

## Plasticity of clay bodies containing bottom ashes from power plant

Hyejin Jeon<sup>†</sup> and Yootaek Kim

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

(Received March 14, 2007)

(Accepted July 24, 2007)

**Abstract** Plasticity of clay bodies containing bottom ashes (BA) and small portion of other wastes was investigated. Plasticity indices of clay bodies using Atterberg limits were measured. It was confirmed that the plasticity indices could be applicable in actual forming process by extrusion. The forming possible compositions were found by changing the contents of water, bottom ash, stone dust, and sewage sludge. The relationship between the plasticity and physical properties of the aggregate green body was also investigated. The compositions for extrusion forming can be expected by measured the plasticity indices and these results were confirmed by real extrusion process. There is also strong relationship between the plasticity indices and the property of aggregate green body.

**Key words** Plasticity, Bottom ash, Extrusion

## 석탄 바닥재를 함유한 점토 소지의 가소성에 관한 연구

전혜진<sup>†</sup>, 김유탉

경기대학교 재료공학과, 수원, 442-760

(2007년 3월 14일 접수)

(2007년 7월 24일 심사완료)

**요 약** 화력발전소에서 발생하는 석탄 바닥재를 효과적으로 재활용하기 위해 여러 가지 폐기물을 함유한 점토소지와 바닥재를 첨가한 점토소지의 가소성 지수를 Atterberg 한계를 이용하여 측정하였다. 그리고 압출 성형을 통하여 가소성 지수가 실제 성형공정에 적용 가능한지를 확인하였다. 수분, 바닥재 함유량, 그리고 석분과 하수오니의 첨가 조성을 달리해 성형이 가능한 조성을 찾았으며, 골재를 만들어 가소성에 따라 성형체의 물성이 어떻게 바뀌는지 조사하였다. 가소성 지수로 압출성형이 가능한 조성을 찾을 수 있으며, 실제로도 압출 성형이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 가소성과 골재 성형체의 물성을 관찰한 결과 첨가 폐기물의 종류에 따라 차이는 있었지만 일반적으로 가소성 지수가 낮아지면, 소지의 비중은 낮아졌으며, 흡수율은 증가하는 경향이 있음을 알 수 있었다.

### 1. 서 론

현대주거도시와 산업도시의 급속한 팽창으로 전력사용처 및 사용량이 급증하고 있고 전력공급을 위한 화력발전소의 발전량도 크게 증가하여, 그에 따라 대량의 석탄회가 발생하게 되었다. 국내에서 발생하는 연간 석탄회 중 발생량이 15~20%를 차지하는 바닥재(bottom ash)의 경우 1,200,000톤이 생산되는 것으로 추정된다[1]. 바닥재는 비산재와는 다르게 물리·화학적 성질이 균일하지 않아 현재 대부분이 인근 연안에 매립 폐기되고 있어 해양환경파괴를 초래함과 동시에 매립지의 포화상

태를 가져와 새로운 매립지의 확보와 개척이 필요한 상태이다[2, 3].

가소성은 골재를 만드는 데 있어 한 가지 중요한 인자로 작용을 한다. 압출 성형 과정에서 발생하는 표면 crack은 소지의 치밀화에 영향을 주어 흡수율 등의 물성에 영향을 끼친다. 이 실험에서는 Atterberg 한계를 이용하여 가소성을 측정하였다. Atterberg 한계는 흙의 공학적 분류, 물리적 역학적 성질을 추정하는 중요한 자료가 된다. Atterberg 한계를 결정하기 위한 시험방법은 1911년 스웨덴의 Atterberg가 제안한 동적실험방법으로 이 실험법은 Casagrade에 의해 실험기구가 개선되어 미국에서 ASTM으로 공인 추천되었다[3, 4].

본 실험에서는 단순 매립에 의해 처리되고 있는 바닥재의 재활용을 증진하기 위해 여러 가지 다른 폐기물을 첨가하여 성형 가능한 가소성 한계 영역을 찾아 바닥재

<sup>†</sup>Corresponding author  
Tel: +82-31-249-9774  
Fax: +82-31-244-6300  
E-mail: bliss31@kgu.ac.kr

Table 1  
Chemical compositions of raw materials

	ig loss	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>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	C
Clay	11.00	57.69	19.02	7.05	0.20	1.04	0.09	2.53	0.92	-	0.17	-	0.22	-
Dredged soil	5.23	67.6	15.8	3.99	0.74	1.07	2.32	2.24	0.87	-	0.04	-	0.02	-
Bottom ash	4.07	45.54	18.59	8.07	2.17	0.78	0.18	0.51	1.33	0.33	0.24	0.01	0.05	18.05
Fly ash	1.51	60.04	14.98	2.02	0.36	0.31	0.21	0.57	0.72	-	0.15	-	-	18.97
Stone ash	3.57	66.74	14.89	2.30	1.96	1.05	3.81	5.22	0.28	-	0.11	-	-	-
Sewage sludge	93.42	3.12	1.35	0.58	0.39	0.12	0.07	0.17	0.05	-	0.64	-	-	-

Table 2  
The average particle size and specific surface area of raw materials

	Clay	Dredged soil	Bottom ash	Fly ash	Stone ash	Sewage sludge
Average diameter (μm)	28.05	22.05	76.20	56.12	28.14	16.95
Specific surface area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	1.192	0.775	0.256	0.547	0.985	0.916

의 사용량을 극대화 시킬 수 있으며 성형이 가능한 조성을 찾아 실제 성형공정에 적용하고자 하였다.

2. 원료 및 실험방법

적점토, 준설토, 바닥재, 비산재, 석분, 하수오니를 원료로 사용하였다. 각 원료를 불밀 또는 편밀하여(불밀한 경우에는 No. 40체로 거름) 24시간 동안 드라이오븐에 건조시켜 사용하였다. 조성은 20 wt% 단위로 변화시켜서 실험을 진행하였다.

실제 공정에서 사용되는 토련기에 적용가능한지를 확인하기 위하여 제작된 몰드와 press를 이용하여 압출 성형 실험을 진행하였으며, 그 결과를 토대로 실제 토련기에서 확인 실험하였다. 압출 성형된 일정크기의 시편을 crack이 심한 정도에 따라 분류한 후, 1100~1200°C, 공기 중에서 소성하여 부피 비중과 흡수율을 측정하였다.

가소성의 정도를 수치화시켜 판단하는 척도로 Atterberg

한계를 이용하여 가소성 지수를 측정하였다.

액성한계는 흙이 유동상태를 나타내는 최소의 함수비를 말한다. 액성한계의 시험 기구는 황동제 접시와 딱딱한 고무저판으로 이루어져 있다. 황동제 접시는 손잡이에 달린 꺾쇠에 의하여 고무저판으로부터 들어올려 졌다가 다시 떨어지도록 되어있다. 액성한계 시험을 수행하기 위하여 반죽한 흙을 경사 60°, 높이가 8 mm의 인공사면을 황동제 접시 안에 조성하고, 표준 흙과기 기구를 사용하여 접시 내의 흙덩어리 중앙에 흙을 판다. 손잡이를 회전시켜 황동제 접시를 10 mm 높이로 올렸다 떨어뜨린다. 25회 낙하하였을 때 흙의 바닥이 12.7 mm 맞붙을 때의 함수비를 액성한계라 정의한다. 25회 낙하하였을 때 흙의 바닥이 12.7 mm 맞붙도록 함수비를 조정하는 것이 어렵기 때문에 동일한 흙에 대하여 함수비를 변화시키면서 타격횟수가 15회~35회 범위에 있도록 최소한 3회의 실험을 실시한다. 시험은 흙의 함수량이 작은 상태에서 많아지는 쪽으로 실시한다.

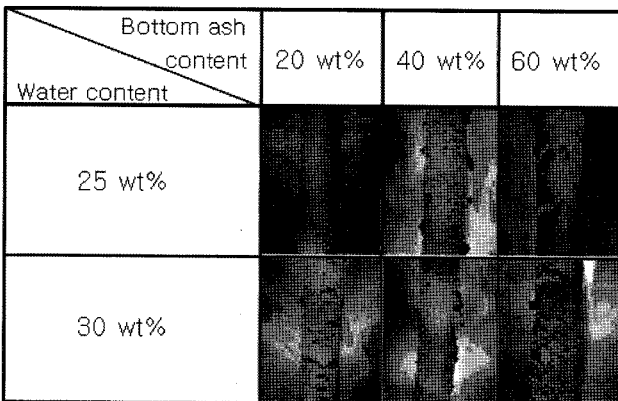


Fig. 1. Photographs of extruded green bodies having various bottom ash and water contents.

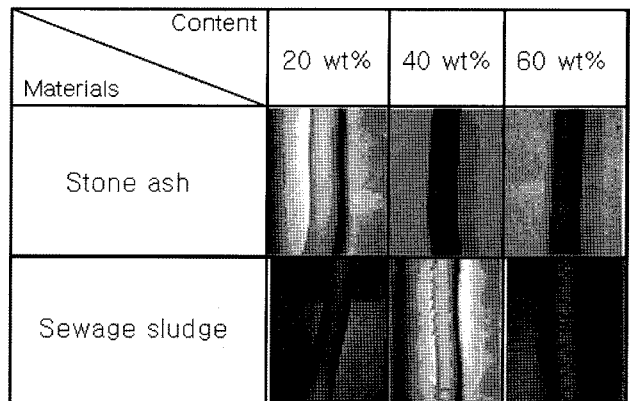


Fig. 2. Photograph of extruded green bodies having various stone ash and sewage sludge contents (fixed water 25 wt%, bottom ash 20 wt%).

소성한계는 흙의 소성단계의 최소한계를 말한다. 흙을 서리 유리판 위에 놓고 손바닥을 사용하여 반복적으로 굴러서 수행되며 반죽된 흙의 직경이 3.2 mm의 실 모양으로 굴러서 부서질 때의 함수비 백분율로 정의된다.

가소성 지수는 흙이 소성상태로 존재할 수 있는 함수비의 범위를 말하는 것으로서, 액성한계와 소성한계 사이를 말한다[4]. 가소성 지수를 수치화 시킨 조성에 대해 같은 조성의 골재를 만들어 성형체의 비중과 흡수율

을 측정하여 가소성 지수와 비교하여 보았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1에서는 바닥재의 함유량을 20 wt%, 40 wt%, 60 wt%로 변화시킨 소지의 수분 함유량을 25 wt%와 30 wt%로 변화하여 압출 성형 시 소지의 crack 정도를

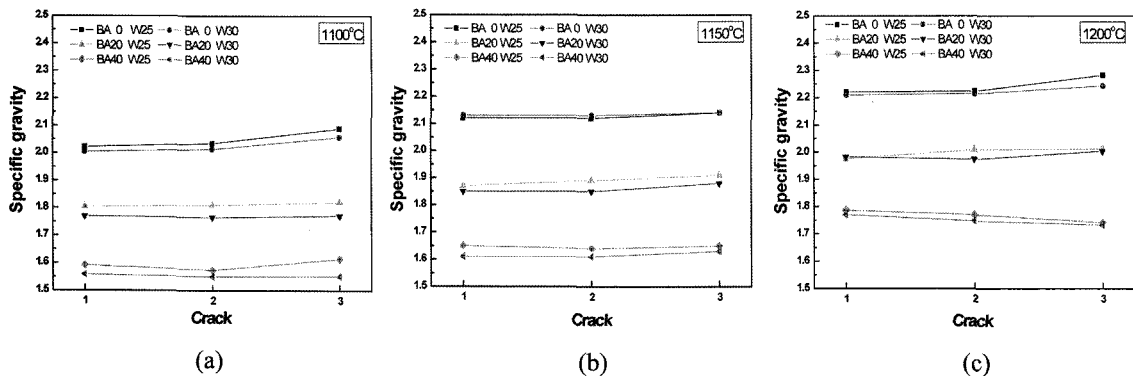


Fig. 3. The graph of specific gravity water 25 wt% vs. 30 wt% (a) 1050°C (b) 1100°C (c) 1150°C, where BA and W means bottom ash and water contents, respectively.

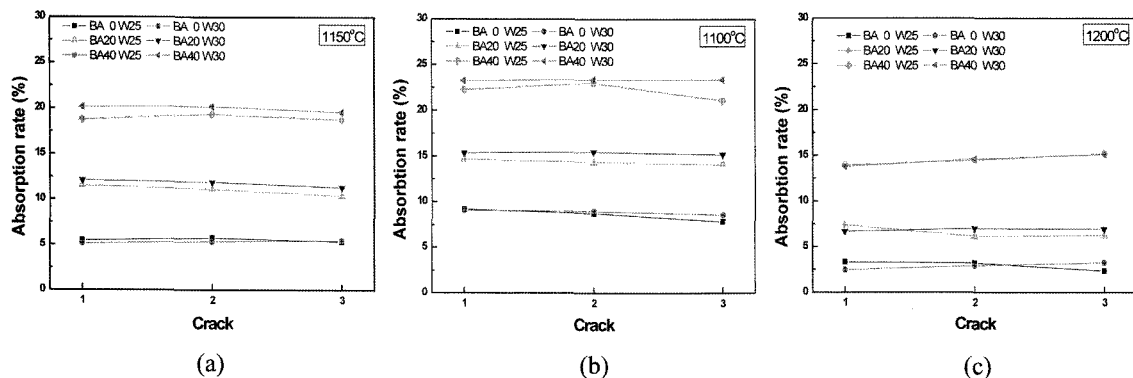


Fig. 4. The graph of absorption water 25 wt% vs. 30 wt% (a) 1050°C (b) 1100°C (c) 1150°C, where BA and W means bottom ash and water contents, respectively.

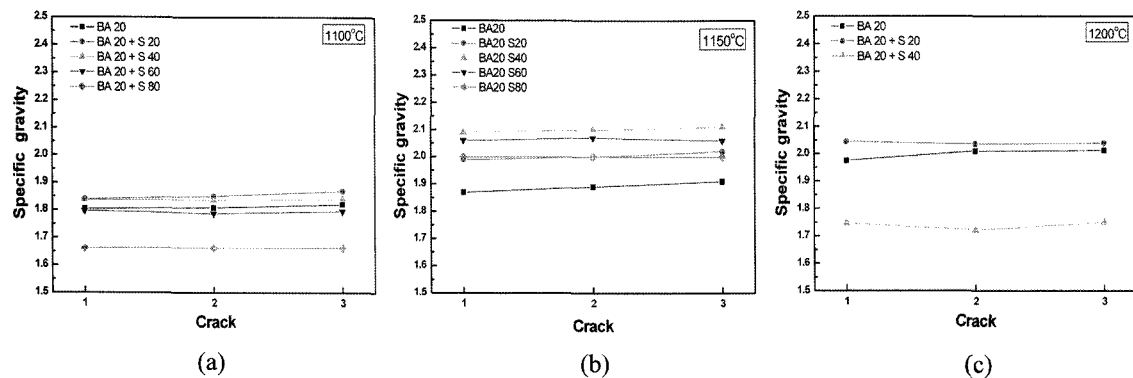


Fig. 5. The graph of specific gravity various stone ash content (a) 1050°C (b) 1100°C (c) 1150°C, where BA and S means bottom ash and stone ash contents, respectively.

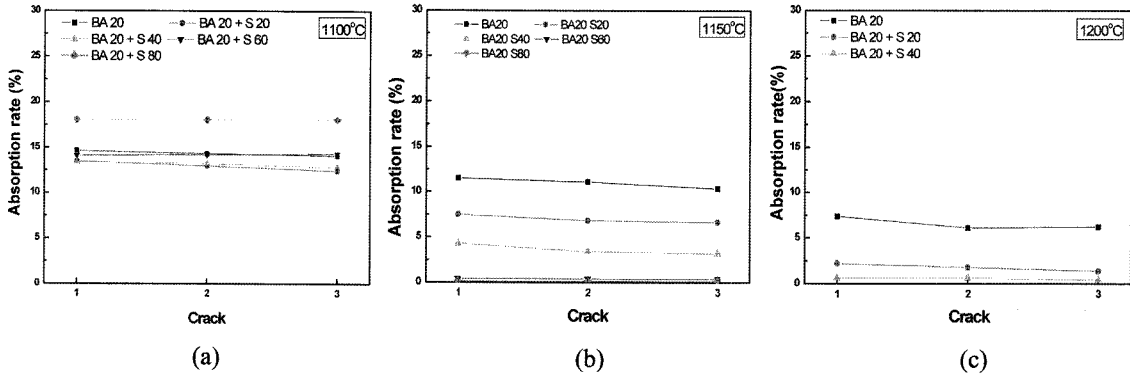
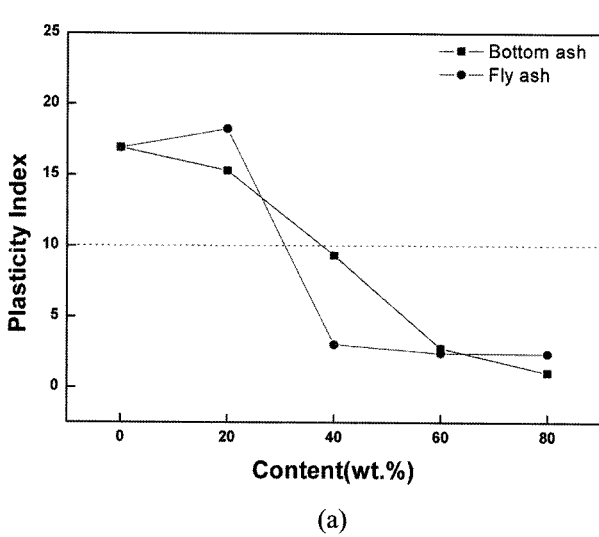


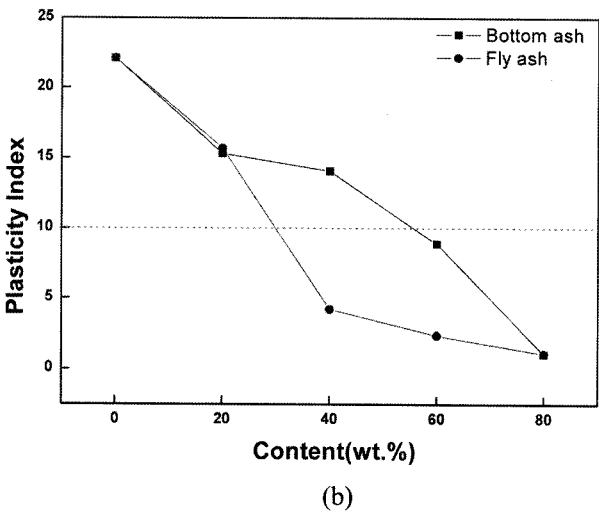
Fig. 6. The graph of absorption rate various stone ash content (a) 1050°C (b) 1100°C (c) 1150°C, where BA and S means bottom ash and stone ash contents, respectively.

비교하였다. 압출 성형 실험에서 수분 30 wt%인 소지가 25 wt%인 소지보다 표면 crack이 더 심하게 생기는 것을 알 수 있다. 이로서 수분은 30 wt% 보다 25 wt%가 적당함을 알 수 있는데, 이는 실제로 일반 성형 시 사용

하는 토련기에서의 수분 함유량인 20~23 wt%와 비슷하다. 소지에 포함된 바닥재의 함유량이 증가함에 따라 표면 crack이 증가한다. 또한 적점도 100 wt%일 때의 압

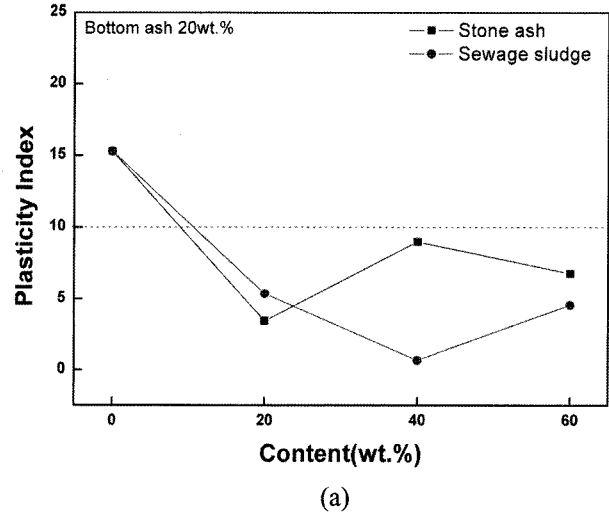


(a)

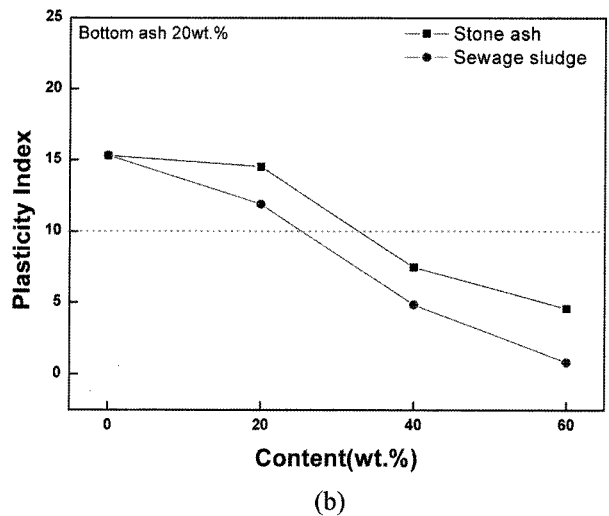


(b)

Fig. 7. Plasticity index of clay bodies with various bottom ash and fly ash contents (a) red clay (b) dredged soil.



(a)



(b)

Fig. 8. Plasticity index of clay base bodies with 20 wt% bottom ash having various stone ash and sewage sludge contents (a) clay (b) dredged soil.

출 성형 시 시편이 끊기지 않은 것과 비교하여 소지에 포함된 바닥재의 함유량이 증가하면 시편이 뚝뚝 끊어져 시편의 길이는 감소하는 경향을 보였다.

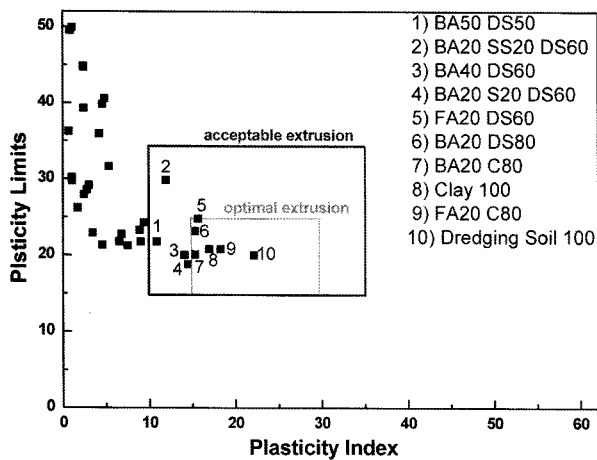
수분을 25 wt%, 바닥재의 함유량을 20 wt%로 고정시키고, 석분을 첨가하여서 압출 성형을 진행한 결과(Fig. 2), 석분 함유량이 증가함에 따라 압출 성형되는 시편의 길이는 감소하지만, 첨가하지 않을 때보다 표면 crack은 줄어들었음을 알 수 있었다. 하지만 하수오니의 경우에는 첨가하지 않았을 때와 비교했을 때 표면의 crack이 별반 차이가 없음을 알 수 있다.

압출 성형된 시편을 일정 크기로 만든 후 1100~1200°C에서 소성한 결과를 Fig. 3~6에 나타내었다. 소지가 압출되어서 나오는 시간과도 일치하는데 crack 1은 비교적 crack 많은 편인 시편, crack 3은 비교적 표면 crack이 적은 시편이다. 조성 번호는 바닥재의 함유량에 따라 BA 0, BA 20, BA 40으로 하였으며 수분 함유량에 따라 W 25, W 30이라고 붙였다. 석분을 첨가하였을 때의

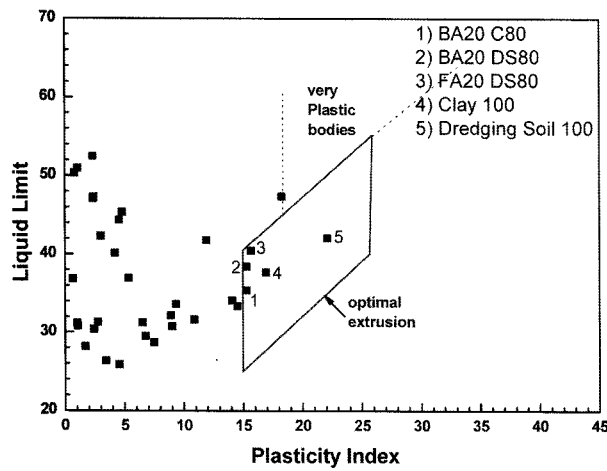
조성번호는 석분의 함유량에 따라 S 20, S 40, S 60이라고 붙였다.

Fig. 3, 4는 수분 함유량과 바닥재의 함유량에 따른 소성체의 비중·흡수율 그래프이며, Fig. 5, 6은 석분 함유량에 따른 소성체의 비중·흡수율 그래프이다. Fig. 3에 보는 것처럼 소성체의 비중은 수분 25 wt%을 갖을 때 더 높음을 알 수 있었는데 Fig. 1에 나타난 것처럼 수분 25 wt% 성형체에서 나타나는 crack이 적어 치밀화 정도가 연관이 있는 것으로 판단된다. 바닥재의 양이 적을수록, 소성 온도가 높을 때 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 4에 나타난 것처럼 흡수율은 수분 25 wt%, 바닥재의 양이 적고, 소성온도가 높을 때 낮음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 1100°C에서 소성한 결과 석분 함유량이 0~60 wt%까지 비중 차이는 크지 않지만 1150°C와 1200°C로 온도가 올라갈수록 눈에 띄게 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 1150°C에서 석분을 첨가하지 않았을 때보다

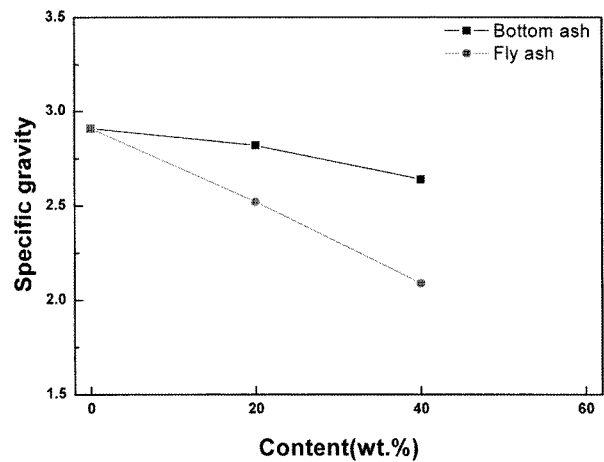


(a)

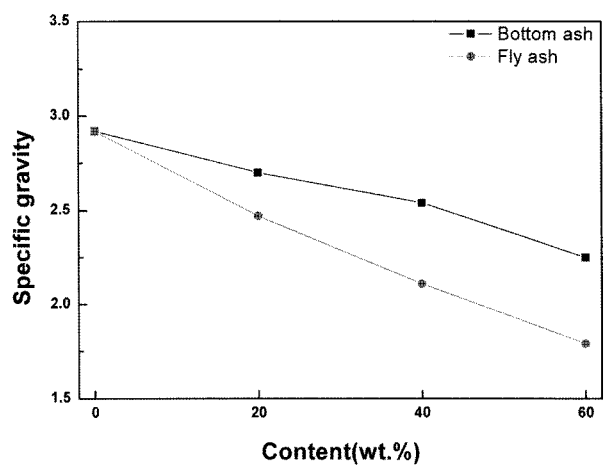


(b)

Fig. 9. Optimal and acceptable extrusion area in (a) plasticity index vs. plasticity limits and (b) plasticity index vs. liquid limits graphs.



(a)



(b)

Fig. 10. The graph of specific gravity of green bodies by changing bottom ash and fly ash (a) in clay (b) dredged soil.

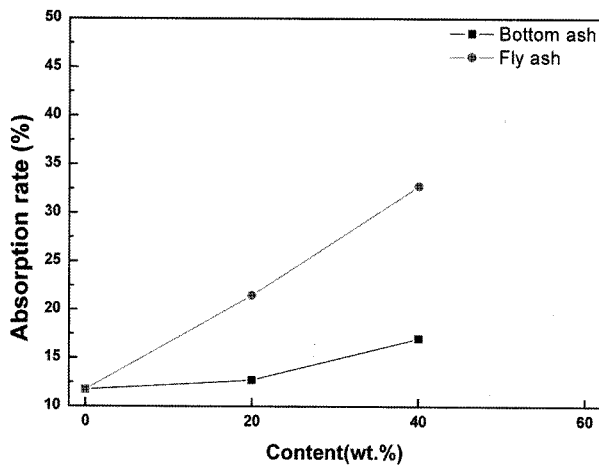
첨가하는 것이 비중이 더 높은 것을 알 수 있었다. Fig. 6에서 흡수율 역시 석분을 첨가하지 않았을 때보다 흡수율이 낮음을 알 수 있다. 1200°C에서는 석분으로 인하여 시편의 표면이 유리화되기 때문에 60 wt% 이상의 시편이 각각 소성되지 않고 함께 녹아 덩어리지는 피가 형성된다. 이는 Table 1에 나타난 것처럼 석분에 SiO<sub>2</sub>가 다량으로 함유되어 액상이 생성되는데 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O가 융점을 낮추어 액상의 형성을 용이하게 하기 때문이다.

Atterberg 한계를 이용한 가소성 지수의 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 준설토 소지와 점토 소지를 비교하고, 바닥재와 비산재, 석분과 하수오니의 가소성 지수를 각각 비교하였다. 바닥재와 비산재를 비교해보면 둘 다 모두 준설토 소지에서의 가소성 지수가 높았고, 전체적으로 바닥재의 가소성 지수가 비산재보다 높음을 알 수 있다. 이는 예상과는 상반되는 결과로서 Table 2에 나타난 것처럼 바닥재와 비산재의 표면에너지 차이에 의해 가소성 차이가 난다고 사료되지만 이에 대한 연구가 좀

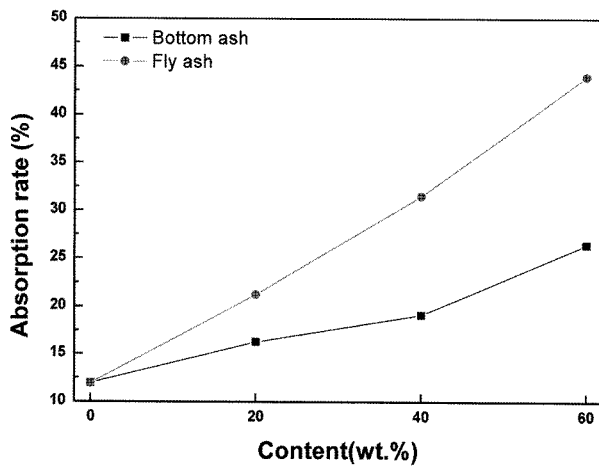
더 지속 되어야 한다. 가소성 지수가 10 이하이면 저소성으로 점착성이 없기 때문에 가소성 지수가 10 이상이어야 성형성이 좋은 것으로 판단된다[5]. 바닥재와 비산재 모두 함유량이 증가함에 따라 가소성 지수가 감소하지만 둘 다 40 wt%까지 성형이 가능함을 알 수 있었다.

바닥재의 함량을 20 wt%로 고정시킨 후 석분과 하수오니를 첨가하여 가소성 지수를 비교해보았다(Fig. 8). 첨가계와는 상관없이 적점토 소지보다 준설토 소지의 가소성 지수가 더 높은 것을 알 수 있다. 하수오니를 첨가했을 때 보다 석분을 첨가하였을 때의 가소성 지수가 더 높았는데, 이는 자연 함수비가 높은 하수오니가 오랜 시간 드라이오븐에서 건조되었기 때문으로 사료된다. 자연 함수비가 높은 흙일수록 건조정도에 의한 영향이 크게 작용하여 소성한계가 높아지기 때문이다[6].

역시 두 첨가물 역시 첨가량이 늘어날수록 가소성 지수가 감소하였는데 석분과 하수오니 모두 40 wt%를 첨가하는 것이 가소성 지수 10을 넘어 성형하기에 적당함을

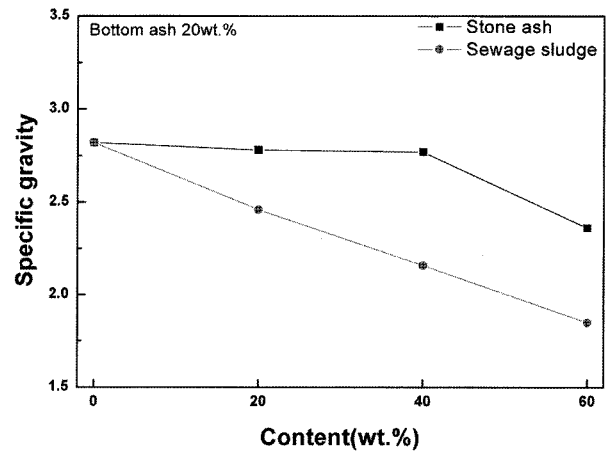


(a)

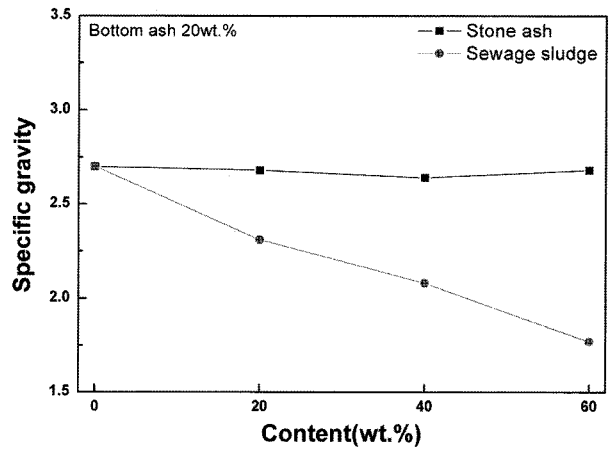


(b)

Fig. 11. The graph of absorption rate of green bodies by changing bottom ash and fly ash (a) in clay (b) dredged soil.



(a)



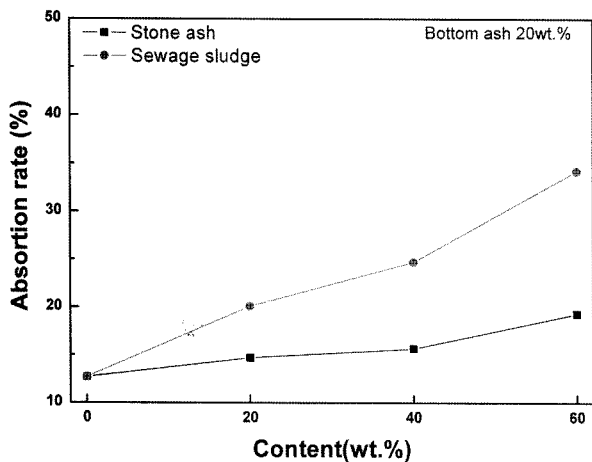
(b)

Fig. 12. The graph of specific gravity of green bodies by changing stone ash and sewage sludge (a) in clay (b) dredged soil.

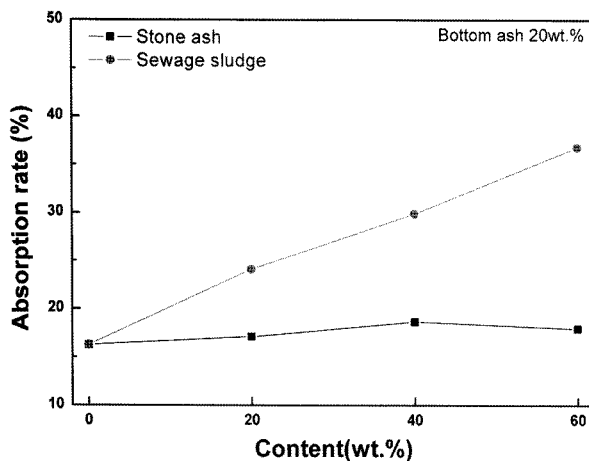
알 수 있다.

Fig. 9를 살펴보면 가소성 지수와 액성한계와 소성한계를 이용하여 실제 압출 성형 일치 하는 것을 알 수 있다[7, 8]. 소성한계에서 압출이 가능하지만 액성한계에서 보면 가소성이 조금 떨어지는 몇몇 조성을 발견할 수 있었는데, 압출 성형 시 수분 범위는 소성한계와 액성한계 사이에 존재하므로 두 그래프중 하나만 적정 범위에 포함되어도 압출 성형하는 데에는 아무런 문제가 없다고 판단된다[8].

골재를 만들어 성형체의 물성을 측정하여 가소성 지수와 경향이 일치하는 가를 확인하였다(Fig. 10~13). 바닥재, 비산재, 석분, 하수오니의 함유량이 많아질수록 비중은 낮아지고, 흡수율은 높아지는 경향을 나타내었다. 바닥재의 비중이 비산재의 비중보다 높았고, 바닥재의 흡수율이 비산재의 흡수율 보다 낮았다. 석분의 비중이 하수오니의 비중 보다 높았으며, 석분의 흡수율이 하수오니의 흡수율 보다 높음을 알 수 있었다. 그리고 이러한



(a)



(b)

Fig. 13. The graph of absorption rate of green bodies by changing bottom ash and fly ash (a) in clay (b) dredged soil.

결과들은 Fig. 9에 나타난 결과와 앞서 진행한 압출성형 결과(Fig. 1, 2)와 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

화력발전소 바닥재를 재활용하기 위해 Atterberg 한계를 측정하고 압출성형 실험을 진행하여 점토 소지의 가소성 지수에 대해 알아보았다.

1) 미분의 비산재보다 바닥재의 가소성 지수가 높은 이유는 입자 크기가 작아 더 많은 양이 소지에 함유되기 때문이라고 사료된다.

2) 적점토에 비해 준설토의 가소성 지수가 높은 이유는 입자가 작은 미분이기 때문으로 사료된다.

3) 준설토 소지에 석분과 하수오니를 첨가하였을 때를 비교해보면 석분과 준설토 소지의 가소성 지수가 높는데 자연함수율이 높은 하수오니가 오랜 시간으로 건조되었기 때문이라고 사료된다.

4) 가소성 지수가 높은 조성은 압출성형에서도 crack이 현저히 줄어들어 성형성이 좋아 실제 공정에서도 적용 가능할 것으로 보인다.

5) 폐기물의 함유량이 많아질수록 가소성 지수가 낮아지는데, 폐기물의 함유량이 높아지면 비중은 낮아지고, 흡수율은 높아지는 실제 같은 조성의 골재 성형체의 물성 측정 결과로 보아 가소성지수가 성형성에 큰 작용을 하는 것으로 알 수 있었다.

6) 가소성 지수로 압출성형이 적합한 조성을 찾을 수 있으며, 이로 인하여 적은 노력과 시간으로 압출이 가능한 성형 조성을 찾을 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년도 경기대학교 산학협력단의 연구비 지원에 의한 결과물임.

#### 참 고 문 헌

[ 1 ] Information personally obtained from Korea Namdong Electrics in 2006.  
 [ 2 ] M. Song, J.B. Jang, B.S. Cho, J.H. Kim, Y.R. Kim and M.H. Kim, "An experimental study on properties of mortar using bottom ash produced in power plant", Journal of the Architectural Institute of Korea 23 (2003) 203.  
 [ 3 ] J.H. Lee, J.H. Shim, J.H. Kim, S.P. Kang, S.J. Choi and M.H. Kim, "A study on the strength properties of concrete containing bottom ash as a part of fine aggre-

- gate”, *Journal of the Architectural Institute of Korea* 21 (2001) 359.
- [ 4 ] ASTM D-4318 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic limit, and Plasticity Index of Soil”.
- [ 5 ] Braja M. Das “Soil mechanics laboratory manual”, Oxford University Press (2002) 35.
- [ 6 ] Muhammad Ashraf Siddiqui, Zulfiqar Ahamed, Akhter Ali Saleemi “Evauation of Swat kaolin deposits of Pakistan for industrial uses”, *Applied Clay Science* 29 (2005) 55.
- [ 7 ] S.J. Kang, Y.M. Park, S.M. Hur and J.S. Kim, “Experimental study on the Atterberg limit changes due to experiment condition”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 20 (2000) 451.
- [ 8 ] J.A. Bain, “A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial minerals”, *Clay Minerals* 9 (1971) 1.
- [ 9 ] M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo and I. Venturi, “Orimulsion Fly Ash in clay bricks-part 2 : technological behavior of clay/ash mixtures”, *Journal of the European Ceramic Society* 22 (2002) 1737.