

대기오염
제13장
대기과학 및 실험 (2022)



박 기 현 (Kiehyun.Park@gmail.com)

과학영재학교 경기과학고등학교

2022년 11월 9일





대기 오염의 정의

- 대기 중에 인위적으로 배출된 오염물질이 한 가지 또는 그 이상이 존재하여, 오염물질의 양과 농도 및 지속시간에 따라 어떤 지역의 불특정 다수에게 불쾌감을 일으키거나 해당지역에 공중보건상의 위험을 끼치고, 인간이나 동식물의 활동에 위해를 주어 생활과 재산을 향유할 정당한 권리를 방해받는 상태(세계보건 기구:WHO)
- 대기 오염은 외기 중에 1종 이상의 오염 물질이 존재하여, 이러한 물질의 성질과 존속에 의해 인체, 동식물 및 재산에 피해를 주거나, 혹은 쾌적한 생활 및 재산에 부당하게 관여되는 것(미국 기술자 총연합회)
- 사람, 동식물의 생명 혹은 재산에 해가 되거나 해가 될 정도로 충분한 양만큼, 그리고 충분한 기간 동안 1가지 혹은 그 이상의 오염물질이 대기에 존재하는 것(애리조나주 대기 오염 규정)
- 대기 오염이란 대기의 자정 능력 이상의 오염물질이 대기 중에 방출되어 특정 지역의 다수인에게 불쾌감을 주는, 혹은 인간과 동식물 및 재산에 유해하고 쾌적한 생활을 방해하는 대기 상태 (대기과학개론)

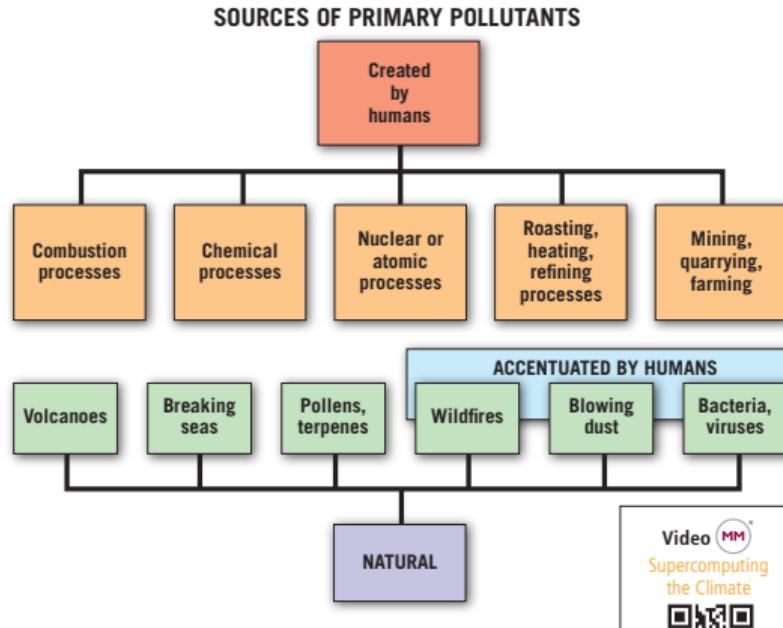


대기오염의 역사

대기 오염은 20세기에 들어서 갑자기 나타난 것이 아니라 대략 11세기부터 서서히 발생해 왔음.

- 석탄 연소 금지 선언(1300년 경, 영국 에드워드 1세)
- 석탄 사용 금지(1578년, 엘리자베스 1세)
- 런던 도시 공장 이전 및 녹지대 설정(1661년, 에브린)
- 대기 오염 연구 위한 선발위원회 구성(1741, 1843, 1845)
- 가축의 참사 사건(1875년)
- 벨기에 뮤즈(Meuse) 계곡(1930), 일본 도쿄-요코하마 천식(1946), 미국 도노라(1948) 사건
- 런던 스모그(1952), 로스앤젤레스 스모그(1954) 사건
- 우리나라는 1960년대 말부터 대기 오염이 나타났으며, 1970년대부터 심화됨
- 대규모 사망 사건은 없었으나 대기 오염에 의한 분쟁 건수가 증가 추세

오염물질 발생원



- 자연적 발생원원
- 인위적 발생원

자연적 발생원



Figure 13.1 Natural source of air pollution These plumes of smoke billowing into the sky from a wildfire in southern Georgia are an example of natural air pollution. Lightning started the fire on April 28, 2011, and on May 8, when this satellite image was acquired,

- 인간 활동과 관계없이 오염 물질을 발생시키는 발생원
- 농도가 높지는 않지만, 주변에 항시 존재
- 화산폭발 : 화산재, 가스(황산화물, 메탄) 방출
- 산불 : 매연, 탄화수소, CO, 질소산화물 방출
- 해양 : 해염입자
- 식물

자연적 발생원



B.

winds. It was because of ston
Plains were called the *Dust Bow*
saw Dust Bowl-like condition
Great Plains. The event shown

"I want the sky to be filled
and upon that cloud of sm
petual promise. That is wl
of the world's population :
quantities of atmospheric p

Since the 1970s, the
of regulations and standa
nology have greatly reduc
pollution episodes in the

인위적 발생원

▼ **Figure 13.4 Stacks belching smoke and soot** Scenes such as this one of steel mills in western Pennsylvania in the late 1940s were once considered a sign of economic prosperity.

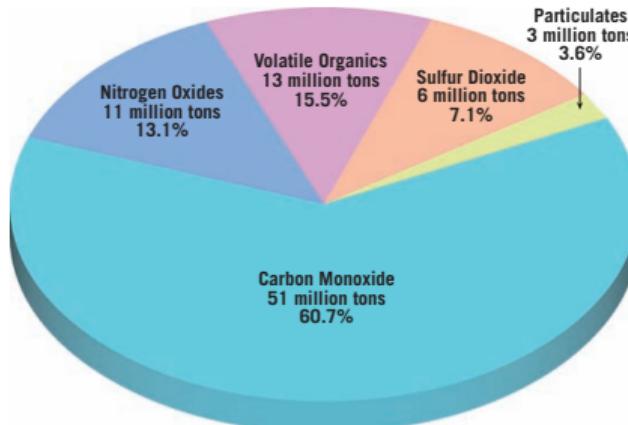


- 인간 활동에 기인한 것
- 가정 난방이나 발전소의 원료(목재, 석탄, 석유)에 의해 아황산가스, 질소산화물
- 공장의 중금속 등 오염물질 배출



오염물질의 분류

the United States in 2012 Percentages are calculated on the basis of weight. The total weight in 2012 was 84 million tons.



대기 오염원은 생물체의 건강과 복지를 위협할 수 있는 농도를 가진 입자와 가스

- 1차 오염물질: 오염원에서 직접 대기로 방출되어 방출 즉시 대기를 오염시킴

입자상 물질(Particulate Matter, PM) : 미세먼지
이산화황(SO₂), 질소화합물(NO_x), 휘발성
유기화합물(VOC), 일산화탄소(CO), 납(Pb)

- 2차 오염물질: 1차 오염원들의 화학반응에 의해 대기 중에서 생성

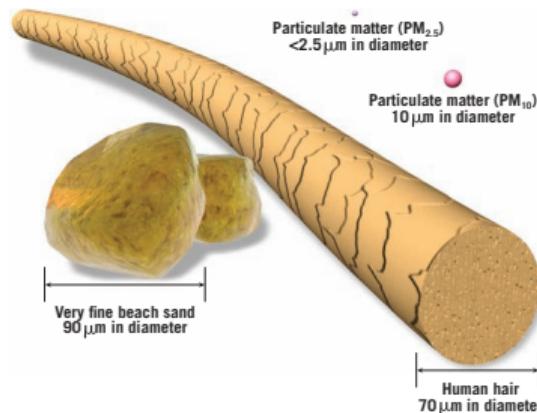
오존, 질소산화물, 휘발성 유기물질이 강한 태양
빛을 매개로 다량의 유독성을 지닌 2차 오염물을
생성함.

- 가스상 오염물질: 탄소 산화물, 황 산화물, 질소
산화물 등 대기 중의 양은 적으나 적은 양으로도
큰 피해를 끼침

- 입자상 오염물질(분진, 에어로졸): 먼지, 스모그,
안개 등 포함한 고체와 액체상으로 구성 가벼운
것은 대기 중에서 떠다니는 가스상 오염물질보다는

입자상 물질(Particulate Matter: PM)

vironment.

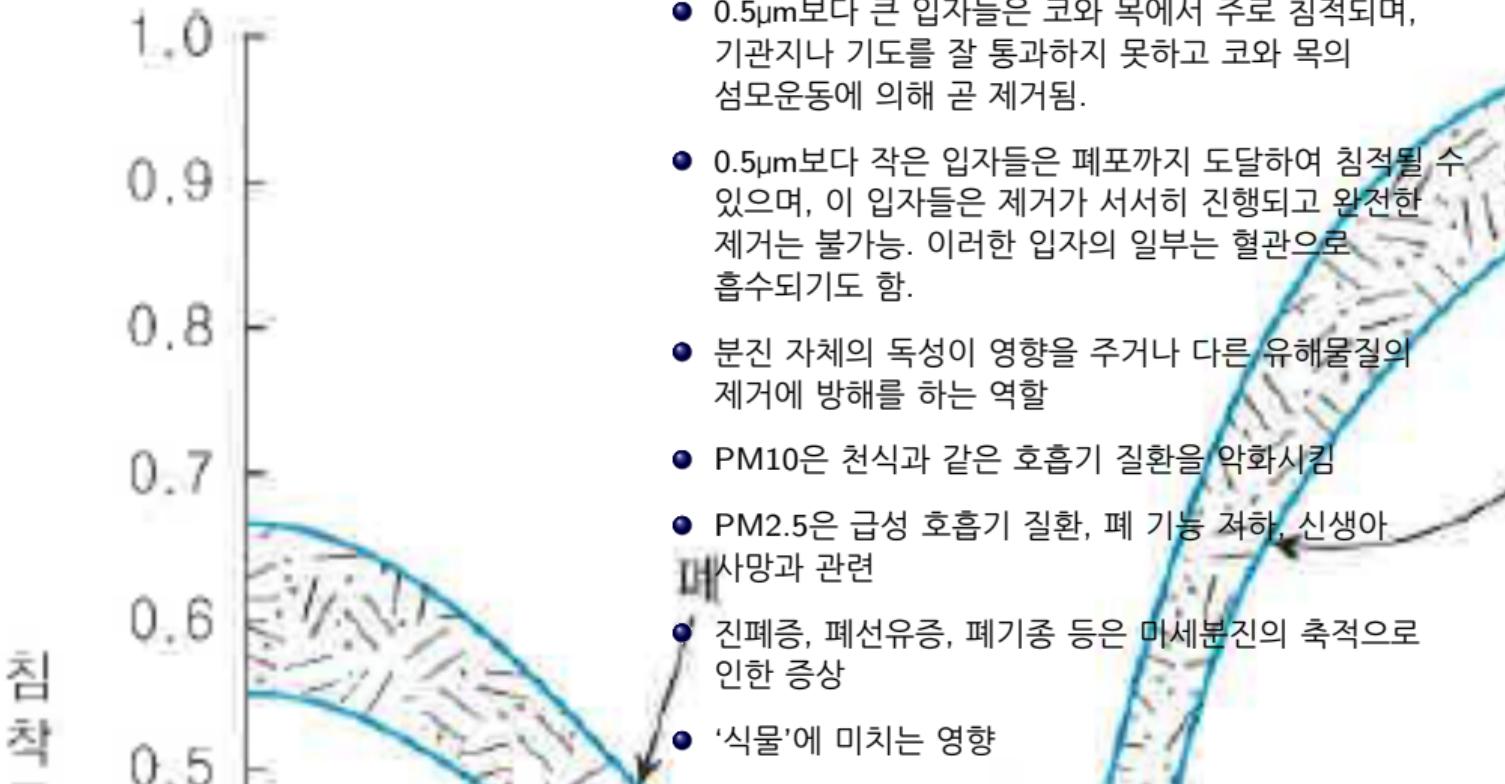


▲ **Figure 13.6 Particulate matter (PM)** This category is a complex mixture of extremely small particles and liquid droplets. The size of particles is directly linked to their potential for causing health problems. Particles 10 micrometers in diameter or smaller frequently pass through the nose and throat and enter the lungs. Once inhaled, these particulate

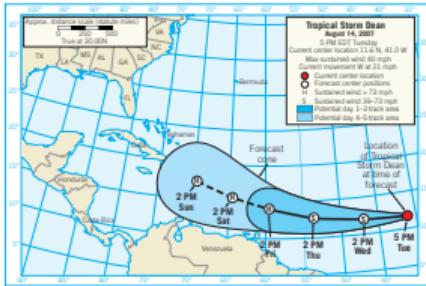
- 생물분진 : 진드기, 박테리아와 바이러스, 꽃가루 등
- 자동차 매연, 공장의 굴뚝 연기, 제철소나 소각장 등의 먼지, 쓰레기 불법 연소
- 사람이 움직일 때, 요리할 때 등
- 해염(파도가 부서질 때 생기는 소금 알갱이)
- 황사, 화산재나 유성의 재
- 미세먼지(PM10)는 직경 10μm보다 작은 입자로 보통 비포장 도로의 운송, 분쇄, 압착 등의 과정에서 발생
- 초미세먼지(PM2.5)는 직경 2.5μm보다 작은 입자로 교통 수단, 발전소, 공장의 연료 소비와 주택 난방에 의해 발생

입자상 물질의 영향

인체에 미치는 영향



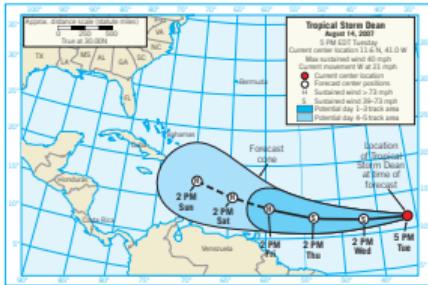
입자상 물질의 영향



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- ‘구조물’에 미치는 영향
- 자체 부식성 물질 또는 입자상물질에 부식성 물질이 흡착 혹은 흡수될 경우 화학적 피해 발생
- 분진은 대개 점성이 있고 산성을 띠고 있어서 표면에 부착되거나 부식을 쉽게 일으킴
- 페인트가 건조되기 전에 분진 입자에 의해 쉽게 손상을 입을 수 있음
- ‘태양복사 및 기후’에 미치는 영향
- 태양빛을 산란하여 시정을 감소시킴 ($0.1 \text{--} 1.0 \mu\text{m}$ 일 때 산란도 최대)
- 분진의 산란과 흡수에 의해 지표면에 도달하는 태양복사량 감소시킴
- 수분을 응축할 수 있는 핵과 같은 역할을 하므로, 대기 중의 분진의 양이 증가하면 강수량이 증가될 수 있음.

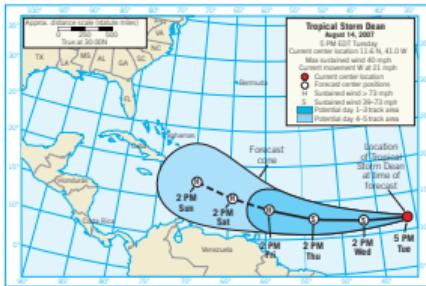
가스상 물질: 이산화 황(SO₂)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- 석탄이나 석유와 같이 황을 포함한 연료가 연소될 때 방출되는 무색 기체
- 주요 방출원 : 발전소, 제련소, 제지공장, 정유시설
- 이산화 황과 산소 분자와의 반응으로 삼산화 황이 생성되고, 물 분자와의 빠른 반응에 의해 황산이 생성됨. 이렇게 생성된 황산은 황산 미스트 혹은 황산 에어로졸임.

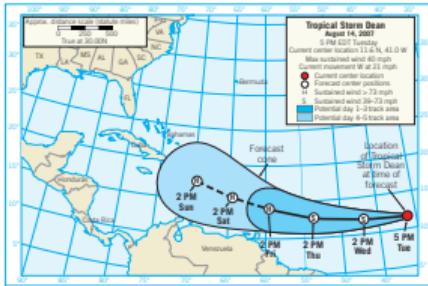
이산화 황(SO₂)의 영향



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- ‘인체’에 미치는 영향
- 황산 에어로졸은 폐포를 자극하여 팽창시키며, 그 결과 작은 폐포가 엉겨 붙어 큰 폐포가 되면서 산소와 이산화 탄소를 교환하는 호흡 면적을 감소시켜, 호흡 곤란 증세를 유발함.
- 특정한 사람(노약자, 심장 혹은 호흡 기계통의 만성 질환자)에게 심각한 영향을 줌
- 천식 증상을 지닌 아이나 야외 활동하는 성인들의 호흡기 질환 및 폐기능 약화, 장기간 노출시 심장 질환 유발
- 저농도에서도 호흡기 자극, 용해도가 높아 기도에 용이하게 흡수, 기관지 점막 자극하여 가래 유발
- 산성비의 원인(부식성) : 대기 중 황산입자가 비와 눈과 함께 풍하측에서 하강

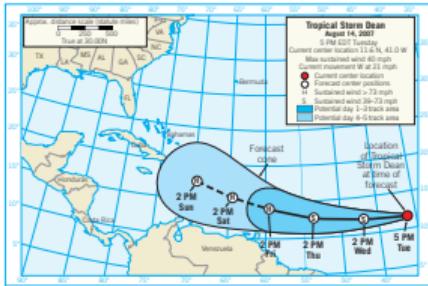
이산화 황(SO₂)의 영향



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- '식물'에 미치는 영향
- 급성피해 : 고농도의 이산화 황에 단시간 노출되어, 식물 잎이 마르거나 탈색되어 고사.
- 만성피해 : 저농도의 이산화 황에 장시간 노출되어 잎 색깔이 황색으로 변색, 잎이 떨어짐.
- 기공이 열린 날이 밤보다 피해가 심함
- 식물의 종류나 기온, 습도, 토양의 종류에 따라 피해 정도는 다양함
- '각종 물질'에 미치는 영향
- 페인트가 이산화황에 노출시 건조 시간이 길어지며, 연화하여 쉽게 훼손됨.
- 금속류의 부식률 가속, 건축재에 포함된 탄산염을 황산염으로 전환시켜 건축재 부식시킴

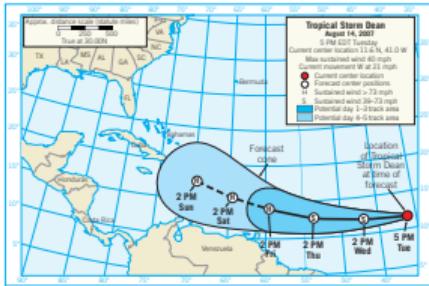
가스상 물질: 질소 산화물(Nox)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- 질소 성분이 포함된 연료를 고온으로 연소시킬 때 산소와 결합하여 생성
- 세균에 의한 생분해 과정에서 생성되기도 함
- 도시 내의 질소산화물 농도가 교외 지역보다 10~100배 더 높음 (즉, 자연적으로 생성되는 경우보다 인간 활동에 의한 요소가 큼)
- 주요 방출원 : 자동차, 발전소(엔진의 연소)
- 일산화질소(NO)가 대기 중에 방출되어 시간이 경과되면 이산화질소(NO₂)로 변화
- 질소 산화물은 일산화질소와 이산화질소를 통칭한 의미
- 악취를 가진 자극성 가스

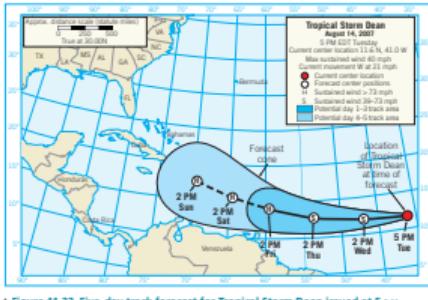
질소 산화물(Nox)의 영향



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm, and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- ‘인체’에 미치는 영향
- 급성 피해(고농도 단기간 노출) : 눈과 코를 강하게 자극하고, 폐출혈 및 폐수종, 폐색성 기관지염을 일으켜 사망에 이르게 함.
- 만성 피해(저농도 장기간 노출) : 만성 폐섬유화, 폐수종 유발
- ‘식물’에 미치는 영향
- 반점 생성, 광합성 속도 저하, 잎의 색 변화
- 기타 영향
- 이산화질소는 수증기와 반응하여 질산(HNO₃)을 생성하며, 부식성을 가진 산성비의 원인이 되기도 함
- 반응성이 매우 높아 스모그 형성에 중요한 역할
- 붉은 갈색을 띠며, 시정을 감소시킴

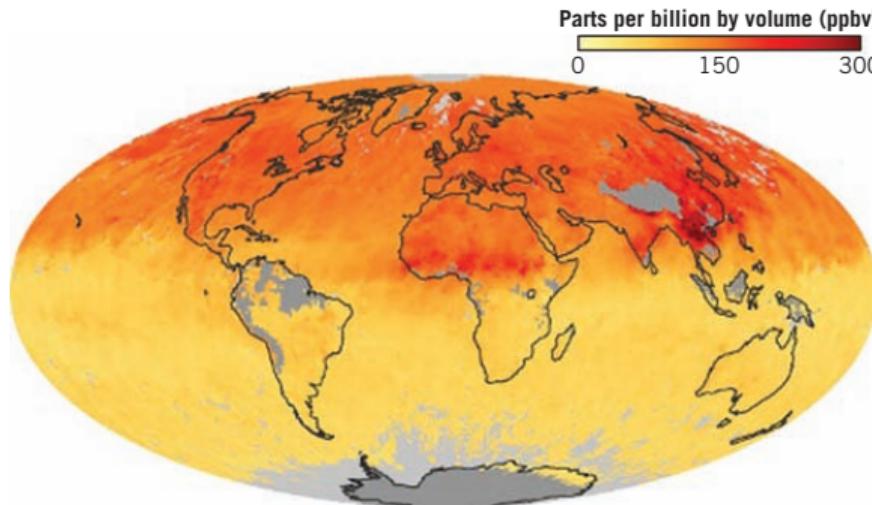
가스상 물질: 일산화 탄소(CO)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- 석탄, 나무, 석유 등의 불완전 연소시 발생하는 무색, 무취의 유독성 기체
- $$C + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO + 29,400 \text{kcal/kmol}$$
- 주요 방출원 : 자동차, 폐기물 소각, 제철소, 가정용 난방 등 연소시설의 불완전 연소
- 가정용 난방 및 취사 연료가 석유와 도시가스로 전환되면서 자동차가 주된 방출원이 됨
- 박테리아의 활동에 의해 이산화탄소로 산화되어 대기에서 제거, 대류권과 성층권에서 광화학 반응에 의해서 제거되기도 함
- 반응성이 매우 높아 스모그 형성에 중요한 역할
- 붉은 갈색을 띠며, 시정을 감소시킴
- $$CO + OH \xrightarrow{O_2} CO_2 + HO_2$$

CO 배출



▲ **Figure 13.8 Carbon monoxide** This map shows average concentrations of carbon monoxide (CO) in the troposphere in April 2010 at an altitude of about 3600 meters (12,000 feet). The data were collected by a sensor aboard NASA's *Terra* satellite. Concentrations of CO are expressed in parts per billion by volume (ppbv). Yellow areas have little or

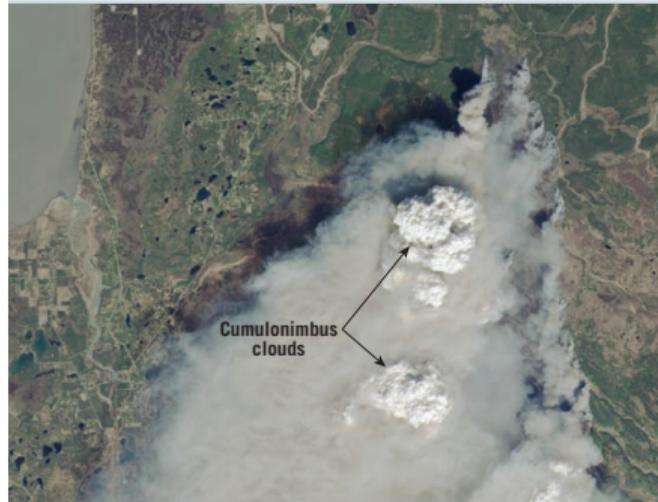
Video 

Global Carbon
Monoxide
Concentration



산불과 대기 오염

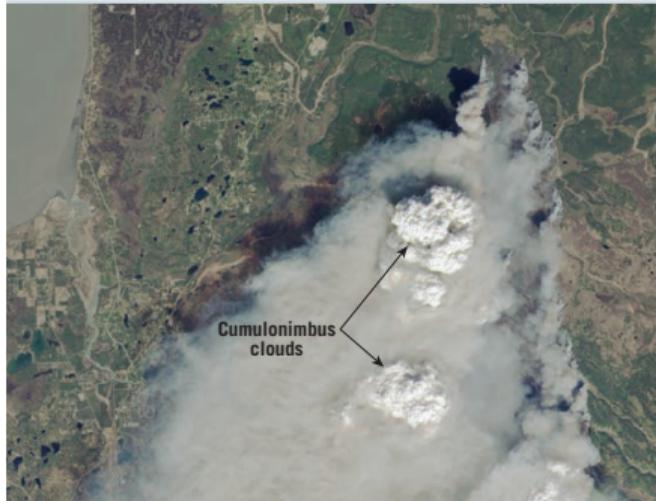
Well-developed cumulonimbus clouds that are also present owe their origin to the wildfires.



Q) 산불은 적란운 발달에 어떻게 영향을 미치는가?

산불과 대기 오염

Well-developed cumulonimbus clouds that are also present owe their origin to the wildfires.



Q) 산불은 적란운 발달에 어떻게 영향을 미치는가?

산불로 인해 데워진 공기는 강한 상승기류를 야기시켜 적란운이 발달할 수 있다.

대기 오염과 기후



▲ Figure 13.A Air pollution episode in Shanghai, China It is not difficult to understand why the amount of solar radiation reaching the surface is reduced in cities.

occurrences of clouds
What is the cause of

Questions

1. An air pollution episode at a high-latitude

대기 오염과 기후



▲ Figure 13.A Air pollution episode in Shanghai, China It is not difficult to understand why the amount of solar radiation reaching the surface is reduced in cities.

occurrences of clouds
What is the cause of

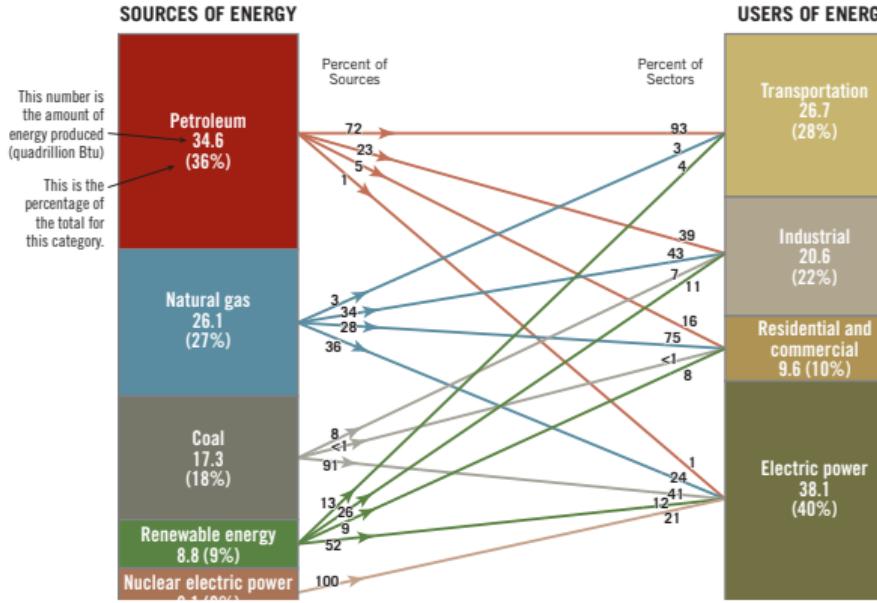
Questions

1. An air pollution episode at a high-latitude

Q) 겨울철 고위도 지역의 도시에서 대기 오염 에피소드는 여름철 유사한 이벤트 보다 표면에 도달하는 태양에너지의 비율이 감소할 가능성이 있다. 왜 그러한가?

대도시의 입자상 물질에 의해 태양 복사 에너지의 15 % 이상 감소하고, 자외선은 30% 이상 감소한다. 겨울철 고위도 지역은 태양의 고도가 낮아 햇빛이 통과하는 대기층이 길어 지표면에 도달하는 태양복사에너지가 더욱 많이 감소할 것이다.

에너지 소비

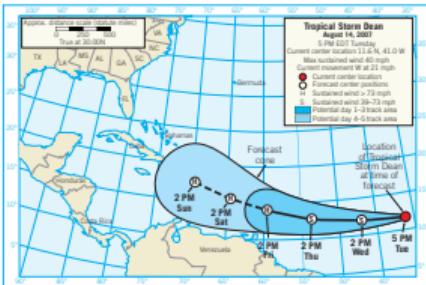


◀ SmartFigure
13.7 U.S. Energy consumption,
2012 Total
consumption w/
94.9 quadrillion
Btu. A quadrillion
is 10 raised to t
12th power, or
a million million.
A major source
of air pollutants
is the burning o
fossil fuels—co
petroleum, and
natural gas.



<http://goo.gl/YHkWC>

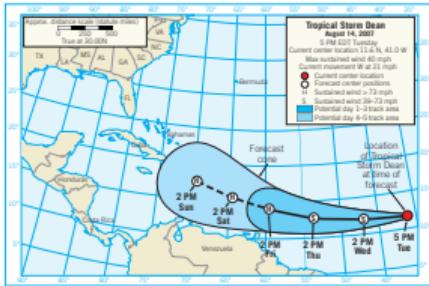
휘발성 유기 화합물(VOCs)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m., Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center forecast 12 hours and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on. The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- 휘발성 유기 화합물 (Volatile Organic Compounds, VOC) 탄화 수소라고도 부름 고체, 액체, 기체의 형태를 모두 띠 수 있음
 - 주요 방출원
 - 1) 식물에서 방출(자연적 배출원) : 기후 변화에 영향, 광화학 반응에 의한 오존 생성에 영향
 - 2) 공장 도장 공정 등 유기용제 사용, 불완전 연소된 가솔린(인위적 배출원)
 - VOCs는 자체로 큰 환경문제를 야기하거나 건강에 직접적 영향을 미치는 경우는 드물지만, 장기간 노출될 경우에는 만성적 피해를 유발할 수 있음.
 - 질소 산화물의 광분해 반응에 관여하여 2차 오염물질 형성(오존 등)에 큰 영향

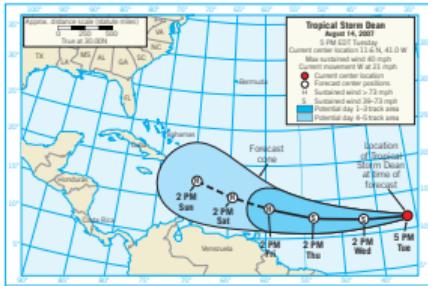
납(Pb)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm, and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- 과거에는 엔진 노킹(knocking) 현상을 막기 위해 자동차 연료에 납을 첨가하여 주요 오염원으로 자동차가 등장했으나 최근에는 1970년대 이후 ‘무연’휘발유를 활용하면서 대기 중의 납 농도는 많이 낮아짐
- 노후 건물의 벗겨진 페인트 조각도 오염원
- 유입된 납의 일부가 혈액, 중추신경, 장기(간, 폐) 등에 축적되며 장기 손상을 일으킴.
- 고농도에 단기간 노출시, 지능 저하, 행동 장애, 심장 질환, 사망을 유발함.
- 태아가 성숙하는 동안 해를 끼치므로, 임산부가 납에 노출되면 조산하거나 저체중 아이를 출산하거나 유산할 수 있음

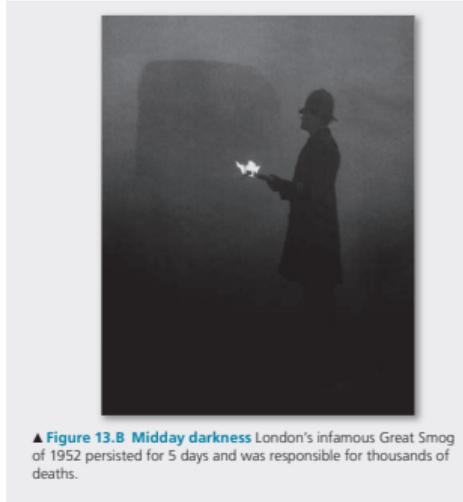
스모그(Smog)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

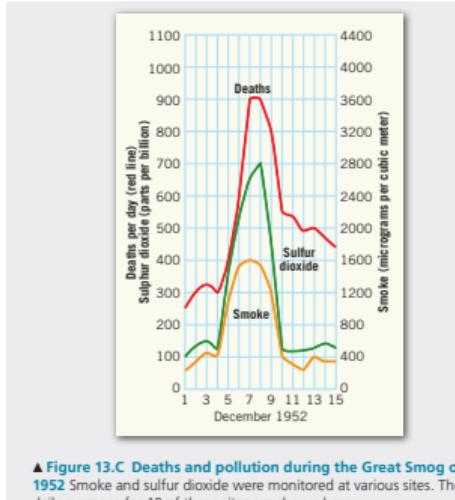
- 도시와 공장 지역에서의 대기 오염을 스모그 현상이라고 함 (연기 smoke+안개 fog)
- 원래 의미는 석탄 연소의 부산물과 높은 습도 상태가 결합되어 나타난 대기 오염 상태를 의미하였음
- 오늘날 스모그는 일반적인 대기 오염을 통칭하며, 연기와 안개의 결합을 엄격하게 적용하지는 않음.

런던형(고전형) 스모그



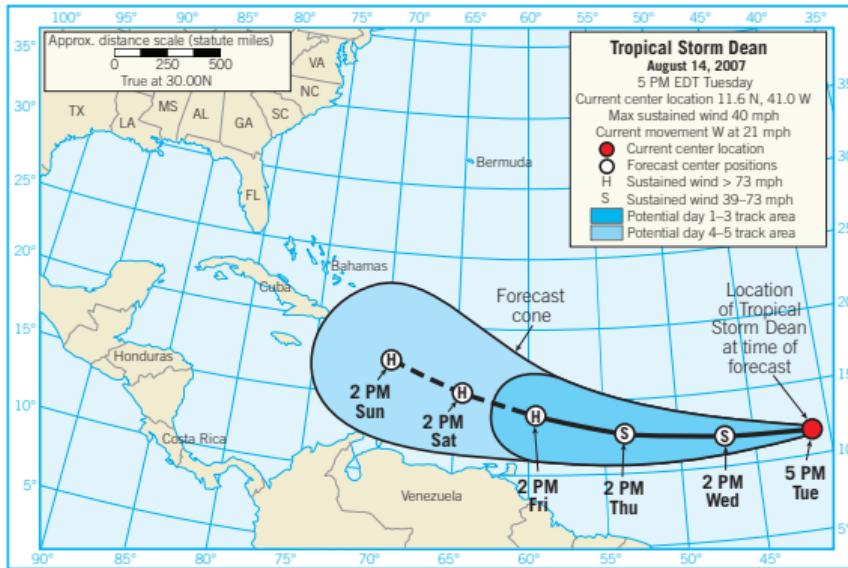
- 1952년 런던에서는 고기압의 정체로 인한 안정한 대기 상태에서 복사역전층이 형성되고 무풍 상태가 지속되면서, 짙은 안개가 끼고 먼지와 아황산가스 농도가 급격히 상승함 심장질환자, 호흡기 환자 급증하며 사망자 속출
- 오염 발생원은 가정 난방용 석탄의 매연과 화력발전소에서 배출된 매연으로 추정
- 안개입자에 흡수된 아황산가스가 석탄먼지의 촉매작용으로 황산미스트를 형성
- 1956년 청정공기법을 제정하고 특정 지역의 석탄 사용 금지

런던형(고전형) 스모그



▲ Figure 13.C Deaths and pollution during the Great Smog of 1952. Smoke and sulfur dioxide were monitored at various sites. The death numbers for 10 of the 50 cities are shown here.

광화학 반응

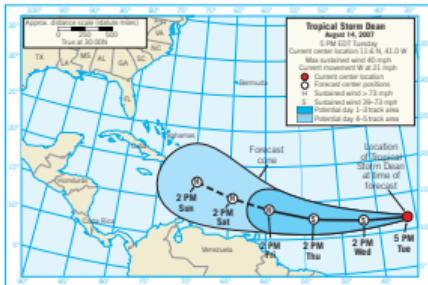


▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

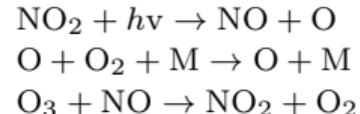
- 강한 태양빛을 매개로 2차 오염물질 형성하는 반응
- (예시) VOCs가 강한 햇빛을 받아 광화학 반응을 하면 반응성, 자극성, 유독성을 지닌 2차 오염물질이 생성
- (예시) 질소 산화물이 태양빛에 의해 광화학 반응을 하면 오존을 생성함

2차 오염물질: 오존(O3)



▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M. Tuesday, August 14, 2007. When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

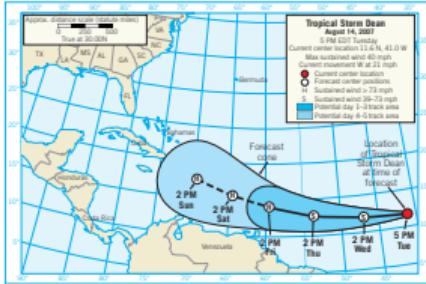
- 광화학 스모그의 주요 요소로, 성층권에서 자연적으로 생성되며, 인간 활동의 영향으로 지표면 부근에서도 생성됨. NO₂의 광분해 순환과정



- 오존의 생성 반응은 강한 일사에 의해 발생하므로 대기 중의 오존은 낮 시간에 한정되어 형성되며, 1년 중 여름에 오존 농도가 가장 높음



오존의 영향



Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a forecast cone. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.

- ‘인체’에 미치는 영향
 - 급성적인 눈의 통증, 극심한 피로와 인체 조정 기능 손실, 폐 기능 손상 등
 - 가슴통증, 심장질환 유발, 호흡기 질병 악화
 - ‘재산’에 미치는 영향
 - 천연 및 인조 섬유에 화학반응을 일으켜 탄소 원자의 구조가 변화됨
 - 고무에 아주 작은 외력이 작용하면 물리적 변형 발생(타이어는 오존 산화에 매우 취약)

광화학(LA형) 스모그

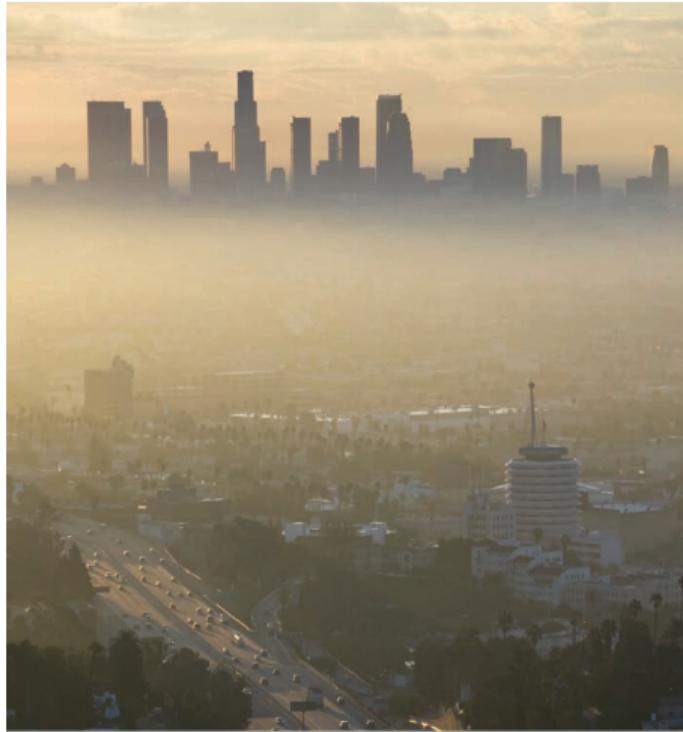


▲ Figure 13.15 Air pollution in downtown Los Angeles

Temperature inversions act as lids that trap pollutants below.

- LA는 연중 침강역전층이 형성되고 해안성 안개가 끼는 도시임.
- 다수의 자동차에서 배출되는 질소 산화물과 탄화 수소는 여름철 자외선에 의해 오존을 포함한 광화학 스모그 물질을 생성
- 즉, 1차 오염물질이 핫빛이 강한 여름철에 2차 오염물질을 생성한 것

광화학(LA형) 스모그



▲ Figure 13.15 Air pollution in downtown Los Angeles

Temperature inversions act as lids that trap pollutants below.

Q) LA에서 발생하는 대기 오염에 영향을 주는 요인을 세 가지로 설명하시오.

광화학(LA형) 스모그



▲ Figure 13.15 Air pollution in downtown Los Angeles

Temperature inversions act as lids that trap pollutants below.

Q) LA에서 발생하는 대기 오염에 영향을 주는 요인을 세 가지로 설명하시오.

- 1) LA는 북태평양 고기압에 의한 하강 기류와 관련된 기온역전이 빈번하게 나타남.
- 2) 태평양으로부터 이동해 온 공기가 차가운 해류에 의해 차가워지고 LA 지역의 따뜻한 공기와 만나면서 따뜻한 공기가 상승하며 기온 역전이 나타남.
- 3) 주변 산들이 도시 스모그의 교외 확산을 방해함.



스모그

Q) 런던형 스모그와 LA형 스모그를 비교하여 설명하시오.



스모그

Q) 런던형 스모그와 LA형 스모그를 비교하여 설명하시오.

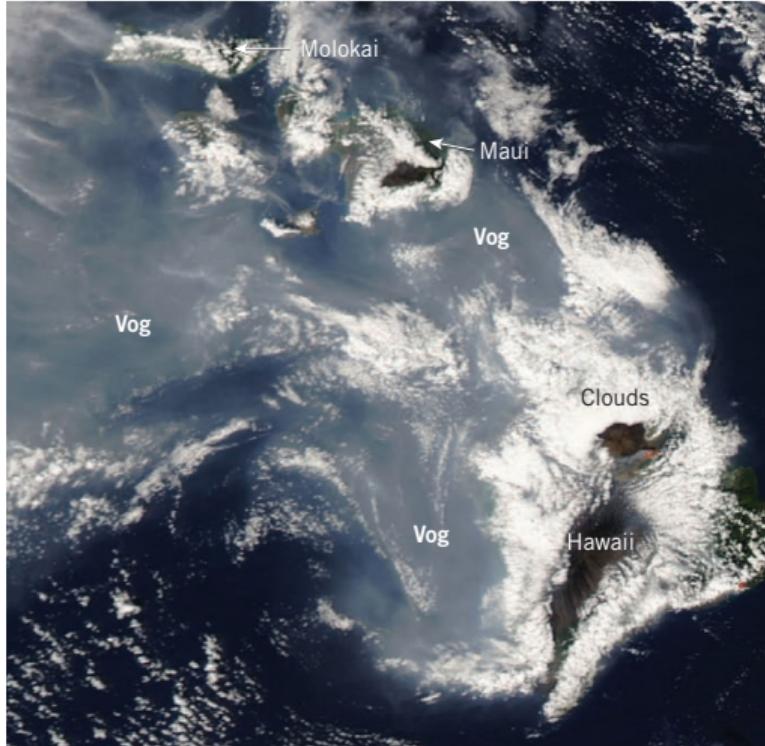
광화학 스모그

발생 원인과 물질	자동차 배기ガス에서 나온 질소 산화물과 탄화수소가 강렬한 태양광선에 의해 광화학 반응이 일어나면서 여러 가지 2차적인 화합물들이 발생
발생 시기	기온이 높고 바람이 적은 맑은 날 낮 대도시에서 발생 (21°C 이상, 습도 70% 이하)
피해	눈, 코, 호흡기를 자극 식물의 DNA 손상
대책	자동차 촉매 변환기를 설치 및 운행 줄이기 질소 산화물 발생 감소 하이브리드, 전기차 등을 사용하는 방법
역전의 형태	침강 역전

런던형 스모그

석탄과 석유 같은 탄화수소 화합물이 연소될 때 발생한 이산화황이 안개와 결합하여 황산 성분을 포함한 안개가 되어 발생
온도가 낮고 습한 밤이나 새벽 역전층이 형성되는 날 발생 (4°C 이하, 습도 90% 이상)
호흡기를 자극하여 사망까지 이르게 함
화석 연료의 사용 자제 이산화황 제거 장치로 황산화물 발생 감소
접지 역전

Volcanic Smog(Vog)



- 활동성 화산에서 방출된 SO₂, H₂O가 강한 햇빛아래 O₂와의 결합으로 발생
- 시정 감소
- 호흡기 질환 악화



2차 오염물질

Q) 스모그의 원래 의미와 현대적 의미를 설명하시오.



2차 오염물질

Q) 스모그의 원래 의미와 현대적 의미를 설명하시오.

스모그(smog)는 연기를 의미하는 *smoke*와 안개를 의미하는 *fog*의 합성어로, 영국에서 석탄 연소로 방출된 연기와 물방울이 결합하면서 형성된 대기 오염을 의미한다. 요즘은 일반적인 대기 오염을 통칭해서 사용하고 있으며, 전통적 의미의 smog와 광화학 스모그 두 가지 형태로 구분하여 사용하기도 한다.

Q) 무게상으로 가장 큰 오염 물질과 오염 물질의 가장 주된 배출원은 무엇인가?



2차 오염물질

Q) 스모그의 원래 의미와 현대적 의미를 설명하시오.

스모그(smog)는 연기를 의미하는 *smoke*와 안개를 의미하는 *fog*의 합성어로, 영국에서 석탄 연소로 방출된 연기와 물방울이 결합하면서 형성된 대기 오염을 의미한다. 요즘은 일반적인 대기 오염을 통칭해서 사용하고 있으며, 전통적 의미의 smog와 광화학 스모그 두 가지 형태로 구분하여 사용하기도 한다.

Q) 무게상으로 가장 큰 오염 물질과 오염 물질의 가장 주된 배출원은 무엇인가?

일산화 탄소가 가장 큰 오염 물질이며, 오염 물질의 주된 배출원은 운송수단이다.



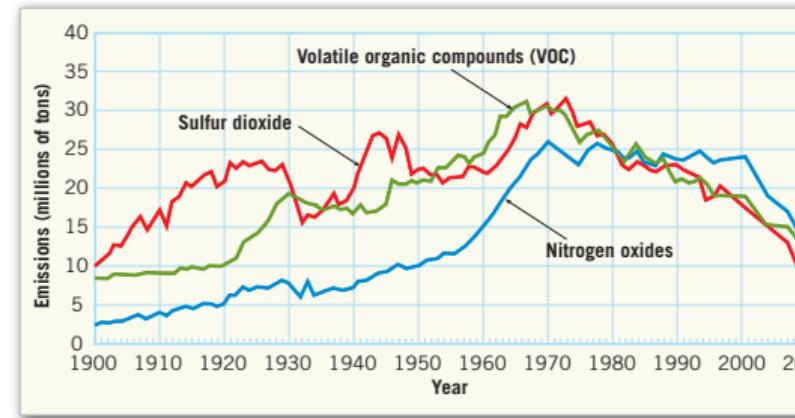
배출량 경향

Table 13.1 Air Quality and Emissions Trends (negative numbers indicate improvements in air quality)

	Percentage Change in Concentrations	
	1990–2012	2000–2012
NO ₂	-50	-38
O ₃ 8-hour	-14	-9
SO ₂	-76	-65
PM ₁₀ 24-hour	-39	-27
PM _{2.5} annual	—*	-33
CO	-75	-57
Pb	-87	-52
	Percentage Change in Emissions	
	1990–2012	2000–2012
NO _x	-52	-50
VOCs	-45	-24
SO ₂	-76	-66
PM ₁₀	-35	-10
PM _{2.5}	-57	-45
CO	-65	-51
Pb	-80	-50

*Data not available.

downward trend in emissions has been due to the Clean Air Act.



기준 설립

Table 13.2 | National Ambient Air Quality Standards

Pollutant	Standard Value	
Carbon monoxide (CO)		
8-hour average	9 ppm*	(10 mg/m ³)
1-hour average	35 ppm	(40 mg/m ³)**
Nitrogen dioxide (NO₂)		
Annual arithmetic mean	0.053 ppm	(100 µg/m ³)***
Ozone (O₃)		
1-hour average	0.12 ppm	(235 µg/m ³)
8-hour average	0.08 ppm	(157 µg/m ³)
Lead (Pb)		
Quarterly average		0.15 µg/m ³
Particulate < 10 micrometers (PM₁₀)		
24-hour average		150 µg/m ³
Particulate < 2.5 micrometers (PM_{2.5})		
Annual arithmetic mean		15 µg/m ³
24-hour average		35 µg/m ³
Sulfur dioxide (SO₂)		
Annual arithmetic mean	0.03 ppm	(80 µg/m ³)
24-hour average	0.14 ppm	(365 µg/m ³)
1-hour average	75 ppb†	

*ppm, parts per million.

**mg/m³, milligrams per cubic meter of air. A milligram is one-thousandth of a gram.

***µg/m³, micrograms per cubic meter. A microgram is one-millionth of a gram.

†ppb, parts per billion.

- 1970년대 'Clean Air Act'(대기정화정책) 발효
- 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency)의 설립
- 네 가지 1차 오염원과 2차 오염원에 대한 기준을 규정
- 1차 오염원: 입자상물질, SO₂, NOx, CO
- 2차 오염원: 오존
- 국가 대기 환경 기준(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)
- 단기 기준: 급성 피해(수 시간 or 수 일 이내에 인간의 호흡에 영향을 미치는 것) 방지
- 장기 기준: 만성 피해(연단위 동안 생리적 요소 변화를 일으키는 것) 방지

Q) Clean Air Act에서 규제하는 오염 물질은?

기준 설립

Table 13.2 | National Ambient Air Quality Standards

Pollutant	Standard Value	
Carbon monoxide (CO)		
8-hour average	9 ppm*	(10 mg/m ³)
1-hour average	35 ppm	(40 mg/m ³)**
Nitrogen dioxide (NO₂)		
Annual arithmetic mean	0.053 ppm	(100 µg/m ³)***
Ozone (O₃)		
1-hour average	0.12 ppm	(235 µg/m ³)
8-hour average	0.08 ppm	(157 µg/m ³)
Lead (Pb)		
Quarterly average		0.15 µg/m ³
Particulate < 10 micrometers (PM₁₀)		
24-hour average		150 µg/m ³
Particulate < 2.5 micrometers (PM_{2.5})		
Annual arithmetic mean		15 µg/m ³
24-hour average		35 µg/m ³
Sulfur dioxide (SO₂)		
Annual arithmetic mean	0.03 ppm	(80 µg/m ³)
24-hour average	0.14 ppm	(365 µg/m ³)
1-hour average	75 ppb†	

*ppm, parts per million.

**mg/m³, milligrams per cubic meter of air. A milligram is one-thousandth of a gram.

***µg/m³, micrograms per cubic meter. A microgram is one-millionth of a gram.

†ppb, parts per billion.

- 1970년대 'Clean Air Act'(대기정화정책) 발효
- 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency)의 설립
- 네 가지 1차 오염원과 2차 오염원에 대한 기준을 규정
- 1차 오염원: 입자상물질, SO₂, NOx, CO
- 2차 오염원: 오존
- 국가 대기 환경 기준(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)
- 단기 기준: 급성 피해(수 시간 or 수 일 이내에 인간의 호흡에 영향을 미치는 것) 방지
- 장기 기준: 만성 피해(연단위 동안 생리적 요소 변화를 일으키는 것) 방지

Q) Clean Air Act에서 규제하는 오염 물질은?

분진, 이산화황, 일산화탄소, 질소산화물, 오존, 납



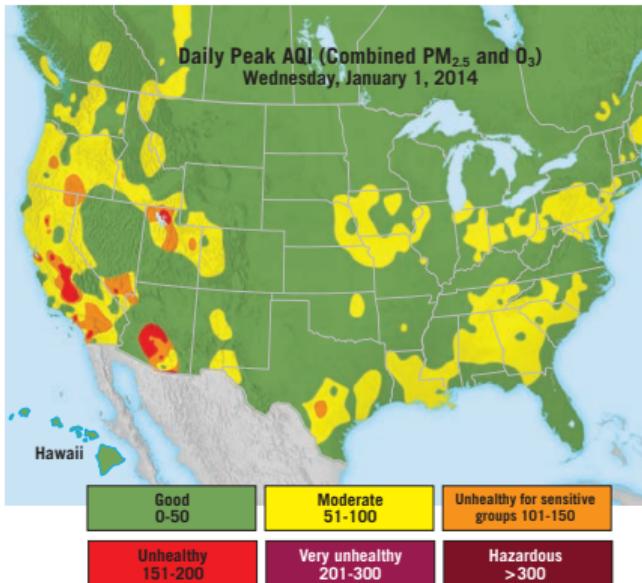
우리나라 대기환경 기준

항목	국가기준	
아황산가스 (SO ₂)	연간 평균치	0.02ppm 이하
	24시간 평균치	0.05ppm 이하
	1시간 평균치	0.15ppm 이하
일산화탄소 (CO)	8시간 평균치	9ppm 이하
	1시간 평균치	25ppm 이하
	연간 평균치	0.03ppm 이하
이산화질소 (NO ₂)	24시간 평균치	0.06ppm 이하
	1시간 평균치	0.10ppm 이하
	연간 평균치	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
미세먼지 (PM10)	24시간 평균치	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	연간평균치	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	24시간 평균치	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
초미세먼지 (PM2.5)	8시간 평균치	0.06ppm 이하
	1시간 평균치	0.1ppm 이하
오존 (O ₃)	연간 평균치	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
납 (Pb)	연간 평균치	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
벤젠 (Benzene)	연간 평균치	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하

- 1시간 평균치는 999천분위수(千分位數)의 값이 그 기준을 초과해서는 안 되고, 8시간 및 24시간 평균치는 99백분위수의 값이 그 기준을 초과해서는 안 된다.
- 미세먼지(PM10)는 입자의 크기가 10 μm 이하인 먼지를 말한다.
- 초미세먼지(PM2.5)는 입자의 크기가 2.5 μm 이하인 먼지를 말한다.

출처 : 환경정책기본법시행령[시행일:2015.1.1] [별표] 환경기준(제2조 관련)

대기 질 지수(Air Quality Index: AQI)

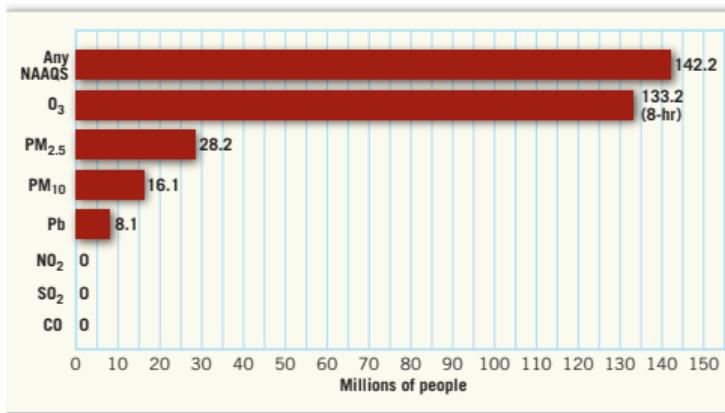


- 일반 대중에게 매일의 공기 질을 알려주기 위한 지수
- EPA는 Clean Air Act에서 규제하는 5가지 오염원에 대한 대기 질 지수를 계산
- AQI는 0~500의 값을 가짐
- 50보다 낮으면 좋은 상태, 51~100 보통, 100보다 높으면 건강에 해로운 상태

13.4 Meteorological Factors Affecting Air Quality

Describe the influence of wind on air quality. Sketch a temperature inversion and relate it to mixing.

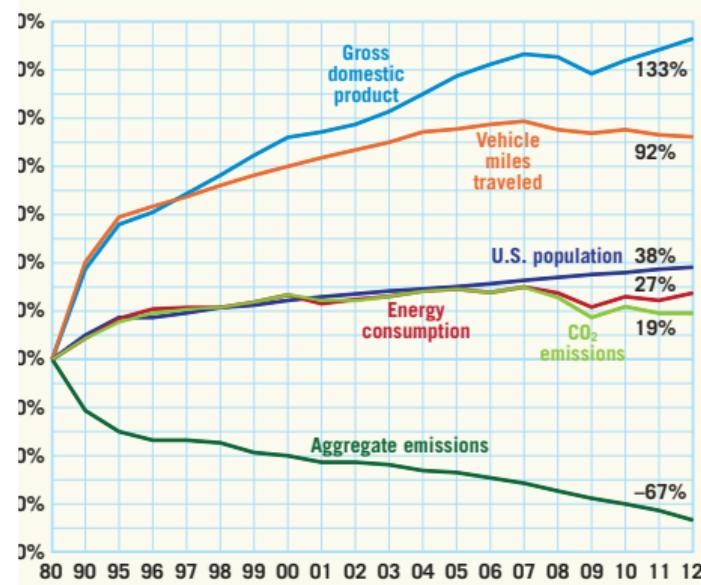
대기 질 지수(Air Quality Index: AQI)



▲ Figure 13.11 Number of people living in counties with air quality concentrations above the levels of the National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) in 2011.

For example, 16.1 million people live in counties where PM₁₀ concentrations exceed the national standard. Despite substantial progress in reducing emissions, there were still more than 142 million people nationwide who lived in counties with monitored air quality levels above the primary national standards.

Vehicle miles traveled increased 92 percent, energy consumption raised 27 percent, and U.S. population increased 38 percent. At the same time, total emissions of the six principal air pollutants decreased by 67 percent.



통합대기환경지수

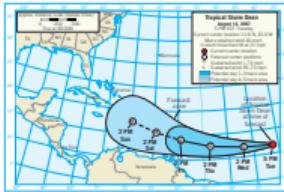


Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 a.m. Tuesday, August 11, 2009, while it was a hurricane. The map shows the projected path of the storm from the center to the outer edge, with a core region indicated by concentric circles. A legend provides information about the forecast period and the cone of uncertainty.

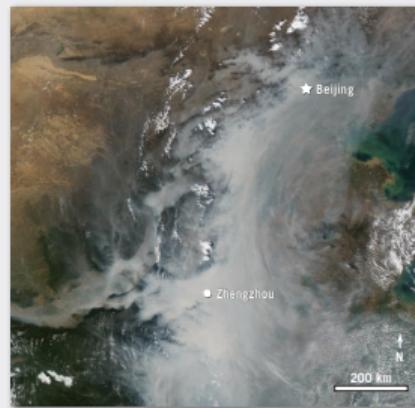
- 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive air-quality index) : 대기 오염도 측정치를 국민이 쉽게 알 수 있도록 하고 대기 오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동지침을 국민에게 제시하기 위하여 대기 오염도에 따른 인체 영향 및 체감오염도를 고려하여 개발된 대기 오염도 표현방식

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$$

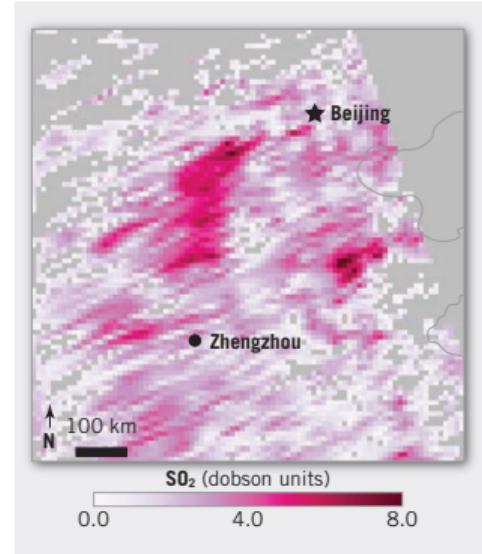
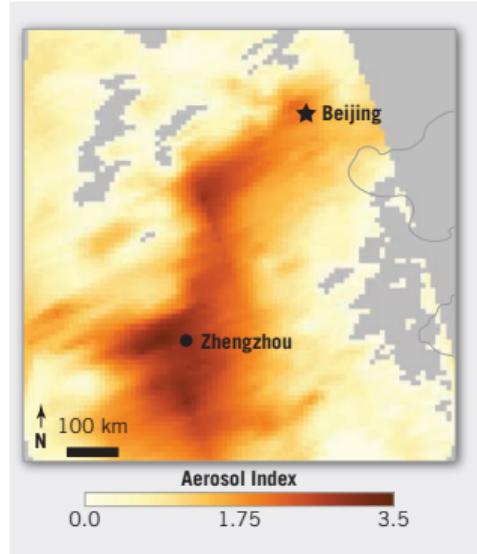
- I_p = 대상 오 대기지수 점수 C_p = 대상 오염물질의 대기중 농도 $BPHI$ = 대상 오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최고 오염도 $BPLO$ = 대상 오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최저 오염도 IHI = $BPHI$ 에 해당하는 지수값(구간 최고 지수값) ILO = $BPLO$ 에 해당하는 지수값(구간 최저 지수값)

-

중국의 대기 오염



▲ Figure 13.D Serious air pollution plagues a portion of China
This satellite image from October 8, 2010, captures the extent of the pollution episode.





바람의 영향

Perhaps you have heard the phrase “The solution to pollution is dilution.” To a significant degree, this is true. If the air into which pollution is released is not dispersed, the air will become more toxic. Two of the most important atmospheric

of pollution were between

- 풍속이 약하면 풍속이 강할 때보다 대기 오염 현상 발생 가능성 큼
- 풍속이 강하면 더 강한 난류 (turbulent)가 발생하여 주변 공기와 혼합을 빠르게 시켜서 오염물질을 많이 희석시킴
- 대기 오염에 영향을 주는 가장 큰 요인은 대기로 방출되는 오염 물질의 양이지만, 꾸준하게 장기간 배출되더라도 하루하루 대기질의 변동은 매우 크게 나타남.

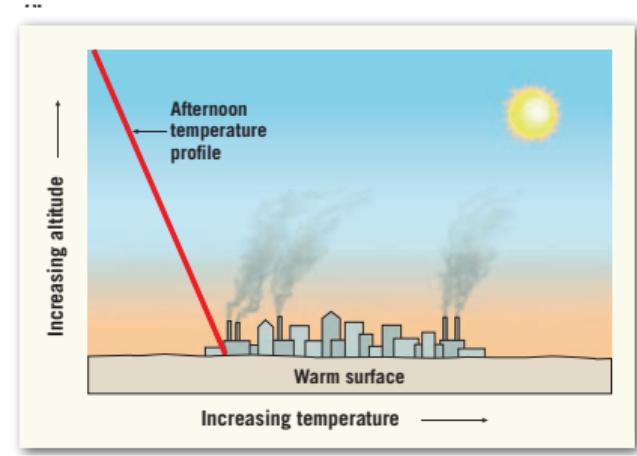
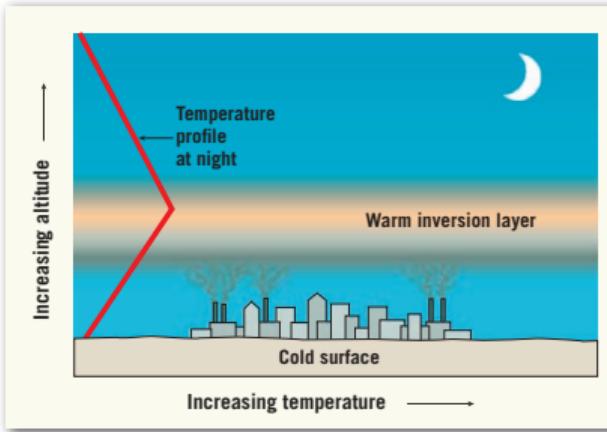


대기 안정도의 영향



- 혼합층 깊이(mixing depth): 지표와 대류가 일어나는 높이까지의 연직방향 높이
- 혼합층 깊이가 커질수록 대기질은 개선
- 오전보다는 오후에, 겨울보다는 여름에 큼
- 대기가 안정하면, 대류가 잘 일어나지 않고 혼합 깊이가 작음
- 대기가 불안정하면, 대류가 잘 일어나고 혼합 깊이가 커짐
- 기온 역전은 대기가 안정하고 혼합층 깊이가 크게 제한.
- 연직운동이 제한되어 지표 부근에 오염 물질 갇힘

대기 안정도의 영향



- 지표 기온역전: 밤에는 복사 냉각으로 지표부근 기온 역전 발생.
- 일출 후에는 지표가 가열되므로 역전층이 점차 사라짐
- 평坦하지 않은 지역에서는 차가운 공기가 고지대와 경사지로부터 서서히 저지대와 협곡에 흘러 들어 역전이 형성되며, 이러한 역전은 일출 후에도 빨리 소멸되지 않음

대기 안정도의 영향

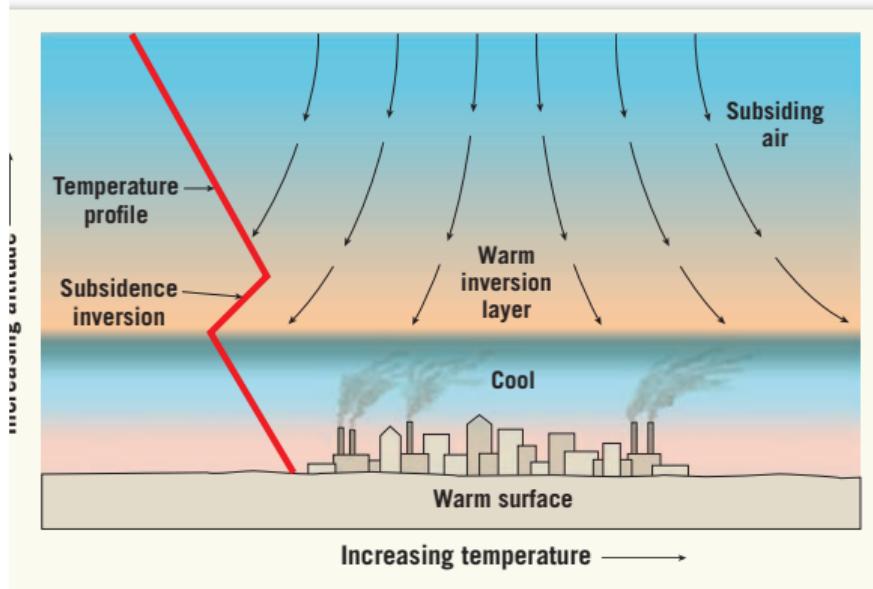
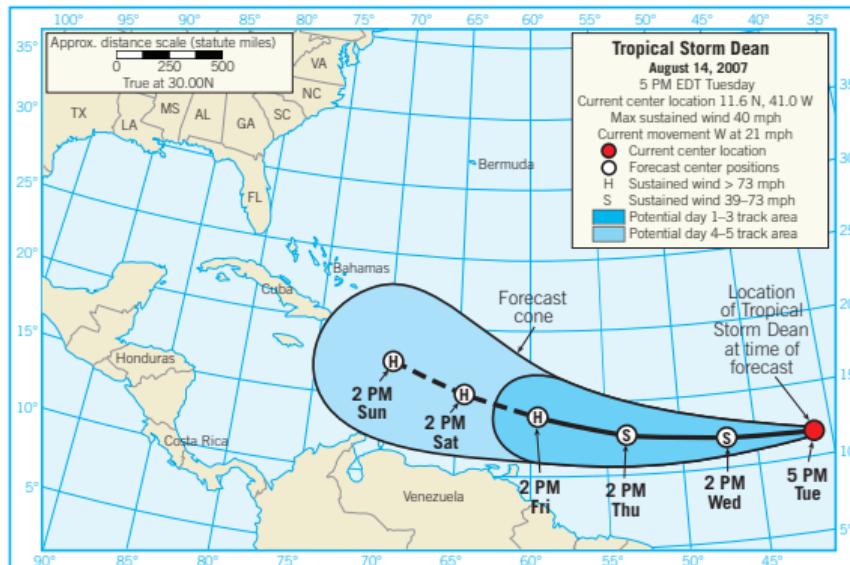


Figure 13.17 Subsidence inversion Inversions aloft frequently develop in association with slow-moving centers of high pressure, where the air aloft subsides and warms by compression. The turbulent surface zone does not subside as much. Thus, an inversion often forms between the lower turbulent zone and the subsiding layers above.

- 상층 기온역전 : 고기압 중심부터 발생하는 침강 공기
- (예시) LA의 대기 오염은 북태평양 고기압의 하강기류로 인한 상층 역전으로 빈번하게 발생



▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



Q) 대기의 상층에서 발생하는 역전과 접지 역전을 비교하여 설명하시오.



Q) 대기의 상층에서 발생하는 역전과 접지 역전을 비교하여 설명하시오.

접지 역전은 보통 밤동안의 지표의 강한 복사 냉각이나, 따뜻한 공기가 차가운 지표나 해수면에 의해 냉각될 때 나타난다. 반면 상층 역전은 고기압의 중심에서 공기가 침강하거나 전선면에서 따뜻한 공기가 차가운 공기 위로 강제 상승할 때 발생한다.

Q) 대기 오염에 영향을 주는 두 가지 대기 조건을 설명하시오.



Q) 대기의 상층에서 발생하는 역전과 접지 역전을 비교하여 설명하시오.

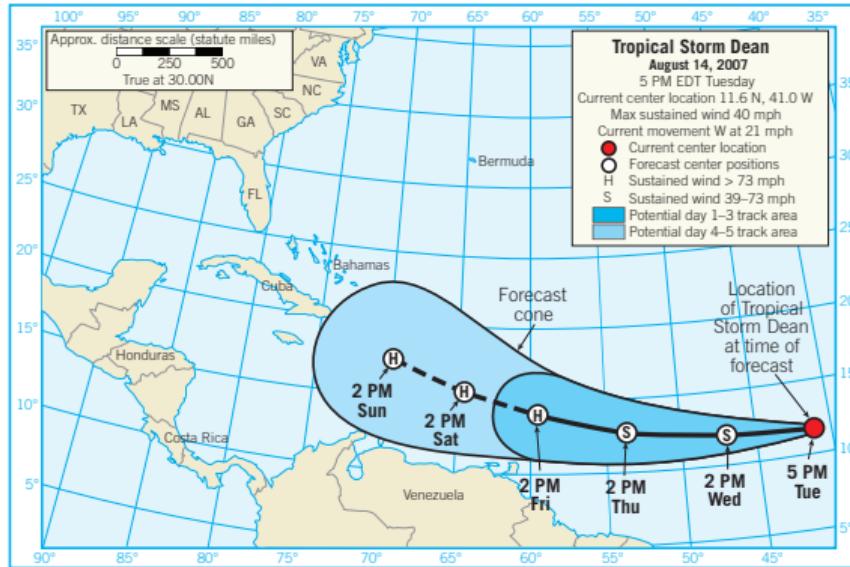
접지 역전은 보통 밤동안의 지표의 강한 복사 냉각이나, 따뜻한 공기가 차가운 지표나 해수면에 의해 냉각될 때 나타난다. 반면 상층 역전은 고기압의 중심에서 공기가 침강하거나 전선면에서 따뜻한 공기가 차가운 공기 위로 강제 상승할 때 발생한다.

Q) 대기 오염에 영향을 주는 두 가지 대기 조건을 설명하시오.

바람의 강도와 대기의 안정도가 대기 오염에 영향을 미친다. 바람이 약하거나 없을 때는 오염 물질을 빨리 이동시키지 못하고, 난류가 약해 고농도의 오염공기를 희석시키지 못해 오랫동안 체류하게 만들어 대기 오염이 심화된다. 기온 역전은 연직 방향의 운동을 제한하여 오염 물질이 지표의 좁은 지역에 머물게 함으로써 대기 오염을 심화 시킨다.

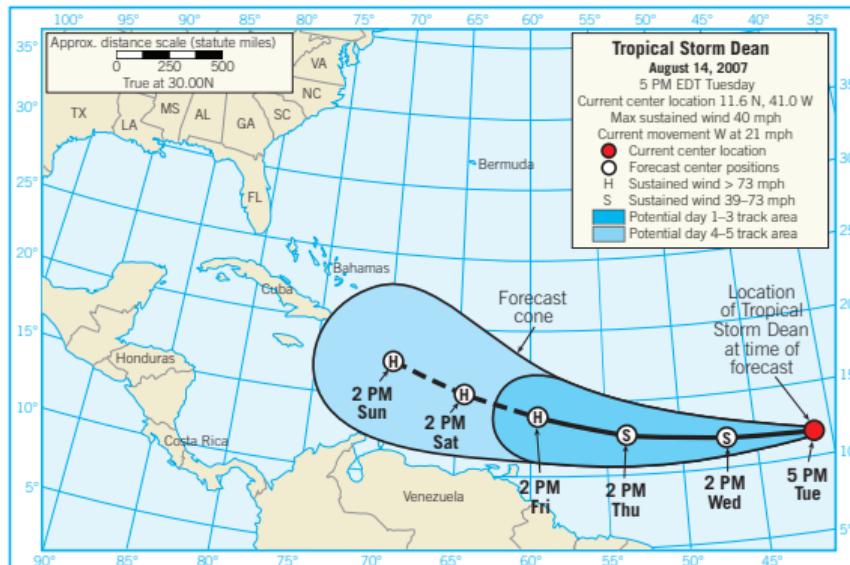


산성비의 정의



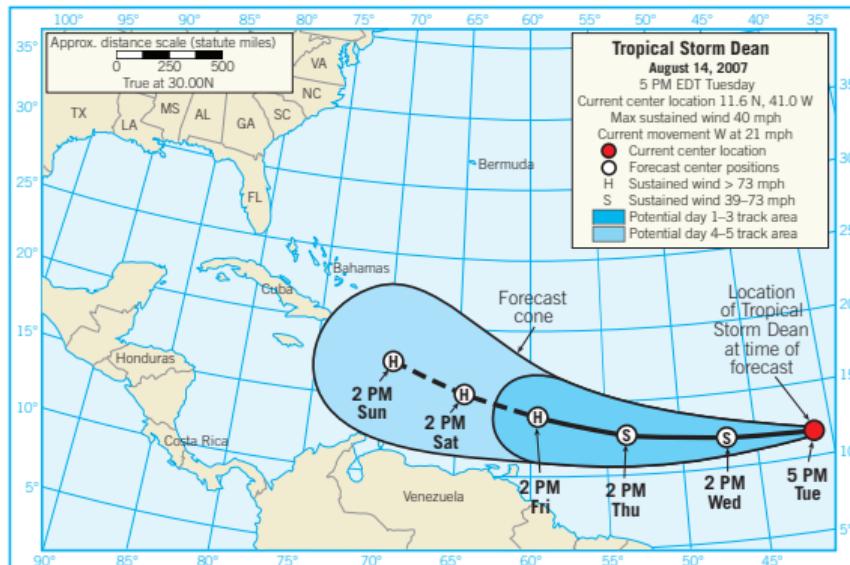
▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 p.m.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone can be expected to remain entirely within the cone roughly 60 to 70 percent of the time.



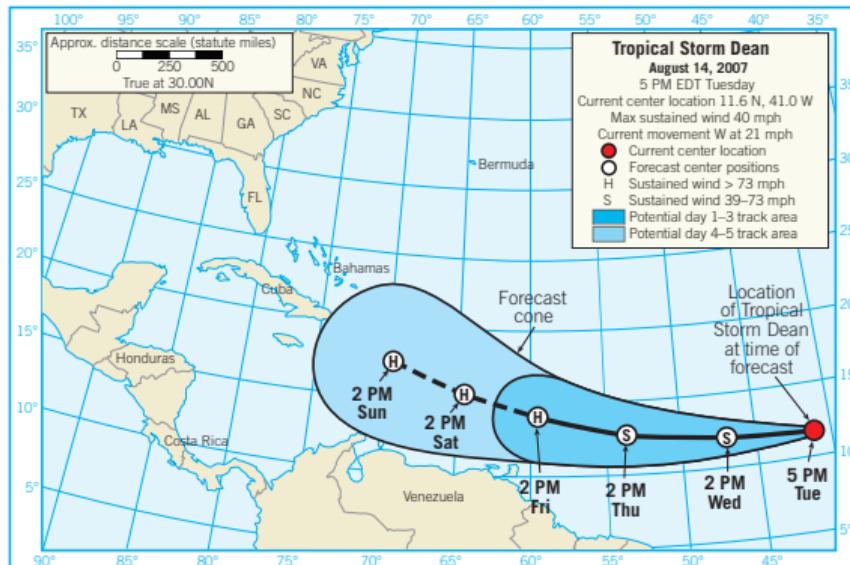
▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



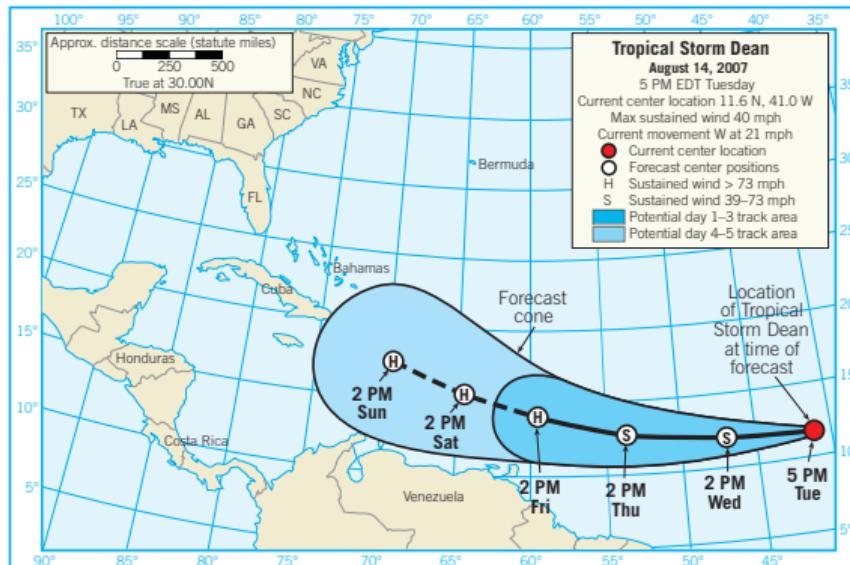
▲ Figure 11.22 Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



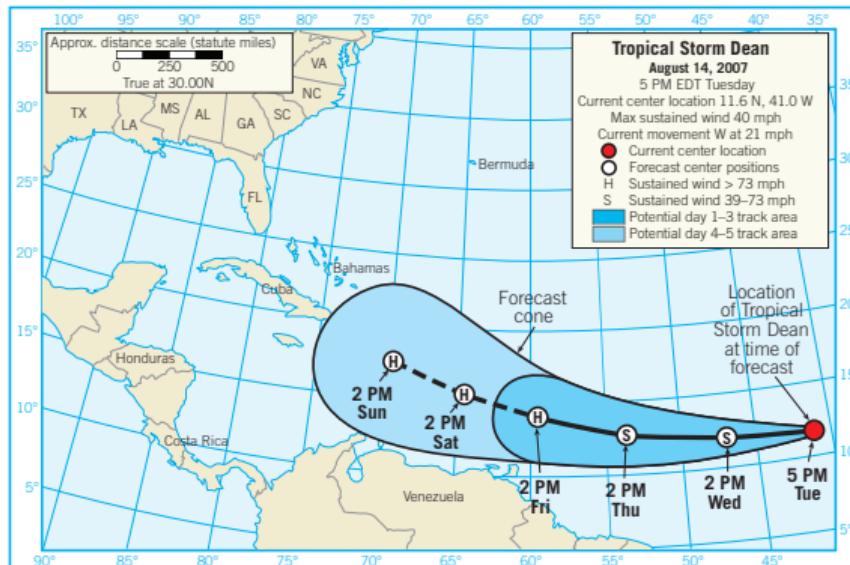
▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



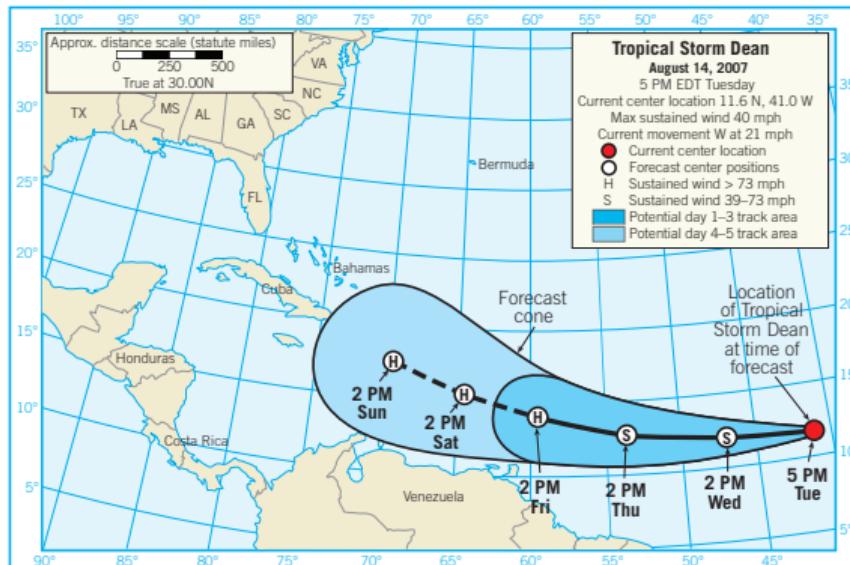
▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone



▲ **Figure 11.22** Five-day track forecast for Tropical Storm Dean issued at 5 P.M.

Tuesday, August 14, 2007 When a hurricane track forecast is issued by the National Hurricane Center, it is termed a *forecast cone*. The cone represents the probable track of the center of the storm and is formed by enclosing the area swept out by a set of circles along the forecast track (at 12 hours, 24 hours, 36 hours, and so on). The size of each circle gets larger with time. Based on statistics from 2003–2007, the entire track of an Atlantic tropical cyclone