

동결-융해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구

박연준¹⁾, 유광호¹⁾, 양광용²⁾, 우 익³⁾, 박 찬⁴⁾, 송원경⁵⁾

Weathering Characteristics of Granite by Freeze-Thaw Cyclic Test

Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You, Kwang-Yong Yang, Ik Woo,
Chan Park and Won-Kyung Song

Abstract. Weathering in nature was simulated by freeze-thaw cyclic test which represents mechanical weathering. Measured physical properties were elastic wave velocities, absorption rate, volume change and weight change. Uniaxial compression tests were also conducted before and after the weathering tests. The change in weight and volume of the specimens were not clearly related to the weathering process, but P, S wave velocities, uniaxial compression strength and Young's modulus were clearly decreased as weathering progresses. Test result can be used for the assessment of long-term stability of rock slopes.

KeyWords: Physical weathering, Freeze-thaw test, Elastic wave velocity, Strength, Young's modulus

초 록. 자연 상태에서의 물리적 풍화를 실험적으로 재현하기 위해서 동결-융해 시험을 실시하였다. 시험 과정에서 탄성과 속도, 흡수율, 무게 및 부피 변화 등의 물리적 성질을 측정하였으며, 시험 전 및 시험 종료 후에 일축압 축시험을 실시하여 강도 및 탄성 계수의 변화도 조사하였다. 시료의 무게 및 부피 변화는 풍화의 진전 정도와 명확한 상관관계를 보이지 않았으나 탄성과 속도와 일축압축강도 및 탄성계수는 풍화가 진행되면서 감소함을 보였다. 시험 결과는 암반 사면의 장기적 안정성 평가에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어: 물리적 풍화, 동결-융해 시험, 탄성과 속도, 강도, 탄성계수

1. 서 론

우리나라는 국토의 70 % 이상이 남북 방향의 크고 작은 산맥으로 이루어져있으며, 그 중 상당 부분이 어느 정도 풍화가 진행된 화강암으로 구성되어 있다. 이러한 산악 지형에서 고속도로, 도로 그리고 철도 등을 건설하려면 대규모 토목공사가 불가피하다. 특히, 절취 구간에서는 높이가 40~50 m에 이르는 구간을 드물지 않게 볼 수 있다. 이러한 토목공사는 오랜 시간 동안 풍화과정을 이미 겪은 암반을 지표로 노출시켜 광물학적, 물리적, 그리고 역학적으로 그 성분을 변화시킬 수 있는 새로운 풍화 작용을 겪게 한다. 또한 여름의 고온

다습한 기후와 겨울의 춥고 건조한 기후는 풍화 과정의 발달에 아주 중대한 역할을 한다.

보통 이러한 변화는 지반강도를 저하시키게 되므로 절취 시에는 아무 문제가 없던 사면도 시간이 지남에 따라서 풍화가 진전되면서 열화되어 안정성을 위협받게 된다. 이는 암석 자체의 열화 뿐 아니라 암반내의 불연속면, 혹은 절리를 따른 유수의 침투 및 풍화에 기인하는 경우도 많으며, 결국 절리면의 집중적인 풍화의 진전으로 절리의 전단강도 저하에 기인한 사면의 붕괴로 이어질 수도 있다. 따라서 풍화에 대한 암반사면의 장기적 안정성 검토를 위해서는 풍화 기구 (mechanism)를 규명하고, 풍화정도에 대한 정량화가 필요하며, 기후조건에 따른 풍화의 진전속도를 예측하여야 한다. 이러한 연구는 암종과 기후조건에 따라 다를 것이므로, 우선 특정한 암종을 대상으로 해당 기후 조건 하에서 연구를 시행한 후 다른 암종 및 다른 기후조건에 대하여 확장하는 것이 올바른 접근방법이 될 것이다.

¹⁾정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

²⁾정회원, 희송지오텍 지반공학부 주임

³⁾준회원, 프랑스 에콜데민 박사과정

⁴⁾정회원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

⁵⁾정회원, 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

접수일: 2003년 3월 28일

심사 완료일: 2003년 4월 25일

본 연구에서는 우리나라의 대표적 암종의 하나인 화강암을 대상으로 물리적인 풍화 기구인 동결-융해 시험을 실시하고 풍화에 따른 암반의 주요 물성 변화를 측정하여 풍화 정도를 정량화 하고자 하였다. 시험 결과는 암반 사면의 장기적 안정성 평가에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시료의 특성

암반의 풍화단계에 대한 판단은 일반적으로 Table 1 과 같이 6단계로 구분한다. 일반적으로 RS와 CW는 토층에 해당하고 HW는 암과 토층의 경계물질로 풍화암에 해당하며, MW, SW, F는 연암 이상의 강도를 가진다고 볼 수 있다.

시험에 사용된 시료는 충북 제천의 중앙고속도로 공사구간의 사면과 경북 김천의 고속전철 공사구간의 절취사면에서 채취해온 것이다. 제천지역 시료는 중부고속도로 서제천 지점에서 채취한 것으로 조립질 화강반암이 주 암상이고, 홍장석류가 큰 결정체로 나오는 것을 발견할 수 있다. 결정체는 간혹 지름이 15 cm가 넘는 것도 있었다. 제천 지역은 낭림층군(Rangrim GP), 편마암(gneiss), 혼성편마암(migmatitic gneiss)의 지질구조를 가지고 있다. 시료는 굴착사면부위에서 암상의 풍화 정도에 따라 총 6등급으로 분류하였고, 비교적 신선한 암석은 현장에서 코어추출기로 직접 코어를 채취했다. 그리고 풍화된 암상에서는 암반에서 쉽게 떨어지는 블록을 채취하여 실험실에서 코어로 성형하여 시험을 실시하였다.

김천 현장의 경우 굴착 완료 후 식생작업등 표면 보호작업이 거의 완료된 상태이므로 현장에서의 시료채취는

불가능하여 조사시 채취된 시추코어나 공사중 시추코어를 채취하여 제천지역의 샘플과 동일하게 풍화정도를 6등급으로 분류하였다. 김천지역은 대보 화강암(Deabo granite), 단천 복합체(Tanchon complex), 화강암질 편마암(granitic gneiss)지대에 속한다. 암상은 편마암, 화강편마암, 화강섬록암 등 그 암상의 변화가 다양하고 지질구조가 발달된 관계로 점이적인 구조가 결여된 곳도 있었다.

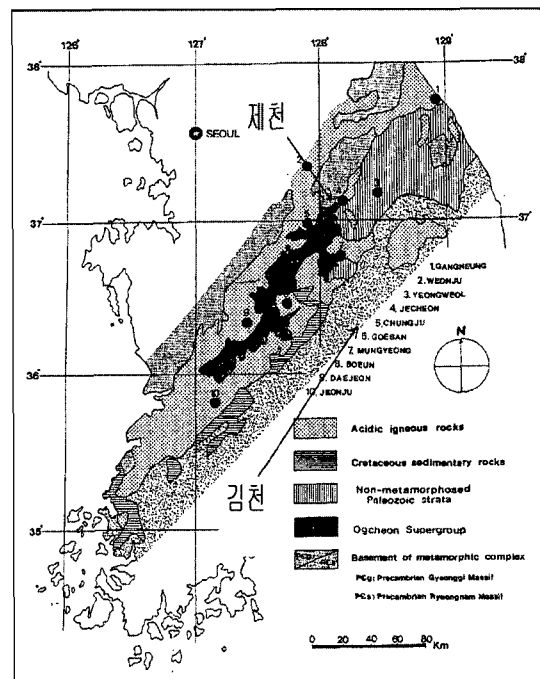


Fig. 1. Sampling location with geological map.

Table 1. Weathering degree of rock mass (Brown, 1981).

단계	구분	분류 기준
I	RS (Residual Soil)	모든 암반이 완전히 흙으로 변화되어 있다. 암석조직은 파괴되었고 체적상의 커다란 변화가 있지만 운반되지는 않은 상태이다.
II	CW (Completely Weathered)	모든 암반이 변질(decomposed)되거나 흙으로 풍화되어 있다. 원래의 암석구조는 대부분 그대로 남아있다.
III	HW (Highly Weathered)	암반이 절반이상 변질되거나 흙으로 풍화(disintegrated)되어 있다. 지반 내 신선하거나 변색된 암반은 불연속적 골격 혹은 핵석 상태로 존재한다.
IV	MW (Moderately Weathered)	암반의 절반이하가 변질되어 있거나 흙으로 풍화되어 있다. 지반내 신선하거나 변색된 암석은 연속적인 골격 혹은 핵석상태로 존재한다.
V	SW (Slightly Weathered)	질리면과 암석의 변색(discolouration)은 풍화에 대한 지표가 되는데 모든 암석 구성 물질은 풍화에 의해 변색되고 신선한 상태보다 다소 약해져 있다.
VI	F(Fresh)	육안으로 암석의 풍화 흔적을 볼 수 없으며, 대규모 불연속면에서 약간의 변색이 관찰될 수 있다.

김천과 제천에서 채취해온 시편을 원통형(50×100 mm 기준)으로 제작하여 각 시료를 지역별 및 풍화 정도별로 구분하여 Rock type(J, W, T) 및 Rock class(1, 2, 3, 4)를 표시하고, 육안으로 관찰한 시료의 표면 상태 및 풍화정도, 절리 수를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Rock types and descriptions.

Rock Type		표면상태	이물질존재여부	절리의수	풍화정도	
김천 Granite-Gneiss (T type)	T1	1	매끈	-	-	F
		2	매끈	-	-	F
		3	매끈	-	-	F
		4	매끈	-	1	F
	T2	1	약간거칠	-	-	F
		2	약간거칠	-	-	F
		3	약간거칠	-	-	F
		4	약간거칠	-	3	F
	T3	1	약간거칠	-	-	SW
		2	거칠	-	-	MW
		3	거칠	-	-	MW
		4	거칠	-	-	MW
	T4	1	매우거칠	-	-	SW
		2	매우거칠	-	-	SW
		3	매우거칠	-	-	SW
		4	매우거칠	-	-	SW
제천 Coarse grained Granite (J type)	J1	1	매끈	-	-	F
		2	매끈	-	-	F
		3	매끈	○	-	F
		4	매끈	-	-	F
	J2	1	매끈	-	-	F
		2	매끈	-	-	F
		3	매끈	-	-	F
		4	매끈	-	-	F
	J3	1	매끈	-	-	SW
		2	매끈	-	-	SW
	J3-1	1	약간거칠	-	-	SW
		2	약간거칠	-	1	SW
	J4	1	약간거칠	-	-	SW
		2	약간거칠	-	-	SW
		3	약간거칠	-	-	SW
		4	약간거칠	-	-	SW
김천 Fine grained Granite (W type)	W1	1	매끈	○	1	SW
		2	매끈	○	-	SW
		3	매끈	○	-	SW
		4	매끈	○	1	SW
	W4	1	약간거칠	-	1	SW
		2	약간거칠	-	2	SW
		3	약간거칠	-	3	SW

3. 시험 방법

극한기후 조건을 성립시키기 위해서는 해당 지역의 기후조건을 맞춰 주어야 한다. 우리나라는 사계절이 뚜렷하고 그 중에서 고온 다습한 여름과 저온 건조한 겨울이 암석의 풍화에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 시험에서도 고온 다습하고 저온 건조한 조건을 만들어 시험을 수행하기 위해 건조로와 냉동고를 사용하여 최대한 기후 조건에 맞게 시험을 수행하기 위해 노력하였다. 크기 1 m×0.6 m×0.2 m의 수조 내부에 침수시킨 시료를 건조로에 넣어서 고온 다습 조건을 만족시키고, 내부온도가 영하 -30°C까지 내려갈 수 있는 냉동고를 제작하여 저온 조건을 조성하였다. 건조 시 오븐 온도를 70±5°C로 8시간 유지하여 열에 의한 파괴를 방지하였다. 동결-융해 시험을 시행하는 순서는 Fig. 2와 같다.

완전 포화상태는 24시간동안 물에 넣어두는 것이 일반적이지만, 이 시험에서는 건조로에 있는 수조에 8시간동안 넣어 둔 상태로 설정하였다. 이때 가능하면 시료들의 간격을 일정하게 유지시켰다. 시간이 경과한 후 시료를 냉동고로 이동시켜 영하 25°C에서 8시간 동안 냉동시켜준다. 시료의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 디지털 온도계를 사용하여 시료 내부의 온도가 어느 정도까지 떨어지는지 측정한다. 이때 가능하면 내부 온도가 -25°C까지 내려가도록 진행하였다. 이 과정을 처음 30 cycle까지는 5회 단위를 한 측정주기로 잡았으

나 예상보다 변화가 적어 31번째 cycle부터는 10회를 한 측정주기로 정하여 측정을 실시하였다. 이와 더불어 31번째 cycle부터는 진공펌프를 사용하여 시료 안에 들어있는 공기를 뽑아내고, 공기가 빠져나온 공간을 물로 채워 시료를 완전한 포화상태로 만들어 동결-융해에 따른 효과를 극대화하였다. 한 측정주기가 끝나면 무게, 부피 및 탄성파 측정을 실시하여 결과치를 기록하였다. 본 연구에서는 이 과정을 100회 실시하였다.

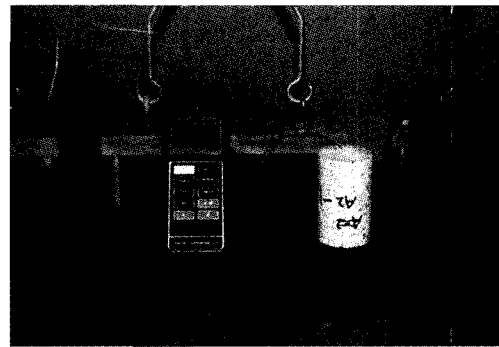


Fig. 3. Measurement of temperature by a digital thermometer.

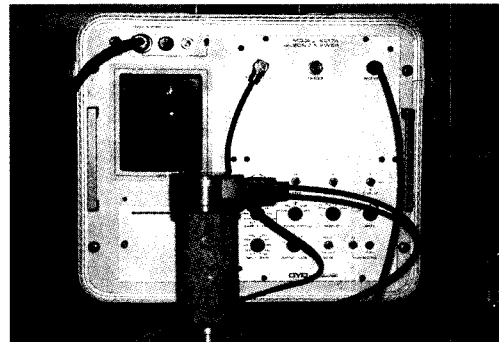


Fig. 4. Measurement of seismic wave velocity.

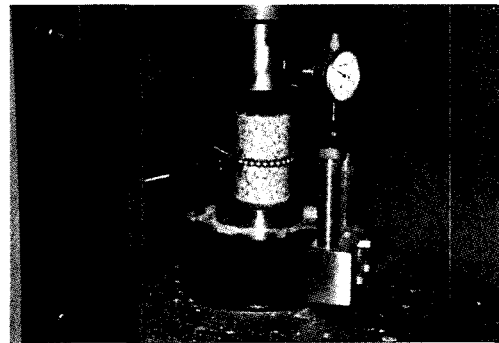


Fig. 5. Specimen and measuring unit for uniaxial compression test.

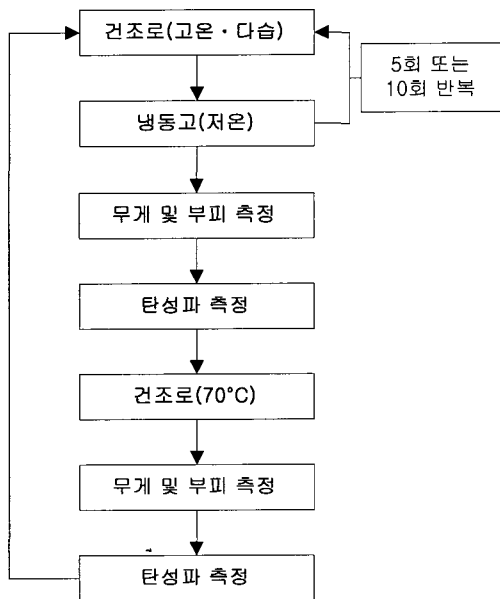


Fig. 2. Flow chart for freeze-thaw test.

탄성과 속도의 측정은 Fig. 4의 일본 OYO사 탄성과 속도 측정기를 사용하여 수행하였다. P파 측정용 발전자는 주파수 500 kHz를 사용하였으며 오차범위는 0.2~0.4 μ s, S파 발전자는 주파수 100 kHz를 사용하였으며 오차범위는 0.4~0.8 μ s이다.

풍화 전후의 강도 및 변형성의 변화 경향을 알아보기 위해서 일축압축시험을 실시하였다. 변형의 측정은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 종방향 변형은 LVDT를, 횡방향 변형은 chain과 LVDT를 사용하여 시료 전체의 변형량을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 흡수율

흡수율이란 암석시료의 공극에 물이 어느 정도 침투하는가를 나타내는 하나의 지표이며, 암석의 기본적인 물성의 하나이다. 암석시료가 흡수할 수 있는 최대의 물의 양이 그 시료의 질량에 대하여 어느 정도인가를 나타내는 비율을 말한다. 흡수율을 구하는 시험은 강제 건조상태(W_1) 및 강제 습윤 상태(W_2)에서 측정된 값을 다음 식으로 표현한다.

$$\frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \times 100(\%) \quad (1)$$

경암의 흡수율은 10 % 이하이며, 신선하고 치밀한 암석에서는 1 %에도 달하지 않는 경우가 많으며 풍화에

따라 흡수율은 증가한다. 흡수율은 암석의 강도가 비교적 약한 암석에서 그 경향이 잘 나타나고 경암에서의 흡수율은 거의 측정되지 않는 경향이 있다(김성환, 유병옥, 조성로, 1997).

Fig. 6은 T type 암석에 대한 흡수율 측정 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 많은 변화가 있지는 않으나 시험이 진행할수록 흡수율이 조금씩 증가하는 경향을 볼 수가 있다. 그러나 T type은 풍화가 진행되지 않은 신선한 암반에 속하는 암종으로 물의 침투가 자유롭지 못하기 때문에 변화가 적게 일어났다. 초기 흡수율은 약 0.04 %이었으며 100cycle 후에는 0.12 %의 평균값을 나타내었다.

T2 class도 흡수율의 변화량에는 다소 차이가 있으나 T1 class와 유사한 경향을 보였다.

Fig. 7의 T3 class는 T1, T2 class와 많은 차이를 보이고 있다. T1 및 T2 class의 경우 0.15 %이하의 상당히 낮은 값을 나타냈지만 T3 class는 1 % 이상의 흡수율을 보이는 시료도 있다. 시료 내부 공극의 크기나 양에서 상대적으로 T3 class가 많은 것으로 생각된다. 하지만 T3-2만 흡수율의 변화가 크게 진행된 모습을 나타내고 나머지는 그래프 형태에 큰 차이점을 발견할 수가 없다. T4 class는 흡수율의 변화량에는 다소 차이가 있으나 T3 class와 유사한 경향을 보였다

J1 class는 매우 신선하고 표면도 아주 매끈한 시료로 아래 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 시험의 진행에 따라 큰 변화를 볼 수 없다. 그래프 변화를 보면 T1 class와 매

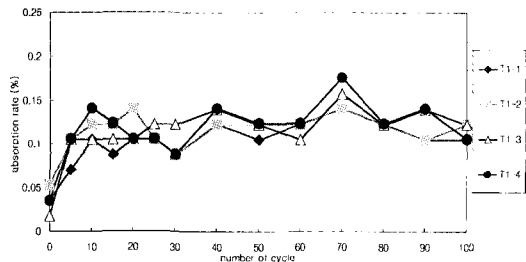


Fig. 6. Absorption rate of T1 class.

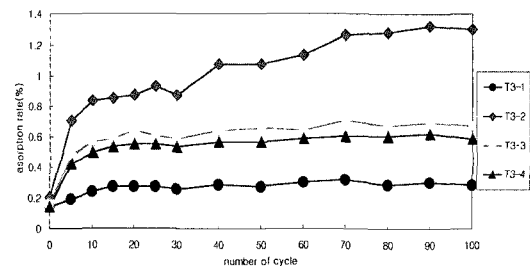


Fig. 7. Absorption rate of T3 class.

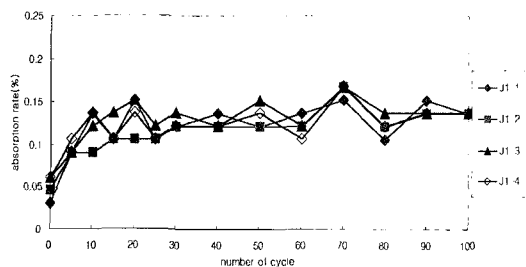


Fig. 8. Absorption rate of J1 class.

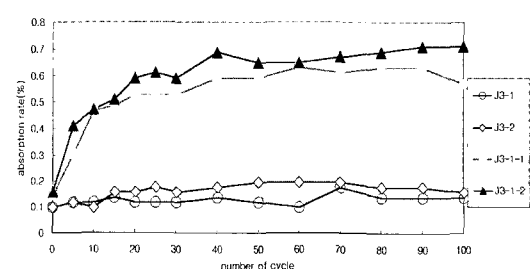


Fig. 9. Absorption rate of J3 and J3-1 class.

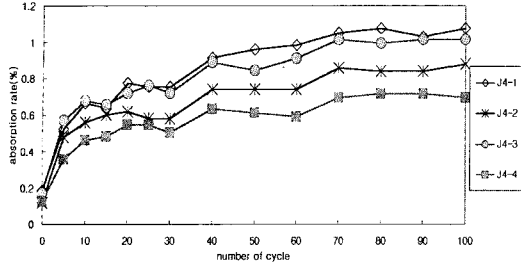


Fig. 10. Absorption rate of J4 class

우 유사한 형태를 나타내고있으며, 겉보기와는 다르게 매우 단단한 화강암임을 알 수 있다.

J3 class와 J3-1 class는 육안 관찰에서 비슷하게 풍화가 진행된 것으로 보였지만 표면이 매끈한 J3와 약간 거친 J3-1의 흡수율 측정 결과는 확연히 구분된다(Fig. 9). 손으로 만져 볼 때에는 J3 class보다 J3-1 class가 오히려 더 단단한 느낌을 받아, 표면 관찰 결과와 실제 시험결과는 차이를 알 수 있었다.

J4 class(Fig. 10)는 처음과 마지막의 변화 폭이 매우 크게 나타나고 있다. 초기에는 평균 0.15 %정도이었으나 100 cycle 후에는 1 %를 넘는 시료도 나타났다. J4 class는 육안 관찰에서 나타난 결과와 같이 풍화가 어느 정도 진행되었고, 표면이 약간 거칠었는데, 흡수율의 변화도 예상한 바와 같이 매우 크게 나타나고 있다.

Fig. 11의 W1 class는 J3 class와 비슷한 그래프 형상을 보여주고 있다. 육안 관찰 결과 풍화가 많이 진행된 것으로 보였지만 실제로 표면이 매끄러워서 동결-융해의 영향을 많이 받지 않은 것으로 보인다. W1-1번은 질리를 포함하고 있기 때문에 다른 시료들에 비하여 풍화의 영향을 많이 받은 것으로 생각된다.

Fig. 12에 도시한 W4 class는 지금까지의 다른 시료들에 비하여 가장 많은 흡수율의 변화를 나타냈다. W4 class는 가장 많이 풍화가 진행된 것으로 보이고, 무게도 다른 시료들에 비하여 가벼웠다. 중간 이후에 데이

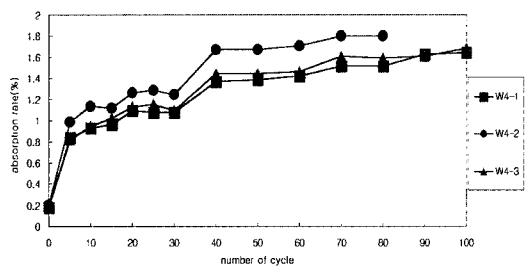


Fig. 12. Absorption rate of W4 class.

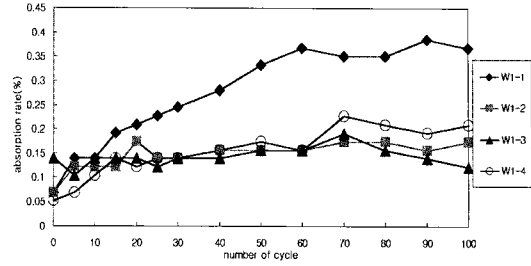


Fig. 11. Absorption rate of W1 class

터가 없는 시료 W1-2는 동결-융해 시험도중 파괴되어 더 이상 측정이 불가능하기 때문에 측정을 중단하였다.

4.2 탄성과 속도 변화

탄성과 속도는 매질의 치밀한 정도에 영향을 받으므로 포화상태와 건조상태로 구분하여 각 상태별로 속도를 측정하였다. 탄성과 속도의 측정은 OYO사의 Model 5217A seismic viewer를 사용하였다. 암석 시료에 대한 측정결과 오차범위는 P파는 0.2~0.4 μ sec, S파는 0.4~0.8 μ sec로 나타났다.

4.2.1 건조 상태

Fig. 13은 T type 시료에 대한 평균 속도를 나타낸 그래프이다. 이 그래프는 처음 측정한 값을 기준으로 동결-융해가 진행되면서 시료의 변화를 상대적으로 비교할 수 있도록 작성하였다. 동결-융해 cycle을 거치면서 탄성과 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

T1 class에서 초기 측정 평균치와 마지막 측정의 평균치의 변화를 보면 P파는 4692 m/s에서 4364 m/s로, S파는 2657 m/s에서 2503 m/s로 10 %이하의 변화를 나타내고 있다.

초기에 신선한 암석이었던 T1 class와 T2 class는 이미 풍화된 T3 class와 T4 class에 비하여 변화의 폭이 작다. 따라서 풍화 과정은 풍화가 진행됨에 따라 가속화 될 수 있음을 알 수 있다.

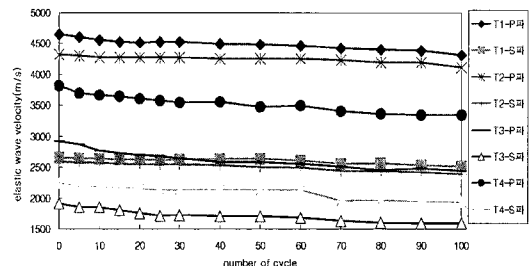


Fig. 13. Mean velocity of P and S wave of T type at dry condition.

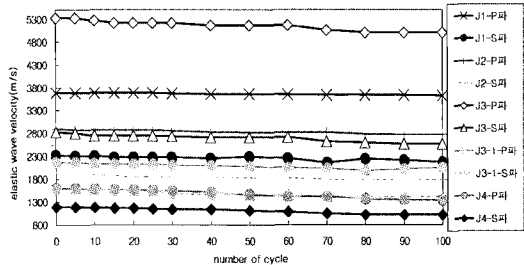


Fig. 14. Mean velocity of P and S wave of J type at dry condition.

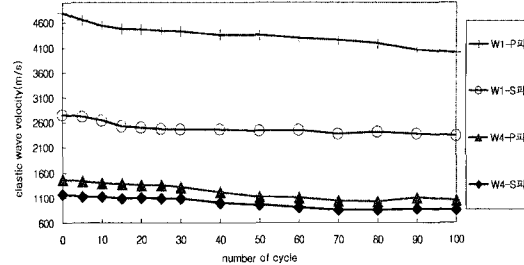


Fig. 15. Mean velocity of P and S wave of W type at dry condition.

Fig. 14는 J type 시료에 대한 평균 속도를 나타낸 그래프이다. 특징적인 것은 신선한 상태이었던 J1 class와 이미 약간 풍화를 겪은 J4 class의 차이점이다. 동일 한 범주의 암석이라 할지라도 초기 풍화 정도에 따라 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. J1 class는 거의 속도의 변화가 일어나지 않았고, J4는 약 20 %에 가까운 속도변화를 보여주었다.

J1 class는 실험 전 P파 평균은 3675 m/s, S파는 2311 m/s를 나타냈다. 풍화 과정을 거친 후 측정값은 P파 3688 m/s, S파 2193 m/s로 측정되었다.

Fig. 15는 W type 시료에 대한 평균 속도를 나타낸 그래프이다. 동결-융해가 거듭되면서 절리를 포함하고 있는 W4 class의 풍화 진행 속도가 절리를 거의 포함하지 않은 W1 class에 비하여 빠름을 보여주고 있다. W type은 가장 풍화가 많이 진행된 시료들로 W1 class의 P파 초기속도는 4926 m/s이고, S파 2885 m/s의 값이 측정되었다. 동결-융해 과정 후에는 P파 4175 m/s, S파 2485 m/s의 값을 보였다. W4 class는 육안 관찰 시 가장 많이 풍화된 시료이었는데 P파 평균은 1255 m/s, S파 1109 m/s로 탄성파 속도도 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

4.2.2 포화 상태

탄성파 중 S파는 액체를 통과하지 못하기 때문에 P,

S파 속도 차이가 건조 때보다 클 것으로 예상되었다. 물에서의 P파는 일반적인 암석에서의 속도와 비슷한 1500 m/sec의 속도를 나타낸다.

Fig. 16은 T type의 탄성파 전파속도의 평균값을 나타낸 그래프이다. T3 class S파의 경우는 처음부터 지속적인 감소를 나타내며, T4 class의 S파는 50회와 80회 사이에서 약 10 %정도의 속도변화를 보여줌을 알 수 있다. T4 class의 경우 이 부근에서 공극률의 증가가 많이 발생하였을 것으로 추정된다.

T1 class의 초기 측정에서 P파의 최고 속도는 5462 m/s이고, 최저는 4832 m/s로 나타났다. S파의 경우는 최고속도가 2855 m/s, 최저속도 2645 m/s가 측정되었다. 100회가 진행된 상태에서 P파 최고 5403 m/s, 최저 4741 m/s로 나타났다. S파의 경우 평균값은 최고 2720 m/s, 최저 2488 m/s로 나타났다. T2 class 평균은 P파 5055 m/s, S파 2597 m/s이고 T3 class같은 경우 P파 2882 m/s, S파 2222 m/s값을 나타낸다. T4 class는 P파 1488 m/s, S파 941 m/s를 나타냈다.

Fig. 17은 J type 시료의 평균 속도를 나타낸 그래프이다. J1 class는 실험 전 P파 평균은 4036 m/s, S파는 2434 m/s를 나타냈다. 풍화 과정을 거친 후 측정값은 P파 4504 m/s, S파 2434 m/s가 측정되어 동결-융해가 진행되면서 오히려 P파 속도가 증가하는 현상을 보여주

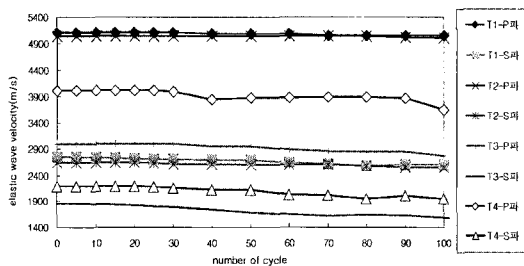


Fig. 16. Mean velocity of P and S wave of T type at saturated condition.

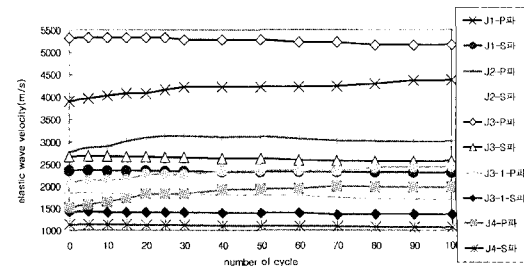


Fig. 17. Mean velocity of P and S wave of J type at saturated condition.

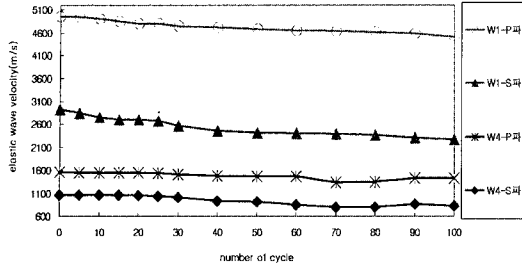


Fig. 18. Mean velocity of P and S wave of W type at saturated condition.

고 있다. 이는 내부의 공극이 확장되고 연결되면서 물로 포화되어 파의 전달이 용이하게 되었기 때문인 것으로 추측된다. J2 class와 J3-1 class, J4 class의 경우에도 J1 class와 비슷하게 증가하는 그래프를 나타내고 있다. J3 class는 다른 시료들과 마찬가지로 점차적으로 감소하는 그래프를 보여주고 있다. 전체적으로 볼 때 J3 class와 J3-1 class는 같은 성질을 가졌으면서도 속도에서 많은 차이를 나타내는데 특히, P파 속도에서 현저한 차이점을 보이고 있다. P파 평균 최고 속도는 J3 class에서 5435 m/s의 최고 값을 나타내었고 J4 class에서 1344 m/s의 최저 값을 보였다. 100 cycle이 진행된 후에도 역시 최고 값은 J3 class에서 5319 m/s, 최저 값은 J4 class에서 1772 m/s로 나타났다. S파의 경우에도 P파와 같이 최고 속도는 J3 class에서 최저 속도는 J4 class에서 나타났다.

Fig. 18은 W type 시료의 평균 속도를 나타낸 그래프이다. W type은 풍화가 가장 많이 진행된 시료들로 W1

class의 P파 초기속도는 4926 m/s, S파는 2885 m/s의 값이 측정되었다. 동결-융해 과정 후에는 P파 4175 m/s, S파 2485 m/s의 값을 나타내었다. W4 class가 가장 많이 풍화된 것을 육안으로 관찰되었듯이 탄성파 속도에서도 가장 낮은 측정값을 나타내고 있다. P파 평균은 1255 m/s, S파 1109 m/s로 대단히 낮은 속도를 나타내고 있다.

건조 상태 시료의 탄성파 전파 속도와 비교해 보면 P파의 속도가 500~600 m/sec 정도 빠른 것을 알 수 있어 공극이 물로 채워진 효과가 가시적으로 나타남을 알 수 있었다. J type에서 다른 시료들과는 다르게 동결-융해 과정을 거치면서 오히려 파의 속도가 증가하는 현상이 발생하였으나 나머지 T type과 W type은 풍화가 진행되어지면서 점점 P, S파 속도가 감소하는 경향을 나타내었다.

4.3 일축압축시험

동일한 부류의 시료에 대하여 풍화 시험 전에 일축압축시험을 수행하고, 풍화 시험이 종료된 후의 시료에 대하여 동일한 시험을 수행하여 풍화가 강도와 변형성에 미치는 영향을 살펴보았다. 여기에는 일축압축 강도와 탄성 계수, 포아송 비를 같은 Table에 나타내어 상관관계를 살펴보았다.

절리를 포함한 시료들은 대부분이 절리를 따라서 파괴가 일어났으며, 따라서 평균값 계산에서 제외하였다.

동결-융해 전후의 측정 결과를 Table 3에 비교하였다. 전반적으로 풍화에 의하여 강도 및 탄성 계수가 감소하였다. 강도의 경우 최대 50 %의 감소를 보였으며, 탄성

Table 3. Change in strength and deformability before and after freeze-thaw cyclic test.

Specimen number	Unconfined compressive strength (kgf/cm ²)			Young's modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)			Poisson's ratio		
	풍화전	풍화후	비율	풍화전	풍화후	비율	풍화전	풍화후	비율
J1	1750	1417	0.81	4.34	4.05	0.93	0.19	0.19	1.00
J2	1710	852	0.50	3.25	2.12	0.65	0.20	0.29	1.45
J3	1120	1170	1.04	3.72	4.00	1.08	0.29	0.17	0.59
J3-1	860	630	0.73	1.66	1.15	0.69	0.21	0.24	1.14
J-4	735	475	0.65	1.14	0.70	0.61	0.32	0.37	1.16
W1	1805	1910	1.06	4.59	4.25	0.93	0.17	0.15	0.88
W4	520	345	0.66	0.44	0.32	0.73	0.31	0.40	1.29
T1	1986	1700	0.86	4.39	4.55	1.04	0.17	0.17	1.00
T2	1650	1295	0.78	4.18	4.14	0.99	0.17	0.16	0.94
T3	716	590	0.82	1.11	1.84	1.66	0.28	0.30	1.07
T4	1013	1096	1.08	1.67	3.31	1.98	0.19	0.20	1.05

계수는 최대 40 %의 감소를 나타내었다. 그러나 J3, W1, T4 등의 시료에서는 강도의 증가가, J3, T1, T3, T4 에서는 탄성계수의 증가가 관찰되었는데, 이는 시료의 불균질성에 의한 것으로 판단되었다. Poisson 비는 전반적으로 약간 증가하는 추세를 보였으나 시료의 불균질성을 감안하면 뚜렷한 변화 경향을 도출할 수 없었다.

5. 결 론

우리나라의 대표적 암종의 하나인 화강암을 대상으로 주된 물리적 풍화 기구인 동결-융해 시험을 실시하고 풍화에 따른 암반의 주요 물성 변화를 측정하였다. 김천 및 제천 사면 현장에서 채취한 화강암 시료에 대하여 동결-융해 과정을 시행하면서 무게 및 체적, 탄성파 속도를 측정하여 풍화에 따른 물리적 성질의 변화를 조사하였다. 주된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 무게의 변화는 0.1~0.2 %정도로 매우 작았다. 즉 화학적 풍화와는 달리 물리적 풍화는 구성 광물의 손실이 별로 나타나지 않았다.
- 2) 탄성파 속도는 P파와 S파 모두 풍화 진전에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 공극이 물로 채워진 포화된 시료의 P파 속도가 건조한 시료의 P파 속도보다 다소 크게 나타났다.
- 3) 탄성파 속도의 감소는 동결-융해에 의한 미세균열의 증가 및 기존 균열의 확장을 의미한다.
- 4) 포화상태에서 J type 시료는 풍화가 진전됨에 따라 오히려 P파 속도가 증가하는 현상이 발생하였는데, 이는 기존의 고립된 공극들이 동결-융해 과정을 거치면서 서로 연결되어 물로 채워지면서 파의 전달이 용이해졌기 때문일 것으로 추측된다.
- 5) 탄성파 전파 속도가 큰 시료는 타 시료에 비하여 일축압축강도도 높게 나타났다.
- 6) 암석의 강도와 탄성계수는 동결-융해 과정을 거치면

서 최대 50 %까지 감소하였다.

- 7) 동결-융해에 의한 풍화 진전 속도는 시험 전 초기 상태에서 풍화 정도가 심할수록 더 빠르게 나타났다. 따라서 동결-융해에 의한 풍화는 풍화가 진행되면서 가속된다고 할 수 있다.

본 연구의 시험 결과는 풍화에 따른 암반 사면의 장기적 안정성 평가에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 국제공동연구사업(과제번호 20015-312-01-2)의 지원에 의해 수행되었으며, 재단 관계자 및 협력 연구기관인 프랑스 파리 에콜데민의 관계자에게도 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 김성환, 유병욱, 조성로, 1997. 9, 암석의 풍화에 따른 강도 변화 특성에 관한 연구, 97 사면안정 학술발표회, 129.
2. 김영화, 홍순호, 1990. 2, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, Jour. Korean Inst. Mining Geol. Vol. 23 No. 2, 221-232.
3. 백용, 구호본, 배규진, 2002. 9, 동결융해 시험을 통한 암석의 열화특성에 관한 실험적 연구, 한국암반공학회 시험분과위원회 기술세미나, 38-47.
4. 정형식, 유병욱, 1997. 12, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국지반공학회, 제13권 제 6호, 73.
5. 최병렬, 탄성파를 이용한 보은지역 암석의 공학적 성질과 이방성에 관한 연구, 한국과학재단 연구사업(과제번호: KOSEF 981-1212-036-2).
6. Brown E. T., 1981, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities, Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 31.

박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과
전임강사

유광호



1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원
토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2566
E-mail: khyou@mail.suwon.ac.kr
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과
전임강사

양광용



2001년 전주우석대학교 자연공과대학
토목공학과 공학사
2003년 수원대학교 공과대학 토목공학과
공학석사
Tel: 02-576-3801~2
E-mail: kwang711@hanmail.net
현재 희송지오택 지반공학부 주임

우 익



1988년 연세대학교 지질학과 졸업
1994년 연세대학교 본대학원 지질학과
구물리전공 졸업
1994년~1997년 현대건설연구소
Tel: 33 1 4932 9009
E-mail: woo@cgi.ensmp.fr
현재 프랑스 에콜데민 박사과정

박 찬



1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
Tel: 042-868-3245
E-mail: chan@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 선임연구원

송원경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 프랑스 에콜데민 지질공학과
공학박사
Tel: 042-868-3247
E-mail: songwk@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 책임연구원