

퍼지논리를 이용한 차량 구동력 제어 시스템

Vehicle Traction Control System using Fuzzy Logic Theory

서 영 덕*, 여 문 수**, 이 승 종***
Y. D. Seo, M. S. Yeo, S. J. Yi

ABSTRACT

Recently, TCS(Traction Control System) is attracting attention, because it maintains traction ability and steerability of vehicles on low- μ surface roads by controlling the slip rate between tire and road surface. The development of TCS control law is difficult due to the highly nonlinearity and uncertainty involved in TCS. A fuzzy logic approach is appealing for TCS. In this paper, fuzzy logic controller for TCS is introduced and evaluated by the computer simulation with 8 DOF vehicle model. The results indicate that the fuzzy logic TCS improves vehicle's stability and steerability.

주요기술용어 : Fuzzy Logic Control(퍼지 제어), TCS(구동력제어 시스템), 8 DOF Vehicle Model (8자유도 차량 모델), Powertrain(동력발생/전달장치)

1. 서 론

최근 들어 자동차의 안전성에 대한 소비자의 욕구가 증가하면서, ABS(Antilock Brake System), TCS(Traction Control System), 에어백 등과 같은 안전장치의 장착이 보편화되고 있다. TCS는 ABS와 함께 차량의 성능과 안정성을 향상시키는 능동안전장치(Active Safety System)의 하나로 ABS와 함께 센서나 액츄에이터(Actuator)를 공

유할 수 있다는 장점으로 인해 비용적인 측면에서도 유리하다. ABS가 제동시 차량의 제동성능과 안정성 확보가 목적이라면, TCS는 반대로 가속시 차량의 가속성능과 안정성을 확보해준다. TCS는 노면조건이 나쁠 경우, 예를 들어 젖은 노면이나 빙판길 노면 등에서 차량이 가속할 경우 바퀴가 스핀하는 것을 방지하여 바퀴와 노면사이에서 최대의 구동력과 횡력을 확보함으로써 차량의 가속 성능과 안정성을 향상시킨다.¹⁾

1983년 스웨덴의 Volvo사가 엔진의 연료 분사량을 제어하는 방식으로 처음 TCS모형을 선보인 이후 TCS는 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 제

* 한양대학교 대학원 자동차공학과
** 정희원, 인하공업전문대학 자동차공학과
*** 정희원, 한양대학교 자동차공학과

어방식도 초기의 연료분사제어에서 스로틀 열림각 제어, 점화시기제어, 브레이크 압력제어 방식등이 개발되었으며 최근의 TCS는 이 제어방식 중 한 두가지를 병용하여 사용하고 있다.²⁾

지금까지 대부분의 TCS 제어법칙은 차량의 높은 비선형성과 차량 파라미터(parameter)의 변화, 타이어와 지면간의 상호작용을 예측하기 어려운 점 등으로 인하여 일반적인 선형 제어 법칙을 사용할 수 없었고, 룰 테이블(rule table)방식이나 실험과 시뮬레이션에 의한 PI 제어제인의 튜닝등으로 이루어져 왔다.³⁾ 그러나 퍼지제어는 제어대상 모델을 근거로 하지 않고 입력력 관계의 언어적인 지식을 바탕으로 하기 때문에 비선형성에 구애를 받지 않으며, 소프트웨어적인 구현이 다른 비선형 제어기에 비하여 비교적 쉽고 빠른 성능을 보여준다. 따라서 비선형성을 많이 내포한 TCS 제어기의 설계에 퍼지논리가 효과적이라 할 수 있겠다. 퍼지논리를 TCS나 ABS에 응용한 사례를 살펴보면, Layne⁴⁾ 등은 ABS의 제어에 Reference모델을 이용한 적응퍼지제어기법을 선보여 노면조건이 변할 때도 신속하게 제어를 할 수 있게 하였고, Mauer⁵⁾ 등은 퍼지논리를 이용하여 노면조건을 판단할 수 있는 ABS를 제시하였으며, Ito⁶⁾ 등은 퍼지논리를 이용하여 노면조건을 판단하여 TCS에 응용하였다. 또한 Tomizuka⁷⁾ 등은 Vehicle Platoon Control에 퍼지논리를 이용하여 브레이크 압력을 조절하는 TCS제어기를 선보였다. 본 연구에서는 퍼지논리의 장점을 이용하여 언어적인 지식에 바탕을 둔 퍼지논리 TCS제어기를 제안하였다. 본 퍼지논리 TCS제어기는 기존에 제안된 제어기⁷⁾가 브레이크 제어기만을 사용하여

저속에서만 사용할 수 있다는 단점을 보완하기 위하여 스로틀 제어기를 동시에 사용하였으며, 직진 성능뿐 아니라, 선회 성능도 살펴보기 위하여 전 체차량모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 TCS제어기는 차량운동의 주요 변수가 되는 슬립율을 입력으로 하여, 스로틀 개도와 브레이크 토크를 조절함으로써 차륜이 스핀하는 것을 방지하여 차량의 구동성능과 안정성을 향상시킬 수 있었다.

2. 시스템 모델링

2.1 파워트레인 모델

본 연구대상 차량은 FF(Front engine Front drive)방식의 차량으로 파워트레인은 엔진, 토크 컨버터, 자동변속기 및 차동기어로 구성되어 있다. 엔진의 모델링은 엔진의 연소 현상을 포함하여 모델링 하는 방법과, 정속 상태에서의 실험을 통하여 구한 엔진 성능 곡선을 이용하는 방법이 있다. 정속 시험 데이터를 이용하는 방법은 정적인 상태에서 구한 성능 값이므로 과도 상태에서는 약간의 오차가 발생할 수 있으나, 오차의 크기가 그리 크지 않은 반면에 사용자가 이용하기 간편하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 정속 상태에서 구한 엔진 성능 데이터를 이용하였다. 엔진의 성능 데이터는 출력토크를 엔진 회전수와 스로틀 개도량의 함수로 측정하고, 이를 2차원 배열의 형태로 나타내어 이용하였다.

토크컨버터는 차량의 유연한 발전, 가속 및 동판시 토크 증대의 기능을 하며, 본 연구에서의 모델링은 정상상태에서 실험으로 구한 토크비와 용

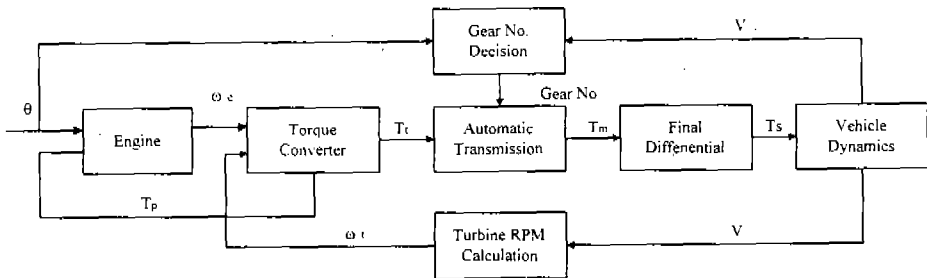


Fig.1 Simulation diagram of powertrain

안한 magic formula 타이어모델¹⁰⁾을 이용하여 그려보면 다음 Fig.4와 같다.

2.3 액츄에이터(Actuator) 모델

TCS에는 스로틀 개도를 조절하는 스로틀 액츄에이터와 브레이크 토크를 조절하는 브레이크 액츄에이터가 필요하다. 본 연구에서는 스로틀 밸브와 브레이크 모델 모두 시간 지연을 갖는 1차 시스템으로 모델링하였으며, 그 식은 다음 식과 같다.

$$\frac{dT_{brake}}{dt} = \frac{T_{brake_c} - T_{brake}}{\tau_b} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_c - \theta}{\tau_\theta} \quad (4)$$

여기서 T_{brake_c} 는 제어가 계산한 브레이크 토크, τ_b 는 브레이크 시상수(time constant), θ_c 는 제어가 계산한 스로틀 개도, τ_θ 는 스로틀 시상수이다.

3. 퍼지논리를 이용한 TCS제어의 설계

퍼지제어는 퍼지 이론의 응용분야로서 가장 활발히 연구 응용되고 있는 분야중의 하나이다. 특히 입출력 관계의 정량적인 분석이 어려운 경우나, 모델에 기준한 제어기의 설계가 어려운 경우에 있어 성공적으로 도입되고 있으며, 다른 비선형 제어기에 비해서 구현하기가 쉽다. 퍼지제어는 또한 부정확하고 모호한 것을 다루기 때문에 TCS와 같이 비선형성과 불확실성(uncertainty)을 내포한 복

잡한 시스템을 다루는데 효과적¹¹⁾이라 할 수 있겠다.

Fig.4에서와 같이 슬립율이 커지면, 구동력이 줄어들어 가속성능이 떨어지고 횡력 또한 감소하여 운전자가 조향시 원하는 경로로 진행할 수 없게 된다. TCS는 구동륜의 슬립이 일정수준 이상 넘어갈 때, 구동토크를 줄여주거나(엔진토크 제어), 브레이크 토크를 조절하여(브레이크 제어) 목표 슬립율을 유지시킴으로써 가속성능과 선회성능을 향상시키는 기능을 한다. 본 연구에서는 퍼지논리를 이용하여 브레이크 토크와 스로틀 개도를 조절하여 휠의 슬립율 목표 값으로 일정하게 유지시켜 주는 퍼지논리 TCS제어기를 제안하였다. 엔진토크 제어만으로는 비대칭노면(spilt- μ road)에서의 제어가 효과적이지 못하며, 저속에서는 공기의 흡입에서 실제 토크 발생까지 어느 정도 전달 지연이 존재하므로 응답이 느리다는 단점이 있다. 이 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 브레이크 제어기를 병용하여 사용하며, 저속이나 출발 시에는 스로틀 제어기와 브레이크 제어기가 동시에 작동, 빠른 시간에 효과적으로 슬립율을 목표 슬립율로 유지 시킬 수 있게 하며, 고속에서는 승차감과 안정성에 나쁜 영향을 끼칠 수 있는 브레이크 제어를 피하고 스로틀 제어만을 수행하였다.

3.1 퍼지논리 스로틀 제어기

제어기의 기본구조는 PD형태를 취하며, 입력 변수는 슬립율과 목표슬립율의 차(e)와 오차의 미분값(Δe)로 하며 그 식은 다음과 같다.

$$e = \lambda - \lambda_{target} \quad (5)$$

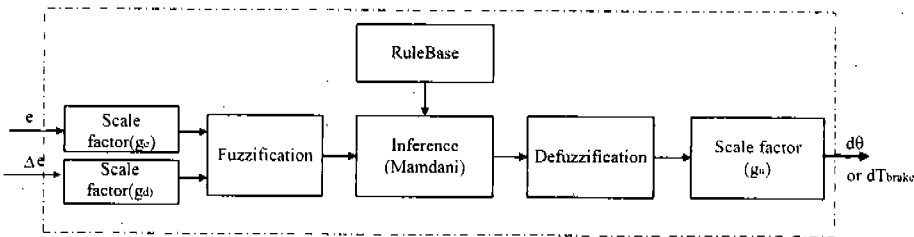


Fig.5 Architecture of fuzzy logic controller

$$\Delta e = \frac{de}{dt} \quad (6)$$

여기서 λ 는 구동륜의 슬립률, λ_{target} 은 목표 슬립률이다

Fig.5는 퍼지논리 제어기의 구조를 보여준다. 위의 그림에서와 같이 퍼지논리 제어기는 크기변환부(scale factor), 퍼지화부(fuzzification), 추론부(inference) 그리고 비퍼지화부(defuzzification)로 이루어져 있다. 크기변환부는 제어입력변수 e 와 Δe 를 $-5 \sim 5$ 로 정규화시키기 위하여 사용된다. 개인 g_e 값의 결정은 목표 슬립률이 결정되면, 오차의 범위가 정해지기 때문에 쉽게 결정할 수 있으며, g_a 값은 다양한 입력값으로 시뮬레이션을 수행하여 오차 미분값(Δe)의 평균적인 구간을 구한 후, 오차 미분값이 $-5 \sim 5$ 로 정규화 되도록 g_a 값을 결정한다. 정규화된 입력값은 퍼지화부를 거쳐 적절한 언어적인 값으로 변환한다. 추론부에서는 지식베이스(knowledge base)를 근거로 퍼지관계와 퍼지논리의 추론규칙을 도입하여 인간의 의사결정방식을 묘사하여 퍼지제어입력을 구해준다. 비퍼지화부는 퍼지 규칙들로부터 추론된 최종적인 결론 값을 결정적인 하나의 실수로 만들어준다. 비퍼지화된 값은 최종적으로 출력크기변환부(output scale factor)를 거쳐 제어입력으로 작용한다.

본 연구에 사용된 입출력 값은 각각 NB(negative big), NS(negative small), Z(zero), PS(positive small), PB(positive big)의 5개의 언어적 변수로 구분되어지고, 그들의 소속함수(membership function)는 Fig.6과 같이 삼각형 퍼지 변수를 사용하였다. 퍼지제어 규칙은 기존의 룰

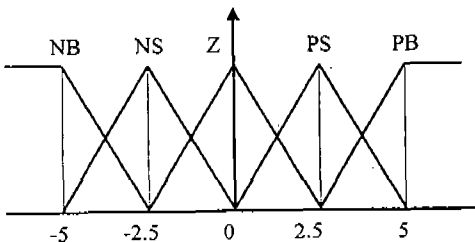


Fig.6 Membership function of input and output

테이블⁷⁾을 이용하였으며, Table 1과 같다. 추론 방식은 Mamdani의 max-min 합성법¹¹⁾을 사용하였고 비퍼지화 방법은 무게중심법(center of gravity method)¹¹⁾을 사용하였다.

퍼지제어기에서 계산된 출력 $d\theta$ 는 제어기의 스톱들밸브 개도변화량이며, 제어기의 스톱들밸브 개도는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_{control} = \theta_{control} + d\theta \quad (7)$$

$$\theta = \min(\theta_{driver}, \theta_{driver} - \theta_{control}) \quad (8)$$

여기서 $\theta_{control}$ 은 제어기의 스톱들 개도를, θ_{driver} 는 운전자의 스톱들 입력을 나타낸다.

최종적으로 엔진에 입력이 되는 스톱들 개도는 운전자의 입력개도와 제어기의 입력개도를 비교하여 작은 값으로 작동하게 된다. 이는 제어기가 운전자의 의지보다 과도한 열립 현상의 가능성을 배제하기 위함이다.

3.2 퍼지논리 브레이크 제어기

브레이크 제어기의 입력과, 룰 테이블은 스톱들 제어기와 동일하며, 다만 출력크기변환부의 크기가 변하고, 스톱들 제어와의 간섭(interference)을 막기위해서 목표 슬립률을 스톱들 제어기보다 약간 낮게 설정한다. 브레이크 제어기는 구동륜의 두 바퀴를 각각 따로 제어하기 때문에 2개가 필요하며, 퍼지논리 제어기를 통하여 브레이크 토크의 변화량 dT_{brake} 가 출력되면, 브레이크 토크는 다음과 같이 계산할 수 있다.

Table 1 Fuzzy rule table

Δe	e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	PS	PS	
NS	NB	NB	Z	PS	PS	
Z	NB	NS	Z	PS	PB	
PS	NS	NS	PS	PB	PB	
PB	Z	PS	PB	PB	PB	

$$T_{brake} = T_{brake} + dT_{brake} \quad (9)$$

최종적으로 계산된 브레이크 토크 T_{brake} 는 1차 시간 지연을 거쳐 바퀴에 작용하게 된다. 브레이크 제어기는 고속에서 작동을 하게 되면 승차감과 안정성에 나쁜 영향을 끼칠 수 있기 때문에 차량의 속도가 기준 속도를 넘으면 작동을 하지 않게 한다.

4. 시뮬레이션

2절에서 제시한 시뮬레이션 모델을 사용하여 3절에서 제안한 퍼지논리 TCS의 성능을 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.

4.1 저속 영역에서의 시뮬레이션

다음은 초기 속도 7.2km/h의 속도로 주행시에 최대 마찰 계수 0.2정도의 미끄러운 노면을 만났

을 때의 시뮬레이션이다. Fig.7과 Fig.8은 TCS 제어를 수행하지 않는 차량이 스톱을 개도를 60%로 유지하면서 급가속할 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 경우에는 노면으로부터 얻을 수 있는 구동력보다 훨씬 더 큰 토크가 구동륜에 전달되어 Fig.7과 같이 구동륜의 속도가 급격히 증가하면서 과도한 슬립이 발생함을 알 수 있다.

Fig.9와 Fig.10은 퍼지논리 TCS를 장착한 차량의 시뮬레이션 결과이다. Fig.10과 같이 스톱을 개도가 급격히 작아져서 엔진토크를 감소시키고, 브레이크 토크가 증가하면서 Fig.9와 같이 구동륜이 슬립하는 것을 막아준다. 일단 슬립율이 감소된 후에는 가속을 위해 닫혀져 있던 스톱을 개도가 점점 증가하고 브레이크 토크는 감소함을 알 수 있다.

Fig.11은 좌측륜이 일반노면 위에 우측륜이 저마찰 노면 위에 있는 경우에 가속시 시뮬레이션 결과이다. 제어가 수행되지 않는 차량은 마찰계수

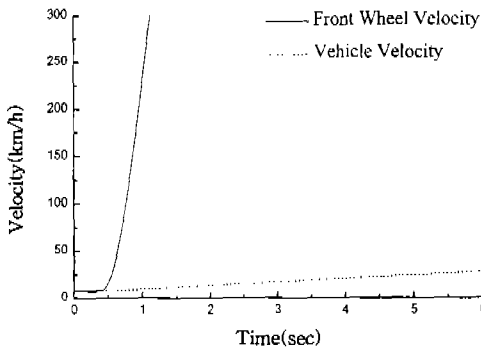


Fig.7 Wheel velocity without TCS

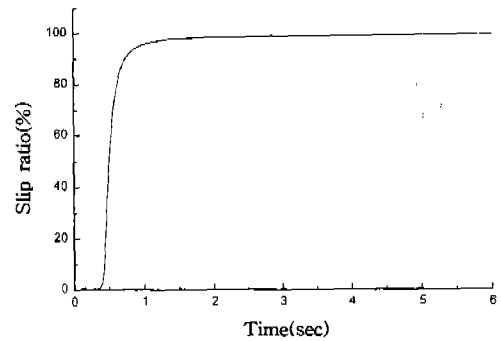


Fig.8 Slip ratio without TCS

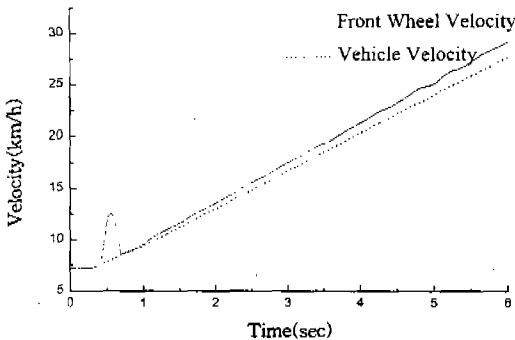


Fig.9 Wheel velocity with TCS

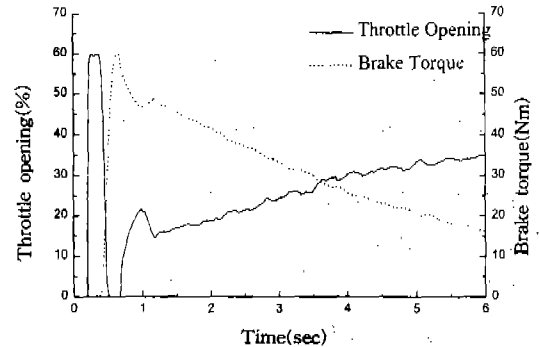


Fig.10 Throttle opening and brake torque

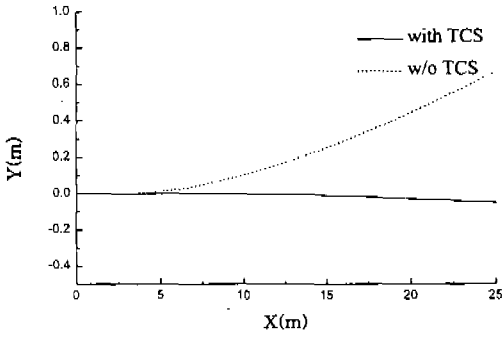


Fig.11 Vehicle trajectory on split- μ road

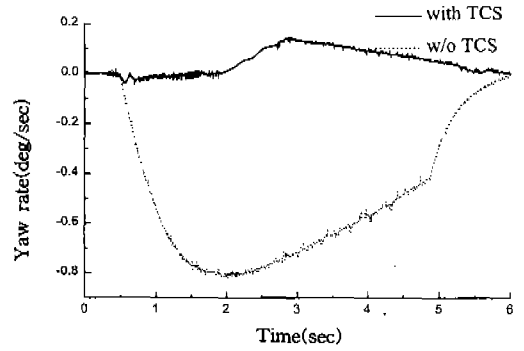


Fig.12 Yaw rate of the vehicle on split- μ road

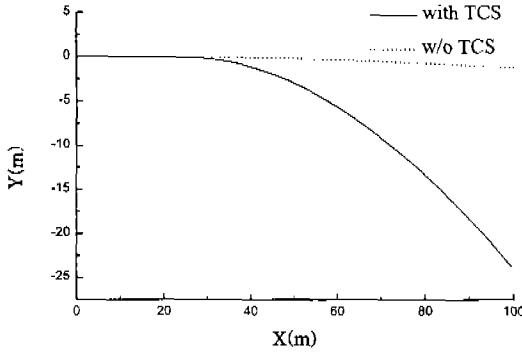


Fig.13 Vehicle trajectory during step steering input

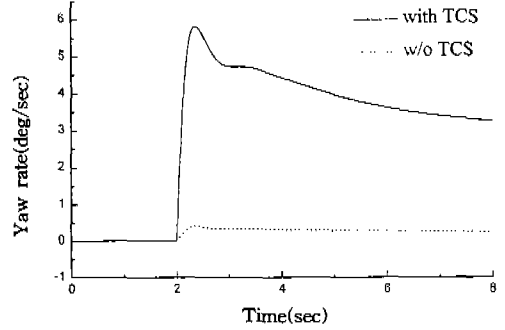


Fig.14 Yaw rate of the vehicle during step steering input

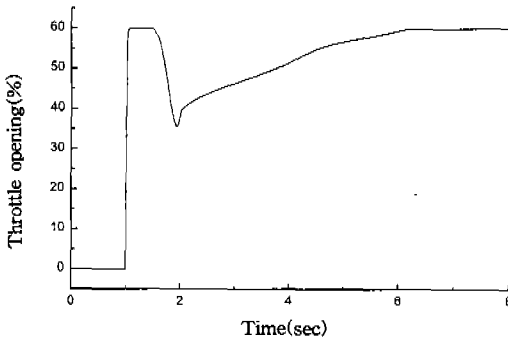


Fig.15 Throttle opening during lane change

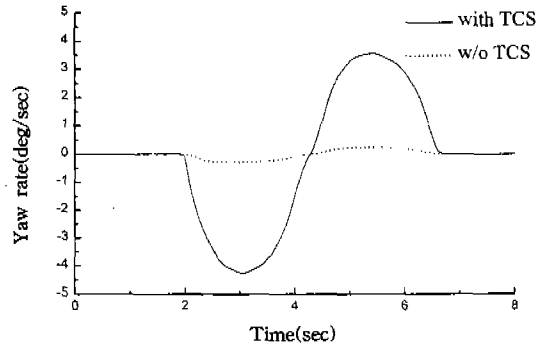


Fig.16 Yaw rate of the vehicle during lane change

가 높은 좌측 노면쪽으로 선회함을 알 수 있다. Fig.12는 이때의 요율(yaw rate)로서 비제어 차량에 과도한 요율이 발생함을 알 수 있다.

4.2 고속영역에서의 시뮬레이션

TCS는 출발이나 가속시 뿐만 아니라 가속 선

회 시에도 과도한 슬립을 방지함으로써 충분한 횡력과 요율을 발생시켜 운전자가 원하는 선회 궤도에서 이탈하지 않게 하여 선회 안정성을 향상시킨다. 다음은 초기속도 40km/h로 주행하다 급가속하면서 미끄러운 노면을 만났을 경우의 일정 조

향각 입력시와 차선변경시의 시뮬레이션 결과들이다.

Fig.13과 Fig.14는 2초 후에 일정 조향각으로 선회할 때의 결과이다. Fig.14에서 알 수 있듯이 퍼지논리 TCS를 장착한 차량이 비제어 차량에 비하여 더 많은 요율을 발생시킴으로써 Fig.13와 같이 운전자의 조향 의지를 충실히 따라감을 알 수 있다.

다음은 차선 변경시 sine 커브 형태의 조향각을 주었을 때의 결과이다. 급가속하면서 슬립율이 증가하면 Fig.15에서와 같이 스티어링 밸브가 급격히 닫혔다가, 일정 슬립을 회복하면서 스티어링 밸브도 원래의 운전자 입력에 천천히 수렴함을 알 수 있다. Fig.16은 이때의 요율로 퍼지논리 TCS 제어를 장착한 차량은 차량이 가속시 스핀하는 것을 방지하여 비 제어차량에 비하여 더 많은 요율을 발생시킴으로써 원활한 차선변경을 수행함을 알 수 있다.

5. 결 론

퍼지논리는 차량의 비선형성에 구애를 받지 않고 비교적 설계가 용이하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 퍼지 논리의 장점을 활용하여 구동 차륜의 슬립을 제어하는 TCS 제어를 제안하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 TCS 제어가 출발시와 선회시에 차량의 안정성과 조향 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Kiichi Yamada, Masayuki Hashiguchi and Masayoshi Ito, "Traction Control System - Simulation Analysis of the Control System", Int. Journal of Vehicle Design. Vol. 12, No. 1, 1991.

2. Alfred Sigl and Herbert Demel, "ASR-Traction Control, State of the Art and Some Prospects", SAE 900204, 1990.
3. Han-Shue Tan, "Vehicle Traction Control: Variable-Structure Control Approach", Journal of Dynamics System, Measurement, and Control, Vol. 113, June 1991.
4. Jeffery R. Layne, Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, "Fuzzy Learning Control for Antiskid Braking Systems", IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 2, 1993.
5. Georg F. Mauer, Gerard F. Giddinger and Yann Chamailard, "Fuzzy Logic Continuous and Quantizing Control of an ABS Braking System", SAE 940830, 1994.
6. Masayoshi Ito, Kenneth Youshioko and Takeshi Saji, "Estimation of Road Surface Condition Using Wheel Speed Behavior", AVEC '94, 9438826, 1994.
7. Mike Bauer and M. Tomizuka, "Fuzzy Logic Traction Controllers and their Effect on Longitudinal Vehicle Platoon Systems", Vehicle System Dynamics, Vol. 25, 1996.
8. 김인찬, 이승중, "GUI를 이용한 Powertrain 설계용 소프트웨어 개발", 한국자동차공학회 논문집, 제 4권 6호, 1996.
9. X. Xia and E.H. Law, "Nonlinear Analysis of Closed Loop Driver/Automobile Performance with Four Wheel Steering Vehicle", SAE 920055, 1992.
10. Ebert Bakker, Hans B. Pacejka, and Lars Linder, "A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies", SAE 890087, 1989.
11. 이광형, 오길록, 퍼지 이론 및 응용, 홍릉과학출판사, pp. 5-1~5-91, 1991.