

긴급제동장치 작동 한계 특성에 대한 실험적 연구

김종혁* · 최지훈** · 박정우* · 박종진** · 박하선***

An Experimental Study on the Operating Limit Characteristics of Autonomous Emergency Braking System

Jonghyuk Kim*, Jihun Choi**, Jungwoo Park*, Jongjin Park**, Hasun Park***

Key Words: ADAS(첨단운전자지원시스템), AEB(긴급제동장치), FCW(전방충돌경고장치), AEB operating limit characteristic (AEB 작동 한계 특성), Traffic accident analysis(교통사고분석)

ABSTRACT

Among the various functions of ADAS (Advanced Driver Assistance System), the most important and representative function to the safety of vehicle passengers is AEB (Autonomous Emergency Braking system). In South Korea, laws are in progress from 2022 for making it mandatory for passenger vehicles to be installed. And as AEB-equipped vehicles continues to increase in the future, the demand for accident analysis related to the AEB function is expected to increase in the future. In order to find out the operating limits of AEB, it is necessary to consider the situations exceeding the standards covered by EuroNCAP. Therefore we have performed four experiments in this study, including situations encountered in real-word traffic conditions, i.e., an oblique stop of Global Vehicle Target (GVT) and ADAS sensor failures. These experimental results are expected to be of great help in accurate and reliable accident analysis by considering them when analyzing traffic accidents for ADAS vehicles.

1. 서론

차량 기술의 발전과 함께 운전자의 편의와 안전 성능을 향상시키기 위한 목적으로 첨단 운전자 지원 시스템(ADAS, Advanced Driver Assistance System)이 장착된 차량이 널리 보급되고 있으며, ADAS의 다양한 기능들 중 차량 탑승자의 안전에 가장 중요하면서 대표적인 기능인 AEB (Autonomous Emergency Braking system)는 기본 안전 사양으로 탑재되고 있다. AEB는 긴급 시 차량 시스템이 자동으로 제동장치를 작동하여 다른 차량 또는 보행자 등

과의 충돌을 회피하거나 경감시키는 역할을 하는 능동 안전 시스템으로 미국 고속도로안전보험협회인 IIHS(The Insurance Institute for Highway Safety)에서는 최근 몇 년 동안 미국 내에서 발생한 교통사고 데이터를 분석하였으며, 대형 트럭의 후방 추돌 사고에서 FCW(Forward Collision Warning)와 AEB가 장착된 차량이 사고 발생률을 약 41% 정도 감소시키는 효과가 있는 것으로 보고하였다.⁽¹⁾

이러한 AEB가 지니는 사고 발생률 감소 효과로 인해 유럽개발위원회에서는 유럽, 일본 및 한국 등 총 40개국에 대해 AEB 장착을 의무화하는데 합의한 바 있다. 우리나라의 경우 2017년도부터 11m 이상의 승합차량과 20ton 초과 대형 상용차에 의무 장착하도록 법규가 만들어졌으며, 2022년도부터는 승용차량에도 의무적으로 장착하

* 국립과학수사연구원 교통과, 공업연구사
** 국립과학수사연구원 교통과, 공업연구관
*** 광주과학수사연구소, 소장
E-mail: jhkim11@korea.kr

도록 하는 법규가 시행될 예정이다. 따라서 향후 AEB 기능이 장착된 차량의 보급화가 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, AEB 기능과 관련된 사고에 대해서도 분석 수요가 증가할 것으로 예상된다.

AEB 기능은 탑재되어 있으면 사고를 예방하는데 큰 도움을 주지만 모든 교통사고를 예방할 수는 없으며, ADAS 작동 알고리즘의 기능적인 또는 성능적인 한계로 인해서도 사고가 발생할 수 있다.

AEB에 대한 연구는 주로 시스템의 개발, 평가 및 검증을 위한 목적으로 국내·외에서 활발하게 진행되고 있다. Carabulea 등은 Matlab과 Prescan을 활용하여 AEB 기능이 탑재된 차량의 LRR(Long-Range Radar)과 SRR(Short-Range Radar)의 측정 범위와 차량 속도 및 차량 전방 장애물의 감지 TTC(Time to Collision) 간의 영향성에 대해 연구하였으며, R. Bours 등은 PreScan과 Matlab/Simulink를 이용하여 HIL(Hardware-in-loop) 테스트와 결합한 형태의 AEB 개발 방법을 제안하였다.^(2,3) Lee 등은 커브 곡선 구간에서 AEB의 성능을 향상시키기 위한 방법을 제안하였으며, PreScan과 Matlab/Simulink를 이용하여 제안한 방법을 검증하였다.⁽⁴⁾

Jang 등은 AEB의 안전성 평가를 위해 IMU, DAQ, DGPS 등의 계측 시스템을 구축하였고, AEB의 안정성을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.⁽⁵⁾ 또한 교통사고 분석에 활용할 목적으로도 여러 연구가 진행된 바 있다. Choi 등은 교통사고 분석 프로그램인 PC-Crash에서 AEB 작동 알고리즘을 구현하여 레이더 감지 각도에 따른 충돌 회피 여부를 연구하였다.⁽⁶⁾ Baek 등은 PC-Crash에서 구동할 수 있는 AEB 시뮬레이션 모델을 개발하였다.⁽⁷⁾

Kim 등은 실차 실험을 통해 실차의 AEB 작동 시퀀스 데이터를 취득하였으며, AEB 시뮬레이션 로직에 적용함으로써 실차의 AEB 작동 성능에 매우 가깝게 시뮬레이션을 할 수 있는 실차 실험 데이터 기반의 AEB 작동 시뮬레이션 기법을 제안하였다.⁽⁸⁾

반면 실제 교통 상황에서는 다양한 변수들이 AEB 작동 여부 및 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 본 연구에서는 실차 실험을 통해 AEB의 작동 한계 특성을 파악하고, AEB 관련 교통사고 분석 시 주요 참고자료로 활용하고자 한다.

2. AEB 작동 실험 환경

2.1. 실험 차량 및 환경

실험 차량으로는 국내차량 중 대중성과 판매량을 고려

하여 Fig. 1과 같이 그랜저 2020년식으로 선정하였으며, AEB 기능이 기본적으로 탑재되어 있는 모델이다. 앞범퍼 중앙 부분에 레이더 센서가 장착되어 있고, 전면유리 중앙 상단 부분에 카메라 센서가 장착되어 있다.



Fig. 1 Vehicle under test (Grandeur IG, 2020)

AEB 실험은 지능형자동차부품진흥원(KIAPI) 내 PG (Proving Ground)에서 수행하였다. KIAPI의 PG는 아래와 같이 범용로, 자율주행시험로, 고속주회로 등 실제 차량 개발에 필요한 실차실험을 전반적으로 수행할 수 있도록 설계되어있다. 본 AEB 실험은 Fig. 2와 같이 PG 내 범용로에서 실시하였다.



Fig. 2 Proving ground for AEB experiment

2.2. 실험 장비

① GVT

EuroNCAP 인증 타깃인 GVT(Global Vehicle Target)는 Fig. 3에 나타낸 바와 같으며, GST(Guided Soft Target)이라고도 불린다. GVT는 레이더, 라이다 등의 ADAS 센서를 통해 감지될 수 있고, GPS 위성 수신을 방해하지 않는 재질로 구성되어 있으며, 중량은 327kg으로 실험차량과의 충돌 시 실험차량의 손상을 줄이기 위해 모듈화된 폼(foam) 구조물이 서로 부직포로 연결되어 있어 충돌 시 GVT가 비산되도록 설계되어 있다.



Fig. 3 GVT setup configuration

② 조향핸들 및 페달 로봇

EuroNCAP AEB 실험 기준을 충족하기 위해서는 실험차량과 GVT 간의 오버랩을 정확히 맞추어야 하며, 실험차량의 속도 또한 계기판에 표시되는 속도 기준이 아닌 실제 속도인 GPS 기반의 속도를 따라야 한다. 따라서 EuroNCAP 인증 장비인 ABDynamics사의 조향 로봇과 가속·제동 페달 로봇을 사용하였다. Fig. 4의 조향 로봇은 차량 핸들에 장착되어 GPS 기반으로 차량의 주행 경로를 정밀 제어하는 역할을 하며, Fig. 5의 가속·제동 페달 로봇은 각각 가속 페달과 제동 페달에 장착되어 차량의 속도를 실험 기준에 맞게 정확하게 제어하고, 위급 상황 발생 시 차량을 제동시키는 역할을 한다.



Fig. 4 Steering wheel robot (SR60, ABDynamics)



Fig. 5 Accel. & brake pedal robot (CBAR600, ABDynamics)

③ IMU 및 DAQ

IMU(Inertial Measurement Unit)는 이동물체의 속도와 방향, 중력, 가속도를 측정하는 장치로 DGPS(Differential Global Positioning System)와 함께 연동되어 실험차량의 위치, 속도, 가속도, 회전운동(롤, 피치, 요)에 대한 정확한 데이터를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 Fig. 6과 같이 EuroNCAP 인증 장비인 Oxford Technical Solution사의 RT3002를 사용하였다. GVT, 조향 및 가속·제동 페달 로봇, DGPS/IMU 등의 여러 장비들로부터 취득 가능한 실험 데이터들을 Fig. 7과 같이 Dewetron사의 SIRIUS DAQ(Data Acquisition)를 통해 취득하였다.

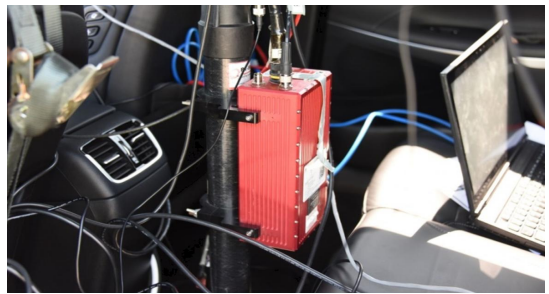


Fig. 6 IMU (RT3002, Oxford)



Fig. 7 DEWE SIRIUS DAQ

3. AEB 작동 한계 실험

AEB 장착 차량의 사고 분석을 위해 실제 교통 상황에서 AEB의 작동 한계를 고려해야 하는 상황은 여러 조건들이 있을 수 있다. 우선 기본적인 시험 기준에 해당되는 EuroNCAP AEB test에서의 작동 특성뿐만 아니라 EuroNCAP에서 다루고 있는 기준을 초과하는 경우에 대해서도 AEB의 작동 한계 특성을 고려하여야 한다. 또한 전방의 차량이 항상 반듯이 정차해 있으리라는 보장이 없기 때문에 비스듬

히 정착해 있는 경우에 대해 고려할 필요가 있다. 그리고 AEB와 관련된 주요 ADAS 센서로는 레이더와 카메라가 있으며, 이 둘 중 하나의 센서가 이물질 부착 또는 파손 등의 문제가 있을 경우 AEB 작동 특성에 미치는 영향에 대해서도 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 총 4가지 상황에 대해 실험을 통해 AEB의 작동 한계 특성을 알아보고자 하였다.

3.1. EuroNCAP AEB test

AEB에 대한 시험 기준은 EuroNCAP에서 가장 대표적으로 다루고 있으며, CCRs, CCRb, CCRm 등 다양한 시험 조건들이 포함되어 있다. 이 중 가장 기본적인 시험 조건이 CCRs(Car-to-Car Rear Stationary)이다. CCRs는 Fig. 8과 같이 평가하고자 하는 차량의 전방에 GVT를 정차시킨 뒤 실험차량인 VUT(Vehicle Under Test)가 GVT의 후방을 향해 주행하면서 AEB를 평가하는 항목이다. 최근에 나오는 차량들의 경우 대부분 AEB와 FCW(Forward Collision Warning)가 합쳐진 타입이며, 이와 같은 경우 성능 시험 기준으로 속도의 범위는 10km/h~50km/h, 오버랩(Overlap)의 범위는 -50%~50%이다.

Car-to-Car Rear stationary

The CCRs scenario is a combination of speed and overlap with 5km/h incremental steps in speed and 25% in overlap within the ranges as shown in the tables below.

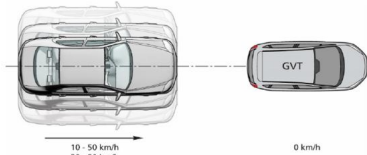


Figure 8-1: CCRs scenario

	AEB + FCW combined		AEB only	FCW only
	AEB	FCW		
AEB CCRs	10-50 km/h -50%~50%	30-80 km/h -50%~50%	10-80 km/h -50%~50%	30-80 km/h -50%~50%

Fig. 8 AEB CCRs test scenario in Euro NCAP

AEB가 작동하게 되면 TTC(Time to Collision, 충돌 소요 시간) 기준으로 FCW가 먼저 작동하게 되고, 이후 부분 제동(Partial Braking)이 작동되면서 약 0.3g 정도의 감속도가 발생하고, 완전 제동(Full braking)이 작동되면서 약 1.0g 정도의 감속도가 발생하게 되어 차량이 완전히 정지하게 된다. 50km/h에서의 그랜저 차량에 대한 AEB 실험 데이터는 Fig. 9에 나타낸 바와 같다. CCRs 100% 조건에서의 AEB 실험은 10km/h에서 70km/h까지 기본 5km/h 단위로 증가시키면서 3회씩 반복하였고, 충돌 시

에는 1회만 진행하였으며, 타깃차량과 자차 간의 상대속도에 따라 FCW, AEB 부분제동 및 완전제동에 대한 3회씩 반복한 TTC를 평균 내어 Table 1과 Fig. 10에 정리하였다.

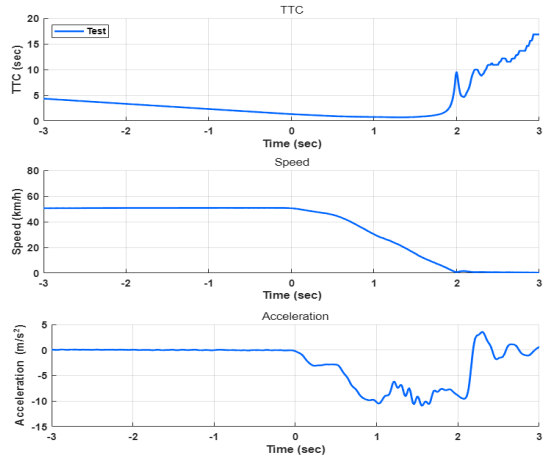


Fig. 9 AEB test data on CCRs 100%, 50 km/h

CCRs 100%에서 AEB는 상대속도가 증가함에 따라 FCW가 작동하는 TTC 또한 증가하는 경향을 나타내었으며, AEB 부분 제동은 40km/h 이상부터 발생하고, 이후 상대속도가 증가함에 따라 AEB 부분 제동이 작동하는 TTC가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 AEB 완전 제

Table 1 AEB operating TTC & result of CCRs 100%

Relative speed (km/h)	Average TTC (sec)			Result
	FCW	Part	Full	
10	1.32	—	0.68	Avoid
15	1.32	—	0.61	Avoid
20	1.48	—	0.67	Avoid
25	1.64	—	0.77	Avoid
30	1.80	—	0.86	Avoid
35	1.91	—	0.96	Avoid
40	2.07	1.07	0.90	Avoid
45	2.18	1.18	0.93	Avoid
50	2.30	1.29	0.96	Avoid
55	2.36	1.35	0.97	Avoid
60	2.49	1.42	0.96	Avoid
65	2.61	1.44	0.99	Avoid
70	2.65	1.48	0.94	Collision

동은 10km/h~35km/h까지는 상대속도가 증가함에 따라 TTC 또한 증가하였지만 이후 40km/h 이상부터는 0.90~0.99초 범위 내에서 작동하며, 70km/h에서 충돌이 발생됨을 알 수 있다.

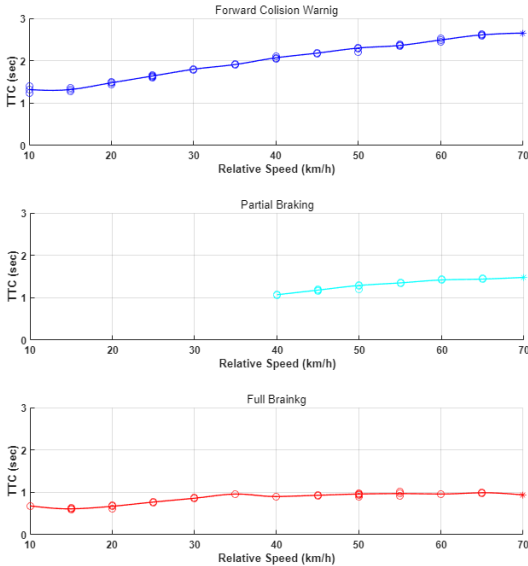


Fig. 10 AEB operating TTC curve according to relative speed

오버랩은 아래 Fig. 11과 같이 GVT와 VUT 간 차량의 폭이 얼마나 중복되는가를 의미한다. GVT와 VUT의 중심선이 완전히 일치하면 100% 오버랩이며 VUT의 중심선이 GVT의 좌측에 있을 경우 부호는 ‘-’가 되며, 반대로 VUT의 중심선이 GVT의 우측에 있을 경우는 ‘+’ 오버랩이다. 평가 시에는 속도를 5km/h 간격으로 증가하며, 오버랩은 25% 단위로 조정한다.

EuroNCAP AEB 시험 기준에 해당되는 오버랩 범위 내

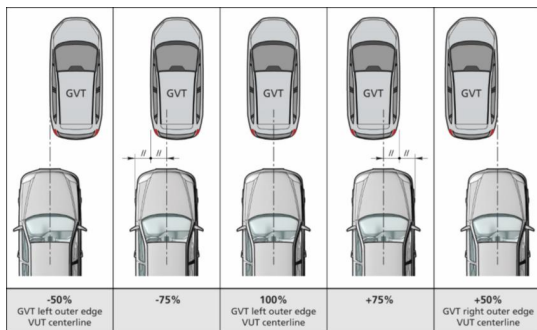


Fig. 11 Overlap test criteria

에서의 AEB 작동 특성이 동일한 지 여부를 확인하고자 오버랩 75%와 50%에 대해서 속도 30, 40, 50km/h에 대해 각각 1회씩 실험을 진행한 결과를 Table 2와 Fig. 12에 정리하여 나타내었으며, 결과에서 알 수 있듯이 유사하게 나타남을 알 수 있다.

Table 2 AEB operating TTC & result of CCRs 100%, 75%, 50%

Overlap (%)	Relative Speed (km/h)	Average TTC (sec)			Result
		FCW	Part	Full	
100	30	1.80	-	0.86	Avoid
	40	2.07	1.07	0.90	Avoid
	50	2.30	1.29	0.96	Avoid
75	30	1.79	-	0.91	Avoid
	40	2.04	1.09	0.91	Avoid
	50	2.30	1.27	0.95	Avoid
50	30	1.80	-	0.92	Avoid
	40	2.09	1.11	0.92	Avoid
	50	2.28	1.28	0.96	Avoid

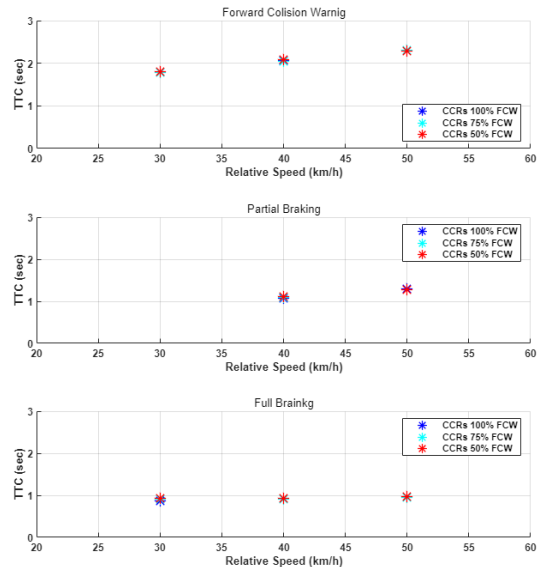


Fig. 12 Comparison of AEB operating TTC within overlap test criteria (CCR 100%, 75%, 50%)

3.2. CCRs 오버랩 기준 초과

EuroNCAP의 기준 오버랩을 초과하는 범위에서 AEB 작동 특성이 어떻게 달라지는지를 확인하고자 오버랩 45%

부터 5% 단위로 실험을 진행하였으며, Table 3에 나타난 바와 같이 오버랩 40%에서 FCW가 작동하고, AEB 부분 제동까지 정상적으로 작동되었으나, AEB 완전 제동이 뒤늦게 작동되면서 충돌이 발생됨을 알 수 있다.

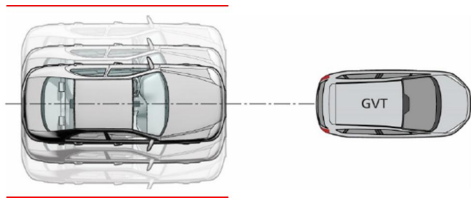


Fig. 13 AEB operating test for CCRs Overlap criteria excess

Table 3 AEB operating TTC & results according to CCRs Overlap criteria excess

Overlap (%)	Relative Speed (km/h)	Average TTC (sec)			Result
		FCW	Part	Full	
45	30	1.75	-	0.90	Avoid
	40	2.08	1.12	0.91	Avoid
40	30	1.84	-	0.54	Collision
	40	2.06	1.08	0.29	

3.3. Target Vehicle 각도 변화

실제 교통상황에서는 전방의 차량이 여러 가지 교통상황으로 인해 비스듬히 정차해 있는 상황이 있을 수 있으며, 이와 같은 경우 AEB의 작동 특성이 어떻게 달라지는지를 알아보하고자 Fig. 14에 나타난 바와 같이 GVT 각도(무게 중심 기준)에 변화를 주며 AEB 작동 실험을 진행하였으며, Table 4에 나타난 바와 같이 각도에 따른 AEB 작동 특성을 비교한 결과, 타깃차량의 각도가 40° 이상 틀어져있을 경우, AEB가 정상적으로 작동되지 않을 수 있고, 충돌될 가능성이 높음을 알 수 있다.

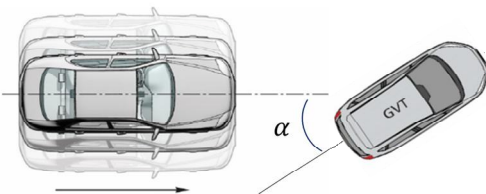


Fig. 14 AEB operating test according to changes in GVT angle

Table 4 AEB operating TTC & results according to angle change of target vehicle

Degree (°)	Relative Speed (km/h)	Average TTC (sec)			Result
		FCW	Part	Full	
15	30	1.77	-	0.89	Avoid
	40	2.02	1.07	0.89	Avoid
20	30	1.8	-	0.9	Avoid
	40	2.06	1.09	0.92	Avoid
25	30	1.79	-	0.88	Avoid
	40	2.01	1.05	0.88	Avoid
30	30	1.74	-	0.85	Avoid
	40	1.23	-	0.89	Avoid
35	30	1.75	-	0.89	Avoid
	40	1.54	1.05	0.91	Avoid
40	30	-	-	-	Collision
	40	-	-	-	
90	30	-	-	-	Collision
	40	-	-	-	

3.4. ADAS 센서 이상 상황

AEB 기능은 레이더 센서와 카메라 센서의 센서퓨전을 통해 작동되므로 이 중 어느 하나의 센서에 이상이 발생했을 때, AEB 작동 특성이 어떻게 달라지는지를 확인하기 위해 ADAS 센서 이상 상황에 대한 AEB 작동 실험을 진행하였다. Fig. 15에 나타난 바와 같이, 레이더 센서의 이상 상황은 알루미늄 호일을 부착하였고, 카메라 센서의 이상 상황은 카메라 센서가 장착되어 있는 위치에 반투명 시트지를 부착하여 카메라 센서의 인식을 방해하였다. 두 경우에 대해 각각 AEB 작동 실험한 결과, FCW와 AEB 모두 작동되지 않았다. AEB의 작동은 레이더 센서와 카메라 센서 중 어느 하나의 센서에서 이상 발생 시 FCW와 AEB 기능은 동작하지 않으며, 이 두 센서가 센서퓨전에 의해 작동됨을 알 수 있다.

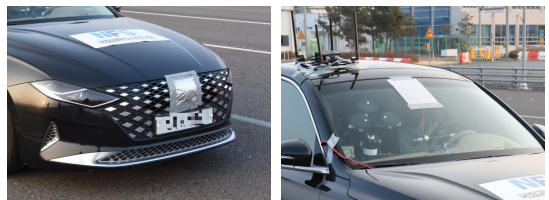


Fig. 15 ADAS sensor malfunction test (left—radar, right—camera)

4. 결 론

본 연구에서는 ADAS 장착 차량에 대한 사고 분석에 활용할 목적으로 AEB의 작동 한계 특성에 대해 실험을 통해 파악하고자 하였다. 실제 교통 상황에서 충분히 발생될 수 있는 4가지의 상황에 대해 AEB 작동 실험을 진행하였으며, 그에 따른 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) EuroNCAP CCRs 시험 기준에 따른 결과, AEB 작동 시 FCW, 부분 제동, 완전 제동이 순차적으로 TTC 기준에 의해 작동되며, 그랜저 차량(2020년식)의 경우 속도 기준인 50km/h를 뛰어넘는 70km/h에서 충돌이 발생됨을 알 수 있다.
- 2) EuroNCAP AEB 시험 기준에 해당하는 오버랩 범위 내에서의 AEB 작동 특성은 매우 유사하며, 오버랩 기준을 초과할 경우 AEB가 정상적으로 작동되지 않아 충돌이 발생될 수 있음을 알 수 있다.
- 3) 전방에 정차 중인 차량의 각도가 틀어져 있는 경우에는 AEB가 정상적으로 작동되지 않아 충돌이 발생될 수 있으며, 그랜저 차량(2020년식)의 경우 약 40° 이상부터 AEB가 작동되지 않아 충돌이 발생될 수 있음을 알 수 있다.
- 4) AEB의 작동은 레이더 센서와 카메라 센서 중 어느 하나의 센서에서 이상 발생 시 FCW와 AEB 기능은 동작하지 않으며, 이 두 센서가 센서퓨전에 의해 작동됨을 알 수 있다.

이러한 실차 실험을 통해 확인한 AEB 작동 한계 특성을 ADAS 장착 차량에 대한 교통사고 분석 시에 반영함으로써 사고 분석 결과에 대한 정확성 및 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 다양한 차종들에 대해서도 추가적인 AEB 실험을 통해 AEB 작동 특성을 데이터베이스화하고, 작동 한계 특성을 사고 분석에 적용하기 위해 지속적으로 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 행정안전부 주관 국립과학수사연구원 중장기과학수사감정기법연구개발(R&D)사업의 지원을 받아 수행한 연구임(NFS2022TAA01).

참고문헌

- (1) J. B. Cicchino, 2017, "Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates," Accident Analysis and Prevention, Vol. 99, pp. 142~152.
- (2) L. Carabulea, C. Pozna, C. Antonya, C. Husar and A. Baicoianu, 2022, "The influence of the Advanced Emergency Braking System in critical scenarios for autonomous vehicles," IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1220, 012045.
- (3) R. Bours, K. Rauf and K. Kietlinski, 2013, "A Method for Developing AEB Systems based on Integration of Virtual and Experimental Tools," 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), paper number 13-0347.
- (4) J. Lee, G. Kim and B. Kim, 2019, "Study on the Improvement of a Collision Avoidance System for Curves," Applied Science, Vol. 9, No. 24: 5380.
- (5) H. Jang, S. Cho and B. Yong, 2013, "The Safety Evaluation Method of Advanced Emergency Braking System," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 21, No. 5, pp. 162~168.
- (6) Y. Choi, S. Kim, J. Jung and J. Yoon, 2017, "A Study on the Applicability of AEBS according to Radar Angle Using PC-Crash and Traffic Accident Database," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 6, pp. 691~701.
- (7) S. Baek, C. Kim, J. Kim, H. Park and J. Lim, 2021, "Development of AEBS Simulation Model for Traffic Accident Analysis of Vehicle with ADAS," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 29, No. 11, pp. 995~1001.
- (8) J. Kim, H. Han, S. Kim, J. Choi, J. Park and H. Park, 2022, "A Study on the AEB Operation Simulation Using PreScan Based on the Vehicle Test," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 30, No. 3, pp. 249~257.