

# 차량 안정성 평가의 객관화를 위한 과도 운동 분석

김정식<sup>1)</sup> · 김영태<sup>2)</sup> · 윤용산<sup>2)</sup>

한국타이어중앙연구소<sup>1)</sup> · 한국과학기술원 기계공학과<sup>2)</sup>

## Analysis of Transient Maneuvers for Objectifying Evaluation of Vehicle Stability

Jungsik Kim<sup>\*1)</sup> · Youngtae Kim<sup>2)</sup> · Yongsan Yoon<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Vehicle Dynamics Research Team, Hankook Tire Co. Ltd., R&D Center, 23-1 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-725, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 25 July 2005 / Accepted 27 September 2005)

**Abstract** : Directional stability is important performance in vehicle and tire design. The current methods to analyze this is generally based on linear concept. Using the existing concept, it cannot realistically explain the subjective assessment at all because it is hard to practically represent the nonlinear behaviour of a complex vehicle system in reality. In this paper, new method to analyze directional stability is introduced. At first, directional stability of vehicle is categorized into yaw, rear axle, and roll stability. In order to objectify these items, driver perceptual parameters based on subjective assessment are used. Using the perceptual parameters, it can successfully explain the transient maneuver of vehicle and extract objective parameters for directional stability. Finally, these objective parameters are successfully validated through two handling tests, lane change and severe lane change. The correlation results show that there exists a good correlation between subjective assessment and the proposed objective parameters.

**Key words** : Vehicle/Tire(차량/타이어), Subjective assessment(주관적 평가), Objective test(객관적 시험), Lane change(차선변경), Severe lane change(가혹한 차선변경), Yaw stability(요안정성), Rear axle stability(후륜 안정성)

### Nomenclature

$a_{yd}$	: lateral acceleration at driver seat, $m/s^2$	$V_d$	: vehicle speed at driver seat, m/s
$C_{xy}$	: covariance between $x$ and $y$ variable	$V_{dx}$	: longitudinal component of vehicle speed at driver seat, m/s
$P_i$	: $i^{th}$ peak point	$V_{dy}$	: lateral component of vehicle speed at driver seat, m/s
$P_{os}$	: overshoot value	$W_f$	: front axle load, N
$R_d$	: turning radius at driver seat, m	$W_r$	: rear axle load, N
$R_{xy}$	: correlation coefficient between $x$ and $y$ variable	$t_s, t'_s$	: settling time, sec
		$t_{os}$	: overshoot time, sec
		$t_d, t'_d$	: damping-out time, sec
		$\beta_r$	: rear axle slip angle, rad

\*To whom correspondence should be addressed.  
jskim@hankooktire.com

- $\beta_d$  : sideslip angle at driver seat, rad
- $\dot{\beta}_d$  : sideslip angle time rate at driver seat, rad/s
- $\delta_{sw}$  : steering wheel angle, deg
- $\kappa_d$  : turning curvature at driver seat, m
- $\dot{\rho}$  : roll velocity, rad/s
- $\omega_d$  : turning velocity at driver seat, rad/s
- $\dot{\psi}$  : yaw velocity, rad/s

**Subscripts**

- $d$  : driver position
- $i$  : peak point index
- $f, r$  : front, rear
- $x, y$  : longitudinal, lateral component

**1. 서론**

차량과 타이어의 성능을 평가하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 운전자가 직접 차량을 운전하여 성능을 결정하는 주관적 평가(subjective assessment) 방법이며, 다른 하나는 실차 계측이나 ADAMS 모의시험에서 얻은 데이터로 차량 성능을 결정하는 객관적 평가(objective assessment) 방법이다. 주관적 평가 방법은 운전자의 감각에 의존하는 부분이 많기 때문에 차량 성능을 정량적으로 표현하기 어려우며, 시간과 비용이 많이 들어가는 단점이 있다. 하지만 실제 차량과 타이어 설계에 있어서 최종 성능 평가는 대부분 주관적 평가에 의해서 이루어지고 있기 때문에 현재까지도 주관적 평가는 매우 중요하며 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이다.<sup>1,4)</sup> 특히 조종안정성(handling)과 승차감(ride) 평가에서는 많은 부분이 이와 같은 주관적 평가 방법에 의존하고 있다.

객관적 평가 방법이 갖고 있는 장점은 차량 성능을 정량적으로 수치화하여 나타낼 수 있는 것이다. 하지만 객관적 평가 방법이 실제 차량과 타이어 설계에 효율적으로 적용되기 위해서는 주관적 평가 결과를 잘 나타내 줄 수 있는 객관적 성능 인자를 추출하는 것이 필요하다. 지금까지 많은 사람들이 이와 같은 연구를 수행해 왔으나 대부분 정상상태(steady-state)에서의 분석방법을 제시하였다. 또한

분석에 사용된 차량 모델은 복잡한 차량을 단순화시킨 자전거 모델(bicycle model)에 기초를 두고 있다.<sup>5,7)</sup> 따라서 기존의 방법들은 비선형성이 강한 차량 시스템을 표현하기에는 부족한 점이 있고 특히 차선변경(lane change)과 같은 과도상태(transient state) 특성이 강한 차량 거동을 충분히 나타내기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 실차계측을 이용하여 조종안정성 분야에서 매우 중요한 항목 중에 하나인 방향안정성(directional stability)에 대한 객관적인 분석법을 제시하였다. 우선 방향안정성을 요안정성(yaw stability), 후륜안정성(rear axle stability) 그리고 롤안정성(roll stability)으로 분류하였다. 이와 같은 성능 항목들은 차량 운동 관점에서 요(yaw), 횡(lateral), 롤(roll)의 3 방향 운동에 해당한다. 다음으로 평가자의 주관적 평가 방법을 자세히 분석하여 주관적 평가와 관련된 차량 거동 인자들을 선정하였다.<sup>8-11)</sup> 이와 같은 차량 거동 인자들은 주관적 평가에서 평가자가 주요하게 고려하는 지각 인자(perceptual parameter)들이다. 실제 주관적 평가가 진행되는 상태에서 차량 거동 인자를 추출하기 위하여 주관적 평가와 실차 계측을 동시에 수행하는 방법을 이용하였다.

마지막으로 분석법의 타당성을 검증하기 위해서 차선 변경과 가혹한 차선변경(severe lane change)에 대한 실차 시험을 수행하였다. 운전자의 주관적 평가와 제시된 객관적 성능 인자간의 상관성 결과로부터 본 연구의 효율성과 타당성을 검증하였다.

**2. 객관적 성능 인자**

차량의 방향안정성(요, 후륜, 롤) 평가에서 평가자가 중요하게 고려하는 차량 거동 인자들로부터 객관적 성능 인자를 추출하였다.

**2.1 차량 거동 인자**

Fig. 1은 차량 거동 인자들을 나타낸 것이다. 이들 인자들을 모두 차량의 안정성 평가와 관련된 평가자의 지각 인자들이다.

운전자의 지각을 가능한 잘 반영하기 위하여 운전석 위치에서 발생하는 선회곡률(turning curvature), 선회속도(turning velocity), 요 속도(yaw rate),

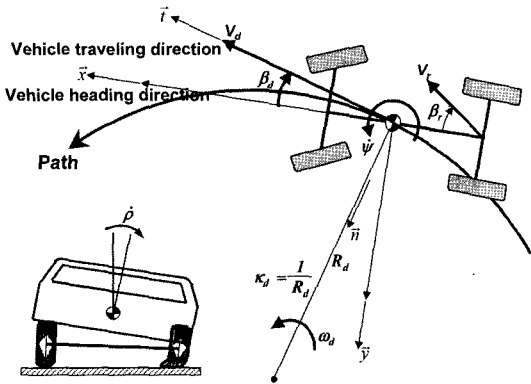


Fig. 1 차량 거동 인자

롤 속도(roll rate), 횡 미끄럼각(sideslip angle), 횡 미끄럼각 변화율(sideslip angle rate) 등의 차량 거동 인자를 고려하였다. 또한 후륜 안정성과 관련하여 차량 후륜에서의 횡 미끄럼각(rear sideslip angle)을 인자로 고려하였다.

운전자 위치의 선회곡률( $\kappa_d$ )은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 차량의 선회 궤적(path)에 대한 정보를 갖고 있다. 즉, 선회곡률이 작은 것은 차량이 큰 선회반경을 갖고 선회하는 것을 의미한다. 이와 같은 특성 때문에 선회곡률을 차량의 안정성과 관련된 부족조향(understeer) 현상과 관련지어 분석할 수 있다.<sup>1)</sup>

운전자 위치의 선회속도( $\omega_d$ )는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 선회 중심점에 대한 차량의 회전 속도로서 선회 빠르기와 안정성에 대한 정보를 갖고 있다.

위와 같은 특성을 갖고 있는 선회곡률과 선회속도는 Fig. 1의  $n-t$  좌표계 성분으로 나타낸 운전자 위치의 가속도 벡터(vector)를 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 여기서 가속도 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{a}_d = \dot{V}_d \vec{t} + \kappa_d V_d^2 \vec{n} \quad (1)$$

식 (1)의  $\vec{a}_d$ 는 다음과 같이  $x-y$  좌표계 성분으로 변환하여 나타낼 수 있다.

$$\vec{a}_d = \left( -\kappa_d V_d^2 \sin\beta_d + \dot{V}_d \cos\beta_d \right) \vec{x} + \left( \kappa_d V_d^2 \cos\beta_d + \dot{V}_d \sin\beta_d \right) \vec{y} \quad (2)$$

식 (2)의  $y$ -방향 가속도 성분을  $a_{dy}$ 로 놓으면  $\kappa_d$ 는 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\kappa_d = \frac{a_{dy} - \dot{V}_d \sin\beta_d}{V_d^2 \cos\beta_d} \quad (3)$$

또한  $\omega_d$ 는 다음과 같은 관계를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$\omega_d = \kappa_d V_d \quad (4)$$

식 (3)에서  $a_{dy}$ ,  $V_d$ ,  $\beta_d$ 는 가속도와 속도 센서를 차량에 장착하여 직접 얻을 수 있다.

Fig. 1에 나타낸 운전자 위치에서 횡 미끄럼각( $\beta_d$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_d \equiv \tan^{-1} \left( \frac{V_{dy}}{V_{dx}} \right) \quad (5)$$

여기서  $V_{dx}$ 와  $V_{dy}$ 는 각각 운전자 위치에서 차량의 전진(longitudinal)과 횡(lateral) 방향 속도 성분이다. 이와 같이 정의된  $\beta_d$ 는 차량이 선회 운동할 때 차량의 자세(vehicle attitude)와 횡 미끄럼의 크기에 대한 정보를 주는 중요한 인자이다.

운전자 위치에서 횡 미끄럼각의 변화율( $\dot{\beta}_d$ )은 시간에 따른  $\beta_d$ 의 변화율로 차량의 자세 변화율을 나타낸다.  $\dot{\beta}_d$ 은 식 (5)를 직접 수치 미분하여 얻을 수 있지만 다음과 같은 운동학적(kinematic) 관계를 이용하면 보다 간편하게 구할 수 있다.

우선 Fig. 1에서  $x-y$  좌표계에 대한 운전자 위치에서 속도 벡터는 다음과 같이 된다.

$$\vec{V}_d = V_d \cos\beta_d \vec{x} + V_d \sin\beta_d \vec{y} \quad (6)$$

식 (6)을 미분하여 정리하면  $\vec{a}_d$ 는 다음과 같이 된다.

$$\vec{a}_d = \left[ \dot{V}_d \cos\beta_d - V_d (\dot{\psi} + \dot{\beta}_d) \sin\beta_d \right] \vec{x} + \left[ \dot{V}_d \sin\beta_d + V_d (\dot{\psi} + \dot{\beta}_d) \cos\beta_d \right] \vec{y} \quad (7)$$

식 (2)와 식 (7)의  $y$  방향 성분 가속도로부터  $\dot{\beta}_d$ 가 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\dot{\beta}_d = \omega_d - \dot{\psi} \quad (8)$$

여기서  $\dot{\psi}$ 은 요속도(yaw rate)이다.

Fig. 1의 후륜 횡 미끄럼각( $\beta_r$ )은 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta_r = \tan^{-1} \left( \frac{V_{ry}}{V_{rx}} \right) \quad (9)$$

여기서,  $V_{rx}$ 와  $V_{ry}$ 는 각각 차량 후륜에서 전진과 횡 방향 속도 성분으로 2축 속도 센서를 차량 후륜에 장착하여 얻을 수 있다. 이와 같은  $\beta_r$ 을 이용하여 차량 후륜부의 횡 미끄럼에 대한 정보를 얻을 수 있다.

요 속도( $\dot{\psi}$ )와 롤 속도( $\dot{\rho}$ ) 인자는 차량의 요와 롤 운동에 대한 정보를 얻기 위한 차량 거동 인자로 선정하였다. 이들 인자들은 회전 각속도(rate gyro) 센서를 차량에 장착하여 얻을 수 있다.

### 2.2 객관적 성능 인자

Fig. 1의 차량 거동 인자들은 과도 운동 특성이 강한 차선변경이나 가속한 차선변경 시험에서는 Fig. 2와 같은 진동 응답을 보인다. 여기서 진동 응답의 크기와 관련하여 다음과 같은 피크(peak) 값들을 객관적 성능 인자로 선정하였다.

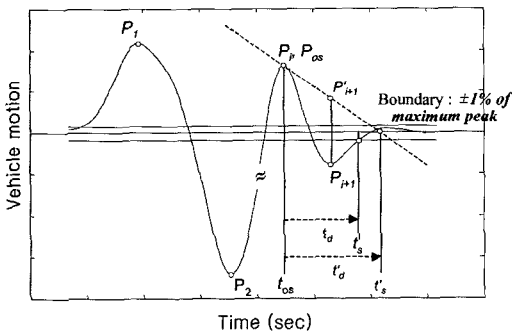


Fig. 2 차량 거동에 대한 객관적 성능 인자

$$P_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

이와 같은 피크 값들은 평가자가 느끼는 차량 거동의 크기와 관련지을 수 있다. 즉, 거동 인자들의  $P_i$ 가 클수록 평가자는 차량 거동이 불안하여 안정성이 부족한 것으로 평가할 것이다.

다음으로 차량 거동 응답의 감쇄시간,  $t_d$ (damp-out time)을 객관적 성능 인자로 선정하였다. 이를 위해 선형 감쇄 기울기를 이용한 감쇄시간을 다음과 같이 정의하였다.

$$t'_d = t'_s - t_{os} = - \frac{P_{os}}{A} \quad (11)$$

여기서  $P_{os}$ 는 오버슈트로 선정된 피크 값이며,  $t_{os}$ 는  $P_{os}$ 에서 시간이며,  $t'_s$ 는  $P_{os}$  바로 다음 피크 값( $P'_{i+1}$ )의 부호를 역으로 한  $P'_{i+1}$ 과 연결하여 만든 직선이 시간 축과 만나는 지점에서의 시간이다.  $A$ 는  $P_{os}$ 와  $P'_{i+1}$ 에 의해서 결정되는 기울기로써 이 값이 클수록  $t'_s$ 는 감소하여 감쇄가 빠르게 된다. 따라서  $t'_d$ 가 작을수록 차량 거동의 수속성은 빠르기 때문에 안정성 유리하게 될 것이다.

차량 거동 응답의 수속성을 나타내기 위한 또 다른 객관적 성능 인자로 다음과 같은 감쇄시간  $t_d$ 를 사용하였다.

$$t_d = t_s - t_{os} \quad (12)$$

여기서  $t_s$ 는 진동 응답이 최대 피크 값의  $\pm 1\%$ 에 도달하는데 걸리는 정착시간(settling time)이다.

감쇄시간  $t_d$ 는 어느 정도 큰 오버슈트 값을 이용하여 감쇄시간을 정의한 것이며,  $t_d$ 는 작은 오버슈트 까지 고려한 감쇄시간이다. 평가자마다 차량 거동의 수속성을 평가하는 방법이 다르기 때문에 두 가지 감쇄시간을 모두 성능 인자로 고려하였다.

### 3. 실차 계측 시험

앞에서 정의된 차량 거동 인자( $\kappa_d, \omega_d, \dot{\psi}, \dot{\rho}, \beta_d, \dot{\beta}_d, \beta_r$ ) 들은 얻기 위한 실차계측 시험을 수행하였다.

#### 3.1 계측 시스템

Fig. 3은 실차 계측 시스템을 나타낸 것이다.  $\beta_r$ 을 측정하기 위하여 차량 후륜에 2축 속도 센서를 장착하였다. 또한 운전자 위치에서 차량 거동을 측정하기 위하여 운전석 위치에 2축 가속도(종 방향, 횡 방향)와 2축 회전 각속도(요, 롤) 센서를 장착하였다. 또한 평가자의 조타 입력각을 측정하기 위하여 조타력 센서를 장착하였다. 사용된 조타력 센서는 직접식으로 차량에 장착된 핸들을 제거하고 장착하는

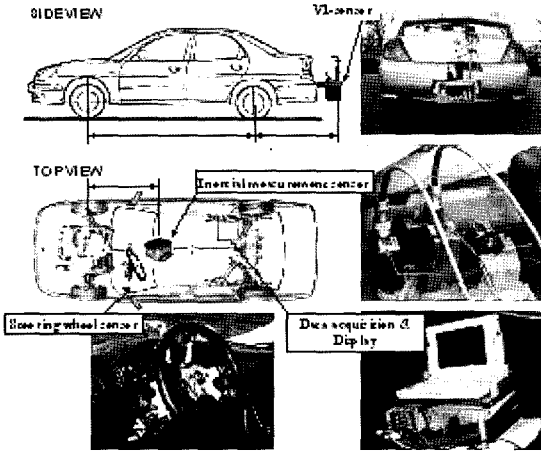


Fig. 3 실차 계측 시스템

방식이다. 센서에서 출력되는 모든 데이터는 100 Hz로 샘플링 (sampling)하였다.

### 3.2 실차 시험

차선변경과 가속한 차선 변경 시험에 대해서 주관적 평가와 실차 계측을 동시에 수행하였다. 차선 변경 시험은 차량 속도 120 kph 정속 조건에서 수행하였으며, 가속한 차선 변경 시험은 80kph에서 가속 페달은 오프(throttle-off) 시키는 방법을 이용하였다.

Table 1은 본 시험에 사용된 차량과 타이어의 시험 조건을 나타낸 것이다. 시험 차량인 Vehicle 1은 전륜 구동 차량으로 전/후륜의 축 하중 배분이 60:40 정도이다. Vehicle 1의 2인 승차 조건 ( $W_f = 9123N$ ,  $W_r = 5680N$ )에서 타이어의 공기압을 인위적으로 변경시키는 시험을 수행하였다. Vehicle 1의 타이어 규정 공기압은 전륜과 후륜 모두 30psi이며, 여기서 인위적으로 부족조향 특성을 발생시키기 위해서 후륜 공기압을 30psi로 고정하고 전륜 공기압을 15psi 까지 감소시켰다. 마찬가지로 인위적으로 과대조향 (oversteer)을 발생시키기 위해서 전륜 공기압을 30psi로 고정시키고 후륜 공기압을 15psi 까지 감소시켰다.

Table 2는 Table 1에 대한 주관적 평가 결과를 나타낸 것이다. 여기서 평가 점수는 Table 3과 같이 10점 만점을 기준으로 평가자가 느끼는 차량 성능의 정도가 "Very poor"이면 2점, "Poor"-4점, "Fair"-6점, "Good"-8점, "Excellent"-10점으로 정하였다. 또한

Table 1 차량과 타이어의 시험조건

Test car	Tire size	Test conditions			Test ID	
		Load	I.P.(psi)			Rim
			Front	Rear		
Vehicle 1 (FF-Car)	205/55R16V	Curb+ 2 persons	15	30	6.5J	T1
			21	30	6.5J	T2
			30	30	6.5J	T3
			30	20	6.5J	T4
			30	15	6.5J	T5

Table 2 주관적 평가 결과

Test ID	Subjective rating		
	Yaw stability	Rear axle stability	Roll stability
T1	9.75	9.75	7.50
T2	6.50	7.75	5.13
T3	7.00	7.00	7.00
T4	3.75	4.25	4.60
T5	3.60	4.50	5.00

Table 3 주관적 평가 점수 기준

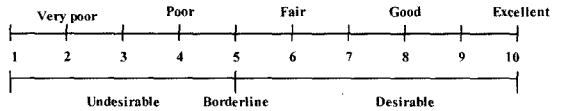


Table 2의 주관적 점수는 평가자가 차선변경과 가속한 차선 변경 시험을 모두 수행한 후 종합적으로 느낀 것을 Table 3의 기준에 의해 기록한 것이다.

Table 2의 평가 결과는 대체적으로 전륜 공기압이 작을수록 안정성이 좋은 것으로 평가 되었다. 이와 같은 원인은 일반적으로 전륜 공기압이 작아질수록 차량의 부족조향 특성이 증가하여 안정성이 향상되기 때문이다.

### 4. 상관성 분석

본 연구에서 제시한 객관적 성능 인자들의 효용성을 검증하기 위하여 주관적 평가 점수 간의 상관성을 분석하였다.

Fig. 4는 상관성 분석 절차를 나타낸 것이다. 분석을 위한 차선 변경과 가속한 차선 변경 시험은 4회 이상 반복 수행하였다. 반복 수행된 시험 데이터로부터 Fig. 2의 객관적 성능 인자들을 구하고 이들 값을 통계 처리하여 주관적 평가 점수 간의 상관성 분석을 수행하게 된다.

요 안정성은  $\kappa_{d_b}$ ,  $\omega_{d_b}$ ,  $\psi$  응답, 후륜 안정성은  $\beta_{d_b}$ ,  $\beta_{d_r}$ ,  $\beta_r$  응답, 롤 안정성은  $\dot{\rho}$  응답에 대한 Fig. 2의 객

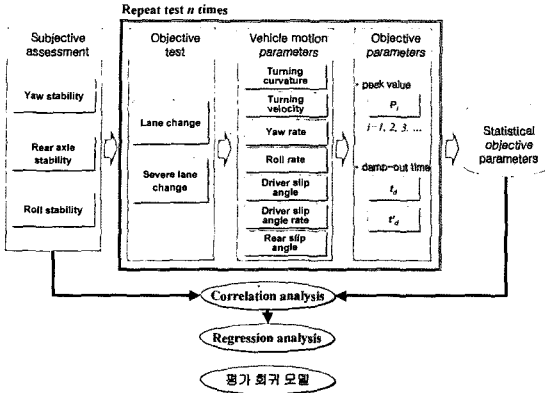


Fig. 4 객관적 성능 인자 추출 및 상관성 분석 절차

관적 성능 인자들을 각각 구하여 상관성 분석을 수행하였다.

상관성 정도를 나타내기 위하여 다음과 같이 정의된 상관계수(correlation coefficient)를 이용하였다.<sup>12)</sup>

$$R_{xy} \equiv \frac{C_{xy}}{\sqrt{C_{xx} C_{yy}}} \quad (13)$$

여기서,  $C_{xy}$ 는 데이터  $x$ 와  $y$  간의 공분산(covariance)이며,  $C_{xx}$ 와  $C_{yy}$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 의 분산(variance)이다. 식 (13)과 같이 정의된 상관계수는 다음과 같은 범위의 값을 갖는다.

$$-1 \leq R_{xy} \leq 1 \quad (14)$$

여기서,  $R_{xy} = 1$  또는  $R_{xy} = -1$ 이면  $x$ 와  $y$  간에는 각각 완전한 양(positive)과 음(negative)의 선형관계가 있음을 나타낸다.  $R_{xy} = 0$ 은  $x$ 와  $y$  간에는 서로 선형관계가 없는 독립임을 나타낸다. 따라서 주관적 평가 점수와 객관적 성능 인자 간에 선형관계가 클수록 상관계수 값이 -1과 1에 근접하게 된다.

#### 4.1 차선변경

Fig. 5는 Table 1의 T3조건에 대한 차선 변경을 6회 반복 수행했을 때 차량 거동 응답을 나타낸 것이다. 시험 결과에서 차량 거동 응답이 어느 정도 산포가 존재하는 것을 알 수 있다. 나머지 T1, T2, T4, T5에 대한 반복 시험에서도 Fig. 5와 유사한 정도의 산포가 존재함을 확인하였다. 따라서 상관성 분석을

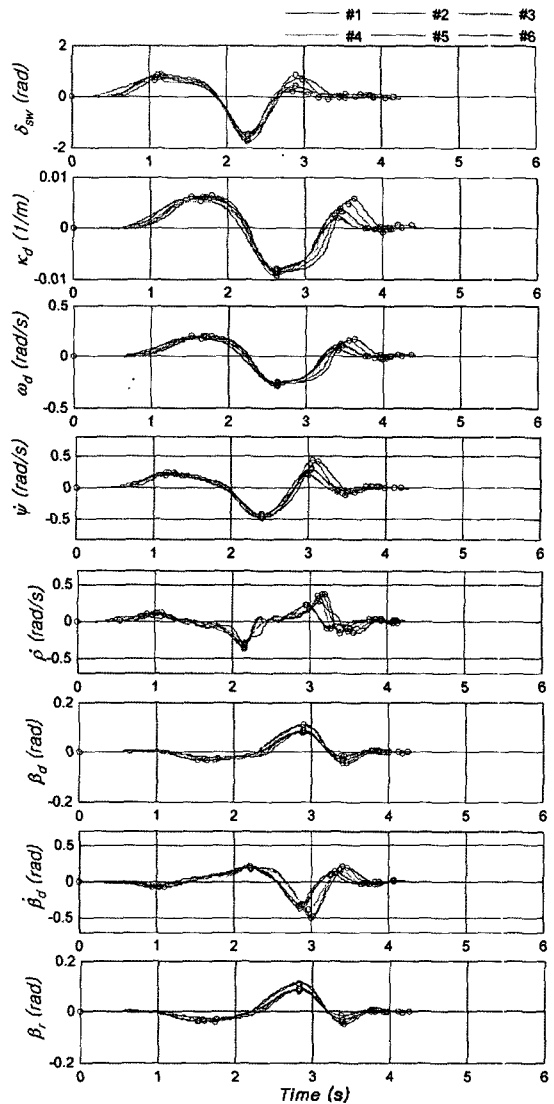


Fig. 5 차선 변경 시험에 대한 차량 거동 응답

위한 객관적 성능 인자를 추출하기 위해서는 통계적 분석이 필요한 것을 알 수 있다.

우선 Fig. 5와 같이 반복 시험된 차량 거동 응답 ( $\kappa_d, \omega_d, \psi, \rho, \beta_d, \beta_d, \beta_r$ )에 대한 Fig. 2의 객관적 성능 인자 ( $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, t_d, t'_d$ )들을 추출하고, 이 값들에 대한 통계 분석을 수행하게 된다.

Fig. 6은 Table 1의 T1~T5 시험에서  $\psi$  응답에 대한 Fig. 2의 객관적 성능 인자 값들의 통계적 특성을 나타낸 것이다. 여기서 상자 그림(box plot)을 이용하

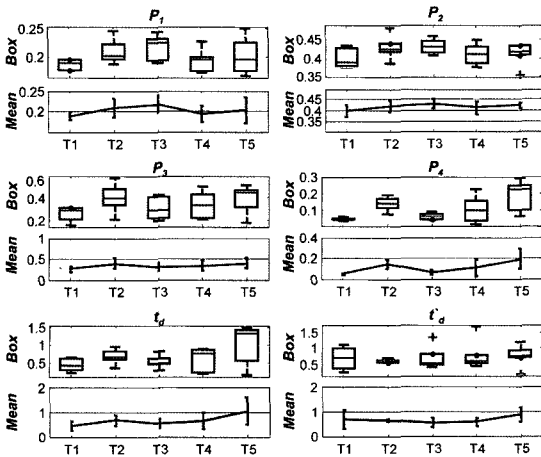


Fig. 6 요 각속도 응답에 대한 객관적 성능 인자의 통계적 특성(차선 변경 시험)

여 객관적 성능 인자 값의 위치, 산포도, 치우침에 대한 정보와 이상치(outlier value)의 존재 유무를 파악하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 T1~T5에 대한 객관적 성능 인자 값의 산포가 존재하며, “+”로 표시된 이상치도 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 2의 T1~T5에 대한 주관적 점수(yaw stability, rear axle stability, roll stability)와 차량 거동 응답의 객관적 성능 인자( $P_1, P_2, P_3, P_4, t_d, t'_d$ )들 간에 상관성 분석을 수행하기 위해서는 Fig. 6과 같이 산포가 존재하는 객관적 성능 인자 값의 통계적 대표치를 선정해야 한다. 이를 위해 Fig. 6과 같은 상자 그림에서 이상치를 제거 시키고 계산한 평균값을 대표치로 정하였다.

객관적 성능 인자  $P_2$ 에 대한 상관성 분석 절차를 예로 들면 우선 Fig. 6의 상자 그림에서  $P_2$ 의 이상치를 제거하고 T1~T5에 해당하는  $P_2$ 의 평균값을 각각 구한다. 이들 평균값들은 Fig. 6의  $P_2$  상자 그림 바로 아래 신뢰구간(유의 수준 0.05)과 함께 나타내었다. 다음으로 T1~T5에 대한  $P_2$ 의 평균값과 Table 2의 주관적 점수 간의 상관성 계수를 식 (13)을 이용하여 구한다.

Table 4는 차선 변경 시험의 차량 거동 응답( $\kappa_d, \omega_d, \dot{\psi}, \beta_d, \dot{\beta}_d, \beta_r, \dot{\rho}$ )에 대한 Fig. 2의 객관적 성능 인자( $P_1, P_2, P_3, P_4, t_d, t'_d$ )들과 주관적 평가 점수간

Table 4 차량 거동의 객관적 성능 인자와 주관적 점수 간의 상관 계수(차선 변경 시험)

	Yaw stability			Rear axle stability			Roll stability
	$\kappa_d$	$\omega_d$	$\dot{\psi}$	$\beta_d$	$\dot{\beta}_d$	$\beta_r$	$\dot{\rho}$
$P_1$	-0.02	-0.04	0.04	0.16	-0.26	0.12	-0.33
$P_2$	-0.45	-0.46	-0.18	-0.26	0.15	-0.24	0.03
$P_3$	-0.89	-0.89	-0.76	-0.63	-0.58	-0.64	-0.95
$P_4$	-0.87	-0.87	-0.83	-0.70	-0.72	-0.69	-0.84
$t_d$	-0.81	-0.82	-0.81	-0.74	-0.73	-0.71	-0.69
$t'_d$	-0.77	-0.76	-0.36	-0.76	-0.71	-0.71	-0.41

의 상관계수 값을 나타낸 것이다. 차선 변경 초반부의 성능 인자인  $P_1, P_2$ 에서는 상관계수가 작은 값을 보이고 있다. 반면 차선 변경 후반부와 관련된 성능 인자  $P_3, P_4, t_d, t'_d$ 에서는 높은 상관성을 보이고 있다. 진동 응답의 수축성과 관련된  $t_d$ 는  $t'_d$ 보다 상관성이 높게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 차량의 안정성은 차선변경 전반부 보다는 후반부에서 주로 평가되는 것을 알 수 있다.

상관계수의 부호는 모두 음을 나타냈는데 이것은 Fig. 2의  $P_3, P_4, t_d, t'_d$  들과 Table 2의 주관적 점수 간에는 반비례 상관성이 있음을 나타낸다. 즉, Fig. 2와 같이 정의된 객관적 성능 인자 값이 클수록 차량 안정성은 불리하게 평가됨을 의미한다.

#### 4.2 가혹한 차선 변경

Fig. 7은 Table 1의 T3조건에서 가혹한 차선 변경을 4회 반복 시험한 차량 거동 응답을 나타낸 것이다. Fig. 5의 차선 변경과 마찬가지로 반복 시험에 대한 편차가 있음을 알 수 있다. 또한 거동 응답의 크기와 피크 값이 커져 차선 변경 보다 차량 거동이 가혹한 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의  $\dot{\psi}$  곡선에서 추출한 객관적 성능 인자 값의 통계적 특성을 나타낸 것이다. 여기에서도 객관적 성능 인자의 산포가 있음을 알 수 있다.

차선 변경에서와 동일한 방법으로 성능 인자의 평균값을 계산하여 Table 2의 주관적 점수와 상관성을 구하였다. Table 5는 객관적 성능 인자와 주관적 점수간의 상관계수를 나타낸 것이다. Table 4의 차선 변경 보다는 대체적으로 높은 상관성을 보이고 있다.

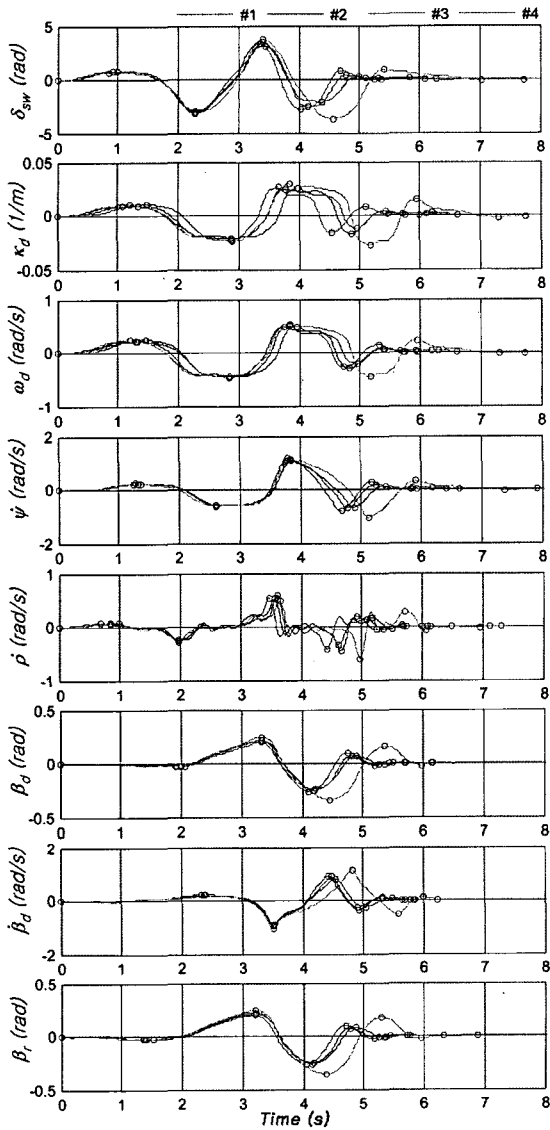


Fig. 7 가혹한 차선 변경 시험에 대한 차량 거동 응답

초반부 특성 인자  $P_1$  보다는  $P_2, P_3, P_4, P_5$ 에서 주로 높은 상관성을 보이고 있다. 진동 응답의 수축성을 나타내는 인자  $t'_d$ 와  $t_d$ 에서는 대체적으로 차선 변경 보다 낮은 상관성을 보이고 있다. 이와 같은 원인은 시험 조건의 차이에서 찾을 수 있다. 즉, 차선 변경은 120 kph 고속에서 수행하였고 가혹한 차선 변경은 80 kph에서 가속 페달은 오프하여 차량의 속도는 점차 감소하게 된다. 일반적으로 차량의 속도가 클수록 요와 횡 방향에 관련된 감쇄계수

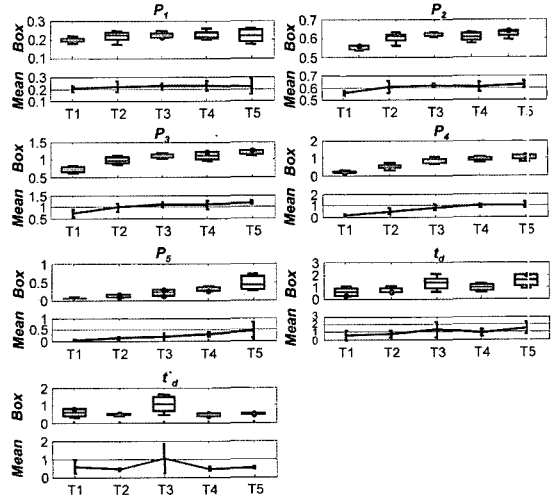


Fig. 8 요 각속도 응답에 대한 객관적 성능 인자의 통계적 특성(가혹한 차선 변경 시험)

Table 5 차량 거동의 객관적 성능 인자와 주관적 점수 간의 상관 계수(가혹한 차선 변경 시험)

	Yaw stability			Rear axle stability			Roll stability
	$\kappa_d$	$\omega_d$	$\psi$	$\beta_d$	$\beta_r$	$\beta_r$	$\dot{\rho}$
$P_1$	-0.97	-0.92	-0.71	0.61	-0.58	-0.72	-0.50
$P_2$	-0.94	-0.94	-0.79	-0.88	-0.87	-0.86	0.25
$P_3$	-0.92	-0.92	-0.88	-0.96	-0.97	-0.95	-0.80
$P_4$	-0.87	-0.87	-0.92	-0.91	-0.91	-0.91	-0.57
$P_5$	-0.76	-0.76	-0.89	-0.93	-0.93	-0.90	-0.57
$t_b$	-0.36	-0.59	-0.61	-0.86	-0.55	-0.76	-0.37
$t'_d$	-0.07	0.72	0.37	0.65	-0.84	0.75	-0.80

(damping coefficient)는 감소하여 수축성과 관련된 차량 거동 특성이 더 잘 나타나게 된다. 따라서 가혹한 차선 변경 시험의 경우 차량 거동은 크지만 속도가 줄어들어 감쇄현상은 오히려 약하게 나타나게 된다.

Table 5의 요 안정성과 후륜 안정성에 대한  $P_2, P_3, P_4, P_5$  인자의 상관성 정도는 Table 4의 차선 변경 보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 평가자가 차량 거동이 급격한 가혹한 차선 변경에서 Table 1의 T1~T5 간의 차이를 상대적으로 확실히 구별하여 Table 2의 점수를 결정하였음을 알 수 있다.

Table 5의 롤 안정성은 Table 4의 차선 변경 보다 낮은 상관성을 보이고 있다. 이와 같은 원인은 평가자의 평가 방법과 차량 거동 특성에서 유추할 수 있다. 즉, 차선 변경은 가혹한 차선 변경 보다 차량 거



동이 단순하기 때문에 차량의 요, 횡 미끄럼, 롤 거동을 구별하기가 용이할 것이다. 반면 가혹한 차선 변경 시험에서는 주로 요와 횡 미끄럼의 거동이 너무 급격하게 발생하여 오히려 롤 거동에 대한 평가가 어렵게 되는 것으로 사료된다.

## 5. 결론

차량의 안정성과 관련하여 요, 후륜, 롤 안정성의 객관적 성능 인자들을 제시하였다. 우선 주관적 평가 방법에 대한 정보로부터 평가자의 지각과 관련된 차량 거동 인자를 선정하였다. 요 안정성과 관련하여 운전자 위치의 선회반경, 선회속도, 요 각속도 인자들을, 후륜 안정성과 관련하여 운전자 위치의 횡 미끄럼 각, 횡 미끄럼 각 변화율, 후륜의 횡 미끄럼 각을, 롤 안정성과 관련하여 롤 각속도 인자를 선정하였다. 이와 같은 차량 거동 인자들의 응답의 크기와 관련된 피크 값과 응답의 수축성과 관련된 감쇄시간을 객관적 성능 인자로 선정하였다.

차선 변경과 가혹한 차선 변경에 대한 실차 계측 시험 데이터에서 객관적 성능 인자를 추출하고 주관적 점수와 상관성 정도를 살펴보았다. 요 안정성, 후륜 안정성, 롤 안정성에서 주로 차선 변경과 가혹한 차선 변경의 후반부에 해당하는 객관적 성능 인자들과 주관적 점수 간에 높은 상관성 결과를 얻었다. 이와 같은 결과로부터 본 연구에서 제시한 객관적 성능 인자가 주관적 평가를 어느 정도 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다.

차량 성능 예측이라는 측면에서 본 연구 결과가 효율적으로 적용되기 위해서는 차선변경과 가혹한 차선변경의 객관적 성능 인자들로 구성된 평가 회귀 모델(assessment regression model)이 구축 되어야 한다. 여기에는 차선변경과 가혹한 차선변경 인자에 적용되는 가중치가 따로 존재하며, 이 값들은 평가자의 고유 성향에 의해서 결정 되어야 할 것이다.

## References

- 1) G. Gim and J. Kim, "Objectification of Subjective Assessment on Transient Steer Characteristic," FISITA2004, No. F2004F071, 2004.
- 2) W. Bergman, "Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling," SAE 730492; 1973.
- 3) P. Fancher, L. Segal, J. Bernard and R. Ervin, "Test Procedures for Studying Vehicle Dynamics in Lane-change Maneuvers," SAE 760351, 1976.
- 4) S. L. Walter, "Quantitative Measurement of Handling Characteristics of Tires and/or Vehicle/Tire Combinations," US Patent, No.4969212, 1990.
- 5) J. Y. Wong, Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, 1978.
- 6) T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," SAE, 1992.
- 7) B. K. Cho and S. J. Song, "An Analysis of Vehicle Handling Characteristics with ADAMS," Transactions of KSAE, Vol.4, No.5, pp.109-118, 1996.
- 8) C. Smith, Tune to Win: The Art and Science of Race Car Development and Tuning, Aero Publishers, Inc., 1978.
- 9) R. Bentley, Speed Secrets: Professional Race Driving Techniques, MBI Publishing Company, 1998.
- 10) C. Lopez, Going Faster: Mastering the Art of Race Driving, Robert Bentley, Inc., 1997.
- 11) F. Fuhn, How to Make Your Car Handle, HP Books, 1981.
- 12) J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, A Wiley-Interscience Publication, pp.48-83, 2000.