

## 환경 이슈

## 1. 남극 상공 오존 홀의 최근 현황과 전망

## 요약

## (1) 오존층의 역할 및 오존 홀 생성 메카니즘

- 오존층은 복사에너지를 흡수해 지구의 열수지를 적정하게 조절할 뿐만 아니라 자외선을 흡수해 지상의 생명체를 보호하는 차단막 역할을 함
- 성층권의 오존은 대류권을 통해 성층권으로 유입된 염소를 함유한 화합물이 자외선을 받아 광분해되면서 발생한 염소기와 반응하여 분해됨

## (2) 오존 홀의 특성

- 남극 상공의 오존층은 흑한기가 끝나는 8월부터 햇빛에너지가 강해지면서 파괴되기 시작해 8월 중순 이후에는 파괴 속도가 급격히 증가함
  - 이에 따라 오존 홀의 크기는 9월 중순에서 10월 초 사이에 최대 규모에 이름
- 남극의 여름이 시작되는 12월부터는 외부 공기와외 차단벽 역할을 하는 남극 상공의 와류가 사라지면서 외부 공기가 유입되어 오존층은 정상으로 회복됨

## (3) 최근 현황

- 금년 8월 이후에 급속히 확장되던 오존 홀의 면적은 9월 10일에 러시아와 중국을 합한 것보다 넓은 약 2,910만 km<sup>2</sup>를 기록해 사상 최대 규모에 도달하였으나 그 후에는 감소 추세를 보임

## (4) 향후 전망

- 오존층 파괴물질에 대한 국제협약인 몬트리올 의정서에 따른 규제를 통해 2010년경부터 오존 농도가 회복되기 시작해 2050년경에는 남극 상공의 오존이 정상화될 것임
  - 대기 중 프레온의 농도는 1990년대 초반 이후 증가세를 멈추는 등 긍정적인 효과가 이미 나타나고 있음
- 기업은 청정생산 공정을 도입하거나 공정 최적화를 통해 사용량 및 방출량을 최소화함으로써 시민기업으로서의 책임을 다해야 할 것임
  - 이러한 기업의 노력은, 그린마케팅으로 연결될 수 있어 환경보전과 기업의 지속성을 다 살릴 수 있는 相生의 모티브로 활용할 수 있게 됨
- 단기적으로 오존층 파괴물질을 회수하고 처리하는 사업의 필요성이 커질 것임

## (1) 오존층의 역할 및 오존 홀 생성 메카니즘

○ 오존은 지표에서부터 지상 60 km까지 존재하는데 약 90%가 밀집되어 있는 지상 15~40 km의 성층권<sup>1)</sup> 구역을 오존층이라 부름

- 표준상태<sup>2)</sup>에서 오존층 오존의 총량은 두께가 2.5~4 mm(250~400 DU<sup>3)</sup>)에 불과해 지상의 공기가 표준상태에서 약 10 km 두께를 보이는 것에 비해 매우 적은 양에 불과하지만 지구상 동·식물들의 생명을 유지시키기 위해 필수적인 기능을 수행함
- 오존층은 복사에너지를 흡수해 지구의 열수지를 적정하게 조절함
  - 지구 대류권으로 유입되는 320 nm 이하의 빛에너지 중 99%를 흡수하여 대류권의 기온을 적정하게 유지시키고 있음
- 오존층은 자외선을 흡수해 지상의 생명체를 보호하는 차단막 역할을 함
  - 피부암을 일으키고 면역체계를 저하시키며 안구질환을 악화시킬 뿐만 아니라 식물들의 광합성을 저해시키는 자외선을 오존층은 막아 줌
  - 과학적인 연구결과에 따르면 오존층이 사라지게 되면 지상의 생물들 역시 존재할 수 없게 될 것이라고 함

○ 오존은 염소를 함유한 화합물이 성층권에서 자외선을 받아 광분해되면서 발생한 염소기와 반응하여 분해됨

- 냉매나 용제, 에어러졸 등에 이용되는 염소화합물은 매우 안정하므로 대류권을 넘어서 성층권 약 30 km 상공까지 도달하는데 이곳으로 복사되는 220 nm 이하의 자외선에 의해 광분해되면서 염소기를 방출함<sup>4)</sup>
  - 염소기는 오존과 반응해 일산화염소가 되며 오존을 분해함<sup>5)</sup>

1) 지구의 대기권은 고도에 따른 온도 변화에 따라 네 개의 구역으로 구분하는데, 고도가 높아짐에 따라 온도가 낮아지는 지상에서 약 10 km까지 구간을 대류권이라 하며 대류권 위층에 존재하면서 고도가 올라갈수록 온도도 같이 높아져 매우 안정한 대기층을 이루고 있는 지상 10~50 km까지 구간을 성층권이라고 하며 고도에 따라 온도가 다시 낮아지는 지상 약 50~80 km까지 구간을 중간권, 고도에 따라 온도가 다시 상승하는 고도 80 km 이상을 열권 또는 전리층이라고 함

2) 0 °C, 1 기압 상태를 이룸

3) DU : Dobson Unit의 약자로 주어진 면적 상의 대기 꺾림에 존재하는 오존의 총량을 표준상태(0 °C, 1 기압)에서 나타내는 두께로 환산하여 1 mm를 100 DU로 정의하는데 대체로 극지방에서의 오존 총량은 400 DU, 적도지방의 경우에는 250 DU 정도를 나타냄

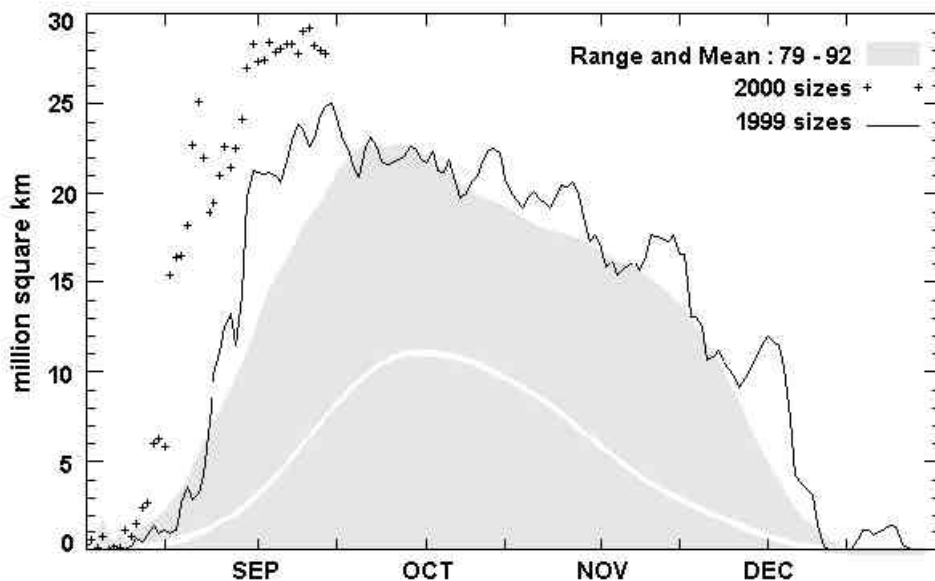
4) 염소화합물  $\xrightarrow{UV}$  중간체 + Cl· (염소기)

- 여기에서 생성된 일산화염소는 오존이 분해되면서 발생한 산소원자와 반응해 염소기를 다시 배출하게 되며 이러한 순환반응<sup>6)</sup>이 10만 번 정도 되풀이되면서 엄청난 양의 오존이 분해되는 것임
- 오존이 분해됨에 따라 정상시에 약 250~400 DU를 나타내던 오존량이 감소되기 시작하여 주어진 대기 컬럼에서의 오존 총량이 220 DU 이하(표준상태에서의 두께 2.2 mm)로 낮아진 지역을 오존 홀이라고 함
- 오존 홀은 기후 특성상 남극에서 주로 나타나는 현상이며 간혹 북극에서 관측되기도 하지만 규모가 남극에 비해 매우 적은 소규모임

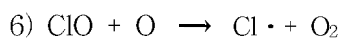
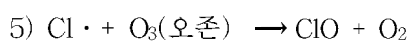
## (2) 오존 홀의 특성

- 남극 상공의 오존층은 흑한기가 지나는 8월부터 파괴되기 시작해 8월 중순 이후에는 오존 홀의 면적이 급격히 증가함(그림 1)

< 그림 1 > 남극 상공에서 나타나는 오존 홀 면적의 계절별 변동 추세



자료 : 미국 NASA, <http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/dataqual/ozone.html>, 2000



- 겨울철이 되면서 성층권 하부에서 염소기가 질산결정과 함께 결빙된 입자로 구성된 극성층운이 생성됨
  - 겨울철에 남극 상공의 대기는 서쪽으로 순환하는 와류 운동을 하면서 남극의 대기를 주위 대기과 격리시켜 열전달을 차단하여 성층권의 기온이  $-80^{\circ}\text{C}$  이하의 매우 낮은 상태로 유지되도록 함으로써 성층권 하부 약 20 km 상공에 극성층운<sup>7)</sup>이 형성됨
  - 이 때 결빙 내에는 대류권으로부터 공급된 염소기가 농축되어 저장됨
  - 대기의 와동은 수개월 동안 유지되다가 봄에 접어들면서 깨지기 시작함
- 봄이 시작되면서 햇빛에너지가 강해지게 되면 극성층운은 증발하게 되고 결빙되어 있던 농축된 염소기가 성층권으로 방출됨에 따라 오존 파괴반응은 급격히 시작됨
  - 오존층 파괴는 대개 8월에 시작되는데 8월 중순부터 강화되어 9월 중순에서 10월 초순에 걸쳐 최대를 나타내며 12월초부터는 없어짐(그림 1)
- 봄을 지나 여름이 될 무렵에는 기온이 상승해 와류가 만든 차단벽이 사라지게 됨
  - 비교적 오존 농도가 높은 바깥쪽 공기가 남극의 성층권으로 유입되어 오존층은 정상으로 돌아가게 됨

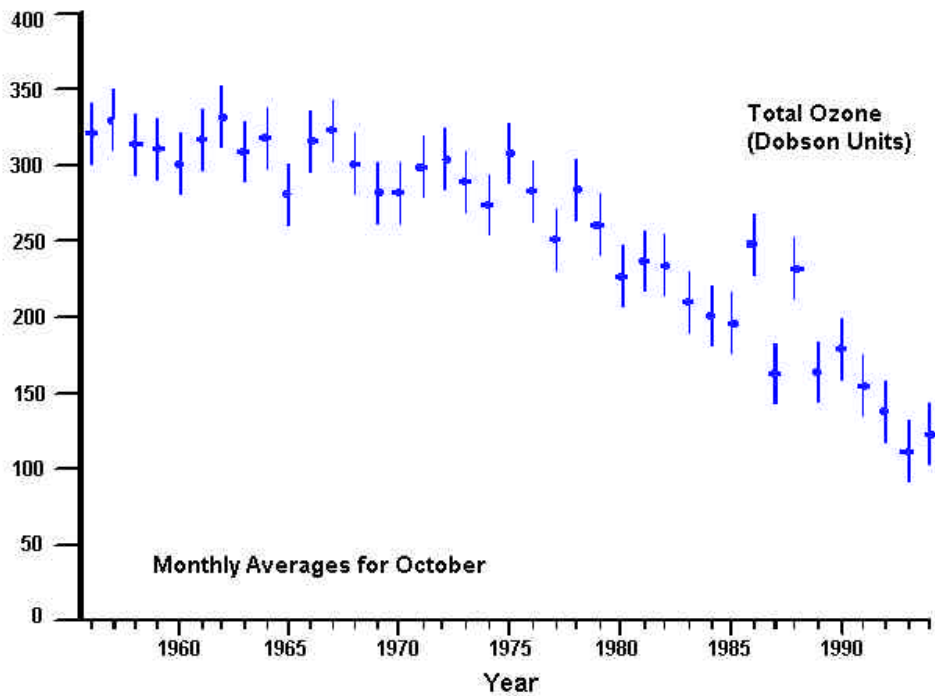
### (3) 최근 현황

- 지금까지 기록된 가장 큰 오존 홀은 1998년 9월 19일, 21일에 남극 상공에서 관측된 것으로서 약 2,700만  $\text{km}^2$ 를 기록해 러시아와 중국을 합친 면적보다 컸음<sup>8)</sup>
  - 남극에서의 오존 농도는 지난 1970년대 후반 이후 지속적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며(그림 2) 금년 들어 오존 홀의 크기가 매우 커지고 있는 추세임(그림 1의 +표시)
  - 작년에는 오존 홀의 최대 면적이 약 2,500만  $\text{km}^2$ 로 전년에 비해 작아졌으나 여전히 그 크기는 한반도의 114 배에 이르는 거대한 것이었음

7) 염소화합물의 배출이 압도적인 북반구에서 남반구에 비해 비교적 미약한 오존 홀이 생성되는 것은 북극에서는 남극에서처럼 기온을  $-80^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어뜨리는 대기의 와류운동이 생기지 않아 강력한 극성층운이 형성되지 않기 때문임

8) 러시아의 면적은 17,075,200  $\text{km}^2$ 이고 중국의 면적은 9,596,960  $\text{km}^2$ 로서 둘을 합한 면적은 26,672,160  $\text{km}^2$ 임

< 그림 2 > 10월 중 남극에서 관측된 평균 오존량 변화



자료 : University of Cambridge, [www.atmch.cam.ac.uk/tour/part1.html](http://www.atmch.cam.ac.uk/tour/part1.html), 2000

○ 금년에 수행되고 있는 조사에 따르면 남극 상공의 오존층이 평소에 비해 빨리 사라지고 있다고 함

- UN 산하 세계기상기구<sup>9)</sup>는 최근에 인공위성을 이용해 남극 오존층의 변화를 조사한 결과, 동 지역의 오존 량이 오존 홀의 존재가 관측되기 전인 1964-76 기간 동안에 측정된 평균량과 비교해 30%가 감소하였다고 8월 30일에 발표함
  - 이는 세계기상기구가 인공위성을 이용해 2주전 관측한 감소율 15%에 비해 두 배나 감소한 것으로서 이렇게 빠른 감소율은 평소에는 관측되지 않던 현상이며 향후 오존 홀의 크기가 훨씬 커질 가능성을 보이는 것임
  - 이러한 결과는 프랑스(20% 감소), 러시아(35% 감소), 일본 및 우크라이나(25% 감소) 연구팀에 의해서도 동일하게 확인됨
- 9월 2일, 남극 상공의 오존 농도는, 불과 4주전인 지난 8월 8일에 비해 33.6%가 감소하였음

9) World Meteorological Organization (WMO)

- 남극에 위치한 일본 昭和기지 상공의 오존 농도가 8월 8일에는 220 DU를 기록하였으나 9월 2일에는 146 DU를 기록하였음
- 고도 10~25 km 상공에서의 감소현상이 뚜렷하게 관측되었으며 특히 고도 15 km 부근 상공의 오존 농도는 오존 홀이 관측되기 전인 1968~1980년 평균 농도에 비해 70% 가량 감소된 상태를 나타냄

○ 9월 10일에는 오존 홀의 면적이 약 2,910만 km<sup>2</sup>에 달해 지난 1998년의 기록을 경신하였음(그림 1)

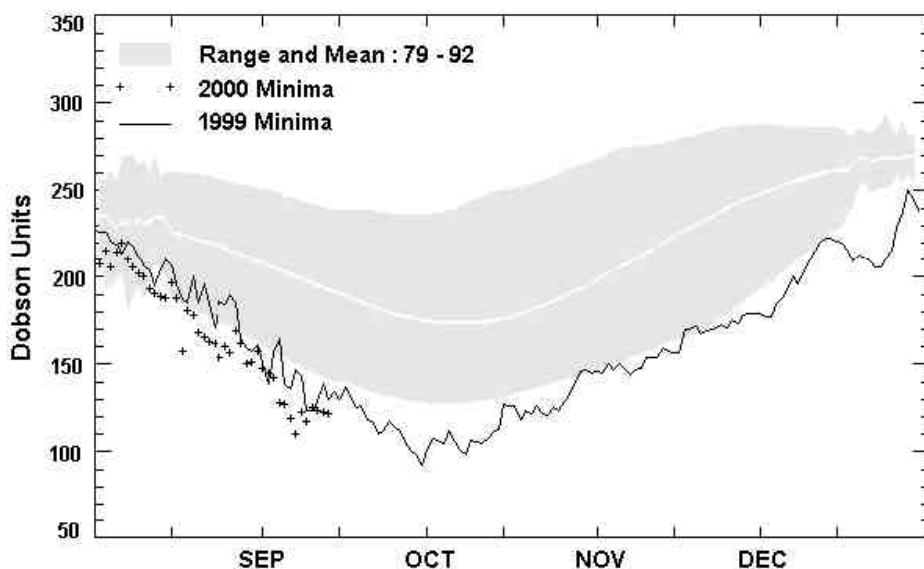
- 미국 NASA의 인공위성에 의한 연속관측에서도 9월 13일, 현재까지 남극 상공의 오존 농도는 계속 낮아지고 있는 추세임

#### (4) 향후 전망

○ 이미 사상 최대 크기를 기록한 남극 오존 홀의 면적은 9월 10일을 정점으로 감소하는 추세를 나타내고 있음

- 오존 홀의 면적과는 달리 남극 상공 오존의 최저 농도는 계속 감소 추세를 보이고 있기 때문에(그림 3) 오존 홀의 면적이 앞으로 증가할 가능성도 배제할 수는 없음

< 그림 3 > 남극 상공에서의 오존 최저 농도 변화 추세



자료 : 미국 NASA, <http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/dataqual/ozone.html>, 2000

- 예년에도 오존 최저 농도의 감소 추세는 10월 초까지 지속되어 왔음
- 이는 오존층 파괴물질에 대한 규제에도 불구하고 이미 배출된 물질들의 화학적인 작용이 끊임없이 일어나고 있음을 의미함
- 대부분의 오존 파괴물질들의 대기 중에서의 체류시간이 길기 때문에 이들이 화학작용을 끝내고 분해되기 전까지는 남극에서의 오존 파괴는 계속 이어질 것임 (표 1)

< 표 1 > 주요 오존 파괴물질의 대기 중 체류시간 (단위 : 년)

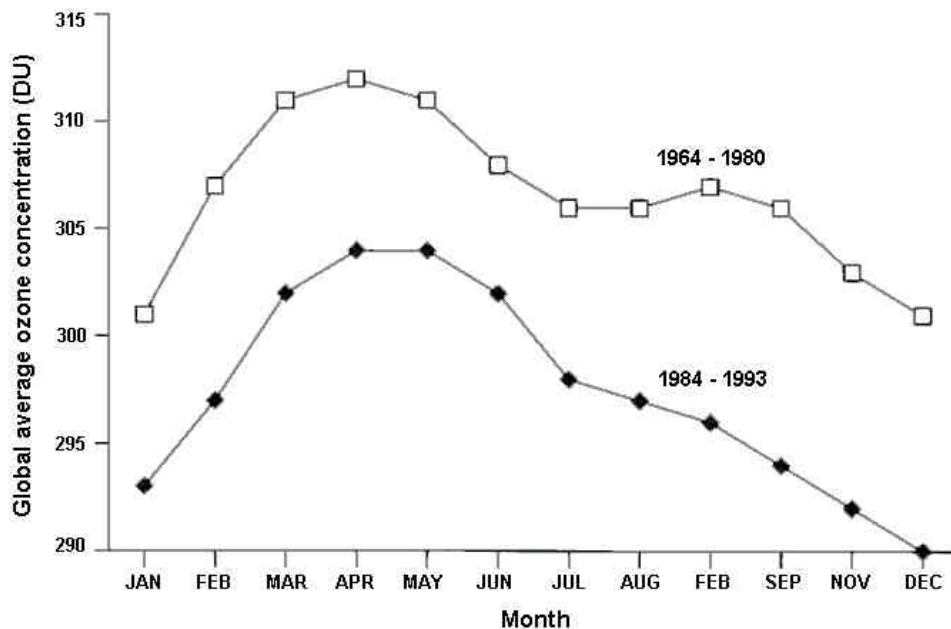
CFC-11	CFC-12	HCFC-22	HCFC-123	CCl <sub>4</sub>	CF <sub>3</sub> Br	HFC-23	SF <sub>6</sub>	CF <sub>4</sub>
50±5	102	13.3	1.4	42	65	250	3200	50,000

자료 : IPCC, 1994

○ 지구 전체적인 열수지를 조절하고 있으며 강력한 자외선을 막아 주는 오존층을 보호하기 위해 몬트리올 의정서를 채택함

- 성층권 오존 농도의 감소현상은 남극 상공에만 국한되는 것이 아니고 전세계적으로 나타나고 있는 현상임(그림 4)

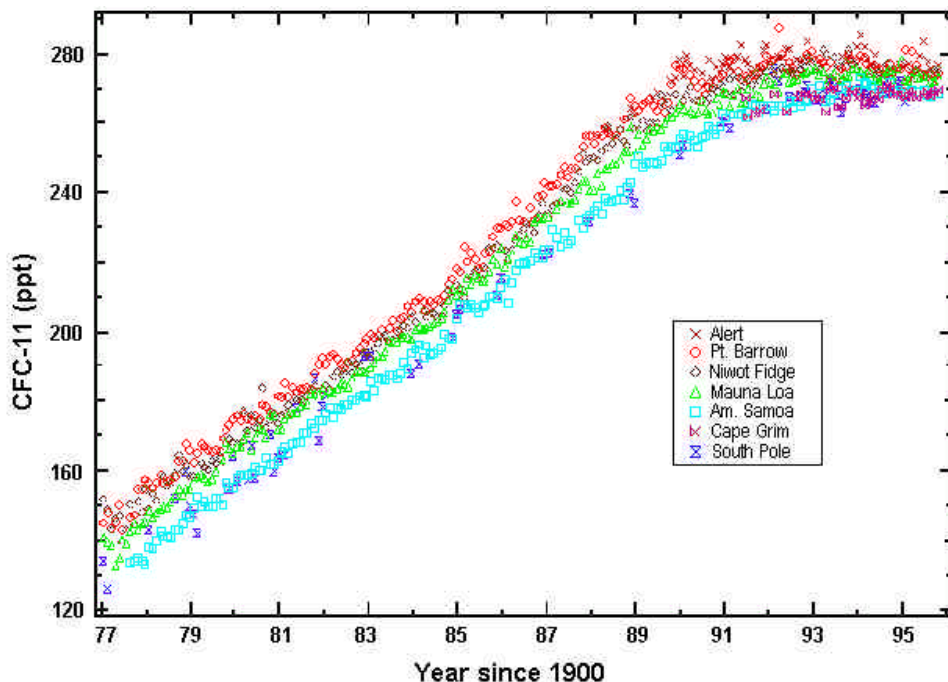
< 그림 4 > 성층권 오존 농도의 전세계 평균 변화



자료 : Bojkov, The Changing Ozone Layer, 1995

- 남극에서 오존 홀이 관측되기 전인 1964~1980년 사이에 성층권 오존의 지구 평균 농도는 301~312 DU 범위를 나타냈으나 이후 1984~1993년 사이에는 290~303 DU로 감소하였음
- 오존층을 보호하기 위해 '오존층 보호를 위한 비엔나 협약'이 1985년에 체결되었고 1987년에는 '오존층을 파괴하는 물질의 사용과 생산을 금지하는 몬트리올 의정서'가 채택됨
- 오존을 파괴하는 에어러졸이나 냉매로 사용하는 프레온과 같이 사람이 만들어낸 오존층을 파괴하는 화학물질에 대한 금지 필요성을 세계가 동의하고 협약을 이행하게 됨
- 이후 '90년 6월 런던 개정안에서 '99년 12월에 체결된 베이징 개정안까지 다섯 차례<sup>10)</sup>에 걸친 수정을 통해 오존층 파괴물질에 대한 규제 강도를 높여 왔음(표 2)
- 이러한 노력의 결과로 '80년대 말까지 꾸준히 높아졌던 프레온의 대기 중 농도는 현재 더 이상 증가하고 있지 않으며(그림 5) 향후 감소추세를 보일 것으로 전망되고 있음

< 그림 5 > 세계 각 지역에서 측정된 프레온(CFC-11)의 대기 중 농도 변화 추세



자료: James W. Elkins, 'The Chapman & Hall Encyclopedia of Environmental Science', 1999

10) 런던 개정안; 1990. 6. 27-29, 코펜하겐 개정안; 1992. 11. 23-25; 비엔나 개정안; 1995. 12. 5-7, 몬트리올 개정안; 1997. 9. 15-17, 베이징 개정안; 1999. 11. 27-12. 3



< 표 2 > 몬트리올 의정서에 의한 오존 파괴물질 규제 일정

선진 국가		개발도상국가	
규제 화합물 (기준년도)	제한 일정	규제 화합물 (기준년도)	제한 일정
주요 CFCs 52종 (1986)	7/1989 : 동결 1994 : -75% 1996 : -100%	주요 CFCs 5종 (1995-97)	7/1999 : 동결 2005 : -50% 2007 : -85% 2010 : -100%
Halons (1986)	1992 : 동결 1994 : -100%	Halons (1995-97)	2002 : 동결 2005 : -50% 2010 : -100%
기타 CFCs 10종 (1989)	1993 : -20% 1994 : -75% 1996 : -100%	기타 CFCs 10종 (1998-2000)	2003 : -20% 2007 : -85% 2010 : -100%
Carbon Tetrachloride (1989)	1995 : -85% 1996 : -100%	Carbon Tetrachloride (1998-2000)	2005 : -85% 2010 : -100%
Methyl Chloroform (1989)	1993 : 동결 1994 : -50% 1996 : -100%	Methyl Chloroform (1998-2000)	2003 : 동결 2005 : -30% 2010 : -70% 2015 : -100%
HCFCs (1989 + 28% of 1989 CFCs consumption)	1996 : 동결 2004 : -35% 2010 : -65% 2015 : -90% 2020 : -99.5% 2030 : -100%	HCFCs (2015)	2016 : 동결 2040 : -100%
HBFCs	1996 : -100%	HBFCs	1996 : -100%
Methyl Bromide (1991)	1995 : 동결 1999 : -25% 2001 : -50% 2003 : -70% 2005 : -100%	Methyl Bromide (1995-98)	2002 : 동결 2005 : -20% 2015 : -100%
Bromochloro- methane	2002 : -100%	Bromochloro- methane	2002 : -100%

자료 : European Commission, 'The Implementation of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer in the European Union', 2000

○ 전 세계적으로 오존층 파괴물질에 대한 생산과 사용을 금지함에 따라 남극의 오존층은 향후 정상 수준으로 회복될 전망이다

- 오존층 파괴물질에 대한 규제는 1987년부터 시작되었지만 2010년 정도에 이르러서야 비로소 오존 농도가 본격적으로 회복되기 시작할 것으로 전망됨
- 남극의 오존층은 비록 더딘 속도이지만 약 2050년경에는 완전히 정상 수준에 도달할 것으로 예측되고 있음

○ 오존층 파괴로 인한 피해로부터 지구 상 어느 누구도 자유로울 수 없으므로 확산을 막기 위한 산업부문의 노력이 가일층 이루어져야 할 것임

- 기업은 청정생산 공정을 도입하거나 공정 최적화를 통해 사용량 및 방출량을 최소화함으로써 시민기업으로서의 책임을 다해야 할 것임
- 산업계에서 사용되는 염소계 화학물질을 식물에서 추출한 자연성 물질이나 무해한 물질로 대체하는 청정생산 공정을 수립하여 유해물질의 배출을 제로화 할 수 있음
- 또한 공정의 최적화를 통해 사용량을 최소화하고 방지설비의 운영효율을 극대화함으로써 대기 중으로 방출되는 양을 극소화 할 수 있음
- 이러한 기업의 노력은, 기업환경보고서, 언론 등 적절한 매체를 통해 적극 홍보에 나설 때 그린마케팅으로 연결될 수 있어 환경보전과 기업의 지속성을 다 살릴 수 있는 相生의 모티브로 활용할 수 있게 됨

○ 향후, 오존층 파괴물질을 회수·처리하는 사업이 중단기적으로 부각될 것임

- 몬트리올 협약에 따라 전 세계적으로 2010년까지 대부분의 오존층 파괴물질의 사용을 중단하기로 함으로써 각 국가별로 오존층 파괴물질을 회수하고 처리하는 사업의 필요성이 증대되고 있음
- 북미, 유럽 및 일본 등 선진국가의 폐가전제품 리사이클법과 맞물려 수요가 커지고 있음
- 일본의 경우, 1,000여 개의 지방자치단체 중심으로 킨론이나 유동상 조각로를 이용해 프레온 가스를 회수하고 처리하는 사업을 진행 중이나 코오베 철강, 일본 석유 등의 업체들도 프레온 회수·처리 사업에 나서고 있음
- 비록 단기적이긴 하지만 중국 등 개발도상국가 중심으로 진출 가능한 시장이 형성될 것으로 전망됨
- 중국은 지난 8월, 자동차, 전자 등 산업계에서 광범위하게 사용하고 있는 스프레이 분사제인 CFC-113과 메틸 클로로포름의 사용 금지 시한을 오는 2009년까지, 사염화탄소를 오는 2004년까지로 앞당겨 금지키로 하는 등 대부분의 개발도상국가들이 비슷한 상황임

기 준 학(02-3669-4097, hiemjhki@shinbiro.com)