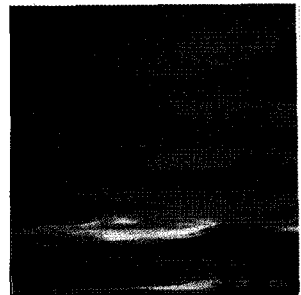


## 두 얼굴의 오존 V 오존구멍의 비밀

이번 겨울에는 서울의 아침기온이 영하 17도까지 떨어지며 전국이 추위에 움츠리게 하는 맹추위가 기승을 부렸다. 겨울철이면 극 주위에서는 극소용돌이라 불리는 주변보다 훨씬 낮은 온도의 찬 공기덩어리가 만들어진다. 그런데 이 극소용돌이의 차단벽이 느슨해지면서 찬 공기가 훨씬 남쪽까지 밀려 내려와 이상저온을 만들어낸 것이다. 물론 남반구의 남극대륙 상공에도 이런 극소용돌이가 만들어지는데 이 극소용돌이의 차폐벽은 북반구에 비하면 훨씬 단단하다. 남극 주변을 찬 남극순환류가 돌면서 남극대륙 상공의 공기를 주변의 공기로 부터 잘 차단해 주기 때문이다.

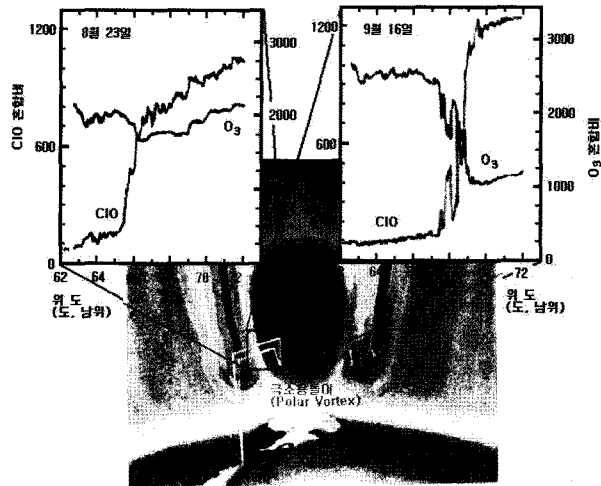


▶▶ 극지방 밤하늘을 장식하는 극성층운. 과학자들은 바로 이 구름의 표면에서 겨울부터 초봄에 걸쳐 오존층을 급격하게 파괴시킬 수 있는 반응들이 극적으로 일어날 수 있는 것을 발견하였다.

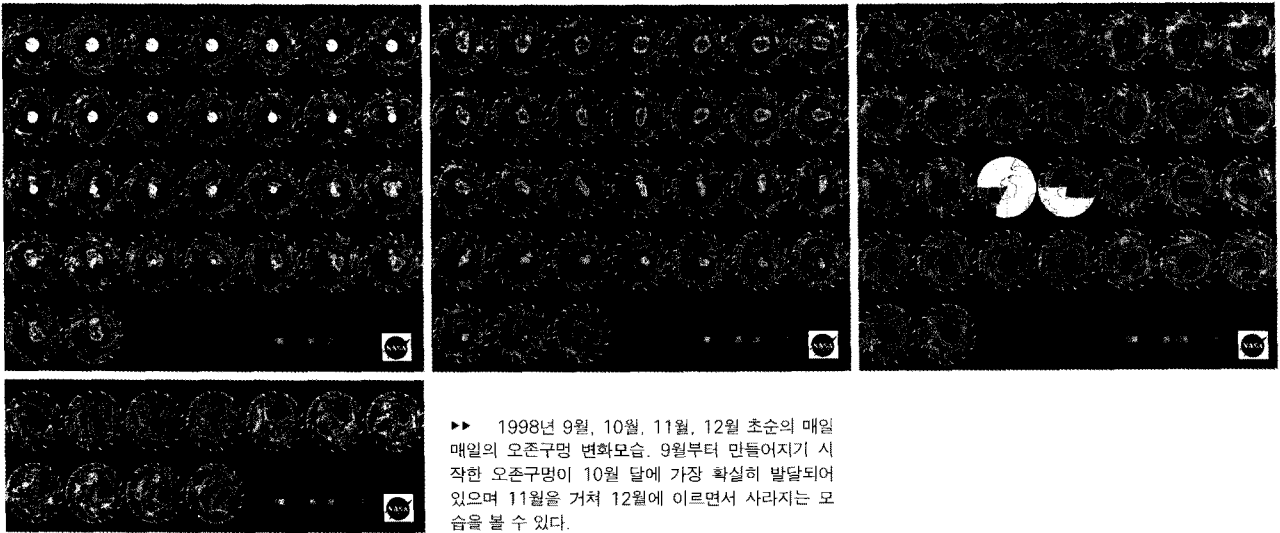
이렇게 만들어지는 극소용돌이의 상층 15~25km 정도의 상공에는 극성층권운(PSC)이라 부르는 특별한 구름이 만들어지면서 겨울 극지방의 밤하늘을 아름답게 장식해준다.



글 김길정 서울대학교 지구환경과학부 교수  
krkim@snu.ac.kr  
글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를 받았으며, 미국 캘리포니아대학 샌디에이고 캠퍼스에서 해양학으로 박사학위를 받았다. 현재 지구환경과학부 학부장 겸 BK21사업 단장으로 있으며, 해양연구소장을 겸임하고 있다.



▶▶ 남극대륙에 발달한 극소용돌이 모습. AAOE 탐사기간 중 폰타아레나스를 출발한 비행기가 극소용돌이 내부로 비행하면서 얻은 대표적인 관측자료들이 함께 도시되어 있다. 오존구멍이 형성되기 이전(8월 23일)에는 위도에 따라 오존 농도의 변화가 거의 없었으나 오존구멍이 형성된 후(9월 16일)에는 비행기가 극소용돌이 내부로 들어가면서 급격히 오존의 농도가 줄어들며 동시에 염소성분(CIO)의 농도가 급격히 높아지는 것을 보여준다.



▶▶ 1998년 9월, 10월, 11월, 12월 초순의 매일 매일의 오존구멍 변화 모습. 9월부터 만들어지기 시작한 오존구멍이 10월 달에 가장 확실히 발달되어 있으며 11월을 거쳐 12월에 이르면서 사라지는 모습을 볼 수 있다.

그런데 놀랍게도 1985년 남극대륙 상공에서 처음으로 오존구멍이 발견된 이후 과학자들은 바로 이 극성층권에 오존구멍의 비밀이 감추어져 있다는 것을 알게 되었다.

### 오존층 파괴반응 조절자

오존구멍이 인류에게 던진 충격은 참 큰 것이었다. 그러나 오존 구멍은 남극대륙의 상공이라는 '제한된 공간'에서 남반구의 초봄(9월~11월경)이라는 '제한된 시간'에만 발생하는 특수 현상이다. 일례로 1997년 9월에서 12월까지 매일매일 수집된 인공위성 자료를 서로 비교해보면 오존 구멍의 시공간적인 제한을 잘 보여준다. 9월이 되면서 서서히 만들어지기 시작한 오존구멍이 10월에서 11월 초순에 이르기까지 가장 활발하다가 서서히 그 크기가 줄어들어 마침내는 사라지는 모습을 볼 수 있다. 왜 이런 특별한 지방에서 이런 특정한 시기에 이런 놀라운 일이 일어나는 것일까?

우리는 앞의 글에서 NO<sub>x</sub>와 ClO<sub>x</sub>가 성층권의 오존을 분해하는 촉매역할을 하고 있음을 이미 살폈었다. 그런데 이런 파괴반응이 끊임없이 돌아가고 있음에도 불구하고 성층권에는 적절한 오존층이 유지되고 있다. 그 이유는 다행스럽게도 자연에 오존층 파괴 촉매 기능을 중단시킬 수 있는 반응들이 동시에 일어나고 있기 때문이다. NO<sub>x</sub>나 Cl, ClO 등의 촉매들이 서로 결합하여 HNO<sub>3</sub>, ClONO<sub>2</sub>, HCl, HOCl 등의 화합물들이 만들어진다. 그런데 저장화합물이라 부르는 이런

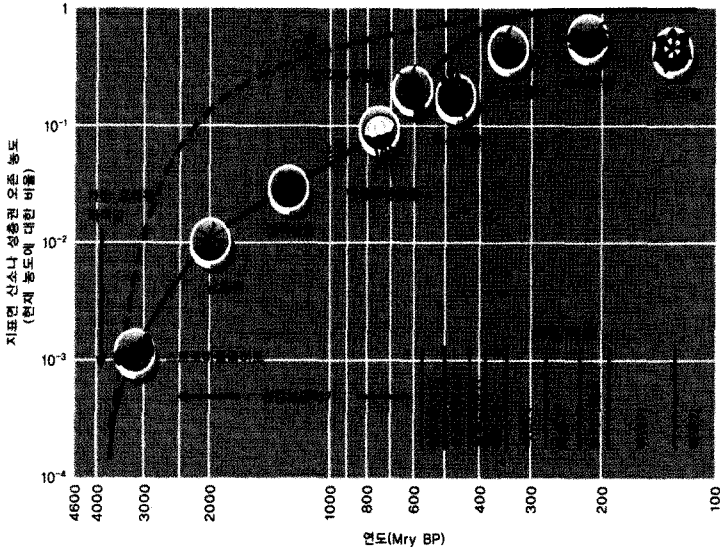
화합물들은 촉매 기능을 잃어버리기 때문이다. 이들이 햇빛을 받으면 Cl·, ClO·, NO<sub>2</sub> 등으로 분해되면서 촉매작용이 다시 활성화되는 것은 물론이다.

즉, 자연에는 오존을 파괴하는 촉매반응을 중지시키는 이런 조절 기능이 있어서 적절한 양의 오존층이 유지되고 있으며, 따라서 이런 조절기능이 없이 걷잡을 수 없는 속도로 오존이 파괴되는 일은 도저히 일어날 수 없다는 것이 당시 과학자들의 생각이었다. 그러나 오존구멍은 예상을 뒤엎고 이런 일이 일어날 수도 있다는 것을 보여준 것이다.

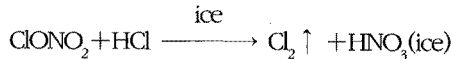
### 극성층운의 마술?

저장화합물인 ClONO<sub>2</sub>와 HCl이 서로 반응하여 염소(Cl<sub>2</sub>)가 생성될 수 있다는 것은 이미 알려져 있었다(ClONO<sub>2</sub>+HCl→Cl<sub>2</sub>+HNO<sub>3</sub>). 이 염소가 광분해하여 염소라디칼이 되면 오존분해의 촉매반응에 다시 참여할 수 있게 된다. 그러나 기체 상태에서 일어나는 이 반응은 속도가 너무 느려서 과학자들의 고려 대상이 아니었다.

그런데 오존 구멍 발견이후 수행된 새로운 연구결과 만약 이 반응이 얼음 표면에서 고체상의 물질과 기체상의 물질이 함께 반응에 참여하는 반응, 즉 불균일반응으로 진행된다면 그 속도가 상당히 빠르다는 것을 알게 되었다. 그리고 바로 극성층운(PSC)이 위 반응의 속도를 촉진시키는 얼음의 역할에 매우 성공적으로 진행시킬 수 있다는 것도 알게 된 것이다.



▶ 지구 역사를 통하여 공기 중의 산소와 오존의 농도가 변화한 모습. 성층권에 오존층의 형성이 충분히 이루어진 후 육상에 생물이 등장하는 것을 볼 수 있다



햇빛이 없는 남극의 겨울 동안 극소용돌이 내의 성층권의 기온이 더욱 낮아져 영하 80도 이하까지 내려가면 질산(HNO<sub>3</sub>)을 함유하는 얼음결정이 만들어질 수 있으며, 위 반응과 같이 이런 극성층운의 도움 하에 열심히 염소가 만들어진다. 더구나 이런 입자에 얼음이 다시 두껍게 덮여 무거운 얼음덩이가 되면 중력에 의하여 대류권으로 가라앉게 되며, 이로 인해 성층권에는 질산을 만드는 원료인 NO<sub>x</sub>의 양이 현저히 줄어드는 결과를 초래한다.

이런 환경의 극소용돌이 내의 성층권에 초봄이 되어 햇빛이 비치기 시작하면 겨울동안 누적되어 있던 염소가 광분해되면서 오존을 분해하는 촉매반응을 시작한다. 문제는 이 파괴반응의 속도를 조절해줄 NO<sub>x</sub>가 이미 성층권에서 사라져 버린 데 있었다. 마침내 고삐 풀린 망아지처럼 조절기능이 상실된 오존층 파괴 작용이 미친 듯이 진행될 수 있다. 이를 억제시킬 수 있는 조절 기능이 회복되는 것은 햇빛의 도움으로 점점 따뜻해진 극소용돌이가 12월 정도가 되면서 마침내 불안정하게 되어 깨어지는 시기이다. 주위의 공기와 섞일 때 함께 유입된 NO<sub>x</sub>가 염소와 반응하여 저장화합물을 만들어

내면서 오존 파괴의 조절 기능이 다시 살아나는 것이다.

### 북반구도 예외가 아니다

근년에 와서는 북극 주위에서도 북반구의 초봄이면 작은 규모이기는 하나 오존 구멍이 발견되고 있다. 우리나라는 다행스럽게 조금 빗겨있으나 유럽 상공에 작은 오존 구멍이 만들어지는 것이 분명히 확인되어 걱정이 더욱 커지고 있는 것이 사실이다. 북반구도 남극대륙에서 보다는 작은 규모이며 다소 불안정하기는 하지만 극소용돌이가 만들어지면서 남극에서와 마찬가지로 이유로 오존구멍이 만들어지는 것이다.

이미 앞서 살펴보았던 대로 오존이 발견된 것이 약 170년 전 일이고 오존층의 존재가 예언된 것이 130년 전의 일이다. 그렇지만 실제 오존은 지구 역사를 통하여 오랜 시간 동안 우리 생명체의 유지에 결정적인 역할을 하여왔다. 46억년의 지구 역사에서 생물들의 역사는 30억년을 넘지만 육상에 생물들이 본격적으로 등장한 것은 지난 4억년도 채 되지 않는다. 어떤 이유에서일까?

### 산소의 진화

오늘날 지구의 대기는 비교적 안정된 조성을 유지하고 있는 것이 사실이지만, 지질학적으로 긴 시간을 거슬러 올라가면 중요한 변화가 있었다는 증거가 남아 있다. 그중 가장 중요한 것이 바로 대기 중의 산소 농도의 변화이다.

과학자들은 과거 대기 중 산소의 농도를 추정해 알아갈 수 있는 여러 흔적들을 살펴면서 대기 중 산소 농도의 변화 과정을 보이는 사나리오를 만들고 있다. 탄생 초기 지구의 대기에는 태양성운을 이루고 있었던 기체나 먼지의 잔해인 수소가 풍부했다. 또 꽤 풍부한 물의 공급원도 가지고 있었다. 더욱이 지구로 볼 때 아주 다행스러웠던 것은 적절한 탄산가스 등에 의한 온실효과로 인해 이들이 액체 상태로 존재할 수 있는 표면 온도를 가질 수 있었던 것이다. 그리고 질소와 적은 양이지만 황화수소, 암모니아, 메탄 등이 있었을 것으로 생각된다. 그러나 분자 상태의 자유로운 산소가 없었음은 분명하다.



물론 높은 상공에서는 대기 중의 수증기가 광분해하여 산소가 서서히 생성되기는 했다. 그러나 본격적인 산소의 생성은 지금부터 약 38억~35억 년 전 즈음에 광합성 능력을 가진 박테리아가 등장하면서부터이다. 이때 만들어진 반응의 부산물이 바로 산소였다. 대기 중으로 방출된 산소는 즉각 물에 녹아 있던 철 이온에 붙잡혀 침전으로 가라앉았다. 이 과정은 꽤 오랫동안 진행되었던 것으로 여겨지는데, 지구의 여러 지역에서 발견되는 옛 산화철의 '적색층'에서 볼 수 있다.

산소의 생성 속도가 철에 의한 퇴적 속도를 증가하기 시작한 약 20억 년 전에 이르면 산소가 마침내 대기 중에 축적되기 시작한다. 옛 대기를 연구하는 화학자들은 산소분자의 진화 역사에서 이정표가 되는 세 시기의 산소량을 대략 다음과 같이 추정하고 있다. 약 20억년 전(2Gyr BP)에는 대기의 산소가 현재 값의 약 1%에 이르고, 약 7억년 전(700Myr BP)에는 대기의 산소가 현재 값의 약 10%에 이르며, 약 3억5천만년 전(350Myr BP)에는 대기의 산소가 현재의 값에 이른다는 것이다.

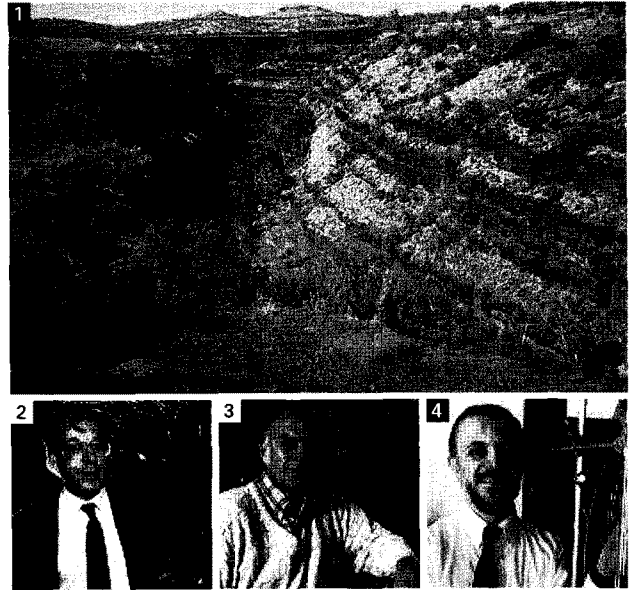
### 오존층은 생명계의 아킬레스건

대기 중 산소의 출현은 지구상에 살고 있는 생명계에 또 하나의 선물을 안겨주었다. 태양으로부터 날아오는 강력한 에너지를 가진 자외선으로부터 지상의 생명을 보호해줄 수 있는 필수적인 보호막 역할을 하는 오존층을 지구 상공에 만들어낸 것이다. 대기 중에 산소의 농도가 증가함에 따라 오존층 또한 점점 두꺼워지면서 지구는 치명적인 태양의 자외선복사로부터 보호되기 시작했고, 이런 환경의 변화는 결국 생물의 진화에도 엄청난 영향을 끼쳤다. 해양에서 육상으로 생물이 삶의 터전을 넓혀간 시기는 바로 대기 중에 충분히 산소가 누적되면서 적절한 오존층이 만들어진 후의 일이다. 그 이전에는 유해한 자외선의 영향을 바닷물 속에서 피할 수 밖에 없었던 것이다.

오존층의 형성은 생명체 스스로가 지구를 더욱 적절한 생명의 행성으로 적극적으로 바꾼 중요한 사건이었다. 이러한 연유로 오존층을 바로 우리 생명계의 아킬레스건이라고도 부르고 있는 것이다.

### 오존층 보호 위해 몬트리올 의정서 체결

남극해 지역의 생물들이 이미 오존층의 감소로 인하여



▶ 1 오스트레일리아의 헤머슬리 지역에 있는 신캄브리아기의 갈철광으로 이루어진 적색층. 이런 적색층은 지구생성 초기에 대기로부터 산소를 공급받아 만들어진 것으로 생각되며 이런 퇴적으로 인하여 대기중에 산소가 축적되는 속도가 지연된 것으로 여겨진다. 2 오존층 내에서의 화학을 규명한 공로로 1995년 노벨 화학상을 수상한 크루첸 3 로울랜드 4 몰리나

늘어난 유해한 자외선의 영향을 받기 시작한 것 같다는 연구결과는 우리 마음을 어둡게 하는 것들의 하나이다. 이 문제가 뎡윈의 나라 남극뿐만 아니라 이제는 사람들이 많이 살고 있는 북반구도 예외가 아님을 알고 있다. 지구환경보호를 위한 전 지구적 노력에 더욱 관심을 가져야 할 때임이 분명하다. 다행스럽게도 오존층을 보호하기 위한 몬트리올 의정서가 오존구멍이 처음 발견된 후 불과 2년만인 1987년에 체결되었고, 오존층 파괴물질의 사용 금지를 더욱 앞당기려는 개정안이 스톡홀름과 런던에서 두 차례에 걸쳐 이루어졌다.

더구나 1995년에는 오존층 화학의 이해에 중요한 기여를 한 과학자 크루첸, 몰리나 및 로울랜드에게 노벨화학상이 수여되면서 오존층 보호에 대한 전인류적 경각심을 더욱 높여 주었다.

이런 전지구적 노력이 조금씩 축적되면서 사람들의 노력이 효과를 보이는 것으로 여겨지는 자료들이 얻어지고 있는 것이 다행이다. 다음 글에서 몬트리올 의정서 이후 전 인류가 오존층 보호를 위하여 진행하고 있는 노력을 살펴보면 오존의 문제를 마무리하기로 하자. ST