

# 이류체노즐을 이용한 분무량과 분무입경 제어시스템 개발<sup>†</sup>

## Development of Control System of Twin-Fluid Nozzles for Controlling Spraying Rate and Droplet Size

이 중 응*	안 형 철*	정 창 주*
정희원		정희원
J. Y. Rhee	H. C. Ahn	C. J. Chung

### SUMMARY

In precision chemical application, increment of biological efficacy with less chemical is the virtue. Spraying rate and droplet size is closely related to biological efficacy. This study was performed to develop a spray-control-system that could control spraying rate and droplet size independently.

Twin-fluid nozzles were selected and tested to certify if the nozzles were suitable for the the objective of this study. Characteristics of the nozzles i.e., spraying rate and droplet size change under the changes of spraying pressure and air pressure were statistically modeled. The model had 1 to 1 matching property between dependent variables and independent variables. Using the property and the model, inverse relationship could be determined between variables. A feedback spray control system was developed and tested with predetermined error of 5% in pressures. The system showed 4% error in spraying rate and 9% error in droplets size. Performance of the system could be upgraded by fine tuning but, in practical sense keeping air pressure in the field sprayer was the bottle neck of commercialization of the spray system.

**주요용어(Key Words)** : 이류체노즐(Twin-flow-nozzle), 분무량(Spraying rate), 분무입경(Droplet size), 제어시스템(Control system)

### 1. 서 론

최근 정밀농업기술의 중요성이 인식되면서 점살포, 직접살포, 또는 방제목표물의 크기에 따른 분무량 조절 등의 기술(구영모, 1996; Bouse, 1994)이 개발되고 있으나 분무량 조절에만 치중되어 있다.

일반적인 수압식 노즐의 경우에 분무압을 이용하여 분무량을 제어하면 분무압에 따라 분무입자의 크기가 변하므로 효율적인 방제효과를 얻기가

어렵다. 하나의 제어인자 즉 분무압만을 이용하여 두 가지의 특성 즉 분무량과 분무입자의 크기를 조절하는 것은 이론적으로 불가능하다. 정밀방제에 있어 입경과 분무량을 독립적으로 조절할 수 있으려면 두 가지 제어인자를 가진 노즐을 이용해야만 가능하며 이러한 범주에 속하는 노즐로는 원심노즐과 이류체노즐, 정전화노즐 등이 있다.

본 연구는 이류체 노즐에는 두 개의 제어인자가 있다는 점에 착안하여, 이류체 노즐의 분무량과

<sup>†</sup> 본 연구는 1997년도 농촌진흥청 특정연구과제로 지원받아 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

분무입경을 모두 제어할 수 있는 제어시스템을 개발하여 평가하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 이류체노즐(twin-fluid nozzle)

이류체노즐은 기체(공기)와 액체를 혼합하여 분사함으로써 공기가 분무입자의 미립화를 도와 분무입경이 타 노즐에 비해 미세한 노즐로서 공기의 분무압(Pa)과 액체의 분무압(Ps)의 조합을 통해 다양한 분무량과 분무입경을 얻을 수 있다.

이류체노즐은 기체와 액체의 혼합방식에 따라 기체와 액체가 노즐캡 내부의 혼합실(Mixing Chamber)에서 혼합된 이후에 분무되는 내부혼합식(Internal Mixing Type)과 분무된 후 기체용 캡의 오리피스에서 분사된 기체에 의해 2차적인 미립화를 유도하는 외부혼합식(External Mixing Type)으로 분류된다.

그림 1은 실험에 사용된 이류체노즐의 단면도로서 외부혼합과 내부혼합방식의 구조를 보여 준다. 그림에서 보듯이 내부혼합식 이류체노즐은 혼합실에서 공기와 액체가 혼합되므로 분무량이 분무압과 공기압의 영향을 모두 받으나 외부혼합식에서는 이미 액체가 분무공(orifice)을 나온 상태에서 공기와 만나므로 분무량은 분무압에만 영향을 받는 특성이 있다.

### 나. 실험장치 구성

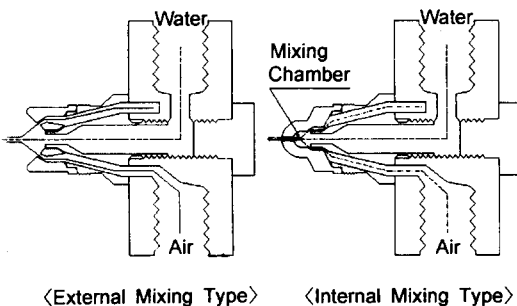


Fig. 1 Structure of twin-fluid nozzles.

공시노즐로는 이류체노즐 중 내부혼합식 3종으로 분사형태가 원형인 setup no.22와 setup no.4 (Spraying System Co.), 분사형태가 부채꼴형인 setup no.43 (Spraying System Co.) 그리고 외부혼합식 중 분사형태가 부채꼴형인 setup no. E45A (Spraying System Co.)를 선정하였다. 각각의 노즐은 분무압 200 kPa, 공기압 3 kPa에서 공기유량이 각각 144, 88, 190, 600 l/m이었다.

공시노즐은 방제기의 주행속도가 1m/s인 상태에서 살포폭(swath) 0.9m로 1ha당 500 l에서 750 l를 살포할 수 있는 것을 선택한 것이다.

분무특성 제어시스템은 feedback 제어를 하며, 압력의 허용오차를 5%로 설정하였다. 주요 구성품은 그림 2와 같이 공기압과 분무압 조절용 전동 밸브, 공기실, 펌프, 공기압축기(3kW), 이류체노즐 및 제어부로 구성되었다. 이 중에서 공기실과 펌프는 동력분무기용 3편단동 플런저 펌프(2.5kW at 700 rpm, 250 kPa, 40LPM)를 사용하였다.

주요 제어 부품의 사양은 표 1에 나타내었다. 그림 3은 제어 알고리즘을, 그림 4는 제어장치를 블록선도를 나타낸 것이다.

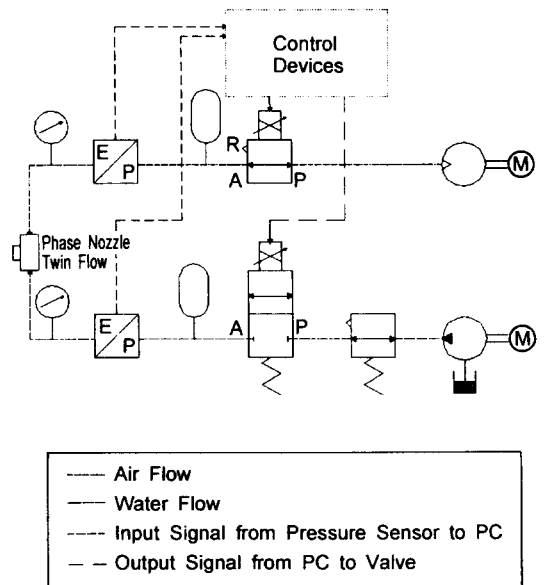


Fig. 2 Spray control system.

Table 1. Specifications of the system parts

Item	Specifications
A/D input/output Board	A/D : 12bit, 16 Channel, 60kHz D/A : 0~5, 0~10 V, 2Ch. DIO : 24Channel On-board clock Model : AX5411, AXIOM
Proportional Valve	Pressure Range : 0~8 bar Model : Type 6022, Burkert Application to Water
	Pressure : 0~10 kgf/cm <sup>2</sup> Input Current : 0~1A Model : VEP3121, SMC Application to Air
Controller & Power Amp	Power : 24V DC Input signal : 0~10V DC Model : 2832 DN 2, Burkert Application to Water
	Power : 24V DC Input signal : 0~5V DC Output Current : 0~1A Model : VEA252, SMC Application to Air
Pressure Sensor	Pressure : 0~10 kgf/cm <sup>2</sup> Output signal : 0~5V DC Model : P-155, Green Sensor Application to Water & Air

다. 분무량과 분무입경의 측정

분무특성 제어시스템을 통한 내부혼합식 이류체 노즐과 외부혼합식 이류체노즐의 공기압(Pa)을 100~500 kPa에서 등간격으로 7수준, 분무압(Ps)을 100~700 kPa 범위로 하되, 분무압과 공기압의 차이를 0~200 kPa에서 등간격으로 5수준 변화시키면서 3반복으로 분무량과 분무입경을 측정하였다.

실제 실험에서 setup no.E45A는 공기압이 높은 경우에 공기압측기의 송풍량이 부족하여 실험이 불가능하였다.

분무입자 측정은 MALVERN Particle sizer 2600C 를 이용하였으며, 입자의 평균입경은 체적중간지름(VMD)으로 나타내었다. 분무입경의 측정위치는 노즐 구멍에서 60cm 떨어진 지점으로 정하였으며 기기특성상 노즐을 수평으로 분무하면서 측정하였다.

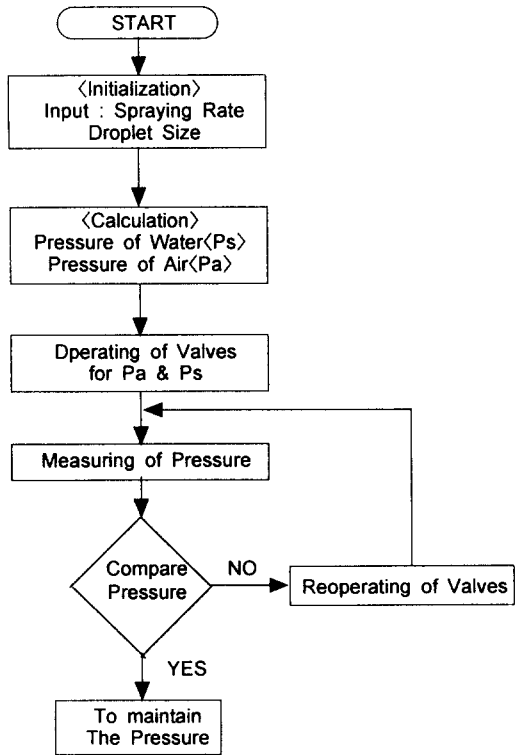


Fig. 3 Control algorithm of the spraying system.

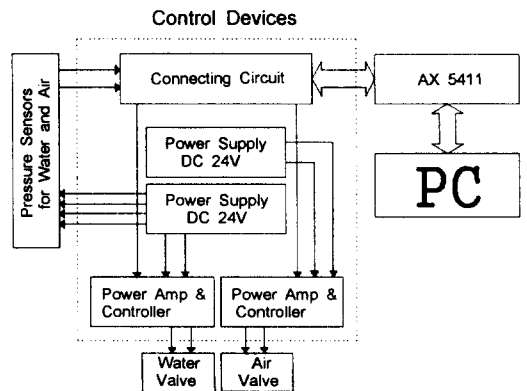


Fig. 4 Block diagram of the control device.

3. 결과 및 고찰

가. 분무량과 분무입경의 회귀식 개발

이류체노즐의 분무입경에 대한 예측식으로 Nu-

kuyama Eq., Tanasawa Eq, Kim Eq. 등이 있으나 (Kim, 1998) 사용된 변수 중에 물의 표면장력, 밀도 등의 변화폭이 작고, 실제 작업시에는 조절 불가능한 변수가 사용되고 있기 때문에 사용하지 않았다.

본 연구에서는 분무량과 분무입경을 종속변수로, 분무압과 공기압을 독립변수로 하고, 각 독립변수의 차수를 3차로 하여 중회귀분석을 한 결과 분무량과 분무입경에 대한 회귀함수식들의 R<sup>2</sup>가 0.994 이상이 나타났으며, 예외적으로 set up no. 43 노즐의 입경예측식에서 R<sup>2</sup>가 0.855가 나왔다. 그 이유는 분무시스템이 안정되게 공기압을 유지시키지 못하였기 때문이다.

setup no. 22인 노즐의 분무입경과 분무량에 대한 회귀함수식은 다음과 같다.

$$Size = 129.92 - 3.63Pa^3 + 19.42Pa^2 + 4.37Pa^2Ps - 47.96Pa - 16.90PaPs - 1.42PaPs^2 + 12.95Ps + 5.00Ps^2 - 0.04Ps^3$$

$$Rate = 166.37 - 12.75Pa^3 - 79.00Pa^2 - 7.63Pa^2Ps - 312.61Pa + 156.55PaPs - 11.67PaPs^2 + 568.84Ps - 125.70Ps^2 + 11.59Pa^3$$

여기서, Size : Droplet size (μm)

Rate : Spraying rate (g/30sec)

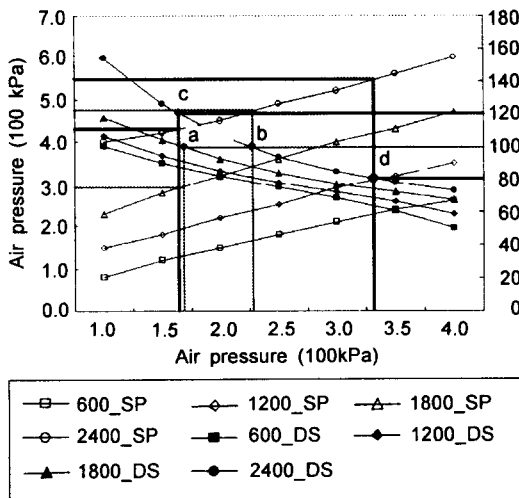


Fig. 5 Control method of spraying rate & droplet size respectively.

Pa : Air pressure (100kPa)

Ps : Spraying pressure (100kPa)

이 식의 적용범위는 공기압 100~500kPa, 분무압 100~700kPa 범위이다.

공시노즐 중에서 setup no. E45를 제외한 나머지 내부혼합식 이류체 노즐들에서는 중회귀식을 개발할 수 있었으나 setup no. 22를 중심으로 이후에 설명한다.

이류체 노즐에서 분무입경과 분무량의 분무압과 공기압에 대한 반응곡선은 각각 그림 5와 그림 6과 같이 단조증가 또는 단조감소를 나타내며 독립변수와 종속변수간에 1:1 대응관계가 성립되었다. 그림 5와 그림 6에서 Pd란 분무압과 공기압의 차이를 말하는 것을 의미한다.

#### 나. 분무압과 공기압의 결정 방법

보간법을 이용하여 개발된 회귀식을 역으로 풀어 주어진 입경이나 분무량에 대응하는 공기압과 분무압을 구하였다(안형철, 1999).

그림 7은 내부혼합식 노즐(setup no.22)에서 분무량이 600, 1200, 1800, 2,400g/min인 곡선을 나타낸 것으로 1,200\_SP란 분무량이 1,200g/min인 곡선을

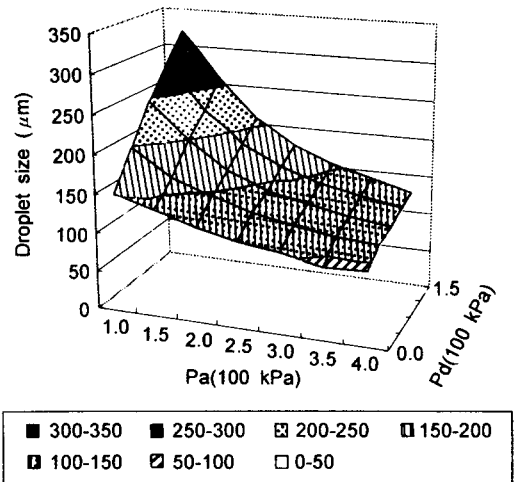


Fig. 6 Change of droplet size with respect to Pa & Pd (setup no. 42).

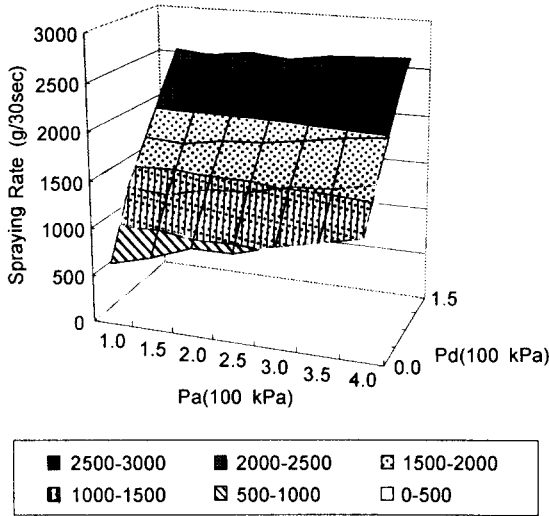


Fig. 7 Change of spraying rate with respect to Pa & Pd (setup no. 42).

공기압과 분무압의 좌표에 나타난 것을 의미하며, 1,200\_DS란 분무량이 1,200g/min인 곡선을 공기압과 분무입경의 좌표에 나타난 것을 의미한다.

분무압과 공기압을 결정하는 방법을 그림 7을 이용하여 설명하면 다음과 같다. 예를 들어 분무입경을 100 μm로 유지하면서 분무량을 1,800g/min에서 2,400g/min으로 증가시키는 것은 그림에서 ㉓점에서 ㉔로 이동하는 경우가 된다.

그림에서 ㉓점의 공기압(Pa)은 170 kPa이고 분무압은 1,800\_SP의 좌측 좌표 값으로 약 295 kPa이다. 새로운 작동점 ㉔의 공기압(Pa)은 그림에서 230 kPa이고 분무압은 2,400\_SP의 좌측 좌표 값으로 약 480 kPa이다.

즉 공기압을 170에서 230 kPa로, 분무압을 295에서 480 kPa로 증가시키면 분무입경을 100 μm로 유지하면서 분무량을 1,800g/min에서 2,400g/min으로 증가시킬 수 있다.

분무량을 유지하면서 입경을 변화시키는 경우, 예를 들어 분무량을 2,400g/min으로 유지하면서 분무입경을 120 μm에서 80 μm로 감소시키는 경우는 그림에서 ㉔에서 ㉕로 이동하는 경우가 된다.

그림에서 ㉔점의 공기압(Pa)은 160 kPa이고 분무압은 2,400\_SP의 좌측 좌표 값으로 약 430 kPa

이다. 또한 ㉕점의 공기압은 330 kPa 정도이고 분무압은 2,400\_SP의 좌측 좌표 값으로 약 550 kPa이다.

따라서 공기압을 160에서 330 kPa로, 분무압을 430에서 550 kPa로 증가시키면 분무량을 2,400 g/min으로 유지하면서 분무입경을 120에서 80 μm로 감소시킬 수 있다.

다. 분무특성 제어시스템의 성능 검증

그림 2와 그림 3의 제어장치를 이용하여 공시노즐들에 대하여 성능 검증 실시하였다.

Table 2는 Steup no. 22인 노즐의 실험자료로서 개발된 회귀식을 이용하여 일정한 분무량을 유지하면서 분무입경의 독립적 제어의 성능을 평가한 것이다.

알고자하는 예상분무량(Rate\_P)과 예상분무입경(Size\_P)을 정하고, 이를 얻기 위해서 필요로 하는 공기압(Pa)과 분무압(Ps)을 회귀식을 이용하여 계산하고, 이 값들을 제어장치를 통하여 실험한 결과, 분무시스템에서 실제 측정된 분무량(Rate\_M)과 측정된 분무입경(Size\_M)과의 오차를 백분율로 나타내었다.

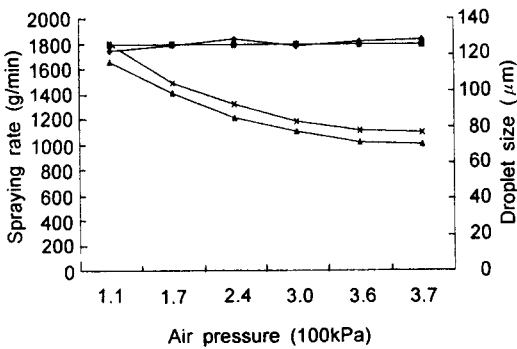
실험결과 분무량의 경우 예상치와 실제측정치간의 차이가 평균 4% 이하였으며 분무입경의 경우에는 9% 이하의 차이를 보였다. 이런 차이는 제어시스템에서 설정압력과 계측된 압력간의 오차를 5%로 허용했기 때문이며 이 오차를 줄여주면 분무량이나 분무입경의 오차는 줄어들 것으로 예상된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 Setup no. 22 노즐의 분무량을 1,800g/min, 2,000g/min으로 유지하면서 여러 단계의 분무입경을 얻는 실험 결과로 예상분무량 (Rate\_P)과 실제 측정된 분무량(Rate\_M) 그리고 예상분무입경(Size\_P)과 실제 측정된 분무입경(Size\_M)의 변화를 그렸다. 오차의 분포는 분산된 형태보다는 편이(bias)된 형태로서 비교적 균일하여 보다 정확한 제어의 가능성을 보여주고 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 예상분무입경(Size\_P)이 77.4 μm, 71.7 μm로 유지하면서 여러 단계의 분무량을 얻는 실험을 한 결과로서 예상분무량(Rate\_P)과 측

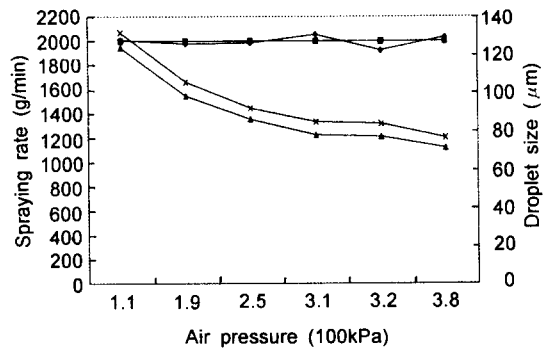
Table 2. The difference values between predicted values & real values (setup no. 22)

Pa	Ps	Spraying rate (g/min)			Droplet size		
		Rate_P	Rate_M	Error (%)	Size_P	Size_M	Error (%)
1.1	2.5	1,795	1,747	3	116.2	126.5	9
1.7	3.0	1,800	1,787	1	98.7	104.3	6
2.4	3.5	1,800	1,838	2	85.2	92.7	9
3.0	4.0	1,800	1,781	1	77.4	83.1	7
3.7	4.5	1,800	1,833	2	70.5	76.8	9
1.1	3.0	2,000	2,008	0	124.0	131.6	6
1.9	3.5	2,000	1,979	1	98.5	106.0	8
2.5	4.0	2,000	1,984	1	86.6	92.6	7
3.2	4.5	2,000	1,928	4	77.4	84.2	9
3.8	5.0	2,000	2,030	2	71.7	76.8	7
1.2	3.5	2,200	2,230	1	129.3	134.4	4
2.0	4.0	2,200	2,157	2	101.2	106.7	5
2.6	4.5	2,200	2,160	2	88.2	95.0	8
3.2	5.0	2,200	2,179	1	79.6	84.9	7
3.4	5.1	2,200	2,125	3	77.3	83.0	7
4.0	5.6	2,200	2,260	3	71.8	76.0	6
3.0	4.0	1,800	1,781	1	77.4	83.1	7
3.2	4.5	2,000	1,928	4	77.4	84.2	9
3.4	5.1	2,200	2,125	3	77.3	83.0	7
3.6	4.4	1,800	1,820	1	71.5	78.0	9
3.8	5.0	2,000	2,030	2	71.7	76.8	7
4.0	5.6	2,200	2,260	3	71.8	76.0	6



◆ Rate\_P   ◆ Rate\_M   ◆ Size\_P   ◆ Size\_M

Fig. 8 The change of droplet size at spraying rate(1,800g/min).



◆ Rate\_P   ◆ Rate\_M   ◆ Size\_P   ◆ Size\_M

Fig. 9 The change of droplet size at spraying rate(2,000g/min).

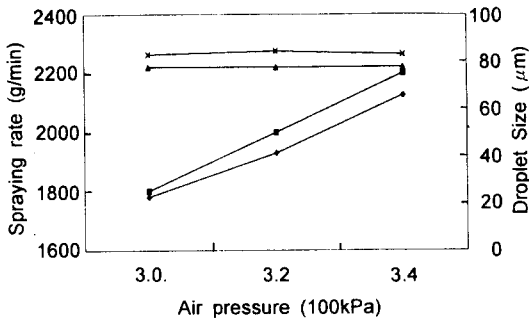


Fig. 10 The change of spraying rate at constant droplet size of 77.4 μm.

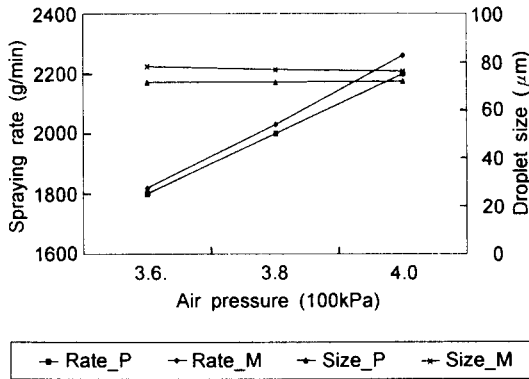


Fig. 11 The change of spraying rate at constant droplet size of 77.4 μm.

정분무량(Rate\_M) 그리고 예상분무입경(Size\_P)과 측정분무입경(Size\_M)의 변화를 그린 것이다.

이 그림에서 볼 수 있듯이 노즐분무입경에 변화를 주지않고 분무량의 조절이 가능하였으며 분무량을 유지하면서 분무입경을 조절하는 것 역시 가능하였다.

그러나 이 시스템이 정밀분무용으로 분무제기에 실용화되기 위해서는 500 kPa 이상의 고압공기를 연속적으로 공급할 수 있는 공기압축기가 방제기에 탑재되어야 하며, 사용할 노즐별로 중회귀함수를 구해야 할 것이다.

분무량과 분무입경을 제어하기 위해서는 공기소모량이 상대적으로 많은 외부혼합식 노즐은 적합

하지 않은 것으로 판단된다. 또한 Fig. 2에 나타난 분무제어시스템은 정상상태에서는 원하는 성능을 보였으나 공기실이 노즐에 설치되었기 때문에 제어신호에 대한 응답이 지연되는 효과가 있으므로 제어시스템의 적합성은 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 요약 및 결론

일반적인 분무제기는 분무압을 조절하여 분무량을 조절하지만 분무입경이 변한다. 본 연구에서는 이류체노즐을 선택하여 분무량과 분무입경을 각각 제어하는 방법과 제어시스템 개발을 시도하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 내부혼합식 3종, 외부혼합식 1종의 이류체노즐을 선택하여 분무압과 공기압의 변화에 따른 분무량과 분무입경 변화곡면을 검토한 결과 단조증가 또는 감소곡면을 갖는다는 특성을 확인하였다.

2. 분무압과 공기압에 대한 분무량과 분무입경의 측정자료를 토대로 R<sup>2</sup> 값이 0.99 이상의 중회귀식을 구하였으며, 개발된 식을 이용하여 공기압과 분무압에 의한 분무량과 분무입경의 독립적으로 제어하는 방법을 개발하였고, 분무압과 공기압을 Feed-back 제어하는 분무특성 제어시스템을 구성하였다.

3. 공시 노즐 중에서 외부혼합식 노즐은 공기압축기의 용량이 부족하여 다양한 분무입경을 얻는데 부적합하였다. 공기소모량이 작은 내부혼합식 노즐을 이용하여 제어특성을 실험하였다. 공기압과 분무압의 제어 오차를 5%로 정하여 실험한 결과 분무량은 4%, 분무입경은 9%의 오차범위를 가지고 제어되어 연구에서 의도한 제어시스템이 가능함을 보였다.

4. 개발된 분무특성 제어시스템이 실용화되려면 충분한 용량의 공기축압기가 필요하고 각 노즐별로 분무특성에 대한 중회귀식을 개발해야 한다.

#### 참고 문헌

1. 구영모. 1996. 주입식 총 유량 자동제어방식 분

- 관 방제기의 개발. 한국농업기계학회지 21(2): 155-166.
2. 안형철. 1999. 분무량과 분무입경의 독립적 제어를 위한 분무제어 시스템 개발. 서울대학교 대학원 석사학위논문
3. Bouse, L. F. 1994. Effect of nozzle type and operation on spray droplet size. ASAE 37(5): 1389-1400.
4. Kim, M. K. 1997. On the optimization Characteristics of Twin-Fluid Nozzles for Cold Fog Machine (I). Proceedims of the 7th ICLAS, Vol II. pp. 706-713.