

## 石炭 바닥재와浚渫土를 이용한多孔性燒結體의 제조 및 특성 평가†

金江德 · \*姜昇求

京畿大學校 新素材工學科, 京畿道 水原市 靈通區 二儀洞 山 94-6

### Preparation and Characterization of Porous Sintered Body Made from Coal Bottom Ash and Dredged soil†

Kangduk Kim and \*Seunggu Kang

Department of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University Suwon 443-760, Korea

#### 요 약

화력발전소에서 배출되는 바닥재와 준설토를 70:30(wt%)로 혼합하고 이를 6±2 mm 크기 구형으로 성형 및 로터리 킬른에서 1125°C/15 min으로 소성한 뒤, 그 물리적 특성을 평가함으로써 오염 토양을 복원하는데 사용되는 흡착제로의 적용 가능성을 분석하였다. 제조된 소결체(BD)는 100 µm 이상의 거대 기공 및 10 µm 이하의 미세기공을 모두 가지고 있었으며, 비표면적, 기공율 그리고 공극율은 각각 12.0 m<sup>2</sup>/g, 30.1% 그리고 38.2%이었다. BD 소결체를 한번 분쇄한 시편(BD-C)은 중형비=2의 부정형이었으나, 부피비중 및 기공크기 분포는 BD와 비슷한 값을 나타내었다. 한편 BD-C 시편의 비표면적, 기공율 그리고 공극율은 BD에 비해 더 우수한 값을 나타내었는데 이는 내부에 존재하던 폐기공(closed pores)이 분쇄과정에서 개기공(open pores)으로 변환되면서 겉보기 부피가 감소했기 때문이다. 제조된 소결체의 영 전하점(IEP)은 약 pH=5이었고 따라서 미생물을 소결체에 결합시킬 때 반응용액의 최적 pH를 알 수 있었다. 본 연구에서 제조된 소결체는 오염 토양 복원에 사용되는 흡착제로의 적용이 가능하며, 더구나 측정된 데이터를 이용하여 BD와 BD-C를 적절한 비율로 혼합하면 적용 상황에 따라 다른 공극율, 기공율 등의 요구 조건을 최적으로 맞출 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 석탄 바닥재, 기공율, 비표면적, 공극, 영전하점

#### Abstract

The spheric sintered body with 6±2 mm diameter was manufactured in a rotary kiln at 1125°C/15 min using green body formed by pelletizing the batch powder composing of coal bottom ash produced from power plant and dredged soil by 70:30, wt%. And the physical properties of sintered body (BD) were analyzed to confirm the possibility for applying to an absorbent to restore a contaminated soil. The sintered body had a giant pore above 100 µm and a fine pore below 10 µm, and bulk density was 1.4. Also its specific surface area, porosity and void proportion were 12.0 m<sup>2</sup>/g, 30.1% and 38.2% respectively. The crushed body (BD-C), produced by crushing a BD specimen into an irregular shape with an aspect ratio of about 2, was similar to BD specimen at bulk density and pore size distribution. But it had superior values of specific surface area, porosity and void proportion compared with BD specimen owing to a decreased apparent volume due to conversion of closed pore existed at interior of BD to open pore during a crushing process. The IEP of sintered body occurred at about pH=5, so the optimum pH condition of reacting aqueous solution could be known before bonding a microbe to the sintered body. Hence, the optimum void proportion and porosity of an absorbent can be obtained by appropriate mixing a BD with BD-C from the base data calculated in this study.

† 2010년 1월 6일 접수, 2010년 1월 18일 1차수정

2010년 1월 29일 2차수정, 2010년 2월 3일 수리

\*E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

**Key words :** Coal bottom ash, Porosity, BET, Void, IEP

## 1. 서 론

토양 오염물질은 종류에 따라 중금속을 포함하는 무기 화합물과 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene) 및 TPH(Total petroleum hydrocarbon) 등의 탄화수소 화합물로 구분된다. 기름과 같은 유기 화합물의 경우, 토양 오염원의 이동 경로에 투과성 반응벽체(PRB, Permeable Reactive Barrier)를 설치하여 이동하는 유기물을 토양 내에서 화학적으로 처리, 분해하는 방법들이 시도되고 있다.<sup>1-6)</sup>

또한 특정 오염물질의 처리를 위해 점토나 제올라이트(zeolite)와 같은 흡착체에 산화제( $H_2O_2$ , Ozone or  $KMnO_4$ ), 영가철(zero valent Fe) 등을 담지시켜 PRB를 구성하여 사용하기도 한다. 그러나 복합으로 오염된 토양을 해결하기 위해서는 기존 재료에 치환 흡착능이나 산화 환원능, 공극 특성 등이 추가적으로 요구된다.<sup>4,5)</sup> 산화제나 영가철을 이용하는 방법 이외에 반응벽체에 미생물을 형성하여 유기 화합물을 제거하는 방법 또한 연구가 진행 중이다.<sup>6,8)</sup>

본 연구에서는 석탄 바닥재를 이용하여 제조된 세라믹 소결체와 이를 분쇄한 시편을 준비하고 각각에 대한 기공률, 공극률, 기공분포, 표면 전하 등의 물성을 평가함으로써 오염토양 정화를 위한 흡착제로의 적용 가능성을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

세라믹 소결체의 원료는 'T시 화력발전소에서 발생되는 석탄바닥재와 준설토를 사용하였다. 각 원료의 입도를 균일하게 제어하기 위해 핀 밀(pin mill)을 이용하여  $150\ \mu\text{m}$  이하로 분쇄하였다. 석탄바닥재의 재활용량을 최대한으로 높이기 위해, 바닥재를 40~80 wt% 범위로 수행한 예비 실험에서, 바닥재가 70 wt% 이상 첨가되면 가스성이 떨어져 제품의 성형이 불가능하였으며, 성형이 가능

한 시험편 중 바닥재가 70% 포함된 것이 부피비중, 흡수율, 공극률 특성이 가장 우수한 결과를 보였다. 따라서 본 실험에서는 바닥재:준설토=70:30(wt%)으로 고정하였다. 분쇄된 석탄바닥재와 준설토를 리본(ribbon) 믹서기를 이용하여 최적 배합비인 70:30(wt%)으로 건식 혼합 후, 조립기를 이용하여 지름  $6\pm 2\ \text{mm}$ 의 구형 성형체로 제조하였다. 제조된 성형체를  $110^\circ\text{C}/48\ \text{hr}$  조건으로 건조 후, 로타리 킬른(rotary kiln)에서  $1125^\circ\text{C}$ 의 온도로 15분간 소성하였다. 제조된 구형 소결체 중 7~8 mm 크기의 일부를 롤러 밀(roller mill)을 이용하여 쇄석 형태로 분쇄하였다. 본 연구에서는 구형으로 제조된 소결체를 BD, 구형 소결체를 분쇄한 쇄석형 소결체를 BD-C로 표기하였다. 시료명에서 B는 바닥재(bottom ash), D는 준설토(dredged soil) 그리고 C는 분쇄(crushing)를 뜻한다.

각 원료의 화학조성은 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)를 이용하여 분석하였다. 원료와 소결체의 결정상 분석과 열적 특성 분석은 XRD (RINT-8100H/PC, Rigaku, Japan)와 TG/DTA(STA 409 C/CD, Netzsch Co., Germany)를 각각 사용하였다. 소결체의 비표면적(ASAP2010, Micromeritics, USA)과 기공크기(Pore master, Quantachrome, USA)를 분석하였으며, 비중 및 흡수율 측정에는 KS F 2503의 '굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법'을 이용하였다.

소결체의 공극률 측정에는 KS F 2505 '골재의 단위용적 질량 및 실적을 시험 방법'을 이용하였다. 소결체의 이미지 관찰 및 미세구조를 분석하기 위하여 Camscope (DCS-105, Sometech vision, Korea)와 SEM (JSM-6500F, Jeol, Japan)을 사용하였다. 소결체의 표면 전하는 Zeta Potential Analyzer(Photal ELS-8000, Otsuka, Japan)를 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

각 원료의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 바닥재

**Table 1.** Chemical composition of raw materials (wt%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	C	ZrO <sub>2</sub>	I.L.*	Total
Bottom ash	45.6	18.6	8.1	2.1	0.8	0.2	0.5	1.3	0.2	0.1	18.1	0.3	4.1	100.0
D-soil <sup>†</sup>	70.7	14.4	3.8	0.8	0.2	2.5	2.7	0.8	-	-	-	-	4.1	100.0

\*I.L. = Ignition loss; <sup>†</sup>D-soil = dredged soil

(bottom ash)는 주성분이  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 로 각각 45.6 wt%와 18.6 wt% 존재한다. 특히 미연탄소(C) 함유량이 18.1 wt%로 비교적 높게 나타났다. 바닥재에 포함된 미연탄소는 소성 과정에서  $\text{CO}_2$  가스를 발생시켜 다공성 구조의 소결체를 형성하는데 기여할 것으로 판단된다. 준설토(dredged soil)의 경우  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 각각 70.7 wt%와 14.4 wt% 존재한다. 또한 준설토에 포함된 알카리 산화물( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )과 알카리토류 산화물( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ )이 일반 점토에 비해 약 1.5배 정도 존재하는 것으로 확인되었다. 이와 같이 준설토는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  성분함량이 낮고 1, 2족 산화물 성분을 많이 포함하고 있어 소결 시 용제로 작용할 것으로 예상되며, 또한 약 4%의 작열감량 물질을 포함하고 있어 가스 발생 및 기공 형성에 영향을 줄 것으로 판단된다.

Fig. 1은 바닥재, 준설토 그리고 소결체의 결정상을 XRD로 분석한 결과이다. 바닥재의 주 결정상은 Quartz( $\text{SiO}_2$ )와 Mullite( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )로 이루어져 있다. 바닥재의 Mullite 결정상은 석탄을 열처리 할때  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 결합되어 형성된 것으로 판단된다. 준설토는

Quartz( $\text{SiO}_2$ )를 주결정상으로 갖고 있으며, 바닥재와 준설토가 7:3으로 혼합되어 제조된 BD 소결체는 Quartz( $\text{SiO}_2$ )와 Mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )가 주결정상을 형성하고 있다.

Fig. 2는 바닥재, 준설토 그리고 소결체의 열적특성을 TG/DTA로 분석한 결과이다. 바닥재(a)는 초기부터 무게가 감소하기 시작되어 400°C 부근까지 5%의 무게감량을 보이다가, 400~800°C 온도 범위에서 22.5%의 급격한 무게감량을 나타냈다. 또한 200~800°C의 온도범위에서 넓은 형태의 발열피크를 나타내었다.

이러한 무게감량과 넓은 형태의 발열피크는 미연탄소의 산화로 인한 발열반응에 의한 것으로 판단된다. 준설토(b)의 경우 400~800°C사이에서 약 3%의 무게감량을 나타내고, 550°C부근에서 약한 발열피크를 보인다. 이는 준설토 내부에 존재하는 휘발성 유기물의 분해로 인한 무게감량과 발열피크로 판단된다. 바닥재와 준설토를 7:3으로 혼합하여 제조된 소결체(c)는 400~700°C 부근에서 발열피크와 함께 8% 정도의 무게감량을 보이는데, 이는 소결체의 주원료인 바닥재에 존재하던 미연

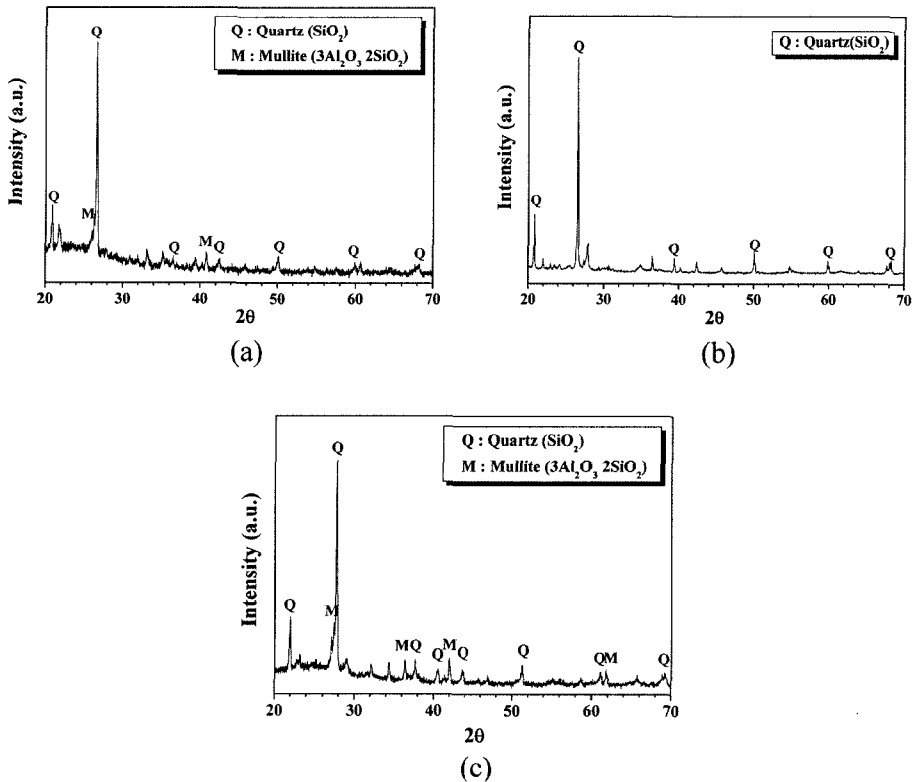


Fig. 1. XRD results of (a) bottom ash, (b) dredged soil and (c) BD.

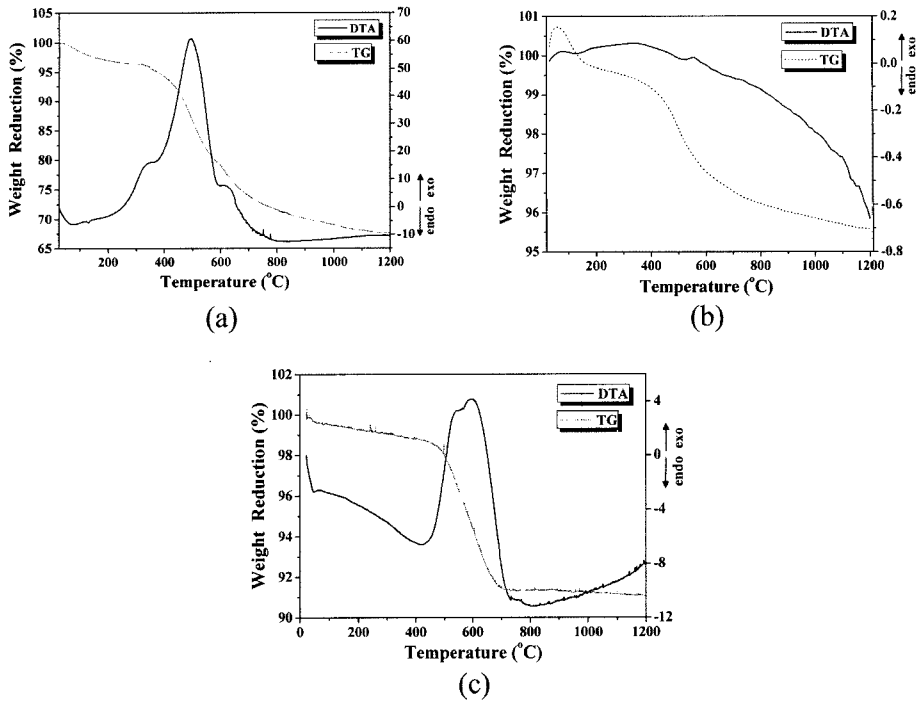


Fig. 2. TG/DTA patterns of (a) bottom ash, (b) dredged soil and (c) BD.

Table 2. Size, shape and void of sintered body

Property \ Specimen I.D.	BD	BD-C
Shape type	Sphere	Irregular
Average size(mm)	6±2	4±2
Aspect ratio	1±0.1	2±0.2
Voids (%)	38.2	33.6

탄소의 연소반응에 의한 것으로 판단된다.<sup>9)</sup> 따라서 로 타리 킬른으로 소성된 소결체에도 많은 양의 미연탄소가 잔존하는 것으로 보아, 미연 탄소를 완전히 제거하기 위하여는 소결 시 승온속도를 더욱 느리게 할 필요가 있다고 생각된다.

Table 2는 제조된 소결체의 입형과 공극률을 나타낸 것이다. 조립기로 제조된 BD 소결체는 가로/세로 비 (aspect ratio)가 약 1인 구형의 형태를 나타내며, 분쇄된 BD-C 소결체의 경우 가로/세로 비가 약 2인 부정형을 나타내었다. 입자의 충전률과 관련이 있는 공극률은 BD 및 BD-C 소결체가 각각 38.2% 및 33.6%로 나타났다. 이는 파쇄된 소결체의 크기가 더 작고 부정형이어서 구형 소결체보다 충전 효율이 좀 더 높았기

Table 3. Physical properties of sintered body

Property \ Specimen I.D.	BD	BD-C
Bulk density	1.4	1.3
Apparent density	2.0	2.3
Apparent porosity (%)	30.1	42.9
Water absorption (%)	21.4	33.4
BET(m <sup>2</sup> /g)	12.0	13.2

때문에, 충전률과 반비례 관계에 있는 공극률이 낮게 나타난 것이다. 세라믹 소결체를 오염 토양 정화를 위한 흡착제로 사용하기 위해서는 소결체의 공극 특성을 적절히 제어해야 한다. 공극특성은 흡착제를 통과하는 액상의 저장, 여과, 그리고 차단 거동과 밀접한 관계가 있기 때문이다.

Table 3은 제조된 소결체의 물리적 특성을 나타낸 것이다. BD 및 BD-C의 부피비중은 각각 1.4와 1.3으로 거의 비슷하게 측정되었다. 부피비중을 측정할 때, 부피는 폐기공과 개기공을 모두 포함시킴으로 두 시편의 부피비중은 같아야 한다. BD와 BD-C의 겉보기 비중은 각각 2.0과 2.3을 나타내었다. BD-C의 겉보기 비중값

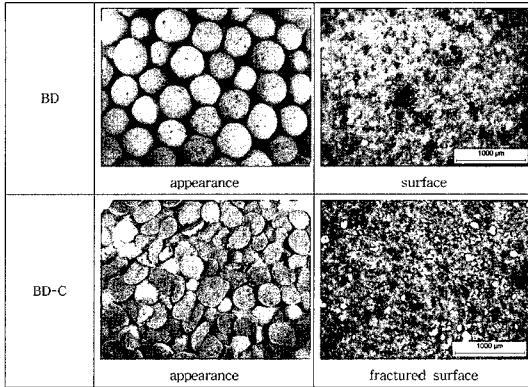


Fig. 3. Optical image of sintered body.

이 높은 것은 BD 시편을 분쇄하면서 중심부에 존재하던 폐기공들이 노출되면서 개기공으로 전환되었기 때문이다. 즉 BD-C의 겉부피가 BD 시편보다 작아지므로 겉보기 비중이 크게 된 것이다. 겉보기 기공률은 BD 시편이 30.1%인데 반하여 BD-C는 42.9%로 1.4배 높았다. 이는 역시 파쇄과정 중에 폐기공(closed pore)이 노출되면서 개기공(open pore)으로 변환되었기 때문이다. 실제로 BD-C시편의 흡수율은 33.4%로 BD의 21.4% 보다 1.6배 높은 것을 확인하였다.

이로부터 분쇄된 소결체 시편, BD-C가 우수한 흡착제 특성을 갖는 것으로 판단된다. 무기질 다공체를 오염 토양 복원을 위해 사용하는 경우 기공률은 최소 40% 되어야 한다고 보고되고 있으며,<sup>5)</sup> 본 실험결과 부정형 BD-C 소결체의 경우 겉보기 기공률이 약 42.9%로 기준에 오염 토양 복원을 위한 다공성 흡착제로 적용 가능할 것으로 판단된다. BD와 BD-C의 BET값은 각각 12.0 m<sup>2</sup>/g과 13.2 m<sup>2</sup>/g을 나타냈으며 이 역시 분쇄에 의한 개기공 증가에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 3은 소결체의 이미지를 광학현미경으로 관찰한 결과이다. BD 시편은 구형의 형태를 가지며 겉질 부분에 미세기공 및 검은색 반점을 많이 포함하고 있다. 검은색 반점은 바닥재에 포함되었던 미연탄소가 소성 공정중에 미처 타지 못한 것으로 판단된다. BD-C 시편은 분쇄를 통하여 소결체 겉질부분(shell)과 함께 중심부분(core)이 함께 노출된 것을 확인할 수 있으며, 내부의 중심부분의 미세기공이 겉질부분 보다 상대적으로 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 소성 시 바닥재와 준설토에 존재하는 미연탄소와 유기물의 연소가 시편 내 다공성의 black core를 형성하는데 기여함을 보여준다.

Fig. 4는 소결체의 미세구조를 SEM으로 더 자세히

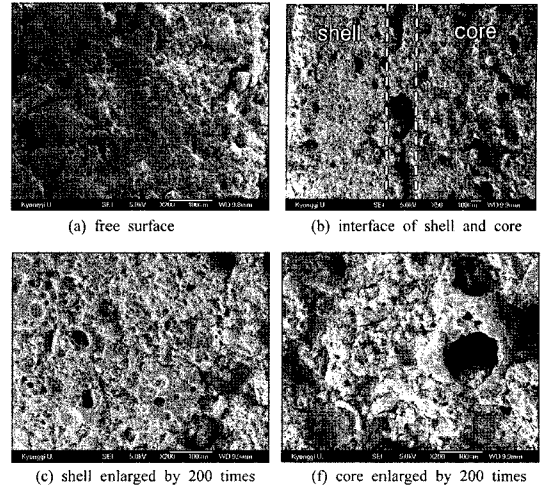


Fig. 4. SEM images of sintered body.

관찰한 결과이다. 그림 (a)는 소결체의 원래 표면을 관찰한 결과이다. 표면에 10 μm 이하의 미세한 기공들이 상당히 존재함을 알 수 있다. 그림 (b)는 소결체를 분쇄하여 내부의 파괴단면을 관찰한 사진이다. 파괴단면의 중앙부분을 중심으로 미세기공이 많이 존재하는 겉질부분(shell)과 거대기공이 많이 존재하는 중심부분(core)으로 확연히 구분됨을 관찰할 수 있었다. 이는 소결 시 겉질부분에서는 형성된 액상(liquid phase)에 의해 기공감소 및 치밀화가 진행되고, 동시에 중심부분(core)에서는 유기물 및 탄소로 인한 가스가 발생하여 다공성 구조가 형성된 것이기 때문이다.

또한 경계면을 따라서 거대한 기공터널이 형성됨을 확인할 수 있다. 그림 (c)와 (d)는 각각 겉질부분과 중심부분을 확대해서 관찰한 결과이다. 겉질부분이 중심부분에 비해 더 치밀한 것을 확인할 수 있으며, 거대기공이 거의 존재하지 않는 반면, 중심부분은 10 μm 이하의 미세기공은 물론, 동시에 100 μm 이상 되는 거대기공도 관찰되었다. 구형 BD 소결체에 비해 분쇄로 인해 중심부분이 많이 노출된 부정형 BD-C 소결체의 흡수율이 높은 이유가 중심부분의 다공성 구조로 인한 것임을 미세구조 관찰 결과로 확인할 수 있다.

Fig. 5는 BD와 BD-C의 기공크기분포를 분석한 결과이다. X축은 기공의 크기를, 오른쪽 Y축은 각 기공의 점유율(%)을 그리고 왼쪽 Y축은 작은 기공부터 큰 기공 순으로의 누적 점유율(%)을 나타낸 것이다. BD의 경우 100 μm 이상의 거대기공이 약 15% 차지하고 있으며, 10 μm 이하의 미세기공이 55%로 많이 존재하는

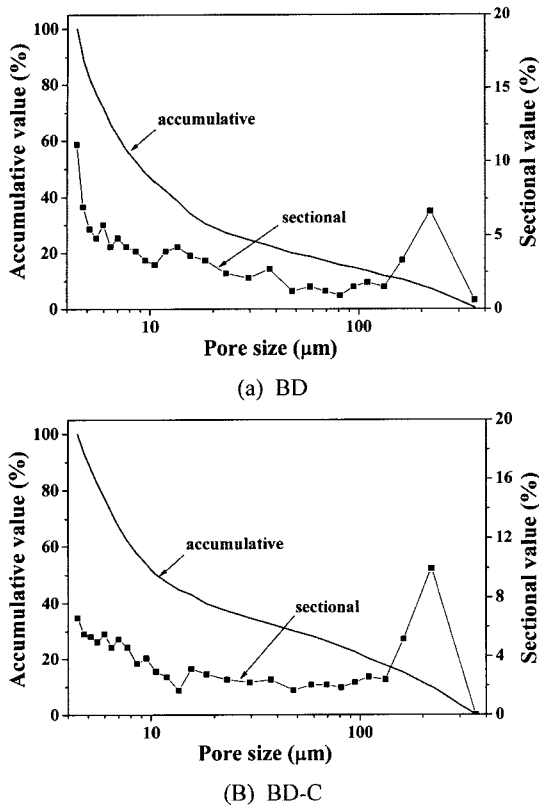


Fig. 5. Pore size distribution of sintered body.

것을 확인할 수 있다. BD-C의 경우 BD와 마찬가지로 100 μm 이상의 거대기공과 10 μm 이하의 미세기공이 각각 20%와 50%로 많이 존재하지만 미세기공의 비율이 감소하고 거대기공의 비율이 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 분쇄공정으로 인한 구형 BD 소결체의 치밀한 겹질부분의 상대적인 감소와 함께 다공성 구조를 갖는 중심부분의 상대적인 증가로 인한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제조된 소결체는 미세한 기공과 거대기공을 모두 갖고 있고 또한 기공률 및 공극률이 우수하여 다공성 무기 흡착제로 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 BD 소결체의 pH 변화에 따른 표면 전하를 측정된 결과이다. 제조된 소결체는 약 pH=5 부근에서 영전하점(IEP: Isoelectric point)을 나타내었다. 즉 소결체 표면 전하의 합이 약 pH=5에서 '0'이 되는 것이다. 일반적으로 물과 접하고 있는 산화물은 수산화된 표면(M-OH, 여기서 M=금속 양이온)을 갖고 있으며, 다음과 같은 반응을 통하여 음전하 또는 양전하를 갖게 된다.

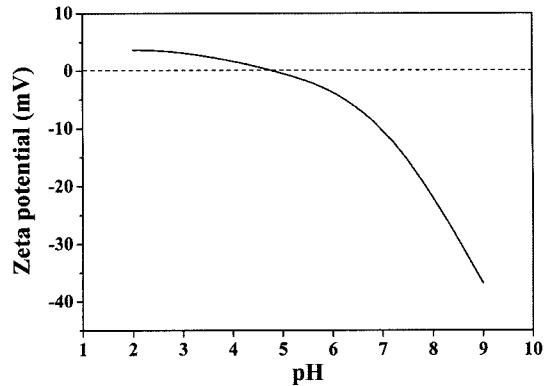
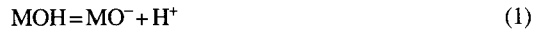


Fig. 6. Zeta potential of sintered body with various pH.



영 전하점보다 pH가 낮은 경우에는 양의 전하를 띠어 음이온을 흡착시킬 수 있고, 이보다 pH가 높은 경우는 음의 전하를 띠어 양이온을 흡착시킬 수 있다.<sup>10)</sup> 이 때문에 산화제, 영양철, 미생물 등을 흡착체에 담지 또는 결합시켜 오염토양 복원을 위한 PRB를 제조하기 위해서는 반응 수용액의 pH 조건이 매우 중요할 것으로 판단된다.

세라믹 소결체를 오염토양 복원을 위한 무기질 흡착제로 활용 시, 요구되는 기공률, 공극률, 흡수율 특성들의 조건에 따라 구형 BD 소결체와 부정형 BD-C 소결체를 적절히 혼합하여 사용하면 효과적인 제어가 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

석탄 바닥재와 준설토를 7:3으로 혼합하여 제조된 구형 세라믹 소결체와 이를 다시 분쇄하여 얻은 부정형 소결체를 비교 분석하였다. 입자의 충전률과 관련이 있는 공극률은 구형 소결체와 부정형 소결체가 각각 38.2% 및 33.6%로 나타났다. 구형 소결체의 부피비중과 기공률은 각각 1.4, 30.1%를 나타냈으며, 흡수율과 비표면적은 21.4%와 12.0 m<sup>2</sup>/g을 나타내었다. 부정형 소결체의 부피비중과 기공률은 각각 1.3, 42.9%를 나타냈으며, 흡수율과 비표면적은 33.4%와 13.2 m<sup>2</sup>/g을 나타내었다. 이러한 특성 변화는 소결체를 분쇄할 때, 내부에 숨겨져 있던 폐기동들이 개기공으로 변화되기 때문

이다.

기공크기 분석결과, 구형 소결체는 100 μm 이상의 거대기공이 약 15% 차지하고 10 μm 이하의 미세기공이 55% 존재하였으며, 부정형 소결체의 경우 100 μm 이상의 거대기공과 10 μm 이하의 미세기공이 각각 20%와 50% 존재하였다. 기공크기 분석과 SEM을 이용한 미세구조 관찰 결과 거대기공과 미세기공이 공존함을 확인할 수 있어 산화제, 영가철, 미생물 등을 결합시켜 흡착제로 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한 소결체의 pH 변화에 따른 zeta 전위를 측정한 결과 pH= 부근에서 영 전하점(IEP)을 나타내었다. 부정형 소결체의 경우 겔보기 기공률이 42.9%로 현재 오염토양 복원에 사용되는 흡착제에 견줄만 한 값을 나타내었다. 더불어, 구형 소결체와 부정형 소결체의 적절한 배합을 통해 기공률과 공극률 제어가 동시에 가능한 흡착제 개발 가능성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단·한국과학재단에서 지원 하는 2009년도 일반 연구자 지원 사업 중 기본연구, 2009-0077077에 의해 수행 되었습니다.

### 참고문헌

1. J. Striegel, D. A. Sanders and J. N. Veenstra, 2001: *Treatment of Contaminated Groundwater Using Permeable Reactive Barriers*, *Environmental Geosciences*, **8**(4), 258-

265.  
 2. J. P. Richardson and J. W. Nicklow, 2002: *In Situ Permeable Reactive Barriers for Groundwater Contamination, Soil and Sediment Contamination*, **11**(2), 241-268.  
 3. H. H. Chae, Y. O. Bae and J. W. Park, 2007: *Durability Extension of Fe(0) Column with Shewanella Algae BrY on TCE treatment*, *J. of the Kor. Geo-Environmental Soc.*, **8**(2), 41-48.  
 4. T. A. Burt, Z. Li and R. S. Bowman, 2006: *Evaluation of Granular Surfactant-Modified/Zelite Zero Valent Iron Pellets As a Reactive Material for Perchloroethylene Reduction*, *J. of Environmental Eng.*, **131**(6), 934-942.  
 5. K. S. Han, 2006: *무기질 다공체를 활용한 토양오염 예방 및 복원기술 개발*, *Ceramist*, **9**(2), 47-55.  
 6. M. M. Scherer, S. Richter and R. L. Valentine, P.J.J. Alvarez, 2000: *Chemistry and Microbiology of Permeable Reactive Barriers for In Situ Groundwater Clean up*, *Critical Reviews in Microbiology*, **26**(4), 221-264.  
 7. L. Yerushalmi, M. F. Manuel, and S. R. Guiot, 1999: *Biodegradation of gasoline and BTEX in a microaerophilic biobarrier*, *Biodegradation* **10**, 341-352.  
 8. Y. Liang, X. Zhang, and D. Dai, G. Li, 2009: *Porous biocarrier-enhanced biodegradation of crude oil contaminated soil*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, **63**, 80-87.  
 9. J. S. Reed, 1995: *Principles of ceramics processing 2nd*, John Wiley & Sons, Inc., 504.  
 10. Y. Kim, and R. J. Kirkpatrick, 1997: *<sup>23</sup>Na and <sup>133</sup>Cs NMR study of cation adsorption on mineral surfaces: Local environments, dynamics, and effects of mixed cations*, *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**, 5199-5208.



金江德

- 2009년 경기대학교 대학원 재료공학과 박사 수료
- 1999년 경기대학교 대학원 재료공학과 석사
- 1997년 경기대학교 재료공학과 학사



姜昇求

- 1993년~현재 경기대학교 신소재공학과 교수
- 1992년 University of Missouri-Rolla, Ceramic Engineering, 공학박사, USA
- 1986년 인하대 무기재료공학과 석사
- 1984년 인하대 무기재료공학과 학사