

초임계 추출 공정의 압력 및 유량 제어계 구성

김 원철[○], 김 흥식, 이 광순
서강대학교

Design of pressure and flowrate control systems
for a supercritical extraction process

Won Cheol Kim[○], Heung Shik Kim, Kwang Soon Lee
Dept. of Chem. Eng. Sogang Univ.

Abstract

Pressure and flowrate control systems for a supercritical extraction process are designed and analyzed. To do this, the dynamic model was first set up using the performance equations of control valves, CO2 compressor and the state equation of the supercritical fluid. Using this model, optimum pairs of manipulated and controlled variable which give least steady state interaction are determined through the relative gain analysis.

1. 서론

지난 수 년간 각국에서는 에너지 절약, 제재 공정의 공해 문제, 종래의 분리 기술로는 처리가 어려운 신소재 수요 등, 화학, 식품, 제약 및 에너지 변환 시설의 대처 방안으로 초임계 유체 추출 기술에 대한 많은 연구들이 수행되어 오고 있다. 그러나 경제성 있는 조업 조건 및 장치의 설계를 위한 정량적인 자료는 매우 부족분한 편이다.

본 연구에서는 초임계 공정운전시 문제가 되는 각 부분에서의 압력, CO2의 유량을 예측하는 동특성 모델을 구성하여 보았다. 압력 및 유량의 해석에는 제어밸브의 특성, 초임계 유체의 상태 방정식, 공기 압축기 (CO2 compressor) 등의 특성식이 엄밀하게 고려되었다.

2. 공정의 개요

Fig.1 에 설계된 공정도를 보였다. 먼저 공기 압축기 (Haskel 사 제품) 에 의해 300 psig 의 CO2 가 8,500 psig 까지의 초임계상태로 압축된 후 초임계 추출기에 전달된다. 초임계 추출기는 고체시료를 다루는 탱크로 연속조업이 어려워 두개의 bed 를 설치하고 전환하며 사용하도록 하였다. 추출기를 나온 CO2와 공기류는 수동 밸브 및 제어밸브에 의해 감압되어 1 차 분리기에 전달된다. 이곳에서 상분리된 일부 추출물은 수위제어에 의해 분리기에서 빠져 나가도록 하였고 CO2 와 나머지 추출물은 다시 수동밸브 및 제어밸브에 의해 감압 후 2 차 분리기 에서 완전히 분리되도록 하였다. 이때 나온 CO2 의 일부는 버리고 나머지는 재순환시켜 다시 압축하도록 하였다. 또한 CO2 탱크 에서 손실된 CO2 를 보충하여 전체 CO2 양의 균형을 맞추도록 하였다.

먼저 각 밸브규격의 결정은 밸브의 특성식(3)

$$C_v = \frac{GPM}{\sqrt{\Delta P/G}} \quad \text{for liq. service} \quad \text{식 (1)}$$

$$C_v = \frac{SCFH \sqrt{(460 + F) G}}{1360 \sqrt{P_1 \Delta P}} \quad \text{for gas service} \quad \text{식 (2)}$$

을 이용하였으며 초임계 상태에서는 liq. service

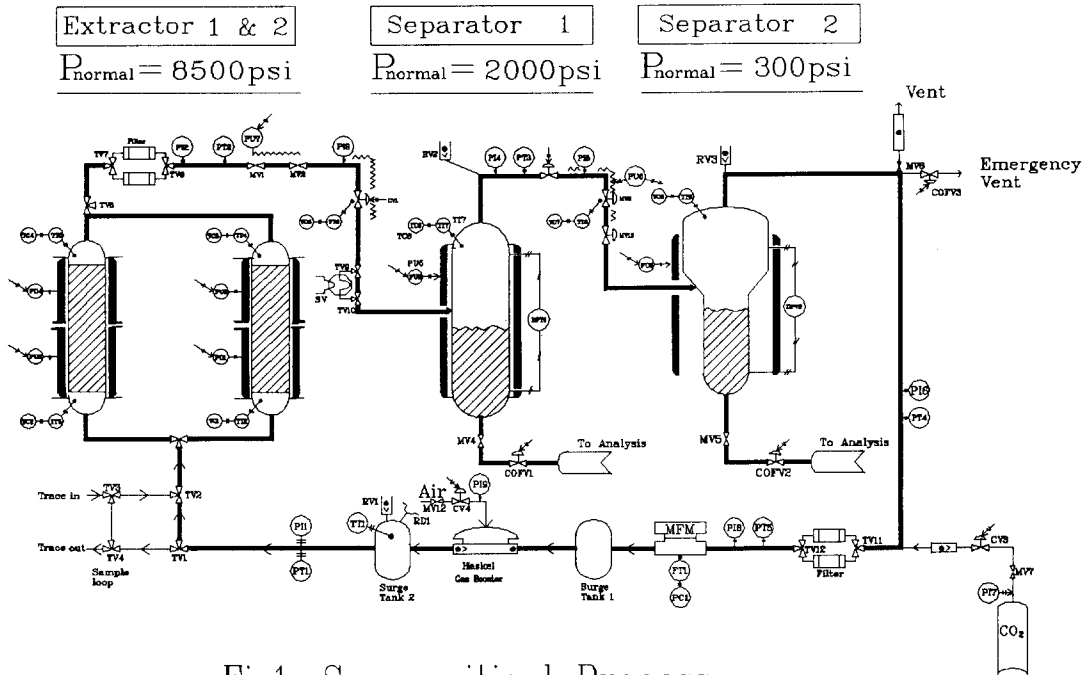


Fig1. Supercritical Process.

식을 기체상태에서는 gas service 식을 이용하였다. Liquid service 식에서 필요한 CO2 초임계유체의 밀도 계산은 Peng-Robinson 식을 이용하여 행하였다. Gas booster 의 용량 결정은 Haskel 사의 특성표 (2) 를 이용하였으며 booster를 기동하는 공기압력, 유입되는 CO2 압력, 토출되는 CO2 압력, CO2 토출량 사이를 나타내는 관계식을 특성표로 부터 regression 하여 구하였다.

3. 모사를 위한 가정 및 기본식

설계된 초임계 추출공정은 CO2 가 재순환되는 가운데 각 장치에서의 압력 및 전체 유량이 조절되어야 하는 까다로운 제어문제를 갖는다. 이 제어계의 구성을 위해 각 부분의 압력, CO2 유량을 나타내는 모델을 구성하고 모사를 행하였다.

모델식의 구성을 위해 도입된 가정은 다음과 같다.

(i) 분리기 2 에서의 압력은 Fig.1의 CV3를 조작하여 행하는 것으로 하였다. 이때 MV6를 통한 vent 양을 충분히 주게 되면 추출기 및 분리기 1에서의 압력이 분리기 2의 압력에 거의 영향을 주지 않게 되므로 분리기 2에서의 압력을 정밀하게 제어 하는 것이 가능해 진다. 따라서 분리기 2에서의 압력은 300 psig로 일정하게 유지되며 gas booster 까지 에서의 압력강하는 무시할 수 있다고 가정한다.

(ii) CO2 에 섞여 있는 불기름에 의한 유체 물성의 변화는 무시한다.

(iii) 압력강하의 유연한 조작을 위해 2 개씩 설치한 수동발브들(MV1-2, MV3-13) 은 이와 동등한 1 개의 수동발브로 환산하여 모델에 고려한다.

초임계 추출 공정의 압력 및 유량 제어계 구성

김 원철[○], 김 흥식, 이 광순
서강대학교

Design of pressure and flowrate control systems
for a supercritical extraction process

Won Cheol Kim[○], Heung Shik Kim, Kwang Soon Lee
Dept. of Chem. Eng. Sogang Univ.

Abstract

Pressure and flowrate control systems for a supercritical extraction process are designed and analyzed. To do this, the dynamic model was first set up using the performance equations of control valves, CO₂ compressor and the state equation of the supercritical fluid. Using this model, optimum pairs of manipulated and controlled variable which give least steady state interaction are determined through the relative gain analysis.

1. 서론

지난 수 년간 각국에서는 에너지 절약, 제재 공정의 공해 문제, 종래의 분리 기술로는 처리가 어려운 신소재 수요 등, 화학, 식품, 제약 및 에너지 변환 시설의 대처 방안으로 초임계 유체 추출 기술에 대한 많은 연구들이 수행되어 오고 있다. 그러나 경제성 있는 조업 조건 및 장치의 설계를 위한 정량적인 자료는 매우 부족분한 편이다.

본 연구에서는 초임계 공정운전시 문제가 되는 각 부분에서의 압력, CO₂의 유량을 예측하는 동특성 모델을 구성하여 보았다. 압력 및 유량의 해석에는 제어밸브의 특성, 초임계 유체의 상태 방정식, 공기 압축기 (CO₂ compressor) 등의 특성식이 엄밀하게 고려되었다.

2. 공정의 개요

Fig.1 에 설계된 공정도를 보였다. 먼저 공기 압축기 (Haskel 사 제품) 에 의해 300 psig 의 CO₂ 가 8,500 psig 까지의 초임계상태로 압축된 후 초임계 추출기에 전달된다. 초임계 추출기는 고체시료를 다루는 탱크로 연속조업이 어려워 두개의 bed 를 설치하고 전환하며 사용하도록 하였다. 추출기를 나온 CO₂와 공기류는 수동 밸브 및 제어밸브에 의해 감압되어 1 차 분리기에 전달된다. 이곳에서 상분리된 일부 추출물은 수위제어에 의해 분리기에서 빠져 나가도록 하였고 CO₂ 와 나머지 추출물은 다시 수동밸브 및 제어밸브에 의해 감압 후 2 차 분리기 에서 완전히 분리되도록 하였다. 이때 나온 CO₂ 의 일부는 버리고 나머지는 재순환시켜 다시 압축하도록 하였다. 또한 CO₂ 탱크 에서 손실된 CO₂ 를 보충하여 전체 CO₂ 양의 균형을 맞추도록 하였다.

먼저 각 밸브규격의 결정은 밸브의 특성식(3)

$$C_v = \frac{GPM}{\sqrt{\Delta P/G}} \quad \text{for liq. service} \quad \text{식 (1)}$$

$$C_v = \frac{SCFH \sqrt{(460 + F) G}}{1360 \sqrt{P_1 \Delta P}} \quad \text{for gas service} \quad \text{식 (2)}$$

을 이용하였으며 초임계 상태에서는 liq. service

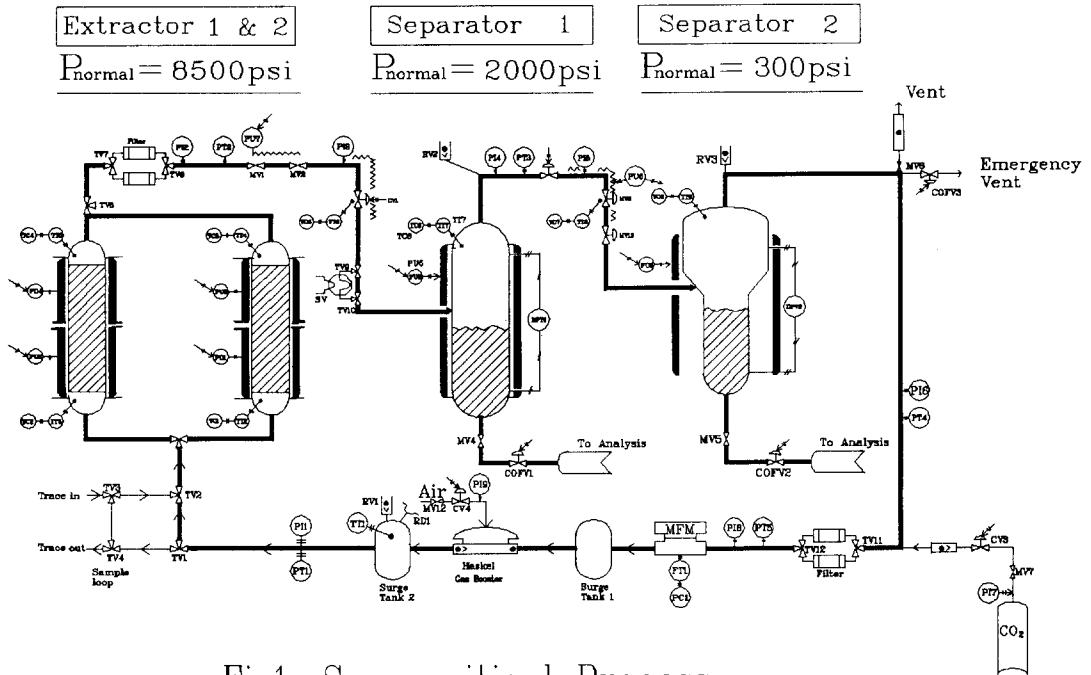


Fig1. Supercritical Process.

식을 기체상태에서는 gas service 식을 이용하였다. Liquid service 식에서 필요한 CO2 초임계유체의 밀도 계산은 Peng-Robinson 식을 이용하여 행하였다. Gas booster 의 용량 결정은 Haskel 사의 특성표 (2) 를 이용하였으며 booster를 기동하는 공기압력, 유입되는 CO2 압력, 토출되는 CO2 압력, CO2 토출량 사이를 나타내는 관계식을 특성표로 부터 regression 하여 구하였다.

3. 모사를 위한 가정 및 기본식

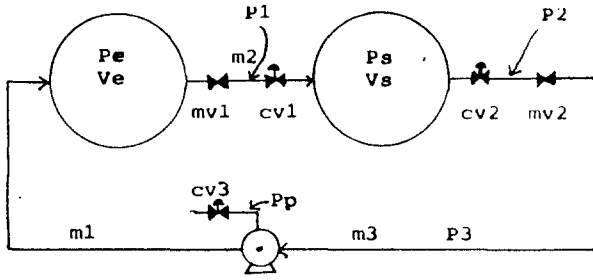
설계된 초임계 추출공정은 CO2 가 재순환되는 가운데 각 장치에서의 압력 및 전체 유량이 조절되어야 하는 까다로운 제어문제를 갖는다. 이 제어계의 구성을 위해 각 부분의 압력, CO2 유량을 나타내는 모델을 구성하고 모사를 행하였다.

모델식의 구성을 위해 도입된 가정은 다음과 같다.

(i) 분리기 2 에서의 압력은 Fig.1의 CV3을 조작하여 행하는 것으로 하였다. 이때 MV6를 통한 vent 양을 충분히 주게 되면 추출기 및 분리기 1에서의 압력이 분리기 2의 압력에 거의 영향을 주지 않게 되므로 분리기 2에서의 압력을 정밀하게 제어 하는 것이 가능해 진다. 따라서 분리기 2에서의 압력은 300 psig로 일정하게 유지되며 gas booster 까지 에서의 압력강하는 무시할 수 있다고 가정한다.

(ii) CO2 에 섞여 있는 불기름에 의한 유체 물성의 변화는 무시한다.

(iii) 압력강하의 유연한 조작을 위해 2 개씩 설치한 수동발브들(MV1-2, MV3-13) 은 이와 동등한 1 개의 수동발브로 환산하여 모델에 고려한다.



Data :

$V_e = \text{extractor} + \text{surge tank 2} = 868 \times 2 = 1,736 \text{ cm}$

$V_s = 257 \text{ cm}$

$P_{ess} = 8500 \text{ psi}, p_{3ss} = 300 \text{ psi}, p_{lss} = 4600 \text{ psi}$

$p_{sss} = 2000 \text{ psi}, p_{2ss} = 1660 \text{ psi}$

$m_{lss} = m_{2ss} = m_{3ss} = 3 \text{ (mol/min)}$

$v \text{ [cm/mol]} = \begin{matrix} 42.9 & \text{at } 8500 \text{ psi} \\ 84.6 & \text{at } 2000 \text{ psi} \\ 113.6 & \text{at } 300 \text{ psi} \end{matrix}$

Fig 2. 압력 및 유량 동특성 모사를 위한 단순 공정도.

이와 같은 가정으로 단순화된 모사를 위한 공정도와 정상상태 조업조건, 그리고 각 조건에서 Peng-Robinson 식으로 부터 계산한 CO2의 molar volume 등을 Fig.2에 보였다.

이제 각 장치에서의 물질 수지식은 다음과 같다.

추출기:

$$V_e \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_e} \right) = m_1 - m_2 \quad \text{식 (3)}$$

분리기 1:

$$V_s \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_s} \right) = m_2 - m_3 \quad \text{식 (4)}$$

밸브:

$$m = 891 C_v \sqrt{\Delta P/v} \quad \text{식 (5)}$$

Gas Booster:

$$m = 1.26 \times 10^{-10} [5 P_3 - P_e + 69,070] [100 - \frac{P_e + 14.7}{P_3 + 14.7}] [P_3 + 14.7] [150 P_p - P_e + 5 P_3]^{0.35} \quad \text{식 (6)}$$

Fig.2에서 수동밸브 MV1 과 제어밸브 CV1 을 흐르는 유량 m_2 는 서로 같으며 이때 MV1 을 흐르는 유량은 $P_e - P_1$ 의 함수로 CV1 을 흐르는 유량은 $P_1 - P_s$ 의 함수로 나타내므로 P_1 의 소거가 가능해지고 결국 m_2 는 다음의 식으로 나타내진다.

$$m_2 = 117 \left[\frac{C_{v1}}{\sqrt{1 + 5.9 \times 10^6 C_{v1}^2}} \right] \sqrt{P_e - P_s} \quad \text{식 (7)}$$

같은 방법으로 m_3 도 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_3 = 83.6 \left[\frac{C_{v2}}{\sqrt{1 + 1.06 \times 10^6 C_{v2}^2}} \right] \sqrt{P_s - P_3} \quad \text{식 (8)}$$

추출기 및 분리기의 식을 압력에 관한 식으로 나타내기 위해 chain rule 을 $(d/dt) [1/v]$ 에 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \right) = \left[- \frac{1}{v^2 (dP/dv)} \right] \frac{dP}{dt} \quad \text{식 (9)}$$

CO2의 상태방정식으로 이용한 Peng-Robinson 식

$$p = \frac{82.05 T}{V-26.3} - \frac{3.86 \times 10^6 [1 + 0.7186(1 - (\frac{T}{304.2})^{\frac{1}{2}})]^2}{V(V+26.3) + 26.3(V-26.3)} \quad \text{식 (10)}$$

으로 부터

$$v \frac{dp}{dv} = v^2 \left[\frac{7.72 \times 10^6 (1 + 0.7186(1 - (\frac{T}{304.2})^{\frac{1}{2}}))^2 (V+26.3)}{V(V+26.3) + 26.3(V-26.3)^2} - \frac{82.05 T}{(V-26.3)^2} \right] \quad \text{식 (11)}$$

의 관계를 얻을 수 있으며 이렇게 얻어진 $v \frac{dp}{dv}$ 에 추출기와 분리기의 정상상태 조업조건을 대입하여 부분적인 선형화를 행하였다.

이와같은 과정을 통해 얻어진 최종적인 식은 다음과 같다.

추출기:

$$1.09 \times 10^{-3} \frac{dP_e}{dt} = m_1 - m_2 \quad \text{식 (12)}$$

분리기:

$$1.21 \times 10^{-3} \frac{dP_s}{dt} = m_2 - m_3 \quad \text{식 (13)}$$

여기서

$$m_1 = 1.26 \times 10^{-10} [5 P_3 - P_e + 69,070] \left[\frac{100 - \frac{P_e + 14.7}{P_3 + 14.7}}{150 P_p - P_e + 5 P_3} \right]^{0.35} [P_3 + 14.7] \quad \text{식 (14)}$$

$$m_2 = \frac{117 C_{v1}}{\sqrt{1 + 5.9 \times 10^6 C_{v1}^2}} \sqrt{P_e - P_s} \quad \text{식 (15)}$$

$$m_3 = \frac{83.6 C_{v2}}{\sqrt{1 + 1.06 \times 10^6 C_{v2}^2}} \sqrt{P_s - P_3} \quad \text{식 (16)}$$

4. 동특성 모사 결과

식 (12)-(16)로 표시된 추출공정에서 조작변수는 CV1, CV2, Pp의 세개, 출력 변수는 Pe, Ps, m3의 세개, 그리고 P3의 변화가 가장 큰 영향을 끼치는 외란이 된다. 이 관계를 Fig.3

에 block diagram으로 보였다. 본 연구에서는 각 출력 변수의 제어를 행하는데 있어서 효과적인 조작변수의 짝을 결정하는데 우선 그 목표를 두었으며 이를 위해 각 조작변수의 계단변화에 대한 출력변수의 응답을 구하였다.

먼저 CV2와 m3의 관계를 제외한 모든 경우, 그 응답이 1차 선형계로 근사될 수 있음을 볼 수 있었으며 시정수는 모두 2-5분 사이의 값을 보이고 있다. CV2의 변화에 대한 m3의 응답은 음의 영(zero)를 갖고 있는 2차계의 특성을 보이고 있으나 제어계의 구성에 문제를 주는 특성은 아니다.

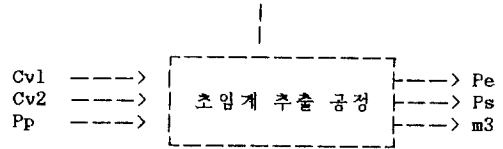


Fig.3. 초임계 추출공정의 block diagram.

Pe, Ps, 및 m3의 제어를 위한 조작변수의 짝은 Bristol의 상대이득을 이용하여 구하였다.

상대이득행렬 값은

	CV1	CV2	Pp	
Pe	0.259	-1.4 × 10 ⁻⁴	0.740	식 (17)
Ps	0.154	0.845	1.03 × 10 ⁻⁴	
m3	0.586	0.154	0.259	

와 같이 나타났다. 이것으로 부터 각 출력변수를 제어하기 위한 조작변수는

P	—	Pp	식 (18)
Ps	—	CV2	
m3	—	CV1	

이 적합함을 알 수 있다.

4. 결 론

식 (17) 에 보인 쌍들의 상대 이득치가 1에 가까우며 나머지 상대 이득치도 모두 0 과 1 사이의 값을 갖는 것, 모든 계단응답이 비슷한 시정수의 단순한 패턴을 보이는 것 으로 부터 기본적으로 식 (18)의 쌍이 잘 선정된 것이라 생각할 수 있다.

인 용 문 헌

1. Bristol, E.H., "On a New Measure of Interaction for Multivariable Control", IEEE Trans.AC-11, 133 (1966)
2. Haskel Catalog on Nonlube-Contaminant Free Gas Booster, Catalog M-26C, Haskel Inc. (1976)
3. Badger Catalog on Research Control Valves, Badger Meter, Inc.