

폐유가스화 공정의 동적모사

고은용, 이승종, 윤용승
고등기술연구원 Plant Engineering Center

Dynamic Simulation for Waste-Oil Gasification Process

Eun-Yong Ko, Seung-Jong Lee, Yongseung Yun
Institute for Advanced Engineering, Plant Engineering Center

요 약

본 연구에서는 검증된 BSU 3톤/일급 석탄가스화공정에 대해 개발된 동적모델을 폐유가스화 공정모델에 적용하였다. 대상공정에 포함된 조작변수들의 변동에 따른 주요 공정변수인 산소/폐유비율 3% 계단증가시킨 결과, 폐유가스화기의 압력은 15분의 시상수를 보이며 최종적으로 2.4%가 증가된 정상상태에 도달하였고, 온도는 초기 1분 이내에 약 3.2%의 급격한 증가를 보인 후 최종적으로 4.1% 증가된 정상상태에 도달하였다. 그리고 생성가스의 조성은 이산화탄소가 6% 증가되었고, 일산화탄소와 수소는 각각 2% 및 8% 감소된 새로운 정상상태에 도달하였다. 이러한 결과를 토대로 폐유가스화기의 부하변동에 따른 주요 공정변수들의 변동경향 및 신뢰성 있는 동적모사 결과를 얻고, 개발된 모델에 cascade 및 ratio 방식의 온도, 압력 제어로직을 설계하여 실공정 적용실험을 통한 전산모사결과 및 안정된 운전특성을 검증할 수 있는 기초를 마련하였다.

1. 서 론

폐유는 저유소와 석유비축기지, 급유소 등 석유제품의 제조, 유통에 관계하는 산업과 전력, 철강, 화학 등의 제공업과 선박등의 운수기관 등 석유제품을 소비하는 모든 산업으로부터 배출된다. 이러한 폐유를 처리하지 않고 그대로 배출시에는 토양과 지하수, 하천, 호수, 해양 등에 심한 환경오염을 유발시켜 환경보존상의 큰 문제를 일으킬 뿐만 아니라 그 인화성, 가연성은 더욱 문제가 되어 사회적, 경제적으로 큰 손실을 가지고 올 수 있어 폐유의 처리·재이용은 국내뿐만 아니라 선진국에서도 중요한 과제로 인식되고 있다.

이러한 폐유의 처리·재이용을 위한 가스화용융 공정기술은 폐기물이나 저급의 시료로부터 연료가스로 에너지를 회수함과 동시에 잔류물인 무기물(회재)을 환경적으로 무해한 슬래크으로 재활용도 가능하도록 하는 복합기술이면서 향후 폐기물처리의 잔존에너지 재활용 측면과 다이옥신 발생이 없고 SO_x/NO_x 발생도 현저히 감소시킬 수 있는 환경적합적인 측면을 볼 때 시급히 국내의 기술경쟁력을 갖추어야 할 분야이다.

일반적으로 플랜트공정에서 동적모사를 사용하는 이유는 정상상태 자료들을 기본으로 하여 설계된 플랜트에서 각각의 단위공정들에 대한 임계상황을 검증하고 신규 플랜트들에 대한 startup 및 shutdown 절차를 설계할 수 있을 뿐만 아니라, 공정전체의 제어로직 설계에

필요한 단위공정들의 상호 연관성 및 공정의 동특성 자료를 얻을 수 있기 때문이다. 최근에는 플랜트공정에 대한 동적모사의 중요성이 점차 강조되고 있는 추세이다.

이에 본 연구에서는 이미 개발 검증된 3톤/일급인 BSU(Bench Scale Unit) 가스화공정에 대한 동적모델을 바탕으로 폐유가스화 공정에 적합한 동적모델을 설계하여 열린루프(Open Loop)의 응답특성을 조사하였다. 우선, 주요조작 변수인 산소/폐유비를 계단증가시켜 각각의 온도, 압력, 생성가스조성 및 생성가스유량의 응답특성을 해석하였다. 또한 현재 진행중인 1톤/일 bench급 폐유가스화에 대한 실험자료와 비교하여 신뢰성 있는 동적모델을 완성함으로써, 향후 scale-up된 가연성 폐기물 처리용 가스화용융 공정기술의 개발을 위한 제어로직 개발과 운전상태의 예측도구로 활용할 예정이다.

2. 본 론

2.1. 폐유가스화 대상공정개요

본 연구의 대상공정은 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 폐유를 가스화기로 주입하는 폐유주입설비, 산소주입기, 가스화기, 생성가스 냉각기, 슬래크/처리설비 등을 포함하며 이외에 각각의 공정을 연결하는 배관 및 각종 밸브류 등을 포함한다.

가스화기의 동적인 거동을 모사하기 위한 모델은 가스화기 주변의 입출력 변수에 대하여 수립된 비정상상태 열 및 물질수지에 의해서 표현된다. 본 모델의 모사에서 대상으로 하는 분류층 가스화기는 가스화기 내부로 주입된 폐유 및 가스상이 강한 스웰에 의하여 매우 빠르게 혼합되고 고온/고압 조건에서 빠르게 반응하기 때문에 반응기내의 완전혼합을 가정하는 모델로 단순화하였다.

본 가스냉각기 모델은 이중관, cross flow 및 shell-and-tube 열교환기 모두를 포함하여 대상공정의 특성에 따라 선택할 수 있도록 구성하였고, 냉각수의 최소유량을 제한하여 냉각수 측의 상변화가 발생하지 않는 조업조건을 대상으로 하였다.

슬래크/처리설비는 슬래크탱을 통하여 폐유가스화기와 직접 연결되어 있고, bench급 공정의 가장 중요한 제어변수중의 하나인 가스화기의 압력변동 응답특성에 큰 영향을 미친다. 슬래크/처리설비에 대한 모델은 슬래크-quench chamber, 슬래크 lock hopper 및 water receiver로 구성되어 있다.

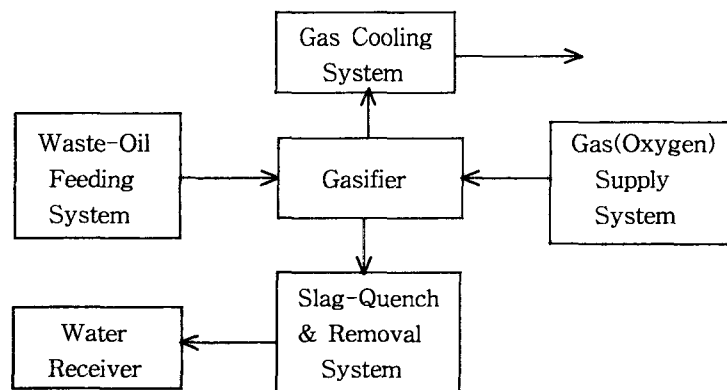


Fig. 1. Schematic diagram for the waste-oil gasification process

2.2. 폐유가스화기의 주요 입출력 변수

폐유 가스화 공정의 입출력 변수는 Fig. 2와 같다. 대상공정인 폐유 가스화공정에 대하여 공정에 직접적으로 관계하는 주요 조작변수는 원료인 폐유의 유량, 산소유량 및 압력조절밸브 열림패도로 요약될 수 있으며 주요 피제어변수는 가스화기 압력, 가스화기 온도, 생성가스의 조성 및 유량으로 구분될 수 있다.

1톤/일급 폐유가스화기로 유입되는 폐유 공급유량은 40 kg/hr이며 입력 값에 대한 계단변화전의 초기 정상상태를 유지하기 위하여 산소의 유량은 가스화기 내화재 문제로 인하여 1400℃의 온도에서 정상상태로 유지되도록 폐유/산소비를 조절하여 입력하였고, 폐유가스화기내의 압력은 가스화공정의 제일 후단에 설치된 압력조절밸브의 열림패도를 조절하여 3.0 기압에서 정상상태로 유지되도록 하였다.

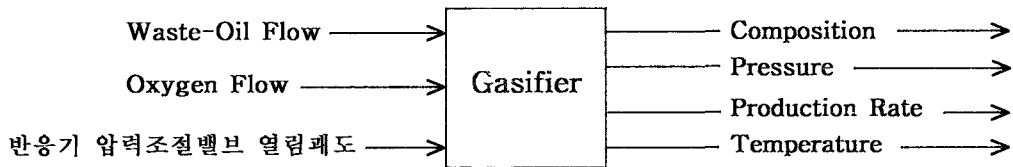


Fig. 2. Input/Output variables of waste-oil gasification process

2.3. 주요 제어목표

폐유가스화 공정에 대한 제어목적은 다음 세 가지 조건을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

- 생성가스 조성의 안정성
- 조업조건 변동에 따른 안정성(step change in load)
- 가스화기 부하변동에 대한 안정성(ramp change in load)

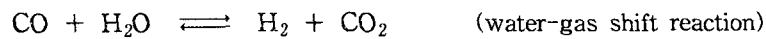
가스화기의 부하, 온도 및 생성가스의 조성에 가장 큰 영향을 미치는 공정변수는 폐유에 대한 산소의 비이다. 정상상태 운전 중 가스화기의 부하를 증가 또는 감소시키기 위해서 가스화기로 공급되는 폐유의 유량을 조절하는 경우, 가스화기의 온도 및 생성가스의 조성을 일정하게 유지하기 위해서는 산소의 유량을 산소/폐유 비의 값이 일정한 상태로 유지될 수 있도록 제어하여야 한다.

Bench급 가스화공정에서 폐유 공급 유량의 설정치는 목표로 하는 가스화기의 운전압력에 따라 변화되어 입력되며, 이에 따른 산소 공급유량의 설정치는 가스화기의 온도제어기로부터 출력된 산소/폐유비 및 공급되는 폐유의 유량에 의해서 결정된다.

2.4. 폐유가스화기 공정모델

폐유가스화 반응에 대한 동적거동을 일반적으로 전산모사하기 위해서는 폐유가스화기 내에서 발생하는 연소 및 가스화반응에 대한 속도론적 고찰이 선행되어야 한다. 그러나 폐유

는 종류에 따라 내재적인 물리화학적 성상이 매우 다양할 뿐만 아니라 이에 따른 반응의 속도론적 특성 또한 매우 복잡하게 나타나기 때문에 모든 종류의 폐유를 대표할 수 있는 일반화된 속도론적 자료를 얻는다는 것은 매우 힘든 실정이다. 따라서 본 연구에서는 가스화반응 모델의 단순화를 위하여 폐유의 반응특성에 대한 속도론적 자료를 사용하지 않고 조업조건에 따라 생성가스의 조성을 예측할 수 있는 열역학적 평형반응 모델을 사용하였다. 폐유에서 전환된 가스상의 조성은 반응온도에 따른 평형조성으로 존재한다고 가정하면 주어진 입력조건에 대하여 생성가스의 열역학적 평형조성의 계산이 가능하다. 생성가스상의 열역학적 평형조성은 일반적으로 Gibbs 자유에너지 최소화법을 이용하여 계산하는 방법이 널리 이용되고 있으나, 이는 열역학적 물성자료 및 반복계산을 요구하기 때문에 실시간 모사를 행하는 동적모사의 모델링에는 적합한 방법이 아니다. 따라서, Wen과 Chaung이 분류층 가스화기에 대하여 제시한 water-gas shift 반응에 대한 평형상수를 이용하여 반복계산없이 가스화 반응에 대한 평형조성을 계산하는 방법을 사용하였다.



$$K_{\text{WGS}} = \frac{[\text{CO}_2][\text{H}_2]}{[\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]} = \exp\left(-3.589 + \frac{4019}{T}\right)$$

그리고 본 연구에서의 대상공정에 대한 시간에 따른 압력변동은 각각의 대상공정에 대하여 수립된 비정상상태 열 및 물질수지로부터 얻어진 대상공정내의 질량과 온도 및 대상공정의 용적을 사용하여 Redlich-Kwong 상태방정식을 사용하여 계산하였다.

2.5. 폐유가스화 공정의 동적모사

대상공정에 대한 입출력 변수간의 동적특성을 해석하기 위하여 단일 제어루프에 의하여 폐유의 공급량을 1톤/일로 하여 3.0기압, 1400℃의 정상상태로 조업중인 폐유가스화 공정에 대한 주요 조작변수 설정치의 계단증가 변화에 대한 전산모사를 실시하였다.

- 산소/폐유비의 3% 계단증가변화에 대한 열린루프 응답

3. 결과 및 고찰

가스화기의 부하변동에 따른 주요 공정변수들의 동특성은 폐유가스화기 전체 공정의 제어로직 설계에 있어서 가장 중요한 자료로 요구된다. Fig. 3.은 폐유가스화기의 조업에서 가장 중요한 변수인 산소/폐유비의 영향을 평가하기 위하여 폐유 가스화기의 압력 및 온도가 각각 3.0atm, 1400℃인 정상상태 초기조건하에서 폐유의 공급유량과 가스화기 후단의 압력조절밸브 열림패도를 일정하게 유지하면서 가스화기로 공급되는 산소/폐유비를 3% 계단증가시켰을 때 얻은 대상공정의 열린루프 응답특성을 보여준다. 본 모델에서는 산소/폐유비를 3% 계단증가시키는 경우 폐유의 공급유량은 일정하고 산소의 유량만이 3% 증가한 공정변화를 의미한다.

Fig. 3.에서 볼 수 있는 바와 같이 폐유가스화기의 압력은 열린루프 상태로 유지되었기 때문에 산소의 공급량 증가에 따라 약 15분의 시상수를 보이며 최종적으로 약 2.4%가 증가된

정상상태에 도달함을 볼 수 있었다. 폐유가스화기의 온도는 발열반응인 연소가 증가함에 따라 초기 1분 이내에서 약 3.2%의 급격한 증가를 보인 후 최종적으로 약 4.1% 증가한 새로운 정상상태에 도달됨을 볼 수 있다. 초기의 급격한 증가는 산소/폐유비의 변화를 계단으로 증가시켰고, 이에 따른 산소의 유량도 빠른 응답특성을 보였기 때문이다.

생성가스의 발열량 제어와 관련된 생성가스의 조성에서 이산화탄소의 양은 연소반응의 증가로 인하여 급격히 증가하고 초기의 함량과 비교하여 6%가 증가된 새로운 정상상태에 도달하는 결과를 볼 수 있다. 또한, 산소/폐유비의 증가에 따라 연소반응이 증가해서 일산화탄소 및 수소 모두 급격히 감소하고, 각각 초기의 함량과 비교하여 2% 및 8% 감소된 새로운 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 상기한 설명에서와 같이 산소/폐유비 변화에 따른 생성가스 조성의 변화는 시상수가 약 30초 이하인 매우 빠른 응답특성을 보이며 현재 bench급 가스화 공정에 설치된 on-line 가스분석 시스템의 시상수 또한 30초 이하이기 때문에 생성가스의 발열량을 제어하기 위하여 제어변수로서 이산화탄소의 농도를 사용하고, 조작변수로서 산소/폐유비를 사용하는 형태의 발열량 제어로직은 공정의 내재적인 특성에 영향을 적게 받으며 동작될 수 있을 것으로 예측된다.

4. 결 론

실제 운전자료와 비교하여 검증된 bench급 가스화공정의 동적모사 결과를 토대로 하여 폐유가스화 공정에 적용하여 동특성 반응의 결과를 제시하였다.

산소/폐유비를 3% 계단 증가시킨 결과, 폐유 가스화기의 압력은 15분의 시상수를 보이며 최종적으로 2.4%가 증가된 정상상태에 도달하였고 온도는 초기 1분 이내에 약 3.2%의 급격한 증가를 보인 후 최종적으로 약 4.1% 증가하였다. 그리고, 생성가스의 조성은 시상수가 약 30초 이하인 매우 빠른 응답특성을 보이며 이산화탄소가 6% 증가되었고 일산화탄소와 수소는 각각 2% 및 8% 감소된 새로운 정상상태에 도달하였다.

가스화공정의 나머지 주요조작 변수인 산소/폐유비를 일정하게 유지하여 폐유 공급유량의 계단증가에 대한 응답특성과 압력조절밸브의 열림패도의 계단증가에 대한 응답특성은 현재 진행 중에 있다.

이러한 폐유가스화 공정의 동적모사 결과를 점차 폐유가스화기의 실공정 조업자료를 이용하여 신뢰성을 검증한 후, 가스화용융 공정 반응기의 운전상태 예측과 제어로직의 설계 및 검증에 활용할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 유희중, 김원배, 윤용승: "석탄가스화공정의 동적모델링", 한국에너지공학회 추계학술발표회 논문집, 47 (1997).
2. 유희중, 김원배, 윤용승: "Bench급 석탄가스화공정의 동적모사 및 제어", 한국에너지공학회 추계학술발표회 논문집, 90 (1998).
3. 이종민, 김용진, 김상돈: "내부순환 유동층 반응기에서의 석탄가스화 및 모델링", HWAHAK KONGHAK, 38(2), 259 (2000).
4. Russell Rhinehart, R., Richard M. Felder, and James K. Ferrell: "Dynamic Modeling of a Pilot-Scale Fluidized-Bed Coal Gasification Reactor", Ind. Eng. Chem. Res., 26, 738 (1987).

5. Caixia Chen, Masayuki Horio, Tochinori Kojima: "Numerical simulation of entrained flow coal gasifiers", Chemical Engineering Science, 55, 3861 (2000).
6. Wen, C.Y. and Cahung, T.Z.: "Entrainment coal gasification modeling", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 18(4), 684 (1979).

감 사

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

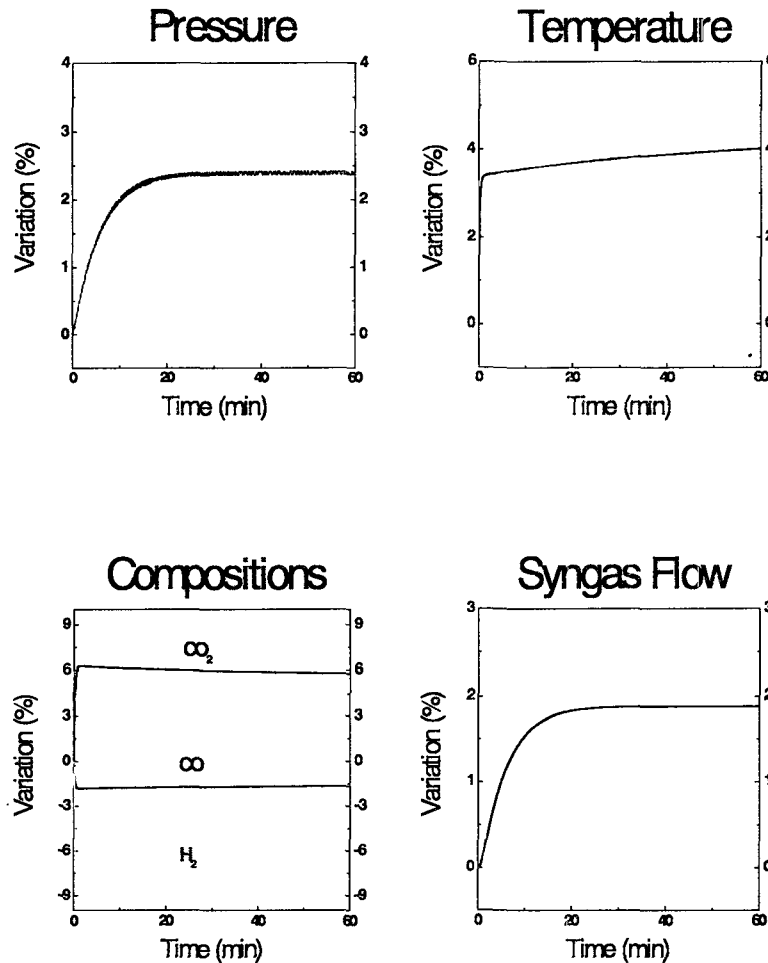


Fig. 3. Dynamic responses with 3% step increase in oxygen flow rate