

전산유체역학을 이용한 L/D 변화의 따른 폐유 가스화기의 특성 고찰

주 지 선, 나 혜 령, 윤 용 승
고등기술연구원 Plant Engineering센터

Studies on the Characteristics of Waste-Oil Gasifier with L/D Variation by using CFD

Ji Sun Ju, He Reung Na, Yongseung Yun
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서 론

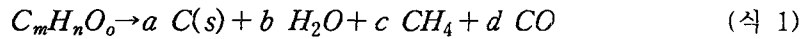
가스화용융기술은 주로 에너지분야에 적용되어 개발되어 온 기술로서, 최근에 이르러 스위스, 독일, 일본 등을 중심으로 폐기물분야에 적용하기 시작한 분야이다. 본 기술은 폐기물이나 저급의 시료로부터 연료가스로 에너지를 회수함과 동시에 잔류물인 무기물을 환경적으로 무해한 슬래크으로 재활용도 가능하도록 처리하는 복합기술이면서 환경/에너지/자원문제에 동시에 접근하는 기술이다[1]. 폐기물 분야에 적용하는 가스화용융기술은 향후 폐기물처리의 잔존에너지 재활용 측면과 다이옥신 발생이 없고 SOx/NOx 발생도 현저히 감소시킬 수 있는 환경적합적인 측면을 볼 때 시급히 국내의 기술경쟁력을 갖추어야 할 분야이기도 하다. 특히, 저급의 시료나 폐기물로부터 시료중의 에너지를 고급의 에너지로 전환시킬 수 있는 가스화용융 기술의 확보는 부존자원이 없는 우리나라에서는 핵심기반 기술로 개발이 되어야 하는 현황이다[3].

본 센터에서는 이러한 고온용융기술을 이용하여 “가연성 폐기물처리용 5톤/일급 가스화용융 공정기술개발”의 과제를 과학기술부 국가지정연구실사업을 통해 수행중에 있다. 이 과제는 폐수슬러지, 오니류, 폐유, 폐유기용재 등의 액상폐기물을 대상으로 하고 있고, 2000년 6월부터 시작하여 5개년 계획으로 진행 중에 있으며, 올해는 1톤/일급 bench 시스템의 설계, 제작, 운전을 목표로 진행 중에 있다.

개발하고 있는 가스화기 형태는 처리하려는 시료를 분무시켜 가스화 반응시키는 Entrained-bed 형태의 가스화기로 시료의 분무시스템과 가스화 반응이 일어나는 반응기의 형상, 크기, 길이등이 중요한 설계인자가 되고 있다[2]. 특히 가스화반응이 고온고압에서 이루어지므로 반응기의 크기는 경제성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 액상폐기물의 가스화반응을 전산유체해석을 통해 해석할 수 있는 방법을 설정하고, 가스화기 직경/길이비에 따른 가스화 반응 특성을 전산해석을 통해 해석함으로써 반응기의 실제 설계에 적용하고자 하였다.

2. 이 론

가스화반응은 탄소화합물이 O₂, CO₂, H₂O 등과 반응하여 중요 생성물인 CO 및 H₂의 가연성 가스를 생성하는 반응으로 일반적으로 다음의 반응식들로 나타낼 수 있다.



액상폐기물의 가스화반응에 대한 반응특성을 모사하기 위해서는 가스화기 내에서 발생하는 연소 및 가스화 반응에 대한 속도론적 고찰이 선행되어야 한다. 그러나 폐유는 종류에 따라 내재적인 물리화학적 성상이 매우 다양할 뿐만 아니라 이에 대한 반응의 속도론적인 특성 또한 매우 복잡하게 나타나기 때문에 일반화된 속도론적 자료를 얻는다는 것은 매우 힘든 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 가스화반응의 단순화를 위해서 폐유의 반응특성에 따른 속도론적인 자료를 사용하지 않고 조업조건에 따라 생성가스의 조성을 예측할 수 있는 열역학적 평형반응 모델을 사용하였다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 분류층 가스화기는 1400℃ 이상의 고온에서 조업되며, 액상으로 분무되어 주입되므로 매우 빠른 속도로 가스상으로 전환되며 전환된 가스상의 조성은 반응온도에 따른 평형조성으로 존재한다고 가정할 수 있다. 이러한 가정을 이용하면 주어진 입력조건에 대하여 생성가스의 열역학적 평형 조성의 계산이 가능하다. 반응에 따른 가스상의 열역학적 조성은 Gibbs 자유에너지 최소화법을 이용하여 계산하는 방법이 많이 사용되고 있다[4].

3. 수학적 모델 및 해법

폐유를 연료로 하는 가스화기 내부에서는 난류반응유동장이 형성되며, 이에 따른 기상지배방정식을 2차원 축대칭 좌표계에서 다음과 같은 편미분방정식의 형태로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\rho u \phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \overline{\rho v \phi}) - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) = S_\phi \quad (\text{식 5})$$

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 일반 종속 변수로서 각 방향에 대한 속도 성분, 엔탈피 및 각종 화학종 등을 대표하고 있으며, x 는 축방향 거리, r 은 직경방향 거리, ρ 는 기체의 밀도, Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 종속 변수에 대한 확산 계수와 생성항을 각각 나타낸다. 그리고, 연료의 반응에 의해 액상에서 기상으로 전달되는 질량, 엔탈피, 운동량의 변화등은 지배방정식의 생성(소멸)항에 포함되어 해석된다. 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 기상의 난류 반응장을 해석하기 위한 현상학적 모델을 위해서는 혼합 분율과 확률 밀도 함수를 이용한 보존 스칼라 모델을 사용하였으며, 반응 생성물의 조성은 주어진 제어 체적내에서 'Gibbs 자유에너지 최소화방법에 의하여 계산되도록 하였다.

또한, 난류반응유동장내에서 주변의 산화제와 반응하여 기상과 액상간의 물질 및 열전달을 일으켜 유동장의 변화에 커다란 영향을 미치는 연료 즉 폐유 액적의 거동을 해석하고자 초기에 유입된 액적의 온도가 반응 온도까지 상승한 후 증발(vaporization) 및 비등(boiling)을 통해 기화되어 기상으로 전달된 후 반응하도록 하는 액적반응모델을 사용하였다.

계산시 조건은 표 1에 나타내었으며, 해석은 상용 열유체해석 code 인 FLUENT V4.4를

사용하였다.

표 1. 전산해석에 사용한 해석조건

조업조건	온도(℃)	1400	시료	C	77.23
	압력(atm)	5		H	11.67
Feed rate (kg/h)	waste oil	41.7	원소분석치 (wt%)	O	0.63
	O ₂	41.7		N	0
	수증기	20.85		S	0.27
가스화기 치수비	직경	D	시료 공업분석치 (wt%)	수분	10
	길이	2D~5D		휘발분	51.85
	입구	0.067D		고정탄소	37.97
	출구	0.25D		회분	0.2

3. 결과 및 고찰

[그림 1]에 가스화 반응으로 생성된 대표적인 성분들의 반응기내의 농도분포를 L/D 가 5 인 경우에 대하여 나타내었다. 가스화반응은 탄소가 O₂, CO₂, H₂O 등과 반응하여 중요 생성물인 CO 및 H₂의 가연성 가스를 생성하는 반응이다. CO의 농도를 보면 입구의 초기반응영역 영역에서는 산화 및 탈휘발화 반응에 의해 CO 농도가 낮게 나타났으며, 상대적으로 연소 생성물인 CO₂의 농도는 높게 나타나고 있다. 그러나 중심부에서 후류쪽으로 CO의 농도가 매우 높은 영역이 나타나는데 이는 탄소가 CO₂와 반응하여 CO가 생성되는 반응이 이 영역에서 나타나는 것으로 보인다. 그 이후로는 점차로 CO 및 CO₂의 농도가 감소하고 H₂의 농도가 증가하는데 이는 [식 5]에 나타낸 water-gas sift reaction의 영향에 의한 것으로 보인다. 이러한 가스화기 내부의 반응생성물의 분포특성을 보면 설정한 전산해석모델이 가스화반응의 현상을 정성적으로 적절히 해석하고 있음을 알 수 있다

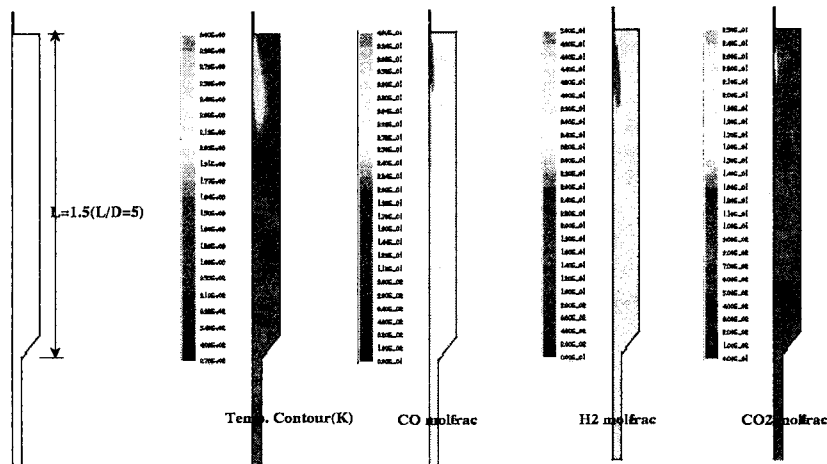


그림 1. 가스화기 내부 가스성분의 분포 (L/D = 5 인 경우)

보다 정량적으로 전산해석값의 정확성을 검증해 보기 위해 water-gas shift 반응에 대한 평형상수를 이용하여 가스화농도를 계산하고 이를 전산해석 값과 비교해 [표 2]에 나타내었다. 평형계산상에서 탄소전환율은 99.5%를 사용하였다. 이 표에 의하면 전산해석을 통해 정량적으로도 근거 있는 값이 계산되어지고 있음을 알 수 있다.

표 2. L/D 변화에 따른 가스화기 출구에서의 온도 및 가스농도

구 분		전산해석값				평형계산값
L/D ratio		2	3	4	5	-
가스농도 (물분율%)	CO	29.2	32.1	32.6	33.2	35.7
	CO ₂	7.5	6.4	6.2	5.9	5.5
	H ₂	40.7	41.7	41.8	42.0	43.4
	H ₂ O	17.9	16.9	16.8	16.5	15.3
	H ₂ S	0.0528	0.0529	0.0529	0.0529	0.0543

L/D의 변화에 따른 가스화기 출구에서의 합성가스의 농도를 보면 가스화기 L/D가 증가할수록 출구에서 H₂O 및 CO₂의 농도는 감소하고, H₂ 및 CO의 농도는 증가하는 경향으로 나타났다. H₂S는 길이비에 따른 영향이 크게 나타나고 있지 않다. 그러나, L/D가 2에서 3으로 증가하는 경우에는 가스농도의 변화 폭이 커나 이후로는 증가 폭이 둔화되어 물분율로 CO 32 ~ 33%, H₂ 41 ~ 42%의 농도를 유지하고 있다. 이러한 경향으로 볼 때 석탄등과 같이 회분의 함량이 많은 경우에는 가스상의 반응외에도 회분의 용융에 필요한 체류시간이 확보되어야 함으로 L/D가 10 이상 크질 수 있으나 회분의 함량이 0.2% 미만으로 낮은 폐유류의 경우 회분의 용융을 고려하지 않는다면 L/D가 3-5의 범위에서도 대부분의 가스화반응이 완료될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐유를 대상으로 전산유체해석을 통한 가스화반응 해석의 방법을 설정하고, L/D 변화에 따른 반응특성을 조사하였다. 전산해석결과 반응기내 가스농도 분포를 볼 때 설정한 전산해석모델이 폐유의 가스화반응의 현상을 적절히 해석하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 폐유의 가스화기의 경우는 회분의 용융을 고려하지 않을 경우 L/D가 3~5의 범위에서도 대부분의 가스화반응이 완료될 수 있을 것으로 판단되었다.

이 연구에서는 폐유 및 수증기, 산화제의 투입 및 혼합방식에 따른 가스화특성에 대한 연구는 이루어지지 않았는데 이에 대한 연구는 향후 전산해석과 실제 실험을 병행하여 지속적으로 수행해 나갈 계획이다.

감 사

본 연구는 과학기술부 산하 한국과학기술평가원에서 지원한 국가지정연구실 “가연성 폐기물처리용 5톤/일급 가스화용융 공정기술개발” 과제의 일환으로 추진되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Fumihiko Tamamushi, Mikio Shimojo and Naggatoshi Fujii, "Study of Heavy Oil Gasification for IGCC", JSME International Journal, Series B, Vol.41, No. 4, 1998.
2. Liebner, W. and Hauser, N. : "Optimizing/Costing Study for a 500 MW IGCC Power Plant based on the Shell Gasification Process", EPRI, Gasification Technologies Conference, 1996.
3. 이승중, 윤용승, 유진열, 서인준 : "중잔유의 500MW급 가스화 복합발전 적용 성능평가", 화학공학, 제37권, 제5호(1999).
4. 나혜령, 이진욱, 윤용승 : "오리멸전의 가스화 반응특성에 관한 수치해석 연구", 에너지공학, 제8권 제2호(1999).