

중형 상용차량 ESC 평가를 위한 Sine with Dwell Test 제안

권백순* · 이경수*

Proposal for Using Sine with Dwell for the Evaluation of ESC for Medium Commercial Vehicles

Baeksoon Kwon*, Kyongsu Yi*

Key Words : Yaw stability(요 안정성), Roll stability(롤 안정성), Medium commercial vehicle(중형 상용차량), Electronic stability control(차량자세 제어장치), Sine with dwell test, Criterion(평가기준)

ABSTRACT

A sine with dwell test is well known as a test scenario for evaluation of performance of electronic stability control(ESC) on passenger vehicles and heavy commercial vehicles. However, when it comes to ESC for medium commercial vehicles, the test scenario has not been established yet. In this paper, the sine with dwell test was modified considering characteristics of medium commercial vehicles. The three main modifications of the original test scenario are the steering angle level, steering frequency, and loading condition of the vehicle. These modifications are derived from simulation study for different medium commercial vehicles. From simulation study, it was shown that the ESC system for medium commercial vehicle is objectively evaluated by the proposed test scenario. A clear improvement on vehicle stability was seen in the results when ESC system was used.

1. 서론

차량자세 제어장치(ESC)는 차량의 브레이크를 독립적으로 제어하여 차량의 요, 롤 안정성 향상에 도움을 주는 장치로, 전 세계적으로 ESC 시스템을 평가할 수 있는 시험 방법 및 평가기준 개발의 필요성이 대두되어 연구가 활발히 진행되어왔다.

차량총중량 4,536 kg 이하에 해당하는 자동차의 ESC시스템의 성능평가 방법 및 기준에 대해 UN/ECE에서는 '08년 6월에 Global Technical Regulation (GTR) No. 8을 공표하였다⁽¹⁾. 이에 미국에서는 미연방 자동차안전기준(FMVSS) No. 126을 통하여 ESC 성능평가 방법 및 기준을 정하고, '11년 9월부터 생산된 차

량에 ESC의무장착을 규정했다⁽²⁾.

차량총중량 11,793 kg을 초과하는 대형 상용차량의 ESC 시스템에 대해서는 '12년 미국에서 FMVSS No. 136의 규정안 제안 공고(Notice of proposed rule-making, NPRM)를 통해 ESC 성능평가 방법 및 기준을 정하였다⁽³⁾. UN/ECE에서는 '11년 승합 및 화물자동차 제동장치에 관한 규정 Regulation No.13에 9인승 이상 승합차, 차량 총 중량 3.5톤 이상 화물차 및 트레일러에 대해 ESC를 정의하고 성능을 검증할 수 있는 조향입력에 대해 나열하였다. 하지만 구체적인 시험 방법이나 성능 평가 기준은 명시되어 있지 않다⁽⁴⁾.

차량총중량 4,536 kg 초과 11,793 kg 이하의 중형 상용차량에 대해서는 유럽이나 미국 모두 명확한 ESC 성능 평가방법 및 성능 기준을 제시하지 않고 있는 상황이다. FMVSS No. 136의 예비규정영향 분석서(Preliminary Regulatory Impact Analysis)에서는 그

* 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : bobboy@snu.ac.kr

이유가 중형 상용차량의 브레이크 종류, 바퀴축의 개수, 화물 종류 등의 다양성으로 인한 가용가능 중형 상용차량 ESC가 아직 개발되어 있지 않기 때문이라고 설명하고 있다⁽⁵⁾.

현재 우리나라 상용차량의 분포를 살펴보면 2014년 기준 중형 상용차량의 비율이 전체 상용차량의 약 63%로 상당 부분 차지하고 있음을 알 수 있다⁽⁶⁾. 따라서 앞으로 국내 산업체에서 중형 상용차량 ESC개발을 위해 가이드 라인을 제시해줄 수 있는 ESC 성능 평가 방안에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 FMVSS No. 136의 대형 상용차량 ESC 평가 시나리오를 분석하고 응용하여 중형 상용차량 ESC를 평가하기 위한 시나리오를 개발하고 시뮬레이션을 통해 시나리오의 적절성을 검증하였다.

2. 중형 상용차량 ESC 요구 기능

ESC의 주요 기능은 크게 평면 포장도로에서 차량 요 안정성 향상과 롤 안정성 향상으로 나뉜다. 또한 ESC 적용차량의 특징에 따라 요구되는 기능이 달라진다. 승용차량의 경우 낮은 질량중심으로 인하여 롤 불안정성보다 요 불안정성 문제가 먼저 발생한다. 반면 대형 상용차량의 경우 높은 질량중심과 적재화물로 인한 롤 불안정성이 요 불안정성보다 먼저 발생한다. 따라서 승용차량 ESC의 요구 기능은 요 안정성 향상에만 초점을 두고 있고 대형 상용차량 ESC의 경우 요 및 롤 안정성 향상이 요구된다.

중형 상용차량 ESC 요구 기능을 정의하기 위해서는 먼저 중형 상용차량의 파라미터 및 거동 특징을 분석하고, 그에 알맞은 ESC 요구 기능을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 상용차량 시뮬레이션 프로그램인 Trucksim에 내장되어 있는 상용차량 파라미터를 근거로 비교 분석을 수행하였다.

2.1. 정적안정성인자(Static Stability Factor, SSF)

정적안정성인자(SSF)는 차량 단독 전복 안정성을 평가하기 위해 사용되는 값으로 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 a_y 는 횡방향 가속도를, g 는 중력가속도, t 는 차량 좌우바퀴 사이 폭, h 는 질량중심의 높이를 나타낸다. SSF의 값이 높을수록 차량의 전복 안정성이 확보됨을 나타낸다⁽⁷⁾.

Table 1 SSF with gross vehicle weight rating

차량 총중량	4,536[kg]이하	4,536[kg]초과 11,793[kg]이하	11,793[kg]초과
차종	승용차, 경트럭	중형 상용차	대형 상용차
SSF	1.02 ~ 1.45	0.65 ~ 1.14	0.51 ~ 0.7

$$SSF = \frac{a_y}{g} = \frac{t}{2h} \quad (1)$$

차량총중량에 따른 SSF를 Table 1에 나타내었다. 승용차 및 경트럭의 데이터는 '05년에서 '08년까지 국내 자동차 안전도 평가(KNCAP) 전복안전성평가 시험에서 측정된 데이터이다⁽⁸⁾. 상용차량의 경우 적재화물의 조건에 따라 SSF값의 변화가 발생하며 대체적으로 승용차보다 SSF값이 낮다. 중형 상용차의 SSF값은 승용차와 대형 상용차의 SSF의 사이 값을 가지며, 특히 완전 적재상태에서는 SSF가 대형상용차의 SSF에 근접하게 낮아지는 것으로 분석되었다. 따라서 중형 상용차량의 ESC요구 기능에는 롤 안정성 향상이 반드시 포함되어야 함을 알 수 있다.

2.2. ESC 요 안정성 향상 기능

ESC의 요 안정성 향상 기능을 Fig. 1에 묘사하였다. 차량의 요 불안정성은 understeer와 oversteer가 있다. 타이어 힘이 선형구간에서 작용할 때 차량의 요 거동이 목표 거동이라 할 때, 어떠한 이유에서 차량의 요 거동이 목표 거동에 미치지 못하면 understeer, 과한 요 거동이 발생하면 oversteer라고 한다. 요 불안정이 발생하였을 때, ESC는 이러한 차량의 거동을 감지하고 목표 거동을 따라갈 수 있도록 적절한 요 모멘트를 발생시키도록 각 바퀴의 독립적 브레이크 입력을 명령해야 한다.

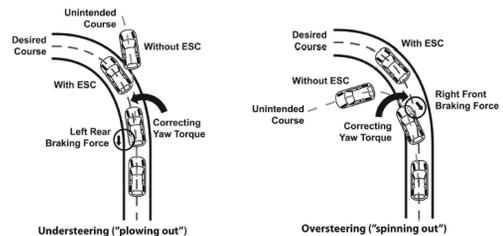


Fig. 1 ESC interventions for understeering and oversteering²

2.3. ESC 를 안정성 향상 기능

ESC의 롤 불안정성 상황을 Fig. 2에 묘사하였다. 차량의 단독 전복은 조향에 의한 과도한 횡방향 가속도가 발생할 때 나타난다. 롤 불안정성이 발생하였을 때 ESC는 차량의 횡방향 가속도를 안전한 수준으로 떨어뜨리도록, 즉 중방향 속력을 줄이도록 브레이크 입력을 명령해야 한다.

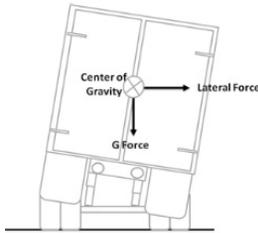


Fig. 2 Vehicle rollover condition³

3. 중형 상용차량 ESC 평가 시나리오

ESC를 평가 하는데 있어 가장 잘 알려진 시나리오는 sine with dwell test(SWD test)이다. FMVSS No. 126과 No. 136 모두 ESC를 평가하는 방법으로 SWD test를 사용하고 있다. 중형 상용차량 ESC를 평가하는데 SWD test를 사용하기 위해 세부적인 시험 방법에 있어 중형 상용차량의 거동 특성에 맞게 시험 조건들을 수정하였다.

3.1. 시험방법

중형 상용차량 ESC 성능평가 시나리오는 크게 주행조건, 화물 적재조건, 도로조건으로 구성되어 있다.

3.1.1. 주행조건

주행 조건은 조향핸들 입력, 초기 속력, 가/감속 조건을 뜻한다.

- 조향핸들 입력: Fig. 3에 나타내었듯 0.6 Hz 사인파형 조향으로 3/4사이클에서 1초 유지시간을 갖는다. 조향입력 진폭은 0.3A에서 0.1A씩 증가시켜 최대 1.3A 또는 400 deg까지 증가 시킨다. A는

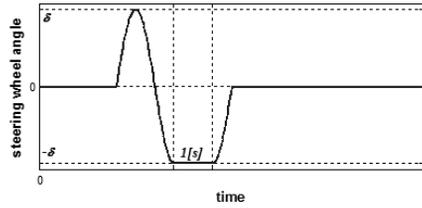


Fig. 3 Sine with dwell maneuver

차량의 기준 조향각으로 점진적 조향 증가 test(slowly increasing steer test, SIS test)에서 0.55g의 횡방향 가속도를 나타내는 조향각이다.

- 초기 속력: 72 km/h
- 가/감속 조건: 조향입력이 들어가는 동안, 기어는 중립으로 하며 일체의 스톱과 브레이크 입력은 없다.

대형 상용차량은 약 48 km/h의 SIS test에서 0.5g의 횡방향 가속도를 갖게 되면 강한 전복위험성이 발생하여 이때의 조향각을 기준 조향각 A로 결정한다⁽⁵⁾. 중형 상용차량은 대형 상용차량보다 SSF가 높다는 점을 고려하여 0.55g의 횡방향 가속도가 발생할 때 조향각을 A로 결정하였다.

승용차에 비해 상용차는 긴 휠 베이스를 갖는다. 이는 상용차량의 조향입력에 대한 차량 거동 응답시간이 승용차 응답시간보다 길어지는 결과를 초래한다. 차량의 응답 특성을 고려하여 승용차량 ESC를 평가하는 SWD 입력에서는 0.7 Hz 사인파를 대형 상용차량 ESC를 평가할 때는 0.5 Hz 사인파를 사용한다. 중형 상용차량 응답속도(휠 베이스 길이)는 승용차와 대형 상용자동차 응답속도의 사이에 존재한다. 이에 근거하여 중형 상용자동차 ESC를 평가하는 SWD 입력 주파수는 0.6 Hz로 결정하였다. 차량 초기 속력은 FMVSS No. 136에 근거하여 72 km/h로 결정하였다.

3.1.2. 화물 적재조건

화물을 적재하는 상용차량의 특성상 차량의 거동은 화물 적재조건에 따라 바뀐다. 일반적으로 화물을 최대로 적재한 조건에서 타이어 슬립각의 증가와 질량중심 높이의 증가로 인해 차량의 요, 롤 불안정성의 가능성이 가장 커진다. 따라서 최대 화물 적재조건에서 test를 진행해야 상용차량 ESC의 적절한 성능평가가 가능하다. 또한 적재 화물의 질량중심이 낮은 조건으로

test를 진행하여 전복 가능성을 최대한 낮추면 ESC의 요 안정성 향상과 롤 안정성 향상의 기능을 모두 평가할 수 있다.

3.1.3. 도로 조건

도로의 마찰계수는 최대의 횡방향 가속도의 크기를 결정한다. 마찰계수가 낮은 노면에서는 요 안정성을 평가할 수 있지만 롤 안정성을 평가할 수 있는 횡방향 가속도를 발생시킬 수 없다. 따라서 차량 요, 롤 안정성을 저해할 수 있는 충분히 큰 횡방향 가속도를 발생시키기 위해 최대 마찰계수 약 0.9를 갖는 건조하고 평평한 노면에서 test를 진행한다.

3.2. 중형 상용차량 ESC 성능 평가기준

SWD test를 통해 요 안정성, 롤 안정성, 반응성, 총세 가지 항목에서 ESC 성능이 평가된다. 각 항목 별 성능 평가기준은 실제 차량 및 ESC시스템의 반복적인 현장 시험을 통해 통계적인 결과를 가지고 결정되어야 하지만, 본 논문에서는 그 사전 단계로 시뮬레이션을 통해 성능 평가기준을 제안하였다.

3.2.1. 요 안정성 평가기준

SWD test를 통한 ESC요 안정성은 요 속도 비(Yaw rate ratio, YRR)로 평가된다. YRR은 식 (2)로 정의된다.

$$YRR_{(T_0+t)} = \frac{\gamma_{(T_0+t)}}{\gamma_{max}} \quad (2)$$

식 (2)에서 T_0 는 조향입력 시작에서 완료까지 시간을 나타내며 γ_{max} 는 시간 T_0 내의 최대 요속도, $\gamma_{(T_0+t)}$ 는 조향입력 완료 후 t 초가 지난 순간에서의 요속도를 나타낸다. YRR은 조향입력 완료 후, 얼마나 빠르게 차량의 회전이 멈추는지를 측정하는 값이며, 값이 낮을수록 요 안정성이 확보됨을 의미한다. 본 논문에서는 중형 상용차량 ESC 성능 기준을 아래의 식 (3), (4)를 모두 만족해야 하는 것으로 제안한다.

$$YRR_{(T_0+0.7)} = \frac{\gamma_{(T_0+0.7)}}{\gamma_{max}} \leq 0.6 \quad (3)$$

$$YRR_{(T_0+1.4)} = \frac{\gamma_{(T_0+1.4)}}{\gamma_{max}} \leq 0.1 \quad (4)$$

3.2.2. 롤 안정성 평가기준

SWD test를 통한 ESC롤 안정성은 횡방향 가속도 비(Lateral acceleration ratio, LAR)로 평가된다. LAR은 식 (5)로 정의된다.

$$LAR_{(T_0+t)} = \frac{a_{y(T_0+t)}}{a_{y,max}} \quad (5)$$

식 (5)에서 T_0 는 식(2)에서와 같은 시간을 나타내며 $a_{y,max}$ 는 시간 T_0 내 차량 질량중심의 최대 횡방향 가속도, $a_{y(T_0+t)}$ 는 조향입력 완료 후 t 초가 지난 순간에서의 횡방향 가속도를 나타낸다. LAR은 조향입력 완료 후, 얼마나 빠르게 차량 횡방향 가속도가 줄어드는지를 측정하는 값이며, 값이 낮을수록 롤 안정성이 확보됨을 의미한다. 본 논문에서는 중형 상용차량 ESC 성능 기준을 아래의 식 (6), (7)을 모두 만족해야 하는 것으로 제안한다.

$$LAR_{(T_0+0.7)} = \frac{a_{y(T_0+0.7)}}{a_{y,max}} \leq 0.4 \quad (6)$$

$$LAR_{(T_0+1.4)} = \frac{a_{y(T_0+1.4)}}{a_{y,max}} \leq 0.05 \quad (7)$$

3.2.3. 반응성 평가기준

SWD test를 통한 ESC반응성은 횡방향 변위(Lateral displacement, LD)로 평가된다. LD는 식 (8)로 정의된다.

$$LD_{(T_i+1.25)} = \int_{T_i}^{T_i+1.25} \int_{T_i}^{T_i+1.25} a_y(t) dt \quad (8)$$

식 (8)에서 T_i 는 조향입력 시작 시간을, $a_y(t)$ 는 시간 t 초에서의 횡방향 가속도를 나타낸다. $LD_{(T_i+1.25)}$ 는 3/4조향 사이클(1.25 초) 동안 차량의 횡방향 변위를 나타내며, 운전자의 의도에 대한 차량의 반응성을 의미한다. 본 논문에서는 중형 상용차량 ESC 성능 기준으로 0.7A이상의 조향입력 진폭에 대해 아래의 식 (9)를 만족해야 하는 것으로 제안한다.

$$LD_{(T_i+1.25)} \geq 1.7 \text{ m} \quad (9)$$

4. 시뮬레이션

검증 된 상용차량 소프트웨어 시뮬레이션 프로그램 Trucksim과 Matlab/Simulink를 사용하여 ESC 평가 시나리오 시뮬레이션을 수행하였다. ESC 알고리즘은 자체 개발하였으며, 시뮬레이션에 사용 된 차량 모델의 파라미터는 Table 2에 나타내었다.

차량마다 SIS test를 수행하여 SWD test를 위한 기준각 A를 먼저 결정하였다. 그 결과 2.5T Truck은 204 deg, Tour bus는 231 deg, 7T Truck은 258 deg의 A를 갖는 것으로 나타났다.

4.1. SWD test 시뮬레이션 결과

Tour bus의 SWD test 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 조향입력 진폭은 1A 였으며 그 외의 주행 조건, 화물 적재조건, 도로 조건은 3.1절에 기술한대로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 ESC 장착 여부에 따라 차량의 요/롤 안정성이 크게 차이가 났다.

Fig. 4-(a)에 나타내었듯 조향입력이 끝난 후 ESC가 장착되지 않은 차량은 요속도가 0으로 수렴하지 못하고 요 안정성이 상실되었다. $YRR_{(T_0+0.7)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 0.02, ESC가 없을 때 1.23을 갖고, $YRR_{(T_0+1.4)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 0.003, ESC가 없을 때 1.46을 갖게 되어 ESC장착 차

량만 요 안정성 평가기준을 만족하였다. 차량의 횡방향 가속도는 Fig. 4-(b)에 나타내었다. $LAR_{(T_0+0.7)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 0.05, ESC가 없을 때 0.87을 갖고 있고, $LAR_{(T_0+1.4)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 0.008, ESC가 없을 때 0.77을 갖게 되어 ESC장착 차량만 롤 안정성 평가기준을 만족하였다. 차량의 횡방향 변위는 Fig. 4-(c)에 나타내었다. $LD_{(T_i+0.7)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 0.05, ESC가 없을 때 0.87을 갖고 있고, $LAR_{(T_0+1.4)}$ 값을 비교해보면 ESC가 있을 때 2.1 m, ESC가 없을 때 2.35 m를 갖게 되어 ESC장착 여부에 상관 없이 운전자 의도에 대한 반응성 평가기준을 모두 만족하였다. Table 3에 조향입력 진폭에 따른 차량 별 SWD test 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 제안 된 ESC 성능 평가 기준을 통해 ESC가 장착되지 않은 차량과 장착된 차량의 안정성을 평가하였고 둘 사이 확연한 차이가 드러났다.

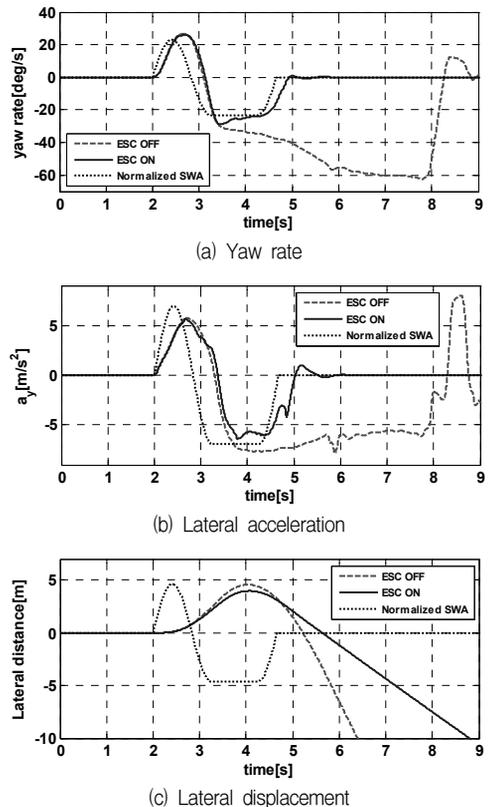


Fig. 4 Results of 1A sine with dwell test of the tour bus

Table 2 Parameter of medium commercial vehicles

차종	2.5T Truck	Tour bus	7T Truck
차량총중량(kg)	5,330	9,620	11,762
휠베이스(m)	4.4	4.49	5
차폭(m)	1.625	2.03	2.03

중형 상용차량 ESC 평가를 위한 Sine with Dwell Test 제안

Table 3 Results of yaw stability, roll stability, and responsiveness criteria of ESC for medium commercial vehicles, oversteer is shortened OS, roll over is shortened RO.

SWA	ESC	$YRR_{(T_0^{*0.7})}$	$YRR_{(T_0^{*1.4})}$	$LAR_{(T_0^{*0.7})}$	$LAR_{(T_0^{*1.4})}$	$LD_{(T_0^{*1.25})}$	Comment
2.5T Truck							
1.0A	Off	1.42	1.57	0.82	0.71	3.17	OS
	On	0.001	0	0.03	0.001	2.49	Pass
1.1A	Off	1.34	1.43	0.79	0.71	3.38	OS
	On	0.001	0	0.03	0.001	2.55	Pass
1.2A	Off	1.28	1.35	0.77	0.72	3.54	OS
	On	0.001	0	0.04	0.003	2.57	Pass
1.3A	Off	1.26	1.3	0.76	0.73	3.67	OS
	On	0.001	0	0.04	0.003	2.64	Pass
Tour bus							
1.0A	Off	1.22	1.46	0.87	0.77	2.37	OS
	On	0.02	0.003	0.05	0.008	2.09	Pass
1.1A	Off	1.30	0.66	0.86	0	2.51	RO
	On	0.03	0.004	0.1	0.01	2.19	Pass
1.2A	Off	1.14	-	0.86	-	2.62	RO
	On	0.04	0.005	0.13	0.013	2.27	Pass
1.3A	Off	-	-	-	-	2.71	RO
	On	0.04	0.006	0.14	0.01	2.33	Pass
7T Truck							
1.0A	Off	0.57	0.07	0.96	0.49	2.18	OS
	On	0.02	0	0.06	0.002	1.95	Pass
1.1A	Off	0.76	0.65	1	0.99	2.29	OS
	On	0.02	0	0.06	0	2.03	Pass
1.2A	Off	0.88	0.94	0.97	0.94	2.38	OS
	On	0.02	0	0.06	0	2.09	Pass
1.3A	Off	0.93	1.02	0.96	0.89	2.46	OS
	On	0.01	0	0.06	0.001	2.15	Pass

5. 결론

본 연구에서는 기존의 SWD test를 수정하여 중형 상용차량 ESC를 평가하기 위한 시나리오와 평가 기준을 제안하였다. 시뮬레이션 연구 결과 제안된 시나리오로 ESC 장착 차량과 미장착 차량의 안정성 차이가 명확히 드러났으며, 평가 기준을 통해 효과적으로 ESC 성능을 평가할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 미래에 보급 될 중형 상용차량 ESC 개발에 있어 설계 기준을 제시할 수 있을 것이다. 또한 다양하고 반복적인 실차 실험을 통해 더 통계적으로 정확한 성능 기준을 마련해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 SNU-IAMD; BK21 프로그램; 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원(14PTSI-C054118-06); 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (2009-0083495)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) 1998 AGREEMENT, *Global Technical Regulation No.8 Electronic stability control systems, Add.8*,

- United Nations Economical Commission for Europe(UNECE), Geneva, June 2008.
- (2) *Federal Motor Vehicle Safety Standards: Electronic Stability Control Systems*. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Docket No. NHTSA-2007-27662, RIN: 2127-AJ77, 2007.
- (3) *Proposed FMVSS No. 136 Electronic Stability Control Systems for Heavy Vehicles, Notice of proposed rulemaking*. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Docket No. NHTSA-2012-0065, RIN: 2127-AK97, 2012.
- (4) *1958 AGREEMENT*, Regulation No. 13 *Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking, Rev.1/Add.12/Rev.7*, United Nations Economical Commission for Europe(UNECE), Geneva, August 2011.
- (5) *Proposed FMVSS No. 136 Electronic Stability Control Systems for Heavy Vehicles, Preliminary regulatory impact analysis*. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, May 2012.
- (6) 2014 국토교통부 자동차 등록현황 보고, <https://stat.molit.go.kr/portal/main/portalMain.do>
- (7) Thomas D. Gillespie, 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, pp. 311.
- (8) 이명수, 김상섭, 2010, 차량무게중심의 측정 및 추정에 관한 연구, Korea, Transaction of KSAE, Vol. 18, No. 5, pp. 91-99.