

입제 비료 변량 살포 제어시스템의 분석 및 설계

김유한 이종용 김영주 유지훈 류관희

Design and Analysis of a Control System for Variable-Rate Application of Granular Fertilizers

Y. H. Kim J. Y. Rhee Y. J. Kim J. H. Yu K. H. Ryu

Abstract

This study was conducted to improve the control performance of a current variable-rate controller for granular fertilizers. Simulation model was developed. Optimized proportional, integral and derivative gains were determined by simulation model using 2nd order PID gain learning algorithm, and these control gains were evaluated through the field tests. Important results of this study are as follows;

1. Principles of pre-existing variable-rate application of granular fertilizers were investigated.
2. Simulation model of a PID controller that could simulate the control system was developed by using Matlab/Simulink program. The program was to determine PID control coefficients through the simulation model and 2nd order PID gain learning algorithm.
3. PID control coefficients obtained from the simulation were applied to the developed model. When the step input was given, Maximum overshoot were 1.96%, rise time were 0.05 sec, settling time were 0.06 sec and steady state error were 0.21% respectively.
4. The simulation model was verified through field tests. The errors of maximum overshoot were 10%, rise time were 0.11 sec, settling time were 0.40 sec and steady state error were 8% because of loads and noises. Rise time was decreased to one third of that of the pre-existing system.
5. If the speed of a fertilizing machine is 0.3~0.6 m/s and the maximum rotation speed of a discharging roller is 64 rpm, rise time would be 0.26 sec and fertilizing machine would cover the distance of 0.07~0.15 m with settling time of 0.4 sec, fertilizing machine would cover the distance of 0.12~0.24 m.

Keywords : Precision farming, PID Controller, 2nd order learning algorithm, Variable-Rate controller, Granular Fertilizer

1. 서론

정밀농업의 필요성이 중요시되는 현재 작물의 생육, 잡초 및 병해충의 발생정도, 토양특성 등을 고려하여 효율적이고 안전하게 원하는 위치에 비료를 원하는 양만큼 투입할 수 있는 변량 제어시스템의 개발은 정밀농업의 핵심 요소라고 할

수 있다. 이 중 입제 비료 변량 살포 제어시스템에 관한 연구는 이미 이루어져, 손(2004)은 입제의 물성조사와 제어시스템의 요인실험을 통하여 입제 변량 제어시스템 개발의 기초적인 자료를 제시하고 모터의 회전 속도에 따른 배출량의 관계를 실험하였으며, 유(2005)는 입제 변량 살포 제어시스템의 제어 신호에 따른 배출 장치의 회전 속도 실험을 통하여

This study was supported by the Agricultural R&D Promotion Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. This article was submitted for publication in February 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in May 2006. The authors are Yu Han Kim, Graduate Student, Researcher, Joong Young Rhee, Associate Professor, Dept of Biosystems Engineering, Seoul National University Young Joo Kim, Researcher, Ji Hun Yu, Graduate Student, Dept of Biosystems Engineering, Seoul National University. The corresponding author is Kwan Hee Ryu, Professor, Dept of Biosystems Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shillim 9-dong, Kwanak-gu, Seoul, In Korea, 151-921; E-mail : <ryukh@snu.ac.kr>

회전 속도 예측식을 구하였다.

현재 국내에는 입제 변량 제어시스템이 개발되어 있으나 모터 및 회전축의 관성, 외란 등의 영향으로 인해 제어시스템의 응답 및 작업 성능, 효율이 최적화되지 못한 상태에 있다.

본 연구에서는 현재 개발된 입제 변량 제어시스템의 제어 성능의 향상을 위해 수행하게 되었으며 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 현재의 입제 변량 제어시스템의 구성과 원리를 이론적으로 구명하여 제어시스템의 응답성, 작동 효율 등의 제어특성을 분석한다.
2. 제어성능을 높이기 위해 제어시스템에 대한 수학적 모형을 개발하고, 이에 따른 PID제어 시뮬레이션 모델을 개발한다.
3. 개발된 PID제어 시뮬레이션 모델을 이용하여 제어특성의 향상을 위한 최적의 PID제어기의 제어계수를 자동으로 결정해주는 프로그램을 개발한다.
4. 선정된 PID제어계수를 이용하여 제어시스템에 반영시켜 성능시험을 통해 제어시스템의 성능향상 정도를 평가한다.

2. 재료 및 방법

가. 입제 변량 제어시스템의 구성과 원리

GIS(Geographical Information System) 및 GPS(Global positioning system)에서 위치정보와 작업속도 정보 등이 중앙 처리부에 입력되면 작업 대상이 되는 필지의 토성 정보를 바탕으로 이를 National Instruments사의 Labview7 프로그램에서 종합하여 Motion Controller를 거쳐 아날로그 신호 형태의 출력으로 바꾸어 모터 구동회로에 제어신호를 전달하게 된다. 이 때 입력신호와 모터에 부착된 엔코더로부터의 펄스가 CPU와 Motion Controller로 전달되며 Motion Controller에는 카운터 회로가 내장되어 모터의 기준 위치로부터 회전 정도와 회전속도를 측정하며, 이러한 폐루프 제어시스템으로

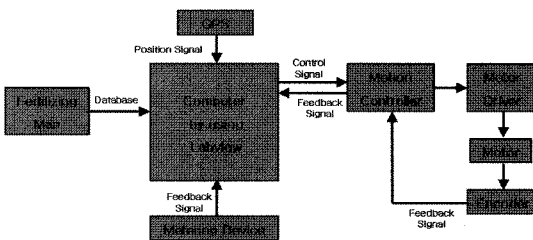


Fig. 1 Schematic diagram of a controller implemented Labview program.

인해 제어기는 빠르고 정확한 응답 성능을 가질 수 있다. 또한 Labview 프로그램을 이용하여 소프트웨어적으로 비례, 미분, 적분 제어계수를 용이하게 설정할 수 있다.

나. 입제 변량 제어시스템의 시뮬레이션

1) 2차 반복 학습 제어 알고리즘

일반적으로 DC 서보 모터 제어는 전문가에 의해서 파라미터 이득들이 정해질 수 있으며 시행착오에 의해 반복 조절해야 하는 불편함이 있다. 따라서 변량 제어시스템의 이득을 설정하는데 있어서 자동 조종 방법을 적용하였다. 2차 반복 학습 제어 알고리즘의 형태는 그림 2와 같으며 이득 결정에 있어서 상승시간에 따른 비례제어계수(P) 이득의 학습 알고리즘을 부가함으로써 시스템의 외란에 대한 강인성에 관심을 두었다(이, 2000).

처음에 초기 PID 이득값에 의해 실행된 결과를 분석하여 부족제동인지 과제동인지 판단하여 과제동이면 응답을 빠르게 하기 위하여 비례제어계수(P) 이득 학습 알고리즘을 적용한다.

$$K_{P,k+1} = P_1 K_{P,k} + P_2 K_{P,k-1} + Q_1 e_{rt,k} + Q_2 e_{rt,k-1} \quad (1)$$

계수 P_1, P_2, Q_1, Q_2 는 반복 시뮬레이션을 통해 제어 목적(입상시간의 개선, 오버슈트의 감소, 정정시간의 개선)에 부합하는 가장 적절하게 시스템을 개선할 수 있는 값으로 택한 것이며, $e_{rt,k}$ 는 목표 상승시간과 k 번째 시뮬레이션으로 얻어

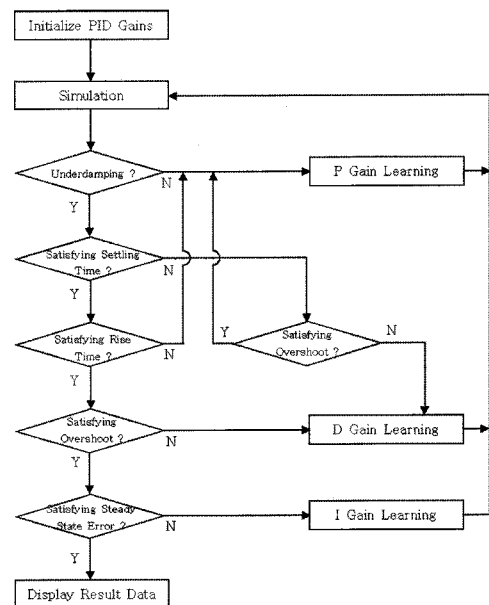


Fig. 2 Flow chart of the 2nd order PID gain learning algorithm.

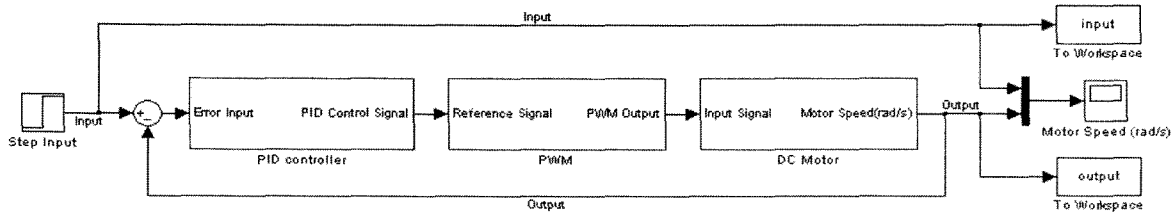


Fig. 3 Simulink program of a DC servo motor speed controller.

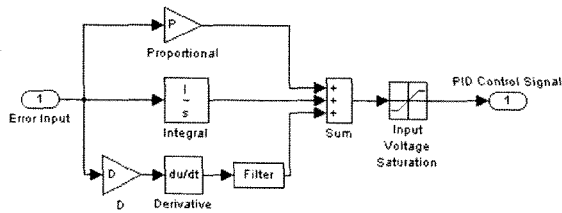


Fig. 4 Block diagram of a PID controller.

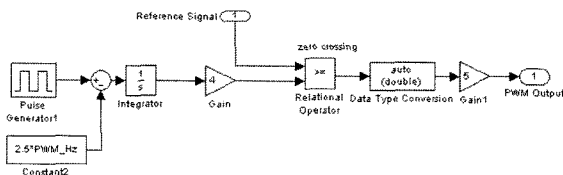


Fig. 5 Block diagram of a PWM signal generator.

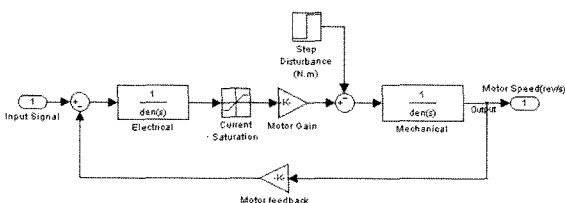


Fig. 6 Block diagram of the DC motor including a motor driver.

진 상승시간의 차이를 의미한다.

이렇게 처음 학습을 실시한 결과 부족제동으로 판단이 되면 정착시간을 판단한다. 만약 정착시간이 목표값을 만족시키지 않는다면 오버슈트를 판단한다. 만약 오버슈트 값이 목표 오버슈트 이상일 경우 미분제어계수(D) 이득 학습 알고리즘을 적용한다.

$$K_{D,k+1} = P_1 K_{D,k} + P_2 K_{D,k-1} + Q_1 e_{pos,k} + Q_2 e_{pos,k-1} \quad (2)$$

$e_{pos,k}$ 는 이상적인 응답비(=1)와 k 번째 시뮬레이션에서의

최저속도와 최고속도 비와의 차를 나타낸다.

이러한 과정을 반복 수행하여 정착시간이 목표 성능 사양에 만족하면 상승시간을 판단한다. 상승시간의 변화가 있을 경우 P 이득 학습을 반복 수행한다. 이 과정은 시스템의 강인성을 개선시켜 준다. 상승시간의 변화가 없다고 판단이 되면 오버슈트를 판단하게 된다. 이렇게 하여 반복하여 수행한 결과가 위의 조건들을 모두 만족할 시에는 마지막으로 정상상태 오차가 목표 성능에 도달하는 가를 판단하게 된다. 정상상태 오차를 판단 대상으로 하여 적분제어계수(I)의 이득 학습 알고리즘을 적용하였다.

$$K_{I,k+1} = P_1 K_{I,k} + P_2 K_{I,k-1} + Q_1 e_{sse,k} + Q_2 e_{sse,k-1} \quad (3)$$

$e_{sse,k}$ 는 목표로 하는 정상상태오차와 시뮬레이션의 정상상태오차와의 차를 나타낸다.

2) 시뮬레이션 프로그램 개발

Mathworks사의 Matlab/Simulink 프로그램 이용하여 작성한 시뮬레이션 프로그램 개략도는 그림 3과 같다. 단위 계단 입력력을 가하면 단위 입력 신호와 현재의 모터 속도와의 차이를 PID제어기에 가하고 이 신호는 PWM(Pulse width modulation) 블럭에 의해 PWM 신호로 바뀌게 된다. 이렇게 생성된 PWM 신호가 모터에 가해지게 되며 모터의 속도는 다시 피드백 된다. PWM 블럭을 넣은 이유는 실제로 모터가 PWM 방식으로 구동되기 때문에 보다 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위함이며, 모터 블럭 역시 모터 드라이버의 특성을 최대한 반영하도록 설계하였다.

그림 3의 PID controller 블럭의 내부는 그림 4와 같이 이루어져 있다. 원하는 목표 속도와 실제 모터 속도의 차가 오차 신호가 되어 PID controller의 입력이 된다. 또한 비례, 적분, 미분 제어의 과정을 통한 출력의 합이 PID controller의 출력이 된다. 미분 제어기에 필터를 위치시킨 이유는 미분 제어기의 출력에는 고주파 노이즈가 많이 포함되어 있어 시뮬

레이션 계산량이 많아지는 것을 피하기 위함이다. 필터의 전달함수는 $\frac{100000}{s+100000}$ 이다. 또한 PID controller의 출력 전압이 실제 출력 전압보다 높아지는 것을 제한하기 위해 saturation 블록을 추가하여 출력 전압이 0 V~12 V가 되도록 제한하였다.

그림 3의 PWM 발생기 내부에는 그림 5와 같이 이루어져 있다. 지정한 PWM 스위칭 주파수를 기준으로 PWM 신호를 출력으로 내보내게 된다. 이때 입력은 PID controller의 출력이 되며 적분기를 통한 삼각파와 비교하여 입력이 높으면 PWM 신호를 출력하고 낮으면 PWM 신호를 출력하지 않는다.

그림 3의 DC Motor 블록은 그림 6과 같이 이루어져 있으며 PWM 출력 신호를 입력으로 하여 모터의 속도를 계산 후 출력하도록 되어 있다. 또한 모터에 흐를 수 있는 전류에는 한계가 있으므로 saturation 블록을 추가하여 0 A~6 A의 전류를 흐를 수 있도록 하였다.

다. 시뮬레이션 모델의 성능 검증

시뮬레이션 모델의 성능을 검증하기 위하여 입제 변량 살포 제어시스템이 장착된 작업기를 0.3 m/s~0.6 m/s 사이의

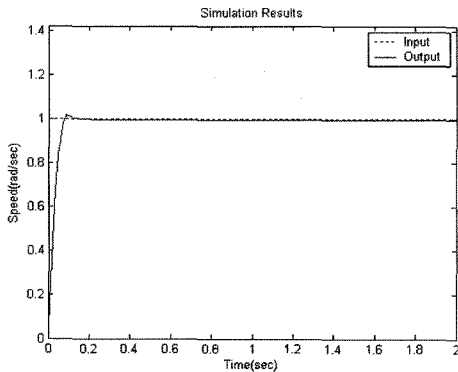


Fig. 7 Step response by simulation.

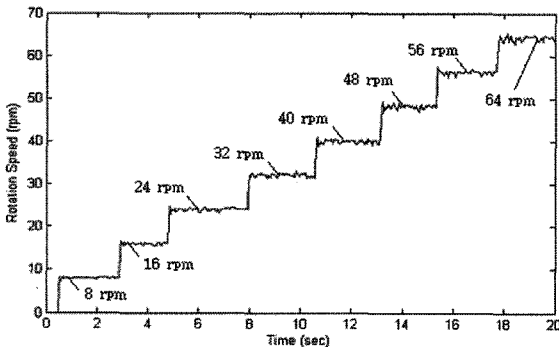


Fig. 8 Results of the actual tests.

속도로 주행시키면서 동시에 입제 변량 제어시스템을 작동시켜 입제비료를 노지에 투입함으로써 시뮬레이션 모델의 검증 실험을 하였다. 이때 제어시스템의 입력 회전 속도의 범위는 입제배출장치의 회전속도로 8 rpm~64 rpm이며 기어비 25 : 1의 감속기를 통해 입제 배출장치의 배출 플러가 회전하므로 실제 배출장치를 구동하는 모터의 회전 속도는 200 rpm 부터 1600 rpm까지에 해당되는 속도로 200 rpm 간격으로 속도를 세분하여 각 회전속도 단계별로 최대 오버슈트, 상승 시간, 정착 시간, 정상상태 오차 등을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 결과

Matlab/Simulink를 이용하여 2차 학습 제어 알고리즘을 사용하여 주어진 제어목표를 만족시키도록 시뮬레이션을 하였다. 총 28번의 반복 계산에 의해 결과가 도출되었으며 비례, 적분, 미분제어계수는 각각 228.2, 8.1, 16.8이었으며 최대 오버슈트, 상승시간, 정착시간, 정상상태오차는 그림 7에서 나타난 것과 같이 각각 1.96%, 0.05 초, 0.06 초, 0.2%였다.

나. 부하외란실험

앞에서 결정한 비례제어계수, 적분제어계수, 미분제어계수를 시스템에 적용하여 변량 제어시스템의 현장 실험을 통해 부하에 대한 실험을 하였다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 노이즈로 인해 오버슈트, 정상 상태 오차 등의 제어 성능에 영향이 있는 것으로 나타났다. 이는 작업기의 엔진 및 PTO 축의 회전, 송풍팬의 회전에 따른 진동, 토양으로부터의 가진 등이 노이즈를 발생시킨 것으로 분석된다.

다. 시뮬레이션 모델의 검증

작업기를 주행하면서 동시에 변량 제어시스템을 작동시켜 화학재를 토양에 투입하여 시뮬레이션 모델의 검증 실험을 하였다. 입력 회전 속도는 8 rpm~64 rpm 이며 기어비 25 : 1의 감속기를 통해 입제 배출장치가 회전하므로 이러한 입력 회전 속도는 모터의 회전 속도가 200 rpm 부터 200 rpm 간격으로 1600 rpm까지에 해당된다.

시뮬레이션 결과와 실제 실험의 결과를 보여주고 있는 표 1을 참조하면 입력 회전 속도가 낮은 경우 시뮬레이션 결과보다 실제 실험 결과의 상승 시간(rise time)이 작은 경향을 보이는 것을 알 수 있으며, 반대로 입력 회전 속도가 높아질수록 시뮬레이션의 상승 시간이 작은 것을 알 수 있다. 정착

Table 1 Results of simulation and experiment

Input (rpm)	Maximum Overshoot (%)		Rise Time (sec)		Settling Time (sec)		Steady State Error(%)	
	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment
8	0.06	6.8880	0.0635	0.0419	0.0908	0.0978	0.0041	5.1778
16	0.08	4.0780	0.0807	0.0874	0.1272	0.1103	0.0058	1.5815
24	0.03	7.7142	0.0947	0.0930	0.1459	0.2075	0.0090	8.0645
32	0.01	7.3930	0.1047	0.1063	0.1599	0.2106	0.0111	6.8070
40	0.07	9.7446	0.1142	0.1626	0.1730	0.2683	0.0127	6.2212
48	0.07	10.6060	0.1251	0.1917	0.1872	0.4682	0.0159	5.5408
56	0.19	9.5702	0.1390	0.2224	0.2042	0.6249	0.0206	4.4547
64	3.44	6.3572	0.1520	0.2604	0.2127	0.4076	0.0450	4.3712

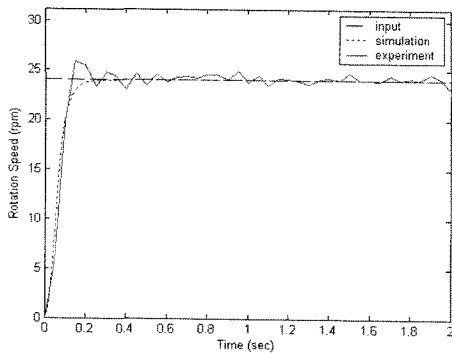


Fig. 9 Controller responses of 24rpm input.

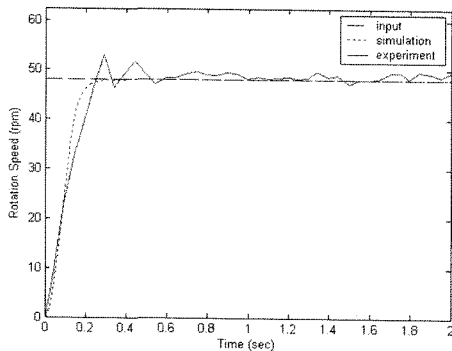


Fig. 10 Controller responses of 48rpm input.

시간(settling time)과 최대 오버슈트(maximum overshoot), 정상 상태 오차(steady state error)의 경우 시뮬레이션의 결과 보다 실제 실험의 값이 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시뮬레이션 모델은 무부하 상태를 기준으로 결과를 얻은 것이기 때문에 실제로 배출기 호퍼에 담긴 화학재로 인하여 배출장치에 작용하는 부하의 영향 때문에 실제 실험에서의 응답성이 전반적으로 시뮬레이션 모델의 그것보다 느려졌기

때문이다.

그러나 이러한 부하의 영향에도 정상 상태 오차의 경우 약 8% 이내로 안정되므로 이 오차 내에서 입체 변량 살포 시스템의 배출장치의 회전속도를 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

또한 입력 회전 속도가 24 rpm, 48 rpm의 경우의 시뮬레이션과 실제 실험의 응답에 대한 비교는 각각 그림 9와 10에 나타난 것과 같다.

배출 물러의 정지 상태에서부터 최대 64 rpm의 속도로 회전시킬 때 상승 시간이 0.26초로 나타났으며, 이는 기존 제어시스템의 상승 시간 0.73초 보다 약 1/3로 줄어든 것이다. 작업기의 주행속도가 0.3~0.6 m/s라고 한다면 배출 물러를 64 rpm으로 회전시킬 때 약 0.26초의 회전 속도 상승 시간 동안 작업기가 진행한 거리는 기존의 0.21~0.43 m보다 줄어든 0.07~0.15 m이며, 정착 시간 이내로 들어오는데 약 0.4초가 소요되고 이 시간동안 작업기는 0.12~0.24 m 정도 진행하게 된다. 토양의 영양, 생육 지도에 따라 작업기가 구획된 셀의 경계를 지나갈 때 배출 물러는 64 rpm 이하의 속도에서 변동하므로 결국 작업기의 진행 거리가 더욱 짧아지게 되며 기존 시스템 보다 더욱 정밀하게 입체를 배출할 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 현재 개발된 입체 변량 제어시스템의 성능 개선을 위해 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 변량 제어시스템의 구성과 원리를 이론적으로 구명하였다.
- (2) PID 제어를 이용한 시뮬레이션 모델을 Matlab/Simulink를 사용하여 개발하였으며 이 모델을 이용하여 2차 학습 제

어 알고리즘을 사용하여 비례, 적분, 미분 제어상수를 자동으로 결정하는 프로그램을 작성하였다.

- (3) 결정된 비례, 적분, 미분제어상수로 시뮬레이션 모델을 이용하여 단위계단 응답을 예측한 결과, 최대오버슈트 1.97%, 상승시간 0.052초, 정착시간 0.066초, 정상상태 오차 0.21%등 양호한 제어 성능을 얻었다.
- (4) 현장 실험을 통해 시뮬레이션 모델을 검증한 결과, 외란 및 부하로 인해 시뮬레이션 결과와는 달리 최대오버슈트 10%, 상승시간 0.11초, 정착시간 0.4초, 정상상태오차 8%로서 차이를 나타내었으나 기존 제어시스템의 성능과 비교할 때 상승 시간과 정착시간은 약 1/3로 크게 감소하는 제어성능의 향상이 있었다.
- (5) 작업기를 0.3~0.6 m/s로 주행하고 배출 롤러를 64 rpm으로 회전시킬 때 0.26초의 상승 시간 동안 작업기의 진행

거리는 기존의 0.219~0.438 m에서 0.078~0.156 m로 감소하였으며, 0.4초의 정착시간 동안 작업기는 0.12~0.24 m 정도 진행하게 된다. 배출 롤러의 회전 속도는 64 rpm 이하에서 변동하므로 결국 작업기의 진행 거리는 더욱 짧아지게 되므로 기존 시스템 보다 더욱 정밀한 살포가 가능하다.

참 고 문 헌

1. 손승용. 2004. 입제 변량살포를 위한 제어시스템 개발. 서울대학교 석사 학위 논문.
2. 유지훈. 2005. 입제 비료의 변량살포를 위한 제어기 개발. 서울대학교 석사 학위 논문.
3. 이은오. 2000. 반복학습제어방법에 의한 DC 서보 모터 속도제어기의 PID 이득 자동조정 프로그램 기법. 단국대학교 석사 학위 논문.
4. Zhuang, S., Komatsu, M. 1996. Automatic Control of fertilizer Applicator and Seeder Based on Running Speed(Part 1)-Development of Control Device and Feeding Performances of Seed and Fertilizer-日本 農業機械學會誌 58(1). pp.40-55.