

트랙터의 전후진 자동 변속을 위한 전자식 액추에이터의 위치 제어 시스템 개발

최창현 우미나 이대현 김용주 정진희

Development of Electric Actuator Position Control System for Automatic Shuttle Shifting of Tractor

C. H. Choi M. N. Woo D. H. Lee Y. J. Kim J. H. Jeong

Abstract

The purpose of this study was to develop position control system of an electric actuator for automatic shuttle shifting of a tractor. The electric actuator was installed at the link of the forward-reverse gearshift of the tractor transmission, and controlled in the ranges of forward, neutral, and reverse positions. The position control system of the electric actuator was developed based on PID (Proportional Integral Derivative) controller and transfer function of the electric actuator. The coefficients of the PID controller were determined by Ziegler-Nichols (Z-N) method and optimized using simulation program. The prototype AMT (Automated Manual Transmission) test unit of the tractor was installed and used to evaluate the performance of the position control. The evaluation system for the control performance consisted of forward-reverse actuator, motor driver, and controller.

The tests were conducted as the controlled positions of the actuator were changed from neutral position to forward, neutral, and reverse positions in sequence. The sequential tests were repeated 20 times. The operations of changing the gearshift were considered as the step response of the control system. Maximum overshoot, settling time, and steady-state error were analyzed. The results showed that performance of the position control system was reasonable and qualified. The maximum overshoots, the steady-state errors, and the settling times of the position control system were 10~20%, 1~5%, and 0.92~1.49 sec, respectively. The modifications of the electric actuator will be required to enhance the performance of position control during field operation.

Keywords : Automated manual transmission, PID, Electric actuator, Position control

1. 서론

트랙터는 로터리, 쟁기 작업 등에 따라 적합한 변속수준의 선택이 필요한 동시에 작업 중 토양부하에 따라 변속작업이 빈번히 발생되므로 변속작업의 편의성 확보는 무엇보다 중요한 요소이다(Kim et al., 2010). 현재 트랙터에 사용되고 있는

파워셔틀(power shuttle)과 무단변속기(Continuously Variable Transmission, CVT)는 자동으로 변속 작업이 가능한 장점이 있으나, 모두 유압장치를 사용하므로 효율이 낮고 가격이 비싸 이를 대체할 수 있는 변속기 개발이 필요한 실정이다 (Song and Lee, 2007).

자동화수동변속기(Automated Manual Transmission, AMT)

This Study was supported by Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry for Agriculture, Forestry and Fisheries, Republic of Korea. The article was submitted for publication on 2010-06-30, reviewed on 2010-07-19, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-08-13. The authors are Chang Hyun Choi, Professor, KSAM member, Mi Na Woo, Researcher, Dae Hyun Lee, Researcher, Faculty of Life Science and Technology, SungKyunKwan University, Suwon, Gyeonggi, Korea, Yong Joo Kim, Senior Research Engineer, KSAM member, and Jin Hee Jeong, Director, LS Mtron LTD., Anyang, Gyeonggi, Korea. Corresponding author: Y. J. Kim, Senior Research Engineer, LS Mtron LTD., Anyang, Gyeonggi, 431-080 Korea; Fax: +82-31-290-7830; E-mail: <babina@lsmtron.com>.

는 클러치를 통하여 동력을 전달하는 수동변속기에 별도의 액추에이터를 장착하여 자동 변속하는 시스템으로 기계식 변속기의 고효율성과 자동변속기의 편의성을 동시에 확보할 수 있다는 장점이 있다. 자동화수동변속기는 벤츠, 볼보, 도요타 등의 선진 자동차 업체를 중심으로 이미 개발되어(Han et al., 2005) 변속감보다 연비를 중요시하는 상용차에서는 적용되고 있으나, 아직까지 트랙터에 적용된 사례는 보고된 적이 없다.

자동화수동변속기의 개발을 위해서는 트랙터에 적합한 액추에이터의 개발 및 제어가 필요하며, 특히 트랙터의 경우에는 전후진, 주변속, 부변속의 변속기를 가지고 있으나, 전후진 변속이 가장 빈번히 이루어지므로 전후진 액추에이터의 개발이 가장 먼저 선행되어야 한다. 그러므로 본 연구는 트랙터의 전후진 자동화수동변속기 개발을 위한 기초 연구로서 트랙터 전후진 변속기에 적합한 액추에이터를 이용하여 PID 위치 제어 시스템을 개발하고 성능을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 방법

가. 전후진 액추에이터 설계

액추에이터는 일반적으로 전자식과 유압식이 있으나, 본 연구에서는 에너지 효율 및 제어 성능을 고려하여 동력전달 효율이 우수한 전자식 액추에이터를 사용하였다. 전자식 액추에이터는 전후진 조작레버의 조작력을 고려하여 설계하였으며 작동 위치에 따른 페루프(feedback) 제어가 가능하도록 별도의 포텐시오미터를 내부에 장착하였다. 포텐시오미터의 측정값은 그림 1과 같이 0~90° 범위에서 20° 간격으로 각각 전진, 중립, 후진의 범위를 갖도록 설정되었으며, 양쪽 끝에 15° 씩 안전범위를 두어 전후진 액추에이터가 지정된 범위를 벗어나 센서가 파손되는 것을 방지하였다. 전후진 액추에이터는 모터 전문 업체에 의뢰하여 제작하였으며, 자세한 사양은 표 1과 같다.

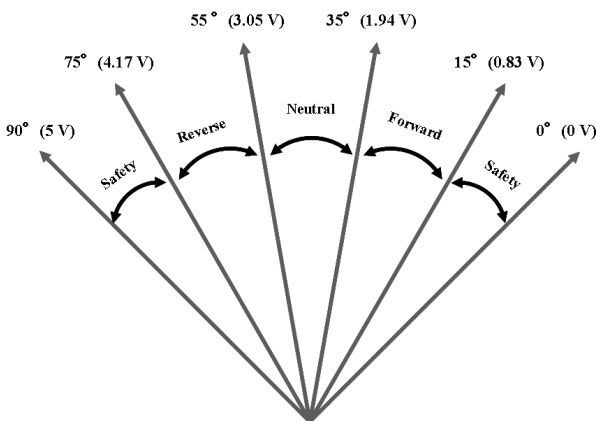


Fig. 1 Potentiometer value of shuttle shifting actuator for ranges of forward, neutral and reverse positions.

Table 1 Specifications of electric actuator for automatic shuttle shifting

Item	Specification	Item	Specification
Power	83 W	Armature resistance (Ra)	1.53 Ω
Voltage/current	9~15 V/4.5 A	Friction factor (B)	3.2×10 ⁻³ kgm ² /s
Torque	43.8 kgf.cm	Back emf constant (Ke)	2.16×10 ⁻¹ Vsec/rad
Speed	19 rpm	Time constant (τ)	29 msec
Torque constant (K)	2.2×10 ⁻² Nm/A	Rotor inertia (J)	1.8×10 ⁻⁴ kgm ²

나. PID 제어 시스템 개발

전후진 액추에이터의 제어 시스템은 전자식 액추에이터, PID(Proportional Integral Derivative) 제어기, 포텐시오미터의 전달함수를 이용하여 개발하였다. 전자식 액추에이터는 식 (1)과 같은 DC 모터의 전달함수를 사용하였으며(Jeon et al., 2007), PID 제어기는 식 (2)를 이용하였다. 포텐시오미터의 전달함수 H(s)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며(Ogata, 2001), 본 연구에서 사용한 포텐시오미터는 기준전압(E)이 5 V, 회전수(N)가 270°/360°로 전달함수가 1에 가까운 값을 가지므로 단위 페루프(feedback)로 가정하였다. 그러므로 전후진 액추에이터 제어 시스템의 전달함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 전체 시스템은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

PID 계수는 전후진 액추에이터의 제어 시스템 성능에 가장 큰 영향을 미치므로(Hur and Yang, 2007) 본 연구에서는 Ziegler-Nichols(Z-N) 방법을 이용하여 PID 계수의 시뮬레이션을 위한 초기값을 선정하였으며, 이를 기준으로 PID 계수 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 전후진 액추에이터의 제어 시스템을 최적화하였다.

$$G(s) = \frac{K_m}{s(\tau s + 1)} \tag{1}$$

$$\tau = R_a J / (R_a B + K K_c)$$

$$K_m = K / (R_a B + K K_c)$$

$$G_{PID} = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} \tag{2}$$

$$H(s) = \frac{E}{2\pi N} \tag{3}$$

$$T(s) = \frac{K_m (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{\tau s^3 + (1 + K_m K_d) s^2 + K_m K_p s + K_m K_i} \tag{4}$$

where, K : Torque constant (Nm/A)

R_a : Armature resistance (Ω)

- B : Friction factor (kgm^2/s)
- K_e : Back emf constant ($Vsec/rad$)
- τ : Time constant (sec)
- J : Rotor inertia (kgm^2)
- E : Reference voltage (V)
- N : Number of turns

$$K_i = \frac{K_p}{2L}$$

$$K_d = K_p \times 0.5L \tag{5}$$

where, L : Delay time (s)
 τ : Time constant (s)

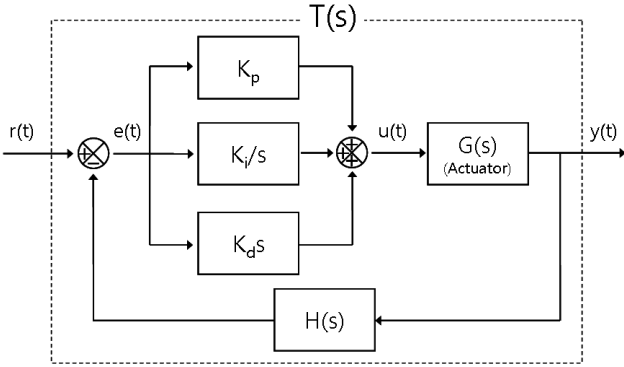


Fig. 2 Block diagram of electric actuator control system.

1) PID 초기 계수 선정

PID 초기 계수는 그림 3과 같이 개루프 시스템에 계단 응답을 통해 얻어진 지연시간(L)과 시정수(τ)로 PID 계수를 결정하는 Z-N 계단 응답법(open loop method)을 이용하였다. Z-N 계단 응답법은 식 (5)와 같이 비교적 간단한 모델을 사용하기 때문에 산업 현장에서 좋은 응답성능을 기대하기는 어려우나(Lee et al., 1998), 최적 제어 계수 선정을 위한 기준점 제공이 가능한 장점이 있다(Ogata, 2001). 전후진 액추에이터의 Z-N 계단 응답 평가는 전후진 액추에이터를 중립에서 전진, 중립에서 후진으로 이동하는 것을 계단 입력으로 가정하여 실험하였다.

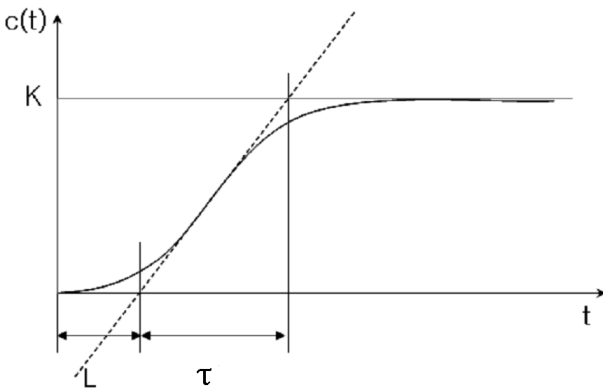


Fig. 3 Characteristic of step response for Z-N method.

$$K_p = 1.2 \frac{\tau}{L}$$

2) PID 계수 최적화

PID 계수의 최적화를 위한 시뮬레이션 프로그램은 그림 4와 같이 LabVIEW(version 2009, National Instrument, USA)를 이용하여 개발하였다. 최적화 시뮬레이션은 Z-N 방법에 의해 선정된 초기 계수를 전후진 액추에이터의 제어 시스템 전달함수를 기준으로 P 계수, I 계수, D 계수 순서로 최적화 시키며, 응답성능과 안정성 평가 결과를 동시에 만족시키는 경우를 최적 계수로 선정하도록 개발하였다.

응답성능은 최대 오버슈트(maximum overshoot), 정착시간(settling time), 정상상태 오차(steady-state error)를 평가하였으며, 3가지 항목을 모두 최소로 만족하는 경우를 최적계수로 선정하였다. 안정성 평가는 시스템의 절대적인 안정성이 아닌 상대안정도를 평가하는 방법인 나이퀴스트 선도(Nyquist plot)의 이득 여유(gain margin)와 위상 여유(phase margin)를 이용하였다. 이득 여유와 위상 여유는 시스템의 안정도를 나타내는 지표로 각각의 수치가 클수록 시스템이 상대적으로 안정하다는 것을 의미하며, 음수인 경우에는 절대적으로 시스템이 불안정하다는 것을 의미한다.

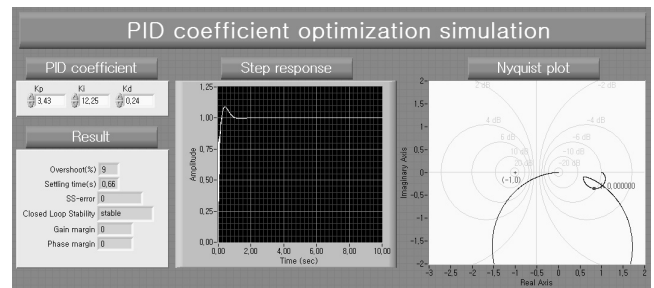
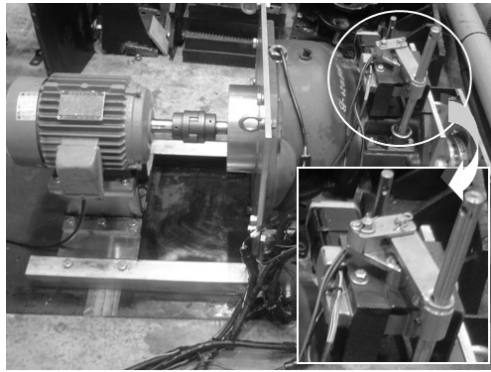


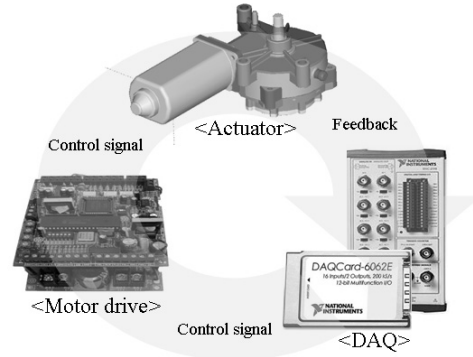
Fig. 4 Simulation program for PID gain optimization.

다. 전후진 액추에이터 제어 성능 실험

전후진 액추에이터 제어를 위한 실내 시험 장치는 그림 5와 같이 디젤엔진의 역할을 하는 AC 3상 모터(5 HP, Hyundai, Korea), 전후진 변속부와 클러치 변속부를 포함하는 클러치 하우징, 전후진 자동변속을 위한 전후진 액추에이터, 전후진 액추에이터의 제어를 위한 제어 시스템으로 구성하였다. 이때, 트랙터의 전후진 변속은 클러치를 해제하여 동력을 차단 시킨 후에 이루어지므로 본 연구에서는 3상 모터를 구동하지 않고 전후진 액추에이터의 위치 제어 성능만을 고려하였다. 전후진 액추에이터는 전후진 변속부가 동기물림변속기어

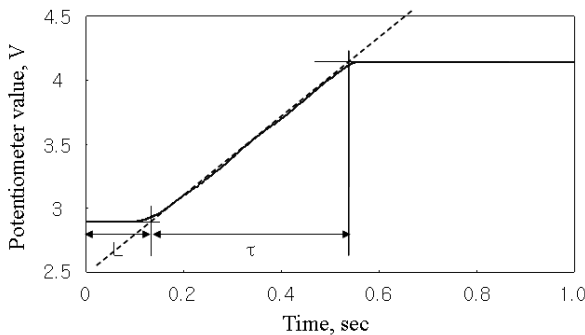


(a) Installation of electric actuator

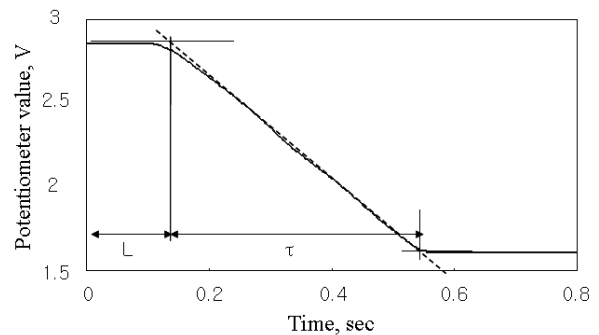


(b) Electric actuator control system

Fig. 5 Performance evaluation system for electric actuator.



(a) Neutral to reverse



(b) Neutral to forward

Fig. 6 Determination of initial PID gain using Z-N step response.

(synchromesh change gear)인 점을 고려하여 그림 5-(a)와 같이 전후진 액추에이터를 전후진 레버의 링크부에 연결하였으며, 액추에이터의 구동에 따라 전후진 레버를 회전시켜 변속이 가능하도록 하였다. 제어 시스템은 그림 5-(b)와 같이 전후진 액추에이터, 모터 드라이버, 데이터 입출력 장치로 구성하였다. 전후진 액추에이터 제어는 0~5 V의 입력 전압으로 0~12 V의 제어 출력이 가능하고 급감속 기능이 있어 양방향 제어가 용이한 모터 드라이버(KDD640UH, Kaesung Control LAB, Korea)를 사용하였으며, 액추에이터의 이동 변위는 자체적으로 내장된 포텐시오미터를 사용하여 측정하였다. 모터 드라이버의 전압 제어 및 포텐시오미터의 신호 측정은 -10~10 V의 아날로그 출력과 12비트 분해능의 아날로그 입력이 가능한 데이터 수집장치(6062E, National Instrument, USA)를 이용하였다. 전체 시스템의 제어는 LabVIEW를 이용하였으며, 제어 주기는 데이터 수집장치의 아날로그 입출력 속도를 고려하여 최대 속도인 0.02초로 설정하였다.

전후진 액추에이터의 제어 실험은 액추에이터를 중립 위치에서 전진, 중립, 후진, 중립의 순서로 제어하는 것을 1 cycle로 하여 총 20회 반복 실험하며 액추에이터의 제어 성능을 평가하였다. 제어 성능은 전진, 중립, 후진으로 이동 시 동작

을 계단 응답으로 가정하여 내장된 포텐시오미터를 통해 얻은 위치 신호의 최대 오버슈트, 정착시간, 정상상태 오차를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

1) PID 제어 시뮬레이션 결과

PID 초기 제어 계수 선정을 위해 전후진 액추에이터를 중립에서 전진, 중립에서 후진으로 이동하는 경우를 Z-N 계단 응답으로 가정하여 포텐시오미터의 응답특성을 그림 6과 같이 측정하였다. 전후진 액추에이터의 지연시간과 시정수는 중립에서 전진의 경우 각각 0.145초, 0.38초로 나타났으며, 중립에서 후진의 경우에는 각각 0.137초, 0.41초로 나타났다. 지연시간과 시정수는 중립에서 전진 혹은 후진으로 가는 경우가 유사한 범위를 보였으며, 본 연구에서는 평균값인 0.14초와 0.4초를 식 (5)에 대입하여 P 계수 3.43, I 계수 12.25, D 계수 0.24의 PID 초기 계수를 계산하였다.

Z-N 방법에 의해 선정된 전후진 액추에이터의 제어 시스템 전달함수를 기준으로 P 계수, I 계수, D 계수 순서로 최적화 시뮬레이션을 수행한 결과는 각각 그림 7, 그림 8, 그림 9

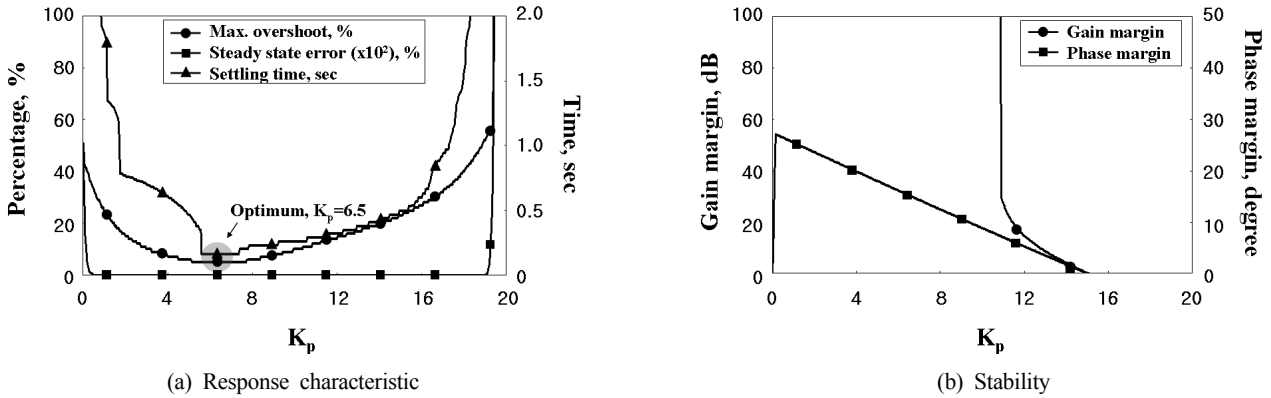


Fig. 7 Simulation result for proportional gain (K_p) optimization.

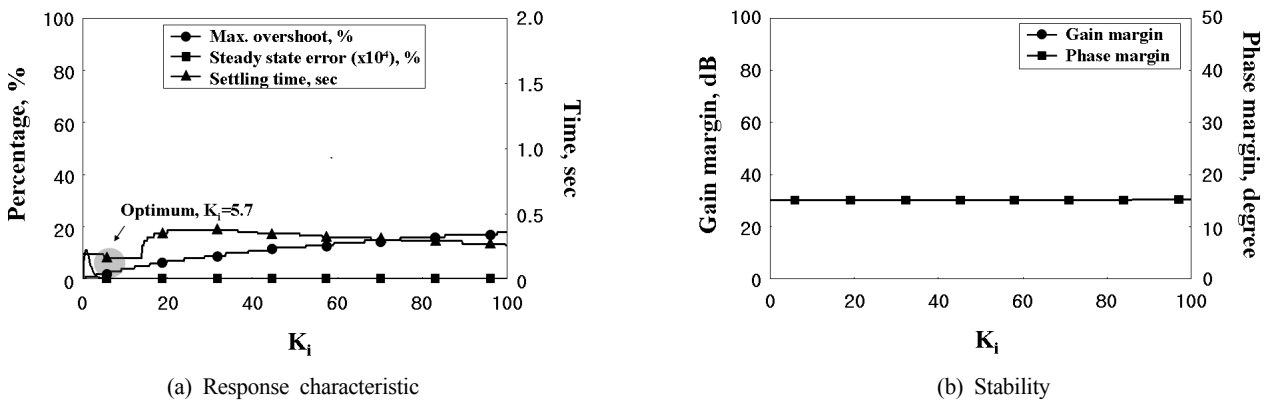


Fig. 8 Simulation result for integral gain (K_i) optimization.

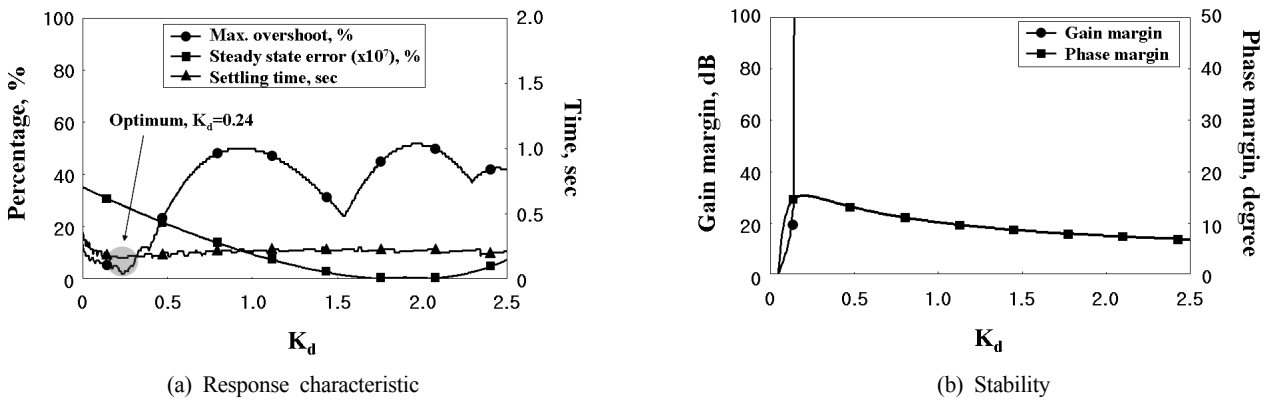


Fig. 9 Simulation result for derivative gain (K_d) optimization.

와 같이 나타났다.

비례 계수의 응답성능과 안정도의 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같이 나타났다. 응답성능은 그림 7-(a)와 같이 P 계수가 6.5인 경우가 최대 오버슈트, 정착시간, 정상상태 오차가 가장 낮게 나타나 가장 좋은 응답특성을 보이고 있으며, 특히 P 계수가 18 이상인 경우에는 응답성능이 크게 저하되어 전후진 액추에이터의 제어가 어려움을 알 수 있다. P 계수가 증가함에 따라 이득 여유는 그림 7-(b)와 같이 12에서 급격히 감소하였으며, 위상 여유는 선형적으로 감소하여 15를 넘는

경우의 시스템은 절대적으로 불안정한 상태를 나타내었다. 그러므로 P 계수 12 미만에서는 위상 여유와 이득 여유가 모두 안정하여 전후진 액추에이터의 최적 P 제어 계수로 6.5를 선정하였다.

P 계수 6.5를 기준으로 I 계수의 응답성능과 안정도를 시뮬레이션 한 결과는 그림 8과 같이 나타났다. 응답성능은 그림 8-(a)와 같이 I 계수가 20 이상인 경우에는 유사하게 나타났으며, I 계수가 5.7인 경우가 가장 우수한 응답특성을 보여주었다. 안정도는 그림 8-(b)와 같이 I 계수의 크기에 상관없

이 이득 여유와 위상 여유가 일정한 값을 가져 모든 범위에서 안정함 알 수 있으며 이 때, 위상 여유는 무한대의 값으로 그림에는 나타내지 않았다.

P 계수 6.5와 I 계수 5.7을 기준으로 D 계수의 응답성능과 안정도를 시뮬레이션 한 결과는 그림 9와 같이 나타났다. 응답성능은 그림 9-(a)와 같이 최대 오버슈트와 정착시간이 D 계수 0.24에서 가장 낮게 나타났으며, 정상상태 오차는 1.7에서 가장 작은 값을 보여 주었다. D 계수가 증가함에 따라 이득 여유는 그림 9-(b)와 같이 전체적으로 높은 값을 가져 안정하였으며, 위상 여유는 약 0.25에서부터 일정하게 감소하는 경향을 보여 주었다. 본 연구에서는 변속 시간이 트랙터 변속기 개발에 가장 중요한 요소인 점을 고려하여 최대 오버슈트와 정착시간이 최소이며, 안정도가 상대적으로 가장 우수한 0.24를 최적 D 계수로 선정하였다.

2) 전후진 액추에이터 제어 성능 평가 결과

전후진 액추에이터의 성능 평가를 위해 중립 위치에서 전진, 중립, 후진, 중립으로 이동하며, 응답성능을 평가한 대표적인 결과는 그림 10과 같이 나타났으며, 응답성능 결과는 표 2와 같다. 실험 결과, 포텐시ومي터의 위치 신호를 통해 모든 변속 범위내로 제어가 가능함을 알 수 있었으나, 시뮬레이션 결과와는 다르게 제어 오차가 증가하였다. 이는 변속 구간의 경계에서 전후진 액추에이터가 기어의 기계적인 동기화를 위해 구동력을 증가시켰기 때문에 변속 후 큰 회전 관성으로 인해 제어 오차가 발생한 것으로 판단된다.

중립에서 전진 위치로 제어한 결과 최대 오버슈트와 정상상태 오차는 각각 20%와 5%로 나타났으며, 전진에서 중립 위치로 제어한 결과 각각 14%와 1%의 응답 특성을 보여 주었다. 중립에서 전진 위치로의 정착시간은 0.92초로 나타났으나, 역방향의 정착시간은 1.49초로 다소 증가하였다. 중립에서 후진 위치로 제어한 결과의 최대 오버슈트와 정상상태 오차는 각각 10%와 4%로 나타났으며, 후진에서 중립 위치로 제어한 결과는 각각 18%와 4%의 응답 특성을 보여 주었다. 정착시간은 중립에서 후진으로 위치 제어한 경우 1.16초로 나타났으나, 후진에서 중립으로의 경우 전진에서 중립으로 위치 제어한 결과와 마찬가지로 다소 증가하여 1.32초로 나타났다. 이것은 중립으로 제어 시, 액추에이터의 회전이 기어의 물림이 없는 상태에서 이루어지므로 상대적으로 전진, 후진의 경우보다 기계적인 마찰이 적어 큰 회전 관성이 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

전후진 액추에이터 제어 성능은 전체적으로 제어 목표를 만족하였으나, 변속 시간에 영향을 미치는 정착시간이 약 1.5초로 다소 늦어 실차 적용을 위해서는 전후진 액추에이터의 출력 향상을 통한 변속 시간의 단축이 필요할 것으로 판단된다.

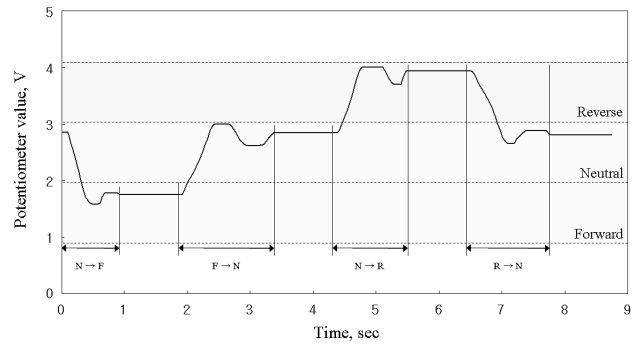


Fig. 10 Position control of electric actuator by optimal PID gain.

Table 2 Results of step response for position control of electric actuator

Control direction	Max. overshoot (%)	Settling time (sec)	Steady state error (%)
N → F	20	0.92	5
F → N	14	1.49	1
N → R	10	1.16	4
R → N	18	1.32	4

N : neutral, F : forward, R : reverse

4. 요약 및 결론

본 연구는 트랙터 자동화수동변속기 개발을 위한 기초 연구로서 전후진 변속기에 적합한 전자식 액추에이터를 이용하여 PID 위치 제어 시스템을 개발하고 전후진 변속 제어 성능을 평가하였으며 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 전후진 액추에이터의 제어 시스템은 PID 제어기와 전자식 액추에이터의 전달함수를 이용하여 개발하였다. PID 계수는 Z-N 방법으로 초기 계수를 선정하고 이를 기준으로 PID 계수 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 전후진 액추에이터의 제어 시스템을 최적화하였다. 제어 시스템의 성능 평가는 디젤 엔진의 역할을 하는 모터, 변속기의 클러치 하우징, 전후진 액추에이터와 제어 시스템으로 실내 시험 장치를 구성하여 수행하였다.
- (2) Z-N 방법으로 PID 계수의 초기값을 선정한 결과, P 계수 3.43, I 계수 12.25, D 계수 0.24로 나타났으며, 이를 기준으로 PID 제어 시뮬레이션을 수행한 결과, 최적 제어 계수는 응답성능과 안정성 평가 결과를 고려하여 P 계수 6.5, I 계수 5.7, D 계수 0.24로 선정되었다.
- (3) 전후진 액추에이터 제어 성능을 평가한 결과, 최대 오버슈트, 정착시간, 정상상태 오차는 중립에서 전진 위치로 제어한 경우에는 각각 20%, 0.92초, 5%이고 역

방향으로 제어한 경우에는 각각 14%, 1.49초, 1%로 나타났다. 중립에서 후진 위치로 제어한 경우에는 각각 10%, 1.16초, 4%였으며, 후진에서 중립 위치로 제어한 경우에는 각각 18%, 1.32초, 4%로 나타났다.

- (4) 전후진 액추에이터 제어 성능은 전체적으로 제어 목표를 만족하였으나, 변속 시간에 영향을 미치는 정착시간이 약 1.5초로 다소 늦게 나타났고 특히 중립으로 제어하는 경우에서 상대적으로 큰 회전 관성이 발생하여 다른 경우에 비해 제어가 느려 실차 적용을 위해서는 전후진 액추에이터의 출력 향상을 통한 변속 시간의 단축이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Han, K. W., W. S. Ryu, S. W. Lee, J. W. Jeon and S. H. Hwang. 2005. Control performance evaluation of the automatic clutch for AMT using embedded system. Proceedings of the KSAE 2005 autumn Conference, pp. 927-934. The Korean Society of Automotive Engineers, Seoul, Korea. (In Korean)
2. Hur, J. G. and K. U. Yang. 2007. Proposal of practical reference-model and its performance improvement for PID control. Proceedings of the KSPSE 2007 Spring Conference, 11(3):71-77. The Korean Society for Power System Engineering, Pusan, Korea. (In Korean)
3. Jeon, C. S., D. S. Kim and J. M. Lee. 2007. PID gain auto tuning of ETB by using RLS. Journal of Korea Robotics Society 2(1):1-8. (In Korean)
4. Kim, Y. J., S. H. Lee, C. H. Choi, S. H. Kim, J. W. Choi, J. H. Jeong, J. Y. Kim, D. H. Lee and C. H. Choi. 2010. Development of an electric actuator for tractor shuttle control. Proceedings of the KSAM 2010 Winter Conference, pp. 91-97. Korean Society for Agricultural Machinery, Suwon, Korea. (In Korean)
5. Lee, W. H., J. N. Choi, J. K. Kim and H. S. Hwang. 1998. Rule-based controller by modified zeigler-nichols tuning. Proceedings of the KIEE 1998 Summer Conference, pp. 775-777. The Korean Institute of Electrical Engineers. (In Korean)
6. Ogata. 2001. Modern Control Engineering. Perntice Hall, New Jersey, USA.
7. Song, C. S. and S. H. Lee. 2007. A study on the design parameter of a hydraulic shift actuator of an AMT. Journal of the Korean Society for Precision Engineering 24(10):75-82. (In Korean)