

자전거 탑승자 대상 자동비상제동장치의 성능평가 시나리오

김태우* · 이경수* · 민경찬** · 이은덕**

Safety Performance Evaluation Scenarios of Autonomous Emergency Braking System for Cyclist Collision

Taewoo Kim*, Kyongsu Yi*, Kyongchan Min**, EunDok Lee**

Key Words : Autonomous emergency braking(자동비상제동장치), Safety assessment procedure(안전 성능 평가), Active safety(능동안전), Driver assistance system(운전자보조장치)

ABSTRACT

This paper present a performance evaluation scenarios to assess the safety performance of autonomous emergency braking (AEB) system for cyclist collision. To guarantee the safety performance of AEB for cyclist, AEB system should be tested in various scenarios which can be occurred in real driving condition. For this, real-traffic car-to-cyclist collision data are analyzed to classify the real traffic collision scenarios. Using this information, typical car-to-cyclist collision scenarios are selected. Also, in order to develop the detail features of these collision scenarios, several accident cases related with these scenarios are explained. Based on these information, test scenarios which can describe the car-to-cyclist collisions occurred in Korea are proposed. For practicality and feasibility of the test scenarios, proposed scenarios should be designed to assess the safety performance of AEB system effectively. For this, some test scenarios are combined or removed based on the consideration about the effectiveness of each scenario to the assessment of the performance of AEB system. To confirm that the proposed test scenarios are realistic and physically meaningful, simulation is conducted using simple AEB system in proposed test scenarios.

1. 서론

자동비상제동장치란 차량에 부착된 카메라, 레이더 등의 센서로부터 얻은 정보를 기반으로 주변의 환경을 인지하고, 사고의 위험이 있는지 판단하여 위험이 예상될 경우 운전자에게 경보하고 차량을 제동하여 사고를 회피하거나 충격을 완화하는 장치로 현재 많은 완성차 업체에서 양산하고 있는 시스템이다.

이러한 자동비상제동장치는 초기에는 전방의 차량을

대상으로 하는 시스템들이 대부분이었으나 최근에는 그 대상이 보행자로 확장되었으며, 추가적으로 자전거를 대상으로 하는 자동비상제동장치와 관련된 연구 역시 활발하게 이루어지고 있다.

이렇게 자전거를 대상으로 하는 자동비상제동장치에 대한 연구가 이루어짐에 따라 차량에 장착된 자전거 대상 자동비상제동장치의 성능을 평가하고자 하는 노력 역시 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 특히 Euro-NCAP(European new car assessment program)에서는 2018년부터 자전거를 대상으로 하는 자동비상제동장치의 성능을 평가할 것으로 고시하였다.⁽²⁾ 또한 이와 관련하여 독일, 스페인 등 Euro-NCAP 관련 멤버국들과 보쉬 등의 제작사 등이 모여 'Assessment methodologies for forward looking

* 서울대학교 공과대학 차량동역학및제어연구실

** 교통안전공단 자동차안전연구원

E-mail : xodn615@snu.ac.kr

integrated pedestrian and further extension to cyclist safety (ASPECSS)'라는 이름의 컨소시움을 개최하는 등 자전거 대상 자동비상제동장치의 성능을 평가하고자 하는 노력을 기울이고 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 국내의 이륜차 사고 통계자료를 기반으로 사고의 특성을 분석하고, 이러한 사고들을 대표할 수 있는 시나리오를 추출하고자 하였으며, 이를 토대로 자전거 대상 자동비상제동장치의 성능을 평가할 수 있는 시나리오를 제안하고자 하였다.

2. 차-대-자전거 대표 사고 시나리오

2.1. 자동비상제동장치 성능평가 대상 시나리오군

자동비상제동장치는 차량 전방에 부착된 카메라 및 레이더 등의 센서를 기반으로 작동하는 장치로, 차량 전방

에 발생하는 위험을 대상으로 하는 시스템이다. 따라서 자동비상제동장치의 성능을 평가하기 위해서는 자동비상제동장치가 정상적으로 작동할 수 있는 범위 내의 타깃을 대상으로 자동비상제동장치의 성능을 확인하여야한다.

이를 위하여 우선적으로 자동비상제동장치의 대상이 될 수 있는 사고 시나리오에 대해 살펴보면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서는 도로상황 및 주변환경, 주변차량 등의 요소는 고려하지 않았으며, 사고 직전의 차량의 거동 및 충돌하는 순간 자전거의 진행방향만을 고려하였다. 또한 자전거가 후방에서 차량을 추돌하는 경우 혹은 차량의 측방에 충돌하는 경우 등 자동비상제동장치를 이용하여 사고를 예방할 수 없는 경우는 포함하지 않았다. 본 연구에서는 이러한 시나리오들을 기반으로 성능평가를 위한 대표 시나리오를 도출하고자 하였다.

2.2. 차-대-자전거 교통사고 통계 분석

다음으로 실제 국내에서 발생하는 자전거사고의 특성을 파악하기 위하여 차-대-자전거 교통사고 통계를 분석하였다. 본 연구에서는 도로교통공단에서 제공하는 교통사고분석시스템(Traffic Accident Analysis System, TAAS)을 기반으로 분석을 실시하였으며, 2010년부터 2014년까지 5년간 발생한 사고들을 대상으로 하였다.

국내에서 발생한 차-대-자전거 교통사고의 사고 유

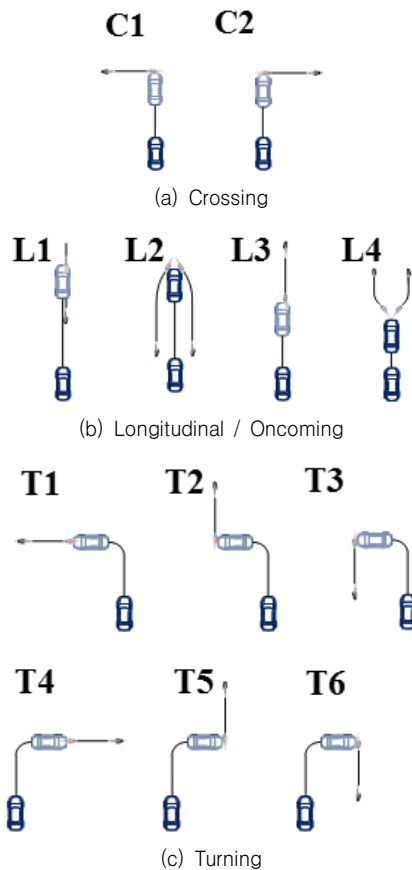


Fig. 1 (a) Wall pressure and (b) skin friction distribution comparison for the 16° compression ramp

Table 1 Collision type statistics in Korea

	Collision type	Accident	
		Count	Rate (%)
Casualties	Total	41,867	100
	Oncoming	900	2.15
	Crossing	20,335	48.57
	Longitudinal	3,226	7.71
	Parking	415	0.99
	etc	16,991	40.58
	Collision type	Accident	
		Count	Fatal rate (%)
Fatalities	Total	888	2.12
	Oncoming	29	3.27
	Crossing	390	43.92
	Longitudinal	167	18.81
	Parking	5	0.56
	etc	297	33.45

형을 알아보기 위해 마찬가지로 2010년부터 2014년까지 발생한 자전거사고 중 차량(승용차, 승합차, 화물차)의 과실로 인해 발생한 사고들의 사고 유형을 살펴보면 Table 1과 같다. Table 1을 살펴보면 차량이 전방에서 횡단하던 자전거의 측면에 충돌하는 측면직각충돌사고(Crossing, 20,335건)가 가장 높은 비율을 보였으며, 같은 방향 진행 중 추돌(Longitudinal, 3226건), 정면충돌(Oncoming, 900건)이 그 뒤를 이었다.

실제로 Table 1를 살펴보면 측면직각충돌이 사상자(Casualty) 및 사망자(Fatalities) 수에서 각각 48.57% 및 43.92%로 가장 높은 비율을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 같은 방향 진행 중 추돌 사고의 경우 그 비중이 측면직각충돌사고 다음으로 높은 사고이면서 동시에 사망률(fatal rate)이 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 같은 방향 진행 중 추돌 사고의 경우 사고가 발생하였을 경우 그 피해가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있었다.

2.3. 차-대-자전거 사고 사례 분석

그러나 위에서 살펴본 사고 유형은 그 분류가 모호한 경향이 있어 실제 발생한 사고들이 어떤 특성을 보이는지 파악하기 힘든 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 실제 발생한 사고 사례들을 조사함으로써 차량과 자전거 사이의 사고가 어떠한 원인으로 발생하는지 살펴보고자 하였다.

자전거사고의 발생원인 및 그에 따른 사고 유형을 살펴보기 위하여 안전행정부에서 발표한 자료에서 제시한 대표 사고 사례를 살펴보면 아래와 같다.⁽³⁾

1) 자동차 차선변경 상황 : 중상 1명

가해 자동차가 차선변경 중, 전방에서 진행 중인 자전거를 발견하지 못하고 자동차의 조수석 뒷바퀴 부분과 자전거의 좌측 부분 충돌

2) 같은 방향 진행 중 추돌 상황 : 사망 1명

가해 자동차가 직진 중(과속 20km/h 초과, 60km/h 도로) 전방에서 같은 방향으로 진행 중인 자전거를 발견하지 못하고 자전거의 후면을 추돌

3) 자전거 측면 추돌 상황 : 사망 1명

가해 자동차가 신호위반하여 교차로 통과 중 우측에서 좌측으로 이동 중인 자전거의 좌측부를 자동차의 정면부로 충돌

4) 자전거 좌회전 상황 : 사망 1명

가해 자동차가 좌회전 중 전방에서 진행 중인 자전거

를 발견하지 못하고 자동차의 좌측부위와 자전거의 우측 부분 충돌

5) 자동차 우회전 상황 : 중상 1명

가해 자동차가 우회전 중 전방에서 진행 중인 자전거를 발견하지 못하고 자동차의 범퍼 우측부분과 자전거의 앞바퀴 부분 충돌

2.4. 자동비상제동장치 성능평가 시나리오

위의 자료를 살펴보면 측면직각충돌사고가 가장 빈도가 높았으며, 같은 방향 진행 중 추돌 사고 및 정면충돌이 그 뒤를 이었다. 이들 세 가지 시나리오는 각각 Fig. 1에 나타난 시나리오군 중 일부를 포함하는데, 측면직각충돌의 경우 C1, C2, T2, T3, T5, T6를, 같은 방향 진행 중 추돌 사고의 경우 L1, L2를, 정면충돌은 L3, L4, T1, T4를 포함하며, C2, L3, L1의 세 가지 시나리오가 각각을 대표한다고 볼 수 있다. 또한 사고사례를 살펴보면 전방 횡단 자전거로 인해 사고가 발생할 때 주변 장애물로 인해 시야가 차단되어 운전자가 반응하지 못하여 사고가 자주 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 C2 시나리오에 대하여 자전거가 장애물 뒤에서 나타나는 경우를 추가로 고려하였다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 사고 시나리오인 측면직각충돌사고, 같은 방향 진행 중 추돌 사고, 정면충돌사고 시나리오 및 장애물이 포함된 측면직각충돌사고를 대표 시나리오로 선정하였다.

이를 기반으로 세부 시나리오를 선정하기에 앞서 이동하는 자전거에 대한 성능평가를 위하여 자전거의 속도를 설정하여야 한다. 행정자치부에서는 어린이 자전거이용자는 7~15km/h의 속도로, 일반 성인 자전거이용자는 15~22km/h의 속도로 운행하는 것을 자전거도로 설계의 기준으로 삼고 있다.⁽⁴⁾ 이에 따라 본 연구에서는 평균적인 속도를 고려하여 자전거의 이동속도를 15km/h로 설정하였다.

또한 차량 속도의 경우 도로교통법 제 19조에 따르면 일반도로에서 자동차는 매시 60킬로미터 이내로 제한하고 있으며,⁽⁵⁾ 실제 자전거와 차량 사이의 사고는 교차로 주행 상황 혹은 자전거가 차도로 통행하는 경우 및 횡단보도 주행상황 등에서 주로 발생한다. 따라서 자전거와 사고가 발생할 때 차량의 속도는 60km/h 이하일 것으로 예상할 수 있다. 이를 토대로 본 연구에서는 차량 속도를 60km/h로 제한하였다. 따라서 자전거의 속도보다 빠른 20km/h에서 60km/h까지를 차량의 속도로 설정하고, 이 경우에

대해 자동비상제동장치의 성능을 평가하고자 하였다.

여기서 장애물이 없는 측면직각충돌사고, 같은 방향 진행 중 추돌 사고, 정면 충돌사고 시나리오의 경우 자동비상제동장치가 작동하지 않는 경우 자전거가 차량의 전면 중앙에 충돌하는 환경에서 자동비상제동장치의 성능 평가를 진행하여 그 성능을 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 장애물이 있는 측면직각충돌사고에 대해 분석하고, 장애물의 적절한 위치를 설정하는 데에 초점을 맞추었다.

3. 자동비상제동 알고리즘

3.1. 자동비상제동 알고리즘 개요

본 절에서는 위에서 제시한 자동비상제동시스템 평가 시나리오의 검증 및 보안을 위하여 간단한 자동비상제동 알고리즘을 설계하였다. 자동비상제동시스템의 경우 각 시스템의 특성에 따라 그 성능에 차이가 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 자동비상제동 알고리즘 대신에 단순한 알고리즘을 사용하였다. 또한 센서 불확실성, 인지에 소요되는 시간, 제어기에서 발생하는 시간지연 등의 성능을 저하시키는 요소들을 측정 거리에 대한 확률적인 오차로써 고려한 알고리즘을 함께 이용하여 각 시나리오에 대해 이상적인 자동비상제동장치의 감속 효과 및 성능 저하 요소들이 고려되었을 경우에 대한 감속 효과를 살펴보고자 하였다.

3.2. 자동비상제동 알고리즘

자동비상제동장치는 운전자가 전방의 위험에 반응하지 못하는 경우 차량에 제동력을 가하여 위험을 회피하거나 충격을 완화하는 장치이다. 본 연구에서는 운전자가 전방의 위험에 대해 제동과 조향 중 하나의 입력만을 이용하여 회피할 수 있다고 가정하였으며, 이때의 회피거동은 종방향 가속도 $-8m/s^2$, 횡방향 가속도 $\pm 4m/s^2$ 를 사용하는 등가속도운동이라 가정하였다. 이때 각각의 거동을 이용하여 전방의 장애물을 회피하는 데에 요구되는 최소 거리는 아래와 같다.

$$d_{braking} = v_{rel} \cdot t_{delay} - \frac{v_{rel}^2}{2a_{x,max}}$$

$$d_{steering} = v_{rel} \cdot \sqrt{\frac{2s_y}{a_{y,max}}} \quad (1)$$

전방의 타깃에 대해 충돌이 예측되는 상황에서 전방 타깃과 자차량 사이의 거리가 식 (1)의 $d_{braking}$ 보다 작을 경우 제동을 이용하여 사고를 회피할 수 없는 경우이며, $d_{steering}$ 보다 작을 경우 조향을 이용하여 사고를 회피하지 못하는 경우이다. 이를 기반으로 본 연구에서는 전방의 타깃에 대해 사고가 예측되는 상황에서 전방 타깃과 자차량 사이의 거리가 $d_{braking}$, $d_{steering}$ 보다 작을 경우 운전자가 사고를 회피하지 못한다고 판단하고, 차량을 제동하는 자동비상제동 알고리즘을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 이상적인 자동비상제동장치와 함께 시스템의 성능을 저하시키는 요소들로 인하여 성능이 저하된 자동비상제동장치를 고려하고자 하였으며, 이때 문제를 단순화하기 위하여 센서에서 측정된 상대거리가 해당 값의 5%내의 오차를 가지는 경우를 가정하였다. 아래의 Fig. 2는 이러한 두 가지 시스템에 대하여 각각이 전방의 정지 장애물에 대해 초기 속도에 따라 최종적으로 속도를 얼마나 감속시키는지 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 초기 차속이 55km/h 이내에서는 이상적으로 충돌을 회피할 수 있는 것을 확인할 수 있으며, 초기 차속이 55km/h 이상에서는 충돌을 완전히 회피하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 약 55km/h 이하에서는 제동회피가, 55km/h 이상에서는 조향회피가 더 적은 거리를 요구하기 때문이다. 또한 Fig. 2에서 Stochastic system에서 Ideal system에 비해 성능이 저하됨에 따라 감속량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

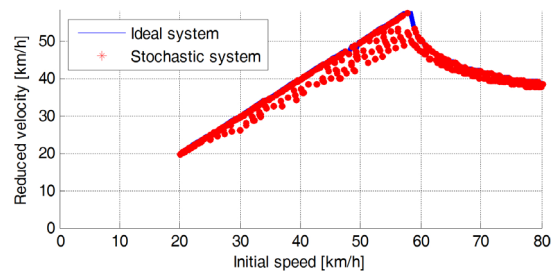


Fig. 2 Speed reduction performance of ideal system and stochastic system

4. 장애물이 포함된 측면직각충돌 세부 시나리오

4.1. 장애물 위치에 따른 자동비상제동장치 성능 변화

장애물이 포함된 측면직각충돌 시나리오는 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 다음으로 Fig. 3은 다양한 초기속도에

자전거 탑승자 대상 자동비상제동장치의 성능평가 시나리오

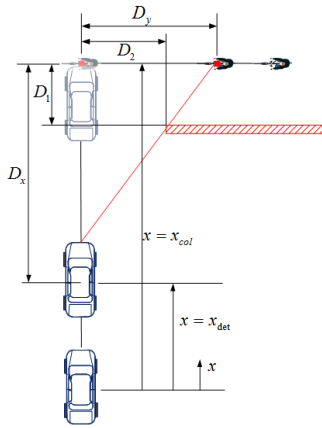


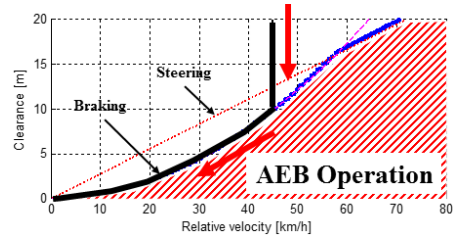
Fig. 3 Crossing cyclist collision with obstacle

대해 자동비상제동장치가 작동되는 시점을 상대속도-상대거리 평면상에 나타낸 것이다. 이때 차량과 자전거가 모두 등속이라고 가정할 경우 D_1 과 D_2 사이의 관계를 타깃을 인지한 순간부터 충돌하는 순간까지 걸리는 시간 (Time from detection to collision, TDC)으로 표현할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

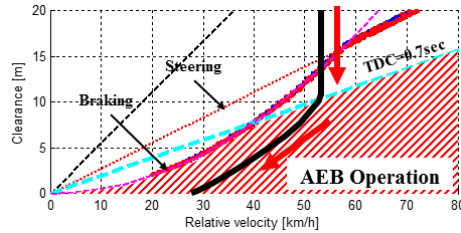
$$D_1 = v_{target} \cdot TDC - \frac{v_{target}}{v_{host\ vehicle}} \cdot D_2 \quad (2)$$

따라서 장애물의 위치에 따라 타깃이 인지된 후 충돌하기까지의 시간을 설정할 수 있음을 알 수 있으며, 이를 이용하여 자동비상제동장치의 성능을 효과적으로 평가할 수 있다. 여기서 자동비상제동장치의 성능을 효과적으로 판단할 수 있는 TDC를 설정하기 위해 다양한 초기속도에서 전방 정지 장애물에 대한 자동비상제동장치의 작동 시점을 상대속도-상대거리 평면상에서 살펴보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 장애물이 없는 상황에서 자동비상제동장치가 작동함에 따른 차량의 거동을 나타내고 있다. 초기에는 시간이 지남에 따라 상대 거리가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 자차량과 타깃 사이의 거리가 제동거리 및 조향회피거리 보다 작아질 경우 자동비상제동장치가 작동하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 장애물이 포함된 측면직각충돌 시나리오에서 자동비상제동장치가 작동하는 상황을 보여주고 있다. 여기서 장애물은 TDC=0.7초를 만족하는 위치에 놓여있으며, 이에 따라 충돌 0.7초 이전까지는 장애물을 인지할 수 없으므로 자동비상제동장치가 작동하지 않는 것



(a)



(b)

Fig. 4 (a) AEB operation region without obstacle (b) AEB operation region with obstacle of 0.7sec TDC

을 확인할 수 있다. 여기서 TDC=0.7초인 상황은 상대속도-상대거리 평면상에서 직선의 형태를 나타내며, 그에 따라 자동비상제동장치가 작동하는 영역이 Fig. 4(b)와 같이 바뀌게 된다.

4.2. 장애물 위치 선정

본 연구의 목적은 자동비상제동장치의 성능을 평가하는 것이며, 실제로 평가를 수행하기 위해서는 최소한의 시나리오로 자동비상제동장치의 성능을 평가할 수 있어야 한다. 특히 장애물이 포함된 측면직각충돌 시나리오의 경우 장애물의 위치에 따라 그 영향이 바뀌기에 장애물의 위치를 적절하게 선정해줄 필요가 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 차량의 속도 범위를 20~60km/h로 설정하였으며, 이러한 속도 범위에서 자동비상제동장치의 성능을 가장 효과적으로 평가할 수 있는 장애물의 위치를 선정하고자 하였다.

Fig. 4(b)를 살펴보면 TDC=0.7초 인 경우 자동비상제동장치를 이용하여 사고를 회피할 수 있는 경계가 약 40km/h 정도로 나타나게 되는 것을 확인할 수 있으며, 차량의 초기속도가 40km/h 미만일 경우 충돌 여부를 통해서, 차량의 초기속도가 40km/h 이상일 경우 충돌시의 상대속도를 통해서 자동비상제동장치의 성능을 평가할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 이를 D_1 과 D_2 로 나타내면

식 (2)에 의해 $D_1 = 1m$ 일 때 $D_2 = 16.48m$, $D_1 = 2m$ 일 때 $D_2 = 16.29m$ 임을 확인할 수 있다.

5. 시뮬레이션

5.1. 장애물이 있는 측면직각충돌상황 시뮬레이션

이렇게 개발된 시나리오에서 자동비상제동장치가 어떠한 특성을 보이는지 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab기반으로 이루어졌으며, TDC=0.7초인 상황에서 초기속도에 따라 어떠한 경향을 보이는지 확인하고자 하였다. 그 결과는 아래의 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)에는 초기 속도에 따른 감속량이, Fig. 5(b)에는 초기 속도에 따른 충돌시의 상대속도가 나타나있으며, 이상적인 경우 약 42km/h 이하의 초기속도에서 사고를 회피할 수 있으나 성능이 저하된 시스템의 경우 42km/h 이하의 저속영역에서도 충돌이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

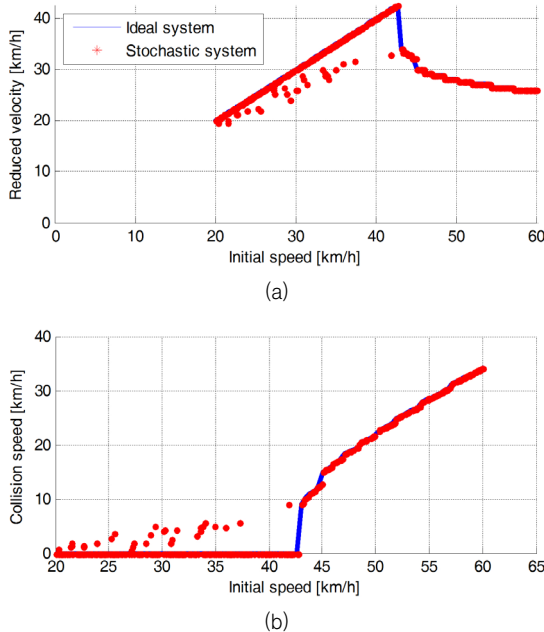


Fig. 5 Crossing with obstacle - simulation result

6. 결론

본 논문에서는 자전거를 대상으로 하는 자동비상제동 장치의 성능을 평가할 수 있는 시나리오를 제시하였다. 이를 위하여 국내에서 발생한 차-대-자전거 사고 통계를 조사하여 대표 시나리오를 선정하였으며, 이를 기반으로 측면직각충돌상황, 정면 충돌 상황, 진행 중 추돌 상황을 대표 시나리오로 선정하였다. 또한 장애물이 있는 상황에서 자동비상제동장치의 성능을 평가하기 위하여 장애물이 포함된 측면직각충돌상황을 고려하였으며, 이 때 자동비상제동장치의 성능을 효과적으로 평가할 수 있는 차량의 초기속도를 설정하였다.

본 논문에서 제시한 시나리오는 이상적인 자동비상제동 알고리즘과 성능 저하가 간단하게 모사된 시스템을 기반으로 세부 조건을 선정하였다. 따라서 이러한 시나리오를 실제 시스템의 평가에 적용하기 위해서는 양산된 시스템 등을 기반으로 실차실험을 통한 검증 및 보완이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 연구비지원(16PTSI-C054118-08)과 2016년 BK21플러스 사업과 the Institute of Advanced Machines and Design (IAMD), Seoul National University에 의하여 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Inseong, Choi, et al., "An Overview on Establishing Safety Assessment Standard of Longitudinal Active Safety System in Korea", ESV 2013-0490.
- (2) Euro-NCAP, 2015, 2020 Roadmap: EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, p. 15.
- (3) 안전행정부, 2013, 자전거 교통사고행태분석을 통한 인프라 개선방안, pp. 60~65.
- (4) 행정자치부, 도로교통부, 2016, 자전거 이용시설 설치 및 관리지침.
- (5) 경찰청, 2015, 도로교통법 2016.2.12. 시행, 19조.