

12월의 엘니뇨현상이 주된 원인 탄산가스 등 대기조성변화 가세

한국의 가뭄 4~7년에 1회꼴

일반적으로 기상 이변이라 함은 정상적인 상황에서 크게 벗어난 것으로 매우 드물게 나타나는 기상 현상을 말한다. 사막 지역에서는 가뭄이 정상이며, 장마는 이변이다. 그러나 장마가 연례 행사인 우리나라에서는 장마가 없다면 그 없음이 또한 이변일 것이다. 장마와는 달리 가뭄이 비록 연례 행사는 아니라 하더라도, 보통 가뭄이라 부를 만한 것은 4~7년에 한 번 꼴로 우리나라에 찾아왔었다.

그런 의미에서 우리나라에서 이변이라 부를 만한 가뭄은 1910년을 앞뒤에 둔 20여년에 걸친 가뭄 밖에 없었다. 과거의 가뭄은 농사와 관련해서 봄철과 이른 여름에 오는 것으로 인식되었으나, 오늘날의 가뭄은 산업 전반에 걸친 용수의 부족이 곧 가뭄으로 인식되기 때문에 때없이 일어날 수 있는 것이고, 따라서 시원치 않은 장마 뒤에는 가뭄이 뒤따르기 마련이다.

이러함에도 불구하고 기상 이변이라는 말이 근래에 와서 매스컴에 상당히 자주 등장하는 것이 사실이다. 특히 엘니뇨 현상에 관련하여 기상 이변이 많이 언급되어 온 것이 사실이다.

올해 초에 유럽 서부에 있었던 세기의 흉수는 차라리 장마라 불러도 될



정도의 장기간(~10여일)에 있었던 폭우에 의한 것으로 기상 이변에 속하는데, 많은 과학자들은 엘니뇨에서 그 원인을 찾으려 했었다.

이 현상은 대기와 해양 사이의 상호 작용 때문에 나타난다. 최근의 연구 결과에 따르면 이것이 나타날 때에는 남반구 여름이 시작되는 12월에 나타나기 시작하는 경향이 있다.

엘니뇨가 오면 페루 앞바다를 포함한 동태평양 열대 해역의 표수층이 예년에 비해 섭씨 2~3도 정도 더 따뜻해지며 흔히 매우 가뭄 그 해역에 단비가 쏟아진다. 지난 30년의 기록에 의지한다면 엘니뇨 현상도 평균 3.75년에 한 번 꼴로 반복되었다.

물론 이 반복이 정확한 것은 아니어서 흔히 4~7년 주기로 불규칙하게 나

타났었다. 그러나 엘니뇨 때에 어떤 특정 기상 이변이 반드시 일어나지는 않는 것으로 보아, 기상 이변의 원인은 엘니뇨와 같은 반복 현상과 더불어 다른 요건에서도 찾아야 될 것이다.

그럼에도 불구하고, 기상 이변이 대체로 엘니뇨 기간 중에 일어났다는 것은 매우 흥미있는 사실로서, 기상 이변이 하나의 임계 현상이 아닐까라는 암시를 받게 된다.

최근에는 온실 기체, 염화불화탄소(CFC), 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx) 등의 대기중 축적에 기인하는 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성 침적 광역화 등이 기상 이변의 원인으로 언급되기 시작했다. 이러한 기후 변화들이 기상 이변을 가능케 하는 임계 조건을 이전보다 쉽게 제공할 가능성이 있다고 보는 모양이다. 뒤에서 언급하겠지만 지구 온난화와 오존층 파괴는 보다 강한 비구름의 출현을 가능케 하며, 이렇게 강화된 대류 운동이 기상 이변의 배경 과정으로 선택될 수 있기 때문일 것이다.

기상 이변을 기상학에서는 아노말로리로 표현한다. 어떤 기상 변수의 값이 예년값과 다를 때 그 편차를 아노말리(anomaly)라 하고, 일반적으로 아노말리의 크기가 한 표준 편차(standard deviation)를 넘어서면 관심의

대상이 된다. 아노말리가 월 평균이나 계절 평균에 관한 것일때 큰 아노말리가 나타남을 일러 이를 이상 기후(anomalous climate)라 부른다.

그렇다면 기상 이변이란 아주 뚜렷한 이상 기후라 볼 수 있겠는데, 보통 이런 경우에 아주 큰 일 평균 아노말리들의 연속이 일련의 동반 사건으로 출현한다. 현재 우리나라에서는 1961년부터 1990년까지의 특정 기간을 정해 예년값을 정하는데, 이것도 기상장들(meteorological fields)이 근본적으로 정체성(stationarity)을 가지고 있지 않음을 반영하기 위함이다.

아노말리가 늘 있음과 같이 이상 기후는 드물지 않다. 그러나 앞서서도 말했듯이 기상 이변은 아주 드문 사건이다. 예를 들면 관측 이래 최고값이나 최저값이 출현했을 때 그것은 당연히 이제까지 단 한번 밖에 나타나지 않은 사건이다.

따라서 흔히 나타났었던 것이라면 그 설명 역시 여러 차례 시도되었을 터이지만 그렇지 않은 것이기 때문에 기상 이변의 인과론적 설명은 어렵고, 흔히 건강부회의 감을 풍길 수 밖에 없다. 굳이 이 글을 통해 시도하려면, 기후 변화의 협조 아래 엘니뇨 현상과 카오스(또는 변덕스런 날씨) 현상의 위상 맞춤(phase locking)에서 기상 이변의 가능성을 찾아 보겠다.

대류권은 상승, 성층권은 하강

〈기후 변화〉 오늘날 지구 전체의 운명이 달린 기후 변화로 아래와 같은 네 가지가 꼽힌다. 기상 이변의 조건 형성 과정으로서의 기후 변화를 생각하기에 앞서, 가끔 태양 복사의 충격적 변동이 기상 이변을 가능케 할 수

있는가를 묻는 이가 있어 이를 먼저 짚어 본다. 태양의 흑점 수는 11년 주기로 변동하고 있다. 흑점이 많을 때, 비교적 지구 외곽에 도달하는 태양 복사의 세기가 높으며, 지구의 차등 가열(differential heating)이 뚜렷하고 대기의 경압성(baroclinity)이 크며 제트 기류가 강하다. 태양 복사의 변동에 대한 대기의 반응은 지표 부근과 열권에서는 빠르고 예민하지만, 중간 고도에서는 비교적 무디어서 지구 자전에 따른 태양 복사의 일변화에 대해서도 대류권이나 성층권의 열 반응은 무시될만 하다. 따라서 태양 복사의 어떤 충격적 변동으로 기상 이변이 출현하리라 보기는(그것이 상당 기간에 걸쳐 일어난다면 몰라도) 힘들다.

〈지구 온난화(Global Warming)〉 하와이의 마우나 로아(Mauna Loa) 관측에 따르면, 대기중 탄산가스(CO₂)의 월 평균 농도는 계절 변동을 제외하면 거의 지속적으로 증가하고 있다. 같은 기간에 걸쳐 관측된 세계 평균 지표 기온도 다소간의 주요 변동을 제외하면 지속적으로 증가하고 있어, 크게 다음의 두 가지 이유를 들어 이를 주로 앞에 말한 CO₂의 증가에 기인하는 것으로 추론하고 있다.

첫째, 과거 20만 여년에 걸쳐 몇몇 특정 지역에서 일어났던 대기중 CO₂ 농도와 지표 기온에 관한 지질학적 연구 결과를 보면, 이들 사이에 아주 높은 상관 관계가 있다.

둘째, 전 지구의 대기와 세계의 모든 해양을 포함하는 유체역학적 접합 시스템(coupled system)의 컴퓨터 모형을 이용하여 대기중 CO₂ 농도의 인위적 증가에 대한 모형의 반응을 계산하면 예외없이 세계 평균 지표 기온의

상승이 모사(simulate)된다.

지구 온난화는 단순히 지표 기온이 전체적으로 증가할 것이라는 정도의 이야기가 아니다. 기상학자에게 있어서 지구 온난화는 온실 기체의 대기중 농도 증가에 수반될 다양한 변화들의 총체적 표현이다.

이 기후 변화의 주요 내용에는 해수면의 상승, 마크로 수문계(강수량, 증발량 그리고 run-off 사이의 균형으로 표현되는 시스템)의 변화, 태풍의 기후학적 변화 등이 포함된다. 지표 기온과 해면 온도가 증가하면 빙하의 일부가 바다로 녹아 들어가고 적어도 해수의 상승이 팽창할 것이므로 해수면은 필연적으로 상승할 것이며, 이에 대한 논의는 이미 상당히 진행된 바 있다.

아직 일반 대중에게 잘 알려지지 않은 것으로 태풍 기후의 가능한 변화에 대한 예상이 있다. 이에 대한 논의에 앞서 먼저 지구 온난화의 구조적인 특징을 알아 보자.

모형 계산으로 본 지구 온난화에서의 기온 변화는 구조적으로 몇 가지 특징을 갖는다. 대류권의 기온은 증가하지만 성층권의 기온이 하강하며, 저위도 지표보다는 고위도 지표에서 기온 상승이 더 뚜렷할 것으로 모든 모형들은 예상하고 있다.

이러한 구조적 변화에 수반될 기상 변화로 비구름의 키와 그 강우 능력의 증가, 그리고 중위도 편서풍 파동의 약화를 들 수 있다. 편서풍 파동은 중위도 10km 부근 상공에 나타나는 제트 기류의 사행(뺨같이 구불거리며 진행함)으로 대표되는 대기 대순환의 한 특징인 바, 그 주요 기능은 열의 극향 수송(poleward transport)과 상향 수

송(upward transport)이다.

이 파동으로 말미암아 적도와 아열대에서 남는 열이 고위도로 수송되며, 태양광의 흡수로 지상에서 남는 열이 복사 방출로 냉각되려는 상층으로 수송되는 것이다. 이처럼 상층으로 열을 수송할 뿐만 아니라 고위도로 열을 수송하는 시스템으로서는 편서풍 파동 이외에 태풍이 있다.

따라서, 만일 열 수송 요구는 이전대로 이면서 편서풍 파동이 약화된다면, 당연히 태풍의 기여가 증대되어야 할 것이므로 태풍의 강도나 출현 빈도의 증가가 예상된다. 특히 강도의 증가는 비구름의 키와 강수 능력의 증가로 가능하며, 출현 빈도의 증가는 온난화에 따른 아열대 해역에서의 수온 증가로 가능하다.

오존층 파괴로 성층권 기온 하강

〈오존 구멍의 확대와 오존층의 퇴화〉
급세기에 들어 인간이 만들어 낸 물질들 가운데 가장 무해하고 안정한 화합물로 알려진 CFC-11과 CFC-12 등 염화불화탄소 계통의 물질들이 바로 그 안정성 때문에 대기 중에서 분해되지 않고 성층권에까지 도달하여 축적됨으로써 지상 25km를 중심으로 발달한 오존층이 퇴화의 위기를 맞고 있다.

CFC는 대체로 무해하고 극히 안정하여 애용되어온 화합물로서, 냉매제나 발포제 등으로 유용하게 쓰인다. 인류가 이를 만들어 쓰면서 알게 모르게 대기 중에 날려 보낸지가 벌써 반세기에 가깝지만, 이것이 성층권까지 진입하여 거기에 있는 오존층을 위협하는 주요 물질로 확인된 것은 불과 10년 밖에 되지 않는다.

성층권의 오존층은 태양광에 포함되

어 지구로 날아드는 자외선의 대부분을 흡수함으로써 지상의 자외선 강도를 낮출 뿐만 아니라 성층권의 비교적 높은 기온을 유지시킨다.

지구가 생긴 태초에 오존층은 없었다. 화산 활동으로 배출된 수증기의 응결로 바다가 이루어지고, 그 속에 광합성 능력을 가진 원시 생명체가 출현하여 산소가 유리되고 이것이 다시 자외선으로 파괴되면서 오존층이 생성될 수 있었으며, 이렇게 오존층이 점차로 형성되면서 지상 자외선 강도의 감소가 있어 고등 생물이 진화할 수 있었던 것이다.

오늘날의 모든 고등 생물(사람은 물론이고 곤충과 나무 등이 이에 속함)은 각각의 서식처에 특유한 자외선 강도에 적응되어 진화되었기 때문에, 오존층의 파괴에 따른 자외선 강도의 증가는 종의 멸절이나 변이를 초래할 것으로 기대된다.

오존층이 파괴되어 자외선이 흡수되지 않으면 성층권의 기온이 하강할 것은 당연하다. 이는 곧 성층권 자체의 파괴를 의미한다. 성층권의 가장 두드러진 기상학적 기능이 자기 밑에 있는 대류권의 난류를 제압하여 적당한 두께로 유지하는 것임을 감안할 때 성층권의 파괴는 기상 이변이 아니라 기상의 파국을 의미한다. 아무리 높게 발달하는 몽게 구름도 성층권으로까지 치밀어 올라가지 못하는 이유가 안정한 성층권이 있기 때문인데, 따라서 성층권의 약화는 비구름들의 두께를 증가시키고 이들의 강수 능력을 강화시킬 것이다.

현재 오존층은 세계의 모든 관측 지점에서 감퇴하는 것으로 보고되고 있으며, 우리나라 상공의 오존층도 예의

없이 감퇴하고 있다. 특히 감퇴율이 높은 곳은 오존층이 상대적으로 두터운 고위도 지역, 특히 북극과 남극 주변이다. 이곳에서는 햇볕이 전혀 없는 겨울철 극야 기간이 끝나고 이른 봄철로 들어가는 한달 정도의 기간에 오존층이 급격히 파괴되었다가 다시 복구되는데, 이 기간 중에 나타나는 오존 감퇴 지역을 오존 구멍이라 부른다.

지난 10년에 걸쳐 계속 확인된 남극 주변의 오존 구멍은 점차로 넓어졌고 또한 깊어진 것으로 관측되고 있으며, 이 기간에 약 10%의 오존 전량의 감소가 보고되었다. 이에 비해 우리나라 상공의 오존 전량의 감소는 지난 10년에 걸쳐 오존 전량의 1% 미만에 그치고 있다. 오존 전량 1% 감소에 대한 자외선 강도의 감소는 대략 2% 정도로 추정되는데, 과학자들의 계산에 따르면, 현재 추세대로 CFC를 사용한 경우 2010년 경에 자외선 강도는 30% 이상 증가할 것으로 보며, 지역적으로는 북반구 중위도에서 최대 증가가 예상된다.

산성비는 지표수 증발 감소시켜

〈산성 침적 광역화(Globalization of Acid Deposition)〉 폐기물의 물지각한 폐기나 광범위한 대기 중 투기 행위로 말미암아 지면 위나 해면 위를 가릴 것 없이 대략 1km의 두께로 지구 전체의 표면을 덮고 있는 행성 경계층(planetary boundary layer)의 화학적 및 광학적 성질이 광역적으로 변화하는 것을 산성 침적 광역화로 일컫는다. 산성 침적 광역화로 표현되는 기후 변화도 범지구적으로 일어나지만, 지구 온난화나 오존층 파괴와 같이 이역시 지역적 구조를 갖는다.

이 지역성의 원인은 앞의 두 가지 기후 변화의 경우와는 상당히 다르며, 이 차이는 산성 침적 광역화의 주범인 유황 산화물(흔히 SOx로 표기)과 질소 산화물(NOx로 표기)의 대기중 잔류 기간이 10일을 넘지 않는데 기인한다. 대기 중에 방출된 SOx와 NOx는 방출된 다음 하루 안에 행성 경계층에 확산되어, 일부는 상승 기류에 편승하여 구름 속으로 들어간 다음 이 경계층 위에서 구름 밖으로 나와 자유 대기 안에서 아주 서서히 하강하면서 재빠른 수평 기류를 타고 상당한 거리로 이송될 수 있다.

오염 물질은 이렇게 자유 대기 안에 있다가 구름을 만나 빗물에 녹아 구름의 하강 기류를 타고 떨어지면서 산성비를 초래한다. 물론 자유 대기로 들어가지 못한 채로 구름 속이나 행성 경계층에 머물다가 위에서 떨어지는 빗물에 녹아 들어감으로써도 산성비가 나타난다.

이 때문에 산성비의 원인 물질은 산성비가 나타나는 곳에서 멀리 않은 배출원에서 나온 것일 수도 있으나, 상당히 멀리 떨어진 배출원에서 나온 것일 수도 있는 것이다. 이런 의미에서, 중국 전역의 급격한 산업화에 수반하는 SOx와 NOx의 배출 증가가 우리나라의 대기질에 미치는 영향은 심각할 수 있다. 그 이유는 황해 연안에서 배출된 오염 물질이 우리나라에 도달하기 전에 강수로 침적될 확률이 상당히 낮기 때문이다.

대기 오염이나 산성비에 따르는 생물학적 및 보건학적 피해 이외에 오염 물질의 광학적 성질에 따르는 기후 변화를 무시할 수 없을런지 모른다.

일반적으로 대기 오염 물질은 태양

광의 후방 산란으로 시정 장애를 야기할 뿐만 아니라 태양광의 지표 흡수를 방해함으로써 지표와 그에 인접한 행성 경계층의 열수지 변화를 초래한다. 그 결과로 대체적으로 지표 기온과 증발이 감소되고, 해양과 육지 사이에 부가적인 기온차가 조성됨으로써 해륙풍계와 계절풍계 등에 변화를 초래할 수 있다.

〈사막화(Desertification)〉 사막화는 원래 자연적으로 발생하는 현상으로 치부되어 왔고, 더구나 우리나라에서 멀리 떨어진 곳에서 일어나는 까닭에 우리의 관심을 가장 못 끄는 기후 변화의 하나였다.

그러나 최근에 우리나라, 일본 및 중국 북부 지역에 만연된 가뭄과 특히 우리나라에 나타난 황사의 강도 및 빈도의 증가, 그리고 황사의 중금속 오염 가능성 등으로 이 기후 변화도 우리와 전혀 무관할 수는 없지 않은가라는 인식이 태동하고 있다. 또한 사막화가 새로운 관심을 끄는 것은 앞에 말한 인위적으로 발생하는 다른 기후 변화에 동반하여 일어날 가능성이 있음에서이다.

기존 사막이 확대되는 현상에는 몇 가지 유형이 있다. 첫째 유형은 연변 지역에서 강수량이 증발량보다 적은 것이 주 원인인 경우이고, 둘째 유형은 중심에서 연변 지역으로 모래가 이송되어 침적되는 것이 주 원인인 경우이다.

첫째 유형에 속하는 것으로 인더스 강 서쪽의 사막화를, 그리고 둘째 유형에 속하는 것으로 사하라사막 남쪽 연변인 사헬 지역의 사막화를 들 수 있겠다. 물론 물 수지 균형의 파괴와 모래 침적이 동시에 일어날 수 있는

며, 특히 모래 침적으로 사막화가 주도되는 연변 지역의 물 수지 균형은 조만간에 파괴되기 마련이다. 어느 경우에도 일단 사막이 되면 지면이 한없이 건조될 수는 없으므로 증발량은 강수량에 맞추어 조절되어, 새로운 사막의 물 수지가 성립할 것이다.

엘니뇨가 한창인 때 동태평양 적도와 아열대 해면 온도는 예년에 비해 뚜렷하게 높아, 일반적으로 엄청나게 증가된 증발이 일어나므로 이 습기의 이동 경로에서 집중 호우의 출현이 가능할 것이다.

이때 지구 온난화는 대기 방색(atmospheric blocking)을 선호하고, 카오스적 시스템의 한 작태로서 제트 기류가 두 가지로 분지(branching)하게 되면, 앞서 동태평양 아열대 해역에서 증발된 수증기가 저위도 쪽의 가지에 실리게 되어 응결됨이 없이 쉽게 중미와 북대서양을 지나 유럽 서부에 이를 수 있게 되는 것이다. 사실, 유럽 서부에서 세기의 폭우가 10여일을 지속한 것은 이 정도의 장기간에 걸친 강수가 의미하는 수량이 지역 규모로서는 공급될 수 없는 막대한 수량임을 말함은 물론이고 그 공급처가 광역이며 멀리까지 펼쳐져 있었음을 말한다.

물에서 수증기로 상 변화를 일으켜 지표에서 증발된 물 분자가 대기에서 응결하여 지표에 되돌아오는데 걸리는 시간이 9~10일임과 수증기가 행성 경계층 안에 머물면서 동태평양에서 서유럽에 이르는데 걸리는 시간이 또한 10일 정도임을 감안할 때, 유럽 폭우와 동태평양의 증발 사이의 연계가 타당한 것으로 받아들여진다.

이 가설에서 제트 기류의 한 관측된 방색이 지구 온난화의 영향을 받는 것

기상이변 왜 일어나나

으로 본 것이 올바른 가정일 수 있겠느냐가 문제인데, 일반적으로 지구 온난화의 한 특징적 효과로 제트 기류의 약화와 방색 빈도의 증가를 가정하는 것은 무리가 아니다.

이런 의미에서 기후 변화는 기상 이변의 임계 조건을 충족시키는 방향으로 일어날 수 있는 것이며, 대기의 방색과 엘니뇨 현상과의 위상 맞춤

(phase locking)에 따라 기상 이변이 현실화될 수 있는 것이다.

보통 대기의 방색은 15일 정도가 지나면 풀리는 경향이 있으나, 그 생성과 소멸은 극히 카오스적이어서 예측하기가 매우 힘든 현상이다. 이로 인한 하류 효과(down-stream effect) 예로서 유럽 서부의 폭우는 적어도 방색이 완성된 다음 2~3일 정도 이후

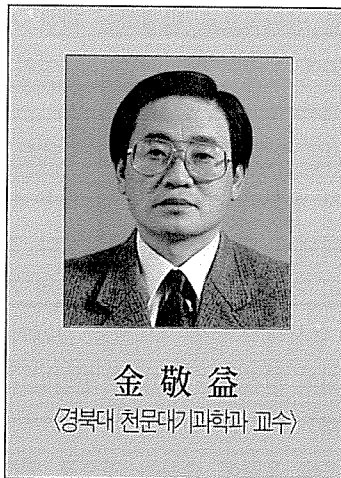
에 생길 일이므로 이 시나리오의 활용성은 앞으로 탐색될 만한 것으로 사료된다. 결론적으로, 기상 이변의 직접적인 원인은 엘니뇨 현상과 카오스 현상의 위상 맞춤이며, 이러한 이변의 출현 빈도를 높이는 조건 형성에 기후 변화가 어떤 역할을 맡고 있는 것으로 사료된다. (57)

인공강우 가능한가

美서 드라이아이스 이용, 46년 첫 성공 구름씨 뿌려 10~20% 강수량 증가 가능

첫 시도 1942년 체코서

최근 국내의 신문과 TV방송은 구름씨뿌리기(cloud seeding)에 의한 강수현상을 '인공강우(artificial rainfall)'라는 용어로 기술하고 있지만, 이 용어는 다른 나라에서는 현재 사용되고 있지 않고 그 대신 인공증우(artificial precipitation enhancement) 또는 증우라는 표현을 쓰고 있다. 그 까닭은 인공으로 구름을 형성하고 비를 내리게 하기보다는 강수의 가능성이 있는 자연상태의 구름에 인공 응결핵이나 빙정핵을 뿌려 강수 발달을 촉진시켜 강수량을 증가시키기 때문이다. 따라서 인공강우보다는 인공증우라는 용



金敬益
(경북대 천문대기피학과 교수)

어를 쓰는 것이 적절하다.

작년에 우리나라 남부지방의 극심한 가뭄이 금년 2월까지 연장되어서 이를 해소하기 위한 한 방법으로 가뭄지역

에 인공증우 실시에 대한 내용이 지난 2월 중순부터 신문과 TV에 보도되었다. 그러던 중 드디어 5월 3일 경북과 충북의 경계지점인 소백산맥의 이화령에서 국내에서는 처음으로 인공증우가 시도되었다. 따라서 앞으로 이를 실용화하기 위한 연구가 국내에서 활발히 진행될 것으로 예상된다.

〈인공 빙정핵의 발견〉 예로부터 많은 사람들이 구름조절(cloud modification)을 함으로써 필요시에 비를 내리게 하거나 사전에 우박을 방지할 수 있지 않을까 하는 생각을 했었다. 이와 같은 생각에서 산의 정상에서 연기를 피워 올리거나 19세기 후기에는 구름 속에 대포를 쏘아 인공증우를 시도