



## 전산유체역학을 이용한 반건식 반응기의 운전조건에 따른 산성가스제거효율에 관한연구

이건주<sup>†</sup>

상지대학교 환경공학과

(2011년 3월 8일 접수, 2011년 3월 18일 수정, 2011년 3월 19일 채택)

## A study of the removal efficiency of acidic gas at various operating conditions using Computation Fluid Dynamics

Geon-ju Lee<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Sangji University, Korea

### ABSTRACT

The modeling of SDR was carried out for the application of the solid waste incineration system. To find optimum operating condition for removal of acidic gases, computation fluid dynamic(CFD) model was used. In this study, the temperature profile of SDR(spray dry reactor) and the gas velocity profile for different models were investigated. In this model, the diameter of SDR was 3 meter and the height of SDR was 9 meter.

The amount of inlet combustion gas of SDR was 6,125 Nm<sup>3</sup>/hr and the inlet temperature of SDR was 493 K. The amount of lime injection of SDR was 151 kg/hr. When the inlet shape of SDR was changed, the temperatur of SDR was changed and the gas velocity of SDR was 0.48 m/sec to 1.17m/sec and the outlet gas velocity of SDR was 6.9 m/sec to 7.42m/sec

As a result of modeling, the average velocities in SDR and outlet were 0.489 m/sec and 7.424 m/sec, respectively, in which the temperature of outlet in SDR was 448 K.

Keywords : Gas velocity profile, Temperature Pprofile, SDR, CFD, Removal Efficiency

### 초 록

본 연구는 소각 시스템에 적용되는 반건식 반응기의 모델링 연구를 수행 하였다. 전산유체역학(CFD)을 이용하여 반건식 반응기에서 속도분포 온도분포를 조사하여 반응기의 최적 운전 조건을 조사하였다. 본 모델에 사용된 반응기의 직경은 3 m 이며 높이는 9 m 이다.

<sup>†</sup>Corresponding author : kjoolee@sangji.ac.kr

반응기로 유입되는 연소가스의 양은  $6,125 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  이며 반응기 유입 가스의 온도는  $493\text{K}$  이다. 반응기에 유입되는 소석회 양은  $151 \text{ kg/hr}$  이다. 반응기의 입구 형상이 변하면 반응기 내의 온도가 변하며 반응기 내의 가스속도는  $0.48 \text{ m/sec}$  에서  $1.17\text{m/sec}$  였으며, 반응기 출구의 가스속도는  $6.9$  에서  $7.42\text{m/sec}$  였다. 모델링 결과에 의하면 반응기 내의 평균 가스 속도와 출구에서의 평균가스 속도는 각각  $0.489 \text{ m/sec}$ 와  $7.424 \text{ m/sec}$  였으며, 반응기 출구 온도는  $448 \text{ K}$  였다.

핵심용어: 가스유속분포, 온도분포, 반건식반응기, 전산유체역학, 제거효율

## 1. 서론

산업이 발달함에 따라 도시의 인구 집중현상이 두드러지게 되면서 도시 주거 지역 및 사업장에서 배출되는 쓰레기의 양이 증가 하고 있다. 쓰레기문제는 근래에 들어 심각하게 논의되고 효율적인 처리 기술의 필요성이 대두되면서 그 일환으로 쓰레기 소각을 통해 처리될 쓰레기의 양을 줄이는 방법이 제시되었다<sup>1)</sup>. 1980년대 이전까지 우리나라의 쓰레기 처리는 주로 쓰레기 수거 분야에만 집중되어 쓰레기를 수집하고 수집된 쓰레기는 저습지, 공터, 농경지, 하천부지, 주택 또는 공장신축 부지 등에 노천투기 등으로 버려져왔다. 그러나 1980년대에 들어와서는 쓰레기의 감량화 및 안정화 처리를 위하여 대규모 생활폐기물 소각시설의 설치가 추진되었고 1990년대부터 매립에 의존하던 폐기물 처리방식을 자원화 방식으로 대폭 전환하였다<sup>1),2)</sup>.

소각시설의 확대는 급격하게 증가하는 폐기물의 감량화, 감용화, 무해화라는 장점과 함께 국토면적이 협소한 국내여건상 매립지 확보의 어려움을 해결하기 위한 대안으로 주목 받고 있고 폐기물로부터 회수된 소각 폐열의 대체에너지화 등 긍정적인 면이 있으나 소각운영에 따른 여러 종류의 배기가스는 필연적으로 배출하게 되며 황산( $\text{SO}_x$ ), 질산( $\text{NO}_x$ ), 할로젠 화합물에 의한 산( $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ), 다이옥신 등은 인체에 해를 끼치는 물론 자연환경에 커다란 영향을 끼치는 유해성분이 발생한다.

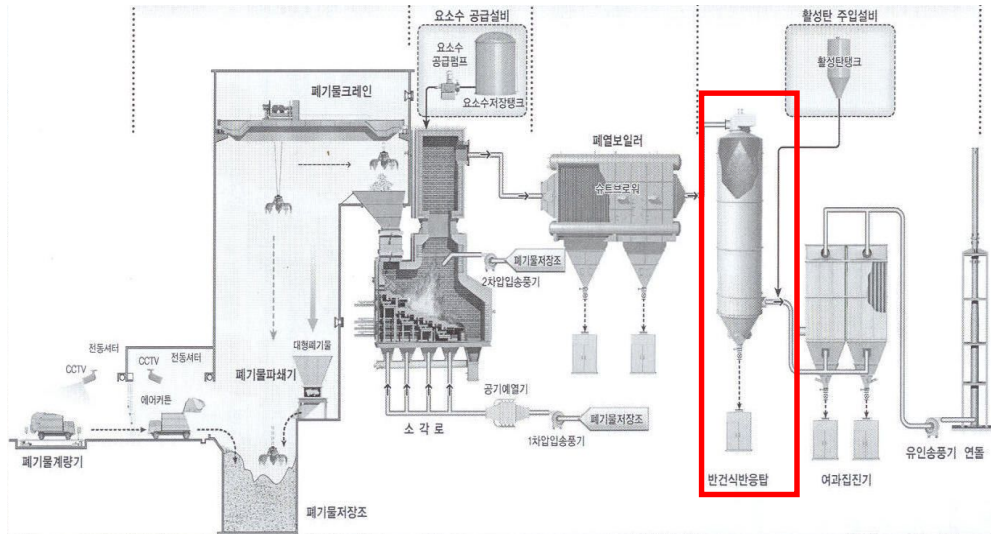
이러한 오염물질 방지시설 중 유해 산성가스 제거설비에는 건식(dry absorption process), 반

건식(semi-dry absorption process) 및 습식(wet scrubbing process) 등이 있으며 각 방법 별 경제적 비용면에서는 건식, 반건식, 습식순이고, 제거효율 측면에서는 건식법은 효율이 낮아 그 적용에 제한을 받으며 습식법은 친수성 산성가스 제거에는 효과가 탁월하나 폐수처리 및 산성 세정폐액에 의한 장치의 부식 등 경제적으로 불리한 점이 있다. 그러나 반건식 반응탑(SDR)은 주로 백필터와 조합하여 설치되어 산성가스의 높은 제거효율 뿐만 아니라 반응생성물이 건조상태이므로 폐수 발생이 없고 포화온도 이상에서 운전되어 장치의 부식과 백연현상이 거의 없다<sup>3)</sup>. 소각공정에서 반건식 반응기의 역할과 공정 위치를 [Fig. 1]에 설명하였다. 본 연구에서는 반건식 반응기 운전조건 및 설계인자를 전산유체역학을 이용하여 예측하며 반응기내에서 산성가스 제거 효율등을 연구한다.

## 2. 반건식 반응탑의 이론적 배경

SDR(반건식 반응탑)에서 산성가스는 폐기물 중에 포함된 염화비닐 플라스틱류 등의 소각시 발생이 되며, 이때 발생하는 유해가스인  $\text{HCl}$ 은 무색의 강한 자극취가 나며 습한공기 중에서 부식성이 매우 강하고 인체 접촉시 피부의 화상 등 극히 유해하며 물에는 매우 잘 녹아서 거의 완전하게 이온화하여 염산용액이 된다. 그리고  $\text{SO}_x$ 는 무색의 자극성 가스로서 저온부식을 일으키고 물에 잘 녹지 않으나 용해시 황산용액이 되며 인체 접촉시 각종 폐질환 유발한다.

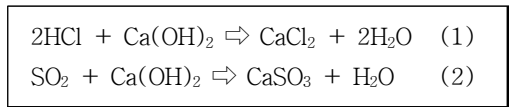
흡수제로서 소석회 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) 슬러리를 사용



[Fig. 1] The SDR in the Incineration process.

하며, 흡수탑에서 소석회(Ca(OH)<sub>2</sub>) 슬러리를 분사하여 주면 흡수탑 내에서 수분은 거의 증발하고 반응생성물과 미반응물은 고형물 상태로 회수되어 지정폐기물로 처리하게 되고, 이 공법에서는 폐수가 발생하지 않게 되어 별도의 폐수처리장을 시설할 필요가 없다.

설비기능은 소석회 슬러리를 균일하게 분사할 수 있는 이유체분무형 노즐 부착 및 출구온도 160℃이하로 제어를 하며, HCl 농도에 따른 소석회 공급량 제어 및 출구온도에 따른 냉각수 사용량을 제어하고, 운전중 노즐교체가 용이하도록 예비노즐을 확보하며, 소석회분무노즐 막힘 등의 고장을 대비한 별도의 냉각수 분무노즐도 확보한다. 산성가스 제거원리는 아래의 반응식으로 반응 한다.



유해산성가스(HCl, SO<sub>x</sub>)를 알칼리 중화제(소석회: Ca(OH)<sub>2</sub>)와 접촉시켜 무독성의 중화염으로 변화 시킨후 포집제거한다.

반응제거과정은 산성가스 --> 수화 --> 중화제와 반응 --> 건조 --> 낙하 --> 포집으로 이루어진다.

소각로에서 연소된 쓰레기에 의해서 발생한 고온의 연소가스는 냉각설비에서 210~240℃의 온도로 냉각되어 후속설비인 반응흡수탑으로 보내진다. 반응흡수탑은 최고 280℃, 최저 150℃에서 작동될 수 있도록 되어 있어, 이 범위를 벗어날 경우에는 보일러 가동을 중지해야 한다. 보일러에서 배출된 배기가스는 반응흡수탑에서 8~13% 소석회슬러리와 병류로 접촉하여 접촉효율을 높이기 위해서 압축공기와 함께 분사하여 접촉면적을 극대화함으로써 제거효율을 최대화하여 산성유해가스성분을 제거한다. 배기가스는 수분을 흡수함으로써 약 160℃로 냉각되며, 반응흡수탑의 출구온도는 소석회 슬러리의 공급량으로 제어한다.

소석회 슬러리에 함유된 수분의 증발로 인하여 유이 배기가스온도가 강하되고 배기가스의 체적을 감소시킨다. 적절한 온도조건에 의한 온도강하로 하류에서 유해가스의 응축방지 및 원활한 백필터 운전을 도모한다. SDR(반건식 반응탑)의

장점은 구동이 용이 하고 경제적이며 대용량의 연소 가스 처리가 가능하다는 점과 함께 건조된 반응물인 비용해성 칼슘화물이 건축재료 등으로 사용 가능하다는 점 등이 있으며, 단점으로는 습식에 비해 제거 효율이 낮다는 점이다<sup>4)~7)</sup>.

### 2.1 흡수제의 선택

반건식 반응탑에서 사용되는 흡수제의 종류로는 Ca(OH)<sub>2</sub>, CaO, CaCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, KOH 등을 사용 할 수 있는데 이중 흡수제의 선택에서 가장 중요한 인자는 흡수성과 가격이다. 즉, NaHCO<sub>3</sub> 의 경우 가장효율이 좋으나 가격이 비싸므로 이의 사용은 경제성이 부족하며, 석회석 같은 경우 가격은 가장 저렴하나 용해도가 낮아 제거효율이 적으므로 사용에 제한을 받는다. 일반적으로 칼슘계 흡수제(Ca(OH)<sub>2</sub>, CaO, CaCO<sub>3</sub>)는 흡수성을 나타내는 반면, 나트륨계 흡수제(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>)는 용해성(Deliquescent)을 나타낸다. 그러므로 가격과 처리효율을 고려할 때 반건식 반응탑의 흡수제로 Ca(OH)<sub>2</sub>, CaO가 적당하다<sup>4)</sup>.

### 2.2 슬러리분무

분무란 분무 건조기(Spray dryer)의 설계에 있어서 가장 중요한 부분으로 액상의 슬러리가 수많은 미세입자로 분리되는 과정을 말한다. 즉, 분무기의 유입된 석회 슬러리는 높은 표면적을 가진 미세한 입자로 분무된다. 반응탑 내부에 분무하기 위해서 흡수제를 전처리하여 수분과 함께 슬러리 혼합탱크에서 5~25 wt%로 혼합하여 분

무장치로 이송된다. 분무기의 종류로 회전식, 압력식, 공기식, 음파식 분무기 등이 있는데 일반적으로 분무건조기에 적용되는 분무기로는 회전식 분무기(rotary atomizer)와 노즐 분무기(nozzle atomizer)이다<sup>13),14)</sup>.

## 3. 연구방법

본 연구에서는 Ansys CFX 프로그램을 이용하여 반건식 반응기의 산성가스 제거효율을 연구하였다. 반건식 반응탑은 가스 체류시간을 10초 이상으로 하고 설계유속을 1.25 m/sec 이하로 하며 연소가스의 입구온도 220℃ 출구 온도 160℃로 제어한다. 반건식 반응기의 구체적 설계조건 및 연소가스온도 및 가스 유속은 [Table 1]에 설명 하였다.

SDR의 지름은 5m이고 실제 통과속도를 계산하여 실제 적용 높이를 가스통과 속도로 나누면 실제가스 통과시간이 나온다. 아래에서 보는바와 같이 11.04s이므로 체류시간은 10초이상이다. 본 연구에서 사용된 반건식 반응기의 형상 및 소석회 투입 노즐 위치를 [Fig. 2]에 설명하였다.

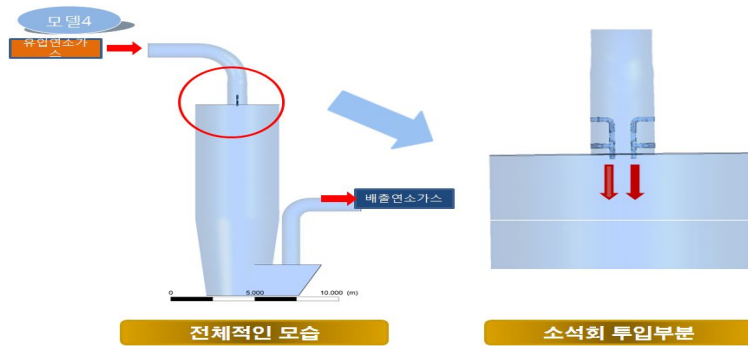
## 4. 결과 및 고찰

SDR의 입구형상에 대한 제거 효율을 알아보기 위해서 모델을 만들어 입구형상에 따른 유동장, 속도, 온도, pH 변화를 알아보았다<sup>8),9)</sup>.

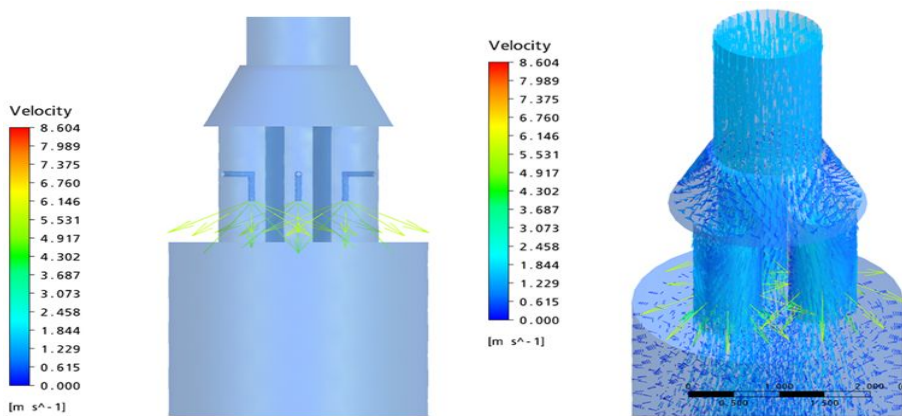
[Fig. 3]은 전산유체 역학 Model의 유입구의 유동분포를 나타내었다. 단위는(m/sec)를 사용하

[Table 1] Design Factor of SDR

설계 조건		
형식	하향 흐름방식, 2류체 노즐	
입구 연소 가스량	6,125 Nm <sup>3</sup> /hr.wet	
출구 연소 가스량	6,125 Nm <sup>3</sup> /hr.wet	
적용 가스량	6,125 Nm <sup>3</sup> /hr.wet (10)	
연소 가스 온도	입구	220
	출구	160
가스체류시간	10sec이상	
가스 설계 유속	1.25 m/s 이하	



[Fig. 2] The shape of SDR for model.



[Fig. 3] The gas flow profile in SDR gas Inlet.

였으며 연소유입가스보다 소석회 분무속도가 더 빠른 것을 알 수 있다. 반응기 상단부로 유해 연소가스와 소석회가 투입되는 유동 현상을 관찰할 수 있다.

[Fig. 4]는 SDR의 유동장 분포를 나타낸 것이다. 반응기 하단부의 구체적 유동장 및 반응기 전체유체의 흐름을 볼 수 있고 전체모습을 보면 반응기 상단부의 소석회가 분무되는 곳에서 빠르게 반응하다 서서히 느려지는 것을 볼 수 있다<sup>10)</sup>.

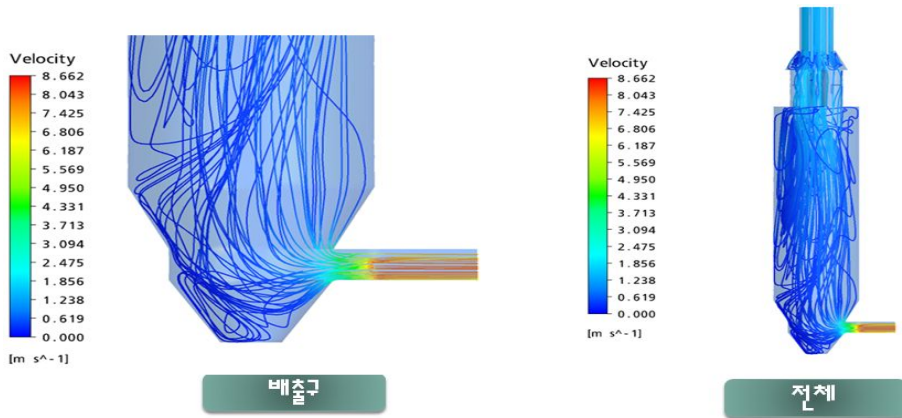
[Fig. 5]는 Model의 전체적인 속도 분포를 보여준다. 가스유속 단위는 (m/s)이며 반응기내 평균속도는 0.49m/sec 이며 배출구 평균속도는 7.42 m/sec 이다.

[Fig. 6]는 Model 의 온도분포를 나타내었고

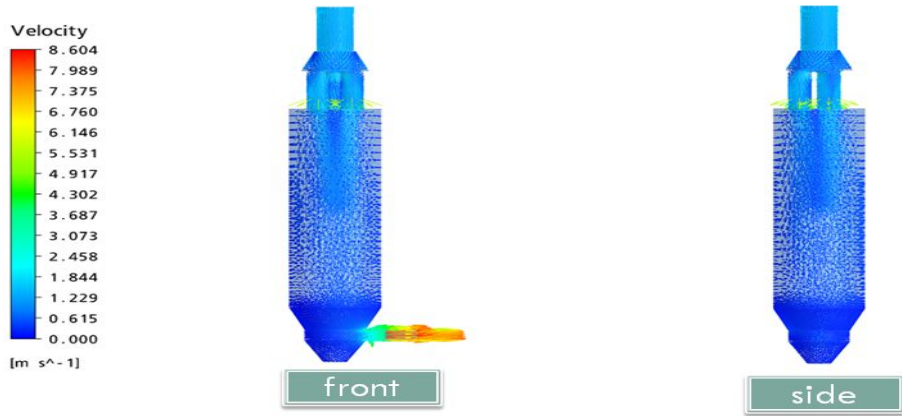
왼쪽에 있는 그림은 반응기 표면에 있는 온도분포를 나타내었고 오른쪽에 있는 그림은반응기의 안쪽 온도를 나타낸다. 반응기 입구 유해연소가스 온도는 220℃ 이며 출구 온도는 175℃ 이다.

[Fig. 7]에서는 소석회와 유해 산가스가 반응하는 부분(top)과 관내의 중간(middle), 배출되는 부분(bottom)으로 나뉘서 온도분포를 나타내었다. 소석회와 반응하는 top 부분은 소석회의 분무로 그 부분의 온도만 일시적으로 낮고 연소가스가 반응을 하면서 점차 온도가 내려가는 것을 볼 수 있다<sup>11),12)</sup>.

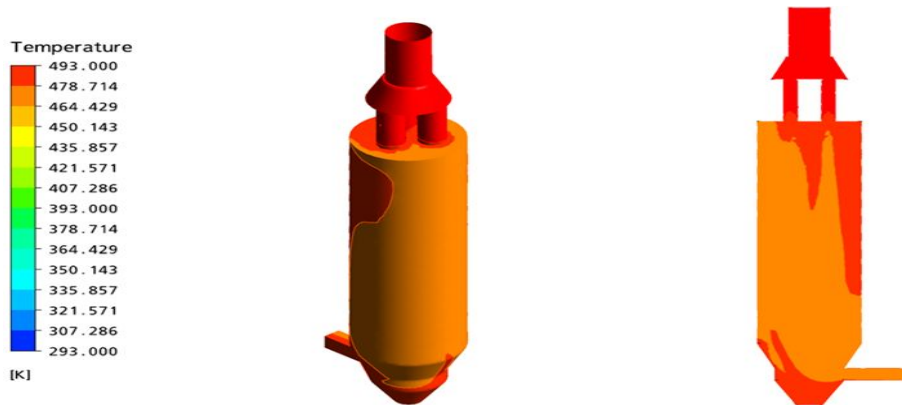
[Fig. 8]은 산성가스가 소석회와 반응했을 때 pH 변화를 보여주고 있으며 반응기 출구 평균 pH 농도는 7.07 이다.



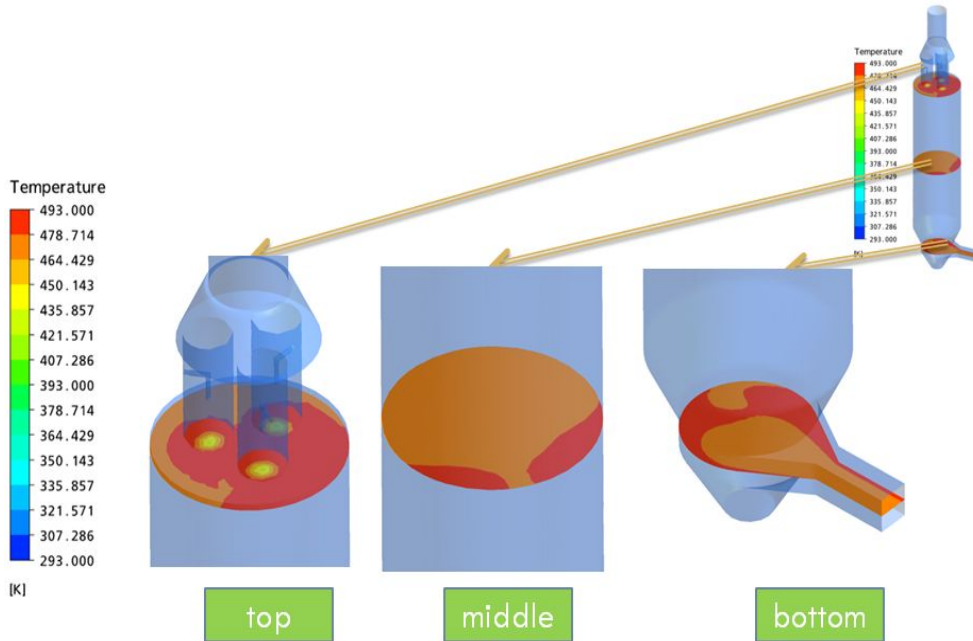
[Fig. 4] The gas flow profile in SDR.



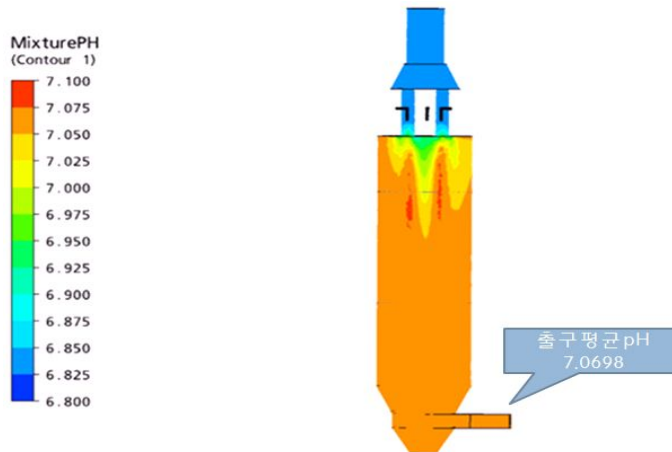
[Fig. 5] The gas velocity profile in SDR.



[Fig. 6] The gas temperature profile in SDR.



[Fig. 7] The gas temperature profile in SDR model.

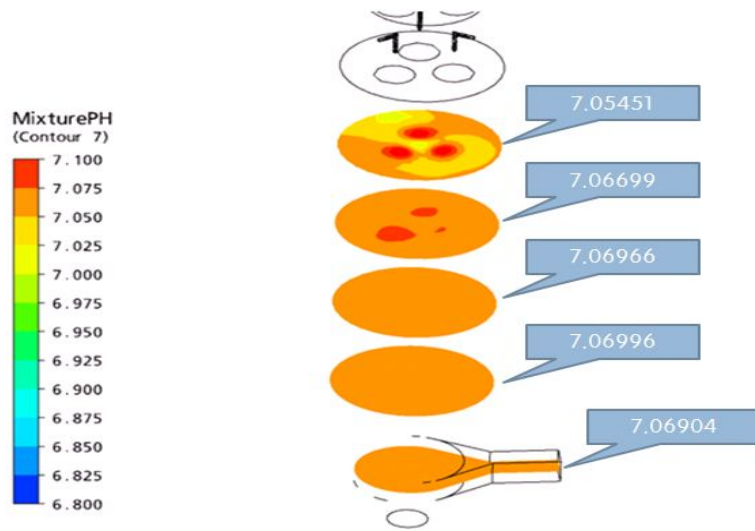


[Fig. 8] The pH profile in SDR.

[Fig. 9]은 SDR 내의 높이(2m, 4m, 6m, 8m, 출구)에 따른 pH 변화를 나타낸 것이다. 산성가스와 소석회( Ca(OH)<sub>2</sub> )의 혼합정도와 체류시간을 보여주는 유동장은 모델의 경우 입구의 형상으로 인하여 상승하려는 와류현상으로 인

## 5. 결론

유입가스와 소석회( Ca(OH)<sub>2</sub> )의 혼합정도와 체류시간을 보여주는 유동장은 모델의 경우 입구의 형상으로 인하여 상승하려는 와류현상으로 인



[Fig. 9] The pH profile in SDR with the height.

하여 가장 좋은 혼합효과를 보여 주었으며 SDR 내의 평균속도를 보여주는 속도분포에서는 SDR 내의 입구의 형상으로 인한 회전에 따른 영향으로 가장 빠른 유속을 보여주었다. 전산유체역학 모델로 부터 반응기 배출온도기준치인 160℃를 모두 초과하는 결과를 나타내었다.

산성가스를 제거해주는 소석회(알칼리)와의 반응에서는 모델결과로부터 pH 7.07로 중성pH기준인 pH 7을 약간 초과하는 것으로 나타났다. 이는 산성가스를 모두 제거하고 남은 소석회기 출구부분으로 방출된 결과로 여겨진다. 따라서 같은 양의 소석회를 투입했을 때 모델해석으로부터 산성가스의 제거 효과가 뛰어난을 알 수가 있었다. 따라서 위와 같이 유동장, 속도, 온도, pH농도의 결과를 종합해 봤을 때 본 연구에 사용되어진 반건식 반응기는 좋은 성능을 보여주는 것으로 보인다.

## 사사

본 논문은 2010년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김두환, “우리나라 폐기물 소각정책 방향”환경부, pp. 56~66 (2000).
2. 환경부 “OECD2030 환경전망보고서”, pp. 111~122 (2010).
3. 김진철 “최신 폐기물 소각기술” 신기술, pp. 78~108 (1995).
4. 이진주 : “반건식반응기를 이용한 SO<sub>2</sub> 제어에 관한 연구” 한국폐기물학회, pp. 629~636 (2000).
5. 배병호 외2, “반건식 백필터에 의한 소각배기가스 중의 HCl, SO<sub>x</sub> 제거, 한국폐기물학회, pp. 1279~1288 (1997).
6. 박기호, “반건식 세정법에 의한 소각배가스처리 실증플랜트 운전 결과”, pp. 56~86(2001).
7. 최진환, “축소규모 반건식 세정장치 실험에 관한 연구” 한국폐기물학회, pp. 12~13, (1995).
8. 김광렬, “최신연소공학”, pp. 36~66, 동화출판사 (1999).
9. 서용권, “전산유체역학”, pp. 7~9, 동아대학교출판부 (2005).
10. 유경선, “흡수제를 이용한 소각로 유해가스 정



- 화기술”, 한국폐기물학회, pp. 611~622 (1997).
11. Dlouhy, J and Gauvin, W. H., “Heat and Mass Transfer in Spray Drying”, AIChE, vol.6, pp. 29~34,(1960).
  12. Masters, K., Spray Drying Handbook, John Wiley & Sons, pp. 25~86 (1979).
  13. Muzio, L. J, and Offen, G.R, “Dry Sorbent Emission Control Technology Part 1, Fundamental Processes”, pp. 942~966, (1987).
  14. Klingspor, J. S., “Improved Spray Dry Scrubbing Through Grinding of FGD” Recycle Materia, pp. 801~811, (1987). 