

1. [김해동 칼럼] 한반도, 이상기후에 갇혔다

By 김해동 | 2022년 8월 9일 | 미래, 미분류

무섭다. 8일 서울과 수도권, 강원도 일대에 하늘이 뚫린 듯 폭우가 쏟아졌다. 서울 동작구에는 8일과 9일 새벽 사이에 420mm가 넘는 비가 내렸다. ‘100년 만의 물폭탄’이라고 한다. 장마가 끝난 게 아니었나? 하지만 몇 달 전만 돌이켜보면, 올 봄 우리는 기상 관측 이래 최소 강수량을 기록한 건조기후로 몸살을 앓았다. 식탁 물가가 오른 것 역시 기후 위기와 관련이 있다. 가뭄과 동시에 덮친 봄철 고온은 실은 지난해부터 이어진 것이고, 결과는 조기 개화와 꿀벌들의 죽음이었다. 한반도 남부는 이미 아열대기후로 변했다. 기상학자인 김해동 교수는 이런 이상 현상을 “한반도가 역대 최악의 ‘트리플 딥 라니냐’에 갇혔기 때문”이라고 진단하고, 가을에는 더 큰 기후 재난이 올 수 있다고 경고한다. 김 교수의 기후 시리즈 세 번째 이야기. [편집자 주]

- ✓ 아열대기후로 변해가는 한반도 기후
- ✓ 여름은 길어지고 겨울은 짧아져
- ✓ 새로운 일상이 되어가는 가뭄과 홍수
- ✓ 스콜성 강수를 닮아가는 여름 강수
- ✓ 최근의 극한 이상기후 발생 원인은 **triple dip** 라니냐
- ✓ 대규모 홍수와 태풍이 집중되는 가을 기후



2022년 8월 8일 물에 잠긴 차량을 두고 대피하는 시민

모습(사진:연합뉴스)

한반도 기후가 아열대기후로 변해가고 있다는 말이 나온다. 1990년대 중반부터 여름이 훨씬 더워지고, 오후에는 열대지방의 스콜 같은 소나기가 내린다. 이런 상황은 식탁 물가와도 직결된다. 기후의 영향을 크게 받는 신선 채소와 과일 가격이 급등하기 때문이다. 사실 현재의 물가 상승 원인에는 코로나와 우크라이나 전쟁의 영향에 더해, 올해 우리나라 기후가 농산물 생산에 부적합했다는 것도 한몫을 하고 있다. 비단 여름의 고온이나 소낙비만 문제가 아니다. 올해 초 엄청난 재난이었던 산불 역시 기상 관측 이래 가장 비가 적고, 가장 기온이 높았던 봄이었기 때문에 더 많이 발생했다고 볼 수 있다.

연초부터 시작된 가뭄과 때 이른 고온 현상, 장마 시작 이후로 계속 이어지는 스콜성 강우로 많은 변화가 일어났다. 기후는 우리가 생각하는 것보다 훨씬 크게 우리의 삶에 영향을 미친다.

한반도를 덮친 이상기후와 꿀벌의 죽음

올해 한반도 기후의 가장 큰 특징은 첫째로 지난해 12월부터 올해 6월까지 이어진 극심한 가뭄, 둘째로 1973년 이후 가장 더웠던 봄(3~5월)과 6~7월의 고온(8월에도 기록적인 고온이 이어지고 있음), 셋째로 장마철은 물론 장마 종료 이후에도 스콜성 소낙비 비중이 높다는 점이다.

먼저 가뭄의 경우, 올 5월은 기상관측 역사상 강수량이 가장 적었던 달로 기록됐다. 3~4월에도 남해안을 제외한 대부분 지역에서 “50년 만의 가뭄”이라는 말이 나왔다. 이 가뭄은 산불로 이어져, 3월에 백두대간을 중심으로 큰 산불이 전국에서 동시다발적으로 발생했다. 6월엔 밀양에서도 큰 산불이 났다.

식수용 댐이 고갈되어 먹을 물이 부족해진 경우도 많았다. 기록적인 고온 현상도 이어졌다. 지난해 11~12월의 이상 고온에 더해, 올해 봄철(3~5월) 전국 평균기온이 역대 가장 높았다. 이 이상고온 현상으로 꽃이 일찍 개화해, 꿀벌이 대량으로 사라지는 큰 이유가 되기도 했다. 특히 기온이 높았던 전남, 경남, 제주 지역에서 꿀벌 피해가 가장 컸다.

유엔식량농업기구(FAO)에 따르면, 전 세계 100대 농산물 중에서 약 71%가 꿀벌을 매개로 수분을 한다. 만약에 꿀벌이 사라진다면 이들 100대 농산물의 생산량은 현재의 30%에도 미치지 못할 것이다. 꿀벌 없이 인공수정만으로 농산물을 키운다면 곡물, 과일, 채소 등의 생산량 격감은 단순히 가격 폭등이 아니라,

저발전국에서 국민들의 영양부족과 사망률 증가라는 재앙으로 이어질 수 있다.



기후변화에 대처하는 시위대의 구호 (사진:셔터스톡)

왜 덥고, 소나기가 자주 내리나?

여름철로 접어든 이후 고온 현상은 더욱 심각해졌다. 우리나라의 여름을 지배하는 북태평양기단이 북서쪽으로 더 확장되었기 때문이다. 고온다습한 남서풍이 유입되고 일사량이 많아지고 일조시간도 늘어나면서, 전국적으로 기상관측망이 확충된 1973년 이래로 기온이 가장 높은 해로 기록될 가능성이 높다.

비는 자주 왔지만, 사실 전체 강수량은 줄었다. 장마 때 비가 오지 않아서다. 체감으로는 이해하기 어려울지 모르나, 6월 하순부터 7월 하순에 걸친 장마 기간에 전국의 강수량은 평년값에 훨씬 못미쳤다. 특히 장마의 피크인 7월 상순의 강수량은 1973년 이래로 역대 3번째로 적었다.

우리 기억과는 좀 다르다. 계속 우산을 들고 다녔기 때문이다. 하지만 이때 내린 비들은 장마전선에서 온 것이 아니었다. 대기 불안정에 따른 소낙성 비가 오히려 더 많았다. 한두 시간 국지성으로 세차게 내리다가 말았다. 아스팔트는 적셨지만, 강물은 불어나지 않았다. 왜 그랬을까?

우리나라 상층의 공기 기온이 낮았기 때문이다. 반면에 하층 대기로 고온다습한 남서 기류가 유입된 것에 더해, 강한 햇살로

지표가 낮 동안에 가열되어 상승 부력을 갖는 고온의 공기가 지상에 만들어졌다. 이런 과정을 통해 상층에 차가운 공기, 하층엔 뜨거운 공기가 만들어지면서 대기가 불안정해졌고, 소낙성 비가 내리기에 적합한 대기조건이 조성되었다.

이런 소낙성 강수는 장마가 종료된 7월 25일 이후로도 더욱 기승을 부리고 있고, 사람들은 이제 우리나라의 여름철 강수 패턴이 열대지역에서 볼 수 있는 스킴으로 변한 것이 아닌지 묻기 시작했다. 올해 경험하고 있는 이 현상은 정말 우리나라가 아열대기후로 변해가는 전조현상일까? 이미 사실상 아열대기후로 변해버린 것은 아닐까?

한반도 남부권은 아열대기후 맞다

열대, 아열대는 ‘기후대’에 따른 구분이다. 서로 다른 기준으로 기후대의 구분을 시도한 기후학자들은 무수히 많다. 그 가운데 가장 널리 받아들여지는 것은 우리나라 중고등학교 교과서도 소개하고 있는 쿠펜의 방법이다. 그는 식물을 기준으로 삼았다. 식물의 분포야말로 기후의 영향이 종합적으로 반영된 결과라고 본 것이다. 쿠펜 이후에 나온 여러 방법들도 결국은 쿠펜의 방법을 적용하기에 편리하도록 개선한 것에서 크게 벗어나지 않는다. 우리 기상청에서 활용하고 있는 트레와다(Trewatha)의 방법도 그 중 하나다.

트레와다 분류에서 아열대기후는 1년 중에서 월평균기온이 10도를 넘는 달이 8개월을 넘는 곳이다. 월평균기온 10도가 중요한 이유는, 이 온도가 식물이 생육할 수 있는 한계온도이기 때문이다. 또 가장 추운 달의 월평균기온이 18도 이하여야 한다. 만약 18도 이상이 되면 열대기후로 분류된다.

이 기준을 적용해 보면 우리나라의 남해안(제주, 경남 통영, 전남 목포 등)은 이미 아열대기후에 속한다. 내륙지역이라고 해도 7개월(4~10월)의 평균기온이 10℃를 넘어섰다. 아열대 기준인 8개월에는 겨우 한 달이 모자라는 상황이다. 한반도 남부는 이미 아열대기후라고 봐도 된다.

아열대기후대는 다시 건조한 경우(사막과 스텝)와 습윤한 경우로 나뉜다. 우리나라의 장래 강수량 변화는 연간 총강수량은 증가하되 계절별로 차이가 나, 여름철엔 늘어나고 겨울철엔 오히려 감소할 것으로 전망된다. 그리고 금세기 중후반경엔 연중 여름철이 7개월(4-10월)을 넘어설 것으로 예상되고 있다. 기상학적으로 말하는 여름철은 1년 중에서 월평균기온이 20도 이상이 유지되는 시기를 말한다. 따라서 장래 우리나라의 기후는 대체로 여름철엔 습윤 아열대 기후, 겨울철엔 건조 아열대기후의

특성을 나타낼 것이다. 가뭄과 홍수가 모두 강화되는 기후의 양극화 현상이 뚜렷해진다. 습윤 아열대기후는 여름철에 마치 열대와 같은 고온다습한 기후로 비가 많이 온다. 그러면 스콜의 특성도 강해진다.

지금 오는 저 비, 스콜인가?

올해 6월 중순경부터 소나기가 자주 왔다. 이런 소낙비는 장마 시기에도 계속되어, 장마 기간에 내린 총강수량에서 소낙성 강수로 내린 양이 장마전선의 활동에 의한 것보다 더 많았다. 그런데 장마가 종료된 이후로도 여전히 소낙성 강수가 기승을 부리고 있다. 그래서 한반도의 여름철 기후가 아열대성으로 변했고, 강수 패턴이 장마 중심에서 스콜로 변한 것이 아니냐는 설왕설래가 많았다. 이런 주장에 대한 기상청의 공식 입장은, 우리나라의 여름철 소나기는 스콜과는 다르다는 것이다. 올해 여름 내린 소낙성 강수는 우리나라 주변에 조성된 평소와 다른 특별한 대기 상황 때문에 발생한 것이며, 스콜과는 형성과정이 다르다는 것이다.

소낙성 강우는 이렇게 만들어진다. 먼저 높은 상공에는 북쪽에서 내려온 찬 공기가 위치하고, 하층으로는 고온다습한 남서기류가 유입된다. 이 남서기류가 북쪽에서 온 상층의 찬 공기를 만나는 곳이 한반도다. 그 결과 비구름이 만들어지면서 나타난 게 소낙성 강수였다.

스콜이 만들어지는 과정은 다르다. 지표면이 강한 햇볕을 받아 가열되어 지상에 뜨거운 공기를 만든다. 그 공기가 상승하면서 냉각되어 비구름을 만들고 짧은 시간에 많은 비를 내린다. 윗쪽의 찬 공기가 다른 곳에서 온 게 아니다. 즉, 그 지역의 강한 지표면 가열이 원인이 되어 만들어지는 강수가 스콜이다. 그래서 스콜은 여름철에 거의 동일한 시간대에 짧은 시간 동안 많은 비를 내린다. 이런 스콜은 디즈니랜드가 위치한 미국 플로리다의 올랜도나 필리핀, 태국 등에서 여름철에 쉽게 만날 수 있다. 반면, 올해 여름 우리의 소나기는 오후 특정 시간에 오는 것이 아니라, 새벽이나 한밤중에도 내리곤 했다. 요컨대, 스콜은 스스로 발생하는 자생형이고, 우리의 소낙성 강우는 간접형이라 다르다는 것이다.

열대나 습윤 아열대 지역에서 여름철 오후에 거의 매일 만나게 되는 스콜. 30분 내외의 짧은 시간 동안에 매우 강한 비가 내린다. (사진: 필자 제공)

최근 2년간 기후재해는 재앙 수준



소나기가 스콜이 아니라고 별일 아닌 것은 아니다. 우리의 기후는 분명히 예전과 달라지고 있다. 지난해 말 고온, 올해 초 고온과 가뭄, 장마 강수량의 감소, 잦은 소나기 등은, 모두 우리의 삶에 큰 영향을 미친다. 우리 뿐 아니라 전 세계적으로 기후변화로 인한 극한 기후 현상이 더 큰 규모로 더 자주 발생하면서 인명과 재산 피해가 빠르게 증가해 가고 있다. 특히 지난해와 올해 그 현상이 도드라진다.

세계기상기구(WMO)가 주목한 지난해의 가장 대표적인 기후재해는, 6월 하순 북미대륙 서부지역에서 발생한 폭염과 7월 중순에 서유럽에서 발생한 대홍수였다. 폭염의 중심지는 캐나다의 브리티시 컬럼비아주의 리튼(lytton)이라는 250명 규모의 작은 마을이었다. 이곳은 북위 55도 이상의 고위도에 위치한 곳으로, 원래 6월 평균기온이 17도에도 미치지 않는 지역이었다. 그런데 이곳의 기온이 지난해 6월 24일 31도를 넘었고, 불과 5일 뒤에는 49.7도라는 캐나다 역사상 최고온을 기록했다. 때마침 건조한 바람까지 겹치면서 대규모 화재가 발생했고, 이상 최고온으로 브리티시 컬럼비아에서만 700명 이상의 고온 사망자가 발생했다.

지난 7월 중순에 발생한 서유럽 홍수는 피해의 중심지였던 독일과 벨기에에서만 200명 이상의 인명피해를 냈다. 사회기반시설이 튼튼해 기후재해로부터 안전한 곳으로 알았던 서유럽조차 기후위기를 피해갈 수 없다는 사실을 입증한 최초의 사건이었다. 안토니오 구테레스 유엔 사무총장은 지난해 11월

영국 글래스고에서 열렸던 제 26 차 기후변화 당사국 회의에서, 세계기상기구가 발표한 ‘2021 세계 이상기후 보고서’를 보고, “기후변화로 바다 깊은 곳부터 산 정상까지 전 세계의 생태계와 지역사회가 황폐화하고 있다”고 탄식했다.

올해 이상기후 현상은 지난해보다 더욱 심각해졌다. 인도에서는 3월부터 꽤 이른 폭염이 시작되어 몬순 비가 시작된 6월 초까지 이어졌다. 유럽과 미국 서부지역에서도 5월부터 폭염이 시작되었고 하지를 전후해서는 40도를 넘어서는 초고온 상황이 넓은 지역으로 확대되었다. 폭염에 극심한 가뭄까지 더해지면서 동시다발적으로 대규모 산불도 발생했다. 오스트레일리아와 파키스탄 등에서는 대홍수가 발생하기도 했다.

모든 이상기후의 원인은 ‘트리플 딥 라니냐’ 현상

이런 극한 이상기후가 기승을 부리는 원인은 무엇일까? 일어나는 지역은 세계 곳곳이고, 가뭄과 홍수처럼 서로 상반되는 것으로 보이는 이상기후 현상들도, 실은 발생 원인은 다르지 않은 것으로 알려져 있다. 기후학자들은 2020년 가을에 시작해 올해는 물론 내년 여름까지도 계속될 가능성이 제기되는 ‘라니냐’ 현상을 지목하고 있다.

라니냐는 간단히 말해, 무역풍의 약화로 발생하는 엘니뇨와 정반대의 현상이다. 적도상에서 동쪽에서 서쪽으로 부는 무역풍이 평년보다 강해져서, 동쪽 바다의 표층 해수가 서쪽으로 더 많이 이동하는 현상이 라니냐다. 그 결과, 적도 태평양 서쪽의 수온은 평년보다 더 높아지고 동쪽은 낮아진다. 듣기에는 별일 아닌 것 같지만, 이게 많은 문제를 일으킨다. 서쪽에는 가뭄과 고온을, 동쪽에는 홍수를 몰고 오는 등, 라니냐 시기엔 엘니뇨 때와 이상기후의 유형도 동서양에서 서로 상반되게 나타나는 경우가 많다.

사실 엘니뇨와 라니냐는 지구온난화 문제가 없었던 아주 오랜 옛날에도 있었던 자연현상이다. 그런데 최근에 그 문제가 특별히 더 크게 나타나는 이유는, 그것의 발생 행태가 과거와 많이 달라졌고, 이상기후에 미치는 영향도 훨씬 커지고 있기 때문이다. 과거에는 엘니뇨와 라니냐가 보통 2~7년에 한 번씩 발생하여 1년 이내에 끝이 났는데, 이번의 라니냐는 2020년 가을에 발생하여 3년째 계속될 가능성까지 제기되고 있다. 그래서 이번의 라니냐를 특별히 ‘트리플 딥(triple dip) 라니냐’라고 부른다.

엘니뇨와 라니냐 관측 역사상 이렇게 길게 이어진 트리플 딥 라니냐는, 1950년에 한 차례 있었을 뿐이다. 강한 엘니뇨와

라니냐가 자주 발생하고 더욱 길게 이어진다는 말은 세계 곳곳에서 대규모 기후재해가 그만큼 심각해진다는 것을 의미한다. 그런데 앞으로는 이런 트리플 덩 라니냐가 더욱 자주 나타날 것이라는 연구논문이 <네이처>에 나와 우리를 긴장시킨다.



침수로 물에 잠긴 이수역(사진:연합뉴스)

이 분야의 권위자인 워싱턴대학의 싱거 교수는 2022년 2월 <네이처-기후변화>에 게재한 논문에서 ‘지구온난화로 해수 온도가 상승하여 해류 흐름의 변화가 커지는 효과가 강화되기 때문에 라니냐 현상이 점차 증가해 갈 것’이라고 예상했다. 그리고 그 결과로 21세기에는 20세기에 비하여 가뭄 발생이 10배나 증가할 것이라고 전망했다. 특히 우리나라가 속해 있는 동아시아와 남아시아, 그리고 북미와 중남미를 중심으로 전 세계에서 동시다발적으로 가뭄이 기승을 부릴 것이라고 예측했다. 생각만 해도 끔찍한 일이다.

우리의 삶을 실제로 위협하는 기후위기

라니냐가 발생한 여름철에는, 북태평양고기압의 북쪽으로는 확장이 보다 이른 시기에 나타나고 그 세력도 더 오래 지속된다. 이런 점을 감안하면 장마가 끝나고 8월부터의 폭염과 늦더위가

만만치 않을 것이라고 예상해 볼 수 있다. 이것이 다가 아니다. 북태평양고기압이 9월까지도 우리나라에 영향을 미치게 되면, 북쪽에서 내려올 찬 공기와 한반도상에서 만나게 된다. 그 결과 ‘정체전선’이 만들어지고 가을비도 많아지게 된다. 이른바 가을장마다. 가을에 만들어지는 강한 태풍이 이 정체전선대를 따라 진행해 올 가능성도 높아진다. 가을 장맛비와 가을 태풍은 농산물에 더욱 치명적인 피해를 입힌다.

최근엔 실제로 이런 사례가 점점 많아지고 있다. 과거엔 8월 하순이 되면 북태평양고기압 세력이 한반도에서 남쪽으로 내려가서 일본에만 영향을 미쳤다. 그래서 가을장마는 일본의 문제였고, 우리나라엔 없던 현상이었다.

지난해부터 보면, 11월부터의 이상고온과 올해 봄까지 이어진 가뭄, 스콜은 아니지만 이상한 장맛비와 여름 폭염, 그리고 가을장마까지, 이렇게 1년 내내 우리나라는 기후재해의 영향 아래 있게 될 가능성이 높다. 이것이 한반도에 현실화하고 있는 기후변화의 실태다.

글쓴이 김해동은

어린 시절부터 과학 교사를 꿈꾸어 부산대 지구과학교육과를 졸업하고 같은 대학에서 기상학 전공으로 석사학위를 받았다. 짧은 교사 생활을 거쳐 동경대학 대학원에서 기상학 전공으로 박사학위를 취득하였다. 박사과정 중 목도한 해양 철분 살포 실험을 계기로 기후변화 문제에 기여할 과학의 역할을 깊이 생각하게 되었다. 기상청 기상연구소 연구관을 거쳐 1998년부터 계명대학교 환경학부 교수로 재직하고 있다.

흙으로 맨 위로

2. =====

3. [김해동 칼럼] 수천년에 한번 오는 기후재난의 일상화

By 김해동 | 2022년 6월 28일 | 국제, 미래, 미분류

2020년대 들어 위기 수준에 도달한 기후변화를 따져보고 이로 인한 기상이변을 짚어보는 김해동 필자의 연재 칼럼이다. 첫 번 칼럼에서는 인도 폭염이 동아시아 여름 날씨와 농업에 끼치는 영향을 다루었고, 두 번째인 이 달 칼럼에서는 이상 기후의 악순환에 대해 이야기한다. 폭염과 가뭄은 식물 생장을 방해하고, 숲의 이산화탄소 흡수 능력마저 저하시킨다. 기후로 인해 숲이 망가지고, 숲이 망가지면 지구 온난화와 기후 위기는 또 당겨진다는 재앙의 고리이다. 이제는 더 이상 미루지 말고, 이 재앙의 고리를 끊어야 할 시점이다. [편집자 주]

- ✓ 온실가스 증가로 곳곳에 때 이른 폭염
- ✓ 갈수록 폭염은 일찍, 자주, 심해져
- ✓ 이상 기후, 이제는 새로운 일상으로
- ✓ 갈수록 예측 어려운 극한의 이상기후
- ✓ **2022** 이른 폭염은 미래 기후 재앙 예고편
- ✓ 이상 기후 현상의 악순환 고리



사진:셔터스톡

지구촌 곳곳에 등장한 때 이른 폭염

올 3월부터 인도에서는 극심한 폭염이 발생하여 세계인들을 놀라게 하였다. 매년 5월에나 나타나던 폭염이 3월에 나타났는데, 그것은 3천 년에 1회의 빈도로 발생할 수 있는 특이한 현상이었다. 그런데 폭염이 일찍 시작된 것은 인도에만 한정되지 않았다. 미국 중서부와 남부 유럽을 중심으로 5월에 폭염이 나타났고 6월 중순에는 40도를 훌쩍 넘는 살인적 고온이 그 영역을 확대하였다. 이런 고온은 이전엔 빨라도 7월 중순 이후에나 나타나던 사건이었다.

유난히도 일찍 시작된 금년도 폭염에 대하여 세계기상기구(WMO)에서는 6월 17일에 다음과 같은 논평을

내어놓았다. ‘금년 폭염이 일찍 시작되고 있는 것은 명백히 기후변화의 영향이다. 오늘날 우리가 목도하고 있는 이상한 기후 현상들은 불행하게도 미래를 미리 맛보는 것이다.’

세계기상기구는 2021년 11월에 영국 글래스고에서 개최되었던 제 26차 기후변화당사국회의(COP26)에 맞춰서 ‘2021년 세계이상기후보고서’를 발표했었는데, 좀체 발생하기 어려운 현상으로 치부해왔던 이상기후 현상이 이제 새로운 일상이 되었다고 지적한 바 있다. 이상기후 현상이란 무엇인가? 지난해와 금년에 어떤 극한 이상기후 현상이 발생하였을까? 장래 이상기후현상은 어떻게 변해갈까? 우리에게 이상기후 현상의 증폭을 막을 시간이 남아 있을까? 이러한 문제를 생각해 본다.

이상기후, 30년 평균값을 벗어난 기후 사건

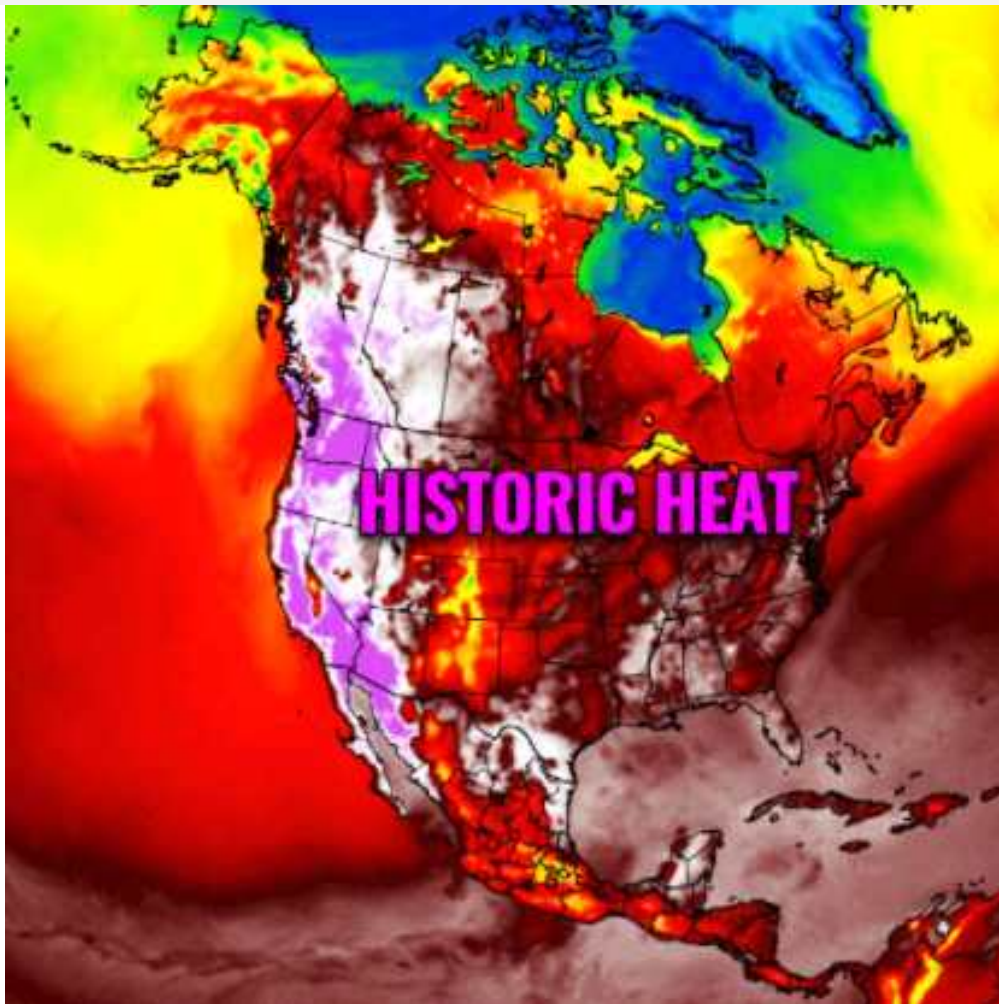
이상기후 현상이란 어떤 지역에서 30년에 1회 정도의 빈도로 발생하여 좀체 나타나기 어려운 기후 현상을 가리킨다(세계기상기구). 기온이라면 30년에 1회 정도 나타나는 고온 또는 저온을 말한다. 강수라면 30년에 1회 정도 나타날 수 있는 홍수 또는 비가 장기간 내리지 않는 가뭄을 의미한다.

이상(abnormal)을 말하려면 먼저 무엇이 정상(normal)인지를 정의해야한다. 세계기상기구(WMO)는 정상 기후를 30년 평균 상태에 근접한 현상이라고 간주한다. 기후 평년값은 10년 단위로 끊은 과거 30년 동안의 평균값을 말한다. 예로서 어느 지역 어느 날의 2022년도 평년 값이란 1991~2020년 동안의 평균값을 가리킨다. 따라서 지금 이상이라고 여겨지는 기후현상도 장기간 이어진다면 그것은 새로운 정상이 된다.

기상 통계학적으로 이상 기후는 30년 평균값의 표준편차를 벗어난 기후 사건이다. 여기서 기준 기간을 30년으로 잡은 이유는 사람들이 가장 왕성하게 활동하는 기간을 30~60세 사이로 보는 것이 통념이기 때문이다. 이 30년을 우리는 한 세대라고 부르기도 한다. 인간의 수명이 길어지고 사회활동 기간도 연장된다면 이상기후를 정의하는 데에 사용되는 기준 기간도 늘어날 가능성이 있다.

그런데 자연 생태계에는 30년 동안에 1회의 빈도로 발생하는 기후 현상을 이상하다고 받아들이지 않는 생물도 많다고 한다. 그러한 예로서 사막에서 생존하는 식물들이 있다. 사막엔 원래 강수량이 매우 적고 수년에 걸쳐서 비가 한 방울도 내리지 않는 경우도 종종 있다. 그러다가 수십 년에 한 번씩 하루에 20~30mm 정도의 많은 비가 내릴 때가 있고 그때 사막의 지중에 묻혀있던 종자가 급히 발아하여 꽃을 피우고 열매를

맺는다. 그 씨앗은 다시 사막의 땅 속에서 많은 비가 오기를 기다린다. 그러한 자연에는 인간이 말하는 이상과 정상의 개념이 적용되지 않는다. 30년 평균값을 정상상태, 그것에서 많이 벗어난 기후를 이상기후라고 하는 것은 주로 중위도 온대지역에 살고 있는 사람들의 삶에 맞춰서 정한 것이라고 말할 수 있다.



2021년 6월 말에 북미 서부지역의 폭염 발생 상황. 캘리포니아 남부지역에서 북극권에 가까운 캐나다의 브리티시컬럼비아 주 리튼 시에 이르기까지 초고온이 나타났다.

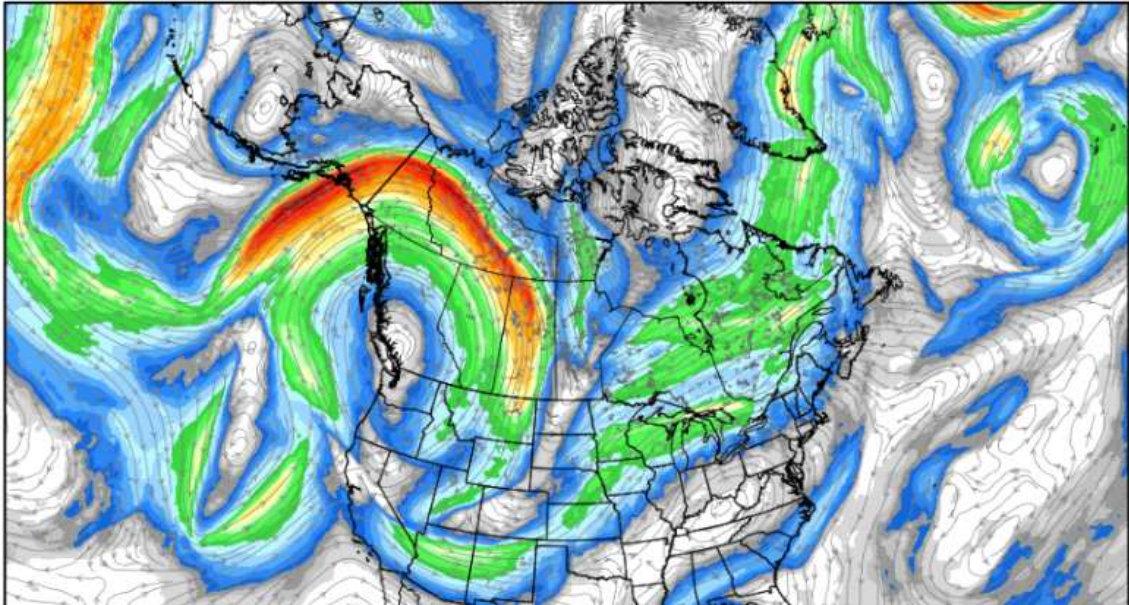
1/10,000 확률의 2021 북미 서부 지역 폭염

인간과 자연생태계에 큰 피해를 주는 대표적인 이상기후 현상은 폭염, 가뭄, 한파, 홍수 그리고 강풍이다. 이 중에서 작년과 금년에 나타난 폭염 현상을 살펴보려 한다. 2021년 북미 서부 고위도 지역의 폭염과 2022년의 인도와 유럽 폭염이 이에 속하는데, 2021년 북미 서부지역과 2022년의 유럽폭염의 실상을 들여다보자.

먼저 2021년 6월 말에 발생하여 오래 지속되면서 많은 인적 물적 피해를 낸 북미대륙 서부지역의 극심했던 폭염 사건을 살펴보자. 폭염은 남부 캘리포니아에서 북극권에 가까운 캐나다의 브리티시 콜롬비아주의 리튼 시에 이르기까지 광범하게 나타났다. 리튼 시를 포함한 캐나다 북부지역의 기온은 평년에 비하여 22~27도나 높았다. 이 폭염으로 캐나다에서만 700명 이상의 고온 사망자가 발생하였고, 미국 오리건주 등의 피해자도 100명을 넘었다. 폭염은 자연 생태계에도 큰 타격을 입혔다. 해수 온도도 덩달아 올라서 북미 서부 태평양 연안의 홍합, 조개, 불가사리 등 바다생물들도 떼죽음을 맞았다. 현장을 조사한 해양 생물학자들에 의하면 폭염이 극심했던 2주간(6월 말에서 7월 상순)에 폐사한 해상 생물이 10억 마리를 넘었고 연어 등 민물 생물들도 몰살에 가까운 피해를 입었다.

미국 컬럼비아대학교의 제프 베라델리(Jeff Beradelli) 교수는 이 폭염의 발생확률을 1/10,000 이하라고 추정하였다. 즉 1만 년에 1회 이하로 발생할 수 있는 매우 희귀한 사건이었다는 말이다. 이 폭염 사건의 원인을 조사하기 위하여 기후변화 국제공동연구인 세계기상원인분석(WWA) 프로젝트가 긴급히 실시되었는데, 이 프로젝트에 미국·네덜란드·영국·캐나다 등에서 27명의 과학자가 참여하였다. 그들은 2021년 7월 8일에 긴급 논문을 통해 연구 결과를 발표하였다. 그들은 6월에 제트기류가 미국 알래스카 위쪽까지 올라가서 오메가(Ω) 형태의 극단적인 흐름을 만들어서 상층 고기압을 형성하고, 그 결과로 열돔(heat dome) 현상이 만들어져서 폭염이 발생한 것은 1천 년에 한 번 정도의 빈도로 발생할 수 있는 희귀한 사건이라고 지적하였다. 아울러 산업화 이전의 지구 평균온도(1850-1900년 동안의 평균기온)에 비하여 지구 기온이 약 1℃ 상승함으로써 이런 그러한 사건이 발생할 확률이 150배나 높아졌다고 했다. 과거엔 1천 년에 1회의 확률로 발생했던 사건이 이제 5~7년에 한 번 발생하는 일상적인 문제가 되었다는 말이다.

WWA 프로젝트에 참여한 연구자중 한 명인 네덜란드 왕립 기상연구소의 오르덴볼프 박사는 이런 발언을 덧붙였다. 기후학자들은 기후위기의 진전으로 극심한 폭염이 보다 빈번하게, 보다 격렬하게 발생할 것이라고 예상했지만, 이런 고위도 지역에서 이 정도의 심각한 폭염이 발생한 것은 예상외의 사건이었다. 우리가 기후변화가 가져올 치명적인 영향을 진정으로 이해하고 있거나 한 것인가라는 중대한 의문을 품게 되었다(일본 마이니찌 신문, 2021. 07. 08).



폭염을 유발한 제트기류의 극심한 사행 구조를 볼 수 있다.

기후학자들은 세계 각지에서 발생하는 대규모 폭염의 원인으로 열돔 현상을 거론한다. 이것을 간단히 알아보자. 상층일기도를 보면 중위도 상공에 북극권의 찬 공기와 남쪽의 더운 공기가 경계를 이루는 위치에 등고선(=등압선)간격이 좁아서 풍속이 강한 영역이 뱀이 기어가듯이 구불구불한 모양(사행(蛇行, meandering))을 만들며 지구를 동서 방향으로 둘러싸고 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 편서풍 파동이라고 하며, 이 파동 내에서 풍속이 일정 수준 이상으로 강한 바람을 제트기류라고 부른다. 이 편서풍 파동(제트기류)의 위치가 북극권 찬 공기와 남쪽 더운 공기의 경계인 셈이다.

북극 지방의 기온이 오르면 남북 간의 기온 차가 줄고 그 결과로 남북방향의 기압 차가 줄어든다. 제트 기류의 풍속은 남북 방향의 기압차에 비례하므로 북극권의 기온이 올라갈수록 느려진다. 지구온난화 속도는 고위도일수록 빨라서 제트기류의 속도가 점차 느려지고 있다. 제트 기류의 속도가 느려질수록 뱀처럼 구불구불하게, 남북방향으로 더 많이 오가며 흐르게 된다. 제트기류가 북쪽으로 치우쳐 흐르는 곳엔 고온이, 남쪽으로 치우쳐 흐르는 곳에는 저온현상이 나타난다.

2021년 여름에 북미 서부지역에서 폭염이 발생한 시기에 북극권의 찬 공기는 동아시아 쪽으로 치우쳤다. 그 결과로 북미대륙 쪽의 제트기류는 평상시보다 훨씬 북극 쪽으로 치우쳐 올라갔고, 제트기류의 흐름 모양이 오메가(Ω) 형태가 되었다.

남쪽의 따뜻한 공기는 북위 55도 이상까지 올라갈 수 있었다. 제트 기류가 오메가 모양의 곡률을 가지게 되면 고기압성 흐름이 만들어진다(상층 고기압 생성).

상층에 정체한 고기압에선 하강 기류가 발생하기에 고기압은 지열로 가열된 공기가 상승하지 못하고 지상에 머물도록 막는 솔뚜껑과 같은 역할을 한다. 또 하강기류는 압축되어 기온이 상승(1km 하강함에 따라서 기온이 10℃씩 상승)하기 때문에 지상의 고온 발생에 기여한다. 이를 열돔(heat dome) 현상이라고 한다.



2014년에 예측하였던 2050년 여름철 프랑스의 미래 고온과 2022년 6월에 관측된 고온 현황으로 두 그림의 수치가 근접해 있는 것을 볼 수 있다.

2022 인도와 유럽의 폭염으로 엿보는 우울한 미래 일상

2022년 여름에 유럽 폭염도 일찍이 시작되어 그 범위를 계속 넓혀갔다. 5월 하순에 스페인에서 34℃를 넘어서는 등 남유럽에서 초고온 현상이 나타났고 대형 산불도 시작되었다. 6월에 접어들면서 폭염은 프랑스와 이탈리아로 확대되어 43℃를 넘는 고온이 나타나서 각종 야외행사가 금지되었다. 하지를 전후로 폭염은 유럽 각지로 확대되어 비교적 선선한 여름 기후를 보이는 독일에서도 40℃에 근접하는 이른 폭염이 나타났다. 폭염은 가뭄과 함께 찾아온다. 폭염과 가뭄이 휩쓸 유럽 각지에서 자연발화의 대형 산불이 수백 건 이상 발생하여 고통을 더하였다.

2022년 유럽 폭염의 가장 큰 특징은 출현 시기가 과거에 비하여 너무 빠르다는 점이다. 유럽 폭염은 수만 명의 인명피해를 냈던 2003, 2007년을 포함하여 지금까지는 매년 7~8월에 나타났었다. 그런데 2022년에는 평년 기온보다 무려 10도 이상 높은 고온이 5~6월에 유럽 각지에서 나타났고, 대부분의 지역에서 기상관측 역사상 가장 높은 고온으로 기록되었다.

이런 이른 시기 폭염 현상은 북미 지역도 다르지 않다. 6월 중순에 폭염주의보를 통보받은 미국 인구는 3분의 1을 넘었고, 6월 10일에 미국 라스베이거스의 일일 최고 기온은 43도까지 치솟았다. 지난 3~5월의 인도와 파키스탄의 장기간 폭염에 이어 유럽과 미국, 아시아 등 북반구 대부분의 지역에서 과거에 비하여 1~2개월이나 이른 시기에 폭염이 기승을 부리기 시작했다.

세계기상기구는 폭염의 조기 출현의 원인이 온실가스 증가가 만드는 기후 변화라고 지적하면서, 이것은 불행하게도 미래에 일상화될 현상을 미리 맛보고 있는 것이라고 하였다. 극심한 폭염의 발생빈도가 100년 전에 비하여 10배 이상 증가하였다는 사실도 밝혔다. IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체)도 폭염 출현이 빨라지고 있는 원인은 온실가스 증가로 인한 지구온난화에 있고, 지구온난화의 진척으로 폭염이 더 일찍 시작되고 더 자주, 더 극심해지고 있다고 지적하였다.

2022년 6월 20일 자 북반구 500hPa 상층일기도인데 북극권의 찬 공기는 북극 주변으로 수축되어 있고 유럽, 인도, 아시아 그리고 북미대륙의 동부와 서부 등 대부분의 지역에 고온(W로 표기)의 상층 공기가 덮고 있는 것을 확인할 수 있다.

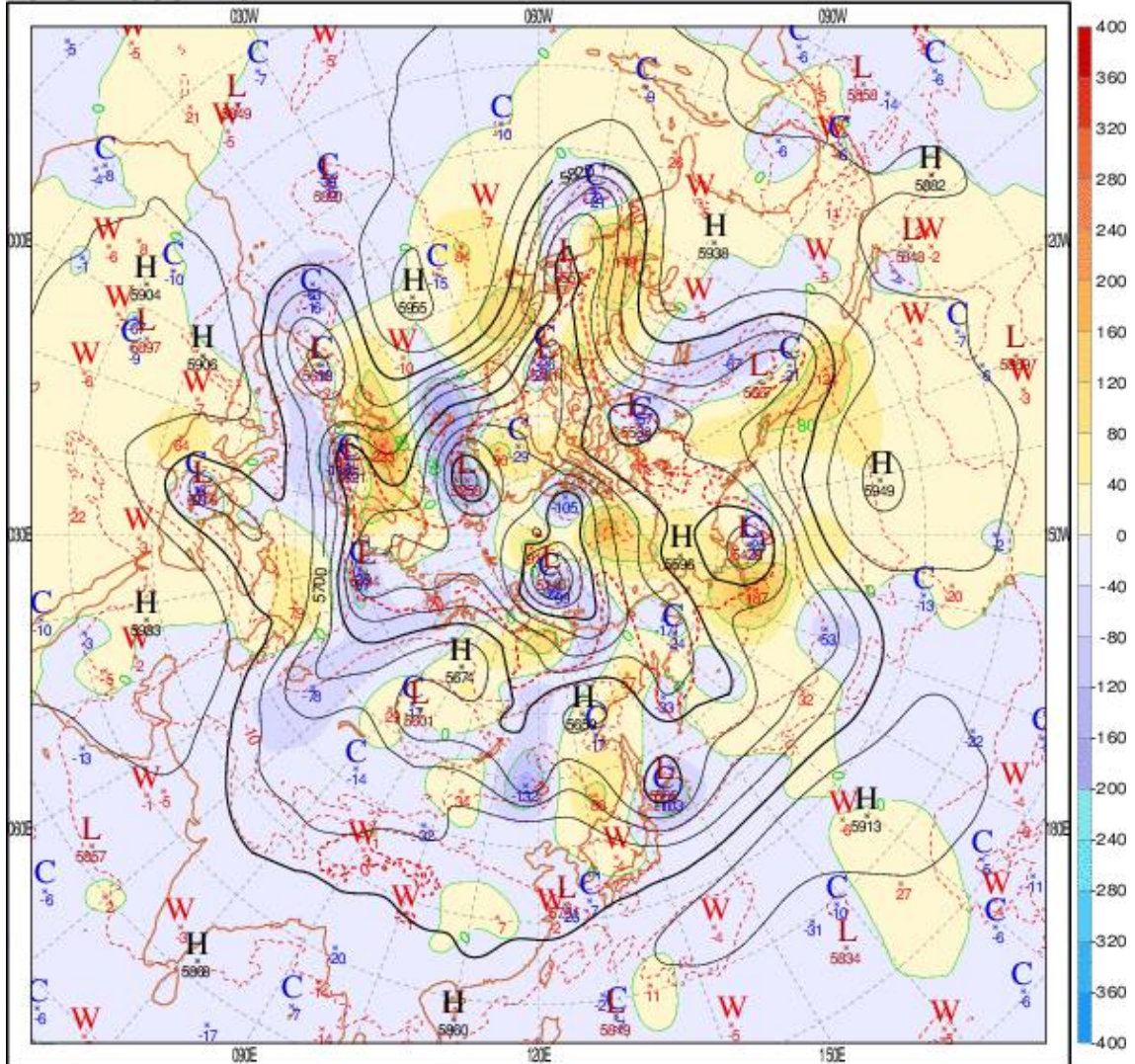
이상기후 현상의 영향과 우리의 대응

기후변화 문제가 대두되기 이전에도 극단적인 이상기후 현상은 있었다. 하지만 과거에는 그러한 사건들의 발생빈도가 현저히

AXXN50 06UTC 20 JUN 2022

500hPa GPH(m) and Tendency for 24hrs(m/day)
GDAPS(KIM NE360NP3 L91, Stereo_60km)
Korea Meteorological Administration

15KST 20 JUN 2022



06UTC 20 JUN 2022 (15KST 20 JUN 2022)

낮았다. 큰 충격을 주는 사건도 발생 빈도가 낮으면 사회적
역량을 모아서 복구하면서 살아갈 수 있다. 하지만 그게 자주
발생하게 되면 버텨낼 수 없게 된다. 이상기후의 발생빈도가
높아지는 현상을 두고서, 이상(abnormal)이 새로운 일상(normal)이
된다고 표현하는데 그러한 상황이 심화될수록 인간과
자연생태계의 지속가능한 삶은 더욱 위협받게 된다. 기후 위기의
근본적인 원인은 주지하다시피 산업화 이후 화석연료를 대량
소비함으로써 급증한 대기 중 온실가스(이산화탄소)에 있다.
그런데 온실가스 증가가 일방적으로 극한 이상기후 현상을
만들어내는 것이 아니라, 이젠 극한 이상기후 현상이 대기 중
온실가스 농도를 높여 지구 온도를 상승시키고 스스로

증폭해가는 괴물의 단계로 접어들었다. 이 문제를 살펴보고, 지금 우리가 무엇을 해야 할지를 생각해 보자.

먼저 2020~2021년 미국 텍사스 한파와 같은 이상 한파를 생각해 보자. 극한 한파는 발생 지역의 경제활동을 파괴하고 다수의 인명피해를 가져온다. 뿐만 아니라 야생 동물과 식물에게 극심한 스트레스를 야기하고 죽음으로 내몰기도 한다. 냉해 스트레스는 식물의 연간 1차 생산량(식물의 연간 생장량)에도 치명적인 악영향을 준다. 식물의 생장 억제는 식물의 이산화탄소량 제거 능력 감소를 의미한다.

숲의 이산화탄소 흡수 능력마저 저하시켜

폭염과 가뭄도 야생 동식물 및 곡물과 과수의 생장에 장애로 작용한다. 이를 다룬 연구논문이 다수 출판되고 있다. 폭염과 가뭄을 유발하는 요인은 많지만, 그 중에서 대표적인 요인으로 엘니뇨(라니냐)현상을 들 수 있다. 그러한 연구 중의 하나로 국종성 등(2017)의 연구를 들 수 있다. 그들은 엘니뇨가 유발하는 가뭄과 폭염은 지구온난화가 진행될수록 고위도 건조지역에 토양수분 고갈 효과가 더해져서 더욱 강해진다는 사실을 밝혔다. 특히 엘니뇨시기에 지구의 허파라고 불리는 아마존의 탄소흡수 능력이 크게 약화되는데, 지구온난화가 더욱 진행될 장래에는 탄소 흡수 능력이 현재보다 60% 가까이 낮아질 것으로 전망하였다.

매년 이른 봄철에 시베리아 사하공화국 주변에서 시작되는 아북극 지역의 산불도 지구온난화로 인한 고온과 가뭄의 영향이다. 산불로 숲이 연소되어 대량의 이산화탄소가 발생하고 숲의 탄소 제거 능력은 저하된다. 또 동토 지역의 산불은 지중에 있는 메탄 하이드레이트를 녹인다. 녹은 메탄은 대기로 방출되기도 하고 산불에 천연가스를 공급하는 역할을 한다. 메탄은 이산화탄소보다 20배 이상 강력한 온실가스이다. 산불로 발생하는 연기는 북극권을 전부 덮기도 한다. 연기를 이루는 먼지가 만년설과 빙하에 내리면 지표면의 태양 복사 에너지 흡수량이 증가하여 빙하가 녹고 북극권의 온도가 더욱 빠르게 올라가게 된다.

고위도 지역 녹화 역시 지구 온도 상승에 일조

북극권의 온도상승에 따른 고위도 지역의 녹화(greening) 현상도 지표면의 태양광 반사율을 줄여서 지표의 태양 복사 에너지 흡수율을 높이기 때문에 고위도 북극권의 빠른 온도 상승을 강화한다. 북극권 온도상승은 편서풍 파동으로 이어지고, 그것이 이상기후 출현의 직접 원인이 된다.

무엇보다도 충격적인 사실은 영국 리즈대학팀의 연구 결과이다. 영국 리즈대학 연구팀이 주도하고 전 세계 100 여 개 기관이 참여한 협동 연구로 30 년 동안 아마존과 아프리카의 열대림을 추적 조사한 결과 숲이 대기 중의 이산화탄소를 제거하는 능력이 급격하게 약화되고 있다는 사실이 밝혀졌다(Nature, 2020). 1990 년대에 열대 원시림은 연간 460 억 톤의 이산화탄소를 제거하였으나 2010 년에는 제거 양이 약 250 억 톤에 불과하였다. 감소분 210 억 톤은 영국, 독일, 프랑스 및 캐나다가 화석연료 사용으로 10 년간 배출하는 양에 맞먹는 규모다. 이런 식으로 간다면 2035 년경에 이들 숲은 이산화탄소 흡수원에서 배출원으로 전락한다고 한다.

열대림의 이산화탄소 흡수량이 빠르게 줄어드는 가장 큰 원인은 지구온난화로 인한 기온 상승 그 자체라고 한다. 그들은 지구 평균온도가 산업화 이전보다 2 도 상승하게 된다면 열대림의 거의 4 분의 3 은 온도 임계 치(32℃)를 넘어선다는 사실을 확인했다며, 온도상승은 열대림의 탄소 저장 능력을 급격하게 감소시킨다고 지적하였다. 온도 임계치를 넘으면 숲은 이산화탄소 흡수원(sink)에서 방출원(source)으로 전락한다.

이처럼 인간의 탄소배출은 지구온난화를 유발하여 이상기후를 만들어냈고, 이상기후는 인간과 지구생태계의 지속가능한 삶을 위협하고 이산화탄소 농도 증가를 조장하여 더 강력한 이상기후로 진화해가는 단계로 접어들었다. 최근 100 년, 1,000 년 나아가서 10,000 년 빈도의 이상기후 현상마저 속출하게 된 것은 이 악순환의 고리가 강고해졌다는 사실을 말해준다. 극한 기후 현상들이 인간이 기후 위기 문제에 관여할 여지와 시간을 빠르게 빼앗고 있다. 비상한 상황이다.

글쓴이 김해동은

어린 시절부터 과학 교사를 꿈꾸어 부산대 지구과학교육과를 졸업하고 같은 대학에서 기상학 전공으로 석사학위를 받았다. 짧은 교사 생활을 거쳐 동경대학 대학원에서 기상학 전공으로 박사학위를 취득하였다. 박사과정 중 목도한 해양 철분 살포 실험을 계기로 기후변화 문제에 기여할 과학의 역할을 깊이 생각하게 되었다. 기상청 기상연구소 연구관을 거쳐 1998 년부터 계명대학교 환경학부 교수로 재직하고 있다.

=====

=====

4. [김해동 칼럼] 인도폭염으로 장마는 악화, 농업은 비상

By 김해동 | 2022년 6월 13일 | 국제, 미래, 미분류

기후변화는 기상이변을 촉진한다. 속이 바뀌면 겉은 더 크게 바뀐다. 2020년대 들어 거의 위기 수준에 도달한 기후변화를 따져보고 그것이 가져오는 기상이변이라는 현상을 짚어보고자 한다. 전문가인 김해동 필자가 수고하기로 했다. 6회에 걸쳐 이상기상의 원인, 가을장마와 슈퍼태풍, 겨울철 이상한파, 대형화하는 홍수와 가뭄, 식물과 곤충의 피해를 다룰 예정이다. 첫 번째 칼럼에서는 봄철 인도폭염으로 인해 한국의 여름 장마가 악화되고 전세계적으로는 가뭄, 토양건조화가 농업위기로 이어지는 구조를 해부한다. 가뜰이나 러시아-우크라이나 전쟁은 끝날 기미가 없는데 이번 여름은 가뭄고 길어질 모양이다.

[편집자 주]

- ✓300년 간격의 폭염이 3년 간격으로 줄어
- ✓일상이 되어버린 과거의 이상기후 현상
- ✓폭염이 잦은 인도에서도 유별난 금년 폭염
- ✓냉방용 화력 발전과 폭염의 악순환 고리
- ✓폭염의 뒤는 가뭄, 생태계 파괴, 흉작
- ✓우크라이나 전쟁과 함께 전세계 밀 품귀



사진: 셔터스톡

2021년 10월 말 발표된 '2021년 이상기상보고서'의 제목은 '새로운 기준이 된 이상기후현상'이었다. 세계기상기구는

이상기상을, 30 년에 1 회의 빈도로 기록될 정도로 좀체 경험할 수 없는 기상 사건이라고 정의한다. 과거엔 사람들이 좀체 경험하지 못했던 특이한 기상현상들이 이젠 일상적으로 발생하는 시대가 되었다는 말이다. 금년에 나온 영국기상청의 분석에 의하면 2010 년 이전에 300 년 빈도로 나타날 수 있던 폭염이 그 이후로는 3 년에 한번 씩 발생하게 되었다고 한다. 이런 경우를 과거엔 이상기후현상이었던 것이 이제는 일상(새로운 기준)이 된 사례라고 할 수 있다. 2022 년에도 과거엔 좀체 볼 수 없었던 이상기후현상이 지구 곳곳에서 빈발하고 있는데, 그러한 사례의 하나로 3 월부터 시작되어 5 월 중순까지 이어진 인도의 폭염사건을 들 수 있다. 금년도 인도폭염은 과거의 그것에 비하여 얼마나 더 대단하고 다른 특성을 갖는 것인지, 인도폭염의 원인과 그것이 우리나라를 포함한 전 세계에 미칠 영향은 무엇인지를 차례대로 살펴보고자 한다.

인도에 폭염이 잦은 이유와 금년도 인도폭염의 원인

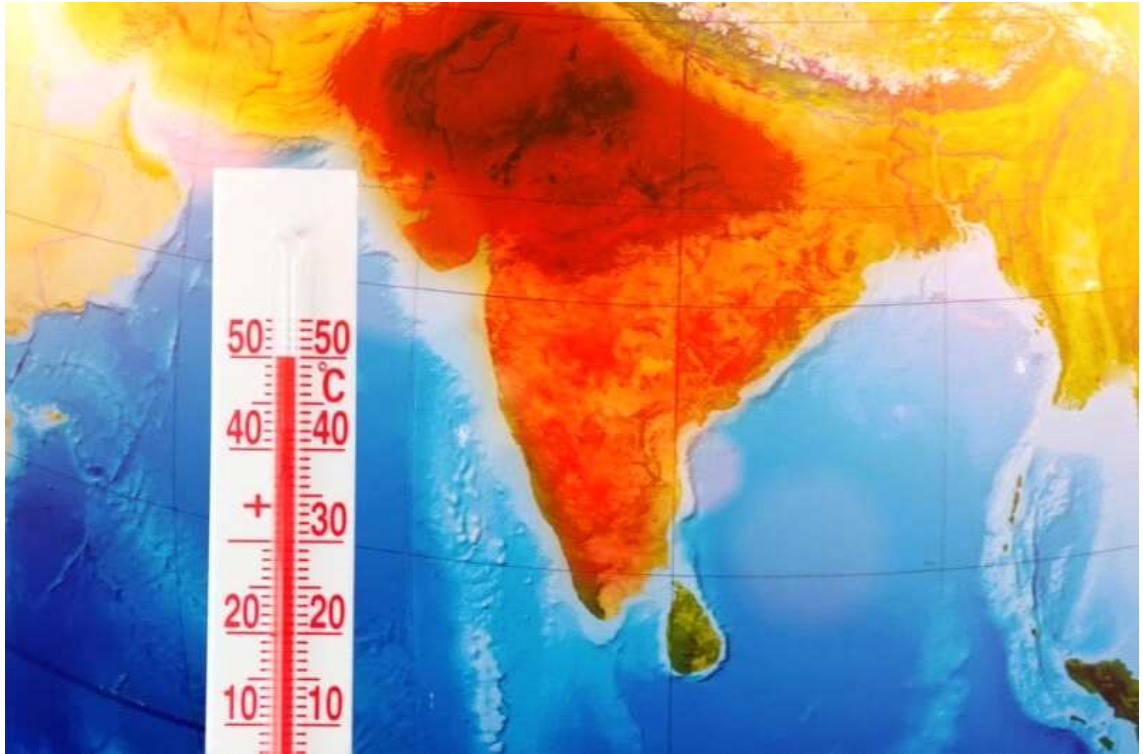
금년도 인도폭염의 가장 큰 특징은 3 월에 시작되었기에 봄이 사라지고 겨울에서 곧바로 여름으로 넘어갔다는 사실에 있다. 금년도 인도의 3 월 기온은 122 년 전에 기상관측을 시작한 이래로 가장 고온이었고, 4 월 기온도 기상관측 역사상 3 번째로 높았다.

계절에 걸맞지 않는 기후의 출현은 인간과 자연에 재앙이 된다. 금년도 인도 폭염이 그에 해당하는 사건이었고, 왜 지금을 기후위기의 시대라고 부르는 지를 알려주는 생생한 사례였다.

영국 임페리얼 칼리지 런던의 그랜섬 연구소에서는 금년에 발생한 인도의 봄철 폭염은 3 천년에 한번 발생할 수 있는 매우 희귀한 사건이라는 연구 결과를 발표하였다. 아울러 산업화 이전에 비하여 지구 온도가 2 도 상승하게 되면 이런 사건이 5 년에 1 회의 빈도로 발생하게 되어 일상적인 기후가 될 것이라고 지적하였다(연합뉴스, 5 월 24 일).

우기 시작 전 연중 최고 더위는 인도에서는 흔한 일

인도에서는 6 월 초에 여름 우기가 시작되기 전에 내륙지역(북위 18 도 동경 80 도 부근)을 중심으로 극심한 고온이 나타난다. 2015 년에는 5 월 31 일 기준으로 2200 명 이상의 사망자가 발생하였다고 인도방재관리국이 발표한 사건도 있었다. 2015 년 폭염을 포함한 인도 내륙의 폭염원인은 보통 다음과 같이 설명한다. 벵갈 만의 수온이 점차 상승하여 5 월 하순부터 적운대류가 매우 활발한 상태가 된다(고온의 해수면으로부터 열과



수증기를 공급받은 하층대기가 왕성한 부력을 얻게 되는 결과임). 상승한 공기에서 수증기가 응결되어 비로 내리고 응결열로 공기는 더욱 가열된다. 이렇게 고온 건조화 된 공기가 인도 내륙 상공으로 이동해가서 그곳에서 하강하면서 폭염을 유발한다. 상층에서 공기가 지상으로 하강할 때에는 부피가 수축되는 효과가 발생하기 때문에 1km 하강함에 따라서 기온이 10 도 정도 상승하는 효과가 나타난다. 하강기류가 강한 곳에서는 구름이 존재하기 어렵기 때문에 지표에 더욱 강한 태양 빛이 도달하여 지표를 가열하기 때문에 기온이 더욱 높아진다. 또 하강기류가 강하면 지표에서 가열된 공기가 상공으로 상승하지 못하고 지표 부근에 정체하게 된다. 이를 대기 열돔 현상이라고 부른다. 인도에서 우기가 시작되기 직전인 5월 하순에 연간 가장 더운 시기가 되는 원인은 이런 대기 순환의 특성에 있다. 해에 따라서 고온의 정도에 차이가 생기는 원인의 상당 부분은 이 대기 순환구조의 강하고 약함으로 설명할 수 있고 고온이 지속되는 기간은 우기가 언제 시작되는가에 크게 의존한다.

제트기류가 이례적으로 꼬불꼬불 흐르며 북인도 상공에 철벽을 두름

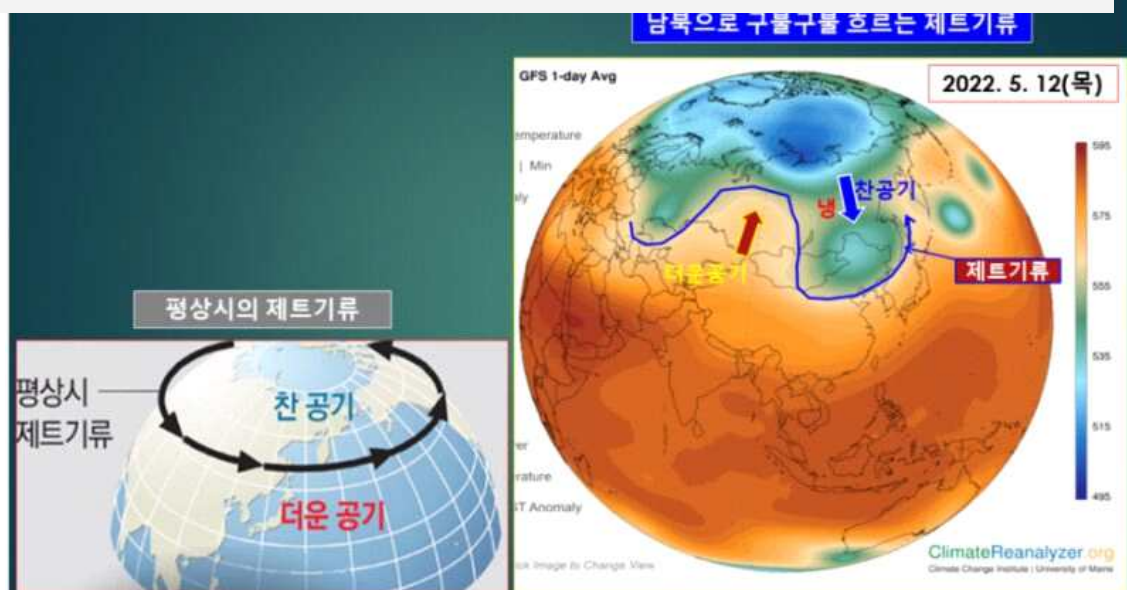
그렇다면 과거보다 일찍 시작된 금년도 인도폭염을 만든 원인은 어떻게 설명할 수 있을까? 전 세계에 일기예보를 제공하는 아큐웨더(AccuWeather)는 인도폭염의 원인을 제트기류의 이상

경로에서 찾고 있다. 상층 대기에서 위도 38도를 중심으로 남북방향으로 사행하면서 지구를 일주하는 편서풍 파동 내의 제트기류가 인도대륙에서 평년에 비하여 훨씬 북쪽으로 돌출하여 사행(meandering, 蛇行)하는 경로를 취하였고, 이로 인해 고온의 남쪽 공기가 평년과 다르게 훨씬 이른 시기에 훨씬 북쪽까지 올라갔다(그림 1). 아울러 이 제트기류가 인도 북부 지역 상공에서 시계방향으로 회전하면서 흐르고 있기 때문에 인도 중북부와 파키스탄 상공에 정체성 고기압이 자리를 잡았다(시계방향의 흐름이 생길 경우에 이를 고기압성 흐름이라고 하고, 이 흐름이 하강기류를 만들어 낸다.) 이 상층 고기압에서 만들어진 하강기류가 마치 솔뚜껑처럼 지표면으로부터 열을 받아서 가열된 하층의 뜨거운 공기가 상승하지 못하도록 내리누른다. 이른바 열돔(heat dome) 상태를 형성하였다. 2022년 6~7월에 기승을 부린 북미 서부지역이나 2018년에 역대급 폭염을 부른 우리나라의 폭염과 비슷한 상황이 형성되었던 셈이다. 고기압의 정체로 쾌청한 날이 이어지면서 태양빛이 지표면을 더욱 강하게 가열하였고 부가적으로 가뭄도 길어졌다. 이를 기상학자들은 상층 제트기류가 만들어낸 강한 고기압이 정체하면서 열돔을 만들었다고 간단하게 표현한다.

그런데 이런 설명은 일기도상에 나타난 현상을 그대로 설명한 것에 불과하다. 문제는 왜 상층 제트기류가 그렇게 이상한 궤적을 따라서 흐르게 되었는가에 대한 답을 찾는 것이다. 이 문제에 대해서 필자의 견해를 제시해 보고자 한다. 이 문제를 다룬 학술 논문이 나온 단계가 아니라 조심스럽지만, 확인된 관측 자료를 바탕으로 원인을 추정해 보면 다음과 같은 점을 들 수 있다.

라니냐로 인해 서태평양에서 고온 바람이 인도양으로 불어와
첫째, 티베트 고기압의 이상 발달이 눈에 띈다. 지난 겨울철에 티베트 고원에 강설량이 평년보다 적어서 이른 시기부터 티베트 고기압의 지표면이 뜨거워졌다. 눈은 토양보다 태양빛을 훨씬 많이 반사할 수 있기 때문에 겨울철에 눈이 많이 내려서 눈 덮임이 충분한 해에는 티베트 고원의 온도상승이 낮고, 그 반대인 경우엔 티베트 고원의 온도가 높게 나타난다. 티베트 고원의 지표온도가 높으면 그곳에서 가열된 공기가 강하게 상승하여 상층대기에서 발산한다(주변으로 흩어져 가는 것을 발산이라고 함). 즉 상층 고기압이 발달하게 된다. 500hPa 이상의 중상층 대기에서는 티베트 고원 중심으로 강한 고기압성 회전이 생겨서 아열대 서풍 제트를 북쪽으로 밀어 올려서 금년과 같이 상층 제트기류의 이상 경로가 유발될 수 있다. 2018년의 여름철에

티베트 고기압이 크게 발달하여 동쪽으로 확장되어 우리나라 상공을 덮어 열돔 현상을 만들었다. 금년에도 재현될 가능성이 높다. 둘째, 라니냐현상의 영향을 들 수 있다. 라니냐의 영향으로 열대 서부 태평양에서 인도양으로 부는 지상의 편동풍이 고수온해역에서 더욱 높은 수온을 만들었다, 그 결과로 2015년 인도폭염 사건의 주요 원인으로 지목된 바와 같이 열대 해역에서 대류가 활발해 지면서 인도 내륙지역과 열대 해역(벵골 만) 사이에 대기 순환 구조가 더욱 강화된 것을 원인으로 들 수 있다. 약간 부연하자면 인도 대륙은 동쪽으로 방글라데시를 끼고 있는 벵골만, 서쪽으로 파키스탄, 아라비아 반도와 이어지는 아라비아해를 끼고 있는데 대부분의 의미있는 기상변화는 벵골만에서 발생해 전체 인도 대륙에 영향을 미친다. 앞서 얘기한 서태평양에서 인도양으로 부는 편동풍의 영향이다.



금년도 인도폭염을 유발한 제트기류의 이상 궤적.뱀처럼 꼬불꼬불 흐르면서 기상이변을 가져온다. 그리스 신화의 도마뱀 살라만더에서 유래해 이같은 이상 궤적을 멘더링이라고 부른다.

이상기후현상이 기승을 부리는 이유와 영향

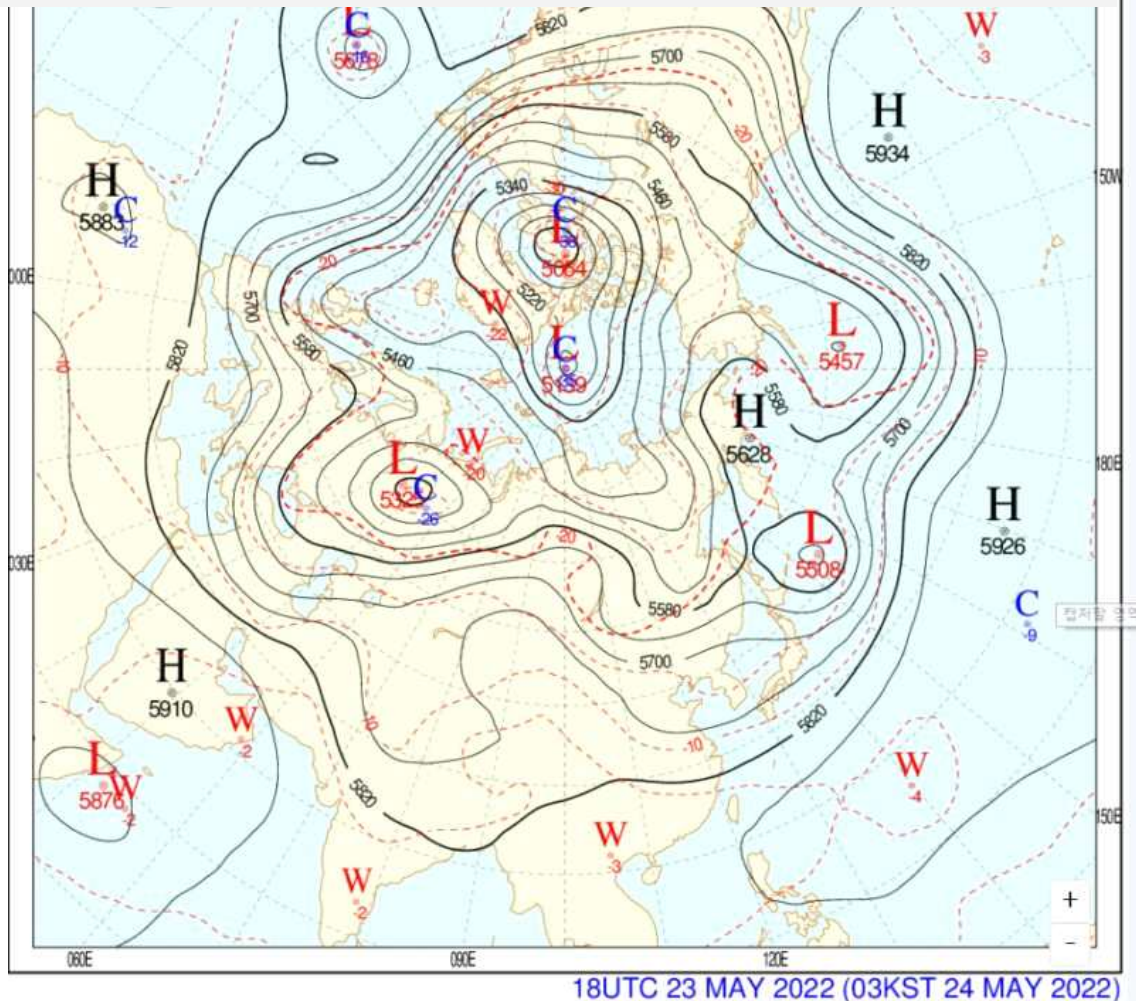
기후변화로 인하여 북극권의 고온화가 진행되어 차가운 공기의 세력이 현저하게 약화되고 있다. 지구온난화로 인한 지구의 온도 상승은 극 지역에서 훨씬 크게 나타나는데 이를 극 증폭현상(polar amplification)이라고 부른다. 극 증폭현상이 상층 제트기류를 약화시키기도 하고 제트기류의 위치를 불규칙하게 만들기도 한다. 이 극 증폭현상이 세계 각지에서 발생하는 계절에 부합하지 않을 정도로 극심한 이상기후 현상을 만든다.

제트기류는 극지방의 찬 공기와 남쪽 따뜻한 공기세력 간의 경계에 위치한다. 극지방 찬 공기와 남쪽의 따뜻한 공기 세력이 균형을 이룰 경우에는 제트기류의 위치가 38도 부근을 중심으로 하여 계절에 따라서 북상(여름) 또는 남하(여름)한다. 그런데 극 증폭현상으로 극지방의 찬 공기 세력이 약해지면 제트기류 자체가 약해지기도 하고, 극지방의 찬 공기가 어떤 경도대에서는 저위도로 치우치고 또 다른 경도대에서는 고위도로 수축된다. 이에 따라서 제트기류가 저위도로 치우친 지역에선 한파가, 고위도로 수축된 지역에선 저위도의 따뜻한 공기가 북상하여 과거에 볼 수 없었던 열파가 나타나기도 한다. 이러한 기후변동성의 확대 현상은 자연생태계와 인간에게 큰 위험요인이 되고 있다. 금년의 경우에도 금년도 5월 23일의 500hPa 고도의 일기도(그림 2)를 통하여 볼 수 있듯이 북극권의 찬 공기가 북미대륙의 서쪽으로 치우쳐 내려갔고, 동아시아에서 인도까지 북극권 찬 공기가 수축되어 있는 것을 볼 수 있다. 일기도 상의 등치선은 500hPa 이 나타나는 고도가 같은 지점을 이은 선으로 등고선이라고 부른다. 그런데 등고선 값은 지상에서 500hPa 고도 사이의 공기 온도에 비례하므로 등고선을 등온선이라고 간주하여도 무방하다. 등치선이 북쪽에서 남쪽으로 내려간 곳은 북극권의 찬 공기가 남쪽으로 치우쳐 위치하고 있는 상황을 나타낸다. 등치선의 간격이 조밀한 곳이 편서풍 파동대의 제트기류가 위치하는 곳이다.

계절에 어울리지 않는 기후의 출현은 심각한 기후재해를 유발한다. 계절을 벗어난 이상기후현상의 출현이 전 세계에서 기승을 부리고 있는데, 금년에도 미국에서는 동부와 서부 지역에서 전혀 다른 형태의 이상기후가 맹위를 떨쳤다. 5월 21일에 서부지역은 저온현상이 나타났고 콜로라도 덴버에서 50cm 가 넘는 폭설이 내렸다. 반면에 동부지역에서는 때 이른 폭염이 기승을 부렸는데, 버지니아주 리치먼드와 필라델피아에서 35도를 넘는 고온이 나타났다.

우리나라에서도 최근 개화시기에 꿀벌이 사라졌다는 뉴스가 이어진다. 그 원인 중의 하나로 계절에 어울리지 않는 기후의 출현을 들 수 있다. 기후위기와 관련하여 가장 주목받는 것은 기온의 빠른 상승이다. 우리나라에서도 3, 4월에도 30도를 웃도는 고온이 종종 나타난다. 그렇게 이른 시기에 고온이 기승을 부리다가도 갑자기 기온이 급강하하는 한파특보가 발령되기도 한다. 이로 인한 농작물의 동해 피해가 증가하고 있다. 이러한

기온의 불순한 변화가 꿀벌과 같은 유익한 곤충들을 멸종으로 내몰고 있어서 또 다른 피해를 만들어 낸다.



2022년 5월 23일 상층 500hPa 고도의 기압분포

인도폭염의 영향 1: 장마전선 일본 머무르며 한국은 마른 장마

인도는 동경 70~90도 사이에 위치하므로 우리나라로부터 서쪽으로 수천 km 나 떨어져 있다. 그럼에도 우리나라를 포함한 동아시아 기후에 큰 영향을 미친다. 우리나라의 여름철 기후를 특징짓는 것으로 장마를 들 수 있다. 매년 5월 말에서 6월 상순경이 되면 일본열도 먼 해양 상에서 장마전선이 만들어진다. 시간이 지남에 따라서 장마전선이 북상하여 6월 하순 정도에 제주도와 남해안이 장마전선의 영향에 접어든다. 이후 7월 중순경까지 장마전선은 한반도를 남북으로 오르내리면서 많은 비를 내리고 사라진다. 장마 후기에는 북태평양고기압의 가장자리를 따라서 수송되어오는 수증기가 전선 상에서 응결하여 비로 내리는 비중이 높다. 하지만 장마 초기에 장마전선에서

만들어지는 비의 상당 부분은 인도에서부터 서풍을 타고 수송되어온 수증기가 응결되어 만들어진다. 이렇게 인도의 기후와 우리나라를 포함한 동아시아의 기후는 밀접하게 연결되어 있다.

벵갈 만을 포함한 인도양 열대해역의 해수면온도도 우리나라를 포함한 동아시아 여름기후에도 큰 영향을 미친다. 그곳의 해수면온도가 높을 경우에는 인도양 전 해역에서 해수면 기압이 낮아진다. 그 저기압이 적도를 따라서 서태평양까지 확장되는 경향을 보인다. 이렇게 되면 필리핀의 민다나오 섬 동쪽 해역에서는 저기압을 향해서 부는 북동풍이 평상시보다 강해진다(기상학자들은 편동풍 편차가 발생한다고 표현함). 이 편동풍 편차를 보상하기 위해서 필리핀 부근 해역을 중심으로 하강기류가 발달하게 되어 대류활동이 억제된다. 이 하강기류가 북태평양 고기압이 북쪽으로 확장되는 것을 억제시킨다. 그 결과 북태평양고기압의 북쪽 가장자리에서 발달하는 장마전선이 일본 열도 부근에 머물면서 그곳에 많은 비를 내리게 되어 우리나라는 장마활동이 약하고 강우량이 적은 해가 되는 경우가 많다.

인도폭염의 영향 2: 석탄발전 증가, 가뭄으로 인한 토양 건조화

이른 봄부터 시작된 폭염이 장기간에 걸쳐서 이어짐으로서 인도와 파키스탄에서 냉방 수요가 치솟고 정전 사태도 빈번하였다고 한다. 발전소에서는 발전량을 늘리면서 석탄재고 부족사태가 빚어졌고 철도 당국은 여객열차 운행을 중단하고 석탄 수송 열차로 긴급 편성하기에 이르렀다. 발전소에서 사용하는 석탄은 저질 유연탄이라 이산화탄소만이 아니라 블랙카본(black carbon)이라고 불리는 검은 분진을 대량 방출한다. 1kw의 전기를 만들 때에 배출하는 이산화탄소 양은 화석연료 중에서 석탄이 압도적으로 많다(천연가스의 약 2배). 블랙카본은 대기오염 물질이면서 강력한 지구온난화 유발 물질이다. 블랙카본이 대기 중에서 태양빛을 흡수하여 대기온도를 높이고(지구온난화 가중), 구름 속에서 응결핵의 역할을 하여 전 세계의 강수량에 불균형을 가져오기도 한다. 블랙카본은 대기 중에 정체하는 시간은 짧지만 대기 중에서 유발하는 지구온난화 효과는 매우 강력하다. 석탄발전소 가동이 전 세계에 폭염을 더욱 가중시키는 상승작용을 한다는 말이다.

폭염은 이란성 쌍둥이로 가뭄을 수반한다. 이른 봄부터 시작되어 길게 폭염이 이어짐으로써 물 부족, 토양건조화가 더욱 심각해진다. 이것은 자연생태계를 파괴하고 농작물에 흉작을 만든다. 인도와 파키스탄은 인구 대국이고, 밀과 면화의 세계적인



생산지이다. 이곳에서 밀 생산에 큰 차질이 빚어지고, 우크라이나 전쟁과 맞물리면서 세계 밀 공급에 비상사태가 빚어지고 있다. 면화생산 차질도 세계 경제에 미치는 파급이 크다. 식량 공급의 부족은 인구가 많고 빈곤한 지역에 기근을 유발하게 되는데, 그것은 2011년 시리아 사태에서 보았듯이 정치적 불안정으로 이어지기 쉽다. 지구촌의 정치 불안정은 비상 상황으로 빠져들고 있는 전 세계의 경제상황을 더욱 어렵게 만들 개연성을 높일 것이다.

글쓴이 김해동은

어린 시절부터 과학 교사를 꿈꾸어 부산대 지구과학교육과를 졸업하고 같은 대학에서 기상학 전공으로 석사학위를 받았다. 짧은 교사 생활을 거쳐 동경대학 대학원에서 기상학 전공으로 박사학위를 취득하였다. 박사과정 중 목도한 해양 철분 살포 실험을 계기로 기후변화 문제에 기여할 과학의 역할을 깊이 생각하게 되었다. 기상청 기상연구소 연구관을 거쳐 1998년부터 계명대학교 환경학부 교수로 재직하고 있다.

홈으로 맨 위로

==