

WLTP 주행모드에서의 경유차 입자상물질 개수 배출 특성

박준홍*[†] · 이종태* · 김정수* · 김선문* · 안근환*

Measuring Particle Number from Light-duty Diesel Vehicles in WLTP Driving Cycle

Junhong Park, Jongtae Lee, Jeongsoo Kim, Sunmoon Kim and Keunhwan Ahn

Key Words: WLTP(Worldwide Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure), 주행모드(Driving cycle), 소형경유차(Light-duty diesel vehicle), 입자상물질 개수(Particle number)

Abstract

Worldwide harmonized light-duty vehicle test procedure (WLTP) for emission certification has been developed in WP.29 forum in UN ECE since 2007. The test procedure is expected to be applied to Korean light-duty diesel vehicles at the same time of adoption in Europe. The air pollutant emissions from light-duty vehicles have been regulated with weight per distance travelled which means the driving cycles can affect the results. The six Euro-5 light-duty diesel vehicles including sedan, SUV and truck have been tested with WLTP, NEDC which is used for emission certification for light-duty diesel vehicles, and CVS-75 to estimate how much particle number emission can be affected by different driving cycles. The averaged particle number emissions have not shown statistically meaningful difference. The maximum particle number emission have been found in Low speed phase of WLTP which is mainly caused by cooled engine conditions. The amount of particle number emission in cooled engine condition is much different as test vehicles. It means different technical solution is required in this aspect to cope with WLTP driving cycle.

1. 서 론

국내에서 제작 또는 수입되는 자동차는 양산 전개발 단계에서 대기환경보전법⁽¹⁾에 따라 환경부의 배출가스 인증을 받아야 한다. 이는 자동차의 증가로 인한 대기오염을 최소화하기 위한 조치로 미국, 유럽, 일본 등 주요 자동차 생산 및 판매 국가에서도 시행되고 있다. 자동차 제작자가 배출가스 인증을 받기 위해서는 규정된 주행모드를 주행하였을 때 내구성을 고려한 시험결과가 배

출허용기준 이내에 있음을 증명해야 한다.

국내 소형차의 경우 휘발유 및 가스 자동차는 미국에서 도입된 CVS-75⁽²⁾ 모드를 적용하고, 경유차는 유럽의 NEDC⁽³⁾ 모드를 적용하고 있다.

미국, 유럽, 일본은 자국의 도로 주행 특성을 반영한 주행모드를 개발하고 이를 자동차 배출가스 인증에 활용하고 있다. 한국, 중국, 인도 등 그 외의 국가들은 국내 산업과 환경 현황에 따라 이들 국가의 주행모드를 선택적으로 도입하고 있다. UN의 유럽 경제위원회⁽⁴⁾는 WP.29 포럼을 조직하여 자동차 산업의 세계화 추세에 따라 자동차 관련 기준의 국제 표준화를 진행하고 있다. WP.29는 1958년 이후 유럽 내의 국가별 인증 기준을 조화하여 127개의 UN ECE Regulation을 제정하고, 유럽 전체의 통합 인증 규정으로 활용하고 있다. 1998년 이후에는 미국, 일본이 본격적으로 합류하여 전세계의 기

(2013년 9월 10일 접수 ~ 2013년 9월 23일 심사완료, 2013년 9월 25일 게재확정)

*교통환경연구소

[†]박준홍, 회원,국립환경과학원 교통환경연구소

E-mail : pjhy98@korea.kr

TEL : (032)560-7610 FAX : (032)561-7013

술 표준인 GTR (Global Technical Regulation)을 제정하는 논의를 하고 있다. 2013년 1월 현재 11개의 GTR이 제정되었고, 이들은 각국의 자동차 인증 시험 방법에 반영되고 있다.

WP.29에서 소형차의 배출가스 인증 시험방법에 대한 논의는 2007년 일본⁽⁶⁾에 의해 처음으로 제안되었고, 2009년 미국, 유럽, 일본⁽⁶⁾이 구체적인 추진계획을 수립하여 본격적으로 진행되었다. 1단계로 2013년 6월에 표준주행모드인 WLTP의 제정은 완료되었으나, 시험절차에 대한 세부사항이 아직 논의 중이며 2014년 3월까지 주행모드 및 배출가스 시험절차에 대하여 모두 국제 표준을 제정하기로 하였다. 이에 유럽의 경우⁽⁷⁾ 차기의 자동차 대기오염물질 및 연료소비를 인증과 관련하여 WLTP를 도입하겠다고 발표하였으며, 국내의 경우 소형 경유차의 배출가스 인증에 유럽의 기준을 적용하고 있는 만큼, WLTP는 유럽의 도입 시기에 맞추어 국내에도 도입이 될 것으로 예상된다.

자동차의 대기오염물질 기준은 단위주행거리 당 배출된 중량(g/km)으로 설정하고 있다. 이러한 방식으로 산출되는 자동차 배출가스는 주행모드의 특성에 따라 그 결과값이 달라질 수 있다. 이는 국립환경과학원에서 자동차의 대기오염물질 배출량 산정을 위해 산출하는 배출계수가 평균차속의 함수로 설정된다는 점에서도 확인할 수 있다. 따라서 향후 인증시험 모드의 변경에 따라 허용기준이 변화될 수 있고, 자동차 제작사 측면에서는 변화된 인증 모드에 대한 배출가스 영향을 평가해야 할 것이다.

본 연구에서는 WLTP 도입에 따라 경유차의 입자상물질 개수 특성이 기존의 인증시험 모드와 비교하여 어떻게 변화되는지를 살펴보았다. 본 연구는 WLTP 개발 이후 주행모드에 따른 배출가스 특성을 평가한 초창기 연구로서, 향후 이에 대응하고자 하는 국내 자동차 관련 연구기관과 제작사에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시험방법

2.1 시험용 자동차

본 연구에서는 국내 승용형 디젤엔진이 탑재된 세단, SUV, 소형트럭으로서 입자상물질 저감장치인 DPF가 적용된 유로-5 경유차량 6대를 이용하여 평가를 수행하였으며, 차량에 대한 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Main specifications of test vehicles

Test vehicle I.D	Type	Engine volume (cc)	Transmi-ssion	Gross vehicle weight (kg)
TV1	Sedan	1995	Auto 5	1755
TV2	SUV	1995	Auto 5	1960
TV3	SUV	2231	Auto 6	2360
TV4	SUV	2959	Auto 7	2650
TV5	SUV	2696	Auto 5	2520
TV6	Truck	2497	Manual 6	3465

2.2 측정장비

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 환경부의 소형경유차 배출가스 인증시험 규정⁽⁸⁾에 따라 차대동력계-CVS(Constant Volume Sampler) 장비를 활용하였다. 차대동력계는 자동차가 평지를 주행할 때 받는 주행저항을 전기적인 제동장치를 이용하여 모사한다. 시험자동차의 차대동력계 주행 중에 발생하는 배기가스는 블로워에 의해 매우 빠른 유속으로 외부공기와 희석되어 오리피스를 통과하게 된다. 이때 희석 배기가스가 임계속도까지 가속되면, 희석 터널내의 유량이 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 가지게 된다. 희석터널에서 샘플링된 입자상물질의 개수 농도를 측정하고, 희석터널의 유량을 이용하면 중량단위의 배출율을 산출할 수 있다. 자동차 배기가스와 외부공기 간의 희석비는 Carbon balance 방법으로 계산할 수 있다. 이러한 측정장치를 CVS(Constant Volume Sampler)라 하는데, 이를 이용하면 자동차 주행 중의 급격한 배기가스 유량 변화에 관계없이 일정한 CVS 유량값을 이용할 수 있어 결과의 신뢰성을 높일

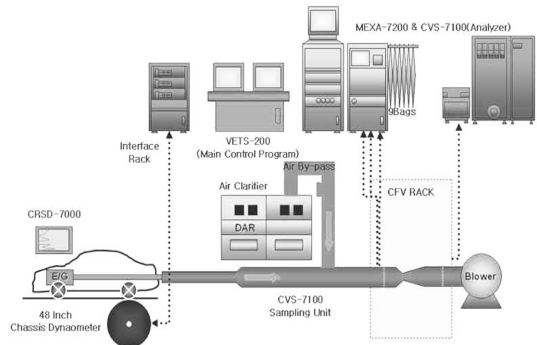


Fig. 1 Schematic diagram for vehicle emission test

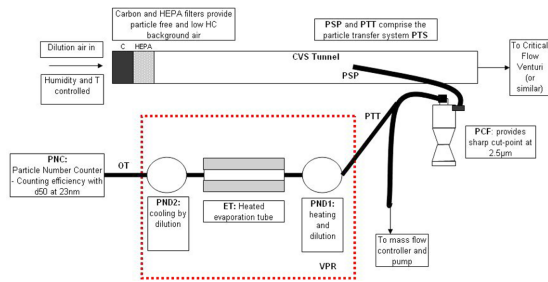


Fig. 2 Schematic diagram of particle number measurement system prescribed by UNECE regulation 839)

수 있다.

국내의 입자상물질 개수 측정은 Fig. 2와 같이 유럽의 UN ECE Regulation No. 83⁽⁹⁾의 규정을 도입하였다. 본 연구에서는 동 규정에 적합한 입자 측정 장치를 적용하였는데, 입자분류기, 회석장치, 휘발성 입자 제거장치, 입자계수기로 구성된다. 회석터널에서 샘플링된 배기가스는 입자분류기에서 2.5 µm 이상인 입자는 제거된다. 이후 회석장치와 증발기를 통해 휘발성 입자를 제거하는데, 장치는 10,000 #/cm³ 이상 개수의 30 nm크기 테트라산탄 입자를 99% 이상 증발시킬 수 있어야 한다. 입자계수기는 23 nm 이상의 입자 개수를 측정할 수 있어야 하며, 41 nm 이상 입자의 측정효율이 90% 이상이어야 한다.

2.3 WLTP 주행모드 특성

WLTP 주행모드는 미국, 유럽, 일본, 한국, 인도의 실제 도로 주행데이터를 측정하여 개발되었다.⁽¹⁰⁾ 국가별 도로 교통량 통계를 활용하여 가중계수를 구하고, 이를 반영하여 차속-가속도 분포를 산정한다. 도로 주행데이터에서 정지 상태에서 가속 및 감속 후에 정지되는 기간까지를 short trip으로 정의한다. short trip을 임의로 조합하여 산출한 차속-가속도 분포와 실제 도로 주행조건에서 측정된 차속-가속도 분포가 가장 유사한 short trip 조합을 최종 주행모드로 결정하는 방식으로 개발되었다. 차속-가속도 분포의 유사성 검증은 통계적 방법인 카이제곱 검정을 적용하였다.

Fig. 3에는 최종 개발된 WLTP 주행모드를 현재 경유 자동차에 적용중인 NEDC 모드, 휘발유자동차에 적용중인 CVS-75 모드와 함께 나타내었다. WLTP 모드는 저속, 중속, 고속, 초고속의 4가지 세부구간으로 나누어지며, 도입국의 필요에 따라 초고속 구간은 도입하지 않아도 된다. 초고속 구간은 최대속도가 약 132 km/h에

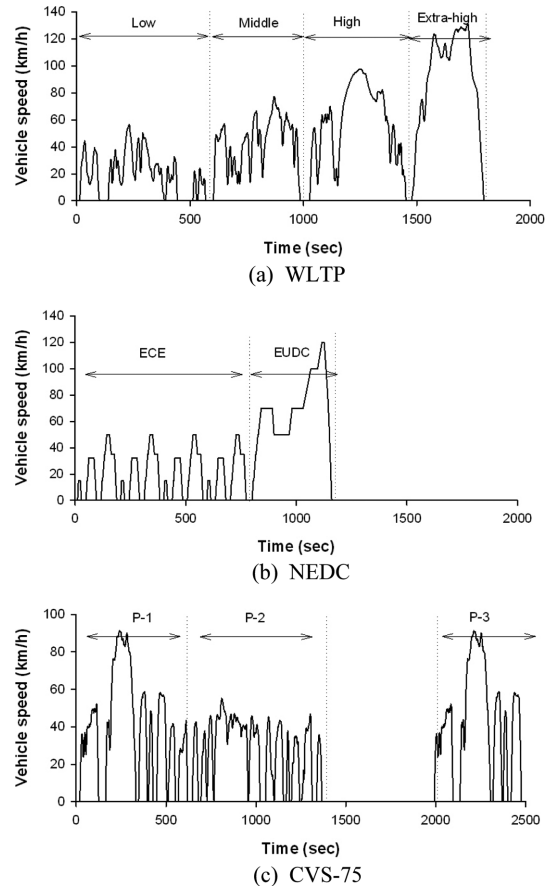


Fig. 3 Vehicle speed profiles of WLTP, NEDC and CVS-75

Table 2 Comparison of driving parameters in driving cycles

Driving cycles	Time (s)	Avg. vehicls speed (km/h)	Max. vehicle speed (km/h)	RPA (m/s ²)
WLTP (LMHE)	1800	46.6	131.3	0.160
WLTP (LMH)	1477	36.6	97.4	0.178
NEDC	1180	33.9	120	0.116
CVS-75	1875	34.4	91.2	0.184

이를 정도로 상당히 고속구간이다. 향후 국가별로 초고속 구간의 도입 여부가 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 2가지 경우에 대해 모두 검토하였다. Table 2에는 WLTP와 기존 인증시험모드의 주요 주행인자 특성을

Table 3 Driving parameters in phases of WLTP

Driving cycles	Time (s)	Avg. vehicle speed (km/h)	Max. vehicle speed (km/h)	RPA (m/s ²)
Low	589	18.9	56.5	0.205
Middle	433	39.5	76.6	0.196
High	455	56.6	97.4	0.135
Extra-high	323	92.0	131.3	0.125

비교하여 나타내었다. 평균차속은 WLTP 저속-중속-고속(WLTP-LMH) 모드와 CVS-75, NEDC 모드가 유사한 수준이지만, 평균상대가속도(RPA)는 NEDC 주행모드가 가장 낮다. WLTP 전체 모드는 초고속 구간의 영향으로 평균차속이 타 모드 대비하여 약 10 km/h 높게 나타나지만, 평균가속도는 NEDC 보다는 높은 수준이다. Table 3에는 WLTP 모드의 각 차속구간의 주요 주행인자 특성을 나타내었다. 평균차속과 가속도의 특성을 고려하였을 때 대체로 도심, 교외, 전용도로, 고속도로의 특성과 유사한 것으로 판단된다.

3. 연구 결과

3.1 주행모드에 따른 입자상물질 개수

Fig. 4에는 현행 소형경유차 인증시험 모드인 NEDC의 입자상물질 개수와 비교하였을 때 WLTP 및 CVS-75 주행시의 결과를 나타내었다. 6대 차량의 평균값은, NEDC 4.64×10^{11} , CVS-75 1.67×10^{11} , WLTP-LMH 4.63×10^{11} ,

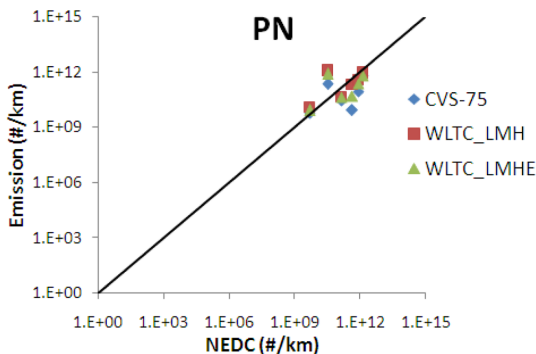


Fig. 4 Comparison of particle number from diesel vehicles as driving cycles

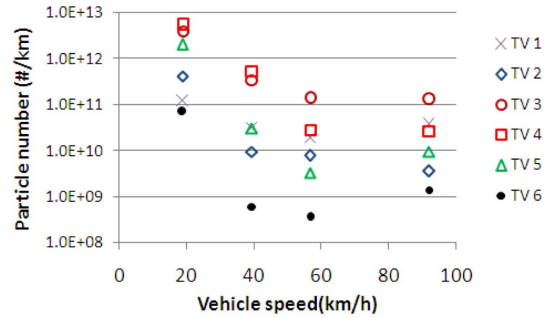


Fig. 5 Comparison of particle number from diesel vehicles as averaged vehicle speed in each phase of WLTP

WLTP-LMHE 2.97×10^{11} 로서 NEDC와 WLTP-LMH에서 다소 높게 나타났다. 그러나 이표본 t-검정(쌍체비교)를 수행한 결과 주행모드에 따른 평균값들은 양측검정 95% 신뢰구간에서 통계적으로 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다. 이는 입자상물질 저감장치인 DPF가 주행모드의 차이에 관계없이 정상적인 성능을 나타내기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 5에는 WLTP 주행모드의 구간별 입자상물질 개수를 평균차속에 따라 나타내었다. Table 3에 나타나 있듯이 WLTP 모드는 평균차속이 18.9, 39.5, 56.6, 92.0 km/h의 소구간으로 구성되어 있다. 모든 차량에서 저속 구간(Low phase)의 단위 주행거리당 배출량이 가장 높게 나타났다. 단위주행거리 당 배출량은 그 특성상 시간에 따른 배출율(g/h)을 차속(km/h)으로 나누어 준 값이다. 따라서 평균차속의 변화에 관계없이 시간에 따른 배출율이 유사하다면 차속이 낮을수록 단위 주행거리당 배출량은 높게 나타날 수 있다. 한편 WLTP 주행모드는 엔진 냉각수 온도가 20~30°C 수준의 냉간 운전 조건에서 배출가스 시험을 실시하므로, 냉간시의 배출량이 전체 결과에 영향을 줄 수도 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 WLTP 주행모드시의 배출특성에 대한 이해를 위해 평균차속과 엔진 냉각 및 열간 조건에서의 입자상물질 개수 특성에 대해 고찰해 보았다.

3.2 평균차속에 따른 입자상물질 개수에 대한 영향

Fig. 6에는 NEDC, CVS-75, WLTP 주행모드에서의 열간 운전 조건에 해당되는 소구간들에서 입자상물질 개수의 시간에 따른 배출율을 나타내었다. 시험차량 별로 차이는 있지만, 평균차속이 증가하면 시간에 따른 입자상물질 개수의 배출율은 유사하거나, 다소 증가하는

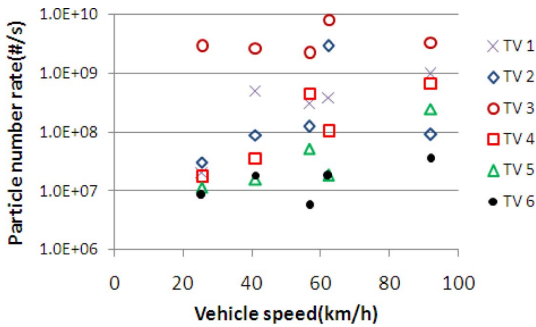


Fig. 6 Comparison of particle number rate from diesel vehicles as averaged vehicle speed in hot-engine phases of driving cycles

경향을 보여준다. 따라서 Fig. 5에 나타난 WLTP의 저속 모드에서 단위 주행 거리당 입자상물질의 개수가 높게 나타나는 것은 배출을 측면의 차이에서 나타나는 것은 아닌 것으로 판단된다.

3.3 엔진 냉간 조건의 입자상물질 개수에 대한 영향

Fig. 7에는 TV2 차량의 WLTP 주행시의 실시간 차속 변화 및 입자상물질 개수 배출을 나타내었다. 시동초기에 입자상물질의 배출율이 매우 높게 나타나고, 이후 안정화 되는 것으로 나타났다. 시동초기의 엔진 냉간 운전 조건에서 엔진에서 배출되는 입자상물질의 배출량이 높고, DPF의 극미세 입자 저감성능도 안정화 되지 않은 상태인 것으로 판단된다.

엔진 냉간 조건의 영향은 CVS-75 모드 주행시 phase 1과 phase 3 구간의 결과값을 비교함으로써 파악할 수 있다. CVS-75 모드의 phase 1과 phase 3는 차속 프로파일은 동일하고, 시동조건에 있어서 phase 1은 냉간 phase 3는 열간조건에서 시작된다. 시험차량의 phase 1

의 단위주행 거리당 입자상물질 개수는 phase 3의 1.7~332.9배까지 차이가 있는 것으로 나타났다. DPF의 냉간 운전 조건에서 저감성능은 차량에 따라 상당한 차이가 있는 것으로 보이며, 이런 특성에 따라 WLTP 주행 모드 대응방안이 달라져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내 소형경유차 6대에 대하여 WLTP 주행모드 및 기존의 NEDC와 CVS-75 모드에서 주행하여 입자상물질의 개수 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시험 경유 차량의 주행모드별 단위 주행거리당 입자상물질 개수 결과에 대한 이표본 t-검정 결과 95% 신뢰구간에서 평균값의 차이는 없는 것으로 나타났다. WLTP 주행모드에서의 입자상 물질 개수 특성은 기존의 NEDC 주행모드와 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.
2. WLTP의 구간 별 주행모드에서 단위 주행거리 당 입자상물질 개수는 저속구간(Low phase)에서 가장 높게 나타났고, 대체로 평균차속이 높아 짐에 따라 낮아지는 경향이였다.
3. WLTP의 저속 모드에서 단위 주행거리 당 입자상물질의 개수가 높은 것은 평균차속에 따른 배출율의 차이보다는 냉간 운전 조건에서 입자상물질 개수 배출율이 높은 것이 주원인으로 나타났다.
4. CVS-75 모드의 엔진 냉간 운전 구간인 Phase 1과 열간 운전 구간이 Phase 3의 입자상물질 개수 결과를 비교한 결과 시험차량에 따라 Phase 1의 배출량이 Phase 3 대비하여 1.7~332.9배 높게 나타났다. 차량의 설계 특성에 따라 엔진 냉간 조건에서 DPF의 극미세 입

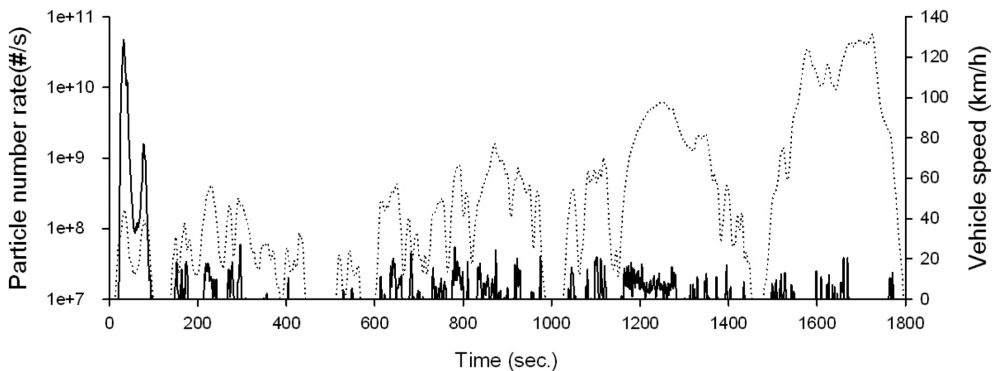


Fig. 7 Real time particle number rate in WLTP driving cycle

자 저감 성능은 상당한 차이가 있는 것으로 보이며, 이러한 차이에 따라 WLTP 대응 방안도 달라져야 할 것이다.

참고문헌

- (1) 환경부, 대기환경보전법 시행규칙 별표 17.
- (2) US Environmental Protection Agency, 40 CFR Part 86, Subpart B-Test Procedures.
- (3) European Commission, “On the approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information”, Regulation (EC) No 715/2007, 2007.
- (4) UN Economic Commission for Europe, “World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), How It Works and How to Join It”, 2012.
- (5) UN Economic Commission for Europe, “Proposal to develop a global technical regulation on worldwide harmonized light-duty test procedure (WLTP), Submitted by the representative of Japan”, ECE/TRANS/WP.29/2007/98, 2007.
- (6) UN Economic Commission for Europe, “Proposals to develop new global technical regulations and/or amendments to established global technical regulations, Submitted by the European Community, Japan and the United States of America”, ECE/TRANS/WP.29/2009/131, 2009.
- (7) CARS21 High Level Group, “On the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union”, Final Report, pp. 60-62, 2012.
- (8) 환경부, 제작자동차 시험검사 및 절차에 관한 규정, 환경부고시 2012-122호, 2012.
- (9) UN Economic Commission for Europe, “Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements”, UN ECE Regulation No. 83, 2011.
- (10) UN Economic Commission for Europe, “Progress report of World-wide Light-duty Test Cycle and Mode Construction”, GRPE-66-34, 2013.