

## 주행 시험 데이터를 이용한 저가형 차량시뮬레이터의 조향감 재현 장치 구현

김 성 수<sup>\*1)</sup> · 정 상 윤<sup>2)</sup> · 이 창 호<sup>3)</sup>

충남대학교 메카트로닉스공학과<sup>1)</sup> · 한국 델파이 주식회사<sup>2)</sup> · 충남대학교 메카트로닉스공학과 대학원<sup>3)</sup>

### Development of A Haptic Steering System for a Low Cost Vehicle Simulator using Proving Ground Test Data

Sung-Soo Kim <sup>\*1)</sup> · Sang-Yoon Jeong<sup>2)</sup> · Chang-Ho Lee<sup>3)</sup>

<sup>1,3)</sup>Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2)</sup>Korea Delphi Automotive Systems Corporation, 395-70 Sindaebang-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-010, Korea

(Received 28 June 2004 / Accepted 22 December 2004)

**Abstract** : A haptic steering system which reflects steering reaction torque has been developed for a fixed base vehicle simulator. The haptic steering system consists of a steering effort sensor, MR-clutch, AC servo motor and controller. In order to generate realistic steering torque feel to driver and at the same time to meet real-time simulation requirement, 3D torque map is constructed by experimental data and torque generation algorithm using the torque map has been also developed. 3D torque map is constructed using curve fitting and interpolation of the measured values of the steering angle, velocity and steering torque from actual slalom test on the proving ground. In order to carry out performance test of the developed haptic steering system, a fixed based vehicle simulator is constructed by integrating real time vehicle dynamics module, VR-video/audio module, and the haptic steering system. Steering torque and steering angle curves have been obtained from virtual testing in the vehicle simulator and performance of the haptic steering system has been evaluated.

**Key words** : Vehicle simulator(차량 시뮬레이터), Haptic steering system(조향감 재현 장치), Real-time simulation(실시간 해석)

### 1. 서론

차량 시뮬레이터에 사용되는 조향 모듈은 보다 현실감 있는 차량시뮬레이터의 개발에 필요한 요소이다. 이는 운전자에게 실제 차량을 운전하는 상황과 같은 느낌을 줄 수 있고 또한 운전자의 차량 조작을 실제 차량에서와 같이 실시간으로 차량모델의 해석에 반영할 수 있도록 하여야 한다. 특히 시뮬레

이터에서 운전자에게 차량의 동역학적 거동해석 결과에 따른 조향감 재현장치를 통한 조향 반력 구현은 시뮬레이터 현실감 확보를 위한 보다 많은 연구와 개발을 요하는 부분이다.

조향감 재현장치에 조향 반력 토크 생성을 위한 연구들이 진행되었다. 유압조력 시스템과 조향 축 동역학을 포함하는 조향 모델은 고주파 성분에 의한 수치적분의 어려움으로 실시간 해석이 용이하지 않다.<sup>1)</sup> 또한 단순히 랙-바의 계산된 반력만을 고려한 조향 반력토크 모델은 실시간 해석은 가능하나,

<sup>\*</sup>To whom correspondence should be addressed.  
sookim@cnu.ac.kr

현실적인 조향감을 제공하지 못하고 있다.<sup>1)</sup>

따라서 본 논문에서는 고정식 실시간 차량 시뮬레이터를 위한, 조향감 재현 장치 개발 및 실시간 시뮬레이션을 가능하게 하는 실험데이터에 의한 조향토크 생성 알고리즘 구현을 목적으로 한다.

조향 감지 센서를 실차에 장착하여 조향각, 차속, 조향 토크를 정지 및 주행상태에서 취득하였다. 실시간 시뮬레이션에서 사용 가능한 조향 반력 토크를 생성하고 적절한 조향 반력 토크의 인가를 위하여 취득된 데이터로부터 3차원 토크맵을 생성하고, 조향반력 구현 알고리즘을 구성하였다. 또한 가상 현실 그래픽스를 이용한 가상주행환경과 실시간 차량동역학 프로그램으로 가상 주행시험을 수행하여 조향반력 구현 알고리즘의 성능을 검증하였다.

## 2. 실험데이터를 이용한 조향감 재현장치의 개요 및 차량 시뮬레이터 구성

조향감 재현 장치는 Fig. 1과 같이 기존의 조향휠에 조향각과 조향 토크를 검출하는 조향감지센서 (steering effort sensor)와 자기 유변 유체(magneto-rheological fluid)를 이용한 MR 클러치와 하모닉 드라이브 감속기가 장착된 AC 서보 모터가 직렬로 연결된 구조를 갖는다.<sup>2)</sup>

조향감지 센서는 중공형태의 축에 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 최대 50Nm의 토크와 1% FS 이상의 분해능 갖는 토크센서와 중공형태의 로터리 엔코더를 사용하여 자체 제작하였다.<sup>3)</sup> Table 1은 조향감 재현 장치에 사용된 요소들의 사양을 나타내고 있다.

본 연구에서 사용된 조향감 재현장치의 MR 클러치는 조향 휠을 회전시킬 때는 느껴지는 조향반력 토크를 구현한다. 이를 위해서는 서보모터의 각 변위를 고정시키고, MR 클러치에 전류를 인가하면 MR 유체의 점성이 높아져, 회전력에 저항하는 토크가 발생한다. MR 클러치의 전류와 토크의 관계는 선형적인 관계를 갖는다.<sup>4)</sup> 또한 조향 휠을 놓거나 회전 방향을 바꿀 때 발생하는 타이어의 셀프 얼라인 토크에 의한 조향휠의 복원력은 AC 서보 모터로 구현되며, 이때는 MR 클러치가 축을 연결하여 AC 모터에 의해 발생하는 토크를 조향 휠에 전달하게

한다.

Fig. 2는 실험적인 데이터를 기반으로 조향감 재현장치에 사용되는 3차원 토크 맵 형성의 개념을 나타낸다. 토크맵 형성을 위한 실험 시험방법 및 데이터 프로세싱을 통한 3차원 토크 맵의 형성에 관하여는 다음 장에서 기술된다.

Fig. 3은 실시간 요구조건을 충족하기 위한 토크맵을 이용한 PC 기반의 저가형 차량 시뮬레이터와 조향감 재현장치의 구성 관계 및 데이터의 흐름도

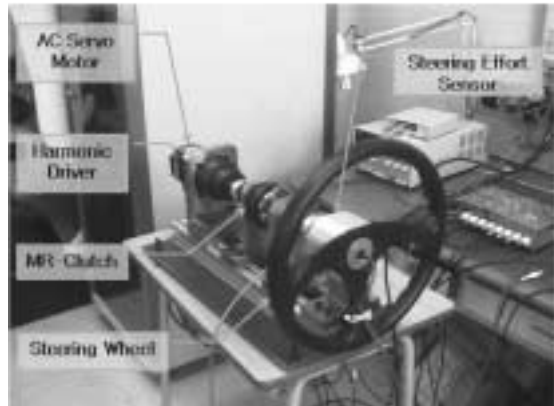


Fig. 1 Haptic steering system

Table 1 Specifications for components of Haptic steering system

구성 요소	회사명	Type	Spec
AC servo motor	Yasakawa Co.	SMMP-02A312 SGDA-02AS (Driver)	정격출력 토크 : 0.637Nm 정격회전속도 : 3000rpm
MR brake	Load Co.	Rotary brake (MRB-2107-3)	Max on-state torque : 50in-lb Max operating speed : 1000rpm
Gear reducer	Harmonic drive	Harmonic drive CSR25	Reducing ratio : 100/1 Max allowable input velocity : 4000rpm

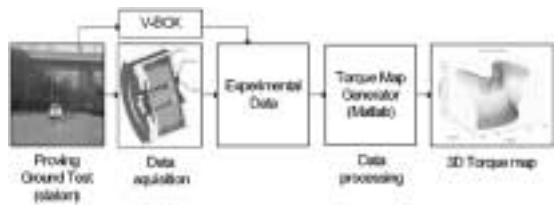


Fig. 2 Procedure for torque map generation

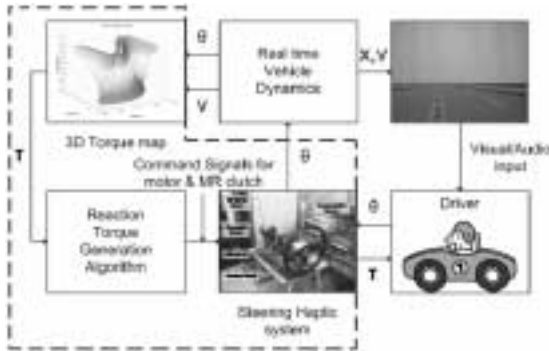


Fig. 3 Conceptual flow for haptic steering system of a low cost vehicle simulator

를 나타내고 있다. 가상환경내의 운전자와 시뮬레이터의 인터페이스 역할을 하는 조향감 재현장치는 운전자의 조향 각 입력이 인가되면, 실시간 차량 동역학 모델로부터, 해당 각 변위에 관한 차량 거동이 계산되고, 이로부터 차량 속도 $v$ 와 조향각의 함수로 나타내지는 3차원 토크 맵을 통해 토크가 구해진다. 계산된 토크를 생성하기 위하여, MR 클러치와 서보모터를 제어하고, 발생된 조향 반력/복원력으로 운전자로 하여금 조향감을 느끼게 한다. 따라서 실시간 내에 차량 동역학 및 3차원 가상 현실 그래픽스가 계산되어야 하며, 이에 맞추어서, 조향감 재현장치가 구동되어야 한다.

### 3. 조향 토크 취득을 위한 실차 실험

앞서 기술한 바와 같이, 본 연구에서 개발하고자 하는 조향감 재현장치에는 실험적인 토크맵이 필요하다. 실험적인 토크데이터의 취득을 위해서 조향감지 센서를 구성하고 있는 토크센서에 대한 테스트를 통하여 정확도를 확인한 후, 실차 실험을 수행하였다.<sup>3)</sup>

실험차량으로는 현대자동차의 Sonata II를 사용하였고 기존의 조향휠을 제거한 후 Fig. 1에 나타난 조향감지센서와 조향휠을 부착하여 실험하였다. 주행시험은 (주)한국타이어에서 제공하는 주행시험장에서 “JASO C706 슬라롬 주행성능 시험방법”으로 실험하였다. 슬라롬 테스트는 10~60Km/h까지 속도를 10Km/h씩 증가시키면서 정속으로 주행하여 일직선상에 있는 30m 간격으로 떨어진 8개의 파일

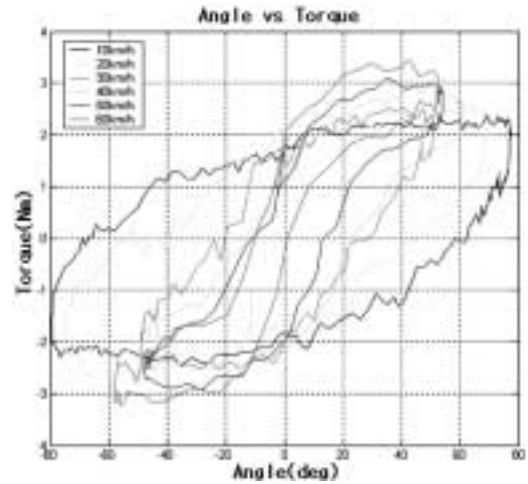


Fig. 4 Slalom test results

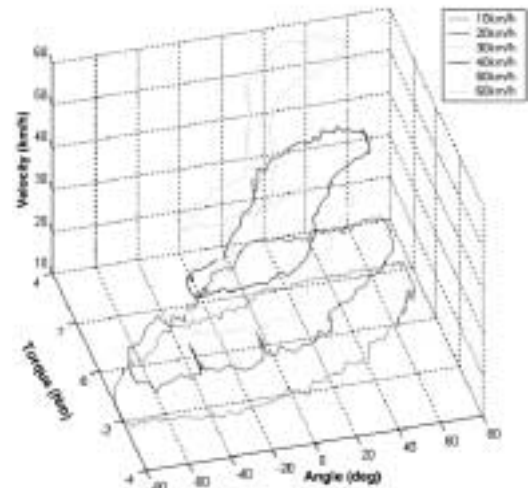


Fig. 5 Slalom test results in 3D space

론을 통과하여 수행하였고, (주) 한국타이어에서 제공한 V-Box를 이용하여 속도를 측정하였다. Fig. 4는 각 슬라롬 시험 주행 단계마다의 결과그래프를 나타내고 있으며, Fig. 5는 이결과를 속도축, 조향각축, 조향토크축에서 표현된 3차원으로 나타낸 그래프이다.<sup>3)</sup>

## 4. 토크맵 구성 및 반력생성 알고리즘

### 4.1 3차원 토크맵 생성

차량 시뮬레이터에서 임의의 속도와 임의의 조향각에 대한 조향 토크를 생성하기 위해서는 속도와

조향각과 반력토크에 대한 3차원 토크맵 구성이 필요하다. 취득한 데이터는 10km/h의 단위로 취득한 데이터이기 때문에 보간법을 이용하여 토크면(torque surface)을 생성하여야 한다. 즉 출력 토크  $\tau = F(\theta, V)$ 를 조향각과 차량속도의 함수로 나타내도록 하여야 한다.

Curve fitting 기법은 Matlab에서 제공하는 도구상자 중 Model based Calibration을 이용하였다. 토크에 대한 다항식(polynomial) 함수는 식 (1)과 같이 조향각  $\theta$ 에 대한 3차 함수와 3차 함수의 계수가 다시 식 (2)~(5)에서 나타난 바와 같이 차량 속도  $v$ 에 대한 다항함수로 나타나 진다. 식 (1)은 다항식의 차수를 높여보았을 때 RMS 오차가 크게 변하지 않을 때까지 시도하여 얻을 수 있었다.

$$\text{Torque} = c_1 + c_2\theta + c_3\theta^2 + c_4\theta^3 \quad (1)$$

$$c_1 = 1.3575 - 0.81997v + 0.23783v^2 + 0.64084v^3 \quad (2)$$

$$c_2 = 4.5345 + 4.2685v - 0.91696v^3 \quad (3)$$

$$c_3 = -2.3196 - 1.141v^3 \quad (4)$$

$$c_4 = -32768 - 4.6144v \quad (5)$$

같은 방법으로 다른 면의 torque surface를 완성하여 x 축을 조향각 y 축을 반력토크 z 축을 차량 속도로 두고 실제데이터 값과 겹쳐보면 Fig. 6과 같이 나타난다. Fig. 6에 나타난 굵은 선은 토크맵 생성 알고리즘에 쓰이는 경계곡선을 나타낸다. 경계곡선에서의 조향각은 경계조향각( $\theta_b$ )으로 나타내며 경계 조향각을 넘어갈 경우 경계 조향각에 해당되는 토크( $\tau = F(V_c, \theta_b)$ )를 출력하게 된다.

본 연구에서는 한정된 시간 내에서 주행시험을 수행하고 또한 고속 슬라롬 시험의 위험성 때문에, 10km/h 이하의 저속시험과 60km/h 이상의 고속시험은 수행하지 못하였다. 슬라롬 시험을 통해서 얻은 조향각의 최대 및 최소범위는 -80도에서 80도 사이의 값을 가지고, 취득한 속도 범위 또한 10Km/h에서 60Km/h이다. 따라서 실제의 차량 시뮬레이터 운

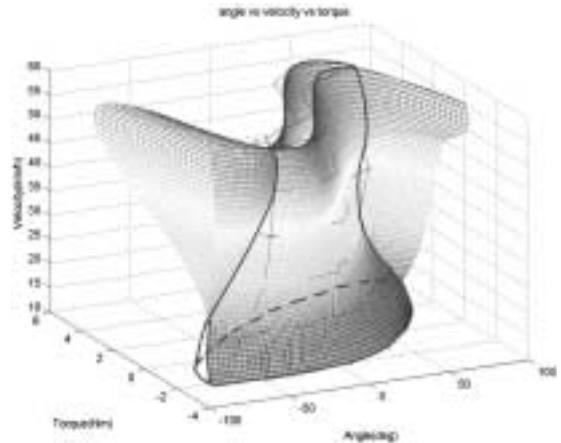


Fig. 6 Three dimensional torque map

전 범위로는 제한적이다. 그러나 저속 및 고속 slalom 시험에 의한 데이터가 얻어질 수 있으면, 앞서 기술한 방법에 의해서, 보다 넓은 범위의 3차원 토크맵이 생성될 수 있다.

#### 4.2 3차원 토크맵 추종 조향 토크 생성 알고리즘

생성된 3차원 토크 맵은 조향토크 히스테리시스 특성을 포함하고 있으므로, Fig. 6과 같이 두개의 곡면에 의해서 토크 맵이 형성된다. 따라서 시뮬레이터의 운전자의 입력 조향각에 대하여 적합한 곡면에서 해당 토크를 계산해 내고, 그것을 조향감 재현 장치에 인가하기 위한 알고리즘이 필요하다. Fig. 7은 3차원 토크맵 추종 조향토크 생성 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다.

토크 생성 알고리즘은 첫째, 사용자의 입력(조향각 속도)의 방향성을 확인한다. 방향성에 따라서 토크 맵의 식 (1)로 표현된 곡면을 선택한다. 여기서 조향각 속도의 증감은 조향 감지 센서의 엔코더 값에서 감지한 조향각의 차이를 시간으로 나눈 수치 미분치를 사용하였다. 그리고 수치 미분치의 고주파 성분을 제거하기 위해 low pass 필터를 통과한 값을 이용하였다.

둘째, 선택된 곡면에서 주어진 차량 속도에 대한 조향각의 경계 값을 확인한다. 이는 이번 연구의 한계가 조향각이 -80~80deg 사이에 존재하고 차량의 속도에 따른 그 경계 값이 다르기 때문에 조향각이 범위를 벗어나게 될 경우 해당 차량속도의 경계 조

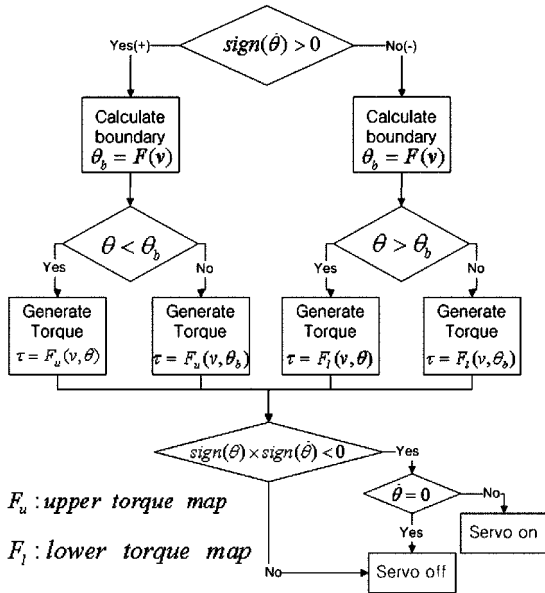


Fig. 7 Torque generation algorithm

향 값에 해당되는 토크 값을 출력하게 된다.

셋째, 해당 차량 속도에 대해서, 조향각이 경계범 위 내에 있을 경우, 해당되는 토크 값을 토크 곡면 식으로부터 얻는다. 앞서 2장에서 기술한 바와 같이 선형적인 MR 클러치의 전류와 토크관계를 이용하여, 전류를 MR 클러치에 인가한다. MR 클러치는 조향 운동에 저항하는 토크를 생성하므로, 조향 반력 토크가 구현된다.

넷째로, 조향각과 조향각속도의 부호를 비교하여 두개의 값이 서로 반대가 될 경우 즉 조향 각이 양수이고 조향각속도가 음수인 경우는, 조향 휠을 놓은 경우(release mode)나, 또는 방향을 바꾸는 경우이므로, 이때는 타이어의 셀프 얼라인 토크에 의해서 조향 복원토크가 생성 되어야 한다. 따라서 이 경우에는 서보 모터가 구동하여 조향 복원력을 인가하도록 하였다.

다섯째, 조향 복원력 구현을 위한 모터구동제어는 조향 복원 강성을 근사화 할 수 있도록 현재의 조향 각에서 조향 휠이 중립의 위치에 올 수 있도록 위치 제어를 하였다.

모터구동은 조향 각이 중립에 오는 위치나 조향 휠의 풀리고 있는 도중 다시 방향을 변화시키거나, 풀리고 있는 도중 다시 조향 휠을 잡고 동일한 조향

각을 유지하는 경우 모터 구동에서 MR 클러치의 작동으로 변환되도록 알고리즘을 구현하였다.

### 5. 조향감 재현장치를 이용한 가상실험

저가형 차량 시뮬레이터에서의 조향감 재현장치의 성능평가를 위하여, 3장에서 기술한 주행 시험장을 PC상에서 OpenGL 라이브러리를 이용하여 가상주행 시험장 환경을 구성하였다.<sup>5)</sup> Fig. 8은 구현된 가상환경을 이용한 가상 실험을 나타내고 있다.

저가형 차량 시뮬레이터의 차량 동역학 모델은 주행시험과는 달리 소나타II 제원을 구하지 못하여, 본 실험실이 보유한 기존의 HMMWV 차량 모델을 사용하였고<sup>6)</sup> 실시간 차량동역학 모델은 순환공식을 기반으로 한 부분시스템 합성방법을 이용하였다.<sup>7,8)</sup> 슬라롬 시뮬레이션을 위한 등속주행은 차량 동역학 모델과 연동된 적응순항제어기 모델을 수정하여 구현하였다.<sup>9)</sup> 따라서, 프로그램 상에서 차량의 주행 속도를 지정하고, 조향감 재현장치의 성능만을 실험할 수 있도록 하였다.

가상 실험을 통한 조향감 재현 장치의 성능평가는 개발한 조향감 재현장치가 토크맵 함수값을 얼마나 잘 추종하는지는 RMS 오차를 가지고 살펴보았다. Table 2와 Fig. 9는 가상환경에서의 슬라롬 시뮬레이션 결과와 추종해야 할 토크맵과의 비교이



Fig. 8 Virtual Slalom test

Table 2 RMSE in virtual test

Vehicle velocity(Km/h)	10	20	30	40	50	60
RMSE	0.4542	0.3275	0.4102	0.3959	0.2967	0.3958

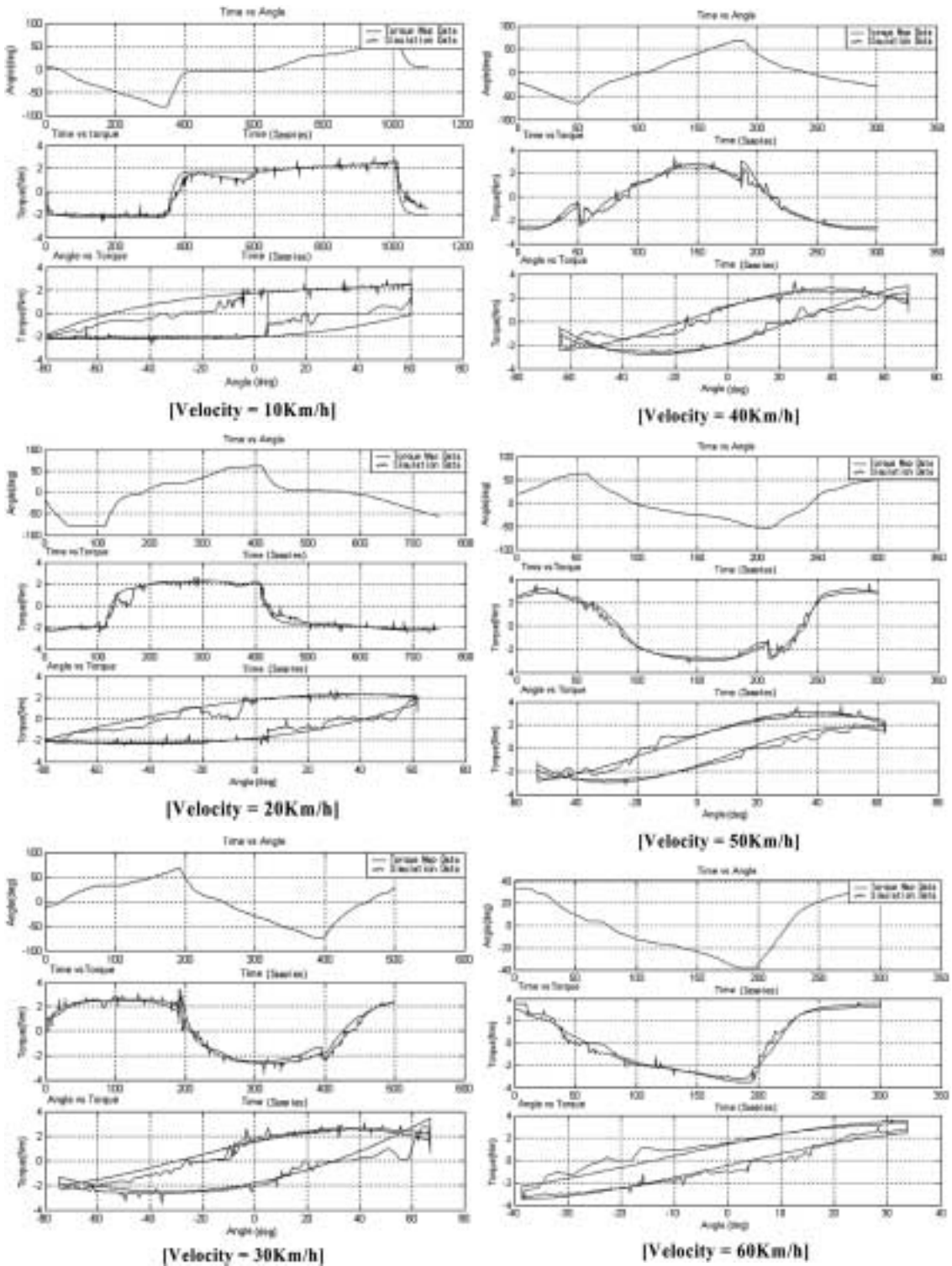


Fig. 9 Comparison with real data and simulation data

다. RMS 오차 값은 0.38005이며 대체적으로 토크맵을 잘 추종함을 알 수 있다. 하지만 RMS 오차 값은 핸들조작의 숙달에 따라서 차이가 있게 된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 실시간으로 조향반력 및 복원 토크를 재현하기 위해서, 조향휠, 조향감지 센서, MR 클러치, 감속기 부착 AC 서보 모터로 구성된 차량 시뮬레이터용 조향감 재현장치를 개발하였다. 실시간 시뮬레이션의 요구조건과 보다 실차에 가까운 조향감을 생성하기 위하여, 실차주행 시험의 실험적 데이터를 이용하여, 조향감 재현 장치의 반력을 생성해 내는 방법을 제시하였다. 실차에서 얻은 조향토크를 이용하여 3차원 토크 맵을 구성하고 히스테리시스 특성을 고려한 토크 맵을 기반으로 한 조향 감 재현 장치 구동 알고리즘을 제시하였다. 또한 가상환경 내에서의 가상실험을 통한 조향감 재현장치의 성능을 평가하였고, RMS 오차는 슬라롬 주행 시뮬레이션에서 평균 0.3808이 나오는 것을 확인하였다. 이를 통해 개발된 조향감 재현 장치의 타당성을 검증하였다.

제안한 실험 데이터를 이용한 조향감 재현 장치는 실험 데이터 취득과 실험 조건(평지)에 제한성을 갖고 있으므로, 얻은 데이터로부터 외삽법에 의한 3차원 토크 맵의 범위의 확장, 또는 전체 조향각, 조향 토크, 차량속도를 나타낼 수 있는 수학적인 실험식의 개발이 추후연구로 진행되어야 한다. 또한 범프에 의한 노면과 타이어의 상호작용에 대한 조향 반력구현 방법도 추가 되어야 한다.

## References

- 1) B.-S. Sohn, "Development of A Human-Machine Interface and A Force Reflective Steering System Model for Low Cost Priving Simulator," MS Thesis Graduate School, Chungnam National University, 2002.
- 2) S.-S. Kim, M.-C. Won, J.-Y. Huh, K.-J. Song and S.-Y. Jung, "Steering Wheel Sensor Design and Performance Test," 2003 KSAE Spring Conference Proceedings, pp.682-687, 2003.
- 3) C.-H. Lee, Y.-G. Bae and S.-S. Kim, "Development of A PC based Low Cost Virtual Reality Driving Simulator for Driving Practice," 2003 KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 1097-1102, 2003.
- 4) S.-S. Kim, "A Subsystem Synthesis Method for Efficient Vehicle Multibody Dynamics," Multi-body System Dynamic 7, pp.189-207, 2002.
- 5) S.-Y. Jeong, "The Development of A Haptic Steering System for Vehicle Simulator," MS Thesis Graduate School, Chungnam National University, 2004.
- 6) Y.-S. Oh and S.-S. Kim, "A Real-time Multi-body Vehicle Dynamics Model using a Subsystem Synthesis Method," Proceedings of 2001 ASME. Design Engineering Technical Conference, September 9-12, 2001.
- 7) C.-S. Hahn, M.-H. Rhee, H. Park and J.-E. Oh, "Development of Simulator for Performance Test of Electric Power Steering of Light Weight Vehicle," KSME Journal A, Vol.25, No.6, pp.923-929, 2001.