

# 철도 디젤차량에서 배출되는 가스상 오염물질의 배출량 추정

## Estimation of Gases Air Pollutants Emission Rates Exhausted from Railroad Diesel Rolling Stocks

박덕신<sup>1)</sup>, 배상호<sup>2)</sup>, 정우성<sup>3)</sup>, 김태오<sup>4)</sup>

Duck-Shin Park, Sang-Ho Bae, Woo-Sung Jung, Tae-oh Kim

---

### ABSTRACT

Of those off-road diesel engines, the railroad diesel rolling stocks (RDRS) for passenger and freight transportation become a growing issue since they are emitting enormous amounts of various air pollutants. Furthermore, up to the present time, emissions from these sources are not well controlled. One of main purposes in this study is to develop emission factors for the RDRS and to estimate a total amount of major air pollutants from the RDRS in Korea. Prior to develop a Korean mode emission factor, the emission factor from the USEPA was simply applied for comparative studies. As a conclusion, based on the emissions calculated from both the USEPA mode and the KoRail mode, the RDRS is considered as one of significant mobile sources of major air pollutants including NO<sub>x</sub> and CO, and thus management plans and control strategies for the RDRS must be established to improve air quality near future in Korea.

---

### 1. 서론

USEPA (US Environmental Protection Agency)에서는 “비도로용 (off-road) 엔진”을 12개월 동안 적어도 1회 이상 비도로에서 사용된 적이 있는 엔진이라고 규정하고 있다 (USEPA, 1998). 최근 연구결과 비도로용으로 사용되고 있는 디젤엔진이 NO<sub>x</sub>와 입자상 오염물질 배출의 주요한 오염원으로 밝혀졌다. 국내외적으로 대기오염원 중 자동차나 트럭 등 도로용 차량에서 배출되는 오염물질에 대해서는 오래 전부터 관심을 기울여 왔지만, 디젤기관차, 선박 및 경작, 건설, 벌목, 채굴 장비 등을 포함하는 비도로용 이동오염원에 의한 오염물질 배출의 제어에 관해서는 논의가 거의 이루어진 적이 없다. 최근 외국에서는 도로용 차량에 의한 오염물질 배출량 저감 노력이 한계에 부딪치면서 상대적으로 규제를 덜 받는 비도로용 차량에서의 오염물질 배출저감기술에 대해 관심이 고조되고 있다 (Andrew *et al.*, 2000). 비도로용 디젤엔진 중 선박에서 배출되는 대기오염

---

1) 한국철도기술연구원, 선임연구원

2) 한국철도기술연구원, 연구원

3) 한국철도기술연구원, 책임연구원

4) 금오공과대학교, 교수

물질과 관련된 연구는 Llyod's Register Engineering Services (1993)와 Cooper *et al* (1996), Cooper (2001)를 중심으로 꾸준히 이루어지고 있지만, 아직까지 국내외적으로 디젤 연료사용량을 근거로 한 디젤기관차에서의 대기오염물질 배출량 계산은 Andrew *et al* (2000)의 연구를 제외하면 거의 이루어지지 않고 있다.

최근 미국 등 선진국들은 배출가스 규제대상을 기존의 도로용 차량에서 비도로용 차량까지 확대 적용하고 있으며, 우리나라에서도 이에 대한 대책마련을 서두르고 있다. 특히, 국제협약을 통해 비도로용 차량 중 선박, 항공기 등의 배출가스 규제방안이 마련되고 있고, 주요 엔진 제작사들도 국제적 배출가스규제에 대처하기 위한 자구책을 강구하고 있으나, 우리나라의 경우 이에 대한 전문적, 기술적 검토가 미흡한 실정이다 (정일록 등, 1999).

도로용 엔진과는 달리 비도로용 엔진에 대해서는 관련 연구가 부족하고, 오염물질 배출자료도 엔진 제작사가 제공하는 일부 자료에 의존하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 철도 디젤차량을 대상으로 각종 측정 장비를 이용하여 가스상 오염물질을 측정 한 후 측정된 오염물질의 농도를 근거로 현재 USEPA의 추정방식에만 의존하고 있는 배출량 산정방법을 국내 철도 디젤차량에 적용할 수 있는 새로운 추정방법을 개발하여 국내 실정에 적합한 효율적인 방안을 제안하였다.

## 2. 배출량 추정 방법

철도 디젤차량에서 배출되는 대기오염물질의 배출량을 구하는 방법은 크게 작동주기 (duty-cycle) 배출, 기관 노치 (throttle notch) 배출 및 연료 사용량을 이용하여 구하는 방법으로 나눌 수 있다 (USEPA, 1998).

작동주기란 장비의 특정 모드에 대한 사용 패턴을 규정한 것으로 정해진 부하, 속도 등에서 사용된 시간의 비율을 의미한다. USEPA의 이동 오염원에 대한 배출기준은 특정 작동주기를 구체화하여 테스트를 했을 때 테스트 과정에서의 배출을 정량화한 것이다. USEPA의 배출기준은 표 1에 나타낸 것과 같이 작동주기를 두 가지 모드로 분류하고 있다. 첫 번째 작동주기인 장거리 (line-haul) 모드는 주로 장거리를 고속으로 주행할 때의 모드로서 고 부하 (고 출력)의 비중이 높다. 두 번째 작동주기는 단거리 (switch) 모드로서 주로 차고지에서 역까지 이동할 때, 혹은 역 구내를 이동할 때, 다른 철도차량을 견인할 때 등 철도차량이 단거리를 저속으로 이동하는 경우의 패턴이며, 공회전과 저 부하 (저 출력)의 비중이 높다.

작동주기를 이용하여 배출량을 구하는 방법을 식 (1)에 나타내었으며, 이 식은 표 1의 각 모드별 가중치를 고려했을 때 작동주기에 따른 오염물질 (HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM)의 질량 배출을 (g/bhp-hr)을 구할 수 있다.

$$E_{idc} = \Sigma (M_{ij}(F_j)) / \Sigma(BHP_j)(F_j) \quad (1)$$

여기서,  $E_{idc}$  = 작동주기 가중치를 고려한 제동특성에 따른 오염물질  $i$  (HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM 등)의 질량 배출을 (g/bhp-hr),

$M_{ij}$  = mode  $j$ 에 대한 오염물질  $i$ 의 질량 배출율,

$F_j$  = mode  $j$ 에 대한 표 1의 가중치,

$BHP_j$  = mode  $j$ 에서 측정된 제동마력 (brake horse power).

Table 1. Weighting factors for calculating emission rates emitted from diesel locomotive engines (USEPA, 1998).

Throttle notch	Test mode	Locomotive without multiple idle notches		Locomotive equipped with multiple idle notches	
		Line-haul	Switch	Line-haul	Switch
Low Idle	1a	NA	NA	0.190	0.299
Normal Idle	1	0.380	0.598	0.190	0.299
Dynamic brake	2	0.125	0.000	0.125	0.000
Notch 1	3	0.065	0.124	0.065	0.124
Notch 2	4	0.065	0.123	0.065	0.123
Notch 3	5	0.052	0.058	0.052	0.058
Notch 4	6	0.044	0.036	0.044	0.036
Notch 5	7	0.038	0.036	0.038	0.036
Notch 6	8	0.039	0.015	0.039	0.015
Notch 7	9	0.030	0.002	0.030	0.002
Notch 8	10	0.162	0.008	0.162	0.008

각 모드에서 제동마력의 출력은 바퀴에서의 동력을 의미하며, 교류발전기나 발전기를 이용한 디젤기관차 테스트에서 제동마력은 식 (2)로 계산되며, 엔진 다이내모 테스트에서의 제동마력은 엔진 속도와 토크에 의해 결정된다.

$$BHP = HP_{out} / A_{eff} + HP_{acc} \quad (2)$$

여기서,  $HP_{out}$  = 교류발전기나 발전기에서 계측된 마력,

$A_{eff}$  = 교류발전기나 발전기의 효율 (%),

$HP_{acc}$  = 보조출력.

기관 노치는 디젤기관차의 공회전 (idle), 다이내믹 제동 및 작동모드 등을 포함하며, 작동모드에서의 배출실험 결과를 이용하여 다음과 같이 디젤기관차에서의 배출량을 계산할 수 있다.

각 모드  $j$ 에 대한 오염물질  $i$  (HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM 등)의 g/BHP-hr 즉, PM에 대한 제동특성 배출  $E_{ij}$ 는 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$E_{PM} = PM \text{ grams} / BHP\text{-hr} = M_{PM \text{ mode}} / \text{Measured BHP in mode} \quad (3)$$

여기서,  $M_{PM \text{ mode}}$ 는 각 테스트 모드에 대한 PM의 배출 (g/hr)을 나타낸다.

연료사용량 자료를 이용하여 철도 디젤차량에서의 배출을 계산할 경우 배출계수 (g/l)와 연료사용량 (kl/year)을 곱해서 식 (4)와 같이 연간 배출을 (emission rates, metric-ton/year)로 나타낼 수 있으며, 식에서 1.1은 metric-ton을 short-ton으로 변환하기 위해서 사용하는 변환계수이다

(USEPA, 1998).

$$\begin{aligned}
 \text{Emission Rates} &= \text{Fuel Consumption Rates (kl)} \\
 &\times \text{Emission Factor (kg/kl)} / 10^6 \times 1.1
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

USEPA에서는 기관차에 대해 g/bhp-hr로 나타내는 평균 배출율을 산정 했다. 배출율은 표 2에서와 같이 장거리와 단거리 모드로 구분하여 적용하고 있다. 장거리 모드는 궤도 위에서 차량을 끌 때 사용되는 모드로서 고속, 화물 및 수송용으로 사용되는 2,000마력 이상의 기관차 엔진을 포함한다. 단거리 모드는 장거리 모드를 제외한 2,000마력 미만으로 저속, 단거리 이동 화물수송에 사용되는 기관차 엔진을 포함한다.

Table 2. Emission rates for the locomotives (USEPA, 1998).

	HC		CO		NOx		PM	
	g/bhp-hr	g/l	g/bhp-hr	g/l	g/bhp-hr	g/l	g/bhp-hr	g/l
Line-haul <sup>1)</sup>	0.48	2.64	1.28	7.04	13.0	71.5	0.32	1.76
Switch <sup>2)</sup>	1.01	5.56	1.83	10.07	17.4	95.7	0.44	2.42
Current Locomotive Emission Rates (1997)								
Line-haul	0.50	2.75	1.50	8.25	13.5	74.25	0.34	1.87
Switch	1.10	6.05	2.40	13.2	19.8	108.9	0.41	2.26

<sup>1)</sup> Line-haul locomotives over the line-haul duty-cycle.

<sup>2)</sup> Switch locomotives over the switch duty-cycle.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 각 모드별 배출량 비교

USEPA 모드에 의한 배출량 추정결과와 KoRail 모드에 의한 배출량 추정결과를 상호 비교하였다. 표 3의 각 모드에 의한 배출량 추정결과를 보면 NOx의 경우 USEPA에 의한 배출량이 2배가량 높게 나타났으나 CO의 경우 KoRail 모드에 의한 배출량이 오히려 1.6배가량 높은 것으로 추정되었다.

표 4에 열차종류별 NOx와 CO의 배출량 추정결과를 상호 비교하였다. 표에서 USEPA와 KoRail 두 가지 모드에서 여객용 열차에 의한 오염물질 배출비율이 가장 높았으며, 다음이 기타 철도차량이고, 화물용 열차에 의한 비율이 가장 낮았다. 이렇게 배출량 추정결과에 큰 차이가 나는 것은 배출량 추정의 가장 큰 변수인 배출계수에 차이가 나기 때문이다.

앞서 USEPA와 KoRail 모드를 비교한 것처럼 USEPA 모드를 이용한 배출량 추정 방법은 미국 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하므로 향후 우리나라에서 철도 디젤차량에 의한 배출량을 추정할 때는 우리나라 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하고, 주력 차종을 대상으로 테스트 엔진을 선정하여 측정된 값을 이용해서 개발된 KoRail 모드에 의한 배출계수를 적용해야 할 것으로 판단된다.

#### 3.2 도로용 엔진과의 배출계수 비교

비도로용 엔진 중 디젤기관차의 대기오염물질 배출계수를 도로용 엔진과 비교하기 위해서 경부

선 상.하행선에서 디젤기관차 1편성에 의한 연료사용량 자료를 이용하여 단위 이동거리 당 오염물질 배출량 (g/km)을 구했다. 경부선 하행선 (서울 → 부산 구간)에서 디젤기관차 1편성이 이동하는데 소모된 경유의 양은 1,372.6 ℓ 이었다. 이 값을 이동거리 (444.3 km)로 나누면 1,372.6/444.3 km=3.1 ℓ/km, 즉, 경부선 하행선에서 디젤기관차 1 편성이 1 km 이동하는데 3.1 ℓ의 경유를 소모했다. 또한, 상행선 (부산 → 서울 구간)에서는 444.3 km의 구간에서 1,463.5 ℓ의 경유를 소모하여 3.3 ℓ/km의 경유를 소모한 것으로 나타났으며, 경부선 상.하행선의 연료소모량을 평균하면 3.2 ℓ/km의 연료를 소모하였다. 연료소모량 값을 앞서 구한 장거리 모드에서의 배출계수와 곱하면 디젤기관차 1편성이 1 km 이동하는데 CO와 NOx가 35.84와 84.5 g/km이 배출되는 것으로 추정된다. 디젤기관차의 배출계수를 도로용 엔진과 비교하여 표 5에 제시하였다. 표에서 CO의 경우 대형트럭의 13.12 g/km 보다 약 3배, NOx의 경우 6.6배가 높은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 철도 디젤차량을 실험대상으로 하여, 최근 관심이 고조되고 있는 비도로용 엔진 중 철도디젤차량에 의한 배출량을 USEPA의 배출계수와 KoRail 모드의 배출계수에 의한 방법으로 각각 추정하였다.

본 연구에서는 도로용 엔진의 배출량 추정에 일반적으로 사용되는 USEPA의 배출계수를 이용해서 배출량을 추정하고, 국내 철도차량에 적용할 수 있는 새로운 추정방법인 KoRail 모드를 개발하였다. USEPA 모드는 미국 지형에 맞게 노치별 가중치를 주었으며, 노치별 시간가중 평균값을

Table 3. Comparisons of NOx and CO emission rates for each mode.

Modes Pollutants	USEPA (short ton/year)			KoRail (short ton/year)		
	Line-haul	Switch	Total	Line-haul	Switch	Total
NOx	18,704.7	9,412.3	28,117.0	6,906.4	4,052.4	10,958.8
CO	1,841.7	990.6	2,832.3	2,930.0	1,692.0	4,622.0

Table 4. Comparisons of NOx and CO emission rates for each train type.

Modes Pollutants	USEPA (short ton/year)			KoRail (short ton/year)		
	Passenger	Freight	Others	Passenger	Freight	Others
NOx	12,238.6	6,465.8	9,415.1	4,518.9	2,387.4	4,053.3
CO	1,205.0	636.6	990.7	1,917.1	1,012.8	1,692.2

Table 5. Comparison of emission factors between on-road engines and diesel locomotive engines. (unit : g/km)

Classification	CO	NOx	HC	SOx
Passenger car (diesel)	2.60	0.44	0.43	-
Small bus (diesel)	1.28	1.44	0.10	0.08
Large bus (diesel)	10.97	12.36	1.55	0.10
Light-duty truck (diesel)	1.67	1.48	0.15	0.08
Heavy-duty truck (diesel)	13.12	12.70	1.64	0.10
Diesel locomotive	35.84	84.50	-	-

사용하였다. 이에 반해 KoRail 모드는 한국 지형에 맞게 노치별 가중치를 주었으며, USEPA 모드와는 달리 노치별 거리가중 평균 값을 사용하였다. KoRail 장거리 모드의 경우 USEPA 노치별 가중평균 값과는 다소 다른 경향을 보였다.

USEPA 모드를 이용하여 배출량을 추정할 결과 2001년 한 해 동안 한국에서 철도차량에 의해 배출되는 NOx는 28,117 ton, CO는 2,832.3 ton으로 추정되었다. KoRail 모드를 이용하여 배출량을 추정할 결과, NOx는 10,959.5 ton, CO는 4,622.1 ton이었다.

향후 우리나라에서 철도 디젤차량에 의한 배출량을 추정할 때는 우리나라 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하고, 주력 차종을 대상으로 테스트 엔진을 선정하여 측정된 값을 이용해서 개발된 KoRail 모드에 의한 배출계수를 적용해야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

정일록, 엄명도, 류정호, 임철수 (1999) 비도로용 건설기계의 오염물질 배출량 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 317-325.

Andrew, J.K., R.F. Sawyer and R.A. Harley (2000) A fuel based assessment of off-road diesel engine emissions, Air & Waste Manage. Assoc., 50, 1929-1939.

Cooper, D. A., K. Peterson, and D. Simpson (1996) Hydrocarbon, PAH and PCB emission from ferries: A case study in the Skagerak-Kattegatt -Oresund region, Atmospheric Environment, 30(14), 2463-2473.

Cooper, D.A. (2001) Exhaust emissions from high speed passenger ferries, Atmospheric Environment, 35, 4189-4200.

Lloyd's Register Engineering Services (1993) *Marine Exhaust Emissions Research Programme*, London, England.

USEPA (1998) *40 CFR Parts 85, 89 and 92, Emission Standards for Locomotives and Locomotive Engines*; final rule.