



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

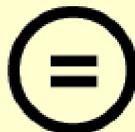
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사 학위논문

미지의 외란과 잡음을 받는 확률시스템의 상태추정과 제어

State Estimation and Control of Stochastic System under Unknown
Disturbance and Noises



지도교수 김 중 화

2016년 2월

한국해양대학교 대학원
제어계측공학과
박 성 환

본 논문을 박성환의 공학석사 학위논문으로 인준함

위원장 공학박사 진 강 규



위 원 공학박사 조 석 제



위 원 공학박사 김 종 화



2015 년 12 월 24 일

한국해양대학교 대 학 원

목 차

Abstract	iii
List of Figure	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 논문의 구성	2
제 2 장 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 시스템	4
2.1 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 알고리즘	4
2.2 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 시스템의 성능검증	11
2.2.1 잡음이 없을 경우의 제어성능	11
2.2.2 잡음이 있을 경우의 제어성능	12
2.3 성능검증 결과의 고찰과 문제점 분석	14
제 3 장 Separation Principle을 이용한 퍼지 PID 제어 시스템	16
3.1 이산시간 시스템에 대한 Kalman 필터 상태 추정 알고리즘	16
3.2 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템 제안	18
3.3 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능검증	21
3.3.1 잡음만 인가될 경우의 제어성능	21
3.3.2 잡음과 미지의 외란입력이 인가될 경우의 제어성능	24
3.4 성능검증 결과의 고찰과 문제점 분석	26
제 4 장 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템	29
4.1 미지의 외란과 잡음이 인가되는 시스템의 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템	29

4.2 Kalman 필터 이노베이션 기반 미지의 외란 추정 알고리즘.....	31
4.3 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘의 제안.....	40
4.4 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘 성능 검증.....	44
4.5 성능검증 결과의 고찰.....	48
4.5.1 기준입력이 변하는 경우의 검증.....	48
4.5.2 미지의 외란 크기가 변하는 경우의 검증.....	50
제 5 장 종합적 성능검증.....	53
5.1 퍼지 PID 시스템의 성능검증 및 고찰.....	53
5.2 Kalman 필터 기반의 퍼지 PID 제어시스템의 성능검증 및 고찰.....	54
5.2.1 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템.....	54
5.2.2 미지의 외란과 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템.....	56
5.3 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템.....	58
제 6 장 결 론.....	64
참고문헌	

State Estimation and Control of Stochastic System under Unknown Disturbance and Noises

Seong-Hwan Park

*Department of Control & Instrumentation Engineering,
Graduate School, Korea Maritime&Ocean University*

Abstract

PID controllers have been widely used in lots of industrial fields because of several positive characteristics. Its structure is so simple to implement and to apply, while its control performance is higher than those of other type controllers for linear time invariant systems. Especially, PID control technique is very useful and effective as long as the given controlled systems are deterministic without any types of noises.

By the way, the real systems found in industrial fields are under noisy circumstance including RMS and/or random noises, and thus they are used to be mathematically modeled as linear time invariant stochastic systems. Although the effect of RMS sinusoidal noises can be reduced by way of comprising a kind of filter such as an RC filter, the effect of random noises can not be reduced by filters.

Under noisy circumstance, the D control action of all types of PID controller, for example conventional PID or fuzzy PID, may not be

operated normally in steady state by the influence of noises. As a result, the output of PID control systems often exhibits a chattering phenomenon around the given reference input in steady state.

When a set of unknown disturbances is driven for the controlled system, even the PID control system may not track the reference input and may resultantly exhibit a steady state error.

In order to improve the wrong D control action by the effect of noises, in this paper, a method to comprise PID control system by adopting the separation principle is suggested. A procedure to comprise the controller according to the suggested method by the separation principle is as follows: At first, the state of the PID control system is estimated by the Kalman filter algorithm using the noisy output under the assumption that the system and measurement noise of the PID control system should be white Gaussian random noises. And then the estimated output from the Kalman filter is fed back to the PID controller to generate an error signal.

In order to compensate the effect of the unknown disturbance, in this paper, a method to comprise PID control system based on Kalman filter with an unknown disturbance estimator is suggested. The used unknown disturbance estimator is composed based on the fuzzy estimation algorithm. When the unknown disturbance is estimated, the estimated value is fed back into the Kalman filter algorithm to compensate the filtered state and fed back into the PID controller to generate a new control input for the purpose of reducing the steady state error of the PID control system.

The eventual PID controller structure to improve the D control action against noises and to compensate the effect of unknown disturbance is suggested, by combining the fuzzy PID controller with Kalman filter based on the unknown disturbance estimator.

In order to verify the control performance of the suggested control system, several simulations were accomplished under circumstances with noises and/or unknown disturbance. As a result, the comprised control system exhibited very good control performances for all simulation conditions and conclusively the effectiveness of the suggested method was qualitatively verified.



List of Figure

- Fig. 2.1 Fuzzification of e^* , r^* and a^*
- Fig. 2.2 Output fuzzification for fuzzy control block 1
- Fig. 2.3 Output fuzzification for fuzzy control block 2
- Fig. 2.4 Structure of variable parameter fuzzy PID controller
- Fig. 2.5 Possible input partition combinations of e^* and r^* using fixed normalization parameter L for fuzzy control block 1
- Fig. 2.6 Possible input partition combinations of r^* and a^* using fixed normalization parameter L for fuzzy control block 2
- Fig. 2.7 Unit step response of LTI discrete-time system
- Fig. 2.8 Unit step responses of LTI discrete-time stochastic system with noise
- Fig. 2.9 Comparison of control performances in case whether noises are absent or not
- Fig. 3.1 Computation flowchart of Kalman filter algorithm
- Fig. 3.2 Block diagram of fuzzy PID control system using separation principle
- Fig. 3.3 Fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 3.4 Response of fuzzy PID control system using separation principle
- Fig. 3.5 Innovation process of Kalman filter
- Fig. 3.6 Fuzzy PID control system based on Kalman filter under unknown disturbance
- Fig. 3.7 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter under unknown disturbance
- Fig. 3.8 Innovation process when unknown disturbance is occurred
- Fig. 3.9 Responses of Kalman filter based fuzzy PID control system according to the absence or presence of unknown disturbance
- Fig. 3.10 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

- Fig. 4.1 Fuzzy PID control system based on Kalman filter under the presence of unknown disturbance
- Fig. 4.2 Test for disturbance presence using innovation process
- Fig. 4.3 Functional diagram of a fuzzy disturbance estimation algorithm
- Fig. 4.4 Input fuzzifications for the fuzzy disturbance estimation algorithm
- Fig. 4.5 Output fuzzification for fuzzy estimation block 1
- Fig. 4.6 Output fuzzification for fuzzy estimation block 2
- Fig. 4.7 Possible input partitioning for r_{ek}^* and r_{rk}^*
- Fig. 4.8 Possible input partitioning for r_{rk}^* and r_{ak}^*
- Fig. 4.9 Flowchart of Kalman filter based state estimation algorithm with disturbance estimation algorithm
- Fig. 4.10 Block diagram of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator
- Fig. 4.11 Flowchart of fuzzy PID control system based on Kalman filter when unknown disturbance estimator
- Fig. 4.12 Control performances of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator
- Fig. 4.13 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 4.14 Response of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance
- Fig. 4.15 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when reference input is changed
- Fig. 4.16 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 4.17 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when unknown disturbance is changed
- Fig. 4.18 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

- Fig. 5.1 Comparison of control performances in case whether noises are absent or not
- Fig. 5.2 Responses of fuzzy PID control system using separation principle
- Fig. 5.3 Innovation process of Kalman filter
- Fig. 5.4 Responses of Kalman filter based fuzzy PID control system according to the absence or presence of unknown disturbance
- Fig. 5.5 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 5.6 Control performances of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator
- Fig. 5.7 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 5.8 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when reference input is changed
- Fig. 5.9 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter
- Fig. 5.10 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when unknown disturbance is changed
- Fig. 5.11 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

제1장 서론

1.1 연구배경

PID제어기는 구조가 간단하고 적용이 쉽고, 제어성능이 우수하며 제어이득 조정이 비교적 쉽기 때문에 산업현장에서는 선형 시불변 시스템(LTI System)의 제어를 위하여 많이 사용되고 있다. 특히 시스템의 수학적 모델 확립이 어려울 경우에는 CPU 기반 퍼지 PID 제어기법이 자주 사용된다.

이와 같은 PID 제어기법은 시스템이 잡음을 받지 않는다는 가정하에서는 우수한 성능을 표출한다. 하지만 산업현장에서의 실제 시스템들은 대부분 잡음을 받고 있으며, 특히 RMS 잡음이 아닐 경우에는 필터 등의 설계를 통하여 잡음의 영향을 감소시키는 것이 불가능하다.

따라서 선형 PID 제어기법이나 퍼지 PID 제어기법을 적용한 제어시스템의 경우, 잡음으로 인한 D 제어동작의 잘못된 동작으로 인해 오차가 작은 정상상태에서는 양호한 제어성능을 표출하는 것이 곤란하다. 시스템 잡음과 측정 잡음이 포함되어 있는 선형 시불변 시스템의 제어를 위해서는 신뢰할 수 있는 추정오차 범위 내에서 시스템의 상태를 추정하여야 한다. 이런 시스템의 상태추정에 Kalman 필터가 널리 이용되고 있으며 시스템의 잡음과 측정 잡음의 통계적 특성이 평균이 0인 백색 가우시안 잡음(White Gaussian Noise)이어야만 Kalman 필터의 적용이 가능하고 또한 양호한 상태 추정 능력을 기대할 수 있다.^{[1][2][3]}

한편, 미지의 입력이 시스템 내 외부에서 인가될 때, 적응성이 뛰어난 퍼지 PID 제어시스템도 기준입력을 정상상태에서 추종하지 못하고 정상상태오차를 표출할 수밖에 없다. 미지의 입력의 영향을 받는 시스템이 비편향성에 대한 필요충분조건 아래일 때 시스템 노이즈와 추정오차에 상관없이 Optimal 필터와 Predictor 필터를 도출하여 상태 추정과 미지의 입력을 추정하는 방법이 연구되어 왔다.^{[4][5]} 또한 이 방법을 기반으로 하여 OEF(Optimal Estimate Filter)의 성능 저하문제를 개선하고 입출력의 변화 없이 결과 도출이 가능한 비편향

최소 표준편차의 미지입력이 있는 시스템에 대한 상태추정을 전체적으로 최적화 시키는 연구도 진행되고 있다.^[6] 또한, LMI(Linear Matrix Inequality)를 이용한 미지의 입력을 추정하는 RFO(Regular Functional Observer)^[7]와 Kalman 필터를 이용한 방법도 연구되어 있으며 비례상태관측기, 적분상태관측기를 이용한 방법도 있다. 비례상태관측기는 비례이득에 비례하여 측정 잡음이 증폭되는 단점이 있고, 적분상태관측기는 출력의 적분을 이용하여 측정 잡음을 감쇄시키는 장점이 있지만, 시스템의 차수가 증가하는 단점이 있다. 두 관측기의 장·단점을 보완한 비례적분상태관측기를 이용한 방법^{[8][9]}과 비례미분상태관측기^[10]도 연구되어 왔다. 최근에는 퍼지 불확실성 추정기법이 결합된 Kalman 필터 기반의 상태 추정 알고리즘이 제안되었다.^[21]

위와 같이 잡음과 미지의 입력이 시스템의 제어성능을 저하시키는 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 분리원리^{[13][14]}와 퍼지 불확실성 추정기법이 결합된 Kalman 필터 기반 상태 추정 알고리즘^[21]을 도입함으로써, 먼저 Kalman 필터 기반으로 시스템의 실제상태 또는 미지의 입력을 추정한 다음, 이를 바탕으로 추정된 출력을 피드백시켜 퍼지 PID 제어기법^[15~20]을 적용하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

제안하는 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위한 방법으로는 선형 시불변 이산 시스템 예제를 활용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

1.2 논문의 구성

본 논문의 제2장에서는 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 알고리즘을 전개하고 선형 시불변 이산시간 확률시스템의 예제를 대상으로 시뮬레이션을 수행함으로써 퍼지 PID 제어기의 제어성능에 대하여 고찰한다.

제3장에서는 선형 시불변 이산 확률 시스템의 제어성능 개선을 위하여 분리원리를 적용하여 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 구성하고, 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행함으로써 제어성능에 대하여 고찰한다. 또한 알려져 있지 않은 입력이 인가될 경우 즉 입력의 불확실성이 존재하는 선형 시불변 이산

시간 확률시스템을 대상으로 퍼지 PID 제어 시스템과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행한 다음 제어성능을 평가하고 문제점을 분석한다.

제4장에서는 시스템에 입력의 불확실성이 존재할 경우, Kalman 필터의 이노베이션 프로세스를 활용하여 입력의 불확실성을 추정하는 퍼지 불확실성 추정 알고리즘을 제안하고, 이를 3장에서 언급한 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘과 결합시킨 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘의 제어성능을 확인하기 위하여 3장에서 사용된 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하며 그 결과를 고찰한다.

제5장에서는 잡음과 미지의 외란이 인가되는 시스템을 제어하기 위하여 채택한 퍼지 PID 제어시스템에서부터 최종적으로 미지의 외란 추정 알고리즘이 결합된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템까지의 성능검증과정을 요약정리하고 고찰한다.

마지막으로 제6장에서는 본 논문을 전체적으로 평가하고 결론을 맺는다.



제 2 장 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 시스템

2.1 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 알고리즘^{[19][20]}

본 논문에서 채택한 퍼지 PID 제어기는 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기로서 그림 2.4와 같은 구조를 가지며, 목표치에 대한 오차와 오차의 변화율 그리고 오차의 변화율에 대한 변화율을 입력으로 사용한다. 이 세 입력을 바탕으로 퍼지 규칙과 비퍼지화기를 각각 포함하는 서로 다른 두 개의 퍼지 제어블록으로 구성되어 있으며 퍼지 제어기 입력의 정규화 파라미터 L 은 고정시킨 상태에서 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU 를 매 샘플링 시간마다 변화시켜 정규화 입력변수 e^*, r^*, a^* 가 항상 구간 $[-L, L]$ 의 범위에 존재하게 함으로써 제어입력의 증분인 PID 제어 입력을 생성하도록 하는 구조이다.

제어기에 사용되는 입력은 식 (2.1)~(2.7)에 의해 정의되고 제어 출력은 식 (2.8),(2.9)로 표현된다.

$$e_k = ref_k - y_k \quad (2.1)$$

$$e_k^* = GE_k \times e_k \quad (2.2)$$

$$r_k = [e_k - e_{k-1}] / T \quad (2.3)$$

$$r_k^* = GR_k \times r_k \quad (2.4)$$

$$a_k = [r_k - r_{k-1}] / T \quad (2.5)$$

$$= [e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}] / T^2 \quad (2.6)$$

$$a_k^* = GA_k \times a_k \quad (2.7)$$

$$dU_k = dU_1 + dU_2 \quad (2.8)$$

$$u_k = du_k + u_{k-1}, \quad du_k = GU_k \times dU_k \quad (2.9)$$

여기서 T 는 샘플링 시간을 나타낸다. 그리고 y_k, e_k, r_k, a_k 는 각각 샘플링 시간 k 에서 프로세스의 출력, 오차, 오차의 시간 변화율, 오차 변화율의 시간 변화율을 나타내며, GE_k, GR_k, GA_k, GU_k 는 각각 e_k, r_k, a_k 의 퍼지화 스케일 파라

미터이고 GU 는 출력 dU_k 의 스케일 파라미터로서 퍼지 PID 제어기의 제어 이득을 계산하는데 사용된다. dU_1 은 퍼지 제어블록1, dU_2 는 퍼지 제어블록2 에서의 출력을 표시하고 u 는 제어 입력을 의미한다.

그림 2.1은 본 논문에서 퍼지 PID 제어기의 입력으로 사용하는 e^* 와 r^* , a^* 의 퍼지집합의 퍼지화 알고리즘을 나타낸 것이다. e^* 는 $EP(ErrorPositive)$ 와 $EN(Error Negative)$ 의 두 개의 퍼지집합으로 퍼지화되고, r^* 는 $RP(RatePositive)$ 와 $RN(Rate Negative)$ 의 두 개의 퍼지집합, a^* 는 $AP(AccPositive)$ 와 $AN(Acc Negative)$ 의 두 개의 퍼지집합을 갖는다.

$output1$ 에 대한 퍼지출력은 그림 2.2에서 보는 것과 같이 $OP(Output Positive)$ 와 $OZ(Output Zero)$, $ON(Output Negative)$ 의 세 개의 멤버를 갖는 퍼지집합으로 퍼지화되고, $output2$ 에 대한 퍼지출력은 그림 2.3에서 보는 것과 같이 $OPM(Output Positive Middle)$ 과 $ONM(Output Negative Middle)$ 의 두 개의 멤버를 갖도록 퍼지화된다.

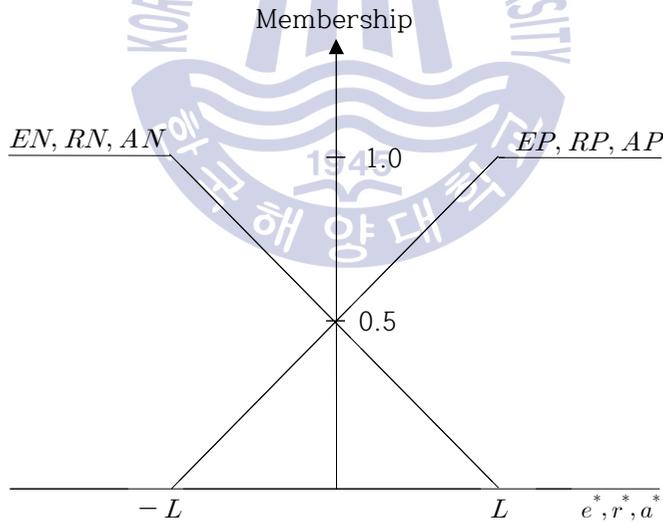


그림 2.1 e^*, r^*, a^* 의 퍼지화

Fig. 2.1 Fuzzification of e^*, r^* and a^*

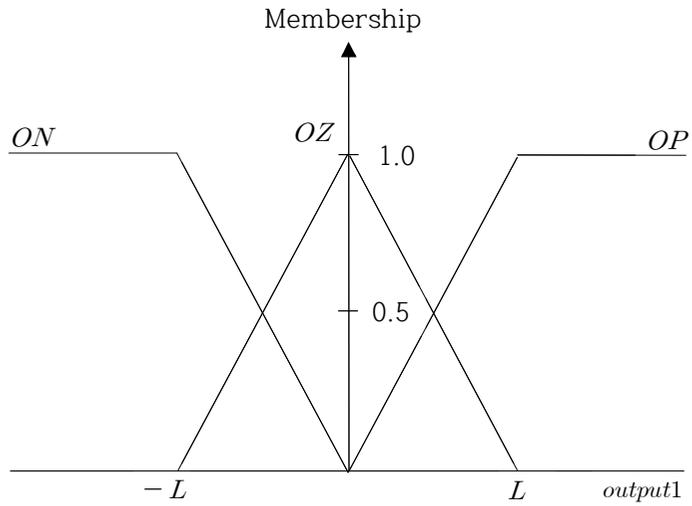


그림 2.2 퍼지 제어블록 1에 대한 출력 퍼지화
 Fig. 2.2 Output fuzzification for fuzzy control block 1

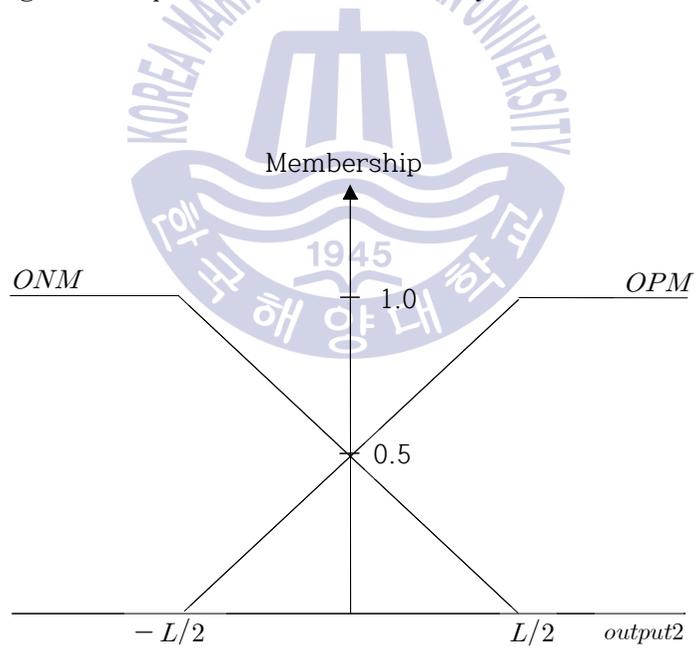


그림 2.3 퍼지 제어블록 2에 대한 출력 퍼지화
 Fig. 2.3 Output fuzzification for fuzzy control block 2

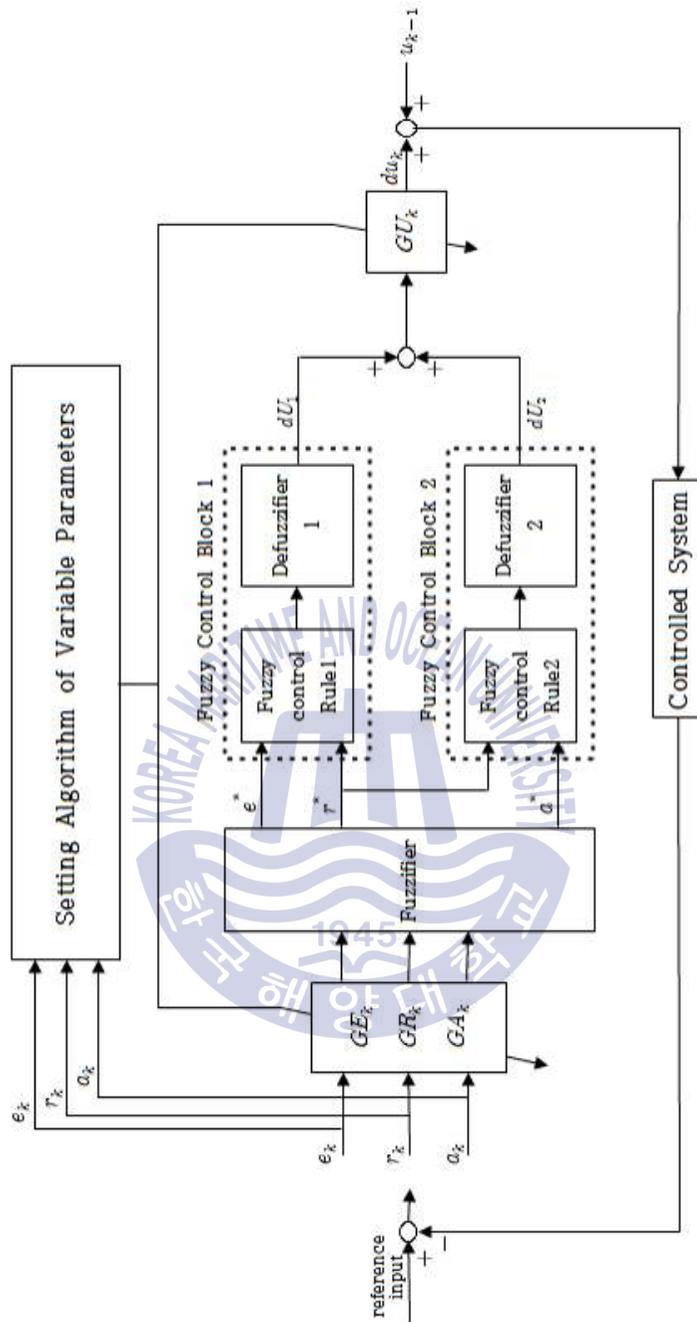


그림 2.4 가변 파라미터 퍼지PID 제어기의 구조

Fig. 2.4 Structure of variable parameter fuzzy PID controller

퍼지 제어규칙은 숙련된 작업자의 풍부한 경험적 지식과 제어 엔지니어의 전문가적 지식을 기초로 하여 만들어진다. 이 퍼지 제어규칙은 'IF ~ THEN ~' 형식으로 표현된다.

퍼지 제어블록 1에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_1 : IF e^* = EP \text{ and } r^* = RP \text{ THEN } output1 = OP$$

$$(R2)_1 : IF e^* = EP \text{ and } r^* = RN \text{ THEN } output1 = OZ$$

$$(R3)_1 : IF e^* = EN \text{ and } r^* = RP \text{ THEN } output1 = OZ$$

$$(R4)_1 : IF e^* = EN \text{ and } r^* = RN \text{ THEN } output1 = ON$$

퍼지 제어블록 2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_2 : IF r^* = RP \text{ and } a^* = AP \text{ THEN } output2 = OPM$$

$$(R2)_2 : IF r^* = RP \text{ and } a^* = AN \text{ THEN } output2 = ONM$$

$$(R3)_2 : IF r^* = RN \text{ and } a^* = AP \text{ THEN } output2 = OPM$$

$$(R4)_2 : IF r^* = RN \text{ and } a^* = AN \text{ THEN } output2 = ONM$$

제어규칙 $(R1)_1 \sim (R4)_1, (R1)_2 \sim (R4)_2$ 에서는 Zadeh의 AND 논리가 적용되었다. 이는 전건부의 두 조건에 대하여 후건부의 적합도를 찾기 위한 min연산을 수행한다. 스케일 파라미터 GE_k 는 식 (2.10), GR_k 는 식 (2.11)의 조건문이 만족할 때 마다 결론부와 같이 가변되며, 제어기의 전체 이득은 항상 일정해야 함으로 GR_k 가 가변됨에 따라 GU_k 도 동시에 같이 가변된다. GA_k 는 식 (2.12)의 조건문이 만족할 때 마다 결론부와 같이 가변된다.

$$IF GE_k \times |e_k| > L \text{ THEN } GE_k = L/|e_k| \quad (2.10)$$

$$IF GR_k \times |r_k| > L \text{ THEN } GR_k = L/|r_k|, \quad (2.11)$$

$$GU_k = 4/GR_k$$

$$IF GA_k \times |a_k| > L THEN GA_k = L/|a_k| \quad (2.12)$$

따라서 가변되는 GE_k , GR_k , GA_k , GU_k 로 인해 제어 블록 1, 2에 대한 입력 공간은 그림 2.5 및 그림 2.6과 같이 $[-L, L]$ 구간내의 $(IC1)_1 \sim (IC8)_1$, $(IC1)_2 \sim (IC8)_2$ 만으로 분할된다.

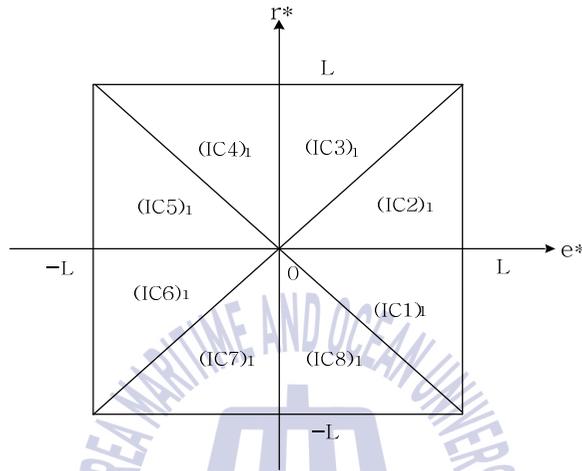


그림 2.5 고정된 정규화 파라미터 L 을 사용한 e^* 와 r^* 에 대한 공간 분할
 Fig. 2.5 Possible input partition combinations of e^* and r^* using fixed normalization parameter L for fuzzy control block 1

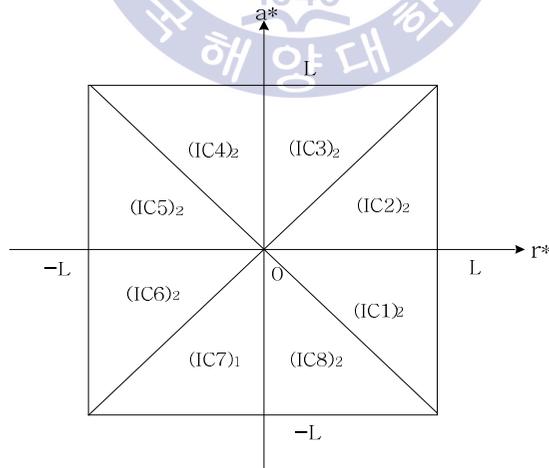


그림 2.6 고정된 정규화 파라미터 L 을 사용한 r^* 와 a^* 에 대한 공간 분할
 Fig. 2.6 Possible input partition combinations of r^* and a^* using fixed normalization parameter L for fuzzy control block 2

비퍼지화를 통한 퍼지 PID 제어기의 출력인 제어입력의 증분 du_k 는 다음과 같은 알고리즘으로 계산된다.

1)

$$\text{IF } GR_k \times |r_k| \leq GE \times |e_k| \leq L \text{ and } GA_k \times |a_k| \leq GR_k \times |r_k| \leq L ,$$

THEN

$$du_k = \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GE_k}{2L - GE_k \times |e_k|} e_k + \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GR_k}{2L - GE_k \times |e_k|} r_k + \frac{0.25 \times L \times GU_k \times GA_k}{2L - GR_k \times |r_k|} a_k \quad (2.13)$$

2)

$$\text{IF } GR_k \times |r_k| \leq GE_k \times |e_k| \leq L \text{ and } GR_k \times |r_k| \leq GA_k \times |a_k| \leq L ,$$

THEN

$$du_k = \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GE_k}{2L - GE_k \times |e_k|} e_k + \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GR_k}{2L - GE_k \times |e_k|} r_k + \frac{0.25 \times L \times GU_k \times GA_k}{2L - GA_k \times |a_k|} a_k \quad (2.14)$$

3)

$$\text{IF } GE_k \times |e_k| \leq GR_k \times |r_k| \leq L \text{ and } GA_k \times |a_k| \leq GR_k \times |r_k| \leq L ,$$

THEN

$$du_k = \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GE_k}{2L - GR_k \times |r_k|} e_k + \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GR_k}{2L - GR_k \times |r_k|} r_k + \frac{0.25 \times L \times GU_k \times GA_k}{2L - GR_k \times |r_k|} a_k \quad (2.15)$$

4)

$$\text{IF } GE_k \times |e_k| \leq GR_k \times |r_k| \leq L \text{ and } GR_k \times |r_k| \leq GA_k \times |a_k| \leq L ,$$

THEN

$$du_k = \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GE_k}{2L - GR_k \times |r_k|} e_k + \frac{0.5 \times L \times GU_k \times GR_k}{2L - GR_k \times |r_k|} r_k + \frac{0.25 \times L \times GU_k \times GA_k}{2L - GA_k \times |a_k|} a_k \quad (2.16)$$

2.2 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 시스템의 성능검증

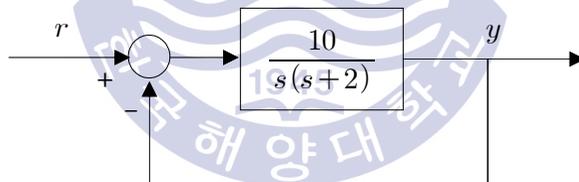
본 절에서는 퍼지 PID 제어기의 효능을 검증하기 위하여 잡음이 없는 선형 시불변 결정 시스템과 잡음이 포함된 선형 시불변 확률 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

2.2.1 잡음이 없을 경우의 제어성능

식 (2.17)과 같은 플랜트 전달 함수 $G(s)$ 를 가지는 단위 피드백 선형 시불변 연속시간 시스템을 대상으로 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 성능을 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

$$G(s) = \frac{10}{s(s+2)} \quad (2.17)$$

이때 이 시스템의 블록선도는 다음과 같다.



식 (2.17)을 샘플링시간 $T=0.01$ 로 이산화 하여 상태 공간 방정식으로 표현하면 식 (2.18)와 같이 표현 할 수 있다

$$\begin{aligned} x_k &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} u_{k-1} \\ z_k &= [1 \ 0] x_k \end{aligned} \quad (2.18)$$

그림 2.7은 식 (2.18)를 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 알고리즘을 이용하여

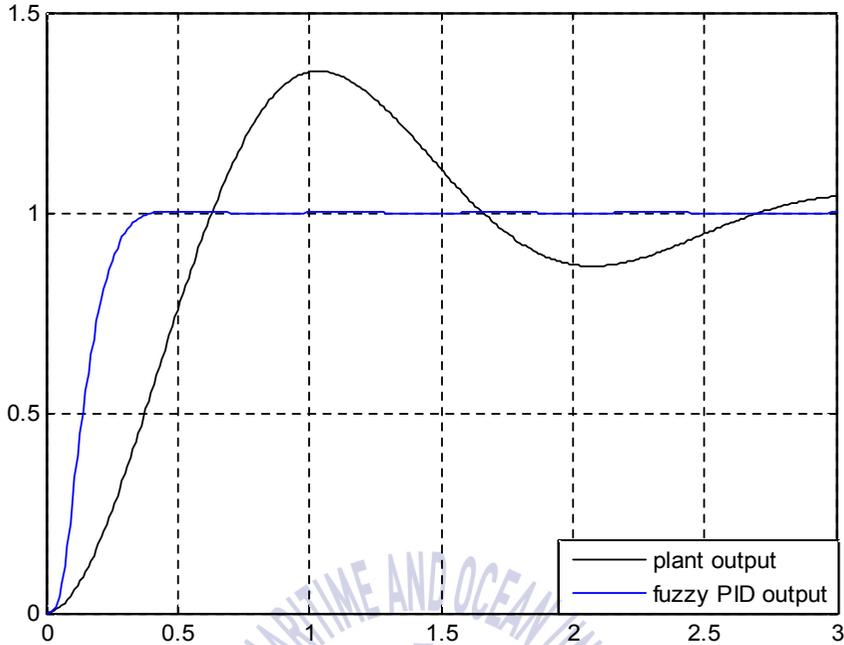


그림 2.7 선형 시불변 이산시간 시스템의 제어 응답
 Fig. 2.7 Unit step responses of LTI discrete-time system

제어를 수행한 결과이다. 검은색 선은 퍼지 PID 제어를 수행하지 않은 단순 피드백 시스템의 출력을 나타내고 파란색 선은 퍼지 PID 제어를 수행한 제어 시스템의 출력을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 상승시간이 짧아 응답속도가 빠르면서도 최대오버슈트가 거의 없이 양호한 제어응답을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 채택한 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기는 기본 제어기로써 무난함을 확인할 수 있다.

2.2.2 잡음이 있을 경우의 제어성능

식 (2.18)과 같이 플랜트 전달 함수 $G(s)$ 를 이산화시킨 단위 피드백 선형 시불변 이산시간 시스템에 시스템 잡음과 측정 잡음이 포함된 확률 시스템을 대상으로 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기 성능을 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

$$x_k = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} u_{k-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_{k-1}$$

$$w_{k-1} \sim N(0, 0.05^2) \quad (2.19)$$

식 (2.19)로 주어지는 시스템은 시스템 잡음이 포함된 선형 시불변 이산시간 시스템의 상태방정식이다. 시스템 잡음인 w_{k-1} 은 평균이 0이고 분산이 0.05^2 인 백색 가우시안 잡음라고 가정한다.

$$z_k = [1 \ 0] x_k + v_k$$

$$v_k \sim N(0, 0.05^2) \quad (2.20)$$

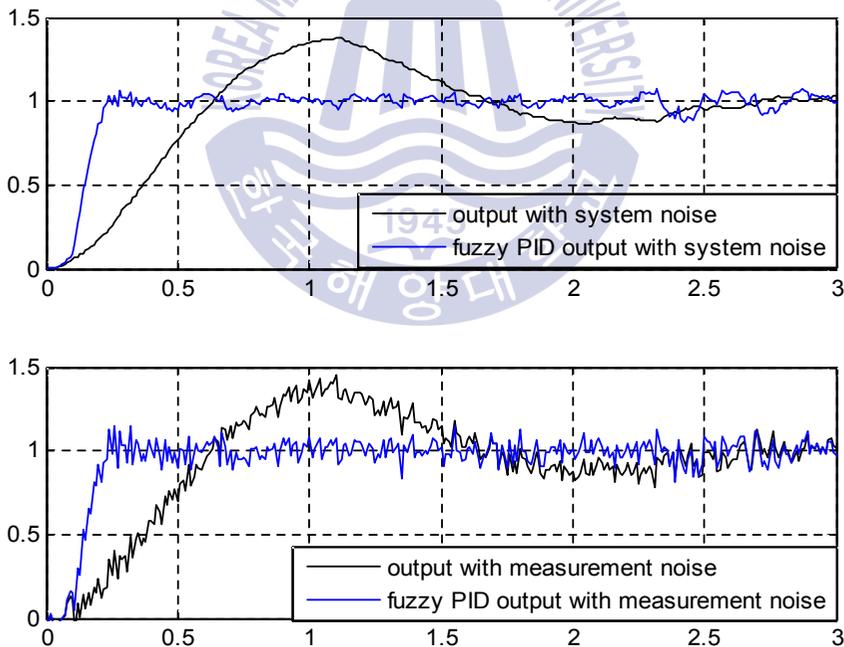


그림 2.8 잡음이 포함된 선형 시불변 이산시간 확률 시스템의 단위스텝 응답

Fig. 2.8 Unit step responses of LTI discrete-time stochastic system with noise

식 (2.20)은 측정 잡음이 포함된 이산시간 시스템의 출력 방정식이다. 측정 잡음인 v_k 는 평균이 0이고 분산이 0.05^2 인 백색 가우시안 잡음이라고 가정한다.

그림 2.8은 식 (2.19)과 식 (2.20)을 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 알고리즘을 이용하여 제어를 수행한 결과이다. 첫 번째 그림에서 검은색 선은 시스템 노이즈만 포함한 단순 피드백 시스템의 출력을 나타낸 것이고 파란색 선은 시스템 노이즈만 포함된 퍼지 PID 제어시스템의 제어성능을 나타낸다. 두 번째 그림에서 검은색 선은 측정 잡음이 포함된 시스템 출력을 나타내고 파란색 선은 측정 잡음이 포함된 퍼지 PID 제어시스템의 출력을 나타낸다.

2.3 성능검증 결과의 고찰과 문제점 분석

위의 2.2절에서 잡음이 없는 선형 시불변 결정 시스템과 잡음이 없는 선형 시불변 확률 시스템의 제어성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행함으로써 단위스텝응답을 얻었고, 이를 토대로 성능검증을 수행하면 다음과 같다.

그림 2.9은 두 가지의 성능검증 결과를 비교하여 보기 위하여 같이 표현한 것이다. 시스템에 잡음이 인가되어 있지 않은 제어시스템의 제어 출력은 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 잡음이 인가된 제어 시스템의 제어성능을 보면 잡음으로 인하여 제어동작 중 D 제어동작에 문제가 발생하여 정상상태에서 양호한 제어성능을 나타내지 못하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 잡음으로 인한 D 제어의 잘못된 동작이 발생하는 것을 개선할 필요가 있다.

시스템 잡음과 측정 잡음이 포함된 시스템을 제어하기 위한 방법으로, 신뢰성 있게 시스템의 상태를 추정한 다음 이 추정치를 바탕으로 선택된 제어기에서 사용하는 분리 원리를 도입하고자 한다. 따라서 다음 제3장에서는 분리 원리를 기반으로 잡음이 포함된 확률 시스템의 상태를 먼저 추정하고 이를 이용한 추정된 출력을 피드백함으로써 퍼지 PID 제어 시스템을 구성하는 방법을 논하고 D 제어동작의 잘못된 동작으로 인한 정상상태에서의 나쁜 제어응답을 개선하고자 한다.

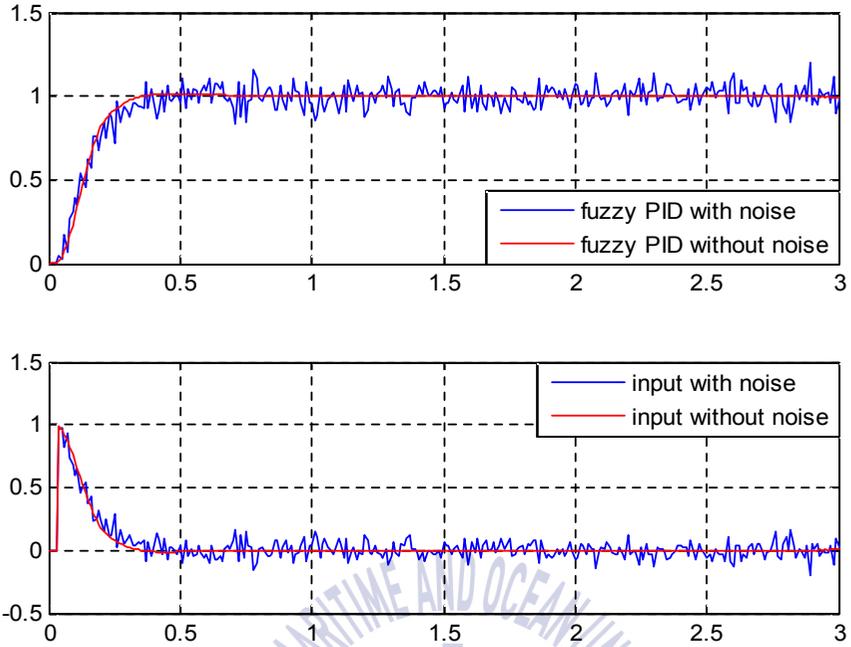
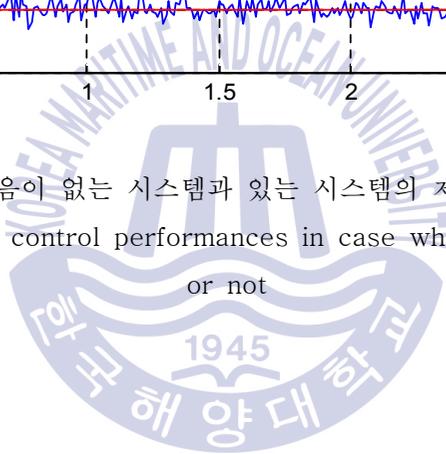


그림 2.9 잡음이 없는 시스템과 있는 시스템의 제어성능 비교

Fig. 2.9 Comparison of control performances in case whether noises are absent or not



제 3 장 Separation Principle을 이용한 퍼지 PID 제어 시스템

본 장에서는 선형 시불변 이산 시스템의 상태 추정에 널리 사용되고 있는 Kalman 필터 알고리즘을 알아보고, Kalman 필터를 기반으로 하는 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템을 구성방법을 제시한 다음, 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰하려 한다.

3.1 이산시간 시스템에 대한 Kalman 필터 상태 추정 알고리즘^[21]

Kalman 필터는 직전 샘플링 시간에서의 상태 추정치와 수학적 모델을 이용하여 현재 시간에서의 예측 추정치를 계산하고, 현재 시간에서의 시스템 잡음과 측정 잡음을 포함한 실제 시스템의 측정치와 예측 측정치와의 차이에 적절한 가중행렬을 곱하여 계산한 보상치를 더함으로써, 현재 시간에서의 필터 추정치를 계산하는 알고리즘이다.

Kalman 필터 알고리즘을 알아보기 위하여 다음과 같은 선형 시불변 이산시간 시스템을 고려한다.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Dw_{k-1} \quad (3.1)$$

$$z_k = Cx_k + v_k \quad (3.2)$$

식 (3.1)은 이산시간 상태 방정식이고, 식 (3.2)는 시스템의 이산시간 측정 방정식이다. w_{k-1} 는 시스템 잡음이고 v_k 는 측정 잡음으로서 평균이 0인 백색 가우시안 분포를 가진다고 가정한다.

그림 3.1은 k 시간에서의 필터 추정치 \hat{x}_k 를 구하는 Kalman 필터 알고리즘의 계산 흐름 선도를 나타낸 것이다.

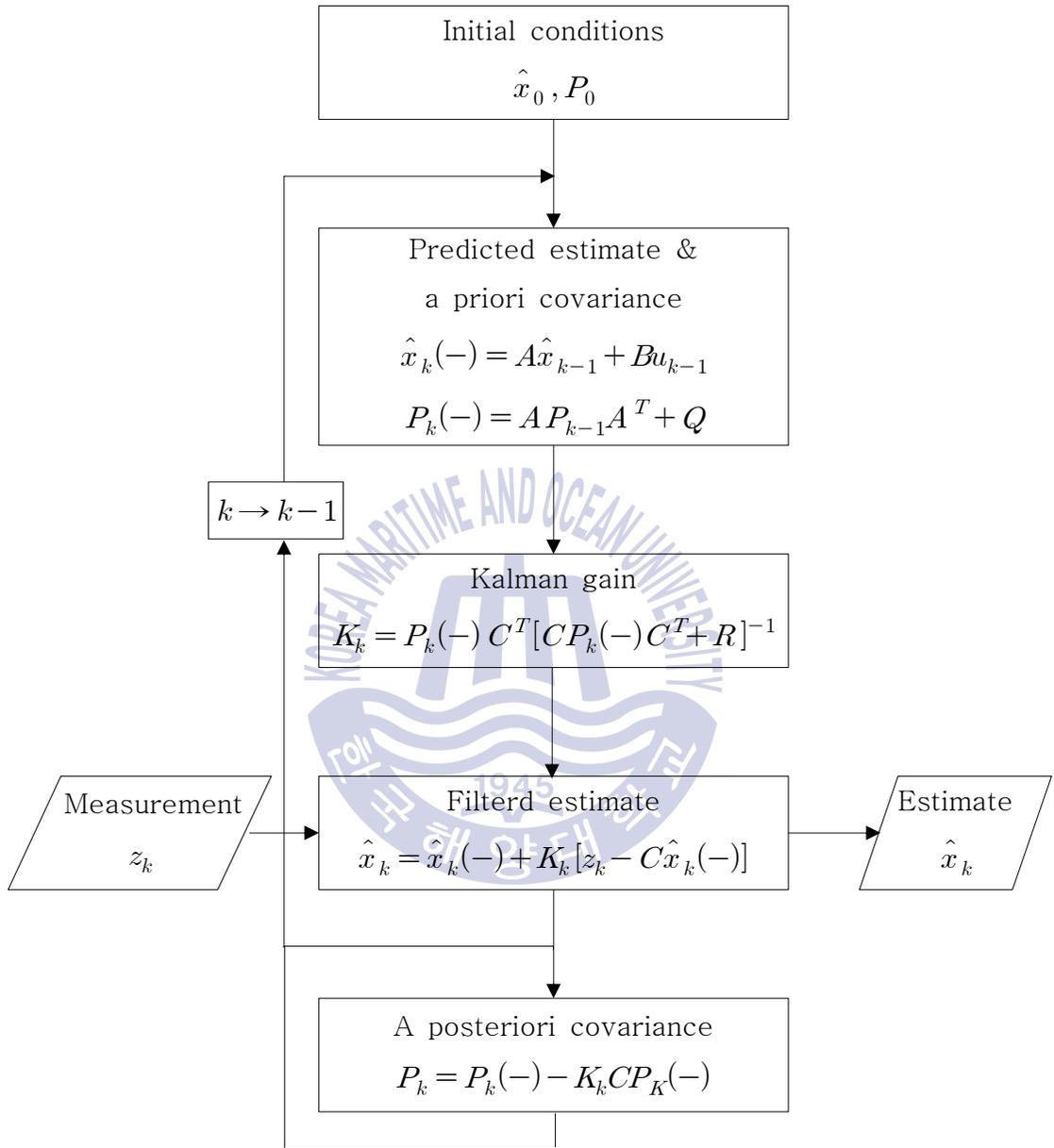


그림 3.1 Kalman 필터 알고리즘 계산 흐름선도

Fig. 3.1 Computation flowchart of Kalman filter algorithm

초기시간에서 주어지는 필터 공분산과 필터 추정치의 초기값을 P_0 , \hat{x}_0 로 정의하면 순환 알고리즘에 따라 현재의 샘플링 시간 k 에서의 예측추정치 $\hat{x}_k(-)$ 와 예측 공분산 $P_k(-)$ 는 식 (3.3)에 의해서 계산된다.

$$\begin{aligned}\hat{x}_k(-) &= A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \\ P_k(-) &= AP_{k-1}A^T + Q\end{aligned}\quad (3.3)$$

다음 단계에서는 식 (3.4)에 의해서 현재시간 k 에서의 가중 행렬인 Kalman 이득 K_k 를 계산한다.

$$K_k = P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R]^{-1}\quad (3.4)$$

필터 추정치 \hat{x}_k 는 식 (3.5)과 같이 계산된다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k(-) + K_k[z_k - C\hat{x}_k(-)]\quad (3.5)$$

마지막으로 다음 샘플링 시간에서의 예측 공분산 $P_{k+1}(-)$ 를 구하기 위하여 식 (3.6)와 같이 필터 공분산 P_k 를 계산한다.

$$P_k = P_k(-) - K_kCP_k(-)\quad (3.6)$$

3.2 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템 제안

평균이 0이고 백색 가우시안 분포를 가지는 시스템 잡음 w_{k-1} 과 측정 잡음 v_k 를 가지는 선형 시불변 이산 확률 시스템의 수학적 모델링은 식 (3.1)과 식 (3.2)에 의해 식 (3.7)로 정리된다.

$$\begin{aligned}
 x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Dw_{k-1} \\
 z_k &= Cx_k + v_k
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

백색 가우시안 분포를 가지는 잡음을 가진 선형 시불변 이산시간 시스템의 상태를 추정하기 위한 Kalman 필터 알고리즘은 식 (3.8)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_k(-) &= A\hat{x}_{k-1}(+) + Bu_{k-1} \\
 P_k(-) &= AP_{k-1}(+)A^T + DQ_{k-1}D^T \\
 K_k &= P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R_k]^{-1} \\
 \hat{x}_k &= \hat{x}_k(-) + K_k[z_k - C\hat{x}_k(-)] \\
 \hat{z}_k &= C\hat{x}_k \\
 P_k(+) &= [I - K_kC]P_k(-)
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

식 (3.8)에서 현재의 샘플링 시간 k 에서의 출력 \hat{z}_k 를 피드백 시킴으로써 구한 퍼지 PID 제어기에 사용되는 입력을 다시 정의하면 식 (3.9)과 같다.

$$\begin{aligned}
 e_k &= ref_k - \hat{z}_k \\
 r_k &= [e_k - e_{k-1}] / T \\
 a_k &= [r_k - r_{k-1}] / T
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

이렇게 구한 퍼지 PID 제어기 입력을 통해 구한 시스템 제어 신호는 식 (3.10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 dU_k &= dU_1 + dU_2 \\
 du_k &= GU \times dU_k \\
 u_k &= du_k + u_{k-1}
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

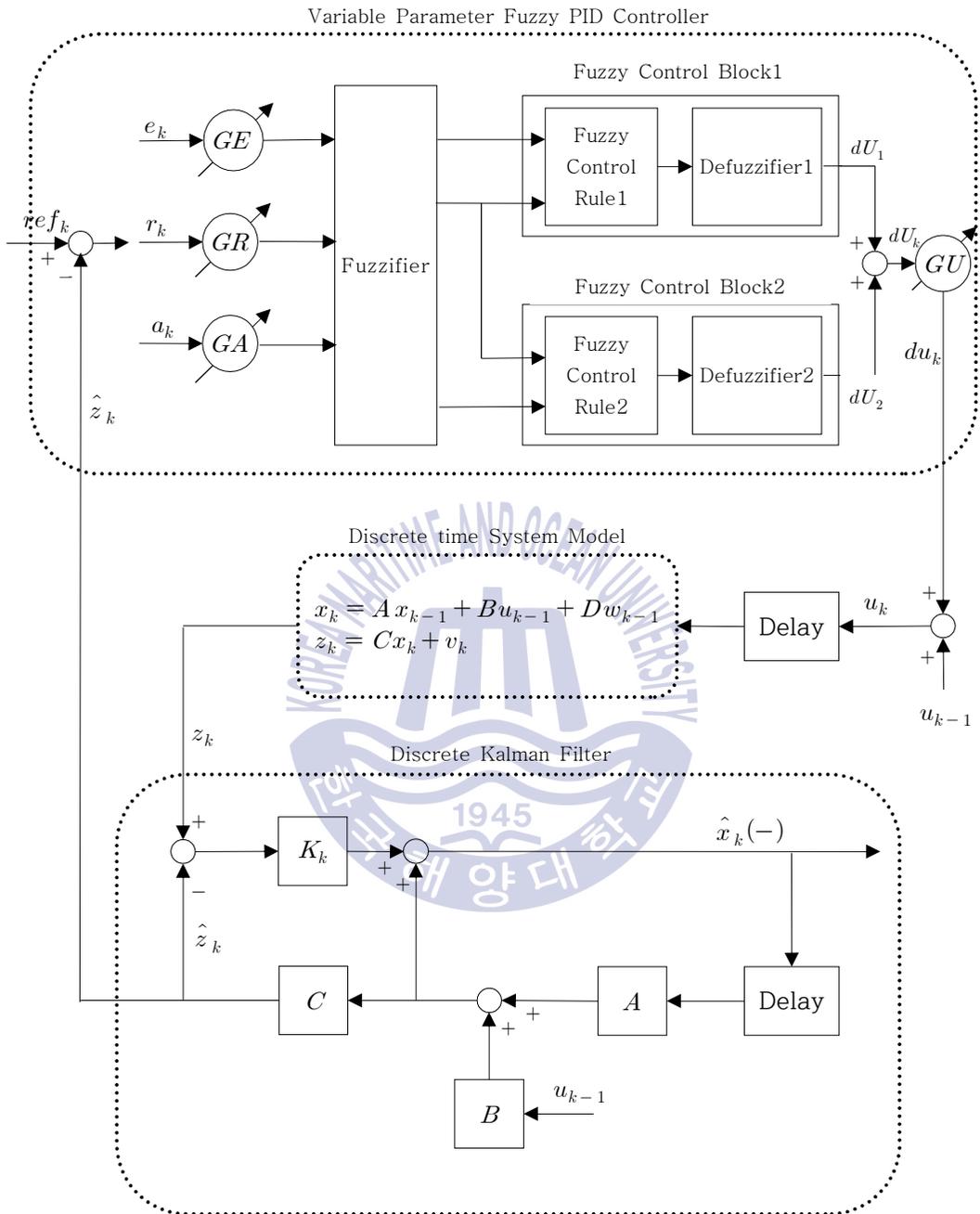


그림 3.2 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템 블록 다이어그램

Fig. 3.2 Block diagram of fuzzy PID control system using separation principle

측정 잡음이 실린 실제 측정치인 z_k 를 대신하여 추정 측정치 \hat{z}_k 를 이용하여 제어를 수행함으로써 제어성능이 향상될 것임을 예측할 수 있다. 이와 같은 결과를 확인하기 위하여 선형 시불변 이산 확률 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰하고자 한다.

그림 3.2는 잡음이 포함된 시스템의 실제 출력대신 Kalman 필터를 이용 추정 측정치를 피드백하여 퍼지 PID 제어를 수행하는 전체 제어시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

3.3 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능 검증

3.3.1 잡음만 인가될 경우의 제어성능

시스템 잡음과 측정 잡음이 인가된 이산시간 시스템에 대한 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 3.3과 같은 제어시스템을 고려한다.

식 (3.11)은 그림 3.3에서 사용된 이산시간 확률 시스템의 상태방정식과 시스템 잡음의 특성을 나타낸다.

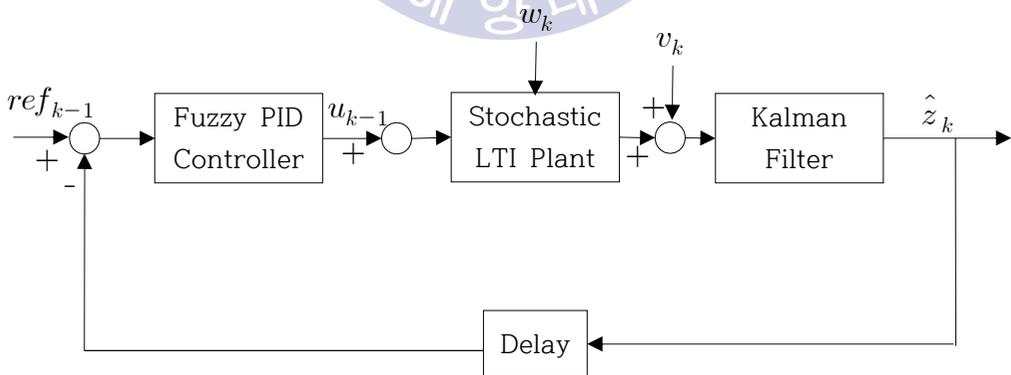


그림 3.3 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템

Fig. 3.3 Fuzzy PID control system based on Kalman filter

$$x_k = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} u_{k-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_{k-1}$$

$$w_{k-1} \sim N(0, 0.05^2) \quad (3.11)$$

식 (3.12)은 이산시간 확률 시스템의 출력방정식과 측정 잡음의 특성을 나타낸다.

$$z_k = [1 \ 0] x_k + v_k$$

$$v_k \sim N(0, 0.05^2) \quad (3.12)$$

그림 3.4는 단위시스템 입력에 대하여 Kalman 필터를 통해 상태 추정을 한 추정 측정치 \hat{z}_k 를 피드백 시켰을 경우 퍼지 PID 제어 시스템의 성능을 나타낸다.

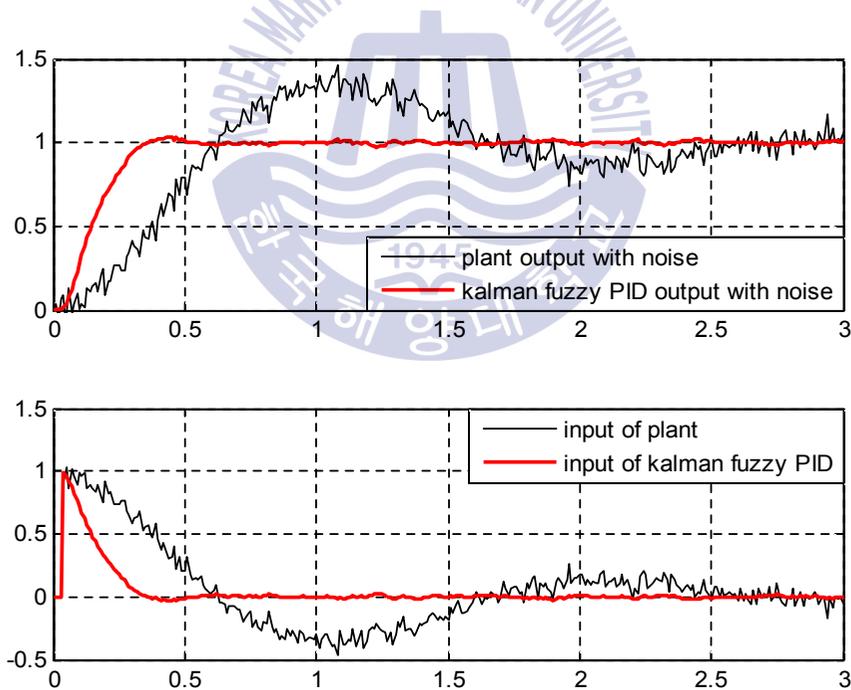


그림 3.4 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템 응답

Fig. 3.4 Response of fuzzy PID control system using separation principle

것이다. 첫 번째 그림에서 검은색 선은 잡음이 인가된 단순 피드백 시스템의 출력을 나타내고 빨간색 선은 Kalman 필터를 통해 추정출력 \hat{z}_k 를 이용하여 퍼지 PID 제어를 수행한 출력의 추정치이다. 두 번째 그림은 추정출력 \hat{z}_k 를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템의 입력을 나타낸 것으로 정상상태에서 상당히 안정되어 있음을 볼 수 있다.

그림 3.5는 정상상태에 있어서 필터 보상치를 구하는데 사용되는 이노베이션 프로세스를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 이노베이션 프로세스의 기댓값이 0에 거의 수렴되어 Kalman 필터가 상태를 잘 추정하고 있음을 판단할 수 있다.

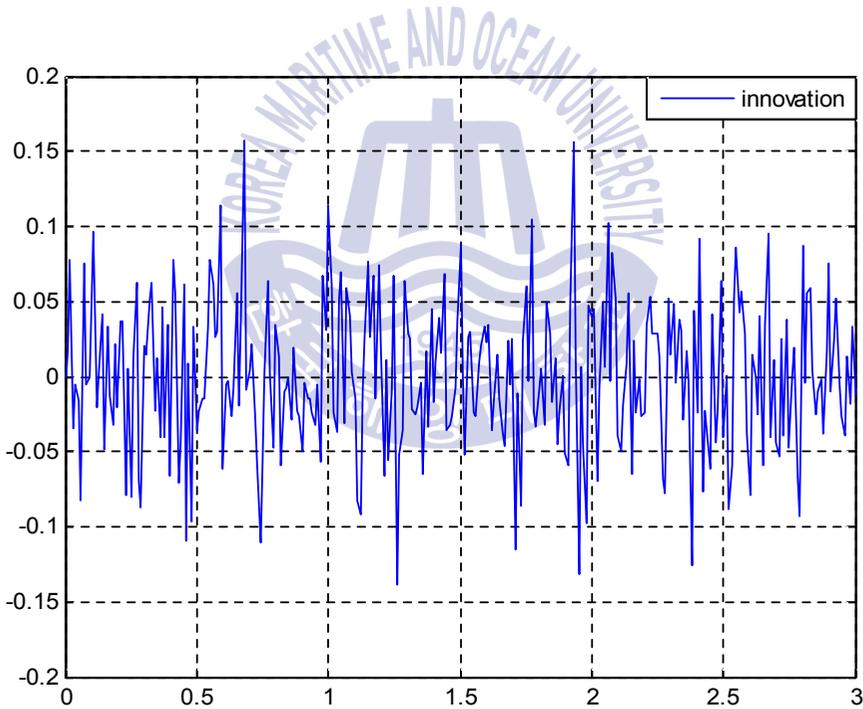


그림 3.5 Kalman 필터의 이노베이션 프로세스
 Fig. 3.5 Innovation process of Kalman filter

3.3.2 잡음과 미지의 외란입력이 인가될 경우의 제어성능

시스템 잡음과 측정 잡음 그리고 미지의 외란이 인가된 이산시간 시스템에 대한 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여 그림 3.6과 같은 제어시스템을 고려한다.

식 (3.13)은 미지의 외란이 인가된 이산시간 확률 시스템의 상태방정식과 시스템 잡음의 특성을 나타낸다.

$$x_k = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} (u_{k-1} + U_{k-1}) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_{k-1}$$

$$w_{k-1} \sim N(0, 0.05^2) \quad (3.13)$$

식 (3.14)는 대상 시스템의 출력방정식과 측정 잡음의 특성을 나타낸다.

$$z_k = [1 \ 0] x_k + v_k$$

$$v_k \sim N(0, 0.05^2) \quad (3.14)$$

미지의 외란 U_{k-1} 은 $U_{k-1} = 1$ 인 스텝으로 인가하여 시뮬레이션을 수행한다.

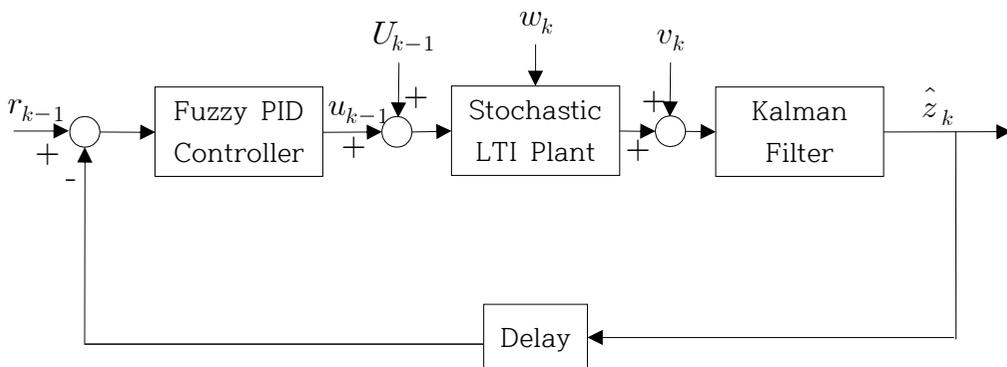


그림 3.6 미지의 외란이 인가되는 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 블록 선도
Fig. 3.6 Fuzzy PID control system based on Kalman filter under unknown disturbance

그림 3.7은 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 첫 번째 그림에서 빨간색 선은 미지의 외란과 잡음이 인가된 퍼지 PID 제어성능을 나타내고 검은색 선은 미지의 외란과 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어성능을 나타낸다. 두 번째 그림에서 빨간색 선은 미지의 외란과 잡음이 인가된 퍼지 PID 제어 시스템의 입력을 나타내고 검은색 선은 미지의 외란과 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 입력을 나타낸다.

그림 3.8은 정상상태에 있어서 필터 보상치를 구하는데 사용되는 이노베이션 프로세스를 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

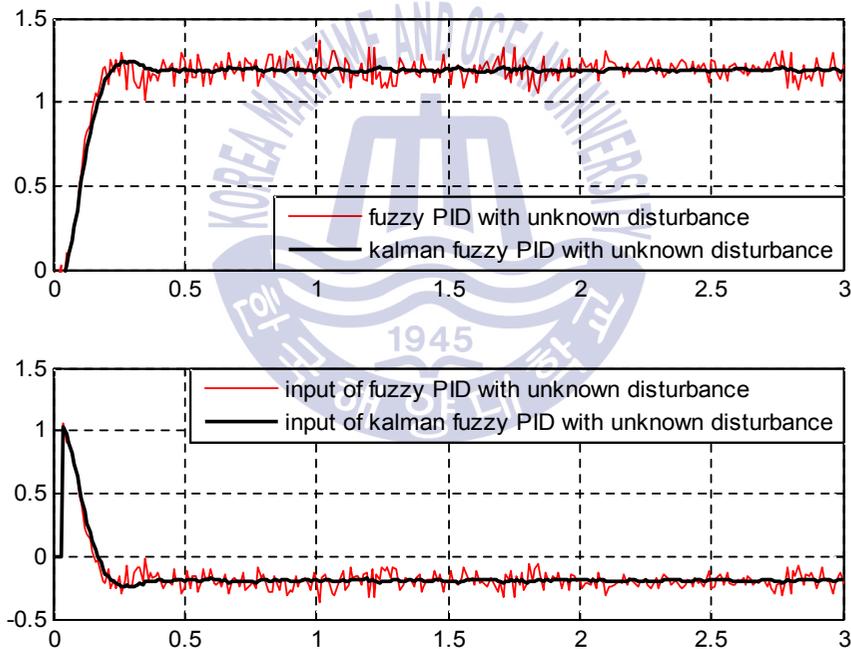


그림 3.7 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 응답
 Fig. 3.7 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter under unknown disturbance

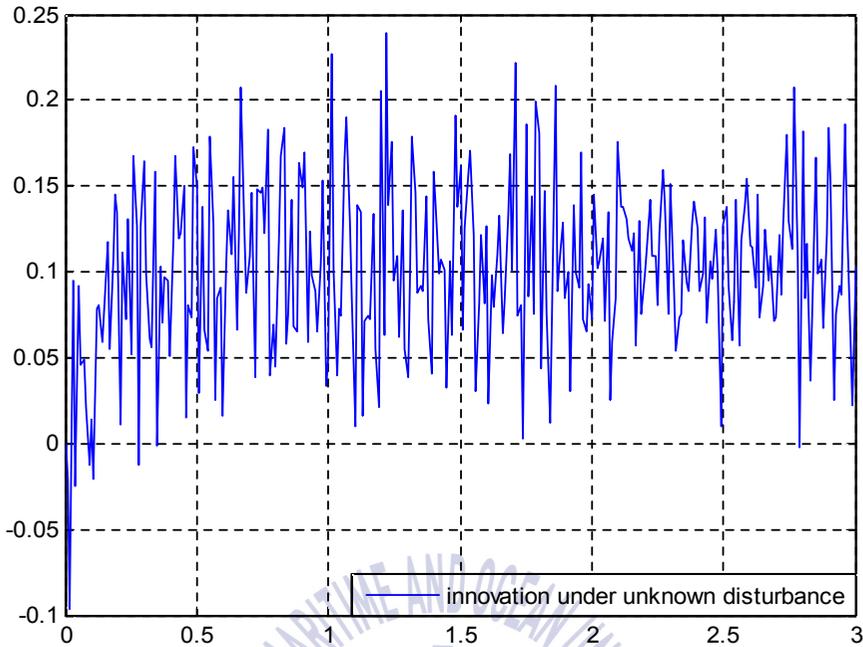


그림 3.8 미지의 외란이 인가될 때의 이노베이션 프로세스
 Fig. 3.8 Innovation process when unknown disturbance is occurred

3.4 성능검증 결과의 고찰과 문제점 분석

그림 3.9은 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 응답과 미지의 외란이 인가되지 않은 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 응답을 비교한 그림이다. 미지의 외란이 인가될 경우에는 분리원리를 사용한 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 응답은 기준입력을 제대로 추종하지 못하고 정상상태에서 오차를 지속적으로 표출하고 있음을 볼 수 있다.

그림 3.10는 정상상태에 있어서 필터 보상치를 구하는데 사용되는 실제 출력 z_k 와 추정 측정치 \hat{z}_k 의 차이인 이노베이션 프로세스를 미지의 외란이 인가될 때와 인가되지 않을 때 시뮬레이션 결과를 비교한 그림이다. 첫 번째 그림은 미지의 외란이 인가되지 않을 때 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과로 0을 중심으로 분포되어 있는 것을 볼 때 확률적 기대치 값이 거의 0이 됨을 확인

할 수 있다. 두 번째 그림에서 이노베이션 프로세스의 결과가 미지의 외란으로 인해 통계적 평균이 0과 큰 차이를 표출하는 것을 확인 할 수 있다.

다음 장에서는 미지의 외란으로 인해 제어 시스템의 출력이 정상상태에서 기준입력을 추종하지 못하는 것을 개선하기 위하여 미지의 외란으로 인해 발생하는 Kalman 필터의 이노베이션 프로세스의 변화량을 적절히 활용하는 방법에 대하여 살펴본다. 우선 필터의 보상치를 실시간으로 키워 주는 Kalman 필터 기반의 미지 외란 추정 알고리즘을 살펴보고, 알고리즘을 통한 외란의 추정치를 이용하여 시스템에 인가되는 입력의 크기를 제한하여 제어 시스템의 성능을 향상 시키는 방법을 제안하고자 한다.

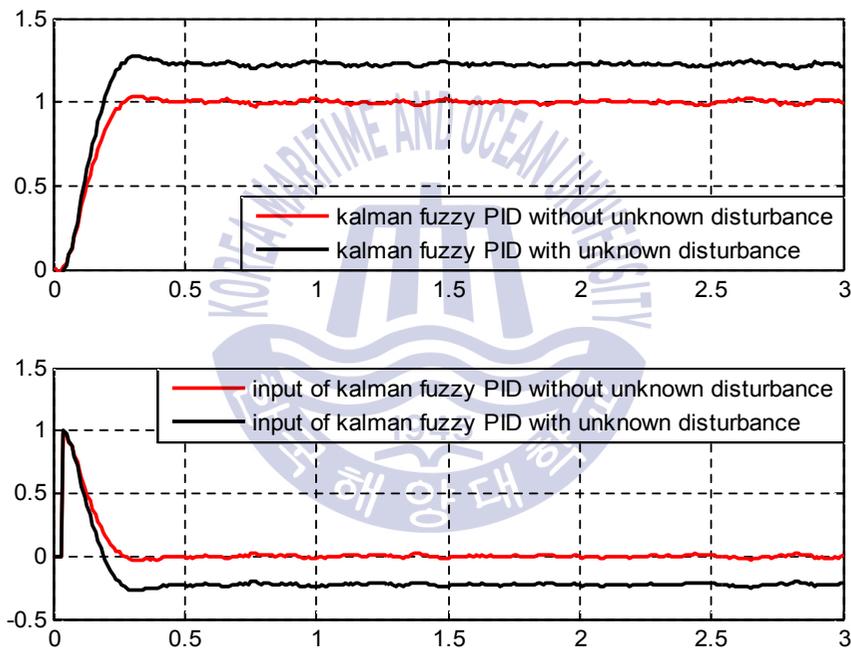


그림 3.9 미지의 외란인가 여부에 따른 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 응답

Fig. 3.9 Responses of Kalman filter based fuzzy PID control system according to the absence or presence of unknown disturbance

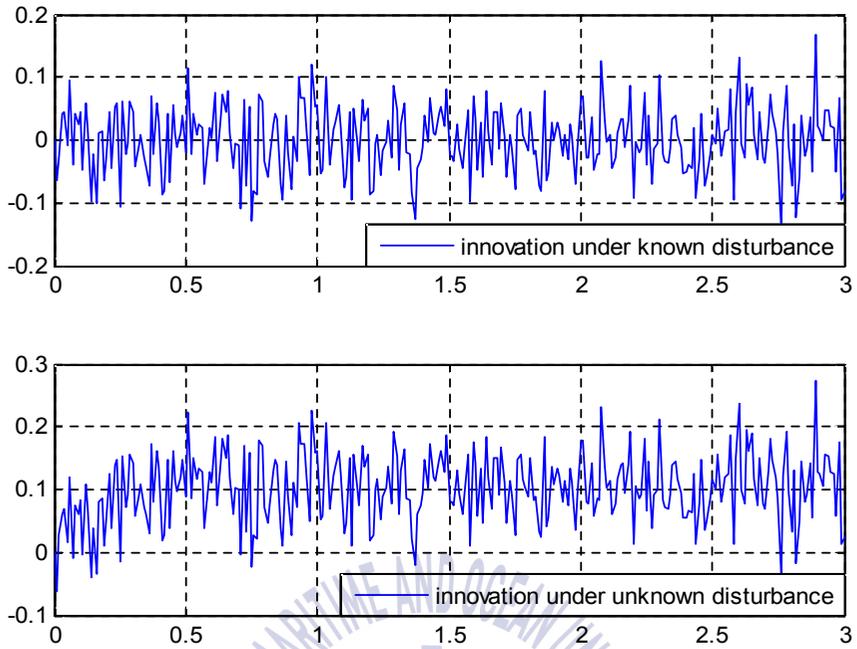


그림 3.10 Kalman 필터 기반 퍼지 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교
 Fig. 3.10 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

제 4 장 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템

이 장에서는 잡음과 미지의 외란이 인가될 경우 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템에 대해 살펴보고, Kalman 필터의 이노베이션을 이용하여 미지의 외란의 존재여부를 판단하는 방법과 미지의 외란 크기를 추정하는 퍼지 외란 추정기법을 이용한 Kalman 필터 기반의 상태 추정 알고리즘을 살펴본 다음, 추정된 외란을 활용한 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 제안한다.

4.1 미지의 외란과 잡음이 인가되는 시스템의 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템

그림 4.1은 알려진 퍼지 PID 제어기 출력 u_{k-1} 에 알려지지 않은 미지의 외란 U_{k-1} 이 인가된 Kalman 필터 상태 추정 기반 퍼지 PID 제어 시스템을 나타낸 블록선도이다.

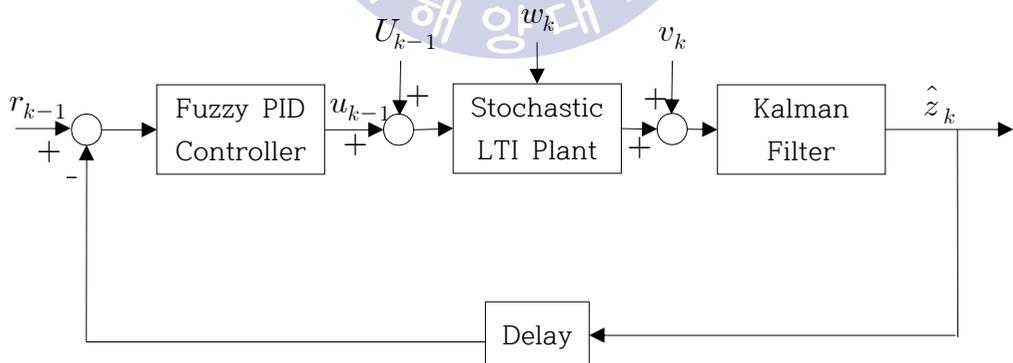


그림 4.1 미지의 외란이 인가되는 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 블록 선도
Fig. 4.1 Fuzzy PID control system based on Kalman filter under the presence of unknown disturbance

알려진 입력 u_{k-1} 만 인가되는 경우의 이산시간 확률 시스템의 상태 공간 방정식은 식 (4.1)과 같다.

$$\begin{aligned}x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Dw_{k-1} \\z_k &= Cx_k + v_k\end{aligned}\quad (4.1)$$

이때, 미지의 외란 U_{k-1} 이 추가로 인가된다면, 상태 공간 방정식은 식 (4.2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}x_k &= Ax_{k-1} + B(u_{k-1} + U_{k-1}) + Dw_{k-1} \\z_k &= Cx_k + v_k\end{aligned}\quad (4.2)$$

미지의 외란이 없는 경우와 있는 경우의 상태변수 사이의 관계는 식 (4.3)으로 정리되고, 출력 사이의 관계는 식 (4.4)와 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned}\bar{x}_k &= Ax_{k-1} + B(u_{k-1} + U_{k-1}) + Dw_{k-1} \\&= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Dw_{k-1} + BU_{k-1} \\&= x_k + BU_{k-1}\end{aligned}\quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}\bar{z}_k &= C(x_k + BU_{k-1}) + v_k \\&= Cx_k + v_k + CBU_{k-1} \\&= z_k + CBU_{k-1}\end{aligned}\quad (4.4)$$

Kalman 필터 알고리즘은 모델링된 시스템과 알려진 입력 u_{k-1} 만 활용하여 구성되고 미지의 외란 U_{k-1} 은 Kalman 필터에서 활용될 수 없다. 따라서 미지의 외란을 가진 선형 시불변 이산 확률 시스템의 상태 추정을 위한 Kalman 필터 알고리즘은 식 (4.5)와 같이 주어진다.

미지의 외란이 Kalman 필터 알고리즘으로 피드백 되지 않음으로 인해 실제 출력 z_k 와 추정 출력 \hat{z}_k 사이에는 식 (4.4)에서 확인된 오차 CBU_{k-1} 로 인한 차이가 날 것을 예상할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\hat{x}_k(-) &= A\hat{x}_{k-1}(+) + Bu_{k-1} \\
P_k(-) &= AP_{k-1}(+)A^T + DQ_{k-1}D^T \\
K_k &= P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R_k]^{-1} \\
\hat{x}_k &= \hat{x}_k(-) + K_k[z_k - C\hat{x}_k(-)] \\
\hat{z}_k &= C\hat{x}_k \\
P_k(+) &= [I - K_kC]P_k(-)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

이로 인해 Kalman 필터의 추정치 \hat{x}_k 는 시스템의 실제 상태 x_k 를 실시간으로 추정하지 못할 것임을 예상할 수 있다. 필터의 추정치가 실시간으로 추정하지 못하더라도 Kalman 필터를 통한 분리원리가 이용되었기 때문에 정상상태에서의 제어성능은 향상될 것임을 예상할 수 있다.

4.2 Kalman 필터 이노베이션 기반 미지의 외란 추정 알고리즘^[21]

매 샘플링 시간마다 발생하는 이노베이션의 값을 절대 값으로 환산하고 이를 특정한 수의 샘플링 구간 동안 합하여 평균을 구한다면 크게 변동되지 않는 값을 얻을 수 있게 된다. 이를 수식으로 표현한 것이 식 (4.6)이다.

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^N |r_{ek-i}| \right\} / N, \quad i = 0, 1, \dots, N \tag{4.6}$$

여기서 r_{ek} 는 샘플링 시간 k 에서 발생하는 이노베이션이고 N 은 축적하고자 하는 데이터 개수의 범위를 정하는 유한 데이터 윈도우이다. N 이 너무 크게 되면 현재의 샘플링 시간 k 에서 들어오는 이노베이션 r_{ek} 가 S 에 미치는 영향이 크지 않아 최신 정보의 영향에 둔감하게 되고, N 이 너무 작게 되면 현재 샘플링 시간 k 에 들어오는 최신 정보의 영향에 너무 민감하게 됨으로써 안정된

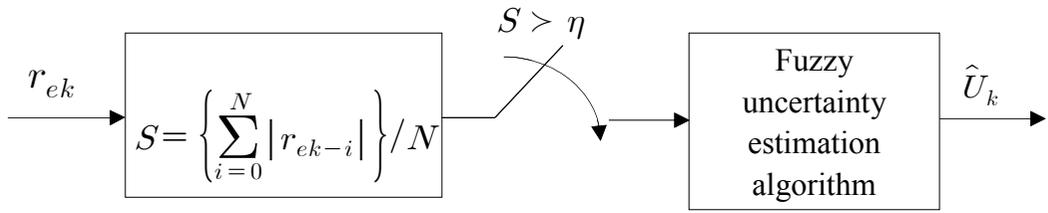


그림 4.2 이노베이션 프로세스를 이용한 미지의 외란 존재여부의 판단
 Fig. 4.2 Test for disturbance presence using innovation process

S 를 얻기가 곤란하게 된다. 따라서 N 의 크기는 실제 시스템의 상황에 따라 추정 알고리즘을 설계하는 설계자가 민감도를 판단하여 결정하게 된다.

그림 4.2는 식 (4.6)에서 계산한 S 값을 토대로 미지의 외란의 존재 여부를 판단하는 것으로 특정한 크기의 기준값과 비교함으로써 이루어짐을 나타낸다. 여기서 η 는 문턱 값으로 정의되는 상수이며 반복적으로 구한 S 값을 토대로 설계자가 결정하는 것이다.

그림 4.3는 미지의 외란의 존재여부를 확인한 뒤 크기를 추정하는 방법인 퍼지 미지의 외란 추정 알고리즘의 기능선도를 나타낸다.

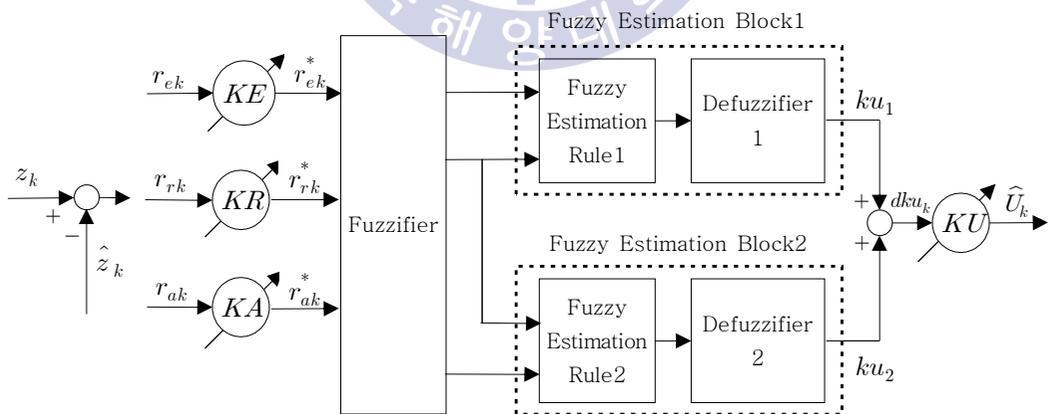


그림 4.3 퍼지 미지의 외란 추정 알고리즘의 기능선도
 Fig. 4.3 Functional diagram of a fuzzy disturbance estimation algorithm

퍼지 추정 알고리즘의 입력은 실제 상태의 측정치 z_k 와 추정 측정치 \hat{z}_k 의 차를 사용하여 퍼지규칙에 활용할 퍼지 변수들을 생성하는데 그 변수들은 식 (4.7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 r_{ek} &= z_k - \hat{z}_k & r_{ek}^* &= KE \times r_{ek} \\
 r_{rk} &= r_{ek} / T & r_{rk}^* &= KR \times r_{rk} \\
 r_{ak} &= [r_{ek} - r_{ek-1}] / T & r_{ak}^* &= KA \times r_{ak} \\
 KE &= L / r_{ek} & KR &= L / r_{rk} \\
 KA &= L / r_{ak} & KU &= 4 / KR \\
 dku_k &= ku_1 + ku_2 & \hat{U}_k &= dku_k \times KU
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

여기서 T 는 샘플링 시간이고 r_{rk} 는 이노베이션 r_{ek} 를 샘플링 타임 T 로 나눈 것이다. r_{ak} 는 이노베이션 r_{ek} 의 샘플링 타임에 따른 변화율이다. KE, KR, KA 는 각각 r_{ek}, r_{rk}, r_{ak} 의 크기를 정규화 시키기 위한 입력 스케일 파라미터이다. KU 는 퍼지 출력 dku_k 를 위한 스케일 파라미터이고 L 은 입력과 출력을 정규화 시키기 위한 정규화 파라미터로서 퍼지 미지의 외란 추정 알고리즘 설계자

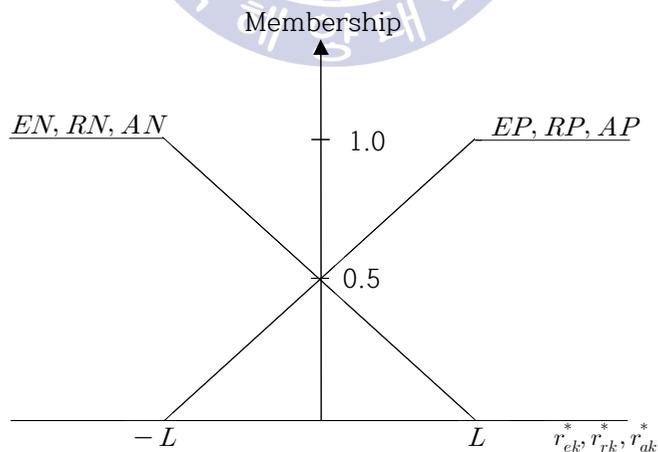


그림 4.4 퍼지 미지의 외란 추정 알고리즘을 위한 입력의 퍼지화

Fig. 4.4 Input fuzzifications for the fuzzy disturbance estimation algorithm

가 결정하는 설계 파라미터이다.

이렇게 생성된 입력으로 사용되는 정규화된 $r_{ek}^*, r_{rk}^*, r_{ak}^*$ 를 퍼지집합으로 사상하는 퍼지화 알고리즘은 그림 4.4, 퍼지 추정 블록1의 퍼지 출력 ku_1 에 대한 퍼지화 알고리즘은 그림 4.5 그리고 퍼지 추정 블록2의 퍼지 출력 ku_2 에 대한 퍼지화 알고리즘은 그림 4.6으로 정의된다.

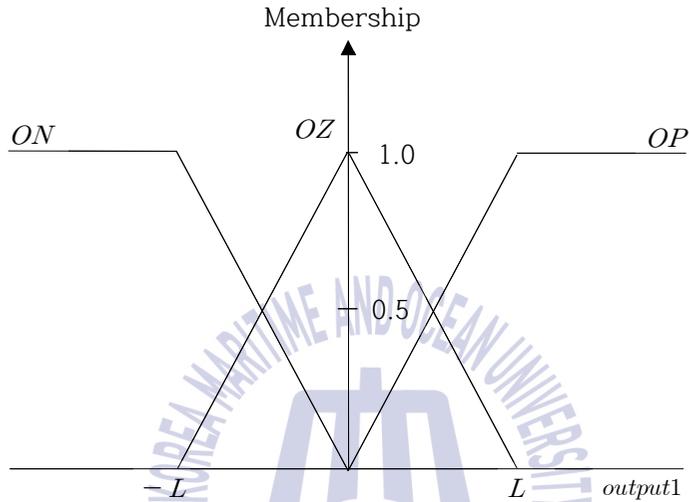


그림 4.5 퍼지 추정블록 1에 대한 출력 퍼지화

Fig. 4.5 Output fuzzification for fuzzy estimation block 1

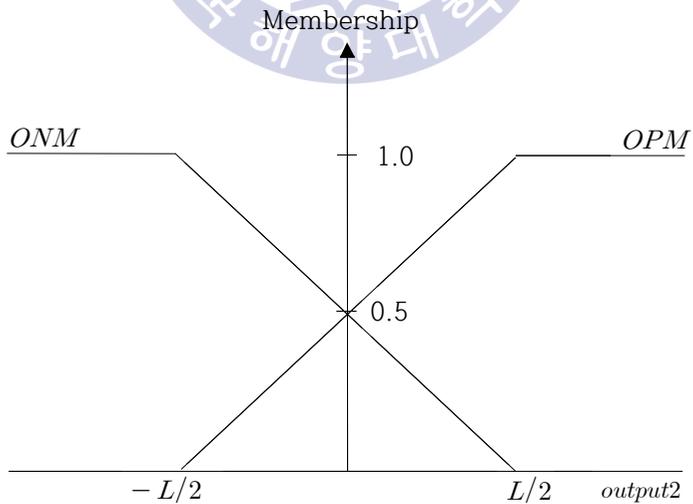


그림 4.6 퍼지 추정블록 2에 대한 출력 퍼지화

Fig. 4.6 Output fuzzification for fuzzy estimation block 2

미지의 외란의 크기를 추정하기 위한 퍼지 외란 추정 알고리즘에 사용되는 퍼지규칙은 ‘IF ~ THEN ~’ 형식으로 표현된다.

퍼지 추정 블록1에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_1 : IF r_{ek}^* = EP \text{ and } r_{rk}^* = RP, THEN output1 = OP$$

$$(R2)_1 : IF r_{ek}^* = EP \text{ and } r_{rk}^* = RN, THEN output1 = OZ$$

$$(R3)_1 : IF r_{ek}^* = EN \text{ and } r_{rk}^* = RP, THEN output1 = OZ$$

$$(R4)_1 : IF r_{ek}^* = EN \text{ and } r_{rk}^* = RN, THEN output1 = ON$$

퍼지 추정 블록2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_2 : IF r_{rk}^* = RP \text{ and } r_{ak}^* = AP, THEN output2 = OPM$$

$$(R2)_2 : IF r_{rk}^* = RP \text{ and } r_{ak}^* = AN, THEN output2 = ONM$$

$$(R3)_2 : IF r_{rk}^* = RN \text{ and } r_{ak}^* = AP, THEN output2 = OPM$$

$$(R4)_2 : IF r_{rk}^* = RN \text{ and } r_{ak}^* = AN, THEN output2 = ONM$$

제어규칙 $(R1)_1 \sim (R4)_1, (R1)_2 \sim (R4)_2$ 에서는 Zadeh의 AND 논리가 적용되었다. 이는 두 개에 대한 최소값을 찾는 min연산이다.

퍼지 추론논리를 퍼지 추정 블록에 적용하기 위한 입력공간은 입력의 크기에 따라 정규화파라미터 범위 $[-L, L]$ 내에 입력들이 항상 존재하도록 식 (4.8)과 같이 매 샘플링 시간마다 스케일 파라미터를 가변시켜 줌으로써, 퍼지 추정 블록1에 대해 그림 4.7, 퍼지 추정 블록2에 대해 그림 4.8과 같이 분할할 수 있다.

$$KE = L/r_{ek}, \quad KR = L/r_{rk}, \quad KA = L/r_{ak} \quad (4.8)$$

퍼지 미지의 외란 추정 알고리즘에 사용된 비퍼지화 알고리즘으로는 무게중심법을 사용하며 비퍼지화된 출력은 식(4.9)와 같다.

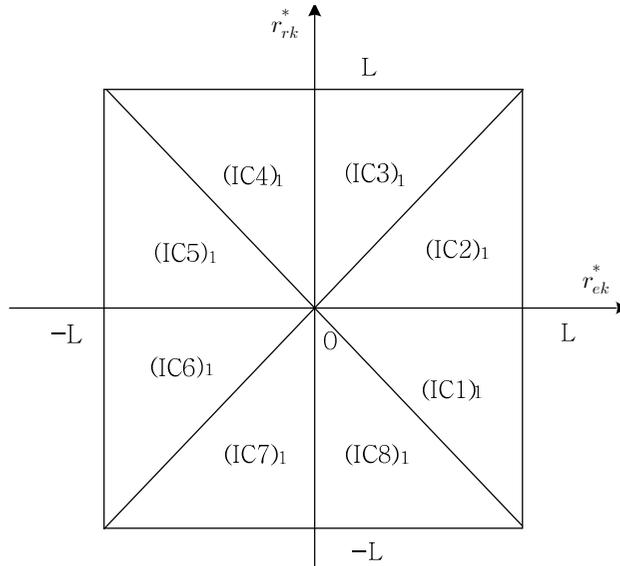


그림 4.7 r_{ek}^*, r_{rk}^* 에 대한 입력공간 분할

Fig. 4.7 Possible input partitioning for r_{ek}^* and r_{rk}^*

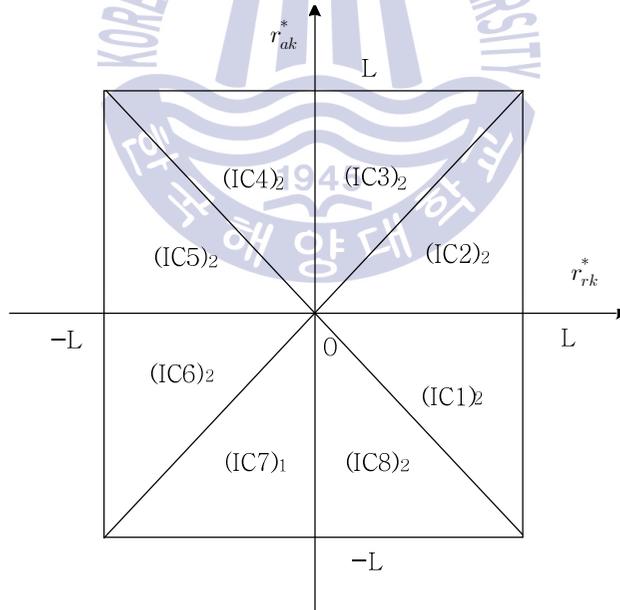


그림 4.8 r_{rk}^*, r_{ak}^* 에 대한 입력공간 분할

Fig. 4.8 Possible Input partitioning for r_{rk}^* and r_{ak}^*

$$dku_k = \frac{\sum(\text{membership of member}) \times (\text{value of member})}{\sum(\text{memberships})} \quad (4.9)$$

비퍼지화를 통한 퍼지 추정 블록 1, 2의 출력 ku_1 과 ku_2 를 합하고, 출력 스케일 파라미터 KU 를 곱함으로써 최종 출력인 미지의 외란 추정 값 \hat{U}_k 를 조건에 따라 정리하면 식 (4.10) ~ (4.13)과 같이 표현할 수 있다.

$$1) \text{ IF } KR \times |r_{rk}| \leq KE \times |r_{ek}| \leq L \text{ and } KA \times |r_{ak}| \leq KR \times |r_{rk}| \leq L, \quad (4.10)$$

THEN

$$\hat{U}_k = \frac{0.5 \times L \times KU \times KE}{2L - KE \times |r_{ek}|} r_{ek} + \frac{0.5 \times L \times KU \times KR}{2L - KE \times |r_{ek}|} r_{rk} + \frac{0.25 \times L \times KU \times KA}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{ak}$$

$$2) \text{ IF } KR \times |r_{rk}| \leq KE \times |r_{ek}| \leq L \text{ and } KR \times |r_{rk}| \leq KA \times |r_{ak}| \leq L, \quad (4.11)$$

THEN

$$\hat{U}_k = \frac{0.5 \times L \times KU \times KE}{2L - KE \times |r_{ek}|} r_{ek} + \frac{0.5 \times L \times KU \times KR}{2L - KE \times |r_{rk}|} r_{rk} + \frac{0.25 \times L \times KU \times KA}{2L - KA \times |r_{ak}|} r_{ak}$$

$$3) \text{ IF } KR \times |r_{ek}| \leq KE \times |r_{rk}| \leq L \text{ and } KA \times |r_{ak}| \leq KR \times |r_{rk}| \leq L, \quad (4.12)$$

THEN

$$\hat{U}_k = \frac{0.5 \times L \times KU \times KE}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{ek} + \frac{0.5 \times L \times KU \times KR}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{rk} + \frac{0.25 \times L \times KU \times KA}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{ak}$$

$$4) \text{ IF } KE \times |r_{ek}| \leq KR \times |r_{rk}| \leq L \text{ and } KR \times |r_{rk}| \leq KA \times |r_{ak}| \leq L, \quad (4.13)$$

THEN

$$\hat{U}_k = \frac{0.5 \times L \times KU \times KE}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{ek} + \frac{0.5 \times L \times KU \times KR}{2L - KR \times |r_{rk}|} r_{rk} + \frac{0.25 \times L \times KU \times KA}{2L - KA \times |r_{ak}|} r_{ak}$$

식 (4.8)을 이용하여 매 샘플링 시간마다 스케일 파라미터를 변경한다면 식 (4.10) ~ (4.13)에서의 분모는 항상 L 이 됨으로써 식 (4.14)과 같은 수식으로 정리된다.

$$\hat{U}_k = E_i r_k + E_p r_{rk} + E_d r_{ak} \quad (4.14)$$

여기서 E_i, E_p, E_d 는 다음과 같다.

$$E_i = 0.5 \times KU \times KE, E_p = 0.5 \times KU \times KR, E_d = 0.25 \times KU \times KA$$

위에서 살펴본 알고리즘을 이용한 Kalman 필터 기반의 상태 추정 알고리즘을 살펴본다. 미지의 외란이 인가될 경우 Kalman 필터의 이노베이션을 토대로 식 (4.6)을 사용하여 미지의 외란의 발생여부를 판단한다. 이때 발생한 미지의 외란의 크기는 퍼지 외란 추정 알고리즘의 결과식인 식 (5.9)에 의해 값이 \hat{U}_k 로 추정된다. 추정된 값을 다음 샘플링 시간에 Kalman 필터 알고리즘에 추가되는 입력으로 피드백 시켜 필터 추정치를 보상시키는 방법을 택해 실제의 상태를 신뢰성 있게 추정할 수 있도록 상태 추정 알고리즘을 구성할 수 있다.

식 (4.15)는 기존의 Kalman 필터 알고리즘에서 추정된 미지의 외란 \hat{U}_k 가 다음 샘플링 시간에 예측 추정치를 계산하는데 입력으로 피드백 된 상태 추정 알고리즘을 정리한 것이다. 여기서 \hat{U}_k 는 식 (4.6)이 만족될 때만 새롭게 계산되고 그렇지 않을 경우에는 이전에 계산된 값을 계속 사용한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k(-) &= A\hat{x}_{k-1} + B(u_{k-1} + \hat{U}_{k-1}) \\ P_k(-) &= AP_{k-1}(+)A^T + DQ_{k-1}D^T \\ K_k &= P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R_k]^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k(-) + K_k[z_k - C\hat{x}_k(-)] \\ P_k &= [I - K_kC]P_k(-) \\ \hat{U}_k &= E_i r_k + E_p r_{rk} + E_d r_{ak} \end{aligned} \quad (4.15)$$

그림 4.9는 미지의 외란 발생유무를 판단하기 위한 알고리즘과 미지의 외란 계산 알고리즘 및 이를 피드백 하는 루프가 삽입된 Kalman 필터 기반의 새로운 상태 추정 알고리즘의 흐름 선도를 나타낸다.

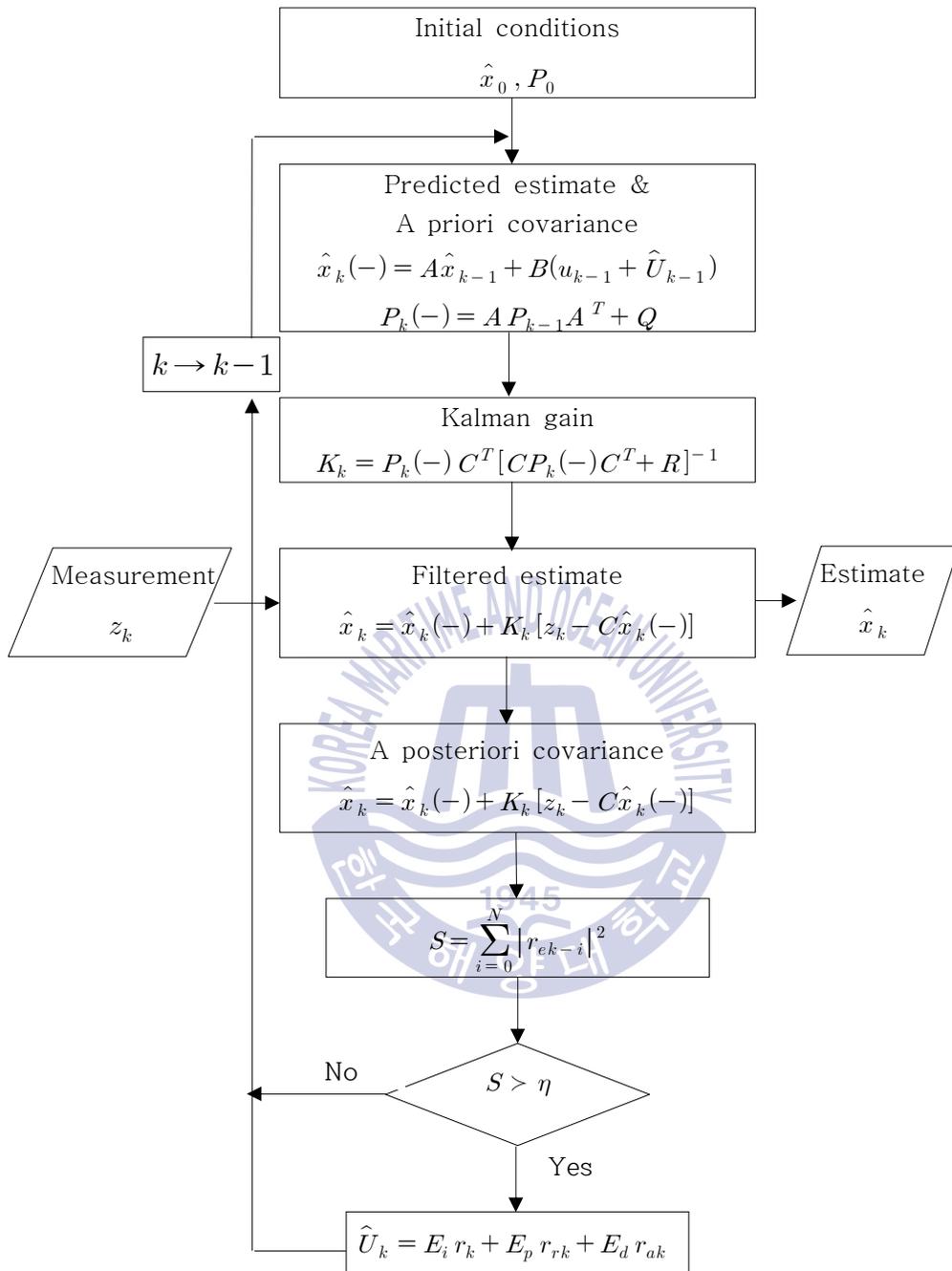


그림 4.9 미지의 외란 추정 알고리즘이 결합된 Kalman 필터 기반 상태 추정 알고리즘의 흐름선도

Fig. 4.9 Flowchart of Kalman filter based state estimation algorithm with disturbance estimation algorithm

4.3 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘의 제안

미지의 외란 추정은 위의 절에서 살펴본 Kalman 필터 기반 상태 추정 알고리즘을 적용하고 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘은 제 3 장에서 살펴본 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 알고리즘을 적용한다.

그림 4.10는 미지의 외란이 인가된 제어 시스템의 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 방법을 블록선도를 나타낸다. 제4장에서 살펴본 것처럼 미지의 외란 U_{k-1} 이 인가 됨으로 인하여 CBU_{k-1} 의 출력 오차가 발생하는 것을 확인 하였다. 그래서 Kalman 필터 기반 상태 추정 알고리즘을 이용하여 상태 추정 값 \hat{U}_k 를 추정하여 시스템 입력에서 미지의 외란을 상쇄시켜줌으로써 제어 시스템의 성능을 기준 입력으로 수렴을 가능하도록 보상 알고리즘을 구성할 수 있다.

시스템의 실제출력 z_k 를 이용하여 분리원리와 미지의 외란을 추정할 Kalman 필터는 식 (4.16)으로 표현 된다.

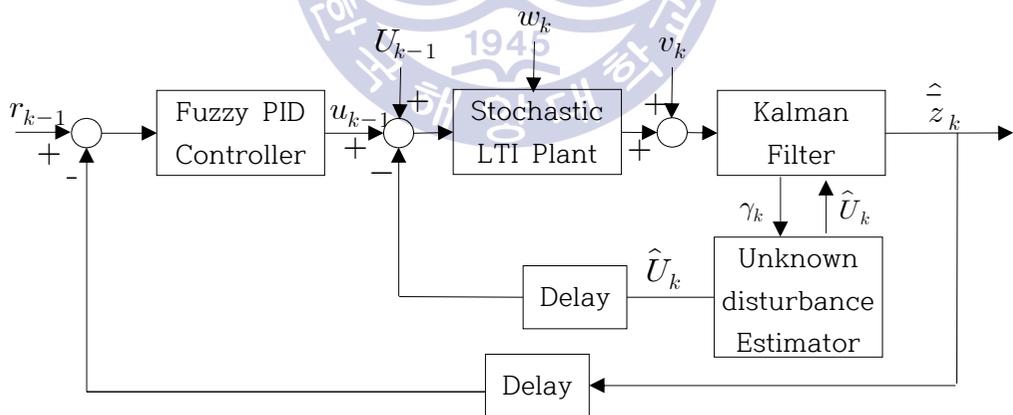


그림 4.10 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 블록선도
 Fig. 4.10 Block diagram of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator

$$\begin{aligned}
\hat{x}_k(-) &= A\hat{x}_{k-1} + B(u_{k-1} + \hat{U}_{k-1}) \\
P_k(-) &= AP_{k-1}(+)A^T + DQ_{k-1}D^T \\
K_k &= P_k(-)C^T[CP_k(-)C^T + R_k]^{-1} \\
\hat{x}_k &= \hat{x}_k(-) + K_k[z_k - C\hat{x}_k(-)] \\
P_k &= [I - K_kC]P_k(-) \\
\hat{z}_k &= C\hat{x}_k \\
\hat{U}_k &= E_i r_k + E_p r_{rk} + E_d r_{ak}
\end{aligned} \tag{4.16}$$

식 (4.16)으로 얻어진 추정 측정치 \hat{z}_k 는 분리원리를 위하여 피드백 시켜 *error* 을 구하고 이를 이용하여 퍼지 PID 제어 입력은 식 (4.17)과 같다.

$$\begin{aligned}
e_k &= ref_k - \hat{z}_k \\
r_k &= [e_k - e_{k-1}]/T \\
a_k &= [r_k - r_{k-1}]/T
\end{aligned} \tag{4.17}$$

이렇게 구한 퍼지 PID 제어기 입력을 통해 구한 시스템 제어 입력은 식 (4.18)과 같다.

$$\begin{aligned}
dU_k &= dU_1 + dU_2 \\
du_k &= GU \times dU_k \\
u_k &= du_k + u_{k-1}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

또한, Kalman 필터의 이노베이션 즉, 실제 상태의 측정치 z_k 와 추정 측정치 \hat{z}_k 의 차를 이용하여 퍼지 추정알고리즘의 퍼지규칙에 활용할 퍼지 변수들을 생성하는데 그 변수들은 식 (4.19)와 같다.

$$\begin{aligned}
r_{ek} &= z_k - \hat{z}_k & r_{ek}^* &= KE \times r_{ek} \\
r_{rk} &= r_{ek} / T & r_{rk}^* &= KR \times r_{rk} \\
r_{ak} &= [r_k - r_{k-1}] / T & r_{ak}^* &= KA \times r_{ak} \\
KE &= L / r_{ek} & KR &= L / r_{rk} \\
KA &= L / r_{ak} & KU &= 4 / KR \\
dku_k &= ku_1 + ku_2 & \hat{U}_k &= dku_k \times KU
\end{aligned} \tag{4.19}$$

식 (4.19)의 퍼지 변수들을 이용하여 5.1절에서의 퍼지 입력과 퍼지 추정 블록들의 출력을 퍼지화와 비퍼지화 방법과 Kalman 필터 기반 추정 알고리즘을 이용하여 상태 추정 값 \hat{U}_k 를 구할 수 있다. 그림 5.9에서 보면 외란추정치 \hat{U}_k 를 시스템 입력에 피드백 시켜 미지의 외란을 상쇄시키는 것은 식 (4.20)과 같다.

$$\begin{aligned}
x_k &= Ax_{k-1} + B(u_{k-1} + U_{k-1} - \hat{U}_{k-1}) + Dw_{k-1} \\
z_k &= Cx_k + v_k
\end{aligned} \tag{4.20}$$

식 (4.20)을 전개하면 식 (4.21), 식 (4.22) 과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned}
\bar{x}_k &= Ax_{k-1} + B(u_{k-1} + U_{k-1} - \hat{U}_{k-1}) + Dw_{k-1} \\
&= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + Dw_{k-1} + BU_{k-1} \\
&= x_k + BU_{k-1}
\end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
\bar{z}_k &= C(x_k + BU_{k-1} - \hat{U}_{k-1}) + v_k \\
&= Cx_k + v_k + CBU_{k-1} - CB\hat{U}_{k-1} \\
&= z_k + CBU_{k-1} - CB\hat{U}_{k-1}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

만약 미지의 외란 추정 알고리즘에 의해 외란 추정치 \hat{U}_k 가 정상적으로 추정된다면 식 (4.22)를 보면 미지의 외란으로 인한 CBU_{k-1} 과 $CB\hat{U}_{k-1}$ 가 서로 상쇄되는 것을 알 수 있다.

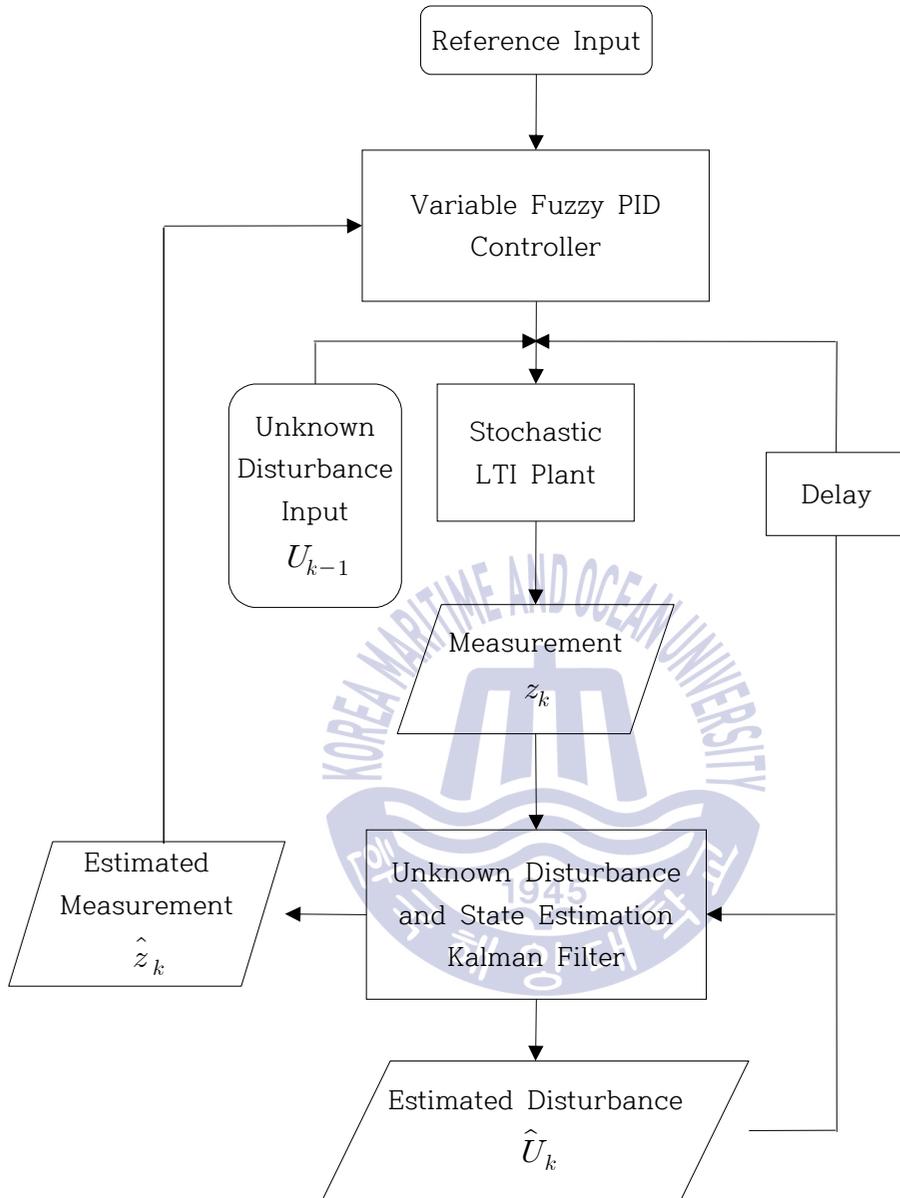


그림 4.11 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘 흐름선도
 Fig. 4.11 Flowchart of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator

그림 4.11은 선형 시불변 이산 확률 시스템에 미지의 외란이 인가되었을 때 분리원리를 이용하여 외란추정 알고리즘을 가진 Kalman 필터로서 먼저 외란입력과 출력을 추정하고 이를 퍼지 PID 제어기에서 활용하도록 하는 제어시스템의 흐름선도를 나타낸 것이다.

따라서 식(4.22)에서 미지의 외란이 상쇄됨에 따라서 미지의 외란이 인가된 퍼지 PID 제어 시스템의 제어성능이 기준 값과의 오차가 줄어들어 정상상태에서 기준 값으로 수렴할 것으로 예상할 수 있다. 이와 같은 성능 개선을 확인하기 위하여 선형 시불변 이산 확률 시스템을 대상으로 그림 4.11의 알고리즘 흐름 선도를 적용하여 다음 절에서 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

4.4 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘 성능검증

미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘의 성능검증을 위해 식 (4.23)과 같은 대상 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}
 x_k &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} u_{k-1} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_{k-1} \\
 w_{k-1} &\sim N(0, 0.05^2) \\
 z_k &= [1 \ 0] x_k + v_k \\
 v_k &\sim N(0, 0.05^2)
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

미지의 외란이 인가된 시스템의 상태공간 방정식은 식 (4.24)과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_k &= \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0098 \\ 0 & 0.9804 \end{bmatrix} x_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.0010 \\ 0.0980 \end{bmatrix} (u_{k-1} + U_{k-1}) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_{k-1} \\
 w_{k-1} &\sim N(0, 0.05^2) \\
 z_k &= [1 \ 0] x_k + v_k \\
 v_k &\sim N(0, 0.05^2)
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

미지의 외란 U_{k-1} 은 $U_{k-1}=1$ 인 스텝으로 인가하여 시뮬레이션을 수행한다.

그림 4.12는 추정된 외란입력과 Kalman 필터 추정출력을 이용하여 퍼지 PID 제어를 수행한 제어시스템의 단위스텝 응답 시뮬레이션 결과이다. 첫 번째 그림의 빨간색 선은 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어를 수행한 결과이고 검은색 선은 추정된 외란입력과 Kalman 필터 추정출력을 이용하여 퍼지 PID 제어를 수행한 응답결과이다. 두 번째 그림의 빨간색 선은 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 입력이고 검은색 선은 추정된 외란입력과 Kalman 필터 추정출력을 사용한 퍼지 PID 제어 시스템의 입력이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 미지의 외란추정을 하지 않을 경우에는 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 응답이 외란으로 인하여 정상상태에서 지속적인 오차를 표출하였으나, 외란추정 알고리즘이 결합된 Kalman 필터기반 퍼지 PID 제어시스템의 응답은 정상상태에서 오차 없이 기

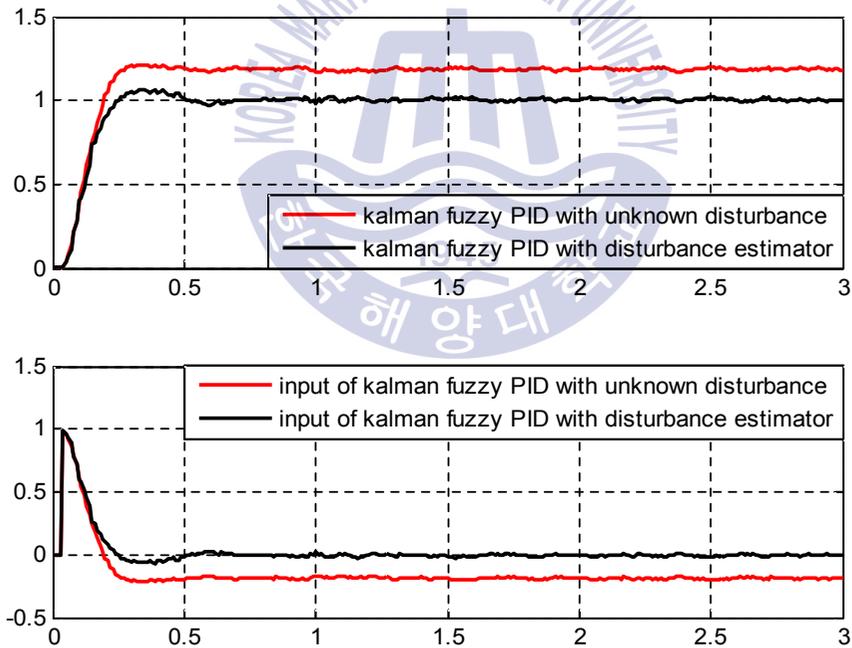


그림 4.12 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능

Fig. 4.12 Control performances of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator

준입력에 수렴함을 볼 수 있다.

그림 4.13는 미지의 입력 추정을 위하여 제안된 알고리즘을 사용한 이노베이션 프로세스와 사용하지 않은 이노베이션 프로세스를 비교한 그림이다. 첫 번째 그림은 제안된 알고리즘을 사용하지 않아 미지 외란의 영향을 받는 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 두 번째 그림은 제안된 알고리즘을 사용함으로써 미지의 외란의 영향이 줄어 든 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 첫 번째 그림의 경우, 미지의 외란을 추정하지 않을 때에는 스텝 외란으로 인해 이노베이션의 통계적 기대값이 0에 수렴하지 않고 있어 Kalman 필터에 의한 상태추정오차가 지속적으로 발생하고 있음을 암시한다. 따라서 퍼지 PID 제어기로 피드백 되는 추정출력도 신뢰할 수 없어 제어시스템의 응답이 정상상태에서 오차를 표출함을 그림 4.12에서 확인할 수 있다. 두

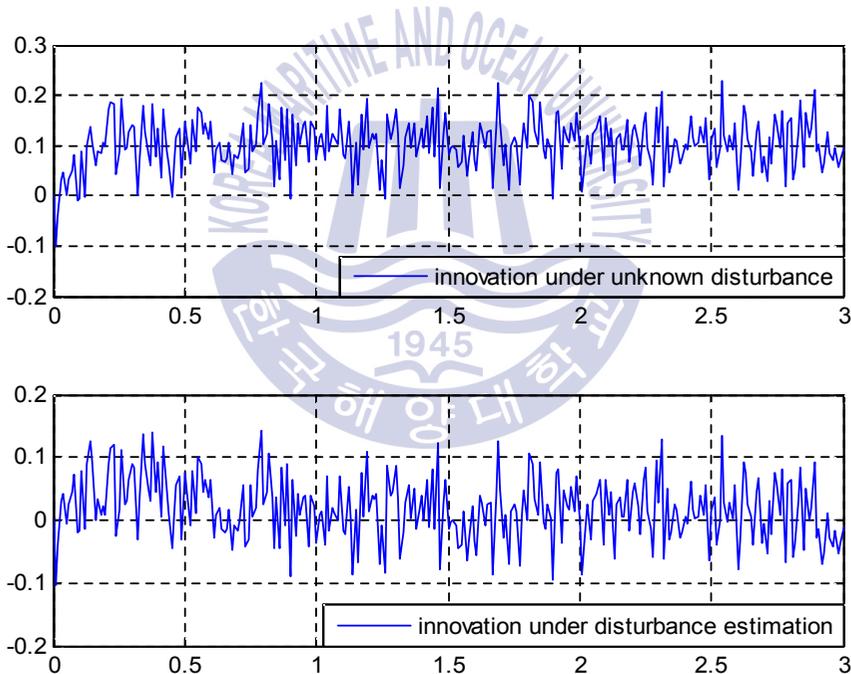


그림 4.13 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교

Fig 4.13 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

번째 그림은 외란을 추정하고 이를 Kalman 필터와 제어입력 생성에 피드백 시킨 경우의 이노베이션으로서, 정상상태에서 통계적 평균이 0에 수렴함을 볼 수 있다. 이는 Kalman 필터에 의해 상태추정이 올바르게 이루어짐으로써 퍼지 PID 제어시스템의 정상상태성능도 기준입력으로 수렴됨을 암시한다.

그림 4.14는 추정된 외란입력과 Kalman 필터 추정출력을 사용한 퍼지 PID 제어를 수행한 시뮬레이션 결과와 미지의 외란을 퍼지 추정 알고리즘을 이용하여 추정한 추정치를 나타낸 그림이다. 두 번째 그림에서 미지의 외란 추정치가 점점 증가하여 정상상태에서는 인가된 스텝외란의 크기인 1에 도달할 것으로 예상되지만, 그 응답속도가 느린 이유는 Kalman 필터 자체의 보상능력으로 인해 외란의 영향이 이노베이션에 바로 표출되지 않기 때문이다.

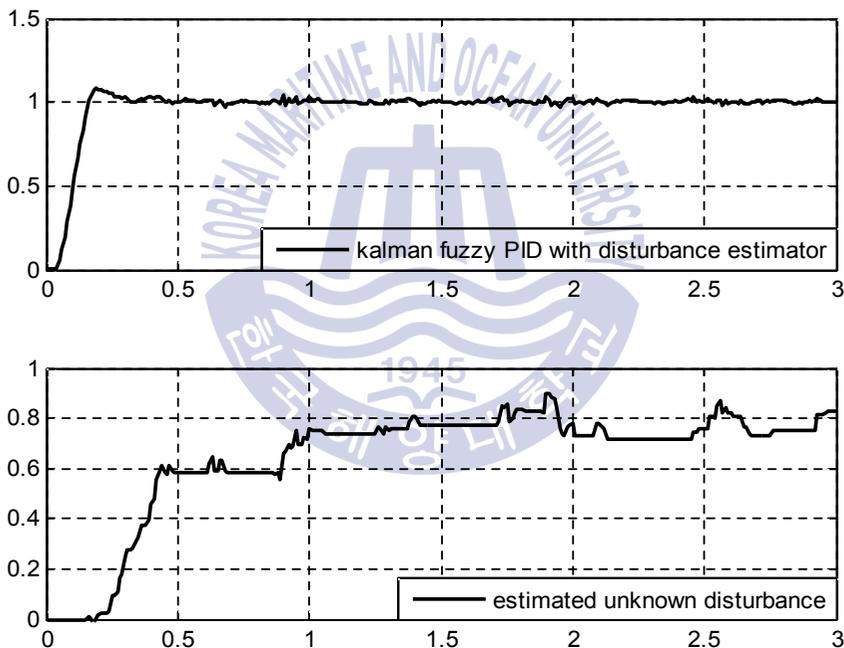


그림 4.14 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 외란 추정치

Fig. 4.14 Response of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance

4.5 성능검증 결과의 고찰

미지의 외란을 추정하는 알고리즘이 결합된 Kalman 필터를 기반으로 분리원리에 의해 제안한 퍼지 PID 제어시스템의 성능을 검증하기 위하여 앞 절에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 정상상태에서 우수한 상태추정성과 제어성능을 표출함을 확인할 수 있다. 제안된 알고리즘의 성능을 좀 더 구체적으로 확인하고 평가하기 위하여 다음과 같은 보다 일반적인 시스템 내·외부 조건을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

4.5.1 기준입력이 변화하는 경우의 성능검증

미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능검증하기 위한 첫 번째 조건으로 기준입력을 아래와 같이 시간 별로 변화를 주고 미지의 외란은 동일한 크기 $U_k = 1$ 로 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\begin{cases} r(t) = 1 & 0 \leq t \leq 3 \\ r(t) = 0 & 3 \leq t \leq 6 \\ r(t) = 0.7 & 6 \leq t \end{cases}$$

시뮬레이션 결과는 그림 4.15 및 그림 4.16과 같다. 그림 4.15를 보면, Kalman 필터 기반의 미지의 외란 추정 알고리즘을 이용하여 미지의 외란을 추정한 추정치 \hat{U}_k 와 Kalman 필터 추정출력 \hat{z}_k 를 피드백 시켜줌으로써, 시스템에 인가되는 입력의 크기를 제한하여 정상상태에서 기준입력을 추종하고 제어동작 중 D제어의 오동작을 줄임으로써 정상상태에서 양호한 제어성능을 표출하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 기준입력이 시간에 따라 변화함에도 변화된 기준입력을 정상상태에서 양호하게 추종하는 것은 물론 정상상태에서 미지의 외란을 근접하게 추정함을 확인할 수 있다. 그림 4.16의 첫 번째 그림을 보면 미지의 외란은 동일한 크기로 주었기 때문에 이노베이션이 수렴하는 특성도 동일한 조건인 그림 4.13과 같은 통계적 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 두 번

깨 그림에서 보이는 바와 같이 제안된 알고리즘을 통해 생성된 이노베이션 프로세스의 값은 0주변에 분포하고 있음을 알 수 있고 이 경우에는 통계적 평균이 거의 0에 근사함을 알 수 있으므로써 외란 추정치가 보상된 Kalman 필터가 정상적으로 상태를 추정하고 있음을 유추할 수 있다.

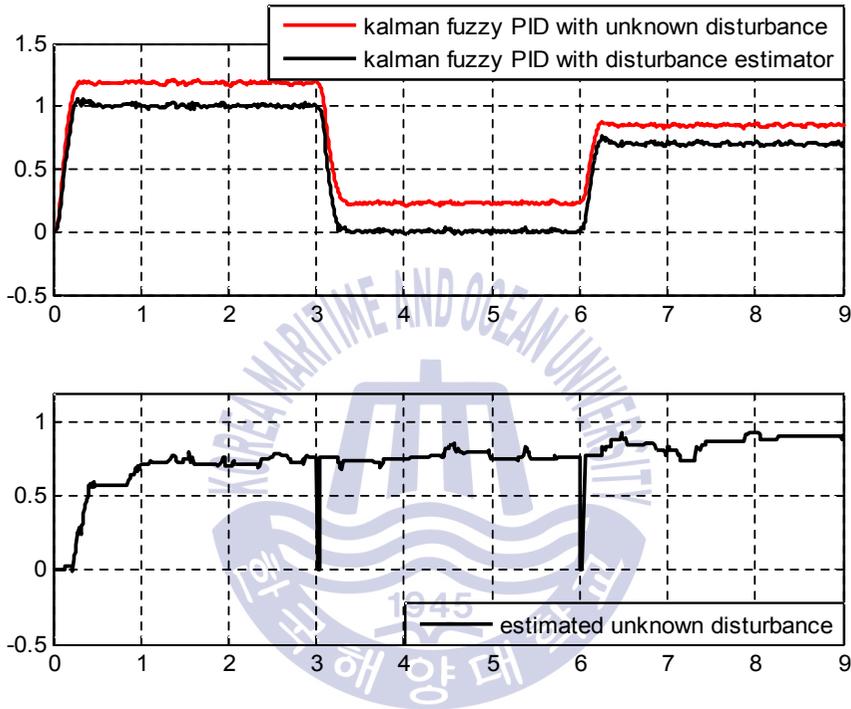


그림 4.15 기준입력이 변할 때 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 추정된 외란

Fig. 4.15 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when reference input is changed

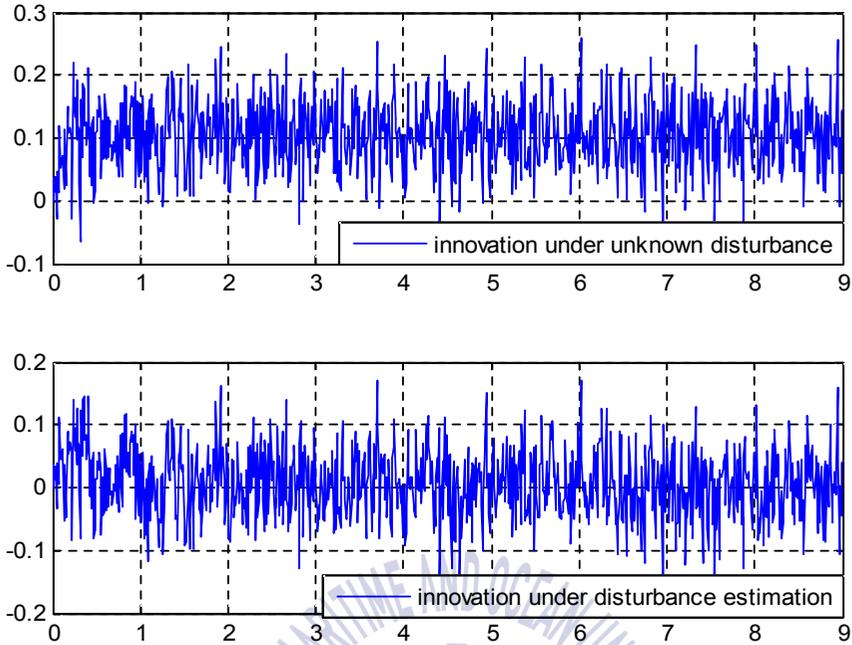


그림 4.16 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교
 Fig 4.16 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

4.5.2 미지의 외란 크기가 변하는 경우의 성능검증

두 번째로 기준입력은 동일한 $r(t)=1$ 로 하고 미지의 외란은 아래와 같이 시간 별로 변화를 주어 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과는 그림 4.17 그리고 그림 4.18과 같다.

$$\begin{cases} U_k = 1 & 0 \leq t \leq 3 \\ U_k = -0.2 & 3 \leq t \leq 6 \\ U_k = 0.7 & 6 \leq t \end{cases}$$

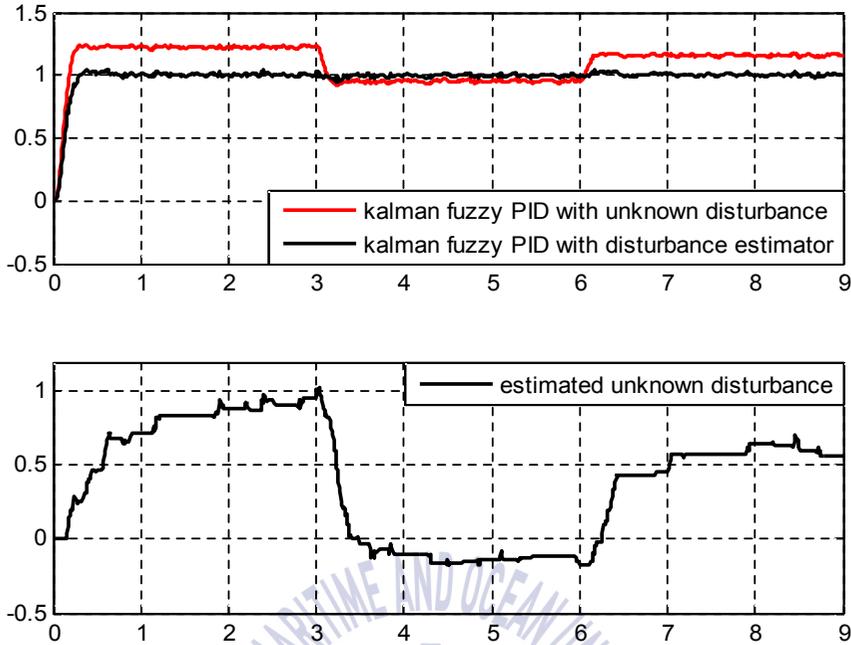


그림 4.17 미지의 외란이 변할 때 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 추정된 외란

Fig. 4.17 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when unknown disturbance is changed

그림 4.17를 보면 미지의 외란은 시간에 따라 변화된 스텝크기로 시스템에 인가되지만 제안된 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 적용한 시스템의 제어성능은, 시스템에 인가되는 잡음의 영향은 물론 인가되는 미지의 외란의 크기가 시간에 따라 변화함에도 외란의 크기를 추정하여 보상함으로써 정상상태에서 기준입력을 양호하게 추종함을 확인할 수 있고 외란 추정치도 인가된 미지의 외란을 근사적으로 추정함을 확인할 수 있다. 그림 4.18은 외란의 크기가 시간에 따라 변할 때의 이노베이션 프로세스를 나타낸다. 첫 번째 그림에서는 인가되는 미지의 외란의 크기가 변화함에 따라 이노베이션 프로세스의 통계적 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 그림에서는 보이는 바와 같이 미지의 외란의 크기가 변화함에도 제안된 알고리즘

을 통해 이노베이션 프로세스의 값은 외란이 변하는 천이상태를 제외한 나머지 구간에서는 0주변에 분포하고 있음을 알 수 있고 이 경우에는 통계적 평균이 거의 0에 근사함을 알 수 있다.

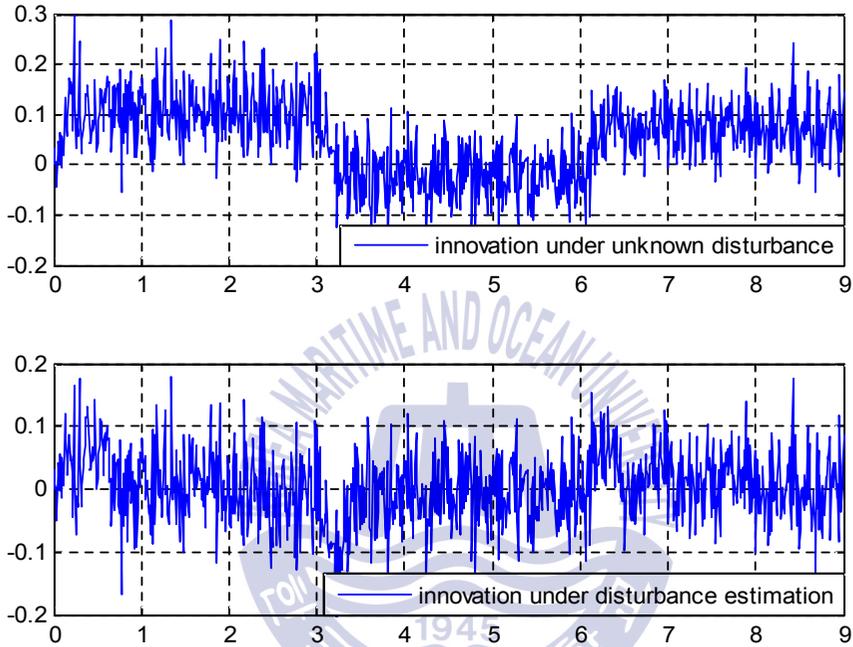


그림 4.18 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교
 Fig 4.18 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

제 5 장 종합적 성능검증

5.1 퍼지 PID 시스템의 성능검증 및 고찰

퍼지 PID 제어기의 성능을 확인하기 위하여 잡음이 없는 선형 시불변 결정 시스템과 잡음이 인가된 선형 시불변 확률 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과는 그림 5.1과 같다. 첫 번째 그림의 빨간색 선은 잡음이 인가되지 않은 제어 시스템의 성능을 나타내고 파란색 선은 잡음이 인가된 제어 시스템의 제어성능을 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 보면 잡음이 인가될 경우에는 적응성이 뛰어난 퍼지 PID 제어를 수행하였음에도 잡음의 영향으로 제어동작 중 D제어의 오동작으로 인해 정상상태에서 수렴하지 못하고 기준입력 부근에서 지속적으로 채터링 현상을 표출하는 것을 확인 할 수 있다.

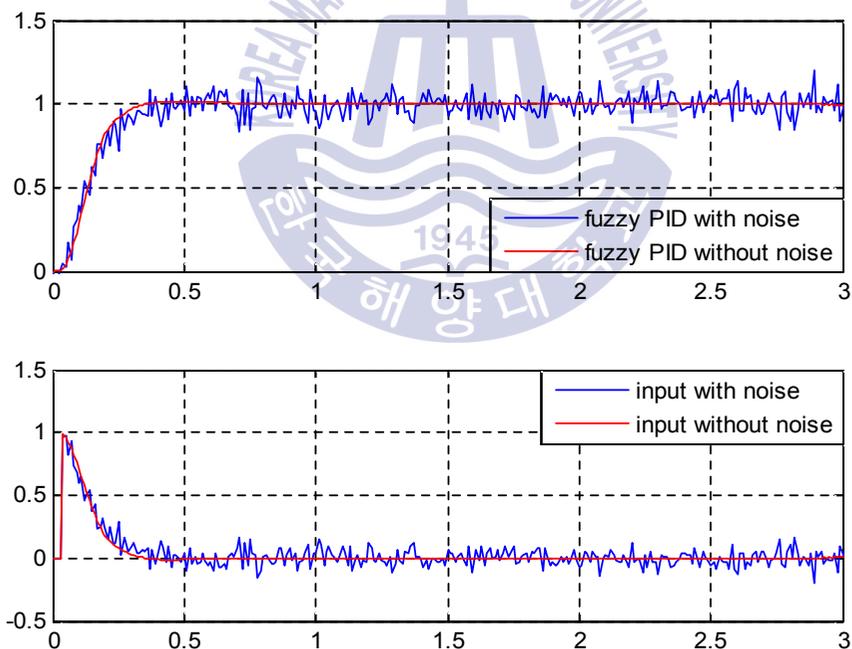


그림 5.1 잡음이 없는 시스템과 있는 시스템의 제어성능 비교

Fig. 5.1 Comparison of control performances in case whether noises are absent or not

5.2 Kalman 필터 기반의 퍼지 PID 제어시스템의 성능검증 및 고찰

잡음으로 인한 제어성능의 문제를 해결하기 위하여 Kalman 필터 기반의 분리원리를 도입함으로써 잡음으로 인한 D 제어의 오동작을 개선함으로써 퍼지 PID 제어시스템의 성능을 개선하고자 하였다.

5.2.1 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템

분리원리를 도입한 퍼지 PID 제어 시스템 성능을 알아보기 위하여 분리원리를 도입하지 않은 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 비교하였고 그 결과는 그림 5.2 그리고 그림 5.3과 같다. 그림 5.2의 첫 번째 그림에서 파란색 선은 잡음이 인가된 시스템의 실제출력을 이용한 제어성능을 나타내고 빨간색 선은 Kalman 필터를 기반으로 하는 분리원리에 따라 Kalman 필터의 추정출력을 피

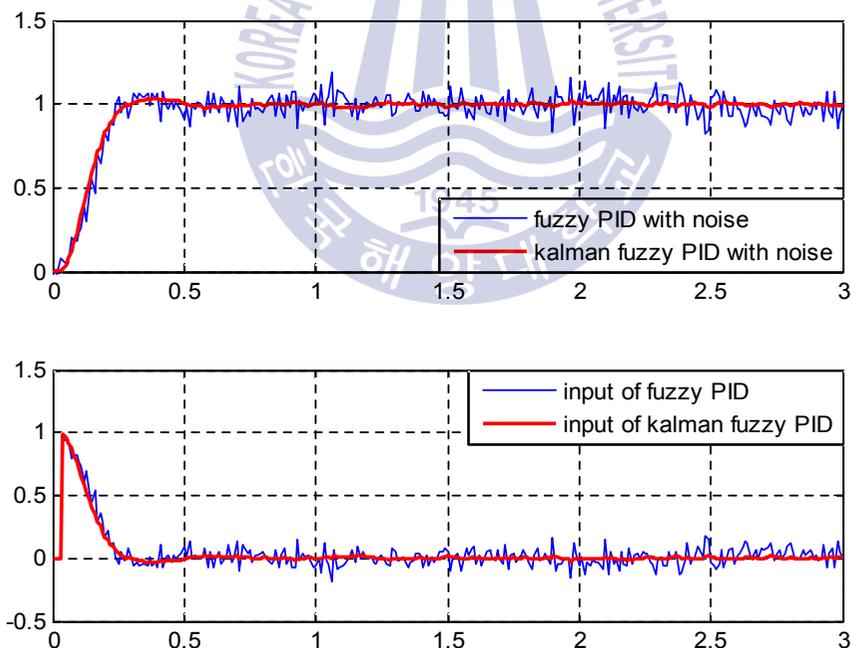


그림 5.2 분리원리를 이용한 퍼지 PID 제어 시스템 응답

Fig. 5.2 Responses of fuzzy PID control system using separation principle

드백한 경우의 제어성능을 나타낸다. 시뮬레이션 결과를 비교하여 보면 Kalman 필터의 추정출력 \hat{z}_k 를 기준입력과 비교하여 퍼지 PID 제어를 수행함으로써 기존에 시스템 출력 z_k 를 기준입력과 비교하여 제어를 수행할 때보다 D제어의 제어동작이 개선되어 정상상태에서 향상된 제어성능을 표출하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5.3은 정상상태에 있어서 필터 보상치를 구하는데 사용되는 이노베이션 프로세스를 나타낸 시뮬레이션 결과로 0을 중심으로 분포되어 있는 것을 볼 때 확률적 기대치가 거의 0이 됨을 확인할 수 있고, 잡음의 영향에도 불구하고 Kalman 필터가 제어시스템의 상태를 정상적으로 잘 추정함을 유추할 수 있다.

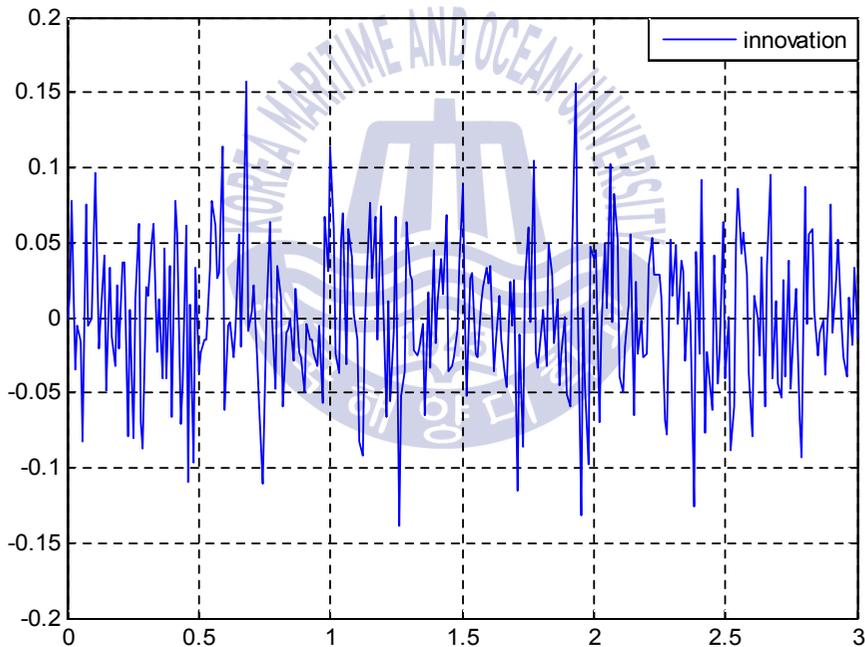


그림 5.3 Kalman 필터의 이노베이션 프로세스

Fig. 5.3 Innovation process of Kalman filter

5.2.2 미지의 외란과 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템

잡음과 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능을 확인하기 위하여, 미지의 외란은 인가되지 않고 잡음만 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템과 성능을 비교하여 보았으며 그 결과는 그림 5.4 그리고 그림 5.5와 같다. 그림 5.4의 시뮬레이션 결과를 보면 Kalman 필터를 통한 추정출력을 사용하여 제어를 수행함으로써 정상상태에서 개선된 D 제어동작을 보이지만 정상상태오차에 대해 적응성이 뛰어난 퍼지 PID 제어기를 사용하였음에도 불구하고 미지의 외란이 인가됨으로써 정상상태에서 기준입력을 제대로 추종하지 못하고 지속적으로 정상상태오차를 표출함을 확인 할 수 있다.

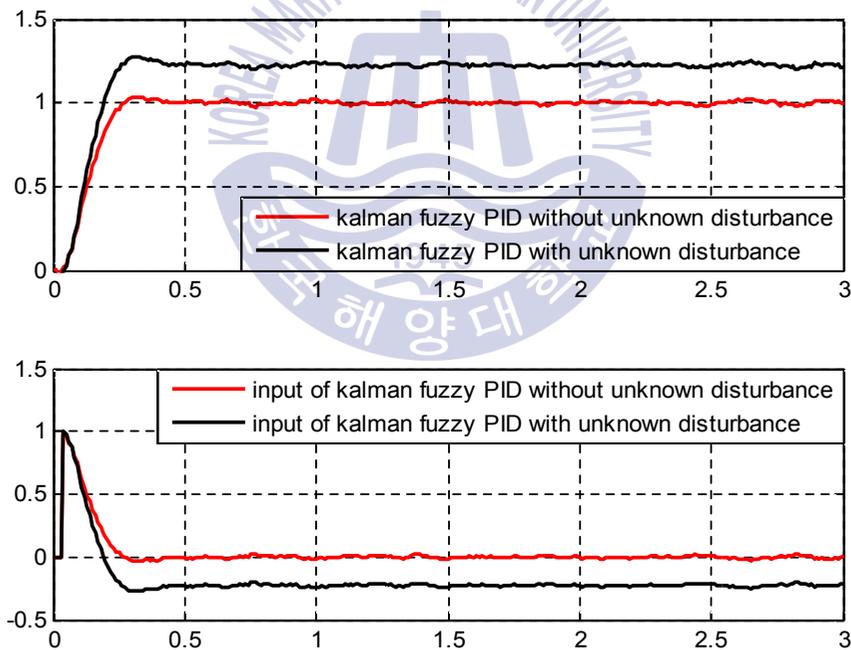


그림 5.4 미지의 외란인가 여부에 따른 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 응답

Fig. 5.4 Responses of Kalman filter based fuzzy PID control system according to the absence or presence of unknown disturbance

그림 5.5는 정상상태에 있어서 필터 보상치를 구하는데 사용되는 이노베이션 프로세스를, 미지의 외란이 인가될 때와 인가되지 않을 때 시뮬레이션 결과를 비교한 그림이다. 첫 번째 그림은 미지의 외란이 인가되지 않을 때 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과로 값들이 0을 중심으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있으며 확률적 기대치가 거의 0이 됨을 확인할 수 있다. 두 번째 그림에서는 이노베이션 프로세스의 시뮬레이션 결과가 미지의 외란의 영향으로 인해 통계적 평균이 0과 큰 차이를 표출하는 것을 확인할 수 있다.

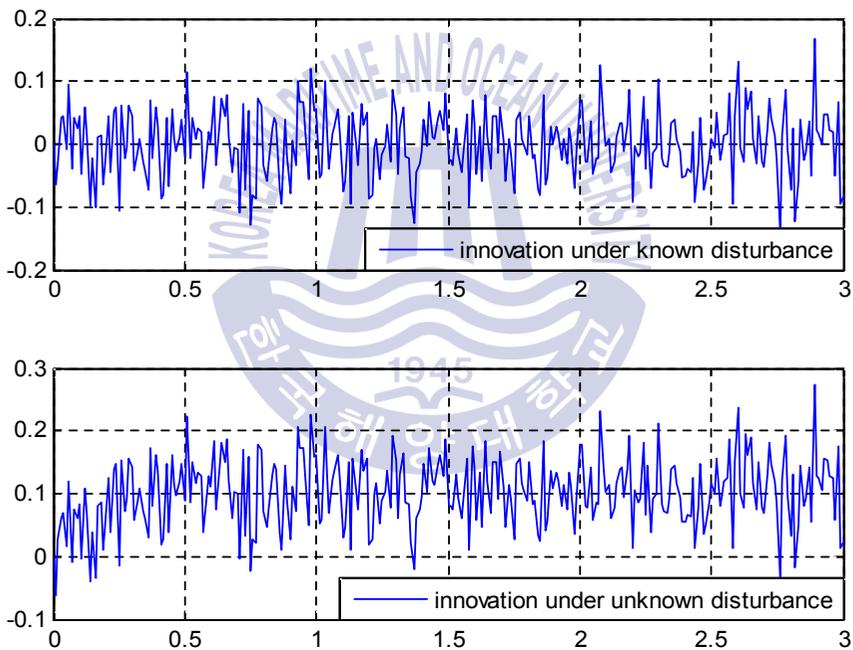


그림 5.5 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교
 Fig. 5.5 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

5.3 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템

미지의 외란으로 인해 제어 시스템의 출력이 정상상태에서 기준입력을 제대로 추종하지 못하는 것을 개선하기 위하여, 미지의 외란으로 인해 발생하는 Kalman 필터의 이노베이션 프로세스의 변화량을 적절히 활용하여 필터의 보상치를 실시간으로 키워주는 Kalman 필터 기반의 미지 외란 추정 알고리즘을 사용함으로써 미지의 외란 추정치를 피드백 시켜 시스템에 인가되는 최종적인 제어입력의 크기를 제한함에 따라 제어 시스템의 성능을 향상 시켜보았다.

첫 번째로 미지의 외란과 잡음이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템의 성능과 추정된 외란 입력과 Kalman 필터 추정출력을 피드백한 퍼지 PID 제어시스템의 성능을 비교하는 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과는 그림

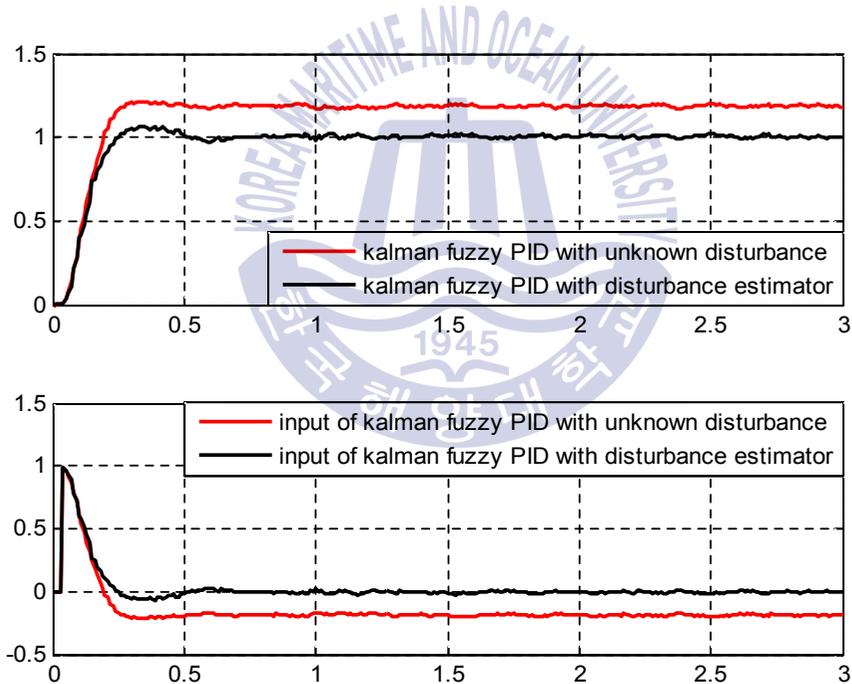


그림 5.6 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능
 Fig. 5.6 Control performances of fuzzy PID control system based on Kalman filter with unknown disturbance estimator

5.6 그리고 그림 5.7과 같다. 그림 5.6의 첫 번째 그림의 빨간색 선은 미지의 외란이 인가된 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어를 수행한 결과이고 검은색선은 추정된 외란입력과 Kalman 필터 추정 출력을 피드백 시켜 퍼지 PID 제어 결과이다. 두 시뮬레이션 결과를 비교하여 보면 제안된 알고리즘을 이용하여 추정된 외란입력을 피드백 시켜 시스템 전체에 인가되는 제어입력의 크기를 제한시켜준 응답이 정상상태에서 기준입력을 매우 잘 추종함을 확인할 수 있다.

그림 5.7은 제안된 알고리즘을 사용한 이노베이션 프로세스와 사용하지 않은 이노베이션 프로세스를 비교한 그림이다. 첫 번째 그림은 제안된 알고리즘을 사용하지 않아 미지 외란의 영향을 받는 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과로 통계적 평균이 0과 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 그림은 제안된 알고리즘을 사용함으로써 미지의 외란의 영향이 줄어든 이노베이션 프로세스 시뮬레이션 결과로 통계적 평균이 0에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

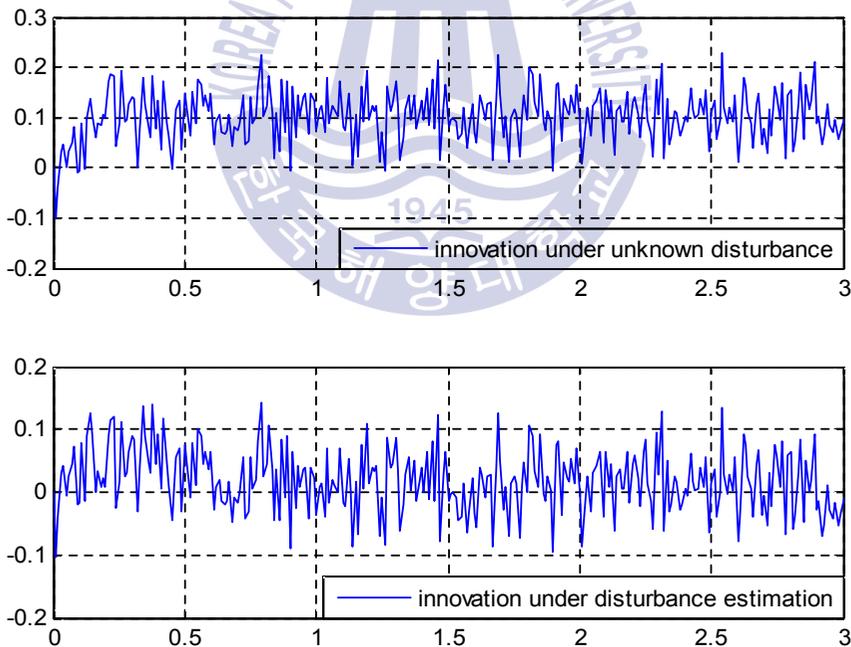


그림 5.7 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교

Fig 5.7 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

두 번째로 기준입력을 아래와 같이 시간 별로 변화를 주고 미지의 외란은 동

$$\begin{cases} r(t) = 1 & 0 \leq t \leq 3 \\ r(t) = 0 & 3 \leq t \leq 6 \\ r(t) = 0.7 & 6 \leq t \end{cases}$$

일한 크기 $U_k = 1$ 로 시뮬레이션을 수행하였으며 그 시뮬레이션 결과는 그림 5.8 그리고 그림 5.9와 같다. 그림 5.8을 보면 Kalman 필터 기반의 미지의 외란 퍼지 추정 알고리즘을 이용하여 미지의 외란을 추정한 추정치와 Kalman 필

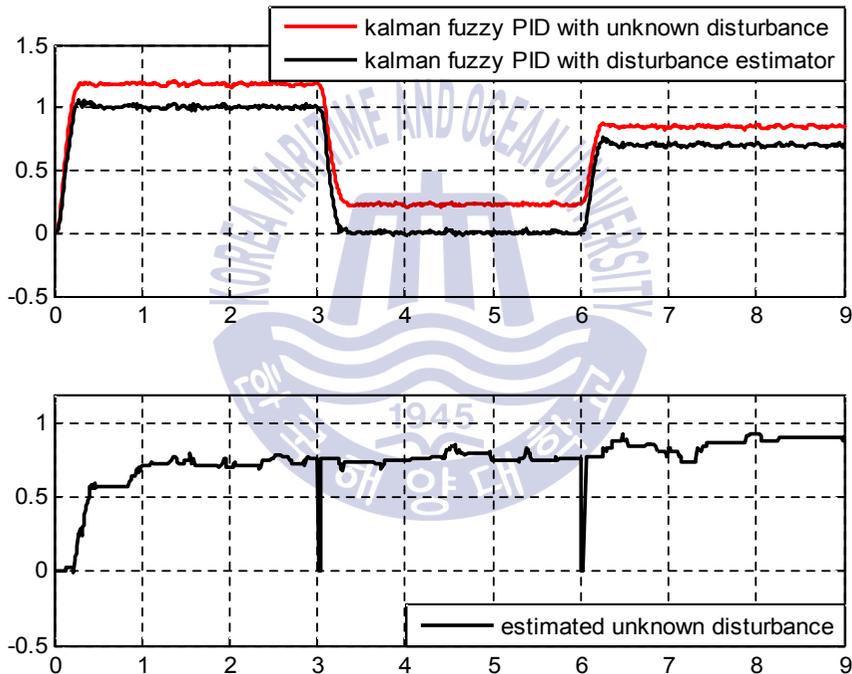


그림 5.8 기준입력이 변할 때 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 추정된 외란

Fig. 5.8 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when reference input is changed

터 추정출력을 피드백 시켜줌으로써 시스템에 인가되는 입력의 크기를 제한하여 정상상태에서 기준입력을 추종하고 제어동작 중 D제어의 오동작을 줄임으로써 정상상태에서 양호한 제어성능을 표출하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 기준입력이 시간에 따라 변화함에도 불구하고 변화된 기준입력을 정상상태에서 추종하는 것은 물론 미지의 외란을 근사적으로 추정함을 확인할 수 있다. 5.9의 첫 번째 그림에서 미지의 외란은 동일한 크기로 주어졌기 때문에 그 통계적 특성이 같다는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 그림에서 보이는 바와 같이 제안된 알고리즘을 통한 이노베이션 프로세스의 값은 0주변에 분포하고 있음을 알 수 있고 이 경우에는 통계적 평균이 거의 0에 근사함을 확인할 수 있다.

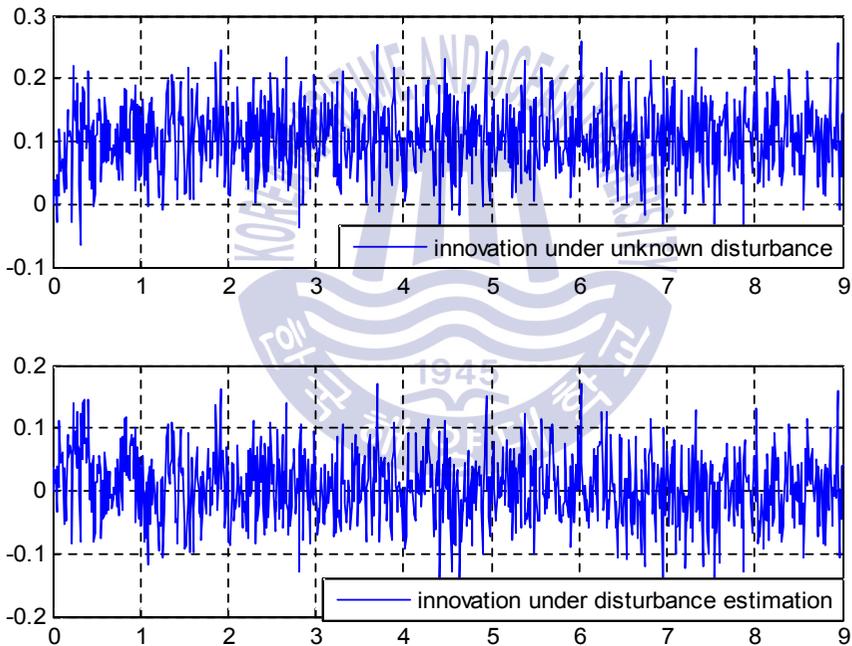


그림 5.9 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교

Fig 5.9 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

두 번째로 기준입력은 일정한 스텝 $r(t) = 1$ 로 하고 미지의 외란은 아래와 같이 시간 별로 변화를 주어 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과는 그림 5.10 그리고 그림 5.11과 같다.

$$\begin{cases} U_k = 1 & 0 \leq t \leq 3 \\ U_k = -0.2 & 3 \leq t \leq 6 \\ U_k = 0.7 & 6 \leq t \end{cases}$$

그림 5.10를 보면 미지의 외란이 시간에 따라 변화된 크기로 시스템에 인가되지만 제안된 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 적용한 시스템의 제어성능은, 시스템에 인가되는 잡음의 영향에서도 개선된 D

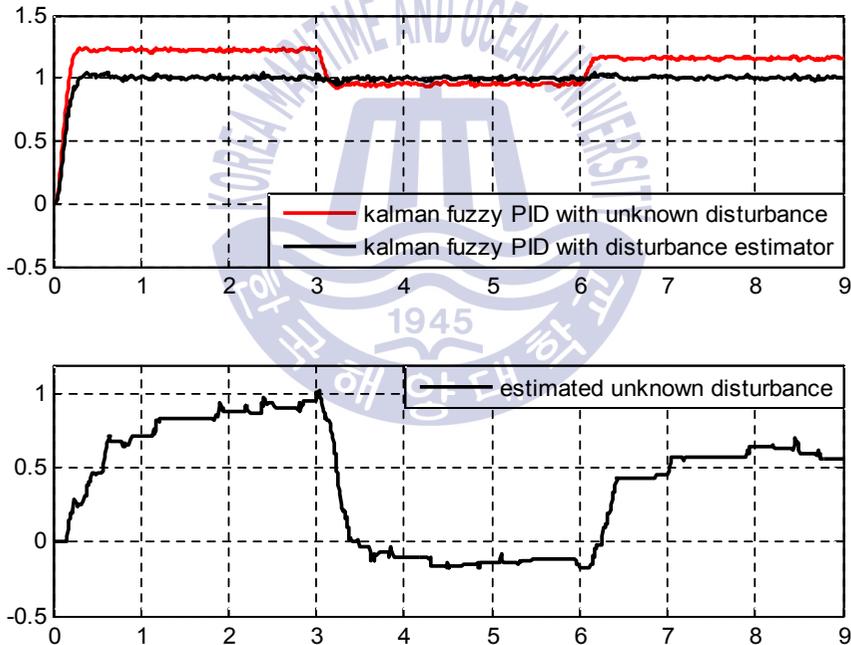


그림 5.10 미지의 외란이 변할 때 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템 성능과 추정된 외란

Fig. 5.10 Responses of fuzzy PID control system based on Kalman filter with disturbance estimator and estimated disturbance when unknown disturbance is changed

제어동작으로 정상상태에서 채터링하지않는 양호한 제어성능을 표출하고 있으며 또한 인가되는 미지의 외란의 크기가 시간에 따라 변화함에도 외란의 크기를 근사적으로 잘 추정하여 보상함으로써 정상상태에서 기준입력을 매우 양호하게추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5.11은 이노베이션 프로세스를 나타낸다. 첫 번째 그림에서는 인가되는 미지의 외란의 크기가 변화함에 따라 이노베이션 프로세스의 통계적 특성이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 그림에서는 보이는 바와 같이 미지의 외란의 크기가 변화함에도 제안된 알고리즘을 통해 이노베이션 프로세스의 값이 0주변에 분포하고 있음을 알 수 있고 통계적 평균이 거의 0에 근사함을 확인할 수 있다.

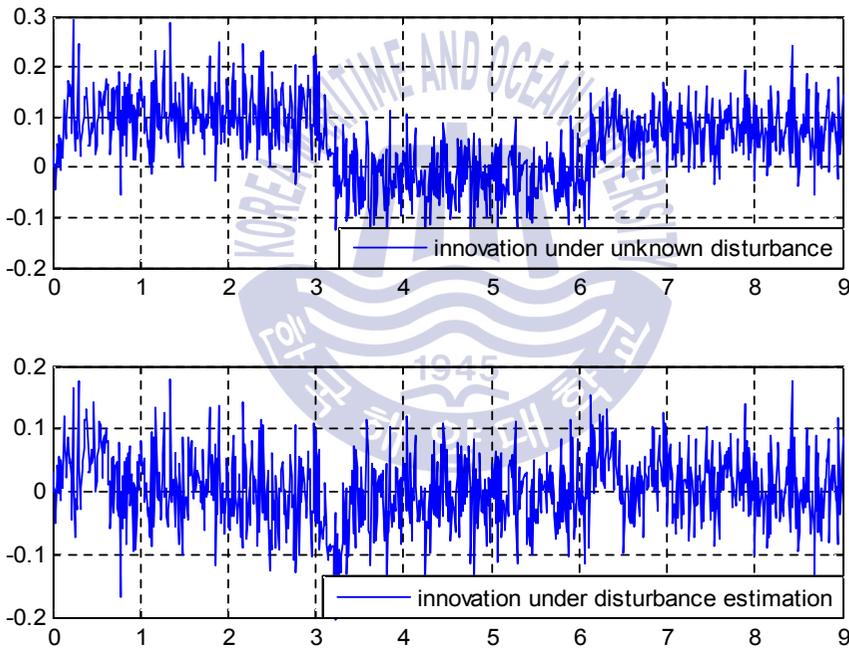


그림 5.11 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템의 이노베이션 프로세스의 비교
 Fig 5.11 Comparison of innovation processes for fuzzy PID control system based on Kalman filter

제 6 장 결 론

본 논문에서는 기존의 연구자들이 제안한 가변 파라미터 퍼지 PID 제어기와 Kalman 필터에 의한 상태 추정 알고리즘을 분리원리를 도입하여 결합시키는 방법과 Kalman 필터의 이노베이션 기반 미지 외란 추정 알고리즘을 적용함으로써, 시스템 잡음과 측정 잡음뿐만 아니라 미지의 외란이 인가되는 시스템 환경에서도 매우 향상된 제어성능을 표출하는, 미지의 외란 추정과 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘을 제안하였으며 시뮬레이션을 수행함으로써 그 가능성을 증명하였다.

- (1) 먼저 선형 시불변 이산 확률 시스템에 대한 가변 파라미터 퍼지 PID 제어 알고리즘을 전개하였고 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행함으로써 정상상태에서는 정확한 D 제어동작을 발휘하지 못하는 것을 확인하였으며, 그결과 D 제어동작의 개선이 필요함을 확인하였다.
- (2) 퍼지 PID 제어동작 중 잡음의 영향으로 인한 잘못된 D 제어동작의 개선을 위하여, Kalman 필터 상태 추정 알고리즘을 분리원리를 도입하여 Kalman 필터의 추정 출력 \hat{z}_k 를 피드백 시키는 가변 파라미터 퍼지 PID 제어시스템 구성방법을 제안하였다. 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며 정상상태에서 D 제어동작을 수행토록 하여 항상 정확한 PID 제어동작이 이루어짐으로써 향상된 제어성능이 표출됨을 확인하였다.
- (3) 미지의 외란이 인가되는 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템은 미지의 외란으로 인해 제어 출력이 정상상태에서 기준입력을 제대로 추종하지 못하는 것을 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 확인하였다.
- (4) Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 시스템에 인가된 미지의 외란에도 불구하고 제어시스템의 성능을 개선시키기 위한 방법으로 Kalman 필터의 이

노베이션을 활용한 외란 추정 알고리즘을 도입하였으며, 예제 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행함으로써 이노베이션 기반의 미지의 외란 추정 알고리즘이 유효하게 적용 되는 것을 확인하였다.

- (5) 미지의 외란과 잡음이 인가된 선형 시불변 이산 확률 시스템에서 퍼지 PID 제어기의 성능 개선을 위해 Kalman 필터 상태 추정을 통한 추정 출력 \hat{z}_k 와 미지의 외란 추정 값 \hat{U}_k 을 피드백 시킴으로써 Kalman 필터의 상태추정 보상은 물론 시스템에 인가되는 최종 제어입력을 제한하여 전체 제어 시스템이 정상상태에서 기준입력을 잘 추종할 수 있도록 하는 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어시스템 구성방법을 제안하였다. 미지의 스텝외란이 변화하거나 기준입력이 변화하는 선형 시불변 확률 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과 매우 양호한 제어동작과 정상 상태성능을 표출하는 것을 입증하였다.

이상의 연구결과를 통해 본 논문에서 제안한 미지의 외란 추정 Kalman 필터 기반 퍼지 PID 제어 알고리즘은 미지의 외란과 잡음이 동시에 인가되는 선형 시불변 이산 확률 시스템의 제어에 매우 적합한 제어 알고리즘임을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 제어시스템 구성방법을 실제 선형 시불변 이산시간 확률 시스템에 적용하여 제어시스템을 구성하고 그 성능을 확인함으로써 그 효능을 실증하는 것이 향후의 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] Moginder S. Grewal and Angus P. Andrews, *Kalman Filtering Theory and Practice*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [2] Andrew H. Jazwinski, *Stochastic Processes and Filtering Theory*, Academic Press, New York, 1960.
- [3] J. Kim, J. Lim, S. Seo, and Y. Ha, "Kalman Filter Based Estimation Algorithm for Uncertainty Estimation of LTI System," Proceedings of the 36th KOSME Fall Conference, pp. 157, 2012.(in Korean)
- [4] M. Darouach, M. Zasadzinski, and M. Boutayeb, "Extension of Minimum Variance Estimation for Systems with Unknown Inputs," *Automatica*, Vol. 39, pp. 867-876, 2003.
- [5] C. S. Hsieh, "Extension of Unbiased Minimum-variance Input and State Estimation for Systems with Unknown Inputs," *Automatica*, Vol. 45, pp. 2149-2153, 2009.
- [6] C. S. Hsieh, "On the Global Optimality of Unbiased Minimum-variance State Estimation for Systems with Unknown Inputs," *Automatica*, Vol. 46, pp. 708-715, 2010.
- [7] L. Wang, H. Xu, and U. Zou, "Regular Unknown Input Functional Observers for 2-D Singular Systems," *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 11, No. 5, pp. 911-918, 2013.
- [8] M. K. Lee, "Unknown Input Estimation of the Linear Systems Using Integral Observer," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 101-106, 2008.
- [9] Y. Xiong and M. Saif, "Unknown Disturbance Inputs Estimation Based on a State Functional Observer Design," *Automatica*, Vol 39, pp. 1389-1398, 2003.
- [10] H. C. Ting, J. L. Chang, and Y. P. Chen, "Proportional-Derivative Unknown Input Observer Design Using Descriptor System Approach for Non-Minimum Phase Systems," *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 9, No. 5, pp. 850-856, 2011.

- [11] T. Floquet and J. Barbot, "State and Unknown Input Estimation for Linear Discrete-time Systems," *Automatica*, Vol. 42, pp. 1883-1889, 2006.
- [12] J. Jin and M. J. Tahk, "Time-delayed State Estimator for Linear systems with Unknown Inputs," *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 117-121, 2005.
- [13] D. Jaessig and B. Friedland, "Separate-bias Estimation with Reduced-order Kalman Filters," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 7, pp. 983-987, 1998.
- [14] M. B. Ignagni, "Separate Bias Kalman Estimator with Bias State Noise," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 35, No. 3, pp. 338-341, 1990.
- [15] J. H. Kim and S. J. Oh, "A fuzzy PID Controller for Nonlinear and Uncertain System," *Springer-Verlag, Soft Computing*, Vol. 4, No. 2, pp. 123-129, 2000.
- [16] I. Kim, B. Lee, and J. Kim, "A Study on the Performance Improvement of the Nonlinear Fuzzy PID Controller," *Journal of Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No. 7, pp. 852-861, 2003.(in Korean)
- [17] K. J. Åstrom, K. H. Johansson, and Q. G. Wang. "Design of Decoupled PID Controllers for MIMO Systems," *American Control Conference*, Vol. 3, pp. 2015-2020, 2001.
- [18] J. H. Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," *한국 퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, Vol. 5, No. 4, pp. 87-100, 1995.
- [19] 김인환, "가변 파라미터를 갖는 비선형 퍼지 PID 제어기의 설계방법에 관한 연구," *한국해양대학교 대학원 제어계측공학과*, 박사논문, 2004.
- [20] 주하나, "비선형 퍼지 PID 제어기의 성능개선에 관한 연구," *한국해양대학교 대학원 제어계측공학과*, 석사논문, 2012.
- [21] 서수경, "선형 시불변 불확실성 시스템을 위한 퍼지 추정기법이 결합된 상태추정 알고리즘," *한국해양대학교 대학원 제어계측공학과*, 석사논문, 2013.