

입제 비료 및 농약의 공기역학적 성질

Aerodynamic Properties of Granular Agrichemicals

이성호*	이중용*	정창주*	이채식**
S. H. Lee	J. Y. Rhee	C. J. Chung	C. S. Lee

1. 서론

입제 농약은 액제 농약에 비하여 약효가 길고 인체나 가축에 피해가 적다는 장점을 가지고 있어 널리 사용되고 있으며 그 종류도 다양하다. 비료의 경우 유기질 비료를 제외하고는 화학비료의 100%가 입제 비료이다. 또한 전체 농약 대비 입제 농약의 사용비율은 64.58% (1995년 기준)이상이므로 전체 농약에서 입제가 차지하는 비중이 높다. 수도작의 시비·방제작업은 98%의 높은 기계화율을 보이고 있지만 제초작업의 경우 단위작업면적당 노동투하시간이 81%를 인력에 의존하고 있으며, 시비작업의 경우는 78%를 인력에 의존하고 있는 형편으로 이러한 문제를 해결할 수 있는 농업용 입제 살포기 개발이 시급한 실정이다.

최근 수도작에 있어서 이러한 노동력 문제와 환경문제를 보완하기 위하여 승용관리기 부착용 봄형 방제기가 도입단계에 있다. 본 연구에서는 승풍식 입제 봄 살포기 개발에 관한 기초 연구로서 입제의 이송에 필요한 주요 공기역학적 성질을 구명하고자 한다. 구체적으로 입제의 기초적 물성을 측정하며 수평이송에 관해서 입제의 부유 및 약동 속도에 영향을 미치는 요인을 분석하고 예측식을 개발하고자 한다. 입제의 수직이송에 관해서는 종말속도를 이론식을 이용하여 구하고 부양 및 약동속도와 비교하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 입제의 기초적 물성 측정

본 연구의 실험재료는 요소비료(남해화학)와 복합비료(17-21-17, 동부화학), 유효성분이 포함되지 않은 모래(sand)와 zeolite 입제를 사용하였다. 입제의 크기는 체분석을 이용하여 구하였다. 체분석시 사용한 샘플량은 500g이었으며 진탕시간은 5분으로 정하였다. 입제의 진밀도는 유기화합물인 95%의 아세톤($(\text{CH}_3)_2\text{CO}$)을 이용하여 측정하였다. 입제의 구형률은 영상현미경(Model MW200, 삼성)으로 측정된 투영단면적과 장축 및 단축의 길이와 입제의 형태는 타원형이라는 가정을 통하여 계산하였다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

** 농촌진흥청 농업기계화연구소

2.2. 입제의 부양속도와 약동속도의 측정장치 구성

입제의 부양속도와 약동속도를 측정하기 위하여 (그림 1)과 같은 실험장치를 구성하였다.

부양속도는 관벽에 놓여 있는 입제가 관내 풍량의 증가로 인해서 부유될때의 공기의 속도를 말한다. 부양속도의 측정은 Francisco(1994)가 제안한 측정방법을 이용하였다.

먼저 (그림 2)의 좌측관과 같이 관내부에 입제를 임의의 높이까지 쌓아두고, 일정한 풍량을 공급해 주면 입제는 바람에 의해 계속 침식되다가 더 이상 침식되지 않는 평형상태에 이르게 된다. 이 때, 관내부에서는 입제 위로 가스가 통과하는 면적과 풍량사이의 관계식으로부터 부양속도를 정의할 수 있다.

$$V_{gbu} = \frac{Q_g}{A_{free}} \quad (1)$$

약동속도는 입제가 관내에서 부유상태(suspension)에 있다가 이송 유체의 속도가 줄게 되면 입제는 점점 아래로 낙하하게 되고 결국에는 관벽에 닿아 구르거나 미끄러지는 현상이 일어난다. 이 때 입제가 낙하하여 정체되는 현상이 발생하는 순간의 유체의 속도를 약동속도라고 정의한다. 약동속도는 부양속도와 달리 입제의 투하율(solid loading ratio)에 매우 큰 영향을 받는다. 여기서 입제의 투하율은 단위시간당 공기의 공급량(mass flow rate of air)에 대한 단위시간당 입제의 공급량(mass flow rate of granule)의 비율이다. 입제의 투하율의 조절은 입제배출량조절장치를 5수준으로 조절하여 투하율의 변화에 따른 약동속도를 측정하였다. 약동속도를 측정하기 위해서 송풍기 흡입구의 개구비(흡입구의 열림면적과 흡입구의 총면적의 비율)를 조절하여 입자가 빠른속도로 부유할때부터 입자가 관바닥으로 침전 될 때의 풍량을 측정설정을 이용하여 구하였다. 측정된 풍속과 개구비는 특정한 함수관계로 표현하기 어렵기 때문에 좌우의 3개 지점의 측정된 풍속을 이용하여 2차함수로 표현한 후 각 개구비별 풍속을 보간법에 의해 구했다. 풍량은 모든 지름의 관에 대해서 수평, 수직, 사선방향으로 1cm 간격으로 풍속을 측정하여 풍량을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입제의 수평 이송 현상에 대한 이론적 고찰

입제의 부양 및 약동속도는 파이프의 지름(D), 입제의 지름(d_p), 입제의 밀도(ρ_p), 입제의 구형률(ψ), 공기의 밀도(ρ_a), 공기의 점도(μ_a), 중력(g)등의 영향을 받는다. 위의 변수들을 차원분석하면 다음과 같은 무차원 함수로 표현된다.

$$f\left(\frac{U_g}{\sqrt{gd_p}}, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \psi, \frac{D}{d_p}, \frac{d_p U_g \rho_g}{\mu_g}\right) = 0 \quad (2)$$

3.2. 공기역학적 성질에 관계되는 기초적 물성

입체의 평균크기는 요소가 1.48mm, 복합비료가 2.31mm, 모래가 0.7mm, Zeolite가 0.86mm 였다. 진밀도, 산물밀도, 공극비는 (표 1)과 같다. 입체의 진밀도는 모래, Zeolite, 복합비료, 요소비료 순으로 컸고 산물밀도 역시 같은 경향을 가지고 있었다. 산물밀도와 진밀도의 비율을 보면 모래, 복합비료, Zeolite, 요소의 순으로 크게 나타났으며 공극비는 이와 반대로 요소, Zeolite, 복합비료, 모래 순서로 크게 나타났다. 입체의 구형율은 (표 2)에 나타내었다.

3.3. 입체의 공기역학적 성질

① 입체의 부양속도

관내로 흐르는 일정한 유체의 풍량으로 높이가 일정해진 입체의 높이를 측정하여 부양속도를 구하였다. 구해진 입체의 부양속도와 Francisco(1994)의 식을 비교하였다. 예측값과 측정값의 SEP(Standard Error of Prediction)는 요소비료가 1.25, 복합비료가 2.71, Zeolite가 0.72, 모래가 1.24로 비교적 큰 오차를 나타내었다. 본 연구에는 구형률을 새로운 변수로 포함시켜 SAS 6.12 (window 용)통계 패키지를 이용하여 새로운 모델식을 개발하였다. (식 3)의 결정계수(R^2)가 0.73이었고 유의확률은 0.01%이었다. (그림 4)는 (식 3)을 이용한 예측값과 측정값을 비교한 것으로 (그림 3)에 비하여 정확한 예측이 가능했다.

$$\frac{v_p}{\sqrt{gD_p}} = 22.42 \left(\frac{D}{d_p} \right)^{-0.413} \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} \right)^{0.157} k^{-0.43} \quad (3)$$

부양속도에 영향을 미치는 인자는 직경의 비(유의확률이 0.01%), 구형률(유의확률 10%), 밀도의 비(유의확률 19%) 순으로 나타났다. 즉 입체의 직경이 크면 클수록, 구형률이 작을수록, 밀도가 클수록 부양속도는 증가하게 된다.

② 입체의 약동속도

(그림 5)는 투하율과 약동속도의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 입체의 투하율이 0.1까지는 약동속도가 크게 변하지 않다가 입체 투하율이 0.2~0.4 범위 내에서는 급격히 증가하게 된다. 입체투하율이 0.4 이상부터는 약동속도가 완만하게 증가하였다. 관내로 입체를 투하시키지 않으면 입체로 인한 저항이 없기 때문에 관내의 공기 속도는 빠르지만 관내로 입체가 투하되면 입체의 저항으로 실제 공기의 속도는 감소하게 된다. 이러한 공기 속도 차로 말미암아 입체의 투하율이 증가할수록 약동속도는 급격하게 증가하게 된다. 이러한 경향은 투하율이 0.4 정도에까지 계속되다가 투하율이 지속적으로 증가하게 되면 약동속도의 증가율은 감소하게 된다. 그 이유는 입체의 관내 이송형태가 균질형(부유상태)에서 균질층

형이나 불연속형으로 바뀌면서 공기저항이 상대적으로 작아지게 때문에 판단된다. 약동속도의 데이터를 이용하여 개발한 예측 방정식은 다음과 같았다. 아래 모델식의 결정계수는 0.845였고, 유의수준은 0.01%로 유의성이 높았다

$$\frac{d_p v_s \rho_a}{\mu_a} = e^{11.7} (\lambda_d)^{0.27} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{-0.69} \left(\frac{\rho_p}{\rho_a}\right)^{-0.32} \quad (4)$$

약동속도는 부양속도와는 달리 입체의 구형률에 큰 영향을 받지 않았다. 입체의 구형률은 유의확률이 70%이상 되어 유의성이 거의 없었다. 반면에 입체의 투하율과 입체의 지름의 비율은 유의확률이 0.01%이었고 밀도의 비율 역시 유의확률이 0.03%로서 충분한 유의성을 가지고 있었다. 약동속도는 입체의 지름의 크기에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 입체의 직경이 큰 입자일수록 바람에 의하여 큰 저항을 받기 때문에 공기흐름에 따라 쉽게 부유할 수 있지만, 입자가 작을수록 입체가 받는 저항력이 약하여 쉽게 관벽에 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 입체의 밀도는 약동속도와 반비례하고 있음을 나타내고 있지만 입체의 투하율함에 입체의 밀도항이 포함되어 있으므로 밀도는 약동속도에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 투하량은 약동속도에서 가장 중요한 인자이며 투하율의 0.27승에 비례하였다.

③ 입체의 종말속도

입체의 종말속도는 실측되지는 않았지만 중요한 공기역학적 성질이므로 Srivastava(1993)의 예측식으로 구하여 부양속도와 약동속도와의 크기를 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 세가지 속도의 크기는 (단위입자의)약동속도, 종말속도, 부양속도 순으로 커졌다. 종말속도를 구하기위하여 가정한 조건은 온도 20℃, 밀도 1.23 kg/m³, 공기의 절대점도는 1.8×10⁻⁵ kg/(m·s) 이었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 입체의 공기역학적 성질에 관여하는 지름, 밀도, 구형률 등의 기초적인 물리적 성질을 측정하고 입체의 크기별, 밀도별, 이송관의 직경별로 부양속도와 약동속도를 측정하여 각 요인이 미치는 영향을 분석하였고 종말속도를 실험식을 통하여 계산하여 부양속도, 약동속도, 종말속도를 비교하였으며 농업용 입체의 부양속도 약동속도의 예측식을 개발하였다.

본 연구의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 입체의 기초적인 물리적인 물성인 입자의 지름, 밀도, 구형률을 측정하였다.
2. 입체의 부양속도는 Re_p 의 영향이 거의 없으며 구형률에 큰 영향을 받고 있었다. 부

양속도의 독립변수는 Fr (Froude number)가 사용되었고, 유의성이 높은 변수는 지름의 비율, 구형률, 밀도의 비율 순서로 나타났다. 개발된 부양속도 예측방정식은 (식 3)과 같다.

3. 약동속도에 있어서 구형률은 약동속도에 영향을 미치지 않았으며 지름이 크면 클수록 약동속도는 작아졌고, 투하율이 증가할수록 약동속도는 증가하였고, 밀도는 큰 영향을 끼치지 않았다. 개발된 약동속도 예측방정식은 (식 4)와 같다.
4. 입제의 종말속도를 예측방정식을 이용하여 예측하였다. 입제의 종말속도는 입제비료와 입제농약의 경우 각각 3~6.4m/s, 4~8.4m/s 였다.

5. 참고문헌

1. 고학균 외. 1990. 농산가공기계학. 향문사
2. 농촌진흥청 농업경영관실. 1996. 작목별 작업단계별 노동력 투하시간, 농촌진흥청
3. 박성현. 1997. 회귀분석. 민영사
4. 송문섭외. 1993. SAS를 이용한 통계자료분석. 자유아카데미
 5. A.K.Srivastava, et al. 1993. Engineering principles of agricultural machines. USA. ASAE publisher.
 6. Francisco J. Cabrejos, et al. 1994. Pickup and saltation mechanisms of solid particles in horizontal pneumatic transport. Powder Technology, 79 : 173-186
 7. G.E. Klizing, et al. 1987. Pneumatic Transport - a Review. Powder Technology 51 : 135-149.

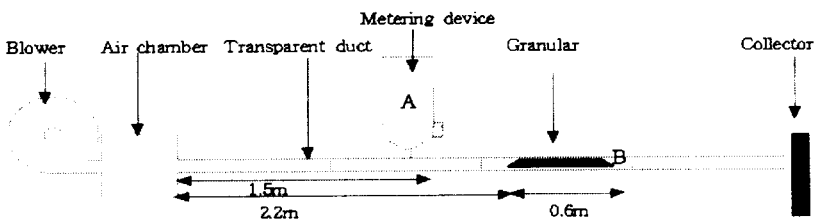


Fig 1. Schematic representation of the setup used for pickup and saltation velocity experiment.

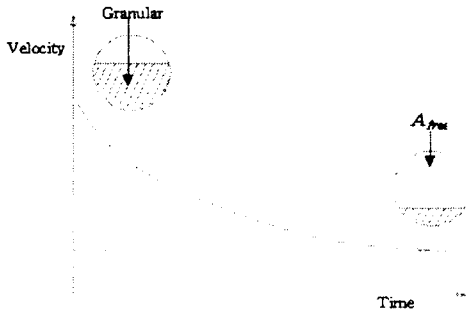


Fig 2. Principle for determining pickup velocity.

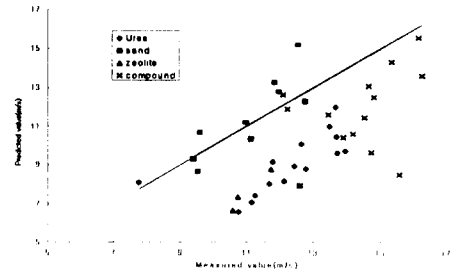


Fig 3. Comparison of measured values to predicted by Francisco(1994) for pickup velocity of granule.

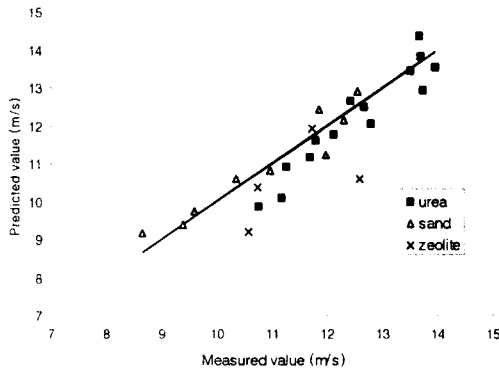


Fig 4. Comparison of measured pickup velocities to predicted values by developed Eq. 3.

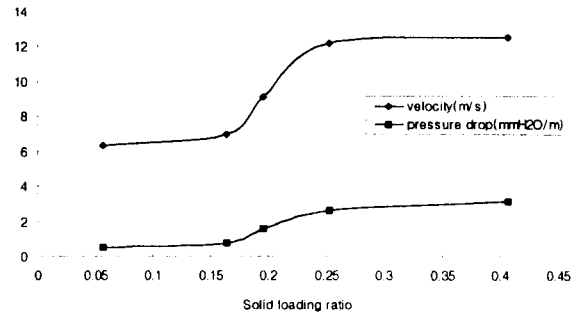


Fig 5. Saltation velocity and pressure drop of compound fertilizer as a function of solid loading ratio, using a 9cm pipe.

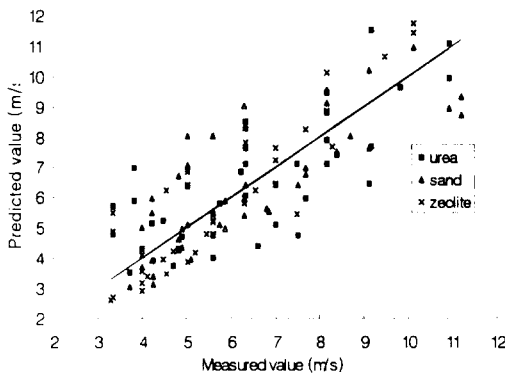


Fig 6. Comparison of measured values to predicted values by developed Eq. 4.

Table 1. True and bulk density of granule.

Granule Density	Urea	Compound	Sand	Zeolite
True density (A, kg/m ³)	1250	1670	2500	1720
Bulk density (B, kg/m ³)	800	900	1330	980
Void ratio	0.563	0.856	0.880	0.755
Ratio (B/A)	0.640	0.539	0.532	0.570

Table 2. Mean and range of granule sphericity.

Granule sphericity	Urea	Compound fertilizer			Zeolite	Sand
		Gray	Red	White		
mean	0.935	0.773	0.926	0.882	0.678	0.743
range	0.89-0.99	0.81-0.91	0.85-0.99	0.73-0.99	0.46-0.78	0.42-0.97

Table 3. Predicted terminal, measured pickup and measured saltation velocity at the initial solid loading ratio.

Granule	Particle diameter (mm)	Terminal velocity (m/s)	Pickup velocity (m/s)	Saltation velocity (m/s)
Urea	1.015	4.31	7.70~11.17	3.35~3.73
	1.295	5.14	11.26~11.78	4.23~4.83
	1.556	5.81	12.12~12.79	4.70~5.61
	1.85	6.49	12.43~13.73	4.23~5.6
	2.18	7.18	13.67~13.96	6.32~5.75
Compound fertilizer	1.015	5.10	-	4.23~5.6
	1.295	6.04	12.23~14.74	-
	1.556	6.81	14.20~14.68	5.75~6.34
	1.85	7.59	13.46~15.35	-
	2.18	8.37	12.11~16.15	5.03~6.32
Zeolite	0.513	2.93	-	3.35~4.00
	0.725	4.00	9.09~10.75	3.35~4.00
	1.015	5.19	-	4.00~5.60
Sand	0.513	3.74	9.39~9.53	3.73~4.23
	0.725	5	11.12~11.98	4.23~4.83
	1.015	6.41	11.84~12.76	4.23~4.83