

조종안정성 평가를 위한 경로제어모델

A Path Control Model to Evaluation Handling Characteristic of Vehicles

탁 태 오* 최 재 민**
Tak, tae-oh Choi, jae-min

ABSTRACT

In this study a path control scheme of simulation models of various vehicles to evaluate their handling characteristic is developed. Based on the forward target method, path deviation error is estimated and the required steering effort to reduce the error is computed by Ziegler-Nichols PID control rule. Velocity control model is also included in the proposed path control scheme to achieve the desired velocity. The path control scheme is implemented on a full vehicle model to perform ISO test procedures, such as steady state cornering, lane change, and sinusoidal input, etc. Through the simulations of ISO test procedures and comparison with actual tests, effectiveness and validity of the path control model is demonstrated.

주요기술용어 : Vehicle dynamics(차량동역학), Path control model(경로제어모델), PID control(비례미적분제어), Forward target method(전방목표법), Bicycle model(자전거모델), Multi-degrees of freedom model(다자유도 모델)

1. 서 론

차량 개발에 있어서 조종안정성을 평가하기 위하여 다양한 실차 주행시험을 수행한다. 실차시험은 시험차량을 제작해야 하고, 또한 필요에 따라 원하는 설계변수를 변경시키면서 수행해야 하기 때문에 많은 시간과 비용이 든다. 이러한 관점에서 차량동역학 해석전용 소프트웨어인 AUTODYN7¹⁾에서는 실차주행시험에 앞서 차량의 컴퓨터모델을 이용한 가상주행시험 기능을 제

공하고 있다. 주행시험은 임의대로 하는 것이 아니라 시험의 객관성을 높이기 위해서 국제표준규정(ISO) 등에서 그 규격을 정해두고 있으므로, 가상주행시험을 수행하기 위해서는 정해진 경로대로 차량을 조종할 수 있는 경로제어모델이 필요하다. 본논문에서는 AUTODYN7에 구현된 경로제어모델의 이론적 배경을 살펴보고, 경로제어모델을 다자유도 차량모델에 적용하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

주행시험의 종류는 ISO에 의해 규정되어 있는데,²⁻⁴⁾ 경로제어 관점에서 구분해 보면 미리 정해진대로 조향입력을 가하는 개회로(Open-loop)시험과 주어진 경로를 추종해 가는 폐회로(Closed-loop)시험이 있다. 개회로 시험에는

* 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

** 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 석사

J-turn시험, 정현과 조향입력시험등이 있으며 폐회로 시험에는 정상 원선회시험, 차선변경시험, 감가속 원선회시험, 슬라롬시험 등이 있다. 폐회로 시험을 수행하기 위해서는 정해진 경로를 원하는 속도로 주행해야 하므로 경로제어 모델이 필요하다. 본 논문에서 말하는 경로제어모델은 운전자의 인지작용이나 인간신체의 반응시간등을 고려하지 않고 순수하게 경로만을 제어하기 위한 모델이다.

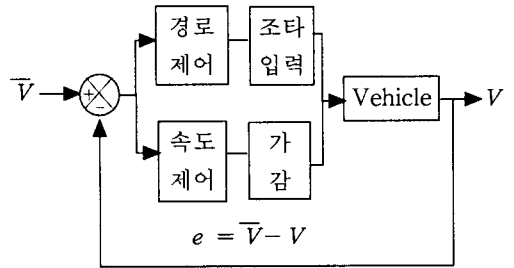
경로를 제어하기 위해서는 경로에 대한 오차를 구해야 한다. 경로오차를 정의하는 방법은 크게 보아 두가지로 나눌 수 있는데, 하나는 현 위치에서의 오차를 구하거나,⁵⁻⁹⁾ 또는 운전자가 전방의 일정거리를 주시하면서 운전하는 것을 고려하여 전방의 주시지점에서 경로오차를 구하는 전방목표법(Forward target method)이다.^{11,12)} 일단 경로오차가 구해지면 비례미적분제어기(PID controller)를 적용하여 경로오차를 저감시킨다. 한편 전방목표법에도 속도와 무관하게 일정한 전방주시거리를 취하는 방법과, 속도의 크기와 방향의 변화를 고려하여 전방주시점을 결정하는 방법이 있다.^{10,11)} 경우에 따라서는 경로오차를 구함에 있어서 필요에 따라 별도의 부가오차를 합산하기도 하고,³⁾ 차선변경시험을 단순히 개회로제어로 수행하기도 하였다.¹³⁾

본 논문에서는 현 위치에서 오차를 구하는 방법과 전방의 주시지점에서 오차를 구하는 방법을 자전거모델(Bicycle model)에 적용하여 그 성능을 비교, 검토한 후, 100 자유도 이상의 다자유도 차량모델에 적용할 수 있는 경로제어모델을 제안하고자 한다.

2. 경로제어 모델

경로제어모델은 목표 경로를 추종하도록 경로제어를 수행한다. J-turn이나 정현과 조향입력시험에서는 정해진 개회로 입력을 스티어링 휠에 가하면 되지만, 정상원 선회나

차선변경시험의 경우에는 정해진 차속과 경로를 벗어나지 않도록 오차를 피드백시키는 폐회로 제어기로 조향 입력을 모델링하여야 한다. 다음 그림은 경로와 속도제어모델의 블록다이아그램을 나타내고 있다. 속도제어는 속도의 오차에 대한 구동 및 제동을 수행하는 비례제어모델을 사용한다.



\bar{V} : 목표속도, V : 실제속도

Fig. 1 Block diagram for path and velocity control model

경로제어를 위한 오차 산출 방법으로는 현위치에서의 오차를 계산하는 방법과 전방주시거리에서 오차를 구하는 전방목표법이 있다. 전방목표법에는 속도와 무관하게 일정한 전방주시거리에서 경로오차를 구하는 방법과, 속도의 크기와 방향의 변화를 고려하여 변화하는 전방 주시점에서 경로오차를 결정하는 방법이 있다. Fig. 2와 같이 차량이 곡률을 가진 경로를 지나갈 때 전방의 L의 위치에서의 경로오차는 다음과 같이 주어진다.

$$e = L\phi + y - \bar{y} \quad (1)$$

그러나 이 경우에 요구된 경로의 곡률이 크거나 경로의 변화가 급격하면 오차가 크게 되는 단점이 있다. 그 단점을 보완하기 위하여 속도의 크기와 방향의 변화를 고려하여 경로오차를 구할 수 있다. 차량의 속도 V 와 요속도 $\dot{\psi}$ 을 고려하면 전방주시거리 L 에서의 예상위치 (x^*, y^*) 는

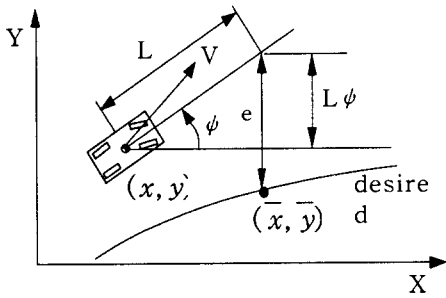


Fig. 2 Forward path error evaluation

다음과 같다

$$x^* = x + V_x \frac{L}{V} \quad (2)$$

$$y^* = y + L\psi + V_y \frac{L}{V} \quad (3)$$

여기서 V_x , V_y 는 차량의 x와 y방향 속도이다. 따라서 경로오차는 다음과 같이 계산된다.

$$e = \sqrt{(x^* - \bar{x})^2 + (y^* - \bar{y})^2} \quad (4)$$

경로오차가 구해지면, 경로오차에 PID제어를 수행한다. 경로오차에 대한 비례조작과 변화를 예측하는 미분동작, 오차의 누적에 대한 보정을 하는 적분동작을 나타내는 전달함수를 사용하여 경로제어를 수행한다. 경로오차의 K배를 조향휠에 가하여 경로오차가 감소되는 비례제어를 수행한 후, 경로오차의 주기 P_{cr} 과 그 때의 비례제어상수 K_{cr} 를 구하고, 지글러-니콜스 법칙(Ziegler-Nichols rules)을 적용하여 PID계수 결정한다. 경로오차 $e(t)$ 에 대한 조향입력을 $u(t)$ 로 하면 $u(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$u = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (5)$$

이 때 각각 비례, 적분, 미분 계수인 K_p , T_i ,

T_d 는 K_{cr} 과 P_{cr} 에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$K_p = 0.6 \times K_{cr}, T_d = 0.125 P_{cr}, T_i = 0.5 P_{cr} \quad (6)$$

지글러-니콜스에 의한 2차 튜닝은 비례제어 실행 후 K_{cr} (임계 비례계수)와 P_{cr} (임계주기)를 이용한다. 임계주기는 오차의 주기로 정하고 임계비례계수는 그 때의 비례계수를 말한다.

차속을 조절하는 방법으로는 차량의 액셀레이터(Accelerator)와 브레이크(Brake)에 해당하는 감가속기를 고려하여, 정해진 속도를 유지하기 위하여 감가속에 따라 전륜에 토크가 전달되게 하였다. 즉, 목표속도와 현속도의 오차에 대한 비례제어 모델을 사용한다. 제동시험에서는 제동력 배분과 브레이크 로크현상(Brake Lock)을 고려하기 위하여 Fig. 3과 같은 이상제동력선도에 따라 제동력을 배분하는 브레이크 모델을 사용한다.

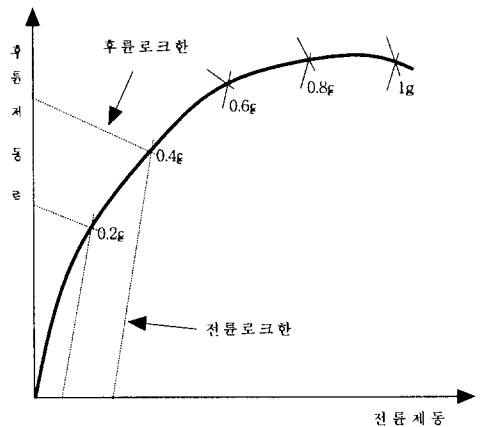


Fig. 3 Ideal brake force curve

다음은 경로제어모델을 검증하기 위하여 Fig. 4 와 같은 자전거 모델에 대한 경로제어를 수행해 보기로 한다. 타이어의 코너링

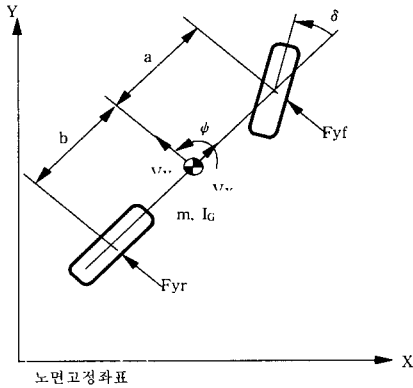


Fig. 4 Bicycle model

특성은 현가장치 특성을 고려하여 전후륜에 선형의 코너링 강성을 적용한다. 자전거 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{X} = -F_{yf} \sin \psi - F_{yr} \sin \psi \quad (7)$$

$$m\ddot{Y} = F_{yf} \cos \psi + F_{yr} \cos \psi \quad (8)$$

$$I_G \ddot{\psi} = aF_{yf} - bF_{yr} \quad (9)$$

Fig. 5는 80km/h로 주행하는 차량의 차선변경시험에 적용된 현위치오차, 일정주시거리오차, 가변주시거리오차모델에 의한 경로의 차이를 나타낸다. 현위치오차모델은 목표경로에 근접하여 주행하고 있는 반면에 일정주시거리오차모델은 다소 반응이 느린 경향을 보이며, 가변주시거리오차모델은 초기상태에는 목표경로에 근접하였으나 급선회 부근에서 오버 슈트가 발생한다. 일정주시거리오차모델은 속도반응에 대한 고려가 없으므로 고속 주행일 경우 반응이 다소 늦은 경향이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 현재 위치에서 오차를 구하든 전방위치에서 오차를 구하든 경로의 추종성에는 큰 차이가 없으며, 오히려 현 위치에서 오차를 구하는 방식이 더 안정적임을 알 수 있다.

단순한 자전거모델과 달리 현가장치를 포함하는 다자유도 차량모델은 그 자유도가

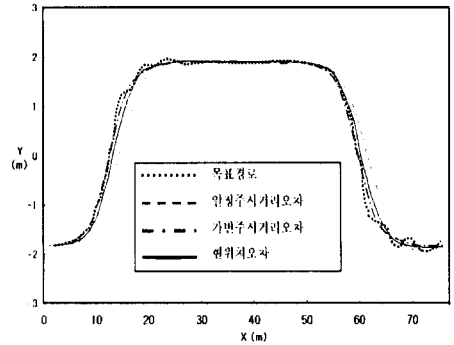


Fig. 5 Comparison to PID controller and prediction controller model

보통 100이 넘는 큰 시스템이고, 특히 타이어 모델이나 조향장치모델과 관련한 비선형성으로 인하여 수치적인 불안정이 자주 나타나므로 단순한 직선주행에도 적분을 수행하지 못하는 경우가 있다. 따라서 가상주행시험을 위한 경로제어를 위해서 안정성의 측면에서 전방목표점보다는 현재 위치에서 오차를 구하고, 이 오차에 대해서 PID제어를 수행하는 방법을 적용하기로 한다.

3. 전차량 모델 시뮬레이션 및 검증

가상주행시험은 조종안정성평가를 위한 실차시험을 대신하여 수학적 차량모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 가상주행시험에서는 차량의 시간영역에서의 정상상태응답이나 과도상태응답을 구하거나, 주파수응답특성을 파악하기도 한다. 정상상태응답과 관련된 시험은 정상 원선회시험이나 슬라롬 등이며, 과도상태응답은 J-turn시험이 대표적이며, 주파수응답특성은 주로 정현파 조향입력시험을 통해서 관찰한다.

실차 주행 시험과 같은 주행 시뮬레이션을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같이 총 23개의 강체로 구성되어 있는 시험용 차량을 모델링하였다. 전

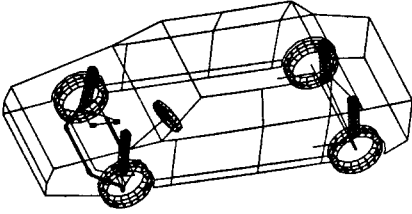


Fig. 6 Full vehicle model

륜은 맥퍼슨 현가장치(McPherson strut suspension)을 사용하여 모델링하였고, 후륜 현가장치는 다중링크(Multilink suspension)형식 중 3-link 서스펜션으로 모델링하였다. 모델의 총자유도는 138개이다.

정상 원선회시험은 일정한 반지름을 가진 원을 속도를 증가시키면서 선회하며, 횡가속도의 증가에 수반하는 조향각의 변화를 측정한다. 차량의 고유조향특성은 차량동역학적 특성치인 언더스티어 계수(K)로 표현된다. 전방목표법을 적용하여 경로제어를 수행하면 차량의 운동이 수렴하지 않거나 극히 제한된 값의 PID상수에 대해서만 수렴하는 불안정한 양상을 나타낸다. 이 이유는 일반적인 다물체 차량모델은 그 자유도가 보통 100을 넘으며, 부싱의 강성, 타이어의 노면 접지력, 또는 조향장치에 포함된 유압장치등으로 인하여 동역학적 시스템이 수치적으로 스티프(Stiff)한 특성을 가지므로 극히 제한된 수치적 안정성 밖에 가지지 못하는 상황이므로 단순한 직진주행에서도 경우에 따라 수렴하지 않는 경우가 있다. 그런데, 경로제어를 수행하기 위해서 조향을 하게 되면 부싱, 타이어, 조향장치 모두에 영향을 미치므로 이것은 시스템의 수치적 불안정성을 더욱더 증폭시킬 가능성이 있기 때문이라고 생각된다.

이러한 어려움 때문에 전방목표법은 다자유도 모델에서는 구현하기가 어려우므로, 현재위치에서 경로오차를 구하고 구해진 오차에 대해서 PID제어를 수행하였다. Fig. 7 에는 비례계수만

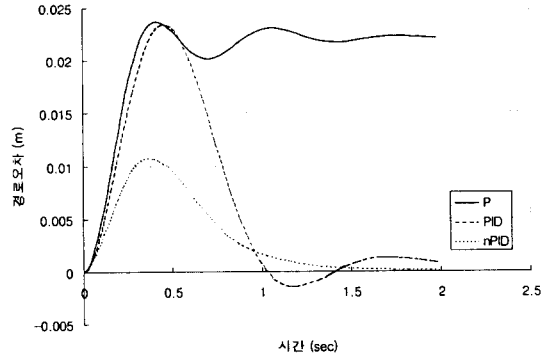


Fig. 7 Comparison to path error using proportional control, PID control

을 적용한 경우, PID계수 모두를 적용한 경우, 결정된 PID계수 모두에 일정한 값을 곱하는 등배제어⁷⁾를 수행한 경우에 대한 경로오차를 보여주고 있다. 이 경우 비례제어만 적용할 때 보다 PID계수 모두를 적용한 경우가 경로오차가 적으며, 또한 PID계수에 일정한 값을 곱한 등배제어가 효과적으로 작용함을 알 수 있다.

가속원선회를 수행한 후에 횡가속도의 증가에 따른 조향각의 변화인 언더스티어 계수(Understeer gradient)와 차량의 상태를 검토한다. Fig. 8은 횡가속도 증가에 따른 핸들 조향각의 증가를 가상주행시험과 실차시험의 결과를 나타낸다. 기울기를 조향기어비로 나누면 언더스티어 계수를 구할 수 있다. 가상시험결과가 실차 시험과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 가상시험에서 초기의 조향각이 급격히 증가하는 현상은 차량이 정지상태에서 시험속도를 증속되면서 정해진 경로를 추종하기 위한 과도 조향 현상을 나타내므로 정상원 선회에서는 무시해도 무방하다.

차선변경시험은 차량의 처음 차선으로부터 다른 차선으로 변경하는 시험으로서, 80km/h에서 120km/h까지 10km/h 씩 증가시키면서 정해진 경로의 통과 여부를 판단한다. 경로함수는 Fig. 9와 같이 $Tanh(x)$ 함수로 부드러운 경로를 만들 수 있다.

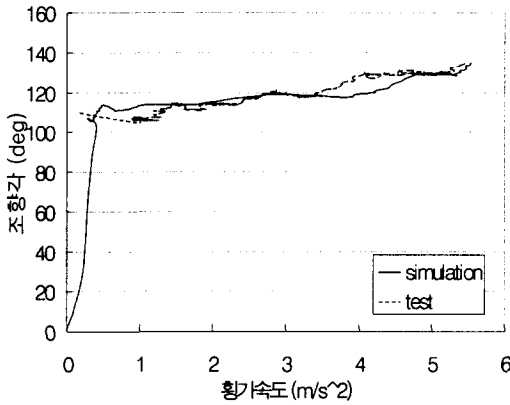


Fig. 8 Understeer gradient

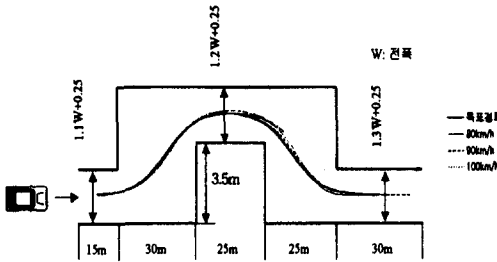


Fig. 9 Path of lane change test

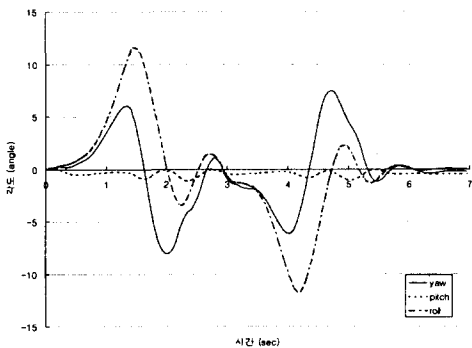


Fig. 10 Vehicle position on lane change

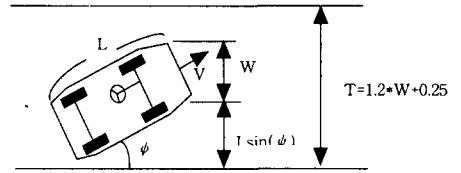


Fig. 11 Pass condition of vehicle

$$y = 1.75 \times \text{Tanh}\left(\frac{x}{5}\right) : x \leq 60 \text{ m} \quad (10)$$

$$y = 1.75 \times \text{Tanh}\left(\frac{-x + 57.5}{5}\right) : x \geq 60 \text{ m} \quad (11)$$

이러한 경로함수를 고려하여 경로오차를 구하고 PID제어를 수행하였다. Fig. 9는 차선 변경시험의 주행경로와 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, Fig. 10은 80 km/h로 차선 변경시험을 수행하였을 때 차량의 요우(Yaw), 피치(Pitch), 롤(Roll)을 나타내고 있다.

Fig. 11에는 국제규정경로의 통과 조건을 나타내었다. 예를 들면 기본모델이 $l = 4215 \text{ mm}$, $W = 1625 \text{ mm}$ 이면, 통로의 폭 $T = (1.2 * W + 0.25) * 1000(\text{mm})$ 로 통로에 진입한 후에 요우각이 $7.84(\text{deg})$ 이상이면 통과 불가능하다. 시뮬레이션 결과 Fig. 10에서 최대 요우각은 $7.28(\text{deg})$ 이므로 통과가 가능하다.

슬라롬 시험도 레인 체인지 시험과 마찬가지로 폐회로시험이며 한계 통과 속도를 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.

정해진 경로를 추종하도록 정상원선회시 구해진 PID 제어계수를 적용하여, 시속 65km/h로 20초 동안 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 12는 슬라롬 시험시 횡방향가속도(Lateral acceleration)를 실차시험과 비교하여 나타내고 있으며 Fig. 13은 요레이트(Yaw rate)의 결과를 실차시험과

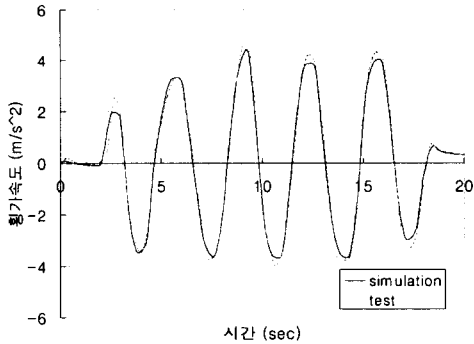


Fig. 12 Lateral acceleration of slalom test

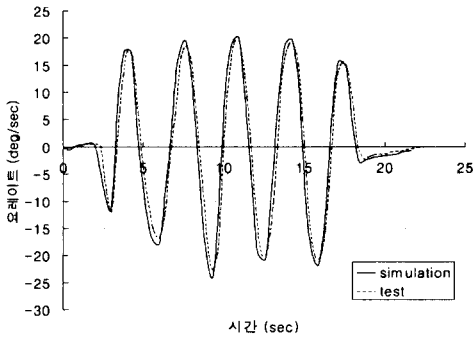


Fig. 13 Yaw rate of slalom test

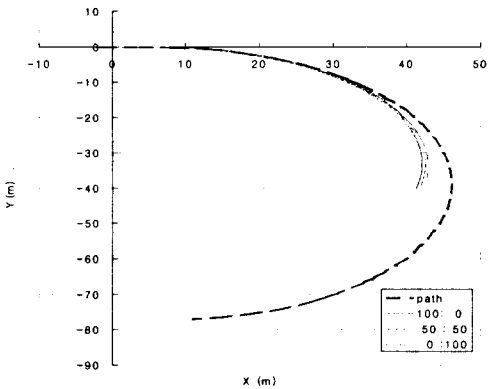


Fig. 14 Brake characteristics on braking in a turn

함께 나타내었다. 두 경우 모두 가상시험결과와 실차시험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

선회제동 시험은 2초 동안 30도의 조향 핸들각을 입력하고, 0.5초 동안 브레이크 압력을 100

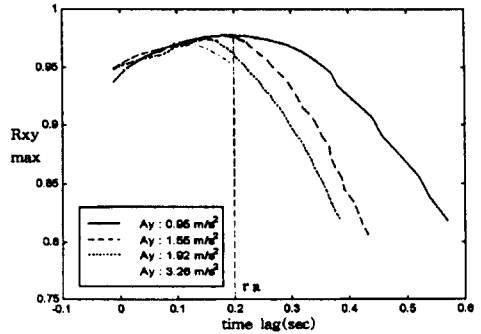


Fig. 15 Lateral acceleration to steer input

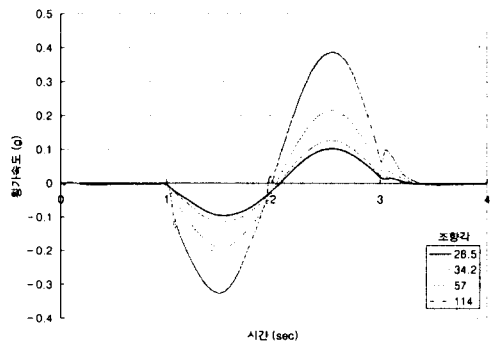


Fig. 16 Cross-correlation function : Rxy

kN까지 증가시켜서 정지시까지 제동을 한다. 단위 압력 당 발생 토크를 나타내는 브레이크 효율계수는 $0.00278 \text{ Nm} / (\text{N} / \text{m}^3)$ 로 하였다.

Fig. 14는 선회 제동시험에서 전후륜 제동력 배분비에 따라 다른 차량경로의 변화를 나타낸다. 후륜의 제동력 배분이 크면 후륜 쪽에 로크현상이 먼저 발생하며, 슬립현상이 전륜보다 많으므로 기준선회보다 안쪽으로 밀리는 경향이 있다.

정현과조향입력시험은 스텝이나 램프 입력과 같이 과도상태응답시험이며, 실제 도로에서 차선 변경시와 유사한 조향입력을 가한 후, 횡가속도의 영역에서 차량의 과도상태반응을 살펴거나 차량거동의 선형성을 결정할 때 유용하다. 조향입력에 대한 횡가속도의 시간지연(time lag)을 구

하기 위하여 핸들 조향각의 크기를 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 조향각의 크기에 따라 횡가속도의 크기가 같이 커지는 현상을 Fig.15에서 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 16과 같이 횡가속도의 상호상관함수를 구할 수 있으며 상호상관함수의 피크치를 이용하여 조향입력에 대한 시간지연을 구할 수 있다.⁴⁾

4. 결론

조종안정성능 평가를 위한 가상주행시뮬레이션을 수행하기 위해서는 경로와 속도제어가 가능한 운전자 모델이 필요하며, 국제 규정에 따라 주행 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 경로를 제어하기 위해서 경로오차를 구해야 하는데 현재 위치에서 경로오차를 구하는 방법과 전방의 일정한 주시지점에서 경로오차를 구하는 전방목표법에 대해서 자전거모델과 다자유도 전차량모델을 이용하여 경로추종성을 살펴본 결과 단순히 현재 위치에서 경로오차를 구하는 것이 더 안정적임을 알 수 있다. 구해진 경로오차에 대해서 PID제어를 수행하기 위해서 지글러-니콜스 법칙에 의해서 계수를 결정하였으며, 정해진 PID계수를 일정 비율로 증가시켜 PID제어를 수행하는 등배제어가 효과적임을 알 수 있었다.

주행시험으로는 차량의 안정성을 평가하기 위한 가속원선회를 수행하여 횡가속도 영역에서 차량의 동특성을 파악하였다. 또한 차선변경시험과 슬라롬시험 등 폐회로시험의 경로제어를 수행하였고, 시험결과를 비교 검토하였다. 제동선회시험이나 정현파입력시험 등의 과도상태응답시험에서는 횡가속도와 요레이트 등을 조향 입력의 크기나 속도에 따라 비교하여 차량의 과도응답특성을 알아보았다. 이로서 AUTODYN7에서 조종안정성 평가를 위한 가상주행시뮬레이션이 가능하도록 하였다.

참 고 문 헌

- 1) AUTODYN7 이론, 예제, 입력 매뉴얼.
- 2) ISO 4138, "Road Vehicles-Steady State Circular Test Procedure", 1998. 11.
- 3) ISO 3888, "Road Vehicles-Test Procedure for a Severe Lane-Change Manuevre Test".
- 4) ISO 8725, "Road Vehicles-Transient Open-Loop Response Test Method with One Period of Sinusoidal Input".
- 5) N. Hata, H. Osanai, S. Hasegawa, S. Takahashi, Y. Watanabe, "An Investigation into Vehicle Controllability and Stability of an Experimental Medium-Duty Truck with Rear-Axle Steering", AVEC '92 No.923014.
- 6) M. S. Habib "Characterization of Driver-Vehicle Directional Control using Three Models of HumanDriver", AVEC '94 No.9437999.
- 7) 손희성, "운전자 모델을 이용한 조종안정성능평가 시뮬레이션", 한국자동차공학회논문집 제5권 제5호, pp.1-8, 1997.
- 8) 이형복, 최천 "전산 차량 동역학을 통한 승용차의 조종안정성 평가 및 성능개선에 대한 연구" 한국 자동차공학회 차체, 차량동역학 부문 학술강연초록집, 1993.
- 9) 안기원, 황원건, "중형버스의 차선변경시 조안성특성에 관한 연구"한국자동차공회 추계학술대회 논문집, 1994.
- 10) "자동차기술핸드북", 한국자동차공학회, 1996.

- 11) T. Landreau, "Simulation of Dynamics Behavior of a Four Wheel Steering Vehicle by Means of a Vehicle and Driver Model", SAE 890078.
- 12) 이영화 외 4명 "운전자-자동차 모델을 이용한 4륜조향자동차의 주행특성 해석, 한국자동차공학회논문집 제3권 제3호, pp.119-128, 1995.
- 13) N. H. Sledge, K. M. Marshek, "Comparison of Ideal Vehicle Lane-Change Trajectories", SAE 971062.