

디젤장비를 사용하는 지하굴착 작업장의 입기량 산정방법 연구

김복윤¹⁾ · 조영도

Research on Calculation of Ventilation Airflow in Underground Excavation Workings using Diesel Equipments

Bok-Youn Kim and Young-Do Cho

ABSTRACT

Recently, most of the underground excavation works are adopting heavy duty mobile diesel equipments which have outstanding merits in view of efficiency. However, these equipments are causing hygienic problems to the workers due to the various hazardous exhaust contaminants. Considering that there are always dead end workings in underground excavation sites, it is very important how to supply enough airflow to the workings to dilute diesel exhaust contaminants. This paper introduced the theoretical mechanism and actual trends of exhaust contaminants of diesel equipments under operation at local mines and suggested the design method of intake air volume in underground excavation workings using diesel equipments.

1. 서 론

기술의 발전과 지하공간의 이용이 확대되면서 최근의 지하 굴착 작업장은 대형장비가 투입되어 높은 작업 능력과 공기단축을 이룩하고 있다. 이러한 발전은 뛰어난 기동성과 생산성 그리고 경제성등을 갖고 있는 디젤장비가 개발 보급되었기 때문이다. 그러나 한편 디젤장비는 엔진에서 배출되는 각종 오염물질로 인해 작업장의 환경을 오염시켜 근로자들의 건강에 심각한 영향을 끼치고 있어 이에 대한 적절한 대책이 뒤따라야 한다. 특히 지하굴착 작업장은 그 특성상 항상 막다른 작업장(Dead End Workings)이 존재하기 때문에 대형 장비에서 내뿜는 많은 양의 오염물질을 허용농도 이하로 희석하기 위해서는 상당한 양의 공기를 외부로부터 공급하지 않으면 안된다.

본 논문은 디젤장비의 오염물질 배출 메카니즘 및 배출량에 대한 이론적 고찰과 국내 갱내 작업장에 투입되

어 있는 장비에 대한 실측치를 바탕으로 경향을 분석하였으며 이러한 오염물질을 희석하는데 필요한 최소 입기량의 산정방법을 연구하여 현장 실무자들의 환기설계에 지침을 제시하고자하였다.

2. 디젤엔진과 오염물질 배출

여러가지 내연기관중에서 실제로 산업 동력으로 가장 폭넓게 사용되고 있는 것은 디젤기관이며 디젤기관은 다른 종류의 내연기관(휘발유,가스)에 비하여 CO 가스배출이 가장 적고, 연료의 휘발성이 낮으며, 스파크에 의한 폭발사고의 염려도 없는 등의 이유때문에 갱내 투입이 가능한 유일한 내연기관이다. 디젤엔진은 실린더의 공기를 압축하여 압축열을 발생시킨 후 연료를 실린더에 분사시켜 연소 시키는 방식으로 엔진의 분류상 왕복식, 4 행정, 압축점화식, 수냉식 기관이다.

디젤 엔진은 연소실의 설계에 따라 직접분사식 엔진

* 1995년 3월 10일 접수

1) 정회원, 한국자원 연구소 자원개발연구부 책임연구원

Table 1. Products of Combustion of Diesel Fuel by Volumetric Basis

Products	Volume (%)
Complete combustion products	
Nitrogen(N ₂)	73
Carbon dioxide(CO ₂) plus oxygen	13
Water(H ₂ O)	13
Incomplete combustion products (Pollutant)	
Hydrocarbons(HC)	<1
Carbon monoxide(CO)	<1
Nitric Oxide(NO)	<1
Nitrogen dioxide(NO ₂)	<1
Carbon(C) or smoke	<1
Sulfur dioxide(SO ₂)	<1
Total	100

[Direct-injection(DI) engine]과 간접분사식 엔진[Indirect-injection(IDI) engine]으로 구분된다. 직접분사식 엔진은 하나의 단순한 연소실에 연료가 분사되도록 되어 있으며, 간접 분사식 엔진은 연소실이 둘로 구분되어 있어 먼저 예비연소실(Prechamber)에 연료가 분사된 다음 노즐을 통해 주 연소실로 이동되도록 되어 있다. 간접 분사식 엔진은 주로 소형 엔진에 적용되고 있다. 이러한 엔진은 일반적으로 입기밀도가 낮기 때문에 Supercharger나 Turbocharger 등에 의해 공기 밀도를 높여준다. 간접분사식 엔진은 보조 연소실의 형태에 따라서 크게 와류연소실방식(Swirl chamber system)과 예비연소실방식(Prechamber system)등 두가지로 분류할 수 있다.⁴⁾

연료의 분사 방식 즉, 분사 시점, 압력, 분사형태 및 분사량 등은 점화, 엔진효율, 오염물질 생성등에 매우 큰 영향을 준다. 엔진의 속도나 출력의 조절은, 입기가 그대로 개방된 상태이므로, 연소실에 분사되는 연료량의 조절만으로 넓은 범위의 연료/공기 비율(Fuel/air ratio)의 조절이 가능하게 된다. 배출 오염물질의 생성은 주로 연료의 불완전 연소에 기인한다. 따라서, 배출 오염물질의 농도를 좌우하는 요소는 연료의 성분, 연소 효율 및 연료/공기 비율등 세가지 이다.⁴⁾

디젤 연료의 성분은 탄소 85-86%, 수소 13-14%, 유황 0-0.9% 및 약간의 기타성분으로 구성되어 있다. 한편 공기는 기본적으로 산소와 질소로 구성되어 있다.

Table 2. Permissible Exposure Limuit.

Substances	Unit	U.S.A.		Korea	
		TWA	STEL	TWA	STEL
CO	ppm	25	-	50	400
CO ₂	%	0.5	3	0.5	3.0
NO	ppm	25	-	25	-
NO ₂	ppm	3	5	3	5
SO ₂	ppm	2	5	2	5

만약 연료가 완전 연소 된다면 연료중 모든 탄소(C)는 모두 탄산가스(CO₂)로, 수소(H)는 모두 수증기(H₂O)로, 유황(S)은 아황산가스(SO₂)로 변할 것이다. 완전연소시의 배출가스의 용적비를 보면 Table 1과 같다.¹⁾

그러나 완전연소란 불가능하기 때문에 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC) 및 입자상물질(Particulate matter)을 배출하게 된다. 그리고 높은 연소온도에 의해 일부의 잉여 산소는 공기중의 질소와 반응하여 일산화질소(NO) 및 이산화질소(NO₂)를 생성시킨다. 유황은 기본적으로 모두 산화유황(SO_x)으로 배출된다.¹⁾ 化學量論的으로 모든 탄소를 탄산가스로, 모든 수소를 수증기로 변환시킬 수 있는 최적 산소량의 계산이 가능하며 설계상 연료/공기비는 0.067이다. 즉 연료/공기비가 0.067 보다 작으면 공기가 완전연소에 필요한 공기 보다 많은 것이고 0.067 보다 크다면 공기가 필요한 양보다 적다는 것이다.¹⁰⁾ 일반적으로 모든 디젤엔진은 연료/공기비가 이론치 보다 약간 낮게 되어 있어 연료 절감과 성능향상에 도움을 주고 있다.

갱내 디젤기관 사용의 초기에는 일산화탄소(CO)가 주 관심의 대상이었으며, 그 후에는 이산화질소(NO₂) 가스 및 아황산 가스(SO₂)였다가 최근에는 입자상 물질(Particulate Matter)이 관심과 연구의 대상이 되고있다.

배출 오염물에 대하여 공기중 최대허용농도(Threshold-Limit Value; TLV)는 미국의 미국정부산업보건기사회의(American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH)가 권고하는 값이 미국정부는 물론 일본, 우리나라등에서 채택되고 있다. 최대허용농도(TLV)는 다시 시간 가중평균 허용농도(Time Weighted Average: TWA)와 순간허용농도(Short Time Exposure Limit): STEL로 구분되어 있다. TWA는 1 교대중의 시간 가중평균농도이며, STEL 값은 교대중 평균농도가 TWA 이내가 되더라도 15분

간이상 계속되면 위험하다고 설정된 농도이다. 그리고 이때 시간간격이 최소 1시간 이상, 1일 최대 4회를 초과할 수 없는 값이다.²⁾

디젤엔진과 관련된 배출가스에 대한 미국과 한국의 최대허용농도를 비교해 보면 Table 2와 같으며 발생과정 및 경향을 보면 다음과 같다.^{2), 5)}

1) 탄산가스(CO₂)

이산화탄소(CO₂)는 산화의 산물로 위험한 독성이 있는 것은 아니고 질식성이며 발생량이 특히 많고 갱도 바닥에 깔리기 때문에 문제가 된다. 탄산가스의 발생량은 사용 연료량에 정비례하며 그 농도는 연료/공기비에 비례해서 화학량론적 연료/공기비 일때 최대가 된다.

2) 일산화탄소(CO)

CO는 연료중 탄소의 불완전 연소로 인해 발생되며 유독성 가스이다. 만약 충분한 산소가 공급된다면 일산화탄소는 모두 산화되어 탄산가스가 되겠지만 실제로는 짧은 반응시간과 낮은 가스 온도 등으로 인해 완전 연소는 거의 불가능하다.

3) 산화질소(NO_x)

산화질소(NO, NO₂)는 기도를 자극하고 폐수종을 야기하는 유독성으로 디젤 배기중에 항상 존재하는 가스이며 그 농도는 간접분사식 엔진에서 보다는 직접 분사식 엔진에서 많이 발생된다. 연소과정에서는 주로 NO가 발생되며 이차적으로 기 발생된 NO가 높은 온도에 의해 공기중의 산소와 반응하여 NO₂가 생성 된다. NO와 NO₂를 합하여 NO_x라고 하며 일반적으로 NO₂는 총 NO_x중 10%이하이다. 지금까지의 연구 결과에 의하면 NO는 그 농도가 32 ppm 이하로 희석되고 배기 온도가 70℃ 이하로 냉각되면 산화가 중단되는 것으로 알려져 있다.

4) 이산화유황(SO₂)

SO₂는 디젤의 산화 과정에서 생성되는 위험한 성분이다. 연료중에 유황성분이 0.5%이면 약 140 ppm의 SO₂를 발생시킨다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다.

5) 탄화수소류(Hydrocarbons)

불연 탄화수소(HC)는 디젤 냄새의 주범으로 누출되는 연료의 증발과 배기중의 불완전 연소 탄화수소류가

주 원인이며 주로 직접 분사식 엔진에서 많이 발생되며, 위험성이 있는 성분이다. HC는 Aldehydes, acrolein, formaldehyde 등의 자극성 성분으로 구성되어 있으며, 가스상태나 디젤 입자상물질에 흡착된 상태로 존재한다. 그 양은 비교적 소량이지만 독성 내지는 발암성 특성 때문에 문제가 된다. Aldehydes의 허용 최대 농도(TLV)는 3 ppm이다. Aldehydes 발생은 기본적으로 직접분사식(Direct injection)디젤엔진의 연소과정에서 생긴다.

6) 호흡성 가연성 분진(Respirable Combustible Dust ; RCD)

디젤 입자상 물질(Diesel Particulate Matter; DPM)은 보건상 미치는 중대한 영향 때문에 최근에 와서 관심의 대상이 되어 있다. 디젤 입자상물질의 90%가 1 마이크로 이하의 호흡성 입도이므로 갱내 근로자들의 건강에 심각한 위협이 되고 있다.¹¹⁾ 특히, DPM은 여러가지 액체, 유화물, 높은 분자량의 탄화수소 및 무기질 성분들을 흡착시켜 그것들을 폐포에까지 운반하는 역할을 하기 때문에 더욱 문제가 된다. 높은 분자량의 탄화수소인 多環芳香族 탄화수소(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons ; PAH)는 동물 실험에서 발암성이 있는 것으로 알려져 있다. 현재까지 DPM의 허용농도는 정하지 못하고 있으며 일반 호흡성 분진에 준하여 규제 되고 있다. RCD는 호흡성 디젤 미립자(Respirable Diesel Particulate ; RDP) 및 광산 갱내에서 흔히 존재하는 각종 호흡성 부유 미립자들로 구성 되어있다.

3. 오염물질의 억제

오염물질의 발생을 원천적으로 최소화하기 위한 기술은 엔진 제작기술이다. 일반 디젤기관이 직접분사식인데 비하여 갱내용 장비는 간접분사식으로 연료를 실린더에 직접분사 하지않고 Pre chamber 또는 Swirl chamber에 일차 분사후 실린더에 분사하는 방식으로 배출가스량이 현저히 감소되고있다. 최근에는 전자 제어방식의 엔진으로 연료의 양과 연료/공기비율 등을 엔진 부하에 따라 최적으로 자동 조절하는 엔진이 개발되어 있으며, 수소엔진도 시제품이 제작되어 시험실적 시험중에 있는 실정이다. 다음으로는 사용연료의 개선이다. 우선 디젤의 품질 개선으로 미국의 경우는 93년부터

이미 유황분 0.05% 이하의 연료가 상용화 되어있으며 콩과 알콜로 만들어진 새로운 갱내용 연료(Methyl soyate)개발이 상당한 단계까지 진행되고 있다.¹⁾

갱내 작업의 디젤화에 있어서 가장 문제가 되는 것은 배기가스로 인한 공기 오염이다. 특히 통기가 불충분하거나 절대량은 확보하더라도 실제 작업장의 유효풍량이 부족한 갱내 작업장일 경우는 더욱 문제가 된다. 대체로 디젤장비를 사용하는 광산에서는 가스 억제에 위한 장치들을 사용하여 배기가스중 독성이나 위해성 가스를 억제하고 있다. 배기가스중 규제되고 있는 유독, 유해성 성분들은 그들의 화학적 성질, 독성, 원가스의 양 그리고 필요 희석비율(dilution ratio) 등에 의해 달라진다. 일단 배출된 가스를 억제하기 위한 기술로는 여러가지 정화장치들이 개발되어 사용되고 있으나 어느 한 장치가 모든 가스에 유효한 것이 없다는 문제점이 있다. 모두 선택적으로 효과가 있을 뿐 전체적인 오염물 억제에는 한계가 있다. 따라서 억제장치 선택에는 여러가지 실험을 거쳐 신중한 선택을 하여야 하며 사후 관리에도 특별한 주의를 기울여야 한다. 국내 광산의 실측결과에 의하면 촉매식 정화장치가 CO는 43% 감소시켰지만 반대로 NOx를 23%나 증가시켜 결과적으로 역효과를 내고 있었다.³⁾ 지금까지 개발되어 활용되고 있는 각종 억제장치를 소개하면 다음과 같다.

1) Water Scrubber(습식 세정장치)

제일 먼저 개발되어 사용된 장치는 Water Scrubber(습식 세정장치)이다. 이 습식 세정장치는 전 세계적으로 갱내 작업에서 가장 널리 사용되고 있다. 적절히 설계되고 잘 유지된 습식 세정장치는 디젤 미립자의 30 - 60%, NO₂의 20%, SO₂의 80%를 각각 제거할 수 있다. 습식 세정장치는 부수적으로 배기의 화염이나 스파크를 제거하고 온도를 냉각시켜 주는 효과가 있다.¹²⁾

2) Catalytic Pellet Scrubber(촉매식 펠러 세정장치)

알루미늄 계열의 촉매화된 알맹이를 사용하는 펠러 세정장치는 보통 갱내 디젤 배기 제어용으로 사용된다. 이 펠러 세정장치는 좋은 조건이라면 90%의 CO와 80%의 탄화수소 및 알데하이드를 제거할 수 있다. 이 장치는 비교적 부피가 크고 어느 정도 사용하고 나면 디젤 배기의 미립자 및 엔진오일 등에 의해 막히는 경향이 있다. 따라서 주기적으로 퇴적된 오염물을 제거하기 위해 알루미늄 입자를 불에 구어 주어야 한다.

3) Fume diluter(매연희석장치)

이 장치는 Coanda 원리를 이용한 유체역학적 장치로 유독성 배기가스를 희석시키고 장비 운전자 주변으로부터 제거하는 장치로 현재 광산에서 활용되고 있는 Air mover와 같은 원리이다. 배기가스는 Fume diluter 본체에 들어간 다음 미리 조정되어 있는 輪形 틈(annular gap)을 통하여 배출된다. 윤형틈을 통과한 다음에는 aerofoil 표면을 통과함으로써 배기가스의 유속이 빨라져서 희석장치 입구에서 저압을 형성하게 해준다. 이러한 저기압으로 인하여 주위의 공기가 2차적으로 흡입 혼합되어 배기가스의 온도를 낮추고 유독가스를 희석하게 된다. 2차 흡입 공기량이 배기량의 약 10-15 배 나된다. 이 fume diluter는 신속한 배기 희석 능력으로 인해 NO가 산화하여 NO₂로 변화하는 현상을 효과적으로 감소시킨다.

4) Diesel Exhaust Purifier(디젤 배기 정화장치)

이 장치는 CO의 90%, 미 연소 또는 불완전 연소 탄화수소의 80%를 산화 시킬 수 있다. 이러한 유독성 배기 가스들이 촉매제를 통하여 비교적 무해한 성분으로 변화 되는 것이다. NO나 NO₂는 이장치로 제거할 수 없다. 그러나 SO₂의 30%를 SO₃로 변화 시킨다. 이 장치는 비교적 크기가 작고 설치가 간단하다. 다른 장치들에 비해 값이 싸고 수천 시간 사용이 가능하다. 이 장치는 촉매제의 막힘과 그로인한 후압(back pressure) 증가를 방지 하기 위하여 정기적인 보수가 필요하다.

5) Diesel Particulate Filters(디젤 미립자 필터)

이 장치는 디젤엔진 배기로 부터 미립자를 잡고, 산화 시키도록 설계된 오염 방지 장치이다. 물론 디젤배기중 미립자와 상승작용을 하는 수반 오염물로 인한 장기적인 건강상의 영향에 대해서는 아직 계속 연구중이지만, 어쨌던 호흡기 질환에 영향을 끼치는 것만은 거의 확실한 것이다. 현재로는 크게 3종의 장치가 보급되어 있다. 즉, Catalytic Trap Oxidizer(CTO), Catalyzed Ceramic Trap 및 Corning Ceramic Trap with Fuel Additives 등이다.

a) Catalytic Trap Oxidizer(촉매식 포집 산화장치)

이 장치는 radial flow, wire mesh 및 stainless steel 등을 이용한 미립자 포집 장치이다. 이 wire mesh는 촉매화된 귀금속으로 캔모양의 stainless 용기 속에 압축되어 장착된다. 이 장치는 배기 매니휠드나 또는 줌 델

어진 위치에도 적절히 제작 설치할 수 있다. 미립자의 포집은 열기설기 엉켜있는 필터의 wire mesh 표면에 미립자가 충돌하여 이루어진다. 실험실 및 현장 실험 결과에 의하면 이 장치는 디젤 배기 오염물을 격감시키는 효과적인 장치임이 밝혀졌다.

b) Catalyzed Ceramic Trap(촉매세라믹 포집장치)

이 장치는 세라믹재를 사용하며, corning glass 를 포집재로 하여 만들어졌다. 이 세라믹 포집방법은 기계적인 포집 메카니즘에 의해 디젤 미립자를 차단하거나 확산시킨다. 재료는 귀금속 촉매에 의해 촉매화되었으며, stainless steel 통에 장착되었다. 온타리오 연구재단의 연구결과 촉매세라믹 포집장치는 디젤 공해물질 제거에 효과적이라는 결론을 얻었다(Vergeer & Lawson 1984). 저온 LHD 실작업 시험에서 CO는 95%, 총 탄화수소는 51%의 감소를 나타냈다. NO는 21%가 감소된 반면, NO₂는 반대로 79%가 증가하였다.

c) Corning Ceramic Trap with Fuel Additives(연료첨가제와 코닝 세라믹 포집장치의 병용)

이 방법은 코닝 세라믹 트랩을 미립자 포집재료로 사용하는 것으로 앞에 언급된 바와 같이 미립자의 차단과 분산을 포집 메카니즘으로 하고있다. 필터의 재생을 잘 되게 하기 위해서 디젤유에 첨가제를 넣는다. 대표적인 연료 첨가제는 디젤 1리터당 망간 80 mg와 동 20 mg 이다. 연료 첨가제는 미립자의 점화온도를 약 150℃로 낮춘다. 이러한 현상이 저온 LHD에서의 필터 재생을 가능하게 해준다.

이와 같이 디젤장비의 환경오염을 제어하기 위한 새로운 기술이 많이 발전하였으나 모든 오염물질에 공통적으로 유효한 장치는 없다. 촉매식 포집산화장치(Catalytic Trap Oxidizer)와 촉매코닝포집장치(Catalyzed Corning Traps)는 미립자를 포집하고, 돌연변이체 생성활동을 억제하고, 가스성분들을 산화시키는데 매우 효과적이다.

4. 오염물질의 희석을 위한 입기량 산정방법

디젤 장비 사용에 의한 환경오염은 배출 가스, 분진, 엔진열 등에 의한 것으로 가스나 분진을 희석하고 온도를 낮추기 위해서는 일차적으로 앞에서 언급한 배출 오염물질 억제기술의 동원이 필요하지만 궁극적으로 어느수준의 오염물질 배출은 불가피하기 때문에 외부로

부터 신선한 공기를 공급하지 않으면 안되며, 실제적으로는 지배적인 유해가스의 희석에 필요한 입기량을 산정하는 것이 통례이다.

1) 열 부하(Heat load)

엔진을 가동시키는 연료의 열량은 그 일부의 에너지가 일을 하기위한 에너지로 변화될 뿐 나머지는 대부분 열로 변환된다. 디젤장비의 열부하는 사용한 연료량, 연료의 열량, 연소효율(95%)등으로부터 계산될 수 있다. 부하율(load factor)은 최대 출력으로 고대중 계속 가동했을 경우 필요한 연료 사용량에 대한 실제 연료 사용량으로 계산되어왔는데, 문헌에 의하면 20%이다. 최대연료 사용량에 대한 평균 연료 사용량으로 계산하면 63-70%이다. 최대 출력시와 평균 출력시의 부하를 비교한다면 부하율은 다음 식으로 구해질 수 있다.³⁾

$$\text{Load Factor} = \frac{Q_a(T_o - T_i)C}{Q_f(T_o - T_i)C} \quad (1)$$

단, Q_a; 실제 공기흡입량 (kg/s)

Q_f; 최대출력시 공기흡입량(kg/s)

T_o; 배기온도 (℃) T_i; 입기온도 (℃)

C; 공기의 비열 (℃ kj/kg)

실제 적재 작업중에만 구하는 식으로 그간 시험결과 최소 소비량과 최대 소비량의 비는 1.6으로 밝혀졌다. 정지시 연료 소모량은 9 l/hr 로 평균 소모량의 0.56배 (56%) 였다. 디젤기관을 열부하 계산결과 1.1-3.1 kw/kw 였으며 평균치는 2.1 kw/kw 였다. 열부하의 평균치가 아닌 최대치를 사용하여 입기량 계산을 하더라도 여유분은 감안해야 된다.

2) 공기오염 지수(Air Quality Index ; AQI)

디젤 기관에서 배출되는 각종 가스의 상호 관계를 감안한 종합적인 환경 평가식으로 공기 오염지수가 제안되어 활용되고 있다(French, 1978).¹⁾

$$\text{AQI} = \frac{\text{CO}}{50} + \frac{\text{NO}}{25} + \frac{\text{RCD}}{2} + 1.5 \left[\frac{\text{SO}_2}{3} + \frac{\text{RCD}}{2} \right] + 1.2 \left[\frac{\text{NO}_2}{3} + \frac{\text{RCD}}{2} \right] \quad (2)$$

많은 현장 실험을 통하여 얻어진 결론은 갯내 작업장

공기의 공기 오염지수(AQI)가 3.0 이하가 되면 보건상 위해가 없는 작업환경이 된다고 한다. 여기서 각종 가스의 단위는 ppm이며, RCD(Respirable CombustibleDust)는 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질(Diesel Particulate Matter)과 갱내에서 발생하는 호흡성분진의 혼합체의 농도(mg/m³)를 말한다. 따라서, 디젤기관을 배출 오염물질의 농도를 측정하여 이 공식에 의해 오염지수를 구한 다음 그 값을 3으로 나누면 그 장비의 회석계수가 된다. 엔진의 배기량에 이 회석 계수를 곱하면 소요 통기량을 구할 수 있다. 이때 AQI 는 물론 3 이하가 되어야 하며 각각의 오염물질은 해당 물질의 허용농도(TLV)를 넘지 않아야 한다. 미국의 광무국(USBM)이 많은 현장시험을 통하여 얻은 결과에 의한 평균적 소요 통기량이 3.6 m³/min/kw 였다고 한다.¹⁾ 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 위의 각종가스 및 분진에 대한 갱내공기중 시간가중 평균농도를 측정하는데 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 오차 범위도 최대 50% 내외까지 되어 현실적으로 매우 어렵기 때문에 광산 설계 단계에서는 사용할 수 없다. 따라서 이 방법은 가동중인 작업장의 환경 평가방법이라 할 수 있다.

3) 분진 회석(Dust dilution)

통기 소요량을 계산하는데 있어서 발생하는 분진의 허용기준 이하로의 회석이 기준이 될수도 있다. 이때의 통기량 계산은 다음과 같은 (3) 식으로 계산될 수 있다.

$$Q = \frac{E \times D}{TLV} - C \tag{3}$$

- 단, Q ; 통기량 (m³/min)
- E ; 디젤입자상물질농도 측정치 (mg/m³)
- D ; 엔진 배기량 (m³/min)
- TLV ; 입자상물질 허용농도 (mg/m³)
- C ; 입기 분진농도 (mg/m³)

4) 유해가스 회석

통기량을 결정하기 위한 가장 현실적이고 여러 나라에서 채택되고 있는 방법은 역시 개별 디젤장비의 가스 배출량을 측정하여 그 농도를 최대허용농도 이하로 회석하는데 소요되는 입기량을 계산하는 방법이다. 가장 합리적인 계산 방법은 실제로 투입된 장비의 배출가스 농도를 정확히 측정하여 꼭 필요한 만큼의 입기량을 산정하는 방법일 것이며, 또 다른 방법으로는 미소량의

가스농도를 다른 방법으로 추정하여 계산하는 방법 그리고 가스 측정을 하지 않고 경험치에 의한 설계계수를 이용하여 장비출력 kw 에의해 계산하는 방법등이 있을 수 있다.

a) 개별 배출가스 측정에 의한 방법

측정된 각각의 배출 가스량에 의한 소요 입기량 계산을 하기위하여 (4)식을 제안한다. 이 식은 4행정 엔진을 전제로 했으며 엔진의 용적효율 80%와 가동시 평균 엔진 회전수(rpm)가 최대 회전수의 70%라는 경험치등이 반영되었다.^{4), 10)}

$$Q = \frac{0.28(R \times D \times g)}{(TLV - C_i)10^6} \tag{4}$$

- 단, Q ; 소요 통기량 (m³/min)
- R ; 엔진 최대 회전수 (rpm)
- D ; 엔진 배기량 (cm³)
- g ; 배출가스 측정치(ppm)
- TLV ; 공기중 가스 최대 허용농도(ppm)
- C_i ; 입기중 유해가스 농도(ppm)

여러 가스에 대하여 계산한 값중 최대치를 소요 통기량으로 한다. 그러나 실제로 지배적인 가스는 NO_x 이므로 소요 입기량 계산은 NO_x에 의해 계산하면 된다.³⁾ 이 방법은 정밀 측정장치와 측정기술을 필요로 하지만 가장 정확한 방법이다.

b) CO₂ 측정에 의한 방법

위의 방법일 경우 개별 장비에 대한 NO_x의 최대 배출농도를 정확히 측정하여야 하기때문에 별도의 측정장비가 필요할 뿐 아니라 NO_x는 다른 가스에 비하여

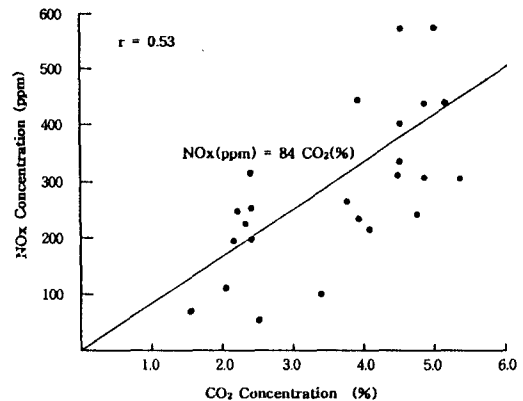


Fig. 1. Relationship between CO₂ and NO_x in Diesel Exhaust.

R ; 엔진 최대 회전수 (rpm)

D ; 엔진 배기량 (cm³)

CO₂ ; 배출가스중 CO₂ 농도 측정치(%)

c) 엔진출력에 의한 방법

한편 가스측정을 하지 않고 엔진출력당 소오 입기량을 구할 수 있는 방법을 모색키 위하여 국내광산 갱내에 투입되어 있는 장비에 대한 실측을 통하여 경험치를 도출한바 다음과 같은 결론을 얻었다. 국내 갱내에 투입된 디젤장비 25대에 대하여 최대 회전수일 때의 배출가스 측정결과와 (4) 식으로 계산한 소오 입기량 계산 결과를 보면(Table 3) 역시 NOx를 기준으로 계산한 값이 가장 많음을 알 수 있으며 변화폭은 1 kw 당 0.4-7.08 m³/min으로 상당히 컸지만 실제로 3.0 m³/min 이상은 3대 뿐이었으며, 엔진출력 kw에 대한 가중 평균치는 2.30 m³/min/kw 로 나타났다.

따라서 AQI에 의한 경험치 (3.6 m³/min/kw) 및 선진 각국의 입기량 기준(3-8 m³/min/kw)⁹⁾등을 감안할 때 장비의 설치개소 또는 운행구간에서 동시에 운전중인 디젤 장비의 최대 출력(kw)의 합계에 대하여 최소한 1 kw 당 3 m³/min 이상의 통기를 확보하면 무난할 것으로 판단되므로 엔진출력 kw당 3 m³/min 를 입기량 설계계수로 제안하고자 한다.

5. 결 론

최근의 지하 굴착 작업장은 대형장비가 투입되어 높은 작업능률과 공기단축을 이룩하고 있다. 이러한 발전은 뛰어난 기동성과 생산성 그리고 경제성등을 갖고 있는 디젤장비가 개발 보급되었기 때문이다. 국내에는 이미 20여개 광산에 140여대의 무궤도 디젤장비가 사용되고 있으며 각종 토목공사장에 투입된 장비는 그 수를 헤아릴 수조차 없을 정도이다. 그러나 디젤장비는 각종 오염물질의 배출로 인해 작업장의 환경을 오염시켜 근로자들의 건강에 심각한 영향을 끼치고 있어 이에 대한 적절한 대책이 뒤따라야 하지만 합리적인 입기량 산정을 위한 연구가 없어 적정환기설계가 어려운 실정이다.

이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 국내 갱내 작업장에 투입되어 있는 디젤장비에 대한 실측치를 바탕으로 오염물질을 회석하는데 필요한 최소 입기량의 산정 방법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모든 가스에 공통적으로 효과가 있는 정화장치는

없으며 촉매식 정화장치(Catalytic purifier)는 CO를 43% 감소시켰지만 반대로 NOx를 23% 증가 시켜 결과적으로 역효과를 나타내고 있었다.

2) 국내의 디젤장비 특성을 감안하면 배기정화장치는 Water Scrubber 와 Fume diluter가 가장 유효할 것이다.

3) 소오 입기량 계산은 개별장비의 배출가스중 NOx 농도를 측정하여 (4) 식을 이용하여 계산 하는 것이 가장 합리적이다.

$$Q = \frac{0.28(R \times D \times g)}{(TLV-Ci)10^6} \quad (4)$$

4) NOx의 정확한 측정이 여의치 못할 경우는 CO₂ 농도의 측정으로 상당히 정확한 NOx 농도 추정이 가능하며 (5) 식에 의해 소오 입기량을 계산할 수 있다.

$$Q = \frac{4.7(R \times D \times CO_2)}{10^6} \quad (5)$$

5) 장비 투입전 설계단계의 경우 또는 더 간편하게 소오 입기량을 산정할 필요가 있을 때는 장비의 출력 kw 당 3 m³/min 를 설계계수로 제안한다.

참 고 문 헌

- 1) J.H.Daniel, Jr., 1984, Diesels in Underground Mining, USBM Report of Investigation 8884
- 2) ACGIH, 1994, Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices
- 3) 김복윤 외, 1994, 갱내무궤도대형장비 사용에따른 내연기관사용대책연구, 자원연 보고서
- 4) John B. Heywood, 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals : Mcgraw-Hill International Edition
- 5) 노동부, 1993, 작업환경 측정에 관한 업무편람
- 6) 미국정부, 1991, U.S. Code of Federal Regulation 30, "Mineral Resources"
- 7) 일본정부, 1993, 일본 금속광산 보안관계 법령집 : 통상산업성, 백아서방
- 8) 일본정부, 1992, 일본 석탄광산 보안규칙 : 통상산업성, 백아서방
- 9) Robert W. Waytulonis, 1987, International Regulation of Diesel Engine Use Underground; A Country-by-Country Synopsis : U.S. Bureau

- of Mine IC 9121
- 10) Robert W. Waytulonis, 1992, Diesel Exhaust Control : SME Mining Engineering Handbook P 1040-1051
 - 11) Robert W. Waytulonis, 1992, Health Risks Associated with the Use of Diesel Equipment Underground : USBM IC 9324, P 4-10
 - 12) Robert W. Waytulonis, 1982, Failure Analysis of Diesel Exhaust-Gas Water Scrubbers : U.S. Bureau of Mines RI 8682
 - 13) A.D. Unsted, 1989, Ventilation Requirements for a Trackless Development End : Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa, P 202-211
 - 14) B.T.McClure, 1988, Effectiveness of Catalytic Converters on Diesel Engine Used in Undergr-
ound Mining : U.S. Bureau of Mine IC 9197
 - 15) J.L.Ambs, 1994, Evaluation of a Disposal Diesel Exhaust Filter for Permissible Mining Machines : U.S. Bureau of Mine RI 9508
 - 16) J.L.Ambs, 1993, The Influence of Oxidation Catalysts on NO₂ in Diesel Exhaust : SAE Paper 932494
 - 17) Jone E. Johnson, 1994, Physical Factors Affecting Hydrocarbon Oxidation in a Diesel Oxidation Catalyst : SAE Technical Paper 941771
 - 18) John R. Culshaw, 1992, Laboratory Evaluation of an Oxidation Catalytic Converter at Various Simulated Altitudes : SAE Technical Paper 921675