

큰느타리(*Pleurotus eryngii*)의 방향족 합성염료 분해 특성

임경환 · 백승아 · 이태수*

인천대학교 생명과학부

Synthetic aromatic dye degradation by white rot fungus, *Pleurotus eryngii*

Kyung-Hoan Im, Seung-A Baek, and Tae Soo Lee*

Division of Life Sciences, Incheon National University, (Songdo-dong) 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea

ABSTRACT: *Pleurotus eryngii*, a white rot fungus, produces two extracellular lignin-degrading enzymes, laccase and manganese peroxidase (MnP). Owing to these enzymes, *P. eryngii* efficiently degrades synthetic chemicals such as azo, phthalocyanine, and triphenyl methane dyes. In this study, we investigated the degradation processes of four aromatic dyes, congo red (CR), methylene blue (MB), crystal violet (CV), and malachite green (MG), by *P. eryngii* under solid and liquid culture conditions. CR and MG were the most quickly degraded under solid and liquid culture conditions, respectively. However, compared to CR, CV, and MG, MB was not degraded well under both culture conditions. The activities of ligninolytic enzymes (laccase and MnP) were also investigated. Laccase was identified to be the major enzyme for dye degradation. A positive relationship between decolorization and enzyme activity was observed for CR, MB, and CV degradation. In contrast, decolorization of MG ensued after high enzyme activity. These results indicate that the degradation process differs between MG and the other aromatic dyes. Therefore, *P. eryngii* could be a potential tool for the bioremediation of synthetic aromatic dye effluent.

KEYWORDS: Aromatic dyes, Degradation, Laccase, Manganese peroxidase, *Pleurotus eryngii*

1856년 최초의 합성염료인 모브 (Mauve)가 탄생한 이후 100,000종 이상의 합성염료 제품이 생산되어 사용되고 있다. 합성염료는 화학적으로 안정적이고 저렴한 가격으로 선명하면서도 다양한 색 표현이 가능하여 섬유, 플라스틱, 종이, 목재, 음식 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(Cho and Ryu, 2015). 하지만 색소를 식물, 동물 등 자

연에서 추출하는 천연염료와 달리 합성염료는 생산 과정에서 다량의 폐수를 발생시키고 독성을 지니고 있어 생태계와 인체에 나쁜 영향을 미친다(Jarosz-Wilkolazka *et al.*, 2002; Jin *et al.*, 2007; Mathur *et al.*, 2012; Rahman *et al.*, 2017). 합성염료에 의한 폐수는 여과, 침전, 이온교환, 오존산화 방법 등으로 처리하거나 흡착제를 활용하여 처리하고 있다. 하지만 이와 같은 폐수 처리 방법들은 그 효율이 낮고 2차 오염 발생이라는 또 다른 문제를 가지고 있다. 따라서 곰팡이, 조류, 세균 등의 생물을 이용한 경제적이고 친환경적인 합성염료 폐수 처리 기술에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다(Cho and Ryu, 2015; Lee, 2021; Sung *et al.*, 2021).

담자균류에 속하는 백색부후균은 갈색부후균과 함께 목재를 분해하는 주요 분류군이다. 백색부후균은 세포외효소인 lignin peroxidase (LiP), manganese peroxidase (MnP), laccase를 분비하여 목재의 리그닌(lignin)을 분해한다. 균의 종류에 따라 분비하는 효소의 종류와 활성이 달라지는데 무성유색고약버섯(*Phanerochaete chrysosporium*)은 LiP, MnP를 분비하여 리그닌을 분해하며, 구름버섯(*Trametes versicolor*)은 주로 laccase를 분비하고 LiP는

J. Mushrooms 2022 June, 20(2):86-91
<http://dx.doi.org/10.14480/JM.2022.20.2.86>
 Print ISSN 1738-0294, Online ISSN 2288-8853
 © The Korean Society of Mushroom Science

Kyung-Hoan Im (Professor), Seung-A Baek (Post-doctor), and Tae Soo Lee (Emeritus professor)

*Corresponding author

E-mail : tslee@inu.ac.kr

Tel : +82-32-835-4614, Fax : +82-32-835-0763

Received April 4, 2022

Revised April 26, 2022

Accepted May 24, 2022

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분비하지 않는다(Leonowicz *et al.*, 2001). 또한 느타리(*Pleurotus ostreatus*), 큰느타리(*P. eryngii*) 역시 LiP를 분비하지 않는다고 알려져 있다(Cohen *et al.*, 2001; Goudopoulou *et al.*, 2010).

백색부후균이 분비하는 비특이적인 효소는 리그닌 뿐 아니라 리그닌과 유사하게 벤젠고리 구조를 가지는 다양한 살충제, polyaromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), trinitrotoluene (TNT), chlorophenols (PCP), cyanides, azide, carbon tetrachloride와 같은 물질은 물론 난분해성 유해합성 물질까지 분해할 수 있다. 구름버섯(*T. versicolor*)은 살충제를 분해하는 능력이 뛰어나며, 높은 농도의 PCBs를 분해할 수 있다(Bending *et al.*, 2002; Ruiz-Aguilar *et al.*, 2002). 균열유색고약버섯(*P. laevis*)은 PAHs를, 유색고약버섯(*P. sordida*)은 TNT를 분해한다(Donnelly *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2010). 이 외에도 느타리(*P. ostreatus*)를 이용하여 olive oil mill waste water를 분해하거나, 느타리(*P. ostreatus*), 흰구름버섯(*T. hirsuta*), 구름버섯(*T. versicolor*), 무성유색고약버섯(*P. chrysosporium*), 꽃구름버섯(*Stereum hirsutum*), 벽돌빛잔나비버섯(*Heterobasidium insulare*)을 이용하여 bisphenol A를 분해하는 등 백색부후균을 이용하여 다양한 환경오염물질 처리를 위한 연구 역시 진행되고 있다(Lee *et al.*, 2005; Goudopoulou *et al.*, 2010; Im *et al.*, 2019; Grelska and Noszczyńska, 2020). 또한 벤젠고리를 가지는 방향족 합성염료도 백색부후균에 의해 분해된다. 무성유색고약버섯(*P. chrysosporium*)은 crystal violet, reactive red 22, acid black 24, methylene blue 등 다양한 종류의 염료를 분해하며, 토기털송편버섯(*T. trogii*)과 구름버섯(*T. versicolor*) 역시 합성염료를 조건에 따라 100% 분해한다. 그 외에 느타리(*P. ostreatus*), 흰구름버섯(*T. hirsuta*), 기계충버섯(*Irpex lacteus*), 줄버섯(*Bjerkandera adusta*) 등 다양한 백색부후균이 가지고 있는 합성염료 분해 능력이 밝혀지고 있다(Fu and Viraraghavan, 2001; Cho and Ryu, 2015; Im *et al.*, 2019; Yesilada *et al.*, 2018)

새송이로 알려진 큰느타리(*P. eryngii*)는 국내외에서 꾸준히 소비되는 버섯 중 하나로 2020년 생산량이 46,817톤으로 국내 버섯 생산량의 30.6%를 차지한다. 큰느타리는 laccase와 MnP를 분비하는 것으로 알려져 있으며 reactive violet 5, reactive black 5 등 azo계, phthalocyanine계 염료를 탈색시킨다(Heinfling *et al.*, 1998; Cohen *et al.*, 2002; Stajic *et al.*, 2009; Hadibarata *et al.*, 2013). 또한 malachite green, safranin T, methylene blue를 93% 이상 제거했다(Wu *et al.*, 2019). 터키의 다양한 지역에서 채집된 큰느타리(*P. eryngii*)의 crystal violet, malachite green 분해능에 대한 연구도 진행되었다(Yildirim *et al.*, 2010). 하지만 산업적 활용 가치를 다양화하기 위해 국내에서 큰느타리의 염료 분해능에 대해 연구된 바가 없다.

따라서 이번 실험에서는 대중적인 식용버섯인 큰느타리

의 방향족 합성염료 탈색 및 분해 능력을 확인하고 이와 관련된 효소의 활성을 알아보고자 하였다. 이에 azo계 염료인 congo red (CR), heterocyclic계 염료인 methylene blue (MB), triphenyl methane계 염료인 crystal violet (CV)과 malachite green (MG) 분해 가능성과 이를 분해하기 위해 생산하는 리그닌 분해 효소의 활성을 측정하였다.

본 실험에서 사용한 백색부후균인 큰느타리(*Pleurotus eryngii*, IUM1577)는 인천대학교 버섯균주은행에서 분양 받았으며, 방향족 합성염료는 4종류로 azo계 염료인 congo red (CR; Junsei Chemical Co., Japan), heterocyclic계 염료인 methylene blue (MB; DC Chemical Co., Korea), 그리고 triphenyl methane계 염료인 crystal violet (CV; Junsei Chemical Co., Japan)과 malachite green (MG; Shinyo Chemical Co., Japan)이다. CR은 200 mg/L, MB, CV, MG는 각각 50 mg/L의 농도로 PDA 혹은 potato dextrose broth (PDB)에 첨가하여 사용하였다.

고체 상태와 액체의 염료 분해 정도는 Baek 등(2015)의 방법으로 측정하였다. 고체 배지에서 균사가 성장한 직경(Mycelia diameter, MD)과 염료가 분해된 부분의 직경(Decolorizing diameter, DD)을 측정하여 분해 능력을 DD에서 MD를 나눈 값인 Decolorization index (DI)로 나타내었다. 액체 상태에서의 염료 분해는 균사를 배양한 액체 배지에 염료를 첨가한 후 1일, 2일, 3일, 5일, 7일, 9일, 11일, 13일 후에 샘플을 취하여 염료가 분해되는 정도를 측정하였다. 각 염료의 최대흡수파장(ϵ_{\max} , A)에서 흡광도를 측정하였으며, 다음의 식을 이용하여 액체 상태에서의 염료가 분해된 정도를 측정하였다.

$$\text{염료 분해 (\%)} = (A_0 - A) \times 100 / A_0$$

A_0 : 염료의 최대흡수파장에서의 흡광도

A : 샘플의 최대흡수파장에서의 흡광도

액체 상태에서의 염료 분해 정도를 측정하기 위해 준비한 샘플을 이용하여 Hong 등(2013)과 Baek 등(2015)의 방법으로 리그닌 분해 효소의 활성을 측정하였다. 먼저 Bradford(1976)의 방법에 따라 1 mg/ml의 bovine serum albumin (BSA; Sigma Chemical Co., USA)으로 표준곡선을 그리고 이를 기준으로 샘플의 단백질 함량을 측정하였다. Laccase의 활성 측정은 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS; $\epsilon_{420} = 36,000 \text{ (M cm}^{-1}\text{)}$)를 기질로 사용하여 측정하였다. Lactate buffer (0.2 M, pH 4.5) 850 μl 와 ABTS 50 μl 를 혼합하고 샘플 100 μl 첨가하였다. 3분간 상온 반응시킨 후 420 nm에서 흡광도를 측정하였다. 1 unit은 1분 동안 산화된 ABTS의 양(μmol)으로 정의하였다. 아래 식에 대입하여 계산하였다.

$$\text{Laccase activity (unit/mg)} =$$

$$[\Delta \text{Absorbance} \times 10^6 \times \text{Total volume(L)}] /$$

$$[\Delta \text{Time(min)} \times \epsilon_{420} \times \text{Sample weight(mg)}]$$

Table 1. Mycelial diameter on the solid medium including aromatic dyes by *Pleurotus eryngii*

Dye	Days of culture on the solid media														
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	54	78	102	126
C	5	18	35	65	85	88									
CR	5	14	31	55	77	86	88	88							
MB	5	11	21	44	51	47	54	63	68	73	75	87	88	88	88
CV	5	10	17	12	12	15	18	21	24	30	33	73	88		
MG	5	5	5	6	6	6	6	7	7	8	8	16	38	70	88

C; Control, CR; Congo red, MG; Methylene blue, CV; Crystal violet, MG; Malachite green. The mycelial diameter was measured for 126 days (mm, n=4).

Manganese peroxidase (MnP) 활성 역시 ABTS를 기질로 사용하였다. Lactate buffer (0.2 M, pH 4.5) 800 µl, ABTS 50 µl, 6 mM MnSO₄ 33 µl 혼합액에 샘플 100 µl를 섞는다. 0.1 mM H₂O₂ 17 µl를 마지막으로 혼합하여 상온에서 30분간 반응시킨 후, 420 nm에서 흡광도를 측정하였다. 1 unit은 laccase와 마찬가지로 1분 동안 산화된 ABTS의 양 (µmol)으로 정의하였으며 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{MnP activity (unit/mg)} =$$

$$\frac{[\Delta\text{Absorbance} \times 10^6 \times \text{Total volume(L)}]}{[\Delta\text{Time(min)} \times \epsilon_{420} \times \text{Sample weight(mg)}]}$$

CR이 첨가된 고체 배지에서 큰느타리의 균사는 접종 후부터 가장 빠른 성장 속도를 보여주었다. 접종 18일만에 배지를 모두 덮었고, 염료가 첨가되지 않은 배지에서와 성장과 차이가 거의 없었다(Table 1). CR 농도가 큰느타리 성장을 억제하긴 하나 그 정도가 크지 않다는 것을 알 수 있다. CR의 분해는 접종 후 6일부터 나타났으며 균사가 자랄 공간이 없어진 18일까지 균사의 생장이 일정한 비율로 앞서 나갔다(Fig. 1). 그 이후 염료의 분해 범위가 넓어지면서 접종 후 21일 만에 DI가 1이 되었는데 균사로 덮여 있는 부분의 배지에 포함된 영양소를 이용하여 염료가 같이 분해되는 것으로 판단된다.

MB가 첨가된 배지에서 균사의 생장은 접종 후 3일부터 관찰되었는데 CR이 첨가된 배지에서의 성장보다 느리게 진행됐지만 꾸준한 성장을 계속했다. 하지만 염료의 분해는 천천히 진행되어 접종 18일 이후 급격하게 염료를 분해하기 시작했다. 하지만 균사가 배지를 모두 덮은 이후 색소가 분해 속도가 늦어지면서 DI 증가가 더디게 일어났는데, CR보다 MB를 분해하는 능력이 낮아 MB가 천천히 분해되는 것으로 보인다.

CV가 첨가된 배지에서도 역시 접종 3일부터 균사가 성장하기 시작하여 접종 후 21일 만에 DI가 1이 되었다. CR의 경우와 비슷하게 CV의 분해 역시 균사의 성장보다 늦게 관찰되었으며 균사의 성장 공간이 없어짐에 따라 DI

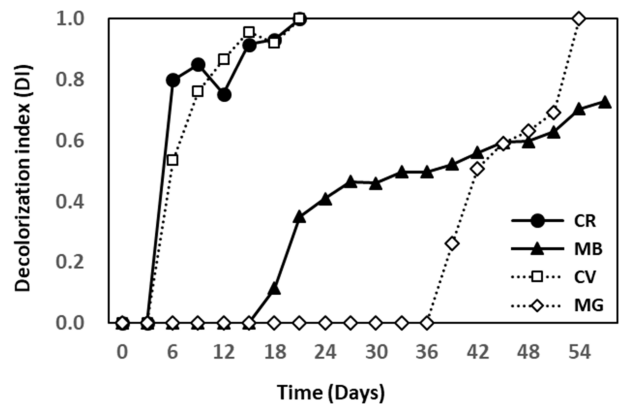


Fig. 1. Decolorization of aromatic dyes on solid phase by *Pleurotus eryngii*. CR: congo red, MG: Methylene blue, CV: Crystal violet, MG: Malachite green. Results are means (n=4).

가 1이 되었다. CR과 CV의 경우 기간 내에 DI 1을 나타냈지만 배지에 첨가된 CV의 농도는 CR의 1/4로 CR을 CV보다 더 효율적으로 탈색시킨다는 것을 의미한다. CR, MB, CV는 균사의 성장이 먼저 일어나고 그 후 염료 분해가 일어난 것으로 보아 dextrose 등 배지에 포함된 영양분을 먼저 이용하여 균사를 성장시킨 후 염료를 이용하는 것으로 보인다. Yildirim 등(2010)의 실험에서도 MB와 CV가 큰느타리 균사의 성장을 저해하지만 균사의 성장과 비례하여 두 염료를 분해하는 것으로 나타났다.

MG가 첨가된 배지에서 균사는 천천히 성장하다 접종 후 39일 이후부터 염료의 분해가 관찰되었다. 그 이후 염료가 분해되는 범위가 균사의 성장보다 넓게 관찰되었다. 접종 54일 후부터 DI가 1을 넘었다. MG가 다른 세 염료보다 독성이 강하여 초기 균사 성장을 억제하지만 균사가 성장을 위해 배지의 영양분을 사용하기 시작하면서 균사의 성장 범위보다 넓은 범위의 색소를 함께 분해하는 것으로 판단된다. 따라서 CR, MB, CV와는 다른 분해 기작으로 염료를 이용하는 것으로 생각된다.

액체 배양 상태에서 큰느타리는 염료 첨가 후 CR과 MB를 빠르게 분해하기 시작했다. CR의 경우 1일째에 약

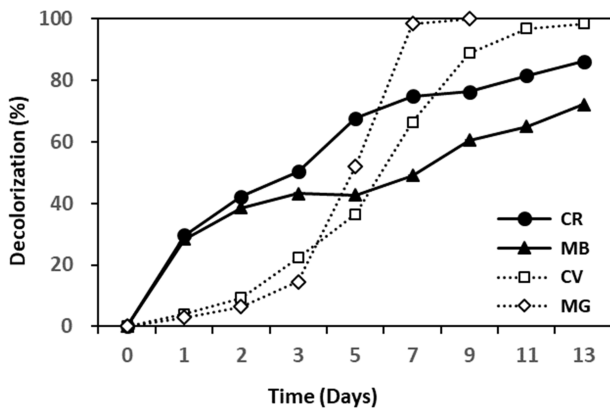


Fig. 2. Decolorization of aromatic dyes on liquid phase by *Pleurotus eryngii*. CR; Congo red, MG; Methylene blue, CV; Crystal violet, MG; Malachite green. Results are means (n=4).

30% 분해가 이루어졌고 3일 후에 50%가 분해되었다(Fig. 2). 하지만 마지막 관찰일인 13일째에는 86%의 분해 정도를 보여 고체 배지와는 다르게 상대적으로 낮은 분해 능력을 보였다. MB 역시 1일째에 약 30%가 분해되고 7일째에 약 50%가 분해되었다. 하지만 13일까지 모두 분해되지 못했다. 반대로 CV는 염료 첨가 후 3일 동안 22%의 낮은 분해율을 보였으나 이후 꾸준히 분해되어 13일째에 염료가 98% 분해되었다. MG 역시 3일 이후부터 염료의 분해가 급격히 진행되어 7일 만에 98%를 분해되고 측정 9일째에는 모두 분해되었다. 고체배지에서도 균사의 생장이 시작된 이후 30일 정도 지난 후 MG의 분해

가 관찰되기 시작하여 탈색이 빠르게 진행되었는데, 이로써 큰느타리의 초기 MG 분해 능력은 낮지만 배양 후반기에 그 분해 능력이 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다.

CR을 첨가한 배지에서 laccase의 활성은 염료 첨가 후 증가하다 3일 이후 다시 감소하였다. 하지만 9일 이후 다시 증가하여 13일째에 최대 활성(0.11 U/ml)을 나타내었다. MnP는 염료 첨가 후 0.02 U/ml 정도의 일관된 활성을 보인다 11일째에 최대 활성도(0.025 U/ml)를 보였다 (Fig 3.). MB를 첨가한 배지의 배양액에서 laccase의 활성 역시 3일까지 증가하다 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보이며 11일째에 최대 활성을 나타냈다(0.13 U/ml). MnP의 활성은 laccase의 활성의 1/10 수준이지만 꾸준히 증가하여 13일째에 최대 활성을 나타냈다(0.013 U/ml). CV를 첨가한 배지의 배양액에서는 laccase의 활성이 꾸준히 계속 증가하여 13일째에 최대 활성도인 0.11 U/ml를 보였으며 이때 염료 역시 거의 모두 분해되었다(98%). MnP 활성 또한 염료 첨가 후 꾸준히 증가하여 13일째에 최대 활성을 나타냈다. MG에서의 laccase는 염료 첨가 후 1일째(0.06 U/ml)와 염료가 모두 분해된 9일째(0.07 U/ml)에 높은 활성을 나타냈는데, CR, MB의 경우처럼 감소하는 경향을 보였다가 다시 증가하였다. MnP의 활성도 비슷하게 나타났다. 네 가지 종류의 염료를 분해하는 과정 laccase의 활성이 MnP의 활성보다 훨씬 높게 나타났으며 이로써 큰느타리의 합성염료 분해에는 laccase의 역할이 가장 큰 것으로 판단되며 MnP 역시 laccase와 같은 분비 경향을 보여 laccase의 공동 혹은 보조 역할을 하는 것으로 보인다.

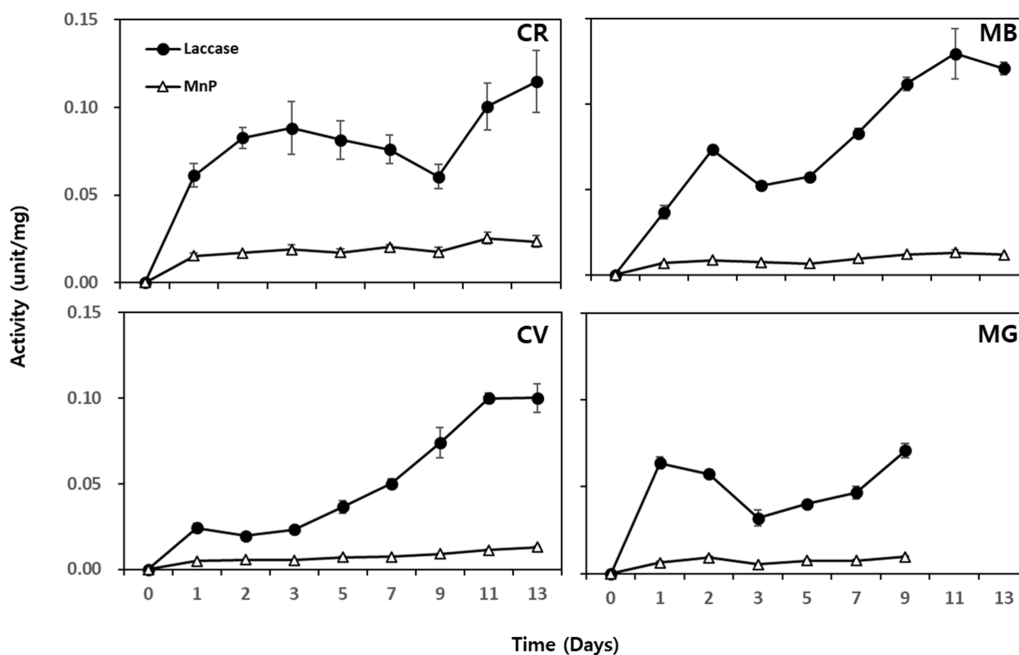


Fig. 3. Activities of ligninolytic enzymes in *P. eryngii* in decolorizing congo red (CR), methylene blue (MB), crystal violet (CV) and malachite green (MG). MnP: Manganese peroxidase. Results are means \pm SD (n=4).

CR, MB, CV 분해의 경우, 액체배양 조건에서 염료의 분해가 시작됨과 동시에 laccase, MnP의 활성이 같이 나타나는 경향을 보였다. 즉, 리그닌 분해 효소가 활성화됨과 동시에 염료가 분해되는 것을 알 수 있었다. 하지만 MG의 경우 배양 초기 리그닌 분해 효소가 먼저 분비되어 활성화되고 그 후 염료가 분해되기 시작했다. 이를 통해 MG의 분해는 큰느타리의 균사가 분비한 세포외분비효소에 의해 바로 이루어지지 않고 별도의 과정이 있는 후, 탈색과정이 진행되는 것으로 판단할 수 있다.

적 요

큰느타리(*Pleurotus eryngii*)는 azo계 염료인 CR, heterocyclic계 염료인 MB, triphenyl methane계 염료인 CV와 MG를 고체와 액체 배양 상태에서 모두 분해할 수 있었으며 고체 배양 조건에서는 CR을, 액체 배양 상태에서는 MG를 가장 효과적으로 분해했다. MB는 고체와 액체 배양 조건에서 모두 가정 적게 분해되었다. 4 종류의 염료 모두 균사의 생장을 저해했으나 MG의 영향이 가장 크게 나타났다. 활성을 측정된 두 종류의 리그닌 분해 효소 중 모두 laccase의 활성이 훨씬 높았으며 MnP 역시 활성은 낮았으나 laccase와 비슷한 경향을 보였다. 따라서 큰느타리는 주로 laccase를 사용하여 방향족 합성염료를 분해하는 것으로 추정된다. CR, MB, CV는 laccase의 활성과 염료 분해 정도가 양의 상관관계를 보인 반면 MG의 경우 높은 효소 활성을 나타낸 후 염료의 분해가 진행되었다. 또한 MG가 모두 분해되었을 때의 laccase 활성(0.07 U/ml)이 다른 염료가 가장 많이 분해되었을 때의 활성(0.10 U/ml)보다 낮았는데 이는 큰느타리의 균사체가 MG를 분해하는 기작이 CR, MB 및 CV 등의 염료를 분해하는 기작과 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 큰느타리의 방향족 합성염료 분해 능력에 대해 밝힘으로써 앞으로 국내산 버섯균주를 이용한 친환경적인 합성염료 처리 기술 개발에 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 인천대학교 교내 연구비 지원(2020-0367)에 의해 수행한 연구 결과입니다.

REFERENCES

- Baek SA, Choi J, Lee TS, Im KH. 2015. Biodegradation of triphenyl methane dyes by white rot fungus, *Trametes versicolor*. *J Mushrooms* 13(1): 63-67.
- Bending GD, Friloux M, Walker A. 2002. Degradation of contrasting pesticides by white rot fungi and its relationship with ligninolytic potential. *FEMS Microbiol Lett* 212(1): 59-63.
- Bradford MM. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem* 72(1-2):248-254.
- Cho KS, Ryu HW. 2015. Biodecolorization and biodegradation of dye by fungi: A review. *KSBB J.* 30(5):203-222.
- Cohen R, Hadar Y, Yarden O. 2001. Transcript and activity levels of different *Pleurotus ostreatus* peroxidases are differentially affected by Mn²⁺. *Environ Microbiol* 3(5): 312-322.
- Cohen R, Persky L, Hadar Y. 2002. Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. *Appl Microbiol Biotech* 58(5): 582-594.
- Donnelly KC, Chen JC, Huebner HJ, Brown KW, Autenrieth RL, Bonner JS. 1997. Utility of four strains of white-rot fungi for the detoxification of 2,4,6-trinitrotoluene in liquid culture. *Environ Toxicol Chem* 16(6): 1105-1110.
- Fu Y, Viraraghavan T. 2001. Fungal decolorization of dye waste waters: A review. *Bioresour Technol* 79(3): 251-262.
- Gao D, Du L, Yang J, Wu W, Liang H. 2010. A critical review of the application of white rot fungus to environmental pollution control. *Biotechnol* 30(1): 70-77.
- Goudopoulou A, Krimitzas A, Typas MA. 2010. Differential gene expression of ligninolytic enzymes in *Pleurotus ostreatus* grown on olive oil mill wastewater. *Appl Microbiol Biotechnol* 88:541-551.
- Grelska A, Noszczyńska M. 2020. White rot fungi can be a promising tool for removal of bisphenol A, bisphenol S, and nonylphenol from wastewater. *Environ Sci Pollut Res Int* 27(32): 39958-39976.
- Hadibarata T, Adnan LA, Yusoff ARM, Yuniarto A, Rubiyatno, Zubir MMFA, Khudhair AB, Naser MA. 2013. Microbial decolorization of an azo dye reactive black 5 using white-rot fungus *Pleurotus eryngii* F032. *Water Air Soil Pollut* 224(6): 1-9.
- Heinfling A, Martinez MJ, Martinez AT, Bergbauer M, Szewczyk U. 1998. Transformation of industrial dyes by manganese peroxidases from *Bjerkandera adusta* and *Pleurotus eryngii* in a manganese-independent reaction. *Appl Environ Microbiol* 64(8): 2788-2793.
- Hong CY, Kim HY, Lee SY, Kim SH, Lee SM, Choi IG. 2013. Involvement of extracellular and intracellular enzymes of *Ceriporia* sp. ZLY-2010 for biodegradation of polychlorinated biphenyls (PCBs). *J Environ Sci Health A* 48(10): 1280-1291.
- Im KH, Baek SA, Choi J, Lee TS. 2015. Degradation of synthetic dye (Congo Red and Methylene Blue) by *Trametes versicolor*. *Korean J Nat Conserv* 8(1): 18-23.
- Im KH, Baek SA, Choi J, Lee TS. 2019. Biodegradation of aromatic dyes and bisphenol A by *Trametes hirsuta* (Wulfen) Pilat. *J Mushrooms* 17(4): 247-254.
- Jarosz-Wilkolazka A, Kochmańska-Rdest J, Malarczuk E, Wardas W, Leonowicz A. 2002. Fungi and their ability to decolourize azo and anthraquinonic dyes. *Enzyme Microb Technol* 30(4): 566-572.
- Jin XC, Liu GQ, Xu ZH, Tao WY. 2007. Decolorization of a dye industry effluent by *Aspergillus fumigatus* XC6. *Appl Microbiol Biotechnol* 74(1): 239-243.
- Lee JJ. 2021. Isotherm, kinetic, thermodynamic and competitive for adsorption of brilliant green and quinoline yellow dyes by activated carbon. *Korean Chem Eng Res* 59(4): 565-573.
- Lee SM, Koo SW, Choi JW, Choi DH, An BS, Jeung EB, Choi IG.

2005. Degradation of bisphenol A by white rot fungi, *Stereum hirsutum* and *Heterobasidium insulare*, and reduction of its estrogenic activity. *Biol Pharm Bull* 28(2): 201-207.
- Leonowicz A, Cho N, Luterek J, Wilkolazka A, Wojtas-Wasilewska M, Matuszewska A, Hofrichter M, Wesenberg D, Rogalski J. 2001. Fungal laccase: properties and activity on lignin. *J Basic Microbiol* 41(3-4): 185-227.
- Mathur N, Bhatnagar P, Sharma P. 2012. Review of the mutagenicity of textile dye products. *Univers J Environ Res Technol* 2(2): 1-18.
- Rahman MM, Rahman MF, Nasirujjaman K. 2017. A study on genotoxicity of textile dyeing industry effluents from Rajshahi, Bangladesh, by the *Allium cepa* test. *Chem Ecol* 33(5): 434-446.
- Ruiz-Aguilar GM, Fernández-Sánchez JM, Rodríguez-Vázquez R, Poggi-Varaldo H. 2002. Degradation by white-rot fungi of high concentrations of PCB extracted from a contaminated soil. *Adv Environ Res* 6(4): 559-568.
- Stajic M, Vukojevic J, Duletic'-Laušević S. 2009. Biology of *Pleurotus eryngii* and role in biotechnological processes: A review. *Crit Rev Biotechnol* 29(1): 55-66.
- Sung S, Lee M, Cho YS. 2021. Removal of anionic dyes and heavy metal ions using silica nanospheres or porous silica micro-particles modified with various coupling agents. *Korean Chem Eng Res* 59(4): 596-610.
- Yesilada O, Birhanli E, Geckil, H. 2018. Bioremediation and decolorization of textile dyes by white rot fungi and laccase enzymes. In *Mycoremediation and environmental sustainability*, Springer, Switzerland. pp. 121-153.
- Yildirim N, Yildirim NC, Yildiz A. 2010. Evaluation of three strains of *Pleurotus eryngii* isolated from geographically different regions of Turkey for their ability to decolorize methylene blue and crystal violet. *Fresenius Environ Bull* 19(3): 447-451.
- Wu J, Xia A, Chen C, Feng L, Su X, Wang X. 2019. Adsorption thermodynamics and dynamics of three typical dyes onto bio-adsorbent spent substrate of *Pleurotus eryngii*. *Int J Environ Res Public Health* 16(5): 679.