

0도에 가깝게 낮추어 발을 통한 열손실을 막는다. 사향소는 겨울이 되면 최대한 활동량을 줄여 에너지 소비를 낮춘다. 아주 추운 날은 조금만 움직여도 저장한 지방을 소모하며 몸의 체온을 유지해야 하므로 이럴 때일수록 움직이지 않고 가만히 있으며 견디는 것이다.

툰드라의 식물은 건조한 환경에서 물의 증발을 막기 위해, 잎을 두껍고 질기게 하거나, 털로 덮는다.

툰드라의 식물은 건조한 환경을 견디는 점에서 사막 식물과 비슷한 면이 있다. 이들은 소중한 물이 증발하지 않도록 몸을 변형

한다. 툰드라 식물의 잎은 두껍고 질기거나 털로 덮여 있어 물의 증발을 줄인다.

낮아지는 기온, 짧아지는 낮의 길이, 사라지는 먹이는 여름이 끝나감을 알려주는 신호다. 툰드라 동물들은 저마다의 방법으로 다가오는 겨울을 준비한다. 나그네쥐는 눈 밑에서 생활하고, 뒤영벌은 겨울잠에 빠진다. 북극여우는 육지에서 바다로 생활 터전을 옮겨 해빙에서 북극곰을 따라 다닌다. 순록은 보다 따뜻한 곳을 찾아 이동한다. 아마 가장 부지런한 동물은 북극제비갈매기일 것이다. 북극제비갈매기는 북극에서 남극으로 자리를 옮긴다. 웬만해서는 북극을 떠나지 않는 흰올빼미는 나그네쥐의 숫자가 줄면 먹이를 찾아 움직이기도 한다. 툰드라의 여름은 생명으로 넘치지만, 동물들이 가을부터 서서히 남쪽으로 여행을 떠나 겨울 툰드라는 쓸쓸한 곳이 된다.

### 3 동토가 녹으면 도대체 무슨 일이 일어날까?

북극이 더워지고 있다. 물론 북극 전체가 동일한 정도로 따뜻해지고 있는 것은 아니다. 지역과 시기에 따라 따뜻해지는 정도에 차이는 있다. 가을과 겨울에 북극해와 북극해 연안에서 온난화 정도가 가장 크고, 러시아 동부와 캐나다 고위도 북극, 그린란드에서도 여름철 온도가 뚜렷하게 높아지고 있다<sup>36</sup>.

북극이 따뜻해지면서 툰드라 생태계에도 변화가 나타나고 있다<sup>37</sup>. (1) 봄에 눈이 일찍 녹고 가을에 눈이 늦게 내려 동토가 눈에 덮여 있는 기간이 짧아진다. (2) 동토의 온도가 높아지고 동토가 녹는다. (3) 극단적인 기상 현상이 더 자주 더 심하게 나타나고 툰드라에서 불이 더 자주 발생한다.

북극의 온난화가 심해지면서, 눈이 일찍 녹고 늦게 내려 대지가 눈에 덮여있는 기간이 줄고 있다. 동토가 녹고, 극단적인 기상 현상이 더 자주 나타난다.

#### 눈에 덮이는 기간이 짧아지면

눈은 툰드라 지역을 대표하는 환경 요인이다. 툰드라 지역은 일년에 8~10개월 동안 눈에 덮여 있다. 눈은 온도가 잘 전달되지 않아서 눈에 덮인 지역은 겨울에 차가운 대기로 열을 많이 빼기지 않는다. 동시에, 눈에 덮인 지역은 알베도(반사율)가 높아 햇빛을 반사해 흡수하는 태양 에너지의 양이 적다. 눈이 얼마나 오랫동안, 얼마나 많이 쌓여 있는지는 생태계 기능을 결정하는 중요한

요인이다.

북극에서 1972~2009년 동안 눈이 덮여 있는 기간은 매 10년마다 평균 3.4일 감소했다<sup>38</sup>. 인공위성 기록이 시작된 1979년부터 눈에 덮인 면적은 매 10년마다 17.8퍼센트 감소했다<sup>39</sup>. 지난 50년간, 쌓이는 눈의 양도 지역에 따라 차이가 있는데, 유라시아의 경우 적설량이 증가했지만, 북미의 경우는 감소했다. 기후 모델은 2050년까지 북극 대부분의 지역에서 눈이 덮여 있는 기간이 10~20퍼센트 정도 감소할 것으로 예측하고 있다.

눈은 툰드라 초식동물들의 주요 생활공간이다. 대기에 비해 눈속이 상대적으로 따뜻하기 때문이다.

눈이 덮인 곳은 툰드라 초식동물에게 중요한 생활공간이다. 나그네쥐는 상대적으로 온화하고 안정된 눈 속에서 겨울을 보낸다. 따

라서 나그네쥐가 안정적으로 눈을 이용할 때 대량 번식이 가능하며, 이것은 툰드라 먹이 사슬을 유지하는 핵심 요인이다. 나그네쥐의 사이클이 무너지면 식물을 먹고 사는 곤충과 병충해가 증가하여 북극의 먹이그물과 생태계 기능이 바뀐다.

눈 위에 비가 와서 살짝 얼어붙는 경우가 있는데(그림4-6), 이런 현상은 그 지역에 살고 있는 생물에 큰 영향을 줄 수 있다. 눈 위에 비가 오면 순록이나 나그네쥐, 스발바르멧닭, 북극여우의 개체수가 줄어들고, 토양 무척추동물 군집도 영향을 받는다<sup>40</sup>.

눈은 토양 미생물에도 영향을 준다. 저위도 북극인 알래스카 북



그림 4-6

눈 위에 비가 와서 살짝 얼어 붙어 있다.

쪽 사면에서 겨울에 쌓인 눈의 깊이가 깊어져서 눈 아래 토양이 따뜻하게 유지되는 날이 많아졌다. 이렇게 토양이 눈에 덮여 수분이 많아지고 따뜻해지자 토양 미생물이 활성화되었다. 미생물의 활동으로 식물이 이용할 수 있는 질소의 양이 증가하고 결과적으로 식물이 더 잘 자라게 되었다<sup>41</sup>. 겨울에 눈이 많이 오면 토양 온도가

높아져 토양 호흡량도 증가한다<sup>42</sup>.

눈이 일찍 녹으면 봄이 일찍 오고 식물의 성장기도 빨리 시작된다. 반대로, 지역에 따라 눈이 증가하기도 하는데, 이 경우에도 식물이 증가할 수 있다. 예를 들어, 스웨덴 라플란드에서 눈이 더 오래 쌓여 있도록 도와주는 담장을 쳤을 때 식물이 더 잘 자랐는데, 이것은 눈이 이 식물의 기생균 감염을 줄여주었기 때문이다. 따뜻한 겨울로 눈이 더 많이 쌓이고 더 오랫동안 녹지 않는 지역에서는 눈이 식물을 보호하여 결과적으로 식물이 더 잘 자란 것이다<sup>43</sup>.

한편 식물이 눈에 영향을 주기도 한다. 식물의 키가 커지고 엽면적 지수(Leaf Area Index, LAI)가 증가하면 나무 주변에 쌓이는 눈이 증가한다. 나무 주변에 더 많은 눈이 쌓이면 승화로 인한 수분 손실은 줄어든다. 지구 시스템 모델에 의하면 키가 큰 관목은 키가 작은 관목보다 봄에 알베도를 낮추고 수증기를 더 발산하여 그 지역을 더 따뜻하게 만든다. 한편 관목의 키가 커지고 잎 면적이 증가하면 그림자가 생겨서 이끼나 지의류 같이 꽃이 피지 않는 식물과 초본이 잘 자라지 못하는 생태계로 바뀐다.

### 동토가 녹으면

동토의 온도가 높아지고 동토가 녹으면서 툰드라가 사라질 전망이다. 가장 북쪽에 있어 북극해와 맞닿은 툰드라 지역이 기후 변화

에 가장 취약한 곳으로 알려져 있다. 툰드라 생물은 지구온난화로 남쪽에서 올라오는 아북극 생물과 경쟁해야 하는 상황이다. 7월 평균 기온이 단 1~2도만 올라가도 기는 형태의 관목과 사초, 내한성 생물이 들어와 살 수 있기 때문이다. 얕은 데 덮친 격으로 해수면이 상승하고 해안선이 침식되면서(바닷가에 있는 동토가 녹아 무너져 내리고 있다) 툰드라의 입지는 더욱 줄어들고 있다.

지구온난화로 툰드라 식물의 생물량이 증가하기도 한다. 시베리아 동부에서 8년간 이산화탄소 흐름을 연구한 결과를 보면, 식물의 일차 생산량은 생육기가 얼마나 길어졌는가 보다는 여름이 얼마나 따뜻해졌는지와 더 관련이 높았다<sup>44</sup>. 즉, 여름이 따뜻해질수록 식물의 생물량은 늘어났다.

툰드라가 따뜻해져 식물의 성장 기간이 길어지면서 툰드라 식물은 낙엽 관목이 늘어나는 쪽으로 변화하고 있다. 관목이 증가하면, 뿌리에 공생 미생물(ECM 또는 ERC\*)을 갖는 식물이 증가하게 되면서, 이들이 질소를 먼저 사용해서 다른 식물들의 질소 이용은 감소한다. 또한 관목이 증가하면 분해가 잘 되지 않는 목질의 부엽토가

\* ECM(ectomycorrhiza)은 다양한 식물 뿌리와 곰팡이 사이에 형성되는 공생 관계를 뜻한다. 자작나무, 너도밤나무, 버드나무, 소나무, 장미과 식물과 담자균, 자낭균, 접합 균류가 여기에 참여한다. 한편 ERC(Ericoid mycorrhiza)은 진달래과 식물과 곰팡이 사이의 공생 관계를 뜻한다. 진달래과 식물이 산성 토양, 척박한 토양에 정착할 때 중요한 역할을 한다.

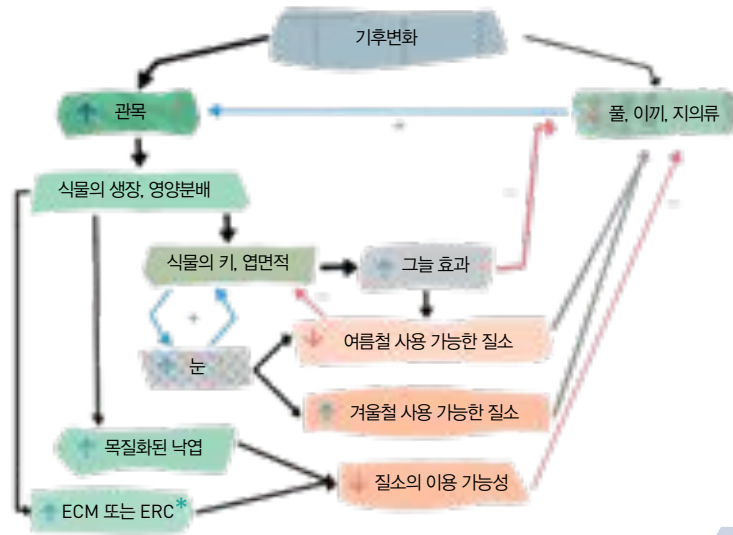


그림 4-7

기후 변화로 북극 툰드라에서 관목이 증가하고 초본과 이끼, 지의류가 감소하는 과정을 보여주는 생태계 피드백

증가하여 질소의 이용가능성이 감소한다. 게다가 관목이 그림자를 만들어 초본과 이끼의 성장을 막는다. 결국 이 지역에서는 관목이 더 잘 자라게 된다(그림 4-7).

### 동토가 녹으면 이산화탄소는?

동토가 녹으면 툰드라는 이산화탄소를 방출할까 아니면 흡수할까? 살아가는 생물에 따라 툰드라는 지구에 온실기체를 공급하는

곳이 되기도 하고 흡수하는 곳이 되기도 한다.

예를들어 유기물이 풍부한 툰드라 이탄습지는 동토가 녹으면 온실기체를 방출한다. 물이끼가 우점하는 이탄 습지는 지구상 최대 유기탄소 저장고 중 하나다. 물이끼는 잘 분해되지 않고 이탄층이 수분함량과 열 상태에 영향을 주며, 토양을 산성으로 만들어 종종 '생태계 엔지니어'라고 불리기도 한다. 이끼가 감소하면 단열효과가 감소하여 영구동토층이 녹으면서 유기물이 더 잘 분해되어 이산화탄소로 방출된다. 이산화탄소는 지구를 따뜻하게 만드는 대표적인 온실기체이기 때문에, 땅속에 얼마나 많은 유기물이 쌓여 있는지, 그리고 얼마나 많은 유기물이 어느 정도나 빠른 속도로 분해되고 있는지 주목받고 있다.

초식동물이 늘어나도 이산화탄소가 증가한다. 그린란드에서 사향소와 순록과 같은 초식동물이 접근하지 못하도록 했더니 식물이 잘 자라고 이산화탄소를 사용하는 광합성도 증가했다. 반면 식물의 뿌리나 토양미생물이 이산화탄소를 방출하는 토양 호흡은 변함이 없었다. 결과적으로 이 지역에서 이산화탄소가 더 많이 흡수되었다<sup>45</sup>. 스발바르에서도 바나클흑기러기가 식물을 먹지 못하도록 막아 놓은 연구지에서는 선태류가 더 늘어나고 식물의 양이 증가하면서 이산화탄소 공급원이었던 지역이 이산화탄소를 흡수하는 곳으로 바뀌었다<sup>46</sup>. 따라서 초식동물이 늘어나면 식물이 줄어들고

식물의 광합성도 감소하여 결과적으로 대기로 방출하는 이산화탄소를 증가시킬 수 있다.

곤충이 갑자기 늘어나도 이산화탄소가 증가될 수 있다. 겨울이 따뜻하면 나방이 엄청나게 늘어나는데, 이 나방의 유충은 자작나무 잎을 갉아먹어 이산화탄소 흡수량을 89퍼센트나 감소시켰다<sup>47</sup>. 즉, 툰드라 지역의 온난화는 곤충을 증가시켜 식물의 광합성량을 감소시키고 결과적으로 이산화탄소를 증가시키는 것이다.

‘보이지 않는 디수’인 토양 미생물도 이산화탄소와 관련이 있다<sup>48</sup>. 툰드라 지역에서 온도가 높아지면, 영구동토층에 있는 얼음이 녹고 식물들이 잘 자라 광합성량이 늘어나 대기로부터 이산화탄소 흡수량이 늘어나게 된다. 그러나, 영구동토층의 얼음이 더 녹게 되면 식물의 광합성에 의한 이산화탄소 흡수량보다 미생물에 의한 이산화탄소나 메탄의 발생량이 증가하여 온실기체 방출량이 늘어날 것으로 예측하고 있다(그림 4-8). 박테리아와 같은 토양 미생물은 토양에 저장되어 있는 유기물을 - 이탄층에서 미처 분해되지 않고 남아 있는 식물의 잔해와 같은 - 분해하여 에너지를 얻고 이산화탄소를 만들어낸다. 실제로 스칸디나비아 반도 산간지역에 위치한 솜털자작나무 숲에 검은시로미로 대표되는 진달래과 식물이 자리 잡으면서 대기중으로 방출되는 이산화탄소가 증가하였다<sup>49</sup>. 왜냐하면 진달래과 식물의 뿌리에 살고 있는 미생물이 토양 유기물



의 분해를 촉진했기 때문이다. 툰드라 생태계가 이산화탄소 흡수원이 될지 아니면 공급원이 될지는 식물의 일차생산량과 미생물의 유기물 분해 속도에 달려있다.

그렇다면 툰드라는 앞으로 관목이 증가하면서 온실기체를 흡수하는 곳이 될까? 관목이 늘어날 때 생태계의 물리적 특성(토양 온도, 수분 상태, 활동층의 깊이 등)과 기능(영양물질 순환, 질소 고정, 미량기체 플럭스 등)이 어떻게 변할지 아직 우리는 모른다. 툰드라 지역에 관목이 늘어난다고해서 광합성으로 인해 이산화탄소가 감소할 것이라고 단정할 수는 없다. 실제 현장에서 온실기체의 변화

툰드라는 과거 1970년대까지는 탄소 흡수 저장소였다. 하지만 1990년대 이후로 툰드라는 탄소를 방출하는 공급원이 되고 있다.

를 관측한 데이터가 부족하고, 생태계에서 일어나는 복잡한 상호 작용을 아직 충분히 이해하고 있지 못하기 때문이다. 그러나 현재까지 진행된 환북극 모델링 연구 결과에 따

르면 1960~1970년대에는 툰드라 지역이 탄소를 흡수하는 저장소였던 반면, 1990년대 이후에는 탄소를 방출하는 공급원이 되고 있는 것으로 예측되고 있다<sup>50</sup>.

툰드라는 변하고 있다. 기후모델에 따르면 2100년까지 북극은 최대 10도까지 기온이 높아진다고 한다. 이와 함께 동토는 줄어들 것으로 보인다. 이런 변화에 툰드라 생물과 생태계가 어떻게 반응할지 아직은 대답하기 어렵다. 아직 우리가 툰드라 생태계에 대해 모르는 부분이 너무 많기 때문이다.

