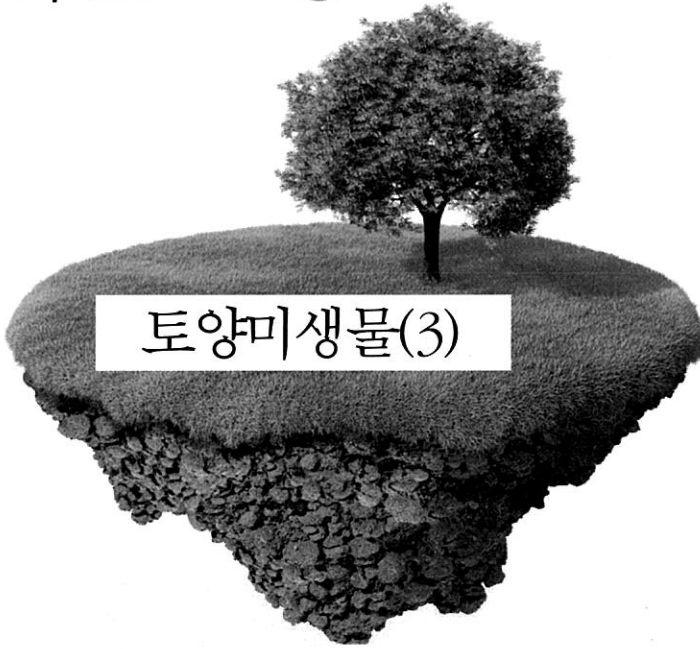




나무가 숨쉬는 토양



토양미생물(3)

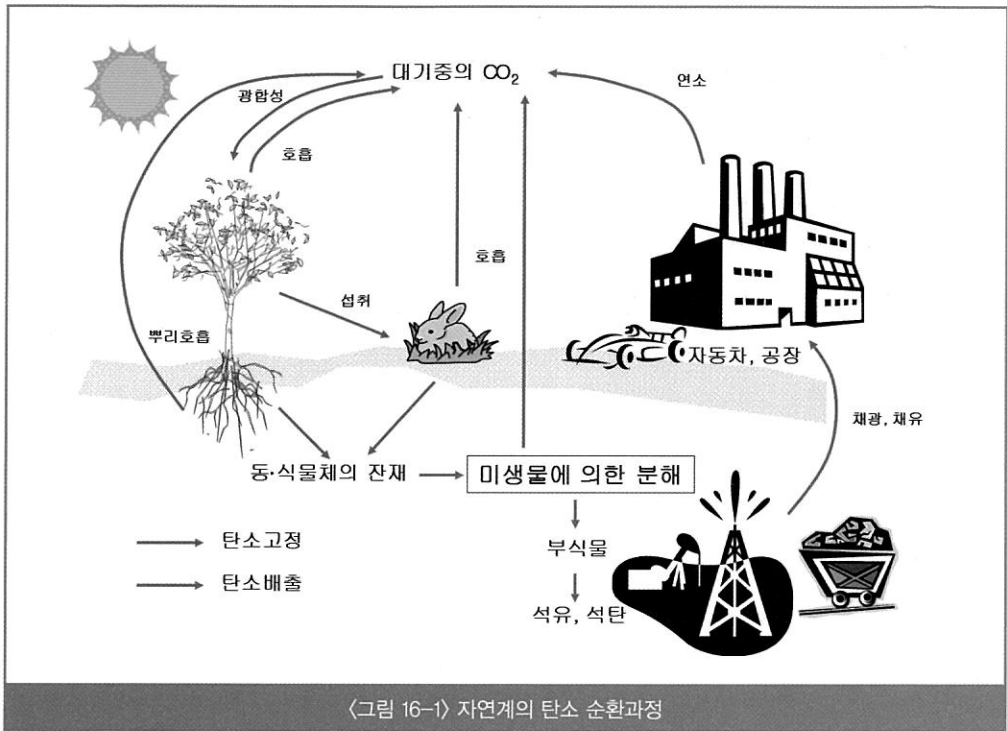


박현준
(주)푸름바이오 대표이사
hunjuni1@hanmail.net

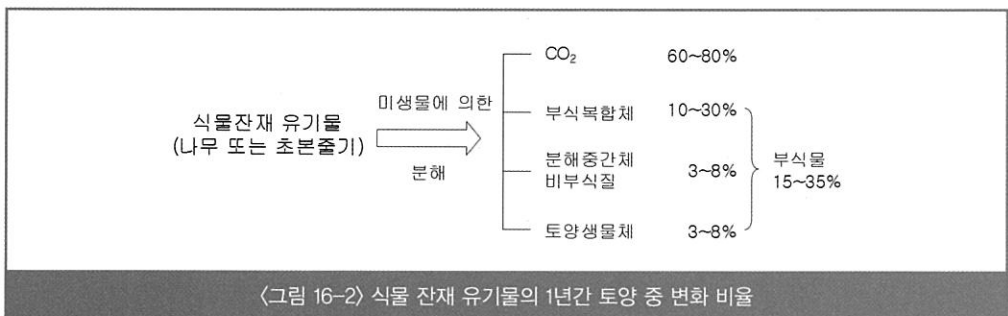
1. 미생물에 의한 유기물 분해

자연계에는 여러 가지 순환계가 존재하는데 이 중에서 탄소, 질소, 인산, 칼륨, 황 등의 토양 내 순환 및 변동이 나무의 생육에 중요하게 영향을 미칠 수 있는 토양환경 중 하나이다. 이 중에서 탄소순환은 지구온난화와 관련하여 최근 환경과 생태적인 측면에서 매우 중요한 분야이며, 나무의 생육에도 직·간접적으로 큰 영향을 미친다.

자연계의 탄소순환은 다음 <그림 16-1>과 같으며 식물에 의한 광합성, 그 식물을 섭취한 동물과 식물의 사체 등이 토양에 묻히면서 미생물에 의해 분해되어 부식물 또는 최종적으로 석탄연료가 되는 탄소고정(동화) 작용과 호흡과 연소에 의한 탄소배출(방출)작용으로 나눌 수 있다.



탄소순환의 여러 가지 과정 중 식물의 잔재 특히 목재나 초본식물의 줄기가 호기적 자연환경에서 미생물에 의해 분해되는 것은 탄소순환에서 가장 중요한 과정일 뿐 아니라 토양의 비옥도, 양분 공급력, 부식물(잔재 유기물) 생성 등 토양의 물리적, 화학적 성질에 큰 영향을 미칠 수 있는 환경 인자의 하나이다.



식물잔재 유기물은 수분이 평균 75%를 차지하고, 수분을 제외한 건물량의 약 95%가 C, H, O로 구성되어 있다. C, H, O는 <표 16-1>과 같이 식물체를 구성하고 있는 단백질, 섬유소(셀룰로오스), 헤미셀룰로오스, 리그닌, 펙틴, 녹말 등의 중요한 구성성분이다.

〈표 16-1〉 식물체의 중요한 유기성분의 구성원소

성분명	구성요소
섬 유 소 (cellulose)	C, H, O
헤미셀룰로오스 (hemicellulose)	C, H, O
펙 틴 질 (pectin)	C, H, O, (Ca)*
녹 말 (starch)	C, H, O
리 그 린 (lignin)	C, H, O
유 지 분 (lipids)	C, H, O
유 기 산 (organic acid)	C, H, O
단 백 질 (protein)	C, H, O, N, S, (P)*
핵 산 (nucleic acid)	C, H, O, N, P
아 미 노 산 (amino acid)	C, H, O, N, (S)*
엽 록 소 (chlorophyll)	C, H, O, N, Mg
카 로 틴 (carotene)	C, H, (O)*
안 토 시 안 (anthocyan)	C, H, O

*종류에 따라 함유

유기물의 분해·변경(부후腐朽, decay) 과정은 매우 복잡하고 아직 완벽하게 잘 해명되어 있지 못하지만, 생태·환경적 측면에서 매우 중요하며, 근래 바이오매스의 이용과 활용 측면에서 반드시 연구되고 밝혀져야 할 항목이다. 조경학적 측면에서는 이러한 연구성과를 이용하여 생태·환경적 조경 즉 자연순환의 한 고리로서 인공적 건축물 또는 인공적 지반에 옥상녹화, 사면녹화, 임해매립지 녹화, 폐탄광 녹화 등 생태환경적 조림, 시설을 하는 조경을 한다면 세대를 지나 후대에도 지속 가능한 조경을 할 수 있을 것이다.

너무 비약한 면이 없지는 않으나 눈에 보이지 않은 미생물에 의한 탄소순환의 고리를 연결하는 것은 생태계를 복원하는 첫걸음이 될 것이며, 그것의 한 부분을 이해하는 것이 본 연재의 목적이다. 조경인들에게 쉽지 않은 내용인 점 미리 사과드리며, 어렵더라도 이러한 분야, 학문이 있다는 것을 알았으면 하는 것이 본 저자의 바람이다. 백과사전의 내용을 다 알 필요가 없듯이 토양미생물과 관련된 내용을 이해하기 보다는 이러한 내용이 있다는 것을 알면 되겠다.

2. 유기물 분해 미생물의 종류

토양에 떨어진 나뭇잎이나 나뭇가지 또는 초본식물의 줄기는 자연적으로 분해 즉 부후되는 데 이와 관련된 미생물의 범위는 매우 넓어 사상균을 비롯하여 세균류, 방선균류에 속하는 것들이며, 사상균류는 기질의 성분을 이용하는 특성의 차이에 따라 다음 세 가지로 크게 분류된다.

- ① 백후균(白朽菌, white-rot fungi)

② 갈후균(褐朽菌, brown-rot fungi)

③ 연부균(軟腐菌, soft-rot fungi)

백후균에 속하는 것은 담자균류(Basidiomycetes)이며 주로 리그닌을 분해하므로 셀룰로오스 등의 고분자 탄수화물이 남게 되므로 백색 또는 옅은 색을 띤다.

갈후균은 백후균이 잘 이용하지 않는 부분인 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 등 탄수화물류를 이요하므로 페놀계 화합물인 리그닌이 남아 갈색을 띤다. 이에 속하는 것도 여러 속의 담자균류가 많은 편이다.

연부균은 살아 있는 생물기생균으로서 병원성의 자낭균류(Ascomycetes)와 불완전균(Fungi imperfecti)의 것이 혼하다. 연부균은 주로 펙틴질과 헤미셀룰로오스 및 셀룰로오스 등 탄수화물류를 분해하고 세포사이의 구성물이 분해되어 세포의 결합이 풀려 부드러워(연화, 軟化)지게 된다.

〈표 16-2〉 유기물 분해에 관련된 세균류

균종	균종
Bacillus	Clostridium
B. brevis	C. thermocellum
B. circulans complex	Clostridium sp.
B. coagulans type A	Pseudomonas
B. coagulans type B	Pseudomonas sp.
B. licheniformis	
B. sphaericus	
B. stearothermophilus	

여러 퇴적물로부터 비슷한 균종들이 분리되는 것으로 보아 시간과 온도 상호관계의 결과로 대략 일정한 “퇴적물 생물군”이 조성되는 것으로 해석된다.

퇴적물의 재료가 세균에 대하여 이용되기 쉽고 유효 영양원이 풍부한 상태이면 세균에 의한 분해작용이 활발하게 진행되고 열이 발생하여 온도가 올라가면 초기 분해에 관련된 곰팡이 종류는 많이 사멸 또는 포자로 남게 되고 호열성 균이 남게 된다. 그 가운데 Bacillus가 주요 속(genus)이며 주요 종(species)은 〈표 16-2〉와 같다. 퇴적물의 내부나 수분이 많은 상태에서는 혐기적 조건이 되므로 Clostridium속의 활동이 왕성해지게 된다.

식물성 퇴적물의 분해균 가운데 세균류는 약 10%이고 방선균이 약 15~30%로 좀 더 많고 부숙의 제2단계에는 내열성 방선균이 가장 많은 균종이 된다. 또한, 이들은 부식화의 후기에 많이 나타나 숙성의 상태에 이르렀음을 가리키게 된다. 부숙관련 방선균으로 확인된 것으로는 다음 〈표 16-3〉과 같다.

〈표 16-3〉 유기물 분해에 관련된 방선균

균종	균종
Actinobifida chromogena	S. violaceus-ruber
Microbispora bispora	Streptomyces sp.
Micropolyspora faeni	Thermoactinomyces
Nocardia sp.	T. vulgaris
Pseudonocardia thermophila	T. sacchari
Streptomyces	Thermomonospora
S. rectus	T. curvata
S. thermofuscus	T. viridis
S. thermoviolaceus	Thermomonospora sp.
S. thermovulgaris	

사상균류는 부숙과정의 후기에 활동하는 주요 균류이며 이때에는 셀룰로오스, 리그닌 그리고 균체가 유용한 기질이 되는 것이다.

〈표 4〉 유기물 분해에 관련된 사상균류

균종	균종
Zygomycetes(접합균류)	Basidiomycetes(담자균류)
Absidia	Coprinus
A. ramosa	C. lagopus
Absidia sp.	Coprinus sp.
Mortierella turficola	Lensites sp.
Mucor	Deuteromycetes(불완전균류)
M. miehei	Aspergillus
M. pusillus	A. fumigatus
Rhizomucor sp.	Humicola
Ascomycetes(자낭균류)	H. grisea
Allescheria terrestris	H. insolens
Chaetomium	H. lanuginosa
thermophilum	H. stellata
Dactylomyces crustaceus	Sporotrichum
Myriococcum albomyces	thermophile
Talaromyces	Malbranchea pulchella
(Penicillium)	Scytalidium
T. dupontii	thermophilum
T. emersonnii	(formerly known as
T. thermophilus	Torula thermophila)
Thermoascus aurantiacus	
Thielavia	
T. thermophila	
T. terrestris	

사상균류는 기질 중량의 30~40%를 감소시키고 후기의 부식화 과정에서 일어나는 생화학적인 반응에 관련된다. 퇴적물의 부숙작용에 있어서 미생물의 생체형성과 부식물화 작용이 중요한 필수적인 과정이나 그에 대한 생화학적인 연구는 아직 충분치 못한 상태이다.

최근에는 유전공학적인 기법으로 예를 들면 리그닌 분해 세포의 효소생성의 유전자를 도입시켜 리그닌의 분해를 촉진시키는 연구도 시행되고 있는데, 이는 목재, 초본식물의 줄기 등 바이오매스를 이용한 에탄올의 생산에서 무척 중요한 연구분야이다.



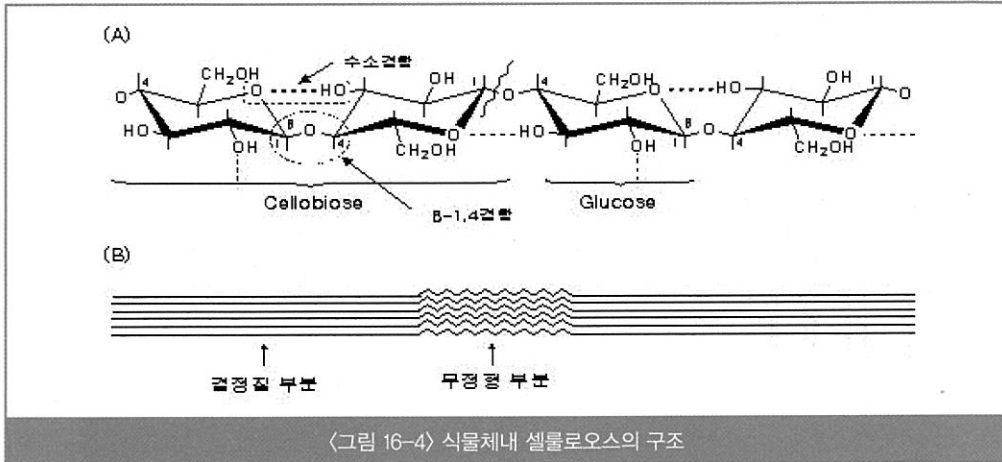
〈그림 16-3〉 나뭇잎을 분해하는 사상균류와 균근

3. 셀룰로오스의 분해

셀룰로오스는 고등식물과 일부 하등식물의 세포벽을 이루는 주 구성분이며 지구 상 자연계에 가장 많은 다당(polysaccharide) 탄수화물이다. 식물의 종류, 식물체의 부위, 나이 등에 따라 함량과 분자의 크기 등에 차이가 있으나 전체적으로 식물체 건조중량의 1/3~1/2을 차지하며 구성의 구분은 포도당(D-glucose)이 이웃 분자와 β -1, 4 결합으로 연결된 사슬모양의 고분자 물질이다.

포도당의 중합도(重合度)는 대개 3,000~10,000의 범위이며, 쌍자엽식물에서 1차 세포벽은 건물 중 당 대략의 조성은 셀룰로오스가 30~60%, 헤미셀룰로오스가 25~50%, 펙틴질이 10~20% 범위이며 세포벽의 셀룰로오스는 미세 섬유다발 안에 미세섬유 사슬상태로 존재하며 40~70개의 사슬은 포도당의 잔기 사이에 수소결합으로 연

결되어 결정성(結晶性) 미세섬유를 이루게 되고 또 다른 부분은 불규칙적인 그물눈(망목, 網目)모양의 무정형 구조로 되어 있다. 2차 세포벽에는 1차 세포벽에서 보다 많은 셀룰로오스가 리그닌과 복합체를 이루어 목질부를 형성한다(2차 세포벽의 조성 예 : 셀룰로오스 41~45%, 헤미셀룰로오스 약 30%, 리그닌 20~30%).



일반적으로 셀룰로오스의 분해속도는 리그닌보다는 빠른 편이나 퇴비의 부숙과정이나 토양 내 또는 자연환경에서 분해속도는 조건에 따라 많은 차이가 생기게 된다. 크게 영향을 끼치는 요인으로는 공존하는 유효질소량, 온도, 공기, 수분, pH, 다른 탄수화물의 양, 공존하는 리그닌 양, 미생물 상(相)의 변동 등을 들 수 있으며 특히 미생물은 인위적으로 우세균종을 선발 사용하여 분해를 촉진시키는 수단으로 응용되기도 하므로 산업적 의의도 갖는다. 다른 요인들도 적정범위가 어느 정도 분명히 있으므로 속성퇴비, 육묘온상, 버섯재배상 제조 등 인위적으로 분해를 조절하게 될 경우 유의할 문제이다.

셀룰로오스를 탄소영양원으로 이용하여 이를 분해시키는 미생물의 종류는 다양하며 환경조건에 따라 우세종의 분포가 변동된다. 주요 균속(菌屬)으로는 사상균류(fungi), 호기성 및 혐기성 중온성 세균류, 담자균류(basidiomycetes), 고온성 세균류, 방성균류를 들 수 있다.

셀룰로오스 분해균 가운데 비교적 분해력이 강한 것으로 알려진 주요 균종을 들면 다음 <표 16-5>와 같다.

미생물에 의한 셀룰로오스의 분해는 그들이 분비하는 효소균에 의하여 단계적으로 진행하게 된다. 그 효소는 한 가지가 아니고 3가지로 된 효소균이 작용하게 된다.

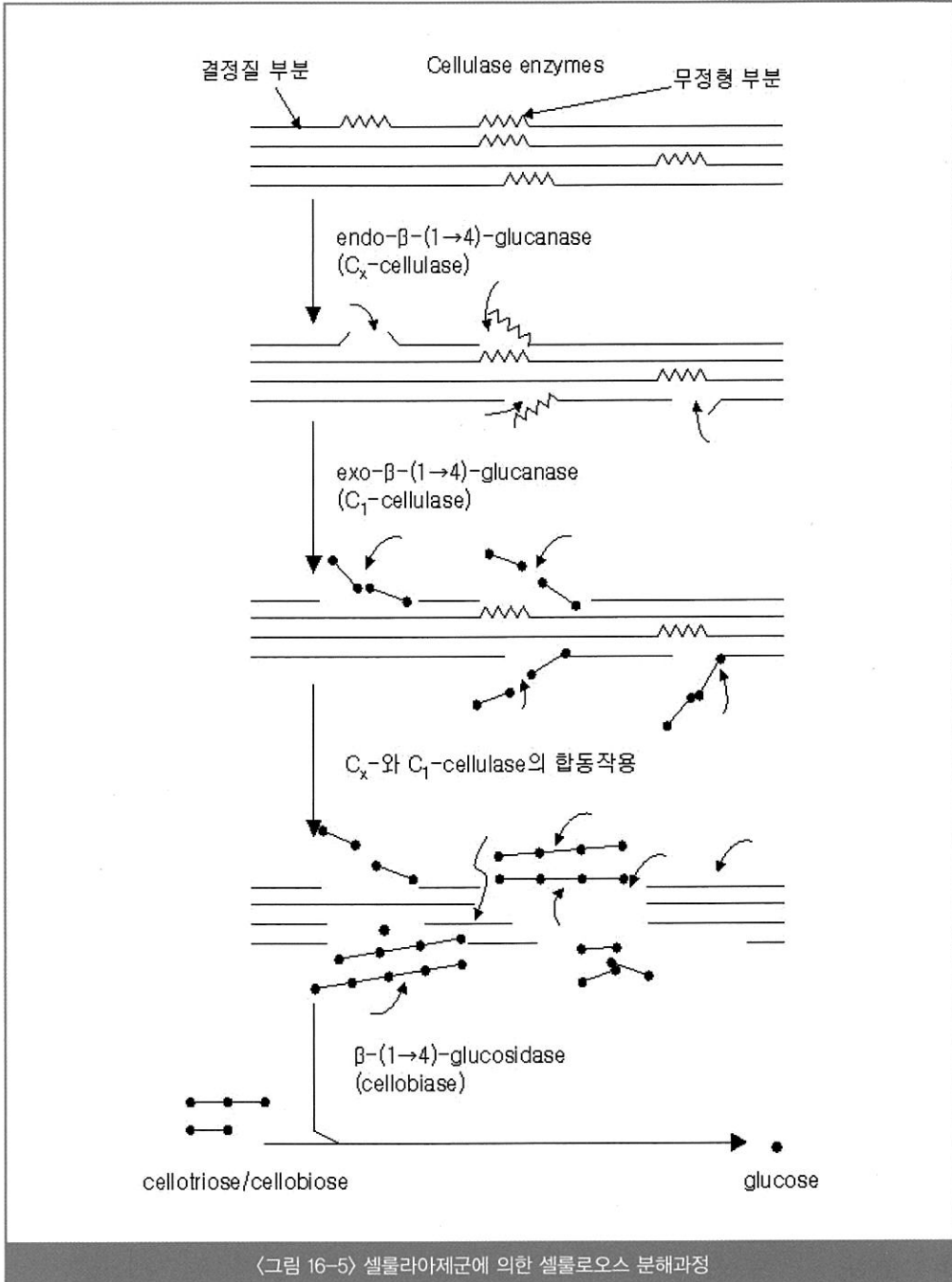
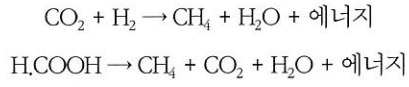
Cx-cellulase는 정확히는 endo- β -(1-4)-glucanase이며 셀룰로오스 사슬에서 무정형 부분과 결정질 부분의 중간을 아무 데나 절단하는 것이며 다음은 C1-cellulase(異名 : cellobiohydrolase, exo- β -(1-4)-glucanase)에 의하여 사슬의 끝 부분으로부터 cellobiose 단위로 절단시키고 결국 두 가지 효소에 의하여 사슬구조가 와해, 절단되어 cellotriose나 cellobiose같은 올리고당이 생산되고 이에 대하여 cellobiase(β -glucosidase)가 단위 포도당으로 분해시키게 된다.

〈표 16-5〉 셀룰로오스 분해성이 강한 주요 균종

균종	특성
세균 <i>Cellvibrio fulvus</i> <i>Cellulomonas</i> <i>Pseudomonas Fluorescens</i> <i>Ruminococcus</i> <i>Clostridium thermocellulaseum</i>	호기성, 중온성 호기성, 중온성 호기성, 중온성 혐기성, 반추동물위 혐기성, 고온성
사상균 <i>Sporotrichum pulverulentum</i> (<i>Chrysosporium lignorum</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>) <i>Humicola insolens</i> <i>Sporotrichum pruinosum</i> (<i>Chrysosporium pruinosum</i>) <i>Sporotrichum dimorphosporum</i> <i>Sporotrichum thermophilum</i> <i>Chaetomium thermophilum</i> <i>Thermoascus aurantiacus</i> <i>Talaromyces emersonii</i>	호기성, 고온성
사상균 <i>Aspergillus niger</i> <i>Aspergillus aculeatus</i> <i>Trametes sanguinea</i> <i>Poria</i> <i>Myrothecium verrucaria</i> <i>Pestalotiopsis westerdijkii</i> <i>Penicillium iriense</i> <i>Polyporus versicolor</i> <i>Pelicularia filamentosa</i> <i>Sclerotium rolfsii</i> <i>Fusarium solani</i> <i>Trichoderma viride</i>	호기성, 중온성
방선균 <i>Streptomyces</i> <i>Thermoactinomyces</i> <i>Thermomonospora curvata</i> <i>Thermomonospora fusca</i>	호기성, 중·고온성 중온성

천연의 셀룰로오스에 대하여 cellulase균에 속하는 각 단일효소는 약하게 작용하나 합동으로는 매우 강하게 작용하므로 이들이 함께 작용할 경우 상승적(相乘的)인 효소가 나타나는 것으로 보인다.

혐기적 환경에서 분해될 경우 혐기성 분해균(예, *clostridium spp*)에 의하여 호기성 균에 의한 생산물과는 다른 H₂, ethanol, 유기산(acetic, lactic, formic 등) 등이 생성되었다가 메탄(methane, CH₄) 합성균의 작용으로 메탄이 생성될 것이다. 🌱



〈그림 16-5〉 셀룰라아제군에 의한 셀룰로오스 분해과정