

## 석탄회-점토계 소지의 가소성 증진에 관한 연구

이기강 · 이효진 · 박천주 · 김동원 · 김유탉 · 김석범

경기대학교 재료공학과, 경기도 수원시 442-760

(1995년 5월 30일 접수)

### A Study on the Plasticity Enhancement of Coal Fry Ash-Clay Bodies

Ki Gang Lee, Hyo Jin Lee, Cheon Joo Park, Dong Won Kim,  
Yoo Teak Kim and Suck Bum Kim

Dept. of Mater. Sci. and Eng., Kyonggi Univ., Suwon 442-760, Korea

(Received May 30, 1995)

#### 요 약

화력발전소에서 발생하는 일반 폐기물인 석탄회는 벽돌 타일 등 소성제품의 원료인 점토와 그 물리·화학적인 성질이 매우 유사하여 대체원료로 대량 이용될 수 있다. 그러나, 대체 이용시 미연탄소등의 영향으로 소지의 가소성을 저하시키므로 그 이용에는 한계를 보여 왔다. 따라서, 본 연구에서는 석탄회의 계면 화학적인 성질을 조절하므로써 대체비율증가의 가능성을 제시하고자 하였다. 석탄회와 점토가 부피로 1:1 혼합한 슬립을 pH 조절하였을 때 pH2에서 가장 좋은 분산특성을 보였으며, 여과성형하여 제조된 소지가 처리하지 않고 얻은 것에 비하여 우수한 가소성을 보였다.

#### ABSTRACT

Fly Ashes, which are produced from coal-fired power plants and classified as general waste, can be used as raw materials for bricks and tiles because of their compositional similarity with clays. There was a limit of substituting fly ash for clay because plasticity decreased with increasing fly ash additions. Accordingly, this study tried to suggest a feasibility of enhancing the substitution ratio by controlling the interfacial properties of fly ash. The slip with 1:1 volume ratio showed the best dispersive characteristics under the condition of pH 2. Filter pressed cakes made of pH 2 slips also showed better plasticity than those of untreated ones.

**Key words:** Coal fly ash, Plasticity, Clay, Filter press

#### 1. 서 론

석탄회화력발전소에서 석탄의 연소로 인하여 발생하는 석탄회는 원탄량의 약 15%에서 40%의 비율로 생성된다. 그 양은 미국의 경우 연간 약 7000만톤, 일본의 경우 약 500만톤 그리고 국내의 경우 약 200만톤으로 막대하게 발생되고 있다. 이러한 석탄회는 일반 폐기물로서 분류되므로 그 처리가 어렵고, 부적절한 처리로 인하여 환경문제를 야기시키고 있다. 따라서, 그 재활용에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>1)</sup>.

한편, 석탄회는 주성분이 알루미늄과 실리카이고 주 결정상이 mullite와 quartz로 이루어져 있으며 입도분포 및 내화도 등의 물리·화학적인 특성이 점토와 유사하므

로 벽돌과 습식타일의 원료인 저급점토의 대체 재료로서의 이용이 가능하다. 그러나 폐기물의 이용이라는 관점에서, 경제성을 고려하고 공정의 변화없이 석탄회를 이용하기 위하여 석탄회의 입도분리나 포함되어 있는 미연탄소제거 등의 원료처리 없이 점토 대체의 최대량을 구하고자 했던 이<sup>2)</sup>의 연구에서 석탄회 첨가율의 증가에 따라 소지는 그 성형성이 저하되므로 그 대체율이 약 30%로 제한되었다. Mukherji<sup>3)</sup> 등의 연구에 의하면 대체율을 증진시키기 위하여 가소점토의 이용, 첨가수분의 조절 및 결합제의 첨가 등에 의해 가소성을 증진시키는 방법이 제안되었다. 그러나, 국내의 요업분야 중 가장 많은 양을 대체할 수 있는 벽돌과 습식타일의 경우 그 원료인 저급점토에 비하여 가소점토가 고가이고 결합제

**Table 1.** Chemical Analysis of Clay and Coal Fly Ash.

	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>	C	Ig-Loss
Ash	40.78	31.59	2.17	4.43	0.99	0.13	0.50	1.51	1.10	14.14	2.63
Clay	67.22	16.62	6.41	0.23	0.53	0.14	2.16	0.88	0.07	-	5.56

**Table 2.** Slip Compositions (Vol.%).

	Slip		
	B1	B2	B3
Ash	-	100	50
Clay	100	-	50

등의 첨가제 이용은 폐기물 재활용의 견지에서 경제성이 결여된다고 할 수 있다 또한 첨가수분의 조절과 결합제 등의 첨가는 벽돌 등의 저급대용량공정에서 그 작업범위의 조절에 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 석탄회의 계면 화학적인 특성을 pH 조절에 의해서만 조절함으로써 성형체의 가스성을 향상시켜서 석탄화의 대체물을 증진시키고자 하였다. 즉, 석탄회의 계면 화학적인 성질로부터 석탄화-점토계 슬립의 최적분산조건을 제시하고, 여과성형한 습윤소지의 비중, 꺾임강도, Mertz cone의 침투깊이를 측정하여 pH 조절에 의한 석탄화-점토계소지 물성을 비교분석하므로써 가스성을 증진시키고자 하였다.

**2. 실험방법**

**2.1. 원료**

실험에 사용된 석탄회와 점토의 화학성분은 Table 1과 같다. 점토는 벽돌이나 습식타일의 원료로서 철분이 약 6% 정도 포함된 저급 점토이다.

**2.2. 원료의 분석**

저급 점토에 대한 석탄회의 호환성을 검토하기 위하여 X-ray Sedigraph(MSG-1, Quantachrome 社)로 입도 분석을 하였으며, 계면 화학적 성질은 Zeta potential(Zeta-meter 3.0)을 측정하여 예측하였다. 또한 slip의 안정성을 측정하기 위하여 pH 변화에 따른 점도변화와 침강높이 실험을 하였다. Table 2에서와 같이 B1, B2, B3의 세 가지 조성을 가지고 점도측정은 비중 1.4의 슬러리를 제조하고 pH를 2, 4, 6, 8, 10, 12로 변화시켜 전단속도 8.4 sec<sup>-1</sup>에서 점도계(DV-II, Brookfield사, 미국)로 하였다. 또, 증류수에 10 wt%의 슬러리를 조제하고 pH를 2, 4, 6, 8, 10, 12로 조정하여 100 ml 매스 실린더에 넣어서 밀

봉하였다.

**2.3. Filter pressing**

점토(B1)와 석탄회 50 vol%-점토 50 vol%(B3)의 조성의 분말을 증류수와 혼합하여 비중이 1.4가 되도록 슬러리를 조제하였다. 불밀에서 1시간 혼합시킨 후 pH 조절을 하지 않은 슬립과 pH를 2, 5로 조정된 슬립을 여과성형(MF POIA-25W, 흥경산업, 한국) 하였다. 여과 또는 400 mesh의 P.E 재질을 사용하였으며, 0.68 MPa의 여과압력으로 1시간동안 여과성형하였다. 여과성형시 배출되는 여과액의 양을 매 5분마다 측정하였고 성형된 습윤소지의 두께와 단면적을 측정하고 다음 식에 따라 cake의 통기율을 계산하였다<sup>4)</sup>.

$$K = \frac{\mu(dQ/dT)L}{AP}$$

where, K : Cake의 통기율

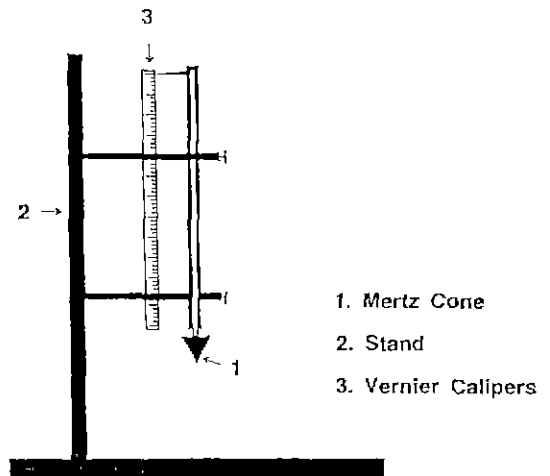
μ : 여과액의 점도

dQ/dT : 0.68 MPa에서의 여과속도

L : Cake의 두께

A : cake의 단면적

P : Filter pressing 압력



**Fig. 1.** Schematic representation of Mertz cone.

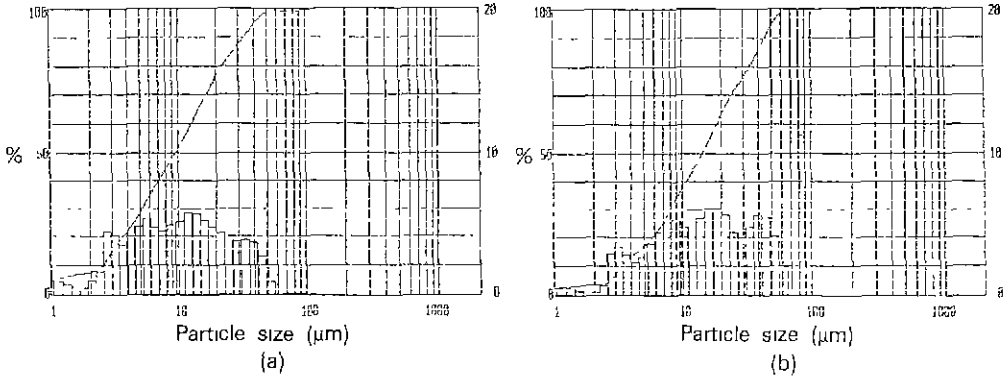


Fig. 2. Particel size distribution of (a) Clay, (b) Ash.

2.4. 물성 측정

여과성형한 습윤소지의 성형성을 평가하기 위하여 비중, 꺾임강도 및 Mertz cone의 침투 깊이를 측정하였다. 비중은 KSL 4004에 의하여 측정되었으며, 꺾임강도는 cross head speed 0.066 mm/mm의 속도로 3점법에 의하여 Instron(4204, National Instrument)으로 측정하였다. Mertz cone의 침투 깊이 측정은 원래 시멘트의 응결 시험 측정에 사용되는 것으로서 시멘트의 적정 수분량을 얻는데 사용되는데<sup>9)</sup>, 본 실험에서는 수분량을 일정하게 하고 cone 침투 깊이의 변화를 측정하여 성형체의 점탄성 거동을 예측하고자 하였다. 실험에 사용된 Mertz cone의 모식도는 Fig. 1과 같으며 여과성형한 습윤소지를 30×100×10 mm 크기로 가압성형하여 cone의 침투 깊이를 측정하고, 바로 건조기에서 100℃로 48시간 건조한 후 시편 무게를 측정하여 함수량을 측정하였다.

2.5. 기공분포 및 미세구조 관찰

성형체의 점탄성 거동은 미세구조와 밀접한 관계가 있으므로 Mercury Porosimeter(Macropores 120, Porosimeter 2000 ; Carlo Erba Inc.)로 기공분포를 측정하고, 주사전자현미경(SX-30E, Topcon, 일본)으로 성형체의 표면과 파단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석탄회의 특성

본 실험에 사용된 석탄회는 경기도 화력발전소에서 생성되는 일반 폐기물로서 그 화학적 조성은 Table 1에서와 같이 미연탄소가 약 14%이고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>의 mole비가 약 1 : 2 정도이므로 점토의 대체 원료로 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다<sup>2)</sup>. 또한 점토와의 호환성을 결정하는 가장 중요한 물리적 특성은 입도분포

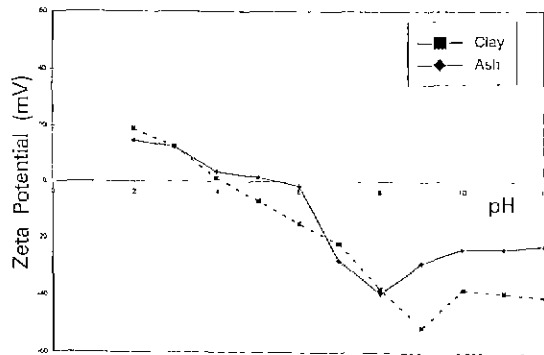


Fig. 3. Zeta Potential as a function of pH.

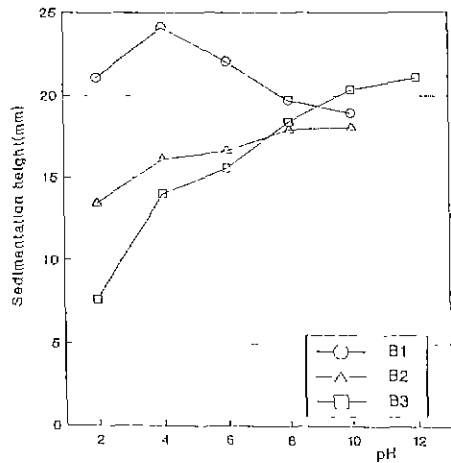


Fig. 4. Sedimentation heights as a function of pH.

Table 3. pH Conditions of B1, B3.

	Body					
	B1			B3		
	B1-2	B1-5	B1-8	B3-2	B3-5	B3-11
pH	2	5	—	2	5	—

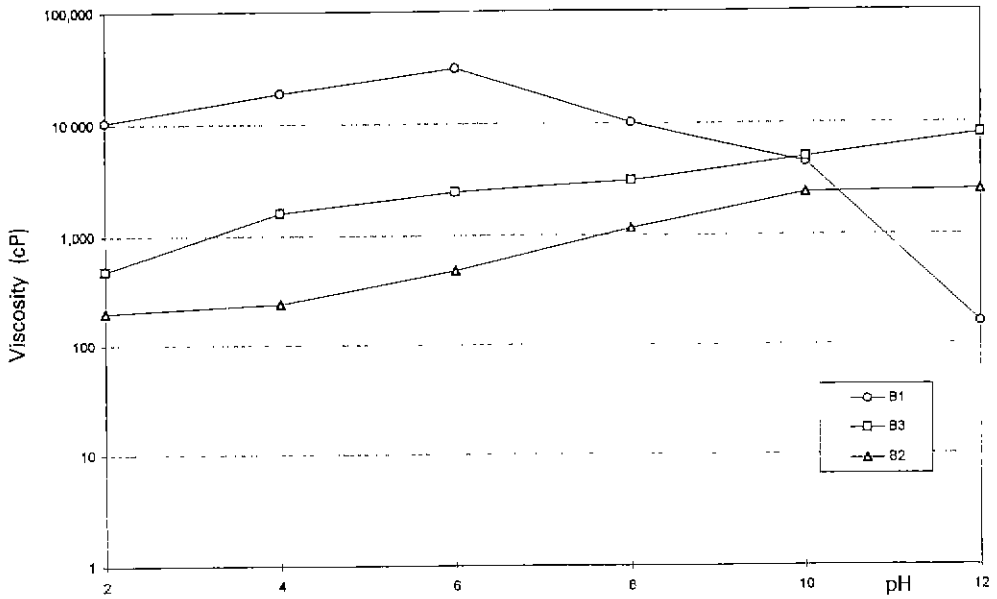


Fig. 5. Viscosities of various slips at constant shear rate of  $8.4 \text{ sec}^{-1}$  as a function of suspension pH.

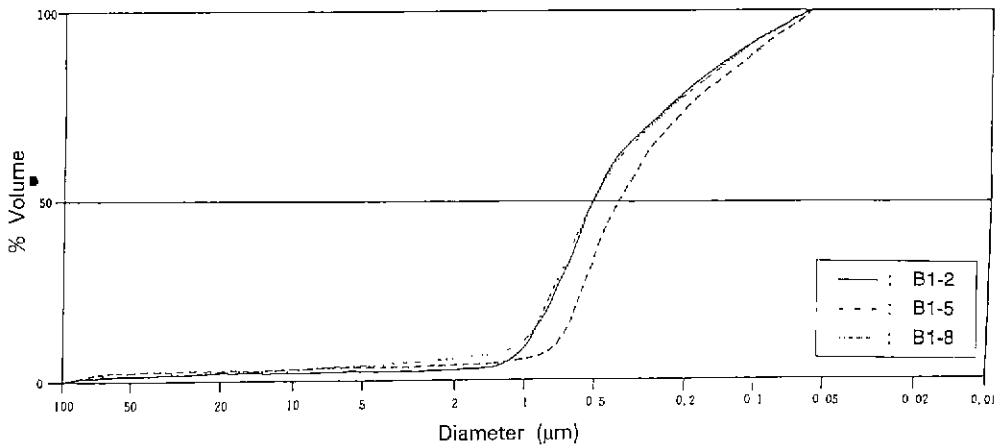


Fig. 6. Pore size distribution of B1 green bodies at different pH conditions.

이다. Fig. 2는 점토와 석탄회의 입도분포 결과이다. 석탄회는 평균입경이 약  $14.4 \mu\text{m}$ 이고  $10 \mu\text{m}$  이하의 입자가 약 38% 존재하며 점토는 평균입경이 약  $9.6 \mu\text{m}$ 이고  $10 \mu\text{m}$  이하의 입자가 약 50%로 석탄회가 점토보다 입경이 크다고 할 수 있다. Fig. 3은 점토와 석탄회의 계면 화학적 성질을 측정하기 위하여 제타전위 측정된 결과이다. 점토는 등전점이 pH 4~5 사이에 존재하며, 석탄회는 pH 5~6 사이에 존재한다. 또한 pH 2에서 점토와 석탄회 모두 약 20 mV이며 pH 9에서 점토는 약 -50 mV의 최대값을 보이고, 석탄회는 pH 8에서 약 -40 mV의 최대

값을 갖는다. 고전적 DLVO 이론<sup>67)</sup>에 의하면 제타전위가 0일 때 입자들간의 반발력이 없어져서 입자들이 빠른 속도로 응집하여 성형체의 미세구조에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 수용액으로 구성된 점토 slip은 입자간의 반발력을 극대화시킬 필요가 있으며, 제타전위가 최대인 점에서 좋은 성형체의 미세구조를 얻을 수 있다. Fig. 4는 점토와 석탄회 슬립의 pH 조절에 의한 침강높이의 변화를 측정된 결과이다. 침강 높이는 슬립에 전단력 없는 상태에서 중력에 의해 고체 입자들이 충전되어 나타내는 높이로서 슬립의 미세구조가 변하지 않고 그

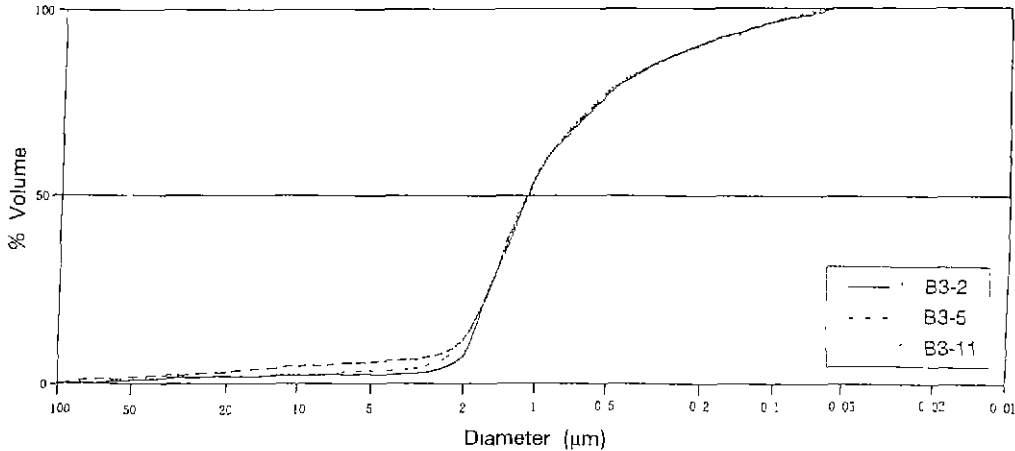
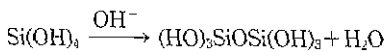
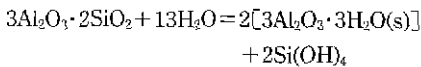


Fig. 7. Pore size distribution of B3 green bodies at different pH conditions.

대로 침전물의 미세구조로 이어진다. 따라서 균일하게 분산되어 있는 슬립의 침강 높이는 낮게 나타나고 응집된 슬립은 높게 나타난다. Fig. 4에서 점토의 pH에 따른 침강 높이를 보면 pH 4에서 최대높이를 가지므로 slip은 매우 응집되었음을 보여주고 pH 10에서 최소 높이를 나타낸다. 이는 Fig. 3의 제타전위 측정에서 예측된 결과와 잘 일치하고 있다. 즉 제타전위가 최대값을 보이는 pH 9에서 슬립의 분산이 가장 잘 일어나 최소 높이를 나타내고, 등전점인 pH 4에서는 최대높이를 보인다. 반면에 석탄화는 pH 2에서 최소값을 보이며 pH 10에서 최대값을 보인다. 이는 Fig. 3의 제타전위에서 예측한 결과와는 일치하지 않는다. 이를 살펴보면 우선 주성분이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>인 석탄화는 발전소에서 약 1300~1400°C의 고온에서 연소가 되었으므로 거의 대부분의 결정상이 mullite이다<sup>8)</sup>. Lee<sup>9)</sup> 등은 mullite의 미세입자(평균입경 약 1 μm)에 대하여 pH 변화에 따른 slp의 안정성을 연구한 결과 mullite는 알칼리 영역(pH 8 이상)에서 mullite 입자표면에서 SiO<sub>2</sub>가 녹아나와 다음과 같은 반응식을 보인다<sup>10)</sup>.



위의 식과 같은 반응으로 녹아나온 silicon species는 물과 반응하여 polysilicon hydroxo precipitate(이하 PSHP)를 형성하고 이 PSHP는 다시 mullite 입자표면에 사슬형태로 흡착된다. 이 반응은 pH가 높을수록 가속되어 pH 10에서는 PSHP의 사슬이 가교현상을 일으켜

입자들을 응집시키는 역할을 한다. 따라서 본 실험에서도 알칼리 영역에서 석탄화의 제타전위 값이 높음에도 불구하고 PSHP의 가교현상에 의하여 슬립이 응집되어 침강 높이가 높게 나타났다고 할 수 있다. 석탄화 50 vol%와 점토 50 vol%의 경우는 석탄화의 영향 때문에 알칼리영역에서는 응집된 구조 즉 침강 높이가 높고, 산성영역에서 분산구조 즉 침강 높이가 낮게 나타나는 것을 발견할 수 있었다 Fig. 5는 진단 속도 8.4 sec<sup>-1</sup>에서 점토, 석탄화 50 vol%와 점토 50 vol%, 석탄화 슬립을 pH 변화시켜 측정된 점도를 도시한 것으로 위의 침강 높이 결과와 일치하였다. 따라서 본 실험에서는 가장 침강 높이가 낮고 점도가 가장 낮은 pH 2와 등전점인 pH 5, 또 비처리한 슬립을 준비하여 여과성형하였다.

### 3.2. 성형체의 물성

점토 100%와 석탄화 50 vol%-점토 50 vol%의 두 조성을 증류수에 슬립비중 1.4로 조정하여 불밀에서 1시간 혼합하였다. 이렇게 조제된 슬립을 Table 3과 같이 pH 2, pH 5 및 비처리로 분산상태를 조정하여 각각 0.68 MPa에서 여과성형하였다.

여과성형은 주입성형과 같은 원리로 처음 압력을 가했을 때 표면층에 형성되는 기공들의 크기 및 분포가 습윤소지 내부에 압력 전달을 좌우하므로 가장 중요한 인자 통기율이다(Table 4). B1의 경우 통기율은 B1-8이 0.76으로 가장 낮게 나타났으며 습윤소지의 함수율이 19.5%로 가장 높았다. 반면에 B1-5는 0.89의 높은 통기율을 보이고 함수율이 18.7%로 가장 낮았다. 이는 성형된 습윤소지의 미세구조 즉 기공의 크기의 분포에 좌우되는 결과로서 평균 기공크기는 0.4~0.6 μm이다. 한편, B3의

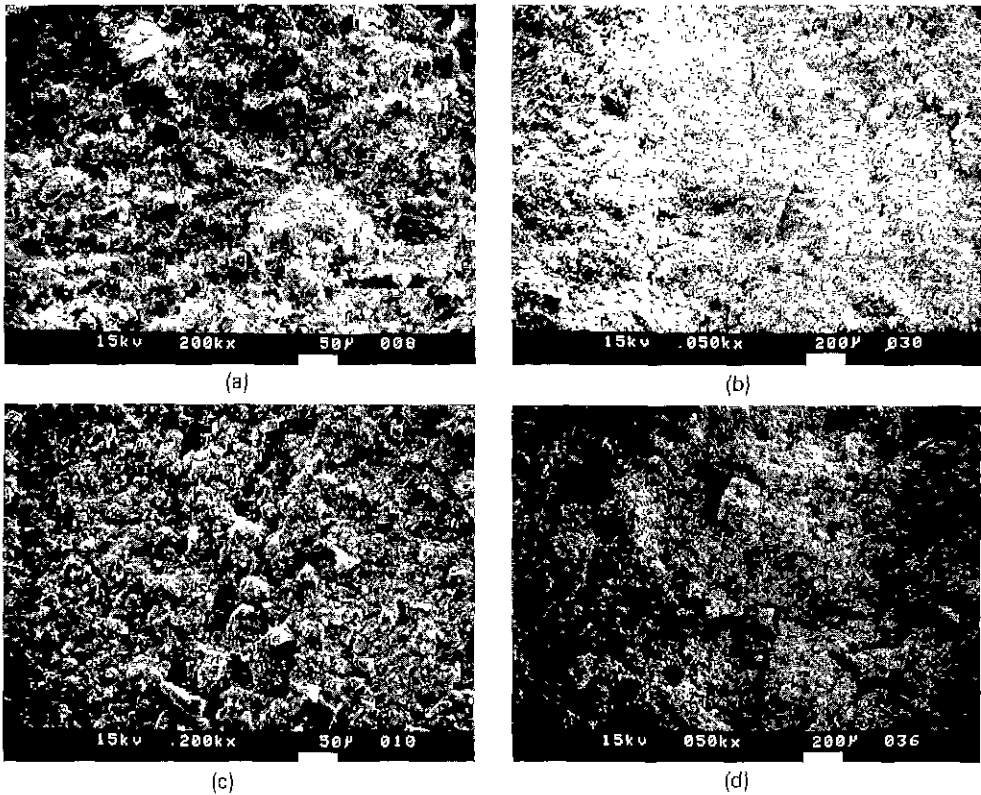
**Table 4.** The Propertied of Cakes Filter Press for 1 hour under the Pressure of 0.68 MPa.

Properties	B1			B3		
	pH 2	pH 5	pH 8	pH 2	pH 5	pH 11
Slope(dQ/dT), ml/min	29.4	29.6	25.2	24.4	28.9	35.9
% H <sub>2</sub> O Retained, wt%	19.1	18.7	19.5	26.7	27.8	28.2
Permeability (K), m <sup>2</sup> ×10 <sup>17</sup>	0.88	0.89	0.76	0.72	1.10	1.02
Ave. Pore Sizediameter, μm	0.6	0.4	0.6	1.1	1.1	1.1

**Table 5.** Physical Properties of Clay & Ash 50-Clay 50 Bodies.

Properties	B1			B3		
	pH 2	pH 5	pH 8	pH 2	pH 5	pH 11
Relative Density (%)	63.1	60.1	63.0	51.8	51.3	51.8
Bending Strength (MPa)	1.76	1.57	1.76	0.83	0.59	0.59
Immersion Depth (mm)	4.5(*1)	2.5(*1)	4.1(*1)	7.0(*2)	4.0(*2)	3.8(*2)

(\*1) at 18% water content, (\*2) at 25% water content.



**Fig. 8.** Scanning electron micrographs of (a) B1-2, surface (b) B1-2, fracture surface (c) B1-5, surface (d) B1-5, fracture surface.

경우는 B3-5가 가장 높은 통기율 1.1을 보이고 함수율 27.8%, B3-2는 통기율 0.72, 함수율 26.7%를 보임으로서 B1의 경우에는는 달리 pH 변화에 따라 현격한 차이를

보이고 있다. B3-11은 비척리한 시편으로서 석탄회 50 vol.%-점토 50 vol.%를 승류수에 분산시키면 pH 11을 나타낸다.

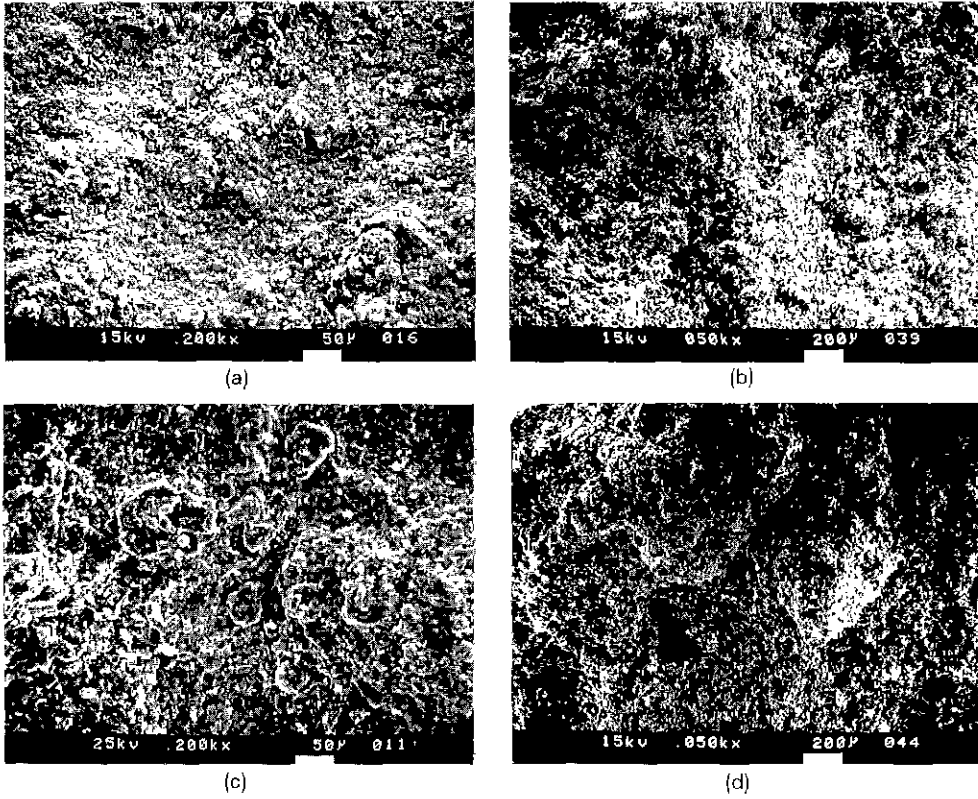


Fig. 9. Scanning electron micrographs of (a) B3-2, surface (b) B3-2, fracture surface (c) B3-2, surface (d) B3-5, fracture surface.

Fig. 6과 Fig. 7은 B1과 B3 조성의 슬립으로 성형된 습윤소지의 기공분포를 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 B1-8의 경우는 평균기공  $0.6\ \mu\text{m}$ 이고 매우 넓은 기공분포를 갖는다. 반면에 B1-2는 평균기공은  $0.6\ \mu\text{m}$ 로 같으나  $1\ \mu\text{m}$  이상의 큰 기공이 매우 줄어들었음을 알 수 있고, B1-5는 평균기공은  $0.4\ \mu\text{m}$ 로 줄어들었으나 기공분포가 넓어지는 것을 발견할 수 있다. 이는 B1-2는 분산이 잘 된 슬립으로부터 성형되어 균일한 미세구조를 가지므로 기공분포가 좁아지는 반면에 B1-5는 응집구조이기 때문에 기공분포가 넓어졌다고 할 수 있다. 그러나 제타전위와 침강높이에서 보듯이 그 변화폭이 크지 않으므로 기공분포 역시 큰 차이를 관찰하기는 힘들다. Fig. 7은 석탄회 50 vol.%-점토 50 vol.%계의 기공분포인데 pH 변화에 따른 현격한 차이를 관찰할 수 있었다. 즉, B3-11의 경우와 비교하여 분산이 잘 된 슬립으로부터 성형된 B3-2는  $2\ \mu\text{m}$  이상의 큰 기공들이 현격하게 줄어들었으며 응집체인 B3-5는  $2\ \mu\text{m}$  이상의 큰 기공들이 매우 많이 존재함을 볼 수 있다. 또한 평균입경이 세 경우 모두 1.1

$\mu\text{m}$ 로 점토의 경우에 비해 거의 2배 증가한 것은 석탄회에 존재하는 미연 탄소분 때문에 cake 내의 수분함량이 그만큼 증가하였고(Table 4, 함수율), 따라서 기공분포도 커졌다고 할 수 있다

위의 결과들을 확인하기 위하여 주사전자현미경을 관찰한 결과가 Fig. 8, 9이다. Fig. 8은 B1-2와 B1-5 습윤소지의 표면 및 파단면 사진인데 pH 조정의 영향에 따른 미세구조의 변화를 명확히 관찰할 수 있다. 즉 B1-2에 비해 B1-5가 엉성하고 큰 기공들이 많이 관찰되는 것을 알 수 있다. 따라서 석탄회를 부피비로 50 vol.% 첨가하였을 때는 점토보다는 석탄회의 계면화학적 성질에 의해 미세구조가 결정되며, 비척리한 경우에 비해 pH 2의 경우는 매우 균질한 미세구조를 보임으로써 성형성이 좋아짐을 볼 수 있다. 이를 확인하기 위하여 비중, 껍입강도 및 Mertz cone 침투깊이를 측정된 결과가 Table 5이다. Table 5에서 상대 밀도를 보면 점토의 경우는 60~63%이고 석탄회를 첨가한 경우는 약 51~52%이다. 이는 위에서도 언급한 바와 같이 석탄회의 미연소분

때문에 성형 cake 내에 수분이 많이 존재하고 따라서, 기공이 많아졌기 때문에 사료되며, 이는 꺾임강도와도 연결되어 석탄회를 첨가한 시편의 꺾임강도는 점토 시편의 경우에 비해 1/2 값에 불과하였다. 또 Mertz cone의 침투깊이 측정은 원래 시멘트의 용수축정이나 Bacher<sup>11)</sup> 등이 석탄회를 첨가한 점토 소지의 가스수량을 측정하기 위하여 고안하였다. 이를 본 실험에서는 일정 수분함량에서 pH 변화에 따른 cone의 침투깊이를 측정하였다. 성형된 cake의 수분량은 약 18%에서 28%로 이는 고체 입자들의 충전성이 약 50%인 상태이다. 이렇게 치밀 충전된 경우는 Onoda<sup>12)</sup>에 의하면 미세구조의 변화에 따라 plasticity와 dilatancy가 나타날 수 있다. 즉, 슬립이 잘 분산된 pH 2의 경우를 생각해 보면 균일한 미세구조를 가진 cake 내에서 입자가 얇은 수막으로 둘러 쌓여 있어 외부의 shear를 해소시켜 가스성을 나타내는 plasticity를 나타낸다. 따라서 일정 수분함량 하에서 cone의 침투깊이는 가스성을 측정하는 간접적인 방법으로 사료되며, 본 실험 결과(Table 5)에서 잘 일치하고 있다. 즉, B3-2의 경우 약 7 mm의 깊이인데 반하여 B3-5는 약 4 mm의 깊이를 보인다. 이는 B3-5가 응집구조이기 때문에 cone이 침투하는 것을 응집입자들의 반발력으로 방해하고, 반면에 B3-2는 입자들 사이의 수막이 외부 전단을 해소시켜 conc이 보다 잘 침투할 수 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

점토와 석탄회 50 vol.%-점토 50 vol.% 조성의 소지에 대하여 여과성형하여 물성을 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 점토와 석탄회의 등전점은 각각 pH 4와 pH 6이다.
2. 석탄회를 점토에 첨가한 경우는 석탄회의 계면화학적 성질의 영향을 받아 pH 2에서 가장 좋은 분산성을 나타내었다.
3. 석탄회를 50 vol.% 첨가한 경우, pH 2에서 여과성형한 습윤소지가 pH 처리하지 않은 것과 비교하여 그 가스성이 증진되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 1994년도 과학재단 특장기초(94-0300-01-03-3)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. C. Black, D. Brockway, S. Hodges and A. Milner, "Utilization of Latrobe Valley Brown Coal Fly-Ash," Gippsland Basin Symposium, Melbourne, **22-23**, 149-155 (1992).
2. 이기강, 김동원, "석탄회-점토계 비돌소지의 곡강도와 미세구조," 한국결정성장학회지, **3(1)**, 45-58 (1993).
3. S.K. Mukherji, B.B. Machhoya, R.M. Savsani, D.R. Vyas and T.K. Dan, "The Utilization of Fly-Ash in the Preparation of Ceramic Tableware and Artware," *Br Ceram Trans.*, **92(6)**, 254-257 (1993).
4. James S. Reed, Introduction to the Principles of Ceramic Processing, p. 302-310, John Wiley & Sons, 1988.
5. 요일공학 핸드북, 일본 요일 협회편, p. 1538 (1979).
6. J. Th. and G. Overbeek, "Electrochemistry of the Double Layer," *Colloid Science*, Vol. 1. Ed. by H.R. Kruyt, Elsevier, Amsterdam, 1952.
7. R.J. Hunter, Foundation of Colloid Science, Vol. 1, Clarendon Press, Oxford, 1987.
8. 이효진, 김동원, 이기강, 김유택, 홍성창, 이치진, "석탄회의 분석," 한국결정성장학회지, **3(2)**, 185-201 (1993).
9. Han N. Cheong, K.G. Lee and Hyun M. Jang, "Effects of Colloid/Interface Variables on Slip Properties and Densification Behavior of Mullite," p. 395-402 in *Ceramic Powder Science III*, Ed. by G.L. Messing, S.I. Mirano and H. Hausner, The American Ceramic Society, Inc. Westville, Ohio, 1990.
10. R.K. Iler, The Chemistry of Silica, Chap. 2 and 3, John Wiley & Sons, 1981.
11. V. Bacher, V. Ernstsens, K.G. Jeppesen, H. Kristiansen and P. Madsen, "Fly Ash in Bricks and Tiles," p. 219-230 in *Fly Ash and Coal Conversion By-Products: IV*, Ed. by Gregory J. McCarthy, et. al., MRS, Pennsylvania, 1987.
12. G.Y. Onoda and E.G. Liniger, "Dilatant and Plasticity in Ceramic Particulate Bodies," p. 611-623 in *Ceramic Powder Science 2*, Ed. by G.L. Messing, E.R. Fuller, Jr. M and H. Hausner, The American Ceramic Society, Inc., Westville, Ohio, 1987.