

디젤 입자상물질의 특성 및 측정 평가에 관한 연구

김복윤¹⁾ · 이상권 · 조영도

Study on Characteristics of Diesel Particulate Matter and it's Measurement and Evaluation

Bok-Youn Kim, Sang-Kwon Lee and Young-Do Cho

ABSTRACT Presently, mobile diesel equipments contribute a lot to improve the economic feasibility of underground mining and tunneling operations. Even in Korea, a lot of diesel equipments are being applied to the underground workings already, but the technology of management and control of them is not sufficient yet. This study handled the production procedure, characteristics and evaluation technology on diesel particulate matter(DPM) which is known as a carcinogen. For easy measurement of DPM using laser dust monitor, conversion factor(k) to gravimetric concentration has been acquired. It is appeared that the critical material among the diesel exhaust pollutants is becoming DPM instead of NO_x from this year of 1996 according to the Government regulation.

1. 서 론

무케도 디젤장비는 광산의 경제성 제고를 위하여 1940년대부터 유럽 및 미국에서 사용되기 시작하였다. 처음에는 배출가스에 의한 보건상의 위해성 때문에 많은 문제점도 있었으나 꾸준한 연구결과 사양화하는 광업계의 재건에 큰 기여를 하고 있다. 현재 미국, 캐나다, 서독, 영국, 남아연방, 소련 등 여러 나라에서 디젤장비가 갱내장비의 주축을 이루고있다. 국내도 20여개 광산을 포함하여 각종 터널공사 현장에서 많은 디젤장비들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 디젤장비가 배출하는 오염물질 중 발암성으로 알려진 디젤입자상물질(Diesel Particulate Matter : DPM)에 대한 이론적인 연구와 함께 농도측정의 편리성을 제고하기 위하여 상대농도 측정값을 질량농도로 환산할 수 있는 질량농도 환산계수를 도출하여 제안하였으며, 또한 광산현장에서 사용하고 있는 장비의 배출농도를 측정 평가하여 국산 일반 장비와 외국산 갱내 전용장비의 갱내환경에 미치는 영향을 비교 분석하여 1996년부터 적용되는 배

출허용 기준치와 대비함으로써 오염 억제 대책의 방향을 제시하고자 하였다.

2. 분진과 디젤입자상물질

2.1 분진 (Dust)

공기를 매체로 하여 그 중에 입자상물질이 부유하고 있는 상태를 총체적으로 Aerosol이라 하며, 그 종류는 생성과정에 의해 결정되는 경우가 많으나 일반적인 분류 방법은 입자상물질의 형태나 거동에 의해 분류하는 경우도 있다. 생성 과정에 의한 분류를 보면 표 1과 같다.

이러한 Aerosol을 통상적으로 분진이라 말하고 있다. 분진의 입도범위는 0.001-1,000 μm 이지만 40 μm 이상의 분진은 발생즉시 침강하므로 일반적으로 총 분진이라 함은 40 μm 이하의 분진을 말한다. 그 중에서도 인체에 흡입할 때 폐포에까지 도달 침착하여 진폐증

* 1995년 12월 접수

1) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부 책임연구원

Table 1. Classification of Aerosol

명칭	상태	생성 메커니즘 및 예
분진 dust	고체 solid	고체물질이 물리적 파쇄과정등에 의해서 적은 입자로 된 것 화학적 조성은 발생원 물질과 같다. 예를 들면 암석의 파쇄에 의해서 발생한 광물성 분진, 곡물분진등 입자의 크기는 초현미경적인 것으로부터 육안적인 입자까지
흠 fume	고체 solid	고체물질이 증발하고, 이것이 응고한 입자, 승화 또는 금속의 산화등 물리 화학 반응에 의해서 발생한 입자. 공기중에서는 많은 경우 산화물로 되고, 구상, 결정상으로 된다. 예를 들면 연 fume, 용접 fume 등. 입경은 1 μm 이하의 것이 많다
연 smoke	액체, 고체 liquid, solid	유기성의 물질이 연소하는 과정에서 발생한 입자, 불완전 연소물, 회분, 수분 등을 함유하는 입자에서 크기는 0.5 μm 이하의 것이 많다. 예를 들면 담배연기.
안개 mist	액체 liquid	액체의 분산, 증발 및 응축 등에 의해 생성되는 것으로 안개, 유제상 농약의 살포, 연무 등이 있다.

등의 질병을 야기하는 입도 범위는 0.5-7 μm 이며, 이러한 입도 범위의 분진을 호흡성 분진(Respirable dust)이라 하여 관심과 연구의 대상으로 하고 있다. 이들은 肺胞에 吸入 沈着되어 塵肺 등 치명적인 직업병의 원인이 되기 때문이다.

2.1.1 분진의 성분

성분중 특히 遊離硅酸分은 폐포에 직접적으로 영향을 주는 제일 위험한 성분이다. 따라서 중요한 것은 공기중의 부유분진의 성분이 아니라 폐포에 도달하는 분진의 성분이 중요한 것이다. 그래서 분진의 최대허용농도 설정도 유리규산분의 많고 적음에 의해 정해진 것이다. DPM은 그 자체의 성분은 탄소에 불과하지만 분진 표면에 부착한 불연 탄화수소류(Unburned Hydro Carbon)가 발암성이기 때문에 위험한 것이다.

2.1.2 분진의 입도

진폐 환자의 해부결과 얻어진 결론은 체내에 침착된 분진의 대부분은 5 μm 이하의 분진입자라는 사실이다. 그 중에서도 가장 위험한 입도는 1-2 μm 입도로 알려져 있으며 약 0.25-10 μm 범위의 입자가 폐에 沈着하는 것으로 밝혀졌다. 침착량의 구성비를 감안하여 일반적으로 0.5-7 μm 를 호흡성 분진이라고 규정하고 특별

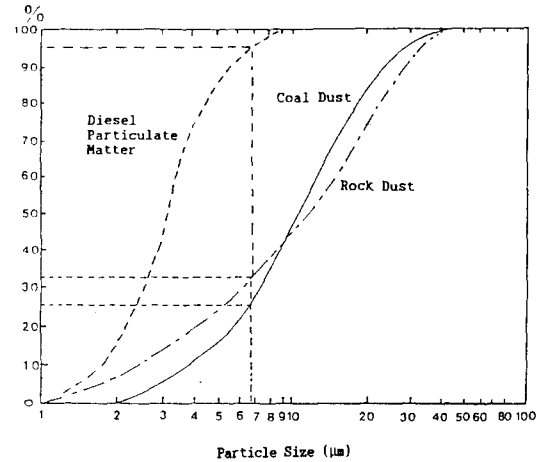


Fig. 1. Size Distribution of Dusts.

히 취급하고 있다. 분진의 종류에 따라서 총 부유분진 중 호흡성 분진의 비율이 다른데 그간 국내 광산분진에 대한 연구 결과는 중량 비로 암석 분진은 약 30%, 석탄 분진은 약 25%가 호흡성분진인 것으로 밝혀졌다. DPM의 입도는 90% 이상이 호흡성 분진으로 알려져 있어 그 위해성이 더 심각하다.⁶⁾ 입도 분포 곡선을 비교해 보면 그림 1과 같다.

2.1.3 분진의 최대 허용농도

공기중의 분진의 농도는 단위 체적당 분진의 질량으로 표시하는 (1)質量濃度(mg/m^3), 단위 체적당 분진 粒子數로 표시하는 (2)個數濃度($\text{particle}/\text{m}^3$)가 있으나 실제로는 인체에 미치는 해가 체내에 침착한 분진의 총 질량과 직접적으로 비례하기 때문에 분진환경은 주로 질량농도로 평가되고 있으며 환경 규제도 질량 농도로 하고 있다.

따라서 각국은 위의 세 가지 요소 즉, 분진의 성분, 입도 및 농도에 의해 최대 허용농도를 규제하고 있다.

분진 환경을 평가하는 방법은 개인이 1일 작업시간 중에 흡입하는 분진량을 평가하는 (1)個人 暴露濃度와 작업장의 평균농도를 평가하는 (2)作業場 粉塵濃度 등 두 가지가 있다. 개인의 건강과 직접적으로 관계가 있는 것은 개인이 흡입하는 분진량이기 때문에 개인 폭로 농도가 이상적일 수 있으나 이 방법의 문제는 같은 작업장에서도 개개인의 분진 흡입량이 같지 않으며 같은 양의 분진을 흡입하더라도 개인에 따라 그 영향이 같지 않다는 점이다. 한편 작업장 분진농도는 환경 관리 측면에서 유리하고 바람직하며, 법률적으로도 작업장의

분진농도를 규제하고 있다. 그러나 현실적으로는 시간적, 공간적으로 유동적인 작업장의 분진환경을 한가지 숫자로 표현하는 것이 매우 어렵다는 문제가 있다.

2.1.4 분진농도 측정

분진농도 측정기는 호흡성 분진 입도 보다 큰 입자를 제거하여 호흡성 분진만을 흡입하도록 하는 것이 중요하다. 분진 측정기는 공통적으로 흡입구, 입도 분리장치, 펌프, 필터, 유량 조절기 등으로 구성되어 있다. 분진농도 측정 법은

- 1) 개수농도법
- 2) 질량농도법
- 3) 상대농도법

등 3종류가 있으나 역시 기본이 되는 방법은 질량농도법이다. 그 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 인체에 미치는 영향이 폐에 沈積된 분진의 질량에 비례한다는 사실이 증명되었기 때문이다.

질량농도 측정기로는 영국의 석탄공사(British Coal)의 전신인 National Coal Board가 개발한 Dust sampler(113A)가 세계적으로 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법은 매번 천평에 의해 평량을 해야 함으로 매우 번거롭고, 평량이 가능할 만큼의 분진을 포집하기 위해서는 상당한 시간이 소요되며, 평량은 실험실에서 이루어져야 하기 때문에 현장에서 즉시 농도를 확인할 수 없다. 그리고 극미량의 분진을 다루기 때문에 상당한 오차가 있을 수 있다는 문제가 있다.

이와 같이 질량농도 측정 법은 측정점이 많을 때에는 많은 시간이 소요되고 번거롭기 때문에 상대농도 측정법이 개발되었다. 상대농도 측정법은 현장에서 순간에 직접 농도를 평가할 수 있다는 장점이 있다. 측정 원리는 분진에 의한 散亂光量에 비례하는 전기량을 pulse로 변환시켜 단위 시간당 pulse 수(count per minute: cpm)를 읽는 방식이다. 그러나 이 기기를 사용하기 위해서는 동종 분진에 대하여 질량농도와 상대농도를 동시에 측정하여 환산계수를 정해 놓아야 한다. 즉 질량농도 환산계수(K)는 동시에 같은 조건에서 측정된 질량농도와 상대농도의 비가 된다.

일단 K 값이 구해지면 상대농도 측정값에 K 값을 곱하여 간단히 질량농도를 구할 수 있게 되어 분진농도 측정이 편리하고 신속하게 이루어질 수 있게 되는 것이다.

2.2 디젤입자상물질

2.2.1 DPM의 생성과정 및 특성

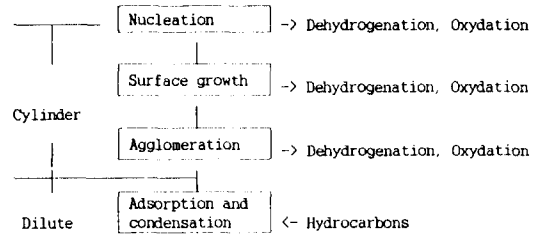


Fig. 2. Proces leading to diesel particulate matters.

DPM은 주로 경유의 연소과정에서 생성된 탄소질 물질(Soot;검댕)에 약간의 유기질 물질이 吸着되어 있는 것으로 일반 분진과 별도로 취급하고 있다. 용어상 디젤입자상물질(DPM)이란 매연(Smoke), 미립자(Particulates) 및 검댕(Soot)를 다 포함하는 내용이며 각각의 정의를 하자면 매연은 고체나 액체 구별없이 배기가스 중에 浮遊한 aerosol을 말하는 것이며, 미립자는 필터를 거쳐 채취된 고체 입자를 말하고, 검댕은 퇴적된 상태의 디젤 입자상 물질을 의미한다. DPM의 구성은 엔진 배기 조건과 입자상 물질 포집 방법에 따라 다르다. 500°C 이상에서는 개개의 입자는 기본적으로 직경 15~30 nm의 球狀 탄소 입자들과 미량의 수소의 집합체들이다. 온도가 500°C 이하로 낮아지면 입자들은 不燃 탄화수소, 산화탄화수소류(ketones, esters, ethers, organic acids) 및 多環芳香族 탄화수소(Polynuclear Aromatic Hydrocarbon)등이 흡착 농축된 높은 분자량의 유기질 성분으로 둘러 쌓인다.

DPM의 형성은 1,000~2,800 K의 온도, 50~100기압의 압력 및 연료 전체를 산화시키기 충분한 공기 등의 환경에서 이루어진다. 연료의 일부 성분이 DPM으로 변화되는 시간은 millisecond 단위이다. 입자상 물질 형성과정은 이러한 입자 생성 및 성장 단계들로 이루어진다. 입자 표면의 흡착과 배기 중에서 탄화수소 성분의 새로운 입자를 형성시키는 응집이 배기 계통과 대기중에서 일어난다. 그림 2는 이러한 과정들의 관계를 설명해준다. 즉, 형성(Nucleation)-표면성장(Surface growth)-산화(Agglomeration)-흡착 및 응축(Adsorption and Condensation)의 과정으로 생성된다.

보통 DPM은 용제에 의해 용해되는 용해성 물질과 용해되지 않는 불용성 물질로 나누어진다. 용제는 dichloromethane 과 benzen-ethanole 혼합물이 사용된다. 대표적인 용해성 물질은 중량 비로 15~30%이지만

그 변화 폭은 10~90%이다.

DPM { 불용성 탄소 핵 ————— 70~85%
 용해성 여러 종류의 탄화수소(HC), 유화물, 극미량의 금속 등 흡착물 — 15~30%

대부분의 DPM 오염은 연료 탄화수소의 연소에서 발생되지만 엔진 오일도 상당한 부분을 차지한다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 엔진 오일은 중량 비로 총 입자상 물질의 약 2~25%, 용해성 유기질의 16~80%의 원인이 되고 있다.⁶⁾ 연료의 각종 성분중 paraffins, olefins 및 aromatics 등이 DPM의 원인성분이며 그 중에서도 芳香族(aromatics)이 가장 큰 원인 성분이다.⁶⁾

DPM의 양, 화학적 물리적 성질 등은 정상 운전 중에 다음과 같은 요소에 의해 변화한다.

- 1) 엔진의 종류
- 2) 작업 사이클
- 3) 연료 및 윤활유의 질
- 4) 엔진의 유지 관리상태
- 5) 흡입공기의 조건
- 6) 운전자의 습관
- 7) 오염 억제장치

2.2.2 DPM의 측정

입자상물질 측정기술의 목적은 대기 중에 배출된 입자상물질의 양을 평가하기 위해서이다. 그 방법은 여러 가지 있으나 발생량이 미량이기 때문에 대부분 장시간의 채집이 필요하다. 가장 기초적인 정보는 중량단위이다. 예를 들면 g/km of vehicles, g/kwh of engine, g/kg of fuel 및 mg/m³ of exhaust 등이다. 매연측정기는 배기를 통과하는 빛의 상대적인 양이나 입자상 물질이 채집된 필터의 상대적 반사광 양을 측정하는 것이다.

2.2.3 DPM이 인체에 미치는 영향

미국의 국립직업병연구소(The National Institute for Occupational Safety and Health; NIOSH)와 국제암연구기관(International Agency for Research on Cancer; IARC)는 각각 디젤엔진의 배출 오염물질은 발암성이 있을 가능성이 있다고 발표하였다. 양 기관은 동물시험을 거쳐 그 가능성을 확인하였으나 정량적인 평가를 아직 내리지 못하고 있다. 이와 같은 결과에 따라 광산안전보건청(Mine Safety and Health Administration; MSHA) 당국은 법률 개정 작업을 추

진하고 있다.

DPM은 중량 비로 90%이상이 모두 입경 1미크론 이하의 호흡성 입자로 폐속 깊이까지 흡입되어 폐 질환을 일으킬 수 있기 때문에 관심의 대상이 되고 있다. 더 큰 문제는 이 DPM이 다음과 같은 다른 물질들을 흡입하여 운반하는 역할을 하는 것이다.

(1) 발암성으로 알려지고 있는 多環 芳香族炭化水素 (Polynuclear Aromatic Hydrocarbon; PAH)

(2) 산화유황(SO_x) 및 산화질소(NO_x) 가스

(3) 황산 및 질산

DPM의 노출 허용한도는 아직 설정되지 못하고 있으며 일반 호흡성 분진의 기준에 따르고 있다. 일부 가스도 발암성이 있으며 ACGIH는 Benzo(a)pyrene, chrysene 및 coal-tar pitch 증가만을 발암성으로 지정하였다. DPM이 건강에 미치는 영향에 대해서는 NIOSH 연구 보고서는 다음과 같은 결론을 내렸다.⁶⁾

“최근 흰쥐에 의한 동물시험 결과 디젤 배기계의 노출은 암 발생과 관계가 있다. 디젤 배출가스에 의한 첫 번째 감염기관은 폐이다. 역학 조사 결과 인간이 직업상 디젤 배기에 노출될 때 폐암 발생율이 높다는 사실이 확인되었다. 폐암 발생의 원인 물질은 DPM이지만 일부 가스도 발암성이다.”

또한 같은 보고서의 권고 항목에서 NIOSH 는 다음과 같이 기술하고 있다.

“디젤 배기에 노출되는 사람들에 대한 발암을 상승이 양적으로 평가되지는 못했지만 노출을 최소화하여 발암 가능성을 낮추어야 한다. 세심한 공중보건 정책으로서 고용자는 근로자들이 디젤 배기에 노출되는 작업장에서는 환경 평가를 하여야 하고 가능한 한 노출을 최소화하여야 한다. 또한 DPM의 어떤 성분은 종양을 일으킨다. 일정량의 배기의 DPM과 가스의 상대적 역할에 대해서는 더 연구되어야 한다.”

NIOSH의 최종 결론은 “디젤엔진의 배기는 인체에 암을 발생시킬 가능성이 있다.”는 것이다.

결론적으로 NIOSH 는 동물실험과 역학조사를 통하여 다음과 같은 권고를 하였다.

“전체 디젤 배기는 직업적 발암성의 가능성이 있다.”

“디젤 배기에 노출되는 근로자가 암에 감염될 위험은 양적으로 규명되지는 않았으나 노출을 최소화하여 암 발생 가능성을 줄여야 한다.”

IARC도 NIOSH 발표에 동의하고 “디젤 엔진의 배기는 인간에게 암을 유발할 가능성이 있다.”라는 결론

을 내렸다.

3. 국내 디젤장비의 입자상물질 발생 현황

국내 광산에는 이미 20여개 광산에 150여대의 디젤 장비가 가동되고 있으나, 이중 갱내 전용으로 제작된 간접분사식 엔진을 탑재한 장비는 15%정도에 불과한 실정이다.²⁾ 이들 장비의 디젤 입자상물질 배출량을 측정하기 위하여 신예미 광업소 현장의 갱내전용 장비 (mine truck 3대, LHD 2대)와 충무화학 정선광업소 현장에서 가동중인 일반용 디젤장비(트럭 2대, 로더 1대)에 대하여 각각 배출 오염물질 측정을 실시하였다.

3.1 측정방법 및 현지측정 결과

측정 항목은 배기 온도, 유해가스, 연소 효율과 함께 입자상물질의 배출량 등이었으며, 연소효율 측정기 (Combustion analyzer)를 사용하여 측정하였다. 이 연소효율 측정장치는 미국의 Bacharach사 제품으로 Model명은 CA300 NSX였다. 이 장비는 각종 연소 장치의 연소 효율과 배기가스의 온도 및 성분별 농도를 측정할 수 있는 장비이다.

한편 디젤 입자상물질의 측정을 위해서는 일본제품인 분진 상대농도 측정기로 최근에 개발된 Dust monitor (Model; LD-1E)를 사용하였다. Dust monitor(LD-1E)는 Laser 광선을 이용한 상대농도 측정기기로 탄광 갱내에서 사용할 수 있도록 방폭형 구조로 제작된 것이다.

배기의 높은 온도와 배기 중에 섞여서 나오는 수분 및 기름기를 제거하여 정밀하고 예민한 분진측정기에 손상을 주지 않고 디젤장비로부터 배출되는 입자상 물질을 측정하기 위하여, 배기 온도를 내리고 수분과 기름기를 제거하기 위한 장치를 제작하여 성공적으로 측정을 실시하였다. 사진 1은 현장 측정 장면이고, 표 2는 측정 결과이다.

그러나 이때 측정된 분진 농도는 단위가 count per minute(cpm)임으로 이 값을 질량농도(mg/m^3)로 환산하기 위해서는 2-1-4항에서 설명한바 있는 질량농도 환산계수(k)의 산정이 필요하였다.

3.2 질량농도 환산 계수 도출

k 값의 산정을 위하여 질량농도 측정기와 상대농도 측정기로 동시에 디젤 입자상물질을 측정하였다. 시험은 약 70,000 km를 주행한 자동차(기아 Hurricane 엔

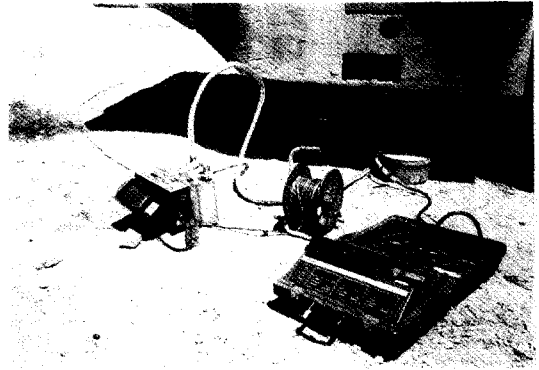


Photo. 1. Measurement of DPM at the Mine Site.

진)로 실시하였다. Bacharach combustion analyzer에 의한 엔진 상태 점검결과 표 3과 같았다.

질량농도환산계수(k) 산정을 위하여 동일 채집 조건을 마련하고 기름기 및 수분으로부터 측정 기기를 보호하기 위하여 그림 3과 같은 장치를 만들어 동일한 시간의 측정값으로 질량농도 환산 계수를 구하였다. 사진 2는 측정 장면이다. 3회에 걸친 측정결과와 환산계수 산정 결과는 표 4 및 표 5와 같았다.

위의 측정결과에 의하여 K 값은 다음 식(1)에 의하여 계산된다.

$$K = C/R \quad (1)$$

K : 질량농도 환산계수

C : 질량농도 (mg/m^3)

R : 상대농도 (cpm)

표 6에서 보는 바와 같이 평균 값은 0.0435 임으로 사사오입하여 0.044를 디젤 입자상물질의 질량농도 환산계수로 택하기로 한다. 이 K 값은 석탄 및 암석분진의 K 값 0.019 및 0.018(92, 김복윤)에 비하여 2배 이상임이 특기할만 하다. 따라서 앞으로는 상대농도 측정기에 의해 간편하고 신속하게 디젤 입자상물질의 측정이 가능하게 되었다.

3.3 측정결과 고찰

개별 장비의 측정 결과는 장비마다의 특성이 다르고 장비 상태, 엔진 조정 상태가 다르기 때문에 다소 기복이 있다고 인정하더라도 마력 가중치를 산정하여 경향성을 분석해보면 다음의 표 7에서 보는 바와 같다.

그림 4는 표 7을 도표화한 것이다.

Table 2. Measured result of gases & DPM of diesel equipments on site

	장비명	RPM	Temp °C	Gases					Eff. %	DPM		비고
				O ₂ %	CO ₂ %	CO ppm	NO _x ppm	SO ₂ ppm		cpm	mg/m ³	
총 부 화 학 정 선 광 산	Truck 대우15T 2525호	중립	96	19.4	1.1	0	104	0	99.9	514	21	365Hp 14618cc 터보차저
		1500	119	19.1	1.3	0	79	0	99.9	3293	132	
		2300	175	18.2	2.0	0	86	0	99.9	4400	176	
	" " " " 2526호	중립	77	19.7	0.9	7	89	0	99.9	477	19	365Hp 14618cc 터보차저
		1500	118	19.5	1.0	1	82	0	99.9	2683	107	
		2300	163	18.4	1.9	78	107	0	99.7	4490	180	
	Loader 대우 2496호	중립	122	18.6	1.7	44	222	0	99.9	335	13	267Hp 11051cc
		1500	158	18.7	1.6	58	239	0	99.7	944	38	
		2200	238	16.1	3.6	77	371	0	65.9	3836	153	
신 예 미 철 광 산	MineTruck Toro40D ①	중립	119	18.5	1.8	3	146	0	99.9	333	13	450Hp 18000cc 터보차저
		1500	163	18.4	1.9	75	179	0	99.7	398	16	
		2400	229	17.7	2.4	105	247	0	55.3	433	17	
	" " ②	중립	113	18.8	1.6	0	155	0	99.9	177	7	450Hp 18000cc 터보차저
		1500	166	17.4	2.6	0	266	0	70.0	707	28	
		2400	260	15.7	3.9	51	462	0	66.0	1283	51	
	" " ③	중립	108	18.9	1.5	0	122	0	99.9	412	16	450Hp 18000cc 터보차저
		1500	160	17.9	2.2	97	264	0	66.3	1056	42	
		2350	260	18.3	1.9	84	235	0	99.4	1137	45	
	LHD 501DL	중립	82	18.6	1.7	0	119	0	99.9	870	35	326Hp 14600cc 터보차저
		1500	130	17.0	2.9	2	237	0	78.3	2573	103	
		2400	209	14.7	4.6	65	468	0	75.5	2570	103	
	LHD400D	중립	93	17.9	2.2	31	190	0	81.3	105	4	267Hp 터보차저
		1500	121	17.1	2.8	32	251	0	79.4	500	20	
		2500	185	16.9	3.0	77	510	0	69.9	2373	95	

Table 3. Performance of Hurricane engine

RPM	Temp. (°C)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)	Eff. (%)	분진 (cpm)
700	113	17.1	2.8	2	192	0	82.0	1,089
2000	121	17.4	2.6	7	70	0	79.6	811
3500	195	16.3	3.4	11	79	0	72.6	1,277

이러한 측정 결과를 법정 허용한도와 비교해 보면 다음과 같다. 국내법에는 지금까지 DPM의 배출량을 규제하지 않고 있었으나 1996년부터는 규제가 된다. 대기 환경보전법 제 31조 규정에 의하면 제작 차의 입자 상물질 배출 허용농도가 1996년도부터는 0.9 g/kwh, 2000년도 이후부터는 0.25 g/kwh로 규정되어 있다.

질량농도(mg/m³)를 g/kwh 단위로 환산하는 방법은 다음과 같다. 즉, 엔진의 kwh당 배기량은 다음 식(2)로 계산될 수 있다.

$$D = \frac{d \times rpm / 2 \times 60 \times 0.8}{1,000,000 \times hp} \quad (2)$$

단, D; 배기량 (m³/kwh)

d; 엔진의 총 배기량(CC)

rpm; 분당 엔진회전수

용적효율; 80 %

hp; 엔진 출력(hp)

따라서 kwh당 분진농도 G는 다음 식(3)으로 계산될

수 있다.

$$G = \frac{D \times C}{1,000} \quad (3)$$

단, G; kwh당 분진농도 (g/kwh)

D; 배기량 (m³/kwh)

C; 질량농도 (mg/m³)

현장 장비의 디젤 입자상물질 측정결과를 위의 방법으로 환산하여 향후 허용농도와 대비해 보면 표 8과 같다.

즉, 규정상으로는 2000년 이전까지는 허용한도를 초과하지 않고 있으나, 그 이후부터는 품질이 개선되지 않으면 안될 것이다. 수입 갱내전용 장비의 경우는 입

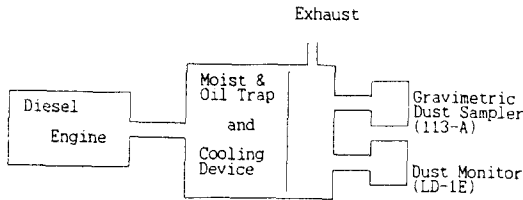


Fig. 3. Conceptual Design of the device for Deciding K Value.

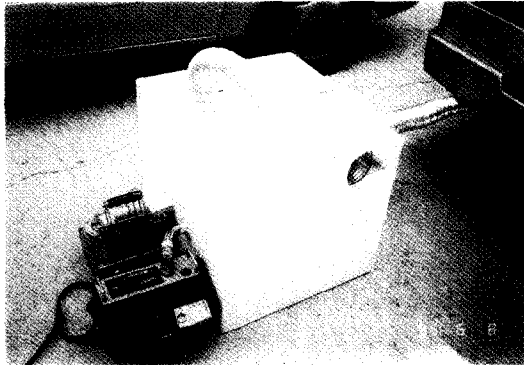


Photo. 2. Measuring Science of K value.

자상 물질의 농도가 허용한도의 19%에 불과하여 2000년 이전까지는 NO_x가 지배적인 오염물질이 될 것이며 2000년 이후부터는 역시 입자상 물질이 지배적인 오염물질이 될 것임을 알 수 있다.

DPM을 포함한 오염물질에 대한 허용한도와 실제 측정결과를 비교해 보면 표 9에서 볼 수 있는 바와 같이 국산 일반용 장비들은 96년부터 통기량 결정에 지배적인 오염물질은 입자상 물질이 될 것이며, 수입 갱내전용 장비들도 2000년부터는 입자상 물질이 지배적인 오염물질이 될 것이다.그 외에 위의 측정결과에서 확인할

Table 5. Measured result of DPM by Laser dust monitor

번호	측정값(counts) (A)	측정시간(min) (B)	상대농도(cpm) (A/B)
1	19,970	30	665.67
2	20,880	30	696.0
3	12,950	12	1,079.17
평균	53,800	72	747.22

Table 6. "K" value obtained by measurement

번호	질량농도(mg/m ³) (C)	상대농도(cpm) (R)	질량농도 환산계수 (K)
1	36.4	665.67	0.0547
2	24.3	696.0	0.0349
3	45.66	1,079.17	0.042
평균	106.36	2,440.84	0.0435

Table 7. Trend of DPM production of diesel equipments

엔진회전수(rpm)	700	1,500	2,300
DPM(mg/m ³)			
일반용 장비(A)	18.1	97.7	171.3
갱내전용 장비	14.8	39.9	56.6
대비(B/A) (%)	82%	41%	33%

Table 4. Measured result of gravimetric concentration of DPM

측정횟수	포집 분진의 질량(mg)			포집시간 (t)	포집 공기량(m ³)		질량 농도 (C) (mg/m ³)
	필터질량 (W1)	포집후 필터 질량(W2)	순분진의 질량 (W2-W1)		분당 흡입량 (l/min)	흡입공기량 (m ³) (2.5t/1000)	
1	125.71	128.44	2.73	30	2.5	0.075	36.4
2	126.53	128.35	1.82	30	2.5	0.075	24.3
3	129.05	130.42	1.37	12	2.5	0.030	45.66
평균			5.92			0.155	38.19

수 있는 사항들은 다음과 같다.

- 1) DPM 발생량은 엔진의 rpm에 비례한다.
- 2) 일반용 장비는 rpm 증가에 따른 DPM 증가율이 높은 반면에, 갱내 전용장비는 증가율이 훨씬 낮다.
- 3) 갱내 전용장비의 DPM 배출량은 일반용 장비의 33%에 불과하다. 바꾸어 말하면 일반용 장비는 갱내 전용장비에 비하여 DPM 발생량이 약 3배나 된다.

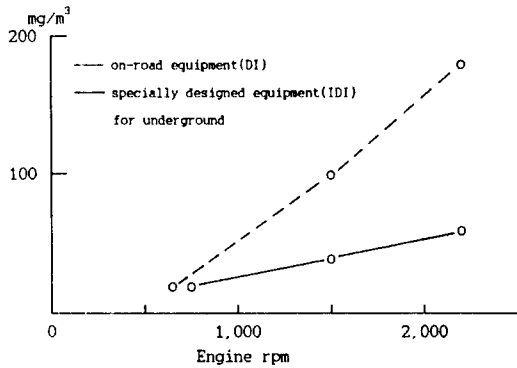


Fig. 4. Trend of DPM production of diesel equipments.

4. 결 론

1) DPM의 이론에 대한 문헌 연구결과 다음과 같이 요약될 수 있다.

- DPM은 경유 및 윤활유의 불완전 연소에서 생성된 탄소질 물질(Soot;검댕)에 약간의 유기 질 물질이 吸着되어 있는 입자들이다. DPM은 용해성과 불용성 물질로 나누어지며, 용해 성 물질은 중량 비로 15~30%이지만 그 변화 폭은 10~90%이다.
- 연료의 각종 성분 중에서도 芳香族(aromatics)이 가장 큰 원인 성분이다.
- DPM은 형성(Nucleation)-표면성장(Surface growth)-산화(Agglomeration)-흡착 및 응착(Adsorption and Condensation)의 과정으로 생성된다.
- DPM은 중량 비로 90% 이상이 모두 입경 1마이크론 이하의 호흡성 입자로 폐속깊이까지 흡입되어 폐 질환을 일으킬 수 있기 때문에 관심의 대상이 되고 있다. 더 큰 문제는 이 DPM이 다음과 같은 다

Table 8. Comparison of DPM against regulation

장비명	DPM 측정치		96년 이후 규정 대비		2000년 이후 규정 대비		비고
	mg/m ³	g/kwh (A)	기준(B) (g/kwh)	대비 (A/B)	기준(C) (g/kwh)	대비 (A/C)	
Dump truck(1)	176	0.53	0.9	59%	0.25%	212%	일반 용장비
" " (2)	180	0.54		60%		216%	
Wheel loader	153	0.48		53%		192%	
Average		0.52		58%		208%	
Mine truck (1)	17	0.05		5.5%		20%	
" "	45	0.13	14%	52%			
" "	51	0.15	17%	60%			
Load Haul Dump(1)	103	0.34	38%	136%			
" " " (2)	95	0.29	32%	116%			
Average		0.17	19%	68%			

Table 9. Governing Pollutants of Diesel Equipments

Pollutants	CO	NO _x	DPM		Notes
			'96-'99	2000-	
Permissible Limit (A)	980 ppm	DI; 750 ppm IDI; 350 ppm	0.9 g/kwh	0.25 g/kwh	
Measured (B)	262.9	300.8	0.52 (0.17)	0.52 (0.17)	() IDI engine
B/A (%)	27%	40%	58% (19%)	208% (68%)	() IDI engine

른 물질들을 흡착하여 운반하는 역할을 하는 것이다.

a. 발암성으로 알려지고 있는 多環 芳香族炭化水素 (Polynuclear Aromatic Hydrocarbon; PAH)

b. 산화유황(Sox) 및 산화질소(NO_x) 가스

c. 황산 및 질산

- 동물시험 결과 디젤 배기에의 노출은 암 발생과 관계가 있다. 디젤 배출가스에 의한 첫 번째 감염 기관은 폐이다. 역학 조사 결과 인간이 직업상 디젤 배기에 노출될 때 폐암 발생율이 높다는 사실이 확인되었다.

2) 국내 광산에는 이미 20여개 광산에 150여대의 디젤 장비가 가동되고 있으나, 이중 갱내 전용으로 제작된 간접분사식 엔진을 탑재한 장비는 15%정도에 불과한 실정이다. 이들 장비의 디젤 입자상물질 배출량을 측정 결과 일반용 장비는 갱내 전용장비에 비하여 DPM 발생량이 약 3배나 되었다.

3) 상대농도 측정기에 의한 DPM 측정을 위한 K 값은 측정결과 0.044로 밝혀졌다. 따라서 앞으로는 상대농도 측정기에 의해 간편하고 신속하게 디젤 입자상물질의 측정이 가능하게 되었다.

4) 지금까지 지배적인 오염물질은 NO_x 였으나, 국산 일반용 장비들은 96년부터 통기량 결정에 지배적인 오염물질은 DPM이 될 것이며, 수입 갱내전용 장비들도 2000년부터는 DPM이 지배적인 오염물질이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Norbert Paas, 1979, "Relationship of Underground Diesel Engine Maintenance to Emissions-part II", Southwest Research Institute of US
2. 김복운 외, 1994, "갱내 무케도 대형장비 사용에 따른 내연기관 사용대책 연구", 한국자원연구소 보고서 KR-94(C)6-7
3. 김복운 외, 1995, "디젤장비를 사용하는 지하굴착 작업장의 입기량 산정방법 연구", 터널과 지하공간, 한국암반역학회지 Vol. 5 P48-56
4. 김복운 외, 1995, "갱내디젤장비 사용을 위한 환경대책 연구", 한국자원공학회지 제32권 4호, P274-285
5. NIOSH, 1988, "Carcinogenic Effects of Exposure to Diesel Exhaust", US Dept. of Health & Human Service
6. John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Co.
7. Robert W. Waytulonis, 1992, "An Overview of the Effects of Diesel Engine Maintenance on Emissions and Performances", IC9324, USBM
8. Robert W. Waytulonis, 1992, "The Effects of Maintenance and Time-in-Service on Diesel Engine Exhaust Emissions", IC9324, USBM
9. C.F. Anderson, 1992, "US Bureau of Mines Diesel Emission Research Laboratory", IC9324, USBM
10. T. R. Taubert, 1992, "Application of Urban Bus Diesel Particulate Control System to Mining Vehicles", IC9324, USBM
11. Bryce K. Cantrell, 1992, "Measurement of Diesel Exhaust Aerosol in Underground Coal Mines", IC9324, USBM
12. Jeffrey L. Ambs & B. Thompson McClure, 1993, "The Influence of Oxidation Catalysts on NO_2 in Diesel Exhaust" SAE Technical paper 932494
13. E.D. Dainty & M.K.Gangal, 1992, "Mine Air Quality and Diesel Machine Certification- An Overview" CANMET Report MRL 92-123(OP)
14. B.T. McClure, 1988, "Effectiveness of Catalytic Converters on Diesel Engines used in Underground Mining" IC9197, USBM
15. Robert W. Waytulonis, 1992, "Diesel Exhaust Control" SME Mining Engineering Handbook P 1040-1051,
16. 조강래, 1992, "디젤 자동차 입자상물질 여과장치 개발(II)", 국립환경연구원 자동차공해 연구소, 과기처
17. 조강래, 1993, "디젤 자동차 입자상물질 여과장치 개발(II)", 국립환경연구원 자동차공해 연구소, 과기처
18. William Zeller, 1987, "Effects of Barium-Based Additive on Diesel Exhaust Particulate", RI 9090, USBM
19. H.William Zeller, 1990, "Effectiveness of Iron-based Furel Additives for Diesel Soot Control" RI 9438, USBM