동결·융해 반복횟수가 증가함에 따라 각 시료의 압축응력은 거의 유사한 비율로 감소하는 것을 알 수 있으며 이는 다른 지역의 결과에서도 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 이때 각각의 초기 응력은 다양하게 나타나는 반면 동결·융해작업의 190회 반복시 압축응력은 강도 차이가 적어지는 경향을 보인다. 즉 동결·융해에 의한 초기시점에서의 강도변화가 현저하다는 것을 알 수 있는데 이는 Yong et al.(1985)이 제시한 첫 번째 반복에 의한 강도저하가 가장 크다는 연구결과와 유사한 것이다.

또한 동결·융해의 반복횟수가 증가할수록 파괴시 축변 형율이 동시에 증가하는 특성을 알 수 있다. 즉, 압축실험을 실시한 초기의 결과에는 변형을 연화현상이 나타나지만 동결·융해의 반복횟수가 증가할수록 변형을 경화현상이 뚜렷해짐을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 강도 감소를 유발시키는 입자 파쇄와 동결·융해와의 상관성을 알아보기 위하여 입도분석을 실시하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 시험 초기상태의 입도분포 곡선에 비해 동결·융해를 반복한 경우의 입도분포 곡선이 좌측으로 이동되는데 이는 풍화의 진행으로 인하여 토립자가 세립화되는 것을 의미하는 것으로 온도의 영향에 따른 풍화작용으로 풍화토의 분산효과가 크다는 것을 알 수 있다.

4.2 모암과 지역별 변화

모암 종류에 따른 동결·융해 반복횟수와 일축압축 강도변화의 상관성을 알아보기 위하여 화성암지역, 퇴적암

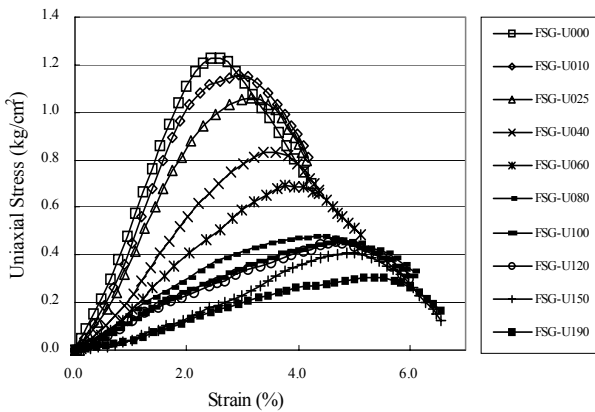
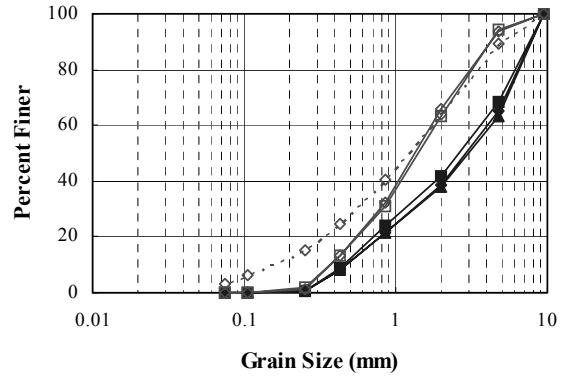
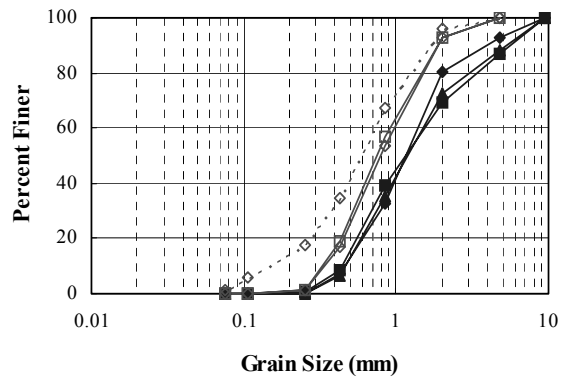


그림 6. 동결·융해 실험조건에 따른 일축압축시험결과(고령)

지역, 변성암지역으로 구분하여 분석하였다. 그림 8은 동결·융해를 반복한 시료의 일축압축강도(q)를 초기강도(q₀)로 나누어 q/q₀로 표현한 것이다. 동결·융해 작용을 190회 반복시켰을 경우의 q/q₀는 모암이 화성암인 지역의 풍화도가 0.26~0.43의 범위를 나타내고 퇴적암인 경우는



(a) 고령



(b) 유성

그림 7. 동결·융해 반복에 따른 입도분포 변화

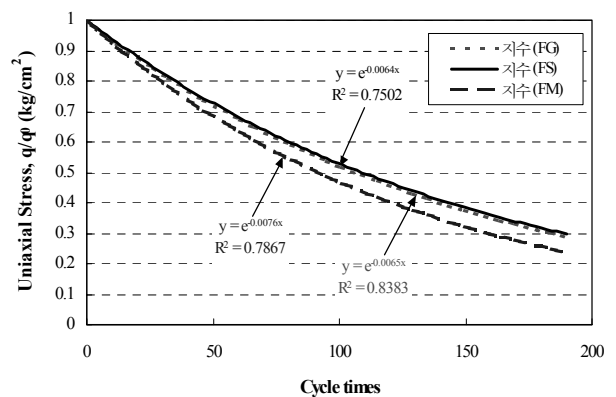
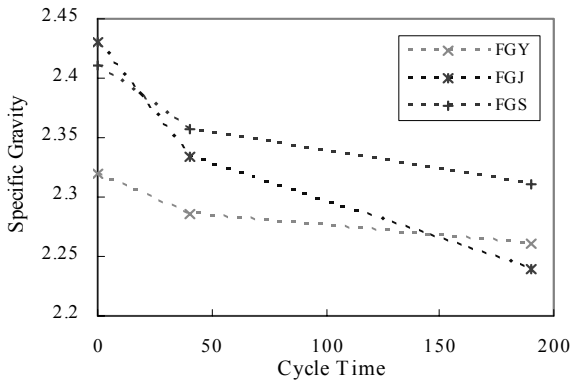


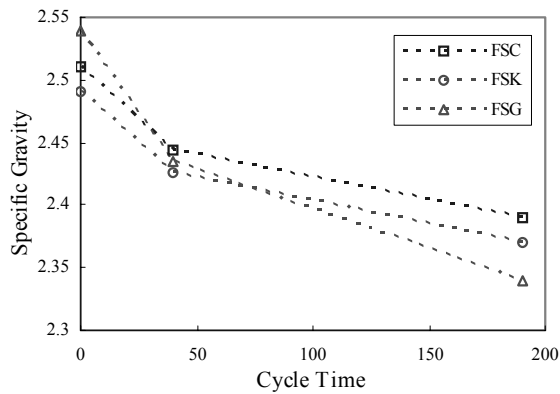
그림 8. 모암별 일축압축강도 변화

0.5~0.76의 범위이며 변성암인 경우에는 0.2~0.33의 범위를 나타내어 동결·융해에 따른 강도의 저하가 가장 큼을 알 수 있다. 따라서 모암이 변성암인 풍화토의 일축압축강도의 감소가 화성암과 퇴적암 지역에 비하여 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

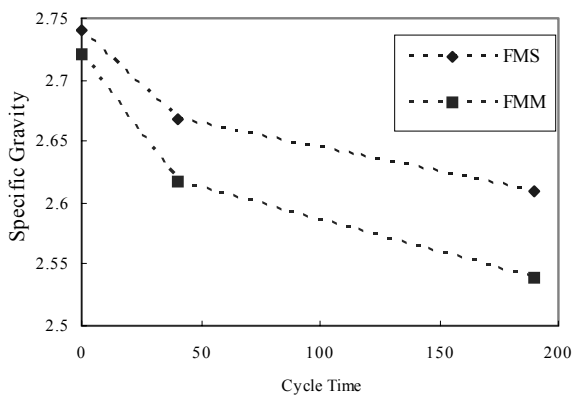
본 연구에서는 겉보기 비중을 측정하여 풍화진행에 따른 변화를 파악하고자 하였다. 실험결과, 그림 9에서 나타난 바와 같이 동결·융해 반복에 따라 비중값이 반복작용을



(a) 화성암



(b) 퇴적암



(c) 변성암

그림 9. 동결·융해 반복에 따른 비중의 변화

시작한 초기에 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 모암별로 초기상태의 비중값을 비교하면 변성암이 가장 크고 그 다음으로 퇴적암, 화성암이 가장 작은 값을 나타내지만 풍화도 변화실험의 결과로부터 감소되는 변화량은 퇴적암과 변성암이 거의 유사하고 화성암은 상대적으로 적은 변화를 나타낸다. 그림 10에서 보는 바와 같이 토립자의 비중이 감소함에 따라 부식율은 점진적으로 증가하는 경향을 나타내는데 비중의 감소는 풍화의 진전을 의미하는 것이다. 결국 비중의 감소와 함께 발생하는 부식율의 증가는 풍화의 진행이 발생되었음을 확인하는 것이다.

지역별 일축압축강도의 변화를 분석하기 위하여 경기 지역은 서울, 광주, 강원지역은 사북, 문경, 전라-충청지역은 유성, 전주, 경상지역은 청도, 고령으로 구분하여 분석하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이 동결·융해 반복작용의 횟수가 증가할수록 감소하는 현상을 나타내는데 190회 반복시켰을 경우의 q/q_0 변화량을 비교하면 경기지역이 0.32~0.43의 범위를 나타내고 강원지역은 0.21~0.34의 범위이며 전라-충청지역은 0.26~0.32, 경상지역은 0.24~0.50의 범위를 나타내며 강도가 저하되었음을 알 수 있다(김용수, 2002).

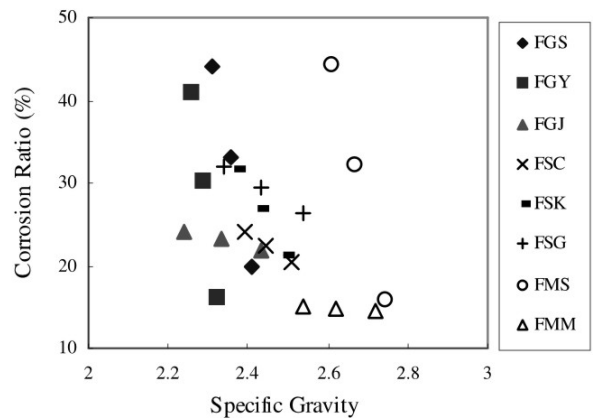


그림 10. 토립자 비중과 부식율의 관계

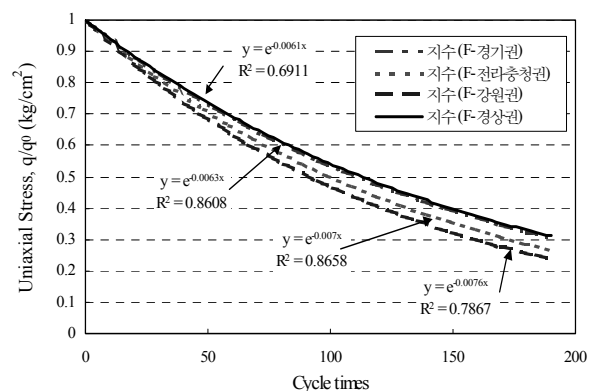


그림 11. 지역별 일축압축강도 변화

5. 결론

풍화토의 특성은 다양한 풍화환경, 풍화도 및 영향인자에 따른 거동의 특이성 때문에 정밀한 접근에 한계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 인공적으로 풍화도를 변화시키는 실험의 초보단계로서 온도 변화에 따른 강도변화 특성을 규명하기 위하여 동결·융해 반복작용 후의 시료를 대상으로 실내시험을 실시하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동결·융해 횟수 변화와 일축압축 강도변화는 높은 상관성을 나타내는데 동결·융해 반복횟수가 증가함에 따라 각 시료의 압축응력은 유사한 비율로 감소하였다.
- (2) 동결·융해에 따른 입자파쇄의 영향을 알아보기 위해 입도분석을 실시한 결과, 온도의 영향에 따른 풍화작용으로 풍화토의 분산효과가 크다는 것을 알 수 있다.
- (3) 모암별 동결·융해 반복횟수에 따른 강도변화 분석결과,

강도저하는 변성암이 가장 크고 화성암, 퇴적암의 순으로 나타났으며 부식율의 증가를 나타내는 비중변화는 퇴적암과 변성암이 거의 유사하고 화성암이 상대적으로 적게 나타났다.

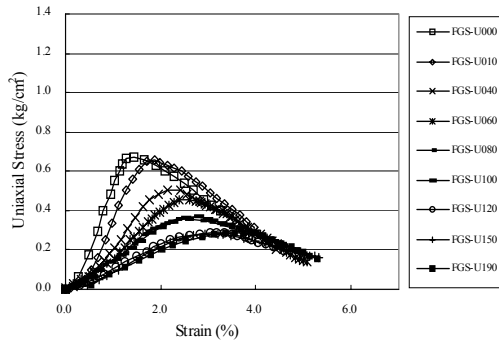
- (4) 지역별 동결·융해 반복횟수와 강도변화 분석결과, 강원, 전라-충청, 경기, 경상지역의 순으로 나타났다.

참고문헌

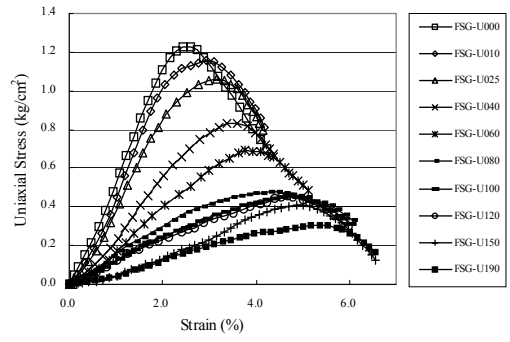
1. 김성수 (1999), *인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가*, 석사학위논문, 서울대학교.
2. 김세은 (2000), *화강풍화토의 동결-융해 후의 동적거동에 관한 연구*, 석사학위논문, 인하대학교.
3. 김용수 (2002), *화강풍화토의 공학적 특성분석을 위한 풍화도 판정법의 제안*, 박사학위논문, 중앙대학교.
4. Yong, R. N., Boonsinsuk, P., and Yin, C. W. P. (1985), "Alteration of Soil Behaviour after cycle freezing and Thawing", *The 4th International Symposium on Ground Freezing*, August, pp.187-195.

(논문접수일 2007. 5. 30, 심사완료일 2007. 7. 2)

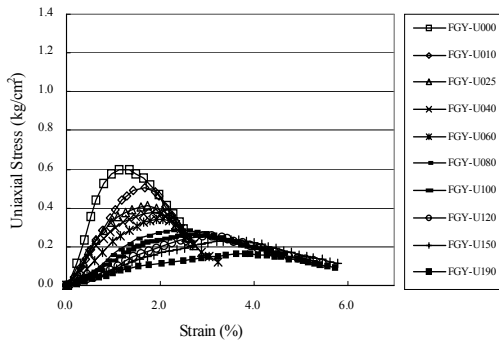
<부록> 동결·융해 실험조건의 일축압축시험결과



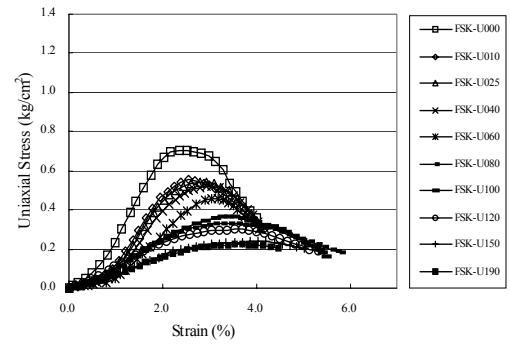
(a) 서울



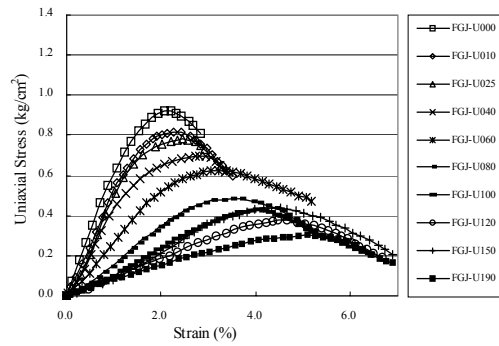
(e) 고령



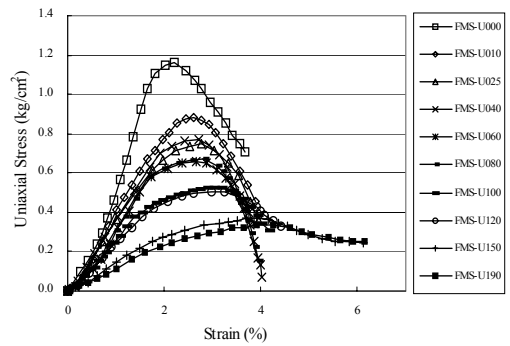
(b) 유성



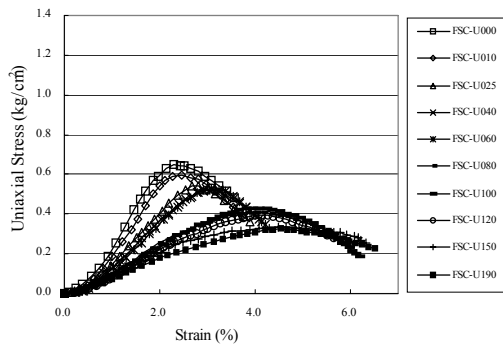
(f) 광주



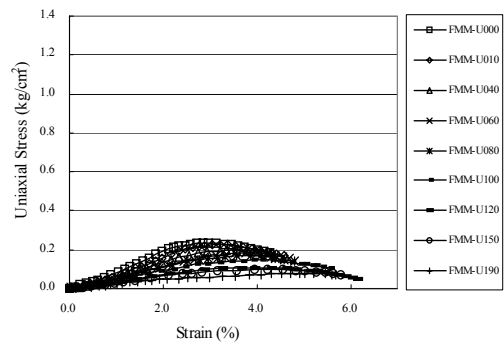
(c) 전주



(g) 사북



(d) 청도



(h) 문경