

버스승강장 시설 개선을 통한 대기오염물질 저감방안 및 위해성 평가

박기형[†] · 도우곤 · 유은철
대기보전과

Reduction of Air Pollutants Through Facility Improvement of Bus Platform and Risk Assessment

Gee-Heyong Park[†], Woo-Gon Do and Eun-Cheol Yoo
Air Preservation Division

Abstracts

This research has been done to minimize the health risk of people at bus shelter from vehicle emission when bus platform are built. Furthermore, we suggested that bus waiting passenger's safety should be ensured and the conclusion is like that ;

Size distribution of particulate matter showed high concentration at the coarse particle region ($>3.2 \mu m$) outside bus platform, at the fine particle region ($<1.8 \mu m$) inside existing bus platform, and at the range of $1 \sim 10 \mu m$ inside modified bus platform, but it showed low level of particulate matter inside modified bus platform comparing outside and existing bus platform.

Total particulate matter level is in the order of outside (a) > existing (b) > modified (c) and PM10/TSP are (a) 78 %, (b) 81 %, and (c) 84 %.

The level of gaseous pollutants (CO, NO, and NO₂) inside modified bus platform are 40 %, 35 % and 70 % of outside bus platform, 53 %, 63 %, and 76 % of inside existing bus platform, so it is considered that the modified bus platform can reduce particulate and gaseous pollutants.

Risk index of NO₂ both inside modified bus platform and existing bus platform didn't exceed "1", the criteria for health effect by noncarcinogenic pollutants, and health risk of modified bus platform was about 24 % lower than that of existing bus platform.

In conclusion, we should not only consider reducing health risk but also ensure bus waiting passenger's safety by minimizing pollutants level for changing old bus platform or building new bus platform.

Key words : particulate matter, size distribution, gaseous pollutants, bus platform, health risk

서 론

산업화에 따른 부산물로서 대기오염은 인간이 제품을 생산하고, 운반하며 우리가 삶을 영위하고 일하는 곳에 빛을 밝혀주고 에너지를 생산하는 것으로부터 남아있는 현상이 되었다. 대기오염의 주요 원인은 연소이나 이것은 또한 인간의 삶에 필수적인 것이다. 이론적으로 완전한

연소가 되면 연료 중의 수소와 탄소는 공기중의 산소와 결합하여 열, 빛, 이산화탄소와 수증기를 만들어내지만, 연료중의 불순물이나 공연비의 부족, 또는 너무 높거나 낮은 연소 온도는 CO, SO_x, NO_x, 재, 미세먼지, 불연소 탄화수소와 같은 대기오염물질들을 생성한다.

도시화에 따라 수반되는 교통관련 대기오염물질이 인체의 미치는 영향뿐만 아니라 알레르기 질환과 연관되어

[†] Corresponding author, E-mail : green911@korea.kr

Tel : +82-51-888-6816, Fax : +82-51-888-6817

있음이 실험연구나 역학연구 등을 통해서 증명되고 있으며, 건강영향과 관련하여 입자상 물질, 특히 PM10, PM2.5와 0.1 μ m이하의 초미세먼지(ultrafine particulate), 이산화질소, 일산화탄소, 벤젠 등도 교통관련 대기오염물질로 중요하다^{1) 2) 3)}.

교통수단의 부정적인 영향은 시간 손실, 자동차 사고, 온실가스 배출, 대기질을 악화시키고 호흡기와 심혈관계와 관련된 건강상 위해이다.^{4) 5)} 많은 연구들은 사람들이 교통수단 등을 통해 호흡하는 공기는 고농도의 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM10과 PM2.5) 그리고 휘발성유기화합물(VOCs) 등으로 인해 안전하지 않다는 것을 보여주었다⁶⁾.

교통수단에서 배출되는 물질은 매우 다양하나, 그중 디젤엔진 배출물질(diesel engine exhaust, DEE)이 가장 대표적이면서 건강영향에 대한 연구가 많이 진행된 물질이다. DEE는 수백가지의 가스상 또는 입자상 물질의 복합체이며 주요 가스상 물질로는 CO₂, O₂, N₂, 수증기, CO, 질소화합물, 황화합물 등과, aldehydes (formaldehyde, acetaldehyde, acrolein 등), 벤젠, 1,3-butadiene, PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons), nitro-PAHs와 같은 수많은 저분자량의 탄화수소 등이 포함되며, 입자상 물질로는 탄소를 함유한 유기화합물, 소량의 황산염, 질산염, 중금속 그리고 기타 미량 원소 등으로 구성되어 있다. 특히 입자의 크기가 2.5 μ m 이하인 미세먼지(PM2.5)와 0.1 μ m이하의 극미세입자는 표면적이 넓어 유기물질을 흡수하는 매체로 작용하며, 입자의 크기가 매우 작아 호흡을 통해 인체에 흡입될 경우 폐 깊숙이까지 침투할 수 있어 호흡기뿐만 아니라 심혈관계 질환까지 유발하는 것으로도 알려져 있다.

교통관련 대기오염 물질 즉, 자동차 배출물질에 노출될 경우 천식의 발생이나 천식 증상을 악화시키는 독성 반응의 기저 메커니즘으로 산화성 스트레스(oxidative stress)가 중요하게 거론된다. NO₂나 입자상 물질과 같은 교통관련 오염물질에 의해서 활성산소(reactive oxygen species, ROS)와 유리기(free radicals)가 생성된다. 교통관련 대기오염물질이 흡입되면 기도에서는 항산화물질에 의해 활성산소를 상쇄시키는 작용을 하게 되나, 이러한 항산화제 방어기제가 압도되는 경우 산화성 스트레스가 증가하게 되며 이로 인한 염증반응은 추가적인 ROS 생산과 염증증가를 초래한다. 고농도의 ROS는 국소적 항산화제의 고갈을 유발하고 표적조직을 벗어나 염증반응의 확산을 유도하게 되어 천식과 같은 기도염증 반응을 유발하게 되는 것이다⁷⁾.

우리나라 대도시의 경우 버스와 지하철로 이루어진 대중교통 시스템이 발달되어 있는 반면 지방 중소 도시의 경우 지하철이 없어 버스 이용 비중이 높으나 현재 우리나라에서 운용되고 있는 버스 이용 체계에 적절한 버스 이용 시스템이 부족한 실정이다. 서울시의 경우 해외 BRT(Bus Rapid Transit ; 간선급행버스) 성공사례를 바탕으로 국내에 가장 먼저 중앙버스전용차로를 설치하였고, 대중 교통 우선의 교통시스템을 도입하여 버스의 속도는 빨라지고 운행 시간과 배차시간이 단축되는 등의 성과를 거뒀으나 먼저 버스 승차를 위해서 차도 중앙의 교통섬으로 이동하여야 하며, 차도의 중앙 교통섬에서 승객들이 버스를 대기하고 있는 동안 자동차에서 배출되는 각종 배출가스, 매연, 차량소음 등과 같은 공해요인에 무방비로 노출되어 있으며 노약자 및 장애인들의 승하차 시 물리적 어려움 등 이용자가 충분히 보호되지 못하고 있다. 최근 위와 같은 문제점 등을 개선하고자 공공환경에서의 유니버설 디자인(Universal design) 평가와 사용자 행태 관찰 분석을 실시하여 다양한 특성의 이용자들이 쾌적한 환경에서 안전하게 버스를 이용할 수 있도록 버스 승강장에 대한 디자인을 강구하고 있으며 또한 급변하는 디지털 시대에 맞추어 새로운 콘텐츠들이 발전하고 있으며, 대표적인 예로서 IT를 기반으로 한 버스정보시스템 들 수 있다.

교통 밀집 지역, 도로변 보행로, 도로 인접 지역에서의 주거나 노동, 자전거로 이동과 대중교통 이용을 위해 대기하는 것 등을 포함한 transport microenvironments에서의 자동차 배출물질이 승객들에게 노출되는 것에 대한 우려가 증가하고 있다. 오염물질의 농도는 다른 환경과 비교해 볼 때 그러한 transport microenvironment에서 일반적으로 높으며 결과적으로 대기중 입자상 물질 오염에 대한 개개인의 일일 노출의 상당 부분이 이러한 환경에서 비교적 짧은 시간에 이뤄질 수 있다⁸⁾.

Daniel Baldwin Hess 등⁹⁾은 버스 승강장에서 입자상 물질에 영향을 미치는 인자로서 통계적으로 유의한 4가지 요인이 있다고 하였으며, 여기에는 시간, 승객 대기 위치, 버스 승강장 근처의 토지 이용, 그리고 버스 승강장에서 흡연자의 존재 등을 제시하였다. 3개의 유리벽으로 된 개방형 승강장 내부에 대기하는 사람들은 오히려 승강장 외부에 대기하는 사람들보다 입자상 물질 특히, 미세먼지(PM2.5)에 노출될 확률이 더 높을 수 있다고 하였다.

디젤 배출가스는 입자표면에 PAHs와 nitro-PAHs가 흡착된 가스상과 검댕 입자(함유량 > 60 %의 원소성 탄소(EC))로 구성되어 있으며 nitro-PAHs의 주요 성분은

Table 1. Vehicle registration number in Busan¹²⁾

(단위:대)

구분 \ year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011.11
계 (증가율)	812,369 (6.8)	862,699 (6.2)	921,084 (6.8)	955,366 (3.7)	966,417 (1.2)	979,969 (1.4)	994,292 (1.5)	1,010,286 (1.6)	1,038,954 (2.8)	1,116,719 (7.4)	1,147,311 (2.7)	1,160,019 (1.1)
승용	547,405	589,257	638,173	667,191	679,433	699,786	718,357	735,941	769,463	851,684	885,945	901,583
승합	92,069	87,697	87,903	85,833	83,048	76,791	73,780	71,609	69,904	68,011	64,531	61,894
화물	167,899	180,393	189,023	195,601	196,740	196,099	194,622	194,713	191,635	189,029	188,731	188,304
특수	4,996	5,352	5,985	6,741	7,196	7,293	7,533	7,823	7,952	7,995	8,104	8,238

1-nitropyrene이다¹⁰⁾.

Pope 등¹¹⁾은 교차로, 환승 허브, 버스 승강장과 같이 교통과 관련된 microenvironment에서는 비교적 짧은 시간에 더 높은 농도의 입자상 오염물질에 노출될 수 있으며 건강상 위해성을 증가시킬 수 있다고 하였다.

부산은 배산임해의 지형 구조를 가지고 있어 많은 교통량을 처리할 수 있는 도로망의 형성에 취약한 구조를 가지고 있으나 교통량은 지속적으로 증가하고 있으며 항만이 도심 인근에 위치하고 있어 항만화물의 시내도로 통과 등으로 기간 도로교통망의 지속적인 확충에도 불구하고 교통체증은 가중되고 있다. Table 1에서 보는 바와 같이 부산시의 자동차 등록대수가 1992년 46만대에서 2007년 약 100만대로 넘어서면서 대기오염의 주요 배출원이 되고 있다.

버스 승강장의 종류 및 특성

가로변 버스 승강장

가로변 버스 승강장은 가로변에 설치되어 있는 가장 일반적인 형태의 승강장으로, 지주와 버스안내 표지판으로 이루어져 있으며, 최근 들어 기존 시설에 추가적으로 칸막이(shelter)와 벤치가 설치되어 이용자들의 편의를 도모하고 있다.

중앙차로 버스 승강장

국내에서는 서울시에서 가장 먼저 중앙버스 전용차로를 설치하였고, 대중교통 우선의 교통시스템을 도입하여 버스의 속도가 빨라지고 운행시간과 배차시간이 단축되는 성과를 거두었다. 부산의 경우 사하구 하단동에 2008년부터 중앙버스 전용차로제를 설치하여 운행하고 있다. 중앙차로 버스 승강장의 경우 가로변 버스승강장과는 다르

게 버스 승차를 위해 차도 중앙의 교통섬으로 이동하여야 한다. 특히 이곳에서 이용자들이 버스를 대기하고 있는 동안 차량으로부터의 배출가스, 매연과 악천후, 차량 소음 등에 무방비로 노출되어 있을 뿐만 아니라 노약자 및 장애인들의 승하차시 어려움 등 여러 위험요소에 노출되어 있다.

다가능 버스 승강장

다가능 버스 승강장의 대표적인 모델은 BRT 우수사례로 브라질 꾸리찌바의 원통형 승강장과 콜롬비아 보고타의 트랜스밀레니오를 꼽을 수 있다. 지하철 건설 1/10 정도의 적은 비용으로 지하철의 편리한 점을 지상으로 옮겨 놓은 대중교통 시스템이다. 이 승강장의 경우 빠른 승하차를 위한 요금 선지불 방식, 버스과 승강대 높이를 일치하게 하고 승강 간격을 없앤 플랫폼으로 휠체어 사용자도 편리한 이용이 가능하도록 설계되어 있으며, BIS (Bus Information System)을 통하여 버스 운행 정보를 제공하고, 냉·난방시설을 겸비한 실내형 버스 형태의 버스 승강장 디자인으로 쾌적한 이용과 기존 개방형 버스 승강장에서 악천후를 포함한 외부 위험요소로부터 안전하게 보호한다.

브라질 남부에 위치한 꾸리찌바시는 ‘지구에서 환경적으로 가장 올바르게 사는 도시’로 알려져있으며 가장 완벽한 대중교통과 녹색교통의 모델도시로 널리 알려져 있다. 토지이용과 교통계획을 완전히 통합시켜 도시교통문화를 완전히 해결했으며, 1990년대에는 승객들이 버스를 타기 전에 요금을 지불하는 원통형 정류장 체계를 도입하여 버스승강대와 동일한 높이의 플랫폼과 장애인들이 승하차를 쉽게 할 수 있는 휠체어 리프트가 구비되어 있다. 이로 인해 승객들의 승하차 시간을 줄이고 불필요한 엔진의 공회전을 방지해 대기오염을 약 30% 정도 저감시켰다고 한다.



Fig. 1. Multi-functional bus Platform.

fig. 1은 인천과 경북 포항시 및 충북 제천시에 설치된 다기능 버스 승강장이며 인천 서구청 앞 설치된 승강장의 경우 2008년 9월 인천 서구에 국내에 처음으로 사방이 투명소재이고 자연채광이 되는 지붕으로 이루어졌으며, 각종 편의시설을 갖추고 있으나 설치비용이 4,345만원으로 다소 높다. 충북 제천시는 2009년 2월 2,800여만원을 들여 냉난방 시내버스 승강장을 설치하여 운영중이다.

또한 요금 선지불 시스템을 들 수 있는데 승객들이 버스를 타기 전에 요금을 지불하는 시스템으로 버스의 공회전을 줄이고 승하차 시간을 단축시킨다. 이러한 시스템은 지하철 요금 지불과 같은 방식이며, 현재 우리나라의 시스템은 버스에 타면서 요금을 지불하게 되어 있으나 이는 승객들이 타는 시간이 늘어나면 버스운행시간 또는 늘어나 버스운행간격이 늘어나게 되며 버스에서 배출되는 이산화탄소뿐만 아니라 각종 대기오염물질도 증가하게 된다.

요금 선지불 시스템은 다기능 버스승강장의 도입이 보편화되면 실현이 가능할 것이지만, 냉난방 시설은 관리 및 운영비용의 문제로 정상가동이 어렵지만 태양열과 풍력 발전을 이용한 운영 방안에 적극적인 계획이 필요하다.

특히 경유차에서 주로 배출되는 오염물질 중에 질소산화

물과 무기탄소를 포함하는 미세먼지가 문제가 되고 있다. 부산시는 인구가 밀집되어 있고 차량정체 시간이 길며 도로주변과 거주지역과의 거리가 짧고 항만 관련 화물차 등 경유가 연료인 대형 화물차량의 운행이 빈번하여 시민들이 느끼는 체감 오염도가 더욱 높으므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 특히 자동차에서 배출되는 미세먼지의 주요 구성요소인 탄소성분(유기 및 무기탄소)은 국립환경과학원 조사결과¹³⁾ 지역적으로 다소 차이는 있으나 PM2.5 조성의 30 ~ 50%를 차지하므로 대기중 PM2.5의 저감을 위해서는 자동차 관련 정책도 중요한 부분이라 할 수 있겠다.

Table 2는 배출가스 제어장치가 없는 경우의 자동차에서 배출될 수 있는 발생원을 비율로 나타낸 것이며 배출물질별로 보면 일산화탄소는 배기구에서 100% 발생하며, 탄화수소의 경우 배기구 62%, 크랭크케이스 20%, 연료탱크에서 증발 9%, 카브레이터에서 증발 9% 이고, 질소산화물의 경우 배출구에서 100%, 입자상물질의 경우 배출구 90%, 크랭크케이스에서 10% 발생하는 것으로 알려져 있다.

역학적으로 대기중 NOx는 건강상 크게 위해를 주지 않



Fig. 2. Picture of Bus Rapid Transit in Busan.

Table 2. Emission sources of automobile with no emission controls¹⁵⁾

Source	Pollutant(%)			
	CO	HC	NOx	Particles
Exhaust	100	62	100	90
Crankcase emission	-	20	-	10
Fuel tank evaporation	-	9	-	-
Carburetor evaporation	-	9	-	-

Table 3. Change number of CNG bus by year in Busan

Year	Total	~2009	2010	2011	2012
Total	2,400	1,069	391	477	463
Express bus	153	9	37	57	50
Intra-city bus	2,247	1,060	354	420	413

(출처:부산광역시 교통국)

Table 4. Emission factors for CNG and Diesel buses¹⁶⁾

Fuel type Pollutants (g/km)	Natural gas			Diesel	
	Type 1	Type 2	Type 3	91/542/EEC/I	91/542/EEC/II
CO	11.63	0.54	5.37	19	13.5
HC	4.96	5.21	8.34	3	2.8
NOx	8.25	13.42	14.73	19	13.5
Particles	0.026	0.025	0.036	1.1	0.6

(출처 : 경유 버스의 배출계수는 European program COPERT에서 인용한 것이며, 이 프로그램은 INRETS와 CORINAIR 자료를 요약한 것임)

지만, 특히 도시지역의 경우 광화학 스모그를 생성시키기 때문에 큰 문제가 되고 있다. 광화학 스모그 생성반응을 통해 오존과 같은 화학물질을 만들며 결국 인간이나 식물에 직접적인 영향을 미치게 된다. 일산화질소(NO)는 무색의 기체로서 대기중 농도는 0.5 ppm 이하로 낮은 편이며 이것으로 인한 건강상의 영향은 낮다는 보고가 있다. 이산화질소(NO₂)는 붉은 갈색을 띤 기체로서 농도가 높을 경우 눈으로 볼 수 있다.

일반적으로 호흡을 통해 이산화질소 노출농도의 80 ~ 90 %가 체내로 흡수 될 수 있으며, 많은 연구에서 이산화질소의 농도가 2 ppm을 넘어가면 건강한 성인의 폐기능을 약화시키거나 상당히 변화시킬 수 있다고 하며 천식환자에게서 0.5 ppm에서 자극을 나타내고 0.5 ppm 이하에서 폐기능이 감소함을 밝혀냈다.¹⁴⁾

부산시에서는 대기질 개선을 위해 120억원을 들여 경유버스를 친환경 CNG 버스로의 교체하고 있으며 2012년까지 2,400대(급행버스 153대, 일반버스 2,247대)를 교체할 예정으로 연도별 교체현황은 다음의 Table 3과 같

다.

Table 4는 천연가스 버스와 경유 버스의 배출계수를 나타낸 것이며, 모든 항목에서 천연가스 버스의 배출계수가 낮게 나타났고, 특히 입자상물질의 경우 천연가스 버스가 경유버스의 3 % 수준으로 매우 낮았다. Table 5는 천연가스 버스와 경유버스의 단위 시간당 입자수 (particles/s)를 나타낸 것이며, 표에서 보는 바와 같이 배출 입자수는 두 가지 버스 타입 모두 감속 (Deceleration)과 공회전(Idle)시 같았으며, 가속시 (Acceleration)가 다른 운전 조건에 비해 상당히 높게 나타났다. 특히 경유 버스의 경우 다른 운전 조건에 비해 10~100배 높게 나타났으며, CNG 버스의 경우 10⁴배 높게 나타나 가속시가 다른 운전 조건에 비해 더 많은 입자상 오염물질을 배출함을 알 수 있다. 버스 승강장의 경우 가속시 배출가스의 직접적인 영향을 받을 수 있기 때문에 버스 대기 승객은 배출가스에 직접적으로 노출될 수 있다.

다음으로 버스 승객 대기시설, 즉 버스 승강장의 경우

Table 5. Emission rates (particles/s) for CNG and diesel buses¹⁾⁾

Driving condition \ Bus type	Deceleration	Idle	Acceleration	Cruise
Diesel Buses	1.5 E+11	1.5 E+11	2.0 E+13	1.8 E+12
CNG Buses	3.3 E+10	3.3 E+10	4.0 E+14	8.5 E+10

(참고 : 대부분의 입자는 0~400 nm의 크기 범위에 있으며, 디젤과 CNG 버스의 개수 중앙 입경은 각각 80~90 nm와 10~12 nm임)

Table 6. Facility numbers of bus platform in Busan

	Total	~2009	2010	2011
Number	1,271(865)	1,088(728)	93(73)	90(70)

(출처:부산광역시 교통국)

Table 6에서 보는 바와 같이 부산시에는 2011년말 현재 1,271개소(시:406개, 구:865개 설치)가 설치되어 있다. 버스 승강장의 경우 장기간 동일 디자인으로 설치되어 있을 뿐만아니라 시설도 노후화 되어 도시미관에서 악영향을 미칠 수 있다. 특히, 개방형 버스 승강장의 경우 자동차 배기가스로부터의 영향을 직접적으로 받기 때문에 건강상 영향도 일반적인 도심 주거지역에 비해 상대적으로 높다는 연구결과도 있다.

버스 승강장의 경우 설치규격은 가로 1.46 m, 세로 3.4 m 높이 2.38 m이며, 기둥은 특수알루미늄, 지붕은 FRP, 유리는 안전강화유리 재질로 되어 있다. 승객대기 시설의 설치기준은 1)도로기준 : 주요 간선도로 및 다중이용장소 중점 설치, 2)보도기준 : 보도폭이 4.0 m 이상이며 주변 상가의 민원이 없는 곳으로 되어 있으며 그림과 같다.

이에 본 연구에서는 향후 버스 승강장 설치 시 차량 배기가스로부터의 버스 대기 승객의 건강상 위해성을 최소화하고, 이와 더불어 도로 차량 운행에 따른 대기 승객의 안전성을 확보할 수 있도록 시설 개선을 제안하고자 한다.

재료 및 방법

연구조건

본 연구를 위해 광안동 소재 버스 승강장 1개소를 선정하여 다음과 같은 조건하에서 수행하였다. 버스 및 자동차 배출가스에 의한 영향을 알아보기 위해 1)버스 승강장 외부, 2)기존 버스 승강장 내부, 3) 개선 승강장 내부 등 3가지 조건에서 조사를 수행하였다.

입경분포 측정

시료채취에 사용된 입경분포 장치는 11 stage cascade impactor (미국, MSP社)이며 중량농도 측정을 위해 사용된 매질은 aluminum foil (Φ 47 mm)이었다. 시료채취 전 항온(20 ± 2 ℃) 및 항습(45 ± 5 %) 조건이 유지되도록 24시간동안 데시케이터내에 보관한 뒤 무게를 측정하였다. 채취한 시료는 현장에서 PTFE 재질의 테이프로 밀봉한 다음 실험실로 운반 후 항온 항습 데시케이터에 시료를 24시간 동안 보관한 뒤 무게를 측정하여 시료채취 전후의 무게차에 의해 중량 농도를 산출하였다.



Fig. 3. Picture of bus platform.

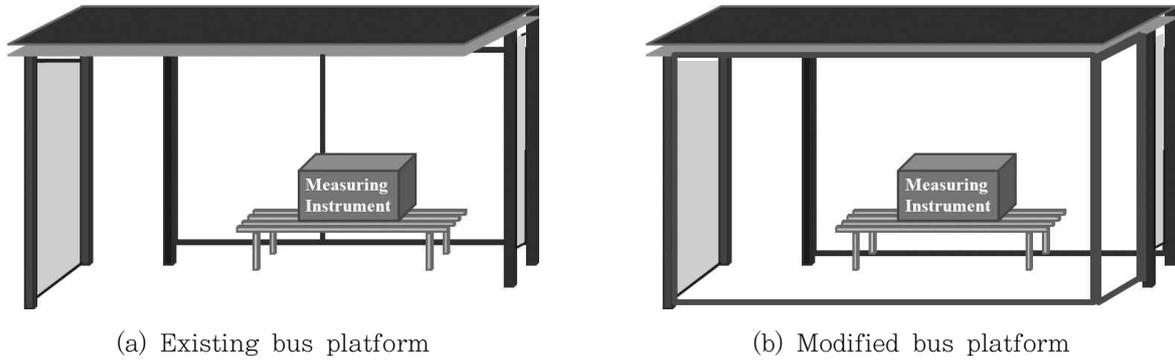


Fig. 4. Bus platform (a) existing (b) modified.

가스상 물질의 측정

본 연구에서는 자동차 배출가스의 대표적인 가스상 물질인 CO, NO_x (NO+NO₂)를 실시간으로 측정하였다. 일산화탄소(CO)의 분석은 CO 분석장비(일본, Horiba 社, 비분산적외선법(NDIR)), 일산화질소(NO) 및 이산화질소(NO₂)의 분석은 NO_x 분석장비(일본, Horiba 社, 화학발광법)를 이용하였으며 5분 간격으로 측정하였다.

건강 위해성 평가

건강 위해성 평가는 ‘어떤 독성 물질이나 위험 상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 혹은 집단의 건강 피해 확률을 추정하는 과학적인 과정’ 이라고 정의할 수 있다. 위해도(Risk)란 유해물질의 특정 농도나 용량에 노출된 개인 혹은 집단에서 유해한 결과가 발생할 확률(Probability) 또는 가능성(likelihood)을 말하며 OECD의 정의에 따르면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{위해성(Risk)} = \text{유해성(Hazard)} \times \text{노출량(Exposure)}$$

* 유해성(Hazard) : 인체나 환경에 해로운 작용을 야기할 수 있는 화학물질의 잠재적 능력

또한 위해성 평가 절차는 미국 국가연구위원회(NRA : National Research Council)에 의해 고안된 유해성 확인, 용량-반응평가, 노출평가 및 위해성 결정의 주요 4단계로 되어 있다.

위해성의 평가(Risk assessment)는 인체가 환경적 위험에 노출되었을 경우, 발생가능한 영향을 정성-정량적으로 평가하는 과정이며, 어떤 규명된 노출로부터 초래될 유해 영향 발생확률을 측정하는 과정이고 또한 독성학적 기준을 이용하여 수용체의 환경에 대한 위해 가능성을 산술적으로 평가하는 과정이다.

위해성 평가는 간단하게 표로 나타내면 아래 Table 7과 같이 4 단계를 통해 수행된다.

Table 7. Health risk assessment process

위험성 확인 (Hazard Identification)	유해물질의 해로운 영향 여부 규명
용량-반응평가 (Dose-Response Assessment)	유해물질의 용량 증가에 따른 수용체에서의 악영향 정도 평가
노출 평가 (Exposure Assessment)	인체나 생태계가 유해물질에 노출되는 정도, 빈도, 기간 등을 산정
위해도 결정 (Risk Characterization)	인체나 생태계에 미치는 위해 정도를 정량적으로 산출

Table 8. Quantitative estimate of carcinogenic and non-carcinogenic risk from inhalation exposure

Pollutant	EPA Classification	RfC (mg/m ³)	NOAEL LOAEL (mg/m ³)	UF	MF
NO ₂	C	0.1	N : 4	30	1

RfC : reference concentration, N : NOAEL, L : LOAEL, UF : uncertainty factor, MF : modifying factor, A : human carcinogen, B : probable human carcinogen, C : possible human carcinogen, D : not classifiable as to human carcinogen, E : no evidence of non-carcinogen for human (US EPA, IRIS, 2005)

용량-반응평가

본 연구에서는 US EPA에서 제공하는 IRIS (Integrated Risk Information System)의 데이터베이스를 이용하여 발암성 및 비발암성 용량-반응평가를 위한 발암성 독성 자료인 단위위해도(unit risk)와 비발암성 독성자료인 RfD (Reference Dose)의 자료를 사용하였다. US EPA의 분류체계인 발암증거의 가중에 따라 발암력을 분류하였고, 단위위해도, 외삽방법(extrapolation method), 암의 형태 및 동물독성 실험으로부터 생물이 어떠한 독성 영향도 나타나지 않는 준위인 최대무영향용량(No Observed Adverse Effect Level : NOAEL)과 건강상에 독성 영향을 나타내는 한계치인 최소영향용량(Lowest Observed Adverse Effect Level : LOAEL) 값을 조사하였다. 또한 특정화학물에 이용될 수 있는 자료의 과학적 불확실성과 외삽할 때 발생하는 불확실성을 교정하기 위한 변형계수(Modifying Factor : MF)와 불확실성계수(Uncertainty Factor : UF) 등을 조사하였으며 아래 Table 8과 같다.

노출평가

버스 및 자동차 배출가스 흡입에 의한 건강 위해성을 살펴보기 위한 필수적인 조건으로 인구집단의 다양한 특성을 반영할 수 있는 노출 계수는 체중, 호흡률, 기대수명, 노출기간 및 노출빈도를 활용하여 노출량을 산정하였다.

1) 체중(body weight)

국민의 평균 체중은 개별연구자에 의한 연구가 아닌 광범위하고 체계적으로 진행되는 국가조사의 대표적인 것으

로 국민체위조사가 있다. 본 연구에서는 2010년 통계청에서 발표한 체중자료를 이용하였으며 평균체중은 19~60세 연령의 남성은 70.9 kg, 여성은 55.6 kg 으로 하였다.

2) 호흡율(inhalation rate)

호흡율은 US EPA의 IRIS에서 건강위해성 평가시 규정하고 있는 20 m³/day를 이용하였다. 본 연구의 경우 점평가치(point estimate)는 호흡율을 30 m³/day를 노출계수 값으로 선정하였다. 확률론적 위해성 평가를 위해 호흡율의 분포는 삼각분포로 가정하였다.

3) 평균수명(average lifetime)

기대 여명은 어느 연령에 도달한 사람이 그 이후 몇 년 동안 생존할 수 있는가를 계산한 생존 연수이다. 이 중에서 특히 0세, 즉 출생시의 평균 기대여명을 평균수명이라고 정의할 수 있다. 우리나라에서는 대부분 통청 자료를 인용하고 있는 실정으로 본 연구에서는 통계청에서 2010년 제시한 0세의 기대여명으로 남자 77.2년, 여자 84.1년을 기준으로 하였다.¹⁸⁾

4) 노출빈도(exposure frequency) 및 노출기간(exposure duration)

본 연구에서는 시간활동표를 이용하여 도로변에 머무르는 시간의 평균값을 산정하였고 점평가치(point estimate) 노출빈도 값의 95 % UCL(Upper confidence level) 값을 활용하였다. 노출기간 값은 통계청에서 제공하는 기대수명 자료를 활용하였으며, 이것 또한 삼각분포로 가정하였다.

비발암성물질의 경우, 위해도 결정에 이용되는 노출량은 일일평균용량(Average Daily Doses : ADDs)으로 나타낼 수 있으며, 아래의 식(1)로 계산할 수 있다.¹⁹⁾

$$Average\ Daily\ Dose\ (mg/kg \cdot day) = \frac{\int Intake\ Dose}{BW \times AT} \dots\dots\dots (1)$$

- Intake Dose = CA × IR × EF × ED
- CA : Chemical concentration in Air (mg/m³)
- IR : Inhalation Rate (m³/day)
- EF : Exposure Frequency (days/year)
- ED : Exposure Duration (years)
- BW : Body Weight (kg)
- AT : Averaging Time (days)

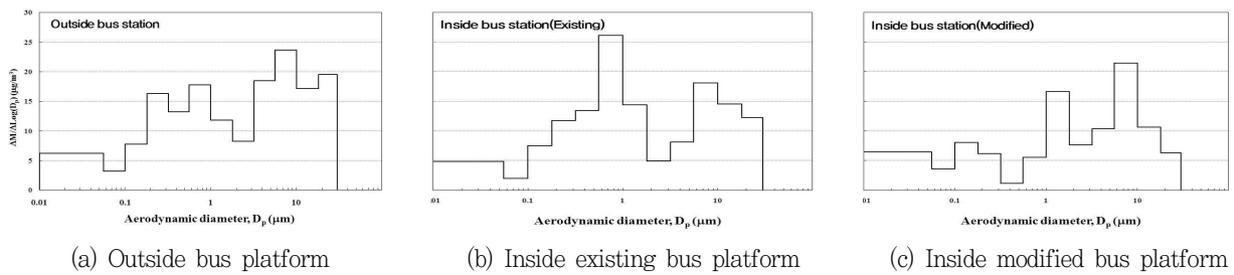


Fig. 5. Size distribution of particulate matter in outside and inside bus platform.

위해도 결정

노출평가를 통해 얻어진 일일평균용량(ADDs)과 IRIS 자료를 이용한 용량-반응평가를 통해 산출된 참고치(RfC)의 비를 통해 비발암 위해도지수를 산출하였다. 위해성 평가는 크게 발암물질과 비발암물질의 독성 기전이 다르므로 평가 방법도 다르게 적용된다. 발암물질은 시뮬레이션 결과 나온 발암 위해도를 EPA에서 위해성 평가에 사용되는 허용 위해도 수준인 1.0E-6과 비교하여 이보다 높은 수준이면 위해성이 높음을 의미하여 낮은 수준이면 위해성이 낮음을 의미한다. 산출된 각각의 위해도 지수는 “1”을 기준으로 1을 초과하는 경우에는 건강상 위해 영향이 발생

할 가능성을 있음을 나타내며, 1이하인 경우에는 안전역에 속해 있음을 제시해 준다. 그러나 위해도 지수의 크고 작음에 따라 위해도의 정도는 평가되지 않는다.

결과 및 고찰

입경분포 농도

입자의 크기 분포는 대기질에 미치는 영향뿐만 아니라 인체에 미치는 영향 파악을 위해서도 중요한 자료로 사용된다. 본 연구에서는 1)버스 승강장 외부, 2)현재의 버스

Table 9. Size distribution of particulate matter outside and inside bus platform.

Particle size (μm)	(a) Outside		(b) Inside (Existing)		(c) Inside (Modified)	
	Mass (μg/m ³)	Content (%)	Mass (μg/m ³)	Content (%)	Mass (μg/m ³)	Content (%)
18.0~	19.5	11.9	12.2	8.8	6.3	6.1
10.0~18.0	17.2	10.5	14.6	10.6	10.6	10.2
5.6~10.0	23.7	14.5	18.2	13.2	21.5	20.7
3.2~5.6	18.5	11.3	8.2	5.9	10.4	10.0
1.8~3.2	8.3	5.1	4.9	3.5	7.7	7.4
1.0~1.8	11.9	7.3	14.4	10.4	16.7	16.1
0.56~1.0	17.8	10.9	26.2	19.0	5.6	5.4
0.32~0.56	13.2	8.1	13.5	9.8	1.1	1.1
0.18~0.32	16.3	10.0	11.7	8.5	6.2	6.0
0.10~0.18	7.8	4.8	7.5	5.4	8.0	7.7
0.056~0.10	3.2	2.0	2.0	1.4	3.6	3.5
~0.056	6.2	3.8	4.8	3.5	6.4	6.2
Total	163.5	100	138.2	100	104.0	100
PM10	126.9	78	111.4	81	87.2	84
Mass Mean Diameter	1.2 μm	50	0.9 μm	50	0.8 μm	50

Table 10. Gaseous pollutants concentration in outside and inside bus platform.

[(a) Outside (b) Inside (Existing) (c) Inside (Modified)]

Pollutants	CO			NO			NO ₂		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
	ppm			ppm			ppm		
Mean	1.241	0.961	0.506	0.161	0.091	0.057	0.050	0.046	0.035
Max.	2.410	1.650	1.170	0.393	0.185	0.150	0.071	0.059	0.054
Min.	0.630	0.470	0.290	0.042	0.026	0.018	0.034	0.036	0.024

승강장 내부 및 3) 도로변 배기가 직접 유입되지 못하도록 개선시킨 버스 승강장 내부 등 3가지 조건하에서 입경분포를 조사하였으며 그 결과는 아래의 Fig. 5 및 Table 9와 같다.

버스 승강장 외부(a)에서 입경분포를 측정된 결과 주로 조대입자(coarse particle) 영역의 3.2 μm 이상의 입경 범위에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었으며, 개방형 부스 형태인 현재 버스승강장 내부(b)에서의 경우는 1.8 μm 미만의 미세영역(fine particle)에서 높은 농도를 나타내었고, 개선 버스승강장 내부(c)에서의 경우는 1 μm 이상의 범위, 특히 조대입자 영역인 10 μm 부근에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었으나 (a),(b)의 조건에 비해 농도 수준은 가장 낮게 나타났다.

총 먼지농도의 경우 Table 8에서 보는 바와 같이 (a)승강장 외부 > (b)승강장 내부(현재) > (c)승강장 내부(개선)의 순으로 높게 나타났다. 총 먼지 대비 PM10이 차지하는 비율은 (a) 78 %, (b) 81 %, (c) 84 %의 순으로 (c)이 조건이 가장 높게 나타났다.

가스상 물질 측정 결과

Table 10에 세 가지 조건에서 측정된 가스상 물질의 농도에 대해서 나타내었다. 일산화탄소(CO)의 평균 노출농도(범위)는 (a), (b), (c) 조건에서 각각 1.241(0.630~2.410), 0.961(0.470~1.650), 0.506(0.290~1.170) ppm으로 승강장 외부에서 측정된 값이 가장 높게 나타났으며 개선 승강장의 경우 절반 수준 이하로 낮아졌다. 일산화질소(NO)의 평균 노출농도(범위)는 (a), (b), (c) 조건에서 각각 0.161(0.042~0.393), 0.091(0.026~0.185), 0.057(0.018~0.150) ppm 으로 이 또한 CO와 유사하게 승강장 외부에서 측정된 값이 가장 높게 나타났으며, 개선 승강장의 경우 절반 수준 이하로 낮아졌다. 이산화질소(NO₂)의 평균 노출농도(범위)는 (a), (b), (c) 조건에서 각각 0.050(0.034~0.071), 0.046(0.036~0.059), 0.035(0.024~0.054)로 CO, NO와 유사한 경향이나 각 조건에서의 농도차가 상대적으로 적게 나타났다. 이는 CO와 NO의 경우는 버스나 자동차에서 불완전 연소에 의해 바로 배출되어 승강장 내외부에 영향을 미치나 NO₂의 경우는 NO가 O₂에 의해 산화되어 생성된 물질이기 때문에 승강장 외부에서의 농도가 상대적으로 높지만 다른

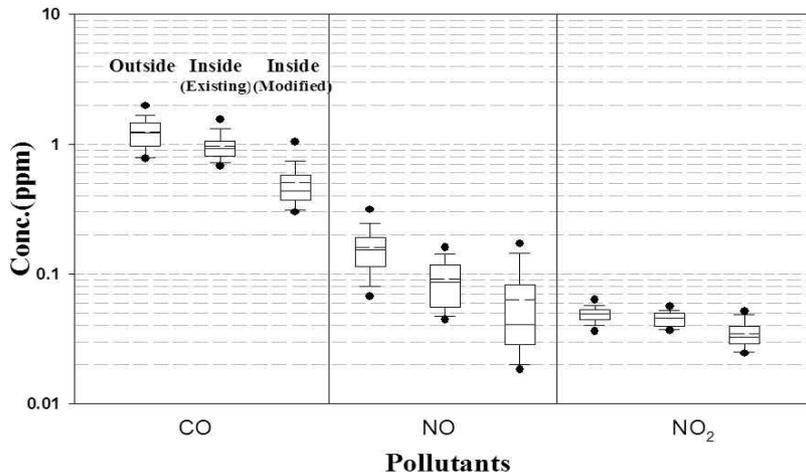


Fig. 6. Comparison of gaseous pollutants in outside and inside bus platform.

Table 11. Correlation analysis of each components in each condition

(a)				(b)				(c)			
	CO	NO	NO ₂		CO	NO	NO ₂		CO	NO	NO ₂
CO	1.000			CO	1.000			CO	1.000		
NO	0.608** <i>p</i> 0.000	1.000		NO	0.144 <i>p</i> 0.324	1.000		NO	0.379** <i>p</i> 0.007	1.000	
NO ₂	0.681** <i>p</i> 0.000	0.699** <i>p</i> 0.000	1.000	NO ₂	-0.085 <i>p</i> 0.563	0.393** <i>p</i> 0.005	1.000	NO ₂	0.429** <i>p</i> 0.002	0.776** <i>p</i> 0.000	1.000

** 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함.

Table 12. Assessment data of NO₂ for this study (M : male, F : female)

Condition	CA (mg/m ³)	IR (m ³ /day)	EF (days/year)	ED (years)		BW (kg)		AT (days)		ADDs (mg/kg·day)	
				M	F	M	F	M	F	M	F
modified BP ¹⁾	0.072	20	43.8	0.38	0.25	70.9	55.6	77.2	84.1	4.4E-3	3.4E-3
existing BP	0.094	20	43.8	0.38	0.25	70.9	55.6	77.2	84.1	5.7E-3	4.4E-3

1) BP : Bus Platform

$$\text{Intake Dose} = \text{CA} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}$$

CA : Chemical concentration in Air (mg/m³)

EF : Exposure Frequency (days/year)

BW : Body Weight (kg)

IR : Inhalation Rate (m³/day)

ED : Exposure Duration (years)

AT : Averaging Time (days)

조건에 비해 농도차가 크지 않았다. 일산화질소(NO)는 자동차 배출가스에서 배출된 후 대기중에서 산화반응(2NO+O₂→2NO₂)에 의해 NO₂로 되지만, 대기중에서 1ppm의 NO 반감기는 100시간 정도되고 NO의 농도가 더 낮아질 경우 반감기는 더 길어지게 된다. 그러나 대기중에서 오존(O₃)도 있기 때문에 저농도에서도 전환속도는 급격히 빨라지게 된다.²⁰⁾

세 가지 조건에서 각 항목별 평균농도에 대한 차이가 있는지를 검증하기 위해 SPSS를 이용한 통계분석결과(T-test, 일표본 검정) 신뢰수준 95 %에서 모두 유의한 것으로 나타나 각 조건별 농도차가 있는 것으로 확인되었다.

Table 11은 각각의 조건에서 각 항목에 대하여 상관분석을 수행한 결과이며 NO와 NO₂의 상관계수가 비교적 높게 나타났다.

인체 위해성 평가

인체 위해성 평가를 위한 일일노출용량(ADDs : mg/kg·day) 산정에 이용된 자료는 아래의 Table 12와 같다.

NO₂에 대한 점평가치(point estimates) 분석 결과 기존 버스 승강장 내부와 개선 버스 승강장 내부에서 남성의 경우 각각 5.7×10⁻³, 4.4×10⁻³으로 비발암성 오염물질에 의한 인체 유해영향의 유무를 판단하는 기준인 “1” 을 초과하지 않았으며, 여성의 경우에도 위해도 지수가 각각 4.4×10⁻³, 3.4×10⁻³으로 1을 초과하지 않은 것으로 나타나 두 가지 조건 모두 위해도가 높지 않았으나, 기존 버스 승강장 내부에 비해 개선 버스 승강장 내부의 위해도가 24 % 정도 낮게 나타났다.

본 연구 결과에서 나타난 위해성은 노출변수의 가정에 의한 불확실성이 존재하고 있으며, 장기간 동안의 농도를 측정할 것이 아니기 때문에 위해성 평가의 결과가 다소 과대 또는 과소 평가되었을 가능성을 무시할 수 없다.

결 론

본 연구에서는 향후 버스 승강장 설치 시 차량 배기가 스로부터의 버스 대기 승객의 건강상 위해성을 최소화하고, 이와 더불어 도로 차량 운행에 따른 대기 승객의 안전

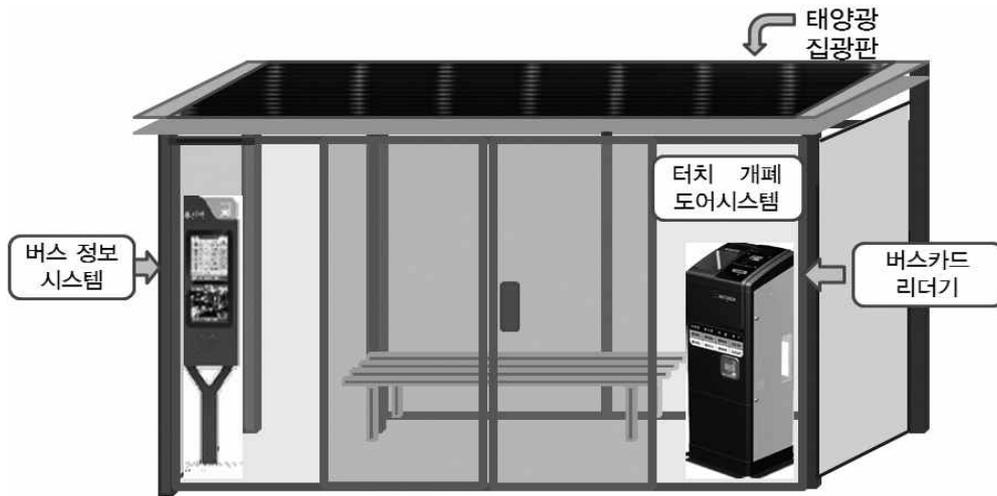


Fig. 7. Improved multi-functional bus platform

성을 확보할 수 있도록 제안하고자 하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 입경분포 측정 결과 버스 승강장 외부는 조대입자 (coarse particle) 영역인 $3.2 \mu\text{m}$ 이상의 입경범위에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었으며, 현재 버스승강장 내부는 $1.8 \mu\text{m}$ 미만의 미세영역 (fine particle)에서 높은 농도를 나타내었고, 개선 버스승강장 내부에서의 경우는 $1 \mu\text{m}$ 이상의 범위, 특히 조대입자 영역인 $10 \mu\text{m}$ 부근에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었으나 승강장 외부 및 현재의 버스승강장 내부 조건에 비해 농도 수준은 가장 낮게 나타났다.
2. 총 먼지농도의 경우 승강장 외부 > 승강장 내부(현재) > 승강장 내부(개선)의 순으로 높게 나타났다. 총 먼지농도 대비 PM10이 차지하는 비율은 (a) 78 %, (b) 81 %, (c) 84 %의 순으로 (c)이 조건이 가장 높게 나타났다.
3. 가스상 물질의 경우 승강장 내부(개선)에서 측정한 일산화탄소(CO), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂)의 평균농도 수준은 승강장 외부의 40 %, 35 %, 70 % 수준이었으며, 승강장 내부(기존)의 53 %, 63 %, 76 % 수준으로 승강장 외부에 비해 CO, NO의 경우 절반 수준 이하였으며, 승강장 내부(기존)에 비해서도 53 ~ 76 % 정도 수준으로 오염물질 저감효과가 있는 것으로 판단된다.
4. NO₂에 대한 위해도 분석 결과 기존 버스 승강장과 개선 버스 승강장 내부에서 위해도 지수가 비발암성 오염물질에 의한 인체 유해영향의 유무를 판단하는 기준

인 “1” 을 초과하지 않았으나, 기존 버스 승강장 대비 개선 버스 승강장 내부에서의 위해도는 24 %정도 낮게 나타나 버스 승강장을 효율적으로 설계하면 인체 위해성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 향후 노후 승강장의 교체시나 신규 승강장의 설치시 오염물질의 저감을 통해 건강상 위해성을 감소시키는 것을 고려할 뿐만 아니라 안전성을 증가시키고 보온, 냉방, 공기 청정기능을 고려한 다기능 버스승강장을 설치할 경우 대중교통 이용 시민의 증가와 대중교통을 이용하는 상당수의 교통약자에게 건강보호에 효율적인 것으로 판단된다.

활용방안 및 제언

활용방안

- 1) 노후 승강장의 교체와 신규 승강장 설치시 다기능 승강장을 설치할 수 있도록 유도

제언

- 1) 버스 및 자동차 배기가스에 직접 노출되지 않도록 시설 개선 필요
- 2) 태양광 에너지를 이용하여 난방 및 냉방 기능을 갖춘 버스 승강장의 설계
- 3) 요금 선지불 시스템 도입을 통한 버스 정차시간의 단축으로 배기가스 노출 저감 및 CO₂ 등의 지구온난화 가스 배출량 감소

- 4) 터치 개폐 도어시스템을 적용하여 배출가스로 인한 직접 노출 방지 및 안전성 확보
- 5) 인체 건강을 고려한 다기능 버스승강장의 설치로 대중교통 이용 시민 증가와 교통약자의 건강보호

참고문헌

1. 김환철, 임중환, “교통관련 대기오염과 알레르기 질환” 천식 및 알레르기 30(1), pp.5~11(2010).
2. WHO, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, Report on a WHO Working Group, Bonn: World Health Organization;2003" <http://www.euro.who.int/document/e79097.pdf>.
3. WHO, "Systematic review of health aspects of air pollution 2003; <http://www.euro.who.int/document/E82792.pdf> and <http://www.euro.who.int/document/E82790.pdf>".
4. Dahl, R., Heavy traffic ahead. Environmental health Perspectives 113, A239~A245.
5. WHO and World Bank, World Report on Road Traffic Injuries. World Health organization and World Bank, Geneva(2004).
6. Adams, H.S., Neuwenhuijsen, M.J., Colville, R.N, McMullen, M.A.S., Khandelwal, P., "Fine particle(PM2.5) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK", The Science of the Total Environment 279, pp.29~44 (2001).
7. 김환철, 임중환, “교통관련 대기오염과 알레르기 질환” 천식 및 알레르기 30(1), pp.5~11(2010).
8. L. Wang, L. Morawska, E.R. Jayaratne, K. Mengersen, D. Heuff, "Characteristics of airborne particles and the factors affecting them at bust stations", Atmospheric Environment, vol 45, pp.611~620(2011).
9. Daniel Baldwin Hess, Paul David Ray, Anne E. Stinson, JiYoung Park, "Determinants of exposure to fine Particulate matter (PM2.5) for waiting passengers at bus stops", Atmospheric Environment, 44 pp.5174~5182(2010).
10. EPA, Health assessment document for diesel engine exhaust. EPA/600/8-90/057F May, pp.1~669(2002).
11. Pope, C.A., D.W., "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association 56(6), pp.709~732.
12. 부산광역시, 2010년 시정백서.
13. 국립환경과학원, “PM2.5 물리·화학적 특성에 관한 연구(I)” (2009).
14. WHO, Air quality guidelines for Europe, WHO Rub, European Series Vol. 23(1987).
15. Kenneth Wark, Cecil F. Warner, Wayne T. Davis, Air pollution its origin and control (1998).
16. E. Corfa, F. Maury, P. Segers, A. Fresneau, A. Albergel, "Short-range evaluation of air pollution near bus and railway stations", Science of the Total Environment 334-335, pp.223~230(2004).
17. Lina Wang, Rohan Jayaratne, Darlene Heuff, Lidia Morawska, "Development of a composite line source emission model for traffic interrupted microenvironments and its application in particle number emissions at a bus station", vol 44, pp.3269~3277(2010).
18. 통계청 홈페이지, <http://kostat.go.kr>, 2011, "2010년 생명표 보도자료"(2011).
19. US EPA, "Exposure Factors Handbook:2011 edition"(2012).
20. Kenneth Wark, cecil F. Warner, Wayne T. Davis, Air pollution its origin and control(1998b).