

## 시간에 따른 강도변화를 고려한 암반사면의 풍화민감특성 분석

박준영<sup>1)\*</sup>, 이정상<sup>1)</sup>, 배성호<sup>1)</sup>, 유영일<sup>2)</sup>, 오정배<sup>2)</sup>, 이두화<sup>2)</sup>

### Weathering Sensitivity Characterization for Rock Slope, Considering Time Dependent Strength Changes

Joon-Young Park, Jeong-Sang Lee, Seong Ho Bae, Yeong-Il Yu, Jung-Bae Oh and Du-Hwa Lee

**Abstract** Rocks undergo weathering processes influenced by changing in pressure-temperature condition, atmosphere, underground water, and rainfall. The weathering processes change physical and chemical characteristics of the rocks. Once the rocks are weathered, the characteristics of them are changed and, because of the changing, several disadvantages such as rock slope failures and underground water spouts are can occur. Before we cut a large rock slope, therefore, we must analyze current weathering conditions of rocks and predict weathering processes in the future. Through the results of such analyses, we can judge reinforcement works. In order to comply with such requests, chemical weathering sensitivity analysis which was analyzed from chemical weathering velocities and other characteristics of rocks has been applied in several prior construction works in Korea. But, It is defective to use directly in engineering fields because it was developed for soils(not rocks), it has too many factors must be considered and the relationships between the factors are not clear, and it is hard to explain the weathering processes in engineering time range. Besides above, because it has been used for isotropic rocks, this method is hard to apply to anisotropic rocks such as sedimentary rocks. According to studies from morphologists (e.g. Oguchi et al., 1994; Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002), time dependent strength reduction influenced by weathering shows a negative exponential function form. Applying this relation, one can synthesize the factors which influence the weathering processes to the strength reduction, and get meaningful estimates in engineering viewpoint. We suggest this weathering sensitivity characterization method as a technique that can explain time dependent weathering sensitivity characteristics through strength changes and can directly applied the rock slope design.

**KeyWords** weathering sensitivity, Time dependent strength change, strength reduction coefficient, rock slope, sedimentary rock

**초 록** 암반(암석)은 생성시와는 다른 온도 압력조건, 대기와 지하수 및 강우 등의 영향으로 풍화작용을 겪게 된다. 풍화작용은 암석을 구성하는 조암광물의 화학적 성질을 변화시키며, 불연속면을 따른 물리, 화학적 제반 특성에 영향을 준다. 암석이 풍화작용을 겪게 되면 암석(암반)의 물성이 저하되는 현상이 나타나 이로 인한 사면의 파괴, 지하수의 유출, 암중간의 차별풍화로 인한 문제가 발생하기도 한다. 따라서, 대규모 사면 절개 시에는 현재의 풍화특성을 분석하여 풍화상태가 앞으로 어떻게 진행될 것인지 예측하고, 이 결과를 토대로 비탈면 보호 및 보강공법에 기준을 판단하는 것이 요구된다. 이러한 요구에 부응하기 위해 기존의 여러 건설사업의 설계단계에서 화학적 풍화속도와 암석의 다른 특성들을 종합하여 분석하는 화학적 풍화민감도 분석 기법이 적용되어 왔다. 그러나 기존의 화학적 풍화민감도 분석은 본래 암반이 아닌 토양의 풍화에 대해 개발된 기법이며 고려되어야 할 변수들의 수가 많고 그 관계가 복잡하며, 공학적 시간단계별로 암반사면의 풍화민감특성을 적용하는데 한계가 있다. 또한, 기존의 방법은 주로 등방성이 강한 화강암질 암석에 특성분석 기법을 적용하여 퇴적암과 같이 이방성이 강한 암반에 적용하기 어려운 문제도 있다. 풍화지형을 연구하는 지형학자들의 연구(Oguchi et al., 1994; Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002)에서 시간에 따라 진행되는 풍화에 의한 암석의 강도저하는 음지수 곱함수의 형태를 나타내는 것을 제안되었다. 이 관계를 공학적으로 적용하면, 풍화에 작용하는 여러 요인들의 결과를 강도저하로 표현할 수 있으며, 강도저하는 암석의 물성을 설명함으로써 공학적으로 의미가 있는 결과를 도출할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 전술한 관계에 의해 풍화진행 시간에 따른 암석의 강도특성 변화를 고려하여 퇴적암에 특화시킨 풍화민감특성 분석을 암반사면의 풍화민감특성을 설명하고 설계에 직접적으로 적용할 수 있는 방법으로 제안한다.

**핵심어** 풍화민감도, 시간에 따른 강도변화, 강도저감계수, 암반사면, 퇴적암

<sup>1)</sup> (주)지오제니컨설턴트

<sup>2)</sup> (주)삼보기술단

\* 교신저자 : jypark@geogeny.biz

접수일 : 2005년 10월 15일

심사 완료일 : 2006년 4월 18일

## 1. 서 론

암반(암석)은 대기중이나 지표 가까이 노출되면서 대기와 지하수 및 강우 등의 영향으로 풍화작용을 겪게 된다. 풍화작용은 암석을 구성하는 조암광물의 화학적 성질을 변화시키며, 불연속면을 따른 물리, 화학적 제반 특성에 영향을 준다. 공학적 관점에서 풍화민감특성분석이란 인위적으로 노출된 암석들이 지표환경 하에서 지하수, 강우(산성비), 대기오염물질 등의 여러 가지 영향으로 공학적으로 사용되는 암반(암석)의 강도 정수가 풍화에 의하여 어느 정도 감소될 수 있는가를 예측하는 분석이다.

외부에 노출되는 비탈면의 암반은 응력개방, 산성비 등 풍화가속화 요인으로 모암의 구성광물 성분에 따라 풍화 진행이 가속화되는데 이러한 작용은 크게 물리적 풍화작용과 화학적 풍화작용으로 나누어 설명할 수 있다. 건조-습윤, 동결-융해의 반복현상 등에 의해 암석 내 균열이 확장되는 현상, 식생 등 생물에 성장에 의해 절리가 확장되는 현상, 절개에 의한 응력 개방, 절개 시 발파와 리핑에 의한 내부 균열의 증가 등이 물리적 풍화작용이라면 이렇게 증가된 균열을 따라 지하수 및 산성비 등의 수분과의 접촉으로 일어나는 화학 반응에 의한 이온용탈, 점토광물의 생성 등이 화학적 풍화작용이라고 할 수 있다. 이와 같이 암석이 풍화작용을 겪게 되면 결론적으로 강도의 저하, 탄성과 속도의 감소 등, 암석(암반)의 물성이 저하되는 현상이 나타나 이로 인한 사면의 파괴, 지하수의 유출, 암중간의 차별풍화로 인한 문제가 발생하기도 한다. 따라서, 대규모 사면 절개 시에는 지질구조 및 모암의 구성성분에 따라 현재의 풍화상태를 등급별로 구분하여 풍화상태가 앞으로 어떻게 진행될 것인지 예측하고 이 결과를 토대로 비탈면 보호 및 보강공법에 기준을 판단하는 것이 요구된다.

기존의 여러 건설사업의 설계단계에서 시행되어 온 화학적 풍화민감도 분석은 임계부하량(critical-load)을 통해 모델링(PROFILE modeling)한 화학적 풍화속도와 암석의 다른 특성들을 종합하여 풍화민감도를 분석하는 기법이다. 화학적 풍화속도 모델링의 경우 본래 토양환경에서 풍화민감도를 분석하는 기법으로 발전되었다. 풍화민감도가 암석에서는 적용이 불합리한 입도의 표면적을 통해 계산하는 화학적 반응속도에 매우 민감하게 작용하는 문제 및 지질학적 반응시간과 실제 암반사면에서 공학적으로 의미가 있는 시간과의 괴리, 풍화요인 상호간의 상관성에 대한 연구의 미비(Hodson et al, 1996; Hodson and Langan, 1999)로 인한 해석상의 주관성 개입 등의 문제로 인해 실제 건설현장에서 우리

가 주로 마주하게 되는 암반사면에 직접적으로 적용하기에는 무리가 있으며, 풍화특성의 공학적 정량화를 통한 설계 반영성이 낮은 문제점 또한 내포하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 풍화작용은 시간에 따라 진행되는 것이고 실제로 공학적으로 문제를 일으키는 것은 화학적 성분의 변화 같은 풍화작용 과정에서 일어나는 미세한 현상들 자체가 아니라 그런 현상들이 종합되어 암석의 물성변화와 같은 외부적 결과로 나타난다는 것에 착안하여 통시적이며, 결과론적으로 시간에 따른 암석 물성의 변화로 풍화현상을 설명하는 것이 더욱 합리적이다. 이러한 관점은 이미 지형학자들이나 자연과학자, 그리고 공학자들에 의해 부분적으로 제시된 바 있으며, 풍화작용의 결과로 나타나는 주된 물성은 암석의 강도와 탄성파속도 특성임이 알려져 있다(Sunamura, 1996; 서만철 외, 1994; 일본토목학회, 2005). 이들 특성은 풍화가 진행됨에 따라 시간에 따라 또한, 깊이 따라 변화해 가는 양상을 보이며 이를 정량화 할 수 있다면 시간단계에 따라 공학적 판단을 내릴 수 있는 기준이 될 수 있다.

풍화지형을 연구하는 지형학자들의 연구에 의하면 (Oguchi et al., 1994; Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002) 풍화에 따라 진행되는 암석의 강도저하는 음지수 함수의 형태로 나타남이 알려져 있다. 이 관계를 공학적으로 적용하면, 풍화에 작용하는 여러 요인들의 결과를 강도저하로 표현할 수 있으며, 그 지역의 환경인자들과 다른 여러 요인들을 강도저감계수라는 개념에 묶어 그것을 그 지역, 그 암종의 특성으로 특수화시킴으로써 복잡한 요인들에 의해 야기되는 분석의 복잡성을 제한할 수 있고 공학적으로 접근하기 용의한 강도라는 암석의 물성을 설명함으로써 공학적으로 의미가 있는 결과를 도출할 수 있다.

건설계획 단계에 있는 철도의 암반사면의 설계단계에서 기존의 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 수행된 이 연구에서는 암반사면의 풍화민감특성을 설명하고 설계에 직접적으로 적용할 수 있는 방법으로 풍화진행 시간에 따른 암석의 강도특성 변화를 고려한 풍화민감 특성 분석을 제안한다.

또한, 이 연구에서는 화강암이나 화강편마암 등, 비교적 조립질의 등방성이 강한 암석을 대상으로 개발되고 사용되어 기존 기법의 암석의 특성에 관한 부분들도 일부 개선하여 사면 형성 시에 풍화현상에 상당히 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있는 이방성이 강하며 비교적 굳기가 무른 셰설성 퇴적암이나 석회암, 혹은 화산암 (서만철 외, 1994; 박형동, 2002; 윤지선, 2002; 김중휘 외, 2005) 등의 여타 암석에서도 사용가능한 내구성

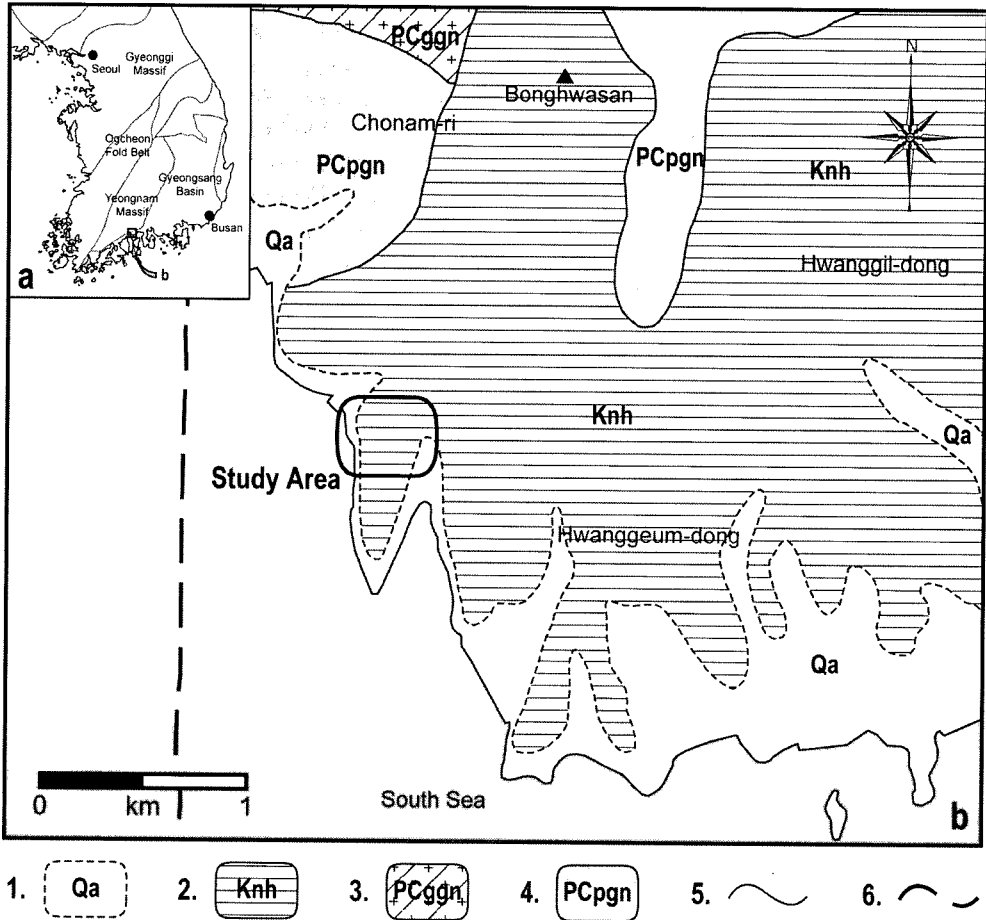


Fig. 1. Geological map of the study area(1. Alluvium, 2. Cretaceous Hasandong Formation, 3. Pre-cambrian granitic gneiss, 4. Pre-cambrian porphyroblastic gneiss, 5. Geological boundary, and 6. Inferred fault).

시험이나 질리분포분석 등의 분석기법을 검토하고 최신 연구 동향을 반영하여 퇴적암에 특화된 기법을 적용하였다.

## 2. 연구지역의 지질특성 및 기존사면 현황

연구 대상지역은 전라남도 광양시 초남리에 해당하는 지역으로 신광양에서 광양읍을 잇는 865번 지방도가 해안을 따라 과입지역을 통과하며 현재 광양항 서측 인입도로가 공사중인 지역이다(Fig. 1).

연구지역은 한반도 지체구조상 경상분지에 속하며, 경상누층군의 하위 층군인 백악기 신동층군의 하산동층 및 이를 관입하고 있는 중생 내지 염기성암맥류가 분포하며, 계곡이나 하천 및 해안을 따라 제 4기 충적층

이 분포하고 있다(한국동력자원연구소, 1989)(Fig. 1).

하산동층은 일반적으로 하위의 낙동층, 상위의 진주층과 정합적인 관계를 보이나 연구지역에서는 낙동층이 없이 반상변정질편마암위에 부정합으로 놓인다. 주로 유백색 내지 담회색의 중립 내지 조립의 사암과 자색의 이암의 교호층으로 이루어지며, 이 외에도 회색 내지 녹회색의 실트질 이암이 함께 교호하기도 한다. 사암의 경우 일부는 역질을 포함하기도 하며 자색이암의 경우에는 내부에 혼적화석 및 고토양기원의 석회질 단괴나 석회층을 포함하기도 한다.

연구 대상사면은 현재 공사중인 도로사면에 인접하여 북측에 위치하며 STA. 1k085~1k480의 구간이며 대절토 구간은 STA. 1k200~1k360의 160m 구간으로 사면 높이가 40m에 해당한다(Fig. 2). 현재 공사중인 도로사면

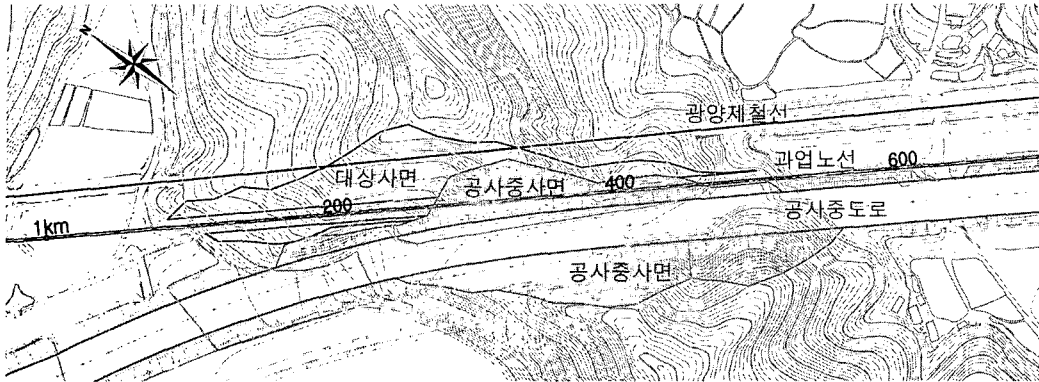


Fig. 2. Locations of the studied slope and the constructing slopes.

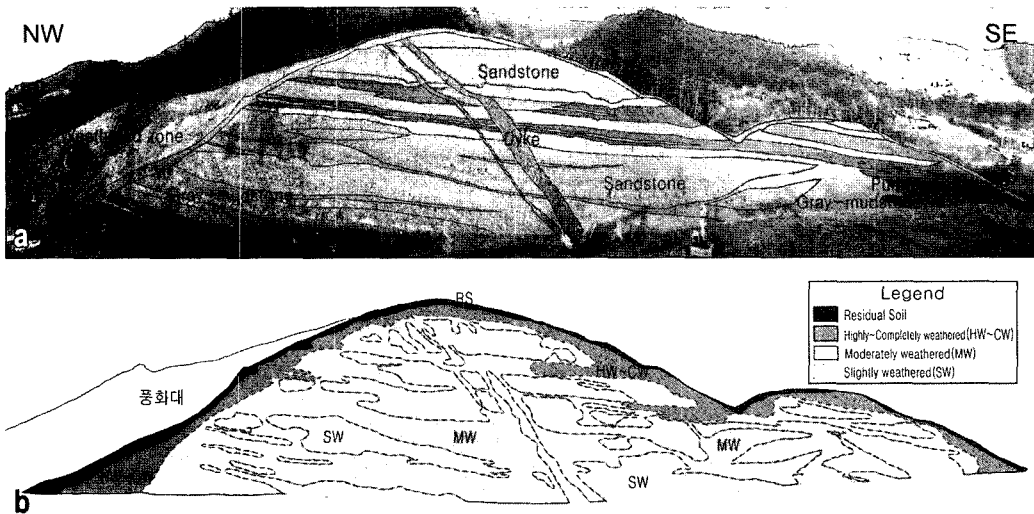


Fig. 3. Descriptions of the constructing slope(a. Geology; b. Weathering rate).

은 담회색사암, 회색이암, 자색이암으로 구성되며 국부적으로 역질사암이 협재한다. 자색이암의 경우 상대적으로 강도 및 풍화에 대한 저항성이 낮을 것으로 판단되며, 회색이암은 국부적으로 특정구간에 풍화정도가 심한 특징을 보인다. 사면을 가로질러 염기성암맥이 2조 분포하며 북서 측에 단층대와 연관된 심한 풍화대가 분포한다. 시공 중 도로사면은 현재 시공 중인 상황임에도 불구하고 상대적으로 풍화의 정도가 심한 편이며 풍화가 진행된 구간과 그렇지 않은 구간의 암반 상태의 차이가 크다(Fig. 3).

대상사면에 대한 시추 및 물리탐사 결과를 기초로 하여 시공 중 도로사면의 암중 분포 및 풍화도 분포를 대상사면에 투영하면 사면 형성시의 대상사면의 암중 및 풍화도 특성을 추정하면 Fig. 4와 같다. 대상사면은 기존사면과 유사하게 사암과 이암류가 교호하는 형상을

보이며 일부 사암은 고 하천의 채널형태로 설형의 경계를 보인다. 퇴적암의 층리는 동북동 내지 북동 방향의 주향과 남동남 내지 남동 방향의 20도 내외의 경사를 보이며 채널 사암이 분포하는 구간의 경우 30도 내외의 비교적 높은 경사를 가질 것으로 추정된다. 5~20m의 영향권을 가지는 단층대가 사면의 중앙부를 N70~80°W 방향으로 관통할 것으로 예상되며 또한, 두 조의 염기성 암맥이 N10°E 내외로 사면의 중앙부를 관통할 것으로 예상되어 이들 단층대와 염기성암맥 및 채널사암 등의 경계부를 따라 주로 풍화가 진행되었을 것으로 예측된다(Fig. 4).

시공 중인 도로사면 및 기존 865번 지방도의 사면의 풍화상태를 고려할 때 담회색 사암에 비해 자색이암과 회색이암의 특정 층준이 가장 풍화에 취약할 것으로 예상되며 세 가지 암종과 MW이상 풍화된 부분과 SW이

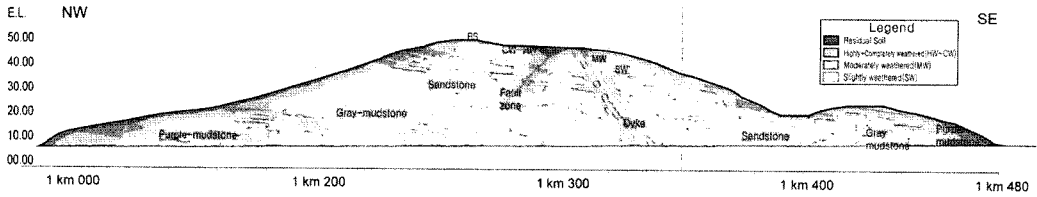


Fig. 4. Expected geology and weathering rate of the newly planned slope.

상의 신선한 부분의 풍화도를 기준으로 총 6개의 구간으로 대분하여 해석에 활용하였다(Fig. 4).

### 3. 기존의 풍화민감도분석

기존의 여러 건설사업의 설계단계에서 시행되어 온 화학적 풍화민감도 분석은 임계부하량(critical-load)을 통해 모델링(PROFILE modeling)한 화학적 풍화속도와 암석의 다른 특성들을 종합하여 풍화민감도를 분석하는 기법이다. 기존 방법은 다음과 같은 방법으로 수행된다. 먼저 기초자료를 얻기 위한 편광현미경, XRD, XRF 등을 이용한 구성암석의 암석학적 분석과 가혹용해시험, 산침투시험 등의 지화학적 분석을 수행하고 이로부터 획득한 자료를 기초로 반응속도 모델링(PROFILE modeling)을 수행하여 화학적 풍화속도 분석을 수행하고 이를 여타의 풍화지수와 비교분석한다. 다음으로 화학적 풍화를 가속시키는 물리적 풍화요인, 즉 단층, 절리 등의 불연속면의 영향을 고려하기 위한 방법으로 불연속면 밀도분포분석을 수행하여 최종적으로 화학적 풍화속도 분석과 종합한다.

그러나 이 기법은 여러 가지 한계를 내포하고 있는데 그 중 가장 근본적인 것은 풍화속도 모델링 기법인 PROFILE modeling이 식생이 포함된 토양환경을 기반으로 개발된 기법이라는 것이라 할 수 있다. Hodson et al (1996), Hodson and Langan (1999) 등의 연구에 따르면 PROFILE modeling에 의한 이온용탈속도는 반응면적을 좌우하는 입자크기에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타나 있다. 토양의 경우는 광물입자들 간의 결합력이 제거되어 있는 형태로 산성비(혹은 지하수)가 토양전체로 침투하여 광물입자의 표면 전체와 반응하는 것이 가능하므로 입자의 크기를 통해 반응면적을 계산하는 것이 가능하나 암반의 경우에는 이것이 불가능하다. 물론 암반의 경우에도 암석 내 공극을 통해 산성비(혹은 지하수)가 침투·유동될 것이나 이는 토양과는 달리 암석을 구성하는 광물입자의 표면적과는 차이가 있으며 교질작용 등의 영향으로 같은 면적에서 반응이

일어난다고 하여도 그 반응속도에는 현격한 차이가 있을 것으로 생각된다. 따라서, 구성광물의 입자크기를 기반으로 수행되는 PROFILE modeling에 적합하게 입력할 수 있는 표면적을 결정하는 것은 사실상 어려우며 설사 가능하다 하더라도 절리나 여타의 미소 크랙 등 암석 내에 포함된 여타의 불연속면의 영향으로 이를 정량화하기는 힘들 것으로 생각된다. 또한 암반 내에서 산성비(혹은 지하수)는 불연속면 분포에 밀접하게 관련되어 유동하고 한 쪽으로의 유동이 크면 상대적으로 주변에서는 극도로 유동이 제한되는 경향이 있어 이를 고려하기는 것이 불가능해 보인다.

이러한 근본적인 한계 이외에도 기존 기법은 고려해야 할 변수가 너무나 많으며 이들의 상호간의 상관성도 잘 밝혀지지 않았으며, 이온용탈속도를 통한 화학적 풍화민감도가 설계에서 활용할 수 있는 강도특성 등의 물성치 변화로 직접적, 정량적으로 환산할 수 없다는 공학적인 문제가 있다.

물론 이 기법이 여러 가지 한계를 내포하고 있는 것은 사실이나 현재까지 많은 현장에서 이용되어 온 기법이며, 풍화현상에 대한 공학적이고 분석적인 접근방법임에는 분명하다. 또한, 차후의 강도변화와의 비교관계 연구에도 필요할 것으로 생각되어 이 연구에서는 기존의 화학적 풍화민감도 분석을 화강암 등의 등방성 암석 뿐만아니라 퇴적암에 적용이 가능하도록 부분적으로 개선하여 수행하였다.

### 3.1 풍화취약광물 진단

암석의 풍화에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중 하나는 암석의 구성광물이다. 동일한 환경에서도 암석의 종류에 따라 풍화에 취약한 광물을 포함하는 경우 훨씬 빠르게 풍화가 진행된다. 특히 산성비에 취약한 원소를 포함하는 광물이나, 팽창성 점토광물 및 방해석 등 수분에 취약한 광물을 포함하는 경우는 풍화에 매우 취약한 특징을 보인다. 따라서, 풍화에 얼마나 민감한가를 고려하기 위해서 반드시 암석의 성분 및 구성광물을 분석하여 풍화취약광물이 얼마나 포함되어 있는가를 정

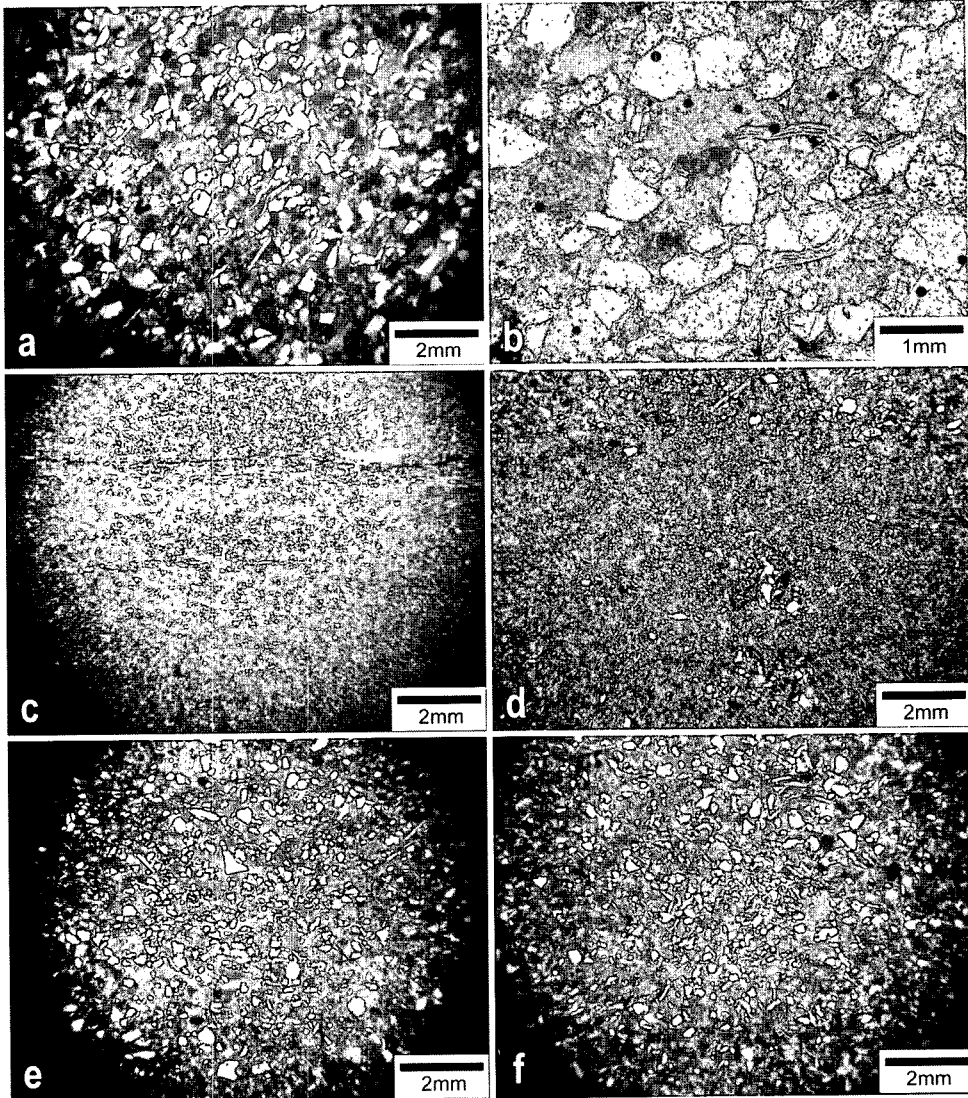


Fig. 5. Microscopic photographs of rocks distributed on the slope(a. SW sandstone; b. MW sandstone; c. SW purple-mudstone; d. MW purple-mudstone; e. SW gray-mudstone; f. MW gray-mudstone).

량적으로 확인할 필요가 있다. 또한, 화학적 풍화민감도 분석을 위한 화학적 풍화등급을 계산하는데 있어서도 정확한 구성광물 및 성분의 함량이 기초 입력자료가 되므로 대상사면을 구성하고 있는 암종들의 구성광물 분석 및 성분 분석이 필수적이다.

### 3.1.1 현미경을 이용한 풍화취약광물 분석

육안 관찰이 불가능한 암석의 구성광물 및 조성을 파악하고 풍화취약광물의 유무 및 함량을 파악하기 위해서 현재 시공 중인 도로사면에서 나타난 특징을 기초로

세 가지 암종의 두 가지 풍화등급을 적용, 총 6 종의 시료군을 채택하고 이들 암석 시료를 0.03mm 두께의 박편으로 가공하여 편광현미경을 이용해 분석하였다. 개별 광물들의 풍화 및 변질상태, 퇴적암의 광물입자 사이를 채우고 있는 시멘트 물질과 2차적 풍화광물의 유무를 확인하였으며, 풍화에 취약한 광물들을 동정하여 전반적인 암석의 풍화상태를 파악하였다.

사암은 석영, 사장석, 알카리장석을 많이 함유하고 있고, 유색광물로 흑운모 등을 많이 함유하고 있다(Fig. 5 a, b). 주구성광물로 석영이 우세하게 산출하며 장석과

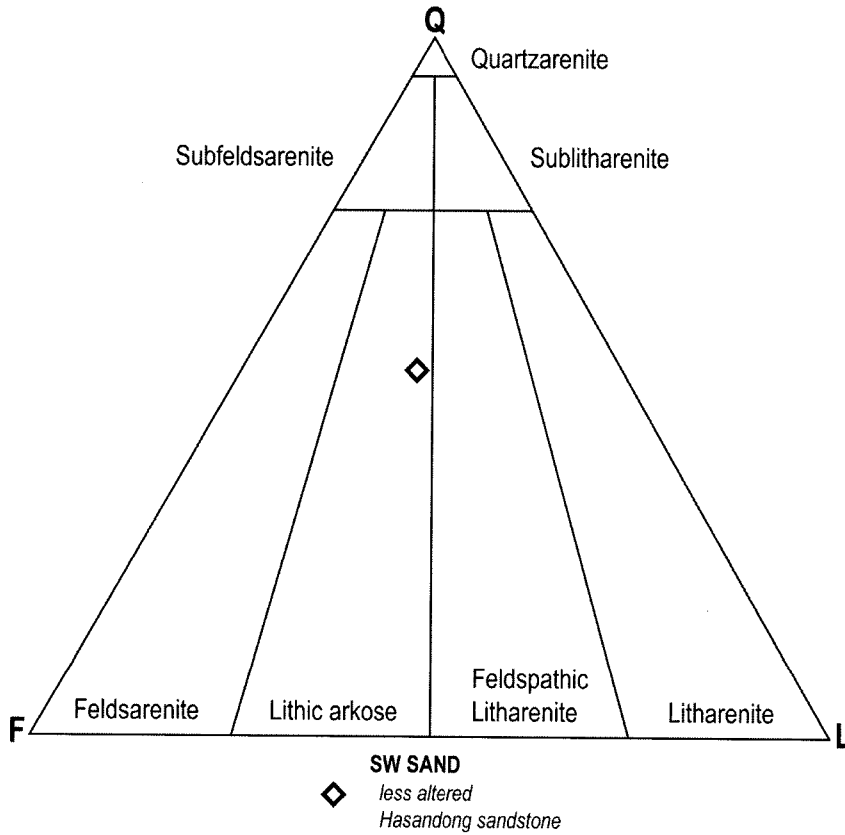


Fig. 6. QFL-diagram suggested by Folk(1968) for the SW sandstone.

암편등도 함께 관찰된다. 장석은 주로 알바이트 쌍정인 특징적인 사장석이 우세하며 대부분 점토광물 등으로 교대, 변질되어 있다. 사암의 광물조성을 석영(Q), 장석(F), 암편(L)의 양을 기준으로 살펴보면 암편질 장석사암에 속하는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 석영(평균 53%)은 주로 단결정의 직소광 결정이 우세하게 산출된다. 장석(평균 26%)의 경우 정장석보다는 사장석이 우세하게 나타나며 풍화과정 및 속성작용 등에 의해 다른 종류로 교질화되어 산출한다. 암편(평균 21%)은 대부분 변성암기원 또는 화산암기원이며 쳐어트와 실트의 일부가 소량으로 산출한다. 운모류는 가장 빈번하게 산출하는 부속광물로 조립질 사암보다는 세립질 또는 실트암에서 많이 관찰된다. 사암의 광물조성은 석영이 가장 많고 사장석, 정장석, 녹니석, 운모류 순이며 시료에 따라 탄산염 물질이 포함되어 있는 경우는 방해석의 함량이 높다.

자색이암 및 회색이암 등 이암은 대개 녹회색 내지 회색 또는 자색의 암색을 보여준다. 현미경 하에서 점

토광물들은 산화철의 피복에 의하여 자색을 띠며, 석영 입자와 철산화물(헤마타이트 등), 일라이트 내지 운모들이 주구성 광물로 산출된다(Fig. 5 c, d, e, f). 또한 캘크리트(calcrete) 인트라클라스트(intraclast)질의 역이 흔히 발달하며 토양기원의 탄산염암이 빈번하게 발달된다. 회색이암은 자색이암에 비해 입자가 크며 일부 실트질에 해당하는 크기의 입자들도 상당수 포함하고 있으며(Fig. 5 c, d), 광물조성은 석영이 가장 많고 사장석, 그리고 녹니석과 운모류가 시료에 따라 순서를 달리하며, 정장석 순으로 나타난다. 자색이암의 경우는 입자의 크기가 미세한 점토질 물질의 함량이 높으며, 광물조성은 석영이 가장 많고 사장석, 녹니석, 운모류, 정장석 순으로 나타나고 방해석을 포함한다. 세 암종 모두 화강암질암, 혹은 응회질암에서 기원하는 것으로 생각되며 이에 기원한 장석류의 함량이 높으면 고토양 기원의 방해석을 상당량 함유하고 있는 것으로 나타난다.

2차적 풍화광물 분석결과 현미경 하에서 나타나는 풍화의 영향은 장석류가 견운모화되어 운모류나 일라이

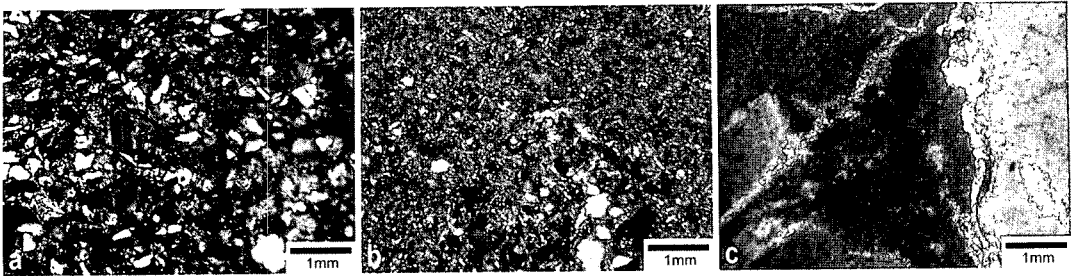


Fig. 7. Microscopic photographs of weathering materials(a. Feldspar is influenced by sericitization and turned into mica and illite; b. Feldspar and mica is changed into chlorite and illite; c. Clay parts are turned into secondary minerals such as illite and hematite).

Table 1. Mineral compositions from XRD quantitative analysis.

Rocks		Mineral composition (Weight%)						
Rock type	Weathering rate	Quartz	K-feldspar	Plagioclase	Mica	Chlorite	Calcite	Other
Sandstone	MW	64.1	9.3	16.3	3.2	7.0	-	0.1
	SW	53.2	8.5	20.7	0.9	5.7	11.0	0.3
Gray-mudstone	MW	48.8	5.1	25.8	3.2	1.8	15.1	0.2
	SW	48.1	5.7	28.0	3.9	7.6	6.7	-
Purple-mudstone	MW	44.2	2.1	29.1	4.2	9.8	10.5	0.1
	SW	41.9	9.2	30.0	4.3	12.3	2.3	-

트 등의 점토광물로 변질 되는 양상, 장석류와 운모류가 녹니석과 일라이트로 변질되는 양상, 또한, 기질을 이루는 점토광물이 철을 함유한 헤마타이트 등의 철산화물로 변질되는 양상이 잘 나타나고 있다(Fig. 7). 석영에 비해 풍화에 약한 장석의 함량이 상대적으로 높게 나타나며 풍화 시에 수분에 쉽게 용출되는 토양기원의 방해석을 포함하고 있어 일반적인 암석들에 비해 풍화에 대한 저항도가 낮을 것으로 예상되며 특히 이암의 기질부는 쉽게 변질되어 점토광물화 되는 양상이 나타나며 입자의 크기와 성분을 고려할 때 자색이암의 풍화에 대한 저항도가 가장 취약할 것으로 생각된다.

### 3.1.2 전암 XRD 분석

편광현미경을 이용한 박편분석만으로 관찰하기 어려운 실투크기 이하의 광물에 관한 정보를 포함한 전체암석의 구성광물 및 함량을 분석하기 위해 XRD를 통한 광물동정 및 정량적 함량분석을 수행하였다. 여기에는 X-선 회절분석기와 SIROQUANT program이 사용되었으며 결과는 Table 1에 정리하였다. 정량분석 결과는 PROFILE modeling 시에 광물조성에 대한 정보를 입력하는 기초자료로 활용하였다.

전암 XRD 분석의 결과그래프는 Fig. 8과 같으며 사암 및 이암류로 구성된 시료들은 석영을 가장 주된 광물조성으로 포함하고 있고 녹니석, 일라이트 등의 점토광물들이 함께 관찰된다. 풍화 시에 물과 반응하여 일라이트 등을 생성하는 정장석 및 스�멕타이트류의 점토광물을 생성하는 사장석의 함량이 상대적으로 높으며, 또한 일부 시료에서는 토양기원의 탄산염암에서 기인한 탄산염암(방해석)의 피크가 관찰된다. 전암 XRD 분석결과 풍화취약광물 및 풍화 시 점토광물을 생성할 수 있는 광물들의 함량이 높아 정밀한 점토광물 분석이 요구된다.

### 3.1.3 점토광물 분리실험을 통한 2차적 풍화광물 분석

퇴적암, 특히 이암의 경우 점토광물의 함량이 높으며 이는 일반적으로 풍화작용을 가속화시키는 요인으로 작용한다(박형동, 2002). 그러나 전암분석만으로는 점토광물의 종류와 함량을 밝혀 낼 수 없으므로 점토크기의 입자를 추출하여 점토광물에 특화된 분석을 필요로 한다. 이를 위하여 원심분리기를 이용 2 $\mu$ m 이하의 입자들을 추출하여 이를 통해 정향시료를 제작한 후 3-35° 구간에서 2°(2 theta)/min의 조사속도로 분석하였으며



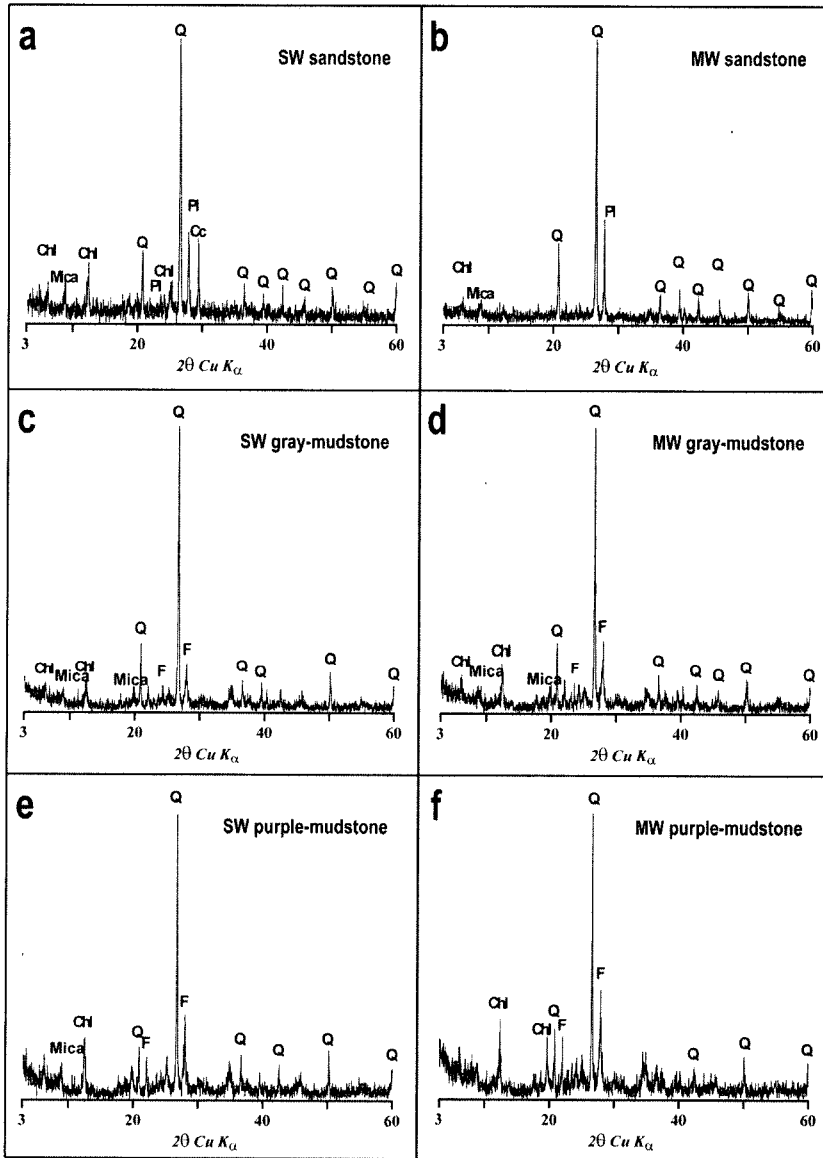


Fig. 8. Peaks resulted from bulk XRD analysis(a. SW sandstone; b. MW sandstone; c. SW gray-mudstone; d. MW gray-mudstone; e. SW purple-mudstone; f. MW purple-mudstone)

이후 열처리와 화학처리를 통해 점토광물의 종을 확인하였다(Fig. 9).

분석결과, 사암 내 점토크기의 입자는 녹니석, 일라이트, 운모류, 석영 등으로 구성되어 있으며 풍화된 시료와 풍화 후 시료 사이의 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 회색이암의 경우 녹니석, 일라이트, 운모류, 석영, 정장석, 사장석, 및 방해석의 피크를 보여주며, 자색이암의 경우 녹니석, 일라이트, 운모류, 석영 및 장석류로

구성되어 있다(Fig. 9). 특히 이암류들의 경우 풍화된 시료에서는 장석류의 피크가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이는 장석류가 풍화작용에 의해 줄어들거나 새로운 점토광물로 전이되었음을 시사한다. 장석류 중 특히 사장석의 경우 수분과 접했을 때 팽창성이 높은 스멕타이트류의 점토광물을 생성할 수 있으므로 팽창성 점토에 대한 주의가 요구된다.

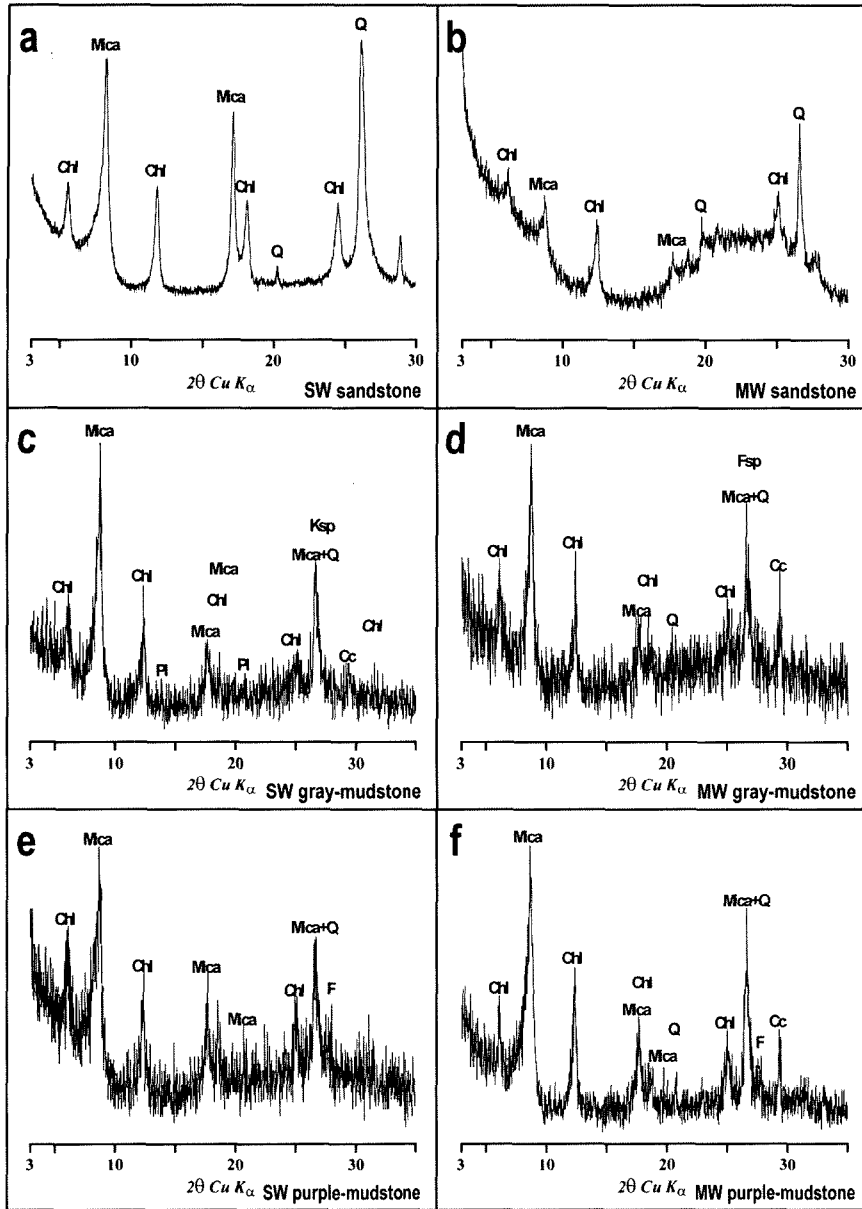


Fig. 9. Peaks resulted from oriented XRD analysis for clay minerals(a. SW sandstone; b. MW sandstone; c. SW gray-mudstone; d. MW gray-mudstone; e. SW purple-mudstone; f. MW purple-mudstone).

### 3.1.4 팽창성 광물 분석

점토광물 중 벤토나이트나 몬트모릴로나이트와 같은 스�멕타이트류는 수분과 접촉시에 팽창성이 높아 풍화에 더욱 민감하며 풍화작용을 촉진하는 촉매역할을 한다(서만철 외, 1994). 대상사면을 구성하는 암석 내에 이러한 팽창성 광물의 함량이 높으면 풍화에 대한 저항

성이 낮아져 수년 내에 암반의 등급이 낮아질 정도의 변화를 보일 수 있으므로 설계 당시의 사면 구매 등 설계정수만을 적용하여 시공을 하는데 무리가 있을 수 있다. 이러한 팽창성 점토광물의 함유유무와 함량을 확인하기 위하여 팽창성 점토광물을 함유할 가능성이 높은 회색이암과 자색이암의 이암류 암석에 대하여 점토코

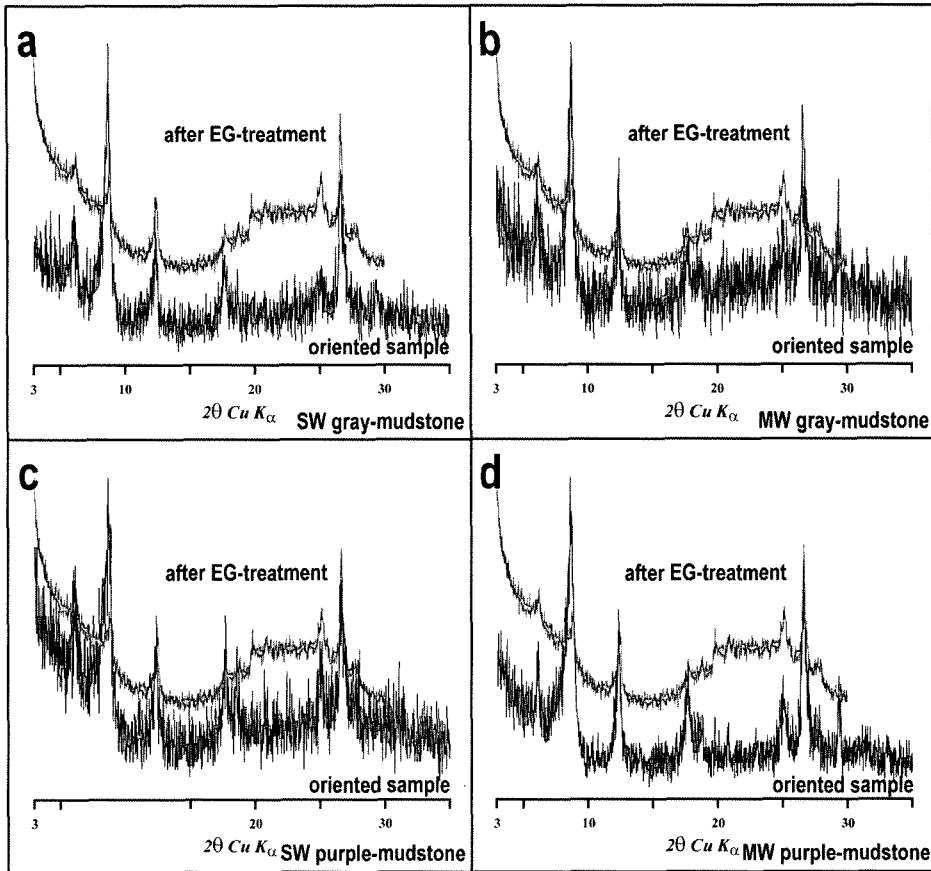


Fig. 10. Peaks resulted from Ethylene-glycol treated XRD analysis for the swelling clay minerals(a. SW gray-mudstone; b. MW gray-mudstone; c. SW purple-mudstone; and d. MW purple-mudstone).

기의 입자를 분리한 후 에틸렌글리콜(ethylen glycol)로 포화시킨 시료를 동일 조건에서 분석하였다(Fig. 10).

분석결과 모든 시료에서 팽창성 점토가 팽창하여 X선의 회절양상이 달라졌음을 의미하는 피크의 경도가 거의 없거나 미미한 것으로 나타나 대상사면을 구성하는 암석들은 스멕타이트류의 점토광물을 함유하지 않는 것으로 판단된다. 그러나, 사장석의 높은 함량과 하산동층 내 적색이암을 바탕으로 잘 발달된 버티졸 고토양 연구를 통해 하산동층의 형성 당시 스멕타이트류의 점토가 존재했음을 지시하는 토양구조들이 현재에도 잘 보존되어 있음(Paik and Lee, 1998; Paik, 1999)을 고려할 때, 본래 이 암석에는 팽창성 점토광물인 스멕타이트류가 함유되어 있었으나 속성작용의 결과로 원래 존재했던 스멕타이트류의 팽창성 점토가 일라이트, 녹니석등으로 전이하는 과정으로 추정할 수 있다.

### 3.2 화학적 풍화민감도 분석

화학적 풍화민감도 분석을 위해서 산성비 등의 풍화 가속화 요인들의 직접적인 공격에 대한 민감도를 파악하고자 산성용액에 암석을 직접 침수시켜 그 반응량을 분석하는 가혹용해시험을 수행하고 광물분석과 가혹용해시험 등의 시험자료와 화학적 풍화에 민감한 작용을 하는 강수량, 기온분포 등의 배경요인들을 입력자료로 질량평형(mass-balancing) 이론과 임계부하량(critical loads) 이론에 기반한 PROFILE modeling을 수행해 풍화속도 모델링을 실시하고 이를 암석을 대상으로 개발된 여러 풍화지수 및 풍화이력에 대한 분석을 통해 검증한 후 암석의 풍화민감도 정수를 산정하였다. 또한, 화학적 풍화를 가속화 시키는 단층, 절리, 층리 등의 불연속면의 영향을 고려하기 위하여 퇴적암에 특화된 불

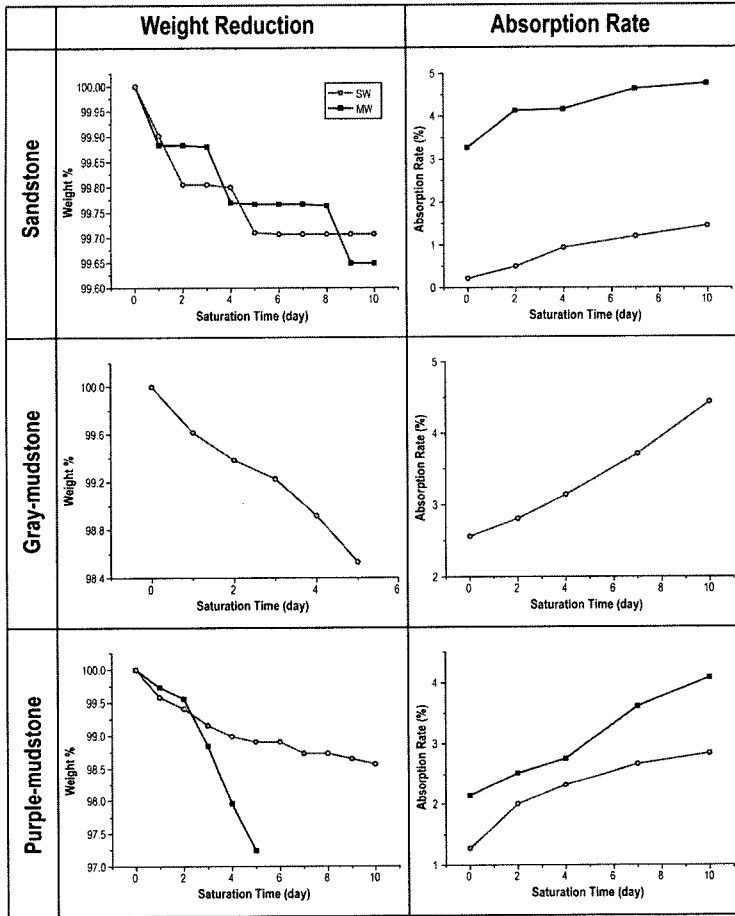


Fig. 11. Weight reduction and absorption rate graphs of the samples.

연속면 밀도분포 분석을 수행하고 최종적으로 이들을 종합하여 재해도의 개념을 도입한 화학적 풍화등급도를 작성하였다.

### 3.2.1 가혹용해시험

지표로 노출되기 전의 암석은 일반적으로 pH7~8의 중성 내지 약염기성의 지하수와 반응하나 지표에 노출되면 응력개방 및 발파나 리핑 등으로 인한 내부 손상에 의해 미세균열이 증가되어 반응 면적이 늘어난 상태로 산성비와 직접적인 물리화학적 반응을 경험하게 된다. 이를 직접적으로 시험하기 위해서는 반응속도를 빠르게 증가시킬 필요가 있는데 본 시험에서는 산의 공격에 의한 풍화 진행속도를 빠르게 하기 위하여 황산원액을 희석하여 pH 1의 산용액을 제작하고 화학적 풍화에 따른 풍화진행 정도를 파악하기 위하여 산용액에 침수시킨 시험편에 대해 시간에 따른 질량 감소와 흡수율의

변화를 측정하였다. 침수 시간에 따른 흡수율의 변화 정도를 파악하기 위하여 시험편의 침수시간은 2, 4, 7, 10(일)으로 설정 하였으며, 침수 시간에 따른 시험편의 질량 변화를 조사하기 위하여 시험편의 침수시간은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10(일)로 설정 하였다. 시료 내부까지 산용액이 완전 침투되도록 하기 위하여 시험편을 산용액에 완전히 침수시키고 침수를 마친 시험편은 즉시 증류수로 산을 제거하여 염이 형성되는 것을 막은 후 105℃에서 5시간 동안 건조시켜 측정하는 작업을 반복 수행하여 정확한 암석만의 질량변화를 분석하였다. 암종과 풍화등급별로 총 6종의 암석시료에 대해 시험하였으며 풍화정도에 따라 변화가 심해 결과를 얻지 못한 풍화된 회색이암을 제외하고 총 5종의 암종에 대한 시험결과를 정리하면 Fig. 11과 같다.

일반적으로 가혹용해시험에서 시간에 대한 질량감소는 암석을 이루는 광물 중 일부가 용해되거나 결정 입

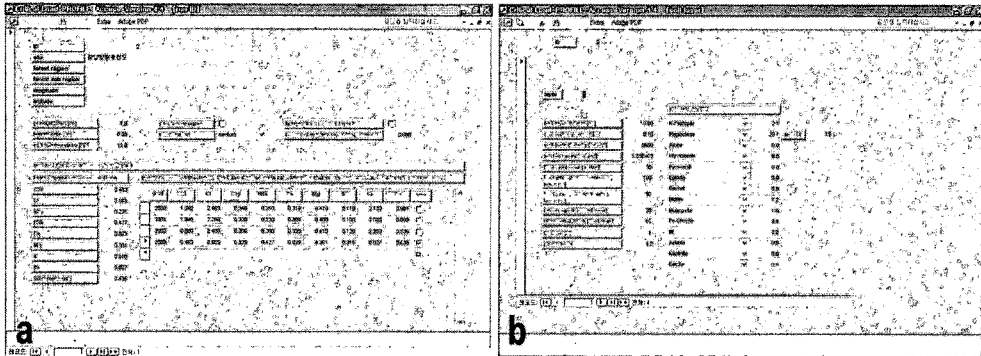


Fig. 12. Sheets for the Environmental factors(a) and the mineral contents(b) in the the PROFILE modeling program.

자의 결합이 파괴되어 나타나는데 일반적으로 흡수수 함수의 감소곡선을 보이며 일정 시간이 지나면 수렴하는 현상을 보이나 대상사면에서 채취된 시료들은 암종 및 풍화정도에 따라 산에 대한 풍화정도가 다르게 나타나긴 하지만 모든 암종이 10일이 경과된 후에도 지속적인 감소를 나타내 일반적인 암반에 비해 대상사면 지역은 전반적으로 산성비에 의한 풍화촉진작용에 취약할 것으로 판단된다. 흡수율은 암석 내부의 균열 발달 상태를 간접적으로 나타내는데 이 또한 시간에 따라 지속적으로 증가하는 현상을 보이고 있어 산침투에 의해 암석 내 균열발달이 지속적으로 이루어지고 있다는 사실을 나타낸다. 따라서 전반적으로 타 지역의 암석에 비해 대상지역의 암석들은 산에 의한 공격에 민감하게 반응하는 것으로 해석할 수 있어 사면 형성이후 주의가 요구된다.

암종별 질량감소율은 회색이암>자색이암>사암의 순으로 나타나며 사암에 비해 상대적으로 자색이암의 질량감소율이 큰 것을 알 수 있는데, 이는 이암류가 입자의 크기가 작아 반응면적이 넓고 점토광물의 함량이 높아 산 반응에 의한 공격에 더욱 민감하기 때문으로 판단된다. 흡수율의 경우에는 신선한 경우에는 이암류가 높으나 풍화가 일어난 경우에는 사암이 더 높은 현상을 보이는데 이는 화강암과 마찬가지로 입자가 조밀집인 경우 물리적 풍화현상의 영향이 균열의 발달을 가속화해 화학적 풍화 속도를 증가시키는 요인으로 작용하기 때문으로 볼 수 있다.

**3.2.2 풍화속도 모델링 분석**

산성화를 만드는 물질에 대한 질량평형이론과 임계부하량이론에 따라 풍화의 진행정도 즉, 풍화민감도를 결정하는 이론에 대해서는 1980년대 후반부터 연구가 진행되어 90년대 중반 유엔유럽경제위원회(UNECE)에서

발간한 보고서를 기점으로 활발하게 연구되었으며 이를 계산하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다 (Nilsson and Grennfelt, 1988; Sverdrup and Warfvinge, 1988; Werner and Spranger, 1996; Posch et al., 1997). 이러한 방법들 중 PROFILE model을 이용한 방법이 가장 구체적인 자료에 기반하고 정량적인 분석기법으로 알려져 있다(Warfvinge and Sverdrup, 1995; Hodson and Langan, 1999).

PROFILE modeling은 질량평형과 임계부하량에 기초한 수학적, 생지화학적 모델이다. 이는 지반의 산집적 효과와 암석 및 토양화학의 여러 가지 요인을 계산하기 위해 제안된 것으로, 특정지역의 자연적인 풍화환경과 대기오염 물질에 대한 산성비를 주된 요인으로 하는 화학적 풍화속도를 당량/면적/시간의 단위로 시뮬레이션하는 모델이다. PROFILE modeling을 수행하기 위해서는 PROFILE modeling 프로그램을 이용 먼저 강수량, 연평균기온, 강하물의 성분 등 자연환경인자에 대한 자료를 구축하여 해당 스위트(Fig. 12a)에 입력하고 SIROQUANT를 이용한 광물정량분석의 자료를 입력(Fig. 12b)하여 암석의 화학종 용출특성, 용출화학종들의 광물과의 반응특성, 용출된 양이온들의 양이온 교환반응 속도를 분석하여 전체적인 풍화에 의한 이온량의 감소를 계산하게 된다.

대상사면에서 채취된 암종과 풍화도를 고려한 6종의 시료에 대해서 모델링한 결과 전체 이온과 주요 양이온의 이탈속도를 정리하면 Table 2와 같다. 이를 단일 광물의 풍화속도를 기준으로 제시된 풍화등급(Table 3)과 비교하면 사암의 경우 풍화된 경우와 그렇지 않은 경우 각각 0.410, 0.478 keq/ha/yr로 class 2의 속도가 예측되며 회색이암의 경우 각각 0.682, 0.696keq/ha/yr로 class 3에, 자색이암의 경우 1.318, 0.940keq/ha/yr로 class 3 내지 4에 해당하여 자색이암이 감람석, 휘석, 방해석 등

Table 2. The results of PROFILE modeling.

Rocks		Chemical weathering rate (keq/ha/yr)							
Rock type	Weathering rate	BC+Na	Ca	Mg	K	Na	Al	Si	PO4
Sandstone	MW	0.410	0.066	0.092	0.062	0.191	1.089	3.488	0.000
	SW	0.478	0.158	0.061	0.042	0.217	1.062	3.499	0.001
Gray-mudstone	MW	0.682	0.293	0.049	0.041	0.299	1.420	4.619	0.001
	SW	0.696	0.208	0.117	0.047	0.324	1.601	5.133	0.001
Purple-mudstone	MW	1.318	0.714	0.172	0.037	0.395	1.929	6.058	0.004
	SW	0.940	0.329	0.175	0.070	0.367	1.908	6.072	0.002

Table 3. Weathering classes of minerals

Class	Chemical weathering rate (keq/ha/yr)	minerals
1 (inert group)	<0.20	quartz, zircon
2	0.21 ~ 0.50	K-feldspar, muscovite
3	0.51 ~ 1.00	plagioclase, amphibole, biotite
4	1.01 ~ 2.00	garnet, olivine, pyroxene, dolomite
5 (fast weathering)	>2.00	calcite

과 같이 지표환경에서 불안정한 광물과 같은 등급을 보여 풍화에 가장 민감할 것으로 예측된다.

### 3.2.3 화학적 풍화이력 및 풍화지수 분석

PROFILE modeling은 토양 상태의 광물들에 대한 화학적 풍화 반응을 모델링하기 위해 개발된 것으로 암석에 직접적으로 적용하기에는 반응속도를 좌우하는 입자크기 설정의 문제나 반응면적 계산, 암중 레이어의 구분 문제 등에 어려움이 있으므로 암석을 대상으로 개발된 여러 풍화지수 및 풍화이력에 대한 분석을 통해 이를 검증할 필요성이 제기된다.

화학적 풍화에 의해 암석(광물) 중의 원소는 천천히 용탈되며, 용탈되는 양과 속도는 원소에 따라 다르다. 이를 이용해서 이동성이 큰 화학종(알칼리금속, 알칼리 토금속)과 이동성이 작은 화학종( $TiO_2$ ,  $FeO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ )과의 비를 측정함으로써 풍화의 정도를 알 수 있다. 또한 이들을 이용하여 대상 암석의 화학적 풍화이력 및 이후 풍화의 진행방향을 유추할 수 있다. 이러한 풍화지수로는 CIA(화학적변질지수), CIW(화학적풍화지수), PIA(사상석변질지수), STI(규소-티타늄 지수), R(Ruxton 비), V(Vogt 잔여지수), WIP(Parker 지수) 등 여러 가지 지수가 있다(Price & Velbel, 2003).

암석의 풍화지수를 분석하기 위해서 암석 내에 포함되어있는 분자의 양을 정량적으로 분석하는 것이 필요

한데, 이를 위해서 전암 XRF(X-Ray Fluorescence: X선 형광) 분석법을 이용하였다. XRF를 이용한 전암분석은 주로 암석의 화학적 특성을 검증 대비해보기 위해 암석의  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$  등의 성분을 분석하고 함량을 측정한다. 풍화가 어느 정도 진행된 시료에 대해서 XRF분석을 수행하고 이를 통하여, 암석의 종류와 동일 암석에서 주 구성 성분의 변화를 분석 비교함으로써 화학적 풍화가 어느 정도 진행되었는가를 예측할 수 있는 기초 자료를 획득하고 이를 통해 풍화지수들 중에서 상관성이 높은 것으로 알려져 있는 CIA, CIW, PIA 지수(Price & Velbel, 2003)를 산정하고 이 결과를 풍화속도 모델링의 결과와 비교하였다. 이들 세 풍화지수는 모두 50 이하가 나오면 신선한 상태임을, 50~100 사이의 수치가 나오면 풍화된 암석으로 판단하며 지수가 클수록 풍화도가 높음을 의미한다. 또한, 이들 수치들을 암종별로 상호 비교하여 풍화정도를 판별하고, 분석대상 시료가 화학적 풍화의 최종단계에까지 이르는 경로와 현재의 풍화 단계를 제시할 수 있다.

대상사면에서 채취된 풍화가 진행된 사암, 회색이암, 자색이암, 실트질이 포함된 자색이암에 대하여 각각 XRF 분석을 실시해서 얻은 결과는 Table 4와 같으며 이를 통해 산정된 풍화지수들은 Table 5와 같다. 이 결과에 따르면 CIA, CIW, PIA 지수 모두 자색이암이 가

Table 4. The results of the XRF analysis.

Rocks	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	L.O.I	total
Sandstone	18.06	2.48	5.85	4.43	3.11	0.03	0.40	0.13	58	0.75	6.77	100
Gray-mudstone	17.67	2.97	4.97	4.51	2.59	0.04	0.51	0.09	59.39	0.74	6.53	100
Purple-mudstone	17.34	0.43	6.55	4.10	3.08	0.02	0.77	0.17	62.24	0.82	4.49	100
Purple-mudstone (silty)	13.78	0.96	5.27	2.84	2.46	0.02	1.14	0.15	68.49	0.67	3.9	99.68

\* total Fe

Table 5. Weathering Indices calculated from the XRF results.

Rocks	CIA	CIW	PIA
Sandstone	64.45	77.75	71.96
Gray-mudstone	61.37	73.91	67.21
Purple-mudstone	72.78	89.43	86.29
Purple-mudstone (silty)	67.30	79.19	74.72

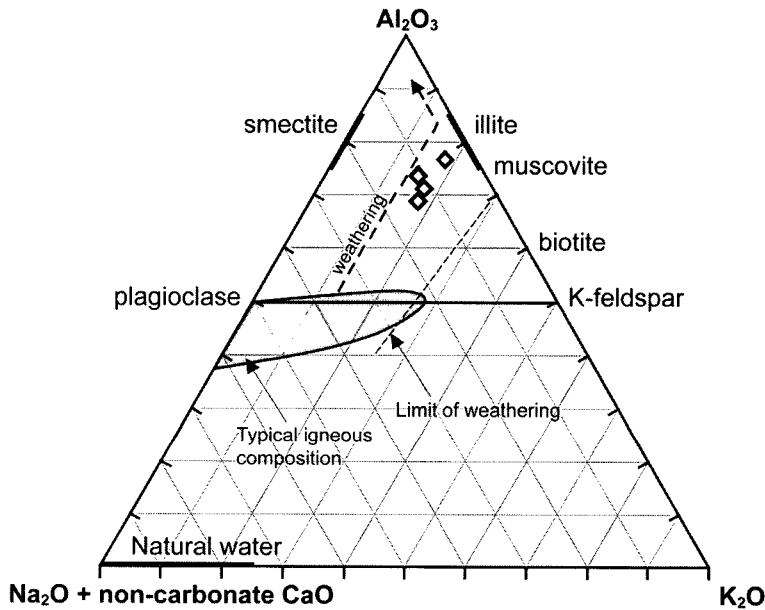


Fig. 13. CIA-diagram with plots of the XRF samples.

장 크며 작은 차이로 사암>회색이암의 순으로 나타나 풍화의 정도가 자색이암이 가장 크고 회색이암이 가장 작은 것으로 나타났으며 이는 자색이암이 가장 풍화에 민감하며 신선한 경우는 회색이암이, 풍화된 경우에는 조립의 입도를 가지는 사암이 풍화에 더 민감하다는 앞의 가혹용해시험과 PROFILE modeling의 결과와도 잘 일치한다. 또한, 암종별로 모든 지수가 50을 초과하므로 신선한 암석에 비해 어느 정도 풍화가 진행된 상황임을 의미한다. XRF 분석에서 산출된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O가

+CaO, K<sub>2</sub>O의 함량비를 이용해 CIA 다이어그램에서 화학적 풍화력 및 향후 풍화의 진행방향을 추정해보면 이들 하산동층의 퇴적암들은 화강암질암인 화강암, 편마암 내지 응회암 기원의 물질들로부터 기원하여 원래는 화강암질의 성분을 가지고 있었으나 풍화가 진행됨에 따라 사장석과 정장석 등이 일라이트와 운모류, 녹니석으로 변질되었음을 알 수 있으며 풍화가 상당부분 진행된 상황인 것을 알 수 있다(Fig. 13). 이 상태로 풍화가 계속 될 경우 일라이트와 운모류, 녹니석 등에

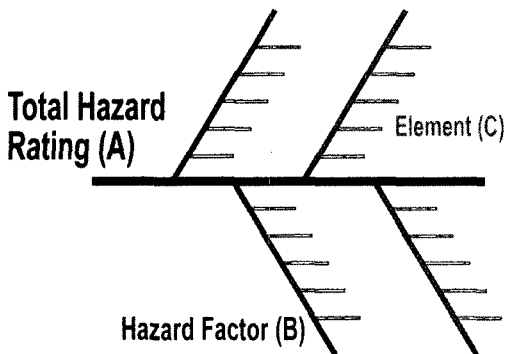


Fig. 14. Model of the decision tree method.

서 K<sub>2</sub>O 등의 성분이 더욱 빠져나가며 카올리나이트 등의 점토광물로 변화해 갈 것으로 생각된다.

### 3.2.4 풍화등급도 산정

일반적으로 재해등급도를 작성하는데 있어 재해를 유발시키는 요인들은 매우 다양하며 이들의 특성이나 작용범위, 상호관계를 정량적으로 설명하기 어려운 경우가 많다. 이러한 경우에 재해도를 작성하기 위한 다양한 방법들이 여러 연구자들에 의해 제기된 바 있는데 (Hertz & Thomas, 1983; Forth et al., 1999; Kaufmann & Quinif, 2002) 본 과업에서는 이들 가운데에서 여러 가지 다른 요인들을 통합적이고 합리적으로 고려한 평가를 수행하기에 적합하여 지질공학적인 문제를 해결 하는데 많이 쓰이는 방법 중에 하나인 decision tree method를 이용하였다.

Decision tree method는 Fig. 14와 같이 큰 가지인 요인(factor)들로 구성되고 각 요인들은 하위의 작은 가지인 요소(element)들을 포함하여 통합적인 재해도를 분

석하는 방법이다. 즉, 각 요소들의 합으로 각 요인들의 재해도 값이 산정되며 이들 요인들의 재해도에 가중치를 부여하여 최종적인 재해도를 계산하게 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R = \sum_{i=1}^n F(i) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m(i)} w_{ij} \times E(i,j) \quad (1)$$

R = 최종재해도 값  
 F(i) = 요인(factor) i의 재해도 값  
 w<sub>(i,j)</sub> = 요인(factor) i의 각 요소(element)의 가중치  
 E(i,j) = 요인(factor) i의 각 요소(element)의 재해도 값 j  
 n = 요인(factor)의 개수  
 m(i) = 요인(factor) i의 요소(element)의 개수

Decision tree method는 굉장히 복잡하고 다양한 요인들을 종합적으로 고려하여 결정을 내릴 때 사용할 수 있는 유용한 방법이다. 또한 각 요인들을 독립적으로 생각하고 값을 산정하므로 이해하기 쉽고, 계산하기에 간단한 특징이 있다. 한편 두 개 이상의 요인들이 서로 영향을 주는 경우에는 이를 반영하기 쉽지 않고, 방법의 특성상 각 요소 및 요인, 가중치 값을 결정할 때에 조사자의 경험과 같은 주관적인 요소들이 많이 작용하는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고, 풍화도와 같이 물리학적, 화학적, 지질학적, 수리지질학적인 여러 요인들의 상관관계가 밝혀지지 않은 상황에서 여러 가지 요인들을 복합적으로 검토해야 하는 재해도 분석에 있어서 가장 효율적인 방법이라고 할 수 있다.

이 방법에 따라 화학적 풍화민감도에 영향을 미치는 요인들을 분석하여 작성한 풍화민감도 분석함수와 그에 따른 등급기준은 Table 6과 같으며 대상사면에서 암종과 풍화정도에 따라 구분한 6종의 시료군에 대해 동일

Table 6. The criterion for the weathering sensitivity.

Class	Note	Expression	WS No.	Weathering Sensitivity (WS) function	
1	ES	extremely sensitive	>1000	$WS = f(V_{dis}, C, C_n, D_{WS}^{disc}, C_f, S, R_{acid}, RI, PF, R_{patt}, R, pH, T, B, H, Vib)$	
2	VS	very sensitive	801~1000	$V_{dis}$ : melting rate of rocks (keq/ha/yr) $R_{acid}$ : influence of acidic rain-fall	$C_f$ : characteristics of infilling material
3	MS	moderately sensitive	601~800	$C$ : clay-mineral property $RI$ : rock property	$T$ : influence of temperature (°C) $S$ : influence of pollution material (mg/L)
4	SS	slightly sensitive	301~600	$C_n$ : characteristics of newly maid clay $PF$ : MASS BALANCE MODELLING result	$B$ : forest (type and density) $H$ : underground water and drainage
5	NI	nearly insensitive	101~300	$D_{WS}$ : swelling rate of rock (μm/m) $R_{patt}$ : influence of rain fall pattern	$Vib$ : volume of traffic and vibration, earthquake
6	I	insensitive	<100	$D_{disc}$ : micro fracture density (n/cm) $R, pH$ : precipitation and pH(mm, pH)	



Table 7. The results from the weathering sensitivity analysis.

Rocks	Sandstone		Gray-mudstone		Purple-mudstone		• chemical weathering sensitivity : sandstone <g-mudstone<p-mudstone	
	SW	MW	SW	MW	SW	MW		
Weathering	SW	MW	SW	MW	SW	MW		
WS No.	401	509	540	586	572	792		
Class	SS	SS	SS	SS	SS	MS		

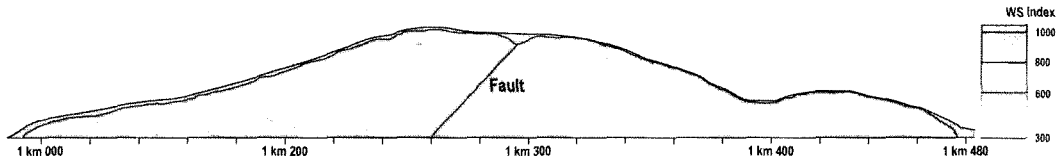


Fig. 15. Weathering sensitivity diagram of the slope based on the chemical weathering rate.

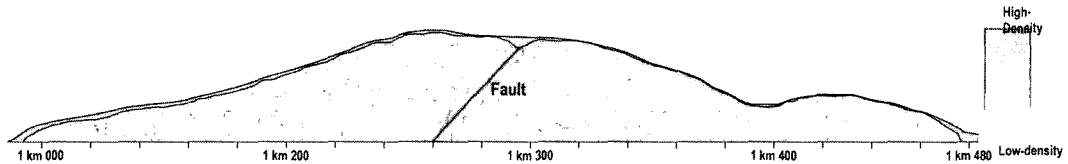


Fig. 16. Discontinuity distribution map of the slope.

한 자연환경요소를 적용하여 나머지 부분에 대한 가중치 적용을 통해 산정한 풍화민감도 정수는 Table 7에 정리하였다. 이에 따르면 화학적 풍화민감도는 사암<회색이암<자색이암의 순서로 민감하게 반응하며 전반적으로 약간민감(SS)등급에 해당하나 자색이암의 경우 풍화 시에 보통민감(MW)등급에 해당되어 주의가 요구된다.

Fig. 15는 풍화민감도 정수를 이용, 157×19개의 격자를 생성하여 격자분석에 의한 크리깅 기법을 사용해 작성한 화학적 풍화속도를 고려한 풍화민감도로 표토에 인접한 부분 및 자색이암이 분포하는 부분에서 부분적으로 매우 민감한 반응을 보이는 것을 알 수 있다.

화학적 풍화속도를 고려한 풍화민감도는 암종별로 화학반응에 의해 일어나는 풍화의 영향을 분석한 내용이다. 그러나 실제 사면에서의 풍화가 진행되는 양상은 같은 암종이라도 절리나 단층, 혹은 층리 등의 분포가 지하수 상태와 연관되어 화학적 풍화를 가속화하는 양상을 보이게 된다. 따라서 대상사면에 대한 정밀 지표지질조사의 결과를 통해 분석된 사면의 불연속면의 자료를 기반으로 종합적인 해석이 필요하다. 특히, 이들 중에서도 더욱 큰 영향을 미치는 단층이나 대규모 절리 및 퇴적암 내의 암석 층준을 구분하는 명확한 층리 등에 대해서는 가중치를 적용하여 그 영향을 반영할 수 있도록 하여야 한다. 불연속면의 영향을 고려하기 위해서는 정밀 지표지질조사를 통한 스캔라인 조사나 시추

공영상촬영장비(BIPS) 혹은 초음파주사검층(BHTV) 등을 이용한 불연속면의 분포분석이 선행되어야 하며 이를 통해 절리망을 생성하고 그 분포를 각종 밀도함수로 표현하여 크리깅 기법을 이용해 절리분포도를 작성하여야 한다. 그러나 과업 대상사면의 경우 층리가 잘 발달한 쇄설성 퇴적암에 해당하며 이 경우는 절리의 발달이 암석의 층준을 구분하는 명확한 층리에 규제되어 절리를 발달시키는 응력의 크기가 큰 대규모 절리를 제외하고는 응력이 층리면에서의 미끌림현상 등으로 소진 및 교란되어 절리가 층준 내에 제한되어 발달하는 양상이 나타나 기존의 화강암이나 편마암등 이방성이 약한 암석에서 주로 사용하던 절리망 생성 방식으로는 절리의 분포를 의미 있게 반영하기 어려운 문제점이 있다(Cooke and Underwood, 2001; Wilkins, et al, 2001, Eyal, et al, 2001).

동일한 응력장 내에서 발달하는 절리의 밀도는 절리를 제한하는 기존의 불연속면, 즉 층리나 다른 절리에 의해 제한되는 두께(Mechanical Layer Thickness: MLT)와 밀접한 관계가 있음이 알려져 있으며(Wilkins, et al, 2001, Eyal, et al, 2001), 이들과 절리간격지수(FSI)와 절리간격비(FSR)을 통해 절리의 분포를 정량화 할 수 있다(Eyal, et al, 2001). 따라서, 본 과업에서는 정밀 사면 지표지질조사 시 각 암종별로 MLT와 FSI, FSR의 관계를 분석하여 각 암종별로 평균절리밀도를

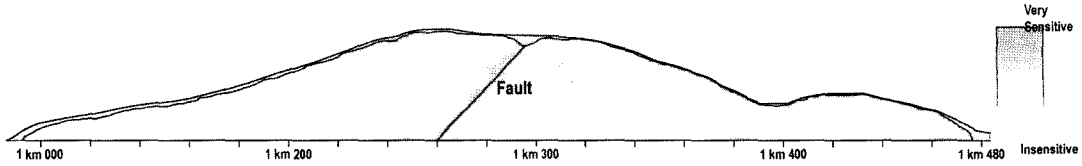


Fig. 17. Chemical weathering sensitivity diagram based on the chemical weathering rate and the discontinuity distribution.

산정하였으며 이를 적용하여 대규모 절리의 분포특성과 함께 157×19개의 격자에 대한 격자분석에 의한 크리깅 기법으로 정량화 하여 이방성이 강한 퇴적암에 특화하여 분석하였다. 그 결과를 도시하면 Fig. 16과 같다.

이상에서 분석된 화학적 풍화속도를 고려한 화학적 풍화민감도와 불연속면 분포영향도를 decision tree method의 기법을 이용 각 요소를 정규화하여 종합한 결과(Fig. 17)는 전체적으로 자색이암 분포지역과 단층대 및 암맥 등의 지질구조대와 층준을 구분하는 채널사암의 경계부, 지표에 가까운 부분 등이 상대적으로 풍화에 민감할 것으로 판단되며, 특히 자색이암과 지질구조대가 만나는 부분을 따라 풍화가 급속하게 진행될 것으로 예상되므로 보강대책이 필요할 것으로 판단했다.

#### 4. 암석강도 저하를 고려한 풍화등급도

기존의 화학적 풍화민감도 분석의 문제점은 토양환경에 기반한 기법이며, 고려되어야 할 변수들의 수가 많고 그 관계가 복잡하고, 공학적 시간단계별로 대상사면의 풍화민감특성을 적용하는데 한계가 있다는 것이다. 여러 가지 요인들에 의해 발생하는 복잡한 변수의 문제를 해결하기 위해서는 풍화작용에 대한 과정에 집중하기보다 결과론적으로 그러한 복잡한 요인에 의해서 진행되는 풍화작용이 우리가 쉽게 접근하고 판단할 수 있는 암석의 공학적 특성 중 어떠한 것들의 변화로 나타나는가에 초점을 두고 접근할 필요가 있다. 즉, 풍화작용은 시간에 따라 진행되는 것이고 실제로 공학적으로 문제를 일으키는 것은 화학적 성분의 변화 같은 풍화작용 과정에서 일어나는 미세한 현상들 자체가 아니라 그런 현상들이 종합되어 암석의 물성변화와 같은 외부적 결과로 나타난다는 것에 착안하여 통시적이며, 결과론적으로 시간에 따른 암석 물성의 변화로 풍화현상을 설명하고자 하는 것이다. 이러한 관점은 이미 여러 학자들에 의해 부분적으로 제시된 바 있으며, 이러한 특성을 나타내는 주된 물성은 암석의 강도와 탄성속도 특성임이 알려져 있다(Sunamura, 1996; 서만철 외, 1994; 일본토목학회, 2005). 이들 특성은 풍화가 진행됨에 따

라 시간에 따라 또한, 깊이에 따라 변화해 가는 양상을 보이며 이를 정량화 할 수 있다면 시간단계에 따라 공학적 판단을 내릴 수 있는 기준이 될 수 있다.

타포니(tafoni)와 같은 풍화지형을 연구하는 지형학자들의 연구에 의하면 (Oguchi et al., 1994; Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002) 풍화에 따라 진행되는 암석의 강도저하는 음지수 함수의 형태를 나타내는 것이 알려져 있다. Sunamura (1996)는 풍화시간에 따른 암석의 강도저하를 다음과 같이 모델화하였다. 특정 풍화진행시간  $t$ 에서의 암석의 강도를  $S(t)$  라고 정의하면 미소시간 간격  $\Delta t$ 가 흐른 후 시간  $t + \Delta t$ 에서의 암석의 강도는  $S(t + \Delta t)$  이고  $\Delta t$ 동안의 강도변화는  $S(t) - S(t + \Delta t)$  로 나타낼 수 있다. 이 변화가  $kS(t)\Delta t$  로 표현될 수 있는 미소시간 간격  $\Delta t$ 동안의 강도저감과 같다고 가정하면

$$S(t) - S(t + \Delta t) = kS(t)\Delta t, \tag{2}$$

으로 표현할 수 있다. 여기에서  $k$ 는 강도저감계수이며 단위는  $[T^{-1}]$ 이다. 또한,  $S(t) - S(t + \Delta t) = \Delta S$  이므로 식 (2)는 다음과 같이 치환될 수 있다.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = -kS \tag{3}$$

이로부터  $\Delta t \rightarrow 0$ 일때 다음과 같은 미분방정식 모델을 얻을 수 있으며,

$$\frac{dS}{dt} = -kS \tag{4}$$

이 방정식의 해는  $t = 0$ 에서  $S = S_0$  인 초기값 조건에서 다음과 같이 얻어진다.

1) 타포니(tafoni) : 암석의 측면에 형성된 풍화구덩이. 주로 화강암 등 조립질 암석이 풍화작용을 받은 결과 암석의 표면에 형성되는 요형의 지형

Table 8. Sampling location for the weathering sensitivity characterization considering time dependent strength reduction.

Slope	Location	Rock type	Weathering	Note
Slope for study	Golyak slope Sta.1k085~480	Mesozoic sedimentary rocks	SW~Fresh	• Under constructing
Pre-existing slope	local road 865	Mesozoic sedimentary rocks	MW	• Constructing term :1996.12~2001.2 • The slope formed at about 1998

Table 9. The results from the slaking durability tests.

Rocks		Slaking durability indices (%)			Slaking durability	Index reduction rate between weathering (%)
		Id1	Id2	Id3		
Sandstone	MW	99.1	94.9	90.7	medium high	7.4
	SW~F	99.6	99.2	98.0	very high	
Gray-mudstone	MW	99.4	98.8	95.8	high	3.0
	SW~F	99.8	99.7	98.8	very high	
Purple-mudstone	MW	90.1	83.8	76.1	medium	23.0
	SW~F	99.6	99.2	98.8	very high	

$$S = S_0 \exp(-kt) \quad (5)$$

여기에서  $S$ 는 시간 풍화진행시간  $t$ 에서의 암석의 강도  $S_0$ 는 풍화를 받지않은 신선상태(혹은 초기상태)에서의 암석강도,  $k$ 는 강도저감계수가 된다.  $k$ 에는 풍화작용에 영향을 미치는 모든 지역적, 기후적, 지질적 요소가 포함되어 있으며 값이 클수록 시간에 따른 강도저감이 커 풍화에 더욱 민감한 것을 의미한다.

식(5)의 관계를 이용하면 풍화작용의 최종결과로 강도의 저하가 나타나며, 이는 풍화에 작용하는 여러 요인들의 결과이며, 그 지역의 환경인자들과 다른 여러 요인들을 강도저감계수라는 개념에 묶어 그것을 그 지역, 그 암종의 특성으로 특수화시킴으로써 복잡한 요인들에 의해 야기되는 분석의 복잡성을 제한할 수 있고 공학적으로 접근하기 용의한 강도라는 암석의 물성을 설명함으로써 공학적으로 의미가 있는 결과를 도출할 수 있다. 향후, 이를 발전시키면, 풍화진행 시 깊이와 강도와의 관계 및 강도의 저하로 차별풍화와, 특정시점에서의 파괴현상 등을 유추할 수도 있을 것으로 생각된다.

식(5)에 의하면 초기의 신선암에서의 강도는 시간이 지남에 따라 음지수함수의 형태로 감소하며, 풍화작용을 받기 시작한 시간을 정확히 알 수 있는 조건이 되면 그 관계를 통해 동일한 환경에서 해당 암종의 강도저감계수를 산정할 수 있고 이를 역산하면 우리가 원하는 시간에 대한 강도의 변화를 예측할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 시간에 따른 강도의 변화에 초점을 맞추어 강도저감계수의 개념을 이용해 시공한지 일정 시간이

지난 대상사면 인근에 같은 암종으로 구성된 기존 도로의 사면에 대한 정밀분석과 기존 도로사면과 대상사면 암석의 접착중 강도에 대한 통계적 분석을 통해 일축압 축강도의 변화를 추정하였으며 슬래이킹 내구성 시험을 보조수단으로 사용하였다. 분석시료의 채취위치와 분석 대상 사면의 정보는 Table 8에 정리하였다.

#### 4.1 슬래이킹 내구성 시험

슬래이킹 내구성 시험은 수분과의 접촉에 의한 물리적 풍화 특성을 평가하는 분석법으로 이를 통해 암종별 물리적 풍화특성을 평가하고 풍화등급도를 작성하는데 보조 자료로 활용하였다. 기존의 ISRM 기준에 따르면 슬래이킹 시험의 주기를 2주기 실시하도록 제안하고 있으나 최근 연구결과들에 의하면(이상균, 1999; Czerewko & Cripps, 2002), 특히 이질암의 경우 2주기의 시험으로는 변화의 변별력이 약하여 내구성을 평가하기 어렵기 때문에 3주기 이상의 시험이 필요한 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 과업에서는 퇴적암에 특화되어 개선된 3주기 1000회전의 슬래이킹 시험법을 적용하였다.

슬래이킹 내구성은 신선한(SW~F) 암석의 경우 모두 매우 높음의 등급을 나타내나 사면형성 이후 일정시간(7년)이 지난 상태에서 풍화된(MW) 암석시료는 사암-보통 높음, 회색이암-높음, 자색이암-보통의 내구성을 보여 풍화가 진행될수록 암석의 내구성이 감소함을 알 수 있다(Table 9, Fig. 18). 또한, 7년간의 풍화에 의한 내구성 지수의 감소율은 사암, 회색이암, 자색이암이 각

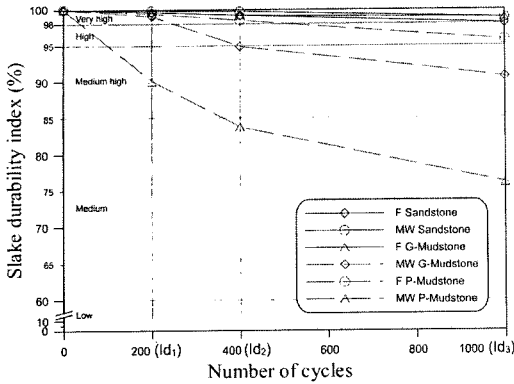


Fig. 18. The results from the slaking durability tests.

각 7.4%, 3.0%, 23.0%로 자색이암이 특히 풍화에 민감한 반응을 보이며 회색이암은 전반적으로 풍화에 대한 저항성이 강한 것으로 평가된다.

**4.2 점하중 강도 시험**

시공시기를 알 수 있는 인근에 위치한 동일 암종 사면으로부터 사면 절개 시 신선했을 것으로 추정되는 사면 심부의 풍화된 시료를 채취하여 현재 시공중인 도로 사면의 신선한 시료와 점하중 강도를 분석하여 산출한 일축압축강도 비교 분석을 통해 시간에 따른 풍화의 영향을 규명했다. 두 사면의 시료 모두 암종별 점하중강도시험을 각각 30회 이상 실시하여 신뢰도를 높여 이를 통계적으로 분석하여 Brook(1977)의 점하중강도와 일축압축강도간의 관계식을 통해 일축압축 강도를 산출하였으며(Fig. 19) 이를 풍화도에 따른 암종별 강도저감계수 산정의 기초자료로 활용하였다. 시험의 결과를 정리하면 Table 10과 같다.

점하중강도시험 결과 전체적으로 정규분포를 따라 신뢰도가 있으며, 암석의 일축압축강도와 점하중강도지수 값의 비(C)는 23.5를 평균값으로 적용하였다. 암종별 강도정수를 비교하면 사암>회색이암>자색이암의 순으로 암석강도가 크게 나타나며 사면형성 이후 일정 시간 동안(7년) 풍화에 의한 강도저감율은 자색이암>사암>회색이암의 순으로 풍화에 대한 저항도가 다르게 평가된다. 동일한 지질조건에서 기존사면과 대상사면의 암석강도를 근거로 풍화등급도 산정에 적용하였다.

**4.3 시간단계별 풍화등급도 산정**

시간단계별 풍화등급도를 작성하기 위하여 위에서 얻은 일축압축 강도의 변화를 기초로 식(5)에 나타난 시간에 따른 강도변화 계산에 필요한 각 암종별 강도저감

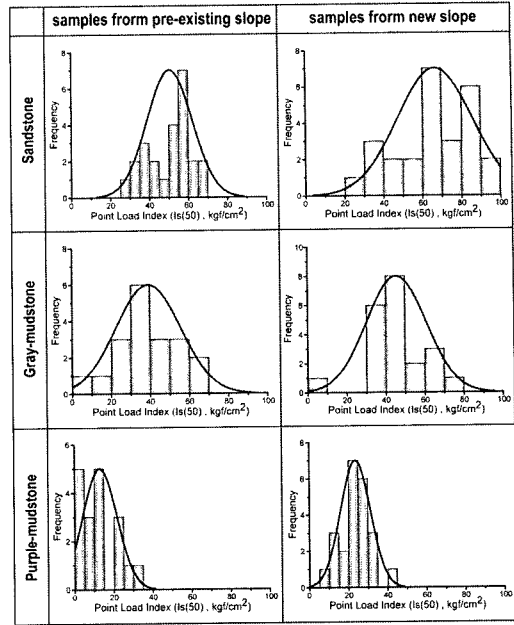


Fig. 19. The distributions of strengths resulted from the point-load tests.

계수(*k*)를 산정하였다. 사암, 회색이암, 자색이암이 각각  $3.669 \times 10^{-2}$ ,  $2.026 \times 10^{-2}$ ,  $8.053 \times 10^{-2}$ 로 나타나 자색이암이 가장 민감하게 나타나며, 회색이암이 시간에 따른 변화율이 가장 낮은 것으로 나타났다(Table 11). 이는 풍화가 진행됨에 따라 초기상태에서는 더욱 강한 사암이 풍화가 진행된 상태에서는 회색이암에 비해 약해지는 앞 절의 화학적 풍화민감도 분석의 결과와도 잘 일치한다. 이를 통해 얻어진 시간에 따른 암종별 일축압축 강도의 감쇠곡선은 Fig. 20과 같다. 일반적인 경우보다 풍화에 의한 사면 표면의 강도저하가 급격하게 일어나는 것을 알 수 있는데 이는 기존의 865번 지방도 주변의 사면에서 나타나는 급격한 풍화로 인한 현상을 잘 설명할 수 있다. 이를 통해 얻어진 암종과 풍화상태를 기준으로 구분한 6개의 시료군의 5년 후, 10년 후의 추정일축압축강도는 신선암의 경우, 사암이 1300.8 kgf/cm<sup>2</sup>, 1082.7 kgf/cm<sup>2</sup>, 회색이암이 964.1 kgf/cm<sup>2</sup>, 871.2 kgf/cm<sup>2</sup>, 자색이암이 370.8 kgf/cm<sup>2</sup>, 247.9 kgf/cm<sup>2</sup>, 풍화암의 경우 사암이 987.8 kgf/cm<sup>2</sup>, 822.3 kgf/cm<sup>2</sup>, 회색이암이 828.2 kgf/cm<sup>2</sup>, 748.4 kgf/cm<sup>2</sup>, 자색이암이 202.7 kgf/cm<sup>2</sup>, 135.5 kgf/cm<sup>2</sup>로 Table 11과 같으며 이를 크리깅 기법을 이용한 157×19개의 격자를 통한 격자분석으로 사면에 적용한 결과는 Fig. 21과 같다.

Table 10. The results from the point load test and the uni-axial compression strengths calculated from the results.

Rocks		Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )				Note
		average (I <sub>s(50)</sub> )	standard deviation (I <sub>s(50)</sub> )	σ <sub>uc</sub>	σ <sub>MW</sub> / σ <sub>SW</sub>	
Sandstone	MW	50.5	11.6	1186.8	0.76	Brook(1977) $\sigma_{uc} = C \times I_{s(50)}$ $\sigma_{uc}$ : uni-axial compression strength $I_{s(50)}$ : point load strength at De=506mm
	SW~F	66.5	19.3	1562.8		
Gray-mudstone	MW	39.0	16.5	916.5	0.86	
	SW~F	45.4	15.3	1066.9		
Puple-mudstone	MW	12.9	8.7	303.2	0.55	
	SW~F	23.6	7.7	554.6		

Table 11. The strength reduction coefficients and the uni-axial compression strengths after 5 and 10 years from the slope construction.

Rocks		Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )				Note
		$S_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$S_{5year}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$S_{10year}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$k$ (yr <sup>-1</sup> )	
Sandstone	MW	1186.8	987.8	822.3	$3.669 \times 10^{-2}$	$S = S_0 \exp(-kt)$ $S$ : strength at time $t$ $S_0$ : strength at initial stage ( $t=0$ ) $k$ : strength reduction coefficient
	SW~F	1562.8	1300.8	1082.7		
Gray-mudstone	MW	916.5	828.2	748.4	$8.053 \times 10^{-2}$	
	SW~F	1066.9	964.1	871.2		
Puple-mudstone	MW	303.2	202.7	135.5	0.55	
	SW~F	554.6	370.8	247.9		

결론적으로 강도저감계수 분석결과 자색이암>사암>회색이암의 순서로 시간에 따른 강도저하가 크게 나타나며 특히 자색이암의 경우 상대적으로 매우 높은 강도저하가 예상되며, 또한, 시간단계별 강도변화를 분석한 결과 사면의 종점부 및 국부적으로 층리면과 평행한 부분에서 500 kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 부분이 관찰되는데 이는 대부분 자색이암에 해당된다. 사면형성 이후 5년경과 단계에서 MW-자색이암 등 이미 풍화가 진행된 부분은 사면형성 후 풍화가 급속하게 진행될 가능성이 존재하므로 이에 대한 적절한 보호공법이 요구된다고 판단하였다. 이러한 결과는 화학적 풍화민감도 분석에서 얻어진 정성적인 결과와도 잘 일치한다. 암석강도를 고려한 분석결과는 시간단계별 풍화특성을 중심으로 분석한 결과이므로 보호공법 선정 및 구조물의 유지·보수의 기초자료로 활용할 수 있는 유용성이 있으며 향후 모니터링 및 보안을 통해 이를 검증해야 한다.

## 5. 토 의

### 5.1 기존사면의 풍화특성 검토

연구지역의 대상사면 인근에는 지방도 865호선이 관통하고 있으며 이에 사면형성시기가 1998년으로 추정되는 십여 개의 대규모 사면이 형성되어 있다. 이는 모두 대상사면과 동일한 지질 및 환경조건에서 사면형성 이후 일정시간(7년) 경과 후의 풍화양상을 보여주는 사면으로 암종별 풍화양상이 잘 나타나므로 풍화민감도 분석결과와의 예측 및 검증자료로 활용할 수 있다. 기존 지방도의 사면들을 분석한 결과 불과 7년 내외의 시간이 흘렀음에도 차별풍화로 인한 침식의 정도의 차이가 빈번하게 발생하고 있으며(Fig. 22a), 암종경계면이 약화되어 지하수의 유동 통로로 작용하고 있다(Fig. 22b). 또한 차별풍화와 지하수 및 불연속면의 상호작용으로 사면의 암괴의 미끄러짐, 붕락 등, 사면 파괴 활동이 빈

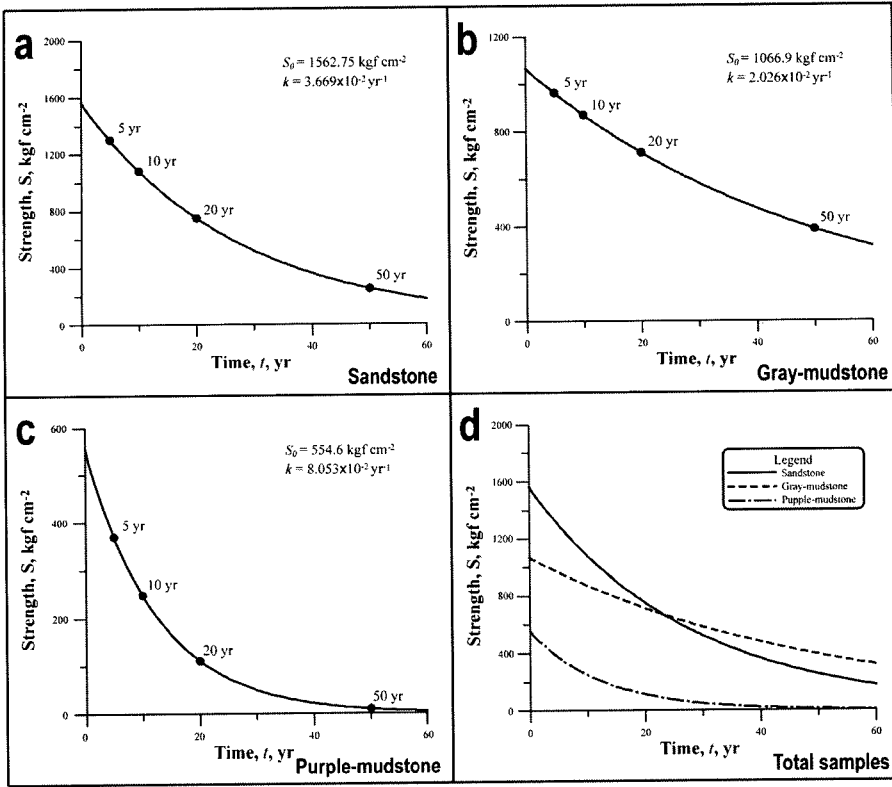


Fig. 20. The time dependent strength reduction curves for the three rock types.

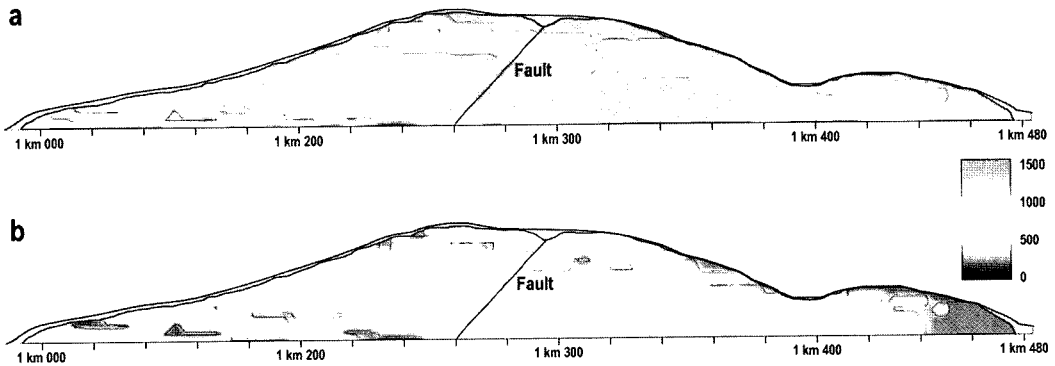


Fig. 21. The weathering sensitivity map expressed by strength distributions for the times at 5 and 10 years after slope constructing.

변하게 관찰된다(Fig. 22c). 이는 대상사면 형성 시에도 수년 내에 같은 문제가 발생할 것임을 예측케 한다. 특히 대상사면의 경우 표고가 40여 미터에 달하며 길이가 총 400여 미터에 해당하는 대규모 사면이며 단층대와 암맥군이 사면을 관통하는 특징(Fig. 2)을 감안할 때 기존 사면에 비해 큰 규모의 문제가 발생할 수 있는 가능

성이 있다.

**5.2 대상사면의 풍화민감특성 종합검토**

앞 절의 시간에 따른 암석의 강도변화 분포(Fig. 21)는 현재의 암종과 풍화도 상태만이 고려되어 있고 절리, 단층, 층리 등의 불연속면 분포상황이 고려되어 있지

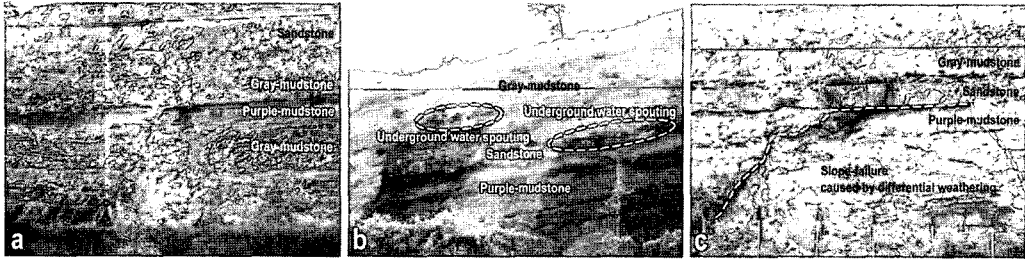


Fig. 22. Examples of the slope instability caused by the weathering processes on the pre-existing rock-slopes near the study area(a. Erosion rates between rocks are different because of the difference of the weathering sensitivities; b. The boundaries between formations became weak and underground water moves and spouts along them; c. Slope failure occurred because of the interactions of weathering processes, underground water, and discontinuities).

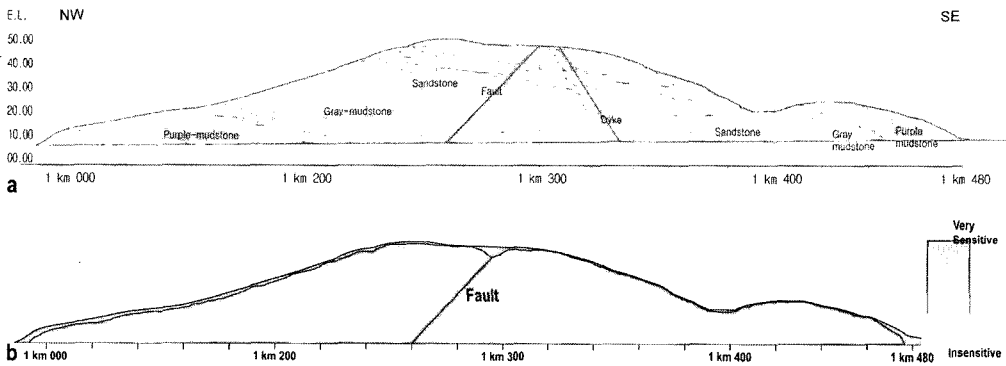


Fig. 23. The weathering sensitivity map synthesizing the discontinuity density and the time dependent strength reduction(a. Geology of the slope; and b. The weathering sensitivity map).

않기 때문에 이를 고려하기 위하여 3.2.4절에서 구해진 불연속면 밀도분포 분석의 결과를 Decision tree method를 이용해 정규화 시켜 종합해 10년 경과 시의 종합적 풍화민감등급도를 작성하였다(Fig. 23). 이 결과는 그 경향성에서 기존의 화학적 풍화민감도 분석의 결과(Fig. 17)와도 잘 일치한다. 그러나 기존 방법에서는 불가능하던 시간단계에 따른 풍화정도의 변화와 강도변화를 나타낼 수 있어 더욱 합리적인 분석이 가능하다. 대상사면은 전체적으로 층리면을 따라 암종별 풍화가 속속 속도의 차이로 인한 차별풍화가 진행될 것으로 판단된다. 암종별로 자색이암이 가장 풍화에 취약한 것으로 분석되며 사암 및 회색이암은 유사한 풍화민감특성을 보이나 시간에 따른 사암의 강도저하율이 높아 사면 형성 후 약 24년이 경과한 후 부터는 사암의 풍화가 더욱 심해질 것으로 판단된다. 대상사면은 층리면의 경사가 저각으로 상대적으로 안정한 측면이 존재하나 단층대 인근의 경우 층리면의 교란 및 단층대를 따른 지하수의 유입으로 풍화가 급속하게 진행될 가능성이 크며,

특히 STA. 1km400 부근에 분포하는 채널사암의 경계부(Fig. 2, 3)는 상대적으로 층리의 경사각이 사면 쪽으로 고각을 형성하고 있어 풍화 시에 암괴의 미끄러짐 현상이 발생할 가능성이 있다.

사면 표층부에서의 풍화민감특성을 종합한 결과 전체적으로 암종별 풍화민감특성이 다르게 나타나는 것으로 예상되므로 암종별 특성을 고려하여 사면보호공법을 적용하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한, 사면형성 시 단층대 및 암맥의 지질구조가 사면에 분포할 것으로 예상되며, 특히 단층대의 경우 빠른 풍화작용과 이에 수반된 붕괴가능성이 존재하므로 충분한 보강공법이 요구된다.

### 5.3 연구의 한계와 발전 방향

이 연구에서는 다양한 접근방법을 종합하고 최신 연구자료를 적용하여 기존의 화학암에 대한 화학적 풍화민감도 분석의 문제점을 개선한 퇴적암지역에 특화되며 공학적 판단 및 접근이 용이한 방법을 통해 풍화민

감도 분석을 수행하였다. 그러나, 이 연구에 사용된 기법도 해결해야 할 문제점들이 있다. 먼저, 이 기법은 현장에 처음 적용된 기법이므로 아직은 충분한 자료가 부족하여 시간을 두고 더 많은 현장의 자료와 기 조사된 자료의 검증이 필요할 것으로 생각된다.

둘째, 이 기법에서 적용된 강도특성은 사면을 구성하는 암반 전체의 강도특성이 아니라 2차원적인 사면 표면 부근의 강도특성이라는 것이다. 시간에 따른 사면 전체 혹은 특정 단면에서의 강도변화와 그것이 사면에 영향을 미치는 현상과의 관계(예를 들면, 일정 시간이 지나 특정 강도 이하가 되면 표층이 유실된다거나 접해 있는 두 층간의 강도차가 얼마 이상이면 차별풍화로 인한 사면의 불이식이 발생한다와 같은)에 대한 연구가 더 진행된다면 설계와 시공 시 사면에 대한 보강대책 수립과 공법적용에, 시공이후에는 장기 관리대책 수립에 명확한 판단기준을 제시할 수 있을 것으로 보인다. Matsukura & Matsuoka(1991), Sunamura(1996), Norwick & Dexter(2002) 등의 연구들은 시간에 따른 강도 변화와 풍화심도의 변화의 관계를 모델링 할 수 있는 가능성을 보여주고 있는데 이에 대한 공학적 관점에서 수치적인 연구가 진행된다면 이러한 문제를 해결하고 3차원 적인 강도특성의 변화를 사면에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 풍화의 영향을 반영하는 암반의 특성에는 강도 변화와 함께 탄성과 속도도 중요한 변화로 포함되는데(서만철 외, 1994; 일본토목학회, 2005) 이 또한, 앞으로 연구가 수행되어야 될 부분으로 생각된다.

다음으로, 절리, 단층, 층리 등의 불연속면의 영향을 합리적으로 고려할 수 있는 방법에 대한 검토가 필요하다. 이 연구에서는 단순히 불연속면 밀도분포와 특정시간의 강도를 기준으로 분석을 수행하였으나 불연속면의 종류와 분포에 따라 등급을 설정하여 암종을 세분화하는 방법 등 더욱 합리적인 방법을 고려해야 할 것으로 생각된다.

마지막으로, 기존의 화학적 풍화민감도 분석을 포함한 여러 가지 풍화특성 분석 방법과의 상관관계에 대한 검증이 필요할 것으로 생각된다. 기존의 방법들은 그 공학적 적용성에 한계가 있기는 하지만, 풍화라는 지속적인 현상 자체에 대한 분석에 초점이 맞추어져 있다. 이들과 강도변화와의 상관관계가 정립되어 진다면 강도변화가 일어나는 요인에 대해서 암종이나 성분, 기후 등의 관계에 따라 설명할 수 있으며, 앞으로의 물리, 화학적 변화도 예측할 수 있을 것이다. 또한, 풍화가 진행되기 전의 신선한 초기상태의 정보를 획득하기 어려운 경우에도 이들 관계에 의해 강도변화를 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 나아가서, 기존 연구와 기법들과의 상

관관계를 밝힘으로 인해서 풍화라는 현상이 종합적으로 사면의 안정성에 미칠 영향에 대해서도 더욱 풍부한 예측과 설명이 가능해 질 것으로 보인다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 기존에 이용되어 오던 화학적 풍화민감도분석의 문제점(토양환경에 적용하기위해 개발된 PROFILE modeling의 암반환경 적용의 불합리성, 고려대상 인자의 복잡성, 공학적인 적용성)을 극복하는 방법으로 풍화진행시간에 따른 암석의 강도특성 변화를 고려하여 퇴적암에 특화시킨 풍화민감특성 분석을 수행하여 암반사면의 풍화민감특성을 설명하고 직접적인 공학적 적용성을 검토하였다. 이를 위해서 기본적인 사면의 지질학적 특성분석과 사면을 구성하는 암석들의 암석학적 풍화특성 분석 실시하였으며, 기존의 현장에서 적용되어오던 화학적 풍화민감도 분석을 퇴적암의 특성에 맞는 방법으로 개량하여 분석함으로써 이 연구의 핵심인 강도변화 예측과의 비교자료로 활용하였다.

지형학자들의 연구에서 도출된 강도저감계수( $k$ )의 개념을 적용하여 사면이 굴착된 후부터 풍화에 의한 암반사면 표면의 시간에 따른 강도변화를 암종별로 예측하였다. 강도저감계수의 경우 사암, 회색이암, 자색이암이 각각  $3.669 \times 10^{-2}$ ,  $2.026 \times 10^{-2}$ ,  $8.053 \times 10^{-2}$ 로 나타나 자색이암이 가장 민감하게 나타나며, 회색이암이 시간에 따른 변화율이 가장 낮은 것으로 나타났다(Table 11). 이를 통해 얻어진 10년 후의 추정일축압축강도는 신선암의 경우, 사암이  $1082.7 \text{ kgf/cm}^2$ , 회색이암이  $871.2 \text{ kgf/cm}^2$ , 자색이암이  $247.9 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났다(Table 11). 이 분석결과를 크리깅 기법을 이용해  $157 \times 19$ 개의 격자를 통한 격자분석으로 사면에 적용하여 강도변화를 고려한 풍화민감등급도를 작성하였으며(Fig. 21) 이 결과는 자색이암>사암>회색이암의 순으로 풍화에 민감하게 나타났다. 또한, 일정기간(약 24년)이 경과하기 전까지 암석의 강도는 사암>회색이암>자색이암의 순으로 나타나며 이 시간이 지나면 풍화가 진행됨에 따라 신선 시에는 더욱 강한 사암이 풍화가 진행된 상황에서는 회색이암에 비해 약해지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 화학적 풍화민감도 분석의 결과 및 기존의 여러 가지 암종별 풍화특성 분석과 잘 일치하며 연구 지역의 풍화로 인한 암반의 변화 특성을 잘 설명해 준다. 이 결과는 설계와 시공 시에는 보강계획에 기준으로 직접적으로 이용될 수 있으며 시공 후에는 사면의 장기 유지관리 대책 수립의 기초자료로 활용 될 수 있다.

그러나, 이 연구에 사용된 기법도 충분한 자료가 부족



한 점, 이 기법에서 적용된 강도특성이 2차원적인 사면 표면 부근의 강도특성이라는 점, 불연속면의 영향을 합리적으로 고려할 수 있는 방법에 대한 검토가 필요한 점, 여러 가지 풍화특성과의 상관관계에 대한 검증이 필요한 점 등 앞으로 더욱 검증되고 개선되어야 할 부분이 있다. 향후 지속적인 연구가 행해진다면 강도저감 계수를 활용하여 이러한 문제점을 해결하고 사면 표층부 뿐만 아니라 심도에 따른 풍화민감특성에도 적용하여 설계에 활용할 수 있을 것이며, 풍화진행에 따라 특정시점에 파괴가 일어날 가능성이 있는 지에 대해서도 활용할 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

- 김중휘, 정의진, 김정환, 윤운상, 2005, 단양지역 내 석회암지역에 발달하는 용식지형의 특징, 지질학회지, 41권 1호, 45-58.
- 박형동, 2002, 이암/세일의 공학적 특성 및 문제, 2002년도 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, 한국지반공학회, 19-30
- 서만철, 김민규, 최석원, 1994, 경북 추령터널 부근 암석의 풍화특성에 관한 지구물리화학적 연구, 지질공학회지, 4권 3호, 269-281.
- 윤지선, 2002, 이암/세일의 공학적 특성 및 문제, 2002년도 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, 한국지반공학회, 51-63
- 이상균, 1999, 지질공학적 특성에 따른 사면안정성에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 79p
- 일본토목학회, 2005, 암반사면의 조사와 대책, 대한토목학회, 440p.
- 한국동력자원연구소, 1989, 광양도곡(1:50,000)과 도곡설명서, 한국동력자원연구소, 22p.
- Brook, N., 1977, A Method for Overcoming Both Shape and Size Effects in Point Load Testing. Proc. Conf. on Rock Engineering, Univ. Newcastle, England, 53-70.
- Cooke, M. L., and Underwood, C. A., 2001, Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening. Jour. Struc. Geol., Vol 23, 223-238.
- Czerewko, M. A., and Cripps, J. C., 2002, Assessing the durability of mudrocks using the modified jar slake index test, Quar. Jour. Eng. Geol. and Hydrogeol., Vol 34, 153-163.
- Eyal, Y., Gross, M. R., Engelder, T., and Becker, A., 2001, Joint development during fluctuation of the regional stress field in southern Israel, Jour. Struc. Geol., Vol 23, 279-296.
- Folk, R. L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, TX. 170p.
- Forth, R. A., Butcher, D. and Senior, R., 1999, Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal. Engineering Geology, Vol 52, 67-74.
- Hertz, D. B. and Thomas, H., 1983, Risk analysis and its application, John Wiley & Sons, New York.
- Hodson, M. E., and Langan, S. J., 1999, Considerations of uncertainty in setting critical loads of acidity of soils: the role of weathering rate determination, Environmental Pollution, Vol 106, 73-81.
- Hodson, M. E., Langan, S. J., and Wilson, M. J., 1996, A sensitivity analysis of the PROFILE model in relation to the calculation of soil weathering rates, Appl. Geochemistry, Vol 11, 835-844.
- Kaufmann, Q. and Quinif, Y., 2002, Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. Eng. Geol., Vol 65, 117-124.
- Matsukura, Y., and Matsuoka, N., 1991, Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-zaki, Boso Peninsula, Japan, Earth Surf. Proc. Landform, Vol 16, 51-56.
- Nilsson, J., and Grennfelt, P., 1988, Workshop report. In: Nilsson, J., and Grennfelt, P. (Eds), 1988, Critical Loads for Sulphur and Nitrogen, Report from a Workshop held at Skokloster, Sweden, March 1988. Nordic Council of Ministers and the United Nations Economic Commission for Europe, 7-32. Stockholm, Sweden.
- Norwick, S. A., and Dexter, L. R., 2002, Rates of development of tafoni in the Moenkopi and Kaibab Formations in meteor crater and on the Colorado Plateau, Northeastern Arizona, Earth Surf. Process. Landforms, Vol 27, 11-26.
- Oguchi, C. T., Hatta, T., and Matsukura, Y., 1994, Changes in rock properties of porous rhyolite through 40,000 years in Koze-shima, Japan, Geog. Rev. Japan, Vol 67A, 775-793 (in Japanese with English abstract).
- Paik, I. S., 1998, Vertic paleosols from the Sindong Group: occurrences, paleo-environments, and stratigraphy. Jour. of the Geol. Soc. of Korea Vol 34, 58-72. (In Korean with English abstract)
- Paik, I. S., Lee, Y. I., 1998, Desiccation cracks in vertic palaeosols of the Cretaceous Hasandong Formation, Korea: genesis and palaeo-environmental implications. Sed. Geol., Vol 119, 161-179.
- Posch, M., Hettelingh, J. P., de Smet, P. A. M., and Downing, R. J. (Eds.), 1997, Calculation and Mapping of Critical Thresholds in Europe (Status Report 1997): Co-ordination Center for Effects. RIVM, Netherlands.
- Price, J. R., and Velbel, M. A., 2003, Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks, Chem. Geol., Vol 202, 397-416.
- Sunamura, T., 1996, A physical model for the rate of coastal tafoni development, The Jour. of Geol., Vol 104, 741-748.
- Sverdrup, H. U., and Warfvinge, P., 1988, Assessment of critical loads of acid deposition on forest soils. In: Nilsson, J., and Grennfelt, P. (Eds), 1988, Critical Loads for Sulphur and Nitrogen, Report from a Workshop held at Skokloster, Sweden, March 1988. Nordic Council of

Ministers and the United Nations Economic Commission for Europe, 81-130. Stockholm, Sweden.

Warfvinge, P., and Sverdrup, H., 1995, Critical loads of acidity to Swedish Forest soils (Reports in Ecology and Environmental Engineering 5:1995), Lund. University, Lund., Sweden.

Werner, B., and Spranger, T., 1996, Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where they are Exceeded 1996 (Federal Environmental Agency Texte 71/96), Federal Environmental Agency, Germany.

Wilkins, S. J., Gross, M. R., Wacker, M., Eyal, Y., and Engelder, T., 2001, Faulted joints: kinematics, displacement - length scaling relations and criteria for their identification, Jour. Struc. Geol., Vol 23, 315-327.



**박준영**

2001년 서울대학교 이과대학 지구환경과학부, 이학사  
2004년 서울대학교 이과대학 지구환경과학부, 이학석사

Tel: 02-3472-2261  
E-mail: jypark@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니컨설팅트 지반사업부 대리



**이정상**

1993년 서울대학교 이과대학 지질학과, 이학사  
1996년 서울대학교 이과대학 지질과학부, 이학석사

Tel: 02-3472-2261  
E-mail: jstop@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니컨설팅트 지반사업부 부장



**배성호**

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 02-3472-2261  
E-mail: shbae007@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설팅트 상무이사



**유영일**

1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사

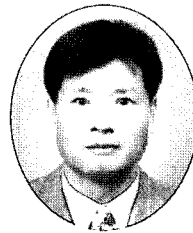
Tel: 02-3433-3235  
E-mail: hidemijk@paran.com  
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 과장



**오정배**

1992년 서울산업대학교 공과대학 토목공학과, 공학사  
1998년 건국대학교 공과대학 토목공학과, 공학석사

Tel: 02-3433-3235  
E-mail: sunnyjb@lycos.co.kr  
현재 (주)삼보기술단 지반사업부 이사



**이두화**

1976년 한양대학교 공과대학 토목공학과, 공학사  
1994년 한양대학교 산업대학원 토목공학과, 공학석사  
2005년 한양대학교 일반대학원 토목공학과, 공학박사

Tel: 02-3433-3027  
E-mail: sbedhl@hotmail.com  
현재 (주)삼보기술단 대표이사