

# 다이옥신 저감을 위한 소각로 설계/건설/운영 방안

최 상민  
한국과학기술원

## 1. 배경

최근 국내 대형 소각장에서 다이옥신류 배출량에 대한 조사 결과가 공개되었다. 조사가 이루어진 11개 소의 소각장 중에서 한군데를 제외한 나머지 10개의 소각장에서 선진국 규제치인 0.1 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>을 초과한 것으로 발표되어 커다란 사회 문제로 거론되고 있다. 소각장에서의 다이옥신류 배출은 전세계적으로 관심의 대상이 되어 왔으며 이를 해결하기 위한 노력도 광범위하게 진행되고 있다. 본 고에서는 발표된 문헌을 중심으로 다이옥신류 저감을 위한 소각로

설계 및 운전 방안에 대한 최근까지 진전된 결과를 소개한다.

## 2. 다이옥신류 배출 저감을 위한 소각로 설계/건설/운영 방안

흔히 소각로라고 불리는 폐기물 소각시스템은 폐기물 전처리부, 연소실, 폐열 회수 보일러, 그리고 공해물질 정화시설로 구성되어 있다. 소각로에서 다이옥신류의 배출을 저감시키려면 이들 구성요소 각각을 적절하게 설계하고 운전하여야만 한다. 그런 배경에서

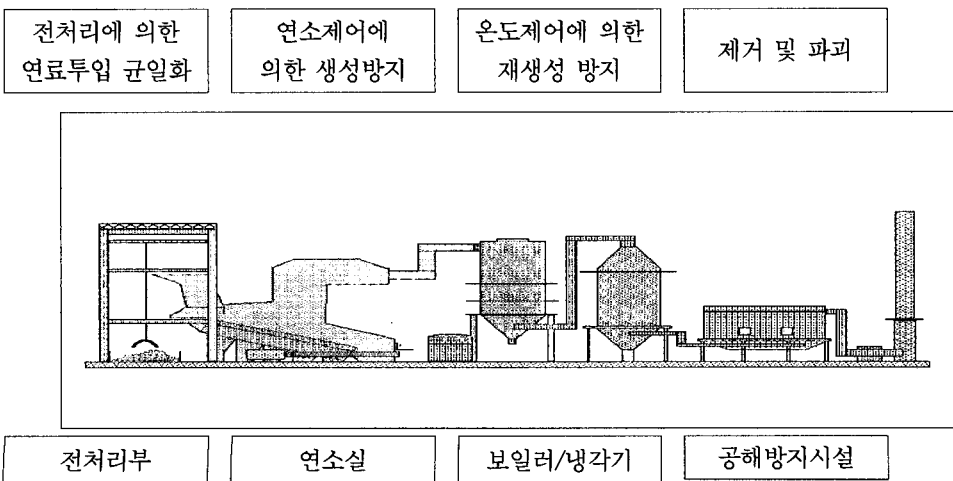


그림 1 소각 시스템의 개요 및 저공해 운전방안 개요

다이옥신 저감방안을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 전처리부 - 연료투입 균일화, 및 문제요소의 사전분리
2. 연소실 - 연소에 의한 생성방지
3. 연소실 후류 및 가스처리부 - 온도제어등에 의한 재생성 방지
4. 배가스 정화시설 - 제거 및 파괴 설비

상기 방안들은 장치를 설계하고 건설하는 과정에서 뿐 아니라, 운영관리 시에도 필수적으로 고려해야 하는 것으로서 종합적이고 체계적인 접근이 이루어져야만 성과를 볼 수 있다.

다이옥신이 소각과정에서 발생할 수 있는 길은 연소 과정에서 생성되거나 연소실 후류의 배가스 정화설비에서 재생성되는 것으로 알려져 있다. 따라서 다이옥신을 저감시키려면 이들 생성을 억제하고 필요시 제거 및 파괴를 위한 설비를 동원하여야 할 것이다. 연소실에서 생성되는 다이옥신류는 연소실내부에서 정상적인 연소(충분한 온도, 체제시간 및 혼합)가 이루어지도록 하여 발생량을 줄일 수 있다. 그러나 소각 연소실을 나와 보일러 및 배가스 정화시설을 지나는 과정에서 다이옥신류가 재생성되기에 적절한 조건이 갖추어질 수 있다. 이렇게 발생된 다이옥신은 후처리 설비에서 석회석 또는 활성탄등에 의해 채집되거나 또는 촉매에 의한 반응으로 파괴되어 진다. 이를 보여 주는 것이 그림 2의 소각 시스템 설비 위치별 다이옥신 농도 측정된 자료이다. 보일러 출구에서 많은 다이옥신이 생성되는 것으로 나타났다.

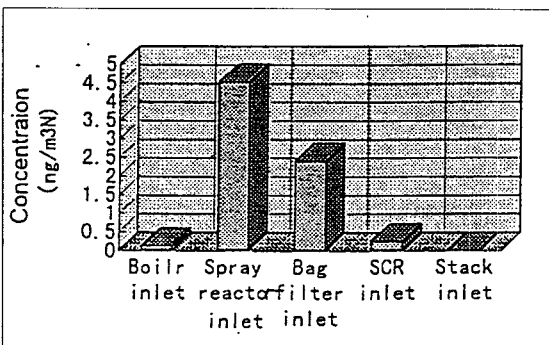


그림 2 소각로 부위별 다이옥신농도

따라서 다이옥신 저감을 위하여는 이들 생성,파괴의 전과정을 파악하고 관리하는 것이 절대적으로 중요하게 된다.

## 2.1 폐기를 전처리부

폐기물의 큰 특성중 하나는 성상이 매우 불균일하다는 점이다. 수집 장소 및 수집 시간에 따라 큰 차이를 보이고 있으며 계절에 따라서도 커다란 변동이 있다. 도착하는 폐기물은 이렇게 불균일할 지라도 연속적인 처리를 하는 소각로에서 불균일한 연료를 투입하면 소각시스템의 정상적인 운전애 방해가 되어 시스템 제어를 어렵게 하고 그 결과로 불완전 연소물질의 배출을 증가시킬 수 있다. 소각로에 투입하기 전에 쓰레기를 충분히 파쇄하고 혼합하여 성상을 균일하게 만드는 것이 소각로 정상운전의 시작이다. 이를 위해선 충분한 크기의 쓰레기 저장소와 크레인의 활동성이 필요하다. 연료 투입은 크레인 운전자의 손 끝에 달려있는 사항으로써 운전상황을 항상 점검하여 상황에 맞는 적절한 연료 조성 및 투입이 중요하다.

## 2.2 연소실

연소실은 고온의 연소 분위기에서 쓰레기를 분해시켜 무해한 가스 및 재료 변환시키는 역할을 하는데 연소가 불완전하면 가스 및 재에 유해한 물질들을 배출하게 된다. 이 물질들은 폐열회수 보일러 및 배가스 정화시설에서 다이옥신류를 생성시키는 전구물질(precursors)역할을 하게 된다. 따라서 연소실에서 안정적인 연소를 이루는 것이 다이옥신류 저감에 무엇보다도 중요하다. 안정적인 소각로내 연소조건으로 충분히 높은 연소온도 (850°C 이상), 반응을 위한 충분한 가스 체류시간 (2 sec 이상), 그리고 여유있는 산소농도 (6% 이상)가 필요하다. 이들 운전조건값은 그러나 절대적인 근거에서 도출된 것이 아니고 유사한 설비에서 얻은 운전경험을 바탕으로 채택한 임의의 조건이다. 그럼에도 불구하고 우리나라를 포함한

여러 나라에서 법규로 까지 채택하는 기준이 되었다. 따라서 이 운전조건을 채택한 배경에 대한 이해가 조건의 이행보다 훨씬 중요하다는 것을 알아야 한다. 소각로의 연소실 온도는 운전조작자들이 가장 중요하게 관찰하고 있는 조건이다. 설정된 온도를 유지하기 위해 여러 가지 운전 변수 들을 조작하게 된다. 온도 관리에서 중요한 것은 운전실에 지시되고 있는 온도가 어떤 의미를 갖고 있는가 알아야 한다는 것이다. 대부분의 경우 연소실 내부온도를 직접 측정하고 있지 않기 때문에 센서의 위치와 그에 따른 지시계와의 차이를 고려한 보정계수를 계산한 근거등에 대한 이해가 필수적이다. 또한 법규로 제시된 온도유지 조건이 이렇게 허술하게 처리되고 있다는 것을 운전자뿐 아니라 관리당국의 관련자도 숙지하고 있어야 한다.

그림 3은 연소로내 체재시간과 다이옥신 배출량의 관계를 보여주고 있다. 체재시간이 짧을수록 다이옥신 배출량이 증가함을 보여준다. 연소로내 체재 시간은 설계과정에서 연소실을 충분히 크게 설계하라는 의미를 갖고 있다. 운전시에는 온도 및 유량을 관찰하여 이 조건이 달성되고 있는가 확인하라는 요구사항으로 받아 들여야 한다. 한편 이 체재시간을 측정하는 적절한 방법이 아직 확립되어 있지 않다는 것도 지적할 사항이다. 또한 설계자뿐 아니라 운전자도 체재시간에 대한 이해와 관리에 참여하여야 한다. 산소농도는 바람직한 연소분위기를 위해서 필수적인 요소임으로 충분한 양의 공급이 있어야 한다. 그러나 공급된 공기도 연소로내부에서 불안전연소의 생성물(products of incomplete combustion)을 포함하고 있는 연소가스와 혼합되지 않으면 소용이 없다. 이러한 배경에서 대형소각로에서는 빠른 속도(50 m/s 이상)의 이차 공기노즐을 이용하여 혼합을 증진시키도록 설계되어 있다. 최근의 국내 소각장 운전상황을 조사한 결과 대부분의 소각장에서 2차 공기를 연소로 출구에서의 온도조절에만 쓰거나 아예 사용을 하지 않고 있는데, 혼합에 효과적으로 2차공기를 주입하여 연소실내에서의 공해물질 파괴를 최대화하는 것이 다이옥신류 저감을 위한 기본 방안이다.

또한 이차공기노즐은 설계 유량을 공급할 때만 연소로 내부로 침투하여 혼합의 목표를 달성 할 수 있으므로 부분유량을 공급할 때에는 혼합의 효과를 염두에 두고 조건 설정을 하여야 한다. 이상은 산소농도를 일정량이상 유지하는 것만으로는 부족하며 공급하는 방법에도 주의를 기울여야만 한다는 의미이다.

한편, 최근 연구결과들은 산소농도가 과도하게 증가하게 되면 오히려 다이옥신류 배출이 증가하는 결과를 보여주고 있어(그림 4) 연소실에서 적당한 산소농도의 유지가 바람직하다. 또한, 산소농도는 연소가스가 정화설비를 통과하면서 계속적인 운전용 공기의 투입에 의해 증가하게 된다. 예로써, SDA의 노즐이 2류체식인 경우 분무를 위해 공기가 투입되고 백필터의 청소를 위해 쓰이는 압축공기, 설비 사이의 틈새에서 주위 공기로부터 새어 들어 도는 것, 굴뚝을 빠져나가기 전에 재 가열시 버너에서의 연소용 공기 등등이 있다. 따라서 굴뚝에서만 산소농도를 측정하게 되면 이와 같은 공기의 유입에 의해 연소실에서 보다 높은 수치를 얻게 된다. 이에 보일러 출구에서의 산소농도의 측정이 연소상황 판단 및 연소제어에 쓰여야 할 것이다. 이러한 산소유입에 의한 공해물질의 회석을 방지하기 위해서 다이옥신류등을 분석할 때 다음과 같은 산소농도 보정식을 이용한다.

$$C = \frac{21-O_2}{21} \times C_s$$

C = 다이옥신류 환산농도 (ng/Nm<sup>3</sup> at O<sub>2</sub>=12%)

O<sub>2</sub>= 잔존 산소농도 (%)

C<sub>s</sub>= 배출가스중의 다이옥신류 농도 (ng/Nm<sup>3</sup>)

일산화탄소는 연료의 연소에서 최종 연소 생성물질(이산화탄소, 수증기등)로 전환하기 위한 중간단계물질로써 연소현상이 안정적이지 못하면 많이 발생하게 된다. 일산화탄소는 최근의 연구들로부터 다이옥신류의 생성과는 직접적인 관계는 없는 것으로 밝혀졌지만, 연소실의 연소성능의 척도로서 연속적인 측정으로 연소제어에 자료로 쓰인다.

정리하면, 연소실에서의 최적의 운전을 위해서는 다음과 같은 사항을 만족시켜야 한다.

1. 충분한 온도 (850°C)
2. 반응을 위한 충분한 가스 체재시간 (2차연소공기의 최종 혼합후 2 sec. 이상)
3. 여유있는 산소농도 (6 %)

이와 같이 안정적인 운전을 위해서는 다음과 같은 설계 및 운전 방안들이 필요하다.

1. 연소용 공기의 적절한 분배
2. 2차 연소용 공기의 효과적 주입에 의한 혼합의 극대화
3. 연속적인 온도, 산소 및 일산화탄소 측정값을 통한 연소 제어

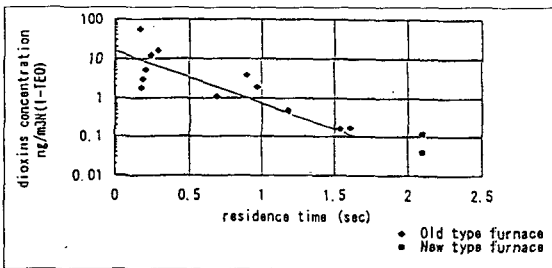


그림 3 연소로내 체재시간과 다이옥신 발생량의 관계

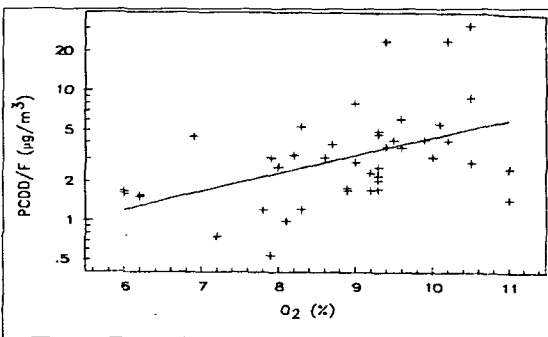


그림 4 산소농도와 다이옥신 발생량의 관계

### 2.3 폐열회수 보일러

소각로용 보일러는 폐열회수 및 연소가스의 냉각을 위한 장치이다. 보일러 내부에서 연소가스는 대략 5

초 내외동안 체류하게 되는데 그림 5와 같이 복사실, 대류 관군 그리고 질탄기를 거치면서 점진적으로 온도가 강해진다. 이 과정중에 배가스는 온도범위 250°C-400°C 범위를 분진이 높은 분위기에서 통과하게 되는데 이 구간에서 다이옥신이 재생성될 가능성이 높다. 따라서 이 구간에서의 연소가스의 체류시간을 최소화 하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 보일러 출구의 온도를 낮추어 주는 것, 즉 연소가스의 냉각 곡선의 기울기를 급하게 하는 것이 한가지 방안이 될 것이다. 그림 6은 보일러 출구의 온도에 따른 다이옥신류 배출량의 실험결과를 보여준다. 온도가 높아짐에 따라 다이옥신류의 발생량이 급격히 증가하는 것을 보여준다.

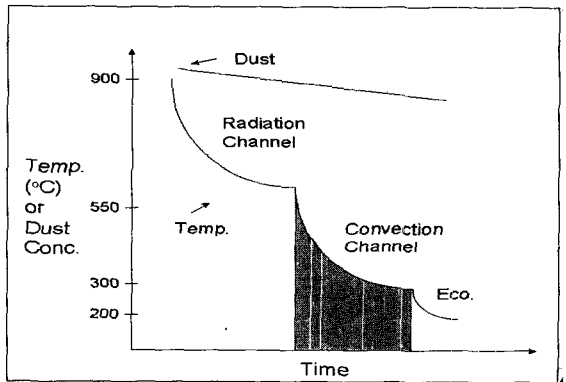


그림 5 폐열회수 보일러에서의 연소가스 온도이력 개념도

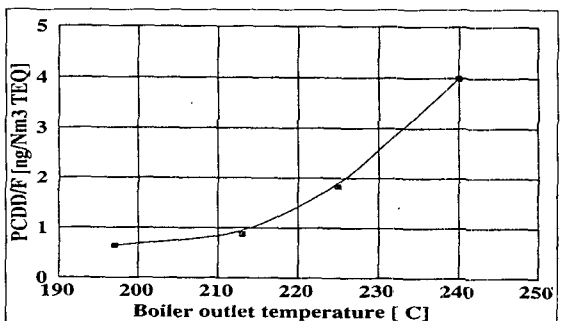


그림 6 보일러 출구 온도와 다이옥신 발생량의 관계

### 2.4 산성가스 세정기

산성가스를 제거하기위한 설비는 크게 습식, 반건식,

그리고 건식으로 나뉘어 진다. 습식에 의한 방식은 HCl과 같은 산성가스 제거에는 효과적이지만 다이옥신류 제거에는 도움을 주지 못하는 것으로 실험연구들은 보고하고 있다. 반건식 및 건식 세정기는 백필터와 함께 다이옥신 제거에 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 이는 분무된 세정 입자뿐 아니라 부유하고 있는 분진도 낮은 온도(200°C 이하)에서 다이옥신을 흡착하는 효과가 있기 때문이다. 그림 7은 석회 슬러리를 분무하는 SDA의 당량비 및 운전 온도에 따른 HCl의 제거효율을 보여주고 있다. 온도가 낮을수록 그리고 당량비가 높을수록 좋은 저감효율을 보이고 있다. 온도에 매우 민감한 장치이므로 온도를 낮게 제어하는 것이 약품의 양을 줄이므로 경제적이다.

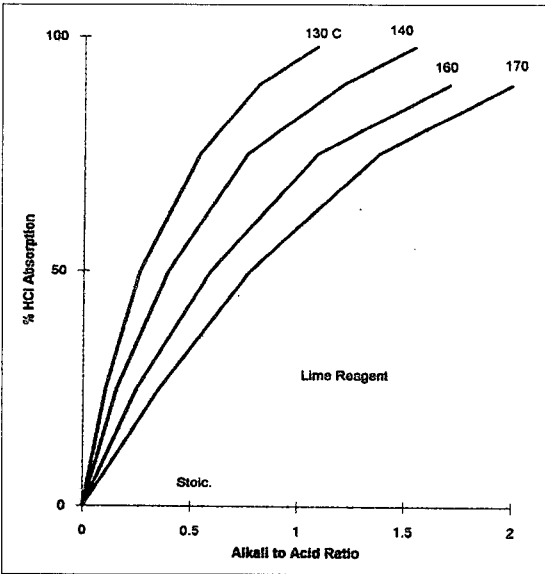


그림 7 SDA의 당량비 및 온도에 따른 HCl 제거 효율.

### 2.5 집진기

전기 집진기는 다이옥신 재생성에 좋은 온도 범위(300°C)에서 운전되어 왔기 때문에 다이옥신과 관련하여 가장 커다란 관심이 집중된 장치이다. 흔히 De Novo합성이라고 불리는 이 생성반응은 온도에 민감하여 온도를 낮추게 되면 다이옥신 재생성을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 그림 8은 집진기 운전 온도와 다이옥신류 발생량의 관계를 보여준다. 대략 250

°C이하에서는 다이옥신류가 재생성되지 않으며 온도가 낮을수록 다이옥신 저감효율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 전기집진기의 집진성능은 온도가 낮아질 때 현저하게 떨어지므로 그 상반되는 효과를 적절하게 조정하여야만 한다.

백필터(Bag Filter 여과포) 및 최근 알려진 세라믹 필터는 흡착에 필요한 흡착막을 필터 표면에 형성하는 운전 특성으로 활성탄을 이용한 흡착제거에 유리하다. 활성탄의 효과적인 흡착을 위해서는 활성탄과 배가스의 접촉시간이 길어야 하며(0.5 sec.) 온도가 낮을수록 흡착효율이 증가한다. 그러나 백필터에서의 온도를 100°C에 가까이 하면 필터 청소를 위한 압축 공기 분사시 냉각효과에 의해 필터에 물이 응축하여 손상이 갈 수 있으므로 130°C-150°C사이에서 운전되는 것이 바람직하다.

### 2.6 활성탄

활성탄(Activated Carbon)은 소각로에서 배출되는 독성유기화합물이나 중금속등의 물질을 흡착에 의해 제거하는 효능이 있다. 공해물질을 흡착하기 위해서는 배가스가 통과하는 영역에 고르게 분포한 흡착막을 형성해야 하는데 이는 백필터 또는 세라믹 필터 등이 적절하다. ESP의 경우 이와 같은 흡착막을 형성하지 못하여 흡착성능이 떨어지는 것으로 분석되고 있다. 활성탄의 분무량은 경험을 바탕으로 98% 이상의 제거효율을 위해서 낮은 온도에서 (150°C이하) 대략 50 mg/Nm<sup>3</sup>정도가 쓰인다.

한편 활성탄을 이용하지 않고 온도제어를 통해 배가스내 분진의 흡착성질을 이용, 다이옥신을 제거할 수 있음을 여러 실험결과들이 보여주었다. 백필터 운전 온도를 130°C이하로 저하시키게 되면 백필터 자체로도 99%에 가까운 저감효율을 보여주었다. 활성탄의 흡착을 위한 표면적은 대략 600 m<sup>2</sup>/g인데, 소각로에서 발생하는 비산재는 1-10 m<sup>2</sup>/g 밖에 되지 않으나 그 양이 많고 운전 온도가 충분히 낮으며 백에서의 유속이 작아 필터에 붙어있는 분진과의 접촉시간이 길어지면 다이옥신류 제거에 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 활성탄의 이용과 더불어 온도 제어로써

다이옥신 제거효율을 증가시키는 것이 경제적인 방안이다.

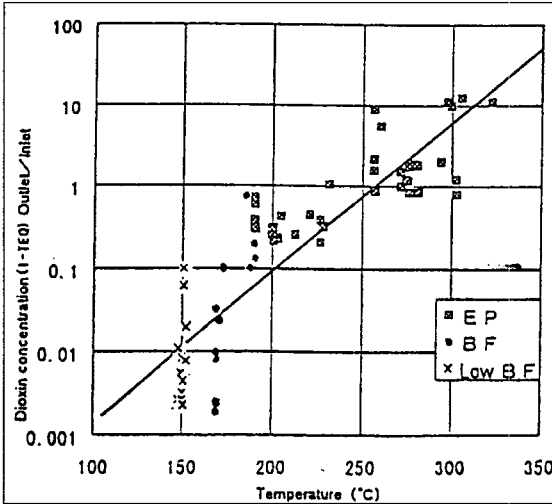


그림 8 집진기 운전온도와 다이옥신 발생량의 관계

### 2.7 촉매 환원 장치 (SCR)

선택적 촉매 환원 장치(Selective Catalytic Converter, SCR)은 원래 NOx 저감용으로 사용되어왔으나 최근 들어 다이옥신류 및 유기화합물 분해에도 효과가 있는 것으로 알려져 소각로 배가스 정화설비로 홍보되고 있다. 최근의 실험결과들은 촉매환원 장치(SCR)의 다이옥신류 분해 효율이 통과가스가 촉매와 접촉하는 시간 즉 유량에 대한 촉매의 크기에 좌우된다고 밝히고 있다. 효율은 면적속도

$$AV(\text{Area Velocity}) = \frac{\text{Flow Rate}}{\text{Surface Area of SCR}}$$

이 작을수록 증가하며 그림 9는 SCR의 AV에 따른 다이옥신 분해 효율을 보여준다. AV가 5 m/hr인 경우 대략 90% 정도의 효율을 보이고 있다. SCR은 운전온도의 영향을 받는데 온도가 300°C일 때 활발한 작용을 보인다. 온도가 낮으면 활성도가 떨어지는 경향을 보이며 암모니아 분무에 의한 촉매 표면에 이물질 부착이 우려되므로 온도범위 250°C-350°C가 바람직한 운전온도이다. 이러한 온도를 맞추어주기 위해서 집진기 및 세정기를 거친 연소가스는 열교환

및 버너에 의한 가열이 필요하다.

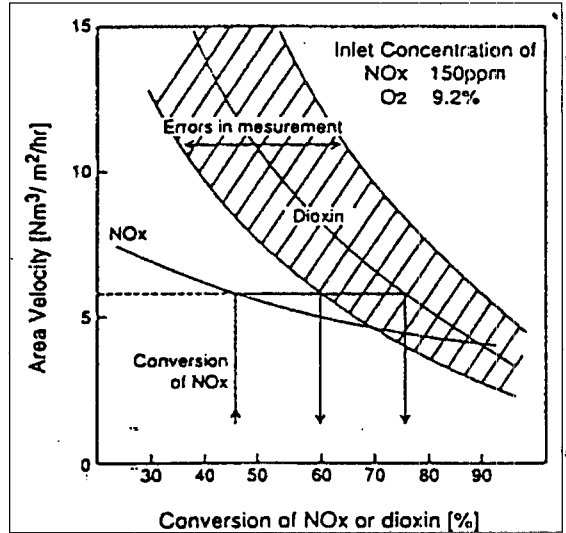


그림 9 SCR의 다이옥신 및 NOx 제거 성능곡선

SCR의 설치 및 운전은 다이옥신의 제거효율 및 그에 따른 시설 및 운전 유지비를 평가하는 경제성 판단을 철저히 할 필요가 있다. 우선 촉매자체의 가격이 고가이므로 초기설치 및 일정기간경과후 개체에 막대한 시설비가 투입된다. 또한 작동온도를 유지시키기 위하여 투입되는 연료 비용이 심각한 수준이다. 그러한 한편 이 장치의 성능도 공금자의 자료에 근거할 수밖에 없으며, 성능보장이 병행된다 하여도 완벽한 운전을 기대하기 어렵다는 구조적인 어려움과 문제점을 갖고 있다.

### 3. 결론

소각로에서 다이옥신류의 배출을 최소화하기 위해서는 연소실에서의 최적 연소, 보일러 및 집진설비에서의 재생성 최소화, 배가스 정화설비에서의 저감효율 최대화 등의 저감인자들의 복합적인 적용이 필요하다. 아무리 좋은 다이옥신 제거설비를 개발하였다 하여도 전단에서 많은 량의 다이옥신을 생성하도록 운전한다면 0.1 ng-TEQ/Nm³ 기준치를 만족시키는

것은 어려워진다. 무엇보다도 다이옥신 재생성의 온도범위, 250°C-400°C의 영역을 피하거나 체제시간을 최소화하는 것이 필요하다. 그리고 집진 설비(백필터)를 낮은 온도(150°C이하)에서 운전함으로써 분진 및 활성탄에 의한 흡착효율을 증가시켜야 한다. SCR과 같은 다이옥신 저감능력이 알려진 장치의 개발 및 적용도 좋은 결과를 가져 올 것이다.

그림 10는 국내 두 대형 소각장의 소각설비내에서 연소가스의 시간에 따른 온도이력을 보여준다. A 소각로는 배가스 정화장치로 SDA, 백필터, 그리고 SCR을 갖고 있고, B소각로는 ESP, 습식 세정기, 그리고 SCR을 갖고 있다. A 소각로는 유럽의 다이옥신 대기 배출제한치인 0.1 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>을 만족시킨 것이며 B 소각로는 5 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 이상으로 측정된 소각로이다. B 소각로가 다이옥신 배출량이 많은 이유중 하나는 온도제어에 있다. 보일러 출구에서 온도가 270°C이며 전기집진기는 260°C에서 운전되는, 다이옥신 생성율이 높은 운전을 하고 있었다. 한편 A 소각로는 보일러 출구의 연소가스온도가 206°C로 다이옥신생성 온도범위 밖이다. 그리고 백필터의 운전온도가 143°C로 다이옥신 흡착에 좋은 조건이다. 이와같은 운전온도의 차이 및 적용 시스템의 성능 차이가 다이옥신 저감능수에 영향을 미치므로 충분한 설계검토후 적절한 시스템을 선정하여 건설에 임해야 하며 건설후에는 적절한 제어방식을 선정, 운전조건 제어에 차질이 없어야 규제치 만족에 다가갈 수 있다.

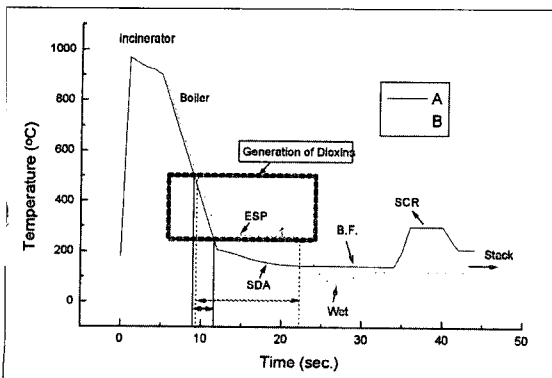


그림 10 국내 소각장의 연소가스 온도이력

## 참고문헌

Bruce, K.R., Beach, L.O., Gullett, B.K., "The Role of Gas-Phase Cl<sub>2</sub> in The Formation of PCDD/PCDF During Waste Combustion," Waste Management, Vol.11 pp.97-102 (1991)

Hiraoka, M., Takeda, N., Kasakura, T., Imoto, Y., Tsuboi, H., Iwasaki, T., "Catalytic Destruction of PCDDs/PCFFs," Chemosphere, Vol.23, Nos.8-10, pp.1445-1452 (1991)

Ok, G., Hanai, Y., Katou, T., "Dechlorination Techniques of PCDDs and PCDFs In Fly Ash From Municipal Refuse Incineration Plants - Continuous Dechlorination Techniques by Screw Conveyer (1) ," Chemosphere, Vol.23, Nos.8-10, pp.1287-1294(1991)

Hiraoka, M., Fujii, T., Kashiwabara, K., Leyama, K., Kondo, M., "The Removal Efficiency of Dioxin in Flue Gas Of MSW Incinerator - Comparison of A Fabric Filter With an Electrostatic Precipitator," Chemosphere, Vol.23, Nos.8-10, pp.1439-1444 (1991)

Addink, R., Drijver, D.J., Olie, K., "Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins/ Dibenzofurans in The Carbon/Fly Ash System," Chemosphere, Vol.23 Nos.8-10 pp.1205-1211 (1991)

Lasagni, M., Moro, G., Pieta, D., Stieglitz, L., "Kinetic Aspects from The Laboratory Simulation of The Formation and Destruction of PCDD/PCDF in Fly Ash From Municipal Waste Incinerators," Chemosphere, Vol.23 Nos.8-10 pp.1245-1253 (1991)

Bozzelli, J.W., Wu, Y., Ritter, E.R., "Thermodynamic Insights on Pthways to Formaion of Chlorinated Dioxins And Dibenzofurans," Chemosphere Vol.23 Nos.8-10 pp.1221-1232 (1991)

Lenoir, D., Kaune, A., Hutzingler, O., Mutzenich, G., Horch, K., "Influence of operating parameters and fuel type on PCDD/F emissions from a fluidized bed incinerator," Chemosphere, Vol. 23, Nos. 8-10, pp. 1491-1500. (1991)

- Magenmaier, H., Horch, K., Fahlenkamp, H., Schetter, G., "Destruction of PCDD and PCDF in refuse incineration plants by primary and secondary measures," *Chemosphere*, Vol. 23, Nos. 8-10, pp.1429-1437. (1991)
- Hinton, W.S., Lane, A.M., "Effect of Zinc, Copper, And Sodium on Formation of Polychlorinated Dioxins On MSW Incinerator Fly Ash," *Chemosphere*, Vol.25 No.6 pp.811-819 (1992)
- Bra, T.G., Kilgroe, J.D., "Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans: Removal From Flue Gas And Distribution in Ash/Residue of A Refuse-Derived Fuel Combustor," *Chemosphere*, Vol.25, Nos.7-10, pp.1381-1386 (1992)
- Wevers, M.D.F., R. Ryman, T., "Reduction of Dioxin Emission From a Municipal Waste 1," *Chemosphere*, Vol.25, Nos.7-10, pp.1435-1439 (1992)
- Gullett, B.K., Bruce, K.R., Beach, L.O., Drago, A.M., "Mechanistic Steps in the Production of PCDD and PCDF During Waste Combustion," *Chemosphere*, Vol.25 Nos.7-10 pp.1387-1392. (1992)
- Lindbauer, R.L., Wurst, F., Frey T., "Combustion Dioxin Supression In Municipal Solid Waste Incineration With Sulphur Additives," *Chemosphere*, Vol.25, Nos.7-10, pp.1409-1414. (1992)
- Kaimann, B., Kluwe, M., Kocker, H.M., Lorber, K.E., "Correlation Between Co- And Pic-Emissions," *Chemosphere*, vol.25 Nos.7-10 pp.1403-1407 (1992)
- Dickson, L.C., Lenoir, D., Hutzinger, O., "Quantitative Comparison of de Novo and Precursor Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins under Simulated Municipal Solid Waste Incinerator Postcombustion Conditions," *Environ. Sci. Technol.*, vol.26, pp.1822-1828 (1992)
- Kilgroe, J.D., Lanier, W.S., Alten, T.R.V., "Development of good combustion practice for municipal waste combustors," *Proceedings of the 15th National Waste Processing Conference*, Detroit, Michigan, May 17-20, 1992, ASME, pp. 145-156.
- Born, G.P., Milder, P., Louw, R., "Fly Ash Mediated Reactions of Phenol and Monochlorophenols: Oxychlorination, Deep Oxidation, and Condensation," *Environ. Sci. Technol.*, Vol.27 pp.1849-1863 (1993)
- Fangmark, I., Bavel, B., Marklund, S., Stromberg, B., Berge, N., Rappe, C., "Influence of combustion Parameters on the Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins, Dibenzofurans, Benzenes, and Biphenyls and Polyaromatic Hydrocarbons in a Pilot Incinerator," *Environ. Sci. Technol.*, Vol.27 pp.1602-1610 (1993)
- 장정국, 이제근, 이기호, 전해수, "도시 폐기물 소각공정에서 다이옥신류 저감방안에 관한 연구," *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, Vol. 1 No pp.630-4 (1994)
- Luijk, R., Akkerman, D.M., Slot, P., Olie, K., Kapteijn, "Mechanism of Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in the Catalyzed Combustion of Carbon," *Environ. Sci. Technol.*, Vol.28 pp.312-321 (1994)
- Gullett, B.K., Lemieux, P.M., "Role of Combustion and Sorbent Parameters in Prevention of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxin and Polychlorinated Dibenzofuran Formation during waste Combustion," *Environ. Sci. Technol.*, Vol.28 pp.107-118 (1994)
- Goldfarb, A.S., Vogel, G.A., Lundquist, D.E., "Technical Aspects of Site Remediation: Carbon Adsorption," *Waste Management*, Vol.14, No.2 pp.145-152 (1994)
- Oku, A., Tomari, K., Kamada, T., Yamada, E., Miyata, H., Aozasa, O., "Destruction of PCDDs and PCDFs, A Convenient Method Using Alkali-Metal Hydroxide in 1,3-Dimethyl-2-Imidazolidinone(DMI)," *Chemosphere*, Vol.31, No.8, pp. 3873-3878, (1995)
- Addink, R., Govers, H.A.J., Olie, K., "Desorption Behaviour of Polychlorinated Dibenzo-P-Dioxins / Dibenzofurans on a Packed Fly Ash Bed," *Chemosphere*, Vol.31, No.8, pp.3945-3950 (1995)
- Hosoya, K., Kimata, K., Fukunishi, K., Tanaka, N., "Photodecomposition of 1,2,3,4- and 2,3,7,8-



- Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) In Water-Alcohol Media On a Solid Support," *Chemosphere*, Vol.31, No.7, pp.3687-3698 (1995)
- Hall, B., Schager, P., Weesmaa, J., "The Homogeneous Gas Phase Reaction Of Mercury With Oxygen, And The Corresponding Heterogeneous Reactions In The Presence of Activated Carbon And Fly Ash," *Chemosphere*, Vol.30, No.4, pp.611-627 (1995)
- Huang, H., Buekens, A., "On The Mechanisms of Dioxin Formation In Combustion Process," *Chemosphere*, Vol.31, No.9, pp.4099-4117 (1995)
- Heeb, N.V., Dolezal, I.S., Buhner, T., Mattrel, P., Wolfensberger, M., "Distribution of Halogenated Phenols Including Mixed Brominated And Chlorinated Phenols In Municipal Waste Incineration Flue Gas," *Chemosphere*, Vol.31, No.4, pp.3033-3041. (1995)
- Addink, R., Govers, H.A.J., Olie, K., "Kinetics of Formation of Polychlorinated Dibenzo-P-Dioxins/Dibenzofurans From Carbon On Fly Ash," *Chemosphere*, Vol.31, No.6, pp.3549-3552 (1995)
- Ide, Y., Kashiwabara, K., Okada, S., Mori, T., & Hara, M., "Catalytic Decomposition of Dioxin From MSW Incineration Flue Gas," *Chemosphere*, Vol.32, No.1, pp.189-198 (1996)
- Kashiwabara, K., Kita, T., Murata, T., Fujimoto, H., "The Municipal Solid Waste Incineration Process For Low dioxins Emission," The 7th ISWA International Congress and Exhibition, Oct, 27, 1996, Pacifico Yokohama.
- Chang, N.B., Huang, S., "Chemosmetric Approach for the Verification of Dioxin/Furan Formation Mechanism in Municipal Waste Incinerators," *Chemosphere*, Vol.32, No.1, pp.209-216, (1996)
- Ghorishi, S.B., Altwicker, E.R., "Rapid Formation of Polychlorinated Dioxins/Furans During the Heterogeneous Combustion of 1,2-Dichlorobenzene and 2,4-Dichlorophenol," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp.133-144. (1996)
- Milligan, M.S., Altwicker, E.R., "Chlorophenol Reactions on Fly Ash. 2. Equilibrium Surface Coverage and Global Kinetics," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 30, pp.230-236 (1996)
- Milligan, M.S., Altwicker, E.R., "Chlorophenol Reactions on Fly Ash. 1. Adsorption/Desorption Equilibria and Conversion to Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 30, pp.225-229 (1996)
- Kreisz, S., Hunsinger, H., Vogg, H., "Wet Scrubbers - A Potential PCDD/F Source?," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp.73-78. (1996)
- Ogawa, H., Orita, N., Horaguchi, M., Suzuki, T., Okada, M., Yasuda, S., "Dioxin Reduction By Sulfur Component Addition," *Chemosphere*, Vol.32, No.1, pp.151-157, (1996)
- Yamaguchi, H., Shibuya, E., Kanamaru, Y., Uyama, K., Nishioka, M. and Yamasaki, N., "Hydrothermal Decomposition of PCDDs/PCDFs In MSWI fly Ash," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp. 203-208. (1996)
- Sierhuis, W.M., Vries, C., Born, J.G.P., "PCDD/F emissions related to the operating conditions of the flue gas cleaning system of MWI-Amsterdam," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp. 159-168. (1996)
- Tejima, H., Nakagawa, I., Shinoda, T., Maeda, I., "PCDDs/PCDFs reduction by good combustion technology and fabric filter with/without activated carbon injection," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp. 169-175. (1996)
- Kato, T., Osada, S., Endo, K., Sakai, S., Hiraoka, M., "Design of a small-scale incinerator with low PCDD/PCDF emissions," *Chemosphere*, Vol. 32, No. 1, pp. 145-150. (1996)
- Stieglitz, L., Bautz, H., Roth, W., Zwick, G., "Investigation of Precursor Reactions in the De-Nove-Synthesis of PCDD/PCDF on Fly Ash," *Chemosphere*, Vol.34, Nos.5-7, pp.1083-1090 (1997)
- Cains, P.W., Eduljee, G.H., "Prediction of PCDD and PCDF Emissions From Municipal Solid Waste (MSW) Incinerators," *Chemosphere*, Vol.34, No.1, pp.51-69 (1997)
- Cains, P.W., Mccausland, L.J., Fernandes, A.R., Dyke, P.,

- "Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans Formation in Incineration : Effects of Fly Ash and Carbon Source," *Environ. Sci. Technol.*, Vol.31, pp.776-785 (1997)
- Smolka, A., Schmidt, K., "Gas/Particle Partitioning Before and After Flue Gas Purification By An Activated-Carbon-Filter," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos 5-7, pp.1075-1082 (1997)
- Kreis, S., Hunsinger, H., Vogg, H., "Technical Plastics as PCDD/F Absorbers," *Chemosphere*, Vol.34 Nos. 5-7, pp.1045-1052 (1997)
- Brubaker, Jr., W.W., Ronald, A. Hites "Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans: Gas-Phase Hydroxyl Radical Reactions and Related Atmospheric Removal" *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 31, pp.1805-1810 (1997)
- Akimoto, Y., Nito, Shin'icki, Inouye, Y., "Comparatives study on formations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and related compounds in a fluidized bed solid waste incinerator using long term used sand and fresh san," *Chemosphere*, Vol. 34, No. 4, pp. 791-799. (1997)
- Gullett, B.K., Raghunathan, K., "Observations on the effect of process parameters on dioxin/furan yield in municipal waste and coal systems," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos 5-7, pp. 1027-1032. (1997)
- Thuß, U., Herzschuh, R., Popp, P., Ehrlich, C., Kalkoff, W.D., "PCDD/F in flue gas and in bottom ash of lignite domestic combustion and the role of the salt content of the burned briquettes," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos. 5-7, pp. 1091-1103. (1997)
- Wanke, T., Vehlouw, J., "TMR-MS on-line measurements in the exhaust gas of a municipal solid waste incineration pilot plant (TAMARA)," *Chemosphere*, Vol. 34, No. 2, pp. 345-355. (1997)
- Hunsinger, H., Kresz, S., Vogg, H., "Formation of chlorinated aromatic compounds in the raw gas of waste incineration plants," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos 5-7, pp. 1033-1043. (1997)
- Mohr, K., Nonn, Ch., Jager, J., "Behaviour of PCDD/F under pyrolysis conditions," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos 5-7, pp. 1053-1064. (1997)
- Pandompatom, B., Kumar, Y., Guo, I., Liem, A.J., "Comparison of PCDD and PCDF emissions from hog fuel boilers and hospital waste incinerators," *Chemosphere*, Vol. 34, Nos 5-7, pp. 1065-1073. (1997)
- Marchall, T., "The use of activated carbon for flue gas treatment," The 1st International Symposium on Incineration & Flue Gas Treatment Technologies, Flue Gas Treatment Part, Session 2, Sheffield Univ., 7-8th July, 1997, IChemE.
- Cains, P., "Mechanisms of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans formation in municipal waste incineration," The 1st International Symposium on Incineration & Flue Gas Treatment Technologies, Flue Gas Treatment Part, Session 4, Sheffield Univ., 7-8th July, 1997, IChemE.
- Clark, D.M., Maaskant, O.L., Yistra, W., " A novel approach to the removal of nitrogen Oxides (NOx) from Waste Incinerator and other flue gas streams using the Shell De NOx system," The 1st International Symposium on Incineration & Flue Gas Treatment Technologies, Flue Gas Treatment Part, Session 4, Sheffield Univ., 7-8th July, 1997, IChemE.