

국내 화강암류를 이용한 일부 인공쇄석사 제조과정에서 생기는 스러지의 광물·물리화학적 특성

Mineralogical and Physico-chemical Properties of Fine Fractions Remained after Crushed Sand Manufacture

유 장 한(Jang-Han Yoo)^{1*} · 안 기 오(Gi-Oh Ahn)¹ · 장 준 영(Jun-Young Jang)²

¹한국지질자원연구원

(Geology and Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

²삼표산업주식회사

(Sampyo Ind. Ltd.)

요약: 국내에서 인공쇄석사의 점유율은 30% 이상이며 지속적인 증가추세에 있다. 국내 인공쇄석사는 주로 화강암류를 그 원암으로 이용하고 있다. 인공모래 제조과정 중에 생기는 스러지(63마이크론 이하입자)는 침전제를 이용하여 분리하며, 그 양은 중량비 15% 내외이다. X-선 회절분석에 의하면 스러지 구성광물은 석영, 장석류가 3/4 이상을 차지하며, 그 밖에 방해석 등과 각종 점토광물류를 포함한다. 점토류 중에는 운모 및 고령토류가 우세하고, 녹니석, 질석과 함께 스�멕타이트류도 포함된다. 쥐라기 화강암류에서 발생하는 스러지는 대체적으로 백악기의 것에 비해서 더 많은 고령토류, 녹니석 및 질석류를 포함한다. 화학조성에 있어서도 화강암류와 스러지의 사이에 명확한 차이를 보여준다. SiO₂ 및 Na₂O 성분 외에는 스러지가 화강암 원석류보다 더 높은 함량을 나타내어, 그들이 풍화작용에 의한 증가임을 나타낸다. 스러지에 대한 입도분석에 의하면, 토양조직 분류에서의 Silt loam 정도에 해당하며, 변수두 투수실험에 의해 측정된 수리전도도에 의하여서도 silt 및 sand가 우세하게 포함된 특성을 나타낸다. 이와 같이, 현재 우리나라에서 버려지고 있는 스러지는 silt 및 점토입자함량에 의하여 불투수성을 야기하므로 산업폐기물로 간주되어 환경오염물로 분류되고 있다.

주요어: 인공쇄석사, 화강암, 스러지, 점토광물류, 고령토, 녹니석, 질석, 스�멕타이트, 쥐라기, 백악기, 풍화작용, 입도분석, 투수계수

ABSTRACT: Artificially crushed sands occupy approximately 30 percent of the total consumption in South Korea. The demand for the crushed sands is expected to rise in the future. Most manufacturers use granitic rocks to produce the crushed sands. During the manufacturing process, fine fractions (i.e., sludges or particles smaller than 63 microns) are removed through the process of flocculation. The fine fraction occupies about 15% of the total weight. The sludges are comprised of quartz, feldspars, calcite, and various kinds of clay minerals. Non-clay minerals occupy more than 75 percent of the sludges weight, according to the XRD semi-quantification measurement. Micas, kaolinites, chlorite, vermiculite, and smectites occur as minor constituents. The sludges from Jurassic granites contain more kaolinites and 14 Å-types than those from the Cretaceous ones. The chemical analysis clearly shows

*교신저자: jhyoo@kigam.re.kr

the difference between the parent rocks and the sludges in chemical compositions. Much of colored components in the sludges was accumulated as the weathering products. Particle size analysis results show that the sludges can be categorized as silt loam in a sand-silt-clay triangular diagram. This result was further confirmed by the hydraulic conductivity data. In South Korea, the sludges remained after crushed sand production are classified as an industrial waste because of their impermeability, and which is caused by their high silt and clay fractions.

Key words : crushed sand, granite, granitic gneisse, sludge, flocculation agent, clay minerals, kaolinites, 14 Å minerals (chlorite/vermiculite), smectite, Jurassic, Cretaceous, particle size analysis, hydraulic conductivity

서 론

천연모래의 급속한 고갈에 의해 인공쇄석사의 점유율은 지속적으로 높아질 전망이다. 내수용 모래 중에 인공쇄석사는 30% 정도를 차지하고 있으며, 수도권에서는 운송가격의 상승에 의해서 그 점유율이 50% 정도까지 된다. 운송거리의 증가에 의한 대도시 주변에서 모래의 공급가격 상승은 미국 등 선진국에서도 비슷한 추세이며, 미국에서 골재(천연 및 인공)의 생산은 연료광물을 제외한 천연자원 생산량의 거의 절반을 차지한다.

국내 인공쇄석사는 그 원석으로서 화강암, 화강편마암 등 입상조직의 산성심성암류 중 유색 광물류를 비교적 적게 포함하는 암석류를 선호하며, 주로 화강섬록암 및 화강암류를 이용하고 있다. 그러나, 미국에서는 쇄석자갈 및 모래의 점유율이 우리와 같이 높지 않은 것으로 알려져 있으며, 건설, 도로포장, 유지 및 보수 등에 사용되는 쇄석제조에 석회석 및 백운석류가 71%나 사용되고, 화강암류는 15%, 화산암류 및 비 입상 조직의 암석류가 7%, 그리고 나머지 7%는 사암, 규암, 대리암, 슬레이트 등으로 다양하다(Tepordei, 2004).

연구에 이용된 슬러지는 삼포(주)에서 운영하는 경기도 파주, 양주(봉재), 화성, 안성지역과 경북 경주의 삼영(주) 등의 5개 쇄석사공장에서 채취하였으며, 이들 중에서 경주 시료는 중생대 백악기말에서 제 3기 초에 관입한 불국사 화강암이며, 그 밖에는 중생대 쥐라-백악기의 대표 화강암류이다.

쇄석사 제조에서 남는 슬러지(Sludge)는 원석을 부수어 모래입자를 만드는 과정에 수반되는 미세한 실트 및 점토(63마이크론이하)입자로 구성된다. 슬러지는 원석을 분쇄하여 모래(sand입

자)와 분리하기 위하여 물로 세척·교반하면서 투입되는 음이온의 성질을 가지는 유기 고분자 응집제에 의하여 분리·수거되며 대략적으로 중량대비 15% 내외가 포함되는 것으로 확인된다.

국내 쇄석사제조에 이용되는 화강암류는 지표부에서의 풍화에 약하며, 조성광물 중 장석류, 운모류 등이 다양한 점토광물류로 변화하여, 쇄석사자체의 품질에 나쁜 영향을 줄 수도 있다. 또한, 슬러지는 실트 및 점토입도의 미세한 입자로 구성되어 있으므로 무단으로 폐기되었을 때 높은 불투수성때문에 지표수 및 지하수의 흐름을 방해하여 환경폐기물로 분류되고 있다.

천연골재를 대체하는 인공쇄석사 생산의 증가는 필연적인 추세이나 환경규제물질로 구분되는 쇄석사 슬러지의 보관 및 처분이 문제가 되고 있으며, 슬러지의 분리를 위해 사용하고 있는 응집제(Poly acryl amide 등의 고분자 유기물) 역시, 환경규제 대상물질로서 주목되고 있는 현실이다(박철환, 1998). 최근, 슬러지를 상토용 토양, 토양개선제 및 경량건축재 제조 등으로의 이용 연구가 있었으나 실용화는 되지 않고 있다(강선덕 외, 1998).

본 론

X-선 회절분석

슬러지가 포함하는 광물조성 및 조성 광물에 대한 정량분석을 위하여 분말상태로 X-선 회절분석을 하였다. 또한, 점토입도에서의 광물동정을 위하여 매스 실린더에서 침전법에 의해 점토입자를 분리하여 시편에 C-축으로의 퇴적을 강화하여 XRD감정을 시행하였으며, Ethylene

Table 1. Quantification of Mineral Species calculated by Siroquant method due to the XRD peaks of the sludges caught in the five crushed sand manufacturers (wt.%)

	Anseong	Paju	Yangju	Gyungju	Namyang	Namyang2
Quartz	30.2	12.7	22.7	28.1	36.2	27.4
Albite	18.6	26.2	22.6	39.2	13.4	25.1
Microcline	26.5	22.1	19.2	23.5	17.2	22.1
Micas	11.2	14.4	17.8	3.6	16.0	6.3
Chlorite/Vermiculite	3.9/3.0	6.7/3.9	5.1/2.1	0/1.5	4.2/2.8	4.6/2.7
Kaolinite	3.0	3.8	3.2	2.0	3.8	4.2
Calcite	-	3.6	2.7	-	0.7	2.4
Smectite	2.6	6.6	4.6	2.1	5.7	5.2

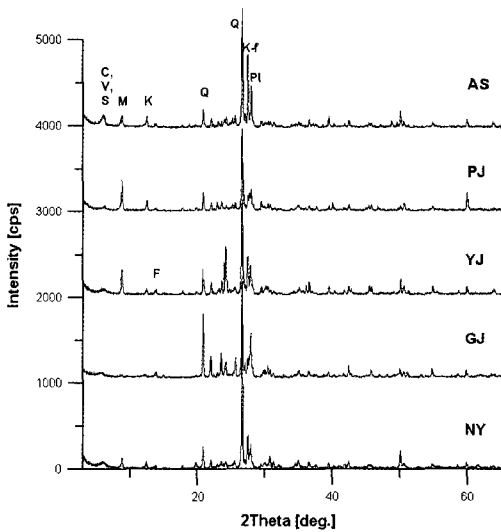


Fig. 1. X-ray powder diffraction patterns (Cu K α radiation) of sludges in the natural state. (AS) Anseong, (PJ) Paju, (YJ) Yangju, (GJ) Gyungju, and (NY) Namyang provinces. (S: smectites, M: micas, C: chlorites, V: vermiculites, K: kaolinites, A: amphiboles, Q: quartz, K-f: alkali-feldspars, Pl: plagioclases).

glycol 및 열처리(550°C)를 통하여 점토광물류를 세분하였으며, Siroquant 법에 의하여 조성 광물을 반정량 분석하였다.

스러지는 실트 및 점토입자로 주로 구성되어 있음에도 불구하고 주구성 광물로서 석영 및 장석류(정장석 및 사장석)를 66.4~87.1% (wt.) 까지 절대적으로 우세하게 포함하고 있으며, 부구성 광물로서 14 Å 광물류(녹니석 및 질

석), 운모류, 고령토류, 각섬석류, 스�멕타이트류 및 방해석 등 다양한 광물들을 포함하기도 한다(표 1) 및 (그림 1, 2, 3).

지질시대가 오래지 않은 백악기에 속하는 경주지역 시료는 14 Å 광물류 및 고령토류를 거의 포함하지 않으며, 스�멕타이트류도 다소 소량으로 포함하여 화강암류가 포함하는 운모류 및 장석류 등이 14 Å 광물류 및 고령토 등으로의 변이가 일어나기에는 비교적 짧은 지질시대 및 환경이었음을 추정케 한다. 반면에, 시대가 좀 더 오랜 경기지역 대보화강암류의 시료들은 경주지역의 시료에 비해서 다소 풍부한 고령토류, 14 Å 광물류와 함께 스�멕타이트류를 소량으로 포함하고 있음이 확인된다. 즉, 경기지역 화강암류는 정장석류, 운모류 등 풍화에 약한 광물들이 가장 안정된 점토광물류의 하나인 고령토류를 특징적으로 포함하고, 안성지역시료를 제외하고는 스�멕타이트류도 미량으로 포함하고 있음을 나타낸다(1996, Brady and Weil). 또한, 방해석의 경우에도 스�멕타이트류가 확인되지 않는 경주 및 안성의 시료에서 포함되지 않는다. 국내 화강암 중 풍화도가 심하게 진척된 노두 및 화강암류 내에 발달된 세맥 등에서 흔히 소량으로 확인되는 대부분의 벤토나이트가 Ca계임을 생각할 때, 방해석 역시 사장석 등에서 방출된 잉여의 Ca에 의한 산물로 추정된다.

화학성분 분석

화강암 원석과 스러지에 대한 주요 10원소

Table 2. Whole rock and sludge analyses from five crushed-sand manufacturers (wt.%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
Anseong, Gr	72.47	14.76	1.58	1.47	0.53	4.25	3.28	0.26	0.03	0.10
Anseong, Sl	64.01	15.40	4.87	2.66	2.13	4.18	2.54	0.62	0.11	-
Namyang, Gr	74.14	13.95	1.66	1.25	0.34	4.19	3.31	0.27	0.04	0.07
Namyang, Sl	65.52	17.03	3.09	1.88	0.58	5.05	3.05	0.39	0.11	0.11
Namyang2, Gr	71.83	14.73	1.62	1.26	0.61	5.14	3.62	0.26	0.03	0.09
Namyang2, Sl	67.04	14.99	2.93	1.88	1.09	5.45	2.69	0.32	0.07	0.15
Paju, Gr	70.20	14.33	3.08	2.00	1.14	4.80	2.77	0.44	0.04	0.11
Paju, Sl	61.99	16.46	4.55	3.11	1.35	5.37	2.05	0.53	0.16	0.19
Gyungju, Gr	73.63	14.47	1.38	0.29	0.12	5.23	2.63	0.17	0.04	0.01
Gyungju, Sl	67.53	17.56	2.55	0.70	0.31	3.74	4.05	0.35	0.13	0.02
Yangju, Gr	73.05	14.48	1.74	1.36	0.35	4.42	3.43	0.26	0.03	0.07
Yangju, Sl	67.44	16.11	2.48	2.07	0.53	5.11	3.10	0.37	0.07	0.13

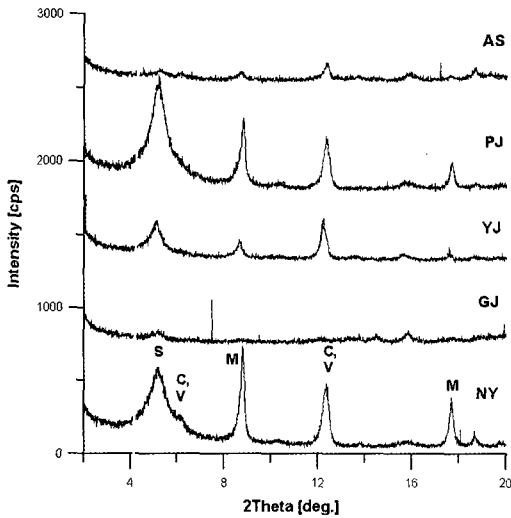


Fig. 2. XRD patterns (Cu radiation, E.G. treatment) of five oriented specimens from sludges of the five areas. (AS) Anseong, (YJ) Yangju, (NY) Namyang, (PJ) Paju, and (GJ) Gyungju provinces. (S: smectites, M: micas, C: chlorites, V: vermiculites, K: kaolinites, K-fd: alkali-feldspars, Pl: plagioclases).

의 화학성분 분석치를 비교할 때, 스러지에서 SiO₂ 및 Na₂O의 함량은 다소 감소를 나타내지만 그 밖의 성분들은 대체적으로 증가를 나타낸다(표 2).

스러지에서 SiO₂의 감소는 풍화에 강한 석영류가 스러지에 상대적으로 적게 포함되며, Na₂O의 감소 역시, 실트 및 점토입자에서 사장석류

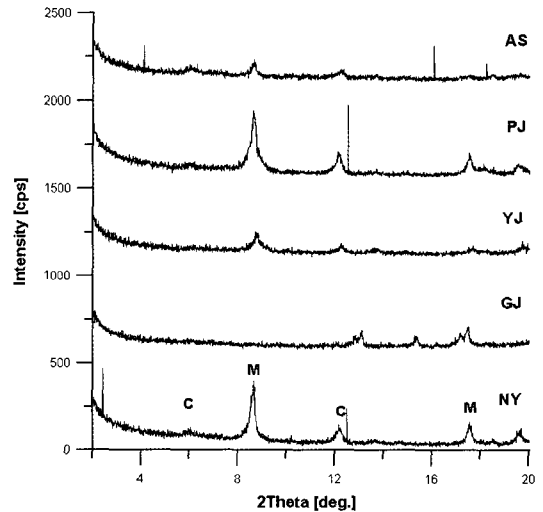


Fig. 3. XRD patterns (Cu radiation of five clay-sized fractions heated in 550°C. (AS) Anseong, (PJ) Paju, (YJ) Yangju, (GJ), (e) Gyungju and (NY) Namyang province. (M: micas, C: chlorites, Q: quartz, K-f: alkali-feldspars, Pl: plagioclases).

가 다소 적게 포함되고, 알바이트 등 사장석류의 풍화 진행정도가 늦은데 원인이 있음을 추정케 한다. 이들 외에 풍화에 약한 정장석류 및 아놀사이트계 장석류를 구성하는 K₂O 및 CaO성분은 실트이하의 입도에서 대체적으로 농집된 결과를 나타내며, 비교적 풍화가 약하게 진행된 백악기 경주지역 시료 및 주라기의 안성지역 스러지시료에서 K₂O의 함량이 적게

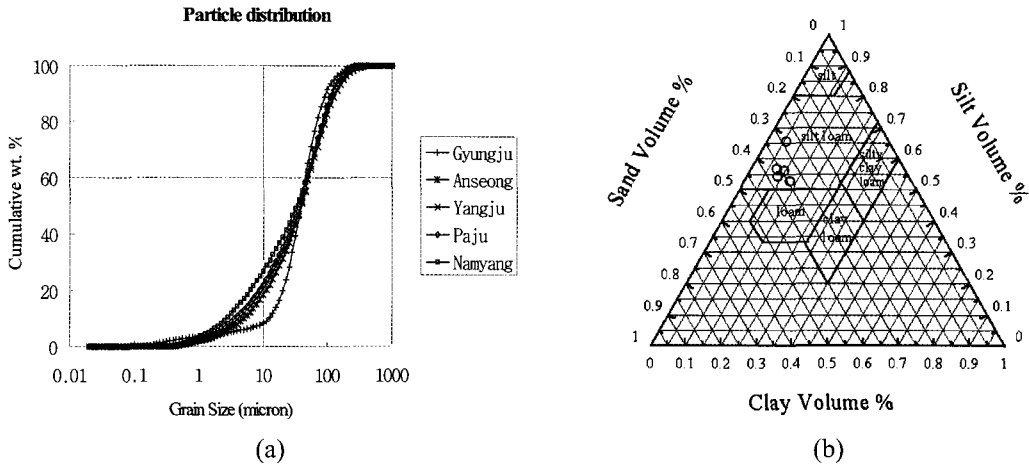


Fig. 4. Particle size analysis of the sludges. a) Qumulative particle size distribution; b) Sand-silt-clay triangular dagram due to the classification of soil texture.

나타난다. 이들 외에 슬러지는 점토광물류의 주요 구성성분인 Al_2O_3 와 함께 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 및 P_2O_5 등 유색광물을 구성하는 주요성분들은 다소 뚜렷한 증가를 나타낸다.

입도분석

슬러지의 입도분포상태를 측정하기 위하여 Malvern Instruments Ltd.에서 제작한 Master-sizer 2000 Ver. 2.00를 사용하였으며, 측정조건은 size range: 0.02~2000 micron, obscuration: 15~20%, 그리고 시료는 증류수에 풀어서 측정하였다. 입도분석 결과는 토양조각분류를 위한 Clay-Silt-Sand의 삼각도표에서 silt loam의 범주에 속함을 확인할 수 있다(Brady and Weil, 1996). 입도분포별 함량비는 대략 clay 6~12%, silt가 53~61%, 그리고 sand는 32~38%를 차지하며, 예상했던 것보다는 clay의 함량은 낮은 편이다(그림 4). 입도축적도표(그림 4-a)에서 시료들은 대체적으로 비슷한 trend를 나타내고, 지질시대가 짧은 경주시료가 역시 fine silt입도가 적게 포함됨을 보여준다.

투수율 측정

인공쇄석사 제조과정에서 남는 슬러지는 야외에 무단으로 방치되면 silt, sand 및 clay의 미

세한 입자로 구성되어 있는 그 특성상 불투수성이 높아 물의 유동을 막기 때문에 농민들의 민원의 소지가 되는 등 환경오염물로 구분되고 있는 가장 큰 이유의 하나이다. 왜냐하면, 고화되지 않은 퇴적물에서 silt 및 clay 같이 입자가 작은 매체가 sand 및 gravel 등 입자가 큰 매체보다 수리전도도(Hydraulic conductivity)가 작다는 것은 잘 알려져 있지만, 통상적으로는 입도분포(Grain-size frequency distribution)와 투수계수와의 관계가 이론적으로 잘 정립되어 있지 않기도 하다(Summers and Weber, 1984).

본 연구에서는 비교적 낮은 수리전도도를 가지는 퇴적물 등 고화되지 않은 물질의 측정에 주로 사용되는 변수두 투수측정기를 사용하였으며 수리전도도에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$K = \frac{d_t^2 L}{d_c^2 t} \ln \left[\frac{h_0}{h} \right]$$

여기서 K는 수리전도도(L/T, cm/s),

L은 시료길이(L, cm),

h_0 는 변수두 튜브의 초기 수두(cm),

h는 변수두 튜브의 최종 수두(cm),

t는 h_0 로부터 h까지 수두가 변하는데 걸린 시간(T),

d_t 는 변수두 튜브의 내경(L, cm), d_c 는 시료

Table 3. Values of hydraulic conductivity and several conditions for the measurement in the study

	m.t.	h ₀	l	d	K
Namyang	58분 12초	3 cm	8 cm	3 cm	2.97×10^{-8}
	40분 06초	3 cm	8 cm		6.47×10^{-8}
Namyang ²	65분 32초	3 cm	8 cm	3 cm	2.42×10^{-8}
Paju	36분 48초	3 cm	8 cm	3 cm	7.69×10^{-8}
	28분 06초	3 cm	8 cm	3 cm	1.31×10^{-7}
	29분 19초	3 cm	8 cm	3 cm	1.20×10^{-7}
Yangju	58분04초	3 cm	8 cm	3 cm	2.73×10^{-8}
	73분 07초	3 cm	8 cm	3 cm	1.08×10^{-8}
Anseong	44분 12초	3 cm	8 cm	3 cm	5.33×10^{-8}
Gyungju	39분 31초	3 cm	8 cm	3 cm	9.94×10^{-8}

*Measuring conditions ; m. t. (measuring time), h₀ (different height between the level of column and that of falling-head tube), l, (length of sample filled in the column), d(inner diameter of column), and K (hydraulic conductivity).

컬럼의 내경(cm)이다.

스러지 등과 같이 고화되지 않은 다공체의 수리전도도 측정을 위해서는 상기한 식을 구성하는 여러 조건을 각 시료에 대하여 가능한 한 비슷하게 유지하므로써, 동일한 종류의 시료들을 비교하기에 유리하게 된다. 실험에서 측정된 스러지들의 수리전도도는 대체적으로 $1.20 \times 10^{-7} \sim 9.94 \times 10^{-8}$ (cm/s)의 사이에 분포한다(표 3). 수리전도도 값의 범위는 silt양이 우세하고 clay 및 sand를 다소 적은 양으로 구성되는 매체의 특징을 나타내고 있다(Boeker and Grondelle, 1995; Smith and Mullins, 2001). 그리고, 고령토 및 스�멕타이트 광물류가 다른 지역의 시료에 비해서 비교적 적게 포함되는 안성 및 경주지역의 시료가 다소 높은 투수계수를 나타내어 전기한 점토류가 적게 포함되므로써 물의 이동성이 좀 더 용이하게 된 것으로 추정할 수 있다. 일반적으로, 고령토와 스�멕타이트류는 함수능력이 가장 높은 점토광물류에 속하며, 그 중에 스�멕타이트류는 물을 흡수하면 팽창하는 특성까지 가지고 있어, 물 등 유체의 흐름을 어렵게 하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서 얻어진 수리전도도는 대전시내 유성일원에서 채취한 화강암기원 sand 및 silt입

도의 풍화토에 대한 수리전도도($1.15 \times 10^{-6} \sim 7.31 \times 10^{-4}$ cm/s)에 비해서 훨씬 낮게 나타난다(정지곤, 서병민, 하성호, 이동원, 2006).

결 언

1) 스러지의 주구성 광물로서 석영 및 장석류(정장석 및 사장석)를 66.4~87.1% (wt.)까지 포함하고 있으며, 부구성 광물로서 14 Å 광물류(녹니석 및 질석), 운모류, 고령토류, 각섬석류, 스�멕타이트류 및 방해석 등 다양한 광물들을 포함한다.

2) 백악기에 속하는 경주지역 시료는 14 Å 광물류 및 고령토류를 거의 포함하지 않으며, 스�멕타이트류도 다소 소량으로 포함하여 14 Å 광물류 및 고령토 등으로의 변이가 일어나기에는 비교적 짧은 지질시대 및 환경이었음을 추정케 한다. 반면에, 유라기에 속하는 경기지역 화강암류는 대체적으로 고령토류를 포함하고, 안성지역시료를 제외하고는 스�멕타이트류도 미량으로 포함한다.

3) 스러지에서 SiO₂ 및 Na₂O의 감소는 풍화에 강한 석영류 및 사장석류가 적게 포함된 것이며, 알바이트 등 사장석류의 풍화 진행정도

가 낮으며, 풍화에 약한 정장석류 및 아놀사이트계 장석류의 K_2O 및 CaO 성분이 농집된 연유이다. 화강암 원석에 비해 스러지는 K_2O 의 함량이 적으며, 점토광물류의 주요 구성성분인 Al_2O_3 와 함께 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 및 P_2O_5 등 유색광물을 구성하는 주요성분들은 다소 뚜렷한 증가를 나타낸다.

4) 입도분석 결과를 Clay-Silt-Sand의 삼각도 표에 표시하면, 스러지들은 Silt loam의 범주에 속한다. 입도별 함량비는 대략 clay 6~12%, silt가 53~61%, 그리고 sand는 32~38%를 차지하며, 예상보다 clay의 함량이 낮은 편이다.

5) 스러지의 수리전도도는 대체적으로 $1.20 \times 10^{-7} \sim 9.94 \times 10^{-8}$ (cm/s)의 사이에 있으며, 그 값의 범위는 silt양이 우세하고 clay 및 sand를 다소 적은 양으로 포함하는 매체의 특징을 나타내며, 입도분석 결과 및 함수능력이 큰 고령토 및 스펙타이트 등의 점토광물류가 적게 포함되는 결과와도 일치하고 있다.

참 고 문 헌

강선덕, 이동남 (1998) 암석 미분 폐스러지를 이용한 하경량기포 콘크리트 제조에 관한 연구. 한국자원

공학회. p. 264-269.

박철환, 강선덕, 민정식, 신중호, 박찬, 정덕영(1998) 쇄석을 이용한 인공모래 개발연구(II). KR-98(C)-20, 한국자원연구소.

정지곤, 서병민, 하성호, 이동원 (2006) 입도분석 및 변수두법을 이용한 교란사질 토양의 투수계수 측정. 한국지질공학회지, 제 16권 제 1호, pp. 15-21.

Bocker, E. and van Grondelle, R. (1995) Environmental physics, John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, England.

Brady, N.C. and Weil, R.R. (1996) The nature and properties of soils, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

Darcy, D.E. (1856) Les Fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont.

Smith, K.A. and Mullins, C.E. (2001) Soil and Environmental analysis : physical methods, Marcel Dekker, Inc., New York.

Summers, W.K. and Weber, P.A. (1984) The relationship of grain-size distribution and hydraulic conductivity-An alternate approach, Ground water, Vol. 22, No. 4, p. 474-475.

Teperdei, V.V. (2004) U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2004, pp. 156-157.

2006년 12월 14일 원고접수, 2006년 12월 18일 게재승인.