

## 기어의 백래쉬 보상을 위한 퍼지 보상기 설계

김 남훈, 허 옥렬, 김 진걸  
인하대학교 전기공학과

### Design of fuzzy compensator for compensate backlash in gear.

Nam hoon KIM, Uk youl HUH, Jin geol KIM  
Department of Electrical Engineering, Inha University

**Abstract** - In rotating systems, backlash imposed limitations on the quality of control. System with gear is an example where this is a well-known limitation. In order to increase the controller performance, We design a fuzzy system to compensate the delay. we prove that under certain conditions the fuzzy compensator guarantees that the backlash output converges to the desired trajectory. Simulation results show that the fuzzy compensator is robust to the backlash parameter.

## 1. 서 론

백래쉬는 궤환 제어 시스템의 실행을 제한하는 요소이다. 백래쉬는 지연, 진동 그리고 비정확성을 유발시킨다. 이러한 문제는 높은 정확도를 요구 하는 시스템에서 중요하게 작용한다. 미지의 백래쉬가 있는 시스템에 대한 접근방법 중에 최근에 Tao와 Kokotovic은 퍼지 적응제어 접근 방법을 사용하였다.[1],[2].

기어가 달려있는 회전하는 시스템에서 백래쉬 현상은 항상 나타난다. 백래쉬 현상이 있는 시스템을 제어하고자 할 때, 백래쉬 현상을 보상할 수 있는 방법은 중요하다. 모터가 제동하고 있다가 가속하거나 가속하고 있다가 제동하는 경우 백래쉬 현상이 일어난다. 이러한 현상은 잠재적으로 불안정성을 내포하고 있다. 그렇기 때문에 모터 제어 시스템은 백래쉬 현상을 보상해야 한다 [3],[4]. 이러한 백래쉬 보상은 기어를 내부에 포함하는 많은 회전 시스템에 적용가능하다. 본 논문의 제어대상 플랜트는 감속기가 달린 직류 모터를 사용한 로봇 관절의 위치 제어 시스템이다.

대상시스템은 백래쉬 이외의 모터의 마찰력이나 각변위를 측정하는 인코더의 해상도의 문제 그리고 그 밖에 모델링 할 때 고려하지 않은 불확실한 요소도 가지고 있다. 백래쉬의 영향을 제어하기 위해서는 다른 비선형적 요소를 무시하고 백래쉬 만을 고려하겠다. 맞물리는 두 기어의 분리가 일어날 때 백래쉬 만큼의 변위를 움직이기 위한 최대 에너지를 최단 시간동안 가하여 두기어가 항상 맞물려 있도록 하는 것이 백래쉬 제어의 기본 개념이다.

2장에서는 백래쉬 보상을 위해 우리가 알고 있는 정보를 갖고 4개의 IF-THEN 룰을 만들었다. 이 4개의 룰을 사용해 퍼지 보상기를 구성한다. 3장에서는 시뮬레이션 블록 선도 및 결과를 다룬다. 마지막 4장에서는 시뮬레이션 결과 및 향후 연구 과제에 대해 언급한다.

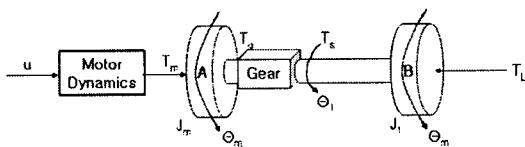


그림 1. 제어 하고자 하는 시스템

## 2. 본 론

우리가 제어하고자 하는 시스템은 그림 1과 같다. 모터에 입력전압  $u$ 가 가해지면 그에 따라 토크가 만들어진다. 이때 만들어진 토크가 축을 회전시키는 힘을 제공하게 된다. 백래쉬는 기어 부분에 존재하게 된다. 백래쉬 현상에 기인해 2차축에 전달되는 토크가 0 또는 임의 값을 갖는다. 이때 전달된 토크가 2차축을 회전시키게 된다. 본 논문에서는 다른 비선형 성을 무시하고 비선형 백래쉬에 대한 퍼지 로직 선 보상기를 구성하고자 한다.

### 2.1 퍼지 시스템...

인공생명의 근본적인 규칙들을 얻는데 있어서 전문가의 지식체계가 존재하는 경우에는 이를 직접 언어적인 형태의 퍼지 규칙으로 표현할 수 있다[5],[6]. 이러한 지식이 존재하지 않고 수치 데이터의 형태로 존재하는 경우에는 클러스터링을 통하여 퍼지시스템을 모델링함으로써 인공생명 현상을 지배하는 기본 규칙들을 얻을 수 있다.

### 2.2 비선형 백래쉬 모델

식(1)의  $a, b, c$ 는 각각 구동되는 기어의 위치( $\theta_1$ ), 구동 모터축의 위치/기어비( $\theta_m/N$ ) 그리고 상대적인 백래쉬 간격을 나타낸다. 전형적인 백래쉬 모델은 그림 2와 같으며  $\theta_1$ 과  $\theta_m/N$ 사이의 관계를 나타낸다. 그림2의 그래프를 수직적으로 나타내면 식(1)과 같다. 이것은 비선형 속도 미분 방정식을 나타낸다. 입력은  $a$ 와  $b$ 와  $b$ 의 미분이며 출력은  $a$ 의 미분이다.

$$\dot{a} \approx g(\dot{b}, b, a) = \begin{cases} \dot{b} & \text{if } \dot{b} > 0 \text{ and } b - a = c \\ & \text{or } \dot{b} < 0 \text{ and } b - a = 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

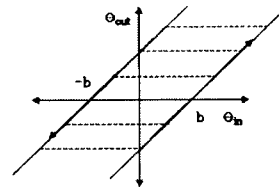


그림 2. 백래쉬 효과

### 2.3 퍼지 로직 백래쉬 선 보상기

그림 1에서 동적 부분 A의 회전 방향이 변하게 되면 B부분의 회전은 시간 지연을 갖고 회전하게 된다. 이 시간 지연을 최소화 하기 위해서 우리는 선보상기를 그림 3과 같이 배치하였다. 그림 3에서  $d_b$ 은 백래쉬 출력에 대한 기준 입력을 나타낸다. 퍼지룰은 학습경험을 바탕으로 해서 만들 수 있다. 만든 룰은 다음 식 (2)



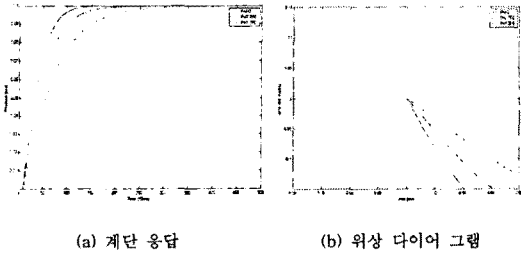


그림 4. 서로 다른 PD 이득값을 사용한 계단응답

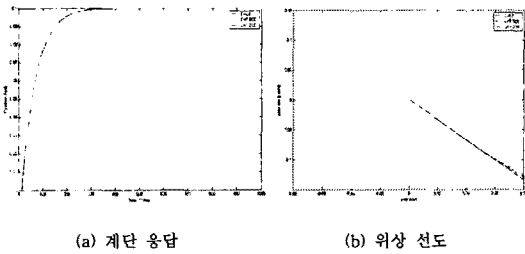


그림 5. 서로 다른 백래쉬 간격에 대해 퍼지 보상기와 PD 제어기를 같이 사용한 결과 (계단 응답)

### 3.2 정현파입력 응답

정현파 응답 시뮬레이션도 그림 3의 페루프 시스템에서 실행했다. 기준입력( $d_p$ )에는 크기가 0.1이고 주파수가 0.7 rad/sec 인 정현파를 사용하였다. 위의 계단입력 시뮬레이션에서와 동일하게 초기에는 기어가 맞물려 있지 않다고 생각하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 어떤 보상 없이 PD제어기만을 사용한 것을 나타낸다. 그림 6(a)에서는 어떤 보상기의 사용 없이 PD 제어기만을 사용한 경우 정현파 입력에 대한 출력에서의 지연을 완벽히 제거할 수 없다는 것을 보여준다. 그림 6(b)의 위상선도에서 P이득이 커지면 limit cycle이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림7에서 우리는 서로 다른 백래쉬 간격에 대해 limit cycle이 거의 동일하다.

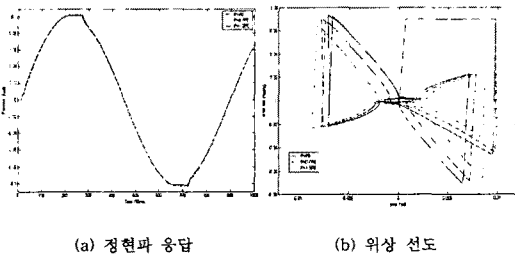


그림 6. 서로 다른 PD 이득값을 사용한 정현파 응답

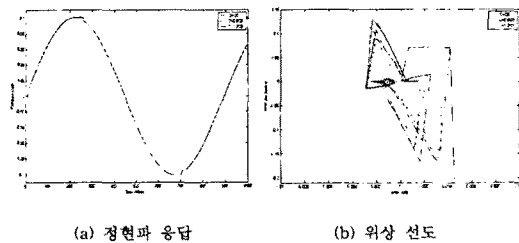


그림 7. 서로 다른 백래쉬 간격에 퍼지 보상기와 PD 제어기를 같이 사용한 결과 (정현파 응답)

## 4. 결 과

본 논문에서는 비선형 백래쉬를 보상하기 위해 4개의 보편화된 룰을 사용하였다. PD 제어기만 가지고는 백래쉬 현상을 어느 정도 보상시킬 수 있다. 하지만 백래쉬 폭이 바뀌게 되면 PD 제어기의 이득값이 변화해야하는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존에 사용하던 PD 이득값을 그대로 사용한다. 그리고 퍼지 보상기로 백래쉬 현상을 보상한다. 그래서 백래쉬가 있는 시스템을 더 효과적으로 제어하게 된다.

현재 시뮬레이션에서는 백래쉬 폭이 정해져 있다는 가정 하에 백래쉬 보상이 이루어 졌다. 대부분의 경우 기어를 오래 사용하게 되면 마찰, 열 그리고 충격등에 의해 백래쉬 폭이 변화하게 된다. 이런 경우에는 본 논문에서 제안한 제어기의 효율이 떨어지게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 현재 백래쉬 간격의 추정기와 적응 퍼지 보상기에 대한 연구를 수행중이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 목격기초연구 지원으로 수행되었습니다. (R01-2003-000-10364-0)

### [참 고 문 헌]

- [1] G. Tao and P.V. Kokotovic, "Adaptive control of plants with unknown output backlash," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 40, no.2, pp.200-212, Feb. 1995.
- [2] G. Tao and P.V. Kokotovic, "Continuous-time adaptive control of systems with unknown backlash," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 40, no.6, pp.1083-1087, June 1995.
- [3] S. De La Salle, M. A. Jansz and D. A. Light, "Design for a feedback control system for damping for vehicle shuffle," in *EAEC European Automotive Congress*, Barcelona, Spain, 1999.
- [4] A. Lagerberg, "A literature survey on control of automotive powertrains with backlash," Control and Automation Laboratory, Department of Signal and Systems, Chalmers University of Technology, Technical report R013/2001, Dec. 2001.
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Inf. Control.*, vol. 8, pp. 338-353, June 1995.
- [6] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic controller Part I," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol. 20, pp.404-418, Apr. 1990.
- [7] 김남훈, 허옥렬, 김진걸, "백래쉬가 있는 기어 시스템의 퍼지 제어에 관한 연구," *Information and control symposium* 논문집, pp.47-49, May 2004.
- [8] Benjamin C. Kuo and Farid Golnaraghi, *Automatic Control Systems*, Wiley, 2003.