

실차 계측을 이용한 차량 조향감 성능 연구

김 정 식*

한국타이어중앙연구소

A Study on Vehicle Steering Feel Using Objective Measurement

Jungsik Kim*

Department of Vehicle Dynamics Research Team, HANKOOK TIRE Co., LTD., R&D Center, 23-1 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-725, Korea

(Received 13 December 2006 / Accepted 19 January 2007)

Abstract : As one of the major handling performances of the vehicle and tire, the steering feel is very important in the high speed where safety and refinement is a major concern for the drivers. This paper presents both subjective and objective techniques for the assessment of the steering feel including the on-center feel and steering response. For this, subjective evaluation method of the steering feel was studied at first and then objective parameters were selected by considering the process by which the steering feel is evaluated subjectively. From statistical analysis of subjective and objective data for the several vehicles and professional drivers, it was found that the subjective assessment of the steering feel could be successfully explained by means of the suggested objective parameters. Also, the main objective parameters related to the subjective assessment of the steering feel could be found.

Key words : Steering feel(조향감), Objective parameter(객관적 인자), Subjective assessment(주관적 평가), Weave steering(위브 조향), Swept steering(스윙 조향), Correlation(상관성)

Nomenclature

- C_{xy} : covariance
- p : p-value for hypothesis test
- R_{xy} : correlation coefficient

1. 서 론

차량이 고속으로 주행하는 상황에서 주행 안정성은 매우 중요하며, 여러 가지 차량 성능 중에서 조향감(steering feel)과 밀접하게 관련되어 있다. 조향감 성능이 좋은 차량의 경우 주행 중에 운전자의 조향 의도를 정확하게 반영하고, 운전자에게 조향 조작에 대한 정보를 명확하게 주어 운전자의 조향 수정

을 작게 한다. 반대로 조향감에 문제가 있는 차량의 경우 차량이 운전자의 조향 입력에 대해 너무 둔감하거나 민감하게 반응하여 운전자로 하여금 운전이 더 많은 노력을 들이게 한다. 이와 같은 현상은 결국 운전자의 집중력을 떨어뜨려 안전사고까지 발생시킬 수 있다.

조향감 성능을 평가하는 방법은 크게 두 가지로 분류 된다. 하나는 평가자가 직접 차량을 운전하여 성능을 결정하는 주관적 평가(subjective assessment) 방법이며, 다른 하나는 실차 계측이나 ADAMS와 같은 모의시험에서 얻은 데이터로 결정하는 객관적 평가(objective assessment) 방법이다. 주관 평가 방법은 운전자의 감각에 의존하는 부분이 많기 때문에 차량 성능을 정량적으로 표현하기 어려우며, 시간

*Corresponding author, E-mail: jskim@hankooktire.com

과 비용이 많이 들어가는 단점이 있다. 하지만 실제 차량과 타이어 설계에 있어서 최종 성능 평가는 현재까지도 대부분 주관 평가에 의해서 이루어지고 있기 때문에 주관 평가는 매우 중요하며, 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이다. 객관적 평가 방법이 갖고 있는 장점은 차량 성능을 정량적으로 수치화 하여 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 인자(objective parameter)를 추출하는 것이 필요하다.

Farrer는 조향감을 크게 조향 거동(steering activity), 조향 토크(steering torque), 차량 응답(vehicle response) 등의 세 가지 특성으로 분류하였다. 이들의 특성을 객관화하기 위하여 조향 토크의 "Friction", "Dead-band", "Stiffness"와 차량 응답의 무응답 구간(response dead-band), 응답게인(response gain), 응답 지연(response time lag) 등의 객관적 성능 인자들을 제시하였다.¹⁾ 또한 ISO(International Standard Organization)를 포함한 많은 연구자들이 조향감 평가와 관련하여 여러 가지 시험 방법과 객관적 성능 인자들을 제시하였다.²⁻⁹⁾ 하지만 이와 같은 기존 연구들에서는 조향감에 대한 주관 평가 방법을 충분히 반영하지 못하였다. 따라서 제시된 객관적 성능 인자들과 주관 평가 간의 관계 규명이 미흡하여 실질적으로 차량과 타이어 개발에 활용하는데 문제점이 있다.

본 연구에서는 조향감에 대한 객관적 성능 인자들과 주관 평가 간의 관계를 명확하게 규명하기 위하여, 운전자의 주관 평가 방법을 자세히 연구하였다. 이로부터 11 가지 질문으로 구성된 주관 평가서를 제작하였으며, 모두 8 명의 전문 평가자가 제작된 주관 평가서를 이용하여 13 개 차량의 조향감 성능을 세부적으로 평가하도록 하였다. 또한 On-center 위브 조향(weave steering), Off-center 위브 조향, 그리고 스윕 조향(swept steering) 시험을 수행하여 조향감과 관련된 41 개의 객관적 성능 인자들을 추출하였다. 아울러 통계적 기법을 이용하여 조향감에 대한 주관 평가와 객관적 성능 인자 간의 상관성 분석을 통하여 차량과 타이어의 조향감은 제안

된 객관적 성능 인자들과 밀접하게 관련되어 있으며, 조향감에 영향을 미치는 주요한 객관적 성능 인자들을 선정할 수 있었다.

2. 주관 평가법

차량과 타이어의 조향감에 대한 주관 평가는 On-center와 Off-center 항목으로 나누어진다.

2.1 On-center

On-center 시험에서 차량은 거의 직진 상태로 움직이며, 차량 속도는 80~180 kph 정도의 고속이다. 조향각은 횡가속도가 0.1 g 정도 발생하도록 작게 입력되며, 입력의 빠르기는 거의 준정상상태(quasi-steady state)인 0.2 Hz 정도이다.

On-center 성능은 조향 토크와 관련된 "On-center effort"와 차량 반응과 관련된 "On-center response" 특성으로 구분되어 전문 평가자에 의해 평가된다. 여기서 평가자에 의해 감지된 차량의 "On-center effort"특성은 Fig. 1과 같은 조향각에 대한 조향 토크 곡선으로 나타낼 수 있으며, y-축에 대하여 대칭인 "U"자 형태를 취하고 있다. 이와 같은 형상에서 전문 평가자는 "Hollow-band", "Friction", "Stiffness" 특성을 감지하여 "On-center effort" 특성을 평가한다. "Hollow-band"는 조향 토크의 변화가 없고 험겁게 느껴지는 영역의 크기로서 Fig. 1(a)에서 평평한 구간에 해당한다. "Friction"은 "Hollow-band" 영역에서 조향 토크의 크기이며, 차량 조향 시스템의 마찰(friction) 특성과 연관되어 있다. "Stiffness"는 조향 휠이 "Hollow-band" 영역을 벗어나면서 조향 토크가 생성(build-up) 되는 특성을 나타낸다. 여기서 평가자들은 조향 토크가 얼마나 급하게 증가하며, 아울러 토크의 증가가 선형 또는 비선형적인가를 평가 한다. 이와 같은 "Stiffness" 특성은 차량 조향 시스템의 컴프라이언스(compliance), 타이어의 코너링 힘(cornering force), 정렬 토크(self-aligning torque) 등과 연관되어 있다.

평가자에 의해 감지된 차량의 "On-center response" 특성은 Fig. 1(b)와 같은 "U" 형태로 나타낼 수 있다. 여기서 평가자는 "Dead-band"와 "On-center gain" 항목을 평가한다. "Dead-band"는 조향각을 입

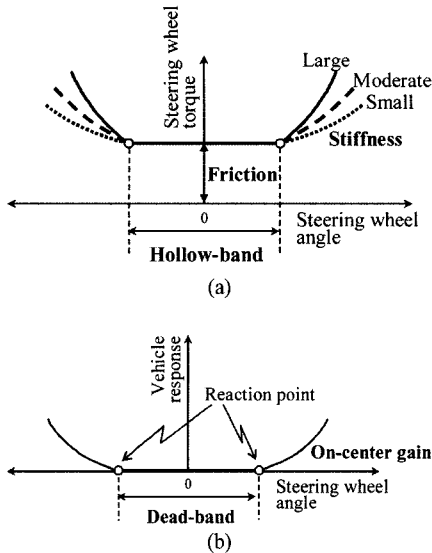


Fig. 1 On-center (a) effort and (b) response characteristics

력해도 차량의 반응이 나타나지 않는 영역의 크기이며, Fig. 1(b)의 평평한 구간에 해당 한다. “On-center gain”은 조향각 입력에 대한 차량 반응의 크기를 나타낸다. 따라서 이 특성이 크면 차량 반응이 민감하게 나타나는 것을 의미한다.

2.2 Off-center

On-center 시험과 마찬가지로 Off-center 평가도 80~180 kph 정도의 고속에서 수행된다. 차량을 직진 주행 상태로 유지한 후 평가자는 시계 또는 반시계 방향으로 조향각을 입력한다. 여기서 조향각은 Fig. 2와 같은 계단 입력(step input) 형태이다. 차량과 타이어 회사에 따라서 시험 방법이 약간 다르지만 일반적으로 조향 입력각의 크기는 20°~40° 정도이며, 입력 속도는 On-center 시험에서 보다 빠르다.

평가자는 Fig. 2와 같은 “Time delay”와 “Off-center gain” 특성을 감지하여 차량의 Off-center 성능을 평가한다. “Time delay”는 조향각 입력에 대한 차량 반응의 시간지연을 나타내며, “Off-center gain”은 조향각 입력에 대한 차량 반응의 크기로 “On-center gain”과 유사한 특성이다.

3. 실차 계측 시험법

조향감에 대한 On-center와 Off-center 현상을 측

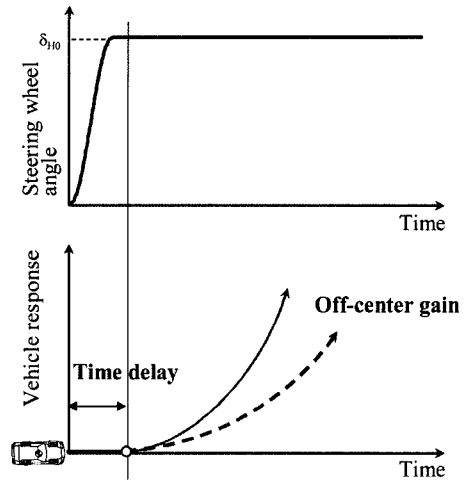


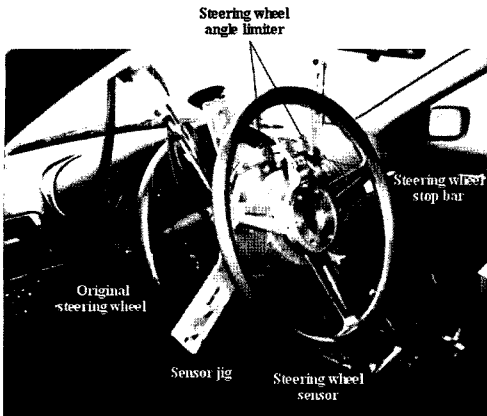
Fig. 2 Off-center(or Steering response) characteristics

정하기 위하여 On-center 위브 조향, Off-center 위브 조향 그리고 스윙 조향 시험을 사용하였다. 모든 시험은 주행 성능 시험장(proving ground)에서 노면이 건조하고, 풍속이 10 kph 미만인 조건에서 수행되었다. 차량 속도는 120 kph로 정하였으며, 시험 중에 속도 변화가 120 kph에서 ±3 % 미만인 경우만 데이터 분석에 사용되었다. 또한 타이어가 일반 주행 조건에 해당하는 온도와 압력의 균형 상태에 도달하도록 시험 전에 10 km 예비 주행을 하였다.

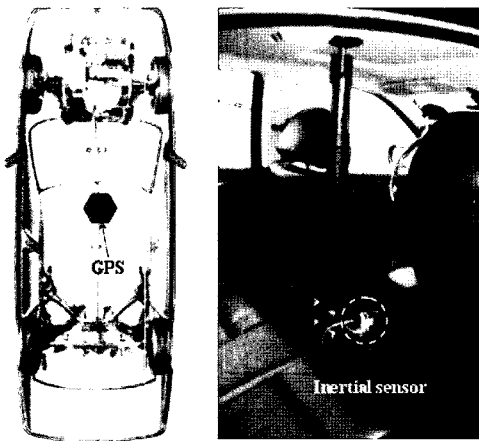
3.1 계측 시스템

On-center와 Off-center에 관련된 신호들을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 여러 가지 센서들을 차량에 장착하였다. 조향각 센서는 조향 휠의 각도, 각속도 그리고 토크를 측정하기 위해 사용되었으며, Fig. 3과 같이 센서 고정부(jig), 센서부, 각도 제한기 등의 세 부분으로 구성되어 있다. 센서 고정부에 의해서 조향 휠 위에 조향각 센서가 장착 된다. 조향각과 토크는 각각 조향각 센서 내부에 삽입된 엔코더(encoder)와 스트레인 게이지(strain gage)에 의해서 측정된다. 또한 각도 제한기에 의해서 시험 중에 조향각 입력의 크기를 정확히 제어할 수 있도록 하였다.

차량의 주행 속도는 GPS(Global Position System) 장비를 이용하여 측정하였다. 또한 차량의 거동을 측정하기 위해서 3 축 가속도(vertical, longitudinal,



(a)



(b)

Fig. 3 Measurement devices for (a) steering wheel angle and torque and (b) vehicle motions

lateral)와 3 축 각속도(roll, pitch, yaw) 센서를 차량 내부에 장착하였다.

3.2 On-center 위브 조향 시험

차량을 120 kph 정속으로 직진 상태를 유지시킨 후 조향각을 정현파 형태로 입력하였다. 시험 중에 노면과 바람과 같은 외란에 의해서 측정 데이터가 영향을 받을 수 있으므로 정현파 조향을 연속적으로 여러 번 반복 입력하였다. 조향 입력각의 크기는 횡가속도가 0.1 g가 되도록 설정하였다. 여기서 0.1 g에 해당되는 조향각을 정확하게 입력하기 위해서 조향각 센서에 있는 각도 제한기를 이용하였다. 또한 조향각 입력 속도를 가능한 0.2 Hz에 맞추기 위해서 반 주기에 해당하는 2.5 sec 마다 신호음을 발생

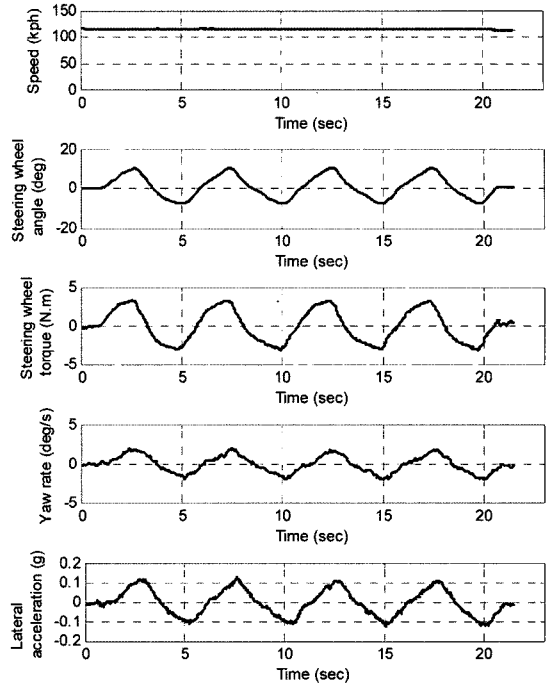


Fig. 4 Objective test results for on-center weave steering

시켜 신호음에 맞추어 조향각을 입력하도록 하였다. 보다 정확하게 조향각을 입력하기 위해서는 조향 로봇(steering robot)을 사용하는 것이 유리 하지만 조향 로봇은 차량에 장착하기 어려우며 비용이 많이 들어가는 단점이 있다.

본 연구에서 제작된 간단한 조향각 입력 장치와 신호음을 이용하여 횡가속도 0.1 g와 조향각 입력 속도 0.2 Hz를 갖는 On-center 위브 조향 시험을 Fig. 4와 같이 성공적으로 수행 할 수 있었다.

3.3 Off-center 위브 조향 시험

이 시험 방법은 앞서 설명한 On-center 위브 조향 시험과 거의 유사하다. 조향각 입력 속도는 0.2 Hz이며, 조향각의 크기는 On-center 위브 시험 보다 큰 0.2 g의 횡가속도가 발생하도록 설정 하였다.

마찬가지로 본 연구에서 제작된 시험 장비를 이용하여 Fig. 5와 같이 Off-center 위브 조향 시험을 수행할 수 있었다.

3.4 스윙 조향 시험

On-center와 Off-center 위브 조향 시험을 통해서

Fig. 1의 “Hollow-band”와 “Dead-band” 특성을 추출하기 어렵기 때문에 스윙 조향 시험을 추가적으로 수행하였다. 우선 0.2 g의 횡가속도를 발생시키는 조향각을 찾고 각도 제한기를 사용하여 조향 입력각의 크기를 고정한다. 다음으로 조향 휠을 미세하게 조작하여 차량을 직진 주행 상태로 유지시킨다. 그 후에 몇 초 동안 조향 휠에서 손을 놓는다. 이와 같은 과정을 통하여 초기 조향 토크를 영으로 초기화 할 수 있다. 다음으로 마찰 클러치(clutch) 원리와 같이 손바닥을 조향 휠 위에 얹고 가능한 부드럽고 천천히 조향각을 입력한다.

이와 같은 방법의 시험을 좌·우 선회 방향 모두 수행 한다. Fig. 6은 0.2 g의 횡가속도를 발생시키는 좌·우 선회에 대한 스윙 조향 시험 결과를 나타낸 것이다. 마찬가지로 간단한 조향 장치를 이용하여 스윙 조향 시험을 성공적으로 수행할 수 있었다.

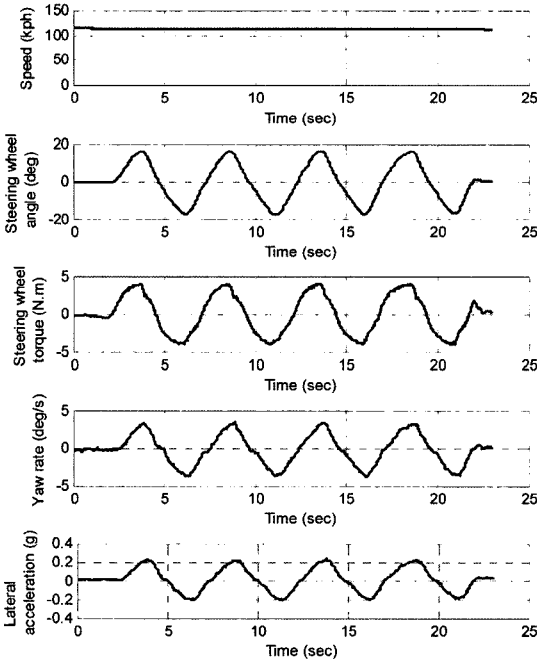


Fig. 5 Objective test results for off-center weave steering

4. 객관적 성능 인자

On-center와 Off-center 위브 조향 그리고 스윙 조향 시험으로부터 Table 1과 같은 조향감과 관련된 41개의 객관적 성능 인자들을 추출하였다. 여기서

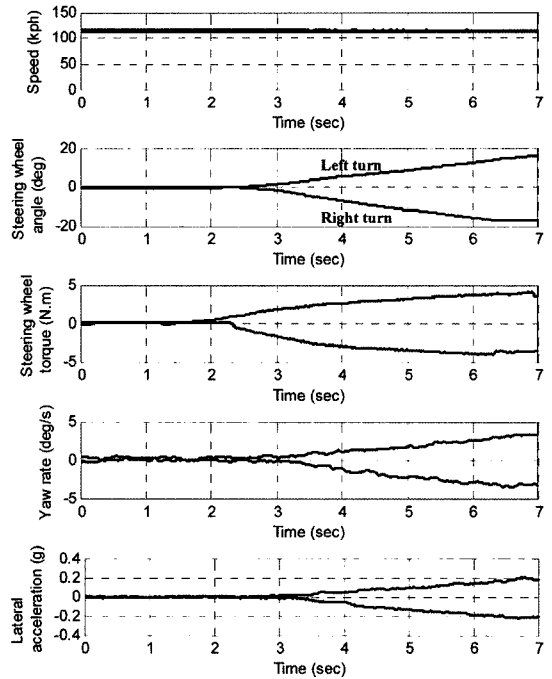


Fig. 6 Objective test results for low-g swept steering

조향각에 대한 조향 토크(steering torque vs. steering wheel angle)와 횡가속도에 대한 조타 토크(steering wheel torque vs. lateral acceleration) 곡선으로부터 조향감의 조타 토크 특성과 관련된 객관적 성능 인자들을 추출하였다. 또한 조향각에 대한 요 속도(yaw velocity vs. steering wheel angle)와 횡가속도 곡선(lateral acceleration vs. steering wheel angle)으로부터 조향감의 차량 응답 특성과 관련된 객관적 성능 인자들을 추출하였다. 모든 객관적 성능 인자들은 Table 1에 표시한 기존 연구 방법을 참고로 추출하였다.^{2,4,5,8)}

5. 실차 시험

조향감에 대한 주관 평가와 객관적 성능 인자 데이터를 얻기 위하여 실차 시험을 수행하였다. 일반적으로 주관 평가에서 객관성을 확보하기 위하여 다양한 연령과 능력 그리고 배경을 갖고 있는 평가자들이 동원 된다. 하지만 조향감의 주관 평가는 일반 운전자가 수행하기 어렵고 어느 정도 숙련된 기술을 갖고 있는 전문 평가자만 가능하다. 따라서 본 연구에서는 차량과 타이어의 조종안정성과 승차감

평가에 대한 4년 이상의 경력을 갖고 있는 8명의 전문 평가자를 선정하였다.

5.1 주관 평가서

조향감에 대한 주관 평가 방법을 기초로 조향감을 모두 11개의 항목으로 세분화시켰으며, 이를 기반으로 Fig. 7과 같은 주관 평가서를 제작하였다. 제작된 주관 평가서는 Fig. 7과 같이 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 관찰 항목(observation item)으로 평가자가 감지한 차량의 실제 현상들에 대한 평가이다. 즉, 평가자는 개인적 취향을 무시하고 차량에서 나타나는 현상 자체의 크기를 평가한다. 예를 들어 Fig. 7에 관찰 항목인 “Hollow-band”는 시험 중에 평가자가 감지한 차량의 “Hollow-band”의 크기가 어느 정도 인가를 평가한다. 두 번째 부분은 평가 항목(evaluation item)으로 일반 소비자의 안전과 차량 개발 개념(concept) 등을 고려한 평가이다. 여기서 평가자의 주관이 많이 개입될 수 있어

Table 1 Objective parameter

Test	Representation	No.	Ref.	Parameter	
On-center	Steering wheel torque vs. steering wheel angle	1	4)	Steering wheel angle at 0 N.m	
		2	4)	Steering wheel torque at 0 deg	
		3	4)	Steering torque gradient around 0 deg	
		4	4)	Steering torque gradient around 0.05 g	
		5	4)	Steering wheel torque at 0.05g	
		6	4)	Steering wheel torque at 0.07g	
		7	8)	Steering work	
weave steering	Steering wheel torque vs. lateral acc.	8	8)	Steering torque gradient around 0 g	
		9	8)	Steering torque gradient around 0.05 g	
	Yaw velocity vs. steering wheel angle	10	4)	Steering wheel angle at 0 deg/s	
		11	4)	Yaw rate gradient around 0 deg	
		12	8)	Yaw rate lag time	
Lateral acc. vs. steering wheel angle	13	4)	Steering wheel angle at 0 g		
	14	4)	Lateral acc. gradient around 0 deg		
	15	2)	Lateral acc. lag time		
Off-center	Steering wheel torque vs. steering wheel angle	16	4)	Steering wheel angle at 0 N.m	
		17	4)	Steering wheel torque at 0 deg	
		18	4)	Steering torque gradient around 0 deg	
		19	4)	Steering torque gradient around 0.1 g	
		20	4)	Steering wheel torque at 0.05 g	
	21	4)	Steering wheel torque at 0.1 g		
	22	8)	Steering work		
	weave steering	Steering wheel torque vs. lateral acc.	23	8)	Steering torque gradient around 0 g
			24	8)	Steering torque gradient around 0.1 g
		Yaw velocity vs. steering wheel angle	25	4)	Steering wheel angle at 0 deg/s
26	4)		Yaw rate gradient around 0 deg		
27	8)	Yaw rate lag time			
Lateral acc. vs. steering wheel angle	Steering wheel angle at peak torque cur.	28	4)	Steering wheel angle at 0 g	
		29	4)	Lateral acc. gradient around 0 deg	
	Steering wheel torque vs. steering wheel angle	30	2)	Lateral acc. lag time	
		31	2)	Steering wheel angle at peak torque cur.	
Low-g swept steering	Steering wheel torque vs. steering wheel angle	32	5)	Steering wheel torque at 0.05 g	
		33	5)	Steering wheel torque at 0.1 g	
		34	5)	Steering torque gradient around 0 deg	
		35	5)	Steering torque gradient around 0.1 g	
		36	2)	Steering wheel angle at 1.0 deg/s	
	Yaw velocity vs. steering wheel angle	37	5)	Yaw rate gradient around 0 deg	
		38	5)	Yaw rate gradient around 0.1 g	
		39	2)	Steering wheel angle at 0.05 g	
	Lateral acc. vs. steering wheel angle	40	5)	Lateral acc. gradient around 0 deg	
		41	5)	Lateral acc. gradient around 0.1 g	

Observation	Time				Lane				
	Slow	Mid	Fast	Stop	Slow	Mid	Fast	Stop	
Scale	Small	Med	Large	Very Large	Small	Med	Large	Very Large	
On-center effort									
Hollow-band	observation								
Friction	observation								
Stiffness	observation								
On-center effort evaluation									
On-center response									
Dead-band	observation								
On-center gain	observation								
On-center response evaluation									
On-center feel evaluation									
Steering response									
Time delay	Observation								
Off-center gain	Observation								
Steering response evaluation									

Fig. 7 Problem sheet for the subjective evaluation of steering feel

평가자 간의 평가 결과가 상이할 수도 있다.

Fig. 1(a)와 같은 On-center의 조타 토크의 특성 평가를 위하여 “Hollow-band”, “Friction”, “Stiffness”를 관찰 항목으로 사용하였고, “On-center effort”를 평가 항목으로 정하여 전반적인 조타 토크의 성능을 평가하도록 하였다. Fig. 1(b)와 같은 On-center의 응답 특성 평가를 위하여 “Dead-band”와 “On-center gain”을 관찰 항목으로 사용하였고, “On-center response”를 평가 항목으로 정하여 차량 응답 성능을 평가하도록 하였다. 아울러 “On-center feel”를 평가 항목에 추가하여 On-center에 대한 종합적인 성능을 평가하도록 하였다.

Fig. 2와 같은 Off-center의 특성 평가를 위하여 “Time delay”, “Off-center gain”을 관찰 항목으로 사용하였고, “Steering response”를 평가 항목으로 정하여 Off-center에 대한 종합적인 성능을 평가하도록 하였다.

평가자가 평가 점수를 표시(marking)하는 방법에서 다음과 같이 기준을 따르도록 하였다. 우선 평가자가 감지한 관찰 항목의 크기를 Fig. 7과 같이 “Small”과 “Large”로 구분하도록 하였다. 다음으로 “Small”과 “Large”의 정도로 “Extremely”, “Very”, “Quite”, “Moderately”, “Slightly”의 다섯 단계로 세분하여 1~10 사이의 점수를 표시하도록 하였다. 평가 항목에 대한 점수를 표시하기 위해서는 우선 “Good”과 “Poor”로 구분하도록 하고, 마찬가지로 이들의 정도는 “Extremely”, “Very”, “Quite”, “Moderately”, “Slightly”로 세분화하여 1~10사이의 점수를

결정하도록 하였다.

5.2 시험 차량과 타이어

Table 2와 같이 모두 13개 차량에 대한 주관 평가 시험과 On-center 워브 조향, Off-center 워브 조향, 그리고 스윙 조향 시험을 수행하였다. 시험에는 고급, SUV(Sport Utility Vehicle), 중형, 소형 등의 다양한 종류의 승용 차량을 포함시켰다.

Table 2 Test vehicles and tires

Test set	Vehicle	Weight (kg)			Wheel-base (m)	Tire	Rim	Inflation pressure of tire (kg/cm ²)	
		Front	Rear	Total				Front	Rear
1	Vehicle #1	993	944	1937	2.94	225/55R17V	7.51	2.25	2.25
2	Vehicle #2	1326	912	2238	2.84	235/55R17H	7.01	2.10	2.10
3	Vehicle #3	1116	740	1856	2.62	P235/60R16T	6.51	2.10	2.10
4	Vehicle #4	1095	776	1871	2.64	P235/60R16T	6.51	2.10	2.10
5	Vehicle #5	1056	710	1766	2.75	P205/65R16H	6.51	2.00	2.20
6	Vehicle #6	771	801	1572	2.70	205/55R16V	6.51	2.46	2.95
7	Vehicle #7	881	754	1636	2.70	205/55R16V	6.51	2.10	2.10
8	Vehicle #8	799	511	1310	2.50	P185/65R14T	5.51	2.10	2.10
9	Vehicle #9	616	401	1017	2.35	155/65R13T	4.51	2.10	2.10
10	Vehicle #10	950	631	1581	2.73	P215/60R16H	6.51	2.10	2.10
11	Vehicle #11	1205	1054	2259	3.00	225/65R16T	6.51	2.50	2.50
12	Vehicle #12	1039	703	1742	2.75	205/55R16V	6.51	2.40	2.20
13	Vehicle #13	676	445	1120	2.35	175/60R14H	5.01	2.10	2.10

6. 상관성 분석

상관성 분석은 크게 두 가지 방향으로 수행되었다. 첫 번째는 객관적 성능 인자들 간의 상관성 분석으로, 이들 결과를 통하여 서로 상관성 있는 인자는 하나로 대체하여 조향감과 관련된 많은 객관적 성능 인자들을 줄일 수 있다. 이와 같은 상관성 분석을 위하여 Table 2의 13개 차량에 대한 실차 계측 시험으로부터 추출된 객관적 성능 인자 데이터를 이용하였다. 두 번째는 주관 평가 항목과 객관적 성능 인자들 간의 상관성 분석으로, 이들 결과를 통하여 주관 평가를 잘 반영하는 객관적 성능 인자를 선정할 수 있다. 이와 같은 상관성 분석을 위하여 13개 차량에 대한 객관적 성능 인자 데이터와 평가자 8명의 평균 주관 점수 데이터를 이용하였다.

상관성 분석을 위하여 다음과 같이 정의된 상관 계수(correlation coefficient)를 이용하였다.¹⁰⁾

$$R_{xy} \equiv \frac{C_{xy}}{\sqrt{C_{xx} C_{yy}}} \quad (1)$$

여기서 C_{xy} 는 데이터 x와 y 간의 공분산(covariance)이며, C_{xx} 와 C_{yy} 는 각각 x와 y의 분산(variance)이다. 식 (1)과 같이 정의된 상관계수는 다

음과 같은 범위의 값을 갖는다.

$$-1 \leq R_{xy} \leq 1 \quad (2)$$

여기서 $R_{xy} = 1$ 또는 $R_{xy} = -1$ 이면 x와 y 간에는 각각 완전한 양(positive)과 음(negative)의 선형관계가 있음을 나타낸다. $R_{xy} = 0$ 은 x와 y 간에는 서로 선형관계가 없는 독립임을 나타낸다.

상관성 분석을 위한 또 다른 방법으로 “두 인자 간에는 선형 상관성이 없다”라는 가설에 대한 검증을 수행하였다.¹¹⁾ 여기서 p-value를 사용하여 위의 가설을 기각하는 판단 기준으로 사용하였다. 즉, p-value가 0.05 보다 작으면 위의 가설을 95% 신뢰도를 갖고 기각하여 상관성이 있다는 것을 의미한다.

6.1 On-center 워브 조향 인자

On-center 워브 조향 시험으로부터 추출한 Table 1의 15개의 객관적 성능 인자들 간의 상관성 분석을 수행하였다. Table 3은 인자들 간의 상관 결과를 나타낸 것으로 상관계수는 위쪽 삼각 행렬로, p-value는 아래쪽 삼각 행렬로 나타내었다. 여기서 객관적 성능 인자들을 Table 1에 표시된 번호로 표시하였다. 즉, Table 1에서 No.1에 해당하는 “Steering wheel angle at 0 N.m”와 No.2에 해당하는 “Steering wheel torque at 0 deg” 간의 상관 계수는 Table 3의 가로 1과 세로 2에 해당하는 값(0.87)이며, p-value는 가로 2와 세로 1에 해당하는 값(0.00)이다. Table 3의 상관계수와 p-value로부터 다음과 같은 상관성 결과를 얻을 수 있었다.

(a) 조향각에 대한 조타 토크 곡선으로부터 추출된 인자(1,2) “Steering wheel angle at 0 N.m”과 “Steering wheel torque at 0 deg” 간의 비례 상관성을

Table 3 Correlation coefficients (upper triangle matrix) and p-values (lower triangle matrix) in objective parameters extracted from on-center weave steering test

	Objective parameter														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.87	-0.41	-0.13	0.66	0.69	0.69	0.60	0.05	0.88	0.32	0.42	0.33	-0.65	-0.04	
2	0.00	0.61	-0.31	0.64	0.77	0.84	0.59	0.04	0.33	0.42	0.42	0.19	-0.34	-0.06	
3	0.17	0.97	0.38	0.36	0.34	-0.05	0.64	-0.06	0.57	0.16	-0.11	-0.40	0.29	-0.11	
4	0.70	0.75	0.55	0.08	0.30	-0.16	-0.22	0.83	-0.06	0.46	-0.32	-0.02	0.34	-0.15	
5	0.05	0.00	0.23	0.79	0.95	0.89	0.60	0.10	0.56	0.44	0.34	0.29	-0.47	0.13	
6	0.10	0.00	0.26	0.50	0.00	0.76	0.37	0.80	0.51	0.35	0.43	0.28	-0.38	0.02	
7	0.00	0.00	0.86	0.60	0.00	0.00	0.37	0.03	0.63	0.63	0.47	0.26	-0.67	0.02	
8	1.00	0.25	0.02	0.40	0.03	0.04	0.21	0.06	0.08	0.49	0.03	0.29	-0.43	-0.36	
9	0.86	0.90	0.84	0.00	0.74	0.17	0.92	0.85	0.08	0.14	-0.20	-0.19	-0.06	-0.22	
10	0.02	0.08	0.22	0.85	0.05	0.07	0.02	0.79	0.78	0.56	0.49	0.29	-0.83	0.23	
11	0.04	0.10	0.59	0.12	0.13	0.27	0.02	0.09	0.64	0.05	0.26	-0.29	0.94	0.13	
12	0.16	0.15	0.72	0.29	0.04	0.15	0.11	0.92	0.35	0.00	0.39	0.74	-0.32	0.68	
13	0.27	0.67	0.17	0.95	0.35	0.49	0.39	0.34	0.74	0.00	0.34	0.00	-0.33	0.70	
14	0.02	0.06	0.35	0.26	0.11	0.21	0.01	0.13	0.84	0.01	0.00	0.28	0.27	0.21	
15	0.90	0.85	0.73	0.61	0.66	0.94	0.95	0.23	0.29	0.45	0.67	0.01	0.01	0.49	

나타내어 조향각에 대한 조향 토크 이력(hysteresis)의 폭과 너비가 비례함을 나타낸다.

(b) 조향각에 대한 요 속도(10,11,12)와 조향각에 대한 횡가속도(13,14,15) 곡선으로부터 추출된 인자들 간에 상관성이 나타났다. 이와 같은 결과는 On-center 위브 시험에서 추출된 요 속도와 횡가속도는 유사함을 의미한다.

(c) Steering work(7)은 조향각에 대한 조타 토크 곡선에서 추출된 인자(1,2,5,6) “Steering wheel angle at 0 N.m”, “Steering wheel torque at 0 deg”, “Steering wheel torque at 0.05 g or 0.07 g”의 크기에 비례하는 상관성을 나타내었다. 이와 같은 결과는 “Steering work”이 On-center 위브 시험에서 발생하는 조타 토크를 조향각에 대해서 적분한 값이기 때문이다.

6.2 Off-center 위브 조향 인자

Off-center 위브 조향 시험으로부터 추출한 Table 1의 객관적 성능 인자들 간의 상관성 분석을 수행하였다. Table 4는 인자들 간의 상관계수와 p-value 값을 나타낸 것이다. 앞의 On-center 위브 시험의 (a), (b), (c)와 유사한 상관성이 나타났으며, 추가적으로 다음과 같은 상관성이 관찰되었다.

“Steering work”(22)은 조향각에 대한 횡가속도와 요 속도 곡선으로부터 추출된 인자(26,29) “Yaw rate gradient around 0 deg”, “Lateral acc. gradient around 0 deg”와 반비례 경향을 나타내었다. 이와 같은 원인은 차량 횡가속도와 요 속도 응답량이 크면 요구 되는 조향각이 작아지기 때문이다.

6.3 스윙 조향 인자

스윙 조향 시험으로부터 추출한 Table 1의 객관적 성능 인자들 간의 상관성 분석을 수행하였다.

Table 5는 인자들 간의 상관 계수와 p-value 값을 나타낸 것이며, 다음과 같은 상관성이 관찰되었다.

(a) 요 속도(36,37,38)와 횡가속도(39,40,41) 곡선으로부터 추출된 인자들 간에는 서로 상관성이 높게 나타났으며, 이와 같은 원인은 스윙 조향 시험이 거의 정상상태 조건에서 수행되어 횡가속도와 요 속도가 유사한 특성을 갖는 것에서 찾을 수 있다.

(b) 차량 응답의 “Dead-band” 크기를 나타내는 인자(36) “Steering wheel angle at 1.0 deg/s”는 차량 응

Table 4 Correlation coefficients (upper triangle matrix) and p-values (lower triangle matrix) in objective parameters extracted from off-center weave steering test

	Objective parameter														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	1.00	0.87	-0.44	0.13	0.55	0.57	0.82	-0.07	0.25	0.67	-0.64	-0.01	0.41	-0.77	-0.39
17	0.00	1.00	-0.03	0.08	0.83	0.81	0.91	0.35	0.26	0.56	-0.60	-0.08	0.14	-0.74	-0.49
18	0.13	0.91	1.00	-0.46	0.27	0.13	-0.05	0.87	-0.36	-0.38	0.07	-0.25	-0.67	0.21	-0.20
19	0.68	0.81	0.12	1.00	0.06	0.30	0.00	-0.26	0.86	-0.05	0.13	-0.29	0.13	0.00	-0.06
20	0.05	0.00	0.37	0.85	1.00	0.96	0.71	0.64	0.26	0.52	-0.48	0.08	0.20	-0.60	-0.30
21	0.04	0.00	0.66	0.32	0.00	1.00	0.73	0.56	0.51	0.48	-0.50	-0.04	0.21	-0.62	-0.33
22	0.00	0.00	0.86	0.99	0.01	0.00	1.00	0.31	0.32	0.44	-0.71	-0.04	0.15	-0.73	-0.40
23	0.82	0.24	0.00	0.40	0.02	0.05	0.30	1.00	-0.04	-0.04	-0.33	-0.26	-0.43	-0.24	-0.39
24	0.41	0.40	0.22	0.00	0.40	0.07	0.28	0.90	1.00	0.04	-0.23	-0.31	0.17	-0.25	-0.14
25	0.01	0.05	0.20	0.86	0.07	0.10	0.13	0.89	0.90	1.00	-0.58	0.37	0.67	-0.79	-0.28
26	0.02	0.03	0.81	0.67	0.10	0.08	0.01	0.28	0.45	0.04	1.00	0.03	-0.27	0.93	0.44
27	0.98	0.81	0.41	0.33	0.81	0.90	0.90	0.40	0.30	0.22	0.93	1.00	0.66	-0.04	0.62
28	0.17	0.65	0.01	0.68	0.52	0.48	0.63	0.14	0.59	0.01	0.36	0.01	1.00	-0.40	0.45
29	0.00	0.00	0.49	0.99	0.03	0.02	0.00	0.43	0.39	0.00	0.00	0.89	0.18	1.00	0.49
30	0.19	0.09	0.51	0.84	0.31	0.27	0.17	0.19	0.64	0.35	0.13	0.02	0.13	0.09	1.00

Table 5 Correlation coefficients (upper triangle matrix) and p-values (lower triangle matrix) in objective parameters extracted from low-g swept steering test

	Objective parameter										
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
31	1.00	0.51	0.55	0.10	-0.17	0.56	-0.52	-0.47	0.57	-0.66	-0.60
32	0.07	1.00	0.92	0.71	-0.10	0.25	-0.31	-0.14	0.39	-0.42	-0.12
33	0.05	0.00	1.00	0.58	0.25	0.19	-0.25	-0.26	0.26	-0.36	-0.25
34	0.74	0.01	0.04	1.00	-0.12	-0.06	-0.07	0.02	0.02	-0.12	0.13
35	0.57	0.73	0.41	0.69	1.00	-0.50	0.48	0.12	-0.59	0.48	0.12
36	0.05	0.40	0.53	0.84	0.08	1.00	-0.92	-0.71	0.96	-0.94	-0.80
37	0.07	0.30	0.41	0.81	0.10	0.00	1.00	0.71	-0.86	0.96	0.74
38	0.10	0.64	0.39	0.96	0.71	0.01	0.01	1.00	-0.66	0.78	0.95
39	0.04	0.19	0.38	0.96	0.03	0.00	0.00	0.01	1.00	-0.93	-0.73
40	0.01	0.16	0.23	0.70	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.81
41	0.03	0.69	0.41	0.67	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

답량을 나타내는 인자(37) “Yaw rate gradient around 0 deg”와 반비례 상관성을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 차량 응답의 “Dead-band”가 크면 응답량이 감소하는 특성을 잘 나타내 주고 있다.

6.4 주관적 평가와 객관적 성능 인자

Table 1의 객관적 성능 인자들과 Fig. 7의 주관 평가 항목 간의 상관성 분석을 수행하였다. Table 6~Table 8은 상관계수와 p-value를 나타낸 것이며, 이로부터 다음과 같은 상관성 결과를 얻을 수 있었다.

(a) 평가자가 감지하는 조향 토크의 “Hollow-band”는 Table 6~Table 7의 “Steering wheel angle 0 N.m”와 Table 8의 “Steering wheel angle at peak torque cur.” 인자들과 낮은 상관성을 나타내었다. 추가적인 상관성 조사 결과 Table 8의 스윙 조향 시험에서 추출된 “Steering wheel angle at 1.0 deg/s” ($R_{xy} = 0.6, p = 0.04$), “Yaw rate gradient around 0 deg” ($R_{xy} = -0.6, p = 0.04$), “Lateral acc. gradient around 0.1 g” ($R_{xy} = -0.6, p = 0.02$)에서 어느 정도 상관성을 나타내었다. 결국 평가자가 감지하는 조향

Table 6 Correlation coefficient and p-value in parenthesis between subjective grade and objective parameter from on-center weave steering test

Subjective items		Objective parameters	
Evaluation	Observation	On-center weave steering	
On-center effort	Hollow-band	Steering wheel angle at 0 N.m	0.0 (0.91)
		Friction	Steering wheel torque at 0 deg Steering work 0.8 (0.00) 0.6 (0.02)
	Stiffness	Steering torque gradient around 0 deg	0.0 (0.87)
		Steering torque gradient around 0.05g	0.6 (0.04)
		Steering wheel torque at 0.05g	0.4 (0.17)
On-center response	Dead-band	Steering wheel torque at 0.07g	0.6 (0.05)
		Steering wheel angle at 0 deg/s	-0.1 (0.82)
	On-center gain	Steering wheel angle at 0 g	0.3 (0.29)
		Yaw rate gradient around 0 deg	0.7 (0.01)
		Lateral acc. gradient around 0 deg	0.7 (0.01)
Steering response	Time delay	Yaw rate lag time	0.1 (0.69)
		Lateral acc. lag time	0.4 (0.13)
	Off-center gain	Yaw rate gradient around 0 deg	0.7 (0.01)
		Lateral acc. gradient around 0 deg	0.6 (0.04)

Table 7 Correlation coefficient and p-value in parenthesis between subjective grade and objective parameter from off-center weave steering test

Subjective items		Objective parameters	
Evaluation	Observation	Off-center weave steering	
On-center effort	Hollow-band	Steering wheel angle at 0 N.m	0.0 (0.94)
		Friction	Steering wheel torque at 0 deg Steering work 0.8 (0.00) 0.6 (0.04)
	Stiffness	Steering torque gradient around 0 deg	-0.1 (0.86)
		Steering torque gradient around 0.1g	0.4 (0.15)
		Steering wheel torque at 0.05g	0.6 (0.04)
On-center response	Dead-band	Steering wheel torque at 0.1g	0.6 (0.03)
		Steering wheel angle at 0 deg/s	-0.2 (0.50)
	On-center gain	Steering wheel angle at 0 g	0.4 (0.21)
		Yaw rate gradient around 0 deg	0.6 (0.02)
		Lateral acc. gradient around 0 deg	0.5 (0.09)
Steering response	Time delay	Yaw rate lag time	0.1 (0.73)
		Lateral acc. lag time	0.5 (0.09)
	Off-center gain	Yaw rate gradient around 0 deg	0.5 (0.06)
		Lateral acc. gradient around 0 deg	0.3 (0.26)

Table 8 Correlation coefficient and p-value in parenthesis between subjective grade and objective parameter from low-g swept steering test

Subjective items		Objective parameters	
Evaluation	Observation	Low-g swept steering	
On-center effort	Hollow-band	Steering wheel angle at peak torque cur.	0.2 (0.42)
		Friction	Steering torque gradient around 0 deg 0.7 (0.00)
	Stiffness	Steering torque gradient around 0.1 g	0.6 (0.04)
		Steering wheel torque at 0.05g	0.4 (0.15)
		Steering wheel torque at 0.1g	0.6 (0.03)
On-center response	Dead-band	Steering wheel angle at 1.0 deg/s	0.3 (0.28)
		Steering wheel torque at 0.05 g	0.2 (0.49)
	On-center gain	Yaw rate gradient around 0 deg	0.8 (0.00)
		Lateral acc. gradient around 0 deg	0.8 (0.00)
		Steering response	Yaw rate gradient around 0.1 g
Steering response	Off-center gain	Lateral acc. gradient around 0.1 g	0.8 (0.00)

토크의 “Hollow-band”는 조향 토크 보다는 차량 응답과 관련이 더 많은 것을 나타내었다.

(b) 평가자가 감지하는 조향 토크의 “Friction”과 “Stiffness”는 조향 토크의 크기인 “Steering wheel torque at 0.05 g”, “Steering wheel torque at 0 deg”와

조향각에 대한 조향 토크의 변화량인 “Steering wheel torque gradient”와 상관성 있는 결과를 나타내고 있다.

(c) 평가자가 감지하는 차량 응답의 “Dead-band”는 제안된 “Steering wheel angle at 1.0 deg/s”와 “Steering wheel angle at 0.05 g” 인자들과 낮은 상관성을 나타내었고, Off-center 위브 조향에서 추출된 “Lateral acc. lag time($R_{xy} = 0.6, p = 0.05$)”에서 어느 정도 상관성을 나타내었다.

(d) 평가자가 감지하는 “On-center gain”과 “Off-center gain”과 관련하여 조향각에 대한 횡가속도와 요 속도 응답량 인자들과 관련 있음을 나타내었다.

평가자가 감지하는 차량 응답의 “Time delay”는 횡가속도와 요 속도의 응답 지연을 나타내는 인자 “Lateral acc. time lag”와 “Yaw rate time lag”와 낮은 상관성을 보이고 있다. 하지만 요 속도 응답량을 나타내는 인자 “Yaw rate gradient around 0 deg”에서 상관성을 찾을 수 있었다($R_{xy} = -0.6, p = 0.04$). 이와 같은 결과는 평가자가 차량 응답의 “Time delay”를 평가하는데 있어 차량 응답량에 더 많은 영향을 받았음을 나타낸다. 실제로 Table 2의 시험에서 차량 간에 “Yaw rate lag time”과 “Lateral acc. lag time”의 차이는 0.06 sec 정보 밖에 되지 않는다. 따라서 평가자가 이와 같은 작은 차이를 명확히 구분하여 평가하기는 어려울 것이다.

7. 결론

차량과 타이어의 조향감 평가에서 평가자가 주요하게 고려하는 특성 인자를 찾기 위한 연구를 수행하였다. 우선 조향감에 대한 주관 평가 방법을 자세히 분석하여 주관 평가 항목을 세부화 시켰고, 이들 특성과 관련된 객관적 성능 인자를 선정하였다. On-center 위브, Off-center 위브 그리고 스윙 조향 시험으로부터 총 41개의 객관적 성능 인자를 추출하였고, 주관 평가 점수와의 통계 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 평가자가 감지하는 “Friction”, “Stiffness” 특성은 조향 토크의 크기와 조향각에 대한 조타 토크 변화와 밀접하게 관련되어 있다.
- 2) 평가자가 감지하는 “On-center gain”, “Off-center

gain” 특성은 조향각에 대한 횡가속도와 요 속도 변화가 중요하게 작용한다.

- 3) 평가자가 감지하는 “Time delay” 특성은 실제 조향각 입력에 대한 차량의 횡가속도와 요 속도 응답의 시간 지연 보다는 응답량과 관련되어 있다.
- 4) On-center 위브, Off-center 위브, 스윙 조향 시험의 횡가속도와 요 속도로부터 추출된 객관적 성능 인자들은 서로 유사한 특성을 갖고 있다. 대체적으로 요 속도에서 추출된 객관적 성능 인자들이 주관 평가를 더 잘 반영하기 때문에 횡가속도 특성 인자를 요 속도 특성 인자로 대체하여 조향감과 관련된 객관적 성능 인자의 수를 줄일 수 있을 것이다.

References

- 1) D. G. Farrer, “An Objective Measurement Techniques for the Quantification of On-centre Handling Quality,” SAE 930827, 1993.
- 2) J. Kim and Y. S. Yoon, “Objectification of Subjective Assessment on Steering Behavior for Vehicle and Tire Design,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering, 2007 (to be published).
- 3) ISO, Road Vehicles-Test Method for the Quantification of On-centre Handling-determination of Dispersion Metrics for Straight-line Driving, ISO/TS 20119:2002(E), 2002.
- 4) ISO, Road Vehicles-Test Method for the Quantification of On-centre Handling-Part 1:Weave Test, ISO 13674-1:2003(E), 2003.
- 5) SAE, Advanced Vehicle Dynamics for Passenger Cars and Light Trucks Seminar, SAE International, 2005.
- 6) H. Tokunaga, K. Misaji and Y. Shimizu, “On-center Steer Feel Evaluation Based on Non-linear Vibration Analytical Method,” Vehicle System Dynamics, Supplement, Vol.41, pp.391-400, 2004.
- 7) J. Park, S. Kim, H. Jung, J. Park and J. Lee, “Nonlinear Steering Systems and Vehicle Model Development for the On-Center Handling Simulation,” 2003 August Workshop and Symposium in the Department of Vehicle Dynamics, KSAE, pp.27-35, 2003.
- 8) K. Norman, “Objective Evaluation of On-center Handling Performance,” SAE 840069, 1984.
- 9) A. Higuchi and H. Sakai, “Objective Evaluation Method of On-center Handling Characteristics,” SAE 2001-01-0481, 2001.
- 10) J. S. Bendat and A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, A Wiley-Interscience Publication, 2000.
- 11) R. E. Walpole, and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Maxwell Macmillan, 1990.