

# 운전자 모델을 사용한 차량의 조향특성 시뮬레이션 Vehicle Steering Characteristics Simulation by a Driver Model

이종석 · 백운경  
J. S. Lee, W. K. Baek

**Key Words** : Driver Model(운전자 모델), Vehicle Model(차량모델), STI Tire Model(STI 타이어 모델), Vehicle Dynamics(차량동역학), Steering Characteristics(조향특성)

**Abstract** : Steering characteristics is an important factor in the evaluation of vehicle quality. To estimate steering characteristics in the vehicle conceptual design stage, vehicle dynamics simulation methods are very efficient. However, it is often difficult to simulate vehicle dynamics for the specific driving scenarios in open-loop driving environment. An efficient driver-in-the-loop vehicle model will be efficient for this job. A good tire model is also very important for the accurate vehicle dynamics simulation. In this research, a driver model is used to simulate vehicle steering dynamics for a 8-dof vehicle model with STI(Systems Technology, Inc.) tire model. For the demonstration of this model, a SUV(sports utility vehicle) and a sedan were simulated.

## 기호 설명

- $X, Y$  : 절대 좌표계
- $x, y$  : 상대 좌표계
- $M$  : 전체 차량질량
- $m_s$  : 차량 상부질량
- $I_{zz}$  : z 축에 관한 차량 관성모멘트
- $I_{xxs}$  : 물 축에 관한 차량 상부질량의 관성모멘트
- $I_{xzs}$  : 차량 상부질량의 관성적
- $e$  : 차량 상부질량에서 물 축까지의 거리
- $U$  : 종방향 속도
- $V$  : 횡방향 속도
- $r$  : 요우 각속도
- $p$  : 롤 각속도
- $\phi$  : 요우 각도
- $S$  : 종방향 슬립
- $\omega$  : 휠의 회전 각속도
- $I_w$  : 휠의 회전축에 대한 관성 모멘트

- $T$  : 구동토크
- $R$  : 타이어의 반경
- $\sigma_x$  : 완화길이
- $\partial F_x / \partial S$  : 종방향 슬립에 대한 타이어 종방향 힘의 기울기

## 1. 서 론

차량개발의 초기단계에서 차량 운동성능을 예측하기 위해서는 차량동역학 시뮬레이션이 종종 활용된다. 주어진 조향입력에 대한 차량의 운동은 다물체 동역학(multi-body dynamics) 프로그램을 이용하여 예측할 수 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 운전자가 차량의 운동에 미치는 영향을 연구하고, 운전자에 의해 발생하는 다양한 조향입력에 대해 차량의 거동을 효율적으로 평가하기 위해서 타당한 운전자 모델이 필요하다.

운전자 모델은 차량의 주행상태에 대해 운전자의 감성적인 인자들인 운전자 매개변수들과 차량의 특성을 이용하는 방법과 운전자가 원하는 경로를 차량이 주행하도록 차량의 동역학 모델을 이용해서 계속적으로 적절한 조향각을 계산하는 방법이 있다.

운전자 모델의 종류는 구조적 인간 모델, 교차모델, 곡률 인식 모델, Hess 모델, 최적화 모델 등이 개발되었다<sup>2)</sup>.

접수일 : 2003년 3월 11일  
백운경(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : baekwk@pknu.ac.kr Tel : 051-620-1615  
이종석 : 부경대학교 대학원 기계설계학과

차량의 조향특성을 시뮬레이션하기 위한 적절한 차량모델에 대한 연구로서 Smith<sup>3)</sup> 등은 차량모델의 복잡성이 차량 동역학 해석결과에 미치는 영향을 조사하기 위해 자전거 모델인 2자유도, 5자유도 모델과 물축 모델인 8자유도 모델을 서로 비교하였다. 배상우<sup>4)</sup> 등은 현가계의 기구학과 유연성(compliance) 특성이 조종안정성에 미치는 영향을 실차 시험과 비교하였다.

본 연구에서는 차량의 조향특성 시뮬레이션에 적합한 차량의 종방향, 횡방향, 요잉, 그리고 물운동이 포함된 4자유도와 휠의 회전 4자유도를 고려하여 간단한 형태의 비선형 차량 동역학 모델을 유도하고, 전방주시 거리를 포함하여 목표경로를 추종하는 운전자 모델을 사용하여 SUV(sports utility vehicle) 차량과 세단(sedan) 차량에 대하여 조향특성을 비교 평가하였다.

## 2. 차량동역학 모델

### 2.1 차량모델

차량의 좌표계는 Fig. 1(a)과 같이 주행노면에 고정되어 있는 절대 좌표계(X-Y)와 차량무게중심에 고정되어있는 차량 고정 좌표계(x-y)를 사용한다.

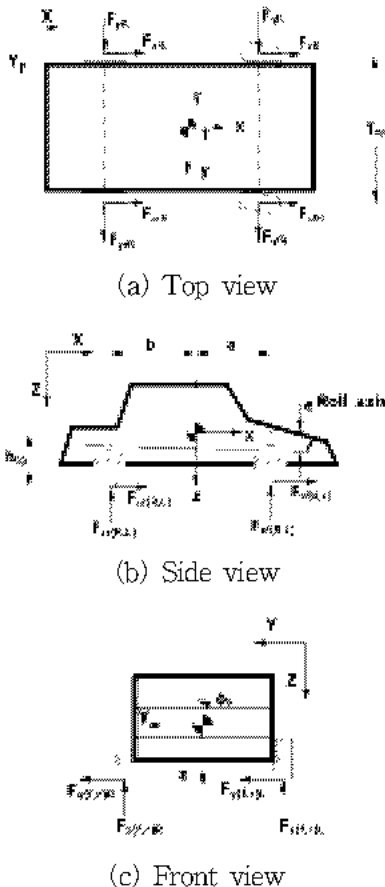


Fig. 1 8-d.o.f. vehicle model

뉴턴의 제 2법칙을 적용하여 종방향, 횡방향, 요잉, 그리고, 롤 운동에 대해 비선형 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M(\ddot{U} - Vr) + m_s e r p = \Sigma F_x \quad (1)$$

$$M(\ddot{V} + Ur) + m_s e \dot{p} = \Sigma F_y \quad (2)$$

$$I_{zz} \dot{r} - I_{xz} \dot{p} = \Sigma M_z \quad (3)$$

$$I_{xx} \dot{p} + m_s e (\ddot{V} + Ur) - I_{xz} \dot{r} = \Sigma M_{xs} \quad (4)$$

여기서, 외력을 나타내는 오른쪽 항들은 차량에 가해지는 타이어 힘, 공기저항, 그리고 구름저항으로 발생되어지는 힘과 모멘트의 합이다.

차량 고정 좌표계에서 절대 좌표계로의 변환은 식 (5)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= U \cos \phi - V \sin \phi \\ \dot{Y} &= -U \sin \phi - V \cos \phi \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 휠 모델

휠 모델은 휠의 구동 및 제동시의 종방향 슬립과 조향시의 각각의 휠에 대한 횡방향 슬립의 차이를 고려하여 모델링 되어져야 한다.

Fig. 2는 측면에서 휠에 가해지는 힘 및 토크를 보이고 있으며, 휠의 동역학은 식(6)과 같이 표현할 수 있다<sup>5)</sup>.

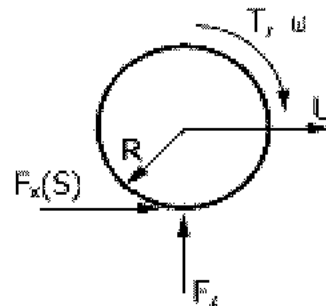


Fig. 2 Wheel dynamics model

$$\begin{bmatrix} \dot{S} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{|u|}{\sigma_x} & -\frac{R \operatorname{sgn}(u)}{\sigma_x} \\ \frac{\partial F_x}{\partial S} R & 0 \\ -\frac{\partial S}{I_w} R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$+ \left[ \begin{array}{c} \frac{|v|}{\sigma_x} \\ \frac{T - F_{x0}R}{I_w} \end{array} \right] \quad (6)$$

2.3 타이어 모델

본 연구에서 사용한 타이어 모델은 STI (Systems Technology, Inc.) 타이어 모델<sup>6~8)</sup>이다. STI 타이어 모델은 반-실험적 모델로서 차량의 조종 안정성 시뮬레이션 연구에 효과적으로 활용되고 있다.

Fig. 3은 횡방향 슬립을 고정하고 종방향 슬립변화에 따라 타이어 모델에서 계산되어지는 종방향 힘을 나타낸다. 횡방향 슬립이 증가함에 따라 발생되어지는 힘이 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 종방향 슬립을 고정하고 횡방향 슬립변화에 따른 횡방향 힘을 나타낸다. Fig. 3의 경향과 유사하게 종방향 슬립이 증가함에 따라 횡방향 힘이 감소함을 알 수 있다. Fig. 5는 횡방향 슬립이 일정할 때 종방향힘과 횡방향힘을 나타내어 STI 모델의 타이어 힘 발생이 전형적인 타원형상을 이루고 있음을 보여준다.

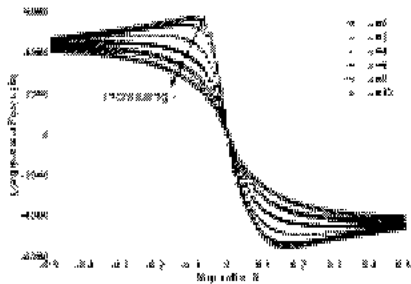


Fig. 3 Longitudinal force of tire

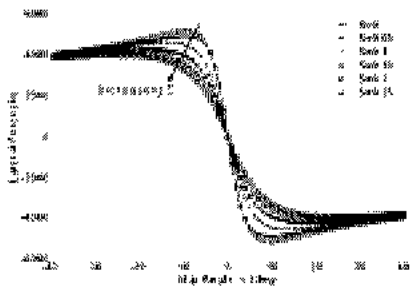


Fig. 4 Lateral force of tire

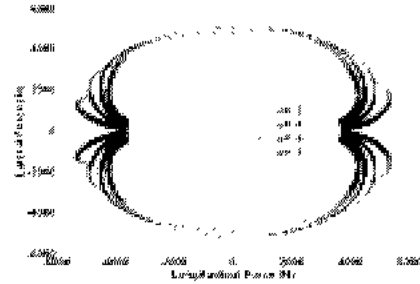


Fig. 5 Longitudinal and lateral tire force

2.4 차량동역학 모델 검증

조향특성을 연구하기 위한 차량동역학 모델을 Fig. 6과 같이 구성요소 상호간의 입출력 변수들로 나타내었다. Fig. 6의 블록 다이어그램을 토대로 하여 MATLAB/SIMULINK환경에서 차량동역학 프로그램을 개발하고, SUV(sports utility vehicle)의 파라미터를 활용하여 실차시험결과와 비교함으로써 차량동역학 모델의 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션에 사용한 SUV와 세단의 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

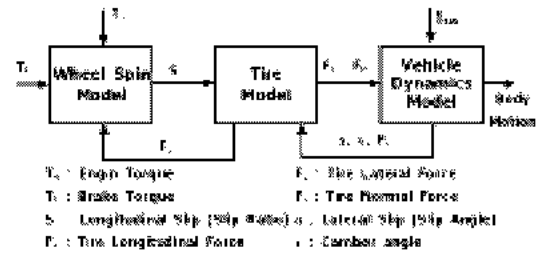
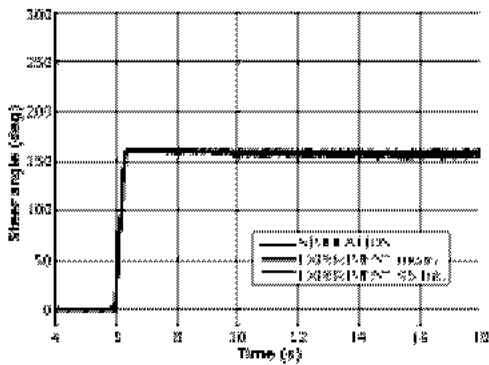


Fig. 6 Block diagram of vehicle steering characteristics simulation

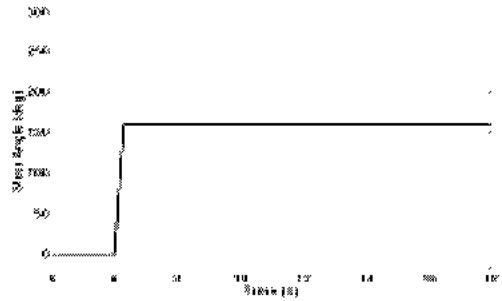
Table 1 Parameters of SUV and Sedan

symbols	SUV	Sedan	units
$M$	1737.3	1649.1	kg
$m_s$	1514.8	1471.1	kg
$I_{zz}$	2706.1	3048.2	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$I_{xzs}$	529.7181	437.7937	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$a$	1.0317	0.9677	m
$b$	1.5463	1.7252	m
$h_{cg}$	0.6818	0.5425	m
$e$	0.2106	0.5425	m
$\partial L / \partial \phi$	52421	53016	Nm/rad
$\partial L / \partial p$	4867.4	5598.7	Nm/rad/s
$T_w$	1.4733	1.5484	m
$I_w$	1.3558	1.3558	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$R$	0.3353	0.3124	m
$\sigma$	0.25	0.25	
$K_{RSF}$	0.5297	0.6118	

Fig. 7(a), Fig. 8(a), Fig. 9(a), 그리고 Fig. 10(a)는 12 m/s의 속도에서 스텝조향(step steer)에 따른 SUV의 시뮬레이션 결과와 실차시험결과를 참고문헌<sup>9)</sup>을 인용하여 나타내었다. Fig. 7(a)는 조향각 입력이며, Fig. 8(a)는 요우각속도이다. Fig. 9(a)는 횡가속도이며. Fig. 10(a)는 롤 각도이다.

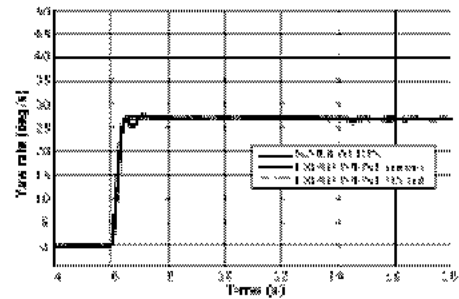


(a) Experimental result (ref. 9)

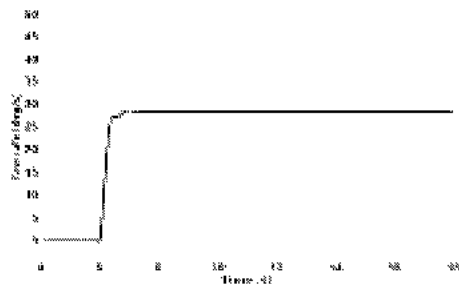


(b) Simulation result

Fig. 7 Step steer input



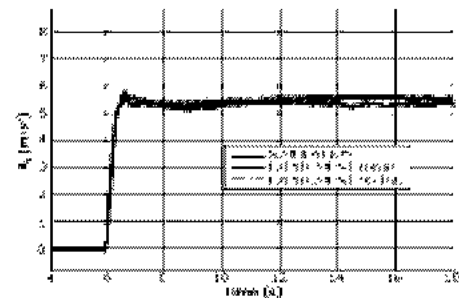
(a) Experimental result (ref. 9)



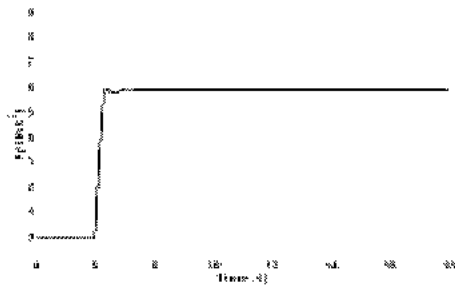
(b) Simulation result

Fig. 8 Yaw rate response

Fig. 7(b), Fig. 8(b), Fig. 9(b), 그리고 Fig. 10(b)는 참고문헌과 동일한 조향입력에 대해 본 연구에서 개발한 차량동역학 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다.

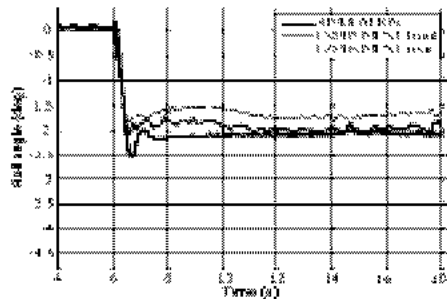


(a) Experimental result (ref. 9)

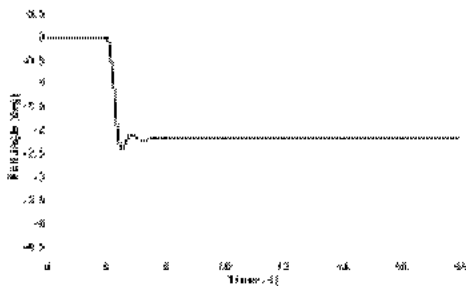


(b) simulation result

Fig. 9 Lateral acceleration response



(a) Experimental result (ref. 9)



(b) Simulation result

Fig. 10 Roll angle response

Fig. 7(b)는 조향각 입력이다. 참고문헌과 동일하게, 160°의 조향각이 입력되도록 하였다. Fig. 8(b), Fig. 9(b), Fig. 10(b)는 요우속도, 횡가속도, 롤 각도를 각각 나타내었다. 본 연구의 시뮬레이션결과가 참고문헌의 실험결과 보다 높은 값을 가지는 것은 실제 현 가장치의 컴플라이언스가 모델에서는 고려되지 않았기 때문이다. 그러나, 참고문헌의 실험결과와 비교했을 때, 본 연구의 시뮬레이션 결과는 조향각 입력에 대한 차량의 조향특성을 잘 나타내고 있다.

### 3. 운전자 모델

운전자의 조향동작을 수학적으로 표현하는 것은 매우 어렵기 때문에 특정조건을 가정하여, 운전자에게 주어진 상황을 단순화하여 표현한다.

차량의 운동을 운전자의 조향에 의해 제어되는 경우의 제어동작을 생각하면 운전자는 절대공간에 대한 횡변위 뿐만 아니라 차량의 요우운동도 감지할 수 있다. 운전자는 Fig. 11과 같이 차량의 전방거리  $L(m)$  을 주시하고 현재의 차량의 자세대로  $L(m)$  진행한 경우 즉,  $L/U$ 되는 시간 뒤에 생길 차량의 횡변위와 목표 경로와의 오차를 감지하고 피드백 제어를 한다고 가정한다. 현재 가장 간단하게 운전자의 조향제어를 고려했을 때의 차량의 운동을 생각하는 경우에 취할 수 있는 운전자 모델로 되어있다<sup>10)</sup>.

Fig. 11에서는 경로 오차량을 계산하는 방법을 보여준다.  $|\phi| \ll 1$  이라고 한다면 식(7)과 같이 유도된다.

$$\varepsilon = y + L\phi - y_{ol} \quad (7)$$

여기서,  $y$ 는 차량의 횡방향 위치,  $\phi$ 는 차량의 요우각,  $L$ 은 전방주시거리,  $y_{ol}$ 은 전방주시거리에서의 목표경로 위치,  $\varepsilon$ 은 경로 오차이다.

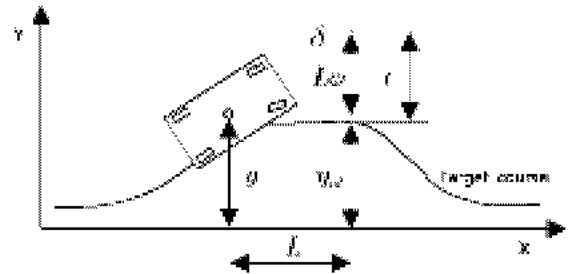


Fig. 11 Path error with aim point

Fig. 12는 운전자와 차량모델을 블록선도로 나타낸 것이다. 제어대상인 차량은 적분성이 강하기 때문에 운전자의 제어동작에는 적분동작은 없고 약간의 미분 동작을 포함하는 비례동작을 적용하였다.

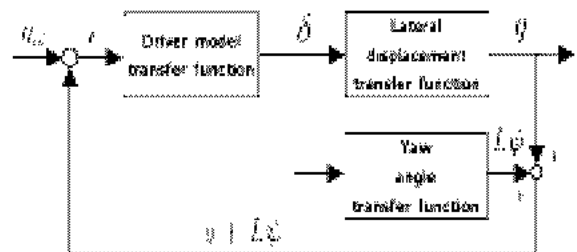


Fig. 12 Block diagram for a vehicle/driver model

#### 4. 조향 시뮬레이션

동일한 파라메타를 가지는 운전자 모델을 사용하여 SUV와 세단에 대해서 종방향 속도가 22.22 m/s(80 km/h) 일 때 단일차선변경과 이중차선변경을 수행하였다.

단일 및 이중차선변경의 경로입력은 ISO 차선 변경 코스(TR3888)<sup>(11)</sup>를 사용하여 도로의 중심선을 따르도록 하였다. Fig. 13에 ISO 차선변경 코스를 나타내었다.

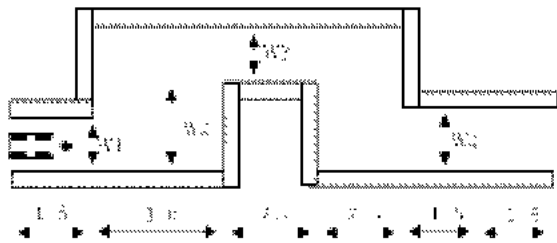
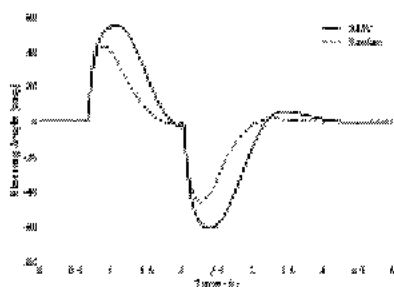


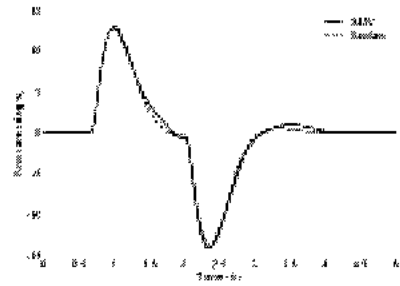
Fig. 13 Double lane change course(ISO/TR 3888)

##### 4.1 단일차선변경

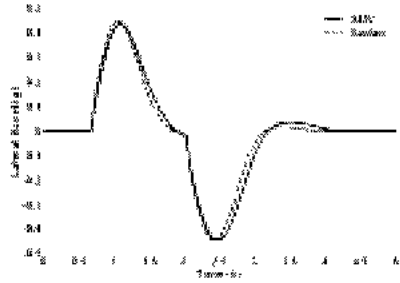
Fig. 14은 단일차선변경을 수행할 때 SUV와 세단의 운전자 모델에서 계산된 조향각과 차량의 응답인 요우각속도, 횡가속도, 롤각도를 나타내었다. Fig. 15는 SUV와 세단의 이동경로이며, 요구되는 이동경로와 실제 차량의 이동경로를 나타내었다.



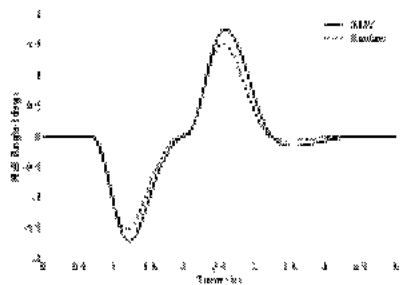
(a) Steer angle



(b) Yaw rate



(c) Lateral acceleration



(d) Roll angle

Fig. 14 Response of SUV and Sedan

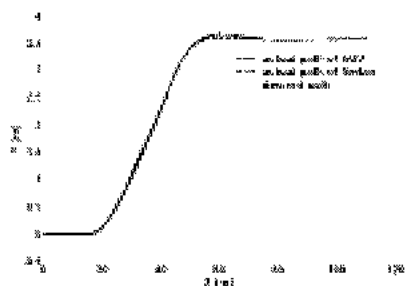
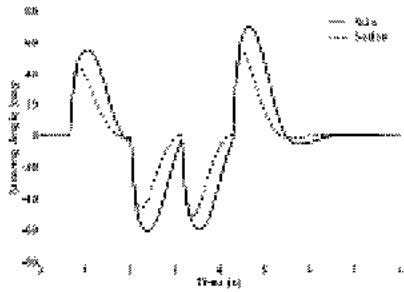


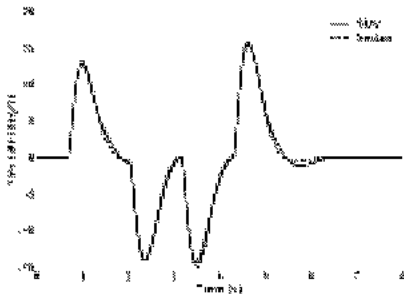
Fig. 15 Path of SUV and Sedan

##### 4.2 이중차선변경

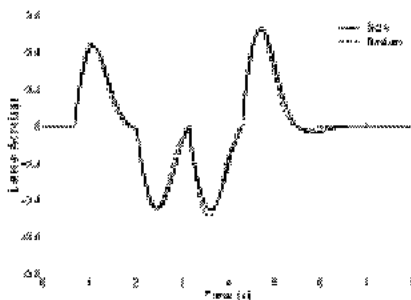
SUV와 세단이 이중차선변경을 수행할 때, 조향각, 요우각속도, 횡가속도, 롤각도를 Fig. 16에 나타내었고, 이동경로를 Fig. 17에 나타내었다.



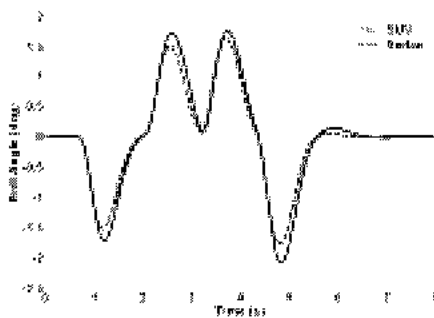
(a) Steer angle



(b) Yaw rate



(c) Lateral acceleration



(d) Roll angle

Fig. 16 Response of SUV and Sedan

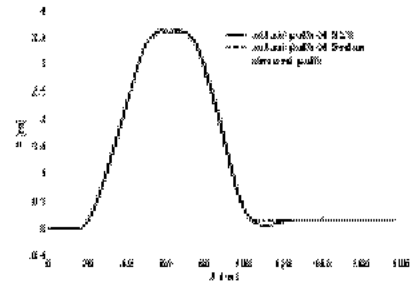


Fig. 17 Path of SUV and Sedan

Fig. 18과 Fig. 19는 차량이 단일차선변경을 수행할 때와 이중차선변경을 수행할 때 발생하는 경로오차를 각각 나타내었다. SUV에 비해 세단이 단일차선변경과 이중차선변경에서 경로오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 경로오차가 작으면 운전자가 조향동작을 작게 수행하게 되므로 조향성능이 더 좋은 차량으로 생각할 수 있다.

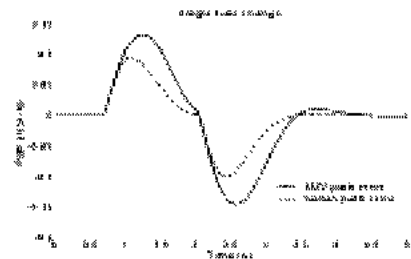


Fig. 18 Path error for single lane change

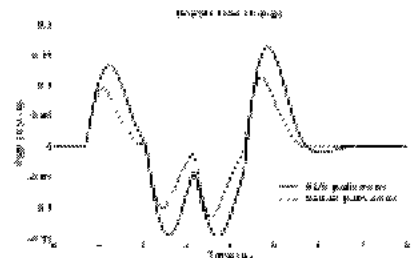


Fig. 19 Path error for double lane change

## 5. 결 론

본 연구에서는 차량의 조향특성을 시뮬레이션하기 위한 8자유도 차량동역학 모델을 유도하고, 주어진 경로를 추종할 수 있는 운전자 모델을 구현하였다. 타이어 모델로는 타이어의 비선형성을 고려하여 STI 타이어 모델 사용하였으며 차량동역학 모델의 유효성

을 검증하기 위해서 참고문헌을 활용해 비교하였다.

본 연구에서는 운전자 모델을 사용한 차량모델이 ISO 시험코스를 통과하는 동안 SUV와 세단의 조향 특성을 예측하였고, 설계초기단계에서 차량의 조향특성 설계에 활용할 수 있음을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 부경대학교 발전기금 연구비의 지원에 의해 연구되었음.

## 참고 문헌

1. 조병관, 송정재, 1996, "ADAMS를 이용한 차량 조종안정성 해석", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 4, No. 5, pp.109~118.
2. 조영건, 1994, "차량 조향을 위한 운전자 모델 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, pp. 1~16.
3. Smith, D. E., et al., 1995, "Effects of Model Complexity on the Performance of Automated Vehicle Steering Controllers: Model Development, Validation and Comparison", Vehicle System Dynamics, Vol. 24, pp. 163~181.
4. 배상우, 외 3, 2000, "차량모델의 복잡성이 차량동역학 해석에 미치는 영향: 모델의 비교 및 검증", 한국자동차공학회 논문집, 제8권, pp. 267~278.
5. Clover, C. L., et al., 1998, "Longitudinal Tire Dynamics", Vehicle System Dynamics, Vol. 29, pp. 231~259.
6. Allen, R. W., et al., 1988, "Analytical modeling of driver response in crash avoidance maneuvering, Vol. II : An Interactive Tire Model for Dirver/Vehicle Simulation", DOT-HS-807-271, System Technology Inc.
7. Allen, R. W., et al., 1988, "Analytical modeling of driver response in crash avoidance maneuvering, Vol. I : Technical background", DOT-HS-807-270, System Technology Inc.
8. Allen, R. W., et al., 1997, "A Vehicle Dynamics Tire Model for Both Pavement and Off-Road Conditions", SAE paper 970599.
9. Salaani, M. K., Heydinger, G. J., 2000, "Model Validation of the 1997 Jeep Cherokee for the National Advanced Driving Simulator", SAE Paper No. 2000-01-0700.
10. 安部正人, 1979, "車輛の運動と制御", 共立出版株式會社, pp. 153~172.
11. (사) 한국자동차공학회, 1996, "자동차 기술핸드북 3 「시험, 평가편」", pp. 115~141.