한국대기환경학회지 제 24 권 제 1 호
J. KOSAE Vol. 24, No. 1 (2008) pp. 72~82
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

국내 이동오염원에서 발생되는 벤젠 배출량 산정

Estimation of Benzene Emissions from Mobile Sources in Korea

이주형 · 차준석* · 홍지형 · 정동일 · 김지영
국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과

(2007년 9월 27일 접수, 2007년 12월 13일 채택)

Ju-Hyoung Lee, Jun-Seok Cha*, Ji-Hyung Hong, Dong-Il Jung and Ji-Young Kim
Air Pollution Cap System Division, Environmental Cap Management Department
National Institute of Environmental Research

(Received 27 September 2007, accepted 13 December 2007)

Abstract

Benzene is a very harmful and toxic compound known as human carcinogen by all routes of exposure. Owing to the risky feature of benzene, several countries such as Japan, UK and EU have established the ambient air quality standard and protect from that risk of it. Korea also has designated it as one of the criteria air pollutants and established the concentration limit (5 $\mu g/m^3$) in the air and is going to apply the standard from 2010. Benzene is emitted from various sources such as combustion plants, production processes, waste treatment facilities and also automobiles. Mobile source is known as one of the major emission sources of benzene. In this study, we estimated the domestic emissions of benzene from mobile source and compared the results with those of advanced countries. Mobile source was divided into 2 categories, i.e., on-road source and non-road source. The total emissions of benzene from mobile source were estimated as 3,106 tons/yr and 1,612 tons/yr was emitted from on-road source and 1,494 tons/yr was from non-road source. Emission ratio of benzene from on-road source showed that 80.0% was from passenger cars, 10.1% was from taxis, 7.2% was from light-duty vehicles, 2.5% was from heavy-duty vehicles and 0.2% was from buses. In the case of non-road source, the distribution showed that 66.3% was from construction machineries, 14.5% was from locomotives, 11.7% was from ships, 7.1% was from agriculture equipments and 0.5% was from aircrafts. The cold-start emissions were estimated as 942 tons/yr and this value was almost 1.5 times greater than that for hot engine emissions (608 tons/yr). In addition, the fuel-based distribution was 65.9%, 31.1% and 2.8% from gasoline, LPG and diesel vehicles, respectively. The emission ratio from mobile source occupied 65% and 30% of total benzene emissions in USA and UK, respectively. In case of Korea, the emission ratio of benzene from mobile source occupied 29% (15% from on-road source, 14% from non-road source) which showed similar value with UK.

Key words : Benzene, Benzene emissions, Mobile sources, On-road, Non-road, Cold start

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7385, E-mail : js11cha@me.go.kr

1. 서 론

상온에서 벤젠(C_6H_6)은 무색, 투명하고 가연성과 자극성이 강한 휘발성유기화합물의 일종으로 대기 중에서 일정농도 이상으로 존재 시 암과 백혈병을 유발시키는 맹독성의 물질이다(Ellenhorm and Barceloux, 1987). 또한, 벤젠은 일반 대기환경 중에 폭 넓게 분포되어 있으며, 인체 노출의 주요 경로는 흡기노출(inhalation exposure)인 것으로 알려져 있다(조완근과 문경조, 1999). 국제 암 연구소(International Agency of Research on Cancer, IARC)와 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 등은 벤젠을 인간이 대기 중에서 1 μg/m^3 (0.03 ppb)의 농도로 평생 노출될 경우 100만 명 중 6명꼴로 발암을 일으키는 '발암성 물질'로 규정하고 있다. 이러한 위해성으로 인해 현재 일본, 영국 및 EU에서는 각각 벤젠의 대기환경기준을 연평균농도 기준으로 3 μg/m^3 (0.94 ppb), 5 μg/m^3 (1.5 ppb), 5 μg/m^3 (1.5 ppb)으로 설정하여 관리하고 있다.

환경부(2006) 자료에 따르면, 2005년 국내 16개 지점의 광화학오염물질측정망에서 측정된 벤젠의 연평균 농도는 0.020 ppb (부산 덕천동)~1.501 ppb (인천 연희동) 수준으로 전체평균은 0.84 ppb를 나타내고 있다. 대체적으로 교통량이 상대적으로 많은 수도권지역의 측정소와 대구 남산동에서 높은 농도를 나타내고 있으며 이는 자동차 배출가스 및 휘발유의 증발에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 해석되고 있다.

이동오염원을 통한 벤젠의 배출량은 국가마다 차이가 있으나, 대부분의 국가에서는 전체 배출량의 30% 이상을 나타내고 있는 실정이다. 이동오염원을 통한 벤젠의 배출량 산정 연구는 유럽을 중심으로 엔진 가열(hot engine emissions)과 엔진 미가열(cold start emissions)로 구분하여 수행되고 있으며 특히, 엔진 미가열 운전 상황에서는 대기의 온도가 배출량에 민감하게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Laurikko *et al.*, 1995). 최근 연구결과에 따르면, 엔진 미가열 시 배출량은 연료 연소, 대기 온도 및 시험 운전모드 등 3가지의 인자들에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타나고 있다(Akko and Nylund, 2003; Weilenmann, 2001; Joumard *et al.*, 2000). Weilenmann *et al.* (2005) 등은 휘발유 및 경유 자동차를 대상으로 엔진 미가열 운전상황에서 다양한 대기 온도(+23°C, −7°C, −20°C)에 따른 벤젠의 배출량 변화에 대한 연구결과를 발표하였는데 이 결과에 따르면 대기 온도가 +23°C일 때보다 −20°C일 때 더 많은 양의 벤젠이 배출되는 것으로 조사되었으며 또한 대부분의 경우 휘발유 자동차가 경유 자동차보다 벤젠 배출량이 더 높은 것으로 조사되었다. 또한, Heeb *et al.* (2003) 등은 자동차 연식에 따른 벤젠 배출량의 상관관계에 대한 연구 결과 대부분 오래된 연식의 자동차일수록 더 많은 벤젠이 배출되고 있는 것으로 발표한 바 있다.

국내 환경부에서도 벤젠의 대기환경기준 설정을 위한 조사연구를 거쳐 연평균 기준 농도 5 μg/m^3 (1.5 ppb)으로 설정하여 2010년부터 이 기준을 적용할 예정으로 있다. 대기환경기준 적용을 통한 대기 중의 농도 규제를 위해서는 벤젠의 배출원에 대한 관리가 중요하며 이를 위해 배출원별 인벤토리 작성도 또한 필요하다. 특히, 벤젠의 주요한 배출원 중의 하나인 이동오염원을 통한 벤젠의 배출량을 조사하는 일은 대기 중 벤젠 농도의 효과적 관리를 위해 매우 중요한 일이라 사료된다.

본 연구에서는 국내 도로 이동오염원(승용차, 승합차, 택시 및 버스)을 대상으로 기축된 국내·외의 자료 등을 활용하여 2004년도 국내 도로 이동오염원 벤젠 배출량을 산정하고 운전상황(엔진 가열, 엔진 미가열 및 증발)에 따른 차종별, 연료별 및 시·도별 벤젠 배출기여도를 산정하였다. 또한 2004년 국내 비도로 이동오염원(철도차량, 선박, 항공기, 농기계 및 건설장비)에 대한 조사도 함께 수행하여 국내 이동오염원에서의 벤젠 배출량 및 배출기여도를 제시하였으며, 이를 선진국의 자료와도 비교 검토하였다.

2. 도로 및 비도로 오염원의 배출량 산정 방법

2.1 도로 이동오염원

국내 도로 이동오염원에서의 벤젠 배출량은 Ntziachristos and Samaras (2000)가 제시한 산정 방법을 기초로 하였으나, 국내 차량 및 기상인자를 고려하는 과정에서 다소 다른 방식이 적용되었으며 전체적으

로는 아래에서 제시하고 있는 식(1)과 같이 엔진 가열, 엔진 미가열 및 증발 배출로 구분하여 산정하였다.

$$E_{onroad,t}=E_{hot}+E_{cold}+E_{eva} \quad (1)$$

$E_{onroad,t}$=도로 이동오염원을 통한 벤젠 총 배출량 (g/yr)
E_{hot} =엔진 가열 시 벤젠 배출량(g/yr)
E_{cold}=엔진 미가열 시 벤젠 배출량(g/yr)
E_{eva} =증발(휘발유 자동차) 시 벤젠 배출량(g/yr)

자동차의 벤젠 배출계수는 아래에 제시된 식(2)에 의해 차종별 VOCs 배출계수에 VOCs 중 벤젠 질량 함량/100을 곱하여 산출하였다. VOCs 배출계수는 교통환경연구소에 의해 개발된 주행속도 및 연식에 따른 차종별 배출계수(류정호 등, 2005, 2004, 2003)를 참고하였으며, VOCs 중 벤젠 함량 기준은 USEPA SPECIATE 4.0 version (U.S. EPA, 2007a)에서 제시한 수치를 토대로 하여 차종별, 연료별로 산출하였다.

$$EF_{benzene,j}=EF_{VOCs,j} \cdot G_j \quad (2)$$

$EF_{benzene,j}$=차종 j의 연식별 벤젠 배출계수(g/km · veh.)
$EF_{VOCs,j}$ =차종 j의 연식별 VOCs 배출계수(g/km · veh.)
G_j=차종 j의 VOCs 중 벤젠 질량 함량/100
(휘발유 및 경유: 1.62%, LPG: 2.42%, CNG: 0.11%)

2.1.1 엔진 가열 (hot engine emissions)

엔진 가열시의 벤젠 배출량은 Ntziachristos and Samaras (2000)가 제시한 방법을 기초로 하되 국립환경과학원(2004)에서 운영중인 대기보전정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 도로별, 시 · 도별, 차종별 자동차 등록대수 및 평균 주행거리 등의 자료(2004년)를 이용하여 아래에 제시된 식(3)에 의해 산정하였다.

$$E_{hot,j}=VKT_j \cdot VN_j \cdot EF_{benzene,j} \quad (3)$$

$E_{hot,j}$ =차종 j의 엔진 가열 시 벤젠 배출량(g/yr)
VKT_j=차종 j의 평균 주행거리(km/yr)
VN_j =차종 j의 등록대수(veh.)
$EF_{benzene,j}$=차종 j의 연식별 벤젠 배출계수(g/km · veh.)

위의 식(3)에서 벤젠 배출계수는 주행속도와 자동차의 연식에 따라 차이를 나타내는데 국립환경과학원 교통환경연구소에서는 이를 고려하여 VOCs 배출계수를 개발한 바 있다. 또한 시 · 도별 자동차의 벤젠 배출량을 산정하기 위해서는 시 · 도별 평균 주행속도를 고려하여야 하는데 교통안전공단 자료(2004년)에 따라 광역시의 경우, 서울 20.50 km/hr, 부산 28.61 km/hr, 대구 25.91 km/hr, 인천 23.60 km/hr, 광주 28.53 km/hr, 대전 25.00 km/hr, 울산 40.50 km/hr을 적용하였고, 그 외 기타 지역은 7개 도시 전체의 도로구간별 주행속도의 평균값인 27.52 km/hr을 적용하였다.

2.1.2 엔진 미가열 (Cold start emissions)

엔진 미가열 시의 벤젠 배출량은 Ntziachristos and Samaras (2000)가 제안한 산정방법을 기초로 하고 국내 기상인자 등을 고려하여 아래 식(4)에 의해 산출하였다.

$$E_{cold,j}=\beta_j \cdot m_j \cdot e^{hot}_j \cdot (e^{cold}/e^{hot}_j-1) \quad (4)$$

$E_{cold,j}$=차종 j의 엔진 미가열 시 벤젠 배출량(g/yr)
β_j =차종 j의 cold 엔진 상태 또는 촉매 light-off 이하 온도 상태의 주행거리 분율
m_j =차종 j의 총 주행거리(km/yr)
e^{hot}_j =차종 j의 엔진 가열 상태에서의 벤젠 배출계수(g/km)
e^{cold}/e^{hot}_j=차종 j의 엔진 가열상태 대비 엔진 미가열 상태에서의 배출 비율

매개변수인 β_j는 아래의 식(5)에 의해 산정되며, 이는 평균 대기온도인 T_a와 자동차 1회 평균 주행거리 l_{trip}에 의해 좌우된다. 국내 l_{trip}는 1996년 수도권 교통센서스에서 조사한 14.26 km를 적용하였고, T_a는 국내 기상청의 1971~2000년까지의 통계자료를 이용하여 연평균 대기온도 12.13°C를 적용하였다. 또한 e^{cold}/e^{hot}_j 값 역시 평균 대기온도에 좌우되는데, 대상 자동차가 휘발유 및 경유를 사용하는 경우에는 식(6)을 적용하였고, 기타 연료를 사용하는 경우에는 식(7)을 적용하여 산출하였다.

$$\beta_j=[0.647-0.025 \cdot l_{trip}] - [(0.00974-0.000385 \cdot l_{trip}) \cdot T_a] \quad (5)$$

$$e^{cold}/e^{hot}_j=[2.8-(0.06 \cdot T_a)] \quad (6)$$

$$=[2.24-(0.06 \cdot T_a)] \quad (7)$$

l_{trip}=1회 평균 주행거리(km)
T_a =연평균 대기온도(°C)

2. 1. 3 증발 배출 (Evaporative emissions)

국내의 자료 부족으로 인해 증발에 의한 벤젠 배출량은 휘발유 차량만을 대상으로 산정하였다. Ntziachristos and Samaras (2000)가 제시한 대로 증발에 의한 배출은 크게 다음과 같이 3개의 부문으로 구분된다.

1) 주간증발손실 (diurnal/daily losses)
2) 고온증발손실 (hot and warm soak losses)
3) 주행손실 (hot and warm running losses)

그러나, 국내의 휘발유 차량은 거의 전부가 카본 캐니스터를 장착하고 있으므로 고온증발에 의한 배출은 없는 것으로 보고, 주간증발손실과 주행손실의 경우에 대해서만 아래의 식(8)을 이용하여 증발 배출량을 산정하였다.

$$E_{eva,j}=365 \cdot [(a_j \cdot e^d)+R] \quad (8)$$

$E_{eva,j}$=차종 j의 증발에 의한 벤젠 배출량(g/yr)
a_j =휘발유 차량 등록대수(veh.)
e^d =Diurnal losses에 의한 휘발유 차량의 벤젠 배출계수(g/yr · veh.)
R =Running losses에 의한 휘발유 차량의 벤젠 배출량(g/yr)

e^d는 아래 식(9)와 같이 나타낼 수 있는데, 독립매개변수인 대기온도와 휘발유의 휘발성에 의해 그 값이 좌우된다. 휘발유의 증기압인 RVP는 평균치로 82 kPa를 적용하였으며, 연평균 최저 대기온도($T_{a,min}$)와 연평균 일교차($T_{a,rise}$)는 T_a를 산출할 때의 동일한 자료를 참고하여 각각 7.5°C와 10.5°C를 적용하여 산출하였다.

$$e^d=9.1 \cdot \exp[0.0158 \cdot (RVP-61.2)+0.0574 \cdot (T_{a,min}-22.5)+0.0614 \cdot (T_{a,rise}-11.7)] \quad (9)$$

RVP=휘발유의 RVP(kPa)
$T_{a,min}$=연평균 최저 대기온도(°C)
$T_{a,rise}$=연평균 일교차(°C)

주행손실(R)은 hot 주행손실($e^{r,hot}$)과 warm 주행손실($e^{r,warm}$)을 포함하고 있는데, 이들 모두 RVP와 T_a의 함수이며 아래의 식(11)과 (12)에 정리하여 제시하였다. 독립변수들인 RVP와 연평균 대기온도는 각각 앞에서 적용한 82 kPa과 12.13°C를 적용하여 산출하였으며, w값은 엔진 미가열 상태에서의 주행거리비율로 β_j와 동일한 값을 나타내므로 이 값을 적용하여 산출하였다.

$$R=m_j \cdot (p \cdot e^{r,hot}+w \cdot e^{r,warm}) \quad (10)$$

m_j=차량 j의 총 주행거리(km/yr)
p =엔진 가열 상태로 끝나는 trip 비율, 1−w
w =엔진 미가열 상태로 끝나는 trip 비율
$e^{r,hot}$ =휘발유 차량의 평균 hot 주행손실 배출계수(g/km)
$e^{r,warm}$=휘발유 차량의 평균 warm 주행손실 배출계수(g/km)

$$e^{r,hot}=0.1 \cdot \exp[-5.967+(0.04259 \cdot RVP)+(0.1773 \cdot T_a)] \quad (11)$$

$$e^{r,warm}=0.136 \cdot \exp[-5.967+(0.04259 \cdot RVP)+(0.1773 \cdot T_a)] \quad (12)$$

2. 2 비도로 이동오염원

비도로 이동오염원은 자동차 이외에 내연기관을 장착한 철도차량, 선박, 항공기, 농기계 및 건설장비 등을 포함하며, 이들을 통한 벤젠 배출량 산정은 국립환경과학원(2004)에서 운영중인 CAPSS를 바탕으로 하였다. 비도로 이동오염원을 통한 총 벤젠 배출량은 다음 식(13)과 같다.

$$E_{nonroad,t}=E_r+E_s+E_{air}+E_{ag}+E_c \quad (13)$$

$E_{nonroad,t}$=비도로 이동오염원의 벤젠 총 배출량(g/yr)
E_r =철도차량의 벤젠 배출량(g/yr)
E_s =선박의 벤젠 배출량(g/yr)
E_{air}=항공기의 벤젠 배출량(g/yr)
E_{ag}=농기계의 벤젠 배출량(g/yr)
E_c =건설장비의 벤젠 배출량(g/yr)

비도로 이동오염원의 벤젠 배출계수는 앞에 언급한 식(2)와 같이 각 종류별 비도로 이동오염원의 VOCs 배출계수에 VOCs 중 벤젠 질량 함량/100을 곱하여 산출하였으며, VOCs 중 벤젠 질량 함량은 철

도차량, 선박, 농기계 및 건설장비는 7.9%, 항공기는 1.9%를 적용하였다 (U.S. EPA, 2007a). 각 비도로 오염원별 배출량 산정식은 아래와 같다.

E_r =∑(노선별 월별 연료소비량) · $EF_{benzene}$

E_s =(정박 시 연료소비량+접안 시 연료소비량) · $EF_{benzene}$

정박 시 연료소비량=입출항 대수 · 평균 정박 일수 · 연료소비계수 · 보정계수

접안 시 연료소비량=∑(톤급별 입출항 수 · 운항거리)/톤급별 연비

E_{air}=(기종별 배출계수 · 기종별 이착륙 횟수 · 보정계수) · $EF_{benzene}$

기종별 배출계수=기종별 운항모드별 소요시간 및 배출계수 · 기종별 엔진 수

E_{ag} 및 E_c=보유대수 · 평균정격출력 · 평균출력비율 · 가동시간 · $EF_{benzene}$ (14)

철도의 VOC 배출계수는 한국철도기술연구원 자료 (정우성 등, 1997)를 활용하여 산정하였고, 선박의 경우 톤급별 연비는 에너지 센서스를 통하여 매 3년마다 조사되고 있는 에너지경제연구원 자료(2001)를 참고하였으며, 이 경우 정박시의 연료 소비계수는 CORINAIR 자료(2006)를, 접안시의 VOC 배출계수는 U.S. EPA (1991) 자료를 활용하여 산정하였다. 항공기의 배출계수는 기종별 엔진에 따라서 다른데, U.S. FAA (Anderson *et al.*, 1997)에서 개발한 EDMS (Emission and Dispersion Modeling System)에 구축되어 있는 배출계수를 사용하였다. 농기계의 연간 가동시간은 농업기계화연구소에서 매 5년마다 농기계 연간작업시간을 조사하고 있어 이 자료를 활용(1999)하였으며, 농기계 VOC 배출계수, 평균 정격출력 등은 국립환경과학원의 자료(엄명도 등, 1999)를 활용하였다. 건설장비 보유대수는 건설교통부에서 발간하는 건설교통 통계연보의 시 · 도별 자료를 활용하였고, 건설장비별 월별 가동율은 대한건설기계협회에서 조사한 자료를 활용하였으며, 건설장비별 가동율은 한국적산연구소에서 제시한 건축공사표준품셈의 가동시간 기준을 이용하여 산정하였다. 그 외 기타 자료는 국립환경과학원 자료(정일록 등, 1997)를 참고하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 도로 이동오염원

본 연구에서 도로 이동오염원 차종은 아래 표 1과 같이 승용차, 승합차, 화물차, 택시 및 버스로 구분하였다. 또한 국내 자동차관리법 시행 규칙 별표 1에 근거하여 승용차는 경형, 소형, 중형, 대형으로 나누었고, 택시는 중형과 대형, 승합차와 화물차는 소형과 중형으로 나누었으며, 버스는 시내버스만을 대상으로 하여 2004년 국내 벤젠 배출량을 산정하였다.

Table 1. Source categories of on-road mobile source.

Source	Classifications
On-road mobile source	Passenger car, light-duty vehicle, heavy-duty vehicle, taxi, bus

3.1.1 차종별, 연료별 배출량

자동차 연식에 따른 차종별, 연료별 벤젠 배출량 결과는 표 2에 나타내었다. 2004년도 기준으로 승용차의 벤젠 배출량은 경형 94톤/년, 소형 493톤/년, 중형 561톤/년, 대형 145톤/년으로 총 1,293톤으로 나타났으며, 영업용 택시는 중형 160톤/년, 대형 2톤/년으로 162톤이 배출되었다. 승합차는 소형 115톤/년, 중형 0.7톤/년이 배출되었고, 화물차는 소형 39톤/년, 중형 1톤/년이 배출되어 총 배출량은 각각 116톤과 40톤이었다. 또한 CNG 시내버스에서는 3톤이 배출되어 자동차(도로 이동오염원)에 의한 2004년 총 벤젠 배출량은 1,612톤인 것으로 산정되었다.

그림 1(a)에서 보듯이 차종별로는 승용차가 전체 배출량의 80.0%로 가장 높은 배출기여도를 나타내었으며, 택시도 10.1%를 차지하여 승용차와 택시가 전체 배출량의 약 90%를 차지하였다. 이 밖에 승합차 7.2%, 화물차 2.5%, 시내버스 0.2%의 배출기여도를 나타내었다. 그림 1(b)에는 연료별 벤젠 배출기여도를 나타내었는데, 휘발유 자동차가 전체의 65.9%로 가장 높은 기여도를 보여주었고, 그 다음으로 LPG 자동차가 31.1%를 나타내었으며 경유 자동차는 전체의 2.8%를 나타내어 휘발유와 LPG 차량에서 대부분의 벤젠이 배출되는 것으로 조사되었다. CNG 차량은 그 대상을 시내버스에 한정하고 있어 벤젠 배

Table 2. Benzene emissions from on-road vehicles by vehicle types and fuels in 2004.

Source categories	Size[a]	Fuels	Age (year)	Emission factor (g/km-vehicle number)	Emission (tons/year)
Passenger car	Light	Gasoline	≤1996, 1997~2002, 2003~2005	0.0973, 0.0914, 0.0112	93.26
		LPG		0.1653, 0.1096, 0.0133	1.04
	Small	Gasoline	≤1986, 1987~2002, 2003~2005	0.0117, 0.1606, 0.0042	483.45
		LPG	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0294, 0.1813, 0.0046	9.64
	Middle	Gasoline	≤1986, 1987~2002, 2003~2005	0.0065, 0.1836, 0.0130	387.78
		Diesel	≤1990, 1991~2002, 2003~2004	0.0051, 0.1117, 0.0106	3.28
		LPG	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0346, 0.2403, 0.0160	169.88
	Full	Gasoline			96.26
		Diesel			16.56
		LPG			31.70
Taxi	Middle	LPG	≤1999, 2000~2001, 2002~2005	0.1907, 0.0332, 0.0484	160.14
	Full				2.39
Light-duty vehicle	Small	Gasoline	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0119, 0.1245, 0.0014	2.72
		LPG		0.0222, 0.1393, 0.0170	112.64
	Middle	LPG	≤1990, 1991~2002. 2003~2005	0.0307, 0.1113, 0.133	0.68
Heavy-duty vehicle	Small	Gasoline	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0130, 0.1239, 0.032	1.33
		Diesel	≤1990, 1991~1997, 1998~2003	0.0051, 0.0660, 0.0464	24.62
		LPG	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0221, 0.1367, 0.0047	13.68
	Middle	LPG	≤1990, 1991~2002, 2003~2005	0.0484, 0.1489, 0.0155	0.86
Bus		CNG	–	0.0055	3.24
		Total			1,611.91

[a] Vehicle management law of Korea.

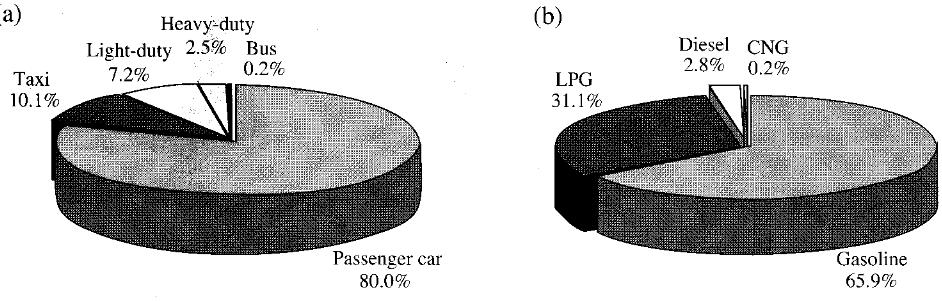

Fig. 1. Distribution of the benzene emissions by (a) vehicle types (b) fuels.

출기여도가 가장 낮은 것으로 조사되었다.

그림 2는 차종별, 연료별 벤젠 배출비율을 정리하여 나타낸 그래프이다. 택시를 포함한 승용차의 경우, 연료별 벤젠 배출기여도는 휘발유 차량 72.9%, LPG 차량 25.8%, 경유 차량 1.4%로 휘발유 차량의 벤젠 배출기여도가 LPG 차량의 약 2.8배 가량 높았다. 반면에 승합차의 경우에는 휘발유 차량 2.3%, LPG 차량이 97.7%를 나타내어 LPG 승합차가 휘발유 승합차보다 압도적으로 큰 벤젠 배출기여도를 보여주었다. 다만, 이번 조사에서는 경유 승합차는 대상에서 제외되어 향후 추가 조사가 이루어질 필요가 있을 것으로 사료된다. 화물차를 대상으로 한 연료별

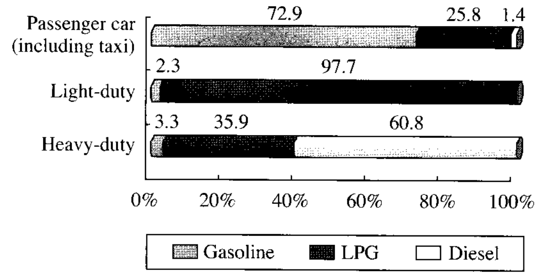

Fig. 2. Distribution of benzene emissions by fuels according to vehicle types.

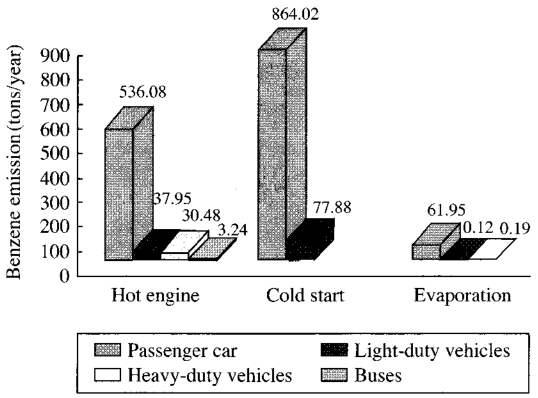

Fig. 3. Benzene emissions according to driving conditions for on-road vehicles.

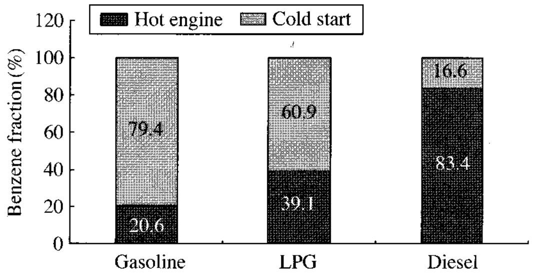

Fig. 4. Benzene emission ratio by fuels at different driving conditions for on-road vehicles.

벤젠 배출기여도는 휘발유 차량 3.3%, LPG 차량 35.9%, 경유 차량 60.8%를 나타내어 앞서 승용차와 승합차의 결과와는 상이한 배출기여도를 보여주었다. 전체적으로 승용차는 휘발유 차량일 때 벤젠 배출기여도가 높은 반면, 승합차는 LPG 차량일 때, 화물차는 경유차일 때 그 기여도가 높은 것으로 조사되었다.

3. 1. 2 엔진 가열, 엔진 미가열 및 증발 시 배출량

그림 3에는 2004년도 자동차의 운전상황에 따른 벤젠 배출량을 차종별로 엔진 가열, 엔진 미가열, 증발 배출로 구분하여 나타내었다. 엔진 미가열 시의 벤젠 배출량이 942톤/년으로 가장 크게 나타났고, 엔진 가열 시에는 608톤/년, 휘발유 자동차의 증발로 인한 증발 배출은 62톤/년으로 조사되었다. 또한, 엔진 미가열 배출/엔진 가열 배출 비율(C/H)은 승용차의 경우 1.6, 승합차 2.0인 것으로 나타나 승용차, 승합차에서는 엔진 미가열 시가 엔진 가열 시보다 평균 1.8배 정도 더 많은 벤젠이 배출되는 것으로 나타났다. 그 외 증발로 인한 벤젠 배출량은 휘발유 자동차만을 대상으로 하였는데, 승용차 62톤/년, 승합차 0.12톤/년, 화물차 0.19톤/년으로 휘발유 차량 비율이 가장 많은 승용차에서 가장 높은 벤젠 배출 기여도를 보여주었다.

한편, CNG용 버스를 제외하고는 엔진 가열 시보다 엔진 미가열 시에 자동차의 벤젠 배출량이 2배 가까이 높게 산출되었다. 이는 연료 연소, 차량의 연식 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하고 있기 때문인 것으로 보이며, 특히 자동차의 엔진 가열 상태는 연료 연소가 안정화 단계에 있는 반면에 엔진 미가열은 저온으로 인한 불완전 연소 단계 및 촉매장치의 비활성화로 인해 엔진 가열 시보다 벤젠이 더 많이 배출되는 것으로 판단된다. 향후 이에 대한 명확한 메커니즘 파악을 위해 다양한 자동차를 대상으로 주행 시험을 통한 오염물질 배출량 자료의 확보가 필요할 것으로 사료된다.

그림 4는 국내 차량의 연료 종류에 따른 엔진 가열과 엔진 미가열 시의 벤젠 배출기여도를 나타내고 있다. 휘발유 차량의 경우에는 엔진 미가열 시 79.4%, 엔진 가열 시 20.6%로 나타나 엔진 미가열 시의 배출기여도가 약 4배 정도 높은 것으로 나타났으나, 반면에 경유 차량의 경우에는 상대적으로 엔진 가열 시의 벤젠 배출기여도가 83.4%로 휘발유 또는 LPG 차량의 경우와 상이한 결과를 나타내었다.

Table 3. Benzene emissions by provincial areas for on-road vehicles in 2004.

Provincial areas		On-road vehicles emissions (tons/yr)			Total
		Hot engine	Cold start	Evaporation	
Metropolitan area (tons/yr)	Seoul	159.48	156.11	12.41	328.00
	Incheon	32.91	44.37	3.1	80.38
	Gyeonggi	106.05	227.62	14.27	347.94
Other areas (tons/yr)	Busan	32.29	52.05	3.95	88.29
	Daegu	34.05	47.69	3.51	85.25
	Gwangju	15.74	24.62	1.69	42.05
	Daejeon	22.97	30.38	2.19	55.54
	Ulsan	9.15	18.57	1.6	29.32
	Gangwon	20.91	38.42	2.03	61.36
	Chungbuk	22.68	40.74	2.08	65.50
	Chungnam	24.53	44.98	2.55	72.06
	Jeonbuk	24.75	42.34	2.28	69.37
	Jeonnam	22.97	38.18	2.01	63.16
	Gyeongbuk	34.41	60.02	3.67	98.10
	Gyeongnam	36.19	64.92	4.21	105.32
	Jeju	8.67	10.89	0.71	20.26
		Total			1,611.91

3. 1. 3 시 · 도별 배출량

2004년도 시 · 도별 운전상황에 따른 벤젠 배출량을 정리하여 표 3에 나타내었다. 시 · 도별로는 인구밀도가 가장 높은 서울이 328톤/년으로 전국에서 가장 많이 배출되는 것으로 나타났고, 경기도가 348톤/년으로 그 뒤를 잇고 있으며, 인천이 80톤/년으로 나타나 수도권 지역에서의 도로 이동오염원 배출량이 전체 도로 이동오염원 배출량의 46.9%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 수도권을 제외한 지역 중에서는 인구밀도가 높은 부산을 포함한 경상도 지역에서 가장 많은 양(291톤/년)이 배출되었고, 청정지역인 제주도는 20톤/년으로 전국에서 가장 낮은 배출량을 보여주었다.

한편, C/H는 수도권역인 경기도가 2.1로 가장 큰 값을 나타내었으며 총 벤젠 배출량이 가장 높게 나타난 서울의 경우에는 1.0을 나타내어 지역마다 약간의 차이를 드러내고 있는데 이는 지역의 특성에 따라 차량 등록 대수, 대기 온도 변화 및 평균 주행거리 등이 모두 다르기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 모든 지역에서 엔진 가열 시보다 엔진 미가열 시에 벤젠이 대기 중으로 더 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 증발에 의한 벤젠은 인구 밀도가 높은 서울과 경기도에서 각각 12.41톤/년와 14.27톤/년이 배출되어 타 지역보다 평균 3~10배 이상 많게 배출되는 것으로 나타났다.

3. 2 비도로 이동오염원

2004년 비도로 이동오염원의 배출량을 산출하여 다음 표 4에 정리하였다. 그 결과, 철도차량이 216톤/년, 선박 176톤/년, 항공기 7톤/년, 농기계 105톤/년 그리고 건설장비 990톤/년으로 총 벤젠 배출량은 1,494톤/년인 것으로 조사되었다. 건설장비에 의한 벤젠 배출기여도가 전체의 66.3%로 가장 높았으며, 다음으로 철도차량이 14.5%를 차지하여, 비도로 이동오염원에서는 건설장비와 철도차량에 의한 배출기여도가 전체의 80% 정도로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그 밖에 선박에서 11.7%, 농업용 차량에서 7.1%, 항공기에서 0.5%의 배출분포를 나타내었다. 비도로 이동오염원 중 수도권에서의 벤젠 배출기여도는 항공기의 경우가 66.6%를 차지하여 가장 높은 것으로 나타났는데 이는 서울 김포공항 및 인천국제공항의 영향으로 판단된다. 또한 건설장비에 의한 벤젠 배출기여도도 수도권 지역에서의 활발한 건설작업 등으로 인하여 절반에 가까운 수치(46.5%)를 나타내고 있었으며, 철도 차량, 선박 및 농기계 등에 의한 수도권에서의 배출기여도는 15% 내외인 것으로 조사되었다.

Table 4. Regional benzene emissions by non-road sources in 2004.

Region	Locomotives	Ships	Aircrafts	Agriculture equipments	Construction machineries
Metropolitan area (tons/yr)	35.64 (16.5%)	24.40 (13.9%)	4.62 (66.6%)	13.63 (12.9%)	460.21 (46.5%)
Other areas (tons/yr)	180.47 (83.5%)	151.09 (86.1%)	2.32 (33.4%)	91.88 (87.1%)	530.16 (53.5%)
Sub-total (tons/yr)	216.11 (100.0%)	175.49 (100.0%)	6.94 (100.0%)	105.51 (100.0%)	990.37 (100.0%)
Total (tons/yr)			1,494.42		

Table 5. Comparison of benzene emissions with foreign countries.

Sources	United states	United kingdom	Korea
Total (ktons/yr)	339 (100%)	14.5 (100%)	10.7 (100%)
Mobiles (ktons/yr)	220 (65%)	4.3 (30%)	3.1 (29%)
On-road vehicles	149 (44%)	3.4 (24%)	1.6 (15%)
Non-road vehicles	71 (21%)	0.9 (6%)	1.5 (14%)

3. 3 선진국과의 이동오염원 배출량 비교

표 5에는 선진국의 벤젠 배출량 중 이동오염원에서의 배출량을 비교, 정리하였다. 미국의 EPA 보고서 (U.S. EPA, 2007b)에 의하면, 미국의 연간 벤젠 총 배출량은 33만 9천 톤(2002년 기준)으로 나타나고 있는데 이 중 이동오염원을 통한 벤젠의 배출기여도는 도로 이동오염원에서 44%, 비도로 이동오염원에서 21%로 전체의 65% (약 22만 톤)를 차지하는 것으로 조사되었다. 또한, 영국의 AEA 보고서 (Dore *et al.*, 2006)에 의하면, 2004년 기준으로 영국의 벤젠 총 배출량(14,500톤) 대비 이동오염원의 배출기여도는 도로 이동오염원 24%, 비도로 이동오염원 6%로 전체의 30% (4,300톤)를 차지하여 것으로 나타나고 있다. 국내의 경우 국립환경과학원(홍지형 등, 2007)의 조사에 의하면, 총 벤젠 배출량은 10,700톤 정도로 추정되며 이를 토대로 국내 이동오염원의 연간 배출기여도를 산출해 보면 도로 이동오염원에서 15%, 비도로 이동오염원에서 14%로 전체 배출량의 29% (3,106톤) 정도를 차지하는 것으로 나타나고 있는데 이는 영국의 이동오염원 기여율과 비슷한 수준이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내의 벤젠 대기환경기준 제정 및 이 기준치의 적용(2010년)과 관련하여 대기중의 농도에 영향을 미치는 벤젠 배출원 중 이동오염원을 대상으로 벤젠 배출량을 산정하였다. 도로 이동오염원과 비도로 이동오염원으로 나누어 기축된 국내 · 외의 배출계수 및 활동도 자료 등을 활용하여 2004년도 기준으로 국내의 이동오염원에서 발생되는 벤젠의 배출량 및 연료별, 차종별 배출 기여도를 제시하였으며, 이를 선진국의 자료와도 비교 검토하였다.

조사 결과 2004년 국내 도로 이동오염원에 의한 벤젠의 총 배출량은 1,612톤인 것으로 나타났으며, 승용차 80.0%, 택시 10.1%, 승합차 7.2%, 화물차 2.5% 및 버스 0.2%의 벤젠 배출기여도를 보여주었다. 연료별 배출기여도는 휘발유 자동차가 65.9%, LPG 자동차가 31.1%, 경유 자동차가 2.8%인 것으로 조사되어, 휘발유 자동차의 벤젠 배출기여도가 가장 높은 반면 경유 자동차는 그 기여도가 상대적으로 매우 낮게 나타났다. 비도로 이동오염원에서의 연간 벤젠 배출량은 철도차량이 216톤, 선박 176톤, 항공기 7톤, 농기계 105톤, 건설장비 990톤으로 총 배출량은 1,494톤인 것으로 조사되어 2004년도 국내 이동오염원을 통한 벤젠 총 배출량은 3,106톤/년인 것으로 산정되었다.

한편, 자동차 엔진 미가열 상태에서의 벤젠 배출량은 942톤/년으로 엔진 가열 상태의 608톤/년보다 약 1.5배 가까이 높게 배출되는 것으로 조사되었는데 이는 엔진 미가열 시에는 저온으로 인한 불완전 연

소 및 촉매장치의 비활성화로 연료 연소가 안정화 단계인 엔진 가열상태보다 오염물질이 많이 배출되기 때문이다.

국내에서 배출되는 벤젠의 총 배출량은 10,700톤 정도로 나타났고, 이를 토대로 국내 이동오염원의 연간 배출기여도를 산출해 보면 도로 이동오염원에서 15%, 비도로 이동오염원에서 14%로 전체 배출량의 29% (3,106톤) 정도를 차지하는 것으로 나타나고 있으며 이는 영국의 이동오염원 벤젠 배출 기여율(30%)과 비슷한 수준이다.

이동오염원을 통한 벤젠 배출량은 국가마다 차량의 종류, 사용연료, 운행조건 및 규제조건 등이 모두 다르기 때문에 그 배출량은 다양화될 수 있으며, 특히, 2004년도 국내의 이동오염원을 통한 벤젠의 배출량 산정은 본 조사에서 처음 수행된 것으로 그 의미가 크다고 사료된다. 이 결과를 기초로 하여 향후 국내 이동오염원에서의 벤젠 배출량 산정의 신뢰성을 확보하기 위해 이에 관한 연구가 계속 수행될 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2004) 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS).

류정호, 한종수, 임철수, 엄명도, 황진우, 유승화, 이태우, 유영숙, 김기호(2003) 자동차 오염물질 배출계수 산정에 관한 연구(I): 중 · 대형버스의 오염물질 배출계수 산정, 국립환경과학원 교통환경연구소, 연구보고서 2003-24-696.

류정호, 임철수, 유영숙, 한종수, 김선문, 황진우, 엄명도, 김진열, 전민선, 김영훈, 이종태, 임윤성 (2004) 자동차 오염물질 배출계수 산정에 관한 연구(II): 경유트럭의 오염물질 배출계수 산정, 국립환경과학원 교통환경연구소, 연구보고서 2004-26-732.

류정호, 유영숙, 임철수, 김선문, 김종춘, 권상일, 정성운, 김대욱(2005) 자동차 오염물질 배출계수 산정에 관한 연구 (III): 소형승합차 오염물질 배출계수 산정, 국립환경과학원, 연구보고서 2005-32-777.

엄명도, 김태승, 황종진, 공유덕, 김종춘, 류정호, 박용희, 서충열, 이종태, 황순호, 정인영, 김대식, 장은성, 김선문, 임철수, 신용훈, 김기호, 신원근, 정성용, 김명신, 정충섭 (1999) 경유엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구 (III), 국립환경과학원 교통환경연구소, 연구보고서 99-20-557.

정우성, 남정석, 한석윤, 김용기, 권성태, 박덕신, 서정원, 김문현, 송문석, 오병진, 표영덕, 강성인, 양중식, 배형민 (1997) 디젤기관의 배출가스 대기오염 현황 및 저감방안에 관한 연구, 철도청, 한국철도기술연구원 최종보고서 1997-0005.

정일록, 김종춘, 류정호, 황순호, 임철수, 이호영, 김기호, 김준명, 한영출, 송보영 (1997) 경유엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(I): 연구건설용 엔진에 사용되는 경유엔진의 오염물질 배출실태조사, 국립환경과학원 교통환경연구소, 연구보고서 97-19-519.

조완근, 문경조(1999) 휘발유 및 환경 담배 연기 관련 벤젠 노출, 한국환경과학회지, 8(3), 319-323.

환경부(2006) 대기환경연보 2005.

홍지형, 차준석, 정동일, 강경희, 이주형, 이상목, 임철수 (2007) 대기 배출원의 벤젠 배출현황, 국립환경과학원 연구보고서.

Akko, P. and N.O. Nylund (2003) Particle emissions at moderate and cold temperature using different fuels, SAE Technical paper series 01, 3285.

Anderson, C., S. Augustine, D. Embt, T. Thrasher, and J. Plante (1997) Emission and Dispersion Modeling System (EDMS) reference manual, U.S Federal Aviation Administration, A170083, April 1997, Washington, DC.

Dore, C.J., J.D. Watterson, T.P. Murrells, N.R. Passant, M. M. Hobson, S.L. Baggott, G. Thistlethwaite, J.W. L. Goodwin, K.R. King, M. Adams, C. Walker, M. K. Downes, P.J. Coleman, R.A. Stewart, A. Wagner, J. Sturman, C. Conolly, H. Lawrence, Y. Li, J. Jackson, T. Bush, S. Grice, and N. Brophy (2006) UK Emission of Air Pollutants 1970 to 2004, AEA Energy & Environment, December 2006.

Ellenhorm, M.J. and D.G. Barceloux (1987) Medical Toxicology: Diagnosis and Treatment of Human Poisoning.

Heeb, N.V., A.-M. Forss, C.J. Saxer, and P. Wilhelm (2003) Methane, benzene and alkyl benzene cold start emission data of gasoline-driven passenger cars representing the vehicle technology of the last two decades, Atmospheric Environment, 37, 5185-5195.

Joumard, R., M. André, R. Vidon, P. Tassel, and C. Pruvost (2000) Influence of driving cycles on unit emissions form passenger cars, Atmospheric Environment, 34, 4621-4628.

Laurikko, J., L. Erlandsson, and R. Abrahamsson (1995) Exhaust emissions in cold ambient conditions: con-

siderations for a European Test Procedure, SAE-paper 950929, SAE Technical paper series, Warrendale, USA.

Ntziachristos, L. and Z. Samaras (2000) COPERT III Computer program to calculate emissions from road transport, Technical Report 49, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

U.S. EPA (1991) Nonroad engine and vehicle emission study report, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-21A-2001, November 1991, Washington, DC.

U.S. EPA (2007a) 2002 National emissions inventory data & documentation, http://www.epa.gov/ttn/chief/net/2002inventory.html.

U.S. EPA (2007b) Technology Transfer Network, Clearinghouse for inventories & emission factors, http://www.epa.gov/ttn/chief/software/speciate/index.html.

Weilenmann, M. (2001) Cold start and cold ambient emissions of Euro II cars, Proceedings of international symposium for transport and air pollution, Boulder, Colorado, USA, 17-19 September 2001.

Weilenmann, M., P. Soltic, C. Saxer, A.-M. Foress, and N. Heeb (2005) Regulated and non-regulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures, Atmospheric Environment, 39, 2433-2441.