

## 극한 기후 조건하에서 풍화된 화강암반 절취사면에 대한 장기적 안정성 연구

### Long Term Stability of Slopes Excavated in Weathered Granite Rock Masses Subjected to Extreme Climatic Conditions

양광용<sup>1)</sup>, Kwang-Yong Yang, 박연준<sup>2)</sup>, Yeon-Jun Park, 유광호<sup>2)</sup>, Kwang-Ho You, 우익<sup>3)</sup>, Ik Woo, 박찬<sup>4)</sup>, Chan Park

- 1) 회송지오텍, Civil Engineer, Heesong Geotek & Engineering CO. LTD.
- 2) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, The Univ. of Suwon
- 3) 파리 에콜데민 박사과정, Graduate Student, Ecole des Mines de Paris
- 4) 한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, KIGAM

**SYNOPSIS** : Slope stability is an important issue in civil engineering works or in open pit mines where both economy and efficiency is required. These are the long-term stability problems which depend on the change of physical properties under a certain weather condition. These can also result in progress of weathering which can change mechanical or hydro-geological properties of rock mass considerably.

In this study, weathering in nature was simulated by freeze-thaw test and Soxhlet test which represent mechanical and chemical weathering respectively. Measured were elastic wave velocities, absorption rate, volume change.

Uniaxial compression strengths before and after the weathering tests were also measured. The change in weight and volume of the specimens were not clearly related to the weathering process, but P, S wave velocities were clearly decreased as weathering progresses. For some class of rocks, P-wave velocity was increased probably because of the saturation due to improved connectivity of the pre-existing pores.

Based on the test results, stability of the slopes were analyzed using FLAC<sup>2D</sup>. Due to the reduced strength parameters, the factors of safety were decreased for the selected sites.

**Key words** : Slope stability, Freeze-Thaw, Soxhlet, P, S wave, Uniaxial compression strengths

## 1. 서론

사면 안정은 토목공사나 노천광산에서 경제적인 면과 공사의 효율적인 면에서 중요한 사항이다. 암반 사면에서 암반의 역학적 성질이나 수리지질 조건은 암석을 변화시킬 수 있는 풍화 진전의 원인이 될 수 있으며, 암반사면의 장기적인 안정성에 중요한 인자로 작용한다. 이 원인을 정량화하기 위하여 인위적으로 기계적 풍화와 화학적 풍화 시험을 수행하였다. 이 결과로 암석의 풍화 정도를 파악하여 사면의 장기적인 안정성을 판단하였다. 시험은 동결-융해시험과 Soxhlet시험(강우량에 의한 풍화)을 수행하여 암석에서 탄성파속도 변화와 흡수율, 부피변화를 파악하고, 일축압축시험을 통해 풍화 전·후 강도를 파악하였다. FLAC<sup>2D</sup>을 사용하여 사면의 안정성해석을 통하여 암반사면의 장기적인 안정성을 파악할 수 있을 것이다. 실험실에서의 인공적인 풍화 실험과 현장에서의 측정 결과를 비교·검토함으로써 초기 지질 조건 및 기후조건에 따른 풍화기구를 이해하고 개념을 정립하는데 목적이 있다.

## 2. 시험방법 및 결과 분석

### 2.1 시료의 특성

암반의 풍화에 대한 판단은 일반적으로 표 2.1과 같이 풍화단계를 6단계로 구분한다. 일반적으로 RS와 CW는 토층에 해당하고 HW는 암과 토층의 경계물질로 풍화암에 해당하고, MW는 연암, SW는 경암, F는 극경암에 해당한다.

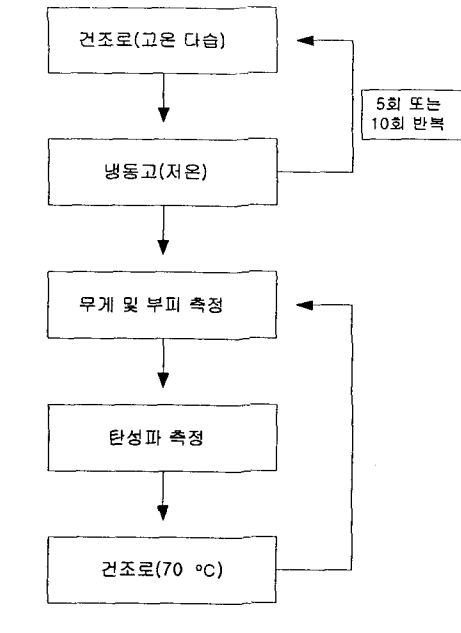
<표 2.1> 암반의 풍화단계기준(Brown, 1981)

단계	구 분	분 류 기 준
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 그대로 남아있다.
III	HW (Highly Weathered)	암반이 절반이상 변질되거나 흙으로 풍화(disintegrated)되어 있다. 지반내 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 핵석 상태로 존재한다.
V	SW(Slightly Weathered)	절리면과 암석의 변색(discolouration)은 풍화에 대한 지표가 되는데 모든 암반은 풍화에 의해 변색되고 신선한 상태보다 극히 약해져 있다.
VI	F(Fresh)	주요 절리면에 대한 육안적인 변색 암반의 풍화를 볼 수 없다.

김천과 제천에서 코어링 해온 시편을 기본 원통형(50×100mm)으로 제작하여 각시료를 지역별, 풍화별로 구분하여 Rock type(J, W, T)으로 분리 표시와 Rock class(1, 2, 3, 4)넘버 표시를 하고, 육안으로 본 시료의 표면 상태 및 풍화정도, 절리 수를 표시하여 데이터 정리하였다. 길이 측정은 버니어캘리퍼스를 이용하여 치수를 기록했다. 코어는 기본 원통형이지만 시료 채취단계에서 도중에 끊어지고, 채취한 블록 크기가 작은 것이 있기 때문에 코어의 규격화를 이루지 못하였다.

<표 2.2> 코어의 분류

Rock Type	Rock class	동결 융해 시료개수
		지름 (50mm)
제천(J type) Coarse grained Granite	J1	4
	J2	4
	J3	2
	J3-1	2
	J4	4
김천(W type) Fine grained Granite	W1	4
	W4	3
김천(T type) Granite-Gneiss	T1	4
	T2	4
	T3	4
	T4	4



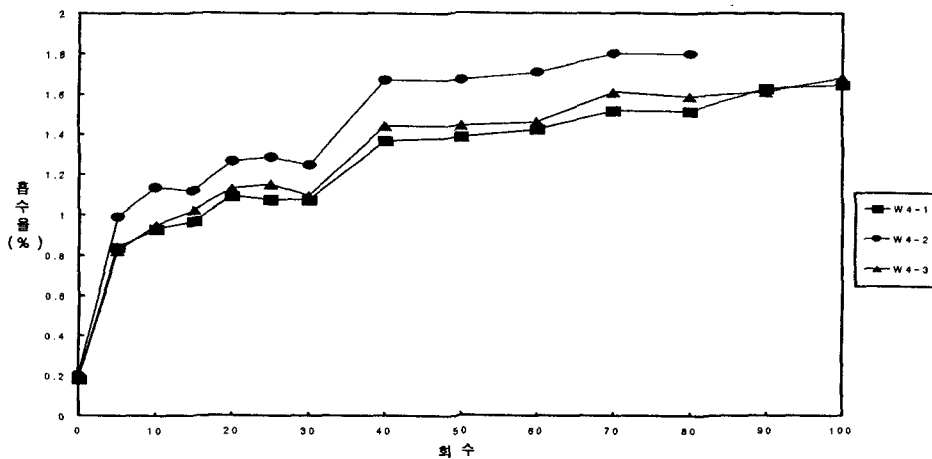
<그림 2.1> 동결-융해시험 순서도

## 2.2 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 나타내고 경암에서의 흡수율은 거의 측정되지 않는 경향이 있다.(김성환, 유병옥, 조성로, 1997)



<그림 2.2> W4 class의 흡수율

### 2.3 탄성파 속도

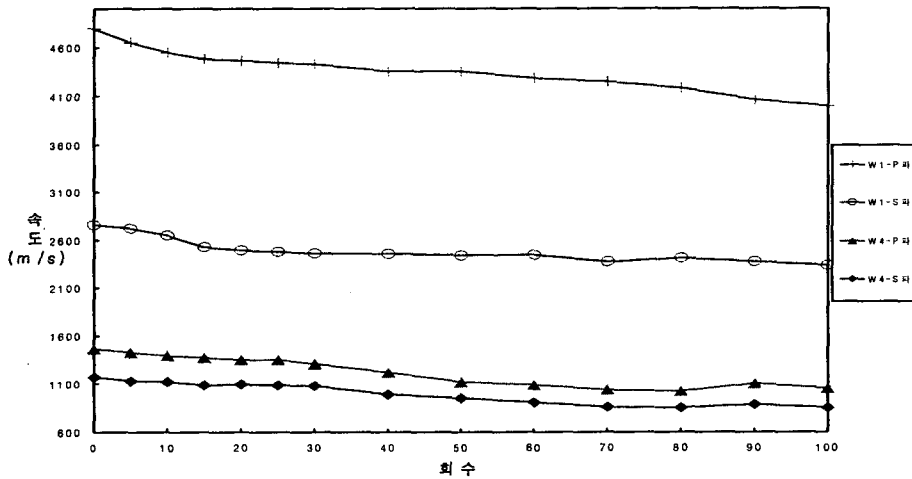
탄성파는 성질이 다른 두 매질을 지날 때 호이겐스원리에 따라서 굴절 또는 반사를 하는 것을 이용하는 원리로 입사각과 반사각의 속도는 같고 입사각에 따라서 굴절속도가 변한다. 탄성파는 매질에 따라 운동하기 때문에 여기서는 포화상태와 건조상태로 구분하여 각 상태별로 속도를 측정하였다. 탄성파 측정은 seismic velocity 측정은 OYO사의 Model 5217A seismic viewer를 사용하였다. 전 시료에 대하여 탄성파 측정은 포화된 상태의 P파, S파를 측정하고, 건조된 상태의 P파, S파 측정을 실시하였다.

시험은 우선 변환기 사이에 시료를 넣지 않은 상태에서 영점을 조정하고, 시료를 넣은 상태에서 파동의 도달시간의 차이를 측정하여 눈금을 읽어준다. 한 시료에 측정은 3~4회 실시하여 가장 작은 수치를 바른 데이터로 기록한다. P파와 S파를 같은 방법으로 측정한다. 하지만 P파는 시료와 변환기 사이에 접촉율이 좋지 않으면 올바른 데이터가 나타나지 않기 때문에 접촉력을 높이기위해서 grease를 사용하여 보다 파의 전달을 원활하게 하여 측정하였다. S파는 고체만을 통과하기 때문에 grease를 사용하지 않았다. 측정값( $\mu$ -sec)을 시료의 길이(cm)로 나누어서 탄성파속도를 구하였다.

$$\frac{(L \times 10^{-2})}{(V_P \times 10^{-6})} = X(m/sec) \quad (2)$$

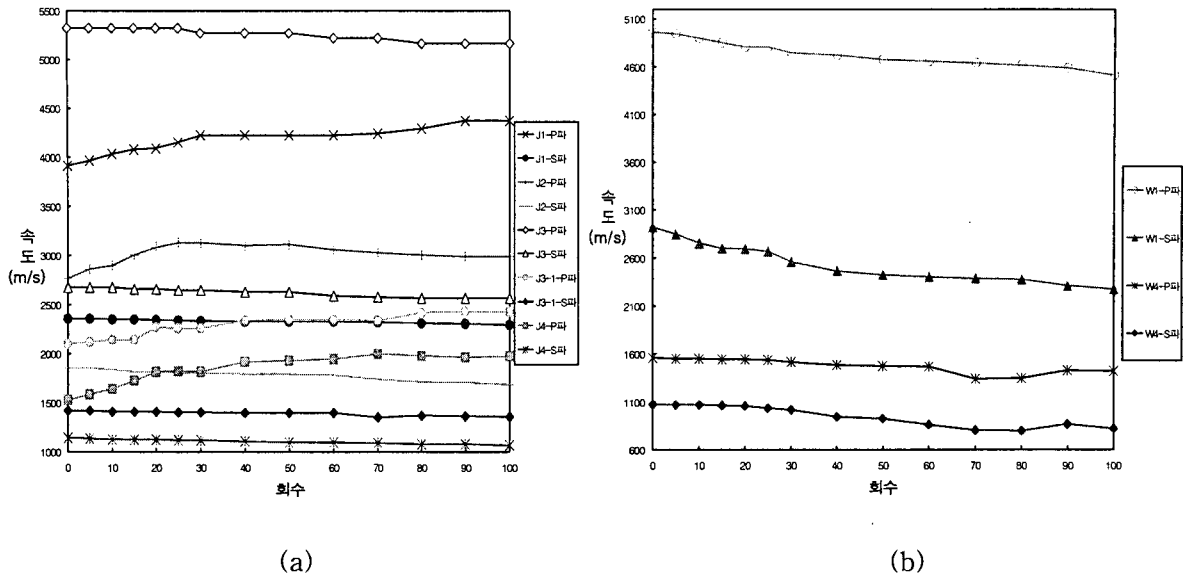
$$\frac{(L \times 10^{-2})}{(V_S \times 10^{-6})} = Y(m/sec) \quad (3)$$

여기서 포화상태란 시료를 25' 상온 수중에 24시간 넣어둔 상태를 '포화 상태'라 하였고, 건조상태란 70'  $\pm$ 5' C의 Oven에서 24시간 건조시킨 상태를 '건조상태'라 하였다. 각 암석 시료에 대한 측정결과 오차 범위는 P파는 0.2~0.4 $\mu$ -sec, S파는 0.4~0.8 $\mu$ -sec로 나타났다.



<그림 2.3> 건조상태의 W type의 P파 및 S파의 평균속도

위 그래프는 가장 일반적인 탄성파를 나타낸 것이다. 시험전의 예상으로는 동결-융해가 진행되면서 시료의 공극의 변화가 많이 생길 것으로 예상되었지만, 실제 시험에서는 공극의 변화가 이루어지지는 했지만 겉으로 표현되는 변화를 보여주지 못했다. 건조상태에서의 탄성파측정값은 공극이 커지면 파의 전달매개체부분을 공기가 채워지기 때문에 속도감소를 나타냈다. 공기는 탄성파를 전달할 수 없기 때문에 시료에 공극이 많고 크기가 커질수록 속도의 감소현상은 더 크게 나타났다.



<그림 2.4> 포화상태의 J type(a), W type(b)의 P과 및 S과의 평균속도

포화 상태에서는 시료의 크기가 작기 때문에 포화상태도 건조상태와 비슷할 것으로 판단되었으나, P과가 공기중에서 보다 물에서 빠른 속도를 나타내는 것을 이 시험에서 알 수 있었다. P과의 속도가 건조상태보다 500~600m/sec정도의 빠른 속도를 나타냈다. 특이한 것은 J type은 다른 시료들과 다르게 증가하는 변화를 보이는 현상이 발생하였다. 나머지 T, W type은 풍화가 진행되어지면서 점점 P, S과가 감소하는 경향을 보여주었다. 전체적으로 탄성파 속도는 포화상태에서 더 빠른 속도를 나타내고 있다.

## 2.4 Soxhlet시험

Soxhlet 시험은 강우에 의한 화학적 풍화에 대한 암반의 풍화를 시험하기위한 시험이다. 특히 여름철 집중 강우에 의해 많은 강우가 지표로 침투하여 암반에 접하면서 화학반응을 일으키는 영향에 대하여 알아보기 위한 시험이다.

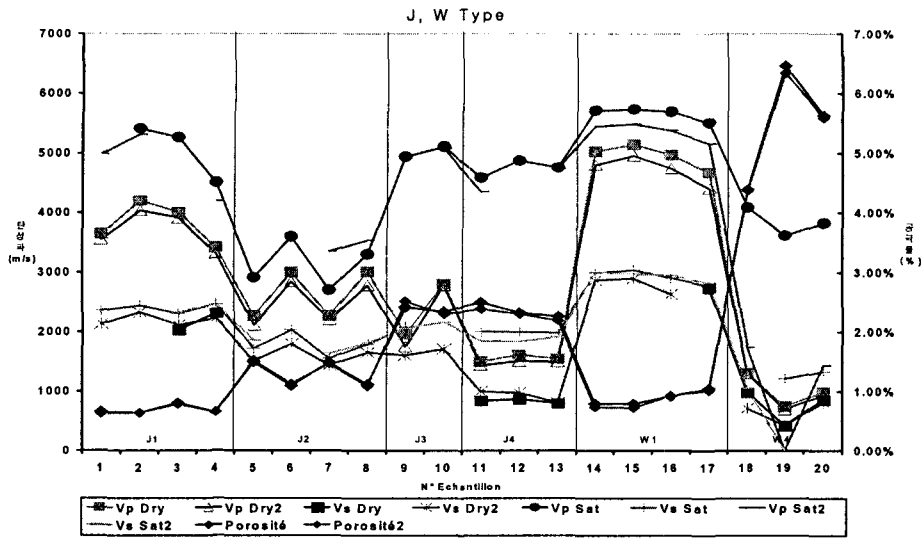
### ■ 이중 Soxhlet원리

- ㉠ 하부 Soxhlet에 있는 샘플과 접하는 물의 온도는 70-75°C.
- ㉡ 샘플에 가하는 물의 pH는 7정도의 중성.
- ㉢ 시험관 일일 강우량은 3200mm이 되도록 시험.
- ㉣ 강우조건은 지속적이고 일정한 강우가 시험동안 가해지는 것으로 가정.
- ㉤ Drainage조건은 자연에서는 강우량 - 배수량 = 증발량이지만 Soxhlet에서는 증발되는 것이 거의 없다고 보기 때문에 강우량 = 배수량 조건이 되고, 배수 속도는 130mm/hour임
- ㉥ 시험시 대기조건은 자연조건보다는 산소나 이산화탄소가 부족함. 이는 곧 Soxhlet에서 샘플과 접하는 물의 경우와도 동일함.

이런 종류의 leaching test는 pH가 중성인 뜨거운 물에 의해 집중적으로 인공적 화학풍화를 시키는 것으로, 이중 Soxhlet은 지속적인 샘플의 침수-노출을 반복함으로써 이를 실현시킬 수 있다

J군과 W군의 시료의 탄성파와 흡수율 비교표는 위에서 본 그래프와는 많은 차이가 나타나고 있다. 전체적인 변화의 폭이 크고 시료별 차이도 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 동결-융해 시험과 반대로 W1

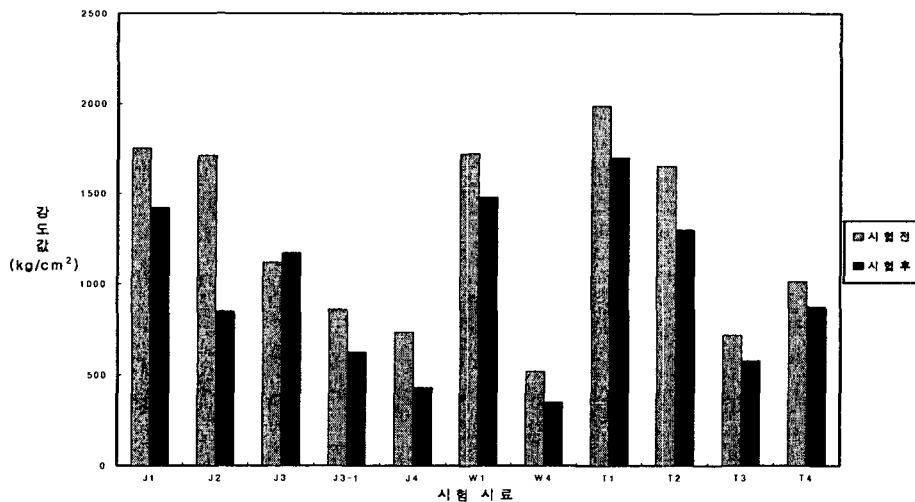
의 탄성파속도가 매우 높은값을 나타내고 있다. 이것은 단지 강수량 변화에 의한 것으로 공극의 변화가 동결-융해 시험보다는 적게 일어남을 알 수 있다.



<그림 2.5> J, W type 탄성파속도와 공극률

### 2.5 일축압축시험

일축압축강도 데이터는 풍화 전·후 두 번 측정하여 평균값을 산출하여 강도값을 비교하였다. 동결-융해 전 일축압축 강도 측정값은 그림 2.6에 그래프로 나타냈다. 위에 나타난 표에서 같은 class에 속하는 암석이지만 강도차가 매우 크게 나고 있다는 것을 알 수 있다. 동결-융해가 진행된 이후의 일축압축강도 값은 그림 2.6에 맞추어서 비슷한 값을 나타내는 class로 비교하였다. W4 class에 두번째 값은 측정하지 않았다. 그 이유는 동결-융해 시험 중간에 자연파괴가 이루어졌기 때문에 강도시험을 하기에 힘든 형태로 파괴되어 측정이 이루어지지 않았다.



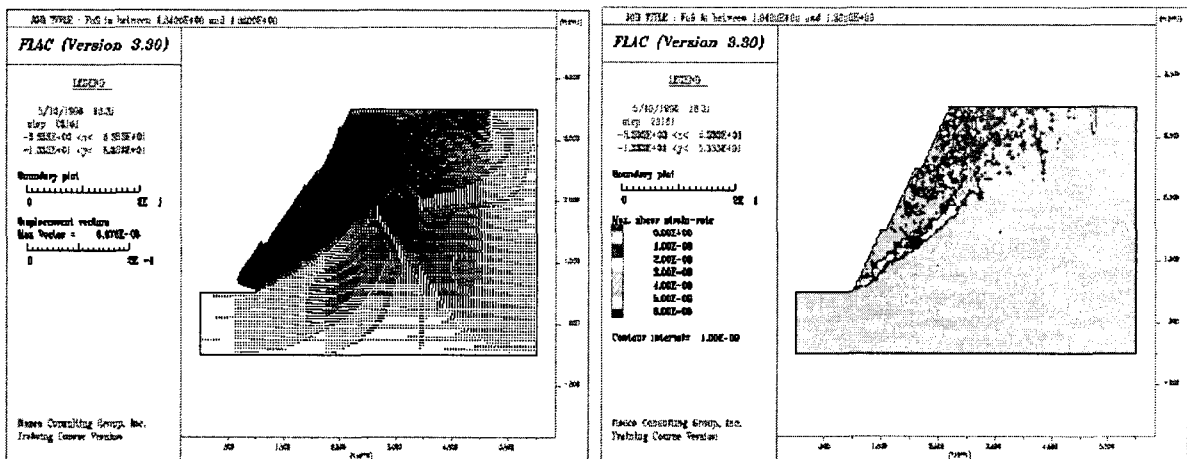
<그림 2.6> 동결-융해시험 전·후 일축압축강도값

### 3. 수치해석

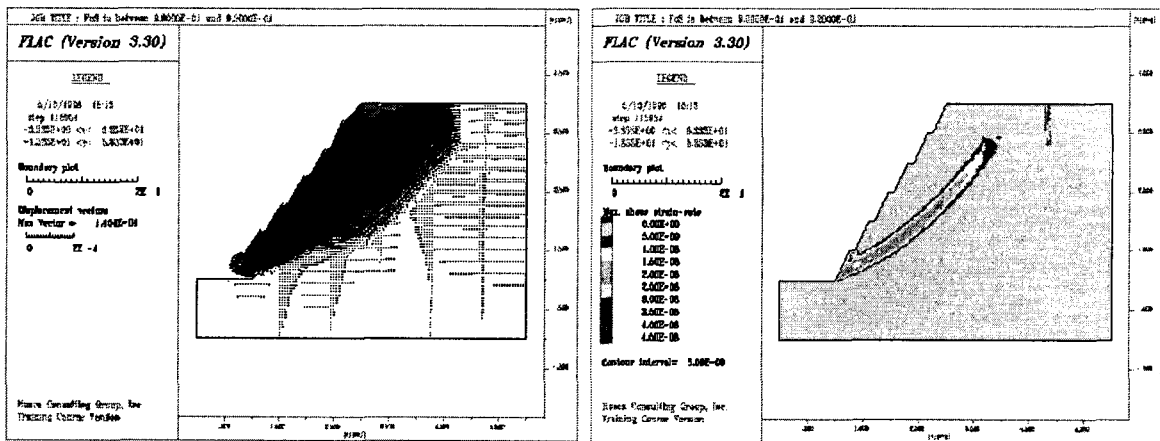
수치해석은 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Analysis of Continua : Ver 3.30)을 이용하였다. 해

석 대상은 풍화시험에서 변화를 많이 보인 J2, W4의 암반등급 III, IV, V를 선정하여 실시하였다. 해석은 J2풍화 전→J2풍화 후, W4풍화 전→W4풍화 후로 수행하였다. 그림 4.2와 같이 해석 영역의 크기 선정은 절취사면의 안정성을 파악하기 위해 좌·우 경계를 넓게 하였고, 요소의 크기는 해석의 민감도를 위해 0.5m 간격을 기준으로 하였다. 총 요소는 120×80로 하였으며 초기 경계조건은 다음과 같이 가정하였다. 모형도에서 J2 class는 사면의 높이를 10m로 정하고, W4 class는 사면의 높이를 5m로 정하였다. 단면 해석의 암반등급 분류시 사용된 기준은 Q값(Barton, 1974)의 값을 기준으로 각 등급에 맞는 물성치를 넣었으며, 풍화단계를 III등급에서 IV등급으로, IV등급은 V등급으로 풍화단계를 진행시켜 수치 해석을 수행하였다.

동결-융해시험 결과를 분석하여 수행한 암반등급 III, IV, V에 대해서 FLAC을 이용한 연속체 해석을 검토한 결과 다음과 같은 해석 결과를 얻었다.



(a) (b)  
 <그림 2.7> J2 풍화 후 파괴된 모양(a), 전단변형률 속도 분포도(b)



(a) (b)  
 <그림 2.8> W4 풍화 후 파괴된 모양(a), 전단변형률 속도 분포도(b)

<표 2.3> 풍화전·후 안전율변화

Rock class	풍화 전	풍화 후
J2	III등급 안전율 2.56	IV등급 안전율 1.36
w4	IV등급 안전율 1.46	V등급 안전율 0.92

#### 4. 결론

- (1) 무게변화와 부피변화는 거의 이루어지지 않았다(시험이 단기간에 이루어짐).
- (2) 탄성과 측정에서 P파, S파는 시험전후 속도의 변화가 많이 감소하는 현상을 보였다.
- (3) 탄성파의 감소는 시험 시료내의 동결-융해에 의한 미세균열이 증가를 의미한다.
- (4) 포화상태에서 J Type의 P파의 증가현상은 공극의 의존도가 증가하면서 더 많은 공극이 물로 포화되기 때문인 것으로 추측된다.
- (5) 탄성과 속도가 낮은 시료일수록 일축강도에서 낮은 강도값을 나타냈다.
- (6) FLAC해석 결과 풍화정도가 약한 J2 class는 절취사면에서 풍화 전·후에 사면의 안정성이 유지되었고, 풍화가 비교적 많이 진행된 W4 class의 경우 풍화가 진행된 후 사면의 파괴가 일어났다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구 지원 프로그램의 지원을 받아 수행된 것이다.

#### 참고문헌

1. 김성환, 유병옥, 조성로, “암석의 풍화에 따른 강도변화 특성에 관한 연구” 97 사면안정 학술발표회 1997. 9, pp.129
2. 김영화, 홍순호, “풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구” Jour. Korean Inst. Mining Geol. Vol. 23 No. 2, pp.221~232, 1990.2.
3. 백용, 구호본, 배규진, “동결융해 시험을 통한 암석의 열화특성에 관한 실험적 연구” 한국암반공학회 시험분과위원회 기술세미나, 2002. 9, pp.38~47
4. 정형식, 유병옥, “암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구” 한국지반공학회 제13권 제6호 1997. 12, pp.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, pp.31.
7. Barton, N. (1988), Rock mass classification and tunnel reinforcement selection the Q-system. Proc. Symp. Rock Class. Eng Purp. ATSM, Special Technical Publication 984, Philadelphia, pp.59~88.
8. Itasca Consulting Group, Inc. (1995) FLAC Version 3.30 Manual.