

fuzzy화(defuzzification)시키는 일이 필요하다.

II-1. 입력으로서 fuzzy집합의 정의 (조건부)

편의상 지금 이후의 모든 fuzzy집합은 정규화(Normal fuzzy set) 되었다고 가정한다. 전체 공간 T에서 정의된 다음의 세 가지 fuzzy 집합을 생각해보자-NS(Negative Small), ZO(Zero), 그리고 PS(Positive Small).

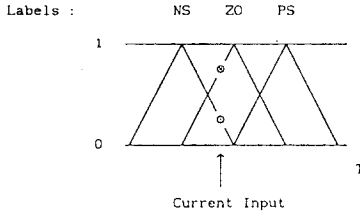


Fig.1. Membership functions of the input fuzzy sets.

Figure 1)에서 두 원 \odot 과 \otimes 는 각각 NS와 ZO에서의 현재 입력에 대한 귀속도(Grade of membership)를 나타낸다. 이것은 현재 입력으로 두가지 규칙이 쓰이게 되었음을 나타낸다. 다시 말하면 활성화된 규칙은 다음의 두가지의 조건부를 가질 수 있다.

- IF 입력이 NS ...
- IF 입력이 ZO ...

이에 해당하는 결론은 두가지일 수도 있고 한가지일 수도 있다. 여기에 다음의 제어규칙이 주어져 있다고 가정하면 결론을 내릴 수 있다.

제어 규칙

- R1 : IF 입력이 NS THEN 출력은 NS.
- R2 : IF 입력이 ZO THEN 출력은 ZO.
- R3 : IF 입력이 PS THEN 출력은 PS.

II-2. 출력으로서의 fuzzy 집합의 정의 (결론부)

입력과 비슷한 방법으로 VP(Valve Position)라는 전체공간에서 정의 되는 fuzzy집합을 Fig. 2.와 같이 정의할 수 있다. 제어 규칙에 따르면, R1과 R2가 입력에 의해 활성화되어서 fuzzy 집합 NS과 ZO를 결론으로 나타내고 있다. 즉, 입력 전체 공간의 fuzzy 집합인 NS과 ZO가 출력 전체 공간의 fuzzy 집합인 NS과 ZO를 각각 활성화시킨 것이다. 그러면, 출력 전체 공간 중에 NS과 ZO 사이에 공정으로 내보낼 값이 있다고 생각할 수 있다. 그러면 한가지 의문점이 생긴다 - 그 사이의 어떤 값이 선택 되어야 하는가?

제시하는 선택의 기준

- a. 입력에 대응하는 출력의 귀속도 함수가 입력의 귀속도와 같은 값을 갖는 곳을 표시한다.
- b. 둘중에서 큰 귀속도를 결과로 택하고 그에 대응하는 전체 공간상의 값을 공정으로 내보낸다.

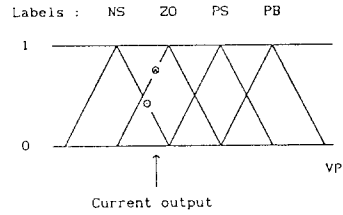


Fig.2. Membership functions of the output fuzzy sets.

Figure 2)를 보면 입력 NS에 대응하는 출력 NS에 \odot 표 하였고, 입력 ZO에 대응하는 출력 ZO에 \otimes 표 하였다. 결과적으로 Fig.2.에서 첫 방향 화살표가 가리키는 전체공간 상의 값이 공정으로 내보내야 하는 값이다.

III. 초임계 유체 추출 공정(SCFEP)에의 적용

III-1. 초임계 유체 추출 공정

보유하고 있는 제어 대상인 초임계 유체 추출 장치는 반 연속식으로 운전되어 시동 문제가 중요하다. 따라서 시동과 제어에 관한 두가지의 제어문제가 동시에 고려되어야 한다. 게다가, 순환흐름으로인해 공정은 상호간섭이 매우 심해진다. 초임계 유체 추출장치의 운전 상황을 대략 살펴보면 다음과 같다.

1. 다소 낮은 압력의 이산화탄소가 ON/OFF 밸브를 지나 공정내로 유입되고 압축기를 통해 높은 압력이 되어 추출기로 유입되는데 압축으로 인해 상승된 온도는 열교환기를 통해 적정온도로 낮아진다.
2. 압축으로 추출기내의 압력은 원하는 압력으로 된다.
3. 추출기내의 추출물과 이산화탄소의 혼합물은 추출기를 지나 두개의 수 조작 밸브를 통해 압력 강하가 생기고 다시 제어 밸브를 통해 원하는 압력으로 낮아져 첫번째 분리기로 유입된다.
4. 추출기의 압력과 첫 번째 분리기의 압력이 둘 다 원하는 압력이 되고나서 분리기의 압력 조절을 위해 추출기에서 첫번째 분리기로 가는 과정과 같은 과정을 통해 두번째 분리기로 유입된다. 유입된 일부는 벤트(Vent)되고 나머지는 순환된다.

공정의 제어 목적은 세가지 압력(P_0 , P_{s1} 그리고 P_{s2})과 물 유속(m_1)의 조절에 있다. 그러나 m_1 의 제어는 독립적으로 제어가 가능하고 P_{s2} 는 자기조절기능이 있으므로 제어 하기로 한다. [6] 평상 운전조건은 다음과 같다.

- P_0 : 350 [atm] P_{s1} : 250 [atm]
- P_{s2} : 30 [atm] m_1 : 1 [mol/min]

Figure 3.은 bench scale로 제작된 본 연구진이 보유하고 있는 SCFEP의 전체적인 공정 그림이다.

III-2. 수학적 모델링 [6]

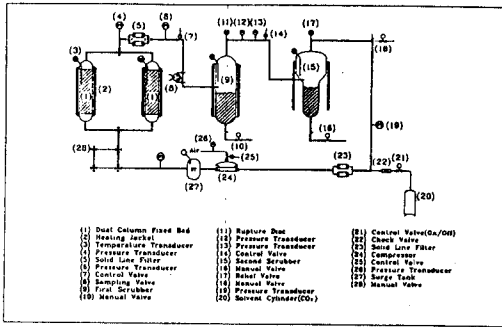


Fig. 3. The complete P & ID of the process(SCFEP).

다음의 가정을 도입하여 공정을 모델링하면 다음과 같다.

가정

1. 공정내의 모든 유체는 이산화 탄소이고 이에 녹아있는 오일은 상대적으로 작다.
2. P_{s2} 의 압력은 잘 조절된다.

$$\frac{dP}{dt} = a(P_s) \left[m_1 - 54.59 C_{v1} \sqrt{P_s - 36.4} \right]$$

$$\frac{dP_{s1}}{dt} = a(P_{s1}) 54.59 \left[C_{v1} \sqrt{P_s - 36.4} - C_{v2} \sqrt{P_{s1} - 36.4} \right]$$

$$\text{where } a(P) = -v^2 \left(\frac{dP}{dt} \right)_P / v$$

III-3. 동특성 [6]

수학적 모델링을 근거로하여 기초적인 공정의 동특성을 살펴보기 위하여 다른 조업 조건에서 같은 크기(+ 5%)의 계단 입력을 공정에 가하였다. Figure 4)와 5)는 내향($[C_{v1}, P_s]$, $[C_{v1}, P_{s1}]$, $[C_{v2}, P_s]$, $[C_{v2}, P_{s1}]$)의 공정 응답 상호간섭이 나타나는 두쌍($[C_{v1}, P_{s1}]$, $[C_{v2}, P_{s1}]$)의 그림을 나타낸다.

Figure 4)와 5)에서 볼 수 있듯이 공정의 정상상태 이득(Steady-state gain)과 시상수(Time constant)가 조업조건에 따라서 크게 변한다. 이 상황을 일반적인 초임계유체의 상평형 그림(Fig.6.)에서도 확인할 수 있다. Figure 6)의 등온선 위에 표시한 o와 o'는 시험한 조업조건이다. 특별히 임계 상태 부근을 살펴 보면 곡선의 기울기가 조업 조건이 변함에 따라서 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 이는 공정의 이득이 크게 변한다고 볼 수 있다. Figure 6)을 기준으로 보면 약 3-4배 이득의 차이가 남을 알 수 있다.

이런 동특성을 갖는 공정에 일정한 이득을 갖는 제어기(PID)를 사용한다면 진동이 매우 심하거나 느린 응답을 보일 것이다.

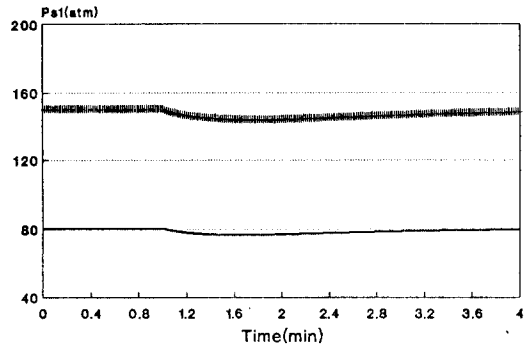


Fig. 4. Step response of P_{s1} at two different operating conditions, (250,80) and (250, 150) when we closed the valve 1 by 5%.

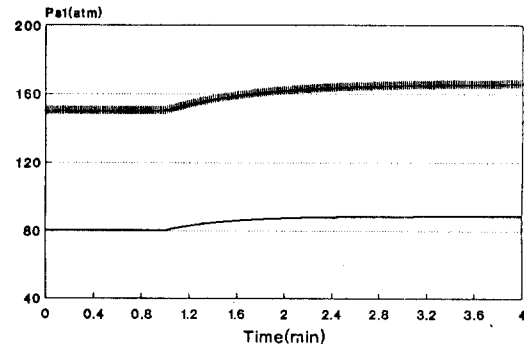


Fig. 5. Step response of P_{s1} at two different operating conditions, (250,80) and (250, 150) when we closed the valve 2 by 5%.

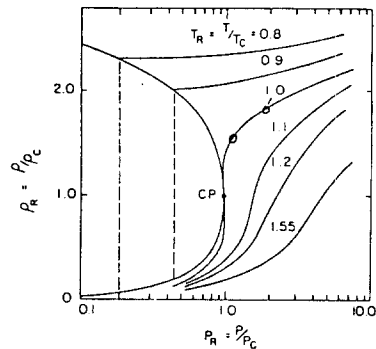


Fig. 6. Variation of the reduced density for a pure component in the vicinity of its critical point.

IV. Fuzzy 모델링

IV-1. Fuzzy 화 (Fuzzification)

1. Fuzzy 집합의 정의

대상 공정의 입력은 두개(추출기와 첫번째 분리기의 압력)인데 이를 두개의 제어 밸브를 통하여 제어한다. 이에 따라 두개의 전체 공간(E(error), CE(change of error))을 정의하였고 각 전체 공간에 여러개의 fuzzy집합을 정의하였다. E는 적분기 CE는 예측기의 역할을 하며 전체공간의 압축을 담당하는 압축인자는 제어기 이득의 역할을 한다. 이들의 역할만을 비교한다면 이는 PID제어기의 3개 파라메타와 비슷하다.

본 연구에서는 시동과 제어에 대해 각각 4개와 7개의 fuzzy집합을 정의하였다. 시동의 경우, E의 경우에 ZO, PZ, PS 과 PB으로 하였고 CE의 경우에 NB, NS, ZO 와 PS으로 나누었다. 제어의 경우는 E, CE 그리고 CV에 대해 각각 NB, NM, NS, ZO, PS, PM 과 PB으로 나누었다. 인간의 상식과 직관들을 감안하여 Fig. 9)와 같은 귀속도 함수를 구성하였다. 다시말하면 ZO에서 멀어질수록 휘지성(Fuzziness)을 증가 시켰다.

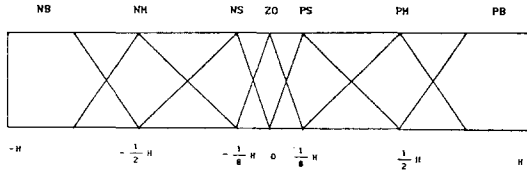


Fig. 7. Membership functions for E, CE and CV.

2. 제어규칙의 구성

Fuzzy제어기의 제어 기준은 불확실한 정보를 포함하고 있는 일상언어로 나타낼 수 있다. 이들 규칙들은 보통 운전자의 경험을 통한 지식과 대상 공정의 물리적인 제한등을 고려하여 만들어 진다. Fuzzy 제어기는 위와 같은 이유로 공정의 성질을 어느정도 포함하고 있기때문에 본 연구의 대상인 MIMO제어의 경우도 SISO로 제어가 가능하다. 다음과 같은 형태의 일반적인 조건문 형식의 규칙을 채택하였다.

일상언어 규칙

R_1 : If A is PB and B is PB then C is NB.

or

R_2 : If A is PB and B is PM then C is NB.

or

o

o

o

or

R_N : If A is NB and B is NB then C is PB.

$$R_j(E, CE) = \bigvee_{i=1}^N R_i(E_i, CE_i)$$

Look-up Table

Table 1. Lookup table for startup.

E CE	ZO	PZ	PS	PB
NB	RC	NS	NB	
NS				
ZO				
PS	NS			

Table 2. Lookup table for control

E CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PH	PS	ZO	NS	NS
NM	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
NS	PH	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
ZO	PH	PS	ZO	ZO	NS	NM	NB
PS	PH	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

Table 1)를 보면 매우 간단하지만 주목할 점이 있다. 가장 중요한 것은 RC이다. E나 CE가 작아지면 작아질수록 미세조정이 필요하게 된다. RC의 의미는 'Changing Rule'로 table 1)에서 table 2)로의 전환을 나타낸다. Table 1)과 2)의 내용을 보면 많은 부분에서 NB를 볼수가 있는데 이는 공정의 특성상 압력이 올라가는것은 느려도 압력강하는 상대적으로 빨리 일어나기 때문이다.

IV-2. Defuzzification

측정된 신호는 fuzzy 집합이 아니기 때문에 이것의 귀속도를 결정하는 것이 필요하다. 또 제어 규칙에 따라 결정되는 값도 fuzzy집합인데다가, 여러개가 있을 수 있으므로 출력을 결정하는 것 역시 필요하게된다. 다음의 세가지 물음을 생각해보자.

- Q1: 입력된 값은 어느 곳에 속하는가 ?
- Q2: 활성화된 규칙에 얼마의 귀속도를 각각 주어야 하는가 ?
- Q3: 원하는 결과를 얻기 위해 출력은 어떤 값이 될 것인가 ?

Section II의 내용을 기준으로한 첫 물음의 답은다음과같다.

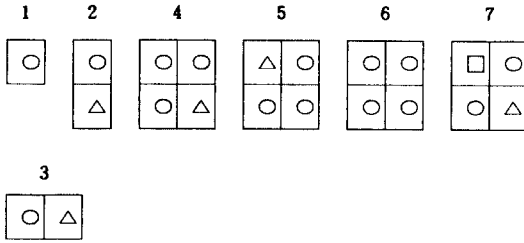
해결책 : Q1

E와 CE에 대한 전체 공간에서 입력이 존재할 수 있는 곳은 각각 다음의 6쌍 중의 한 곳에 있게 된다.

(NB, NM) (NM, NS) (NS, ZO) (ZO, PS), (PS, PM), (PM, PB)

해결책 : Q2 그리고 Q3

두 입력으로 활성화될 수 있는 모든 종류의 제어 규칙은 다음과 같은 도식화된 모형으로 나타낼 수 있다.



여기서 ○, △ 그리고 □는 fuzzy집합들을 의미한다.

경우 1 과 6 : 꼭지점

경우 2 와 3

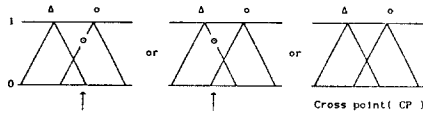


Fig. 8. Activated functions for the case 2 and 3.

Figure 8)의 위쪽 화살표는 두입력중 큰 귀속도를 갖는 입력이 활성화 시킨 출력의 입력과 같은 귀속도를 갖는 점이다. 나머지 경우들에 대해서도 같은 방법으로 출력을 계산할 수 있다.

V. 수치 모사

V-1. 알고리즘

위에 나타낸 fuzzy제어기를 이용한 제어 알고리즘을 Fig. 9)에 보였다. Figure 9)상의 여러 블럭 가운데 가장 중요한 것은 'Contraction of UD'라고 이름 붙여진 블럭이다. 제어기는 처음에 정확하지 않은 값을 가지고 시작되기 때문에 설정점 근처에 가면 처음에 주어진 값을 가지고 미세한 조절을 할 수 없다. 따라서 자동적으로 공정 변수와 초기 상태의 차를 전체 공간으로 해주는 즉 자동압축이 되게 하였고 이를 조절해주는 차단인자를 도입하였다. 이는 전체공간의 과도한 압축을 막는다. 그리고 블럭 중에 'Limit filter'라는 블럭은 제어 밸브의 불필요한 진동을 막기위한 것이다.

V-2. 제어기 파라메타

제어기의 성능 조절을 위하여 다음과 같은 세가지의 파라메타를 도입하였다. 그것들은 α, β 그리고 L_s 인데 α 는 제어 밸브의 민감도를 조절하기 위한 것이며(Fig. 10), β 는 제어기가 CE에 대해 지나친 영향을 받지 않도록 조절하기 위한 것이며(Fig. 11) L_s 는 차단인자로서 전체공간의 지나친 압축을 막는다.(Fig. 12)

VI. 결과 및 고찰

- 제시한 fuzzy 제어기

제시한 제어기의 파라메타를 바꾸어 가면서 그 영향을 살펴 보았다. 이를 Figure 10, 11 그리고 12에 나타내었고 그 결과를 Table 3)에 정리하였다. 결과를 보면 제어 성능에 가장 큰영향을 미치는 파라메타는 제어 밸브의 민감도를 조절하는 α 임을 알 수 있다. 나머지 두개는 특수한 경우만($L_s = 1$)제외하면 대체로 좋은 결과를 보인다.(Table 3. 참고)

- 다른 알고리즘을 사용한 fuzzy 제어기[7]

Figure 13와 14을 보면 좋은 성능을 가진 제어기이지만 분리의 압력이 처음에 너무 많이 떨어지고 또 공정의 시작과 끝의 파라메타를 찾아주어야 한다는 어려움이 있다. 이에 비해 제시한 제어기는 분리의 압력이 거의 떨어지지 않고 공정의 파라메타를 몇번의 시도로서 좋은 결과를 얻을 수 있다.

- 일반적인 형태의 PID 제어기

공정은 비선형성이 심하여 공정의 정상상태 이득이 조업 조건에 따라 심하게 변하고 또 공정의 시상수 또한 변한다. 이를 정상적으로 알아보기 위하여 공정을 FOPDT(First Order Plus Dead Time)모델로 근사하였고 이를 근거로 조업 조건을 바꾸어 가며 공정의 정상상태 이득과 시상수를 구해 Table 4)에 보였다. 이를 보면 일정한 조업조건에서 잘 동작하는 제어기가 오 동작할 수 있다는 것을 예상할 수있다. 또 FOPDT 모델을 이용하여 PID제어기의 파라메타를 구하고(IAE) 그성능을 Fig. 15)에 보였다. 예상한대로 PID제어기는 전혀 공정을 조절하지 못함을 볼 수 있다.

VII. 실험

수치 모사를 통해 그 성능을 확인한 fuzzy제어기를 가지고 실제 초임계 유체 추출 장치를 이용하여 제어기의 성능을 검증하였다. 용매는 이산화 탄소를 이용하였고 대상 물질은 대두에서 대두유를 추출하는것으로 하였다. 실험은 온도를 30 °C로 하고, 추출기의 압력을 250 atm 첫 번째 분리기 압력을 150기압으로 올린뒤 조업 조건이 추출기는 350 atm으로 첫 번째 분리기는 200 atm으로 올리는 것으로 하였다. 제어기의 파라메타는 추출기 압력 제어기를 $\alpha=\beta=1.0, L_s=1/8$ 로 하였고 분리기 압력 제어기를 $\alpha=0.5, \beta=1.0, L_s=1/8$ 으로 하였다. Figure 16)에 제어 결과를 나타 내었다.

VIII. 결론 및 제안

1. 수학적인 모델없이 시간에 따라 변하고 비 선형성이 심한 다변수계인 초임계 유체 추출 공정을 대상으로 fuzzy 전문가 제어계를 제시하였다.
2. 제시한 제어기는 파라메타 조정이 쉽고 아주 간단한 defuzzification 방법을 가지고 있어서 실시간대 운전에 적합하다.

3. 제어 규칙의 변환이 쉬운뿐만 아니라 인간의 사고를 기본으로 작성하였기 때문에 다른 공정에 적용이 용이할 것으로 생각된다.

IX. 사용 기호

- A, B : Fuzzy sets.
 CE : Change of error.
 E : Error.
 K_c : Steady state gain of PI controller.
 L_s : Blocking parameter. ($0 < L_s \leq 1$)
 NB, NM and NS : Fuzzy labels : negative big, negative medium and negative small, respectively.
 P : Process variable.
 PB, PM and PS : Fuzzy labels : positive big, positive medium and positive small, respectively.
 P_e : Pressure of extactor. (atm)
 P_{s1} : Pressure of the first separator. (atm)
 R : A set of rules.
 T, U, V and W : Universe of discourses.
 v : Volume (cm³)
 Z0 : Fuzzy label : Zero.

Greek letters

- α : Sensitivity factor ($0 < \alpha \leq 1$)
 β : Contraction parameter for CE. ($0 < \beta \leq 1$)
 μ : Membership function.
 τ : Time constant. (min)

X. 참고 문헌

1. L.A.Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 1, 28, 1973
2. E.H.Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis", IEEE Trans. Comp., 12, 1182, 1977
3. S.E.Sheridan, "Automatic Kiln Control at Oregon Potland Cement Company's Durkee Plant Utilizing Fuzzy Logic", IEEE Trans. Ind. App., IA-20, NO. 3, 562, 1984
4. M.Sugeno and G.T.Kang, "Fuzzy Modeling and Control of Multilayer Incinerator", 18, 329, 1986
5. R.M.Tong, M.B.Beck, and A. Latten, "Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process", Automatica, 16, 695, 1980
6. 연구보고서, "에너지 절약 공정 - 초임계 유체 추출 기술", 한국과학재단, KOSEF 87 - 0604 - 03, 1990
7. 유두선, "모호논리를 이용한 초임계 유체 추출 공정의 제어", 석사학위 논문, 서강대학교, 1990
8. W.J.M. Kickert and E.H.Mamdani, "Analysis of a Fuzzy Logic Controller", Fuzzy Sets and Systems, 1, 29, 1978
9. M.Gupta, J.B.Kiszka, and G.M.Trojan, "Multivariable

Structure of Fuzzy Control Systems", IEEE Trans. , Man, Cybern., SMC-16, No. 5, 638, 1986

10. Mchugh, M. A., and V.J.Krukorris, Supercritical Fluid Extraction, principles and practices, Butterworths, 1986

Table3. Summary of the control responses with parameters.

Parameters	α			β			L_s		
	0.1	0.5	1.0	0.5	1.0	2.0	1/4	1/8	1/16
Response	Sensitive			Similar			Similar		
Decision	x	bad	good	good	bad	good	good	bad	

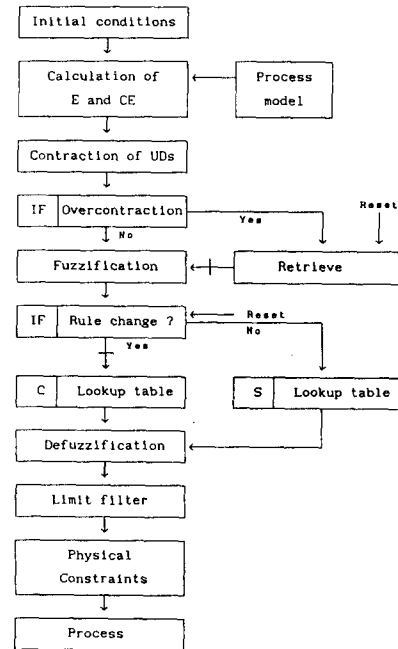


Fig. 9. Algorithm for simulation.

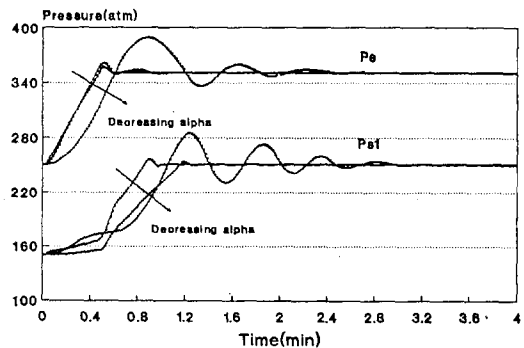


Fig. 10. Control Performance with variable α . (0.1, 0.5, 1.0)

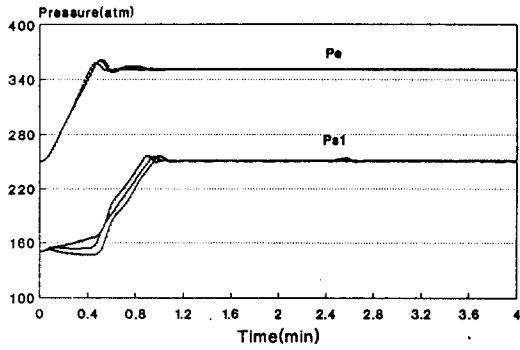


Fig. 11. Control Performance with variable β .
(0.5, 1.0, 2.0)

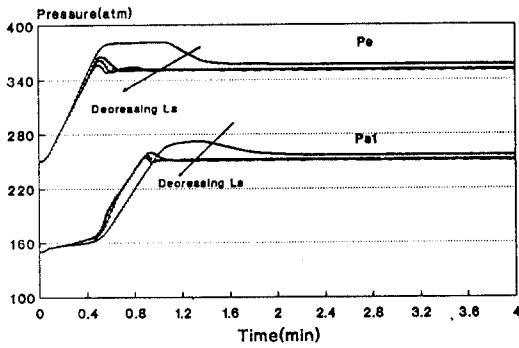


Fig. 12. Control Performance with variable L_s .
(1, 1/4, 1/8, 1/16)

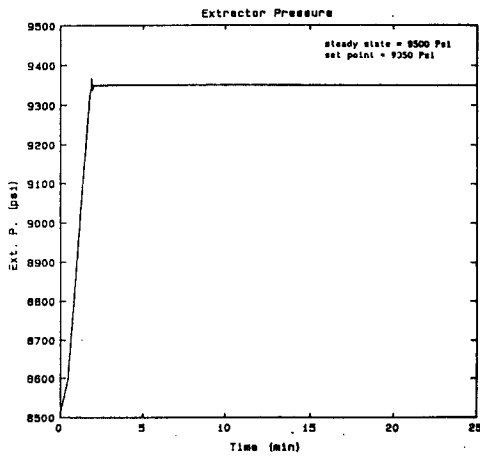


Fig. 13. Response of P_e .

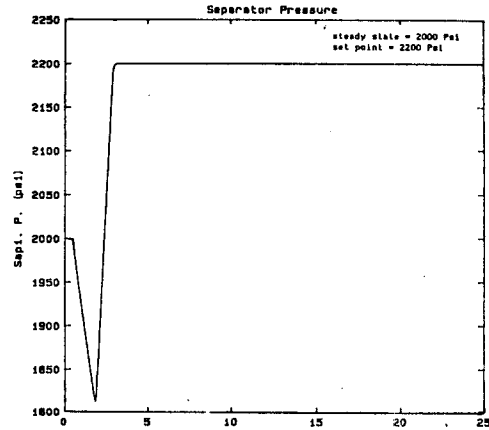


Fig. 14. Response of P_{s1} .

Table 4. K and τ with varying operating conditions.

	(150, 80)	(200, 100)	(250, 150)	(300, 200)	(350, 250)
K	9.84/5.25	15.4/7.5	21.7/14.1	28.8/22.0	36.5/31.2
τ	0.71/0.51	0.81/0.6	0.89/0.74	0.96/0.84	1.0/0.93

* / * : Extractor / Separator 1

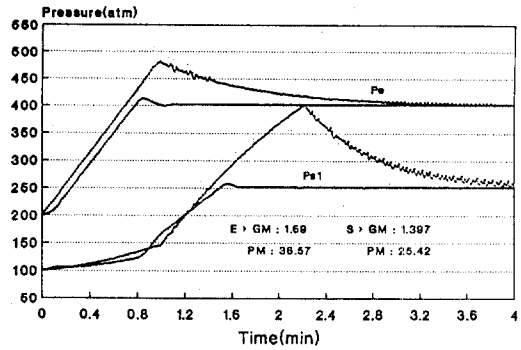


Fig. 15. Control performance of PI controller tuned by Minimum IAE.

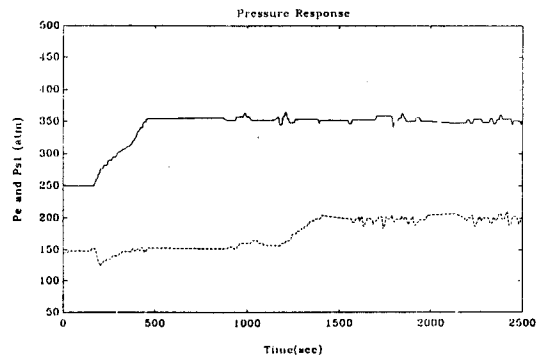


Fig. 16. Experimental Results