

국내 화강암류를 이용한 일부 인공쇄석사 제조과정에서 발생되는 슬러지의 광물·물리화학적 특성

Mineralogical and Physico-chemical Properties of Sludge Produced During Artificial Sand Processing

유 장 한* (Jang Han Yoo) · 김 용 욱 (Yong Ug Kim)

한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

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

요약: 국내 모래수요에서 인공쇄석사의 점유율은 30% 이상이며 지속적인 증가추세에 있다. 인공쇄석사는 주로 화강암 및 편마암류를 원암으로 이용하며, 공정 중에 생기는 슬러지(63마이크론 이하입자)는 침전제를 이용하여 분리되며, 중량대비 15% 내외가 포함된다. 슬러지 구성광물은 석영, 장석, 운모류와 함께 고령토, 녹니석, 질석, 스멕타이트 및 방해석도 간혹 포함된다. 유라기 화강암류에서 발생하는 슬러지는 대체적으로 백악기 화강암류에 비해서 더 많은 고령토 및 스멕타이트를 포함한다. 반면, 선캠브리아기 시료는 고령토 및 스멕타이트가 확인되지 않는다. 화학조성에 있어서도 화강암류와 슬러지의 사이에 명확한 차이를 나타낸다. 주요 10성분 중에서 SiO_2 , Na_2O 및 K_2O 를 제외한 나머지 성분들은 슬러지에서 훨씬 높은 함량을 나타낸다. 슬러지에서 SiO_2 의 감소는 점토입도에서의 석영함량 감소에 기인하며, Na_2O 감소는 알바이트에 비해서 Ca사장석이 풍화에 약하기 때문이며, K_2O 는 대체적으로 변화가 미약하다. 슬러지에 대한 입도분석에 의하면, 토양조직 분류상 사질양토에 해당한다. 투수율 측정에 의하면 투수계수가 높으며, 그 원인은 실트 및 점토입자가 다소 풍부하기 때문이다. 현재 우리나라에서 폐기되는 슬러지는 불투수성이 높아 산업폐기물 중의 환경오염물로 분류되며, 쇄석사의 회수율을 저하시키므로 원암선택시 풍화를 덜 받은 화강암류를 선택할 필요가 있다.

주요어: 인공쇄석사, 침전제, 슬러지, 입도분석, 투수계수

ABSTRACT: The consumption of artificially crushed sands exceeds more than 30 percent of the domestic sand supply in South Korea, and its rate is still increasing. For the manufacture of crushed sand granites and granitic gneisses are preferred, fine fractions (i.e. sludge, particles finer than 63 microns) are removed by use of flocculation agents, and its amount occupy about 15 wt%. The sludges consist of quartz, feldspars, micas, chlorite/vermiculite, kaolinites, smectites and occasionally calcite. Among the clay minerals micas are usually predominant, and 14 Å minerals, kaolinites and smectites are rather scarce. Jurassic granites usually contain more kaolinites and smectites than those of Cretaceous to Tertiary granites, probably due to longer geologic ages. On the other hand, sludge from Precambrian gneiss does not contain kaolinites and smectites. Chemical analyses for the granites and their sludges show rather clear differences in most of major chemical components. Except for SiO_2 , Na_2O and K_2O ,

*교신저자: jhyoo@kigam.re.kr

all other components represent rather clear increase. Decrease of SiO_2 content is attributed to the relative decrease of quartz in the sludges. And the Na_2O decrease is caused by a relatively stronger weathering property of albite compared to Ca plagioclase. The K_2O content shows rather small differences throughout the whole samples. The increases of Al_2O_3 and other major components resulted from weathering processes and most of colored components are also concentrated in the sludges. Particle size analyses reveal that the sludges are categorized as sandy loams in a sand-silt-clay triangular diagram. The sludge is now classified as industrial waste because of its impermeability, and this result was also confirmed by rather higher hydraulic conductivities. For the environmental problems, and accomplishing effective sand manufacture, more fresh rocks with little weathering products must be chosen.

Key words : artificially crushed sand, sludge, flocculation agent, kaolinites, smectite, 14 Å minerals, particle size analysis, hydraulic conductivity

서 언

시료 및 연구방법

하상모래 등 천연으로 산출되는 모래가 고갈됨에 따라 내수의 30% 이상을 인공쇄석사가 차지하고 있으며, 국내에서는 쇄석모래 생산을 위한 원석으로서 유색광물류를 비교적 적게 포함하면서 화산암 및 사암 등에 비해 강도가 낮아 파쇄가 용이한 화강암류나 화강암질 편마암류를 선호하는 경향이다.

쇄석사 제조에서 남는 슬러지(Sludge)는 원석을 분쇄하여 모래를 만드는 과정에서 남게되는 미세입자를 일컬으며, 실트 및 점토(63마이크론 이하)입도로 주로 구성된다. 원석은 분쇄 후에 커다란 저수조에서 모래입자와 슬러지와 분리할 용이하게 하기 위해 응집제를 투입하여 세척·교반하며, 이 과정에서 중량대비 15% 내외의 슬러지가 남게 된다.

대체적으로 장석류를 주성분광물로 포함하는 화강암 및 편마암질 암석류는 풍화에 약한 편이며, 특히 Ca 사장석류, K 장석류 및 운모류는 다소 선택적으로 풍화되어 고령토, 스멕타이트 및 방해석 등으로 변이되는 경향이 있다. 슬러지에는 파쇄과정에서 석영 등 풍화에 강한 광물에서 유래한 실트 및 점토입자뿐 아니라, 풍화 등 변질에 약한 장석류 및 운모류 등에서 유래한 변이광물이 상대적으로 풍부하게 농축되는 경향이 있다. 이번 연구를 통하여 지질시대에 따른 원암의 풍화특성을 비교하고, 쇄석사의 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있는 특성을 파악하고자 하였다.

연구대상지역은 7군데로서 충남 공주지역은 지질시대로 볼 때 제일 오랜 지역인 선캄브리아기에 속하는 편마암을 원석으로 하고, 경기도 파주, 양주 및 안성지역은 각각 중생대 쥐라기의 각섬석흑운모화강암, 흑운모화강암 및 편마암상 각섬석흑운모화강암이며, 경북 경주 및 경상지역은 지질시대가 젊은 중생대 백악기 불국사 화강암섬록암 및 흑운모화강암류이다. 그리고, 경기도 화성지역은 시대미상으로 알려져 있는 남양화강암이 분포하는 지역이다.

연구방법으로는 각 지역에서 산출되는 원석들에 대한 암석 현미경을 통하여 주성분광물의 풍화 및 변질정도를 관찰하였다. 슬러지의 광물 조성 파악을 위하여 분말상태 전시료의 X-선 회절분석과 함께 반정량을 위하여 Siroquant법을 이용하였다. 점토입도의 광물세분을 위하여 침전법에 의해 점토입자를 분리하였으며, 녹니석 등으로부터 스멕타이트를 구분하기 위하여 Ethylene glycol처리를 하였다. 쇄석사제조를 위한 원료인 화강암 및 편마암, 그리고 슬러지에 대한 화학성분분석은 한국지질자원연구원의 X-선 형광분석기에 의하였다. 슬러지의 입도분포 측정에는 연세대학교가 보유한 Malvern Instruments Ltd.의 레이저형 Mastersizer 2000 Ver. 2.00를 사용하였다. 측정조건은 size range: 0.02 ~ 2000 micron, obscuration: 15 ~ 20 %이며, 시료는 중류수에 풀어서 측정하였다. 수리전도도 측정에는 모래, 실트 및 점토 등 각종 미고화물질의 측정에 적합한 변수두 투수측정기(Falling-head permeameter)를 사용하였다. 일관된 측정

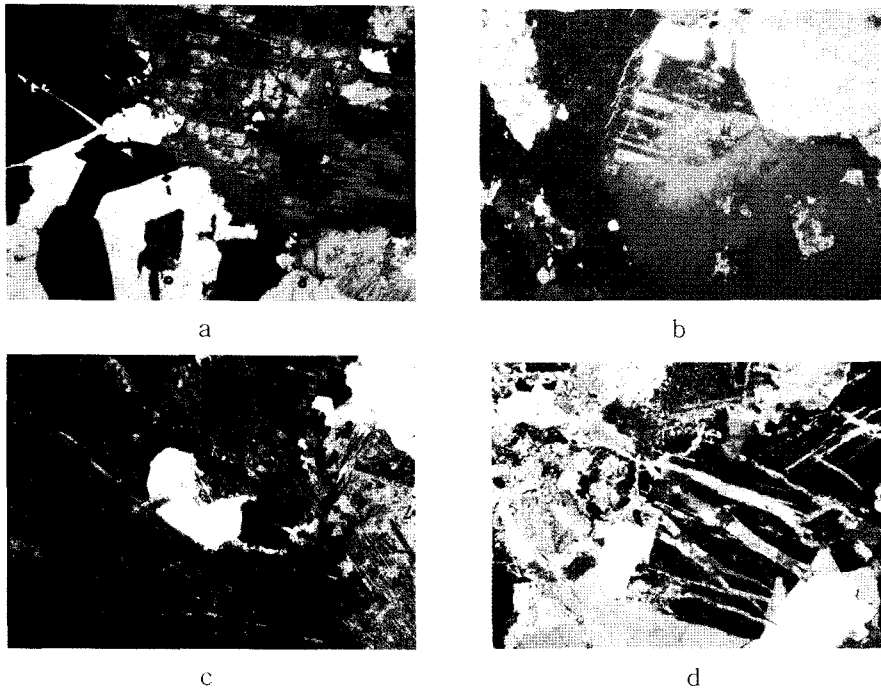


Fig. 1. ($\times 50$) Plagioclase alterations showing different weathering grade. (a) Twinned plagioclase and perthite of the Gyungsan granite, all of plagioclase are nearly fresh. (b) Plagioclase showing albite twinning represent more or less sericitized texture in the Gyungju granite. Most of plagioclase are slightly sericitized. (c) Sericitized plagioclase and rather severely altered biotite from the Paju granite. (d) Plagioclase with minute shreds and rather complex veinlets filled with sericites are found from the Whaseong granite.

을 위하여 측정기 튜브의 내경 3 cm, 낙차높이 차이 3 cm, 튜브를 채우는 시료 길이 8 cm, 그리고 시료의 양을 55 gr 내외로 통일하였다.

결과 및 토의

암석의 현미경 관찰

편광현미경에 의하면, 지질시대가 오래지 않은 백악기 불국사화강암류는 주라기대보화강암류에 비하여 사장석결정 내의 변질현상이 다소 미약하게 나타난다. 풍화작용 등에 의한 사장석의 변질은 보통 미세한 점(dot)이나 비늘(flake) 형태로 확인되는 견운모화 작용(sericitization)이 흔히 알려져 있으나, 파주화강암 등 주라기에 속하는 암석에서는 사장석류뿐 아니라 운모류까지 심하게 녹니석화된 것이 확인된다(그림

1). 일반적으로 사장석류의 풍화진척도는 K-장석류에 비해서 3배 정도 빠른 것으로 알려져 있으며, 견운모화 작용뿐 아니라 결정 내에서 세맥을 형성하는 방해석 등을 확인하고 있다(White *et al.*, 2001, White *et al.*, 2005). 연구지역 내에서도 지질시대가 확실하지 않은 것으로 알려진 경기도 화성지역 화강암은 견운모와 함께 방해석(?)이 소량으로 충전하고 있는 세맥이 장석결정 내의 crack뿐 아니라 광물결정들 사이에서 흔하게 확인된다. 이들은 단순한 원암의 풍화변질의 산물이 아니며, 후기에 일어난 구조운동 등과도 관련이 있는 것으로 추정된다. 이와 같이, 화강암 내의 방해석은 화강암류가 탄산염암을 관입하거나, 후기 열변질 등에 의해서도 생성되는 것으로 알려져 있다(White *et al.*, 2005). 공주의 선캠브리아기 편마암시료는 석영량이 우세하고 장석류가 적게 포함된 편으로써, 화강

Table 1. Siroquant semi-quantification of mineral species measured for the sludges from the seven sand manufacturers (wt.%)

Sample	Locality	Gyung-san	Gyung-ju	Anseong	Yang-ju	Paju	Whaseong	Gongju
Quartz		28.5	28.1	30.2	22.7	12.7	36.2	56.3
Albite		38.1	39.2	19.1	22.6	26.2	13.4	12.9
Microcline		20.5	24.0	26.5	19.2	22.1	17.2	4.7
Micas		7.2	3.6	11.2	17.8	14.4	16.0	14.8
Ch/V		3.0/0	0/1.5	3.9/3.0	5.1/2.1	6.7/3.9	4.2/2.8	6.6/3.1
Kaolinites		2.0	1.0	3.0	3.2	3.8	3.8	-
Calcite		-	-	-	2.7	3.6	0.7	2.5
Smectites		0.5	2.6	2.1	4.6	6.6	5.7	-

Ch = Chlorite, V = Vermiculite.

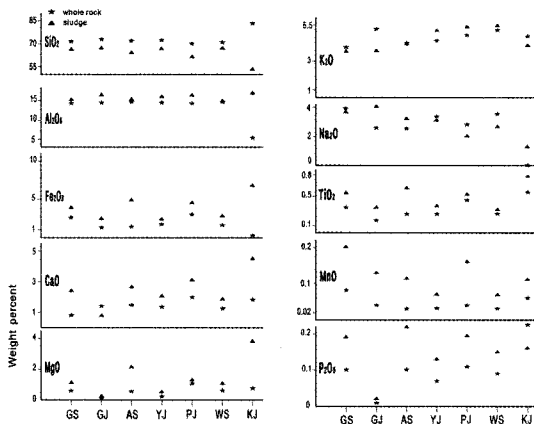


Fig. 2. Relative abundance of 10 major components between the whole rocks and their sludges in the study areas. (GS = Gyung-san, GJ = Gyung-ju, AS = Anseong, YJ = Yangju, PJ = Paju, WS = Whaseong and KJ = Kongju or Gongju).

암류와는 현저히 다른 광물조성 및 조직을 나타내며, 오랜 지질연대임에도 불구하고 장석류에서 건운모화 등 풍화변질현상 등은 거의 확인되지 않는다.

X-선 회절분석

슬러지는 실트 및 점토입자들로 주로 구성되어 있음에도 불구하고 주구성 광물로서 석영 및 장석류(정장석 및 사장석)를 우세하게 포함(66.4~87.1 wt%)하며, 부구성 광물로서 14 Å 광물류(녹니석 및 질석), 운모류, 고령토류, 각섬석류, 스멕타이트류 및 방해석 등을 포함하기도 한다(표 1, 그림 3~5).

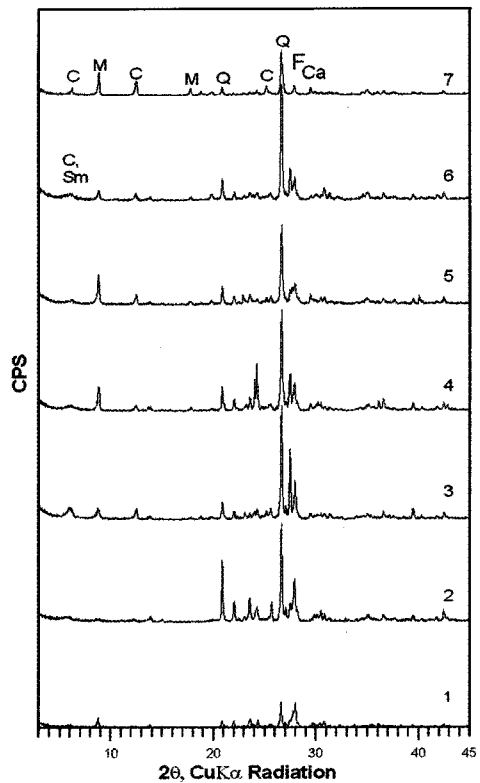


Fig. 3. X-ray powder diffraction patterns (CuK α radiation) of the sludges in the natural state. (1) Gyung-san, (2) Gyungju, (3) Anseong, (4) Yangju, (5) Paju, (6) Whaseong and (7) Gongju. (Sm : smectites, M : micas, C : chlorites, V : vermiculites, K : kaolinites, A : amphiboles, Q : quartz, F : feldspars, Ca : calcite).

슬러지의 광물조성에서 지질시대가 오래지

Table 2. Whole rock and sludge analyses taken from 7 sand manufacturers (wt.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Ti ₂ O ₂	MnO	P ₂ O ₅	Locality and sample state	Geologic age
71.41	14.37	2.67	1.81	0.62	3.96	3.91	0.35	0.08	0.1	Gyungusan Gr.	Ter.-Cret.
66.51	15.37	3.99	2.41	1.21	3.67	3.8	0.55	0.2	0.19	Gyungusan Sl.	
73.63	14.47	1.38	0.29	0.12	5.23	2.63	0.17	0.04	0.01	Gyungju Gr.	
67.53	17.56	2.55	0.7	0.31	3.74	4.05	0.35	0.13	0.02	Gyungju Sl.	Jura.
72.47	14.76	1.58	1.47	0.53	4.25	3.28	0.26	0.03	0.1	Anseong Gr.	
64.01	15.4	4.87	2.66	2.13	4.18	2.54	0.62	0.11	0.22	Anseong Sl.	
73.05	14.48	1.74	1.36	0.35	4.42	3.43	0.26	0.03	0.07	Yangju Gr.	Age Unknown
67.44	16.11	2.48	2.07	0.53	5.11	3.1	0.37	0.07	0.13	Yangju Sl.	
70.2	14.33	3.08	2	1.14	4.8	2.77	0.44	0.04	0.11	Paju Gr.	
61.99	16.46	4.55	3.11	1.35	5.37	2.05	0.53	0.16	0.19	Paju Sl.	Pre Cam.
71.83	14.73	1.62	1.26	0.61	5.14	3.62	0.26	0.03	0.09	Whaseong Gr.	
67.04	14.99	2.93	1.88	1.09	5.45	2.69	0.32	0.07	0.15	Whaseong Sl.	
84.52	5.38	1.92	0.9	0.72	4.62	0.06	0.54	0.06	0.30	Gongju Gn.	Pre Cam.
53.85	16.94	7.16	4.51	3.84	4.09	1.39	0.78	0.11	0.16	Gongju Sl.	

Gr. = Granite, Sl. = Sludge, Gn. = Gneiss.

많은 백악기의 경산지역시료와 선캠브리아기에 속하는 공주시료는 고령토 및 스�멕타이트를 아주 소량으로 포함하거나, 거의 포함하지 않으며, 운모류 및 장석류 등이 고령토와 스�멕타이트 등으로의 변이가 일어나기에는 비교적 짧은 지질시대 및 환경이었음을 추정케 한다. 그러나, 백악기의 경주시료는 고령토 및 스�멕타이트가 확인되어 경산지역의 화강암류와는 다소 구별이 되며, 포항일대에서 제4기단층지역 중 단층주변물질이 화강암류로 구성된 입실단층 및 원원사지역 등에서 흔히 확인되고 있는 스�멕타이트의 존재는 통상적인 풍화작용의 범위를 넘어서는 열수 등이 관계한 변질작용이 있었음을 추정케 한다(유장한 외, 1990; 박성민 외, 2007). 반면에, 안성지역시료를 제외하고는 대보화강암류를 원암으로 사용한 슬러지들은 모두 고령토류와 스�멕타이트류를 약간씩 포함한다. 또한, 방해석의 경우에도 스�멕타이트류가 확인되지 않는 경주 및 공주시료에서만 포함되지 않아, 풍화가 진척된 화강암체에서 확인되는 스�멕타이트가 Ca계 벤토나이트임을 생각할 때, 방해석 역시 풍화 등에 의해서 사장석 등에서 방출된 잉여의 Ca에 의한 생성물로 추정된다. 조립질 화강암의 풍화와 점토입도의 광물변이에 대한 X-선회절분석 연구에서 고령토와 함께

스멕타이트가 확인되기도 하며, 사장석결정 내에 생성된 세립질 견운모의 다음 풍화산물로서 스�멕타이트가 형성됨을 확인하였다(Taboada, *et al.*, 1999).

화학적 성분 분석

슬러지는 화강암 원석과의 주성분 10원소에 대한 화학성분 비교에서 명확한 차이를 나타낸다. 슬러지는 대체적으로 풍화 등의 변질작용을 통해서 SiO₂, Na₂O 및 K₂O 외의 다른 주요 성분은 화강암 원석류보다 훨씬 증가된 현상을 나타낸다. 슬러지에서 SiO₂의 감소는 실트 및 점토입도에서의 석영함량이 상대적으로 적어지기 때문이다. 풍화에 다소 강한 알바이트장석류를 구성하는 Na₂O함량은 쥬라기 화강암류기원의 슬러지에서는 대체적으로 감소를 나타내나, 풍화가 덜 진척된 안성 및 백악기의 경주지역 슬러지에서 Na₂O함량의 증가현상은 다소 이해가 되지 않는다. K₂O 성분은 백악기화강암류를 원석으로 하는 슬러지에서 다소 감소하는 현상이고, 쥬라기 화강암류의 슬러지는 견운모화 등에 의해 생성된 K₂O가 슬러지에 다소 농축되기 때문에 다소 증가하는 것으로 추정된다(표 2). 대체적으로는 장석류를 구성하는 Ca, Na 및

Table 3. Hydraulic conductivity values (cm/s) of the sludges.

Gyongsan	Gyungju	Anseong	Yangju	Paju	Whaseong	Gongju
2.737×10^{-9}				1.31×10^{-7}	6.47×10^{-8}	2.43×10^{-8}
~	9.94×10^{-8}	5.33×10^{-8}	2.73×10^{-8}	~	~	~
3.432×10^{-9}				7.69×10^{-8}	2.42×10^{-8}	2.63×10^{-9}

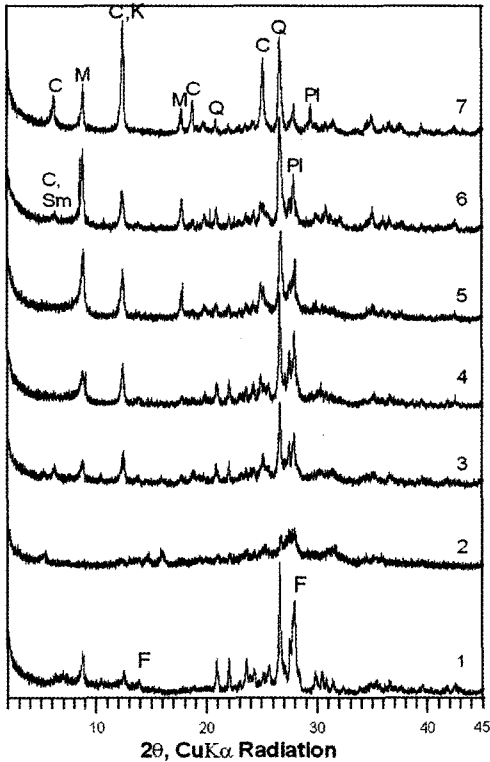


Fig. 4. XRD patterns of 7 clay-sized fractions extracted from sludges. (1) Gyongsan, (2) Gyungju, (3) Anseong, (4) Yangju, (5) Paju, (6) Whaseong and (7) Gongju. (Sm : smectites, M : micas, C : chlorites, V : vermiculites, K : kaolinites, A : amphiboles, Q : quartz, F : feldspars, Pl : plagioclases.

K성분 중에서 풍화에 약한 Ca 사장석류를 구성하는 Ca는 슬러지에서 확실한 증가를 나타내며, 좀 더 풍화에 강한 K 사장석류는 상대적으로 풍화에 강한 Na 사장석류에 비해 K함량이 슬러지에서 다소 증가되어 나타난다. 이들 외에 점토광물류의 주요 성분인 Al_2O_3 와 함께 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 및 P_2O_5 등 유색광물을 구성하는 주요성분들은 대체적으로 뚜렷한 증가를

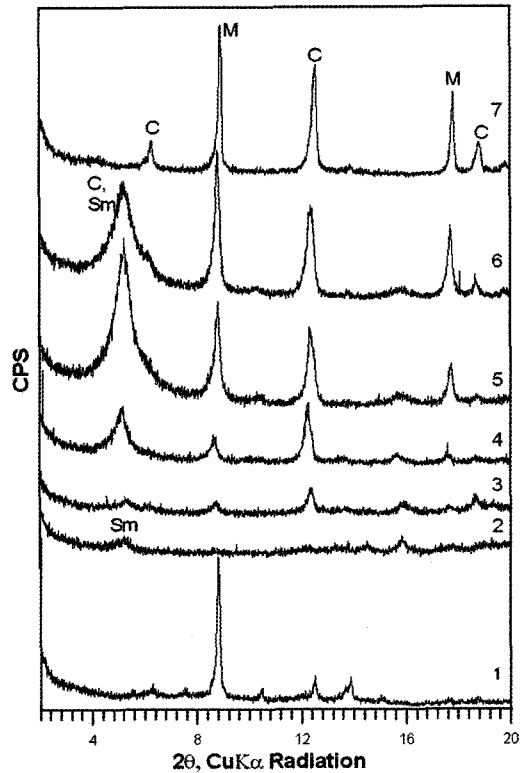


Fig. 5. XRD patterns of 7 E.G. treated clay-sized samples. (1) Gyongsan, (2) Gyungju, (3) Anseong, (4) Yangju, (5) Paju, (6) Whaseong and (7) Gongju (Sm : smectites, M : micas, C : chlorites).

나타낸다(그림 2).

화강암지대 토양층에 포함되는 모래입자 내의 점토결정에 대한 SEM 및 EDS연구에서 Si, K, Na, Mg 등은 현저히 감소됨을 기재하였다 (Scarciglia, *et al.*, 2005).

입도분석

슬러지의 입도분포를 측정하여 점토, 실트, 모래입도의 삼각도표에 의한 토양조직분류에

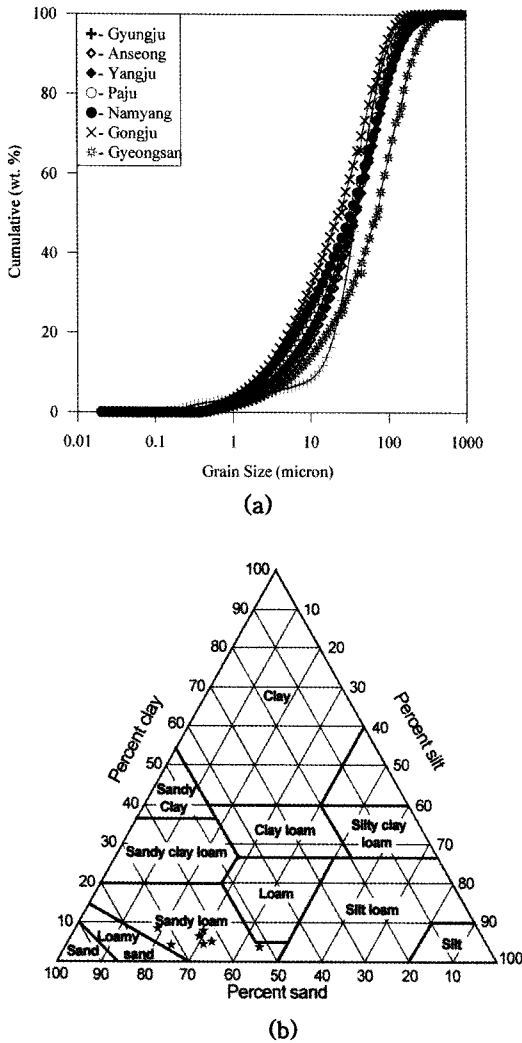


Fig. 6. Particle size analysis of the sludges. (a) Cumulative particle size distribution; (b) Sand-silt-clay triangular diagram due to the classification of soil texture. The textural class name for the sludges (stars in the diagram) could be designated as sandy loam.

의하면 모든 슬러지들은 사질양토의 범주에 속함을 확인할 수 있다(Brady and Weil, 1996). 입도분포별 함량비는 점토 3.4~8.2%, 실트 18.8~52.5%, 그리고 모래 44.0~73.0% 정도이며, 예상보다 점토의 함량은 낮은 편이다(그림 6a, b). 입도분포 축적도표에서 시료들은 대체적으로 비슷한 경향을 나타내지만, X-선회절분석에 의해 석영, 장석류의 함량이 높게 나타난 경우

및 공주슬러지는 모래입도의 함량이 높은 특성을 나타내며, 이들은 화학성분 중 SiO₂ 함량 역시 높은 편이다. 한편, 백악기의 경산시료는 가장 적은 모래입도와 함께 가장 많은 실트함량을 나타내어, 입도분포가 지질시대 및 통상적인 풍화작용과 밀접한 관련은 가지지 않는 것으로 추정된다. 또한, 화강암류의 3대 조성광물 중에서 석영과 장석류를 제외한 운모 등 점토광물류와 기타광물의 함량이 높은 양주, 파주 및 화성시료는 점토입도의 함량이 높게 나타난다.

투수율 측정

인공쇄석사 제조과정에서 남는 슬러지는 실트, 모래 및 점토의 미세한 입자로 구성되어 있기 때문에 불투수성이 높아 물의 자유로운 유동을 막기 때문에 야외에 무단으로 방치되면 민원의 소지가 되는 등 환경오염물로 구분되는 가장 큰 이유의 하나이다. 고화되지 않은 퇴적물에서 실트 및 점토 등의 작은 입자들이 모래, 자갈 등의 큰 매체보다 투수계수(Hydraulic conductivity)가 작다는 것은 잘 알려져 있지만, 통상적으로는 입도분포(Grain-size frequency distribution)와 투수계수와의 관계가 이례적으로 잘 정립되어 있지 않은 편이다(Summers and Weber, 1984).

연구에서 측정된 슬러지들의 수리전도도는 대체적으로 $1.31 \times 10^{-7} \sim 2.63 \times 10^{-9}$ (cm/s)의 사이에 분포하며(표 3), 수리전도도 값의 범위는 실트 및 점토입자를 다소 많이 포함하는 매체의 특징을 나타내고 있다(Boecker and Grondelle, 1995 ; Smith and Mullins, 2001). 국내에서 폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로 사용하기 위한 규정치인 10^{-7} (cm/s) 이하가 요구되는데 슬러지는 이보다 좀 더 낮은 값을 나타내기 때문에 앞으로의 활용이 기대되기도 하며, 1980년도 후반부터 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 등의 지오멤브레인이 사용되고 있으며, 일부에서는 화강토와 벤토나이트 등의 혼합차수재가 이용된다(정하익 외, 1995). 본 연구에서 얻어진 수리전도도는 대전시내 유성일원에서 채취한 화강암기원 모래 및 실트입도의 풍화토에 대한 수리전도도($1.15 \times 10^{-5} \sim 7.31 \times 10^{-4}$ cm/s)에 비해서도 훨씬 낮게 나타난다(정지곤 외, 2006). 고령토 및 스멕타이트류가 다른 지역에 비해서 비교적

적게 포함되는 안성 및 경주지역의 시료는 다소 높은 투수계수를 나타낸다. 반면에 이들 점토류가 좀더 많이 포함되는 시료들은 투수율이 낮아지며, 실트함량이 월등하게 높은 경산시료와 함께 점토입도가 풍부한 공주시료도 수리전도도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 일반적으로, 고령토와 스멕타이트류는 함수능력이 가장 높은 점토광물류에 속하며, 그 중에서 스멕타이트류는 물을 흡수하면 팽창하는 특성까지 있어, 물 등 유체의 흐름을 더욱 어렵게 하는 특성을 가진다.

결 언

1) 쇄석사제조 후에 남는 슬러지는 주구성 광물로서 석영 및 장석류(정장석 및 사장석)를 66.4~87.1% (wt.)나 포함하며, 부구성 광물로서 14 Å 광물류(녹니석 및 질석), 운모류, 고령토류, 각섬석류, 스멕타이트류, 방해석 등 다양한 광물을 포함한다.

2) 백악기에 속하는 경북 경산지역시료는 가장 신선한 편으로 고령토 및 스멕타이트를 거의 포함하지 않는다. 다만, 경주지역 시료는 고령토류를 극히 소량으로 포함하며, 스멕타이트류는 소량으로 확인되어 고령토로의 변이가 일어나기에는 비교적 짧은 지질시대 및 환경이었으나, 스멕타이트를 생성시킨 열수작용 등 다른 원인이 있었음을 추정케 한다. 반면에, 유라기에 속하는 화강암류는 상대적인 오랜 지질시대 등으로 인하여 풍화작용 등에 의한 고령토류를 좀 더 풍부하게 포함하고, 안성지역시료를 제외하고는 스멕타이트도 소량씩 포함한다. 공주지역 편마암은 장석결정이 적은 이유도 있겠으나, 고령토 및 스멕타이트는 거의 확인되지 않으며, 이들이 오랜 변성작용 등에 의하여 녹니석 및 운모류 등으로 변이되었을 가능성이 높다.

3) 슬러지에서 SiO_2 의 감소는 풍화에 강한 석영류가 화강암원석에 비해 상대적으로 적게 포함된 것이다. K_2O 는 유라기화강암 슬러지에서 높게 나타내나, 백악기 슬러지는 원석에 비해 낮게 나타나, 풍화가 덜 진행되었음을 추정케 한다. 또한, Na_2O 는 풍화정도가 약한 백악기 및 유라기의 안성지역 슬러지에서는 거의 유사하거나 증가를 나타내지만, 유라기에서 유래한 슬러지에서는 감소된다. 이상의 세가지 성분 외

에, 점토광물류의 주요성분인 Al_2O_3 와 함께 Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , MnO 및 P_2O_5 등 유색광물 구성성분들은 풍화 등에 의해 뚜렷한 증가를 나타낸다.

4) 슬러지는 입도분포 분석결과에 의한 점토-실트-모래의 삼각도표에서 사질양토의 범주에 속한다. 입도별 함량비는 점토 3.4~8.2%, 실트 18.8~52.5%, 그리고 모래 44.0~73.0%를 차지하며, 예상보다 점토입자의 함량은 낮은 편이다. 모래입도 함량이 높은 경주 및 공주시료는 높은 석영 및 장석함량과 함께 SiO_2 함량도 높은 편이며, 양주, 파주 및 화성시료는 점토함량이 풍부한 편이다.

5) 슬러지의 수리전도도는 $1.31 \times 10^{-7} \sim 2.63 \times 10^{-9}$ (cm/s) 사이에 있으며, 이 값은 실트 및 점토입도를 어느 정도 포함하는 매체의 특징을 나타내는 것으로, 이들의 함량과 다소 밀접한 관계를 나타낸다. 입도분석 결과는 함수능력이 큰 고령토 및 스멕타이트 등의 점토광물류를 다소 포함하는 결과와도 일치하여, 폐기되는 슬러지를 이용한 차수재 등 매립장의 복토재 등으로의 활용이 기대된다.

6) 효과적인 쇄석사제조를 위한 화강암류 원석을 선택을 위해서는 채석대상 암석이 포함하는 사장석류의 경하 관찰과 함께, 분쇄하여 얻어지는 슬러지의 화학성분 및 광물조성 파악 등을 통하여 양질의 원석선택이 가능할 것이다.

참고문헌

- 박성민, 강한, 장윤득, 임창복, 김정진 (2007) 제4기 입실단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토의 산출상태에 따른 광물조성연구: 고해상도 분말회절 분석을 중심으로. 한국광물학회지, 제 20권 제 2호, pp. 83-90.
- 유장한, 홍세선, 이형재, 조한익 (1990) 전북지역 퇴적점토 및 경기도 강화지역 원지성 점토조사. 비금속광상조사연구, 한국동력자원연구소(KR-90-2B-1), pp. 3-64.
- 정지근, 서병민, 하성호, 이동원 (2006) 입도분석 및 변수두법을 이용한 교란사질 토양의 투수계수 측정. 한국지질공학회지, 제 16권 제 1호, pp. 15-21.
- 정하익, 이용수, 심한인, 전이배, 우제윤, 정문경 (1995) 폐기물 매립지 차수재 개발, 한국건설기술연구원, pp. 1-118.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (1996) The nature and properties of soils, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

- Boeker, E. and van Grondelle, R. (1995) Environmental physics, John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, England.
- Scarciglia, F., Le Pera, E. and Critelli, S. (2005) Weathering and pedogenesis in the Sila Grande Massif (Calabria, South Italy): From field scale to micromorphology. *Catena*. Vol. 61, issue 1, pp. 1-29.
- 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, pp. 474-475.
- Taboada, T. and Garcia, C. (1999) Smectite formation produced by weathering in a coarse granite saprolite in Garcia (NW Spain), *Catena*. Vol. 35, issues 2-4, pp. 281-290.
- White, A.F., Schulz, M.S., Lowenstern, J.B., Vivit, D.V. and Bullen, T.D. (2005) The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks: Implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, Issue 6, pp. 1455-1471.
- White, A.F., Bullen, T.D., Schulz, M.S., Blum, A.E., Huntington, T.G. and Peters, N.E. (2001) Differential rates of feldspar weathering in granitic regoliths, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 65, Issue 6, pp. 847-869.

2007년 12월 5일 원고접수, 2007년 12월 17일 게재승인.