

## 석탄회 미연탄소함량 동시측정을 위한 석탄회 정전용량 분석에 관한 연구

이재근 · 김장우 · 구재현 · 신진혁 · 김성찬 · 신희수 · 황유진  
부산대학교 기계공학과

### Capacitance Characteristics of Fly Ash for Monitoring the Unburned Carbon Contained in Fly Ash

Jae-Keun Lee, Jang-Woo Kim, Jae-Hyun Ku, Jin-Hyouk Shin, Seong-Chan Kim,  
Hee-Soo Shin and Yu-Jin Hwang

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

#### 요 약

본 연구는 화력발전소 연소가스 배기덕트 내의 석탄회 미연탄소함량 동시 측정을 위한 석탄회 정전용량 분석에 관한 연구로서, 화력발전소 출력효율 증대, 양질의 석탄회 재활용 및 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 유해가스 저감을 기여하고자 하였다. 석탄회 정전용량 측정 시스템은 정전용량 계측기, 입자포집기, 측정셀로 구성되며, 전압이 인가된 양 극판 사이에 석탄회를 투입하여 정전용량을 측정하고 입력주파수, 상대습도, 수분함량, 발전소별 성분비에 따른 정전용량 특성을 분석하였다. 석탄회 정전용량은 미연탄소함량에 따라 비례적으로 증가하였으며, 석탄회 수분함량과 철 함유량이 주된 변수였다. 보령, 하동, 삼천포의 화력발전소별 석탄회의 정전용량특성을 데이터베이스화 하였으며 20% 이하의 미연탄소함량을 예측할 수 있는 경험식을 도출하였다.

**Abstract** — The carbon-in-ash system for simultaneously monitoring the unburned carbon in fly ash produced in a coal-fired power plant is designed and evaluated using the domestic fly ash produced in the coal-fired power plant. Real time monitoring is very important to control the combustion of the boiler in the coal-fired power plant and the purification system for fly ash recycling. The carbon-in-ash system based on the capacitance measurement consists of a LCR meter, a duct collector and an electrode cell. The capacitance of fly ash increases linearly with increasing fly ash carbon contents. The water content in fly ash plays an important role on the ash capacitance. The empirical equation for predicting the content of unburned carbon in fly ash produced in the domestic Boryung, Hadong and Samchenpo coal-fired power plants can be derived in the range of carbon content 0~20%.

#### 1. 서 론

석탄회에 함유된 미연탄소함량(Loss On Ignition, LOI)은 보일러 연소상태의 직접적인 영향 인자로 보일러 연소 최적화로 발전소 출력효율 증대, 양질의 석탄회 재활용 및 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 유해가스 저감을 위하여 연소가스 배기덕트에서 석탄회의 미연탄소함량을 연속적인 자동 측정이 필요하다. 미연탄소함량 측정기술은 배기덕트 현장에 직접 적용되어 연소가스 기류 속의 석탄회에 함유된 미연탄소함량을 연속적, 자동적으로 측정하여 컴

퓨터 시스템과 연결함으로써 정확한 연소상태를 파악하여 최적 연소조건 확립, 발전소 운전상태 점검용이 및 석탄회 품질관리를 용이하게 할 수 있다. 따라서 이를 위해 미연탄소함량을 연속적이고 정확하게 측정할 수 있는 기술과 데이터베이스 구축이 요구된다.

본 연구는 석탄회의 미연탄소함량 동시 측정을 위한 정전용량 특성 연구로, 국내에 설치운전되고 있는 삼천포, 보령 그리고 하동 화력발전소에서 발생하는 석탄회 형상 및 성분 분석과 함께 입력주파수, 상대습도, 수분함량에 따른 석탄회 정전용량을 분석하여 석탄회에 함

유된 미연탄소함량 동시 측정시스템을 개발하고자 하였다. 아울러 화력발전소의 석탄회 미연탄소함량의 자동측정을 통하여 보일러 연소 최적화 기술에 기여하고자 하였다.

2. 미연탄소함량 측정기술

2-1. 강열감량(KS L-5405)

기존의 석탄회 미연탄소함량 측정방법(KS L-5405)은 연소가스 배기덕트 또는 전기 집진장치 퇴적함으로부터 석탄회를 포집한 후, 전기로를 사용하여 온도 750°C에서 미연탄소를 완전 연소시켜 석탄회 질량이 일정하게 유지될 때까지 강열감량하는 것으로 6시간 이상의 매우 긴 측정시간이 요구된다. 그리고 강열감량 전후의 석탄회 질량차를 측정하여 완전연소된 미연탄소함량을 측정하기 때문에 측정오차는 매우 작다는 장점이 있으나, 측정과정이 연속적이지 못하고 장시간이 요구된다는 단점을 가지고 있다<sup>[14][15]</sup>.

2-2. 정전용량법

정전용량은 유전체의 전자분극현상에 의해 지배되는데 이 유전체 전자분극은 외부전기장의 변화와 밀접한 관련성을 가지고 있으며, 일반적으로 외부전기장에 대한 유전체의 전자 분극현상인 전자 재배치는 물질의 특성 중의 하나이다. 정전용량측정에 의한 미연탄소함량 측정 기술은 매우 효과적인 방법으로, 같은 크기의 전압을 인가한 2장의 전극판 사이에 석탄회를 유전체로 투입시킬 때, 석탄회속의 미연탄소함량에 따른 절연도는 전극판 사이의 정전용량과 비례한다. 따라서 탄소함량 측정은 정전용량을 변화시킴으로써 측정할 수 있다.

Fig. 1은 정전용량과 자유전하 충전 메카니즘으로, 양극판에 전압 V가 인가될 때 전극상의 전하축적량은 전극에 평행한 밀면을 갖는 검사체적(Control Volume) ABCD에 가우스 (Gauss)법칙을 적용하여 식(1)에 의해 구해진다.

$$Q_f = A\sigma_f = \frac{\epsilon_0 A}{d} V = C_0 V \quad (1)$$

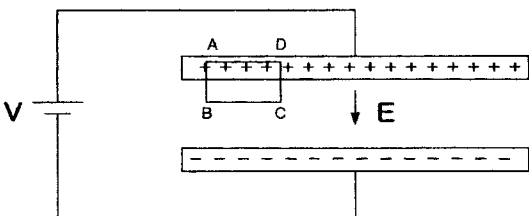
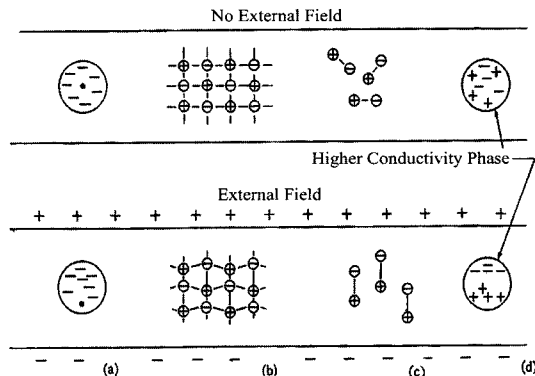


Fig. 1. Theoretical mechanism for free electric charge and capacitance [19].

여기서, Q는 자유전하량(F), A는 극판 면적(m<sup>2</sup>), V는 인가전압(V), d는 극판 간격(m), C<sub>0</sub>는 전기용량(Electric Capacity, pF)으로 전극사이가 진공인 평행판 콘덴서에서 전기용량을 말하며 기하학적 크기에 의해 결정된다. 전극사이에 유전체가 채워져 있을 경우, 전극면에는 전압과 기하학적 크기만으로 결정되는 자유전하(Free Charge)와 유전체의 종류에 의존하는 속박전하(Bound Charge)가 축적된다. 따라서, 전극사이에 유전체를 삽입할 때 자유전하와 속박전하의 총합인 진전하(True Charge)량은 증가한다<sup>[16]</sup>. 석탄회를 전극사이의 유전체로 사용할 때 석탄회 내의 미연탄소함량에 따라 정전용량 값은 비례적으로 변화하며, 미연탄소분이 유전체 속의 미립도체로 작용하여 전극판에 진전하 유도가 많아진다.

Fig. 2는 정전분극 메카니즘을 설명하는 것으로, 외부 전기장이 인가될 때 유전체의 4가지 분극현상, 즉 (a)는 전자분극, (b)는 이온분극, (c)는 영구쌍극자, (d)는 공간전하분극을 나타낸다. 전자분극은 원자핵 주위의 전기적으로 중성인 전자가 외부전기장에 의해 분극이 일어나는 현상을 의미하며, 원자가 클수록 분극성은 더욱 커지게 된다. 이온분극은 고체 유전체에서 주로 나타나는 현상으로 원자나 이온이 주기적으로 입체적인 배열을 하게 되고, 외부 전기장이 인가되면 각각의 이온이 상대적 변위를 일으켜 새로운 위치에서 안정상태가 되며 이와 같이 전하의 변위에 의해 생긴 분극을 이온분극이라고 한다. 영구 쌍극자는 분자구조에 의해서 발생하고, 전계가 가해지면 영구 쌍극자는 외부 전계 방향으로 일정하게 배열되며 가장 대표적인 영구 쌍극자로 물분자가 있다. 공간전하 분극현상은 유전체가 불균질한 경우에 생기는 것으로 유전체 속에 저항이 매우 낮은 재료가 존재할 때 발생하며, 다상의 유전체가 혼재해 있을 때 전하 캐리어가 유전체 계면으로 이동하여 전하가 흘러 들



a. Electronic polarization, b. Ionic polarization, c. Permanent polarization, d. Space-charge polarization

Fig. 2. Dielectric polarization mechanism [20].

어가 발생하는 분극현상이다. 이러한 현상은 마치 간격이 좁은 수많은 캐패시터(Capacitor)들이 존재하는 메카니즘과 같으므로 총 전하 축적량은 매우 크고 유전상수도 매우 커지게 되며, 부도체속에 아주 미소한 도체상이 분산되게 되는 경우 유전상수가 최대 1,000을 초과하는 경우도 있다<sup>[6][7]</sup>.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 미연탄소함량 자동측정 센서의 구성도를 나타낸 것으로 알루미늄 전극판, 아크릴 전극지지대, 시료 투입구, 정전용량 측정기 등으로 구성되어 있다. 석탄회는 센서 상부의 투입구를 통해 극판 내부에 투입되며 극판이 대기 중에 노출되지 않을 만큼의 석탄회가 투입이 되면 정전용량 계측기를 통해 미연탄소함량에 따른 정전용량값을 측정한다. 본 실험에 사용되는 미연탄소함량 측정장치는 석탄회가 투입되는 센서 및 정전용량 계측기(홍창, Digital LCR Meter, Z9216)로 구성되며, 센서 밀면은 착탈식으로 설계하여 측정 후 시료 제거가 용이하도록 제작하였다. 실험용 석탄회는 원산지가 호주, 중국산 석탄으로 국내 주요 화력발전소인 삼천포, 하동, 보령 화력 발전소로부터 발생되어 채집하였다.

정전용량은 유전체 유전율과 센서의 기하학적 크기인 극판넓이, 극판간격 및 외부 전기장의 세기에 따라 식(1)에 의해 계산하였으며, 석탄회 미연탄소함량, 수분함량, 입력주파수 및 주변 온·습도에 따른 정전용량 변화를 분석하였다. 센서는 평행한 알루미늄 극판을 사용하여 극판간격 7 mm, 극판넓이 0.11×0.1 m<sup>2</sup>로 제작하였으며, 인가전압은 안정적인 계측기 내부전압인 1 V를 사용하였다. 미연탄소함량에 따른 정전용량 특성 분석실험에서 극판에 인가한 전류는 선형성, 안정성을 고려하여 주파수 100 kHz 조건에서 수행되었다. 석탄회 정전용량에 따른 미연탄소함량 측정결과는 전기로를 사용하여 강열감량에 의해 측정된 미연탄소함량과 비교, 분석함으로써 신뢰도를 검증하였다.

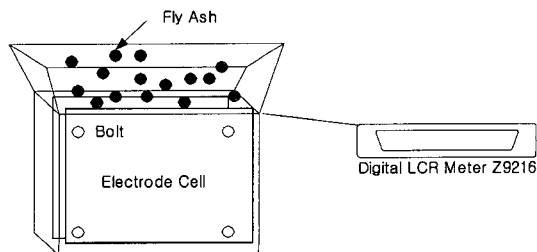
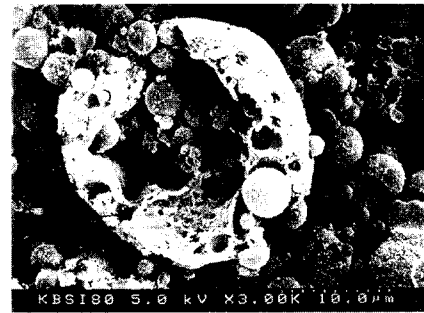


Fig. 3. Schematic diagram of a sensor for carbon-in-ash analysis.

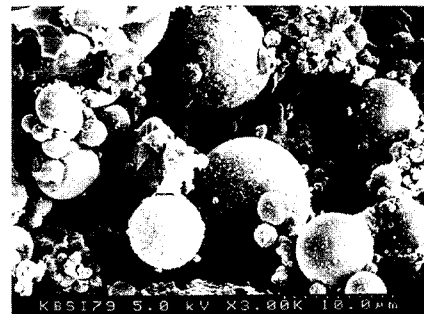
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4-1. 석탄회 특성분석

Fig. 4는 보령, 삼천포, 하동 화력발전소의 석탄회 전자현미경 촬영 결과로, 석탄회 형상은 형성과정에 따라 다양한 형태를 가지게 되는데 일반적인 석탄회 형상인 구형 및 다공질 입자의 형상을 나타내고 있다. 석탄회의 형상은 형성과정과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 큰 입자의 표면에 미세입자들이 부착되어 있는 형상으로 미세 입자들은 분쇄탄이 연소하면서 부서져 형성된 파편으로 비구형 입자들이 주종을 이루고 있는 것으로 분석되었다. 석탄회는 다양한 형상의 입자가 존재하며, 대부분의 석탄회는 구형의 입자인 반면 분쇄탄의 형상은 비



(a) Boryong fly ash



(b) Samcheonpo fly ash



(c) Hadong fly ash

Fig. 4. Scanning electron micrographs of fly ash.

**Table 1. Analysis of chemical composition of fly ash.**

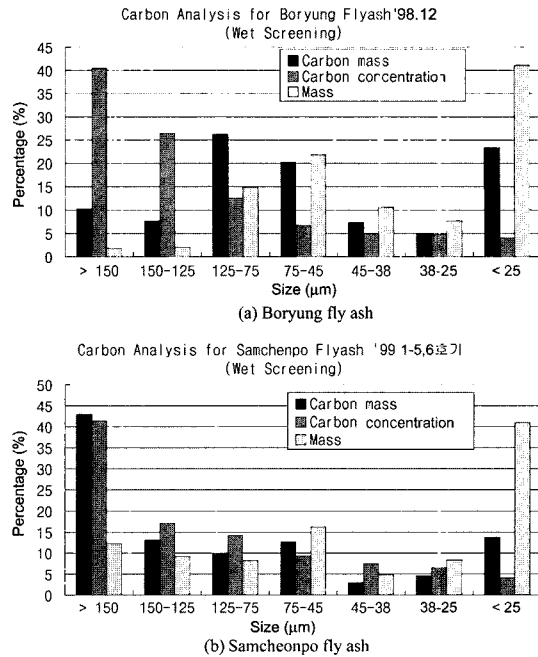
Component	Hadong fly ash	Boryung fly ash	Samcheonpo fly ash
SiO <sub>2</sub>	48.241	44.364	60.193
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.913	27.237	24.999
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.274	7.215	3.631
CaO	10.101	12.704	3.816
MgO	0.757	1.093	1.179
Na <sub>2</sub> O	0.756	0.723	0.689
MnO	0.093	0.129	0.030
K <sub>2</sub> O	0.833	0.760	0.692
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.614	0.625	0.915
TiO <sub>2</sub>	1.279	1.110	1.038
LOI*	3.718	3.342	3.259
Total	99.579	99.302	99.847

\*LOI: Loss on Ignition.

구형의 무정형(Amorphous)으로 이루어져 있다. 석탄회  
의 형상과 성분구성은 무정형 입자들이 연소영역에 노출되는  
정도, 원시료 종류 및 채취 위치에 따라 차이가 있다. 석탄회  
(a)는 다공질 형상의 입자로 큰 입자의 내부와 입자의 표면에서  
가스화가 진행되면서 입자내부에서 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>가 방출되어  
입자가 부풀어지고 속이 빈 형상의 석탄회이다. 석탄회  
(b)는 구형 입자가 용융되어 서로 부착하여 형성된 응결  
(Coagulation) 구조를 나타내고 있으며, 석탄회 (c)는 구형  
입자들이 서로 부착되어 있는 응집(Agglomeration)형상을  
보이고 있다<sup>[8]-[12]</sup>.

Table 1은 발전소별 석탄회의 구성성분을 엑스레이 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)로 분석을 한 결과로,  
전체 석탄회 성분 중 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 약 80% 정도로 대부분을 차지하고 있다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 원시료에 함유되어 있던 황철광의 성분이 산화반응하여 형성된 것으로, 철 성분이 함유된 정도에 따라 붉은색에서 검은색까지 색상이 다양하게 분포한다. 보령석탄회는 LOI 값이 유사한 하동, 삼천포 화력발전소 석탄회에 비해 상대적으로 높은 정전용량 값을 가지며, 이는 정전분극 메카니즘에서 공간전하 분극에 기인한 것으로 분체 형태의 유전체 속에 미량 포함된 미량의 도체물질에 의해 유도전하의 생성을 촉진하여 높은 정전용량 값을 가지기 때문이다<sup>[13]-[15]</sup>. 보령 석탄회는 전도성 물질 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 하동, 삼천포 석탄회보다 상대적으로 많이 포함하고 있으므로 상대적으로 높은 정전용량값이 측정되며, 붉은색 계열의 석탄회가 많이 포함된 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 석탄회 입경 분포에 따른 탄소함유량을 각 시료별로 나타낸 것으로, Fig. 5(a)에서 보여준 것처럼 보령화력발전소 석탄회의 경우, 입경 20 μm 이하의 탄소함유량이 전체의 24%를 차지한다. 반면에, Fig. 5(b)에서 보여준 것처럼 삼천포 화력발전소의 석탄회는 입경 150



**Fig. 5. Carbon concentration and percentage as a function of fly ash size.**

μm 이상의 미연탄소함량이 전체의 43%를 차지하였다. 이것은 석탄연소시 대부분 미분탄이 큰 입자로 분쇄되어 보일러에 공급될 때 연소조건이 미흡하여 큰 입자 내부에 타지 않는 탄소성분이 남아 있기 때문이다. 탄소가 연소할 때 남은 잔여성분은 대부분 원탄(Raw Coal)에 함유되어 있던 광물질이며, 탄광에서 채굴한 석탄을 분쇄기로 분쇄하여 질량평균직경 40~80 μm 정도로 갈아 보일러에 이송시켜 연소하게 되며 노즐을 통해 보일러 내로 분사된 미분탄(Pulverized Coal)은 온도 1,200°C 이상의 고온 가스로부터 복사 및 대류열을 받아 가열되나 큰 미분탄의 경우 입자내부까지 충분히 연소가 되지 않으며 Fig. 5(b)의 삼천포 석탄회처럼 큰 입자의 석탄회에 미연탄소함량이 많게 된다.

#### 4-2. 주요 변수별 석탄회 정전용량 분석

Fig. 6은 외부 전기장의 입력 주파수 변화에 따른 석탄회 정전용량 변화를 나타낸 것으로, 입력 주파수는 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz에 대하여 측정하였다. 주파수 1 kHz에서는 석탄회의 정전용량값은 상대적으로 높은 값이 측정되었으며 이는 낮은 주파수의 외부 전기장 변화에 따라 유전체의 전자 재배치가 잘 이루어지기 때문이다. 주파수 100 kHz에서는 상대적으로 전자 재배치가 느리게 이루어지므로 1 kHz 영역에서보다 낮은 정전용량

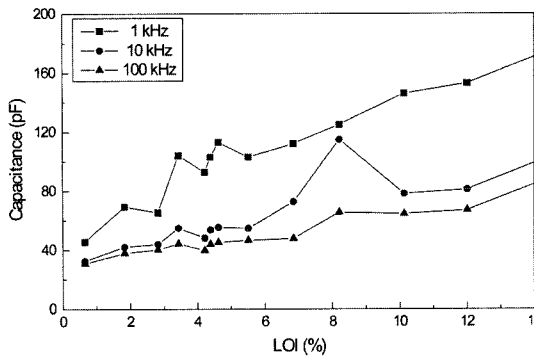


Fig. 6. Test results of ash capacitance as a function of input frequency.

값이 측정된 것으로 생각된다. 주파수 1 kHz 및 10 kHz에서는 정전용량값이 높게 측정되어 특성 변화를 쉽게 볼 수 있는 장점이 있으나, 노이즈(Noise)가 많이 발생하기 때문에 오차가 작고 재현성이 양호한 정전용량 데이터 측정을 위하여 최적 입력주파수를 결정하는 것이 필요하다. 측정결과로부터 석탄회 미연탄소함량에 따른 정전용량값의 노이즈가 작고 재현성이 양호한 주파수는 100 kHz로 분석되었으며, 본 연구에서는 정전용량에 따른 미연탄소함량 특성 분석을 위한 외부 입력주파수로 100 kHz를 선택하였다.

Fig. 7은 상대습도 변화에 따른 석탄회 정전용량의 변화를 분석한 것으로, 입력주파수 100 kHz, 항온항습 챔버내에서 온도 27°C, 상대습도 23%에서 64%까지 정전용량값은 54 pF으로 일정하였으며, 동일한 시료에서 주변 상대습도 변화는 석탄회 정전용량값에 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 이는 정전용량값은 극판 기하학적 형상이 고정되어 있을 때 외부 전기장의 변화, 유전체 성분 등의 전자 재배치에 영향을 주는 인자에 의해서만 결정되기 때문이다.

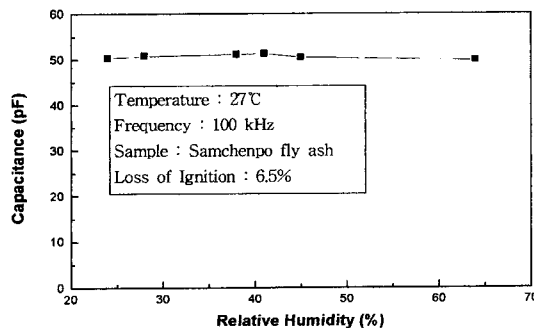


Fig. 7. Test results of ash capacitance as a function of relative humidity.

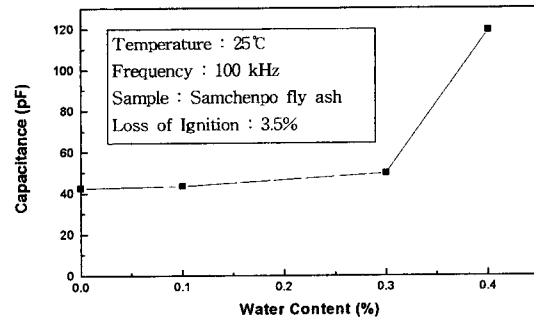


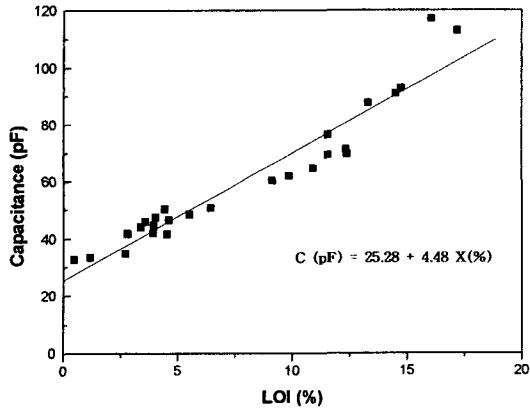
Fig. 8. Test results of ash capacitance as a function of water content.

Fig. 8는 석탄회에 함유된 수분함량변화에 따른 정전용량 변화를 나타낸 것으로, 석탄회를 수분 챔버에 일정시간 방치한 후 샘플링 하여 수분측정기를 통해 수분함량을 측정하여 정전용량값을 측정한 결과로써 수분함량이 증가함에 따라 석탄회 정전용량값이 급격히 상승함을 알 수 있다. 그 이유는 분체 형태의 유전체에서는 유전체속에 포함된 미량의 도체성분이 정전용량의 값에 매우 큰 영향을 주기 때문이다. 석탄회 속에 함유된 수분은 유전체 속에서 도체성분으로 작용할 뿐만 아니라 영구쌍극자인 H<sub>2</sub>O 성분에 의해 전자분극이 활성화되어 정전용량 상승의 주원인이 된다. 따라서 정전용량값을 이용한 미연탄소함량 측정을 위해서 수분함량에 대한 영향을 최소화하기 위해 전열처리(Pre-heating)과정이 요구되며, 본 연구에서는 수분함량이 0.1% 미만의 시료를 대상으로 정전용량값 특성을 데이터베이스화하였다.

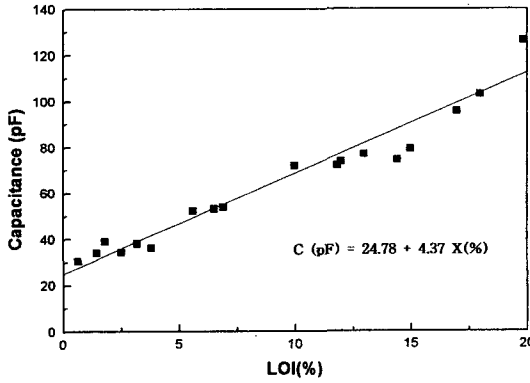
4-3. 발전소별 석탄회의 정전용량 분석

Fig. 9는 하동, 삼천포, 보령화력발전소로부터 발생된 각각의 석탄회에 대하여 미연탄소함량에 따른 정전용량(C)을 나타낸 것으로, 미연탄소함량(X) 0%~20%에 대하여 측정한 결과 보령석탄회의 경우, C(pF)=35.44+3.76 X(%), 삼천포석탄회의 경우, C(pF)=24.78+4.37 X(%), 하동석탄회의 경우 C(pF)=25.28+4.48 X(%)로 미연탄소함량(X)에 따라 정전용량값(C)이 비례적으로 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 석탄회의 미연탄소성분은 유전체 속의 미립 도체로 작용하여 전압이 인가된 양극판의 유도전하량을 증가시키기 때문이다.

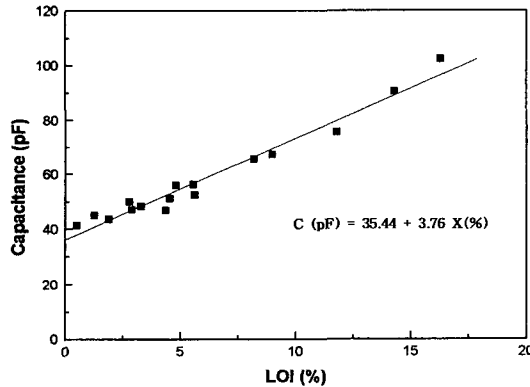
Fig. 10은 하동, 삼천포, 보령화력발전소 석탄회에 대하여 미연탄소함량에 따른 정전용량 변화를 하나의 그래프로 나타낸 것으로, 외부입력주파수 100 kHz, 알루미늄 극판간격 7 mm, 극판넓이 0.11×0.1 m<sup>2</sup>, 인가전압은 계측기 내부전압인 1 V에서 미연탄소함량 0%~20%에 대한 정전용량값이 30 pF~130 pF으로 나타났다. LOI 0%



(a) Hadong fly ash.



(b) Samcheonpo fly ash.



(c) Boryung fly ash.

Fig. 9. Test results of ash capacitance as a function of carbon content.

에서 보령 석탄회의 정전용량값이 하동, 삼천포 화력 발전소의 정전용량값 보다 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 보령 석탄회 유전체속에 포함된 미세한 도체성분인 철성분이 다량 포함되어 있기 때문인 것으로 분석하였다. 철성분은 분체형태의 유전체속에서 도

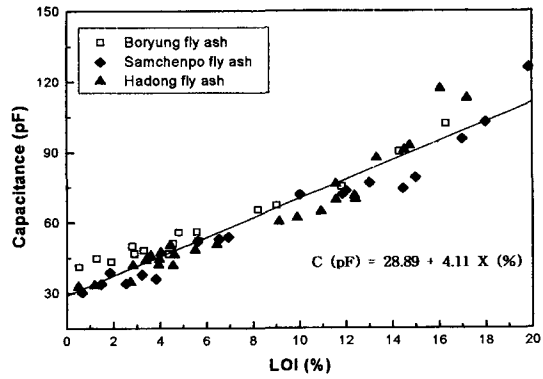


Fig. 10. Summary of ash capacitance for various domestic fly ash samples.

체성분으로 작용하여 유전체의 유전분극현상을 활성화시켜 극판의 속박전하의 양을 증가시킨다.

Table 2는 삼천포, 하동, 보령 화력발전소 석탄회에 대하여 미연탄소함량에 따른 정전용량 분석결과로부터 도출한 경험식을 나타낸 것으로, 미연탄소함량 0%~10%, 10%~20%, 0%~20% 구간별로 경험식을 유도하여 비교 분석한 결과 석탄회 LOI 값과 경험식으로부터의 미연탄소함량값은 최대 0.91%로 나타나는 것으로 분석하였다. 식(2)는 본 연구에서 석탄회의 정전용량 특성분석을 통해 도출한 미연탄소함량에 따른 정전용량 경험식이다.

$$C = 28.89 + 4.11X \quad (2)$$

여기서, X는 석탄회의 LOI(%), C는 정전용량(pF)을 표시한다. 즉 석탄회를 보일러나 이송덕트로부터 채취하여 정전용량값을 본 연구에서 개발한 센서로 측정하면 채취한 석탄회의 미연탄소함량을 식(2)로부터 얻을 수 있다. 본 연구를 통하여 석탄회 미연탄소함량에 대한 실시간 모니터링이 가능함을 알 수 있으며, 발전소의 보일러 최적연소, 석탄회 재활용, 에너지 절감 및 청정에너지 기술부문에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 화력발전소에서 발생하는 석탄회 미연탄소함량을 동시측정하기 위한 석탄회 정전용량 분석에 관한 연구로, 석탄회의 성분 분석 및 LOI 값에 따른 정전용량 특성 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정전용량법을 사용하여 석탄회에 함유된 미연탄소함량을 실시간 측정할 수 있었다.
- (2) 국내 삼천포, 하동, 보령 석탄회발전소에서 발생하는 석탄회의 미연탄소함량(X, %)과 정전용량(C, pF)

**Table 2. Empirical equations for estimating the contents of unburned carbon in fly ash.**

LOI range (%)	Boryung fly ash	Samcheonpo fly ash	Hadong fly ash
0~10	$C_{B1}=38.70+3.01X$	$C_{S1}=25.93+4.27X$ $C_{T1}=31.15+3.39X$	$C_{H1}=31.52+3.11X$
10~20	$C_{B2}=26.15+4.52X$	$C_{S2}=-17.72+6.95X$ $C_{T2}=-13.92+7.40X$	$C_{H2}=-56.48+10.67X$
0~20	$C_{B3}=35.44+3.76X$	$C_{S3}=24.78+4.37X$ $C_{T3}=28.89+4.11X$	$C_{H3}=25.28+4.48X$

Note : 1. C : Capacitance (pF), 2. X: Loss On Ignition (LOI) (%), 3. B : Boryung fly ash, 4. S : Samcheonpo fly ash, 5. H : Hadong fly ash, 6. T : Total.

의 관계를 계측하여 데이터베이스화한 결과, 경험식은,  $C=28.89+4.11X$ 의 선형적인 관계식을 도출하였으며, 오차는 최대 0.91%이었다.

(3) 석탄회를 보일러나 이송덕트로부터 채취하여 정전용량값을 측정하고 도출한 경험식을 사용하면 채취한 석탄회의 미연탄소함량을 실시간으로 측정하는 것이 가능하다. 아울러, 이러한 실시간 모니터링은 발전소의 보일러 최적연소, 석탄회 재활용, 에너지 절감 및 청정에너지 기술부문에 기여할 것이라 기대된다.

**후 기**

본 논문은 에너지관리공단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

**참고문헌**

- American Society for Testing and Materials, "Annual Book of ASTM Standards", Part 26, Standard D 3174-89, "Standard Test Method for Ash in the Analysis of Coal and Coke", ASTM, Philadelphia, PA. (1989).
- Jakiel, T.C., Loskiewicz, J., Nezamzadeh, M. and Tracz, G.: "The Influence of High Iron Content in Coal Ash on Measurement of 4.43 MeV carbon", Radiation and Isotopes, 55 (1998).
- Kempster, R.D. and Cross, P.A.E.: "Apparatus for Monitoring the Caron Content of Boiler Flue Ash", Eur. Patent Appl. No. 86 307 677, 4: Publication number EP 0217677 A2, G01N 31/12 (1987).
- Robert, C.B. and Dykstra, J.: "Systematic Errors in the Use of Loss-On-Ignition to Measure Unburned Carbon in Fly Ash", Fuel, 74, 4 (1995).
- Smith, W.F.: "Foundations of Materials Science and Engineering", 청문각 (1999).

- 장민수, 이재현: "기초 유전체", 부산대학교 기초과학 연구소 (1998).
- 한봉조: "재료과학", 문운당 (1986).
- Flagan, R.C. and Friedlander, S.K.: "Particle Formation in Pulverized Coal Combustion - a Review" (1988).
- 남호기, 마삼선, 정영택: "석탄회: 이용가치와 재활용 기술", 한국전력공사 (1994).
- 이정언, 이재근: "석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회 특성과 형성분석에 관한 연구", 한국에너지공학회, 7, 1, 146-156 (1998).
- 이정언, 이재근: "석탄연소 보일러에서 생성된 석탄회의 분석과 형성메카니즘 해석에 대한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 22, 12, 1691-1701 (1998).
- 이정언, 이재근: "석탄화력 발전소에서 생성되는 석탄회에서 Cenosphere 입자의 특성에 관한 연구", 대한환경공학회지논문, 22, 10, 1881-1891 (2000).
- 구재현, 이정언, 이재근: "석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회의 수분함유량 및 온도에 따른 비저항성 특성 연구", 대한기계학회논문집 B권, 24, 4, 526-532 (2000).
- 이재근, 김성찬, 손낙원, 김두현, 오정근: "마찰대전 정전분리기를 이용하여 석탄회에 함유된 미연탄소분 제거에 관한 연구", 자원리싸이클링학회논문집, 6, 3, 15-21 (1997).
- 이재근, 구재현, 이정언, 정석희: "전기집진기에서 추타시 석탄회의 박리 및 재미산 특성에 대한 실험적 연구", 대한환경공학회지, 20, 1, 119-128 (1998).
- 이정언, 안영철, 김성찬, 구재현, 나성수, 신진혁, 이재근: "부유분리법에 의해 분리한 고순도 정제석탄회와 고탄소 석탄회의 특성", 자원리싸이클링학회논문집, 8, 4, 11-19 (1999).
- 이정언, 이재근: "역류형 컬럼 부유기를 이용한 석탄회 정제에 관한 연구", 자원리싸이클링학회논문집, 8, 5, 51-58 (1999).