

동결융해시험에 의한 사암 및 안산암의 풍화특성 평가

강성승^{1)*}, 김종인²⁾, 오바라 유조³⁾, 히라타 아츠오⁴⁾

Estimation of Weathering Characteristics of Sandstone and Andesite by Freeze-Thaw Test

Seong-Seong Kang, Jong-In Kim, Yuzo Obara, Atsuo Hirata

Abstract Variations of physical properties such as weight loss rate, wave velocity and uniaxial compressive strength after performing freeze-thaw cyclic test were measured in order to define weathering characteristics of sandstone and andesite. Weight change in specimens of the two rocks decreased with increasing the repetition number of freeze-thaw cyclic test. In particular, weight loss of andesite specimens was very irregular. P-wave velocity of sandstone specimens decreased more than 5%. On the other hand, P-wave velocity of andesite specimens do not vary up to 500 cycles and decreased more than 5% after 1000 cycles. This implies that the sandstone are easily weakened and loosened by weathering processes, while the andesite are relatively strong. In addition, the wave velocity changes of the andesite specimens coincident with the weight change. Uniaxial compressive strengths of the sandstone specimens slightly decreased at the early stage of the freezing-thawing cyclic test, then tended to be irregular after 64 cycles. In conclusion, the rock specimens showed smaller weight loss, less had lower strength reduction rate.

Key words Weathering characteristics, Freeze-thaw, Weight loss rate, Wave velocity, Uniaxial compressive strength

초 록 사암과 안산암에 대한 풍화특성을 살펴보기 위하여 동결융해 반복시험을 실시한 후, 두 암석에 대한 중량 감소율, 탄성파속도, 일축압축강도 등의 물성 변화를 측정하였다. 중량 변화의 경우 두 암석 모두에서 동결융해 반복 횟수가 증가함에 중량이 감소하는 경향을 보였다. 특히 안산암에서는 중량 감소 경향이 시험편에 따라 매우 불규칙하게 나타났다. 탄성파속도 변화에 있어서 사암은 5%이상의 감소 경향을 보였으며, 안산암은 동결융해 반복시험 500 사이클까지 탄성파속도 변화가 거의 없다가 1000 사이클부터 5%이상의 감소 현상을 보였다. 이것은 안산암이 비교적 풍화에 강한 암석인 반면, 사암은 풍화받기 쉬운 암석인 것을 의미한다. 또한 안산암의 탄성파속도 변화 양상은 안산암의 중량 변화와 일치한다. 사암의 일축압축시험 결과에서 일축압축강도는 동결융해 반복시험 초기 사이클 구간에서 미미한 강도저하를 보이다 64 사이클부터는 불규칙한 경향을 나타냈다. 결과적으로, 중량 감소가 적은 암석 시험편일수록 강도저하율도 작게 나타났다.

핵심어 풍화특성, 동결융해, 중량 감소율, 탄성파속도, 일축압축강도

1. 서 론

터널이나 지하발전소와 같이 암반 내에 건설되는 구

조물은 건설 후 수십 년이 경과한 현재에도 건설 당시의 상태를 유지하며 큰 보수를 하지 않고 사용되고 있다. 이러한 구조물은 건설 후 오랜 기간 동안 그 기능을 유지하는 것이 안정성에 있어서 매우 중요하다. 하지만, 암반은 바람과 강우, 건조와 습윤, 또는 한랭과 온화한 기후 등 주기적인 자연현상의 영향을 받아 서서히 풍화가 진행된다. 다양한 요인에 의해 발생하는 풍화로 인하여 암반 구조물은 암반 자체의 강도저하뿐만 아니라 구조물의 기능도 약해질 수 있다(Harrison and Hudson, 1997). 지반재료로서 암반을 토양과 비교할 때 암반은 그 특성

¹⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 교수

²⁾ 조선대학교 에너지자원공학과 겸임교수

³⁾ 일본 구마모토대학 대학원 자연과학연구과 교수

⁴⁾ 일본 소조대학 에코디자인학과 교수

* 교신저자 : kangss@chosun.ac.kr

접수일 : 2011년 4월 12일

심사 완료일 : 2011년 4월 21일

게재 확정일 : 2011년 4월 22일

상 단단하기 때문에 풍화에 대한 내구성이 강하다. 지금까지 건설된 암반 구조물은 건설된 이후 그 기간이 수십 년 정도로 암반 구조물이 유지될 수 있는 기간을 고려할 때 그다지 오랜 기간이라 할 수 없다. 따라서 풍화로 인해 암반의 강도저하가 뚜렷하게 나타나지 않고, 이에 따라 암반 구조물에 대한 공학적인 검토의 필요성이 크게 대두되지 않았다. 하지만, 최근 동결과 융해 현상이 주기적으로 일어남으로써 암반의 풍화가 현저하게 발생되는 지역에 암반 구조물을 건설하는 사례가 점차적으로 증가하고 있다. 이러한 지역에 암반 구조물을 건설할 경우, 장기간에 걸쳐 주기적으로 암석재료의 물성을 측정, 분석, 평가하는 작업은 향후 구조물의 안정성을 확보하기 위해 매우 중요한 과정이다. 따라서 암반의 물성 변화를 일으키는 풍화의 메커니즘을 밝히고 이것을 고려한 합리적인 암반 구조물의 설계법을 확립하는 것이 필요하다.

암석에 대한 풍화 메커니즘 연구는 과거의 경우 주로 육안관찰에 따른 암석의 상태로부터 풍화등급을 추정하였다. 이는 풍화 정도를 관찰하는 연구자의 숙련도에 따라 결과에 차이가 발생할 수 있으며 정성적인 해석에 의존하는 문제점이 존재한다. 현재는 다양한 도구나 장비를 이용하여 실내시험이나 현장시험을 실시함으로써 정량적인 해석이 이루어지고 있다. 국내에서도 이러한 다양한 시험을 통하여 풍화 메커니즘을 규명하고, 이것으로부터 풍화특성을 파악하고자 끊임 없는 노력이 이루어지고 있다(김영화와 홍순호, 1990, 정형식과 유병옥, 1997, 김성수와 박형동, 1999, 광진철과 백환조, 2000, 최석원과 이찬희, 2000, 박연준 외, 2003, 장현식 외, 2004, 백용 외, 2005, 윤석봉 외, 2006, 권오일 외, 2007, 이찬희 외, 2008, 엄정기와 신미경, 2009, 조태진 외, 2009, 송원경 외, 2009). 암석의 풍화 메커니즘을 이해하기 위한 암석의 내구성 평가에 있어서 동결융해시험이나 약액에 의한 안정성시험과 같은 풍화촉진시험법이 이용되는데, 이들 시험법은 경과한 시간에 따라 측정을 반복함으로써 높은 정밀도를 나타낸다(尾原祐三와 平田篤夫, 1998).

풍화지표 중 화학적 또는 광물학적 풍화지표(Chigira, 1988, 1990, Chigira and Sone, 1991, Jayaverdena et al., 1994, 최석원과 이찬희, 2000, 김영택 외, 2005, 윤석봉 외, 2006, 이찬희 외, 2008, 조태진 외, 2009)는 화학적 풍화 단계에 의한 원소의 이동이나 광물의 변화에 근거한다. 하지만 이들 지표를 알기위해 실시하는 분석은 복잡하고 시간도 많이 소요된다. 반면에 역학적 및 물리적 풍화지표(김성수와 박형동, 1999, 광진철과 백환조, 2000,

Nicholson and Nicholson, 2000, 박연준 외, 2003, 장현식 외, 2004, 조태진 외, 2009)는 비교적 간단한 시험으로 구할 수 있고 시간도 그다지 소요되지 않는다. 일축 압축강도이나 점재하시험과 같은 역학적 풍화지표는 파괴시험을 통해 풍화지표를 구하게 됨으로써 같은 공시체에 대하여 경과한 시간에 따른 측정이 불가능하다. 또한 역학적 풍화지표를 구하기 위해서는 다수의 시험편이 필요하고, 각 측정 사이클에 수 개의 파괴시험을 실시해야 하는 문제점을 안고 있다. 이것에 비해 비중, 흡수율, 탄성파속도, 질량감소율 등과 같은 물리량은 경과한 시간에 따라 측정이 가능하고 역학적 특성보다도 밀접한 관계가 있으므로 암석의 내구성 평가지표로서 이용하기 쉬운 풍화지표라 여겨진다.

따라서 이 연구에서는 사암과 안산암에 대한 풍화특성을 평가하기 위하여 풍화촉진시험법의 하나인 동결융해시험을 실시한 후, 각 시료에 대한 동결융해 반복 횟수에 따른 중량, 탄성파속도, 일축압축강도의 변화를 측정하였다. 그리고 이상의 결과로부터 이들 암석에 대한 물리적 특성 변화를 분석하였다.

2. 동결융해시험

인공적으로 풍화된 암반시료를 얻기 위해 동결융해시험을 실시하였다. 이 연구에서 사용된 동결융해시험 장치는 전자동 콘크리트용 시험 장치로서 ASTM-666-77에 근거하여 설계되었다(Fig. 1). 이 시험 장치는 두개의 챔버로 구성되어 있으며, 역사이클 순환방식이다. 즉, 한 개의 챔버가 동결하는 동안 방출하는 열을 이용하여 다른 챔버를 융해시키는 방식이다. 시험편을 물이 담긴 고무 용기 내에 넣고, 이 용기를 브라인(brine) 용액에 넣어 포화상태로 온도변화를 반복하다(Fig. 2). 브라인 용액의 온도범위는 $-19.0^{\circ}\text{C} \sim 17.3^{\circ}\text{C}$ 이며, 시료 중심의 온도 변화는 $-17.3^{\circ}\text{C} \sim 17.0^{\circ}\text{C}$ 이다. 그림에서 보는바와 같이 동결융해시험 1사이클의 소요 시간은 6.3시간이다.

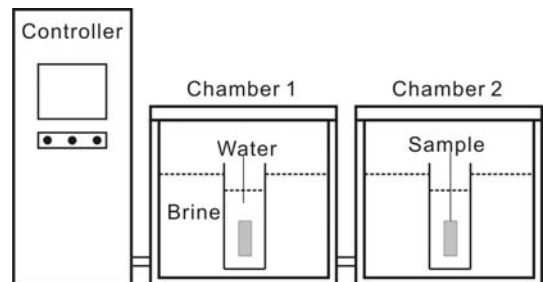


Fig. 1. Schematic diagram of freeze-thaw cyclic test machine.

Table 1. Initial physical properties of sandstone and andesite (UCS: Uniaxial compressive strength, BTS: Brazilian tensile strength)

Sample	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	P-velocity (km/s)		UCS (MPa)	BTS (MPa)
			Dry	Wet		
Sandstone	2.50	9.51	2.65	3.20	70	4.6
Andesite	2.51	7.08	4.49	4.64	120	7.6

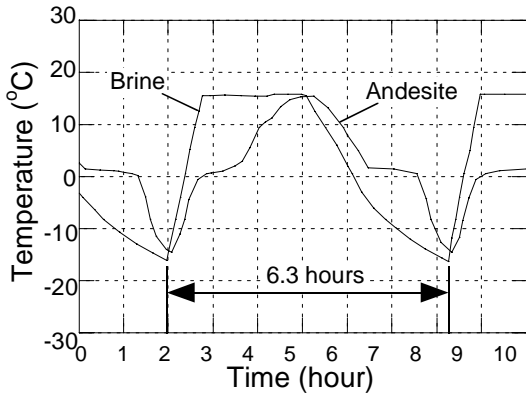


Fig. 2. Temperature-time curve of brine and andesite.

동결융해시험에 사용된 시료는 사암과 안산암으로서 풍화를 받지 않은 신선한 암석이다. 시료의 형상은 원주형으로 크기는 사암의 경우 직경 35 mm, 높이 90 mm, 안산암의 경우 직경 55 mm, 높이 200 mm이다. 각 암석의 초기 물성치는 Table 1과 같다. 이들 시료를 110°C의 노조건기에 1일간 건조시킨 후 건조중량을 구하였다. 다음으로 데시케이터에 물을 넣고 시험편을 침수시킨 후 진공펌프로 강제 포화시키고, 또한 1~3개월간 수중에서 포화시킨 시험편을 동결융해시험에 사용하였다. 동결융해시험을 반복한 시험편에 대해 중량과 탄성파속도를 측정하고 일축압축시험을 실시하여 이들 시험편에 대한 역학적 성질의 변화와 강도저하 정도를 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 중량비 측정

동결융해시험을 반복함으로써 시험편 내부의 구조가 변화하여 시험편에 풍화가 진행될 것으로 예상된다. 따라서 시험편의 중량 감소율은 거시적인 풍화를 나타내는 한 가지 지표로 사용될 수 있다. 그래서 동결융해시험 반복 사이클 수의 증가와 함께 포화상태 시험편의 중량을 측정하여 중량 변화를 분석하였다. 중량은 전기식 지시저울(XT-1220M)을 이용하였으며, 저울의 측정 정

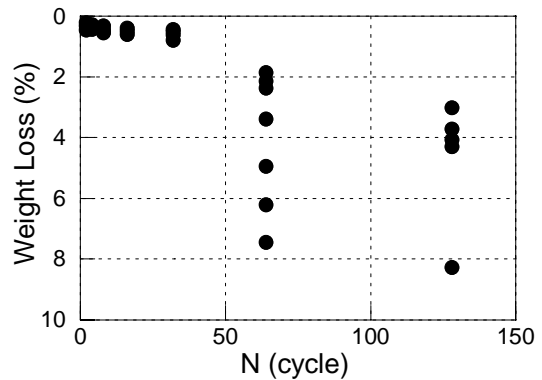


Fig. 3. Relationship between weight loss and cycle in sandstone specimens.

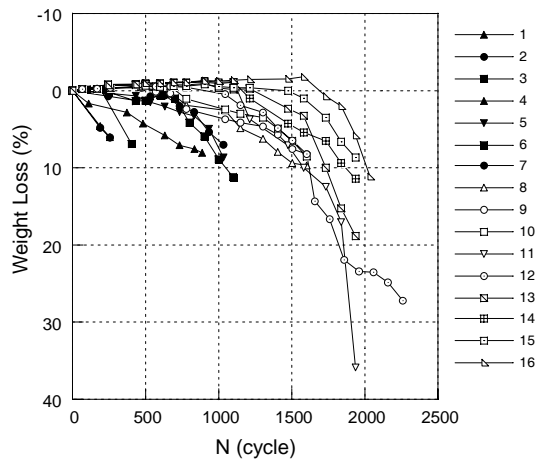


Fig. 4. Relationship between weight loss and cycle in andesite specimens.

밀도는 0.01 g이다. 사암의 중량 측정 시험편은 27개이고 안산암은 16개의 시험편을 대상으로 하였다. 사암과 안산암의 동결융해시험 반복 사이클 수와 중량 감소율의 관계를 나타내면 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

사암의 경우 32 사이클과 64 사이클 사이에 불연속 구간이 관찰되었다. 이것은 이 시험 구간에서 시험편 표

면에서의 풍화가 급격하게 진행된 것에 기인하지 않고 서서히 이루어진 결과로서 시험편 표면의 박리현상이 연속적으로 일어났기 때문으로 사료된다. 안산암의 경우 시험편 8부터 16까지는 중량이 증가한 후 감소하는 경향을 보였다. 여기에서 중량이 증가한 이유는 물이 시험편 내부에 침투했기 때문으로 판단된다. 그림에서 보이는바와 같이 안산암은 시험편에 따라 중량이 감소되는 시점에서 매우 불규칙한 경향을 보인다.

3.2 탄성파속도 측정 및 변화율

물체 내부를 전파하는 탄성파속도는 물체 내부의 구조에 영향을 받아 변화한다. 암석이 풍화를 받아 내부 구조가 변할 때 탄성파속도는 감소한다. 따라서 탄성파속도도 거시적인 풍화 정도를 나타내는 한 가지 지표라 할 수 있다. 동결융해시험으로 반복한 원주형 시험편에 대해 탄성파속도 측정 시스템을 이용하여 정기적으로 탄성파속도를 측정하였다(Fig. 5). 이 측정 시스템은 초음파 펄스 발생기, 저잡음 프리앰프, 디지털 오실로스코프, 송수신용 진동기 등으로 구성되어있다. 초음파 펄스 발생기에 의한 펄스 출력은 송신용 진동기에 보내지고, 시료 내에 탄성파로서 전파된다. 시험편 내부에서 감쇄한 신호 성분은 수신용 진동기에 의해 전기신호로 변환된 후 저잡음 프리앰프를 거쳐 초음파 펄스 발생기와 내장된 프리앰프에 의해 증폭되어 디지털 오실로스코프에 송신되어 저장된다. 저잡음 프리앰프는 장치 주변에서 불규칙한 잡음을 없애기 위해 사용된다. 주파수 범위는 DC-1 MHz로 광대역 주파수며, 공진주파수는 200 kHz이다. 사암의 탄성파속도 측정 시험편은 6개이고 안산암은 16개의 시험편을 대상으로 하였다. 사암과 안산암

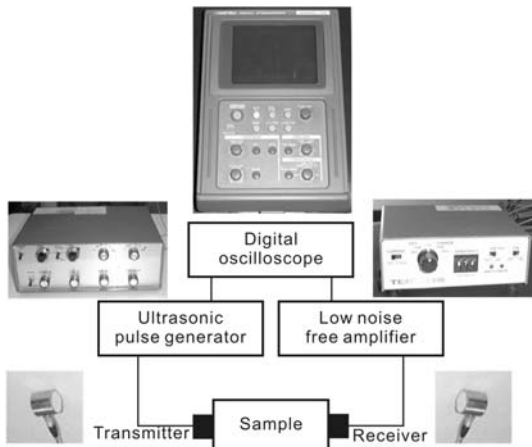


Fig. 5. Measurement system of wave velocity.

의 동결융해시험 반복 사이클 수와 탄성파속도의 관계를 나타내면 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

사암의 초기 탄성파속도는 약 2700 m/s이지만, 32 사이클에서 2500 m/s로 감소하였으며, 탄성파속도가 가장 빠를지라도 약 5%이상의 감소 경향을 보였다. 이것은 사암이 상대적으로 풍화를 받기 쉬운 암석에 속하는 것을 의미한다. 반면 안산암은 500 사이클까지 탄성파속도가 거의 감소하지 않았다. 이들 두 암석의 탄성파속도 결과를 비교해 볼 때, 안산암은 사암보다 풍화 내구성이 큰 암석으로 평가된다. 500 사이클 이후 안산암의 탄성파속도는 급격히 감소하는 시험편과 천천히 감소하는 시험편의 두 형태로 나눌 수 있다. 즉, 탄성파속도가 급격히 감소하는 시험편은 600 사이클에 도달하기 전, 천천히 감소하는 시험편은 1000 사이클을 초과한 시점부터 5%이상 감소하는 경향을 보였다. 안산암의 탄성파속도는 중량 변화에서와 같이 동결융해시험이 반복 될 때

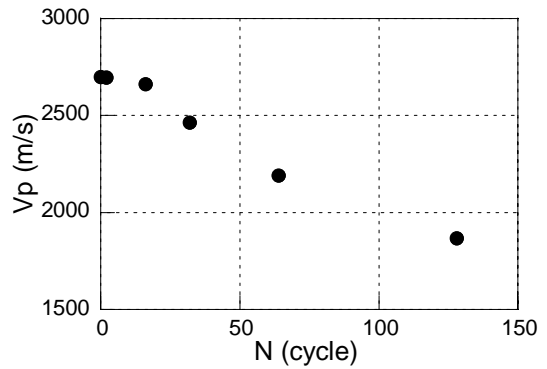


Fig. 6. Relationship between wave velocity and cycle in sandstone specimens.

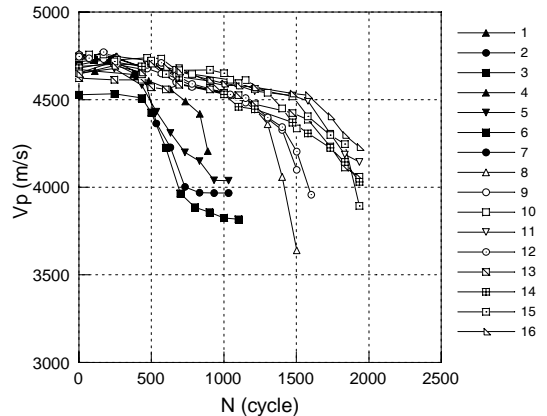


Fig. 7. Relationship between wave velocity and cycle in andesite specimens.

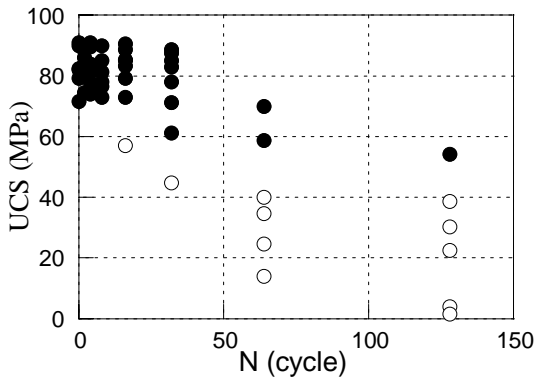


Fig. 8. Relationship between uniaxial compressive strength and cycle in sandstone specimens.

초기에서 후기로 갈수록 시험편에 따라 그 감소 정도가 매우 불규칙하였다.

3.3 일축압축강도

사암에 대해서 실시한 일축압축시험에서 사암의 일축압축강도 계산은 최대하중을 동결융해시험을 시작하기 전 측정된 원주형 시험편의 초기 단면적을 이용하였다. 사암의 일축압축시험은 52개의 시험편을 대상으로 하였다. 사암의 동결융해시험 반복 사이클 수와 일축압축강도의 관계를 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 보이는바와 같이 일축압축강도는 32 사이클까지는 2~3개의 시험편에서만 감소 경향을 보이다가 64 사이클부터 매우 불규칙한 경향을 보였다. 사암의 중량 변화와 비교할 때, 중량 감소가 적은 시험편일수록 강도저하가 작게 나타나는 경향이 뚜렷하게 확인되었다(Fig. 8의 검정색 기호). 따라서 동결융해 반복시험에서 큰 범위의 사이클에서는 일축압축강도의 상한 곡선이 시험편 내부의 강도저하특성을 나타내는 것으로 사료된다.

4. 결론

사암과 안산암에 대한 동결융해 반복시험을 실시하여 풍화에 따른 중량, 탄성파속도, 일축압축강도 등의 물성변화를 측정하였다. 그 결과로부터 동결융해 조건하에서 사암과 안산암의 물성 변화를 정리하면 다음과 같다.

1. 중량 변화에 있어서 사암은 동결융해시험 32 사이클과 64 사이클 사이에 불연속 구간이 나타났으며, 이것은 사암 시험편 표면에서 연속적으로 일어난 박리현상이 기인하는 것으로 사료된다. 안산암의 경우 동결융해

시험 초기에는 중량이 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 안산암의 중량 감소 경향은 시험편에 따라 매우 불규칙한 경향을 나타냈다.

2. 탄성파속도 변화에 있어서 사암은 초기 2700 m/s에서 32 사이클에서 2500 m/s로 감소하였고, 가장 빠른 탄성파속도일지라도 5%이상의 속도 감소 경향을 보여 풍화를 받기 쉬운 암석 중의 하나로 판단된다. 반면, 안산암은 동결융해 반복시험 500 사이클까지 탄성파속도 변화가 거의 없다가 1000 사이클부터 5% 이상 감소하는 경향을 보여 비교적 풍화에 안정된 암석에 해당되는 것으로 판단된다. 하지만 안산암의 중량 변화와 비슷하게 탄성파속도 변화가 시험편에 따라 감소 정도가 매우 불규칙한 경향을 나타냈다.

3. 사암에 대해서 실시한 일축압축시험에서 일축압축강도는 동결융해 반복시험 초기 사이클 구간(32 사이클)에서 미미한 강도저하를 보였으며, 64 사이클부터는 불규칙한 경향을 나타냈다. 사암의 중량 변화와 비교할 때, 중량 감소가 작은 시험편일수록 강도저하가 작게 나타나는 경향이 뚜렷하였다. 따라서 동결융해 반복시험에서 큰 범위의 사이클에서는 일축압축강도의 상한 곡선이 시험편 내부의 강도저하특성을 나타내는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 박진철, 백환조, 2000, 풍화에 의한 국내 편마암체의 지질 공학적 물성의 변화, 한국자원공학회지, 37, 262-271.
2. 권오일, 백용, 임성빈, 서용석, 2007, 국내 주요 암종별 사면의 동결-융해에 의한 열화심도 계산, 대한지질공학회지, 17, 3, 359-365.
3. 김성수, 박형동, 1999, 인공풍화실험을 이용한 석재 물성의 변화 연구, 한국자원공학회지, 36, 141-149.
4. 김영택, 이찬희, 이명성, 2005, 부여 정립사지 오층석탑의 보존과학적 풍화훼손도 평가, 자원환경지질학회지, 38, 6, 675-687.
5. 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반하는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 한국자원공학회지, 23, 2, 221-232.
6. 박연준, 유광호, 양광용, 우익, 박찬, 송원경, 2003, 동결-융해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구, 터널과 지하공간, 13, 3, 215-224.
7. 백용, 서용석, 정자혜, 권오일, 2005, 동결융해에 의한 암반 사면의 열화심도 산정, 대한지질공학회지, 15, 3, 325-335.
8. 송원경, 우익, 김복철, 2009, 풍화가속실험을 통한 독도 암체의 풍화특성 분석, 터널과 지하공간, 19, 4, 318-327.
9. 엄정기, 신미경, 2009, 경남 함안군 백악기 이암의 동결-융해에 따른 물성변화 및 미세균열 발현특성, 터널과 지하공간, 19, 2, 146-157.
10. 윤석봉, 박연천, 박성미, 이정은, 이찬희, 최석원, 2006, 논산 관촉사 석조미륵보살입상의 암석학적 특성과 풍화훼손도, 자원환경지질학회지, 39, 6, 629-641.

11. 이찬희, 이정은, 신은정, 김사덕, 2008, 경천사십층석탑의 암석학적 특성과 풍화훼손도, 지질학회지, 44, 6, 765-779.
12. 장현식, 장보안, 이준성, 2004, 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 세일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화, 대한지질공학회지, 14, 4, 401-416.
13. 정형식, 유병옥, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국지반공학회, 13, 6, 73-.
14. 조태진, 이상배, 황택진, 원경식, 2009, 풍화진행에 따른 한라산조면암의 역학적 특성변화, 터널과 지하공간, 19, 4, 287-303.
15. 최석원, 이찬희, 2000, 부여 대조사 화강암 미록보살입상의 물리적 및 화학적 풍화, 지질학회지, 36, 4, 559-574.
16. 尾原祐三, 平田篤夫, 1998, 岩石の風化に関する研究, 墓石調査とその検討結果報告書, 熊本工業大学と熊本大学
17. Chigira, M., 1988, Chemical weathering of mudstone of the Pleistocene Haizume Formation, Niigata Prefecture, central Japan, Journal of the Geological Society of Japan, 94, 6, 419-431.
18. Chigira, M., 1990, A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area, Engineering Geology, 29, 119-138.
19. Chigira, M. and Sone, K., 1991, Chemical weathering mechanisms and their effects on engineering properties of soft sandstone and conglomerate cemented by zeolite in a mountainous area, Engineering Geology, 30, 195-219.
20. Harrison, J. P. and Hudson, J. A., 1997, Engineering rock mechanics - Part 2: Illustrative worked examples. Pergamon, 73-74.
21. Jayaverdena, U. de S. and Izawa, E., 1994, A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from SriLanka, Engineering Geology, 36, 303-310.
22. Nicholson, D. T. and Nicholson, F. H., 2000, Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 25, 1295-1308.

강성승



1993년 조선대학교 자원공학과 공학사
 1996년 강원대학교 자연대학 지구물리학과 이학석사
 2000년 Kumamoto University 토목공학과 Ph.D.

Tel: 062-230-7112
 E-mail: kangss@chosun.ac.kr
 현재 조선대학교 에너지자원공학과 교수

김종인



1994년 조선대학교 자원공학과 공학사
 1996년 조선대학교 자원공학과 공학석사
 2006년 조선대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 062-603-3946
 E-mail: nam4tin@nate.com
 현재 조선대학교 에너지자원공학과 겸임교수

오바라 유조



1987년 Nagoya University, Eng. Dr.

E-mail: obara@kumamoto-u.ac.jp
 現在 熊本大學 大学院自然科學研究所 教授

히라타 아츠오



1992년 Kumamoto University, Eng. Dr.

E-mail: hirata@ce.sojo-u.ac.jp
 現在 崇城大學 Eco-design學科 教授