

경유승용차 도입이 터널 소요환기량에 미치는 영향분석

김효규^{1*}, 송석헌², 김남영³, 이창우⁴

The effects of introduction of diesel passenger cars on the ventilation requirements for road tunnels

Hyo-Gyu Kim, Seok-Hun Song, Nam-Young Kim, Chang-Woo Lee

Abstract Since the first diesel passenger car hit the local road in late 2005, the share of diesel cars is growing significantly; possibly up to the level as in the western Europe. In this study, the effects of introduction of diesel passenger cars on the ventilation rate and facility capacity are analyzed for the three individual cases with different basic exhaust rate based on the vehicle age, the vehicle class percentage and the smoke exhaust rate. The target tunnel for this comparative study is a typical 2 km-long 2-lane highway tunnel. Case 1 assuming the current local design standards and the diesel vehicles comprising 40% of the total passenger cars on the road required more ventilation rate and facility capacity than in the case only with the current standards. Case 2 which is the real tunnel currently in the designing stage taking into account the vehicle age but ignoring the diesel vehicle ratio, and Case 3 on the contrary considering the both factors show similar level of ventilation characteristics as EURO-3 emission regulation. Application of the emission standard set by the Ministry of Environment for newly manufactured vehicles in the current local tunnel design standard indicates higher requirements than for EURO-2 regulation, whereas the emission standard came into effect in 2006 results in the ventilation characteristics similar to EURO-4. This study aims at providing fundamental information for assessing the basic emission rate and determining the optimal ventilation rate and facility capacity considering the growing percentage of diesel cars and gradually decreasing level of smoke emission forced by the relevant laws.

Keywords: Diesel passenger car, ventilation requirements, smoke exhaust rate, road tunnel

요 지 2005년 하반기부터 국내 승용차시장에 경유승용차의 시판이 허용되면서 시장점유율이 점증하고 있어, 향후 서유럽의 경우와 같은 수준으로 까지도 증가할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 경유승용차의 확대보급에 따른 터널 소요환기량 및 환기설비용량 변화를 검토하기 위하여 차령, 차종구성비, 매연 배출량 변화추이를 감안한 기준배출량을 달리하는 3가지 경우를 비교 분석하였다. 전형적인 2km 길이의 2차선 고속도로 터널을 대상으로 한 비교연구에서 현 환기설계기준상의 기준배출량과 경유승용차 구성비 40%를 가정한 Case 1의 경우, 현 설계기준보다 상대적으로 많은 소요환기량 및 환기설비용량을 요구하였다. 차령은 고려하나 경유승용차를 감안하지 않은 기준배출량을 설계에 반영하고 있는 실제 터널을 대상으로 한 Case2와, 차령 및 경유승용차 보급률을 동시에 고려한 배출계수에 의한 기준배출량을 적용한 Case3은 모두 EURO-3 규제기준과 비슷한 수준의 환기특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 한편, 국내 기존 환기설계기준에 적용하고 있는 환경부 제작차 허용배출량 기준은 EURO-2 규제기준보다 높은 편으로 조사되었으며, 2006년부터 적용하고 있는 허용배출량 기준은 EURO-4 규제기준과 비슷하게 분석되었다. 본 연구는 향후 국내 경유승용차의 확대보급에 따른 경유차량 구성비의 증가, 매연 배출량 규제에 따른 매연배출량의 감소 등의 변화를 고려한 오염물질의 기준배출량 산정을 통하여 최적 소요환기량 및 환기설비용량 결정을 하기 위한 기초자료의 제공을 목적으로 하고 있다.

주요어: 경유승용차, 소요환기량, 매연배출량, 도로터널

1. 서 론

도로터널의 환기방식 결정에 있어 소요환기량은 가장

중요한 요소이며, 소요환기량 산정을 위해서는 제작차 허용배출량 혹은 운행차량의 배출계수로부터 차종별 오염물질별 배출량을 산출하여야 한다. 그러나 국내 환기설계기준은 기준배출량의 적용값을 1996년 환경부의 대기환경보전법 시행령에 근거하고 있다는 점과 환경부와 건설교통부의 차종구분이 명확히 구분되어 있지 못하다는 점 등이 정확한 기준배출량의 산출을 어렵게 만들고 있다. 이와 함께 2005년 하반기부터 시판된 경유승

¹(주) 세익엠이씨 차장

²(주) 세익엠이씨 이사

³(주) 삼보기술단 상무

⁴동아대학교 지구환경공학부 교수

*교신저자: 김효규 (xram77@chol.com)

용차의 도입은 소효환기량 산정시 매연의 기준배출량에 대한 추가검토의 필요성을 제기하고 있다.

실제 국내보다 먼저 경유승용차가 보급된 유럽시장에서의 시장점유율이 1990년에 10% 수준에서 2000년에 이미 30%를 넘어섰으며, 2005년을 기준으로 서유럽의 평균 경유승용차 판매비율이 약 50%에 근접한 것으로 보고되고 있다(그림 1 참조). 이와 같은 시장점유율의 급격한 증가는 디젤엔진 기술의 발달로 인한 소음, 진동의 저감과 연비효율의 개선 그리고 오염물질의 저감 등 환경문제 해소에 따른 것으로 보인다.

90년대 초기에는 디젤엔진이 대부분 간접분사식이어서 열전달손실 등이 많아 가솔린엔진 차량에 비해 연비 향상율이 약 15% 정도에 그쳤으나, 최근 연료분사기술인 커먼레일(Common-Rail)식 연료분사장치를 사용하는 직접분사식 엔진을 사용하여 30% 가량의 연비를 향상시켰고, 여기에 파일럿분사(Pilot Injection) 등을 이용하여 소음과 진동을 저감시켰다. 또한 CO₂ 배출량은 기관의 효율에 반비례하므로 디젤기관이 가솔린기관에 비

해 유리하다. 이러한 점들이 유럽시장에서 경유승용차의 보급을 급속히 확산시킨 것으로 보인다. 현재 국내 경유승용차의 보급은 초기단계이나 향후 시장점유율은 더욱 확대될 것으로 예측된다(BOSCH 사, 1999, 자동차부품산업진흥재단, 2003).

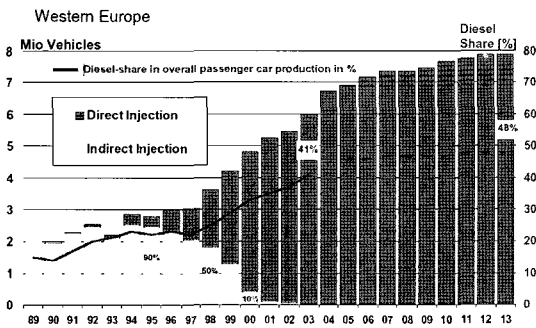
본 논문에서는 승용차중 경유승용차의 확대보급에 따른 매연의 기준배출량값 변화와 이로 인하여 환기설계에 미치는 영향 검토를 목적으로 한다. 이를 위하여 국내차량 보급현황 조사를 통한 경유승용차의 등록현황을 분석, 최근 개정된 환경부의 차종별 제작차 배출량 허용기준에 따른 기준배출량값 재산정 및 기존 환기설계 기준과의 비교검토, 그리고 소효환기량과 환기용량을 검토하였다.

2. 차량현황 조사

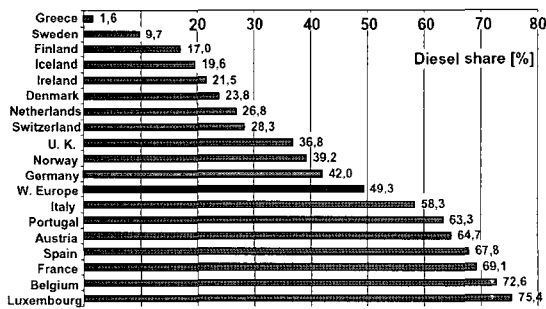
2.1 자동차등록대수 증가추이

최근 10년간(1995년~2005년) 국내 자동차등록대수의 증가추이를 표 1에서 살펴보면 연평균 6.2%의 증가율을 보였으며, 차종별로는 승용차가 연평균 6.4%, 승합차가 연평균 6.3%, 화물차는 연평균 5.5%의 증가율을 보이고 있다. 또한 승용차의 승차정원이 10인 이하로 상향조정됨에 따라 다른 차종에 비해 증가율이 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 승합차의 증가율은 점차 둔화되고 있는 것으로 나타나고 있다. 이를 용도별로 구분하여 살펴보면 영업용이 연평균 5.7%, 관용이 2.4%의 증가율을 보이고 있는데 비해 자가용은 6.2%로 자가용 자동차의 증가폭이 큰 것으로 나타나고 있다.

반면, 자동차에 사용되는 연료를 그림 2에서 살펴보



(a) 서유럽 디젤차량의 시장점유율 전망



(b) 유럽국가별 디젤차량의 판매비율(2005년)

그림 1. 유럽에서의 경유승용차 보급현황 (BOSCH 사, 2004, Klaus-Peter Schindler, 2006)

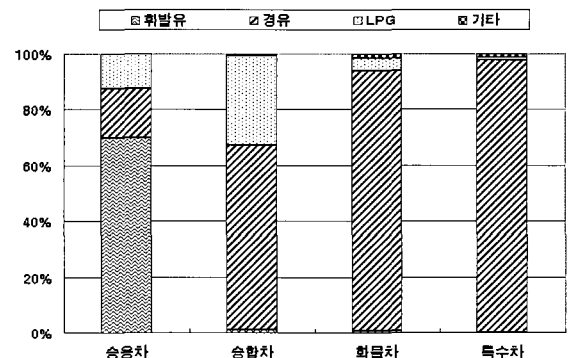


그림 2. 차종별 사용연료 현황(2005년)

표 1. 자동차 등록대수 현황 (건설교통부/건설기술연구원, 2006)

| 연도 | 합계 | 차종별 | | | | 용도별 | | |
|---------|------------|------------|-----------|-----------|--------|--------|------------|---------|
| | | 승용차 | 승합차 | 화물차 | 특수차 | 관용 | 자가용 | 영업용 |
| 1995 | 8,468,901 | 6,006,290 | 612,584 | 1,816,582 | 33,445 | 45,537 | 7,974,728 | 448,636 |
| 1996 | 9,553,092 | 6,893,633 | 663,011 | 1,962,564 | 33,884 | 47,093 | 9,025,544 | 480,455 |
| 1997 | 10,413,427 | 7,586,474 | 719,127 | 2,072,256 | 35,570 | 50,075 | 9,860,052 | 503,300 |
| 1998 | 10,469,599 | 7,580,926 | 748,320 | 2,104,683 | 34,670 | 49,990 | 9,908,561 | 511,048 |
| 1999 | 11,163,728 | 7,837,206 | 993,169 | 2,298,116 | 35,237 | 49,665 | 10,550,225 | 563,838 |
| 2000 | 12,059,276 | 8,083,926 | 1,427,221 | 2,510,992 | 37,137 | 50,409 | 11,388,961 | 619,906 |
| 2001 | 12,914,115 | 8,889,327 | 1,257,008 | 2,728,405 | 39,375 | 51,723 | 12,193,837 | 668,555 |
| 2002 | 13,949,440 | 9,737,428 | 1,275,319 | 2,894,412 | 42,281 | 53,396 | 13,172,886 | 723,158 |
| 2003 | 14,586,795 | 10,278,923 | 1,246,629 | 3,016,407 | 44,836 | 55,238 | 13,780,768 | 750,789 |
| 2004 | 14,934,092 | 10,620,557 | 1,204,313 | 3,062,314 | 46,908 | 56,529 | 14,110,608 | 766,955 |
| 2005 | 15,396,715 | 11,122,199 | 1,124,645 | 3,102,171 | 47,700 | 57,563 | 14,555,187 | 783,965 |
| 년평균 증가율 | 6.2 | 6.4 | 6.3 | 5.5 | 3.6 | 2.4 | 6.2 | 5.7 |

면, 승용차의 경우 휘발유 차가 69.9%로 높은 비중을 차지하고 있지만, 승합차, 화물차 및 특수차의 경우에는 디젤을 사용하는 자동차가 각각 66.3%, 93.2%, 97.9%로 높은 비중을 차지하고 있다. 전체자동차중 휘발유를 연료로 사용하는 자동차는 50.7%를 차지하고 있다.

2.2 경유승용차 현황

그림 3에서처럼 승용차의 총 등록대수는 매년 증가하고 있는데, 이중 휘발유승용차의 구성비는 매년 감소하는 경향을 보이나 경유승용차의 구성비는 계속 증가하는 것으로 나타나고 있다. 자동차 주행거리 실태조사 보고서(교통안전공단, 2004~2006)에 따르면, 승용차 전체에 대한 경유승용차의 구성비는 약 18%, 년평균 주행

거리비의 약 20% 정도를 차지하는 것으로 나타나고 있다. 2005년 하반기부터 경유승용차가 시판되기 시작한 점을 고려한다면 향후 경유승용차의 구성비는 지속적으로 증가될 것으로 예상되며, 주행거리의 비율도 상대적으로 증가할 것으로 전망된다.

3. 제작차 허용배출량 기준과 기준배출량 산정

환기계산시 환경법(대기환경보전법 시행령, 1996~2006)에서 규제하고 있는 제작차 허용배출량 기준(g/km or g/kw·h)의 분석이 필수적이며, 이는 오염물질별 기준배출량(m²/h or m³/h)을 산정하여 소요환기량을 계산하기 위한 기초자료가 되기 때문이다.

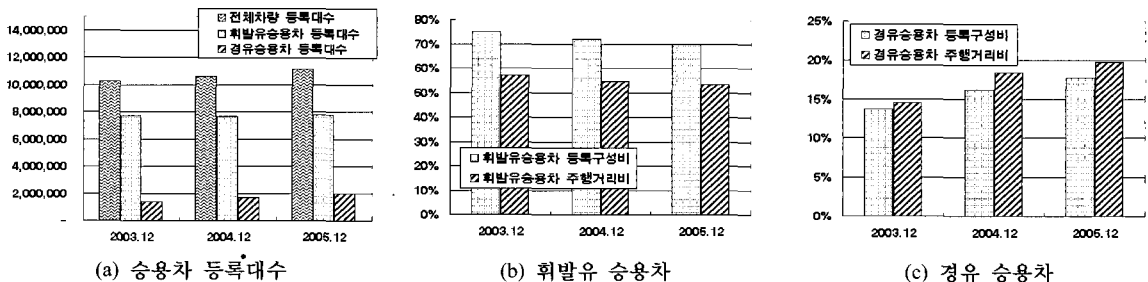


그림 3. 국내 승용차의 등록구성비 및 주행거리비 (교통안전공단, 2004~2006)

3.1 제작차 허용배출량 기준

1997년/2002년 한국도로공사에서는 표 2를 바탕으로 차종별 오염물질별 배출량 규제치를 적용할 수 있도록 환기설계기준을 마련하였다(한국도로공사, 1997/2002).

3.2 기준배출량(q₀)

현 환기설계기준에는 경유승용차에 관한 언급이 별도로 없으나, 향후 경유승용차의 보급이 확대될 경우를 대비하여 매연 및 CO/NOx의 기준배출량이 상이한 특성을 감안한 소요환기량을 재검토가 요구된다. 표 3은 표 2의 내용을 차종별로 구분한 다음 오염물질별 제작차

허용배출량 기준을 재정리한 것이다. 참고적으로 매연에 대해서는 차량의 중량별 보정을 하여 기준배출량을 적용하고 있다.

원칙적으로 단위차량당 기준배출량의 변동은 없어야 하나 승용차내 경유승용차 구성비의 증가에 따라 매연 등의 발생량은 증가하므로 소요환기량 계산을 위해 승용차 전체대수와 기준배출량의 곱으로 일괄 적용할 경우는 경유승용차의 구성비만큼 각각의 기준배출량을 선행 보간한 값을 사용할 수 있다. 경유승용차의 구성비에 따른 승용차의 오염물질별 기준배출량은 그림 4와 같다. 대체적으로 경유승용차의 증가는 매연 및 NOx의 오염

표 2. 환경부 고시 제작차 허용배출량 기준 (1996.9.14 환경부령 제24호)

(a) 휘발유, 가스 자동차

| 적용기간 | 차종구분 | 단위 | 매연 | CO | NOx | 측정방법 | 비고(건설교통부 기준 차종구분)* |
|-------------|------|------|----|------|------|--------|--------------------|
| 2000.1.1 이후 | 승용차 | g/km | 0 | 2.11 | 0.25 | CVS-75 | → 승용차 |
| | | | | 2.75 | 0.44 | | → Jeep, 8인승 이하 |

(b) 경유 자동차

| 적용기간 | 차종구분 | 단위 | 매연 | CO | NOx | 측정방법 | 비고(건설교통부 기준 차종구분) |
|-------------|---------|--------|------|------|------|--------|-------------------------------|
| 2000.1.1 이후 | 승용차 | g/km | 0.05 | 1 | 0.62 | CVS-75 | → 승용차 |
| | | | 0.11 | | 1.02 | | → Jeep, 8인승 이하 |
| 2004.1.1 이후 | 소형화물(가) | g/km | 0.06 | 1.27 | 0.64 | CVS-75 | → 소형버스(시험중량 1.7톤 이하) |
| | 소형화물(나) | g/km | 0.08 | 1.52 | 0.71 | | → 소형트럭(보통트럭 1~8톤중 소형화물 (가)이외) |
| 2000.1.1 이후 | 중량화물 | g/kw·h | 0.25 | 4.9 | 6 | D-13 | → 대형버스, 중형/대형/특수트럭 |
| | | | 0.1 | | | | → 시내버스 |

(주) 차종구분은 환경부의 차종구분과 건설교통부의 8개 차종구분(환기설계기준에서는 세미트레일러와 풀트레일러의 평균값을 고려하여 7개 차종으로 분류함)을 비교 정리한 것임.

표 3. 차종별 오염물질별 제작차 허용배출량 및 기준배출량

| 제작차 허용 배출량 기준 | 승용차 | | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|---------------|------|------|------|--------|------|--------|--------|--------|
| | 휘발유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 |
| | g/km | | g/km | g/kw·h | g/km | g/kw·h | g/kw·h | g/kw·h |
| 매연 | - | 0.05 | 0.06 | 0.25 | 0.08 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| CO | 2.11 | 1.0 | 1.27 | 4.9 | 1.52 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| NOx | 0.25 | 0.62 | 0.64 | 6 | 0.71 | 6 | 6 | 6 |

| 기준배출량 | | 승용차 | | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|-------|-------------------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| | | 휘발유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 |
| 매연 | m ² /h | 0 | 18.893 | 29.606 | 172.195 | 31.594 | 83.018 | 208.750 | 265.832 |
| CO | m ³ /h | 0.101 | 0.048 | 0.061 | 0.652 | 0.073 | 0.320 | 0.721 | 0.933 |
| NOx | m ³ /h | 0.010 | 0.024 | 0.025 | 0.642 | 0.027 | 0.315 | 0.710 | 0.919 |

| 매연의 중량별 기준배출량 | | 5톤 | 10톤 | 20톤 | 40톤 |
|-----------------------|--|----|-----|-----|-----|
| m ² /h·veh | | 72 | 160 | 235 | 275 |

표 4. 국내의 제작차 허용배출량 및 기준배출량 비교

(a) 유럽기준(PIARC, 2004)

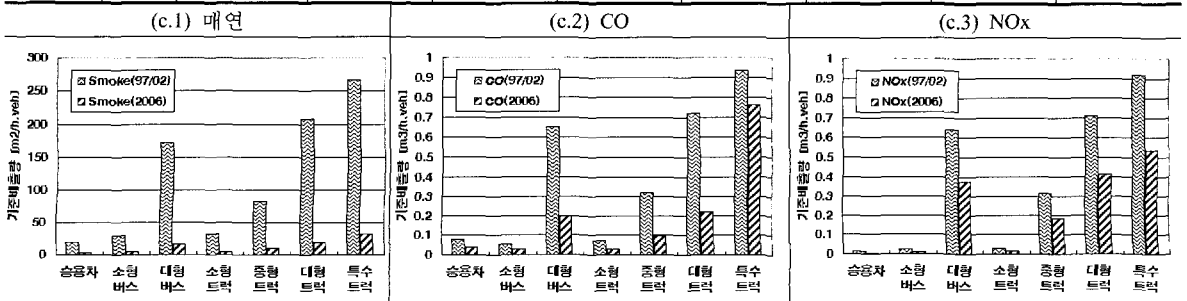
| 구분 | 차종 | 승용차 | | 소형버스 | 소형트럭 | 대형버스 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|--------|-----|------|-------|------------------|------|--------|------|------|------|
| | | 연료 | 휘발유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 |
| | 단위 | g/km | | g/km 혹은 g/kW·h * | | g/kW·h | | | |
| EURO-1 | 매연 | - | 0.14 | 0.4 | 0.4 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 0.68 |
| | CO | 2.72 | 2.72 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| | NOx | 0.97 | 0.97 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| EURO-2 | 매연 | - | 0.09 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| | CO | 2 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | NOx | 0.5 | 0.7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| EURO-3 | 매연 | - | 0.05 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | CO | 2.3 | 0.64 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 |
| | NOx | 0.15 | 0.5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| EURO-4 | 매연 | - | 0.025 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| | CO | 1 | 0.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| | NOx | 0.08 | 0.25 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 |

(b) 국내기준 (한국도로공사, 1997/2002, 환경부, 1996~2006)

| 구분 | 차종 | 승용차 | | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|-----------------------|-----|-------|-------|------|--------|------|--------|------|-------|
| | | 연료 | 휘발유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 | 경유 |
| | 단위 | g/km | | g/km | g/kW·h | g/km | g/kW·h | | |
| 한도공 97/02 (현기준) | 매연 | - | 0.05 | 0.06 | 0.25 | 0.08 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| | CO | 2.11 | 1 | 1.27 | 4.9 | 1.52 | 4.9 | 4.9 | 4.9 |
| | NOx | 0.25 | 0.62 | 0.64 | 6 | 0.71 | 6 | 6 | 6 |
| 환경부 2006 | 매연 | - | 0.025 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.03* |
| | CO | 1.06 | 0.5 | 0.63 | 1.5 | 0.63 | 1.5 | 1.5 | 4* |
| | NOx | 0.031 | 0.25 | 0.33 | 3.5 | 0.33 | 3.5 | 3.5 | 3.5* |

(c) 경유승용차(40%)를 고려한 국내 기준배출량 비교

| 구분 | | 승용차 (6:4)* | 소형 버스 | 대형 버스 | 소형 트럭 | 중형 트럭 | 대형 트럭 | 특수 트럭 |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 한도공 97/02 (현기준) | 매연 [m ² /h·veh] | 18.893 | 29.606 | 172.195 | 31.594 | 83.018 | 208.750 | 265.832 |
| | CO [m ³ /h·veh] | 0.080 | 0.055 | 0.652 | 0.072 | 0.320 | 0.721 | 0.933 |
| | NOx [m ³ /h·veh] | 0.015 | 0.022 | 0.642 | 0.027 | 0.315 | 0.710 | 0.919 |
| 환경부 2006 | 매연 [m ² /h·veh] | 2.624 | 4.112 | 15.813 | 4.388 | 10.626 | 18.250 | 31.562 |
| | CO [m ³ /h·veh] | 0.040 | 0.027 | 0.199 | 0.030 | 0.098 | 0.221 | 0.761 |
| | NOx [m ³ /h·veh] | 0.005 | 0.012 | 0.374 | 0.012 | 0.184 | 0.414 | 0.536 |



물질 발생량은 증가하나 CO의 오염물질 발생량은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

다음으로 표 4는 현 환기설계기준과의 비교연구를 위해 국내의 주요 제작차 허용배출량 기준과 국내의 기준배출량을 정리하였다. 표 4의 (a)의 * 표시는 매연 이외의 소형버스 및 소형트럭에 대한 배출량 단위는 [g/km]가 아닌 [g/kW.h]이며, (b)의 * 표시는 환경부 2006년 이후 제작차량에 대한 규제기준 적용시 중차량은 ND-13모드의 배출값을 적용하였으나, 특수트럭의 경우는 ETC모드의 배출량값 적용하였으며, (c)의 * 표시는 경유승용차를 고려한 경우로 승용차내 휘발유승용차대 경유승

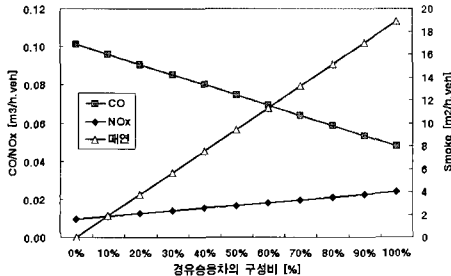


그림 4. 경유승용차의 구성비에 따른 기준배출량의 변화

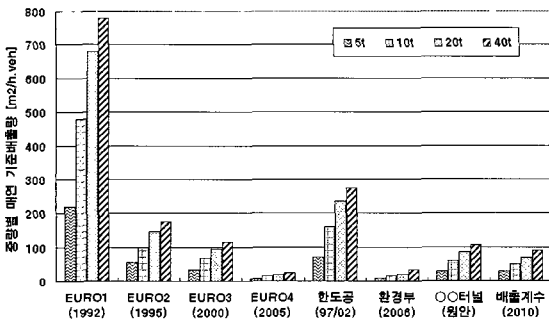


그림 5. 국내의 중량별 매연 기준배출량에 대한 주요 규제기준 비교

표 5. 휘발유 및 경유승용차의 오염물질 배출량 비교 (환경부/경유차환경위원회, 2003)

| 차종 | 연료 | 배기량 (천cc) | 오염물질 배출량(g/km) | | | | | CO ₂ (g/km) | 연비 (km/ℓ) |
|--------|-----|-----------|----------------|-------|------|-------|-------|------------------------|-----------|
| | | | 계 | CO | HC | NOx | PM | | |
| 아반떼 XD | 경유 | 2.0 | 0.51 | 0.129 | 0.02 | 0.326 | 0.033 | 170.0 | 15.5 |
| | 휘발유 | 2.0 | 0.31 | 0.24 | 0.03 | 0.04 | - | 223.0 | 10.5 |
| 라비타 | 경유 | 1.5 | 0.62 | 0.16 | 0.01 | 0.417 | 0.036 | 163.4 | 16.4 |
| | 휘발유 | 1.5 | 1.02 | 0.92 | 0.03 | 0.07 | - | 213.7 | 10.9 |

용차의 구성비를 6:4로 가정하여 기준배출량을 산출하였다.

그림 5는 국내의 주요 배출량 규제기준에 대하여 현 국내 환기설계기준과 비교하기 위하여 매연의 기준배출량을 중량별로 재정리하여 비교한 그림이다. 중량별 매연의 기준배출량 수준을 살펴보면, 현재의 환기설계기준은 EURO-2의 규제기준보다는 다소 높은 수준을 나타내고 있으며, 환경부의 2006년 이후 제작차 허용배출량 기준을 적용할 경우는 EURO-4의 규제기준과 비슷한 수준을 보이고 있다. 현재 국내에서 생산되는 주요 승용차들이 EURO-3~4의 규제기준에 맞추어 출고됨을 고려할 때, 국내 환기설계기준상의 매연의 기준배출량은 다소 높은 편으로 해석된다.

4. 경유승용차 도입에 따른 환기검토 사례연구

앞서 그림 4에서 살펴본 것처럼 차량의 오염물질 배출 특성 측면에서 경유엔진은 휘발유엔진에 비해 일산화탄소의 배출량은 적고, 질소산화물 및 입자상물질의 배출량은 많은 것으로 나타난다. 실제 EURO-3 차량을 기준으로 한 비교시험 자료(환경부, 2003)를 살펴보면, 표 5에서와 같이 CO와 HC는 휘발유차의 1/2~1/5 수준이며, NOx는 휘발유차 보다 6~8배(EURO-4 만족차량은 3~4배) 더 배출되고 있다. 일반적으로 짧은 도로터널에서 저속시 CO에서 환기용량이 결정되는 경우가 많으나, 장대터널에서는 매연 및 NOx에 의해 환기용량이 결정되는 경우가 많으므로 경유승용차의 증가는 향후 장대터널의 설계시 더욱 큰 영향을 미치게 될 것이다. 경유승용차의 보급에 따른 소요환기량 변화를 검토하기 위한 사례로 전형적인 고속도로상의 2차로 도로터널을 대상으로 선택하였다.

표 6. 입력자료

(a) 터널제원

| 구분 | 대상터널(Case 1) | 기타 계산조건 |
|-------------------------|------------------|---------------------------------|
| 터널연장 [km] | 2 | 터널내 공기밀도: 1.2 kg/m ³ |
| 내공단면적 [m ²] | 75.0 | 차도내 벽면마찰계수: 0.025 |
| 대표직경 [m] | 8.731 | 터널입구 층적손실계수: 0.6 |
| 평균표고 [m] | 200 | 자연저항풍의 크기: -2.5 m/s(역풍) |
| 중단경사 [%] | 상하행선별 ±1.0 | 화재에 대한 제연풍속: 2.5 m/s at 20MW |
| 차선수 [lane(s)] | 편도 2차로 | 도로의 교통용량: 2200 pc/h·lane |
| 환기팬 규격 [mm] | Ø1030(× 30 kW) | 제트팬 송압계수(K): 1 / 1.1 = 0.9 |

(b) 교통량제원

| 차종구분 | 승용차 | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 | AADT | 대형차 혼입률 |
|------------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------|---------|
| 구성비 [%] | 56.9% | 7.3% | 4.2% | 6.4% | 14.9% | 6.9% | 3.4% | 100.0% | 29.4% |
| PCE [pc/대] | 1 | 1 | 1.5 | 1 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 1.164 | |

(c) 터널내 오염물질별 허용기준

| 차속 [km/h] | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 매연 [m ⁻¹] | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| CO [ppm] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| NOx [ppm] | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |

(d) 승용차내 경유승용차의 구성비에 따른 기준배출량

| 기준배출량 | 승용차(x: 경유승용차 구성비 [%]) | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|-------------------------|-----------------------------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| 매연 [m ² /h] | y_smoke = 18.89x | 29.606 | 172.195 | 31.594 | 83.018 | 208.750 | 265.832 |
| CO [m ³ /h] | y_co = -0.05328x + 0.1013 | 0.061 | 0.652 | 0.073 | 0.320 | 0.721 | 0.933 |
| NOx [m ³ /h] | y_nox = 0.01428x + 0.009653 | 0.025 | 0.642 | 0.027 | 0.315 | 0.710 | 0.919 |

4.1 대상터널 및 입력제원(Case 1)

사례연구를 위한 대상터널의 제원, 교통량과 터널내 환경검토 기준은 다음의 표 6과 같다. 터널제원은 일반적인 고속도로상의 터널단면, 중단경사(구배), 표고(계획고)로 결정하였으며, 교통량은 2001년 교통량 통계연보상의 전국 고속도로의 평균 차량구성비를 적용하였다(건설교통부, 2002). 환기팬의 규격은 Ø1030형 제트팬을 선정하였고, 기타 계산조건 및 입력계수값은 현 환기설계기준(건설교통부, 2004, 한국도로공사, 1997/2002)을 참고하였으며, 단 터널내 풍속을 고려한 제트팬 분류효율은 안전율을 고려하여 1.1을 적용하였다(동·중·서일본고속도로주식회사, 2006).

4.2 Case 1의 환기검토 결과

대상 터널에 대한 환기검토 결과를 표 7~표 8에 나타내었으며, 현 설계기준(경유승용차 미고려)에 의한 제트팬 설치대수는 18대이나, 현재 차량등록대수를 고려한 경유승용차의 구성비 20%를 고려하면 제트팬 설치대수는 20대로 증가된다. 또한 유럽시장과 같은 경유승용차 보급을 40%를 적용할 경우의 설치대수는 22대로 늘어난다. 따라서 현 환기설계기준은 향후 목표연도에 대한 경유승용차의 확대보급을 고려하여 추가적인 환기용량을 검토할 필요가 있으며, 보급률 40%에서의 분석대상 터널(Case 1)에 대한 추가 소요환기량은 56.4 m³/s, 추가 제트팬 대수는 4대 정도가 더 필요한 것으로 분석되었다(표 8 참조). 여기서 추가 소요환기량은 차량속도별 최대 소요환기량을 나타내고 있는데, 제트팬 환기방식

표 7. 97/02 한국도로공사 환기설계기준에 따른 환기검토 결과 요약

| 경유승용차 구성비 | 상향경사 방향 | | | | 하향경사 방향 | | | |
|-----------|-------------------|--------|-----------|--------|-------------------|--------|-----------|--------|
| | Qreq_MAX | 환기용 JF | 방재용 JF | 설치용 JF | Qreq_MAX | 환기용 JF | 방재용 JF | 설치용 JF |
| | m ³ /s | EA | EA | EA | m ³ /s | EA | EA | EA |
| 0%(현기준) | 619.2 | 17.5 | 13.1 (+2) | 18 | 294.4 | 8.2 | 13.1 (+2) | 16 |
| 10% | 633.3 | 18.7 | 13.1 (+2) | 19 | 295.9 | 8.5 | 13.1 (+2) | 16 |
| 20% | 647.4 | 19.6 | 13.1 (+2) | 20 | 297.3 | 8.9 | 13.1 (+2) | 16 |
| 30% | 661.5 | 20.9 | 13.1 (+2) | 21 | 298.8 | 9.2 | 13.1 (+2) | 16 |
| 40%(본연구) | 675.6 | 22.0 | 13.1 (+2) | 22 | 300.3 | 9.7 | 13.1 (+2) | 16 |
| 50% | 689.6 | 23.1 | 13.1 (+2) | 24 | 301.7 | 10.0 | 13.1 (+2) | 16 |
| 구분 | 소요환기량 분포 | | | | 제트팬 대수 분포 | | | |
| 분석결과 그래프 | | | | | | | | |

(주) 방재용 제트팬의 (+2)는 화재시 소손을 고려하여 1개소 2대를 고려한 대수임

표 8. 주행속도별 환기검토

| 구분 | 경유승용차 구성비 : 0%(현 기준) | 경유승용차 구성비 : 40%(본 연구) |
|----------|------------------------------|---|
| 소요환기량 분포 | | |
| 비고 | 최대값: 619.2 m ³ /s | 최대값: 675.6 m ³ /s(56.4 m ³ /s 증가) |
| 제트팬대수 분포 | | |
| 비고 | 환기용: 18대, 방재용: 16대 | 환기용: 22대, 방재용: 16대(4대 증가) |

표 9. 규제기준에 따른 환기검토

| 구분 | 소요환기량 | 제트팬 대수 |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| EURO-2 규제기준 | <p>소요환기량 [m³/s]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> | <p>제트팬 대수 [EA]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> |
| 비고 | 547 m³/s(129 m³/s 감소) | 환기용: 9대, 방재용: 16대(설치대수 6대 감소) |
| EURO-3 규제기준 | <p>소요환기량 [m³/s]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> | <p>제트팬 대수 [EA]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> |
| 비고 | 384 m³/s(292 m³/s 감소) | 환기용: 5대, 방재용: 16대(설치대수 6대 감소) |
| EURO-4 규제기준 | <p>소요환기량 [m³/s]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> | <p>제트팬 대수 [EA]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> |
| 비고 | 266 m³/s(410 m³/s 감소) | 환기용: 1대, 방재용: 16대(설치대수 6대 감소) |
| 환경부 2006 규제기준 | <p>소요환기량 [m³/s]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> | <p>제트팬 대수 [EA]</p> <p>주행속도 [km/h]</p> |
| 비고 | 227 m³/s(449 m³/s 감소) | 환기용: 2대, 방재용: 16대(설치대수 6대 감소) |

(주) 괄호()안의 숫자는 원안(경유승용차 40%를 고려한 현 환기설계 기준)대비 증감을 나타냄.

을 적용할 경우 최소 내공단면적이 61.92 m²에서 67.56 m²으로 5.64 m²이 더 필요함을 의미한다. 그러나 본 사례연구에서는 내공단면적이 75.0 m²을 확보하고 있으므로 내공단면적의 추가증가는 필요가 없는 것으로 분석된다.

다음으로 표 9는 목표연도의 경유승용차 구성비를 40%로 가정할 경우, 주요 규제기준별 소요환기량 및 제트팬 대수를 현재의 기준(동일한 경유승용차 구성비 적용)과 비교 분석하였다. 현 환기설계기준과 비교할 경우, EURO-1 규제기준 수준은 제트팬 방식의 적용이 불가능하여 과도한 것으로 분석되었으며, EURO-2~3 규제기준은 현 환기설계기준보다 다소 낮은 소요환기량과 제트팬 대수를 나타내었다. 끝으로 EURO-4 및 환경부 '2006년 이후' 규제기준은 제트팬 대수가 2대 미만으로 나타나 급격한 소요환기량의 감소 및 제트팬 용량을 감소시키는 것으로 분석되었다.

4.3 현 설계단계에 있는 실제터널의 기준배출량에 의한 환기검토(Case 2)

현재 설계되고 있는 국내 최장대 도로터널의 원안 설계시 차령을 고려한 새로운 기준배출량이 제시되어 적용되었으며(한국도로공사, 2006), 기준배출량은 차령계

수를 고려하기 위해 제작차(2006년 이후 배출량)와 운행차(2000년~2006년 배출량)를 구분하고 등록차량대수에 따른 해당연도의 차종별 구성비만큼 각각의 배출량에 대한 기중평균값을 기준배출량으로 산출하였다. 그러나 중량별 매년 기준배출량의 보정을 고려하지 않고 있으며 경유승용차는 고려되지 않았다.

Case2는 Case1의 터널제원에 대하여 기준배출량만 변경하여 검토한 경우이다. 실제터널의 기준배출량은 경유승용차의 구성비를 고려하고 있지 않지만 소요환기량 및 제트팬 대수를 고려할 때, 경유승용차의 구성비를 40%로 고려한 EURO-3기준과 비슷한 환기검토결과를 보이는 것으로 분석된다.

4.4 배출계수에 의한 환기검토(Case 3)

현재까지 배출계수법에 의해 설계된 국내사례는 없지만, 부분적인 적용성 연구는 2000년에 건설기술연구원에서 진행된 적이 있다(한국도로공사/한국건설기술연구원, 2000). 그러나 목표연도까지 차령 및 차종구성에 근거한 비교적 정확한 배출계수를 추정하는 것은 어려움이 있으므로 배출계수의 개념은 비교적 가까운 목표연도에 대한 환기검토에만 적용이 가능하다.

배출계수에 관한 유일한 기존 연구결과(정용일 Unknown)

표 10. 설계단계 실제터널의 기준배출량 및 환기검토 결과

(a) 기준배출량(한국도로공사, 2006)

| 기준배출량 | 승용차 | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 매연 [m ² /h] | 0 | 18.900 | 69.120 | 20.420 | 33.330 | 76.450 | 98.930 |
| CO [m ³ /h] | 0.057 | 0.039 | 0.320 | 0.039 | 0.131 | 0.354 | 0.458 |
| NOx [m ³ /h] | 0.001 | 0.022 | 0.509 | 0.022 | 0.250 | 0.563 | 0.729 |

(b) 환기검토 결과

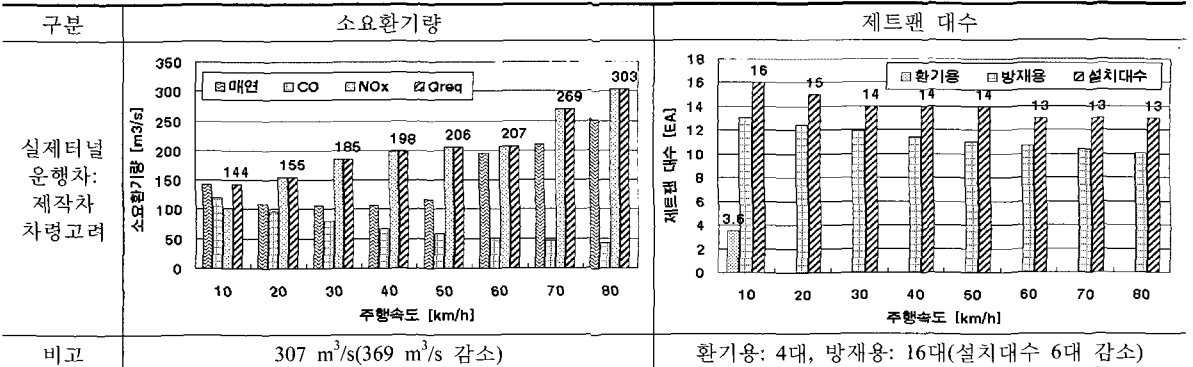


표 11. 배출계수 및 교통량(차령구성비) 추정 모델(정용일의 배출계수 연구 참조)

| 차종 | 승용차(경유 보정) | | | | 소형버스 | | | 소형트럭 | | | 대형차량 | | | 교통량(차령구성비) 추정 모델 $f(x) = a \cdot \exp(-0.5 \cdot (\ln(x/x_0)/b)^2)$ |
|------|------------|---------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|--|
| 연료 | 경유차 | 휘발유+경유 | | | 경유 | | | 경유 | | | 경유 | | | |
| 년도 | 구성비 | 매연 | CO | NOx | 매연 | CO | NOx | 매연 | CO | NOx | 매연 | CO | NOx | |
| 2000 | 0 | 0.05 | 2.61 | 0.25 | 0.11 | 2.11 | 1.02 | 0.14 | 2.11 | 1.06 | 0.1 | 3 | 7 | |
| 2001 | 0 | 0.05 | 2.61 | 0.25 | 0.11 | 2.11 | 1.02 | 0.14 | 2.11 | 1.06 | 0.1 | 3 | 7 | |
| 2002 | 0 | 0.01 | 2.61 | 0.25 | 0.07 | 0.8 | 0.65 | 0.1 | 0.95 | 0.78 | 0.1 | 3 | 7 | |
| 2003 | 0 | 0.01 | 2.61 | 0.19 | 0.07 | 0.8 | 0.65 | 0.1 | 0.95 | 0.78 | 0.1 | 2.1 | 5 | |
| 2004 | 0 | 0.01 | 2.61 | 0.19 | 0.07 | 0.8 | 0.65 | 0.1 | 0.95 | 0.78 | 0.1 | 2.1 | 5 | |
| 2005 | 0.05 | 0.0025 | 2.5115 | 0.2055 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.1 | 2.1 | 5 | |
| 2006 | 0.1 | 0.0025 | 1.229 | 0.0646 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.1 | 2.1 | 5 | |
| 2007 | 0.2 | 0.005 | 1.148 | 0.0852 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | |
| 2008 | 0.3 | 0.005 | 1.148 | 0.0852 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | |
| 2009 | 0.4 | 0.01 | 0.986 | 0.1264 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | |
| 2010 | 0.45 | 0.01125 | 0.9455 | 0.1367 | 0.025 | 0.5 | 0.25 | 0.06 | 0.74 | 0.39 | 0.02 | 1.5 | 3.5 | |

| | |
|------|------------|
| a | 0.0885 |
| b | 0.0028 |
| x0 | 2000.3611 |
| Rsqr | 0.85507066 |

표 12. 년도별 차령구성비를 고려한 허용기준 (2010년)

| 허용기준 | 승용차 | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | g/km | g/km | g/kW·h | g/km | g/kW·h | g/kW·h | g/kW·h |
| 매연 | 0.019 | 0.060 | 0.076 | 0.092 | 0.076 | 0.076 | 0.076 |
| CO | 2.019 | 1.030 | 2.243 | 1.180 | 2.243 | 2.243 | 2.243 |
| NOx | 0.177 | 0.565 | 5.269 | 0.674 | 5.269 | 5.269 | 5.269 |

표 13. 배출계수에 의한 기준배출량 및 환기검토 결과

(a) 기준배출량(2010년)

| 기준배출량 | 승용차 | 소형버스 | 대형버스 | 소형트럭 | 중형트럭 | 대형트럭 | 특수트럭 |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 매연 [m ² /h] | 7.872 | 12.336 | 53.252 | 13.164 | 32.504 | 63 | 85.416 |
| CO [m ³ /h] | 0.097 | 0.049 | 0.298 | 0.057 | 0.147 | 0.33 | 0.427 |
| NOx [m ³ /h] | 0.007 | 0.022 | 0.564 | 0.026 | 0.277 | 0.623 | 0.807 |

| 매연의 중량별 기준배출량 | 5톤 | 10톤 | 20톤 | 40톤 |
|-----------------------|----|-----|-----|-----|
| m ² /h·veh | 30 | 50 | 70 | 90 |

(b) 환기검토 결과

| 구분 | 소요환기량 | 제트팬 대수 |
|-----------------------------|---|-------------------------------|
| 기준 연구에 의한 배출계수 적용 (2010년기준) | | |
| 비고 | 343 m ³ /s(333 m ³ /s 감소) | 환기용: 4대, 방재용: 16대(설치대수 6대 감소) |

를 인용하여, 교통량(차량구성비) 추정 모델은 1985년~2005년까지의 현재 등록차량을 대상으로 LOG NORMAL 회귀식에 의한 결과값을 2000년~2010년 까지 동일비율로 적용하였다. 그리고 경유승용차는 2005~2010년까지 5~45%로 증가하는 것으로 가정하여 2010년을 기준으로 한 기준배출량을 선정하였다.

Case3 역시 Case1의 터널제원에 대하여 기준배출량만 변경하여 검토한 경우이다. 단, Case1의 경유승용차 구성비를 단계적으로 5%~45%로 증가시켰으며, Case2처럼 분석년도(2010년)를 기준으로 교통량 모델의 회귀식과 차령에 따른 배출계수들의 가중평균을 고려하여 표 12와 같은 허용기준을 작성하였으며, 이를 표 13의 (a)처럼 다시 기준배출량으로 산출하였다.

Case 3의 분석결과 소요환기량 및 제트팬 대수를 고려할 때, 경유승용차의 구성비를 40%로 고려한 EURO-3 규제기준 수준보다는 다소 낮으나, 실제터널의 기준배출량에 의한 환기검토(Case 2) 결과보다는 다소 높은 환기량 및 환기용량이 필요한 것으로 분석되었다. 그러나 전체적으로 고려해 볼 때 실제터널의 기준배출량에 의한 환기검토(Case 2)와 배출계수에 의한 환기검토(Case 3)는 모두 EURO-3 규제기준의 배출량 수준과 비슷한 분포를 나타내었으며, 소요환기량 및 환기용량에는 별 차이가 없는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 경유승용차의 도입에 따른 터널 환기 영향 검토를 수행하였다. 경유승용차 구성비의 변화를 고려한 기준배출량별 소요환기량 및 환기설비용량 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 국내 경유승용차의 보급에 따라서 승용차내 경유승용차의 구성비는 향후 계속 증가될 전망이므로 터널 환기설계시 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.
2. 고속도로상의 전형적인 터널(연장 2 km, 2차선)을 대상으로 하여 현 환기설계기준상의 기준배출량과 경유승용차 구성비 증가를 고려하여 분석한 Case 1은, 향후 경유승용차의 구성비가 40%로 증가될 경우 현 환기설계 기준보다 4대의 제트팬(Ø1030) 추가설치가 필요한 것으로 분석되었다.

3. 현재 국내 환기설계기준에 적용하고 있는 환경부의 제작차 허용배출량 기준은 EURO-2(1997) 규제기준보다 높은 편으로 조사되었으며, 2006년 이후 적용되는 제작차 허용배출량 기준은 EURO-4(2005) 규제기준과 비슷한 수준으로 조사되었다.
4. 차령은 고려하였으나 경유승용차 보급율을 감안하지 않은 기준배출량을 적용하고 있는 현 설계단계의 장대터널 Case2와, 차령 및 경유승용차를 고려한 배출계수에 의한 기준배출량을 적용한 Case3은 모두 EURO-3(2000) 규제기준과 비슷한 수준의 환기특성을 나타내는 것으로 분석되었다.
5. 경유승용차의 구성비가 지속적으로 증가되고 매년 배출량에 대한 규제가 지속적으로 강화됨에 따른 매년 배출량은 감소할 전망이므로 터널환기 계획시 차령, 차중구성비, 매년 배출량 변화추이를 감안한 배출계수에 기초한 최적 소요환기량 및 설비용량의 결정이 요구되며, 현 설계기준 또한 이를 고려한 개정이 시급히 필요하다.

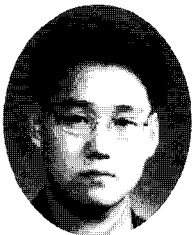
감사의 글

본 연구는 2007년도 건설교통부 산학연 중점연구사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업 -도로터널 환기시스템연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

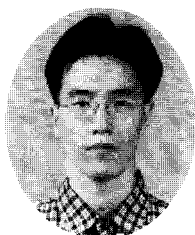
1. 건설교통부 (1992~2000(2004수정판 포함)), 도로용량 편람.
2. 건설교통부 (2002), 2001년도 도로교통량통계연보.
3. 건설교통부/건설기술연구원 (2006), 2006년도 교통안전 연차보고서, 11-1500000-000164-10.
4. 교통안전공단 교통안전연구원 (2004~2006), 2003~2005년도 자동차 주행거리 실태조사.
5. 동·중서 일본고속도로 주식회사 (2006), 설계요령 제3집 터널편, pp. 54-57.
6. 자동차부품산업진흥재단 (2003), 경유승용차에 의한 환경영향평가 및 기술대응과제, 연구보고서 KAP 03-05, pp. 1-100.
7. 정용일(Unknown), 자동차공학특론([Http://www.AutoEnv.org](http://www.AutoEnv.org))
8. 한국도로공사 (1997~2002), 고속도로 터널 환기시설 설계기준.

9. 한국도로공사 (2006), 고속국도 제60호선 ○○~○○ (○○○~○○간) 건설공사 제14공구 ○○터널 환기 및 방재시설 공사[기계설비보고서]
10. 한국도로공사/한국건설기술연구원 (2000), 도로형태에 따른 최적환기량 산정 및 단계건설에 관한 연구(II단계) 최종보고서, pp. 3-1~3-90
11. 환경부/경유차환경위원회 (2003), 경유차 대기오염 저감대책(경유승용차 배출허용기준 포함), 경유차 대기오염 저감대책 공개토론회, pp. 1-40.
12. 환경부법령 (1996~2006), 대기환경보전법, 대기환경보전법시행령, 대기환경보전법시행규칙.
13. BOSCH 사 (1999), Diesel Accumulator Fuel-Injection System Common Rail, pp. 22-23.
14. BOSCH 사 (2004), Clean Diesel Engines with Innovative Injection Systems, UNEP/IEA Joint Workshops, pp. 1-9.
15. Schindler, K.-P. (2006), "Accelerating light-duty diesel sales in the U.S. market", 12th Diesel Engine- Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference August 20-24, Detroit, Michigan, pp. 1-36.
16. PIARC (2004), Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation, (C5) 05.14.B, pp. 21-23.



김 효 규
(주)세익엠이씨
차장

E-mail: xram77@chol.com



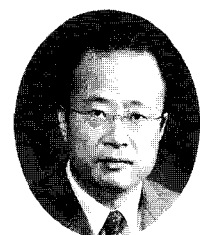
송 석 헌
(주)세익엠이씨
이사

E-mail: stoneman100@hanmail.net



김 남 영
(주)삼보기술단
상무

E-mail: nykim@shinbiro.com



이 창 우
동아대학교
지구환경공학부
교수

E-mail: cwlee@daunet.donga.ac.kr