

농업용 방제기의 정전분무 노즐 개발

조성인* · 신동준**

(*서울대학교 농공학과 교수 · **서울대학교 농공학과 대학원생)

Development of the Electro-static Nozzle for the Agricultural Sprayer

Seong-In Cho* · Dong-Joon Shin**

Dept. Agric. Engineering, Seoul National Univ. Suwon 441-744

적 요

정밀방제의 필요성과 더불어 정전효과를 이용한 방제작업의 필요성이 커지고 있다. 본 연구에서는 정전효과를 이용한 분무기를 설계하고 그에 대한 성능을 평가하였다. 분무기의 절연성을 고려하여 최대의 효과를 얻기 위한 전압과 정전노즐의 설계변수들을 결정하였다. 설계된 노즐은 피복률, 입자 밀도, 입자 크기에 있어서 우수한 성능을 나타냈다.

1. 서론

1. 연구의 필요성

방제작업은 노동투하시간이 매우 크며(41시간/10a), 거의 모든 작업시간 동안 작업자는 농약에 노출되어 극심한 농약중독 피해가 발생하여 방제작업을 기피하게 된다. 또한 농약의 과다 사용에 의한 유수 및 지하수의 오염은 심각한 환경문제로 대두되고 있다.

특히 액제 살포의 경우 분무입자들의 유수 침투 및 과수에 이르기 전에 지면에 떨어짐으로 인한 약액의 손실, 공기 중에서 약액의 비산으로 인한 작업자의 안전 위협 등의 문제가 더욱 심각하다. 작업자를 농약 피해로부터 보호하고 작업환경을 향상시키기 위해서는 정전효과를 이용한 방제작업이 요구된다.

정전효과를 이용한 정전분무기는 고압의 전기를 사용하므로 작업자 안전 문제 및 절연 문제가 발생된다. 또한 과다한 절연재료를 사용하게 되면 제작비 및 분무기 부피의 문제가 발생된다. 즉, 최소의 절연 재료를 사용하여 최대의 정전분무 효과를 얻을 수 있어야 한다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 최대의 효과를 낼 수 있도록 정전분무 노즐의 형상의 최적화를 실시하였다.

2. 연구사

산업분야에서 정전효과를 이용한 응용사례는 painting 및 epoxy coating 작업 등의 특수 도장재료의 정전 살포 등이 있으며, 우리 주위에서 흔히 사용되고 있는 프린터의 일종인 잉크젯 방식의 프린터가 일반적인 사례이다.

정전효과를 농업분야에 응용한 외국의 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Ananthewaran과 Law(1981)은 잔디 등의 엽상식물을 모의로 한 평면형 인공물을 대상으로 실험을 하였다. Carlton 등(1995)은 정전효과를 이용하여 Aerial 분무기를 개발한 후 면화를 대상으로 실험하여 입자 분포도 및 살포방향과 반대편에 있는 작물의 표면에도 우수한 방제효과를 나타냄을 보였다¹⁾.

Cooper와 Law(1987)는 bipolar charging이란 새로운 기법을 사용하여 정전효과를 이용한 분무기의 성능 향상에 대한 연구를 하였다²⁾. Giles와 Law(1985)는 대상체의 기하학적인 형태와 입자분포와의 관계를 규명하기 위하여 cylindrical target의 직경과 간격, 살포형태를 실험변수로 선정하여 실험하였다³⁾.

Law(1995)는 정전효과를 적용시킨 분무기에 약액의 분무 순간에 공기를 고압으로 주입할 수 있는 장치를 설치함으로써 도달성을 향상시켜 약액의 사용량을 50% 감소시켰다. 또한, Law(1978)는 pneumatic-atomizing nozzle에 대한 설계변수들을 최적화하여 정전분무 노즐을 설계한 바 있다⁴⁾.

3. 이론적 배경

가. 정전 유도 대전

농업용 분무기에서 분무 입자를 대전시키는 방법

에는 다음의 3가지가 사용된다.

- 1) 전도성 액체의 유도 대전(induction charging of conductive liquids)
- 2) 전도성 및 비전도성 액체의 이온화장 대전(ionized field charging of either conductive or non-conductive liquids)
- 3) 반도체 액체의 직접 대전(Direct charging of semi-conductive liquids)

유도 대전은 분무입자가 형성되는 영역에 전기장을 형성하여 분무입자를 대전시키는 방법이고, 이온화장 대전은 강력하게 이온화된 영역을 만들어 유체를 그 영역으로 통과시킴으로써 대전시키는 방법이며, 직접 직접대전은 유체를 고압에 노출시킨 상태로 얇은 틈을 통과시킬 때 발생하는 상호반발력을 이용하는 방법이다.

농약액을 물에 일정한 비율로 희석한 수용액을 살포하기 때문에 위의 방법 중 전도성이 우수한 약액을 대상으로 분무액이 노즐로부터 분무되는 위치에 고전압의 전극을 설치하여 정전효과를 발생시키는 유도현상에 의한 대전방법을 선택하였다.

(그림 1)과 같이 분무액이 노즐로부터 분사되는 곳에 근접하게 설치되어 있는 고전압 전극이 음전하로 대전되어 있을 때, 농약액과 같은 전도성 액체가 전극에 근접한 부분을 통과할 때 전기장에 의해 전자가 그림에서 보는 방향으로 이동하여 양전하로 대전

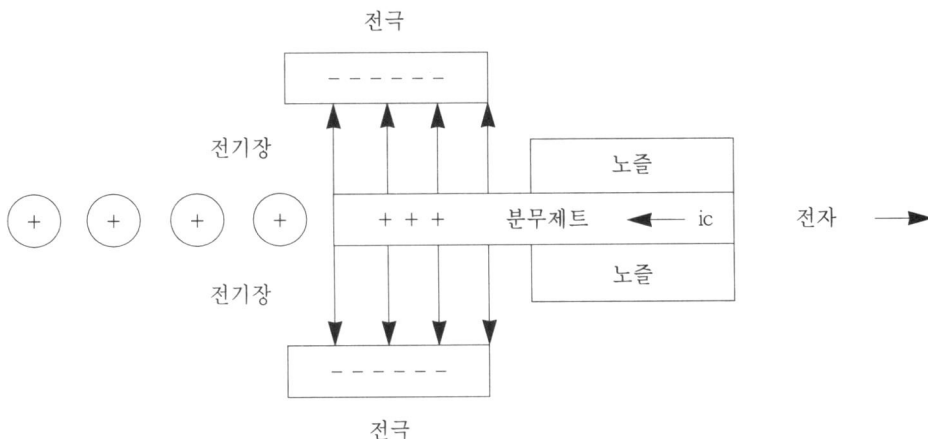


그림 1. 유도현상에 의한 대전의 원리

되고, 분무 입자가 형성될 때 이 전하는 분무 입자에 남아 있게 된다. 이러한 전자의 이동이 분무액이 전극 사이를 통과하기 전에 이루어져야 하기 때문에 분무액이 전도성 액체이어야만 한다. 분무제트의 표면에 유도되는 전하의 양은 전극에 가해진 전압의 크기에 비례한다.

나. 유전체 내부의 전기장의 세기

정전 분무기는 고압의 전기를 사용하기 때문에 전기계통에서의 누전이나 전극에서의 스파크가 발생할 가능성이 높다. 이는 작업자의 안전 문제는 물론이고, 전극의 전압 강하를 초래하여 입자 대전을 저하시키게 된다. 전극에서의 스파크는 전극과 분무액의 제트 사이에 형성되는 전기장의 크기에 따라 다르게 발생한다.

(그림 2)는 서로 다른 물질로 채워져 있는 두 개의 평판쌍을 나타낸 그림이다. 좌측의 평판쌍은 대기로 채워져 있고 우측의 평판쌍은 유전율이 ϵ 인 물질로 채워져 있는 평판쌍이다. 전압 V 가 거리 d 를 유지하고 있는 두 개의 평판에 가해졌을 때 평판 내부의 전기장의 세기는 평판 사이를 채우고 있는 물질의 유전율과 비유전율에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$E_0 = \frac{V}{d} \tag{1}$$

$$E = \frac{E_0}{K} = \frac{1}{K} \frac{V}{d} = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \right) \frac{V}{d} \tag{2}$$

여기서,

K : 비유전율,

ϵ_0 : 공기의 유전율,

ϵ : 절연체의 유전율,

E_0 : 평판 사이가 대기로 채워져 있을 경우의 전기장의 세기,

E : 평판 사이가 절연체로 채워져 있을 경우의 전기장의 세기를 나타낸다.

즉, 유전율이 높은 재료로써 절연을 하면 같은 전기장의 크기를 갖게 하면서 더 높은 전압을 가할 수 있다.

II. 재료 및 방법

정전효과를 이용한 분무기의 성능 실험을 위하여 각 실험장치 요소들을 (그림 3)과 같이 구성하였다.

1. 분무장치

본 연구에서 구성한 분무시스템은 (그림 4)와 같이 약액을 포함한 약액탱크, 분무압 형성을 위한 펌프, 약액의 분무를 위한 노즐과 압력설정을 위한 릴리프 밸브(relief valve)로 구성하였다.

분무압 형성을 위해 선정한 펌프(광성분무기)는 회전수 800rpm의 속도로 회전하면서 25kg/cm²의 압력을 생성하는 플러저 펌프를 사용하였다.

펌프의 운전을 위해 전동기를 사용하였으며 국내에서 흔히 사용되는 기종을 선택하였으며 구체적인 전동기의 사양은 다음 (표 1)과 같다.

본 연구의 공시노즐로는 단위 면적당 균일량 살포 및 기부살포에 유리하여 붐스프레이에 많이 사용하는 TeeJet 11001VS(SprayingSystems, USA)를 사용하였다.

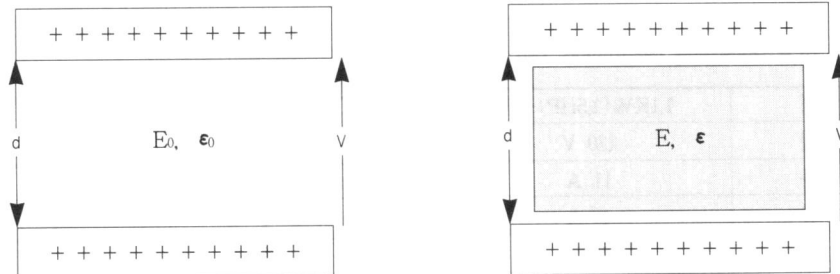


그림 2. 유전체 내부의 전기장의 세기

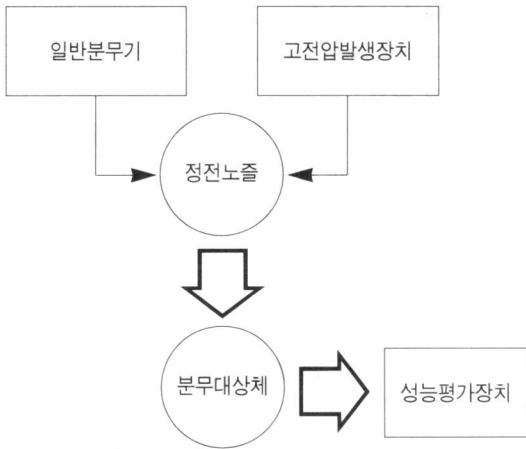


그림 3. 정전 분무 장치의 개략도

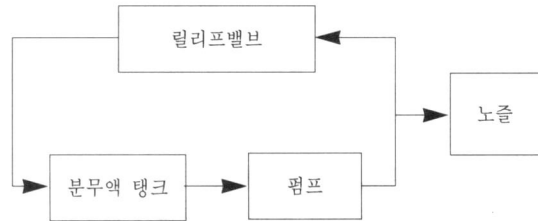


그림 4. 분무장치의 구성

2. 고전압 발생장치

정전효과 발생을 위해서는 고전압을 발생할 수 있는 전원장치가 필요하다. 본 연구에서 선정된 고압전원 발생장치는 입력전원은 AC 220V, 출력 전원은 최고 DC 65,000V를 발생할 수 있는 전원장치로서 승압시 발생하는 접지와외의 방전을 방지하기 위해 2번에 걸쳐 승압하는 방식을 사용하였다. 정류회로는 실리콘을 이용한 반파정류 회로이며, 2차 승압회로는 절연유로 절연된 케이스 내부에 권선이 설치되어 있어서 고압 발생으로 인한 대기 방전을 방지할 수 있도록 설계되어 있다. 고압 상태에서 부하의 감소로 전류가 증가하는 위험한 상황을 방지하기 위하여 미량의 전류에도 반응하는 relay회로를 이용한 안전장치가 설치되어 있다. 고전압 발생장치의 사양은 (표 2)와 같다.

표 1. 모터의 사양(Dongyang electronics. Co. Ltd)

모 델 명	1.1KW(1.5HP)-4P
입 력 전 압	220 V
전 류	11 A
시 동 전 류	49 A
주 파 수	60 Hz
효 율	58 %
회 전 속 도	1710 rpm

3. 전극

가. 설계변수

1) 전극의 형상

정전 유도 현상은 전극에 의해 발생된 전기장 내부에 있는 분무제트의 표면에서 발생한다. 따라서, 분무제가 전극에 의해 형성되는 전기장의 내부에 있도록 설계되어야 한다. (그림 5)는 본 연구에 사용된 노즐에 의해 형성되는 제트의 형상 및 전극의 형상이다. 여기서 t 는 전극을 절연하기 위해 사용된 절연체의 두께, d 는 절연체와 분무제트와의 간격, E 는 절연체 내부에 발생하는 전기장의 세기, E_0 는 절연체와 분무제트 사이에 발생하는 전기장의 세기이다.

표 2. 고전압 발생장치의 사양 (Hyundai Radiation. Co. Ltd.)

전 압 범 위	-65kV ~ 0V
허 용 전 류	0 ~ 50 A
주 파 수	60 Hz
과 형	반파 정류
전 극	negative

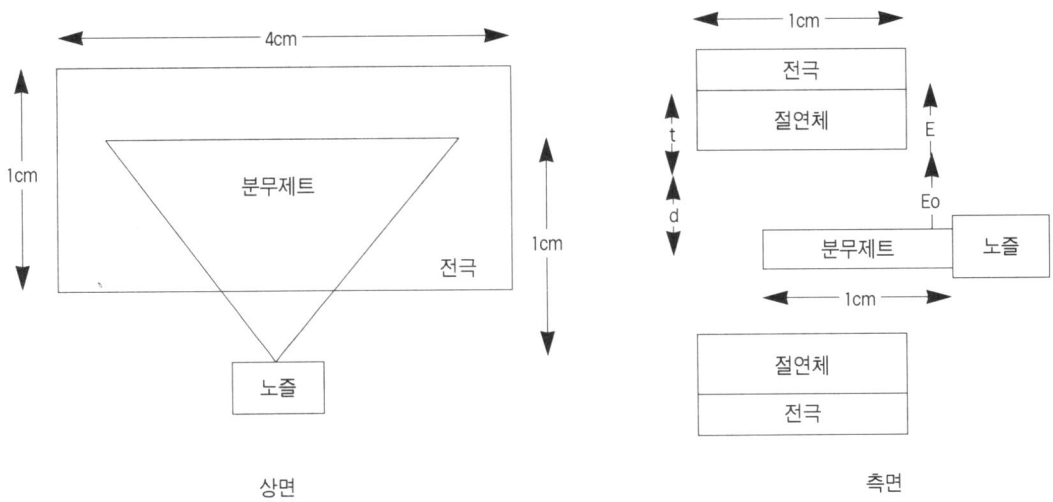


그림 5. 분무제트 및 전극의 형상

2) 작동전압

대전된 전하량은 분무제트 표면에서의 전기장의 세기에 비례하고 전기장의 크기는 적용된 전압에 비례한다. 그러므로, 전압이 높을수록 대전되는 전하량은 증가한다. 그러나, 과도한 전압은 전기계통에서의 누전 및 전극에서의 스파크를 발생시킨다. 이는 작업자의 안전 문제뿐만 아니라 전압의 강하를 초래하여 정전효과를 감소시킨다. 그러므로, 전극에서의 스파크를 발생시키지 않는 최대의 전압이 작동전압이 된다.

3) 절연체의 두께

절연체는 전극에 적용되는 전압을 일정하게 유지하면서도 그 내부의 전기장을 감소시킴으로써 스파크의 발생을 억제한다. 그러나 절연체의 두께가 커질수록 분무제트와 전극과의 거리가 멀어져 분무제트 표면에서 전기장에 의한 정전효과를 감소시키며, 두께가 너무 얇으면 가공의 어려움이 생긴다.

4) 전극과 제트와의 거리

전극과 분무제트와의 거리가 너무 멀면 분무제트 표면에서의 전기장이 감소하여 대전량이 감소되고 너무 가까우면 가공의 어려움 및 스파크 발생의 가능성이 높아진다.

나. 치수의 결정

(그림 5)와 같은 정전분무 노즐에 전압 V 가 가해졌을 때 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$V = V_0 + V' = E_0d + Et \tag{3}$$

여기서,

V : 적용된 전압(V),

V_0 : 절연체의 전위차(V),

V' : 절연체와 분무제트 표면 사이의 전위차(V),

E_0 : 절연체 내부에서의 전기장의 세기(V/m),

E : 절연체와 분무제트 사이에서의 전기장의 세기(V/m),

t : 절연체의 두께,

d : 절연체와 분무제트 사이의 거리를 나타낸다.

식 (2)로 부터 다음이 성립한다.

$$E_0 = KE \tag{2-1}$$

식 (2-1)을 식 (3)에 대입하면,

$$V = KE d + Et = E(Kd + t)$$

$$E = \frac{V}{Kd + t} \tag{4}$$

스파크가 발생하는 최소의 전기장을 E_s 라고 하면

식 (4)로부터

$$E = \frac{V}{Kd + t} \leq E_s \quad (5)$$

일 때 전극에서 스파크가 발생하지 않는다. 전극 표면에서의 부분적인 전하의 집중으로 인한 전기장 세기의 증가를 고려하면,

$$nE = \frac{nV}{Kd + t} \leq E_s \quad (6)$$

여기서,

n : 전기장의 증가를 고려한 안전계수이다. 식 (6)을 정리하면,

$$E_s Kd + E_s t - nV \geq 0 \quad (7)$$

가 되고, 식 (7)이 만족되도록 전극을 설계하여야 한다.

다. E_s 의 결정

E_s 를 결정하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다.



그림 6. E_s 의 결정

(그림 6)은 거리 d 만큼 떨어져 있고 전위차가 V 인 두 개의 평판을 나타낸 그림이다. 고정된 d 에 대해 전압을 증가시켜 스파크가 발생하는 전압을 찾아 d

와 V 와의 관계를 조사하였다.

(표 3)은 4개의 전극간격에 대한 실험 결과이다.

실험결과 전극간격과 스파크가 발생하는 전압사이에는 다음과 같은 관계가 있었으며 그 때의 상관계수(R^2)은 0.8668이었다.

$$E_s = \frac{V}{d} = 1,0031(kV/mm) = 1,003,100(V/m)$$

라. 노즐 치수의 결정

노즐의 절연체재료는 비유전율이 23인 실리콘 재료를 사용하였고, 안전계수는 10으로 하였다. (표 4)는 식 (7)에 의해 결정된 설계변수들의 조합들 중 일 부분이다.

제작 용이성과 실용성을 감안하여 본 연구에서는 $d=38mm$, $t=38mm$ 인 전극을 제작하였다. 이 때 허용 최대 전압은 10kV이며 분무제트 표면에서 발생하는 전기장의 크기는 109,940V/m이다.

5. 분무액

본 연구에서는 감수지를 이용한 분무성능평가 방법과 형광물질과 영상처리를 이용한 분무성능 평가를 병행하여 실시하였다. 감수지를 이용한 성능 평가시에는 분무액으로 물을 사용하였으며, 형광물질을 이용한 성능 평가시에는 형광물질의 수용액을 사용하였다. 형광물질로는 360nm 근방 영역의 자외선에 자극되어 400nm 근방의 가시광선을 발하는 $C_{40}H_{44}N_{12}O_{10}S_2$

표 3. 평판 사이의 간격과 스파크가 발생하는 전압과의 관계

전극간격(mm)	3.20				5.95				9.45				12.55			
실험 횟 수	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
전 압(kV)	4.5	4.2	4.3	4.0	7.8	7.8	7.8	8.0	10.0	11.5	10.0	12.0	11.0	14.0	12.5	13.0

표 4. 설계 변수

Model No.	Voltage(V)	d(m)	t(m)	E(V/m)	$E_0(V/m)$
1	5013	0.0019	0.0019	109940	2528620
2	10027	0.0038	0.0038	109940	2528620
3	13270	0.0050	0.0057	109940	2528620

(fluorescent frighntener 28)을 사용하였고 계면활성제로 t-octylphenoxypolyethoxy-ethanol(triton X-100)을 사용하였다. 분무액은 fluorescent brightener 285g, triton X-100 100ml, 물 4.5 l 를 혼합하여 제조하였다.

6. 성능평가 장치

(그림 7)은 본 실험의 성능평가에 사용된 영상획득 장치의 개략도이다.

장치의 구성은 다음과 같다.

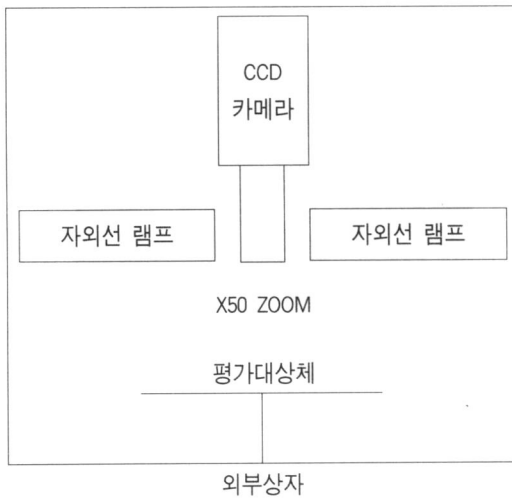


그림 7. 분무입자 영상획득 장치

가. CCD Camera

-PULNIX사의 TMC-7.

나. Zoom Lens

-ARAM 50×.

다. 자외선 램프

- SANYO DENKI사의 G10T8-AN 10W 4개.

- 분무대상의 약 15cm 위에서 자외선 조사.

7. 실험 목표물

본 실험에서는 실제 작물을 대신할 수 있는 유사한 형태의 대상체를 선정하여 작물의 표면에서 부착되는 입자의 분포를 관찰하고자 하였다. 엽상식물을 대표할 만한 형상으로 직경 12cm, 두께 1mm의 플라스틱

원형 평판을 선정하였으며 평판의 윗면과 아랫면에 분무입자의 분포상태를 획득할 수 있도록 감수지(인공목표물) 또는 실제 식물(자연목표물)의 잎을 부착하여 분무실험을 하였다. 실험 대상체는 (그림 8)과 같은 장치에 부착하여 대상체의 각도와 노즐과의 거리 등을 변화시키면서 실험을 하였다.

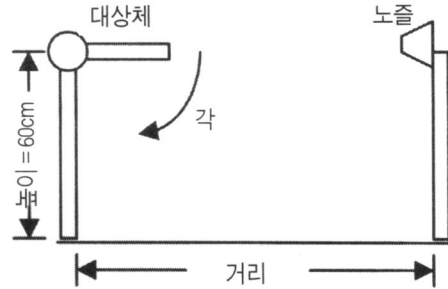


그림 8. 실험목표물

III. 결과 및 고찰

1. 정전효과에 의한 분무립의 피복상태

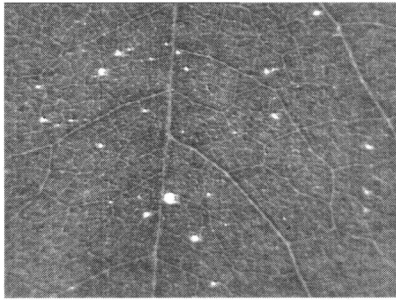
(그림 9, 10)은 나뭇잎에 대한 피복모습으로, 거리는 90cm, 각도는 0°에서 획득한 RGB영상에서 Blue 값만 추출한 영상이다. 그림에서 보는 바와 같이 윗면과 아랫면의 피복모습이 뚜렷하게 구별되고, 특히 정전효과를 적용시킨 경우에 아랫면의 피복률이 월등히 향상된 것을 확인할 수 있다.

2. 피복률 분석

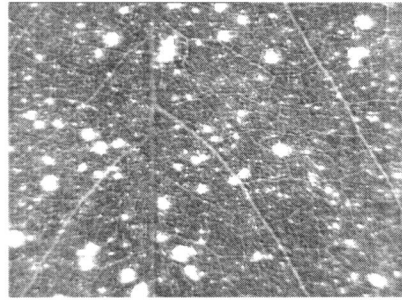
부착립의 피복정도를 나타내는 피복률의 크기를 (표 5)에 나타냈다.

표를 보면 정전효과를 적용시킨 경우의 대체로 피복률이 향상됨을 확인할 수 있었다. 대상체의 각이 45°이고 거리가 90cm일 때 정전효과가 없을 때의 4.57배까지 향상되었다.

거리가 멀어질수록 입자가 대상체에 도달하기 전에 다른 물체에 부착되거나 또는 대전된 전하가 대기 중에서 손실됨으로써 정전효과가 적게 나타난 것

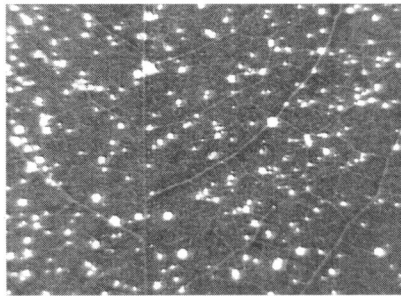


(가) 뒷면

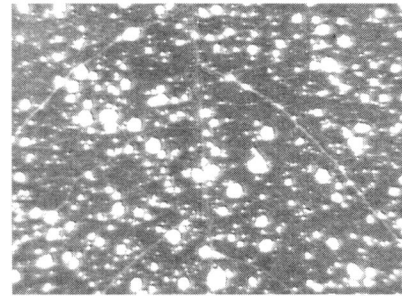


(나) 앞면

그림 9. 정전효과가 없을 경우



(가) 뒷면



(나) 앞면

그림 10. 정전효과가 있을 경우

으로 판단된다.

3. 입자밀도 분석

(표 6)은 인공과 자연 대상체의 부착립 입자밀도를 구한 값이다.

피복률과 마찬가지로 대상체까지의 거리가 멀 경우 분무입자들의 비산으로 인하여 부착한 입자의 개수가 감소하는 경향을 보였다.

4. 부착립의 입자경 분포 분석

(표 7, 8)은 대상체의 각도가 45°일 때 인공대상체의 뒷면에 부착한 입자들의 거리 및 평균입경에 따른 분포표이다.

이 분포들의 공통점은 정전효과를 작용시켰을 때

부착립의 개수가 증가함은 물론 전체 부착립 분포에서 100~200 μ m의 부착립이 차지하는 비율이 상대적으로 높았으며, 특히 100~200 μ m의 부착립이 정전효과에 민감한 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 최대의 정전효과와 고전압에 대한 안전성을 고려하여 정전분무노즐을 설계하였고, 이 노즐의 성능을 평가하기 위하여 분무대상체와의 거리, 분무대상체의 각도, 고전압 발생장치의 출력전압의 크기를 변화시켜 실험을 하였다. 분무성능평가를 위하여 감수지와 형광물질을 사용하여 실제 잎에 대한 부착립의 영상을 획득하여 영상처리를 이용하여 부착립의 피복률, 입자밀도, 평균입경의 분포를 구하였다.

획득한 자료를 분석한 결과 다음과 같은 결론을

표 5. 인공 및 자연 분무대상체에 대한 피복률(%)

면/각		거리 (cm)	정전효과 있음	정전효과 없음	정전효과 없을 경우에 대한 증가율(%)
윗면/0°	인공	60	16.456	13.381	23
		90	1.608	3.235	-50
	자연	60	15.643	11.939	31
		90	1.745	2.917	-60
아랫면/0°	인공	60	10.205	3.474	194
		90	0.867	0.420	106
	자연	60	8.178	5.417	51
		90	0.084	0.039	115
아랫면/45°	인공	60	1.032	0.601	72
		90	0.602	0.108	457
	자연	60	1.940	1.174	65
		90	0.155	0.648	-76
아랫면/90°	인공	60	6.089	2.558	138
		90	2.545	2.041	25
	자연	60	4.404	2.308	91
		90	0.343	0.115	198

표 6. 인공 및 자연 분무대상체에 대한 분무입자 밀도(No./cm²)

면/각		거리(cm)	정전효과 있음	정전효과 없음	정전효과 없을 경우에 대한 증가율(%)
윗면/0°	인공	60	580	465	25
		90	154	222	-31
	자연	60	360	308	17
		90	49	140	-65
아랫면/0°	인공	60	554	353	57
		90	80	54	48
	자연	60	287	156	84
		90	6	3	100
아랫면/45°	인공	60	153	72	113
		90	68	23	196
	자연	60	99	59	68
		90	54	56	-3
아랫면/90°	인공	60	363	262	39
		90	234	170	38
	자연	60	138	186	-26
		90	20	7	186

표 7. 각도 45°, 거리 60cm일 때 인공대상체 뒷면에 부착한 분무립의 입경분포

크기 정전효과	50 μm 이하	100 μm 이하	150 μm 이하	200 μm 이하	250 μm 이하	300 μm 이하
있음	27	89	24	10	1	2
없음	10	43	11	6	1	0

표 8. 각도 45°, 거리 90cm일 때 인공대상체 뒷면에 부착한 분무립의 입경분포

크기 정전효과	50 μm 이하	100 μm 이하	150 μm 이하	200 μm 이하	250 μm 이하	300 μm 이하
있음	8	39	12	6	3	0
없음	5	12	5	1	0	0

얻었다.

① 계산된 최대 허용 전압 이하에서는 노즐이나 기타 전기계통에 방전이 발생하지 않았다. 즉, 제작된 정전분무기는 허용 전압 이하에서 전기적으로 안전하였다.

② 분무대상체 윗면의 피복률은 약 최대 5배 정도 까지 향상을 보였으며, 특히 대상체의 반대면에 큰 효과를 나타냈다.

③ 결과적으로 제작된 정전분무기는 부착립의 피복률, 입자밀도에 있어서 우수한 수치를 보였으며, 미세한 입자들의 부착특성을 향상시켜 우수한 분무성능을 나타내는 것으로 확인하였다.

참고문헌

1. Anantheswaran, R. C. and S. E. Law, 1981, Electrostatic precipitation of pesticide sprays onto planar targets, *Transaction of the ASAE* vol. 24(2), pp.273~276 & 280.
2. Cooper, S. C. and S. E. Law, 1987, Bipolar spray charging for leaf-tip corona reduction by space-charge control, *IEEE Transaction IA-23(2)*, pp.217~223.
3. Giles, D. K. and S. E. Law, 1985, Space charge deposition of pesticide sprays onto cylindrical target arrays, *Transaction of the ASAE* vol.

28(3), pp.658~664.

4. Law, S. E., 1978, Embedded-electrode electrostatic-induction spray-charging nozzle: Theoretical and engineering design, *Transaction of the ASAE* vol. 21(6), pp.1096~1104.
5. Bowen, H. D. and S. E. Law, 1985, Dual particle-specie concept for improved electrostatic depositionthroughspace-charge filedenhancement, *IEEE Transaction IA-21(4)*, pp.694~698.
6. Bowen, H. D. and S. E. Law, 1989, Effects of liquid conductivityupon gaseous discharge of droplets, *IEEE Transaction IA-25(6)*, pp.1073~1080.
7. Carlton, J. B., L. F. Bouse and I. W. Kirk, 1995, Electrostatic charging of aerial spray over cotton, *Transaction of the ASAE* vol. 38(6), pp.1641~1645.
8. Cooper, S. C. and S. E. Law, 1988, Depositional characteristics of charged and uncharged droplets applied by an orchard air carrier sprayer, *Transaction of the ASAE* vol. 31(4), pp.984~989.
9. Cooper, S.C. and S. E. Law, 1989, Variable frequency and waveform high-voltage power supply for three-phasetraveling electric filed system, *Transaction of the ASAE* vol. 32(4),

pp.1477~1483.

10. Cooper, S. C. and S. E. Law, 1990, Computer-based charge transfer data acquisition from multiple targets undergoing electrostatic spraying, *Transaction of the ASAE* vol. 33(2), pp.666~670.