

미세먼지 관리기준과 발생원별 관리방안

Regulation Standard of Fine Particles and Control Techniques of Emission Sources

박 해 우 · 조 영 민*

경희대학교 환경응용과학과, 환경연구센터

(2013년 6월 18일 접수, 2013년 7월 29일 수정, 2013년 7월 29일 채택)

Haewoo Park and Young Min Jo*

Department of Applied Environmental Science, Kyunghee University,
Center for Environmental Studies

(Received 18 June 2013, revised 29 July 2013, accepted 29 July 2013)

Abstract

This paper has comprehensively reviewed fine dust control technology from emission sources. Owing to the stringent national regulation, domestic industries have made consistent efforts to develop the high efficiency facilities since 1960s. In these days, harmful particulate pollutants including dioxins and PAHs as well as $PM_{2.5}$ are also of critical interests in government and civic groups. In addition, simultaneous treatment of gas and particles is being widely studied. It is believed that hybrid facilities which integrate a few advanced equipment may meet the atmospheric guidelines.

Key words : Fine dust, $PM_{2.5}$, Dust control, Hybrid equipment, National regulation

1. 서 론

2011년 3월, '환경정책기본법 시행령 제2조' 개정을 통하여 대기환경기준에 초 미세먼지인 $PM_{2.5}$ 의 기준이 신설되었다. 이는 2015년도부터 시행될 예정이며, 24시간 기준으로 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1년 기준으로는 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 설정하였다. 이는 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획('15~'24)시행시점을 고려하여 정해졌으며, 해당 법이 시행되기 전에 측정방법에 대한

충분한 이해, 각 시설별 배출량에 대한 이해, 배출원별 초미세먼지 제어법의 이해를 통해 충분한 대비가 이루어지게 하기 위함이다. 또한 이러한 초미세먼지는 미세먼지와 더불어 그 양이 증가할 때 일별 사망자 발생건수와 일관되지는 않으나 유의한 상관관계가 있으며 (Schwartz *et al.*, 1999), 심폐질환이나 폐암 등과 관련된 질병인자뿐만 아니라 사망률과도 관계가 있다고 발표되었다 (Anderson, 2009). 이는 국내 연구 결과에서도 나타났으며, 특히 65세의 노인과 초등학교 학생 등과 같은 노약자들은 보다 큰 영향을 받는다 (Park *et al.*, 2008). 또한 대기중의 미세먼지는 시야를 가릴 뿐만 아니라 그 농도에 따라 위성신호에 영

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-201-2485, E-mail : ymjo@khu.ac.kr

향을 주기도 한다는 연구결과도 발표되었다(Yu and Hong, 2012). 미세먼지는 물리적인 오염물질일 뿐만 아니라 그 구성성분에 따라 화학적으로도 다양한 특성을 가지고 있기 때문에 알려지지 않은 수많은 영향요소가 존재할 것으로 예상된다.

이러한 연구가 본격적으로 이루어지기 이전인 A.D 50년, Pliny와 Elder가 최초로 산업먼지의 개념에 대하여 언급하였고, Pollux는 A.D. 150년 이집트의 탄광먼지가 문제라고 하였으며, Leonardo da Vinci는 전쟁중 먼지와 독성가스로부터 보호하기 위하여 젖은 섬유류를 사용하여 미세먼지를 제어하는 방법을 이용한 기록이 있다(Kvestoslav, 1998). 시간이 지남에 따라 섬유를 사용한 필터, 전기를 이용한 전기집진기, 액체를 이용한 스크러버, 원심력을 이용한 사이클론 등 다양한 종류의 먼지 포집기술에 대한 연구가 본격적으로 이루어졌으며, 국내에서도 1960~1970년대의 급속한 산업화로 인한 대기오염의 증가와 1980~1990년대부터 환경오염에 대한 대중의 관심이 증대되면서 지속적인 개발 노력을 통하여 PM_{10} 이상의 먼지들은 거의 완벽하게 처리하고 있다. 그렇지만 인체와 재산상에 피해를 주는 먼지는 대부분 $10\mu m$ 이하 크기에 해당되며, $PM_{2.5}$ 의 경우 별다른 여과없이 체내 폐포에까지 도달할 수 있으므로 그 위해성이 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 정부차원에서 보다 작은 먼지, 미세먼지, 초미세먼지를 제어할 수 있는 기술을 지속적으로 연구하고, 개발하고 있다. 본 논문에서는 미세먼지가 다량 발생하는 현장을 중심으로 관리방안과 포집기술에 대하여 포괄적으로 검토하고, 앞으로의 기술방향에 대하여 논하고자 한다.

2. 국내외 미세먼지 규제 현황

국내의 미세먼지 규제 현황은 각 국가에서 적용하는 기술의 타당성을 판단하거나 새로운 기준을 정하고자 할 때에 효과적인 자료로서 활용할 수 있다. 그 중에서도 미국은 환경오염, 특히 대기와 관련된 법령을 가장 먼저 제정했다. 미국의 대기환경법제는 청정대기법(Clean Air Act: CAA)이 그 근간을 이룬다. 1970년 개정 CAA는 연방정부로 하여금 연방대기질 기준(National Ambient Air Quality Standards: NAAQS)을 설정하고 이행계획을 마련하였으며, 이 기준은 5

년마다 심사하여 적절하게 수정하기로 하였다. 이에 1977년, 미국 의회는 연방정부가 정한 연방대기질 기준을 달성하지 못한 지역에 대하여 특별한 요건을 부과하는 한편, 더 나은 대기질을 유지하고 있는 지역에 대해서도 새로운 요건을 부과하였다. 이로인하여 1990년, 또 한번의 개정이 이루어졌으며, 기준을 달성하지 못한 지역에 보다 엄격한 제재를 가하도록 하였다. 이러한 지속적인 개정을 통하여 현재의 기준 물질들을 선정하여 규제하기 시작하였다(Kim, 2002).

유럽연합의 경우 유럽공동체시절에 개최한 1972년 파리 정상회담으로부터 환경규제가 시작되었다. 이후 1987년부터 회원국에 대하여 법적인 구속력이 있는 통일적인 환경법률이 제정되기 시작하였고, 이후 1992년 마스트리히트조약, 1997 암스테르담조약, 2001년 리스조약, 2007년 리스본조약 등을 통하여 전반적인 환경문제에 대하여 구체적으로 다루었다(Shin, 2010a). 이들은 환경보호의 중요성을 일찍 깨닫고 실질적이고, 효과적인 환경보호를 위한 조치들을 적극적으로 마련하였으나 주로 CO_2 등과 같은 기후변화에 대비하는 규제들이 대부분이며, 미세먼지와 관련된 기준은 미국의 진행에 맞추어 유사하게 관리하고 있다.

일본의 경우 기준에 있던 기준을 토대로 1960년대 후반에 심각한 공해문제로 고심하던 지자체가 해당 지역 내의 환경보전을 위한 조례를 제정하였는데, 그 가운데 일부 자치단체는 국가기준보다 엄격한 배출 기준을 수립하면서 보다 본격적으로 대기오염방지를 운용하며, 지역 대기질을 관리하기 시작하였다.

이렇게 각 국에서는 자체적으로 대기환경에 대해 관심을 가지고 각각의 상황에 맞는 규제를 제정해 왔으나 대체로 미국과 유럽의 규제에 맞추어 설정하고 있다. 우리나라도 1978년을 시작으로 현재의 새로운 $PM_{2.5}$ 에 대한 규정에 이르기까지 다양한 변화가 있었다. 이에 현재 가지고 있는 각 국의 미세먼지를 비롯한 각종 오염물질의 기준을 살펴보고 국내의 경우와 비교하여 보고자 한다.

2.1 국외 미세먼지 관리기준

각 국가에서는 자신들 국가의 기준에 적합한 대기환경 기준을 유지하는 것이 일반적이다. 한국, 미국, 일본, 중국 등에서는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 제외하고는 ppm(volume/volume)을 사용하여 나타낸다. 그러나 유럽의 경우 모든 항목에 대하여 $\mu g/m^3$ 을 적용하고 있다.

Table 1. Ambient Air quality standard in world.

	Period	U.S.A ^{a)}	U.K ^{b)}	Canada ^{c)}	Australia ^{d)}	Japan ^{e)}	Hongkong ^{f)}	China ^{g)}	Swiss ^{h)}	EU ^{j)}	WHO ⁱ⁾
SO ₂	1hr	—	0.132	0.334	0.20	0.10	0.30	0.15	—	0.13	—
	24hr	0.14	0.047	0.115	0.08	0.04	0.13	0.05	0.035	0.047	0.008
	1yr	0.03	—	0.023	0.02	—	0.03	0.02	0.0105	—	—
CO	1hr	35	—	—	—	—	25	—	—	—	—
	8hr	9	8.6	—	9	20	9	10.00	—	8.6	—
	24hr	—	—	—	—	10	—	4.0	6.4	—	—
NO ₂	1hr	—	0.105	0.213	0.12	—	0.11	0.15	—	0.105	—
	24hr	—	—	0.106	—	0.04~0.06	0.06	0.10	0.039	—	—
	1yr	0.053	0.021	0.053	0.03	—	0.03	0.05	0.015	0.021	0.105
O ₃	1hr	0.12	—	0.082	0.10	0.06	0.12	0.16	0.060	—	—
	4hr	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	—
	8hr	0.075	0.05	0.025	—	—	—	—	—	0.06	0.050
PM ₁₀	1hr	—	—	—	—	200	—	—	—	—	—
	24hr	150	50	120	—	100	180	150	50	50	50
	1yr	—	40	70	50	—	55	100	20	40	20
PM _{2.5}	24hr	35	—	30	25	35	—	—	—	—	25
	1yr	15	25	—	8	15	—	—	—	25	10
Pb	1mon	1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3mon	0.15	—	—	—	—	1.5	1.5	—	—	—
	1yr	—	0.25	—	0.5	—	—	1.00	—	0.5	—
Benzene	1yr	—	5	—	—	3	—	—	—	5	—
PAH	1yr	—	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—

^{a)}http://epa.gov/air/criteria.html

^{b)}http://uk-air.defra.gov.uk/library/annualreport/air_pollution_uk_2008.pdf

^{c)}http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/reg_e.html

^{d)}http://www.ephc.gov.au/taxonomy/term/34

^{e)}http://www.env.go.jp/kijun/taiki.html

^{f)}http://www.me.go.kr

^{g)}Ambient air quality standard

^{h)}http://www.bafu.admin.ch/luft/00632/00634/index.html?lang=en

ⁱ⁾Air quality in Europe-2012 report

^{j)}WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide

293°C, 101.3 kPa 조건일 때 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, Pb, Benzene, PAH에 대하여 국내와 같은 표기법으로 환산하여 표 1에 비교요약하였다. T는 절대 온도(K), p는 기압(kPa), M은 해당 오염물질의 분자량을 의미한다.

동일 기준을 적용하여 계산한 표 1을 고찰해보면, 각 국가마다 민감하게 관리하고 있는 오염물질의 종류가 다르다는 사실을 확인할 수 있다. 미세먼지에 있어서도 PM₁₀은 관리기준이 서로 다르기도 하지만 PM_{2.5}의 경우, EU와 WHO 기준에 준하여 유사한 관리값을 적용하고 있는 것으로 보인다.

2.2 국내 대기오염 관리현황

국내의 경우에는 표 2에 요약되어 있는 바와 같이 1978년 SO₂에 대한 기준을 최초로 설정한 이후, 각종 기준이 신설되고 변경되면서 여섯 차례의 수정을 거쳐 지금과 같은 기준을 가지게 되었다. 대기 중의 총부유먼지를 뜻하는 TSP는 1983년 개정하여 1993년까지 유지되었으며, 1993년 미세먼지인 PM₁₀ 기준이 신설되어 1995년 이후 적용되고 있다. PM_{2.5}는 앞서 언급한 바와 같이 2011년에 제정되었고, 2015년도부터 시행될 예정이다. 이러한 규제의 변화는 전체적으로 미국과 EU, WHO와 같이 선진국이나 국제기구의 규제기준을 따르고 있으며, 지속적으로 강화되

Table 2. Korean ambient air quality standard (Atmospheric environment yearbook, 2012).

	Period	1978	1983	1991	1993	2001	2007	2011
SO ₂	1 hr	-	-	-	0.25	0.15	0.15	0.15
	24 hr	0.15	0.15	0.15	0.14	0.05	0.05	0.05
	1 yr	0.05	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02
CO	1 hr	-	-	-	25	25	25	25
	8 hr	-	20	20	9	9	9	9
NO ₂	1 hr	-	0.15	-	0.15	0.15	0.1	0.1
	24 hr	-	-	0.15	0.08	0.08	0.06	0.06
	1 yr	-	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03
O ₃	1 hr	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	8 hr	-	-	-	0.06	0.06	0.06	0.06
	1 yr	-	0.02	0.02	-	-	-	-
TSP	24 hr	-	300	300	300	-	-	-
	1 yr	-	150	150	150	-	-	-
PM ₁₀	24 hr	-	-	-	150	150	100	100
	1 yr	-	-	-	80	70	50	50
PM _{2.5}	24 hr	-	-	-	-	-	-	50
	1 yr	-	-	-	-	-	-	25
Pb	3 mon	-	-	1.5	1.5	-	-	-
	1 yr	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5
Benzene	1 yr	-	-	-	-	-	5	5

고 있다.

그러나 아직 시행되지 않은 규정도 있으며, 국내의 경제적 여건이 외국의 상황과 동일하지 않기 때문에 대기환경 기준을 준수하기 위해서는 보다 다양한 방법으로서의 접근이 필요하다. 또한 아황산가스(SO₂)나 일산화탄소(CO)와 같은 후진국형 오염물질은 과거부터 진행된 정부의 청정연료와 저황유의 공급, 저공해자동차 보급확대 등에 의하여 상당히 감소하여 대기환경기준을 충분히 충족시키므로 상대적으로 민감도가 덜한 편이다. 그러나 분석기술의 발달과 배출원의 다양화로 인하여 휘발성유기화합물과 수은을 비롯한 미량 금속원소물질, 그리고 PM_{2.5}의 대기중 농도가 정확하게 측정분석되고 있으므로 이에 따른 관리규정이 조만간 시행될 예정이다(Ministry of environment, 1997).

3. 미세먼지 제어기술

여러 가지 대기오염 물질 가운데 미세먼지는 갈수

록 그 규제가 크게 강화되고 있는 항목이다. 특히 미세먼지의 발생원은 매우 다양하며, 그에 따라 배출되는 미세먼지의 성분, 크기, 양, 화학적 성분 등이 크게 차이가 나기 때문에 각각의 배출 먼지의 특성에 적합한 다양한 방지시설을 설치하여 미세먼지를 제어한다. 이때 대기오염방지시설이란 대기오염물질배출시설로부터 나오는 오염물질을 제거하는 시설로서 환경부령에 정해진 것을 의미한다(대기환경보전법 2013 제2조 12).

표 3은 Lapple(1961)이 정리한 입자의 크기와 입자상(Solid of Liquid) 물질의 종류 및 각각의 적합한 제어장치를 요약한 차트이다. PM₁₀ 입자들에는 금속 흄이나 박무(mist), 안개와 스모그를 유발하는 입자상 물질이 있고, 화석연료의 연소 잔존물인 oil smoke, fly ash, coal dust 등도 10µm 이하에 분포한다. 기타 카본블랙이나 안료분말, 해염 등도 미세한 입자를 구성하고 있으며, 생물입자로서 바이러스와 박테리아도 PM₁₀에 속한다. 한편, PM₁₀ 입자에 대한 제어법을 주목해서 살펴보면 Filter (Cloth collector/High efficiency air filter), Wet Scrubber, Electrostatic precipitators, Ultrasonics 기법 등이 대표적임을 알 수 있다. 이들은 대부분 관성력과 정전기력을 이용한 기계적 포집장치이다. 각 장치들에 대한 기본적인 원리와 종류를 살펴해보았다.

3.1 필터(Filter)

필터는 기상이나 액상 중의 작은 고형물을 제거하기 위한 여과체를 의미한다. 필터는 분진이 함유된 배출가스를 나란히 설치된 여러 개의 필터에 통과시키고 분진을 집진시키는 장치이다. 미세먼지를 제어하기 위해 주로 사용하는 섬유필터는 연소가스로부터 입자상 오염물질을 분리하는, 가장 잘 알려진 도구이다.

필터에 있어서 단일섬유의 포집원리는 그림 1에 요약한 바와 같이 (a) 관성, (b) 차단, (c) 확산, (d) 중력에 의한 메카니즘이 있다.

이렇게 단일 필터섬유 자체도 약간의 분진을 포집하지만, 직물위에 빠르게 쌓인 먼지층이 포집체로서 더욱 중요한 역할을 한다. 미세먼지는 먼지입자층에 의해 더욱 효율적으로 포집된다. 필터는 필터섬유의 종류, 필터형태, 집진기 내의 필터 배치방법, 처리가스가 필터로 유입되는 방법 등에 따라 여러 가지 형

Table 3. Lapple.C.E's range of particle sizes and kind of cleaning equipment (Lapple, 1961).

		Particle diameter, microns (μm)								
		0.0001	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	10,000
Technical definitions	Gas dispersoids									
	Solid			Fume					Dust	
Common atmospheric dispersoids	Liquid				Mist				Spray	
				Smog			Cloud and fog	Mist	Drizzle	Rain
Typical particles and gas dispersoids								Fertilizer		
								Ground limestone		
					Oil smokes			Fly ash		
					Tobacco smoke			Coal dust		
					Metallurgical dusts and fumes				Beach sand	
								Cement		
					Carbon black			Puiverized coal		
		Common gas molecules						Diameter of hair		
								Insecticide dust		
					Combustion nucler			Ground taic		
								Pollens		
					Aitken nucler			Milled flour		
					Atmospheric dust				Red blood cell diameter (7.5μm)	
					Sea salt nucler					
								Lung damaging dust		
				Viruses			Bacteria			
Types of gas cleaning equipment				Ultrasonics				Settling chambers		
							Centrifugal separators			
				Liquid scrubbers						
				Cloth collectors						
								Common air filters		
				High efficiency air filters						
								Mechanical separators		
				Electrostatic precipitators						

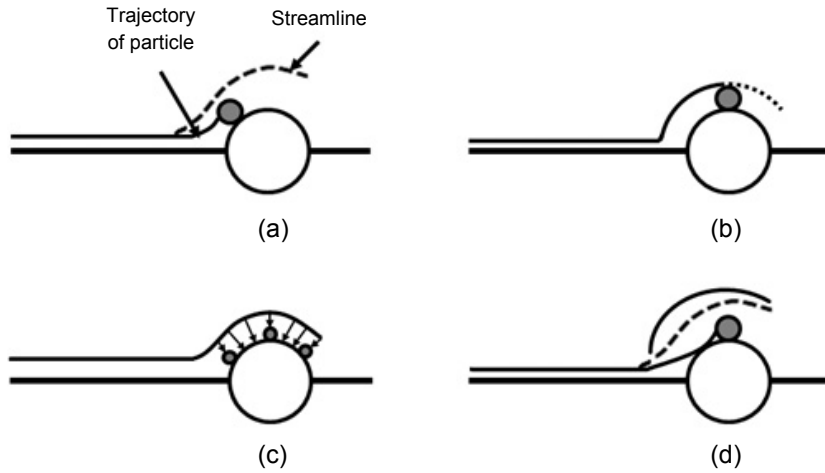


Fig. 1. Particle capture mechanism of filter fiber.

태가 있다.

필터에 의한 미세먼지 처리는 집진효율이 높고, 필터의 형태를 인위적으로 조작할 수 있기 때문에 여러 가지 형태의 분집을 포집할 수 있으며, 설계규모에 따라 다양한 용량을 처리 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 다양한 압력저항의 조건에서 운전할 수 있으며, 다른 집진방식에 비하여 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 다만, 필터의 특성에 따라 고온과 부식성 화학물질이 포함되어 있는 가스를 처리하고자 할 때에는 필터의 잦은 교체가 필요할 수 있으며, 습윤 환경에서는 사용하기 어렵다. 또한 지속적인 교체, 탈진 등의 과정이 요구된다(Cooper and Alley, 2002).

최근에는 미국, 영국, 독일, 러시아, 일본 등에서 세라믹이나 금속 소재인 SiC, Al₂O₃ fiber, sintered metal powder, Al₂O₃-SiO₂ fiber 등을 이용하여 높은 온도(600~1,200°C)와 고압(6~15기압)까지 적용이 가능한 집진필터를 개발하였고, 화학적 내구성을 강화하는 기술과 열적충격에 강한 재질이 개발되고 있다. 특히 세라믹 소재를 이용한 고온, 고압용 필터의 단점인 높은 압력손실 등을 극복하기 위한 SiC 소재의 저밀도 세라믹필터나 테플론 코팅에 의한 유리섬유필터 등이 개발되고 있다(Hong, 2002). 뿐만 아니라 가장 기본적인 원리를 적용한 집진기술이기에 전기집진기술과 사이클론, 여과집진기 자체의 조합 등을 이용하여 Hybrid 집진공정도 활발하게 연구되고 있다.

3. 2 사이클론 (Cyclone)

사이클론은 약 100여 년 전부터 미국을 비롯한 전세계에서 사용되어 왔고, 여전히 모든 산업가스 처리장치 가운데 가장 널리 사용되는 장치 중의 하나이다. 사이클론이 광범위하게 사용되는 주된 이유는 가격면에서 경제적이고, 구조가 간단하며, 가혹한 운전조건에서도 안정적으로 운전할 수 있기 때문이다.

사이클론을 사용함에 있어서 그 자체만으로는 엄격한 대기오염 규정을 만족시킬 수 없지만 비용이 적게 들며, 유지보수가 거의 필요없기 때문에, 다른 최종처리장비의 전처리장비로서 이상적이다. 또한 이를 응용하여 유가물질 회수공정 등에도 다양하게 사용되기도 한다. 그러나 PM₁₀ 이상의 분진에서는 90% 이상의 높은 집진효율을 얻을 수 있으나 작은 크기의 입자를 대상으로 하였을 때에는 낮은 효율을 보인다는 단점이 있다. 강한 선회류를 이용한 관성흐름 원리를 적용하기 때문에 높은 유속으로 인한 압력손실도 무시할 수 없는 약점이라고 볼 수 있다.

그림 2에 도시한 바와 같이 사이클론은 유체의 흐름에 따라 Reverse flow cyclone과 uni-flow cyclone으로 나뉘지만 역방향 흐름식인 Reverse flow cyclone이 가장 일반적이다. 또한 유입구의 형태에 따라 (a) Helical entry나 (b) wrap around entry와 같은 접선유입 형태가 있고, (c) Axial entry 방식의 축상유입 사이클론이 있다.

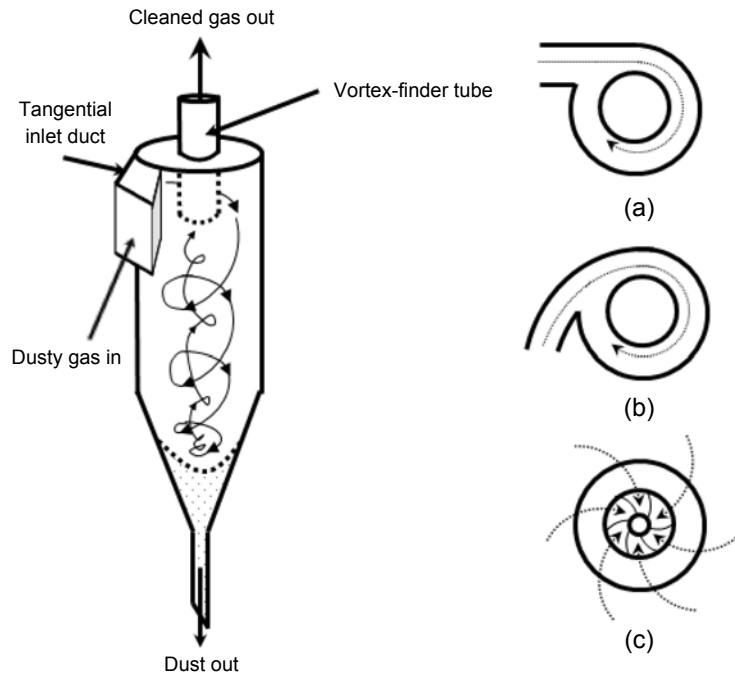


Fig. 2. Standard cyclone with inlet shape (Copper and Alley, 1994).

사이클론의 집진효율에 영향을 끼치는 요소로는 가스의 밀도, 유입구의 폭, 유효 회전수, 유입가스의 속도, 입자와 가스의 밀도차 등이 있으며, 처리량 혹은 집진효율에 따라 다양한 규격의 표준 사이클론이 제시되어 있다.

최근에는 기존의 사이클론으로부터 배출되는 미세 입자를 추가적으로 제거할 수 있는 PoC (Post cyclone) 라는 보조장치가 개발되기도 하였다 (Plomp *et al.*, 1996). 그림 3에 도시한 이러한 PoC는 간단한 디자인, 낮은 비용, 입자상 물질의 재회수가 가능하다는 장점이 있으며, 기존 사이클론의 유출구가 PoC의 유입부가 되는 형태로 장착하는 구조로서 별도의 동력원이 필요없다는 장점이 있다. 이로부터 추가적인 효율증대효과가 있으며, 1차 배출된 오염물질의 유입위치에 따라 최대 40~50%의 회수율을 보였다 (Jang *et al.*, 2008).

또한 사이클론과 전기집진기의 원리를 복합적으로 적용한 electro-cyclone을 한국기계연구원에서 개발하였으며 (Ministry of environment, 2008), 한국에너지기술연구원의 여과포 집진방식과 사이클론의 원리를

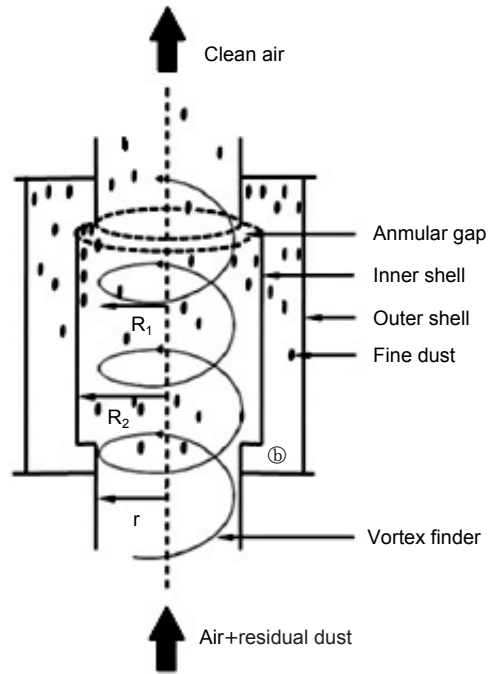


Fig. 3. Schematic diagram of PoC (Jang *et al.*, 2008).

집복시킨 Cybag-filter의 개발(Park, 2007) 등 타 집진 장비와의 융합기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

3.3 스크러버 (Scrubber)

오염물질을 습식공정으로 제거하는 장치를 뜻하며 ‘세정집진기’라고도 칭한다(그림 4 참고). 스크러버의 원리는 세정액(일반적으로 물)과 직접적인 접촉에 의해 충돌(Inertial impaction)과 차단(Interception), 응

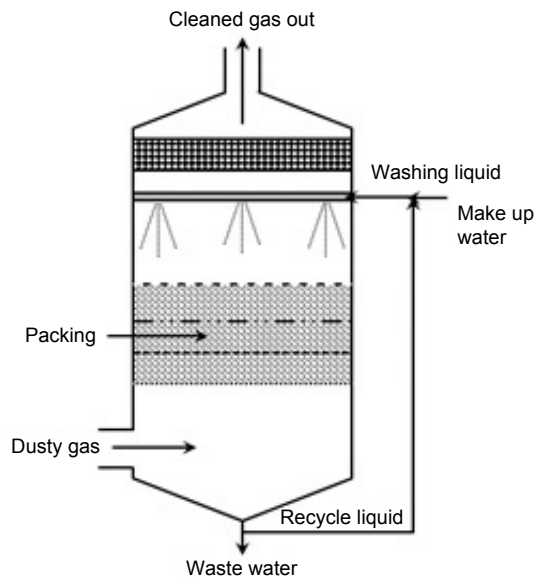


Fig. 4. Schematic diagram of typical scrubber (Oh et al., 2004).

축(Condensation)의 원리로 먼지입자를 제거한다(Oh et al., 2004). 이는 자연계에서 이루어지는 습식침강(Wet deposition)의 원리인 wash out현상을 기계화 시킨 것으로 액체의 물성에 따라 미세먼지뿐만 아니라 가스상 오염물질을 동시에 처리할 수 있다. 스크러버의 규격은 사용되는 액체와의 접촉표면적, 세정에 필요한 에너지 공급방법, 액체의 순환속도, 액체의 종류, 스크러버의 형태 등에 따라 다양하게 구분하고 있다.

스크러버의 경우 가연성, 폭발성 먼지를 안정적으로 처리할 수 있으며, 제거 가능한 입자의 크기는 1 μ m 이상이다. 단일장치에서 미세먼지와 가스를 동시에 처리하기 위하여 배출가스의 화학적 특성에 준하여 산 또는 알칼리성 세정액을 사용할 수 있다. 연소공정에서 발생하는 고온가스를 냉각시키는 효과가 있고, 그로 인하여 집진효율의 변화를 가져올 수 있다. 한편, 사용 액체의 종류에 따라 장치의 부식가능성이 있고, 유출수와 슬러지를 추가적으로 처리해야하기 때문에 추가 설비가 요구된다. 집진된 먼지의 경우 재사용하는 것이 용이하지 않기 때문에 집진된 입자상 물질을 회수가 필요한 공정에서는 적용이 어렵다.

또한 스크러버를 사용할 때는 일반적인 문제점뿐만 아니라 액적의 동반 배출현상을 방지해야 백무현상을 제거할 수 있다. 난류상 기액접촉과정을 거쳐 미세먼지입자가 정화된 가스는 액적과 함께 배출된다. 따라서 미세한 액적을 95% 이상 제거할 수 있는 데미스터를 설치해야 하며, 기타 방지장치와 결합하고자 할 때에는 그 배열을 설정하는 데에 신중하여야 한다.

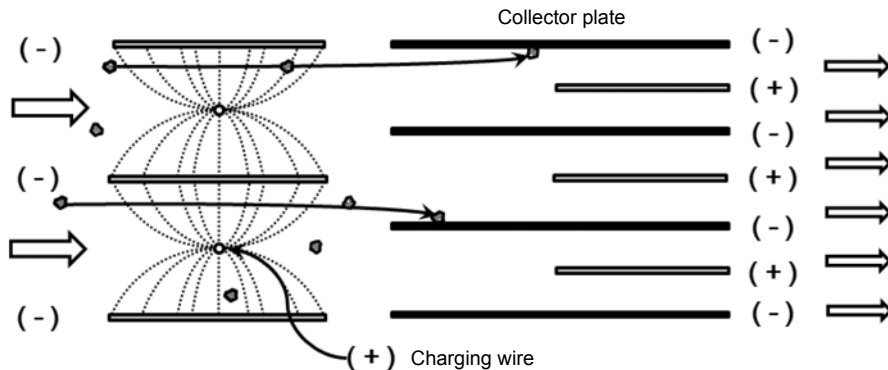


Fig. 5. Principle of electrostatic precipitator (Environmental glossarist, 1996).

Table 4. Development of ESP (Hong, 2002).

Year	Main equipment's contents	Country	Collect efficiency (%)
1980s	Basic ESP (< 300 mm) - Nomal discharge electrode intermit electret charge ESP - Semi pulse*ms)	USA, JAPAN, GERMAN, ITALY act	Particle: 99.0
1990s	Wide plate spacing Electrostatic Precipitator (400 mm <) - Rigid body type's charging wire - Mobile charging wire - Wet type Gas conditioning system - Particle components control using SO ₃ , NH ₃ Pulse type ESP - Micro pulse (μs) method	USA, GERMAN USA JAPAN, ITALY	Particle: 99.35
2000s	Hybrid ESP - Wide plate, Micro pulse, Mobile complex ESP - Dry, Wet and filtrate complex ESP - Submicron particle, Heavy metal and Gas treatment ESP	USA, JAPAN GERMAN	Particle: 99.9 Heavy metal: 90.0 Gas: 80.0

3. 4 전기집진기 (Electrostatic Precipitators)

전기집진기는 미세먼지 입자의 정전기력 이용한 집진장치로 유입공기의 이온화, 오염물질의대전, 이동, 오염물포집, 부착물제거 및 청정가스 배출의 과정으로 구성된다. 미세먼지는 우선적으로 10,000 V 이상의 강한 코로나 방전을 통해서 양극으로 하전되고, 이후 3,000~8,000 V의 직류 전압을 가진 음극 전극판에 부착됨으로써 배출가스 흐름으로부터 분리된다. 그림 5는 전기집진기의 기본 구조를 나타낸 것으로, 충전선(Charging wire)과 집진판(Collector plate)으로 구성되어있다.

집진 전극판에 부착된 먼지입자는 물리적 충격을 통하여 떨어뜨리거나 액상으로 세정하여 제거하게 된다. 이러한 전기집진기는 공기 청정기 등 함진 농도가 비교적 낮은 경우에 사용되고 있으며, 포집력이 다른 장치와 달리 전체 가스에 적용되는 것이 아니라 집진되는 먼지입자에게만 적용된다. 따라서 전기집진기는 매우 낮은 압력손실을 가지게 된다.

Hong (2002)은 보다 엄격해지는 미세먼지 제어기준을 충족하기 위해 고효율 집진기술을 적용해야하며, 지속적인 연구를 통하여 표 4와 같이 장치가 변천해왔다고 설명하였다.

그 이외에도 그림 6과 같은 전기집진기술을 적용한 새로운 방지기술로서 이온화 장비를 비롯한 브러쉬를 삽입하여 집진효율을 99% 이상까지 증가시킨 Novel space charge ESP (Andrei *et al.*, 2012), 전기집

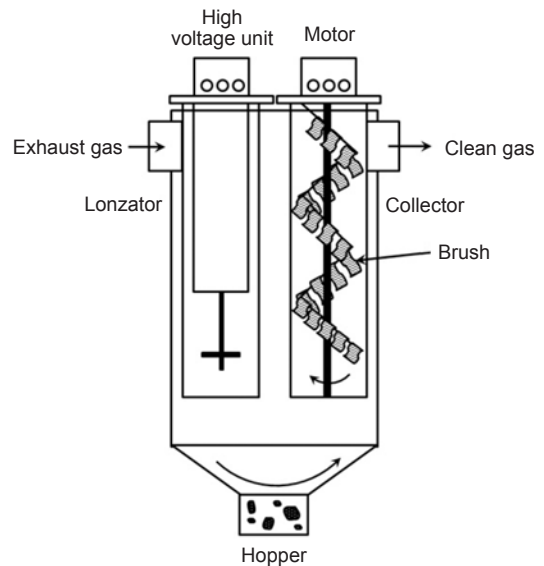


Fig. 6. Novel space charge ESP (Andrei *et al.*, 2012).

진기의 효율을 감소시키고, 전력소모량을 증가시키는 Back corona 현상을 최소화 시킬 뿐만 아니라 미세먼지 제거효율을 99.95%까지 증대시킨 Alstom Electrostatic Precipitators (Alstom, 2009) 등이 개발되었다. 이들은 각종 발전소나 금속성입자, 광물을 다루는 현장에서 널리 사용되고 있다.

4. 주요 발생원에서의 미세먼지 제어현황

대기오염을 방지하는 최고의 방법은 미세먼지를 비롯한 각종 오염물질이 발생하지 않도록 공정을 구성하여 환경오염물질의 배출근원적으로 억제하는 것이지만 사실상 완벽한 제어는 불가능하다. 따라서 발생원에서는 미세먼지가 생성될 가능성이 있는 잠재적 단계를 축소시키거나 최종 배출단계에 포집시설을 설치하여 배출량을 제어하게 된다. 각종 제어설비들은 발생원의 특징에 맞추어 발전되어 왔으며, 시간적으로도 산업시설의 발달과정과 유사하게 진보되어 왔다. 자연적으로 미세먼지가 발생하는 자연발생원을 제외한 인위적 발생원 (Anthropogenic Air Emissions) 은 크게 연소, 증발, 순간적 노출, 폐기물 처리 등이 있다 (Roger, 2006). 국내의 경우 몇몇 연구에 따르면 대기 중에 존재하는 미세먼지 가운데 인위적 발생원에 의한 것이 40~50%를 차지하고 있으며, 그 가운데에서도 디젤과 가솔린 (운, 수송) 연소, 폐기물소각, 2차분진발생 공정, 제철소, 대량의 석탄 및 연료유를 연소하는 대형 발전시설, 산업단지 등이 있다 (Ministry of environment, 2012; Lee *et al.*, 2009; Heo *et al.*, 2008; Oh *et al.*, 2008; Gong, 1998). 따라서 화석연료를 연소하는 화력발전소, 도시폐기물 소각장, 제철소, 시멘트 제조업장, 자동차 등의 발생원별 관리현황과 현장에서 적용되고 있는 제어기술에 대하여 간단히 살펴보고자 한다.

4.1 화력발전소

화력발전소는 석탄과 중유 등을 연소시키면서 발생하는 에너지를 전기 에너지로 변환하는 시설이다. 일반적으로 대형 발전소는 증기를 발생시키는 보일러, 회전력을 전기로 바꾸는 발전기 등이 설치되어 있으며, 비교적 규모가 작은 자가 발전용에는 회전용기관으로 가스 터빈과 디젤 기관이 사용되고 있다. 국내에서는 1929년 당시 경성전기주식회사 (京城電氣株式會社)에서 건설한 1호기 (10MW급 석탄화력)가 1930년 11월 준공되어 전력생산을 개시한 당인리 화력발전소를 시작으로 수많은 발전소가 건설되었다. 이 가운데 1961년부터 가동하기 시작한 부산 화력발전소가 가장 오래되었으며, 최근에는 2010년 말부터 영흥화력 5, 6호기가 건설 중에 있으며, 2014

년 6월과 12월에 각각 준공될 예정이다. 또한 2012년에는 국내 최대규모의 석탄화력발전소인 태안화력 9, 10호기가 착공되었다. 2010년 기준으로 국내의 석탄 화력발전소의 발전기 대수는 총 50대로 약 24,205 MW의 발전용량을 보유하고 있다. 이후 영흥화력발전기 (1,700 MW)와 태안화력 발전기 (2,100 MW)가 완공되면 우리나라는 총 52대의 발전기에서 약 28,005 MW의 전기 에너지를 생산하게 된다 (Korea power exchange, 2011).

최근에는 각종 전력난과 더불어 원자력 발전의 안전성에 대한 문제가 제기되고 있는 바, 화력발전소의 역할이 더욱 중요하게 인식되고 있다. 그러나 석탄화력발전소는 국가 지정대기오염물질인 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소, 미세먼지의 주요 발생원이다. 아울러 각 발전소들은 각종 첨단 방지시설을 설치하여 이러한 대기오염물질의 배출을 최소화하려고 노력하고 있다.

화력발전소의 연료종류별 대기오염 물질, 그 중에서도 미세먼지의 배출량은 국내탄 (4,978톤), 석탄 (3,951톤), 중유 (1,347톤), 가스복합 (806톤), 가스 (760톤), 액체연료복합 및 내연 (223톤)의 순서로 국내탄을 사용하는 발전소에서 비교적 많은 양이 배출되는 것으로 나타났다. 또한 이들 각 발전소에서는 방지대책으로 먼지를 제어하기 위하여 울산, 영남, 여수, 평택, 남제주, 북제주, 부산, 영동, 영월, 군산, 서천, 호남, 삼천포, 보령, 태안 발전소는 전기집진기를 사용하고 있으며, 제주 화력발전소에서는 원심력 집진기를 사용하고 있다. 또한 비산먼지를 제어하기 위하여 여과집진기 방진망 또는 방진벽, 살수설비를 추가 설치하고, 보령화력발전소의 경우 방진림을 조성하여 바람에 의한 비산을 최대한 억제하도록 하였다 (KNA Environment Forum, 1999). 대부분의 발전소에는 추가적인 제어장비, 방진장비, 신규공정 등을 도입하여 과거보다 엄격해지고 있는 배출허용기준을 준수하고자 노력하고 있다. 예를 들면, 서울화력발전소의 경우 먼지 배출량이 높았던 과거의 연료사용방식 보다는 LNG 등과 같은 청정연료를 사용하는 설비로의 변화를 추구하기도 하였다. 그림 7은 복합화력발전소의 설치형태와 구조를 나타낸 것으로서, 각 상황에 맞추어 방지시설의 위치에 다양한 집진장치를 적용할 수 있다 (Park, 2012).

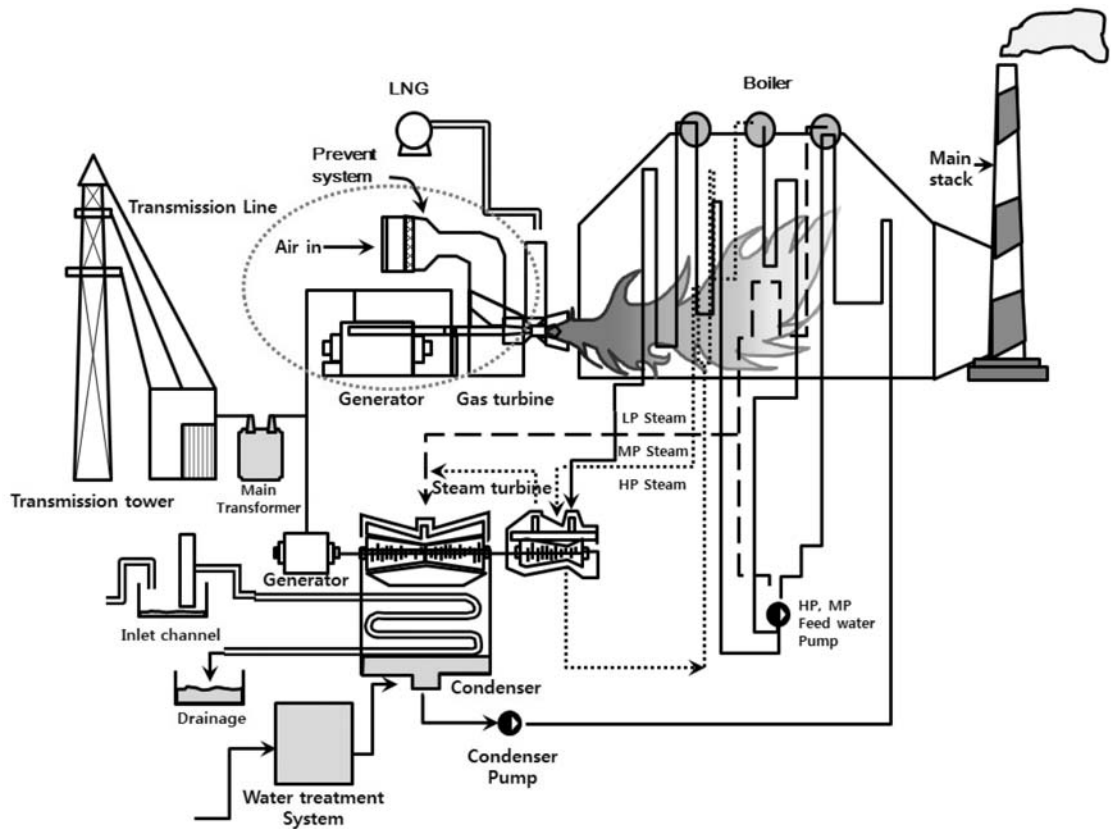


Fig. 7. Schematic process of coal fired power plant (Park, 2012).

4.2 시멘트 제조시설

최근 환경부 중앙환경분쟁조정위원회는 시멘트공장 인근 지역주민들이 미세먼지로 인한 건강피해 배상을 요구한 사건에 대하여 그 피해를 인정하고 당해 5월 8일 A시멘트 등 4개사에 6억 2300만 원을 배상하도록 결정하였다. 국립환경과학원이 2009~2011년 충북대학교에 의뢰하여 실시한 조사 결과, 시멘트 제조공장에서 발생하는 미세먼지가 주민들의 건강에 영향을 끼친다는 내용의 연관성이 밝혀졌다(National Institute of Environmental Research, 2010; National Institute of Environmental Research, 2012).

시멘트는 석회를 주성분으로 하는 건축접착제를 의미한다. 대표적인 시멘트는 석회(CaO), 실리카(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화철(Fe₂O)을 함유한 원료를 적당한 비율로 혼합하여 약 1,450°C에서 소성해서 얻은 클링커로, 적당한량의 석고를 가하여 분쇄함으로써

분말화한 건설재료이다. 이를 토대로 여러 가지 혼합을 통하여 다양한 특성의 시멘트가 개발되고 있다. 시멘트 제조공정의 기본적인 석회 소성 화학작용은 900°C에서 CaCO₃를 분해하여 CaO와 CO₂ 가스로 분해하는 것이다. 칼슘산화물이 고온(1,400~1,500°C)에서 이산화규소, 알루미늄, 철산화물과 반응하여 클링커가 되는데, 규산염, 알루미늄산염, 칼슘아철산염의 형태로 형성된다. 이러한 클링커에 석고와 다른 첨가제를 첨가하여 함께 분쇄하면 일반적인 시멘트가 제조된다.

오늘날 가장 많이 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트의 제조는 채광공정, 분쇄 및 혼합공정, 소성공정, 제품화공정의 네 단계로 구분할 수 있다. 석회석 광산에서 원료를 채취하여 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료 등을 건조한 후 적당량을 비율로 배합, 원료밀로 미분쇄하고 혼합사일로 중에서 균일하게 혼합한다.

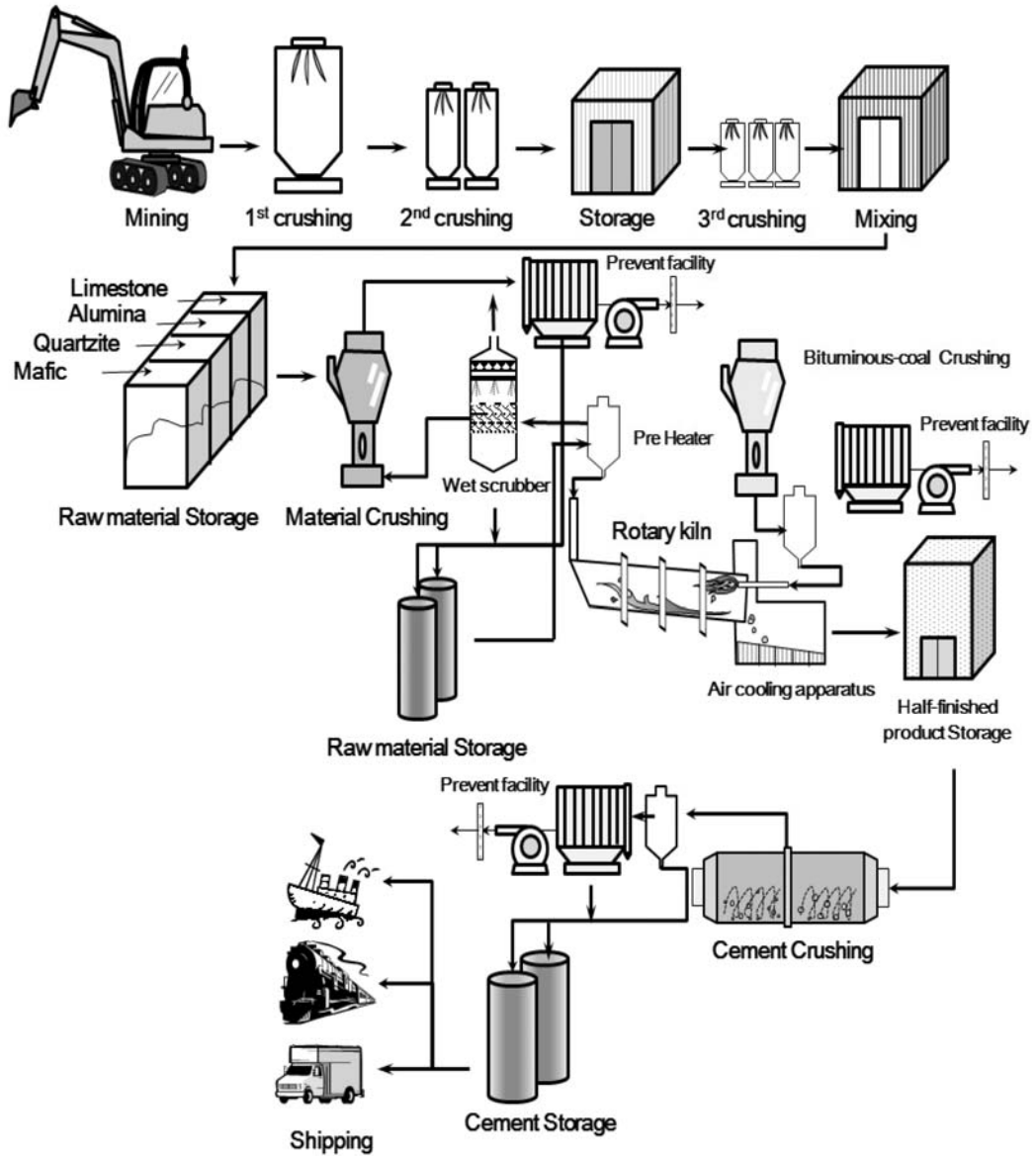


Fig. 8. Cement manufacturing process (Ministry of environment, 2009).

다음 원료배합물을 예열기를 통하여 로터리 킬른으로 공급하고 충분히 소성한 후 냉각하여 시멘트 클링커를 생산해낸다. 최종적으로 클링커에 적당량의 석고를 가하여 제품밀로 미분쇄하여 시멘트 제품이 된다.

그림 8을 보면, 최초의 석회석 채광 공정, 3회 연속

분쇄공정이 존재하며, 그 외에도 각 원료, 시멘트를 분쇄하는 공정이 존재한다. 이때 미세먼지 발생량이 크게 증가하기 때문에 위의 공정들을 공정배출원(Process Source)이라고 한다. 원료 및 연료의 저장, 클링커, 시멘트 등 생산품의 저장, 원료, 연료 및 제품의 운송 등의 과정에서도 미세먼지가 발생하는데, 이를

비공정배출원 (Non Process Source)이라고 한다.

따라서 각 공정에서 먼지 발생을 방지하기 위한 다양한 방법을 사용할 수 있도록 환경부로부터 2009년 지침령이 제공되었다. 우선 충분한 살수작업과 제조 시설의 밀폐에 초점이 맞추어지고 있으며, 각 공정별로 충분한 집진장치를 설치할 것을 권고하고 있다. 살수는 채광, 채취, 분쇄, 운송 등의 과정에서 각 원료의 이동에 따른 미세먼지발생을 방지하기 위하여 제안되고 있다. 계절적으로 살수가 곤란한 겨울에는 방진막을 설치하거나 노면청소차량을 운행하여 최대한 살수와 유사한 방법을 통하여 분진의 발생이나 비산먼지의 형성을 억제하도록 한다. ‘밀폐’는 이미 발생한 미세먼지의 비산을 방지하기 위하여 자재투입구, 조쇄공정, 분쇄공정, 운송시의 적재함 등에 적용된다. 그 외의 일반적인 지침사항으로는 주요 집진장비에 대하여 정기적인 점검을 통한 최적조건의 운영, 노면청소차량 운행 및 주기적인 물청소, 방진장치의 철저한 예방점검, 현장 작업자들에 대한 비산먼지 관리 교육 실시 등이 있다(Ministry of environment, 2009).

4. 3 제철소

제철소는 철광석에서 철을 추출하여 강판, 강관 등의 철재를 생산하는 곳이다. 우리나라는 1970년 4월 1일 포항제철소를 착공한 이후, 지속적으로 그 수가 증가하여 2005년 기준으로 4,772만 톤을 생산하면서 세계 5위에 등극하였으며, 전세계 철강 생산량의 4.2%를 차지할 정도로 그 규모가 크다고 할 수 있다. 이러한 국내 철강산업의 경우 1970년 이후 획기적인 성장을 이룩하여 국가 경제 발전에 있어 공헌한 바가 매우 크지만 에너지 과소비 및 폐기물의 대량 발생 등 환경오염 유발업종으로서의 역할도 무시할 수가 없다. 철강산업은 철광석에서부터 강철 재생산에 이르기까지 연소, 제련, 중발, 야적, 운반, 파쇄, 누출, 마모 등의 다양한 생산 공정이 있으며, 생산 설비도 대규모로서 이들의 설비에서 각종 대기, 수질, 토양 오염물질 및 폐기물 등이 다량 발생하기 때문에 대기, 수질 및 토양 등에 대한 종합적인 환경대책이 요구되고 있다(Cho *et al.*, 2009; National institute of environmental research, 2007).

제철소에서 미세먼지가 발생하는 공정은 주로 제선, 제강, 압연 등이 있으며, 전반적인 생산공정에서도 발생하게 된다. 제철소에서 발생하는 먼지는 일반

Table 5. Chemical composition of slag & dust from furnace (Shin 2010).

	Shaft furnace (%)	OxyFuel combustion furnace (%)		
		Convert furnace	Open-hearth furnace	Electric furnace
CaO	39	40~46	15~25	30~50
MgO	12	2~8	6.0~9.5	5~10
SiO ₂	36	10~15	15~20	10~20
Al ₂ O ₃	10	1~2	1~2	5~10
FeO	0.5	18~30	15~25	15~30
MnO	0.4	5~7	3~10	3.0~6.5
TiO ₂	-	0.5~1.5	-	0.3~1.0
S	1.4	0.05~0.1	0.05~0.2	0.02~0.20
P ₂ O ₅	-	0.5~2.0	1~2	0.3~0.9

적으로 철이나 석회 성분을 많이 함유하고 있기 때문에 제철공정의 철원으로 재활용하여 배출량을 줄이거나 포집된 먼지입자의 자원화를 통해 타 시설의 연료로 활용하기도 한다. 제철소에서 발생하는 미세먼지의 화학조성은 표 5와 같다(Shin, 2010b).

제철소에서는 공정의 변화뿐만 아니라 지속적인 집진설비 개선 및 노후 집진기의 교체를 통하여 배출량 자체를 줄여나가고 있다. 국내의 한 제철소에서는 집진성능 향상을 위한 마이크로 펄스 시스템(MPS: Micro-Pule System)을 설치하여 소결공장의 먼지집진 성능을 48% 이상 향상시키기도 하였다. 또한 원료를 수송하는 벨트 컨베이어 프레임보다 20m 높은 곳에 고공살수 장치를 설치하여 물을 분사시켜 파쇄설비 및 컨베이어 벨트 등에서 광석가루가 비산하는 것을 방지하고 있다. 또한 환경전담원이 페트롤카로 제철소 전 지역의 비산먼지 취약지점을 일일 순찰하여 발생여부를 확인 하는 등 자체적 노력을 기울이고 있다(Posco, 2003). 대부분의 공정에서 제철소 먼지의 급속특성을 이용하여 전기집진기를 많이 사용하고 있으며, 포집된 먼지입자를 재활용하기도 한다.

4. 4 폐기물 소각장

소각시설은 고체상 폐기물을 소각하는 소각로뿐 아니라 전처리시설, 대기오염물질 방지시설, 에너지 전환시설 등으로 이루어진 복합시설이다. 소각시설의 주요설비의 관리는 소각시설의 설치 및 운영, 관리지침에서 중요한 내용으로 다루고 있다(Ministry of environment, 2006). 국내 소각시설은 1984년 의정부에 50톤/일의 스토커 방식의 소각시설이 처음으로 설

Table 6. Dust control facilities in stoker type incinerators (Ansan Environmental Technology Development Center, 2000).

Incinerator	Control facilities
Daeil	Cyclone+Wet Scrubber+Wet ESP
Korea environment	Multi-clone+Semidry Scrubber+ESP
Bukyung industry	Dry Scrubber+Filter
Ecoservice korea	Cyclone+Semidry Scrubber+Filter
Jindo	1 st Wet Scrubber+2 nd Wet scrubber+Wet ESP
Sunglim oil chemical	Semidry Scrubber+Filter
	Cyclone (solid)+ESP+Wet Scrubber+Packed bed
	Cyclone+ESP+Wet Scrubber+Packed bed

Table 7. Dust control facilities in fluidized bed incinerators (Ministry of environment, 2006).

Incinerator	Control facilities
Suji incineration	SNCR+Semi-dry Scrubber+Activated Carbon+1 st Bag filter+2 nd Bag filter
Sungnam sludge incineration	Cyclone+Semi-dry Scrubber+Bagfilter
Ansan sludge incineration	Bagfilter+Wet Scrubber
Guri sludge incineration	Bagfilter+Wet Scrubber
Jeju sanbuk incineration	Activated Carbon+Slaked lime+Bagfilter+SCR
Jeju sannam incineration	Activated Carbon+Slaked lime+Bagfilter+SCR

치된 이후 2002년까지는 총 29개가 운영되고 있으며, 지속적으로 늘고 있는 추세이다. 국내 소각장 설비 및 기술은 대부분 일본과 유럽에서 도입하였으나 현재는 대부분 국산화되어 거의 기술자립의 위치에 왔다고 할 수 있다. 국내의 경우 일본이나 유럽과 쓰레기의 특징이 많이 다르기 때문에 그 구성성분에 준하는 자체개발이 필수적이기도 하다. 이렇게 발전해온 소각시설에서는 쓰레기가 연소하면서 2차 오염물질이 발생하는데, 가스상 및 입자상의 대기오염물질과 수질오염물질, 소각재 등으로 구분되며, 2차 오염물질의 배출량은 폐기물의 성상, 연소실 구조, 소각방법, 용융정도 등에 따라 다르다.

폐기물이 소각로에서 연소되면 CO₂와 H₂O가 생성되고 연소가스 형태로 변환되어 분진, SO_x, HCl, NO_x, 중금속류, 다이옥신 등의 대기오염 물질과 함께 대기로 배출된다. 고체폐기물을 소각로 내부에서 연소분해하기 때문에 외형적인 공정은 단순하지만, 충분한 전처리와 이루어지지 않아 수분이 많은 난연성 생활폐기물을 소각로에 직접 투입할 경우 연소온도가 낮아져서 불완전 연소 및 다이옥신과 같은 유해물질이 발생할 가능성이 높으며, 미세먼지에 각종 유해물질이 포함되어 배출되기 쉽다. 실제 소각설비의 후처리에서 포집되는 비산재에는 여러 종류의 중금속이 함유되어 있기 때문에 지정폐기물로 특별하게 관리되

고 있다(Han, 2002). 특히 소각장 비산재는 입자크기와 구리, 아연, 카드뮴, 납 등의 함유량과 관계가 있다는 사실 또한 알려졌다(Kim *et al.*, 2000). 이러한 유해물질을 제외하고도 소각과정 중 발생하는 분진은 기본적으로 흡습성이 뛰어나고 수분함량이 높으며, 응집력과 부착성이 커서 냉각되면 고착되기가 쉽다는 특징을 가지고 있다. 또한 비피 비중이 작고 가벼우며, 입자가 큰 분진은 연소가스 냉각설비 등 비교적 유속이 느린 부분에서 침강이 되므로 집진시설로 유입되는 먼지의 평균입경은 작다고 볼 수 있다. 소각과정에서 생성되는 산성가스가 먼지입자 표면에 흡착되는 현상은 장치의 부식을 초래할 수 있기 때문에 넓은 온도 범위에서 운전이 가능한 집진장치의 설비가 요구된다.

따라서 소각시설에서의 집진장치는 유입되는 연소가스중의 입자물질이 1~75 μm의 작은 크기라는 점을 반영하여 고효율 집진기로서 전기집진기나 여과 집진기를 채택하고 있으며, 다른 집진기들은 이들의 보조적 역할을 할 수 있도록 배치하고 있다. 또한 집진기 내에서 다이옥신의 재합성을 피하기 위하여 가능하면 250~400°C의 온도범위는 피하는 구조로 설계해야 한다(Myung, 2006).

실제 스토커식 소각시설의 경우, 안산환경센터(2000)의 연구보고에 따르면 시화, 안산산업단지

있는 사업장 폐기물 소각장들은 표 6과 같은 방지시설을 갖추고 있음을 알 수 있다.

한편, 국내 유동상식 소각장들은 표 7에 요약한 방지시설을 적용하고 있다. 유동상 소각시설의 특성상 강력한 기체유동현상으로 인하여 고체물질의 마찰과 충돌 등으로 인하여 미세입자의 발생 가능성이 매우 크다. 따라서, 충분한 방지시설을 갖추지 않을 경우 배출허용기준을 훨씬 초과하고 있는 것으로 나타난 바, 집진 설비가 반드시 필요함을 알 수 있다(Ministry of environment, 2006).

스토커식이나 유동식 소각로를 갖춘 소각장에서의 대기오염방지시설의 현황을 살펴보았을 때, 단일 집진장치보다는 전기집진기나 필터, 싸이클론, 스크러버 등을 직렬로 배열한 복합 여과집진기가 적용되어 있음을 알 수 있다.

4.5 자동차

자동차는 도시이동오염원의 가장 대표적인 발생원이다. 대도시 대기오염물질의 대부분은 도로를 운행하는 차량에서 배출되고 있는 것으로 알려져 있는 바, 자동차의 대기오염물질 배출현황과 그 제어 방법에 대해 고찰해보고자 한다.

지난 50년간 세계 차량 증가율(약 10배 이상)은 인구 증가율(2배)을 훨씬 능가하였다. 우리나라의 경우 2010년도 자동차 등록대수가 자가용 16,902 천대, 영업용 차량 974 천대, 관용차량 66 천대로 총 17.9 백만대를 넘어섰다(Ministry of environment statistics, 2010). 인구밀도가 높고 자동차 운행대수가 많은 서울과 수도권은 지방보다 대기질의 악화 정도가 상대적으로 심각하다고 할 수 있다. 이러한 이동오염원에서 발생하는 미세먼지는 시민들과 매우 가까운 위치에 존재하고, 실제로 인체에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 저감장치의 영향이 더욱 중요하다(Lim *et al.*, 2009).

도로를 운행하는 차량으로부터 발생하는 대기오염물질의 배출량은 엔진설계와 운전특성, 운전자의 운전과 정비 습성, 연료의 조성, 부착된 오염 방지기술, 환경조건 등에 의해 영향을 받는다. 특히 연료의 조성은 오염물질의 배출량과 밀접한 관련이 있다. 포함되어 있는 불순물 가운데 황성분은 오염물질인 SO₂를 직접적으로 생성하게 하며, 자동차 배기부에 장착되어 있는 촉매변환장치의 촉매기능을 저하시키는

촉매독으로 작용한다. 궁극적으로 CO와 VOC같은 유해가스 배출량 증가의 원인이 되기도 한다.

납성분 또한 가솔린 연료에서 ‘불순물’로 간주된다. 우리나라는 오래전부터 무연연료를 사용하도록 의무화하는 정부규제에 의하여 거의 존재하지 않으나 과거에는 차량증가와 동일하게 대기중 납의 농도가 증가하기도 하였다. 따라서 연료의 조성을 고탄소, 저황, 저납으로 유지할 때는 오염물질의 배출이 감소한다고 할 수 있다(Cooper, 2002).

자동차 배기가스의 미세먼지에 대한 직접적인 배출량 감소방법으로는 공해방지장치(DPF)의 부착이 있다. 특히 디젤연료 차량에 처음 사용되기 시작한 ‘포집형 산화장치(Trap oxidizer)’는 촉매 변환장치와 분진 여과장치를 조합시킨 것으로서 검댕과 기타 디젤 배출물질을 일단 포집하고, 그 후에 산화시키는 방지시설이다. 국내에서도 디젤 자동차의 후처리 기술로서 미세먼지를 제거하기 위한 필터트랩 방식의 DPF(Diesel Particulate Filter)를 개발하여 배출가스에 포함되어 배출되는 매연을 여과포집하고 있으며, 집진방식을 이용한 자동차매연저감용 머플러가 개발되기도 하였다. 그 외에도 촉매를 이용한 연속재생방식을 적용하는 후처리 장치도 다양하게 개발되고 있으며, 첨가제를 이용한 연속재생방식을 적용한 Trap-Muffler system가 개발되기도 하였다(Korea institute of machinery&materials, 2003).

5. 미세먼지 함유 유해물질

각 현장에서의 미세먼지 제어기술은 주로 PM₁₀에 초점이 맞추어져 있다. 앞으로는 새로운 규정에 준하여 PM_{2.5}를 비롯한 다이옥신, PAH 등 미세먼지에 함유되어 있을 확률이 높은 물질에도 초점을 맞추어 방지기술을 개발하고 준비해야 할 것으로 예상된다.

특히 2015년부터 시행될 예정인 PM_{2.5}의 대기중 농도관리는 배출원의 배출 기준이나 표준측정방법의 설정과 함께 시급히 대비해야하는 과제이다. PM_{2.5}는 입자의 특성상 관성이나 확산효과에 의한 포집이 쉽지 않기 때문에 다중 포집장치를 적용해야한다. 특히 정전기력이나 자기력을 더하여 0.1~1.0 μ m 크기의 입자를 효과적으로 포집하는 공정이 다양하게 개발되고 있다. 그러나 대기 중에 존재하는 많은 양의

PM_{2.5}는 미연소 탄소나 2차반응에 의해 생성되는 염의 종류이므로 연소조건이나 전구물질의 발생을 최대한 억제하는 접근 방법도 고려해야한다. 또한 노천소각을 비롯한 비관리연소행위 등으로부터 대기중으로 직접 배출되는 입자상 오염물질에도 PM_{2.5}가 상당량 포함되어 있다. 따라서 PM_{2.5}에 대한 보다 포괄적인 관리규정이 시급히 설정되어야한다.

다이옥신은 벤젠 고리에 염소를 포함하고 있는 환경호르몬류의 화합물로 잘 알려진 물질로서, 매우 안정하여 대기환경 중에서 물리화학적으로 큰 변화가 없다. 물에 잘 녹지않는 대신 지방에 잘 녹기 때문에 체내에 들어가면 배출되지 않고 쉽게 축적된다. 다이옥신은 살충제, 제초제 등 농업 및 산업 화학물질의 부산물에서 방출되기도 하며, PCDD (Polychlorinated dibenzo-p-dioxins)를 함유한 폐기물을 연소할 때 방출된다. 또한 염소를 함유한 물질과 식물체를 동시에 연소시킬 때나 노천소각과 같은 비관리 형태의 연소활동 시에도 대량 발생하게 된다. 이들은 먼지입자에 쉽게 부착이 되어 대기중에서 부유한다. Bae *et al.* (2012)의 연구에 의하면 특히 봄철 미세먼지 중 PM_{2.5}에서 다이옥신 농도 비율은 94%, 겨울 미세먼지 중 PM_{2.5}에서 다이옥신 농도 비율이 84%로 나타났다. 따라서 대기중의 다이옥신을 효과적으로 감축하기 위해서는 초미세입자인 PM_{2.5}를 제거하는 것이 실효성이 있을 것으로 판단된다(Bae *et al.*, 2012).

다환방향족 탄화수소 물질 (PAH, polyaromatic hydrocarbons)은 유해대기오염물질인 HAPs (Hazardous Air Pollutants)의 일부이며, 독성, 신경장애성, 종양성, 발암성, 태아기형성, 돌연변이성 등을 유발함으로써 다이옥신과 동일하게 '환경호르몬'으로 인식되고 있다. PAH 가운데 특히 위해성이 높은 물질은 Acenaphthene, acenaphthylene, anthracene, benzo(a) anthracene, benzo(a) pyrene, benzo(b) fluoranthene, benzo(g,h,i) perylene, benzo(k) fluoranthene, chrysene, dibenzo(a,h) anthracene, fluoranthene, fluorene, indeno(1,2,3-cd) pyrene, phenanthrene, pyrene 등이 있으며, 대도시 오염된 대기나 산업지역에서 미량 발견되고 있다(Korea Environment Institute, 1994). 이들은 주로 나무와 화석연료를 불완전 연소할 때 생성되지만, 석유와 가스를 태우는 각종 엔진, 나무를 때는 난로, 용광로, 담배연기, 산업장의 연기와 매연, 자동차 등에서도 배출된다. 이러한 PAH는 대체로 가스형태로 배출되지만 대

기 중에서 응축과 흡착에 의해 입자상으로 상변환이 일어난다(Burford *et al.*, 1993). 따라서 PAH는 미세입자의 위해성과 동시에 유해물질로서 간주될 수 있기 때문에 다른 가스형태의 오염물질이나 일반적인 미세입자보다도 훨씬 그 중요성이 높다고 할 수 있다(Van *et al.*, 1984). 이러한 경향은 국내 연구에서도 지속적으로 발표되어 왔으며, 계절에 따른 대기입자 중 함유량의 차이에 관한 연구결과가 최근 발표되기도 하였다(Lee *et al.*, 2012). 그 밖에 교통수단과 미세먼지 및 PAHs 간의 관계가 있음이 밝혀졌으며, 특히 100 nm 이상의 자동차 배출먼지입자에 포함된 PAH의 농도가 높게 나타났다. 이때 입자의 크기가 증가할수록 PAH의 농도는 감소하였다(Song *et al.*, 2012). 도심지역의 부유미세먼지에 포함된 PAH의 농도는 35~67 ng/m³ 범위로 나타났으며, 수도권 외곽과 비교하였을 시 평균적으로 1.5~3배 가량 차이가 나타나는 것으로 보고되었다(Park *et al.*, 2010; Hong *et al.*, 2009).

결국 대기중 PAH 제어는 우선 발생원에서 규제오염물질을 제어하기 위해 연소조건이나 원료물질의 개선 등이 이루어져야 하고, 미세먼지에 포함되어 최종적으로 배출되는 양을 고려하여 적절한 집진기술을 적용하는 노력이 병행될 필요가 있다.

6. 결 론

2000년부터 우리나라 대기오염물질 배출업소의 오염방지시설 투자실적은 꾸준히 증가하여 2011년에는 2,831.8억 원으로 집계되었으나 2010년도 대비 10.9% 감소한 것으로 나타났다. 특히 조립금속, 기계장비 제조업에서 꾸준히 상승하고, 석유정제업, 화학제품 제조업에서의 방지시설 투자가 증가를 보이고 있다(Ministry of environment, 2012). 전체적인 대기오염 방지시설에 대한 민간투자비용은 2000년도부터 2011년도까지 총 28,621.3억 원인 것으로 나타났다.

이러한 방지시설 투자에 있어서 배출업소들은 기존의 방지기술들을 활용하기도 하지만, 환경의 중요성이 강조되고, 민원이 증가함에 따라 보다 고성능의 기술을 개발하고, 적용하고있다. 특히, PM_{2.5}로 대표되는 초미세입자에 관한 국가 관리가 2015년부터 시행될 예정이기때문에 한층 진보된 융합형 제어기술

의 개발이 시급하며, 현장 적용이 가능한 설비가 제작되어야 한다. 따라서 발생원 여건에 따라 적용이 가능한 국내외 관리기술을 검토하여 실증실험연구나 융합장비 개발 등이 적극적으로 이루어져야 한다.

References

- Alstom (2009) Environmental Services and replacement Parts.
- Anderson, H.R. (2009) Air Pollution and mortality : A history, *Atmospheric Environment*, 43, 142-152.
- Andrei, B., R.P. Hanns, S. Helmut, and W. Klaus (2012) Fine Particle generation evolution and control by small biomass combustion, *J. Manage. Environ. Quality*, 23(1), 36-55.
- Ansan Environmental Technology Development Center (2000) Optimization of operation and process of incineration facilities for industrial wastes, 65-96.
- Bae, I.S., I.S. Kim, J. Kweon, S.W. Eom, and J.Y. Lee (2012) Characteristics of Dioxins Level according Particle Size Distribution of Dust in the Ambient Air of Seoul, *Proceeding of the 55th Meeting of KOSAE*, Seoul, Paper No. PB19, 116.
- Burford M.D., B. Steven. and J.D. Miller (1993) Extraction of spiked versus native PAH from heterogeneous environmental samples using supercritical fluid extraction and sonication in dichloromethane, *Anal. Chem.*, 65, 1497-1505.
- Cho, Y.J., M.H. Jeong, J.M. Jeon, and B.S. Son (2009) A Study on the Concentration of Fine Particles and Heavy Metals in Iron Works, *J. Korean Soc. Environ.*, 401-409.
- Cooper, C.D. and F.C. Alley (2002) *Air Pollution Control-A Design Approach*, 3rd Ed., Waveland Press Inc., U.S.A., 99-238pp, 547-561pp.
- Environmental glossarist (1996) *Environmental engineering terminology dictionary*, Sungandang.
- Gong, S.Y. (1998) Management plan for pre pollutant reduction at emission source - pocus on optimum prevent facilities, *Korea Environment Institute*, 20-25.
- Han, B.I. (2002) Domestic waste incineration facility's condition and development process, *Architecture & Urban Research Information Center*, 39-51.
- Heo, J.B., B.R. Choi, K.S. Kim, and S.M. Yi (2008) Association of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) from Different Sources with Daily Mortality in Seoul, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 188-190.
- Hong, J.H. (2002) Fine dust control in industrial facilities (ESP/Filter), *Air Purification Tech.*, 54-66.
- Hong, S.B., S.H. Kang, W.H. Kim, Y.P. Kim, S.M. Yi, Y.S. Ghim, S.H. Song, S.H. Jung, and J.H. Hong (2009) PAHs Concentrations of PM₁₀ in Seoul Metropolitan Area, *J. Korean Soc. Environ.*, 25(4) 347-259. (in Korean with English abstract)
- Jang, J.H., J.H. Lee, and Y.M. Jo (2008) Simultaneous Control of Dust and Gases Using a Double Centrifugal Device, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 24(3), 336-345. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.K. (2002) Analysis of Environmental policy in US and KOREA, *Reformation of Environmental Legislation*, 22, 401-402.
- Kim, J.B., W.K. Lee, and Y.J. Shim (2000) A Basic Study on the Effective Management for MSWI Fly Ash (II)-Effect of Leaching Parameter, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 22, 1357-1364. (in Korean with English abstract)
- KNA Environment Forum (1999) Korea's environmental conversion measure 21 for A.D. 2000, 206-216.
- Korea Environment Institute (1994) Plan for countermeasure research of hazardous air pollutant restriction, 252-254.
- Korea institute of machinery & materials (2003) *The Trend and Prospect of Diesel After treatment Technology*.
- Korea power exchange (2011) *power plant current situation 2010*.
- Kvestoslav R. Spurny (1998) *Advances in aerosol filtration*, lewis publishers., U.S.A., 4-6pp.
- Lapple, C.E. (1961) Processes Use Many Collector Types, *Chemical Engineering*, 58(5), 687-692.
- Lee, T.J., J.B. Huh, S.M. Yi, S.D. Kim, and D.S. Kim (2009) Estimation of PM₁₀ Source Contributions on Three Cities in the Metropolitan Area by Using PMF Model, *J. of Atmos. Environ.*, 25(4), 275-288. (in Korean with English abstract)
- Lee, W.C., J.I. Dong, S.P. Hong, S.H. Kim, and P.M. Park (2012) 2012 Proceeding of the 54th Meeting of KOSAE Seoul, Paper No. PA11. 62.
- Lim, Y.U., W.Y. Sun, Y.J. Lee, H.J. Kim, and M.S. Park (2009) Health Risk Assessment of PM Reduction from Diesel Particulate Filter., *Korean J. of Atmos. Environ.*, 541-542.
- Ministry of environment (1997) 97 Environment white paper.
- Ministry of environment (2006) *Development of Fine Particulate Collection Equipment Using Ceramic Cake - Fine Dust Removal Technology*, 63.

- Ministry of environment (2008) System Technology for New Type of Advanced Hybrid Particulate Collector, 62-63.
- Ministry of environment (2009) Management tips for scattering dust at cement workplace, 3-29.
- Ministry of environment (2012) 2011 Condition of investment for Environmental pollution prevention facilities.
- Ministry of environment statics (2010) Environmental statics yearbooks - The Number of Vehicle Registered by kind, 391.
- Myung, S.Y. (2006) Advanced Engineer Wastes Treatment, Namyangmoonhwa (9), 47-48.
- National institute of environmental research (2007) A Study of Monitoring Method on Exposure Level and Bio-markers of Environmental Pollutants (Gwangyang).
- National Institute of Environmental Research (2010) A Health Survey on Residents Living near a Cement Plant or Limestone Mines in Yeongwol City 2009.
- National Institute of Environmental Research (2012) A Health Survey on Residents Living near a Cement Plant or Limestone Mines in Jecheon City & Danyang City 2011.
- National Institute of Environmental Research (2012) Emission Sources and Behavior of PM_{2.5} Organic Materials (III), 32-33.
- Oh, J.M., Y.M. Jo, M.H. Kim, U.M. Kwon, I.S. Choi, I.J. Hwang, J.S. Kim, and J.Y. Park (2004) Men and Environment, Hyungsul Publish, 138-143pp.
- Oh, M.S., S.S. Yang, T.J. Lee, and D.S. Kim (2008) Quantitative Source Apportionment of Size-resolved Atmospheric Aerosols on the Area of Yongin-Suwon Border, Proceeding Of the 46th Meeting of KOSAE, Seoul, Paper No. PB4. 490-492.
- Park, C.H., S.W. Song, Y.M. Lee, W.J. Heo, J.H. Kim, G.B. Kim, D.S. Kim, S.D. Yu, and Y.H. Chung (2008) Health Effect of Exposure to Airborne Asian Dust and Ultrafine Particle, 90-104.
- Park, J.S., S.K. Yoon, and W.K. Bae (2010) Distribution and emission source of PAHs in ambient air of Seoul, J. Korean Analy. Sci & Tech., 23(3), 269-277. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.O. (2007) New dust filtration, Korean Facility Engineering, 4-12.
- Park, Y.O (2012) Technique trend of Gas Turbine Intake Air Filter System's Depth Cartridge Filter In Combined Cycle Power Plant, Air Cleaning Technology, 25(3), 16-28.
- Plomp, A. M.I.L. Beuner and A. Hoffmann (1996) Post cyclone. an approach to a better efficiency of dust cyclones, Korean J. of Aerosol Sci., 27, 631-S632.
- POSCO (2003) Pocso environmental report.
- Roger, D.G. (2006) Principles of Air Quality Management, 2nd ED., Taylor & Francis., U.S.A., 76-99pp.
- Schwartz, J., G. Norris, T. Larson, L. Sheppard, C. Claiborne, and J. Koenig (1999) Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality, Environ Health Perspect, 107, 339-342.
- Shin, O.J. (2010a) The Research on Modification Various Laws and Regulations for Developed Standard of Environmental Regulation, Korea Legislation Research institute, 129-131.
- Shin, Y.T. (2010b) A study on dust removal system and optimal operation of a reverse air fabric filter bag house, Incheon University.
- Song, S.H., D.Y. Paek, Y.M. Lee, C.W. Lee, C.H. Park, and S.D. Yu (2012) Ambient Fine and Ultrafine Particle Measurements and Their Correlations with Particulate PAHs at an Elementary School Near a Highway, J. Asian of Atmos. Environ., 6(2) 96-103.
- Van. Vaeck L., K.V. Cauwenberghe, and J. Janssens (1984) The gas-particle distribution of organic aerosol constituents : measurement of the volatilisation artefact in Hi-Vol cascade impactor sampling, J. Atmos. Environ., 18(2), 417-430.
- Yu, S.D. and W.P. Hong (2012) A Study on the Effects of Rine Particles to Satellite Signal. Korean J. Electron. Comm. Scie., 7(1), 125-134. (in Korean with English abstract)