

친환경 정밀농업을 위한 입제 변량살포기 개발 (III) - 공기이송 시스템 분석과 입제 살포균등도 향상 -

김영주 김학진 장태사 이종용

Development of a Variable Rate Granule Applicator for Environment-Friendly Precision Agriculture (III)

- Analysis of Pneumatic Conveying System and Improvement of Fertilizer Application Uniformity -

Y. J. Kim H. J. Kim T. S. Jang J. Y. Rhee

Abstract

Application of precision farming technology to rice cultivation could be an effective measure for rice quality improvement and environment-friendly agriculture. This study was conducted to develop a variable rate pneumatic granule applicator. Previous study reported that application uniformity of the prototype machine (C.V. = 23.3%) was not satisfactory. To improve the uniformity, increase of blow-head number from 12 to 16 was suggested. Analysis of the pneumatic conveying system showed that increase of number of blow-head was possible. Three-way variance analysis of the modified applicator showed that inserting length should be changed according to granule metering rate. The range of metering rate from 27.3 to 417.9 g/s were divided into 4 levels and 4 sets of inserting lengths were determined to ensure CV values less than 15%. The revised applicator showed satisfactory C.V. values of 9.4 to 14.6% in the metering rate. Granule conveying pattern was observed using a high speed camera and judged as the homogeneous flow pattern.

Keywords : Variable rate applicator, Precision agriculture, Pneumatic conveying, Blow head

1. 서론

정밀농업은 농업생산 전 과정의 정보를 이용하여 투입재의 양을 줄이면서 농산물의 수량, 농산물의 품질을 극대화할 수 있는 기술이다(Ryu 등, 2006). 이 연구는 우리나라 수도작에 정밀농업기술을 접목하기 위한 기획과제로 수행된 것이다. 우리 농업은 DDA협상을 비롯하여 한-미 FTA 등 쌀 재배에 커다란 위협이 되는 국제 협상을 앞두고 있다. 고품질 친환경 벼재배 기술의 확립을 위하여 정밀농업기술의 실용화는 시급

히 요청된다.

앞서 제 1보에서는 변량입제살포기의 개념설계(Ryu 등, 2006)에 대하여 제2보에서는 분두의 개발과 이를 이용한 살포시스템(Kim 등, 2006)에 대하여 보고한 바 있다. Fulton 등 (2005)은 여러 종류의 비료살포기의 살포량에 따라 살포유형을 분석한 연구에서 변이계수(Coefficient of Variation) 20%를 기준으로 삼아 그 보다 작은 경우를 우수한 것으로 그 보다 큰 것을 불량한 것으로 평가한 바 있다. 제 2보에서 개발한 붐형 살포기의 살포 균등도는 가장 좋은 경우가 살포높이

This study was conducted by the research fund supported by Agricultural R&D promotion center (ARPC). The article paper was submitted for publication in September 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2006. The authors are Young Joo Kim, Graduate Student, KSAM member, Seoul National University, Hak Jin Kim, Researcher, KSAM member, National Institute of Agricultural Engineering, Tae Sa Jang, Professor, Department of Environmental Engineering, Gwangju University, Joong Young Rhee, Professor, KSAM member, Seoul National University, Vice director of Agriculture and Life Sciences Research Institute. Corresponding author: J. Y. Rhee, Professor, Department of Biosystems & Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, 151-921, Seoul, Korea; E-mail: <jyr@snu.ac.kr>.

80 cm, 시간당 살포율 23.5 g/sec일 때 23.3% 였다. 새로 개발된 분두는 구조가 단순하고 새롭다는 장점은 있었지만 살포의 균등도에 있어서 미흡함이 있었다. 따라서, 살포 균등도를 높이기 위하여 분두의 개수를 늘려야 하는데 이것은 공기이송시스템의 성능과 직결된 것이므로 분두의 개수를 증가시켰을 때, 송풍기의 용량이 충분한지를 검토해야 한다.

이상적인 입제 살포기가 되기 위해서는 입제의 물리적 성질에 따라 분두의 수집관 삽입길이를 조정할 필요가 없거나 그럴 필요가 적어야 하며, 단위시간당 입제 배출량에 따라 살포형이 변하지 않아야 한다. 제 2보에 의하면 입제의 종류에 따른 균등도의 변화는 크지 않으나 단위시간당 입제 배출량에 대해서는 균등도에 있어서 유의성 있는 차이가 나타났으므로 이에 대한 개선도 필요하다.

국내의 분형 공기 이송식 입제 살포기의 개발 사례로는 Kim 등(2005)이 있다. Kim 등이 개발한 분형 공기이송 벙 담수산과기는 살포폭 7 m를 유지하기 위하여 두 개의 원심식 송풍기를 이용한 바 있는데 분두 개수가 24개였다. 송풍기의 풍량이 변하지 않는 상황에서 분두의 개수 증가는 분두당 배출 용량을 적게 하고 분관 내부의 유속과 분관 내 공기이송 형태에 영향을 미칠 것으로 예상된다. Shrikant 등(1993)은 공기이송시스템에서 입제의 이송 형태가 달라짐을 보고하면서 이송 형태를 균질형(Homogeneous type), 균질층형(Stratified type), 불연속형(Blowing dunes type), 침전층형(Settled layer type) 등으로 구분하였다. Lee et al.(1998)은 입제 공기이송에 있어서 관내의 입자를 부양시키는 부양속도(Pick-up velocity)와 부양된 입자가 가라앉지 않는 한계인 약동속도(Saltation velocity)를 예측하는 식을 개발한 바 있다.

본 연구는 입제변량살포기의 다른 부분은 변화시키지 않고 분두의 개수를 증가시킬 수 있는지 공기이송 시스템의 능력을 분석하고, 분두의 개수를 증가시켰을 때 균등한 살포를 얻으면서 입제의 종류나 단위시간당 입제의 배출량에 변화가 적은 분두의 수집관의 삽입길이를 새롭게 정하는 것을 목표로 한다.

2. 재료 및 방법

시험에 사용한 공시기는 분두의 배치와 개수를 제외하고는 제 1보(Ryu 등, 2006)와 제 2보(Kim 등, 2006)에 보고된 것과 동일하며 공시비료 역시 슈퍼21과 신세대 복합비료로서 제 2보와 동일하였다.

가. 공기이송시스템의 분석

공기이송시스템은 시로코팬 형식의 송풍기와 공기를 4개의 흐름으로 나누는 분지관, 입제가 고속의 공기 기류에 투입되

는 혼합실(Mixing chamber), 혼합실과 4개의 분관을 연결하는 주름관(내경 38 mm, 길이 1.8 m와 2.8 m), 분두가 설치된 분관(내경 54 mm, 길이 2 m)으로 구성된다. 그림 1은 송풍기의 성능곡선이다. 선정된 송풍기는 설계구동속도인 5,000 rpm에서 15.4 m³/min의 송풍량을 갖는다.

분관 하나에는 3개씩 분두가 배치되어 있었으나 이를 4개로 증가시킬 경우에도 입제의 이송형태가 균질형을 유지할 것인지 알기 위하여 먼저 1차 시작기의 공기이송시스템에 대한 정압과 풍속에 대한 시험을 실시하였다. 정압과 풍속 측정은 Digital Micromanometer(ZEPHYR DIGITAL MANOMETER, Solomat Co, USA)을 이용하여 정압과 풍속을 구하였다. 분관에는 공기와 입체비료가 함께 이동하고 있으나 측정기는 유체흐름일 경우에만 정상적으로 작동하는 문제가 있어 공기이송시스템분석에서는 비료를 살포하지 않고 송풍기만 작동시켰다. 살포율이 가장 큰 경우인 327.3 g/s인 경우에 공기유량에 대한 입체비료의 유량의 부피 비율이 0.0048로서 낮았으므로 비료살포 여부가 공기흐름에 큰 영향은 주지 않는 것으로 판단하였다.

분의 공기이송시스템은 대칭으로 구성되어 있으므로 좌측 분관을 선정하여 내측과 외측을 이루는 두개의 분 섹션에 대하여 풍속과 정압을 분석하였다. 이 때 분관(내경 38 mm)과 공기혼합실을 이어주는 주름관의 길이는 내측과 외측 각각 180 cm와 280 cm였다.

유량을 구하는데 있어 공기이송시스템에 주름관이나 분지관, 혼합실과 같이 공기흐름을 교란시키는 요소가 많이 있어 공기 흐름을 fully developed로 가정하기 힘들다. 본 연구에서는 하나의 분관 단면에서 그림 2와 같이 13개 지점의 풍속을 3회 반복하여 측정하여 평균을 구하고 이를 주변의 면적에 곱하는 방식으로 풍량을 구하고 이를 이용하여 분관 단면에서의 평균유속을 구하였다. 그림 3은 분관에서 각 분두를

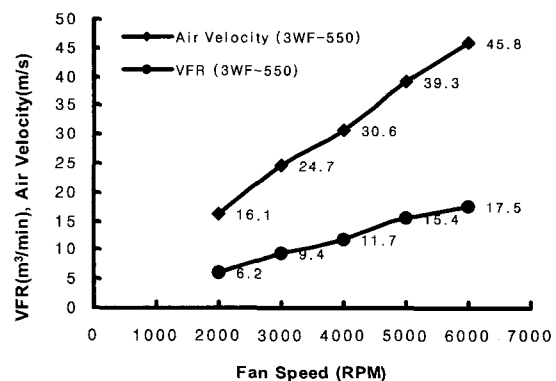


Fig. 1 Volume flow rate and air velocity curves of the selected fan (3WF-550).

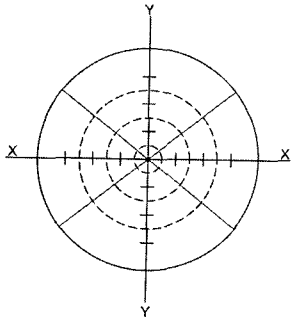


Fig. 2 Air velocity and pressure measurement points in the boom pipe cross section.

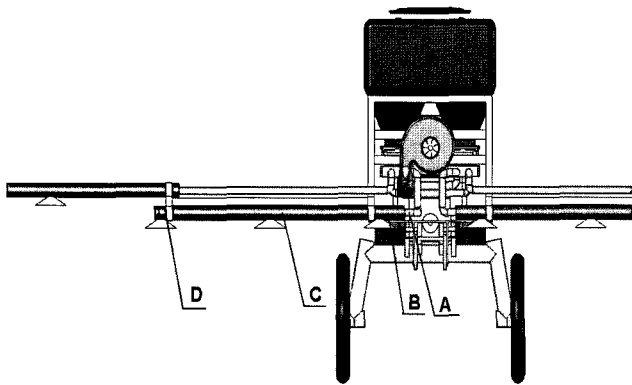


Fig. 3 Air velocity and pressure measurement points.

지나면서 분두를 통한 정압손실과 풍량 손실을 측정하기 위한 측정점을 나타낸 것이다. 그림에서 A지점은 주름관을 B지점부터는 아크릴로 제작된 붐관에서 각각의 분두 중심으로부터 10 cm 앞의 지점을 나타낸다. 시작기의 공기이송시스템은 분두가 3개 이므로 주름관을 포함하여 모두 4개 지점에서 풍속과 정압이 측정되지만 개선된 공기이송시스템에는 분두가 4개이므로 모두 5지점에서 측정되었다. 분두의 개수를 늘리는 판단기준은 Lee 등(1998)이 제시한 부양속도와 약동속도를 기준으로 하였다.

나. 살포장치의 개선과 살포 균등도 평가

1차 시작기의 분두는 수집판의 삽입길이를 알기 어려운 점이 있어서 본 연구에서는 수집판의 재질을 스테인레스 판으로 바꾸어 삽입조절이 부드럽게 이루어지도록 하였으며 삽입길이를 쉽게 알아보도록 눈금자를 분두 몸체에 설치하였다. 그림 4는 본 연구에 사용된 개선된 분두의 모습을 나타낸 것이다. 또한 하나의 붐관에 설치되는 분두를 3개에서 그림 5와 같이 4개로 늘렸다. 자료해석에 필요한 분두번호는 붐관에서 공기가 들어오는 쪽으로부터 설치된 순서에 따라 1번부터 4번까지 부여하였다.

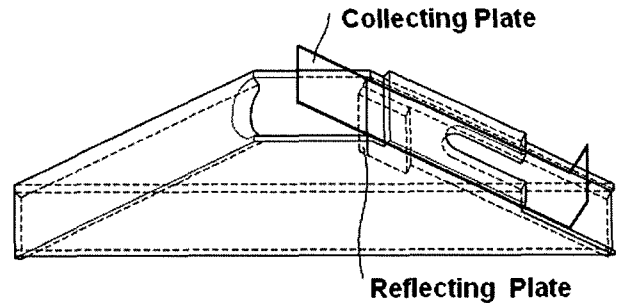


Fig. 4 Isometric view of a blow head.

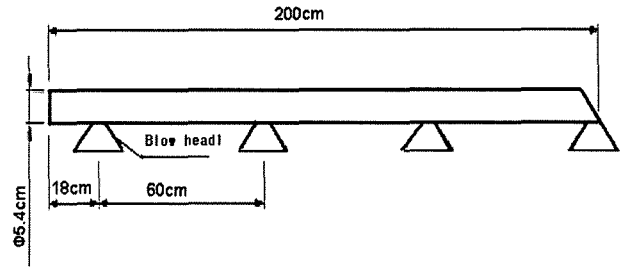


Fig. 5 Placement of blow heads in a boom section.

살포형에 영향을 미치는 변수에는 수집판 삽입길이 조합, 입제의 종류와 단위시간당 입제 배출량이 있다. 입제 두 종류(신세대, 슈퍼21)와 시간당 살포율 두 수준(30 g/s, 50 g/s) 및 수집판 삽입길이 조합 4조건(표 1 참고)에 대하여 살포형을 구하고 C.V.값(변이계수)을 계산하였다. 실험에서 얻은 C.V. 값들은 MINITAB(MINITAB Inc., V14.1)을 이용하여 삼원 변량분석(Three-way ANOVA)을 하였다. 실험방법은 살포높이 80 cm에서 30초간 하나의 붐 섹션에 살포된 비료를 30 cm 간격으로 수집하여 C.V.값을 계산하였으며 3반복으로 실험하였다. 살포높이에 따른 균등도의 변화는 제2보의 결과와 유사할 것으로 판단되어 수행하지 않았다.

단위시간당 입제 살포량에 따른 C.V.값이 15%이하인 수집판 삽입길이의 조합을 시행오차법으로 찾았다. 또한 살포장치를 개선한 경우에도 균질형으로 살포되는지를 확인하기 위하여 공기이송시스템의 유동특성을 분석하고 비료를 살포하는 조건에서 고속카메라를 분두 근처에 설치하여 공기이송 유형을 확인하였다. 실험에 사용한 고속카메라의 제원은 표 2와 같다.

Table 1 Combination of inserting lengths (mm) of collecting plate for uniformity test.

Combination	Blow head (No.)		
	1	2	3
BH-A	20	30	30
BH-B	20	35	35
BH-C	25	35	35
BH-D	30	30	30

Table 2 Specifications of the high speed camera

Item	Specifications
Sensor array	32 channels, CMOS sensor
Image resolution	1504×1128 pixels
Recording rates	selectable 25 to 100, 000 fps
Shutter speed	5 μs

3. 결과 및 고찰

가. 공기이송시스템의 분석

1) 분석 기준의 설정

Lee 등(1998)이 제안한 입체의 부양속도와 약동속도는 식 1과 식 2와 같다. 공시비료의 평균입경과 물성자료(Kim 등, 2006)를 대입하여 신세대 비료와 슈퍼21의 부양속도와 약동속도를 구한 결과는 표 3과 같다. 설계에 사용해야 할 기준 되는 부양속도와 약동속도는 공시 비료의 평균입경에 대하여 구하고 그 중에서 큰 값을 설계기준으로 채택하였다.

$$\frac{v_p}{\sqrt{gD}} = 22.42 \left(\frac{D}{d_p}\right)^{-0.413} \left(\frac{\rho_p}{\rho_a}\right)^{0.157} k^{-0.43} \quad (1)$$

Where, v_p = Pick-up velocity (m/s)

g = Gravity acceleration (m/s²)

D = Diameter of pipe (m)

d_p = Diameter of tested granule (m)

ρ_p = Mass density of tested granule (kg/m³)

ρ_a = Mass density of air (kg/m³)

k = Sphericity

$$\ln\left(\frac{d_p v_s \rho_a}{\mu_a}\right) = \ln\left[(\lambda_l)^{0.27} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{-0.69}\right] - 0.00021\left(\frac{\rho_p}{\rho_a}\right) + 9.75 \quad (2)$$

Where, v_s = Saltation velocity (m/s)

μ_a = Air dynamic viscosity (kg/m·s)

λ_l = Solid loading ratio

Table 3 Calculated pick-up velocity and saltation velocity of test fertilizers

Fertilizer (True density)	Size	Diameter (mm)	Pick-up velocity (m/s)	Saltation velocity (m/s)
Shinsedae (1.507 g/cm ³)	average	2.62	14.3*	6.1
Super21 (1.405 g/cm ³)	average	1.90	12.4	6.8*

* Design criterion

나. 공기이송시스템의 유동 분석

기존의 송풍기를 그대로 이용하면서 분두의 개수를 늘릴 수 있는지를 확인하기 위하여 1차 시작기의 공기이송시스템에 대하여 풍속과 정압을 비교 분석하였다. 그림 6은 1차 시작기의 공기이송시스템 중 내측 불관의 각 위치에서의 풍속과 정압변화를 나타낸 것이다. 외측 불관의 각 위치에서의 풍속과 정압변화도 내측 불관에 유사한 형태로 나타났다. 1번 분두(B지점)에서 풍속은 부양속도보다 충분히 컸으며 3번 분두(D지점)에서 풍속은 설계 기준 풍속인 약동속도와 6.8 m/s 보다 약간 작은 6.3 m/s 였다. 따라서 불색선 1개당 분두의 개수를 3개에서 4개로 설계할 때 마지막 분두에서 풍속이 약동속도보다 작을 것으로 예상되지만 입자의 운동은 관성력이 있으므로 4개로 증가시켜도 살포에는 지장이 없을 것으로 판단하였다.

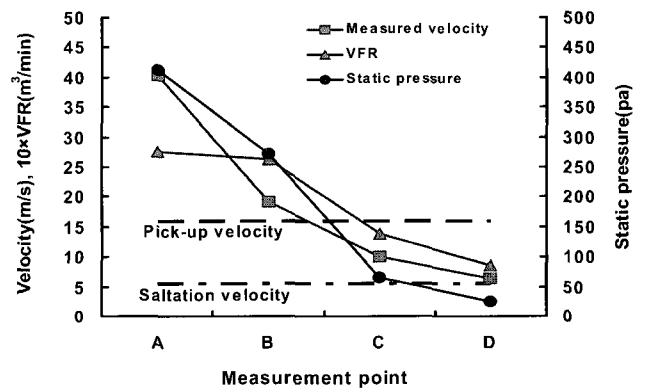


Fig. 6 Air velocity and pressure at 4 different positions of a one boom section.

한편 압력의 변화를 살펴보면 분두를 통과함에 따라 일정하게 정압이 감소함을 볼 수 있다. 분두간의 거리가 60 cm로 짧으므로 관마찰이 정압변화에 미치는 영향을 무시하고, 분두의 손실계수(Loss coefficient)를 식 (3)을 이용하여 구하였다. 계산 결과 분두 1번에서 2번 사이는 1.645, 분두 2번에서 3번 사이는 1.275로 나타났다.

$$K = \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho_a g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) / \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (3)$$

where, K : loss coefficient

V_1 : Air velocity at upstream point

P_2 : Static pressure at downstream point

그림 7은 좌측 불 중에서 안쪽에 위치하는 불관 내의 위치별 유속 프로파일을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 x-x축의 유속 프로파일은 위치에 상관없이 좌우 대칭의 형태를 나타내며 y-y축의 유속프로파일은 1번 분두에서는 상하 간에 대

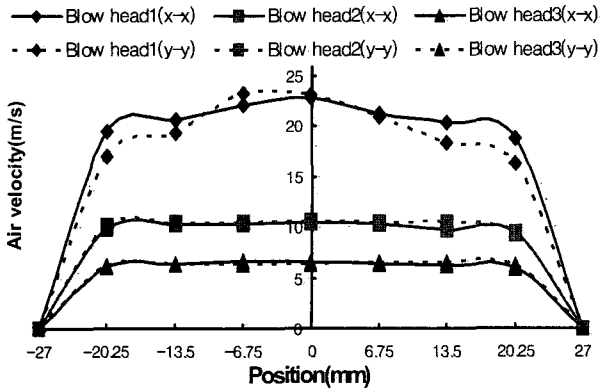


Fig. 7 Air velocity profile at 3-blow heads (length of mixing chamber from boom pipe:180 cm).

칭을 이루지 못하지만 2번과 3번 분두에서는 비교적 대칭적인 유속 프로파일을 보이고 있다. 이러한 경향은 바깥쪽에 위치하는 분두에서도 같은 경향을 나타냈으므로 자료는 생략하였다. 분두 각 지점의 레이놀드수를 구한 결과 70800, 37150, 23200으로서 모두 난류영역에 해당한다.

다. 개선된 살포장치의 균등도 분석

그림 8은 분두별 수집판 삽입길이를 25-35-35 mm로 하고, 살포율 14.9-59.4 g/s로 신세대 복합비료를 살포하였을 때 분섹션 하나의 살포형을 예로서 나타낸 것이다. 분두의 개수를 늘림에 따라서 C.V. 계수도 작아졌는데 살포율 14.9 g/s일 때 C.V.값은 13.7%였으며 59.4 g/s일 때는 14.6%를 나타내었다.

수집판 삽입길이, 시간당 살포율, 신세대 비료가 살포 균등도에 미치는 영향을 삼원변량분석한 결과는 표 4와 같다. 제 2보에서 보고된 바와 달리 입체의 종류는 5% 유의수준에서 차이를 보였으며, 입체의 시간당 살포량은 여전히 고도의 통계적 유의 차이를 보였다. 이 결과에 근거하여 본 연구에서는 살포율에 따라 분섹션내 분두의 수집판 삽입길이를 조절할

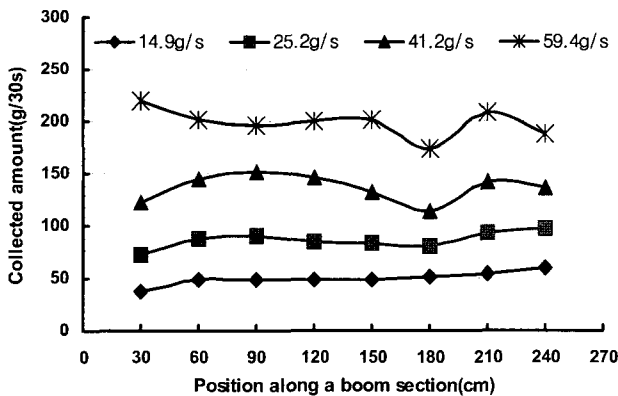


Fig. 8 Application patterns by application rate.

필요가 있다고 판단하였다.

라. 시간당 살포율별 분두의 수집판 삽입길이의 결정

입체의 살포율 수준별로 균등도가 우수한 분두의 수집판 삽입길이의 조합을 시행오차법으로 결정하였다. 표 5에 나타내었듯이 살포율을 4개의 구간으로 나누고 각 살포율 범위에서 시간당 살포율 변화에 따른 분두의 수집판 삽입길이의 최적 조합을 구하였다. 그림 9는 살포율 전체 범위에 대하여 계산한 C.V.값과 제2보에서의 값을 비교한 것이다. 분두 3조에서는 수집판 삽입길이를 조절하더라도 시간당 살포율에 따라 C.V.값이 대부분이 30% 이상의 값을 보였으나, 개선된 살포장치는 전체적으로 C.V.값이 15%이하로 양호하였다. 입체살

Table 4 Analysis of Variance for CV (%)

Source	DF	SS	MS	F
Blow head	3	8814.7	2938.2	5030.02**
Application rate	1	14.2	14.2	24.30**
Fertilizer	1	3.8	3.8	6.50*
Error	42	24.5	0.6	
Total	47	8857.2		

** significant at p=0.01

* significant at p=0.05

Table 5 Optimum combination of inserting lengths according to application rate

Inserting length of collecting plate (mm) (No. of blow head:1-2-3)	Application rate (g/s)		C.V. (%)
	Range	Value	
20-35-30	RA	15~55	9.5~12.7
25-30-30	RB	55~220	9.4~13.7
25-25-30	RC	220~310	11.5~14.6
40-20-30	RD	310~420	12.9~13.6

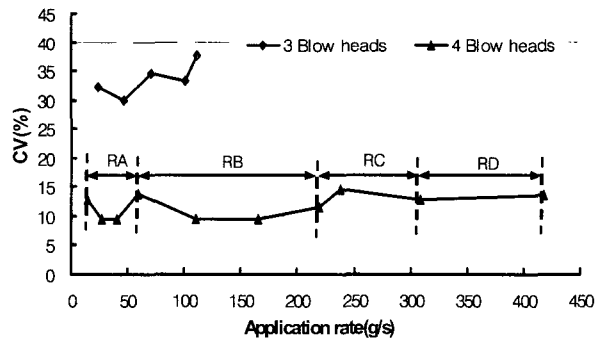


Fig. 9 CV values achieved by the adjusting collecting plate according to the range of application rate.

포작업의 작업속도와 비료의 처방량이 정해지면 살포율이 계산되는데, 살포율에 따라서 최적의 수집판 삽입길이를 표 5를 보고 정할 수 있다.

마. 개선된 공기이송시스템의 공기유동과 이송형태 분석

그림 10은 개선된 공기이송시스템의 내측 붐관에서 위치별 풍속, 풍량과 정압변화를 나타낸 것이다. 외측 붐관의 각 위치에서의 풍속과 정압변화도 내측 붐관과 같은 유사한 형태로 나타났다. 1번 분두(B지점)에서 풍속은 설계기준인 부양속도보다 충분히 컸으며 4번 분두(E지점)에서 풍속은 설계기준 풍속인 약동속도 6.8 m/s보다 작은 5.9 m/s였다. 분두의 개수가 하나 더 증가하였지만 마지막 분두에서 풍속은 비례하여 줄지 않았는데 이에 대해서는 유체역학적인 해석이 필요한 것으로 판단된다. 분두별 손실계수를 식 (3)을 이용하여 구한 결과 1번 분두, 2번 분두, 3번 분두의 손실계수가 각 1.828, 0.949, 1.133으로 나타났다. 이는 개선 전의 분두에서 손실계수보다 작은데, 손실계수가 위치나 전체 분두의 개수에 따라 다르게 나타나기 때문에 손실계수를 이용한 붐관-분두의 공기이송시스템 해석은 곤란한 것으로 판단된다.

개선된 붐 섹션 중 마지막 분두에서 풍속은 약동속도보다 작았으므로 입체 이송형태를 확인할 필요가 있었다. 그림 11은 분두와 붐관에서 입체의 이송형태를 고속카메라로 촬영한 것으로서 두 경우 모두 균질한 형태를 보였다. 마지막 분두에서 풍속이 약동속도보다 작아도 균질형을 나타낸 이유는 주름관을 통하여 입체가 이송되는 동안에 가속이 되어 균질형을 이룬 이후에 입체가 관성을 가지게 되므로 주변의 유속이 느려져도 곧 바로 침전되지 않았기 때문으로 판단된다. 비디오 분석에서 구한 입체의 평균 이동속도는 1번 분두에서 7.3 m/s, 4번 분두에서 3.5 m/s로서 공기의 속도보다는 작지만 충분히 관성을 가지고 있음을 알 수 있다.

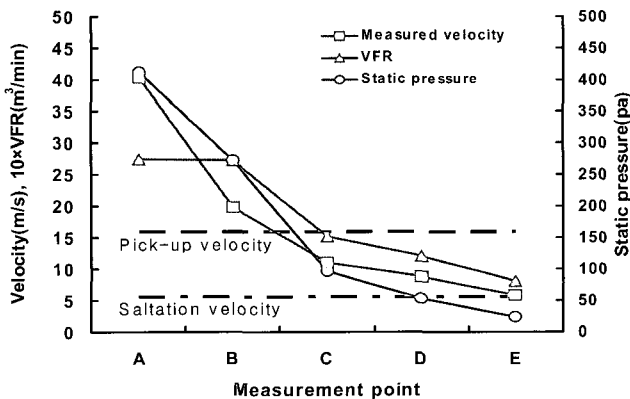
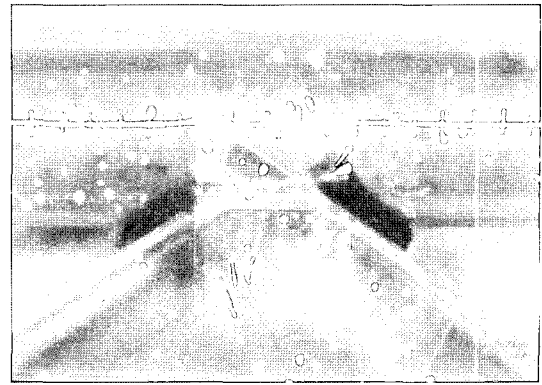
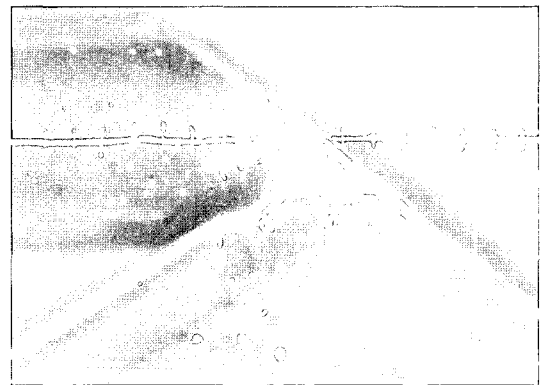


Fig. 10 Air velocity and pressure at 5 different positions of a one boom section.



(a) First blow head



(b) Last blow head

Fig. 11 View of granules floating in the boom pipe by air flow.

4. 요약 및 결론

제 2보(Kim 등, 2006)에서 발표한 연구는 송풍기 1개에 총 12개의 분두를 부착시켜 균등한 살포를 할 수 있는지 검토하였으나 C.V.값이 23.3%로서 만족스럽지 못하였다. 따라서 본 연구는 선행연구에서 개발된 송풍식 입체살포기의 주 구조를 변경하지 않고 분두의 개수를 증가시킬 수 있는지 여부를 검토하고 개선된 살포시스템의 살포 균등도를 평가하고 균등한 살포형을 얻는 분두의 수집판의 삽입길이를 결정하기 위하여 수행되었다.

1차 시작기의 공기이송시스템을 분석한 결과 모든 분두에서 설계 기준이 되는 약동속도보다 크고, 입체가 관성을 가지고 이송되므로 분두를 총 16개로 증가시키는 것이 가능하다고 판단하였다. 분두를 증가시킨 살포장치를 이용하여 입체의 종류, 입체 살포율, 분두의 수집판 삽입길이 조합이 살포 균등도에 미치는 영향을 삼원분산분석한 결과, 모두 유의성 있는 차이를 나타내어 입체 살포율에 무관하게 분두의 수집판 삽입길이를 정하는 것은 어렵다고 판단하였다. 따라서 시간당 입체 살포량의 범위(27.3~417.9 g/s)를 4개의 구간으로

나누어 C.V.값이 15% 이하의 살포균등도(9.4~14.6%)를 가진 수집판 삽입길이의 조합을 구하였다.

입자의 이송상태를 고속카메라를 이용하여 확인한 결과 봄색선의 마지막 분두에서도 균질형으로 이송됨을 확인하였다. 개선된 공기이송시스템을 분석한 결과 분두의 개수가 늘어나는 경우에 마지막 분두에서 풍속이 약동속도보다 작았지만 입자의 관성이 있어 입자들이 균질형으로 이송되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Fulton, J. P., S. A. Shearer, S. F. Higgins, M. J. Darr and T. S. Stombaugh. 2005. Rate response assessment from various granular VRT applicators. *Transaction of the ASAE* 48(6): 2095-2103.
2. Kim, Y. J., H. J. Kim, M. Seo and J. Y. Rhee. 2006. Development of Variable Rate Granule Applicator for Environment-Friendly Precision Agriculture(II)- Development of Pneumatic Fertilizer Blow Head and Its Application Uniformity -. *Journal of Biosystems Engineering* 31(6):474-481. (In Korean)
3. Frank, M. W. *Fluid mechanics*, 5/E. 2004. McGraw-Hill, INC.
4. Lee, S. H., J. Y. Rhee, C. J. Chung and C. S. Lee. 1998. Aerodynamic Properties of Granular Agrichemicals. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 23(2):105-115.
5. Ryu, K. H., Y. J. Kim, S. I. Cho and J. Y. Rhee. 2006. Development of Variable Rate Granule Applicator for Environment-Friendly Precision Agriculture(I) - Concept Design of Variable Rate Pneumatic Granule Applicator and Manufacture of Prototype . *Journal of Biosystems Engineering* 31(4): 305-314. (In Korean)
6. Shrikant, V. Dhodapkar and George E. Klinzing. 1993. Pressure fluctuations in pneumatic conveying systems. *Powder technology* 74(2):179-195.
7. 김충길, 김진영, 박석호, 최덕규, 곽태용. 벼 담수산파기 개량 연구. 2005. 농업공학 시험연구 보고서. 149-157.