'90 韓國自動制御學術會議論文集 1990. 10.26~27

모호논리를 이용한 초임계유체추출공정의 제어

* 유 두 선
주) 신도리코 기술연구소 화성개발부

이 광 순, 남 성 우, 김 정 한
서강대학교 화학공학과

Control of Supercritical Fluid Extraction process using Fuzzy Logic

* Doo - Sun Yoo
Sindo Ricoh company, Ltd.
Chemicals R & D Dept.

Kwang-Soon Lee, Seung-Woo Nam, Jeung-Han Kim
Dept. of Chemical Eng.
Sogang University

Abstract

A fuzzy control control scheme has been proposed for a supercritical extraction process which has attracted much attention recently as a new separation technology.

Based on the manual operation experience, three control pairs between manipulated and output variables are selected first and then seven membership functions are defined for control error and time rate of the error, respectively for each control pair, resulting in fourty nine Fuzzy control rules. In addition to these, the membership functions are defined in two steps(coarse and fine) to enhance control performance. Fuzzy inference is performed using MAX-MIN composition rule and defuzzified control output is calculated based on center of gravity method.

The prosed Fuzzy control scheme has been assesed through numerical simulation. As a result, the proposed scheme shows good control performance comparable with that by INA (inverse nyquist array) whic usually requires complicated design procedure.

1.서론

초임계유체 추출현상은 비휘발성 물질이 고밀도 응축상에서 저밀도 팽창상인 초임계 유체로 이동하는 증발현상이라고 이해되기도 하며 또 한편으로는 용매간의 상호작용에 의한 용해현상이라고 이해되기도 한다. 이와같이 증류와 추출의 양면성을 갖는 초임계 유체 추출기술은 기존의 기술로는 분리가 어려웠던 이성체, 열변성혼합물의 분리,고분자 물질의 정제,천연식물로 부터 의약, 향료와 같은 유효성분의 분리를 비롯하여 에너지 절약형 무공해공정 개발등 그 응용범위가 넓어 최근 비상한 관심을 끌면서 활발한 연구가 진행되는 첨단 분리기술의 하나이다. 그러나 초임계유체 추출기술은 아직 초보적인 단계에 있으며 경제성 있는 조업조건 및 장치의 설계를 위한 정량적인 자료는 매우 불충분한 편이다. 현재 상업화 되어있는 초임계유체 추출공정으로는 서독 HAG 사의 커피로 부터 카페인을 제거하는 공정이 있으며 이외에도 맥주에서 쓴맛을 내는 호프향 추출, 담배의 니코친 제거, 석탄의 액화, 활성탄의 재생등에 상업적으로 이용되고 있다.

본 연구에서 대상으로 한 공정 (Fig. 2. 공정개요 참조)는 초임계유체 CO_2를 환류시키는 공정으로 Fig.1.에서 보여지는대로 3개의 제어변수 (Pe:추출기의 압력 , Ps1: 분리기1 의 압력, m1: 이산화탄소의 몰흐름 속도) 에 vent되

는 이산화탄소의 몰흐름 속도(m4)가 외란으로 작용하는 계를 3개의 조작변수 (CV1: 제어밸브 1, CV2: 제어밸브 2, Pp: 가스부스터를 가동 시키는 공기압) 를 이용하여 제어하는 계로 표현할 수 있다.

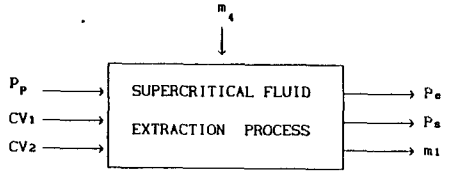


Fig. 1. Black box representation of the supercritical fuid extraction process.

본 연구의 대상이 되는 초임계유체 추출공정은 공정운전상 다음의 문제점을 가지고 있다. 첫째, 3개의 공정변수들 간에는 심한 상호간섭이 존재하며, 둘째, 공정의 모델화가 어렵고 비선형성이 심하다는 것이다. 이와같은 문제점을 효과적으로 해결하기 위해서는 공정변수들 간의 상호간섭을 줄이기 위한 decoupling 기법, 모델화의 어려움을 극복하기 위한 MRAC (model referenced adaptive control) 등의 최신 제어기법을 도입하는 것을 생각할 수 있으나 이들이론은 복잡한 수학이론에 근거한 것으로 현장조업자, 엔지니어들의 이해를 구하기 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 80년대 들어 특히 일본의 산업계를 중심으로 대단한 호응을 얻고 있으며 간단한 논리와 조업경험에 바탕을 두고 구성되는 모호제어 기법을 도입하여 앞에서 언급한 문제에 효과적으로 대처할 수 있는 제어기를 설계하고자 한다.

정의가 어려운 공정의 제어는 많은 경우 경험에 근거한 수동조작으로 행해진다. 이러한 공정의 조업자 들은 비록 대상공정의 수학적인 모델은 모를지라도 융통성 있는 사고, 정성적인 분석이라는 제어전략을 사용하여 공정을 적절히 제어할 수 있다. 이러한 수동조작의 특징을 살펴보면 i) 계가 바뀌어도 신축성 있게 대처하고 ii) 경험에의해 계를 학습하고 iii) 불확실한 정보를 다루는 능력이 있다는 것이다. 모호제어는 이러한 수동조작의 장점을 불확실한 정보를 다루는 수학적인 방법인 모호집합론의 개념을 이용하여 컴퓨터에 이식시키는 것이라 할수있다. 모호제어 에서는 계의 정의가 어려워 수학적인 모델링이 곤란한 공정에 대한 현장조업자들의 수동조작 전략을 귀속도 함수의 개념을 이용하여 획률적인 정량적 수치로 변환한 후, 모호 집합론과 모호논리의 수학적 도구로 처리하여 제어하게 된다.

본 연구에서는 수차례에 걸친 수동운전의 경험과 전산기 모사실험 경험을 토대로 제어규칙을 만들어 냈으며, 제어규칙에 포함된 언어변수를 정의한 후 모호논리에 근거한 추론을 하여 사람이 제어루프 안에 들어가 있는 것과 같은 논리적 제어를 수행하였다.

과학에서는 양적인 것, 정확히 표현되는 것을 연구의 대상으로 삼고 있지만 질적인것, 부정확한 것은 경시해온 경향이 농후하다. 그러나 이러한 전통으로 부터 벗어나 애매모호한 표현이나 대상도 과학적인 사고의 영역이 될수 있을것으로 여겨온 Lotfi. A. Zadeh는 1965년 모호집합 (Fuzzy set)이라는 처음으로 도입 하였으며 이를 근거로 모호논리라는 논리체계가 정립되었다. 일찌기 Zadeh도 지적하였듯이, 인간이 무엇인가를 추리해 나가는데 있어서 정확하다기보다는 오히려 부정확한 편으로 쏠리기 쉬운 경우가 많다. 예를 들면 " 키가 작은 사람들의 집합 "과 같은 표현에서 "작다"라고 하는 기준이나 그 경계가 모호하므로 종전대로라면 이러한 사람들의 집합은 분명히 획정지을 수 없다. 그러나 일상생활에서 우리의 대화를 비롯하여 사회현상에 있어서 애매모호한 대상이나 표현을

허다히 찾아볼 수 있을 것이다. 종래의 확률론이나 2치논리 (two valued theory) 로서는 처리할수 없는 막연한 대상도 형식화 할수 있도록 이론적 기반을 닦아놓은 모호집합의 개념은 그간 불과 20년 만에 그계 진전 함으로써오늘날에는 인간공계, 시스템 공학, 패턴 인식, 정보검색등 여러 방면에서 활용되기에 이르렀으며, 수학적인 모델을 이용하여 제어하기 힘든 복잡한 공정을 모호논리에 근거한 제어기로 자동제어한 일례가 발표되고 또 반도체 칩에의해 초당 수백만, 수천만의 추론을 행할수 있는 여건이 형성되면서 현재 일본, 구미, 미국 그리고 중국등에서 많은 관심을 가지고 연구개발 되고있다.

본 연구의 진행과정은 수차례에 걸친 수동운전의 경험에 의하여 제어규칙을 만들어 내고, 제어규칙에 포함된 언어변수 (linguistic variable)를 정의한 후 모호논리에 근거한 추론을 하여 사람이 제어루프 안에 들어가 있는 것과 같은 논리적 제어를 수행 하였다.

2. 본론

2-1. 공정의 개요.

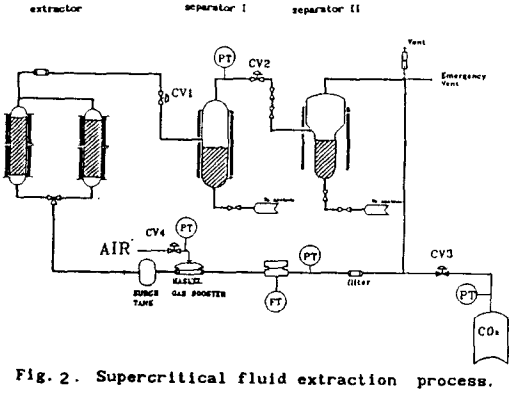


Fig. 2. Supercritical fluid extraction process.

Figure 2.에 본 연구의 대상으로 설정한 초임계 유체 추출공정의 공정도를 보였다. 먼저 gas booster에 의해 300 psi의 CO_2가 8500 psi까지의 초임계 상태로 압축된 후 초임계 추출기에 전달된다. 추출기를 나온 CO_2와 추출물은 수동밸브 및 제어밸브에 의해 감압되어 1차 분리기에 전달되고, 이곳에서 상분리된 일부 추출물은 수위제어에 의해 1차 분리기에서 빠져 나가고 CO_2와 나머지 추출물은 다시 수동밸브 및 제어밸브에 의해 감압된 후 2차 분리기에 의해서 완전히 분리된다. 이때 나온 CO_2의 일부는 방출시키고 나머지는 재순환시켜서 다시 압축을 하여 사용한다. 또한 손실되는 CO_2는 tank로부터 보충하여 전체 CO_2의 양은 균형을 이루도록 하였다. 추출기, 각 분리기의 압력, 그리고 CO_2의 유량조절을 위하여 4개의 제어밸브(CV1-CV4)를 설치하였고, 온도제어를 위해 외부에 전열기와 냉각기를 설치하였다. 추출기 및 각 분리기 사이에서의 압력강하로 인한 제어밸브의 특성에 영향을 일으킬 수 있는 효과를 막기 위하여 수동밸브(MV1,2,3,4)를 2단으로 설치하였으며 추출기와 분리기를 중심으로한 물질 수지식에 의해 아래의 식들이 얻어진다.

추 출 기 :

$$V_e \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{V_e}\right) = m1 - m2$$

분리기 1 :

$$V_{s1} \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{V_{s1}}\right) = m2 - m3$$

분리기 2 :

$$V_{s2} \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{V_{s2}}\right) = m3 + m5 - m1 - m4$$

제어밸브 :

$$m = 569.85\ CV \sqrt{\Delta P/v}$$

가스 부스터 :

$$m1 = 1.26\times10^{-10}(5P3 - P_e + 69.07)\left(100 - \frac{P_e + 14.7}{P3 + 14.7}\right)(150P_p - P_e + 5P3)^{0.35}$$

Figure 3.에 간략화된 공정도를 표시하였다.

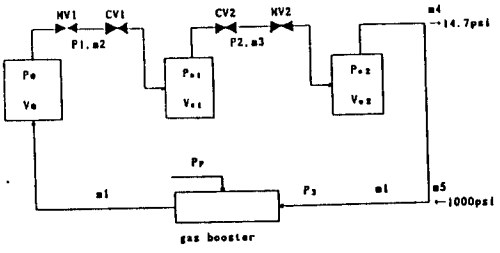


Fig.3. Simplified process.

2-2. 제어규칙의 도출.

수차례의 수동운전 실험결과에 의하면 3개의 제어변수 간에는 상호간섭이 매우 심하므로 동시에 세 변수를 원하는 설정치에 맞추려는 시도보다는 어느 한 변수를 일정하게 설정치 값으로 유지시킨 후 다른 변수를 맞추고 나머지 변수를 제어하는 방법이 상호간섭을 가장 최소화 할 수 있는 방법으로 제시되 었다. 즉, 최초로 제어하고자 하는 변수가 설정치에 거의 이를때 까지 나머지 2개의 변수들은 제어하지 않고 최초의 제어변수가 설정치에 거의 이르면 , 이때 다음으로 제어하고자 하는 변수를 맞추어 나가는 방법이고 운전조작상 가장 수월한 것으로 경험되었다. 수동운전 경험에 하면 최초에 이산화탄소의 몰흐름 유속을 맞춘후 추출기의 압력을 제어하고 마지막으로 분리기 1 의 압력을 제어하는 과정을 취하며 이때 이들 제어변수를 제어하는 조작변수는 이산화 탄소의 몰유량-가스 부스터를 가동시키는 공기압, 추출기 압력-제어발브 1, 분리기 1의 압력-제어발브 2 의 제어량이 가장 운전을 수월하게 하는 방법임이 경험되었다. 이와같은 운전경험에 의해 아래의 규칙을 구성하였다.

규칙 1 : 이산화탄소의 몰흐름 유속이 설정치 보다 매우 작고 이산화 탄소의 몰유량의 변화율이 그게 감소하면 가스부스터를 가동시키는 공기압을 최대로 증가 하라.

규칙 2 : 이산화탄소의 몰흐름 유속이 설정치 보다 매우 작고 이산화 탄소의 몰유량의 변화율이 적당히 감소하면 가스부스터를 가동시키는 공기압을 크게 증가 하라.

규칙 48 : 이산화탄소의 몰흐름 유속이 설정치 보다 매우 크고 이산화 탄소의 몰유량의 변화율이 적절히 증가하면 가스부스터를 가동시키는 공기압을 크게 감소 시켜라.

규칙 49 : 이산화탄소의 몰흐름 유속이 설정치 보다 매우 크고 이산화 탄소의 몰유량의 변화율이 크게 증가하면 가스부스터를 가동시키는 공기압을 최대로 감소 시켜라.

이산화탄소의 몰흐름유속이 설정치에 거의 다다르면 위의 규칙과 함께 제어발브 1에 대한 규칙이 적용되며, 추출기의 압력도 거의 설정치에 다다르면 위의 두가지 규칙과 함께 제어발브 2 에 대한 규칙이 적용된다.

위의 규칙들을 look-up table로 만들기위해 일반적인 형태로 변환하면

RULE 1 : IF ERROR IS PB AND CHANGE OF ERROR IS NB THEN CONTROL VALVE POSITION IS 1.

RULE 2 : IF ERROR IS PB AND CHANGE OF ERROR IS NM THEN CONTROL VALVE POSITION IS 2.

RULE 48: IF ERROR IS NB AND CHANGE OF ERROR IS PM THEN CONTROL VALVE POSITION IS 48.

RULE 49: IF ERROR IS NB AND CHANGE OF ERROR IS PB THEN CONTROL VALVE POSITION IS 49.

where NB = NEGATIVE BIG

NM = NEGATIVE MEDIUM

NS = NEGATIVE SMALL

ZO = ZERO

PS = POSITIVE SMALL

PM = POSITIVE MEDIUM

PB = POSITIVE BIG

CONTROL VALVE POSITION 1 - 완전히 닫힌 상태

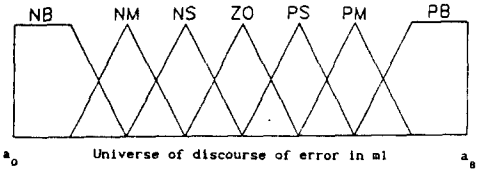
CONTROL VALVE POSITION 49- 완전히 열린 상태

위의 규칙들을 LOOK-UP TABLE 로 만들면 아래와 같다.

CE / E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	43	44	45	46	47	48	49
NM	36	37	38	39	40	41	42
NS	29	30	31	32	33	34	35
ZO	22	23	24	25	26	27	28
PS	15	16	17	18	19	20	21
PM	8	9	10	11	12	13	14
PB	1	2	3	4	5	6	7

2-3. 모호이론의 도입

위의 규칙은 기존의 집합론이나 논리로는 다룰수가 없으므로 이의 해결을위해 제시된 수학적인 도구가 모호집합론과 모호논리 이다. 위에서 정의된 언어변수 (Linguistic variable)의 귀속도함수 (Degree of membership function) 는 다음의 형태로 주어진다.



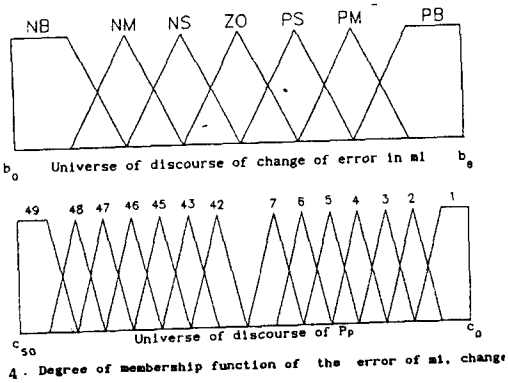


Fig 4. Degree of membership function of the error of ml, change of error of ml and Pp.

3. 결과

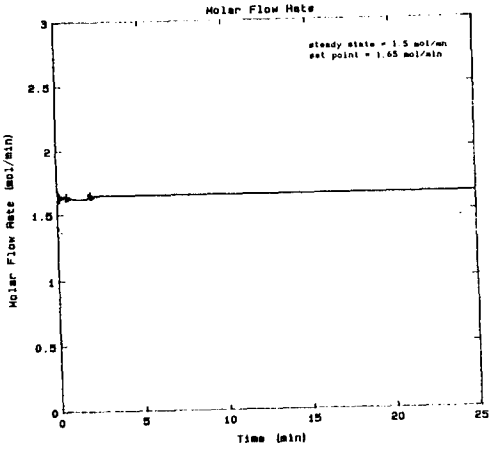


Fig. 5. Process output of ml.

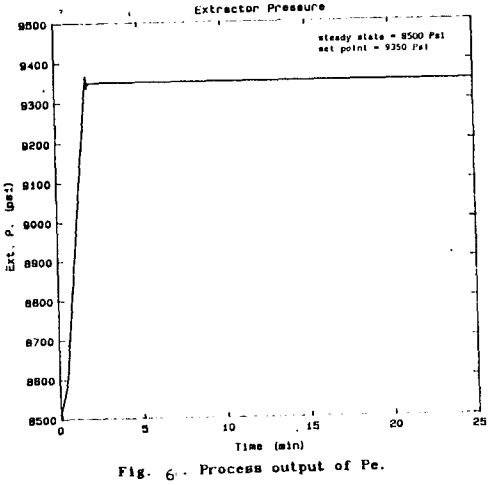


Fig. 6. Process output of Pe.

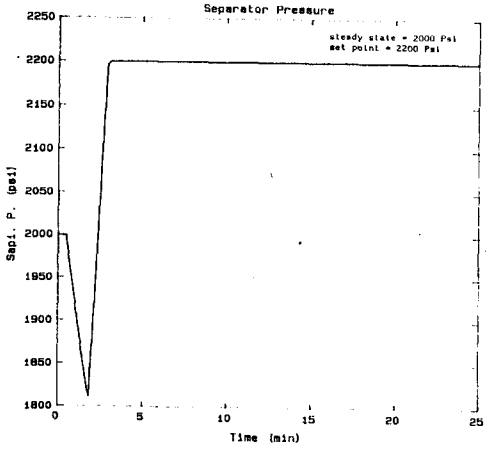


Fig. 7 Process output of Psi.

1) 상호간섭이 심한 다변수계에 대해서 수동운전 경험에 의해 제시된 제어방에 의한 모호제어를 시도한 결과, decoupling의 복잡한 수학적과정을 거치지 않고도 안정된 제어기의 설계가 가능했다.

2) 오차, 오차의 변화율에 대해 2단계의 (coarse, fine) 귀속도함수를 정의 함으로서 제어성능을 높일 수 있었다.

3) 공정의 모델이 없이도 출력들은 overshoot가 거의 없는 특성을 보였다.

4. 인 용 문 헌

(1) Badger catalog on research control valves, Badger Meter, Inc.(1980).

(2) Haskel catalog on nonlube-Contaminant Free Gas Booster, Catalog M-26C, Haskel Inc.(1976).

(3) L. A. Zadeh, " Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes",IEEE Trans.syst.,Man,Cybern.,vol.SMC-1,no.1,(197

(4) MADAN M. GUPTA, JERZY B. KISZKA and G.,M.TROJAN , "Multivariable Structure of Fuzzy Control Systems ", IEEE Trans.syst.,Man,Cybern.,vol.SMC-16,no. 5,(1986).

(5) R. M. Tong , M. B. Beck and A. lattens , " Fuzzy control of the activated sluge wastewater treatment process " , Autometica, 16, 695(1980).

(6) L. P. Holmblad and J.-J. Ostergaard, " Control of a cement kiln by fuzzy logic ", in : M.M. Gupta and E. Sanchez, Eds., Fuzzy information and decisionprocess,pp.398-399,North-Holland, Amsterdam, (1982).

(7) Madan M. Gupta and Takashi Yamakawa,Fuzzy logic in knowledge based systems,decision and control, North-Holland, (1988).