

차량의 주행역학적 특성규명을 위한 시험 및 평가방법

許 昇 鎭
韓國科學技術院 先任研究員



• 1956年 7月 5日生
• 자동차공학 연구중에서 특히 자동차 Crush/Crash 해석, Vehicle Dynamic, 자동차 진동 및 소음 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

교통안전도 향상에 관련되는 문제는 자동차 공학분야에서 주요 연구과제가 되고 있다. 이러한 연구과제를 해결하기 위해서는 교통사고 발생의 주요 요인들과 그 요인들간의 종속적인 상호관계가 체계적으로 연구, 분석되어야 한다. 일반적으로 도로교통상의 안전도 문제는 '인간', '차량', '환경'계의 영향권내에서 해석될 수 있다. 따라서 차량의 주행특성에 관한 연구를 수행하기 위해서는 차량 자체는 물론, 운전자 및 주행상황(환경적요소)이 종합적으로 고려되어야 한다. 그림 1에서 보듯이 '운전자', '차량', '환경'의 제어계에 있어서 운전자는 주행예정코스에 대한 제어임무를 맡게되며, 차량은 제어되는 시스템에 해당되고, 나아가서 환경적요소는

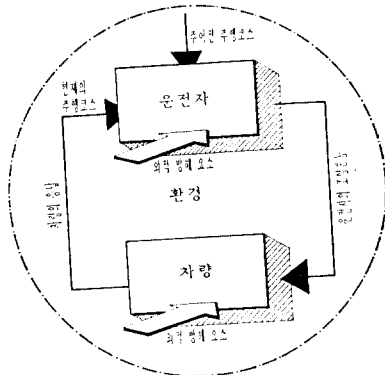


그림 1 "운전자-차량-환경" 제어 시스템의 상호 작용도

전체 제어계에 미치는 외적 방해 요소의 바탕이 된다. 따라서 이러한 세가지 시스템의 상호관계에 대한 분석을 토대로 '안전한 주행특성'에 대한 정의가 내려질 수 있으며, 또한 이를, 시험·판별하기 위한 객관적인 주행방법이 아울러 검토·결정되어야 한다. 이는 결국 주행시 안전도 측면에서 차량의 최적설계를 위한 기본토대를 마련해 줄 것이다. 이에 관련되는 차량 주행특성의 제반 연구 및 평가방법을 다음 내용과 같이 기술하고자 한다.

2. 주행특성에 관한 연구방법

각종 주행상황에서 차체의 운동은 운동좌표계와 그것의 시간적인 변화량에 의해서 서술되어진다. 이때 운동좌표계는 그림 2에서와 같이 3개의 수평운동 자유도 즉, 종축운동, 횡축운동, 수직운동과 3개의 회전운동 [로울링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing)운동]으로 구성된다. 이러한 차체의 운동자유도들은 주행중 심한

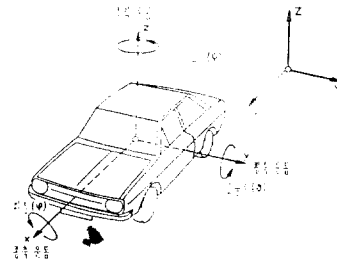


그림 2 차량의 기본적인 운동자유도.

비선형적 특성을 갖고 서로 연결되어 작용된다. 그러한 복잡성에 기인되어 차량 차체는 물론 전체 제어계 “운전자-차량-환경”에 대한 연구는 주로 주행실험을 통한 주행특성의 주관적 판별 방법에 의해 수행되어져왔다. 그러나 쉽게 예측할 수 있듯이, 이러한 주관적 판별방법의 경우 얻어진 결과들이 매우 큰 편차를 보이게 되므로 주행역학적 설계를 위해서 단지 참고적인 자료에 불과하게 된다. 이에 반해서 정밀도가 높은 가벼운 계측기의 개발 및 이론적 시뮬레이션을 위한 대형컴퓨터의 보급을 통해서 최근에 들어 비로소 객관적인 평가방법들이 모색될 수 있었다.

주행특성의 객관적 연구를 위해서는 근본적으로 두가지 방법이 고려될 수 있는데, 이른바 폐쇄회로과정(closed-loop-process)과 개방회로과정(open-loop-process)이다. 폐쇄회로과정 개념에는 주행성능시험, 주행 시뮬레이터(driving simulator)를 이용한 실험 그리고 운전자-차량의 시뮬레이션 등이 포함될 수 있는 반면에 개방회로과정은 차량자체의 객관적인 주행 성능시험과 차량의 수학적 모델링에 의한 연구로 대별될 수 있다.

폐쇄회로시험(closed-loop-test)에 대한 제어회로는 그림 3과 같다. 여기에서 차량과 운전자가 함께 다루어지므로 종축동력학(longitudinal dynamics)과 횡축동력학(lateral dynamics)에 관련되는 제어계들이 모두 닫혀져 있다. 주행코스가 주어지며, 아울러 측면풍에 의한 힘, 주행도로의 불규칙성과 기술기등의 외부조건이 고려된다. 이러한 시험으로부터 얻어지는 측정결과는 운전자-차량 시스템의 비매개변수적 인지(non-parametric identification)를 위해 사용될 수

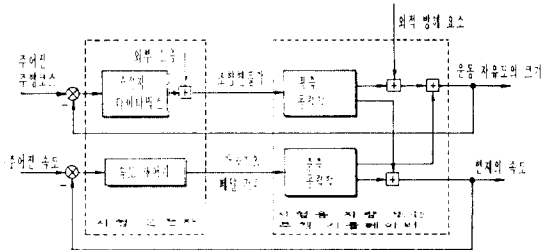


그림 3 폐쇄회로시험

있다. 반면에 매개변수적인지(parametric identification)를 위해서는 각 시스템 요소들의 특성함수가 수학적으로 규명되어야 하는데, 실제 운전자의 모델링은 매우 복잡하여 상당한 어려움을 제기하게 되므로 결과의 완전한 평가는 불가능하게 된다. 이러한 이유로해서 부분시스템인 ‘운전자’를 전체시스템의 수학적 모델링에 직접 실제적으로 포함시킬 수 있다. 그러한 연구개념은 이른바 주행시뮬레이터를 통해서 가능하게 되는데, 이는 결국 실험실내에서의 폐쇄회로시험이라 할 수 있겠다.

폐쇄회로과정에 반하여 개방회로과정은 운전자의 영향을 고려하지 않은채 외적인 방해요소에 대한 차량의 동적응답을 연구하는 것이다. 이러한 방법을 통해 차량 주행특성에 관련되는 매개변수들을 규명할 수 있으며, 나아가서 전체 시스템의 동적특성을 최적화하는데 기여할 수 있다.

그림 4와 같은 개방회로시험(open-loop-test)에서는 횡축동력학에 관련되는 제어계는 열려져 있으며, 시험운전자(test driver) 또는 조향기계(steering machine)를 통해 주행경로를 고려하지 않은채 오직 주어진 조향핸들의 입력신호만을 차량에 가하고, 이때 나타나는 차량의 응답을 조사하는 것이다. 이 경우 조향핸들을 지정된 불규칙적인 각도로 움직일때 이를 고정제어(fixed control)라 하며, 또는 자유로이 놓은 상태에서의 주행실험을 자유제어(free control)라 정의한다. 물론 개방회로시험의 경우에서도 종축동력학에 관련되는 제어계는 시험운전자 또는 속도조절기를 통하여 일정한 속도를 유지하도록 조절기능을 갖게된다.

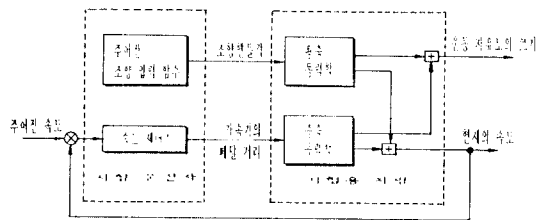


그림 4 개방회로시험

는 오우버스티어(oversteer)의 성질을 규명하기 위해 이미 오래전부터 응용되어왔다. 언더스티어 및 오우버스티어에 관한 주관적인 판정결과와 잘 일치하는 관계 특성치로서 understeer/oversteer gradient(EG)가 사용되는데 이들은 그림 9에서와 같이 두가지 시험조건(일정한 반경 또는 일정한 속도)아래서 각각 표시되어진다. 여기에서 understeer/oversteer gradient는 횡가속도에 대한 조향각의 변화율과 Ackermann 조향각의 변화율에 대한 차이에 의해 정의되며, 고유조향 특성이 중립, 언더스티어, 오우버스티어 일때 각각 $EG=0$, $EG>0$, $EG<0$ 으로 구분되어진다. 실제 운전자의 주관적인 측면에서는 요잉 각속도를 감지하므로써 주행중인 차량의 고유 조향특성을 판별할 수 있다.

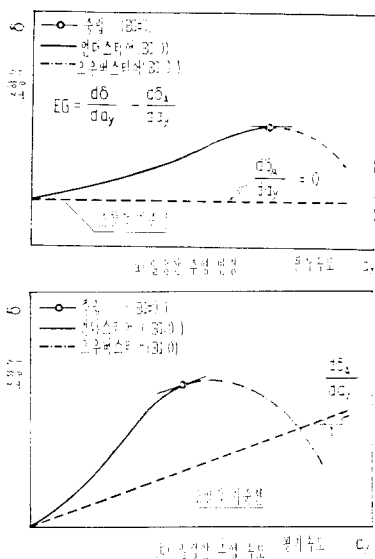


그림 9 정상상태의 고유조향 특성에 관한 정의

실제 차량설계 측면에서의 사용예로서 그림 10에서와 같이 US-ESV(US-Experimental Safety Vehicle)⁽²⁾의 개발을 위한 설계기준을 들 수 있다. 여기에서는 표준화된 요잉 각속도가 0.4g의 횡가속도 조건에서의 주어지는 주행속도에 대하여 그림에서 빗금으로 표시되어 있는 범위내에서 언더스티어 경향을 갖도록 설계지침이 규정되어 있다.

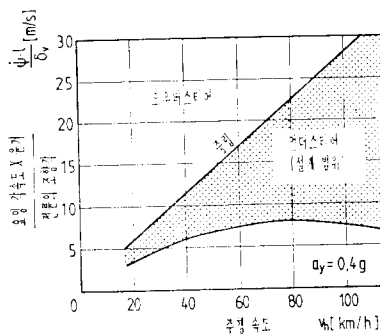


그림 10 정상상태의 고유조향 특성 관점에서 US-ESV 설계지침

5.2 과도적 조향작동(Transient Steering Operation)

이러한 주행시험의 기본 개념은 시간 또는 주파수 영역에서의 주어진 차량에 대한 주행역학적 특성함수를 규명하는 것이다. 그리고, 시스템의 입력함수에 해당되는 조향핸들의 시간에 대한 각 함수에 따라 램프입력시험(ramp input test), 정현파 입력시험(sine input test) 그리고 복원 주행특성 시험으로 세분화 될 수 있다.

(1) 램프 입력시험⁽³⁾

이 주행시험에서는 시험용 차량이 가능한 큰

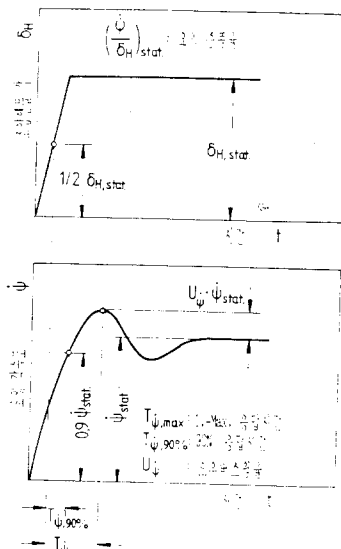


그림 11 램프 입력의 조향각에 대한 요잉 각속도의 출력함수 및 특성치

회전 각속도와 일정한 진폭을 갖고 직진 주행상태로부터 원형 주행상태로 진입된다. 다음 그림 11에서는 도식적으로 이 주행시험에 대한 조향핸들자의 입력함수 및 이에 대한 요잉운동의 응답함수를 나타내고 있으며, 또한 관련되는 평가 특성치들을 정의하고 있다.

응답 지연시간은 최종적인 조향각의 약 50%에 관계되는 시점을 기준으로 정의된다. 또한 최종 조향각의 90%에 도달되는 시점에 해당되는 응답시간은 T_{ϕ} , 90%이며, 최초로 최대치에 도달되기까지의 응답시간을 $T_{\phi, \max}$ 로 표시한다. 나아가서 요잉각속도 증폭율과 오우버스윙율(over swing factor) U_{ϕ} 는 각각 정상상태에서의 관련크기와 관계되어 정해진다.

일반적으로 볼때 빠른 응답특성을 갖는 차량은 대신에 단점으로서 더욱 큰 진폭의 진동특성을 나타낸다. 차량동력학의 선형이론에 의하면 이러한 시험에서의 더욱 빠른 응답특성은 곧 정상상태의 원형 주행시험에서 더욱 심한 언더스티어 경향을 뜻하게 된다. 이러한 측면에서 차량의 효과적인 주행역학적 설계를 위한 US-ESV 기준규정은 그림 12와 같다. 즉, 이그림에서 볼때 주행속도 112km/h에서 오우버스윙율 1.7의 상한선과 주행속도 40km/h에서 오우버스윙율 약 0.9의 하한선이 주어지고 있다.

(2) 정현파 입력 시험

과도적인 고유 조향특성을 조사하기 위한 방법으로서 이외에 차량의 주파수 응답특성을 측

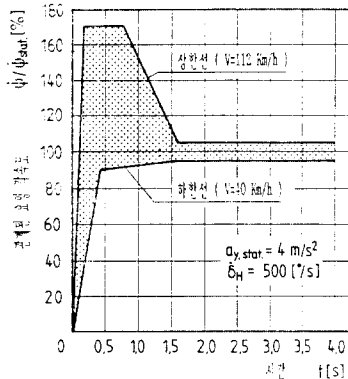


그림 12 랩프 입력시험 결과를 바탕으로 한 US-ESV 설계지침

정하는 것이다. 일정한 진폭을 갖는 정현파함수에 의한 입력을 조향핸들에 가할때 출력함수로서 차량의 운동크기 즉, 요잉 각속도, 횡가속도 등을 일정한 주행속도에 대하여 측정하는 것이다. 그리고, 정현파 함수의 입력주파수를 점차 증가시켜가면서 원하는 주파수 범위내에서의 동적특성을 모두 확인하는 것이다. 이 시험과 관련하여 다음 그림 13에서는 심하게 언더스티어 특성을 갖는 차량과 약한 언더스티어 특성을 갖는 차량의 대표적인 주파수 특성함수를 횡가속도와 요잉 각속도에 대하여 각각 나타내었다.⁽⁴⁾

일반적으로 주파수 특성함수의 진폭에 대한 도표는 해당차량의 주행역학적 안정성(stability) 판별에 도움을 주게된다. 심한 언더스티어 경향을 갖는 차량의 경우, 횡가속도에서 약 1Hz 주파수 범위까지 거의 뚜렷한 진폭변동이 관찰되지 않고 있는데, 이는 곧 원칙적으로 0.5Hz 미만 주파수 범위에 해당되는 보편적인 주행상태의 경우, 거의 주행특성이 변하지 않는다는 것을 의미하는 것이다. 반면에, 약한 언더스티어 경향을 갖는 차량의 횡가속도 진폭에 대한 주파수 특성은 0.5Hz 정도에서 이미 -4dB 정도의 차이를 보이고 있다. 이와같은 횡가속도 주파수 특성과 연유해서 심한 언더스티어 경향을 갖는 차량의 경우, 요잉 각속도에 대한 진폭의 주파수 응답함수는 약 2Hz에서 고유진동수를 갖으며 뚜렷한 동적 응답특성을 보이고 있는데, 이는 주어진 차량이 약 2Hz 주파수 영역까지에서 주어진 안정제도에 복원되는 매우 좋은 주행역학적 특성을 의미하게 한다.

그리고, 해당되는 특성함수의 주파수에 대한 위상변화는 그림 14와 같다. 근본적으로 해당차량의 조절성(controllability)에 관한 연구가 이를 통해 가능하게 된다. 이 두가지 위상에 관한 주파수 특성에서 볼 수 있듯이, 심한 언더스티어 경향을 갖는 차량은 매우 작은 상위차를 나타내므로써, 약한 언더스티어 경향을 갖는 차량에 비하여 운전자의 동적인 조향핸들 조작에 대해 훨씬 민감하게 응답을 보임을 의미하고 있다. 이와같은 상호관계를 종합 검토하여 볼 때

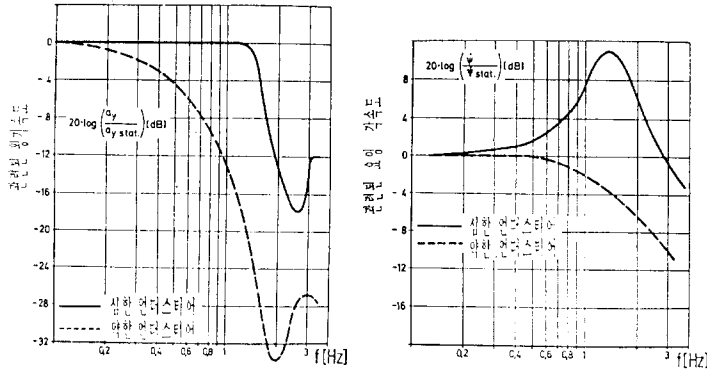


그림 13 부계중심에서 측정된 횡가속도와 요잉가속도의 주파수 특성함수(진폭)

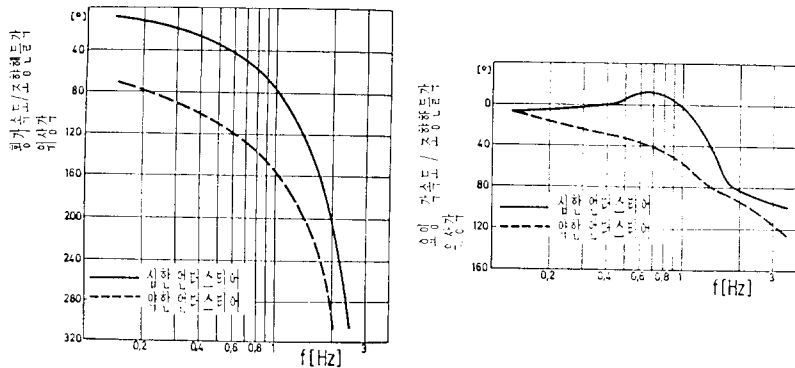


그림 14 부계중심에서 측정된 횡가속도와 요잉가속도의 주파수 특성함수(위상)

안정성과 조절성에 관련되는 과도상태의 주행역학적 특성을 고려하는 효과적인 차량설계를 위한 지표는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 횡가속도의 진폭에 대한 주파수 특성에 큰 변동이 없을것.
2. 위상차의 주파수에 대한 변화가 가능한 미미하게 유지될것.
3. 차량자체의 요잉운동에 대한 고유진동수주위에서 요잉 가속도의 진폭에 대한 주파수 특성이 심하게 증폭되지 않도록 할것.

그렇지만 물론 위와 같은 일반적인 고려사항은 실제적으로 횡가속도와 요잉 가속도 또는 진폭과 위상변화사이의 상대적인 연계관계때문에 결코 완전한 의미는 갖을수 없으며, 궁극적으로 이러한 상호관계 요소들의 영향을 적절히 절충하여 고려함으로써 비로소 궁극적인 설계목표에 도달할 수 있을 것이다.

이러한 측면에서 차량의 근본적인 두가지 조향특성 즉, 차량 응답특성의 크기와 민첩성에 관계되는 최적설계 지표는 Weir 와 DiMarko⁽⁵⁾에 의해 그림 15에서와 같이 정의되었다. 즉, 이 도표에서는 운전자가 차량의 조절기능 업무를 가장 용이하게 처리하기 위해서는 차량의 응답정도를 의미하는 요잉증폭율과 응답신속도에

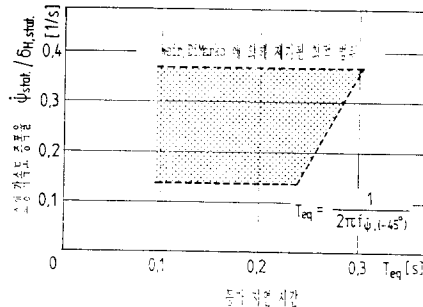


그림 15 정현과 입력시험의 경우 조향특성에 관한 최적범위

해당되는 등가 지연시간의 상호관계가 그림과 같이 표시된 범위에서 존재하여야만 한다는 것이다.

(3) 조향복원 특성 시험

커브 주행상태에서 직진 주행상태로 넘어갈때의 차량주행 특성을 규명하기 위해 조향복원 특성에 관한 주행시험이 수행된다. 이 경우 조향핸들은 정상상태의 원형주행에서 갑자기 풀어주게 되는데, 이는 곧 자유제어에 해당되는 것이다.

요잉 각속도의 시간에 대한 변화를 그림 16과 같은 도표에 표시하므로써 이와 관련된 사항을 비교하게 된다. US-ESV 해석규정에 의하면 조향핸들 구속을 풀후 2초후에 측정된 요잉 각속도는 $\pm 4^\circ/s$ 보다 작은 범위에서 변화를 해야한다. 기타 평가 기준치로서는 요잉운동의 감쇠계수와 조향핸들각 또는 요잉각의 최대진폭을 등이 적용될 수 있다.

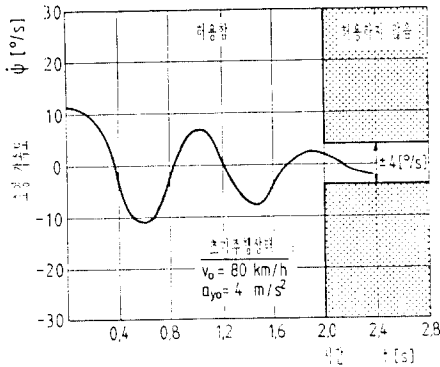


그림 16 복원 주행특성 시험에 관한 평가

5.3 커브주행시 제동

제동과 조향을 동시에 가할때의 주행특성을 평가하기 위해서 일반적으로 이와같은 주행시험을 적용한다. 특히, 여기에서는 요잉안정도(yawing stability)와 조향시스템의 제어가능성 관점에서 연구되어진다. 요잉안정도는 정상 원형주행상태에서 제동시 나타나는 요잉각과 미끄럼각의 변화를 통해 규명되며, 조향시스템의 제어가능성은 횡가속도 및 주어진 주행코스로부터의 측면이탈 정도를 측정하므로써 알아볼 수 있다.

예를들면, 그림 17에서와 같이 횡가속도 및

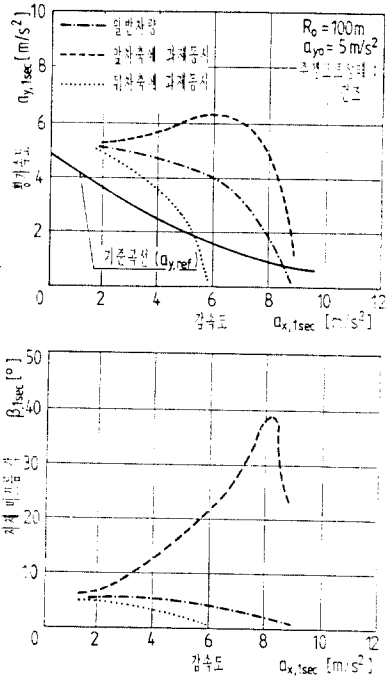


그림 17 커브길에서 제동시 감속도에 대한 횡가속도와 차체 미끄럼각

미끄럼각의 특성치들을 차량감속도의 함수로서 세가지 차량-일반차량, 앞 차축에 과제동시, 뒷 차축에 과제동시-의 경우들에 대해 각각 나타내었다⁽⁶⁾.

또한 전혀 주행코스 이탈이 없는 경우의 이상적인 횡가속도 변화를 기준곡선으로 동시에 표시하였다. 일반차량의 경우 횡가속도가 약 8.5 m/s² 가량의 감속도까지 기준곡선 상부에 존재하게 되는데, 이는 차량이 초기 주행반경 보다 작은 크기로 원형주행을 하게됨을 나타낸다. 나아가서 기준곡선과의 교차점에서 초기주행 반경과 일치하는 원형주행을 하게되며 이에 해당되는 감속도는 주행코스를 유지하기 위한 한계치로 정의된다. 더욱 감속도를 증가시킬때 횡가속도는 영(zero)에 이르러 결국 주행코스를 이탈하기 시작하며 더이상 차량은 조향기능을 잃게 된다. 뒷차축에 과제동을 가할때, 최대 횡가속도는 일반제동 시스템 경우에서보다 더욱 크게 나타나는데, 즉 더욱 심하게 주행코스 내부로

차량은 회전하게 되어 차량의 조향기능은 오랫동안 유지시킬 수 있으나, 반면에 상대적으로 매우 큰 미끄럼각의 변화를 통해서 요잉안정도는 감소하게 된다. 이에 반하여 앞차축에 과제동을 가하는 경우에는 앞바퀴들이 일찍 로킹('locking') 현상을 일으키므로 그림에서 보듯이 주행코스 유지내지는 차량의 조향기능의 한계성을 나타내는 최대 감속도는 매우 작은 값에서 나타냄을 알 수 있다.

이러한 시험과정을 거쳐서 이 경우와 같은 앞뒤 차축에 과제동이 걸리는 차량의 제동특성을 위해 바람직하지 못한 시스템이 설계단계에서 규명, 보완되어 질 수 있다.

6. 맺음말

차량 주행특성을 규명하기 위한 연구방법에 대한 일반적 고찰을 토대로 주요 개방회로시험과 관련 평가기준들이 소개되었다. 그러나, 차량의 주행상 안전도 연구를 위한 종합적인 척도는 이제까지 설명된 평가기준들로부터 아직 명확히 귀결지을 수 없음을 강조하여야 한다. 이 유로서는, 한편으로 응용되어진 연구방법들이 실제 교통사고 발생상황을 포괄하기에는 아직 불충분하며, 또 한편으로는 주어진 한 시험방법에서 주행안전도 판정을 위해 제기된 특성치가 절대적인 값으로 확정지을 수 없기 때문이다.

따라서 전체 시스템 '운전자-차량-환경'에 있

어서 주행특성의 완전한 평가를 내리기 위해서는, 객관적으로 서술될 수 있는 차량의 주행특성-안정성 및 조절성과 운전자에 의한 주관적인 판별 또한 환경요소에 의한 영향들에 대하여 상호 연관관계가 복합적으로 해석, 규명되어져야만 할 것이다.

물론 이러한 최종목표에 도달하기 위해서는 이 분야에 아직 광범위한 연구과제들이 대두되고 있으며, 현재 세계적으로도 이 분야에 집중적인 연구가 수행되고 있는바, 국내의 관계 기술축적 및 정립은 역시 매우 절실하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) DIN 70000 : Road Vehicles; Vocabulary of Vehicle Dynamics.
- (2) ESV Emphasize Crashworthiness, Automotive Engineering, 1971.
- (3) ISO/DIS 7401 : Road Vehicles-Transient Response Test Procedure (Step/Ramp Input)
- (4) A. Zomotor, 1978, "Messverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens", Automobil-Industrie.
- (5) D.H. Weir, R.J. DiMarko, "Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data", SAE-Paper 780010.
- (6) K. Rompe, 1979, "Testverfahren fuer das Bremsen in der Kurve", ATZ.

