

자전거 주행시 경사 안정성에 대한 실험적 분석 Experimental Analysis of Tilt-stability in Bicycling

°송준결* · 신재철** · 이종원***

Joon-Keol Song, Jae-Cheol Shin and Chong-Won Lee

Key Words : Simulator(시뮬레이터), Bicycle(자전거), Tilt Stability(경사 안정성),

ABSTRACT

In development of an advanced bicycle simulator, the investigation of the interactions between bicycle and rider during cycling is paramount important because bicycle is a two-wheeled human-powered vehicle. In this work, the tilt stability, among various interactions, of bicycling is investigated experimentally. In the experiments, the tilt angles of the bicycle, riders body and head are measured, as the riding path and the speed are varied. Subjects are asked to ride along four typical paths on rigid flat ground: the straight, C-curved, S-curved and circle paths.

The results from extensive experiments with different subjects can be summarized as: 1) The tilt angles of bicycle and rider are almost out of phase during pedaling along the straight path. 2) The bicycle tilt angle is nearly proportional to the square of bicycle speed for the straight and curved paths, and to the curvature for the curved paths. The head tilt angle is the biggest and the body tilt angle is the smallest for the straight path, but the tendency is reversed for the C-curved path. During the curve maneuvering, the rider's head tends to tilt by less than 40% of the bicycle tilt angle.

1. 서 론

최근 컴퓨터의 발달과 생활 수준의 향상으로 인하여, 과거에는 생각할 수 없었던 것들을 경험할 수 있는 가상 현실 분야가 급속도로 발전되고 있다. 특별히 이 가상현실 기술은 여러 산업분야에 중요한 도구로 발전하며 그 영역을 계속해서 넓혀 나가고 있다.

과거, 시뮬레이터에서 운전자는 관찰자이거나 피동적으로 감각이나, 정보를 받는 개체로 여겨졌다면 앞으로 발전될 가상현실에서의 운전자는 시뮬레이션에 적극적으로 참여하게 되어, 시뮬레이터의 상호 작용이 많아져 몰입성이 증가되며, 좀 더 재미있고, 현실감 있는 시뮬레이터들이 개발, 발전되고 있다. 이러한 기술들이 계속해서 발전된다면, 시뮬레이터는 사람의 반응에 크게 영향을 받지 않는 기계가 주는 감각을 재현해주는 것에서 벗어나,

사람과 상호작용이 큰 기계나 기구들, 더 나아가서는 동물의 반응들까지 가상으로 시뮬레이션 할 수 있게 된다.

이러한 기술들의 발전을 위해서는 그 가상환경에서 재현된 감각을 생성하고, 다시 상호작용을 받아들이는 운동감 재현 기술의 발전이 필요하며, 이의 한 부분으로 시뮬레이터 운전자의 경향을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다.

자전거는 시뮬레이터의 대상으로서 많은 특징이 있지만, 그 중에서 가장 중요한 특징으로 운전자가 그 대상인 자전거와 상호작용이 크다는 점을 들 수 있다. 예를 들면 자동차는 도로상황 등에 크게 관계없이 페달과 운전대의 위치 신호만으로도 시뮬레이션이 가능하지만, 자전거는 페달 토크의 크기, 주행 방향, 핸들링 힘과 토크뿐만 아니라, 운전자의 위치와 운동도 중요한 영향을 주게 되고, 또 자전거의 움직임이 운전자에 다시 영향을 주는 복잡한 양상을 띤다.

이처럼 자전거 주행은 운전자의 운동과 밀접하게 연관되어 있고, 외부 환경에 의한 영향이 많아 자전거를 시뮬레이터로 구현하는데 많은 어려움이 따른다. 또 자전거 시뮬레이터를 조율하는 과정도, 운전자의 중요한 운동에 관한 연구가 부족하여 현실감 있는 시뮬레이터 제작을

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : jksong@cwllab.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3056, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과 대학원

*** 한국과학기술원 기계공학과

위해서는 주행 실험을 통한 운전자의 운동을 수집하여 그 특성을 분석하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 자전거의 주행에 가장 많은 영향을 미치게 되는 경사각 안정성에 관한 실험적인 분석을 수행하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 설계 및 계획

(1) 실험 계획

자전거를 주행하는 동안 운전자는 많은 운동을 하게 된다. 하지만 이 모든 운동 하나 하나를 분석하는 것은 매우 어려울 뿐 아니라, 그 모든 운동이 자전거 주행이나 운전자의 운동 경향에 큰 영향을 주는 것은 아니므로 운전자의 운동 중에 자전거 주행에 영향이 많은 운동을 선택하여 분석하는 것이 합리적이다. 자전거 주행에 영향을 주는 운전자의 움직임은 선택하기 위해 자전거의 특성을 고려하면 다음과 같다. 자전거는 바퀴가 앞뒤로 나란히 있기 때문에 피치각(pitch)에 대해 모멘트를 받는 것은 그리 중요하지 않으며 운전자가 요(yaw) 방향으로 모멘트를 주기는 힘들기 때문에 운전자가 자전거에는 롤(roll) 방향으로 주는 모멘트가 가장 주요한 모멘트가 된다. 운전자가 자전거에 주는 모멘트를 직접 측정하기는 어려움으로 운전자의 롤(roll) 방향의 기울임 각도를 측정하여 모멘트를 추정할 수 있도록 한다.

또 자전거 주행에 많은 영향을 주지는 않지만 시물레이터의 현실감 향상을 위해서, 운전자의 시야를 추정하는 것은 그래픽에서 현실감을 더하는데 중요한 요소가 된다. 그래픽부는 운전자의 정면에서 운전자에게 보여 주게 됨으로 그래픽부에서 중요한 부분은 운전자 얼굴의 롤(roll) 방향의 경사각이 된다.

따라서 본 연구에서는 자전거의 가속도와 자전거, 운전자 몸통, 머리의 롤(roll) 방향의 경사각을 측정하기로 한다

자전거 진행 방향을 X, 오른쪽 방향을 Y, 위쪽 방향을 Z축이라고 하면, Z, Y축의 방향의 선형 운동과 피치(pitch) 운동은 무시할 만 하거나 없다고 볼 수 있다. 따라서 자전거의 주요한 운동은 절대 좌표계에서 직선 주행과 진행 방향의 곡선 주행이다. 또 주행할 때 곡선은 모두 순간 순간의 원운동으로 대체할 수 있기 때문에 직선과 원 혹은 원의 일부분을 자전거로 주행했을 때의 결과를 일반적인 자전거 주행의 경우로 볼 수 있다. 본 연구에서는 자전거가 직선 주행할 때, 원 주행, 그리고 원의 부분 곡선인 C, S 곡선을 주행하면서 운전자의 경향을 분석하기로 하였다.

(2) 실험 장비

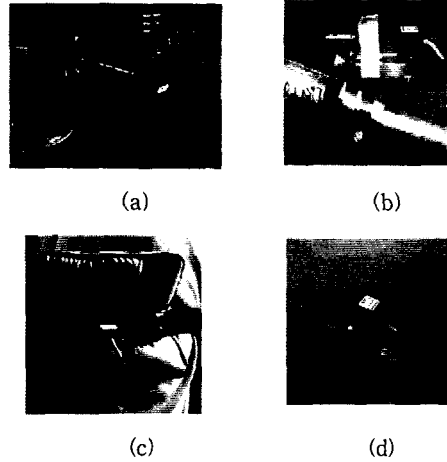


Fig. 1 실험용 자전거와 센서

본 연구에서는 실제 주행하는 자전거와 운전자의 데이터 수집이 필요하므로 야외에서 실제 주행하며 실험을 수행할 수 있는 장비들을 구성하였다(Fig. 1a). 실험에서 측정하고자 하는 것은 자전거, 운전자의 몸통, 머리의 경사각임으로 각 부분에 경사각 센서를 부착하여 각을 측정하였다. 자전거 프레임이 수평지그를 달고 경사각 센서를 부착하였고(Fig. 1b), 운전자의 경사각을 측정하기 위하여 등의 상부에 경사각 센서를 부착하였는데, 운전자의 몸은 연성이 있기 때문에 센서 고정을 용이하게 하고, 운전자에게 센서 부착으로 인한 불편으로 일반적인 운동에 방해가 되지 않도록 신축성 있는 벨트와 지그를 사용하여 센서를 고정하였다(Fig. 1c). 운전자의 머리의 경사각을 위한 센서는, 자전거용 헬멧에 플라스틱 본드를 이용하여 고정하였다(Fig. 1d). 운전자가 자신이 얼마의 속도로 주행중인지 알 수 있도록 자전거용 속도계를 부착했다.

실험은 굴곡이 많은 바닥을 피하여, 평평하고 고른 시멘트 바닥에서 시행하였고 각 실험은 일반성을 높이기 위해 실험당 최소 3명 이상의 실험 대상이 참가하도록 하였다.

(2) 주행 경로별 실험 방법

위와 같이 자전거 특성을 고려하여 주행 경로를 직선과 곡선으로 나눌 수 있는데, 곡선을 원, C곡선, S곡선을 선택하였고, 속도에 따른 경향을 알아 보기 위하여 속도를 7~24km/h에서 주행하였다.

직선주행은 선을 그어 놓고 이를 따라 정확히 주행하도록 요구하는 대신, 직선에서 크게 벗어나지 않고 주행하도록 하여 운전자가 직선을 따라가는 것을 너무 의식

해서 자연스러운 움직임에 방해가 되지 않도록 했다. 이 실험에서는 원심 가속도 등 외부 가속도가 크지 않아, 가속도를 이용한 경사각 보정은 하지 않았다. (Fig. 2)는 직선 주행의 실험 결과로 8Hz의 절점 주파수를 갖는 저주파 통과 필터를 거친 경사각을 보여주고 있다.

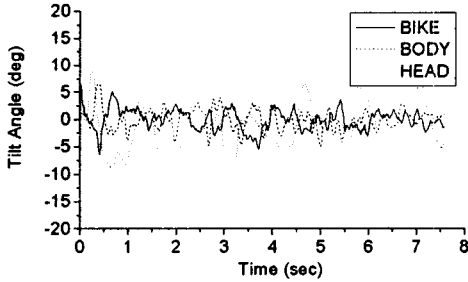


Fig. 2 직선 주행

C 곡선 경로는 원의 1/4부분을 주행하는 것으로 반지름을 3, 4, 5, 6m로 변화시키며 실험하였다. 이 경우 주행할 때 받는 원심력의 영향을 보정해 주었다. 원 운동시 원심력 자체의 크기는 크지 않지만 원심력에 의한 경사각의 변화를 보정해 주어야 할 필요가 있었다. 운전자가 곡선을 충실히 따른 정도와 몸과 자전거에 기울임 각을 준 시점이 각각 다르기 때문에 자전거가 곡선을 주행할 때의 시간의 1/6배의 시간을 평균할 시간 구간으로 잡고 평균한 값 중에서 최대값을 선택하였다.

S 곡선 경로는 서로 다른 방향의 C 곡선 두 개가 2m의 직선을 사이에 두고 연결되어 있는 모양의 경로이다. 본 실험에서는 왼쪽 방향, 오른쪽 방향 순이다. 이 곡선을 따르기 위해서는 운전자는 순서대로 양쪽을 동시에 조향을 해야 되는 주행 코스로 좌우 연속적인 회전시 평행되는 경향을 관찰할 수 있다.

원주행의 실험은 3, 4, 5m 반지름의 원을 그리고 이 원을 5회 주행하도록 하였다. 실험 직전에 항상 직선을 주행하여 가속도계와 경사각 센서의 위치를 조절하였다. 또, C곡선과 같은 방법으로 원심력에 의한 경사각의 변화를 보정하였다.

2.2 실험 결과 및 분석

(1) 직선 주행

자전거 직선 주행시 운전자와 자전거의 경사각의 위상차를 구하기 위해서 자전거의 위상을 기준으로 한 위상파를 사인함수로 근사하면 (Fig. 3)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 결과에서 자전거는 몸통, 머리와는 거의

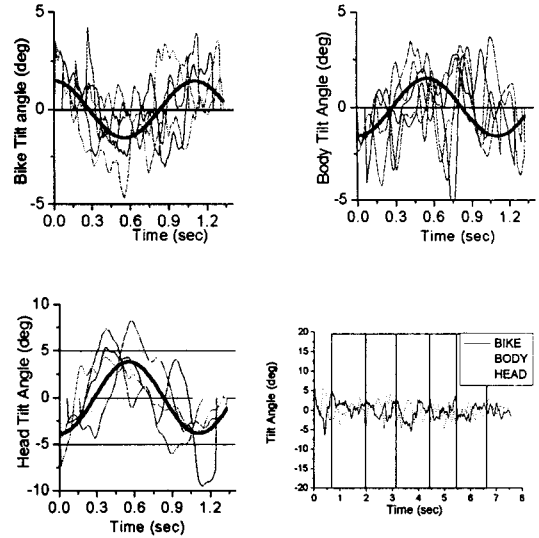


Fig. 3 각 부분의 위상차

	BIKE	BODY	HEAD
PHASE(rad)	0π	0.9π	0.8π

Table 1 각 부분의 위상각 비교

π 의 위상차를 갖는 것을 관찰할 수 있다(Table 1). 따라서 위상과 크기를 동시에 도시하면 (Fig. 4)과 같이 나타난다. 그 크기는 머리, 몸통 자전거 순의 경사각의 크기를 갖는다.

경사각의 크기를 수학적으로 모델링 하는 것은 시뮬레이터에 적용시 유용하기 때문에 다음과 같은 과정을 통하여 간단한 모델을 유도하였다. (Fig. 5)는 직선을 주행시 받는 힘을 그린 그림이다. 자전거가 받는 힘과 모멘트의 합을 구하면 다음과 같다.

$$F_b + F_s = Mg \quad (1)$$

$$F_x l_p \cos \theta_1 - mgl_b \sin \theta_1 - (Mg - F_x) l_s \sin \theta_1 = 0 \quad (2)$$

여기서 F_x 는 페달 부하이고, F_b 는 운전자의 몸무게로 인해 자전거에 주어지는 부하, M 은 운전자의 몸무게, l_p , l_b , l_s 는 각각 페달의 y축 길이, 자전거의 무게 중심까지의 거리, 자전거의 안장까지의 거리이고, θ_1 , θ_2 는 각각 자전거와 운전자의 기울임 각도이다. $F_x l_p$ 가 ($mgl_b + Mgl_s$)에 비하여 작기 때문에 (2)식을 θ_1 에 대해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_1 = \frac{F_x l_p}{(mgl_b + Mgl_s) + F_x l_s} \approx \frac{l_p}{mgl_b + Mgl_s} F_x \quad (3)$$

이때 자전거의 정속 주행에서는 에너지의 대부분이

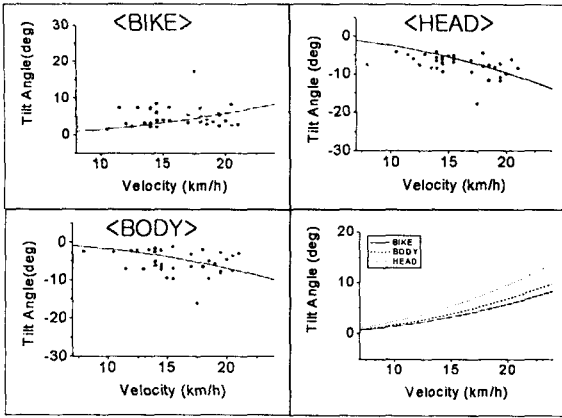


Fig. 4 직선 주행시 경사각과 속도

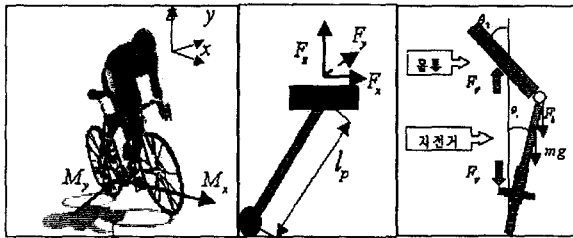


Fig. 5 주행시 페달 부하와 자유 물체도

마찰과 공기 저항으로 소진 되는데 이 힘은 대략 속도의 2차 함수로 근사가 가능하므로[1] 페달 부하는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$M_y \phi_p = l_d F_{resist}, F_{resist} = Bv^2, l_d = r_w \phi_p \quad (4)$$

M_y 는 페달 토크, F_{resist} 는 저항력, v 는 자전거의 전진 속도, l_d , l_{pz} 는 각각 주행거리, 크랭크의 길이이며, ϕ 는 페달의 위치각, B 는 마찰 및 저항에 대한 2차항의 계수이다. M. L. Hull의 연구에 의하면 각 방향의 페달 부하 중에서, F_z 의 크기는 F_x , F_y 에 비해 각각 약 3~4배 큰 값을 갖는다[2]. 따라서 M_y , F_z 만의 함수로 근사하여 표시할 수 있다. 식 (3)(4)를 정리하면 다음과 같이 속도의 2차 함수의 2차 항으로 나타난다(Fig. 4).

$$\theta_1 = \frac{r_w l_p B}{(mgl_b + Mgl_{pz})l_{pz} \sin \phi_p} \approx Cv^2 \quad (5)$$

따라서 직선 주행시에도 자전거에 모멘트가 발생하므로 시뮬레이션시 그 모멘트를 고려 해야한다. 이 결과를 이용하면 모멘트가 발생하여도, 회전으로 연결하지 않고 계속 주행하여야 하는 모멘트의 오차범위를 추정할 수 있다.

(2)곡선 주행

곡선을 주행하는 자전거의 수학적 모델을 세우기 위해, R 는 주행하는 원 곡선의 반지름, g 는 중력 가속도,

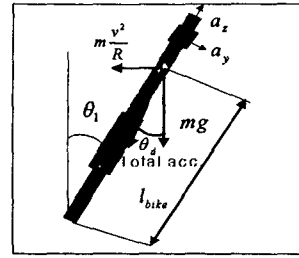
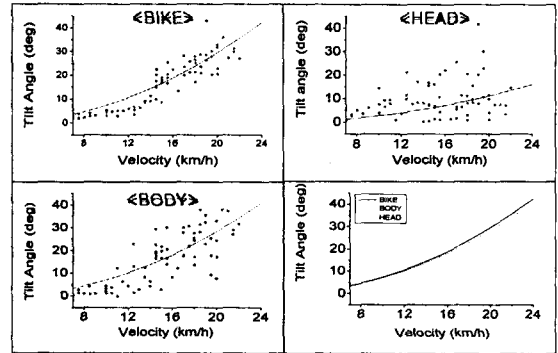
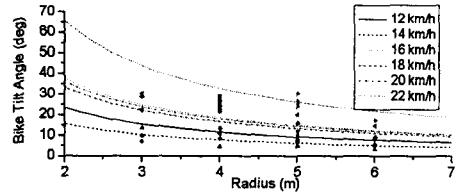


Fig. 6 자유 물체도



(a)



(b)

Fig. 7 경사각과 속도, 반지름

l_{bike} 는 면에서 운전자를 포함하는 자전거 시스템의 무게 중심까지의 거리를 나타낸다고 하면(Fig. 6), 모멘트의 합은 식(6)과 같이 나타낼수 있다.

$$m \frac{v^2}{R} l_{bike} \cos \theta_1 = mgl_{bike} \sin \theta_1 \quad (6)$$

이 식을 θ_1 에 대하여 정리하면 식(7)과 같이 곡선의 반지름에 반비례하고 속도의 제곱에 비례하는 식을 구할 수 있다(Fig. 7).

$$\tan \theta_1 = \frac{v^2}{Rg} \approx \theta_1 = \frac{k}{g} \frac{v^2}{R} \quad (7)$$

(Fig. 7b)에서 반지름이 커짐에 따라 경사각이 점점 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 또 각 반지름에서 자전거, 몸통, 머리의 경사각 크기를 비교해 보았을 때, 직선

주행과는 달리 자전거 몸통, 머리 순의 경사각 크기를 가짐을 볼 수 있다. 특히 운전자 머리의 경사 각도가 자전거나 몸통의 각도보다 작은 것을 주의할 필요가 있다. 자전거 시뮬레이터에서는 일반적으로 원심력에 대한 운동감을 재현해 줄 수 없기 때문에 자전거의 경사각에 대해 그래픽부를 롤(Roll)방향으로 경사각을 주므로써 그것을 보상한다. 실험을 통해 얻은 데이터에서 모든 속도 영역에서 자전거와 운전자의 머리의 경사각의 비를 구하여 평균한 값은 0.4이다. 이러한 결과를 자전거 각도에 대해 실험과 일치한 값을 사용하는 것이 반드시 더 나은 현실감을 보장하지는 않지만 기본 조율값으로 그래픽 부에 40%정도 경사각을 설정하는 것이 좋다는 결론을 얻을 수 있다.

S곡선의 경우 (Fig. 8)은 반지름 3m의 경우 속도에 따른 좌우 방향 곡선 주행시 경사각과, 반지름 3, 5 6m에 대한 경사각 차이를 막대 그래프로 표시하고 있다. 반지름이 작을수록 속도에 따른 경사각 값의 차이가 나고 반지름이 6m로 큰 경우는 차이가 거의 나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 반지름이 작을 때에는 급격하게 조향을 해야하기 때문에 두 번째의 곡선에서는 곡선을 잘 따르지 못하거나, 미처 조향이 완료되기 전에 곡선 구간을 빠져 나왔으리라 추측할 수 있다. 반지름이 충분히 큰 경우에는 충분히 조향할 수 있는 시간적 여유가 있으므로 양쪽 값의 거의 차이가 나지 않는다.

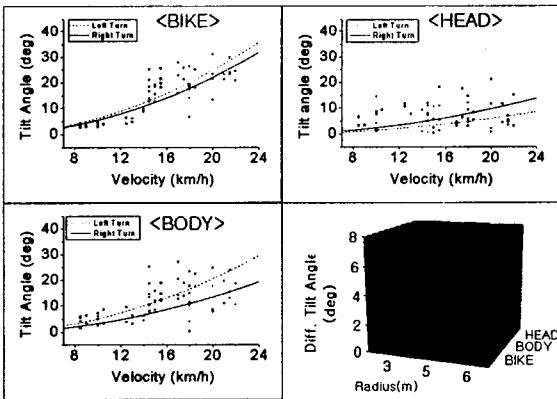


Fig. 8 S 곡선 주행 (R=3m)

(3) 원 곡선 주행

(Fig. 9)은 각각 반지름 3, 4, 5m 때의 속도에 대한 경사각 값을 보여주고 있다. 자전거의 각도는 크게 변하지 않는 반면 반지름이 작을수록 운전자의 몸통 각도가

급격히 커지는 것을 관찰할 수 있다. 원 주행에서 C곡선 주행과는 달리 조향을 위해서 자전거의 경사각 보다 자전거의 핸들 조향을 더 많이 사용함을 유추할 수 있다. 또 같은 반지름이지만 C곡선의 경사각이 더 크을 알수 있는데, 이는 C곡선의 경우 짧은 시간에 곡선을 주행하는 과도기적인 특성이 있고, 원 주행은 오랫동안 비교적 같은 운동을 유지하고 있는 정상상태의 특성이 반영되었기 때문이라 볼 수 있다.

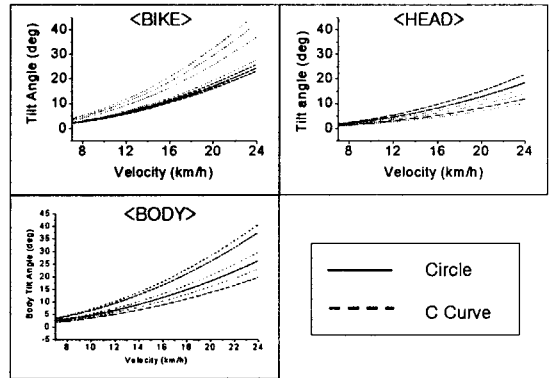


Fig. 9 원 곡선 주행

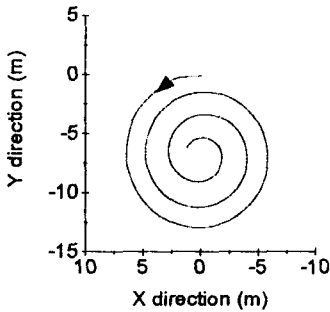
2.3 동역학 프로그램과의 비교

앞에서 수행하였던 실험 결과를 한국과학기술원에서 2000년에 개발된 자전거 시뮬레이터 동역학[3]의 시뮬레이션 결과와 비교하여 보았다. 동역학에서 자전거에 초기 경사각과 핸들의 조향각을 주고 주행하도록 하였다. 속도를 일정하게 유지하도록 하기 위해서, 마찰 및 공기 저항 등을 무시하였다. (Fig. 10a)은 시뮬레이션 결과로 자전거의 주행 궤적을 그린그림이다. 파파도폴로스(Papadopoulos)에 의하면 자전거가 원을 정확히 주행할 때는 자전거 핸들에 운전자가 아무런 토크를 가하지 않아도 핸들의 일정한 각이 유지되는 때이다[4]. 따라서 시뮬레이션의 결과는 초기 속도와 경사각을 결정해주고, 핸들에 아무런 토크를 가하지 않고 주행하도록 하였고, 반지름에 대한 기울기의 값들을 구하였다.

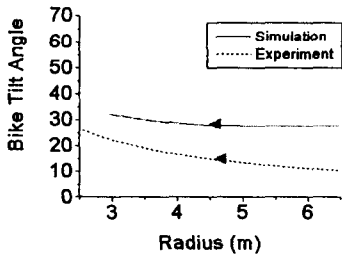
(Fig. 10b)은 두 결과를 비교해서 표시한 그래프이다. 반지름이 3m정도일 때 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 각각 30도 및 20도 정도로 10도 정도의 차이가 있음을 볼 수 있다. 그리고 반지름이 점점 커졌을 때, 실험의 결과는 급격히 감소하지만, 시뮬레이션 결과는 30도 정도를 계속 유지하고 있음을 볼 수 있다. 실험 과정이 반지름이 클수록 실제 결과와 다르게 되어 있다. 시작을 반지름이 큰 궤적에서 점점 작은 궤적으로 갔기 때문에 반지름이 클 때 실제보다 더 작은 값이 나오게 되는데, 이 결과에

	실험	시뮬레이션
속도	18	17.8
핸들 상태	운전자 주행	핸들 토크 없음
운전자 몸무게	60	50
운전자 상태	주행에 적극 참여	운전자 조작 없음

Table 2 시뮬레이션과 실주행 상태 비교



(a)



(b)

Fig. 10 시뮬레이션 결과와 실험 비교

서는 실제보다 훨씬 크게 나와, 실험 과정으로 인한 오차는 아님을 알 수 있다.

3. 결론

실주행시 운전자의 운동 경향을 살펴보기 위하여 자전거를 주행하면서 자전거와 운전자의 중요한 운동을 측정하였다. 주행한 경로는 직선, C곡선, S곡선, 원이고, 각 실험에서, 자전거의 속도, 가속도, 경사각을 측정하여, 이를 근거로 운전자의 중요한 경향 몇 가지를 찾았다.

첫째, 자전거에 토크를 가하려는 움직임은 자전거의 경사각과 운전자의 몸통, 머리의 경사각이 반대의 위상을

가지며 주행하는 것을 확인 하였다. 둘째, 직선 주행에서 자전거, 몸통, 머리의 경사각도는 속도의 2차 함수로 그 경향을 근사화할 수 있음을 보였다. 또한 경사각의 크기는 머리, 몸통, 자전거 순으로 나타났다. 셋째, C 곡선 주행의 경우에도 각 부분의 기울임 각도는 속도의 2차 함수의 2차항으로 그 경향을 근사화 할 수 있으며 경사각의 크기는 직선 주행과 다르게 자전거, 몸통, 머리 순으로 나타났다. 넷째, C 곡선 주행에서 경사각이 속도에 비례할 뿐만 아니라 곡선의 반지름에 반비례하는 경향을 확인하였다. 다섯째, S곡선의 경우 곡선의 반지름이 작을수록 조향에 대한 편향성이 크게 나타났다. 여섯째, 각 부분의 경사각을 2차 함수의 2차항으로 근사하였을 때, 자전거 각도는 크게 변하지 않는 반면, 운전자의 몸통의 경사각이 급격히 커져, 원 주행에서는 핸들의 각도가 보다 중요함을 보였다. 또 경사각의 전체적인 크기가 C곡선이 커, 정상상태의 특성을 가진 원 주행과는 달리 과도기적인 특성을 보였다. 마지막으로, 실제 주행을 통하여 얻어진 데이터와 현재 자전거 시뮬레이터에 사용되는 동역학 엔진과 비교하였고, 경사각의 결과로는 평균 10도 이상의 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

실제 자전거를 주행하면서 얻은 운전자의 경향은 좀더 진보된 자전거 시뮬레이터를 제작할 때 중요한 기본 자료로 사용될 수 있다. 자전거만의 동역학 뿐만 아니라, 운전자의 동역학을 고려하거나, 경향을 사용하여 시뮬레이터 사용자에게 느끼게 하고 싶을 때 사용할 수 있는 기본적인 연구로, 좀더 현실감이 높은 자전거 시뮬레이터를 제작하는데 유용한 자료로 사용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 가상현실 연구센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) F. R. Whitt, D. G. Wilson, "Bicycling Science 2nd," The MIT Press, Figure 7.2, pp155, 1982
- (2) M. L. Hull, R. R. Davis, "Measurement of Pedal Loading in Bicycling: 1. instrumentation," J. Biomechanics, Vol 14, No.12, pp843-856, 1981
- (3) 이정렬, "자전거 시뮬레이터용 운동생성 알고리즘 개발," 석사학위논문, 한국과학기술원, 2000
- (4) J. M. Papadopoulos, "Bicycle Handling Experiments You Can Do, Early draft," Cornell University, Dec. 1987