

벚짚수확기의 매트형성장치 구동용 유압모터의 속도 제어기

- 직류모터의 위치 제어 -

Microprocessor-based Speed Controller for Hydraulic Motor at Mat Forming Device of Straw Harvester - D.C. Motor Position Control -

신 범 수*	김 상 현*
정회원	정회원
B.S.Shin	S.H.Kim

1. 서론

벚짚수확기는 수확작업이 끝난 후 포장에 널려진 벚짚을 걷어올려 메쉬레이팅한 후 건조 및 베일러 작업이 용이하도록 연속적인 벚짚 매트를 만들어 다시 포장에 넣어놓아 단시간 내에 건조가 되도록 하는 새로운 농작업기계로서, 벚짚 매트의 균일성 유지 및 매트를 끊어지지 않도록 만드는 것이 매우 중요하다. 균일하고 연속적인 벚짚 매트를 만들기 위해서는 벚짚수확기의 주행부와 독립되어 별도의 유압모터에 의해 구동되는 매트형성장치의 작동속도를 본체의 주행속도에 동기시켜야 한다. 매트형성장치를 구동하는 유압모터는 수동식으로 조작하는 유량제어밸브에 의해 회전속도가 제어되는데, 본 연구에서는 본체의 주행속도 변화에 따라 매트형성장치의 작동속도를 자동적으로 변화시킬 수 있도록 12V 직류모터를 이용하여 유량제어밸브의 위치를 제어할 수 있는 제어장치를 개발하는 것을 연구목표로 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

실험장치는 그림1에서 보는 바와 같이 실제 벚짚 수확기에 장착된 것과 동형인 5마력급 유압모터와 유량제어밸브, 유압펌프 등으로 구성된 유압 시스템 및 두 개의 압착 컨베이어 벨트로 이루어진 매트형성장치로 되어 있다. 유압모터는 감속기와 스프로킷을 통하여 체인으로 매트형성장치의 강철롤을 구동하며, 유량제어밸브는 수동식으로서 총 6 회전을 하면서 유압모터의 회전속도를 제어한다. 유량제어밸브를 작동시킬 조작기로 시중에서 쉽게 구할 수 있는 36:1의 감속기어가 부착된 12V 직류모터(6W, 60 rpm)를 사용하였다. 유량제어

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업기계공학과

벨트는 회전하면서 동시에 전후로 이동하기 때문에, 스플라인 축으로 된 유니버설조인트를 사용하여 유량제어벨트와 직류모터를 연결하였다. 직류모터의 회전 각변위를 측정하기 위하여 감속기어 반대편의 모터 축을 연장하여 로타리엔코더(500 pulse/rev)를 장착함으로써 직류모터의 출력축이 1회전할 때 18,000개의 펄스를 발생케 하여 정교한 위치제어가 가능하도록 하였다.

나. 제어장치

1) 제어장치의 구성

제어장치는 그림 2에서와 같이 제어기, 조작기, 벧짚수확기의 주행속도 측정부, 매트형 성장치의 컨베이어 벨트 선속도 측정부 및 유량제어벨트 각변위(또는 직류모터 각변위) 측정부 등으로 구성된다. 제어기는 고속 입출력 장치가 내장되어 있고 또한 별도의 하드웨어가 필요 없이 PWM신호를 발생하는 기능이 있어 모터 제어가 용이한 80196KC-20 마이크로프로세서(Intel, U.S.A.)를 사용하였다. 측정된 벧짚수확기의 주행속도를 기준입력으로 하고, 현재의 컨베이어 벨트 속도가 제한되어 두 신호의 차인 오차신호에 따라 제어기에서 조작량을 계산한 후 직류모터 구동기에 제어신호를 보내도록 하였다. 또한 직류모터가 위치제어를 수행할 때, 직류모터의 위치정보가 제한될 수 있도록 제어장치를 구성하였다. 그림 3에 마이크로프로세서와 각 인터페이스 회로와의 모식도를 나타내었다.

2) 제어 알고리즘

매트형 성장치의 컨베이어 벨트의 선속도는 벧짚 수확기의 주행속도와 일치하여야 하므로, 벧짚수확기 주행부의 구동스프로켓의 회전속도, ω_g 는 매트형 성장치의 컨베이어 벨트 구동 강철롤의 기준 회전속도, ω_{cr} 가 된다. 이때, 두 속도 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\omega_{cr} = (R_g/R_c) * \omega_g \quad (1)$$

여기서, ω_g = 주행속도 로타리엔코더 신호의 회전속도(또는 주파수)

R_g = 벧짚 수확기 구동 스프로켓의 반경, 0.07m,

R_c = 컨베이어 벨트 구동 강철롤의 반경, 0.1775m.

강철롤의 실제 회전속도(ω_c)는 축에 설치한 로타리엔코더로부터 측정할 수 있는데, 다음과 같이 두 신호의 차가 바로 오차신호로서 제어기에 입력된다.

$$\omega_e = \omega_{cr} - \omega_c \quad (2)$$

제어기는 오차신호, ω_e 의 부호에 따라 직류모터의 회전 방향을 결정하고 그 절대값만큼 직류모터가 구동할 수 있도록 제어신호를 계산하여 직류모터로 출력한다.

한편 조작기의 작동 특성을 규명하기 위하여 유량제어벨트의 열림 정도에 따른 매트형성

장치의 컨베이어 벨트 선속도와와의 관계를 구하였다. 본 연구에서 사용된 유량제어밸브(F600S, Parker, Italy)는 고가의 서보밸브와 달리 저가의 모델로서 정밀한 유량 제어는 곤란하지만, 실험적으로 유량제어밸브의 열림 정도에 따른 매트형성장치의 강철롤의 회전속도와의 관계를 구해 본 결과 R^2 값이 0.963으로 매우 선형적으로 나타났기 때문에, 강철롤 회전속도와 유량제어밸브를 구동하는 직류모터 회전 각변위와의 관계를 다음과 같이 선형화하여 직류모터의 제어기준으로 사용하였다.

$$\theta = 22.25 \cdot N_c \quad (3)$$

여기서, θ : 직류 모터가 위치할 각변위, deg

N_c : 강철롤의 회전속도, rpm

따라서, 측정된 오차신호에서 1 Hz의 차이는 식(3)의 강철롤 회전속도와 직류모터의 각변위와의 관계로부터, 약 2.7° 만큼 직류 모터를 회전시켜야 한다고 할 수 있다.

제어장치가 벧짚수확기의 주행속도 및 매트형성장치 구동 강철롤의 속도를 측정하는 샘플링 시간은 100ms로 하였다. 벧짚 수확기가 최고속도인 1m/sec의 속도로 주행하고 있는 중이라도 100ms동안 주행속도 변화 폭이 크지 않기 때문에 직류모터의 위치제어를 해야 할 양이 크지 않고 매트형성장치의 속도 오차를 최소화할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 한편, 위치제어 루프를 수행하게 될 직류모터의 제어주기는 예비실험을 통하여 10ms가 적정하다고 판단하였다. 소프트웨어 인터럽트를 구동하여 직류모터의 위치제어를 할 수 있도록 하여 100ms동안 직류모터는 매 10ms마다 10번의 위치 피드백 제어를 수행하기 때문에, 직류모터는 주어진 시간 내에 목표 위치에 도달하여 안정화될 수 있다.

오차신호의 크기에 따라 목표 회전각변위가 결정되면 직류모터는 100ms동안 10회의 위치제어 루틴을 수행하게 되는데, 부드럽게 모터를 구동시키기 위하여 알고리즘에 모터의 속도제어 기능을 추가하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 10회의 구간을 30%, 40% 및 30%로 나누어 각각 가속-동속-감속 구간을 두었다.

다. 실험 방법

본 연구에서 제어기는 측정된 오차신호에서 1Hz의 변화를 기준으로 100ms 마다 10ms 간격으로 직류모터를 제어하도록 되어 있다. 따라서, 제어장치의 성능실험은 오차신호 1Hz에서 10Hz에 해당하는 기준 회전 각변위를 계단입력으로 가한 후 직류모터의 응답 특성을 조사하였다. 특히, 비례제어, 비례-적분제어 및 비례-적분-미분제어 방식에 대하여 이득조정 과정을 거치며 최적의 응답특성을 보인다고 판단되는 상수 이득들에서 시스템의 응답 특성인 %최대오버슈트, 상승시간, 정정시간 및 정상상태 오차 등을 조사하였다.

본 연구에서의 제어장치의 성능 실험은 무부하 상태의 직류모터에 단위계단 입력을 가한 후 10ms 마다 직류모터의 회전 각변위를 측정하는 방식으로 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

가. 비례제어

그림 5는 각각의 오차신호에 대하여 비례제어만을 적용하였을 때의 단위계단 응답특성을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이, 시행착오법으로 이득조정(Gain tuning)과정을 거치면서 최적이라고 판단되는 이득상수에서 제어장치의 시간응답 성능 지표를 표 2에 나타내었다. 비례제어만이 적용되었을 경우 대 부분의 경우 최대 약 5%까지의 정상상태 오차가 존재하였으나, 정정시간은 90 - 165 ms 내외로 오차신호의 샘플링 시간 100ms 내에 목표 위치에 도달할 수 있는 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다. 그러나 계단입력의 크기가 커짐에 따라 진동도 커지고 또한 정정시간이 길어지는 것을 확인할 수 있었다.

나. 비례-적분제어

그림 6은 비례제어에서와 같은 방식으로, 오차신호 1Hz 부터 10Hz까지의 계단입력에 대하여 비례-적분제어를 적용한 제어장치의 시간응답 특성을 나타낸 것이다. 표 3은 각 계단입력에 대하여 적용한 최적의 상수이득 값들이며, 각각에 대한 시간응답 성능 지표를 표 4에 나타내었다. 비례-적분 제어를 수행한 경우, 정상상태 오차는 개선되었지만 정정시간은 크게 늘어나고 진동도 심해진 것으로 나타났다.

다. 비례-적분-미분제어

그림 7은 비례-적분-미분 제어 방식을 사용하였을 때의 실험 결과이다. 본 실험에서는 이득조정 과정을 거쳐 여러 크기의 오차신호에 대하여 직접하다고 판단된 이득상수들을 고정하고 계단입력의 크기를 변화시키며 성능 실험을 수행하였다. 비례제어 이득상수는 $5 * 1/9$, 적분기 이득상수는 $2 * 1/11$, 미분기 이득상수는 $5 * 1/7$ 이 적용되었으며, 성능 지표를 표 5에 나타내었다. 정상상태 오차는 0으로 되었으며 비례-적분 제어 방식보다는 정정시간을 줄일 수 있었다.

라. 외란에 의한 영향

벧짚 수확기의 주행속도에 변화가 없는 한 직류모터는 일정한 위치에 고정되어 있어야 하는데, 인위적으로 직류 모터에 외력을 가하여 직류모터가 움직이게된 외란에 대한 응답 특성을 조사한 결과, 그림 8 에서 보는 바와 같이, 외란에 대하여 매우 둔감한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

80196KC-20 마이크로프로세서와 12V 직류모터를 사용하여 유압모터의 속도 조절용 유량제어밸브의 위치제어를 할 수 있는 제어장치를 개발하여 성능 실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) P제어의 경우, 오차 신호의 크기에 따라 비례제어 이득 값을 조정해 주어야 했으며 대체로 5%내에서 정상상태 오차를 보였으며 100ms 이내에 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. PI제어의 경우도 오차 신호의 크기에 따라 비례제어 이득 및 적분제어 이득의 조정이 필요하며 정상상태 오차는 P제어 보다 크게 개선되었으나 정정시간이 너무 길어지는 단점이 있었다. PID제어의 경우는 고정된 제어 이득상수들로서 모든 크기의 오차신호에 대하여 정상상태 오차를 0으로 할 수 있었으며 정정시간도 200ms내외로 유지할 수 있었다.

2) 외란에 대하여 제어장치의 응답특성은 매우 둔감한 것으로 나타나 제어 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있었다.

5. 참고문헌

- 남 상 일 등. 1995. 농산부산물수확기 기술개발에 관한 연구. (최종보고서)통산산업부.
 차영배. 1997. Microcontroller 80196. 다다미디어.
 이우선, 이상우, 1995. 모터자동제어, Ohm사

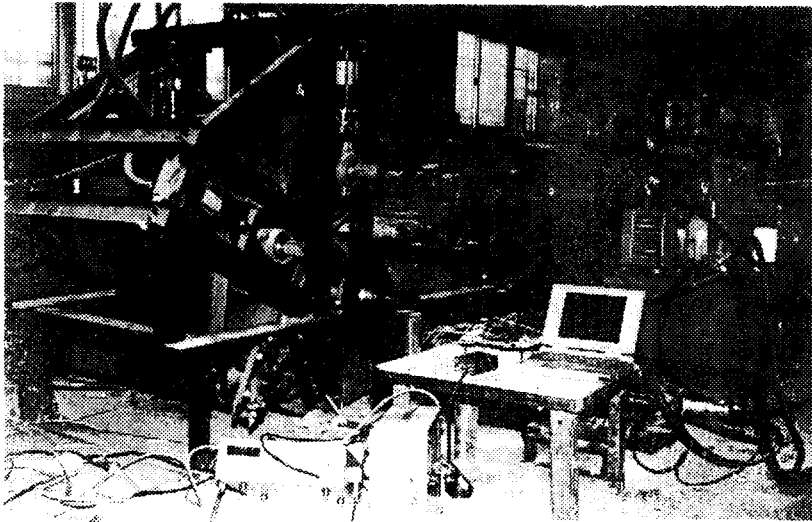


Fig. 1. Experimental apparatus

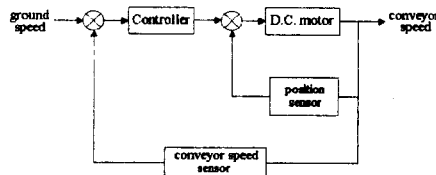


Fig. 2. Blockdiagram of controller

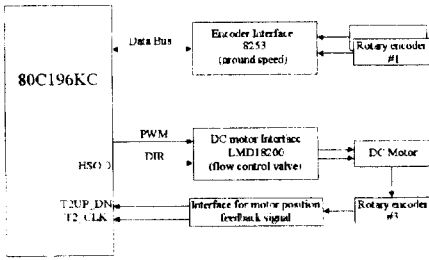


Fig. 3. Interface circuits to 80196 microprocessor

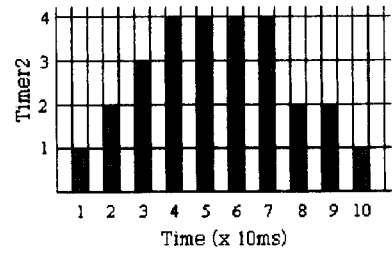


Fig. 4. Velocity profile of dc motor for 1 Hz error signal

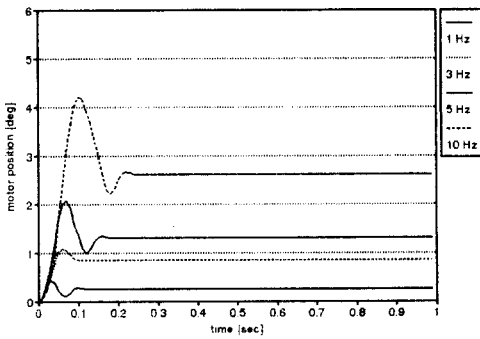


Fig. 5. Step input response of P-control system at errors of 1, 3, 5 and 10Hz

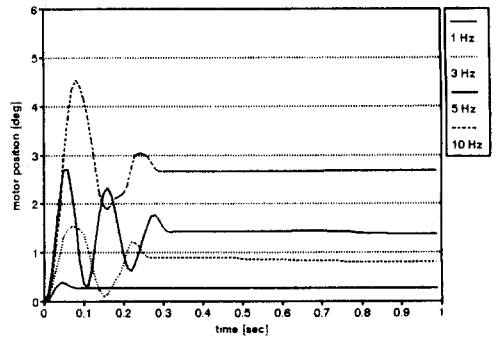


Fig. 6. Step input response of PI-control system at errors of 1, 3, 5 and 10Hz

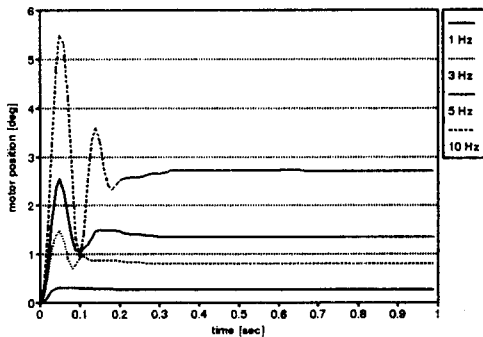


Fig. 7. Step input response of PID-control system at errors of 1, 3, 5 and 10Hz

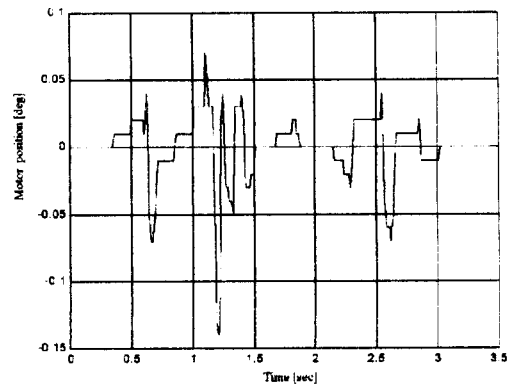


Fig. 8. System response to the disturbance

Table 1. Proportional gain with different error signals.

Magnitude of Error (Hz)	Kp
1	4/3
3	1/2
5	2/3
10	4*1/9

Table 2. Performance characteristics of control system with P control

Magnitude of Error (Hz)	% Max. Overshoot (%)	rise time (ms)	settling time (ms)	steady-state error(%)
1	59.3	10	90	3.8
3	34.6	26	110	4.9
5	54.1	30	115	3.0
10	55.6	40	165	3.7

Table 3. Proportional and Integration gains

Magnitude of Error (Hz)	Kp	Ki
1	1/2	1/4
3	3/8	1/30*2
5	1/10*5	1/40*2
10	1/5	1/40

Table 4. Performance characteristics of control system with PI control

Magnitude of Error (Hz)	% Max. Overshoot (%)	rise time (ms)	settling time (ms)	steady-state error(%)
1	40.7	20	85	0
3	90.1	25	570	1.3
5	99.3	15	320	1.5
10	68.5	30	235	1.1

Table 5. Performance characteristics of control system with PID control

Magnitude of Error (Hz)	% Max. Overshoot (%)	rise time (ms)	settling time(ms)	steady-state error(%)
1	14.8	20	165	0
3	81.5	20	210	0
5	88.9	20	220	0
10	103.3	20	235	0