

미국 디젤기관차의 매연 배출기준과 비교한
국내 디젤기관차의 매연 배출 저감목표 설정 연구
Study on the Establishment of Reduction Goals for Air Pollutants
Emissions from Diesel Locomotives in Korea by Comparison with
Emission Regulation in United States

조영민* 박덕신** 권순박** 임인권***
Cho, Young Min Park, Duck Shin Kwon, Soon Bark Lim, In Gwon

ABSTRACT

The air pollutant emission from the railroad diesel locomotive is still a significant environmental concern in many countries including Korea and United States. The emission characteristics of the railroad diesel locomotive were extensively studied in this study. Particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x) emitted from a large locomotive engine (2-cycle, 16-cylinder, and 3,000-horsepower) under various engine-rating conditions was analyzed with a scanning mobility particle sizer and a gas stack sampler by using a dilution tunnel. We could gain the emission values of 2.1 g/horsepower-hour for PM and 42.7 g/horsepower-hour for NO_x. We proposed the emission reduction goal of the railroad diesel locomotive for Korea in comparison with the regulation of United States.

1. 서론

철도는 도로 교통수단에 비하여 단위수송량 대비 에너지 소모량과 대기오염물질 배출량 등이 매우 적어 친환경적인 교통수단으로 각광받고 있다. 그러나, 디젤 엔진이 장착된 철도용 디젤기관차 또는 디젤동차 등에서 배출되는 오염물질은 전혀 여과되지 않은 채 대기 중으로 배출되고 있다. 이는 현재 도로 교통수단의 경우 배출되는 대기오염물질에 대하여 규제가 되고 있는 것에 반해 철도의 경우는 아무런 규제가 없기 때문이다. 2005년 현재 국내에는 디젤기관차가 587량, 디젤동차가 602량 등 총 1,189량이 있는데, 전철화를 통하여 디젤기관차를 전철로 대체하고 있으며, 이에 따라 디젤차량의 신규도입(8량)은 점차 감소하고, 폐차(14량)는 점차 증가하는 추세에 있다. 그러나, 향후로도 철도에서는 30년 이상 디젤기관이 지속적으로 쓰일 것으로 보인다. 또한 외국에도 많은 철도용 디젤차량이 운행 중에 있는데, 표 1과 같이 미국 20,878량, 중국 10,752량, 독일 5,338량, 인도 4,837량, 프랑스 3,881량 등 전세계적으로 6만량 이상에 이른다.

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

E-mail : ymcho@krri.re.kr

TEL : (031)460-5362 FAX : (031)460-5319

** 정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

*** 비회원, (주)씨에이테크

표 1. 외국의 철도용 디젤차량 대수 현황

국가	디젤기관차	디젤동차	합계	기준연도
중국	10,752	0	10,752	2002
미국	20,878	0	20,878	"
체코	1,380	791	2,171	"
독일	2,578	2,760	5,338	"
프랑스	2,958	923	3,881	"
이태리	1,538	825	2,363	"
포르투갈	2,043	15	2,058	"
루마니아	2,250	155	2,405	"
우크라이나	2,698	0	2,698	2001
캐나다	2,911	7	2,918	2002
인도	4,815	22	4,837	"
일본	494	1,547	2,041	"

이에 따라 미국의 경우는 Tier 2 규제에 의하여 미세먼지 배출이 규제되고 있으며, (US EPA, 2004) 유럽의 경우에도 EURO 기준이 철도차량에 대하여 적용될 예정이다. 이 연구에서는 국내 디젤기관차에서 발생하는 오염물질의 배출특성을 조사하고, 이를 미국 디젤기관차의 매연 배출기준과 비교함으로써 향후 국내 디젤기관차의 매연 배출 저감목표를 설정하고자 하였다.

2. 실험

디젤기관차는 2행정 16기통 엔진이 일반적이며, 디젤동차와 발전차는 6, 8, 16기통 엔진 등으로 다양하며, 출력은 200마력에서 3,000마력까지 다양하다. 본 실험에서는 2행정 16기통 3,000마력의 16-645E3 엔진이 장착된 특대형 디젤기관차 (7100~7500계)를 대상으로 배출되는 매연을 측정하였다. 배기가스 분석시 바람과 난류의 영향을 최소화하기 위하여 보조연돌을 사용하고, 배출가스의 온도를 낮추고 농도를 희석하기 위하여 희석 터널 (그림 1, 2)을 사용하여 측정하였다. 미세입자 분석은 광산란 입자계수기 (RION KC-01B)와 SMPS (TSI 3934)를 이용하여 수행하였으며, 가스 분석은 stack sampler (Sensonic 5100)를 이용하여 CO, NO, NO₂, O₂, 매연, 연소효율 등을 측정하였다. 측정과 분석은 SAE J177에 따라 수행하였다. VOCs는 6ℓ 크기의 캐니스터 캔에 포집한 후 GC-MS로 분석하였다.



그림 1. 본 실험에 사용된 희석 터널 (외형)



그림 2. 본 실험에 사용된 회석 터널 (내부)

3. 결론

표 2는 notch를 0, 2, 4, 6, 8-notch로 변화시키면서 디젤기관차에서 배출되는 배출 가스의 온도, 산소 농도, excess air ratio, 이산화탄소 농도, 일산화탄소 농도, 질소산화물의 농도를 모니터링한 표이다. 부하가 증가함에 따라 산소 농도는 감소하고, 반대로 이산화탄소 농도는 증가하였다. 일산화탄소 농도는 6-notch에서 가장 높았으며, 8-notch로 엔진 출력을 더욱 증가시켰을 때에는 오히려 감소하였다. 질소산화물의 경우, 배출량은 엔진 출력과 거의 비례하여 증가하였는데, 이는 엔진 출력이 클 때 엔진의 온도가 높아져서 질소의 산화반응이 더욱 활발하게 일어나기 때문인 것으로 보인다.

표 2. 엔진 부하에 따른 배출가스의 특성 분석

Notch	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
idle	18.9	1.5	110	234
2	17.4	2.6	147	359
4	15.2	4.3	257	630
6	13.1	5.8	1,069	857
8	13.0	5.9	412	1,282
Mean	15.5	4.0	399	672
S.D.	2.6	1.9	393	418

표 3은 디젤기관차의 오염물질 배출농도를 나타낸 표이다. Notch가 커지면 커질수록 출력이 증가하기 때문에 RPM과 BHP, 그리고 gas velocity가 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나, 산소 농도는 반대로 감소하여 8-notch에는 12.3%까지 감소하였다. 질소산화물과 일산화탄소, 미세먼지, 그리고 연기의 농도는 7-notch까지는 증가하다가 8-notch에서 다소 감소하였다. 그러나, 탄화수소는 8-notch보다 7-notch일 때가 더 높았다.

표 3. 디젤기관차의 오염물질 배출농도

Notch	RPM (revolution per minute)	BHP (brake horse power)	O ₂ (%)	gas velocity (m/sec)	NOx (ppm)	CO (ppm)	HC (ppm)	PM (mg/m ³)	smoke (B-NO.)
idle	260	17	20.1	4.11	248	158	162	4.0	2.8
1	302	173	18.7	7.29	604	200	126	6.0	4.4
2	368	426	17.5	8.94	969	283	404	6.0	6.8
3	492	830	15.8	13.79	1,417	453	590	12.5	6.4
4	559	1,057	15.1	16.36	1,568	625	852	17.0	6.8
5	645	1,434	14.3	22.57	1,688	901	959	259.0	7.0
6	715	1,823	13.4	27.59	1,780	1,368	1,216	396.0	7.4
7	810	2,409	12.3	35.48	1,822	2,069	1,431	505.0	7.8
8	894	2,953	12.3	43.09	1,806	1,776	1,490	255.0	7.6

표 4는 디젤기관차의 시간당 오염물질 배출량을 나타낸 표이다. 출력이 증가하면 증가할수록 질소산화물, 일산화탄소, 탄화수소, 미세먼지의 농도가 크게 증가하였다. 질소산화물의 시간당 오염물질 배출량은 idle에서 1,622 g/h에 불과하였으나, 8-notch에서는 126,460 g/h에 이르러 약 78배 증가하였다. 일산화탄소와 탄화수소의 경우도 idle에서는 641 g/h와 311 g/h에 불과하였으나, 8-notch에서는 각각 76,271 g/h와 28,291 g/h로 각각 119배와 91배 증가하였다. 미세먼지의 경우도 idle에서는 발생량이 15 g/h로 매우 적었으나, 7-notch에서는 9,282 g/h로 619배나 증가하였다. 그러나, 더 출력을 높여 8-notch가 되었을 때에는 오히려 발생량이 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 8-notch에서 더 고온이 되어 매연 자체가 일부 산화되어 이산화탄소 및 기타 다른 오염물질의 형태로 배출되기 때문인 것으로 보인다.

표 4. 디젤기관차의 시간당 오염물질 배출량

Notch	NOx (g/h)	CO (g/h)	HC (g/h)	PM (g/h)
idle	1,622	641	311	15
1	7,027	1,428	412	30
2	14,149	2,425	1,708	49
3	33,359	6,031	3,881	1,282
4	44,265	9,326	6,491	1,804
5	63,797	19,481	9,848	3,773
6	81,221	36,271	15,025	7,017
7	105,408	70,963	22,319	9,282
8	126,460	76,271	28,291	6,187

표 5는 표 4에서 얻은 시간당 오염물질 배출량을 제동마력으로 나누어 얻은 것이다. 단위마력당 오염물질 배출량을 보면, 질소산화물, 일산화탄소, 그리고 탄화수소의 발생량은 idle에서 가장 크게 나타났으나, 미세먼지의 경우는 7-notch에서 가장 크게 나타났다. 질소산화물과 일산화탄소는 출력이 증가함에 따라 2-notch까

지는 감소하다가 그 이후에 증가하는 경향을 보였다. 질소산화물은 4-notch 이후로는 거의 변화가 없었고, 일산화탄소의 경우는 7-notch까지 지속적으로 증가하다가 8-notch 때 다소 감소하는 것으로 나타났다. 탄화수소는 1-notch까지 감소하다가 그 이후로 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 미세먼지 배출량도 다른 경향을 보이는데, 3-notch까지 감소하다가 그 이후로는 7-notch까지 지속적으로 증가하고, 8-notch 때에는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 질소산화물, 일산화탄소, 미세먼지의 배출량은 7-notch에서 각각 최대치인 43.33 g/bhp-h, 30.24 g/bhp-h, 3.90 g/bhp-h로 나타났고, 탄화수소의 배출량은 8-notch에서 최대치인 9.59 g/bhp-h로 나타났다.

표 5. 디젤기관차의 제동마력당 오염물질 배출량

Notch	NOx (g/bhp-h)	CO (g/bhp-h)	HC (g/bhp-h)	PM (g/bhp-h)
idle	95.98	37.95	18.40	0.87
1	43.78	8.64	2.96	0.31
2	32.98	5.68	4.01	0.11
3	38.01	7.47	4.47	0.16
4	41.31	8.93	6.09	0.17
5	44.17	14.00	6.82	2.59
6	44.13	20.43	8.21	3.85
7	43.33	30.24	9.25	3.90
8	42.67	26.32	9.59	2.11
평균	41.30	15.21	6.42	1.56

현재 국내에서 도로용 디젤기관에는 배출 규제가 적용 중이며, 정부에서는 이 배출 기준을 만족시킬 수 있도록 매연저감장치의 장착을 중앙정부 (환경부)와 지방정부 (지방자치단체)의 공동부담으로 지원하고 있다. 그러나, 현재 철도차량용 디젤기관에는 규제기준이 없는 상태인데, 그 이유는 철도차량용 대형 디젤차량에 적용이 가능한 오염물질 정화장치를 제작하기 위한 기술이 부족하기 때문이다.

그러나, 2005년 5월에 경기도 오산에서 디젤기관차에서 발생한 매연에 의하여 비닐하우스가 피해를 입은 사건에 대하여 환경부 중앙환경분쟁조정위원회가 철도운행에 의한 매연, 분진피해를 인정하여 한국철도공사에게 4,103,710원을 배상하도록 결정하는 등 디젤 매연에 대한 피해가 구체적으로 나타나고 있어 앞으로도 유사한 피해신청과 배상결정이 잇따를 것으로 전망된다. 수도권외의 경우, 2005년 수도권대기질보전특별법이 발효되면서 향후 수도권을 운행하는 철도용 디젤차량에도 배출 규제기준이 제정되어 적용될 것으로 예상된다. 현재, 서울시와 환경부에서 적용 타당성을 검토하고 있으며, 적절한 대형 디젤기관차용 오염물질 정화장치가 개발되면 역시 환경부와 지방정부의 재정 지원이 가능할 것으로 예상된다.

유럽의 경우에는 비도로용 디젤차량에 대하여 1999년부터 Directive 97/68/EC의 형식으로 선포되었으나, 철도차량은 이 규제에서 빠져있어 유럽의 디젤기관차는 아무런 규제를 받지 않고 있다. 그러나, 미국의 경우 1997년 12월에 EPA (Environmental Protection Agency)에서 신규 철도차량 및 철도차량엔진에 대한 질소산화물, 탄화수소, 미세먼지 등에 대한 규제를 제정하여 2000년부터 시행하기로 하였다. 이에 따라 표 6과 같이 단계별로 배출 규제 기준이 마련되어 현재 Tier 2 규제가 적용되고 있다. 이 기준에 따르면, line-haul 모드에서 탄화수소, 일산화탄소, 질소산화물, 미세먼지의 경우 각각 0.3 g/bhp-h, 1.5 g/bhp-h, 5.5 g/bhp-h, 0.20 g/bhp-h이고, switch 모드에서 0.6 g/bhp-h, 2.4 g/bhp-h, 8.1 g/bhp-h, 0.24 g/bhp-h이다. 그러나, 2004년 EPA에서 입법예고한 법령에 따르면 현실성을 고려하여 미세먼지와 질소산화물에만 적용되며, 질소산화물은 9.5 g/bhp-h, 미세먼지는 0.6 g/bhp-h이다.

표 6. 미국의 철도용 디젤차량 배출 규제 기준

Stage	신규 생산 및 재생 시점	mode	HC (g/bhp-h)	CO (g/bhp-h)	NOx (g/bhp-h)	PM (g/bhp-h)
Tier 0	1973~2001년	Line-haul	1.0	5.0	9.5	0.60
		Switch	2.1	8.0	14.0	0.72
Tier 1	2002~2004년	Line-haul	0.55	2.2	7.4	0.45
		Switch	1.2	2.5	11.0	0.54
Tier 2	2005년	Line-haul	0.3	1.5	5.5	0.20
		Switch	0.6	2.4	8.1	0.24

현재 국내 대형 디젤기관차에서 배출되는 값은 질소산화물의 경우 최대 43.33 g/bhp-h, 미세먼지의 경우 최대 3.9 g/bhp-h인데, 평균적으로 각각 41.3 g/bhp-h, 1.56 g/bhp-h 정도로 나타나 미국의 규제 기준을 크게 웃돌고 있는 상황이다. 이 규제 기준을 만족시키기 위해서는 배출가스의 배출저감목표는 질소산화물은 약 90%, 미세먼지는 85% 가량이 되어야 한다.

현재 디젤기관차의 매연을 저감하는 장치로는 디젤입자필터 (DPF; diesel particulate filter), 디젤산화촉매 (DOC; diesel oxidation catalyst), 플라즈마 NOx 저감장치, 4-way 촉매 시스템, 선택적 촉매 환원법 (SCR; selective catalytic reduction; SCR) 장치 등이 있으며, 실용화를 위한 노력이 계속되고 있다. 이런 저감장치의 개발은 디젤기관차의 환경성 향상과 더불어 철도의 친환경 이미지 제고에 큰 기여를 하게 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발사업에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Andrew, J. K., Sawyer, R. F., and Harley, R. A. A fuel based assessment of off-road diesel engine emissions. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 2000, 50, 1929-1939.
- (2) Kinsey, J. S., Mitchell, W. A., Squier, W. C., Linna, K., King, F. G., Logan, R., Dong, Y., Thompson, G. J., and Clark, N. N. Evaluation of methods for the determination of diesel-generated fine particulate matter: Physical characterization results. *J. Aerosol Sci.*, 2006, 37, 63-87.
- (3) Kittelson, D.B. (1998) Engines and nanoparticles. *J. Aerosol Sci.*, 29, 575-585.
- (4) US EPA. (2004) Reducing emissions for locomotive and marine diesel engine. *Federal Register, Proposed Rules* 69, No.124, 39275-39289.