한국에너지공학회지(2003), 제12권 제3호
Energy Engg. J(2003), Vol. 12, No. 3, pp. 223~230

제철슬러지 소각로 열교환기에서의 파울링특성 연구

박상일 · 김정근 · 김기홍* · 박용준** · 조성문**

한국에너지기술연구원, 신연소연구센터
*포항산업과학연구원, 환경에너지연구센터
**포스코, 에너지진단팀
E-mail : sipark@kier.re.kr

A Study on the Heat Exchanger Fouling Characteristics of Sludge Incinerator at the IronWorks

Sang-Il Park, Jeong-Keun Kim, Ki-Hong Kim*, Yong-Joon Park and Sung-Moon Cho****

Korea Institute of Energy Research, Advanced Combution Research Center
**RIST, Environment & Energy Research Center*
***POSCO, Energy & Thermal Audit Team*

요 약

본 연구에서는 제철소의 슬러지 소각로 배가스의 냉각을 위한 열교환기에서의 가스측 파울링 현상의 측정 및 분석에 대한 연구를 수행하였다. 소각로 배가스는 열교환기의 수직 전열관을 통과하면서 냉각되며 동시에 연소용 공기를 예열한다. 이러한 열교환기의 파울링은 주로 열교환기 입구에 발생하여, 본 연구에서는 열교환기의 입구 형태와 비슷한 형상의 오염다공판을 사용하여 슬러지 소각로 배가스의 파울링 현상을 측정하였으며, 부착분진에 대한 특성분석을 수행하였다. 분석 결과, 분진 부착율은 온도와 분진성분 및 분진크기에 영향을 받으며, 또한 오염다공판의 위치에 따라 부착형태가 다르게 나타났다. 또한 전산해석을 통하여 오염다공판의 구멍 크기에 따라 분진부착율이 변하는 것을 알 수 있었다. 그리고 오염다공판을 사용하여 다관식 원통형 열교환기의 입구에서의 파울링 특성을 측정할 수 있음을 확인하였다.

Abstract — A study was performed to measure and analyze the gas-side fouling of heat exchanger to cool the exhaust gas from sludge incinerator at ironworks. The incinerator gas passes through inside of the vertical tubes of heat exchanger to preheat the combustion air. This kind of fouling occurs at the entrance region of the heat exchanger and thus the perforated fouling plate was designed to measure the gas-side fouling and to analyze the particulate deposit. As a result of analysis, the particulate deposition rate was influenced by temperature, particulate composition and size and also the deposition patterns were different according to the location of perforated fouling plate. The computational analysis was performed to obtain the deposition rates at the perforated fouling plate and the calculation showed that the deposition rate was varied with the hole size and particulate size. It was proved that the fouling at the entrance region of heat exchanger could be measured by the perforated fouling plate designed in this study.

1. 서 론

산업체 소각로의 고온 배가스에는 소각대상물질의 특성에 따라 다양한 성분의 오염물질이 함유되어 있다. 소각처리물질에 따라 오염물질의 특성이 결정되며, 일반적으로 2차 연소실 출구에서 약 850°C 이상을 유지하고 있다. 이러한 고온 배가스의 후처리를 위하여 일정 온도 이하로 냉각할 필요가 있어서 주로 배가스 냉각용 열교환기가 사용되고 있다. 그러나, 이러한 소각 배가스의 냉각과정에서 열교환기의 입구와 전열면에 가스측 파울링 현상이 발생하여 열교환기의 전열성능이 감소하고 또한 심한 경우, 유로면적을 줄여 통풍저항을 증대시키게

Table 2. Composition of ironworks sludge.

Composition	C	H	N	S	Incombustibles	Heating value
Content (%)	11.80	1.75	0.32	0.36	85.77	2,270 kcal/kg

된다[1]. 이러한 소각 열교환기의 파울링의 측정을 위하여 영국의 National Engineering Laboratory에서는 NEL fouling probe를 개발하여 다양한 배가스의 파울링 특성을 측정하였다[2][3]. 이러한 NEL fouling probe는 주로 전열관 외벽의 입자부착율을 측정한다. 그러나, 본 연구의 슬러지 소각로의 공기예열기에서의 파울링은 주로 열교환기의 입구에서 발생하여 열교환기의 유로면적의 감소에 의한 통풍저항의 증가로 조업에 어려움이 있다. 이러한 종류의 파울링의 측정을 위하여 본 연구에서는 오염다공판을 설계하였으며, 실제로 파울링 실험장치에 적용하여 단시간내에 입자부착율과 통풍저항을 측정하고, 부착입자의 분석연구를 수행하였다[4]. 본 연구에서의 파울링 특성분석은 주로 온도와 오염다공판 위치(또는 2차 연소실 체류시간)의 영향을 고찰하였으며, 이외에 분진입자의 유속, 크기 및 성분의 영향도 검토하였다. 그리고 오염다공판의 입자부착율에 대한 이론적인 검증을 위하여 전산유동해석을 수행하였으며, 이의 결과로 입자부착율에 대한 다공판 구멍의 직경과 입자크기의 영향을 고찰할 수 있었다. 또한 본 연구의 오염다공판을 사용하므로서, 소각물질과 소각운전조건에 따른 열교환기에서의 가스측 파울링의 특성변화를 비교적 단시간내에 측정할 수 있음을 확인하였다.

2. 슬러지 소각분진의 특성

제철슬러지 소각로는 슬러지 혼합 및 공급장치, 로타리 킬른식 연소로, 2차 연소실, 공기예열기, stabilizer, 전기집진기, 반건식 세정탑, 백필터, 유인송풍기와 연돌로 구성되어 있다. 제철소각로의 처리용량은 90톤/일이며, 슬러지의 종류는 크게 3가지로 열연슬러지, 화성슬러지와 페스컴로 나눌 수 있다. 2차 연소실의 배가스 출구온도를 850℃ 이상으로 유지하고 있으며. 2차 연소실의 후단에 설치한 연관식 공기예열기의 입구에 파울링 현상이 나타났다. 슬러지 소각로의 열교환기 입구의 부착분진을 채취하였으며, EDAX를 사용하여 성분을 분석하였다. Table 1에 열교환기 부착분진의 분석결과 나타난 각 성분의 함량을 나타내었다. 이러한 EDAX 분석결과로 분진의 주성분은 Fe이며, 추가의 XRD 분석결과 이러한 철 성분은 Fe_2O_3로 존재하는 것으로 나타났다. 이외에는 Cr, Mn 등의 금속류가 일부 포함되어 있고, 나머지는 일종의 salt로서 Ca 등이 함유되어 있다. 그리고 제철 슬러지의 원소분석을 수행하였으며, 분석 결과는 Table 2에 나타내었으며, 이의 발열량은 건조시료 기준으로 약 2,270 kcal/kg 정도로 나타났다.

Table 1. Composition of incinerator heat exchanger deposit.

Composition	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe
Content (wt%)	1.86	0.88	0.93	0.64	2.30	0.93	92.46

3. 파울링 측정 장치 및 측정 방법

슬러지 소각로의 공기예열기 입구에 발생하는 파울링의 분석을 위하여, 파울링 측정용 실험장치를 설치하였다. Fig. 1에 슬러지 소각시스템과 파울링 측정장치의 구성도를 나타내었다.

소각로의 2차 연소실과 공기예열기의 사이에 있는 4"의 관찰구에 2" 파이프를 연결하였으며, 배가스 유입구로부터 약 1.5 m, 3.0 m 그리고 4.5 m 떨어진 위치에 2" 플랜지를 설치하여 파울링 측정용 다공판을 설치할 수 있도록 하였다. 이 후에 오리피스 유량계, 유량조절밸브, 유인송풍기와 사이클론을 설치하였으며 공기예열기의 입구에서의 배가스 온도와 오염다공판을 설치하는 2" 플랜지의 각 위치 그리고 오리피스 유량계 부분에서의 배관내의 배가스의 온도를 측정하였다. 각 위치에서의 온도를 측정하기 위하여 k-type 열전대를 사용하였으며, 오리피스에서의 압력차를 미압측정계를 사용하여 측정하였다. 그리고 열전대의 온도와 미압측정계에서 발생하는 전압신호를 hybrid recorder에 연결하여 측정하였으며, 이를 개인용 컴퓨터에 연결하여 측정결과를 기록하였다.

3군데의 오염다공판에서의 배가스온도를 파울링 측정

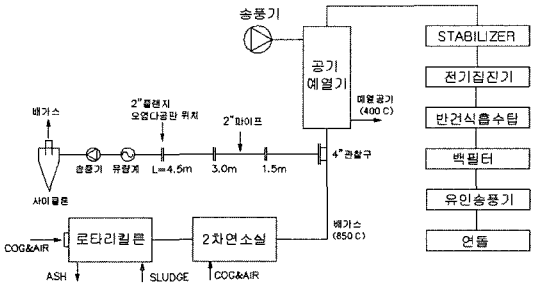

Fig. 1. Sludge incinerator and fouling test system.

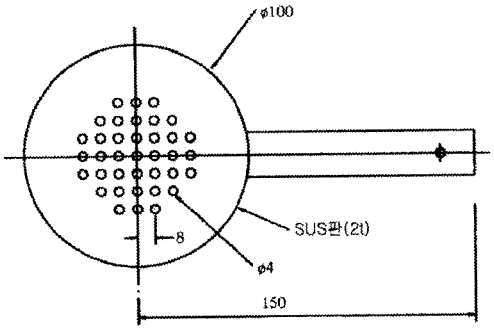

Fig. 2. Design of perforated fouling plate.

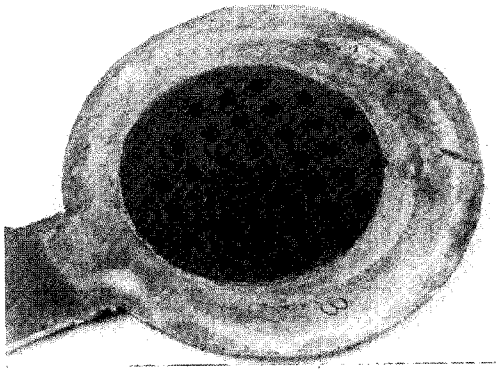

Fig. 3. Particulate deposit pattern of (A-3) fouling plate.

실험동안 일정하게 유지하기 위하여 2" 파이프의 외벽에 전기히터를 감았다. 이러한 전기히터의 용량은 약 3~5 kW 정도이며, 전열선의 보호를 위하여 세라믹 보호관을 사용하였다. 그리고 전기히터를 설치한 2" 파이프에 두께 50 mm의 세라믹 단열재를 사용하여 단열하였다.

그리고 본 연구에서 파울링측정 다공판을 설계하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 다공판 구멍의 직경을 4 mm, 그리고 다공판 구멍 중심간의 거리를 8 mm로 하였으며, 구멍의 배열을 4각 배열로 하였다.

파울링 측정실험을 위하여 먼저 원하는 위치의 2" 플랜지 사이에 오염다공판을 설치하였다. 그 후에 송풍기를 가동하고 배가스 유량조절 밸브를 닫혔던 상태에서 약간씩 배가스가 유입되도록 밸브의 개도를 조절한다. 그리고 온도조절계를 사용하여 전기히터에 보내주는 전력량을 조절하여 자동적으로 각 위치에서의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 시간이 경과하면서 오염다공판 위치에서의 온도가 일정 온도에 도달하면, 2" 배관에서의 배가스의 유속이 약 2.0 Nm/sec가 되도록 유량조절밸브를 조절하여 파울링 측정실험을 수행한다. 일정한 시간이 경과한 후에는 전기히터와 송풍기의 작동을 중단하고, 유량조절밸브를 잠가서 공기가 배관내를 통하여 반대쪽으로 유입되는 것을 막는다. 그 후에 오염다공판이 설치된 위치에서의 온도가 냉각된 후 플랜지를 풀어서 오염다공판을 분리한다. 그리고 이러한 실험동안의 온도와 압력의 측정자료를 컴퓨터에 저장한다.

4. 소각 배가스 파울링측정 실험결과

오염다공판을 사용한 파울링 측정실험을 11회 수행하였으며, 파울링실험이 종료된 후에 오염다공판의 분진의 부착형태의 사진을 촬영하였다. 그리고 오염다공판 시편의 실험전과 실험후의 무게를 측정하여 실험시간동안 오염다공판에 부착된 분진의 무게를 계산하였다. 분진의 부착율은 부착분진의 무게를 실험시간으로 나누어 계산하였다. 여기서 A시편과 B시편의 주요 차이점은 실험시기가 달라서 소각 슬러지의 성분의 차이로 볼 수 있다.

또한 별도로 오염다공판에서의 공기의 통과유속을 약 2 Nm/s로 유지한 경우의 상온에서의 오염다공판의 압력

Table 3. Pressure drop and deposition rate of each specimen.

Specimen no.	Time (min)	Specimen temperature (°C)	Specimen distance (m)	Pressure drop (mmAq)	Deposition rate (g/hr)
A-3	20	860-870	3.0	-	10.41
A-4	32	720-640	3.0	-	3.9
A-2	60	750	3.0	-	2.808
B-1	120	750	3.0	4.9	0.745
B-2	60	750-850	3.0	4.9	0.88
B-3	60	850	3.0	4.9	0.26
B-4	120	750	3.0	4.4	1.325
B-5	120	900	3.0	6.8	1.015
B-6	120	650	3.0	4.5	0.34
B-7	120	850	4.5	-	0.515
B-8	120	850	1.5	4.1	2.14

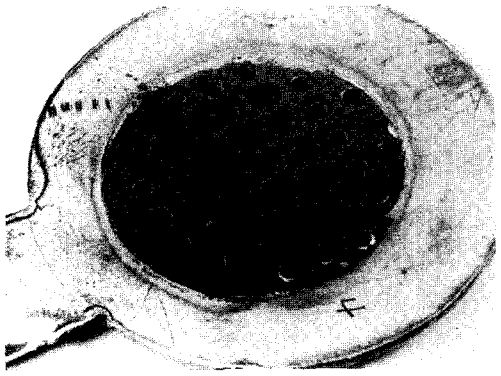

Fig. 4. Particulate deposit pattern of (A-4) fouling plate.

손실을 측정할 수 있는 실험장치를 제작하였다. 그리고 파울링 측정실험 후 분진이 부착된 상태 그대로의 오염다공판을 압력손실 측정장치에 장착하여 동일한 조건에서 분진이 부착된 상태의 오염다공판 시편 B의 상온에서의 압력손실을 측정하였다. 그리고 이러한 각 시편의 실험조건과, 압력손실 그리고 분진부착율의 실험결과를 요약하여 Table 3에 나타내었다. 그리고 파울링 측정실험후의 시편(A-3)와 시편(A-4)의 2가지의 오염다공판에의 분진의 부착형태를 촬영하였으며, 이러한 2가지의 시편 사진을 Fig. 3와 Fig. 4에 나타내었다.

5. 오염다공판의 분진부착형태 분석

A시편의 오염실험 결과를 보면, 실험시간은 대략 20~60분 정도이며, 이러한 3가지 A시편의 실험조건의 주요한 차이점은 시편에서의 배가스 온도로 시편(A-4)와 시편(A-3)에서의 배가스의 평균온도는 각각 680℃와 870℃이다. Fig. 4의 시편(A-4)의 사진에서 보면, 분진이 전체적으로 부착되나 4 mm 구멍의 유로를 막는 현상은 나타나지 않았다. 오히려 전면 구멍 주위에 약간의 입자 충돌과 탈착에 의한 배가스의 유로의 형태가 형성되어 있다. 이것은 전면에 전체적으로 입자가 부착되나, 구멍 주위에서는 비교적 입경이 큰 입자가 기존에 부착된 입자와 충돌하여 부착된 입자를 탈착시켜 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 부착된 입자는 대개 10 μm이하의 미세 분진이며, 전기집진기에 포집된 분진은 10~ 50 μm까지 입경분포가 비교적 광범위하다. 따라서 10 μm 이하의 미세분진은 오염다공판에 부착되나, 이보다 큰 분진입자는 부착되지 않고 오히려 부착분진과 충돌하여 부착된 분진을 탈착시키는 형태를 갖는 것으로 보인다.

그러나 Fig. 3의 시편(A-3)의 경우를 보면, 배가스의 온도가 약 870℃ 정도로 높아서, 분진 자체의 부착력이 강화되는 것으로 볼 수 있다. 이 경우, 시편(A-4)의 경우와 달리 입자충돌에 의한 부착입자의 탈착 현상이 거의 없다. 그리고 부착분진의 점착력이 더 강하여 직경 4 mm의 구멍의 주위를 일부 막고 있는 것으로 나타났다. 따라서 시편(A-4)의 경우는 구멍 막힘에 의한 통풍저항 증가는 없는 것으로 보이나, 시편(A-3)의 경우, 직경 4 mm의 유로가 급격하게 축소되어 통풍저항이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

시편 B의 경우, 분진의 부착 형태가 2가지로 나타나고 있다. 즉, 전반적인 다공판 전면에 일정하게 부착된 분진 형태와 그리고 4 mm 구멍의 입구주위에 집중적으로 부착된 분진 형태로 나눌 수 있다.

즉, 다공판 전면에서는 가스유속이 줄어들기 때문에 비교적 점착성이 적은 입자도 부착될 가능성이 증대된다. 이것은 입경이 큰 입자가 다공판 전면에 충돌하여 점착성이 약한 다공판 표면에 부착된 분진을 탈착시킬 수 있는 가능성이 줄어들기 때문이다. 그리고 다공판 전면에서는 가스의 유선(stream line)의 굴절각도가 완만하여 미세한 입자들은 가스와 함께 가스의 유선을 따라 흘러가기 때문에 비교적 점착성이 약한 입경이 큰 분진입자들이 다공판 전면판에 도달할 가능성이 증가하게 된다.

그리고 다공판 구멍의 입구에서는 다공판 구멍을 통과하는 가스의 유속이 빨라지며, 또한 가스의 흐름의 굴절각도가 커진다. 따라서 다공판 구멍의 입구주위에서는 주로 점착성이 크고, 미세한 입자의 부착 가능성이 증대된다[5].

시편(B-5)의 경우, 배가스의 온도가 900℃이며, 다른 B시편들에 비하여 다공판 구멍의 유로의 막힘 현상이 뚜렷하게 나타난다. 이것은 역시 온도가 높아지면 분진의 부착성이 증가하며, 유로의 막힘 속도가 빨라지게 된다. 이 경우 역시 다공판 전면에 부착된 분진과 구멍 주위에 부착된 분진의 2가지로 구분할 수 있다.

A시편과 B시편의 실험결과를 비교하면, 다공판의 부착분진 자체가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. A시편의 경우, 부착분진의 점착성이 더욱 크게 나타나며, 750℃ 이상에서 급격히 유로가 막히는 현상이 나타났다. B시편의 경우, 분진의 점착성이 비교적 적고, 약 900℃ 이상의 경우, 유로의 막힘 현상이 나타난다.

A시편과 B시편의 오염다공판을 이용한 오염실험에서 보면, 다공판의 전면에 부착되는 분진과 다공판의 구멍 입구부분에 집중적으로 축적되는 분진으로 나눌 수 있다. 다공판 전면에 부착되는 분진은 대개 점착성이 약한 입경이 큰 분진이 부착되며, 구멍입구에 부착되는 분진은 비교적 점착성이 강한 미세한 분진이 부착될 가능성이 높다. 그리고 소각로에 투입되는 슬러지내의 분진 특성에 따라서 다공판 전면에 부착되는 분진의 부착량

은 매우 크게 변화하나, 다공판 입구에 부착되는 점착성의 미세분진의 부착량은 이에 상관없이 비교적 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서, 다공판 전면에 부착되는 분진의 점착성이 약하여, 이러한 분진의 축적이 다공판의 구멍을 막을 가능성은 매우 적다.

그러나, 다공판의 구멍의 입구 주위에 집중적으로 부착되어 축적되는 분진은 점착성이 비교적 강하여, 여기에 충돌하는 비교적 입경이 큰 입자에 의하여 탈착될 가능성이 적다고 판단된다. 그리고 구멍의 입구주위에 집중적으로 분진 입자가 부착되므로 구멍의 입구쪽으로 분진입자의 부착영역이 성장하며, 서서히 구멍의 유로를 막을 가능성이 있다.

6. 오염다공판 부착분진의 분석결과

오염다공판위에 부착된 분진의 시료를 채취하여 분진의 SEM 사진을 촬영하였으며, Fig. 5에 시편(A-3)의 부착분진의 현미경 사진을 나타내었으며 Table 4에 EDAX 성분분석 결과를 나타내었다. 부착분진을 보면, 산화철 입자에 염종류의 미세입자가 붙어있는 것을 알 수 있으며, 이러한 부착분진의 주성분은 역시 Fe 성분인 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 시편(B-5)의 파울링 실험시의 오염다공판 전면에의 부착분진과 구멍주위의 부착분진 그리고 전기집진기에서의 채취분진의 입경분포를 동시에 비교하여 나타내었다. 이러한 시편(B-5)의 입경분포를 소각로의 공기예열기 입구에 부착된 분진시료와 당시의 전기집진기

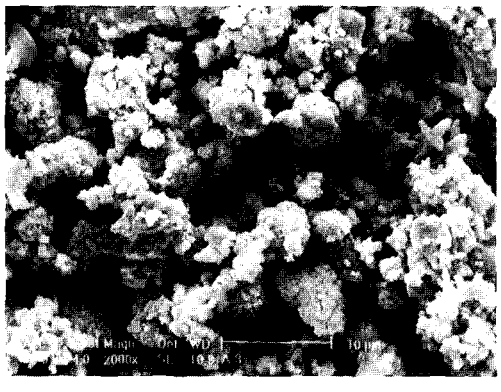

Fig. 5. Photograph of deposit on (A-3) fouling plate.

Table 4. Composition of deposit on (A-3) fouling plate.

Composition	Na	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe
Content (wt%)	4.09	4.44	0.85	5.00	0.85	1.65	0.46	82.66

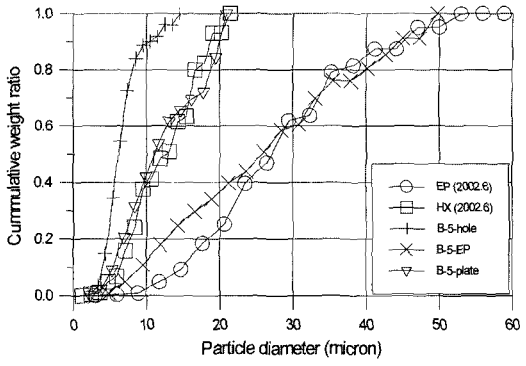

Fig. 6. Comparison of particulate size on fouling plate, air preheater and EP.

에서 채취한 분진의 입경분포를 서로 비교하여 나타내었다.

그리고 시편(B-5)의 파울링 실험에서의 채취분진의 입도분포를 비교하여 보면, 오염다공판의 구멍 주위에 부착된 분진은 약 5~12 μm 정도로 다른 경우에 비하여 매우 미세한 분진이 집중적으로 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 시편(B-5)의 오염다공판의 전면에 부착된 분진은 대략 5~20 μm 정도이며, 이 경우 전기집진기에서 채취한 분진의 크기는 약 10~50 μm으로 오염다공판 전면에 부착된 분진의 크기보다 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 대체적으로 오염다공판에는 대개 미세한 분진이 부착되며, 특히 오염다공판의 구멍주위에는 더욱 미세한 분진들이 집중적으로 부착되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 보면, 공기예열기에서 채취한 분진입도분포는 시편(B-5)의 전면판에 부착된 분진의 크기와 비슷하게 나타나며, 시편(B-5)의 구멍주위의 분진의 입도크기는 이보다 작게 나타났다. 그러나, 실제로 소각로의 공기예열기에서 채취한 분진은 주로 전열관의 구멍 주위에 집중적으로 부착되는 현상이 나타나고 있으며, 따라서 소각로의 공기예열기의 부착분진은 공기예열기의 전면에 부착된 것이 아니고, 오히려 전열관 입구의 주위에 부착된 분진을 채취한 것으로 볼 수 있다. 이러한 이유로 볼 때, 소각로 공기예열기의 부착분진의 입도분포는 시편(B-5)의 전면에 부착된 분진과 비교하는 것보다 시편(B-5)의 구멍주위의 분진의 입도분포와 비교하는 것이 합리적이다.

이러한 가정을 할 때, 공기예열기의 분진의 입도분포와 오염다공판의 구멍주위의 분진의 입도분포가 서로 다른 이유는 주로 오염다공판의 구멍이 약 4 mm이며 공기예열기의 전열관경은 3"(약 83 mm 정도)이므로, 이러한 전열관의 직경의 차이에 의하여 구멍주위에 집중적으로 부착되는 분진의 크기가 서로 다르게 나타난다고 볼 수 있다. 3" 전열관의 경우 배가스의 유로가 오염다

공판에 비하여 비교적 완만하므로, 미세분진이 3" 전열관의 입구에 부착될 가능성은 오염다공판에 비하여 줄어들게 된다. 따라서 공기예열기의 3" 전열관 입구에서의 분진부착율은 오염다공판에 비하여 낮으나, 3" 전열관 입구의 부착분진의 평균입경은 오염다공판 구멍주위의 부착분진의 평균입경보다 크게 된다고 볼 수 있다. 실제로 이러한 부착분진의 입도분포를 분석한 결과, 3" 전열관 부착분진의 평균입경은 12.6 μm 그리고 시편(B-5)의 오염다공판 구멍주위의 부착분진의 평균입경은 6.18 μm인 것으로 나타났다.

7. 오염다공판의 분진부착율

슬러지 소각로의 공기예열기 입구 또는 오염다공판의 분진 부착은 분진입자의 주성분인 산화철(Fe_2O_3)입자의 표면에 부착된 점착성 염성분의 점착력에 의하여 결정된다고 볼 수 있다. 소각로의 분진의 성분은 주로 산화철을 포함한 중금속류, SiO_2와 Al_2O_3과 같은 비가연성 물질, 그리고 Na와 Ca 등을 함유한 salt 등으로 대략적으로 구분할 수 있다. 이중에 점착성을 나타낼 수 있는 성분은 주로 Na와 Ca를 함유한 저융점의 다양한 염(salt) 성분인 것으로 볼 수 있다. 이러한 오염다공판에 부착된 분진의 Na와 Ca의 함량은 EDAX 분석을 통하여 측정하였다.

ESDU는 석탄연소 보일러에서의 파울링 정도를 예측하는 파울링지수(fouling index)로서 연소재내의 Na_2O의 중량비를 사용하였다[6]. 그리고 Na_2O의 함량이 2% 이상인 경우, 대류형 열교환기에서의 파울링이 발생한다고 보고하였다. 본 연구의 경우에서의 모든 측정결과에서 Na의 함량이 모두 2% 이상인 것으로 나타났다.

따라서 이러한 염의 함량을 나타내는 Na의 함량이 바로 분진의 점착성의 강도에 영향을 미친다고 가정하여 분진부착율과 이러한 Na의 함량의 관계를 고찰하였다. 여기서는 비교적 소각로의 연소조건이 일정하였던 그리고 오염다공판을 이용한 실험이 많이 수행되었던 B시리즈 시편의 오염실험 결과를 주로 대상으로 하여 고찰하였다.

Fig. 7에는 B시편의 분진부착율의 Na의 함량에 따른 변화를 나타내었다. 이러한 경우, 분진내의 Na의 함량이 증가할수록 분진의 부착율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향으로부터 분진내의 염(salt)의 함량이 증가하면, 분진의 표면에 점착성 물질의 부착질량이 증가하여 분진의 점착성이 증가하며, 따라서 오염다공판이나 소각로의 경우 공기예열기의 입구에서의 분진의 부착확율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에 A시편과 B시편의 분진부착율의 온도에 따른 변화를 나타내었다. 이 경우, A시편의 분진부착율은 B시편의 분진부착율에 비하여 상당히 크게 나타난다. 이것은 소각물질과 소각로의 운전조건에 따라 발생 분진의 종류가 다르고, 또한 오염측정시간이 A시편의 경우 짧기 때문이다. 따라서 A시편과 B시편의 분진부착율을 직접 비교하는 것은 쉽지 않다.

그러나, Fig. 8에서 A시편과 B시편의 경우를 분리하여 분석하면, A시편과 B시편의 경우 모두 분진부착율은 배가스 즉 오염다공판 시편의 온도에 따라 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이것은 역시 산화철 분진의 표면에 존재하는 여러 가지 다양한 염(salt)의 성분이 온

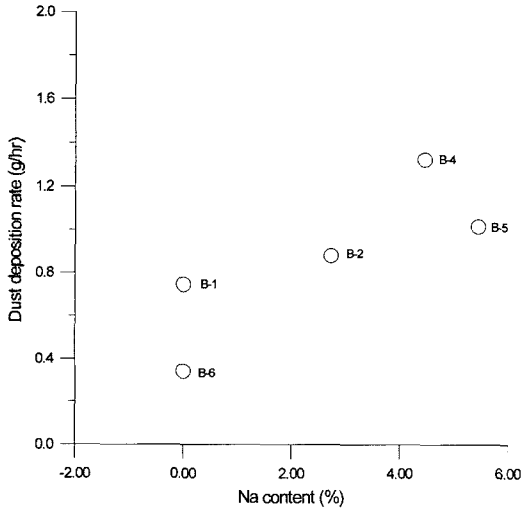

Fig. 7. Variation of deposition rate with Na content of B specimens.

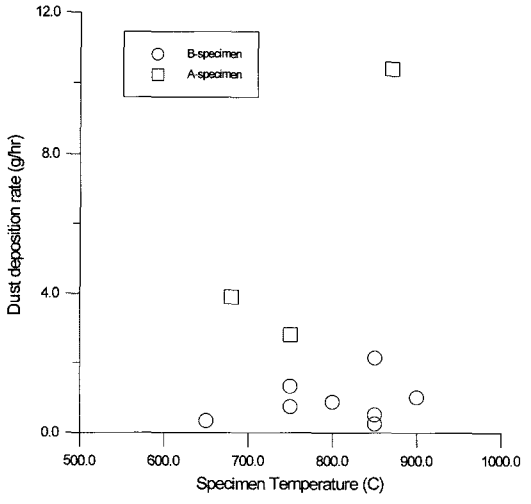

Fig. 8. Variation of deposition rate with temperature.

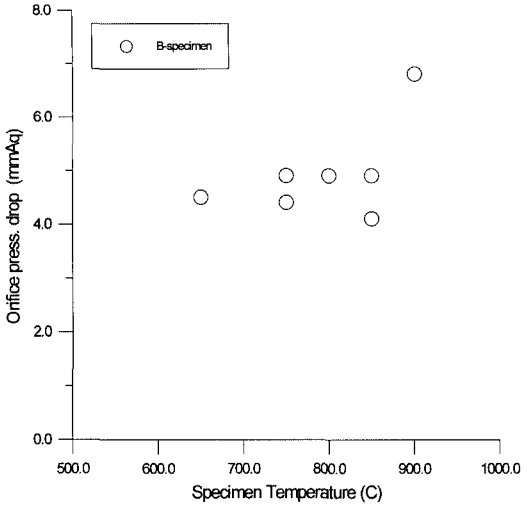

Fig. 9. Variation of pressure drop of fouling plate with specimen temperature.

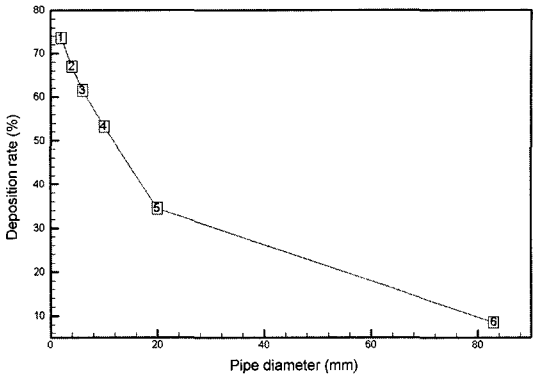

Fig. 10. Variation of particle deposition efficiency with pipe diameter.

도가 증가하면서 각각의 염(salt)의 용융점에 근접하여 점착성이 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 9에 B시편의 오염다공판 실험후의 분진이 부착된 다공판을 사용하여 상온상태에서 2" 배관 내의 공기의 유속을 약 2 m/s로 유지한 경우에 측정한 오염다공판에서의 압력손실의 시편온도에 따른 변화를 나타내었다.

따라서 이러한 상온의 압력손실의 측정실험은 각 오염다공판에서의 구멍에서의 분진의 부착으로 인한 유로막힘 현상에 의한 최종의 유로저항의 시편별 차이를 측정하기 위한 것이다. Fig. 9에서 보면, B시편의 분진부착율은 온도에 따라 대략적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 어느 온도 이하에서는 뚜렷한 경향을 파악하기 어려운 것으로 볼 수 있다. 이것은 Fig. 9에서 시편온도가 900°C인 경우의 1개의 시편의 경우 이외에는 실험온도 범위에서 분진부착율에 큰 차이가 나타나지 않기 때문이다. 이러한 경향은 산화철 입자의 표면에 부착된 점착성의 분진의 점착력은 그러한 점착성 성분의 용융점에서 어느 정도 냉각된 온도이하에서는 뚜렷하게 감소하는 것으로 생각할 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 분진부착율의 온도에 따른 변화 곡선으로부터 분진의 부착율이 갑자기 증가하는 특정 온도를 결정할 수 있으며, 이러한 온도는 오염다공판이나 소각로의 공기예열기의 입구에서의 분진의 부착 여부를 결정하는 중요한 인자가 될 수 있다. Fig. 9로부터 이러한 경계온도는 850~900°C 사이에 존재하는 것을 유추할 수 있으며, 이러한 염의 대표적인 성분으로 용융온도가 884°C인 Na_2SO_4가 있다. 그러나, 이러한 경계온도는 소각물질에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 각각의 소각물질에 대한 분진부착에 대한 경계점에서의 온도를 파악할 필요가 있다고 생각된다.

8. 열교환기 입구에서의 입자부착율 전산해석

소각로 공기예열기의 배가스 유입구의 형태와 다공판의 형태는 서로 유사한 것으로 판단된다. 따라서 이러한 형태를 단순화하여 하나의 전열관과 여기에 유입되는 배가스의 유로를 연결하여 전산유체해석을 수행하였다. 전산유체해석을 위하여 FLUENT를 사용하였으며, 다공판의 구멍의 직경을 2, 4, 6, 10, 20 그리고 83 mm로 가정하였다. 그리고 배가스내의 분진입자의 직경은 7, 13 그리고 18 μm로 가정하여 계산하였다[7].

Fig. 10에 분진입경이 13 μm인 경우의 다공판 구멍 크기에 따른 분진입자의 포집율의 변화를 나타내었다. 이러한 계산 결과로부터 다공판 구경이 증가할수록 분진입자의 포집율은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 다공판의 구경이 동일한 경우, 분진입자의 포집율은 분진입경에 따라 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

9. 결 론

슬러지 소각로의 공기예열기에서의 분진부착의 원인을 파악하기 위하여, 2" 배관을 통하여 배가스를 유입하고, 배가스의 통로에 오염다공판을 사용하여 단시간에 소각로 배가스의 오염특성을 측정하는 데 성공하였다. 이러한 오염다공판을 이용한 오염측정실험을 통하여, 소각물질과 운전방법, 그리고 2차 연소실 출구의 배가스 온도 및 체류시간의 영향을 고찰하였다. 실험 결과, 오염특성은 소각로의 운전상태와 배가스의 온도의 영향을 받으며, 주로 배가스의 온도를 어느 정도 낮추면, 오염현

상은 크게 감소하는 것으로 나타났으나, 이러한 경계온도는 소각조건에 따라 약간씩 변화는 것으로 나타났다.

그리고 열교환기의 입구에서의 분진 입자의 유동현상에 대한 전산유체 해석을 수행하였으며, 이러한 해석 결과로서 오염다공판에서의 분진입자의 집진효율은 전열관 직경의 크기가 작은 경우 더 높다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 분진 크기의 증가에 따라 집진효율도 함께 높아지는 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 슬러지 소각로 공기예열기 입구에서의 파울링 특성의 오염다공판을 사용한 배가스측 열교환기 파울링 측정 및 제어기술을 개발하므로서, 슬러지 소각로의 공기예열기를 비롯한 여러 가지 산업체의 배가스의 파울링 특성의 파악과 이러한 산업체의 고온 배가스로부터의 열회수를 위한 기술 향상에 일부 도움이 될 것으로 판단된다[8].

참고문헌

1. Bott, T.R.: Fouling Notebook Institution of Chemical Engineers (1990).
2. Marner, W.J. and Henslee, S.P.: "Survey of gas-side fouling measuring devices", NTIS No. DE84014595 (1984).
3. Glen, N.F. and Howarth, J.H.: "Modelling refuse incineration fouling", UK national conference on heat transfer, 401-420, Glasgow, W. UK, 14 Sep. (1988).
4. 박상일: "고체순환형 열교환기술 개발", 한국에너지기술연구원 보고서 (2002).
5. Howarth, J. and Bott, T.R.: "High temperature fouling : The nature of deposits", in Fouling Science and Technology, Ed. by Melo, L.F. *et al.*, Publ. by Kluwer Academic Publishers, pp. 679-700 (1988).
6. Bott, T.R.: Fouling of Heat Exchangers, Ed. by Elsevier, Amsterdam (1995).
7. 심석주: "오염다공판 입자포집율의 전산유체해석에 관한 연구", CF-Tech 중간보고서 (2002).
8. 박태준 외: "도시종합에너지시스템 개발에 관한 연구", 한국에너지기술연구소 보고서 No. KIER-986702 (1999).