

제철슬러지 소각로의 공기에열기 입구의 파울링특성 연구

박상일, 김정근

한국에너지기술연구원, 신연소시스템연구센터

A Study on the Entrance Region Fouling of Sludge Incinerator Air-preheater at IronWorks

Sang-Il Park, Jung-Keun Kim

Korea Institute of Energy Research, Advanced combustion system research center

1. 서론

산업체 소각로의 고온 배가스에는 소각물질의 특성에 따라 다양한 성분의 오염물질이 함유되어 있다. 고온 소각배가스의 후처리를 위하여 배가스냉각용 열교환기가 사용되고 있다. 그러나, 소각로 열교환기의 입구와 전열면에 파울링 현상이 발생하여 열교환기의 전열성능이 감소하고 또한 심한 경우, 유로면적이 줄어들어 통풍저항이 증대된다.¹⁾ 종전의 파울링 연구는 주로 전열관 외벽의 입자부착율을 측정한다.^{2,3)} 그러나, 본 연구의 연관식 공기에열기에서의 파울링은 주로 열교환기의 입구에서 발생하였다. 이러한 종류의 파울링의 측정을 위하여 본 연구에서는 오염다공판을 설계하였으며, 실제로 파울링 실험장치를 설치하여 실험을 수행하였다.⁴⁾ 본 연구에서의 파울링 특성분석은 주로 온도와 위치의 영향을 고찰하였으며 이외에 분진입자의 유속, 크기와 성분의 영향도 검토하였다. 그리고 오염다공판의 입자부착율에 대한 이론적인 검증을 위하여 전산유동해석을 수행하였다. 또한 본 연구의 오염다공판을 사용하므로써, 소각물질과 소각운전조건에 따른 열교환기에서의 가스측 파울링의 특성변화를 비교적 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

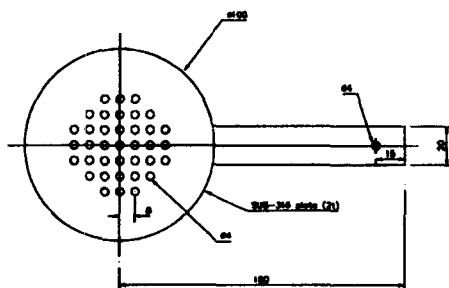
2. 공기에열기 파울링 측정장치

제철슬러지 소각로는 슬러지 혼합 및 공급장치, 로타리 킬른식 연소로, 2차연소실, 공기에열기, stabilizer, 전기집진기, 반건식 세정탑, 백필터, 유인송풍기, 그리고 연돌로 구성되어 있다. 제철소 소각로의 슬러지의 종류는 크게 3가지로 열연슬러지, 화성슬러지 그리고 페스컴이다. 소각로 공기에열기 입구에 발생하는 파울링의 분석을 위하여, 파울링측정용 실험장치를 설치하였다. 소각로의 2차연소실과 공기에열기 사이에 있는 기존의 관찰구에 2"파이프를 연결하였으며, 배가스 유입구로부터 약 1.5m, 3.0m, 그리고 4.5m 떨어진 위치에 2"플랜지를 설치하여 파울링측정용 다공판을 설치할 수 있도록 하였다. 이후에 오리피스 유량계, 유량조절밸브, 유인송풍기와 사이클론을 설치하였으며 공기에열기의 입구에서의 배가스 온도와 오염다공판을 설치하는 2"플랜지의 각 위치 그리고 오리피스 유량계부분에서의 배관내의 배가스의 온도를 측정하였다. 오염다공판 설치위치인 3군데의 2"플랜지에서의 배가스온도를 파울링 실험동안 일정하게 유지하기 위하여 2"파이프의 외벽에 전기히터를 설치하였다.

그리고 본 연구에서 파울링측정 다공판을 설계하였으며, 이를 [그림.1]에 나타내었다. 다공판 구멍의 직경을 4mm, 그리고 다공판 구멍중심간의 거리를 8mm로 하였으며, 구멍의 배열을 4각 배열로 하였다.

파울링 측정실험을 위하여 먼저 원하는 위치의 2"플랜지 사이에 오염다공판을 설치하였다. 그리고 온도조절계를 사용하여 전기히터의 전력량을 조절하여 자동적으로 각 위치에서의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 시간이 경과하면서 오염다공판 위치에서의 온

도가 일정 온도에 도달하면, 유량조절밸브를 조절하여 파울링 측정실험을 수행한다. 일정한 시간이 경과한 후에는 전기히터와 송풍기의 작동을 중단하고, 유량조절밸브를 잠근다. 그 후에 오염다공판이 설치된 위치에서의 온도가 냉각된 후 플랜지를 풀어서 오염다공판을 분리한다. 그리고 실험동안의 온도와 압력의 측정자료를 컴퓨터에 저장한다.



[그림.1] 파울링 측정용 다공판

3. 소각배가스 파울링측정 실험결과

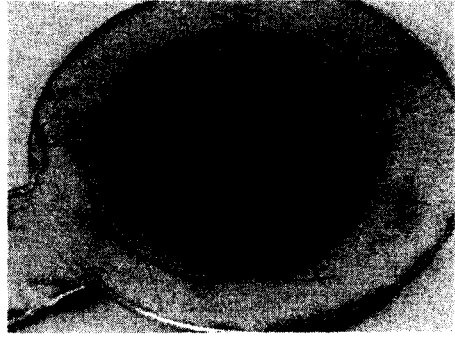
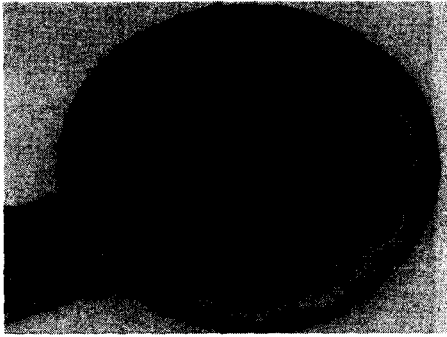
오염다공판을 사용한 파울링 측정실험을 11회 수행하였으며, 파울링실험이 종료된 후에 오염다공판의 분진부착형태의 사진을 촬영하였다. 그리고 오염다공판의 시편의 실험전과 실험후의 무게를 측정하여 실험시간동안 오염다공판에 부착된 분진의 무게를 계산하였다. 분진의 부착율은 부착분진의 무게를 실험시간으로 나누어 계산하였다. 이러한 각 시편의 실험조건과, 압력손실 그리고 분진부착율의 실험결과를 요약하여 [표.1]에 나타내었다. 그리고 파울링 측정실험후의 시편(A-3)와 시편(A-4)의 2가지의 오염다공판에의 분진의 부착형태를 촬영하였으며, 이러한 2가지의 사진을 [그림.2]와 [그림.3]에 나타내었다.

[표.1] 각 시편의 압력손실과 분진부착율

시편번호	실험시간 (분)	시편온도 (°C)	시편거리 (m)	압력손실 (mmAq)	분진부착율 (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-8	120	850	1.5	4.1	2.14
B-7	120	850	4.5	5.7	0.515

4. 오염다공판의 분진부착형태 분석

A시편의 오염실험 결과를 보면, 실험시간은 대략 20분~60분 정도이며, 이러한 3가지 A시편의 실험조건에의 주요한 차이점은 시편에서의 배가스온도로 시편(A-4)와 시편(A-3)에서의 배가스의 평균온도는 각각 680°C와 870°C이다. 시편(A-4)의 사진에서 보면, 분진이 전체적으로 부착되나 4mm 구멍의 유로를 막는 현상은 나타나지 않았다. 오히려 전면 구멍 주위에 약간의 입자층들과 탈착에 의한 배가스의 유로의 형태가 형성되어 있다.



[그림.2] 오염다공판(A-3)의 분진부착형태

[그림.3] 오염다공판(A-4)의 분진부착형태

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 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세분진이며, 전기집진기에 포집된 분진은 $10\text{--}50\mu\text{m}$ 까지 입경분포가 비교적 광범위하다. 따라서 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세분진은 오염다공판에 부착되나, 이보다 큰 분진입자는 부착되지 않고 오히려 부착분진과 충돌하여 부착된 분진을 탈착시키는 형태를 갖는 것으로 보인다.

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

시편B의 경우, 분진의 부착형태가 2가지로 나타나고 있다. 즉, 전반적인 다공판 전면에 일정하게 부착된 분진형태와 그리고 4mm 구멍의 입구주위에 집중적으로 부착된 분진형태로 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 유선(stream line)을 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 유선(stream line)의 굴절각도가 커진다. 따라서 다공판 구멍의 입구주위에서는 주로 점착성이 강한 미세입자의 부착 가능성이 증대된다.

A시편과 B시편의 실험결과를 비교하면, 다공판의 부착분진 자체가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. A시편의 경우, 부착분진의 점착성이 더욱 크게 나타나며, 750°C 이상에서 급격히 유로가 막히는 현상이 나타났다. B시편의 경우, A시편에 비하여 분진의 점착성이 약하고, 약 900°C 이상의 경우에, 유로의 막힘현상이 나타난다.

A시편과 B시편의 오염다공판을 이용한 오염실험에서 보면, 다공판의 전면에 부착되는 분진과 다공판의 구멍 입구부분에 집중적으로 축적되는 분진으로 나눌 수 있다. 그러나, 다공판 구멍의 입구주위에 집중적으로 부착되어 축적되는 분진은 입경이 매우 작으며 또한 점착성이 비교적 강하여 여기에 충돌하는 비교적 입경이 큰 입자에 의하여 탈착될 가능성이 적

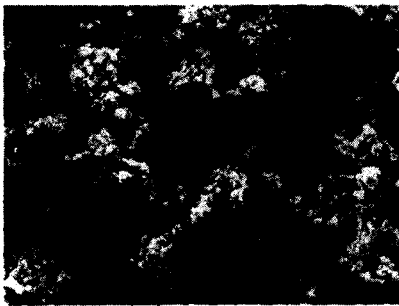
다고 판단된다. 그리고 구멍의 입구주위에 집중적으로 분진입자가 부착되므로 구멍의 입구 쪽으로 분진입자의 부착영역이 성장하며, 서서히 구멍의 유로를 막을 가능성이 있다.

5. 오염다공판 부착분진의 분석결과

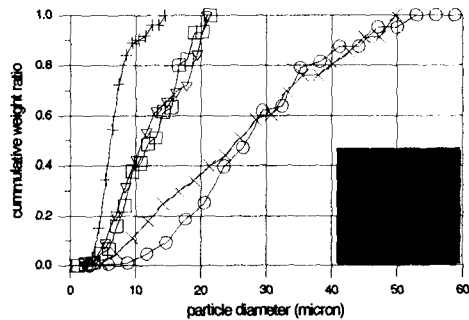
오염다공판위에 부착된 분진의 시료를 채취하여 SEM사진을 촬영하였으며, [그림.4]에 시편(A-3)의 부착된 분진의 현미경 사진을 나타내었다. 그리고 [표.2]에 EDAX를 사용한 분진의 성분분석 결과를 나타내었다.

[그림.5]에 시편(B-5)의 파울링실험시의 오염다공판 전면의 부착분진과 구멍주위의 부착분진 그리고 전기집진기에서의 채취분진의 입경분포를 비교하여 나타내었다. 이러한 시편(B-5)의 입경분포를 다른 실험의 경우에 소각로의 공기에열기 입구에 부착된 분진시료와 당시의 전기집진기에서 채취한 분진의 입경분포와 서로 비교하여 나타내었다.

그리고 시편(B-5)의 파울링실험에서의 채취분진의 입도분포를 비교하여 보면, 오염다공판의 구멍주위에 부착된 분진은 약 5-12 μm 정도로 나타나 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 경우의 전기집진기에 채취한 분진의 크기는 약 10-50 μm 으로 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.



[그림.4] 오염다공판 부착분진의 사진



[그림.5] 분진입경분포 비교

[표.2] 오염다공판(A-3) 부착분진의 성분분석 결과

성분	Na	Al	Si	Mo	Ca	Cr	Mn	Fe
함량(wt%)	4.09	4.44	0.85	5.00	0.85	1.65	0.46	82.66

6. 오염다공판의 분진부착율

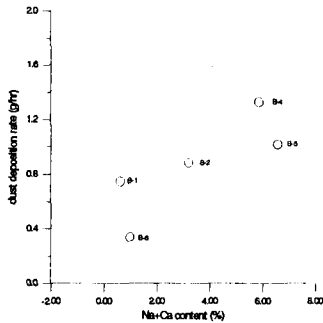
슬러지 소각로의 공기에열기 입구 또는 오염다공판에서의 분진부착은 분진입자의 주성분인 산화철(Fe_2O_3)분진의 표면에 부착된 점착성 성분의 점착력에 의하여 결정된다고 볼 수 있다. 소각로 분진의 성분은 주로 산화철을 포함한 금속류, SiO_2 와 Al_2O_3 와 같은 비가연성 물질, 그리고 Na와 Ca등을 함유한 염(salt)등으로 대략적으로 구분할 수 있다. 이중에 점착성을 나타낼 수 있는 성분은 주로 Na와 Ca를 함유한 저융점의 다양한 염(salt)성분인 것으로 볼 수 있다. 이러한 오염다공판에 부착된 분진의 Na와 Ca의 함량은 EDAX분석을 통하여 측정하였다.

따라서 이러한 염의 함량을 나타내는 Na와 Ca의 함량이 바로 분진의 점착성의 강도에 영

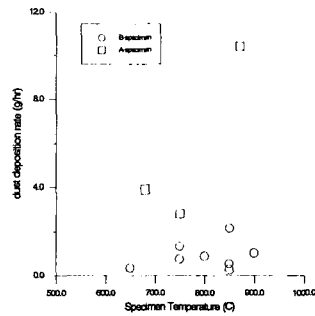
향을 미친다고 가정하여 분진부착율과 이러한 염의 함량의 관계를 고찰하였다. 여기서는 비교적 소각로의 연소조건이 일정하였던 그리고 오염다공판을 이용한 실험이 많이 수행되었던 B시편들의 오염실험 결과를 주로 대상으로하여 고찰하였다.

[그림.6]에는 B시편의 분진부착율의 (Na+Ca)의 함량에 따른 변화를 나타내었다. 이러한 경우, 분진입자의 성분내에 Na와 Ca를 함유한 염(salt)종류의 함량이 증가할수록 분진의 부착율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향으로부터 분진내의 염(salt)의 함량이 증가하여 분진입자의 표면에 점착성 물질의 부착질량이 증가하면 분진입자의 점착성이 증가하며, 따라서 오염다공판이나 소각로의 경우 공기에열기의 입구에서의 분진의 부착확율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

[그림.7]에 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, 특히 오염측정시간이 A시편의 경우 짧기 때문이다. 따라서 A시편과 B시편의 분진부착율을 직접 비교하는 것은 쉽지 않다. 그러나, [그림.7]에서 A시편과 B시편의 경우를 분리하여 분석하면, A시편과 B시편의 경우 모두 분진부착율은 배가스온도에 따라 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이것은 역시 산화철 분진의 표면에 존재하는 Na와 Ca를 포함하는 여러 가지 다양한 염(salt)의 성분이 온도가 증가하면서 각각의 염(salt)의 용융점에 근접하여 점착성이 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.



[그림.6] Na+Ca함량에 따른 분진부착율



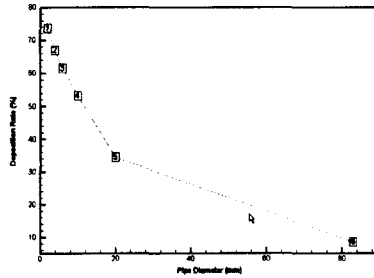
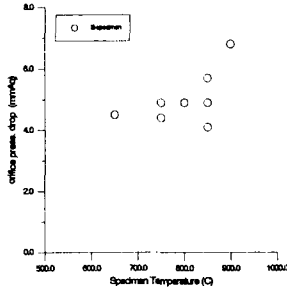
[그림.7]온도에 따른 분진부착율

[그림.8]에 B시편의 오염실험후의 분진이 부착된 다공판의 상온상태에서의 압력손실의 시편온도에 따른 변화를 나타내었다. 이것은 각 오염다공판에서의 분진부착으로 인한 유로저항의 시편별 차이를 측정하기 위한 것이다. B시편의 분진부착율은 온도에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 산화철 입자의 표면에 부착된 점착성 분진의 점착력은 온도에 따라 증가하는 것을 의미한다. 따라서 분진부착율의 온도에 따른 변화특성은 소각로의 공기에열기 입구에서의 분진부착에 대한 중요한 인자가 될 수 있다. 그러나, 이러한 경계온도는 소각물질에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 각각의 소각물질에서 생성되는 분진의 전열면에서의 부착에 대한 경계온도를 파악할 필요가 있다.

7. 열교환기 입구에서의 입자부착을 전산해석

소각로 공기에열기의 배가스 유입구의 형태와 다공판의 형태는 서로 유사한 것으로 판단된다. 따라서 이러한 형태를 단순화하여 하나의 전열관과 여기에 유입되는 배가스의 유로를 연결한 모델에 대하여 전산유체해석을 수행하였다. 전산유체해석을 위하여 FLUENT를

사용하였으며, 다공판 구멍의 직경을 2, 4, 6, 10, 20와 83mm로 가정하였다. 그리고 배가스 내의 분진입자의 직경은 7, 13와 18 μm 으로 가정하여 계산하였다.⁵⁾ [그림.9]에 분진입경이 13 μm 인 경우의 전열관 직경에 따른 분진입자의 포집율의 변화를 나타내었다. 이러한 계산 결과로부터 전열관경이 증가할수록 분진입자의 포집율은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 전열관경이 동일한 경우, 분진입자의 포집율은 분진입경에 따라 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.



[그림.8] 온도에 따른 다공판 압력손실

[그림.9] 전열관경에 따른 분진포집율

8. 결론

슬러지 소각로의 공기에열기에서의 분진부착의 원인을 파악하기 위하여, 2"배관을 통하여 배가스를 유입하고, 배가스의 통로에 오염다공판을 설치하여 단시간에 소각로 배가스의 오염특성을 측정하였다. 이러한 오염다공판을 이용한 오염측정실험을 통하여, 소각물질과 운전방법, 그리고 2차연소실 출구의 배가스 온도 및 체류시간의 영향을 고찰하였다. 실험 결과, 오염특성은 소각로의 운전조건과 배가스 온도의 영향을 받으며, 배가스 온도를 낮추면, 오염현상은 감소하는 것으로 나타났으나, 이러한 경계온도는 소각조건에 따라 변화하는 것으로 나타났다.

그리고 열교환기의 입구에서의 분진입자의 유동현상에 대한 전산유체해석을 수행하였으며, 이러한 해석결과로서 오염다공판에서의 분진입자의 집진효율은 전열관직경의 크기가 작은 경우 더 높으며, 분진크기의 증가에 따라 집진효율도 함께 높아지는 것으로 나타났다.

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, pp.401-420, Glasgo, W. UK, 14 Sep. 1988.
4. 박상일: "고체순환형 열교환기술 개발", 한국에너지기술연구원 보고서, 2002. 11.
5. 심석주: "오염다공판 입자포집율의 전산유체해석에 관한 연구", CF-Tech 주간보고서, 2002. 10.