

## 인공 풍화기법과 Slake-Durability Test를 통한 암반의 내구성 평가

이종윤<sup>1)</sup>, 김학수<sup>2)</sup>, 박형동<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교, <sup>2)</sup>(주)지오제니 컨설턴트

### 1. 서론

고온다습한 여름과 저온건조한 겨울이 뚜렷이 구분되며 반복되는 우리나라와 같은 기후 조건은 암석의 풍화를 쉽게 일으킬 수 있는 조건이다(Candan et al., 2000). 풍화가 진행된 암반은 역학적, 물리학적 그리고 광물학적 특성이 변화하며, 풍화가 진행될수록 변화의 정도는 더욱 커진다. 이는 암석을 구성하는 광물 입자 자체의 열화나 입자간의 결합력 약화 등으로 판단해 볼 수 있다. 풍화에 대한 저항성은 일종의 암반의 내구성이며, 내구성은 중요한 공학적 매개변수로서, 사면과 지하굴착의 안정성을 평가하는 중요한 암반물성중의 하나이다(Crosta, 1998). 이러한 내구성의 변화는 암석 및 불연속면의 전단강도 저하를 야기해 전반적 사면붕괴나 국부적 낙석의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 암반사면의 장기적 안정성 확보를 위해서는 풍화에 따른 암반의 내구성이 규명되어야 한다.

본 연구에서는 국내의 00 도로사면굴착 현장에서 채취한 화강암, 편암, 석류석 화강편마암, 복운모 화강암을 대상으로, 자연 상태에서의 장기적인 물리적 풍화를 모사하는 인공풍화를 적용한 후, Slake durability test를 실시하였다. Slake durability test는 각 시료당 총 5 cycle을 수행하여 암반의 내구성과 시험에 의한 마모를 구분해 보고자 하였다. 또한 slake durability test 결과의 광물학적 해석을 위해 X-선 회절분석을 실시하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 인공풍화시험

일반적으로 암석이 지표환경 하에서 겪는 풍화는 지질현상 중 하나이므로 풍화에 따른 암석물성의 변화를 실제 풍화현상으로부터 관찰하고 파악하는 것은 산성비에 의한 대리석의 용해와 같이 상대적으로 빨리 진행되는 현상을 제외하면 거의 불가능하다. 따라서 사면이나 굴착지반의 장기적 안정성을 검토하기 위해 풍화에 따른 물성변화를 파악하기 위해서는 풍화와 유사한 현상을 암석시료가 겪을 수 있도록 인위적으로 유도할 필요가 있다. 인공풍화 실험은 대상이 되는 암석이 겪게 될 풍화현상 중 지배적인 것이 무엇이냐에 따라 동결 및 용해의 반복, 염분의 형성, 산성용액에 침수하는 등의 실험조건을 단독 또는 복합적으로 적용하기도 한다.

김성수(1999)는 산성용액침수, 염분결정화 등 2종류의 인공풍화실험을 거친 암석시료에 대한 slake durability test를 실시한 바 있다. 그러나 염분결정화의 경우 해안에 인접한 지역의 암석이 많이 겪는 풍화현상으로 알려져 있고, 산성용액침투실험은 산성비의 발생빈도가 높은 도심지의 문제로 국한될 수 있다. 결국 인공절취사면의 대상 지반이 주로 겪게 될 풍화현상은 사계절의 뚜렷한 반복에 기인한 주기적인 습윤-건조에 의한 것으로 판단된다. 즉, 습윤-건조시 암석을 구성하는 조암광물의 서로 다른 열팽창률에 의해 미세균열이 생성되고 전파되며, 균열 내부의 수분이 동결-융해되어 발생하는 부피변화 역시 암석 내 미세균열을 발생시킬 수 있다는 점을 감안해 볼 때, 대상시료에 대한 현실적인 인공풍화의 조건은 습도와 온도조건의 변화를 고려한 주기적인 동결-융해의 반복으로 사료된다. 이는 “굴착 → 지표에 노출 → 풍화”라는 현실적인 상황을 반영함으로써 대상 지반에 대한 보다 정확한 풍화저항성에 대한 정보를 줄 수 있을 것으로 기대하기 때문이다.

## 2.2 Slake durability

Slaking이란 암석이 건조상태일 경우에는 일정한 강도와 구성 입자간에 결합력을 유지하고 있지만 물과 접촉할 경우 구성입자간 결합력이 급격히 감소하여 disintegration되는 현상으로 일종의 풍화가 가속되는 현상이라 할 수 있다. slaking 현상이 두드러진 암종은 주로 shale, siltstone, mudstone, claystone 등의 미세한 입자로 구성된 퇴적암이며 사암이나 역암의 경우도 교결물질의 종류에 따라 slaking 현상이 심한 경우도 있다. 응회암 역시 slaking 현상이 잘 나타나는 암종으로 알려져 있다. 특히 고화정도가 낮은 퇴적암의 경우 상당히 심한 slaking 현상을 보일 수 있다. 더욱이 이들 암종에는 대체로 점토광물이 많이 존재하므로 존재하는 점토광물의 종류에 따라 팽창(swelling)도 발생할 가능성이 있다. 이처럼 팽창의 가능성이 높은 암석의 경우 “습윤(wetting)-건조”의 반복으로 인한 함수비의 변화에 따라 팽창-수축이 반복됨으로써 암석내 미세균열을 발생시키게 되고, 이러한 균열은 내부로의 수분의 침투를 더욱 용이하게 하여 slaking 현상을 가속화할 수 있다. 또한, 이온교환과 응력해방에 따른 영향도 간과할 수 없는 slaking 현상의 매카니즘이다(Franklin & Chandra, 1972).

slaking 현상은 젖음 자체보다는 “습윤-건조”의 반복에 의해 더욱 가속된다. 예를 들어, slaking 현상이 발생할 수 있는 지반을 굴착한 후 적절한 사후대책이 이루어지지 않는다면, 향후 강수, 지하수 조건의 변화 등의 원인에 의해 이미 slaking 된 입자들은 침식되고 이로 인해 내부의 신선한 암석이 노출되어 slaking 되는 현상이 반복되어 상당한 시간이 경과되었을 때 깊은 심도까지 slaking 현상이 진행됨으로써 사면의 불안정성을 증가시킬 수 있다.

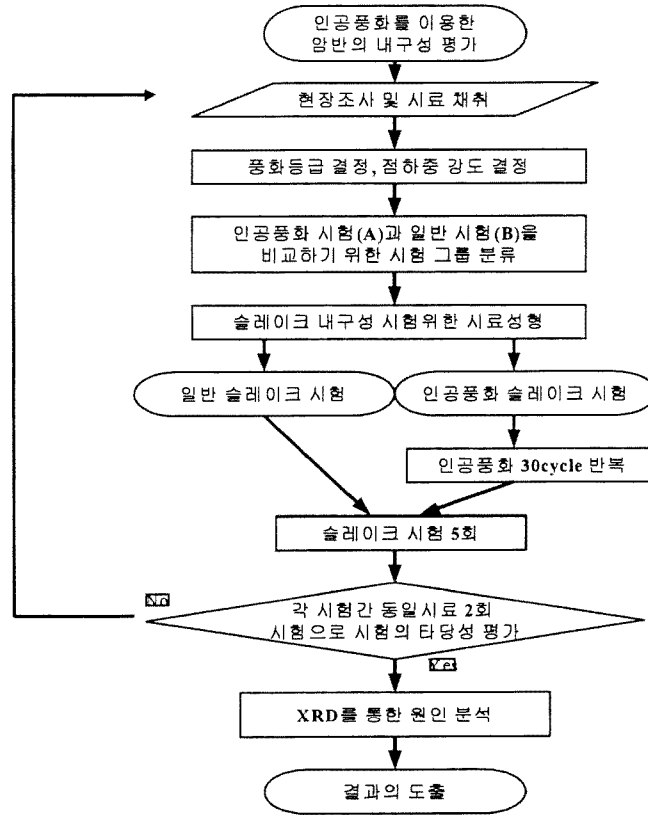


그림 1. 인공풍화를 적용한 슬레이크 시험 흐름도

### 3. 시험방법

일정온도와 습도를 조절할 수 있는 항온습기를 이용하여 '고온다습-저온건조'한 우리나라의 기후조건을 모사하였다. 인공풍화의 영향을 기존시험과 비교하기 위해, 같은 시료에 대해 인공풍화 후 슬레이크 시험과 일반적인 슬레이크 시험으로 구분하였다. 그림 1에 본 시험과정을 나타낸 흐름도를 제시하였다.

#### 3.1 시료의 특성 및 선정 방법

시험에 사용된 시료는 국내의 00 도로 공사구간의 절취사면에서 채취해온 것이다. 이 지역의 주 암상은 화강암이며, 구간에 따라 암종의 변화가 있는 것이 특징이다. 시료의 선정은 크게 화강암, 화강편마암, 편암 3종류로 하였으며, 시료 채취구간의 대부분을 차지하는 화강암에 대해서는 지역과 구성입자에 따라 춘천 화강암, 화천 화강암, 복운모 화강암으로 세분하였다. 채집된 시료는 주로 파쇄가 심하게 이루어졌거나 이미 절리면이 상당히 변색되거나 상당한 두께의 적갈색 철산화물이 관찰되어 낮은 slake durability 특성을 보일 수 있다고 판단되는 시료를 선택하였다. 슬레이크 내구성 시험의 결과와 초기 강도와의 관계를 알아보기 위해 시료에 대한 점하중 실험을 실시하였다. 표 1에 실험에 사용된 시료의 특성을 요약 정리하였으며, 그림 2는 시료의 실험 전 사진이다.

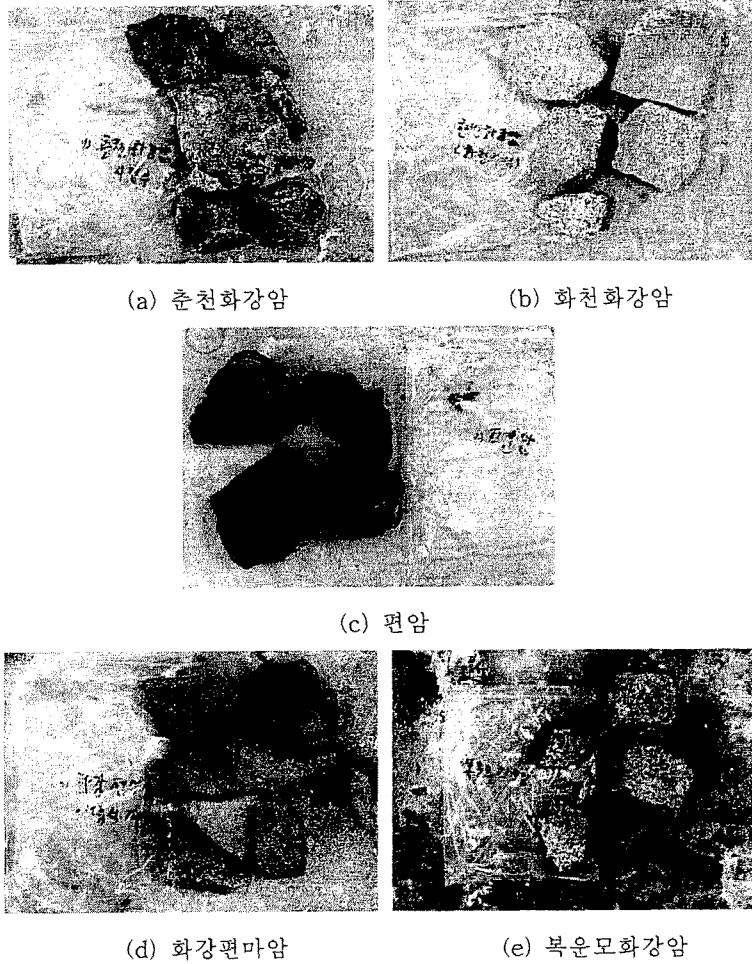


그림 2. 실험 전 시료 사진

표 1. 시험에 사용된 시료의 암종, 시료 특징 및 분류

Rock Type	시료상태	점하중 강도(MPa)	풍화정도	암반분류 (표준품셈)	화강암 풍화지수 <sup>1)</sup>
춘천화강암	가벼운 충격에도 으깨질 정도이며, 석영입자의 이탈이 두드러지고, 표면은 매우 거칠	29	MW (Moderately Weathered)	풍화암	보통풍화 (Moderately weathered)
화천화강암	(1)과 비슷한 상태이지만, 석영입자의 이탈은 상대적으로 적은 경향으로, 표면은 거칠	33	MW (Moderately Weathered)	풍화암	보통풍화 (Moderately weathered)
편암	매우 신선한 상태로 표면은 매끈함	69	F (Fresh)	경암	-
석류석화강편마암	시료성형이 어려울 정도의 강도를 가진 매우 신선한 상태로 표면은 매끈함	76	F (Fresh)	경암	-
복운모 화강암	절리면의 변색이 두드러지며, 표면은 약간 거칠	47	SW (Slightly Weathered)	연암	완전얼룩 (Completely stained)

1) (Irfan & Dearman, 1978)

### 3.2 시료의 인공풍화

인공풍화시험을 통한 풍화가속화 방법은 시험조건의 극단적 설정과 반복횟수를 매우 크게 설정하는 방법이 있으나, 각각의 조건이 실제 어느 정도의 시간을 모사할 수 있는지에 대한 정량적인 기준은 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 반복횟수 증가법을 이용하여 서울 화강암의 풍화 경향성을 분석한 사례를 참고하였다(Kim and Park, 2003). 본 연구에서 실시된 인공풍화시험은 그림 3과 같은 조건을 1 cycle로 설정하고 항온항습기에서 총 30회 반복한 이후의 시료에 대하여 slake durability test를 실시하였다. 고온과 저온의 시간이 다른 것은 사용한 항온항습기의 습도 조절능력 때문이며, 시료가 충분히 건조되고 충분히 젖을 수 있는 상태를 최적화하기 위함이다. 현재까지 인공풍화의 개념을 정량화할 수 있는 시험이 국내외에서 많이 진행되지 않은 관계로 본 시험에서 제안하는 인공풍화시험기법은 임의적이며 간접적일 수 밖에 없다.

표 2, 3 슬레이크 내구성 분류 좌, (Franklin & Chandra, 1971) 우, (Gamble, 1972)

Slake durability index $I_{d2}$ (%)	Classification	Group Name	Retained after One 10min Cycle(%)	Retained after Two 10min Cycles(%)
0 - 25	very low	Very high durability	>99	>98
25 - 50	low	High durability	98-99	95-98
50 - 75	medium	Medium high durability	95-98	85-95
75 - 90	high	Medium durability	85-95	60-85
90 - 95	very high	Low durability	60-85	30-60
95 - 100	extremely high	Very low durability	<60	<30

### 3.3 Slake durability test

LA 마모시험과는 달리 암석이 물과 접촉한 상태에서 일정한 충격을 받았을 때 특정입도 이하의 입자로 분해되는 중량비로 slaking 특성을 평가하는 시험법이 Franklin과 Chandra(1971)에 의해 제안되었고 이는 현재 암석시료의 slaking에 대한 내구성 평가의 표준시험법으로 ISRM이 권고하고 있다. 그 시험을 위한 표준시험장치는 그림 3과 같다. ISRM에서 표준시험법으로 제안하고 있는 것은 이암등 퇴적암에 대해 시험 2 cycle 이다. 그러나 본 연구에서는 지속적으로 발생할 가능성이 있는 풍화현상에 대해 고려해보고자 5 cycle 로 시행하였다. 통상 슬레이크 내구성 시험의 결과는 표 2와 3에 제시된 기준에 따라 암석의 내구성을 평가한다.

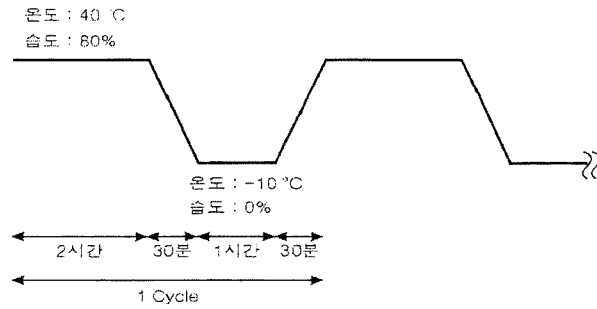


그림 3. 인공풍화실험(동결-융해) 방법

#### 4. 결과 및 고찰

Slake durability test 결과 각 시료의 1st 및 2nd cycle 후의 index인  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$ 의 값과 그 값에 따른 암석의 slake durability 분류현황을 표 4에 정리하였다.

표 4. 일반적인 시료에 대한 실험결과와 분류

시료	$I_{d1}$	$I_{d2}$	시험오차 (신뢰도 95%기준)	Franklin의 분류기준( $I_{d2}$ )	Gamble의 분류기준	
					$I_{d1}$	$I_{d2}$
춘천화 강암	95.84	93.13	3.5% (OK)	very high	Medium high durability	Medium durability
화천화 강암	99.64	98.74	2.8% (OK)	extremely high	Very high durability	Very high durability
편암	98.76	97.72	0.6% (OK)	extremely high	High durability	High durability
석류석 화강편 마암	99.64	99.55	0.9% (OK)	extremely high	Very high durability	Very high durability
복운모 화강암	97.86	96.99	1.6% (OK)	extremely high	Medium high durability	High durability

시험결과 '춘천화강암'시료가 다른 시료에 비해 상대적으로 낮은 slake durability를 보이고 있다. 비슷한 암반 강도로 인해 같은 종류로 분류되는 암석이라 할 지라도, 내구성에 차이가 있을 수 있으며, 그 차이는 초기강도의 차이와 상관성이 있음을 알 수 있다(표 1, 표 4).

굴착 후 적절한 대책이 수행되지 않았을 경우 풍화에 따른 대상지반 특성의 변화를 살펴 보기 위해 인공풍화실험을 수행하였고 인공풍화를 거친 이후의 각 시료별 slake durability index는 표 5에 정리하였다.  $I_{d1}$ 의 변화에 미치는 인공풍화의 영향을 살펴보면, '춘천화강암'시료가 인공풍화실험을 거치지 않은 시료의  $I_{d1}$ 에 의한 값보다 3%이상 차이를 보여 인공풍화에 가장 민감하게 반응한 시료로 판단해 볼 수 있다.

표 5. 인공풍화 시료에 대한 시험결과와 분류

시료	I <sub>d1</sub>	I <sub>d2</sub>	시험오차 (신뢰도 95%기준)	Franklin 의 분류기준(I <sub>d2</sub> )	Gamble의 분류기준	
					I <sub>d1</sub>	I <sub>d2</sub>
춘천화강암	92.80	86.30	3.1%	high	Medium durability	Medium durability
화천화강암	99.07	98.45	1.5%	extremely high	Very high durability	Very high durability
편암	98.63	97.16	0.3%	extremely high	High durability	Very high durability
석류석 화강편 마암	99.66	99.33	0.5%	extremely high	Very high durability	Very high durability
복운모 화강암	98.12	96.63	0.9%	extremely high	High durability	Very high durability

그림 5는 인공풍화를 거치지 않은 시료(자연상태)와 인공풍화를 거친 시료의 슬레이크 내구성 값의 변화를 보여주는 그래프이다. '춘천화강암'은 두 방법간 차이가 분명하고 cycle이 진행될수록 값의 차이가 커지는 경향을 확실히 볼 수 있다. 비록 미미한 차이지만 인공풍화를 거친 경우의 ΔI<sub>d</sub>(인접 slake durability index간 차)가 인공풍화를 거치지 않은 경우의 ΔI<sub>d</sub>가 보다 크게 나타나는데, 이는 인공풍화실험에 의해 입자간 결합력의 감소 또는 미세균열의 형성으로 인해 slaking 현상에 대한 저항성이 감소하였음을 의미한다. 즉, 인공풍화를 거치면서 어느 정도 결합력이 상실된 입자가 분리된 결과로 판단되므로 이 지역 지반 굴착 시에는 풍화에 따른 slake durability 특성을 감안한 사후대책이 필요하다. 또한, 3cycle 이상 반복했을 경우, I<sub>d</sub>가 일정하게 감소하는 경향을 보여, 본 시험 시료의 경우에 대해서 슬레이크와 마모를 구분하기 위해서는 2cycle이 적절할 것으로 보인다.

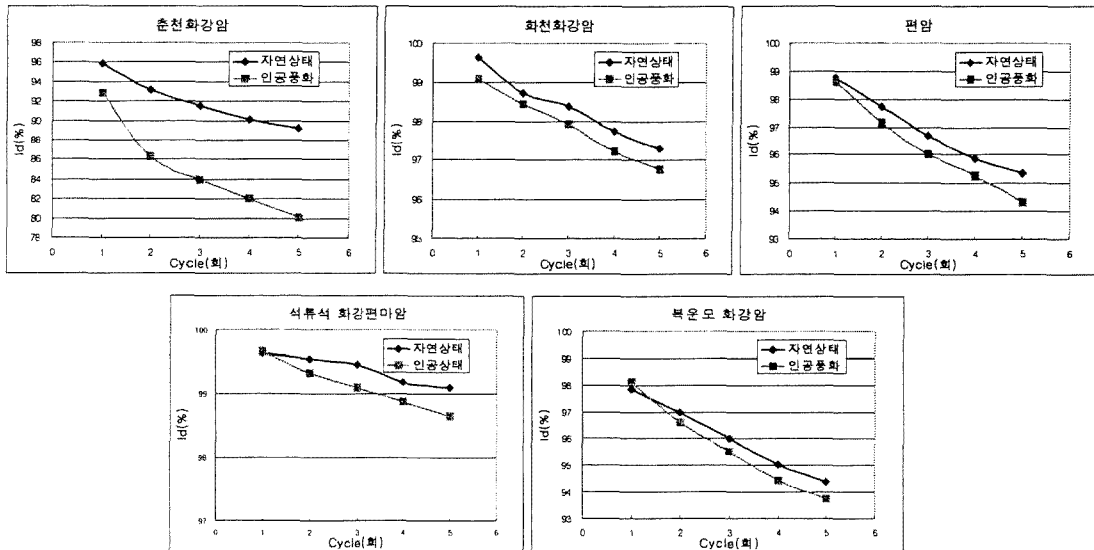


그림 5. 자연상태 및 인공풍화 시료의 slake durability test결과 비교

춘천화강암과 화천화강암이 비슷한 초기강도로써 같은 암종으로 분류되지만, 내구성 시험 결과와 인공풍화의 영향 정도는 큰 차이를 보여, 이에 대한 분석을 XRD를 이용하여 분석해보았다. 결과에 미치는 요소는 많이 있으나, 여기서는 암석을 구성하는 광물의 조성상태를 통해 결과의 차이를 규명하고자 하였다.

그림 6과 그림 7을 통해 알 수 있듯이, 화천화강암의 석영 최대치가 춘천화강암보다 2배 이상 높게 나왔다. 이는 전자의 경우가 풍화에 강한 광물이 상대적으로 다수 분포되었거나, 석영의 결정화정도가 상대적으로 크을 알 수 있다. XRD의 정량적 분석에 관한 한계를 고려한다고 하더라도, 시험결과와 비교했을 때, 석영 최대치와 내구성의 상관성을 본 시험에서는 찾을 수 있었다.

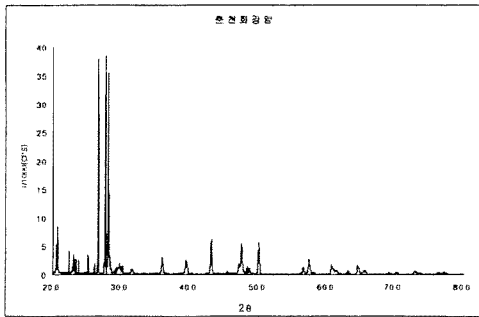


그림 6 춘천 화강암의 X선 회절 분석

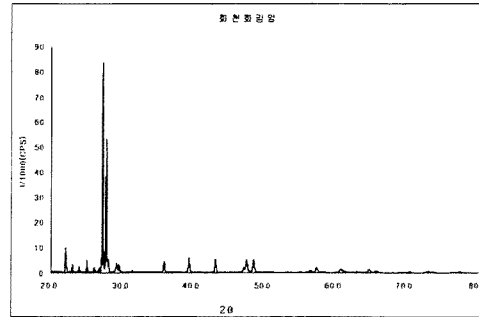


그림 7 화천 화강암의 X선 회절 분석

## 5. 결론

(1) 초기 유사한 강도 및 특성을 보였던 춘천 및 화천 화강암 시료가 인공풍화이후 슬레이크 내구성 지수의 급격한 차이를 보였다. 이는 화강암이 시험한 다른 암종 중에 인공풍화의 영향을 가장 크게 받는 것을 의미한다.

(2) 이 원인을 XRD를 통해 분석해본 결과, 화강암의 주요구성 광물이고 일반적으로 풍화에 강한 석영의 결정화 정도나 상대적 양적차이로 인한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 보다 정밀한 정량적 분석을 위해서는 SEM 등을 활용하는 것이 필요하다.

(3) 슬레이크 내구성 시험을 5회까지 수행해 본 결과, 대부분의 시료에서 3cycle 이상에서는 일정하게 Id 값이 감소하는 경향을 보여, 내구성이 아닌 마모의 영향으로 판단이 되며, 본 시험에 사용된 암석의 경우, ISRM에서 제시하는 2회 시험 과정이 타당함을 알 수 있었다.

(4) 본 시험을 통해, 화강암의 경우 굴착이후 풍화의 정도가 초기 유사한 물성을 지녔다 할지라도 기후 및 지역에 따라, 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 시험을 통해 암반의 내구성이 장기적인 사면안정성의 문제 여부를 평가할 수 있는 중요한 인자임을 판단할 수 있다.



## 참고문헌

1. 김성수, 1999, 인공풍화실험을 이용한 석재의 공학적 내구성 평가, 서울대학교 석사학위논문, pp. 3-71.
2. Crosta G, 1998, Slake Durability Vs Ultrasonic Treatment for Rock Durability Determinations, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 35, No. 6, pp. 815-824.
3. Franklin J. A., and Chandra R., 1971, The Slake-Durability Test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 9, pp. 325-341.
4. Gamble J. C. 1972, Durability-Plasticity Classification of Shales and other Argillaceous Rocks, Ph.D. Thesis, University of Illinois.
5. Irfan, T.Y. and Dearman, W.R., 1978, The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England, Q. J. Engng. Geol., Vol. 11, pp. 233-244.
6. Kim S.S. and Park H.D., 2003, The relationship between physical and chemical weathering indices of around Seoul, Korea, Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 62, pp. 207-212.