

응축성 먼지를 고려한 국내 미세먼지 배출 현황

이 임 학 | 서울시립대학교, 환경공학부
연구교수
E-mail : imhack@empal.com

1. 서론

우리나라 국립환경과학원은 대기오염물질 배출원별 기여도를 파악하고 대기정책에 따른 대기질 개선 효과를 파악하기 위하여 CAPSS를 개발하고 구축하였으며, 1999년부터 TSP (PM10 포함) 배출량을 매년 산정해 오고 있다⁹⁾.

이용기 등은 지역별 도시대기 PM10 농도의 입경별 점유율을 분석한 결과 지역에 관계없이 점유율이 가장 높은 구간은 입경 $0.3\mu\text{m}$ 부근이었으며, 다음으로 $2.5\mu\text{m}$ 부근과 $5.0\mu\text{m}$ 부근에서 높게 나타남을 보고하였다¹⁰⁾.

그런데, 일반 대기 중 입자 입경분포 특성과 달리 연소 활동에 의하여 발생한 입자의 입경분포와 밀도 특성은 일반대기 중의 그것과는 다를 수 있을 것이다. 일 예로 박규태는 EURO 4와 EURO 5의 차량의 평균차속에 대한 입자상 물질(PM) 분석 연구에서 차속별 나노입자 분포 결과를 log-normal 형태로 나타낸 결과, 저속(4.2km/h)운행 시 100nm 이상의 나노입자 배출이 높았으나 차속이 증가할수록 EURO 4와 EURO 5 모두 입경 50nm (0.05 μm) 영역에서 배출이 증가하는 경향을 보였다¹⁴⁾.

지난 수 십년간 우리 나라의 국가 먼지배출량은 여과성 먼지에 국한하여 관리를 수행해 왔었다. 이로 인하여 먼지를 배출하는 원인 파악의 정확도에

한계가 있었을 것이며, 여과성 먼지만을 고려한 배출원 관리정책으로 효과적인 먼지 저감효과를 거두는데 분명 애로사항도 존재했을 것이다. 따라서, 본 논고에서는 최근 연구되고 있는 응축성 먼지를 고려한 먼지 배출량을 산정하여 서울과 인천지역에서의 먼지 배출량 관리방안에 대하여 논의해보고자 하였다.

물론 아직까지는 응축성먼지 배출계수의 표본이 많지 않아 먼지 배출량 산정의 정확도에 의문점이 존재하는데, 이는 앞으로 펀드가 투입되어 응축성 먼지 배출계수의 표본을 더 늘린다면 기술적으로 극복 가능하리라 판단한다. 부디 이 글이 응축성 먼지에 대한 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어져 우리나라 먼지 배출량을 저감하는데 조금이나마 일조할 수 있기를 바란다.

2. 현행 대기오염물질 분류 체계

우리나라 환경부는 대기배출원을 CAPSS(Clean Air Policy Support System)으로 운영하고 있었다. CAPSS 배출원 분류체계는 유럽 CORINAIR 배출원 분류체계(SNAP 97)를 기초로 하고 있으며, 2007년부터 배출원 분류체계를 국내 현실에 맞추어 변경하여 운영하고 있었다.

연료연소 배출원은 에너지산업(01), 비산업(02), 제조업 연소(03)로 나누며 제조업의 연소가 아닌 공정 발생 배출은 생산공정(04)에 포함됨. 주유소 및 저유소의 휘발유 증발은 에너지 수송 및 저장(05), 페인트 등의 사용으로 인한 배출은 유기용제 사용(06) 배출원에 해당되었다. 자동차는 도로(07), 항공, 선박, 건설기계 등은 비도로(08) 배출원으로 분류되며 폐기물처리(09) 및 농업활동(10)에 의한 배출원도 포함하고 있었다. 그 외 산불 및 화재는 기타 면오염원(11), 도로 재비산, 건설활동 등은 비산먼지(12), 고기구이, 숯가마 등은 생물성 연소(13) 배출원으로 분류되었다¹⁾.

3. 연소 배출 먼지의 측정

일반 대기 중 입자 입경분포 특성과 달리 연소 활동에 의하여 발생한 입자의 입경분포와 밀도 특성은 일반대기 중의 그것과는 다를 수 있을 것이다²⁾. 일 예로 박규태는 EURO 4와 EURO 5의 차량의 평균 차속에 대한 입자상 물질(PM) 분석 연구에서 차속별 나노입자 분포 결과를 log-normal 형태로 나타낸 결과, 저속(4.2 km/h)운행 시 100nm 이상의 나노입자 배출이 높았으나 차속이 증가할수록 EURO 4와 EURO 5 모두 입경 50nm (0.05 μm) 영역에서 배출이 증가하는 경향을 보였다¹⁴⁾.

표 1. 우리나라 대기배출원 분석

구분	내용	비고
에너지산업연소	점오염원은 대기배출원관리시스템(Stack Emission Management System, 이하 SEMS)을 기반으로 상향식방법(Bottom Up Approach)을 이용하여 배출량을 산정함. 점오염원에서 소비되는 연료를 제외한 나머지 연료를 면오염원으로 분류하며 석유공사, 석탄협회, 도시가스회사 등의 통계자료를 기초로 하향식방법(Top Down Approach)을 이용하여 배출량을 산정함	
비산업 연소		
제조업 연소		
생산 공정	생산 공정에서의 오염물질 배출량은 기본적으로 제품 생산량이나 원료 투입량을 기반으로 산출한다. 생산 공정 부문의 배출계수는 유럽 CORINAIR, 미국 EPA 및 국내조사에서 검증된 배출계수를 적용하며, 방지효율이 고려된 제어(controlled) 배출계수를 적용하였음	
에너지 수송 및 저장	화석연료, 특히 휘발성이 강한 휘발유의 공급으로 인한 VOC 배출량을 산정함	
유기용제 사용	페인트, 잉크, 세탁소 용매 및 가정용품 등 휘발성이 큰 유기용제의 사용에 따른 휘발성 유기화합물 배출량을 산정하며 산업시설 도장, 건축물·비산업용 도장, 세정, 세탁, 기타 인쇄, 가정, 아스팔트 포장 등으로 나누어 산정함	
도로 이동오염원	도로에서 주행하는 자동차로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하며 차종에 대한 분류는 국내의 자동차 관리법 규칙에 따라 분류(승용차, 승합차, 화물차, 특수자동차, 이륜차)함	
비도로 이동오염원	비도로 이동 오염원에 의한 배출량은 자동차 이외의 내연기관을 장착한 철도, 선박운항 및 항공기, 건설장비, 농기계 배출량으로 분류하여 산정함	
폐기물 처리	폐기물 소각, 폐수처리, 매립, 퇴비화 등의 폐기물 처리로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하는 부문이며, 배출량은 생활폐기물과 사업장폐기물(플레이어링 제외)의 소각에 의한 배출량만을 산정함	
농업	농업 부문은 가축의 분뇨관리 및 비료사용으로 인한 암모니아 배출량을 산정함	
기타 면오염원	기타 면오염원은 일반적으로 식생에 의한 오염물질 배출, 습지나 토양에서의 오염물질 배출, 산불 및 화재 등이 포함됨	
비산먼지	비산먼지는 도로운행으로 인한 자동차 재비산 먼지와 사업장 또는 공정상에서 일정한 배출구 없이 대기로 배출되는 먼지를 말함	
생물성 연소	생물성 연소는 고기 및 생선구이, 노천소각, 농업잔재물 소각, 목재난로 및 보일러, 아궁이, 숯가마에서 대기로 배출되는 오염물질을 포함한다. 해당 배출원의 통계 및 설문조사 자료를 활동도로 사용하며 계수는 국내개발 계수를 적용하고 있음	

더구나, 최근에 공부주 등은 석탄, 중유, 경유 등 기준에 먼지 배출원이라고 규정해 왔던 연료들 외에 도시가스에서도 무시할 수 없을 만큼의 먼지

(PM2.5)가 배출된다고 보고하고 있으므로⁷⁾, 기체 연료를 사용하는 시설에서의 먼지 관리방안 수립 마련이 심각하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

표 2. 연소 및 조리 시 먼지 발생 특성 분석 연구

연구자	측정 분석 장비	측정 범위 (μm)	연소 및 조리기구 (연료)	조리 재료	침투 입경 (μm)
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1 ~ 10	숯불	-	0.1 (연소시) 0.6 (끓 때)
			등유 램프	-	0.1
			기름 램프	-	0.1
			등유 히터	-	0.1
			가스 렌지	-	0.1
Wallace et al. (USA, 2008)	SMPS (TSI-3936)	0.002 ~ 0.064	가스 버너	-	0.005 ~ 0.010
L'Orange et al. (USA, 2012)	cascade impactor (NanoMOUDI 125-R, MSP Corp.)	0.01 ~ 10	우드 팻렛 조리 스토브	-	0.22 ~ 0.33
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011 ~ 1.083	모닥불	-	0.123
			석탄	-	0.048
			배설물 케이크	-	0.152
			등유	-	0.062
			LPG	-	0.052
Li et al. (China, 2017)	Electrical Low Pressure Impactor	0.03 ~ 10	액화 가스	Rapeseed Oil	0.2
				Sunflower Oil	0.1 ~ 0.2
				Soybean Oil	0.03 ~ 0.2
				Corn Oil	0.1 ~ 0.2
Abt et al. (USA, 2000)	SMPS (TSI-3934)	0.02 ~ 0.6	가스 오븐	Oven Cooking	0.02 ~ 0.06
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS(TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01 ~ 10	가스 스토브	Cheese grilling	0.041
				pork meat grilling	0.043
				bacon grilling	0.049
				vegetable grilling	0.029
				Olive oil + Chip	0.061
				Peanut oil + Chip	0.049
				Sunflower oil + Chip	0.049
Lee (Korea, 2012)	OPC (Grimm 1.10)	0.3 ~ 20	숯불 직화구이	Beaf	0.35
				Pork	0.35

또한, 도시가스는 우리나라 조리 시설에서 범용적으로 사용하는 연료이므로, 우리나라에서 광범위하게 사용하고 있는 도시가스를 연료로 가동되는 조리시설에서 발생하는 먼지 배출 특성을 분석할 필요성이 매우 높다고 사료된다²⁾.

따라서, 본 절에서는 가정에서 사용되고 있는 도시가스 렌지에 팬을 올려 놓고 기름을 두른 후, 고등어를 조리하면서 가스렌지의 배기장치 가동 유무에 따른 먼지 배출 특성을 입경별 분석을 통하여 수행하였다. 가스렌지 조리과정에서 배출되는 먼지의 입경을 분석하면 가정 및 상업시설의 가스연료 설비의 조리과정에서 배출되는 먼지의 저감방안을 수립하는데 기술적으로 기여할 것으로 기대할 수 있을 것이다²⁾.

조리과정에서 발생하는 먼지의 peak 입경을 Table 1에 나타내었다. Fan 등은 nephelometric particulate monitor를 사용하여 촛불, 등유 램프 및 히터, 기름 램프, 가스렌지 등의 연소기구에서 발생하는 미세먼지를 측정하고, 촛불 끌 때를 제외하면 먼지 분포의 peak 입경이 모두 0.1 μm 로 보고하였는데⁶⁾, 이는 사용기구의 최소 검출한계가 1 μm 이었기 때문일 것으로 추정되었다. Wallace 등은 10분 동안 가스 버너를 연소시킨 후 발생한 먼지를 불을 끈 후 5분~37.5분까지 SMPS 기기로 분석하여 peak 입경이 0.005~0.010 μm (5~10 nm)로 나타남을 보고하였다¹⁰⁾. 이 실험은 불을 끈 후 시간이 지나면서 관측되는 먼지의 입경이 커지고 있음을 의미하고 있었다¹⁰⁾.

L'Orange 등은 Wood Pellet Cook Stove으로부터 배출되는 먼지를 cascade impactor로 측정하여 먼지의 peak 입경이 0.22~0.33 μm 로 나타남을 보고하였다⁹⁾. 이는 바이오매스를 연료로 사용하는 조리기구로부터 발생하는 먼지는 가스 기구로부터 발생하는 먼지 입경보다는 수 십배 크다는 것을 의미한다⁹⁾.

Tiwari 등은 Condensation Particle Counter를 사용하여 연료별 먼지의 peak 입경을 산정한 결과 장작불이 0.123 μm , 석탄이 0.048 μm , 우분 케익이 0.152 μm , 등유가 0.062 μm , LPG 가 0.052 μm 로

나타났음을 보고하였다¹²⁾.

Li 등은 팬 위에 유채씨유, 해바라기씨유, 콩기름, 옥수수기름 등을 두르고, 액화가스를 연료로 하여 가열한 후 발생먼지의 peak 입경을 Electrical Low Pressure Impactor를 사용하여 측정하고, 유채씨유 사용 시 0.2 μm , 해바라기씨유 사용 시 0.1~0.2 μm , 콩기름 사용 시 0.03~0.2 μm , 옥수수기름 사용 시 0.1~0.2 μm 로 보고하였다(Li et al., 2017). Abt 등은 Gas Oven을 사용하여 오븐 요리를 할 때, SMPS를 사용하여 peak 입경을 조사한 결과 0.02~0.06 μm 로 보고하였다⁵⁾.

Buonanno 등은 SMPS/APS(TSI)와 Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI) 기기를 사용하여 가스 스토브 조리 시 발생하는 먼지의 peak 입경을 실험한 결과 Cheese grilling에서 0.041 μm , pork meat grilling에서 0.043 μm , bacon grilling에서 0.049 μm , vegetable grilling에서 0.029 μm 를 나타내었다고 보고하였으며, Olive oil + Chip에서 0.061 μm , Peanut oil + Chip에서 0.049 μm , Sunflower oil + Chip에서 0.049 μm 로 보고하였다⁸⁾.

이준복은 OPC (Optical Particle Counter)를 활용하여 쇠고기와 돼지고기를 숯불에서 직화구이로 조리할 때, 발생하는 미세먼지를 입경별로 측정했는데, 최소 사이즈인 0.35 μm 에서 peak 농도를 나타내었다¹¹⁾.

위 결과에서 나타났듯이 연소먼지의 측정에 있어 측정기구의 선택이 매우 중요하며 수나노~수십나노미터까지 측정가능한 기기를 측정해야 연소활동으로 만들어지는 먼지가 정상적으로 측정분석이 가능할 것으로 판단되었다.

4. 여과성 먼지와 응축성 먼지를 고려한 우리나라 먼지 배출량 산정

미세먼지는 발생에 따라 크게 1차 생성 입자와 2차 생성 입자로 구분되며, 1차 생성입자는 대부분 여과성 입자 (FPM)와 응축성 입자 (CPM)로 구분되

고 주로 PM-10과 PM-2.5의 범위 내에서 존재하고 있다. 여기서 CPM은 대기 중에 기체상으로 배출되어 응축 또는 냉각 등으로 생성되며 PM-2.5 보다 작은 형태로 존재 한다(US EPA, 2012; NARSTO, 2003; W.M.Hodan and W.R.Barnard, 2004). 이러한 CPM에 SO₂와 NO_x가 대표적인 전구물질(precursor)에 해당되며, VOCs, EC/OC, NH₃ 등의 물질 또한 입자 응축에 관여한다(Eddie Terrill et al., 2006)고 알려져 있다. 배출구에서 배출되는 오염물질은 여과성(Filterable) PM과 응축성(Condensable) PM으로 크게 분류 할 수 있다. 먼저 FPM은 초기 배출시점에서 존재하는 입자의 크기는 2.5~10 μm 크기로 구성되며 고체 및 액상으로 존재한다.

CPM은 배출구에서 가스로 배출되어 짧은 시간 내에 대기 중 차가운 공기와 접촉하면서 짧은 시간 내에 응축되어 대부분 2.5 μm 이하의 입자 크기로 존재한다. CPM은 organic PM과 inorganic PM으로 구성되어 있고, 최근 배출원에서 청정연료라고 알려진 LNG 사용이 증가하는 추세이기 때문에 앞으로 organic PM이 중요해질 전망이다¹³⁾.

지금까지 우리나라 CAPSS에서 산정된 고정배출원에서의 입자상 물질(TSP, PM10, PM2.5) 배출량은 여과성 먼지(filterable PM, FPM) 만을 산정하였을 뿐, 응축성 먼지(condensable PM, CPM)를 고려하지 않았다. 일반대기 중에서 산정하는 먼지는 여과성 먼지와 응축성 먼지를 구별하고 있지 않으나, 배출원에서의 먼지는 여과성 먼지와 응축성 먼지를 구별하여 측정할 수 있으며, 또한 측정하여야 한다. 배출원에서 배출되는 총먼지(total PM, TPM)는 그림 1과 같이 여과성 먼지와 응축성 먼지로 구성되기 때문이다⁹⁾.



그림 1. 여과성 먼지(FPM) 응축성 먼지(CPM), 총먼지(TPM)과의 관계

배출가스 중 FPM 측정은 기존에 확립되어 있는 U.S. EPA의 Method 201A를 바탕으로 국내 실정에 맞게 만든 공정시험기준 측정방법 (ES 01317.1, MOE, 2014)을 이용하여 pilot scale과 field scale에서 cyclone을 이용하여 미세먼지를 등속흡인 (95~110%) 하여 측정하며, CPM 측정은 U.S. EPA의 Method 202 측정방법을 바탕으로, FPM 측정에서 사용하는 프로브 후단에 응축기를 연결하여 FPM과 CPM을 동시에 측정한다.

측정이 완료되면 각 시험방법별로 FPM 및 CPM의 필터와 회수액을 회수한 뒤 각각 방법에 따라 전처리 및 분석을 실시한다. 굴뚝에서 배출된 먼지 및 가스는 노즐을 통해 들어와 cyclone으로 입경이 분리되고 필터 홀더 안에 있는 필터에 FPM이 포집된다. 그 후 필터를 지나 condenser를 거쳐서 나온 응축성미세먼지는 흡수병1과 흡수병2 사이와 흡수병2와 흡수병3 사이에 있는 필터 홀더에 설치된 필터에 포집된다. Condenser는 가스 및 수분을 응축시키고, SO₂로부터 생성되는 잠재적인 물질을 저감하기 위하여 사용하는 것이며 흡수병은 응축성 미세먼지의 유기 및 무기 물질을 측정하는 것으로, 흡수병1 (응축된 수분을 잡아주는 흡수병)과 그 뒤에 있는 흡수병2 (뒤받쳐주는 흡수병-변형된 그린 버드스미스 형) 안에 CPM이라 칭하는 미량의 무기물질과 유기물질이 채취된다. 이어서 CPM 포집을 위해 사용되는 필터는 47 mm 혹은 그보다 큰 크기에 비반응성, 비분해성 필터여야 하고, 유기물을 함유하지 않는 99.95% 이상의 포집률을 보이는 필터여야 한다⁷⁾.

일반적 먼지 포집 방법은 여지 부분이 100~190℃의 범위에서 동작하고 있기 때문에 크기가 매우 작은 응축성 미세먼지는 여지에 잡히지 않고 통과하게 된다¹⁶⁾. 응축성 먼지는 굴뚝 내부의 고온조건에서는 기체상이지만, 굴뚝에서 배출 즉시 주위 공기의 냉각작용으로 응축하여 고체 또는 액체를 형성한다. 현재 대부분의 국가들은 필요성을 느끼지 않았기 때문에 응축성 미세먼지를 통상적으로 측정

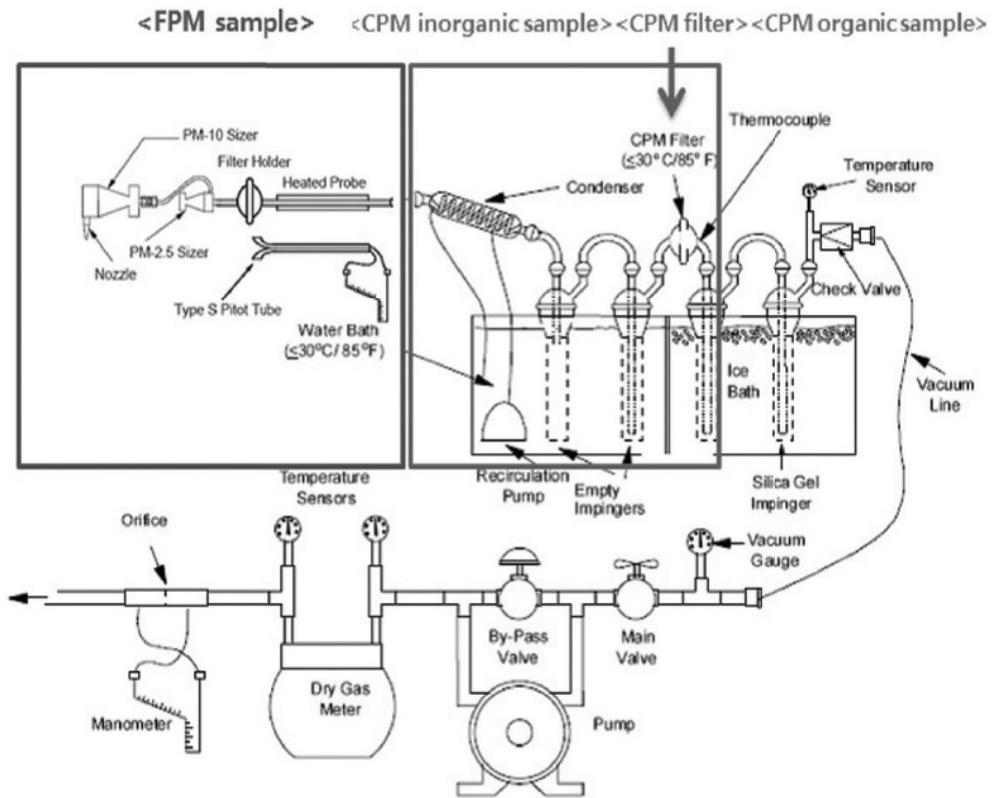


그림 2. 여과성 먼지 및 응축성 먼지 측정 장비 (공부주 등 2016)

하지 않았다. 응축성 미세먼지는 PM2.5의 중요한 부분을 차지하기 때문에 응축성 미세먼지가 PM2.5에 포함되어 있지 않은 경우 배출원에서의 먼지배출량은 실제보다 과소평가 될 것이다⁸⁾. 이에 우리나라 국립환경과학원에서는 2014년과 2015년에 고정오염원 중 일부 시설에 대하여 먼지배출량 측정방법 중 응축성 미세먼지 측정법을 추가하는 작업을 수행했으며, 연료별 배출계수도 공개하였다^{13, 14)}.

따라서, 본 절에서는 우리나라 현재 여과성먼지 위주의 CAPSS 배출량에 고정오염원의 CPM 배출량을 추가로 고려한 먼지 배출량을 산정하여 지자체별로 기존 여과성먼지만을 고려한 배출량과 응축성 먼지를 고려한 배출량을 비교한 후, 차이가 난다면 현 먼지관리정책을 어떻게 보완해야할 지

를 생각해 보았다. 본 절의 연구방법과 결과, 고찰, 결론은 이임학 등이 2017년에 한국대기환경학회에 보고한 자료를 인용한 것임을 밝힌다.

본 절에서 사용한 CAPSS 데이터는 국립환경과학원 홈페이지로부터 엑셀형식으로 다운받은 2013년 데이터를 가공하여 사용하였다. 다음은 CPM 배출계수에 대한 산정방식의 설명이다. 국립환경과학원(NIER (2015)에서 발표한 우리나라와 미국의 고정오염원 CPM 배출계수는 표 3과 같다. 위로부터이며, LNG, 경유, 벙커 C유는 방지시설이 없는 상태의 보일러에서 측정된 값이고, 유연탄 배출계수는 발전소 방지시설 후단에서 측정된 값이었다.

LNG, 경유, 벙커 C유, 유연탄의 경우에는 CAPSS

표 3. CPM 배출계수

연 료	TPM	FPM	CPM	단 위	비 고
LNG 보일러	206.67	3.79	202.88	mg/m ³	uncontrolled
경유 보일러	65.78	3.38	62.40	mg/L	uncontrolled
B-C유 보일러	371.47	143.83	227.64	mg/L	uncontrolled
유연탄 화력발전소	71.65	6.55	65.10	g/ton	controlled

표 4. 지역별 TPM , FPM, CPM 배출량

(단위 : ton/yr, %)

지역	구분	소계	비산업연소	생산공정	에너지산업연소	제조업연소	폐기물 처리	농업	기타면오염원	도로이동오염원	비도로이동오염원
서울	TPM	8,430.3	6,252.8	0.0	694.3	24.0	18.2	0.0	54.2	735.9	650.9
	FPM	1,807.2	334.0	0.0	12.7	1.3	18.2	0.0	54.2	735.9	650.9
	CPM	6,623.1	5,918.8	0.0	681.6	22.7	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
인천	TPM	23,791.6	1,286.8	332.5	19,106.2	2,053.1	13.7	0.0	15.2	377.3	606.9
	FPM	2,322.4	42.7	332.5	532.8	401.3	13.7	0.0	15.2	377.3	606.9
	CPM	21,469.2	1,244.1	0.0	18,573.4	1,651.8	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C

N/C : Not Calculated

상의 PM2.5 배출량에 표 1의 여과성 먼지배출계수 대비 응축성 먼지의 비율을 곱하여 산정하였다. 즉, LNG의 경우 $202.88 / 3.79 = 53.53$ 배, 경유의 경우 $62.40 / 3.38 = 18.46$ 배, 병커 C유의 경우 $227.64 / 143.83 = 1.58$ 배, 유연탄의 경우 $65.10 / 6.55 = 9.94$ 배의 비율을 CAPSS 상의 PM2.5에 곱하여 CPM의 양을 산정하였다. 병커 A유와 병커 B유는 병커 C유의 비율을 적용하였으며, 무연탄의 경우에는 유연탄의 비율을 적용하여 응축성 먼지를 산정하였다.

지역별로 여과성 먼지와 응축성 먼지를 비산업연소, 생산공정, 에너지산업연소, 제조업연소, 폐기물 처리, 농업, 기타면오염원, 도로이동오염원, 비도로이동오염원 등으로 구분하여 산정한 결과를 표 4에 나타내었다.

국내 배출계수를 적용한 서울특별시의 경우 연간 응축성 먼지는 6,623.1톤으로서, 비산업연소

5,918.8톤, 생산공정 0.0톤, 에너지산업연소 681.6톤, 제조업연소 22.7톤으로 산정되었다. 연간 여과성 먼지는 1,807.2톤으로서 비산업연소 334.0톤, 생산공정 0.0톤, 에너지산업연소 12.7톤, 제조업연소 1.3톤, 폐기물 처리 18.2톤, 농업 0.0톤, 기타면오염원 54.2톤, 도로이동오염원 735.9톤, 비도로이동오염원 650.9톤으로 산정되었다. 응축성 먼지와 여과성먼지를 합한 연간 총 먼지는 8,430.3톤으로서 비산업연소 6,252.8톤, 생산공정 0.0톤, 에너지산업연소 694.3톤, 제조업연소 24.0톤, 폐기물 처리 이하는 여과성 먼지량과 같았다.

국내 배출계수를 적용한 인천광역시의 경우 연간 응축성 먼지는 21,469.2톤으로서, 비산업연소 1,244.1톤, 생산공정 0.0톤, 에너지산업연소 18,573.4톤, 제조업연소 1,651.8톤으로 산정되었다. 연간 여과성 먼지는 2,322.4톤으로서 비산업연소 42.7톤, 생

산공정 332.5톤, 에너지산업 연소 532.8톤, 제조업 연소 401.3톤, 폐기물 처리 13.7톤, 농업 0.0톤, 기타 면오염원 15.2톤, 도로이동오염원 377.3톤, 비도로이동오염원 606.9톤으로 산정되었다. 응축성 먼지와 여과성먼지를 합한 연간 총 먼지는 23,791.6톤으로서 비산업연소 1,286.8톤, 생산공정 332.5톤, 에너지 산업 연소 19,106.2톤, 제조업 연소 2,053.1톤, 폐기물 처리 이하는 여과성 먼지와 같았다.

그림 3의 기여도 퍼센트를 보면, 그림 3 a의 여

과성 먼지에서 도로 이동오염원의 비중은 40.7%, 비도로 이동오염원의 비중은 36.0%를 차지하였다. 반면 그림 3 b의 총먼지의 경우에는 도로 이동오염원의 기여도는 8.7%, 비도로이동오염원의 기여도는 7.7%로 줄어든 반면 비산업연소의 기여도는 여과성 먼지만을 고려했을 경우의 18.5%로부터 응축성 먼지를 고려한 총먼지 기준으로는 74.2%로서 총 먼지의 절반에 육박하는 기여도를 보였다.

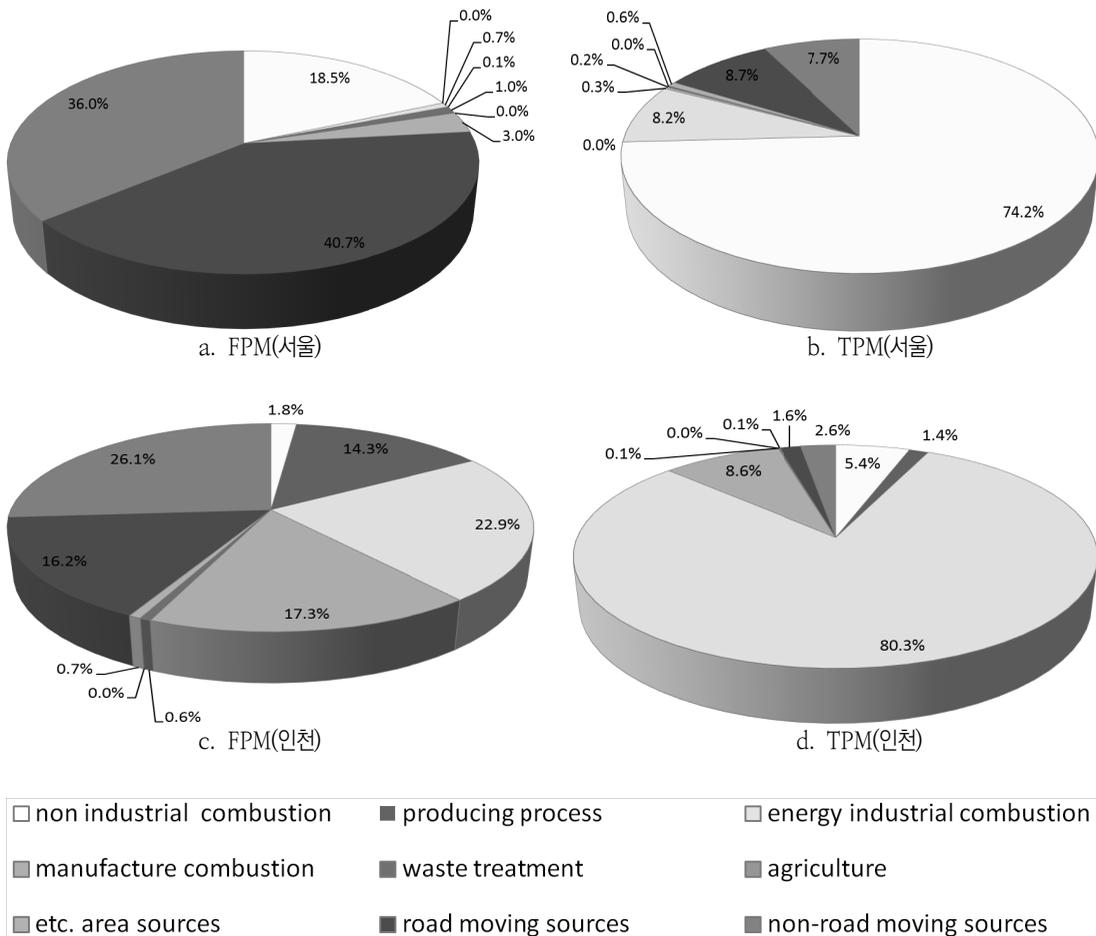


그림 3. 응축성 먼지를 고려하기 전후의 서울과 인천의 먼지 배출량 (2013)

그런데, 서울시의 경우 2016년 7월 ‘서울시 대기질 개선 특별대책’을 발표했다. 세부내용은 ① 주요 발생원(자동차 비산먼지)+교통수요 관리, ② 2.5톤 이상 노후 경유차, 관광용 등 전세버스, 서울진입 경유버스등 집중 관리, ③ 한양도성 내부 1호 '녹색 교통진흥지역', 대중교통 중심으로 ④ (초)미세먼지 경보제 세분화 등 정보공개 촘촘히, 대기질 연구 모니터링도 병행 ⑤ '18년까지 3년간 집중 시행으로 서울 연평균 미세먼지 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성 목표 등이었다(Seoul, 2016).

기존 CAPSS에 의한 배출원 분석 방법에 의하여 서울시는 응축성 먼지를 고려하지 않고 여과성 먼지만을 고려하게 되면, 도로 및 비도로 이동오염원의 배출량이 그림 3 a처럼 대부분(76.7%)을 차지하였기 때문에, 먼지저감 정책도 이동오염원에서의 배출량 저감에 무게중심을 둘 수밖에 없었을 것이다. 그런데, 응축성 먼지를 고려하게 되면 제일 많은 기여도를 보이는 배출원이 그림 3 b처럼 비산업 연소가 되기 때문에 향후 서울시 먼지저감 정책은 고정오염원 중 비산업 연소부분에 대한 저감정책을 추가로 수립하는 보완작업이 필요할 것으로 판단되었다.

물론 기존 환경부의 배출원 배출량 산정방법에서는 먼지에 있어서만큼은 청정연료라고 공인하였던 기체상 연료(LNG, LPG 등)에 의한 먼지 관리방안이 활성화되어 있지 않기 때문에 서울시가 기체상 연료에 의한 배출량 산정과 저감정책을 수립하기 위해서는 중앙정부와의 협력업무 수행도 필요하게 될 것이다.

인천의 경우 여과성 먼지에 응축성 먼지를 고려하면 에너지산업 연소와 제조업 연소에서 증가분이 총먼지에서의 증가분 중 대부분으로 분석되었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 카테고리별 기여율을 분석하면, 그림 3 c의 여과성먼지기준에서는 비도로 이동오염원, 에너지산업연소, 제조업연소, 도로이동오염원이 큰 차이 없는 기여도를 보여주

고 있었으나, 응축성먼지를 고려한 그림 3 d의 총먼지 기준은 에너지산업연소가 80.3%, 제조업연소가 8.6%를 차지하는 것으로 분석되었다.

인천시는 2016년 6월 ‘2020 미세먼지 종합대책’을 발표하였다(Incheon, 2016). PM2.5 배출원 기여도 분석에서 발전소 35%, 건설기계24% 사업장 15%, 도로이동차량 12% 등으로 발표했는데, 대부분이 2차 생성 먼지로 발표하였고 응축성 미세먼지에 대한 기여도 분석 자료는 찾아보기 어려웠다.

2015년에 국립환경과학원에서 우리나라 발전소 및 보일러의 응축성 미세먼지 배출계수를 보고하였으므로, 인천시에서는 PM2.5의 대부분이 2차 생성에 의한 배출이라고 보고(Incheon, 2016)한 점을 향후에는 수정보완 연구가 수행될 필요성이 있다고 판단되었다. 생성기작이 달라지면 저감정책 또한 달라져야 할 것이므로 향후 인천시에서는 응축성먼지를 고려한 저감정책도 연구하여 보완해야 할 필요성 또한 고려해야 한다고 사료되었다.

표 5에 서울 지역 비산업 연소 category에 대한 사용 연료별 여과성 먼지와 응축성 먼지의 배출량을 나타내었다. 여과성 먼지는 주거용 무연탄 부문이 52.1%로 가장 높게 나타났고 주거용 24.7%로 그 뒤를 이었으나, 응축성 먼지는 주거용 LNG 부문이 74.5%로 절대적인 비중을 차지하였고, 그 뒤를 주거용 무연탄이 차지하였다.

표 6에 인천 지역 에너지 산업 연소 category에 대한 사용 연료별 여과성 먼지와 응축성 먼지의 배출량을 나타내었다. 여과성 먼지는 공공발전 LNG 부문이 40.7%로 가장 높게 나타났고 공공발전 무연탄 부문이 39.7%로 그 뒤를 이었다. 응축성 먼지에서도 공공발전 LNG 부문이 62.5%로 절대적인 비중을 차지하였고, 그 뒤를 민간발전 LNG 부문이 27.4%를 차지하였다. 위와 같이 서울과 인천지역의 응축성 미세먼지 배출량은 주로 LNG 연소에 의한 배출량 비중이 높게 나타났다.

표 5. FPM and CPM (서울 CAPSS 비산업 연소 부문)

(단위 : ton/yr, %)

Item	Seoul			
	FPM	%	CPM	%
Residential_anthracite	174.1	52.1	691.1	11.7
Residential_kerosene	1.1	0.3	17.3	0.3
Residential_diesel	0.1	0.0	1.2	0.0
Residential_LPG	0.2	0.1	1.4	0.0
Residential_LNG	82.4	24.7	4,411.8	74.5
Commercial & Public_kerosene	0.4	0.1	6.0	0.1
Commercial & Public_diesel	3.5	1.0	35.6	0.6
Commercial & Public_LPG	1.1	0.3	63.7	1.1
Commercial & Public_LNG	4.6	1.4	245.7	4.2
Commercial & Public_bunker oil	17.1	5.1	13.7	0.2
etc.	49.3	14.8	431.3	7.3
sum	334.0	100.0	5,918.8	100.0

표 6. FPM and CPM (인천 CAPSS 에너지산업 연소 부문)

(단위 : ton/yr, %)

Item	Incheon			
	FPM	%	CPM	%
Public generation_LNG	217.0	40.7	11,614.4	62.5
Public generation_bituminus	211.5	39.7	1,665.6	9.0
Private generation_LNG	95.0	17.8	5,085.9	27.4
Private generation_diesel	0.0	0.0	0.7	0.0
Petroleum refining_bunker oil	5.5	1.0	2.0	0.0
Petroleum refining_LNG	1.0	0.2	55.2	0.3
District heating_LNG	2.8	0.5	150.3	0.8
sum	532.9	100.0	18,574.1	100.0

우리나라는 아직까지 연소배출원에 대한 먼지 배출량 인벤토리 중 응축성 먼지를 고려하지 않고 있다. 측정 대상의 숫자를 늘려 국립환경과학원에서 보고¹⁴⁾한 응축성 먼지 배출계수의 대표성을 지금보다 높인다면 향후, 응축성 먼지를 고려한 배출량을 입력하여 도출한 대기질 모델링 결과와 기존의 1차 및 2차 먼지만의 기여율로 산정된 대기질 모델링

결과와의 비교 작업이 수행되면 흥미로운 결과가 도출될 것으로 판단되었다.

지금까지 고려되지 않았던 응축성 먼지 배출량이 공식적으로 산정되어 통계 체계로 들어오면 기존에 유지해 오던 지자체별 먼지 총량 할당제, 사업장의 배출부과금, 환경영향평가, 배출원별 특성을 각각 다르게 나타내는 지자체별 대기환경 개선

방안 수립 등의 문제는 어떻게 풀어가야 할 것인지에 대한 대책이나 계획도 새로운 관점에서 고민되어야 할 것으로 사료되었다.

또한, 본 연구에서 설정한 CAPSS category 중 응축성먼지를 산정하지 않은 폐기물 처리, 농업, 이동오염원(특히 CNG 버스 포함)에 대해서는 차후의 연구가 수행되어 완성도 높은 국가 응축성 먼지 배출량 인벤토리가 구축되기를 기대한다.

5. 결론

국립환경과학원에서 보고한 응축성 먼지의 배출계수를 활용하여 CPASS에 적용시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

응축성 먼지의 고려 여부에 따라 서울과 인천 지역에 대하여 각기 다른 패턴의 배출원의 기여도를 보였다. 여과성 먼지만을 고려했을 때에는 주로 이동오염원의 비중이 높았으나, 응축성 먼지를 고려하면 서울은 비산업연소의 기여도가 높아졌으며, 인천 지역은 에너지 산업 연소의 비중이 높아졌는데, 향후 우리나라 지방도시에 계획 중인 집단에너지시설 및 제조업 연소시설의 경우, 입지 적정성 파악 시 응축성먼지 배출량을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

따라서, 국가적으로 먼지문제를 해결하려면 응축성 먼지의 고려가 필요하며, 지역 배출원이 가지는 특성에 따라 배출량 분석과 진단, 예측 및 대책수립이 적절하게 이루어져야 할 것으로 사료되었다.

연구에 활용된 국립환경과학원의 배출계수가 석탄 화력을 제외하면 주로 방지시설이 설치되지 않은 보일러를 대상으로 하고 있다는 점에서 한계를 가지고 있는데, 완성도 있는 고정배출원에서의 CPM 배출량을 구하기 위해서는 controlled(방지시설 설치) 조건하에서의 CPM 배출계수를 지속적으로 산정하는 연구가 향후에 필요할 것이다.

- 참고문헌 -

1. 국립환경과학원, 국립환경과학원 국가대기오염물질 배출량 서비스, <http://airemiss.nier.go.kr/mbshome/mbs/airemiss/>, 2018. 02
2. 김성미, 이임학, 이경빈, 김진식, 권명희, 2017, “고등어 조리 시 발생하는 미세먼지의 입경 분석”, 한국대기환경학회, Vol. 33, No. 4, pp. 361~369.
3. 이임학, 최두성, 고명진, 박영권, 2017, “고정오염원의 응축성 먼지 배출량을 고려한 서울과 인천의 먼지 관리방안”, 한국대기환경학회, Vol. 33, No. 4, pp. 319~325.
4. Christian L'Orange, John Volckens, Morgan DeFoort, Influence of stove type and cooking pot temperature on particulate matter emissions from biomass cook stoves, Energy for Sustainable Development, 16 (2012) 448-455
5. Eileen Abt, Helen H. Suh, George Allen and Petros Koutrakis, Characterization of Indoor Particle Sources: A Study Conducted in the Metropolitan Boston Area, The National Institute of Environmental Health Sciences, Vol. 108, No. 1 (2000), pp. 35-44
6. Fan, C., Zhang, J., “Characterization of emissions from portable household combustion devices: particle size distributions, emission rates and factors, and potential exposures”, Atmospheric Environment 35 (2001) 1281-1290
7. Gong, B., Kim, Kim, H., Lee, S., Kim, H., Jo, J., Kim, J., Gang, D., Park, J. and Hong, J., “A Study on the Characteristics of Condensable Fine Particles in Flue Gas”, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 32, No. 5, October 2016, pp. 501-512
8. G. Buonanno, L. Morawska, L. Stabile, Particle emission factors during cooking activities, Atmos-

- pheric Environment 43 (2009) 3235~3242
9. Jin, H.A., J.H. Lee, K.M. Lee, H.K. Lee, B.E. Kim, D.W. Lee and Y.D. Hong (2012) The Estimation of PM_{2.5} Emissions and Their Contribution Analysis by Source Categories in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), pp 211~221.
 10. Lance Wallace, Fang Wang, Cynthia Howard-Reed, Andrew Persily, Contribution of Gas and Electric Stoves to Residential Ultrafine Particle Concentrations between 2 and 64 nm: Size Distributions and Emission and Coagulation Rates, *Environmental Science & Technology*, Vol. 42, No. 23, 2008
 11. Lee, Jun Bok, A Study on Characteristics of Particulate Matter Generated from the Under-fired Char broiling of Meat, Department of Environmental Engineering Graduate School, The University of Seoul, 2012
 12. Mahesh Tiwari, Sanjay Kumar Sahu, Rahul Chindhu Bhangare, Ajmal Yousaf, Gauri Girish Pandit, Particle size distributions of ultrafine combustion aerosols generated from household fuels, *Atmospheric Pollution Research* 5 (2014) 145~150
 13. NIER (2014) A Study on the Improvement of Fine Particles Measurement Method in Flue Gas.
 14. NIER(2015) A Study on the Improvement of Fine Particles Measurement Method in Flue Gas(II).
 15. Shuangde Li, Jiajia Gao, Yiqing He, Liuxu Cao, Ang Li, Shengpeng Mo, Yunfa Chen, Yaqun Cao, Determination of time- and size-dependent fine particle emission with varied oil heating in an experimental kitchen, *Journal of Environmental Science*, 51 (2017) 157~164
 16. Tsukada, M., N. Nishikawa, A. Horikawa, M. Wada, Y. Liu and H. Kamiya (2008) Emission potential of condensable suspended particulate matter from flue gas of solid waste combustion, *Powder Technology*, 180(1-2), 140~144.
 17. W.D. Cyrs, D.A.Boysen, G.Casuccio, T.Lersch, T.M.Peters, Nano particle collection efficiency of capillary pore membrane filters, *Journal of Aerosol Science* 41 (2010) 655-664
 18. Yang, H.H., K.T. Lee, Y.S. Hsieh, S.W. Luo, M.S. Li (2014) Filterable and Condensable Fine Particulate Emissions from Stationary Sources, *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 2010~2016.
 19. Yong-Ki Lee, Ki-Jong Lee, Jae-Seong Lee and Eun-Sang Shin, Regional Characteristics of Particle Size Distribution of PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 28, No. 6 (2012) pp. 666~674