

수도작용 붐 방제기의 수평제어장치 개발에 관한 연구*

A Study on Control System for Balancing a Boom of Self-Propelled Boom Sprayer

정 창 주*	노 현 권*	최 영 수**	장 영 창*
정회원	정회원	정회원	정회원
C. J. Chung	H. K. Noh	Y. S. Choi	Y. C. Chang

ABSTRACT

Chemical application is one of the most important field operation in rice production. Rolling of a boom due to local unevenness and softness in fields causes a local under/over-application of spray. In this study, the vertical movement of boom tips due to unevenness of ground in paddy fields was investigated, and an active pendulum suspension control system was designed and tested for compensating the movement and balancing the boom to the ground. The results for testing the performance of the control system showed that the system could balance the boom both in flat and inclined fields. The active pendulum control system developed in this study could be properly used for improving spraying performance of a boom sprayer.

주요용어 (Key Words): boom sprayer, control, boom balancing

1. 서 론

국내 수도작의 방제작업은 대부분 동력분무기를 이용하여 수행되고 있다. 동력분무기에 의한 방제작업은 작물에의 충분한 침투를 위한 다량살포와 이에 따른 비산의 발생 및 환경 오염, 살포의 비정확성과 비균일성, 과다 농약에 대한 작업자의 노출 등의 부정적인 측면이 부각되어 이의 개선책으로 붐방제기에 대한 요구가 날로 높아지고 있다. 특히 붐을 이용한 기부살포방법은 농약의 사용을 최소화하고 필요한 곳에만 국부적으로 농약을 살포할 수 있어 최근 연구되고 있는 살포방법이다.

붐방제기의 방제효과를 높이기 위해서는 붐을 지면에 수평으로 유지함으로써 작물에 대한 약액의 살포높이가 일정하게 유지되어야 한다. 무논의 붐방제기는 지반의 연약성과 정지작업의 정도에 따라 차륜의 침하 정도가 다르기 때문에 붐이 좌우로 기울어짐으로써 붐의 수평유지가 어렵다(Frost, 1988). 따라서 무논에서 붐방제기가 기능을 충분히 발휘하기 위해서는 붐프레임의 수평제어장치가 필수적으로 포함되어야 한다. 특히 기부살포시 필요한 살포높이를 유지하지 못하면 살포의 비균일성이 증대되어 그 살포효율이 낮아지게 된다(Tadatashi, 1992).

본 연구에서는 무논에서의 붐의 기울어짐 정도를

* 이 논문은 1996년도 서울대학교 발전기금 일반학술연구비에 의하여 연구되었음.

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

** 전남대학교 농과대학 농공학과

측정하고, 그 자료를 바탕으로 붐방제기 프레임의 설계에 수평제어가 가능한 능동 진자 현가장치 (Active pendulum suspension)를 채택하였다. 능동 진자 현가장치의 역할은 기계적 응력을 줄이고, 포장 표면의 불균일에 의해 방제기 본체와 붐이 기울어지는 것으로부터 붐을 수평으로 제어함으로써 살포높이를 일정하게 유지하고 살포효율을 증가시키는데 있다.(O'Sullivan, 1986)

본 연구의 목적은 수도작 붐방제기의 수평제어장치 개발을 위해 첫째, 무논의 포장상태에 따른 붐의 기울어짐 정도를 측정하고 둘째, 능동 진자 현가장치를 이용한 붐의 수평제어시스템을 모형화하며 셋째, 붐의 수평제어시스템을 구성하고 성능을 평가하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 공시기

연구에 사용된 방제기는 M사 제품인 승용 자주식 방제기로 주행방식은 4륜구동이다. 붐은 전면 장착형이며 붐의 조작은 전동식으로 운전석에서 붐의 개폐, 붐 승강이 가능하고, 포장 조건이나 작물의 생육 높이에 맞추어 붐의 높이를 조절할 수 있다. 관행방제 작업의, 소량살포, 입제살포, 고랑파기 등의 작업이 가능하다. 연구에 사용된 방제기의 제원은 표 1과 같다.

나. 붐거동 측정

이 실험은 기존의 방제기에 부착되어 있는 붐에 대하여, 무논주행시 붐 끝의 높이 변화를 측정함으로써 포장의 불균일성에 따른 붐의 거동을 구명하고 붐 수평 제어의 기초 자료를 구하기 위해 수행되었다.

붐 거동 측정장치는 붐방제기, 붐 끝에 장착된 로터리 포텐시오미터, A/D 변환용 PC Lab card, 컴퓨터, 알루미늄 샤프트 그리고 로터리 포텐시오미터에 부착된 연결봉으로 구성되어 있다.

Table 1 Specification of a self-propelled boom sprayer used in the study

Machine name	BSA-410	
Size,	m	3.0×1.8×1.9
Boom length,	m	8.9 (unfold)
Ground clearance,	m	650
Weight,	kg	556
Rated Output,	ps/rpm	6.6 / 1800
Driving mechanism	4WD	
Turning mechanism	FW steering	
Transmission	FW, 6; BW, 2;	
Traveling speed,	km/h	1.0 - 9.0
Tire size,	mm	900 × 95
Minimum turning radius, m	2.8	

그림 1에 붐거동을 측정하고 있는 모습을 나타냈다. 그림에서 붐의 수평면과 붐 끝에 부착된 연결봉이 이루는 각을 α 라고 할 때 로터리 포텐시오미터의 출력전압을 E_0 라 하면 α 는 E_0 에 비례한다. 따라서 기준면으로부터 붐 끝의 높이 H 는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$H = \text{Stick length} \times \cos \alpha \dots\dots\dots (1)$$

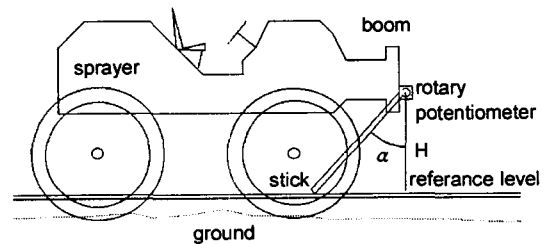


Fig. 1 A schematic representation of boom tip measurement system.

붐방제기의 포장 주행시 붐 끝이 요동을 함에 따라 기준면 위에 위치한 연결봉이 로터리 포텐시오미터를 회전시킨다. 이에 따라 로터리 포텐시오미터는 회전 각도에 비례하는 전압을 출력하고 출력된 전압

은 PC Lab 카드를 통해서 A/D로 변환되어 컴퓨터를 통해서 봄끝의 높이 변화가 측정되었다. 이 실험에서 방제기의 주행속도는 방제작업시 일반적 주행속도인 1.1 km/h로 서울대학교 부속농장의 논에서 실시되었다. 실험이 실시된 포장은 이앙전 경운과로 타리 작업이 이루어진 논으로써 일반적인 포장의 상태를 나타내는 것으로 간주하였다.

다. 봄 수평제어메카니즘

본 연구에서는 봄 수평제어 방식으로 능동현가장치식을 채택하였다. 공기방제기는 봄의 수평을 제어하기 위하여 봄방제기의 요동과 분리해서 봄 지지 프레임의 중앙부에 회전축을 설치하여 봄의 요동이 가능하도록 설계하였다.

그림 2는 설계된 구조를 입체적으로 나타낸 것으로 봄방제기의 프레임과 봄이 회전축에 의해 나뉘어져 있어서 봄이 진자운동을 할 수 있다. 따라서 방제기의 프레임 한쪽에 설치되어 있는 작동기가 봄을 밀고 당김에 따라 봄은 축을 중심으로 회전을 하면서 지면에 수평을 이루게 된다.

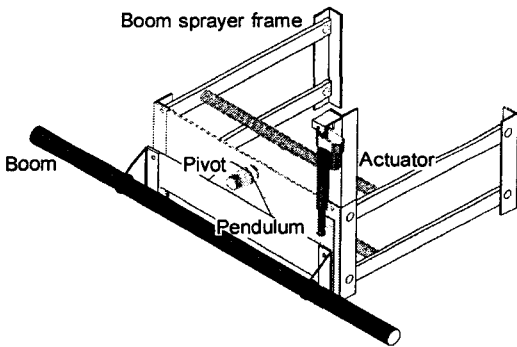


Fig. 2 The modified boom structure at the horizontal position.

표 2에는 설계 변경된 봄 구조에 대해 장착된 작동기의 길이 변화에 따른 봄 끝의 높이 변화를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 봄끝은 작동기 변화에 대해 수평면을 기준으로 $\pm 78\text{cm}$ 가 변화하였다.

Table 2 The movement of the boom tip with the change in the actuator length

Actuator length (cm)	Boom tip height (cm)	Boom angle (degree)
30	163	10
37.5	85	0
45	7	-10

라. 수평제어 장치의 수학적 모델링

본 연구에서 채택된 제어장치의 성능을 검토하고 제어부의 주요 설계기준을 결정하기 위하여 능동 진자 현가장치를 수학적으로 모델링 하였으며 그 모델에 기초한 시뮬레이션을 통해 무논내 주행시 제어 시스템의 적응성을 예측하고자 하였다.

그림 3은 봄방제기와 능동 봄 수평제어부를 도식적으로 표현한 것이다. 수학적 모델링에 쓰인 변수는 표 3에 나타내었다.

그림 3에서 지면은 AA'선으로 나타내었고 O축을 기준으로 회전한다. 불균일 지면을 주행할 때 봄의 기울기에 영향을 주는 주된 요인은 봄방제기 본체의 좌우 요동이므로 시뮬레이션을 위해서 봄방제기의 움직임은 순간 회전중심 O에 대한 것으로 간주하였다. 봄방제기 본체의 무게중심은 G_0 이다. 시뮬레이션이 봄방제기의 포장주행시 좌우 요동에 있어서의 봄의 수평유지에 관련되어 있기 때문에 xy를 축으로 하는 이차원으로 나타내었다. 지면의 불균일은 봄방제기의 차륜에 의해서 봄방제기의 프레임에 전달된다.

봄의 무게중심은 G이며 봄은 작동기 P2P3에 의해서 봄방제기 본체 프레임에 연결되어 있고 회전축 P1을 중심으로 작동기에 의해 회전할 수 있다.

봄의 움직임을 분석하기 위한 능동 봄 수평 제어 시스템의 운동방정식은 라그랑지식을 통해서 표현될 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

기준점 0을 기준으로 방제기 본체의 기울기 α 가 시계방향으로 증가할 경우 그에 따른 봄방제기의 운동을 나타내었다

Table 3 Notation of terms in the mathematical model

Notation	
α	Inclination of spray vehicle to horizontal, rad
β	Inclination of boom to horizontal, rad
γ	Inclination of ground to horizontal, rad
θ	angle between P1P3 and P1P2, rad
P	Displacement of actuator, m
G	Center of gravity of boom
G _v	Center of gravity of spray vehicle
M ₁	Mass of spray vehicle, kg
M ₂	Mass of boom, kg
I ₁	Moment of inertia of spray vehicle about axis through G _v perpendicular to plane, kg m ²
I ₂	Moment of inertia of boom about axis through G perpendicular to plane, kgm ²
L	Actuator length, m
l	Length from P1 to P3, m
L1	Length from P1 to G, m
L2	Length from actuator(P2) to P1, m
L2	Length from actuator(P2) to P1, m
L3	Length from ground to G _v , m
L4	Length from ground to P1, m
L5	Length from P1 to left of vehicle, m
K _c	Coefficient of current transfer function
K _p	Coefficient of piston transfer function
K	K _c K _p
T	Time constant of current and transducer transfer function, s
F	Torque exerted by actuator about pivot P1, Nm
s	Laplace operator
C ₁	Tire, vertical damping coefficient, N · s/m
C ₂	Suspension rotational damping coefficient, m s · N/rad
K ₁	Tire ,vertical stiffness coefficient , N/m

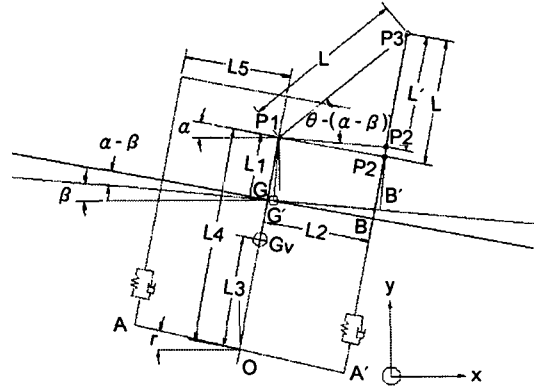


Fig. 3 A schematic representation of a sprayer and an active pendulum boom suspension.

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T_L}{\partial \dot{\alpha}} \right] - \frac{\partial T_L}{\partial \alpha} + \frac{\partial V_L}{\partial \alpha} \\ & + \frac{\partial D_L}{\partial \dot{\alpha}} = Q_\alpha = 0 \dots\dots\dots (2) \\ & \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T_L}{\partial \dot{\beta}} \right] - \frac{\partial T_L}{\partial \beta} + \frac{\partial V_L}{\partial \beta} \\ & + \frac{\partial D_L}{\partial \dot{\beta}} = Q_\beta = F \dots\dots\dots (3) \end{aligned} \right.$$

여기서 . T_L = 운동에너지(Kinetic Energy)
 V_L = 위치에너지(Potential Energy)
 D_L = 소멸함수(Dissipation function)

능동 진자 현가장치의 위치에너지 V_L은 다음과 같다.

$$V_L = M_1 g L_3 \cos \alpha + M_2 g [L_4 \cos \alpha - L_1 \cos \beta] + K_1 (\gamma - \alpha)^2 L_5^2 \dots\dots\dots (4)$$

능동 진자 현가장치의 소멸 함수 D_L은 다음의 식으로 나타내어진다.

$$D_L = C_1 (\dot{\gamma} - \dot{\alpha})^2 L_5^2 + \frac{C_2}{2} (\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 \dots\dots\dots (5)$$

그림 3에서 T_L을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_L = \frac{1}{2} M_1 L_3^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} M_2 v_G^2$$

따라서, 총운동에너지 T_L 은 네 개 인자로 이루어지며 첫 번째 2개의 인자는 각각 그림 3에서 O점을 기준으로 차체가 α 만큼 기울어 질 때 좌우로 움직이는 무게중심의 속도와 회전운동에 의한 운동에너지이고 세 번째 인자는 불의 회전에 의한 운동에너지이며 마지막 인자는 불 무게중심의 속도에 기인하는 운동에너지이다.

총운동에너지 T_L 을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_L = \frac{1}{2} M_1 L_3^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} M_2 [L_4^2 \dot{\alpha}^2 + L_1^2 \dot{\beta}^2 + 2L_1 L_4 \dot{\alpha} \dot{\beta} \cos(\alpha - \beta)] \dots\dots\dots (6)$$

식(4), (5), (6)을 이용하여 식(2), (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 α , β 가 매우 작다고 가정하여 2차 미분 항들을 무시하였다.

$$\begin{bmatrix} M_1 L_3^2 + I_1 + M_2 L_4^2 & M_2 L_1 L_4 \\ M_2 L_1 L_4 & I_2 + M_2 L_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2C_1 L_3^2 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_1 g L_3 - M_2 g L_4 + 2K_1 L_3^2 & 0 \\ 0 & M_2 g L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(C_1 \dot{\gamma} + K_1 \gamma) L_3^2 \\ F \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

그림 3에서 작동기의 길이 변화 P는 다음과 같이 주어진다.

$$P = -L + L' = -L + \sqrt{l^2 + L_2^2 - 2lL_2 \cos(\theta - \beta)} \dots\dots (8)$$

여기서 $\theta = \cos^{-1}\left(\frac{L_2}{l}\right)$

작동기에는 선형모터 및 유압동 여러 종류가 있으며 모델링에 채택된 작동기의 경우 부하에 관계없이 불을 움직이는 충분한 동력이 있다고 가정한다. 불과 지면사이의 각도차이에 관련된 작동기의 길이에 관한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P}{\gamma - \beta} = \frac{K_p K_c}{[Ts + 1]s} = \frac{K}{[Ts + 1]s} \dots (9)$$

위의 식(7), (8), (9)를 동시에 만족시키는 해를 구하면 능동 진자 현가장치의 불 거동을 예측할 수 있다. 공시기로 하나의 불방제기를 선정함으로써 시뮬레이션에 쓰일 변수들 중 방제기 본체의 기울기 α , 제어된 불의 기울기 β , 작동기의 시간상수 T 및 비례상수 K를 제외하면 그 밖의 변수들은 표 4와 같이 결정되어졌다.

표 4의 변수중 차체의 질량 M_1 은 공시기와 같은 장치를 사용한 참고문헌 1에서 구하였으며, 타이어의 감쇠 계수 C_1 및 강성 계수 K_1 은 참고문헌 5에서 참고하였고, 불의 질량 M_2 는 불, 노즐, 호스, 프레임 등 구성품의 무게를 측정하여 계산하였다. 작동기의 길이 L, 길이 $L_1 \sim L_5$, 및 l 은 공시방제기의 불의 길이와 불 끝단의 높이 변화(표 2 참조)에 근거해 결정하였다. 또한 회전축의 감쇠 계수 C_2 는 0으로 가정하였다.

Table 4 The simulation variables used in the study

방제기 질량(M_1), kg	556
불 질량 (M_2), kg	39.3
L, m	0.375
L1, m	0.142
L2, m	0.345
L3, m	0.933
L4, m	1.15
L5, m	0.60
F, N · m	$98.1 \times l \times \cos(\theta - (\alpha - \beta))$
l, m	0.51
C_1 , N · s/m	2800
C_2 , m · s · N/rad	0
K_1 , N/m	3.2×10^5

수학적 모델링에 쓰일 변수의 값 중에서 차체의 질량관성모멘트($I_1=115.605\text{kg}\cdot\text{m}^2$)는 질량이 M_1 인 차량을 가로, 세로가 각각 1.2m, 0.7m인 정육면체로 가정하고, 차체의 무게중심으로부터 회전축까지의 거리를 0.217m로 산정하여 구하였다. 봄의 질량관성모멘트($I_2 = 260.205 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)는 질량이 M_2 인 봄을 길이가 8.9m, 봄의 무게중심으로부터 회전축인 pivot까지의 거리가 0.142m인 봄으로 가정하고 구하였다.

결정된 시뮬레이션 변수에 기초하여 작동기의 T 및 K를 변화시켜가면서 방제기 본체의 기울기 α 의 변화에 따른 제어된 봄의 기울기 β 가 지면의 기울기 γ 에 접근하는 응답성을 분석함으로써 능동 진자 현가장치의 제어성능을 예측하였다.

다. 봄 수평 측정 시스템

설계된 수평제어부 내에서 봄의 수평을 측정하기 위해 고정밀도의 경사각 센서(PMP-S10T)를 사용하였다. 이 경사센서는 경사각 $\pm 10^\circ$ 의 범위 내에서 직선적인 출력을 얻을 수 있다.

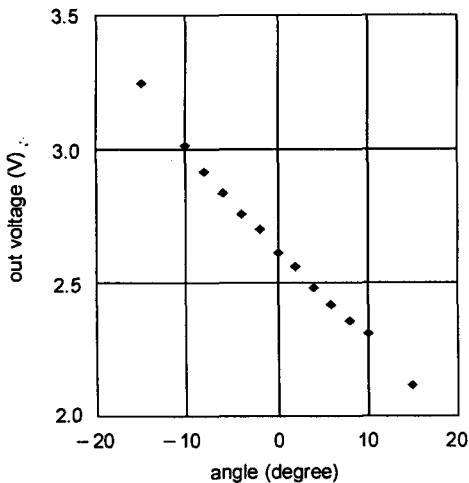


Fig. 4 The output characteristic of angle sensor.

그림 4는 입력전압을 5V로 했을 때의 출력특성도

로서 경사가 변함에 따라 출력이 직선적으로 변함을 알 수 있다. 그래프를 분석하여 다음과 같은 경사도와 출력전압과의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$V = -0.0362 \times \theta - 2.64 \quad (R^2 = 0.9935)$$

여기서 $V =$ 출력전압(V)

$\theta =$ 경사도($^\circ$)

윗식을 통해서 경사센서에서 출력되는 전압신호를 측정하면 경사센서의 경사도를 알 수 있다.

바. 작동기 선정

본 연구에서 사용하는 봄방제기에는 유압시스템이 없으므로 배터리 구동형 파워실린더를 작동기로 선정하였다. 유압 실린더의 경우 대부분의 농기계가 유압시스템을 갖추고 있어 기존 시스템의 변경으로 사용이 가능한 이점이 있으나 응답성이 느린 단점을 갖고 있다. 반면 직류모터로 작동되는 파워 실린더는 상대적으로 설치 비용이 저렴하고, 동력원으로써 배터리를 이용할 수 있으며, 빠른 응답성을 확보할 수 있는 이점이 있다.

표 5에 선정한 파워 실린더의 제원을 표시하였다. 표에서 나타나는 바와 같이 파워실린더의 행정은 150mm로 수평제어메카니즘에서 나타낸 작동기 요건에 적합하였다. 파워 실린더의 상부는 봄방제기의 본체 구조물에 연결시켰으며 하부는 회전운동이 가능하도록 봄프레임에 연결하였다.

Table 5 The characteristic of a power cylinder in the study

Model No.	LPA010M1.5(V)
Rated power (kg)	10
Stroke (mm)	150
Speed (mm/s)	50
Power supply (V)	DC 12V
Current in rated load (A)	1.7

사. 수평제어 알고리즘

그림 5는 붐 수평제어계의 순서도를 나타낸 것으로 붐의 경사 정도가 경사센서의 출력전압 형태로 전환되어 PC Lab 카드를 통해서 A/D 변환되는 알고리즘으로 구성되었다.

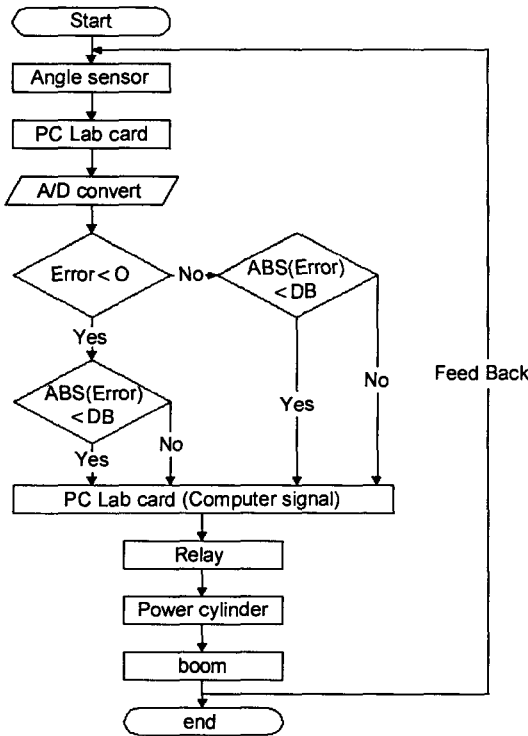


Fig. 5 The flow chart of boom height control system.

컴퓨터에서 PC Lab 카드를 통해서 변환된 입력신호(경사센서의 경사정도)와 제어 프로그램에서 기준값(수평일 때의 값)의 차이를 계산한 후 에러 및 데드 밴드(dead band)에 따라서 다시 PC Lab 카드를 통해서 디지털 제어 신호를 내 보낸다. 출력된 디지털 신호에 따라 파워 실린더 구동 릴레이가 작동되어 파워 실린더가 정회전(붐을 올림), 역회전(붐을 내림), 정지의 동작을 하게 된다. 이 과정을 피드백으로 반복하여 그 결과로 붐의 수평을 원하는 수준으로 제어할 수 있다.

아. 수평제어장치의 성능시험

앞에서 제시한 설계기준에 따라 수평제어 장치의 시작기가 구성되었으며 그 성능이 검증되었다. 실험은 실내실험과 포장실험으로 나누어서 실시했다.

실내실험은 설계·제작된 수평제어 시스템의 성능을 안정된 실험조건에서 평가할 뿐만 아니라 다양한 작동조건에서도 그 성능이 적용될 수 있도록 제어 알고리즘 및 제어 시스템을 보완하기 위하여 수행되었다.

그에 따라 붐 거동 측정에서 측정한 붐 거동 주파수 및 진폭에 해당하는 입력신호를 컴퓨터 내부에서 발생시키고 컴퓨터에서 그 입력신호와 붐의 중간에 장착된 경사센서의 출력신호를 비교하였다. 그리고 컴퓨터에서 비교된 신호의 차이에 따라 PC lab 카드로 파워 실린더를 구동하는 디지털 신호를 발생시켰으며 파워실린더에 의해 붐이 좌우로 움직임에 따라 붐의 중간에 부착된 경사센서의 출력신호가 변하면, 변한 출력신호와 입력신호를 다시 컴퓨터에서 비교를 한 후 위의 셋째 이후의 과정을 되풀이하면서 출력신호가 입력신호를 따라가도록 실내실험을 실시하였다. 또한 실내실험시 컴퓨터 내에서의 자료수집시간인 샘플링 시간을 조절하면서 알고리즘을 보완했다.

포장 실험에서는 실내실험을 통해 제작된 수평제어 시스템의 실제적 제어성능을 평가하였다. 포장실험은 지면의 기울기를 기준값으로 하여 수평으로 한 후 붐의 중간에 부착된 경사센서의 신호를 입력받고 기준값인 지면의 기울기와 경사센서의 신호를 컴퓨터를 통해서 비교함으로써 수행되었다.

붐 방제기를 수평제어 시스템을 적용하지 않은 채 포장을 주행하면서 붐의 거동을 경사센서로 측정하였다. 그 다음 같은 구간에서 수평제어 시스템을 적용한 후 제어된 붐의 거동을 경사센서로 측정한 후 기준값인 수평에 대해 붐의 수평정도를 측정했다. 또한 경사지에서의 적용가능성을 보기 위해 기준값을 수평대신에 경사지에 해당하는 신호로 한 후 붐의 기울기에 따른 출력과 기준값의 오차를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 붐 거동

기존 붐 방제기의 무는 주행시 붐 끝의 높이 변화를 통해 포장상태에 따른 붐의 기울어짐 정도를 측정하였다. 측정된 붐 거동에서 작은 진폭으로 측정된 거동은 붐의 좌우 요동에 영향을 적게 주는 것으로 간주하여 무시하고 붐끝의 진폭이 크게 변하는 정도를 분석하였다. 그림 6은 실험결과의 한 예를 보여주고 있다.

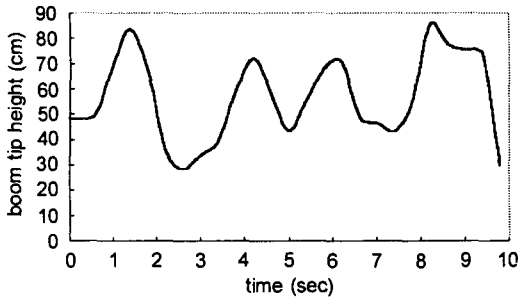


Fig. 6 The boom tip behavior at boom sprayer speed of 1.1km/hr.

붐의 기울어짐 정도는 포장상태에 따라 다소 차이가 있었으나 큰 차이는 나타나지 않았다. 그림 6에서 보듯이 방제기의 속도가 1.1km/hr일 경우 붐 끝의 거동이 10초당 1사이클에서 3사이클 범위에서 변화하였고, 붐 끝의 높이는 13~90cm의 범위에서 변화하였다. 그림 6에서 시작점을 수평의 위치로 했을 때 붐은 $5.0^{\circ} \sim -2.9^{\circ}$ 범위에서 좌우 요동현상을 보였다. 이것을 붐의 각도로 계산하면 11.3° 의 범위였다. 따라서, 이 결과를 바탕으로 실내실험에서 붐 거동에 대한 입력값을 0.1Hz ~ 0.3Hz, 진폭을 $\pm 10^{\circ}$ 로 하면 실제 붐의 거동에 잘 부합된다고 할 수 있다.

나. 수평제어시스템의 시뮬레이션

붐거동 측정 결과에 따르면 무는내에서 붐은 대략

$-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$ 범위에서 기울어지는 것으로 나타났다. 따라서 표 5에 나타난 변수들을 시뮬레이션에 대입하고 방제기 본체의 기울기 α 를 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 로 증가시키면서 그에 따라 제어된 붐의 기울기 β 의 값을 RUNGE-KUTTA 수치적분법으로 구하였으며 그 결과는 그림 7과 같다.

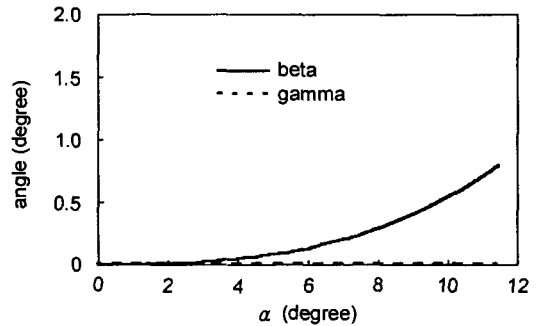


Fig. 7 The compensated angle of boom(β) with respect to the ground for an inclined angle of vehicle(α).

지면의 기울기인 γ 는 0.001로서 수평으로 간주하고 붐방제기 본체가 차륜의 침하 및 지면의 불균일에 의해 기울다고 가정했다.

그림 7에서 보듯이 차체가 기울기 α 가 증가할 때 제어된 붐의 기울기 β 는 거의 변화가 없이 제어목표치인 지면의 기울기 γ 에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 능동 진자 현가장치의 붐 수평제어가 잘 된다는 것을 나타내고 있다.

제어 장치의 수학적 모델링의 식 (7), (8) 및 (9)에서 작동기의 성능을 나타내는 시간상수 T 값을 0.2 ~ 0.8까지 0.2씩 증가시키면서 그에 따른 주파수 응답성을 그림 8에 나타내었다. 제어부에 의해 붐이 수평을 유지할 때 방제기 본체의 기울기 α 와 그에 따른 제어된 붐의 기울기와의 차이인 $\alpha - \beta$ 의 크기의 비는 1이 되어야 한다. 이는 붐의 수평상태가 지면의 기울기에 일치하는 것을 의미하게 된다. 또한 바람직한 제어성능을 얻기 위하여는 위상차가 0° 가 되어야 한다.

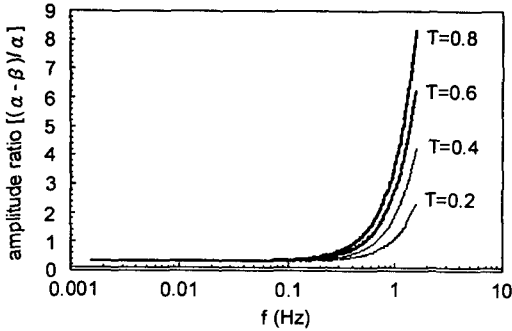


Fig. 8 The frequency responses(amplitude ratio) of an actively suspended boom (range of T = 0.2 ~ 0.8).

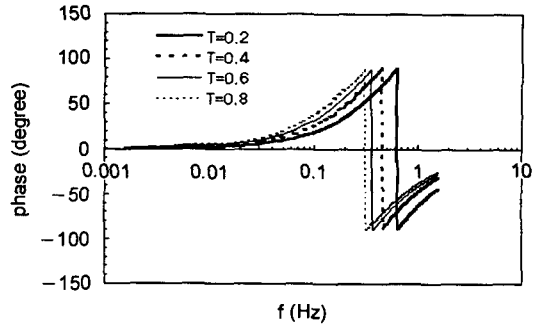


Fig. 9 The frequency responses(Phase angle) of an actively suspended boom (range of T = 0.2 ~ 0.8).

그림 8에기 시간상수 T 값이 증가할수록 같은 주파수에서 증폭비가 크게 나타나고 있다. 이것은 작동기의 시간상수 T 값이 클수록 방제기 본체의 기울기 α 에 따른 제어된 붐의 기울기 β 가 지면의 기울기 γ 에 접근하는 응답성이 나쁘다는 것을 나타내고 있다. 그와 같은 결과는 0.4Hz 이상의 영역에서 더욱 뚜렷한 경향을 보여 주었다. 즉 설계된 제어시스템이 무논에서 토양의 불균일에 의해 붐의 좌우 요동이 자주 일어날 경우 적절한 수평제어가 불가능하다는 것을 보여주었다. 그러나 붐 거동측정 실험 결과로부터 토양의 불균일에 의한 붐의 기울기에 영향을 주는 붐 방제기 본체의 거동은 10초당 1사이클에서 3사이클 사이의 저주파로 이 시스템은 저주파 영역에서 응용 가능한 것으로 볼 수 있다.

그림 9는 그림 8을 측정했을 때의 위상 지연으로 시간상수 T 값이 증가함에 따라 위상 지연이 커지고, 같은 위상 지연에서의 해당 주파수영역이 증가하는 것을 보여 주고 있다.

그림 10에는 설계된 능동 진자 현가장치를 작동기로 비례제어를 할 경우 작동기 비례상수 K 값을 0.2 ~ 1.0까지 증가시키면서 그에 따른 주파수 응답성을 나타낸 것으로 그림에서 알 수 있듯이 작동기의 K 값이 증가할수록 저주파 영역에서 차체의 기울기 α 에 따른 제어된 붐의 기울기 β 가 원하는 수준인 지면의 기울기 γ 에 접근하는 응답성이 좋다는 것을 나타내고 있다.

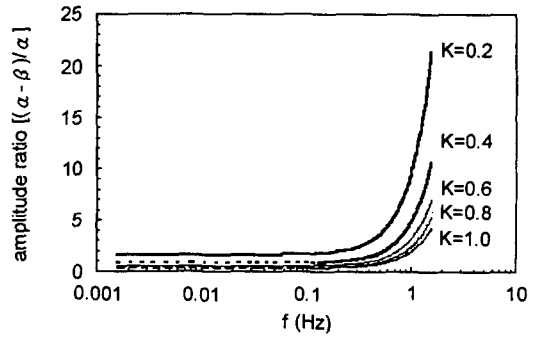


Fig. 10 The frequency responses(amplitude ratio) of an actively suspended boom (range of K = 0.2 ~ 1.0).

시뮬레이션 결과에 의하면 수평제어 시스템에 적용하는 작동기는 시간상수 T 값이 작을수록, 비례상수 K 값이 1에 가까울수록 좋은 응답성을 보인다는 것을 알 수 있었다.

다. 성능 실험

개발된 수평제어 시스템을 붐 방제기에 장착하여 제어 성능실험을 실내실험과 포장실험 두 가지 경우에 대해서 수행했으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 실내 실험

그림 11, 12는 로터리 포텐시옴터로부터 입력신

호를 준 후 경사센서의 출력신호가 입력신호와 같게 될 때까지 파워 실린더를 작동시킨 후 그 응답성을 나타낸 것으로 unit input을 10° 로 했을 때 파워실린더가 붐을 내릴 경우 상승시간(Rising time)은 0.7초이며 응답성은 11.74° /sec, 붐을 올릴 경우 상승시간은 0.8초이고 응답성은 8.839° /sec (붐 끝의 높이로 계산하면 각각 85cm/sec, 65.5cm/sec)로 중력에 의해 붐을 내릴 때와 올릴 때 약간의 차이가 있으나 붐을 수평으로 제어하는 데에는 적합하였다.

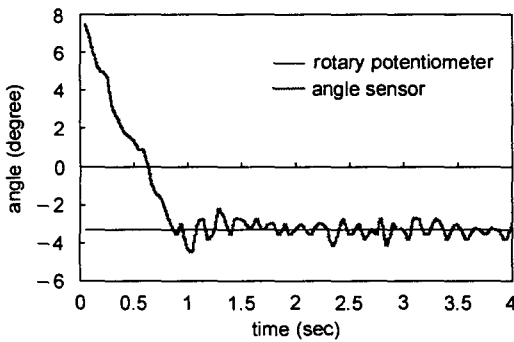


Fig. 11 The response of the power cylinder (Expanding).

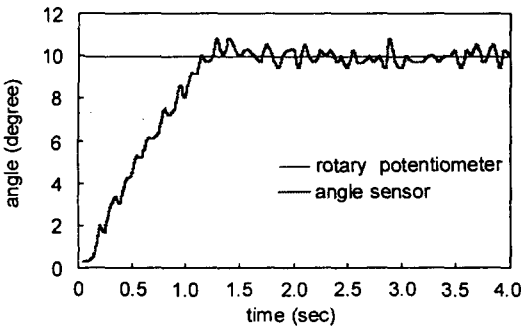


Fig. 12 The response of the power cylinder (Shrinking).

입력신호의 주파수를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4Hz로 진폭은 $\pm 9^\circ$ (붐 끝의 높이로는 $\pm 65\text{cm}$)에 해당하는 정현파를 입력으로 하고 샘플링 시간을 30ms로 한 후 경사센서의 응답출력정도 측정하였다.

그림 13에 주파수가 0.3Hz일 때의 응답출력정도

를 나타내었는데 그림에서 보듯이 0.3Hz에서는 지연시간이 거의 없이 입력신호를 따라가고 있는 것을 알 수 있었고 0.1, 0.2Hz에서도 같은 결과를 나타내었다. 따라서 0.3Hz 미만의 붐의 기울기에 대한 수평제어가 매우 안정적으로 수행된다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 14에 나타낸 것처럼 입력신호 0.4Hz 일 때는 경사센서의 응답출력정도가 시간뿐만 아니라 진폭에서도 입력신호를 따라가지 못했다. 따라서 수평제어 시스템은 0.3Hz~0.4Hz 사이에 임계점이 있는 것을 알 수 있다.

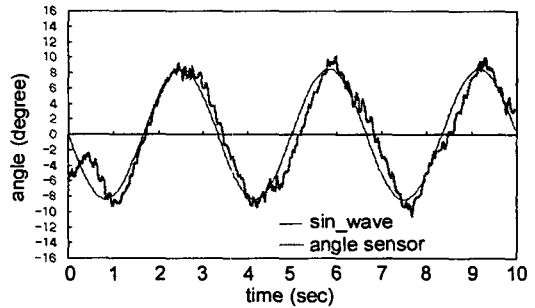


Fig. 13 The response of the control system at a simulated input for unevenness of ground(sinewave, sampling time 30ms, 0.3Hz).

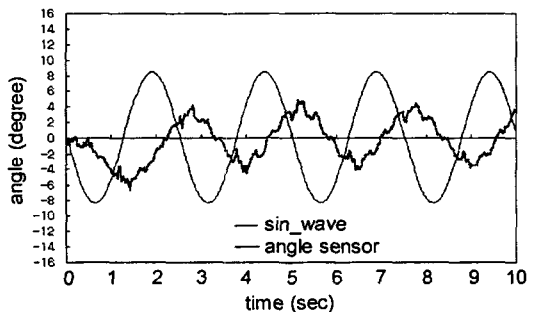


Fig. 14 The response of the control system at a simulated input for unevenness of ground(sinewave, sampling time 30ms, 0.4Hz).

설계된 붐 수평제어 시스템은 측정된 붐의 기울기

변화인 0.1Hz에서 0.3Hz 범위에 대해서 매우 안정적으로 작동함을 보여 주었으며 이는 시뮬레이션의 결과와 매우 잘 일치되었다.

(2) 포장 실험

그림 15는 봄 수평제어 시스템을 작동하지 않은 채로 포장에서 봄 방제기를 1.7km/hr의 속도로 주행하였을 때, 포장의 불균일성에 따른 봄의 기울기를 경사센서의 출력으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 봄이 8° 까지 기울었다가 다시 -8° 로 좌우 요동 현상이 일어났다.

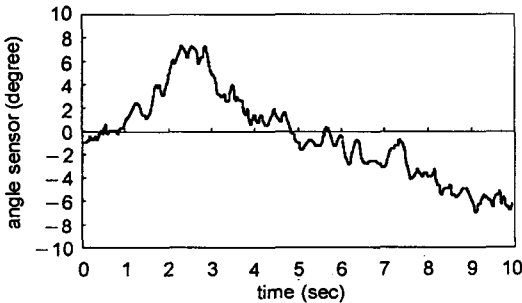


Fig. 15 The output signal of angle sensor without the control system in field test.

같은 구간에서 봄 수평제어 시스템을 적용하고 기준값을 다르게 하여 봄의 기울기를 측정하였고 그 결과를 그림 16, 17에 나타내었다.

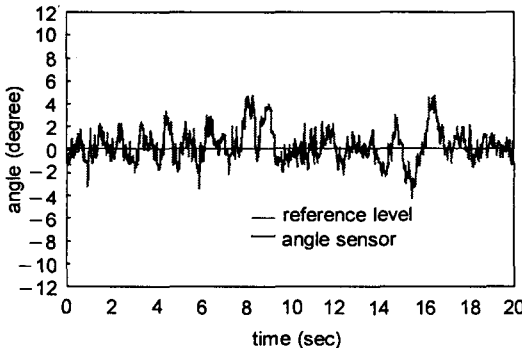


Fig. 16 The output signals of the angle sensor with the control system in field test(reference level = 0°).

그림 16은 수평제어시 기준값(지면의 기울기)이 0° 로 수평일 때의 제어된 봄의 기울기를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 봄의 수평제어가 기준값의 ±3.5° 이내에서 가능함을 보여주고 있다.

그림 17에서는 지면이 -3.75° 로 기울어져 있는 경사지로 가정했을 때 자세제어 성능을 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 기준값을 0으로 간주할 때 수평제어 정도가 ±4° 이내에서 제어가 가능함을 보여주고 있다.

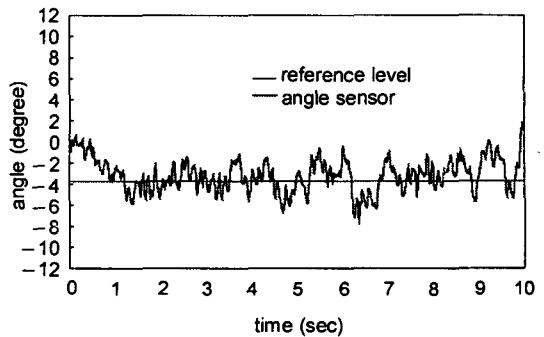


Fig. 17 The output signals of the angle sensor with the control system in field test(reference level = -3.74°).

수평제어장치의 성능시험의 결과로부터 기준값을 변화시킴으로써 봄의 기울기를 수평뿐만 아니라 원하는 기울기로 유지할 수 있다는 것을 알 수 있으며 설계된 수평제어 장치가 평지인 무논뿐만 아니라 경사진 밭에서도 봄의 기울기를 제어할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

4. 요약 및 결론

동력 분무기에 의한 관행의 방제작업은 다량살포와 이에 따른 비산의 발생 및 환경 오염, 살포의 비정확성과 비균일성, 파다 농약에의 작업자의 노출 등의 문제점이 있으며 이에 따라 봄 방제기에 대한 요구가 높아지고 있다. 수도작에 있어 봄 방제기는 지반의 연약성과 정지작업의 정도에 따라 차륜의 침하정도가 다르기 때문에 봄의 수평유지가 어려워 균

일한 방제작업의 수행이 어렵다. 포장표면의 불균일에 의해 발생하는 붐의 기울기를 지면에 대해 수평으로 제어함으로써 살포효율을 증가시킬 수 있다. 따라서, 본 연구는 수도작용 붐 방제기의 수평제어 장치를 개발함을 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다

1. 포장에서의 방제작업시 붐 끝의 움직임을 구명한 결과 본 연구에서 붐의 기울기에 영향을 주는 방제기 본체의 좌우 요동은 0.1Hz~0.3Hz 의 저주파였으며 진폭은 $\pm 9^\circ$ 사이로 나타났다.

2. 기존의 붐 고정식 붐 방제기를 능동 진자 현가 장치로 설계 변경함으로써 붐의 수평제어가 가능하도록 하였다.

3. 지면의 불균일에 의한 방제기 본체의 기울기에 따른 제어된 붐의 기울기를 시뮬레이션 하였으며 그 결과 수평제어 시스템에 적용하는 작동기의 시간상수 T 값이 작을수록, 비례상수 K값이 1에 가까울수록 좋은 응답성을 얻을 수 있었다.

4. 개발된 붐 수평제어 시스템으로 포장실험을 수행한 결과 붐의 기울기는 수평에 대해 최대 $\pm 4^\circ$ 의 오차 내에서 제어가 가능하였다.

참 고 문 헌

1. 김형조. 1996. 수도작용 자주식 붐 방제기의 작물 손상을 고려한 차륜설계 및 조향형식별 차륜궤적 - 작물손상의 시뮬레이션. 서울대학교 석사학위 논문.
2. 이강걸. 1996. 수도작용 붐 방제기의 피복특성에 관한 실험적 연구. 서울대학교 석사학위 논문.
3. 정창주. 1990. 農業機械學. 서울대학교출판부
4. Donald T. Greenwood. 1988. Principles of Dynamics. Prentice-Hall, Inc.
5. Marchant, J. A., Frost, A. R. 1989. Simulation of the Performance of State Feedback Controllers for an Active Spray Boom Suspension. Journal of Agricultural Engineering Research 43, 77-91.
6. O'Sullivan, J. A. 1986. Simulation of the Behaviour of a Spray Boom with an Active and Passive Pendulum Suspension. Journal of Agricultural Engineering Research 35, 157-173.
7. Tadatashi Satow, Keiji Miyamoto and Kiyooki Matsuda. 1992. Control of Spraying Height with Ultrasonic Sensor for Boom Sprayer(Part 1). 農業機械學會誌 54(2):31-39.