

조종안정성평가 시험을 위한 조향 및 운전자모델

Steering and Driver Model to Evaluate the Handling and Stability Characteristics

탁 태 오* 최 재 민**
Tak, Tae-oh Choi, Jae-min

ABSTRACT

In this study, a modeling method of power-assisted steering systems and driver models for vehicle dynamic analysis using AUTODYN7 is presented. Pressure-flow relations of flow control valve are derived, and the equations of motion of a steering gear are obtained. Combining pressure-flow relations and equations of motion, the steering force can be represented as a function of steering wheel angle or torque. Driver model was modeled based on a PID controller and forward target method. With the steering systems and driver model, various driving tests are conducted using AUTODYN7.

키워드 : 조향장치, 차량동역학, 운전자모델, 비례미적분제어

Keywords : Steering System, Vehicle Dynamics, Driver Model, PID Control

1. 서 론

차량 개발에 있어서 조종안정성능을 확보하기 위하여 다양한 실차주행 시험을 수행한다. AUTODYN7에서는 사용자의 편의성에 중점을 두고, 국제 규격에 부응하는 다양한 종류의 가상주행 시험을 제공한다. 주행시험의 종류는 크게보아 정해진 조타 입력을 하여 운전자가 핸들수정을 하지 않는 오픈루프(Open-Loop)시험과, 운전자가 핸들조작으로 주어진 경로를 추종해가는 클로уз 루프(Closed-Loop)시험으로 나눌 수 있다. 이러한 운동조건은 국제 표준 규정(ISO)에 의해 규정되어 있으며, 자동차의 성능을 확인하고자 하는 경우에 실차시험을 수행하여 조종안정성을 판단하게 된다. 그러나 실차시험에서 소요되는 막대한 경비를 절감하고 개발기간을 단축하기 위해서 실차시험 대신에 차량의 수

학적인 모델을 이용한 시뮬레이션 기법이 사용되어 왔다. 이러한 차량동역학 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 조향장치 모델과 정해진 경로를 추종할 수 있는 운전자 모델이 필요하다.

조종안정성 시험은 차량의 기초 특성, 서스펜션 특성, 스티어링 시스템 특성 등 설계파라미터를 측정하는 시험과 실차 주행에 의한 오픈루프와 클로уз 루프의 조종안정성 시험등이 있다. 실차주행시험에는 정상상태의 응답특성을 파악하기 위한 정상원 선회시험, 감가속 원선회 시험, 손놓기 안정성 시험, 슬라팜 시험, 직진안정성 시험, 주파수 응답 시험, 횡풍안정성 시험, J턴 시험, 필링시험등이 있으며, 각각 국제표준 규정(ISO)에 따라 수행한다. 자동차는 실제 인간의 조종으로 의미있는 운동을 하므로 조종안정성은 인간과 자동차계로 생각해야 한다. 따라서 조종안정성을 평가하기 위해서는 인간의 감각을 대신하는 운전자 모델을 적용해야한다.

운전자모델을 구현하는 방법으로는 일반적으로 두 가지가 있는데, 차량의 현재 위치와 상태를 나타내는 운전자 매개변수(Driver Parameter)를 이용해서 제어 동작의 전달함수 형태로 나타내는 방법과, 운전자

* 강원대학교 기계공학과 부교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 기계공학과 석사과정

이 연구는 1998년도 G7 샤시시스템 종합설계 및 해석 S/W 개발 과제의 일환으로 수행되었음.

의 조향 반응시간을 고려하여 원하는 경로를 따라서 차량이 주행하도록 경로오차가 줄어들 때까지 조향입력을 가하도록 모델링하는 방법이 있다.[1] 실제로 조종안정성에 관련하여 여러 연구가 진행되고 있으며, 인간의 신경계통과 차량의 특성을 전달함수로 적용하여 시뮬레이션을 수행하고 있다. 참고문헌[2]에서는 경로 제어를 위해 비례미적분 제어기(PID Controller)를 적용하였다.

조종안정성 평가 시뮬레이션에서 인간-자동차계의 모델링방법은 중요하다. 감각계, 중추신경계, 신경-근육계 등의 복잡한 결합으로 구성된 비선형적인 특성을 가진 인간을 수식으로 완벽하게 구현하기는 쉽지 않다. 그러나 자동차의 조종동작은 일정한 규칙성을 나타내기 때문에 운전자의 수학적 모델이 가능하게 된다. 이때 클로우즈 루프 제어 모델에 있어서 인간의 조타제어 동작을 표현하기 위하여 인간을 선형 피드백계로 간주하고 전달함수로 기술하는 방법을 많이 사용하고 있다.[3]

이러한 조종안정성 평가를 수행하기 위해서는 경로 제어를 위해 가해지는 조타력에 대한 조향장치의 모델이 필요하며, 조향 핸들로부터 휠까지의 변위와 힘의 관계를 규명하여야 한다. 본 연구에서는 선회시 입력된 운전자의 입력에 대한 반응을 비례미적분제어를 통하여 분석하였으며, 경로오차(Path Error)에 대해 비례미적분제어를 실차 모델에 적용하였고, 차량동역학 해석 프로그램인 Autodyn7에 조향 및 운전자 모델을 적용함으로써 실차 주행 시뮬레이션을 용이하게 하였다.

2. 조향장치 모델링

파워 어시스트 조향장치는 유압을 제어하는 로터리 밸브와 유압의 조력으로 조타력을 발생시키는 부분으로 구성되어 있다. 즉, 입력부인 핸들에 회전을 가하면 로터리 밸브에서 유량의 방향을 제어하여 기어부의 좌우 실린더에 유압을 가한다. 이렇게 형성된 유압은 직선 방향의 힘으로 변환되어 타이로드에 전달된다. 그림1은 파워어시스트 조향장치 시스템을 나타내고 있고, 컬럼부, 기어부, 피니언과 랙바부의 운동 방정식은 식 (1),(2),(3)과 같다.

$$I_h \ddot{\theta}_h = T_h - K_t(\theta_h - \theta_p) - C_h \dot{\theta}_h \quad (1)$$

$$I_p \ddot{\theta}_p = K_t(\theta_h - \theta_p) - C_p \dot{\theta}_p - \frac{e_L}{2\pi} F_r \quad (2)$$

$$m_r \ddot{x}_r = F_r - C_r \dot{x}_r + A_c(P_a - P_b) - F_{ext} \quad (3)$$

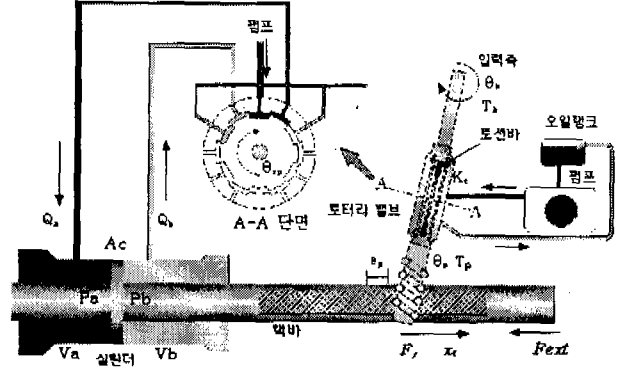


그림1. 파워스티어링 시스템의 개념도

로터리 밸브는 좌우 대칭으로 기어부로 유체의 유입, 유출이 같고, 비압축성 유동이라고 가정하면, 기어부로의 유량 q_l , 오리피스계수 C_d , 공급유량 q_s 의 관계로부터 기어부에 작용하는 압력 b_l 을 구할 수 있다. 기어부의 작용압력은 양 실린더의 압력차이로 다음과 같다.

$$P_l = \frac{q_l^2}{9C_d^2(1-\theta^2)^2} \{ (1+q^2)\theta - (1+\theta^2)q \} \quad (4)$$

$$q = \frac{q_l}{q_s}, \theta = \frac{\theta_{rp}}{\theta_0} \quad (5)$$

여기서, θ_0 는 슬리브의 언더랩량, θ_{rp} 는 도선바의 비틀림각이다. 기어부로의 공급유량 q_l 은 유체가 비압축성이라고 가정할 때 실린더의 이동 체적이라고 할 수 있고 다음과 같이 랙바의 이동속도 \dot{x}_r 와 실린더의 유효단면적 A_c 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$q_l = \dot{x}_r A_c \quad (6)$$

조향장치 모델링의 검증을 위하여 그림 2와 같이 실험장치를 구성하였고, 조향각, 핸들조타력, 실린더 압력등을 측정하였다. 그림3은 방향틀기 조향입력에 대한 파워 어시스트 조향장치의 조향각-토크특성을 나타내고 있고, 그림4는 조향각-압력특성을 나타내고 있다. 각 특성은 일정한 히스테리시스(hysteresis loop)를 나타내고 있는데 핸들복원성, 스티어링 링크 강성 그리고 핸들유격의 정도를 나타내고 있고 실험과 시뮬레이션의 히스테리시스가 유사함을 알 수 있다.

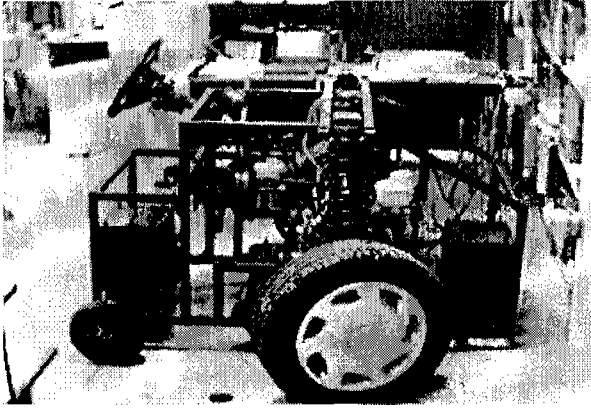


그림 2. 파워어시스트 조향 실험장치

이나 슬라럼시험에서는 정해진 개회로 입력을 스티어링 휠에 가하면 되지만, 정상원 선회나 차선변경시험의 경우에는 정해진 차속과 경로를 벗어나지 않도록 오차를 피드백시키는 폐회로 제어기로 운전자 입력을 모델링하여야 한다. 이러한 경로제어를 위한 운전자모델은 선형피드백 보정 조타모델과 차량위치 예측제어 모델이 있다.

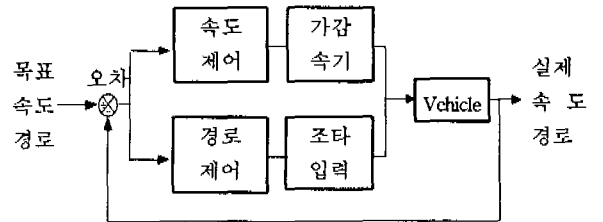


그림 5. 운전자모델의 블록 다이어그램 (Block Diagram)

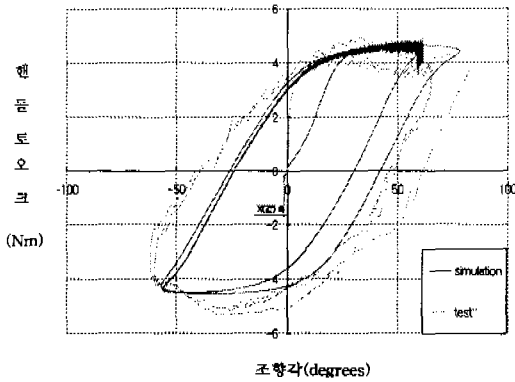


그림 3. 조향각-토크 특성의 비교

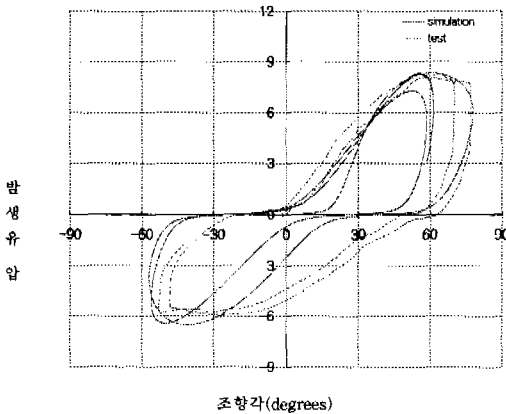


그림 4. 조향각-압력특성의 비교

먼저 차량의 속도를 제어하기 위하여 실제 차량의 가속장치와 브레이크에 해당하는 제어를 고려하여 전후륜에 식 (7)의 토크를 전달한다.

$$T_{vel} = h (V_t - V_c) \quad (7)$$

여기서 T_{vel} 는 휠에 가해지는 토크이며 h 는 속도제어 비례상수이고, V_t 와 V_c 은 각각 목표속도와 실제속도를 나타낸다.

경로제어를 위한 모델중 전방오차 수정모델은 전방 주시 거리(L)를 도입한 것으로서 운전자는 차량의 전방 일정거리를 주목하고, 이 점을 가지고 장래의 차량 위치를 예측해서, 이 점과 목표로 하는 경로와의 오차에 비례한 수정 조타를 하는 모델이다. 이 모델은 그림 6과 같이 차량이 곡률이 작은 경로를 지나갈 때 차량의 현 위치에 대하여 전방 L의 위치에서의 오차를 산출하며 그 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = L\phi + y - y_{OL} \quad (8)$$

여기서 L 는 차량의 전방 주시 거리, ϕ 는 차량의 요우각 (미소각이면 $L\sin(\phi) \approx L\phi$), y 는 차량의 노면고정좌표에 대한 Y축 좌표이고, y_{OL} 은 전방 L 거리의 노면고정좌표에 대한 경로의 Y좌표이다. 그러나 이 경우에 요구된 경로의 곡률이 크거나 경로의 변화가 급격하면 오차가 크게 되는 단점이 있다.

3. 운전자 모델

운전자 모델은 그림 5와 같이 목표 속도와 경로를 추종하도록 속도 및 경로제어를 수행한다. J-turn

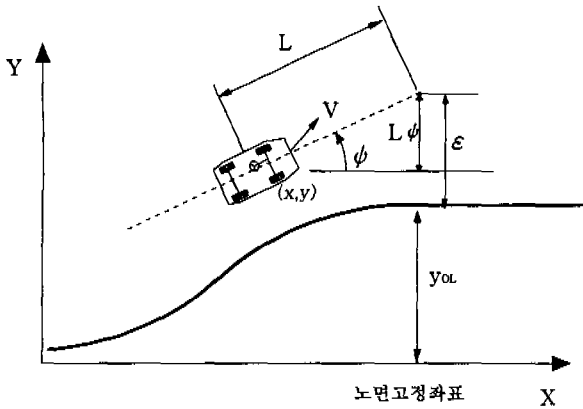


그림 6. 1차 예측에 의한 전방오차 산출

그 단점을 보완한 2차 전방 오차 수정 모델은 속도 방향의 변화를 감지 도달위치 예측하는 모델이다. 그림 7은 전방오차 수정을 위한 2차 예측방법을 나타내며, 식(9)는 그때의 오차를 나타낸다.

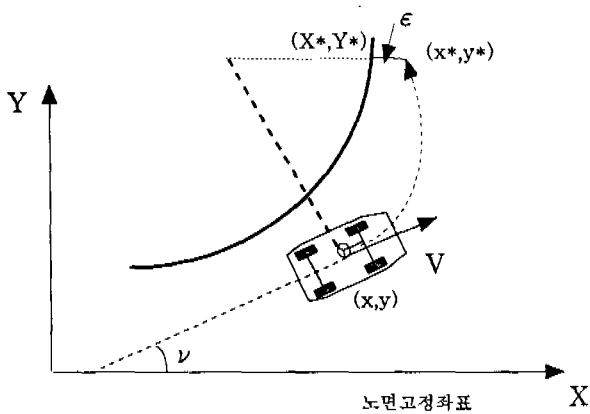


그림 7. 2차 예측에 의한 전방오차 산출

$$\epsilon = \sqrt{(x^* - X^*)^2 + (y^* - Y^*)^2} \quad (9)$$

또 다른 경로제어 방법으로는 비례미적분 제어(PID Control)가 있다. 비례미적분 제어는 경로오차에 대한 비례조작과, 조향입력의 변화를 예측하는 미분동작, 오차의 누적에 따른 보정동작을 나타내는 전달함수를 이용한다. 경로제어기를 모델링하기 위하여 식(10)과 같이 첫 단계로 비례제어만 적용한 다음 경로제어기의 상수값을 구하는 방법을 사용한다.

$$T_{path} = h(Y_t - Y_c) \quad (10)$$

여기서 T_{path} 는 스티어링 휠에 가해지는 조타력이

며 h 는 경로제어 비례상수이고, Y_t 와 Y_c 은 각각 목표경로와 실제경로를 나타낸다.

비례미적분제어의 각 계수는 그림 8와 같이 비례제어에서 구해진 경로오차의 임계주기 P_{cr} 과 그 때 사용된 임계 비례상수 K_{cr} 을 표1의 지글러-니콜스 법칙(Ziegler-Nichols rule)에 의한 제2차 튜닝을 사용하여 정하고, 식(11)의 전달함수에 계수를 적용하여 시뮬레이션을 수행한다.

$$H(s) = K_p \left(1 + \frac{T_i}{s} + T_d s \right) e^{-\tau s} \quad (11)$$

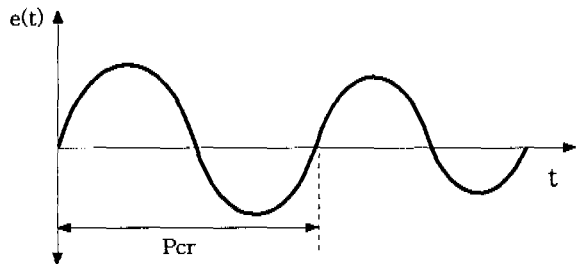


그림 8. 경로오차의 임계주기 및 비례 임계상수

표 1. 지글러니콜스 제 2차 튜닝의 각 계수

제어기	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

그림 9는 80km/h 속도의 차선변경시험에 적용된 비례미적분제어와 1,2차 경로예측모델의 궤적을 나타내고 있다. 경로예측 모델 PID제어에 비하여 다소 불안정하거나 반응이 느린 경향이 나타났다.

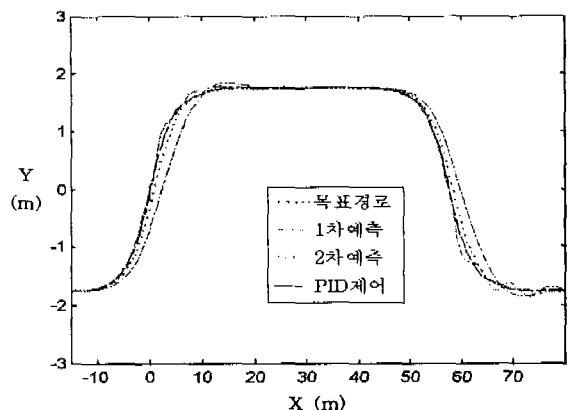


그림 9. 비례미적분제어와 예측제어 모델의 차이

4.2 정상원 선회 시험

정상원선회 시험은 선회반지름이 일정한 조건하에서 구심가속도의 증가에 수반하는 특성값 변화를 측정하는 기본적인 정상특성시험이다. 정상 주행상태에서 차량의 고유 조향 특성을 규명하며, 그 특성은 조향특성의 주관적인 판정결과와 우수한 연관성을 갖는 차량동역학적 특성치인 언더스티어 계수(K)로 표현된다. 여기에서 K는 횡가속도에 대한 조향각의 변화율과 애커만(Ackermann) 조향각의 변화율의 차이로 서 식 (12)과 같이 정의된다.

$$K = \frac{d\delta_f}{da_y} - \frac{d\delta_A}{da_y} \quad (12)$$

그림 11는 정상원선회의 경로 제어의 결과이고, 그림 12은 비례제어를 실시한 후 임계주기를 찾아 비례미분제어로 변환하는 시뮬레이션을 수행하였을 때의 경로오차의 수렴을 나타내고 있으며, 그림 13은 언더스티어 계수를 나타내고 있다.

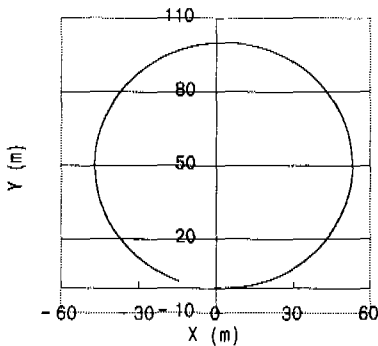


그림 11. 정상원선회의 결과

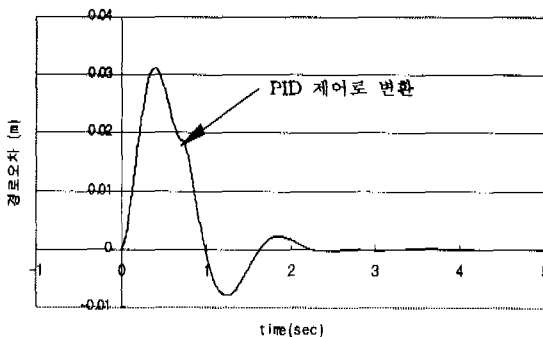


그림 12. 비례미분제어를 적용한 정상원선회의 오차의 수렴

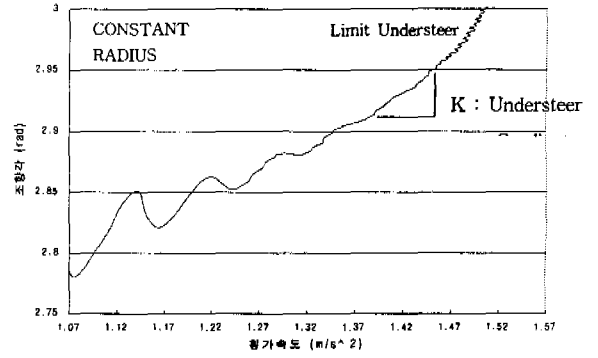


그림 13. 언더스티어 계수

4.3 차선변경시험

차선변경시험은 차량의 처음 차선으로부터 다른 평행의 차선으로 변경하는 시험으로서, 80km/h에서 120km/h까지 10km/h 씩 증가시키면서 각 파라미터를 측정하며 통과 여부를 판단한다. 경로함수는 식 (13)과 같이 Tanh(x)함수로 부드러운 경로를 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} y &= 1.75 * \text{Tanh}(x/5) & : x <= 60\text{m} \\ y &= 1.75 * \text{Tanh}((-x+57.5)/5) & : x >= 60\text{m} \end{aligned} \quad (13)$$

이러한 경로함수를 고려하여 오차를 미분하여 PID 제어를 수행하였다. 그림14는 차선변경시험의 주행경로와 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 그림14는 동일한 차량을 속도 80km/h와 120km/h로 차선변경시험을 수행하였을 때의 횡가속도를 비교한 것이다.

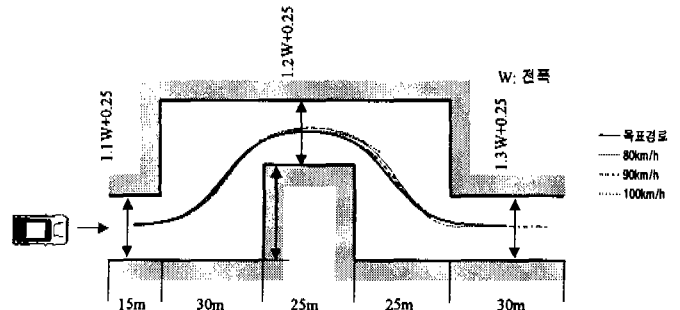


그림 14. 차선변경시험 주행경로와 시뮬레이션 결과

4.4 J-turn (Step steering test)

J-turn 시험은 과도 응답 시험의 하나이며 계단과 조향입력에 대한 차량의 동특성을 관찰하는 시험으로서 일반적인 방법은 조향입력이 가해졌을 때 감/가속 없이 초기속도로 진행하는 것이다. 100km/h의 속도에서 직진 주행으로부터 횡방향 가속도가 4m/s²가 되도록 스텝모양의 조향입력을 가한다. 그림 15는

파워어시스트 조향 시스템을 고려한 차량의 J-Turn 시험시 조향각과 피니언의 각 차이를 나타내고 있고, 그림 16는 그 때 발생한 조타 토크를 나타내고 있다.

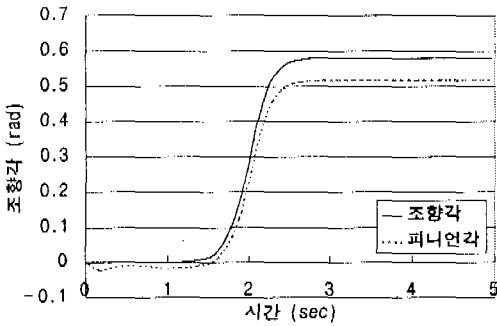


그림 15. 조타입력에 대한 피니언의 반응

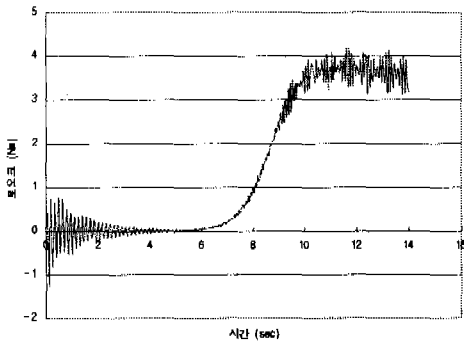


그림 16. J-Turn 시험시 조타력 (파워)

4.5 슬라롬 시험

슬라롬 시험도 레인 체인지 시험과 마찬가지로 경로 규제에 의한 클로우즈 루프 테스트이며 한계 통과 속도와 차의 한계성을 측정할 수 있다. 시험 방법은 파일론을 라인상에 등간격으로 설정하고 일정차속으로 통과하였을 때 특성값을 측정하는 방법으로 시행하며 승용차일 경우 30m에서 통과 기준을 65km/h로 정하고 있다. 그림 17은 슬라롬시험수행시 궤적을 나타내고 있다.

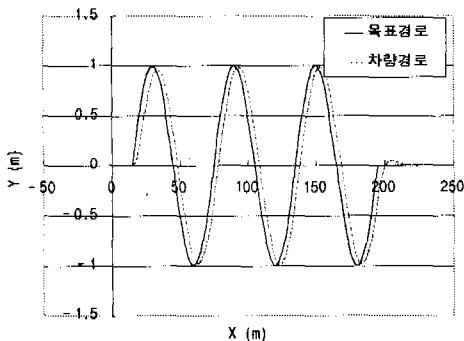


그림 17. 슬라롬 시험의 궤적

4.6 시뮬레이션 및 시험결과와의 비교 분석

그림 18의 차량으로 수행된 실차주행시험과 시뮬레이션을 비교하기 위하여 시험에 사용된 조향각을 시간에 대한 커브 데이터로 시뮬레이션에 적용하였다. 실차시험과 같은 속도가 나오도록 속도제어를 수행하였으며, 실험에서의 차량 경로를 추종하도록 시뮬레이션하여 차량운동상태를 비교하였다.

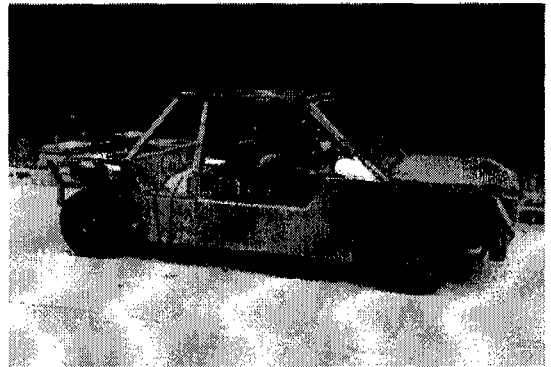


그림 18. 실차주행시험용 차량

정상원선회시험은 반경 30m의 원을 11km/h에서 44km/h까지 속도를 증가시키면서 측정하였다. 언더스티어 계수는 횡가속도에 대한 조향각의 변화율과 에커만(Ackermann) 조향각의 변화율의 차이이며, 그림 19에서의 기울기의 변화율로 표현된다. 실험과 시뮬레이션의 언더스티어 그래디언트가 유사함을 알 수 있고, 실험차량은 약한 언더스티어 경향을 나타내고 있다.

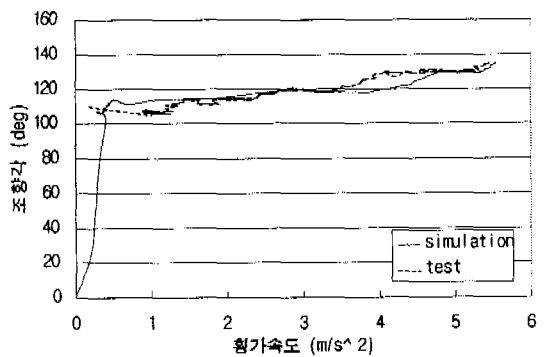


그림 19. 정상원선회 횡가속도에 대한 조향각

차선변경시험으로 부터는 차량의 응답성과 수렴성을 얻을 수 있으며, 실제 도로환경과 유사한 조향입력에 대한 차량의 반응을 알 수 있다. 시속 80km/h에서 수행하여, 횡가속도로부터 조향에 대한 지연과

오버슈트의 정도를 파악한다. 요우각의 급격히 증가하면 통과 불능상태가 되는데 차량의 안정성을 파악하는 데 중요한 시험이다. 선회시의 차량응답성을 알아보기 위하여, 횡가속도와 요레이트를 분석해 보았다. 그림 20과 21은 차선변경시험의 실험과 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 전체적인 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 그림 21의 요레이트에서 시뮬레이션의 결과가 직선구간으로 귀환하는 과정에서 다소 요레이트가 큰 것을 알 수 있다. 이는 실제 차량에 비하여 Yawing 운동에 대한 감쇠특성이 작게 고려되고 있음을 나타낸다.

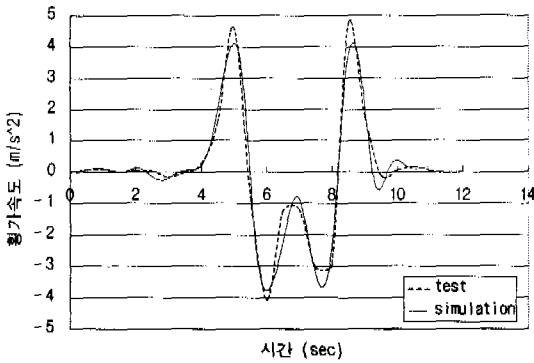


그림 20. 차선변경시험의 횡가속도

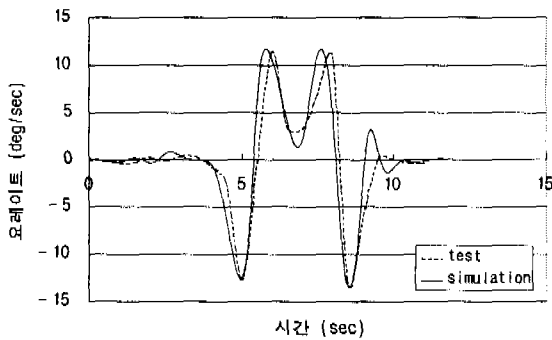


그림 21. 차선변경시험의 요레이트

슬라롬 주행시험은 차선변경시험과 같이 차량의 한계성을 평가할 수 있으며, 통과 최대 차속을 측정한다. 파일론 간격 18m의 경로에서 시속 40km/h로 실험 및 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 22와 그림 23에 나타내었다. 앞서 수행된 차선변경시험에 대한 결과와 같이 횡가속도 신호는 실험과 시뮬레이션 결과가 잘 일치하고 있으며, 상대적으로 요레이트의 결과는 Yawing 감쇠특성의 차이에 의해 기인되는 실험과 시뮬레이션상에서의 약간의 위상차이를 보이고 있다.

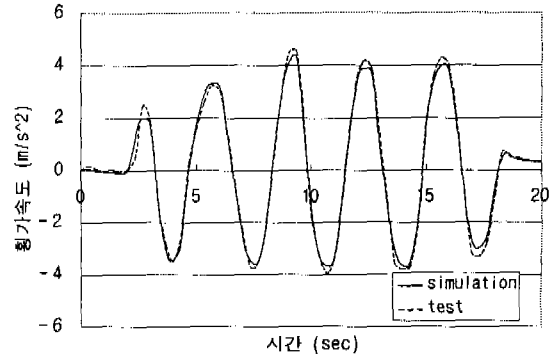


그림 22. 슬라롬 주행시험의 횡가속도

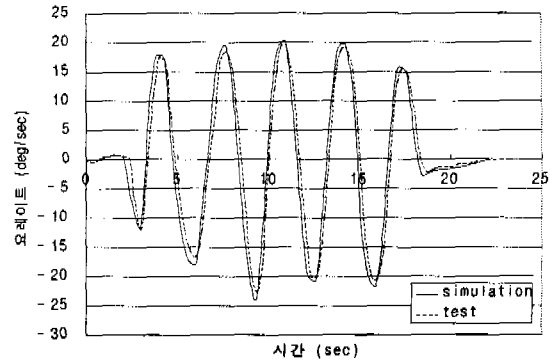


그림 23. 슬라롬 주행시험의 요레이트

스텝조향 입력 시험은 과도응답시험으로 스텝모양의 입력에 대하여 반응시간과 오버슈트값을 산출하여 차량의 동적 반응을 평가한다. 그림 24는 스텝조향 입력 시험시의 실험과 시뮬레이션의 횡가속도를 비교한 것이다. 그림 25는 요레이트의 비교이며, 시뮬레이션의 반응이 조금 빠르게 나타났다. 그 이유는 시험차량의 조향장치와 현가장치를 포함하는 컴플라이언스 (Compliance)가 시뮬레이션 모델보다 다소 크기 때문이라 추정된다.

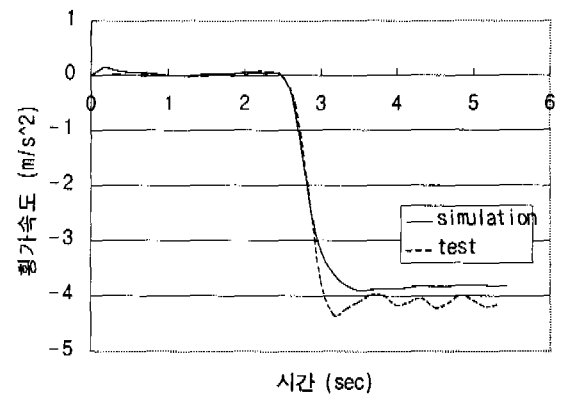


그림 24. 스텝조향 입력시험의 횡가속도

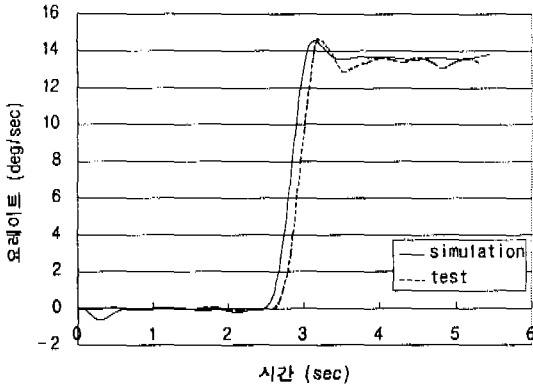


그림 25. 스텝조향 입력시험의 요레이트

5. 결 론

조종안정성능 평가를 위하여 경로와 속도제어가 가능한 운전자 모델과 조향모델을 모델링하였고, 시험규정에 따라 각종 시뮬레이션을 수행하였다. 조향장치 모델링에서는 유압조절밸브와 유량-압력특성을 고려하여 파워어시스트 조향장치를 모델링하고 실험을 통하여 밸브의 압력특성을 비교 검토하였다. 운전자모델에서는 비례미적분제어를 사용할 경우 경로오차가 빠르게 수렴됨을 알 수 있었다. 차량의 안정성을 평가하기 위한 정상원선회에 운전자 모델을 적용하였으며, 횡가속도를 증가시킴으로써 언더스티어 그래디언트를 구할 수 있었다.

차량의 조종안정성을 평가할 시뮬레이션에 적용할 수 있는 조향,운전자 모델을 모델링하였다. 특히, 실차 주행시험과 시뮬레이션을 비교하여 가상주행시험을 검증하였는데, 주행특성 시뮬레이션시에 실제차량의 컴플라이언스(Compliance)특성에 대한 정확한 고려는 차량의 Yawing 응답특성의 시뮬레이션 오차에 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 이영화의 4명, "운전자-자동차 모델을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석", 한국자동차공학회논문집 제3권 제3호, pp.119~128, 1995
- [2] 손희성 "운전자 모델을 이용한 조종안정성능평가 시뮬레이션", 한국자동차공학회 논문집 제5권 제5호, pp.1~8, 1997.
- [3] "자동차기술핸드북", 한국자동차공학회 1996.
- [4] 카야바工業株式會社, "自動車の 操舵係と操安性", 山海堂, 平成 8年

- [5] Hitoshi Soma, Kameo Hiramatsu "Dynamic Identification of Driver-Vehicle System using A-R method", Vehicle System Dynamics, 24 (1995) pp. 263~282
- [6] 이형복, 최천 "전산 차량 동역학을 통한 승용차의 조종안정성 평가 및 성능개선에 대한 연구" 한국자동차공학회 1993년도 차제, 차량동역학 부문 학술강연초록집
- [7] Thierry Landreau, "Simulation of Dynamic Behavior of a Four Wheel Steering Vehicle by Means of a Vehicle and Driver Model", SAE Paper No.890078