

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.4.019>

구동장치의 정밀한 위치제어를 위한 구동제어기법에 대한 해석적 연구

안원근^{a,*}

An Analytical Study on Control Algorithm for the Precise Position Control of the Actuator System

Wongun Ahn^{a,*}

^aActuator Systems Department, Hanwha Corporation R&D Institute, Korea

*Corresponding author. E-mail: horse37@hanwha.com

ABSTRACT

Using a actuator to which the motor and the gear is applied to the I-PD control method and a dual-loop system to carry out precise position control. I-PD control algorithm performs an operation to reduce the overshoot in the transient response. Accordingly, the actuator obtains a precise position tracking result. Also it utilizes two sensors and dual loops. It reduces the adverse effect on the precise position control that may occur by the end play of the gear train. In this paper, we uses the actuator model applying the BLDC motor and gear in order to determine the position tracking result by the dynamic characteristic change. It was verified by the simulation results.

초 록

모터와 기어를 적용한 구동장치를 이용하여 정밀한 위치제어를 수행하기 위하여 I-PD 제어기법과 이중루프를 시스템에 적용한다. I-PD 제어기법은 과도응답 시 오버슈트를 줄이는 동작을 수행함으로써 정밀한 위치 추종 결과를 얻는다. 또한 두 개의 센서와 이중루프를 이용하여 기어 시스템의 end play 성분 에 의해 발생할 수 있는 위치추종에 대한 악영향을 저감하여 구동장치가 정밀한 위치추종을 할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 이러한 개념을 설명하고, 동특성 변화에 의한 위치추종 결과를 확인하기 위하여 BLDC 모터와 기어를 적용한 구동장치 모델을 이용하여 시뮬레이션 결과로 검증하였다.

Key Words: I-PD Control(적분-비례미분 제어), Dual Loop(이중 루프), BLDC Motor(브러쉬리스 직류 모터), Gear(기어), Actuator(구동장치)

Received 8 December 2015 / Revised 5 July 2016 / Accepted 11 July 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

CO : controller output

e : error
 Kp : proportional gain constant
 Ki : integral gain constant
 Kd : derivative gain constant
 PV : process variable
 r : reference signal

1. 서 론

Brushless DC electric (BLDC) 모터와 기어를 이용한 구동장치는 산업 전반에서 다양하게 사용되고 있다. 일반적으로 구동장치를 적용 시 구동장치 말단에서 감속이 필요하며, 보다 큰 토크를 사용하기 위하여 감속기로 기어를 사용한다. 이러한 기어는 백래쉬 성분을 포함하고 있다. 이러한 백래쉬의 총 합은 end play로 표현되며, 구동장치 말단에서의 위치제어 성능을 저하시키며 간혹 미세진동을 유발하는 원인이 되기도 한다 [1].

정밀한 위치제어가 필요한 어플리케이션에서 이러한 end play 성분은 시스템 안정성을 낮추고 구동제어 성능을 저하시킨다. 또한 구동제어 출력에 의한 오버슈트는 정밀한 위치제어를 필요하는 어플리케이션에서 지양되어야 하는 성분으로, 이러한 오버슈트를 최소화하여야 구동장치의 정밀한 위치제어가 가능하다. 추진체의 자세제어를 위한 구동장치를 개발하고 이를 제어하고자 할 때, 주로 PID 제어기법을 사용한다. 이러한 방법은 위에서 언급한 단점들을 지니고 있다. 본 논문에서는 변형된 PID 제어기법을 제시하여 위에 설명된 문제점에 의한 구동제어 악영향을 최소화 하고자한다.

이 논문에서는 기어 백래쉬에 의해 발생하는 end play(clearance between the motor shaft and the actuator output) 성분과 오버슈트 발생에 의한 위치제어 정밀도를 저하시키는 문제점을 보완하기 위하여, I-PD 제어기법과 두 개의 센서를 이용한 이중루프를 적용하여 구동제어기법을 제시하였다. 일반적인 I-PD 제어기법과 다르게 두 개의 센서를 독립적으로 구성한 I-PD 제어기

법을 사용하여 이중루프를 적용하였다. 본 논문에서 제시된 방법으로 end play 성분에 의한 영향성을 줄여 시스템의 구동제어 성능저하를 방지하는 것과 오버슈트를 저감하는 것에 대한 검증으로 M&S (Modeling and simulation) 기법을 이용하여 시스템의 동특성 성능을 검증하였다. M&S tool로 Matlab&Simulink를 이용하였다.

2. 구동장치의 위치제어 정밀성 저감 요소

BLDC 모터와 기어를 이용한 구동장치에서, 기어의 end play 성분에 의해 구동제어 위치추종 능력이 저감된다[2]. 구동장치 제어 시 end play 성분에 의해 불감영역(dead-band)이 존재한다. 이 불감영역은 모터의 정/역 회전 전환 시 구동장치의 출력이 모터와 동일하게 동작하지 못하는 부분으로, 불감 영역이 클수록 위치추종 능력은 저감된다. 기어의 end play의 의해 발생하는 불감영역에 대하여 구동제어 시 영향성은 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 1에서 A-B 구간은 정방향으로 모터가 동작하고 구동장치도 모터와 같이 연동하여 동일하게 동작한다. 하지만 B-C 구간에서는 모터가 역방향으로 동작하지만 구동장치는 모터의 동작을 따라가지 못한다. 이는 반대 방향으로 전환 시에도 동일한 문제가 발생하는 구간이 존재하는데, 이것은 B-C 구간에서 end play에 의해 발생하는 불감 영역으로 인하여 모터와 구동장치의 동작이 연동되지 못하는 것이다.

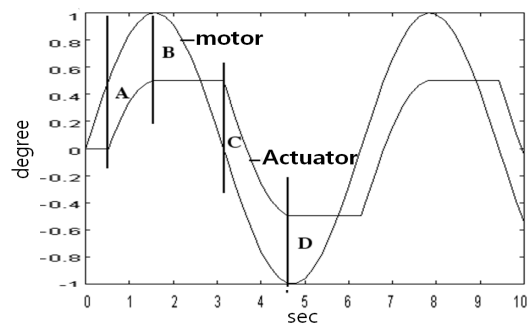


Fig. 1 Dead-band of end play component.

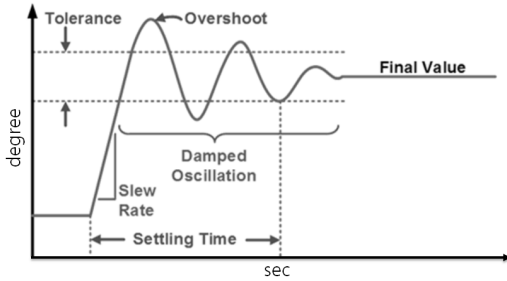


Fig 2. Overshoot and settling time.

또한 구동제어 시 오버슈트 성분이 존재하는데, 이는 다양한 게인 튜닝 시도를 통해 오버슈트를 줄이는 방안을 찾을 수 있다. 다만, 게인 튜닝을 위해 많은 시간과 노력이 필요하며, 오버슈트를 원하는 만큼 저감시킬 수 없을 수도 있다. 오버슈트는 작을수록 구동장치의 위치제어가 정밀해지는 경향이 있으며, 양방향성을 갖고 위치제어가 짧은 시간동안 빈번하게 이루어지는 어플리케이션에서는 오버슈트를 최소화 하여야만 시스템의 원하는 동적 성능을 만족할 수 있다[2].

Fig. 2와 같이, 구동장치의 입력에 의한 출력은 오버슈트(overshoot), 반응속도(slew rate), 정착시간(settling time)의 성능 팩터를 갖는다[3]. 위에서 표현한 바와 같이, 오버슈트를 최소화 할 수 있다면 오버슈트에 의해 발생하는 위치 오차를 줄일 수 있으므로, 정밀한 위치제어가 가능한 구동장치를 구현할 수 있다.

3. I-PD 제어기법과 이중루프

3.1 I-PD 제어기법

구동장치에 I-PD 제어기법을 적용하여 입력 신호와 구동장치 출력신호를 이용하여 I 게인의 입력신호로 사용하고, 모터 출력신호(PV)를 PD 게인의 입력신호로 사용한다. 이와 같은 경우 입력신호인 reference 신호가 스텝명령일 때 미분기에 의해 발생할 수 있는 출력단의 임펄스 성분을 제거하여 출력단의 오버슈트를 최소화 할 수 있다.

이러한 제어기법을 시스템에 적용하기 위하여

Eq. 1~3을 이용하여 제시하고자 하는 제어기를 구성하였고, 이는 두 개의 독립적인 센서를 사용하고 이중루프를 적용한 I-PD제어기이다.

$$CO = K_p(-PV) + K_i \int e dt + K_d \frac{d(-PV)}{dt} + bias \quad (1)$$

$$dCO = K_i e dt - K_p d(PV) - K_d \frac{d^2(PV)}{dt} \quad (2)$$

$$CO(k) = CO(k-1) - K_p [PV(k) - PV(k-1)] + K_i T e(k) - \frac{K_d}{T} [PV(k) - 2PV(k-1) + PV(k-2)] \quad (3)$$

Eq. 1은 제시한 I-PD 제어기법을 정형화 한 것이다. Eq. 1에서 기본형 PID 제어기법과 다른 점은 error 대신 음의 process variable이 사용된 것이다. 기본적인 PID 제어기법에서 사용하는 error는 reference 신호와 process variable의 차이인데, 본 논문에서 제시하는 제어기법은 P-term 과 D-term의 게인에 reference 신호를 제거하고 process variable 값만 사용한다. 이는 refernece 신호의 급격한 변동에 의한 구동장치의 출력 변동을 최소화하기 위함으로, 오버슈트를 최소화 시킬 수 있다.

Eq. 1의 I-PD 제어기법을 기본으로 이산 성분으로 수식을 변경하면 제어기법 출력 미소 성분은 Eq. 2와 같다. 최종적으로 이산 제어기의 출력 값은 Eq. 3과 같이 표현된다. 따라서 시스템에 적용된 제어기법은 Eq. 3을 바탕으로 I-PD 제어기법을 모델링하였다.

3.2 이중루프를 적용한 I-PD 제어기

이중루프를 적용한 I-PD 제어기의 블럭다이어그램은 Fig. 3과 같다.

이중루프 모델은 단일루프 모델과 다르게, 모터단의 위치를 측정할 수 있는 별도의 센서를 이용하고 위치 값(PV)을 산출하였다. 이때, 센서는 선형이라고 가정한다. 전체 시스템 모델은 Fig. 4와 같다. 일반적인 I-PD 제어기와 차이점은 모터단의 위치 출력 값(PV)을 이용해

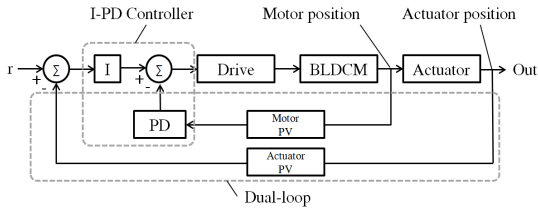


Fig. 3 I-PD and dual-loop block diagram.

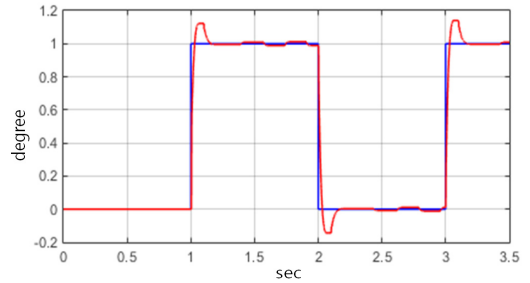


Fig. 5 Basic PID & single-loop simulation.

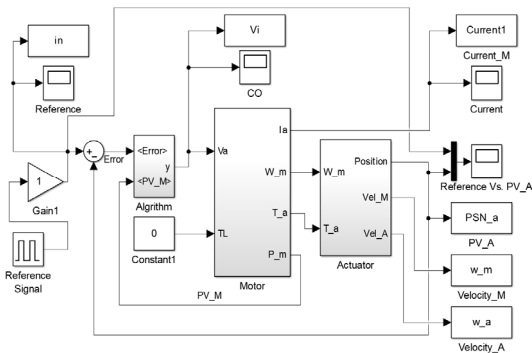


Fig. 4 I-PD and dual-loop simulation model.

PD-term으로 반환하는 것이다. 이때 PD-term에는 reference 신호를 사용하지 않는다. 또한 모터의 출력과 구동장치의 출력을 독립된 센서로 이중루프를 구성함으로써, 제어기 출력이 모터와 구동장치의 위치 오차를 보정할 수 있도록 하였다. 이는 모터의 위치와 구동장치의 위치를 동시에 측정하여 기어의 백래쉬에 의해 발생하는 모터와 구동장치 사이의 end play 성분의 영향을 줄여 정밀한 위치 제어가 가능하게 한다.

4. 구동 위치제어 성능비교

논문에서 제시한 방안인 I-PD 제어기법과 이중루프를 이용한 구동장치 모델은 Fig. 4와 같다. 이 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 구동장치의 구동제어 성능을 검증하였다.

Fig. 4는 본 논문에서 제시하는 I-PD 제어기법과 이중루프를 적용한 구동장치 모델이다. 입력 신호로 구형파를 사용하였으며, 구동장치의 회전 위치가 출력이다.

4.1 기본형 PID 제어기법 + 단일루프 구조

Eq. 4는 PID 제어 제어기법의 기본형이며, Eq. 5는 미소분을 표현한 것으로 이를 이용하여 Eq. 6과 같이 기본형 PID 제어기법을 표현할 수 있다.

$$CO = K_p e + K_i \int edt + K_d \frac{de}{dt} + bias \quad (4)$$

$$dCO = K_p de + K_i edt + K_d \frac{d(de)}{dt} \quad (5)$$

$$CO(k) = CO(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i T_e e(k) + \frac{K_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

Eq. 6에서 제시된 제어기법 모델을 적용한 구동장치 성능 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다.

4.2 PI-D 제어기법 + 이중루프 구조

본 논문에서 시스템에 적용하는 변형 PID 제어기법은 기본형의 PID 제어기법에 사용되는 에러변수를 P, I, D계인 항목별로 변형시킴으로써 오버슈트를 최소화 하는데 목적을 두고 있으며, 이는 PI-D 제어기법과 I-PD 제어기법과 유사하다.

구동장치의 위치제어 정밀성을 향상을 위해 오버슈트를 최소화하고자 하는데, 이를 실현하고자 사용하는 방안이 제어시스템의 에러량 산출 방법의 변형이다. 실제 구동장치는 reference 신호와 피드백 센서의 출력데이터 차이로 에러량이 결정되는데, 이 에러량이 제어기에 입력값이 되며 이를 제어기법으로 계산함으로써 구동을 위

한 구동장치의 입력치가 결정된다. 이는 구형과 같은 reference 신호가 주어질 때 순간적인 에러량은 매우 크며, 원하지 않는 구동장치 출력으로 이어진다. 이와 같은 상황에서는 큰 오버슈트를 발생시키고, 순간적인 임펄스 성분과 같은 큰 출력을 갖게 된다[3]. 이러한 순간적인 임펄스 성분을 최소화하기 위하여 에러량을 계산하는 방식을 변형하는 것이고 이에 대한 방안이 두 개의 독립적인 센서와 이중루프를 이용한 PI-D 제어기법의 적용이다.

에러량은 reference 신호와 센서 데이터 출력치의 차이지만, 이때 reference 신호를 제거 후 에러량을 센서데이터 출력으로 결정하여 D-term의 에러량으로 사용한다면, Eq. 4와 같이 변형된 PID 제어기법 수식이 유도된다. 변형된 에러량을 D-term에 적용하는 이유는 큰 변동 성분의 미분양은 매우 큰 값이므로 구동장치 성능에 악영향을 끼칠 수 있기 때문이다[4].

$$CO(k) = CO(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i T e(k) - \frac{K_d}{T} [PV(k) - 2PV(k-1) + PV(k-2)] \quad (7)$$

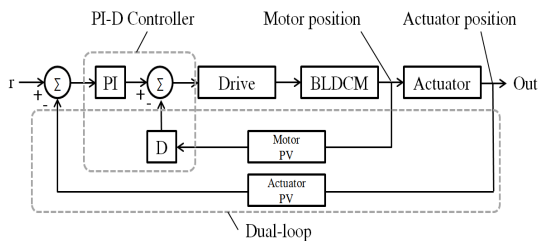


Fig. 6 PI-D and dual-loop block diagram.

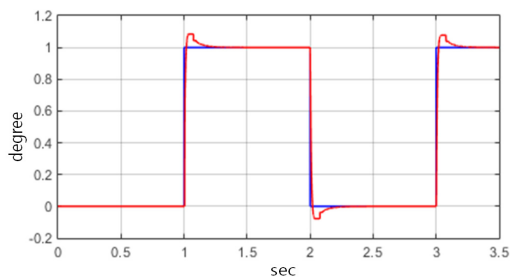


Fig. 7 PI-D & dual-loop simulation.

Eq. 7은 Fig. 6과 같이 블록다이어그램으로 표현할 수 있으며, 이는 이중루프를 적용한 PI-D 제어기법이다.

Fig. 6은 PI-D 제어기법을 사용한 블록 다이어그램으로, Fig. 3의 I-PD 제어기법과 다르다. 차이점은 P-term의 에러량을 계산할 때, reference 신호의 사용 여부이다. 또한 Eq. 7에서 제시된 제어기법 모델을 적용한 구동장치 성능 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다.

4.3 I-PD 제어기법 + 이중루프 구조

이와 같은 방안에 추가로 P-term에도 변형된 에러량을 적용하여 PID 제어기법을 구현할 수 있다. 이 또한 reference 신호의 급작스런 변화에 대한 구동장치의 원하지 않는 출력 변동성을 최소화하기 위함이며, 이를 수식으로 표현하면 Eq. 3과 같다. 이는 두 개의 독립적인 센서를 이용하여 I-PD 제어기법에 이중루프를 적용한 것과 같다.

Eq. 3에서 제시된, 이 논문에서 제시하는 제어기법에 대한 모델은 Fig. 4와 같고, 이 모델을 적용한 구동장치 성능 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다.

본 논문에서 제시하는 I-PD 제어기법과 이중루프를 적용한 제어기법을 정형화된 수식으로 표현하면 Eq. 1과 같고, 성능 시뮬레이션 모델에 적용한 이산 제어기 수식은 Eq. 3과 같다.

5. 제어 안정도 분석

안정도 판별 방법으로 극점과 영점의 위치와 Nyquist 다이어그램을 이용하였다.

아래의 안정도 판별은 본 논문에서 제시하는 I-PD 제어기법과 이중루프를 적용한 결과이며, 이는 Fig. 4에 표현된 모델을 이용한 것이다.

입력과 출력의 관계에 따른 시스템의 안정성은 특성방정식의 근 또는 시스템의 고유값들을 이용해 쉽게 알 수 있다. 이를 직관적으로 알 수 있도록 극점과 영점을 Fig. 9에 도시하였다. 모든 극점이 좌반평면에 존재하므로 시스템은 안

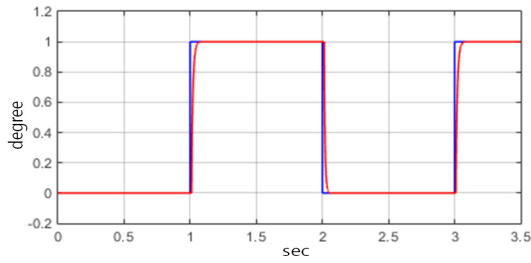


Fig. 8 I-PD & dual-loop simulation.

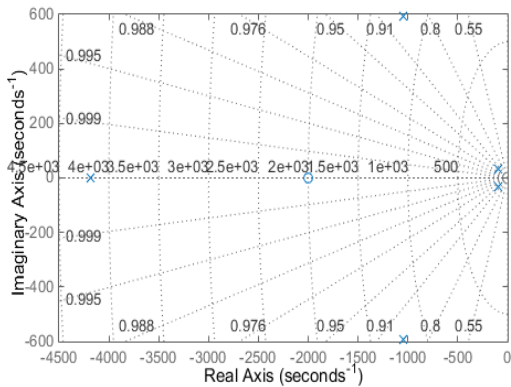


Fig. 9. Pole-Zero map.

정하다. 또한 영점이 허수축에서 충분한 거리를 갖으므로 출력의 오버슈트가 작은 것을 확인할 수 있다.

나이퀴스트 선도는 전 주파수에 걸쳐 주파수 응답 특성을 살필 수 있으므로 결과이므로 이를 Fig. 10에 도시하였다. 실수축 교차점이 점(-1,0)보다 우측에 존재하므로 이 시스템은 안정하다.

6. 결 론

본 연구의 결과로 도출된 구동장치는 Fig. 11과 같은 형태로 구현될 수 있으며, 이는 추진체의 자세제어를 위한 구동장치로 활용 될 수 있다.

PID 제어기법 기본형과 D-term에 변형된 에러량을 적용한 PI-D 모델, P-term과 D-term에 변형된 에러량을 동시에 적용한 I-PD 모델의 시뮬레이션을 수행하였다.

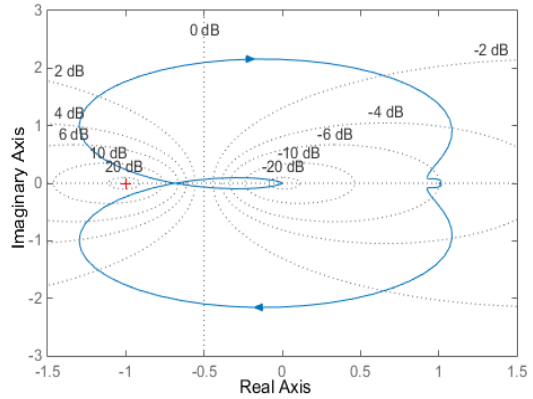


Fig. 10. Nyquist diagram.

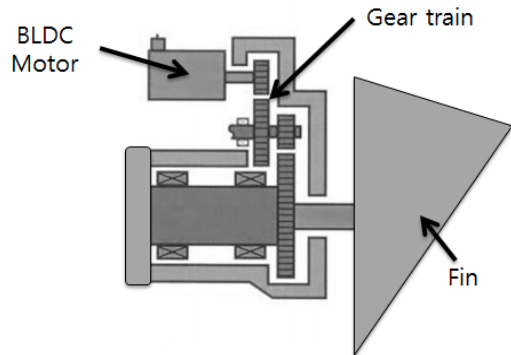


Fig. 11. Actuator system using the BLDC motor and gear train.

세 가지 제어 기법에 개별 적용되는 게인 값은 지글러-니콜스에 의한 게인튜닝 방법을 기본으로하여 초기 게인 값을 선정한 후 오토 튜닝을 적용하였다. 오토 튜닝 방법은 Mathwork(社)의 매트랩 시뮬링크에서 지원하는 도구로써, 모델의 입력과 출력 사이에 플랜트를 포함한 시뮬링크 블록의 조합을 이용하여 제어기의 성능과 안정성 사이에 균형을 갖는 알고리즘 게인을 선정할 수 있다. 오토 튜닝 방법을 이용하여 루프의 대역폭을 만족하며, 위상 마진이 60°인 제어 알고리즘의 게인을 선정한 후 응답시간, 대역폭, 과도응답, 위상마진의 값이 변경되도록 게인을 튜닝하여 값을 선정하였다. 이때, 적용된 게인 값은 백래쉬 모델의 비선형 특성으로 인한 오토 튜닝에 한계가 존재하므로 백래쉬 모델이 반영

Table 1. Gain tuning result.

Item	Kp	Ki	Kd
PID & single-loop	27	500	0.4
PI-D & dual-loop	37	600	0.3
I-PD & dual-loop	15	750	0.04

되지 않은 상태에서의 오토 튜닝 방법을 기반으로 게인 튜닝한 결과이다. 이러한 과정을 거쳐 최적의 게인 값이라고 판단되는 값을 최종적으로 선정하였다. 이후 세 가지 모델에 대하여 오버슈트와 정착시간을 비교하였다. 최종 선정된 게인 값은 Table 1과 같다.

선정된 게인 값을 모델에 적용하여 시뮬레이션 결과를 비교하면 Table 2와 같다.

시뮬레이션 결과로써, I-PD 제어 기법과 이중루프를 적용한 시스템의 성능이 오버슈트가 최소화되고 빠른 정착시간을 갖는 것을 확인하였다.

또한 4장에서 제시된 시뮬레이션 결과와 같이 위치추종 성능인 정상상태오차도 기본적인 PID 대비하여 향상됨을 확인하였다.

Table 2의 성능 측정 팩터와 같이, 이는 제시된 방법이 구동장치의 위치제어 정밀성 향상을 위한 방안으로 적절하다는 것을 보여주는 결과이다. 이는 end-play가 존재하는 구동장치에 기존의 PID 제어기법을 이용 시 발생할 수 있는 오버슈트를 적절히 제거하며, 동적 성능저하가 발생하지 않는다는 것이다.

Table 2. Simulation results comparison.

Item	PID single-loop	PI-D dual-loop	I-PD dual-loop
Overshoot	11.7%	7.6%	0.2%
Settling time	0.32초	0.27초	0.09초

본 연구에서 BLDC 모터와 기어를 이용한 구동장치에서 발생할 수 있는 end play 성분과 오버슈트에 의한 위치추종 성능 저감 현상에 대하여, 독립된 두 개의 센서를 이용한 I-PD 제어기법과 이중루프를 적용하여 구동장치의 위치제어 성능을 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

References

1. Wilson, D.R., *Modern Practice in Servo Design*, Pergamon, Oxford, U.K., 1970.
2. Astrom, K.J. and Hagglund, T., *PID Controllers : Theory, Design and Tuning*, 2nd edition, ISA, Pittsburgh, P.A., U.S.A., 1995.
3. Astrom, K.J. and Hagglund, T., *Advanced PID Control*, ISA, Pittsburgh, P.A., U.S.A., 2006.
4. Visioli, A., *Practical PID Control*, Springer-Verlag, London, U.K., 2006.