

벼의 횡류 연속식 건조 모델 개발과 퍼지논리를 이용한 건조 속도 제어에 관한 연구(II) - 건조속도제어 -

Development of Continuous Cross-Flow Rice Drying Model and Drying Speed Control System Using Fuzzy Logic(II) - Drying Speed Control -

송대빈*	고학균**	조성인**
정희원	정희원	정희원
D. B. Song	H. K. Koh	S. I. Cho

ABSTRACT

A drying speed control system using fuzzy logic was developed in order to minimize the damage of rice quality for a large capacity continuous dryer. The performance of the system was tested at two object moisture content of 17% and 25% on a wet basis. For object moisture content of 17% on a wet basis, the final output moisture contents from 20.46%, 20.96%, 18.98% on a wet basis were 17.99%, 17.6% and 17.23% on a wet basis, respectively. For object moisture content of 25% on a wet basis, the final output moisture contents from 28.85%, 26.95%, 28.11%, 27.8% on a wet basis were 25.24%, 24.9%, 25.23% and 25.09% on a wet basis, respectively.

주요용어(Key Words): 건조속도제어(drying speed control), 퍼지제어(fuzzy control)

1. 서 론

벼의 건조작업중 미질에 직접적인 영향을 끼치는 것은 내부에 균열이 일어나 동할미가 발생하는 것으로 이러한 동할미는 현미 제조과정과 정미 제조과정에서 쉐미의 형태로 유실되어 도정효율을 저하시키고, 백미중에 포함된 동할미는 식미를 저하시키는 원인이 된다. 이러한 동할현상은 건조작업시 건조요인인 건조속도, 건조공기온도, 투입함수율, 최종 건조함수율과 밀접한 관계가 있다. 따라서 건조기를 이용한 벼의 열풍건조작업에서는 동할미 발생이 최소로 되는 조건에서 건조가 가급적 빠르게 진행되도록 하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 벼의 건조현상을 정확하게 예측하고 동할발생에 영향을 미치는

여러 요인들을 수식화 또는 신호화하여 건조기 제어에 이용할 수 있어야 한다. 건조속도제어란 투입함수율의 변동에 관계없이 최종 함수율이 일정하게 유지되도록 건조요인을 자동 선정하는 것으로, 건조속도를 투입함수율에 따라 적절하게 조정함으로써 동할미 발생을 감소시키는 건조작업을 의미한다. 건조작업에서 건조속도를 일정하게 유지하기 위해서는 건조속도에 관련되는 건조기 작동요인을 주어진 건조환경, 즉 투입함수율, 최종 건조함수율, 외부공기온도, 습도 등에 따라 적절하게 조절해 주는 제어장치가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 건조모델과 퍼지논리를 이용한 건조 속도 제어장치를 개발하고 실험을 통하여 그 성능을 검증하고자 하였다.

* 경상대학교 농과대학 농업기계공학과
** 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

2. 재료 및 방법

가. 퍼지 변수

이 연구에서는 입력변수로 투입함수율과 함수율 차를 그리고 열풍온도와 벼의 이송속도를 출력변수로 하였다. 투입함수율은 17~30%(wb) 범위에서 23%(wb)와 21%(wb)를 기준으로 언어변수를 3등분으로 하였고, 열풍온도는 동할발생 급증온도를 고려

하여 30~60℃의 범위에서 7등분 하였다. 함수율차는 일반적인 건조관행을 고려하여 -5%(wb)에서 5%(wb)의 범위에서 11등분 하였고, 원료이송속도는 건조처리용량을 기준으로 20분에서 40분 범위에서 7등분 하였다. 투입함수율, 건조공기온도, 함수율차, 원료이송속도에 대한 언어변수를 표 1, 2, 3, 4에, 그리고 그에 따른 귀속도 함수를 그림 1, 2, 3, 4에 나타냈다.

Table 1 Linguistic variables of "Initial moisture content"

MTNB	MTZE	MTPB
Mois Ture Negative Big	Mois Ture ZERo	Mois Ture Positive Big

Table 2 Linguistic variables of "Drying air temperature"

TNVB	TNB	TNS	TZ	TPS	TPB	TPVB
Temp. Negative Very Big	Temp. Negative Big	Temp. Negative Small	Temp. Zero.	Temp. Positive Small	Temp. Positive Big	Temp. Positive Very Big

Table 3 Linguistic variables of "Moisture content difference"

DNVB	DNB	DNM	DNS	DNVS	DZE
Diff. Negative Very Big	Diff. Negative Big	Diff. Negative Medium	Diff. Negative Small	Diff. Negative Very Small	Diff ZERo

DPVS	DPS	DPM	DPB	DPVB
Diff. Positive Very Small	Diff. Positive Small	Diff. Positive Medium	Diff. Positive Big	Diff. Positive Very Big

Table 4 Linguistic variables of "Grain moving speed"

NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Negative Big	Negative Medium	Negative Small	ZERo	Positive Small	Positive Medium	Positive Big

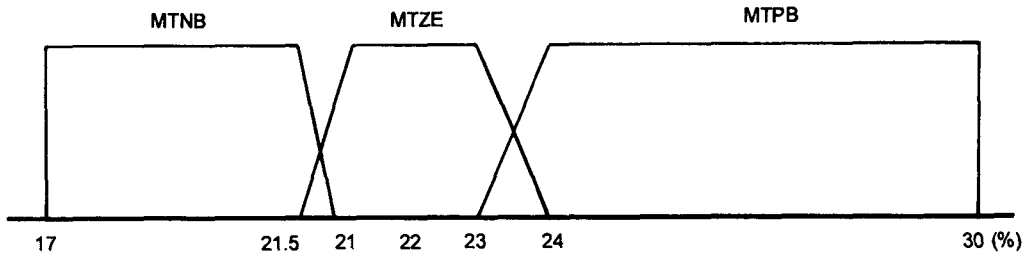


Fig. 1 Membership function of "Initial moisture content".

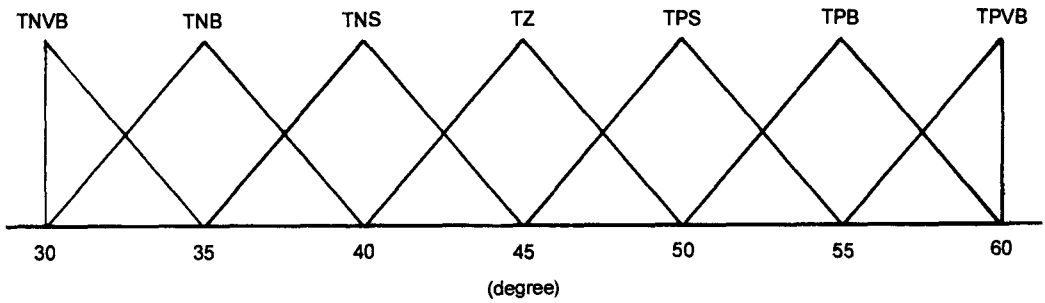


Fig. 2 Membership function of "Drying air temperature".

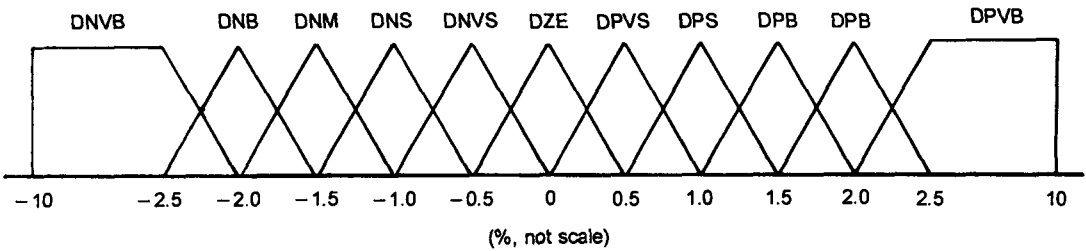


Fig. 3 Membership function of "Moisture content difference".

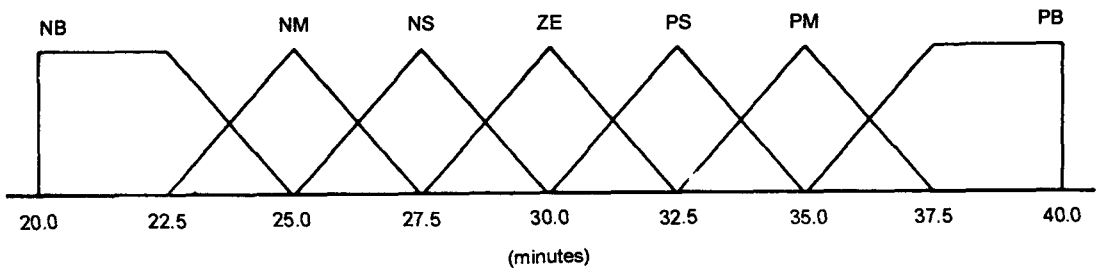


Fig. 4 Membership function of "Grain moving speed".

Table 5 Fuzzy rules (When initial moisture content is MTPB)

Rule # 1	If MTPB and DPVB Then PB and TPB
Rule # 2	If MTPB and DPB Then PB and TPB
Rule # 3	If MTPB and DPM Then PM and TPB
Rule # 4	If MTPB and DPS Then PS and TPB
Rule # 5	If MTPB and DPVS Then PS and TPB
Rule # 6	If MTPB and DZE Then ZE and TZ
Rule # 7	If MTPB and DNVS Then NS and TNS
Rule # 8	If MTPB and DNS Then NS and TNS
Rule # 9	If MTPB and DNM Then NM and TNS
Rule #10	If MTPB and DNB Then NB and TNB
Rule #11	If MTPB and DNVB Then NB and TNVB

나. 퍼지 규칙

투입 함수율과 함수율차를 기준으로 우선 건조가 빠르게 되도록 규칙을 결정 하였고, 같은 건조속도에서는 원료 이송시간이 길어지도록 하였다. 각 입력변수에 대한 출력변수의 퍼지 규칙은 IF<입력>, THEN<출력>의 형태로 구성 하였으며, 표 5에 그 일부를 나타냈다.

다. 비퍼지화 방법

비퍼지화 방법에는 무게중심법, Mamdani법, Sugeno법 등이 있으나 일반적으로 무게중심법이 많이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 무게중심법에 의해 다음과 같은 수식을 이용하여 출력 퍼지값을 구하였다.

$$\text{출력퍼지값} = \frac{\sum (\text{적합도 이하 면적} \times \text{해당부분 귀속도함수의 중심점})}{\sum \text{적합도 이하 면적}}$$

라. 건조기 자동제어 알고리즘

앞에서 검증된 건조모델 1과 퍼지규칙을 이용하여 건조기 자동제어를 위한 프로그램을 Borland C++ 언어로 개발하였다. 건조기 자동제어 알고리즘은, 먼저 표준 열풍온도(45℃)와 이송속도(30분)를 기준으로 건조모델에서 최종 건조함수율을 계산하고, 계산된 함수율을 목적함수율과 비교하여 그 함수율차

와 투입함수율을 입력변수로 하여 퍼지추론 과정을 거친다. 퍼지추론 과정에서 결정된 열풍온도와 이송속도를 건조모델에 다시 입력하여 최종 건조함수율을 계산하고 이것을 목적함수율과 비교하여 정해진 오차범위에 도달할 때까지 이러한 반복을 계속한다. 함수율차가 설정된 오차 이내가 되면 프로그램 실행을 종료하고 그 때의 건조공기온도와 이송속도를 출력하도록 구성되어 있다. 상세한 자동제어 알고리즘은 그림 5와 같다.

마. 제어장치의 성능 검증

1) 실험장치

건조모델 검증실험에 사용된 실험장치를 사용하여, 제어 구성도는 그림 6과 같다.

2) 실험재료

건조모델 검증실험에 사용된 벼를 실험원료로 사용하였다.

3) 실험방법

가) 함수율 측정

제어장치의 성능 검증실험은 건조모델 검증실험과 달리 투입함수율이 퍼지제어용 프로그램에 입력변수로 사용된다. 따라서 함수율 측정에 오븐법을 사용할 수 없기 때문에 단립수분 측정장치를 사용하여 투입함수율과 건조 후 함수율을 측정 하였다. 일반적으로 단립수분 측정장치를 이용하여 함수율을

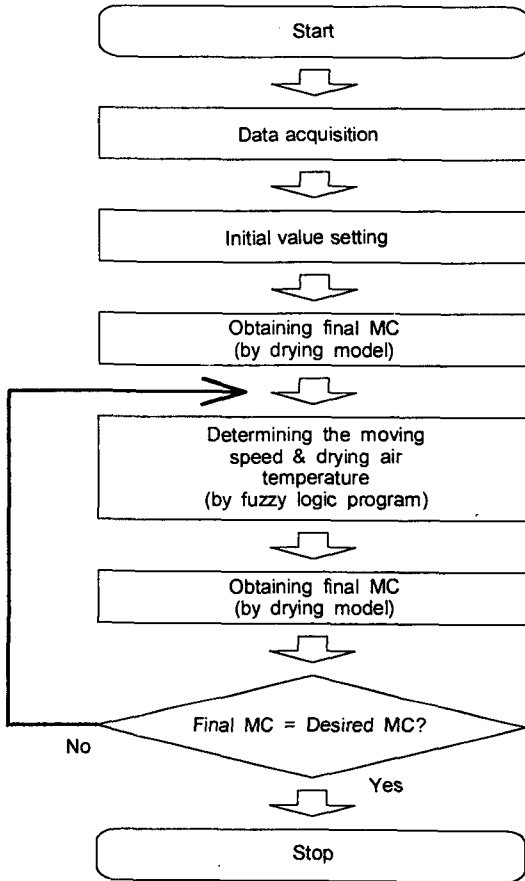


Fig. 5 Flow chart of rice drying control.

측정하는 경우 시료의 채취방법에 유의해야 한다. 즉 원료의 어느 한 부분의 함수율이 전체 함수율을 나타낼 수 있기 때문에 원료를 충분히 혼합한 후 함수율 측정용 시료를 채취해야만 한다. 본 실험에서는 투입원료의 경우 5개의 플라스틱 용기에 전체 원료를 혼합하여 분산 시킨 후 각각의 용기에서 약 700g의 시료를 채취하고, 이를 다시 혼합하여 함수율을 10회 측정하고, 그 평균치를 원료의 투입함수율로 하였다. 건조 후 함수율의 경우 총 건조시간을 10등분한 시간 간격에 순차적으로 시료를 채취하여 충분히 혼합한 후 함수율을 측정하여 이를 건조 후 함수율로 결정하였다.

나) 투입 벼의 온도 측정

투입 벼의 온도 역시 퍼지제어용 프로그램의 입력 변수이므로 건조모델 검증실험에 적용된 방법으로 벼의 온도를 측정하였다.

다) 건조실험

투입 함수율을 고함수율, 저함수율, 동일함수율의 3수준으로 하여 건조실험을 실시하였다. 고함수율의 경우에 목적함수율을 25%(wb), 저함수율의 경우에는 목적함수율을 17%(wb)로 설정하여 실측치를 목적함수율과 비교하였다. 상세한 건조실험 내용은 표 6과 같다. 표 6에서 기계 작동조건은 실제 실험장치가 가동된 조건을 의미하며, 이 조건에서 건조 후

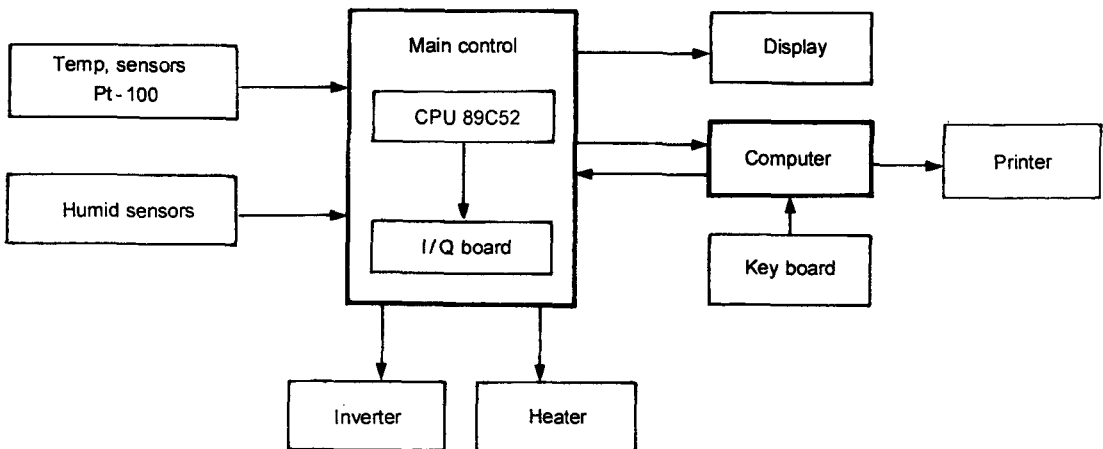


Fig. 6 Schematic diagram of control unit.

Table 6 Experimental conditions for rice drying

Exp. No.	Inlet M.C. (%, wb)	Obj. M.C. (%, wb)	Drying condition					
			Program output			M/C. operation		
			Drying temp. (°C)	Conv. speed (min.)	Outlet M.C. (%, wb)	Drying temp. (°C)	Conv. speed (min.)	Outlet M.C. (%, wb)
F-1	20.46	17	50.0	32.70	17	50.12	33.25	17.05
F-2	20.96	17	50.0	38.75	17	49.80	38.53	17.01
F-3	18.98	17	40.0	27.50	17	39.56	26.22	17.00
F-4	28.85	25	51.2	31.44	25	47.61	33.25	25.16
F-5	26.95	25	38.4	23.73	25	38.50	23.41	25.02
F-6	28.11	25	45.7	29.83	25	43.99	33.25	24.88
F-7	27.80	25	43.6	29.20	25	43.00	26.22	25.30

* M.C. : moisture content.

* wb : wet basis.

Table 7 Result of rice drying in low moisture contents

Exp. No.	Inlet M.C. (%, wb)	Objective M.C. (%, wb)	Outlet M.C. (%, wb)
F-1	20.46	17.00	17.99
F-2	20.96	17.00	17.60
F-3	18.98	17.00	17.23

함수율을 동시에 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 저함수율에서 제어장치 성능검증

저함수율에서의 건조실험 결과는 표 7과 같다. 그림 7은 실험구 F-1, F-2, F-3의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 실험구 F-1의 경우 목적함수율과 0.99%(wb)의 비교적 큰 차이를 보였는데, 이는 시료 채취과정에서 건조층 상부의 고함수율 부분이 주로 수집되었기 때문이다. 이하 F-2, F-3의 경우 건조 후 함수율과 목적함수율이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

나. 고함수율에서 제어장치 성능검증

표 8은 고함수율에서의 건조실험 결과를 나타낸 것이고, 그림 8은 실험구 F-4, F-5, F-6, F-7의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 표 8에서 알 수 있듯이 전 실험구에서 건조 후 함수율이 목적함수율과 거의 일치하는 것을 알 수 있고, 특히 실험구 F-6과 F-7은 동일 함수율 수준에서 제어장치의 반복성 실험을 행한 것으로 역시 목적함수율과 일치하는 결과를 나타냈다.

다. 자동제어 성능 평가

자동 제어기의 성능을 평가하기 위해 목적 함수율과 실측치의 차이를 이용한 다음 식으로 R.M.S 값을 계산하였다.

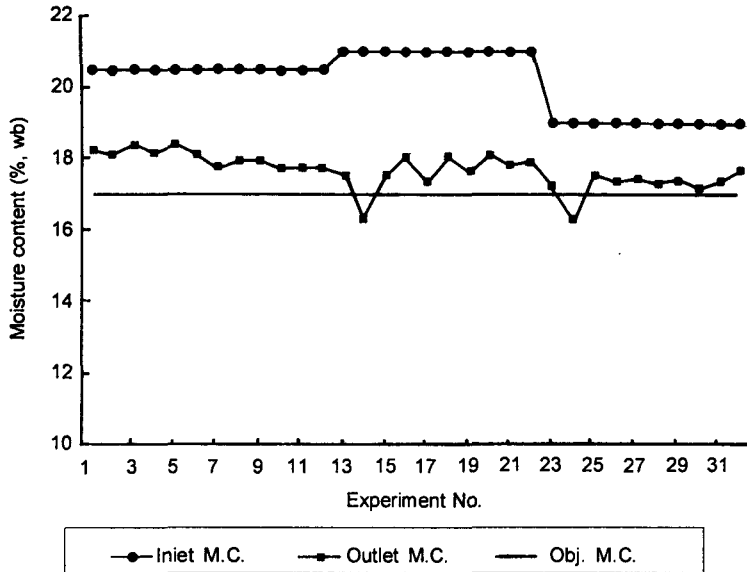


Fig. 7 Comparison of the moisture contents for F-1, F-2, F-3.

Table 8 Result of rice drying in high moisture contents

Exp. No.	Inlet M.C. (% wb)	Objective M.C. (% wb)	Outlet M.C. (% wb)
F-4	28.85	25.00	25.24
F-5	26.95	25.00	24.90
F-6	28.11	25.00	25.23
F-7	27.80	25.00	25.09

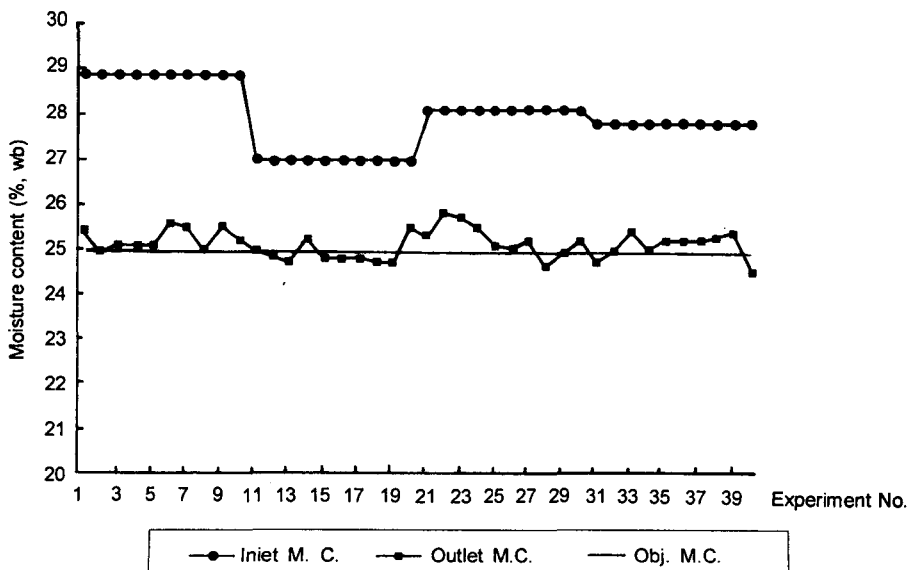


Fig. 8 Comparison of the moisture content for F-4, F-5, F-6, F-7.

Table 9 R.M.S. value as for experiments

Exp. No.	No. of data	R.M.S. (% w.b.)
F-1	12	0.975
F-2	10	0.773
F-3	10	0.434
F-4	10	0.242
F-5	10	0.276
F-6	10	0.492
F-7	10	0.350

$$R.M.S = \sqrt{\frac{\sum (deviation)^2}{No. of data}}$$

여기서, deviation : 목적 함수율과 실측치의 차이.
No. of data : 관측 데이터 수.

표 9에 각 실험구별 R.M.S. 값을 나타냈다. 표 9에서 실험구 F-1과 F-2를 제외하고는 R.M.S. 값이 모두 0.5%(w.b.) 이내로 나타났다.

4. 요약 및 결론

제어장치의 검증실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 투입함수율을 20.46%(wb), 20.96%(wb), 18.98%(wb)로 하고, 목적함수율을 17%(wb)로 하여 실험을 수행한 결과 건조 후 함수율이 17.99%(wb), 17.6%(wb), 17.23%(wb)로 나타났으며, 투입함수율을 28.85%(wb), 26.95%(wb), 28.11%(wb), 27.8%(wb)로

하고, 목적함수율을 25%(wb)로 하여 실험을 수행한 결과 건조후 함수율이 25.24%(wb), 24.9%(wb), 25.23%(wb), 25.09%(wb)로 나타났다. 관차의 최대치는 실험구 F-1의 0.99%(wb)로 나타났으며, 나머지 실험구에서는 0.5%(wb) 이하로 나타났다. 따라서 개발된 제어장치가 실제 건조작업에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

(2) 제어장치의 반복성 실험을 위한 실험구 F-6과 F-7의 경우 실험구간 건조함수율의 차이는 0.14%(wb)로 나타났으며, 건조 후 함수율 역시 목적함수율과 거의 일치 하였다.

(3) 제어장치의 성능을 R.M.S. 값으로 나타낸 결과 F-1과 F-2를 제외한 모든 실험구에서 0.5%(w.b.) 이하의 값을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. 이광형 등. 1992. 퍼지이론 및 응용 II. 홍릉과학출판사.
2. 이광형 등. 1991. 퍼지이론 및 응용 I. 홍릉과학출판사.
3. Dubois, D. and H. Prade. 1980. Fuzzy Set and System : Theory and Applications. Academic Press.
4. Jamshidi M., N. Vadiiee and T. J. Ross. 1993. Fuzzy Logic and Control. Prentice-Hall, Inc.
5. Tan, J. and Z. Chang. 1994. Linearity and a tuning procedure for fuzzy logic controllers. Trans. of the ASAE 37(3):973-979.
6. Wang, L. X. 1994. Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis. Prentice-Hall, Inc.