

철도디젤차량에서 배출되는 오염물질의 배출량 산정방법 개발

Development of Estimation Methods of Pollutant Emissions from Railroad Diesel Rolling Stocks

박 덕 신 · 김 동 술^{1)*}

한국철도기술연구원 철도환경연구그룹
경희대학교 환경응용화학대학 대기오염연구실 및 환경연구센터
(2004년 4월 30일 접수, 2004년 8월 5일 채택)

Duck-Shin Park and Dong-Sool Kim¹⁾

Railroad Environmental Research Group, Korea Railroad Research Institute

¹⁾*Air Pollution Lab., School of Environment & Applied Chemistry and Center for Environment Studies, Kyung Hee University*

(Received 30 April 2004, accepted 5 August 2004)

Abstract

Up to the present time, many methods to estimate emissions from a particular diesel engines have wholly depended on the quantity of diesel fuel consumed. Then, the recommended emission factors were normalized by fuel consumption, and further total activity was estimated by the total fuel consumed. One of main purposes in the study is newly to develop emission factors for the railroad diesel rolling stock (RDRS) and to estimate a total amount of major gaseous 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. When applying the USEPA emission factors, total exhaust emissions from the RDRS in Korea were estimated by 28,117tons of NO_x, 2,832.3tons of CO, and 1,237.5tons of HC, etc in 2001.

In this study, a emission factor for the RDRS, so called the KoRail mode (the Korean Railroad mode) has been developed on the basis of analyzing the driving pattern of the Gyeongbu-Line especially for the line-haul mode. Explicitly to make the site specific emission factors, many uncertainty problems concerning weighting factors for each power mode, limited emission test, incomplete data for RDRS, and other important input parameters were extensively examined. Total exhaust emissions by KoRail mode in Korea were estimated by 10,960tons of NO_x, and 4,622tons of CO, and so on in the year of 2001. The emissions estimated by the USEPA mode were 2.6 times higher for NO_x, and 1.6 times lower for CO than those by the KoRail mode. As a conclusion, based on the emission calculated from both the USEPA mode and the KoRail mode, the RDRS is considered as one of the significant mobile sources for major gaseous pollutants and thus management plans and control strategies for the RDRS must be established to improve air quality near future in Korea.

Key words : Railroad diesel rolling stock (RDRS), Emission factor, Emission rates

* Corresponding author

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

1. 서 론

국내외적으로 대기오염 배출원 중 자동차나 트럭과 같은 도로용 차량에서 배출되는 오염물질에 대해서는 오래 전부터 관심을 기울여 왔지만, 디젤기관차, 선박 및 경작, 건설, 벌목, 채굴 장비 등을 포함하는 비도로용(off-road) 이동오염원에 의한 오염물질 배출의 제어에 관해서는 논의가 거의 이루어진 적이 없다. 최근 외국에서는 도로용 차량에 의한 오염물질 배출량 저감노력이 한계에 부딪치면서 상대적으로 규제가 미진한 비도로용 차량에 대해 관심이 고조되고 있다(Andrew *et al.*, 2000). 이에 따라, 미국을 비롯한 선진국들은 배출가스 규제대상을 기존의 도로용 차량에서 비도로용 차량까지 확대 적용하고 있다. 특히, 국제협약을 통해 비도로용 오염원 중 선박, 항공기 등의 배출가스 규제방안이 마련되고 있으며, 주요 엔진 제작사들도 국제적 배출가스규제에 대처하기 위한 자구책을 강구하고 있다.

국내 비도로 대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구는 국립환경연구원(1999, 1997)과 경기도(2000), 신문기 등(2003)의 연구에서 건설기계와 농기계 등을 중심으로 일부 이루어진 바 있으나 체계적인 검토가 미흡한 실정이다. 특히 대기오염배출원 목록(source inventory) 개발에 관한 연구는 대기오염 배출모델링과 정책분야에만 초점을 맞추고 있는데, 이는 배출실험과 엔진사용에 대한 한계와 활용 자료의 미진으로 정확한 배출목록을 작성하는데 어려움이 따르기 때문이다. 국외의 경우에도 비도로용 엔진은 그 종류와 응용범위의 다양성 때문에, 해당 오염원에 대한 정확한 조업실적과 배출량 산정이 불확실한 실정이다(Andrew *et al.*, 2000).

미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 “비도로용 엔진”을 12개월 동안 적어도 1회 이상 비도로에서 사용된 적이 있는 엔진이라고 규정하고 있다(USEPA, 1998). 최근 연구결과, 비도로에서 사용되고 있는 디젤엔진이 NO_x와 입자상 오염물질의 주요 오염원으로 밝혀지고 있다(Kittelson, 1998). 비도로용 디젤엔진 중 선박에서 배출되는 대기오염물질과 관련된 연구는 Lloyd's Register Engineering Services(1993)와 Cooper *et al.*(1996), Cooper(2001)를 중심으로 꾸준히 이루어지고 있지만, 아직까지 국

내외적으로 디젤 연료사용량을 근거로 한 디젤기관차에서의 대기오염물질 배출량 계산은 Andrew *et al.*(2000)의 연구를 제외하면 거의 수행된 바 없다.

우리나라에서는 디젤엔진이 가솔린엔진보다 연소 효율이 좋고 연료 경제성이 높으며 인화점이 낮고 안전성이 우수하다는 이유로 대부분 철도차량에 디젤엔진을 사용하고 있다. 전 세계적으로 철도차량에 의한 대기오염물질 배출량은 도로차량과 기타 산업 부문의 배출량과 비교할 때 적은 편이지만, 우리나라는 2001년말을 기준으로 연간 약 3억 2천만 리터의 연료를 소모하고 있으며, 철도의 여객수송 분담율은 연간 약 824만명으로 전체 여객 수송량의 약 6.2%를 차지하고 있으나(환경부, 2001) 아직까지 배출량에 대한 규제는 이루어지지 않고 있다.

철도디젤차량은 디젤기관차(diesel locomotive)와 디젤동차(diesel rail car)로 나눌 수 있다. 비도로용 엔진인 디젤기관차는 도로용 대형 디젤엔진과는 다른 동력전달체계를 가지고 있으며 대기오염 배출특성도 다르다. 도로용 엔진은 디젤엔진에서 발생된 기계적 에너지를 차축에 직접 전달하지만, 디젤기관차는 디젤엔진에서 생성된 에너지로 주발전기(main generator)를 구동하고, 여기서 전기에너지를 발생시킨 후, 이 전기에너지를 이용해 차축(wheel)을 구동하는 다소 복잡한 체계로 구성되어 있다. 또한, 디젤기관차 엔진에는 출력을 높이기 위해 배출가스가 일정 온도 이상으로 상승하면 터보과급기(turbo charger)가 구동되는데, 이 과급기로 인해 도로용 디젤엔진과는 다른 독특한 배출특성을 보인다(박덕신 등, 2003).

본 연구에서는 철도디젤차량 중 디젤기관차를 대상으로 디젤엔진에서 배출되는 대기오염물질의 배출특성을 파악하고자 하였다. 그리고, 현재 미국 EPA 등에 의존하고 있는 배출량 산정방법을 개선하고, 국내 운행특성에 기초한 배출량 산정방법을 개발하고자 하였다.

2. 철도디젤차량 배출량 산정방법

2.1 USEPA 모드에 의한 배출량 산정방법

연료연소에 의한 대기오염물질 배출계수(emission factor)는 간단히 연료의 단위 소비량에 대해 대기 중으로 배출된 오염물질의 평균값(kg of pollutants/kg of

fuel combusted)을 의미한다. 이에 따라 오염물질의 총 배출량은 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$ER = FC \times EF \tag{1}$$

여기서, ER는 연간 총오염물질 배출량(emission rates, metric-ton/year), EF는 연간 총연료사용량(kl/year),는 배출계수(g/l)로서 연간 총오염물질 배출량은 배출계수(g/l)와 연료사용량(kl/year)을 곱한 값을 10⁶으로 나누어 준 후, metric-ton을 short-ton으로 변환하기 위해 변환계수 1.1을 곱하여 구할 수 있다.

비도로용 철도디젤차량에서의 배출가스 총량을 산정하기 위해서는 철도디젤차량 보유대수 및 연간 디젤연료사용량(차종별 및 노선별), 운행패턴(장거리 및 단거리 모드), 배출량 등을 조사하여야 한다. 철도디젤차량에서의 배출가스 총량을 산출하는 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 연간 연료사용량이란 철도디젤차량이 소비한 연간 총 연료사용량으로서, 본 연구에서는 철도차량을 종류별 및 노선별로 구분하여 조사하였다. 운전패턴과 배출량은 앞서 언급한 바와 같이, 미국 EPA에서 정의한 것처럼 장거리 모드(line-haul mode)와 단거리 모드(switch mode) 두 가지로 구분하였다. 철도디젤차량에 의한 연간 배출가스 배출량은 차량 종류별 및 노선별로 계산하였으며, 최종 결과는 NOx, CO, HC 등 비도로용 엔진의 주요규제대상 대기오염물질에 대한 연간 총배출량으로 표현된다.

미국 EPA 모드를 이용하여 배출량을 산정할 경우 비교적 용이하게 철도디젤차량에 의한 연간 총오염물질 배출량을 산정할 수 있다. 배출량은 연간 철도디젤차량에 대한 연료사용량 자료를 이용해서, 우선 운전형태별로 분류한 후 이 값을 미국 EPA의 배출계수와 곱하면 구할 수 있다. 그러나 이 방법에서는 모드별 노치(notch)의 가중치를 일률적으로 적용하기 때문에 해당지역의 지역적 특성을 고려할 수 없는 단점이 있다. 노치란 기계의 속도를 제어할 수 있도록 만들어진 조종핸들(handle)의 단계로서 디젤기관차에는 8노치까지 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해, 우리나라 대표노선인 경부선을 선정하고, 이 노선에서 운행되는 디젤기관차의 운전패턴을 분석한 후 단위거리당 해당 노치의 가중평균을 구하였다. 그리고 이 모드를 Korea Railroad를 의미

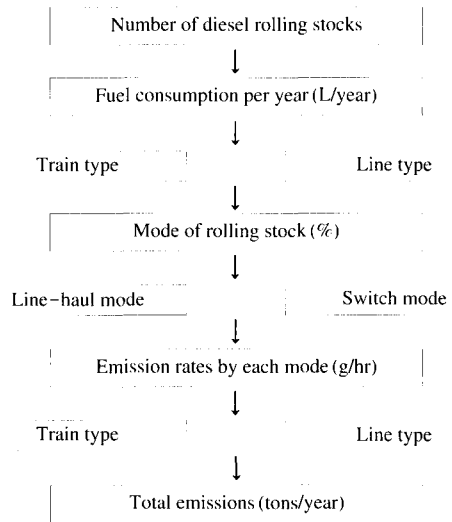


Fig. 1. A flow chart for estimating total emissions on the basis of fuel consumption from diesel rolling stocks.

하는 “KoRail 모드”라고 명명하였다. 본 연구에서는 이 방법으로 배출량을 산정한 후 미국 EPA 모드에 의한 배출량 산정 결과와 비교하였다.

2.2 작동주기 모드에 의한 배출량 산정방법

철도차량의 운행특성을 고려한 작동주기를 이용하여 배출량을 구하는 방법을 식(2)에 나타내었다. 이 식을 이용하여, 표 1의 각 모드별 가중치를 고려했을 때, 작동주기에 따른 오염물질(HC, CO, NOx, PM)의 질량배출율(g/bhp-hr)을 산정할 수 있다.

$$E_{idc} = \sum (M_{ij}(F_j)) / \sum (BHP_j)(F_j) \tag{2}$$

여기서, E_{idc} = 작동주기 가중치를 고려한 제동특성에 따른 오염물질 i(HC, CO, NOx, PM 등)의 질량배출율(g/bhp-hr),

M_{ij} = mode j에 대한 오염물질 i의 질량배출율,

F_j = mode j에 대한 표 1의 가중치,

BHP_j = mode j에서 측정된 제동마력(brake horse power).

각 모드에서 제동마력의 출력은 바퀴에서의 동력을 의미하며, 교류발전기나 발전기를 이용한 디젤기관차 테스트에서 제동마력은 다음 식(3)으로 계산된다. 엔진 동력계 시험에서의 제동마력은 엔진 속도

와 토크에 의해 결정할 수 있다.

$$BHP = HP_{out} / A_{eff} + HP_{acc} \quad (3)$$

여기서, HP_{out} = 교류발전기나 발전기에서 제측된 마력,

A_{eff} = 교류발전기나 발전기의 효율(%),

HP_{acc} = 보조출력.

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

각 모드 j 에 대한 오염물질(HC, CO, NO_x, PM 등)의 $g/bhp-hr$ 즉, PM 에 대한 제동특성 배출 E_{ij} 는 식(4)로 구할 수 있다.

$$E_{PM} = PM \text{ grams/bhp-hr} = M_{PM \text{ mode}} / \text{Measured bhp in mode} \quad (4)$$

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

배출가스 측정자료를 이용하여, 디젤기관차의 각 작동모드에서 각 오염물질들에 대한 질량배출을 $M_{X \text{ mode}}$ 은 전식일 경우 식(5)로, 습식일 경우 식(6)으로 구할 수 있다.

$$M_{X \text{ mode}} = (DX/10^6) (DVol) (MW_X/V_m) \quad (5)$$

$$M_{X \text{ mode}} = (WX/10^6) (WVol) (MW_X/V_m) \quad (6)$$

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

여기서, X 는 오염물질의 종류, DX 는 전식조건에서 오염물질 X 의 농도(ppm 혹은 $ppmc$), WX 는 습식조건에서 오염물질 X 의 농도(ppm 혹은 $ppmc$), MW_X 은 오염물질의 분자량(g/mol), $DVol$ 은 전식조건에서 배출가스의 총유량(ft^3/hr), $WVol$ 은 습식조건에서 배출가스의 총유량(ft^3/hr), V_m 은 표준온도와 압력 하에서 가스 1 몰의 부피(ft^3/mol)를 의미한다.

3. 연구 및 방법

3.1 배출가스 측정방법

디젤기관차 엔진에 대한 배출가스 측정은 SAE procedure J177의 규정에 따랐으며 측정절차는 다음과 같다. ① 엔진을 구동하고 워밍업을 한다. 정격속도(rated speed)와 부하에서 최소 10분간 혹은, 모든 온도와 압력이 평형상태에 도달하면 워밍업을 완료한다. ② 엔진을 각 모드에서 최소 20분간 작동한다. 즉, 엔진이 안정화되어 배출물질이 일정하게 배출되는데 소요되는 시간이 최소 10분, 배출물의 측정에 소요되는 시간이 최소 5분간이다. ③ 각 성분들에 대한 평균 기록지 출력값과 보정곡선(calibration curve)으로부터 각 모드에 대한 CO, CO_2, NO, NO_2 의 기록지의 마지막 3분 동안의 자료를 평균하고 기록한다. 가스상 물질의 배출특성은 디젤기관차 엔진의 출력을 아이들(2.3%)에서 2노치(11.2%), 4노치(33.0%), 6노치(59.1%), 8노치(100%)까지 단계별로 증가시키면서 측정하였다. 철도디젤차량을 이용한 대기오염물질의 측정에 관한 보다 상세한 내용은 박덕신 등(2003)을 참고할 수 있다.

3.2 KoRail 모드 개발방법

KoRail 모드는 철도디젤차량의 운행특성을 고려한 작동주기모드의 한 종류로서 미국 EPA의 연료사용량을 근거로 한 배출량 산정방법을 보완하기 위해서 개발된 것이다. KoRail 모드는 국내에서 운행되고 있는 철도디젤차량 중 주력 차종인 7,000호대를 실험 차량으로 선정하여, 배출되는 오염물질의 특성을 파악하고, 대표노선으로 선정한 경부선에서 철도디젤기관차의 운전패턴을 분석하여 장거리 모드에 대한 노치별 가동비율을 파악하였다. 단거리 모드의 경우 공회전(1노치)이 전체의 70% 이상을 차지하고, 주로

역이나 정비지역에서 정차할 때나 저속으로 단거리를 이동할 때의 노치 사용패턴이다. 한국철도에서는 단거리 모드에 대한 운전선도를 마련해 놓지 않고, 기관사가 임의로 상황에 따라 노치를 가동하므로 논문에서는 미국 EPA의 노치별 가동비율 값을 사용하였다. 각 모드에 대한 노치별 사용비율 값에 디젤 기관차 엔진 출력, 배출가스 온도, 배출오염물질의 농도 및 배출량 등의 자료를 이용하여 NOx, CO 등에 대한 배출계수를 산정하였다.

3.3 KoRail 모드에 의한 배출량 산정방법

비도로용 엔진에서 배출되는 오염물질의 총량은 작업시에 배출되는 배출량과 작업현장 간의 이동을 위한 도로 주행시 발생하는 배출량의 합으로 구할 수 있다. 비도로용 엔진 중 철도차량과 유사한 일반 건설장비의 경우, 배출가스 총량을 산정하는 방식은 식 (7)과 같다(정일록 외, 1999).

$$ER = NC \times RP \times AR \times RT \times EF \quad (7)$$

여기서, ER은 해당 건설장비의 연간 배출가스 총량(g/year), NC는 건설장비의 보수대수, RP는 당해 장비류의 보유비 가중평균 정격출력(kW)을 나타낸다. 그리고 AR은 정격출력에 대한 작업시의 평균출력 비율(%), RT는 연평균 가동시간(hr/year), EF는 원단위 배출계수(g/kW-hr)를 의미한다.

그림 2는 현재 철도청에서 사용하는 대표적인 운전선도를 표시한 것이다. 최근까지 국내 철도차량에

대한 연구가 거의 이루어지지 않아 참고자료는 전무한 실정이다. 운행 중인 철도차량에서 배출되는 오염물질의 배출량을 계산하기 위해서는 다양한 정보가 필요하다. 그 중 궤도차량의 운행패턴은 차량이 주어진 일정거리를 어떻게 운행했는지를 파악할 수 있는 중요한 자료이다. 철도차량의 경우 다소의 차이가 있지만 일정한 거리를 거의 일정한 시간동안 운행한다. 이 경우 철도차량도 일반자동차와 마찬가지로 운전자에 따라 엔진출력에 차이를 보인다. 철도차량 운전선도에는 노선의 지형, 구배, 회전반경, 그 구간별 사용 노치와 운전형태 등이 표시되어 있는데, 운전자가 특정노선을 가장 효율적으로 운전할 수 있도록 정보를 제공한다. 또한, 이들 자료는 도식화되어 운전자가 알기 쉽게 계량화 되어 있다. 디젤기관차 운전자들은 일정구간을 운행하기 전, 이 선도를 충분히 인지한 상태에서 운전을 하기 때문에 정시운전이 가능하고, 탈선과 충돌 등 대형 사고를 예방할 수 있다.

본 연구에서는 경부선을 대표노선으로 선정하였다. 경부선은 노선의 길이가 444.3 km이며, 우리나라의 동맥노선이라고 할 수 있다. 우리나라 지형에 맞는 장거리 모드에 해당되는 KoRail 모드를 개발하기 위해, 경부선에 대한 운전선도를 입수한 후 자료를 분석하였다. 우선, 경부선 상·하행선 운전선도를 근거로 전체 노선 444.3 km를 100 km 간격으로 4개 구간으로 나누고, 상·하행선에 대해 각 노치의 조성비율과 가중평균 등을 파악하고 운전패턴을 작성하였다. 표 2는 전 구간 중 한 구간(50 km)에 대한 노치

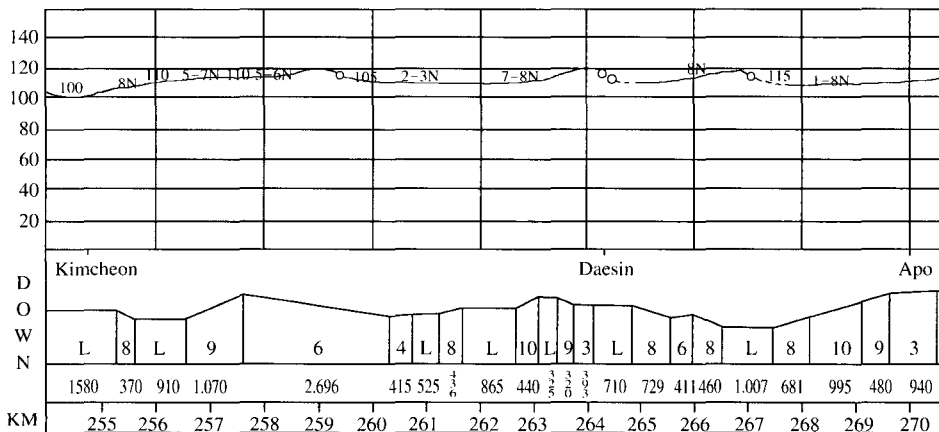


Fig. 2. A typical driving pattern of diesel locomotives on the Gyeongbu-Line from Seoul to Busan (KNR, 2001).

Table 2. An example of frequency distribution for each notch applied on the basis of a specific distance range of 50 km on the Gyeongbu-Line.

Distance	Notch									Total
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	1.1 (2)	0.7 (18)	1.8 (9)	1.8 (10)	0.4 (11)	0.4 (12)	0.7 (23)	0.7 (24)	1.7 (1)	
	3.0 (4)	1.3 (35)	0.7 (19)	1.3 (15)	0.75 (13)	0.75 (14)	0.2 (29)		1.5 (3)	
	1.1 (6)		0.2 (27)	0.7 (20)	1.3 (16)	0.7 (22)			2.3 (5)	
	1.2 (8)				0.7 (21)				1.7 (7)	
	1.4 (15)				0.2 (28)					
Distance	3.6 (17)								0.3 (30)	
	1.2 (25)								3.9 (32)	
	0.2 (26)								1.3 (34)	
	1.2 (31)								4.0 (37)	
	3.3 (33)									
	0.7 (36)									
Accumulate distance (km)	18.0	2.0	2.72	3.8	3.35	1.85	0.9	0.7	16.7	50
Probability	0.360	0.04	0.054	0.076	0.067	0.037	0.018	0.014	0.334	1.0

별 사용빈도의 계산 예를 제시한 것이다. 표에서 공회전(0)의 1.1이란, 공회전 상태로 이동한 거리 1.1 km를 의미하며 괄호안의 숫자는 전 구간에 대해 설정한 일련번호이다. 이와 같은 방식으로 전체 50 km 구간에 대한 노치별 사용빈도를 구하고, 노치별 사용빈도를 합산하면, 해당 구간의 노치별 사용빈도 평균값을 구할 수 있다. 한편, 상·하행선 노치별 조성비율과 가중평균 자료를 서로 조합하였으며, 지형의 구배에 따른 노치의 조성비 차이를 보완하였다.

3.4 모드별 비교내용 및 방법

본 연구에서는 두 가지 방법으로 철도디젤차량에 의한 연간 총 오염물질 배출량을 산정하였다. 그 중 하나는 국내에서도 일반적으로 사용되고 있는 미국 EPA의 배출계수를 이용하였으며, 다른 하나는 본 연구를 통해 개발한 KoRail 배출계수를 이용하였다. 배출계수를 이용하여 배출량을 추정하고, 미국 EPA 모드에 의한 배출량 추정결과와 KoRail 모드에 의한 배출량 추정결과를 상호 비교하였다. 또한, 철도디젤기관차 1편성에 의한 연료사용량 자료를 근거로 오염물질 배출량을 구하여 철도디젤차량의 대기오염물질 배출계수를 도로용 엔진과 비교하였다.

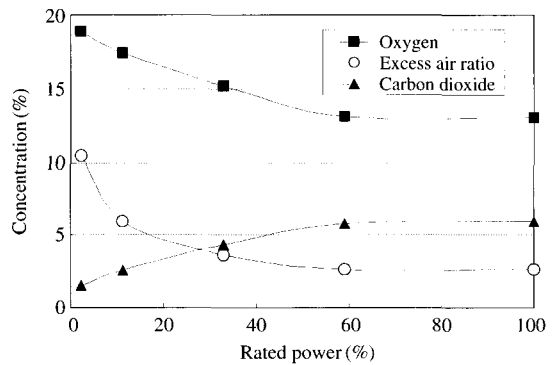


Fig. 3. Variation of oxygen and CO₂ concentrations with increasing engine power rate.

4. 결과 및 논의

4.1 NOx 및 CO 농도

디젤기관차 배출가스의 측정결과를 표 3에 나타내었다. CO₂의 농도(%)는 그림 3에서와 같이 공회전 모드에서 1.5%를 보인 후 점차 증가하여 최대출력에서 5.9%로 나타났다. 또한 CO 농도(ppm)의 경우, 일반적으로 공연비가 적을수록 CO 농도가 증가한다고 알려져 있지만(구자에 등, 1996), 본 실험에서는 그림 4에 나타난 것과 같이 엔진출력이 최대출력의

Table 3. Characteristics of exhaust gases for each engine load.

Engine load (%)	Temp (°C)	O ₂ (%)	Efficiency (%)	λ^1	CO ₂ (%)	Gas concentration (ppm)			
						CO	NO	NO ₂	NOx
2.3 (idle)	101	18.9	72.4	10.45	1.5	110	201	33	234
11.2 (2 notch)	174	17.4	69.1	5.94	2.6	147	329	30	359
33.0 (4 notch)	268	15.2	69.0	3.62	4.3	257	610	20	630
59.1 (6 notch)	362	13.1	67.7	2.66	5.8	1,069	839	18	857
100 (8 notch)	371	13.0	67.5	2.62	5.9	412	1,150	32	1,282
Mean	255	15.5	69.1	5.06	4.0	399	626	27	672
SD ²⁾	118	2.6	2.0	3.30	1.9	393	384	7	418

¹⁾ λ : excess air ratio.

²⁾ SD : Standard Deviation.

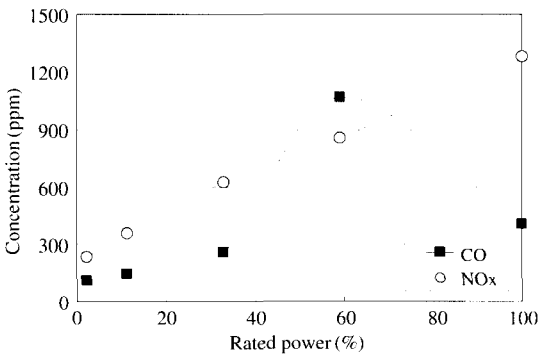


Fig. 4. Variation of CO and NOx concentrations with increasing engine power rate.

2.3%에서 110 ppm을 나타낸 후 59.1%에서 최대값인 1,069 ppm이었으며, 최대출력에서는 412 ppm으로 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 현상을 명확히 규명하기 위해서는 여러 변수들에 대한 검토가 필요하지만, 현재까지의 실험결과로는 디젤기관차 특성상 터보 과급기가 작동되어 측정결과에 영향을 미친 것으로 사료된다. 과급기는 제한된 실린더 용적에서 더 큰 출력을 얻기 위해서 연료 공급량을 증대시키고, 이에 상응하는 소요공기량을 증대시키기 위해 급기 밀도를 대기압 이상으로 가압하여 공급하는 장치를 말한다(형설출판사, 1991). 디젤기관차 배출가스는 일반적으로 약 1,000° F(538°C)의 높은 열과 14 psi 가량의 압력을 지니고 있어 가스터빈을 구동할 만한 에너지를 보유하고 있다. 정격부하에서 이 배출가스를 터빈 휠(wheel)에 공급하여 공기압축기를 구동하

면 출력 증가, 공기여과기 저항 감소, 고지대에서의 공기밀도 저하 등에 대처할 정도의 다량 공기를 생산한다(윤세택, 1984). 과급을 하지 않는 일반 엔진에서는 부하가 증가할수록 공연비가 점차 감소하고, 공연비의 감소에 따라 입자의 배출이 증가하는 경향을 보이지만, 터보 과급기에 의해 공기가 추가 공급될 경우 입자 배출 역시 감소한다고 보고 된 바 있다(Burscher *et al.*, 1998).

NOx는 공연비가 거의 양론적(stoichiometric)이고, 온도가 높을 때 형성된다. 다른 인자들이 일정하다면 연소효율이 좋을수록 NOx가 많이 생성된다(Janet *et al.*, 2001). NOx의 배출은 분사시기를 늦추거나 폭발 시점을 최적화하여 감소시킬 수 있다(Heywood, 1988). NOx의 농도(ppm)는 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 234 ppm, 최대출력에서 1,182 ppm으로 엔진출력이 증가함에 따라 증가하였고, 배출가스 온도가 상승함에 따라 선형적으로 증가하였다. 연소효율(%)은 최대출력의 2.3%에서 72.4%, 최대출력에서 67.5%로, 출력이 증가할수록 점차 감소하였다. 과잉 공기비는 입자의 농도분포에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었는데(Kittelson, 1998), 측정결과 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 10.45이었으나 산소농도의 감소와 함께 점차 감소하여 엔진출력이 최대출력의 59.1%에서 2.66, 최대출력에서 2.62로 나타났다.

4.2 USEPA 모드에 의한 배출량 산정

4.2.1 연료사용량

연료사용량 자료에 표 4의 미국 EPA의 모드별 배

Table 4. 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 ¹⁾	0.48	2.64	1.28	7.04	13.0	71.5	0.32	1.76
Switch ²⁾	1.01	5.56	1.83	10.07	17.4	95.7	0.44	2.42

¹⁾ Line-haul locomotives over the line-haul duty-cycle.

²⁾ Switch locomotives over the switch duty-cycle.

Table 5. Fuel consumptions for each train type.

Stock type	Mode			Total
	Line-haul mode	Switch mode		
Diesel locomotive (l)	215,632,657	42,623,695		258,256,352
Percentage (%)	83.5	16.5		100
General rail car (l)	4,135,702	12,257,062		16,392,764
Percentage (%)	25.2	74.8		100
Other rail car (l)	18,031,326	34,532,785		52,564,111
Percentage (%)	34.3	65.7		100
Special rail car (l)	17,588	19,506		37,094
Percentage (%)	47.4	52.6		100

출을 값(g/l)을 적용하여 전국 철도 노선별, 차량종류별 배출량을 산정하였다. 철도 노선별 배출량의 경우 각 노선에서의 연료사용량은 모드별 연료 소모량을 합산한 값이므로 배출량을 산정하기 위해서는 연료 사용량을 열차 운행패턴에 따라 모드별로 분류해야 한다. 그러므로 표 5의 철도 차량종류별 연료사용량 자료에서 여객과 화물을 합산한 것이 장거리 모드, 기타가 단거리 모드이므로 총 연료사용량 대비 각 모드별 비율을 구하였다. 표에서 디젤기관차는 장거리 모드의 비율이 83.5%로 단거리 모드의 16.5%보다 월등히 높고, 일반동차, 특수동차, 특별동차의 장거리 모드보다 높은 것으로 나타났다.

4.2.2 노선별 배출량

전국 41개 노선에서 2001년 한 해 동안 배출된 대기오염물질을 노선별로 산정한 결과를 표 6에 나타내었다. NOx의 총량은 28,117 ton으로 이중 장거리 모드에 의한 양이 18,704.7 ton으로 전체 NOx 배출량의 66.5%를 차지했으며, 단거리 모드는 9412.3 ton이 배출되어 전체 배출량의 33.5%를 차지하였다. 경부선의 경우 전체 배출량의 절반이 넘는 52%에 해당하는 14,612.1ton의 NOx를 배출한 것으로 산정되

Table 6. The fuel consumption and emission rates of NOx, CO, HC on the basis of all Korean railroad lines.

Fuel consumption (l)	Pollutants	Emission rates (short ton/year)		
		Line-haul	Switch	Total
327,250,321	NOx	18,704.7	9,412.3	28,117.0
	CO	1,841.7	990.6	2,832.3
	HC	690.6	546.9	1,237.5

었다. 전국 주요 노선에서의 전체 NOx 배출량은 경부선 14,612.1 ton (52.0%) > 호남선 2,448.6 ton (8.7%) > 중앙선 2,026.5 ton (7.2%) > 전라선 1,503.3 ton (5.3%) > 경전선 1,098.3 ton (3.9%)의 순서로 나타났다.

CO의 총량은 2,832.3 ton으로 이중 장거리 모드에 의한 양이 1,841.7 ton으로 전체 CO 배출량의 65%를 차지했으며, 단거리 모드에 의해서 990.6 ton이 배출되어 전체 배출량의 35%를 차지하였다. NOx와 마찬가지로 경부선의 경우 전체 배출량의 절반이 넘는 52.1%에 해당하는 1,476.1 ton의 CO를 배출한 것으로 산정되었다. 전국 주요 노선에서의 전체 CO 배출량은 경부선 1,476.1 ton (52.1%) > 호남선 245.8 ton (8.7%) > 중앙선 203.0 ton (7.2%) > 전라선 150.3 ton (5.3%) > 경전선 110.0 ton (3.9%)의 순서로 나타났다.

HC의 총량은 1,237.5 ton으로 이중 장거리 모드에 의한 양이 690.6 ton으로 전체 HC 배출량의 55.8%를 차지했으며, 단거리 모드에 의해서 44.2%에 해당하는 546.9 ton이 배출되었다. 경부선의 경우 전체 HC 배출량의 53.1%인 656.6 ton을 배출한 것으로 산정되었다. 전국 주요 노선에서의 HC 배출량은 경부선에서 656.6 ton (53.1%), 호남선에서 105.0 ton (8.5%), 중앙선에서 85.5 ton (6.9%), 전라선에서 62.6 ton (5.1%), 그리고 경전선에서 46.2 ton (3.7%)을 배출한 것으로 나타났다.

4.2.3 차량별 배출량

철도 차량별 배출량 산정 결과는 표 7에서 보듯이 2001년 한 해 동안 철도 디젤차량에 의해 배출된 대기오염물질 총량이 NOx는 28,119.5 ton, CO는 2,832.4 ton 그리고, HC는 1,237.6 ton으로 산정되었다. 그림 5에 NOx, CO, HC의 배출량을 산정한 결과를 나타내었다. 그림에서 NOx의 경우 전체 배출량 중

Table 7. The fuel consumptions and estimated emission rates of three major gaseous pollutants on the basis of the train types.

Classification	Fuel consumption (l)	Emission rates (short ton/year)		
		NOx	CO	HC
Saemaoul	28,079,942	2,208.5	217.5	81.5
Mugunghwa	96,802,580	7,613.5	749.6	281.1
Tong-il	17,735,028	1,394.9	137.3	51.5
Bidulgi	223	0.0	0.0	0.0
Other passenger	408,579	32.1	3.2	1.2
Mixed	2,587	0.2	0.0	0.0
Package	7,873,693	619.3	61.0	22.9
Out of service (pass)	4,705,386	370.1	36.4	13.7
Ordinary freight	81,223,175	6,388.2	629.0	235.9
Other freight	220,879	17.4	1.7	0.6
Other construction	765,201	60.2	5.9	2.2
Total	237,817,273	18,704.3	1,841.7	690.6
Single unit	5,685,192	598.5	63.0	34.8
Switching	12,015,939	1,264.9	133.1	73.5
Testing	68,823	7.2	0.8	0.4
Helping	4,897,012	515.5	54.2	30.0
Un-govern	66,771,082	7,029.0	739.6	408.4
Total	89,438,048	9,415.1	990.7	547.0
Passenger total	155,608,018	12,238.6	1,205.0	451.9
Freight total	82,209,255	6,465.8	636.6	238.7
Other total	89,438,048	9,415.1	990.7	547.0
Grand total	327,255,321	28,119.5	2,832.4	1,237.6

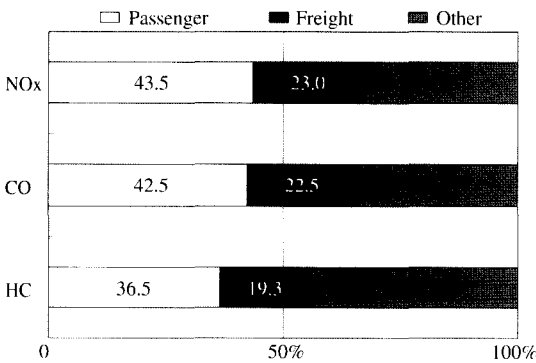


Fig. 5. The estimated emission rates of three major gaseous pollutants for each train type on the Korean railroad.

여객용에 의한 배출량이 43.5%, 화물용에 의한 배출량이 23.0%, 기타 철도차량에 의해서 33.5%가 배출되어졌다. CO는 여객용 철도차량에 의해서 전체 배출량의 42.5%, 화물용 차량에 의해서 22.5% 그리고,

단행 (single unit), 입환 (switching), 시운전 (testing), 보기 (helping), 피제어 (un-govern) 등 기타에 의해서 35.0%가 배출된 것으로 조사되었다. HC의 경우 여객용 철도차량에 의해서 36.5%, 화물용 철도차량에 의해서 19.3%, 나머지 철도차량에 의해서 44.2%가 배출된 것으로 나타났다. NOx, CO, HC 등 규제 대기 오염물질의 철도차량 종류별 배출 비율은 여객용 차량이 전체의 41.4%를 차지했으며, 단거리 모드에 해당되는 기타가 전체의 36.7%, 그리고 화물용 차량이 21.9%를 차지했다.

4.3 KoRail 모드에 의한 대기오염물질 배출량

4.3.1 KoRail 모드에 설정된 가정

철도디젤차량에서 배출되는 대기오염물질의 배출량을 파악하기 위해서는 먼저 배출계수를 산정해야 한다. 배출계수는 엔진의 운전패턴 분석자료에 해당 노치 및 부하에서의 오염물질 배출자료를 입력하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 경부선 전구간 444.3 km에 대하여 철도디젤차량의 배출량을 산정하기 위해, 운전선도 자료에 입각하여 디젤기관차의 운전 패턴을 분석하였다. 이때 디젤기관차 역시 기관사에 따라 운전패턴에 차이가 크기 때문에 표준 운전선도에 입각하여 운전패턴을 파악하였다.

KoRail 모드의 개발에 앞서, 우선 디젤기관차의 운전선도가 실제 운행시 사용되는 노치의 빈도와 동일하다고 가정하였다. KoRail 모드의 경우, 경부선 구간을 대표노선으로 선정하였고, 다른 구간에도 동일하게 적용하였다. 참고로 미국 EPA 모드는 노치의 사용빈도를 시간을 기준으로 결정되었지만, 본 연구에서 개발된 KoRail 모드는 거리를 기준으로 노치의 사용빈도를 결정하였다. 또한, 배출량을 산정할 때 디젤기관차의 가감속시 대기오염물질의 추가배출은 고려하지 않았으며, 운행 중 역에서의 정차시 배출도 배출량 산정에서 제외하였다.

경부선을 상하행선으로 구분할 때, 디젤기관차의 노치별 가동율은 다소 차이가 있었다. 이는 노선별 구배 차이로 엔진부하가 변하기 때문에 나타나는 현상이다. 그럼에도 불구하고, 노치별 가동율을 상하행선 왕복운행 관점에서 파악하면 거의 동일한 비율로 나타났다. 즉, 특정차량이 A와 B 구간을 운행할 경우 A에서 B로 운행할 때의 구배가 오르막이었다면, 등

Table 8. Estimated driving patterns of diesel locomotives on the Gyeongbu-Line.

Notch Distance	Notch								Total
	0(1)	2	3	4	5	6	7	8	
0 ~ 100 km	0.343	0.040	0.046	0.085	0.094	0.030	0.023	0.339	1.0
100 ~ 200 km	0.438	0.030	0.044	0.056	0.036	0.031	0.071	0.294	1.0
200 ~ 300 km	0.385	0.081	0.057	0.090	0.065	0.035	0.037	0.250	1.0
300 ~ 400 km	0.349	0.032	0.043	0.052	0.044	0.061	0.053	0.366	1.0
Average	0.379	0.046	0.048	0.070	0.060	0.039	0.046	0.312	1.0
Percentage (%)	37.9	4.6	4.8	7.0	6.0	3.9	4.6	31.2	100

Table 9. Emission characteristics and emission factors for NOx calculated by the KoRail mode.

Notch	Conc. (ppm)			Emission of NOx (g/hr)	Emission rates /power (g/bhp-hr)	Emission factor/power (g/bhp-hr)		Emission factor by the KoRail mode (g/l)	
	NO	NO ₂	NOx			Line-haul	Switch	Line-haul	Switch
0(1)	201	33	234	746	9.95				
2	329	30	359	1,143	3.18				
4	610	20	630	2,452	2.32	5.08	7.91	26.4	41.2
6	839	18	857	3,614	1.91				
8	1,150	32	1,282	6,207	1.94				

일한 구간을 B에서 A로 운행할 때는 내리막이 되기 때문에 에너지(부하) 측면에서 상하행선을 합산하면 거의 유사한 값이 된다. 표 8은 경부선 상하행선에서의 노치별 가동율을 평균하여 나타낸 것이다. 표에서 공회전(1노치)의 가동율이 37.9%로 가장 높았으며, 8노치에서 31.2%인 것으로 조사되었다. 즉, 공회전(1노치)과 8노치가 전체의 약 70%를 차지하는 것으로 분석되었다. 기타 노치의 경우 각각 10% 미만으로 비교적 낮은 빈도분포를 보였다.

4.3.2 KoRail 배출계수

경부선을 대상으로 철도디젤기관차의 운전패턴을 분석하고 장거리 모드에 대한 노치별 가동율을 파악하였다. 반면, 단거리 모드는 주로 역이나 정비구역에서의 정차, 또는 단거리 저속 이동할 때의 운행모드로서, 공회전(1노치)이 전체 70% 이상을 차지하는 운전패턴이다. 앞서 서술한 것처럼, 한국철도에서 단거리 모드에 대한 운전선도가 없고, 기관사가 임의로 상황에 따라 노치가 가동되기 때문에 본 연구에서는 미국 EPA의 노치별 가동율을 사용하였다. 각 모드에 대한 노치별 가동율에 엔진출력, 배출가스 온도, 배출오염물질의 농도 및 배출율 등의 자료를 이용하여

NOx와 CO에 대한 배출계수를 개발하였다.

표 9에 디젤기관차의 부하조건별로 NOx의 농도와 배출율을 계산하여 제시하였다. 표에서 NOx는 NO와 NO₂를 합한 것이다. NOx의 배출율(g/hr)을 계산할 때도 NO와 NO₂를 각각 구하여 합산하였다. 단위 시간당 NOx 배출율은 부하에 따라 증가하여 8노치에서 최대 6,207 g/hr로 배출되는 것으로 분석되었다. 단위출력당 NOx 배출율(g/bhp-hr)은 부하가 증가하면 오히려 감소하여 공회전(1노치)에서 최대값 9.95 g/bhp-hr를 보인 후, 6노치에서 최소값 1.91 g/bhp-hr를 나타내어 공회전을 할 때 최대 배출되는 것으로 분석되었다. 단위출력당 배출계수(g/bhp-hr)는 장거리 모드에서 5.08 g/bhp-hr, 단거리 모드에서 7.91 g/bhp-hr로 산정되었다. KoRail 배출계수는 단위 시간당 디젤기관차 엔진출력에 대한 NOx의 배출계수를 의미하며, 배출계수(g/l)는 장거리 모드에서 26.4 g/l, 단거리 모드에서 41.2 g/l로 단거리 모드가 다소 높게 나타났다.

표 10에 디젤기관차 부하조건별로 CO의 농도와 배출율을 계산하여 제시하였다. CO의 배출율(g/hr)은 공회전에서 307 g/hr이었으며, 엔진부하가 증가할수록 배출율이 점차 증가하여 6노치에서 최대값

Table 10. Emission characteristics and emission factors for CO calculated by the KoRail mode.

Notch	Conc. (ppm)	Emission rates of CO (g/hr)	Emission rates/power (g/bhp-hr)	Emission factor/power (g/bhp-hr)		Emission factor by the KoRail mode (g/l)	
				Line-haul	Switch	Line-haul	Switch
0(1)	110	307	4.10				
2	147	418	1.16				
4	257	918	0.87	2.15	3.30	11.2	17.2
6	1,069	4,162	2.20				
8	412	1,991	0.62				

Table 11. Emission rates of NOx, CO on the all of Korean railroads estimated by the Korail mode.

Fuel consumption (l)	Pollutants	Emission rates (short ton/year)		
		Line-haul	Switch	Total
327,250,321	NOx	6,906.4	4,052.4	10,958.8
	CO	2,930.0	1,692.0	4,622.0

4,162 g/hr를 보인 후, 최대출력인 8노치에서 1,991 g/hr로 오히려 감소하는 경향을 보였다. 표에서 CO의 출력당 배출계수 (g/bhp-hr)는 장거리 모드에서 2.15 g/bhp-hr, 단거리 모드에서 3.3 g/bhp-hr로 산정되었다. KoRail 배출계수 (g/l)는 NOx와 동일한 방법으로 산출하였으며, 배출계수는 장거리 모드에서 11.2 g/l, 단거리 모드에서 17.2 g/l로 단거리 모드에서 다소 높게 나타났다.

4.3.3 노선별 배출량

연료사용량 자료에 KoRail 모드별 배출계수 값을 적용하여 국내 철도노선별 배출량을 산정한 결과를 표 11에 나타내었다. 한 해 동안 배출된 NOx의 총량은 10,958.8 ton으로 이중 장거리 모드에 의한 배출량이 6,906.4 ton으로 전체 배출량의 63% 가량을 차지하였다. 반면, 단거리 모드에 의해서는 전체 37%인 4,052.4 ton의 NOx가 배출되었다. NOx의 경우, 경부선에서의 배출량 비율이 전체의 50% 가량을 차지하였으며, 그 외 호남선(8.6%), 중앙선(7.1%), 전라선(5.2%) 등 주요 노선에서의 배출량이 대부분을 차지하였다. 한 해 동안 배출된 CO의 총량은 4,622 ton으로 이중 장거리 모드에 의한 배출량이 2,930 ton으로 전체 CO 배출량의 63.4%를 차지하였다. 단거리 모드에 의한 CO 배출량은 1,692.0 ton으로 전체의 36.6%를 차지하는 것으로 산정되었다. CO 역시 전국 주요

Table 12. Estimated emission rates of NOx and CO on all the Korean railroads.

Classification	Fuelconsumption (l)	Emission rates (short ton/year)	
		NOx	CO
Saemaoul	28,079,942	815.4	345.9
Mugunghwa	96,802,580	2,811.1	1,192.6
Tong-il	17,735,028	515.0	218.5
Bidulgi	223	0.0	0.0
Other passenger	408,579	11.9	5.0
Mixed	2,587	0.1	0.0
Package	7,873,693	228.7	97.0
Out of service (pass)	4,705,386	136.6	58.0
Ordinary freight	81,223,175	2,358.7	1,000.7
Other freight	220,879	6.4	2.7
Other construction	765,201	22.2	9.4
Total	237,817,273	6,906.2	2,929.9
Single unit	5,685,192	257.7	107.6
Switching	12,015,939	544.6	227.3
Testing	68,823	3.1	1.3
Helping	4,897,012	221.9	92.7
Un-govern	66,771,082	3,026.1	1,263.3
Total	89,438,048	4,053.3	1,692.2
Passenger total	155,608,018	4,518.9	1,917.1
Freight total	82,209,255	2,387.4	1,012.8
Other total	89,438,048	4,053.3	1,692.2
Grand total	327,255,321	10,959.5	4,622.1

노선인 경부선, 호남선, 중앙선, 전라선 등에 의한 배출량이 전체의 대부분을 차지하는 것으로 조사되었다.

4.3.4 차량별 배출량

표 12에 철도 차량별 배출량 산정결과를 제시하였다. 표에서 2001년 한 해 동안 철도디젤차량에 의해 배출된 NOx의 총량은 10,959.5 ton, CO는 4,622.1 ton인 것으로 산정되었다. 그럼 6에서와 같이 NOx의 경우 전체 배출량 중 여객용에 의한 배출량이 41.2%,

화물용에 의한 배출량이 21.8%, 그리고 기타 철도차량에 의해서 37.0%가 배출된 것으로 조사되었다. CO는 여객용 철도차량에 의해서 전체 배출량의 41.5%, 화물용 차량에 의해서 21.9%, 그리고 기타 철도차량에 의해서 36.6%가 배출된 것으로 산정되었다. 철도차량의 종류별 PM, NOx, CO의 배출량 비율은 여객용 철도차량에 의해서 41.5%, 화물용 철도차량에 의해서 21.9%가 배출되어 여객과 화물을 합친 장거리 모드에 의해서 63.4%가 배출되고, 단거리 모드에 해당하는 기타 철도차량에 의해서 36.6%가 배출된 것으로 산정되었다.

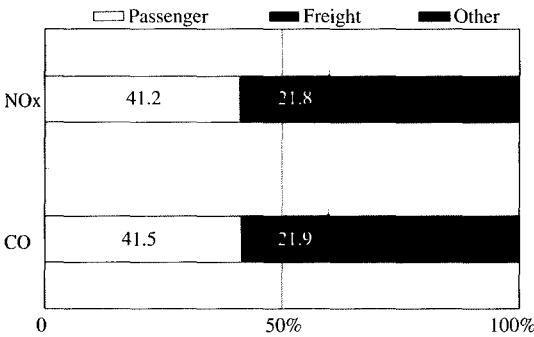


Fig. 6. Emission rates of NOx and CO on the all of Korean railroads for each train type.

4.4 USEPA와 KoRail 모드의 비교

4.4.1 배출계수의 비교

본 연구에서는 두 가지 방법으로 철도디젤차량에 의한 연간 총 오염물질 배출량을 산정하였다. 그 중 하나는 국내에서도 일반적으로 사용되고 있는 미국 EPA의 배출계수를, 다른 하나는 본 연구를 통해 개발한 KoRail 배출계수를 이용하였다. 미국 EPA 모드와 KoRail 모드의 특징을 비교해보면, 미국 EPA 모드는 장거리 모드의 경우, 공회전의 비율이 높고(57.0%), 8노치의 비율이 낮은 특징이 있으며(16.2%), 노치별 시간가중 평균값을 사용하고 있었다. 반면, KoRail 모드는 장거리 모드에 대해서 경부선을 대상으로 국내 실정에 적합한 운전패턴을 분석하여 노치별 가중치를 구하였으며, 노치별 거리 가중 평균값을 사용하였다. 장거리 모드의 경우 공회전 비율이 37.

Table 13. Comparisons of emission factors between our KoRail and the USEPA modes.

Pollutants	Emission factor by the KoRail mode (g/l)		Emission factor by the USEPA mode (g/l)	
	Line-haul	Switch	Line-haul	Switch
NOx	26.4	41.2	40.70	60.50
CO	11.2	17.2	12.10	13.75

Table 14. The emission standards for the diesel locomotive engines in the U.S.A. (USEPA, 1998).

Tier 0 (1973 ~ 1999)								
Mode	HC		CO		NOx		PM	
	g/bhp ³ -hr	g/l	g/bhp-hr	g/l	g/bhp-hr	g/l	g/bhp-hr	g/l
Line-haul ¹⁾	1.00	5.50	5.00	27.50	9.50	52.30	0.60	3.30
Switch ²⁾	2.10	11.55	8.00	44.00	14.00	77.00	0.72	3.96
Tier 1 (2000 ~ 2004)								
Line-haul	0.55	3.03	2.20	12.10	7.40	40.70	0.45	2.48
Switch	1.20	6.60	2.50	13.75	11.00	60.50	0.54	2.97
Tier 2 (2005 and later)								
Line-haul	0.30	1.65	1.50	8.25	13.50	74.25	0.34	1.87
Switch	0.60	3.30	2.40	13.20	19.80	108.90	0.41	2.26
Current Locomotive Emission Rates (1997)								
Line-haul	0.5	2.75	1.5	8.25	13.5	74.25	0.34	1.87
Switch	1.1	6.05	2.4	13.2	19.8	108.9	0.41	2.26

¹⁾ Line-haul locomotives over the line-haul duty-cycle.

²⁾ Switch locomotives over the switch duty-cycle.

³⁾ bhp : brake horse power.

1%로 8노치의 비율인 35.4%와 비슷한 수준이었다.

표 13에 미국 EPA와 KoRail 모드에 의한 배출계수(g/l)를 비교하여 제시하였으며, 표에서 미국 EPA의 배출계수는 표 14의 미국 EPA의 철도디젤기관차 배출기준으로서 2000년부터 2004년까지 적용되는 Tier 1의 값을 적용한 것이다. 비교결과, NOx는 KoRail 배출계수가 미국 EPA의 배출기준 보다 낮은 것으로 나타났다. CO의 경우 단거리 모드에서 KoRail 배출계수가 미국 EPA의 배출기준 보다 다소 높은 것을 알 수 있었다.

표 15에는 미국 EPA 모드와 KoRail 모드의 배출계수 차이의 원인을 규명하기 위해서, 미국 EMD, GM에서 측정된 디젤기관차의 배출가스 측정자료와 본 연구에서 시험엔진을 대상으로 측정된 배출가스 측정 자료를 비교한 것이다. 배출계수의 주요 입력자료인 배출가스의 농도 차이는 배출계수 및 배출량 산정결과에도 영향을 미치게 된다. 표에서 엔진출력과 산소농도(%)에는 큰 차이가 없었지만, NOx의 경

우 EMD, GM 엔진에서 다소 높게 측정되었다. CO의 경우 시험엔진에서 EMD, GM 엔진에서 보다 고농도로 측정되었다. KoRail 배출계수를 미국 EPA 계수와 비교해본 결과, 대기오염물질에 따라 다르지만 최대 1.5배가량 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 향후 철도 디젤차량에서의 배출계수를 적용할 때, 미국 EPA 배출계수와 기준을 그대로 적용할 경우 우리 실정에 적합하지 않은 측면을 예상할 수 있다.

4.4.2 산정 배출량의 비교

미국 EPA 모드와 KoRail 모드에 의한 배출량 산정결과를 상호 비교하였다. 표 16에서 각 모드에 의한 배출량 산정결과, NOx의 경우, 미국 EPA 모드에 의한 배출량이 2.6 배가량 높게 조사되었다. 그러나 CO의 경우, KoRail 모드에 의한 배출량이 오히려 1.6 배가량 높게 조사되었다. 표 17은 열차종류별로 NOx 및 CO의 배출량 산정결과를 상호 비교한 것이다. 표에서 미국 EPA와 KoRail 두 가지 모드에서 여객용 열차에 의한 오염물질 배출비율이 가장 높았으며, 다음이 기타 철도차량이었으며, 화물용 열차에 의한 비율이 가장 낮았다. 이와 같이 산정결과가 큰 차이를 보이는 것은 배출계수가 차이를 보이기 때문이다. 앞서 미국 EPA와 KoRail 모드를 비교한 것처럼, 미국 EPA의 배출량 산정법은 주로 평지인 미국 지형에 맞게 개발된 모드이기 때문이다. 앞으로 국내 철도디젤 차량에 의한 배출량을 산정할 때는 국내 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하여야 하며, 주력 보유 차종을 시험엔진으로 선정하고 본 연구를 통해 개발된 KoRail 배출계수를 적용함이 타당할 것으로 사료된다.

Table 15. Characteristics of air pollutants exhausted from the EMD, GM engine, and a test engine.

Notch	EMD, GM ¹⁾				Test engine			
	bhp	O ₂ (%)	NOx (ppm)	CO (ppm)	bhp	O ₂ (%)	NOx (ppm)	CO (ppm)
0	17	20.1	161	102	75	18.9	234	110
2	395	17.7	493	44	359	17.4	359	147
4	1,035	15.5	869	46	1,057	15.2	630	257
6	1,971	13.3	1,083	152	1,895	13.1	857	1,069
8	3,159	12.3	1,097	328	3,206	13.1	1,282	412

¹⁾ EMD, GM lab report reference No. 77-9-11A.

Table 16. Comparisons of NOx and CO emissions for each mode.

Modes	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 17. Comparisons of NOx and CO emissions for each train type.

Modes	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 18. Comparison of emission factors between on-road diesel 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	00.10
Diesel locomotive	35.84	84.50	-	-

4.5 도로용 엔진과의 배출계수 비교

비도로용 엔진 중 디젤기관차의 대기오염물질 배출계수를 도로용 엔진과 비교하기 위해서 경부선 상·하행선에서 디젤기관차 1편성에 의한 연료사용량 자료를 이용하여 단위 이동거리 당 오염물질 배출량(g/km)을 구하였다. 경부선 하행선(서울→부산 구간)에서 디젤기관차 1편성이 이동하는데 소모된 경유는 1,372.6l이었다. 이 값을 이동거리(444.3km)로 나누면 3.1l/km의 연료소비율을 나타내었다. 또한, 상행선(부산→서울 구간)에서는 444.3km의 구간에서 1,463.5l의 경유를 소비하여 3.3l/km의 경유를 소비한 것으로 나타났으며, 경부선 상·하행선의 연료소비량을 평균하면 3.2l/km이었다. 연료소비율 값을 앞서 구한 장거리 모드에서의 배출계수와 곱하여 철도차량 1편성이 1km 이동하는데 배출되는 NOx와 CO의 배출계수는 각각 84.5g/km, 35.84g/km이었다. 디젤기관차의 배출계수를 도로용 엔진과 비교하여 표 18에 제시하였다. 표에서 보면 디젤기관차의 배출계수가 CO의 경우 대형트럭에 비해 약 3배, NOx의 경우 6.6배가 더 높은 것으로 조사되었다.

5. 결 론

비도로용 엔진에 대해서는 관련 연구가 부족하고, 오염물질 배출자료도 엔진 제작사가 제공하는 일부 자료에 의존하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는

10여회에 걸쳐 규제대상 오염물질을 측정하여 철도 디젤엔진의 대기오염물질 배출특성을 파악하고, 측정된 오염물질의 농도를 근거로 현재 미국 EPA의 산정방식에만 의존하고 있는 배출량 산정방법에 대한 개선방안으로 국내 철도 디젤차량에 적용할 수 있는 새로운 방법을 개발하여 국내 실정에 적합한 효율적인 방안을 제안하였다.

KoRail 모드의 배출계수는 대표노선으로 선정된 경부선에서 철도 디젤기관차의 운전패턴을 분석하여 장거리 모드에 대한 노치별 가동비율을 파악했다. 단거리 모드의 경우 여러 가지 제한요인으로 인해 미국 EPA의 노치별 가동비율 값을 사용하였다. 각 모드에 대한 노치별 사용비율 값에 디젤기관차 엔진 출력, 배출가스 온도, 배출오염물질의 농도 및 배출량 등의 자료를 이용하여 NOx와 CO에 대한 배출계수를 산정하였다.

본 연구에서는 도로용 엔진의 배출량 산정에 일반적으로 사용되는 미국 EPA의 배출계수와 본 연구를 통해 개발된 KoRail 배출계수를 이용하여 배출량을 산정하였다. 미국 EPA 모드는 장거리 모드의 경우 공회전의 비율(57.0%)이 높고, 8노치의 비율(16.2%)이 낮은 특징이 있으며, 노치별 시간가중 평균값을 사용하였다. KoRail 모드는 장거리 모드에 대해서 경부선을 대상으로 운전패턴을 분석하여 노치별 가중치를 구했으며, 노치별 거리 가중 평균값을 사용하였으며, 장거리 모드의 경우 공회전 비율이 37.1%로 8노치의 비율인 35.4%와 비슷한 수준으로 나타났다. NOx의 배출계수는 KoRail 모드가 미국 EPA 모드보다 낮았으며, CO의 경우 단거리 모드에서 KoRail 배출계수가 미국 EPA의 배출계수 보다 높게 나타났다.

미국 EPA 모드를 이용하여 배출량을 산정한 결과, NOx는 28,117 ton, CO는 2,832.3 ton이 배출되고, KoRail 모드에 의해서는 NOx는 10,958.8 ton, CO는 4,622 ton이 배출되는 것으로 나타났다. 각각을 비교하면 NOx의 경우 미국 EPA 모드에 의해서 배출량을 산정하면 산술적으로 연간 17,158 ton 가량이 더 많이 배출되고, CO의 경우 KoRail 모드에 의해서 배출량을 산정하면 연간 1,790ton 가량이 더 배출되게 된다.

철도차량에 대한 미국 EPA의 배출계수와 KoRail 배출계수를 비교하면 대기오염물질에 따라 다르지만

거의 50% 가까이 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 대상 엔진의 상태, 지형에 의한 운전패턴의 차이, 각 노치별 가중치의 차이 등 여러 가지 요인 때문으로 사료된다. 연구결과, 미국 EPA 모드를 이용한 배출량 산정방법은 미국 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하므로 향후 국내에서 철도 디젤차량에 의한 배출량을 산정할 때는 국내 지형에 맞게 개발된 모드를 사용하고, 주력 차종을 대상으로 시험 엔진을 선정하여 측정된 값을 이용해서 개발된 KoRail 모드에 의한 배출계수를 적용해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 2003년도 기관 고유사업(철도 친환경 기반기술 연구)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

경기도(2000) 21C 경기 대기보전 실천계획.
 구자에, 노수영, 배중식, 정경석, 황상순 공역(1996) 내연기관. 회중당, 86-90.
 국립환경연구원(1997) 경유 엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(I).
 국립환경연구원(1999) 경유 엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(III).
 박덕신, 김태오, 김동술(2003) 디젤기관차 엔진에서 배출되는 입자의 특성분석. 한국대기환경학회지, 19(2), 133-143.
 신문기, 김호정, 장영기, 홍지형(2003) 건설장비와 농기계에 서 배출되는 연도별 대기오염 배출량 변화추세.

한국대기환경학회지, 19(6), 805-810.
 윤세택(1984) 최신 디젤전기기관차. 정문사문화주식회사, 112-114.
 정일록, 엄명도, 류정호, 임철수(1999) 비도로용 건설기계의 오염물질 배출량 산정에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 15(3), 317-325.
 철도청(2002) 2001 철도통계연보.
 형설출판사(1991) 내연기관, 형설출판사, 325-342.
 환경부(2001) 환경통계연감(제 13호).
 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.
 Burtscher, H., S. Kunzel, and C. Huglin(1998) Characterization of particles in combustion engine exhaust, J. Aerosol Sci., 29, 389-396.
 Cooper, D.A., K. Peterson, and D. Simpson(1996) Hydrocarbon, PAH and PCB emission from ferries: A case study in the Skagerak-Kattegat-Oresund Region, Atmospheric Environment, 30(14), 2463-2473.
 Cooper, D.A.(2001) Exhaust emissions from high speed passenger ferries, Atmospheric Environment, 35, 4189-4200.
 Heywood, J.B.(1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill: New York.
 Janet, Y., L.M. Robert, and S.G. Michael(2000) In-use emissions from heavy-duty diesel vehicles, Environ. Sci. & Technol., 34(5) 729-740.
 Kittelson, D.B.(1998) Engines and nanoparticles, J. Aerosol Sci., 29, 575-585.
 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.