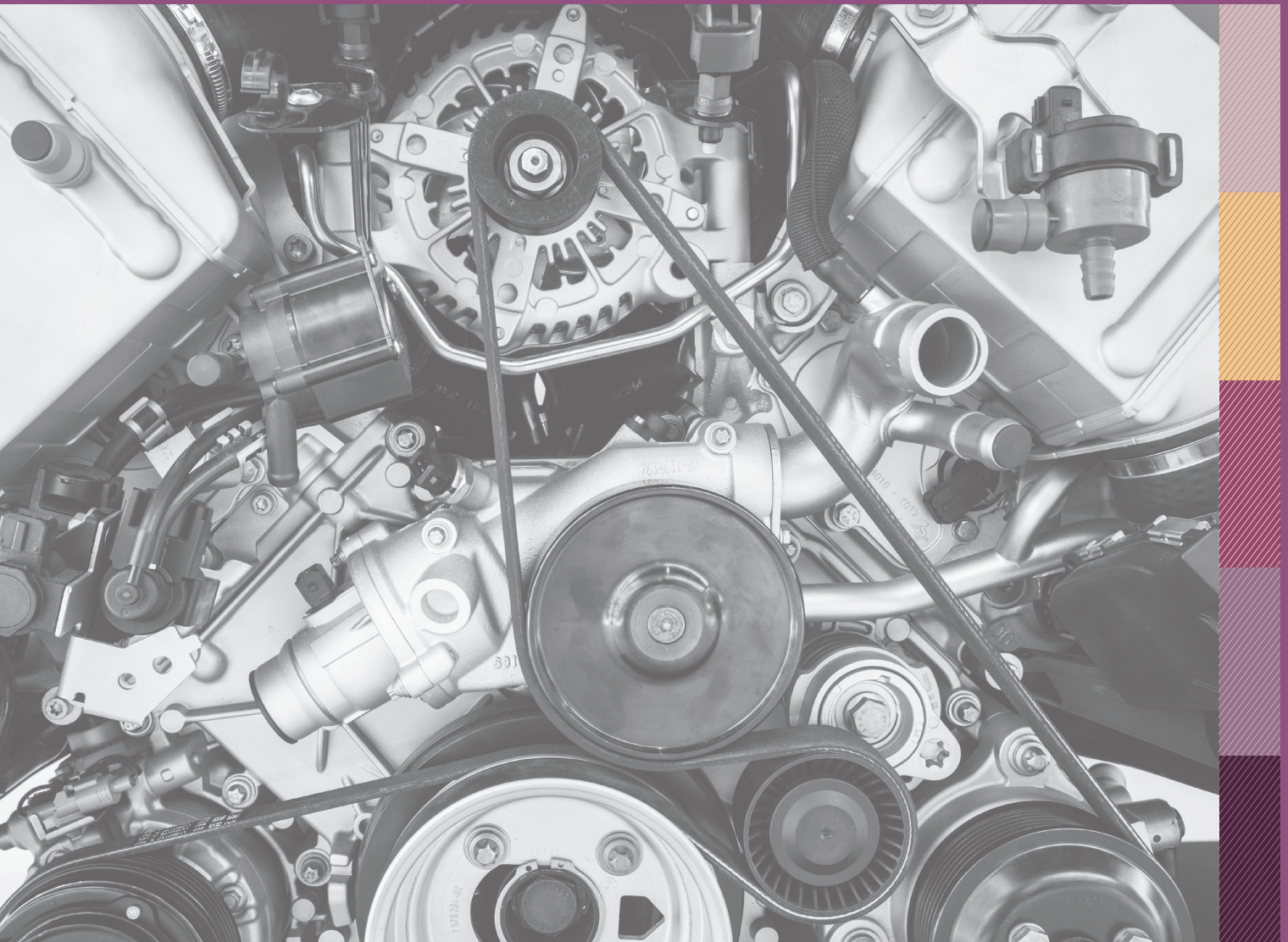


디젤엔진 배출물질

DIESEL ENGINE EXHAUST

—
발암 요인 보고서



디젤엔진 배출물질

DIESEL ENGINE
EXHAUST

발암 요인 보고서

KEY FINDINGS

- 국제암연구소 발암물질 분류에서 인간에게 발암성이 확인된 물질로 분류함(Group 1)
- 디젤엔진 배출물질은 디젤엔진 배기관에서 외부로 배출되는 모든 배기물을 말하며, 이는 가스, 증기, 액체 에어로졸 및 입자 물질의 복잡한 혼합물로 탄소, 물, 일산화탄소, 이산화탄소 등의 주요 화학성분이 포함되어 있음
- 작업장에서 디젤엔진 배출물질의 노출은 디젤 연료를 사용하는 지게차 및 대형 차량 등(덤프트럭, 버스, 기차, 대형 운반차, 트랙터 등)에서 주로 발생함. 디젤 차량의 수리 또는 정비, 도로 요금소, 소방서, 선박이나 기차의 정거/정박장에서도 노출될 수 있으며, 건설 현장에서 유지 보수 작업 시에도 나타남
- 디젤엔진 배출물질에 대한 노출은 폐암 및 방광암 발생 위험이 있음

01 노출 현황

일반 인구집단에서의 노출



일반 인구는 디젤엔진을 사용하는 다양한 여러 운송 수단의 배기가스를 통해 노출되며, 이때 노출정도는 노출원과의 거리, 교통수단의 양과 종류, 과거 교통수단에 의한 오염물질의 지역 내 잔류량 등에 따라 다를 수 있습니다. 또한 도시 지역 어린이들은 교통이 복잡한 지역이나 인근 지역으로 버스를 타고 등교할 때 주로 노출될 수 있으며, 실내 환기 정도에 따라 디젤엔진 배출물질이 실내 오염의 상당 부분을 차지할 수 있습니다.

직업적 노출

작업장에서 디젤엔진 배출물질의 노출은 디젤 연료를 사용하는 지게차 및 대형 차량 등(덤프트럭, 버스, 기차, 대형 운반차, 트랙터 등)에서 주로 발생합니다. 또한 디젤 차량의 수리 또는 정비, 도로 요금소, 소방서, 선박이나 기차의 정거/정박장에서도 노출될 수 있으며, 건설 현장에서 유지 보수 작업 시에도 나타납니다. 디젤엔진 배출물질은 전문 버스 기사, 대형 화물트럭 운전자, 택시 기사뿐만 아니라 경찰, 교통 감시인도 직업적으로 노출되며, 광부와 터널 건설 노동자가 가장 높은 노출 직업군으로 알려져 있습니다.



02 연구에서의 인체 발암성

국제보건기구 산하의 국제암연구소는 디젤엔진 배출물질을 인간에서 암을 일으키는 확실한 물질인 1군 발암물질로 분류하고 있습니다. 디젤엔진 배출물질에 노출되면서 발생할 수 있는 암에는 폐암, 방광암 등이 있습니다.

03 노출 기준

- **US (MSHA*)** : 8-hr TWA†: 160µg/m³
- **US (California)** : 8-hr TWA: 20µg/m³
- **EU** : 8-hr TWA: 50µg/m³

*MSHA : Mine Safety and Health Administration

†TWA : Maximale Arbeitsplatzkonzentration(Maximum workplace concentration)

04 노출 저감법

디젤엔진 배출물질에 노출될 수 있는 근로자들의 건강보호 및 안전을 위하여 아래와 같은 방법을 통해 디젤엔진 배출물질 노출을 방지하도록 해야 합니다.

<p>DPF EGR SCR</p>			
<p>디젤엔진 배출물질 노출을 제어하기 위해 배출원에 대한 가장 적합한 제어 시스템 사용하기</p>	<p>디젤 연료를 안전한 연료(천연가스, 배터리 구동 차량 등)로 대체하기</p>	<p>호흡용 보호 장비(RPE)는 디젤엔진 배출물질과 그 입자의 구성 요소에 따라 적합한 보호구 사용하기</p>	<p>작업장에서는 오염되지 않은 깨끗한 공기를 충분히 공급하기</p>

05 제언

디젤엔진 배출물질은 디젤엔진을 사용하는 다양한 여러 운송 수단의 배기가스를 통해 노출되며, 작업장에서 디젤 연료를 사용하는 지게차 및 대형 차량 등에서 주로 발생합니다. 디젤엔진 배출물질에 대한 노출은 폐암 및 방광암 발생 위험을 높이기 때문에 이에 노출될 수 있는 근로자들의 작업 환경을 적절하게 잘 관리해주는 것이 필요하며, 향후 디젤 연료를 안전한 연료(천연가스, 배터리 구동 차량 등)로 대체하는 것은 디젤엔진 배출물질에 대한 노출을 줄일 수 있는 방안이 될 수 있습니다.

디젤엔진 배출물질

Diesel engine exhaust

- 디젤엔진 배출물질은 디젤엔진 배기관에서 외부로 배출되는 모든 배기물을 말함. 디젤엔진 배출물질은 가솔린 엔진에 비해 보통 10배 이상 더 많은 그을음을 포함하며, 일반적으로 디젤엔진은 가솔린엔진보다 더 많은 질소산화물, 황산화물, 알데히드 및 입자상 물질, 일산화탄소를 생성함. 디젤엔진 배출물질은 가스, 증기, 액체 에어로졸 및 입자 물질의 복잡한 혼합물로 탄소(carbon), 물(H₂O), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 알콜(Alcohol), 알데히드(Aldehyde), 케톤(Ketone), 다양한 탄화수(Hydrocarbons), 다환방향족탄화수소(PAHs) 등의 주요 화학성분이 포함되어 있음.
- IARC(국제암연구소) 발암물질 분류에서 2012년 6월 디젤엔진 배출물질을 2A등급(발암추정물질)에서 1등급 발암물질로 상향 조정함(Group 1)
- 일반인구는 디젤엔진을 사용하는 다양한 여러 운송 수단의 배기가스를 통해 노출되며, 이때 노출 정도는 노출원과의 거리, 교통수단의 양과 종류, 과거 교통수단에 의한 오염물질의 지역 내 잔류량 등에 따라 다를 수 있음.
- 작업장에서 디젤엔진 배출물질의 노출은 디젤 연료를 사용하는 지게차 및 대형 차량 등(덤프트럭, 버스, 기차, 대형 운반차, 트랙터 등)에서 주로 발생함. 디젤 차량의 수리 또는 정비, 도로 요금소, 소방서, 선박이나 기차의 정거/정박장에서도 노출될 수 있으며, 건설 현장에서 유지 보수 작업 시에도 나타남.

01 노출 현황

일반 인구집단에서의 노출

일반인구의 교통수단 관련 노출은 노출원과의 거리, 교통수단의 양과 종류, 과거 교통수단에 의한 오염물질의 지역 내 잔존 정도 등에 따라 다를 수 있다. 교통 관련 오염물질의 농도는 일반적으로 도로와의 거리가 멀어질수록 줄어들며, 오염원의 종류에 따라 다르나 거리에서 100~600m 이상 떨어지면 기저 농도 수준으로 줄어든다. 도로 주변에서 배출된 오염물질은 거리가 멀어질수록 희석되어 농도가 낮아지며, 특정 거리 이상에서는 일반적인 대기 수준으로 떨어진다는 것을 의미한다(IARC, 2014). 배출원 분포 연구는 복잡한 대기오염 혼합물 중 교통의 기여도를 결정하는 데 도움이 될 수 있는데, 전 세계적으로 수행된 연구에 따르면 일반적인 도시 대기오염에서 미세먼지(지름 < 2.5µm)에 대한 기여도는 디젤 차량의 경우 3~15%로 보고되었다(IARC, 2014). 도시 지역 어린이들은 교통이 복잡한 지역이나 인근 지역으로 버스를 타고 등교할 때 주로 노출될 수 있으며, 실내 환기 정도에 따라 디젤엔진 배출물질이 실내 오염의 상당 부분을 차지할 수 있다(IARC, 2014).



직업적 노출

디젤엔진 배출물질 노출은 광업, 철도, 건설 및 운송 산업을 포함한 다양한 직업적 환경에서 발생한다. 작업장에서 디젤엔진 배출물질의 노출은 디젤 연료를 사용하는 지게차 및 대형 차량 등(덤프트럭, 버스, 기차, 대형 운반차, 트랙터 등)에서 주로 발생한다. 디젤 차량의 수리 또는 정비, 도로 요금소, 소방서, 선박이나 기차의 정거/정박장에서도 노출될 수 있으며, 건설 현장에서 유지 보수 작업 시에도 나타남. 또한, 고정 전력원(발전기)에서도 발생한다. 디젤엔진 배출물질은 전문 버스 기사, 대형 화물트럭 운전자, 택시 기사뿐만 아니라 경찰, 교통 감시인도 직업적으로 노출된다(KOSHA, 2015). 노출의 주요 결정 요인은 실내 또는 실외에서 디젤엔진의 크기, 수 및 사용, 환기 정도이다. 원소 탄소(elemental carbon), 질소산화물 및 다환방향족탄화수소(PAHs)와 같은 여러 가지 노출 마커가 사용되었다. 디젤엔진 배출물질 노출수준에 대한 일반적으로 인정되는 대리 측정값은 원소 탄소이지만, 이는 디젤엔진 배출물질에만 국한되지 않는다. 광부(디젤엔진을 사용하는 환경)와 터널 건설 노동자는 가장 높은 노출 직업군으로, 원소 탄소 노출 평균 수준이 100µg/m³ 이상이다. 부두 노동자, 디젤 정비공 및 유지 보수 인력은 평균 20~40µg/m³ 수준에 노출되며 기차 승무원, 건설 노동자 및 선박 적하 및 하역 작업에 종사하는 노동자는 약 10µg/m³의 원소 탄소 수준에 노출된다. 전문 운전자는 평균 약 2µg/m³의 낮은 수준에 노출된다(IARC, 2014). 원소 탄소 노출수준은 직업별로 크게 다르므로 이러한 상대적인 순위는 특정 상황에 따라 다를 수 있다. 또한 디젤엔진 배출물질의 구성은 사용 시나리오, 작동 조건 및 엔진 기술의 차이로 인해 직업적 환경에 따라 다르다(IARC, 2014).



02 발암성

구분	분류
IARC(국제암연구소)	Group 1(인간에게 발암성이 확인된 물질)

01 폐암

전세계적으로 보고된 65건의 연구 결과에 대한 최근 메타분석에서는 디젤엔진 배출물질 농도와 폐암 위험 간의 유의한 양-반응 상관관계를 발견하였다(Starke et al., 2024). 디젤엔진 배출물질에 대한 연노출량이 10µg/m³씩 증가할 때마다 폐암 위험은 1.013배(95% CI, 1.001-1.021) 증가하는 것으로 확인되었다. 또한, Ge, et al. (2020)이 14개 환자-대조군 연구에 포함된 대상자들을 통합하여 분석한 결과에 의하면, 디젤엔진 연소물에 노출된 남성 근로자들의 폐암 발생률은 유의하게 증가하였으며, 폐암의 아형(Subtype) 중에서 편평상피세포암(Squamous cell carcinoma)와 소세포암(Small cell carcinoma)가 연관성이 강한 것으로 나타났다.

디젤엔진 배출물질 노출에 의한 폐암 위험도 평가는 주로 광부, 철도 근무자, 운수 산업 종사자들을 대상으로 한 직업 코호트 연구에서 많이 이루어졌다. 미국 광부를 대상으로 수행된 코호트 연구(Attfield et al., 2012)와 코호트 내 환자-대조군 연구(Silverman et al., 2012)에서는 디젤엔진 배출물질의 노출 지표로 원소 탄소를 사용했고, 폐암 사망에 이르기까지의 잠복기를 15년으로 설정했다. 근로자의 흡연 상태를 보정했을 때, 두 연구 모두 노출량이 증가할수록 폐암 사망위험이 증가하는 추세를 보였다. 특히 근로 기간 동안의 누적노출량이 가장 높은 사분위에 해당하는 자는 가장 낮은 사분위에 비해 폐암 사망위험이 2배 이상 높은 것으로 확인되었다.

미국의 대규모 코호트 연구에서 디젤엔진이 보급화된 1959년 이후 철도 노동자 5만여 명을 추적 관찰한 결과, 1996년까지 38년간 폐암으로 인한 사망자는 4천여 명으로 확인되었다(Garshick et al., 2004). 노동자들의 직무분류에 따라 노출군(기관사, 승무원 등)과 비노출군(사무직 등)으로 나뉘었을 때, 노출군에서의 폐암 사망위험은 비노출군보다 1.40배(95% CI, 1.30-1.51) 높은 것으로 관찰되었다. 그러나 연구 결과가 발표된 후 1959년 디젤엔진 보급화 이전 이미 디젤가스에 노출되었을 가능성이 제기됨에 따라, 해당 연구팀에서는 철도 노동자들의 1945년부터 1959년까지의 디젤가스 노출량을 추가로 평가했다(Laden et al., 2006). 분석 결과에 따르면, 노출군의 폐암 사망위험은 노출군에 비해 1.77배(95% CI, 1.50-2.09) 높은 것으로 나타났으며, 유의미한 양-반응 관계 역시 확인되었다.

미국 운수 산업 종사자를 대상으로 한 코호트 연구에서는 디젤엔진 배출물질에 노출된 노동자의 근무 기간이 길어질수록 폐암 사망위험이 유의하게 증가한다고 보고했다(Garshick et al., 2008). 특히 20년 이상 종사했던 노동자인 경우 폐암 사망률이 비노출군보다 2배 이상 높은 것으로 확인되었다. 또한 직무분류에 따라 폐암 사망위험을 살펴봤을 때, 노출량이 적은 직군에 비해 부두 근로자의 폐암 사망위험이 1.30배(95% CI, 1.07-1.58) 유의하게 높은 것으로 관찰되었다.

이외에 발표된 일부 코호트 연구들은 적은 표본 크기임에도 불구하고 유의한 연관성이 확인되었다(Gustavsson et al., 1990, Neumeyer-Gromen et al., 2009, Emmelin et al., 1993). 이러한 연구들은 스톡홀름 버스 정비공, 독일 광부, 스웨덴 항구 부두 종사자를 대상으로 한 연구들이며, 모두 디젤엔진 배출물질 노출 증가에 따른 폐암 발생 및 사망 위험도의 증가가 관찰되었다. 예로 Neumeyer-Gromen et al.(2009)의 연구 결과에 의하면, 1970년부터 2001년까지 추적관찰한 독일 광부 중 디젤엔진 배출물질 누적 노출량이 4.90mg/m³/year 이상인 노동자의 폐암 사망률은 노출량이 적은 자에 비해 2.53배(95% CI, 1.13-5.69) 높은 것으로 밝혀졌다. 특히 10년 이상 근무한 경우 폐암 사망위험이 더욱 높은 수준인 3.30배(95% CI, 1.30-8.37)인 것으로 확인되었다.



일반 인구집단을 대상으로 수행된 환자-대조군 연구도 보고된 바 있다(Pintos et al., 2012). 캐나다 몬트리올 지역의 폐암 진단자 1,593명과 대조군 1,427명이 모집된 해당 연구에서는 자세한 직업 종사 기록을 통해 대상자들의 생애 디젤엔진 배출물질 노출량을 추정했다. 연구 결과에 의하면, 직업적 디젤엔진 배출물질 누적 노출이 가장 낮은 그룹에 비해 가장 높은 그룹의 폐암 발생위험이 1.80배(95% CI: 1.3-2.6) 높은 것으로 나타났다. 또한 폐암의 조직학적 유형에 따라 분류했을 때, 디젤엔진 배출물질에 지속해서 노출될 경우 편평세포암의 위험이 2.09배(95% CI: 1.3-3.2) 증가한 것으로 보고되었다. 한편, 유럽과 캐나다에서 수행된 11개의 일반 인구집단 대상 환자-대조군 연구를 통합분석한 결과를 살펴보면, 직업 매트릭스를 활용하여 추정된 디젤엔진 배출물질 노출량과 폐암 발생위험은 양의 상관관계를 보였으며, 노출 기간에 따라 증가하는 양의 노출-반응 관계 역시 확인되었다(Olsson et al., 2011).

여러 연구에서 흡연의 영향을 보정한 이후에도 디젤엔진 배출물질 노출과 폐암의 위험성 간의 양의 상관관계가 나타났고 디젤엔진 배출물질에 대한 노출군과 비노출군을 비교한 대부분의 연구에서는 통계적으로 유의한 양의 노출-반응 관계가 관찰되었다. 여러 직업 관련 연구와 다양한 연구 설계 방법에서도 양의 노출-반응 관계가 나타났기에 이를 종합해 볼 때 디젤엔진 배출물질 노출에 따른 폐암의 위험성 증가는 우연이나, 바이어스 또는 다른 교란 요인에 의한 결과라고 보기 어려운 것으로 검토되었다(IARC, 2014).

02 방광암

캐나다에서 수행된 환자-대조군 연구에서는 남성 방광암 환자 658명과 대조군 1360명의 디젤엔진 배출물질에 대한 누적노출을 추적하였다(Latifovic et al., 2015). 10년 이상 고농도 디젤엔진 배출물질에 노출되었을 때 방광암 발생위험이 2.45배(95% CI, 1.04-5.74) 유의하게 증가한 것으로 나타났다. Kogevinas 등(2003)은 6개 유럽 국가에서 1976년부터 1999년 사이에 수행된 11개 환자-대조군 데이터를 결합하여 30~79세의 3,346명의 남성 방광암 환자와 6,840명의 대조군을 대상으로 분석했다. 노출은 각 직업에서 노출의 유병률과 평균 노출 수준을 곱한 값으로, 서로 다른 기간에 걸쳐 평가되었으며, 대상자는 최대 노출 수준에 따라 세 개의 그룹(low, medium, high)으로 나누어졌다. 그 결과 흡연 상태를 보정한 후 디젤 배출물질 노출수준이 가장 높은 제3삼분위에 해당하는 대상자의 방광암 발생위험은 노출되지 않은 대상자보다 1.25배(95% CI: 1.05-1.4) 높은 것으로 나타났다. 노출은 디젤 배출물질에 대한 중간 및 저노출 대상자의 방광암에 대한 위험은 적은 것으로 나타났다. Richardson 등(2007)은 디젤엔진 배출물질에 노출될 가능성이 있는 여러 직업과 방광암의 과도한 발생률 간의 연관성을 발견했다. 설문지는 1983년에서 1990년 사이에 암 진단을 받은 20세 이상 남성 15,463명(응답률 60.1%)이 작성했고, 방광암(94% 전이세포암) 1,062건과 암 대조군 8,057건의 직업 병력을 확인할 수 있었다. 디젤엔진 배출물질 노출군의 방광암 위험은 비노출군에 비해 1.18배(95% CI: 1.04-1.35) 높은 것으로 나타났다. 특히 노출군 중에서 누적 노출이 가장 높은 그룹은 가장 낮은 그룹보다 방광암 위험이 1.25배(95% CI: 1.04-1.49) 유의하게 증가한 것으로 확인되었으며, 누적 노출에 대해 유의한 노출-반응관계가 관찰되었다.

동물 실험에서 나타난 암 (IARC, 2014)

종류	실험결과
 마우스(Mouse)	<ul style="list-style-type: none"> NMRI(Naval Medical Research Institute) 마우스를 이용해 수행한 흡입 독성 연구에서 전체 디젤 배기가스 및 여과된 디젤 배기가스에 노출되면 폐선암이 있는 동물 수가 각각 76마리 중 13마리(17%) 및 93마리 중 18마리(19%)로 크게 증가했고, 대조군은 84마리 중 2마리(2%)로 관찰되었다(Heinrich et al., 1986a).
 래트(Rat)	<ul style="list-style-type: none"> Fischer 344 래트 쥐를 이용해 수행한 흡입 독성 연구 결과, 18개월 이상 생존한 래트 쥐에서 폐종양[주로 기관지-폐포 선종 및 선암] 발생률이 전체 디젤 배기가스에 노출된 그룹(19명 중 8명, 42%; 19명 중 5명(26%)의 악성 종양 포함)에서 대조군(121명 중 5명, 4%; p<0.01)이나 여과된 배기가스에 노출된 그룹(108명 중 4명, 4%; p<0.01)보다 유의하게 높았다(Iwai et al., 1997)

흡수, 분포, 대사 및 배설

인체 호흡기 내 연소 에어로졸의 침전에 대한 실험 연구 결과 흡인된 디젤엔진 배출물질의 폐 잔존량은 전체의 30±9%이며, 입자 크기의 중간값은 0.124±0.035μg로 보고되었다(Morawska et al., 2005). 디젤엔진 배출물질의 대사에 관한 연구는 주로 직업장에서 노출된 사람을 대상으로 시행되었는데, 이러한 연구 중 많은 연구(아래에 설명됨)는 주로 hydroxylated PAHs, amino-PAHs, pyrene 등의 생체 지표 측정에 중점을 두었고, 디젤엔진 배출물질에 노출된 사람이 PAH의 대사물을 추적, 분배, 대사, 배출하는 것으로 보고했다(IARC, 2014). 추가 연구에서는 디젤엔진 배출물질에 노출된 사람의 소변에서 1-hydroxypyrene, nitro-PAH, 저분자량 alkane 등이 관찰되었다.

Nielsen 등(1996a)은 버스 차고지 근무자 및 정비공과 대조군에서 디젤엔진 배출물질 및 사용된 윤활유 노출 차이를 평가하기 위해 혈중 헤모글로빈에서 소변 1-hydroxypyrene과 hydroxyethylvaline 부가물의 수치를 측정하여 바이오마커를 평가했다. 그 결과 디젤엔진 배출 물질에 노출된 근로자는 대조군보다 두 바이오마커 수치가 유의하게 높았으며, 두 바이오마커 수치 간에는 상관관계가 있다고 보고했다. 이는 대기 오염원으로부터 PAHs에 대한 노출 연구 시 피부 흡수를 고려해야 할 중요한 요소임을 시사한다.

Huang 등(2007)은 기관차 엔진 검사장에서 디젤엔진 배출물질에 노출된 중국인 근로자 17명(흡연자 73%)에게 4일 연속으로 근무 전후 소변을 채취하여 1-hydroxypyrene 수치를 측정하고 결과 3일 이상 연속적인 샘플링 기간 동안 수치가 증가하는 것이 관찰되었다. 또한, 몸 전체를 하나의 구획으로 간주하고, 약물이 몸에 들어오면 즉시 전체에 고르게 분포하고, 일정한 속도로 제거된다고 가정하는 1-구획 약동학 및 비선형 혼합 효과 모델을 사용하여 피렌 대사의 생물학적 동태를 연구한 결과, 소변 중 1-hydroxypyrene 평균 반감기는 29시간으로 추정되었다(Huang et al., 2007). 디젤엔진 배출물질(표적 농도, 300μg/m³ as PM10) 또는 청정 공기에 1시간 동안 조절된 노출을 시작한 후 24시간 동안 38명의 개인으로부터 수집된 단시간 소변 샘플에서 1-aminopyrene 농도를 측정했다. 소변 1-aminopyrene 시간 가중 평균 농도는 청정 공기와 비교해 디젤엔진 배출물질에 노출된 후에 유의하게 더 높았다(중앙값, 138.7 대 21.7ng/g creatinine; p<0.0001). 디젤엔진 배출물질 및 청정 공기 노출을 비교할 때, 노출 전에서 노출 후 첫 번째 배뇨(24시간 시점) 또는 노출 후 최고 단시간 소변 농도까지 1-aminopyrene 농도의 유의한 증가가 나타났다(각각 p=0.027 및 p=0.0026). 디젤엔진 배출물질에 대한 표준화된 노출 후 소변 중 1-aminopyrene 농도 및 소변 내 출현 시간 경과에서 개인 간 변이가 크게 관찰되었다(Laumbach et al., 2009). 후속 연구에서 1-aminopyrene 배설에 대한 데이터의 약동학적 분석 결과, 약 63%의 연구 참여자는 중앙값 최대 배설 시간이 5.37시간인 반면, 30%의 피험자는 최대 배설 시간이 24시간 이상으로(Huyck et al., 2010) 유전적 다형성, 대사 효소 또는 호흡률 차이가 배설률 차이에 영향을 미칠 수 있다.

유전독성

디젤엔진 배출물질에서 발생하는 PM2.5 200μg/m³에 2시간 동안 노출된 5명의 연구 참여자를 대상으로 한 실험 연구에서 노출 시작 6시간 후에 혈액 샘플을 채취한 결과, 산화스트레스, 염증, 백혈구 활성화 및 혈관 항상성에 관련된 유전자 발현의 변화가 나타났으며, 이는 공기 중 PM2.5 수준과 관련이 있었다(Peretz et al., 2007). 또 다른 실험 연구(Pettit et al., 2012)에서는 건강한 피험자 14명을 디젤엔진 배출물질에서 나오는 PM2.5 300μg/m³에 2일 동안 하루 1시간씩, 최소 1주일 간격으로(총 노출 2시간) 노출 후 24시간에 혈액을 채취하여 유전자 발현을 분석한 결과, 산화스트레스, 단백질 분해 및 응고 경로에 관련된 유전자가 다르게 발현되는 것으로 나타났다.

두 실험 연구 모두 엔진 배기가스에 노출되면 산화스트레스에 관련된 유전자의 발현이 변하는 것을 발견했다.

Salvi 등(2000)은 건강한 연구 참여자 15명을 디젤엔진 배출물질의 PM10 300μg/m³에 1시간 동안 노출 후 6시간 후에 기관지 세척을 실시하고 선택된 유전자와 단백질의 발현을 평가했다. interleukin(IL)-8 유전자, IL-8 protein 및 growth-regulated oncogene-α protein 단백질의 발현의 증가가 관찰되었으며 디젤엔진 배출물질에 노출되어 염증 반응이 일어났다는 증거를 제공했다.

이와 같이 인체가 디젤엔진 배출물질에 노출되면 폐포 세포와 백혈구의 산화스트레스 반응과 염증 반응에 관련된 유전자의 발현이 증가한다. 디젤엔진 배출물질이 많이 포함된 공기에 사람이 노출되면 bulky DNA 형성, DNA 손상, 소핵(micronucleus)이 만들어진다. 또 유전자 손상을 나타내는 물질이 디젤엔진 연소물이나 이들이 많이 포함된 공기에 노출된 사람에게서 검출되었다(IARC, 2014).

디젤엔진 배출물질은 다양한 가스상 물질과 입자상 물질로 구성되며, 따라서 이 모든 구성 물질을 동시에 정량적으로 평가한다는 것은 어렵다. 디젤엔진 배출물질의 노출기준 설정과 노출수준의 평가는 디젤엔진 배출물질의 건강 영향을 고려한 일부 대리 지표(surrogate)를 대상으로 하며, 현재 국내에서는 디젤엔진 배출물질에 대한 직업적 노출기준이 설정되어 있지 않은 상태이다. 디젤 배출물질 노출에 의한 건강 영향으로 가장 많이 고려되는 것은 폐 염증(pulmonary inflammation)과 폐암(lung cancer)이다(산업안전보건연구원, 2020). 미국 MSHA는 지하 광산에서 사용되는 디젤엔진 장비들로부터 광부들이 디젤엔진 배출물질에 노출되는 것을 관리하기 위해 노출기준을 마련하였다. 처음에는 원소 탄소로 시작했으나 지하 탄광에는 유기탄소(organic carbon, OC)의 발생원이 없어 총 탄소(total carbon, TC, EC+OC)로 대리지표를 변경했고 8시간 TWA 160μg/m³의 직업적 노출기준(OEL, Occupational Exposure Limit)으로 적용하였다(MSHA, 2014). 미국 OSHA는 디젤엔진 배출물질의 성분인 일산화탄소와 질소산화물에 대해서만 규제하고 있고(OSHA, 2012), 디젤엔진 배출물질 자체에 대한 별도 기준은 설정하고 있지 않다.

미국 캘리포니아주는 모든 업종을 대상으로 20μg/m³을 기준으로 제시하고 있는데, 이는 캘리포니아 환경청의 유해인자 평가국의 평가 근거에 기초하고 있다. 그러나 법적 강제 기준은 아니며 권고 기준이다(California Department of Public Health, 2002). 직업적 노출기준 제정 시스템이 가장 구축이 잘되어 있는 미국 산업위생전문가협회(ACGIH)는 일찍부터 디젤엔진 배출물질에 대한 노출기준 마련을 시도했고, 초기에는 1μg 이하 크기의 입자상 물질로 제안하다가 나중에는 EC로 20μg/m³을 제안했으나(Birch, 2003) 노출기준으로 도입되지는 않았고 현재도 없는 상태이다.

2018년 유럽연합(European Union, EU)에서는 원소 탄소를 대리지표로 하는 8시간 TWA(time weight average) 50μg/m³의 직업적 노출기준을 제시했고 시행에는 유예기간을 두고 있다. 광업과 지하 터널 건설업의 경우 2026년부터, 기타 업종은 2023년부터 EU 회원국들이 법적 기준으로 적용하도록 하였다. 스위스는 법적 기준으로 호흡성 입자 크기의 원소 탄소 100μg/m³를 8시간 가중평균 기준으로 설정하고 있다(Taxell, 2017). 핀란드는 상대적으로 낮은 노출 기준을 설정하고 있는데 일반 사업장은 5μg/m³의 호흡성 원소 탄소, 광업과 지하 건설 사업장은 5μg/m³의 8시간 가중평균 기준을 제시하고 있다(FIOH, 2019). 그러나 핀란드의 기준은 법적 강제 기준이 아닌 권고 기준이다. 네덜란드는 2019년에 전문가 위원회에서 건강 영향에 기초한 기준(health-based OELs)으로 매우 낮은 디젤엔진 배출물질의 노출기준을 정부에 권고했다(Health Council of the Netherlands, 2019). 두 가지 기준을 제시하고 있는데 관리의 목표 위험 수준(target risk level)으로는 10만 명당 4명의 추가 사망위험이 발생하는 수준으로 0.011μg/m³의 호흡성 원소 탄소(8hr-TWA)를 권고했고, 금지 위험 수준(prohibition risk level)으로 1,000명당 4명이 추가 사망위험이 발생하는 수준으로 1.03μg/m³의 호흡성 원소 탄소(8hr-TWA)를 권고

하고 있다. 이 권고기준은 법적 기준이 아닌 네덜란드 정부에서 디젤엔진 배출물질의 법적 기준 결정에 참고하도록 제안한 것이다. 독일은 2017년 유해물질 위원회에서 호흡성 원소 탄소 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 법적 기준으로 제시했고, 2022년까지 지하 광산에는 적용을 유예했다(Gefahrstoffe Reinhaltun der Luft, 2017). 오스트리아는 지하 광산에 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기타 업종에 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 호흡성 원소 탄소를 대상으로 노출기준을 제정했다(Bakke et al., 2014). 호주는 법적 노출기준은 제정되지 않은 상태이며, 2013년 호주 산업위생학회(AIOH)에서 EC 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 노출기준을 권고했고(AIOH Exposure Standards Committee, 2013), 호주 내 퀸스랜드, 웨스턴오스트레일리아, 뉴사우스웨일스 등의 주에서는 이 기준을 광업에 적용하는 주 정부의 가이드라인으로 사용하고 있다(Department of Mines and Petroleum, 2013; Department of Natural Resources, 2014).

※ 국내외 디젤엔진 배출물질 노출기준 현황

Jurisdiction	OEL (Occupational Exposure Limits)	Marker of exposure	Notes
United States			
US (MSHA*)	8-hr TWA†: 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Total carbon; respirable dust	Since 2006. Applies to underground metal and non-metal mines. Method: NIOSH 5040.
US (California)	8-hr TWA: 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Diesel particulates	Recommended limit. Not legally enforceable.
Europe			
EU	8-hr TWA: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elemental carbon	Adopted December 2018 (becomes effective in 2026 in underground mining and construction tunnels and in 2023 in other industries). Legally enforceable.
Switzerland	8-hr MAK‡: 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respirable elemental carbon	Since 2012.
Finland	8-hr TWA: 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8-hr TWA: 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respirable elemental carbon	Recommended: general workplaces. Recommended: mines, underground construction.
Netherlands	8-hr TWA: 0.011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8-hr TWA: 1.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respirable elemental carbon	Recommended: target risk level. Recommended: prohibition risk level.
Germany	8-hr TWA: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Respirable elemental carbon	Set in 2017. Does not apply to underground mines until 2022.
Austria	8-hr TWA: 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 8-hr TWA: 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Elemental carbon/respirable aerosol	Underground mines(since 2011). All other industries(since 2011).
Australia & New Zealand			
Australia	8-hr TWA: 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Submicron elemental carbon	Recommended OEL. Adopted by Queensland, Western Australia, New South Wales.
New Zealand	8-hr TWA: 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Inhalable elemental carbon	Enacted 2016.

* MSHA: Mine Safety and Health Administration
 † TWA: Time Weight Average
 ‡ MAK: Maximale Arbeitsplatzkonzentration(Maximum workplace concentration)

05 보호 방법

근로자들의 건강보호 및 안전을 위하여 유해물질의 노출을 관리해야 한다. 예를 들면 작업 방법 변경, 작업장 레이아웃 변경, 작업장 내 배기가스를 제거하기 위한 방법 수정, 또는 디젤 연료를 안전한 연료(천연가스, 배터리 구동 차량 등)로 대체하여 디젤엔진 배출물질 노출을 방지하도록 해야 한다. 작업장에서 디젤엔진 배출물질의 노출 제어가 합리적으로 시행될 수 없는 상황에서는 개별적 상황을 고려하고 노출을 줄이기 위해 필요한 관리 조치를 취해야 한다. ① 디젤엔진 배출물질 노출을 제어하기 위해 배출원에 대한 가장 적합한 제어 시스템을 사용하여야 하며, 호흡용 보호 장비(RPE)는 차선책이 되어야 한다. ② RPE는 디젤엔진 배출물질과 그 입자의 구성 요소에 따라 적합한 보호구를 사용해야 한다. 작업장에서 디젤엔진 배출물질 노출을 제어하기 위해 제공하는 모든 조치가 효과적인 상태로 유지되고, 효율적으로 작업 순서에 맞게 배치되어 있는지 확인해야 한다(KOSHA, 2015).

작업장별 디젤엔진 배기가스 노출 관리(KOSHA, 2015)

주차장 및 정비소



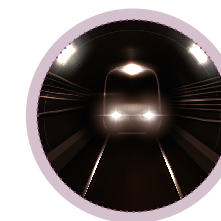
- 작업장에서 공회전하는 여러 차량이 있는 경우에는 적절한 자연 공기 교환에 의해 제어될 수 있는 것보다 더 많은 양의 배기가스가 발생한다. 제어의 가장 효과적인 방법은 배기관에 외부 배출 시스템을 이용하여 노출원의 배기가스를 제거할 수 있다.
- 다른 방법으로는 배기관 출구에 부착된 휴대용 필터를 사용한다.
- 동시에 여러 대의 차량에 배기가스가 발생하는 경우 여러 대의 차량 배기관에 부착시킬 수 있는 연결 시스템을 사용할 수 있다.

버스 차고지



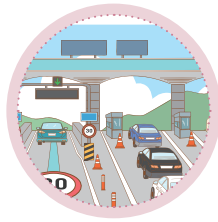
- 운전자 또는 수리기사가 점검하는 동안 디젤엔진 배기가스에 노출될 가능성이 크다.
- 가장 이상적인 공학적 방안은 일반적인 환기 시스템이다. 예를 들어 문을 개방하고, 차고지 벽면과 지붕에 통풍구를 설치한다. 지붕이나 벽면의 통풍구를 개방하여 깨끗한 공기의 흐름을 지속해서 유지한다.

철도의 수리 및 철도 터널



- 작업자는 터널 내 작업, 유지 보수 및 수리 등으로 디젤엔진 배기가스에 다량으로 노출될 수 있다. 차량이 공회전할 때 디젤엔진은 다량의 배기가스를 배출한다. 따라서 공회전 시간을 감소시킬 필요가 있다.

도로 통행 요금소



- 도로 통행 요금소 및 주차장에서 근무하는 작업자의 경우 디젤과 가솔린 엔진 배기가스에 노출될 수 있다.
- 노출수준은 기상 조건, 차량의 수, 제어 수단에 따라 달라진다.
- 도로 통행 요금소 실내는 양압 하에 유지되도록 하고 오염되지 않은 신선한 공기가 충분히 공급되어야 한다.

소방서



- 소방서의 경우 24시간 대기하기 때문에 소방차가 위치한 차고 내에 엔진에서 배출되는 배기가스가 축적될 수 있다.
- 배기 추출 시스템에 연결된 배기관을 차량 배기관에 부착하여 디젤엔진 배기가스를 제거할 필요가 있다.
- 차량이 급히 출동해야 하는 경우, 자동으로 엔진 배기관에 부착되었던 연결관이 분리되는 장치를 장착한다.

REFERENCES

- 한국산업안전보건공단. 사업장에서 디젤엔진 배기가스 노출 근로자의 보건관리지침. 2015.
- 산업안전보건연구원. 디젤엔진배출물 노출실태 및 작업환경관리 방안 연구. 2020.
- IARC(International Agency for Research on Cancer), Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 105, Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes. 2014.
- Kaplan I. Relationship of noxious gases to carcinoma of the lung in railroad workers. J Am Med Assoc. 1959;171:2039-2043.
- Romero Starke K, Bolm-Audorff U, Reissig D, Seidler A. Dose-response-relationship between occupational exposure to diesel engine emissions and lung cancer risk: A systematic review and meta-analysis. Int J Hyg Environ Health. 2024;256:114299.
- Ge C, Peters S, Olsson A, et al. Diesel Engine Exhaust Exposure, Smoking, and Lung Cancer Subtype Risks. A Pooled Exposure-Response Analysis of 14 Case-Control Studies. Am J Respir Crit Care Med. 2020;202(3):402-411.
- Attfield MD, Schleiff PL, Lubin JH, et al. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Cohort Mortality Study With Emphasis on Lung Cancer. J Natl Cancer Inst. 2012;104:869-883.
- Silverman DT, Samanic CM, Lubin JH, et al. The Diesel Exhaust in Miners Study: A Nested Case-Control Study of Lung Cancer and Diesel Exhaust. J Natl Cancer Inst. 2012;104:855-868.
- Garshick E, Laden F, Hart JE, et al. Lung cancer in railroad workers exposed to diesel exhaust. Environ Health Perspect. 2004;112:1539-1543.
- Laden F, Hart JE, Eschenroseder A, Smith TJ, Garshick E. Historical estimation of diesel exhaust in a cohort study of U.S. railroad workers and lung cancer. Cancer Causes Control, 2006;17(7):911-919.
- Garshick E, Laden F, Hart JE, et al. Lung cancer and vehicle exhaust in trucking industry workers. Environ Health Perspect. 2008;116:1327-1332.
- Gustavsson P, Plato N, Lidström EB, Hogstedt C. Lung cancer and exposure to diesel exhaust among bus garage workers. Scand J Work Environ Health. 1990;16:348-354.
- Neumeyer-Gromen A, Razum O, Kersten N, et al. Diesel motor emissions and lung cancer mortality-results of the second follow-up of a cohort study in potash miners. Int J Cancer. 2009;124:1900-1906.
- Emmelin A, Nyström L, Wall S. Diesel exhaust exposure and smoking: a case-referent study of lung cancer among Swedish dock workers. Epidemiology. 1993;4:237-244.
- Garshick E, Schenker MB, Muñoz A, et al. A case-control study of lung cancer and diesel exhaust exposure in railroad workers. Am Rev Respir Dis. 1987;135:1242-1248.
- Pintos J, Parent M-E, Richardson L, Siemiatycki J. Occupational exposure to diesel engine emissions, and risk of lung cancer: evidence from two case-control studies in Montreal, Canada. Occup Environ Med. 2012;69:787-792.
- Olsson AC, Gustavsson P, Kromhout H, Peters S, et al. Exposure to diesel motor exhaust and lung cancer risk in a pooled analysis from case-control studies in Europe and Canada. Am J Respir Crit Care Med. 2011 Apr 1;183(7):941-8. doi: 10.1164/rccm.201006-0940OC. Epub 2010 Oct 29. PMID: 21037020; PMCID: PMC7259806.
- Latifovic L, Villeneuve PJ, Parent MÉ, et al. Bladder cancer and occupational exposure to diesel and gasoline engine emissions among Canadian men. Cancer Med. 2015;4(12):1948-1962.
- Kogevinas M, 't Mannetje A, Cordier S, et al. Occupation and bladder cancer among men in Western Europe. Cancer Causes Control. 2003;14:907-914.
- Richardson K, Band PR, Astrakianakis G, Le ND. Male bladder cancer risk and occupational exposure according to a job-exposure matrix-a case-control study in British Columbia, Canada. Scand J Work Environ Health. 2007;33:454-464.
- Heinrich U, Muhle H, Takenaka S, et al. Chronic effects on the respiratory tract of hamsters, mice and rats after long-term inhalation of high concentrations of filtered and unfiltered diesel engine emissions. J Appl Toxicol. 1986;6:383-395. a.
- Iwai K, Higuchi K, Udagawa T, et al. Lung tumour induced by long-term inhalation or intratracheal instillation of diesel exhaust particles. Exp Toxicol Pathol. 1997;49:393-401.
- Morawska L, Hofmann M, Hitchens-Loveday J, et al. Experimental study of the deposition of combustion aerosols in the human respiratory tract. J. Aerosol Sci. 2005;36:939-957.
- Nielsen PS, Andreassen Å, Farmer PB, et al. Biomonitoring of diesel exhaust-exposed workers. DNA and non-smoking adducts and urinary 1-hydroxypyrene as markers of exposure. Toxicol Lett. 1996;86:27-37. a.
- Huang W, Smith TJ, Ngo L, et al. Characterizing and biological monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in exposures to diesel exhaust. Environ Sci Technol. 2007;41:2711-2716.
- Laumbach R, Tong J, Zhang L, et al. Quantification of 1-aminopyrene in human urine after a controlled exposure to diesel exhaust. J Environ Monit. 2009;11:153-159.
- Huyck S, Ohman-Strickland P, Zhang L, et al. Determining times to maximum urine excretion of 1-aminopyrene after diesel exhaust exposure. J Expo Sci Environ Epidemiol. 2010;20:650-655.
- Peretz A, Peck EC, Bammler TK, et al. Diesel exhaust inhalation and assessment of peripheral blood mononuclear cell gene transcription effects: an exploratory study of healthy human volunteers. Inhal Toxicol. 2007;19:1107-1119.
- Pettit AP, Brooks A, Laumbach R, et al. Alteration of peripheral blood monocyte gene expression in humans following diesel exhaust inhalation. Inhal Toxicol. 2012;24:172-181.
- Salvi SS, Nordenhall C, Blomberg A, et al. Acute exposure to diesel exhaust increases IL-8 and GRO-alpha production in healthy human airways. Am J Respir Crit Care Med. 2000;161:550-557.
- MSHA. Title 30 Mineral Resources; 2014. 370p. Available from: <http://aflweb.msha.gov/regs/30cfr/>
- Occupational Safety and Health Administration. Hazard Alert -Diesel Exhaust/Diesel Particulate Matter. 2012. Available from: https://www.osha.gov/dts/hazardalerts/diesel_exhaust_hazard_alert.html
- California Department of Public Health. Diesel Engine Exhaust. 2002. Available from: <https://www.cdph.ca.gov/Programs/CCDPHP/DEODC/OHB/HESIS/CDPH%20Document%20Library/diesel.pdf#search=Diesel%20Engine%20Exhaust>
- Birch ME. Monitoring of diesel particulate exhaust in the workplace. 2003. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), #2154.
- Taxell P, Santonen T. Diesel Engine Exhaust: Basis for Occupational Exposure Limit Value. Toxicol Sci. 2017;158(2):243-251.

REFERENCES

- Finnish Institute of Occupational Health (FIOH). Dieselpakokaasujen tavoitetasoperustelumuistio. 2019.
- Health Council of the Netherlands. Diesel Engine Exhaust. Publication no. 2019/02. The Hague: Health Council of the Netherlands; 2019.
- T. Gebel. Diesel engine exhaust: one occupational exposure limit or several ones?. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*; 2017.
- Bakke B, Ulvestad B, Thomassen Y, Woldbæk T, Ellingsen DG. Characterization of Occupational Exposure to Air Contaminants in Modern Tunnelling Operations. *The Annals of Occupational Hygiene*. 2014;58(7):818-29.
- AIOH. Exposure Standards Committee. Diesel particulate matter and occupational health issues. Position paper. Victoria, Australia: Australia Institute of Occupational Hygienists; 2013.
- Department of Mines and Petroleum, Resources Safety. Management of diesel emissions in Western Australian mining operations - guideline. East Perth, WA: Government of Western Australia; 2013.
- Department of Natural Resources MaE. QGN 21: Guidance note for management of diesel engine exhaust in metalliferous mines. Mining and Quarrying Safety and Health Act 1999. Version 1. Queensland: State of Queensland; 2014.
- Keefe A, Peters C, Telfer J, Slot N, Shergill S, Jardine K. Setting an Occupational Exposure Limit for Diesel Engine Exhaust in Canada: Challenges and Opportunities. 2019.

발암 요인 보고서 (디젤엔진 배출물질)

발간에 참여한 분들

국립암센터 연구진

김병미 국립암센터 암예방사업부

최윤주 국립암센터 암예방사업부

김태월 국립암센터 암예방사업부

변아영 국립암센터 암예방사업부

영역별 참여 전문가

박은영 고려대학교

이철우 국립환경과학원

예신희 산업안전보건연구원

디젤엔진 배출물질

DIESEL ENGINE EXHAUST

-
발암 요인 보고서