
Fuzzy-PID 제어를 이용한 차량의 정속주행 시뮬레이션

임영도*, 김승철**, 박재형**

Simulation for Intelligent Cruise Control of vehicle using Fuzzy-PID Controller

Young-Do Lim*, Seung-Chul Kim**, Jae-Hyung Park**

Abstract

The purpose of this paper is to describe how the characteristics of the movement of cars can be modeled with computers. For this, we use Matlab and simulate the characteristics of the cruise-speed at which the car is driven using the Fuzzy PID controller. The model of the car is designed by M-S(Matlab-Simulink) and each parameter of PID is estimated automatically by the Fuzzy controller. The simulation of the car is carried out on straight base tracks, and then this is compared and analyzed with the simple Fuzzy controller and the simple PID controller.

요 약

본 논문은 차량의 엔진을 컴퓨터를 이용하여 모델링하고, 이를 본 논문에서 설계한 Fuzzy-PID 제어기로 성능을 평가하는 것으로서, 차량의 정속주행 특성을 Fuzzy-PID제어기를 이용하여 시뮬레이션 한다. 차량의 엔진 모델은 MATLAB-Simulink를 이용하여 설계하고, PID의 각 파라미터값은 Fuzzy 제어기를 이용하여 자동 추정하는 형태로 구성한다. 차량의 시뮬레이션은 직선주로상에서 이루어지고, 이를 퍼지 제어기, 그리고 PID 제어기와 비교 분석해 보았다.

* 동아대학교 전자공학과 교수

** 동아대학교 전자공학과 박사과정

접수일자 : 1998년 8월 18일

1. 서론

PID 제어기는 강인한 수행성 때문에 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. PID 제어기의 설계에는 3가지의 파라미터 즉, 비례이득, 적분 이득, 그리고 미분 이득이다. 그러나 최적화된 파라미터의 값을 결정하기 위해서는 상당한 어려움이 발생한다. PID 제어기는 두 개의 형태로 나뉜다. 첫 번째, PID 제어기 파라미터를 가장 적절한 값으로 선택한 후 고정하는 것인데, 이는 Ziegler-Nichols방법이 가장 잘 알려진 방법중 하나이다. 이 방법을 사용하는 경우 PID 제어기는 간단하나, 파라미터가 변하는 제어 시스템에서는 효율적으로 제어할 수는 없고, 매번 파라미터 값을 재조정 해야만 하는 번거로움이 따른다. 두 번째는 퍼지 논리를 이용하여 PID 제어기의 각 파라미터를 자동으로 추정하는 것으로서 플랜트의 특성이 바뀌어도 우수한 적응력이 있다.^[1] 따라서, 본 논문에서는 두 번째 방법과 같은 Fuzzy-PID 제어기를 구성하여 차량의 정속주행특성을 시뮬레이션 한다. 차량의 정속주행특성을 시뮬레이션 하기 위하여 엔진모델을 구성하고 이를 바탕으로 하여 PID, Fuzzy, 그리고 본 논문에서 설계한 Fuzzy-PID 제어기의 성능을 비교 평가해 보고자 한다.^{[2],[3],[4],[5],[6]}

II. 제어기 설계 및 플랜트 모델

2-1. 플랜트 모델

그림 1은 차량의 Power train 부분을 나타내었다. Power train은 크게 Engine Dynamics, Transmission, Drive Train, Brake Train 부분으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 차량 설계의 전단계로서 Engine Dynamics를 설계하고, 이를 제어기의 플랜트로 사용하고자 한다.^{[2],[3]}

엔진의 모델링은 V4엔진을 사용하여 차량의 속도 제어에 중점을 두고 구성하였다. 그리고 모델링의 단순화를 위하여 공기의 재순환 성분과 바퀴 또는 지면의 비선형적 저항성분은 무시하였다. 제어기는 먼저 원하는 속도와 실제 속도를 입력받는다. 여기서 원하는 속도는 차량이 현재 유지하고자하는 속도이고, 실제 속도는 플랜트의 출력성분이다. 그리

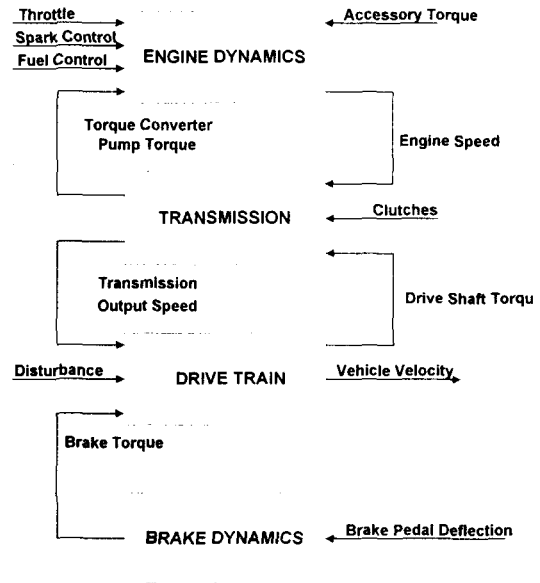


그림 1. Power train 구성도

고 제어기를 거쳐서 Throttle 각을 조정함으로써 원하는 실제 출력, 즉 엔진의 출력을 얻게된다. 그림 2는 전체 시스템 블록도를 나타내고 있다.

전체 시스템의 동작원리는 다음과 같다.

1. Throttle Body를 통해 원하는 Throttle valve의 각이 입력되며, 여러 가지 성분(throttle 각, 연료와 공기의 주입량)을 평가한다. ^{[1], [2], [3]}
2. Intake manifold의 역할은 최종 출력성분인 엔진 속도와 Throttle Body를 거쳐 나오는 공기의 질량 성분을 입력받아서 Intake manifold를 빠져나가는 공기의 질량비를 결정한다.

$$\dot{m}_{ai} = MAX \cdot TC \cdot PRI \dots\dots\dots (1)$$

\dot{m}_{ai} : Intake manifold로 들어가는 공기의 비율
 MAX : Throttle 완전 개방시의 최대 공기 유동비
 TC : Throttle 각으로서 정규화된 특성
 PRI : 정규화된 압력 감응함수
3. Intake manifold를 통해서 얻어진 공기의 질량비 성분은 최종 출력성분인 엔진 속도와 함께 연료분사부분의 입력으로서 선택된다. 즉 연료분사부분은 공기와 연료의 적절한 혼합에 의한 동력부분의 구동성을 결정한다. ^{[2], [4]}

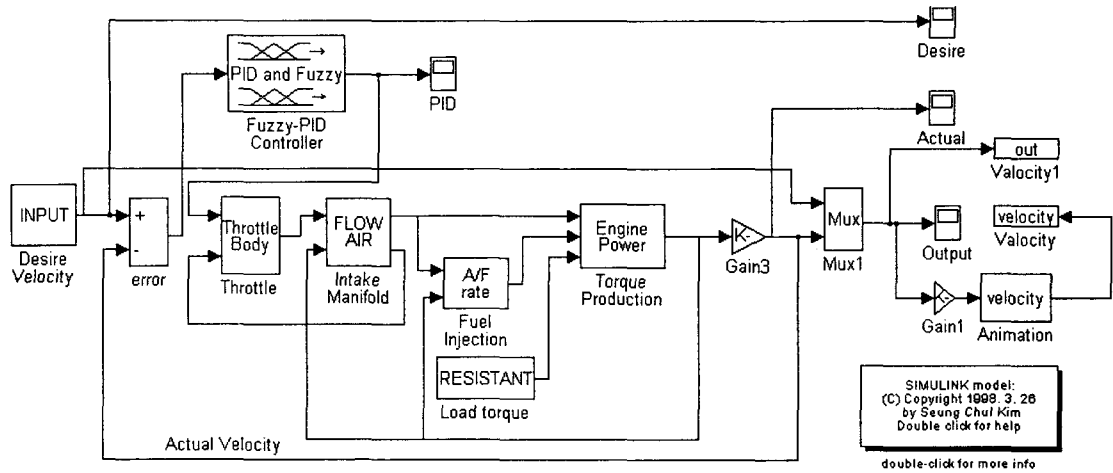


그림 2. 전체 시스템 블록도

$$T_i = c_T \frac{\dot{m}_{\omega} \left(t - \frac{5.48}{\omega_e} \right)}{\omega_e \left(t - \frac{1.3}{\omega_e} \right)} \cdot AFI \left(t - \frac{5.48}{\omega_e} \right) \cdot SI \left(t - \frac{1.3}{\omega_e} \right) \dots (2)$$

$$\Delta t_{it} = \frac{5.48}{\omega_e}, \Delta t_{st} = \frac{1.3}{\omega_e}$$

T_i : 엔진의 실마력, AFI : 정규화된 공기/연료의 혼합비, ω_e : 엔진속도, Δt_{it} : 연료주입 지연성분, Δt_{st} : 점화지연성분, SI : 정규화된 점화관계 함수

2-2. 제어기 설계

본 논문에서 사용되는 Fuzzy-PID 제어기는 Fuzzy를 이용하여 PID 제어기의 각 파라미터값을 자동적으로 추정하는데 그 목적이 있으며, 기본적인 구성 형태는 그림 3과 같다.

여기서 사용된 접근법은 제어기 파라미터를 발생시키는 퍼지 규칙과 추론을 개발하는 것이다. K_p, K_d 는 $[K_{p, \min}, K_{p, \max}], [K_{d, \min}, K_{d, \max}]$ 에 의해 미리 규정된 영역내에 존재한다고 가정한다. 여기서 $K_{p, \min}, K_{p, \max}, K_{d, \min}, K_{d, \max}$ 는 Zeigler-Nichols 방법에 의해 계산된 값들로서,^[1] 상기와 같이 적당한 영역을 실험적으로 결정하여 구

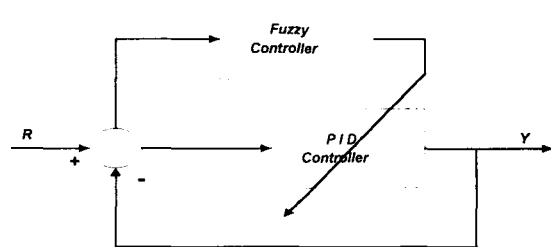


그림 3. Fuzzy와 PID 제어기의 결합

하고자 한다. 편리를 위해 K_p, K_d 는 아래의 선형 변형 영역에서 정규화 된다.

$$K_p' = (K_p - K_{p, \min}) / (K_{p, \max} - K_{p, \min})$$

$$K_d' = (K_d - K_{d, \min}) / (K_{d, \max} - K_{d, \min}) \dots (3)$$

제안된 방법에서 PID 파라미터는 현재의 오차 $e(k)$ 와 그것의 첫 번째 차이 $\Delta e(k)$ 를 기반으로 결정된다. 적분 시간상수는 미분 시간상수와 의 관계로 결정된다.

$$T_i = aT_d \dots (4)$$

그리고 적분 이득은 아래에 의해 얻어진다.

$$K_i' = K_p / (aT_d) = K_p^2 / (aK_d) \dots (5)$$

파라미터 K_p' , K_d' 와 α 는 아래 형식의 퍼지 규칙의 집합에 의해 결정된다. [5], [6]

If $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_i , then K_p' is C_i , K_d' is D_i , $\alpha = \alpha_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$

여기서 A_i , B_i , C_i , D_i 는 퍼지 집합이고, α_i 는 상수이다. 비퍼지화는 다음과 같다.

$$K_p' = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{p,i}' \dots\dots\dots (6)$$

$$K_d' = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{d,i}' \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_i}[\Delta e(k)]$ 인 멤버십 함수이다.

K_p' , K_d' , α 가 한번 얻어지면, PID 제어기 파라미터는 (3)식과 (5)식으로부터 아래의 방정식으로서 계산되어진다.

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min})K_p' + K_{p,min} \dots\dots (9a)$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min})K_d' + K_{d,min} \dots\dots (9b)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d) \dots\dots\dots (9c)$$

여러 프로세서에 관한 확장 확장 시뮬레이션 연구를 기반으로 하여 K_p 의 영역과 K_d 의 영역을 결정하기 위한 대략적인 규칙은 식 (10)과 같다.

$$K_{p,min} = 0.32K_u, K_{p,max} = 0.6K_u$$

$$K_{d,min} = 0.08K_u T_u, K_{d,max} = 0.15K_u T_u$$

..... (10)

여기서 K_u , T_u 는 Ziegler-Nichols 방법에 의해 측정된 비례제어에 대한 안정 임계에서의 진동의 주기와 이득이다. Ziegler-Nichols 방법에 의해 측정된 $K_u = 0.8$, $T_u = 0.5$ 와 같이 결정되었다.

본 논문에서 사용되어진 퍼지 제어기의 역할은 세 변수 K_p' , K_d' 와 α 를 찾는 것이다. 아래에는 이 세변수를 찾기 위한 각각의 퍼지 제어기의 소속 함수형태를 나타내었다.

1) alpha에 대한 소속함수 형태 및 규칙표

입력 성분에 대한 소속함수는 삼각형 형태로서 7개의 등방형을 사용하였다. 그림 4와 그림 5는 α 에 대한 출력측 멤버십 함수 형태 및 look-up table을 나타내고 있다.

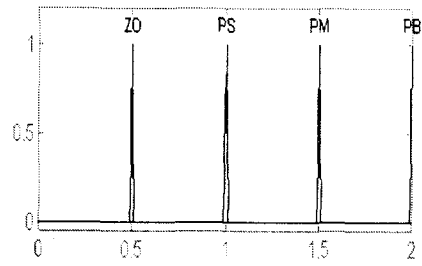


그림 4. Output membership function α

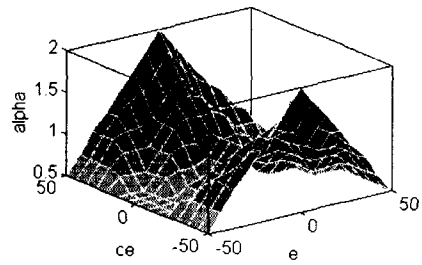


그림 5. Look-up table

2) K_p' 에 대한 소속함수 및 규칙

입력 성분에 대한 소속함수는 삼각형 형태로서 7개의 등방형을 사용하였다. 그림 6과 그림 7은 K_p' 에 대한 출력측 멤버십 함수 형태 및 look-up table을 나타내고 있다.

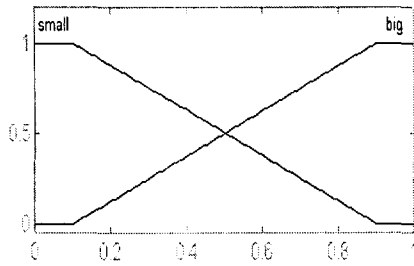


그림 6. Output membership function K_p'

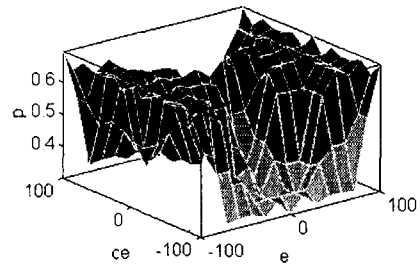


그림 7. Look-up table

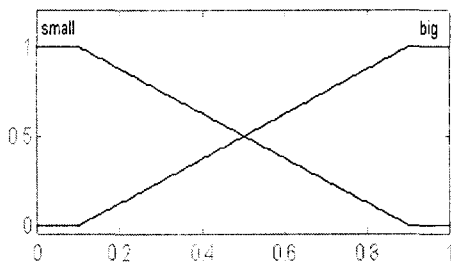


그림 8. output membership function K_i'

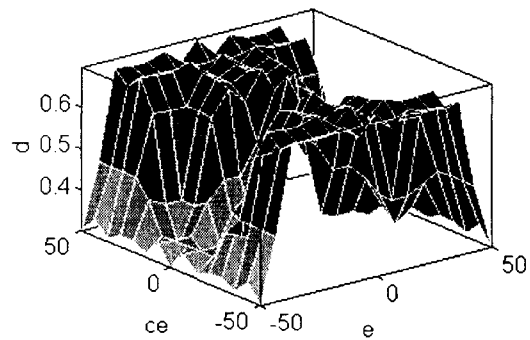


그림 9. Look-up table

3) K_i' 에 대한 소속함수 형태 및 규칙

입력 성분 에 대한 소속함수는 삼각형 형태로서 7 개의 등방형을 사용하였다. 그림 8과 그림 9는 K_i' 에 대한 출력측 멤버십 함수 형태 및 look-up table 을 나타내고 있다.

표 1. Fuzzy tuning rules of α

ce \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	2	3	4	5	4	3	2
NM	2	3	3	4	3	3	2
NS	2	2	3	3	3	2	2
ZO	2	2	2	3	2	2	2
PS	2	2	3	3	3	2	2
PM	2	3	3	4	3	3	2
PB	2	3	4	5	4	3	2

표 2. Fuzzy tuning rules for K_p'

ce \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	S	S	S	S	S	B
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	B	S	S	S	S	S	B

표 3. Fuzzy tuning rules for K_d'

ce \ e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	B	B	B	B	B	S
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	S	B	B	B	B	B	S

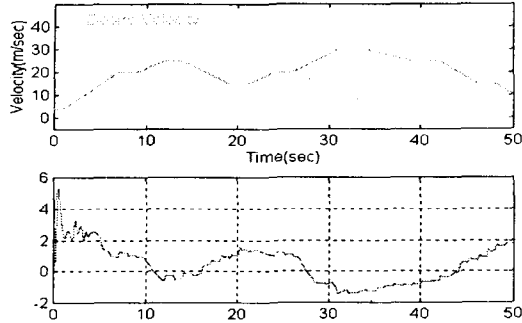


그림 10. 퍼지 제어기의 출력 파형 및 오차(m/sec)

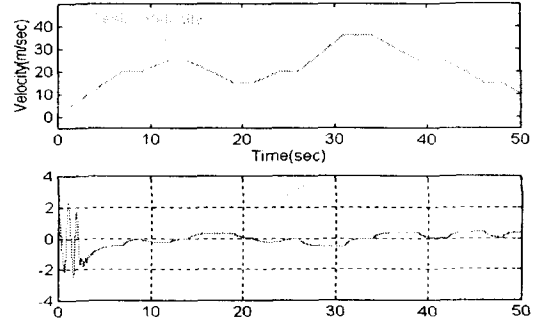


그림 11. PID 제어기의 출력 파형 및 오차 (m/sec)

퍼지 제어기의 추론과 비퍼지화는 Mamdani의 Max-min과 무게중심법을 사용하였다.

Ⅲ. 모의 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 식 (2)와 같은 차량의 엔진 동력학 식을 바탕으로 Fuzzy-PID 제어기의 우수성을 증명하기 위하여 퍼지 제어기와 PID 제어기를 함께 비교분석하였다. 시뮬레이션 구간은 0초에서 50초까지로 하고 그에 따른 차속은 다음과 같다.

- 최소 차속 : 4 m/s → 14.4 km/h
- 최고 차속 : 36 m/s → 129.6 km/h

그림 10은 퍼지 제어기를 사용했을 때의 출력파형이다. 사용된 퍼지 제어기는 원하는 지령속도와 실제 출력 속도를 입력받아 이 둘의 오차를 수정하는 형태로 구성되었다. 멤버십 함수는 입력측 2개로 5개의 등방형 삼각형 소속함수를 썼으며, 출력측 멤버십 함수 역시 등방형 삼각형 소속함수를 사용하였으며, 규칙은 25개를 사용하였다. 시뮬레이션 결과 차량의 속도가 진동하는 형태는 발생하지는 않았지만, 원하는 설정치에 근접하지 못함을 알 수 있다.

그림 11은 PID 제어기를 사용한 시뮬레이션 결과 파형이다. PID 제어기에서 사용된 각각의 파라미터 값들은 Ziegler-Nichols방법에 의해 구해진 값으로서, $K_u = 0.8$, $T_u = 0.5$ 이다. 이 값을 사용하여 적용된 K_p , K_i , K_d 는 다음과 같다.

표 4. PID에서 사용된 K_p , K_i , K_d

$K_p = 0.6 \times K_u$	$K_i = 0.5 \times T_u$	$K_d = 0.125 \times T_u$
0.48	0.25	0.0625

시뮬레이션 결과 초기에(대략 0 ~ 10초 구간사이) 다소 진동이 발생하지만 앞서 보았던 Fuzzy 제어기에 비하여 오차가 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

그림 12는 본 논문에서 사용한 Fuzzy-PID 제어기의 출력파형이다. 시뮬레이션 결과, 앞에서 살펴보았던 두 제어기에 비하여 0 ~ 10초 구간에서 약간의 오차가 발생하나 나머지 시뮬레이션 구간동안에서는 오차가 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

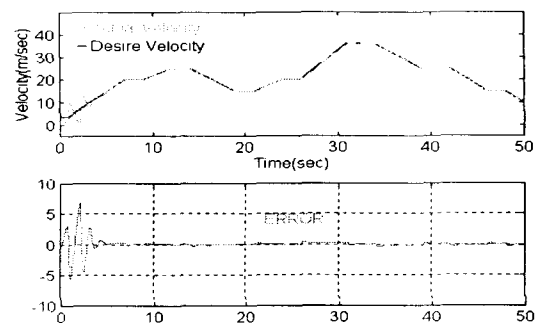


그림 12. Fuzzy-PID 제어기의 출력파형 및 오차 (m/sec)

아래표는 이들 세가지 제어기를 사용했을 경우의 누적오차를 나타내고 있다.

표 5. 누적오차 비교

Fuzzy	PID	Fuzzy-PID
5245.13	1684.02	1516.01

이상의 세가지 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 비교 분석해 보면, 본 논문에서 사용한 Fuzzy-PID 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

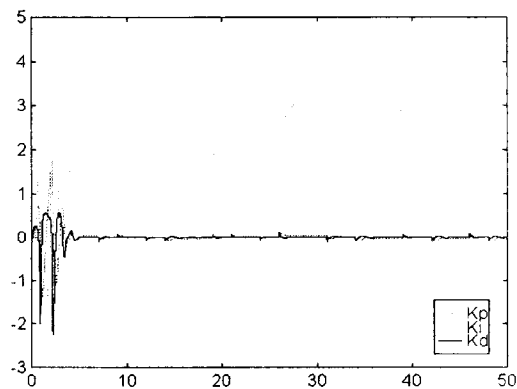


그림 13. 시뮬레이션 후의 Kp, Ki, Kd값들의 변화

그림 13은 Fuzzy-PID 제어기를 통해 나온 PID 제어기의 각 파라미터값의 변화를 나타낸 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 퍼지 제어기, PID 제어기 그리고 본 논문에서 사용한 Fuzzy-PID 제어기를 비교 분석하였으며, 그 결과 출력 파형에서 알 수 있듯이 비록 Fuzzy-PID 제어기가 초기에 다소 많은 오차를 만들지만 시간이 경과함에 따라 가속과 감속시 응답과 오차 값이 퍼지 제어기와 PID 제어기에 비해 우수함을 확인하였다.

향후 연구계획은 그림 1에 나타낸 Power train을 구성하고 이를 시뮬레이션을 통해 결과를 고찰하고, 나아가 이를 실제 차량에 적용시키고자 한다.

V. 참고문헌

- [1] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller", *IEEE Transactions on Systems Vol 23*, No. 5, pp. 1392 -1398
- [2] J.J. Moskwa and J.K. Hedrick, "Modeling and validation of automotive engines for control algorithm development", *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 114, no. 2, pp.278-285, 1992
- [3] D. Cho and J.K. Hedrick, "Automotive powertrain modelling for control", *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, vol. 111, no. 4, pp.568-576, 1989
- [4] D.H. McMahon, J. Hedrick, and S. Shladover, "Vehicle modelling and control for automated highway systems", in *American Control Conference*, pp. 297-303, 1990
- [5] J.J. Moskwa and J. Hedrick, "Automotive engine modelling for real time control application", in *American Control Conference*, pp. 341-346, 1987
- [6] G. Vachtsevanos, S. Farinwata, and D. Pirovolou, "Fuzzy logic control of an automotive engine", in *IEEE Control and Decision Conference*, 1992

임 영 도(Young-Do Lim)

1973년 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1978년 : 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업
(공학석사)

1987년 : 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업
(공학박사)

1988 ~ 현재 : 동아대학교 전자공학과 교수

주관심 분야 : 신경망 제어, 퍼지 제어, 전력전자,
고주파 유도가열



김 승 철(Seung-Chul Kim)

1995년 : 동아대학교 전자공학과
졸업 (공학사)

1997년 : 동아대학교 전자공학과
대학원 졸업(공학석사)

1997년~현재 : 동아대학교 전자
공학과 대학원 박사과정

주관심 분야 : 퍼지제어, 유전알고리즘, 진화프로
그래밍



박 재 형(Jae Hyung Park)

1987년 : 동아대학교 전자공학과
졸업 (공학사)

1990년 : 동아대학교 전자공학과
대학원 졸업(공학석사)

1996년~현재 : 동아대학교 전자
공학과 대학원 박사과정

주관심 분야 : 신경망 제어, 퍼지 제어, 유전 알고
리즘, 로보틱스