

산업용 전기집진 장비에서의 오존(O₃)발생에 대한 산업기준 필요성과 저감방안 연구

Industry standards for ozone generation in industrial electrostatic precipitator Need & Reducing research

김영수*, 황준호**†, 유흥수*, 임형길*, 김정훈*, 심재석*, 최갑봉*

Young-Soo Kim*, Jun-Ho Hwang**†, Hong-Soo Yoo*

Hyung-Gil Im*, Jung-Hoon Kim*, Jae-Seok Sim*, Gap-Bong Choi*

Abstract Increasing social interest in the fine dust (PM10) and ultra-fine dust (PM2.5), the utilization rate is high multiple use facilities of the masses, various reduction measures and measurement techniques have been applied. In particular, the efficiency of the maintenance on air conditioning equipment of the managed facilities at home and abroad of the fine dust is increasing the proportion of high electrostatic precipitator (Electrostatic Precipitator, EP). But, Standardized ozone measurement procedures and accurate management criteria associated with this is an unsatisfactory state. In this paper, to analyze current, mainly being used are part corona (negative corona, following NC) ozone generation status of the system of electrostatic precipitator. Also Attempting to seek a sealed necessity of setting standardized measurement methods and reference values of ozone generated by the use of electrostatic precipitator in space or underground tunnels and effective reduction measures.

Keywords : Fine Dust, Electrostatic Precipitator, Corona, Ozon)

초 록 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)에 대한 사회적 관심이 높아지면서 대중의 이용률이 높은 다중 이용시설에서는 다양한 저감 대책과 측정기술이 적용되고 있다. 특히 국내외 미세먼지 관리대상 시설의 공조 설비에 유지관리 효율이 높은 전기집진장비(Electrostatic Precipitator, EP)의 사용비중이 늘어나고 있으나, 이에 따른 표준화된 오존 측정 절차나 정확한 관리기준이 미흡한 상태이다. 본 논문에서는 현재 주로 사용되고 있는 부코로나(negative corona, 이하 NC)방식의 전기 집진장비에 대한 오존 발생 현황을 분석하고, 밀폐된 공간 혹은 지하 터널에서의 전기 집진설비 사용으로 발생한 오존의 표준화된 측정 방법과 기준치 설정 필요성 및 효율적인 저감 방안을 모색코자 한다.

주요어 : 미세먼지, 전기집진, 코로나 방전, 오존

1. 서론

미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 저감에 관한 사회적 관심이 높아진 국내외 상황에서 전기집진장비(Electrostatic Precipitator, EP)의 사용 비중이 늘어나고 있는 추세이다.

일반적인 전기집진 방식은 코로나 방전을 이용하여 미세먼지 입자를 음(-)또는 양(+이온

† 교신저자: 건국대학교 공과대학 기계공학과(@naver.com)

* 서울메트로 도시철도연구원,

** 건국대학교 공과대학 기계공학과

으로 하전시킨 후 집진판에 접촉시켜 습식 혹은 건식으로 입자를 포집하고 있다. 본 논문에서는 현재 개발하고 있는 미세먼지 제거차량과 관련하여 적용할 수 있는 부코로나식(NC) 전기집진기술의 오존 발생 특성을 알아보고 일부 밀폐된 공간(지하 터널)에서의 전기집진설비 상용화에 따른 오존 발생에 대한 산업 기준 필요성과 오존 발생 저감 방안을 모색하였다.

2. 본 론

2.1 전기집진 기술과 오존

2.1.1 오존의 유해성과 관리기준

오존(O₃)은 산업안전보건법에 등재된 관리대상유해물질로 산화작용을 하려는 성격이 큰 기체이다. Ewers 등[6]에 따르면 이러한 오존에 사람이 지속적으로 노출되면, 호흡기관의 단백질 및 효소 구조를 변형시켜 호흡기 질환 악화, 폐용량 감소 등의 위험성이 있다.

환경부/대기정책과 공개자료

■ 오존농도의 수준 및 노출시간별 인체에 미치는 영향

농도(ppm)	노출시간	인체 및 실험동물에 미치는 영향
0.02	5분	냄새 감지
0.03~0.3	1시간	달리기 선수의 기록저하
0.05~0.1	30분	불안감을 느낌
0.05~0.2	-	코 및 인후의 자극
0.05~0.6	1시간	천식 환자의 발작빈도 증가
0.1	30분	두통, 눈에 자극
	1시간	시각장애, 폐포 내의 산소 확산력 저하
0.1~0.25	30분	호흡수의 증가
0.3	-	호흡기 자극, 가슴압박
	5분	호흡량의 증가
0.35	3~6시간	시력 감소
0.37~0.75	2시간	호흡량 현저하게 감소
0.5	2시간	폐기능 저하
1.0	6시간	동물(쥐)의 사망률 증가
1.5~2.0	2시간	심한 피로, 가슴통증, 기침

<Table1 오존농도의 수준 및 노출시간별 인체에 미치는 영향 (환경부)>

환경부 실내공기질 관리 기본계획:국내외 실내오염물질 관리기준(Table 2)은 한국은 1시간 평균 0.06~0.08ppm 이하, 미국 EPA(Environmental Pollution Agency) 기준 8시간 평균 0.075ppm 이하, ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 기준 0.05ppm 이하이며, WHO 기준 8시간 평균 0.05ppm 이하로 규정되어 있다. 과거 공기청정기 등에서 발생하는 오존문제가 대두되면서 위에서 제시된 오존발생 기준을 만족하기 위한 국내외 연구가 많이 진행되었으나 산업현장에서 사용되고 있는 대용량 전기집진 장비에서 발생하는 오존에 대한 관한 연구는 미비한 상태이다. 다만 캘리포니아 법규집 94803조에 산업용 전기집진에 대해 단지 “산업용으로만 사용할 것”, “[오존 방출 제품으로 건강에 유해할 수 있음] 라벨이 눈에 잘 띄도록 표시되어 있어야 한다.” 는 정도의 명문적인 규정만 존재하고 있다.

구 분	한국 (환경부)	독일 (Umweltbundesamt)	미국		캐나다	WHO	
			EPA	ASHRAE	Health Canada		
미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀	100~200 (6시간)	-	150 (24시간)	50(연간)	-	20(연간) 50(24시간)
	PM _{2.5}	-	25(24시간)	35(24시간) 15(연간)	-	100(1시간) ¹⁾	10(연간) 25(24시간)
오존(ppm)	0.06~0.08 (1시간)	-	0.075 (8시간)	0.05 (8시간)	0.02 (8시간)	0.05 (8시간)	0.05 (8시간)

<Table 2. 환경부 실내공기질 관리 기본계획(2015-2019) 국내외 실내오염물질 관리기준>

최근 미세먼지를 저감하기 위해 전기집진 시설이 대중이용 시설 적용이 늘어나면서 오존 발생에 대한 현황을 정확하게 파악하고, 지하터널 등 환기가 잘 이루어지지 않는 공간에서의 오존 발생량에 대한 분석을 통해 측정방법, 지하시설 환경기준치 등을 수립하고 적용할 필요가 있다.

2.1.2 산업용 전기집진 기술과 기준치 필요성

그린피스(NGO 환경단체)와 베이징 대학 연구팀의 연구에 따르면 매년 25만명이 초미세먼지(PM2.5)로 인해 조기 사망하는 것으로 보고하였으며[7,10], 포스코ICT에서는 중국 제철소와 석탄화력발전소 등에 산업용 MPS(마이크로 펄스 하전)전기집진기를 수출하는 등[9] 전기 집진방식의 미세먼지제거 공기청정 시장이 성장하고 있는 추세이다(Table 2)

공기청정기 세계 및 국내 시장 전망 (단위: 억달러, 억원, %)

구분	2013	2014	2015(E)	2016(E)	2017(E)	2018(E)	2019(E)	CAGR(%)
세계 시장	38	41	48	57	67	78	92	16.1
국내 시장	3,000	5,000	5,600	6,272	7,025	7,868	8,812	12.0

주) 2013년 기준 미국9%, 한국12.0%, 중국34% 등 각국 평균성장률을 기준으로 17.5% 추정
 자료: Euromonitor Internaional, TechScience, 업계 추정 기초로 KISTI 재작성

<Table 3. 공기청정기 세계 및 국내 시장 전망>w

국내외 산업용 전기집진 시장의 수출경쟁력을 강화를 위해서는 사용환경 및 위험성을 고려한 규제 및 인증 제정 등으로 장비의 신뢰성을 사전에 확보할 필요가 있다. 전기집진장비의 코로나방전에 따른 오존 발생량에 대한 연구[2]에 따르면 일정 전압 이상의 고전압에서 오존의 발생량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 현재 본 연구에서 개발하고 있는 NC방식을 이용한 전기집진장비의 경우 인가전압을 최적화시켜 미세먼지 효율 대비 오존 발생

치를 최소화 시켰으며, 일반적인 대기 환경 기준치에 맞출 예정이다. 실제 지하철 환기실에 동등한 사양의 전기집진기를 설치하여 측정된 오존의 평균값(Table 4)은 0.043ppm(전체 평균값과 차이가 큰 1월 측정값을 제외한 9~12월 평균값)으로 실내 공기질 관리기준 인 0.06ppm (8시간 평균)을 넘지 않는것으로 나타나고 있다.

측정항목	허용기준	1월 측정분석값			9월 측정분석값			10월 측정분석값			11월 측정분석값			12월 측정분석값			평균측정값
		전단	후단	효율(%)	전단	후단	효율(%)	전단	후단	효율(%)	전단	후단	효율(%)	전단	후단	효율(%)	
미세먼지	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	59.22	3.92	93.38	66.7	4.4	93.4	56.1	5	91.09	53.6	4.1	92.35	60	4.4	92.67	92.58
이산화탄소	1000 ppm	304.8	308.2	-1.12	402.9	372.8	7.47	407.2	391.4	3.88	397.3	403.7	-1.61	350.8	311.7	11.15	적합
일산화탄소	10 ppm	0.7	0.6	14.29	0.7	0.4	42.86	1	0.6	40	1.2	0.8	33.33	1.3	0.7	46.15	적합
포알데하이드	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5.6	10.7	-91.07	3.7	11.2	-202.7	4.8	9.6	-100	6.7	11.2	-67.16	15.6	15.2	2.56	적합
총휘발성유기화합물	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	338.1	374	-10.62	437.7	275	37.17	382.9	311.8	18.57	409.2	368.1	10.04	124.1	33.5	73.01	적합
이산화질소	0.05 ppm	0.0112	0.0107	4.46	0.0373	0.0431	-15.55	0.0382	0.0336	12.04	0.0294	0.0328	-11.56	0.0372	0.0279	25	적합
오존	0.06 ppm	0.0051	0.0141	-176.47	0.0174	0.0423	-143.1	0.0197	0.0466	-136.55	0.0208	0.0431	-107.21	0.0088	0.0399	-488.64	0.0372
온도	$^{\circ}\text{C}$				28.1	28.5	-1.42	18.5	18.4	0.54	13.6	14.4	-5.88	3.3	8.4	-154.55	
습도	%				62	60	3.23	56	53	5.36	48	46	4.17	53	35	33.96	

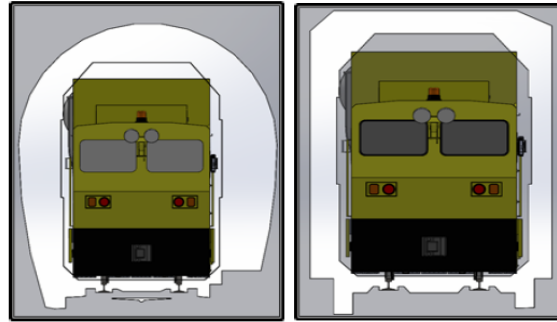
<Table4. 지하철 환기실 내 설치된 전기집진기 공기질 측정 결과표>

그러나 WHO 기준과 실내 공기청정기 제품 관리 기준(CA 인증기준)인 0.05ppm 에 근접하는 수치로 나타나 평균값이 아닌 측정치의 경우에 따라서는 기준치를 초과하는 경우가 생기게 된다. 즉,대용량 설비에 적합한 측정기준(측정시간, 측정방법, 기준치 초과 회수, 환기 시설이 아닌 폐쇄 공간의 경우 등의 여러가지 환경요인)을 적용하지 않을 경우 이에 따른 검증절차가 더 복잡해져, 신뢰성 확보가 어려워지므로 인증에 필요한 산업용 장비의 정확한 인증절차 수립과 기준치 정립이 필요한 것이다.

2.2 지하 터널의 전기집진기술

2.2.1 터널 단면적을 고려한 오존 발생 측정

현재 개발 중인 터널 내 전기집진기술을 적용한 차량을 이용할 경우 여과되는 공기의 총유량은(이동속도 5km/h, 작업시간 2시간, 풍량 23.4CMS 가정)할 경우 168,480 m³ 이다.



<Fig 1. 두 종류의 단선터널 모형도>

전기집진차량의 오존 발생 측정방법은 위 해당 유량의 총량을 기준으로 오존발생 누적량의 총량 대비 농도를 산출해야 하며, 이 경우 <Fig 1>과 같이 안전도를 고려하여 오존 누적량이 가장 많은 단선터널을 기준으로 수치를 측정해야 할 것이다. 또, 집진차량의 배기부, 운전석, 터널 궤도상부에서의 집진 전 후 오존 발생량을 공기의 유동에 따라 비교해석이 추가적으로 필요하며, 터널 내 공기의 유동은 작업구간 뿐만 아니라 주변 구간에도 영향을 끼치므로 유효범위를 산정하여 총량의 변수값을 선정해야 할 것으로 보인다. 식(1)

$$M_t(a) = \frac{V_o}{V_a + V_e} A(x) + B_o \quad (1)$$

(M_t : 측정, V_o : 오존누적치, V_a : 총유량, V_e : 주변유량, A : 보정계수, B_o : 오프셋)

2.2.2 지하 터널의 오존발생 저감 방안

앞서 측정된 환기실 내 전기집진시설의 경우 측정값의 일부가 기준치를 초과할 위험이 있어 이를 저감하기 위한 추가적인 방안을 고려해보면, 전기 집진기의 기준전압을 낮추는 방법 외에도 오존의 특성을 활용한 후처리 방안을 고려해 볼 수 있다. 오존은 공기 중에서 다음과 같이 분해되어 반감기를 갖게된다(식(2), 식(3))



Air		Dissolved in water (pH 7)	
Temp (°C)	Half live	Temp (°C)	Half live
-50	3 months	15	30 min
-35	18 days	20	20 min
-25	8 days	25	15 min
20	3 days	30	12 min
120	1,5 hours	35	8 min
250	1,5 seconds		

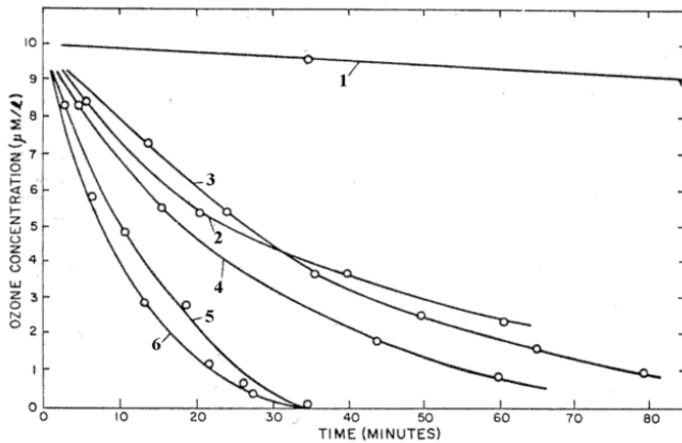
<Table 5. Half-life of ozone in gas and water at different temperatures - LENNTECH>

<Table 5>에 따르면, 공기 중에서 비교적 낮은 속도로 분해되며, 온도가 높을수록 분해속도가 빨라진다. 전기집진기의 저항범위에 따른 특성은 .<Table 6>과 같다.[3]

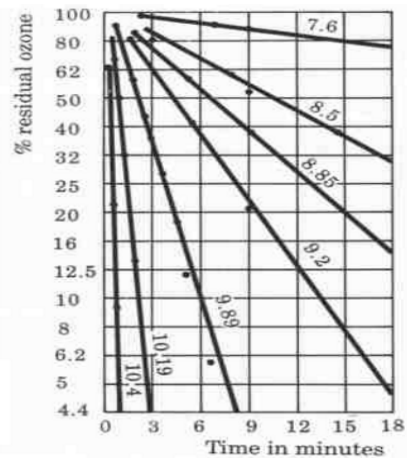
저항범위	$10^4\Omega\text{-cm}$ 이하	$10^4\Omega\text{-cm} \sim 10^{10}\Omega\text{-cm}$	$10^{11}\Omega\text{-cm}$ 이상
오존상태	집진극 재비산	이상적인 집진상태	역전리(Back Corona) 집진율 저하
온도범위	$150^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$ 이하	$160^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$	250°C 이상
집진기 상태	전도도 증가로 전기비 저항 증가	기준상태	분진 입자가 반도체적 물성으로 전기전도도 증가(체적전도증가)

<Table 6. 저항범위와 온도에 따른 전기집진기 특성>

따라서, 공기의 온도를 높일 수 있다면, 250°C 이상의 Baking 과정으로 오존의 분해속도를 높일 수 있다. 그러나 배터리를 이용하는 차량의 경우, 소모전력의 문제로 불가능해 보여 열을 확보할 수 있는 추가장치가 필요해 보인다. 다른 방안으로는 오존의 용해특성을 이용한 방법이 있다. 수용성 기체인 오존은 <Fig 2>, <Fig 3> 과 같은 용해특성을 가진다.



<Fig2.Ozone decomposition in different type of water(T=20°C), 1=double-distilled water, 2=distilled water, 3=tap water, 4=groundwater of low hardness, 5=filtered water from Lake Zurich(Switzerland), 6=filtered water from Bodensee(Switzerland)>



<Fig3.Effect of the pH on the decay of ozone (T=15°C)>

이 같은 특성을 이용해 물의 종류(성분) 및 pH에 따라 반감기가 변화하므로[1] 습식 전기집진기 세정액을 이용하거나 후처리 장치를 이용하여 배출되는 공기에 미스트를 분무하여 발생된 오존을 줄일 수 있을 것으로 보인다.

3. 결론

환기가 잘 되지 않는 곳의 전기집진장비 적용은 오존 발생에 따른 위험성이 항상 존재한다. 따라서, 지하터널, 실내 공조 내부시설 등에 산업용 전기집진장비를 사용할 경우 그에 관한 정확한 관리기준과 규제가 필요하다. 이를 위해서는 운용 시간, 시간당 오존 발생량 제한치, 측정방법에 대한 표준화 등 실내 공기질 관리 및 산업현장에 적용가능한 구체적인

기준치 마련이 필수적이다. 또한, 일정한 공간에서 운용 시 오존의 분해속도와 필터에서의 오존 발생속도가 같아지는 특이점에서의 농도에 관한 기준이 마련되어야 하며, 작업자가 필요할 경우 연속적인 장비 사용시간에 따른 근로 기준도 수립해야 할 것이다.

본 연구에서 진행하는 미세먼지 집진차량의 경우도 지하터널 집진 차량의 특성상 큰 유량의 공기가 필터를 통과하면서 발생하는 오존의 누적절대량이 높은 편이고, 제한된 공기유입으로 인해 1차 필터링 된 공기의 2차 집진 가능성이 존재하여 전체적인 농도 상승이 발생할 수 있다. 따라서, 일반적인 대기관리 기준치에 준하는 전기집진 전압을 설정하여 개발하고 있으며, 앞서 고찰해본 오존기체의 중화방법 등을 포함하여 발생하는 오존의 후처리를 통한 저감 방안도 지속적으로 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호: 16RTRP-B082467-03, 과제명: 초미세먼지 제거차량 시스템개발)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] LENNTECH BV, Home - Library - Ozone - ‘Ozone decomposition’, 2016-07-18, <http://www.lenntech.com/library/ozone/decomposition/ozone-decomposition.htm#ixzz4EkAGNdc3>
- [2] Noh, Kwang-Chul, Young-Ho Lee, and Myung-Do Oh. "Generation Characteristics of Ozone and NO_x and Particle Removal in the Electrostatic Precipitators." Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B27.10 (2003): 1442-1449..
- [3] 박성복, 2009 - 12 “대기오염물질 특성 및 방지시설”, 한국환경기술단 제 4 회 계장기술, pp.112~119.
- [4] RITCO, 2015 - 08 “도시철도 터널 미세먼지 제거차량 개발 HEPA 필터 적용 검토”, 국토교통부 연구개발사업 (연구단) 나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 세부과제 3.
- [5] 환경부, 2015 - 02 “실내공기질 관리 기본계획(2015-2019)”, 국내외 실내오염물질 관리기준 (오존, 미세먼지), pp 15~16.
- [6] Ewers, U., and D. Nowak. "Health hazards caused by emissions of laser printers and copiers?." GEFÄHRSTOFFE REINHALTUNG DER LUFT-GERMAN EDITION- 66.5 (2006): 203.
- [7] Nawahda, Amin, et al. "Evaluation of premature mortality caused by exposure to PM_{2.5} and ozone in East Asia: 2000, 2005, 2020." Water, Air, & Soil Pollution 223.6 (2012): 3445-3459.
- [8] W. Jeong, S. Jeon “Design of a dust intake system for railway vaccuming vehicle”, 한국생산제조시스템학회 학술발표대회 논문집, 197-197, 2015.
- [9] 박승혁 기자, “포스코 ICT "미세먼지 OUT"...중국 발전소에 전기집진기 공급”, 매일신문, http://www.imaeil.com/sub_news/sub_news_view.php?news_id=29941&yy=2016, 2016-06-20.
- [10] 박성복, ‘공기청정기’, 한국과학기술정보연구원(KISTI), KISTI 마켓리포트, 2015.02.