한국에너지공학회(2003년도)
춘계 학술발표회 논문집 P517-522

1톤/일급 폐유 가스화 공정의 동적 특성 해석

이봉렬, 이승종, 윤용승
고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터

Analysis of dynamic characteristic for the 1Ton/Day-Scale Waste Oil Gasification Process

Bong-Ryeol Lee, Seung-Jong Lee, Yongseung Yun
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

1. 서 론

가스화 용융 기술은 주로 에너지 분야에 적용, 개발되어 온 기술로 폐기물의 에너지화라는 이론 연구에 머물러 왔지만, 최근에서야 효과적인 폐기물 이용을 위한 공정의 개발을 중심으로 발전되어 왔으며, 향후 연소반응에 근거한 공정을 점차 대체할 것으로 예측되고 있다[1]. 폐기물을 대상으로 하는 가스화 용융 기술은 특히 환경 문제와 에너지 문제를 동시에 접근할 수 있는 것으로 가스화 공정을 거쳐 발생되는 생성가스에 포함된 유해 성분이 적고, 저급 에너지를 연료 가스나 연료유 등의 고급에너지로 전환이 가능한 기술이다.

폐유 가스화 용융 기술은 기본적으로 폐유 가스화 공정, 생성가스 냉각 공정, 생성가스 처리공정 등이 집적화 되어있어 공정들 상호간의 조업 연계성이 매우 크기 때문에 공정의 정상상태를 기본으로 한 설계 및 운전에서 예측되기 어려운 문제점들을 내포할 수 있으며, 또한 기존의 화력발전 플랜트와 비교하여 규모가 방대하고 공정이 복잡하기 때문에 운전대안 및 제어로직의 설계에 있어서 적잖은 어려움이 발생될 수 있다. 본 연구는 폐유 가스화 공정을 대상으로 하여 초기 정상상태의 운전조건에서 운전변수를 변화시켰을 경우, 시스템을 실시간으로 모사가 가능한 동적모사 프로그램을 통하여 가스화 공정의 과도상태 응답 특성을 파악하고, 동적모사 결과를 실제 공정의 설계에 기초자료로 활용하는데 목적이 있다.

2. 폐유 가스화 공정 모델링 및 해석 방법

폐유 가스화 공정의 동적모사 프로그램은 폐유, 산소 및 스팀 공급설비, 폐유 가스화기, 생성가스 냉각설비 등의 공정으로 구성되며, 폐유 가스화 공정에 포함된 밸브, 각종 센서류를 포함하는 계장품 및 수력망에 대한 모델들이 포함된다. 여기서는 가스화기와 생성가스 냉각 설비를 설명하였으며, 폐유 가스화 공정 흐름의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

2-1. 가스화기 모델

폐유 가스화 반응에 대한 동적 특성을 일반적으로 모사하기 위해서는 폐유 가스화기 내에서 발생하는 연소 및 가스화 반응에 대한 속도론적 고찰이 선행되어야 한다. 하지만 가스화기에서 발생되는 가스의 조성을 예측한다는 것은 여러 동력학적, 화학적 유용한 정보들을 기초로 예측되어져야 하는데 이러한 변수들을 알아낸다는 것은 사실상 불가능하다. 이러한 생성가스 조성을 예측하기 위해 화학평형원리를 적용하는데, 가스화 반응이 충분히 빠르게 일어나게 된다면 생성가스는 화학평형 하에서 반응된다는 가정이다. 실제적으로 가스화기 내부에서 반응되는 속도는 충분히 빠르고 반응 조건인 온도 또한 높기 때문에 이러한 가정을 사용하는 것은 타당하다[2]. 또한 가스화기의 동적 거동을 모사하기 위한 모델은 가스화기 주변의 입출력 변수에 대하여 수립된 비정상상태 열 및 물질수지에 의해서 표현된다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 폐유 가스화기는 1100℃~1400℃이상의 고온에서 운전되고, 내부로 유입되는 폐유 및 가스상이 강한 스월에 의하여 매우 빠르게 혼합되고 고온/고압 조건에서 빠르게 반응하기 때문에 반응기내의 완전혼합을 가정하는 모델로 단순화하였다. 평형반응 모델과 열 및 물질수지 모델에 의해서 구성된 가스화기 모델의 구조는 Fig. 2와 같으며, 가스화기 모델의 주요 입출력 변수는 Fig. 3과 같다.

2-2. 생성가스 냉각 설비 모델

가스화기로부터 생성된 가스는 가스화기 후단에 설치된 가스냉각기를 통해 냉각된다. 가스냉각기 모델은 이중관 parallel flow type, 이중관 cross flow type 및 shell-and-tube type 열교환기 모두를 포함하여, 대상공정의 특성에 따라 사용자가 선택할 수 있도록 구성하였다. 본 논문에서는 이중관 cross flow type 열교환기를 선택하여 공정을 해석하였다. 모델의 단순화를 위하여 가스냉각기 또한 축방향의 온도분포를 계산하지 않는 뭉친 변수계로 가정하였으며, 냉각수의 최소유량을 제한하여 냉각수 측의 상변화가 발생하지 않는 조업조건을 대상으로 하였다. 또한 단지 입구측의 가스 및 냉각수의 조건을 사용하여 열교환량(Q_{exc})을 계산하기 위하여 열교환기의 설계에 널리 사용는 Effectiveness-NTU 방법[3]을 사용하였다.

2-3. 정상상태 운전 조건

가스화 공정의 성능을 좌우하는 여러 변수 중에서 산소 유입량, 산소/시료비 등은 가스화기의 온도 및 성능을 제어하는 중요한 변수이다[4]. 이러한 조작 변수들을 조절함으로써 주요 운전 변수 및 가스화기 성능 변화에 대한 결과 얻고, 이러한 자료를 통하여 시스템 전체를 컨트롤이 가능하게 된다. 이 절에서는 동적모사를 위하여 사용된 시료의 성분, 정상상태에서의 운전 조건을 나타내었고, 동적모사 결과를 비교하기 위해 정상상태에서 발생되는 생성가스의 조성을 나타내었다. 폐유 가스화 공정의 동적모사에 사용된 시료의 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. *Chemical composition of the waste oil.*

C	H	O	N	S	Ash
87.6	11.31	0.53	0.18	0.21	0.17

위와 같은 폐유를 기준으로 정상상태 운전 조건은 Table 2와 같다. 운전압력은 371.4kPa,

가스화기 온도는 1157℃이고, 가스화기에 유입되는 폐유 시료의 양은 1000kg/day이며 공급되는 산소의 양은 폐유 시료대비 1.0이다.

Table 2. Feeding and steady state operating conditions.

Operating Pressure	371.4kPa	Operating Temperature	1157℃
Waste Oil Input	1000kg/day	O_2/Waste Oil Ratio	1.0
Steam/Waste Oil Ratio	0.3	Pressure Control Valve Open	75%

가스화 공정의 동적 특성을 비교하기 위하여 정상상태의 압력, 온도, 생성가스의 유량 및 조성이 기준이 되며, 이에 대하여 운전 변수의 변화를 주었을 때 가스화기의 성능변수에 미치는 영향을 비교 분석이 가능하게 된다. Table 3은 동적모사 프로그램을 실행하여 입력에 어떠한 변화도 주지 않은 정상상태 조건하에서 폐유 가스화 공정을 거쳐 생성되는 가스의 조성을 얻은 결과이다.

Table 3. Syngas composition at steady state condition.

CO	CO_2	H_2	H_2O	H_2S	N_2
48.69	1.35	46.72	3.15	0.05	0.04

3. 결과 및 고찰

3-1. 산소 유입량 계단 증가 특성

Fig. 4는 폐유 가스화기의 운전에서 중요한 변수인 산소/폐유비의 영향을 평가하기 위하여 폐유 가스화기의 압력 및 온도를 정상상태 초기 조건하에서 폐유의 공급유량과 증기 투입량을 일정하게 하고, 가스화기로 공급되는 산소/폐유비를 1.05, 1.10, 1.15 등으로 계단증가시켰을 때의 대상 공정 응답특성을 보여준다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 폐유 가스화기의 압력은 산소의 공급량 증가에 따라 약 10~15분 이내의 시간에서 급격한 증가를 보이고 최종적으로 각각 새로운 정상상태 압력에 도달함을 볼 수 있었다. 폐유 가스화기의 온도는 발열반응인 연소반응이 증가함에 따라 초기 1~2분 이내에 급격히 증가한 후 새로운 정상상태에 도달됨을 볼 수 있다. 1.05배 유입조건의 경우 초기 온도 대비 약 11%, 1.1배일 때 약 21%, 1.15배일 때 약 32%까지 증가하는 것을 보여주고 있다. 초기의 급격한 온도의 증가는 산소/폐유비의 변화를 계단으로 증가시켰고, 이에 따른 산소의 유량이 빠르게 가스화기에 유입되면서 연소반응이 이루어지게 되고 이에 따른 응답특성을 보였기 때문이다. 생성가스의 조성에서 이산화탄소의 생성양은 연소반응의 증가로 급격히 증가하여 발생가스 중에 1.05배일 때 약 1.73%, 1.1배일 때 약 2.03%, 1.15배 산소 유입일 때 약 2.30%까지 차지하였다. 이는 절대량으로 계산된 것으로 변화량은 각각 0.38, 0.68, 0.95로 초기 정상상태에 비해 증가한 것이다. 상대적으로 일산화탄소가 생성가스 중에 포함된 양은 이산화탄소가 증가한 것에 반하여 각각의 조건에 따라 48.31%, 48.01%, 47.74%로 감소하였다. 절대량으로 계산된 변화량은 각각 0.38, 0.68, 0.95로 감소한 것이다. 즉, 가스화기 내부에서 가스화반응에 의해 발생했던 일산화탄소가 연소반응으로 인해 이산화탄소로 전환된 것이다. 발생되는 수소 가스 역시 연소반응으로 인하여 발생량이 초기 급격히 감소하다가 최종적으로 각각 44.95%,

43.12%, 41.25%에서 새로운 정상상태에 도달하는 결과를 얻었다. 수소의 초기값 대비 변화량은 각각의 유입 조건에 따라 1.77, 3.6, 5.47로써 발생되었던 수소가스가 연소에 의해 감소되는 경향을 보여주고 있다. 산소/폐유비 변화에 따른 생성가스 조성의 변화는 조건변화 이후 약 1분 이하인 매우 빠른 응답 특성을 보인다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 산소 공급량의 증가로 가스화기 내부에서 연소반응이 주도적으로 일어나게 되어 수소와 일산화탄소 가스가 산소와 반응이 촉진되면서 일산화탄소와 수소의 변화량이 감소하게 된 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐유를 대상으로 가스화 공정의 동적모사 프로그램을 사용하여 산소/폐유비 조작변수에 의한 가스화 공정의 동특성 결과를 얻었다. 산소 공급량을 1.05, 1.10, 1.15등으로 계단 증가 시켰을 경우 압력과 생성가스의 발생량은 최대 약 10%와 7.4% 정도로 증가한 후 안정화되었으며, 상대적으로 산소 유입량만이 가스화기 내부에서 증가하게 되어 가스화기 온도변화는 다른 조건들에 비하여 크게 증가하여 1.15배의 경우 기준 정상상태 온도 대비 약 32%까지 증가하는 결과를 보였다. 생성가스 조성에서도 수소와 일산화탄소가 상대적으로 많이 감소하고 이에 반하여 이산화탄소가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

공정의 동적특성 자료는 실제 폐유 가스화 공정 설비의 신규 건설이나 운전에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 기 개발된 폐유 가스화 동적모사 프로그램을 바탕으로 부가 공정들의 모델을 더하여 앞으로 실제 공정 구성에 더욱 부합하는 프로그램으로 개선해 나아갈 것이다.

감 사

본 연구는 과학기술부 산하 한국과학기술평가원에서 지원한 국가지정연구실 "가연성 폐기물처리용 가스화용융 공정기술개발" 과제의 일환으로 추진되었습니다. 지원에 감사드립니다.

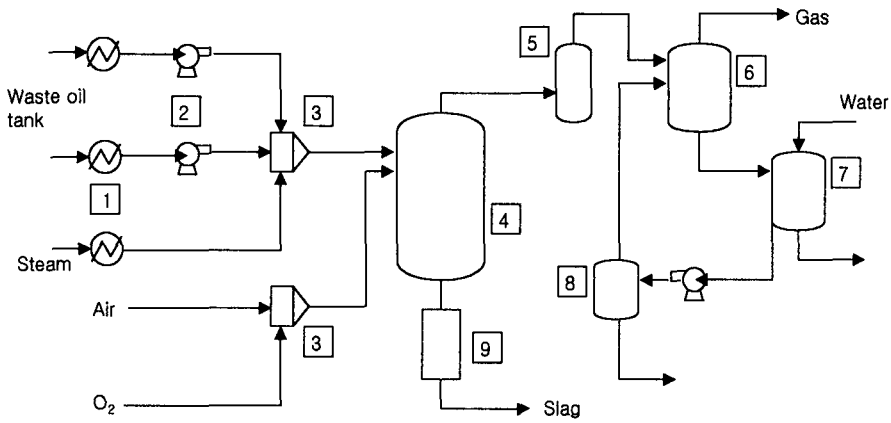
참고문헌

1. Paola Cipriani, Paolo De Filippis, Fausto Pochetti, "Solid Waste Gasification : Energy Recovery From Polyethylene Biomass Mixtuers", Journal of Solid Waste Technology and Management, Vol. 25, No. 2, (1998)

2. G. Kovacik, M. Oguztorelli, A. Chambers and B. Ozum, "Equilibrium Calculaitons in Coal Gasification", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 15, No. 2, pp. 125-131, (1990)

3. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, (1980)

4. Fumihiko Tamamushi, Mikio Shimojo and Naggatoshi Fujii, "Study of Heavy Oil Gasification for IGCC", JSME International Journal, Series B, Vol. 41, No. 4, (1998)



1 Heater 2 Pump 3 Mixer 4 Gasifier 5 Water spray 6 Scrubber
7 Water tank 8 Bag filter 9 Slag quench chamber

Fig. 1. Schematic diagram of the waste oil gasification

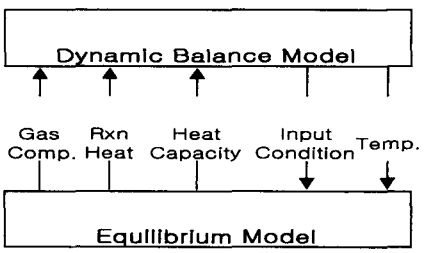


Fig. 2. Configuration of gasifier model.

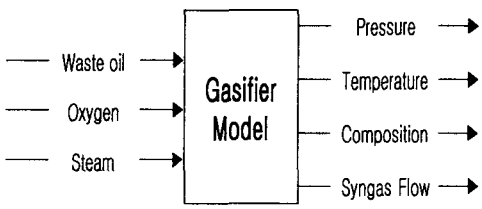


Fig. 3. In/Output variables for gasifier model.

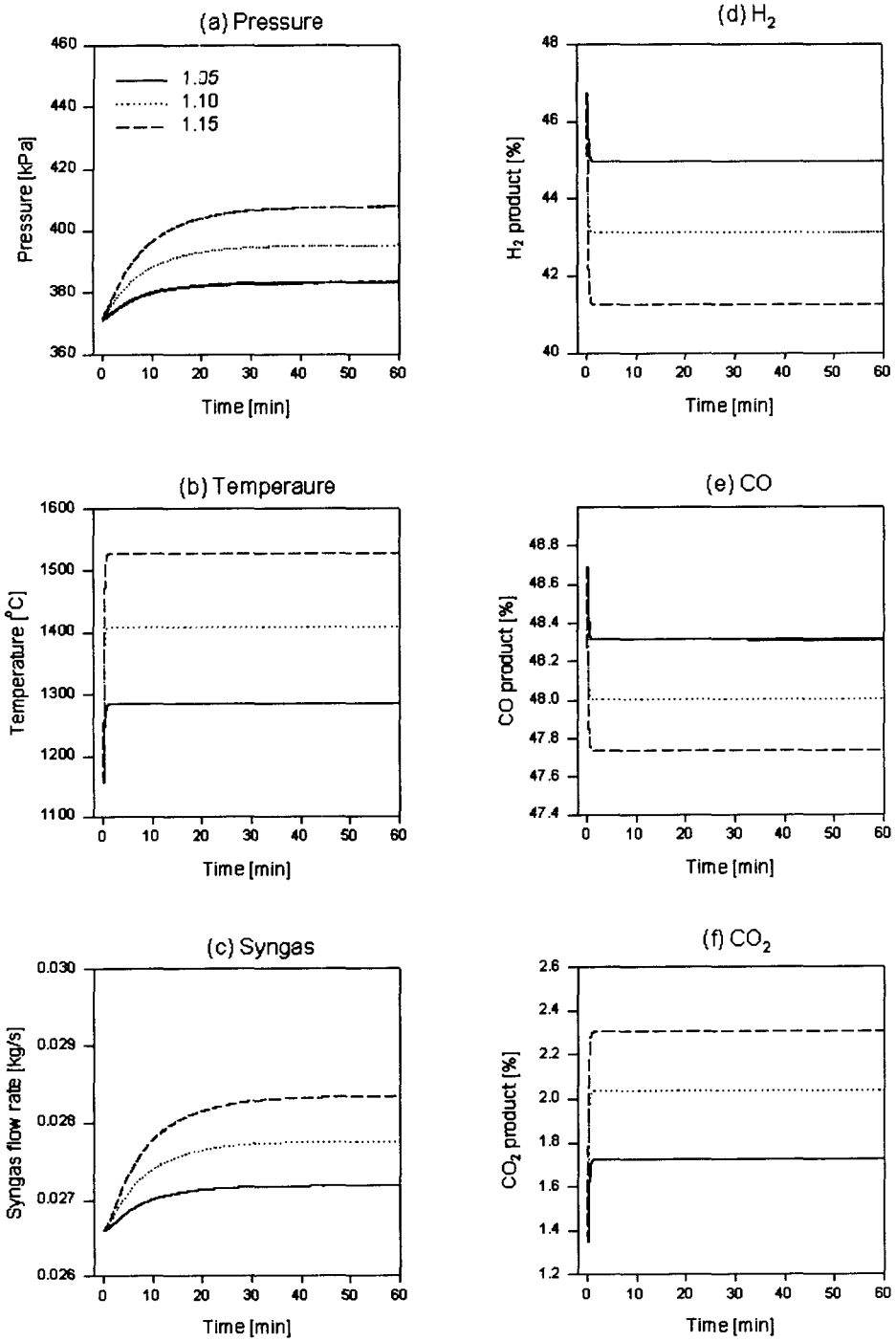


Fig. 4. Transient responses of O_2 step input increase(1.05:1.10:1.15).