

# 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 수분함유량 및 온도에 따른 비저항성 특성 연구

구재현\* · 이정언\* · 이재근\*\*  
(1999년 6월 26일 접수)

## A Study of Fly Ash Resistivity Characteristics Generated from the Coal Fired Power Plant as a Function of Water Concentration and Temperature

Jae-Hyun Ku, Jung Eun Lee and Jae Keun Lee

**Key Words:** Fly Ash(석탄회), Resistivity(비저항성), Electrostatic Precipitator(전기집진기), Temperature(온도), Water Concentration(수분함유량)

### Abstract

Recent studies have been directed toward obtaining a better understanding of the application of electrostatic precipitators to collect fly ash particles produced in a coal-fired power plant. Electrical resistivity can be described as the resistance of the collected dust layer to the flow of electrical current and is an important property for the collection efficiency in the electrostatic precipitator. In this paper, fly ash resistivity as a function of temperature up to 450 °C has been experimentally investigated using the resistivity meter consisted of the movable electrode, dust cup, and furnace. Resistivity was found to increase with increased temperature up to 200 °C due to the reduction of water concentration and then gradually decrease with increased temperature due to the activation of electrons. As the resistivity of fly ash in the flue gas temperature of 150 °C was measured  $>10^{10}$  ohm·cm, the efficiency of fly ash removal in the electrostatic precipitator might be expected to be low due to back-corona phenomenon. Flue gas conditioning in the electrostatic precipitator to reduce the resistivity of fly ash is required.

### 1. 서 론

화력 발전소나 보일러에서 석탄 또는 기름을 연소시킨 후 발생하는 석탄회(Fly Ash)는 전기집진기, 사이클론, 여과포 등으로 제거되는데 석탄회의 각종 특성에 따라 집진시설의 성능이 크게 달라지므로 석탄회 집진시설의 효율향상을 위하

여 여러 종류별 석탄회의 특성분석이 요구되고 있다. 석탄회의 물리적, 전기적, 화학적 특성 중 전기적인 특성인 비저항성(Resistivity)은 주로 정전기력을 이용하여 석탄회를 제거하고 또한 높은 집진율을 갖는 전기집진기의 성능에 크게 영향을 주는 중요한 특성이라 할 수 있다. 석탄회의 비저항성에 영향을 주는 인자중에서 석탄회의 수분함유량 및 온도 등이 가장 중요하다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구에서는 국내 석탄 화력발전소에서 발생하는 각종 석탄회의 비저항성 특성을 분석하는 것으로 본 실험을 위해 설계, 제작한 비저항성 측정장치로 분위기 온도를 상온에서 450 °C까지 변화시켜 석탄회의 비저항성 값을 측정하고 또한 수분함유량에 따른 비저항성 특성을 분석하고자 한다.

\* 부산대학교 공과대학 대학원

\*\* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : jklee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2455 FAX : (051)512-5236

## 2. 석탄회의 특성

Fig. 1은 석탄이나 기름을 연소시킨 후 발생하는 석탄회의 전자현미경 사진으로써, 석탄회의 대부분은 구형으로 평균 질량직경은 20~30  $\mu\text{m}$  범위이다. 석탄회의 특성은 석탄회의 크기분포, 농도, 형상, 비중 등을 나타내는 물리적 특성,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  등의 석탄회의 화학적 특성, 분진의 비저항성을 나타내는 전기적 특성으로 크게 3가지로 분류할 수 있다. 이 중 석탄회의 전기적 특성인 비저항성은 전기집진기에 있어서 매우 중요한 특성이다. 분진의 비저항성 (Resistivity)이란 전기집진기와 같이 입자의 전기적 성질을 이용하여 포집하는 집진장치에서 입자가 대전될 때, 입자가 갖는 저항성을 나타낸다. 즉 포집된 분진층 두께 1 cm, 단위면적 1  $\text{cm}^2$ 내에 포집분진이 갖는 전기저항을 말하며, 단위는  $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ 로 표시된다. 이러한 비저항성은 분진내 전하이동에 대한 저항으로 생각할 수 있다. 전기집진기의 경우 높은 집진효율을 얻기 위하여 입자가 가져야 할 정상 비저항성 범위는 107~1010  $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ 이다.<sup>(1)</sup> Table 1은 석탄회의 비저항성의 범위에 따라 3가지 영역으로 분류한 것이다. 비저항성이 107  $\text{ohm}\cdot\text{cm}$  이하인 입자는 비저항성이 너무 낮아 대전되어 집진 후 집진판에서 쉽게 전하를 잃어버리기 때문에 처리가스내로 재미산 현상(Reentrainment)을 일으키게 되고 결과적으로 집진효율을 저하시키는 결과를 가져오게 된다. 이에 반하여 비저항성이  $10^{10}$   $\text{ohm}\cdot\text{cm}$  이상인 입자는 비저항성이 너무 높다. 일단 대전이 되면 집진극에 포집되어도 전하를 쉽게 잃어버리지 않기 때문에 집진판에 전하가 계속 누적되어 집진판상에서 방전현상 즉, 역 코로나현상(Back Corona)을 발생시킨다. 이 경우 또한 집진효율을 저하시킨다. 이렇게 집진효율을 저하시키는 고 또는 저 비저항성 입자들의 경우에는 수분, 암모니아, 황산 등의 화학물질을 분사시켜 줌으로써 집진효율이 양호한 정상 비저항성 입자의 전기적 특성을 나타낼 수 있도록 제어할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 집진장치에서 분진의 비저항성에 영향을 주는 여러 가지 인자들을 고려한 연구의 필요성이 대두되고 현재 여러 제어 방법들이 개발, 발전되고 있다.<sup>(3,4)</sup>

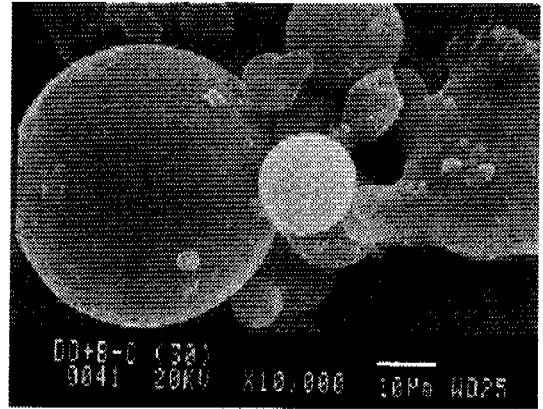


Fig. 1 SEM micrograph of fly ash (Mixture of Anthracite coal ash and Bunker-C oil ash)

Table 1 Electrical resistivity of fly ash<sup>(1)</sup>

Fly Ash	Resistivity ( $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ )
Low Resistivity Fly Ash	$10^4 \sim 10^7$
Normal Resistivity Fly Ash	$10^7 \sim 10^{10}$
High Resistivity Fly Ash	$> 10^{10}$

입자의 비저항성에 크게 영향을 주는 주요인자는 습도 및 온도이다. 입자의 습도가 증가하면 전기전도도가 증가하여 비저항성이 감소한다. 이러한 성질을 이용하여 석탄회의 비저항성을 감소시키려면 입자에 수증기를 분사, 살수함으로써 고 비저항성의 입자를 정상영역의 입자로 변화시킬 수 있다.<sup>(5-7)</sup>

## 3. 실험개요 및 실험방법

### 3.1 비저항성 측정방법

석탄회의 비저항성 특성은 연소가스가 흐르는 관 내에서의 측정 또는 전기로 내에서의 측정으로 나눌 수 있다.<sup>(8)</sup> 관 내에서의 측정은 실제 관

내에서의 온도 및 습도, 즉 실제 분위기 속에서 입자의 비저항성을 측정하는 방법이다. 이러한 측정방법은 가장 정확한 측정방법이라 할 수 있으나, 관 내의 온도가 아주 높은 고온에서 측정하고자 할 때 재료 및 재질면에서 그 온도에 견딜 수 있는 비저항성 측정 장치를 제작하기가 힘들다는 문제점이 있다. 전기로 내에서 측정하는 방법은 전기로 내에서 온도 및 습도를 인공적 분위기를 조성하여 입자의 비저항성을 측정하는 방법으로써 관 내의 실제 분위기가 아닌 만큼 오차가 발생할 수 있는 문제점도 있으나 관 내에서 측정하는 것보다 여러 가지 변화를 설정할 수 있으므로 다양한 실험을 할 수 있다는 장점이 있다. 본 실험에서는 전기로 내에서 측정하는 방법을 이용하여 석탄회의 여러 온도에 따른 비저항성의 변화를 측정하고자 한다.

Fig. 2는 입자의 비저항성을 측정할 수 있는 비저항성 측정 장치로써 분진컵 안에 분진을 담고 그 위에 이동전극을 얹어 전류를 통하게 하여 전기 저항성을 측정함으로써 비저항성을 얻을 수 있다. 본 실험에 사용되는 비저항성 측정장치는 비저항성 측정 셀(Cell)을 이용한 ASME PTC-28 기준으로 셀모양, 수분함유량, 분위기 온도, 석탄회 두께, 인가전압, 전압인가 시간, 이동전극의 무게 등을 고려하여 설계 및 제작되었다.<sup>(9~14)</sup> 전원공급장치와 전류계 등의 선정을 위하여 이론적으로 최대 비저항값  $10^{12}$  ohm·cm를 얻기 위한 최대 전압값을 구하여야 한다. 오옴의 법칙인 식 (1)과 저항과 비저항성의 관계 식 (2)로부터 비저항성( $\rho$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{(V \cdot A)}{(I \cdot L)} \quad (3)$$

여기서,  $\rho$  : 비저항성 (ohm·cm), R : 저항 (ohm), A : 전류가 흐르는 방향에 수직인 면적( $4.9 \text{ cm}^2$ ), L : 분진층의 두께 (0.7 cm), V : 분진층을 통과하는 전압(V), I : 분진층을 통과하는 전류(A)이다. 본 실험에서는 최대 전압값이 100 kV, 최대 전류 10 mA 용량을 가진 직류 전원공급장치(한국스윗칭, F9225M12-D)와  $\mu\text{A}$  측정용

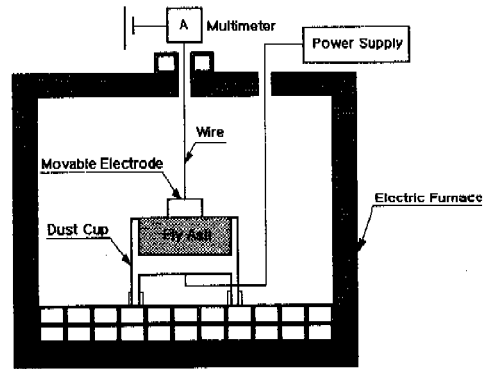


Fig. 2 Schematic diagram of the resistivity meter based on ASME PTC-28 code

전류계(새한, Type ST-100)를 사용하였다. 전기로의 크기는  $300 \times 250 \times 140$ (mm)이고 최대 가동 온도가 약  $1,600 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 전선은 약  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도속에서 100 kV의 전압, 10~20 mA의 전류를 견딜 수 있는 석면선(단면적  $2 \text{ cm}^2$  연선)을 사용한다. 스테인레스 스틸의 재료로 제작된 이동전극(직경 2.5 cm)은 분진컵(직경 7.5 cm)에 담겨 있는 석탄회 위에 얹어져서 석탄회를 통해 흐르는 전류를 받아 전류계로 흘러 보내어 전류를 측정하게 하는 역할을 한다. 분진컵은 전원공급장치와 연결되어 전원을 공급받아 이 장치에 담겨져 있는 실험용 석탄회에 전원을 흘려 보내는 역할을 한다. 여기에 담길 석탄회의 두께는 최고 10 mm로 설계되었다.

### 3.2 실험내용 및 방법

비저항성 측정을 위한 최적 실험조건을 구하기 위해 먼저 인가전압에 따른 비저항성 측정으로 최적의 인가전압을 찾아내고 측정하고자 하는 석탄회의 수분함유량을 측정한다. 석탄회에 함유되어 있는 수분함유량을 측정하는 방법으로 KS L 5405 규정에 따라 석탄회에 온도  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 열을 2시간 정도 가하여 수분을 증발시켜서 전자저울(Ohaus, AP250D)을 사용하여 증발전과 후의 무게를 측정한다. 따라서 석탄회의 수분함유량은 증발전과 후의 수분 질량감소량에 수분밀도를 고려한 수분 체적감소량을 계산하여 증발전의 석탄회 질량에 석탄회 밀도를 고려한 원시료 체적량으로 나누어 체적백분율(Vol%)로 구한다. 이때 계산된

는 석탄회 수분함량의 체적백분율은 기공율을 포함하지 않은 석탄회 입자들의 순수부피에 대한 값을 의미한다.

온도에 따른 석탄회의 비저항성을 측정하는 방법으로는 Fig. 2와 같이 비저항성 측정장치를 이용하고, 측정하고자 하는 석탄회를 분진컵에 7 mm두께로 담고 전기로의 분위기 온도를 변화시키면서 인가하는 전압에 대하여 석탄회를 통과하여 검출되는 전류를 전류계로 측정하여 식 (1)로부터 비저항성( $\rho$ )을 구한다.

#### 4. 비저항성값 측정결과

##### 4.1 전압에 따른 전류 및 비저항값 측정

전압과 온도에 따른 비저항성값을 측정하기 전에 적절한 인가 전압을 구하기 위해서는 주어진 석탄회에 대한 인가전압에 따른 전류값 및 비저항성값을 측정하여야 한다. Fig. 3은 측정온도 60 °C에서 인가전압에 대한 무연탄과 벙커 C유를 섞은 혼합연료에서 발생된 석탄회 비저항성값을 측정한 것으로서, 인가 전압의 초기 증가에 대하여 비저항성값은 감소현상을 나타내며, 인가전압 600~1,900 Volt 사이에서  $4.5 \times 10^9$  ohm·cm의 일정한 비저항성값을 유지한다. 그리고 2,000 Volt에서 절연 파괴 현상으로 비저항성값은 크게 감소한다. 즉, 측정전류는 증가하다가 전기적 절연상태가 파괴되어 순간적으로 과도한 전류가 흐르게 되는데, 이때의 과도전류 측정값은 너무 커서 전류계로 측정할 수 없었다. 분위기 온도가 25 °C와 80 °C일 때도 각 온도에 대하여 인가 전압에 대한 측정전류의 변화는 거의 비슷한 추세를 보였다. 수분함유량이 1.85%인 무연탄과 벙커 C유를 섞은 혼합연료에서 발생된 석탄회에 흐르는 전류는  $\mu A$  단위의 전류계에 의하여 인가전압이 600~1,900 Volt의 범위에서 분진층을 통과하는 수  $\mu A$  단위의 전류측정이 가능하였다. 이러한 측정결과를 바탕으로 하여, 4.2절과 같이 각종 석탄회별로 각 온도변화에 따른 비저항성 측정실험을 수행한다.

##### 4.2 온도변화에 따른 비저항성 측정

온도변화에 따른 비저항성의 측정은 무연탄과 벙커 C유를 50 wt%씩 섞은 혼합연료 및 각종 유연탄

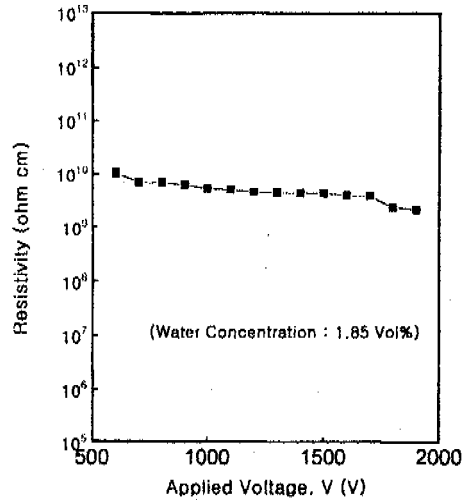


Fig. 3 Effect of applied voltage on fly ash resistivity (Mixture of Anthracite coal ash and Bunker-C oil ash, 60 °C)

을 50%씩 섞은 혼합연료의 석탄회에 대해 실험하였다. 혼합탄의 종류로는 무연탄(50%)과 벙커 C유(50 wt%), Drayton(50 wt%)과 NoVa(50 wt%), NoVa (50 wt%)와 MPCC(50 wt%), Macquarie(60 wt%)와 MPCC(40 wt%), Douglas(50 wt%)와 Allied(50 wt%), BHP(50% wt)와 Allied(50 wt%) 등의 6종류의 탄종별 석탄회에 대하여 25~450 °C의 온도변화에 대한 비저항성값을 측정하였다.

Table 2와 Fig. 4~Fig. 6은 온도변화에 따른 비저항성값의 변화를 나타낸 결과로서, 종모양의 볼록형태로 온도증가에 따라 증가하고 200 °C 이후로는 점차 감소한다. Fig. 4는 무연탄과 벙커 C유의 혼합연료에서 발생된 석탄회의 온도변화에 따른 비저항성 측정값을 나타낸 것으로, 상온에서 비저항성값이  $5.6 \times 10^7$  ohm·cm이고 온도증가에 따라 비저항성이 증가하다가 180 °C에서 비저항성값이  $1.58 \times 10^{11}$  ohm·cm로써 최고값이며 180 °C 이상의 온도증가에서는 비저항성이 감소하여 450 °C에서 비저항성값이  $3.85 \times 10^9$  ohm·cm로 측정되었다. Fig. 4~Fig. 6과 같이, 대부분의 석탄회는 온도가 130~200 °C의 범위에서 비저항성값의 최고치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 종모양의 볼록형태에서 비저항성의 최고치 온도를 중심으로 그 이하의 온도범위에서는 비저항성값은 주로 수분의 영향을 많이 받게 되고, 그 이상의 온도 범위에서는 비저항성값이 온도가 높아짐에

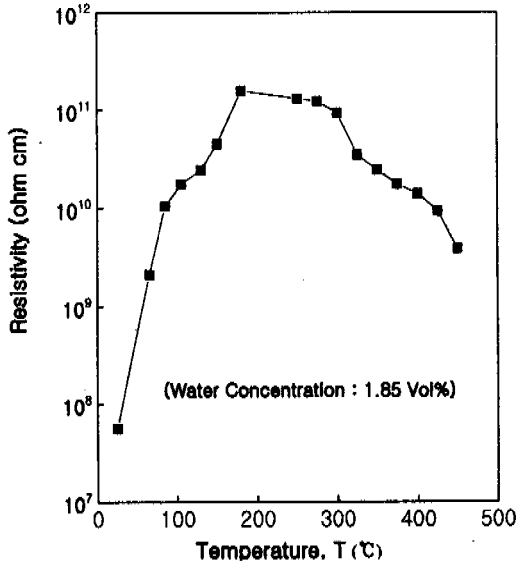


Fig. 4 Resistivity measurement of fly ash as a function of temperature (Mixture of Anthracite coal ash and Bunker-C oil ash)

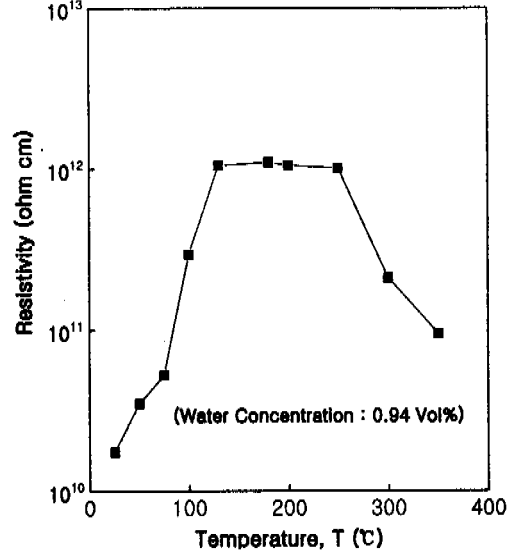


Fig. 5 Resistivity measurement of fly ash as a function of temperature (Mixture of Drayton coal ash and NoVa coal ash)

Table 2 Resistivity measurement of fly ash as a function of temperature (Mixture of Anthracite Coal Ash and Bunker-C Oil Ash, Water Concentration = 1.85 Vol%)

Temperature	Applied Voltage(V)	Current( $\mu$ A)	Resistivity(ohm · cm)
25 °C	100	12.5	$5.6 \times 10^7$
65 °C	150	0.5	$2.1 \times 10^9$
105 °C	250	0.1	$1.8 \times 10^{10}$
130 °C	350	0.1	$2.5 \times 10^{10}$
150 °C	450	0.07	$4.5 \times 10^{10}$
180 °C	900	0.04	$1.6 \times 10^{11}$
250 °C	750	0.04	$1.3 \times 10^{11}$
300 °C	400	0.03	$9.3 \times 10^{10}$
350 °C	350	0.1	$2.5 \times 10^{10}$
400 °C	200	0.1	$1.4 \times 10^{10}$
450 °C	275	0.5	$3.9 \times 10^9$

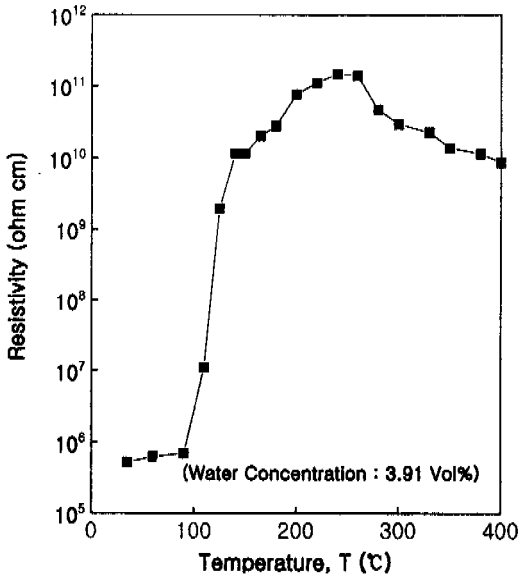


Fig. 6 Resistivity measurement of fly ash as a function of temperature (Mixture of NoVa coal ash and MPCC coal ash)

따라 석탄회를 구성하고 있는 전도성 성분의 활성화에 기인하므로 주로 석탄회의 구성성분이 주요 변수가 된다. 즉, 온도의 영향은 일정한 온도 이하에서 온도가 낮아질수록 가스의 상대습도가 높아져 입자 표면에 수분의 응축으로 인해 전하의 전도도가 증가되어 전기적 비저항성이 낮아지는 것이며, 일정한 온도 이상이 되어도 비저항성이 낮아짐을 알 수 있는데, 이는 고온에서 입자 내 전기전도도가 증가함에 기인한다. 온도변화에 따른 비저항성 결과는 온도 80 °C 이상의 범위에서 비저항성을 측정하였던 Bickelhaupt(1979)의 측정결과와 유사한 경향성을 나타낸다.<sup>(6)</sup> 대부분 전기집진기의 처리가스 온도는 150 °C 정도이므로 국내 각종 석탄회의 비저항성 값이 150 °C에서  $10^{10}$  ohm·cm보다 큰 고 비저항성 석탄회로써 집진시 역 코로나현상으로 집진효율이 저하될 우려가 있다. 따라서 해결책은 고 비저항성 석탄회에 온도에 따라 수증기를 분사하여 전기전도도를 상승시켜 비저항성을 낮게 조절할 수 있다.

#### 4.3 수분변화에 따른 비저항성 측정

Fig. 7은 Drayton(50%)과 NoVa(50%) 혼합탄의 석탄회에 대하여 수분컨텐츠를 이용해 1.1, 6.9,

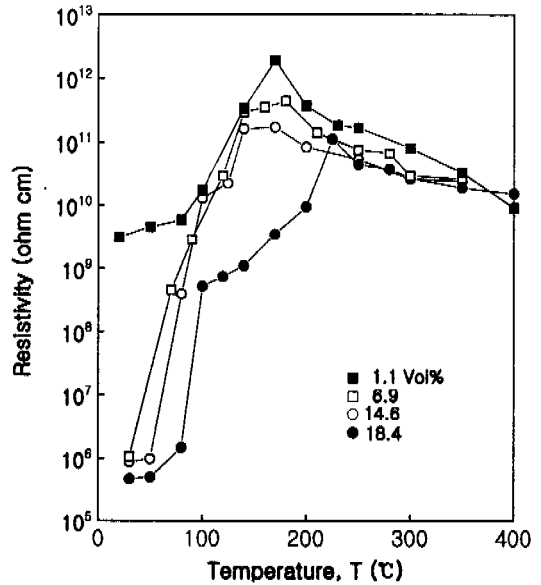


Fig. 7 Resistivity measurement of fly ash as a function of water concentration and temperature (Mixture of Drayton coal ash and NoVa coal ash)

14.6, 18.4%의 수분량을 함유시켜 온도변화에 따른 석탄회의 비저항성을 측정된 결과로써, 대체적으로 석탄회 수분함유량이 많아질수록 전기전도도가 높아져서 비저항성이 낮아짐을 알 수 있으며, 최고치의 비저항성 이상의 온도에서는 수분증발로 인해 수분함유량의 변화에 따른 비저항성 변화가 적어 수분의 영향보다 석탄회 성분에 의한 활성화 에너지가 주된 인자이다. 그러나 200 °C 이하 온도에서는 비저항성이 수분의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 수분변화에 따른 비저항성 측정결과는 수분함유량 4.8~14.1 Vol%의 범위에서 비저항성을 측정하였던 Bickelhaupt(1979)의 분석결과와 유사하다.<sup>(6)</sup>

### 5. 결론

석탄회를 제거하는 전기집진기의 효율에 크게 영향을 주는 석탄회의 비저항성은 석탄회의 수분함유량과 분위기 온도가 주된 변수로 작용하며, 국내 석탄 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 비저항성 특성에 의한 연구결과는 다음과 같다.

(1) ASME PTC-28 규격에 의해 이동전극, 분진

컵, 전기로, 전원공급장치로 구성되는 비저항성 측정장치를 설계, 제작 및 성능평가를 수행하였다.

(2) 온도 변화에 따른 석탄회의 비저항성값 변화는 상온으로부터 온도증가에 따라 비저항성이 증가하나, 200 °C 이후로는 감소하는 종모양의 불룩형태로 측정되었다. 최고 비저항성값은 130~200 °C의 범위에서 비저항성값이  $10^{11}$  ohm·cm 이상으로 측정되었다.

(3) 비저항성값은 수분의 증가에 따라 전기 전도도가 높아져 감소한다. 최고치의 온도를 중심으로 그 이하의 온도 범위에서는 주로 수분의 영향을 많이 받게 되고, 그 이상의 온도 범위에서는 주로 석탄회의 구성성분인 전도성 성분의 활성화에 의한 것으로 사료된다.

(4) 국내 각종 석탄회는 비저항성값이 150 °C에서  $10^{10}$  ohm·cm보다 큰 고 비저항성 석탄회이다. 150 °C에서 운전되는 국내 전기집진기의 석탄회 집진시 역 코로나현상으로 집진효율이 저하될 것으로 판단된다. 고 비저항성 석탄회는 분위기 온도감소 및 석탄회의 수분함유량을 증가시켜 전기 전도성을 증가시킴에 따라 석탄회 비저항성을 낮게 하는 방법이 요구된다.

### 참고문헌

- (1) Beachler, S. D. and Jahnke, J. A., 1981, APTI Course 4/3 Control of Particulate Emissions Student Manual.
- (2) Oglesby, S. J. and Nichols, G. B., 1978, *Electrostatic Precipitation*, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.
- (3) Theodore, L. and Reynolds, J., 1983, "Control Technology News: ESP Bus Section Failures: Design Considerations," *Journal of the Air Pollution Control Association*, 33(12), 1215~1218.
- (4) White, H. J., 1984, "전기집진기(Electrostatic Precipitators)," 대기오염방지공학, 김동술 역, 신광문화사, pp. 133~158.
- (5) White, H. J., 1977, "Electrostatic Precipitation of Fly Ash," *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27(4), 308~318.
- (6) White, H. J., 1977, "Electrostatic Precipitation of Fly Ash," *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27(2), 114~120.
- (7) 김종석, 조병환 공저, 1991, 대기오염 방지 기술, 동화기술.
- (8) McDonald, J. R., and Dean, A. H., 1982, *Electrostatic Precipitator Manual*, Noyes Data Corp., pp. 215~331.
- (9) ASME PTC-28, 1965, Determining the Properties of Fine Particulate Matter. Section 4.05, Method for Determination of Bulk Electrical Resistivity, pp. 15~17.
- (10) Bickelhaupt, R. E., 1979, "A Technique for Predicting Fly Ash Resistivity," EPA-600/7-79-204, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park.
- (11) 이재근, 하만영, 김경천, 김귀순, 구재현, 1995, "온도와 수분함유량 변화에 의한 Fly Ash의 비저항성 특성연구," 대한기계학회 춘계 학술대회논문집(II), pp. 517~522.
- (12) 하만영, 이대래, 안승표, 김경천, 이재근, 김귀순, 박호동, 1996, "파울링 예측을 위한 가스-입자 유동 해석 (1)-고온 풍동 설계 및 성능 실험," 대한기계학회논문집, 제20권, 제11호, pp. 3695~3705.
- (13) 조형희, 이재근, 박호동, 서태원 (1998), "분체 이송관내 압력 조절을 위한 오리피스 주위에서의 입자 유동 및 마모해석," 대한기계 학회논문집 B권, 제22권, 제11호, pp. 1499~1508.
- (14) 이정언, 이재근 (1998), "석탄연소 보일러에서 생성된 석탄회의 분석과 형성메카니즘 해석에 대한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제12호, pp. 1691~1701.