

# Aspen plus를 이용한 산업폐기물 소각공정시 발생 오염물질 예측

이주호\*, 정문현\*, 권영현\* 김민철\*\*, 이재정\*\*, 이강우\*\*, 손병현\*

\*한서대학교 환경공학과

\*\* (주)유성 중앙연구소

e-mail:jjuo@nate.com

## Estimation of air pollutants generated in the industrial-waste incinerator using Aspen plus

Ju-Ho Lee\*, Moon-Hun Jung\*, Young-Hyun Kwon\*, Min-Choul Kim\*\*,

Jae-Jeong Lee\*\*, Gang-Woo Lee\*\*, Byung-Hyun Shon\*

\*Dept. of Environmental Engineering, Hanseo University

\*\*YOO SUNG Co. Ltd., R&D Center

### 요 약

최근 화석에너지 고갈 문제와 폐기물의 지속적인 발생량 증가로 인해 폐기물을 이용한 열에너지 회수가 이슈화 되고 있다. 폐기물처리를 통한 에너지 회수 공정 가운데 소각이 가장 많이 이용되고 있으나 소각시 발생하는 대기오염 물질을 처리하기 위한 설계 및 설치비용에 많이 소요 된다. 본 연구에서는 화학공정 모사기인 Aspen plus를 이용해 소각공정 및 배가스 처리 공정모사를 실시하였다. 폐기물 소각 공정으로는 1·2차 연소실과 NO2를 환원하는 SNCR공정, 산성가스(HCl, SO2)를 제거하는 SDA공정, 입자상 물질을 처리 하는 bag filter공정을 모사하였다. 공정모사 결과 실제 산업폐기물 소각로의 처리효율과 일치 하였고 이를 바탕으로 동일한 공정 및 조건하에 소각로에 투입되는 폐기물의 조성비를 달리하여 공정 모사한 결과 오염물질의 배출량을 예측할 수 있었다. 이러한 오염물질 발생량 예측은 소각장의 폐기물 투입이 일정하지 않을 경우 조업 조건의 변경에 도움 뿐만아니라 공정개선 의 효과적일 것으로 판단된다.

### 1. 서론

최근 화석에너지의 비용 증가 및 환경 규제의 강화로 신·재생에너지의 개발 및 보급의 문제가 이슈화됨에 따라 바이오에너지, 풍력 에너지, 폐기물 에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 이 중 폐기물 에너지는 잠재 가치가 가장 크고 경제적으로 타 에너지원에 비해 우위에 있어 현시점에서 가장 유망한 에너지원이라고 평가되고 있다[1,2]. 2007년 우리나라의 생활폐기물 발생량은 2006년에 비해 3.1% 증가하였으며 이 중 지정폐기물은 13.5%로 그 발생량은 점진적으로 증가하는 추세를 보이고 있다[3]. 폐기물 처리 방법 중 매립 처리비용이 계속해서 감소하고 있으며 소각에 의한 처리 비용이 점진적으로 증가하는 추세에 있다. 따라서 효율적인 폐기물 소각과 대기오염물질(SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, CO, HF, dioxin 등) 제거를 위한 공정의 선택이 매우 중요시 되고 있다. 그러나 배가스 처리 공정이 복잡하고 또한 특정 오염물질의 선택성 등

을 고려해야 하므로 최적의 공정을 선택하기란 단순하지 않고 많은 비용 및 시간이 필요하다. 그러므로 이러한 비용 및 시간을 줄이고 공정선택의 위험요소를 제거하기 위해서는 반드시 공정 모사 프로그램이 필요하다.

화학공정을 모사 할 수 있는 software로는 Aspen plus, PRO/II, HYSYS, ChemCAD, 등이 있으며, 이 중 Aspen plus는 1,500개 이상의 순수 성분에 대한 데이터 베이스가 내장 되어 있고, 다양한 열역학 모델과 단위 조작 장치를 모사할 수 있는 모듈이 내장 되어 폐기물 소각처리의 단위 및 복합 공정 모사에 매우 적합하다고 판단된다.[4,5]

본 연구에서는 현재 조업되고 있는 A폐기물 처리업체의 소각로 및 배가스 처리 공정(SNCR, SDA, B/F 등)을 기존에 모사한 결과를 바탕으로 동일한 조업 조건하에 투입되는 폐기물의 조성비에 따른 오염물질의 발생량을 예측하고자한다.

## 2. 공정모사

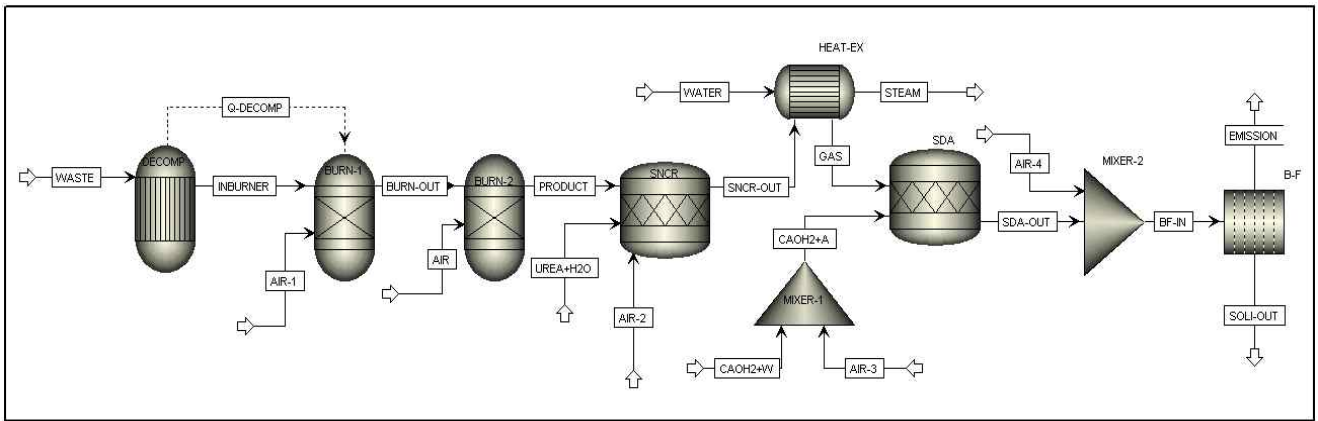
A폐기물 처리 업체 소각로의 처리용량은 1일 95 ton 으로서, 주요한 공정은 연소 부분, 스팀 생산 부분, 유해가스 처리 부분, 입자상 물질 분리 부분으로 구성 되어있으며 [그림1]은 소각장의 주요한 공정을 Aspen plus flowsheet로 나타낸 것이다. 소각로에서 주로 처리 하는 폐기물은 폐합성수지류, 폐합성고무류, 폐합성섬유류, 폐유류, 폐유기용제류, 폐종이/천 등이며 조성은 각각 약 30%, 10%, 26%, 5%, 15%, 10%로 구성되어 있다. 투입되는 폐기물의 각각의 원소분석, 삼성분 분석, 발열량과 평균적인 물리 화학적 조성을 [표 1]에 나타 내었으며 이 값을 이용하여 공정모사를 실시하였다. 또

한 동일한 공정 조건에서 투입 폐기물의 조성비를 달리 하여 동일한 조건에서 투입되는 폐기물의 조성비에 따른 대기 오염물질의 발생량을 공정을 통해 예측하였다. 다음 [표 2]는 투입되는 폐기물의 조성비 변환 값을 나타 내었다. 폐기물 소각 공정에서 필요한 reactor(block)에 대한 설명은 다음 [표 3]과 같다.

### 2.1 연소 부분

#### 2.1.1 연소

BURN-1(RGibbs)반응기는 Gibbs의 자유에너지를 최소화하여 화학적 평형을 이루는 반응기로서 1차공기와 함께 연소가 이루어진다. 그러나 구성 물질의 불균일한 폐기물의 특성상 BURN-1 반응기에서 Gibbs의 자유에



[그림 1] 폐기물 소각 및 배가스 처리 공정 flowsheet

[표 1] 폐기물의 물리·화학적 특성

| Proximate analysis(wt%) |       |        |       |       |        |       |       |       |
|-------------------------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                         | 폐합성수지 | 폐합성고무류 | 폐합성유류 | 폐유류   | 폐유기용제류 | 폐종이/천 | 기타    | 평균    |
| Moisture                | 0.2   | 0.5    | 7.46  | 3.5   | 1.5    | 20    | 83    | 11.86 |
| Volatiles               | 69.43 | 76.77  | 70.57 | 88.44 | 89.14  | 80.23 | 25.60 | 75.02 |
| Fixed carbon            | 10.53 | 14.69  | 12.90 | 11.46 | 10.76  | 9.19  | 7.73  | 10.23 |
| Ash                     | 20.04 | 8.54   | 16.53 | 0.10  | 0.10   | 10.58 | 66.67 | 14.75 |
| LHV(kcal/kg)            | 7,848 | 9,086  | 4,122 | 9,687 | 6,176  | 3,370 | -292  | 5,522 |
| Ultimate analysis(wt%)  |       |        |       |       |        |       |       |       |
| Carbon                  | 66.76 | 77.65  | 45.40 | 85.21 | 63.24  | 43.49 | 10.13 | 58.74 |
| Hydrogen                | 8.60  | 9.97   | 5.75  | 10.98 | 8.19   | 6.78  | 2.07  | 7.73  |
| Nitrogen                | 0.10  | 1.74   | 6.46  | 0.50  | 0.29   | 0.06  | 1.87  | 2.01  |
| Chlorine                | 4.30  | 1.38   | 0.11  | 0.10  | 0.10   | 0.00  | 0.20  | 1.66  |
| Sulphur                 | 0.10  | 0.36   | 1.08  | 2.20  | 0.10   | 0.18  | 0.4   | 0.52  |
| Oxygen                  | 0.10  | 0.36   | 24.67 | 0.90  | 27.97  | 38.91 | 18.67 | 14.59 |
| Ash                     | 20.04 | 8.54   | 16.53 | 0.10  | 0.10   | 10.58 | 66.67 | 14.75 |

[표 2] 공정 모사 투입 폐기물의 조성비(%)

| 구분   | 폐합성수지 | 폐합성고무류 | 폐합성유류 | 폐유류 | 폐유기용제류 | 폐종이/천 | 기타 |
|------|-------|--------|-------|-----|--------|-------|----|
| 모사-1 | 30    | 10     | 24    | 5   | 6      | 15    | 10 |
| 모사-2 | 10    | 10     | 30    | 5   | 20     | 15    | 10 |
| 모사-3 | 5     | 10     | 10    | 40  | 20     | 5     | 10 |
| 모사-4 | 10    | 20     | 10    | 15  | 10     | 30    | 5  |
| 모사-5 | 10    | 30     | 5     | 15  | 10     | 5     | 25 |

[표 3] Aspen block 설명

| Block(name)       | Description  | phenomena                           |
|-------------------|--|-------------------------------------|
| RYield(DECOMP)    | Non-stoichiometrical reactor based on know yield distribution                                  | Combustion                          |
| RGibbs(BURN-1)    | Rigorous reactor and multiphase equilibrium based on Gibbs free energy minimization            | Combustion                          |
| RCSTR(BURN-2)     | Rigorous continuous stirred tank reactor with rate-controlled reaction based on known kinetics | Combustion                          |
| RStoic(SNCR, SDA) | Stoichiometrical reactor based on know fractional conversion                                   | NO, SO <sub>2</sub> , HCl reduction |
| HeaX(HEAT-EX)     | Heat exchanger(boiler)   | Steam generation                    |
| Mixer(MIXER-1,2)  | Use Mixer to combine streams into one stream   | Combine streams                     |
| FabFI(B-F)        | The filter bags work in parallel to separate solid particles from a gas stream                 | Solid separation                    |

[표 4] 소각장 측정값과 모사결과 값의 비교

| 구분 |      | CO(kg/hr) | HCl(kg/hr) | SO <sub>2</sub> (kg/hr) | NO <sub>x</sub> (kg/hr) | steam(m <sup>3</sup> /day) |
|----|------|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 측정 | 최대값  | 2.34      | 0.66       | 3.88                    | 6.84                    | 14                         |
|    | 최소값  | 0.35      | N.D        | 3.17                    | 4.56                    | 10                         |
|    | 평균값  | 1.37      | 0.48       | 3.45                    | 5.67                    | 12.5                       |
| 모사 | 모사-1 | 1.24      | 0.59       | 3.17                    | 2.17                    | 13                         |
|    | 모사-2 | <0.01     | 0.25       | 3.22                    | 1.77                    | -                          |
|    | 모사-3 | <0.01     | 0.15       | 7.10                    | 6.28                    | -                          |
|    | 모사-4 | 0.01      | 0.3        | 4.31                    | 11.58                   | -                          |
|    | 모사-5 | <0.01     | 0.44       | 4.92                    | 6.17                    | -                          |

너지를 직접 계산 할 수 없기 때문에 DECOMP(RYield) 반응기를 통과시킴으로써 폐기물을 구성하는 원소들로 분해되어 Gibbs의 자유에너지를 계산할 수 있고, 분해 시 발생하는 열은 다시 BURN-1 block으로 보내져 1차 주입공기와 연소하게 된다. 이렇게 생성된 물질들은 BURN-2 block에서 2차 공기와 반응하여 CO를 CO<sub>2</sub>로 연소 시킨다.

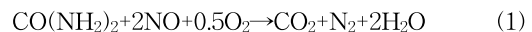
### 2.1.1 NO<sub>x</sub> 제거

SNCR은 촉매를 사용하지 않고 환원제로 NH<sub>3</sub> 또는 urea(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>)를 이용하여 NO<sub>x</sub>를 제어하는 기술로 적절한 난류의 혼합과 약 850~1000℃의 온도 범위에서 NO<sub>x</sub>를 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O 환원하는 공정이다. 반응온도가 최적의 온도 보다 낮을 경우 NO<sub>x</sub>의 제거 효율 감소 및 NH<sub>3</sub> slip이 발생되고 최적온도 보다 높을 경우 NH<sub>3</sub>가 NO로 산화 되어 NO<sub>x</sub>제거 효율 저하 및 환원제 이용률이 감소하게 된다.

NO<sub>x</sub>의 생성 및 제거는 많은 변수 즉, NSR (Normalized Stoichiometric Ratio), temperature window, 공기비, 로의 구조, 노즐, 소각로 형상 등을 고려해야 되지만 본 연구에서는 Soutudeh -Gharebaagh의 연구결과와 기존의 운영데이터를 통해 화공양론 conversion을 이용하였다[5,6,7,8,9,10].

본 모사에서는 40%의 urea용액과 물을 혼합하여 양론적으로 필요한 urea 농도를 계산한 후 반응기에 주입 하였으며 NO<sub>x</sub>의 제거는 RStoic 반응기에서 다음의 화

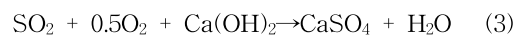
학양론식 (1)을 이용하여 계산하였다.



## 2.2 오염물질 제거

### 2.2.1 산성가스 제거

슬러리 상태의 Ca(OH)<sub>2</sub> 분무에 의해 가스상/액상 및 고상 화학 반응으로 산성가스(SO<sub>2</sub>, HCl 등)가 제거되며 Ca(OH)<sub>2</sub>에 의한 CO<sub>2</sub>, HF의 제거량은 매우 적기 때문에 고려하지 않았으며 RStoic 반응기에서 산성가스의 제거에 대한 화학 반응식은 다음과 같다[10].



### 2.2.1 입자상 물질 제거

일반적으로 SDA는 Ca(OH)<sub>2</sub> 슬러리를 분사함으로써 SO<sub>2</sub>, HCl 제거 시 많은 양의 부산물(CaSO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>)을 발생한다. 이 부산물과 다른 입자상물질 제거하기 위해 bag filter 연계하여 사용한다[4]. Bag filter의 모사에서는 탈진을 위한 최대 압력 강화와 입경분포를 이용하여 모사 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

## 참고문헌

폐기물 소각장의 설계데이터를 이용한 공정모사를한 결과를 바탕으로 동일한 운영 조건하에 투입되는 폐기물의 조성변화에 따른 공정을 모사를 실시하였으며 [표4] 소각장 실제 측정 자료 및 모사 결과 값을 나타내었다.

모사-1은 실제 폐기물의 투입되는 조성비를 적용하여 모사한 데이터로 소각장의 실제 조업에서 발생하는 오염물질의 거의 유사한 값이 나왔으나, NO<sub>x</sub>와 CO의 경우에는 약간의 오차를 보였다. 이는 모사에 사용한 자료와 실제 소각로에 유입되는 산업폐기물의 성상(발열량 등) 및 조업 조건(공기비 등)의 변동에 기인하는 것으로 판단된다. 차후 NO<sub>x</sub>생성 및 제거에 대한 reaction kinetic의 개선을 통해 개선 될 것으로 사료된다.

실제 공정과 동일한 조건에서 폐기물의 조성비를 다르게 하여 공정 모사를 실시한 모사를 살펴보면 우선 모사-3·4·5는 비교적 SO<sub>2</sub>의 발생량이 많을 것을 관찰할 수 있는데 이는 황의 함량이 높은 폐유류나 폐합성유류로 인해 발생한 것을 알 수 있다. 또한 NO<sub>x</sub>의 경우 모사-1보다 많이 발생하는 것을 관찰 할 수 있는데 이는 폐기물 조성비 변화에 따라 발열량이 증가하여 thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 원인이라고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 기존에 폐기물 소각장의 설계운영데이터를 바탕으로 소각 및 후처리 공정 모사를 실시하였다. 이를 바탕으로 투입되는 폐기물의 조성비를 달리하여 동일한 조업 조건에서 오염 물질의 발생량을 예측 모사를 수행했다.

1. 연료중의 황성분 함량이나 염소 성분에 따라 SO<sub>2</sub>, HCl가 다량 발생하는 것을 관찰 수 있었다. 이러한 SO<sub>2</sub>, HCl의 발생량의 예측을 통해 Ca(OH)<sub>2</sub>의 주입 물비나 주입 농도 등을 결정하는데 유용하다고 판단된다.

2. 폐기물 중 질소 함량이나 조성비에 따른 발열량으로 인한 NO<sub>x</sub>의 발생을 예측 하였고 이를 통해 조업시 효율적인 연료 조성비나 환원제의 주입량 및 농도를 결정하는데 효과적이라고 사료된다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 08지역기술혁신B-03)에 의해 수행되었습니다.

- [1] 손병현, 이주호, 정문현, 김민철, 고주현, 박홍석, 이강우, “산업단지에서 배출되는 폐 유기성 슬러지의 열적 특성-제지업 및 음식료업을 중심으로-”, 한국산학기술학회논문지, 9(5), 1359-1367(2008).
- [2] 김민철, 이강우, 이만식, 손병현, “화학제품제조업에서 배출되는 폐 유기성슬러지의 열적 특성” 한국산학기술학회논문지, 9(6), 1745-1753(2008).
- [3] 환경부 “2008 환경백서”.
- [4] 조정호 “Aspen plus를 이용한 화학공정의 모사”, 2001.
- [5] E. Jannelli, M. Minutillo, “Simulation of the flue gas cleaning system of an RDF incineration power plant”, Waste management, 27(2007), 684-690.
- [6] Aspen Plus User Guide, Aspen Technology.
- [7] 신미수, 김혜숙, 장동순, “산업용 보일러의 질소산화물 제어를 위한 SNCR 적용 연구”, 大韓環境工學會誌, 286~292, 2005.
- [8] Soutudeh-Gharebaagh, R., Legros, R., Chaouki, J., Paris, J., “Simulation of circulating fluidized bed reactors using ASPEN PLUS”, Fuel, 327-337(4), 1998.
- [9] 이각로, 엄태인, 채종성, 민동예, 문승현, 현주수 “상용소각로에서 SNCR를 이용한 NO<sub>x</sub> 제거를 위한 수치해석적 연구” 한밭대학교 환경공학과, 한국에너지기술 연구원.
- [10] 박기호, 김병환, 이의신 “반건식 세정법에 의한 소각 배가스처리 실증 플랜트 운전” 大韓廢棄物學會誌, 第22卷, 第7號, 161-171 (2001).