

부산지역 경유버스를 CNG버스로 대체시 발생하는 대기오염물질 배출량 산정 및 변화 분석

방진희 · 강윤희 · 송상근 · 김유근*

부산대학교 지구환경시스템학부

(2011년 11월 23일 접수; 2011년 12월 21일 수정; 2012년 1월 31일 채택)

Estimation of Air Pollutant Emissions for the Conversion of Diesel to CNG in the Busan Metropolitan Area

Jin-Hee Bang, Yoon-Hee Kang, Sang-Keun Song, Yoo-Keun Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 23 November, 2011; revised 21 December, 2011; accepted 31 January, 2012)

Abstract

The emissions of several air pollutants (NO_x, CO, VOCs, etc.) for the replacement of all diesel buses by Compressed Natural Gas (CNG) buses were estimated in the Busan Metropolitan Area (BMA). These emissions were calculated from emission factors considering the different driving speeds with bus routes, distance traveled, and deterioration factors. For the purpose of this study, three categories of fuel type were selected: (1) the combination of diesel (65%) and CNG buses (35%) (DSL+CNG case), (2) all diesel buses (DSL case), and (3) all CNG buses (CNG case). The emissions of NO_x and CO in the CNG case were estimated to be significant decreases (by about 50% and 98%, respectively) relative to the DSL case. Conversely, the emission of VOCs (980.7 ton/year) in the CNG case were a factor of 3.3 higher than that (299.8 ton/year) in the DSL case. In addition, the diurnal variations of emissions between two city buses (e.g. diesel and CNG) and all other vehicles were distinctly different because the two city buses operate at a regular time interval. Our overall results suggest the possibility that the pollutant emissions from the CNG buses can exert less influence on air quality in the target area than those from the diesel buses.

Key Words : CNG bus, Emission factor, Different driving speed, Bus route, BMA

1. 서론

2000년대 이후 도시에서의 자동차 수요가 급증함에 따라 자동차에서 배출되는 대기오염물질 또한 증가하는 추세이고(국립환경과학원, 2007), 전체 대기

오염원 중에서도 자동차 배출량이 높은 비율을 차지하고 있다(Mage 등, 1996; Mayer, 1999). 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)을 이용해 산정된 국가대기오염물질 배출량 자료(국립환경과학원, 2007)에 따르면 전체 인위적 배출량 중 도로이동오염원에서의 질소산화물(NO_x: nitrogen oxides) 배출이 41.7%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며 자동차에서 배출되는 질소산화물과 휘발성유기화합물질(VOCs: volatile organic compounds)은 강

*Corresponding author : Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2652
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

한 일사조건일 때 대기 중에서 광화학 반응을 일으켜 고농도 오존오염 유발에 결정적 기여를 한다. 특히, 시내버스에서의 경우, 우리나라 자동차의 0.2%로 낮은 비율이지만 배출되는 NOx의 양은 상대적으로 높은 6.4%를 차지하고 있어 연료개선을 통한 효율적인 저감정책에 대한 논의가 지속적으로 이루어지고 있다.

현재 운행중인 시내버스의 주요 연료는 경유(Diesel)와 천연가스(Natural gas)이며 최근 배출물질 저감을 위해 경유에서 천연가스로 대체되는 추세이다. 천연가스는 해저, 유전지대 등의 지하에서 채취하는 저급 탄화수소의 혼합물로, 메탄(CH₄)이 주성분인 가연성가스를 총칭한다. 천연가스는 효율적 수송 및 저장을 위하여 -162 °C로 냉각하여 부피를 축소한 무색투명한 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)로 변환되고 다시 기화과정을 거쳐 압축천연가스(CNG, Compressed Natural Gas) 형태로 사용되어 진다(Menon와 Komarneni, 1998). 압축천연가스는 액화과정에서 미세먼지, 황 등 불순물을 제거한 청정연료로서 연소될 때 대기오염물질이 거의 발생하지 않아 자동차배출가스저감을 위한 효과적인 에너지로 평가받고 있다(Nylund 등, 2008).

천연가스자동차는 1992년부터 1997년까지 환경기술개발사업(G-7)의 일환으로 개발되었으며, 천연가스버스(이하 CNG버스) 시범운행을 통해 그 우수성이 확인되었다. 2000년 6월 이후 정부는 국내 대기오염 저감을 위해 월드컵개최도시를 중심으로 CNG버스를 보급하기 시작하였다(한국천연가스협회, 2010). 현재 서울의 경우, 전체 시내버스 중 CNG 버스가 98.2%를 차지하고 있으며(전국버스운송사업조합연합회, 2011) 부산 또한 쾌적한 도시 대기질 조성을 위해 2011년 현재 전체 시내버스 중 43%를 차지하고 있는 경유버스를 2012년까지 연차적으로 CNG버스로 교체할 방침이다. 부산지역은 산이 많이 존재하여 시내버스 노선은 산지를 피해 도심을 중심으로 분포하며 이에 따라 도로이동오염원에서의 배출량 분포가 좁은 면적에 집중되어 있다. 따라서 부산시에서 도로이동오염원 중 높은 비율을 차지하고 있는 시내버스가 경유버스에서 CNG버스로 교체되면 부산의 배출량 시·공간분포가 변화될 것으로 예상된다.

시내버스의 연료가 경유에서 CNG로 개선될 경우,

배출되는 대기오염물질의 종류 및 양적인 변화는 부산의 대기질에도 영향을 미칠 수 있다. 이를 예측하기 위해서는 CNG버스 운행시 배출되는 대기오염물질의 정확한 산정이 필수적이며, 버스노선 및 운행정보가 고려된 배출량의 시·공간적인 분포에 대한 연구가 선행되어야 한다. 하지만 현재 CNG버스 운행시 발생하는 배출량의 대부분은 특정 차량만을 대상으로 추적 계측하는 배출이동측정시스템을 이용하여 산출되고 있어(이 등, 2011; 맹 등, 2006) 배출량의 시·공간적인 변화를 분석하기에 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 부산에서 현재 운행 중인 시내버스를 대상으로 국립환경과학원의 도로이동오염원 배출량 산정법(국립환경과학원, 2010b)을 적용하여 경유버스로만 운행될 경우와 CNG버스로만 운행될 경우에 대해 각각 배출량을 산정하였다. 또한 부산의 시내버스 노선도(<http://bus.busan.go.kr>)를 입력자료로 하여 MIMS (Multi-scale Intergrated Modeling System) Spatial Allocator (<http://www.ie.unc.edu/cempd/projects/mims/spatial>)를 이용하여 각 연료에 대해 격자별 시내버스 배출량(1 km의 수평해상도)을 산출하였다. 이를 바탕으로 경유버스에서 CNG버스로의 교체로 인해 배출되는 대기오염물질의 변화를 시·공간적으로 분석해 보았다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역

본 연구에서 시내버스 배출량은 부산광역시를 중심으로 산정되었으며, 부산 시내버스 노선이 존재하는 김해시와 양산시의 일부지역이 포함되었다. Fig. 1은 부산지역의 지리·지형적 조건과 본 연구에서 고려된 시내버스 노선도를 제시한 것으로 배산임해의 지형 구조인 부산의 경우 도로체계가 환상방사형이 아닌 도심집중형으로 형성되어 있어 도로이동오염원 역시 시내 중심으로 배출량이 집중되어 있을 것으로 예상된다.

시내버스 배출량 산정에 앞서 부산의 전반적인 배출환경을 조사하기 위하여 국립환경과학원(2010a)에서 산정한 2008년도 대기오염물질 배출량을 토대로 배출되는 대기오염물질에 대한 대분류별 배출량 기여

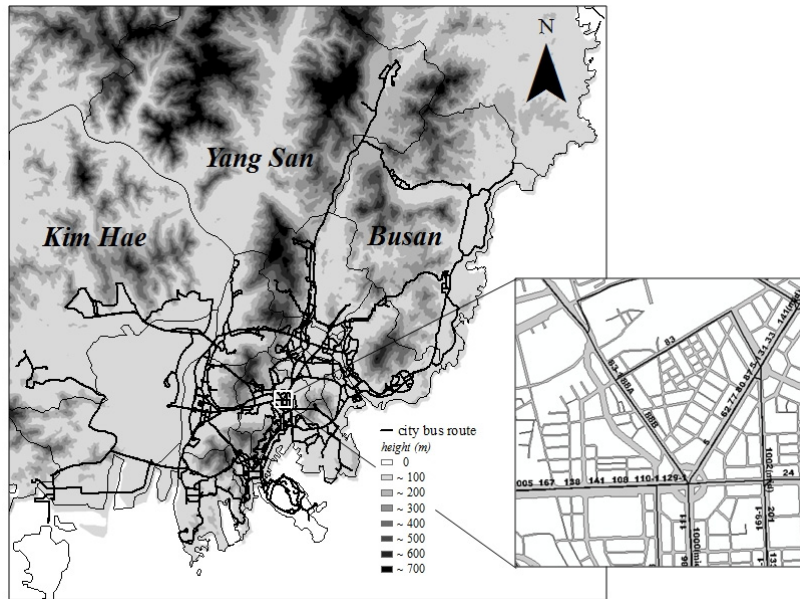


Fig.1. Bus routine in the Busan metropolitan; (a) total bus routine, (b) bus routine and bus number in a busy administrative unit.

울을 Table 1에 제시하였다. 물질별 배출량을 살펴보면 CO의 도로이동오염원은 전체 배출량 중 82.7%의 높은 비율을 차지하고 있고, 다른 물질들과 비교해 보았을 때도 대분류별 배출량 중 도로이동오염원이 차지하는 비율이 가장 높았다. PM₁₀도 마찬가지로 40.4%로 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. NO_x의 도로이동오염원은 비도로이동오염원 다음으로 40.2%의 높은 비율을 차지했다. VOC의 도로이동

오염원이 차지하는 비율은 16.5%로 73.7%를 차지하는 유기용제 다음으로 높은 비율을 나타내고 있다.

이처럼 부산은 자동차와 같은 도로이동오염원에서의 다량의 대기오염물질이 배출되고 있고, 이중 전체 교통량의 3.7%를 차지하고 있는 시내버스의 연료가 경유에서 CNG로 교체 된다면 배출량 변화가 예상되므로 시내버스에서 배출되는 오염물질을 정량적으로 산정할 필요가 있다.

Table 1. Summary of domain-wide emissions (ton/year) of air pollutants with emission inventory categories in the Busan metropolitan area. The number of parenthesis denotes the fraction (%) of each category in total emissions from all source categories

category	air pollutant	CO	NO _x	PM ₁₀	VOC
Electric generation		0.0 (0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
Non-electric generating Utility		2604.5 (6.7)	5988.2 (13.4)	217.7 (11.3)	203.4 (0.6)
Industrial combustion		40.0 (0.1)	348.6 (0.8)	126.7 (6.6)	6.7 (0.0)
Industrial process		0.6 (0.0)	165.6 (0.4)	13.1 (0.7)	216.9 (0.6)
Storage and transport		0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	1603.3 (4.6)
Solvent utilization		0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	25500.7 (73.7)
On-road mobile		31976.7 (82.7)	17966.0 (40.2)	780.5 (40.4)	5695.2 (16.5)
Non-road mobile		3463.4 (9.0)	19735.0 (44.1)	763.8 (39.6)	1057.4 (3.1)
Waste treatment		128.7 (0.3)	503.1 (1.1)	9.8 (0.5)	284.4 (0.8)
Agriculture		0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
Biogenic		455.9 (1.2)	10.8 (0.0)	18.8 (0.0)	38.1 (0.1)

2.2. 시내버스 배출량 산정방법

부산 시내버스의 연료는 천연가스를 압축한 연료로서 대형버스 중 일부에서 사용하는 CNG와 디젤 엔진을 장착한 버스에서 사용하는 경유로 구분된다. 연료에 따라 배출되는 오염물질과 그 비율이 다르기 때문에 2012년 부산시 정책에 따라 전체 시내버스가 CNG버스로 바뀌었을 경우(CNG Case)와 과거 전체 시내버스가 경유버스였던 경우(DSL Case)에 대해 각각의 시내버스 배출량을 산정하였다. 또한 2008년 국가대기오염물질 배출량 자료(CAPSS)와의 비교를 위해 경유버스와 CNG버스가 각각 65%, 35%의 비율로 운행되었던 2008년의 경우(CNG+DSL Case)를 추가로 산정하였다.

시내버스 배출량은 국립환경과학원에서 제공하는 도로이동오염원 배출량 산정 방법을 적용하였으며(국립환경과학원, 2010b) 도로에서 주행하는 자동차로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하는 배출유형 중 연료 교체로 인한 배출량 변화를 알아보기 위해 엔진 가열 (hot-start)배출만 고려하였다. 식 (1)의 배출량 산정방법에서 열화계수는 차량의 노후화에 따른 추가적인 배출량을 산정하기 위하여 노후화의 정도를 나타낸 것이다. 자동차의 경우, 운행시간이 경과함에 따라 촉매 및 엔진의 노후화로 인하여 생산 초기보다 추가적인 배출이 이루어지기 때문에 연식별로 다른 열화계수를 적용하여야 하나(엄 등, 2002), CNG버스의 열화계수에 대한 정보가 부족하므로 가장 비슷한 효과를 내는 택시 열화계수를 적용하였다.

$$\text{배출량}(g) = \text{열화계수}(\text{차종, 연료}) \times \text{배출계수}(\text{차종, 연료}) \times \text{주행거리}(\text{차종, 연료}) \quad (\text{식 1})$$

배출계수는 경유버스와 CNG버스에 따라 다르며 오염물질 종류와 연식에 따라 분류된다. 또한 각 배출계수는 버스 주행속도의 함수로 구성되는데 현재 국가 대기오염물질 배출량의 경우, 지역평균 주행속도(부산광역시의 경우 25 km/h)를 적용하고 있으며 배출량 계산에 필요한 또 다른 변수인 주행거리는 국립환경과학원(2010b)의 경우 차종별 차량 등록대수와 평균 주행거리를 이용하여 차량 총 주행거리(Total VKT)를 산정한 다음 이를 교통량이 관측되는 도로의

차량주행거리(VKT)와 교통량 비실측 도로로 나누어 공간 배분을 하여 나타내는 반면 본 연구에서는 시내버스 배출량의 불확실성을 줄이기 위하여 각 버스 노선별 거리(6~86 km)를 고려하였으며, 배출계수 산정에 필요한 운행속도는 주행거리와 소요시간을 바탕으로 계산하여 입력하였다(버스 노선별 주행속도: 17.6~30.7 km/h).

국립환경과학원의 배출계수를 이용하여 배출량을 산정한 결과 저감효과가 있을 것으로 예상되었던 CNG버스로 교체 시 배출량은 경유버스 운행시 배출량과 큰 차이를 나타내지 않았다. 본 연구에서는 보다 정확한 배출량을 산정하기 위하여 CNG버스의 배출계수의 경우 국립환경과학원의 배출량 산정 방법에 추가로 2006년에 수행한 교통환경연구소의 차량엔진 시험결과에 따른 DOC(배출가스저감장치) 부착 전후의 오염물질별 저감비율(CO 98.1%, VOC 30.3%, NO_x -0.6%)을 적용하여 재산정하였다(교통환경연구소, 2007). 이러한 수정을 한 이유는 배출계수 산출식에 따라 산출된 배출계수를 적용할 경우, 2004년 이후 강화된 배출허용기준에 따라 보급된 천연가스버스의 실제적인 대기오염물질 배출저감효과를 제대로 반영하지 못하는 한계가 있기 때문이다(교통환경연구소, 2006).

Table 2는 저감비율을 적용시킨 각 연료에 대한 오염물질별 배출계수를 제시한 것이다. 경유를 CNG로 교체할 경우, CO는 99.0%, NO_x는 49.6%의 배출계수 감소가 계산되었다. 반면 VOC는 경유보다 CNG버스로 교체될 경우, 오히려 250.9% 증가하는 것으로 나타났다. PM₁₀은 CNG버스에서 배출되지 않으므로 배출량 산정에서 제외되었다. 그 밖에 배출량 산정에서 필요한 각 시내버스에 대한 노선운행 정보(운행대수, 운행거리, 소요시간, 운행횟수 등)는 부산시 시내버스 노선개편 안내 시스템(<http://bus.busan.go.kr>)을 참고하였다. 각 시내버스 배출량 산정에는 과거 노선정보 자료 수집의 한계로 2011년 1월 운행 중인 시내버스에 대한 노선정보를 적용하였으며, 부산은 2011년 1월 이후 현재까지 총 2511대(상용 2371대, 예비 140대)의 시내버스가 133개의 노선에 대해 운행되고 있다(<http://www.busan.go.kr>).

Table 2. Emission factors, enter the average drive speed, of pollutants by fuel type (g/km)

fuel	air pollutant			
	NO _x	CO	VOC	PM ₁₀
Diesel	13.45	3.85	1.12	0.28
CNG	6.78	0.04	2.81	-

2.3. 격자 배출량 생성방법

시내버스 배출량의 공간적 분포 변화를 분석하기 위하여 계산된 각 노선별 시내버스 배출량을 ArcGIS 프로그램(v.9.1)과 MIMS (Multi-scale Integrated Modeling System) Spatial Allocator를 이용하여 격자별 시내버스 배출량 자료(1 km × 1 km)로 변환하였다. MIMS Spatial Allocator는 배출량 및 대기질 모델링을 위한 입력자료를 생성하기 위해 개발된 프로그램으로 점(point), 선(polyline), 면(polygon) 형태로 구성된 shape 파일을 격자로 구성된 원하는 영역에 대해 각 격자에 포함되는 개수, 길이, 면적에 따라 속성을 할당시켜 주는 기능을 가지고 있다(Eyth와 Benje, 2005; Kim 등, 2008).

본 연구에서는 MIMS Spatial Allocator를 활용하기 위해 먼저 부산시 버스 노선이 포함되는 1 km × 1 km 격자로 구성된 대상영역(남북방향 58 km, 동서방향 58 km)을 구성하였으며, ArcGIS 프로그램을 이용하여 버스 노선별 계산된 대기오염물질 배출량 정보가 포함된 shape 파일을 생성하였다. 이를 위해 부산의 현재 시내버스 노선도와 도로링크 정보를 바탕으로 133개의 왕복노선을 Polyline 형태로 생성하였고 각 노선별 해당되는 경유 및 CNG버스에서 배출되는 대기오염물질(NO_x, CO, VOC, PM₁₀)의 배출량을 산정하여 이를 속성정보로 입력하였다. 이후 MIMS Spatial Allocator를 수행하였다. MIMS Spatial Allocator는 각각의 버스노선에 대해 총 노선길이를 1로 보고, 격자별 포함되는 노선길이의 비를 배출량 할당비율로 계산한 뒤, 그 노선의 전체 시내버스 배출량에 계산된 격자별 배출량 할당비율을 적용하여 격자별 배출량을 산출하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국가 대기오염물질 배출량과의 비교

산정된 시내버스 배출량 분석에 앞서 국가 대기오

염물질 배출량 자료(국립환경과학원, 2010a)의 시내버스 배출량과 비교해 보았다. 현재 국가 대기오염물질 배출량 자료는 1999년부터 2008년까지 데이터베이스가 구축되어 있으며 대부분인 도로이동오염원 내에 경유 및 CNG 연료를 사용하는 시내버스에 대해 구분하여 배출량을 제공하고 있다. 본 연구에서는 부산시 경유버스와 CNG버스가 각각 65%, 35%의 비율로 운행되었던 2008년에 대해 비교하였다.

Fig. 2는 2008년 경유 및 CNG 시내버스에 대한 국가 대기오염물질 배출량과 본 연구에서 산정한 배출량을 물질별로 비교한 것이다. 전체 시내버스 배출량에 대해서는 본 연구결과가 국가 대기오염물질 배출량보다 다소 적게 산정되었다(NO_x: -1%, CO: -36%, VOC: -9%, PM₁₀: -22%). 연료별 배출량에서는 국가 대기오염물질 배출량보다 경유의 경우 NO_x 438.2 ton/year, CO 67.1 ton/year, VOC 18.7 ton/year, PM₁₀ 13.4 ton/year 더 적게 계산되었다. 반면, CNG에 대해서는 NO_x와 VOC는 각각 162.3 ton/year, 10.4 ton/year 더 많이 산정되었고, CO에 대해서만 275.1 ton/year 적게 계산되었다. CNG버스 배출량 중 CO의 차이가 큰 이유는 매연저감 장치를 고려한 저감 효과를 반영하여 나타나는 것으로 사료된다. CNG버스는

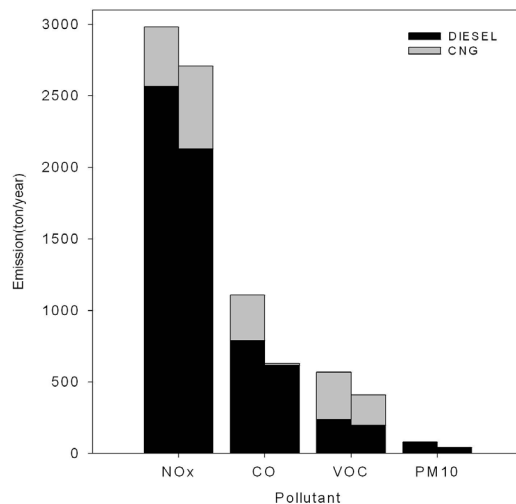


Fig. 2. Compare calculated emission(right bar) with CAPSS data(2008, National Institute of Environmental Research, left bar) consisting emissions of CNG bus(black bar) and Diesel bus(gray bar).

기체 상태인 압축천연가스를 원료로 하기 때문에 경유버스와 비교했을 때 매연이나 미세먼지 배출이 없는 장점이 있다. 이에 따라 CNG버스에서의 엔진가열로 인한 PM₁₀은 배출은 계산되지 않았다.

이와 같은 배출량 차이는 시내버스 배출량 산정시 고려된 운행속도 및 주행거리의 차이에서 기인한 것으로 판단된다(정 등, 2010). 본 연구에서는 현재 운행 중인 시내버스별 GIS 노선정보와 운행속도(17.6 km/h~30.7 km/h)를 고려하여 산정하였으므로 보다 현실적인 배출량 산정이 가능하고 이에 따라 배출량의 불확실성을 감소시킨 것으로 판단된다.

3.2. 시내버스 배출 총량 변화

부산시 시내버스의 연료를 경유에서 CNG로 교체함에 따라 시내버스에서 배출되는 대기오염물질별 총량 변화를 분석하였다. Table 3은 앞서 2.2절에서 언급된 각 연료별 경우의 NO_x, CO, VOC, PM₁₀에 대한 부산시 연간 시내버스 배출량을 나타낸 것이다.

Table 3. Total emissions of diesel bus and CNG bus in Busan (ton/year)

air pollutant Case*	NO _x	CO	VOC	PM ₁₀
DSL	3277.3	951.4	299.8	68.6
DSL+CNG	2707.3	630.9	538.2	46.5
CNG	1648.5	27.9	980.7	-

*DSL Case is diesel bus 100%.

DSL+CNG Case is diesel bus 65% and CNG bus 35%.

CNG Case is CNG bus 100%.

전체 시내버스가 경유버스일 경우(DSL Case)와 비교해 시내버스의 35%가 CNG버스로 교체되면(DSL+CNG Case) NO_x, CO, PM₁₀에 대해 각각 22.4%, 43.7%, 45.0%의 저감효과가 있는 것으로 분석되었다. 이후 CNG버스로 전부 교체되면(CNG Case) NO_x, CO에 대해 각각 49.7%, 97.1%의 저감효과가 있었고 NO_x의 경우 1628.8 ton/year 줄어든 1648.5 ton/year, CO의 경우 923.5 ton/year 줄어든 27.9 ton/year의 배출량이 발생할 것으로 계산되었다. 또한 CNG버스는 매연이나 미세먼지 배출이 없으므로 PM₁₀ 배출량은 경유에서 CNG로 연료가 교체될 때, 100% 저감되는

것으로 나타났다.

VOC에 대해서는 CNG 연료의 상대적으로 큰 배출계수로 인해 오히려 배출량이 증가하였다. 시내버스가 경유 연료만 사용할 경우(DSL Case)와 비교해 전체 시내버스의 35%가 CNG 연료를 사용할 경우(DSL+CNG Case) 약 2배, CNG 연료를 100% 사용할 경우(CNG Case)에는 약 3.3배 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Okamoto와 Kado(2006)와 Hesterberg 등 (2008)의 연구결과와도 일치하는 것으로 제시된 바 있다.

이상과 같은 부산 내 시내버스의 배출 총량 변화는 국가 대기오염배출량의 도로이동오염원 중 시내버스 배출량의 기여(2008년 NO_x 17.2%, CO 3.6%, VOC 10.1%, PM₁₀ 10.4% 차지)를 고려해 볼 때, VOC를 제외한 대부분의 배출물질에서 감소가 뚜렷해 전반적인 배출량 저감측면에서 효과가 있을 것으로 판단된다. 특히 CO의 경우, 적지 않은 양이 시내버스에서 배출되는데 CNG버스 교체로 인한 저감효과도 97.1%로 나타나 그 효과가 더욱 클 것으로 예상된다.

3.3. 시내버스 배출량 공간분포 변화

시내버스 연료 교체로 인한 배출량 저감량은 공간별로 다르게 나타날 수 있다. 즉, 많은 시내버스가 자주 운행되는 도심의 경우, 연료교체로 인한 배출량 저감효과는 더욱 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 부산시 시내버스 배출량에 대한 공간적인 변화를 살펴 보기 위해 MIMS Spatial Allocator를 이용하여 각 경우에 대한 격자별(1 km × 1 km) 배출량을 계산하고 그 결과를 Fig. 3에 제시하였다.

먼저 전반적인 공간분포를 살펴보면 시내버스가 경유버스일 경우(DSL Case)와 CNG버스일 경우(CNG Case)가 배출량의 정량적 차이는 있으나, 배출량 분포패턴은 유사하게 나타났다. 부산에 형성된 다양한 고도의 산등성으로 인해 도로 및 버스노선의 분포가 비교적 산이 존재하지 않는 산과 산사이의 골 및 연안을 따라 집중되어 있으므로 (Fig. 1(a) 참고) 시내버스 배출량도 이러한 특성이 반영되었다. 가장 큰 배출량을 보여주는 지점은 동구와 진구 사이에 존재하는 격자(30, 27 격자)로 버스노선이 집중되어 있고 운행되는 버스 대수(3590 대/일, 전체 시내버스일일 운

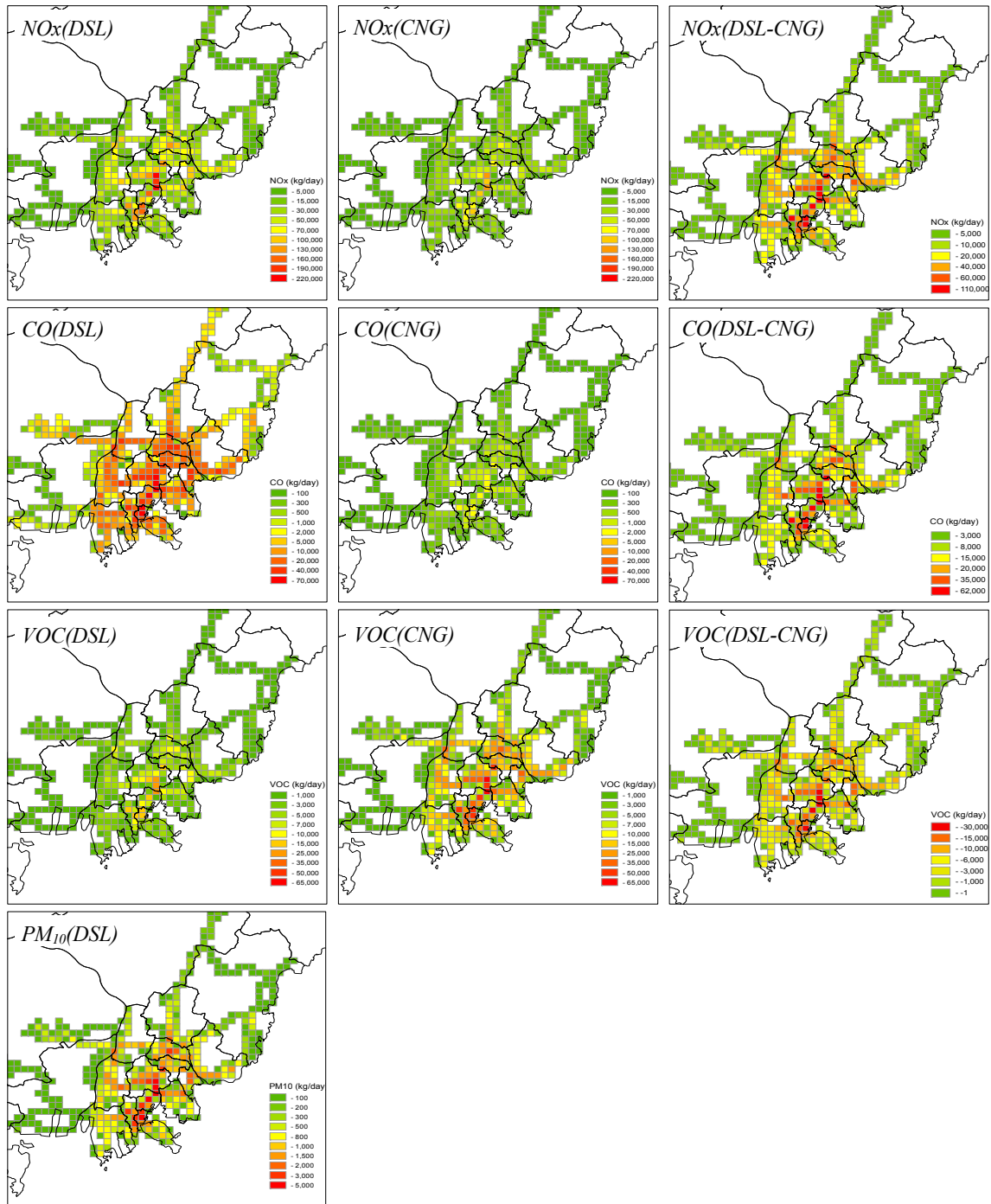


Fig. 3. Gridded emissions(grid 1km × 1km, kg/day) from line source in the Busan metropolitan. Gridded emissions of Diesel bus emission(DSL) and CNG bus emission(CNG). And difference between Diesel bus gridded emission and CNG bus gridded emission.

행량의 32.3%)도 또한 많은 것(Fig. 1(b) 참고)이 원인이다.

NO_x 배출량의 경우, 경유버스 운행시에는 16~213,936 kg/day (평균 20,267 kg/day)였던 배출량 분포가 CNG버스로 교체시 7~107,316 kg/day (평균 10,197 kg/day)로 나타나 격자에 따라 최소 9 kg/day에서 최대 106,620 kg/day까지 줄어드는 것(격자별 저감율 48.3~55.5%)으로 분석되었다. 저감율은 배출량이 많은 격자에서 가장 크게 나타났고, 배출량이 적을수록 저감량도 줄어들었다. CO 배출량은 경유버스 운행시에는 33~62,835 kg/day (평균 5975 kg/day)였던 배출량 분포가 CNG버스로 교체시 1~1,828 kg/day (평균 175 kg/day)로 나타나 격자에 따라 최소 32 kg/day에서 최대 61,007 kg/day까지 줄어드는 것(격자별 저감율 96.8~98.4%)으로 분석되었다.

VOC 배출량에서는 경유버스 운행시에는 1~19,799 kg/day (평균 1,853 kg/day)였던 배출량 분포가 CNG버스로 교체시 4~64,059 kg/day (평균 6,065 kg/day)로 격자별 3~44,260 kg/day 증가하여 205.3~300.0% 증가하였다.

공간분포에서도 배출량 산정과 마찬가지로 CNG버스에서는 엔진기열로 인한 PM₁₀ 배출은 없기 때문에 격자별 배출량은 산정되지 않았다. 총 면적이 765.94km²에 달하지만 시내버스를 포함한 자동차의 운행량이 많은 중구와 동구는 각각 0.37%와 1.28%로서 가장 적은 면적을 차지하고 있어서 도로이동 오염원이 도심지에 집중되어있다.

3.4. 시내버스 배출량의 시간별 변화

시내버스의 경우, 일 중 운행간격이 비교적 일정하므로 출·퇴근시간대에 높게 나타나는 일반적인 도로이동오염원 배출의 시간별 변화 특성과는 차이가 있다(Sowden 등, 2008). 따라서 일 중 도로이동오염원 배출량 중 시내버스배출량이 차지하는 비율은 시간별로 달라지게된다. 부산시 시정백서(2010)에 따르면 부산시내 6~20시에 교통량 조사지점 84개소에서 측정된 교통량 분석에서는 3.7%를 차지하던 시내버스가 하루 24시간 관측소(31개 교통측정관측소)에서의 측정 자료에서는 4.3%로 증가하여 자동차 운행량이 상대적으로 적으며 시내버스는 운행중인 새벽시간대

(5시)와 밤시간대(20~24시)에 시내버스 배출량이 전체 배출량에 기여하는 정도가 높아짐을 예상할 수 있다. 보다 상세한 시간대별 시내버스 배출량이 전체 도로이동오염원 배출량에서 차지하는 비율과 경유버스가 CNG버스로 교체시 물질별 배출량 변화에 따른 시간별 변화를 분석하기 위해 Fig. 4를 제시하였다.

Fig. 4에서 막대그래프는 시간별 도로이동오염원 배출량을 나타낸 것이다. 검은색 막대는 시내버스 배출량(각 시간대별로 왼쪽 막대는 경유버스, 오른쪽 막대는 CNG버스)이며 회색 막대는 국가 대기오염배출량에서 시내버스 배출량을 제외한 도로이동오염원 배출량(국립환경과학원, 2010a)을 나타낸 것으로 경우와 CNG버스에 관계없이 동일하게 적용되었다. 시내버스 배출량을 제외한 도로이동오염원의 시간별 배출량은 연배출량을 365일로 나누어 일배출량으로 변환한 뒤, 부산시 시간별 교통량 측정자료(부산광역시, 2010)를 참고하여 시간별 자동차 운행 비율을 반영하여 계산하였으며 시내버스 배출량은 운행간격이 비교적 일정하므로 운행 중(새벽 5시~밤 12시) 시간별 배출량을 일정하게 계산하였다. 또한 점선과 실선은 각각 전체 도로이동오염원 배출량 중 경유버스와 CNG버스 배출량이 차지하는 비율을 나타낸 것이다.

CO 배출량의 경우, 새벽 1시부터 5시까지는 시내버스의 운행이 존재하지 않으므로(34대의 심야버스는 제외) 시내버스 배출량이 차지하는 비율이 0%로 나타나며 경유버스의 경우(검은 점선) 자동차 통행량이 상대적으로 적고 시내버스는 운행되는 5시에 최고치(3.0%)를 기록하고 있다. 이후 출퇴근 시간인 오전 8~9시에 전체 도로이동오염원 배출량이 많아져 시내버스 배출량은 최고 수준(0.16 ton/hour)임에도 불구하고 시내버스의 기여는 줄어들고 이는 밤 22시까지 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 22시 이후로는 시내버스 외 도로이동오염원 배출량이 줄어들면서 시내버스가 차지하는 배출량 비율이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 CNG버스의 경우(검은 실선), CO 배출량이 크게 저감되어 최고 0.09%(오전 5시)를 기록하였으며 전체 도로이동오염원 배출량 중 차지하는 비율이 크게 줄어들었다.

시간별 배출량 변화와 전체 도로이동오염원 배출량에 대한 기여율에서는 NO_x, VOC, PM₁₀ 배출량 역

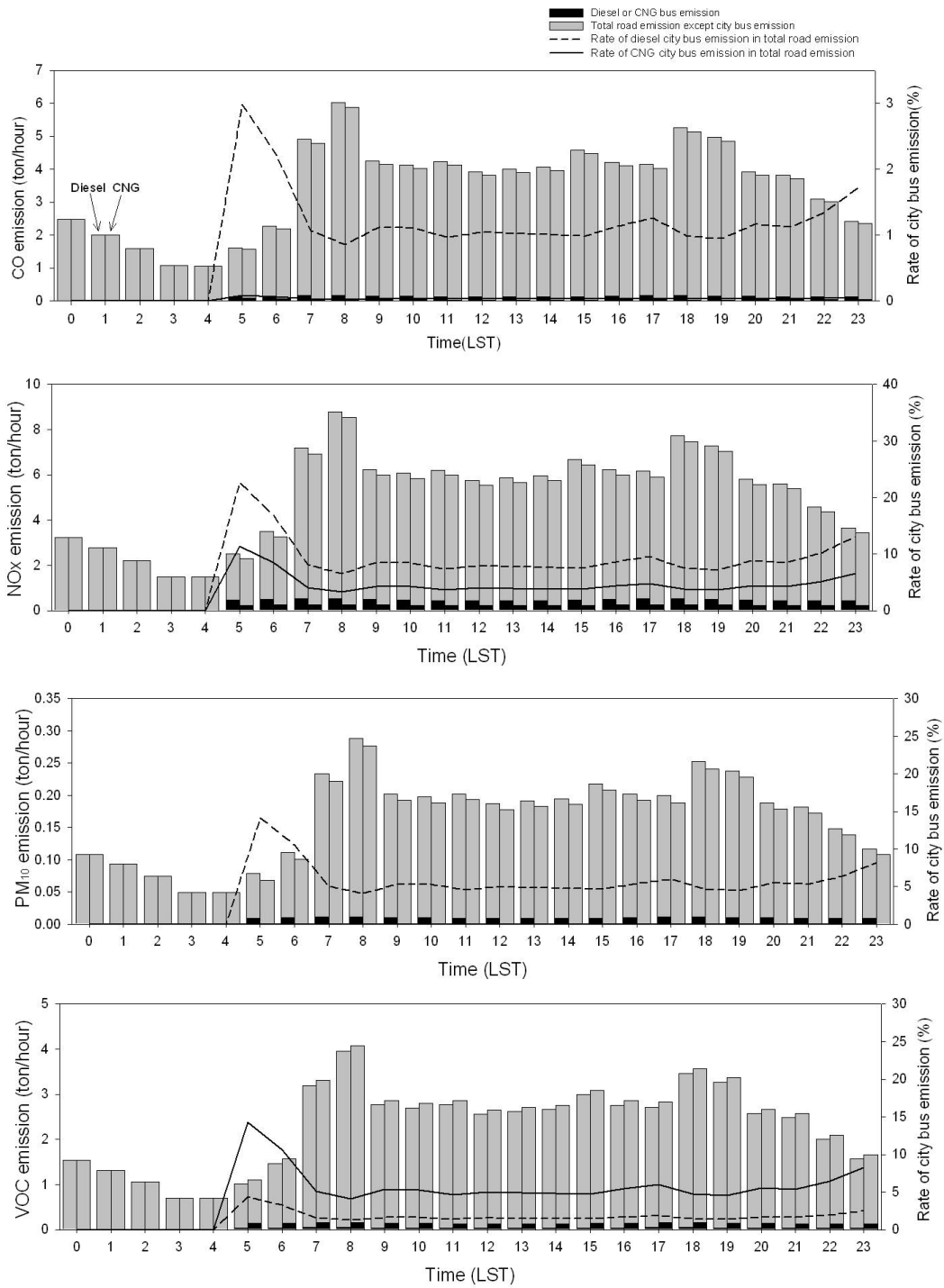


Fig. 4. hourly city bus emission(black bar) and total road emission except city bus emission(gray bar). And the ratio of Diesel city bus emission in total road emission(dash line), ratio of CNG city bus emission in total road emission(solid line).

시 CO와 유사한 시간변화를 보였다. NO_x 배출량의 경우, 경유버스 운행시(검은 점선) 시간별 배출량은 오전 8~9시에 0.54 ton/hour로 최고였으나 전체 도로 이동오염원 배출량에서 차지하는 비율은 오전 6시에 22.6%로 크게 나타났다. CNG버스로 교체되면(검은 실선) 시간별 분포 패턴은 유사하나, 배출량 저감효과로 인해 전체 도로이동오염원 배출량에서 차지하는 비율은 약 50% 수준으로 나타났다. 반면 VOC 배출량의 경우, 시간대별 기여율 변화는 유사하나 앞서 언급한 것처럼 경유버스에서 CNG버스로 교체될 때 배출량이 오히려 증가하여 도로이동오염원 배출량에 대한 기여율도 약 2.3~3.2배로 증가하였다. 마지막으로 PM₁₀ 배출량은 경유버스 운행시 0.01 ton/year(오전 8~9시)로 최대 배출량을 나타냈고, 이 시간대에 전체 배출량 중 경유버스 배출량이 차지하는 비율은 4.1%로 가장 낮게 나타났다. 경유버스가 CNG버스 교체되면 PM₁₀은 100% 감소되기 때문에 대기 중 PM₁₀ 농도 수준은 줄어들 것으로 예상된다.

이러한 결과는 부산시 경유버스가 CNG버스로 교체될 때 나타나는 시내버스 배출량 변화가 시간대에 따라 대기질에 미치는 영향이 다를 수 있음을 의미한다. 또한 연안에 위치하여 국지기상의 영향을 크게 받는 부산의 경우, 연료교체로 인한 시내버스 배출량 변화는 일 중 발생하는 해륙풍순환과 함께 부산의 대기질에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서 산정된 경유 및 CNG 시내버스 배출량을 토대로 3차원 대기질 모델링이 수행된다면 시내버스 연료교체로 인한 대기질 개선에 대한 정확한 평가가 가능할 것이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 부산지역 시내버스가 경유버스에서 CNG버스로 교체될 때의 배출량 변화를 산정하고 배출물질의 공간 분포변화의 특성을 분석하였다. 먼저 국립환경과학원의 도로이동오염원 배출량 산정방법을 이용하여 대기오염물질 배출총량을 산정하였다. CNG버스로 교체될 때 배출량 변화를 효과적으로 분석하기 위해 3가지 실험조건 - 1) DSL+CNG case : 경유버스와 CNG버스가 65 대 35의 비율(%)로 운행, 2) DSL case : 부산시내 운행되는 모든 버스가 경유버스

라고 가정, 3) CNG case : 운행되는 모든 시내버스가 CNG버스라고 가정 - 으로 나누어 배출량을 산정하였다. 이후, ArcGIS프로그램을 이용하여 각각의 버스 왕복노선을 생성하고 배출량 정보를 입력한 후 MIMS Allocator프로그램을 통해 대상지역의 배출량 공간분포 및 특성을 살펴보았다. 본 연구에서는 부산시 시내버스 연료교체에 따른 배출량이 어떻게 변하는지 정량적으로 분석하는데 목표를 두었다.

배출량 산정결과, 도로이동오염원 중 가장 큰 비율을 차지하고 있는 NO_x의 배출량은 DSL case에서는 3277.3 ton/year, DSL+CNG case에서는 2544.3 ton/year, CNG case에서는 1648.5 ton/year로 산출되었으며, 모든 시내버스를 CNG버스로 교체되었을 때는 경유버스만 운행할 때와 비교하여 약 50%정도의 저감효과를 보는 것으로 나타났다. CO의 경우 DSL case는 951.4 ton/year, DSL+CNG case는 535.8 ton/year, DSL case는 27.9 ton/year이다. 경유버스가 100%(혹은 CNG버스 0%)인 DSL case와 비교하여 CNG버스 비율이 35%인 DSL+CNG case에서의 CO 배출량은 DSL case에 비해 약 44% 정도 저감이 나타났으며, CNG버스가 100%인 CNG case에 비해 약 95% 정도 높게 산출되었다. 이것은 CO의 경우 경유버스에서 나오는 배출량이 CNG버스에 비해 월등히 많음을 의미한다. 이와는 달리 VOC는 DSL case에서는 299.8 ton/year, DSL+CNG case에서는 606.2 ton/year, CNG case에서는 980.7 ton/year가 나오며 CNG버스로 교체에 따라 배출량이 점점 증가하는 것으로 나타났다. PM₁₀의 배출량은 DSL case는 68.6 ton/year, DSL+CNG case는 37.7 ton/year이고 CNG case는 모든 시내버스가 CNG버스로 교체된 사례이므로 매연과 미세먼지가 배출되지 않아 PM₁₀은 산정되지 않았다. 배출물질의 공간분포 변화를 보면 도로집중형의 도로체계로 인해 교통량이 많은 지역에서 시내버스 배출량도 집중되어 있음을 알 수 있다. 사례별로 배출량의 정량적 차이는 있으나, 배출량 분포 패턴은 유사한 것으로 나타났다. 시간별 변화를 살펴보면, 시내버스의 시간별 배출량은 일정 간격으로 운행되므로 다른 이동오염원의 배출량과는 서로 차이가 나타났다. 따라서 이러한 결과는 부산시 시내버스가 CNG버스로 모두 교체될 때 나타나는 시내버스 배출량 변화가

시간대에 따라 대기질에 미치는 영향이 다를 수도 있다는 것을 의미한다. VOC를 제외한 나머지 1차 오염물질들이 큰 비율로 감소됨에 따라 인간의 건강과 환경에 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 예상되는 반면 대기 중의 1차 오염물질의 화학반응에 의해 간접적으로 생성되는 2차 오염물질의 농도에는 다소 영향을 줄 것으로 사료된다.

본 연구는 부산지역 모든 시내버스가 CNG로 교체되는 것을 가정한 후 실측이 아닌 산정법을 적용하여 대기오염물질을 정량적으로 산정해 배출량 변화를 분석한 것에 의의를 두었다. 이러한 주요 연구 결과는 향후 연료개선에 따른 대기질변화 모델링 수행에 있어 중요한 기초정보를 제공할 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3308)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

교통환경연구소, 2006, 배출계수 산출식.
 교통환경연구소, 2007, 천연가스버스 엔진동력계 시험 결과.
 국립환경과학원, 2007, 주요대기오염물질 배출량 변화 추이.
 국립환경과학원, 2010a, 대기오염물질 배출량 2008.
 국립환경과학원, 2010b, 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(II).
 맹성호, 이범호, 주경석, 이대엽, 박용희, 권상일, 전상우, 2006, PEMS를 이용한 대형차량 배출가스측정 및 실시간 희석 효율 산출, 유체기계공업학회 2006 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 3-525.
 부산광역시, 2010, 부산광역시 시정백서.
 엄명도, 류정호, 이종태, 이태우, 권상일, 김기호, 2002, 중량경유자동차의 배출가스 열화계수 평가 방법에 관한 연구, 국립환경연구원보, 611-621.
 이석환, 김홍석, 박준혁, 윤준규, 2011, 이동형 배출가스 측정시스템(MEL)을 이용한 디젤, CNG, LPG 시내버스에서 배출되는 입자상 물질 평가, 대한기계학회

논문집, B(4), 337-444.
 전국버스운송사업조합연합회, 2011, <http://www.bus.or.kr/data/tongae.htm>.
 정상우, 엄명도, 홍지형, 2010, 국내에서 운영중인 시내버스의 시험모드에 따른 배출특성 비교 연구, 한국 대기환경학회지, 26(4), 403-411.
 한국천연가스협회, 2010, <http://www.kangv.org>.
 Eyth, A., Benjey, W., 2005, Generation sophisticated spatial surrogates using the MIMS Spatial Allocator, Presented at 14th Annual Emission Inventory Conference, Las Vegas, NV, April 11 - 14, 2005.
 Hesterberg, T. W., Lapin, C. A., Bunn, W. B., 2008, A comparison of emissions from vehicles fueled with diesel or compressed natural gas.
 Kim, S. T., Moon, N. Y., Byun, D. W., 2008, Korea Emissions Inventory Processing Using the US EPA's SMOKE System, Asian Journal of Atmospheric Environment, Vol.2-1, 33-46.
 Mage, D., Ozolins, G., Peterson, P., Webster, A., Orthofer, O., Vandeweerd V., Gwynne, M., 1996, Urban air pollution in megacities of the world, Atmospheric Environment 30(5), 681-686.
 Mayer, H., 1999, Air pollution in cities, Atmospheric Environment 33, 4029-4037
 Menon, V. C., Komarneni, S., 1998, Porous adsorbents for vehicular natural gas storage: A review, Journal of Porous Materials 5, 43-58
 Nylund, N., Erkkilä, K., Lappi, M., Ikonen, M., 2008, Transit bus emission study: Comparison of emission from diesel and natural gas buses.
 Okamoto, R. A., Kado, N. Y., Kuzmichy, P. A., Ayala, A., Kobayashi, R., 2006, Unregulated Emissions from Compressed Natural Gas (CNG) Transit Buses Configured with and without Oxidation Catalyst, Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 332-341.
 Sowden, M., Cairncross E., Wilson, G., Zunchle, M., Kirillova, E., Reddy, V., Hietkamp, S., 2008, Developing a spatially and temporally resolved emission inventory for photochemical modeling in the City of Cape Town and assessing its uncertainty, Atmospheric Environment, 42(2008), 7155-7164.