

백색부후균에 의한 합성염료의 탈색과 리그닌분해 효소의 생산

구본준¹ · 김민식¹ · 김인만¹ · 김선웅¹ · 최원혁¹ · 이미화¹ · 조해진² · 이태수^{2*}

¹제물포고등학교, ²인천대학교 생명과학부

Decolorization of Synthetic Dyes and Ligninolytic Enzymes Production by White Rot Fungi

Bon Joon Gu¹, Min Sik Kim¹, Yin Man Kim¹, Seon Woong Kim¹, Won Hyeok Choi¹,
Mi Hwa Lee¹, Hae Jin Cho² and Tae Soo Lee^{2*}

¹Jemulpo High School, Incheon 400-190, Korea

²Division of Life Sciences, University of Incheon, Incheon 406-772, Korea

(Received June 18, 2012. Revised June 21, 2012. Accepted June 22 2012)

ABSTRACT : This study has been conducted to screen the decolorization of 4 aromatic synthetic dyes and production of ligninolytic enzymes by 4 white rot fungi such as *Bjerkandera adusta*, *Cerrena unicolor*, *Pleurotus pulmonarius* and *Abortiporus biennis*. It was found that *B. adusta*, *C. unicolor*, and *P. pulmonarius* have the ability to efficiently decolorize congo red and moderately decolorized amaranth and orange G in solid and liquid culture media. However, the decolorization rate of 4 synthetic dyes by *A. biennis* was relatively low. The decolorization of congo red, amaranth, orange G were related to the growth rate of the fungal mycelia in the solid medium. But, the all fungi tested did not efficiently decolorize methylene blue in the liquid culture media. To investigate the production of ligninolytic enzymes in media containing aromatic compounds, fungi were cultured in 1% naphthalene supplemented potato dextrose broth medium. All fungi tested had the capability to produce laccase, lignin peroxidase and manganese peroxidase, and *B. adusta* was the best ligninolytic enzymes producing white rot fungus among other fungi tested.

KEYWORDS : Decolorization, Ligninolytic enzyme, Synthetic dye, White rot fungi

서 론

Azo계의 congo red 염료(dye)가 1856년 처음으로 합성된 이래 염료는 우리의 가정과 산업계에서 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 다양한 색깔의 합성염료를 이용해 종이, 섬유, 플라스틱 및 목재를 염색하여 상품성을 높이고 또한 음료나 음식에도 염료를 첨가하여 맛이 있어 보이게 하고 있다. 우리나라에서 옛 부터 널리 사용해진 식물 유래의 천연염료는 인체에 무해한 장점은 있으나 염색 과정에 많은 시간과 노력이 소모되고 염색 후 쉽게 탈색되는 등의 단점이 있어서 최근의 섬유산업에서는 거의 사용되지 않고 있다. 따라서 색상이 화려하고 탈색이 되지 않아 염색이 오래 지속되는 등의 장점이 있는 화학 합성 염료가 널리 보급되어 사용되고 있다. 그러나 합성염료는 염색 공정 후 환경으로 방출되면 독성을 나타내고 난분해성이어서 생태계에 오랜 기간 잔류하여 환경을 오염시키는 단점이 있다(Yoon, 1994). 전 세계에서는 연간 약 10,000톤

이 넘는 염료가 생산되고 있는데 이들 염료의 대부분은 합성염료이고 이들 염료는 azo계 염료, heterocyclic계 염료, indigo계 염료 및 트리페닐메탄(triphenyl methane)계 염료 등으로 분류된다. 염색에 사용된 염료의 약 10~15%는 폐수로 방출되나 이들 폐수에 함유된 염료는 폐수처리장에서 모두 처리되지 못하고 하천이나 강으로 방류되어 환경을 오염시키고 있다 따라서 염료의 방류로 인해 오염된 환경을 정화하기 위한 친환경적인 폐수처리 기술의 개발이 진행되고 있다 (Chaube *et al.*, 2010, Kim *et al.*, 1995).

이에 지난 30여 년 간 과학자들은 섬유의 염색 과정에서 방출되는 염료를 생물학적인 방법으로 분해하여 환경을 보호하기 위한 연구를 지속적으로 수행해 왔다. 초기에는 미생물 중 세포주기가 짧은 세균을 이용하여 염료를 효과적으로 분해할 수 있었으나 산업화에 어려움이 많았다. 이를 타개하기 위해 합성염료와 유사한 환상의 구조를 갖고 있는 리그닌을 분해하는 백색부후균이 세균에 비해 합성염료를 보다 효과적으로 분해한다는 것이 밝혀지면서 백색부후균을 이용한 염료 분해연구가 점차 활기를 띠게 되었다 (Chung *et al.*, 1992, Field *et al.*, 1993).

*Corresponding author <E-mail : tslee@incheon.ac.kr>

이에 본 실험에서는 우리나라에 자생하는 백색부후균 중 줄버섯 단색털구름버섯, 산느타리 및 유관버섯 등 4종의 버섯균사체를 인천대학교 버섯균주 및 DNA은행에서 분양받아 congo red, amaranth, orange G 및 methylene blue 등 4종류의 염료가 첨가된 고체와 액체배지에 배양하여 이들 공시균의 염료 탈색에 대한 실험을 수행하였다. 이외에도 1%의 naphthalene이 함유된 potato dextrose broth 배지에 공시균을 10일 간 배양하여 laccase, lignin peroxidase 및 manganese peroxidase 등의 리그닌 분해효소 생산에 관한 실험도 수행하였다.

재료 및 방법

균주 및 배양

본 실험에 사용된 줄버섯(*Bjerkandera adusta*; IUM 2604), 단색털구름버섯(*Cerrena unicolor*; IUM 4440), 산느타리(*Pleurotus pulmonarius*; IUM 2362) 및 유관버섯(*Abortiporus biennis*; IUM 304) 등 4종의 백색부후균 균주는 인천대학교 생명과학부의 “버섯균주 및 DNA은행” 으로부터 분양받았다. 이들 균주는 PDA 배지(Potato 200 g, Dextrose 20 g, DW 1,000 ml)가 10 ml 들어 있는 페트리 접시에서 7일간 25°C의 배양기에서 암배양 후 실험에 사용하였다.

염료

본 실험에는 azo계 염료와 heterocyclic계 염료 등 4종류의 염료를 사용하였다. 이 중 azo계 염료는 congo red, amaranth와 orange G 등 3종류와 heterocyclic 계 염료는 methylene blue 1종류 이었다. 실험에 사용한 시약은 모두 독일의 Merck사에서 구입하였으며 이들 염료는 증류수에 녹이고 여과지로 여과하여 멸균한 후 배지에 첨가하여 실험에 사용하였다.

고체배지에서의 백색부후균의 균사생장과 염료의 탈색

백색부후균이 고체배지에 첨가된 염료를 분해하는 실험은 PDA 배지에 각각의 염료를 0.02%의 농도로 첨가하고 멸균한 후 10 cm의 페트리접시에 부어 굳힌 후 염료가 첨가되지 않은 페트리접시에서 1주일 간 25°C에서 암배양한 공시균의 균사체를 페트리접시의 가장자리로부터 1 cm 떨어진 부위로부터 5 mm의 cork borer로 떼어내 각각의 염료가 첨가된 페트리접시의 중앙에 이식하였다. 대조균은 백색부후균이 접종되지 않고 각각 4종류의 염료가 첨가된 PDA 페트리접시를 사용하였다. 각각의 공시균을 접종한 PDA 페트리접시는 25°C의 배양기에서 10일 간 암배양 후 성장한 균사체의 직경(MD)과 균사체에 의해 탈색된 염료의 직경(DD)를 측정하였다. 이들 균에 의한 염료의 탈색지표는 DI (decolorization index)로 표시하였으며, $DI = DD/MD$ 라는 식을 사용하여 계산하였다. 각각

의 실험은 4반복하여 수행하였다.

액체배지에서의 염료의 분해

공시된 백색부후균이 액체배지에 첨가된 염료를 분해하는 실험은 각각의 염료가 0.02%의 농도로 첨가된 potato dextrose broth(PDB)를 이용하여 수행하였다. 250 ml 용량의 삼각플라스크에 각각의 염료가 첨가된 액체배지 100 ml 를 넣어 살균 후 직경이 5 mm인 10개의 균사체 disc를 접종하고 25°C의 배양기에서 140 rpm으로 24일 간 암배양하였다. 매 2일 마다 각각의 백색부후균의 균사체가 배양되고 있는 삼각플라스크내의 배양액을 피펫을 이용하여 2 ml씩 꺼낸 뒤 원심분리기를 이용하여 4000 rpm으로 25°C에서 2분간 원심 분리하여 상등액을 취하였다. Congo red는 562 nm, amaranth는 525 nm, orange G는 478 nm 그리고 methylene blue는 586 nm에서 분광광도계(OPTIZEN 2120UV, Korea)를 이용하여 각각의 상등액 흡광도를 측정하였다. 대조균은 백색부후균이 접종되지 않았으나 각각의 염료가 함유된 PDB를 사용하였다. 염료의 탈색율은 아래의 식을 이용하여 구하였다. 탈색율 (decolorization Index, %) = $(A_0 - A) \times 100 / A_0$. 이때 A_0 는 균을 최초로 배양한 때의 액체배지의 흡광도이고 A는 각각의 시간대 액체배지의 최대 흡광도이다. 각각의 실험은 4반복하여 수행하였다(Jayasinghe *et al.*, 2008).

액체배지에서 리그닌 분해효소의 생산

나프탈렌이 첨가된 액체배지에서 공시된 백색부후균이 생성하는 리그닌 분해효소의 양을 측정하기 위해 100 ml 용량의 삼각플라스크에 1%의 포도당과 1%의 naphthalene이 첨가된 20%의 PDB 배지 40 ml를 넣어 살균 후 5 mm 직경의 균사체 disc 10개를 접종하여 25°C에서 10일간 정지 배양하였다. 배양이 끝난 배양액은 Whatman No. 2 여과지로 걸러 배양액과 균사체를 분리하였으며 여과한 배양액은 4°C의 냉장고에 보관하면서 리그닌 분해효소의 종류와 양의 분석에 사용하였다.

Laccase의 활성 측정

Laccase의 활성은 Bourbounnais *et al.*(1995)의 실험방법에 따라 수행하였다. 이 방법은 기질인 ABTS(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid))를 5 mM 의 농도에서 산화하는 것에 기초를 두고 있다. 즉, 기질을 2.4 ml의 sodium acetate buffer(0.1 M, pH 5.0)에 녹인 후 여과한 배양액 100 ml를 첨가해 30°C에서 2분간 반응 후 420 nm에서 흡광도를 측정하였다.

Lignin peroxidase의 활성 측정

Lignin peroxidase(LiP)의 활성 측정은 Tien과 Kirk (1983)의 실험 방법을 따랐는데 이 방법은 veratryl alcohol이 veratryl aldehyde로 산화되는 것을 310 nm에서 흡광도

를 측정하는 것이다. 즉, 50 mM sodium tartrate buffer (pH 5) 2.2 ml에 2 mM의 veratryl alcohol 40 µl를 넣고 각각의 백색부후균 균사체의 배양 여과액 240 µl를 섞은 후 0.2 mM의 H₂O₂를 20 µl 첨가하여 25°C에서 반응시킨 후 곧 바로 310 nm에서 흡광도의 변화를 측정하였다. 효소의 활성단위는 veratryl alcohol로부터 분(min)당 생성되는 veratryl aldehyde의 양(umole)을 1 unit로 정의하였다.

Manganese peroxidase의 활성 측정

Manganese peroxidase(MnP)의 활성 측정은 Glenn과 Gold(1985)의 실험방법을 따랐는데 이 방법은 Mn(II)가 Mn(III)로 산화되는 것에 기초를 둔 것으로 0.1 M의 sodium succinate buffer 2.5 ml에 0.01%의 phenol red와 0.1 mM의 MnSO₄를 기질로 사용하는 것이다. 즉, 2.5 ml의 기질과 200 µl의 배양 여과액을 반응혼합물로 준비한 후 0.1 mM의 H₂O₂를 첨가해 30°C에서 2분간 반응시킨 후 5 M의 NaOH 첨가해 반응을 중지시키고 610 nm에서 흡광도의 변화를 측정하였다. 효소의 활성단위는 Mn(II)로부터 분(min)당 MN(III)로 산화되는 양(umole)을 1 unit로 정의하였다.

결과 및 고찰

고체배지에서 백색부후균의 성장과 염료탈색

고체배지에서 공시균의 균사체 성장과 염료 탈색의 결과를 Table 1에 표시하였다. 고체배지 내의 염료 분해는 공시한 백색부후균의 균사체가 배지로 분비한 리그닌 분해효소의 작용에 의해서 염료가 탈색되면서 이루어진다. 본 실험에서 4종류의 염료가 첨가된 배지 중 백색부후균의 균사체가 가장 빠르게 성장하고 염료의 탈색이 잘 이루어진 배지는 congo red를 첨가한 배지로 이 배지에서 10일간 성장한 4종의 백색부후균의 균사체 직경은 모두 83 mm 이상이었으며 염료가 분해되어 탈색된 배지의 직경도 모두 균사체가 성장한 거리와 유사하게 나타났다. Azo 계열에 속하는 congo red는 비교적 다른 azo 계열의 염료에 비해 리그닌 분해효소에 의해 용이하게 분해된다고 보고되어 있다(Ollikka *et al.*, 1993). 다음으로 균사체 성장이 양호했던 배지는 amaranth가 첨가된 배지로 이 배

지에서 10일 간 배양한 줄버섯, 단색털구름버섯 및 산느타리의 균사체 직경은 각각 85 mm, 84 mm, 82 mm로 congo red 배지에서 배양한 것에 비해 생장은 조금 저조하였으나 염료의 탈색지표는 균사체의 성장 직경과 동일하였다. Orange G 첨가 배지에서 배양한 모든 공시균의 균사생장은 congo red와 amaranth에서 배양한 공시균의 균사체의 비해 균사체의 생장이 저조하였다. 특히 methylene blue가 첨가된 배지에서 배양한 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 및 유관버섯의 균사체 직경은 각각 13 mm, 12 mm, 11 mm, 8 mm로 나타났으며 탈색지표도 58~69%로 나타나서 methylene blue를 첨가한 배지에서 배양한 공시균은 azo계열의 염료를 함유한 배지에서 배양한 공시균에 비해 균사의 성장과 염료의 탈색율이 매우 낮았다. 따라서 본 실험에 사용한 azo계열의 congo red와 amaranth 첨가 배지에서 배양한 줄버섯, 단색털구름버섯 및 산느타리의 균사체 성장과 염료의 탈색율은 대부분 매우 높게 나타나 이들 공시 백색부후균의 균사체를 이용해 congo red와 amaranth를 효과적으로 분해할 수 있을 것으로 사료되었으나 methylene blue를 분해하는 데에는 실용성이 없는 것으로 판단되었다.

액체배지에서 백색부후균의 염료탈색

백색부후균을 congo red, amaranth, orange G 및 methylene blue 등 4종의 염료가 첨가된 액체배지에서 배양한 후의 탈색율은 고체배지의 실험 결과와 유사하게 나타났다. 모든 공시균주에서 congo red의 탈색율이 가장 높았으며, 균주 간 탈색율에는 다소 차이가 있었다(Fig. 1). Congo red를 가장 잘 탈색시킨 공시균은 줄버섯으로 배양 18일 후 congo red를 95% 이상 탈색하였고, 다음은 단색털구름버섯으로 배양 18일 후 93%를 탈색하였으며, 산느타리는 배양 24일 후 80%, 그리고 유관버섯은 배양 24일 후 가장 낮은 45%의 탈색율을 보였다. 그러나 congo red에 비해 amaranth의 분해율은 공시한 균주 모두에서 낮게 나타나 배양 20일 후에도 80% 이하로 낮았다. 특히 유관버섯의 amaranth 탈색율은 배양 24일 후에도 30%로 매우 낮았다. Orange G의 분해율도 유관버섯은 제외한 다른 공시균주에서 62~70%로 나타났으며, 유관버섯은 배양 24일 후에도 탈색율은 23%로 매우 낮았다. Heterocyclic계

Table 1. Decolorization of aromatic dyes on solid media by white rot fungi

Scientific names of white rot fungal species	Congo red			Amaranth			Orange G			Methylene blue		
	MD (mm)	DD (mm)	DI	MD (mm)	DD (mm)	DI	MD (mm)	DD (mm)	DI	MD (mm)	DD (mm)	DI
<i>Bjerkandera adusta</i>	86 ± 3.3	86 ± 1.5	1.00	85 ± 4.1	85 ± 0.8	1.00	79 ± 1.5	79 ± 2.3	1.00	13 ± 1.7	09 ± 1.1	0.69
<i>Cerrena unicolor</i>	84 ± 2.4	84 ± 2.2	1.00	84 ± 3.0	84 ± 1.4	1.00	78 ± 1.0	78 ± 3.0	1.00	12 ± 1.3	07 ± 1.5	0.58
<i>Pleurotus pulmonarius</i>	84 ± 3.0	84 ± 3.2	1.00	82 ± 1.8	82 ± 3.3	1.00	75 ± 2.2	71 ± 1.4	0.95	11 ± 2.0	07 ± 2.4	0.64
<i>Abortiporus biennis</i>	83 ± 2.5	83 ± 2.0	1.00	81 ± 1.2	73 ± 2.0	0.90	67 ± 1.5	63 ± 2.4	0.94	08 ± 1.4	05 ± 1.7	0.63

MD: Diameter of mycelial colony, DD: Diameter of decolorization zone, DI: Decolorization index = DD/MD. The diameter of mycelial colony and decolorization zone were measured (mm, n=4) after 10 days of incubation.

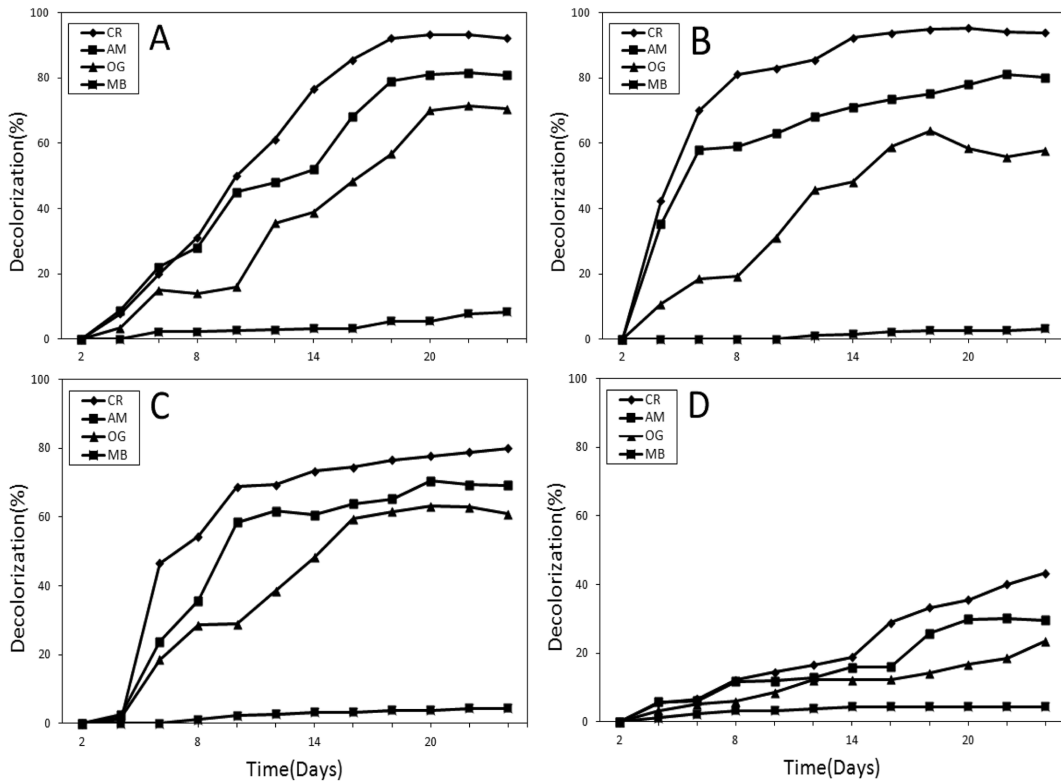


Fig. 1. Fungal decolorization of aromatic dyes in the liquid media. CR: Congo Red, AM: Amaranth, OG: Orange G, MB: Methylene Blue, A: *Bjerkandera adusta*, B: *Cerrena unicolor*, C: *Pleurotus pulmonarius*, D: *Abortiporus biennis*.

열의 염료인 methylene blue의 탈색율은 모든 공시균주에서 매우 낮아서 배양 24일 후에도 탈색율이 줄버섯에서 가장 높은 10%를 나타냈고 다른 3종의 공시균주는 모두 5% 이하의 탈색율을 나타내 모든 공시균주는 methylene blue를 효과적으로 탈색시키지 못하였고 본 실험결과는 앞의 고체배지 실험 결과와도 매우 유사하게 나타났다 (Table 1). 따라서 본 액체배지 실험에서 공시균주는 azo계 열의 염료 탈색에는 비교적 효과가 있었지만 heterocyclic 계열의 methylene blue 염료의 탈색 효과는 매우 낮았다. 따라서 앞으로 methylene blue를 효과적으로 탈색하기 위해서는 본 실험에 사용한 균주 외에 새로운 백색부후균의 탐색과 선발이 필요할 것으로 사료된다.

액체배지에서 리그닌 분해효소의 생산

액체배지에서 공시균의 리그닌 분해효소 생산을 탐색하기 위해 1%의 포도당과 1%의 naphthalene이 첨가된 20%의 PDB 배지에 각각 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 및 유관버섯 등 4종의 백색부후균 균사체 disc 10개를 접종하여 10일간 배양 후 배양액을 여과하여 리그닌 분해효소의 종류와 양을 분석하였다.

Laccase의 활성

공시된 4종의 백색부후균 균사체를 나프탈렌이 1% 첨가된 액체배지에서 각각 10일 간 배양하여 여과한 배양액

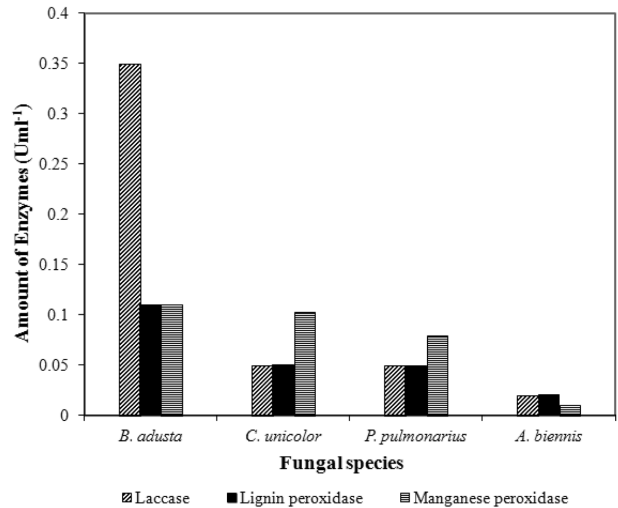


Fig. 2. Production of laccase, lignin peroxidase, manganese peroxidase by white rot fungi in potato broth supplemented with 1% naphthalene and glucose after 10 days of incubation. Results are the means of 4 replications.

의 laccase(Lac)활성을 조사하였다. 가장 많은 Lac을 생산한 균은 줄버섯이었고 그 다음으로 산느타리, 단색털구름버섯 및 유관버섯 순으로 나타났다(Fig. 2). 줄버섯은 Lac을 0.35 Uml⁻¹생산하였고 가장 생산량이 낮았던 유관버섯은 0.02 Uml⁻¹이었다. 따라서 두 버섯 간 Lac의 생산량

차이는 17.5배로 크게 나타났다.

Lignin peroxidase의 활성

나프탈렌을 1% 첨가한 배지에서 10일 간 배양한 4종 백색부후균의 lignin peroxidase(LiP) 생산량을 측정할 결과 가장 많은 LiP를 생산한 버섯은 줄버섯이었으며 다음으로 단색털구름버섯, 산느타리, 유관버섯 순으로 낮아졌다(Fig. 2). LiP 효소의 생산량은 줄버섯 0.11 Uml^{-1} , 단색털구름버섯 0.05 Uml^{-1} , 산느타리 0.049 Uml^{-1} , 그리고 유관버섯이 가장 적은 0.02 Uml^{-1} 를 생산하였다. 따라서 가장 많은 LiP를 생산한 줄버섯과 유관버섯의 생산량 차이는 5.5배로 나타났다.

Manganese peroxidase의 활성

나프탈렌을 1% 첨가한 배지에서 각각의 공시균을 접종하여 10일 간 배양하여 측정할 manganese peroxidase (MnP)의 생산량은 Fig. 2에 나타내었다. 생산된 효소의 양을 측정할 결과 가장 많은 MnP를 생산한 균은 줄버섯으로 0.11 Uml^{-1} , 이었으며 다음으로 단색털구름버섯 0.102 Uml^{-1} , 산느타리 0.078 Uml^{-1} , 그리고 유관버섯 0.01 Uml^{-1} 순으로 점차 생산량이 감소하였다.

따라서 본 실험을 통해 azo계열의 염료가 첨가된 액체 배지에서 양호한 탈색 효과를 보인 균은 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 등 3종으로 이들 균주 모두는 congo red에 대한 분해율이 높았으나 유관버섯은 이와는 달리 분해율은 다소 낮았다. 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 등의 amaranth와 orange G에 대한 분해율은 앞의 congo red의 분해율에 비해 다소 낮았으며 유관버섯의 분해율은 앞의 균에 비해 분해율이 낮았다. 그러나 methylene blue의 탈색능은 모든 공시균에서 5~10%에 머물러 효율적인 분해가 이루어지지 못하는 것으로 나타났다. 또한 PDB 배지에 1%의 나프탈렌을 첨가한 후 공시균을 10일 간 배양하여 생산된 리그닌 분해효소의 종류와 양을 측정할 결과, 공시균에 따라 생산된 효소의 양에 차이가 있었지만 모두 laccase, lignin peroxidase 및 manganese peroxidase 등의 효소를 생산하는 것으로 나타났다. Hataka (1994)는 실험을 통해 백색부후균의 리그닌 분해효소로 보고된 Lac, LiP 및 MnP 등 3 종류의 효소 중 리그닌의 분해 활성이 가장 높은 효소의 조합은 LiP와 MnP이고 다음은 Lac와 MnP의 조합 그리고 가장 낮은 분해 활성을 나타낸 조합은 Lac와 LiP 조합이라고 보고하였다. 본 실험에서도 congo red, amaranth 및 orange G 등에 대한 탈색율이 높게 나타난 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 등 공시균은 LiP와 MnP 조합의 생산량이 비교적 높아 congo red, amaranth 및 orange G를 효율적으로 분해 할 수 있었던 것으로 사료되었다. 그러나 본 실험에 사용한 4종의 백색부후균주 모두는 methylene blue가 함유된 고체배지에서의 생장이 매우 저조하였고 또한 methylene blue가 함유

된 액체배지에서도 methylene blue의 탈색율이 매우 낮았다. Jang 등(2006)은 Lac, LiP 및 MnP를 모두 생산하는 백색부후균인 구름버섯의 methylene blue 분해율이 100%라고 보고하였는데 본 실험에서 Lac, LiP 및 MnP 등의 리그닌 분해효소를 가장 많이 생산한 줄버섯의 methylene blue 탈색율은 10%에 머물러 methylene blue를 효율적으로 분해하지 못하였다. 이렇게 methylene blue의 분해에 대한 대조적인 결과를 규명하기 위해서는 앞으로 각각의 공시균이 생산한 효소의 양과 질 그리고 공시균의 배양 환경 등에 대한 추가의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 백색부후균 중 줄버섯, 단색털구름버섯, 산느타리 및 유관버섯 등의 균사체를 이용하여 congo red, amaranth, orange G 및 methylene blue 등의 합성염료 탈색에 관한 실험을 수행하였다. 실험 결과 줄버섯과 단색털구름버섯은 congo red가 함유된 고체와 액체배지에서 이들 염료를 93~95% 탈색하였으며 amaranth는 약 80%, orange G는 62~70% 탈색시키는 것으로 나타났으나 유관버섯에 의한 3종류의 염료 탈색율은 30% 내외로 매우 낮았다. congo red, amaranth 및 orange G 등 각각의 염료가 첨가된 배지에서의 염료 탈색율은 이들 배지에서 배양한 균사체의 성장과 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 모든 공시 균주는 methylene blue가 함유된 고체와 액체배지에서 methylene blue를 효과적으로 탈색하지 못하는 것으로 나타났다. 공시된 백색부후균의 액체 배지에서의 리그닌 분해효소 생산을 탐색하기 위해 1%의 나프탈렌이 첨가된 PDB 배지에 공시균을 10일 간 배양 후 효소의 종류와 양을 분석한 결과 모든 공시균은 laccase, lignin peroxidase 그리고 manganese peroxidase 등의 효소를 생산하는 것으로 확인되었으며 공시균주 중 줄버섯이 리그닌 분해 효소의 생산이 가장 왕성한 것으로 나타났다.

감사의 말씀

본 연구는 2011년도 제물포고등학교 특별연구 활동 프로그램 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Bourbounnais, R., Paice, M. G., Reid, I. D., Lanthier, P. and Yaguchi, M. 1995. Lignin oxidation by laccase isozymes from *Trametes versicolor*. *Appl. Environ. Microbiol.* 61:1876-1880.
- Chaube, P., Indurkar, H. and Moghe, S. 2010. Biodegradation and decolorisation of dye by mix consortia of bacteria and study of toxicity on *Phaseolus mungo* and *Triticum aestivum*. *Asiatic*

- J. Biotech. Res.* 1:45-56
- Chung, H. S., Choi, H. T. and Yoon, K. S. 1992. Regulation of laccase by catabolite repression in *Trimorphomyces papilionaceus*. *Kor. J. Microbiol.* 30:78-82. (in Korean).
- Field, J., Jong, E., Feijoo-Costa, G. and Bont, J. A. M. 1993. Screening for ligninolytic fungi applicable to the biodegradation of xenobiotics. *Trends in Biotech.* 11:44-49.
- Glenn, J. K. and Gold, M. H. 1985. Purification and characterization of an extracellular Mn(II)-dependent peroxidase from the lignin-degrading basidiomycetes *Phanerochaete chrysosporium*. *Arch. Biochem. Biophys.* 242:329-341.
- Hataka, A. 1994. Lignin-modifying enzymes from selected white-rot fungi: production and role in lignin degradation. *FEMS Microbiol. Rev.* 13:125-135.
- Jang, T. W., Jun S. C., Ahn, T. S. and Kim, K. J. 2006. Production of lignin degrading enzymes and decolorization of various dye compounds by various dye compounds by wood-rot fungi. *Kor. J. Microbiol.* 42:34-39. (in Korean).
- Jayashinghe, C., Intiaj, A., Lee, G. W., Im, K. H., Hur, H., Lee, M. W., Yang, H. S. and Lee, T. S. 2008. Degradation of three aromatic dyes by white rot fungi and the production of ligninolytic enzymes. *Mycobiol.* 36:114-120.
- Kim, H. Y., Lee, Y. E., Choi, H. T. and Song, H. G. 1995. Decolorization of dyes by white rot fungi. *Kor. J. Mycol.* 23:298-304. (in Korean).
- Ollikka, P., Alhonmaki, K., Leppanen, N., Glumoff, T., Rajola, T. and Suominen, I. 1993. Decolorization of azo, triphenyl methane, heterocyclic, and polymeric dyes by lignin peroxidase isozymes from *Phanerochaete chrysosporium*. *Appl. Environ. Microbiol.* 59:4010-4016.
- Tien, M. and Kirk, T. K. 1983. Lignin-degrading enzyme from the hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Burds. Sci.* 221:661-663.
- Yoon, K. H. 1994. Decolorization of poly R-478 by *Coriolus versicolor* IFO 30388). *Kor. J. Microbiol.* 32:182-185. (in Korean).