대구지역 적색 셰일과 흑색 셰일의 공학적 특성

곽성민¹ · 정용욱² · 김교원^{1*}

¹경북대학교 지질학과, ²계명대학교 첨단건설재료실험센터

Engineering Properties of Red Shale and Black Shale of the Daegu Area, Korea

Seong-Min Kwag¹, Yong-Wook Jung², and Gyo-Won Kim^{1*}

¹Department of Geology, Kyungpook National University

²Advanced Construction Materials Testing Center, Keimyung University

본 연구에서는 생성 당시의 퇴적환경이 상이한 것으로 알려진 대구지역의 적색 셰일과 흑색 셰일의 물리적 및 역학적 특성을 확인하기 위하여 단위중량, 흡수율, 공극률, 초음파속도, 일축압축강도, 점하중강도, 슬레이크 내구성 및 열화특성 시험 등을 실시하였고, XRD 및 XRF 분석과 SEM 영상 분석을 수행하였다. 시험결과 두 셰일의 단위중량은 유사하였으나 흡수율과 공극률은 적색 셰일이 흑색 셰일보다 더 높았다. 특이하게도 공극률이 높은 적색 셰일의 초음파속도, 일축압축강도, 점하중강도지수 가 흑색보다 더 높은 값을 보였는데 이는 흑색 셰일 내에 발달된 엽층리의 영향인 것으로 판단된다. 열화시험에서는 용액의 산성도가 증가할수록 또 수침시간이 길어질수록 시료의 점하중강도지수와 슬레이크 내구성지수의 저감정도가 심하였으며, 흑색 셰일보다는 공극률이 큰 적색 셰일에서 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 셰일, 초음파속도, 흡수율, 일축압축강도, 점하중강도지수, 슬레이크 내구성지수, 열화시험

The physical and mechanical properties of red shale and black shale exposed in the Daegu area were investigated in tests conducted to determine unit weight, absorption ratio, porosity, ultrasonic velocity, unconfined compressive strength, point load strength, slake durability index, and deterioration characteristics. XRD, XRF, and SEM analyses were also performed on the shale specimens. While the unit weights of the two shales were similar, the absorption ratio and porosity were higher in the red shale than in the black shale. Despite the higher porosity of the red shale, the ultrasonic velocity, compressive strength, and point load strength were higher in the red shale, which is an unexpected result that may be due to the presence of fine laminations in the black shale. The deterioration rate, as determined from the point load strength and the slake durability index, increased with increasing immersion time and with the acidity of the immersion liquid. The deterioration rate was higher for the red shale than for the black shale because of the higher porosity of the former.

Key words : shale, absorption ratio, ultrasonic velocity, uniaxial compressive strength, point load strength index, slake durability index, deterioration test

*Corresponding author: gyokim@knu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구 배경 및 목적

암석은 그 구성광물의 종류, 비율, 방향성, 화학성분 등에 따라 물리적 성질이 달라지며 이는 또한 강도 및 변형특성 등 공학적 특성에 영향을 미친다. 암석은 생성 환경과 조건에 따라 공학적으로 이방성 특성을 나타내기도 하는데, 층리가 잘 발달하고 있는 경상누층군의 세일도 강한 이방성을 보이는 것으로 알려져 있다.

이방성 암석에 대한 연구는 1960년대부터 Jaeger (1960)와 McLamore and Gray (1967)에 의해 본격적으로 시작하였으며 Hoek and Brown (1980)은 이방성 암석의 파괴이론을 제안하였고 Franklin and Chandra (1972), Wyllie (1992) 등에 의해 이방성 암석에서 일축 압축강도와 점하중강도지수의 상관관계에 대하여 보고된 바 있다. 국내에서도 특히 대구지역 퇴적암의 공학적 특성(So and Choi, 1975; Jeoung, 1996a,b; Im et al., 2005; Kim and Kim, 2006), 세일의 이방성 파괴 특성(Kim et al., 2001a,b; Lee and Kim, 2008; Lee and Youn, 2009) 등에서 다수의 연구가 이루어진 바 있다. 하지만 세일의 생성 당시의 퇴적환경의 차이에 의하여 색상이 결정되는 것으로 알려진 적색 세일과 비적색 세일(비적색 세일의 대부분은 짙은 회색 또는 흑색을 띠기 때문에 편의상 흑색 세일로 칭한다.)의 색상에 따른 공학적 특성의 차이에 대한 연구는 전무한 편이었다.

본 연구지역인 대구시는 지질학적으로 중생대 백악기에 형성된 지층으로 경상누층군 하양층군에 속하며 하부로부터 칠곡층, 신라역암, 학봉현무암, 함안층, 반야월층의 층서를 이루고 있다. 구성 암석은 세일, 이암 및 사암이 대부분을 차지하고 있고 그 중에서도 세일이 우세하게 나타나는데, 세일은 퇴적암 중에서도 이방성이 가장 뚜렷하게 나타나고 있다. 본 연구의 목적은 적색 세일과 흑색 세일의 공학적 특성에서 어떠한 차이가 있는가를 구명하는 것으로, 각 암석 시료에 대하여 다양한 물성시험과 역학시험을 실시하였으며 얻어진 시험결과를 근거로 각 특성 간의 상관성을 분석하였다.

연구방법

본 연구에 이용된 시료는 대구지하철 2호선 건설 당시 수행된 지반조사의 코어시료를 이용하였는데, 적색 세일은 만촌역 부근의 함안층에 속하는 시료이고 흑색 세일은 대공원역 부근의 반야월층에 속하는 시료이다. 시험은 여러 시추공에서 채취된 대략 5.0 m 심도의 시

Fig. 1. Texture of red shale without bedding planes and black shale with bedding planes.

료를 선별하여 사용하였으며 대표시료의 층리구조는 암석 절단면 사진(Fig. 1)에서 보는 바와 같이 적색 세일은 층리면의 발달이 뚜렷하지 않은 반면 흑색 세일은 분명한 층리면을 보이고 있다. 시료는 층리의 방향성에 따라 공학적 특성에서 이방성을 보이는데, 이방성 암석에 대한 선행연구(Kim et al., 2001a,b; Lee and Kim, 2008)에 의하면, 재하 축과 층리면의 각도가 0° 와 90° 에서 최대강도를 보였으며 60° 에서 가장 낮은 강도를 나타내었다. 따라서 본 연구에서의 실내시험에 사용된 코어 시료들은 층리면의 방향성에 따른 이방성 영향을 제거하기 위하여 층리면이 수평방향으로 배열되도록 시료를 제작하였다. 또 본 연구의 모든 시험방법은 ISRM (1978, 1979a, 1979b, 1985), 한국암반공학회(2010)에서 제안한 암석표준시험법에 준하여 실시하였다.

전체단위중량은 자연 상태의 무게와 시료의 부피를 이용하여 구하였고, 이 시료를 건조기에서 24시간 이상 건조 시키고 그 사이 4시간 간격으로 시험편의 무게를 측정하여 시험편의 무게가 0.1% 이내로 변할 때의 건조 무게를 구하고 시료를 여과수를 담은 밀폐된 용기에 넣고 48시간 이상 수침 후 표면을 젖은 천으로 닦아내고 습윤 무게를 구하고, 이를 이용하여 흡수율과 공극률을 구하였다.

비파괴시험인 초음파속도시험은 Ultracon-170 시험기를 이용하여 파동전송 측정방식으로 송신기와 수신기의 이격거리 및 파동의 전파시간을 측정하는 직접법을 이용하였다. 암석의 화학성분 분석을 위한 XRF (X-Ray Fluorescence)분석, 광물성분 분석을 위해 XRD (X-Ray Diffraction)분석을 실시하였고, 암석표면의 미세구조와 구성원소를 파악하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscope)분석을 수행하였다.

압축압축강도 시험용 시료는 NX코어로서 직경 대 길

이 비(L/D)가 약 2.0이 되도록 제작하여 기본적인 물성인 단위중량, 공극률 및 흡수율을 먼저 측정하였으며, 초음파속도를 측정한 후 일축압축강도 시험을 측정하였다. 점하중강도지수 시험은 직경 대 길이 비(L/D)가 1.0이 되도록 코어를 성형하여 층리면에 수직방향으로 제하여 시험을 실시하였다. 일축압축강도 시험은 적색과 흑색 각각 27개, 점하중강도지수 또한 마찬가지로 각각 27개의 시료 총 108개의 시료에 대하여 시험을 실시하였다. 일축압축강도 시험에 이용된 시험기는 UTM으로 최대용량 1,000 kN, 변위센서의 범위는 0~200 mm이고 시료는 NX 코어 크기로 편평도 0.025 mm로 연마하여 2~15분 사이에 깨어질 수 있도록 속도를 재하하였다. 점하중강도 시험은 일축압축강도 시험에 이용된 시험기를 이용하였으며 가압장치는 선단부가 구형으로 된 원추형이며 중심축이 ± 0.2 mm 오차 범위 이내로 일치하는 장치를 이용하였으며, 시료가 10~60초 이내에 파괴될 수 있도록 재하속도를 조절하였다.

열화시험은 시료를 서로 다른 산성 및 알칼리 용액(pH 3.0, pH 5.6, pH 7.0 및 pH 9.0)에 일정시간(1, 5, 10, 15 및 30일) 동안 침윤시킨 후 적색과 흑색 각각 5개의 시료에 대하여 흡수율과 점하중강도지수를 측정하는 것으로 진행하였는데 초기치 측정 시료 10개를 포함하여 총 210개의 시료에 대하여 시험이 수행되었다. 열화시험은 임의의 조건을 부여하여 강도 및 내구성의 저하를 알아보는 시험으로 저감 정도를 알아보기 위해 일정한 산도의 용액에 침수한 후 그 영향을 흡수율, 점하중강도지수 및 슬레이크 내구성지수의 변화를 측정함으로써 평가하였다. 시험 방법은 우선 증류수에 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 이용하여 밀폐용기에 각각 pH 3.0, pH 5.6, pH 7.0, pH 9.0이 되도록 pH-meter로 조절된 농도의 용액에 시료를 수침시키고 시간의 경과에 따라 1일, 5일, 10일, 15일, 30일 간격으로 시료를 건져내어 흡수율을 구하고 점하중강도지수를 측정하였다. 이때 pH 농도를 유지하기 위해 시료를 건져내는 5일 마다 침수용액을 pH-meter로 측정하여 용액의 농도를 조절하였다. 슬레이크 내구성 시험은 점하중강도 시험 후 파괴된 시료를 이용하여 질량 40~60 g인 덩어리 10개를 총 450~550 g로 성형하여 실시하였다. 이 시험은 우선 시료를 깨끗한 드럼에 넣고 이를 건조조에 넣은 다음 무게가 변하지 않을 때까지 건조시킨 후 무게를 측정하고 시험기에 거치하여 회전속도 20 rpm으로 10분 동안 실시한 후 105°C 건조소에서 무게가 변하지 않을 때까지 건조시킨 후 무게를 측정하는 것을 1

cycle로 두 번을 수행하여 슬레이크 내구성지수를 구하였다.

시험 결과

기본 물성시험

세일의 전체단위중량(γ), 흡수율(A_b), 공극률(n)을 측정하였는데, 시료번호는 전체단위중량을 기준으로 정렬하였다. 이는 공극률, 함수비, 온도, 역학적 성질과도 연관이 있기 때문에 가장 낮은 전체단위중량을 1번으로(R-1, B-1) 재배열하여 각각 기재 하였다. Table 1에 정리한 바와 같이 전체단위중량 측정 결과 적색 세일은 $\gamma = 2.49 \sim 2.77 \text{ g/cm}^3$ (평균 2.63), 흑색 세일은 $\gamma = 2.48 \sim 2.76 \text{ g/cm}^3$ (평균 2.60)을 나타내어서 단위중량의 편차는 거의 없는 것으로 나타났다. 흡수율은 적색 세일이 $A_b = 2.30 \sim 3.82\%$ (평균 3.15), 흑색 세일은 $A_b = 0.91 \sim 1.36\%$ (평균 1.15)를 보여서 적색 세일의 흡수율이 더 높았으며, 흡수율과 관련이 큰 공극률 또한 적색 세일이 (평균 8.24)로 흑색 세일의 (평균 2.99)보다 높게 나타났다.

초음파속도

초음파속도는 비파괴시험으로 일축압축강도 시험을 수행하기 전의 시료에 대한 P파 속도(V_p)를 구하였다. P파 속도는 암석의 밀도와 밀접한 관련이 있으며 이는 암석의 종류, 조직, 공극률, 이방성, 함수율 및 온도 등에 영향을 받는다. 시험 결과 P파 속도는 적색 세일은 $V_p = 1.83 \sim 4.95 \text{ km/sec}$ (평균 3.71)로 나타났고, 흑색 세일은 $V_p = 2.14 \sim 4.17 \text{ km/sec}$ (평균 2.88)의 속도를 보였는데(Table 1), 적색 세일의 P파 속도 변화범위가 좀 더 큰 것은 공극률 및 함수율의 변화 범위가 적색 세일이 더 넓게 나타나는 점과 관련이 있을 것으로 생각되고 공극률과 함수율이 상대적으로 높은데도 불구하고 적색 세일의 평균속도 더 높게 나타나는 것은 흑색 세일에 발달한 엽층리(laminar)등의 미세 불연속면의 영향인 것으로 추정된다.

일축압축강도

일축압축강도(q_u) 시험은 층리면의 발달로 이방성이 있는 세일코어 시료를 축과 층리면의 각도가 수직을 이루도록 성형한 시료에 대하여 시험을 수행하였으며, 시험 후 대부분 시료의 파괴면이 축에 평행한 방향으로 나타났다. 시험 결과 적색 세일은 $q_u = 68.91 \sim 86.21 \text{ MPa}$ (평균 76.11)의 강도를 보였고, 흑색 세일은 $q_u = 40.72 \sim$

Table 1. Properties of shales.

Red Shale	γ_i (t/m ³)	A_b (%)	n (%)	V_p (km/sec)	q_u (MPa)	I_S (MPa)	Black Shale	γ_i (t/m ³)	A_b (%)	n (%)	V_p (km/sec)	q_u (MPa)	I_S (MPa)
R-1	2.49	3.82	9.50	2.70	69.72	2.04	B-1	2.48	1.29	3.20	2.38	41.60	1.63
R-2	2.52	3.63	9.14	2.91	69.87	2.08	B-2	2.49	1.36	3.39	2.47	44.70	1.78
R-3	2.52	3.67	9.25	2.90	69.25	1.57	B-3	2.53	1.34	3.38	2.27	42.82	1.67
R-4	2.53	3.35	8.44	4.07	71.74	2.37	B-4	2.53	1.26	3.19	2.49	41.23	1.71
R-5	2.54	3.58	9.08	3.00	70.63	2.28	B-5	2.54	1.25	3.18	2.41	40.80	1.56
R-6	2.55	3.71	9.44	1.83	68.91	2.01	B-6	2.54	1.26	3.20	2.14	40.72	1.26
R-7	2.56	3.36	8.57	3.08	72.86	1.78	B-7	2.54	1.25	3.18	2.40	43.46	1.50
R-8	2.56	3.44	8.78	3.14	70.21	2.19	B-8	2.54	1.23	3.12	2.60	44.67	1.71
R-9	2.57	3.69	9.47	2.97	70.81	2.16	B-9	2.54	1.26	3.21	2.34	40.97	1.36
R-10	2.59	3.40	8.78	3.21	71.43	1.68	B-10	2.55	1.22	3.10	2.59	45.03	1.85
R-11	2.60	3.41	8.86	3.32	75.42	2.69	B-11	2.58	1.18	3.03	2.32	43.67	1.78
R-12	2.60	3.00	7.79	3.69	79.34	2.79	B-12	2.58	1.22	3.15	2.45	45.34	2.02
R-13	2.61	3.45	8.99	3.38	73.66	1.82	B-13	2.58	1.17	3.01	2.60	46.50	1.78
R-14	2.62	3.20	8.37	3.52	78.12	2.72	B-14	2.59	1.15	2.98	2.61	46.77	2.13
R-15	2.63	3.34	8.78	3.61	70.73	2.30	B-15	2.60	1.15	2.99	2.98	45.32	1.82
R-16	2.63	3.12	8.19	3.78	76.95	1.92	B-16	2.61	1.04	2.71	2.78	48.97	1.88
R-17	2.65	3.05	8.07	3.91	78.23	2.30	B-17	2.61	1.11	2.90	3.02	48.32	2.16
R-18	2.68	2.82	7.55	4.07	80.18	2.58	B-18	2.63	1.16	3.05	3.24	44.20	1.81
R-19	2.69	2.78	7.46	4.11	81.23	2.83	B-19	2.63	1.08	2.83	3.11	45.37	1.84
R-20	2.71	2.72	7.36	4.24	80.23	2.76	B-20	2.64	1.15	3.03	3.24	48.50	1.85
R-21	2.71	2.96	8.01	4.18	82.17	2.93	B-21	2.65	1.09	2.89	3.12	50.30	2.16
R-22	2.71	2.88	7.79	4.51	77.64	2.67	B-22	2.65	1.08	2.85	3.21	49.80	1.98
R-23	2.73	2.38	6.51	4.59	80.09	2.71	B-23	2.69	0.99	2.67	3.62	49.28	2.20
R-24	2.74	2.30	6.29	4.79	86.21	3.04	B-24	2.70	1.04	2.81	3.74	50.00	1.95
R-25	2.74	2.67	7.30	4.95	84.62	3.18	B-25	2.74	0.94	2.58	3.76	51.60	2.09
R-26	2.75	2.72	7.46	4.87	82.37	2.83	B-26	2.75	0.91	2.49	4.17	54.10	2.23
R-27	2.77	2.63	7.28	4.91	82.35	2.76	B-27	2.76	0.93	2.57	3.74	52.50	2.20

54.10 MPa (평균 46.17)의 강도를 나타내어서(Table 1), 적색 셰일이 상대적으로 높은 강도에서 파괴가 일어나는 것을 알 수 있다. 공극률이 큰 적색 셰일이 낮은 강도에서의 파괴가 예상되었으나 일축압축강도에 미치는 요인 중 불연속면인 엽층리가 잘 나타나는 흑색 셰일에서 낮은 강도에서 파괴가 이루어진 것으로 보인다.

점하중강도지수

점하중강도지수(I_S) 시험은 비교적 간단하게 시료를 성형하여 시험할 수 있기 때문에 일축압축강도나 인장강도를 추정하는데 널리 이용된다. 본 연구에 이용된 시료

의 경우 이방성이 있는 셰일을 이용하여 시험을 하였기 때문에 암석의 이방성을 고려하여 재하 축과 층리면의 각도가 수직을 이루도록 시료를 성형하여 시험하였고 대부분의 파괴는 층리면에 거의 수직방향으로 일어났다. 시험 결과 적색 셰일은 $I_S=1.57\sim3.18$ MPa (평균 2.41)의 강도를 보였으며, 흑색 셰일은 $I_S=1.26\sim2.23$ MPa (평균 1.85)의 강도에서 파괴가 일어났다. 이를 널리 사용되고 있는 $q_u=24I_S$ 의 경험식을 이용하여 일축압축강도로 환산하면 적색 셰일 $q_u=57.84$ MPa 및 흑색 셰일 $q_u=44.40$ MPa이 되어 실제 측정된 일축압축강도와는 다소 차이를 보이고 있다. 그러나 평균 점하중강도지수

Table 2. Chemical composition of shales determined by XRF analysis.

(unit: %)

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
Red Shale	53.06	17.95	5.67	6.27	5.83	8.80	0.58	1.23	0.25	0.08
Black Shale	46.05	15.41	9.91	4.40	4.76	15.32	0.49	1.71	0.21	0.17

Table 3. Mineral composition of shales determined by XRD analysis.

(unit: %)

Sample	Quartz	Albite	Calcite	Muscovite	Chlorite
Red Shale	4	35	11	36	13
Black Shale	5	27	12	42	14

(a) Red Shale

(b) Black Shale

Fig. 2. SEM images of shales.

는 일축압축강도와 마찬가지로 파괴강도는 적색 셰일이 흑색보다 더 높게 나타났다.

XRF, XRD, SEM 분석

암석의 물리적 성질은 주로 화학 및 광물조성에 의해 영향을 받게 된다. XRF시험으로 화학성분 분석결과 적색과 흑색 셰일은 유사한 경향을 보였고 SiO₂, Al₂O₃, MgO, K₂O, Fe₂O₃, CaO 성분이 우세하게 나왔다(Table 2). XRD시험을 통한 광물성분의 분석결과 석영(Quartz), 장석(Albite), 방해석(Calcite), 백운모(Muscovite), 점토광물(Clay mineral) 등을 주로 포함하고 있었는데(Table 3), 두 암석에서의 광물성분의 차이는 크지 않는 것으로 보인다. SEM 분석을 실시하여 시료의 성분 및 미세구조를 관찰한 결과 적색과 흑색 셰일은 유사한 광물조성을 보였다(Fig. 2).

열화시험 결과

전술한 바와 같이 서로 다른 산성도를 가지는 용액에

일정시간 동안 수침시킨 시료에 대하여 흡수율, 점하중 강도지수 및 슬레이크 내구성지수를 측정하고 SEM 분석을 실시하여 셰일의 특정 환경 하에서의 열화도를 평가하였다.

흡수율

암석의 흡수율은 산성도 및 수침시간에 따라 변화될 것이라 판단하여 이 시험을 수행하였다. 수침되어 있던 시료를 안정장비를 착용한 후 표면을 젖은 천으로 닦아내고 포화상태의 무게를 잰 후 건조로에서 건조시켜 건조무게를 측정하여 흡수율을 구하였다. 용액에 수침하기 전의 적색 셰일의 흡수율은 평균 3.07%, 흑색 셰일의 흡수율은 평균 1.13% (Table 1 참조)이었는데, 산성도 pH 3.0 농도의 용액에서 시간이 경과할수록 적색 셰일은 최대 3.57%까지 흡수율이 증가하였고, 흑색 셰일은 최대 1.39%의 흡수율 상승을 나타내었다(Fig. 3). 또 산성도에 따른 흡수율 변화를 관찰한 결과, 산성도가 강한 용액(pH 3.0, pH 5.6)에서 상대적으로 긴 시간 수침시킨 시료에서 큰 흡수율의 증가를 보였는데 중성(pH

Fig. 3. Variation in absorption ratio with immersion time.

Fig. 4. Variation in point load strength with immersion time.

7.0)과 알칼리 용액(pH 9.0)에서는 흡수율의 변화가 거의 없는 것과 비교된다. 이 현상은 세일에 포함된 방해석(CaCO_3)이 산성용액에서 장기간 수침시킬 때 더 많이 용해되기 때문인 것으로 판단된다.

점하중강도지수

수침 전 시료의 점하중강도지수는 적색이 평균 2.30 MPa, 흑색이 평균 1.60 MPa의 파괴강도를 보였는데 용액의 산성도와 수침시간에 따라 Fig. 4에 보이는 바와 같이 변화되었다. 즉, 용액의 pH 3.0과 pH 5.6에 수침시킨 시료에서 시간 경과에 따라 현저한 강도의 저하현상이 있었으나, 중성 및 알칼리 용액에 침수시킨 경우에는 강도 변화가 거의 없었다. 이 중 pH 3.0 용액에서 최대 강도감소를 보였는데 적색 세일의 경우 초기강도 2.30 MPa에서 1.57 MPa로 현격한 강도 저하가 일어났고, 흑색 세일의 경우 1.60 MPa에서 1.20 MPa로 강도가 저하되었다. 강도 저하율은 적색 세일이 흑색 세일보

다 더 컸는데 이는 적색 세일의 공극률이 더 크고 흡수율을 또한 높기 때문인 것으로 판단된다.

슬레이크 내구성지수

슬레이크 내구성 시험은 수중에서 암석끼리 서로 부딪치면서 마모되는 정도에 대한 저항성을 평가하는 시험으로 시료는 점하중강도 시험 후의 파괴된 조각을 40~60 g의 시료 10개를 이용하여 내구성 시험을 실시하였다. 시험 결과는 Gamble (1971)의 슬레이크 내구성지수(I_d) 분류표를 기준으로 내구성을 평가하였다. 초기의 슬레이크 내구성지수는 적색 세일이 99.78%, 흑색 세일이 99.73%로서 두 시료 모두 매우 높은 내구성(Very high durability)을 보였었다. 그러나 용액의 산성도가 강할수록 또 수침 경과 시간이 길어질수록 Fig. 5에서 보듯이 내구성 지수는 현저하게 감소하였다. 산성인 pH 3.0 용액에 수침시킨 시료의 내구성의 저하가 가장 많이 일어났으며 적색 세일의 경우 $I_s = 97.65\%$ 로 다른 시료

Fig. 5. Variation in slake durability index with immersion time.

Fig. 6. SEM images showing pores formed by calcite dissolution with increasing immersion time in a liquid of pH 3.0.

에 비해 상대적으로 내구성이 크게 저하되었으며, 흑색 셰일은 $I_s = 98.76\%$ 로 상대적으로 적은 변화를 보였다. 이 결과는 점하중강도지수의 경우와 유사하게 pH 3.0 용액에 긴 시간 수침시킨 적색 셰일의 내구성이 상대적으로 더 많이 감소하는데 이 또한 적색 셰일의 공극률과 흡수율이 높기 때문인 것으로 판단된다.

SEM 분석

열화시험을 통해 용액의 농도와 시간의 경과에 따라 적색과 흑색 셰일의 열화정도가 다른 것을 알 수 있는데 가장 큰 변화를 보이는 pH 3.0 용액에 수침시킨 시료에 대하여 SEM 분석을 실시하였다. 즉, 열화시험 결과에서 산성용액이 시료 내의 방해석 성분을 용해시켜 강도 및 내구성의 저하를 일으킨 것이라 판단되며 SEM 사진을 통해 그 용해양상을 관찰한 결과 Fig. 6와 같이 수침시간이 경과할수록 방해석의 용해정도가 증가하여 공극이 증가함을 알 수 있다. 그림에서 초기(수침 전)에

SEM 사진에서 보였던 자형으로 생성되어 있는 능면체 형의 방해석이 시간이 지날수록(수침 후) 용해되어 하나의 작은 공동과 같은 양상으로 나타났다. SEM사진을 찍기 위하여 하나의 시료에 대하여 거의 유사한 지점의 사진을 확보하기 위해 target 지점에 임의의 표시를 해 두어 최대한 같은 지점의 사진을 확보하기 위해 노력하였다. 그림에서 보듯이 적색 셰일에서의 방해석의 용해정도가 흑색 셰일에 비해 상대적으로 더 많은 것을 알 수 있다.

암석특성의 상관관계

빈도분포 특성

본 연구의 시험결과를 Kim and Kim (2006)의 선행 연구 'Correlation between Engineering Properties of Rocks in Korea'의 셰일에 관련된 내용과 비교해 보면 다음 Fig. 7과 같이 전체단위중량은 적색과 흑색 셰일이

Fig. 7. Distribution of selected properties of shales.

유사한 값을 가지며, 흡수율은 적색 셰일이 흑색보다 조금 높은 부분에 위치하였다. P파 속도는 적색과 흑색 셰일에서 겹치는 부분이 있지만 상대적으로 적색 셰일이 좀 더 높게 나왔다. 일축압축강도 또한 전체적인 빈도가 적색 셰일이 좀 더 높은 강도에 분포하였다.

단위중량과의 상관성

암석의 단위중량은 주로 공극비와 구성광물의 비율에 따라 결정되며, 단위중량은 암석강도 및 변형특성에 영향을 준다. 즉, 같은 종류의 암석에서는 단위중량이 클수록 암석은 조밀하고 공극비가 낮아서 강도와 변형계수가 증가하고 탄성파(P파) 전파속도가 빨라지며 흡수율은 낮아진다. 시험 결과에 의하면 단위중량(γ_t)에 대한 흡수율(A_b), 공극률(n), P파 속도(V_p) 및 일축압축강도(q_u)의 상관성은 Fig. 8과 같이 나타났는데, 이 결과에서 알 수 있듯이 이들 사이의 상관성이 매우 양호하였다. 특이한 사실은 적색 셰일의 흡수율과 공극비가 상대적으로 흑색 셰일보다 크면서도 불구하고 흑색 셰일보다 P파 속도와 압축강도가 크게 나타났다는 사실이다. 이는 전술한 바와 같이 흑색 셰일에 내제된 염층리의 영향인 것으로 판단된다. 단위중량이 증가할수록 흡수율과 공극률이 감소하고 P파 속도와 일축압축강도는 증가하는 것

은 예상된 결과이지만 이 시험결과에 의하면 적색 셰일의 변화 정도가 흑색 셰일보다 더 심한 것으로 나타났다. 즉 Fig. 8에서 적색 셰일의 fitting curve의 경사가 상대적으로 흑색 셰일보다 급하게 나타나고 있다.

이들 특성치 사이의 상관식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Red Shale } A_b &= -4.76\gamma_t + 15.66 \\ n &= -9.38\gamma_t + 32.91 \\ V_p &= 8.37\gamma_t - 18.31 \\ q_u &= 58.50\gamma_t - 77.72 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Black Shale } A_b &= -1.53\gamma_t + 5.13 \\ n &= -2.89\gamma_t + 10.51 \\ V_p &= 7.02\gamma_t - 15.42 \\ q_u &= 43.91\gamma_t - 68.11 \end{aligned}$$

P파 속도와 상관성

시험 결과에 의하면 P파 속도(V_p)에 대한 흡수율(A_b), 공극률(n), 일축압축강도(q_u) 및 점하중강도지수(I_s)의 상관성은 Fig. 9과 같이 나타났는데, 이 결과에서 알 수 있듯이 이들 사이의 상관성도 대체적으로 양호하였다. P파 속도에 대한 이들 특성치의 상관성계수가 전술한 단

Fig. 8. Relationship between selected properties and total unit weight.

Fig. 9. Relationship between selected properties and P-wave velocity.

Fig. 10. Relationship between compressive strength and point load index, and comparison with other empirical equations.

위중량에 대한 것 보다 낮아서 P파 속도에 대한 특성치의 상관관계가 상대적으로 낮음을 확인하였다.

이들 특성치 사이의 상관식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Red Shale } A_b &= -0.49V_p + 4.99 \\ n &= -1.01V_p + 11.99 \\ q_u &= 5.94V_p + 54.04 \\ I_s &= 0.42V_p + 0.82 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Black Shale } A_b &= -0.20V_p + 1.72 \\ n &= -0.38V_p + 4.07 \\ q_u &= 6.08V_p + 28.68 \\ I_s &= 0.34V_p + 0.86 \end{aligned}$$

점하중강도지수와 일축압축강도의 상관성

점하중강도지수가 높을수록 일축압축강도가 증가하는 것은 예상된 결과이나 적색 셰일의 일축압축강도 값이 흑색 셰일에 비하여 상대적으로 크게 나타났다. 셰일에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관성에 대한 선행 연구에서 Wyllie (1992)는 이방성암석의 일축압축강도가 점하중강도지수의 15~50배 사이라고 하였고, 셰일에 대하여 Chung and You (1997)는 $q_u = 23I_s + 13.6$ 의 경험식을 제시한 바 있고, 대구지역 셰일에 대해서 Lee and Youn (2009)은 $q_u = 14.4I_s$ 의 관계식을 제시하였다. 본 연구의 시험결과와 선행연구를 비교한 결과 Fig. 10에서 보듯이 대체적으로 서로 유사함을 알 수 있다.

토 의

적색 셰일은 퇴적분지인 호수 얕은 곳의 산화환경에

서 퇴적되어 퇴적물에 포함된 유기질 성분과 철 성분의 산화에 기인하여 적색을 띠는 반면에 흑색 셰일은 호수 깊은 곳의 환원환경에서 퇴적되어 퇴적물에 포함된 유기물이 산화되지 않은 채로 암석에 포함되어 비적색(회색 혹은 흑색)을 띠는 것으로 알려져 있다. 따라서 색상이 서로 다른 두 암석은 퇴적물의 공급원이 같은 지역일 것으로 판단되는데 이는 광물 및 화학성분 분석결과와 같이 서로 매우 유사한 성분을 가진 것으로 확인되었다.

일반적으로 셰일의 공극률과 흡수율은 암석의 풍화도에 따라 상당히 넓은 범위를 보이는 것으로 알려져 있는데, 대구지역 흑색 셰일에 대하여 Jeoung (1996)은 공극률, $n = 11.41 \sim 11.81\%$, 적색 셰일에 대하여 Cho and Kim (2009)은 공극률, $n = 4.41\%$, 또 Lee and Youn (2009)은 셰일의 공극률, $n = 1.10 \sim 2.33\%$ 로 보고한 바 있다. 또 Kim et al. (2010)은 백악기 셰일(전라남도 화순지역)에 대한 연구에서 셰일의 공극률의 범위를 $n = 1.33 \sim 20.49\%$ (평균 10.02)로 보고하면서 풍화등급별로 신성한 상태(f) $n = 1.33 \sim 4.30\%$, 약간풍화(sw) 상태 $n = 7.03 \sim 13.15\%$, 중간풍화(mw) 상태 $n = 9.53 \sim 14.73\%$, 심한풍화(hw) 상태 $n = 11.12 \sim 20.49\%$ 의 값을 가진다고 보고하였다. 본 연구에 이용된 시료의 공극률은 적색 셰일 $n = 6.29 \sim 9.50\%$ (평균 8.24), 흑색 셰일 $n = 2.49 \sim 3.39\%$ (평균 2.99)로 확인되어서, 화순지역의 연구결과와 비교하면 적색 셰일은 약간 풍화화된 상태이고 흑색 셰일은 신성한 시료인 것으로 판단된다.

적색 셰일의 흡수율과 공극률이 흑색 셰일보다 높음에도 불구하고 압축강도와 P파 속도가 높게 나온 것은 대표시료의 사진에서 보듯이 흑색 셰일에 내재된 층리면이 수직방향으로 발달된 엽층리가 불연속면으로 P파의 전달속도를 느리게 하였고, 서로 다른 광물로 이루어

져 있어서 암석의 결합력에 영향을 미치는 것으로 보인다. 특성치 성호간의 상관성을 분석한 결과, 단위중량 및 P파 속도에 대한 다른 특성치의 상관성은 대체로 양호하였다.

열화시험에서는 산성도가 높을수록 또 수침시간이 길어질수록 열화정도가 심하여 점하중강도지수와 슬레이크 내구성지수가 현격하게 감소하고 흡수율이 크게 증가하였다. 이는 셰일의 구성입자를 교결시켜주는 역할을 하는 방해석 성분이 산성용액에 용해되어 암석구성 입자의 결합력이 감소한 결과로 보이는데, 이는 SEM 사진에서 확인한 바와 같다.

결론

대구지역의 경상누층군 하양층군에서 관찰되는 함안층의 적색 셰일과 반야월층의 흑색 셰일에 대하여 기본 물성시험, 역학시험, XRF 화학분석 및 XRD 광물분석, SEM 이미지 분석 및 열화시험을 실시하고 시험결과의 특성치에 대하여 상관성을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- XRF, XRD, SEM 분석에서 적색 셰일과 흑색 셰일은 화학적 및 광물학적 성분에서 서로 유사함을 보였다. 화학성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , K_2O , Fe_2O_3 , CaO 의 성분이 우세하게 나타나고, 광물성분은 석영, 장석, 방해석, 백운모, 점토광물 등을 주로 포함하고 있었고, SEM 이미지에서는 광물조성 및 배열이 유사하게 나타났다.
- 전체단위중량은 적색 셰일은 평균 2.63 g/cm^3 , 흑색 셰일은 평균 2.60 g/cm^3 으로 비슷하였고 흡수율과 공극률은 각각 적색 셰일이 3.15%와 8.24%, 흑색 셰일이 1.15%와 2.99%로 좀 더 크게 나왔다.
- P파 속도는 적색 셰일이 3.71 km/sec , 흑색 셰일이 2.88 km/sec 의 속도로 나타났고, 일축압축강도는 적색 셰일은 76.11 MPa, 흑색 셰일은 46.17 MPa, 점하중강도지수는 적색 셰일이 2.41 MPa, 흑색 셰일이 1.85 MPa의 강도에서 파괴가 일어났다.
- 열화시험에서 용액의 산성도가 큰 pH 3.0 용액에서 시간이 지날수록 저감의 정도가 가장 크게 나타났으며, 수침시간 경과에 따라 흡수율은 점차 증가하여 적색 셰일이 3.07%에서 최대 3.57%로, 흑색 셰일이 1.13%에서 1.39%로 증가하였고, 점하중강도지수는 2.30 MPa에서 1.57 MPa로, 흑색 셰일은 1.60 MPa에서 1.20 MPa의 강도 저하를 보였으며, 슬레이

크 내구성지수는 적색 셰일은 99.78%에서 97.65%로, 흑색 셰일은 99.73%에서 98.76%로 낮아졌다.

- 단위중량에 대한 흡수율, 공극률, P파 속도 및 일축압축강도의 상관성은 매우 양호하였고, P파 속도에 대한, 흡수율, 공극률, 일축압축강도 및 내구성지수의 상관성은 대체로 양호하였으며, 이들 상관관계식을 도출하였다.
- 점하중강도지수에 대한 일축압축강도의 상관관계를 분석하였고 셰일에 대한 다른 선행연구 결과와 비교하였다.

사 사

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비지원(11CRTI-C059640-01)에 의해 수행되었으며, 일부는 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 지원되었습니다.

References

- Cho, L. H. and Kim, G. W., 2009, Creep Behaviour of Red Shale in the Haman Formation by Multi Stage Loading Test, The Journal of Engineering Geology, 19(2), 165-175. (In Korean with English abstract)
- Chung, H. S. and You, B. O., 1997, A Study on Variation of Rock Strength due to Weathering and It's Estimation, Journal of the Korean Geotechnical Society, 13(6), 71-93. (In Korean with English abstract)
- Franklin, J. A. and Chandra, R., 1972, The slake durability test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 9(3), 325-341.
- Gamble, J. C., 1971, Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, Ph. D., thesis, University of Illinois, 159.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, Underground excavations in rock, Inst of Mining and Metallurgy, 157-165.
- Im, S. B., Kim, G. W. and Seo, Y. S., 2005, Application of Artificial Neural Networks for Prediction of the Unconfined Compressive Strength (UCS) of Sedimentary Rocks in Daegu, The Journal of Engineering Geology, 15(1), 67-76. (In Korean with English abstract)
- ISRM, 1978, Suggested Methods for Determining Sound Velocity, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15(2), 53-58.
- ISRM 1979a, Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16(2), 137-140.
- ISRM, 1979b, Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and

- Related Properties and Swelling and Slake-durability Index Properties, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16(2), 143-156.
- ISRM, 1985, Suggested Method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22(2), 51-60.
- Jaeger, J. C., 1960, Shear failure of anisotropic rock, *Geological Magazine*, 97, 65-72.
- Jeoung, T. J., 1996a, Mechanical Property of Cretaceous Shale Distributed in the vicinity of Taegu, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 17(6), 489-496. (In Korean with English abstract)
- Jeoung, T. J., 1996b, The variation of Poisson's ratio for The Cretaceous Sandstones and Shale in the Eui-seung Subbasin, *The Journal of Engineering Geology*, 6(2), 103-110. (In Korean with English abstract)
- Kim, G. W. and Kim, S. J., 2006, Correlation between Engineering Properties of Rocks in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 16(1), 59-68. (In Korean with English abstract)
- Kim, H. G., Kim, T. K., and Oh, K. H., 2010, Analysis of the Mechanical Properties and Slake Durability of Fresh to Weathered Cretaceous Shale, *The Journal of Engineering Geology*, 20(3), 311-318. (In Korean with English abstract)
- Kim, Y. S., Heo, N. Y., Bang, I. H., Lee, J. H., and Sung, E. S., 2001b, Anisotropy Failure Characteristics of Shale, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 17(2), 13-20. (In Korean with English abstract)
- Kim, Y. S., Seo, I. S., Heo, N. Y., Lee, J. H., and Kim B. T., 2001a, Engineering Characteristics of Shale due to the Angle of Bedding Planes, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 17(1), 5-13. (In Korean with English abstract)
- Korean Society for Rock Mechanics, 2010, 암석표준시험법, Korean Society for Rock Mechanics.
- Lee, Y. H. and Kim, H. D., 2008, Inherent Strength Anisotropy of the Shale in Daegu Region, *Korean Geo-Environmental Society*, 9(7), 45-51. (In Korean with English abstract)
- Lee, Y. H. and Youn, C. H., 2009, The Point Load Index of the Daegu Shale and its Relation to the Uniaxial Compressive Strength, *Korean Geo-Environmental Society*, 10(3), 37-45. (In Korean with English abstract)
- McLamore, R. and Gray, K. E., 1967, The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks, *Journal of Engineering for Industry*, 89(1), 62-73.
- So, C. S. and Choi, B. R., 1975, Engineering Properties of Some Sedimentary Rocks from the Gyeongsang Supergroup, *Econ. Environ. Geol. (old J. Kor. Inst. Mining Geol.)*, 8(4), 203-210. (In Korean with English abstract)
- Wyllie, D. C., 1992, *Foundations on Rock*, Chapman & Hall, England, 403.

원고접수일: 2013년 9월 24일

수정본채택: 2013년 10월 21일

게재확정일: 2013년 10월 25일

곽성민

경북대학교 지질학과

702-701 대구시 북구 대학로 80

Tel: 053-950-5357

E-mail: orikura@nate.com

김교원

경북대학교 지질학과

702-701 대구시 북구 대학로 80

Tel: 053-950-5357

E-mail: gyokim@knu.ac.kr

정용욱

계명대학교 첨단건설재료실험센터

704-701 대구시 달서구 달구벌대로 1095

E-mail: jyw@kmu.ac.kr