



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

ACF공기필터를 사용한 승용차내 공기질 향상

Improvement of indoor air quality using ACF air filter in passenger
vehicles



指導教授 金仁洙

2014年 2月

韓國海洋大學校 大學院

環境工學科

文亨碩

本 論文을 文亨碩의 工學博士 學位論文으로 認准함

委員長 工學博士 宋 永 彩 (印)

委 員 工學博士 金 仁 洙 (印)

委 員 理學博士 高 星 澈 (印)

委 員 工學博士 張 在 秀 (印)

委 員 工學博士 金 東 根 (印)

2013年 12月 13日

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	
2. 문헌 연구	
2.1 주행중인 승용차 내의 공기질	3
2.1.1 미세먼지	3
2.1.1.1 미세먼지의 특징	6
2.1.1.2 미세먼지의 인체 영향	10
2.1.1.3 미세먼지 대책	13
2.1.2 이산화탄소	15
2.1.2.1 이산화탄소의 특징	17
2.1.2.2 이산화탄소 발생원	18
2.1.2.3 이산화탄소의 피해	18
2.1.2.4 이산화탄소 대책	19
2.1.3 VOCs (Volatile Organic Compounds)	20
2.1.3.1 VOCs의 특징	23
2.1.3.2 VOCs 발생원	24
2.1.3.3 VOCs의 피해	26
2.1.3.4. VOCs 대책	27
2.2 공기청정용 필터	29
2.2.1 PP 부직포 필터	31
2.2.2 (PP+AC) 콤비네이션 필터	23
2.2.3 ACF 필터	33
2.2.3.1 활성탄소섬유의 개요	34
2.2.3.2 활성탄소섬유의 구조와 성질	40
2.2.3.3 활성탄소섬유의 역사	48

2.3 흡착 이론	45
2.3.1 물리적 흡착	45
2.3.2 화학적 흡착	46
2.3.3 흡착 평형	46
2.3.4 파과곡선이론	51
2.4 흡착탑에서 동특성	52
3. 실험 방법	
3.1 실험 조건	55
3.2 실험 장치 및 실험 방법	58
3.2.1 미세먼지 실험 장치 및 실험 방법	58
3.2.2 이산화탄소 실험 장치 및 실험 방법	59
3.2.3 VOCs 실험 장치 및 실험 방법	61
3.2.3.1 실험 재료	61
3.2.3.2 실험 장치 및 실험 방법	61
4. 결과 및 고찰	
4.1 주행 중인 승용차 내 미세먼지 농도 변화에 대한 연구	65
4.1.1 오전(AM), 오후(PM)에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	5 6
4.1.2 공기순환모드(Actuator) 및 송풍기(Blower) 작동에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	68
4.1.3 창문개폐에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	70
4.1.4 탑승 인원수에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	72
4.1.5 차중에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	74
4.1.6 지역에 따른 승용차 내 PM _{2.5} 의 농도 변화	76
4.1.7 승용차 내 공기청정 필터 종류별 PM _{2.5} 의 농도 변화	78
4.2 주행 중인 승용차 내 이산화탄소 농도 변화에 대한 연구	80
4.2.1 오전(AM), 오후(PM)에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	0 8
4.2.2 공기순환모드(Actuator) 및 송풍기(Blower) 작동에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	82
4.2.3 창문개폐에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	84

4.2.4 탑승 인원 에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	8
4.2.5 차중에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	8
4.2.6 지역에 따른 승용차 내 CO ₂ 의 농도 변화	9
4.2.7 승용차 내 공기청정 필터 종류별 CO ₂ 의 농도 변화	9
4.3 공기청정용 필터의 VOCs 제거 효율에 대한 연구	94
4.3.1 가스검지관법에 의한 ACF 필터의 VOCs 흡착능력	9
4.3.2 ACF 종류에 따른 톨루엔의 연속흡착능력	9
4.3.3 ACF의 충전량과 충전밀도에 따른 톨루엔의 연속흡착능력	100
4.3.4 충전탑 직경크기에 따른 톨루엔 흡착능력	103
4.3.5 충전탑 온도변화에 따른 톨루엔 흡착능력	105
4.4 ACF의 흡착 동특성	107
5. 결론	109
NOMENCLATURE	III
참고문헌	113



List of Tables

Table 1. Guidelines for indoor air quality in public transportation	4
Table 2. Indoor air quality standard for multi-use facilities	5
Table 3. Dust sources	6
Table 4. Contribution and emissions of PM _{2.5} by sources	7
Table 5. Effects of fine dust on the human body	21
Table 6. Standards and measurement methods of controlled substances	41
Table 7. Body response to CO ₂	91
Table 8. 37 Types of controlled VOCs	22
Table 9. Industrial sources of VOCs	52
Table 10. Health effects of VOCs	62
Table 11. Raw materials of activated carbon fiber	63
Table 12. Characteristics of ACF produced from various materials	73
Table 13. Properties of ACF and AC	93
Table 14. Development history of activated carbon fibers	44
Table 15. Conditions for test driving	75
Table 16. Conditions for continuous adsorption experiment	36
Table 17. Reduction efficiency of VOCs by 3 kinds of mat filter	49
Table 18. Adsorption characteristics of KF-1500 and MD-1100	99

List of Figures

Fig. 1 Dust formation and separation	9
Fig. 2 Location reached by particles in the respiratory system	0· 1
Fig. 3 Atmospheric CO ₂ at Mauna Loa observatory	7 1
Fig. 4 Structure of the air conditioning system	0 3
Fig. 5 Schematic diagram of airflow	13
Fig. 6 Structure of particulate filter	23
Fig. 7 Structure of combination filter	33
Fig. 8 Manufacturing process of activated carbon fiber	63
Fig. 9 Structure of granular activated carbon and activated carbon fiber	04
Fig. 10 Main factors of the ACF structure related to its properties	1· 4
Fig. 11 Adsorption isotherm curve of activated carbon fiber	2 4
Fig. 12 Different types of adsorption isotherm	9 4
Fig. 13 Breakthrough curves for adsorption	25
Fig. 14 Driving routes	6
Fig. 15 Location of the dust monitor in the test car	8 5
Fig. 16 Connection of the dust monitor	95
Fig. 17 Location of the GFC Infra-red analyser installed in the test car	0· 6
Fig. 18 Connection of GFC	6
Fig. 19 Schematic diagram of experimental apparatus	2 6
Fig. 20 PM _{2.5} concentration in the test car during (A)morning and (B)afternoon in downtown Jeonju	7· 6
Fig. 21 PM _{2.5} concentration in the test car with respect to actuator and blower functioning	6
Fig. 22 PM _{2.5} concentration in the test car with respect to window opening and closing	7
Fig. 23 PM _{2.5} concentration in the test car with respect to number of person	73
Fig. 24 PM _{2.5} concentration in the test car with respect to type of car	5· 7

Fig. 25 PM _{2.5} concentration in the test car with respect to (B)downtown and (K) suburb	77
Fig. 26 PM _{2.5} concentration in the test car according to the type of filter	9·7
Fig. 27 CO ₂ concentration in the test car during (A)morning and (B)afternoon in Jeonju downtown	8
Fig. 28 CO ₂ concentration in the test car with respect to actuator and blower functioning	8
Fig. 29 CO ₂ concentration in the car with respect to actuator and blower functioning	85
Fig. 30 CO ₂ concentration in the test car with respect to number of person	7·8
Fig. 31 CO ₂ concentration in the test car with respect to type of car	9·8
Fig. 32 CO ₂ concentration in the test car with respect to downtown and suburb	1·9
Fig. 33 CO ₂ concentration in the car test with respect to kind of filter	3·9
Fig. 34 Breakthrough curves of toluene on ACF bed at 25 °C.Q=2 L/min, C _o =200 ppm, M=2.2 g, φ=15 mm	7·9
Fig. 35 Adsorption isotherms of toluene on (1)KF-1500 and (2)MD-1100	8·9
Fig. 36 Distribution of mesopores measured by BJH equation	8·9
Fig. 37 Breakthrough curves of toluene on MD-1100 at different packing amount and density at 25 °C, φ=15 mm, Q=2 L/min, and C _o =200 ppm	101
Fig. 38 Breakthrough curves of toluene on ACF (MD-1100) at different diameter of packing bed. Q=2 L/min, C _o =200 ppm, M=2.2 g	401
Fig. 39 Breakthrough curves of toluene on ACF (MD-1100)	601
Fig. 40 Time dependence of breakthrough concentration of toluene on ACF (MD-1100)	81

Improvement of indoor air quality using ACF air filter in passenger vehicles

Hyung Suk Moon

Department of Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Recently, The Korea Ministry of Environment has revised the Public Facilities Indoor Air Quality Control Act, and monitors indoor air quality of public transportation vehicles. So, it is necessary to design a program to make sure that the concentrations of ultrafine particulate matter($PM_{2.5}$), carbon dioxide(CO_2), and VOCs will not exceed the limits the Korea Ministry of Environment set.

We measured the concentrations of $PM_{2.5}$, CO_2 and VOCs in passenger vehicles by changing driving conditions to find ways of reducing those concentrations in downtown Jeonju. We found out that when the actuator was set to the internal circulation mode and the air blower to Level 2, the concentration of $PM_{2.5}$ was quickly reduced to the lowest level.

When car windows were opened during driving, outer pollutants entered the car and also inner particulate matter flied in all direction and increase of passengers caused scattering of the ultrafine paticles. When the actuator was set to the external mode and the blower to Level 2, the concentration of CO_2 became relatively low, revealing the opposite outcome to the case of the $PM_{2.5}$ concentration.

When the windows were closed and the actuator was the internal circulation mode, the concentration of CO_2 rose up rapidly. As the number of passengers increased, the concentration of CO_2 increased as well.

A great amount of VOCs was generated in new passenger vehicles. Measurement through the gas detecting tube method revealed that removal rate of the ACF nonwoven filter for three VOCs (formaldehyde, toluene and benzene) was over 97.5%, being much more efficient than commercial PP nonwoven filter and (PP+AC) combination nonwoven filter. It was also efficient in removing $PM_{2.5}$ and CO_2 .

Then, when ACF was filled in an adsorption tower and toluene was consecutively adsorbed under various experimental conditions, it was found that the adsorption efficiency was enhanced when filling height of the adsorption tower was increased rather than when diameter of the tower was widened. It was also found that under conditions with initial concentration of toluene 200 ppm; fluid speed 2 L/min; filling density 0.1779 g/m^3 , the break-through point adsorption amount and the maximum adsorption amount for Japanese's ACF (KF-1500) were 71.8 mg/g-acf and 181.5 mg/g-acf, and for Chinese's ACF (MD-1100) were 45.55 mg/g-acf and 53.77 mg/g-acf.

Therefore, this study concludes that the ACF nonwoven filter can be used effectively in removing $PM_{2.5}$, CO_2 and VOCs in passenger vehicles.

KEY WORDS : ACF 활성탄소섬유; $PM_{2.5}$ 초미세먼지($PM_{2.5}$); CO_2 이산화탄소; VOCs 휘발성 유기 화합물; Car 승용차; Air cleaning filter 공기청정용 필터

제 1 장 서 론

최근 자동차 이용의 증가는 도심지 공기를 오염시켜 심각한 공해 문제를 발생시키고 있다 [1]. 일반적으로 차량 실내의 공기오염물질 농도는 실외 대기오염물질 농도보다 높은 것으로 보고되고 있는데, 특히 출·퇴근 시 차량 내의 오염 노출이 일상 활동보다 월등히 높다 [2]. 대다수의 사람들이 차량에서 보내는 시간이 증가하면서 깨끗하고 쾌적한 차량 실내 공기질에 대한 관심이 점차 커지고 있다.

실내공기 오염물질에는 미세먼지, CO₂ 등 무기가스 및 톨루엔 등 자동차 내장재에서 배출되는 유기가스 등이 있다. 현재 이들 오염물질을 제거하기 위해 차량 공기필터의 성능개선에 활발한 연구활동이 진행되고 있지만 아직까지 만족할만한 연구결과가 도출되지 않아, 더욱 효율적이며 완벽한 성능을 가진 실내 공기정화용 필터개발이 시급한 실정이다.

공기청정 필터로 가장 많이 사용되는 폴리프로필렌재질의 부직포 필터는 값이 저렴하다는 장점이 있으나 유기화합물제거에 한계가 있어 폴리프로필렌과 활성탄소를 조합한 콤비네이션 필터를 사용하는 경우가 많다. 유기물질 흡착제로서 입상활성탄소가 성능과 경제적인 측면에서 다른 흡착제보다 우수하기 때문에 기상, 액상 오염물질의 최종처리에 널리 쓰이고 있다. 그러나 활성탄소는 흡·탈착 속도가 느리고 제한된 비표면적과 넓은 세공분포로 인하여 미량 물질의 흡착분리나 다성분 혼합물의 선택 흡착에는 한계가 있다. 뿐만 아니라 흡착제의 충전량이 많아 흡착설비가 대형화되며 장치 운전 시 편류현상과 급격한 압력 손실이 큰 단점으로 지적되고 있다. 또한 사용된 활성탄은 재생 이용이 어려워 처리 운용비가 높아지게 된다 [3].

본 연구에서는 이러한 결점을 보완하는 새로운 타입의 흡착제가 장착된 공기청정필터로서 활성탄소섬유필터(Activated carbon fiber filter, ACF필터)를 사용하였다. ACF필터는 미세기공으로 이루어져 효율적으로 유기성 휘발물질들을 제거할 수 있으며 비표면적과 세공용적이 활성탄소에 비하여 월등히 크다. 뿐만 아니라 발달된 세공이 모두 미세공이고 이들이 표면에 노출되어 있어서 흡착질에 대한 확산저항이 거의 없기 때문에 흡착속도가 빠르고 흡착용량이 크므

로 미량의 유해물을 신속히 제거하는데 효과적이다 [4]. 아직까지 활성탄소섬유를 소재로 하는 공기청정필터는 공급 초기상태이고 활발히 이용되지 않고 있지만 중국발 미세먼지에 대한 대안으로 효과적인 승용차 실내공기질 향상을 위한 우수한 공기청정필터의 사용이 시급하게 되었으므로 향후 사용이 급증할 것으로 기대된다.

본 연구는 승용차 내 공기질 향상을 목적으로 차량에 ACF 공기필터를 장착하여 여러 주행조건에서 미세먼지의 제거성능, CO₂의 제거성능 그리고 톨루엔등 유기물질의 제거성능을 고찰하여 최적의 영향인자를 도출하고 그에 따른 ACF 공기청정 필터 시제품을 설계하기 위한 기본 연구를 수행하였다.

본 연구의 결과는 ACF 공기청정 필터의 실용화를 위한 실험 데이터를 지원하며 나아가 실내 공기질 향상에 관련된 산업의 기술력 향상과 세계 필터시장의 경쟁력 우위확보에 기여하리라 기대된다.



제 2 장 문헌 연구

2.1 주행 중인 승용차 내의 공기질

2.1.1 미세먼지

우리나라 환경부는 세계보건기구의 보고를 인용하여 세계에서 대기오염으로 매년 3백만 명이 사망한다고 보고하고 있는데, 이는 전체 사망자수인 5천5백만 명의 5%에 해당하는 수치이다 [5]. Sin (2006)의 연구에 의하면 천식환자의 30~40%, 호흡기 질환환자의 20~30%가 대기오염이 원인이라고 한다 [6]. Seo (2010)는 2006~2010년(5년간) 서울, 울산, 천안의 아파트에 거주하는 산모 658명을 대상으로 미세먼지 (Particulate Matter, PM_{10}) 농도에 따른 태아와 태어난 아이들의 성장 상태를 장기간 조사한 결과 PM_{10} 이 산모의 몸 안으로 들어가 염증을 유발하고 혈액을 끈적거리게 만들어 태반을 통한 태아의 영양공급을 방해하여 태아의 성장과 지능을 저하시킨다는 결과를 발표하였다 [7]. 이처럼 대기오염으로 인한 사망자수의 증가 및 피해의 증가 원인으로 실내거주시간의 증가를 들 수 있다. Kim et al. (2004)은 전국 성인 838명을 대상으로 조사한 자료에 따르면 1일 평균 실내 거주시간은 약 20.3시간이며, 교통수단 등 실내공간에서 거주하는 시간까지 합산한다면 하루 중 97%에 해당하는 23.3시간을 실내에서 보낸다고 하였다 [8]. 그는 또한 실내공기 중 PM_{10} 농도를 측정하였고, 미세먼지의 70% 이상이 $PM_{2.5}$ 이며 특히 차량 실내의 공기 오염물질 농도는 실외 대기 오염 물질 농도 보다 높다고 보고하였다. Gwon et al. (2006)이 실시한 서울지역 운전환경조건에 따른 승용차 내의 실내공기 오염도 조사에서 탑승자들은 외부 환경에 비하여 높은 농도의 PM_{10} 에 노출되고 있다고 보고 하였다 [9]. Kwak et al. (2012)은 자동차 오염원 중에 주행 시 발생하는 PM_{10} 이 주 오염원으로 보고하였고, Kim et al. (2010)은 고속버스의 승객 수에 따른 차량연식과 PM_{10} 과의 농도 관련성을 보고하였으며, Kim (2008)은 지하철 차량내 공기질 관리방안에 대하여 연구하였고, Seaton et al. (2005)은 런던지하철에서 초미세먼지가 승객과 근로자에게 오염물질노출 심각성을 알렸다 [10-13]. Yang et al. (2004)은 실

내공기 수준을 개선시키면 운전자뿐만 아니라 탑승자의 건강 위해성을 감소시킬 수 있다고 보고한 바 있다 [14].

그동안 우리나라는 PM₁₀을 중심으로 공기질을 측정하여 왔다. 그러나 현재 선진국(미국, 일본) 중심으로 PM_{2.5}의 심각성을 인식하고, PM_{2.5}제거방안을 강구중에 있다. 이에 우리나라 환경부도 실내공기질 관리법과 2006년 12월에 대중교통수단 실내 공기질 관리 가이드라인, 다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법을 제정하여 실내 공기질의 평가지표를 세우고 관리하기 시작하였으며 2011년-2012년(2년간) 수도권, 백령도, 중부권, 남부권, 제주지역의 PM_{2.5}농도를 측정하고 제거 대책을 연구 중에 있다 [15-17]. Table 1은 대중교통수단 실내 공기질 관리 가이드라인을 제시한 것이며 Table 2는 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법에 관련된 5개의 유지기준과 권고기준을 제시한 것이다.

Table 1. Guidelines for indoor air quality in public transportation [16]

Pollutant	Type	Level 1(Normal)	Level 2(Rush hour)
CO ₂	Urban railway	Below 2,500 ppm	Below 3,500 ppm
	Train, Bus	Below 2,000 ppm	Below 3,000 ppm
PM ₁₀	Urban railway	Below 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Below 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Train, Bus	Below 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Below 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Table 2. Indoor air quality standard for multi-use facilities [15]

Pollutant	Standard	Remark
PM ₁₀	Below 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maintain standard
CO ₂	Below 1000 ppm	Maintain standard
Formaldehyde	Below 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Maintain standard
Total airborne bacteria	Below 800 CFU/m ³	Maintain standard
CO	Below 10 ppm	Maintain standard
NO ₂	Below 0.05 ppm	Recommendation standard
Rn	Below 4.0 pCi/L	Recommendation standard
TVOCs	Below 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Recommendation standard
Asbestos	Below 0.01 ea/cc	Recommendation standard
Ozone	Below 0.06 ppm	Recommendation standard

PM_{2.5}는 대기 중에 떠다니는 직경 2.5 μm 보다 작은 먼지로 머리카락 직경(약 50~70 μm)의 최대 1/30에서 최소 1/200수준이다. 특히, 자동차 배기가스 및 도로의 먼지 등으로부터 발생하는 PM₁₀ 및 승용차 실내의 PM₁₀은 그 크기와 성분이 매우 복잡하고 다양하며 그의 화학적 조성 또한, 인간의 건강에 중대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 이러한 PM₁₀이 오늘날 많은 시간을 승용차 내에서 보내고 있을 인체의 몸 안으로 노출되지 못하게 대처할 필요성이 증대되었다.

2.1.1.1 미세먼지의 특징

입자크기가 지름 10 μm (10 μm 는 0.001 cm)이하를 PM_{10} (Particular Matter)이라 하며 직경 2.5 μm 이하를 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)라고 한다. 특히 $\text{PM}_{2.5}$ 는 머리카락 직경과 비교하여 약 1/30 ~ 1/200수준이며 우리 눈에 보이지 않을 정도로 가늘어 호흡 시 폐 속 깊은 곳까지 도달하여 인체에 영향을 끼치게 된다. 입자크기가 지름 10 μm (10 μm 는 0.001 cm)이하를 PM_{10} 이라 하며 직경 2.5 μm 이하를 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)라고 한다.

미세먼지는 숲을 태우거나 폐기물 소각, 오래된 건물, 낡은 옷, 담배연기나 모기향, 황사 등처럼 주변에서 흔히 일어나는 현상만으로도 발생이 되어 주의가 필요하다. Table 3은 미세먼지 발생원 종류를 Table 4는 $\text{PM}_{2.5}$ 기여도 및 배출량을 나타낸 것이며, Fig. 1은 미세먼지의 형성과 구분을 도식화 하였다 [18-19].

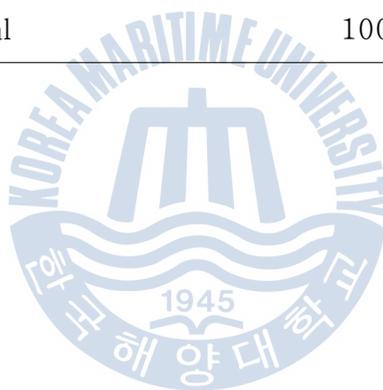
Table 3. Dust sources [18]

Type	Source
Stationary emission source	Heating, Industrial, Development, etc
Anthropogenic sources	Mobile emission source Automobile exhaust and tire wear
Etc	Construction site fugitive dust, open burning, etc
Natural sources	Fog, smoke, dust, volcanic eruptions, wind erosion of soil, etc.
Other sources	By reaction of the secondary sulphate, nitrate produced

Table 4. Contribution and emissions of PM_{2.5} by sources [19]

Article		Contribution (%)	Emission quantity (ton/year)	PM _{2.5} / PM ₁₀		
CAPSS*	Combustion energy industry	5.4	7,406	0.90		
	Non-industrial combustion	2.0	2,680	0.90		
	Combustion of manufacture	10.6	14,400	0.90		
	Production Process	4.6	6,199	0.90		
	Road mobile sources	16.7	22,781	0.90		
	Non road mobile sources	2.6	3,584	0.90		
	Waste Treatment	0.0	58	0.90		
Mobile emission source	Petrol cars	0.5	687	1.00		
	Motorcycles	0.8	1,027	0.90		
	Construction Machinery	5.8	7,915	0.94		
CAPPS supplement / addition	Road scatter	9.1	12,458	0.14		
	Road scatter (unpaved)	7.0	9,552	0.10		
	Construction activities	0.8	1,025	0.10		
	Fugitive dust	Agricultural activities	Cultivation	0.4	597	0.20
			Harvest	1.3	3,567	0.15
		ground	2.6	1,389	0.19	
		Livestock activities	1.0			

		Grilled meat	2.9	3,975	0.93
		Open burning(Disposal)	3.4	4,683	0.92
CAPPS supplement / addition	Biological combustion	Open burning(Agricultural residues)	8.5	11,630	0.95
			28.7		
		Forest fires	0.7	890	0.95
		Charcoal burner	8.8	11,938	0.95
		Furnace	1.1	1,545	0.95
		Firewood stove	3.2	4,406	0.95
Total			100	136,195	



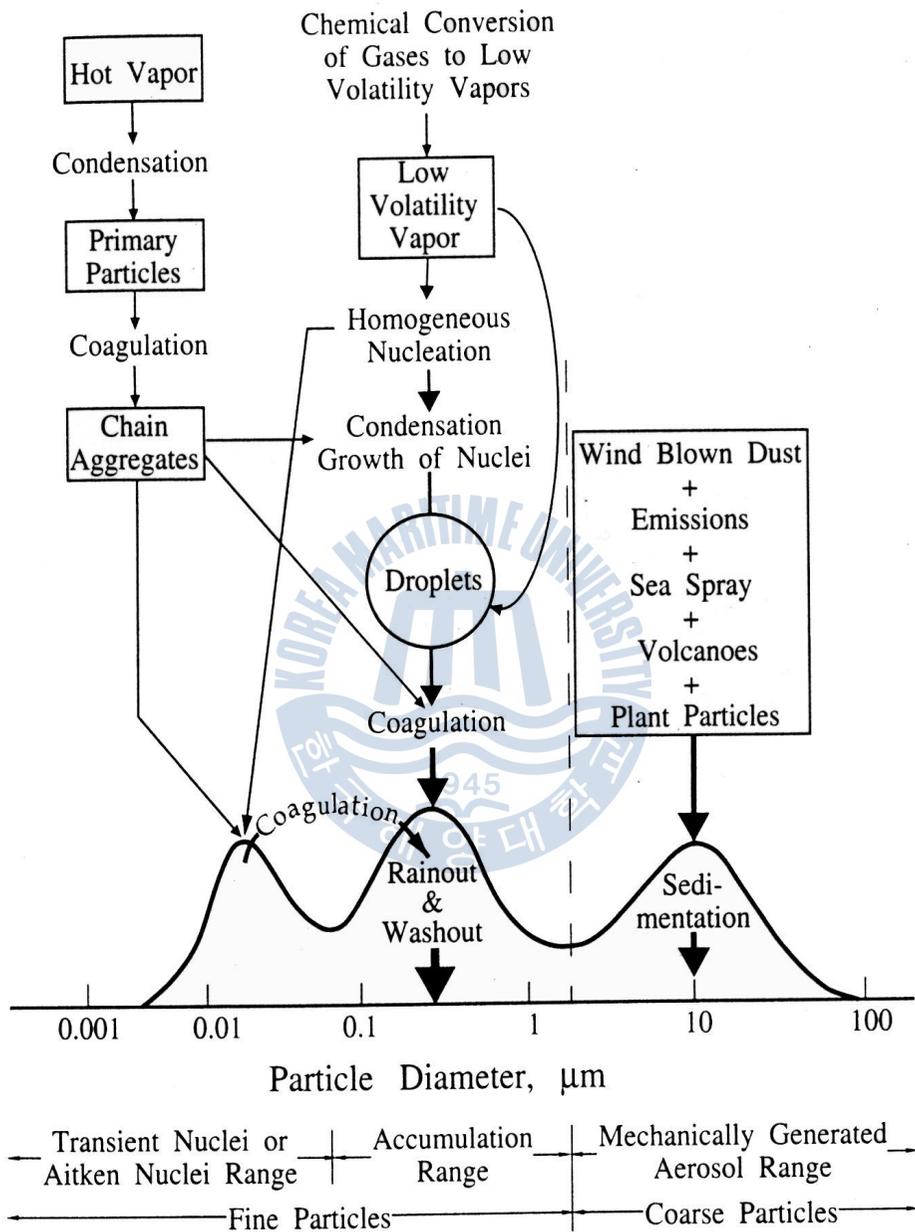


Fig. 1 Dust formation and separation [18]

2.1.1.2 미세먼지의 인체 영향

미세먼지는 10 μm 이상의 큰 먼지는 대부분 코의 점막과 섬모에 걸려 인체 내로 유입이 거의 안 되며 5.0~10 μm 미만의 크기 역시 점막과 섬모에 걸려져 객담으로 배출이 된다. 하지만 문제는 0.1~2.5 μm 크기의 먼지로 기관지를 통과할 수 있어 폐 포 내 침착율이 가장 높다. 이에 진폐증이나 규폐증을 발생시킨다. 같은 중량의 입자라 할지라도 극 미세입자는 그 표면적이 월등히 크기 때문에 세포로의 침투가 용이하고, 크기가 큰 입자에 비하여 폐나 기도 등의 인체 장기에 쉽게 흡수되고 또한, 폐에서 세포와의 반응성이 증가하는 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 입자별 호흡기 내 도달 위치 현황을 나타낸 것이다 [18].

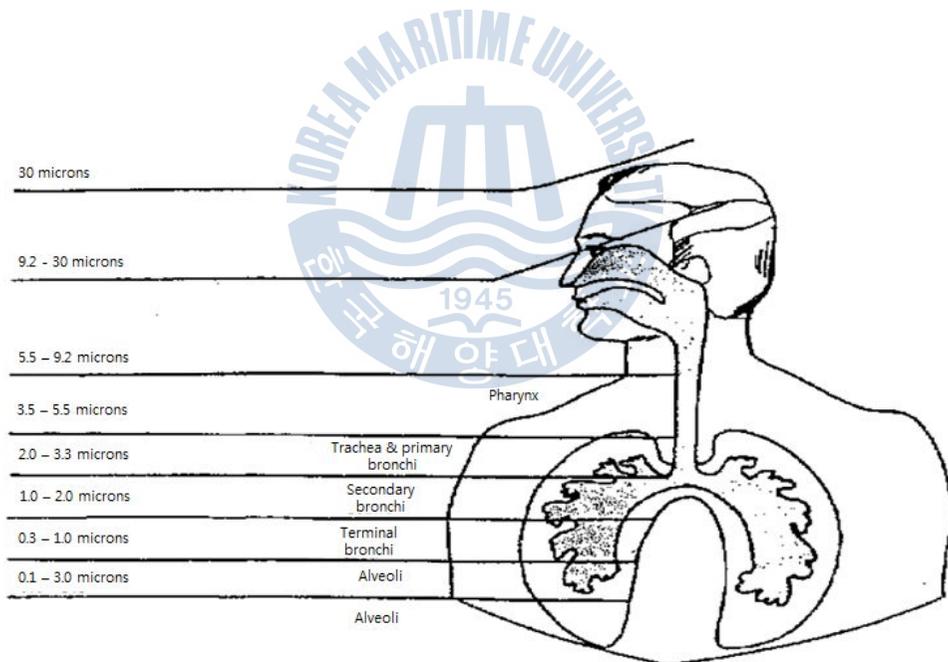


Fig. 2 Location reached by particles in the respiratory system [18]

그림처럼 미세먼지 입자가 인체 내에 유입이 되면 천식이나 알레르기 증상이 증가하며 기관지염 등의 호흡기 질환과 혈액순환을 방해하며 조산, 저체중아 출산 등의 영향을 끼친다. 또한 연세대 환경공해연구소의 보고에는 미세먼지로 인한 조기 사망비율이 인구수 대비 서울이 상위권에 있다고 한다. 피해는 인체 뿐만이 아니다. 한국 환경정책평가연구원에서는 수도권지역의 미세먼지로 인한 사회적 피해비용은 연간 4조 4천억에 달하는 것으로 추정하고 있으며 경기개발 연구원에서는 최대 10조원으로 추정 중에 있다고 한다. Table 5는 미세먼지에 대한 인체 영향을 나타내었다 [20].



Table 5. Effects of fine dust on the human body [20]

Fine Dust (by weight)	Approx. number of fine dust particles per liter of air	Health Effects	Recommendations
0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 9.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0–30'000	No negative health effects to be expected	No special recommendations
10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 19.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30'001–60'000	No negative health effects to be expected	No special recommendations
20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 34.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	60'001–105'000	Hardly any negative health effects to be expected	No special recommendations
35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 49.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	105'001–150'000	Asthmatics and children with asthma may show cough and asthma symptoms when exposed to dust over a long period of time. People suffering from cardiac and vascular diseases may also show a worsening of symptoms	Adults and children suffering from respiratory diseases and people suffering from cardiac and vascular diseases should reduce exposure to contaminated areas
50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 99.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150'001–300'000	Long exposure can lead to irritations of the respiratory tract, coughs and headache	Time spent in contaminated areas should be reduced
100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and higher	300'000+	Can lead to irritations of the respiratory tract, coughs and headache. The frequency of asthma attacks may increase.	Time spent in contaminated areas should be reduced to a minimum

2.1.1.3 미세먼지 대책

미세먼지는 인체 피해에 영향을 미치므로 반드시 저감해야 하는 물질이다. 특히 실내가 좁고 밀폐되기 쉬운 승용차 내에서의 인체 영향이 극대화되므로 이를 방지할 필요성이 증대되고 있다.

현재 실행 중에 있는 저감 대책으로 경유 상용차에서 PM₁₀의 경우 0.1 g/kWH에서 0.02 g/kWH로 상향하였으며 경유 다목적형 차량은 0.07 g/kmH에서 0.04 g/kmH로, 경유 승용차의 경우 0.05 g/kmH에서 0.025 g/kmH로 강화하는 방안을 실행 중에 있다. 이를 위해 정부에서는 저감장치(DPF: Diesel Particulate Filter)를 부착한 저공해 경유자동차의 보급을 하고 있으며 중·대형 경유차의 경우 대당 700만원, 1톤 이하 화물차는 대당 1~200만원의 보조를 하고 있다.

또한 사업장에 대한 배출기준을 강화 또는 신설하여 약 20~25%정도로 기준을 강화하였으며 EURO 6 기준을 도입하여 교통수단의 배기가스에 대한 기준을 강화하였다.

그리고 한중일 광역 미세먼지 문제를 해결하기 위해 LTP사업 협조체계를 구축하여 전 세계적으로 미세먼지를 해결하기 위해 노력하고 있다.

Table 6은 강화된 규제 물질과 측정방법을 나타낸 것이다 [19].

Table 6. Standards and measurement methods of controlled substances [19]

Article	Standard	Way of measuring
SO ₂	The annual average below 0.02 ppm 24-hour average below 0.05 ppm 1-hour average below 0.15 ppm	Pulse U.V. Fluorescence Method
CO	8-hour average below 9 ppm 1-hour average below 25 ppm	Non-Dispersive Infrared Method
NO ₂	The annual average below 0.03 ppm 24-hour average below 0.06 ppm 1-hour average below 0.10 ppm	Chemiluminescent Method
PM ₁₀	The annual average below 50 µg/m ³ 24-hour average below 100 µg/m ³	Ray Absorption Method
PM _{2.5}	The annual average below 25 µg/m ³ 24-hour average below 50 µg/m ³	Weight concentration method or Automatic measurement
Ozone	8-hour average below 0.06 ppm 1-hour average below 0.1 ppm	U.V Photometric Method
plumbum	The annual average below 0.5 µg/m ³	Atomic Absorption spectrophotometry
benzene	The annual average below 5 µg/m ³	Gas Chromatography

2.1.2 이산화탄소

이산화탄소(Carbon dioxide, CO₂)의 꾸준한 배출로 인하여 지구 온난화가 급속히 빨라지고 있다. Park (2006)은 2100년의 대기온도는 현재보다 평균 2 °C 상승하여 해수면이 평균 50 cm 상승한다고 보고하였고 Yi et al. (2010)은 온도가 2 °C 상승할 경우 육상 및 해양생태계에 커다란 변화를 초래하며 6 °C 상승 시에는 생태계의 수 많은 종이 멸종을 초래할 수 있다고 한다 [21,22]. 인간은 주변의 CO₂ 농도가 400 ppm일 때는 큰 영향을 받지 않지만 1,000 ppm 이상이 되면 불쾌감 등의 현상이 나타나며 2,000 ppm이 되면 컨디션의 변화가 생기기 시작하고 그 이후 농도부터는 어깨 결림이나 두통, 현기증 및 사망까지도 이를 수 있음이 알려져 있다 [23]. 실내 공기 중의 CO₂ 농도는 실내 공기질(IAQ)을 평가하는데 있어 중요한 지표로 작용한다. Kwon et al. (2011)은 CO₂ 농도와 관련된 지하철 객실의 자연환기효과에 대한 연구를 수행하고, CO₂ 농도가 높아지면 직접적으로 재실자의 온열환경 쾌적성을 저하시키는 문제를 야기한다고 보고하였고, Cho et al. (2012)은 실내공간에서 재실자의 호흡에 따른 CO₂ 및 산소 농도 변화를 연구 하고 인원수에 따른 CO₂ 농도의 상관성을 보고하였다 [24,25]. 또한 Yang et al. (2004)은 승용차에 1명이 탑승한 상태에서 측정한 CO₂의 농도가 1시간 경과 후 환경부 권고 기준치인 1000 ppm보다 훨씬 높은 약 5,000 ppm 까지 상승함을 밝혀 밀폐된 공간에서 CO₂의 위험성을 경고하였다 [14]. Lee et al. (1999)은 탑승자가 2인일 경우 20분이 경과하면 역시 5,000 ppm에 근접한다고 보고하였다 [26]. 또 Shin et al. (2010)은 고속버스 내 CO₂ 농도는 하계 및 추계 측정시 10개 노선에서 환경부 가이드라인 Level 1 (2,000 ppm)과 Level 2 (3,000 ppm)를 만족시켰으나, 하계 비수기 측정결과는 일부 구간에서 Level 1 을 초과하는 것으로 조사되었다 [27]. Kim (2008)도 지하철 차량내 공기질 관리 방안에 관한 연구를 하면서 비록 환기를 통해 꾸준히 관리를 하고 있지만 CO₂ 농도가 평균 2,000 ppm 이상이 되어 더 발전적인 저감대책의 필요성을 말하고 있다 [12]. 이에 환경부에서는 다중이용시설 실내 공기질 관리법 및 시행규칙을 마련하고, CO₂는 1,000 ppm 이하를 유지하도록 권고하고 있다 [15]. 그러나 도서관, 영화관, 학원, PC방등 재실자 밀도가 높은 곳은 자연환기가 어려워 일부를 개정해 CO₂ 기준을 1,500 ppm까지 완화하여 관리하고 있다. Sohn et al. (2006)

은 서울 일부 지역 교통수단의 실내공기질 평가를 하였고, 장시간 좁은 차 내부에서 일하는 택시기사의 경우 92%가 실내 공기가 외부공기보다 훨씬 나쁘다고 대답하였음을 보고하였다 [28]. 일반인의 경우는 교통수단의 실내공기가 나쁘다는 대답이 57%로써 이는 전보다 증가한 수치이지만 일반인들은 아직도 많은 수가 실내공기오염을 주의하지 않다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 차량 실내의 공기오염물질 농도는 실외 대기오염물질 농도보다 높은 것으로 보고되고 있다 [29]. Lee et al. (2006)은 아파트 각 실별 CO₂ 농도의 시계열적 변화와 환기실태를 비교하여 1~4번의 환기 횟수에 따른 CO₂ 농도는 16.5 ~ 41.8%정도를 저감시킬 수 있다는 저감 방안을 제시하였고, Kim et al. (2012)은 강의실에서의 CO₂ 농도 제어 방안으로 환기량의 증가와 식물의 광합성에 의한 공기정화를 제시하였다 [30,23]. Kim et al. (1994)은 에너지효율성증대를 위하여 실내가 밀폐화가 되면 CO₂ 농도가 증가하여 실내에 거주하는 사람들의 건강을 위협하여 빌딩증후군 같은 증상을 일으킬 수 있다고 보고하였다 [31]. Oh et al. (2010)등은 실내 CO₂ 농도가 작업능률에 미치는 영향을 연구하였는데 실내 CO₂ 농도증가는 작업생산성의 양적인 측면보다 질적인 측면에 영향이 크며, 여성이 남성에 비해 높은 영향을 받는 것으로 보고 있어 CO₂ 농도 관리의 필요성을 강조하였다 [32]. 기상청 보도 자료에 따르면 CO₂의 농도 상승세가 1999년부터 2005년까지 평균 2.5 ppm이 증가했으며 2007년 390 ppm이 관측돼 가장 높은 수치를 기록하였다고 한다 [33]. 이는 세계기상기구 (WMO)에서 발표한 전 지구 연평균증가량 (94~04년)인 1.9 ppm에 비해 상당히 높은 수치이다. 한편 하와이 마우나로아 관측소에서 측정된 CO₂ 농도는 처음으로 400 ppm(ppmv), 즉 0.04%를 돌파했다고 보고하여 CO₂의 농도의 증가를 경고하고 있다 [34]. Fig. 3은 마우나 로아의 CO₂ 농도 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

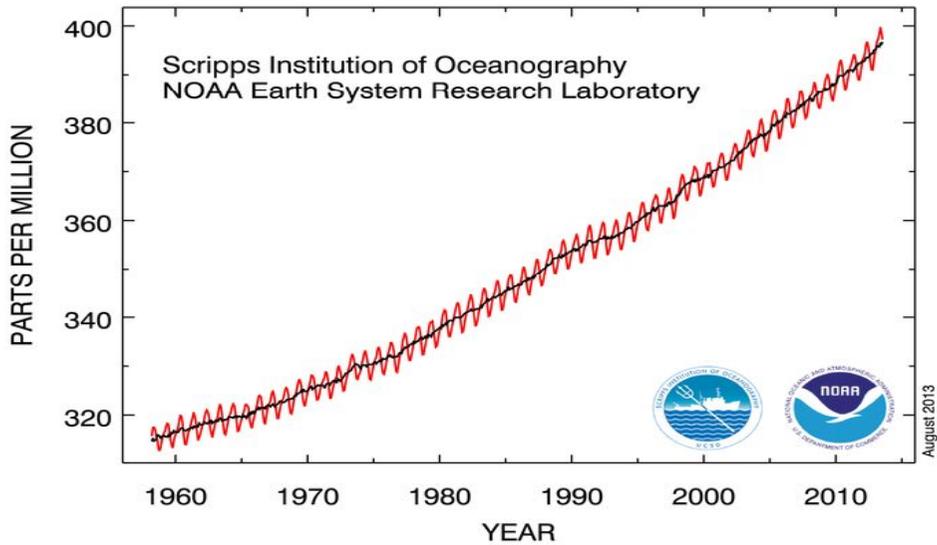


Fig. 3 Atmospheric CO₂ at Mauna Loa observatory [34]

2.1.2.1 이산화탄소의 특징

이산화탄소는 대기에 포함되어 있는 가스로 자체에는 독성이 없고, 보통은 무해한 기체이다. 분자량은 44.0095 g/mol이며 비중은 공기 1에 대하여 1.529, 승화점은 -78.50 °C이다. 또한 지극히 친밀한 존재로 무색, 무취의 지구상 대표적인 탄소 산화물이며, 압력을 가하면 쉽게 액화하며 이를 더 압축하면 고체 상태인 드라이아이스를 만들 수 있는데 상온, 상압에 놓아두면 다시 승화하여 기체로 날아간다. 이산화탄소는 물에 약간 녹아 탄산이 되어 약한 산성용액을 만들 수 있으며 수산화칼슘과 반응하여 탄산칼슘을 만들기 때문에 수산화칼슘을 물에 녹인 용액인 석회수에 이산화탄소를 통과시키면 용액이 뿌옇게 흐려지는 점을 이용하여 이산화탄소를 검출한다. 현재의 이산화탄소 농도는 약 400 ppm(0.04%)이다. 산업혁명 이전의 추정 농도는 280 ppm으로 일직선으로 상승 중으로 보고 있는데 이러한 원인으로 자동차 배기가스와 인구증가, 자원사용량 급증을 들 수가 있다.

2.1.2.2 이산화탄소 발생원

이산화탄소는 공업적으로 석회석에 산을 가하거나 석회석을 가열하여 얻는다. 알코올과 같은 탄소화합물이 연소할 때 물과 함께 생성되기도 하며 생물체가 유기물을 분해하는 과정에서도 만들어진다. 생명체는 호흡을 통해 유기물을 분해하면서 생활에 필요한 에너지를 얻는데 이때, 이산화탄소가 만들어지고, 혈액 내 이산화탄소의 농도가 높아지면 날숨을 통해 공기 중으로 배출한다. 또 식물의 부패, 화산폭발, 동물의 호기, 화석연료의 연소 등에 의하여 대기 중에 배출되는데 식물의 광합성이나 해양에 녹음으로써 대기 중에서 제거가 된다.

2.1.2.3 이산화탄소 피해

이산화탄소는 5000 ppm의 환경에 시간 가중평균으로 8시간 이상 있는 것은 인체에 위해가 있다고 여겨지고 있으며, 공기 중의 농도가 3~4% (30000 ~ 40000 ppm)를 넘으면 두통, 현기증, 구토 등이 나타나고, 7%를 넘으면 폐가 이산화탄소를 배출할 수 없게 되어 몇 분 만에 의식을 잃게 되며 그 상태가 계속 되면 사망에 이를 수도 있다. 또한 대기 중의 농도가 꾸준히 증가함에 따라 지구온난화의 주범으로 지목되고 있으며 500 ppm까지 도달할 것으로 예상하고 있는 2100년에는 지상의 기온이 1~3.5 °C 정도 상승할 것으로 보고 있다.

Table 7은 이산화탄소 농도별 인체 피해를 나타낸 것이다 [35].

Table 7. Body response to CO₂ [35]

concentration (ppm)	Influence
0~450	Good
450~700	No health problems
700~1000	Feel discomfort
1000~2000	Condition deteriorates
2000~3000	Stiff neck, headache, etc.
3000~	Detrimental to health

2.1.2.4 이산화탄소 대책

현재 전 세계적으로 이상기후가 발생하고 있다. 주된 원인으로 온실가스를 들 수 있다. 따라서 온실가스를 줄여야만 하는 이유가 생긴 것이다. 온실가스에는 메탄, 이산화탄소, 오존, 질소산화물 등이 포함되어 있으며 이중 이산화탄소가 지구 온난화를 가속화 시키고 있다.

오늘날과 같이 개발추세가 지속된다면 이산화탄소 농도는 2 배로 증가할 것으로 보게 되며 2 배 증가 시 지구 표면의 온도는 1.5~4.5 °C로 상승할 것으로 예상하고 있다. 하지만 화석연료를 주 에너지원으로 사용하고 있는 이때에 이산화탄소의 농도 감소는 힘든 일이다. 화석연료의 사용에 의해 80~85%의 이산화탄소가 발생하기 때문이다. IEA의 에너지 전망을 보면 OECD국가에 있어서 탄소의 상승폭은 각 지역마다 적게는 24%에서 많게는 48%까지 증가할 것으로 예상하고 있어 이산화탄소의 대책이 시급하다.

현재 IEA는 탄소세를 부과하여 이를 극복하고자 한다. 현재 1톤당 100달러의 탄소세를 부과하고 있다.(석유로 환산 시 1 B/L당 약 12달러) 이러한 탄소세는 탄소 배출량을 거래할 수 있기에 적게 배출한다면 남은 탄소배출량을 판매할

수가 있다.

탄소세로 인해 OECD국가에 있어서는 화석연료사용이 감소하고 있음을 확인하였다. 하지만 탄소세를 3배로 한다 해도 탄소 배출량의 삭감율은 2배에 지나지 않는다. 이는 아직 화석연료를 대체할 연료를 확보하지 못했기 때문이다. 그러므로 대체 에너지의 개발도 하나의 대책으로 떠오르고 있다.

1992년 리우에서 국제회의를 개최한 세계대표들은 지구의 기후변화에 위기감을 느끼고 기후변화에 관한 협약을 진행하였다. 하지만 이산화탄소의 배출이 많은 선진국들이 협약을 잘 이행하지 않아 교토에서 제 3차 당사국 총회를 열어 2012년까지 1990년에 비해 5.2% 낮은 이산화탄소를 배출하도록 감축량을 설정하여 이산화탄소의 배출량을 감소시키기 위한 노력을 하고 있다.

이산화탄소의 주요 배출원으로 교통부문을 빼 수 없다. 교통부문의 화석연료 사용으로 인해 지구 이산화탄소의 20%를 차지하고 있는 것으로 산출되었다. 이에 우리나라에서는 혼잡통행료 징수 및 세제혜택 부여 등의 교통 발생을 감축하는 방안과 이산화탄소 배출이 없거나 배출이 적은 교통수단을 장려하는 방안, 저공해 혹은 무공해 연료를 사용하는 차량이나 성능 개선을 통한 화석연료의 사용량 감소 방안을 추진 중에 있다.

2.1.3 VOCs (Volatile Organic Compounds)

휘발성 유기 화합물이 대기 중에 휘발돼 악취나 오존을 발생시키는 탄화수소 화합물로 피부 접촉이나 호흡기 흡입으로 인해 신경계에 장애를 일으키는 발암 물질이다. 벤젠이나 포름알데히드, 톨루엔, 자일렌, 에틸렌, 스티렌, 아세트알데히드 등이 대표적인 VOCs이다. 주로 석유화학, 정유, 도료, 도장공장의 제조와 저장과정, 자동차 배기가스, 페인트나 접착제 등 건축자재, 주유소의 저장탱크 등에서 발생한다. VOCs는 대기 중에 배출되어 질소산화물과의 광화학반응에 의해 인체 및 동·식물에 유해한 옥시단트의 전구물질로 작용하나 국내의 경우 대기환경보전법상에 대기오염물질로만 지정되어 있을 뿐 구체적 배출억제 방안 및 관리제도가 매우 미비한 실정이다. VOCs의 배출원 관리는 주요 배출원별 방지기술 등 시설관리가 주 관리 방법이며 개별 VOCs의 배출량 산정 및 분석

에는 많은 어려움이 있다. 하지만 VOCs들은 광화학 반응성 및 인체에 대한 발암성 등 유해성이 각각 다르므로 개별 VOCs 화합물의 배출현황 및 배출량 산정이 매우 중요하며 배출되는 수많은 화합물을 측정하기 위한 측정방법 및 분석기기, 분석요원 등이 확보되어야 할 것이다.

산업체에서 많이 사용하는 용매에서 화학 및 제약공장이나 플라스틱 건조공정에서 배출되는 유기가스에 이르기까지 매우 다양하며 끓는점이 낮은 액체연료, 파라핀, 올레핀, 방향족 화합물 등 생활주변에서 흔히 사용하는 탄화수소류가 거의 휘발성 유기 화합물에 해당한다.

국내에서는 1995년에 개정된 대기환경보전법에 근거하여 여천공업지구, 울산·미포·온산 공업단지를 특별대책지역으로 지정하였으며 1997년 12월에는 대기환경보전법시행령을 개정하여 규제대상의 범위를 탄화수소류 중 레이드증기압이 27.6 kPa이상인 물질에서 10.3 kPa이상인 물질로 확대하고 주유소를 규제대상시설로 추가하였다. 또 1999년 10월에 10.3 kPa이하의 물질 중의 유해한 물질도 관리할 수 있도록 레이드증기압의 범위제한을 두지 않도록 환경보전법시행령을 개정하였다. Table 8은 37개의 규제 물질을 나타낸 것이다 [36].

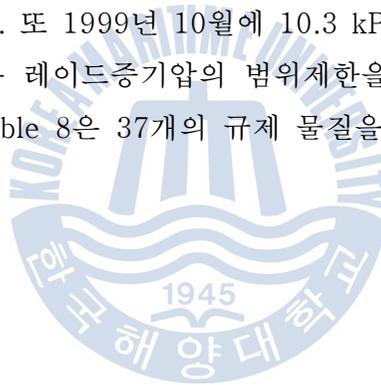


Table 8. 37 Types of controlled VOCs [36]

No	Products and Name	molecular formula
1	Acet-aldehyde	CH_3CHO
2	Acetylene	C_2H_2
3	Acetylene Dichloride	$C_2H_2Cl_2$
4	Acrdein	C_3H_4O
5	Acrylonitrile	C_3H_3N
6	Benzene	C_6H_6
7	1,3-Butadine	C_4H_6
8	Butane	C_4H_{10}
9	1-Butene 2-Butene	$C_4H_8[CH_3CH_2CHCH_2]$ $C_4H_8[CH_3(CH)_2CH_3]$
10	Carbon Tetrachloride	CCl_4
11	Chloroform	$CHCl_3$
12	Cyclohexane	C_6H_{12}
13	1,2- Dichloroethane	$C_2H_4Cl_2[C(CH_2)_2Cl]$
14	Diethylamine	$C_4H_{11}N[(C_2H_5)_2NH]$
15	Dimethylamine	C_2H_7N
16	Ethylene	C_2H_4
17	Formaldehyde	$HCHO$
18	n-Hexane	C_6H_{14}
19	Isopropyl Alcohol	$C_3H_8O[(CH_3)CHCH_3]$
20	Methanol	CH_3OH
21	Methyl Ethyl Ketone	$C_4H_8O[CH_3COCH_2CH_3]$
22	Methylene Chloride	CH_2Cl_2
23	Methyl Tertiary Butyl Ether	$CH_3OC(CH_3)_2CH_3$
24	Propylene	C_3H_6
25	Prorylene Oxide	C_3H_4O
26	1,1,1- Trichloroethane	$C_2H_3Cl_3$
27	Trichloro ethylene	C_2HCl_3

28	Gasoline	—
29	Naphtha	—
30	Crude Oil	—
31	Acetic Acid	$C_2H_4O_2$
32	Ethylbenzene	C_8H_{10}
33	Nitrobenzene	$C_6H_5NO_2$
34	Toluene	C_7H_8
35	Tetrachloro ethylene	C_2Cl_4
36	Xylene	C_8H_{10}
37	Styrene	C_8H_8

2.1.3.1 VOCs 특징

휘발성 유기 화합물의 유형은 존재하는 상의 형태에 따라 휘발성(증기압이 10-2 kPa이상)과 반휘발성(증기압이 10-2 ~ 10-8 kPa), 비휘발성(증기압이 10-8 kPa이하)으로 분류한다.

세계보건기구(WHO)는 휘발성 유기 화합물을 비등점에 따라 구분하는데 비등점이 0 °C~(50-100 °C)인 경우 고휘발성(VVOCs), (50-100 °C)~(240-260 °C)를 휘발성(VOCs), (254-260 °C)~(380-400 °C)를 반휘발성(SVOCs), 380 °C 이상을 고체상태(POM: Particlebond Organic Compounds)로 분류하고 탄화수소류 중 레이드 증기압(Reid Vapor Pressure, RVP)이 10.3 kPa(1.5 psia)이상인 석유화학제품, 유기용제 또는 기타 물질로 정의되고 있다.

휘발성 유기 화합물이 다른 유해 대기오염 물질과 구분되는 가장 큰 특성은 대기에서 질소 산화물 존재 하에 하이드록시 라디칼(OH)과 연쇄반응이 일어나 오존을 포함한 광화학 산화물을 생성시키는 것이다.

휘발성 유기 화합물이 대기 중 광화학 반응에 참여하여 오존 오염을 유발하는 정도를 오존생성능력(Photochemical ozone creation potentials. POCP)이라 하는데 일반적으로 하이드록시 라디칼과 반응하는 정도에 의한 UCR법으로 평가를 한다.

질소산화물의 일산화질소 산화물과 반응하여 하이드록시 라디칼 재생 연쇄반

응을 형성하기도 하며 형성된 이산화질소는 광화학 반응에 의해 오존을 생성시키게 된다.

국내의 대기환경보전법시행령 제 39조 1항에서는 석유화학제품·유기용제 또는 기타물질로 정의하고 있는데 환경부 고시 제 1998-77호에 따라 벤젠·아세틸렌·휘발유 등 31개 물질 및 제품이 규제대상에 있으며 미국에서는 UCR법에 의해 에탄을 오존 비반응성 휘발성 유기 화합물로 분류하고 에탄과 하이드록시라디칼과의 반응성을 기초로 규제대상 휘발성 유기 화합물을 선정하고 있다 [37].

만약 오존 농도를 낮추기 위해서는 반응성이 큰 휘발성 유기화합물의 배출 감소가 우선 시 되어야 하지만 할로겐화 탄화수소류와 같이 광화학 반응성이 낮지만 대기 중 수명이 긴 휘발성 유기 화합물도 있어 오존 문제 특성상 반응성이 비교적 작은 휘발성 유기 화합물에 대해서도 소멸조치를 취해야만 할 것이다.

2.1.3.2 VOCs 발생원

대기로 방출되는 VOC는 크게 나누어 자동차와 같은 유동성 발생원과 고정 발생원이 있으며 고정성 발생원으로는 각종 용제 사용처, 석유화학산업, 유기화학산업, 철강 산업, 식품 산업, 폐수 및 폐기물 처리업, 농업 등이 있다. 따라서 각 사업장에서 주로 방출되는 VOC를 성분별로 살펴보면 Table 9와 같다 [38].

Table 9. Industrial sources of VOCs [38]

Industry	Sources
Paint Shop	Chlorinated hydrocarbons, Ester, Alcohol, Boqueron, Toluene, Dimethylformamide
Dry Cleaning	Chlorinated hydrocarbons, gasoline, fluorinated hydrocarbon
Print and Paper	Chlorinated hydrocarbons, BTX
Textile Manufacturing	Acetone, alcohols, methylene chloride, methyl disulfide
Rubber and Glue	Ketones, ethers, BTX
Plastic	Chlorinated hydrocarbons, esters, alcohols, ketones and xylene
Automobile and petrochemical	Aliphatic hydrocarbons, benzene, an aromatic hydrocarbon
Metals and Electronics	Chlorinated hydrocarbons, esters, alcohols, organic acids
Chemical and pharmaceutical	All solvents
Wastewater Treatment	Amine, mercaptan destruction

2.1.3.3 VOCs의 피해

휘발성 유기 화합물의 방향족 또는 할로젠족 탄화수소는 물질자체가 직접적으로 인체에 유해하다. 또 지방족 탄화수소류는 인체에 대한 유해성이 크지 않지만 광화학반응이 일어나 스모그발생의 원인이 되기도 한다. 지표면 부근에서 오존의 생성에 관여하여 지구온난화에 간접적으로 기여도 하며 프레온은 성층권의 오존층 파괴 원인으로 알려져 있다. Table 10은 휘발성 유기 화합물의 인체영향을 나타낸 것이다.

Table 10. Health effects of VOCs

Benzene	Hematopoietic dysfunction (pancytopenia, aplastic anemia)
Halogenated hydrocarbons	Hepatotoxicity, renal toxicity, cardiac toxicity (arrhythmias, sudden death) Carcinogen
Vinyl chloride	Musculoskeletal disorders, liver toxicity, carcinogenicity (liver vasculature six kinds)
Methanol	Blindness, metabolic acidosis
Formaldehyde	Allergic dermatitis, lung function decline, carcinogenic
Carbon disulfide	Encephalopathy, peripheral neuropathy, coronary heart disease, vision, disability, hepatotoxicity, nephrotoxicity
N-hexane	Peripheral neuropathy
Toluene	Visual disturbances, dermatitis, respiratory disease, central nervous system disorder

2.1.3.4 VOCs 대책

국내의 휘발성 유기화합물 관련 규제는 '95년 대기환경보전법에 규제 관련 근거를 마련하였으며 '99년부터 대기환경보전법 제 8조의 2의 규정에 의한 대기환경 규제지역에서 휘발성 유기화합물을 규제토록 되어 있다 [37]. 현재 국내의 휘발성 유기화합물 관련 규제는 대기환경 규제지역과 특별 대책지역으로 나누어 볼 수 있으며 대기환경 규제지역은 광역규제가 필요한 대도시 및 공단 지역을 대상으로 하며 주로 오존의 생성에 기여하는 광화학 반응성 물질의 규제에 중점을 두고 있다. 국내 대기환경보전법상에 명시된 오존의 환경기준은 8시간 평균 0.08 ppm이하, 1시간 평균은 0.1 ppm이하이며 특히 1시간 평균치의 경우 연간 3회 이상 그 기준을 초과하여서는 안 된다고 규정되어 있다.

1988년부터 1994년까지 환경부에서 측정한 자동 측정망의 오존오염도 자료를 활용하여 분석한 결과에 의하면 대부분 서울, 신도시 등 수도권지역과 공단 지역이 단기기준 3회 이상 초과되는 것으로 나타났으며 주요도시의 단기환경기준 초과횟수는 매년 증가('90년 31회, '94년 54회) 추세에 있다. 오존의 단기환경기준 초과지역과 횟수는 휘발성 유기화합물의 주요배출원인 자동차운행과 용제사용의 급증으로 증가될 것으로 예상된다. 현재 대기환경규제지역에서의 규제제품 및 물질은 32종이다. 특별대책지역은 주로 공단을 끼고 있는 배출원의 규제에 중점을 두고 지정 및 규제가 되고 있으며 현재 '96년 여천산업단지 지역과 '97년 울산, 온산 산업단지 지역이 규제대상으로 되어 있다. 이들 지역에서는 광화학 반응성 물질과 인체 유해성 물질을 대상으로 규제가 되고 있으며 규제대상 제품 및 물질의 수도 47개로 대기환경규제지역보다도 많은 실정이다. 그리고 '97년 12월 대기환경보전법 시행령 제39조 1항을 개정하여 휘발성 유기화합물의 정의를 탄화수소류 중 레이드 증기압이 27.6 kPa이상인 물질에서 10.3 kPa이상인 물질로 강화하고 제 2항에 주유소를 추가하여 2004년부터 규제토록 하는 등의 관련 규제가 확대, 강화되고 있다. 환경부의 향후 휘발성 유기화합물 관련 관리 지침은 특별대책지역의 경우 수처리 설비의 경우 규제 완화와, 방지설비나 후 처리설비의 도입에 외자가 필요한 경우 규제의 유예를 검토중이다. 그리고 규제지역의 확대 및 규제수단, 규제물질의 지정 등의 경우는 연구용역을 통해서 재조정할 계획이다.

대기환경규제지역의 경우는 오존농도 달성지역과 오존농도 미달성 지역으로 구분하여 미달성 지역의 경우 연도별 감축목표를 정하여 이를 달성할 수 있도록 휘발성 유기화합물에 대하여 규제 예정이다. 대기환경보전법 제 28조 2항에 명시된 '휘발성 유기화합물질의 규제' 규정 및 동법 시행령, 시행규칙에 구체적인 VOC 규제대상물질, 규제지역, 규제시설 및 휘발성 유기화합물 방지시설의 설치기준 등을 준비 중이다. 동법 제 28장 2항의 내용은 다음과 같다.

가. 대기환경규제지역 안에서 휘발성 유기화합물질을 배출하는 시설로서 대통령령이 정하는 시설을 설치하고자 하는 자는 환경부령이 정하는 바에 따라 관할 시도지사에게 신고하여야 한다.

나. 제 1항의 규정에 의한 시설을 설치하고자 하는 자는 휘발성 유기화합물질의 배출을 억제 또는 방지하는 시설을 설치하는 등 휘발성 유기화합 물질의 배출로 인한 대기환경상의 피해를 방지하기 위한 조치를 하여야 한다.

다. 제 2항의 규정에 의한 휘발성 유기화합물의 배출을 억제방지하기 위한 시설 설치의 기준 등에 관하여 필요한 사항은 환경부령으로 정한다.

라. 시도지사는 제 2항의 규정을 위반하는 자에 대하여 휘발성 유기화합물질을 배출하는 시설 또는 그 배출의 억제방지를 위한 시설의 개선 등 필요한 조치를 명할 수 있다.

제 28조 2항에서 '대통령령이 정하는 시설'이라 함은 지금까지 배출허용기준 규제대상에서 제외되어 왔던 석유 저장시설 및 출하시설, 주유소, 도장시설, 인쇄시설 및 세탁시설 등이 새로운 규제대상에 포함되었다. 철강, 비철금속 제조업의 경우는 유기용제 사용시설, 유류유기용제 및 유기용제 함유물질 저장시설이 해당된다고 볼 수 있다.

환경부에서 '휘발성 유기화합물질의 규제'신설과 함께 마련한 각 배출원별 휘발성 유기화합물질 배출 억제, 방지시설에 관한 기준 등(제64조 관련)의 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다.

석유정제 및 석유화학제품제조업의 제조시설의 경우는 펌프, 압축기, 압력완화

장치, 검사용 시료채취장치, 배수 및 집수조, 중간집수조(junction box), 하수구(sewer line)등에서의 누출이 최대한 방지될 수 있도록 규정을 하고 있으며, 폐수처리장의 유수 분리조나 저장탱크는 부유지붕을 설치, 운영하거나 상부덮개를 설치하여야 하며 상부덮개를 설치한 경우에는 덮개와 유체표면과의 사이의 공간에서 발생된 휘발성 유기화합물을 포집, 처리할 수 있는 시설을 설치하거나 제어할 수 있는 제어시설을 설치, 운영하여야 한다.

저장시설의 경우는 내부부상지붕(internal floating roof)형 저장시설, 외부부상지붕(external floating roof)형 저장시설, 기존의 고정형 지붕형(fixed roof) 저장시설의 경우를 각각 구분하여 휘발성 유기화합물질의 대기 중으로 직접 배출방지를 자세하게 규정하였다. 이외에도 출하시설, 저유소, 세탁시설 등에 관련된 배출원별 관리방안도 마련되어 있다.

2.2 공기청정용 필터

공기 청정용 필터란 자동차의 공조 장치에 의해 실내로 유입되는 공기를 정화하기 위한 필터로 정의할 수 있는데 캐빈 에어필터라고도 부른다.

미국 캘리포니아 주의 South Coastal Air Quality Management District는 최근 수행된 연구결과에 의하면 자동차 내부 공기의 오염정도는 외부보다 최대 10배까지 더 오염되어 있다고 보고하고 있다. 이러한 오염물 중에는 배기가스, 도로상의 분진, 화분, 곰팡이 포자 등이 있으며, 이러한 오염물들은 자동차의 에어컨 시스템에 의해 내부로 유입돼 호흡하는 도중에 호흡기로 유입되며, 오염물질들로 인해 인체는 여러 가지 부작용을 나타낸다. 5.0 μm 크기의 꽃가루나 도로 먼지 등은 대부분 코와 기간지에 침착이 되며 1.0~5.0 μm 범위의 산업체에서 배출된 먼지와 도로먼지, 검댕의 종류가 기관지와 기관지 세관 폐포 사이에서 침착된다.

폐의 안까지 들어오는 0.01~1.0 μm 크기의 입자상 물질은 대부분이 산업체에서 배출되는 먼지와 도로 먼지이다. 따라서 인간의 호흡기로 유입되어 폐에서 침착되는 악성 미립자상 물질의 크기는 대부분이 5.0 μm 이하로 확인되었다.

실제 도로 주행 시 승용차내로 유입되는 공기 중에는 꽃가루, 석면입자, 박테

리아, 도로먼지 등의 많은 종류의 악성 미립자상 물질과 오존, 벤젠, 톨루엔, 하이드로젠, 아황산염, 포름알데히드, 암모니아, 일산화탄소, 일산화질소, 이산화질소, 이산화황 등과 같은 유해기체상 물질이 다량 함유되어 있다.

유해기체상 물질이 다량 함유된 자동차 실내 분위기에 장시간 노출 시 피부 알레르기 질환, 호흡기 질환 및 각종 신장 질환과 같은 질환의 유발 요인이 되고 있다는 연구 결과도 보고되어 있다.

승용차의 운전자 및 승객의 건강과 쾌적한 실내 공기질을 유지하기 위하여 정화된 공기를 승용차 내로 유입시키는 캐빈 에어필터의 개발이 오래전부터 연구되어 왔다. 고급 차량에는 예전부터 캐빈 에어필터를 장착하여 왔으며, 소형 승용차에도 장착하기 위한 연구가 수행되어 왔고 최근에는 장착되고 있다. Fig. 4와 5는 차량용 공조시스템구조와 공기흐름 개략도를 나타낸 것이다.

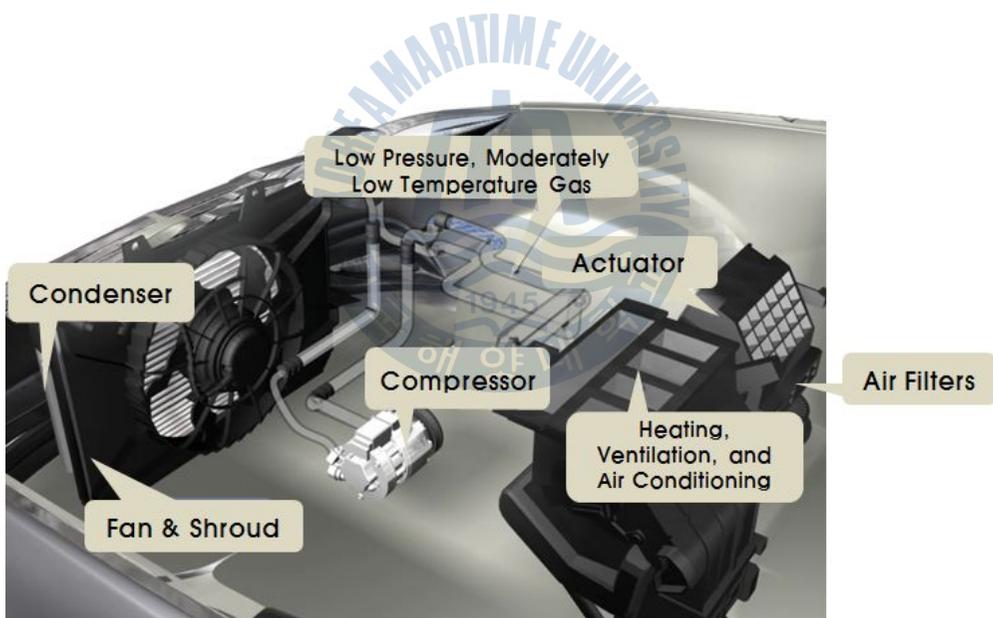


Fig. 4 Structure of the air conditioning system

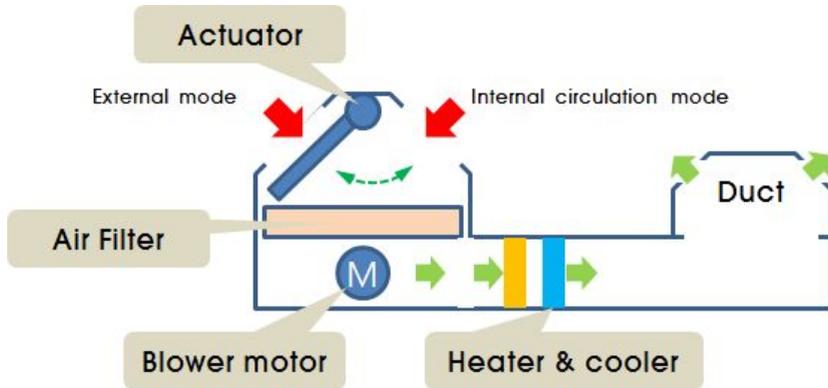


Fig. 5 Schematic diagram of airflow

2.2.1 PP 부직포 필터

입자상 물질 제거용 필터는 2층(two layers) 또는 3층(three layers)으로 형성되어 있는데, 1층(1st layer)은 prefilter 층으로서 재질은 polypropylene 또는 polycarbonate 섬유로 만들어진 부직포로 되어 있다. 두 번째 층(2nd layer)은 micronfiber 층으로서 재질은 polypropylene 또는 polycarbonate fiber를 사용한 정전부직포 층이다. 세 번째 층은 지지층으로서 polyethylene net 또는 polypropylene spunbond를 사용하였다. Fig. 6에 particulate filter의 구조를 나타내었다.

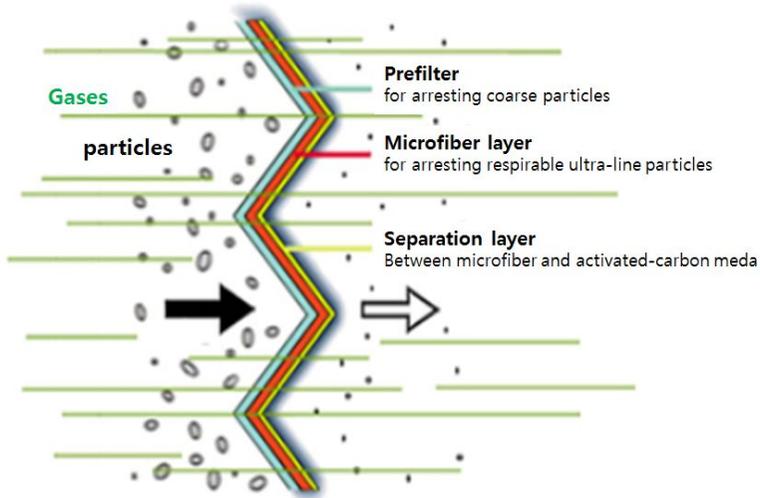


Fig. 6 Structure of particulate filter

2.2.2 (PP+AC) 콤비네이션 필터

콤비네이션 필터는 PP 부직포 필터의 세 번째 층을 electret filter를 사용하여 활성탄소입자(Activated carbon powder)를 코팅하는 방법으로 첫 번째 층은 prefilter, 두 번째 층은 정전필터층, 세 번째 층은 약취 등 가스상 오염 물질을 흡착 제거하는 활성탄소입자, 마지막에 커버층으로 구성되어 있다. Fig. 7에 (PP+AC) 콤비네이션 필터의 구조를 나타내었다.

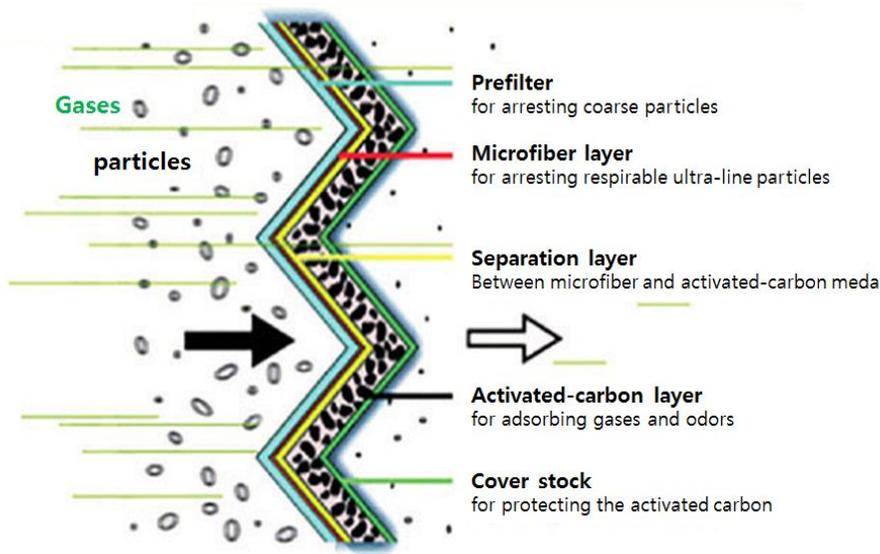


Fig. 7 Structure of combination filter

2.2.3 ACF 필터

건설교통부는 “신축공동주택 실내 공기질 및 운송수단의 권고기준”을 제정하고 새 자동차의 내장재 등에서 배출되는 포름알데히드와 톨루엔, 벤젠, 스틸렌, 자일렌, 에틸렌, 아세트알데히드의 6가지 휘발성 유기 화합물(VOCs)로 인하여 탑승자에게 피로, 두통, 눈의 자극 등의 증상이 나타날 수 있는 ‘새 차 증후군’에 대해서 실태조사를 하였다 [39]. 그 결과 대형버스의 경우는 7개 항목 중 3~4개 항목에서 동 권고기준을 초과하는 것으로 나타났으며 대부분의 승용차에서도 권고기준에 육박하는 VOCs 배출이 조사되었다.

휘발성 유기 화합물 중 톨루엔(toluene)은 상기 증상 외에 흥분, 혼란, 불면증 등을 초래하기도 하고 고농도에서는 식욕부진, 보행 장애, 매스꺼움 및 사망을 초래하기도 한다 [1]. Lee et al. (2011)은 자동차 도어트림 암레스트로부터 방출되는 휘발성 유기화합물 평가를 하였는데 톨루엔은 주로 TPO skin과 PP substrate로부터 방출됨을 밝혔다 [40]. Lee et al. (2010)은 자동차용 공기청정기

의 성능 평가를 수치적으로 연구하였으며 자동차 후면에 공기청정기를 설치할 경우 효과적인 VOCs 저감 성능이 나타난다고 보고하였고, Cho et al. (2008)은 철도차량용 바닥재와 내장재에서 방출되는 VOCs가 객실 승객의 건강을 위협할 수 있으므로 VOCs를 덜 방출하는 내장재가 사용되어야 한다고 주장하였다 [41,42]. Cho et al (1998)도 공기질 조절장치 작동으로 승용차 내부의 공기질을 평가하였으며, 일본에서는 Kouichi et al. (2009)이 자동차 실내에서 발생하는 VOCs 성분을 측정하여 보고하였다 [43,44].

현재 차량에 상용되고 있는 PP 부직포필터와 활성탄소가 첨착된 콤비네이션 필터는 VOCs 제거에 효과적이지 못한 것으로 알려져 있다. 활성탄소는 휘발성 유기화합물 및 각종 부하에 대한 대응성이 좋고, 촉매소각법과 비교하여 저렴한 가격과 특정 물질에 대한 독성을 보이지 않는 장점을 가지고 있으나 2차 오염물의 발생과 과도한 압력 손실, 높은 분진 발생률, 재생사용의 어려움 등의 단점을 가지고 있다 [45]. 그리하여 세계적으로 활성탄소를 대신할 수 있는 새로운 타입의 흡착제 개발이 요구되고 있다. 활성탄소섬유(ACF)는 이러한 새로운 타입 흡착제의 한가지이다. 즉 ACF는 섬유상탄소흡착제로서 비표면적이 대단히 크고 표면에 발달된 세공들이 거의 모두가 미세공들로 내부와 서로 관통되어 있어서 물질전달 저항이 매우 적으므로 흡착속도가 활성탄소의 100배 이상인 것으로 알려져 있다. 따라서 근래에 ACF를 사용한 VOCs 흡착에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다 [46].

Kim et al. (2008)은 ACF를 이용하여 흡착bed에서의 톨루엔 흡착특성을 연구하였으며, Byun et al. (2009)도 ACF를 이용하여 톨루엔과 IPA의 흡·탈착 성능 특성을 연구하였다 [47,48]. Park et al. (2006)은 ACF 필터의 벤젠 흡·탈착 특성을 연구하였으며, Son et al. (2005)도 활성탄소와 ACF에 의한 톨루엔의 흡·탈착 성능을 비교하였다 [49,50].

2.2.3.1 활성탄소섬유의 개요

활성탄소섬유(Activated Carbon Fiber, ACF)란 유기섬유를 탄화 및 활성화 하여 제조한 흡착성질을 지닌 흡착제를 말하며 전구체 (precursor)섬유에 따라 셀룰로오스계, 아크릴계, 페놀수지계, 핏치계 등으로 나눌 수 있다.

두 개의 상이 존재하는 경계면에서 물질의 농도가 증가하는 현상을 흡착(adsorption)이라고 한다. 흡착 현상은 실생활 가운데에서 폭넓게 이용되고 있는 현상으로서 과거로부터 전해오는 숯 등을 이용한 식료품의 탈색에서부터 시작하여 의약품 제조, 담배나 방독마스크용의 필터, 그리고 현대 사회의 큰 문제점이라고 할 수 있는 산업용, 가정용 공해물질의 제거에 이르기까지 다양한 용도에 사용된다. 기존의 흡착제로 사용되던 것은 실리카겔과 알루미늄, 제올라이트, 활성탄 등이 있다. 그 중에서 활성탄은 입상, 분말상의 것이 사용되어 왔는데 최근에 제 3의 활성탄으로서 섬유상의 활성탄, 즉 활성탄소섬유가 공업적으로 생산되어 사용되고 있다. 활성탄소섬유에 앞서 개발된 탄소섬유는 1959년에 공업화된 이후로 우주항공 분야나 자동차, 건축물, 스포츠 분야 등에서 고성능 재료로서 각광을 받아 사용되고 있다. 탄소섬유가 기계적, 열적 성질에 초점을 맞추어 개발 사용되고 있다면 활성탄소섬유는 흡착에 초점을 맞추어 개발된 소재인데 기존의 활성탄에 비해 더욱 향상된 흡착용량과 흡착속도, 그리고 빠른 탈착에 의한 재사용성과 폭넓은 성형성을 그 특징으로 한다.

보통 2차원적 형태를 갖는 활성탄소섬유가 활성탄에 비해 비표면적이 더 큰 이유도 미세공이 활성탄에 비해 월등히 많기 때문인데, 이로 인하여 유기 및 비유기 화합물 흡착질에 대해 뛰어난 흡착성을 갖게 된다.

섬유상의 활성탄소를 얻기 위해서는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 기존의 탄소섬유에 활성을 부여하는 공정이 추가된다. 탄소섬유의 제조공정과 다른 점은 탄소섬유 제조시의 탄소화 공정과 동시에 활성 부여를 위한 활성화 공정이 추가된 점이라 할 수 있다. 활성화 공정에서는 기체(특히 스팀)나 액상의 화학약품을 사용하게 되는데 기체를 이용한 활성화가 가장 널리 사용된다. 활성탄소섬유의 다공성 표면은 바로 이 활성화 공정에 의해 발생하게 된다. 이렇게 제조되는 활성탄소섬유의 전구체로는 Table 11에 보인 바와 같이 네 가지가 주로 사용된다. 또한 사용된 원료에 따라 제조된 활성탄소섬유의 구조나 성질이 영향을 받게 되는데, 이를 Table 12에 보였다. 각각의 전구체로부터 얻은 상이한 성질을 용도에 맞게 응용할 수 있다는 면에서 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 제품 생산이 가능하다.

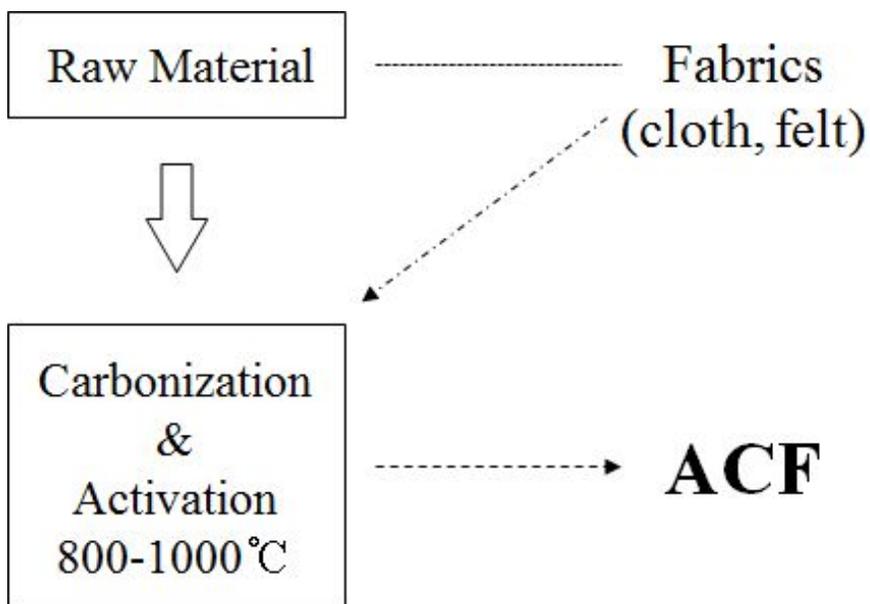


Fig. 8 Manufacturing process of activated carbon fiber

Table 11. Raw materials of activated carbon fiber

Raw materials	Carbon content
Rayon-based	44.4%
PAN-based	67.9%
Phenol resin-based	76.6%
Pitch-based	93.1%

Table 12. Characteristics of ACF produced from various materials

	Phenol-based ACF	Cellulose-based ACF	PAN-based ACF	Pitch-based ACF
avg. pore Diameter (nm)	1.5~3.5	1.0~1.6	2.0~3.0	1.7~2.1
Tensile Strength (kg/mm ²)	30~40	7~10	20~50	15~20
Tensile Modulus (kg/mm ²)	2000~3000	1000~2000	7000~8000	400~640
pH	7.0	7.0	7.0	7.0
Adsorbed Benzene (wt %)	30~80	30~60	20~45	

활성화 방법은 수증기, 탄산가스 등 산화성 가스에 의한 활성화법과 약품 활성화법으로 구분되며 수증기 활성화법이 비교적 간단하고, 제조비가 저렴하여 많이 응용된다. 매우 가는(15 μm이하) 섬유상에 발달된 미세공들은 기상이나 액상 흡착에 있어서 대단히 신속한 세공 내 흡착(intraparticle adsorption)을 보이고 있다.

ACF는 기본형태가 섬유상이므로 직포나 부직포, 종이 등의 형태로 가공하여 사용할 수 있어서 취급이 용이하다. 또한 낮은 온도에서 탈착이 용이하므로 재생성이 뛰어나다. 또한 활성탄에 비하여 비표면적이 월등히 크고 흡착성능이 우수하며 짧은 비사용층 길이를 보이고 있어 수차례의 재사용이 가능하다. 하지만 원료가 비싸다는 단점이 있다. 그렇지만 단위무게 당 부피가 월등히 커서 활성탄에 비하여 소량으로도 효과적인 흡착을 수행할 수 있다.

Table 13에 ACF와 활성탄의 성질을 비교하였다. ACF는 현재까지 대부분의 기상·액상 흡착공정에 사용되고 있는 입상 혹은 분말상 활성탄과 흡착성능이 비교될 수 있는데 이는 이 두 탄소흡착제의 구조적 차이로 설명할 수 있다.

분자 직경 크기가 8 Å이하인 직경을 갖는 기공을 극미세공(Submicropore)라고 하는데 활성탄은 약간의 중기공(20~500 Å)과 많은 양의 대기공(500 Å이상)으로 구성되어 있는 반면 ACF는 거의 대부분이 미세공으로 이루어져 있다. 따라서 ACF의 단위무게당 기공의 부피와 표면적이 활성탄에 비해 훨씬 크므로 흡착용량이 크고, 미세공만이 발달되어 있으므로 흡착반응이 이루어지는 미세공까지 신속하게 흡착질이 도달할 수 있어 흡착속도가 빠르다. 또한 ACF는 섬유직경이 매우 작아 외부유체와 접촉효율이 증대되며, 흡착탑에서의 흡착질의 투과저항이 매우 적어 탑내의 압력강하가 낮다. 따라서 흡착제로서의 ACF의 우수한 흡착성질은 ACF의 구조적 특성이 중요한 영향을 미친다 [51].



Table 13. Properties of ACF and AC

Article	Activated carbon fiber	Activated carbon
The specific surface area	1500~2000	1000~1100
Pore volume	0.7~1.2	0.3~0.7
Pore radius	10~20	10~3000
The adsorption rate	More than 100 times faster than the granular activated carbon (micropore filling)	3 mass transfer (diffusion) – (capillary condensation) – (micropore filling)
Reproduction	100 ~ 200 °C hot air or steam heated	280 °C due to the decomposition of the metal impregnated Difficult to play
Pore Structure	Mostly composed of micropore	macropore, mesopore, micropore 3 classified by type
Sorption	Benzene removal rate: 45 ~ 50% Amine odor removal rate: 96% Mercaptan removal: 100%	Benzene removal rate: 30 ~ 35% Amine odor removal rate: 13% Mercaptan removal rate: 95%
Driving Problems	No changes in packing density Dust not occurred No recontamination	Changes in packing density Dust generation Possible re-contamination

2.2.3.2 활성탄소섬유의 구조와 성질

활성탄소섬유는 입상 또는 분말상 활성탄이 활성을 갖게 되는 원리와 동일한 원리로, 미세공에 의해 활성을 띠게 된다.

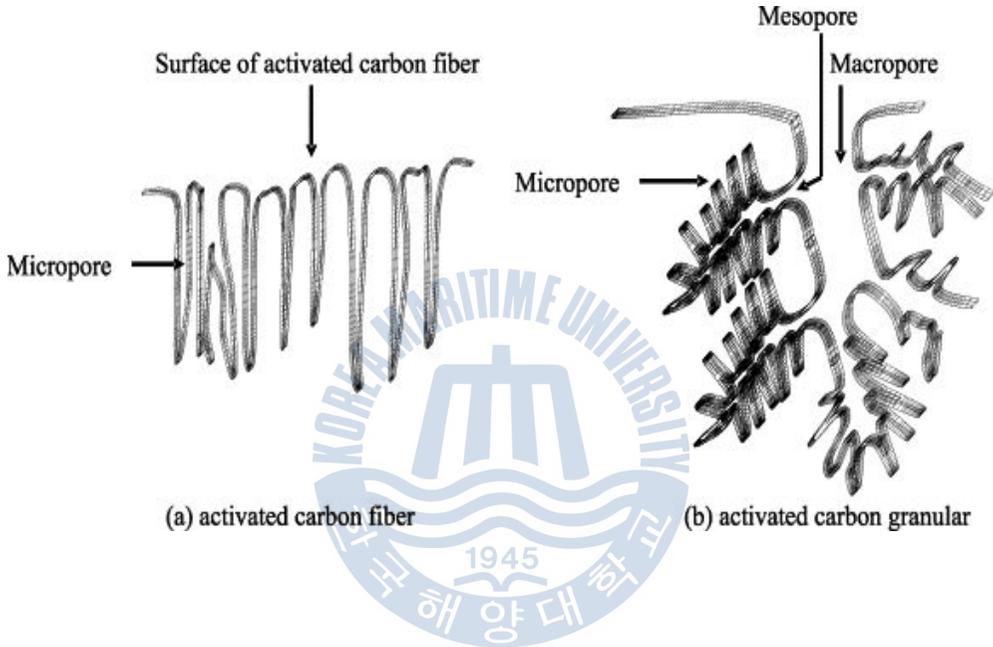


Fig. 9 Structure of granular activated carbon and activated carbon fiber

Fig. 9에서 활성탄과 활성탄소섬유의 개략적인 구조를 볼 수 있는데, 활성탄은 세공의 직경이 50 nm 이상인 대기공과 2~50 nm인 중기공, 2 nm 이하인 미세기공으로 구성되어 있는데 반해 활성탄소섬유는 미세기공으로만 구성되어 있다. 이러한 구조적 차이로 말미암아 특성의 차이가 발생한다. 여기에서는 Fig. 10에서 보인 바와 같이 네 가지 측면에서 활성탄소섬유의 구조와 성질을 고찰하도록 한다.

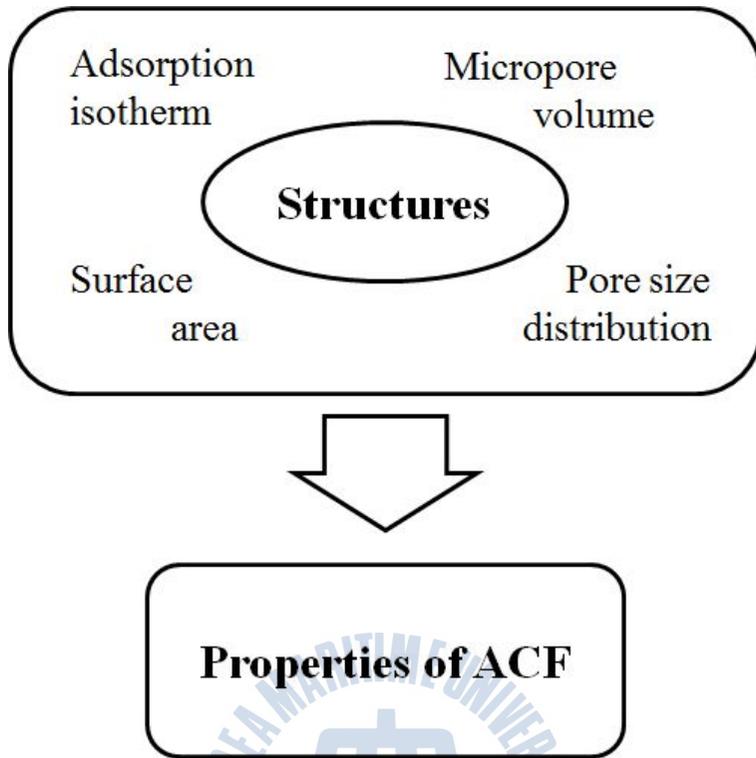
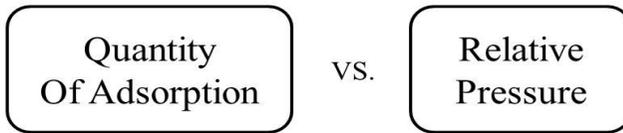


Fig. 10 Main factors of the ACF structure related to its properties

보통 세공 구조에 의해 흡착을 나타내는 소재를 고찰하는 경우 흡착등온곡선을 분석하여 표면 구조 특성을 밝히게 된다. 활성탄소섬유의 경우 질소 가스 등의 흡착실험 결과를 통해 Fig. 11과 같은 유형의 흡착등온곡선이 얻어지는데, 이는 BET I type의 것으로서 Langmuir 모델로도 알려져 있는 것이다. 곡선의 상대압이 낮은 부분의 곡선은 미세기공을 채우는 기구에 의해 나타나며 좀 더 높은 다층흡착에 의해 나타나는 것으로 해석된다. 미세기공은 그 외의 구조에 비해 더욱 안정한 잠재력을 가지므로 세공 크기 분포 역시 흡착 거동에 영향을 미치게 된다.

Adsorption Isotherm



for ACF, Type I (Langmuir model)

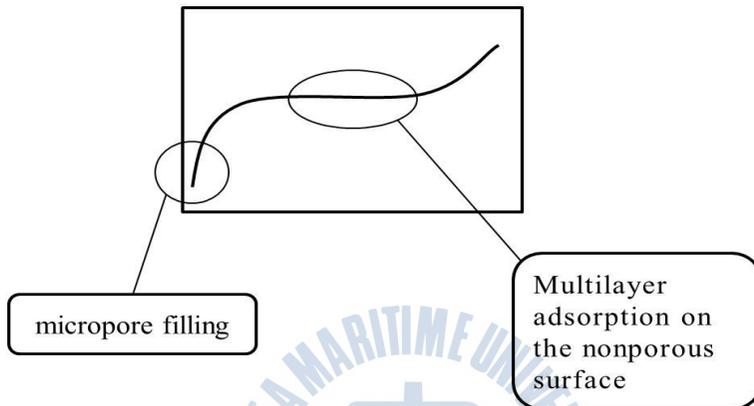


Fig. 11 Adsorption isotherm curve of activated carbon fiber

다음으로는 활성탄소섬유의 비표면적, 미세공의 체적, 세공 크기 분포에 대해 살펴보도록 한다. 활성탄소섬유의 비표면적과 미세공 체적을 활성탄과 비교하면 비표면적은 800~1600 m²/g으로 활성탄보다 큰 값을 가지며, 미세공의 체적도 평균 0.8 ml/g으로서 약 0.3 ml/g인 활성탄보다 두 배 이상 큰 값을 갖는다.

세공 크기 분포는 흡착질의 크기에 대한 선택적 흡착성이나 미세공의 체적 등에 영향을 미치는 인자이다. 세공 직경에 따른 세공 분포의 경우 활성탄은 세공이 넓은 영역에 걸쳐 존재하는 반면에 활성탄소섬유는 2 nm이하의 영역에 집중적으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

2.2.3.3 활성탄소섬유의 역사

활성탄소섬유는 1962년에 미국의 Abbott에 의해 처음으로 특허화 되었고 1972년에 영국에서 특허화 되었다. 그 후 여러 가지 전구체 섬유를 사용한 활성탄소섬유가 본격적으로 세상에 알려지기 시작한 것은 1976년 이후이다. Table 14에서 세계 최초로 활성탄소섬유를 공업적으로 생산하여 상품화한 것은 일본의 Toyobo이며 영국의 경우에는 국방성 연구소가 기술개발 한 것을 각 민간사(시브고만사, 차콜크로스사)가 생산·판매하고 있다. 일본에서는 Toyobo 에 이어 Kuraray Chemical, Toho rayon, Osaka gas 등이 공업화하였다. 시장에서의 상품전개는 선발기업인 Toyobo가 상품의 다양화를 포함하여 가장 넓게 진행하고 있으며 생산량에 있어서도 가장 많은 것으로 추정되며 Toho rayon이 그 뒤를 잇고 있다. 일본에서의 활성탄 공업은 1920년대 중반부터 시작하여 60년 이상의 역사가 있으며 입상탄, 분말탄의 두 종류가 주로 생산·사용되고 있다. 활성탄소섬유가 시장에 나온 것은 20년 정도로 생산량은 분말탄, 입상탄에 비해 적다. 활성탄소섬유는 성능은 비록 대단히 뛰어나지만 가격에서는 활성탄의 약 20배 가까이 비싸기 때문에 활성탄의 대체용으로 여겨지기 보다는 활성탄에 비해 뛰어난 성능을 이용해야만 하는 용도에서 사용되는 추세이다. 일본의 4대 메이커는 전구체 섬유에서 각각 차이를 나타내는데, Toyobo는 viscose rayon 을 Toho rayon 은 PAN 을 Kuraray는 phenol resin 섬유를 그리고 Osaka gas 는 pitch 를 전구체로 하여 생산하고 있다.

Table 14. Development history of activated carbon fibers

Year	ACF	AC
1959		Industrialization of CF(UCC).
1962	ACF from viscose rayon(Abott, USP 3053755)	Shindo(MITI) found PAN as a precursor for CF.
1966	AC textile from viscose rayon (Doying, UCC etc)	
1967		Johnson improved stabilizing process of PAN-CF
1968		Economy(Carbonrandum succeeded in phenolic resin fiber)
1972	Arons & McNair : ACF & fabric from phenolic precursor	
1975	Viscose rayon tape ACF from Toyobo Co., Ltd.	
1976	PAN ACF by Toho Beslon(Toho Rayon) Co., Ltd.	
1977	Honeycomb type solvent recovery equipment(Toho Rayon Co.,Ltd.)	
1980	Kuraray Chemical initiated ACF production from Kynol.	
1983	Nippon Carbon Co., Ltd. joined ACF production from viscose rayon.	
1988	Coal-tar pitch ACF(Osaka Gas Co. Ltd.)	

2.3 흡착이론

흡착(Adsorption)이란 유체상의 어떤 성분이 고체 흡착제(Adsorbent)의 경계면으로 전달되어 농도가 증가하는 분리현상을 의미한다 [52]. 폐 가스 중의 기체 또는 증기상의 오염 물질 분자들은 고체상 물질의 표면에 포집된다. 흡착하는 고체상 매질을 흡착제라고 하는 반면에, 흡착되는 기체상 또는 증기상 물질을 흡착질이라고 한다. 이 흡착 공정은 공장의 배기로부터 악취나 오염 물질들을 제거하는데 유용할 뿐만 아니라, 비교적 낮은 농도의 배기 중 오염 물질을 정화하는데 효과적이다. 즉, 기상이나 액상의 흡착질(Adsorbate)이 분자의 정전기적 인력이나 반데르발스 힘(Van Der Waals forces)에 의하여 고체의 경계면에 흡착되는 현상을 의미하고, 반대로 고체의 표면으로부터 흡착질이 분리되는 현상을 탈착(Desorption)이라 한다. 탈착에 의하여 흡착제는 재생(Regeneration)되고 다시 사용할 수 있다.

반응속도가 신속하게 이루어지는 흡착현상과 달리 경계면에서 도입된 농도가 외부로 투과, 확산되면서 전체적으로 서서히 농도가 증가하는 경우를 흡수(absorption)이라고 한다. 흡착과 흡수는 경계면에 국한되는 현상인가의 여부로 구별하지만, 흡착과 흡수가 동시에 진행되거나 경계면이 애매하여 두 현상을 명확하게 구별하기 어려울 때는 수착(sorption)이라 부른다 [53].

2.3.1 물리적 흡착

분산력(Van der Waals force 나 London force)의 결과로서 일어나는 흡착을 보통 물리적 흡착(physorption)이라 부르는데 이 경우, 흡착된 분자는 특별한 자리들에 고정되는 것보다는 계면 내에서 자유로이 2차원 병진운동을 하게 된다. 이 물리적 흡착은 기체의 액화현상과 비슷하여 활성화 에너지가 거의 없으므로 흡착속도가 빠르고 평형에 도달하는 시간이 짧다. 그러나 흡착제의 세공이 아주 가늘고 좁은 미세공인 경우 기체확산이 느려져서 물질전달이 지연되어 흡착이 느린 것처럼 관찰되기도 한다. 이 물리적 흡착은 분자나 흡착제가 본래 가지고 있거나 흡착도중 생성된 쌍극자와 쌍극자 사이의 인력이나 분자와 원자의 분산력에 의한 것으로, 분자 구조에는 변화가 없고 흡착되는 물질과 고체 표면

간에 전자이동이 없이 일어나므로 분자의 종류나 성질에 관계없이 온도만 적절하면 흡착될 수 있고, 이 인력에 의해 표면뿐 아니라 흡착된 분자위에도 흡착이 진행될 수 있어서 흡착층이 여러 개로 두꺼워질 수 있다. 또한 표면의 구성 원소나 화학적 상태보다 표면의 물리적 구조에 의해 달라지기 때문에 고체의 표면적을 측정하는데 유용하다.

2.3.2 화학적 흡착

화학적 흡착(chemisorption)은 화학반응이므로 활성화 과정을 거쳐야 흡착될 수 있으며 활성화 에너지가 큰 경우 흡착속도가 아주 느려져서 물리흡착과 구별될 수 있다. 그러나 흡착열이 아주 크면 발생된 흡착열이 계의 온도를 높여 주어 흡착이 빠르게 일어날 수도 있다. 이는 흡착제 표면과 흡착된 분자 사이에 전자가 이동되어 생성된 이온사이에 나타나는 정전기적 인력이나 전자공유로 전자의 밀도분포가 달라져 화학결합이 형성되어야 일어나기 때문에 흡착되는 물질과 고체표면의 종류에 따라 흡착여부가 결정된다. 또한, 화학 결합이 생성될 수 있는 표면에만 흡착이 일어나므로, 흡착층이 한 층으로 제한한다. 이 화학적 흡착은 표면조성에 따라 또는 표면원자의 배열형태에 따라 흡착가능성이 결정되므로, 표면의 화학적 성질과 특정한 물질의 분산 상태를 조사하는데 활용되며 특히, 금속표면에는 수소나 일산화탄소가 선택적으로 화학흡착되므로 금속이 담지된 촉매에서 금속의 분산 상태를 이들의 흡착량으로부터 결정할 수 있다.

2.3.3 흡착 평형

유체와 고체 또는 유체와 유체가 서로 접하고 있을 때 특정 성분의 계면에서의 농도와 유체 본체 중의 농도가 다른 현상을 흡착이라고 한다. 계면에서의 농도가 유체 본체 농도보다 큰 경우를 정흡착, 반대로 낮은 경우를 부흡착이라고 한다. 흡착은 계면과 특정 성분 사이의 반데르발스 힘 등 물리적인 힘에 의해 흡착하는 물리흡착과 화학 결합에 의해 흡착하는 화학흡착이 있다. 화학흡착은 결합력이 강하고 간단히 탈착되지 않는 경우가 있어 비가역흡착이라고도

불린다. 물리흡착은 반데르발스 힘이나 전기력 등에 의해 흡착되기 때문에 결합에너지가 10~15 kcal/mol이하로 결합력이 약해 비교적 용이하게 탈착된다. 이 때문에 표면적이 큰 다공질 물체를 흡착제로 사용하여 유체 중의 특정 성분을 분리 또는 제거하는 것이다.

흡착상태는 기체의 농도(또는 압력), 흡착이 일어나는 온도, 그리고 단위흡착제당 흡착량으로 나타낼 수 있다. 이의 정량적인 표현방법에는 일정한 온도에서 기체압력에 대해 흡착량을 나타내는 흡착등온선 (adsorption isotherm)과 일정한 압력 하에서 온도에 따라 흡착량을 나타내는 흡착등압선(adsorption isobaric) 및 흡착량이 일정한 흡착등흡착식(adsorption isosteres)이 있다. 이중 흡착량과 흡착세기를 유추하고 표면적이나 세공크기 분포를 구하는 등 고체표면의 성질을 결정하는 자료로서는 흡착등온선을 많이 사용하고, 흡착종류를 판단하기 위해서는 흡착등압선을 많이 사용한다.

Fig. 12는 Brunauer, Deming and Teller가 제안한 대표적인 흡착등온선의 형태이다. Type I 은 Langmuir형이라 불리는 것으로 흡착이 단분자층(monolayer)으로 끝나는 흡착계에서 나타나며, 기체의 압력에 무관하게 흡착량이 일정한 부분이 단분자층 흡착량이 된다. 이러한 형태의 흡착등온선은 흡착세기가 크고 특정한 흡착점에만 흡착이 일어나는 화학흡착에서 주로 일어나며, 세공이 없는 흡착제의 물리흡착에서는 거의 나타나지 않는다.

제올라이트나 활성탄소 및 ACF와 같이 노출된 세공이 대부분 미세공이어서 낮은 압력에서도 흡착된 분자들에 의해 세공이 채워지는 경우 물리흡착에서도 이 형태의 흡착등온선이 나타난다.

물리적인 흡착과 화학적인 흡착에서 가장 간단하면서 가장 유용하게 사용되는 식이 Langmuir 등온식이며, 균일표면에서의 단층흡착의 경우에 적용될 수 있다. Langmuir 등온식은 다음의 가정에 기초를 두고 있다.

- ① 흡착된 분자나 원자가 특정한 국부적인 흡착점에 존재한다.
- ② 각각의 흡착점은 한 개의 분자나 원자와 결합할 수 있다.
- ③ 모든 흡착점에서의 흡착에너지는 일정하며 이웃하는 흡착질과 상호 영향이 없다.

이러한 흡착등온식은 흡착과 탈착속도식 사이의 동적 평형에 개념적인 기초를 두고 있다. 흡착이 일어난 흡착점에서는 더 이상 흡착이 되지 않으므로, 단위표면적당 흡착속도는 $r = a\gamma(1-\theta)$ 이다. 여기서 a 는 부착확률(sticking probability)이고, γ 는 충돌횟수(collision frequency)이다.

한편, 단위표면적당 탈착속도는 $\beta\theta$ 로 표시될 수 있으며 여기서 β 는 탈착속도상수이다. Langmuir등온선은 동적평형이라 가정하는 속도론적 접근방식이다. 동적평형상태에서는 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\theta(= \frac{q}{q_m}) = \frac{bP}{1+bP} \quad (1)$$

여기서 θ 는 단층흡착분율이고, q 는 체적으로서의 흡착량, q_m 은 단층흡착량이고, b 는 Langmuir 상수이며, P 는 압력이다.

1938년 Brunauer, Emmett 및 Teller에 의해 발표된 B.E.T 흡착등온선은 다분자층에 적용할 수 있는 것으로 흡착되는 분자와 흡착제 사이에 선택성이 없는 물리흡착에 적용될 수 있고, 흡착등온선으로부터 단분자층 흡착량을 쉽게 결정할 수 있어 흡착제나 촉매의 표면적을 측정하는데 널리 이용되고 있다. B.E.T 흡착등온선은 2가지 가정 하에 유도한 것이다.

- 첫 번째 층을 제외한 모든 층에서의 흡착열은 액체의 액화열과 같다.
- 증발-응축 조건이 동일하고 $P=P_0$ (P_0 =포화 증기압)일 때 고체표면의 흡착질은 bulk liquid로 응축된다. 즉, 층의 수가 무한하다.

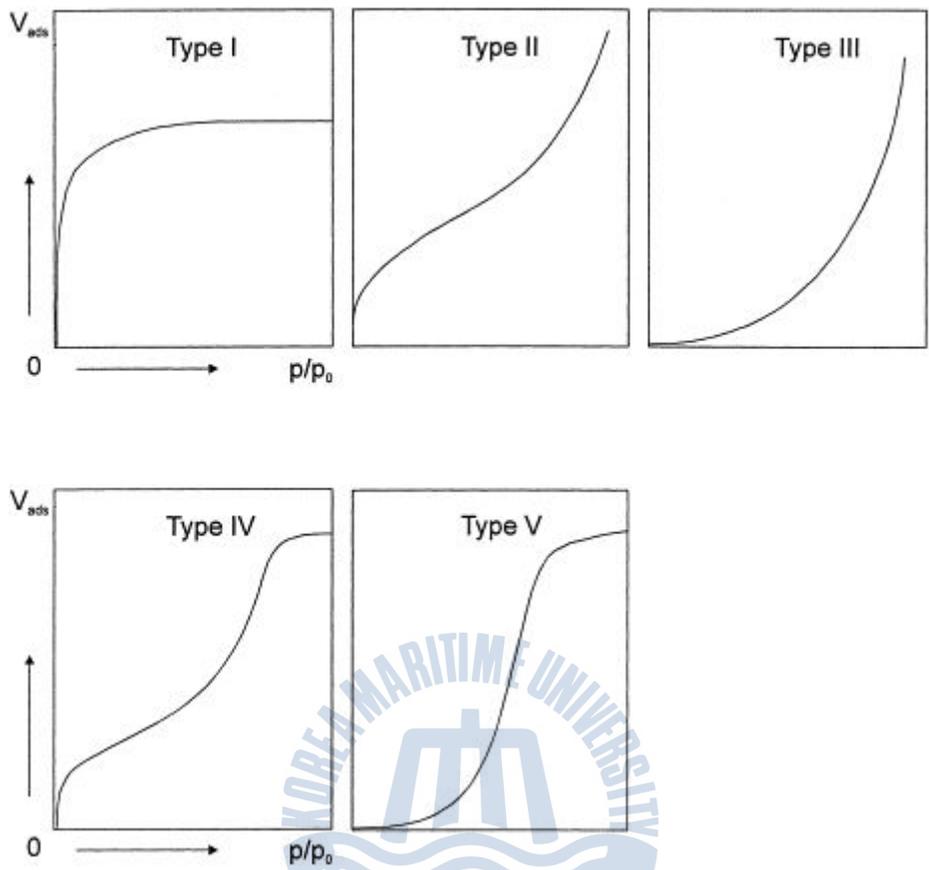


Fig. 12 Different types of adsorption isotherm

이 B.E.T식은 일반적으로 $0.05 \leq P/P_0 \leq 0.35$ 인 범위에서 직선경향을 보인다. 촉매나 흡착제 중에는 상대압력이 0.2이상이면 직선관계가 성립되지 않는 경우도 있다.

위에서 서술한 Langmuir 흡착등온선과 B.E.T 식과는 달리 흡착실험에서 얻은 흡착등온선을 수식화 하는데 Langmuir 흡착등온선에 미분흡착열이 표면덮힘 정도에 따라 지수적으로 감소된다는 이론과 선형적으로 감소된다는 이론이 있는데, 전자를 Freundlich 흡착등온선, 후자를 Temkin 흡착등온선이라 한다. Langmuir 등온식은 균일한 흡착에너지를 갖는 흡착제와 비극성 흡착물질의 경우에 잘 적용되고, Freundlich 등온식은 불균일한 흡착에너지를 갖는 흡착제의 경우에 잘 적용되는 것으로 알려져 있다.

Type II는 거의 세공이 없는 흡착제(non-porous adsorbent)나 미세공보다 훨씬 더 큰 세공경(pore diameter)을 갖는 흡착제에서 발견된다. 낮은 압력에서는 주로 고체표면에 흡착되어 직선이 시작되는 점에서 표면이 모두 덮이기 때문에 여기까지 흡착된 흡착질의 양을 단분자층 흡착량으로 보고 표면적을 구하기도 한다. 이 곡선의 기울기는 기체분자와 고체표면사이, 기체분자와 기체분자사이의 상호작용에 의해 달라진다.

Type III는 활성탄소에 대한 물의 흡착에서처럼 흡착되는 분자가 고체표면에 젖지(wetting)않을 때, 즉 접촉각이 90보다 클 때 관찰되는 것으로 흡착열이 흡착질의 액화열(heat of liquefaction)보다 적을 때 나타난다.

Type IV는 15~1000 Å의 pore 반경을 갖는 흡착제에서 나타나며, knee 부분은 Type II와 비슷한데, 일반적으로 이 부분에서 최초의 단분자층 흡착(monolayer adsorption)이 거의 끝난다.

Type V는 Type III와 달리 흡착질-흡착제 사이의 상호작용력(interaction potential)이 작은 경우에 일어나며 Type IV와 같은 범위의 기공을 갖는 흡착제에서 나타난다.

Type IV형과 V형 흡착등온선은 기체압력을 얻은 등온선과 압력을 감소시켜서 얻은 등온선이 일치하지 않는데 이를 히스테리시스(hysteresis)라 부른다. 이는 모세관응축으로 생성된 매니스커스의 반지름과 모양이 흡착될 때와 탈착될 때 서로 다르기 때문이다.

2.3.4 파과 곡선 이론

입상활성탄이 충전된 고정층 흡착장치를 예를 들어 총괄흡착속도를 설명하면 흡착질을 포함한 유체를 흘러 보내는 경우 흡착은 최초 층 입구부에서 급속히 일어나고, 나머지 층에서 연속적으로 흡착이 일어난다. 이 흡착이 일어나는 부분이 흡착대이며 유기물을 포함한 유체가 계속적으로 유입되면 흡착대의 부분이 고정층의 아래쪽으로 이동하는데 이는 최초 흡착이 일어나는 흡착대가 포화되어 층입구에서의 흡착질 농도에 평형흡착량에 달하고, 흡착대가 층출구쪽으로 이동한다. 흡착대의 선단이 층출구에 도달하면 층출구에서 유체중의 흡착질이 나타나고 그 농도는 상승하여 층입구의 농도에 도달하게 된다. 유출 유체량 또는 유출시간을 횡축에 두고, 유출액 내의 흡착질의 농도를 종축에 두는 농도 변화 곡선을 파과곡선(Break Through Curve)이라 한다. 파과곡선은 각 시스템의 물리화학적 특성 즉, 평형관계와 물질 이동속도에 의해 영향을 받는다. Fig 13은 흡착탑의 출구에서의 유출농도를 시간에 따라 표시한 파과곡선이다 [54].

일반적으로 출구농도가 입구농도의 약 10%가 되는 점 A를 파과점(Break Point)이라 하며 파과점 이후 출구농도는 급격히 증가하여 종말점 B에 도달하게 된다. 결국 활성탄의 수명은 유량, 피 흡착질의 종류 및 농도, 충전된 활성탄의 양과 종류 등에 따라 달라지며 같은 운전 조건일 경우 초기 활성탄(신탄)의 흡착력에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

파과곡선은 S자 형이 이상적이나, 평형관계, 입자내 확산속도, 경막의 물질이동속도, 조작조건에 의해 변화할 수 있다. 출구 농도가 어떤 허용값(보통 10%)에 도달하게 되는 지점을 파과점(Break point)이라고 한다. 그것의 소유된 유량이나 시간을 파과시간, 파과곡선의 종말농도를 종말점이라고 한다. 물질전달 저항이 없고 축방향의 분산이 없는 이상적인 경우에는 물질전달 영역이 무한소폭이 되며, 파과곡선의 기울기가 수직선이 되나, 실제 흡착공정에서는 파과곡선의 기울기가 S형이 되는 경우가 대부분이다 [55,56].

따라서 파과곡선을 통해 에너지 비용을 절감하고, 흡착제를 효율적으로 이용하기 위해서는 좁은 물질전달영역이 바람직하다.

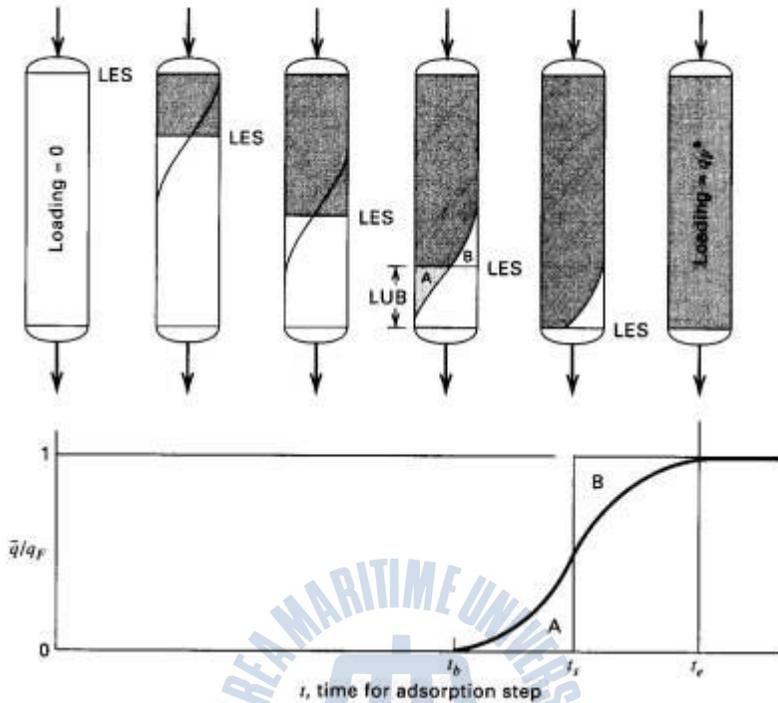


Fig. 13 Breakthrough curves for adsorption [54]

2.4 흡착탑에서 동특성

활성탄 충전 흡착탑에서의 동특성에 대한 일반적인 설명은 여러 가지가 제시되었지만 아직도 정확한 메카니즘의 제시는 미흡하다. 특히 최근에 개발된 ACF는 그 미세공 구조가 AC와 달라 흡착탑에서의 동특성도 다를 것으로 예상된다. 활성탄 흡착탑으로부터 제시된 Wheeler 식은 흡착용량과 속도상수 분석에 널리 사용되고 있다 [57]. 흡착탑에서의 증기 파과곡선의 분석은 수정된 Wheeler 식에 의해 종종 행하여지고 있다. 다음 (2)식은 파과시간을 제시하고 있다.

$$t_b = \frac{W_e}{Q C_o} \left[M - \frac{\rho_B Q}{k_v} \ln \left(\frac{C_o}{C_x} \right) \right] \quad (2)$$

여기에서 t_b 는 파과시간, C_x 는 파과점에서 유출농도, C_o 는 유입농도, Q 는 유속, M 은 흡착제 용량, ρ_B 는 흡착제 bulk density, W_e 는 동적흡착용량, k_v 는 속도상수이다. 이식은 유출농도가 적을 때 특히 유효한 것으로 알려졌다. Yoon et al. (1984)은 semi-empirical 가스 흡착모델을 가지고 파과곡선 예측식을 제시하였다 [58]. 그들의 모델은 유출농도에 대해서 다음의 (3)식과 같이 나타났다.

$$C_x = C_o \frac{1}{1 + \exp[k'(\tau - t)]} \quad (3)$$

여기에서 k' 는 속도상수이고 τ 는 50% 파과시간이다. 이 속도상수 k' 는 다시 다음과 같은 식으로 이 관계식은 Bohart et al. (1920)가 Wheeler 식으로부터 유도했다 [59].

$$k' = k_v \frac{C_o}{\rho_B W_e} \quad (4)$$

그리고

$$\tau = \frac{\rho_B W_e}{k_v C_o} \ln \left[\exp\left(\frac{k_v L}{V_L}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

여기에서 L 은 흡착탑의 높이, V_L 은 선속도이다. 식 (3)로부터 다음과 같은 식(6)을 유도할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{C_x}{C_o - C_x}\right) = k'(t - \tau) \quad (6)$$

식 (4),(5)을 식(6)에 대입하면 식 (7)이 된다.

$$\ln\left(\frac{C_x}{C_o - C_x}\right) = \frac{k_v C_o}{\rho_B W_e} t - \ln\left[\exp\left(\frac{k_v L}{V_L}\right) - 1\right] \quad (7)$$

그러므로 $\ln\left(\frac{C_x}{C_o - C_x}\right)$ 는 시간에 대하여 선형적인 관계를 갖는다. 이 데이터의 분석으로 흡착용량과 속도상수의 흡착공정을 구할 수 있다.

대개의 경우는 $\exp\left(\frac{k_v L}{V_L}\right) \gg 1$ 이므로 식 (7)은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{C_x}{C_o - C_x}\right) = \frac{k_v C_o}{\rho_B W_e} t - \frac{k_v L}{V_L} \quad (8)$$



제 3 장 실험 방법

3.1 실험 조건

실험에 사용된 승용차는 2종류로 2010년 출고되어 현재까지의 주행거리가 70,000 km인 중고차(기아의 K5)와 2012년에 출고된 주행거리가 25,000 km인 중고차(현대자동차의 아반테 MD)이다.

실험은 Lee et al. (2006)이 제시한 조건을 참조하여 2013년 4월중에 비가오지 않는 날을 택하여 하루에 13차례씩 주행 조건별로 7일 동안 총 91차례에 걸쳐 실시하였다 [60]. 즉, 기아자동차의 K5차량 기준으로 하루 8~9시간 동안 전주 시내·외 구간을 주행하였다. 미세먼지 측정은 전주 시내·외 지역, 창문 개폐, 탑승 인원, 차종, 송풍기(Blower) 작동 유무, 공기순환모드(Actuator)의 내기·외기 모드 및 필터의 종류를 달리하여 실시하였다.

Fig. 14는 전주시내 중심가 및 시외의 주행경로를 나타내었다. 주행거리는 시내·외 모두 약 15 km로서 시내는 시속 30 km로, 시외는 시속 70km로 주행하면서 측정하였다. 실험차량은 동일한 환경 조건으로 측정하기 위하여 시험 전 5분간 환기하였고, 모니터 작동 후 주행을 시작하면서 1분 간격으로 데이터를 수집하여 총 30회 측정하였다. 각 실험조건에 따라 운전자 외 1인이 각각 차량 앞좌석 주변 $PM_{2.5}$ 농도를 측정하였다. Table 15는 여러 가지 다른 실험조건을 정리한 것이다. 각 실험조건에 따른 $PM_{2.5}$ 농도의 평균치는 조건별로 제일 높은 값과 제일 낮은 값을 제외한 나머지 5개 측정치의 평균값으로 정하였다.

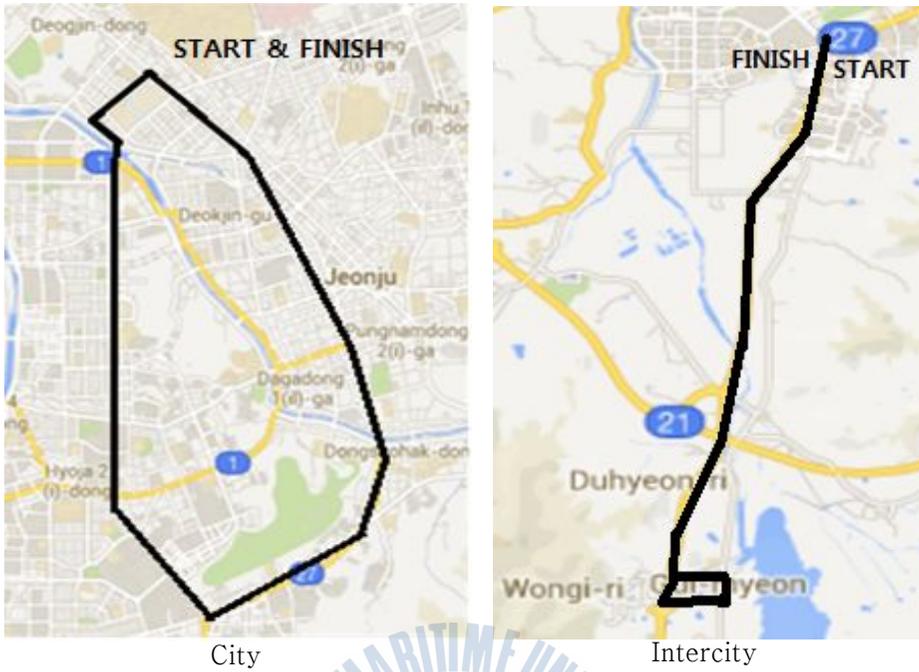


Fig. 14 Driving routes

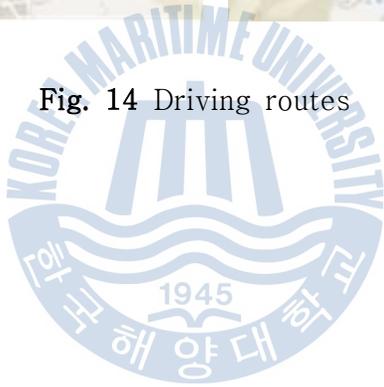


Table 15. Conditions for test driving

No	Time	Actuator	Window	Persons	Jeonju area	Blower	Filter	Model
A	AM	Inside air	Close	2	Down town	Off	Non-woven	K5
B	PM	Inside air	Close	2	Down town	Off	Non-woven	K5
C	PM	Outside air	Close	2	Down town	Off	Non-woven	K5
D	PM	Outside air	Close	2	Down town	2	Non-woven	K5
E	PM	Inside air	Close	2	Down town	2	Non-woven	K5
F	PM	Inside air	Front windows Open	2	Down town	Off	Non-woven	K5
G	PM	Inside air	All windows Open	2	Down town	Off	Non-woven	K5
H	PM	Inside air	Close	4	Down town	Off (Probe Front)	Non-woven	K5
I	PM	Inside air	Close	4	Down town	Off (Probe Rear)	Non-woven	K5
J	PM	Inside air	Close	2	Down town	Off	Non-woven	MD
K	PM	Inside air	Close	2	Suburb	Off	Non-woven	K5
L	PM	Inside air	Close	2	Down town	2	Combination	K5
M	PM	Inside air	Close	2	Down town	2	ACF	K5

3.2 실험 장치 및 실험 방법

3.2.1 미세먼지 실험 장치 및 실험 방법

PM_{2.5} 측정은 광산란식 미세먼지 측정장치(Grimm Co., Model 1.109 Type, Germany)를 사용하였다. 장비 연결은 Dust Monitor는 뒷좌석에, Probe는 앞좌석 룸미러에서 10 cm하단에 설치하였고, 자동차 배터리에 DC-AC Trans1000A를 설치하여 Dust Monitor를 연결하였으며, Probe를 노트북에 연결하여 측정자료를 저장하였다. 미세먼지 측정기의 연결 위치와 연결도는 Fig. 15, Fig. 16에 표현 하였다.

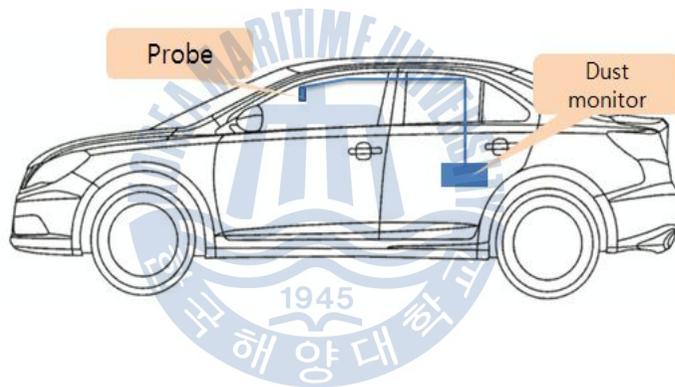


Fig. 15 Location of the dust monitor in the test car

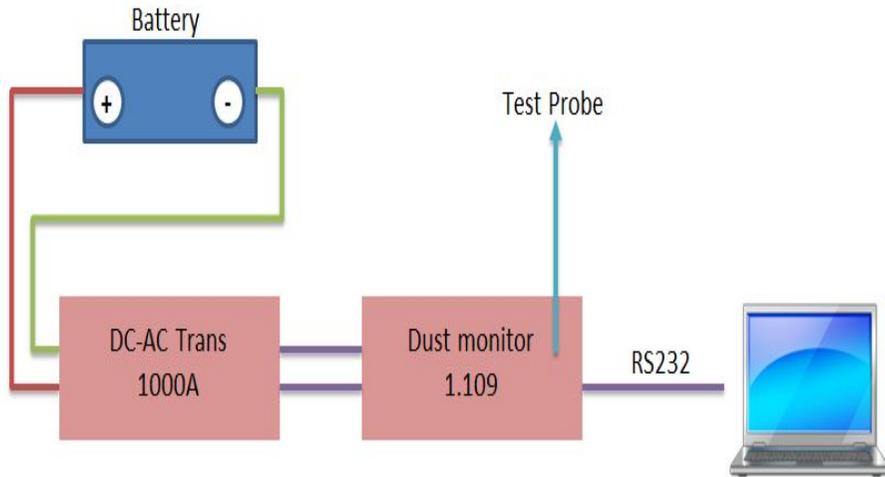


Fig. 16 Connection of the dust monitor

미세먼지는 Table 15의 조건으로 7일 동안 13차례씩 총 91차례의 측정을 하였으며 운전자 외 조수석의 1인이 탑승하여 30분간 측정하였다.

3.2.2 이산화탄소 실험 장치 및 실험 방법

이산화탄소는 GFC적외선 분석기인 이산화탄소 측정장치 (SIGNAL Co., Model 7200FM Type, England)를 사용하였으며, 실험차량 내 측정장비의 위치와 연결은 Fig. 17 및 Fig. 18과 같다. GFC Infra-red Analyser는 뒷좌석에, Probe는 앞좌석 룸미러에서 10 cm하단에 설치하였고, 자동차 배터리에 DC-AC Trans 1000A를 설치하여 GFC Infra-red Analyser를 연결하였으며, Probe를 노트북에 연결하여 측정자료를 저장하였다.

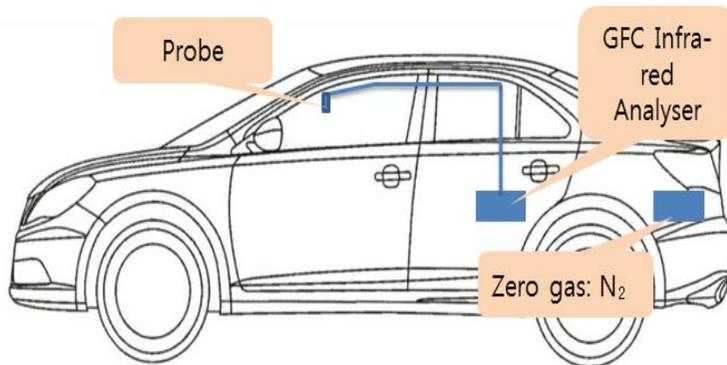


Fig. 17 Location of the GFC Infra-red analyser installed in the test car

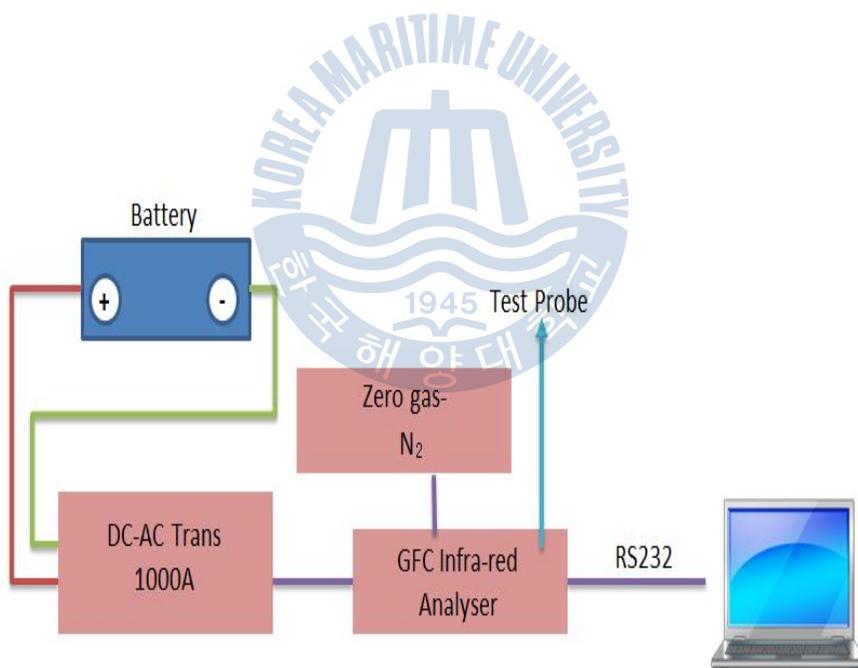


Fig. 18 Connection of GFC

3.2.3 VOCs 실험 장치 및 실험 방법

3.2.3.1 실험재료

본 실험에 사용된 톨루엔은 시약급 (Aldrich co., 99.5%)이고, 활성탄소섬유 (ACF)는 MD-1100 (Sutong ACF Co, China) 와 KF-1500 (Toyobo, Japan)을 사용하였다. 이들 ACF는 실험 수행 전 200 °C로 유지된 건조기에서 24시간 건조 후 데시케이터에 넣고 일정량씩 꺼내어 사용하였다. 이들의 세공특성을 BET 비표면적 측정장치 (Bel japan. inc., BELSORP-max, Japan)를 사용하여 측정하였다.

3.2.3.2 실험장치 및 방법

ACF 필터의 톨루엔에 대한 회분흡착능력은 검지관식 가스측정기법 (KSI-2218)에 의하여 수행되었다. 즉, ACF 필터(76 g)를 현재 사용되고 있는 PP 부직포 필터(40 g) 및 (PP+AC) 콤비네이션 필터(127 g)를 비교하기 위하여 각각 5 L들이 흡착력측정 가스백에 넣고 ①포름알데히드, ②톨루엔, ③벤젠을 각각 초기농도가 15 ppm, 20 ppm, 20 ppm되게 주입한 후 2시간 경과 후에 시험가스백 안에 남아있는 가스의 농도를 가스측정기법으로 측정하였다. 이때 흡착된 VOCs의 흡착율(%)는 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{탈취율}(\%) : ((C_b - C_s) / C_b) \times 100 \quad (9)$$

C_b : blank, 2시간 경과 후 시험 가스백안에 남아 있는 시험가스의 농도

C_s : 시료, 2시간 경과 후 시험가스백안에 남아 있는 시험가스의 농도

흡착탑을 사용한 톨루엔의 연속흡착장치는 Suzin et al. (2000), Lim et al. (2000)이 제시한 바와 유사하게 구성하였으며 개략도는 Fig. 19와 같다 [61,62].

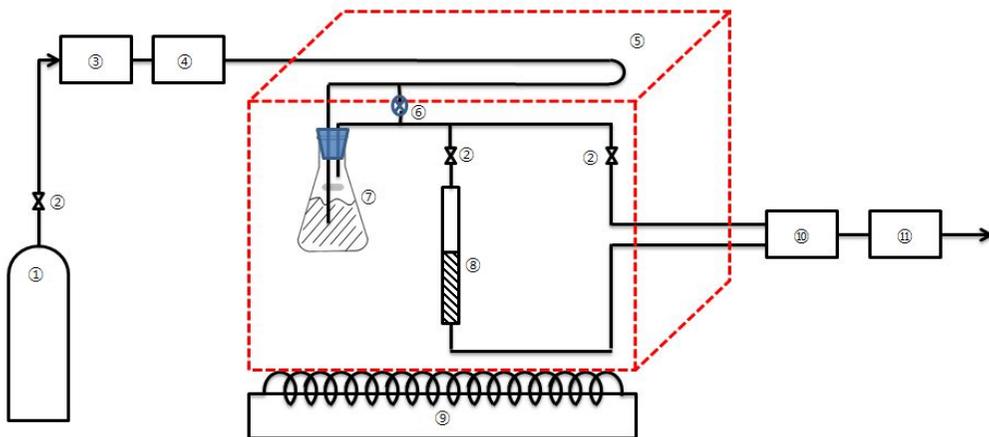


Fig. 19 Schematic diagram of experimental apparatus

- ① air reservoir, ② valve, ③ dryer, ④ mass flow controller,
- ⑤ temperature control chamber, ⑥ flow meter, ⑦ VOCs generator,
- ⑧ ACF packed bed, ⑨ heat and temperature controller,
- ⑩ VOCs detector, ⑪ computer

실험장치의 주요부분은 MFC에 의한 유량조절부, 톨루엔증기 발생부, 흡착제 충전탑부 및 유출증기 분석부로 구성되어 있다. 액상 톨루엔이 채워지고 건조 공기에 의하여 톨루엔 증기가 발생하는 삼각플라스크와 ACF가 충전된 pyrex유리관 흡착탑 (내경 15 mm, 30 mm, 길이 200 mm) 은 그림의 점선으로 표시된 전기로 가열되는 항온상자 내에 넣어져 있다. 주입공기는 건조기를 거쳐 유량 조절장치(MFC)에 의하여 2 L/min로 공급되었다. 이 공기는 항온을 유지하기 위하여 항온 상자 내를 장시간 돌아온 후 일부는 톨루엔 발생용기에 직접 주입하고 일부는 발생용기(1 L 삼각플라스크)로부터 배출되는 증기와 혼합되어 공기중 톨루엔의 농도를 조절할 수 있도록 공급하였다. 실험은 항온상자의 온도를 25 °C, 35 °C로 유지하여 실시하였다. 톨루엔 발생용기 통과 공기량과 분기하여 공급된 공기량을 각각 1 L/min로 조절하였을 때 흡착제 충전탑으로 들어가는 톨루엔의 초기농도(C_0)는 190~205 ppm(25 °C), 395~405 ppm(35 °C)이었다. 그리하여 분기공기량을 조절하면서 초기농도를 각각 200 ppm, 400 ppm으로 고정하였다. 각 장치의 연결은 1/4 inch 테프론 재질의 튜브를 이용하였다. ACF 충전탑의 위아래에는 고정을 위하여 약 3 mm두께의 glass wool을 채워 넣었다. Table 16에 연속흡착실험을 위한 여러 가지 조건을 정리하였다.

Table 16. Conditions for continuous adsorption experiment

No.	ACF packing (g)	Bed diameter (mm)	Bed height (mm)	Packing density (g/cm^3)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Kind of ACF
1	2.2	15	70	0.1779	25	MD-1100
2	2.2	15	70	0.1779	25	KF-1500
3	2.2	15	140	0.0889	25	MD-1100
4	4.4	15	140	0.1779	25	MD-1100
5	2.2	30	35	0.0889	25	MD-1100
6	2.2	15	70	0.1779	35	MD-1100

VOCs 회분흡착실험에서는 가스검지관이 사용되었고 흡착탑으로부터 배출되는 공기 내 톨루엔의 농도는 VOCs 농도측정기(Indoor Air Quality monitor, IAQRAE, USA)에 의하여 측정되었다. 이 탐지기 측정범위는 0.01~500 ppm이다. 배출된 톨루엔 증기의 농도는 파과곡선으로 나타내었으며, 파과점(t_b)은 초기농도의 5%가 배출되는 시점을 선택하였다. 각 실험의 파과곡선으로부터 파과점, 최대흡착용량(W_e), 파과점에서의 유효흡착율을 구하였으며, 이들 데이터를 비교적 많이 적용되고 있는 Yoon et al. 식에 대입하여 ACF의 톨루엔에 대한 흡착동특성을 밝히고자 하였다 [58].



제 4 장 결과 및 고찰

4.1 주행 중인 승용차 내 미세먼지 농도 변화에 대한 연구

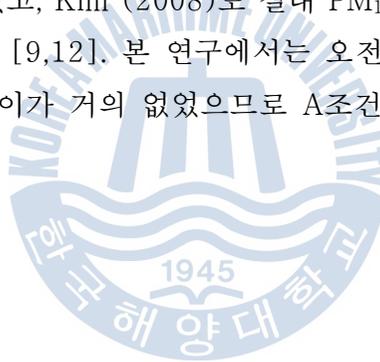
4.1.1 오전(AM), 오후(PM)에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 20에 전주 시내 중심가를 주행했을 때 승용차 내 PM_{2.5}의 시간에 따른 농도변화의 평균치를 도시하였다. 그림으로부터 승용차 내 모니터가 작동후의 PM_{2.5}의 초기농도는 각각 (A)오전(AM)에는 $70 \pm 12\% \mu\text{g}/\text{m}^3$, (B)오후(PM)에는 $73 \pm 12\% \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 큰 차이가 없었다. 환경부에서는 2011년 수도권 대기중 PM_{2.5} 연평균 농도는 약 $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2012년에는 $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 이었고, 남부권의 PM_{2.5} 연평균 농도는 2011년에는 $30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2012년에는 $24.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도라고 보고하였다. 비록 Fig. 20의 결과가 환경부의 보고와 차이는 있지만 환경부 보고에서 남부권의 농도가 서울과 비슷하다고 발표한 점을 고려할 때 전주시내 중심가도 이제는 공기 청정에 주력해야 할 시점에 이르렀음이 분명하다.

AIR KOREA가 조사한 전주시내 PM₁₀의 4월 평균농도는 $78.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이나 PM_{2.5}의 농도는 발표되지 않아 본 연구의 결과와 비교는 불가능하였다. 환경부는 대도시 PM_{2.5}의 농도는 대체로 PM₁₀의 40~80%로 추정할 수 있다고 하지만 정확도가 떨어져 신뢰성에 문제가 될 수 있다 [63]. 따라서 PM_{2.5}를 공개 하고 있는 인천시와의 비교를 통해 신뢰성을 높였다. 인천시 신흥 지역 4월초의 PM_{2.5} 농도는 평균 $56.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었는데 이는 환경부 보고 보다 높았다. 이번 에 측정된 전주시내 중심가의 오전 및 오후 PM_{2.5} 측정치가 매우 높았음은 몹시 우려되는 바이다. 물론 측정 시기나 측정 장소 및 여러 가지 조건에 따라 측정치가 달라 직접 비교하기는 쉽지 않지만 앞으로 지속적인 측정에 의하여 신뢰할만한 정보를 얻을 수 있다고 판단된다.

전주 시내 중심가를 주행하면서 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화를 측정된 결과, 오전에는 처음 6분 동안은 PM_{2.5} 농도가 약 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 신속하게 감소하다가 그 이후는 아주 서서히 감소하고 약 20분 이후부터는 약 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도를

유지하였다. 이는 내기 모드에서는 외부 대기중의 영향이 없기 때문에 승용차 내의 실내 $PM_{2.5}$ 에 영향을 주는 공기의 유동이 적어 시간이 지날수록 농도가 떨어지기 때문이다. 오전 주행 시 승용차 내 $PM_{2.5}$ 의 초기 감소속도를 원점에서 접선을 그어 구한 결과 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{min}$ 이었다. 이에 반하여 오후의 주행에서는 처음부터 서서히 감소하면서 역시 20분 후에는 오전 주행과 마찬가지로 약 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도를 유지하였다. 오후 주행 시 승용차 내 $PM_{2.5}$ 의 초기 감소속도는 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 오전 중 $PM_{2.5}$ 의 초기 감소속도가 오후보다 약 3배 이상 빨랐다. 한편, 전체적으로 오전 주행에서 $PM_{2.5}$ 농도가 낮았던 것은 승용차가 내기 모드라 해도 외부의 영향을 덜 받았기 때문으로 판단된다. Gwon et al. (2006)이 실시한 서울지역 운전환경조건에 따른 승용차내의 실내공기 오염도 조사에서 PM_{10} 농도는 승용차 밖이 약 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 승용차 안이 약 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 탑승자들은 외부환경에 비하여 실내에서 더 높은 농도의 PM_{10} 에 노출되고 있다고 보고하였고, Kim (2008)도 실내 PM_{10} 농도는 주변 환경에 따라 달라질 수 있다고 하였다 [9,12]. 본 연구에서는 오전 주행과 오후 주行的 승용차 내 $PM_{2.5}$ 농도에서 차이가 거의 없었으므로 A조건 이후의 실험은 오후 주행을 기준으로 실시하였다.



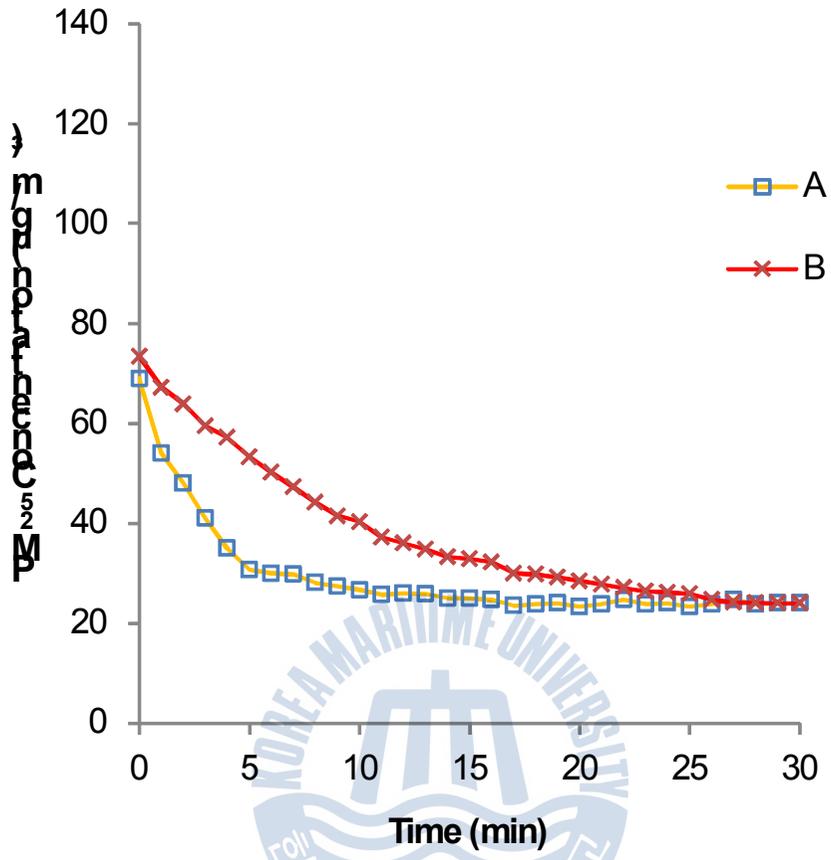


Fig. 20 PM_{2.5} concentration in the test car during (A) morning and (B) afternoon in downtown Jeonju

4.1.2 공기순환모드(Actuator) 및 송풍기(Blower) 작동에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 21에 공기순환모드 및 송풍기 작동(실험번호: B,C,D,E)을 달리한 승용차 내 PM_{2.5}의 시간에 따른 농도변화를 도시하였다. 그림으로부터 공기순환모드를 내기 모드로 고정하고, 송풍기를 2단으로 조절했을 때 (E)의 미세먼지 농도는 처음 5분 동안은 급격하게 감소하고, 이어서 서서히 감소하다가 15분 이후부터는 약 6-7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 일정하게 유지되었다. 이 경우 PM_{2.5}의 초기 감소속도는 분당 18.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 (B)의 경우보다 약 3.6배나 빨랐다. 초기 공기순환모드를 외기 모드로 고정하고, 송풍기를 작동하지 않았을 때에도 처음에는 급격히 감소하고 이어서 서서히 감소하다가 15분 이후부터는 PM_{2.5}의 농도의 변동이 심하며 오히려 서서히 증가하는 경향을 보였다. 이 경우 PM_{2.5}의 초기감소속도는 분당 10.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 (B)의 경우보다 약 2.1배 빨랐다. 그러나 공기순환모드가 내기 모드일 때보다는 승용차 내 PM_{2.5}의 농도가 훨씬 컸다. 반면에 (C),(D)의 경우 외기 모드에서 실내에 공기 필터가 장착되어 있음에도 승용차 내의 PM_{2.5} 농도가 감소하지 않고 있다. 즉, 승용차 내 PM_{2.5} 농도의 감소에는 공기순환모드의 역할이 매우 중요함을 알 수 있다. 공기순환 작용이 내기모드인 경우 외부의 PM_{2.5} 유입이 훨씬 감소하였기 때문이며 Gwon et al. (2006)의 연구에서도 유사한 결과가 보고된 바 있다 [9]. 이러한 결과는 이제부터 중·대도시 지방자치단체는 시민의 건강을 보호하기 위하여 시내 중심가에서 발생하는 PM_{2.5}의 농도를 격감시키는 노력을 경주하여야 하겠다.

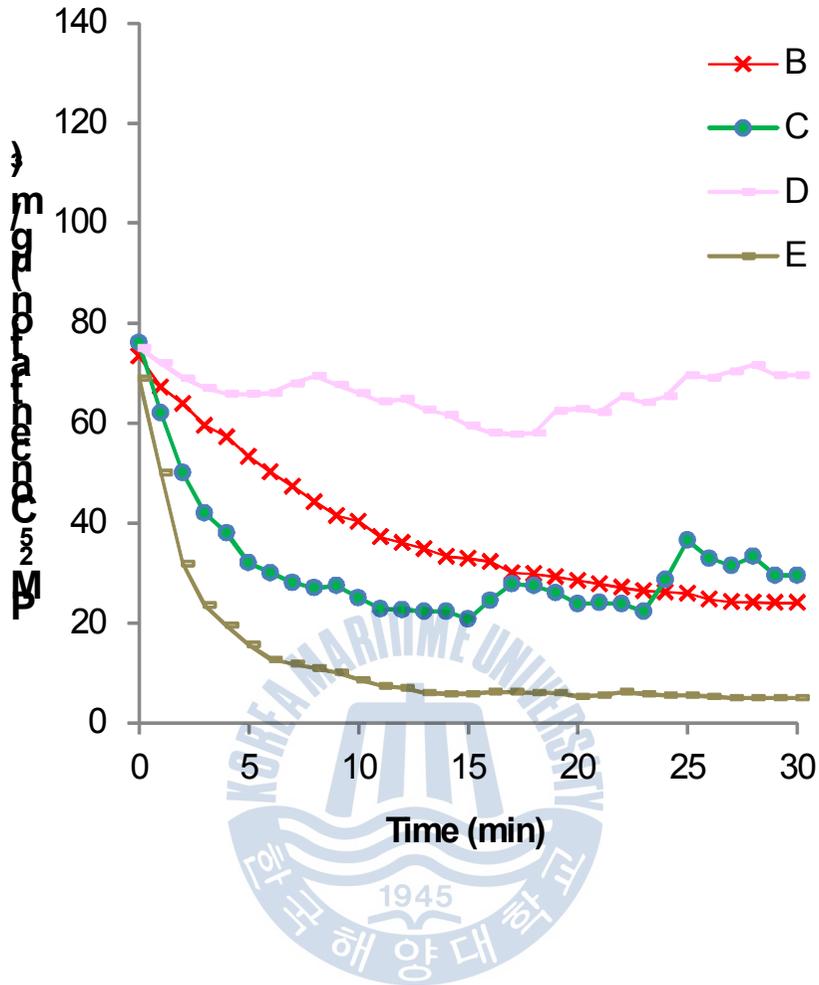
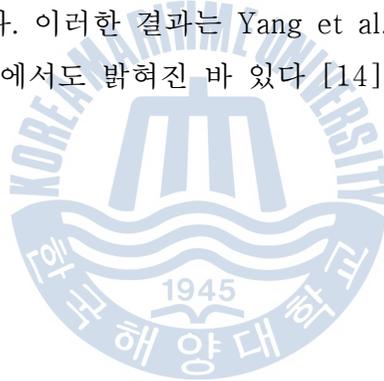


Fig. 21 PM_{2.5} concentration in the test car with respect to actuator and blower functioning ; B : Actuator – internal circulation mode, Blower – off, C : Actuator – external mode, Blower – off, D : Actuator – external mode, Blower – lever 2, E : Actuator – internal circulation mode, Blower – lever 2

4.1.3 창문개폐에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 22에는 주행 중에 승용차의 창문을 열고, 닫았을 때의 내부 PM_{2.5}의 농도 변화를 살펴 본 결과이다. 창문을 닫았을 때는 30분 동안 실내 PM_{2.5}의 농도가 서서히 감소함을 알 수 있다. 이는 공기순환모드가 내기 모드로, 송풍기가 2단으로 조절된 상태에서 외부의 먼지와 매연 등이 진입하지 않았기 때문이다. 그러나 창문을 앞 쪽 2개만 연 경우와 4개를 모두 연 경우에는 실내 PM_{2.5}의 농도가 전혀 감소하지 않고 약 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유지되고 있다. 이는 내부에서 공기순환모드와 송풍기가 모두 작동해도 외부에서 진입하는 오염원 때문에 감소하지 않는 것이다. 이로부터 승용차 내부에 설치된 오염원 제거용 공기 정화용 필터 등은 능력 발휘에 앞서 짧은 시간 내에 무용지물로 바뀔 수 있다. 그러므로 오염이 심한 시내 중심가를 주행할 때는 승용차의 창문을 열어서는 안 된다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 Yang et al. (2004)의 자동차 실내공기질 현황에 관한 보고서에서도 밝혀진 바 있다 [14].



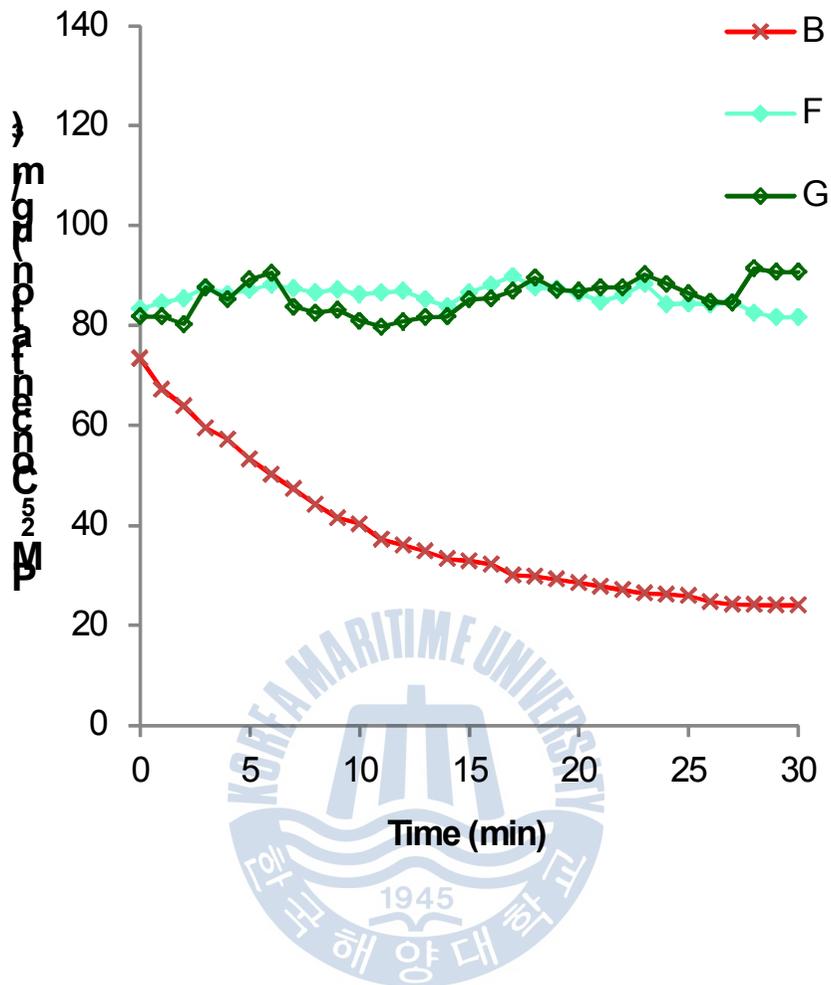


Fig. 22 PM_{2.5} concentration in the test car with respect to window opening and closing; B : widow-close, F : window-Front open, G : window-all open

4.1.4 탑승 인원 에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 23는 탑승 인원 에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 영향을 조사한 결과이다. 그림 으로부터 2인이 탑승하였을 경우에는 PM_{2.5}의 농도가 서서히 감소하여 20분 후 에는 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도를 유지하였다. 그러나 4인이 탑승하였을 경우에는 운 전석에서 측정하던 뒤쪽 승객좌석에서 측정하던 초기 8분까지는 급격히 감소하 다가 그 이후부터는 농도가 감소하지 않고 오히려 15분 이후부터 약 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 결과는 승용차 내 여러 시설 과는 별도로 4인이 함께 호흡하는 동안 초기 PM_{2.5}의 상당량이 인체에 흡입되 다가 약 7-8분 후부터는 인체로부터 배출되는 PM_{2.5}의 양이 증가하면서 승용차 내 PM_{2.5}의 평형상태를 유지시키는 것으로 판단된다. 또한 4인이 뒤척이는 과정 에서 승용차 내 안착되어 있던 먼지들이 교대로 부유하는 것으로도 판단된다. Kim (2008)도 오염물질의 농도는 승차인원과 매우 밀접한 상관성이 있을 것으 로 보고한 바 있다 [12]. 그러나 Kim et al. (2010)은 주행 중인 고속버스 내에 서 승객 수에 따른 PM₁₀의 농도를 비교해 보아도 어떤 경향을 발견하지 못했 다고 보고하였다 [11]. 탑승인원이 제한되어 있는 작은 공간의 승용차 내에서는 탑승인원에 따라 PM_{2.5}의 농도가 크게 변하는 것으로 판단된다.

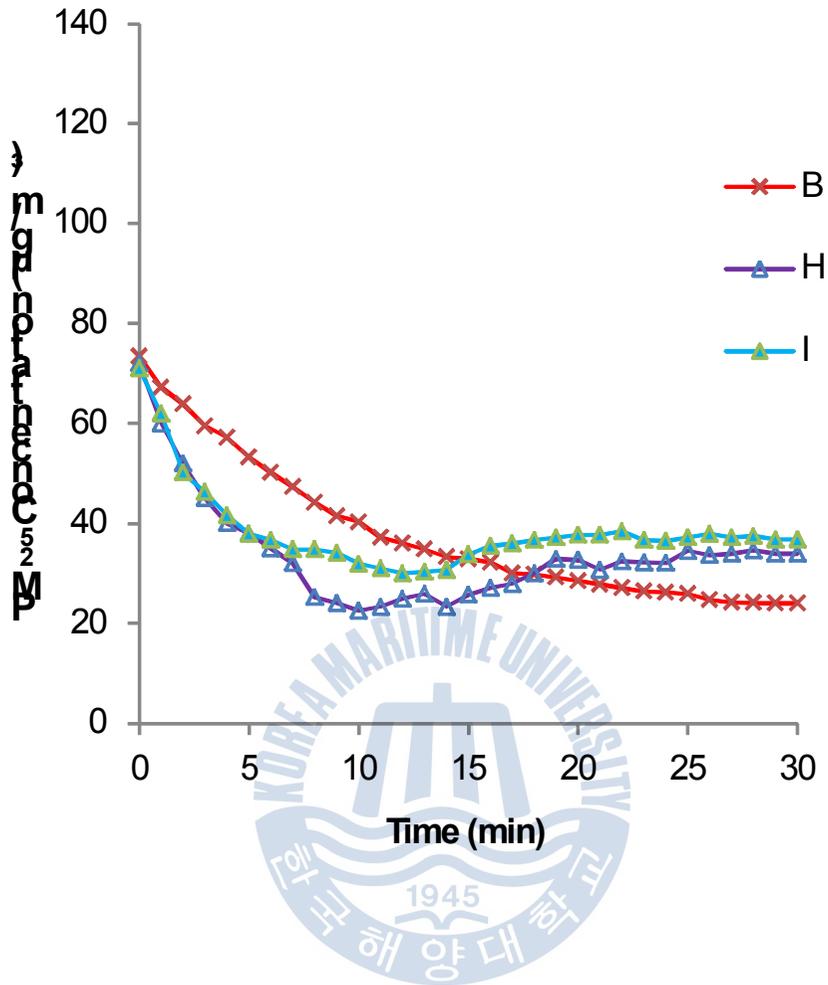
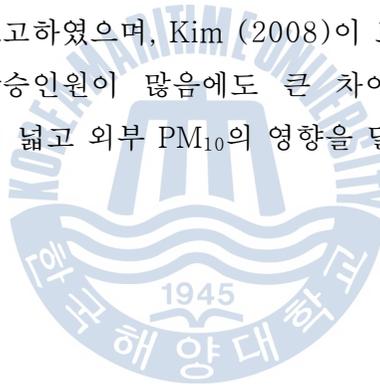


Fig. 23 PM_{2.5} concentration in the test car with respect to number of person; B : 2 people, H : 4 people [probe front], I : 4 people [probe rear]

4.1.5 차종에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 24는 차종에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화를 측정된 결과이다. 그림으로부터 일반 중형 승용차 (K5- 2000 cc)내 PM_{2.5}의 농도는 처음에는 신속히 그리고 시간이 지나면서 서서히 감소하고 소형 승용차 (MD- 1600 cc)의 경우는 시간이 지남에 따라 매우 서서히 감소하여 15분 이후 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도를 유지하고 있다. 이는 공간이 넓은 중형 승용차의 경우는 여러 가지 제거 기능에 의하여 PM_{2.5} 농도가 주행시간에 따라 선형으로 감소하지만 공간이 작은 소형 승용차의 경우에는 PM_{2.5}의 밀집이 더 심하여 주행시간에 따라 감소 추세가 둔화되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 소형 승용차의 경우에는 탑승인원이 적을수록 PM_{2.5}의 농도를 신속히 감소시킬 수 있음을 뜻한다. 한편, Kim et al. (2010)의 연구에서는 승객 수에 따른 PM₁₀의 농도를 비교해 보더라도 어떤 경향을 발견할 수 없다고 보고하였으며, Kim (2008)이 보고한 서울시 지하철도 내에서의 PM₁₀ 변화는 탑승인원이 많음에도 큰 차이가 없었다고 보고하였다 [11,12]. 이는 탑승공간이 넓고 외부 PM₁₀의 영향을 덜 받기 때문으로 판단된다.



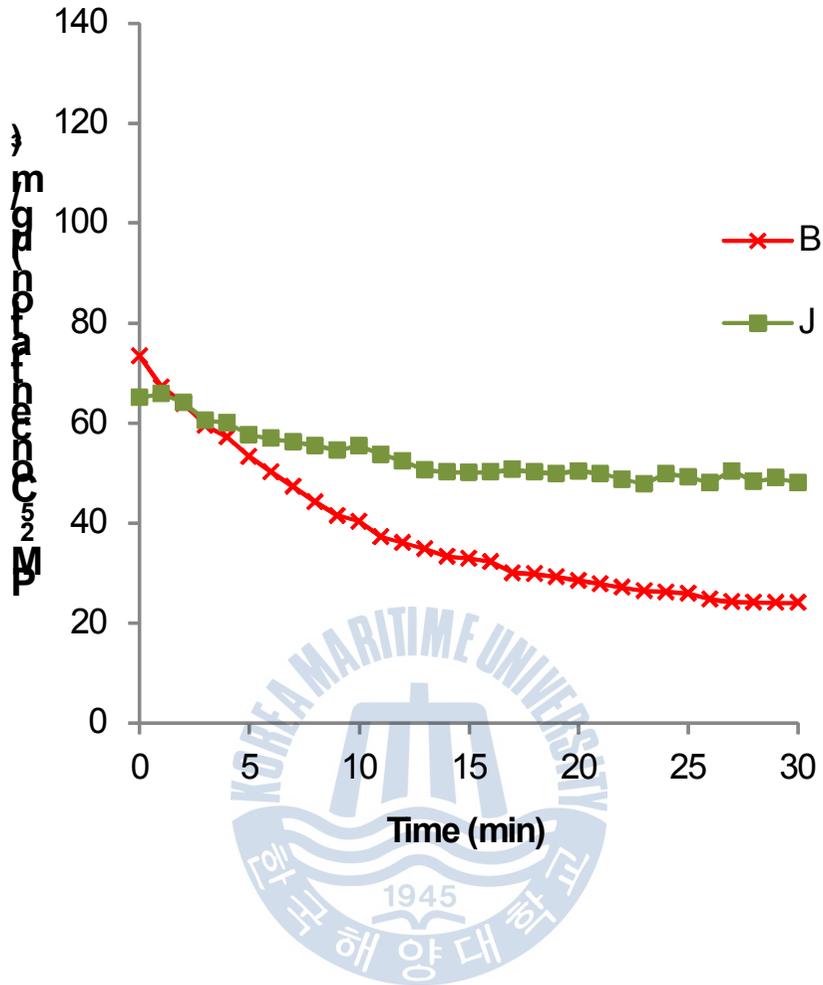
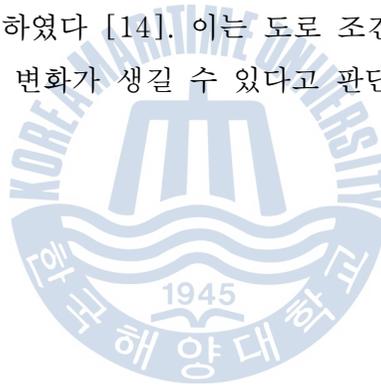


Fig. 24 PM_{2.5} concentration in the test car with respect to type of car; B : K co. K5, J : H co. AVANTE

4.1.6 지역에 따른 승용차 내 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 25은 전주시내 중심가를 시속 30 km로, 전주 시외를 시속 70 km로 주행했을 때의 승용차 내 PM_{2.5} 농도의 변화를 측정한 결과이다. 시내를 저속으로 주행할 경우에는 비록 외부의 PM_{2.5} 농도가 커도 승용차 내 PM_{2.5}의 농도가 서서히 그리고 꾸준히 감소하고 있으나 시외를 주행할 경우에는 처음 7분 동안은 감소속도가 시내보다는 빨랐으나 이어서 감소속도가 평형에 이르고 8분 이후부터는 외부의 PM_{2.5}가 훨씬 적음에도 불구하고 승용차 내 PM_{2.5}의 농도가 시내 주행 시보다도 높았다. 이는 승용차 내 PM_{2.5}의 농도와 감소추세는 외부의 PM_{2.5} 농도 보다는 승용차의 주행 속도에 더 크게 의존하고 있음을 뜻한다. 즉, 주행 속도가 커질수록 내부에 안정화되어 있던 PM_{2.5}들의 유동이 더 심해짐을 알 수 있다. Yang et al. (2004)의 연구에서는 측정주변 도로의 조건 환경에 따라 영향을 받을 수 있다고 보고 하였다 [14]. 이는 도로 조건뿐만 아니라 날씨나 속도 등의 조건에 따라 농도의 변화가 생길 수 있다고 판단된다.



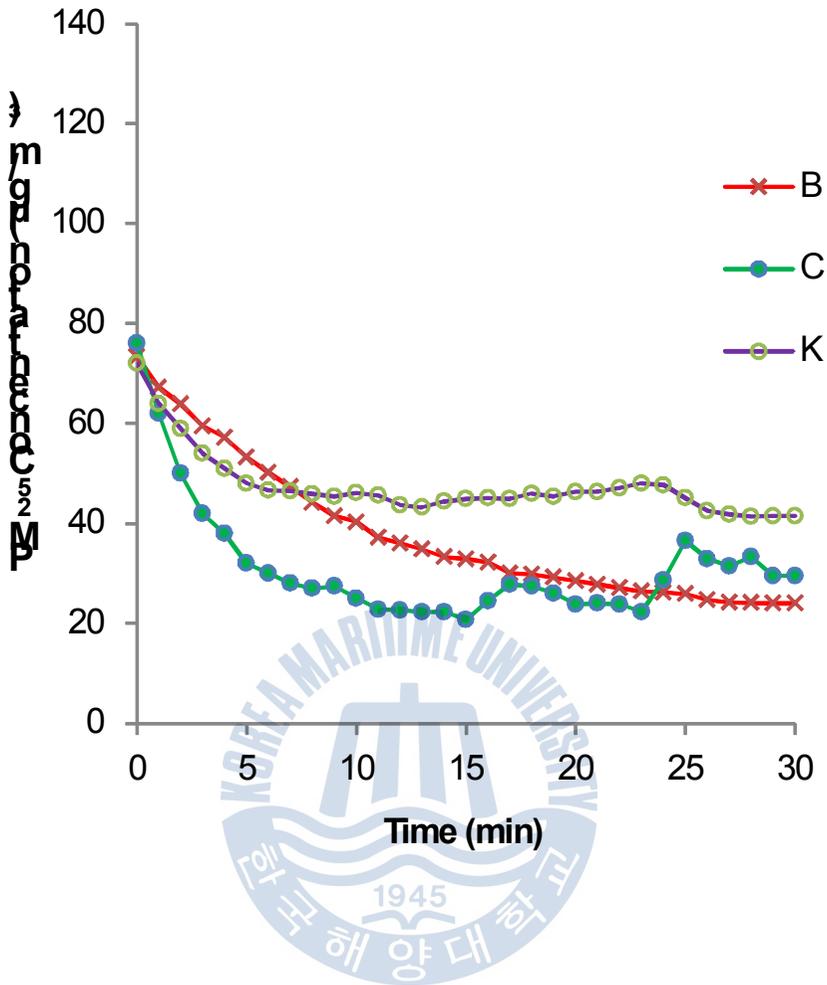


Fig. 25 $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the test car with respect to (B)downtown and (K)suburb; B : Actuator–internal circulation mode, C : Actuator–external mode, downtown, K : Actuator–internal circulation mode

4.1.7 승용차 내 공기청정 필터 종류별 PM_{2.5}의 농도 변화

Fig. 26에 승용차 내 공기정화 필터의 종류별 PM_{2.5} 농도 변화를 측정된 결과를 도시하였다. 그림으로부터 3가지 필터가 모두 주행의 초기에는 PM_{2.5}를 신속히 제거하다가 일정한 시간이 경과하면 제거능력이 일정해지며 따라서 PM_{2.5}의 농도도 일정한 수준을 유지하고 있다. 그중에서도 PP 부직포 필터는 사용량(40 g)이 훨씬 적은데도 초기 15분 동안에 승용차 내 PM_{2.5}의 약 90%를 제거하고 이후에는 초기농도의 약 10%의 PM_{2.5} 농도를 유지하면서 흡착능력을 발휘하고 있다. 활성탄소섬유(ACF) 부직포 필터의 PM_{2.5} 제거활동은 PP 부직포 필터와 유사한 형태이나 평형에 도달하면 초기농도의 약 20%를 유지함으로써 PP 부직포 필터에 비하여 우수하지는 않았다. 반면에 (PP+AC) 콤비네이션 필터의 경우는 사용량이 127 g이나 되는데도 PM_{2.5}의 제거능력은 다른 부직포 필터에 비하여 뒤떨어지고 있다. 그러므로 승용차 내 PM_{2.5} 제거용 필터로는 현재에 많이 사용되고 있는 PP 부직포 필터가 가장 우수하다고 판단된다. 그러나 Park et al. (2006)의 연구처럼 ACF 필터 본래의 연구목적은 휘발성 유기물질의 흡착에 있으므로 PM_{2.5}와 더불어 화학적 휘발성 물질을 함께 제거하기 위해서는 ACF 필터로 적절히 처리하여 사용하는 것도 추천할 만하다 [49].

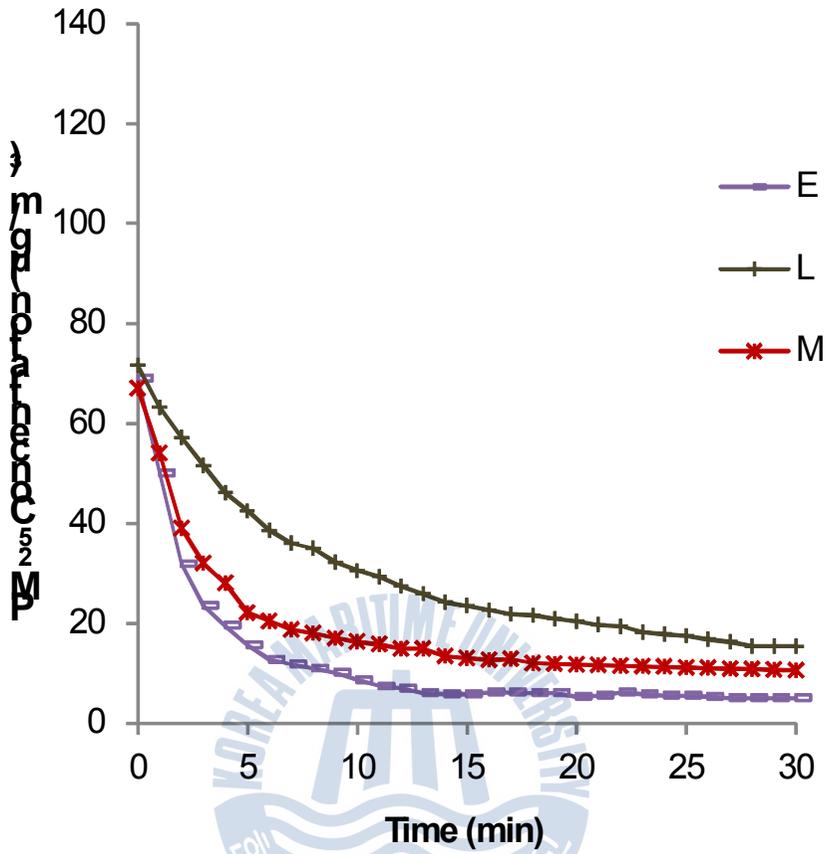


Fig. 26 PM_{2.5} concentration in the test car according to the type of filter (E) non woven filter, (L) combination filter and (M) ACF filter

4.2 주행 중인 승용차 내 이산화탄소 농도 변화에 대한 연구

4.2.1 오전(AM), 오후(PM)에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 27에 전주 시내 중심가를 오전과 오후에 주행했을 때 승용차 내 CO₂의 시간에 따른 농도변화를 도시하였다. 그림으로부터 승용차 내 주행 전 CO₂의 초기농도는 각각 오전(AM)에는 $800 \pm 6\%$ ppm, 오후(PM)에는 $789 \pm 6\%$ ppm으로서 시내중심가의 CO₂ 농도는 오전, 오후 큰 차이는 없었다. Park et al. (2005)이 보고한 한반도 배경대기지역의 CO₂ 농도변동 특성에 관한 연구에서도 시간대의 농도가 약간의 차이를 보이는 것은 출·퇴근 등의 혼잡한 상황과 식물의 광합성 작용 등의 영향인 것으로 판단되며, 오전과 오후는 큰 차이가 없었다고 하였다 [64]. 2013년 4월 중에 서울시내 18개 지점에서 이산화탄소(CO₂) 농도를 측정한 결과 하루 평균 706 ppm으로 나타났다. 이는 우리나라 배경 측정소인 안면도 지점에서의 396 ppm보다 훨씬 높다. 이번 조사에서도 서울중심가 도로변에서의 CO₂ 농도 (790.4 ppm)는 주택가 (682.9 ppm), 학교(649.4 ppm) 보다 높은 것으로 나타났다. Gwon et al. (2006)은 CO₂ 농도는 도심구간에서 580-760 ppm정도로서 평균 670 ppm을 나타내고 있고, 외곽구간은 500-600 ppm정도로서 평균 550 ppm을 나타내고 있어서 도심구간이 약 1.2배 정도 높게 나타나고 있다 [9]. 전주시 중심가 도로변에서의 초기 농도가 800 ppm인 것은 서울시내 평균 706 ppm보다 높은 값으로 전주시내 중심가도 서울 못지 않게 공기가 오염되어 있음을 알 수 있다. 외국의 경우를 살펴보면, 중국 광둥성 광주시내의 차량이 주행하는 거리에서의 CO₂ 농도는 평균 786 ppm으로서 전주시내 중심가의 CO₂ 농도와 일치하였다 [65]. 전주 시내 중심가를 공기순환모드를 내기모드로 고정하고, 송풍기를 off로 하고 주행하면서 승용차 내 CO₂의 농도 변화를 측정한 결과, 오전[A], 오후[B] 모두 내기 모드에서는 외부 대기의 영향이 없어서 승용차내의 사람이 내뿜는 CO₂가 밖으로 배출되지 않았기 때문으로 판단된다. 초기 약 800 ppm이었던 CO₂ 농도가 25분 후에 5,000 ppm까지 급속하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Yoon et al. (2005) 및 Lee et al. (1999)이 보고한 결과와 거의 일치하였다 [66,26].

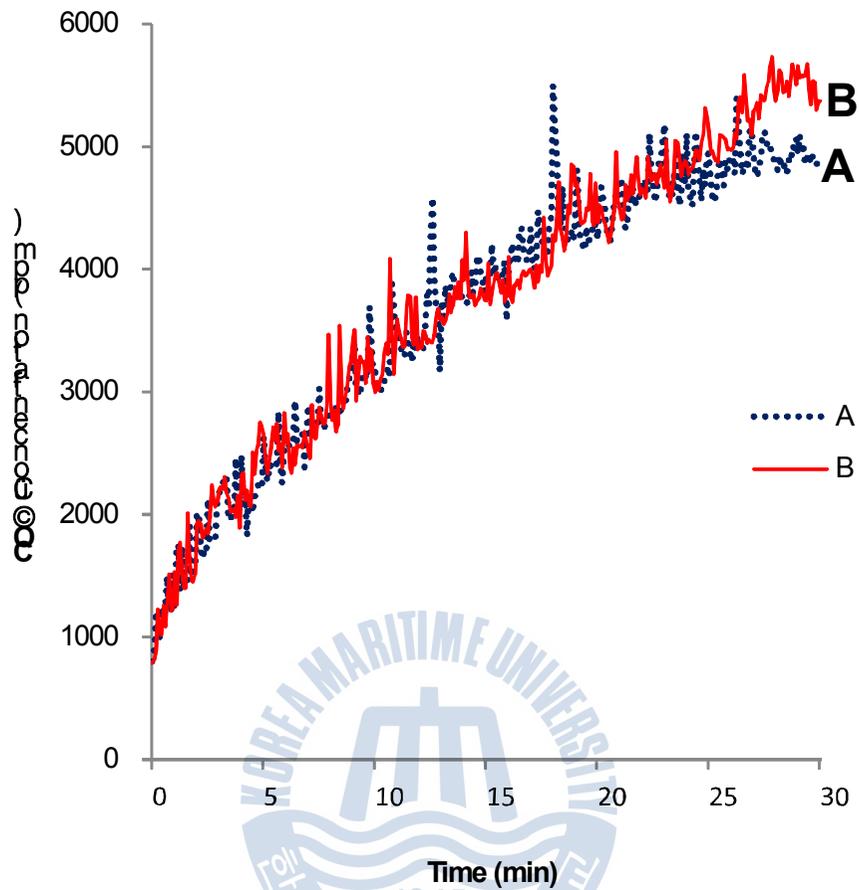


Fig. 27 CO₂ concentration in the test car during (A) morning and (B) afternoon in Jeonju downtown

4.2.2 공기순환모드(Actuator) 및 송풍기(Blower) 작동에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 28에 공기순환모드 및 송풍기 작동(실험번호: B,C,D,E)을 달리한 승용차 내 CO₂의 30분 동안의 농도변화를 도시하였다. 그림으로부터 공기순환모드를 외기 모드로 고정하고, 송풍기를 2단으로 조절한 (D)의 경우는 처음 1~2분 동안에 약 500 ppm정도 상승하였다가 시간이 지남에 따라 서서히 감소하여 초기 CO₂ 농도를 계속 유지하고 있다. 그러나 송풍기가 2단이지만 내기모드를 유지한 (E)의 경우는 CO₂농도가 송풍기를 off로 한 (B)와 마찬가지로 꾸준히 상승하며 30분 후에는 5000 ppm으로 가장 낮은 (D)와 비교하여 약 5배나 증가하였다. 송풍기를 off로 해도 외기모드를 유지한(C)의 경우는 CO₂ 농도가 (D)와 마찬가지로 초기 CO₂ 농도를 계속 유지하고 있다. 이는 공기순환모드와 송풍기를 통한 환기가 승용차 내 CO₂ 농도를 저감시키는데 중요한 역할을 하고 있음을 보여주는 것이다. 또한 공기순환모드를 외기 모드로 하면 주행 중에 적절한 공기 유입이 일어나고 있다고 보인다. 이러한 결과는 신선한 공기의 유입 필요성과 우수한 공기청정용 필터장착의 필요성을 강조하는 것이다.

Kim (2008)의 연구에서도 외부로부터의 유입공기가 실내 CO₂농도를 저감시키고 있음을 보고한 바 있으며, Wargocki et al. (2000)이 사무실에서의 통풍효과를 연구한 결과에서도 통풍속도를 증가시킬수록 CO₂ 농도는 저감되며 특히 1인당 초당 2.5 l 이상 통풍량이 필요하다고 보고하였다 [12,67]. Myhrvold et al. (1997)은 환풍량을 증가시키면 CO₂ 농도가 감소한다고 하였다 [68].

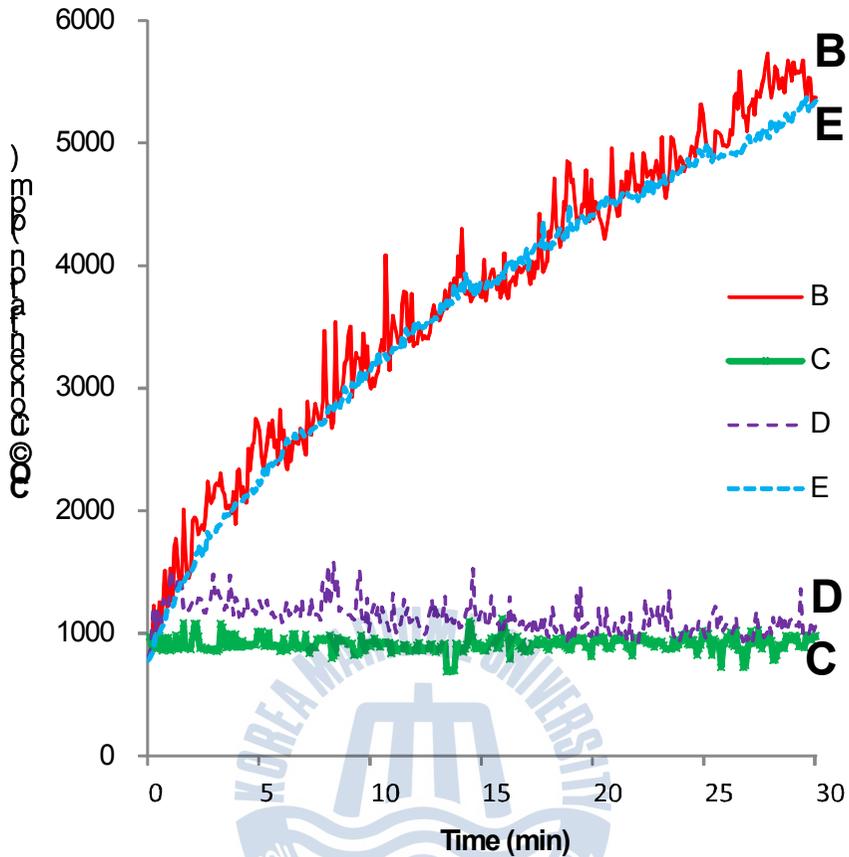
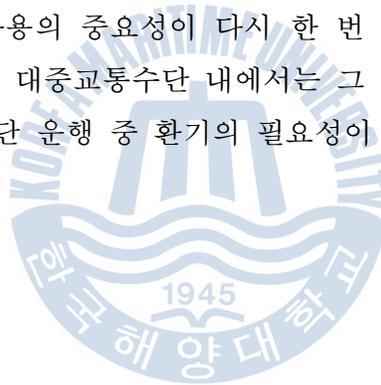


Fig. 28 CO₂ concentration in the test car with respect to actuator and blower functioning; B : Actuator – internal circulation mode, Blower – off, C : Actuator – external mode, Blower – off, D : Actuator – external mode, Blower – lever 2, E : Actuator – internal circulation mode, Blower – lever 2

4.2.3 창문개폐에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 29에는 공기순환모드가 내기 모드로, 송풍기가 Off로 조절된 상태에서 주행 중에 승용차의 창문을 열고 [F,G], 닫았을 때 [B]의 내부 CO₂의 농도 변화를 살펴 본 결과이다. 창문을 닫았을 때는 30분 동안 실내 CO₂의 농도가 5,000 ppm에 도달함을 알 수 있다. 이는 호흡에 의해 CO₂가 생성되고, 공간의 한계로 인해 CO₂ 농도가 점차 증가하기 때문이다. 창문을 앞쪽 2개만 연 경우 [F]와 4개를 모두 연 경우 [G] 모두 실내 CO₂의 농도가 조금씩 감소하고는 결국 외부 CO₂ 농도와 같아지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 CO₂ 농도의 감소를 위해서는 승용차의 창문을 열어서 환기해야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 결과는 Shin et al. (2010)의 대중교통수단의 실내공기질 실태에 관한 연구를 통해서도 확인할 수 있다 [27]. 그러나 동절기 등 창문을 열수 없는 형편이 많으므로 우수한 공기청정용 필터 사용의 중요성이 다시 한 번 강조된다. 외부 공기의 유입이 제한되어 있는 좁은 대중교통수단 내에서는 그 연관성이 더 크다고 볼 수 있어, 그만큼 대중교통수단 운행 중 환기의 필요성이 중요하다고 하겠다.



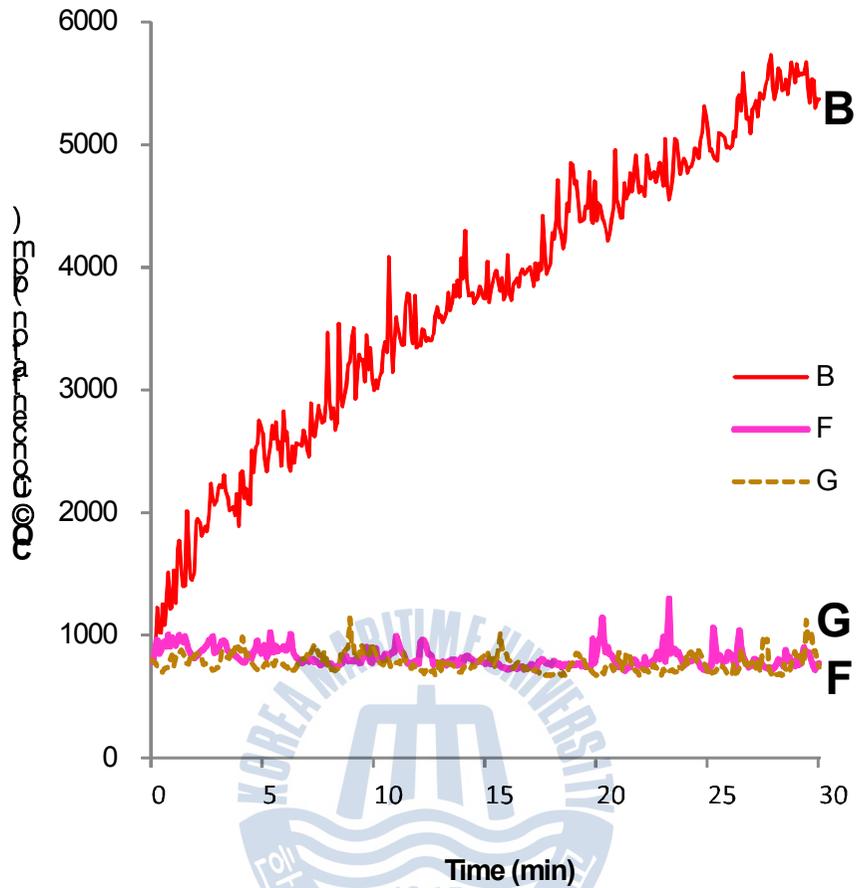
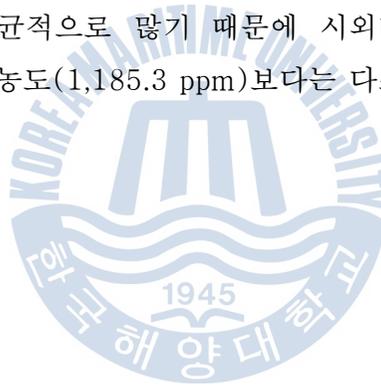


Fig. 29 CO₂ concentration in the test car with respect to window opening and closing; B : widow-close, F : window-front open, G : window-all open

4.2.4 탑승 인원 에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 30은 탑승 인원 에 따른 승용차 내 CO₂의 영향을 조사한 결과이다. 앞에서 [B]의 조건으로 2인이 탑승하였을 경우 CO₂의 농도가 급격히 증가함을 밝힌바 있는데 4인이 탑승하였을 경우에는 운전석에서 측정하든, 뒤쪽 승객에서 측정하든 2인이었을 때보다 훨씬 더 급격히 상승된 그래프를 보이고 있다. 초기 약 800 ppm이었던 CO₂의 농도가 7분 후에 5,000 ppm까지 급속하게 증가하고 10분 이후에 탑승자가 어지러움을 호소하였다. 이러한 결과는 승용차 내 4인이 함께 호흡하는 동안 승용차 내 CO₂의 농도가 급격하게 증가하는 것으로 판단된다. So et al. (2008)이 발표한 전동차 실내공기질 및 CO₂ 농도 측정에서도 실내 CO₂ 농도는 승객 수에 비례함을 알 수 있다 [69]. 따라서 승용차 내 CO₂농도는 탑승인원수에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다. Shin et al. (2010)도 시외버스의 탑승인원이 평균적으로 많기 때문에 시외버스의 CO₂ 농도(1,458.6 ppm)가 고속버스의 CO₂ 농도(1,185.3 ppm)보다는 다소 높은 것으로 보고하였다 [27].



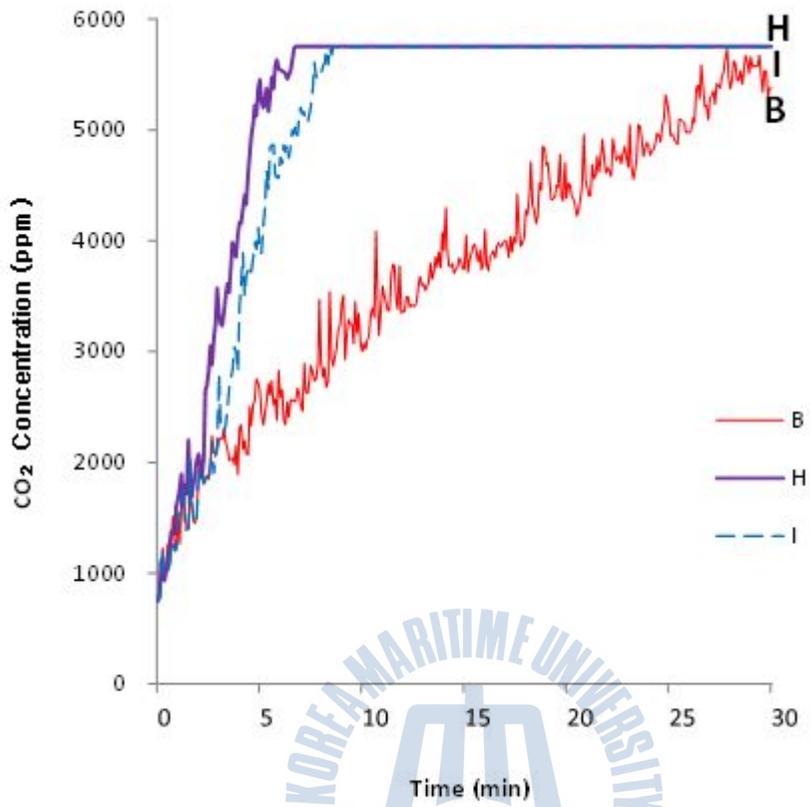


Fig. 30 CO₂ concentration in the test car with respect to number of person; B : 2 people, H : 4 people [probe front], I : 4 people [probe rear]

4.2.5 차종에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 31는 차종에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화를 측정한 결과이다. 그림으로부터 일반 중형 승용차(K5- 2000 cc)내 CO₂의 농도는 [B]와 같이 크게 증가하여 약 25분에는 5000 ppm을 넘어섰다. 소형 승용차(MD- 1500 cc)의 경우 [J]도 CO₂ 농도가 크게 상승하고 있음은 중형 승용차 모두 비슷한 패턴을 보이고 있지만 공간이 약간 넓은 중형 승용차가 작은 소형 승용차에 비하여 농도가 조금 낮은 점을 확인 할 수 있었다. 따라서 CO₂ 농도는 실내공간의 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이것은 CO₂의 밀집도가 공간이 좁을수록 더 증가하기 때문이다. Sohn et al. (2006)은 택시는 내부가 좁고 문을 닫고 운행하는 경우가 많아서, 버스와 지하철보다 CO₂의 농도가 높은 결과를 보인다고 하였다 [28].



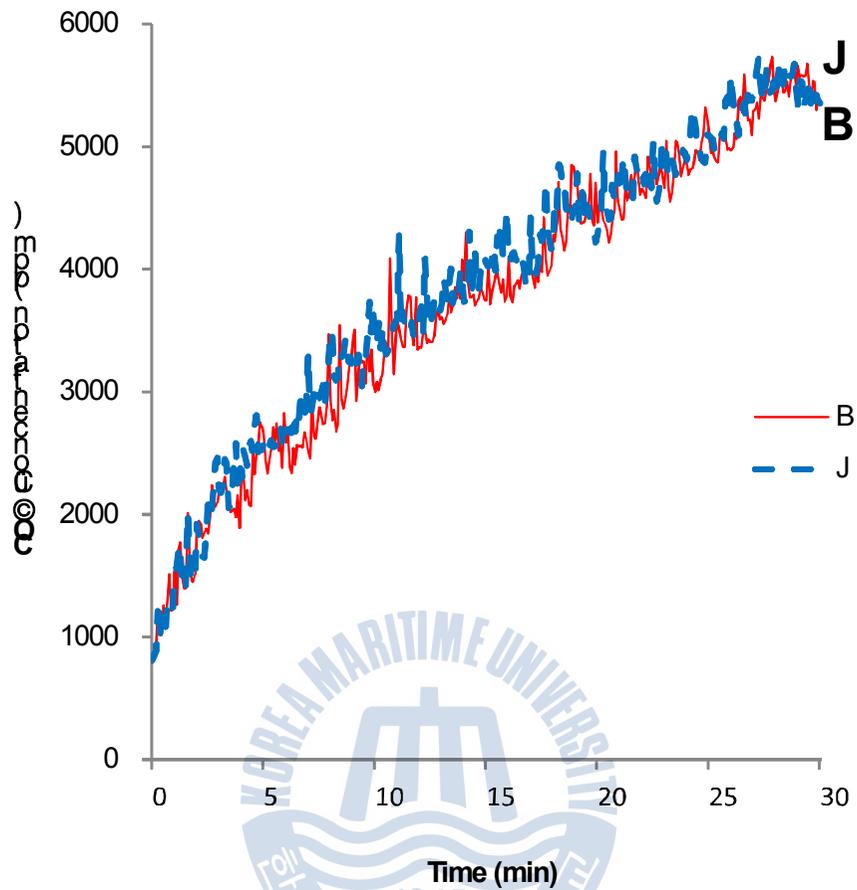
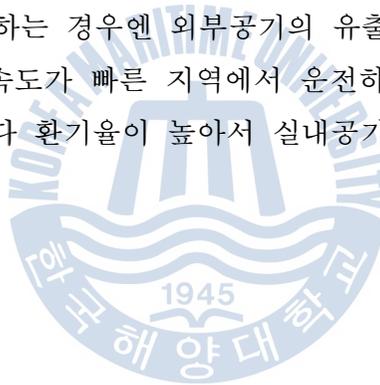


Fig. 31 CO₂ concentration in the test car with respect to type of car; B : K co. K5, J : H co. AVANTE

4.2.6 지역에 따른 승용차 내 CO₂의 농도 변화

Fig. 32은 전주시내 중심가를 시속 30 km로, 전주 시외를 시속 70 km로 주행했을 때의 승용차 내 CO₂의 변화를 측정된 결과이다. 시내를 저속으로 주행할 경우에는 꾸준히 CO₂ 농도가 증가하고 있으나 시외를 주행할 경우에는 시내 주행보다 초기 7분에서 증가가 빨랐으나 약 10분 약 4,500 ppm으로 CO₂ 농도가 다소 안정되었다. 이는 속도가 증가함에 따라 외부에서 공기가 조금씩 실내로 유입이 되어 CO₂ 농도가 더 이상 증가하지 않은 것으로 보인다. (K)의 경우 공기순환모드가 내기모드라 해도 자동차속도에 의한 공기의 유입이 조금씩 있다는 것을 알게 되었으며 외부의 공기 유입으로 인하여 CO₂ 농도가 안정되거나 감소되는 것으로 보고 있다. 따라서 지역에 따른 농도변화보다는 속도나 외부의 유입의 정도에 따라 변화 한다고 할 수 있다. Gwon et al. (2006)도 환기 풍량을 0으로 하여 운전하는 경우엔 외부공기의 유출입이 일어난다는 것을 확인하였고, 그 양은 주행속도가 빠른 지역에서 운전하게 되면 주행속도가 느린 지역에서 운전할 경우보다 환기율이 높아서 실내공기질이 나은 상태를 유지하였다고 보고하였다 [9].



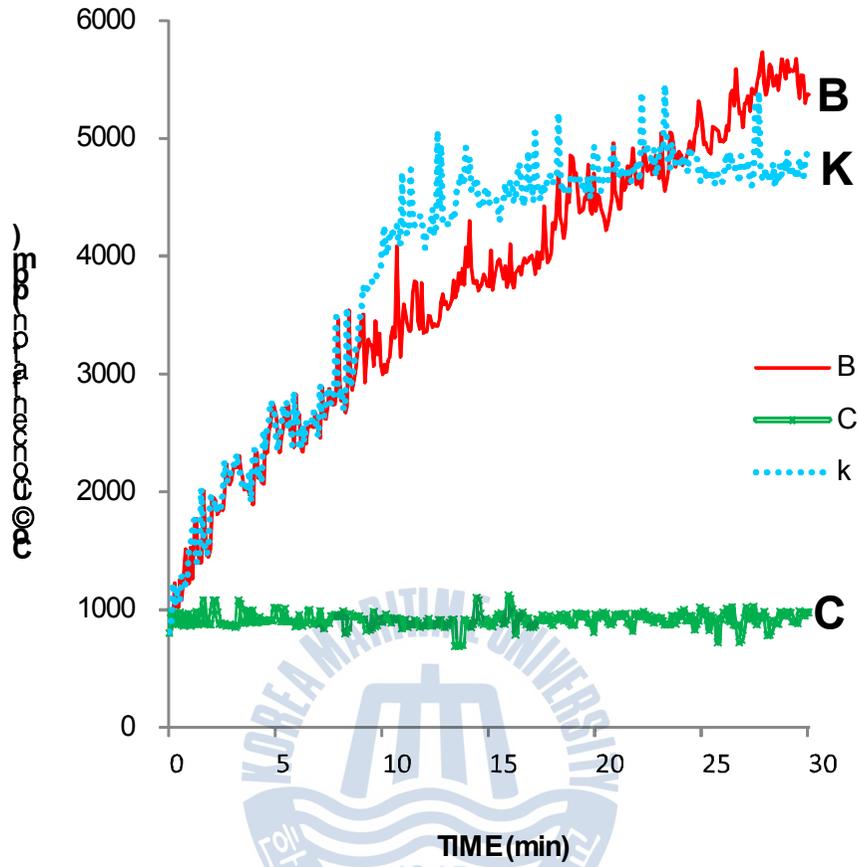
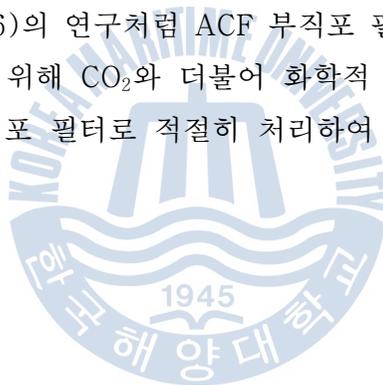


Fig. 32 CO₂ concentration in the test car with respect to downtown and suburb; B : Actuator–internal circulation mode, downtown, C : Actuator–external mode, downtown , K : Actuator–internal circulation mode, suburb

4.2.7 승용차 내 공기청정 필터 종류별 CO₂의 농도 변화

Fig. 33에 승용차 내 공기정화 필터의 종류별 CO₂ 농도 변화를 측정된 결과를 도시하였다. 그림으로부터 3가지 필터 모두 측정 시에 CO₂ 농도가 계속 상승되는 것을 알 수가 있다. 하지만 ACF 부직포 필터는 사용량(76 g)이 적은데도 약 15분까지 3,000 ppm으로 CO₂의 농도가 다른 2종류의 필터보다 CO₂의 증가가 완만하게 올라가고 있다. 하지만 측정 종료 후의 CO₂ 농도를 비교해보면 3가지 필터가 비슷하게 상승하고 있다. 이는 현재 나와 있는 자동차용 에어컨필터가 CO₂ 제거에는 다소 효능이 떨어진다는 것을 보여주고 있다. 다만 ACF 부직포 필터가 CO₂의 증가속도를 줄여주어 다른 상용 PP 부직포 필터 및 (PP+AC) 콤비네이션 필터에 비해 성능이 좋은 것으로 보인다. Yoon et al. (2011)이 연구한 자료에는 ACF의 흡착량이 좋고, 기공이 많아 흡착성능이 우수하다고 한다 [70]. 따라서 Park et al. (2006)의 연구처럼 ACF 부직포 필터 본래의 연구목적인 휘발성 유기물질의 흡착을 위해 CO₂와 더불어 화학적 휘발성 물질을 함께 제거하기 위해서는 ACF 부직포 필터로 적절히 처리하여 사용하는 것도 추천할 만하다 [49].



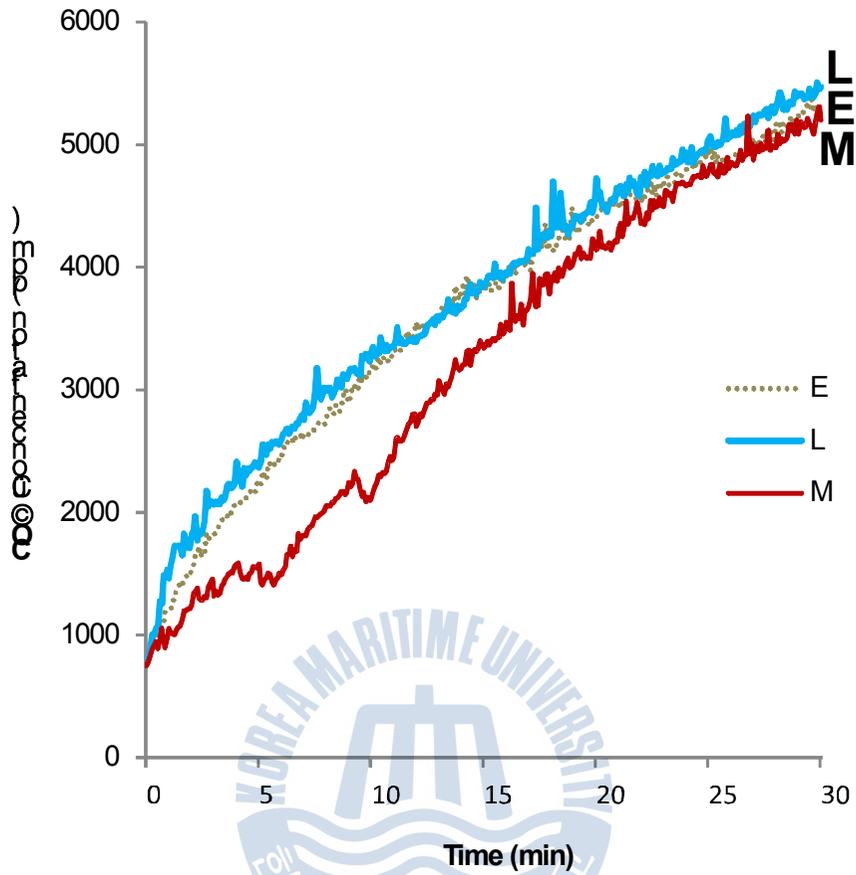


Fig. 33 CO₂ concentration in the test car with respect to kind of filter. (E) non-woven filter, (L) combination filter and (M) ACF filter

4.3 공기청정용 필터의 VOCs 제거 효율에 대한 연구

4.3.1 가스검지관법에 의한 ACF 필터의 VOCs 흡착능력

Table 17에 가스검지관으로 측정된 3종 부직포의 VOCs 흡착능력을 정리하였다. 표로부터 PP mat는 포름알데히드를 20%정도 제거할 뿐 톨루엔이나 벤젠은 거의 제거하지 못하였고, PP+AC mat는 포름알데히드와 벤젠의 제거율은 우수하나 톨루엔은 78.9%로 우수하지 못하였다. 반면에 ACF 부직포는 실험에 사용된 VOCs 모두를 97.5%이상 제거함으로써 3종의 부직포중 VOCs 흡착능력이 가장 우수함을 알 수 있다. 이러한 결과는 비록 부직포의 양이 서로 다르지만 VOCs 흡착능력에서 정성적인 비교는 될 수 있다. 그러나 시간에 따른 정량적인 제거능력을 알 수 없으므로 이후의 실험은 ACF 충전탑에 의한 톨루엔의 과과곡선을 측정하여 ACF의 연속흡착능력을 측정하였다.

Table 17. Reduction efficiency of VOCs by 3 kinds of mat filter

VOCs	PP mat	(PP+AC) mat	ACF mat
Formaldehyde	20.0	> 99.3	> 99.3
Toluene	5.0	78.9	> 97.5
Benzene	0.0	> 97.5	> 97.5

※ measured by FITI Testing & Research Institute

4.3.2 ACF 종류에 따른 톨루엔의 연속흡착능력

Fig. 34는 ACF의 종류에 따른 톨루엔의 흡착 파과곡선을 비교한 결과이다. 그림으로부터 (1) MD-1100 ACF와 (2) KF-1500 ACF는 모두 파과점 이후 급격한 상승곡선을 보이는데 이러한 형태는 톨루엔의 흡착이 좁은 물질전달지역 (narrow mass transfer zone)에서 진행됨을 의미한다. 그 이유는 흡착제 표면에 발달된 세공들이 대부분 미세공들로서 톨루엔의 흡착이 Dubinin의 미세공 충전 이론에 의하여 매우 신속하게 흡착되었음을 뜻한다. 초기농도의 5%를 배출할 때의 시간을 파과점(t_b)이라 할 때, 두 ACF의 파과점은 각각 61 min 과 230 min 으로서 KF-1500의 파과점이 MD-1100보다 3.76배 길었다. 이는 KF-1500의 비표면적이 MD-1100의 비표면적보다 크기 때문이다. 일반적으로 시판 KF-1500 은 비표면적이 $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ 이고 MD-1100은 비표면적이 $1100 \text{ m}^2/\text{g}$ 임을 뜻한다. 그러므로 KF-1500의 비표면적은 MD-1100보다 1.36배 크다는 뜻이다. 그런데 KF-1500의 파과점까지의 소요시간이 3.76배나 큰 것은 세공의 크기 분포도를 좀 더 자세히 검토할 필요성을 제시한다. 그리하여 두 ACF에 대한 등온흡착곡선과 BET 비표면적을 다시 분석하게 되었다.

Fig. 35은 두 ACF의 77K 에서의 질소흡착에 대한 등온흡착곡선을 측정한 결과이다. 그림으로부터 두 ACF는 모두 상대압력(P/P_0)이 작을 때 질소의 흡착량이 급격히 증가하고 곧 평형에 이르게 됨으로서 전형적인 Type I 곡선, 즉 표면에 발달된 세공들이 대부분 미세공들로 이루어졌음을 뜻한다, 한편, Table 18에 정리된 등온흡착곡선들로부터 분석된 BET 특성치들을 검토하면 더 정확한 해석을 할 수 있다. 우선 두 ACF의 비표면적은 각각 $1690 \text{ m}^2/\text{g}$ 과 $1090 \text{ m}^2/\text{g}$ 로서 KF-1500는 비표면적이 MD-1100보다 1.55배 더 컸고, 총세공부피도 1.59배 더 컸다. 그리고 미세공부피도 KF-1500이 1.41배 컸다. 주목할 사실은 중기공부피로서 KF-1500이 3.76배 더 컸다. 이 중기공의 비율은 바로 파과점까지 이르는 흡착능력의 비와 같았다. 비록 평균 세공크기가 1.75 nm와 1.70 nm로 비슷하지만 MD-1100은 세공들이 1.70 nm전후에 집중되어 있는 반면에 KF-1500은 1.75 nm보다 훨씬 작은 미세공들로부터 2.0 nm보다 다소 큰 중기공(중기공: 2-50 nm)까지 넓게 분포되어 있음을 뜻한다. 이러한 사실은 중기공 분포도로부터 확인할 수 있다. Fig. 36은 두 ACF의 BJH 식에 의한 중기공 분포도이다. 그

림으로부터 중기공들의 분포가 주로 2-5 nm에 있으며 KF-1500는 MD-1100 보다 역시 약 3-4배 정도 많음을 알 수 있다. 따라서 톨루엔의 흡착은 미세공 충전 뿐만 아니라 중기공에 의한 모세관 응축현상이 크게 작용한 것으로 보인다. 다만, KF-1500의 중기공들은 2 nm에 가까운 크기로 등온흡착곡선에서 중기공의 특징인 이력현상(hysteresis)이 $p/p_0=0.4$ 이후에 희미하게 나타날 뿐 전체적으로는 Type I 으로 도시되었다고 판단된다.



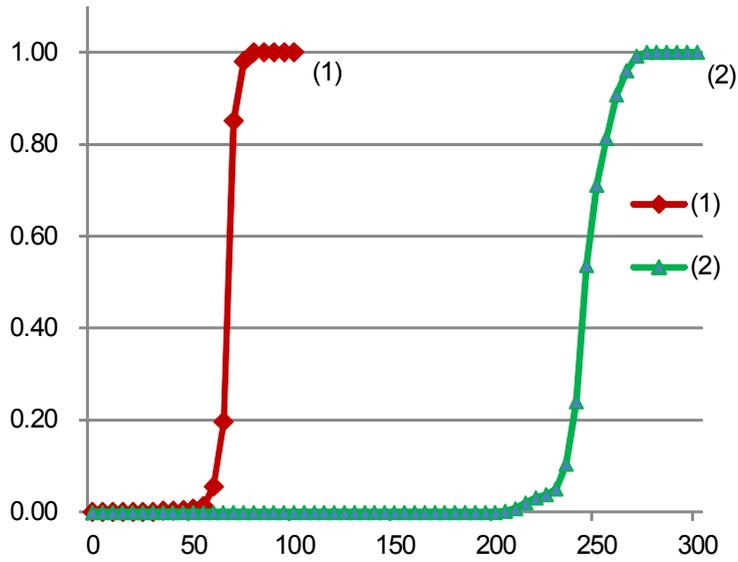
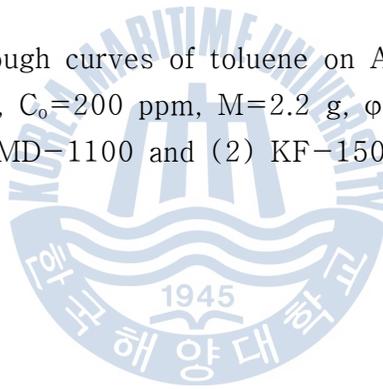


Fig. 34 Breakthrough curves of toluene on ACF bed at 25 °C. $Q=2$ L/min, $C_0=200$ ppm, $M=2.2$ g, $\phi=15$ mm :
 (1) MD-1100 and (2) KF-1500



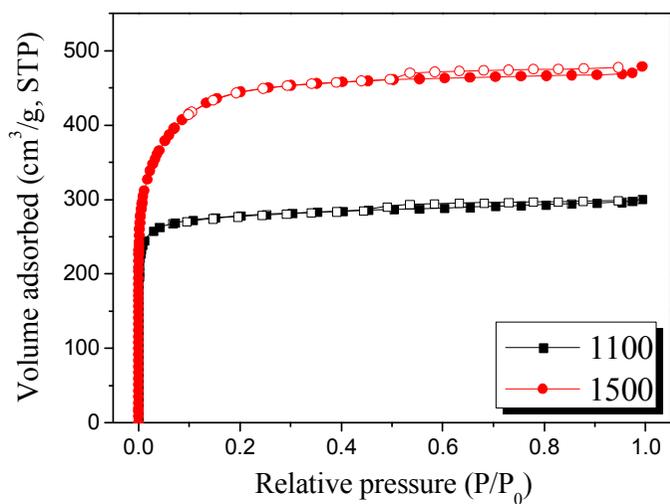


Fig. 35 Adsorption isotherms of toluene on (1)KF-1500 and (2)MD-1100

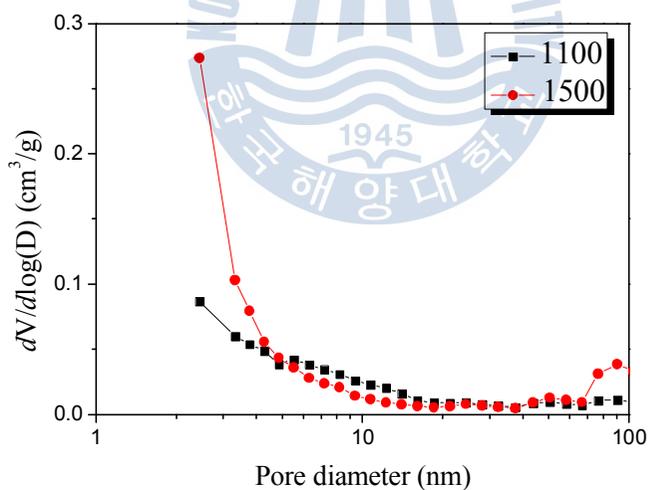


Fig. 36 Distribution of mesopores measured by BJH equation

Table 18. Adsorption characteristics of KF-1500 and MD-1100

ACF	Specific surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Micropore (cm ³ /g) Mesopore (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)
KF-1500	1690	0.7388	0.6032 0.1356	1.75
MD-1100	1090	0.4640	0.4279 0.0361	1.70

두 ACF에 의한 파과곡선은 파과점 이후 모두 급격한 “S” 모양을 보이고 얼마 후 초기농도와 일치하여 더 이상의 흡착은 이루어지지 않았다. 급격한 “S”형태는 흡착능력이 매우 우수하여 흡착제의 이론적 흡착 능력에 접근하고 있음을 뜻하며 이러한 경우에는 최대연속흡착용량(W_e)은 $C/C_0=0.5$ 인 점에서의 흡착량으로 환산된다.

$C/C_0=0.5$ 가 될 때의 흡착시간은 각각 72 min, 243 min이었다. 따라서 초기농도 200 ppm, 유속 2 L/min이었을 때의 MD-1100 ACF의 파과점(61 min)까지의 흡착량과 최대연속흡착용량은 각각 45.55 mg/g-acf, 53.77 mg/g-acf, KF-1500 ACF의 파과점(230 min)까지의 흡착량과 최대흡착용량은 각각 171.8 mg/g-acf, 181.5 mg/g-acf 이었다. 그러므로 MD-1100 ACF의 파과점에서의 흡착능력은 최대연속흡착용량의 84.7%, KF-1500 ACF의 파과점에서의 흡착능력은 최대연속흡착용량의 94.7%로서 ACF의 흡착효율이 매우 높으며, KF-1500 ACF는 훨씬 효율이 좋았음을 알 수 있다.

톨루엔의 기상 초기농도 200 ppm은 다음 식에 의하여 821.43 mg/m³ 으로 환산되었다.

$$\frac{mg}{m^3} = ppm \times \frac{\text{분자량}}{22.4} \quad (10)$$

Baek et al. (2011) 및 Kim et al. (2008)이 본 실험과 유사한 실험 장치를 사용하여 ACF와 ACF에 의한 톨루엔 흡착실험을 수행한 결과 ACF의 파과곡선은 좁은 물질전달지역 형태를 보이지만 활성탄소는 빠른 배출 및 완만한 파과곡선으로 안정화되기까지 긴 시간이 소요되는데 그 이유는 활성탄소는 증기공이나 대기공이 많이 공존하기 있기 때문으로 설명하였다 [45,47]. 이러한 설명은 Huang et al. (2003)의 연구와도 일치한다 [71]. Baek et al. (2011)은 0.03 g ACF를 충전한 흡착탑에 100 ppm의 톨루엔 증기를 0.5 L/min로 통과시키면 370 mg/g-acf의 최대흡착용량을 얻을 수 있음을 보고하였는데 이는 본 실험결과의 약 2배로서 훨씬 우수한 흡착능력을 보였지만 소량의 충전량과 낮은 농도로 실험한 결과이므로 그들의 실험결과를 본 실험의 결과와 직접 비교하는 데는 무리가 있다고 판단된다 [45]. Kim et al. (2008)은 여러 가지 유리한 조건으로 파과점이 많이 증가함을 보였지만 ACF 단위질량당 톨루엔 흡착량은 제시하지 않았다 [47]. Son et al. (2005)도 흡착량을 제시하지는 않았으나 활성탄소와 달리 ACF에 흡착된 톨루엔은 약 90 °C에서 거의 탈착이 됨을 보고하였다 [50].

4.3.3 ACF의 충전량과 충전밀도에 따른 톨루엔의 연속흡착능력

Fig. 37은 ACF의 충전량과 충전밀도를 달리하고 톨루엔의 흡착능력을 측정한 파과곡선들이다. 즉 실험 (1)은 MD-1100 2.2 g을 내경 15 mm의 충전탑에 70 mm 높이로 채워 충전밀도를 0.1779 g/m³ 되게 하였고, 실험 (3)는 2.2 g을 140 mm 높이로 채워 충전밀도를 0.0889 g/m³ 되게 하였으며, 실험 (4)는 4.4 g을 140 mm 높이로 채우고 충전밀도를 실험 (1)과 같이 조절한 것이다.

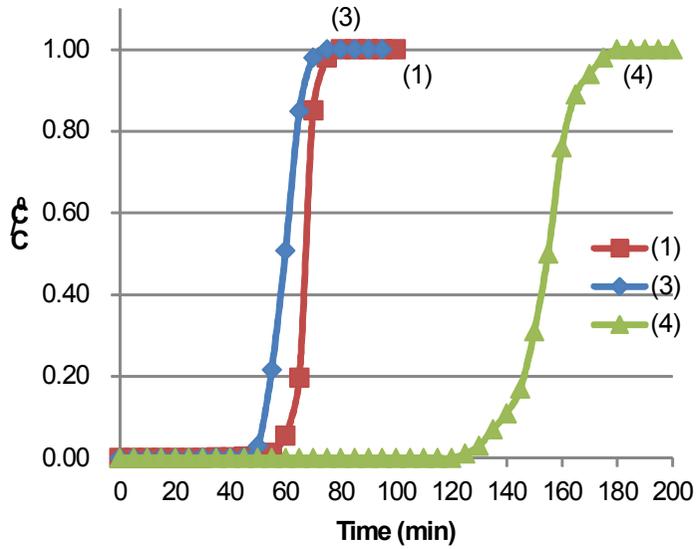


Fig. 37 Breakthrough curves of toluene on MD-1100 at different packing amount and density at 25 °C, $\phi=15$ mm, $Q=2$ L/min, and $C_0=200$ ppm, (1) 2,2 g, 70 mm, 0.1779 g/cm³, (3) 2,2 g, 140 mm, 0.0889 g/cm³, (4) 4.4 g, 140 mm, 0.1779 g/cm³

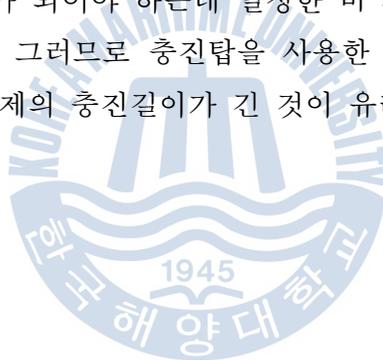
그림으로부터 충전높이를 늘려 충전밀도를 낮추거나(실험③), 충전밀도는 같고 충전량을 2배로 증가시켰을 때(실험④) 파과점 이후의 파과곡선이 모두 “S” 형태로 급격히 상승하고 곧 초기농도에 도달하는 모습은 실험(1)과 일치하고 있다. 그러나 충전높이를 늘려 충전밀도를 낮추면 파과시간이 61분보다 단축된 53분으로서 실험①의 86.9%의 효율을 보였고, $C/C_0=0.5$ 에 해당하는 파과시간은 62분으로 최대흡착용량(W_e)은 실험(1)의 86.1% 수준이었다. 충전량이 같으나 충전높이를 증가시키면 충전밀도가 감소하면서 흡착질과 흡착제의 접촉이 불량해지고 채널링(Channeling) 현상이 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 효과적인 흡착질 제거를 위하여는 흡착제의 적절한 충전밀도가 요구됨을 알 수 있다. 그리하여 충전량과 충전높이를 2배로 증가시켰으나 충전밀도를 같게하면 톨루엔의 파과점이 128분으로서 실험(1)의 2.1배, $C/C_0=0.5$ 에 해당하는 파과시간은 154분으로서 최대흡착용량(W_e)은 실험(1)의 2.14배 이었다. 즉 흡착탑의 단면적이 같은 경우 충전밀도를 같게하고 충전높이를 증가시키면 파과점과 최대흡착용량이 다소 증가하는데 이 때의 증가는 비 사용층 길이(LUB , length of unused bed)가 일정하여 실제 흡착층의 길이가 증가하기 때문이다. 비 사용층 길이는 다음 식에 의하여 계산한다.

$$LUB = L \left(1 - \frac{W_b}{W_e} \right) \quad (11)$$

여기에서 W_e 는 최대흡착용량이고 W_b 는 파과점에서의 흡착량이다. (11)식에 의거한 실험(1)의 비사용층길이는 10.7 mm이었다. 이는 사용층의 길이가 이론적으로 59.3 mm라는 뜻이다. 실험(4)의 경우는 비사용층의 길이가 23.7 mm로서 실험(1)보다 길었다. 실험(4)의 이론적인 LUB 는 실험(1)과 같이 10.7 mm이어야 하므로 실험(4)가 실험(1)과 같이 수행되었다면 실제 흡착층의 길이는 129.3 mm로서 파과점(W_b)시간이 133분이 된다. 따라서 실제 파과점 128분은 흡착제가 다소 불균일하게 충전되었기 때문으로 판단된다. Kim et al (2008)은 ACF 부직포를 여러장 겹쳐 충전높이를 달리하고 톨루엔의 유속을 달리하여 실험한 결과 충전높이를 높게 하고 유속을 느리게 하면 파과점이 늦게 나타난다고 보고하였는데 이는 당연한 결과이다 [47].

4.3.4 충전탑 직경크기에 따른 톨루엔 흡착능력

Fig. 38는 직경 크기가 다른 두 충전탑에 같은 양의 ACF를 충전밀도를 다르게 충전한 후 톨루엔의 흡착능력을 측정한 파과곡선들이다. 즉, 실험(1)은 ACF 2.2 g을 내경 15 mm의 충전탑에 70 mm높이로 채워 충전밀도를 0.1779 g/m^3 되게 하였고, 실험 (5)는 ACF 2.2 g을 내경 30 mm의 충전탑에 35 mm높이로 채워 충전밀도를 0.0889 g/m^3 되게 한 것이다. 그림으로부터 충전높이를 낮춘 실험(5)의 파과곡선도 역시 "S"형태를 보이며 파과점 이후 급격히 상승하여 곧 초기 농도에 도달하는 모습이 실험 (1)과 일치하고 있다. 그러나 충전탑의 직경을 늘리면 파과점 경과시간이 45분으로 실험 (1)의 73.7% 효율을 보였고, $C/C_0=0.5$ 에 해당하는 파과시간은 52분으로서 최대흡착용량(W_e)은 실험(1)의 72.2% 수준이었다. 만약 내경 30 mm 충전탑에 2.2 g을 채워 충전밀도를 0.1779 g/m^3 되게 한다면 높이는 17.5 mm가 되어야 하는데 일정한 비 사용층 길이를 고려한다면 흡착효율은 더 떨어진다. 그러므로 충전탑을 사용한 톨루엔의 연속 흡착은 충전탑의 직경이 작고 흡착제의 충전길이가 긴 것이 유리함을 알 수 있다.



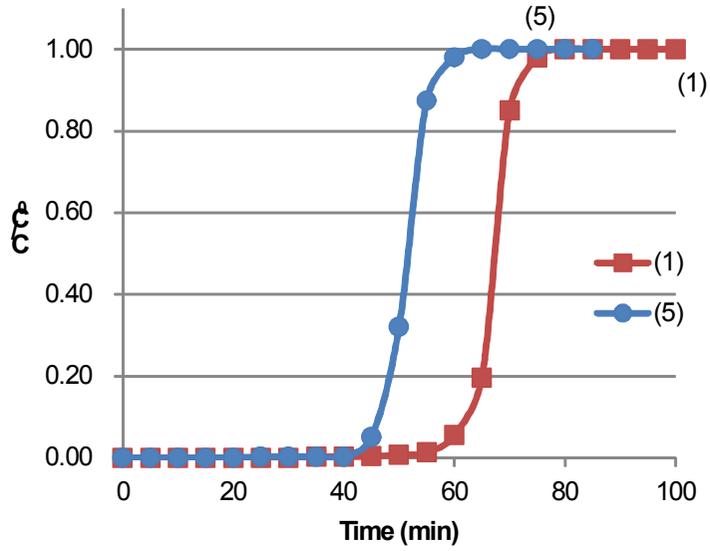
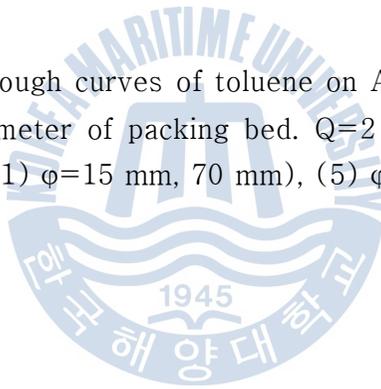


Fig. 38 Breakthrough curves of toluene on ACF (MD-1100) at different diameter of packing bed. $Q=2$ L/min, $C_0=200$ ppm, $M=2.2$ g, (1) $\phi=15$ mm, 70 mm), (5) $\phi=35$ mm, 35 mm



4.3.5 충전탑 온도변화에 따른 톨루엔 흡착능력

Fig. 39는 충전탑이 들어 있는 장치의 온도, 즉 흡착온도를 달리하고 톨루엔의 흡착능력을 측정한 파과곡선들이다. 장치내 온도가 다르면 톨루엔 증기 발생량도 달라진다. 실험(1)은 흡착탑 온도가 25 °C로 흡착탑에 들어가는 톨루엔 초기 농도가 분기공기량에 의하여 200 ppm으로 조절된 경우이며, 실험(6)은 35 °C로 유지된 장치내에서 톨루엔의 초기 농도를 400 ppm으로 조절한 경우이다. 400 ppm 증기량은 식(10)에 의하여 1642.86 mg/m³ 이다. 그림으로부터 톨루엔 농도가 높아짐에 따라 파과시간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. 실험(6)의 파과점은 39분으로 실험(1)의 61분보다 훨씬 빨랐고, 이때의 톨루엔 흡착량(W_b)는 58.25 mg/g-acf 이었다. $C/C_0=0.5$ 에 해당하는 파과시간은 48분으로서 이때의 최대흡착용량(W_c)은 71.69 mg/g-acf 이었다. 이 값들은 실험(1)의 경우보다 큰데 그 이유는 초기농도가 2배로 커졌기 때문이다. 즉, 공기공급량과 ACF 충전량은 같으나 톨루엔의 초기 농도가 증가되었기 때문이다. 뿐만 아니라 일반적으로 흡착은 온도가 높을수록 그 성능이 떨어진다. 한편, 공급농도가 2배로 증가한 반면에 파과점 흡착량은 겨우 15.3%, 최대흡착용량은 23%가 증가하므로서 흡착메카니즘은 Langmuir 식이 적용되고 ACF에 의한 톨루엔의 흡착은 저농도에서 특히 유효할 것으로 판단된다. 새로 출고된 승용차내의 휘발성 유기화합물의 농도가 얼마동안 200 ppm이하를 유지한다면 ACF 부직포 필터를 사용하면 비교적 짧은 시간내에 톨루엔이 제거될 것으로 믿어진다. Kouichi et al. (2009)는 승용차내 VOCs 농도는 실내 온도에 의존성이 크다고 보고하였다 [44]. 즉, 실내 온도 20, 40, 및 60 °C에서 톨루엔의 농도를 측정한 결과 각각 150, 720, 2670 µg/m³으로서 톨루엔 농도는 온도 상승에 따라 기하급수적으로 증가함을 보고하였다. 따라서, 추운 겨울철에 실내 온도가 춥다고 신선한 공기순환 없이 장시간 온풍 상태로 운전하는 일은 좋은 습관이 아님을 알 수 있다.

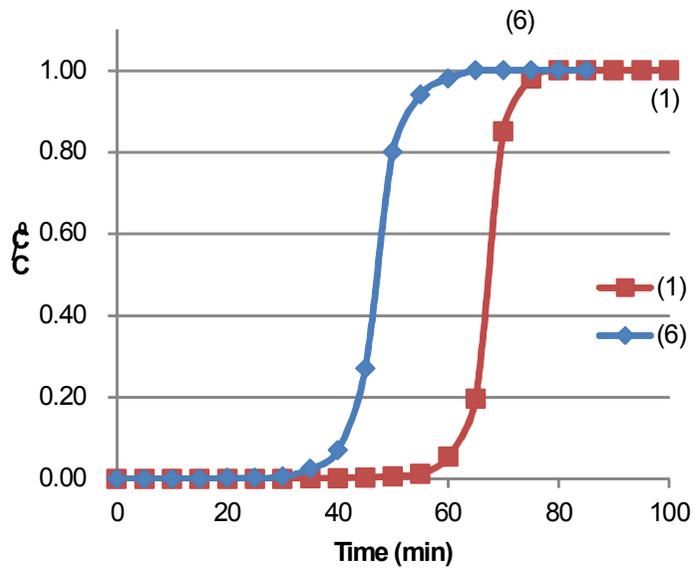
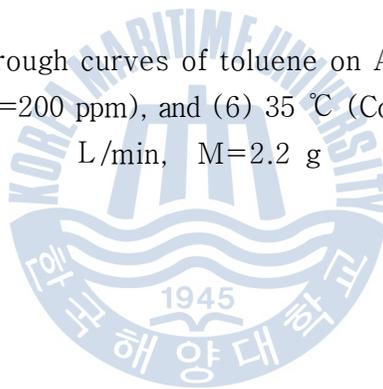


Fig. 39 Breakthrough curves of toluene on ACF (MD-1100) at (1) 25 °C ($C_0=200$ ppm), and (6) 35 °C ($C_0=400$ ppm). $Q=2$ L/min, $M=2.2$ g



4.4 ACF의 흡착 동특성

Cheng et al. (2004)과 Das et al. (2004) 등 여러 연구자들이 활성탄소 충전 흡착탑의 파과곡선으로부터 흡착 동특성을 보고하였으나 ACF 충전탑으로부터의 동특성에 관한 보고는 찾아보기가 힘들다 [72,73]. 그리하여 여기에서는 활성탄소 흡착탑으로부터 제시된 여러 가지 식들 중에서 가장 많이 응용되고 있는 식 (8)의 Yoon과 Nelson식을 ACF 충전탑에 적용하여 새로운 타입의 흡착제에 대한 동특성을 분석하고자 하였다.

$$\ln\left(\frac{C_x}{C_0 - C_x}\right) = \frac{k_v C_0}{\rho_B W_e} t - \frac{k_v L}{V_L} \quad (8)$$

여기에서, 톨루엔 초기 유입농도: $C_0 = 821.43 \text{ mg/m}^3$ (200 ppm), ACF 충전밀도: 0.1779 g/cm^3 , 흡착제 충전높이: 70 mm, 선속도: $V_L = 18.875 \text{ cm/sec}$ (2 L/min, $\phi = 15 \text{ mm}$)이다. $\ln\left(\frac{C_x}{C_0 - C_x}\right)$ 를 시간에 대하여 도시하면 Fig. 40과 같은 선형적인 관계를 보이며, 그림의 기울기 $\left(\frac{k_v C_0}{\rho_B W_e}\right)$ 와 절편값 $\left(\frac{k_v L}{V_L}\right)$ 으로부터 동적흡착용량 W_e 와 속도상수 k_v 값을 계산할 수 있다. 그리하여 Fig. 40을 회기분석하여 시간에 대한 직선식을 구한 결과 기울기 0.475 min^{-1} , 절편값 -31.55 을 얻을 수 있었으며, 따라서, $W_e = 49.52 \text{ mg/g-acf}$ 와 속도상수 $k_v = 85 \text{ sec}^{-1}$ 를 얻었다. 이렇게 구한 동적흡착용량을 Fig. 34의 $C/C_0 = 0.5$ 에서 얻은 실험 실적 최대흡착용량 53.77 mg/g-acf 와 비교할 때 8%이내의 편차로 일치하였다. 그러므로 Yoon과 Nelson식은 새로운 흡착제인 ACF의 톨루엔에 대한 흡착동특성 해석에 적용하여 속도상수와 동적흡착용량을 예측하는데 활용 할 수 있다. 속도상수 k_v 값은 흡착질과 흡착제 종류에 따라 결정되는 상수로서 여러 종류의 VOCs를 실험하면서 속도상수의 변화를 살펴볼 수 있다.

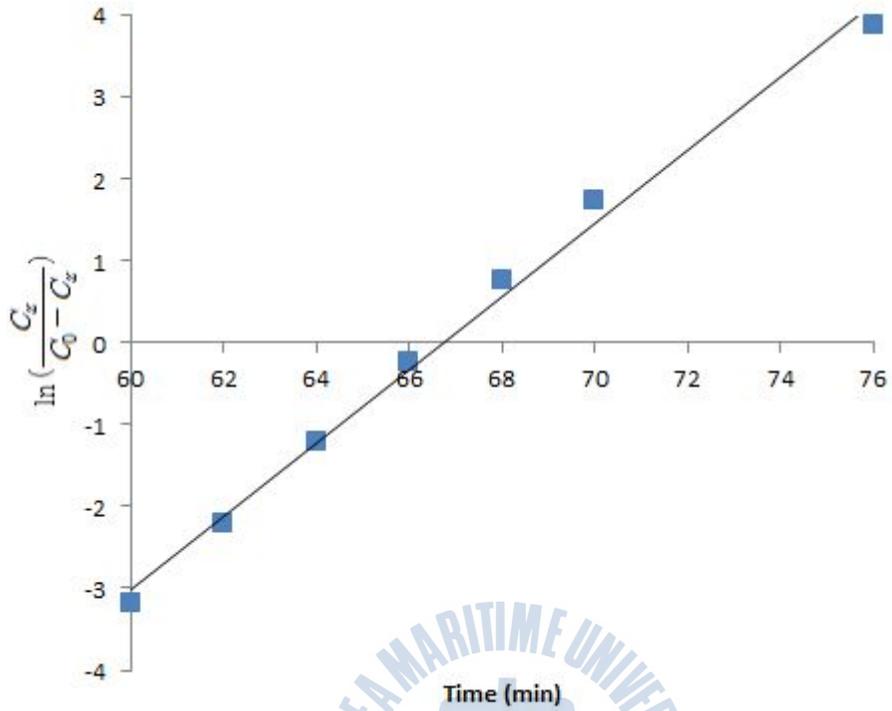


Fig. 40 Time dependence of breakthrough concentration of toluene on ACF(MD-1100)

제 5 장 결 론

승용차의 주행조건을 달리하면서 실내 미세먼지($PM_{2.5}$)와 CO_2 의 농도 변화를 측정하고 실내 공기질 향상조건을 추적하였으며, 활성탄소섬유필터를 제작하여 상용의 폴리프로필렌재질의 부직포 필터 및 폴리프로필렌과 활성탄소를 조합한 콤비네이션 필터와 함께 실내 미세먼지($PM_{2.5}$), CO_2 및 VOC(톨루엔)의 저감효과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주행 중인 차량 실내 초미세먼지($PM_{2.5}$)의 거동을 안정화시키기 위해서는 창문을 닫고 공기순환 작동기를 공기순환모드로, 블로워를 가동한 상태로 주행하면서 공기청정용 필터를 자주 교환할 필요성이 있다.
2. 실내 CO_2 농도는 자주 창문을 개폐하거나 공기순환 작동기를 외기모드로 하였을때 감소하므로 초미세먼지의 경우와 상반되는 결과를 보인다. 따라서 두 오염원을 동시에 제거 할 수 있는 새로운 타입의 공기청정필터가 필요하다.
3. 활성탄소섬유필터(Activated carbon fiber filter, ACF 필터)는 상용의 폴리프로필렌재질의 부직포 필터 및 폴리프로필렌과 활성탄소를 조합한 콤비네이션 필터보다 VOCs 제거에서 월등한 효과를 보여주고 있다. ACF를 충전한 흡착탑에서 여러조건으로 톨루엔 증기를 통과시키면서 흡착동특성을 분석한 결과 ACF의 톨루엔 흡착 파과곡선은 긴 시간의 파과점과 짧은 비사용층 길이를 보이고 파과점 이후는 신속한 “S” 형태 (narrow mass transfer zone)의 파과곡선을 보이므로 톨루엔 증기가 ACF 부직포 필터에 많은 양이 매우 신속하게 흡착됨을 알 수 있다. 이는 ACF에 발달된 세공들이 대부분 미세공들이고 이들에 의한 미세공충진이 기여했기 때문이다.

4. ACF에 2-5 nm 크기의 중기공들이 발달되어 있으면 모세관 응축현상이 더해져서 훨씬 우수한 흡착효과를 얻을 수 있다. ACF에 의한 톨루엔의 흡착은 미세공에 의한 미세공 충전이론과 더불어 중기공에 의한 모세관 응축이론이 함께 적용됨을 밝혔다. 뿐만 아니라 ACF 필터는 미세먼지와 CO₂의 제거에도 상용의 공기 필터와 비교할 때 더 우수한 성능을 보였다. 따라서 승용차 실내 공기질 향상을 위해서는 중기공이 많이 발달된 ACF 필터를 사용하는 것이 요망된다.



NOMENCLATURE

C_e : Concentration at equilibrium (mg/l , ppm)

C_s : Concentration at surface (mg/l , ppm)

P/P_0 : Relative pressure of nitrogen

q : Adsorption amount at equilibrium (mg/g)

T : Activation temperature (K)

r : Radial coordinate for adsorbent

t : Adsorption time (min)

m : Adsorbent weight (g)

θ : Diffraction angle

w : Adsorption amount (g)

N : total number of adsorbent at equilibrium

N_m : the number of molecules in the completed monolayer

$$C = \frac{A_1 v_2}{A_2 v_1} e^{(E_1 - L)/RT}$$

P_0 : saturated vapor pressure [mmHg]

P : vapor pressure [mmHg]

ν_1, ν_2 : vibrational frequency of adsorbate of 1st and 2nd layer

A_1, A_2 : condensation coefficient of 1st and 2nd layer



참고 문헌

1. Kim, C.N. & Lee, Y.K., 2005. A study on concentration change of volatile organic compounds; VOCs by using Mock-up Test. *Journal of the society of air-conditioning and refrigerating engineers of korea*, 17(5), pp.487-495.
2. Kim, D.W., Lee, B.Y., Yang, W.H. & Kim, Y.H., 2005. Indoor air quality in some areas of study on the commercial vehicle, *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, 14(1), pp.20-21.
3. Choi, S.Y., 2001. *Adsorption characteristics of dimethyl methylphosphonate on ACF*. Master's, Chugnam University.
4. Ryu, S.K., 1990. Porosity of Activated Carbon Fibers, *High Temp-High Pressure*, 22, pp.345-354.
5. Korea MOE(Ministry Of Environment), 2012. *Environmental Health Guide for Mothers and Infants*.
6. Sin, D. C., 2006. Health effects caused by pole / fine dust. *Proceedings of Fall at KSEE*, pp.45-45.
7. Seo, J. H., 2010. *The effect of prenatal PM₁₀ exposure on fetal growth and pregnancy outcome*. Ph.D. Ewha Womans University.
8. Kim, B. E., Sa, Y.S. & Kim, H.G., 2004. Dust measurement survey in indoor air research. *RIST Study*, 18(3), pp.241-250.
9. Gwon, O.Y. & Ahn, Y.S., 2006. In-vehicle Pollution under Various Driving Conditions, *Proceedings of fall at KOSAE*, 43(6), pp.564-565.
10. Kwak, J.H., Kim, H.S., Woo, S.J. & Lee, S.H., 2012. Physical characterization of traffic-generated PM₁₀ and PM_{2.5}, *Proceedings of fall at KOSAE*, 51(2), pp.45-45.
11. Kim, D.H., Sin, I.C., Lee, J.H. & Kim, J.Y., 2010. A study on Investigation of Indoor Air Quality of Public Transportation System (Expresss, Intercity bus). *Journal of KOSORE*, 9(2), pp.108-117.

12. Kim, T.G., 2008. *The Study on Management Methods for Air Quality of Subway Train Space*. Master's. University of Seoul(2008).
13. Seaton, et al., 2005. The London Underground: dust and hazards to health, *Occup Environ Med* , 62, pp.355–362.
14. Yang, W.H., Kim, D.W. & Kim, M.H., 2004. Potential Exposure to Air Pollutants for Driver and Its Control Using Commercial Air Cleaning Device Inside Vehicle. *Journal of KSEH*, 30(5), pp.481–486.
15. Korea MOE, 2004. *Indoor Air Quality Management Act as a multi-use facility*.
16. Korea MOE, 2006. *Indoor air quality of public transport management guidelines*.
17. Korea MOE, 2013. *PM_{2.5} Reduction and public health protection measures*.
18. Korea MOE, 2009. *PM-1.0 Research trends*.
19. Press of Korea MOE, 2011.
20. www.iqair.com
21. Park, S.D., 2006. Global Warming and Climate Change An Overview of Tech. *Journal of Energy & Climate Change*, 1(1).
22. Yi, H.I. & Shin, I.C., 2010. Impact of Climate Change on the Ocean Environment in the Viewpoint of Paleoclimatology, *proceedings of Atmosphere Korean Meteorological Society*, 20(3), pp.379–386.
23. Kim, S.B., Kim, J.H. & Kim, J.J., 2012. A Study on the CO₂ Concentration Control in Lecture Room, *Proceedings of fall at KIAEBS*, pp.97–100.
24. Kwon, et al., 2011, Removal efficiency of PM₁₀ & CO₂ in subway mock-up cabin, *Proceedings of spring at the korean society for railway*, pp.613–618.
25. Cho, et al., 2012. Study on the CO₂ & O₂ concentration change upon the breathing of residents, *Proceedings of fall korean society for atmospheric environment*. pp.151.
26. Lee, et al., 1999. Drivers' Emotional Change According to Environmental Change in the Automobile. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 18(2), pp.25–34.

27. Shin, Y.C., Lee, J.H., Kim, J.R. & Kim, D.H., 2010. A study on Investigation of Indoor Air Quality of Public Transportation System, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 9(2), pp.108–117.
28. Sohn, J.R., Choi, D.W., Choi, J.S. & Woo, W.G., 2006. Assesment of Indoor Air Quality within Public Transport Vehicles operating in specified locations throughout Seoul. *Journal of Korean sanitation*, 21(1), pp.12–20.
29. Lee, et al., 1999. Emission Characteristics of Air Pollutants produced from Idling of Vehicles. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 8(1), pp.27–32.
30. Lee, B.S. & Park, J.K., 2006. Comparison about Time Serial Change of Carbon Dioxide's Concentration and Ventilation at Apartment Room. *Journal of Korea Society of Environmental Adminstration*, 12(1), pp.27–36.
31. Kim, Y.S., Hong, S.C. & Jeon, J.M., 1994. An Investigation of Indoor Air Quality of Public Transportation System in Seoul City. *Kor. J. Env. Hith. Soc.*, 20(1), pp.28–38.
32. Oh, G.S., Jung, G.J. & Im, Y.B., 2010. Impact of Indoor CO₂ Concentration on Work Performance, *Proceedigns of Architectural institute of korea*, 30(1), pp.385–386.
33. www.kma.go.kr
34. www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/
35. www.ashrae.org
36. www.law.go.kr
37. Korea MOE, *Clean air conservation act*.
38. www.kist.re.kr
39. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005. *Prepare plan new car syndrom management standards*.
40. Lee, I.H., Yoo, J.H. & Kim, M.G., 2011. Evaluation of volatile organic compounds emitted from door–trim armrest using micro chamber and 20 L static chamber. *Journal of analytical science & technology*, 24(4), pp.290–297.

41. Lee, Y.H., Seo, J.W., Park, J.H. & Choi, Y.H., 2010. Numerical study on performance assessment and installation conditions of an automotive air cleaner, *Proceedings of spring at KSCFE*, pp.263–270.
42. Cho, Y.M., Park, D.S., Kwon, S.B. & Park, E.Y., 2008. Characterization of volatile organic compounds emission from interior materials of railway passenger cabin. *Journal of the korean society for railway*, 11(2), pp.182–187.
43. Cho, W.K. & Park, K.H. 1998. Evaluation of air quality inside passenger car with operating air quality system. *Journal of the korean environmental sciences society*, 7(5), pp.573–580.
44. Kouichi, Tatsu. & Shinichi, Tanabe., 2009. Measurement of VOC occur in car interior. *Journal of the society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of japan*, 12(153), pp.27–35.
45. Baek, et al., 2011. Adsorption/Desorption properties of VOCs on activated carbon fiber. *Journal of the korea academia-industrial cooperation society*, 12(5), pp.2439–2444.
46. Lee, Y.K., Kim, K.H., Ryu, S.K. & Park, B.S., 2004. Decomposition of NO by Cu-impregnated ACFs. *Journal of korean chem.Eng*, 42(2), pp.196–201.
47. Kim, S.K. & Chang, Y.R., 2008. Adsorption characteristics of toluene in the adsorption bed packed with activated carbon fiber. *Journal of KOSAE*, 24(2), pp. 220–228.
48. Byun, et al., 2009. Adsorption and Desorption Performance of toluene and IPA for ACF and activated carbon. *Journal of Applied chemistry*, 13(1), pp.65–68.
49. Park, J.H., Byun, J.H., Hwang, J.H. & Ji, J.H., 2006. Adsorption and Desorption characteristics of ACF(activated carbon fiber) Filter to Gaseous Benzene, *Proceeding of the 41 st Meeting of KOSAE*, (41), pp.529–530.
50. Son, et al., 2005. *Performance comparison of toluene's adsorption and desorption by activated carbon and activated carbon fiber*. Theories and

- applications of Chem. Eng., 11(5).
51. Sakoda, A. & Kawazoe, K., 1984. *Carbon Fiber*, Marcel Dekker, Inc., New York and Bansal.
 52. Burwell, R.L.Jr., 1977. *Adv. Catal.*, 26, pp.351.
 53. Jeon, H.J., 1992. Introduction to Catalyst, 14.
 54. Seader, J.D. et al., 1998. *Separation process principles*, Wiley:New York.
 55. Weber, W.J. Jr., 1972. *Physicochemical Process for Water Quality Control*, Wiley Interscience, New York, pp.640.
 56. McCabe, W.L., Smith, J.C. & Harriot, P., 1995. *UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING*, Chap 24.
 57. Jonas, L.A. & Swirberly, W.J., 1972. *Journal at Catal.* 24, pp.446.
 58. Yoon, Y.H. & Nelson, J.H., 1984. Application of gas adsorption kinetics I. A theoretical model for respirator cartridge service life. *Journal of AIHA* , 45(8), pp.509–516.
 59. Bohart, G. S., Adams, E.Q. & Am, J., 1920. *Chem. Soc.* 42, pp.523.
 60. Lee, et al., 2006. Status of Worldwide Auto–Cabin Air Quality Study, *Proceedings of fall at KSAE*, pp.495–500.
 61. Suzin, Y., Nir, I. & Kaplan, D., 2000. The effect of flow pattern on adsorption of dimethyl methylphosphonate in activated carbon beds and canisters. *Journal of Carbon*, 38, pp.1129–1133.
 62. Lim, J.S., Paek, S.J., Kim, B.S. & Ahn, W.S., 2000. Adsorption property of DMMP on Impregnated Activated Carbon and prediction of breakthrough time, *Proceedings of KSCBRD*, pp.1–7.
 63. www.airkorea.or.kr
 64. Park, K.J., Choi, J.C., Choi, B.C. & Chung, H.S., 2005. Variation of Background–Atmospheric Concentration of Carbon Dioxide (CO₂) in Korea Peninsula. *Korean Journal of the atmospheric sciences*, 41(6), pp.955–965.
 65. Zhao, L. et.al., 2004. Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM₁₀ and CO while walking along streets in urban

- Guangzhou, China, *Journal of Atmospheric Environment*, 38, pp.6177–6184.
66. Yoon, D.W., Hong, S.M., Kang, H.S. & Kim, H.J., 2005. Indoor air quality inside the car status, *Proceedings of Korean Society for Indoor Enviroment*, 2(1).
67. Wargocki, P., Wyon, D.P. & Sundell, J., 2000. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS):symptoms and productivity. *Journal of Indoor Air*, 10, pp.222–236.
68. Myhrvold, A. & Olesen, E., 1997. Pupil's health and performance due to renovation of schools, *Proceedings of Healthy Buildings/IAQ*, 1, pp.81–86.
69. So, J.S. & Yoo, S.Y., 2008. A Prediction of CO₂ Concentration and Measurement of Indoor Air Quality in the EMU. *Journal of the korean society for railway*, 11(4), pp.378–383.
70. Yoon, K.S., Lee Y.S. & Ryu, S.K., 2011. Propellant Shelf–life Extension by Surface–modified Activated Carbon Fiber. *Journal of Korean Chem. Eng. REs.*, 49(4), pp.443–448.
71. Huang, Z.H., Kang, F., Liang, K.M. & Hao, m.J., 2003. Breakthrough of methylethylketone and benzene vapors in activated carbon fiber beds. *Journal of Hazardous Materials*, 3978, pp.1–9.
72. Cheng, T., Jiang, Y., Zhang, Y. & Liu, S., 2004, Prediction of breakthrough curves for adsorption of ACF in a fixed bed, *Carbon*, 42, pp.3081–3085.
73. Das, D., Gaur, V. & Verma, N., 2004, Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber, *Carbon*, 42, pp.2949–2962.