

## 풍화에 따른 백악기 셰일의 물성 및 슬레이크 내구성에 관한 연구

김해경<sup>1</sup> · 김태국<sup>2</sup> · 오강호<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>광주교육대학교 과학교육과, <sup>2</sup>전남대학교 토목공학과, <sup>3</sup>전남대학교 지구과학교육과

### Analysis of the Mechanical Properties and Slake Durability of Fresh to Weathered Cretaceous Shale

Hai-Gyoung Kim<sup>1</sup>, Tae-Kuk Kim<sup>2</sup>, and Kang-Ho Oh<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Gwangju National University of Education

<sup>2</sup>Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University

<sup>3</sup>Dept. of Earth Science Education, Chonnam National University

본 연구에서는 전라남도 화순군 일대에 분포하는 중생대 백악기 셰일을 대상으로 실내 시험을 통하여 풍화정도에 따른 물리적 특성과 슬레이크 내구성 특성을 파악하였다. 심한풍화 상태에서 신선한 상태의 셰일의 비중은 2.14~2.88, 건조밀도는 1.86~2.83(g/cm<sup>3</sup>), 함수율은 0.12~6.36(%), 공극률은 1.33~20.49(%) 그리고 흡수율은 0.51~8.52(%)의 범위를 갖는다. 물리적 특성 중에서 공극률과 함수율은  $Ab = 0.44P - 0.09$ (Ab: 함수율, P: 공극률)의 관계식으로 표현되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.99로 상관성이 양호한 편이다. 심한풍화 상태에서 신선한 상태의 풍화정도에 따른 셰일의 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ )는 90.07~99.33(%)의 범위를 갖으며, 또한 점하중강도 지수( $Is_{(50)}$ )는 10.8~90.2(kg/cm<sup>2</sup>)의 범위를 갖는다. 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수와의 관계에서는 점하중강도 지수가 클수록 슬레이크 내구성은 강한 것으로 나타났으며, 이들의 상관관계식은  $Is_{(50)} = 1E-07e^{0.2033Id_2}$ (kg/cm<sup>2</sup>) ( $r^2 = 0.69$ )로 표현 된다.

**주요어** : 셰일, 물리적 특성, 슬레이크 내구성, 점하중 강도 지수

We performed laboratory measurements of the mechanical properties and slake durability of Cretaceous shale from the Hwasun area, Korea, including highly weathered and fresh samples, yielding ranges of specific gravity of 2.14-2.88, dry density of 1.86-2.83 (g/cm<sup>3</sup>), water content of 0.12-6.36 (%), porosity of 1.33-20.49 (%), and absorption ratio of 0.51-8.5 (%). The absorption ratio shows a strong linear relation with porosity, expressed as  $Ab = 0.44P - 0.09$  (Ab: absorption ratio, P: porosity). Values of the slake durability index ( $Id_2$ ) and point load intensity index ( $Is_{(50)}$ ) of highly weathered to fresh shale are 90.07-99.33 (%) and 10.8-90.2 (kg/cm<sup>2</sup>), respectively.  $Id_2$  is linearly related to  $Is_{(50)}$ , expressed as  $Is_{(50)} = 1E-07e^{0.2033Id_2}$ (kg/cm<sup>2</sup>)( $r^2 = 0.69$ ). This equation is a useful tool for estimating the  $Id_2$  value for shale in the Hwasun area.

**Key words** : shale, mechanical properties, slake durability, point load intensity index

### 서론

암석의 풍화는 지표 부근에서 대기나 물의 영향으로 모암이 변질되는 일련의 과정으로서 지하 심부에 있던 모암이 여러 가지 작용에 의하여 풍화되기 쉬운 조건에 노출되었을 때, 모암은 풍화되기 시작한다. 이때 암석의 풍화는 모암의 종류와 구조, 지하수 조건, 기후, 시간, 지형 및 생

물 등의 영향을 받는다. 특히 암석의 풍화는 오랜 시간에 걸쳐 이루어지는데 반해, 암석의 풍화등급을 결정하기 위하여 실시되는 여러 가지 시험들은 암석이 풍화되는 시간에 비하여 아주 짧은 시간에 이루어지기 때문에 현재까지 이루어진 풍화정도를 완전하게 결정하기 보다는 앞으로 진행될 풍화에 대한 가능성을 예측하는데 이용된다. 한편 풍화작용에 대한 암석의 저항성(내구성)을 측정하는 것은

\*Corresponding author: yeongsanriver@hanmail.net

암석의 풍화 정도를 결정하고 앞으로의 풍화 가능성을 예측하는데 있어 중요한 의미를 지닌다. 내구성은 여러 가지 풍화작용에 대하여 정의되며, 동결에 대한 저항성을 나타내는 동결 내구성(frost durability), 마모에 대한 저항성을 나타내는 마모 내구성(abrasion durability) 그리고 물에 대한 내구성을 나타내는 슬레이크 내구성(slake durability) 등이 있다. 이 중에서도 슬레이크 내구성 시험이 지수화되어 있어 많이 사용된다(이희근과 양형식, 1997).

Slaking 현상이란 점성토의 덩어리를 급속히 수중에 가라앉히면 내부에 갇힌 공기가 빠져나와 흩덩어리가 부서지는 현상 또는 암석이 건조의 반복에 따라 용이하게 세편화하는 현상을 말한다(임종석 등, 1996). 상당한 고결력을 가진 암석이라도 지하수위 변동, 굴착 등에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화 등에 의해 암석의 고결력이 저하되는 경우가 있다. 특히, 연한 암석에서는 환경 변화에 의거한 건조 및 습윤의 반복에 의하여 급격히 고결력을 잃어 조적이 파괴되는데, 이와 같은 특징적인 성질을 나타내는 암석에는 점토 함유량이 높은 이암이나 셰일의 경우가 많으며 사면 붕괴나 지압 문제 등, 암반 공학적으로 중요한 각종 문제와 관련이 있다(윤지선, 1991). 이암 및 셰일과 같은 이질암을 이루는 점토질 성분이 수분과 만나면 짧은 시간에 흐트러져 궁극적으로는 구조적 강도를 잃는 결과를 초래한다. 이러한 현상은 다른 암종에 비해 두드러지는 현상으로 절취사면이 수분에 노출되어 수개월 안에 토사와 유사한 거동을 보이는 문제점을 안고 있으며, 국내에서도 일부 국한되기는 하지만 간혹 사면 절취 후, 노출된 이암 및 셰일 암반이 쉽게 풍화되어 문제를 일으키는 경우가 보고되고 있다(박형동, 2002). 슬레이크 내구성 지수(slake durability index)는 Franklin and Chandra (1972)에 의해 암석이 건조와 습윤을 반복함으로써 고결력을 잃어 조적이 파괴되는 현상을 착안하여 고안되었으며, 특히, 건조와 습윤에 매우 민감한 점토광물이 많이 포함되어 있는 이암과 셰일 등의 세립질 쇄설성 퇴적암의 풍화도와 내구성을 정량적으로 평가하는데 유용하다.

국내의 이암 및 셰일은 중생대 백악기 퇴적암류가 주로 분포하는 경상남·북도 및 대구지역에 광범위하게 분포하고 있으며, 이외에도 전라남·북도 및 포항 지역 등에 분포하고 있다. 국내에서의 셰일 암석에 대한 연구는 주로 공학적 특성 및 지질공학적 특성에 관하여 여러 학자들(이정인 등, 1982; 정형식과 유병욱, 1997; 김영수 등, 2001a, b; 이영휘 등, 2000; 정태중, 1996; 김교원과 김수정, 2006; 민덕기와 문종규, 2006a, b)에 의해 연구되어 왔다. 특히 이암 및 셰일의 슬레이크 특성에 관한 연구로

는 포항에 분포하는 이암 층의 슬레이크 및 팽창 특성(이영휘, 1995), 온도와 pH 조건에 따른 슬레이크 내구성 지수의 관련성(이승재 등, 2001) 그리고 점하중 강도 지수에 따른 슬레이크 내구성과 흡수율의 특성(김경석 등, 2002)이 있었으며, 이러한 연구들은 주로 대구 및 경상남·북도 지역에 분포하는 셰일과 이암에 대해서 연구가 한정되어 있다.

따라서 본 연구에서는 전라남도에 위치하는 백악기 퇴적분지(능주분지, 해남분지, 함평분지) 중의 하나인 능주분지(김봉균 등, 1982)의 중심부인 화순군 지역에 분포하는 중생대 백악기 퇴적암류 중, 셰일의 풍화에 따른 물리적·역학적 특성 및 슬레이크 내구성 특성을 밝혀 설계 및 지반 공학적 문제 해결을 위한 기초 자료로서 활용하는데 연구의 목적을 두었다.

## 시료 및 연구방법

연구 시료가 분포하는 지역은 전라남도 화순군 북면 일대로 중생대 백악기 능주분지에 해당되는 지역이다. 이 지역에는 쇄설성 퇴적암인 셰일, 사암 및 역암이 호층으로 분포하고, 여기에 응회암 및 응회암질 사암이 협재되며, 상기 퇴적암류를 안산암이 관입하였다. 퇴적암류 중, 셰일은 흑색, 회색 및 적색의 셰일이 분포하며 이 중, 육안에 의한 암석의 풍화와 변질 정도에 의해 풍화도를 분류한 Wyllie (1992)의 안에 따라 신선(fresh), 약간풍화(slightly weathered), 중간풍화(moderately weathered), 심한풍화(highly weathered) 상태의 각각 6개 시료, 총 24개의 시료를 채취하였다. 암석의 신선한 상태는 암석의 변질이나 변색의 풍화 흔적이 보이지 않은 경우, 약간풍화 상태는 풍화에 의해 약간의 변색이 보이며 신선한 상태보다 강도가 약한 경우, 중간풍화 상태는 암석의 반 이상이 토양으로 붕괴되고, 신선 또는 변색된 암석이 불연속적으로 또는 핵석(corestone)으로 존재하는 경우, 심한풍화 상태는 암석의 반 이상이 토양으로 붕괴되고, 신선 또는 변색된 암석이 불연속적으로 또는 핵석으로 존재하는 경우를 의미한다.

한편 강도 특성을 파악하기 위하여, 현장에서 부정형 시료를 대상으로 풍화정도에 따라 층리면의 수직 방향으로 점하중 시험(ISRM, 1985)을 실시하여 50 mm 코아 시료를 기준으로 한 점하중 강도 지수( $I_s$ )를 구하였다. 점하중 강도 지수( $I_s$ )는 먼저 불규칙한 시료에 대한 점하중 강도 지수( $I_s$ ) ( $I_s = P/De^2$ ,  $De^2 = 4A/\pi$ )를 구하고, 보정계수(F) ( $F = (De/50)^{0.45}$ )를 곱하여 구하였다. 실내 시험으로는 각 셰일의 물리적 특성을 파악하기 위하여 자연 상태의 공

중중량( $W_1$ ), 80~110°C로 24시간 이상 건조시킨 상태의 강제 건조상태의 공중중량( $W_2$ ), 72시간 이상 수중에 담그고 충분히 흡수시킨 포화 함수 상태의 강제 습윤 상태의 공중중량( $W_3$ ) 그리고 강제 습윤상태의 수중중량( $W_4$ )을 구하고(윤지선, 1991), 함수율( $w = \{(W_1 - W_2) / W_2\} \times 100(\%)$ ), 공극률( $P = \{(W_3 - W_2) / (W_3 - W_4)\} \times 100(\%)$ ), 함수율( $Ab = \{(W_3 - W_2) / W_2\} \times 100(\%)$ ) 그리고 건조밀도( $\gamma_d = W_2 / V$ , 여기서  $V$ 는 겉보기 부피로  $(W_3 - W_4) / \text{물의 밀도}$ )를 각각 구하였다. 또한 각각의 셰일에 대한 슬레이크 내구성 특성을 파악하기 위하여 슬레이크 내구성 시험(Brown, 1981)을 이용하여 2사이클 후의 슬레이크 지수를 구하였다. 마지막으로 셰일의 물리적 특성과 점하중 강도 지수 및 슬레이크 내구성 지수와의 상관관계를 분석하였다.

**슬레이크 내구성 시험**

이 시험은 2회의 건조 및 습윤을 반복한 후, 암석 시료의 연화 또는 붕괴에 의한 저항의 정도를 평가하는 것이다. 슬레이크 내구성 시험의 장치는 2 mm 표준 mesh로 제작한 길이 100 mm, 직경 140 mm의 원통형 드럼으로 구성 되어 있다. 드럼의 회전 속도는 20 rpm 이며 이때, 드럼의 하부 40 mm는 물에 잠기게 한다. 한 개의 시료는 중량이 40-60 g 정도로 대략 구형의 형태로 코너는 둥근 모양의 암편 10개를 준비한다. 건조된 시료를 드럼에 넣고, 10분간 200회 회전 시킨 후, 남아 있는 시료의 건조 무게를 측정한다. 이를 2회 반복한다. slake durability index ( $Id_2$ )는 다음 식에 의하여 구한다. 높은 내구성을 갖는 암석을 평가할 때는 3cycle 이상의 시험을 한 후, 내구성 지수를 구할 수 있다.

$$\text{slake durability index } (Id_1) = (B - D / A - D) \times 100 (\%)$$

$$\text{slake durability index } (Id_2) = (C - D / A - D) \times 100 (\%)$$

A : 드럼 + 시료 무게

B : 1 cycle 후의 드럼+남은 시료 무게

C : 2 cycle 후 드럼+남은 시료 무게

D : 드럼 무게

Gamble (1971)은 셰일과 점토질 암에 대한 슬레이크 내구성 시험 결과, 내구성과 암석의 지질시대와는 상관성이 적고, 밀도와는 선형적으로 증가하며, 이와 반대로 자연 함수율과는 반비례하는 경향을 보인다고 하였다(Goodman, 1980). 위의 결과에 의해 Gamble (1971)은 슬레이크 내구성을 Table 1과 같이 분류하였다.

**Table 1.** Slake durability classification.

Group Name	% Retained after one 10-minute cycle (dry weight basis)	% Retained after two 10-minute cycle (dry weight basis)
Very high durability	>99	>98
High durability	98-99	95-98
Medium high durability	95-98	85-95
Medium durability	85-95	60-85
Low durability	60-85	30-60
Very low durability	<60	<30

**실험 결과 및 고찰**

**물리적 특성**

전라남도 화순군 북면 일대 지역에 분포하는 중생대 백악기 셰일의 물리적 특성은 Table 2와 같다. 비중은

**Table 2.** Physical characteristics of Shale in the Hwasun area.

Sample No.	G <sub>s</sub>	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	P (%)	Ab (%)	I <sub>s(50)</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Id <sub>2</sub> (%)	Id <sub>5</sub> (%)
f-1	2.61	2.57	0.21	1.33	0.51	54.9	99.16	98.84
f-2	2.88	2.83	0.15	1.72	0.60	69.3	99.03	97.78
f-3	2.82	2.76	0.15	1.94	0.69	65.4	99.18	98.68
f-4	2.55	2.47	0.12	3.36	1.32	88.4	99.33	98.58
f-5	2.54	2.48	0.14	2.79	1.10	58.6	99.02	98.60
f-6	2.51	2.41	0.14	4.30	1.71	90.2	99.19	98.81
sw-1	2.26	2.04	0.82	10.88	4.82	45.7	97.80	95.59
sw-2	2.44	2.22	0.69	9.95	4.07	48.3	97.83	96.08
sw-3	2.24	1.97	1.03	13.55	6.05	41.2	97.59	96.34
sw-4	2.40	2.24	1.42	7.15	2.98	40.1	97.70	93.80
sw-5	2.39	2.22	0.85	7.64	3.20	34.5	97.02	94.21
sw-6	2.40	2.25	0.56	7.03	2.92	49.4	97.36	94.32
mw-1	2.14	1.86	0.63	14.73	6.90	30.1	95.80	90.67
mw-2	2.26	1.99	0.70	13.35	5.91	31.0	96.36	88.91
mw-3	2.20	1.92	0.71	14.61	6.64	29.4	96.61	91.55
mw-4	2.24	2.02	1.96	10.82	4.83	21.9	96.58	90.73
mw-5	2.30	2.10	2.17	9.53	4.14	25.5	95.64	90.33
mw-6	2.21	2.00	1.70	10.95	4.95	20.2	95.22	87.71
hw-1	2.40	2.00	6.36	20.49	8.52	19.3	93.90	85.02
hw-2	2.28	1.98	4.25	15.38	6.74	17.1	94.10	85.70
hw-3	2.43	2.04	5.25	19.10	7.86	17.6	93.77	86.56
hw-4	2.47	1.95	1.26	11.12	5.29	12.4	90.15	78.98
hw-5	2.22	1.93	2.21	15.24	6.87	10.8	90.07	79.97
hw-6	2.29	2.02	3.55	13.44	5.88	14.5	90.87	81.89
Min.	2.14	1.86	0.12	1.33	0.51	10.8	90.07	78.98
Max.	2.88	2.83	6.36	20.49	8.52	90.2	99.33	98.84
Aver.	2.40	2.18	1.54	10.02	4.35	39.0	96.22	91.65

f: fresh, sw: slightly weathered, mw: moderately weathered, hw: highly weathered

전체적으로 2.14~2.88의 범위이며, 평균 2.40이다. 건조 밀도는 1.86~2.83( $\text{g}/\text{cm}^3$ )의 범위로 평균 2.18( $\text{g}/\text{cm}^3$ )을 나타낸다. 함수율은 0.12~6.36(%)의 범위와 평균 1.54(%)를 나타낸다. 공극률은 1.33~20.49(%)의 범위로 평균 10.02(%)를 나타내며, 흡수율은 전체적으로 0.51~8.52(%)의 범위와 평균 4.35(%)를 보인다. 풍화정도에 따른 건조 밀도, 함수율, 공극률, 흡수율, 슬레이크 내구성 지수 및 점하중 강도 지수는 Fig. 1과 같다. 건조 밀도는 신선한 상태의 평균 2.58( $\text{g}/\text{cm}^3$ )에서 약간풍화 상태의 평균 2.35( $\text{g}/\text{cm}^3$ )로 급격히 감소함을 보여주며, 중간풍화와 심한풍화 상태에서는 평균 1.98( $\text{g}/\text{cm}^3$ )을 보여주고 있다. 함수율은 신선한 상태의 0.15(%)에서 약간풍화, 중간풍화 및 심한풍화 상태로 갈수록 증가하며, 심한풍화 상태에서의 값의 범위는 1.26~6.36(%)까지 넓게 분포되어 있다. 공극률은 신선한 상태에서 평균 2.57(%)이며 풍화가 진행될수록 심한풍화 상태의 평균 15.79(%)까지 점차적으로 증가하는 일반적인 형태를 보여준다. 흡수율 역시 공극률과 같이 신선한 상태

에서의 평균 0.98(%)에서 풍화가 진행될수록 심한풍화 상태의 평균 6.86(%)까지 점차적으로 증가하고 있다. 점하중 강도 지수( $I_{s(50)}$ )는 풍화 정도별로 심한풍화 상태에서 신선한 상태까지 10.8~90.2( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )까지 다양하게 변화하는 것으로 나타났다. 풍화 정도별로 보면 신선한 상태에서는 54.9~90.2( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), 약간풍화 상태에서는 34.5~49.4( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), 중간풍화 상태에서는 20.2~31.0( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 그리고 심한풍화 상태에서는 10.8~19.3( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )의 범위를 보여 주며, 이 중에서 신선한 상태에서의 값이 다소 큰 범위로 분포하고 있는데, 이는 육안적 판단에 의한 오차성을 내포하고 있다. 국내의 다른 지역에 분포하는 세일(김성환 등, 1997)의 풍화 정도별 점하중 강도 지수의 값과 비교할 때, 연구지역에 분포하는 세일의 풍화에 따른 점하중 강도 지수의 값이 약간 높은 경향을 보인다(Table 3).

연구 지역에 분포하는 중생대 백악기의 신선한 상태의 세일의 물리적 특성과 대구지역에 분포하는 중생대 백악기 세일(이영휘 등, 2002)과 비교하면, 연구 지역의 신선한 세

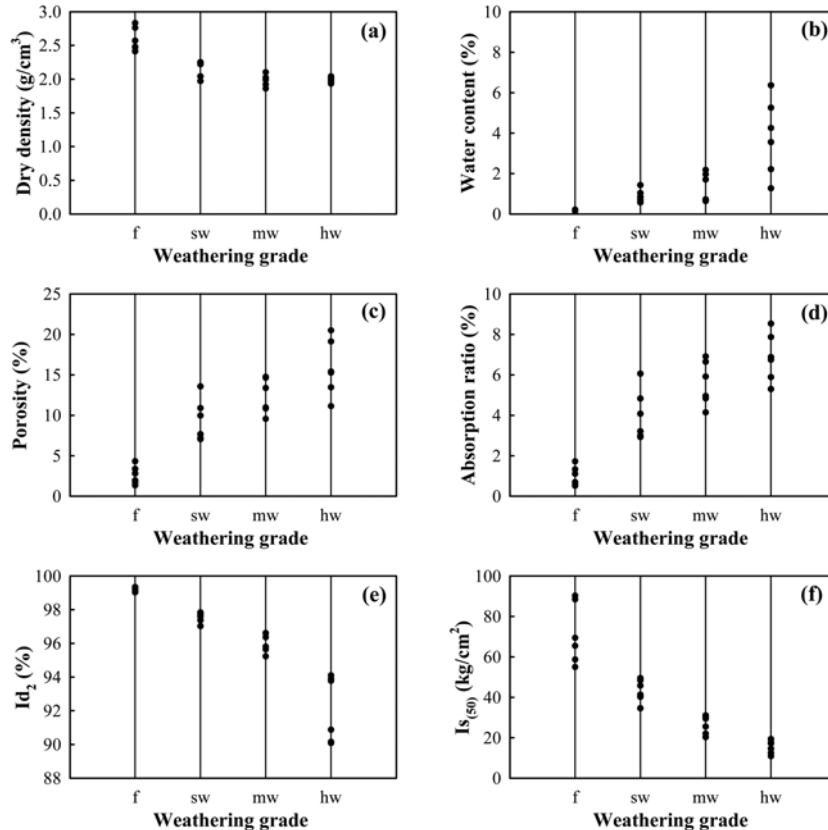


Fig. 1. Physical and mechanical properties of tested shales for different grades of weathering (a: dry density, b: water content, c: porosity, d: absorption ratio, e:  $I_{d_2}$ , f:  $I_{s(50)}$ ).

**Table 3.** Point load intensity index( $I_{s(50)}$ ) for shale samples.

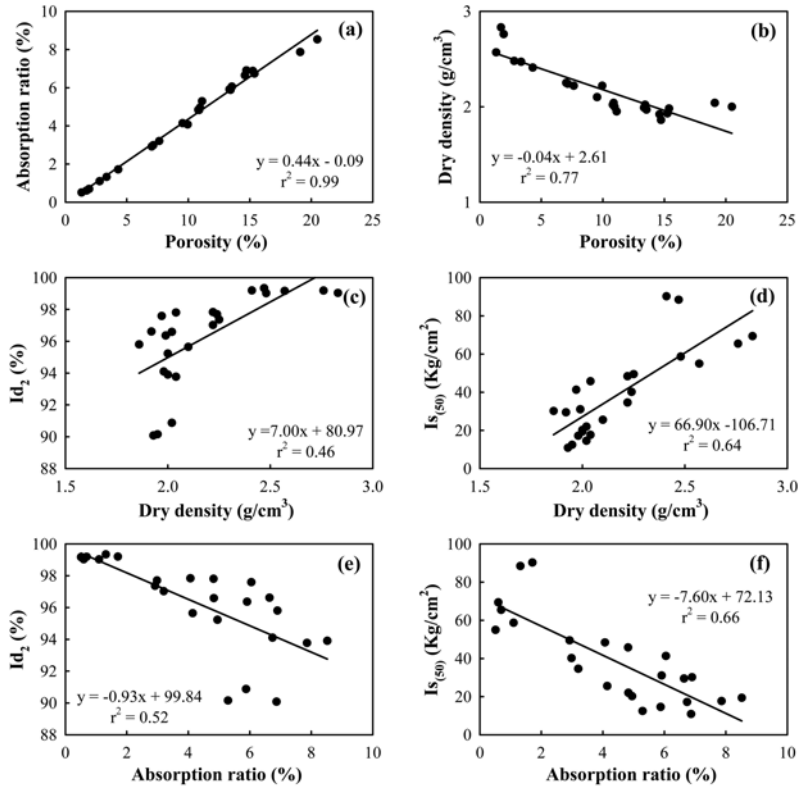
rock type	sampling site	$I_{s(50)}$ (kg/cm <sup>2</sup> )			
		hw	mw	sw	f
shale <sup>1</sup>	Guma, Jungang Exp. highway	0~13	6~30	25~45	45~75
shale <sup>2</sup>	Hwasun	10.8~19.3	20.2~31.0	34.5~49.4	54.9~90.2

<sup>1</sup>김성환 등(1997), <sup>2</sup>this study

일의 평균비중은 2.59로 대구 지역 셰일의 비중 2.53~2.77과 유사하며, 또한 공극률은 평균 2.57%로 대구 지역 셰일의 공극률 0.36~2.33% 보다 약간 높은 편이다. 흡수율은 평균 0.98%로 대구 지역 셰일의 흡수율 0.13~0.87% 보다 높은 편이다. 진라북도 무주지역에 분포하는 셰일과(이정인 등, 1982) 비교하면 밀도는 2.68보다 낮은 편이며, 공극률은 1.04%보다 높은 편이다. 또한 이희근과 양형식(1997)은 국내 8개 지역 137개 셰일 시료의 실험 결과 공극률이 1~7%의 범위를 보인다고 하였는데, 연구 지역 셰일의 공극률은 평균 2.57%로 이 범위의 값을 보여주고 있다.

**물리적 특성의 상호관계**

공극률과 흡수율의 관계는 공극률이 클수록 흡수율이 증가하는 밀접한 상관관계를 가지며, 비례적이다. 이들 특성 치들의 회귀분석 결과  $Ab=0.44P-0.09$ (Ab: 흡수율, P: 공극률)의 식으로 표현되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.99로 상관성이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 2). 공극률과 건조 밀도의 관계는 공극률이 증가할수록 건조밀도는 낮아지는 일반적인 형태를 보여주며, 관계식은  $\gamma_d=-0.04P+2.61$ (g/cm<sup>3</sup>)로 표현되며 결정계수( $r^2$ )는 0.77로 비교적 상관성이 양호한 것으로 나타났다. 흡수율과 건조밀도 관계



**Fig. 2.** Correlations among properties (a: porosity vs. absorption ratio, b: porosity vs. dry density, c: dry density vs.  $Id_2$ , d: dry density vs.  $I_{s(50)}$ , e: absorption ratio vs.  $Id_2$ , f: absorption ratio vs.  $I_{s(50)}$ ).

는 흡수율과 공극률의 관계가 밀접하기 때문에 흡수율과 건조밀도 관계 역시 이와 유사한 결과를 보인다. 또한 슬레이크 내구성 지수와 밀도와의 관계는 건조밀도가 클수록 슬레이크 내구성 지수는 증가하며 관계식은  $Id_2 = 7.0\gamma_d + 80.97(\%)$  ( $r^2 = 0.46$ )로 표현 될 수 있다. 건조 밀도에 따른 점하중 강도와의 관계는 건조밀도가 클수록 점하중 강도가 커지는 경향을 보이며 이들의 관계식은  $Is_{(50)} = 66.9\gamma_d - 106.71(\text{kg/cm}^2)$ 로 표현 되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.64를 나타낸다. 흡수율이 증가 할수록 슬레이크 내구성 지수와 점하중 강도지수는 작아지는 경향을 보이며 결정계수( $r^2$ )는 각각 0.52와 0.66이다. 슬레이크 내구성 지수와 함수율과의 관계는 함수율이 높을수록 슬레이크 내구성 지수는 낮아지는 특징을 보인다. 이와 같이 슬레이크 내구성 지수와 건조밀도 및 함수율과의 관계 특징은 Gamble (1971)의 연구와도 유사하다.

**풍화도별 슬레이크 내구성 지수**

세일의 풍화도별 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ )의 특징을 살펴보면 풍화상태가 신선한 상태의 세일에서의 내구성 지수의 변화는 크지 않으며, 풍화가 진행 될수록 내구성 지수는 작은 값을 보인다. 풍화상태에 따른 슬레이크 내구성 지수의 변화를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 신선한 상태의 세일의 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ )는 Gamble (1971)의 분류에 의하면 신선한 상태는 평균 99.15%로 very high durability에 속하며, 약간풍화와 중간풍화 상태는 각각 평균 97.55%와 96.03%로 high durability 그리고 심한풍화 상태의 경우 평균 92.14%로 medium high durability에 해당이 된다. 신선한 상태의 세일의 경우 슬레이크 내구성 지수는 99.02~99.33%의 범위로 대구 지역에

분포하는 중생대 백악기 세일의 슬레이크 내구성 지수인 99.7~99.8%(박시현, 1996)과 99.0~99.5%(이영휘 등, 2002)와 비교하면 거의 유사한 값을 보이며, 신생대 3기의 이암(35.6~88.6%)(박시현, 1996) 보다는 높은 값을 보인다. 풍화도별 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ )의 변화는 신선한 상태의 평균 99.15%에서 심한 풍화상태의 평균 92.14%까지 완만하게 감소하고 있다. 5cycle에서의 슬레이크 내구성 지수( $Id_5$ )는 신선한 상태에서 평균 98.54%, 심한풍화 상태에서 평균 83.02%를 보인다. 전체적으로 슬레이크 내구성 지수의 변화 양상을 보면 1cycle에서 3cycle까지는 슬레이크 내구성 지수가 완만하게 감소하다가, 3cycle과 4cycle에서 슬레이크 내구성 지수가 급격히 감소하는 특징을 보인다. 특히, 심한풍화 상태에서 내구성 지수의 감소폭이 큰 편이다(Table 2와 Fig. 3). hw-1 시료의 내구성 시험 결과, 3cycle에서 4cycle 사이에서 입자의 가장자리가 둥글게 마모되는 특징을 보여준다(Fig. 4).

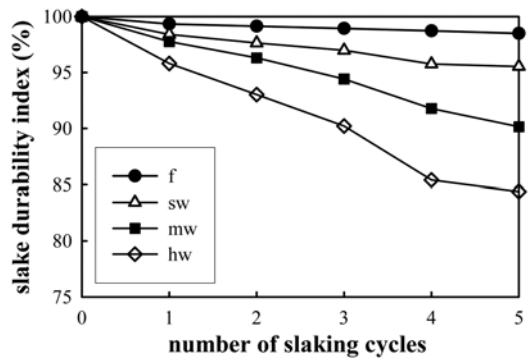


Fig. 3. Correlation between number of slaking cycles and slake durability index for samples of shale.

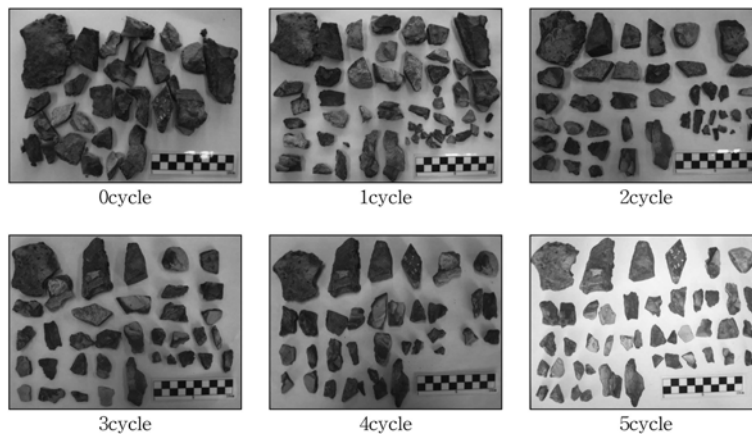


Fig. 4. Change in shape and size of sample pieces after various cycles of the slaking test (hw-1). Scale bar is 10 cm.

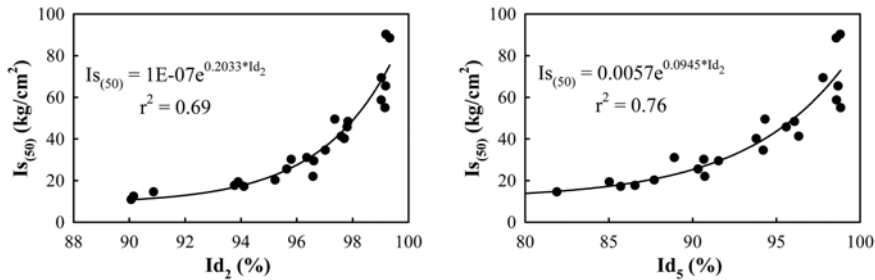


Fig. 5. Correlation between the point load strength index ( $I_{s(50)}$ ) and the slake durability index for shale (a:  $Id_2$ , b:  $Id_5$ ).

**슬레이크 내구성 지수와 점하중강도 지수와의 관계**  
 셰일의 풍화정도별 물리적 특성의 변화 경향을 보면 풍화 정도가 진행될수록 건조밀도, 슬레이크 내구성 지수 및 점하중강도 지수는 감소하고 있다(Fig. 1). 위의 결과에 따라 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수의 상관관계를 예측할 수 있다. 점하중강도 지수는 암석 및 암반의 일축압축강도를 예측할 수 있는 간편하고 실용적인 유용한 방법으로 점하중강도와 일축압축강도의 상관성은 양호한 것으로 알려져 있으며(Franklin & Chandra, 1972; Bieniawski, 1975, 1989; Pelles, 1975; Hawkins and Olver, 1986), 국내에서도 여러 암종에 대한 연구 결과(이수근과 이송, 1995; 정형식과 유병욱, 1997; 김영수 등, 2001b; 이승재 등, 2001; 문종규, 2001; 민덕기와 문종규, 2006a)들 역시 양호한 상관관계를 보여주고 있다. 본 연구에서는 셰일 시료의 코아 성형이 어려워 일축압축강도의 측정이 이루어지지 않아 점하중 강도 측정이 이루어 졌다. 따라서 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ ,  $Id_5$ )와의 상관관계를 분석하였다(Fig. 5). 분석결과 연구지역 셰일의 점하중강도 지수가 클수록 슬레이크 내구성은 강한 특성을 보이며, 점하중강도 지수와  $Id_2$ 와의 관계식은  $I_{s(50)} = 1E-07e^{0.2033Id_2}$  ( $kg/cm^2$ )와 같이 지수 함수식으로 표현되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.69를 보여주며, 또한 점하중 강도 지수와  $Id_5$ 와의 관계는  $I_{s(50)} = 0.0057e^{0.0945Id_5}$  ( $kg/cm^2$ )와 같이 지수 함수식으로 표현되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.76으로 역시 상관성은 비교적 양호한 편이다.

국내의 여러 암종에 대한 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수와의 관계성은 점하중 강도 지수가 클수록 슬레이크 내구성 지수는 강한 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며(정형식과 유병욱, 1997), Leung과 Radhakrishnan (1990)은 여러 풍화단계의 사암, 이암, 셰일의 강도와 슬레이크 내구성 지수가 관계가 있음을 연구하였다. 본 연구에서 셰일의 풍화정도별 점하중 강도 지수는 일축압축강

도와의 상관성이 유지되므로 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수와의 관계성은 밀접한 관계가 있다는 결과를 뒷받침한다. 따라서 위의 식들은 셰일의 풍화정도별 점하중 강도 지수의 값을 이용하여 슬레이크 내구성 지수인  $Id_2$ 와  $Id_5$ 의 값을 유추하는데 유용한 식이라고 생각한다.

### 결론

전라남도 화순군 일대에 분포하는 중생대 백악기 셰일의 풍화정도에 따른 물리적 특성과 슬레이크 내구성 특성에 관한 실내 시험 결과 다음과 같다. 심한풍화 상태에서부터 신선한 상태의 셰일의 비중은 2.14~2.88, 건조밀도는 1.86~2.83( $g/cm^3$ ), 함수율은 0.12~6.36(%), 공극률은 1.33~20.49(%) 그리고 흡수율은 0.51~8.52(%)의 범위를 갖는다. 물리적 특성 중에서 공극률과 함수율은  $Ab = 0.44P - 0.09$  ( $Ab$ : 함수율,  $P$ : 공극률)의 식으로 표현되며, 결정계수( $r^2$ )는 0.99로 상관성이 양호한 편이다. 심한풍화 상태에서 신선한 상태의 풍화정도에 따른 셰일의 슬레이크 내구성 지수( $Id_2$ )는 90.07~99.33(%)의 범위를 갖으며, 또한 점하중강도 지수는 10.8~90.2( $kg/cm^2$ )의 범위를 갖는다. 점하중강도 지수와 슬레이크 내구성 지수의 관계에서 점하중강도 지수가 클수록 슬레이크 내구성은 강한 것으로 나타났으며, 이들의 상관 관계식은  $I_{s(50)} = 1E-07e^{0.2033Id_2}$  ( $kg/cm^2$ )로 표현 된다. 이와 같이 점하중강도 지수에 따른 슬레이크 내구성 지수와의 관계식은 현장에서 설계 및 지반공학적 문제 해결을 위한 기초 자료로서 활용할 가치가 있다.

### 사사

논문의 미진한 부분을 세심하게 살펴주시고 많은 도움이 될 조언을 해 주신 장찬동, 김광영 심사위원님과 익명의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 김경석, 유병욱, 이상돈, 2002, 경상분지 세일 지역에서의 절토사면 파괴 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, 104-114.
- 김교원, 김수정, 2006, 한반도의 암종별 공학적 특성의 상관성 분석, 대한지질공학회지, 16, 59-58.
- 김봉균, 김종환, 박희인, 윤석규, 이대성, 이하영, 장기홍, 정창희, 1982, 한국의 지질과 광물 자원, 대림문화출판사, 520p.
- 김성환, 유병욱, 조성로, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도 변화 특성에 관한 연구, 한국지반 공학회 97 사면안정 학술발표회 논문집, 115-136.
- 김영수, 서인식, 허노영, 이재호, 김병탁, 2001a, 층리면을 고려한 세일의 공학적 특성, 한국 지반공학회논문집, 17(1), 5-13.
- 김영수, 허노영, 방인호, 이재호, 성인수, 2001b, 세일(혈암)의 이방성 파괴특성, 한국지반 공학회논문집, 17(2), 13-20.
- 문종규, 2001, 암석의 일축압축강도와 점하중강도의 상관관계에 관한 연구, 울산대학교 석사학위논문, 75p.
- 민덕기, 문종규, 2006a, 울산지역 퇴적암의 강도 추정법 연구-점하중 강도 지수로부터 일 축압축강도 추정-, 한국지반공학회논문집, 22(8), 63-75.
- 민덕기, 문종규, 2006b, Schmidt hammer 반발지수로 울산 지역 퇴적암의 공학적 특성을 추정하기 위한 연구, 22(10), 139-150.
- 박시현, 1996, 퇴적암의 역학적 특성에 관한 연구, 경북대학교 대학원 석사학위논문, 71p.
- 박형동, 2002, 이암과 세일의 지질공학적 특성, 한국지반 공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, 20-30.
- 윤지선, 1991, 암석압반의 조사와 시험, 구미서관, 671p.
- 이수근, 이송, 1995, 점하중강도를 이용한 한국화강암의 일축압축강도 추정방법, 대한토목학회, 15, 1015-1027.
- 이승재, 노상림, 윤지선, 2001, 포항지역 이암과 대구지역 흑색 세일의 물리, 역학적 특성, 한국자원공학회지, 38(4), 310-315.
- 이영휘, 1995, 포항 이암층의 slaking, 팽창 및 전단강도 특성, 한국지반공학회지, 12(2), 33-42.
- 이영휘, 김용준, 박준규, 2000, 압축강도와 풍화에 관련된 퇴적암의 공학적 특성, 한국지반 공학회논문집, 16(1), 5-17.
- 이영휘, 김용준, 정강복, 2002, 퇴적암의 공학적 특성 및 문제점, 한국지반공학회 암반역학 위원회 학술세미나 논문집, 32-50.
- 이정인, 이희근, 유창하, 양형식, 1982, 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성연구(제1보)-주요 탄진 지역 및 지하발전소건설지역에 분포하는 퇴적암의 역학적 성질-, 대한광산학회지, 19, 260-267.
- 이희근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교 출판부, 504p.
- 임종석, 이원택, 권호진, 송영우, 박용원, 1996, 지반공학 용어사전, 671p.
- 정태종, 1996, 대구지역에 분포하는 백악기 세일의 역학적 특성, 한국지구과학회지, 17, 489-496.
- 정형식, 유병욱, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국 지반공학회지, 13(6), 71-93.
- Bieniawski, Z. T., 1975, The point load test in geotechnical practice, Engineering Geology, 9, 1-11.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, Inc., 272p.
- Brown, E. T., 1981, Rock characterization testing and monitoring(ISRM suggested methods), Pergamon press, 200p.
- Franklin, J. A. and Chandra, R., 1972, The slake durability test, Int J Rock Mech Sci 9, 325-341.
- Gamble, J. C., 1971, Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, Ph. D., thesis, University of Illinois, 159p.
- Goodman, R. E., 1980, Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, 478p.
- Hawkins, A. B. and Olver, J.A.G., 1986, Point load test: correlation factors and contractual use an example from the Corallian at Weymouth, Geological society publication, 2, 269-271.
- ISRM, 1985, "Suggested Methods for Determining Point Load Strength", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 22, 51-60.
- Leung, C. F. and Radhakrishnan, R., 1990, Geotechnical properties of weathered sedimentary rocks, Geotech Eng, 21, 29-48.
- Wyllie, D. C., 1992, Foundations on Rock, Chapman & Hall, England, 403p.

---

2010년 8월 2일 원고접수, 2010년 9월 15일 게재승인

## 김해경

광주교육대학교 과학교육과

500-703 광주광역시 북구 풍향동 1-1

Tel: 062-520-4151

Fax: 062-520-4158

E-mail: khg@gnue.ac.kr

## 김태국

전남대학교 토목공학과

500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

Tel: 062-530-1650

Fax: 062-530-1659

E-mail: ktk0114@hanmail.net

## 오강호

전남대학교 지구과학교육과

500-757 광주광역시 북구 용봉동 300

Tel: 062-530-2327

Fax: 062-530-2519

E-mail: yeongsanriver@hanmail.net