

원심입제살포기의 설계인자가 성능에 미치는 영향

Design Parameter of Fertilizer Broadcaster

이중용* 황진성* 김영주*

정회원 정회원 정회원

J.Y. Rhee J.S. Hwang Y. J. Kim

1. 서론

입제 비료나 농약, 토양 개량제를 살포하는 방법 중의 하나인 원심식 살포방법(Broadcasting)은 기계구조가 간단하여 고장의 염려가 적으며 작업폭도 넓기 때문에 광포살포 방법으로 널리 이용되었다. 그러나 살포형이 균등하지 않으므로 중첩에 의하여 균등도를 향상하게 된다.

한편 농작업의 생력화라는 패러다임은 비료살포를 단독 작업보다는 경운과 동시에 또는 이앙/이식과 동시에 추구하게 되어 벼를 수확하면서 보리재배용 비료를 살포하거나 이앙하면서 기비를 시비하고 제초제를 살포하는 기계 등이 개발되었다. 이런 경우에 작업폭은 동시에 수행되는 다른 작업에 의해 결정되므로 입제 살포폭이 광포일 필요가 없으며 오히려 정폭으로 균등하게 살포하는 것이 요구된다. 또한 정밀농업이라는 패러다임의 대두되면서 원심식 살포방법의 변량살포에 대한 적응성에 대한 검토가 필요하지만 이에 대한 검토는 미비한 실정이다.

원심살포기에 대한 연구로는 수직형 로터리 살포기에 관한 연구(성, 1989)외에도 Patterson(1962), Inns(1962), Olieslagers(1996) 등이 수학적인 모델을 개발했으나, 개발된 모형에서 회전스피너와 비료입자와의 충돌은 제외되었으며 검증에 있어서 다양한 설계요인이 고려되지 못하였다.

본 연구는 원심식 입제 살포기의 성능을 예측하는 모델을 개발하기 위한 실험적 연구로서 살포기의 설계인자가 살포성능에 어떠한 영향을 미치는지를 구명하기 위한 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시입제비료

본 연구에서는 수도작용인 D사의 10-16-10 비율의 복합비료(compound fertilizer)를 실험재

*서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

료로 선택하였으며 비료의 물리적 성질은 이(2001)에 발표되었다. 표 1은 비료와 재료간의 마찰계수를 나타낸 것이다.

2.2 입제운동의 관측

스피너 내에서 복합비료입자와 운동을 분석하기 위하여 고속 카메라(Kodak EktaPro, EM Motion Analyzer Model 1000-E)와 영상 처리 프로그램(MAW1.2)을 사용하였다.

Table 1 Friction coefficient of tested fertilizers

Material	Friction Coefficient
PVC	0.45
Steel	0.50
MC	0.52

*Experimental condition : 25°C /29% 69%RH

*Moisture content : 2.2%(d.b)(10-16-10)

Table 2 Experimental parameters and values

Particle	Fertilizer, pellet
Material of spinner	MC, PVC, Steel
Diameter of spinner(mm)	200, 300, 400
Speed of spinner(rpm)	200, 500, 800
Release height from the base of the spinner(mm)	50, 100, 150
Release distance from the center of the spinner(mm)	43, 83, 123
Angle of vane to radial axis(°)	-15, 0, 15

고속카메라는 영상처리장치, 카메라, 비디오 모니터, 광원으로 이루어져 있으며, 영상처리장치를 PC에 연결하여 데이터를 전송할 수 있도록 되어있다.

카메라 렌즈의 초점거리는 50mm이었으며, 렌즈와 대상체와의 거리는 1900mm로 고정하였다. 그림 1과 같이 실험장치와 실험용 비료 살포기를 설치하고, 입자를 1개씩 10-15회 입자의 운동을 고속카메라로 촬영을 하였다. 실험에 고려한 설계인자와 설계인자별 수준 및 그 크기를 표 2에 요약하였다.

고속카메라의 분해능은 1/1000 sec이었고, 이미지는 MAW파일 형태로 저장 후, MS-Excel파일 형태로 전환하여 분석하였다.

실험조건에 사용된 변수를 Fig. 3에 나타냈으며 그림에서 'S'는 스피너의 지름, 'H'는 입자의 낙하 높이, 'D'는 스피너의 회전중심을 기준으로 한 입자의 낙하 위치, 'A'는 스피너의 방사방향을 기준으로 한 베인의 각도를 의미한다.

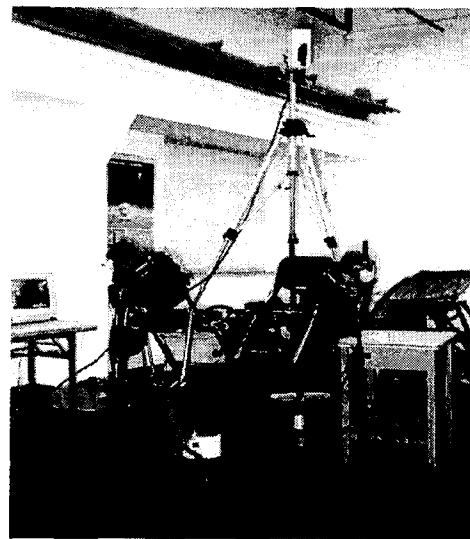


Fig. 1 Experimental setting for capturing particle motion on the spinner.

영상처리 프로그램(MAW2.1)내에서 입자의 운동을 데이터화하기 위하여 각각의 영상프레임 입자의 위치를 개별의 point로 취한 후, 프로그램내의 위치 측정기능과 각 영상별 시간차이를 이용하여 비료입자의 위치, 속도를 측정하였다.

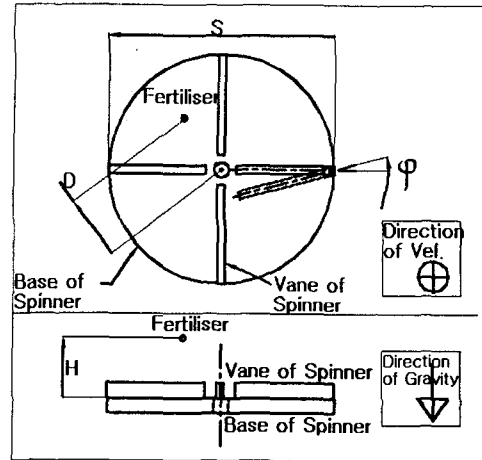


Fig 2 Definition of experimental parameters.

4. 결과 및 고찰

4.1 입자의 운동분석 방법

스피너 재료, 스피너의 회전속도 등의 6가지 조건하에서 실험을 통하여 원판살포기에서 복합비료(10-16-10)의 운동을 분석하였다. 평면으로 투영하여 입자의 운동을 관찰하였으므로 본 연구에서는 입자가 스피너를 벗어나는 순간의 출발속도(v_0 , m/s)와 원판에 머문 각도(θ , deg)를 결과로써 제시하였다.

4.2 스피너 재질의 영향

스피너 재질을 3수준(MC, PVC, 철판)으로 하여 실험한 결과(표 3) 스피너의 재질에 따라서 MC, 철판, PVC 순으로 출발속도가 컸으며 스피너에 머문 각도는 철판, MC, PVC 순으로 컸다. 일반적으로 스피너의 재질은 비료에 대한 내부식성을 기준으로 선정되는 것이 마땅하지만 비료의 살포거리에도 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 표 1에서 보듯이 PVC는 마찰계수가 작아 입자가 빨리 미끄러지며, 가속받는 시간이 작기 때문에 속도가 느려진 것으로 판단된다.

Table 3 Effect of the spinner material on the leaving velocity and stay angle

Material	v_0 (m/sec)	θ
MC	10.34	107.4
PVC	9.08	101.8
Steel	9.38	112.9

speed of spinner 500rpm, diameter of spinner 300mm, release distance 43mm, release height 50mm, angle of vane 0degree

4.3 스피너 회전속도의 영향

스피너의 회전속도를 3수준(200, 500, 800 rpm)으로 하여 실험한 결과를 표 4에 정리하였다. 입자의 출발속도는 스피너의 회전속도와 고도로 비례 증가하였다. 입자가 머문 각도는 저속과 중속에서는 비슷하였지만 고속에서는 작게 나타났고 입자의 출발 방향은 고속에서 특별하게 크게 나타나서 그 이유에 대한 이론적 해석을 요구하고 있다. 한편 출발속도 (v_o , m/s)와 스피너의 각속도(ω , rpm)의 관계를 구해보면,

$$v_o = -0.0002\omega^2 + 0.0345\omega - 2.5658 \quad \dots \text{Eq(1)}$$

입자의 출발속도가 비선형적으로 증가했다는 것은 Olislager et. al.(1996)이 제시한 출발속도에 관한 식 2와 크게 다르다.

$$v_o = \frac{R_d \times \omega}{\sin \beta_o} \quad \dots \text{Eq(2)}$$

여기서 R_d 는 스피너의 직경, ω 는 스피너의 각속도, β_o 는 입자가 스피너에서 이탈하면서 반경방향과 이루는 각도이다. 여기서 β_o 는 코리올리 가속도와 베인의 원주방향속도에 의해 결정되며, 이식은 미끄럼운동 만을 가정하여 구한 것이다.

4.4 스피너의 지름에 의한 영향

스피너의 지름(D, mm)을 200, 300, 400 mm로 변화를 주었을 때 실험결과를 표 5에 정리하였다. 지름에 비례하여 출발속도는 커졌으며 식(2)와 마찬가지로 R^2 이 0.9999에 이르는 고도로 유의한 직선적인 관계를 보였다.

$$v_o = 0.0347D - 1.0517 \quad \dots \text{Eq(3)}$$

입자가 스피너에 머무는 각도(θ , degree) 역시 직경에 대하여 R^2 가 0.9946에 이르는 고도로 직선에 유사한 관계를 보여 주고 있다.

$$\theta_{xy} = 0.2545D + 34.383 \quad \dots \text{Eq(4)}$$

Table 4 Effect of the diameter of spinner on the leaving velocity and stay angle

Diameter	v_o (m/sec)	Θ (°)
200mm	5.86	84.2
300mm	9.38	112.9
400mm	12.79	135.1

material Steel, speed of spinner 500rpm, release distance 43mm, release height 50mm, angle of vane 0degree

Table 5 Effect of the spinner speed on the leaving velocity and stay angle

Speed	v_o (m/sec)	Θ_y (°)
200rpm	3.64	108.0
500rpm	10.34	107.4
800rpm	13.91	85.0

material MC, diameter of spinner 300mm, release distance 43mm, release height 50mm, angle of vane 0degree

Table 6 Effect of the release distance from the center of spinner on the leaving velocity and stay angle

Distance	v_o (m/sec)	Θ (°)
43mm	10.34	107.4
83mm	8.33	58.2
123mm	8.44	33.9

material MC, speed of spinner 500rpm, diameter of spinner 300mm, release height 50mm, angle of vane 0degree

그러나, 입자의 투입위치가 반경방향에서 43mm 떨어진 지점이므로 투입위치로부터 원주까지 반경 방향 거리(r_s , mm)를 독립변수로 하는 경우에는 다른 함수식을 얻을 수 있다.

$$r_s = \frac{D}{2} - 43 \quad \dots\dots\dots \text{Eq(5)}$$

$$v_o = 0.0692r_s + 1.9282 \quad \dots\dots\dots \text{Eq(6)}$$

$$\theta = 49.776 \ln(r_s) - 117.77 \quad \dots\dots\dots \text{Eq(7)}$$

Table 7 Effect of the release height from the base surface of spinner on the leaving velocity and stay angle

Height	v_o (m/sec)	Θ (°)
50mm	10.34	107.4
100mm	4.61	118.1
150mm	7.08	116.4

material MC, speed of spinner 500rpm, diameter of spinner 300mm, release distance 43mm, angle of vane 0degree

즉 반경이 커짐에 따라 입자의 속도가 빨라지므로 머문 각도는 비례하기보다는 점차 작아지는 것을 알 수 있다.

4.5 낙하위치의 영향

회전중심을 기준으로 한 비료의 투입위치를 스피너 중심으로부터 43, 83, 123mm의 3수준으로 하여 실험한 결과를 표 6에 정리하였다. 출발속도(v_{xy})는 낙하위치가 회전중심에서 멀어질수록 10.34 m/sec에서 8.44 m/sec 로 감소하였다. 그 이유는 낙하위치가 반경방향에서 멀수록 입자가 베인에 밀착되어 가속을 제대로 받지 못하기 때문으로 판단되며 출발속도가 일정한 경향을 나타내지 못하는 이유는 실험회수의 부족이거나 실험수준 83과 123의 지점 사이에 최소값을 나타내고 다시 증가하는 경우로 해석되므로 보다 실험수준을 조정하여 다시 실험할 필요가 있다.

스피너에 머무는 각도(θ)를 투입지점과 이탈지점간의 반경방향 거리(r_s)의 함수식으로 표시하면 다음과 같이 지수함수 형태의 고도로 유의한 회귀식을 얻을 수 있었다.

$$\theta = 22.696e^{0.0144r_s} \quad \dots\dots\dots \text{Eq(8)}$$

즉 투입지점이 스피너 원주에 가까울수록 스피너에 머무는 각도는 지수함수 형태로 작은 각도를 나타내었으며 그 이유는 원주에 가까운 부분에서는 스피너 베인의 속도가 고속이고 원심력도 크기 때문인 것으로 판단된다.

Table 8 Effect of the angle of vane on the leaving velocity and stay angle

Angle	v_o (m/sec)	Θ (°)
(-)15°	9.20	95.2
0°	8.33	58.2
(+)15°	7.18	41.5

material MC, speed of spinner 500rpm, diameter of spinner 300mm, release distance 83mm, release height 50mm

4.6 낙하높이의 영향

스피너의 원판면으로부터 투입구까지의 높이 즉 낙하높이를 3수준(50, 100, 150mm)으로 하여 실험하였고 결과값을 표 7에 정리하였다. 출발속도는 4.61 m/sec에서 10.89 m/sec 사이의 커다란 값의 차이를 보였는데 일정한 경향을 나타내지 못하였다. 그 이유는 낙하위치의 영향과 마찬가지로 추정된다. 낙하높

이가 증가하는 경우에는 스피너에 접촉하는 속도가 커지므로 스피너 상에서 입자와 베인 또는 스피너 면간의 충돌로 인하여 예측 불가능한 상황이 이루어지므로 보다 많은 회수의 실험이 요구된다.

입자가 스피너에 머무는 각도(θ)는 투입높이에 따라 다소 증가하지만 커다란 차이는 나타나지 않았다.

4.7 베인 각도의 영향

스피너의 방사방향을 기준으로 한 베인의 각도(ϕ)를 3수준(-15° , 0° , $+15^\circ$)으로 하여 실험하였다. 출발속도(v_{xy})는 7.18m/sec에서 9.20m/sec 사이의 값을 나타냈다. 이 실험에서 비료 입자의 투입위치는 83mm로서 베인이 전경이 될 수록 입자가 머문 각도와 출발속도가 증가하며 15° 증가시 10% 정도의 출발속도 증가를 가져 오므로 살포폭을 넓히고 도달거리를 증대시키는 방법으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 출발속도와 머문 각도에 대한 회귀식은 다음과 같다.

$$v_o = -0.0673\phi + 8.2367, \quad \theta = -2.45\phi + 66.5 \quad \dots\dots\dots \text{Eq(9), (10)}$$

본 실험연구에서 특이한 점은 대부분의 문헌에서 입자의 운동은 베인의 면을 따라서 구름 운동 또는 미끄럼운동을 한다고 가정하지만, 고속카메라로 획득한 영상이나 시뮬레이션 결과를 통하여, 입자가 베인 면을 따라서 방사상으로 운동하는 동안에 베인과의 미끄럼운동뿐만 아니라 충돌현상(즉, 입자가 베인면에 충돌한 후 짧은 시간 후에 다시 베인과 충돌하는 과정)을 반복한다는 것이다. 이 현상은 특히 스피너의 회전속도가 클수록, 낙하지점이 회전중심으로

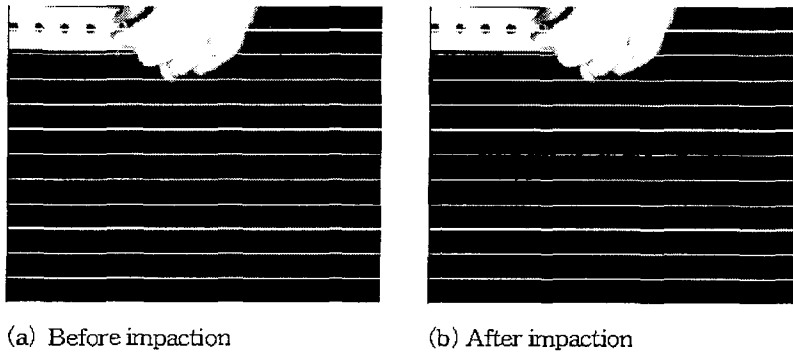


Fig. 3 View of a fertilizer showing impaction with a vane while sliding on the spinner.

부터 멀수록 두드러졌다. Fig. 18은 충돌전후의 모습을 나타낸 것으로 비료의 투입낙하지점을 스피너 중심으로부터 123mm로 하는 경우로써 사진간 시간 간격은 0.001초이다.

5. 요약 및 결론

입체 비료살포는 주요 농작업임에도 불구하고 다른 분야에 비하여 기계화가 미비하다. 그것은 살포기에 대한 정형화된 설계자료의 부족도 한 요인이 된다. 본 연구는 비료살포기의 설계에 필요한 자료를 제시하한 실험자료를 확보하기 위하여 수행되었으며 다양한 설계인자를 설정하여 설계인자가 입자의 출발속도와 스피너 원판 상에 머문 각도에 미치는 영향을 고속영상 분석 시스템을 이용하여 분석하였다.

1. 스피너의 재질은 출발속도나 머문 각도에 차이를 나타냈으나 그 차이는 크지 않았다.

2. 스피너의 회전속도는 2차함수 형태로 증가되었으며 스피너의 지름에 따라서는 직선적으로 증가하지만 독립변수를 직경이 아닌 투입위치로부터 출발지점까지의 반경방향 거리로 볼 경우에는 출발속도는 여전히 직선적으로 비례하였으나 머문 각도는 로그함수로 회귀식을 얻었다.

3. 낙하위치와 낙하높이의 영향을 살펴보면 일정한 경향을 보이지는 않으나 낙하위치가 스피너의 중심에 가까울수록, 낙하높이가 작을수록 출발속도나 머문 각도가 커짐을 보였다.

4. 스피너 깃의 각도가 전경일수록 출발속도와 스피너에 머문 각도가 커지며 후경일수록 작아져 깃의 각도는 중요한 설계인자임을 알수 있었다.

5. 비료의 운동을 고속촬영하여 분석한 결과 입자는 미끄럼 운동만이 아니라 베인이나 스피너에 충돌하는 현상이 관찰되었으며 이 현상은 스피너의 회전속도가 빠를수록, 투입구의 위치가 스피너 중심에서 멀수록, 낙하높이가 높을수록 많이 발견되며 이러 경우에는 이론적인 입자운동해석이 큰 오차를 보일 수 있다고 판단되었다.

6. 참고문헌

1. Inns, F. M. and A. R. Reece. 1962. The theory of the centrifugal distributor II: Motion on the disc, off-centre feed. J. agric. Engng Res. 7(4):345-353
2. Olieslagers, R. et al. 1996. Calculation of Fertilizer Distribution Patterns from a Spinning Disc Spreader by means of a Simulation Model. J. of agric. Engng Res. 63:137-152
3. Patterson, D. E. and A. R. Feed. 1962. The theory of the centrifugal distributor I: Motion on the disc, near-centre feed. J. agric. Engng Res.7(3):232-240.
4. Rhee, J. Y., J. S. Hwang and T. G. Kang. 2000. Properties of Mixed Compound Fertilizer for Applicator Design. Proceedings of the KSAM vol.5(2):130-135.
5. Sung, M. K., J. G. Park and C. H. Choi. 1989. Particle Motion of Vertical Rotary Distributor for Granular Material. J. of the KSAM. vol.14(4) : p.242-250.