

# SNCR 공정에서 요소수 분무 조건에 관한 수치 해석

정유진\*, 정문헌\*, 박기우\*, 홍성길\*, 정종현\*\*, 손병현\*\*\*  
씨이테크(주) 연구개발센터\*  
대구한의대학교 보건학부\*\*  
한서대학교 환경공학과\*\*\*  
e-mail : bhshon@hanseo.ac.kr

## Numerical Analysis of Urea Injection Conditions in the Selective Non-Catalytic Reduction(SNCR) Process

Yu-Jin Jung\*, Moon-Heon Jeong\*, Ki-Woo Park\*, Sung-Gil Hong\*,  
Jong-Hyeon Jung\*\*, Byung-Hyun Shon\*\*\*  
\* C.E.Tech Co. Ltd., R&D Center

\*\* Faculty of Health Science, Daegu Haany University

\*\*\* Department of Environmental Engineering, Hanseo University

### 요약

SNCR 기술은 SCR에 비해 탈질 효율은 떨어지지만 촉매없이 고온 배출가스에 NH<sub>3</sub> 또는 요소수를 직접 분사하여 질소와 물로 환원시키는 방법이므로 초기 투자비 및 운영비가 적어 최근 국내 대다수의 소각장, 산업용 보일러 등에 널리 적용되고 있다. 단, SNCR 기술은 급격한 온도 강하나 접근의 불용이성, 불균일한 혼합, 액적의 증발시간 지연, 불균일한 운전 조건 등의 영향을 크게 받으며, 특히 반응 온도가 가장 중요한 변수로서 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000℃라는 점에서 이상적인 반응 온도 조건을 찾아서 환원제를 분무하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 열유동 전산해석을 통해 스토커식 소각로의 폐기물 성상별 화염 온도 분포를 예측하고 적정 반응 온도 영역을 확인하여 요소수 주입 고도를 선정, 폐기물 성상별 분무 조건을 확립하고자 수치 해석적 연구를 수행하였다. 폐기물 성상(고질/중질/저질 폐기물)별로 화염 온도를 예측한 결과, 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000℃, 폐기물 성상의 심한 변화 때문에 소각로의 효율적인 연소 조건 제어에 어려움 등을 고려하여 약 700~1,000℃ 온도 영역대를 환원제 분무 온도로 선정하였다. 폐기물별로 발열량에 따른 화염 온도가 모두 다르기 때문에 환원제 분무 위치를 3지점으로 선정하여 각 지점별로 분무 운전 조건을 확립하였다.

### 1. 서론

최근 들어 우리 사회는 소비수준의 향상으로 인해 생활쓰레기 및 폐기물 발생량이 기하급수적으로 증가하여 폐기물의 처리 방법이 기존의 매립 방식에서 점차 소각 방식으로 변화하고 있다. 폐기물을 소각할 때 Dust, HCl, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 2차 오염물질이 발생하고 이들 오염물질을 저감시키기 위해서는 연소 방법을 개선하거나 소각로 후단에 배가스 처리시설을 설치하는 방법 등이 있다. 이 중에서 NO<sub>x</sub> 저감 기술은 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 연소 개선과 연소 후 처리기술로 나눌 수 있다. 연소 개선에 의한 저감 방법은 연소 조건을 변경하여 발생량을 줄이는 방법이나, 소각로의 경우 폐기물 성상의 극심한 변화 때문에 효율적인 연소 조건 확립 및 제어에 어려움이 있다.

연소 후 처리기술로는 SCR (Selective Catalytic Reduction)과 SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction)이 대표적인 방법이다. SCR 기술은 환원제로 NH<sub>3</sub>, CO, H<sub>2</sub>S 등을 사용하며 환원제를 배가스에 분사, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 촉매층을 통과시키는 방법으로 제거 효율이 상당히 우수하나, 고가 촉매를 사용해야 하고 촉매 수명에 대한 보장을 할 수 없는 단점이 있다. SNCR 기술은 SCR에 비해 탈질 효율은 떨어지지만 촉매없이 고온 배출가스에 NH<sub>3</sub> 또는 요소수를 직접 분사하여 질소와 물로 환원시키는 방법이므로 초기 투자비 및 운영비가 상대적으로 경제적이어서 최근 국내 대다수의 소각장, 산업용 보일러 등에 널리 적용되고 있다. 단, SNCR 기술은 급격한 온도 강하나 접근의 불용이성, 불균일한 혼합, 액적의 증발시간 지연, 불균일한 운전 조건 등의 영향을 크게 받으며, 특히 반응

온도가 가장 중요한 변수로서 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000℃라는 점에서 이상적인 반응 온도 조건을 찾아서 환원제를 분무하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

이에 본 연구에서는 열유동 전산해석을 통해 스토커식 소각로의 폐기물 성상별 화염 온도 분포를 예측하고 적정 반응 온도 영역을 확인하여 요소수 주입 고도를 선정, 폐기물 성상별 분무 조건을 확립하고자 수치해석적 연구를 수행하였다.

## 2. 수치 해석 내용

### 2.1. 수치 해석 개요

#### 2.1.1. 기초 방정식

유체의 유동에 대한 물리적인 특성을 나타내는 기본적인 법칙이 있다(mass, momentum, energy conservation 법칙들). 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송 방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다[3].

$$\text{div}(\rho V \phi_i - \Gamma_{\phi_i} \text{grad} \phi_i) = S_{\phi_i} \quad (1)$$

$S_{\phi_i}$ 는 부력항( $S_{\text{buoyancy}}$ )을 제외한 비정상항, 압력구배 등을 포함한 모든 source term을 나타낸다. 난류 모델에는 난류점성계수를 취급하는 방법에 따라 여러 가지 모델이 있는데, 본 연구에서는 Launder와 Spalding에 의해 제시된 Standard k-ε turbulence model을 사용하였다[4].

#### 2.1.2. 해석 방법

본 연구에 사용된 상용 소프트웨어인 FLUENT에서는 이산화 방법으로 유한 체적법을 사용하고 있다. 모든 수치 해석은 상류 차분 도식과 엇갈림 격자계를 이용하여 수행하였다. 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 벽면과 고체 표면에서의 전단 응력은 벽함수를 이용하여 계산하였다. 촉매층은 실제 형상과 공극을 모델링하여 구현하는 것이 불가능하므로 Porous jump model을 이용하여 다공성 물질로 가정하고 국부 유속에 대한 단위 면적당 압력강하로 계산하였다.[5]

#### 2.1.3. 연소 모델

소각로 내부 화염 예측을 위해 폐기물이 소각로로 유입되어 하부에서 주입되는 1차 공기로 인해 가열된 후 탈-휘발화 과정을 거치면서 일산화탄소와 수

소가 발생하여 이와 산소가 반응하는 것으로 가정하였다. 폐기물 성상의 고형 탄소 성분이 없어 연소시 촉 생성은 없는 것으로 가정하였고, 소각로 내 공기와 휘발성 기체간의 반응 모델은 Eddy-dissipation 모델을 사용하여 계산하였다. 연소시 고온 현상을 더욱 사실적으로 묘사하기 위해 P1-model을 이용하여 복사열전달 효과를 고려하였다.

### 2.2. 수치 해석 모델

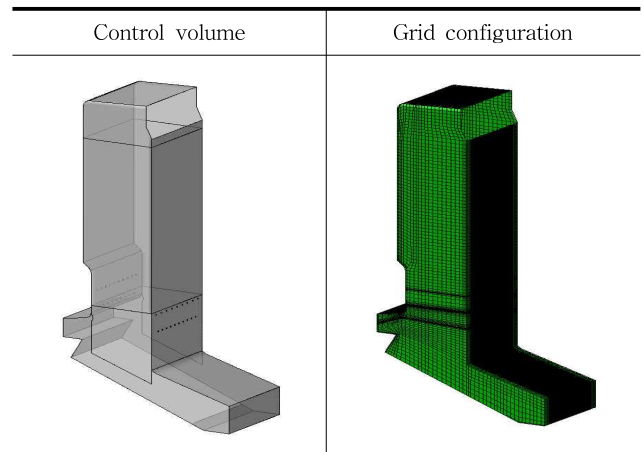
#### 2.2.1. 해석 대상

본 연구 대상인 스토커 소각로의 용량은 8,333 kg/hr이며, 1차 공기의 유입은 연소실 하단 면에서 “건조/연소/후연소” 3단계로 나뉘어져 이루어지며 2차 공기는 소각로 좌우에서 유입되는 형태이다.

#### 2.2.2. 해석 모델

[표 1]에 유동해석을 위한 소각로 모델과 수치 계산을 위한 격자 형성(grid configuration) 모습을 나타내었다.

[표 1] 해석 모델



#### 2.2.3. 경계 조건

열유동 전산해석에 필요한 상세 경계 조건은 [표 2] ~ [표 5]에 정리하였다.

[표 2] 폐기물 성상

구분	삼성분(wt %)			화학적 성분(wt %)						소계
	수분	가연분	회분	C	H	O	N	S	Cl	
고질	23.00	65.62	11.38	38.54	3.40	22.58	0.64	0.14	0.32	65.62
중질	27.00	61.70	11.30	32.41	2.94	25.00	0.70	0.15	0.50	61.70
저질	32.00	55.45	12.55	26.01	2.76	25.30	0.68	0.10	0.60	55.45

[표 3] 1차 / 2차 연소용 공기량 조건

구분(Nm <sup>3</sup> /hr)	고질	중질	저질
1차 공기량	31,189	28,000	22,563
2차 공기량	16,794	9,333	5,641
유입 공기량	3,867	3,867	3,867
총 공기량	51,850	41,200	32,071

[표 4] 1차 / 2차 연소용 공기비 및 온도 조건

구분	고질	중질	저질
1차	공기비	65.0	75.0
	온도(°C)	120	180
2차	공기비	35.0	25.0
	온도(°C)	20	20

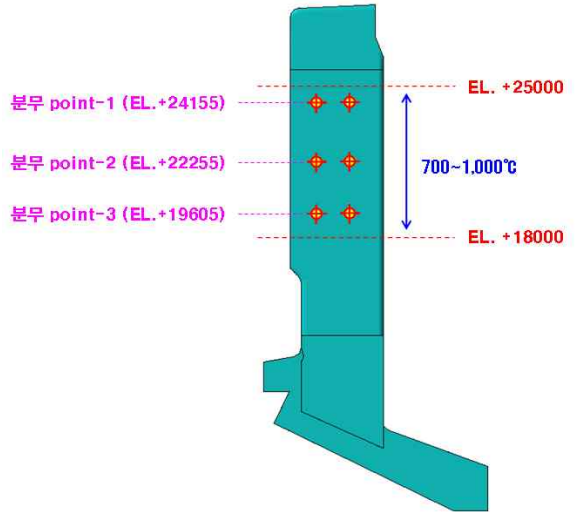
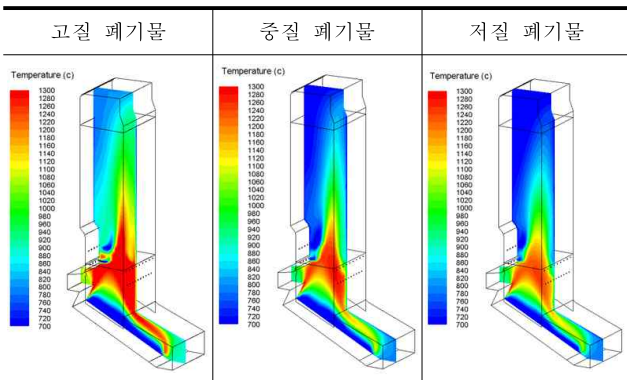
[표 5] 수냉관 조건

급수 온도 (°C)	급수 압력 (kg/cm <sup>2</sup> )
220	2

3. 결과 및 고찰

폐기물 성상(고질/중질/저질 폐기물)별로 화염 온도를 예측한 결과를 [표 6]에 나타내었다. 아울러 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000°C이라는 점과 폐기물 성상의 극심한 변화 때문에 소각로의 효율적인 연소 조건 제어에 어려움이 있다는 점, CFD 예측치의 오차를 감안하여 [그림 1]과 같이 약 700~1,000°C 온도 영역대를 환원제 분무 고도로 우선 선정하였으며 고질, 중질, 저질 폐기물별로 발열량에 따른 화염 온도가 모두 다르다는 점을 감안하여 환원제 분무 위치를 위 온도 범위내에서 3지점을 선정하였다.

[표 6] 폐기물 종류별 화염 온도 예측 결과



[그림 1] 환원제 분무 고도 및 위치 선정

이에, 각 지점의 온도 예측치 평균값을 plotting 하여 [표 7]에 나타내었다.

[표 7] 분무 위치에서의 예측 온도 평균치

고질 폐기물	중질 폐기물	저질 폐기물
878.5°C	768.0°C	717.7°C
920.2°C	803.6°C	761.9°C
986.7°C	872.1°C	838.1°C

최종적으로, [표 8]에 각 지점의 온도 예측치 평균값을 정리하여 각 지점별로 폐기물 종류에 따른 분무 운전 조건을 확립하였다.

[표 8] 분무 운전 조건

	폐기물 종류별 단면 평균 온도(°C)		
	고질 폐기물	중질 폐기물	저질 폐기물
Point-1	878.5	768.0	717.7
Point-2	920.2	803.6	761.9
Point-3	986.7	872.1	838.1
운전 조건	- 고질 폐기물 소각시 : 노즐 1,2,3단 동시 가동 - 중질 및 저질 폐기물 소각시 : 노즐 3단 가동		

중질 및 저질 폐기물 연소시에는 분무 Point-3에서 온도 조건을 만족하므로 최하단 분무 노즐을 가동하고, 고질 폐기물 연소시에는 모든 분무 위치에서 최적의 온도 조건을 만족하고 있어 분무 Point-1,2,3에서 동시적으로 분배하여 가동하면 최적의 탈질 효율을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

SNCR 기술은 급격한 온도 강하나 접근의 불용이성, 불균일한 혼합, 액적의 증발시간 지연, 불균일한 운전 조건 등의 영향을 크게 받으며, 특히 반응 온도가 가장 중요한 변수로서 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000℃라는 점에서 이상적인 반응 온도 조건을 찾아서 환원제를 분무하는 것이 매우 중요하다 할 수 있겠다.

이에 본 연구에서는 열유동 전산해석을 통해 스토커식 소각로의 폐기물 성상별 화염 온도 분포를 예측하고 적정 반응 온도 영역을 확인하여 요소수 주입 고도를 선정, 폐기물 성상별 분무 조건을 확립하고자 수치해석적 연구를 수행하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 폐기물 성상(고질/중질/저질 폐기물)별로 화염 온도를 예측한 결과, 최적 반응 온도 영역대가 약 800~1,000℃라는 점과 폐기물 성상의 극심한 변화 때문에 소각로의 효율적인 연소 조건 제어에 어려움이 있다는 점, CFD 예측치의 오차를 감안하여 약 700~1,000℃ 온도 영역대를 환원제 분무 고도로 우선 선정할 수 있었다.
2. 분무 고도로 우선 선정된 약 700~1,000℃ 온도 영역대를 고질, 중질, 저질 폐기물별로 발열량에 따른 화염 온도가 모두 다르다는 점을 감안하여 환원제 분무 위치를 위 온도 범위내에서 3지점을 선정하여 각 지점별로 폐기물 종류에 따른 분무 운전 조건을 확립할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Thanh D.B. Nguyen, Tae-Ho Kang, Young-Il Lim, Won-Hyein Eom, Seong-Joon Kim, Kyung-Seun Yoo, "Application of urea-based SNCR to a municipal incinerator : On-site test and CFD simulation", Chemical Engineering Journal 152 (2009), pp.36-43.
- [2] Mi-Soo Shin, Hey-Suk Kim, Dong-Soon Jang, "Numerical study on the SNCR application of space-limited industrial boiler", Applied Thermal Engineering 27 (2007), pp.2850-2857.
- [3] 전영남, 김승호, 류창국, "소각로 연소실내의 폐기물 층 연소현상에 대한 수치 모델링 연구", 대한환경공학회지 논문, pp.925-931, 2003.
- [4] 명현국, "수치유체공학", 한미출판사, pp. 124-138, 1997.
- [5] Patankar SV, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- [6] 신병록, 장근식, 조강래, "전산유체역학", 대영사, pp. 264-277, 1997.