

트랙터의 전자 유압식 히치 제어 시스템에 관한 연구 (III)

—컴퓨터 시뮬레이션—

Electronic-Hydraulic Hitch Control System for Agricultural Tractors (III)

—Computer Simulation—

金 琪 榮*, 柳 寬 熙*, 劉 壽 男**

K. Y. Kim, K. H. Ryu, S. N. Yoo

Summary

The purposes of this study were to perform theoretical analysis of an electronic-hydraulic hitch control system for position and draft control of tractor implements and to investigate the performance of the control system through computer simulation. Computer simulation models which could predict the responses of the system to the step and sinusoidal inputs in position and draft controls were developed using the simulation package "TUTSIM". The effects of control mode, hydraulic flow rate, deadband, and proportional constant on control performance of the system were investigated. The simulated results were compared with the experimental ones to verify the simulation models. The simulation models appeared to be a useful means for the analysis and the design of the electronic-hydraulic hitch control system.

1. 緒 論

농업용 트랙터의 3점 히치에 장착된 작업기의 제어(플라우의 경심 제어 등)를 위한 電子油壓式 히치 제어 시스템은 위치나 견인력을 센서로 감지하여 전기적 신호로 변환시킨 후 이를 전자식의 비교기나 마이크로컴퓨터 등으로 처리하여 전기유압식의 방향제어밸브를 작동시켜 히치를 승강시키는 시스템으로서 마찰, 관성, 히스테리시스 등으로 인하여 제어의 정확성이 떨어지는 기계유압식 제어 시스템의 결점을 보완한 것이다. 특히 마이크로컴퓨터를 이용한 電子油壓式 제어 시스템을 채용할 경우 제어의 정확성뿐만 아니라, 신호 처리의 용이성,

다양한 작업 조건에 대한 적용성, 여러 작업 상태의 동시 표시에 의한 운전자의 조작성 등에서 큰 성능 향상을 기할 수 있다.

최근 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 제어 시스템의 분석 및 설계가 많이 이루어지고 있다. 트랙터의 電子油壓式 히치 제어 시스템에 있어서도 요구되는 응답성과 안정성을 갖도록 설계하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션의 이용이 바람직할 것이다.

따라서 이 연구에서는 농업용 트랙터의 電子油壓式히치 제어 시스템의 성능 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 만들고, 이를 이용하여 제어 시스템이 적절한 성능을 갖추도록 하기 위한 설계 자료를 제시하고자 하였으며 그 구체적인 목적은 다음

* 서울대학교 農科大學 農工學科

** 全南대학교 農科大學 農工學科

과 같다.

1) 電子油壓式 3점 히치 제어 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고 그 유효성을 검증한다.

2) 유압 회로의 유량, 불감대(deadband), 샘플링 주기, 제어기의 선택에 따른 제어 시스템의 응답성을 조사 분석하여 제어 시스템의 설계 자료를 제시한다.

2. 材料 및 方法

가. 트랙터 히치 제어 시스템 실험 장치의 구성

그림 1은 유압식 제어 시스템의 성능분석을 위한 시뮬레이션 모델에 사용된 전자유압식 히치 제어 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

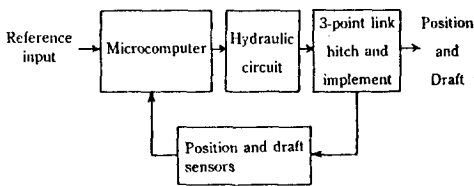


Fig. 1. Block diagram for the electronic-hydraulic hitch control system

설정 입력부는 위치, 견인력, 불감대 및 비례상수를 설정하기 위한 것으로 위치신호 및 견인력 신호와 함께 마이크로 컴퓨터로 구성된 전자제어부에 연결된다. 전자제어부에는 유압 회로의 전자조작 방향제어밸브와 이에 DC 24V의 전원을 공급해주는 전원공급기와 연결되어 있어 시스템이 작동되도록 되어 있다. 전자조작방향제어밸브는 3위치 4포트, 스프링 작동 텐덤 센터형인데, 이는 on-off 방식의 밸브로서 유량을 밸브 스펙의 위치에 따라 조절할 수 없는 형식의 밸브이다.

전자제어부는 작업기의 위치 제어와 견인력 제어시 설정 입력과 센서로부터의 피드백 신호와의 오차를 불감대와 비교하여 입력차가 불감대에 포함되면 전자조작 방향제어밸브를 중립상태에 그대로 두며, 불감대를 벗어나면 전자조작방향제어 밸브에 상승 및 하강 신호를 내보내 작업기를 상승 또는 하강시킨다. 오차가 불감대를 벗어날 때 상승 및 하

강신호를 내보내는 방법에는 단순히 상승 또는 하강신호를 내보내는 On-off 제어 압식과 입력차에 비례하여 상승 및 하강 신호의 펄스폭 즉, 전자조작 방향제어밸브의 작동 시간을 조절하여 출력하는 PWM 제어 방식 등 두가지를 사용하였다.

나. 시뮬레이션 프로그램 패키지 "TUTSIM"

전자유압식 히치 제어 시스템의 분석을 위해 사용된 패키지 "TUTSIM"은 선형 또는 비선형, 불연속시스템 등에 편리하게 이용할 수 있는 시뮬레이션 프로그램이다. "TUTSIM"의 이용은 선형 또는 비선형 시스템 모델들을 블록선도 또는 bond graph의 형태로 모델화함으로써 가능하다.

다. 시뮬레이션 방법

1) 위치 제어

위치 제어를 위한 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 계단입력과 정현파입력을 가했을 때 이에 대한 응답을 기보고된 유수남 등¹⁾의 실제 실험 결과와 비교하였다.

계단입력은 작업기의 상승시 설정입력을 3V (룩샤프트의 각변위로 53.8°)로 가하였다. 유압 회로의 유량 수준은 실제 실험에서와 같이 5, 10, 15ℓ/min (이때 작업기의 승강속도는 각각 10.1, 20.2, 30.3 cm/s)로 변화시켜 응답을 구하였다. On-off제어 방식에서는 불감대의 크기를 변화시켜 작업기의 헌팅이 일어나지 않는 최소의 설정 불감대를 구하였고 PWM 제어어세는 비례 상수를 변화시켜 작업기의 헌팅 현상이 없는 적정 비례 상수의 크기를 구하였다.

정현파 입력은 $2 + \sin 2\pi ft$ V(룩샤프트의 각도로 $29.2 + 14.6 \sin 2\pi ft^\circ$)로 변화시켜 진폭이 2V가 되도록 가하였는데 On-off 및 PWM의 두 가지 제어 방식, 유압 회로의 유량 수준, 정현파의 입력 주파수에 따른 제어 시스템의 응답을 구하고, 진폭의 변화와 임출력간의 위상차가 나타나는 경향을 분석함으로써 제어 시스템의 변동입력에 대한 추종성을 파악토록 하였다.

또한 On-off 제어방식에서 헌팅이 일어나지 않는 최소의 설정 불감대를 구하여 유량의 변화에 따른

설정 불감대의 변화를 조사하였으며, PWM 제어 방식에서는 유량의 변화에 따른 적정 비례 상수 값의 변화를 조사하였다.

2) 견인력 제어

견인력 제어의 응답특성 분석도 계단입력과 정현파입력을 설정입력부에 기하여 이에 대한 응답을 조사하였다. 계단입력은 작업기의 하강시 견인력 센서의 출력이 0V에서 2V로 변화하도록 입력을 가하였다. 정현파 입력은 $1.5 + 0.5 \sin 2\pi ft$ V로 변화시켜 진폭이 1V(견인력 센서에서의 힘의 진폭은 268 kgf)가 되도록 가하였다. 실험은 On-off 제어 방식과 PWM 제어 방식 각각에 대하여 유압 회로의 유량을 변화시키면서 견인력 제어 시스템의 응답을 조사하였다.

견인력 제어에서도 위치 제어와 마찬가지로 실제 실험보다 유량 수준을 높여서 유량의 변화에 따른 설정 불감대의 크기 변화를 구하였다.

3. 제어시스템의 수학적 모형화

본 연구에서 사용한 전자유압식 히치 시스템의 위치 제어 및 견인력 제어 특성과 이에 영향을 미

치는 주요 요인들을 파악하고자 시스템 각 구성부의 수학적 모델을 구하고 이 수학적 모델로부터 전체 시스템의 블록선도를 완성한 뒤, 이것을 이용하여 제어 시스템의 응답에 영향을 미치는 요인을 파악하고, 주요 요인들의 변화에 따른 응답을 디지털 컴퓨터를 통하여 이론적으로 추정하였다.

가. 제어 시스템의 블록선도

그림 2는 시스템의 지연시간을 고려하고 유압 회로에서 압축유량과 누출유량을 무시했을 때의 제어 시스템으로 On-off 제어 방식에 의해 위치 제어를 수행하는 경우의 시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

위치 제어의 경우 제어 시스템의 특성은 샘플링 주기, 유압 회로의 유량, 불감대의 크기, 시스템의 지연시간, 유압 피스톤, 작업기 및 3점 히치 링케이지의 치수, 위치센서의 이득 등에 의해 결정되고 PWM 제어의 경우 이들 요인중 불감대를 제외한 요인들과 비례상수 K_p 에 의해 결정된다.

견인력 제어에서는 위치센서의 이득이 제외된 위치 제어의 요인에 견인력센서의 이득을 첨가한 요인들이 영향을 미치게 된다.

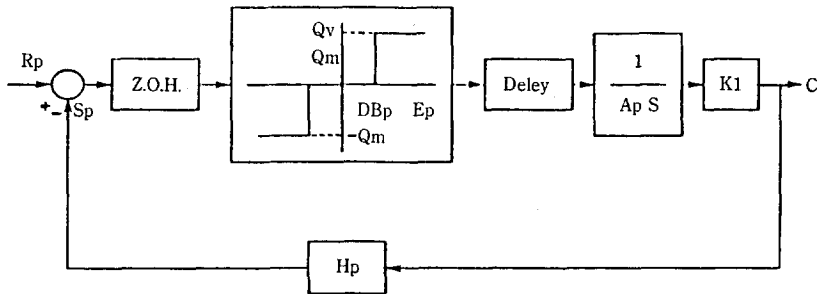


Fig. 2. Block diagram of the position control system operated on on-off control mode

나. 제어 시스템의 "TUTSIM" 블록선도

그림 3에는 On-off 방식의 위치 제어 시스템의 분석을 위한 "TUTSIM" 블록선도를 일례로서 나타내었다.

On-off방식의 위치 제어 설정입력으로는 계단과 입력일 때 PLS(pulse) 블록, 정현파입력일 때 TIM

(time), GAI(gain), SIN(sine) 블록을 사용하였다. PLS 블록은 펄스나 계단과 입력원으로서 DC 0-5V의 설정입력을 낼 수 있도록 하였다. 오차검출기로는 SUM(summation) 블록을 사용하였는데 여기에서는 0-5V의 전압범위로 들어오는 PLS 블록의 입력과 위치센서 신호를 0-5V의 전압으로 변환한 부계환의 GAI(multiply inputs by parameter) 블록

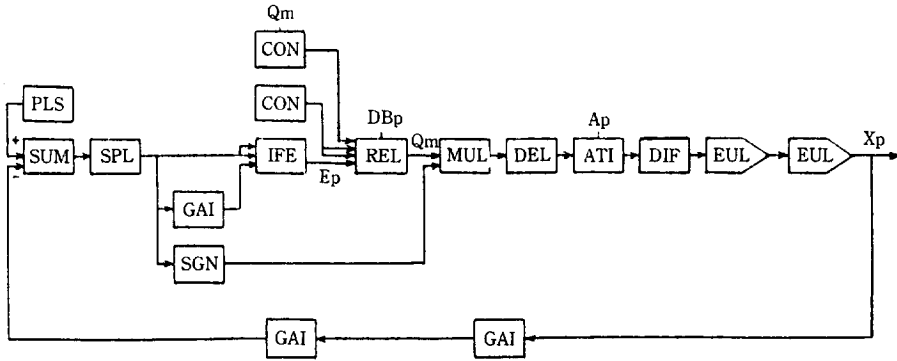


Fig. 3. Block diagram of the position control system operated on on-off control mode with step input using TUTSIM function blocks

에서 나온 값과 비교하여 그 차이 만큼의 오차신호를 발생한다. SUM블록에서 나온 신호는 sample-and-hold의 역할을 하는 SPL블록으로 들어가서 T1 초 간격으로 샘플링된 뒤 작동유량을 내기 위하여 다음 블록으로 들어간다. 릴레이와 같은 조건블록인 REL 블록은 IFE(If condition then input 1 else input 2) 블록에서 들어온 작동신호 Ep를 REL 블록에 설정된 불감대의 크기와 비교하여 불감대 보다 크면 유량 Qm을, 작으면 0을 내보낸다. 이 작동유량 Qm은 DEL(delay N time units) 블록에서 시스템의 지연시간만큼 지연된 뒤 ATT(divide inputs by parameter)에서 피스톤의 단면적 Ap로 나누어져 피스톤의 속도 Xp가 된다. 이 Xp값은 EUL(Euler integrator)에서 적분되어 작업기의 위치신호 Xp가 된다. 다시 이 신호는 GAI 블록에서 상수 K1을 곱해 룩사프트의 각도로 변환하고, 여기에 GAI 블록에서 위치센서의 이득 Hp와 곱해져 위치센서의 신호가 전압으로 변환된다.

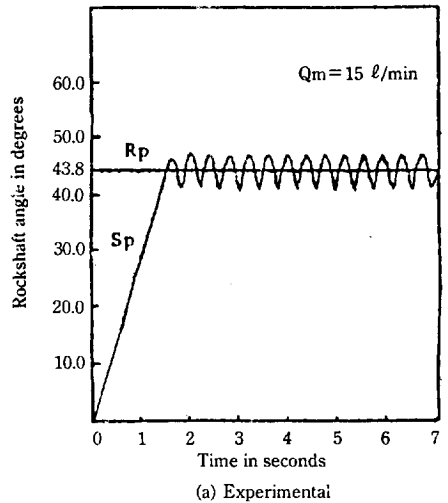
4. 結果 및 考察

가. 위치 제어

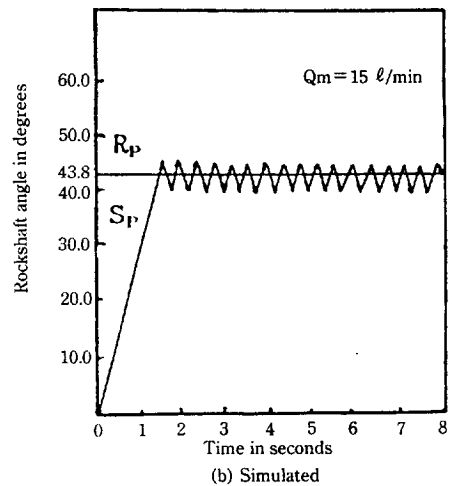
1) 계단입력에 대한 시스템의 응답

가) On-off제어 방식에 의한 응답

그림 4는 On-off제어 방식으로 시스템을 작동시켰을 때 불감대를 설정치 않고 작업기를 상승시킬 경우의 실제 실험과 시뮬레이션의 응답예를 나타낸



(a) Experimental



(b) Simulated

Fig. 4. Step responses of the position control system operated on on-off control mode with no deadband (Rp=Reference position, Sp=Position sensor output, Qm=Flow rate)

것이다. 실제 실험과 시뮬레이션 모두 작업기가 설정위치에 이르렀을 때 불감대가 없는 관계로 계속 진동하는 현상이 일어났는데, 유압 회로의 유량이 각각 5, 10, 15ℓ/min일 때 록사프트의 각변위로 설정위치에 대하여 실제 실험 결과는 $-1.83^{\circ} \sim +1.43^{\circ}$, $-2.56^{\circ} \sim +1.83^{\circ}$, $-3.29^{\circ} \sim +2.56^{\circ}$ 의 범위에서 진동하나 시뮬레이션 결과는 $\pm 1.12^{\circ}$, $\pm 1.86^{\circ}$, $\pm 2.79^{\circ}$ 로 실제 실험 결과보다 진동의 진폭이 조금씩 작았다. 실제 실험에서는 진동시 설정위치의 아래쪽으로 작업기가 더 많이 내려가는데 이는 실험장치에 쓰인 작업기의 자중에 의한 영향 때문이다.

On-off제어 방식으로 시스템을 작동시켰을 경우에는 유압 회로의 유량이 각각 5, 10, 15ℓ/min일 때 실제 실험에서는 불감대를 록사프트의 각변위로 설정위치에 대하여 각각 $\pm 0.37^{\circ}$, $\pm 0.73^{\circ}$, $\pm 1.46^{\circ}$ 시뮬레이션에서는 불감대를 $\pm 0.52^{\circ}$, $\pm 1.0^{\circ}$, $\pm 1.58^{\circ}$ 로 설정하였을 때 진동없는 제어가 이루어졌다. Dwyer 등⁽⁶⁾은 작업기의 승강속도가 빨라 지연시간 동안 작업기가 설정한 불감대를 통과함으로써 시스템이 지속적으로 진동하는 것을 불안정하다고 정의하고 불감대가 시간지연과 상승 속도의 곱보다 작으면 시스템이 불안정해진다고 하였다. 유량이 5, 10, 15 ℓ/min일 때 록사프트의 각속도가 각각 0.18, 0.36, 0.54 rad/sec인 것을 감안한, 그들이 제시한 헌팅을

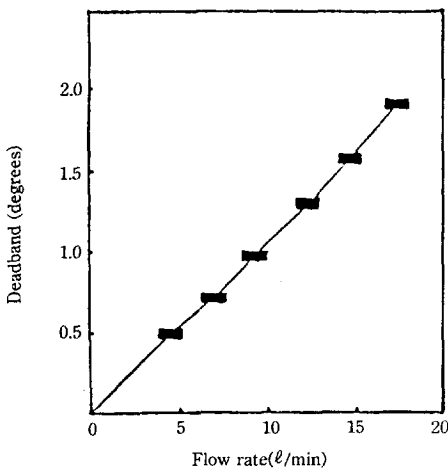


Fig. 5. Relationship between critical deadband and flow rate of the position control system operated on on-off control mode with step input

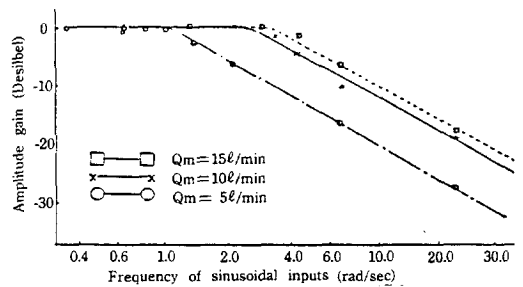
일으키지 않는 최소 불감대는 $\pm 0.69^{\circ}$, $\pm 1.37^{\circ}$, $\pm 2.06^{\circ}$ 로 시뮬레이션 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션 모델을 이용하여 실험 범위내의 다른 유량들에 대해서도 설정위치에서 진동이 일어나지 않는 설정 불감대를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 시뮬레이션을 수행하여 얻은 각 유량에 따른 설정 불감대를 예로서 표시한 것이다.

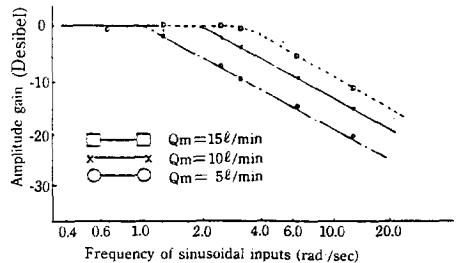
가) On-off제어 방식에 의한 응답

PWM제어 방식에 의하여 시스템을 작동시켰을 때 Kp값이 너무 작게 설정되면 설정위치에 도달하는 시간이 길어지고 Kp값이 너무 크면 설정위치에서 진동하는 것으로 나타났다. 시스템의 원만한 제어를 위해서는 적절한 Kp값을 설정해 주어야 하는데 이 적정 Kp값은 유량수준에 따라 변하게 된다. 실제 실험에서는 유량이 각각 5, 10, 15ℓ/min일 때, Kp값이 각각 1.6, 0.8, 0.6인 경우 설정위치에서 반복적인 진동을 하였는데 시스템의 안정성을 고려하여 이 값보다 작게 Kp를 설정할 때 필요가 있다.

시뮬레이션의 수행으로 구한 Kp의 값은 유량이



(a) Experimental



(b) Simulated

Fig. 6. Frequency responses of the position control system operated on on-off control mode with three different flow rate (gain plot)

각각 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5ℓ/min일 때 각각 1.6, 1.1, 1.8, 0.65, 0.55, 0.45였다.

2) 정현파입력에 대한 시스템의 응답

가) On-off제어 방식에 의한 응답

그림 6은 유압 회로의 유량 수준과 설정위치 입력력의 주파수에 따른 시스템의 대수이득곡선을 한 예로서 나타낸 것이다. 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 대체로 일치했으며 저역통과 필터의 특성을 나타내었다. 또한 이득의 감소가 시작되는 차단주파수는 유량이 증가할 수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

나) PWM제어 방식에 의한 응답

PWM 제어에서는 On-off 제어시와 마찬가지로 유량이 증가할수록 이득이 감소되는 주파수나 위상차가 커지는 주파수는 증가하여 제어시스템의 응답성이 좋아지는 것을 볼 수 있었다.

나. 견인력 제어

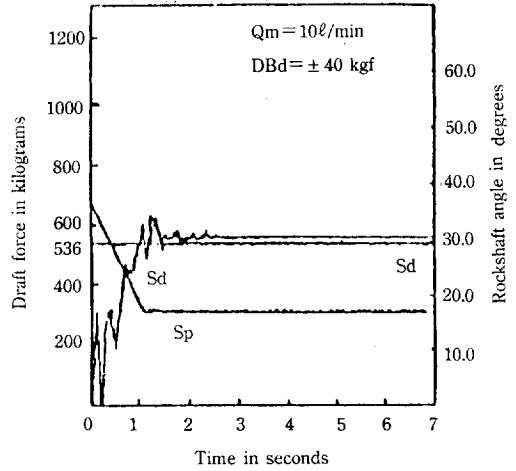
1) 계단입력에 대한 시스템의 응답

가) On-off제어 방식에 의한 응답

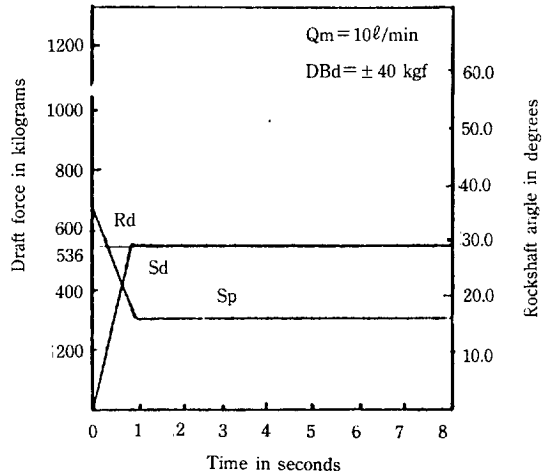
그림 7은 유압 회로의 유량 수준에 따라 ± 40 kgf의 불감대를 두어 설정 견인력 부근에서 작업기의 지속적인 현탕이 일어나지 않도록 하였을 때의 실제 실험과 시뮬레이션의 응답을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과에서는 운동이 시작되거나 멈출 때 견인력센서의 출력이 안정함을 알 수 있다.

이는 실제 실험에서는 견인력센서에 견인저항뿐만 아니라 작업기에 작용하는 수직력, 그리고 작업기의 운동시 유압밸브의 급격한 기폐로 인한 작업기의 급격한 승강으로 인하여 충격력이 가해지기 때문이다.

Dwyer 등⁽⁶⁾은 견인력 제어 시스템에 관한 연구에서 견인력 제어시 불감대가 시간지연과 상승속도 그리고 경사에 따른 견인력의 변화율들의 곱보다 작으면 시스템이 불안정하다고 하였는데, 유압 유량이 5, 10, 15ℓ/min일때 작업기의 승강속도는 10.1, 20.2, 30.3cm/s로서 설정 불감대는 각각 $\pm 19.3 \pm 23.4 \pm 58.0$ kgf로 계산된다.



(a) Experimental



(b) Simulated

Fig. 7. Step responses of the draft control system operated on on-off control mode with dead-band of ± 40 kgf (Rd=Reference draft, Sd = Drft sensor output, Sp=Position sensor output, Qm=Flow rate)

실제 실험에서는 각 유량수준에 대하여 불감대를 $\pm 27, \pm 40, \pm 54$ kgf로 설정함으로써 진동없는 제어가 가능하였다. 유량 수준이 각각 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5ℓ/min일 때 시뮬레이션 수행으로 구한 진동없는 제어에 필요한 설정 불감대는 각각 12, 18, 24, 30,

36, 42 kgf이었다.

나) PWM제어 방식에 의한 응답

PWM제어 방식을 이용한 견인력 제어도 위치 제어에서와 마찬가지로 Kd의 값이 너무 크게 설정되면 현탕현상이 일어나는데 각 유량에 따라서 현탕현상이 일어나기 시작하는 Kd의 값을 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 그 값은 유량수준이 각각 5, 7, 5, 10, 12.5, 15, 17.5ℓ/min일 때 각각 0.6, 0.5, 0.3, 0.23, 0.2, 0.15이었다.

2) 정현파 입력에 대한 제어시스템의 응답

가) On-off제어 방식에 의한 응답

설정견인력의 주파수에 따른 제어 시스템의 대수이득곡선으로부터 실제 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 위치제어와 마찬가지로 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

가) PWM 제어 방식에 의한 응답

설정견인력의 주파수에 따른 제어시스템의 대수이득곡선으로부터 시뮬레이션 결과는 실제 실험 결과와 다르게 나타났다. 즉 대수이득곡선으로부터 시뮬레이션 결과에서 낮은 주파수에서는 유량간에 이득의 차이가 없었는데 반하여 실제 실험 결과에서는 차이가 있었다. 그리고 시뮬레이션 결과에서는 유량이 클수록 주파수 응답성이 좋은 반면 실제 실험 결과에서는 유량이 작을수록 주파수 응답성이 좋게 나타났다. 이것은 실제 실험에서는 PWM방식으로 견인력 제어를 할 때 오차신호에 비례하여 유량을 변화시키기 위하여 밸브를 자주 여닫는 관계로 충격력이 견인력센서에 전해지는데 이 충격력은 유량이 커질수록 크게 나타났기 때문이라 판단된다.

5. 要約 및 結論

본 연구는 농업용 트랙터의 전자유압식 히치 제어 시스템의 성능예측을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 만들고, 이를 실제 실험 결과와 비교하여 그 유효성을 검증하고, 이를 이용하여 제어 시스템이 적정한 성능 갖추도록 하기위한 설계 자료를 제시

하려는 목적으로 수행되었다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 히치 제어 시스템의 이론적 분석을 통하여 작업기의 동적 거동과 제어시스템의 응답을 분석할 수 있도록 시스템 각 구성부의 수학적 모델로부터 위치 제어 및 견인력 제어시의 시스템의 블록선도를 구하였다.

2) 제어 시스템의 수학적 모형화에 의해 만든 시스템의 블록선도를 컴퓨터 시뮬레이션 패키지 "TUTSIM"을 사용하기 위한 블록선도로 변환하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

3) 시뮬레이션 결과 위치 제어시 On-off제어 방식과 PWM 제어 방식 모두 실제 실험 결과와 같은 경향을 갖는 응답특성을 나타내었다. 견인력 제어시에는 On-off제어의 경우 위치 제어와 마찬가지로 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 일치하였다. 그러나 PWM 제어의 경우 정현파입력시 실제 실험에서 밸브가 자주 여닫히는 관계로 견인력센서에 계속적인 충격력이 가해지기 때문에 시뮬레이션 결과와 다른 경향을 나타내었다.

4) 시뮬레이션 모델을 이용하여 위치 제어와 견인력 제어시 On-off제어 방식으로 제어를 할 때 진동없는 제어를 위한 유량에 따른 불감대의 크기를 구하였고, PWM 제어 방식에서는 설정위치에서 진동이 일어나는 비례 상수값을 구해 제어 시스템이 안정하게 제어될 수 있는 비례 상수값의 한계를 제시하였다.

參 考 文 獻

1. 유수남, 류관희 박준걸, 1989. 트랙터의 전자유압식 히치 제어시스템에 관한 연구(I) - 위치 제어-. 한국농업기계학회지 14(3) : 160-180.
2. 유수남, 류관희, 윤여두, 1989. 트랙터의 전자유압식 히치 제어 시스템에 관한 연구(II) - 견인력 제어-. 한국농업기계학회지 14(4) : 229-241.
3. 김기영, 1990. 시뮬레이션에 의한 트랙터 3점 히치 제어 장치의 설계. 서울대학교 석사학위논문.
4. Alderson, L.L., 1984. Electronic hitch control.

- ASAE publication 8-84 : 60-66.
5. Ayers, P.D. and K. Venugopal Varma. 1987. Personal computer aided design (PCAD) of electro-hydraulic control systems. Trans. of the ASAE 3(2) : 241-246.
 6. Dell' Acqual. R., G. Dell'orto, R. Guagliumi, G. Amedi and A. Covolinal. 1986. Agricultural vehicle electronics-A new hitch control. SAE. paper No. 860479.
 7. Dobrinska, R. and R. Jarboe, 1981. The development and application of electro-hydraulic control system for 4wd tractors. SAE. paper No. 810941.
 8. Dwyer, M.J., D.A. Crolla and G. Pearson. 1974. An Investigation of the potential for improvement of tractor draught controls. J. Agric. Eng. Res. 19 : 147-165.
 9. Hesse, H. and W. Scharader. 1984. Hitch system comparison mechanical, hydraulic, electronic. SAE. paper no. 841130.
 10. Hobbs, J. and H. Hesse. 1980. Electronic/Hydraulic hitch control for agricultural tractors. SAE. paper No. 801018.
 11. Smith, D.W. and R.R. Yoerger. 1975. Simulation of tractor three point hitch draft control system. Trans. of the ASAE 18(3) : 404-408.
 12. Squire, R.E. 1984. Electronic draft control system. ASAE publication 8-84 : 67-75.