

주입식 총유량 자동제어방식

분관 방제기의 개발*

A Direct Injection-mixing Total-flow-control Boom Sprayer System

구영모*

정희원

Y.M. Koo

ABSTRACT

A direct injection sprayer was designed using the concepts of injection mixing and total flow control, flowrate-based system compensating for the variation of forwarding speed. A metered rate, proportionally to the actual diluent flow rate, of a tracer chemical was injected directly into the diluent stream. The injection of chemical may improve the precision and safety of chemical application process.

The control system was evaluated for the variables of the control interval, tolerances and sensitivities of flow regulation valve and injection pump. Performance of the system was assessed as that the response time of flow rate, response time of injection rate, absolute steady state error, and the coefficient of variance(C.V.) of concentration were 8.5 and -0.53 seconds, 0.067 lpm(0.8%) and 3.15%, respectively, at optimal parameters of control interval of 1.0 sec, fast sensitivity of flow regulation valve, medium sensitivity of injection pump and medium tolerance of flow rate. Performance of the system can be improved by increasing the sensitivity of flow regulating valve and employing a high resolution velocimeter, such as Doppler radar.

주요용어(Key Words) : 분관 방제기(Boom Sprayer), 직주입(Direct Injection), 총유량 제어(Total Flow Control), 제어 동특성(Control Characteristics).

1. 서론

거의 모든 농산물의 생산과정에서 필수적이라 할 수 있는 防除作業에 있어서는 현재의 노동집약적, 비효율적, 作業忌避性 등을 고려할 때 생산효율, 방제효과, 작업자 및 환경보호의 측면에서 새로운 防除體系의 개발이 시급하다. 한국의 전담농업을 중심으로 현재 방제체계에서 개선되어야 할 점들을 나열하면 다음과 같다. ① 소형 동력분무기를 이용한 노동집약적인 방제작업은

생산비의 절감이 어렵다. ② 携帶型 혹은 可搬型 동력분무기에 單頭型 노즐을 사용하므로 작업자에 따라 농약의 投與量을 조절하기 어렵다. ③ 불균일한 塗布로 인하여 방제효과의 감소를 초래한다. ④ 고압용 노즐(spray gun)의 사용으로 입경이 100 μ m 이하의 미세입자의 飛散으로 인한 손실은 물론 작업자의 호흡기를 통한 흡입이 우려된다. ⑤ 혼합, 계량, 운반등 농약의 취급과정에서 직접 화학물질과 접촉함으로써 농약사고가 우려된다. ⑥ 분무입자에 近接한 작업방법과 보

+ 이 논문은 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해서 연구되었음

* 경북대학교 농과대학 농업기계공학과

호장비의 미비로 중독사고를 일으킬 경우가 많다. ⑦ 살포작업후 탱크의 잔여혼합액은 용기와 함께 부적절하게 폐기되어 생활용수 및 토양오염의 직접적인 원인이 된다.

防除技術에 대한 지금까지의 관심은 다른 농업생산기술 분야에 비하여 미진하였으나 농업의 규모가 커지고 기업화가 예상되는 실정에서 생산효율, 방제효과, 작업자 및 환경보호의 측면에서 새로운 방제체계를 개발해야 할 것으로 인식하고 있다. 선진농업 체계를 위하여 방제전문 자격제도를 두어 효과적이며 안전한 방제작업을 하도록 하며 환경보전협회, 농업연구소, 농촌지도소 등 관련기관을 통하여 지도, 관리, 감독, 연구토록 해야 한다.

최근의 방제기술에 관한 연구개발의 동향은 작업효율의 개선, 농약사용의 최적정화, 안전과 환경보전 등이다.(McWhoter, 1991; 이중용 1994). 이 연구동향은 자동제어 기술을 접목하므로써 진행되고 있으며 先混合 총유량 제어방식, Bypass방식 등으로 살포량의 적정화를 추구하였다(Bode, 1988). 그러나 작업자의 안전 및 환경보전의 측면에서 취약점이 지적되었고 이를 보완하기 위하여 直注入 濃度制御方式이 제안되었다(Broder and Cole Jr., 1987). 이 방식은 농약의 양을 조절하여 희석액에 직접 주입하여 混入하므로 작업자를 농약으로부터 분리하여 접촉피해를 최소화하며, 방제작업후 남겨진 농약원액과 표준용기는 회수되어 작업자 및 환경보호의 목적을 달성할 수 있다. 그러나 농약농도의 변화가 노즐까지 도달하는 遲延時間으로 인하여 생기는 살포량의 過渡誤差는 일반허용치를 상회하였다(구영모 et al., 1996; Tompkins et al., 1990; Way, 1992).

위에서 언급한 여러 가지 제어방식을 검토한 결과 직주입 총유량 제어방식을 가장 이상적으로 평가하였고, 直注入 總流量 制御方式 boom sprayer system의 내용은 식(1)에서 구체적으로 설명할 수 있다(Koo and Kuhlman, 1993).

$$F = \frac{600 \times Q_i \times C}{W \times SPD}$$

$$C = \theta_p / \theta_s = Q_w + Q_p \quad \dots\dots(1)$$

(1)에서 F는 농약살포량(L/ha), Q_i 는 노즐에서의 총배출유량(L/min), W는 全撒布幅 또는 붐길이(m), SPD는 방제기의 속도(km/hr), C는 혼합시 농약의 농도, Q_p 는 농약의 注入流量(L/min), Q_w 는 희석액(물)의 유량(L/min)이다. 定量의 살포량(F)을 一定한 살포폭(W)으로 살포할 때 變數인 방제기속도(SPD)에 대하여 노즐에서의 총배출량(Q_i)을 조절하게 되며, 따라서 농약의 농도(C)를 일정하게 유지하기 위하여 농약의 주입량(Q_p)을 제어하게 된다.

따라서 本 研究의 目的은 앞으로의 영농규모와 농업구조에 적합한 방제작업의 難點들로부터 환경 및 작업자를 보호하며 最適量의 농약을 균일하고 유효하게 살포하여 방제효과를 極大化할 수 있는 直注入 總流量 自動制御方式 噴管防除機(Direct Injection-mixing Total-flow-control Boom Sprayer)를 개발하고 성능을 평가하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 방제기 회로의 구성

총유량 제어방식 및 직주입 혼합방식의 개념을 도입하여 개발된 분관방제기는 그림 1 과 같이 희석액 유량조절부, 농약 주입부, 혼합 및 살포장치부와 세부부를 통합 및 조절하는 제어부로 이루어져 있다. 방제기의 회로는 실험용 시종기로 22HP 트랙터(대동 L2202-4WD) 후미에 장착할 수 있도록 설계하여 희석액이 담길 물통은 200L의 용량을 선택하였다. 그러나, 물통은 선두부에 Ballast 대신 설치하거나 견인형으로 트레일러에 올려 보다 큰 용량으로 회로를 구성할 수 있다. 주펌프는 30-40 L/min의 토출량에서 5-6 kg/cm²의 수두를 낼 수 있는 비용적식 점성펌프(유진펌프, Wesco 101×1)를 선택하여 트랙터 PTO에 연결하여 동력을 전달하였다. 비용적식 펌프를 사용하였으므로 전자 유량조절

밸브(Spraying Systems Co., 244A-3/4)를 By-pass 관로에 설치하여 유량 및 압력을 조절하였고 분관(booms)과 노즐로의 관로 개폐는 전자 솔레노이드 밸브 (Spraying Systems Co., 144A)로 하였다. 유량조절밸브는 全開로부터 全閉까지의 1/4 회전에 걸리는 시간은 14sec이며 압력 변화는 정현곡선을 이룬다.

주펌프로의 유입과 토출관로는 진동 및 상대운동을 고려하여 25mm 호스를 사용하였고 교반관로 이후는 측관로(bypass)까지 20mm PVC 파이프, 솔레노이드 이후의 분관로는 16mm PVC 파이프 구성하였다. 10m 길이의 분관에는 50cm 간격으로 광역노즐(Extended range, Spraying Systems Co., XR8001 Teejet) 20개를 달았다.

농약주입부는 역류방지용 체크밸브를 밀고 회석액의 압력을 이기며 定容積의 微量을 토출하도록 피스톤식 FMI 펌프(Fluid Metering Inc., CSC-Q1)를 선택하였고 펌프는 회전수 조절을 위하여 경부하 직류모터(FMI-QV, 1/27HP, 0.41 A)를 사용하였고 구동모터의 응답속도는 신호입력으로부터 20ms 이하였다. 주입펌프의 유입구에 연결될 3L 용량의 표준 농약용기는 건식연결구(Quick-dry lock disconnect)로 결합 및 분리를 수월케 하였다.

나. 계측용 센서 및 제어용 Interface

그림 1에 보인 바와 같이 압력변환기(Omega Eng.Inc., PX181, 170.72Pa/digit)와 지침식 압력계가 주관로의 압력을 측정하기 위하여 설치하였다. 솔레노이드 밸브가 열리며 分流하여 노즐로 배출되는 회석액(물)만의 유량을 측정하기 위하여 밸브후 15cm 위치에 터빈식 유량센서(Omega Eng.Inc., FTB603, K=3100 pulses/L)를 설치하였다. 방제기의 회전속도를 측정하기 위하여 근접센서(금성기전, ZVF-C12-4DNO)를 후륜 내측에 부착된 톱니형판(잇수 60개, 0.16 kph/pulse)에 근접고정 시켰으며 프로그램에서 바퀴의 미끄럼을(slipage)을 10%로 계산하였다. 주

입용 정용량 펌프의 회전속도는 로타리형 엔코더(금성 마이크로닉스, MS50-0060BO)를 이용하여 측정하였고 농도 변화는 Conductivity Sensor (Omega, CDE-344)로 측정하였다.

직주입 총유량 방제기 제어를 위하여 범용 PLC(금성기전, G5)를 사용하였다. 사용된 PLC는 반복연산 제어방식 CPU(G5CPU, 10MHz)를 내장하여 시퀀스 제어전용 명령 및 언어를 이용하여 프로그래밍하고 계측 및 제어를 실행하였다. 계측 및 제어를 위한 Interface로서 Digital I/O, A/D, D/A, Counter를 장치하였다. Digital Input(GX41)은 10.2~26.4VDC 영역에서 사용하도록 광절연 하여 제어기의 主스위치 및 교정스위치로부터 개폐여부를 읽으며 방제기속도 측정을 위한 근접센서와 같이 저주파수 계수에 응용되었다. Output(GY41)은 광절연 Transistor 출력으

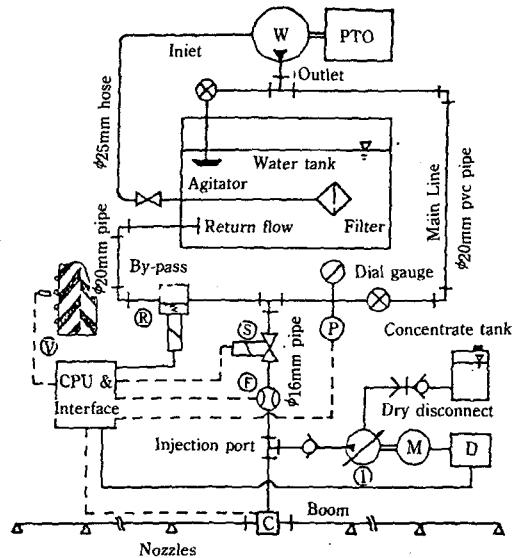


Fig.1 Schematic of the direct injection-mixing total-flow-control boom sprayer.

C : concentration sensor, D : DC motor drive, F : turbine flowmeter, I : injection metering pump, M : DC motor, P : pressure transducer, R : electric flow regulating valve, S : solenoid boom valve, V : vehicle speed sensor, W : main pump (Wesco type).

로 하여 12VDC용 릴레이를 구동시키므로 전자 유량조절밸브의 정/역회전 제어에 사용되어 방제시스템의 압력 및 유량조절의 주된 역할을 한다. 압력변환기 및 트랙터 전지 전압으로부터의 신호를 읽는 데 A/D변환기(G58AD, 분해능 1 mV)가 사용되었고 유량센서와 엔코더로부터의 펄스신호는 Counter(GD61, 20kHz)를 사용하여 계수 하였다. 주입펌프의 DC모터는 4-20mA 신호를 받아 직류전압을 조절하는 구동기(FMI, V200, Converter-fed DC drive)를 이용하였으므로 D/A 변환기(G54DA, 분해능 4μA)로부터 신호를 출력하여 변속 모터제어를 구현하였다. 본 연구에 사용된 PLC는 자체 CPU로 계측 및 제어가 가능하지만 자료수집 및 상태감시를 위해 PC link(G5C24)를 사용하였고 PC측 프로그램은 MS-DOS의 QBASIC을 이용하였다.

다. 制御動特性和 살포특성의 측정 및 실험방법

방제기의 동특성을 분석하기 위하여 트랙터의 속도를 8kph에서 12kph로 갑자기 증가시킴으로써 계단신호의 입력을 주었다. 방제기제어의 동특성에 영향을 미치는 독립변수들은 ① 제어간격(Control interval)으로 2.0, 1.0, 0.2 sec, ② 오차허용도(Tolerance)로 0.5, 2.25, 4.5%, ③ 제어민감도(Sensitivity)로 유량조절밸브와 주입펌프 모터의 각 Actuator에 대하여 민감, 보통, 둔감을 선택하였다. 이러한 실험변수들에 대하여 측정하여 검토할 동특성 종속변수로는 ① 반응시간(Response time), ② 절대 定常狀態 오차(Absolute steady state error), ③ 변이계수(Coefficient of variance), ④ 過行量(Overshoot)등이며, 살포특성 종속변수로 ⑤ 회석액유량(Water flow rate), ⑥ 농약주입량(Injection rate), ⑦ 농도(Concentration)등이었다.

분석에서 사용된 종속변수 들을 그림 2와 식(2)-식(3)에서 설명하고 정의하였다. 반응시간은 평균목표치 도달시간(A1)에서 평균반응치 도달시간(B1)까지 경과한 시간을 측정했다. 정상

상태 오차는 평균목표치(Tmean)와 평균반응치(Vmean)의 差異이며 절대 정상상태 오차는 그 차이의 절댓값으로 정의하였다. 방제속도의 계단입력이 이상적이 아니었으므로 제어계의 안정성 분석을 위해 목표치 변이계수(TCV)와 반응치 변이계수(VCV)를 이용하여 식(2)에서 목표치에 대한 반응치의 상대변이계수(Relative C.V., RCV)로 나타내어 분석에 이용하였고, sd는 표준편차이다. 목표치 과행량(TOS)과 반응치 과행량(VOS)을 또한 고려하였고 식(3)을 이용하여 목표치에 대한 반응치의 상대치인 상대과행계수(Relative overshoot, ROS)로 나타내었고, Tmax와 Vmax는 각각 목표와 실측반응의 최고치이다. 통계분석으로 Duncan의 다중비교법을 이용하여 각 평균간 비교하였다.

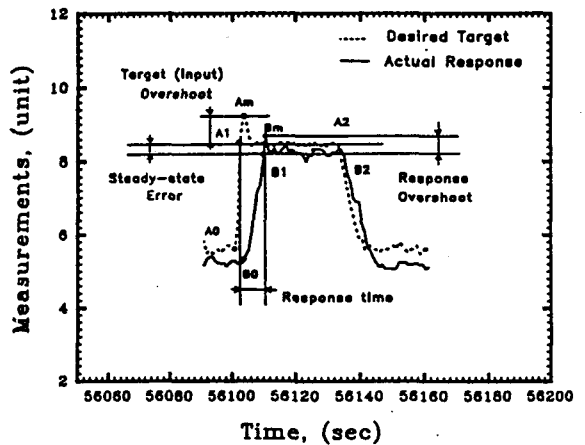


Fig. 2 Definition of the response time, steady state error and overshoots.

$$RCV = \frac{VCV}{TCV}, \quad VCV = \frac{sd}{Vmean}, \quad \dots(2)$$

$$TCV = \frac{sd}{Tmean} \quad \dots(2)$$

$$ROS = \frac{VOS}{TOS}, \quad VOS = (Vmax - Vmean),$$

$$TOS = (Tmax - Tmean) \quad \dots(3)$$

3. 방제기 운영 및 제어 프로그램

전형적인 분무방제기의 운영방법은 목표속도에 (예로 10kph) 해당하는 주변속기의 단수를 선택 하고(대동 L2202-4WD은 전진 7단), 주펌프의 정 격회전수에 해당하는 PTO변속기의 단수를 선택 하여(PTO 4단 1600RPM) 엔진 Throttle을 2600 RPM에 고정하여 방제작업을 실시한다. 그러나 부하의 변동에 따라 전진속도 및 PTO회전속도는 20% 이내에서 변동하며 이는 살포량에 오류를 초래한다. 이를 보정하기 위하여 전진속도 (SPD)의 변동에 따라 회석액의 목표유량(TQ_w)을 결정하고 전자 유량조절 밸브를 정/역으로 조작하며, 실제유량(Q_w)에 비례하여 주입펌프의 목표회전속도를 결정하여 농약의 주입량(Q_p)을 조절함으로써 농도(C)를 일정하게 유지한다.

분무작업의 시기, 즉 솔레노이드 밸브가 열려 노즐에서 분무작업이 일어나는 상태는 운전자가 결정하는 것이 운영상 유리하여 주스위치가 수동으로 열릴 때만 회석액의 유량이 제어되도록 하였다. 농약주입은 주스위치와 CPU 프로그램에 의해 여러 경우별로 조절되도록 하였고 PTO가 멈춰 있을 때, 즉 주펌프가 정지되어 압력이 쉰이면 주스위치가 켜져도 제어가 되지 않도록 안전장치를 하였다. 농약주입은 주스위치가 닫힌 상태에서 농약주입이 절대로 일어나지 않도록 하였고, 교정 스위치를 두어 농약 없이 노즐의 교정 및 점검할 수 있도록 압력을 300kPa으로 유지되도록 하였다. 표 1에 각 운영의 경우를 정

리했다.

제어 프로그램의 流通圖는 그림 3과 같이 接点標示형식으로 나타내 보였다. 제어기에 전원을 넣고 최초 수초 동안 각종 변수를 읽고 계산하며 시스템의 초기화를 행한다. 방제작업의 입력변수로서 농약살포량(F, L/ha), 살포폭(W, m), 미끄럼율(Sf, %), 목표농도(C)이며, 시스템 변수로서 주입펌프 조정계수(k1), 주입펌프 민감도(k2), 회석액 유량조정 민감도(k3), 유량조정 오차허용도(k4)등 이었다. 제어 및 계측간격은 clock에 의해 결정되어 계측이 시행되며, 압력(PRS), 공급전압(Volt), 트랙터 속도(SPD), 회석액 유량(FLW, Q_w), 주입펌프 회전수(RPM)가 측정된 후 트랙터속도와 변수(A)로부터 목표유량(Tf_w, TQ_w)이 계산된다.

정상적인 방제 작업을 위해서 주스위치가 켜 있는지, 주펌프가 정상으로 작동하는지(PRS > minimum pressure), 트랙터가 주행을 하는지 (SPD > minimum speed)를 점검한 뒤 회석액의 유량 및 농약주입량을 제어한다. 유량제어는 오차허용도(k4) 내에서 유량 조절밸브의 정/역회전 및 회전시간을 목표유량과 실제유량의 차(FLW)와 민감도(k3)를 이용하여 결정한다. 주입량은 회석액의 유량(FLW, Q_w)과 조정계수(k1)를 이용 목표 펌프회전수(Trpm)를 계산하고 목표회전수와 실제회전수(RPM)의 차(RPM)와 민감도(k2)로 결정하여 해당 4-20mA 신호를 D/A를 통하여 펌프구동에 보냄으로써 회전수를 조정하였다. 트랙터의 정지상태(SPD < minimum

Table 1. Operating cases of total-flow-control injection sprayer

Tractor Speed (SPD)	Main pump PTO(PRS)	Master s/w (Solenoid boom v/v)	Reset s/w (Calibration)	Case	Results
ON	ON	ON	N/A	Spraying	Normal control
		OFF	N/A	Turning	Bypass flows
	OFF	OFF	N/A	Transporting	Speed calibration
OFF	ON	ON	ON	Nozzle calibration	Maintaining 3bar
		OFF	N/A	Pausing	Bypass flows
	OFF	OFF	N/A	OFF	Normal stop

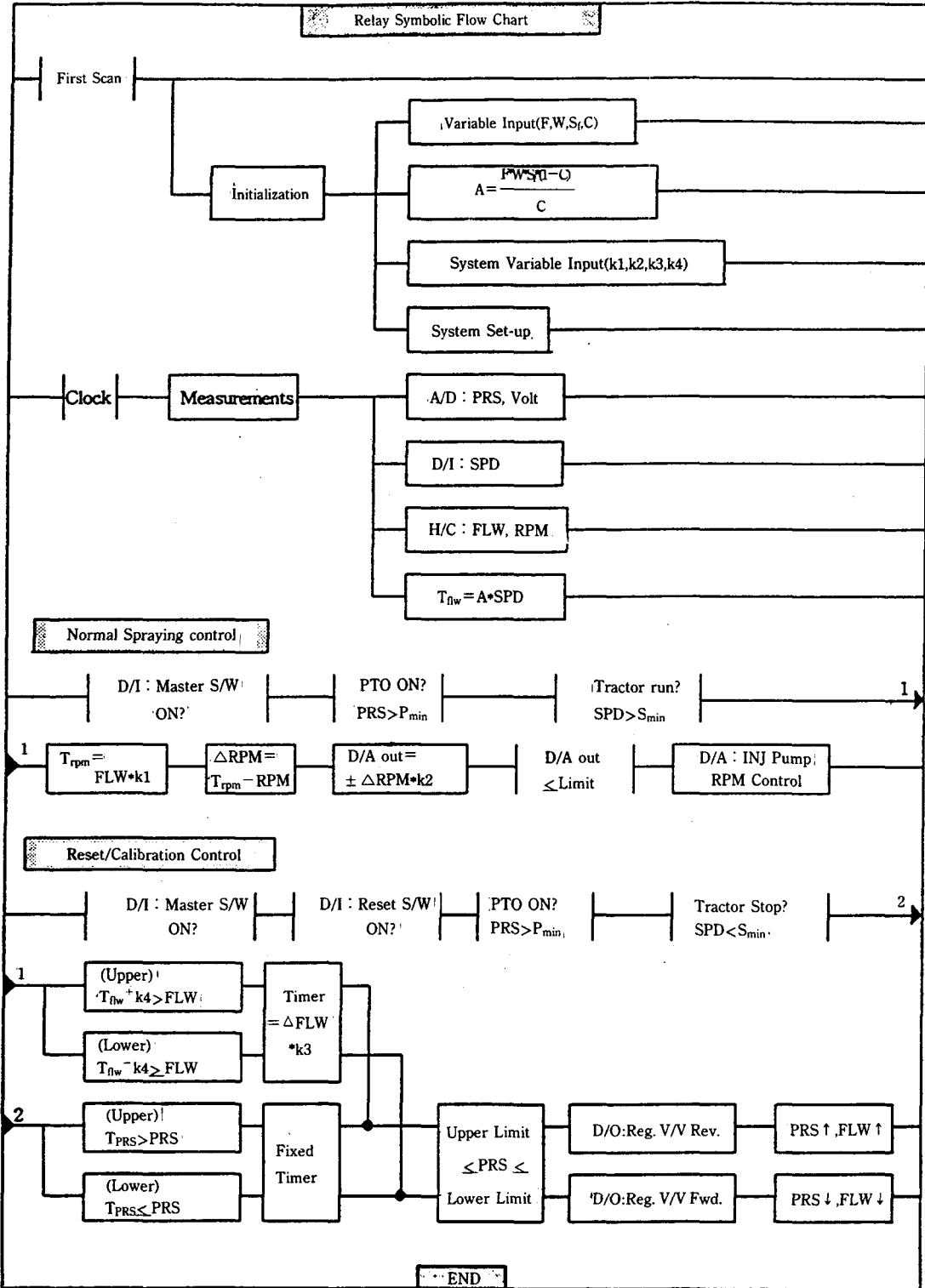


Fig. 3 Flow chart of a control program of the direct injection sprayer.

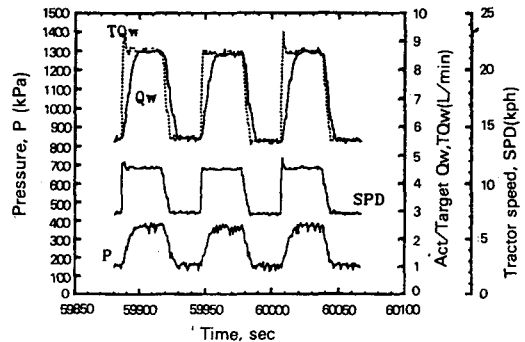
speed)에서 방제작업의 조정과 Reset을 위해서 주스위치가 켜 있는지, 주펌프가 정상으로 작동하는지를 점검한 뒤 주배관의 압력이 300kPa이 되도록 제어한다. 이때 각 노즐의 유량을 점검하거나 시스템이 오동작했을 때 정상으로 되돌리는 작업을 한다. 압력제어는 오차허용도 1% 내에서 유량조절밸브의 정역회전으로 조정하며, 이때 농약의 주입은 절대로 일어나지 않도록 주입펌프 회전수를 0으로 고정한다. 유량조절밸브가 과도회전 하지 않도록 상한 420kPa과 하한 100kPa을 두었고 프로그램의 scan time은 정상작동의 경우 6-7msec 였다.

4. 결과 및 고찰

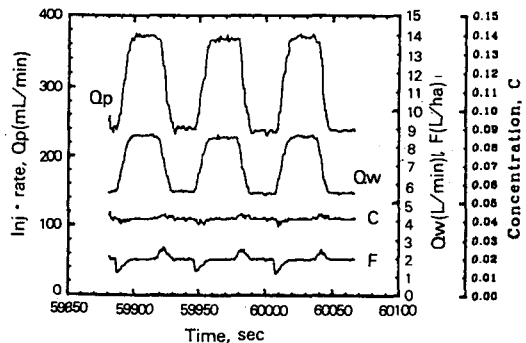
제어대상을 압력으로 했을 경우는 목표유량으로부터 송출계수(Cd)를 중간매체로 목표압력을 $P=(Qw/Cd)^2$ 에서 계산해야 하며 송출계수는 레이놀드수와 팽창계수 등을 변수로 하여 유량, 밸브 및 노즐상태에 영향을 받는다. 따라서, 압력대상 제어에서는 압력이 오차허용 이내에서 제어되어도 실제 송출유량은 조건이 변화함에 따라서 허용범위를 넘을 수 있다. 이 방법은 기술상 간편한 이점이 있지만 송출계수의 변화를 보정해야하는 문제점이 있고 유량에 대한 오차는 더 커질 수 있으며 조정될 수 없었다.

그림 4-a는 트랙터 속도의 8kph에서 12kph로 계단형 입력에 따른 희석액 유량의 전형적인 반응실험의 결과를 나타낸다. 점선으로 표시된 목표유량과 실제유량을 비교하면 반응시간이 존재함을 알 수 있다. 농약주입량 제어실험으로부터 그림 4-b에 전형적인 유량 및 농약주입량 제어의 실험결과를 보였다. 그림에서 희석액의 유량(Qw)에 대한 농약의 주입량(Qp)의 반응을 나타내었으며 이에 따른 농도변화(C)와 농약살포량(F)을 나타내었다. 살포량은 트랙터속도가 상승할 때 목표량보다 낮게 나타나 음의 과도오차를 보였다. 이는 트랙터속도의 상승을 따라가지 못하는 유량조절밸브의 늦은 응답속도에 주

로 기인하며 반대로 속도가 하강할 때는 반대로 양의 과도오차를 보였다. 농약의 농도는 주입구로부터 노즐에 이르는 지연오차(lag time)를 없애기 위하여 일정히 유지하기를 원했으며, 주입펌프의 민감도가 낮으면 희석액의 유량변화에 둔감하게 반응하여 농약농도의 과도오차를 초래하였다.



(a) Desired flow rates(TQw) were compared with actual flow rates(Qw).



(b) Actual concentration(C) and application rate(F) were determined.

Fig.4 (a) Typical responses of water flow rate (Qw) and pressure(P) to the tractor speed (SPD) ; and (b) responses of chemical concentration flow rate(Qp) to the water flow(Qw).

희석액 유량조절밸브의 민감도는 보통값($k_3=4$)으로 고정하고, 제어간격을 주변수로한 제어계의 동특성에 대한 실험결과를 표 2에 나타

Table 2. Average response time of flow rate and net response time of injection rate for the experimental variables at the flow sensitivity of k3=4(medium)

Independent variables	Dependent variables	Response time of flow rate (sec)	Net Response time of injection rate (sec)
Control interval (sec)	2.0	12.68 a	0.80 a
	1.0	8.74 b	0.49 a
	2.0	8.83 b [18]	0.19 a
Tolerance, k4(%) (wrt 8.0 lpm)	0.5	11.00 a [6]	0.73 a
	2.25	9.92 b [6]	0.50 a
	4.5	10.29 ab [6]	0.51 a
Sensitivity, k2 (injection pump)	1(slow)	9.61 b	2.02 a
	2(mid)	11.31 a [9]	-0.38 b
	3(fast)	10.71 a [9]	-0.69 b
Replication	1	10.25 a [6]	0.50 a
	2	10.50 a [6]	0.70 a
	3	10.46 a [6]	0.53 a

- * The numbers in the bracket [#] indicates the number of missing values due to unstable controls.
- ** Means of variable effects followed by the same letter are not significantly different(Duncan's multiple range test at $\alpha=0.05$)

내었다. 제어간격 0.2초에서 낮은 민감도(k2=1)의 경우를 제외한 실험에서 불안정한 제어특성을 보여 실험을 계속하지 못하였고 缺員值(missing value)로 처리하였다. 제어간격 2.0초의 경우가 유량제어 반응시간 12.68초로 나타나 1.0과 0.2초의 제어간격의 경우에서 각각 8.74, 8.83초로 나타난 반응시간보다 늦게 나타났으며 오차 허용도는 작을 때 느린 반응시간을 보였다.

주입량 제어 반응시간은 목표 농약주입량에 이르는 시간에서 목표 회석액유량에 이르는 시간을 뺀 값이며 주입펌프 반응시간에 직접 영향을 미치는 변수로는 주입펌프의 민감도(k2)로 나타났다. 주입펌프의 민감도가 낮을 수록 반응시간이 길어져 민감도 1, 2와 3에서 2.02, -0.38과 -0.69초로 각각 나타났다. 주입량 반응시간은 이론상 음의 값을 가질 수 없으나 민감하면 과행(overshoot)함으로써 목표치에 미리 도달하여 실제로 음의 값을 보였다.

위의 분석결과 반응시간 및 안정도를 기준으로 제어간격 1.0초가 가장 알맞은 제어조건으로 판단되었으며, 다른 변수들의 더 자세한 분석을 위하여 제어간격 1.0초에 대하여 오차허용도, 주입펌프 제어민감도, 회석액 유량조절밸브의 민감도등에 대한 분석결과를 표 3에 보였다. 제어간격을 1.0초에 고정된 실험에 대하여 유량제어 반응시간에 모든 변수가 영향을 미쳤으며 유량 오차 허용도(k4)와 유량조절밸브의 민감도(k3)가 클수록 빠른 반응시간을 보였다.

주입량 제어반응시간에 직접 영향을 미치는 변수로는 주입펌프의 민감도(k2)로 나타났으며 주입펌프의 민감도가 낮을 수록 반응시간이 늦어져 민감도 1, 2와 3에서 1.58, 0.09과 -0.17초로 각각 나타났다. 너무 민감하면 과행함으로써 제어계를 불안정하게 하므로 보통 민감도(k2=2)의 경우가 가장 알맞은 것으로 분석되었다.

절대 정상 오차에 직접적으로 영향을 미치는

Table 3. (a) Average response time of flow rate, net response time of injection rate, absolute steady state error of flow rate, overall C.V. of concentration for the experimental variables at the control interval of 1.0 sec.

Independent variables	Dependent variables	Response time	Net response	Absolute steady	Overall C.V. of
		of flowrate (sec)	time of injection rate(sec)	state error of flow rate(lpm)	concentration (%)
Tolerance, k4(%) (wrt 8.0 lpm)	0.5	9.70 a	0.50 a	0.074 b	3.66 a
	2.25	8.68 b	0.68 a	0.083 b	3.56 a
	4.5	7.98 c	0.34 a	0.164 a	3.54 a
Sensitivity, k2 (injection pump)	1(slow)	8.04 b	1.58 a	0.114 a	4.37 a
	2(mid)	9.28 a	0.09 b	0.097 a	2.59 b
	3(fast)	9.06 a	-0.17 b	0.110 a	3.72 a
Sensitivity, k3 (flow reg valve)	5(fast)	8.32 b	0.47 a	0.115 a	3.85 a
	4(mid)	8.74 ab	0.49 a	0.094 a	3.62 a
	3(slow)	9.29 a	0.56 a	0.113 a	3.29 a
Replication	1	9.15 a	0.35 a	0.092 a	—
	2	8.83 ab	0.69 a	0.125 a	—
	3	8.37 b	0.48 a	0.104 a	—

(b) Average relative C.V. of flow rate, relative C.V. of injection rate, relative overshoot of flow rate, and relative overshoot of injection rate for the experimental variables at the control interval of 1.0 sec.

Independent variables	Dependent variables	Relative C.V.	Relative C.V.	Realtive over-	Realtive over-
		of flow rate	of injection rate	shoot of flow rate	shoot of injec- -tion rate
Tolerance, k4(%) (wrt 8.0 lpm)	0.5	0.505 a	0.926 a	0.352 a	0.664 a
	2.25	0.591 a	0.859 a	0.444 a	0.857 a
	4.5	0.546 a	0.792 a	0.475 a	0.756 a
Sensitivity, k2 (injection pump)	1(slow)	0.576	0.598 b	0.577 a	0.559 b
	2(mid)	0.501 a	0.717 b	0.297 a	0.665 ab
	3(fast)	0.563 a	1.272 a	0.394 a	1.054 a
Sensitivity, k3 (flow reg. valve)	5(fast)	0.669 a	1.039 a	0.431 a	0.794 a
	4(mid)	0.458 b	0.741 a	0.337 a	0.596 a
	3(slow)	0.516 ab	0.795 a	0.497 a	0.889 a
Replication	1	0.604 a	0.928 a	0.287 a	0.604 a
	2	0.514 a	0.687 a	0.482 a	0.751 a
	3	0.525 a	1.002 a	0.503 a	0.936 a

* Means of variable effects followed by the same letter are not significantly different (Duncan's multiple range test at =0.05).

변수는 오차허용도였으며, 허용도가 클수록 절대정상상태 오차는 0.074, 0.083, 0.164 lpm로 상승하였고 8.0 lpm을 기준으로 0.9%, 1.0%, 2.1%의 오차였다. 실험상의 정상오차는 이론 기대치의 반정도였으나 허용도가 너무 적은 경우에는 ($k_4=0.5\%$) 오차 허용폭을 넘나들며 제어가 필요 이상으로 행해져 오차가 줄어들지 않았다.

농약의 농도변이를 실험시간(약 180초)동안의 변이계수로써 나타내었고 주입펌프의 보통 민감도($k_2=2$)에서 최소치를 보였는데, 이는 민감도가 크면 모터제어의 안정구역을 벗어나 불안정 파동현상을 보이며, 민감도가 낮으면 회석액의 유량변화에 둔감하게 반응하여 농약농도의 과도 오차를 초래하기 때문으로 분석되었다. 또한 빠른 제어간격에서는 카운터를 통한 신호의 분해능이 저하되어 제어의 정밀도가 저하되어 제어의 불안정을 가져올 수 있으므로 펄스신호는 펄스직류변환기(Frequency-to-analog converter)를 사용할 것을 추천한다.

제어계의 안정도를 나타내는 상대변이계수를 유량과 주입량제어에 대하여 그리고, 상대과행계수를 유량과 주입량제어에 대하여 표 3-b에 제시하였다. 상대변이계수는 정상상태에서의 안정도를 표시하며 1.0이하에서 안정하다. 따라서, 유량조절 밸브의 민감도가 높으면 유량제어의 상대변이계수는 커지나 1.0이하에 있으므로 제어계는 높은 민감도에서도 안정하다. 주입량 제어의 상대변이계수는 유량제어의 안정도(상대변이계수)에 의해서도 영향을 받으며 또한 주입펌프의 민감도에 직접적 영향을 받게 된다. 민감도가 높을 수록 주입량의 상대변이계수는 증가하며, 민감도(k_2) 1, 2, 3에 대하여 각각 0.598, 0.717, 1.272로 보였다. 주입펌프의 민감도가 너무 높으면 1.0 이상에 있게 되고 제어계는 불안정하다.

상대과행계수는 초기 과도안정도를 표시하며 1.0이하에서 안정하다. 상대과행계수는 상대변이계수와 비슷한 경향을 나타내어 주입량제어에 대한 상대과행계수는 주입펌프의 민감도가 영향을 미쳤고 높은 민감도에 대하여 1.0이상의 과행

계수를 보였다. 그러나, 유량제어에 대한 상대과행계수는 모든 변수에서 그 영향이 뚜렷하지 않았다. 변이계수(C.V.)와 과행량(overshoot)은 제어민감도와 관계 있었으며 유량제어에 대한 값은 주입량제어에 대한 값보다 낮은 수치를 보였다. 이는 트랙터의 전진속도에서 과행적 신호입력이 있었음에도 불구하고 유량조절밸브가 과감쇠(over damped)되어 있어 유량 제어에 영향을 미치지 않았으나 주입펌프는 높은 민감도에서 1.0이상의 불안정 반응을 보였다.

위의 분석결과를 바탕으로 직주입 총유량 자동제어계의 최적 변수 값을 보았다. 1.0초의 제어간격의 경우가 제어간격 2.0초 보다 반응시간이 짧으며 0.2초의 제어간격 보다 안정된 동특성을 보였다. 유량조절밸브의 동특성은 과감쇠(overdamped)되어 있어 유량제어밸브의 큰 민감도($k_3=5$)에도 안정된 행동을 보였다. 유량오차 허용도는 보통($k_4=9$)의 경우 2.25%를 예상하지만 실제상 1.0%정도의 오차를 보였고 허용도가 더욱 낮아지면서 실제오차는 항상되지 않

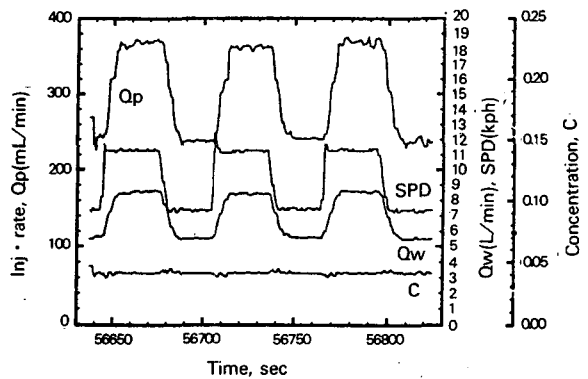


Fig. 5 Behaviors of an optimized injection spray system for the variables of 0.1 sec control interval, high flow regulating valve and medium injection pump sensitivities and 2.25% flow control tolerance. Response of chemical concentrate flow rate(Qp) to the water flow(Qw), Actual concentration(C) were determined.

았다. 주입펌프의 민감도는 빠를수록 반응시간이 빨라지나 너무 민감하면 반응시간이 옴으로 나타나면서 불안정한 동특성을 보였다. 농도의 변이계수(C.V.)는 주입펌프의 민감도에 직접 영향을 받았으며 보통의 민감도($k_2=2$)에서 최소의 변이계수를 나타냈다. 그림(5)에 최적의 경우의 실제 실험결과를 보였고, 유량제어 및 주입펌프 평균 반응속도는 각각 8.5초와 -0.53초였다. 절대 정상상태오차의 평균값은 0.067 lpm였으며 농도의 변이계수는 3.15%였다.

4. 요약 및 결론

농산물의 생산 과정에서 필수적이라 할 수 있는 防除作業에 있어서 현재의 노동집약적, 비효율적, 作業忌避性등을 고려할 때 생산효율, 방제효과, 작업자 및 환경보호의 측면에서 直注入總流量制御시스템이 개발되었으며 살포작업의 조건에 따라 자동으로 계량하여 直接混入하는 直注入式은 작업자를 농약으로부터 분리하여 접촉으로 인한 피해를 최소화하며, 방제작업후 잔여농약의 원액과 표준용기는 회수되기 때문에 경제적이고 작업자 및 환경을 보호할 수 있다.

본 연구를 통한 제어시스템의 동특성의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다:

- ① 유량기준 제어 만이 유동조건의 변화에도 허용범위 내에서 제어가 가능하다.
- ② 제어간격은 반응시간 및 안정성을 기준으로 1.0초가 최적으로 판단되었다.
- ③ 유량제어 오차허용도와 밸브의 민감도가 클수록 빠른 유량제어의 반응시간을 보였다.
- ④ 주입펌프의 민감도가 높을수록 주입량 반응시간이 빠르게 나타났으나 너무 민감하면 과행함으로써 제어계를 불안정하게 하였다.
- ⑤ 유량의 절대 정상상태 오차는 이론 기대치의 반정도 였으나 허용도가 너무 미세한 경우는 허용범위를 넘나들며 제어가 필요 이상으로 행해져 오차를 줄일 수 없었다.
- ⑥ 농약의 농도 변이계수는 주입펌프의 보통 민감도에서 최소치를 보이며 이는 민감한 경우

의 불안정한 동특성과 둔감한 경우의 반응지연시간 때문이었다.

⑦ 유량조절 밸브의 민감도가 높아도 제어계는 안정하였고 (유량의 상대변이계수 <1.0), 주입펌프의 민감도가 높을수록 상대변이계수는 증가하여 높은 민감도에서 제어계는 불안정하였다 (주입량의 상대변이계수 >1.0).

⑧ 상대과행계수는 주입펌프의 높은 민감도에 대하여 1.0이상의 과행계수를 보였다.

⑨ 유량제어에 대한 상대변이계수와 상대과행계수값은 주입량제어에 대한 그 값들 보다 낮은 수치를 보임은 유량조절밸브는 과감쇠 되어 있고 주입펌프는 높은 민감도를 갖음을 뜻한다.

⑩ 직주입 총유량 자동제어계의 최적 변수값을 보면 1.0초의 제어간격의 경우에서 안정된 동특성을 보였고, 유량조절밸브의 동특성은 과감쇠 되어 있어 유량제어밸브의 큰 민감도($k_3=5$)에도 안정된 행동을 보였다. 유량오차 허용도는 보통($k_4=\pm 2.25\%$)의 경우 실제상 1.0%정도의 오차를 보였고, 농도의 변이계수(C.V.)는 주입펌프의 민감도에 직접 영향을 받았으며 보통의 민감도($k_2=2$)에서 최소의 변이계수를 나타내며 안정성을 보였다. 이때 유량제어 및 주입펌프 평균 반응속도는 각각 8.5초와 -0.53초, 절대 정상상태오차의 평균값은 0.067 lpm, 농도의 변이계수는 3.15%였다.

앞으로의 과제는 반응속도를 빠르게 하기 위하여 유량조절밸브의 회전속도를 빠르게 하여 민감도를 높이고, 트랙터의 전진속도를 Doppler radar 등 분해능이 좋고 바퀴의 미끄러짐을 보정할 수 있는 센서로 교체함으로써 보다 신뢰성 있는 제어를 구현할 수 있다. 또한 표준용기를 제작하여 농약의 생산, 유통, 사용, 재활용의 체계를 구성함으로써 작업자를 농약으로부터 분리하여 접촉으로 인한 피해를 최소화하며, 방제작업후 잔여농약의 원액과 표준용기는 회수하여 경제적인 뿐만 아니라 작업자 및 환경을 보호할 수 있다.

참고문헌

1. 구영모, 스티븐 영, 테니스 쿨만. 1996. 주입식 분방제기의 농약 혼합 유동특성. 한국농업기계학회 21(2) : 144~152
2. 이중용 1994. 정밀방제기술의 이론적 기초와 작업자 안전 확보방안. 농약정보. (122): 52-56
3. ASAE Standard. S372.1 Terminology and definitions for agricultural chemical application.
4. Bode, L.E. 1988. Spray Application Technology. 85-110 in Method of Applying Herbicides. Monograph No.4 of WSSA, C.G. McWhorter and M.R. Gebhardt, eds. WSSA.
5. Broder, M.F. and C.A. Cole, Jr. 1987. Minimizing hazardous waste from application of fertilizer-pesticide mixtures. ASAE Paper 87-1605. ASAE St. Joseph, MI.
6. Koo, Y.M. and D.K. Kuhlman. 1993. A variable flow nozzle with consistent spray performance. Transactions of the ASAE. 36 (3) : 685-690.
7. McWhorter, C.G. 1991. Report of meeting to develop priority needs for aerial application research. Agricultural Aviation. 18 (10) : 22-31.
8. Tompkins, F.D.; K.D. Howard; C.R. Mote and R.S. Freeland. 1990. Boom flow characteristics with direct chemical injection. Transactions of the ASAE. 33(3) : 737-743.
9. Way, T.R., K.Von Bager, R.D. Grisso and L. L. Bashford. 1992. Simulation of chemical application accuracy for injection sprayers. Transactions of the ASAE. 35(4) : 1141-1148.