

# ANFIS 기반 경로추종 운동제어에 의한 모형차량의 자동주차

## Autonomous Parking of a Model Car with Trajectory Tracking Motion Control using ANFIS

장효환<sup>1,✉</sup>, 김창환<sup>1</sup>  
Hyo Whan Chang<sup>1,✉</sup> and Chang Hwan Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea Univ.)  
✉ Corresponding author: hwchang@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3354

Manuscript received: 2009.4.30 / Accepted: 2009.10.1

*In this study an ANFIS-based trajectory tracking motion control algorithm is proposed for autonomous garage and parallel parking of a model car. The ANFIS controller is trained off-line using data set which obtained by Mandani fuzzy inference system and thereby the processing time decreases almost in half. The controller with a steering delay compensator is tuned through simulations performed under MATLAB/Simulink environment. Experiments are carried out with the model car for garage and parallel parking. The experimental results show that the trajectory tracking performance is satisfactory under various initial and road conditions*

Key Words: Autonomous Parking (자동주차), Trajectory Tracking Motion Control (경로추종 운동제어), Model Car (모형차량), Fuzzy Control (퍼지제어), ANFIS (적응 뉴로퍼지추론시스템)

### 1. 서론

최근 전기 전자 및 센서 기술의 급속한 발전에 따라 기술융합을 통해 자동차의 안전성과 편의성을 향상시키는 지능형 자동차에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 하나인 주차지원시스템은 주차에 어려움을 겪는 운전자들에게 도움을 줄 수 있는 기술이며, 차량이 스스로 주차공간을 인식하여 장애물을 회피하는 주차경로를 생성한 후 그 경로를 추종하도록 차량을 제어한다. 주차지원시스템은 자동과 반자동 시스템으로 분류되는데, 자동 주차지원시스템에서는 차량이 조향과 속도를 모두 스스로 제어하고, 반자동 주차지원시스템에서는 차량의 조향은 차량 스스로 제어하고 속도는 운전자가 가속 페달과 브레이크 페달의 조작을 통해 적절하게 조절한다.

경로추종 제어에 관한 기존 연구는 차량형 이

동로봇 분야에서 많이 연구되어 왔다.<sup>1,4</sup> 하지만 기존연구에서는 기준경로가 이동시간에 따른 기준위치로 결정되고, 제어입력으로 휠각속도와 차량의 속도를 사용하기 때문에 운전자가 차량의 속도를 제어하는 반자동 주차지원시스템에서는 적용이 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 반자동 주차지원시스템에 적합하도록 기준경로를 이동거리에 따른 기준위치로 제시하고 그 경로를 추종하는 운동제어를 위하여 ANFIS 제어기를 제안하였다. 차량의 횡방향오차와 요각도오차의 멤버쉽함수를 이용하여 차량의 휠각도만을 제어하는 퍼지제어기에서 훈련데이터 셋을 추출하고 오프라인의 훈련을 통하여 ANFIS(Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System) 제어기를 설계하였다. 훈련된 ANFIS 제어기는 기존의 퍼지제어기에 비하여 연산시간을 약 절반으로 감소시켜 주었다.

MATLAB/Simulink 환경에서 시뮬레이션을 수행하여 차량의 조향지연을 보상하기 위한 보상기를 포함한 제어를 조율하였다. 제안한 제어를 대형 승용차의 약 1/9 크기인 모형차량에 적용하여 다양한 초기조건과 노면조건에서 실험을 수행하였다. 실험 결과로 모형차량의 경로추종 성능은 만족할 만한 수준이었으며, 제안된 제어기는 외란에 대하여 강인함을 보였다.

## 2. 차량 모델링

본 연구에서는 반자동 주차시뮬레이션을 수행하기 위하여 모형차량을 모델링하였다. 차량모델은 Fig. 1 과 같은 이상적인 기구학 모델이다.

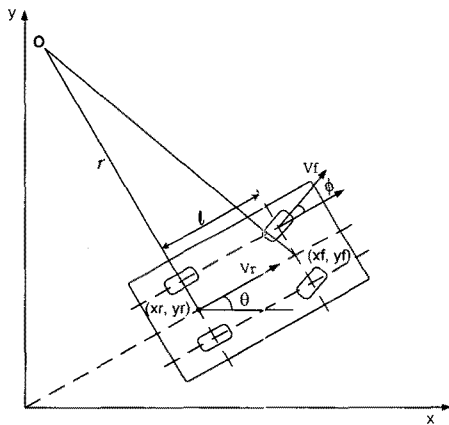


Fig. 1 Vehicle kinematics model

기구학 모델에서 차량의 기준위치는 전륜 중심 좌표와 후륜 중심좌표로 각각 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 주차를 수행하기 위한 기준경로가 차량의 후륜 중심좌표를 기준으로 생성되므로 이는 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_r \cdot \cos \theta \\ v_r \cdot \sin \theta \\ \frac{v_r}{l} \cdot \tan \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

조향장치의 동특성 및 노면과 타이어 사이의 마찰력에 의한 조향지연을 고려하기 위하여 조향장치를 다음과 같이 1 차 함수로 가정하여 모델링

하였다.

$$\frac{\phi}{\phi_c} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

여기서  $\phi_c$  는 제어기 출력 휠각도,  $\phi$  는 차량의 실제 휠각도이며,  $\tau$  는 조향장치의 시상수이다.

## 3. 경로추종 운동제어 알고리즘

### 3.1 오차의 정의

본 연구의 반자동 주차지원시스템은 먼저 주차를 위한 기준경로를 생성한 후, 이 기준경로를 차량이 추종하는 시스템이다. 차량이 주어진 기준경로를 정확하게 추종하기 위해서는 차량의 현재위치와 목표위치에 대한 정확한 정보가 필요하다. 차량의 현재위치는 확장 칼만 필터를 사용하여 차량의 비전센서, 초음파센서 및 전후륜에 장착된 엔코더 정보를 융합하여 추정할 수 있다고 가정하였다.<sup>4</sup>

Fig. 2 는 x-y 좌표계에서 기준경로 상의 목표위치(기준위치)와 차량의 현재위치와의 오차를 보여주고 있다. 그림에서 차량 진행방향의 오차를  $x_e$ , 횡방향오차를  $y_e$ , 차량 요각도오차를  $\theta_e$  라고 정의한다. 오차벡터  $p_e(x_e, y_e, \theta_e)$  는 기준위치벡터  $p_r(x_r, y_r, \theta_r)$  와 현재위치벡터  $p_c(x_c, y_c, \theta_c)$  로부터 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (p_r - p_c) \quad (3)$$

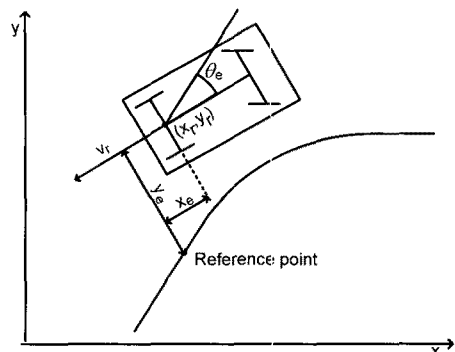


Fig. 2 Error configuration

### 3.2 경로추종 운동제어

기존 연구에서는 Mandani 퍼지추론모델을 사용하여 차량의 횡방향오차( $y_e$ )와 요각도오차( $\theta_e$ )에 따른 제어출력 값인 휠각도( $\phi$ )를 구하였다.<sup>5</sup> 퍼지 제어기는 차량과 같은 비선형 시스템의 제어에 적합하고 상황에 따라 파라미터가 변하더라도 강인한 제어가 가능하다는 장점이 있지만,<sup>6</sup> 연산 속도가 느린 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 적응 뉴로퍼지추론시스템인 ANFIS 제어를 제안하고 기존 연구의 Mandani 퍼지제어기에서 훈련 데이터 셋을 추출하여 훈련하였다.

#### 3.2.1 ANFIS 제어기

ANFIS 는 적응 네트워크 구조를 갖는 퍼지추론 시스템이며, 비선형 시스템을 위한 제어기로 최근에 많이 사용되고 있다.<sup>7-9</sup> 본 연구에서 81 개의 규칙을 갖는 ANFIS 를 사용하고 있으나, 이해를 돕기 위해 Fig. 3 에는 두 개의 규칙만을 갖는 ANFIS 의 구조를 나타내었다. ANFIS 는 그림과 같이 5 개의 층으로 구성되어 있는데 각 층의 역할과 추론 과정은 식(4)~(9)와 같다.

Layer 1 : 멤버쉽 등급 생성

$$\mu_{A_i}(y_e) = \exp\left\{-\left(\frac{y_e - c_i}{a_i}\right)^2\right\} \quad (4)$$

$$\mu_{B_i}(\theta_e) = \exp\left\{-\left(\frac{\theta_e - c_i}{a_i}\right)^2\right\} \quad (5)$$

Layer 2 : 발화강도(firing strength) 생성

$$w_i = \mu_{A_i}(y_e) \times \mu_{B_i}(\theta_e), \quad i = 1, 81 \quad (6)$$

Layer 3 : 발화강도의 정규화

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_{81}}, \quad i = 1, 81 \quad (7)$$

Layer 4 : 규칙 출력 연산

$$\bar{w}_i \phi_i = \bar{w}_i (p_i y_e + q_i \theta_e + r_i) \quad (8)$$

Layer 5 : 제어값 출력

$$\phi = \sum_i \bar{w}_i \phi_i = \frac{\sum_i w_i \phi_i}{\sum_i w_i} \quad (9)$$

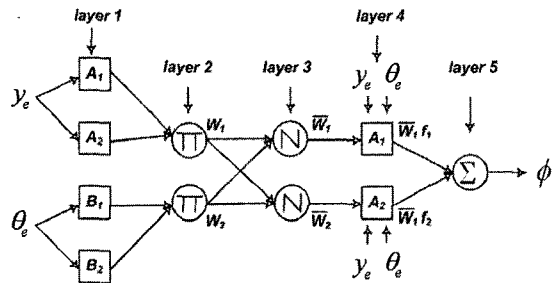


Fig. 3 ANFIS structure

ANFIS 는 2 개의 훈련 가능한 파라미터 즉, 조건부 파라미터(premise parameters) [ $a_i, c_i$ ]와 결론부 파라미터(consequent parameters) [ $p_i, q_i, r_i$ ]로 구성된다. ANFIS 의 훈련은 조건부 파라미터의 최적화를 위해서 gradient descent 를 사용하고, 결론부 파라미터의 최적화를 위해서는 LSE(least squares estimate) 를 사용하여 이루어진다. 파라미터의 최적화를 위해 두 개의 서로 다른 알고리즘을 사용하기 때문에 ‘혼합된 학습규칙’(hybrid learning rule)이라고 한다. ANFIS 의 훈련은 LSE 를 통해 결론부 파라미터를 먼저 갱신하고, 오차를 역으로 전파하여 조건부 파라미터를 갱신한다.

#### 3.2.2 ANFIS 훈련

ANFIS 제어기의 훈련을 위해서 Mandani 퍼지제어기를 사용하여 훈련 데이터 셋을 추출하였다. Mandani 퍼지제어기는 차량의 횡방향오차( $y_e$ )와 요각도오차( $\theta_e$ )를 퍼지제어기의 입력 멤버쉽함수(membership function: MF)로 퍼지화하고, 휠각도( $\phi$ )를 출력 멤버쉽함수로 퍼지화하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각  $y_e$ 와  $\theta_e$ 의 입력 MF를, Fig. 4(c)는  $\phi$ 의 출력 MF를 보여주고 있다.

퍼지제어기는 우선  $y_e$ 의 크기에 따른 제어입력 값에 대한 규칙을 정하고, 추가로  $y_e$ 의 크기와  $\theta_e$ 를 AND 논리법 칩에 적용하여  $\theta_e$ 에 따른 제어입력 값에 대한 규칙을 정하였다. 즉,  $y_e$ 가 큰 경우에는 위치추종을 우선으로 하도록  $\theta_e$ 를 고려하지 않았고,  $y_e$ 가 작은 경우에만  $\theta_e$ 를 고려하였다. 또한  $y_e$ 와  $\theta_e$ 의 부호가 같으면 차량이 목표경로에 접근하는 것으로, 부호가 다르면 목표 경로에서 이탈하는 것을 기본 규칙으로 하여 83 개

의 규칙을 갖는 퍼지제어기를 설계하였다. 입력 변수들에 의한 추론 결과는 무게중심법을 사용하여 비퍼지화하였다.<sup>5</sup>

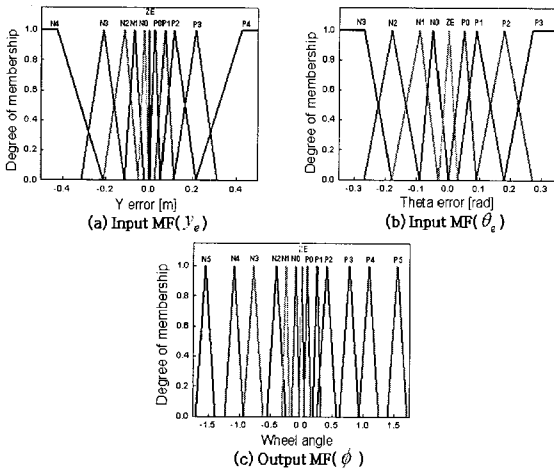


Fig. 4 Membership functions of fuzzy controller

Mandani 퍼지제어기의 입력 MF 에서  $y_e$  와  $\theta_e$  가 각각  $-0.5m \sim 0.5m$  와  $-30^\circ \sim 30^\circ$  일 때 생성되는 출력 값을 훈련 셋으로 하여 9000 개의 데이터 셋을 추출해 ANFIS 의 오프라인(off-line) 훈련에 사용하였다. ANFIS 규칙의 갯수는 훈련시간 대비 만족할 만한 오차를 보이는 81 개로 하였다. Fig. 5 는 학습의 반복에 따른 RMSE (Root Mean Square Error)를 보여주고 있는데 혼합된 학습규칙을 사용한 11 번의 훈련 후에 RMSE 는 약 0.025(최대 출력 MF 의 0.78%)로 만족할 만한 수준으로 수렴하였다.

Table 1 은 본 연구에서 제안한 ANFIS 제어기와 Mandani 퍼지제어기의 연산시간을 비교하여 보여주고 있다. Pentium 4, dual-core, 3.2Ghz, 1GB 메모리를 갖는 PC 에서 Process Explorer 를 사용하여 MATLAB 을 통해 10,000 번 연산에 소요된 시간을 측정하여 1 회 연산에 필요한 시간으로 나타낸 것

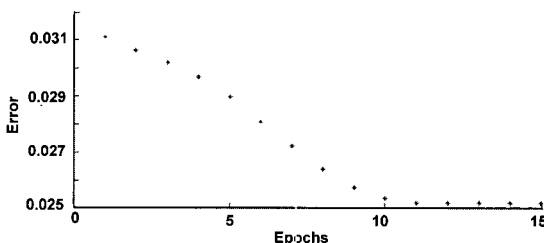


Fig. 5 RMSE vs training number

Table 1 Comparison of the processing time per sampling

	ANFIS	Mandani Fuzzy
Processing time (msec)	1.323	2.528

이다. 제안된 ANFIS 제어기는 기존 연구의 Mandani 퍼지제어기<sup>5</sup>에 비해 연산시간을 약 절반으로 감소시켜 주기 때문에 실시간 제어에 좀더 적합하며, 실제 차량에의 적용도 가능해질 것으로 기대된다.

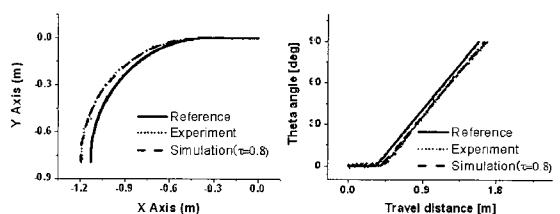
### 3.2.3 경로추종 운동제어 알고리즘

본 연구에서 사용한 모형차량은 실내 바닥재질의 노면에서 미끄러짐이 많이 발생하였기 때문에 카펫 재질의 노면에서 실험을 수행하였다. 하지만, 타이어와 노면 사이의 마찰력으로 인해 모형차량 조향장치 본래의 동특성 보다 더 큰 조향지연 현상이 발생하였다.

Fig. 6 은 모형차량에 최대 크기( $20^\circ$ )의 휠각도를 계단입력으로 가하였을 때 개회로 상태에서의 경로추종 성능과 요각도 동특성에 대한 실험 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 조향지연으로 인해 차량은 기준경로를 제대로 추종하지 못하였고, 조향장치 모델(식(2) 참조)의 시상수를 0.8sec 로 하였을 때 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.

위와 같은 조향지연 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서 ‘조향지연 보상기’를 제안하였다. 주차를 위한 기준경로는 이동거리에 따른 세 가지 기준 값, 즉, 차량의 기준좌표( $x_r, y_r$ ), 기준요각도( $\theta_r$ )와 기준휠각도( $\phi_r$ )로 생성된다. 조향지연 보상기는 차량의 속도에 따라 미리 정해진 보상거리만큼 기준조향각( $\phi_r$ )을 앞당겨 입력시켜 준다.

Fig. 7 은 시뮬레이션을 통하여 구한 차량의 속



(a)Trajectory tracking

(b)Yaw angle

Fig. 6 Effects of steering delay

도에 따라 요구되는 보상거리를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 차량 속도가 빨라짐에 따라 보상거리는 거의 비례적으로 증가하였다.

Fig. 8 은 본 연구에서 제안한 경로추종 운동 제어 알고리즘의 블록선도를 보여주고 있는데, ‘기준 경로 모델’, ‘조향지연 보상기’, ‘ANFIS 제어기’로 구성되어 있다. ‘기준경로 모델’에는 종방향오차를 일정한 값 이내로 제한하는 보상기가 포함되어 있는데, 이는 초기위치가 기준경로를 이탈한 경우나 범프로 인하여 이동거리가 기준경로보다 늘어난 경우에 종방향오차의 증가로 인해 추종제어 성능이 저하되는 것을 억제시켜 주는 역할을 한다.

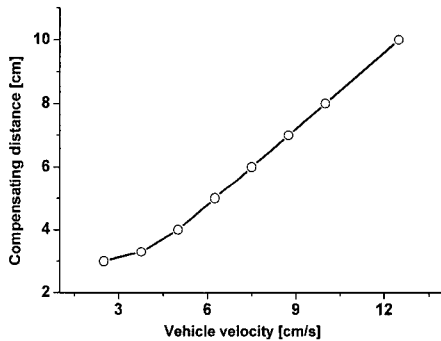


Fig. 7 Compensating distance adjusted to vehicle velocity

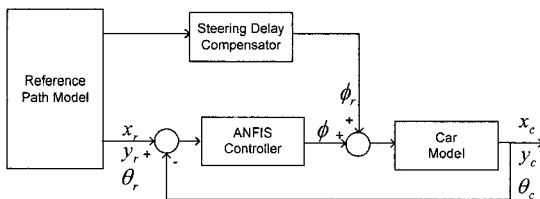
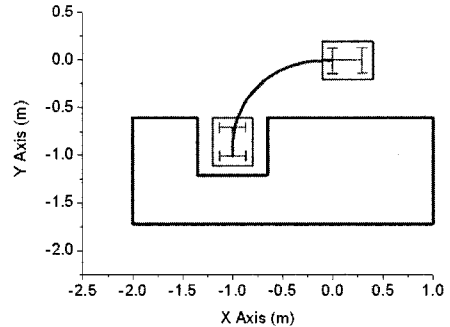


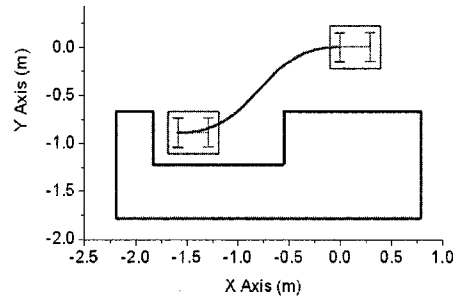
Fig. 8 Block diagram of a proposed ANFIS-based trajectory tracking control system

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 환경

Fig. 9(a)와 (b)는 본 연구에서 사용한 직각 및 평행 주차경로를 각각 보여주고 있다. 각 주차경로의 초기위치는  $(0,0,0^\circ)$  이고, 최종위치는 (a)와 (b)에서 각각  $(-1, -1, 90^\circ)$ 와  $(-1.6, -0.8, 0^\circ)$ 이다. 주차경로는 한번의 후진으로 주차가 가능한 최단 경로이며, 별도의 경로계획에 의해 생성되었다.<sup>4</sup> 차량의 이동속도는 운전자가 곡선구간에서는 감속한다고 가정하여 직선구간에서는 8cm/sec, 곡선구간에서는 7.5cm/sec로 하였다.



(a) Garage parking



(b) Parallel parking

Fig. 9 Reference trajectory for autonomous parking

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink 환경에서 수행되었다. 조향지연 보상기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 경로추종 성능에 미치는 보상기의 효과를 분석하고 보상기를 포함한 제어기를 조율하였다.

Fig. 10 은 본 연구에서 사용한 실험장치를 보여주고 있는데, 호스트컴퓨터와 모형차량으로 구성되어 있다. 모형차량의 축간거리(wheelbase)는 0.315m, 타이어의 직경은 0.14m 이며, 축간거리 기준으로 대형 승용차의 약 1/9 크기이다. 모형차량에는 조향제어용 서보모터, 구동용 DC 모터와 엔코더, StarGazer 센서, 호스트컴퓨터와 무선통신을 위한 Bluetooth, 모터 및 통신 제어를 위한 Atmega128 가 장착되어 있다. Atmega128 은 8 비트 범용 마이크로 프로세서로 RISC 구조를 가지며 16Mhz 로 작동한다. 적외선 LED 와 카메라로 구성된 StarGazer 센서는천장에 미리 부착한 4 개의 경계표(landmark)에 대한 상대자세로부터 현재위치를 인식하며, 정밀도는 변위  $\pm 0.01m$ , 방향  $\pm 0.5^\circ$  이내이다. StarGazer 센서를 통해 얻은 현재위치 정보는 Bluetooth 를 이용해 80msec 마다 호스트컴퓨터로 전송된다. 호스트컴퓨터는 모형차량으로부터 전송받은 위치정보를 기준경로와 비교하여 횡방향

오차 ( $y_e$ )와 요각도오차 ( $\theta_e$ )를 연산하여 그에 따른 제어입력값인 휠각도 ( $\phi$ )를 모형차량에 전송한다.

초기위치의 변화에 따른 외란과 노면에 범프와 같은 불확실성이 존재하는 외란에 대한 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다.

Fig 11(a)와 (b)는 각각 직각 및 평행 주차경로에서 모형차량의 초기위치를 보여주고 있다. 초기위치 A 는 기준경로의 시작점과 동일한 위치이며,

B 와 C 는 초기위치의 인식 오류 또는 위치 인식 후에 발생한 차량의 미끄러짐을 가정한 위치이다.

또한 각각의 주차경로상에 차량의 이동방향과 수직되게 7 개씩의 범프를 균일한 간격으로 설치하여 울퉁불퉁한 노면을 재현하였다. 설치한 범프는 높이와 폭이 각각 0.5cm 인 가늘고 긴 나무막대이며, 범프의 높이 0.5cm 는 모형차량이 넘어갈 수 있는 최대 높이이다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 조향지연 보상기의 효과를 고찰하고, 정상경로에서의 제어성능을 실험결과와 비교하였다.

Fig. 12 와 Fig. 13 은 각각 직각 및 평행 주차경로에서 조향지연 보상기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하여 보여주고 있다. 보상기를 적용한 경우에 기준경로를 좀더 정밀하게 추종하여 횡방향오차와 요각도오차가 감소한 것을 확인할 수 있었다.

Table 2 는 시뮬레이션 결과를 최대오버슈트와 최종위치오차 기준으로 정리한 것을 보여주고 있

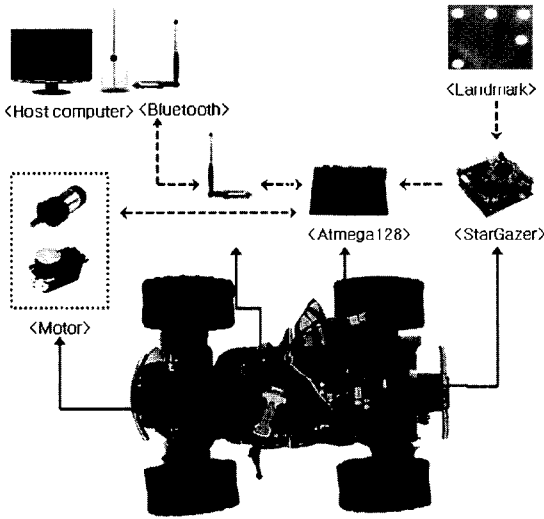


Fig. 10 Experimental setup

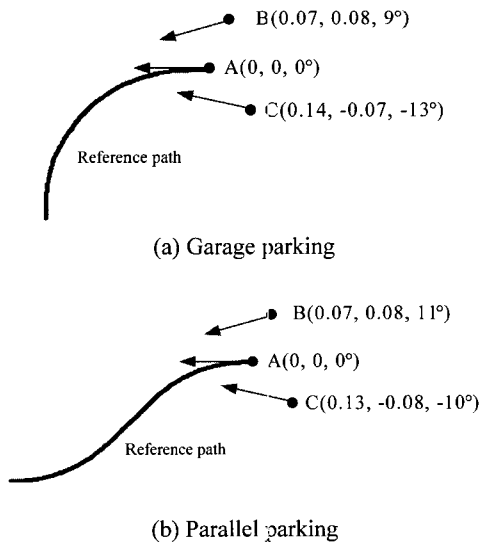


Fig. 11 Initial conditions of the model car for autonomous parking

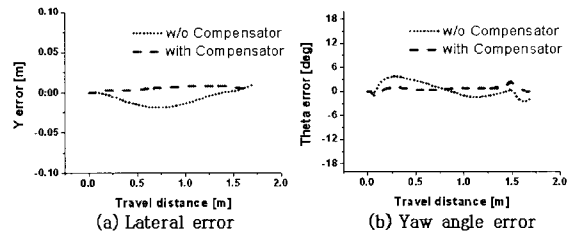


Fig. 12 Comparison of tracking errors of the model car between with compensator and w/o compensator for the garage parking

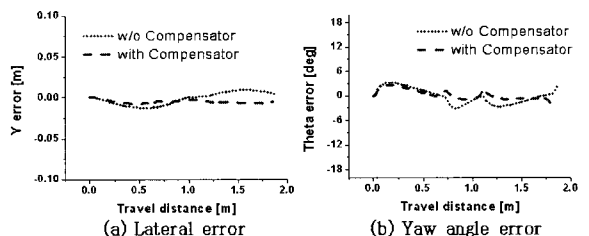


Fig. 13 Comparison of tracking errors of the model car between with compensator and w/o compensator for the parallel parking

Table 2 Comparison of tracking errors of the model car between with compensator and w/o compensator

	Compen- sator	Max. overshoot		Final error	
		$y_e$ (m)	$\theta_e$ (deg)	$y_e$ (m)	$\theta_e$ (deg)
Garage parking	with	0.008	2.28	0.05	-0.08
	w/o	0.019	3.73	0.009	-1.77
Parallel parking	with	0.008	2.58	-0.005	-1.70
	w/o	0.013	3.21	0.004	2.35

다. 보상기에 의해 최대오버슈트 기준으로 횡방향 오차  $y_e$  와 요각도오차  $\theta_e$  는 각각 최대 58%와 39% 까지 감소하였고, 최종위치오차 기준으로  $y_e$  와  $\theta_e$  는 각각 최대 44%, 95%까지 감소하였다. 따라서 조향지연 보상기가 경로추종 제어성능 향상에 상당히 효과적임을 확인할 수 있었다.

Fig. 14 와 Fig. 15 는 각각 직각 및 평행 주차경로에서의 추종제어 성능에 대한 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교하여 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 정량적으로는 차이가 있지만 정성적으로는 비교적 일치하였고, 직각주차보다는 평행주차에서 좀 더 잘 일치하였다. 실험 결과의 차이는 모델링에서 반영하지 못한 동역학적 특성,타이어와 노면 사이의 마찰력과 신호처리 노이즈 등에 대한 불확실성 때문인 것으로 사료된다.

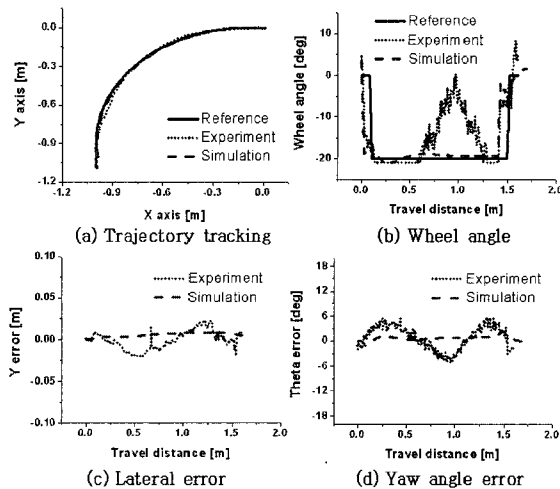


Fig. 14 Comparison of the simulation result with the experimental one for the garage parking

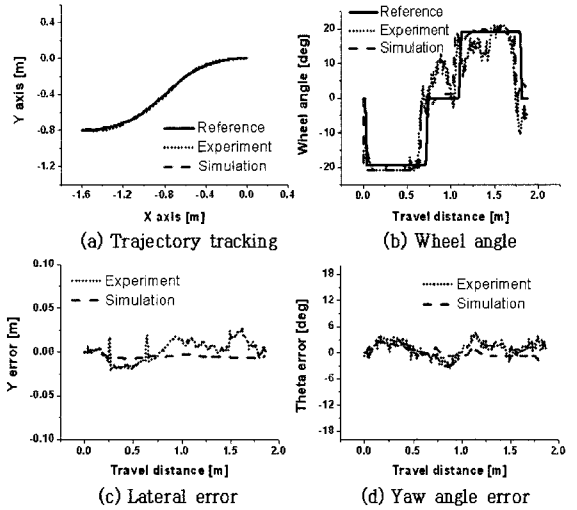


Fig. 15 Comparison of the simulation result with the experimental one for the parallel parking

5.2 실험 결과

Fig. 16 과 Fig. 17 은 각각 직각 및 평행 주차경로에서 세 가지 초기위치에 대하여 실험을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 정상경로(A)뿐만 아니라 초기위치가 이탈된 경우(B, C)에도 모형차량은 비교적 정밀하게 기준경로를 추종하였다.

Table 3 은 실험 결과를 최대오버슈트와 최종위치오차 기준으로 정리한 것을 보여주고 있다. 초기위치가 이탈된 경우(B, C)의 최대오버슈트는 모

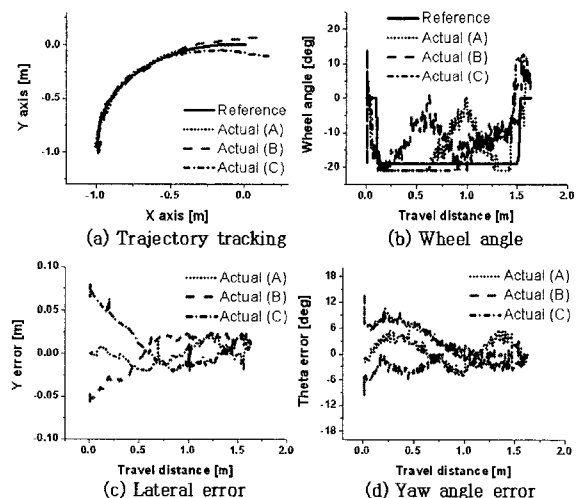


Fig. 16 Tracking performance of the garage parking

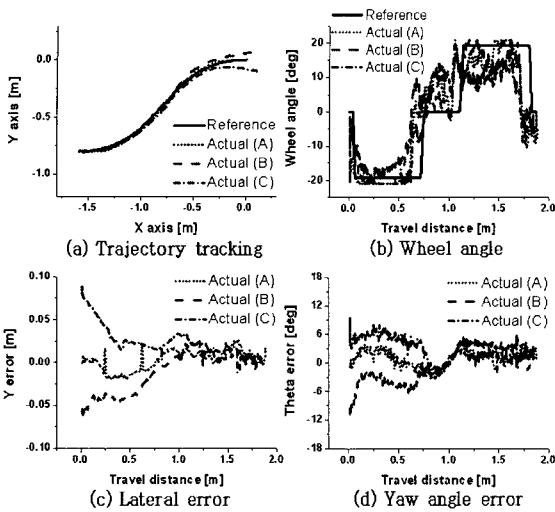


Fig. 17 Tracking performance of the parallel parking

형차량이 기준경로에 처음으로 복귀한 후에 발생한 횡방향오차  $y_e$  와 요각도오차  $\theta_e$  의 최대 값으로 나타내었다. 표에서 볼 수 있는 것처럼 일부 조건에서  $\theta_e$  의 최대오버슈트가 약간 크게 나타났으나 최종오차는 만족할 만한 수준의 결과를 보였다. 따라서 제안한 제어기가 초기위치 변화에 따른 외란에 대하여 강인성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.  $\theta_e$  의 최대오버슈트가 약간 크게 나타난 원인은 첫째, 주차경로 초반에 곡선구간이 바로 시작되어 조향지연 보상기의 기능이 제대로 발휘되지 못했기 때문이고 둘째, 모형차량의 최대 휠 각도가  $20^\circ$ 로 제한되어 있고 정밀도에도 한계가 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 18 과 Fig. 19 는 각각 직각 및 평행 주차 경로에서 경로상에 범프가 있는 노면에서 실험을 수

Table 3 Comparison of the experimental result for various initial conditions

	Initial cond.	Max. overshoot		Final error	
		$y_e$ (m)	$\theta_e$ (deg)	$y_e$ (m)	$\theta_e$ (deg)
Garage parking	A	0.021	4.80	0.005	-1.47
	B	0.022	2.52	0.013	-0.20
	C	0.022	2.95	0.010	0.02
Parallel parking	A	0.026	4.21	0.006	0.63
	B	0.023	5.43	-0.005	-0.15
	C	0.029	4.38	-0.002	1.82

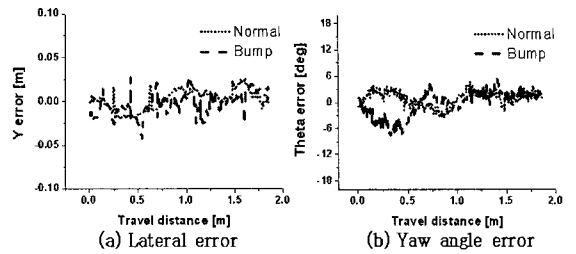


Fig. 18 Tracking performance of the garage parking on the bumpy road

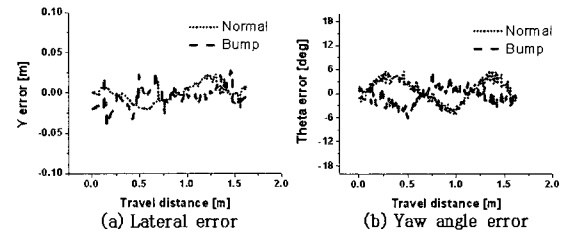


Fig. 19 Tracking performance of the parallel parking on the bumpy road

행한 결과를 일반 노면에서의 실험 결과와 비교하여 보여주고 있다. 범프가 있는 경우 차량이 범프를 통과하면서 흔들림이 발생하여 횡방향으로 최대  $\pm 0.03m$  까지, 요각도는 최대  $\pm 2^\circ$ 까지 변화하였다. 범프로 인하여 이동거리가 늘어나고, 흔들림이 발생하여 기준경로를 벗어났지만 모형차량은 비교적 안정적으로 경로를 추종하여 범프와 같은 불확실이 존재하는 외란에 대하여도 제어기가 강인함을 보였다.

Fig. 20 은 직각주차 경로상에 범프가 존재하는 노면에서의 주차실험 동영상을 5sec 간격으로 보여주고 있다. 주차에 소요된 시간은 약 35sec 로 일반노면 경우의 24sec 에 비해 11sec 가량 더 소요되었는데, 범프로 인해 차량의 속도가 느려졌기 때문이다.

## 6. 결론

본 연구에서 직각 및 평행 주차 기준경로를 추종하는 ANFIS 기반 운동제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 경로추종 성능과 제어기의 강인성을 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) ANFIS 경로추종 운동제어기는 기존 연구의 Mandani 퍼지제어기에 비해 연산시간을 약 절반으



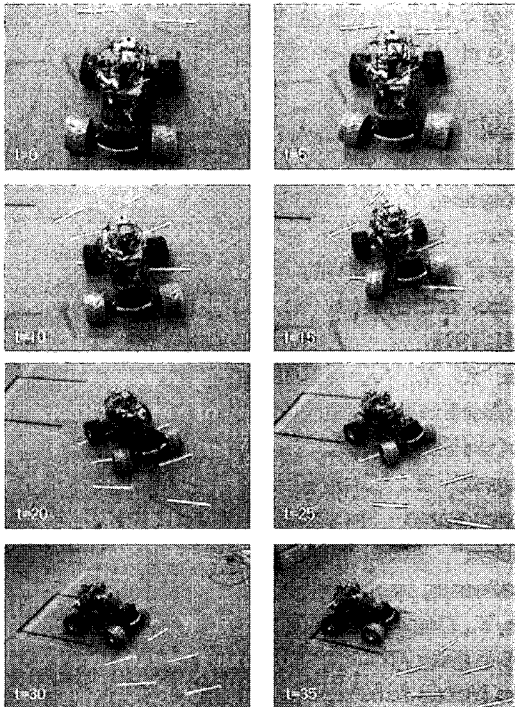


Fig. 20 Video frames showing garage parking of the model car on the bumpy road (t: sec)

로 감소시켜 주기 때문에 실시간 제어에 좀 더 적합하며, 실제 차량에의 적용도 가능해질 것으로 기대된다.

2) 조향장치의 동특성 및 노면과 타이어 사이의 마찰력에 의하여 발생한 조향지연을 보상하기 위하여 제안한 보상기가 경로추종 제어성능 향상에 상당히 효과적임을 확인할 수 있었다.

3) 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 정량적으로는 차이가 있지만 정성적으로는 비교적 일치하였고, 직각주차보다는 평행주차에서 좀 더 잘 일치하였다.

4) 다양한 초기위치에 대해 실험을 수행한 결과 모형차량은 비교적 정밀하게 기준경로를 추종하여 제안한 제어기가 초기위치 변화에 따른 외란에 강인함을 보였다.

5) 주차경로상에 있는 범프로 인하여 이동거리가 늘어나고, 흔들림이 발생하여 기준경로를 벗어났지만 모형차량은 비교적 안정적으로 경로를 추종하여 범프로와 같은 불확실성이 존재하는 외란에 대하여도 제어기가 강인함을 보였다.

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었으며 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고문헌

1. Kanayama, Y. and Kumura, Y., "A Stable Tracking Control Method for a Non-Holonomic Mobile Robot," IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, No. 91TH0375-6, pp. 1236-1241, 1991.
2. Bae, K. Y., "A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to the Driving Control of a Mobile Robot," J. of the KSPE, Vol. 23, No. 12, pp. 46-55, 2006.
3. Seignez, E., Lambert, A. and Maurin, T., "Autonomous Parking Carrier for Intelligent Vehicle," IEEE Intelligent Vehicle Symposium Conference, pp. 411-416, 2005.
4. Lee, K., Chung, W. and Chang, H. W., "Improvement of Odometry Accuracy and Parking Control for a Car-Like Mobile Robot," The Journal of Korea Robotics Society, Vol. 3, No. 1, pp. 16-22, 2008.
5. Kim, S. K., Chang, H. W., Kim, C. H. and Chung, W., "Path tracking Motion Control using Fuzzy Inference for a Parking-Assist System," Proc. KSAE Autumn Conference, No. 4, pp. 1876-1881, 2007.
6. Cai, L., Rad, A. B. and Chan, W. L., "A Robust Fuzzy PD Controller for Automatic Steering Control of Yaw Dynamics for 4WD Vehicle," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 425-430, 2004.
7. Shing, J. and Jang, R., "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
8. Prabu, D., Kumar, S. and Prasad, R., "Dynamic Control of Three-Link SCARA Manipulator using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System," IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 1609-1614, 2008.
9. Srinivasan, A. and Nigam M. J., "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based control of six DOF robot manipulator," Journal of Engineering Science and Technology Review 1, pp. 106-111, 2008.