

## 퍼지 로직을 이용한 힘반사형 전동 조향 장치

### Force-Reflecting Electronic Power Steering System Using Fuzzy Logic

◦ 박 창 선\* • 권 동 수\*\*

\* 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과 (Tel:+82-02-958-3457, Fax:+82-02-968-1638, E-mail: parkcs@robot.kaist.ac.kr)

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 (Tel:+82-042-869-3042, E-mail: kwon@automation.kaist.ac.kr)

**Abstract:** Vehicle steering system determines the direction of a vehicle. A manual steering system consists of mechanical connections between the steering wheel and tires. Recent power steering system adds an actuator to help a driver to steer easily at low speed. However, at front collision, the driver can be injured by steering shaft and the power steering pump decreases the engine power. To solve these problems, electronic power steering system which connects the steering wheel and tires with electronic connection is proposed, that has advantages such as decrease of engine load and increase of driver safety reactive. Since the ratio between driver's steering torque and steering torque of tires can be controlled freely, the torque which is delivered from the road to the driver through tires and steering wheel can be reshaped to make the driver feel comfortable. In this paper, the ratio of delivering steering torque and the magnitude of force to be delivered from road to driver has been controlled using fuzzy controller, and it's effectiveness has been shown through simulation results.

**Keywords:** Force Reflecting, Electronic Power Steering System, Fuzzy Logic

#### 1. 서론

자동차의 조향 장치는 운전자의 조향각을 차량 바퀴에 전달하여 운전자의 의도에 따라 자동차가 움직이도록 하는 장치이다. 초기의 조향 장치는 운전자와 바퀴 사이에 단순한 연결로만 이루어진 수동 조향 장치(Manual Steering System)로서 저속에서는 운전자가 조향 시 핸들이 무겁게 느껴져 노약자나 여성이 운전할 경우 어려움이 많았다. 이를 위해 운전자가 가한 조향 토크에 추가 액추에이터를 부착하여 운전자가 적은 토크로 손쉽게 조향할 수 있는 기계적 구조의 동력 조향 장치가 개발되었다. 그러나, 차량이 고속으로 주행할 경우 운전자의 작은 토크에도 조향각이 크게 변하기 때문에 급조향 시 차량이 전복되는 위험이 발생하여 속도에 따라 액추에이터의 힘을 조절하는 동력 조향 장치가 개발되었다.[6][10] 저속에서는 핸들을 가볍게 느끼도록 하여 운전자가 손쉽게 조향할 수 있고, 고속에서는 핸들을 무겁게 느끼도록 하여 운전자가 급조향을 하지 못하도록 하여 차량이 전복되는 것을 방지하였다.

그러나, 조향 핸들을 지탱하고 조향 핸들과 차량의 바퀴를 연결시키는 조향축은 차량 충돌 시 들출로 인한 운전자의 사고를 유발할 수 있고, 동력 조향 장치에서 추가된 액추에이터는 차량 엔진의 출력을 이용하기에 엔진의 출력이 감소되는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 동력 조향 장치의 기계적 구조를 모터,

엔코더와 같은 전기적 구조로 대체한 전동 조향 장치(Electronic Power Steering System)을 제안하여 앞의 문제점들을 해결하고자 한다. 기존의 동력 조향 장치에서 기계적인 연결을 통해 전달한 힘을 모터와 엔코더를 사용하여 전기 신호로써 전달하게 되므로 조향축이 필요없게 되고 자동차의 여유 전력을 사용하여 모터를 구동하므로 엔진의 출력도 감소하지 않는다. 그러나, 핸들과 바퀴 사이에 직접적인 연결이 없기 때문에 바퀴와 노면 사이의 마찰력과 같이 차량에서 전달되는 힘을 운전자가 느끼지 못하는 문제점이 발생한다. 핸들과 모터의 관성 모멘트와 댐퍼 값만을 느끼고 조향할 경우 앞에서 설명하였던 속도의 변화에 따른 조향 감각의 변화를 느낄 수 없게 되어 급조향에 의한 차량의 도로 이탈 혹은 차량 전복의 위험이 발생한다. 이를 방지하기 위해 운전자의 조향 의도와 자동차의 상태에 따른 적절한 토크 피드백이 필요하며 이를 구현하기 위해 퍼지 제어기를 사용하였다. 자동차, 조향 핸들, 운전자는 모델링을 통해 구현하였으며 운전자의 경우 퍼지 로직 상에서 초보자와 숙련자를 구분하여 구성하였다. 이 모델들을 바탕으로 초보자와 숙련자 각각에 대해 토크 피드백을 가했을 경우와 가하지 않았을 경우에 대한 도로 궤적 추적 오차, 사이드 슬립(side slip)의 크기 비교, 운전자가 가하는 조향력의 크기 비교를 통하여 단순 전동 조향 장치와 토크 피드백을 가한 전동 조향 장치의 차이점과 향상되는 정도를 확인할 것이다.

## 2. 전동 조향 장치(Electronic Power Steering System) 모델링

본 논문에서 사용하는 자동차 모델은 한양대[11]의 8자유도 모델을 바탕으로 하는 2륜 구동 차량 모델로서 각 바퀴의 조향과 구동을 모터를 통해 이루어 지는 것으로 가정하였다. 그 외의 가정으로서 차량의 기구학적인 영향 무시, 도로 노면의 굴곡에 따른 영향 무시, 횡풍에 의한 영향 무시, 수직 운동과 피칭(pitching) 운동을 무시하였고, 직진 하중 전달과 횡하중 전달 영향은 고려하였으며, 롤축의 위치를 한 위치에 고정되어 있다고 하였고, 이들 가정으로부터 모델링을 출발하였다.

### 2.1 차량 동역학 모델

차량 모델은 총 8자유도를 가지고 있으며 이중 4자유도는 차량 본체의 운동을 나타내며 나머지 4자유도는 차량의 바퀴 운동을 표현한다. 차량 본체에서 표현되는 자유도는 직진(longitudinal) 운동, 횡(lateral) 운동, 요잉(yawing) 운동, 롤링(rolling) 운동의 4자유도이다. 직진 운동과 횡운동은 차량 좌표계에서 각각 x, y 방향을 나타낸다. 요잉 운동은 xy 평면에 수직인 z 축을 중심으로 회전하는 운동이고 롤링 운동은 x 축을 중심으로 회전하는 운동으로 각각  $\psi$ 와  $\phi$ 로 나타내어진다. 차량 바퀴에서 표현되는 자유도는 바퀴의 회전에 따른 각속도로서 전체 바퀴에 4자유도가 표현된다. 자동차의 위에서 바라본 좌표계와 앞에서 바라본 좌표계를 아래 그림과 같이 나타내었다.

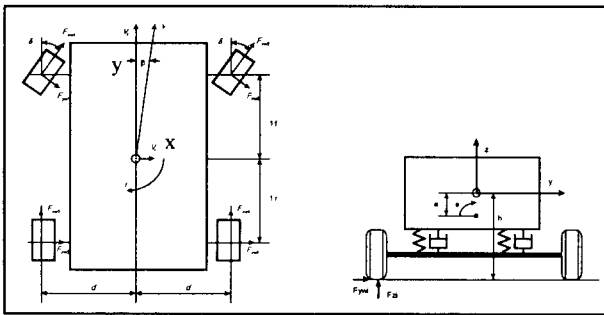


그림 1 위, 앞에서 바라본 자동차의 모델링

Fig. 1 Vehicle modeling through up and front side

4 개의 자유도에 대해 뉴턴의 제 2 법칙을 적용하면 아래와 같은 비선형 운동 방정식을 구할 수 있다. 이 식들을 통해 직진 방향의 속도( $V_x$ ), 횡 방향의 속도( $V_y$ ), 요잉 모멘트( $r$ ), 롤링 모멘트( $p$ )를 구할 수 있다.

### 2.2 타이어 모델

타이어 모델은 자동차에 나타나는 비선형성을 표현하는 중요한 모델로서 자동차의 운동을 근본적으로 제공하는 역할을 하고 있다. 비선형성을 가지는 타이어 모델을 표현하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 이 중에서 본 논문은 마찰원에 근거하여 타이어의 직진력과 횡력을 슬립율과 슬립각으로 표현하는 해석적 모델인 Dugoff 모델을 사용하였다.[12]

$$F_{px} = \frac{C_s - S}{1 - S} \cdot f(X_s) \cdot (2 - f(X_s)) \quad (1)$$

$$F_{py} = \frac{C_{\alpha} - \tan \alpha_s}{1 - S} \cdot f(X_s) \cdot (2 - f(X_s))$$

$F_{xi}$ 는 각 바퀴의 직진 방향의 힘이고  $F_{yi}$ 는 바퀴의 횡 방향 힘을 뜻한다. 차량 동역학 모델을 바탕으로 차량의 운동을 나타내는 차량 전체 모델을 구성할 수 있고, 모델에 대한 상태값으로 직진 방향 거리, 직진 방향 속도, 직진 방향 가속도, 횡 방향 거리, 횡 방향 속도, 횡 방향 가속도, 요잉 앵글, 요잉 모멘트, 롤 앵글, 롤 모멘트를 출력하게 된다.

### 2.3 조향 핸들 모델

조향 핸들은 운전자의 조향각을 자동차의 바퀴에 전달하는 역할과 도로 노면과 자동차의 상태에 따른 토크 피드백의 역할을 수행한다. 본 논문의 조향 핸들 장치는 기계적인 연결을 통한 토크의 전달을 모터와 엔코더를 이용한 전기 신호의 전달로 바꿀 수 있도록 구성한 모델이다. 기구학적, 전기적 모델을 바탕으로 조향 핸들을 simulink 상에서 다음 그림과 같이 구현하였다.

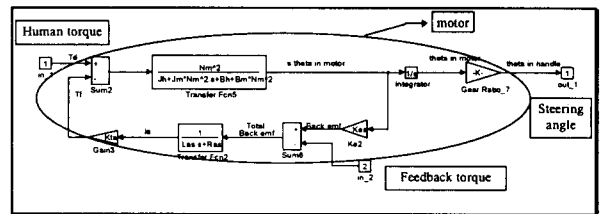


그림 2 모터 모델 Simulink block

Fig. 2 Simulink block of motor model

이 모델은 운전자의 조향 토크에 따른 조향 핸들의 조향각과 토크 피드백에 따른 조향각의 관계를 나타내었다. 그림 2는 토크를 입력으로 하여 토크의 변화에 따른 회전각을 출력으로 하는 발전기 개념을 이용하여 모델을 구성하였다. 그림 2에서 입력 1은 운전자가 조향 핸들에 가하는 조향 토크를 의미하고, 입력 2는 모델에 토크를 피드백하기 위한 것으로서, 피드백하고자 하는 토크에 비례하는 전압을 모터 양단에 가함으로써 피드백되는 토크의 값을 변화시키는 구조로 되어 있다. 출력 1은 사람이 가하는 조향 토크와 모터의 역기전압을 통해 발생하는 토크 피드백의 차에 의한 핸들의 조향각을 출력한다.

### 2.4 사람 모델 피지 로직

사람이 주어진 궤도를 따라 자동차를 운전하기 위해서는 여러 주행 상황들을 종합 판단한 뒤 조향 핸들에 토크를 가함으로써 이루어진다. 주행 시 사람은 시각으로부터 가장 많은 조향 정보를 습득하고, 조향 핸들에서 전해지는 힘으로부터도 정보를 습득한다. 현재 차량의 위치와 가고자 하는 목적지와의 차이만큼 운전자는 조향 핸들에 토크를 가하게 되며, 만약 핸들에서 추가적인 힘이 전해질 경우 더 큰 토크를 가함으로써

원하는 주행각을 회전시키게 된다. 본 논문에서는 사람의 조향 특성을 결정하기 위한 변수로서 시각 정보를 설정하여 현재 차량의 위치와 목적지와의 각도차와 각도차의 각속도를 입력으로 조향 토크를 출력하도록 퍼지 로직을 이용하여 운전자를 모델링 하였다. 초보자와 숙련자를 구분하기 위하여 입력의 변화에 대한 출력의 반응에 따라 부드럽고 유연하게 반응하는 경우를 숙련자로 설정하였다. 다음 그림 3는 초보자와 숙련자의 fuzzy logic control surface를 보여준다. 초보자에 비해 숙련자의 surface가 더욱 부드러운 유연하게 변하는 것을 알 수 있다.

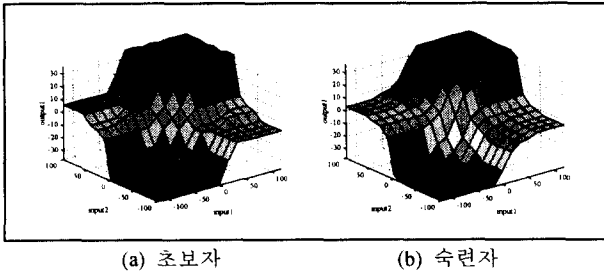


그림 3 Fuzzy logic control surface - 초보자, 숙련자  
Fig. 3 Fuzzy logic control surface - beginner, experter

### 3. 퍼지 제어기(Fuzzy Controller) 제안

#### 3.1 토크 피드백 퍼지 제어기

기계적인 연결을 통해 노면과 자동차 바퀴 사이에 작용하는 힘이 전달되는 기존의 방식에 비해, 전기적으로 연결되어 전기 신호만으로 힘을 전달하는 본 시스템에서는 노면과 자동차 바퀴 사이에 작용하는 힘을 직접 운전자에게 전달 할 수는 없다. 따라서, 운전자는 자동차의 속도와 노면의 상태에 따른 조향 환경의 변화를 느끼게 하기 위한 추가 제어기가 필요하게 된다. 본 논문에서는 추가 제어기로 퍼지 제어기를 적용하여, 입력은 조향각, 조향 토크, 자동차 주행 속도를 사용하였고 출력은 피드백되는 토크로 구성하였다.

자동차가 저속으로 주행중 일 때 조향 토크가 큰 것은 현재 차량이 언더스티어(understeer)한 상태이므로 작은 조향 토크에 대해서도 바퀴의 조향각을 크게 해주는 것이 좋다. 그러나, 고속으로 주행중 일 경우 조향 토크가 큰 것은 운전자의 의향과 상관없이 자동차의 전복을 발생시킬 수 있으므로 큰 조향 토크에도 바퀴의 조향각이 작게 변화하도록 하는 것이 운전자의 안전을 위한 길이다. 따라서, 바퀴에서 전달되는 조향 토크를 저속에서는 고속에서보다 적은 비율로 조향 핸들에 피드백 하는 것이 좋다.

#### 3.2 차량 모델, 사람 모델 및 퍼지 제어기 성능 해석

전동 조향 장치와 사람 모델과 퍼지 제어기의 성능 테스트 및 검증에 위해 우선 초보자와 숙련자의 성능 해석을 위해 추가적인 제어를 하지 않은 상태에서 60 Km/h의 속도로 주행하

는 자동차와 최대 횡방향 거리가 5 m인 트랙에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, 초보자와 숙련자 각각에 대해 퍼지 제어를 수행하지 않았을 경우와 수행했을 경우를 구분하여 속도별 트랙별로 시뮬레이션을 수행하였다. 속도는 저속, 중속, 고속을 대표하여 30 Km/h, 45 Km/h, 60 Km/h로 구분하였고, 트랙은 직진 방향의 주기가 75m인 사인파 형태의 트랙을 횡 방향의 최대 길이가 5m와 20m 두 가지로 구분되도록 구성하였다. 총 24가지의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하여 제안한 모델들의 특성과 성능을 측정하였다.

아래 그림은 초보자에 대해 토크 피드백 제어를 가했을 경우의 전체 시스템 simulink block을 나타낸다.

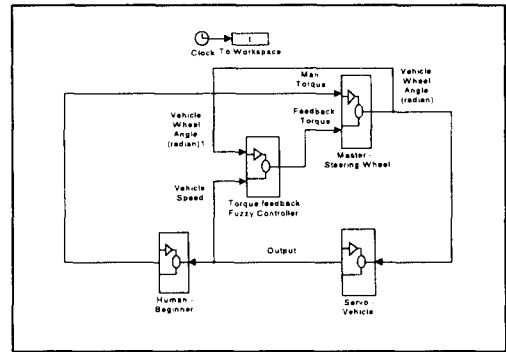
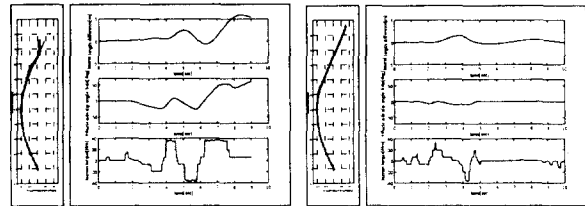
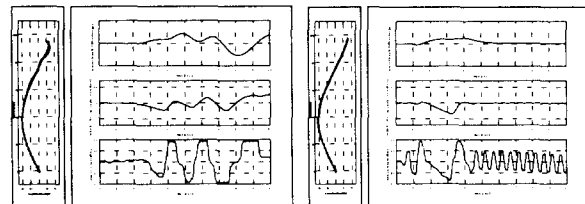


그림 4 초보자 simulink block - fuzzy control  
Fig. 4 Beginner simulink block - fuzzy control



(a) No control (b) Fuzzy control  
그림 5 초보자, 초기속도 : 60 Km/h, 최대 길이: 20m  
Fig. 5 Beginner, initial speed : 60 Km/h, max lateral length : 20m



(a) No control (b) Fuzzy control  
그림 6 숙련자, 초기속도 : 60 Km/h, 최대 길이: 20m  
Fig. 6 Experter, initial speed : 60 Km/h, max lateral length : 20m

그림 5는 60 Km/h의 초기 속도와 최대 횡방향 거리가 20m인 주행 환경에서 초보자에 대해 토크 피드백 제어를 가하지 않았을 경우와 가했을 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 알 수 있듯 제어가 운전자로 하여금 작은 조향 토크를 효과적으로 가할 수 있게 함으로서 제어를 가했을 경우 주어진 궤적을 잘 따라갈 뿐 아니라 궤적 오차 또한 줄어드는 것을

알 수 있다. 그림 6의 (b)는 숙련자에 대한 시뮬레이션 결과로서 초보자와 마찬가지로 도로를 벗어나지 않고 부드럽게 궤적을 따라가는 것을 알 수 있다. 60 Km/h의 초기 속도로 주행하는 자동차에서 제어가 포함되지 않은 경우, 초보자와 숙련자의 두 경우 모두 주어진 궤도를 이탈하는 현상이 발생하게 되는데 고속에서 급회전 시 차량은 오버스티어 상태가 되어 궤도에서 벗어나게 되고, 벗어난 궤도를 따라가기 위해 운전자는 급히 조향 핸들을 회전하여 다시 오버스티어 상태가 된다. 결국 운전자는 오버스티어를 반복하게 되어 도로 궤적을 벗어나 궤도를 이탈하게 된다. 퍼지 제어를 통해 적절한 토크를 운전자에게 피드백 함으로서 그림 5의 (b), 그림 6의 (b)과 같이 주어진 궤도를 잘 추종함을 알 수 있다.

## 5. 결론

앞에서 전동 조향 장치를 모델링하여 시뮬레이션상에서 사인파 형태의 도로를 주행하게 하여 조향 성능을 테스트하였다. 보다 나은 조향 성능을 수행하기 위하여 토크 피드백 퍼지 제어를 적용하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

기존의 기계식 동력 조향 장치는 차량 충돌 시 조향축의 돌출로 인한 운전자의 위험이 증가하고, 운전자의 조향 토크를 증폭하기 위하여 사용하는 유압 액츄에이터는 엔진의 힘을 사용하기에 엔진의 출력을 감소시키고 이로 인해 동력 조향 장치가 증폭할 수 있는 최대 값이 제한 된다. 기계적인 방법을 사용하기 때문에 복잡한 환경에 대해 적절한 조향 토크를 구현하지 못하는 단점이 있다. 기존의 장치는 노면에서 전달되는 힘이 직접적으로 운전자에게 전달이 되어 자동차의 상태와 노면의 상태를 직접 느낄 수 있는 장점이 있으나, 운전자가 원하지 않는 힘까지 전달하게 되어 운전자를 피곤하게 만드는 요인이 된다. 최근 차량에는 노면에서 전달되는 힘 중 고주파수 성분을 기계적으로 필터링하여 전달하는 기계식 동력 조향 장치를 구현하였으나, 복잡하고 다양한 환경에는 한계가 있다.

본 논문에서는 전동 조향 장치를 제안하여 시뮬레이션 상에서 실험함으로써 위의 문제점들을 향상 또는 해결할 수 있음을 보였다. 노면에서 전달되는 힘을 적절히 전달하기 위해 전동 조향 장치의 경우 노면에서 전달되는 힘이 직접 운전자에게 전달되지 않고 조향 장치 설계자의 의도에 맞춰 전달되므로 기존의 기계식 조향 장치에서 구현할 수 없는 적합한 제어를 추가함으로써 복잡하고 다양한 환경에도 적용할 수 있다.

또한, 제한된 환경에서 조향 성능과 전체 차량의 성능을 측정하기 위한 도구로써 모듈화 된 시뮬레이션 툴을 제공하여 손쉽고 다양한 측정이 가능해 졌다.

## 참고문헌

- [1] Hassan Moghbell, Alistair Taiq, Gary Sinde and Wally Ready, "Electronically Assisted Steering", International Congress & Exposition, SAE, 920268, pp.9-17, 1992
- [2] N. Matsumoto, M. Tomizuka, "Vehicle Lateral Velocity and Yaw Rate Control with Two Independent control Inputs", ASME, Journal of Dynamic system, Measurement and Control, vol. 114, pp.606-613, 1992
- [3] H. Higasa, F. Ishikawa, H. Nasu and S. Hayashi, "Vehicle Motion Control of the four Wheel-in Motor Drive Electric Vehicles", 자동차 기술회, 921068, 1992
- [4] Shigeru Iga, Akihiko Sakazaki, and Naoki Shibata, Takeshi Ohe, "Motor Driven Power Steering - For the Maximum Steering Sensation in Every Driving Situation", International congress and Exposition, SAE, 880705, pp.1-12, 1988
- [5] J. J. Duffy, "1988 Lincoln Continental Variable-Assist Power Steering System", International Congress and Exposition, SAE, 880707, pp.1-5, 1988
- [6] K. Uchida and M. Miyoshi, "Development of Variable-Valve-Gain Rotary Valve for Speed Proportional Power Steering System", Passenger Car Meeting, SAE, 891979, pp.1-7, 1989
- [7] Mikio Nakahara, Fujio Momiyama, and Takashi Ueda, "Load and/or Speed Sensing Power Steering for Medium and Heavy Trucks", SAE Technical Paper Series, 852331, pp.1-7, 1985
- [8] James E. Forbes, Steven M. Baird, and Thomas W. Weisgerber, "Electrohydraulic Power Steering - An Advanced System for Unique Applications", International Congress and Exposition, SAE, 870574, pp.1-9, 1987
- [9] Hassan Moghbell, Alistair Taiq, Gary Sinde and Wally Ready, "Electronically Assisted Steering", International Congress & Exposition, SAE, 920268, pp. 9-17, 1992
- [10] Keiichi Nakamura, Kunihiko Eto and Yutaka Morik, Syunichi Matsumura and Eiichi Kusama, "Power Steering System with Travelling Condition Judgement Function", Passenger Car Meeting, SAE, 891980, pp. 1-7, 1989
- [11] Gyong Tae Kye, Kun Soo Huh, "Non Steady-State Cornering Performance Analysis Considering Vehicle Tyre Model", 석사논문, 한양대학교, 1995
- [12] H. Dugoff, P.S. Fancher, L. Segel, "An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance", SAE Transactions, 79:341-366, 1970, SAE Paper No.700377