

WEB 7

보존생물학

- W7.1 생물다양성 위기
- W7.2 생물다양성의 가치
- W7.3 멸종을 초래하는 요인들
- W7.4 생물다양성 위기에 대한 진화적 관점
- W7.5 멸종 위기종과 생태계 보존 방안

도입

생물권이 직면한 커다란 도전들 중 가장 심각한 것은 생물 멸종이 가속화되고 있다는 것이다. 6,500만 년 전(65 MYA) 백악기 말기 동안에만 많은 종이 사라져 버린 것은 아니다. 이러한 문제는 보존생물학의 필요성을 부각시켜주고 있다. 보존생물학은 어떻게 종과 군집, 생태계를 보존하는지를 다루는 응용과학 학문 분야이다. 이학문은 종 풍부도가 감소하는 원인을 연구하고 이런 감소를 방지하는 방법을 고려하는 것을 목표로 한다. 이 장에서는 생물다양성 위기와 그의 중요성을 검토한 다음, 그 동안의 사례들을 통해 많은 멸종 종들이 담당하고 있는 중요한 역할과 멸종의 요인들에 대해 알아본다. 종 및 지역 사회 수준에서 복구 노력에 대해 검토로 마무리한다.

W7.1 생물다양성의 위기

학습 목표

1. 시간의 경과에 따른 멸종의 역사에 대해 설명하시오.
2. 생물다양성 보존에 대한 주요 쟁점들에 대해 설명하시오.

멸종(extinction)은 생명계에서 일어나는 사실의 하나로 대부분의 종은 궁극적으로는 멸종의 길을 걷게 된다. 과학계에 알려진 종(대부

분 화석 자료를 통해)의 99% 이상은 이미 멸종했다. 그러나 현재도 멸종 속도는 놀랍도록 높게 나타나고 있는데, 오늘날 열대지방 같은 곳에서의 매우 빠르게 가속화되는 서식지 소실을 감안해볼 때, 전 세계의 생물다양성(biodiversity)의 20% 정도는 이번 세기의 중반까지 사라질 것으로 추정되고 있다. 또한 생물종의 상당수는 우리가 그들의 존재를 인지하기도 전에 사라져버리고 있다. 과학자들의 추정에 따르면 전 세계의 진핵생물의 15% 정도만이 동정되어 학명이 부여되었고, 이 비율도 열대지역에서는 훨씬 낮을 것이다.

이러한 생물종의 소실은 잘 알려지지 않은 집단의 생물에게 더 큰 영향을 주게 될 것이다. 전 세계 식물 25만 종 중에서 5만여종이, 2만



그림 W7.1 인간 거주 이전의 북미.

인간이 도착하기 전에 북미에서 발견된 동물에는 새와 세이버 이빨 고양이, 거대한 땅 나무늘보, 테론 독수리와 같은 대형 포유류가 포함되었습니다. 란초 라 브레아 타르 핏이라는 제목의 찰스 R 나이트의 이 그림은 현재 로스앤젤레스 한복판에 있는 한 장소를 묘사하고 있다.

종의 나비 중에서 4천여종이, 전 세계 1만 종의 새 중 거의 2천 종이 사라질 수 있다. 45억 년의 지구 역사에서 인류 역사는 20만년 밖에 되지 않으며, 인류가 농경을 시작하지 1만년 밖에 안 된다는 것을 고려해볼 때 이러한 사실은 매우 놀랍고 충격적인 것으로 받아들여 진다.

선사시대 인류는 지역적 멸종에 책임이 있다

현재 일어나는 멸종의 속도는 과거 상태의 연구를 통해 알 수 있다. 선사시대의 인류(Homo sapiens)는 새로운 지역에 들어갈 때마다 큰 혼란을 야기했다. 예를 들어, 약 12,000년 전 마지막 빙하기 말에 북아메리카의 동물상은 맘모스(mammths), 마스토돈(mastodons), 말, 낙타, 거대한 육상 나무늘보(sloths), 검치 호랑이 그리고 사자 등 오늘날 아프리카에 살고 있는 동물들과 유사한 다양한 대형 포유류로 구성되어 있었다(그림 W7.1).

인류의 출현 직후 바로 74% 에서 86%에 이르는 거대 동물(45 Kg 이 넘는 동물들)들이 멸종했다. 이러한 멸종은 사냥에 의해서 일어났으며, 간접적으로는 숲을 태우고 벌목을 통해 초래되었다. 일부 과학자들은 이러한 멸종이 기후 변화로 인해 나타났다고 주장하지만, 이 가설은 초기 빙하기에서 대량 멸종이 일어나지 않은 이유와 왜 크기가 작은 동물들이 큰 동물들에 비해 영향을 덜 받았는가에 대해서는 설명하지 못하고 있다.

전 세계적으로, 인류의 등장으로 인하여 비슷한 결과가 나타났다. 4만년 전 호주는 하마나 표범과 비슷한 크기와 생태를 가진 2미터 높이의 캥거루, 6미터 길이의 왕도마뱀 등과 같은 매우 다양한 거대 동

물들이 번창했지만 이들도 인류의 출현과 유사한 시기에 모두 사라졌다.

작은 섬들에서는 황폐화가 더 가속화 되었다. 마다가스카르(Madagascar)에서는 고릴라 크기의 종들을 포함하여 최소 15종의 여우원숭이가 멸종된 것으로 보이며, 난장이 하마 그리고 날지 못하는 코끼리새라 불리던 지구 역사상 가장 거대한 조류인 에이피오르니스 Aepyornis(3 m 키와 450 kg가 넘는 조류) 등이 멸종되었다. 뉴질랜드에서는 13종의 모아스(Moas)와 그 외의 거대 종들 그리고 날지 못하는 조류 등을 포함해 30종의 조류가 멸종되었다. 흥미롭게도 거대 동물군의 멸종에서 살아남은 대륙 하나가 있는데, 그것은 바로 아프리카이다. 과학자들의 추정에 따르면 선사 시대에 아프리카에서 멸종이 없었던 것은 바로 대부분의 인류가 아프리카에서 살면서 진화했기 때문인 것으로 여겨지고 있다. 결과적으로 아프리카의 생물 종들은 수백만 년 동안 인류와 함께 진화해오면서 인간의 포식에 대해 적응하고 대처하며 진화해 온 것이다.

멸종은 유사 이래 계속 되었다

역사적으로 멸종 비율은 조류와 포유류들을 통해 잘 알려져 있는데, 그 이유는 이 종들은 상대적으로 개체 크기가 커서 연구가 잘 되어있기 때문이다. 다른 생물 종들에 대한 멸종 수치의 추정치는 들쭉날쭉하다. 표 W7.1에서 제시된 자료는 확보 가능한 최적의 증거를 바탕으로 만들어진 것으로 1600년부터 현재까지 멸종 기록을 보여주고 있다. 이 표에서는 1600년 이래 85종의 포유류와 113종의 조류

표 W7.1		지난 1600년 이후 멸종된 분류군				
분류군	기록된 멸종 현황				종수	멸종된 분류군 비율
	본토	섬지역	대양	합계		
포유류	30	51	4	85	4,000	2.1
조류	21	92	0	113	8,600	1.3
파충류	1	20	0	21	6,300	0.3
어류	22	1	0	23	24,000	0.1
무척추동물*	49	48	1	98	1,000,000+	0.01
현화식물	245	139	0	384	250,000	0.2

* 많은 종에 대한 지식의 부족으로 멸종된 무척추동물의 수는 과소평가될 수 있다(같은 이유로 다른 그룹의 종 수도 더 작게 과소평가될 수 있다).

가 멸종한 것으로 제시되어 있는데, 이는 현재 알려진 포유류의 1.7%, 조류의 1.1%에 해당한다.

대다수의 멸종은 1900년 이후 발생했으며, 20세기 동안 매년 5종의 식물과 동물이 멸종되었다. 멸종의 비율적 측면에서의 이러한 증가는 생물다양성의 위기에서 중요 요인으로 작용한다.

불행하게도 상황은 더 악화되고 있다. 그 실례로 1999년에서 2009년까지 “멸종위기”로 인식된 조류 종의 수는 13% 감소했고, 최근 한 보고서에 따르면 지구 식물 종들의 절반 이상이 멸종 위기에 처해 있다고 알려졌다. 일부 연구자들은 금세기가 끝날 때까지 모든 척추동물의 2/3가 소멸할 것으로 예측하고 있다.

중 내부를 살펴보면 상황은 더욱 심각하다. 최근 연구에 따르면 모든 육지 척추 동물 종의 3분의 1이 상당한 수의 개체군 멸종을 경험했다. 이런 걱정스러운 경향은 우리가 이미 멸종 위기에 처한 종에 국한되지 않는다. 오히려 이러한 감소하는 종의 30%는 현재 문제가 없는 것으로 간주되어, 현재 상태에도 불구하고, 그들의 미래가 위협에 처할 수 있음을 시사한다. 포유류 중 그룹에 대한 상세한 연구에 따르면 대부분은 현재 역사적 지리적 범위의 40%에서 사라졌으며 거의 절반이 1900년 이후 분포의 80% 이상을 잃었다.

역사적으로 볼 때 대부분의 멸종은 주로 섬 지역에서 일어나고 있다. 그 실례로 최근 400년 동안 85종의 포유류가 멸종하였는데, 이 중 60%가 섬에 살고 있는 동물이었다. 이러한 결과는 섬에 사는 종이 지니고 있는 특별한 취약성 때문인 것으로 해석되고 있다. 섬에 사는 생물 종들은 흔히 포식자가 없는 상태에서 진화해왔기 때문에 인간이나 쥐와 고양이와 같은 도입 포식자로부터 도망칠 능력을 지니지 못하고 있었던 것이다. 더욱이 인간은 경쟁자(competitors)와 질병(diseases)도 도입시켰는데, 그 실례로 말라리아(malaria)는 하와이섬의 조류 군집을 황폐화시켰다. 섬 지역의 개체군의 크기는 상대적으로 작기 때문에 W7.3절에서 볼 수 있듯이 멸종에 대해 특별한 취약성을 지니고 있다.

최근 멸종 위기가 섬에서 대륙으로 이동했다. 대부분의 생물 종들이 멸종이 발생하는 대륙에서 위협받고 있으며, 금세기 내에 이러한 지역은 멸종 위기를 직면하게 될 것이다.

일부 사람들은 인류가 멸종에 대해 관심 가질 필요가 없다고 주장하고 있는데, 이 견해에 따르면 멸종은 자연적인 현상이며 대량 멸종은 과거에도 일어났었다는 점을 근거로 제시하고 있다. 실제로 대량 멸종은 지난 5억년 동안 여러 차례 일어났다(22.7 참조). 그러나 현재의 대량 멸종 사건은 단일종(우리!)에 의해 촉발된 유일한 사건이기 때문에 주목할 만하다. 더욱이 종 다양성은 보통 몇 백만 년 후에 회복되지만, 이것은 우리의 후손들에게 생물 다양성의 이익과 기쁨을 부정하기에 긴 시간이다.

또한 이번엔 생물 다양성이 회복될지는 분명하지 않다. 이전의 대량 멸종 이후, 새로운 종은 이전에 사용했던 종의 멸종으로 인해 새롭게 유용 가능한 자원을 이용하는 쪽으로 진화했다. 그러나 오늘날



그림 W7.2 할레아 칼라 은검초(Haleakala silversword, *Argyroxiphium sandwicense*).

현재 많은 종의 은검초는 아주 작은 지역에서 자생한다. 이 사진은 식물의 수명 주기 중 두 단계를 보여준다.

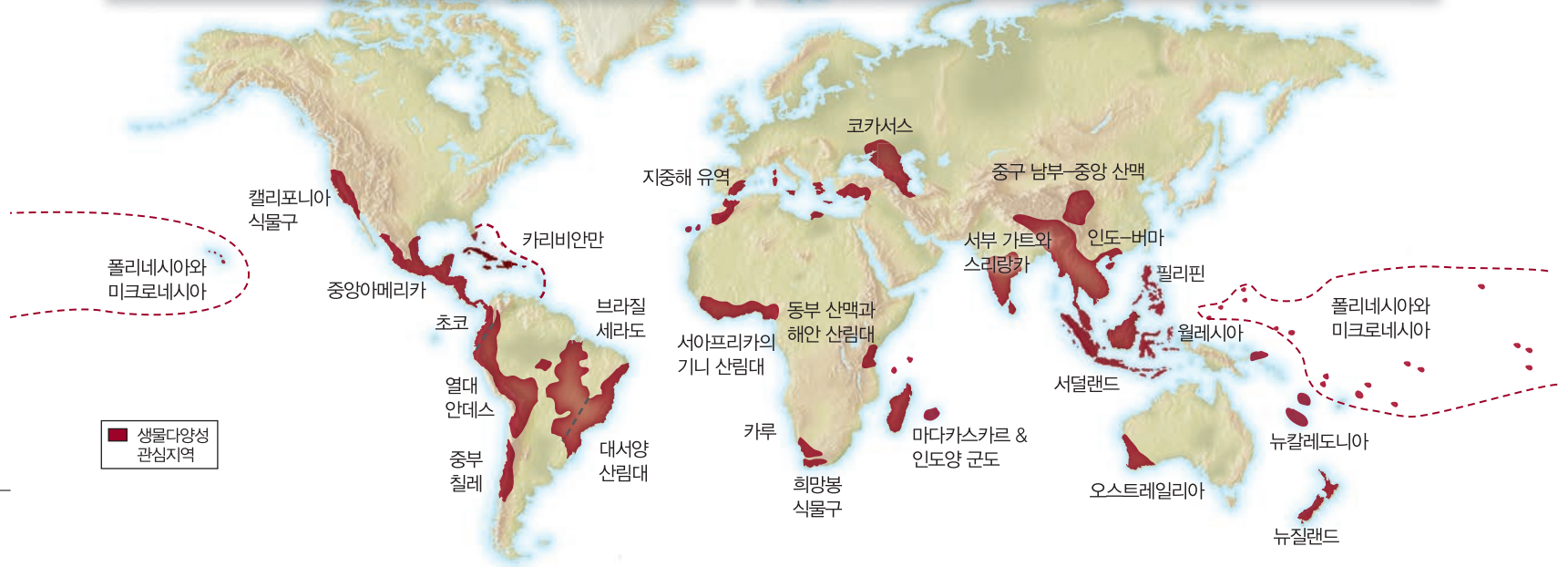


그림 W7.3 고유종들이 많이 분포하는 관심지역.
이 지역들은 고유종이 풍부하고, 이런 종들이 대개 멸종 위기에 처해 있는 지역이다.

에는 인간이 서식지를 파괴하고 자신이 사용할 자원을 가져 가기 때문에 이러한 자원은 아쉽게도 얼마 남지 않게 되었다

고유종은 특히 위협받고 있다

자연적으로 유일하게 그 지역에서만 발견되고, 다른 지역에서는 찾을 수 없는 종을 고유종(endemic species)이라고 부른다. 고유종이 살고 있는 지역은 매우 넓게 분포할 수 있는데, 그 실례로 검은 체리나무(*Prunus serotina*)는 북아메리카의 모든 온대 지역의 고유종이다. 일반적으로 고유종은 제한적인 지역에만 나타나는데, 코모도 드래곤(*Varanus komodoensis*)은 인도네시아 군도에 있는 소수의 작은 섬에만 살고 있고, 마우나 케아와 할레아 칼라 은검초(*Argyroxiphium sandwicense sandwicense* and *A. s. macrocephalum*)는 각각 하와이 섬의 한 화산 분화구에서만 서식한다(그림 W7.2). 해양 섬, 호수 및 고산지대 등 지역적으로 고립된 곳에서는 고유종과 멸종

위기 종들의 분포 비율이 높다.

고유 식물종의 수는 지역마다 크게 다를 수 있다. 예를 들어 미국의 경우 379종의 식물이 텍사스와 그 밖의 장소에서 발견되지만, 뉴욕에는 오직 한 종의 고유종만 존재한다. 사막, 산맥, 해안, 오래된 숲, 초지 등의 다양한 서식지를 가진 캘리포니아에는 다른 어떤 주보다 더 많은 고유 식물종들이 살고 있다.

종 관심지역

세계적으로 고유종이 특히 밀집되어 있는 특정한 지역이 있는데, 보존주의자들은 고유종이 많지만 종이 빠르게 사라지는 지역을 관심 지역(hotspot)이라고 명명하였다. 이러한 관심지역들로는 다양한 열대우림 마다가스카르, 히말라야 동부, 캘리포니아, 남아프리카 및 호주 등과 같은 지중해성 기후를 가진 지역 및 그 밖의 다른 몇몇 지역 등이 포함된다(그림 W7.3, 표 W7.2). 종합적으로 25개의 관심지역이

표 W7.2		일부 관심지역들에서 나타나는 고유종의 수		
지역	포유류	파충류	양서류	식물
대서양 해안산림(브라질)	160	60	253	6,000
남아메리카 초코지역	60	63	210	2,250
필리핀 지역	115	159	65	5,832
안데스 열대지역	68	218	604	20,000
호주 남서지역	7	50	24	4,331
마다카스카르	84	301	187	9,704
남아프리카(케이프타운지역)	9	19	19	5,682
캘리포니아 지역	30	16	17	2,215
뉴 칼레도니아	6	56	0	2,551
중국 남중부	75	16	51	3,500

확인되었는데, 이곳에서는 육상 생물종의 절반에 가까운 종류들이 서식하고 있다.

왜 이들 지역에 많은 고유종이 분포하고 있는지가 현대 과학 연구의 관심사가 되었다. 관심지역의 일부 지역은 높은 종다양성을 가지고 있으며, 이러한 보존 지역에서는 종 다양성이 높고, 높은 생산성과 같이 일반적으로 높은 종의 다양성에 대한 설명이 적용될 수 있다 (56장 참조). 또한 일부 관심지역들은 뉴질랜드, 뉴칼레도니아, 그리고 하와이 섬과 같은 고립된 섬들인데, 이런 외딴 섬들은 오랜 기간을 거친 진화적 다양화의 결과로 어떤 다른 곳에서 발견되지 않는 특이한 식물과 동물 종들로 이루어진 풍부한 생물상을 보여준다.

생물 다양성 관심지역에 대한 또 다른 설명은 종 분화 과정이 특히 빠른 속도로 발생하는 지역에서 발생한다는 것이다. 이러한 생각은 다른 설명과 상호 배타적이지 않다. 높은 비율의 종분화는 생태계 생산성의 기능 일 수 있으며, 우리는 섬에서 흔히 볼 수 있는 적응방사선이 일반적으로 높은 종분화 비율과 관련이 있음을 알고 있다.

그러나 그러한 높은 비율에는 다른 원인이 있을 수 있다. 예를 들어 아마존 지역의 높은 생물 다양성은 빙하기 동안 발생한 종 분화 과정의 결과라는 가설이 있다. 가설은 다음과 같다. 빙하기 동안 지구의 물 대부분은 빙하에 갇혀 있었다. 그 결과 강우량이 줄어들었고 많은 열대 우림이 사바나로 변했다. 그러나 산에서는 여전히 열대 우림을 지탱할 수 있을 만큼 강수량이 높았다(57 장 참조). 그 결과, 원래 아마존 유역 전체를 덮고 있던 하나의 연속적인 숲이 사바나 서식지로 분리된 고립된 숲 조각으로 변모되었다. 그 결과, 널리 퍼진 종의 개체군이 유전적으로 분리되었고, 따라서 가설에 따르면 동종 종분화가 발생하여 이 지역의 종 다양성이 크게 증가했다는 것이다. 일부 과학자들은 다른 생물 다양성 지역에서 작동했을 수 있는 유사한 메커니즘을 제안했다. 처음 제안된 지 40년이 지났지만 이 “홍적세

레피지아 가설(pleistocene refugia hypothesis)”은 여전히 활발하게 논의되고 있다.

최근 생물 다양성 관심지역을 설명하기 위해 진화론적으로 영향을 받은 대안 가설이 제안되었다. 이 가설은 서로 다른 유형의 서식지 사이의 전환 영역이 높은 종분화 비율로 이어진다는 것을 암시한다. 자연 선택이 그러한 영역에서 매우 강력하고 다양하다는 것이다. 예를 들어 열대 우림이 사바나로 변하는 것과 같이 전환의 반대편에 있는 동일한 종의 개체군은 서로 다른 선택 압력에 직면하고 이러한 다양한 선택으로 인해 개체군이 다른 종이 될 수 있다(22장 참조).

이 2가지 가설과 다른 가설은 종 멸종의 패턴을 결정하는 핵심 요소가 새로운 종이 발생하는 속도라고 주장한다. 이러한 생각이 옳은 한, 이러한 인식의 결과는 생물학자들이 보존 계획에서 진화 과정을 고려해야 한다는 것이다. 진화 과정을 보존하고 새로운 종의 지속적인 생산을 통해서만 우리는 미래에도 풍부한 종을 잘 유지할 수 있을 것이다.

관심지역에서 인구는 증가한다

관심지역에 서식하고 있는 많은 고유종들의 분포 및 서식 때문에 그 들의 생물다양성을 보호하는 것은 세계의 생물학적 유산을 안전하게 보호하는데 매우 중요하다. 또 다른 관점에서 보면 단지 세계 지표면의 1.4%만 보호해도 세계 유관속식물의 44%, 육상 척추동물의 35%를 보호할 수 있게 되는 것이다.

불행하게도 이런 관심지역의 보존에 따라 많은 고유종들이 증가하지만 인구도 함께 증가하는 현상이 나타나고 있다. 2010년, 이런 관심지역들은 세계 인구의 22%인 15억 명이 거주하고 있으며, 인구 밀도 증가 추세를 보이고 있다(그림 W7.4). 게다가 이런 관심지역 중 하나(남아프리카의 Succulent Karoo)는 출산율이 사망률 보다 높고,

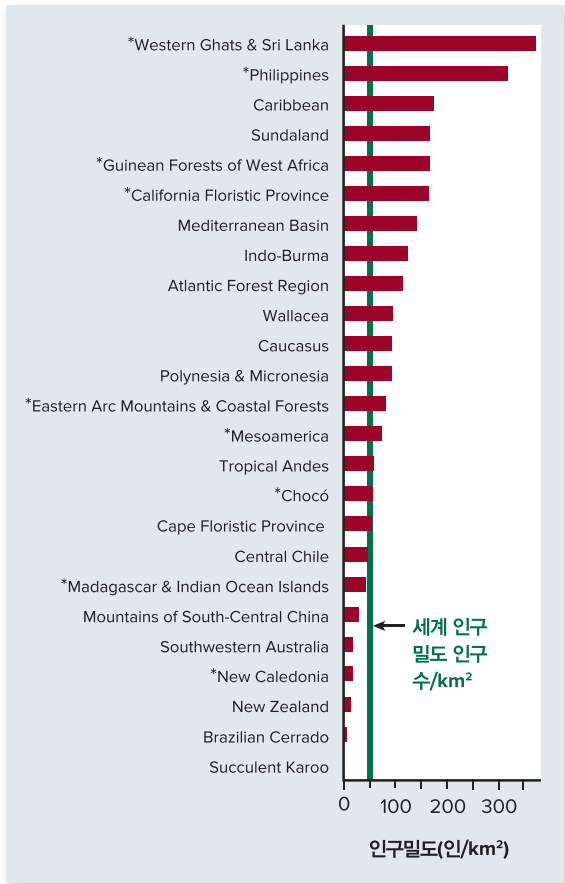


그림 W7.4 관심지역의 인구.

생물다양성의 관심지역에 있는 인구밀도. 별표(asterisk)는 인구 증가율이 1.6%를 넘는 지역을 나타내며 이는 세계 평균(1.2%)보다 3분의 1 이상 높다.

탐구문제 왜 개체군 밀도와 성장률은 관심지역마다 다른가?

자료 분석 개체군 밀도가 환경에 대한 위협의 좋은 지표라고 가정한다면, 특별히 나쁜 상태는 아니지만, 현재 개체군이 빠르게 증가하고 있기 때문에 미래에 문제가 될 가능성이 높은 관심지역은 무엇인가?

유입 인구가 증가하여 인구 밀도가 빠르게 증가하고 있다는 것이다. 이를 종합해보면 관심지역의 인구 증가율은 세계 평균 인구 증가율을 크게 초과하고 있다(그림 W7.4). 일부 평균에서는 세계 인구 증가율의 2 배에 근접한 수치를 보여주고 있다.

그리 놀랄 일은 아니지만 관심지역 중 많은 곳들이 농경, 건축, 경제 발전에 의해 많은 서식지가 파괴되는 현상을 보이고 있다. 관심지역에서 원래 면적의 70% 이상이 이미 소실되었으며, 14곳에서는 15% 이하의 서식지만 남아있는 상태이다. 마다가스카르에서의 연구에 따르면 본래 산림의 90%가 소실된 것으로 추정되었고, 세계의 어떤 곳에도 발견되지 않은 종들의 85%가 섬에서 멸종되었다. 브라

질 대서양 해안의 산림에서는 산림 벌채가 더욱 확대되어 본래 산림의 95%가 사라졌다.

인구 증가만 관심지역의 서식지 파괴를 초래하는 것은 아니다. 선진국 사람들의 상업적 개발도 서식지 파괴에 중요한 역할을 하였다. 예를 들면, 열대우림에서의 광범위한 벌목은 미국, 서유럽 및 일본 등 세계 선진국들에 목재로 제공하게 되면서 서식지를 파괴하였다. 마찬가지로 중남미 지역의 많은 산림은 목장 건설로 인해 소실되었다. 선진국에서 이런 관심지역들이 위기에 처해 있는데, 그 이유는 이런 관심지역은 부동산 및 상업적 가치가 높기 때문에 그 좋은 실례는 미국의 플로리다와 캘리포니아에서 잘 볼 수 있다.

핵심 요약 W7.1

가장 최근의 생물 다양성의 손실은 선사 시대와 역사적 시대의 인간 활동으로 인한 것이다. 고유종은 지구상의 한 지역에서만 발견된다. 관심지역으로 알려진 고유종이 많은 지역은 특히 인간의 침입으로 위협을 받고 있으며 그 보존이 중요하다.

- 생물 다양성 관심지역에서 왜 그렇게 많은 자원 착취가 발생하는가?

W7.2 생물다양성의 가치

학습 목표

1. 생물다양성의 직접적 경제 가치와 간접적 경제 가치를 구별하시오.
2. 생물다양성의 심미적 가치가 무엇을 의미하는지 설명하시오.

왜 우리는 생물다양성의 소실을 걱정해야 하는가? 그 이유는 생물다양성이 우리에게 많은 면에서 소중하기 때문이다.

- 식물, 동물 및 기타 그룹의 종으로부터 우리가 얻는 산물의 직접적인 경제적 가치
- 우리가 소비하지 않고 종에 의해 창출되는 편익의 간접적인 경제적 가치
- 윤리적, 미적 가치

생물다양성의 직접적인 경제적 가치는 생존에 필요한 자원을 포함한다

많은 생물 종들은 의식주, 의약품, 의복 및 생물량(에너지와 그 외의 용도) 및 주거지와 같은 직접적인 가치를 부여한다. 세계 식량자원의 대부분은 밭 열대 및 반 건조 지역에 있는 야생종의 품종 개량을 통해 얻어졌다. 결국 인류에게 중요한 작물들인 옥수수, 밀 그리고 쌀은 상대적으로 유전적 변이가 거의 없고(20.3절 창시자 효과 참조), 그 야생형과 유사한 종들은 높은 다양성을 보인다.

미래에는 수확량을 늘리거나 새로운 해충에 대한 저항력을 얻기 위해 유전적 변이가 요구될 것이다. 실제로 최근의 농작물의 교배 실험에서 일반 작물과 유사한 야생종의 보존의 중요성이 대두되고 있다. 그 실례로 일반적으로 판매하는 토마토 상품의 주요 품종을 페루 산간지역에 서식하는 크기가 작고, 색깔이 특이한 토마토 야생종과 교배했을 때, 작물의 수확량은 50% 증가되었고, 영양소 함유량과 색소는 훨씬 더 좋아졌다.

세계 인구의 70% 정도는 의약품의 원료를 야생식물에 직접적으로 의존하고 있다. 그에 부가하여 오늘날 사용되는 처방 의약품과 비처방 의약품의 40%는 식물이나 동물의 성분에서 추출하고 있다. 세계적으로 가장 널리 사용되는 의약품인 아스피린은 열대 버드나무(*Salix alba*)의 잎에서 처음 추출되었다. 소아 백혈병을 치료하기 위한 의약품은 마다가스카르의 로시 페리윙클(*Rosy periwinkle*)로부터

얻어졌고(그림 W7.5), 다양한 암과 기타 질병들을 효과적으로 치료할 수 있는 의약품은 서북미 주목(*Pacific yew*)으로부터 생산되었다. 전체적으로 항암 치료제의 62%가 식물과 동물에서 추출한 제품에서 개발되었다.

최근에 생물학자들은 어떤 종의 유전자를 다른 종에 도입하여 종을 변형시키는 기술을 완성하였는데 그를 통해 인류는 다른 종으로부터 얻어진 유전자를 이용하여 혜택을 보기 시작하고 있다(17장 참조). 유용한 유전자를 찾기 위해 동물과 식물 유전체를 찾는 이른바 “전망있는 유전자” 분야가 시작되었다.

지구상의 생물에서 아주 소량의 유전자만을 조사하여 인간에게 유용한 특성을 가지고 있는지 여부를 확인할 수 있었다. 생물다양성 보존은 인류의 미래에 대한 혜택을 유지시켜 준다. 그러나 불행하게도 많은 유용한 종들이 열대 우림과 같은 서식지에서 서 우려할 만한 속도로 파괴되고 있는 것도 현실이다.

간접적인 경제 가치는 생태계에서 유래한다

다양한 생물군집(biological communities)은 건강한 생태계 유지에 매우 중요하다. 생물다양성은 천연수의 화학적 품질을 유지하는데 중요한 역할을 하며, 폭우와 가뭄에 의한 생태계 영향에 완충 역할을 해 준다. 또한 토양을 보존하고 미네랄과 영양소 손실을 막으며, 지역에서의 큰 기후 변화를 막고, 오염물질을 흡수하며, 유기물의 분해와 무기물의 순환을 촉진하는데도 중요한 역할을 한다.

56장에서 살펴본 바와 같이 생태계의 안정성 및 생산성은 종 풍부도와 직접적으로 연관되어 있다. 생물다양성의 파괴는 생태계 안정성을 감소시키고, 생산성을 저하하며, 사막화, 침수, 광물화를 가속화시키고 많은 바람직하지 않은 결과들을 초래한다.

온전한 서식지의 가치

경제학자들은 원래대로 잘 유지된 서식지를 훼손된 서식지와 비교하면서 원형 서식지의 사회적 가치를 금전적인 관점에서 비교할 수 있다. 많은 연구에 따르면 온전한 생태계(intact ecosystem)는 서식지를 파괴하여 얻어내는 산물보다 훨씬 더 큰 가치를 지니고 있다. 태국에서의 한 예를 들어보면, 새우양식장이 들어서면서 해안의 맹그로브(mangrove) 산림 및 서식지가 사라지게 되었다. 새우의 양식도 가치는 있었지만, 목재 및 석탄 생산, 연안 어장 및 맹그로브에 의해 제공되는 폭풍으로부터의 보호 효과 등에 대한 가치는 새우 양식의 가치를 훨씬 능가한다(그림 W7.6a).

이와 마찬가지로, 서아프리카에 있는 카메룬의 온전한 열대우림은 열대과실 및 다른 산림자원들을 제공한다. 농업과 야자 농장을 위해 산림을 황폐화시켰을 때, 홍수 빈도의 증가뿐만 아니라 하천 오염에



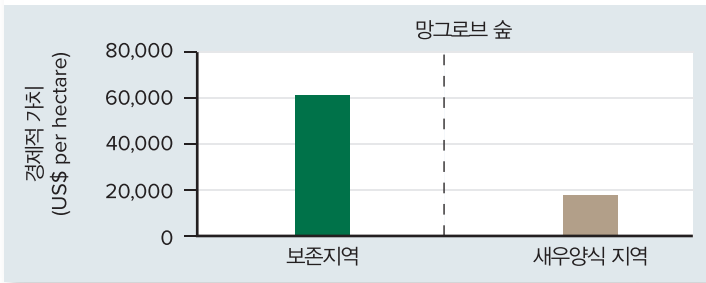
a.



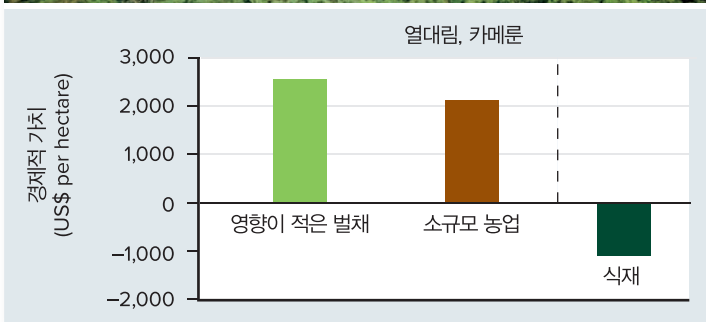
b.

그림 W7.5 임상치료 약품에 가치를 지닌 식물들.

a. 로시 페리윙클, 카타란투스 로제우스, 빈블라스틴, 빈크리스틴에서 추출한 두 가지 약물은 소아 백혈병에 효과적인데, 생존율을 20%에서 95% 이상으로 증가시킨다. b. 택솔(taxol)과 같은 암 퇴치 약물은 주목 껍질인 *Taxus brevifolia*에서 개발되었다.



a.



b.

그림 W7.6 서식지 보존의 경제적 가치.

a. 태국의 망그로브는 새우 양식장보다 더 가치있다. b. 카메룬의 열대우림은 파괴되었을 때 보다 더 많은 경제적 이익을 제공한다.



자료 분석 개간된 망그로브 서식지에 설립된 새우 양식장이 돈을 벌면 어떻게 망그로브를 개간하는 것이 경제적 이익이 아닐 수 있는가?

중요한 역할을 하는 침식 활동이 증가되었다. 이렇게 개발에 소요되는 비용, 혜택 등을 종합해보면, 원래 그대로 산림을 보존하는 것이 가장 큰 경제적 가치를 가진다는 것을 보여주고 있다(그림 W7.6b).

사례연구 : 뉴욕시의 수계

아마도 온전한 생태계 가치로 가장 잘 알려진 사례로 뉴욕시의 수계(watersheds)를 들 수 있을 것이다. 850만 명의 뉴욕 시민을 위한 물의 90%가 캣스킬산(Catskill Mountains)과 인근 델라웨어강(Delaware River)의 상류에서 온다(그림 W7.7). 4천 km² 이상의 시골 산악 지역으로부터 흘러 들어온 물은 인공호에 집수되고, 이 물은 130 km가 넘는 수도관로를 통해 매일 49억 리터씩 뉴욕시로 공급된다.

1990년대에 뉴욕시는 딜레마에 빠지게 되었는데, 이는 물이 공급되는 수원지 부근에서는 개발과 수질 오염이 가속화됨에도 불구하고, 오히려 연방 정부의 새로운 수질 규제법은 더 깨끗한 물을 요구하고 있었기 때문이었다. 뉴욕시는 두 개의 선택권을 갖고 있었는데, 그것은 깨끗한 물을 제공하기 위해 생태계의 기능을 보호하는 일을 할 것인지, 혹은 뉴욕시에 오는 물을 정화하기 위해 정수장을 건설할 것인지 하는 것이었다. 비용분석 결과 선택의 문제는 아주 명료하게 나타났다. 정수장 건설 비용은 60억 달러에 매년 운영비 3억 달러가 추가되는데 비해 생태계 보존을 선택할 경우 10년 동안 10억 달러의 비용만으로도 기능하다는 것이었다. 따라서 결정은 아주 쉽게 내려졌다.

경제적 상반관계

상기의 사례들은 생태계가 제공해주는 서비스의 가치를 제시해 주고 있다. 그러나 생태계를 본래 그대로 보존하는 것이 그것을 다른 용도로 대체하는 것보다 항상 가치가 있는 것은 아니다. 미국에서 초기에 사람들이 정착하게 되었을 때, 토지가 광대하고 충분히 생태계를 다른 용도로 대체한 것은 분명 혜택이었다. 최근 까지도 때때로 서식지의 파괴는 경제적으로는 바람직한 결과를 가져올 수 있다. 현재 우리는 여전히 원래의 잘 유지된 생태계가 제공하는 서비스에 대해서는 아주 기초적인 지식만을 가지고 있다. 종종 홍수와 오염의 증가, 강우 감소, 혹은 태풍 피해와 같이 예상치 못한 악 영향이 발생했을 때야 비로소 잘 보존된 자연의 진가를 알게 된다.

이와 같은 논쟁은 생태계 내에 있는 특정한 종을 보전하는 문제에도 적용된다. 대부분의 종(species)에 관한 생물학 지식이 아주 조금 알려져 있다는 것을 감안해 볼 때, 특히 열대지방에서 종을 다른 곳에 이통 혹은 이주시켰을 때 어떤 결과가 나타날지에 대해 아는 것은 불가능 하다. 비행기의 부품 번호를 임의적으로 한자리 수를 변경한다고 상상해보자. 비행기 좌석의 쿠션을 두루말이 화장지로 바꿀 수

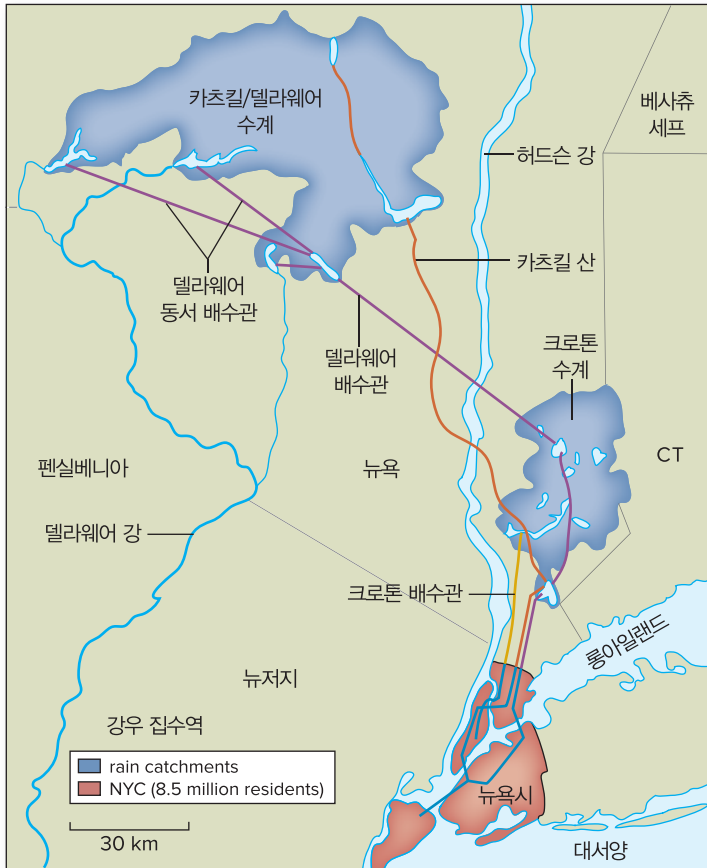


그림 W7.7 뉴욕시의 수자원.

뉴욕은 먼 곳에 있는 수계로부터 물을 공급받는다. 이들 지역의 생태적 건전성을 보존하는 것이 새로운 수질 정화시설을 건설하는 것보다 훨씬 더 경제적이었다.

있고, 날개를 고정하는 주요한 볼트를 연필로도 쉽게 바꿀 수 있을 것이다. 그러나 생태계의 생물 다양성을 감소시키는 것은 우리가 의존하고 그 기능을 잘 알지 못하는 생태계의 미래에 대해 도박을 하고 있는 것이다. 최근 생태경제학(ecological economics) 분야에서는 사회적인 혜택이 생물종에 의해서 어떻게 제공되는지, 그리고 생태계의 가치가 어떻게 적절하게 매겨질 수 있는 지에 대해 연구를 진행하고 있는데, 문제는 두 가지로 대별된다. 첫째, 최근까지 우리는 생태계가 제공하는 서비스의 금전적 가치를 제대로 파악하지 못했고, 지금은 변화하고 있는 상황이다

두 번째 문제는 종종 환경의 질적 저하로 이득을 얻는 사람들과 그 대가를 지불하는 사람들이 다르다는 것이다. 태국의 맹그로브 예에서, 새우 양식업자들은 재정적인 보상을 받지만 지역민들은 그 비용을 그대로 떠안는다. 대기오염과 수질오염을 유발하는 공장들도 마찬가지이다. 환경경제학자들은 전체적으로 사회가 떠안는 비용에 비해 혜택을 최대로 부여하기 위해 환경 서비스의 적절한 값을 매기고, 환경의 이용을 규제하는 방안을 고안하고 있다.

윤리적, 미학적 가치는 우리의 양심과 우리의 의식을 기반으로 한다

많은 사람들이 생물다양성을 보존하는 것이 윤리적 문제라고 믿고 있는데, 이는 인간이 모든 종들로부터 혜택을 얻지 못한다 할지라도, 그 종들의 존재 자체로 가치가 있기 때문이다. 윤리적 측면에서 이런 사람들은 다른 생물종을 착취하고 파괴하는 것과 동시에 책임이 뒤따른다고 느낀다. 많은 종의 생물 및 생태계 전체를 제거할 수 있고, 인간이 자행하고 있는 것에 대해 반성할 수 있는 지구에서의 유일한 생물은 바로 인간이 되기 때문이다. 또한 우리 주변의 생물다양성을 위해 수호자 또는 관리자로 행동해야 하는 것도 인간의 일이다.

거대한 산맥, 아름다운 꽃, 혹은 웅장한 코끼리 등 생물다양성의 미학적 가치를 부정하는 사람은 거의 없을 것이다. 하지만 우리가 자연에 둘러싸여있을 때 우리의 느낌을 새롭게 해주는 가치 혹은 미적 가치를 어떻게 부여할 것인가? 그것에 대해 인간이 할 수 있는 최선의 방법은 그것이 더 이상 존재하지 않을 때 우리가 느낄 깊은 상실감에 대해 고려해 보는 것이다.

핵심 요약 W7.2

생물 다양성의 직접적인 가치에는 우리의 삶을 향상시키고 지속 가능한 방식으로 사용할 수 있는 천연물 및 의약품과 같은 생존을 위한 자원이 포함된다. 간접적 가치에는 깨끗한 물의 가용성과 레크리에이션 혜택과 같은 건강한 생태계가 제공하는 경제적 혜택이 포함된다. 생물 다양성의 미적 가치는 자연 환경을 경험할 때 우리의 아름다움과 평화의식을 의미한다.

- 새우 양식업자들이 운영을 중단하고 그들이 사용하는 지역을 개선하도록 설득하기 위해 어떤 주장을 할 수 있는가?

W7.3 멸종을 초래하는 요인들

학습 목표

1. 종 멸종의 주요 원인을 나열하시오.
2. 이러한 원인이 어떻게 상호 작용하여 멸종에 영향을 줄 수 있는지 설명하시오.

표 W7.3 멸종의 주요 요인					
분류군	주어진 요인에 영향을 받는 종의 %*				
	서식지 소실	남획	종 도입	기타	미확인
멸종					
포유류	19	23	20	2	36
조류	20	11	22	2	45
파충류	5	32	42	0	21
어류	35	4	30	4	48
멸종 위기종					
포유류	68	54	6	20	—
조류	58	30	28	2	—
파충류	53	63	17	9	—
어류	78	12	28	2	—

* 일부 종들은 하나 이상의 요인에 의해 영향을 받기 때문에 합계가 100%가 넘는 경우도 있다.

멸종(extinction)을 초래하는 요인에는 다양한 원인들이 있는데 독립적으로 일어나거나 혹은 다른 요인들과 함께 작용하여 일어난다(표 W7.3). 과거에는 과도한 남획이 멸종의 커다란 원인이었는데, 이는 오늘날까지도 멸종의 주된 요인이다. 오늘날 대부분의 생물에서 가장 큰 문제점은 서식처의 소실이며, 두 번째 문제점은 외래종 도입이다. 종의 멸종에 기여하는 다른 주요 요인들에는 자연적 또는 인위적 요인으로 생태계 통로의 방해, 오염, 유전적 변이의 소실 및 자연적 또는 인간이 초래한 재앙적 교란을 포함하여 많은 다른 요인들도 종 멸종에 기여할 수 있다.

이러한 요인들 중 하나 이상이 생물종에 영향을 미친다. 실제로 연쇄반응이 일어날 수 있는데, 어떤 종에 대한 하나의 요인이 종을 취약하게 하고, 다른 요인에 의해 더욱 더 심각하게 악영향을 받기도 한다. 예를 들어 서식처 파괴는 출생률 감소 및 사망률 증가를 야기하는데, 이러한 결과로 개체군은 크기가 점점 작아져 이를 사라지게 할 수 있는 홍수나 산불과 같은 재난에 더욱 더 취약해지게 된다. 또한 서식처가 보다 더 작게 분리되면서 개체군 격리가 일어나고, 집단 간 유전자 교환이 중단되고, 교란에 의해 완전히 파괴된 서식지에서는 개체군 증식이 일어나지 못하게 된다. 결국 개체군의 크기가 극히 작아짐에 따라, 근친 교배가 증가하고 유전적 부동(genetic drift)에 의하여 유전적 변이는 상실된다. 최후의 어떤 하나의 요인에 의한 결정적 멸종은 거의 없을 것으로 생각되며, 대부분은 많은 요인들과 그들의 상호작용이 점진적으로 종을 멸종에 이르게 할 것이다.

양서류는 종감소에 처해 있다 : 사례 연구

1963년 파충류 학자인 사베이지(Savage) 박사는 코스타리카의 구름이 덮인 원시림을 걷고 있었다. 바람이 부는 능선에 도달했을 때

그는 그의 눈을 믿을 수가 없었다. 그의 앞에 번식을 하고 있는 거대한 두꺼비 집단이 있었는데, 너무나 놀라운 것은 두꺼비의 색깔이었다 : 두꺼비의 색이 그가 그전까지 보아왔던 그 어떤 것보다 달리 밝고, 눈이 부시게 빛나는 오렌지색이었다(그림 W7.8).

두꺼비의 색이 너무 놀랍고 뜻밖이어서 사베이지 박사는 잠시 명명한 두꺼비의 색이 어떻게 오렌지색이 될 수 있는지에 대한 가능성을 생각했었고, 그렇게 될 수 없을 것이라고 생각한 그는 두꺼비 연구에 몰두하였다. 결국 신종인 황금 두꺼비 Bufo(Bufo periglenes.)를 학계에 보고하였다.

그 후 24년 동안 매년 봄, 번식 기간 동안 엄청난 수의 두꺼비들을 볼 수 있었다. 이들의 서식처는 외향적으로 아주 잘 보존되어 생태계 기능을 잘 수행하는 서식지로 법적으로 몬테베르드(Monteverde) 산림 보존지역으로 정해졌고, 생태 보전의 성공적인 모델인 인식되



그림 W7.8 멸종된 종. 1989년 야생에서 마지막으로 관찰된 황금 두꺼비(Bufo periglenes). 브라이언 세이지.

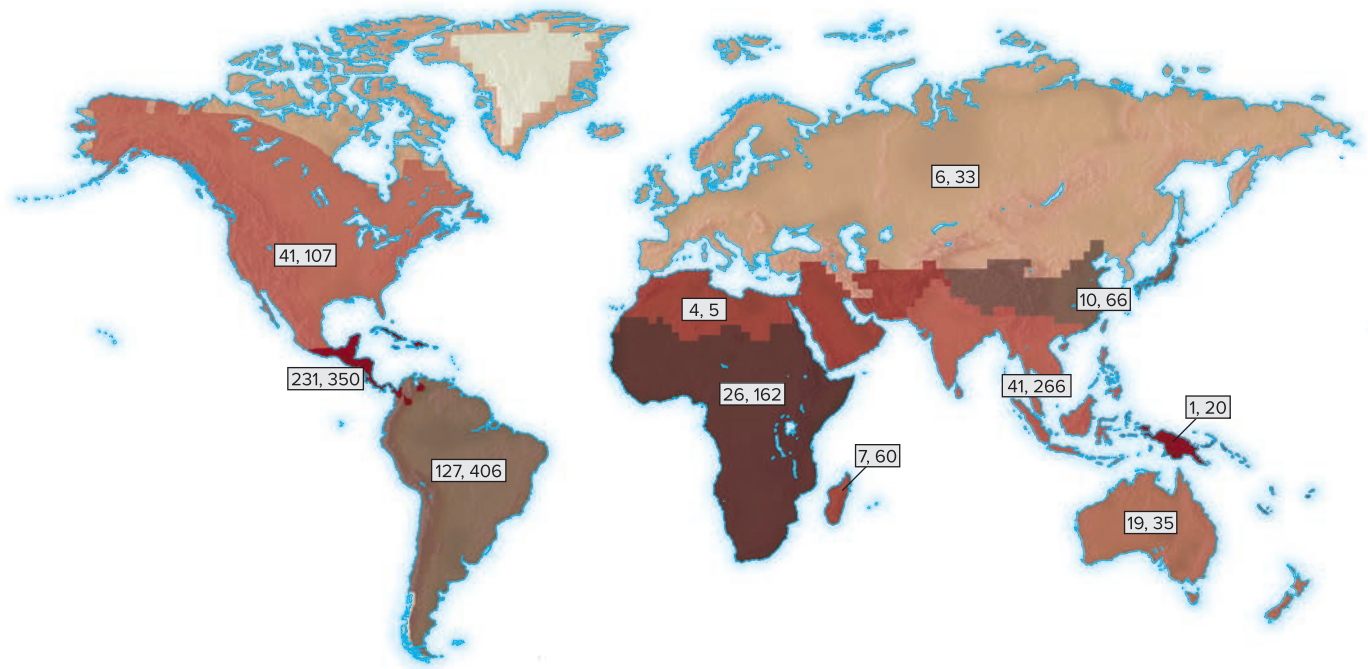


그림 W7.9 멸종 위기의 양서류.

네모상자 속의 왼쪽 숫자는 2017년 전 세계 지역에서 멸종되거나 심각한 위협을 받는 종의 수를 나타내고, 오른쪽 숫자는 2004년에 멸종 위기에 처한 다른 종의 수를 표시한다. 이 수치는 과학자들이 잘 알려지지 않은 종에 관심을 집중함에 따라 상향 수정 될 것이 확실하다.

고 있다. 그 후 1988년에 두꺼비가 거의 보이지 않았고, 1989년에는 단 한 마리의 수컷 두꺼비만이 관찰되었다. 이후 많은 노력에도 불구하고 더 이상 황금 두꺼비를 볼 수 없게 되었다.

곤경에 처한 개구리들

얼마 지나지 않아 양서류 전문가들은 황금 두꺼비 이야기가 독특하지 않다는 것을 깨달았다. 전 세계적으로 한때 풍족했던 개구리 개체수가 줄어들거나 완전히 사라졌다.

이후 학자들은 개구리와 다른 양서류가 왜 이러한 문제에 처해 있는지 알아내기 위해 많은 시간과 노력을 들였다. 하지만 불행 하계도 애초에 의심했던 것 보다 상황은 더욱 더 악화되었다. 양서류 전문가들은 최근 모든 양서류의 43%가 개체군 크기 감소를 겪고 있으며, 전 세계 양서류의 3분의 1은 에콰도르, 베네수엘라, 오스트레일리아,

미국 등의 각기 다른 나라에서 멸종 위기에 처해있다고 보고 하였다 (**그림 W7.9**).

더욱이 동남아시아나 중앙아프리카와 같은 세계의 많은 지역의 정보는 거의 존재하지 않기 때문에 이러한 수는 대부분이 아주 과소 평가된 것으로 추정되었다. 실제로 학자들은 스리랑카의 섬 지역에서 최근 100종이 멸종하였다고 생각했는데, 이런 원인은 아마도 최근 스리랑카에서 열대우림 면적의 95%가 사라졌기 때문일 것이다..

우려하는 이유

양서류의 감소는 몇 가지 이유에서 매우 걱정스러운 일로 받아들여 지고 있다. 첫째, 금두꺼비를 포함한 많은 종들이 매우 잘 보호된 원시 서식처에서도 감소하고 있다. 이러한 지역에서 종들이 절멸하게 된다면, 전 세계의 생물다양성을 보존하는 인간의 능력에 의문을

던져보아야 할 것이다.

둘째, 많은 양서류는 특히 환경 상태에 민감한데, 이는 주변 환경의 화학물질들이 습한 체표면으로 직접 흡수되기 때문이며, 특히 양서류는 유생 시기에 수중 서식처에서 살기 때문에 오염되지 않은 깨끗한 물이 반드시 필요하다(34.6절 참조). 다른 측면에서 이전에 탄광갱도에서 공기의 질(대기오염 정도)을 알아내기 위해 카나리아를 이용한 것과 마찬가지로 양서류를 이들에 이용할 수 있는데, 카나리아가 죽게 되면 광부들은 밖으로 빠져나와야 한다는 것을 알고 있었다.

셋째, 양서류의 개체수 감소 원인은 단 하나의 요인이 아닌 것이 분명하다. 단 하나의 원인이 관심의 대상일 수는 있지만, 염화불화탄소(chlorofluorocarbon, CFCs)의 적극적 이용 감소에 의한 오존층 복원(57장 참조)에서 보여준 바와 같이 전 세계가 환경문제를 해결하기 위해 협력한다면 현재의 상황을 뒤집을 수도 있다. 하지만 여전히 다른 생물 종들은 서식처 파괴, 지구 온난화, 오염, 성충권의 오존 감소, 풍토병, 도입된 외래종 등의 문제들에 의해 피해를 입고 있다.

여러 가지 면에서 전 세계의 환경이 악화되고 있다는 것을 보여주고 있다. 세계 환경이 심각한 문제 속에 있다는 것을 알려주는 지표로서 양서류는 “카나리아” 같은 역할을 할 수 있을까?

서식지 감소는 종의 풍요도를 파괴한다

표 W7.3에 제시된 바와 같이 서식처의 소실은 오늘날 멸종의 가장 중요한 원인이다. 열대우림에서 해저에 이르기까지 모든 유형의 많은 서식지 파괴가 일어나고 있는 것을 고려해보면, 이것은 그렇게 놀랄 일이 아니다. 자연 서식처는 다음과 같은 네 가지 면에서 인간에 의해 나쁜 영향을 받고 있다:

1. 파괴(Destruction)
2. 오염(Pollution)
3. 붕괴(Disruption)
4. 서식처 분할(Habitat fragmentation)

이러한 원인들 외에도 앞 장에서 다루었던 전 세계의 기후 변화가 서서히 확산되고 있으며, 이러한 여러 요인들과 연계하여 작용하게 된다. 기후 변화에 따라 서식처는 일부 변하거나, 모두 사라질 수 있다. 이에 대한 사례로 북극곰(*Thalarctos maritimus*)을 들 수 있다. 북극곰은 먹이인 바다물개를 사냥하기 위해서 떠다니는 얼음이 필요하게 되었는데, 이는 기후 온난화에 따라 나타난 결과이다. 몇몇 연구에 따르면, 지구 모든 생물 종의 30%가 지구 온난화에 의해 위협에 처할 수 있다고 추정된다.

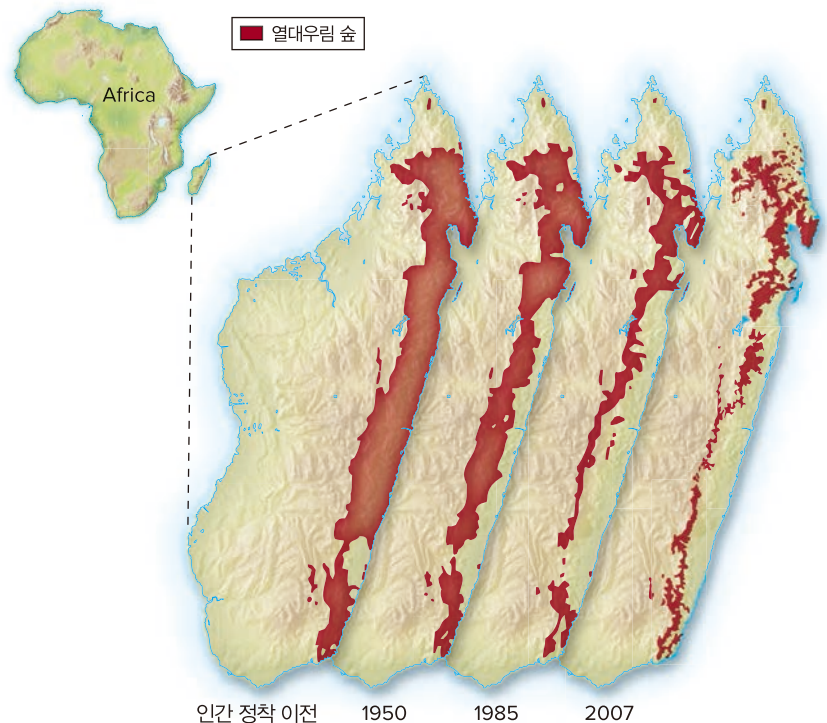


그림 W7.10 멸종 및 서식지 파괴.

동 아프리카 연안의 섬인 마다가스카르 동부 해안을 덮고있는 열대 우림은 섬의 인구가 증가함에 따라 점차적으로 파괴되고 분열되었다. 이제 동부 해안의 원래 숲의 90%가 사라진 상태다. 마다가스카르의 31종의 영장류 중 16종을 포함하여 많은 종들이 멸종되었고 다른 많은 종들이 멸종 위기에 처해있다.

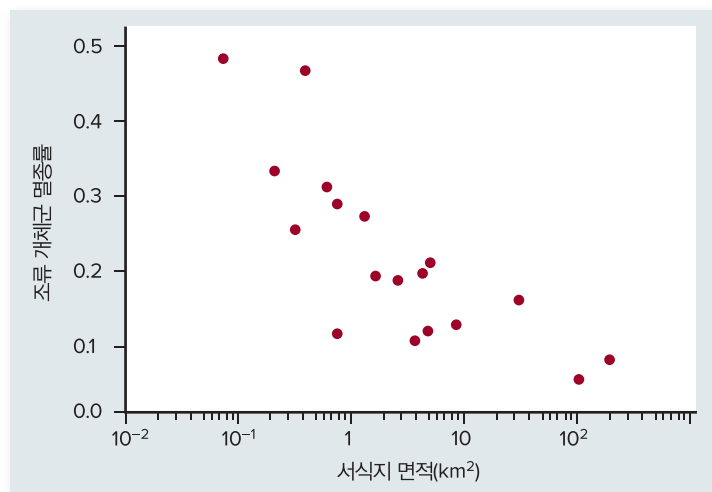


그림 W7.11 멸종 및 섬 면적.

이 데이터는 핀란드의 서식지 섬에서 조류의 서식지 면적 함수로서의 개체수의 멸종률을 나타낸다. 작은 섬들은 훨씬 더 많은 멸종률을 보인다.

자료 분석 면적이 90% 줄어들면 멸종률이 높아지는가? 만약 그렇다면 어느 정도까지 높아지는가?

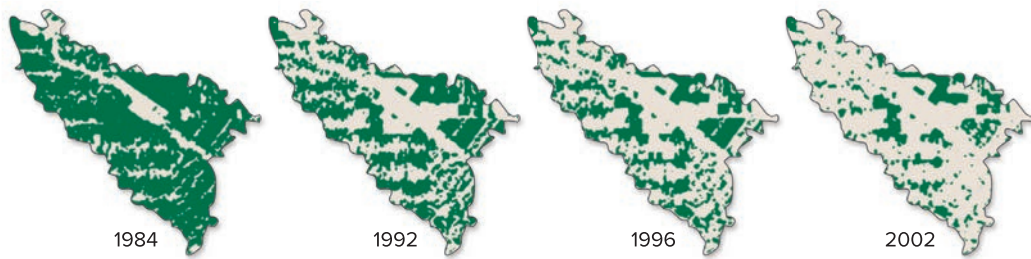


그림 W7.12 열대 우림의 분할.

18년 동안, 브라질의 900 km² 지역에 있는 열대우림은 벌목과 농업용 토지의 개간으로 인해 크게 줄어들었다.

서식지의 파괴

특정한 종들이 이용할 수 있는 서식지의 일부는 쉽게 파괴될 수 있다. 이러한 파괴는 목재의 “깨끗한” 벌채, 목초지를 조성하기 위한 열대림의 불에 의한 파괴, 도시 확장 및 산업 발달 등에 의해 흔히 발생한다. 계속되는 산림 벌채는 가장 만연하고 있는 형태의 서식처 파괴이다(그림 W7.10). 많은 열대림은 연간 1% 혹은 그 이상 벌채되거나 불에 타서 사라지고 있다.

생물 종들이 이용할 수 있는 서식지 감소의 결과를 추정하기 위해 생물학자들은 “서식지의 면적이 커지면 커질수록 생물의 종 수는 증가한다”는 잘 확립된 원리를 이용한다(그림 56.22 참조). 이러한 관계는 지리적인 위치, 생물의 종류, 지역의 유형 등에 따라 다르게 나타나지만, 일반적으로 서식지 지역의 면적 크기가 10배 증가하면 대략적으로 종의 수가 두 배가 된다. 다시 말해 이 관계식이 제시하는 것은 서식지 크기의 90%가 줄어들면, 서식지는 단지 10%만 남게 되고, 절반의 종들은 사라지게 된다는 것이다. 이 가설은 핀란드에 있는 섬들(즉, 부적합한 서식지로 둘러싸인 특정 유형의 서식지 섬)에 서식하는 조류 연구로부터 증명되었는데, 새들의 멸종률은 군도의 크기(면적)와 반비례 한다는 것이다(그림 W7.11).

오염

서식지는 오염(pollution)에 의해 몇몇 종들이 그 곳에서 더 이상 살 수 없는 정도에 이르기까지 질적으로 저하가 된다. 서식지의 질적 저하는 산성비에서부터 살충제에 이르기까지 많은 오염의 결과로 발생된다. 수생 환경은 특히 취약한데, 그 실례로 유럽과 북미의 북부에 있는 많은 호수는 본질적으로 산성비에 의해 피해를 입고 있다(57장 참조).

붕괴

인간의 활동은 일부 종이 서식할 수 없을 정도로 서식지를 붕괴할 수 있다. 예를 들어 앨라배마(Ala bama)와 테네시(Tennessee)에 있는 동굴에 사는 박쥐는 그 곳을 찾는 관광객 때문에 지난 8년 동안 거의 100%까지 개체가 감소되었다. 매달 사람들의 동굴 방문횟수가

1회 이하인 동굴에서는 20% 미만의 개체군이 사라졌지만, 매달 방문 횟수가 4회 이상일 때 박쥐의 개체는 86%에서 95%까지 감소했다.

일반적으로 인간은 55장에서 논의된 포식자-먹이 또는 공생 관계와 같이 종간에 발생하는 상호 작용을 자주 변화시킨다. 이러한 붕괴는 생태계 전체에 광범위하게 영향을 미친다. 그 실례로 꽃가루를 운반해 주는 곤충들이 살충제에 의해 모두 죽어버린다면 식물은 생식을 할 수 없게 되기 때문에, 식물의 씨앗을 먹이로 하는 모든 식물 의존성 동물들에게 영향을 미친다.

Habitat fragmentation

서식지의 소실은 흔히 어떤 개체군의 개체 수의 감소를 가져올 뿐만 아니라 개체군을 분할하여 개체군 간의 연결 고리를 끊어 패치(patches) 형태의 조각으로 만든다(그림 W7.12). 서식지는 도로나 주거지가 숲을 침범하여 뚜렷하지 않게 조각으로 분할될 수도 있다. 이런 결과는 서식지에 살고 있는 개체군을 일련의 더 작은 개체군으로 만들고, 종종 범위 크기와 멸종률 사이의 관계 때문에 비참한 결과를 초래한다.

서식지가 분할되고 그 크기가 계속 줄어들면서, 서식지의 상대적인 경계 혹은 가장자리 면적은 증가한다. **가장자리 효과(edge effect)**는 개체군의 생존 기회를 상당히 많이 감소시킬 수 있다. 주변에서의 미기후 변화(기온, 바람, 습도)는 많은 생물종들이 살아갈 수 있는 좋은 서식지를 감소시키는데, 이것은 물리적인 서식지 분할보다 더 큰 영향을 준다. 예를 들어 열대우림의 고립 분할된 지역의 경우 가장자리에 서식하는 나무들은 태양광에 직접적으로 노출되어 결국 이런 나무들은 평상시에 숲속의 서늘하고 습한 환경에서 서식하던 나무들보다 더 뜨겁고, 건조한 환경에서 서식하게 되면서 나무들의 생존과 성장에 부정적인 영향을 미치게 된다. 한 연구에 따르면 숲의 가장자리 100 m 이내에 서식하고 있는 수목의 생체량은 서식지가 분할된 이후 첫 17년 동안 36%까지 감소했다.

또한 주변 서식지가 증가하면 몇몇 종의 기생 동·식물 및 포식 동물들에게 개방된 공간을 제공하게 된다. 따라서 분할된 서식지의 크기가 감소하면 할수록, 가장자리로부터 떨어져 있는 서식지의 상

그림 W7.13 서식지 분할에 대한 연구.

브라질 마나우스(Manaus)의 토지 소유자들은 다양한 크기의 열대 우림을 보존하여 패치 크기가 멸종에 미치는 영향을 조사하기로 합의했다. 생물 다양성은 벌목 전후의 격리된 패치에서 모니터링되었다. 서식지 분할은 패치 내에서 중요한 종 손실을 가져왔다. 작은 조각에서 사라진 대표적인 종 중의 하나가 병장개미이다.



대적 비율은 감소하게 되고, 결과적으로 더욱더 많은 서식지가 마련되어 그 속에 다양한 종이 서식할 수 있게 된다. 서식지 분할은 다양한 생물종의 지역적인 멸종을 가져오게 한다.

서식지 분할의 영향에 대한 사례는 브라질의 마나우스(Manaus) 지역에서 수행된 연구에서 확실하게 볼 수 있는데, 열대우림이 상업적으로 벌목되면서 서식지 분할이 일어난 것이다. 토지 소유자들은 다양한 크기의 열대림의 패치를 보존하는데 동의했으며, 벌목 전에 이들 지역에서 조사를 실시하였다. 벌목이 진행된 이후 현재 고립된 패치로부터 종들은 사라지기 시작했다(그림 W7.13). 넓은 서식 범위가 필요한 원숭이들이 제일 먼저 사라졌고, 행군하는 병장개미에 의해 밀려나온 곤충을 섭식하는 새들은 개미 개체군이 너무 좁은 서식지에서 집단을 유지할 수 없게 되자 새들도 사라지게 되었다. 예상된 바와 같이 멸종률은 패치의 크기와 반비례하지만, 크기가 가장 큰 서식지 패치(100 헥타르)도 15년도 안되어 서식하는 조류 종의 절반이 사라졌다. 원숭이와 같은 몇몇 종들은 넓은 서식지 패치를 필요로 하기 때문에 넓은 서식지 패치는 생물 다양성을 높게 유지하기 위해서는 필수 불가결한 요인이다. 배워야 할 교훈은 보존 프로그램이 이러한 효과를 피하기 위해 적절한 크기의 서식지 파편을 제공해야 한다는 것이다.

사례연구 : 조류(명금류)의 감소

1966년 이후 미국의 어류 및 야생동물보호국(US Fish and Wildlife Service)은 매년 번식조류 조사(Breeding Bird Survey)를 실시하는데, 여기에는 수천 명의 아마추어 조류학자 및 조류 감시자들이 참가하여 매년 조류 개체 수를 측정한다. 최근에 충격적인 결과가 보고되었는데, 개똥지빠귀, 찌르레기, 검은 찌르레기 등과 같이

인간주변에서 1년 내내 번성하는 텃새들은 지난 50년 동안 이들의 수와 분포가 증가한 반면, 숲속 깊이 서식하는 명금류(songbird)는 심각하게 감소하고 있다. 이러한 감소는 개똥지빠귀, 피꼬리, 풍금조, 개고 마리, 멧새, 휘파람새 등과 같은 장거리 이동 철새에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 이러한 새들은 여름에는 북부의 숲에 둥지를 틀지만, 겨울에는 남미나 중미 혹은 카리브해 연안의 섬에서 겨울을 보낸다.

미국동부의 여러 지역에서는 열대 조류 종의 3/4 이상이 심각한 감소 추세를 보이고 있다. 예를 들어 워싱턴 D.C.에 있는 락크릭 공원(Rock Creek Park)에서는 지난 20년 동안 90%의 철새가 보이지 않게 되었다. 전국적으로 미국 딱새는 1970년대에 10년 동안 약 50%가 감소했다. 텍사스와 루이지애나에 위치한 국가기상청(NWS)의 레이더 사진 연구 결과의 분석에 따르면, 매년 봄 동안 멕시코만을 이동하는 새들은 1960년대에 비하여 약 50% 감소했다고 보고하고 있다. 이러한 결과는 전체 조류 10억 마리 중에서 절반이 사라졌다는 것을 의미한다.

이러한 광범위한 감소를 초래한 가장 큰 원인으로는 서식지 분할과 서식지소실을 꼽을 수 있다. 서식지의 분할 및 미국과 캐나다 접경에서 하절기 부화 실패는 명금류의 번식에 상당한 부정적 영향을 미치고 있다. 멸종 위기에 처한 대부분 조류 종은 깊은 숲에 적응하고, 이들이 번식하여 새끼들을 기르는데, 한쌍 당 25 에이커의 서식지 면적 이 필요하다. 그러나 도로나 개발에 의해 산림이 파괴됨에 따라 이 새들을 주변 숲에서 찾는 것은 점점 더 어려워지고 있는 실정이다.

둘째로, 더 중요한 요인은 중미와 남미에서 겨울철 서식지의 이용성 여부이다. 숲이 파괴되고 황폐화됨에 따라 많은 철새 종들이 겨울

서식지를 잃고 있다. 여름과 겨울 서식지 모두 파괴되는 이중 악재(double-whammy)는 많은 종들에게 너무 많은데, 이는 많은 종에서 관찰되는 급격한 개체수 감소를 설명한다.

과도한 남획은 종을 빠르게 파괴한다.

인간이 사냥하거나 포획한 생물종들은 초기에 그 종이 매우 풍부하였더라도 현재 아주 중대한 멸종 위기에 놓여있다. 1세기 전 북미의 하늘은 나그네 비둘기(pouter pigeons) 등의 거대한 무리에 의해 덮힐 만큼 가득 찼지만, 육질이 맛이 있다고 소문나면서 이들을 멸종 위기로 몰아갔다. 거대한 무리를 지어 북미의 중앙 평원을 이동하는 들소(bison)는 간신히 같은 운명을 면했다.

상업적 동기부여에 따른 과도한 남획

상업적 시장은 흔히 종의 남획을 가져온다. 그 실례로 국제적 모피 무역은 친칠라(chinchilla)나 비큐니(vicuna), 수달(otter) 그리고 많은 고양이과 종의 상당수 개체수를 감소시켰다. 또 다른 예로 상업적으로 매우 가치가 있는 나무의 벌목도 있는데, 서인도의 마호가니 나무(Swietenia mahogani)의 대부분은 이미 벌목되었고, 레바논의 고산지에 넓게 퍼진 광범위한 삼나무림 역시 오늘날 극소수의 독립된 숲으로만 남아있다.

사례연구 : 고래

지구상에 살아있는 동물들 중에서 가장 크기가 큰 고래는 상업적인 포경(whaling)에 의해 그 수가 감소하여, 오늘날 전 세계의 해양에서 보기가 드물게 되었다. 20세기 초 석유로부터 가공된 값이 싸고, 고품질의 오일이 생산되기 전에는 고래 지방으로부터 얻어지는 기름이 세계 시장에서 유통되었다. 또한 수염고래가 바닷물에서 플랑크톤을 걸러내기 위해 사용한 “베일린”이라는 이름의 미세 격자 모양의 구조물이 여성용 의복에 사용되었다. 고래는 매우 큰 동물이기 때문에, 포획된 각각의 개체는 상당한 상업적 가치를 지닌다. 18세기에 상업적 포경업에 의해 가장 큰 피해를 입은 것은 참고래(right whale)다. 참고래는 행동이 느리고 포획하기 용이하며, 죽었을 때 가라앉지 않기 때문에 참고래라는 이름을 얻게 되었고, 150배럴의 기름과 풍부한 고래의 수염을 얻을 수 있었기 때문에 상업적으로 포경하는 최적의 고래로 뽑혔다.

참고래가 감소함에 따라 포경 선원들은 회색고래, 혹등고래, 북극고래로 대상을 바꾸었다. 이들의 수가 감소함에 따라 포경 선원들은 모든 고래들 중에서 가장 큰 흰긴수염고래(blue whale)로 대상을 바꾸었으며, 이들이 대량으로 포경되었을 때, 긴수염고래(fin whale)

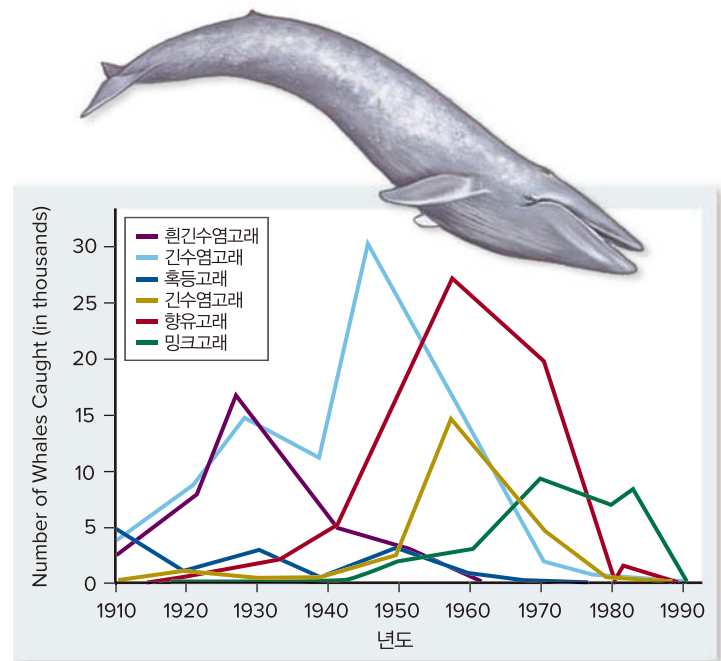


그림 W7.14 20세기 일부 고래 종의 세계.

여획량 각 종은 차례로 포획을 당했고, 그 수가 너무 줄어들어 상업적으로 수익을 낼 수 없게 되었다.

탐구문제 사냥이 중단되어도 고래 개체수가 회복되지 못하는 이유는 무엇일까?

자료 분석 5데이터 분석 20세기 초에는 두 종의 고래만이 심하게 사냥되었다. 이 그래프는 다른 종의 사냥 증가 시기에 대한 설명을 제공하는가?

로 그리고 다음으로는 정어리고래(Sei whale), 그리고 향유고래(sperm whale)로 대상을 바꾸어갔다. 고래의 모든 종이 상업적 포획의 대상이 됨에 따라 고래의 개체수는 급격히 감소하기 시작했다(그림 W7.14).

참고래의 포경은 1935년에 불법으로 지정되었으며, 그때까지 참고래는 멸종의 직전까지 몰려 그 수는 5% 미만이 되었다. 그 이후로 보호되었지만, 북대서양과 북태평양의 참고래 수는 예전 수준으로 회복되지 않고 있다. 1946년에 몇몇 다른 종들이 멸종될 위기에 직면하였고, 포경이 허용된 국가들은 상업적 포경을 규제

하기 위해 국제포경위원회(International Whaling Commission IWC)를 구성했다. 닭장을 지키는 여우처럼 IWC는 수 십 년 동안 고래의 사냥을 제한하는데 별 도움이 되지 않았고, 고래의 개체수는 계속해서 급격하게 감소하였다

결국 1974년 소형 밍크고래를 포함한 모든 고래의 개체 수가 감소할 때, IWC는 흰긴수염고래, 회색고래, 향유고래의 포경을 금지하였고, 다른 종들에 대한 부분적인 금지법을 제정하였다. 이런 법률은

아주 빈번하게 위반되어 결국 1986년 IWC는 모든 상업적 포경에 대하여 전 세계적인 포경 활동 정지를 입법화하였다. 과학적 연구를 가장한 몇몇 상업적 포경은 빈번하게 계속되었지만, 지난 30년 동안 연간 포경 활동은 극적으로 감소하였다.

몇몇 종들은 멸종 위기에서 회복되는 것으로 나타났지만, 다른 종들은 그렇지 않았다. 혹등고래의 수는 1960년대 초 이후로 연간 약 10% 정도 증가하면서 개체수가 2배 이상이 증가하였고, 태평양 회색고래는 1000마리 미만의 포경업 제한 한계선을 입법화 한 이후 약 2만 마리 정도의 수준으로 완전히 회복되었다. 그에 비해 정어리고래, 긴수염고래, 북대서양 참고래는 아직 회복되지 않았고, 이들이 회복될지의 여부는 아무도 모른다.

유입된 외래종은 토착종과 서식지를 위협한다

한 종이 지리학적 범위를 확장해 가는 자연적 과인을 개체군 형성(colonization)은 다양한 방법으로 일어난다. 한 무리의 새 떼가 생겨나면, 새는 과실을 먹고 그 종자를 먼 지역 혹은 해수면이 낮은 지역에 배설하게 되고, 이는 이전에 격리된 장소와 그렇지 않았던 곳을 연결시켜주는 역할을 한다. 새로운 개체군이 정착하는 이런 과정은 드물게 일어나지만, 일단 일어나면 자연 군집의 변화는 크게 일어날 수 있다. 그 이유는 이런 개체군 형성은 이전에 전혀 접촉한 적이 없던 새로운 생물종을 동반해오기 때문이다. 결과적으로 생태학적 상호작용은 강하게 일어날 수 있는데, 그 이유는 이런 종들이 포식자를 피하거나 경쟁을 최소화하는 방향으로 진화하지 않았기 때문이다.

개체군 형성에 대한 인간의 영향

불행히도 인간의 활동 때문에 자연적 생물 정착은 최근에 아주 희소하게 되었다. 종 도입은 인간 활동에 의해 다양한 방법으로 발생되는데, 때때로 의도적이기도 하지만 보통은 그렇지 않다. 식물과 동물은 대규모 해양 선박의 선박 평형수(ballast water)에 의해 이송되고, 나무로 만들어진 상자 안에 들어있는 딱정벌레의 애벌레, 보트, 자동차, 비행기 속의 밀입국, 심지어는 신발 바닥에 붙어있는 진흙 속의 식물 종자 및 포자 형태로 이송될 수 있다. 몇몇 연구자의 연구를 종합해보면 약 5만 종의 많은 종들이 미국에 도입된 것으로 추정되고 있다.

인간에 의한 종 도입 효과는 엄청나게 큰 것으로 나타났다. 미국에서만 하더라도 외래종 퇴치에 소요되는 경제적인 비용을 연간 140억 달러로 추정하고 있다. 예를 들어 미국 콜로라도 주에서 외래 도입된 12종의 식물은 수십만 에이커 이상의 면적을 덮고 있는 것으로 나타났다. 이들 종들 중 단지 3종이 밀을 재배하는 농부에게 수천만



그림 W7.15 파이프를 막고 있는 얼룩무늬 홍합(*Dreissena polymorpha*). 드이 홍합은 유럽에서 유입된 것으로, 현재 북미의 강들에서 주요한 문제가 되고 있다.

달러의 비용을 소비하게 했다. 같은 시기에 유럽에서 들어온 잎이 우거진 등대풀(spurge)은 토종 목초를 몰아내고 소를 위한 방목장을 손상시켜 연간 1억 4천 4백만 달러의 비용이 낭비되고 있다. 흑해 지역에서 토종 연체동물인 얼룩무늬 홍합(zebra mussel)은 미국 동부와 중부 전체에 걸쳐 큰 문제가 되고 있다. 이들의 서식 평균 밀도는 700,000/m²로 수력발전소의 흡입용 파이프의 흐름을 방해하여 연간 30억~50억 달러의 피해를 주고 있는 것으로 평가되었다(**그림 W7.15**).

본래의 토종 생태계에 외래종 도입은 마찬가지로 극적인 영향을 준다. 그 중에서도 섬들은 크게 영향을 받았다. 예를 들어 55장에서 언급한 바와 같이 등대를 지키는 고양이 한 종은 스테판 섬의 참새를 멸종시켰다. 남태평양에서 들쥐는 그곳에 사는 새를 완전히 소멸시키는 결과를 가져왔는데, 이는 조류가 바닥에 둥지를 틀며, 진화적으로 포식자에 대한 방어 체계가 없었기 때문에 쥐들로 인해 크게 영향을 받은 것이다. 최근 괌(Guam)섬에 도입된 갈색 나무뱀은 본래 살던 산새의 모든 종을 제거하였다.

하와이에서는 약간 다른 문제가 보고되었다. 말라리아에 내성을 가지고 있지 않은 본토종들이 외래 도입된 모기들이 가지고 온 말라리아로 인해 본토 동물상의 70% 이상인 100종 이상이 멸종되었거나, 혹은 모기가 살 수 없는 지대가 높고, 추운 고도지역에 제한되어 분포하고 있다(**그림 W7.16**).

도입종의 영향은 항상 직접적이지는 않지만, 생태계를 통하여 반영될 수도 있다. 예를 들어 아르헨티나 개미는 미국 남부에 퍼져 토종 개미의 개체수를 급격히 감소시켰다. 이런 토종 개미의 멸종은 토



그림 W7.16 멸종 위기에 처한 하와이 조류인 아키아폴라우(*Hemignathus munroi*)와 파릴라(*Loxioides bailleui*).

하와이 토종새의 3분의 2 이상은 현재 멸종했거나 개체수가 크게 감소하였다. 이 섬들에 전파되는 모기들과 함께 유입된 조류 말라리아가 주요 원인이다.

종 개미를 먹고 사는 해안 뱀도마뱀(*Phrynosoma Coronatum*)에 악영향을 주었다. 개미의 멸종으로 도마뱀은 선호하지 않는 개미 종을 섭식하였다. 게다가 본토종 개미는 씨앗을 먹어 주변에 씨앗 전파에 중요한 역할을 하는데 비해 아르헨티나 개미는 씨앗을 섭식하지 않아 그러지 못했다. 아르헨티나 개미가 출현한 남아프리카에서는 씨앗을 퍼트리는 분산자가 사라져 최소한 한 종의 식물에서 생식 성공률이 감소한 것으로 나타났다.

그러나 도입종의 가장 심한 피해 결과는 전체 생태계가 변할 때 나타난다. 몇몇 도입된 식물종은 서식지를 완전히 황폐화시킬 수 있고, 본토종을 없애지게 하여 단일종 생존지역(즉, 단일종이 점유하는 지역)으로 변하게 한다. 캘리포니아에서는 한때 생산성이 높은 목초지였던 곳이 현재는 노란별 영경귀(*Centaurea solstitialis*)의 단일종이 4백만 헥타르의 광활한 면적을 차지하고 있다. 하와이에서는 카나리아 제도에 서식하는 작은 나무인 *Myrica faya*가 널리 퍼졌다. 이들 종의 질소 고정능이 매우 높기 때문에 토양의 질소 함량을 90배까지 증가시켰고, 그 결과 질소를 이용하는 종이 퍼지게 되었다.

도입된 종과 싸우기 위한 노력

일단 외래 도입종이 자리를 잡기 시작하면, 이들을 완전히 없애는 것은 매우 어렵고, 비용이 많이 들며, 시간도 많이 소요된다. 특정 소규모 섬에서의 염소와 토끼 제거와 같은 몇몇 사례들은 성공적이었지만, 다른 많은 노력들은 모두 실패하였다. 도입종에 의한 파괴를 막는 최선의 방법은 이들이 최초의 장소로 도입되는 것을 막는 것이다. 말하기는 쉽지만 정부 기관들은 이러한 외래 도입종이 자리를 잡기 전에 종의 확산을 방지할 수 있는 대안을 마련해야 한다

사례연구 : 빅토리아 호수의 시클리드

빅토리아 호수(Lake Victoria)는 크기가 엄청나게 크고, 수십이

얕은 담수 바다로 적도의 동 아프리카 중심부에 위치해 있고, 스위스 크 기만한 면적을 가지고 있다. 이 호수에는 과거에 450종이 넘는 시클리드(cichlid) 종이 서식할 만큼 믿기 어려운 정도의 다양한 군집의 서식지였다(그림 22.17 참조). 시클리드는 크기가 작고, 농어와 유사한 어류로 물고기 길이는 5—13 cm 범위에 있고, 수컷들은 매우 다양한 색깔을 가지고 있다. 그러나 오늘날 이러한 시클리드 종의 대부분은 멸종 위기에 처해 있거나 멸종되었다.

많은 시클리드의 고유종이 갑자기 사라지게 된 원인은 과연 무엇일까? 1954년 맛이 아주 좋아 상업적 가치가 있는 어류인 나일농어가 빅토리아 호수에 놓여있는 우간다 수역에 인위적으로 도입되었다. 길이가 1 m 이상까지 자라는 나일농어는 수산업의 새로운 근간을 만들었다(그림 W7.17). 수십 년 동안 이런 농어가 중대한 영향을



그림 W7.17 나일농어 (*Lates niloticus*).

길이 2 m, 질량 200 kg에 달하는 이 포식성 물고기는 잠재적인 식량 공급원으로 빅토리아 호수에 도입되었다. 이 종은 결국 수백 종의 시클리드류를 멸종하게 만들었다.

미칠 것이라고는 전혀 알수 없었다. 30년이 지난 1978년까지 나일농어는 호수로부터 포획한 모든 어류 생산량의 2% 미만을 차지하였다.

그 후 나일농어의 개체수는 폭발적으로 증가하였고, 급속하게 호수 전체로 퍼져 시클리드를 포식하게 되는 문제가 발생하였다. 1986년에는 호수에서 잡힌 전체 어류의 80%가 나일농어였으며, 고유종인 시클리드는 사실상 사라졌다. 개방된 구역에서 서식하는 모든 종을 포함하여, 70%가 넘는 시클리드의 종이 사라져버렸다.

그렇다면 무엇이 시클리드의 대멸종을 야기하였을까? 그 방아쇠 역할을 한 것은 부영양화로 여겨지고 있다. 1978년 이전에는 빅토리아 호수의 용존 산소 수준은 모든 깊이에서 높게 유지되었고, 이런 농도는 수심 60m 이상까지도 나타났다. 그러나 1989년까지 계속된 농경지에서 흘러나오는 물, 마을이나 도시의 하수에 포함된 높은 영양분은 호수에 과잉 유입되면서 호수의 심층부에 심각한 산소 고갈이 야기되었고, 이는 적조 현상을 유발시켰다. 초기에 조류(algae)를 섭식하는 시클리드는 이러한 그들의 먹이 공급 증가에 대한 반응으로 그들의 개체 수가 증가할 것이라 생각되었지만, 과거 비슷한 적조 현

상이 일어났을 동안의 상황과는 다르게 나일농어가 이 상황에서 더 유익한 것으로 나타났다. 급작스러운 조류 증가로 초기의 시클리드 개체의 증가는 나일농어의 개체수를 폭발적으로 증가시켰고, 나일농어는 먹을 수 있는 모든 시클리드를 단숨에 먹어치워 버린 것이다.

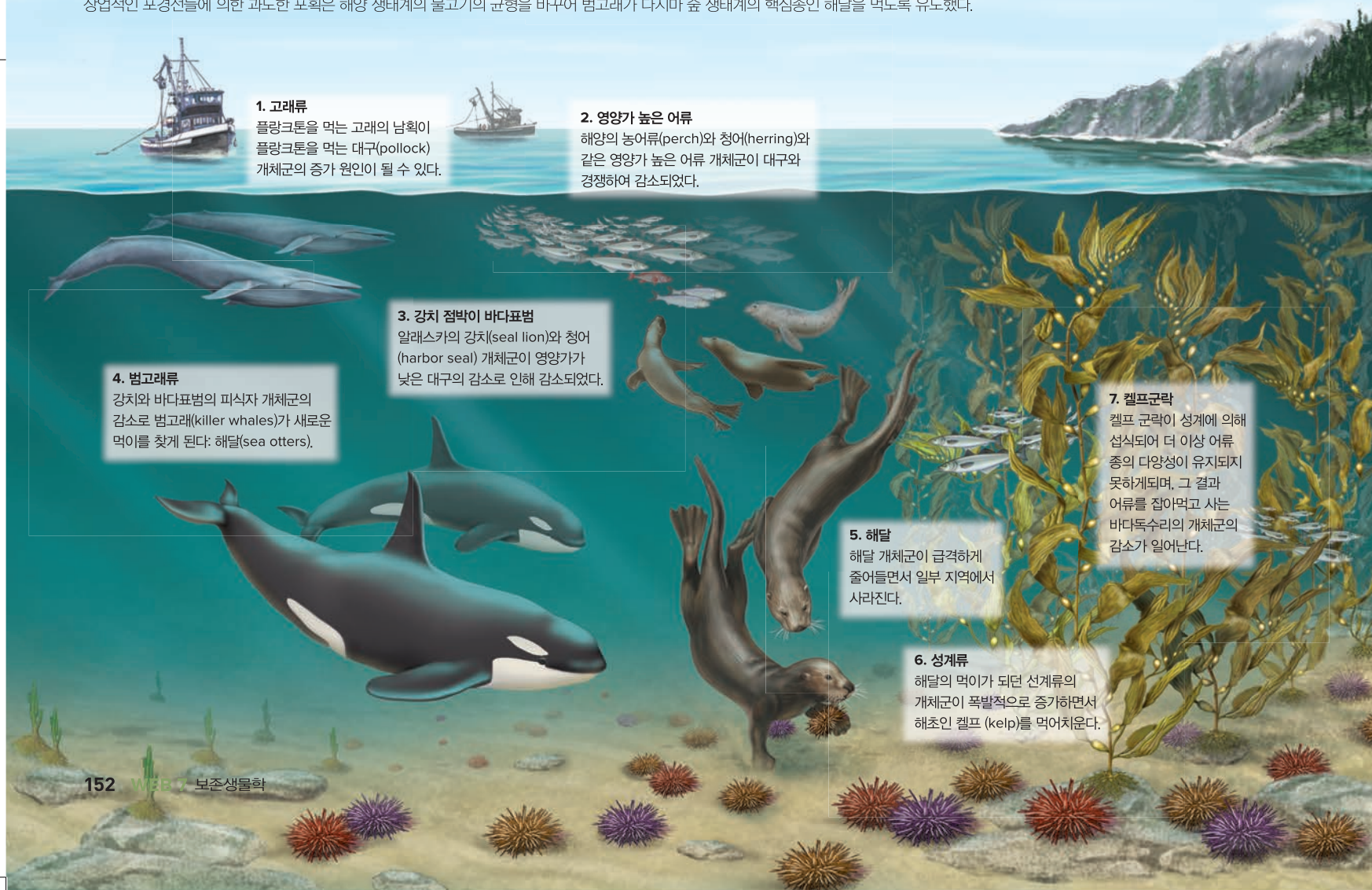
1990년 이후 빅토리아 호수의 상황은 더 악화되었는데, 이는 남미로부터 도입된 부유성 수초인 히아신스(*Eichhornia crassipes*) 때문이었다. 부영양화(eutrophic conditions)가 일어난 상태에서 수초의 생식은 빠르게 일어났고, 이 수초의 두꺼운 매트가 연안대 전체를 뒤덮게 되어 결국 개방 수역에 살지 않고 연안대에 서식하는 시클리드의 연안 서식처에 산소 공급이 중단된 것이다.

생태계 파괴는 연쇄적 종의 멸종을 야기한다

종들은 그들의 생태학적 먹이 연쇄가 붕괴될 때 멸종하기 쉽다. 생태계 안에서 많은 종들 사이의 연계 때문에(56장 참고), 인간 활동이 한 종에 영향을 미칠 경우 궁극적으로 다른 많은 종들에게 악영향을 미친다.

그림 W7.18 켈프 (다시마) 군락 생태계의 파괴.

상업적인 포경선들에 의한 과도한 포획은 해양 생태계의 물고기의 균형을 바꾸어 범고래가 다시마 숲 생태계의 핵심종인 해달을 먹도록 유도했다.



1. 고래류

플랑크톤을 먹는 고래의 남획이 플랑크톤을 먹는 대구(pollock) 개체군의 증가 원인이 될 수 있다.

2. 영양가 높은 어류

해양의 농어류(perch)와 청어(herring)와 같은 영양가 높은 어류 개체군이 대구와 경쟁하여 감소되었다.

3. 강치 점박이 바다표범

알래스카의 강치(seal lion)와 청어(harbor seal) 개체군이 영양가가 낮은 대구의 감소로 인해 감소되었다.

4. 범고래류

강치와 바다표범의 피식자 개체군의 감소로 범고래(killer whales)가 새로운 먹이를 찾게 된다: 해달(sea otters).

5. 해달

해달 개체군이 급격하게 줄어들면서 일부 지역에서 사라진다.

6. 성게류

해달의 먹이가 되던 성게류의 개체군이 폭발적으로 증가하면서 해초인 켈프(kelp)를 먹어치운다.

7. 켈프군락

켈프 군락이 성계에 의해 섭식되어 더 이상 어류 종의 다양성이 유지되지 못하게되며, 그 결과 어류를 잡아먹고 사는 바다독수리의 개체군의 감소가 일어난다.

최근의 사례로 알래스카와 알류산 열도를 흐르는 차가운 해수에 서식하는 해달(sea otters)이 이에 해당된다. 해달의 개체수는 최근 몇 해 동안 급격하게 감소하였는데, 500마일의 해안선에서 해달의 개체수는 1970년대의 5만 3천 마리에서 최근에는 6천마리 정도로 약 90% 가까이 급감하였다. 이런 비극적인 감소에 대한 조사에서 해양 생태 학자들은 해양의 생물종들과 해저 켈프 숲 생태계 사이에서 먹이 연쇄의 상호작용 및 어떤 생물종의 치사에 의한 연쇄적 생물 치사 도미노 현상은 56장에서 논의된 바와 같은 하향식(top-down) 및 상향식(bottom-up)으로 일련의 상호작용을 밝혀냈다.

사례연구 : 알래스카의 근해 서식처

초기에 해달(sea otter) 개체수의 감소를 가져오게 한 것은 이 절의 도입부에서 언급한 바와 같이 과도한 상업적 포경업 때문이었다. 동물성 플랑크톤의 수를 조절해 고래가 없어지게 되면서 해양의 동물성 플랑크톤은 변성하게 되고, 이는 풍부한 동물성 플랑크톤을 먹고 사는 대구류(pollock)의 급증을 야기했다. 이러한 풍부한 먹이 공급으로 대구류는 청어와 대양농어와 같은 북태평양의 어류와의 경쟁에서 우점하게 되고, 결국 1970년대에 다른 어류들의 수를 급감하게 만들었다.

이후에 연쇄적인 도미노 효과는 가속되기 시작했다. 영양이 풍부한 양식 어류의 감소는 알래스카의 바다사자와 잔점박이 바다표범 개체수에서 뒤이은 충돌로 이어졌고, 그 때문에 대구는 충분한 영양분을 공급하지 못했다. 이러한 감소는 또한 범고래(killer whales)이라고도 함)가 먹이의 가치가 떨어지는 고래를 먹지 않고 대신에 바다표범과 바다사자를 먹이로 바꾼 것에 의해 가속화되었을지도 모른다; 1970년대 이후로 이러한 기각류(물개 및 바다사자류)의 수가 급격히 감소하였다.

기각류 개체 수의 급감에 따라 몇몇 범고래들은 먹이 부족에 직면하였고, 차선책으로 먹이를 해달로 바꾸었다. 대양으로부터 범고래들이 들어가기에 입구가 매우 좁고 얇은 만에서 해달은 약 12% 감소한데 비해, 범고래들이 쉽게 드나들 수 있는 만에서는 한 해 동안 2/3의 해달이 사라졌다.

성계를 먹는 해달이 사라지면서 성계의 개체 수는 폭발적으로 증가하였고, 성계들이 다시마(켈프)를 먹음으로써, 다시마 군락이 파괴되었고, 결국은 다시마 군락 생태계가 완전히 황폐화되었다(그림 W7.18). 그 결과로 다시마 군락에서 서식하는 어류인 독중개류 및 쥐노래미류는 감소하기 시작했다

핵심종의 소실

55장에서 살펴본 것처럼 핵심종(keystone species)은 일정 지역

의 생태계에서 구조와 기능을 유지하는데 결정적인 역할을 하는 종으로 단순히 종 풍부도를 기반으로 할 때 기대 이상으로 영향을 주는 종이다. 그림 W7.18에서 보는 바와 같이 해달은 켈프 군락 생태계의 핵심종이며, 이들의 사라짐은 불행한 결과를 초래한다.

핵심종은 정량적 개념이라기 보다는 정성적 개념(질적인 개념)으로 어떤 군집 내에서 특히 중요한 역할을 하는 종을 지칭하며, 핵심종의 특성은 보통 이들이 군집에 미치는 영향의 크기로서 나타난다.

사례연구 : 왕박쥐류

구대륙 열대지방에서 박쥐(그림 W7.19)의 일종인 "왕박쥐"의 많은 종들이 심하게 쇠퇴한 것은 이들의 급격한 감소는 핵심종의 소실이 같은 생태계 내에서 살고 있는 다른 종들에게 어떻게 극적으로 악영향을 미치고, 어떻게 크나큰 멸종을 야기하는지에 관한 연구 사례를 제공해 준다.

이 박쥐들은 태평양과 인도양의 섬에서 서식하는 식물 종과 매우 밀접한 관계가 있다. 과일 박쥐류는 약 200여종을 포함하고 있고, 대략 이들의 1/4 정도가 왕박쥐속(Pteropus)에 속하며, 보통 남태평양의 섬에 널리 분포하고 있어 이들은 꽃가루를 전달해 주는 유일한 수분 매개자인 동시에 종자를 퍼뜨리는 역할을 한다.

사모아(Smoa)에서의 연구에 따르면, 약 80~100%의 종자가 건기 동안에 왕박쥐류에 의해 지면에 떨어진다고 보고하고 있다. 이들은 열매를 먹고? 먼 거리를 이동하는 도중에 종자를 배설한다. 많은



그림 W7.19 핵심종의 중요성.

과일 먹는 박쥐의 한 종류인 큰박쥐류는 오래된 열대 섬의 핵심종이다. 큰박쥐류는 많은 식물들의 수분과 씨앗의 전파에 있어 핵심적인 역할을 한다. 사냥과 서식지 파괴로 인한 이들의 감소는 많은 남태평양 군도의 생태계에 치명적인 영향을 미치고 있다.

식물 종들은 수분을 전적으로 이러한 박쥐들에 의존한다. 야간에 개화하는 몇몇 꽃의 종들은 과일 박쥐만 수분 역할을 할 수 있도록 진화되었고, 다른 잠재적인 수분 매개자에 의한 수분 역할을 막을 수 있도록 진화되었다.

괌(Guam)에서는 최근 왕박쥐류 두 종이 거의 멸종되어 생태계에 큰 영향을 주었다. 식물학자들은 몇몇 식물종은 열매를 아예 맺지 못하였거나 아주 미미하게 열매를 맺어 정상일 때 보다 훨씬 적은 과실을 생산한 것을 알게 되었는데, 이는 열매가 원래 나무로부터 멀리 퍼지지 못하기 때문에 묘목은 보통 이미 성숙한 나무와 경쟁할 수 밖에 없다.

왕박쥐는 식량이나 스포츠를 목적으로 한 인간의 사냥 및 이들을 유해 동물로 생각하는 과수원 농부에 의해 멸종 위기에 처해있다. 왕박쥐는 백만 마리 정도에 이르기까지 매우 큰 집단으로 떼 지어 살기 때문에 종 감소에 특히 취약하다. 이들은 규칙적이고 예측할 수 있는 양상으로 행동하기 때문에 이들이 머무르는 곳을 쉽게 찾아낼 수 있고, 사냥꾼들은 한번에 수천마리를 쉽게 사냥할 수 있기 때문이다.

왕박쥐류 중 특정 종을 보호하기 위한 프로그램들은 이제 막 시작되었다. 한 가지 성공적인 사례로는 이 프로그램이 마다가스카르 주변 인도양에 있는 로드리게스 섬(Rodrigues Island)에서만 볼 수 있는 로드리게스 과일박쥐(*Pteropus rodricensis*)를 구한 것을 들 수 있다. 과일 박쥐의 개체 수는 1955년에 약 1,000마리에서 1974년에는 100마리 이하로 급락했는데, 이는 대부분 농업 활동으로 인한 과일박쥐의 서식처 소실 때문이었다. 1974년 이래 과일박쥐의 종은 법적으로 보호되었고, 섬의 숲 지대는 나무 심기 프로그램을 통하여 점점 커졌다. 11개의 인위적 집단 번식지가 설치되었고, 야생의 박쥐 개체수는 4,000마리까지 증가했다. 이는 법적 보호, 서식처 복원, 및 인위적 번식을 통해 매우 효과적인 보호 프로그램의 성공 사례를 만든 사례이다.

규모가 작은 집단은 특히 취약하다

앞에서 논의된 요인들 때문에 많은 종의 개체군 서식지는 점점 분할되고, 그 크기도 감소되고 있는데, 그런 개체군들은 특히 멸종되기 쉽다.

개체군 통계학적 요인들

규모가 작은 개체군들은 생존하기 어렵거나 생식력이 떨어지는 경우 멸종에 취약하다. 예를 들면 선천적으로 크기가 작은 개체군들은 홍수나 산불, 혹은 풍토병과 같은 재난을 견뎌 낼 수 있는 능력이 떨어진다. 그의 한 사례로 히스헨(heath hen)이라는 닭을 들 수 있

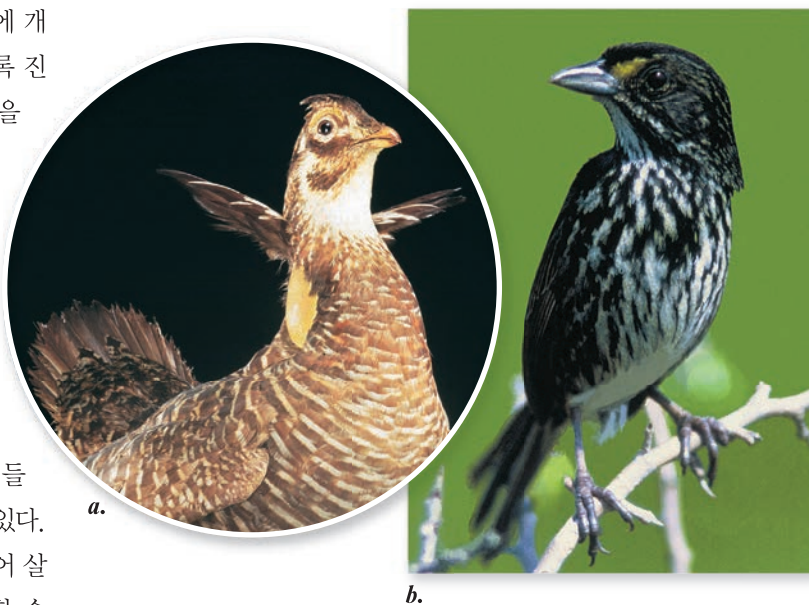


그림 W7.20 더 이상 존재하지 않는 종.

a. 1932년에 멸종된 히스헨(*Tympanuchus cupido cupido*)의 박물관 표본 b. 마지막 남아 있던 검은 해변참새(*Ammodramus maritimus nigrescens*) 수컷

다. 히스헨은 한때 미국 동부 전체에서 흔히 볼 수 있었던 종이었지만, 18, 19세기에 사냥이 거세지면서 매사추세츠의 케이프 코드 연안의 섬인 마사즈 빈야드(Martha's Vineyard)에서 단지 하나의 개체군을 제외하고 모든 개체군이 완전히 사라졌다. 보존구역을 만들어 보호하던 이 하나의 개체군은 수적으로 증가하였으나, 결국은 대부분의 보호 서식지가 산불로 파괴되었다. 생존한 소규모 개체군은 이듬 해에 특이한 포식자 새의 집단에 의해 황폐화되었으며, 그 후에 곧 유행병이 수반되었다. 이 히스헨이 마지막으로 목격된 것은 수컷으로 1932년이였다(그림 W7.20a).

개체군의 크기가 극도로 작아질 때, 어떤 불운은 최후를 가져온다. 예를 들어 검은 해변참새(dusky seaside sparrow, 그림 W7.20b)는 과거에 플로리다 연안의 동쪽에서 발견되었으나, 현재는 멸종한 종으로 5마리의 개체로 줄어들었는데, 이들은 모두 수컷에서만 일어났다. 규모가 큰 개체군에서는 모든 개체들이 하나의 성별로 될 가능성이 극히 적지만 소규모의 개체군에서는 우연하게 5회 혹은 10회 혹은 심지어 20회까지 연이어 태어나는 모든 개체들이 하나의 성별로 나타날 수 있는데, 이것은 결국 이 종을 멸종으로 이끈다. 더욱이 개체군의 크기가 매우 작을 때, 개체들은 서로를 찾는데 어려움을 겪게 되기 때문에(제56장에서 다룬 엘리 효과.), 개체군이 멸종을 향해 질주하게 된다.

유전적 변이성의 결여

크기가 작은 개체군은 두 번째 딜레마에 마주치게 된다. 이들은

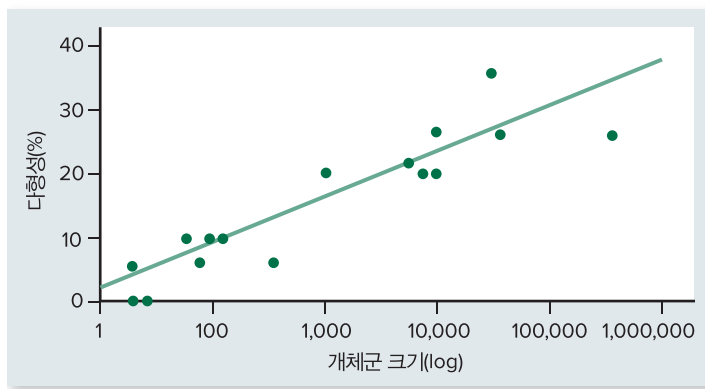


그림 W7.21 작은 개체군의 유전적 변이성 감소.

뉴질랜드의 산에 고립된 개체군에서 서식하는 수목(*Halocarpus bidwillii*)의 경우 다형성의 유전자 비율은 개체군 규모와 밀접한 관계를 가지고 있다.

? 탐구문제 왜 작은 집단은 유전적 변이를 잃게 되는가?

개체 수가 적기 때문에 개체군 내에서 유전적 변이가 잘 나타나지 않아 유전적 부동(genetic drift)이 발생한다(그림 W7.21). 규모가 작은 대부분의 개체군에서는 유전적 변이가 일어나지 않거나 일어나도 아주 적게 일어나게 되는데, 그 결과 생겨난 유전적인 측면에서의 높은 동질성은 개체군에게 큰 재앙이 될 수 있다. 유전적 변이는 이형 접합체의 이점(20장 참조)과 유전적으로 변이가 있는 개체가 2개의 치명적인 열성 대립 유전자를 가지지 않는 경향이 있기 때문에 집단에 유익하다. 변이가 일어나지 않는 개체군에서는 병약하고, 건강이 좋지 않거나 불임 개체들이 주로 나타난다. 실험실에서 작은 크기의 개체군으로 유지되는 설치류와 초파리의 집단은 세대가 지남에 따라 각 세대마다 이전 세대에 비해 약하고, 생식능력이 감소하면서 궁극적으로는 완전히 절멸된다.

비록 종의 멸종 원인이 전적으로 유전적 변이의 결핍 때문이라고 설명하기는 어렵지만, 동물원과 자연 개체군의 비교 연구에 따르면, 유전적으로 다양한 개체들은 그렇지 못한 개체군보다 훨씬 더 자연적 응력이 높은 것으로 밝혀졌다. 더욱이 오랜 시간 동안의 장기적 측면에서 볼 때, 제한된 유전적 변이를 가진 개체군은 환경 변화에 적응하는 능력이 감소했는데, 이는 인간이 환경을 여러 가지 방식으로 변화시키는 방식을 고려할 때 특히 우려된다(57장 참조).

개체군통계학적 요인과 유전적 요인의 상호작용

개체군의 크기가 감소함에 따라 개체군 통계학적 요인(demographic factors)과 유전적 요인(genetic factors)은 서로 연계되어 “멸종의 소용돌이(extinction vortex)”를 만들어낸다. 다시 말해 개체군이 작아짐에 따라 개체군은 수적인 측면에서 재앙에 더 취약해진다.

유전적 변이가 연이어 없어지기 시작하면, 번식율이 감소되면서 개체수도 더욱 감소된다. 결국 개체군은 전부 사라지게 되지만, 이러한 종말이 하나의 특별한 요인 때문이라는 것은 맞는 생각은 아니다.

사례연구 : 프레리치킨

현재 멸종된 히스헨과 근연 관계에 있는 크기가 더 큰 프레리치킨(Prairie chicken)은 1kg의 체중을 가지고 있으며, 외향이 아주 현란하고, 화려하게 짝짓기 하는 것으로 유명한 조류이다(그림 W7.22). 일리노이주에 서식하는 초원 뇌조류는 지난 70년간 개체수가 감소하였다.

한때는 엄청난 수의 프레리치킨이 일리노이 주의 전체 지역에 서식하였으나, 1837년 쟁기가 도입되면서 뿌리를 땅에 깊게 박고 있는 초원의 풀을 제거하게 되어 초원은 농지로 전환되기 시작했다. 20세기에서는 초원이 모두 사라졌고, 1931년에 히스헨(heath hen)이 일리노이에서 지역적으로 멸종하기 시작했다. 프레리치킨은 그 수가 1933년에 2만 5천 개체에서 1962년에는 2천 마리로 주 전체에 걸쳐 감소하였다. 농업 집약도가 낮은 주변 주에서는 계속해서 번성하였다.

1962년과 1967년 일리노이주에서는 프레리치킨을 보호하려는 노력으로 조류 보호지역이 만들어졌다. 그러나, 개인 사유지인 초원과 그 곳에 서식하는 프레리치킨은 계속하여 사라졌고, 1980년대에 프레리치킨은 2개의 보호지역을 제외하고는 일리노이 주에서는 멸종되었으며, 심지어 보호 지역에서도 그 수가 감소하였다. 1990년 이 종의 평균 부화율은 91—100%였으나, 최근에는 38%까지 매우 낮아졌다. 1990년대 중반까지 각 보호구역에서 수컷의 개체 수가 6개체로 감소되었다.



그림 W7.22 짝짓기 의식.

그레이트 프레리치킨(*Tympanuchus cupido pinnatus*)의 수컷은 식도의 일부인 밝은 오렌지색 공기 주머니를 머리 양쪽에 있는 풍선으로 부풀린다. 공기가 주머니 속으로 유입되면 수 킬로미터 밖에서 들을 수 있는 3 음절 저주파 “뽀뽀뽀”가 생성된다.

보호구역에 있는 개체군에 무슨 문제가 있었던 것일까? 한 가지 주목할 만한 점은 이들 개체군은 개체군의 크기가 매우 작았고, 한 마리의 수컷이 무리를 지배했기 때문에 일리노이의 프레리치킨은 심각한 유전적 문제를 발생시킬 만큼의 유전적 변이를 상실했다는 것이다. 이러한 아이디어를 시험하기 위해 일리노이 대학의 생물학자들은 1974년과 1993년 사이에 일리노이에서 죽은 조류의 냉동 조직 샘플의 DNA를 비교하였고, 이를 통해 일리노이의 이들 조류에 유전적 다양성이 감소하는 사실을 밝혀냈다.

그 이후 연구자들은 1930대에 같은 개체군으로부터 수집한 새들의 깃털 뿌리 조직에서 DNA를 추출하였다. 이들은 일리노이의 조류들이 1970년대에 개체군이 사라지기 전 같은 장소에서 서식하던 조류들의 유전적 다양성이 무려 1/3이 사라진 것을 알게 되었다. 이와는 대조적으로, 다른 주들의 개체군에서는 유전적 변이는 높은 반면 일리노이 주에서는 낮았다

현재 일리노이 프레리치킨의 멸종을 향한 질주를 멈추게 하기 위한 단계적인 계획이 세워져 있다. 야생동물 관리자들은 유전적으로 다양한 개체군을 가진 미네소타, 캔자스, 네브라스카로부터 일리노이로 이식시키기 시작하였다. 1992년과 1996년 사이에, 다른 주에서 이식된 총 518개체의 프레리치킨은 일리노이의 개체군과 교배되었고, 1998년에 부화율은 94%까지 회복되었다. 이는 프레리치킨이 일리노이에서의 멸종으로부터 보 호되었음을 보여준다. 그러나 2011년의 우박과 2013년의 가뭄은 큰 걸림돌이었으며 개체수가 다시 돌아올 수 있는지 여부는 아직 밝혀지지 않았다.

이 장에서 강조되는 학습 내용은 일이 너무 지나치지 않도록 하는 것, 즉 단 하나의 고립된 개체군을 바탕으로 떨어뜨리지 않게 하는 것들의 중요성이다. 유전적으로 상이한 다른 개체군이 없었다면, 일리노이주의 프레리치킨은 살아남지 못하였을 것이다. 검은 해변참새(Dusky seaside sparrow)의 마지막 개체군에서 최후의 암컷이 사라졌을 때, 그곳에는 다른 지역의 암컷이 없었기 때문에 이 종은 절멸하고 말았다.

핵심 요약 W7.3

멸종의 원인은 서식지 파괴, 오염, 붕괴 및 분열 등이 있다. 과도한 증가는 개체수를 낮은 수준으로 줄이거나 완전히 제거할 수 있다. 도입된 종은 토착 집단에 큰 피해를 줄 수 있다. 마지막으로, 소규모 집단은 재앙으로부터 반동하는 능력이 적고 유전적 변이의 손실에 취약하다. 이러한 모든 요인의 상호 작용은 종의 멸종을 앞당길 수 있다.

- 멸종 위기에 처한 종의 서식지가 사라질 경우 보호하기 위해 야생에서 데리고 나오는 것이 합리적인가?

W7.4 생물다양성 위기에 대한 진화적 관점

학습 목표

1. 진화적 구조를 정의하시오.
2. 보존 문제를 완화시키는 데 있어 자연 선택과 종 분화의 잠재적인 역할에 대해 설명하시오.
3. 계통발생학적 관점이 생물다양성 보존 결정에 어떻게 영향을 미칠 수 있는지 설명하시오.

진화적 구조를 정의하시오. 보존 문제를 완화시키는 데 있어 자연 선택과 종 분화의 잠재적인 역할에 대해 설명하시오. 계통발생학적 관점이 생물다양성 보존 결정에 어떻게 영향을 미칠 수 있는지 설명하시오.

진화생물학은 생물다양성 위기에 대한 우리의 이해와 가능한 해결책에 어떤 기여를 하는가? 이 장의 시작 부분에서, 우리는 대량 멸종을 포함한 멸종이 지구 역사를 통틀어 진화 과정의 규칙적인 부분이라는 점에 주목했다. 진화는 생물 다양성 위기를 완화하거나 회복을 촉진하는 데 어떤 역할을 할 것인가?

진화는 멸종 위기에 처한 집단을 구할 수 있다

20장과 21장에서 보았듯이, 생물 학자들은 이제 자연 선택이 강할 때 진화적 적응이 매우 빠르게 일어날 수 있음을 깨달았다. 결과적으로 종은 인간이 부과하는 변화하는 환경에 적응할 수 있다. 실제로 몇 가지 예가 기록되어 있다. 예를 들어, 많은 개구리 멸종은 최근에 인간에 의해 전 세계로 퍼져 나간 새로 출현한 질병인 chytridiomycosis의 결과이다. 개구리 개체군은 매우 빠르게, 때로는 몇 주 만에 사라지고 많은 종들이 멸종되었다. 그러나 최근 몇 년 동안 시에라 네바다 황족 개구리(그림 W7.23)와 같은 몇몇 종은 개구리의 질병 저항성 진화의 결과로 반등하기 시작했다. 또 다른 예는 지구 온난화로 인한 겨울의 지연 발병을 이용하여 휴면되기 전 연말에 활동하도록 진화한 모기 종이다.

이러한 사례는 고무적이며 매년 더 많이 보고되고 있지만, 진화적 구조는 아마도 제한된 해결책 일 것이다. 새로운 환경 문제에 직면하여 다음과 같은 의문이 뒤따른다. 새로운 적응은 종들이 멸종되기 전에 진화할 수 있을까? 안타깝게도, 개체수가 작아지면 유전적 변이를 잃게 되며, 개체수가 감소함에 따라 구조하는 것이 점점 더 어려워진다. 많은 경우에, 이 종들이 대처해야 하는 환경적 타격은 너무



그림 W7.23 시에라 네바다 주의 노란 다리 개구리, 라나 시어래(*Rana sierrae*).

커서 빠르게 적응할 수 없다. 시원하고 어둡고 습한 열대 우림 내부에 적응한 열대 우림 딱정벌레를 생각해 보라. 특정 종의 열대 우림 식물을 먹는데 특화된 것일 수 있다. 숲을 베어 내면 딱정벌레 개체군은 덥고 건조하며 밝은 환경에 적응해야 하며 아마도 기본적인 먹이가 부족할 것이다. 그러한 상황에서, 집단 대부분의 개체는 필요한 많은 유전적 변화가 진화하기 전에 비교적 빨리 멸종될 것이다.

인간의 서식지 단편화는 종 분화율을 증가시킬 수 있다

일부 과학자들은 인간의 환경 파괴가 모든 부정적인 결과에도 불구하고 밝은 전망을 가질 수 있다고 주목했다. 여러 면에서 우리는 종분화 증가를 촉진하고 있다. 예를 들어, 서식지 단편화로 인해 집단을 지리적으로 고립되게 한다. 마찬가지로, 침습종은 종종 자연 범위에서 멀리 떨어진 지역에 도입되어 다시 동종 이식 개체군으로 이어진다. 이러한 지리적 격리는 종종 종분화 과정의 중요한 부분이다(22장 참조). 또한 이러한 고립된 개체군은 종종 다른 환경 조건을 경험한다. 22장에서 보았듯이 격리와 상이한 선택적 압력의 조합은 종 분화에 특히 강력한 자극으로 작용한다. 또한 도입종과 고유종(또는 도입된 두 종) 간의 교잡은 특히 식물에서 종분화를 촉진할 수 있다(그림 22.10). 이 과정의 많은 예가 현재 알려져 있다(그림 W7.24).

그럼에도 불구하고 종 분화율의 증가는 현재 진행중인 멸종의 급격한 증가율을 보상하지 못할 것이다. 우선 종 분화는 일반적으로 자연 선택에 의한 적응보다 훨씬 느린 과정이다. 게다가 개체군은 지속될 수 있는 경우에만 종을 지정할 수 있으며 많은 고립된 개체군은 멸종될 가능성이 높다. 마지막으로, 우리는 전체 수와 마찬가지로 종의 정체성에 대해 더 많이 관심을 기울여야 한다. 여러 종의 얼룩말 혼합이나 노란 별 엉겅퀴(두 개의 고도로 침략적인 종의 이름)를 진



그림 W7.24 미국 북서부에서 놀라운 눈개승마(*Tragopogon mirus*)가 자라났다. 그 종은 그 지역에 도입된 두 유럽 종 사이의 잡종화의 결과로 생겨났다.

화하는 것은 많은 종류의 열대우림 전문가를 잃는 것과 반드시 같은 거래는 아니다.

생물 학자들은 계통 발생을 사용하여 보존 결정을 알린다

모든 종은 다른 면에서 같지 않다. 현대의 파충류 4종 중 하나인 뱀두목(*Rhynchocephalia*)을 생각해 보시오. 뱀두목(*Rhynchocephalia*)은 2억 4천만년 전에 처음으로 진화했으며 중생대에서 다양했지만 오늘날에는 모국인 뉴질랜드에서 멸종 위기에 처한 종인 투아타라(*tuatara*)만이 남아 있다(그림 W7.25a). 대조적으로 뱀두목(*Rhynchocephalia*)의 자매 분류군은 유린목(*Squamata*)으로, 약 1만 개의 살아있는 종을 포함한다(그림 W7.25b). 그것이 구현하는 진화적 유산을 감안할 때, 투아타라는 분명히 보존의 최우선 과제이다.

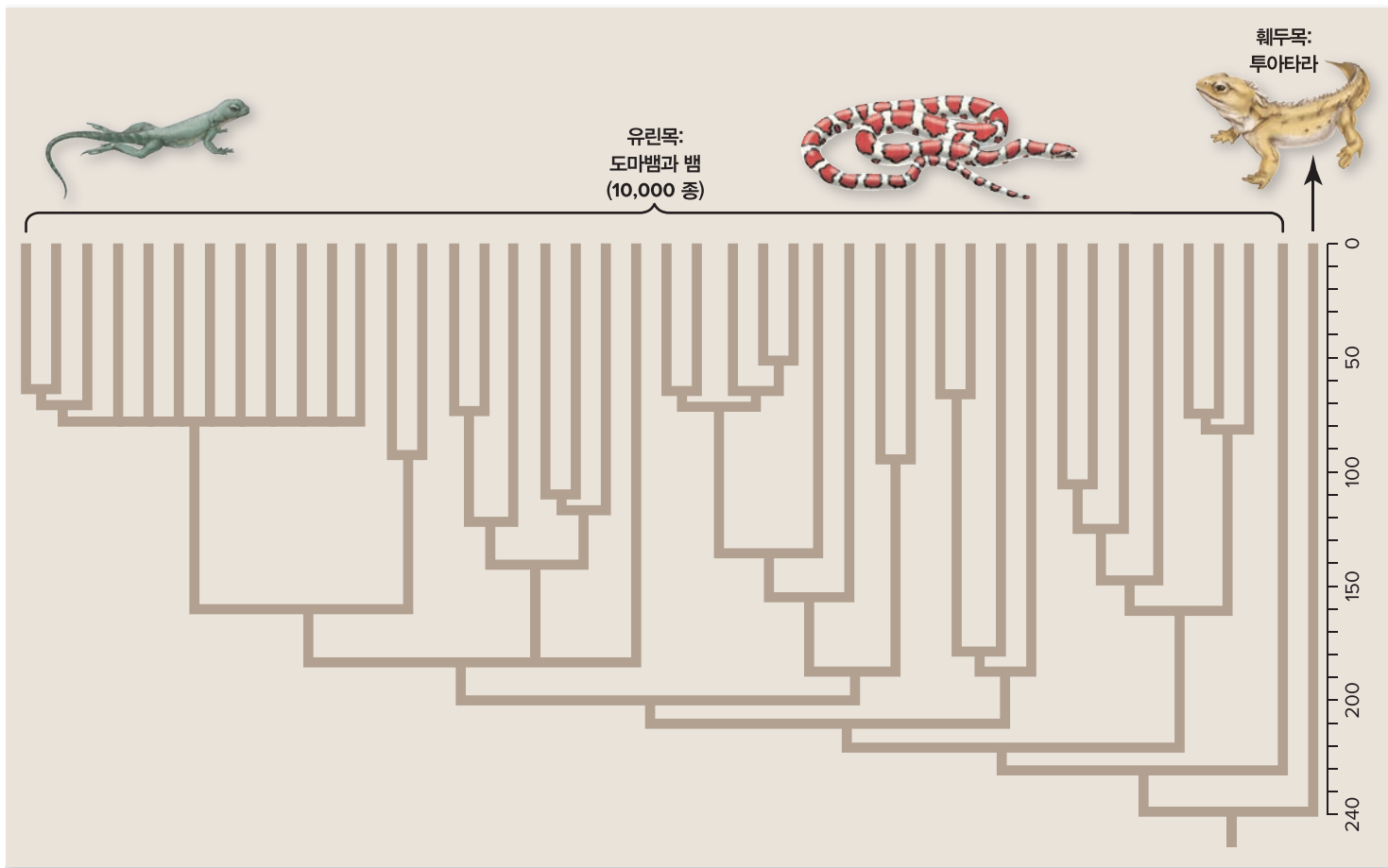
보존주의자들은 이제 희귀한 보존 자원을 어디로 보낼지 결정하는데 중요한 요소로 계통 발생에 대해 일상적으로 찾아본다. 계통 발생 관계를 고려하는 것은 두 가지 측면에서 중요하다. 첫째, 실질적인 측면에서 유연관계가 거의 없는 종은 다른 종과 공유되지 않는 독특한 특징과 적응을 가질 가능성이 더 높다. 그러한 속성은 언젠가 인간에게 유용할 수도 있다. 뱀두목(*Rhynchocephalia*)이 2억 4천만년 동안 어떤 귀중한 유전적 수법을 진화시켰는지 누가 알겠는가? 대조적으로, 400종의 아놀리스 도마뱀(*Anolis*) 중 하나와 같이 유연관계를 가진 종은 다른 종과 공유되지 않는 형질이나 유전자를 고유하게 보유할 가능성이 적다.

좀 더 미묘한 의미에서 계통 발생적으로 구별되는 종도 가치가 있다. 투아타라(*tuatara*)의 존재는 공룡 시대의 새벽으로 돌아가게 하며, 한 번 잃으면 결코 되찾을 수 없는 삶의 태피스트리의 한 부분을 상징한다.



그림 W7.25 계통발생은 보존 결정에 정보를 제공할 수 있다.

a. 투아타라(*Sphenodon punctatus*)는 휘두목(Rhynchocephalia)의 유일한 생존 그룹이다. **b.** 유린목(Squamata)인 도마뱀과 뱀은 휘두목의 자매 계열을 구성한다.



핵심 요약 W7.4

자연 선택은 변화하는 환경 조건에 가장 적합한 개체를 선호한다. 어떤 경우에는, 이러한 진화적인 구조 덕분에 생물들이 적응할 수 있지만, 많은 경우, 자연 선택이 따라잡기에는 변화가 크고 너무 빠르다.

여러 가지 이유로, 인간에 의한 환경 변화는 새로운 종의 진화 속도를 증가시킬 수 있다.

- Why are phylogenetically distinctive species particularly important to conserve?

W7.5 멸종위기종과 생태계 보존 방안

학습 목표

1. 도입된 종을 제거하고 상위 포식자를 재확립할 때의 영향을 비교하시오.
2. 환경 복원 전략을 나열하십시오.
3. 한 장소에서 발생했던 동일한 종을 복원하는 것이 항상 가능하지는 않은 이유를 설명하십시오.

종의 멸종위기에 대한 원인이 밝혀지면, 복원 계획을 수립하는 것이 가능해진다. 그리고 그 원인이 상업적인 목적을 위한 과잉 수확에 대한 것이라면, 수확을 제한하여 위협받는 종을 보호하고 규제하는 것이 가능하다. 그 원인이 서식지 교란에 의한 것이라면 서식지를 복원하는 쪽으로 계획을 수립하면 된다. 고립된 소규모 개체군(subpopulation)에서의 유전적인 변이의 감소를 막기 위해서는 유전적으로 다른 개체군의 개체를 이식하는 방식으로 해결할 수 있다. 멸종 위기에 직면한 개체군은 그 속의 개체를 포획하여 인위적 교배 프로그램(captive breeding program)을 통해 다시 다른 적절한 서식지에 재 도입시키면 된다.

이러한 문제의 해결에는 막대한 재정적 지원이 필요하다. 사건이 발생한 이후 해결하는 것보다는 “환경적인 연쇄 파괴”가 일어나지 않도록 하는 것이 훨씬 더 경제적이다. 즉, 위기 상황이 발생하기 전에 생태계를 보호하고 생물을 모니터링하는 것이 환경을 보존하고 멸종을 방지하는 데 있어서 가장 효과적인 수단이다.

유입된 종을 제거하면 토착종을 복원할 수 있다

서식지는 단 하나의 외래종 도입에 의해서 파괴되기도 한다. 이런 경우의 서식지 복원 방법은 외래종을 제거하는 것이다. 한 때 빅토리아 호수의 다양했던 시클리드 종의 복원을 위해서 멸종 위기 종을 증식시켜 다시 방류하였는데, 이를 통해 외래종인 워터 히야신스와 나일 농어의 개체들은 조절되거나 퇴치될 것이고, 부영양화는 개선될 수 있게 된다.

외래종의 퇴치가 결정되면 신속한 조치를 취하는 것이 중요하다. 아주 공격적인 아프리카 벌(killer bees라고 부름)이 우연히 브라질에 전파되었을 때, 그들은 그 지역에 단지 일부 계절에 제한적으로 남아 있었다. 그러나 현재 이들은 서쪽 반구의 대부분 지역을 점유하

고 있다.

최상위 포식자를 다시 도입하면 생태계가 복원된다

많은 지역에서 큰 포식자가 제거되었다. 56장에서 살펴본 바와 같이 최고 영양 수준을 제거하면 생태계 전체에 영향을 미친다. 따라서 생태계를 균형 잡힌 기능적 상태로 복원하려면 최상위 포식자 개체군을 재 확립해야 한다.

사례연구 : 옐로우스톤 늑대

미국의 옐로우스톤 국립공원(Yellowstone Park)은 20세기 초 공원 내 회색늑대(*Canis lupus*)의 멸종에 의해 생태계의 균형이 많이 파괴되어 왔다. 이들 포식자의 개체수를 유지하지 않게 되면, 초식동물인 엘크(elk)나 사슴의 무리수가 급격히 증가하게 되고, 이들의 증가는 식물을 위협하게 되기 때문에, 결국 엘크 무리도 먹이 부족 현상으로 굶어 죽게 되었다.

공원 내 자연적 평형상태를 복원하기 위한 시도로 1995년과 1996년에 각각 캐나다로부터 두 무리의 늑대들을 도입하여 국립공원에 방사하였다. 늑대들은 잘 적응하였고, 성공적으로 번식하여 2002년도에는 16개의 무리가 형성되었고, 2013년에는 그 개체수가 400에 이르게 되었다.

공원인근의 목장주는 늑대 복원에 대해 불편 했겠지만, 가축들에 대한 위험은 거의 없는 것으로 보고되었으며, 옐로우스톤 국립공원의 생태적 평형도 점차적으로 잘 회복되고 있었다. 엘크는 더 큰 무리를 만들어 공격을 피했고, 공격 받기 쉬운 강 근처 지역은 회피하는 것으로 나타났다. 그 결과 버드나무와 같은 하천 주변부 식물들의 수가 증가하게 되었고, 나아가 이들은 비버(beavers)에게도 먹이를 공급하여 이들이 댐을 쌓고, 옐로우스톤에서 찾아보기 드문 서식지 형태인 연못이 만들어지게 하였다. 이렇게 새롭게 복원된 서식지는 수년 동안 감소하거나 거의 자취를 감춘 딱새(redstart)와 같은 몇몇 종의 조류의 증가에도 기여하였다. 왜 이러한 회복이 옐로우스톤의 일부 지역에서는 발생하고 다른 지역에서는 발생하지 않았는지에 대해 현재 논의되고 있다.

오염의 영향은 정화 및 복원으로 되돌릴 수 있다

화학적 오염에 의해서 심각하게 훼손된 서식지는 오염물질이 정화(clean up) 되어야만 복원(rehabilitation)이 가능하다. 뉴잉글랜드에 있는 나슈아강의(Nashua River)의 복원은 이런 성공적인 사례를 제시하고 있는데, 복원 시 어떻게 협력해야 심하게 오염된 서식지를 원래 상태에 가까운 서식지로 복원하는지를 보여주고 있다.



a.



b.

그림 W7.26 서식지 복원.

위스콘신 대학의 수목원은 복원 생태학을 개척했다. a. 대초원의 복원은 1935년 11월 초기 단계였다. b. 오늘날의 대초원. 이 사진은 1935년 사진과 거의 같은 장소에서 촬영되었다.

한때 염료제조 공장으로부터 배출되는 화학물질에 의해 심하게 오염되었던 강물은 이제 깨끗해졌고 그에 따라 여가 활동에도 잘 이용되고 있다.

기능적인 지역사회와 생태계는 심하게 손상된 환경에서도 복원될 수 있다

종, 그리고 어떤 경우에는 전체 공동체가 사라지거나 돌이킬 수 없이 변형되었다. 워싱턴 주의 온대 삼림을 깨끗하게 자르는 것은 땅의 일부를 밀밭이나 아스팔트 주차장으로 개조하는 것과 마찬가지로 보존할 수 있는 여지를 거의 남기지 않는다. 이러한 상황을 만회하려면 보존보다는 복구가 필요하다. 모든 종들이 효과적으로 제거된 생태계에서, 환경보호론자들은 만약 이러한 종들이 확인할 수 있다면, 그 지역의 자연 거주자인 동식물의 복원을 시도할 수 있다(그림 W7.26).

160 WEB 7 보존생물학

비록 원종의 각 종을 원래의 비율로 재정립하는 것은 원칙적으로 가능하지만, 군집의 재건을 위해서는 먼 저 원래 서식하던 생물들의 실재를 알아야 하며, 각 종에 대한 생태 특성을 알아야 한다. 우리는 이 정도의 정보를 거의 가지고 있지 않기 때문에, 어떤 복구도 진정으로 깨끗하지 않다. 게다가, 지구 온난화와 다른 변화 때문에, 특정 장소에서 발생했던 종들은 더 이상 그곳에서 살 수 없을지도 모른다.

복원생물학자(restoration biologist)들은 같은 군집의 구성을 재창조하려고 노력하기 보다는 생태계의 기능을 복원하는 것에 초점을 맞추고 있다. 이런 접근방식은 과거처럼 단순한 종복원 방식이 아니라 종들이 살아가는 자연 상태의 서식지에서 일어나는 과정 및 생태 기능을 재건하는 데 초점을 맞추고 있다.

포획에 의한 번식 프로그램을 이용하여 일부 종들을 구했다

한 종 또는 몇 종에 국한해 복원 계획을 수립할 경우, 멸종으로부터의 위협을 피하기 위해 자연 개체군에 직접 개입해야 한다.

사례연구 : 송골매

미국에서 송골매(peregrine falcon) 같은 맹금류의 개체수는 2차 세계대전 직후에 급감하였다. 1942년 미시시피 강의 동부에는 약 350쌍의 송골매가 살았는데, 1960년에는 모두 사라졌다. 이 사건의 주범은 다른 아닌 화학 살충제인 DDT로 밝혀졌다(59장 참조).

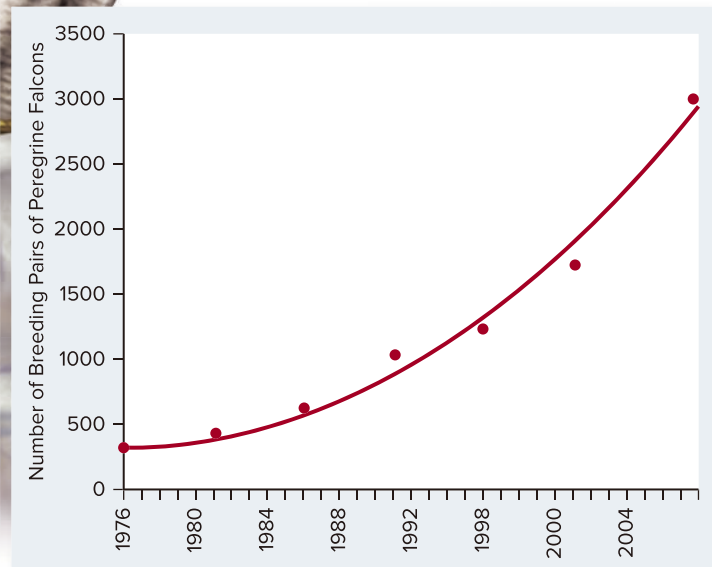
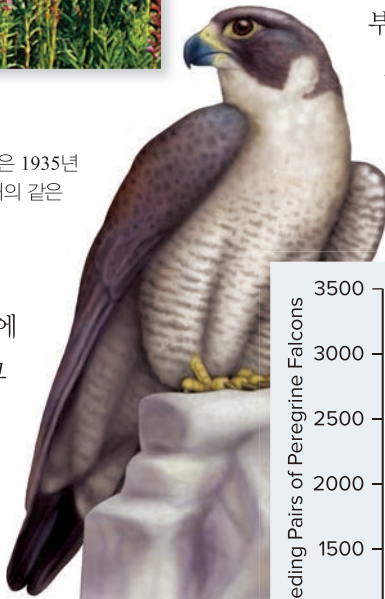


그림 W7.27 Success of captive breeding.

The peregrine falcon, *Falco peregrinus*, has been reestablished in the eastern United States by releasing captive-bred birds over a period of 25 years.

미국 동부지역에서의 맹금류의 개체수를 급격히 감소시키는 원인이 되었던 DDT는 1972년 연방 법안에 의해 사용이 중지 되었으나 송골매의 복원을 위한 자연 개체군은 더 이상 미국 동부지역에서는 남아있지 않았다. 이에 따라 1970년에 코넬대학교에서는 이종을 포획하여 인위적으로 교배하는 포획 육종프로그램(captive breeding program)을 확립하였다. 1974년 이후 북미에서 6천마리 이상의 새들이 방류되어, 놀랍게도 강력한 회복이 이루어졌고, 이 종은 전체 역사적 범위로 복원되었다(그림 W7.27).

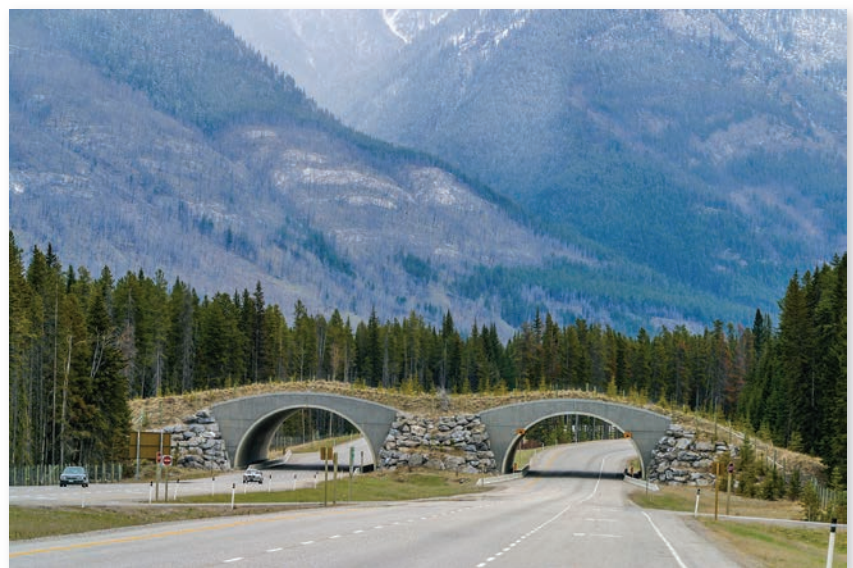
현재 보존 접근 방식은 다차원적이다

보존주의자(conservationist)들은 과거로부터 계속 서식지 분할의 문제를 해결하려고 노력해 왔는데, 이들은 주로 국립공원이나 보존 지정 지역에서 전혀 훼손되지 않은 원래의 자연 상태로 보존하는 데에만 힘써왔다. 그러나 시간이 지나면서 분명한 사실은 어떤 지역에서 보호받을 수 있는 면적이 제한되어 있다는 것이다. 더욱이 대다수 지역은 완전하게 보호받지 못하고 있음에도 불구하고, 이런 지역들이 많은 종에게 여전히 적절한 서식지를 제공하고 있다는 것이다.

이렇게 넓은 토지를 장기간에 걸쳐 성공적으로 관리하기 위한 열

쇠는 지방 토지 이용과 호환될 수 있는 방식으로 운영하는 것이다. 예를 들어, 핵심 보호구역에서는 경제활동이 허용되지 않지만, 나머지 토지는 자원의 비파괴적 수확에 사용될 수 있다. 심지어 몇몇 종의 사냥이 허용되는 지역도 많은 다른 종들에 대한 보호가 허용된다. 예를 들어 모잠비크에서는 엄격하게 보호되고 있는 고롱고사 국립공원(4000 km²)이 생태학적으로 지속 가능한 관광, 임업, 사냥, 농업 관행을 장려하는 부지로 둘러싸여 있다(5400 km²).

생태통로(corridor)는 원래의 잘 보존된 지역들이 서로 떨어져 있을 때 이런 지역들을 서로 연결해 생물들의 확산에 도움을 주는데, 이는 어떤 개체군이 재난에 의해 소실되었을 때 효과적으로 생물의 개체군을 증가시키고, 개체군의 재정착을 가능하게 한다. 생태통로는 일년내내 장거리를 이동하는 생물종도 보호해줄 수 있다. 동아프리카의 생태통로는 유제류(ungulate)의 이동로를 제공해주었다. 코스타리카에서 생태통로는 저지대의 열대우림 지역(라셀바 생물관측소 지역)을 산악지대의 열대우림(바우리오 카릴로 국립공원 지역)과 연결시켜주는 역할을 하여, 조류, 포유류 및 나비류 등의 많은 생물종들이 고도 간에 이동하는 것을 가능하게 만들어주었다(그림 W7.28).



b.

그림 W7.28 생태통로는 종의 생존을 촉진할 수 있다.

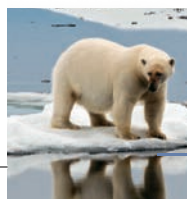
a. 코스타리카의 라셀바 생물관측소는 브라울리오 카리오 국립공원과 연결되어 있다. 이 생태통로는 해발 35 m의 라셀바에서 2900 m까지의 산악 서식지로 조류, 포유류, 나비류 및 다른 동물들을 이동시킬 수 있다. 더 작은 규모에서, 생태통로는 동물들이 극복할 수 없는 장벽들을 안전하게 건너게 하여 개체수가 서로 고립되는 것을 막을 수 있다.

보존 구역이 아주 광범위한 경우에 대한 관심 외에 최근에 보존 생물학자들은 생물다양성 유지를 위한 또 다른 최상의 방법으로 특정 종에 대한 관심보다는 원형 그대로의 생태계로 보존하는데 주안점을 두고 있다. 이러한 이유 때문에 대부분의 경우 보존주의자들의 관심은 보존이 가장 필요한 생태계를 먼저 찾아내고, 이런 관심은 결국 생태계 내에 있는 생물종을 보호할 뿐만 아니라 생태계 기능까지 보호하게 만든다. 이와 같은 관심은 이들 보호 구역이 규모가 커야 하며, 수계와 같은 구성 요소들을 보호하여 보호 구역 밖의 활동으로 인해 보호구역 내의 생태계가 위협받지 않도록 해야만 한다.

핵심 요약 W7.5

Restoration of species may prevent extinction, but only if restoration of habitat or an entire ecosystem is also undertaken. Removal of introduced species, return of top predators, and cleanup of pollutants are primary strategies for habitat restoration. In cases where extinction appears imminent, removal of individuals from the wild and preservation in captive breeding programs may be necessary while habitat is restored.

- Can habitat restoration ever approach a pristine state? Why or why not?



핵심 개념 요약

W7.1 생물다양성의 위기

■ 선사시대 인류는 지역적 멸종의 원인이었다

마지막 빙하기 이후 인류가 북아메리카에 도착한 직후, 최소 75%의 대형 포유류가 멸종했다. 세계의 다른 지역에서도 같은 유형이 관찰되었다.

■ 역사적으로 멸종은 계속되어 왔다

대부분의 역사적 멸종은 1900년 이후로 일어났다. 현재 대멸종은 호모 사피엔스라는 한 종에 의해 촉발된 유일한 사건이며, 이후 진화적 회복에 널리 자원을 이용할 수 없게 될 유일한 사건이다.

■ 특히 토유종 관심지역이 위협받고 있다

토유종은 한 가지 제한된 범위에서 발견되며, 따라서 멸종되기 쉽다. 관심지역은 많은 고유종들이 있는 지역이고, 많은 관심지역은 인구 증가와 높은 멸종률의 현장이다.

W7.2 생물다양성의 가치

■ 생물 다양성의 직접적인 경제적 가치는 우리의 생존을 위한 자원을 포함한다

식품, 의류 및 주거지, 의약품 등 다양한 종과 생태계에서 많은 제품을 얻는다.

■ 간접적인 경제적 가치는 생태계 서비스에서 도출된다

온전한 생태계는 수질 유지, 토양과 영양분의 보존, 지역 기후의 온건화, 영양분의 재활용과 같은 서비스를 제공한다. 온전한 생태계의 가치는 종종 사라질 때까지 분명하지 않다.

■ 윤리적, 심미적 가치는 우리의 양심과 의식에 기초한다

인간은 생태계의 심미적, 생태적, 경제적 가치를 보호하기 위해 윤리적 결정을 내릴 수 있고 내려야 한다.

W7.3 멸종을 초래하는 요인들

■ 양서류는 종감소에 처해 있다 : 사례 연구

모든 양서류 종의 거의 절반이 개체수 감소를 경험했다. 단 한 가지 원인도 확인되지 않았으며, 이는 지구 환경 변화가 원인일 수 있음을 암시한다.

■ 서식지 감소는 생물 종들의 풍요로움을 파괴한다

서식지는 파괴되거나, 오염되거나, 붕괴되거나 또는 분할될 수 있다. 서식지가 점점 분할되면서 경계나 가장자리에서 발생하는 나머지 서식지의 상대적 비율이 급격히 증가해 기생충, 병원생 침습종, 포식자에게 종을 노출시킨다(그림 58.12).

■ 과잉 착취는 종을 빠르게 소멸한다

야생 종을 사냥하고 수확하는 것은 멸종될 위험이 있다. 북대서양의 대구 어업 붕괴와 고래 종의 감소는 많은 사례들 중 두 가지에 불과하다.

■ 도입된 종은 토착종과 서식지를 위협한다

새로운 종의 자연적 또는 우연한 도입은 종 상호 작용의 형태로 도입된 종의 성장에 대한 견제와 균형 부족으로 인해 공동체에 크고 종종 부정적인 변화를 초래한다.

■ 생태계의 붕괴는 멸종위기의 계단식 현상을 일으킬 수 있다

소멸 단계들은 영양단계를 통해 하향식 또는 상향식일 수 있다. 핵심종의 손실은 경쟁을 증가시키고 생태계 구조와 기능을 크게 변화시킬 수 있다.

■ 규모가 작은 집단은 특히 취약하다

재앙, 짝짓기 부족, 유전적 변이성의 상실은 모두 감소된 개체군을 멸종시킬 가능성이 더 높아지게 한다.

W7.4 생물다양성 위기에 대한 진화적 관점

■ 진화는 멸종 위기에 처한 집단을 구할 수 있다

자연선택은 변화하는 환경조건에 적응하는 것을 선호할 것이고, 때로는 멸종을 예방할 것이다.

■ 인간의 분할은 종분화 비율을 증가시킬 수 있다

서식지 단편화, 변화하는 조건, 그리고 교배는 새로운 종의 기원을 촉진시킬 수 있다.

■ 생물학자들은 보존 결정을 알리기 위해 계통발생을 사용한다

계통 발생학적으로 독특한 종은 보존하는데 특히 중요하다.

W7.5 멸종 위기종과 생태계 보존 방안

■ 유입된 종을 제거하면 토착종을 복원할 수 있다

유입된 종의 제거는 매우 어렵고 새로운 종이 유입된 직후에 이루어진다면 가

장 성공적이다.

■ 최상위 포식자를 다시 도입하면 생태계가 복원된다

포식자를 재확립하는 것은 생태계를 통해 퍼져나가는 효과를 가질 수 있다.

■ 오염의 영향은 정화 및 복원으로 되돌릴 수 있다

엄청난 노력과 큰 비용으로 오염된 환경을 복구할 수 있다.

■ 기능적인 지역사회와 생태계는 심하게 손상된 환경에서도 복원될 수 있다

심하게 훼손된 서식지는 종종 원래 상태로 복구될 수 없지만 기능적인 생태계로 복원될 수도 있다.

■ 포획에 의한 번식 프로그램을 이용하여 일부 종들을 구했다

종들은 포획 상태에서 사육되어 야생으로 돌아갈 수 있는데, 그 이유는 그들의 멸종위기의 원인이 된 요인이 더 이상 위협이 되지 않기 때문이다. 서식지의 보존이 성공적인 재도입의 열쇠가 될 수 있다.

■ 현재 보존 접근 방식은 다차원적이다

생물다양성을 보존하는 가장 좋은 방법은 개별 종보다는 온전한 생태계를 보존하는 것이다. 넓은 땅을 관리하는 열쇠는 지역적 인간의 필요와 양립할 수 있는 방식으로 땅을 운영하는 것이다.

생태통로의 분산은 서식지 조각들을 서로 그리고 더 큰 서식지들과 연결시켜, 개체수 크기, 유전적 교환, 그리고 재정착을 가능하게 한다..



연습문제

■ 1단계: 이해력 확인하기

- 보존 관심지역을 가장 잘 기술한 것은
 - 빠르게 사라지고 있는 고유종들이 많은 지역
 - 적극적으로 종 다양성을 지키려고 노력하는 사람들이 사는 지역
 - 멸종률이 높은 섬 지역
 - 토착종이 도입종으로 대체된 지역
- 생태계가 제공하는 간접적인 경제적 가치는
 - 생태계 복원 후 이용에서 발생하는 경제적 가치를 초과하지 않는다.
 - 그 가치는 신중하게 결정되지 않았다.
 - 생태계 복원에 드는 비용보다 훨씬 클 것이다.
 - 전적으로 미적인 부분에 관한 것이다.
- 양서류 감소를 가장 잘 설명한 것은?
 - 지역적 서식지 파괴로 인한 세계적인 양서류 개체군의 감소
 - 세계 기후 변화에 의한 양서류 개체군의 감소
 - 코스타리카에서 설명되지 않는 금두꺼비의 감소
 - 위에 정답없음
- 서식지 분할 현상이 개체군에 끼치는 해로운 영향은
 - 이전에 연속적이던 유전자 흐름이 차단되었기 때문이다
 - 적절한 서식지에서 경계면이 상대적으로 증가했기 때문이다
 - 번식하기에 서식지가 너무 작기 때문이다.
 - 위의 모든 것들 때문이다.
- 개체군의 크기가 크게 감소했을 때, 유전적 다양성 및 이형 접합체는
 - 증가하고, 멸종 가능성을 증가시킨다.
 - 감소하고, 멸종 가능성을 낮추어 준다.
 - 일반적으로 멸종 가능성에 영향을 주지 않는 요인들이다.
 - 미래의 변화에 대해 개체군을 보호하는 방식으로 자동적으로 반응한다.
- 야생에 방류하는 포획-번식 프로그램은
 - 멸종위기에 처한 종을 구할 수 있다.
 - 야생 개체군의 유전적 다양성이 매우 낮을 때만 성공할 수 있다.
 - 적절한 서식지 복원 및 개체군 조절 둘 다를 적절히 결합했을 때 성공적이다.
 - 위에 정답없음

■2단계: 적응력 평가하기

- 역사적으로 섬에 서식하는 종들은 본토에 서식하는 종들보다 더 빨리 멸종했다. 다음 중 이 현상을 가장 잘 설명한 것은?
 - 섬의 종들은 천적도 없었고, 선천적인 회피 전략 없이 진화했다.
 - 인간은 섬에 질병과 경쟁자를 도입하여 섬 개체군에 악영향을 주었다.
 - 섬의 개체군은 일반적으로 본토에 있는 개체군보다 크기가 작다.
 - 위 모두가 맞다.
- 지금까지 존재하던 종들의 99%가 멸종했다.
 - 이는 현재의 멸종률이 정상보다 높지 않다는 것에 대한 증거가 될 수 있다.
 - 이들 소설의 대부분은 지난 400년 동안에 발생했다.
 - 이는 지구에 생물종이 너무 많았다는 것을 보여준다.
 - 상기 설명은 모두 틀리다.
- 생물다양성 위기를 효율적으로 다루기 위해 개별 종의 보존은
 - 생태계 보존과 복원에 대한 원리와 함께 접목시켜야 한다.
 - 단지 더 많은 종들로 넓혀가는 데 필요한 완전한 관리 접근 방식이다.
 - 생물다양성 위기를 다루는데 어떤 역할도 하지 않는다.
 - 일반적인 생태계 관리의 원리와 상반된다.
- 생태계에 외래 포식자를 도입하는 것은 어떤 이유에 의해 멸종을 초래할 수 있는가?
 - 상부에서 하부로 영양단계 연쇄작용에 의해
 - 토착 포식자의 과도한 경쟁에 의해
 - 고유종들이 적응하지 못한 기생충의 전파에 의해
 - 위의 설명 모두가 옳다

■3단계: 사고력 함양하기

- 이전에 존재하던 종의 99%가 바로 지금 멸종한다면, 최근 몇 세기 동안의 멸종률을 왜 걱정해야 하는가?
- 생태계를 복원하는 일은 항상 비용이 소요되고, 혜택도 있다. 보통 혜택은 사회의 각 분야로 흘러들어가고, 소요 비용은 사회 전체가 부담한다. 따라서 언제, 어떻게 생태계를 변화시킬 것인가를 결정하는 것은 어려운 일이다. 그러나 우리가 오늘날 이해하는 방식으로 생태계를 바꾸는 것은 (예, 맹그로브 숲에서 새우 양식장으로 전환) 문제가 되는가? 이런 결정을 할 때 지표가 될 만한 다른 예가 있는가?
- 세계적으로 발생하는 요인들로 인해 양서류 개체군들이 전 세계적으로 감소한다는 증거가 있다. 이 멸종이 자연스러운 작용이라고 알고 있는데, 양서류의 전 지구적인 멸종이 자연스러운 멸종과 다르다는 것을 어떻게 알 수 있는가?
- 55장에서 종들 간의 상호작용을 살펴보았고, 56장에서는 영양단계 간의 상호작용에 대해 살펴보았는데, 한 종의 멸종이 어떻게 생태계에까지 광범위한 영향을 줄 수 있는가? 멸종했을 때 다른 많은 종들에게 영향을 주는 생물 종을 예측할 수 있는가?
- 멸종 전에 모든 개체군은 크기가 작아진다. 개체군의 크기가 작은 것이 멸종에 직접적인 이유인가? 아니면 멸종시키는 다른 요인에 의한 결과로 개체군의 크기가 작아지는 것인가?