

대기오염과 환경지표종에 대한 기초연구

정 환 도

연구진

연구책임

- 정환도 / 도시기반연구실 책임연구위원

- 목 차 -

제1장 연구의 개요	3
제1절 연구의 배경 및 목적	3
제2절 연구내용 및 수행과정	5
제2장 대기오염과 이끼에 관한 이론적 고찰	9
제1절 대기오염 관한 이론적 고찰	9
1. 대기오염특성	9
2. 대기오염물질의 종류와 영향	18
3. 광역대기오염이 환경에 미치는 영향	27
제2절 이끼의 특성	36
1. 이끼의 형태적 특성 및 생육환경	36
2. 이끼의 채집과 분류	47
3. 이끼의 생태	59
4. 이끼의 효과 및 이용	67
제3장 대기의 평가지표 및 자연생태계 조사와 이끼를 활용한 대기오염 평가방법 75	
1절 대기의 평가지표	75
1. 지수의 개념과 대기질 지수 개발 사례	75
제2절 자연생태계 조사 및 이끼를 활용한 대기오염 평가방법	83
1. 자연생태계 조사	83
2. 이끼를 활용한 대기오염 평가방법	87
제4장 결론 및 관리방안	95
제1절 결론	95
제2절 정책건의	98
참고문헌	99

- 표 목 차 -

<표 2-1> 오염되지 않은 대류권 공기의 가스상 조성	11
<표 2-2> 대기오염 배출원 유형 및 특징	14
<표 2-3> 지표면의 맑고 건조한 대기의 조성	18
<표 2-4> 입자상 대기오염물질의 정의와 특징	20
<표 2-5> 황화합물의 종류와 배출원 및 배출과정	23
<표 2-6> 광역대기오염의 분류	28
<표 2-7> 주요 오존층 파괴물질	31
<표 2-8> 이끼의 성장형태 및 특성	39
<표 2-9> 생육환경에 따른 이끼종류	47
<표 2-10> 이끼의 각 종류(Class)의 비교표	50
<표 2-11> 선강의 각 아강(Subclass) 비교표	52
<표 2-12> 선강의 분류표	53
<표 2-13> 태강의 각 목 비교표	56
<표 2-14> 태강의 분류표	57
<표 2-15> 빨이끼강의 분류표	58
<표 3-1> PSI와 AEI의 비교	76
<표 3-2> AEI에 적용한 환경기준	77
<표 3-3> ORAQI와 AI의 비교	78
<표 3-4> 국가대기환경기준	79
<표 3-5> 지역대기환경기준	80
<표 3-6> 지수구간별 개요	81
<표 3-7> 지수구간별 개요	82
<표 3-8> 우점도 계급 및 내용	85
<표 3-9> 군도계급 및 내용	86
<표 3-10> IAP에 의한 SO ₂ 농도추정	88

<표 3-11> IAP에 의한 SO ₂ 농도추정	88
<표 3-12> 피도와 빈도에 의한 계급구분	89
<표 3-13> 다양한 이끼와 이끼측정을 위한 지역수집	90
<표 3-14> 대기오염의 측정방법	91
<표 3-11> IAP에 의한 SO ₂ 농도추정	86
<표 3-12> 피도와 빈도에 의한 계급구분	87
<표 3-13> 다양한 이끼와 이끼측정을 위한 지역수집	88
<표 3-14> 대기오염의 측정방법	89

- 그림 목 차 -

<그림 1-1> 연구 과정	6
<그림 2-1> 고도에 따른 각 대기층별 수직 온도 분포	10
<그림 2-2> 대기오염제어 및 관리체계도	12
<그림 2-3> 오염된 공기의 성분	15
<그림 2-4> 산성우의 세계적 분포	30
<그림 2-5> 남극의 오존층 파괴현상	32
<그림 2-6> 남극지방의 시간에 따른 오존층 파괴현상의 변화	33
<그림 2-7> 대기 중 이산화탄소의 농도 변화	34
<그림 2-8> 지구 평균기온의 변화	35
<그림 2-9> 이끼의 구조	37
<그림 2-10> 이끼의 형태	38
<그림 2-11> 이끼식물의 포자형성	40
<그림 2-12> 완성 전 포자(좌), 원사체(우)	40
<그림 2-13> 이끼의 생식기관. 좌(장정기), 우(장관기)	41
<그림 2-14> 이끼의 생활사	42
<그림 2-15> 돌틈, 블록사이에 균락을 이루고 있는 은이끼*	60
<그림 2-16> 도로주변에 생육하는 담뱃잎이끼*	61
<그림 2-17> 물속에 사는 강물이끼	62
<그림 2-18> 물위에 떠서 생육하는 은행이끼	63
<그림 2-19> 물위나 진흙에 생육하는 물긴가지이끼	64
<그림 2-20> 나뭇잎에 생육하는 이끼	65
<그림 2-21> 동물의 배설물 위에서 자라는 이끼	66

제1장 연구의 개요

제1절 연구의 배경 및 목적

최근 산업화, 도시화로 인해 인간문명의 진보, 산업발달, 생활수준의 향상으로 인류에게 경제적 풍요와 생활의 편의를 가져다주었다. 그러나 인구의 증가, 산업발달에 따른 시설의 대형집단화, 교통량 증가 및 화석연료의 사용량 증가 등으로 인해 배출되는 각종의 환경오염물질로 인해 환경오염이 심각한 문제로 대두되고 있다.

그 중 대기오염의 주범이 되는 아황산가스와 질소 산화물은 인간 뿐 아니라 동·식물, 건축구조물에 이르기까지 광범위하게 피해를 주는데, 이들 중 이동이 불가능한 식물은 대기오염 피해가 가장 심한 것으로 발표되고 있다.

대기오염물질은 식생에 직접 영향을 주기도 하지만 더 심각한 것은 비에 녹아 토양에 이입되어 토양을 산성화시키는 것이다. 산성화된 토양은 식물의 생식기관이나 잎에 영향을 주어 식물생리 및 대사과정에 이상을 주어 양분유실, 독성물질증가, 인산흡수 감소, 뿌리활력 저하, 토양미생물 활동을 둔화시켜 결국 고사현상이 발생하는 등 직접 또는 간접적으로 영향을 미친다(Smith, 1980).

이러한 복합적인 영향으로 산림의 쇠퇴현상이 일어나고, 식물의 종 다양성이 감소하게 되어 식생의 구조와 기능이 단순화되어 결국에는 생태계 전반에 걸쳐서 악영향을 미치게 된다(Nagy and Nagy,1981; jakucs, 1991).

한편, 환경오염 정도의 판정에는 생물지표법을 많이 이용하는데, 생물은 환경적 여건과 상호작용 관계에 있기 때문에 어떤 장소에 특정생물이 출현한다는 것은 그곳의 환경적 특성을 반영하며(김재한, 2003), 이러한 특정생물은 서식한 곳의 환경지표종이라고 할 수 있다.

환경오염의 환경지표종에는 담수조류, 수서곤충, 지의류, 선태류, 고등식물 등 다양한 생물을 대상으로 연구되고 있다. 계류에서는 수서곤충을 이용하여 수질을 분

제 1 장

연구의 개요

제1절 연구의 필요성 및 목적

제2절 연구내용 및 과정

류할 수 있으며, 대기오염은 지의류, 선태류, 또는 고등식물을 이용하여 오염의 정도를 구분할 수 있다(김제한, 2003).

이 중 이끼는 조직이 단순하여 환경대기와 직접적으로 접촉되면 민감하게 반응하기 때문에 특별한 실험치리를 하지 않더라도 대기오염 정도를 그대로 파악할 수 있다는 점에서 환경지표종으로 매우 유용하다(Taoda, 1976; 송종석과 송승달, 1995; 송종석, 1999). 그러나 이끼는 고등식물과 마찬가지로 국가의 중요한 유전자원임에도 불구하고 우리나라에서는 그에 대한 연구가 초보단계이며, 아직 대기오염지표종으로 활용되지 않고 있어 이에 대한 연구가 절실한 상황이다.

본 연구는 저탄소 녹색성장이 국가전략사업으로 추진되고 있음에 따라 녹색성장의 떠오르는 블루오션(blue ocean)으로 이끼에 대한 문헌조사를 통한 기초정보 제공과 대기오염과의 관계를 검토하여 환경지표종으로서의 가치를 검토하고자 한다.

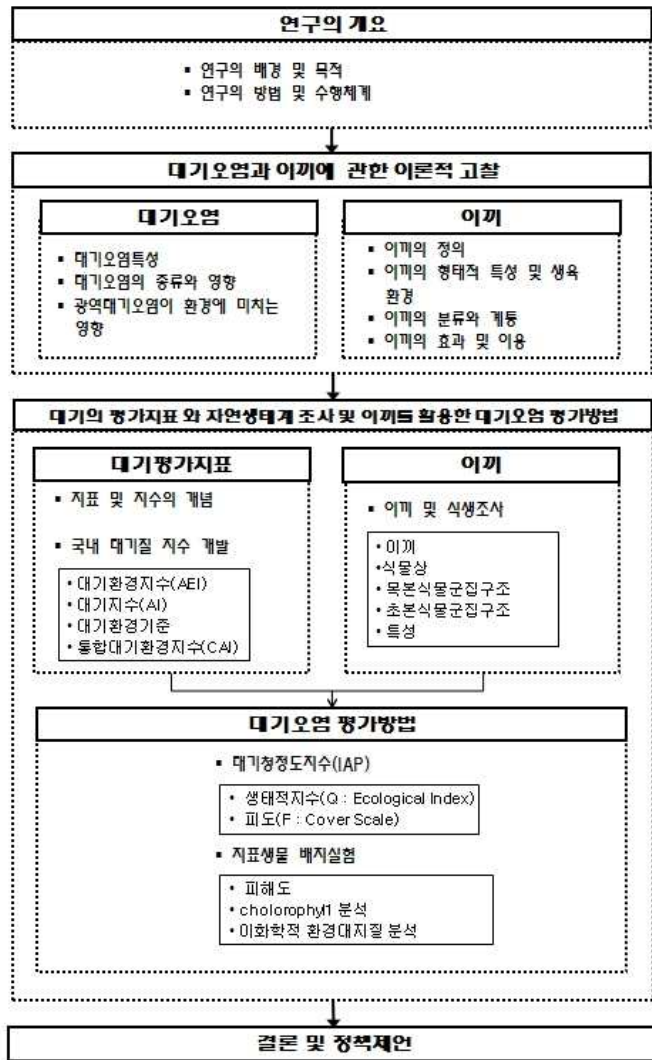
제2절 연구내용 및 수행과정

본 연구에서는 다루는 주요 내용은 대기오염이 이끼에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로 대기오염과 이끼에 대한 개념 및 종류에 대한 이해와 상관관계를 살펴보고자 한다.

먼저 대기질에 대한 기초분석을 수행하기 위해 대기오염 특성과 관련하여 대기오염의 정의, 대기오염의 분야구분, 대기오염물질의 배출원, 대기오염물질의 측정 및 단위와 대기오염물질의 종류와 영향, 그리고 광역대기오염이 환경에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 이와 더불어 하등식물로서 국내에서 연구가 거의 미비한 이끼의 이해를 위해 이끼에 특성에 관련하여 이끼의 형태적 특성 및 생육환경, 이끼의 분류와 계통, 이끼의 효과 및 이용에 대해서 알아보았다.

다음으로 대기오염의 종류에 따라 객관적인 평가지표를 설정하기 위해 지수 및 지표에 대해 알아보고, 국내의 대기질 지수 개발에 대해서 논하였다.

또한 대기오염의 정도에 따른 이끼를 조사하기 위한 조사방법과 생물학적 환경평가 기법으로 그 유용성과 그 기능성을 검토하고자 대기청정도지수와 이끼의 체내 오염물질을 분석하는 분석방법, 그리고 이끼에 생육에 영향을 미치는 자연생태의 식물상, 목본식물군집구조, 초본식물군집구조, 토양의 조사방법과 그에 따른 분석방법에 대해서 살펴보았다.



<그림 1-1> 연구 과정

제 2 장

대기오염과 이끼에 관한 이론적 고찰

제1절 대기오염에 관한 이론적 고찰

제2절 이끼의 특성

제2장 대기오염과 이끼에 관한 이론적 고찰

제1절 대기오염 관한 이론적 고찰

1. 대기오염특성¹⁾

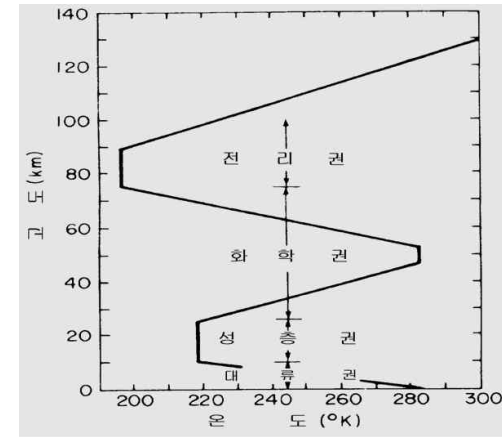
1) 대기의 성상

대기오염 문제를 취급하려면 먼저 주 대상이 되는 대기에 대한 여러 가지 물리·화학적 성상 및 구조에 대해 파악하는 것이 중요하다.

대기란 지구 주위를 둘러싸고 있는 일종의 기체 집단으로서 대략 지표면으로부터 600 ~ 1000km까지 비균일적으로 존재하고 있다. 이러한 대기의 총 질량은 약 $5.3 \times 10^{21}g$ 정도이며, 이것을 압력 단위로 환산하며 지표면 $1cm^2$ 당 평균 1kg의 무게에 해당되는 공기량에 쌓여 있는 것이 된다. 그러나 대기는 지구중력에 의해 지구 주위를 둘러싸고 있기 때문에 상대적으로 지구 표면에 가까이 위치한 공기층일수록 그 위의 공기층에 눌러 밀도가 높아지게 되며, 상층 대기로 갈수록 공기 밀도는 급격히 감소된다.

대략 전체 대기 질량의 90% 정도가 하층 16km 정도 내에 분포하고 있으며, 99.9%의 양은 하층 48km 이내에 존재하고 있다. 아래 <그림 2-1>은 고도에 따른 수직 온도 분포 특성을 대기의 수직구조 권역별로 나타낸 것이다.

대기의 수직 온도 분포를 살펴보면, 우리 인간이 생활하고 있는 지표면 부근의 대기 온도는 $15^{\circ}C$ ($288. K$) 정도이며, 이러한 온도는 고도가 높아질수록 하강하게 된다. 그리고 각 권역별로 고도에 따른 수직 온도 분포는 서로 다른 형태를 보이고 있다.



<그림 2-1> 고도에 따른 각 대기층별 수직 온도 분포

대기의 구조는 크게 대류권, 성층권, 화학권, 전리권 등으로 이루어져 있으며, 이중 대류권이 대기 오염 현상과 밀접한 관계를 맺고 있는 대기층이 된다. 대류권은 대기중 최하의 기층으로서 공기 밀도가 가장 크며, 대략 지표로부터 고도 11km 정도에까지 범위에 걸쳐 있다. 대류권내의 기층은 불안정하여 여러 가지 기상현상이 일어나며, 특히 고도상승에 따른 기온하강이 평균 $-0.65^{\circ}C/100m$ 의 율로 일어나 대류권 최상층부(대류권계면)에서의 평균온도는 약 $-56^{\circ}C$ 에 이르고 있다. 이러한 대류권은 다시 지표면 거칠기의 영향을 받고 있는 지상 1km 이내의 지구경계층과 그 이상의 자유대기로 구분한다.

1) 신용섭 외(2004) 새로운 환경공학개론. 형설출판사

2) 대기오염의 정의

근본적으로 대기오염이란 공기 중에 외부 물질의 존재를 의미한다. 대기오염문제는 이러한 외부물질의 농도가 인간의 복지를 방해할 때 일어나며, 세계보건기구(WHO)에 따르면 「대기오염이란 인공적으로 배출되어 대기 중에 있는 오염물의 양, 농도, 및 지속시간의 과잉으로 특정지역의 다수에게 불쾌감을 주는 상태, 혹은 공중위생상 인간, 동·식물 및 재산에 유해하고 쾌적한 생활을 방해하는 상태」라 정의하고 있다.²⁾ 또한 Engineers Joint Council는 「대기오염이란 먼지, 혼연, 가스, 연무, 악취, 연기 또는 수증기 등과 같은 오염물질이 한가지 또는 그 이상으로 실외대기에 존재하면서 그 양, 특성 및 지속성이 인간이나 동·식물의 생활과 재산에 해를 끼치거나 생활과 재산의 편안한 향유를 부당하게 방해하는 상태」라고 정의되어 있다.³⁾

따라서 대기오염이란 오염되지 않은 공기에 이물질이 혼입되어, 그 결과로서 인간에게 직·간접적으로 피해를 유발할 경우로 정의할 수 있을 것이다.

<표 2-1> 오염되지 않은 대류권 공기의 가스상 조성

종류	ppm(vol)	μg/m ³
질소	780,000	8.95×10 ⁸
산소	209,400	2.74×10 ⁸
수분	—	—
아르곤	9,300	1.52×10 ⁷
이산화탄소	315	5.67×10 ⁵
네온	18	1.49×10 ⁴
헬륨	5.2	8.50×10 ²
메탄	1.0-1.2	6.56-7.87×10 ²
크립톤	1.0	3.43×10 ³
질소산화물	0.5	9.00×10 ²
수소	0.5	4.13×10 ¹
크세논	0.08	4.29×10 ²
유기성 증기	ca 0.02	—

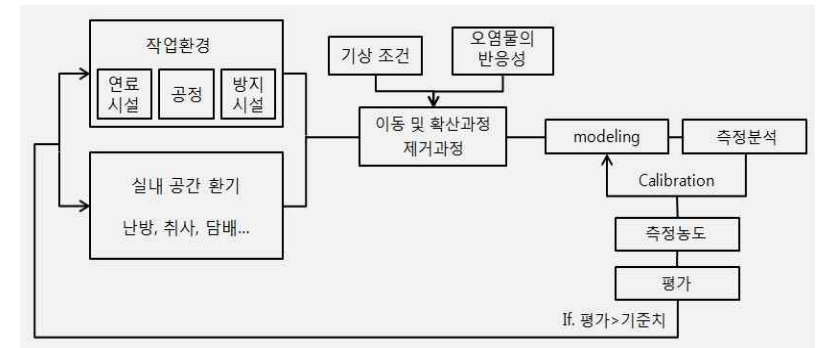
2) 서광석(2001) 대기오염개론. 대학서림
3) 김태선(2003) 도시주거지역 완충녹지의 대기오염 저감효과

대기오염을 규정하는 또 다른 방법은 “오염되지 않는” 혹은 “정상적인” 건조 공기의 조성을 먼저 규정하고 이와 같은 조성에서 더 많은 양으로 존재하면서 인간, 동물, 식물, 혹은 물질에 해를 주는 조성 물질 혹은 대기조성과 다른 물질들을 대기오염물질로 분리하는 것이다. <표 2-1>은 오염되지 않은 대류권 공기의 가스상 조성을 보여준다.

오염되지 않는 공기란 인간이나 그들의 활동이 지구상에 존재하지 않는다고 가정할 때의 공기의 조성을 의미한다. 오염되지 않은 공기의 정확한 조성을 아는 것은 인간이 대기의 조성을 결정할 수 있는 도구와 의지를 가지게 된 시점이 이미 수 천년동안 대기를 오염시켜 온 시점이기 때문에 불가능하다고 할 수 있다. 바다, 극 지역, 사막, 혹은 산과 같은 가장 고립된 지역에서의 공기도 정확하게 표현하면 희석된 오염공기라고 할 수 있다.

3) 대기오염의 분야 구분

환경공학분야에서 다루고 있는 대기오염제어 및 관리체계도를 <그림 2-2>에 개략적으로 도시하였다. 환경공학에서 취급하고 있는 대기오염의 영역은 오염된 장소에 따라 크게 실내대기오염과 옥외 대기오염으로 구분될 수 있다.



<그림 2-2> 대기오염제어 및 관리체계도

먼저 실내대기오염은 실내공간의 활용목적에 따라서 생산 공장 내의 작업대기 환경과 지하공간 사무실 등의 생활실내 대기환경으로 세분될 수 있다. 실내공간에서 적절한 수준의 대기질을 유지 관리하거나, 옥외대기로 배출되는 배기가스의 농도를 적정수준이하로 낮추기 위하여 환기시설이나 방지시설 등을 가동하고 있다. 환기시설은 송풍기의 사용유무에 따라 강제환기 및 자연환기 시설로 구분되는데, 전자의 경우 보통 방지시설을 포함하고 있는 것이 일반적이다.

방지시설은 대기오염물질 배출시설로부터 배출되는 오염물질이 배출허용기준 이하로 배출되기 위해 설치되는 시설로 제어대상 오염물질의 물리적 성상에 따라서, 입자상오염물질 및 가스상 오염물질 방지시설로 구분 될 수 있다.

실내공간의 각종 배출원에서 방출되는 대기오염물질은 작업자 보호의 관점에서, 실내공간의 대기질을 규제하는 산업안전보건법(노동부)에 적용받는 동시 배출구(연돌)를 통해 옥외대기로 방출되는 때는 배출허용기준(환경부)에 의해서도 규제를 받게 된다. 배출구를 통해 옥외 공기중 배출된 대기오염물질은 기상조건과 오염물질의 성상(크기, 밀도, 반응성 등)에 따라 대기 중에서의 이동·확산 및 제거과정을 거친 뒤 최종적으로 피해지점에서의 특정농도를 형성하게 된다.

이때 피해지점에서 형성된 농도를 파악하기 위하여 직접 시료를 채취분석하거나, 대기모형을 이용하여 농도를 산정해 내게 된다. 이렇게 산정된 농도자료를 평가한 후, 그 결과가 평가기준치(옥외 대기 환경기준치 등)의 초과여부에 따라 적절한 추후조치를 취하게 된다.

이와 같이 대기오염의 영역은 배출원에서 배출된 오염물질이 최종적으로 피해지점에 도달되어 형성된 농도에 대한 평가과정을 포함하고 있는 것과 같이 범위가 넓다. 대기오염의 각 과정을 정확히 이해되어야만 효과적인 대기질 관리가 용이해질 수 있다.

4) 대기오염물질 배출원

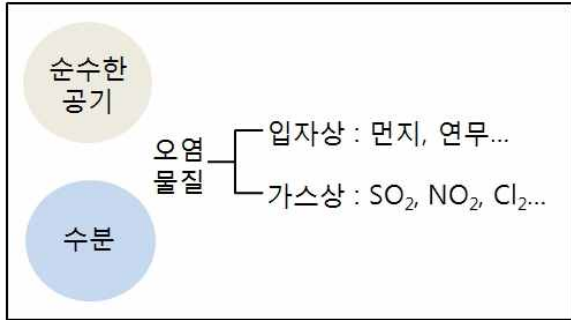
대기오염물질 배출원은 인간의 활동과 관계없이 오염물질을 발생시키는 자연적 배출원(natural sources)과 이에 반하는 인위적 배출원으로 크게 나눌 수 있다. 주요한 자연적 배출원과 인위적 배출원의 예를 들면 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 대기오염 배출원 유형 및 특징

유형	배출인자	특징
자연적 배출원	화산폭발	입자상물질, SO ₂ , H ₂ S, 메탄가스 등이 발생. 영향을 광범위하게 미침.
	산불	다량의 연기, 불연소 탄화수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물 및 재 등이 발생. 가시도 및 태양광선의 감쇠현상 초래.
	먼지폭풍	다량의 입자상 물질 발생. 가시도 악화현상 초래.
	해양	해양입자 형태로 입자상물질 배출. 금속과 페인트 부식 유발.
	식물	주요탄화수소 배출원. 숲 상공에 나타나는 푸른색의 박무는 나무에서 배출되는 휘발성 유기화합물이 대기 반응을 통하여 형성되는 것으로 알려져 있다.
인위적 배출원	점 오염원 (point source)	발전소, 도시폐기물 소각로, 대규모공장과 같이 하나의 시설이 다량의 오염물질을 배출하는 것. 높은 굴뚝에서 배출되는 것이기 때문에 그 영향범위가 넓다.
	선 오염원 ((line source)	대표적인 것은 자동차로서 이는 도로를 중심으로 오염물질을 발생시켜 도로주변에 대기오염문제를 일으키게 하는 것. 배출구가 낮아 대기확산이 잘 이루어지지 않기 때문에 지표면에 보다 직접적인 영향을 미치는 특성.
	면 오염원 (area source)	주택과 같이 일정 지역 내에 소규모 발생원이 다수 모여 오염물질을 발생함으로써 해당 지역내에 오염문제를 발생시키는 것. 배출구가 낮아 대기확산이 잘 이루어지지 않기 때문에 지표면에 보다 직접적인 영향을 미치는 특성.

5) 대기오염물질의 측정 및 단위

대기오염물질로 오염된 공기에는 아래 <그림 2-3>과 같이 순수한 공기성분, 수분 및 다양한 대기오염물질로 혼합되어 있다.



<그림 2-3> 오염된 공기의 성분

이렇게 오염된 공기 중 특정 오염물질의 농도를 분석하기 위해서는 먼저 대표성과 신뢰성을 가질 수 있는 적절한 시료채취위치와 채취점을 선정한 후, 특정오염물질만을 선택 분리할 수 있는 방법을 통해, 시료를 채취한 후, 적절한 전처리와 분석방법을 통하여 측정해 내어야 한다.

일반적으로 대기오염물질의 측정 및 분석은 크게 연도를 통하여 대기 중으로 배출되는 물질에 대해 농도를 측정하는 배출허용기준시험과 일반 대기환경중의 대기오염물질 농도를 측정하는 환경기준 시험방법으로 구분되어 있다.

(1) 시료채취위치

이론적으로 될 수 있으면 시료채취지점수를 많이 선정하여 분석된 농도자료는 대표성과 신뢰성을 높게 유지할 수 있을 것이다.

그러나 시간과 경비의 제약으로 인해 시료채취지점수를 무한정 선정할 수 없기 때문에, 가능한 농도자료의 신뢰성과 대표성이 확보될 수 있는 시료채취위치를 적절히 선정함으로써 이와 같은 문제를 완화할 수 있다.

현행 우리나라의 공정공해시험법에서는 위와 같은 문제를 고려하여, 배출허용기준 및 환경기준시험을 위한 시료채취위치 선정 등에 대해 다음과 같이 규정해 놓고 있다.

■ 시료 채취 위치 선정

① 배출허용기준 시험을 위한 채취위치 선정

가스상물질의 경우 원칙적으로 가스의 흐름이 안정되어 균일한 농도의 시료를 채취할 수 있다고 판단되는 지점을 선정하도록 규정되어 있다.

입자상물질의 경우, 수직굴뚝 하부 끝단으로부터 위를 향하여 그 곳의 굴뚝 내경이 8배 이상이 되고, 상부 끝단으로부터 아래를 향하여 그 곳의 내경이 2배 이상이 되는 지점에 측정공 위치를 선정하는 것을 원칙으로 한다. 또한 위의 기준에 적합한 측정공 설치가 곤란하거나 측정작업의 불편, 측정자의 안정성 등이 문제될 때에는 하부 내경이 2배 이상과 상부 내경의 1/2배 이상 되는 지점에 측정공 위치를 선정할 수 있다.

② 환경기준 시험을 위한 채취위치 선정

시료채취위치는 그 지역의 주위환경 및 기상조건을 고려하여 다음과 같이 선정한다.

- ㉠ 시료채취위치는 원칙적으로 주위에 건물이나 수목 등의 장애물이 없고, 그 지역의 오염도를 대표할 수 있다고 생각하는 곳을 선정한다.
- ㉡ 주위에 건물이나 수목 등의 장애물이 있을 경우에는 채취위치로부터 장애물까지의 거리가 그 장애물 높이의 2배 이상 또는 채취점과 장애물 상단을 연결하는 직선이 수평선과 이루는 각도가 30°이하 되는 곳을 선정한다.
- ㉢ 주위에 건물 등이 밀집되거나 접근되어 있을 경우에는 건물 바깥벽으로부터 적어도 1.5 m 이상 떨어진 곳에 채취점을 선정한다.
- ㉣ 시료채취의 높이는 그 분근의 평균오염도를 나타낼 수 있는 곳으로 가스상 물질은 1.5~10 m, 입자상 물질은 3.0~10 m로 한다.

(2) 측정 분석

대기분야의 측정분석은 시료채취위치에서 바로 자동분석기를 이용하여 농도를 분석해 내는 경우와 일단 채취된 시료를 실험실이나 자동분석기가 있는 곳으로 이동시켜 농도를 분석하는 경우로 농도를 분류할 수 있다.

오존농도분석과 같이 시료의 변질이 우려되는 경우 그 오차를 줄이기 위해서 현장에서 바로 측정하는 방식이 권장되지만 일반적으로 자동측정장치의 구입이 고가이기 때문에 현실적으로 적용하기에는 한계가 있다.

화학적 방법에 의해 농도를 산정해내는 경우와 분석기기를 사용하여 농도를 정량해내는 방법으로 분류할 수 있다. 이렇게 측정된 대기오염물질은 그 물리적 형태에 따라 먼지와 같은 입자상 물질은 공기단위부피(m^3)당의 오염물질의 질량(μg)으로 표시하며, 황산화물, 질소산화물과 같은 가스상물질은 공기단위부피당(m^3) 포함되어 있는 가스상물질의 부피(ml)로 표시하는 것이 일반적이다. 특히 그 단위가 $\frac{m\ell}{m^3}$

일 경우, ppm단위로 나타내기도 한다.

그러나 먼지농도의 경우 시료채취시의 온도와 압력에 불편을 해소시키기위해 표준상태($0^\circ C$, 1atm) 혹은 특정의 온도, 압력($20^\circ C$, 1atm)상태로 보정하여 그 농도를 나타내고 있다. 보통 가스상 물질의 경우 특정 가스상 물질만을 선택적으로 흡수하는 흡수액을 통과시켜 오염된 공기 속에 들어있던 특정가스상 물질이 흡수액에 모두 흡수되었다고 가정하여, 그 흡수액 속에 들어있는 특정 가스상물질의 양을 실험적으로 산정한 뒤 이 양을 시료채취를 위해 통과된 총 공기량과 연결시켜 농도를 산정하는 방식을 사용하고 있다.

이에 반해 먼지농도는 오염된 공기중에 포함되어 있는 먼지성분만을 분리 포집하기 위하여 보통 필터방식을 사용하는데, 시료채취 전후의 필터무게차이와 시료채취시 통과된 공기량을 측정하여 먼지농도를 산정하게 된다.

2. 대기오염물질의 종류와 영향

자연상태에 존재하는 대기는 주성분인 질소와 산소 이외에도 <표 2-3>에 나타난 바와 같이 여러 가지 미량가스를 포함하고 있는 혼합물이다. 대기오염물질이란 자연상태 대기 중에 존재하지 않는 물질이거나, 본래 대기의 구성성분일지라도 농도가 평균농도 이상으로 증가하여 인간과 자연환경에 악영향을 미치는 물질을 말한다.

대기오염물질은 화산활동과 같은 자연현상에 의하여 배출될 수도 있고, 인간의 활동에 의하여 배출될 수도 있다. 여기서는 자연적인 배출원에서 배출되는 대기오염물질들은 제외하고 인위적인 배출원에서 배출되는 대기오염물질들에 대해서 설명하였다.

<표 2-3> 지표면의 맑고 건조한 대기의 조성

성분	농도(ppmv)	농도(r%)
질소(N ₂)	280,000	78.09
산소(O ₂)	209,500	20.95
알곤(Ar)	9,300	0.93
이산화탄소(CO ₂)	320	0.032
네온(Ne)	18	0.0018
헬륨(He)	5.2	0.00052
메탄(CH ₄)	1.5	0.00015
크립톤(Kr)	1.0	0.0001
수소(H ₂)	0.5	0.00005
일산화이질소(N ₂ O)	0.2	0.00002
일산화탄소(CO)	0.1	0.00001
크세논(Xe)	0.08	0.000008
오존(O ₃)	0.02	0.000002
암모니아(NH ₃)	0.006	0.0000006
이산화질소(NO ₂)	0.001	0.0000001
일산화질소(NO)	0.0006	0.00000006
이산화황(SO ₂)	0.0002	0.00000002
황화수소(H ₂ S)	0.0002	0.00000002

대기오염물질의 생성기구에 따라 배출원으로부터 배출된 형태 그대로인 1차오염물질(primary pollutants)과 1차오염물질이 대기 중에서 1차오염물질간 화학반응 혹은 1차오염물질과 대기 중의 정상성분과 화학반응을 통하여 생성된 2차오염물질(secondary pollutants)로 분류될 수 있다. 그러나 일반적으로 사용되는 대기오염물질의 분류는 대기오염물질의 물리적인 성상에 따른 분류로써, 물리적 상태가 가스인 물질들은 가스상 대기오염물질 그리고 물리적 상태가 고체상인 물질들은 입자상 대기오염물질로 분류된다.

1) 입자상 대기오염물질

대기오염물질 중 입자상 대기오염물질이 차지하는 비율은 약 9%정도이다. 대기 중 입자상물질의 입경 범위는 0.001 μm ~ 500 μm 정도이나, 0.1 μm ~ 10 μm 범위의 입경을 갖는 입자상물질이 대부분이며 입자상 대기오염물질은 적은 양에 비하여 환경에 미치는 피해는 심각하다.

입자상 대기오염물질은 대기 중에서 입자상물질 자신의 무게에 의하여 대체로 침강분리되는 강하분진과 무게가 가벼워서 침강분리가 잘되지 않는 부유분진으로 크게 나눌 수 있으며, 입자상 대기오염물질의 종류는 다음 <표 2-4>와 같다.

입자상 대기오염물질의 고정발생원은 분진의 고정 발생원인 일반가정, 상가, 공장 그리고 발전소이며, 주요 고정 발생원은 화석연료(석탄)를 사용하는 화력 발전소이다. 분진의 발생공정은 여러 가지가 있으나 가장 중요한 발생공정은 화석연료의 연소공정이다. 자동차와 같은 이동배출원에서 발생하는 입자상 대기오염물질은 연료의 불완전연소에 의한 탄소, 탄화수소, 그리고 연료첨가제 중에 포함된 금속에 의한 금속성재 등이 있다.

입자상 대기오염물질은 대류권내의 대기 중에 부유하면서 가시도에 영향을 미치며, 특히 입경 0.1 μm ~ 1 μm 정도의 입자들이 시야에 방해를 준다. 일반적으로 입자상 대기오염물질은 고도 2km이하의 대기 중에 존재하면서 햇빛을 산란하여 입경에 따라 다양한 광학적 효과를 나타낸다. 그러나 대규모 화산 폭발의 경우와 같이

입자상 대기오염물질들이 성층권까지 상승하게 되면, 지구로 입사되는 태양빛을 차단하여 지구의 평균기온을 낮출 수도 있다.

이와 같이 입자상 대기오염물질이 대기권 내에 존재하는 위치에 따라, 단순한 광학적 효과를 유발할 뿐만 아니라 지구의 기후에도 영향을 미칠 수 있다. 또한, 입자상 대기오염물질은 입자 표면에 가스상 오염물질 혹은 중금속 등을 부착하고 있는 경우가 대부분이기 때문에 인체와 생물체에 많은 악영향을 미칠 수 있다. 인체에 호흡을 통하여 입자상 대기오염물질이 침투하는 경우 입경이 10 μm 보다 큰 입자들은 호흡기에서 효과적으로 제거되나, 약 0.5 ~ 10 μm 사이의 입자들은 폐에까지 도달하여 침전될 수 있다.

<표 2-4> 입자상 대기오염물질의 정의와 특성

명 칭	정의 및 특성
분진 (particulate matter)	대기 중 입자상 물질들의 총칭.
재 (fly ash)	연소시 발생한 미세한 회재입자. 불완전 연소한 연료를 포함하기도 함.
검댕 (soot)	타아르에 젖은 탄소입자가 뭉친 것.
에어로졸 (aerosol)	대기 중 고체 혹은 액체 입자가 부유하고 있는 일종의 콜로이드.
먼지 (dust)	파쇄, 연마, 폭발등과 같은 물리적 작용으로 형성된 고체입자. 모체의 성질을 갖고 있으며, 체분리 가능 함.
안개 (fog, mist)	증기가 응축되거나 액체가 분리되어 생성된 액적. 100 μm 보다 큰 입자는 빗방울 형성.
훈연 (fume)	연소, 승화 또는 증류와 같은 화학적 반응에 의해 생긴 고체 입자. 1 μm 보다 작은 입자로 체분리 불가능 함.
연기, 매연 (smoke)	연소와 같은 일종의 산화과정에서 생긴 입자. 광학적인 밀도가 전제됨.
연무 (haze)	대기 중 약간의 수증기를 가진 입자가 주변의 입자와 합쳐진 것.
스모그 (smog)	연기와 안개가 결합된 형태로써 광화학적 반응 생성물과 수증기가 결합되어 자극성의 에어로졸을 형성함.

특히, 2 ~ 4 μ m 정도의 입자들이 폐내에 가장 잘 침전되며, 이러한 입자들은 표면에 여러 가지 독성물질들을 부착하여 인체 내로 운반하는 역할을 하게 된다.

따라서 10 μ m 보다 작은 입자상 대기오염물질들이 인체에 대한 영향이 크며, 우리나라에서는 1995년 1월 1일부터 PM-10 대기기준이 입법화되어 10 μ m 보다 작은 입자들의 대기 중 농도를 별도로 측정하여 관리하고 있다. 황산화물과 연관되어 입자상 대기오염물질의 대기 중 농도가 증가하게 되면, 윗쪽 호흡기 감염이나, 심장병, 기관지염, 천식과 폐렴 등을 유발하고 독성을 가진 중금속 fume 등은 인체나 동물에 치명적인 피해를 줄 수 있다.

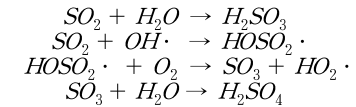
2) 가스상 대기오염물질

가스상 대기오염물질에는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 탄화수소(HC), 할로젠화합물, 일산화탄소(CO), oxidant, 그리고 이산화탄소(CO₂) 등이 있으며, 우리나라에서는 총 16개 항목으로 분류하여 규정하고 있다. 이들 중 중요한 가스상 대기오염물질은 황산화물과 질소산화물이며, 대부분의 가스상 대기오염물질들은 화석연료의 연소과정에서 주로 발생된다. 여기서는 몇 가지 중요한 가스상 대기오염물질들을 설명하였다.

(1) 황산화물(SOx)

일반적으로 배출되는 황화합물의 종류는 다음 <표 2-5>와 같다. 여러 가지 황화합물 중 황산화물이 가장 중요한 가스상 대기오염물질이며, 주로 화석연료의 연소과정에서 발생된다. 화석연료의 연소과정에서 발생하는 황산화물은 연료중에 포함된 유기황과 무기황 중의 일부가 연소되어 발생되며, 아황산가스(SO₂)의 발생량이 거의 대부분을 차지한다. 아황산가스는 무색의 자극성 기체로 환원성이 있으며, 수분이 있으면 아황산으로 각종 색소를 표백한다.

또한, 대기 중에서 광화학반응이나 촉매반응에 의하여 다른 대기오염물질과 반응하고 2차 오염물질을 형성하는 특징이 있다. 대기 중에서 수분과 반응하여 황산을 생성하고 산성비의 원인이 되기도 한다.



<표 2-5> 황화합물의 종류와 배출원 및 배출공정

종류	주요 배출원 및 배출공정
황산화물 (SO, SO ₂ , SO ₃ 등)	연료의 연소, 황산제조, 비철금속 정련, 용광로, 화산
H ₂ S	석유정제, 연료의 연소, 화산
황산염 (H ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄ 등)	연료의 연소, 바다 소금물에 의한 SO ₄ ²⁻ 의 방출

사람이나 동물이 아황산가스에 노출되면 기관지 수축현상이 일어난다. 일반적인 경우 아황산가스 농도가 5 ppm이상이 되면 인체에 반응이 나타나지만 민감한 사람은 1 ~ 2 ppm에서도 가벼운 반응을 보인다. 동일한 아황산가스 농도에서도 습도가 낮은 경우에는 피해가 적지만 미립자 혹은 황산 등 흡입성 물질이 혼합되어 있는 경우에는 피해가 증가한다.

식물의 경우 잎의 하부 기공으로 침투한 아황산가스는 해면조직과 색소조직을 파괴한다. 따라서 광택이 없고 건조한 잎의 주변과 잎맥에 반점이 형성되고 이로 인해 잎의 수분이 상실되고 건조되어 황갈색 혹은 상아색으로 퇴색하여 죽게된다.

(2) 질소산화물(NOx)

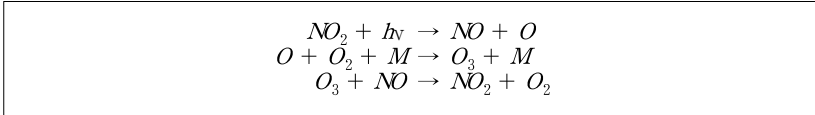
가스상 대기오염물질 중 질소산화물에는 N₂O, NO, NO₂, NO₃, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 있다. 이러한 질소산화물 중에서 NO, NO₂가 가장 중요한 질소산화물이며, 일반적으로 질소산화물(NOx)이라고 하면 이들 두 물질을 말한다.

자연상태에서 상당량의 질소산화물이 생물학적으로 발생되나, 배출농도가 적고 주변지역으로 거의 확산되지 않으므로 자연적인 발생원에 의한 환경오염은 무시한다. 인위적으로 발생하는 질소산화물은 화석연료의 연소과정에서 주로 발생된다.

질소산화물은 질소원의 종류에 따라 대개 fuel NOx와 thermal NOx로 분류된다. Fuel NOx는 연료 중에 포함된 질소가 산화분위기내에서 질소산화물로 전환된 것을 말한다. 그러나 황산화물과는 달리 fuel NOx는 연료 중에 포함된 질소가 모두 질소

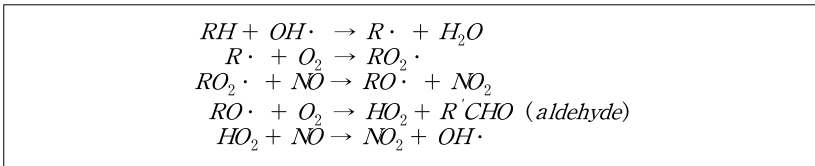
산화물로 전환되지는 않으며, 경우에 따라 다르지만 연료에 포함된 유기질소의 최대 약 60%정도만이 질소산화물로 전환되는 것으로 알려져 있다. 반면에 thermal NOx는 연료를 연소시키기 위하여 공급된 공기 중의 질소가 1000°C이상의 고온산화분위기에서 산소와 결합하여 생성된 것이다. 화석연료의 연소과정에서 배출되는 질소산화물은 대부분이 thermal NOx에 해당되며, NO₂보다 NO의 배출량이 월등히 많다. Thermal NOx의 배출원으로는 화력발전소, 산업용 보일러 이외에도 내연기관을 사용하는 자동차와 선박 등 이동오염원도 중요한 배출원이다.

화석연료의 연소과정에서 질소산화물은 대기 중에서 여러 가지 2차오염물질을 형성하는 특징이 있으며, 중요한 2차오염물질들은 질산, 오존과 광화학 스모그 등을 들 수 있다. 이산화질소(NO₂)는 대기 중에서 수산화라디칼(OH)과 반응하여 질산(HNO₃)을 생성하며, 이것은 산성비의 원인이 된다. 또한, 질소산화물은 다음과 같은 광화학반응에 의하여 오존(O₃)을 생성한다.



위와 같이 이산화질소가 광분해되는 순환과정에서 오존이 생성되게 된다. 성층권 내에 존재하는 오존은 인간에게 유익한 작용을 하지만, 지표면 근방에 존재하는 오존은 강력한 산화제로써 인체와 생태계에 악영향을 미친다.

질소산화물이 대기 중에서 탄화수소화합물과 공존하는 경우에는 다음과 같은 광화학반응에 의하여 광화학 스모그를 형성한다.



이와 같이 생성된 광화학 스모그는 기도축소, 눈, 코와 목구멍 등을 자극하고 많은 호흡성 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다.

일산화질소(NO)는 무색의 기체로 인체와 생물체에 대한 영향이 그다지 크지 않고 이산화질소는 적갈색 스모그를 유발하며, 0.2~0.6 ppm 정도에서도 면과 나일론 섬유를 탈색시킨다. 식물의 경우에는 이산화질소의 농도가 25 ppm을 초과하면 급성피해를 야기 시킨다. 인체에 대하여 급성 혹은 만성피해를 유발하며 급성의 경우 코를 강하게 자극하고 폐충혈, 폐수종, 기관지염과 폐렴을 유발시켜 결국 사망에 이르게 한다. 1~3 ppm 정도의 농도에서 냄새를 느낄 수 있으며 500 ppm에서는 즉시 폐수종을 유발하고 1일 이내에 사망한다. 만성적인 피해의 경우 10~40 ppm 정도의 농도에 장기간 노출된 사람은 만성 폐섬유화 및 폐수종을 일으킨다고 보고되어 있다.

(3) 일산화탄소(CO)

일산화탄소는 무색, 무미 그리고 무취의 가스로 화석연료의 연소시 탄소가 산소가 부족한 상태에서 불완전 연소하였을 때 발생된다. 특별한 경우 고온에서 이산화탄소와 탄소와 함께 분해되어 일산화탄소를 생성하는 경우도 있다. 화석연료의 연소 시 연료와 연소장치의 종류, 연소장치의 조업상태 즉, 연소온도, 체류시간, 공기비 등에 따라 일산화탄소의 발생량은 크게 다르다. 화력발전소는 화석연료를 대량 소모하기 때문에 대기오염물질의 중요한 고정발생원이지만, 화력발전소의 연소관리가 매우 철저하기 때문에 일산화탄소의 배출량은 다른 오염원에 비하여 상대적으로 적다. 오히려, 주택난방과 교통기관에서 발생하는 일산화탄소의 배출량이 거의 대부분을 차지한다.

일산화탄소는 공업적으로 매우 용도가 많은 가스로써 일산화탄소의 강한 환원력을 이용하여 금속산화물을 환원시키는데 주로 사용된다. 이외에도 일산화탄소를 원료 물질로 하여 메탄올, 시안화물, 알데히드, 케톤 그리고 금속탄화물의 생산에 이용되기도 한다. 도시 대기 중의 일산화탄소 농도수준에서는 일산화탄소가 물질이나 식물에 뚜렷한 피해를 미치지 않는 않지만 인체에는 좋지 않은 영향을 미친다. 일

산화탄소는 산소보다 헤모글로빈에 대한 친화력이 200배 정도 더 커서 적은 양의 일산화탄소로도 인체 내 산소 운반량을 현저히 감소시킨다. 인체가 일산화탄소를 흡입하면 혈류 내 탄화헤모글로빈(CO₂Hb)을 형성하여 혈류의 산소 운반량이 감소되며, 이로 인하여 뇌의 활동이 영향을 받고 심장박동이 빨라지는 산소결핍현상이 나타난다.

(4) 오존(O₃)

오존은 성층권의 오존층 내에 존재하여 유해한 자외선을 차단하는 역할을 하지만, 지표면 근방의 대기 중에도 0.04 ~ 0.1 ppm의 낮은 농도로 존재한다. 지표면 근방에 존재하는 오존은 번개에 의하여 자연적으로 발생되기도 하고 고전압선 주변의 방전에 의하여 생성되기도 하며 질소산화물의 광화학반응에 의하여 2차오염물질로 생성되기도 한다.

오존은 탄화수소화합물과 함께 광화학 스모그를 형성하여 인체에 피해를 주기도 하지만 자극성이 강하고 산화성이 큰 가스로써 오존 그 자체만으로도 인체와 생물체에 큰 피해를 준다. 인체의 경우 0.02~0.05 ppm정도에서 냄새를 감지할 수 있고 0.1 ppm에서 30분이상 노출되면 두통을 일으킨다. 0.1~1.0 ppm 농도에서는 눈에 영향을 주어 시각장애를 일으키고 폐포내의 공기확산능력을 떨어뜨린다. 0.8~1.7 ppm정도에서는 폐충혈이 일어나고 9 ppm이 되면, 폐수종을 유발하게 된다. 만성중독의 경우에는 기관지 천식 이외에 폐, 장 등을 악화시키고 체내 효소계를 교란시켜 DNA, RNA에 작용하여 유전인자에 변이를 초래할 수 있다.

식물의 경우 잎의 율타리세포를 파괴하여 얼룩모양의 반점을 만들고 심하면 해면상조직까지 파괴하여 잎을 백색 혹은 황갈색으로 탈색시킨다. 고무의 경우에는 고무표면에 열화현상을 유발한다.

따라서, 오존이 성층권에 존재하는 경우에는 인간과 생태계에 매우 유익하지만 지표면 근방에 존재하는 경우에는 심각한 피해를 줄 수도 있다.

3. 광역대기오염이 환경에 미치는 영향

1) 광역대기오염의 정의

기체는 항상 그 기체를 담고 있는 용기를 가득 채우려는 성질이 있으며, 서로 다른 종류의 기체들은 특별히 혼합하지 않더라도 자발적으로 균일 농도로 혼합되려는 성질이 있다. 이러한 기체의 성질은 대기오염에 있어서 수질오염과는 구별될 수 있는 독특한 현상을 유발시킨다. 대기오염물질을 담은 그릇인 지표면상의 대기권은 수평적으로나 수직적으로 크기가 매우 크고 물리적인 경계가 없다.

따라서, 지표면상의 한 지점에서 배출된 대기오염물질은 기체의 일반적인 특성으로 인하여 배출된 지점 근방의 한정된 영역의 대기만을 오염시키는 것이 아니고 훨씬 더 넓은 영역, 궁극적으로는 지구 전체의 대기를 오염시킬 수 있다. 또한, 대기권내 여러 가지 기상현상으로 인하여 대기오염물질의 확산속도는 더욱 강화된다. 이와같이 대기권내에는 물리적인 경계가 없는 특성과 기체의 일반적 특성으로 인하여 발생하는 대기오염만의 독특한 현상이 광역대기오염이다.

광역대기오염이란 지표면상의 특정지점에서 배출된 대기오염물질이 해당지점의 대기만을 오염시키는 것이 아니고 장거리이동에 의하여 그 지점의 지역적, 국가적 경계를 벗어나 주변지역, 주변국가 더 나아가서 지구 전체의 대기를 오염시키고 피해를 주는 것을 말한다. 이러한 광역대기오염문제를 해결하기 위해서는 특정국가의 노력만으로는 해결하기 곤란하며, 국가 간의 이해가 상충되는 경우 인접지역 국가 간의 지역환경문제를 야기하고 경우에 따라서는 범지구적인 국제 혹은 지구환경문제를 야기한다.

2) 광역대기오염의 분류와 영향

일반적으로 대기오염물질이 확산되는 동안 희석에 의하여 농도가 크게 저하되고, 일부는 자연적인 정화작용에 의하여 제거되기 때문에 지표면상의 특정지역에서 일상적으로 배출된 대기오염물질이 단기적으로 지구전체의 대기질을 위협하지는 못한다. 그러나, 거대한 화산폭발이나, 거대한 운석의 충돌 등과 같이 단기간 동안 대량의 대기오염물질이 방출되거나, 이산화탄소의 방출과 같이 장기간 동안 대기오염물질이 방출되어서 지구전체의 물질순환에 영향을 미치는 경우에는 배출된 대기오염물질이 단기적으로 혹은 장기적으로 광역대기오염을 유발할 수 있다.

광역대기오염은 이산화탄소의 방출과 같이 장기간 동안 대기오염물질이 방출되어서 지구전체의 물질순환에 영향을 미치는 경우, 지역환경문제의 경우에는 해당지역의 국가간 공동노력에 의하여 해결될 수 있지만, 지구환경문제의 경우에는 지구상의 모든 국가가 협력하여야만 해결될 수 있다. 현재 일반적으로 논의되고 있는 광역대기오염문제를 분류하면 다음 <표 2-6>과 같다.

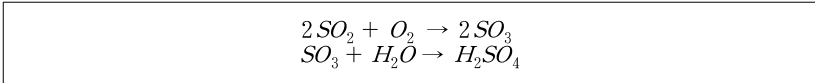
<표 2-6> 광역대기오염의 분류

광역대기오염문제	원인물질	생태계에 미치는 영향
산성비	황산화물(SOx) 질소산화물(NOx)	하천, 호수, 삼림, 토양의 산성화, 황폐화 인간과 동식물에 악영향
오존층 파괴	CFC, 할론 등	인간과 생물상 파괴 생태계 파괴
지구온난화	이산화탄소, 메탄 등	지구평균온도의 상승 해수면의 상승

(1) 산성비

깨끗한 대기 중에서 수분이 응축되어 물방울이 형성되면, 이 물방울에는 대기 중에 존재하는 이산화탄소(CO₂)가 용해되어 탄산이 형성된다. 자연상태에서 물방울에 용해된 탄산이 주변의 이산화탄소와 용해도평형에 도달하게 되면, 물방울의 pH는 약 5.6의 값을 갖는다. 따라서 자연상태에서 형성된 빗물의 pH는 약 5.6의 값을 가지며, 이 값보다 더 작은 pH 값을 갖는 강우를 산성비라고 한다.

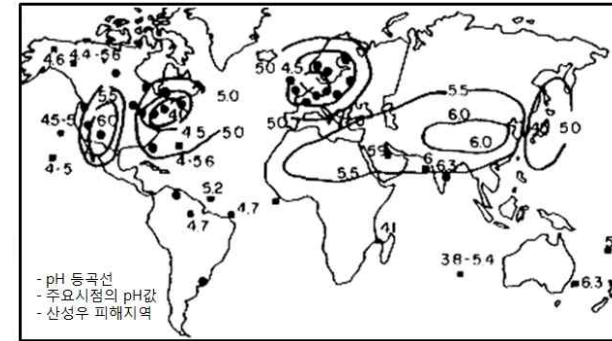
산성비의 pH가 낮은 이유는 자연상태에서 발생하는 탄산 이외의 여러 가지 산을 포함하고 있기 때문이며, 산성비에 포함된 탄산 이외의 대표적인 산은 황산(H₂SO₄)과 질산(HNO₃)이다. 이들 황산과 질산은 석탄과 석유 등 화석연료의 연소에 의하여 발생된 산생성가스[황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)]가 구름이나 빗방울속으로 아래와 같은 화학반응을 통하여 흡수되었기 때문에 생성된 것이다.



이와 같은 산성우는 하천, 호수 등을 산성화시키며, 토양중의 영양염류를 용출시키고 토양을 산성화시켜 산림을 파괴하고 생태계에 큰 피해를 입힌다. 일반적으로 황산염과 질산염은 대기 저층 2km이내에서 이동하나, 경우에 따라 오염원으로부터 수백 km 떨어진 지점까지도 이동한다.

유럽의 경우 영국, 동부와 북부 유럽에서 배출된 산생성가스가 북동쪽으로 이동하여 스칸디나비아반도에 있는 국가들의 생태계를 심각하게 파괴하였다. 스웨덴과 노르웨이의 40여개 호수의 생태계가 산성비에 의하여 전멸하였으며, 핀란드의 경우에는 40여개 호수의 생태계가 전멸하였다. 이외에도 산림을 크게 훼손하였으며, 특히 침엽수들이 크게 영향을 받았다.

<그림 2-4>에 전 세계적인 산성비의 분포를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 산성비는 유럽의 스위스 산악지대, 스칸디나비아반도지역, 미국의 중서부와 캐나다 등 북미지역이 심각한 양상을 보이고 있다.



<그림 2-4> 산성우의 세계적 분포

산성비는 화석연료의 연소에 의하여 발생된 황산화물과 질소산화물에 의하여 주로 생성되기 때문에 산성비를 저감하기 위해서는 황산화물과 질소산화물의 배출량을 줄이는 것이 가장 효과적인 방법이다. 이것을 달성하기 위한 방법으로는 연료의 사용량을 줄이는 방법 이외에 연료를 청정연료로 전환하는 방법, 연소장치와 연소방법을 개선하는 방법 그리고 배기가스를 탈황시설과 탈질시설을 사용하여 처리하는 방법 등이 있다.

(2) 오존층 파괴

지구 대기권의 성층권내 지표면으로부터 25~30km 영역에는 오존이 약 10ppm의 농도로 존재하는 오존층이 존재한다. 이러한 오존층은 태양으로부터 도달되는 자외선 중 인간에게 가장 해로운 파장 200~280nm의 자외선을 거의 전량 흡수하고 인간에게 덜 해로운 파장 280~320nm의 자외선을 70~90% 정도 흡수한다. 따라서 오존층은 지표면에 도달하는 해로운 자외선을 여과하고 대기와 지표면의 온도를 조절하는 기능을 하며, 생물체 생존에 결정적인 역할을 한다.

오존층 내에서 오존은 자외선에 영향을 받아 산소로 분해되는 분해반응과 오존의 생성반응이 동시에 진행되며, 오존의 분해반응과 생성반응의 반응평형은 성층권으로 유입되는 자외선의 양에 의하여 결정된다. 그러므로 오존층 내의 오존은 오존

의 생성반응과 분해반응에 영향을 미치는 다른 가스가 존재하지 않고 자외선의 유입량이 일정할 때 평형농도로 일정한 값을 유지한다.

그러나 성층권의 오존층에는 여러 가지 종류의 가스가 존재하며, 오존의 분해반응에 촉매의 역할을 하는 가스가 존재하면 그 농도가 극미량일지라도 오존층의 오존농도는 크게 감소하게 된다. 이와 같이 오존층 파괴에 영향을 미치는 가스들을 <표 2-7>에 나타내었다. 이러한 미량가스들은 자신은 화학적으로 매우 안정하여 지표면으로부터 상승하여 파괴되지 않은 상태로 오존층내로 유입될 수 있으며, 오존층 내 오랜기간 잔류하면서 자외선의 영향을 받아 다른 물질들과 화학반응을 한다. 특히, 염화불화탄소(CFCs)는 아래와 같은 화학반응을 통하여 자외선에 의해 분해되어 염소원자를 방출하며, 이 염소원자는 오존을 연속적으로 급격히 파괴한다.

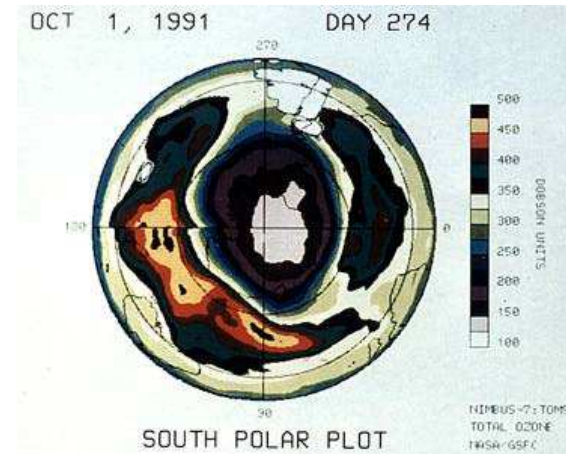


<표 2-7> 주요 오존층 파괴물질

종류	구성성분	오존파괴지수	용도	연간생산량(톤)	대기권잔류기간(연)
CFC-011	CFC13	1.0	냉매, 에어로졸, 발포제	298,000	65-75
CFC-012	CF2Cl2	0.9-1.0	냉매, 에어로졸, 발포제, 살균, 식품냉동, 화장품	438,000	100-140
CFC-113	CCl3CF3	0.8-0.9	용제, 화장품	138,500	100-134
CFC-114	CClF2CClF2	0.7-1.0	냉매		300
CFC-115	CClF2CF3	0.4-0.6	냉매, 거품크림안정제		500
할론1301	CBrF3	10.0-13.2	소화제	2,600	110
할론1211	CClBrF2	2.2-3.0	소화제	2,600	15
HCFC-22	CHClF2	0.05	냉매, 에어로졸, 발포제, 소화제	81,200	16-20
메틸클로로포름	CH3CCl3	0.15	용제	499,500	5.5-10
사염화탄소	CCl4	1.2	용제	71,200	50-69

<그림 2-5>는 남극상공의 오존층 파괴를 나타낸 위성사진이다. 오존층이 파괴되기 위해서는 자외선, 염소원자 그리고 고체상태의 질산(HNO₃)구름이 동시에 존재하여야 하며, 고체상태의 질산구름은 영하 45°C이하에서 발생된다. <그림 2-5>에 나타난 바와 같이 남극의 오존층 파괴가 심한 것은 남극상공의 오존층에서 질산구름의 생성이 용이하기 때문인 것으로 알려져 있다.

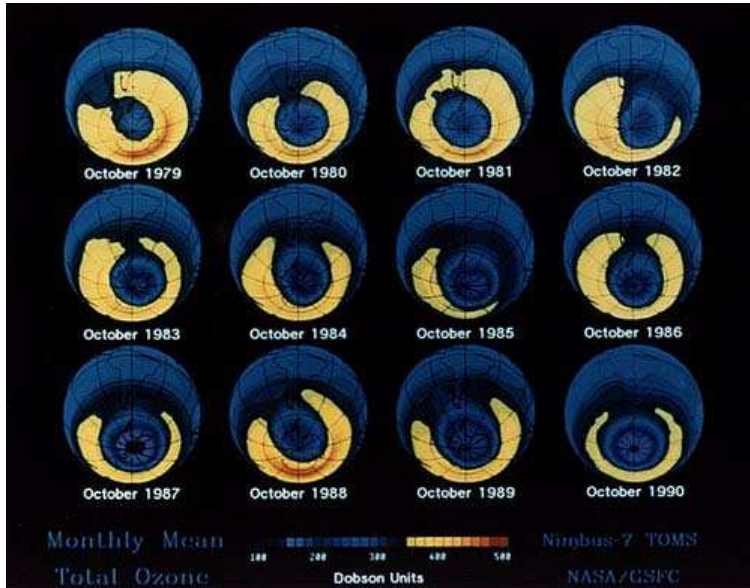
<그림 2-6>은 남극지방의 오존층의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 남극지방의 오존층 파괴는 날로 심화됨을 알 수 있다. 최근에 촬영된 위성사진에 의하면, 지역에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로 모든 지역의 오존층 농도가 감소되고 있는 추세를 보이고 있다.



<그림 2-5> 남극의 오존층 파괴현상

자외선은 파장이 짧을수록 생물체조직에 대한 영향이 더 큰 것으로 알려져 있다. 오존량이 10% 감소하면 지표면에 도달하는 UV-B(파장 280 ~ 320 nm)의 양은 20% 정도 증가하며, UV-B는 동식물 세포의 단백질 및 DNA에 직접 영향을 미쳐 세포를 죽이거나 DNA를 손상시켜 피부암을 유발한다. 오존량 1% 감소 시 피부암 발생률은 2% 증가하는 것으로 예측되고 있다. 또한, 자외선은 식물의 성장을 둔화시키고,

식물 호르몬과 엽록소에 피해를 주며, UV-B는 물속 깊이까지 침투하므로 단세포 조류에게도 심각한 피해를 준다. 이외에도 자외선은 재산상의 피해를 야기하며, 지구의 기후에까지도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.



<그림 2-6> 남극지방의 시간에 따른 오존층 파괴현상의 변화

(3) 지구온난화

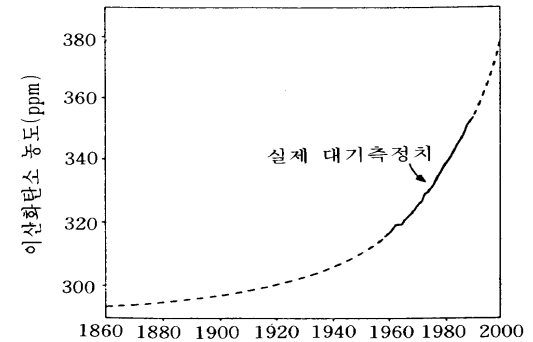
태양으로부터 지표면으로 입사된 햇빛은 일부 대기와 지표면에 의하여 흡수되어 지구를 덥히고 일부는 지표면에서 반사되어 파장이 긴 적외선의 형태로 지구 밖으로 방출된다. 그러나 지구 대기권에 적외선 복사열의 방출을 차단하는 가스가 존재하게 되면, 마치 지구는 온실에 둘러싸인 것과 같은 결과가 된다. 이러한 현상을 온실효과라고 하며, 온실효과를 유발하는 대기 중 가스성분을 온실가스라고 한다. 적절하게 방출되어야만 하는 적외선 복사열이 축적됨에 따라 지구의 평균기온은

상승하게 되며, 이와 같이 지구의 평균기온이 증가하는 현상을 지구온난화라고 한다.

지구온난화의 원인으로는 태양활동의 변화, 화산활동 그리고 온실가스에 의한 온실효과가 지적되고 있다. 여기서, 광역대기오염과 관련하여 온실가스에 의한 온실효과에 대하여 논의하겠다.

온실효과를 유발하는 온실가스로는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 일산화이질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs) 그리고 오존(O₃) 등이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 온실가스들 중에서 지구온난화에 대한 기여도(복사강제력)는 이산화탄소의 경우 55%로 가장 높은 값으로 추정되고 있다.

그린랜드의 얼음으로부터 산업혁명 이전 대기 중 이산화탄소농도는 270 ~ 280 ppm 정도이었던 것으로 측정되었으나, 그 이후부터 농도가 현저히 증가하여 1990년 대기 중 이산화탄소의 평균농도는 353ppm까지 증가하였다. <그림 2-7>은 대기 중 이산화탄소의 농도 변화 경향을 나타낸 것이다. <그림 2-7>에 나타난 바와 같이 산업혁명 이후 산림파괴와 화석연료 사용량의 증대로 인하여 매우 급격한 증가추세를 보이고 있으며, 이러한 추세를 유지할 경우 2100년에는 대기 중 이산화탄소 농도가 460 ~ 560 ppm에 이를 것으로 전망된다.

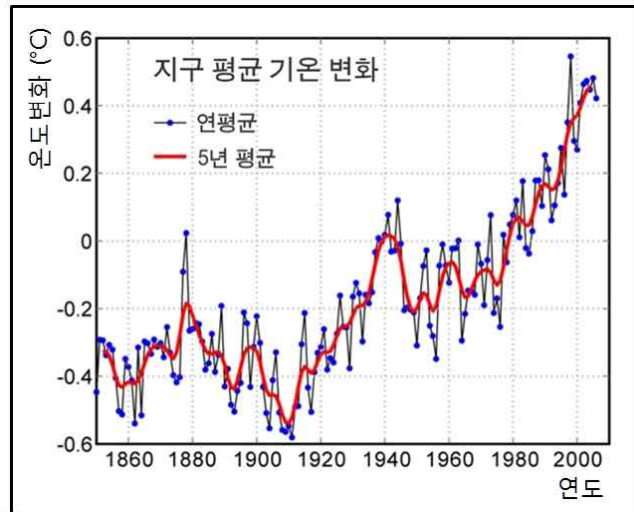


<그림 2-7> 대기 중 이산화탄소의 농도 변화

<그림 2-8>은 과거 약 113년간 관측된 지구의 평균기온 변화를 분석한 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 남, 북반구가 약간의 차이를 보이지만 지구의 평균기온이 약 0.3 - 0.6 °C 상승한 것으로 추정된다. 특히, 최근 10년간은 평균적으로 과거 113년간의 어느 기간보다 높은 기온 상승률을 보이고 있다.

지구온난화가 진행되어 지구의 평균기온이 증가하게 되면, 먼저 토양과 생물체내에 저장되어 있는 탄소가 이산화탄소 혹은 메탄의 형태로 방출되어 지구 전체의 탄소순환에 영향을 주며 대기 중 온실가스의 양이 증대되어 지구온난화가 가속될 것이다. 지구의 평균기온이 증가됨에 따라 해수온도 역시 증가될 것이며, 이로 인해 저고도 지역의 침수와 지하수의 염분 유입등의 피해가 발생될 수 있다.

지구온난화의 영향은 앞에서 언급한 것 이외에도 기후 변화로 인한 농작물의 수확 감소, 질병발생률의 증가 등 인간을 포함한 생태계 전반에 막대한 영향을 미칠 것으로 추정된다.



<그림 2-8> 지구 평균기온의 변화

제2절 이끼의 특성

1. 이끼의 형태적 특성 및 생육환경

1) 이끼의 형태적 특성

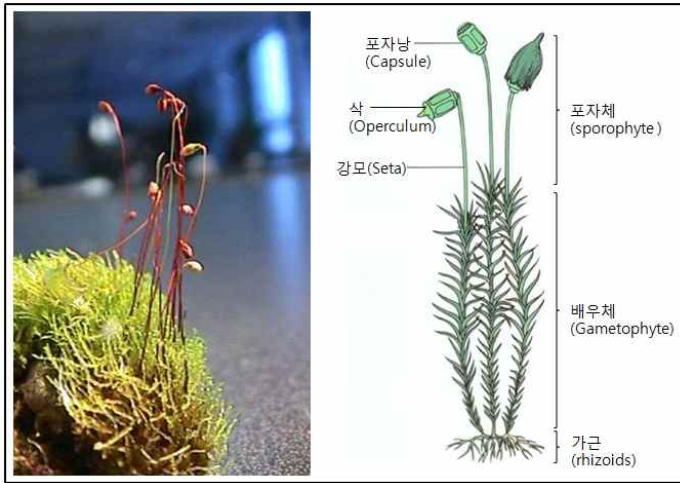
(1) 이끼의 구조

이끼는 일반적으로 소형의 형태가 많고, 수정에 있어서 물을 필요로 하며, 꽃을 피우지 않고 포자로 번식한다. 포자는 부모가 되는 식물에서 떨어진 곳에 떨어져 발아하며, 새로운 개체가 된다. 일반적으로 볼 수 있는 이끼식물의 몸은 배우체라고 불리며, 배우체의 위에 포자를 만드는 포자체가 형성된다.

이끼는 크기가 약 1mm에서부터 1m이상까지 다양하나 대부분 작으며, 관다발계가 결여되고 구조가 단순하다. 이끼의 구조는 줄기의 표피세포가 확장되어 만들어진 가근(rhizoids)과 잎이 분화 된 경엽체⁴⁾로서 줄기·잎으로 나눌 수 있다(그림2-9 참조). 가근은 헛뿌리라고도 부르는데, 몸을 지탱하거나 표면적을 크게 하는 역할을 하며, 줄기는 고등식물과 같이 물이나 영양분의 이동을 위한 통도 조직으로서의 기능은 거의 하지 못한다.

이끼는 암수가 서로 분리되어 자성과 웅성 배우체로 존재한다. 웅성기관에서 생산된 정자는 물을 통해서 동일 식물체 또는 다른 식물체상의 자성기관의 장란기에 도달하여 수정된다. 수정의 결과 새인 접합자는 포자체인 이끼류로 성숙하게 되는데 포자체 자루 끝의 포자낭 속에서 포자들이 성숙되면 포자낭은 다양한 기작으로 포자를 방출한다. 포자는 바람 또는 비에 의해서 다른 장소로 이동되고 발아하여 원사체로 발달하게 된다. 원사체는 수분이 많은 환경에서 잘 자라며 녹색 조류처럼 보이는 눈을 형성하고, 각 눈은 자라서 잎이 많이 배우체 식물로 성장한다.

4) 외부에서는 줄기와 잎이 구별되고 내부에 관다발의 분화를 인정하는 식물체. 선태식물, 선강에 대해서는 엽상체가 높은 정도의 것이라는 견해도 있지만, 줄기에관다발 상의 조직분화를 인정하기 때문에 경엽체라고도 할 수 있다.



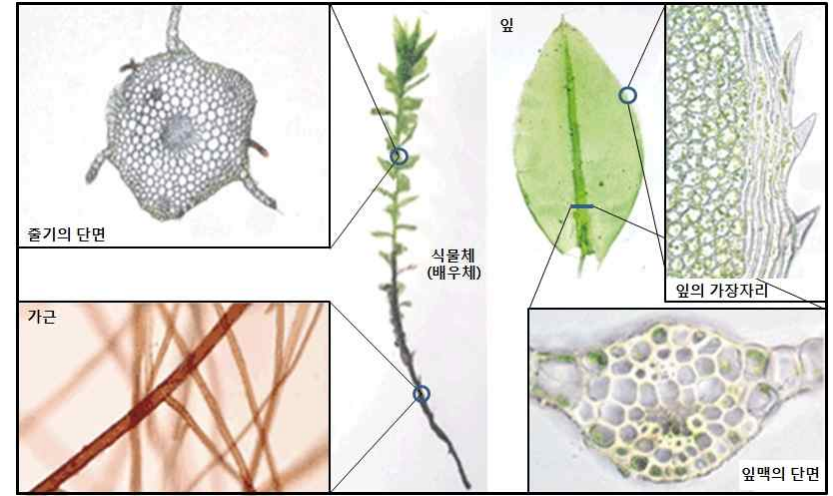
<그림 2-9> 이끼의 구조

(2) 이끼의 형태

줄기의 끝에 있는 1개의 정단세포⁵⁾에서 잘라져 나온 세포로부터 잎과 축주의 모든 조직이 만들어진다. 많은 이끼식물이 사면체형의 정단세포를 가지며, 측면에 있는 3면에서 잘라져 나온 세포는 분화하여 잎이나 줄기가 된다. 잎은 대부분의 종에서 한 층의 세포층으로 이루어져 있다(그림-10 참조).

선강의 경우, 잎의 중앙에 중륜이라고 불리는 줄기형태의 구조를 만드는 것도 있다. 잎의 형태나 크기, 잎이 피는 방식 등은 분류에 있어서 매우 중요하다.

5) 조류(藻類), 이끼식물, 양치식물에 있어 생장점의 최선단에 위치하는 시원세포. 일반적으로 주변의 세포보다 큰 1개의 세포를 가리키지만 2~5개의 시원세포군으로 이루어지는 경우도 있다. 모양, 크기는 종류에 따라 다양한데 고사리, 구실살이, 생이가래에서는 표면과 2개의 오목면에 긴 반렌즈형이고 쇠뜨기, 속새, 솔잎란에서는 표면과 삼면으로 둘러싸인 역삼각원뿔형이다. 이러한 정단세포는 규칙적인 방향으로 세포분열을 하여 새로운 조직을 만든다. 종자식물의 생장점에서는 이런 형식의 시원세포를 볼 수 없다.



<그림 2-10> 이끼의 형태

이끼의 성장형태는 가 개체의 성장형태와 개체군의 성장형태를 바탕으로 구분된다. 각 개체의 성장형태는 수직형(Orthotropic)과 수평형(Plagiotropic)으로 나눌 수 있다. 수직형은 줄기가 부착된 매체에 수직하게 성장하는 종류이고 수평형은 짝이 매체에 수평방향으로 성장하는 것들이다. 개체군의 성장형태는 단년생(annuals), 단초형(short turfs), 장초형(Tall turfs), 쿠션형(cushions poister), 매트형(mets), 웨프트형(wafts), 걸이형(pendants), 꼬리형(tails), 팬형(fans), 가지형(dendroids) 등으로 나뉘며(Magdefrau, 1982), 세부내용은 <표2-8>과 같다.

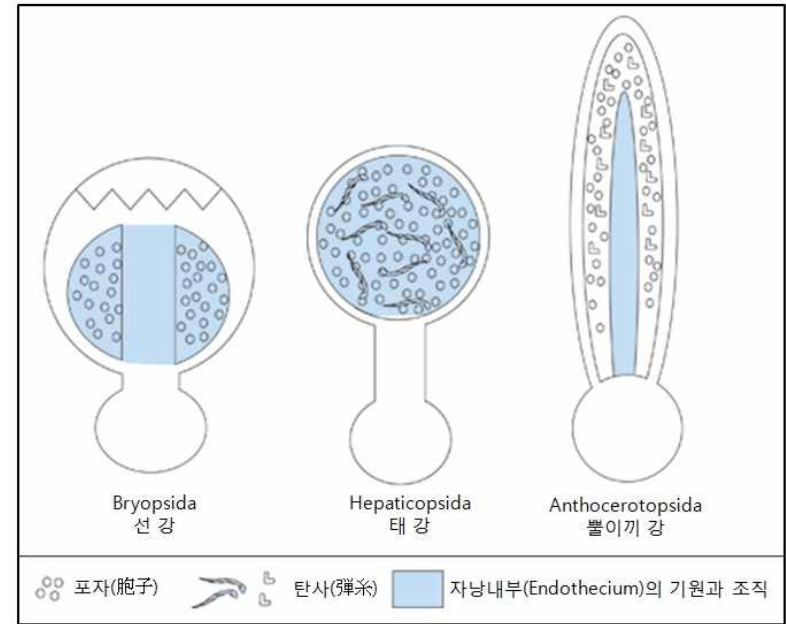
<표 2-8> 이끼의 성장형태 및 특성

성장형태	특징
쿠션형(cushions poister)	수직방향의 아주 많은 수의 싹이 자라는 것이 특징
매트형(mets)	바위나 수피의 표면에 수평의 싹들이 가근에 의해서 단단히 고정된 종류
웨프트형(wafts)	개체군이 층을 이루어 직조형태를 이루는 종류
걸이형(pendants)	나무가지 등에 성장하여 줄기나 싹이 길게 매달려 있는 형태
꼬리형(tails)	걸이형에 비해 다소 짧은 싹들이 꼬리처럼 형성되는 종류
팬형(fans)	꼬리형과 유사하나 평평한 잎의 구조
가지형(dendroids)	토양에 주로 서식하며 배우체의 상부에 수평방향으로 큰 잎과 많은 싹들이 자라는 형태를 가짐

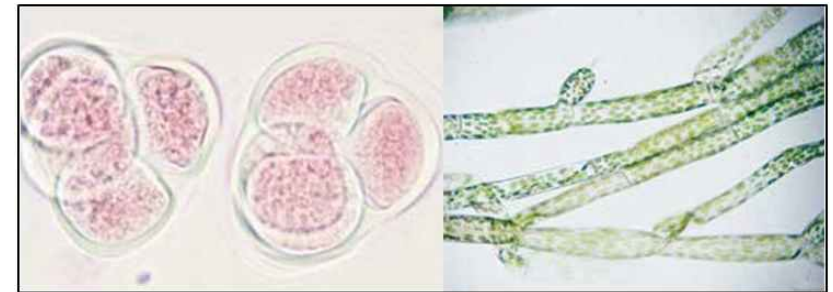
(3) 이끼의 포자

난이 배우체에서 수정하면 포자체로 발달한다. 포자체는 내무에 포자가 만들어지는 삭, 삭과 다리를 연결하는 자루, 포자체를 배우체의 위에 고정되어 영양을 흡수하는 다리로 구성되어 있다(그림2-11).

삭은 선강과 태강, 뿔이끼강 사이에 있으며 구조가 다르다. 선강의 경우 삭위에 모를 가지며 뚜껑이 분리되는 것을 통해 포자가 방출되지만, 태강과 뿔이끼강은 모를 가지지 않고 삭이 분열되어 포자가 방출된다. 포자가 발아하여 원사체가 되고, 다시 배우체가 만들어진다.



<그림 2-11> 이끼식물의 포자형성



<그림 2-12> 완성 전 포자(좌), 원사체(우)

(4) 이끼의 번식

이끼의 일생에는 유성세대와 무성세대가 규칙적으로 번갈아 나타나는데, 무성세대는 독립영양생활을 하지 못하며, 유성세대는 영양을 완전히 의존한다.

우리가 흔히 볼 수 있는 이끼의 식물체는 배우체라고 하는 유성세대이며, 이 경우 배우체가 성숙되면 생식기관이 달린다. 생식기관에는 난자를 만드는 플라스크형의 장란기⁶⁾와 정자를 만드는 기둥(봉형태) 혹은 구 형상의 장정기⁷⁾가 있다(그림 2-13). 생식기관은 포엽이라 불리는 잎으로 보호된다(그림 2-11).



<그림 2-13> 이끼의 생식기관. 좌(장정기), 우(장란기)

태강은 조란기의 주변에 있는 잎이나 줄기 등의 조직이 장란기를 보호하기 위하여 포엽 이외에도 화피 등과 같이 특수한 형태로 분화한다. 조란기의 기부(기초가 되는 부분)의 불거진 부분을 복부라고 부르며, 여기에서 난자가 만들어진다.

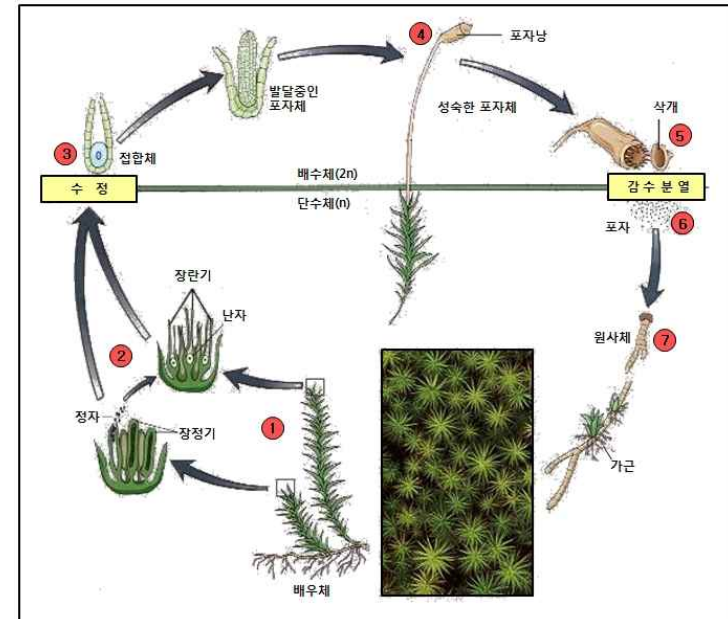
생식기관 속에서 수정이 이루어지는데, 장정기에서 나오는 정자는 2개의 길다란 편모가 있으며, 우산이끼 등에는 편모 끝에 대형의 구상 부착물이 있다. 수분이 있으면 정자는 장란기 내의 난세포에 도달하여 수정한다. 수정란은 분열을 거듭하여 배에서 젊은 포자체가 된다. 포자체는 염색체수 2n인 무성세대이다. 배가 포자체로 될 때, 선강에서는 장란기의 위쪽 질반이 떨어져서 포자체 끝에 부착하여, 그대로

6) 이끼류, 조류, 양치류, 대부분의 나자식물의 자성생식기관

7) 장정기. <식물>선태식물, 양치식물 따위에서 정자를 만들고, 간직하여 두는 기관. 대개는 타원형의 주머니 모양이고 다세포로 되어 있다

성장해서 모자가 된다. 태강에서는 장란기는 떨어져서 포자체의 기부에 남는다.

성장한 포자체는 선단부가 부풀어서 포자낭이 되고, 내부의 포자 모세포가 감수분열을 하여 포자를 만든다. 따라서 포자는 이미 염색체수가 n으로서 유성세대, 즉 배우체의 맨 처음 단계에 해당한다. 태강에서는 포자 모세포와 탄사세포가 만들어지며, 이것은 후에 변형하여 나선형의 비후대가 있는 탄사로 된다. 선강에서는 이 탄사세포가 생기지 않는다. 포자는 성숙하면 포자낭으로부터 비산하여 지상 등에 떨어져서, 적당한 수분·빛·온도조건 하에서 발아하여 원사체를 만든다. 원사체의 세포에는 많은 엽록체가 함유되어 있으며, 이것에 의해서 독립영양생활을 한다. 원사체의 선단 또는 원사체의 일부에 눈[芽]이 형성되고, 여기서 이끼의 몸이 발생한다. 포고나툼(Pogonatum) 등에서는 원사체의 발달이 두드러지고 영존성이 있으며, 식물체는 극히 퇴화되어 있다(그림 2-14).



<그림 2-14> 이끼의 생활사

(5) 이끼의 진화

이끼는 다습한 온대나 아열대 기후에서 크게 번성해 암상에 명석 모양을 형성하거나 바위표면, 나무그루터기나 가지 등을 덮으며 한대지방이나 고산지역의 물이 고여 있는 광범위한 지역을 뒤덮기도 한다. 이끼는 토양의 영양순환에 중요한 역할을 한다. 즉 제한된 수분이나 대기 중에 있는 무기물을 사용해버려 종자식물이 흡수하지 못하게 하는 경우도 있고, 어떤 경우에는 이끼층이 물의 침투를 줄이고 빨리 증발시켜서 특정 종자식물의 수분흡수를 저해시킴으로써 숲의 식생조성을 간접적으로 조절하기도 한다. 특히 습원에서는 물이끼류가 다량의 물을 보유하고 산성도를 높게 하여 다른 종자식물을 몰아낸 뒤 모여 명석 같은 무리를 형성한다. 바위 표면에 서식하는 이끼는 토양 형성을 도와 작은 곤충이나 진드기류, 마지막으로는 속씨식물과 들쥐, 새등이 살 수 있도록 하는 식생의 천이를 유도한다.

이끼의 화석은 매우 드물지만 아마도 가장 오랜 화석은 3억 6,000만~3억 7,400만 년 전의 태본기말에 발견된 것으로 추정된다. 이것은 태강인 리본이끼목에 속하는 식물과 비슷하다. 가장 잘 보존된 화석은 2억 8,600만~3억 6,000만 년 전 에오세의 호박 속에 보존된 것이나 이와 같은 현생 이끼는 없다. 선대식물문은 선강·태강·뿔이끼강으로 구성되고 약 1,000속 1만 8,000종 이상을 포함한다. 그보다 더 자세히 분류할 때는 태강에서는 배우체의 구조가 선강나 뿔이끼강에서는 포자체의 구조 특히 포자낭의 구조가 중요하다.

2) 이끼의 생육환경

이끼의 대부분은 건조한 곳에서도 생존이 가능하며, 빛이나 일정온도가 갖추어 있지 않아도 이끼의 포자는 수년 후 정상적으로 발아한다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 비교적 단순한 조직형태이기 때문에 악조건인 환경속에서도 놀라운 번식력으로 오랜시간 생존 할 수 있었다. 이러한 강인 생명력은 이끼가 생육하는 곳에 환경조건만 맞다면 확산속도는 무척 빠를 것이다. 또한 이끼는 여러 조건의 물에서도 생을 영위할 수 있는데 흐르는 물이나 정체된 물, 바닷물, 담수, 덩거나 찬물, 깨끗한 물이나 오염된 물 등을 막론하고 적응력이 강하다.

일반적으로 이끼는 땅 위에서 자라거나 살아 있는 나무 및 죽은 식물 위에서 자란다. 어떤 이끼는 바위 표면에서 자라기도 하고 물 속에서 자라기도 한다. 스피라크나과(一科 Splachnaceae)에 속하는 많은 종(種)들과 같이 동물의 시체나 노폐물과 같은 질소가 풍부한 곳에서만 사는 것이 있는 반면, 키아토디움속(Cyathodium)·미트테니아속(Mittenia)·스키스토스테가속(Schistostega)은 동굴의 입구, 에페메롭시스속(Ephemeropsis)·리본이끼속(Metzgeria)·작은귀이끼과(Lejeuneaceae)에 속하는 많은 종들은 잎의 표면이나 차들의 아래쪽, 구리이끼속(Scopelophila)은 구리함량이 높은 토양, 디디모돈 토파케우스(Didymodon tophaceus), 피시덴스 그란디프론스(Fissidens grandifrons), 유클라디움 베르티컬라툼(Eucladium verticillatum)은 석회분이 많은 땅에서 자란다. 그러나 지속적으로 수분과 어느 정도의 햇빛을 받아야 하며 온도와 대기습도도 적당해야 잘 자란다. 몇몇 종만이 건조나 냉해에 강하다.

(1) 수분과 양분⁸⁾

이끼(일부 지의류 포함)가 성장하는 곳에서의 수분 관계는 명확하지 않다(Evans and Johansen, 1999). 이끼가 성장하는 곳에서 침투량이 증가한다는 결과가 있는 반면에 이들 식생을 제거하는 경우 침투량이 오히려 증가한다는 결과가 있는 반면에 이들 식생을 제거하는 경우 침투량이 오히려 증가한다는 상반된 결과도 있기 때문이다. 연구결과가 극히 제한된 수이지만, 이끼로 인해 수분증발로 인한 토양수분의

8) 최윤선(2003) 이끼의 수질정화능력에 관한연구.한경대학교 산업대학원 학위논문

손실 또한 상반된 결론을 보이고 있다. 토양수분 손실이 줄어드는 것은 이끼류가 건조되면서 토양을 피복하여 수분증발이 억제되기 때문이라고 설명하고 있다.

이끼의 수분흡수는 고등식물에 비해 비교적 다양한 방법으로 이루어진다. 이끼는 완전히 건조된 상태에서도 사멸하지 않고, 수분이 공급되면서 다시 급속하게 광합성을 하여 생장을 지속한다. 일부는 가근을 통하여 수분을 흡수하지만 대부분의 이끼는 식물체의 표면전체를 통해서 수분을 흡수한다(During, 1992). 영양분은 수분과 유사한 방법으로 통해서 흡수한다. 수분전달체계에 따라서 이들은 Endohydric과 Ectohydric의 두가지로 구별할 수 있다. Endohydric류는 수분이동이 세포와 같은 조직의 체내에서 주로 이루어지며, Ectohydric류는 조직 외부에서 모세관현상에 의해서 이루어진다. Endohydric류에서는 수분이 토양과 같이 바닥에서 흡수되어 잎이나 증발이 이루어지는 기관으로 이동되나 Ectohydric류에서는 수분이 식물체 전체에서 흡수되거나 소실되어 빠른 속도로 수분이동이 이루어진다. 따라서 Endohydric류는 바위와 같이 불투수성 매체에서 많이 발견되며 토양에서 서식하더라도 토양과의 부착이 느슨하다.

이끼가 흡수할 수 있는 수분량은 종류에 따라서 크게 다르다. 이들은 대체로 건조 중량의 50~2000%의 수분을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있다(Schofield, 1985). 맑은 날 햇볕에 의해서 마른 이끼는 약 5%수준의 수분을 갖는다. 건조된 상태에서는 100°C 이상뿐 만 아니라 -196°C의 온도에서 일정시간 경과 후에도 생존이 가능하다. 아주 높은 양이온치환용량으로 인해 이끼류는 낮은 농도의 양분까지도 흡수가 가능하다. 따라서 강수 중에 포함된 각종 양분을 흡수할 수 있으며, 종종 주위에 서식하는 고등식물로부터 흘러내리는 물속의 양분까지도 흡수한다. 양분의 이동은 수분의 이동과정과 거의 유사하다.

(2) 주변 환경과의 관계

이끼가 양분, 토양온도, 토양수분, 토양의 미생물활동 등의 주변 환경에 미치는 영향은 지역의 식물상의 총 생체량의 비율을 고려하면 상대적으로 크다(Sveinbjornsson and Oechel, 1992). 특히 극지와 같은 극한 기상조건에서의 생산성

은 다른 고등식물에 비해서 훨씬 크다. 이끼의 생장과 관련된 주변 환경에는 낙엽이나 부엽토, 토양미생물에 의해서 방출되는 이산화탄소, 수분, 그리고 주변의 미기상 등이 있다. 낙엽은 햇볕을 가리거나 이끼의 생장에 물리적으로 영향을 미치게 되며, 이들이 분해되면서 생성되는 각종 화학물질은 이끼의 생장을 방해할 수도 있다. 반면에 낙엽으로부터 방출되는 양분은 이끼의 생장에 도움을 주기도 한다. 이끼가 덮인 지역에서는 수목의 증자가 발아되는 조건이 좋기도 하지만, 발아 후 뿌리가 토양에 도달하지 못해 더 이상 성장하지 못할 수도 있다. 유럽의 연구에서는 일부 선대식물과 특정 종자식물과의 상호 관계를 밝힌 바도 있다.

이끼가 서식하는 지역의 위치에 따라서 광 투과량은 개방된 지역에 비해 적게는 10~20%수준으로 낮을 수 있다. 주변에 고등식물의 식생밀도가 아주 높아서 이들에 의한 빛의 차단량이 많은 경우에는 이끼류가 받을 수 있는 광량은 더욱 낮을 수 있다. 대기로부터 이끼에 도달하는 수분량은 주변 식생조건에 따라서 달라지며, 식생의 종류에 따라서 도달하는 수분의 형태도 다르다. 예를 들어 침엽수의 경우 잎에서 떨어지는 형태의 빗물이 많고 가지나 수피를 통해 흘러내리는 빗물의 양이 적으나, 활엽수는 이와 반대이다. 지역에 따라서는 안개나 이슬이 필요한 수분공급원이 되기도 한다. 이끼가 접하는 이산화탄소의 농도는 토양에서 생성되는 양이 다르기 때문에 지역에 따라서 크게 다를 수 있다.

2. 이끼의 채집과 분류

1) 이끼의 채집과 표본

(1) 이끼 채취에 대한 기본 상식⁹⁾

이끼를 채집하는데 우선 필요로 하는 이끼가 어떤 장소에 살고 있는지를 알아야 하는데 몇 가지를 예를 들어 살펴보면 <표 2-9>와 같다.

<표 2-9> 생육환경에 따른 이끼종류

생육환경	종류
인가주변	은이끼, 풍경이끼, 꼬마이끼, 수염이끼 등
야외 숲	솔이끼류, 모래이끼, 꼬마이끼, 털깃털이끼 등
산골짜기	솔이끼류, 꼬마이끼, 흰털이끼, 깃털이끼, 물이끼류, 아기초롱이끼, 나무이끼, 꽃송이이끼등

*나무이끼와 꽃송이이끼의 경우 국내에서는 오대산과 한라산 일부에서만 발견됨

(2) 채집방법¹⁰⁾

- ① 이끼의 생육하는 흙, 바위, 나무 등의 채집 장소와 부착장소는 동정할 때 큰 도움이 되므로 자세히 관찰하고 기록한다.
- ② 이끼가 부착하고 있는 나무(활엽수, 침엽수 등)와 부착 높이 등을 기록한다.
- ③ 같은 채집 장소에서는 삭병(금년이나 작년생), 삭모, 삭이 있는 것이 동정에 매우 중요하므로 삭이 있는가를 꼼꼼히 관찰하며 채집한다.
- ④ 이끼는 생육기간이 짧아 채집기회가 적으므로 포자가 있는 부분과 생육상태에 따라 색깔이 다양한 포자가 없는 어린부분도 함께 충분한 양을 채집하는 것이 좋다.
- ⑤ 채집 장소 근처에 생육하는 지의류, 양치류, 고등식물 등의 다른 식물도 함께 채집하고 식물군락도 조사하여 기록한다.

9) 다용도 고품질 이끼 생산기술개발. 농촌진흥청 1995

10) 한국동식물도감 제24권 식물편(선태류).취두문

- ⑥ 채집한 이끼의 뿌리부분에 흙이 많이 붙어 있을 경우 물로 조심해서 씻는다.
- ⑦ 채집한 이끼는 채집할 때마다 생태적 조사사항을 채집 용지에 기록하며, 기록한 채집 용지와 같이 채집종을 놓고 채집 일련번호를 기록하여 큰 용지에 쓴다.
- ⑧ 삭이 극히 소량일 때에는 그 식물체를 따로 작은 용지에 싸고 같은 채집 일련번호를 기록한 다음 기록된 채집 용지와 함께 큰 용지에 쓴다.
- ⑨ 부착 장소는 양지와 음지, 방향, 물기의 정도, 토양의 종류와 색깔, 표고의 높이 등도 조사하여 기록한다. 작은 나침반과 클리노메타(clinometer)를 준비하면 더욱 좋다.

(3) 채집방법

- 바위, 돌, 콘크리트 등에서 사는 이끼
 - 모종삽의 끝부분을 사용하여 군락을 이룬 덩어리가 부서지지 않도록 주의하면서 조금씩 채집하여 비닐봉지에 담는다.
- 지표면에 사는 이끼
 - 모종삽의 엽면등을 사용하여 잔디땃장을 떼어내듯 채집하며 잡초나 나무뿌리가 있을 경우 무리하게 큰 사이즈로 채집하지 않는 것이 좋다.
- 나무 수피에 사는 이끼
 - 등산용 칼로 나무표피의 투박한 겉껍질을 얇게 벗겨내어 수목에 상처가 나지 않게 주의하며 다른 이끼와 섞이지 않도록 비닐봉지에 싸서 가져간다.

2) 이끼의 분류

이끼는 육상에서 생활하는 식물군 중 하나로, 이끼 및 선태류라고 불리며, 지구 상에는 약 1,5000~25,000여종의 이끼가 살고 있는 것으로 추정된다. 이 중 5000여종이 열대우림 지역에 사는 것으로 알려져 있다. 수중에서 진화해온 조류(藻類)의 일부가 육지로 올라와, 현재의 육상식물이 되었으며, 육상식물의 가장 초기의 체제가 남아 있는 것이 바로 이끼이다.

선태식물 분류체계에 대해서는 의견이 많았는데, Bryophyta를 오직 선류(moss)로만 한정하고 태류(Liverwort)와 빨이끼강(hornwort)까지 하나의 문으로 독립시켜 각각의 Division Bryophyta, Division Hepataphyta, Division Anthocerochyta 등 별개의 문으로 취급했으나(Scaligel *et al.*, 1966; Bold *et al.*, 1980), 근래에는 1899년 M. A. Howe의 연구가 널리 인정되어 포자체와 배우자체 세대의 형태를 기초로 해서 선강(Class Musci), 태강(Class Hapaticae), 빨이끼강(Class Anthocerotae)으로 분류한다(Weier *et al.*, 1950; Scale *et al.*, 1966; Iwatsuki & Mizutani, 1972; Neuchul, 1974; ehoe, 1980; Bell, 1992; Makino, 2000). 또한 각각을 Bryopsida, Hepaticopsida, Anthocerotopsida로 사용하기도 한다(Iwatsuki, 2001).¹¹⁾

이처럼 이끼는 크게 선강, 태강, 빨이끼강 3개로 분류되며<표2-10>, 우리나라에서는 최초로 1980년 최두문 교수에 의해 “한국동식물도감 제 24권 식물편(선태류)”에 691종이 정리되었다. 이를 바탕으로 2007년 국립수목원에서 239종을 추가 발견하면서“한국 이끼 목록”을 발간하였지만, 아직도 이끼에 대한 과(Family)에 형질 규정이 뚜렷하지 않은 것이 많고, 지금까지 밝혀진 이끼의 종에 대한 표본과 같은 명확한 근거가 없어 국내의 이끼에 대해 뒷받침해 줄 자료가 미비한 실정이다.

<표 2-10> 이끼의 각 종류(Class)의 비교표

구분 분류	선강	태강	빨이끼강
원사체	사상이고 분지도 잘 발달되며, 드물게 반상인 것도 있음.	분지되지 않은 사상인 것도 있으나, 대부분 덩어리 모양(塊狀)과 반상임.	분지되지 않은 사상인 것도 있으나, 대부분 덩어리 모양(塊狀)과 반상임.
체제	경엽체	경엽체와 엽상체	엽상체
가근	다세포이며 길게 분지됨.	단세포성	단세포성
줄기	보통 직립형임.	보통 옆으로 눕고, 아랫배가 분화되거나 없음.	없음
잎	보통 주맥이 있음	경엽체는 좌우대칭으로 배열하며, 보통 2~4갈래로 깊이 갈라진 것이 많고, 맥이 없음	없음
잎이 피는 방식	나생(螺生)	좌우대칭	-
생식기	외생(外生)	외생(外生)	엽상체 속에 생김
수정란의 최초분열(방향)	횡방향	횡방향	종방향
삭자루	단단히 장수삭이 완성되기 전에 늘어남.	부드럽고 단명포자 방출직전에 늘어남.	없음
포자체의 기공	대부분있음	없음	있음
모자(帽)	있음	없음	없음
촉수	있음	없음	대부분있음
삭의 개구(방식)	뚜껑이 열림 혹은 수직분열	세로로 4분열 또는 불규칙하게 열림	세로로 2분열됨
탄사	없음	있음	있음
엽록체	다수	다수	1~ 몇개
피레노이드*	없음	없음	있음
유체	없음	있음	없음

*이끼식물 및 이보다 하등식물의 엽록체에 포함되는 무색의 부속기관이다

11) 임은영. 제주도 동백산의 선태식물상.2006

(1) 선강

원사체는 복잡하게 가지를 친 사상체이고 여기서 배우체가 나오므로 배우체는 포자의 발아 후 많은 시간이 지난 후에 분화된다. 헛뿌리는 다세포성이고 가지를 친다. 배우체는 경엽상이고, 잎은 나선상 또는 3개 이상의 엽을 지어 배열한다. 잎은 중앙맥을 가지며, 세포는 단순한 지방체를 갖고 후각화되어 있지 않다. 삭의 기부에 흔히 측사를 갖고 있고, 삭의 표면에는 기공이 있고 삭개에 의해 열리며, 그 주위에는 삭치가 있고 측주는 짧다. 삭모는 삭의 끝에서 성숙할 때까지 삭을 싸고 있고, 포자는 시간을 두고 산포된다. 삭병은 내부에 원시적인 통도조직을 가진다(표 2-11 참조). 각 아강(Subclass)들의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

■ 물이끼아강(Sphagnidae)

원사체는 엽상체 모양이고, 배우체가 성숙하면 흔히 똑바로 서고 많은 가지를 친다. 잎은 세포벽에 구멍이 뚫려 있고 속이 빈 유리질세포(hyaline cells)가 많아 물을 잘 흡수하고 많이 저장한다. 삭병은 없고 끝에 포자체가 달린다. 작은 구형이고 삭개에 의해 열리나 삭치는 없다. 측주는 둥근 돛 모양이다. 습원이나 습한 산성 토양에 산다.

■ 검정이끼아강(Andreaeidae)

원사체는 엽상이고 배우체는 성숙하면 흔히 똑바로 자라고, 검은색을 띠며, 잎은 촘촘히 배열된다. 삭병은 없으나 포자체는 배우체의 조직이 신장되어 만들어진 짧은 위족 위에 달린다. 삭은 원추형이며 삭치와 삭개는 없고 세로 방향의 4쪽으로 열개한다. 포자를 형성하는 조직은 긴 골무 모양이다. 북극지방의 노출된 화강암 바위나 모래, 드물게는 하천에서 자란다.

■ 참이끼아강(Bryidae)

선강의 대부분이 이것에 속한다. 원사체는 사상이고, 배우체는 성숙하면 똑바로 서거나 땅 위에 누워 자라며, 잎이 많고 여러 가지 색을 띤다. 삭병이 있고 위족은

없으며, 삭은 원통형 또는 구형이다. 작은 삭개를 통해 열리고, 삭개 밑에 삭치를 갖지만 없을 경우도 있다. 포자형성조직은 측주를 둘러싼 속 빈 원통형이고, 삭의 기부 쪽 표면에 기공이 있다. 다양한 환경에 잘 적응해 살고 있다.

<표 2-11> 선강의 각 아강(Subclass) 비교표

구분 분류	물이끼 아강	검정이끼 아강	참이끼 아강
체제	경엽체, 방사상칭, 배복적 구조	경엽체, 방사상칭, 배복적 구조	경엽체, 방사상칭, 배복적 구조
세포	투명세포는 크고 엽록세포는 작음	세포가 많고, 작은 엽록체가 있음	세포가 많고, 작은 엽록체가 있음
분지	특정장소에 다발로 분지됨	차상(叉狀)으로 분지됨	차상분지이나 옆가지가 있음.
잎맥	없음	있음	있음
가근	있음	있음	있음
생식기	장란기의 경부세포는 6줄이며 장정기는 외생이고 포엽에 싸임	장란기의 경부세포는 6줄이며 장정기는 외생이고 포엽에 싸임	장란기의 경부세포는 6줄이며 장정기는 외생이고 포엽에 싸임
삭병	배우체 조직위에 삭이 생김	배우체 조직위에 삭이 생김	포자체에 생김
삭치	없음	없음	있음
측추	돛형	돛형	원추형
삭의 개구(방식)	삭 상부가 둥글게 떨어짐	양끝을 남기고 가운데만 4분열	삭개가 떨어져 열림

선강은 물이끼 아강(Sphagnidae)에 1목 1과 1속 20종, 검정이끼 아강(Andreaeidae)에 1목 1과 1속 1종, 참이끼 아강(Bryidae)에 12목 50과 199속 624종으로 총 14목 52과 645종이다(표2-12 참조),

<표 2-12> 선강의 분류표

Class	Subclass	Order	Family		
선강 Bryopsida	물이기 아강 Sphagnidae	물이기 목 Sphagnales	물이기 과	Sphagnaceae	
	검정이기 아강 Andreaeidae	검정이기 목 Andreaeales	검정이기 과	Andreaeaceae	
	참이기 아강 Bryidae	네삭치이기 목 Tetraphidales	네삭치이기 과	Tetraphidaceae	
			담뱃대이기 목 Buxbaumiales	담뱃대이기 과	Buxbaumiaceae
			솔이기 목 Polytrichales	솔이기 과	Polytrichaceae
			봉황이기 목 Fissidentales	봉황이기 과	Fissidentaceae
			흙이기 목 Archidiales	흙이기 과	Archidiaceae
			꼬리이기 목 Dicranales	금실이기과	Dicranaceae
				새우이기 과	Bryoxiphiaceae
		명주꼬리이기 과		Seligeriaceae	
		꼬리이기 과		dicranaceae	
		흰털이기 과		Leucobryaceae	
		침꼬마이기 목 Pottiales	통모자이기 과	Encalyptaceae	
			침꼬마이기 과	Pottiaceae	
			고깔이기 목 Grimmialea	고깔바위이기 과	Grimmiaceae
		나무연지이기 과		Erpodiaceae	
		표주박이기 목 Funariales	표주박이기 과	Funariaceae	
			화병이기 과	Splachaceae	
		참이기 목 Bryales	참이기 과	Bryaceae	
			초롱이기 과	Mniaceae	
			긴몸초롱이기 과	Aulacomniaceae	
			너구리꼬리이기 과	Racopilaceae	
			너구리꼬리이기 과	Rhizogoniaceae	
			한랭이기 과	Meesiaceae	
			노간주나무이기 과	Timmiceae	
	구슬이기 과	Bartramiaceae			

<표 2-12> 선강의 분류표(계속)

Class	Subclass	Order	Family	
선강 Bryopsida	참이기 아강 Bryidae	선주름이기 목 Orthotrichales	선주름이기 과	Orthotrichaceae
		방울이기 목 Isobryales	방울이기 과	Isobryaceae
			나무이기 과	Climaciaceae
			뿔이기 과	Hedwigiaceae
			방울이기 과	Cryphaeaceae
			죽재비이기 과	Leucodontaceae
			오소리이기 과	Trachypodaeeae
			나무풀이기 과	Pterobryaceae
			새이기 과	Myuriaceae M. Fleisch.
			누운끈이기 과	Meteoriaceae
			납작이기 과	Neckeraceae
			대호꼬리이기 과	Thamnobryaceae
			호랑꼬리이기 과	Lembophylaceae
			기름종이이기 과	Hookerialceae
			공작이기 과	Hypoptergiaceae
			수염이기 과	Theliaceae
			가시꼬마이기 과	Fabroniaceae
			고깔검정이기 과	Leskeaceae
			깃털이기과	Thuidiaceae
			버들이기 과	Amblystegiaceae
			양털이기 과	Brachytheciaceae
			윤이기 과	Entodontaceae
			산주목이기 과	Plagiotheciaceae
			무성아실이기 과	Sematophyllaceae
			털깃털이기 과	Hypnaceae
			수풀이기 과	Hylocomiaceae

(2) 태강

우산이끼강이라고도 한다. 원사체는 2~3개의 세포로 축소되어 있고, 헛뿌리는 단 세포성이다. 엽상 또는 경엽의 배우체는 포자의 발아 직후에 분화하고, 포자낭을 받치고 있는 측사가 없다. 잎은 진정한 중앙맥이 없고 잎세포는 흔히 두꺼우며, 세포 내에 복잡한 지방체가 있다. 삭(포자낭)에 기공이 없고 세포벽은 가로로 비후되며 세로로 열개된다. 포자낭이 열개될 때 탄사가 뒤틀리며 모든 포자가 일시에 방출된다. 삭모는 삭병이 자라나도 기부에 남아 있다(표 2-13 참조). 태강은 망울이끼아강(Jungermannidae)에 2목 29과 71속 257종, 우산이끼아강(Marchantiidae)에 1목 6과 10속 24종이며 총 35과 81속 281종으로 분류된다(표 2-14 참조).

<표 2-13> 태강의 각 목 비교표

구분 분류	원산이끼목	망울이끼목	리본이끼목	우산이끼목
구성	방사적이며 줄기 잎이 분화됨	배복적이며 줄기잎이 분화됨	배복적이며 엽상체임	배복적이며 엽상체임
잎이 붙는 위치	위치는 부정하며 막대모양임	일정함	잎이 없음	잎이 없음
조직의 분화	없음	없음	없음	복잡함
유체	거의 전세포에 분포	거의 전세포에 분포	거의 전세포에 분포	체세포에 분포
분지	정단분지, 줄기의 새분지	정단분지, 줄기의 새분지	차상 분지같이 보임, 줄기 새분지	차상분지, 줄기 새 분지는 희귀
가근	없음	있음	있음	있음
장란기	단생이며 나출됨	화피 또는 포막으로 싸임	포막으로 싸임	포막으로 싸임
줄기세포	6줄	5줄	5줄	6줄
위치	부정	정단착생	비정단 착생	비정단 착생
구성	-	삭, 삭병, 족부	삭, 삭병, 족부	삭 족부, 삭병은 짧거나 없다.
삭	-	삭벽은 2~10세포 층이며, 각 세포벽은 수평 방향으로 비후함	삭벽은 2~5세포층, 각 세포벽은 수평 방향으로 비후함	삭벽은 단세포층임
열계	-	4종열	4종열	불규칙 열계
포자형성	-	탄사수반	탄사수반	탄사수반

<표 2-14> 태강의 분류표

Class	Subclass	Order	Family	
태 강 Hepaticopsida	망울이끼 아강 Jungermannidae	망울이끼 목 Jungermanniales	쌍갈고리이끼 과	Herbertaceae
			술잎이끼 과	Pseudolepicoleaceae
			털가시잎이끼 과	Trichocoleaceae
			베슬이끼 과	Lepidoziaceae
			목걸이이끼 과	Calypogelaceae
			개밭이끼 과	Cephaloziaceae
			길게밭이끼 과	Cephaloziellaceae
			망울이끼 과	Jungermanniaceae
			은비늘이끼 과	Gymnomitriaceae
			엄마이끼 과	Scapaniaceae
			기밭이끼 과	Geocalycaceae
			날개이끼 과	Ptagopciaceae
			Arnelliaceae	Arnelliaceae
			털은행잎이끼 과	Acrobolbaceae
			부채이끼 과	Radulaceae
			털잎이끼 과	Ptilidiaceae
			주머니털이끼 과	Lepidolaenaceae
			세줄이끼 과	Porellaceae
			지네이끼 과	Frullaniaceae
			가시지네이끼 과	Jubusaceae
			작은귀이끼 과	Lejeuneaceae
	리본이끼 목 Metzgeriales	비늘우산대이끼 과	Fossombronaceae	
		물우산대이끼 과	Pelliaceae	
		Allisoniaceae	Allisoniaceae	
		마키노우산대이끼 과	Makinoaceae	
		거미집이끼 과	Pallaviciniaceae	
		넓은잎우산대이끼 과	Blasiaceae	
		초록우산대이끼 과	Aneuraceae	
	리본이끼 과	Metzgeriaceae		
	우산이끼 아강 Marchantiidae	우산이끼 목 Marchantiales	조개우산이끼 과	Targioniaceae
			패랭이우산이끼 과	Conocephasaceae
			Wiesnerellaceae	Wiesnerellaceae
			Ayoniaceae	Ayoniaceae
우산이끼 과			Marchantiaceae	
둥근이끼 과	Ricciaceae			

(3) 빨이끼강

각태강이라고도 한다. 원사체는 짧은 사상(絲狀)이거나 없고, 포자 발아 직후에 분화한다. 헛뿌리는 단세포성이고 매끈하며, 배우체는 엽상이다. 장란기는 독립된 구조를 갖지 않고 엽상체 속에 묻혀 있으며, 장정기는 엽상체 속에 함몰된 작은 방 속에 달린다. 엽상체는 아래쪽에 기공 같은 구멍을 갖고, 가끔 점액분비물을 지닌 방을 갖는다. 복잡한 지방체는 없고, 엽록체가 존재하며 피레노이드도 있다. 포자낭은 빨 모양으로 기공이 있으며 탄사는 흔히 다세포성이고 나선상의 비후는 없다. 삭의 축주는 끝까지 길며, 삭의 성숙이 기부의 분열조직에서 이루어지므로 삭은 위에서 아래쪽으로 시간을 두고 세로로 열개된다.

빨이끼강은 1목 2과 3속 4종으로 간혹 나머지 선태식물과 독립된 문으로 분류되기도 한다(표 2-15 참조).

<표 2-15> 빨이끼강의 분류표

Class	Subclass	Order	Family	
빨이끼 강 Anthocerotopsida	-	빨이끼목 Anthocerotales	빨이끼과	Anthocerotaceae
			Notothylayaceae	Notothylayaceae

3. 이끼의 생태

일반적으로 이끼는 땅 위에서 자라거나 살아 있는 나무 및 죽은 식물 위에서 자란다. 어떤 이끼는 바위 표면에서 자라기도 하고 물 속에서 자라기도 한다. 스피라크나과(一科 Splachnaceae)에 속하는 많은 종(種)들과 같이 동물의 시체나 노폐물과 같은 질소가 풍부한 곳에서만 사는 것이 있는 반면, 키아토디움속(*Cyathodium*)·미트테니아속(*Mittenia*)·스키스토스테가속(*Schistostega*)은 동굴의 입구, 에페메롭시스속(*Ephemeropsis*)·리본이끼속(*Metzgeria*)·작은귀이끼과(*Lejeuneaceae*)에 속하는 많은 종들은 잎의 표면이나 차들의 아래쪽, 구리이끼속(*Scopelophila*)은 구리함량이 높은 토양, 디디모돈 토파케우스(*Didymodon tophaceus*), 피시덴스 그란디프론스(*Fissidens grandifrons*), 유클라디움 베르티킬라툼(*Eucladium verticillatum*)은 석회분이 많은 땅에서 자란다. 그 이외에도 산길변이나 경작지 주변, 절이나 신사의 경내 및 공원의 나무줄기 같은 가까운 곳에서도 이끼식물의 관찰이 가능하다. 그러나 지속적으로 수분과 어느 정도의 햇빛을 받아야 하며 온도와 대기습도도 적당해야 잘 자란다. 몇몇 종만이 건조나 냉해에 강하다.

1) 길가에 생육하는 이끼¹²⁾

(1) 은이끼(*Bryum argenteum* Hedw.)

시가지의 돌담이나 시멘트 담 또는 습도가 있는 마당, 지붕, 암반, 또는 나무줄기 등 여러장소에 밀생하여 군락을 만든다. 가장 흔히 볼 수 있는 이끼이다. 식물체가 작으로 백록색인데, 줄기는 분지가 잘되며 가늘고, 높이는 5~10mm이며 곧게 서고 밑에는 많은 가근(헛뿌리)이 있다. 잎의 길이가 0.5~1mm이며 끝이 짧게 뾰족하고 복외상으로 붙으며 넓은 알모양인데, 중앙부가 깊게 굽어져 있다. 잎의 상반부에 엽록 세포가 없고 투명하기 때문에 은색으로 보이는 것이 이 종의 특징이다.

암수 한그루이며 작은 길이가 1.64mm이고 너비는 0.3mm정도이며 긴 타원형이었고, 짧은 경부가 있으며 RMx이 밑으로 처진다. 구완은 2열이며, 어린 식은 황록색인데 점차 황색으로 변하여 성숙하면 적갈색이 된다. 삭병의 길이는 30mm, 삭개의 길이는 0.33mm정도이다.



<그림 2-15> 돌틈, 블록사이에 군락을 이루고 있는 은이끼*

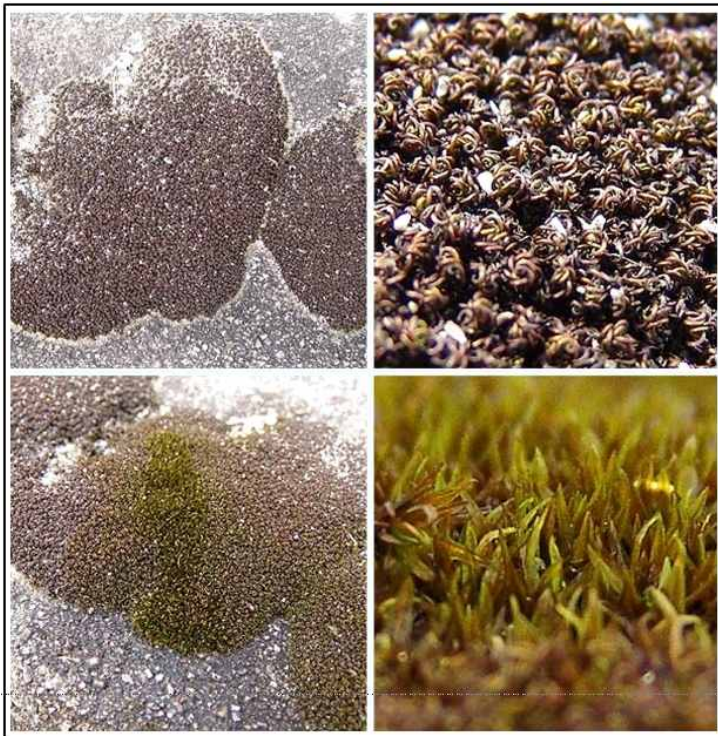
*<http://blog.murablo.jp/kaisei/date/2010-03-21.html>

(2) 담뱃잎이끼(*Hyophila propagulifera* Broth.)

양지쪽의 토양이나 바위 절벽 또는 콘크리트나 담, 돌담에 착생하며 자란다. 식물체는 갈색이며, 줄기의 길이는 15mm정도이다. 잎은 넓은 혀모양인데 길이는 1.5~2mm이고, 너비는 0.6~0.8mm이며 예두로서 짧은 투명침이 있고, 잎 가장자리에는 톱니가 없다.

12) 최두문(1988) 한국동식물도감 제 24권 식물편(선태류)

삭은 원통형이며 길이는 1.2~2mm이고, 너비는 0.5mm이다. 삭병은 길이가 3~8mm 이고, 삭의 표피 세포는 두꺼운 세포벽을 갖고 불규칙한 긴 네모꼴이며 길이는 50 μ정도이다. 구환은 분화하며, 삭개는 길이가 0.3~0.8mm이고, 삭모는 길이가 4~5.5mm이며, 포자는 연한 녹갈색이고, 지름은 9~12μ이다. 무성아는 알모양에서 서양배 모양인데 그 표면은 큰 돌기가 여러 개 있으며 길이는 60~80μ이고 암갈색이다.



<그림 2-16> 도로주변에 생육하는 담뱃잎이끼*

*<http://had0.big.ous.ac.jp/plantsdic/bryophyta/pottiaceae/hamakigoke/hamakigoke.htm>

2) 물속에 사는 이끼

(1) 강물이끼(*Fontinalis antipyretica* Hedw)

깨끗한 물이 흐르는 개울이나 도랑 같은 바위, 말뚝 등에 착생하여 생육하며 양호한 하천 수질 지표종이기도 한다.

줄기는 길고 30cm 이상이 될 수도 있고, 불규칙하게 분기한다. 잎은 3열로 너무 조밀하지 불지 않고, 달걀모양으로 길이 3~8mm 정도이다. 수직으로 축소되고 잎은 대생이며 둔하다.¹³⁾



<그림 2-17> 물속에 사는 강물이끼

13) <http://www.cgr.mlit.go.jp/oitagawa/Bio/plants/index012.htm>

3) 물에 떠서 사는 이끼

(1) 은행이끼(*Ricciocarpus natans* Carda.)

논이나 연못 또는 고인 물에 수생하거나 진흙위에 착생한다. 엽상체의 길이는 1~1.5cm이며 너비는 4~8mm정도이다. 엽상체는 반 엽통모양이고 가운데의 맥이 뚜렷하며 선단부위에서 갈라지며 마치 은행나무와 같은 형태를 취한다.¹⁴⁾ 기실공은 크고, 각각에 기공이 있으며 6~8개의 공변 세포가 있는데 퇴화하여 거의 없는 것도 있다. 세포벽은 약간 비후된다.

엽상체의 횡단면은 거의 평평하나 위쪽 중앙이 약간 오목하고 가장자리는 약간 얇다. 수생하는 엽상체의 아래쪽에는 긴 톱니가 있는 자주색의 복인편이 밀생되어 있으며, 가근은 적거나 없다. 육생하는 엽상체는 그 모양이 우산이끼와 비슷하나 다르고, 복인편은 밀생하고 황갈색이나 자주색을 띠며 많은 무색의 헛뿌리가 있다. 암수한그루이다.¹⁵⁾



<그림 2-18> 물위에 떠서 생육하는 은행이끼

(2) 물긴가지이끼(*Riccia fluitans* L.)

연못이나 논 속 또는 개울가의 물 속에 군생하며, 습기가 있는 흙에서도 살아갈 수 있다. 식물체는 녹색이거나 황록색이며, 엽상체의 길이는 10~50mm이고 너비는

14) 「愛知県維管束植物レッドリスト」 (2009年) p.722

15) 한국동식물도감

0.5~1mm이며, 규칙적인 2갈래로 갈라지고, 헛뿌리와 복인편은 없다. 기실공이 없으며, 기실은 2~3층이다. 엽상체의 횡단면은 양쪽이 둥글고 나비는 두께의 3~4배가 된다. 엽상체 본체의 신장은 건조 상태에 따라 큰 차이가 있다.

암수한그루이다. 생식기관은 희귀하며, 포자체는 엽상체의 복면 위에 둥근 돌기로 형성하며, 포자는 황갈색으로 투명하고 지름이 75~90 μ m이며 표면에는 유두가 있다.



<그림 2-19> 물위나 진흙에 생육하는 물긴가지이끼

4) 나뭇잎에서 자라는 이끼

(1) *Leptolejeunea elliptica* ¹⁶⁾

습도가 높은 숲의 나뭇잎 위에서 생육하며 잎의 세포에 유체를 갖고, 곰팡이와 같은 독특한 향기를 낸다. 잎에 눈 점 세포가 10개 정도이며 아랫배 한쪽에 점, 용골과 상대방의 톱니 곁에 투명세포가 있지만 확인하기 어렵다.

16)

http://translate.google.co.kr/translate?hl=ko&sl=ja&u=http://sigesplants.chicappa.jp/Leptolejeunea_elliptica-1.html&ei=UMMrTZLxBI6sQOFjoyHBg&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=4&ved=0CEoQ7gEwAw&prev=/search%3Fq%3D%25E3%2582%25AB%25E3%2583%2593%25E3%2582%25B4%25E3%2582%25B1%26hl%3Dko%26newwindow%3D1%26sa%3DG%26prmd%3Dvns



<그림 2-20> 나뭇잎에 생육하는 이끼



<그림 2-21> 동물의 배설물 위에서 자라는 이끼

5) 동물의 배설물에 사는 이끼

(1) *Splachnum ampullaceum* Hedw.

황폐한 지역에 세계적으로 분포하고 주로 죽은 동물이나 배설물에 생육한다.

그림22는 북극권의 스피치베르겐섬에서 촬영된 것으로 순록의 배설물 위에서 자리 자리잡고 있다. 포자체는 아름답고 선명하며, 포자체의 아래쪽이 치마처럼 펼쳐져 있다. 이 화려한 모습으로 파리등의 곤충을 유인하여 포자를 다른 배설물로 퍼트린다.¹⁷⁾

17)

<http://translate.google.co.jp/translate?hl=ko&sl=ja&u=http://ja.wikipedia.org/wiki/%25E3%2582%25B3%25E3%2582%25B1%25E6%25A4%258D%25E7%2589%25A9&ei=0YvTTNqEOLu-sQPMnfmvBg&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=14&ved=0CF4Q7gEwDQ&prev=/search%3Fq%3D%25E8%2598%259A%25E8%258B%2594%25E6%25A4%258D%25E7%2589%25A9%26hl%3Dko%26sa%3DG%26prmd%3Di>

4. 이끼의 효과 및 이용

1) 이끼의 효과

(1) 이끼의 일반적인 효과¹⁸⁾

■ 생육기반 불필요

이끼식물은 통도조직이 없어 대기로부터 수분과 양분을 직접 흡수하여 성장하므로 기반이 필요하지 않다.

■ 어떤 조건에서도 성장

이끼는 유리, 철판, 콘크리트, 흙, 돌 등 성장기반과 수평과 수직, 음지와 양지 등 조건을 가리지 않고 성장할 수 있다.

■ 유지관리 불필요

이끼는 내부와 외부의 수분포텐셜을 빠른 속도로 평형 시키는 식물이기에 관수 등 관리행위가 필요 없다.

(2) 이끼의 환경적 효과

■ CO₂고정에 의한 지구 온난화 억제

일반식물에 고정된 CO₂는 식물이 죽거나 낙엽으로 토양에서 분해되어 다시 대기로 환원되는 반면, 이끼는 분해가 현저히 느리고 탄소를 고정한 채로 퇴적되어 이탄층을 형성하는 특성을 지니고 있어 지구 온난화 방지에 기여할 수 있다.

■ 옥상이나 벽면의 미기후 완화효과

이끼는 옥상이나 벽면에 착생되면 태양 에너지의 직접 전달을 차단하여 옥상 바닥이나 건물벽면의 급격한 온도변화를 완화시켜 주고 복사열도 감소시켜 구조물의 내구성 증대 효과를 얻을 수 있다.

18) 특수공간 녹화와 실루리안 시스템. 일송

■ 수원함양

통상적으로 자기 무게 20배 이상 수분을 보유하는 것으로 알려진 이끼는 무기물로 둘러싸인 도심에서 수자원을 함양시킬 수 있는 자원이라 할 수 있다.

■ 초기 생태계의 회복

이끼는 생물이 살 수 있는 최초의 기반을 형성합니다. 이끼가 성장하면 이를 바탕으로 다양한 생물의 서식이 가능하게 되어 놓여진 환경 여건에 따라 다양한 생태계가 형성될 수 있다.

(3) 토양의 피복효과

이끼류에 의한 토양의 피복과 이에 따른 토양보전효과에 관련된 연구는 거의 없는 실정이다. 다만 지의류와 이끼류를 포함한 소위 미소생물상이 가지는 토양 보전 효과에 대한 연구는 제한적으로 보고되고 있다(Evans and Johansen, 1999). 이들 결과에 의하면 지의류, 곰팡이, 그리고 이끼류가 토양표면에 서식함에 따라서 토양은 결속되고 따라서 토양침식에 대한 저항력이 증가한다는 것이다. 토양의 결속은 이들 미소 생물상 중 일부 Cyanobacteria가 분비하는 polysaccharides의 화학적 토양고결과 이끼류가 가근에 의한 물리적 토양결속의 두 가지에 의하는 것으로 설명되고 있다.

이끼류를 포함한 미소생물상과 지표수에 의해 발생하는 토양유실에 관련된 연구는 역시 아직 명확하지 않다. 미소생물상과 관련된 침투수량과 토양유실량에 관한 최근의 연구결과로서, Williams(1995)은 미국의 유타에서 수행한 실험결과를 바탕으로 미생물상이 존재하는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 면상(interrill) 침식량이 감소하는 반면 침투수량의 증가는 없는 것으로 결론을 지었다. 물론 미생물상의 우점종이 cyanobacteria였기 때문에 이끼류 식생 단독에 의한 결과로 볼 수는 없다.

비교적 습하고 햇빛이 다소 약한 곳에서 서식하는 이끼류를 관찰해 보면 토양표면을 피복, 토양유실을 억제하는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 솔이끼의 하나인 *Eurhynchium striatum* 이 토양침식에 저항하여 생존하고 있는데 주변의 토양이 심하게 침식되었음에도 불구하고 이끼가 덮인 곳의 아래 부분에서는 토양 침식이 거

의 발생하지 않고 있음을 볼 수 있다. 적어도 이끼가 성장하는 곳에서는 토양유실이 억제됨을 판단할 수 있다. 따라서 경사면에 다른 초본류나 기타 고등식물이 서식할 수 없는 조건에서 토양보전을 위한 대안으로서 이끼를 활용하는 것이 가능하다고 판단된다.

2) 이끼의 이용

이끼는 앞에서 설명한 바와 같이 수리 조절 기증, 저수지 기능, 비탈면 침식 방지 기능 등이 있으며, 소동물에게 작은 안식처를 제공하고 종자의 발아에 이용되기도 하며 일부 곤충에겐 음식을 제공한다.

또한 나라별로 인류가 이끼를 다양한 용도로 활용해 온 것은 각종 문헌을 통해서 알 수 있다. 13세기경 영국에서는 과일이나 야채를 보관하기 위해서 이끼를 이용해 왔으며, 유럽의 일부지역에서는 배를 만드는데 물이 새기 않도록 하기 위한 재료로서 사용했다(Richardson, 1981). 집을 짓는데 필요한 건축자재로서, 베개나 매트리스의 재료로서, 미국 대륙의 인디언들은 흡착용도나 등불의 심지으로도 이용하였다. 특히 Sphagnum류는 오랫동안 상처치치용 붓대(dressing)로 이용되어 왔다. 면봉대가 자중의 4~6배의 수분을 흡수할 수 있는데 반해 Sphagnum류는 자중의 건조중량의 16~20배의 액체를 흡수할 수 있는 장점이 있고, 다공성이며 미약하지만 부패를 방지하는 성질을 가지기 때문이다(Richardson, 1981). 일본의 경우 토양 보완제, 이끼정원을 만드는 등 원예에 활용되고 있다. 중국에서는 예전부터 의약품으로 사용하였는데, 최근의 화학적 연구에서 과학적 근거가 인정되고 있으며 많은 화학물질이 이끼에서 발견되고 있다. 또한 유전학, 물리학, 생태학 분야의 많은 연구에서 이끼를 활용하고 있고, 생태학자들은 생태계의 변화에 매우 민감하게 반응하는 이끼종을 찾아내 대기 및 수질오염의 지표 또는 희귀한 금속, 광물 분포의 지표로 활용하고 있다.

현재 국내에서는 환경에 잘 반응하는 몇몇 이끼종을 대상으로 연구를 하였다. 그

결과를 살펴보면 망울이끼는 물속의 중금속을 빨아 들여 물을 깨끗하게 하고 깎지이끼는 오염에 강하여 오염된 물을 정화시켜주며, 연지이끼는 오염에 약하여 환경오염측정의 지표로 이용된다. 우산이끼의 세포속의 액체는 약의 원료로도 쓰이며, 꼬리이끼는 벼에 생기는 도열병을 치료하는데 쓰인다.¹⁹⁾

(1) 원예적 이용

이끼는 특히 이탄이끼의 경우 높은 물저장 능력 때문에 식물화분에 이용되고 있다. 이끼와 토양을 섞어 호산성 현화식물의 가벼운 보습제로 사용하고 있으며, 난류, 특히 착생종들은 대개 이탄이끼 기질에서만 재배한다. 온대지방에서 습지의 이탄이끼가 퇴적되어 만들어진 이탄은 정원의 토양을 덮는 재료 또는 비료로서 대량으로 사용되어 무기질을 더해주는데, 이탄이 분해될 때 부식토와 함께 토양을 비옥하게 만든다. 또한 이탄이끼는 같은 방식으로 식충식물과 같은 습지식물의 생육기질로도 이용되고 있다. 양묘장에서는 이탄이끼를 식물 수송 및 뿌리 포장용으로 사용하고 있다.

선류는 화분에 심어 장식용 또는 토양의 건조 방지용으로 이용하기도 하지만, 일본에서는 분경의 분재 아래에 돌, 태강과 함께 심어 작품을 연출한다. 특히 일본 사찰에서는 이끼정원을 조성하여 선류를 심고 잘 관리하고 있으며, 이 정원은 불교의 정신이 투영된 고요하고 조화로운 미적 분위기를 자아내게 한다.

■ 의학적 이용

고대부터 일부의 이끼는 약용으로 이용되었는데, 태류를 뜻하는 Liverworts의 어원이 이를 증명하고 있다. 태강이 인간의 간 "Liver"와 닮았다고 해서 간질환 치료에 사용되었다고 한다. Calyptra라고 하는 털이 있는 삭모의 태강은 사람의 머리카락을 자라게 한다고 하여 털이끼(Hair Moss)로 불려졌으며, 또는 여성들이 많이 이

19) www.putso.com.ne.kr/frame4.html

용했기 때문에 숙녀이끼(Lady Moss)라고도 했다.

*Sphagnum sp.*는 뛰어난 물 저장력 때문에 상처를 감싸는 붕대로 만들어 이용했다. 1차 세계대전 동안 이탄이끼의 압축건조재를 지혈을 위한 외과 처치용으로 사용했는데, 캐나다 적십자회는 매월 20,000개의 드레싱을 준비했다고 한다. 중국에서는 선류를 식물기름과 혼합하여 습진, 벤상처, 화상 등 치료에 이용하였으며, 선류의 추출물은 기관지염, 심혈관 질환에 사용했고, 어떤 종은 이노제로 이용했다고 한다.

화학적 분석에서 대부분의 이끼가 항생성분을 가지고 있는 것으로 밝혀졌다. 건조한 이탄이끼는 습보다 더 흡수력이 높기 때문에 외과 처치용으로도 활용되지만 병원 감염을 예방하기 위해서도 이용되고 있다. 이끼 중에 많은 종은 석탄산(Phenolic) 함유물을 가지고 있기 때문에 병원성 곰팡이나 박테리아의 성장을 억제시키기도 한다. 이런 자연에서 만들어지는 생물체계의 성분은 식물의 나이, 계절, 자생지 등에 따라 달라진다. 또한 선류로부터 분리한 항암물질을 투여한 결과 암세포가 성장을 멈추었다.

반대로 어떤 태강은 사람에게 알려지성 피부염을 일으키기 하기 때문에 잘 다루야 한다.

■ 생물 제제

그 동안 화학적 분석기술의 발달로 특정 생물학적 기능을 가진 수많은 유기화합물이 분리되었다. 어떤 태강에서 발견한 특유의 향기 또는 매운 맛을 내는 물질이 경제적으로 중요한 가치가 인정될 경우 추출되어질 것이다. 성장호르몬을 가진 어떤 태강은 뿌리 또는 묘목의 생장을 멈추게 하거나 촉진하였다. 어떤 이끼는 곤충이나 달팽이가 싫어하는 또는 독이 되는 함유물을 가지고 있다. 이런 물질 중에는 물고기를 죽일 만큼 강한 독성이 있는 것도 있다.

이런 모든 화학적 연구의 결과들이 아직은 경제적으로 중요성이 부각되지 않고 있으나, 미래의 잠재적 가치는 충분하다고 볼 수 있다. 따라서 이끼는 생물체계를 개발하는 중요한 자원이 될 것이다.

■ 생물지표로 이용

많은 이끼는 특성의 자생지에서만 생육할 정도로 생태적 범위가 좁다. 이런 성향 때문에 어떤 생태적 조건의 지표로서 가치를 가질 수 있다. 그래서 이끼는 임업과 농업을 위한 토양조건, 수문학 연구를 위한 수질, 환경 연구를 위한 대기의 지표로 활용될 수 있다. 어떤 이끼는 구리, 철, 납, 아연 등과 같은 광물이 풍부한 기질에서만 생육하기 때문에 매장 광물의 예측에 활용될 수 있을 것이다.

어떤 생태적 조건에 대한 지표가 되는 이끼의 기능은 대기 및 강, 호수의 수질오염을 모니터링 하는데 유용하다. 유럽, 일본, 북아메리카에서 이런 목적으로 이끼를 시험한 결과 성공적이었다. 이끼는 현화식물의 잎처럼 밀납상피(Waxy Cuticle)에 의해 보호가 되지 않기 때문에 빗물 속의 황산화물과 같은 산업 대기 오염물을 쉽게 흡수한다. 또한 잎을 통해 무기물을 흡수하고, 심지어 많은 양의 금속물질을 축적하기도 한다. 이끼는 대부분의 현화식물 보다 훨씬 민감하다. 이끼의 종에 따라 다양한 대기 및 수질오염에 대한 내성 때문에 민감한 종, 특히 수피에서 생육하는 착생종의 분포도를 만들 수 있을 것이고, 지역별 오염 상황을 파악하는데 활용할 수 있을 것이다. 또한 내성이 있는 종은 화학적 분석을 통해 오염 정도를 추정할 수 있을 것이다. 이런 연구가 아직 활발하게 이루어지진 않고 있지만 산업의 발달에 따라 중요성이 더욱 증가하게 될 것이다.

제3장 대기의 평가지표 및 자연생태계 조사와 이끼를 활용한 대기오염 평가방법

제 3 장

대기의 평가지표 및 자연생태계 조사와 이끼를 활용한 대기오염 평가방법

제1절 대기의 평가지표

제2절 자연생태계 조사 및 이끼를 활용한 대기오
염 평가방법

1절 대기의 평가지표

1. 지수의 개념과 대기질 지수 개발 사례

1) 지표 및 지수의 개념

지표 혹은 지수란 어떤 형상이나 변화를 대표하는 요약된 정보를 의미하나 그 표현방식에는 차이가 있다. 지표(Indicators)는 특정 대상의 현황과 그 변화 추이를 파악하기 위하여 그것을 가장 잘 나타내 줄 수 있는 '한정된 수의 대표적인 통계'라고 할 수 있는 반면, 지수(Index)는 특정형상의 변동을 알기 쉽게 나타내기 위하여 일정한 때를 '일정한 수를 기준으로 비교한 숫자'라고 할 수 있다.

일반적으로 말해 지표는 해당분야에 대한 변화를 측정하며, 고려되어야 할 기준과 요인을 제공한다. 또한 정책의 달성도를 평가하는 척도가 되며, 일반국민에게 해당분야의 상태를 고지하여 바람직한 방향으로 유도하기 위한 경고와 유도역할을 담당한다. 그러므로 지표는 특정사회의 특정문제에 대한 현재의 정도를 평가하며 각종 정책의 수립, 집행이 특정정책목표에 미치는 효과를 평가하는 척도로 활용될 수 있으며, 일반 국민으로 하여금 해당 사회의 발전상태의 추이를 파악하고 이해하는데 도움을 줄 있는 정보를 제공한다.

지수는 그 취하는 방법에 따라 개별지수와 종합지수로 나눌 수 있다.

개별지수는 단일한 통계 계열을 비교할 때 쓰이며, 종합지수는 다수의 통계계열을 종합하여 작성한다. 종합지수에는 작성하는 방법에 따라 각 요소를 동등한 단위로 취급 계산하는 단순지수와 각 요소를 중요도에 따라 가중치를 주어 계산하는 가중지수가 있다.

지표 및 지수는 명확하게 정의된 수요자들을 대상으로 그들의 이해와 관심에 적

합하도록 선정되어야 하며, 사용자의 이해가능성을 극대화시키기 위해서는 단순화, 계량화, 집합성 등의 속성을 지니고 있어야 한다.

그리고 기술적 측정 가능성 및 투명성, 과학적 타당성, 비용효율성, 지표평가 개선을 위한 시계열적 비교가능성과 통제성 등이 선정에 있어서 고려되어야 한다.

이러한 속성을 지니고 있는 지표 및 지수는 모든 이해 당사자들에게 현상을 용이하게 진단하게 하고, 적절한 의사결정과 그 결과의 모니터링을 가능하게 한다.

2) 국내 대기질 지수 개발

(1) 대기환경지수(AEI, Air Environment Index)

대기환경지수(AEI)는 미국 표준오염원지수(PSI)에서 변형된 것으로 PSI에서 적용되었던 SO₂, CO, NO₂, TSP, O₃, TSP×SO₂ 환경인자를 사용하고, 0~500범위 대신에 0~100범위로 한다(표 3-1 참조).

〈표 3-1〉 PSI와 AEI의 비교

내용	PSI	AEI	비고
오염물질	SO ₂ , CO, NO ₂ , TSP, O ₃ , TSP×SO ₂ 6개 인자	동일	
기준	국가대기환경기준/미국 EPA의 연방에피소드기준/심각한 유해농도	단일기준/장기기준/미국 EPA의 연방에피소드기준/심각한 유해농도	기준치 자체가 인체의 정확한 영향을 반영하고 있지 못함.
지수	0-500	0-100	AEI는 100을 최대로 정함. 국민들이 100분율에 익숙함
계산방법	분할 선형합수 이용	동일	노모그래프 이용가능
지수설명	0-50/good, 50-100/moderate, 100-200/unhealthful, 300-500/hazardous	0-20/양호, 20-40/보통, 40-60/나쁨, 60-80/매우나쁨, 80-100/위해	영향과 주의사항 진술 - AEI에서도 유사한 내용을 서술할 수 있음
보고	TV, 신문, 라디오에 반시계모양그림으로 표현	TV, 전광판이용반시계모양, 막대로 표현가능	24hr이하(24hr/12hr/8hr) 평균치로 유동적으로 할 수 있음.
예측	국립 기상청 대기오염 예측 프로그램 이용	기상자료의 지원으로 예측가능	관상대 예보시 변화상태를 예측가능

자료 :이방훈, 1990

환경기준치는 장, 단기 기준치 및 미국 EPA 기준치를 이용하여 5개의 범주로 구분하고 계산된 각 오염지수 중에서 가장 높은 지수를 선정하여 AEI로 삼는다.

〈표 3-2〉 AEI에 적용한 환경기준

항목 기준	AEI값	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24hr	SO ₂ (ppm) 24hr	TSP×SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{p}$ pm)	CO (ppm) 8hr	O ₃ (ppm) 1hr	NO ₂ ²⁰⁾ (p pm) 1hr
장기기준	20	150	0.05	-	8	0.02	0.05
단기기준	40	300	0.15	-	20	0.1	0.15
주의농도	60	375	0.3	22.727	25 ²¹⁾	0.2	0.6
경고농도	80	625	0.36	91.259	30	0.4	1.2
위급농도	90	875	0.8	137.413	40	0.5	1.6
위해농도	100	1,000	1.0	171.329	50	0.6	2.0

AEI값의 각 한계치는 20을 장기기준, 40을 단기기준으로 하고 60/80/90/100은 EPA의 인체건강과 관련한 주의/경고/위급/심각한 위해농도 기준으로 한다. 따라서 0-20은 건강에 '양호', 20~40은 '보통', 40~60은 '나쁨', 60~80은 '매우 나쁨', 80~100은 '위해'로 나타낼 수 있다(표 3-2참조).

(2) 대기지수(AI, Air index)

대기지수(AI)는 미국의 ORAQI (Pak Ridge Air Quality Index)지수에서 변형된 것으로 SO₂, CO, NO₂, TSP, O₃인자를 사용하여 환경기준치의 0.5배가 되는 것이 5개 중 2개, 기준치의 1배가 될 때를 80으로 한다. 이때 60으로 하고 5개의 인자가 기준치의 1배가 될 때를 80으로 한다. 기준치는 단기기준치를 적용한다. 즉 SO₂는

20) NO₂ 경우는 주의농도 이하도 존재(장·단기 환경기준치가 설정되어 있음).

21) 미국기준치에 비하여 수치가 높아서 중간값으로 함.

0.15ppm(24hr), CO는 20ppm(8hr), NO2는 0.15ppm(1hr), TSP는 300 μ g/m3(24hr) O3는 0.1ppm(1hr)으로 하며, 총지표를 산출하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$AI = \left(5.97 \sum_{i=1}^5 (C_i/S_i) \right)^{1.29}$$

Ci : i오염물질의 농도
Si : Ii오염물질의 기준치

각 범주의 근거는 0~14, 15~30, 30~60, 60~80, 80이상의 5단계로 나타내어 “좋음”, “보통”, “나쁨”, “매우나쁨”, “위해”로 나타낸다.

<표 3-3> ORAQI와 AI의 비교

내용	OPAQI	AI	비고
오염물질	SO2,CO, NO2, PM(TSP), O3,	동일	-HC는 제외
기준	환경기준(24시간)	단기기준	기준치 적용 유동적임
지수	0-1,000정도	0-200	
계산공식	$(5.7 \sum_{i=1}^5 (C_i/S_i))^{1.37}$ -10 : 암농도일 때 -100: 기준치 1배일때 100	$(5.97 \sum_{i=1}^5 (C_i/S_i))^{1.29}$ -60: 기준치 0.5배 2개/1배 3개 -80 : 5개의 인자 모두 기준치 1배	
지수설명	0-20/excellent, 20-40/good, 40-60/fair, 60-80/poor, 80-100/bad, 100이상/dangerous	0-15/좋은, 15-30/보통, 30-60/나쁨, 60-80/매우나쁨, 80이상/위해	15는 기준치의 0.25배, 30은 기준치의 0.5배 수준임
보고	TV와 라디오로 알림	TV나 전광판을 이용하여 지수를 알림	발표는 시간대 평균치별로 유동적으로 가능
예측	예측을 하지 않고 있음	기상자료의 지원이 있으면 예측가능	에너지 소비량과 재원 입력되어 있어야함

(3) 대기환경기준

우리나라는 사람의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 유지하기 위해 환경정책 기본법에 대기환경기준<표 3-4>을 설정하여 환경개선을 위한 오염정도의 판단과 예측 및 대책 강도의 척도로 활용하고 있다.

또한 환경정책기본법 제10조(환경기준의 설정) 제3항의 의거 환경부장관의 승인을 얻어 당해 지방자치단체의 조례로 별도의 지역대기환경기준을 설정할 수 있으며, 현재 조례로 설정하여 운영하고 있는 자치단체는 서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 제주도 등이 있다.

<표 3-4> 국가대기환경기준

구분	국가기준	측정방법
아황산가스(ppm)	연평균	자외선형광법 (Pulus U. V. Fluorescence Method)
	24시간평균	
	1시간평균	
일산화탄소(ppm)	연평균	비분산적외선법 (Non-Dispersive Infrared Method)
	8시간평균	
	1시간평균	
이산화질소(ppm)	연평균	화학발광법 (Chemiluminescent Method)
	24시간평균	
	1시간평균	
미세먼지(μ g/m2)	연평균	베타선흡수법 (β -Ray Absorption Method)
	24시간평균	
	1시간평균	
오존(ppm)	연평균	자외선광도법 (U.V Photometric Method)
	8시간평균	
	1시간평균	
납(μ g/m2)	연평균	원자흡광광도법 (Atomic Absorption Spectrophotometry)
벤젠(μ g/m2)	연평균	가스크로마토그래프법 (Gas Chromatography)

* 1시간 평균치는 999천분위수(千分位數)의 값이 그 기준을 초과하여서는 아니되고, 8시간 및 24시간 평균치는 99백분위수의 값이 그 기준을 초과하여서는 안됨

* 미세먼지는 입자의 크기가 10 μ m이하인 먼지를 말함

<표 3-5> 지역대기환경기준

구분		서울시	인천시	대전시	제주도
아황산가스(ppm)	연평균	0.01	0.015	0.015	0.01
	24시간평균	0.04	0.04	0.04	0.04
	1시간평균	0.12	0.12	0.13	0.10
일산화탄소(ppm)	8시간평균	9	7	7	5
	1시간평균	25	20	20	13
이산화질소(ppm)	연평균	0.03	0.04	0.02	0.027
	24시간평균	0.06	0.07	0.06	0.04
	1시간평균	0.10	0.14	0.10	0.10
미세먼지(μg/m2)	연평균	50	60	40	60
	24시간평균	100	120	100	120
오존(ppm)	8시간평균	0.06	0.06	0.06	0.06
	1시간평균	0.10	0.10	0.10	0.10
납(μg/m2)	연평균	0.5	0.5	0.5	0.25
벤젠(μg/m2)	연평균	5		5	

*1시간, 8시간 24시간의 평균치는 연간 3회 이상 그 기준을 초과하여서는 아니됨

*미세먼지는 입자의 크기가 10μm이하인 먼지를 말함

*자료: 서울특별시 환경기준조례, 인천광역시 대기환경기준조례, 대전광역시 환경기본조례, 제주특별자치도 환경기본조례

(4) 통합대기환경지수(CAI)

통합대기환경지수(Comprehensive Air-Quality Index: CAI)는 대기오염 측정치를 국민이 쉽게 알수 있도록 하고 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동지침을 국민에게 제시하기 위해 인체 위해성과 대기환경기준을 고려하여 개발된 대기오염도 표현방식이다.

지수는 0부터 500까지 6단계로 나누어 점수가 커질수록 대기상태가 좋지 않음을 나타내며, 지수계산방법을 5개 대기오염물질 각각의 점수를 산정한 후 그 중 가장 높은 점수를 통합지수값으로 사용한다. CAI의 점수계산은 다음의 수식과 같다.

$$I_P = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_P - BP_{LO}) + I_{LO}$$

여기서 IP= 오염물질의 대기지수점수

CP=오염물질의 대기 중 농도

BP_{HI} =오염물질오염도 해당구간의 최대 오염도

BP_{LO} = 오염물질오염도 해당 구간의 최소 오염도

I_{HI} = BP_{HI}에 해당하는 지수값(구간 최대지수값)

I_{LO} = BP_{LO}에 해당하는 지수값(구간 최소지수값)

<표 3-6> 지수구간별 개요

지수구분	점수구분값	점수구분값		농도구분	SO2	NO2	CO	C3	PM10
		ILO	IHI		ppm	ppm	ppm	ppm	μg/m2
					1hr	1hr	1hr	1hr	24hr
A	좋음	0	50	BPLO	0	0	0	0	0
				BPHI	0.020	0.030	2.00	0.040	30
B	보통	51	100	BPLO	0.021	0.031	2.01	0.041	31
				BPHI	0.050	0.060	9.00	0.080	80
C	민감 균영 향	101	150	BPLO	0.051	0.061	9.01	0.081	81
				BPHI	0.100	0.150	12.00	0.120	120
D	나쁨	151	250	BPLO	0.101	0.151	12.01	0.121	121
				BPHI	0.150	0.200	15.00	0.300	200
E	매우 나쁨	251	350	BPLO	0.151	0.201	15.01	0.301	201
				BPHI	0.400	0.600	30.00	0.500	300
F	위험	351	500	BPLO	0.401	0.601	30.01	0.501	301
				BPHI	1	2	50	0.600	600

* 「대기오염도실시간공개」 홈페이지

<표 3-7> 지수구간별 개요

구간	구간의미
A	대기오염 관련 질환자군에서도 영향이 유발되지 않을 수준
B	환자군에게 만성 노출시 경미한 영향이 유발될 수 있는 수준
C	환자군 및 민감군에게 유해한 영향이 유발될 수 있는 수준
D	환자군 및 민감군(어린이, 노약자 등)에게 유해한 영향 유발, 일반인도 건강상 불편감을 경험할 수 있는 수준
E	환자군 및 민감군에게 급성노출시 심각한 영향 유발, 일반인도 약한 영향이 유발될 수 있는 수준
F	환자군 및 민감군에게 응급 조치가 발생되거나, 일반인에게 유해한 영향이 유발될 수 있는 수준

* 산출된 각각의 오염물질 별 지수 점수가 민감군 영향 이상의 등급이 2개 물질 이상일 경우 통합점수에 가산점 부여

-1개일 경우 : 점수가 가장 높은 지수점수를 통합지수로 사용

-2개일 경우 : 가장 높은 점수가나온 오염물질을 영향 오염물질로 표시하고 그 오염물질의 점수에 50점 가산

-3개이상일 경우 : 가장 높은 점수가 나온 오염물질을 영향 오염물질로 표시하고 그 오염물질의 점수에 75점 가산

* 「대기오염도실시간공개」 홈페이지

제2절 자연생태계 조사 및 이끼를 활용한 대기오염 평가방법

1. 자연생태계 조사

1) 일반적 개황(기후 및 기상)

본 연구 일반적 개황에서는 기후 및 기상, 지형 및 지질 현황을 다루고 있는데, 이끼의 생장에 영향을 끼치는 기후 및 기상 개황을 중심으로 조사 분석하였다. 기후 및 기상 개황은 대전시의 통계자료를 활용하여 월평균기온과 강수량을 분석한다.

2) 식물 생태 조사

(1) 식물상

식물상은 대기오염에 따른 이끼 생육의 영향 여부를 파악하기 위한 분석이다. 수치지도의 지형도와 나침반, 고도계 등을 사용하여 대상지 전 지역에 분포하고 있는 식물상을 조사하며, 조사된 식물마다 사진촬영을 병행하고 현장에서 동정이 어려운 식물은 채집을 하여 실내동정을 실시한다. 식물종 목록은 대한식물도감(이창복, 1993)의 해부학적인 특색을 취한 분류방식인 Fuller & Tippe의 관속식물문에 따라 정리한다.

(2) 목본식물군집구조

식물군집의 생태학적 분석방법에는 정성적인 방법과 정량적인 방법으로 나눌 수 있는데, 본 과업에서는 식물군집의 현상 및 잠재식생 예측을 위하여 상대우점치, 수관투영 및 층위구조, 종수 및 개체수, 종다양도 등을 분석한다.

■ 조사구 설정 및 식생조사

조사구는 주변식생환경에 따라 이끼 생육의 영향여부를 파악하기 위하여 10m × 10m 크기의 방형구 단위로 Belt-transect를 설치하며, 식생조사는 각 조사구내에 출현하는 수종을 대상으로 교목·아교목층은 흉고직경(DBH) 2cm이상, 관목층은 2cm이하로 구분하여 각 수목의 수종명, 수고, 지하고, 수관폭 등 규격을 조사하였으며, 분포 위치를 도면화한다.

■ 상대우점치

각 조사구의 수관층별 종간 상대적 우세를 비교하기 위하여 Curtis & McIntosh(1951) 방법을 응용한 이경재 등(1990)의 방법으로 상대우점치(I.P. : importance percentage)를 구하고 수고를 고려하여 평균상대우점치(M.I.P. : mean importance percentage)를 다음과 같이 산정한다.

$$I.P. = \frac{\text{상대밀도} + \text{상대피도}}{2}$$

$$M.I.P. = \frac{3 \times \text{교목층 I.P.} + 2 \times \text{아교목층 I.P.} + 1 \times \text{관목층 I.P.}}{6}$$

■ 수관투영도 및 층위구조도

모니터링 조사지를 대상으로 주요 조사구별 교목층과 아교목층의 수관투영 및 층위구조를 도면으로 작성한다.

■ 종수 및 개체수

식생조사 자료를 바탕으로 각 조사구의 층위별로 출현하는 종수 및 개체수를 분석하여 식물군집구조의 변화를 추정하고자 한다.

■ 종다양도

종구성상태의 다양한 정도를 나타내는 측도인 종다양성은 희귀종(rare species)에

중요성을 두는 Shannon의 종다양도(Pielou, 1975)와 최대종다양도(H'max), 균제도(J'), 우점도(D)를 산정한다.

- Shannon의 수식은 다음과 같다.

$$H' = -\sum p_i \log p_i$$

$$H'max = \log S$$

$$J' = H'/H'max$$

$$D = 1 - J'$$

(여기서, pi는 전체 종의 총 개체수에 대한 어떤 종의 개체수 비, S는 구성종수임) 이상의 상대우점치, 종수 및 개체수, 종다양도를 비교분석한다.

(3) 초본식물군집구조

목본식물군집구조 고정조사구내에 5m × 5m(25m²) 크기의 방형구(Quadrat)를 설정, 조사구내에 출현하는 초본식물을 대상으로 Braun-Blanquet(1964)방법으로 아래와 같이 우점도 및 군도를 구한다. 또한 대상지내에 출현하는 주요 초본식물군락의 분포현황을 도면화한다.

■ 우점도(優占度: dominance, D)

우점도는 피도(被度)와 수도(數度)의 조합에 의한 것으로 7계급으로 구분한다.

<표 3-8> 우점도 계급 및 내용

계급	내용
5	조사구 면적의 3/4이상을 덮고, 개체수는 임의
4	조사구 면적의 1/2~3/4을 덮고, 개체수는 임의
3	조사구 면적의 1/4~1/2을 덮든가, 혹은 개체수가 많음
2	조사구 면적의 1/10~1/4을 덮고, 개체수는 임의
1	개체수는 많으나 피도가 낮음. 혹은 산재하나 피도가 높음(단, 1/10정도)
+	피도는 낮고 산재
r	고립하여 출현하고 피도는 극히 낮음

■ 군도(群度, sociability)

군도는 각 출현종 개체의 집합 혹은 분산정도를 나타내는 것으로 5단계로 구분한다.

<표 3-9> 군도계급 및 내용

계급	내용
5	동종개체의 지엽이 상호 접촉하여 전면을 덮고 있는 단순군락의 상태
4	군도 5의 상태에 구멍이 뚫려있거나, 다른 종이 그 구멍의 부분에 생육하고 있는 상태
3	군도 4의 식물 피복 부분과 구멍의 부분이 역관계인 상태
2	군도 3이 소규모 되어있는 상태
1	단독으로 생육한 상태

■ 수목활력도

대상지의 교목층의 우점종을 대상으로 수목생육의 활력도에 따라 이끼의 생육 변화를 파악하기 위해 수목활력도(relative tree vitality)를 측정한다. 수목활력도 측정기구는 Shigometer Model OZ-93을 사용하며, 지상에서부터 약 1.2m 높이에서 지형경사를 기준으로 상, 하, 좌, 우 4개 방향에서 전기저항치를 측정한다. 측정시에는 기준수치를 200으로 설정하여 측정한다.

3) 토양특성(토양삼상분포)

토양삼상분포 특성 조사용 시료는 모니터링 대상지에서 A0층을 걷어내고 코어를 이용하여 채취한다. 토양삼상(three phase of soil)은 토양 중 토양입자와 유기물의 고상과 토양용액의 액상, 그리고 토양공기의 기상의 용적비이다.

토양삼상비는 먼저 core를 이용하여 시료를 채취한 뒤, 토양의 건조중량을 진밀도로 나누어 고상의 부피로 하고, 그 토양의 수분을 정량하여 물의 밀도로 나눈 값을 액상의 부피로, 전체 부피에서 액상과 고상의 부피를 빼준 값을 기상의 부피로 하여 백분율로 표시한다.

2. 이끼를 활용한 대기오염 평가방법

1) 이끼의 조사방법

이끼분포현황은 고정조사구내 수목의 수피에 분포하는 이끼류(지의류)를 대상으로 분포현황의 도면화 및 사진을 통한 이끼류 변화양상을 모니터링하며, 특히 도면화된 이끼류의 분포현황별 피도를 측정하여 증감여부를 파악한다.

2) 연구 분석방법

(1) 대기청정도지수(IAP : Index of Atmosphere Purity)

인간과 거의 같은 생활공간에 위치한 활엽수 수피상에 착생한 이끼의 분포상을 조사 하며, 조사지역간의 착생종과 피도와의 생태적지수를 계산하여 IAP를 산출한다. IAP의 계산은 Desloover 와 Leblanc가 제안한 생태적 지수(Ecological Index : Q)와 피도(Cover Scale : f)를 곱한 값을 나타낸 값이다.

$$IAP = \frac{\sum(Q \times f)}{10}$$

조사지역은 Taoda(1975)가 제안한 조사지역의 활엽수를 대상으로 흉고직경 20cm 이상의 수목으로, 지상으로부터 1.0m~2.0m범위에 생육하는 이끼를 조사한다.

IAP에 의한 대기오염 정도의 파악은 LeBlanc(1970, 1974)에 의해 구분된 지역구분을 따르며(김준민, 1991), 각각의 조사지역마다 대기질을 측정하여 비교하지 못하기 때문에 Leblanc(1974)등이 제안한 IAP에 의한 연평균 SO₂농도의 추정(LeBlanc, F, G. 1974, 양수인 등, 1995)을 적용하여 각 지역별 SO₂의 농도를 추정해 본다.

<표 3-10> IAP에 의한 SO₂ 농도추정

IAP	연평균 SO ₂ 농도(ppm)
74 <	< 0.01
50~74	0.010~0.013
25~49	0.013~0.020
1~24	0.020~0.030
0	> 0.03

<표 3-11> IAP에 의한 SO₂ 농도추정

IAP	의미
5.5이하	심한 오염지역
5.6~15.5	중 오염지역
15.6~35.5	중 자연지역
35.6~75.5	자연지역
75.6	심산(深山)지역

㉠ 생태적 지수(Q : Ecological Index)

생태적 지수는 대기오염에 대한 “약한 정도”이다. 즉 오염에 강한 종은 공존종수가 적어서 Q치가 낮아 어느 장소에서나 잘 출현하지만, Q치가 높은 오염에 약한 종은 공존 종수가 많으며 환경대기질이 좋은 곳에서만 출현한다. 환경대기질의 판정시 대기청정도를 표현하는데 Q치가 클수록 적합하다고 할 수 있다.

생태적 지수 Q는 Leblanc와 Desloover가 제안한 다음 식으로 계산한다.

$$Q = \frac{\sum Sni}{S_n}$$

S_{ni} : 특정종의 출현지점에서의 공존종수(Number of Species)
 S_n : 특정 종의 출현 지점 수(Number of Site)

㉡ 피도(f : Cover Scale)

피도의 구분은 Desloover 와 Leblanc의 제안을 참고하여 5단계로 구분 조사한다.

<표 3-12> 피도와 빈도에 의한 계급구분

계급	빈도	피도
5	> 70%	> 60%
4	40~70%	40~60%
3	20~40%	20~40%
2	10~20%	< 20%
1	< 10%	<10%

(2) 지표생물 배치실험²²⁾

각 조사지역에 Bryo-meter를 설치하여 15일 경과 후에 Chamber 内の 이끼들을 관찰하였고, 환경대기질의 현지농도를 알아보기 위해서 Kimoto handy sampler(1.5 L/min)로 SO₂, NO₂, Oxidant를 그리고 Alkali paper로 30일 동안 흡수 축적된 SO_x, NO_x를 측정·분석한다.

Bryo-meter 이 장치는 공기정화 실험법을 선대식물에 응용한 것이다. 물을 공급하는 수조, 정화된 공기를 공급하기 위한 active carborn filter box, 공기를 흡입시키는 air pump, 검체가 되는 이끼를 심을 두개의 Chamberfh, 현지의 공기가 바로 유입되는 오염Chamber와 active carborn filter box를 통해서 정화된 공기가 유입되는 정화Chamber로 구성되어 있다.

Bryo-meter에 이식할 이끼의 선정은 Taoda(1975)의 제안에 따라 야외에서의 내성 지수가 높은 무성아실이끼, 넓은잎윤이끼, 내성지수가 낮은 나무연지이끼, 은이끼, 우산이끼의 무성아를 택한다.

22) 고화석(1988) 대기오염이 선대식물에 미치는 영향.

<표 3-13> 다양한 이끼와 이끼측정을 위한 지역수집

species	collection site	growth site	tolerance index
Clastobryella kusatsuensis	SUPIA	bark	strong
Entodon challengeri	JEUNGSIM	bark	strong
Venturiella scinesis	JEUNGSIM	bark	weak
Bryum argenteum	JEUNGSIM	concrete	weak
Gemma of Marchatia Polymorpha	C.N.U	soil	weak

■ 피해도

현지에 Bryo-meter를 설치하여 15일동안 노출시킨 후에 이끼들의 피해도를 측정하였다. 피해도는 이끼의 종류마다 정화 chamber의 녹색부분 백분율을 100에서 뺀 값이다(식3).

$$\text{피해도} = 100 - \text{생존율} \quad (\text{식3})$$

$$\text{생존율} = \frac{\text{오염chamber의 녹색면적}}{\text{정화chamber의 녹색면적}} \times 100 \quad (\text{식4})$$

■ chlorophyll 분석

Mackinney법을 변화시켜 유발에 3ml의 90% acetone을 넣은 후, 이끼와 함께 MgCO3 (10mg/cm²)을 넣어 완전히 마쇄시켜 엽록소를 추출한 액을 시험관에 옮기고, 다시 2ml의 90% acetone으로 유발을 닦아서 시험관에 옮긴후 이 액을 암냉소에서 24시간 방치하여 미세분말을 가라앉힌 후, 4000~5000 G (Hitachi Refrigerated centrifuger 20PR-5)에서 10분간 Centrifuge한 다음 Spectrophotometer (Gilford RESPONSETMUV-VIS Spectrophotometer)로 645nm와 663nm, 750nm에서의 흡광도를 측정하여 다음 식으로 계산한다.

$$\text{Total Chl}(\text{mg}/\ell) = 20.2D_{645} + 8.02D_{663}$$

$$\text{Chla}(\text{mg}/\ell) = 12.7D_{663} - 2.69D_{645}$$

$$\text{Chlb}(\text{mg}/\ell) = 22.9D_{645} - 4.68D_{663}$$

(3) 이화학적 환경대기질 분석

환경대기질의 현지농도를 알아보기 위해서 Kimoto handy sampler로 분당 1.5L의 공기를 흡입시켜, 한 시간 동안 흡수액에 포집된 공기를 가지고 측정대상 오염물질인 SO2, NO2, Oxidant를, 그리고 Alkali paper로 30일 동안 축적된 NOx, SOx의 시료채취 및 분석방법은 Table.2, 3과 같다.

<표 3-14> 대기오염의 측정방법

Item	Method	Colorimetric Method and Alkali paper Method	
		Hr	Method
SO2		1~2 hr	Impinger(Kimto handy sampler)
NO2		1~2 hr	Impinger(Kimto handy sampler)
Oxidant		1~2 hr	Impinger(Kimto handy sampler)
SOx		30 days	K2CO3 paper
NOx		30 days	K2CO3 paper

제4장 결론 및 관리방안

제1절 결론

본 연구는 대기오염과 이끼의 특성에 대해 알아보고, 대기질과 이끼의 조사와 분석방법을 고찰함으로써, 추후 대기오염이 이끼에 미치는 영향에 대하여 분석하기 위하여 수행되었다. 내용을 요약하면 다음과 같다.

대기오염이란 오염되지 않은 공기에 이물질이 혼입되어, 그 결과로서 인간에게 직, 간접적으로 피해를 유발할 경우라 할 수 있다. 배출원으로는 크게 자연적 배출원과 인위적 배출원으로 나뉘며, 자연적 배출원은 화산폭발, 산불, 먼지폭풍, 해양, 식물이고, 인위적 배출원은 점오염원, 선오염원, 면오염원이다. 이러한 오염원을 공정공해시험법에서 규정하는 배출허용기준에 따라 시료를 측정하여 분석한다. 종류에는 입자상대기오염물질로 분진, 재, 먼지 등 10가지가 있으며, 가스상대기오염물질에는 SO_x, NO_x, CO등이 있다. 다음으로 광역대기오염은 이산화탄소의 방출과 같이 장기간 동안 대기오염물질이 방출되어서 산성비, 오존층 파괴, 지구온난화 등으로 지구전체의 물질순환에 영향을 미치는 경우 배출된 대기오염물질이 단기적으로 혹은 장기적으로 오염을 유발할 수 있는 것으로 이러한 경우 해당지역의 국가간 공동노력에 의하여 해결될 수 있지만, 지구환경문제의 경우에는 지구상의 모든 국가가 협력하여야만 해결될 수 있다.

한편 이끼는 육상에서 생활하는 식물군 중 하나로, 이끼 및 선태강라고 불리며, 지구상에는 약 1,500~25,000여종의 이끼가 살고 있는 것으로 추정된다. 구조는 줄기의 표피세포가 확장되어 만들어진 가근(rhizoids)과 잎이 분화 된 경엽체로서 줄기·잎으로 이루어져 있다.

개체군의 성장형태는 단년생(annuals), 단초형(short turfs), 장초형(Tall turfs), 쿠션형(cushions poister), 매트형(mets), 웨프트형(wafts), 걸이형(pendants), 꼬리형(tails), 팬형(fans), 가지형(dendroids) 등으로 나뉘며, 번식은 크게 유성세대와 무성

제 4 장

결론 및 정책건의

제1절 결론

제2절 정책건의

세대가 규칙적으로 번갈아 나타나는데 우리가 흔히 보는 이끼의 식물체는 배우체라고 하는 유성세대이다. 이 경우 배우체가 성숙되면 생식기관이 달리며, 생식기관에는 난자를 만드는 플라스크형의 장란기와 정자를 만드는 기둥(봉형태) 혹은 구형상의 장정기가 있다. 생식기관은 포엽이라 불리는 잎으로 보호된다. 이끼의 대부분은 건조한 곳에서도 생존이 가능하며, 빛이나 일정온도가 갖추어 있지 않아도 이끼의 포자는 수년 후 정상적으로 발아한다. 이는 위에서 설명한 바와 같이 비교적 단순한 조직형태이기 때문에 약조건의 환경속에서도 놀라운 번식력으로 오랜시간 생존 한다.

이끼는 크게 선강, 태강, 빨이끼강 3가지로 나뉘며, 선강이 52과 201속 645종, 태강이 35과 81속 281종, 빨이끼강이 2과 3속 4종으로 총 89과 285속 930종이다. 또한 CO₂고정에 의한 지구 온난화 억제, 옥상이나 벽면의 미기후 완화효과, 수원함양, 초기 생태계의 회복, 토양의 피복효과에 효과가 있으며, 토양보충제, 정원 등의 원예적, 기관지염, 심혈관질환 등의 의학적, 대기오염을 측정할 수 있는 생물지표로 이용할 수 있다.

위의 내용을 바탕으로 대상지에 적용하여 분석하기 위해 대기오염과 이끼의 조사와 분석방법에 대해 알아보았다. 대기질의 통합대기환경지수는 대기환경지수, 대기질지수, 대기환경기준을 종합 적용한 것으로 국민들이 쉽게 알 수 있도록 하여 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동지침을 국민에게 제시하기 위해 인체위해성과 대기환경기준을 고려하여 개발된 것이다.

이끼는 수목의 수피에 분포하는 이끼류(지의류)를 대상으로 분포현황의 도면화 및 사진을 통한 이끼류 변화양상을 모니터링하며, 특히 도면화 된 이끼류의 분포현황별 피도를 측정하여 중감여부를 파악하여 대기청정지수를 이용해 대기오염이 이끼에 미치는 영향에 대해서 분석할 수 있도록 하였다. 또한 식물상, 목본식물군집구조, 초본식물군집구조, 토양분석을 지점 조사구를 설정한 후 정밀조사하여 종다양도, 우점도, 피도, 군도, 오염도 측정 등의 분석을 통해 이끼 생육의 영향 여부를 파악하고자 하였다.

이처럼 본 연구에서는 대기오염과 이끼에 대한 문헌조사와 선진국들의 자료 검

토를 통한 기초정보 제공과 이끼와 대기오염의 관계를 검토하여 이끼가 환경지표종으로서의 가치를 검토하고, 가능하다면 이끼의 감수성 및 생육특성을 파악하고자 하는 것이 1차 목적이라 하겠다.

그러나 국제적으로 이끼에 대한 연구가 활발한데 비해 우리나라는 아직까지 연구가 미미한 실정이 초보적인 단계를 벗어나지 못하고 있다.

앞으로 이끼를 환경지표종으로 활용하기 위해서는 첫째, 관련연구자들의 연구물들이 축적되고, 검증되어야 하며, 둘째, 이를 기반으로 우리나라 실정에 맞는 이끼종과 각종 생물지표종의 선정과 방법론의 표준화가 이루어져야한다. 마지막으로 정부의 주도 아래 이끼를 활용한 감시 측정망을 설립하여 체계적인 생태계 보전에 힘써야 할 것으로 사료된다.

제2절 정책건의

본 연구를 수행하는 동안 환경지표종인 선태식물에 대한 자료수집 및 데이터 구축이 가장 어려운 부분이었다. 이는 선진국에 비해 선태식물 연구에 대한 유전자원으로써의 중요성과 필요성을 간과하고 있는 부분으로 환경지표종으로써의 개발과 활용을 위해서는 연구기관과 지방자치단체에서 장기적이고 계획적인 기초연구가 매우 시급한 실정이다.

유럽연합과 유엔 유럽경제위원회(UNECE), 경제협력개발기구(OECD)에서도 생물지표의 결과를 모니터링 하는 도구로 활용하여 왔으며, UNESCO는 MAB(Man and Biosphere)프로그램을 통해 환경지표 생물을 대기, 수질, 토양오염에 대한 지표로 활용할 것을 적극 권장하고 있다.

또한 국제 생물과학 연합은(IUBS)는 환경지표생물 프로그램을 지속적으로 연구해 왔으며, 또한 연구자들은 국지생태계를 포함하는 환경의 변화를 감지할 수 있는 종합 모니터링프로그램개발에 노력을 가하고 있다.

이처럼 우리나라 역시 양질의 연구결과를 위해서는 환경지표종(이끼)에 대한 기초데이터 관리를 위한 데이터베이스(DB)구축이 시급하며, 그 결과를 활용하여 환경오염 시스템 구축에 적극 노력하여야 한다.

향후 이러한 환경지표종(이끼)의 조사와 연구는 선태류(이끼)의 귀중종, 귀중군락을 파악하는 등 우리의 유전자원의 보전에 큰 의미를 가지며, 이들의 파악은 또 입지의 유효한 이용한 정보로의 활용 등 대전시의 도시생태계연구의 활용도 기대된다. 또한 지표종에 대한 연차별 모니터링을 통해 각종개발과 환경변화에 대한 자연생태계 훼손 및 환경오염에 대한 기초데이터도 구축될 것으로 판단한다.

참고문헌

- 가강현(1997). 한국의 지의류 연구사. 임업정보, 제 80호., p40.
- 고화석(1988) 대기오염이 선태식물에 미치는 영향.
- 김계훈, 박순남(2000) 중부지역 도시 자연녹지 토양중 NO3-, SO42- 및 중금속 분포. 한국환경농학회지 19(4):351-357.
- 김기호, 문국현(2006) 도시의 생명력, 그린웨이
- 김명수(2001) 파편화된 서식처 복원을 위한 기초 이론고찰, 한국환경보존학회지 4(2):pp52-61
- 김성조, 백승화, 문광현, 장광호, 김수진, 이승현. (1999) 익산 제2공단 토양의 중금속 함량 분포 조사. 한국환경농학회지 18(3):250-258.
- 김용균(2002), "생태영향평가 적합 생물지표 개발", 환경신기술, 통권 제 7호, p48.
- 김재한(2003) 생물지표를 이용한 환경오염 평가의 유용성. 국제문화연구 제21집 (2003. 2) pp.237-261.
- 김준민(1991) 도시와 공업지대의 대기의 so2와 지의류 분포에 관하여. 대한민국 학술원 논문집(자연과학 편) 제 30호, 1991, pp.47-71.
- 김태선(2003) 도시주거지역 완충녹지의 대기오염 저감효과
- 농촌진흥청(1995) 다용도 고품질 이끼 생산기술개발
- 박봉규, 김옥경(1983) 식물체에 미치는 납·아연(Pb,Zn)의 영향. 한국생태학회지 6(2):98-105.
- 서광석(2001) 대기오염개론. 대학서림
- 송종석(1999)태백산맥 일대 침엽수림의 선태식물상의 수리분류학적 연구. 한국생태학회지 22: 119-129.
- 송종석, 송승달(1995) 지리산지 침광호효림과 상록침엽수림 내에 분포하는 임상선태류식생의 군락생태학적 연구. 한국식물학회지 38: 305-317
- 신용섭 외(2004) 새로운 환경공학개론. 형설출판사
- 양수인, 하훈, 임항선, 박찬욱, 홍석순, 정병석(1995) 선태식물을 이용한 전남지역 대기오염도 평가. 한국대기보존학회지, 제 11권 2호. Pp. 137~144.
- 이경재, 임경빈, 조재창, 류창희(1990) 속리산 삼림군집구조에 관한 연구(I) -소나무림 보전계획-. 응용생태연구회지 4(1): 23-32.
- 이창복(2003) 대한식물도감. 향문사
- 임은영(2006) 제주도 동백산의 선태식물상
- 최두문(1980). 한국동식물도감 식물편(선태류).문교부
- 최용규(1992) 금강의 수질, 어패류, 이끼 및 토양중의 중금속 함량조사, 공주대학교 석사학

위논문.

- 久野春子, 大橋 毅.(1993) 大氣汚染の指標植物(2). 大氣汚染學會誌 28(3); A65~A76.
- 愛知県維管束植物レッドリスト」 (2009年) p.722
- Bell, N.(1994) The ecological effects of increased aerial deposition of nitrogen, British Ecological Society, Ecological Issues 5, p. 36
- Bell, P. R. (1992) Green plants their origin and diversity. Cambridge Univ. Victoria. pp. 100~126.
- Bold, H. C., C. J. Alexopoulos, T. Delevoryas. (1980) Morphology of plants and fungi. Harper & Row, Publishers. New York. pp. 166~279.
- Braun-Blanquet, J.(1964) Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. neu bearb. Aufl. Springer, Berlin, Wien, New York, 865pp.
- During, H.F.(1992) Ecological classifications of bryophytes and lichens, in Bryophytes
- Evans, R.D. and J. R. Johansen(1999) Microbiotic crusts and ecosystem processes, Critical Review in Plant Science 18(2), pp.183~225.
- Iwatsuki, Z. & M. Mizutani. (1972) Coloured Illustrations of Bryophytes of Japan. Hoikusha publishing Co. Ltd. Osaka. 405 pp. (in Japanese).
- Iwatsuki, Z. (2001) Mosses and Liverworts of Japan. Heibonsha Ltd. Tokyo. 355 pp. (in Japanese).
- Jakucs, P. (1991) Eutrophication in forest ecosystems. In G. Esser and D. Overdieck, eds., Modern ecology: Basic and applied aspects. Elsevier, New York, pp. 571~578
- Kremen, C., R. K. Colwell, T. L. Erwin, D. D. Murphy, R. F. Noss, and M. A. Sanjayan(1993) Terrestrial arthropod assemblages: their use in conservation planning. Conserv. Biol. 7:796~808.
- LeBlanc, F. and J. De Sloover(1970) Relation between industrialization and the distribution and growth corticoles., Rev. canad. Biol.20, 823~827
- Leblanc, F., G. Robitaille and D.N. Rao(1974) Biological respanse of Lichens and Bryophytes to environmental pollution in the Murdochville copper mine area, Quebec, Jour. Hattori Bot. Lab. No. 38, 405~433.
- Magdefrau, K(1982) Life-forms of bryophytes. In Bryophyte Ecology edited by A. J. E. Smith. Chapman and Hall Ltd.
- Makino, T.(2000) Newly Revised Makino's New Illustrated Flora of Japan. The Hokuryukan Co. Ltd. Tokyo. pp. 1173~1197 (in Japanese).
- May, R. M.(1988) Conservation and disease. Conserv.Biol.2:28~30.
- Mellor A. and J.R. Revan(1999) Lead in the soils and stream sediments of an urban

- catchment in tyneside, UK. Water, Air and Soil Pollution 112:327~348.
- Nagy, M. and J. Nagy. (1981) Diversity of herb layer of black locust forest, Acta Biol. Debercina 18, pp. 15~20
- Neushul, Michael. (1974) Botany. Hamilton publishing company. California. pp. 228~240.
- Noss, R.F.(1990) Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. Conserv. Biol. 4:355~364.
- Richardson, D. H.S.(1985) The Biology of Mosses, Blackwell Scientific Pub.
- Scalgel, R. F., R. J. Bandoni, B. E. Rouse, W. B. Schofield, J. R. Stein, T. M. C. Taylor. (1966.) An Evolutionary Survey of the Plant Kingdom. Wadsworth Publishing Company. INC. Belmont. California. pp. 302~351.
- Schofield, W. B.(1985). Introduction to Bryology, Macmillan Pub. Co.
- Smith, W.H(1980) Air pollution—a 20th century allogenic influence on forest ecosystems. In proceeding of symposium on effects of air pollution on mediterranean and temperat forest ecosystems. USDA Forest Service. No.PSW-43, pp.79~87
- Sveinbjornsson, B. and W.C.Oechel(1992) Controls on growth and productivity of bryophytes: environmental limitations under current and anticipated conditions. In Bryophytes and Lichens in a Changing Environment, edited by J. W. Bates and A. M. Farmer. Oxford Science Pub.,
- Taoda, H(1976) bryophytes as indicators of air pollution. In:science for better environment, proc.Intern.Congr.Human Envur.(HESC).
- Tilman, D.(1987) Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients, Ecological Monographs 57, pp. 189~214
- Ulrich, B. and R. Mayer and P. K. Khanna (1980) Chemical change due to acid precipitation in a loss-derived soil in central Europe, Soil Sci. 130, pp.193~200
- Weier, T. E., M. G. Barbour, C. R. Stocking, T. L. Rost. (1950) Botany. John Wiley & Sons, Inc. U. S. A. pp. 551~571.

정책과제보고서 2011-19

대기오염과 환경지표중에 관한 기초연구

발행인 이 창 기

발행일 2011년 11월

발행처 대전발전연구원

302-846 대전광역시 서구 월평본1길 39(월평동160-20)

전화: 042-530-3515 팩스: 042-530-3575

홈페이지 : <http://www.djdi.re.kr>

인쇄: ○○○○○ TEL 042-○-○ FAX 042-○-○

이 보고서의 내용은 연구책임자의 견해로서 대전광역시의 정책적 입장과는 다를 수 있습니다.

출처를 밝히는 한 자유로이 인용할 수 있으나 무단 전재나 복제는 금합니다.