

# 농업용 방제기의 정전분무 노즐의 설계

## Design of the Electro-static Nozzle for the Agricultural Sprayer

조성인\*

조도연\*

정희원

S.I.Cho

D.Y.Cho

### 1. 서론

방제작업은 노동투하시간이 매우 크며, 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 약액의 손실, 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 절연문제가 발생된다. 또한 과다한 절연재료를 사용하게 되면 제작비 및 분무기 부피의 문제가 발생된다. 즉, 최소의 절연재료를 사용하여 최대의 정전분무 효과를 얻을 수 있어야 한다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 최대의 효과를 낼 수 있도록 정전분무 노즐의 형상의 최적화를 실시하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 분무장치

본 연구에서 구성한 분무시스템은 약액을 포함한 약액탱크, 분무압 형성을 위한 펌프, 약액의 분무를 위한 노즐과 압력설정을 위한 릴리프 밸브(relief valve)로 구성하였다. 분무압 형성을 위해 선정된 펌프는 회전수 800rpm의 속도로 회전하면서  $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력을 생성하는 플린저 펌프를 사용하였다.

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

#### 나. 고전압 발생장치

고압전원 발생장치는 입력전원은 AC 220V, 출력 전원은 DC -65,000V까지 발생할 수 있는 전원장치로서 승압시 발생하는 접지와 방전을 방지하기 위해 2번에 걸쳐

---

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

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 relay 회로를 이용한 안전장치가 설치되어 있다.

## 다. 전극

### 1) 설계변수

#### (1) 전극의 형상

정전 유도 현상은 전극에 의해 발생된 전기장 내부에 있는 분무제트의 표면에서 발생한다. 따라서, 분무제트가 전극에 의해 형성되는 전기장의 내부에 있도록 설계되어야 한다. Fig.1은 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 세기다.

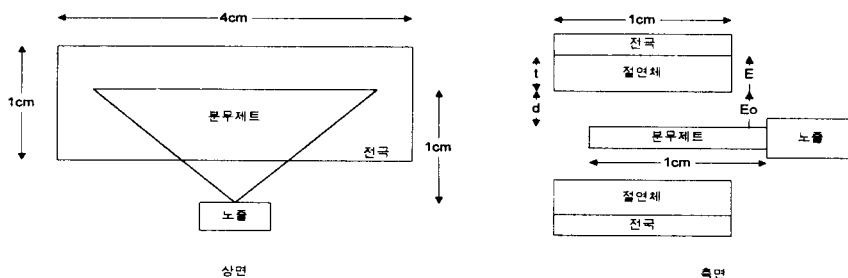


Fig.1 The shapes of the spray jet and the electrode

#### (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 분무제트표면에서 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.

## 2) 치수의 결정

Fig.1와 같은 정전분무 노즐에 전압  $V$ 가 가해졌을 때 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$V = V_0 + V' = E_0 d + Et \quad (1)$$

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,

$a$ : 절연체와 분무제트 사이의 거리를 나타낸다.

유전체 내의 전기장의 세기는 다음과 같은 관계가 있다.

$$E_0 = KE \quad (2)$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하면,

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

$$E = \frac{V}{Kd + t} \quad (3)$$

스파크가 발생하는 최소의 전기장을  $E_s$ 라고 하면 식 (3)으로부터

$$E = \frac{V}{Kd + t} \leq E_s \quad (4)$$

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

$$nE = \frac{nV}{Kd + t} \leq E_s \quad (5)$$

여기서,  $n$ 은 전기장의 증가를 고려한 안전계수이다. 식 (5)을 정리하면,

$$E_s Kd + E_s t - nV \geq 0 \quad (6)$$

가 되고, 식 (6)이 만족되도록 전극을 설계하여야 한다.

### 3) $E_s$ 의 결정

$E_s$ 를 결정하기 위하여 다음과 같은 실험을 하였다.

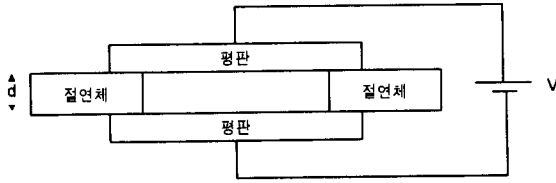


Fig.2 Determination of  $E_s$

Fig.2은 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. Table 1은 4개의 전극간격에 대한 실험 결과이다.

Table 1. The relationship of the space between plates and the spart onset voltage

전극간격(mm)	3.20				5.95				9.45				12.55			
실험 횟수	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
전압(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

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

$$E_s = \frac{V}{d} = 1.0031(kV/mm) = 1,003,100(V/m)$$

### 4) 노즐 치수의 결정

노즐의 절연재료로는 비유전율이 23인 실리콘 재료를 사용하였고, 안전계수는 10으로 하였다. 식 (6) 및 제작 용이성과 실용성을 감안하여  $d=38mm$ ,  $t=38mm$ 인 전극을 제작하였다. 이 때 허용 최대 전압은 10kV이며 분무제트 표면에서 발생하는 전기장의 크기는 109,940V/m이다.

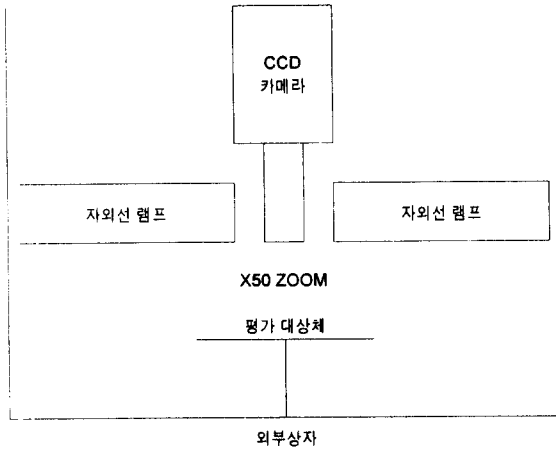
### 라. 분무액

본 연구에서는 감수지를 이용한 분무성능평가 방법과 형광물질과 영상처리를 이용한 분무성능 평가를 병행하여 실시하였다. 감수지를 이용한 성능 평가시에는 분무액으로 물을 사용하였으며, 형광물질을 이용한 성능 평가시의 분무액은 형광물질의 수용액을 사용하였다.

형광물질로는 360nm 근방 영역의 자외선에 자극되어 400nm 근방의 가시광선을 발하는  $C_{40}H_{44}N_{12}O_{10}S_2$ (fluorescent frightener 28)을 사용하였고 계면활성제로  $t$ -octylphenoxypolyethoxyethanol(triton X-100)을 사용하였다. 분무액은 fluorescent brightener 28 5g, triton X-100 100mℓ, 물 4.5ℓ를 혼합하여 제조하였다.

마. 성능평가 장치

Fig.3은 본 실험의 성능평가에 사용된 영상획득장치의 개략도이다.

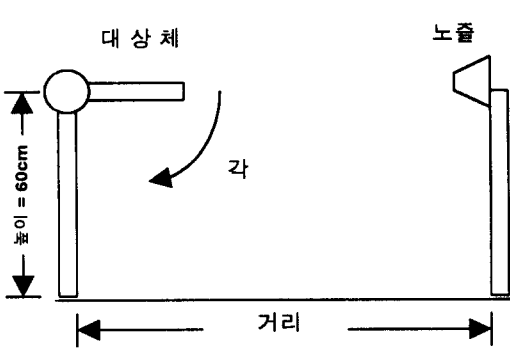


CCD Camera는 ARAM 50배 ZOOM 렌즈를 부착한 PULNiX사의 TMC-7을 사용하였으며 자외선 램프는 SANYO DENKI사의 G10T8-AN 10W 4개를 부착하여 분무대상의 약 15cm 위에서 자외선을 조사하였다.

실험 대상체에 분무액을 분무한 후 영상획득 장치를 이용하여 영상을 획득하여 IMAGE PRO(Media Cybernetics사) 프로그램을 이용하여 피복률, 입자평균지름, 입자의 개수를 측정하였다.

Fig.3 Image acquisition system for spray droplets

바. 실험 목표물



직경 12cm, 두께 1mm인 원형 평판의 윗면과 아랫면에 분무입자의 분포상태를 획득할 수 있도록 감수지(인공목표물) 또는 실제 식물의 잎(자연 목표물)을 부착하여 분무실험을 하였다. 실험 대상체는 Fig.4와 같은 장치에 부착하여 대상체의 각도와 노즐과의 거리 등을 변화시키면서 실험을 하였다.

Fig.4 Spraying Target

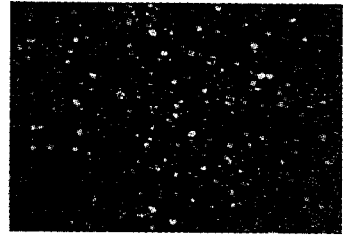
3. 결과 및 고찰

가. 정전효과에 의한 분무립의 피복상태

Fig. 5,6은 나뭇잎에 대한 피복모습으로, 형광액을 이용하여 거리는 60cm, 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.



(a) Back side

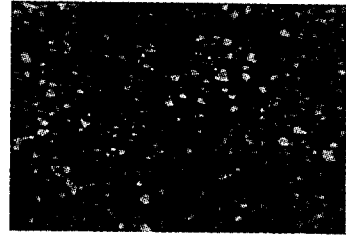


(b) Front side

Fig.5 Non-electrostatic



(a) Back side



(나) Front side

Fig.6 Electrostatic

나. 피복률 분석

부착립의 피복정도를 나타내는 피복률의 크기를 Table 2에 나타냈다.

표를 보면 정전효과를 적용시킨 경우의 대체로 피복률이 향상됨을 확인 할 수 있었다. 대상체의 각이  $45^\circ$  이고 거리가 90cm일 때 정전효과가 없을 때의 5.57배까지 향상되었다. 거리가 멀어질수록 입자가 대상체에 도달하기 전에 다른 물체에 부착되거나 또는 대전된 전하가 대기 중에서 손실됨으로써 정전효과가 적게 나타난 것으로 판단된다.

Table 2. Coverage rate for the artificial and the natural target(%)

side/angle		distance (cm)	electrostatic on	electrostatic off	Increasing rate
upside/ $0^\circ$	artificial	60	16.456	13.381	23
		90	1.608	3.235	-50
	natural	60	15.643	11.939	31
		90	1.745	2.917	-60
downside/ $0^\circ$	artificial	60	10.205	3.474	194
		90	0.867	0.420	106
	natural	60	8.178	5.417	51
		90	0.084	0.039	115
downside/ $45^\circ$	artificial	60	1.032	0.601	72
		90	0.602	0.108	457
	natural	60	1.940	1.174	65
		90	0.155	0.648	-76
downside/ $90^\circ$	artificial	60	6.089	2.558	138
		90	2.545	2.041	25
	natural	60	4.404	2.308	91
		90	0.343	0.115	198

다. 입자밀도 분석

Table 3는 인공과 자연 대상체의 부착립의 입자밀도를 구한 값이다.

Table 3. Density of the spray deposits for the artificial and the natural target(No./cm<sup>2</sup>)

side/angle		distance (cm)	electrostatic on	electrostatic off	increasing rate
upside/0°	artificial	60	580	465	125
		90	154	222	-31
	natural	60	360	308	17
		90	49	140	-65
downside/0°	artificial	60	554	353	57
		90	80	54	48
	natural	60	287	156	84
		90	6	3	100
downside/45°	artificial	60	153	72	113
		90	68	23	196
	natural	60	99	59	68
		90	54	56	-3
downside/90°	artificial	60	363	262	39
		90	234	170	38
	natural	60	138	186	-26
		90	20	7	186

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

라. 부착립의 입자경 분포 분석

Table 4, 5은 대상체의 각도가 45° 일 때 인공대상체의 뒷면에 부착한 입자들의 거리 및 평균입경에 따른 분포표이다.

Table 4. Distribution of the average diameters of spray deposits when 45°, 60cm

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

Table 5. Distribution of the average diameters of spray deposits when 45°, 90cm

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

이 분포들에서 볼 때 정전효과를 작용시켰을 때 부착립의 개수가 증가함은 물론 전체 부착립 분포에서 100~200μm의 부착립이 차지하는 비율이 상대적으로 높았으며, 특히 100~200μm의 부착립이 정전효과에 민감하다는 것을 알 수 있다.

## 4. 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 얻었다.

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

나. 분무대상체 윗면의 피복률은 약 최대 5배 정도까지 향상을 보였으며, 특히 대상체의 반대면에 큰 효과를 나타냈다.

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

## 5. 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) : 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)* : 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) : 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) : 1096 ~ 1104