

# 디젤기관차 엔진에서 배출되는 오염물질의 특성 분석

## Characteristic Analysis of Pollutants Emission from Diesel Locomotive Engine

박덕신<sup>1)</sup>, 정우성<sup>2)</sup>, 정병철<sup>3)</sup>, 김동술<sup>4)</sup>

Duck-Shin Park, Woo-Sung Jung, Byung-Chul Jung, Dong-Sool Kim

---

### ABSTRACT

As the air pollution caused by diesel vehicles goes worse, so non-road vehicles exhaust gas standards are more strict in an foreign countries. There is growing evidence that diesel vehicles could play the important role in determining health effects. Most of the particle number emitted by diesel engines is in the nanoparticle range,  $D_p < 50\text{nm}$ , while most of the mass is in the accumulation mode,  $50\text{nm} < D_p < 1000\text{nm}$  range. The aim of this work was to investigate pollutants in the exhaust of railroad diesel rolling stock under load tests.

---

### 1. 서론

철도차량에 디젤기관을 사용하고 있는 이유는 가솔린기관의 동력효율이 약 23%인 것에 비해 디젤기관은 약 33%로 높고, 우리나라에서 경유의 연료가격은 가솔린의 약 절반으로 저렴하며, 인화점(flash point) 또한 약 170 °C로 가솔린의 약 100 °C와 비교할 때 높아서 안전성이 우수하기 때문이다. 반면 미세 먼지나 질소산화물의 배출량이 증가하여 주요 대기오염원으로 점차 부각되고 있다. 배기가스 중에 함유된 입자의 크기는 다양한 경로를 통해 환경과 인간의 건강에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다.

전 세계적으로 철도차량에 의한 총 대기오염물질에의 기여는 도로 차량과 기타 산업부문과 비교할 때 적은 비율을 차지한다. 현재 우리나라에서 경유를 연료로 사용하는 철도차량은 디젤기관차(diesel locomotive), 디젤동차(diesel rail car), 증기기관차(steam locomotive) 등이며 1999년말 기준으로 연간 약 3억 2천만 리터의 연료를 소모한다. 등록된 차량의 대수는 디젤기관차가 491량, 디젤동차가 603량, 증기기관차가 1량 등이며, 수송수단 중 철도의 여객수송 분담율은 연간 약 824 백만명으로 전체 여객 수송량의 약 6.2% 가량을 차지한다.

최근 미국 등 선진국을 중심으로 배출가스 규제대상을 기존의 도로용 차량에서 비도로용 차량까지 확대적용하고 있으며, 우리나라에서도 이에 대한 대책마련을 서두르고 있다. 특히, 비도로용

---

1) 한국철도기술연구원, 선임연구원  
2) 한국철도기술연구원, 책임연구원  
3) 한국철도기술연구원, 연구원  
4) 경희대학교, 교수

중 선박, 항공기 등은 국제협약을 통해 배출가스 규제방안이 마련되고 있어 주요 엔진 제작사들은 이러한 국제적 배출가스규제를 만족하기 위한 자구책을 강구하고 있으나 우리나라의 경우 이에 대한 전문적, 기술적 검토가 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 그 동안 비도로용 차량으로 분류되어 국내에서는 물론 국제적으로 관련 자료와 연구가 미흡했던 디젤기관차에서의 배출가스 특성에 대하여 언급하였다.

## 2. 디젤기관차 일반현황

### 2.1 보유대수 및 제원

현재 철도청에서 운용하고 있는 디젤기관차는 견인마력에 따라 소형, 중형, 대형, 특대형으로 나눌 수 있다. 이 중 소형은 2000~3000대로 주로 입환용에 사용되고 중형과 대형은 각각 4000대와 5000~6000대로 화물용에 특대형은 7000대로 여객용으로 주로 사용된다. 디젤기관차 총 보유대수는 1999년 말 기준으로 총 487대로 이 중 2000대는 34대, 3000대는 65대, 4000대는 32대, 7000대는 356대로 7000대가 전체 디젤기관차의 73.1% 가량을 차지하고 있다.

표 1에 주로 여객용으로 사용되는 7000대 디젤기관차의 주요 장치 제원을 나타내었다. 7000대 디젤기관차는 16 밸브, 2 사이클 기관이고, 실린더의 크기는 230×254mm(bore×stroke)로서 실린더 하나의 체적은 10553 cm<sup>3</sup>이다. 압축비(compression ratio)는 7000대가 14.5:1, 7000대를 제외한 나머지 7100, 7200, 7300, 7500대 차량이 16:1이다. 견인마력(HP)은 3000마력이고, 기관의 RPM은 유전에서 315~390이고, 8노치에서 900이다. 그리고, 디젤기관차의 최고속도는 150 km/h이며, 차량의 크기는 대략 3150×20982×4000mm(W×D×H)이다.

표 1. 디젤기관차 7000대 형식별 주요장치 제원

모델		7000	7100-7200	7300	7500	7500(New)
		FT36 HCW-2	GT 26CW	GT 26CW-2	GT 26CW	GT 26CW-2
엔진형식		16-645F3B	16-645E3	16-645E3	16-645E3	16-645E3
실린더(mm) (내경×행정)		230×254	230×254	230×254	230×254	230×254
설계방식		2스트로트 사이클	2스트로트 사이클	2스트로트 사이클	2스트로트 사이클	2스트로트 사이클
압축비		16 : 1	14.5:1	14.5:1	14.5:1	14.5:1
rpm	유전	390	315	315	315	315
	8노치	900	900	900	900	900
견인마력(HP)		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
자중(ton)		118.0	132.0	124.0	132.0	124.0
치차비		57:20	57:20	57:20	62:15	62:15
최대속도(KPH)		150	150	150	150	150
길이(mm)		20.982	20.787	20.787	20.787	20.787
폭(mm)		3,150	3,127.5	3,127.5	3,127.5	3,127.5
높이(mm)		4,000	4,254	4,254	4,254	4,254

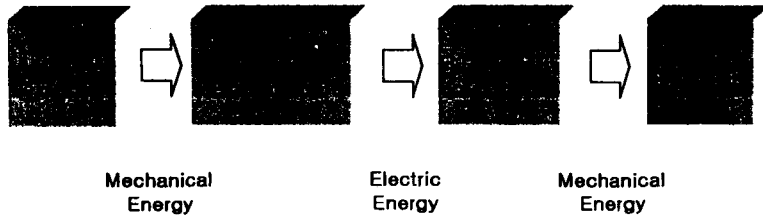


그림 1. 디젤기관차 동력전달경로 및 작동원리

## 2.2 엔진출력

디젤기관차는 그림 1에서 연료유가 지닌 열에너지를 운동에너지(mechanical energy)로 바꾸어 주는 디젤기관(diesel engine)과 이 운동에너지를 전기에너지(electric energy)로 바꾸어 주는 주발전기(main generator), 발전기에서 생산된 전기에너지를 받아 이를 회전운동에너지로 바꾸어 주는 견인전동기(traction motor), 회전에너지를 차륜(wheel)에 전달하여 차를 진행시키는 대차장치 및 기타 부속장치 등으로 구성되어 있다. 디젤전기기관차는 디젤기관에서 발생한 원동력으로 주발전기를 구동하여 발전된 전원을 견인전동기에 공급하여 견인전동기로 하여금 동륜을 회전시키도록 설계된 기관차를 말한다. 이것은 디젤자가발전장치를 구비한 전기기관차로 볼 수 있다.

동력계(dynamometer)는 엔진시험장치 중 가장 중요한 것으로서 엔진출력을 재는데 사용된다. 전기동력계(electric dynamometer)는 엔진이 연소되지 않은 상태에서 엔진을 구동하는 전동기를 사용하며, 엔진의 기계적 손실을 측정한다. 전기동력계에 전압과 전류측정기를 장착하면 엔진의 제동마력을 구할 수 있다. 부하시험을 실시하여 7000대 디젤기관차의 엔진출력을 구했다. 디젤기관차의 견인마력은 유전에서 74.6 bhp, 최대출력인 8노치에서 3205.7 bhp로 나타났다. 견인마력은 엔진마다 다소 차이가 있지만 엔진이 정상상태일 경우 통상  $3,000 \pm 200$  bhp의 범위이다.

## 2.3 배출가스 규제동향

미국 환경보호청(US. EPA)에서는 1997년 12월 17일에 기 제작되거나 앞으로 제작될 기관차 및 그 엔진에서 배출되는 CO, THC, NOx, PM 등에 대한 배출규제를 표 2와 같이 채택하여 실시하고 있다. 표에서 보여주듯이 Tier 0는 1973년에서 1999년까지 제작된 기관차를 대상으로 하며, Tier 1은 2000년에서 2004년까지 제작되었거나 제작될 기관차, Tier 2는 2005년 이후 제작될 디젤기관차를 대상으로 한다. 규제모드는 Line-haul과 Switch 두 가지로 분류하였으며, Line-haul은 고속, 화물 및 수송용으로 사용되는 2000마력 이상의 기관차 엔진, Switch는 2000마력 미만으로 저속, 단거리 이동용 화물수송용에 사용되는 기관차 엔진을 포함한다.

제작시기에 따라 예측되는 기관차의 예상 배출율(emission rates)을 표 3에 나타내었다. 배출을 역시 배출규제와 마찬가지로 총 3단계로 나뉘어져 있다. Tier 0은 1973년에서 2001년까지 제작된 기관차, Tier 1은 2002년에서 2004년까지 제작될 기관차, Tier 2는 2004년 이후 제작될 기관차를 대상으로 한다. 예상 배출율은 NOx의 경우 Tier 0에서 8.6 g/bhp·hr이 Tier 1에서는 6.7 g/bhp·hr로 Tier 2에서는 5.0 g/bhp·hr으로 점차 낮아지는 것을 알 수 있다.

표 2. 미국 환경보호청(US. EPA)의 디젤기관차 배기가스 배출기준

Tier 0 (1973 ~ 1999)								
Mode	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	1.00	5.50	5.00	27.50	9.50	52.30	0.60	3.30
Switch	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

표 3. 미국환경보호청(US. EPA)의 디젤기관차 배기가스 배출율

Tier 0 (1973 ~ 2001)								
Mode	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	0.48	2.64	1.28	7.04	8.6	47.3	0.32	1.76
Switch	1.01	5.56	1.83	10.07	12.6	69.3	0.44	2.42
Tier 1 (2000 ~ 2004)								
Line-haul	0.47	2.59	1.28	7.04	6.7	36.85	0.32	1.76
Switch	1.01	5.56	1.83	10.07	9.9	54.45	0.44	2.42
Tier 2 (2004 and later)								
Line-haul	0.26	1.43	1.28	7.04	5.0	27.5	0.17	0.94
Switch	0.52	2.86	1.83	10.07	7.3	40.15	0.21	1.16

### 3. 측정결과 및 고찰

#### 3.1 배기가스 측정결과

디젤기관차에서 배출되는 배기가스는 stack sampler(Sensonic 5100, Austria)를 이용하여 측정하였으며 측정결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 디젤기관차 배기가스 온도는 유전에서 101 °C이었으나 2노치부터 급격히 상승하여 8노치에서 371 °C를 나타냈다. 산소농도(%)는 유전에서 18.9%이었으며, 노치가 상승함에 따라 13.0%까지 감소하였다. 일산화탄소 농도(ppm)는 6노치에서 1069 ppm으로 최대 값을 나타냈다. 이런 현상은 보다 정밀한 측정과 변수들에 대한 세밀한 검토가 병행되어야 하겠지만 디젤기관차 특성상 turbo charger의 작동으로 배기가스의 재순환이 이루어지면서 농도가 상승한 것으로 사료된다. 질소산화물로 통칭되는 NOx의 농도(ppm)는 배출가스의 온도가 상승하면 동반 상승하는 것으로 알려져 있으며, 측정결과에서도 동일한 패턴을 보였다. 연소 효율(combustion efficiency, %)은 유전에서 72.4%, 8노치에서 67.5%로 출력이 증가할수록 점차 점차 감소하는 것으로 나타났다. 과잉공기비(excess air ratio, λ)는 완전연소를 위해 공급하는 여분의 공기량을 표시하는 지표로서 측정된 산소농도로 계산하며, 1노치에 9.57, 8노치에 2.62로 산소농도의 감소와 함께 점차 감소하는 경향을 보였다.

### 3.2 배기가스 입경분석

배출구로부터 배출되는 입자상 물질은 배기가스의 일부만을 시료로 사용하는 희석터널(dilution tunnel)을 이용해서 입자크기 측정장비(SMPS)로 측정했다. SMPS(scanning mobility particle sizer)는 DMA(differential mobility analyzer, TSI 3071A)와 CPC(condensation particle counter, TSI 3022A)로 구성되며, 희석터널은 미국 EPA의 희석터널법에 대한 규정에 준하여 제작하였다. 터널내부의 온도는 28℃로 일정하게 유지하였다. 배기가스는 연결관을 통해 터널에 들어가고, 이와 별도로 필터를 통해서 도입된 깨끗한 공기로서 희석하고, mixing orifice에서 균일하게 혼합된 후 터널하류에 설치된 포집용 채취관에서 SMPS를 이용해서 측정하였다.

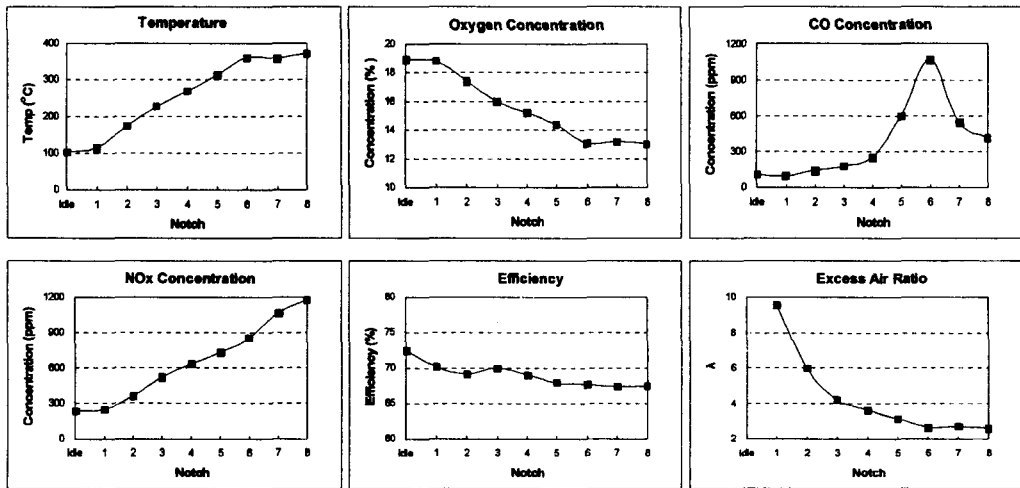
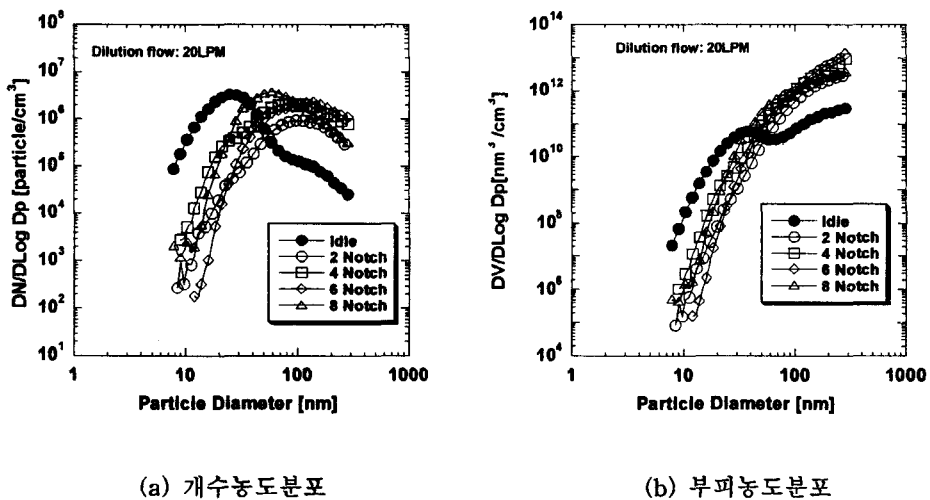


그림 2. 디젤기관차 배기가스 측정결과



(a) 개수농도분포

(b) 부피농도분포

그림 3. 디젤기관차에서 배출되는 입자의 농도분포(20 lpm)

그림 3은 각 노치에서 SMPS로 측정된 입자의 개수(number size distribution)와 부피농도분포(volume size distribution)를 나타냈다. 이 측정은 디젤기관차의 특수성으로 인해 각 노치에서 약 2분 정도 시행되었다. 이 실험결과로부터 회석조건 20lpm에서의 공회전(idle)을 제외한 모든 분포는 비슷한 모양을 보이고 있다. 그림 3 (a) 개수농도분포에서 입자 입경의 대부분이 10~200 nm의 범위로 미세입자인 것으로 나타났다.

최근 경유 차량에서 발생하는 미세입자의 위해성과 관련해서 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지 밝혀진 미세입자의 대표적인 영향으로는 체류시간, 광학특성, 입자표면적, 건강 영향 등이 있다. 입자크기와 관련된 가장 큰 관심은 미세입자와 초미세입자의 인간 건강에 대한 영향이다. 미국 환경보호청(US. EPA)에서 제안한 미세입자의 기준은 미세입자와 건강영향 사이의 상관을 밝히는 연구에 바탕을 두고 있으며, 연구결과에서 PM10 농도보다 미세입자가 인간의 건강에 더 나쁜 영향을 미치는 것으로 발표되었다.

#### 4. 결 론

철도 디젤차량에 대한 일반현황 및 배기가스 배출특성을 측정결과 중심으로 언급하였다. 디젤기관차 배기가스 측정결과 CO, NO<sub>x</sub> 등 가스상 물질의 농도가 비교적 높게 나타났다. 회석터널에서 배기가스를 회석한 후 SMPS를 이용한 입경 측정에서는 대부분의 입자가 미세입자인 20~100 nm의 크기범위를 보여서 인체 영향에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

철도 차량은 비도로용 차량으로 분류되어 우리나라에서는 아직까지 규제대상이 아니지만 비도로용 차량에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근 미국 등 선진국을 중심으로 배출가스 규제대상을 도로용 차량에서 비도로용 차량까지 확대 적용하고 있으며, 환경부에서는 국제 규제추세 움직임에 대응하기 위해 철도 등 비도로용 차량에 대한 배출량 파악을 위한 기초조사 등 대책마련을 서두르고 있다. '90년대 이후 지속적으로 전철화를 추진하여 디젤 철도차량의 비율이 상대적으로 줄어들었지만 수송분담율면에서는 중요한 위치를 차지하기 때문에 디젤 철도차량에 대한 지속적인 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] 철도청, 디젤기관차 검수지침서, 1995.
- [2] 정일록, 엄명도, 류정호, 임철수, 비도로용 건설기계의 오염물질 배출량 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회지 제 15권 제3호, pp. 317~325, 1999.
- [3] US. EPA, Technical Highlights-Emission Factors for Locomotives, EPA420-F-97-051, 1997.
- [4] 한국철도기술연구원, 디젤기관의 배출가스 대기오염 현황 및 저감방안에 관한 연구, 1997.
- [5] David, B. Kittleson, Engines and nanoparticles, J. Aerosol Sci. Review Vol. 29, pp. 575~585, 1998.