

## 미국의 차량 배출가스 종류와 분석모형



이 건 우 | 한양대학교 공학기술연구소/교통물류공학과 연구교수

### 1. 서론

지구온난화 및 환경오염 문제가 전세계적으로 대두되고 있는 상황에서 우리나라도 이런 동시대적 흐름에 맞춰 녹색성장이라는 국가적 목표하에 환경문제 및 녹색기술 개발에 많은 투자와 노력이 이루어지고 있다. 교통 및 도로부문에서도 환경에 대한 문제가 예외가 될 수는 없다. 에코드라이빙, 탄소 중립형 도로와 같은 다양한 녹색기술 관련 도로정책들이 여러 전문가와 연구자 사이에서 제시되고 있다.

이러한 녹색기술 관련 도로 운영 정책 및 기술들을 실제 정책에 반영하기 위해서는 현 상황 및 여러 대응 시나리오에 따른 정확한 환경적 분석(Environmental impact analyses)이 필요하다. 이를 위해서는 도로 부문에서 환경적으로 악영향을 끼치는 주된 요인인 차량운행에 따른 배출가스량 분석(vehicle emission analyses)이 필수적이라 할 수 있겠다. 하지만 국내에서는 외국에서 개발되어 환경적 정책 평가에 활용되고 있는 정형화된 차량 배출가스 분석 모형이 거의 개발되어 있지 않는 실정이다.

본 기사에서는 미국에서 현재 개발되어 사용되고

있는 차량 배출가스 분석 모형과 이에 따른 배출가스의 종류에 대한 내용을 소개하고자 한다. 배출가스의 종류는 미국 환경부에서 제시한 대기오염물질을 중심으로 내용이 다루어지고, 차량 배출가스 분석모형은 거시적 모형과 미시적 모형으로 구분하여 소개하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 차량 배출가스의 종류

미국 환경부(U.S. EPA)는 6종류의 대기오염물질을 기준오염물질(criteria pollutant)로 정의하였다. 기준오염물질로는 오존(O3), 일산화탄소(CO), 황산화물(SO), 질소산화물(NOx), 납(Pb), 그리고 미세먼지(PM)가 있다. 이 중에서 차량은 납을 제외한 기준오염물질을 발생시키는 주된 요인 중에 하나이다.

#### • 오존(O3)

오존은 성층권에서 자연발생적으로 생겨나는 good

ozone과 지상층에서 형성되는 bad ozone으로 크게 2가지로 구분할 수 있다. 여기서 bad ozone은 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOC)이 열과 햇빛과 함께 화학적으로 반응하여 간접적으로 생성된다. 이 bad ozone은 지구 온난화와 도시의 열섬현상을 일으키는 주된 원인 중에 하나이고, 천식과 같은 폐기능 관련 질병에도 악영향을 미치는 요소 중에 하나이다. 산업시설물, 발전시설, 그리고 차량들이 오존을 발생시키는 주된 오염원들이다(U.S.EPA, 2003a).

• 일산화탄소(CO)

무색 무취 가스인 일산화탄소(CO)는 화석연료가 불완전연소(incomplete combustion) 시에 발생하며, 특히 추운 계절에 많이 발생한다. 일산화탄소는 또한 신체기관 및 조직에 산소공급을 줄여 공공보건에도 악영향을 끼친다. 전체 일산화탄소 배출량의 약 85%가 주로 도로에서 주행하는 차량들로부터 발생한다(U.S.EPA, 2005).

• 황산화물(SO<sub>2</sub>)

황산화물은 황이 포함된 연료가 탈 때, 주로 생성되고 물에 쉽게 용해되는 성질이 있다. 황산화물은 다른 가스들과 반응하여 대기 중에 황을 발생시킨다. 이 황산화물도 오존처럼 천식과 같은 폐기능과 관련 질병에 악영향을 끼치는 물질이다. 황산화물의 주된 오염원으로는 화력발전이 전체 발생량의 약 70%를 차지하고 있으며, 차량 중에서는 경유를 사용하는 차량인 디젤 기관차와 배에서 주로 발생한다.

• 질소산화물(NOx)

일산화탄소 처럼 무색 무취인 질소산화물(NOx)은 고온에서 화석연료가 타는 과정에서 형성된다. 하지만, 질소산화물은 종종 대기 중에 미세물질들과 결합하여, 도시지역에 적갈색층을 형성하기도 한다. 질소산화물은 bad ozone과 산성비를 일으키는 주요 오염물질이고, 호흡기 관련 질병을 일으키기도 한다. 질소산화물의 주된 오염원은 차량이며, 전체 발생량

의 약 55%를 차지하고 있다.

• 납(Pb)

납은 현재 금속처리공장에서 주로 발생하고 있으며, 1978년 이후로 특히 차량에서 발생하는 양이 크게 줄어든 오염물질이다. 납은 심장 및 혈관 질병, 혈관, 뼈, 그리고 근육에 축적 시 신경시스템 이상을 일으키는 해로운 물질 중에 하나이다.

• 미세먼지(PM)

미세먼지(Particulate Matter)는 대기 중에서 매우 작은 물질과 액상 물방울(liquid droplets)을 구성하고 있고, 다양한 오염원으로부터 대기 중에 형성된다. 대기 중에서의 미세먼지는 치사율을 높이는 것으로 알려져 있다. 미세먼지는 크기에 따라 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 크게 2가지로 구분할 수 있다. PM<sub>10</sub>은 10 마이크로 미터 보다 작은 입자들로 구성되어 있고, 폐나 혈관에 침투하여 폐기능 질환을 일으킨다. 2.5 마이크로 미터 보다 작은 미세입자들로 구성된 PM<sub>2.5</sub>는 폐기관 및 혈관 깊숙이 들어가 천식, 심장병, 그리고 미성숙아와 유산같은 질병을 일으켜 공공보건에 악영향을 끼친다(그림 1 참조). 미세먼지는 발전소, 농업, 차량 등 다양한 오염원으로부터 발생한다. 특히 차량에서는 경유를 주로 사용하는 화물차량 및 기관차에서 발생한다. 전체 차량 미세먼지 발생량 중 약 72%는 경유 차량에서 발생한다.

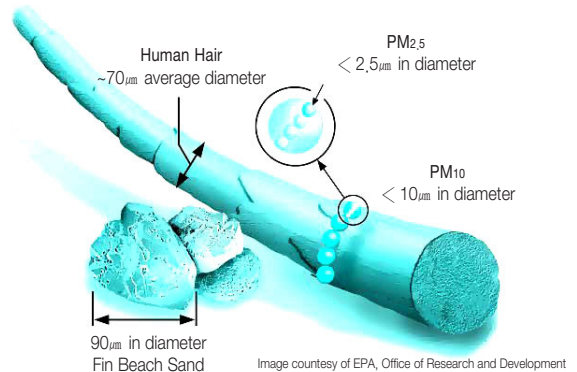


그림 1. 미세먼지의 크기 : PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>(U.S. EPA)

## 2.2 미국의 차량 배출가스 모형

차량 배출가스 추정모형은 차량 정지 모드(idling mode) 및 주행 모드(cruising mode)와 같은 차량 activity로부터 발생하는 배출량을 계수를 고려하여 추정한다. 배출가스는 차대 동력계(chassis dynamometer)나 on-board unit(OBU)와 같은 측정장비를 사용하여 수집한다. 그리고 이렇게 수집된 배출가스 자료는 속도(혹은 가속도)와 차량 주행거리 함수의 형태로 배출가스 종류별로 구분지어 모형화한다. 배출가스 추정모형은 차량의 종류(승용차, 트럭), 연료의 종류(휘발유, 경유), 그리고 차량의 연식별로 구분하여 모형화한다. 예를 들자면, 승용차 등의 차량은 일반적으로 휘발유를 사용하고, 기관차, 군용 장비, 화물트럭 등 많은 힘을 요구하는 차량들은 경유를 주 연료로 한다(Sawyer et al.,2000).

차량 배출가스 추정모형은 크게 거시적 모형(macroscopic or macro-scale)과 미시적 모형(microscopic or micro-scale)으로 구분할 수 있다. 분석수준은 차량활동 입력자료(inputs of vehicle activities)와 연구대상의 범위(size of study area)에 따라 결정할 수 있다. 도시 단위 및 지역수준의 배출가스 분석이 필요할 경우에는 차량활동 자료수집이 상대적으로 용이한 거시적 모형을 사용하는 것이 적합하다. 거시적 모형은 차량의 평균속도와 이동거리(VKT 혹은 VMT)를 차량활동 입력자료로 요구한다. 반면에, 미시적 추정모형은 거시적 모형에 비해 대상지역이 상대적으로 작은 범위로 할 때, 그리고 상세한 수준의 도로 교통 운영 전략 평가 시에 주로 고려된다. 미시적 모형은 초단위로 개별 차량의 가감속을 고려하기 때문에, 상세한 수준의 차량활동 입력자료(예, 초단위 차량계적자료)를 요구한다.

현재 미국에서 개발되어 사용하고 있는 거시적 배출가스 분석 모형으로는 미국 환경부에서 개발한 MOBILE6(U.S.EPA, 2003b)와 캘리포니아에서 개발한 EMFAC 2007(CARB, 2006)이 대표적 모형이다. 미시적 수준에서 분석할 수 있는 모형에는 캘리포

니아 리버사이드 대학에서 개발한 Comprehensive Modal Emission model(CMEM)과 버지니아텍에서 개발한 Virginia Tech Microscopic Emission Model(VT-Micro)가 대표적이다. 그리고, 가장 최근에 미국 환경부에서 개발한 MOVES라는 차량 배출가스 추정모형이 존재한다(U.S. EPA, 2009a). MOVES 모형은 미시적 분석과 거시적 분석을 모두 할 수 있는 장점이 있다.

### 2.2.1 거시적 차량 배출가스 모형

미국에서 사용되는 거시적 배출가스 분석 모형인 MOBILE6와 EMFAC은 차량활동 기반 배출계수(vehicle activity specific emission rate)를 추정하기 위해서, 차종, 차량연식 및 중량, 차량 평균속도, 온도 및 습도, 에어컨의 사용, 그리고 차량운행 모드(예, 주행, 정지)를 고려한다. 총 배출량은 차량 활동기반으로 추정된 배출계수와 차량 이동거리의 곱으로 계산된다(Rakha, Ahn and Trani, 2003). 하지만, MOBILE6와 EMFAC이 서로 비슷한 차량활동 입력자료를 요구한다고 할지라도, 두 모형간의 차량 배출량 분석결과는 다르게 나타난다. 주된 이유는 EMFAC은 캘리포니아에서만 사용하기 위해서 개발된 모형이고, 반면에 MOBILE6는 미국 전체의 자료를 취합하여 개발된 모형이기 때문이다(Claggett and Houk, 2008).

#### • MOBILE6

MOBILE6는 2001년에 첫 번째 버전이 개발되었다. 초기 버전 MOBILE6는 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)만 분석 가능하였고, 이후 버전에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 미세먼지(PM)에 대한 배출량 분석이 포함되었다. MOBILE6의 모형식은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$EF = \sum VMT \times (BER \times CF) \quad (1)$$

여기서, EF는 차량 배출가스량을 나타내고, VMT는 각 차종의 차량 이동거리를 나타내며, BER는 차

량 배출계수, 그리고 CF 는 온도와 같은 상관계수를 나타낸다.

입력변수 중에서, 평균속도는 도로 종류별, 시간 대별 모든 차량 종류를 고려한 평균속도의 분포로부터 계산된다. 다시 말해서, MOBILE6는 각 차종 개별의 평균속도를 고려할 수는 없다. MOBILE6는 차량 무게(vehicle loads)와 연료종류(fuel types)에 따라서 26개의 차종으로 구분하며, 차량운행모드(vehicle driving mode)와 도로의 종류(road type)도 고려하여 개발되었다(표 1과 표 2참조)(U.S.EPA, 2003b).

표 1. MOBILE6 차종 구분(U.S.EPA, 2003b)

번호	차종	내용
1	LDGV	Light-Duty Gasoline Vehicles (Passenger Cars)
2	LDGT1	Light-Duty Gasoline Trucks 1 (0-6,000 lbs. GVWR, 0-3,750 lbs. LVW)
3	LDGT2	Light-Duty Gasoline Trucks 2 (0-6,000 lbs. GVWR, 3,751-5,750 lbs. LVW)
4	LDGT3	Light-Duty Gasoline Trucks 3 (6,001-8,500 lbs. GVWR, 0-5,750 lbs. ALVW)
5	LDGT4	Light-Duty Gasoline Trucks 4 (6,001-8,500 lbs. GVWR, greater than 5,751 lbs. ALVW)
6	HDGV2b	Class 2b Heavy-Duty Gasoline Vehicles (8,501-10,000 lbs. GVWR)
7	HDGV3	Class 3 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (10,001-14,000 lbs. GVWR)
8	HDGV4	Class 4 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (14,001-16,000 lbs. GVWR)
9	HDGV5	Class 5 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (16,001-19,500 lbs. GVWR)
10	HDGV6	Class 6 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (19,501-26,000 lbs. GVWR)
11	HDGV7	Class 7 Heavy-Duty Gasoline Vehicles (26,001-33,000 lbs. GVWR)
12	HDGV8a	Class 8a Heavy-Duty Gasoline Vehicles (33,001-60,000 lbs. GVWR)
13	HDGV8b	Class 8b Heavy-Duty Gasoline Vehicles (>60,000 lbs. GVWR)
14	LDDV	Light-Duty Diesel Vehicles (Passenger Cars)
15	LDDT12	Light-Duty Diesel Trucks 1 and 2 (0-6,000 lbs. GVWR)
16	HDDV2b	Class 2b Heavy-Duty Diesel Vehicles (8,501-10,000 lbs. GVWR)
17	HDDV3	Class 3 Heavy-Duty Diesel Vehicles (10,001-14,000 lbs. GVWR)

18	HDDV4	Class 4 Heavy-Duty Diesel Vehicles (14,001-16,000 lbs. GVWR)
19	HDDV5	Class 5 Heavy-Duty Diesel Vehicles (16,001-19,500 lbs. GVWR)
20	HDDV6	Class 6 Heavy-Duty Diesel Vehicles (19,501-26,000 lbs. GVWR)
21	HDDV7	Class 7 Heavy-Duty Diesel Vehicles (26,001-33,000 lbs. GVWR)
22	HDDV8a	Class 8a Heavy-Duty Diesel Vehicles (33,001-60,000 lbs. GVWR)
23	HDDV8b	Class 8b Heavy-Duty Diesel Vehicles (>60,000 lbs. GVWR)
24	MC	Motorcycles (Gasoline)
25	HDGB	Gasoline Buses (School, Transit and Urban)
26	HDDBT	Diesel Transit and Urban Buses
27	HDDBS	Diesel School Buses
28	LDDT34	Light-Duty Diesel Trucks 3 and 4 (6,001-8,500 lbs. GVWR)

\* ALVW = Alternative Loaded Vehicle Weight; GVWR= Gross Vehicle Weight Rating

표 2. MOBILE6 배출가스 형태 구분(U.S.EPA, 2003b)

번호	운행모드	내용	배출가스	차종
1	Running	Exhaust Running Emissions	All except tire and brake wear	All
2	Start	Exhaust Engine Start Emissions (trip start)	HC, CO, NOX, & toxics	Light-duty vehicles and MC
3	Hot Soak	Evaporative Hot Soak Emissions (trip end)	HC, BENZ, MTBE	Gas, inc. MC
4	Diurnal	Evaporative Diurnal Emissions (heat rise)	HC, BENZ, MTBE	Gas, inc. MC
5	Resting	Evaporative Resting Loss Emissions (leaks and seepage)	HC, BENZ, MTBE	Gas, inc. MC
6	Run Loss	Evaporative Running Loss Emissions	HC, BENZ, MTBE	Gas, inc. MC
7	Crankcase	Evaporative Crankcase Emissions (blow-by)	HC	Gas, inc. MC
8	Refueling	Evaporative Refueling Emissions(fuel displacement and spillage)	HC, BENZ, MTBE	Gas, inc. MC
9	Break Wear	Particulate matter from brake component wear	Brake wear particulate	All
10	Tire Wear	Particulate matter from tire wear	Tire wear particulate	All

\* MC = Motorcycles; MTBE= methyl tertiary butyl ether; BENZ= benzene; Gas, inc. MC= Gasoline including motorcycles.

• Emission FACtors Model(EMFAC)

EMFAC 모형은 거시적 수준에서 차량 배출가스를 분석하기 위해서, 2000년에 캘리포니아 환경부(California Air Resources Board:CARB)에서 처음 개발되었다. EMFAC 모형의 가장 최신 버전은 2006에 배포되었고, EMFAC 2007이라 부른다. EMFAC은 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 미세먼지(PM), 황산화물(SO<sub>2</sub>), 납(Pb), 그리고 연료소비를 분석할 수 있다. 그리고 EMFAC은 MOBILE과 달리 미세먼지를 PM<sub>10</sub> 와 PM<sub>2.5</sub>로 구분하여 분석할 수 있는 장점이 있다. EMFAC은 MOBILE과 비슷하게 차량의 무게와 연료의 종류에 따라 13종류로 차량을 구분한다. 차량 배출량 분석을 위해서 EMFAC은 차량의 연식, 지역 인구, 차량 이동거리, 그리고 통행의 수를 필요로 한다. 또한 EMFAC은 MOBILE 처럼 차량의 운행조건에 따른 분석도 가능하다(CARB, 2006).

EMFAC M의 모형식은 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$EF = \sum(\sum BER \times TF) \times VMT \quad (2)$$

표 3. EMFAC2007 차량 구분(CARB, 2006)

차종 번호	연료종류	내용	차량 무게 (lbs)	약어
1	All*	Passenger Car	All	LDA
2	All*	Light-Duty Trucks	0-3,750	LDT1
3	Gas, Diesel	Light-Duty Trucks	3,751-5,750	LDT2
4	Gas, Diesel	Medium-Duty Trucks	5,751-8,500	MDV
5	Gas, Diesel	Light-Heavy-Duty	5,801-10,000	LHDT1
6	Gas, Diesel	Light-Heavy-Duty	10,001-14,000	LHDT2
7	Gas, Diesel	Medium-Heavy-Duty	14,001-33,000	MHDT
8	Gas, Diesel	Heavy-Heavy-Duty	33,001-60,000	HHDT
9	Gas, Diesel	Other Buses	All	OB
10	Diesel	Urban Buses	All	UB
11	Gas	Motorcycles	All	MCY
12	Gas, Diesel	School Buses	All	SBUS
13	Gas, Diesel	Motor Homes	All	MH

\* gas, diesel, and electric

여기서 EF는 차량 배출가스량, VMT는 각 차종의 차량 이동거리(각 차종별 이동거리의 비율), BER는 차량 배출계수, 그리고 TF는 각 차종의 기술적 기능의 비율을 나타낸다.

2.2.2 미시적 차량 배출가스 모형

미시적 모형(microscopic or microscale emission models)은 거시적 모형과 달리, GPS와 같은 측정 장비 및 미시적 교통 시뮬레이션 분석에서 발생하는 차량궤적(second-by-second vehicle trajectories)의 초단위의 순간 속도와 가속도를 고려하여 차량의 배출가스와 연료소모를 측정한다. 따라서 미시적 모형은 교통혼잡, 신호체계 등의 다양한 교통운영조건 하에 환경적 분석이 가능하다(Park and Rakha, 2006; Boriboonsomsin and Barth, 2008). 미국에서 현재 개발되어 주로 사용되고 있는 미시적 모형으로는 University of California, Riverside에서 개발한 CMEM과 Virginia Tech에서 개발한 VT-Micro가 있다(Barth et al., 2000; Ahn et al., 1999; Rakha and Ahn, 2004).

• Comprehensive Model Emissions Model(CMEM)

CMEM(Barth et al., 2000)은 University of California, Riverside, University of Michigan, 그리고 Lawrence Berkeley National Laboratory 이 공동으로 연구를 시작하여 1995년에 처음으로 개발되었다. CMEM은 미국에서 개발된 미시적 모형 중에 가장 많이 사용되고 있는 모형이기도 하다. CMEM은 차량의 운영에 따른 차량 물리적 특성과 힘을 기반(physical, power-demand modal emission model)으로 만들어진 모형이다. CMEM 모형의 일반적인 구조는 연료비율(fuel rate, FR), 엔진 배기배출량(engine-out emission indices), 그리고 시간종속 촉매통과 비율(time-dependent catalyst pass fraction, CPF)의 요소를 구성하고 있다. 그 모형식은 식(3)과 같다.

$$Tailpipe\ Emission = FR \cdot \left( \frac{g_{emission}}{g_{fuel}} \right) \cdot CPF \quad (3)$$

표 4. CMEM 차종 구분(George and Barth, 2006)

카테고리	차량 기술 카테고리
Normal Emitting Cars	
1	No Catalyst
2	2-way Catalyst
3	3-way Catalyst, Carbureted
4	3-way Catalyst, FI, >50K miles, low power/weight
5	3-way Catalyst, FI, >50K miles, high power/weight
6	3-way Catalyst, FI, <50K miles, low power/weight
7	3-way Catalyst, FI, <50K miles, high power/weight
8	Tier 1, >50K miles, low power/weight
9	Tier 1, >50K miles, high power/weight
10	Tier 1, <50K miles, low power/weight
11	Tier 1, <50K miles, high power/weight
24	Tier 1, >100K miles
50	LEV PC (Low Emission Vehicles)
51	ULEV PC (Ultra Low Emission Vehicles)
52	PZEV (Partial Zero Emission Vehicle)
Normal Emitting Trucks	
12	Pre-1979 (<=8500 GVW)
13	1979 to 1983 (<=8500 GVW)
14	1984 to 1987 (<=8500 GVW)
15	1988 to 1993, <=3750 LVW
16	1988 to 1993, >3750 LVW
17	Tier 1 LDT/2/3 (3751-5750 LVW or Alt. LVW)
18	Tier 1 LDT4 (6001-8500 GVW, >5750 Alt. LVW)
25	Gasoline-powered, LDT (> 8500 GVW)
40	Diesel-powered, LDT (> 8500 GVW)
41	Pre 1991, 2-stroke HDDT
42	Pre 1991, 4-stroke HDDT
43	1991 to 1993, 4-stroke, Mech. FI HDDT
44	1991 to 1993, 4-stroke, Elect. FI HDDT
45	1994 to 1997, 4-stroke, Elect. FI HDDT
46	1998, 4-stroke, Elect. FI HDDT
47	1999 to 2002, 4-stroke, Elect. FI HDDT
High Emitting Light Duty Vehicles	
19	Runs lean
20	Runs rich
21	Misfire
22	Bad catalyst
23	Runs very rich

여기서, FR은 연료사용률(fuel use rate, grams/s),  $g_{emission} / g_{fuel}$ 은 엔진 배기 배출량(단위 : units of grams of engine-out emissions per gram of fuel consumed), 그리고 CPF는 배기구에서 배출되는 배기량의 비율(ratio of tailpipe to engine-out emissions)이다. CPF는 일반적으로 연료/공기 비율과 배출량의 함수이다.

CMEM은 연료의 종류, 배출가스 정제기술, 차량 이동거리, 차량의 무게, 그리고 차량의 연식을 고려하여 36개의 차량형태로 구분한다(Barth et al., 2006; George and Barth, 2006). CMEM은 연료 소모량(FC), CO, NOx, CO<sub>2</sub>, HC를 분석할 수 있다. CMEM의 경우를 기반으로 하는 차량에 대한 미세먼지(PM)의 분석과, 최근 출시된 차량에 대한 분석에는 한계가 있다.

• VT-Micro

VT-Micro는 미시적 교통 시뮬레이션 모형인 INTEGRATION의 한 부분으로 사용되기 위해 Virginia Tech에서 개발하였다(Ahn et al., 1999; Rakha and Ahn, 2004). VT-Micro는 연료소모량을 비롯하여 HC, CO, NOx, CO<sub>2</sub>, and PM에 대한 분석이 가능하다. VT-Micro의 모형식은 회귀분석 모형(log-transformed regression model)을 바탕으로 개발되었다. VT-Micro는 가감속을 구분하여 변수들을 추정하였고, 그 모형식은 식(4)와 같다.

$$MOE_e = \begin{cases} e^{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (L_{i,j}^e \times u^i \times a^j)}, & \text{for } a \geq 0 \\ e^{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (M_{i,j}^e \times u^i \times a^j)}, & \text{for } a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, MOE<sub>e</sub>는 순간 연료 소모량 및 차량 배출량(1/s in the case of fuel consumption and mg/s in the case of vehicle emissions), L<sub>i,j</sub><sup>e</sup>과 M<sub>i,j</sub><sup>e</sup>은 속력 'i'와 가속력 'j'일 때, MOE 'e'의 회귀계수, u는 차량 순간 속도(km/h), 그리고 a는 차량 순간 가속도(km/h/s). VT-Micro는 데이터 마이닝 기법 중에 하나인 CART 알고리즘(classification and regression tree (CART) algorithm)을 활용하여, 차

종을 구분하였다(Rakha, Ahn and Trani, 2004).

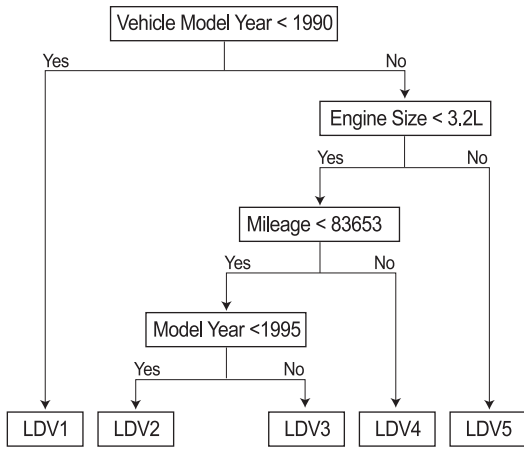


그림 2. CART algorithm 기반 VT-Micro 차종 구분도 (Rakha et al., 2004)

### 2.3 Motor Vehicle Emission Simulator(MOVES)

MOVES(U.S.EPA, 2009; U.S.EPA, 2010)는 미국 환경부(U.S. EPA)에서 2009년에 개발된 차량 배출가스 분석 툴로써, 기존의 모형인 MOBILE6를 대체하기 위해 만들어졌다. MOVES는 VSP(Vehicle specific power)와 속도를 고려한 Modal binning 방법(modal binning approach)을 사용하였다. VSP 함수식은 식(5)와 같다(Nam, 2003).

$$VSP = v \times (a \times (1 + \epsilon) + g \times grade + g + C_R) + 0.5d \times C_D \times A \times v^3 / m \quad (5)$$

여기서,  $v$ 는 차량속도(m/s),  $a$ 는 차량가속도(m/s<sup>2</sup>),  $\epsilon$ 는 회전질량(rotational mass)을 설명하는 질량계수(mass factor),  $g$ 는 중력가속도,  $grade$ 는 도로구배(%),  $C_R$ 는 회전저항(rolling resistance, ~0.0135),  $d$ 는 공기밀도(air density, 1.2),  $C_D$ 는 공력저항계수(aero-dynamic drag coefficient),  $A$ 는 앞면면적(frontal area, 0.7), 그리고  $m$ 은 차량 무게(단위 : metric tons)를 나타낸다. 일반적인 계수값들을 적용한 VSP 함수식은 식 (6)과

같다(U.S.EPA,2003c).

$$VSP(kw/metric ton) = v \times (1.04 \times a + 9.81 \times grade + 0.132) + 0.00121v^3 \quad (6)$$

MOVES는 휘발성 유기화합물(VOC), CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> 등을 분석할 수 있으며, 하이브리드 차량을 포함한 도로 상에서 발생하는 다양한 형태의 배출량 분석이 가능하다. MOVES와 MOBILE6의 초기 결과 비교분석에 따르면, VOC 배출량의 경우 MOVES가 MOBILE6에 비해 낮은 값이 도출되는 경향이 있고, 질소산화물과 미세먼지의 경우 MOVES가 MOBILE6에 비해 높게 나타나는 경향이 있다(U.S.EPA, 2009).

MOVES의 차종 구분은 FHWA의 HPMS(Highway Performance Monitoring System)를 바탕으로 구분되어져 있고, HPMS의 차종 구분에 부합되는 MOVES의 차종은 표 5와 같다.

MOVES의 주된 장점은 3개의 다른 위계(national, county, project)에서 차량 배출량 분석이 가능한 것이다. National과 county 수준에서 거시적 분석 방법으로 배출량을 추정하고, 반면에, project 수준에서는 도로 링크별 평균속도를 고려한 거시적 분석과 차량계적자료를 바탕으로 한 미시적 분석이 가능하다.

표 5. MOVES 차종과 HPMS 차종 구분(U.S.EPA, 2010)

MOVES ID	MOVES 차종	HPMS ID	HPMS 차종
11	Motorcycle	10	Motorcycles
21	Passenger Car	20	Passenger Cars
31	Passenger Truck	30	Other 2 axle-4 tire vehicles
32	Light Commercial Truck	30	Other 2 axle-4 tire vehicles
41	Intercity Bus	40	Buses
42	Transit Bus	40	Buses
43	School Bus	40	Buses
51	Refuse Truck	50	Single Unit Trucks

<표 계속>

52	Single Unit Short-haul Truck	50	Single Unit Trucks
53	Single Unit Long-haul Truck	50	Single Unit Trucks
54	Motor Home	50	Single Unit Trucks
61	Combination Short-haul Truck	60	Combination Trucks
62	Combination Long-haul Truck	60	Combination Trucks

\* Short-haul truck is a combination truck with the majority of operation within 200 miles of the home base. On the other hand, long-haul truck operates beyond 200 miles of the home base. Intercity bus does not include transit buses or school buses and is mainly used by commercial carriers for city-to-city transport.

### 3. 결론

본 기사에서는 미국의 차량 배출가스 종류와 배출가스 분석 모형을 거시적 수준과 미시적 수준으로 구분지어 기술하였다. 정형화된 국내형 차량 배출가스 모형의 구축 시에 본문에 기술한 체계 및 접근방법을 바탕으로 개발이 이루어진다면, 현재 미국에서 개발되어 사용되고 있는 차량 배출가스 분석모형 보다 나은 국내형 모형개발을 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

Ahn, K., Trani, A., Rakha, H. and Van Aerde, M. (1999) 'Microscopic Fuel Consumption and Emission Models', Proceedings of the TRB 78th Annual Meeting. CD-ROM. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

Barth, M., An, F., Younglove, T., Scora, G., Levine, C., Ross, M. and Wenzel, T. (2000) 'Comprehensive Modal Emission Model (CMEM), Version 2.0 User's Guide', University of California, Riverside.

Barth, M., Davis, N., Scora, G., Collins, J. and

Norbeck, J. (2006) 'Measuring and modeling emissions from extremely low emitting vehicles', Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 1987, pp. 21-31.

Boriboonsomsin, K. and Barth, M. (2008) 'Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions', Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 13, no. 2, March, pp. 112-125.

California Air Resource Board (2006) EMFAC 2007 user's guide, Sacramento, CA.

Claggett, M. and Houk, J. (2008) 'Comparing MOBILE6.2 and Emfac2007 Emissions Factors for Mobile Source Air Toxics', Proceedings of the TRB 87th Annual Meeting. CD-ROM. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

George, S. and Barth, M. (2006) 'COMPREHENSIVE MODAL EMISSIONS MODEL(CMEM), version 3.01, User's Guide', Center for Environmental Research and Technology, University of California, Riverside.

Nam, E. (2003) 'A Physical Emissions Rate Estimator for MOVES', 13th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop.

Park, S. and Rakha, H. (2006) 'Energy and Environmental Impacts of Roadway Grades', Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 1987, pp. 148-160.

Rakha, H., Ahn, K. and Trani, A. (2003) 'Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM Models for Estimating Hot-Stabilized Light-Duty Gasoline Vehicle Emissions', Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 30, pp. 1010-1021.

Rakha, H. and Ahn, K. (2004) 'INTEGRATION Modeling Framework for Estimating Mobile Source Emissions', Journal of Transportation Engineering, vol. 130, no. 2, pp. 183-193.



Rakha, H., Ahn, K. and Trani, A. (2004) 'Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions', Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 9, pp. 49-74.

Sawyer, R.F., Harley, R.A., Cadle, S.H., Norbeck, J.M., Slott, R. and Bravo, H.A. (2000) 'Mobile Source Critical Review: 1998 NARSTO Assessment', Atmospheric Environment, vol. 34, pp. 2161-2181.

U.S.EPA(2003a) Ozone - Good Up High Bad Nearby, [Online], Available: <http://www.epa.gov/oaqpsool/gooduphigh/>[Feb 2008].

U.S.EPA(2003b) 'User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2. Mobile Source Emission Factor Model', no. EPA420-R-03-101.

U.S.EPA(2003c) 'Proof of Concept Investigation for the Physical Emission Rate Estimator (PERE) to be Used in MOVES', U.S. Environmental Protection Agency, no. EPA420-R-03-005.

U.S.EPA(2005) Six Common Air Pollutants, [Online], Available: <http://www.epa.gov/airquality/ulbanair/>[Feb 2008].

U.S.EPA(2009) 'Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2010 User Guide', U.S. Environmental Protection Agency, no. EPA-420-B-09-041.

U.S. EPA(2010) 'Motor Vehicle Emission Simulator(MOVES) : User Guide for MOVES 2010'.

## 학회지 원고접수 안내

학회지 편집위원회에서는 다음과 같은 내용으로 여러분을 초대하고자 합니다. 언제든지 참여하시어 알찬 학회지를 만듭시다. 여러분의 원고를 기다리겠습니다. (연락처 : 학회사무국 또는 편집위원)

컬 럼	내용 및 형식	비 고
권두언/축사/제언/격려사	시사성 있는 내용으로 A4 2쪽이내 분량으로 작성	편집위원회 주관
특집	회원들에게 도로포장내용과 최신동향소개 : 특집편집위원회 주관하여 연재	게재원고료 지급 심의 후 게재
기술기사	도로 및 도로포장과 관련된 기술보고서로서 A4 10쪽 이내 분량으로 작성 : 사례연구, 공사지, 성공 및 실패사례, 지역별 도로특성, 국내 산학연 합동 연구, 국내외 관련연구소 소개 등	심의 후 게재
기술위원회 세미나 주요내용	기술위원회 세미나 내용을 자세히 요약하여 그 내용을 회원들에게 알리는 컬럼	기술위원회 제공
해외기술동향	도로 및 도로포장관련 해외의 최신 연구내용 및 결과로 A4 4쪽 이내	
국내의 학술회의	도로 및 도로포장과 관련된 학술 및 기술강좌, 세미나 등의 내용 소개	E-mail 이용 가능
문화산책(교양)	교양과 관련된 내용으로 A4 4쪽 이내 : 수필, 취미생활(등산, 낚시 등), 독후감 및 의견제시 등 자유내용	게재원고료 지급 심의후 게재
국내의 신간도서 소개	최근 발간된 도로 및 도로포장 도서 내용소개 및 찬평과 국내 회귀 입수 서적 소개	E-mail 이용 가능
학교 및 업체연구소 소개	도로 및 도로포장관련 학교 연구실 및 업체 연구소의 A4 2쪽 내외의 소개	게재분량 엄수
학회소식	정기총회 및 학술발표회 소식, 이사회 회의록, 기술위원회 활동소식 등	학회 사무국 제공
Q/A	도로 및 도로포장 관련 문제에 대한 질문과 답변	E-mail 이용 가능
회원동정	주소변경, 직장변경, 경조사, 회원가입, 박사 및 석사학위 취득자 등	E-mail 이용 가능

\* 집필자는 필히 본인 및 공동집필자 사진을 첨부하십시오.

E-mail : [ksre1999@hanmail.net](mailto:ksre1999@hanmail.net)