

오존과 광화학 산화물

■ 오존과 광화학 스모그

스모그라는 용어는 1905년 영국의 한 대기오염학회에서 도시의 오염된 연기(smoke)와 안개 (fog)의 합성물을 설명하면서 처음 사용하였다. 그 당시 스모그 속의 연기는 석탄과 비누, 세제, 청정제, 종이, 유리, 염료 등 소비재에 사용되는 화학약품의 연소 배출물 때문에 만들어졌다. 주로 검댕, 황산, 질산, 염산, 황화칼슘 및 황화수소 등이 공기 중에 배출되었는데, 이로 인해 초래된 공해를 **런던형 스모그**라고 부른다. 이 스모그 사건들은 19세기와 20세기에서 발생하여 많은 시민들을 죽음에 이르게 하였다.

한편, 햇볕이 짙었던 미국 LA에서도 대기오염 현상이 20세기 초반부터 나타났다. 당시 LA에서는 공장 매연이 너무 두꺼워 시민들은 매연을 통해 일식현상을 맨눈으로도 볼 수 있었다. 이 LA 스모그는 자동차의 수가 증가함에 따라 더욱 악화되었는데, 많은 공장들을 닫고 노천소각을 금지시켜도 오염이 계속되어 런던형 스모그와는 성격이 다르다고 생각하였다. 과학자들은 일사량이 많은 여름 낮에 주로 생기는 이 스모그를 **LA형 스모그** 또는 **광학적 스모그**라고 부르게 되었다.

캘리포니아 공대의 하겐스미트 교수는 1950년 실험실에서 스모그로 피해 받는 식물에 관해 연구하다가 스모그 속의 오존이 바로 LA 오염의 주범이라는 사실과 햇빛이 존재할 때 질소산화물과 반응성 기체가 반응하여 오존이 생성된다는 사실을 발견하였다. 그는 오존이 눈을 자극하며, 여러 가지 재료물질에 피해를 주고, 호흡기에 영향을 주며 높은 농도에서는 수분 이내에 고무가 갈라진다는 사실도 발견하였다. 광화학 스모그 현상은 전세계 대부분 도시에서 발생하고 있다.

■ 오존이란 무엇인가?

황사나 스모그와 같이 눈에 보이는 오염물질도 있지만 대기오염물질의 대부분은 눈에 보이지 않는다. 일산화탄소와 아황산가스는 비록 보이지는 않지만 연료가 연소되는 과정에서 배출되므로 오염물질의 존재를 짐작할 수 있다. 그런데 오존의 경우 공장굴뚝에서 '배출'되지 않는다고 한다. 여름철에 가끔씩 오존주의보가 발령되는데, 대기 중 오존은 어디에서 만들어지는 걸까? 또 실내에서 복사기나 레이저 프린터를 오랜 시간 사용할 때 맡을 수 있는 비릿한 냄새가 오존이라고 하는데 대기 중 오존과 어떻게 다른가? 그리고 인류에게 도움을 준다는 성층권 오존은 또 무엇인가?

산소원자(O) 2개가 결합한 산소분자(O₂)는 안정된 물질인데 비하여 산소원자가 하나 더 결합된 **오존분자(O₃)**는 불안정한 물질로 매우 강력한 산화제이다. 오존은 11~50km 높이에 존재하는 성층권 오존과 우리가 살고 있는 지구표면 가까이 대류권 오존(지표면 오존)으로 구분할 수 있다. 성층권 오존은 태양에서 들어오는 자외선을 흡수하여 지구상의 인간과 생물을 보호하는 고마운 오존이다.

우리는 수돗물을 소독할 때 염소나 오존을 사용하는 것을 잘 알고 있다. 오존은 강력한 산화제로 물 속의

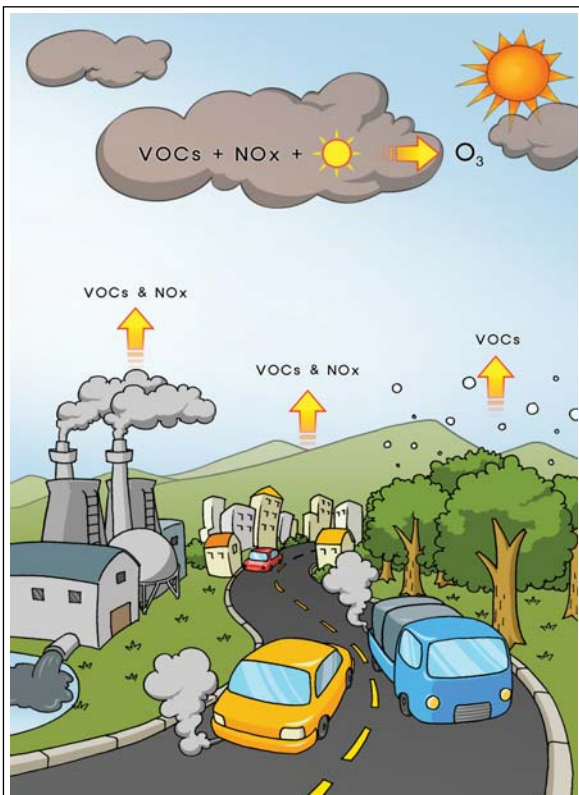
냄새를 없애거나 미생물을 살균할 때 사용하는 유익한 화학물질이다. 하지만 우리가 숨 쉬는 공기 중에 들어있는 오존은 인간에게 매우 해롭다. 가끔 오존이 악취를 제거하고 공기를 정화시켜 좋은 화학물질로 잘못 알고 있는데, 만약 공기를 정화시킬 정도로 오존의 농도가 높다면 여러분의 허파는 이미 심각한 영향을 받았을 것이다. 따라서 복사기나 레이저 프린터를 사용할 때 배출되는 오존은 매우 해로운 오염물질로서 빈번한 환기를 통해 제거하여야 한다. 이와 같이 화학적으로는 동일한 오존이 경우에 따라 좋은 역할과 나쁜 역할을 달리하고 있다.

■ 오존은 어떻게 만들어지나?

지표면 오존은 오염된 대기 중에서 **질소산화물 (NO_x)**과 **휘발성 유기화합물 (VOC: Volatile Organic Compounds)**이 화학적으로 반응하여 만들어진다. 반응이 일어나기 위하여서는 햇빛이 필요하기 때문에 **광화학 반응**이라 부르며 기온이 높을 때 반응이 빨라진다. 오존은 공장 굴뚝에서 직접 배출되지 않고 다른 오염물질로부터 간접적으로 만들어지기 때문에 **2차 오염물질**로 분류되는 전형적인 인위적 오염물질이다. 오존은 불안정하므로 생성된 오존은 곧바로 주변 물질과 반응하여 빠르게 사라진다. 여름철 낮에 오존 농도가 높은 것은 소멸되는 속도보다 생성되는 속도가 빠르기 때문이다. 햇빛이 없는 밤에는 오존이 거의 없다.

광화학 반응에 의하여 오존이 생성될 때에는 PAN (peroxyacetyl nitrate)이나 과산화수소, 알데하이드와 같은 물질도 조금 생성되는데 이들을 **광화학 산화물**이라 부른다. 광화학 산화물에 의한 피해는 오존과 유사하다. 특히 광화학 반응이 활발할 때에는 기체상태의 광화학 산화물과 함께 1 μm 이하의 미세분진들이 생성된다. 이 분진이 햇빛을 산란시켜 가시거리를 짧게 하기 때문에 **광화학 스모그**라 부른다. 광화학 스모그는 **햇빛이 강하고 맑은 여름날 오후 2~5시경 바람이 불지 않을 때 더욱 높게 나타난다.**

여름철 낮 대도시는 오존 생성에 필요한 오염물질과 햇빛, 기온이 모두 풍족하기 때문에 오존 농도가 높아지기 쉽다. 오존 생성에 필요한 **질소산**



화물은 연소과정에서 배출된다. 대부분의 질소산화물은 공기의 80%를 차지하는 질소가 고온에서 산소와 결합하여 배출되기 때문에 천연가스와 같이 질소성분이 거의 없는 청정연료를 연소할 때에도 배출된다. 대도시에서는 질소산화물의 대부분이 자동차, 난방 및 취사 활동에서 배출된다.

오존 생성에 필요한 또 하나의 오염물질인 **휘발성 유기화합물**도 자동차에서 많이 배출된다. 대부분은 머플러를 통해서 배출되지만 자동차의 연료계통과 주유소 등 연료를 취급할 때도 누출되어 증발되는 양이 많다. 휘발성 유기화합물은 또한 페인트칠과 같이 일상생활에서 용매를 사용할 때를 비롯하여 다양한 산업공정에서 배출되며, 한편, 숲속의 식물들도 터펜화합물과 같은 반응성이 큰 유기화합물을 다량 배출한다. 일반적으로 주변이 산림으로 둘러싸인 도시는 수목화가 덜된 도시보다 오존의 배경농도가 높다.

■ 오존은 얼마나 해로운가?

오존은 산화능력이 크기 때문에 인체의 폐 조직, 농작물, 고무, 플라스틱, 페인트 등 오존에 노출된 물질은 무엇이든 손상을 받게 된다. 인체에 대한 피해는 주로 **호흡기 계통**에 집중된다. 고농도 오존을 흡입하면 입, 코, 목의 점막이 마르고 숨이 빨아지고 폐울혈과 부종이 생길 수 있다. 또한 폐 감염의 위험이 커지고 천식과 같은 호흡기 질환이 악화될 수 있다. 사람에 따라서는 메스꺼움과 기침, 그리고 가슴에 통증을 느낄 수 있다. 어린이와 노약자, 호흡기 질환이 있는 사람이 가장 위험하나 공사장 작업자나 도로시설 관리직원과 같이 야외활동이 많은 경우는 건강한 사람도 조심하여야 한다. 최근 연구에 의하면, 오존의 인체 및 농식물에 미치는 영향은 짧게 고농도로 노출되는 것보다 길게 저농도로 노출되는 것이 더욱 크다고 한다. 오존은 매우 낮은 농도에서도 만성호흡질환, 천식 악화, 폐활량 감소, 폐렴, 생체면역능력의 감소와 같은 현상이 나타날 수 있다.

오존은 **산림감소와 농작물에 주는 피해**가 매우 크다. 식물의 성장과 작물의 생산능력을 저해하며, 병충해에 대한 저항성과 환경오염, 악천후 기상과 같은 환경변화에 대한 적응능력을 약화시킨다. 또한 나뭇잎의 황화현상을 일으키고 낙엽을 촉진시키며 장기적으로는 산림과 생태계를 손상시킨다. 오존의 산화능력은 재료에도 영향을 주어, **고무와 플라스틱을 딱딱하게 만들고 균열을 일으키며, 직물과 섬유의 강도를 약화시키고 탈색시킨다.**

■ 우리나라의 오존 농도는 어떠한가?

우리나라는 오존에 대하여 환경기준을 설정하여 관리하고 있다. 1시간 평균기준은 0.1ppm이며, 8시간 평균기준은 0.06ppm이다. 반면, 미국의 경우 1시간 평균기준은 0.12ppm이며, 8시간 평균 0.08ppm을 적용하고 있다. EU도 8시간 평균을 기준으로 채택하고 있는데 기준 농도는 우리나라와 같은 0.06ppm이다. 기준치 초과여부를 결정하는 것은 나라마다 통계처리 방법이 달라서 직접 비교하기는 어렵다. 대략 1년에 300일 정도 측정할 때, 우리나라는 상위 1% 즉, 3번째로 높은 농도가 0.06ppm을 초과하면 안 되며, 미국은 4번째로 높은 농도가 0.08ppm을 초과하면 안 되므로 우리나라 기준이 더욱 엄격하다고 하겠다.

오존은 보통 기온이 높을수록, 질소산화물과 휘발성 유기화합물의 농도가 높을수록, 풍속이 작을수록, 일사량이 풍부할수록, 상대습도가 낮을수록 높은 농도를 보인다. 우리나라 오존의 연평균 오염도는 2008년

23ppb로서 1998년 이후 큰 변동 없이 일정한 수준을 보이고 있다. 오존은 광화학 산화물의 특성상 여름을 중심으로 **5월에서 9월 사이에 농도가 높으며 이 기간을 오존 시즌**이라 부른다. 우리나라에서는 1시간 환경기준 초과는 7월에 많이 나타나며 8시간 환경기준 초과는 5, 6월에 많이 나타난다. 이는 기온이 높은 한여름에는 0.1ppm 이상 고농도가 잠깐씩 나타나는데 비하여 5, 6월에는 0.06ppm 이상의 농도가 몇 시간씩 지속되기 때문이다. 2008년도의 경우 전국의 230개 측정소 가운데, 220개소(96%)가 8시간 환경기준을 초과하였으며, 100개소(44%)가 1시간 환경기준을 초과하여 심각한 상태이다.

■ 피해를 줄이기 위해서는 어떻게 하여야 할까?

오존은 다른 대기오염물질처럼 바람을 따라 쉽게 이동한다. 대규모 공업단지와 대도시가 오존오염의 중심지이고 나무와 식물에서 나오는 반응성 탄화수소도 오존 생성에 커다란 기여를 하기 때문에 이들 지역으로부터 바람을 맞는 이웃 도시의 주민들은 큰 피해를 받을 수 있다. 예를 들어, 우리나라에서는 서풍이 주로 불기 때문에 서쪽에 위치한 공단이나 도시에서 생성된 오존이 동쪽에 위치한 이웃의 청정지역에 피해를 줄 수 있다. 오존의 피해를 줄이는 방법에는 고농도가 나타날 때 피하는 소극적 방법과 고농도가 아예 생기지 않게 하는 적극적 방법이 있다.

우리나라에서는 1995년 서울을 시작으로 전국에서 **오존경보제**를 실시하고 있다. 1시간 평균 농도가 0.12ppm 이상이면 주의보, 0.3ppm 이상이면 경보, 0.5ppm 이상이면 중대 경보가 발령된다. 그동안 경보 단계 이상의 농도가 나타난 적은 없으나 주의보는 드물지 않게 발령되었다. 주의보가 발령되면 어린이와 노약자, 호흡기 질환이 있는 사람은 외출을 자제하고 건강한 사람도 과격한 실외 활동을 삼가야 한다. 오존 농도가 매우 높아 경보가 발령되면, 행정당국은 자동차 운행제한과 연료사용 감축, 조업단축 등의 조치를 취할 수 있다.

오존 피해를 줄이는 가장 적극적인 방법은 **오존의 원인물질을 직접 줄이고 조정**하는 것이다. 우리나라 환경부는 이를 위한 기초자료를 얻기 위해 현재 전국에 측정망을 설치하고 질소산화물과 휘발성 유기화합물을 감시하고 있다. 이 자료가 국민의 건강과 대기환경보호를 위해 심층적으로 분석되어 합리적 정책개발에 하루빨리 응용되어야 하겠다.

한편, 오존은 2차 오염물질이고 바람을 따라 이동하기 때문에, 오존의 피해를 줄이기 위해서는 **원인물질을 제공하는 풍상지역의 이웃 도시와 서로 협조**하여야 한다. 또한 우리 도시가 만든 오존 원인물질이 몇 시간 후 옆 도시에 고농도 오존으로 나타나기 때문에 지자체 간에 대기환경개선을 위한 정책개발이 필요하다.

도시에서 오존의 원인물질을 주로 배출하는 오염원은 자동차이다. 따라서 우리 지역과 이웃 도시의 오존과 광화학 스모그를 줄이기 위해서는 **환경친화적 자동차 관리법**을 익히고 일상생활화 하여야 한다. 즉, 자동차를 운전할 때 공회전이나 급출발, 급제동을 삼가고, 에어컨 사용을 최소화하며, 무더운 낮 시간을 피해 기름을 넣는다. 자동차를 잘 정비하고 타이어 공기압을 적절히 유지하는 것도 도움이 된다. 페인트칠, 드라이클리닝과 같이 용매를 사용하는 작업은 낮 시간에는 피한다. 또한 화력발전소가 질소산화물의 주요 배출원 중의 하나이므로 **에너지 절약 운동**이 간접적인 오존저감 방법이 된다.