

# 팽이버섯 수확후배지를 이용한 곰팡이 균사체 기반 복합소재의 특성

안기홍\* · 최두호 · 한재구 · 이강호

농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 버섯과

## The characteristics of fungal-mycelium-based composite materials using spent mushroom substrates of *Flammulina velutipes*

Gi-Hong An\*, Du-Ho Choi, Jae-Gu Han, and Kang-Hyo Lee

Mushroom Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA Eumseong 27709, Chungbuk, Korea

**ABSTRACT:** This study was conducted to develop a renewable and sustainable bio-material to replace polystyrene (EPS) in fungal-mycelium-based composite using agricultural by-products. Four mushrooms (*Ganoderma lucidum*, *Fomitella fraxinea*, *Phellinus linteus*, and *Schizophyllum commune*) were cultured in an oak sawdust plus rice bran substrate to select the mushroom with the best growth. The mycelia of *G. lucidum* showed the best growth. To investigate the optimal mixing ratio with spent mushroom substrate (SM) and oak sawdust (OS), samples were prepared by mixing SM and OS at ratios of 50%:50%, 60%:40%, and 80%:20% (w/w). Each substrate was then inoculated with *G. lucidum*. *G. lucidum* showed the best mycelial growth of 140.0 mm in the substrate with SM and OS mixed at a 60%:40% ratio. It was also found that the substrate with SM and OS mixed at a 60%:40% ratio had the best handling properties. The compressive strength of mycelial materials inoculated with *G. lucidum* was in the range of 300–302 kgf mm<sup>-1</sup>, and the materials were four times stronger than polystyrene materials. These results indicate that substrates comprising spent mushroom substrate mixed with oak sawdust can be successfully upcycled to mycelium-based composite materials using *G. lucidum*. This represents a sustainable approach.

**KEYWORDS:** Composite materials, *Ganoderma lucidum*, Mycelium, Spent mushroom substrates

현대 사회에서 가장 많이 사용되는 복합소재의 기본 재료는 플라스틱이며 그 종류 또한 다양하게 존재하여 일상 생활에서 흔히 접할 수 있으며 없어서는 안될 소재 중의 하나이다. 1950년부터 2015년까지 생산된 플라스틱은 약

8,300백만 톤이며, 이 중 약 9%만이 재활용되며 12%는 소각, 70%는 매립된다(Kim *et al.*, 2017). 이와 같이 소각되거나 매립되는 플라스틱은 소각 시 디옥신과 같은 환경 호르몬이 다량 방출되며 매립 시 분해되는데 500년 이상의 긴 시간이 소요되어 지구 환경오염의 주요한 원인이 되고 있다. 이처럼 플라스틱에 의한 환경오염의 심각성으로 인하여 최근 플라스틱 대체소재에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 중의 하나가 곰팡이 균사체 기반 복합소재(FMBC, Fungal Mycelium-Based Composite material) 연구분야이다.

균사체는 균사가 양분을 흡수하기 위하여 계속 뻗어 나가며 서로 치밀하게 얽혀 형성된 구조를 말하며 이러한 구조가 균사체 기반 복합소재의 원리가 된다. 복합소재의 균사체는 기질(배지)을 완전히 소비하기 전에 불활성화 시킴으로써 만들어지며, 이 경우 기질에 감염된 균사체에 의하여 기질의 섬유조직 또는 입자가 서로 단단히 결합되어지는 특성을 이용한다(Jones *et al.*, 2018). 이러한 특성들을 바탕으로 균사체 복합소재는 폼(foam), 천연물질, 고

J. Mushrooms 2023 September, 21(3):185-189  
<http://dx.doi.org/10.14480/JM.2023.21.3.185>  
 Print ISSN 1738-0294, Online ISSN 2288-8853  
 © The Korean Society of Mushroom Science

Gi-Hong An(Researcher), Du-Ho Choi(Post-doctoral researcher),  
 Jae-Gu Han(Researcher), Kang-Hyo Lee(Senior researcher)  
 \*Corresponding author  
 E-mail : agiho@korea.kr  
 Tel : +82-43-871-5731, Fax : +82-43-873-5702

Received August 25, 2023  
 Revised September 11, 2023  
 Accepted September 17, 2023

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.

분자와 같은 성질을 지니게 되며(Apples *et al.*, 2019; Jones *et al.*, 2018), 균사체를 이용한 복합소재 중에서 대표적으로 스티로폼(Expandable polystyrene)의 포장대체재, 유기단열재 대체재, 건축자재 등이 있다.

국내 버섯 산업은 버섯생산 자동화 기술과 더불어 병재 배 방식이 주요 생산기술로 자리잡으며 느타리, 큰느타리, 팽이 등과 같은 농산버섯의 생산이 전체 식용버섯 생산량의 88% 이상을 차지하고 있으며, 그 이외에 양송이, 목이 등을 포함하여 연간 약 14.3만 톤 정도가 생산되고 있다고 알려져 있다(Kang, 2019; Ministry of agriculture, food and rural affairs, 2021). 또한 대표적 임산버섯인 표고는 2018년 약 2.5만 톤 정도가 생산되었으며 생산량 증대를 위하여 기존의 원목재배 방식에서 톱밥 등을 이용한 봉지재배 방식으로 급속히 전환되고 있다(Kang, 2019; Korea Rural Economic Institute, 2019). 버섯 배지에 주로 사용되는 톱밥재료는 참나무, 소나무, 포플러 등이 사용되며 그 이외에 재료로는 콘코브, 면실박, 비트펄프 등이 사용된다. 수확후배지(spent mushroom substrate)는 버섯 생산 후 발생하는 버섯 잔여물과 균사체 등을 포함한 배지이며 버섯은 재배 과정 중 배지 원료의 20% 정도만 이용하고 나머지는 수확후배지에 남아있으며, 버섯 1 kg을 생산하는데 5 kg 정도의 수확후배지가 발생한다(Kang *et al.*, 2019; Moon *et al.*, 2015a; Williams *et al.*, 2001). 이렇게 발생하는 수확후배지의 일부는 재활용 자원으로 유기질 퇴비(Ehaliotis *et al.*, 2005), 토양개량제(Stamets, 2001), 가축 사료자원(Bae *et al.*, 2006; Moon *et al.*, 2015a; Moon *et al.*, 2012b)으로 활용하는 농가들이 증가하고 있다. 하지만 수확후배지의 배출량이 0.3톤 이상일 경우에는 폐기물관리법에 의거하여 처리 시 전용 처리시설 및 전용 운반 차량 등이 필요하게 되어 아직까지도 버섯 재배농가들에 있어서 수확후배지의 처리는 심각한 고민 중의 하나이다.

본 연구에서는 국내 버섯 농가들의 수확후배지 처리문제를 해소함과 동시에 농산부산물 자원의 재순환 측면에서 팽이의 수확후배지를 활용하여 곰팡이 균사체 기반 복합소재 중 스티로폼 소재 등을 생산하여 제품화하기 위하여 기본적인 연구를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 팽이(*Flammulina velutipes*) 수확후배지는 충청북도 음성군 생극면 소재의 팽이 재배 농가로부터 직접 구입하여 사용하였다. 팽이 수확후배지는 병재배의 자실체 수확 후 탈병기의 분쇄작업을 거쳐 배출되고 있었으며, 배지의 주요성분으로는 콘코브, 미강, 밀기울, 비트펄프, 면실피 등으로써 버섯 재배 농가 자체 배지 제조 매뉴얼에 따라 제조되었다.

버섯 균사체의 생육속도가 빠른 균주를 선발하기 위하여 국립원예특작과학원 버섯과에서 보존 중인 버섯유전자원(KMCC) 7,700 여점 중에서 구멍장이버섯과(Polyporaceae)의 야생버섯류 46 균주와 재배버섯류 13 균주를 1차 선발

하였다(Table 1). 선발된 각 균주는 PDA (Potato Dextrose Agar) 배지에 접종한 후 25°C에서 7일간 암배양을 수행하였고, 배양이 완료된 후 각 균주의 균사체 직경을 측정하였다.

선발된 균주들의 톱밥배지에서의 균사체 생육을 알아보기 위하여 참나무 톱밥과 미강 80% : 20% (w/w) 비율로 혼합된 배지를 제조하였고, 직경 140 mm의 페트리디쉬에 충전한 후 각 선발 균주를 접종하였다. 균주가 접종된 각 배지는 25°C에서 14일간 배양하였으며, 배양이 완료된 후 균사체의 직경을 조사하였다. 또한 배양이 완료된 소재 샘플은 80°C 드라이오븐에서 6시간 건조 시킨 후 손으로 만졌을 때 부서짐의 정도를 나타내는 취급비율(handling rating)로써 조사하였다(Schritt *et al.*, 2021).

선발된 우수 균주 영지(*G. lucidum*)를 이용하여 팽이 수확후배지(SM, Spent mushroom substrate)와 참나무 톱밥(OS, Oak Sawdust)의 혼합비율을 결정하여 균사체 복합소재의 기질로 활용하기 위하여 팽이 수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS)을 각각 120°C에서 20분간 멸균을 수행하였다. 팽이 수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS)의 혼합비율은 50% : 50% (w/w), 60% : 40% (w/w), 80% : 20% (w/w)로 제조하여 직경 140 mm 페트리디쉬에 충전하였으며, 각 혼합비율의 배지에 영지(*G. lucidum*)균주를 접종한 후 25°C에서 15~30일간 암배양을 수행하였다. 배양이 완료된 후 각 배지 위의 균사체의 생육과 소재 샘플의 취급비율(handling rating)을 조사하였다.

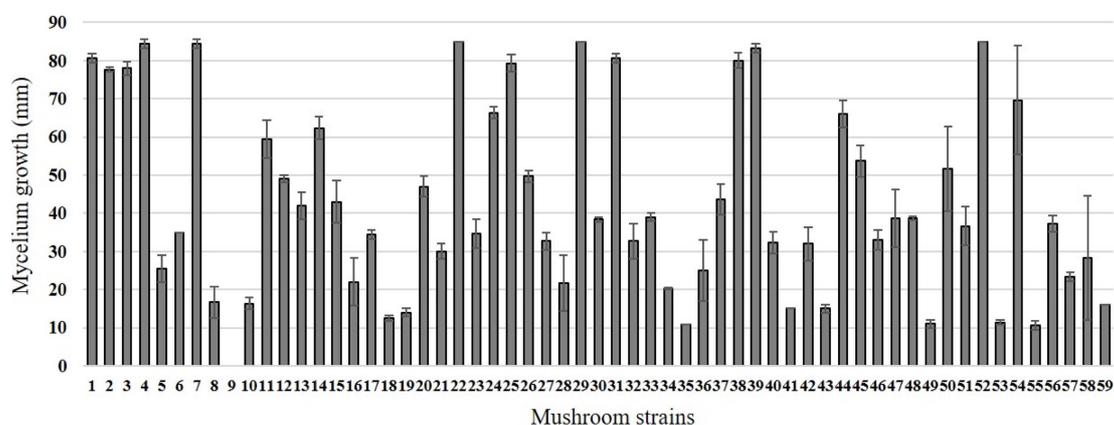
팽이 수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS)을 60% : 40% (w/w)로 혼합한 배지를 제조하고 선발된 영지(*G. lucidum*)균주를 접종하여 배양한 후 균사체 소재 사각시편(L 14.5 cm × W 7 cm × D 3 cm)의 압축강도를 만능인장시험기(UTM-2020, MYUNGJI TECH, Seoul, Korea)로 측정하였다. 시험속도는 30 mm min<sup>-1</sup>이며, 초기 설정하중은 0.5 kg으로 시작하여 최대 300 kg까지 무게를 설정하였다. 압축 판상의 이동거리는 대조 샘플로 사용한 스티로폼 기준으로 두께 23 mm의 절반인 10 mm로 설정하여 압축강도 시험을 수행하였다.

균사체 복합소재 제조에 적합한 균주를 선발하기 위하여 구멍장이버섯과(Polyporaceae)의 야생버섯류 46 균주와 재배버섯류 13 균주의 균사체 생육속도를 조사한 결과는 Fig. 1과 같다. PDA 배지 하에서 배양 7일째에 균사체 직경 80 mm 이상을 나타낸 야생버섯류 균주는 흰용털구름버섯(No. 1, *Coriolus pubescens*), 구름버섯(No. 4, *Coriolus hirsutus*), 치마버섯(No. 7, *Schizophyllum commune*), 단색털구름버섯속(No. 22, *Cerrena* sp.), 상황버섯(No. 29, *Phellinus linteus*), 구름송편버섯(No. 31, *Trametes versicolor*), 아까시재목버섯속(No. 39, *Fomitella fraxinea*)으로 총 7 균주이었으며, 재배버섯류 중에서는 영지(No. 52, *G. lucidum*) 1 균주로 나타났다.

균사체의 생육속도가 빠른 균주들이 톱밥배지에서 균사

**Table 1.** List of the wild and cultivation mushrooms used in this study

No	Scientific name	Common name	No	Scientific name	Common name
1	<i>Coriolus pubescens</i>	흰용털구름버섯	31	<i>Trametes versicolor</i>	구름송편버섯
2	<i>Coriolus brevis</i>	송곳니구름버섯	32	<i>Kretzschmaria deusta</i>	겹질고약방석버섯
3	<i>Coriolus hirsutus</i>	흰구름버섯	33	<i>Hymenochaete intricata</i>	기와소나무비늘버섯
4	<i>Polyporus varius</i>	노란대구명장이버섯	34	<i>Volvariella bombycina</i>	흰비단털버섯
5	<i>Cerrena</i> sp.	털구름속	35	<i>Abundisporus pubertatis</i>	반배착자색구멍버섯
6	<i>Ganoderma applanatum</i>	잔나비겹상	36	<i>Phlebia acerina</i>	단풍아교고약버섯
7	<i>Schizophyllum commune</i>	치마버섯	37	<i>Tyromyces chioneus</i>	개떡버섯
8	<i>Phellinus igniarius</i>	진흙버섯	38	<i>Trametes hirsuta</i>	흰구름송편버섯
9	<i>Phellinus laevigatus</i>	가지진흙버섯	39	<i>Fomitella fraxinea</i>	아까시재목버섯
10	<i>Porodaedalea pini</i>	층층버섯	40	<i>Daedalea dickinsii</i>	등갈색미로버섯
11	<i>Lenzites betulina</i>	조개겹질버섯	41	<i>Phellinus gilvus</i>	마른진흙버섯
12	<i>Favolus alveolaris</i>	벌집버섯	42	<i>Laetiporus sulphureus</i>	덕다리버섯
13	<i>Mycoacia uda</i>	젖은송곳버섯	43	<i>Fistulina hepatica</i>	소혀버섯
14	<i>Pycnoporus coccineus</i>	간버섯	44	<i>Trametes gibbosa</i>	대합송편버섯
15	<i>Inonotus mikadoi</i>	황색시루뻨버섯	45	<i>Piptoporus soloniensis</i>	자작나무버섯
16	<i>Inonotus hispida</i>	털시루뻨버섯	46	<i>Onnia orientalis</i>	대구명버섯
17	<i>Inonotus xeranticus</i>	금빛시루뻨버섯	47	<i>Pleurotus eryngii</i>	큰느타리
18	<i>Inonotus obliquus</i>	자작나무시루뻨버섯	48	<i>P. eryngii</i> var. <i>ferulae</i>	이위느타리
19	<i>Oligoporus balsameus</i>	겹친손등버섯	49	<i>Lyophyllum ulmarium</i>	만가닥버섯
20	<i>Daedaleopsis rubescens</i>	도장버섯	50	<i>Flammulina velutipes</i>	팽이
21	<i>Peniophora incarnata</i>	오렌지겹질고약버섯	51	<i>Ganoderma applanatum</i>	잔나비불로초
22	<i>Cerrena</i> sp.	털구름속	52	<i>Ganoderma lucidum</i>	영지
23	<i>Fomitopsis pinicola</i>	소나무잔나비버섯	53	<i>Hericium erinaceus</i>	노루궁뎅이버섯
24	<i>Schizophyllum commune</i>	치마버섯	54	<i>Paecilomyces japonica</i>	눈꽃동충하초
25	<i>Irpex lacteus</i>	기계층버섯	55	<i>Sparassis crispa</i>	꽃송이버섯
26	<i>Neofavolus alveolaris</i>	벌집구멍장이버섯	56	<i>Lentinula edodes</i>	표고
27	<i>Inonotus cuticularis</i>	시루뻨버섯	57	<i>Cordyceps militaris</i>	번데기동충하초
28	<i>Trametopsis cervina</i>	갈색살송편버섯	58	<i>Pleurotus ostreatus</i>	느타리
29	<i>Phellinus linteus</i>	상황버섯	59	<i>Agaricus bisporus</i>	양송이
30	<i>Coriopsis strumosa</i>	가죽질구름버섯			



**Fig. 1.** Mycelium growth of selected mushroom strains used in this study. The result obtained from three replications (n=3). No 1 ~ 59 indicated the number of mushroom strains that shown by Table 1.



**Fig. 2.** Growth of four mushrooms (1, *Ganoderma lucidum*; 2, *Fomitella fraxinea*; 3, *Schizophyllum commune*; 4, *Phellinus linteus*) on oak sawdust + rice bran substrate for 21 days (A is a front-side, and B is a back-side of substrate).

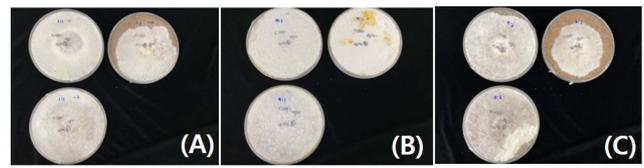
**Table 2.** Growth of mycelium and handling ratings of four mushrooms on oak sawdust + rice bran substrate by mixing ratio of 80% : 20% (w/w).

Mushroom	Growth of mycelium (mm)	Handling rating <sup>a)</sup>
<i>Ganoderma lucidum</i>	140 ± 2.89	++++
<i>Fomitella fraxinea</i>	125 ± 1.16	+++
<i>Schizophyllum commune</i>	140 ± 1.53	++
<i>Phellinus linteus</i>	123 ± 0.71	0

The results are represented by the mean ± S.D. of values obtained from three replications (n=3).

<sup>a)</sup> 0, sample broken; +, large damage; ++, medium-sized damaged; +++, Slight damage; +++++, undamaged

체가 원활하게 잘 생육하는지에 대하여 알아보기 위하여 참나무 톱밥과 미강을 80% : 20% (w/w) 비율로 제조하고 기질로 활용하였다. 접종된 균주는 영지(No. 52), 아까시재목버섯(No. 39), 치마버섯(No. 7), 상황버섯(No. 29) 4균주 이었으며, 배양 14일째 균사체 생육을 조사한 결과로는 영지(No. 52)와 치마버섯(No. 7)이 우수하였으며, 다음은 아까시재목버섯(No. 39), 상황버섯(No. 29)의 순이었다(Fig. 2, Table 2). 또한 배양 21일째에 4 균주 모두 톱밥 표면이 균사체로 덮일 때까지 성장하였다. 배양이 완료된 각 소재는 80°C에서 6시간 건조 후 각 소재의 취급비율을 조사하였다. 취급비율은 소재를 손으로 만졌을 때 부서짐의 정도를 나타냈으며(Schritt *et al.*, 2021), 영지 균주(No. 52)가 접종된 소재가 가장 취급비율이 높았다. 반면, 상황버섯(No. 29)의 경우 손으로 만졌을 때 쉽게 부서지는 특성을 나타내며 가장 낮은 취급비율을 나타냈다. 다양한 균사체 소재 연구 중 초기에는 주로 복합 균사체 소재 개발에 초점이 맞추어졌으며, 주로 영지류, 느타리류와 같은 백색부후균이 주로 사용되어 오고 있다(Vandelook *et al.*, 2021). Schritt *et al.*(2021)에 의하면 균사의 생육속도와 균사의 밀도와는 상관관계가 없으며, 반면 소재 내부의 균사밀도와 취급비율은 강한 상관관계



**Fig. 3.** Growth of mycelium of *Ganoderma lucidum* (No. 52) in each substrates (A; spent mushroom substrate 50% + oak sawdust 50%, B; spent mushroom substrate 60% + oak sawdust 40%, C; spent mushroom substrate 80% + oak sawdust 20%).

**Table 3.** Growth of mycelium and handling ratings of *Ganoderma lucidum* strain (No. 52) in each substrate by mixing with spent mushroom substrate (SM) and oak sawdust (OS) in a ratio of 50% : 50%, 60% : 40%, and 80% : 20% (w/w).

	SM (50) : OS (50)	SM (60) : OS (40)	SM (80) : OS (20)
	Mycelium growth (mm)		
7 days	55.6 ± 1.00	71.7 ± 2.65	56.7 ± 2.89
14 days	108.3 ± 0.58	140.0 ± 1.16	103.3 ± 2.31
Handling rating <sup>a)</sup>	+++	++++	+++

The results are represented by the mean ± S.D. of values obtained from three replications (n=3).

<sup>a)</sup> 0, sample broken; +, large damage; ++, medium-sized damaged; +++, Slight damage; +++++, undamaged

를 나타낸다고 기술하고 있다. 또한 소재 건조밀도는 부피에 대한 시료의 건조중량 비율로 계산할 경우, 영지 균주가 높은 균사체 밀도를 나타내고 있었다(Schritt *et al.* 2021).

수확후배지를 균사체 복합소재 기질로 활용하기 위하여 수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS)을 50% : 50% (w/w), 60% : 40% (w/w), 80% : 20% (w/w)의 혼합비율로 제조하여 선발 균주인 영지(No. 52) 균주를 접종한 후 25°C에서 15~30일간 암배양을 수행한 결과는 Fig. 3 및 Table 3과 같다. 배양이 완료된 후 균사체의 생육직경은 수확후배지(SM) : 참나무 톱밥(OS) = 60% : 40% (w/w) 혼합배지에서 가장 생육이 우수한 것으로 나타났다. 또한 소재 배양 완료 후 건조한 소재의 취급비율도 가장 높은 것으로 나타났다.

수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS)을 60% : 40% (w/w) 비율로 혼합한 배지를 제조하고 선발된 영지(No. 52) 균주를 접종하여 배양한 균사체 소재 사각시편에 대한 압축강도를 측정된 결과는 Table 4와 같다. 균사체 소재의 압축강도는 최대 하중에서 300 - 302 kg<sub>f</sub>이었으며, 판상 이동거리는 5.33 - 6.53 mm (Breaking point)로 나타났다. 반면 동일한 크기와 두께의 스티로폼 소재의 압축강도는 67 - 82 kg<sub>f</sub> 이었으며, 판상 이동거리는 9.91 - 9.92 mm

**Table 4.** Comparison of a compressive strength of mycelium materials (MM) and styrofoam materials (SM).

Sample	1 kgf (mm)	2 kgf (mm)	3 kgf (mm)	4 kgf (mm)	5 kgf (mm)	Max_Ld <sup>a)</sup> (kgf)	Brk P <sup>b)</sup> (mm)
MM	0.2 ± 0.01	0.4 ± 0.11	0.6 ± 0.21	0.7 ± 0.21	0.8 ± 0.20	301.3 ± 0.95	6.1 ± 0.67
SM	0.2 ± 0.10	0.4 ± 0.17	0.5 ± 0.20	0.6 ± 0.23	0.8 ± 0.27	74.1 ± 7.93	9.9 ± 0.01

<sup>a)</sup> Maximum load

<sup>b)</sup> breaking point

인 것으로 나타나 설정 이동거리의 10.0 mm 부근에서 부서지는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과로부터 수확후배지 활용 균사체 소재는 압축강도면에서는 스티로폼에 비하여 약 4배 정도 강도가 우수하였으나, 판상 이동거리가 짧은 지점에서 부서지며 탄력성은 없는 것으로 확인되었다.

### 적 요

야생버섯 및 재배버섯들 중에서 생장이 우수한 균주를 선발하기 위하여 PDA 배지 상에서 생육이 빠른 9 균주를 선발하였다. 톱밥배지에서 균주별 균사체의 생장을 알아보기 위하여 참나무 톱밥과 미강 80% : 20% (w/w) 비율로 혼합한 배지에서 선발된 치마버섯(No. 7), 상항버섯(No. 29), 아까시재목버섯(No. 39), 영지(No. 52) 균주를 접종하여 14일간 배양한 결과, 영지(No. 52) 균주의 균사체 생장이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 기질 건조 후 취급비율도 영지버섯 균사체를 배양한 배지에서 가장 우수하였다. 수확후배지(SM)와 참나무 톱밥(OS) 혼합비율 50% : 50% (w/w), 60% : 40% (w/w), 80% : 20% (w/w)로 배지를 제조하여 선발 균주인 영지(No. 52) 균주를 접종하여 배양한 결과, 균사체의 직경은 수확후배지(SM) : 참나무 톱밥(OS) = 60% : 40% (w/w) 혼합배지에서 균사체 생육과 취급비율이 우수한 것으로 나타났다. 영지(No. 52) 균주를 접종하여 배양한 균사체 소재 사각시편의 압축강도는 300.7 – 302.4 kgf로 스티로폼에 비하여 약 4배 정도 강도가 우수하였으나 탄력성은 없는 것으로 확인되었다. 위와 같은 결과는 버섯농가의 고민거리인 수확후배지를 활용한 균사체 복합소재 개발을 통하여 수확후배지의 재활용을 위한 높은 가능성을 확인하였으며, 향후 기초적인 자료로 활용도가 높으리라 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2023년 농촌진흥청 국립원예특작과학원 시험연구사업(과제번호 PJ015830012023)에 의하여 수행된 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

### REFERENCES

Appels FVW, Dijksterhuis J, Lukasiewicz CE, Jansen KMB,

Wösten HAB, Krijgsheld P. 2018. Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material. *Sci Rep* 8: 4703.

Bae JS, Kim YI, Jung SH, Oh YG, Kwak WS. 2006. Evaluation on feed-nutritional value of spent mushroom (*Pleurotus osteratus*, *Pleurotus eryngii*, *Flammulina velutipes*) substrates as a roughage source for ruminants. *J Anim Sci Technol* 48: 237-246.

Ehaliotis C, Zervakis GI, Karavitis P. 2005. Residues and by-products of olive-oil mills for root-zone heating and plant nutrition in organic vegetable production. *Sci Hortic* 106: 293-308.

Jones M, Bhat T, Huynh T, Kandare E, Yuen R, Wang CH, John S. 2018. Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire Mater* 42: 816-825.

Kang HW. 2019. Industrial utilization of spent mushroom substrate. *J Mushrooms* 17: 85-92.

Kim DS, Kim YW, Kim KJ, Shin HJ. 2017. Research trend and product development potential of fungal mycelium-based composite materials. *Kor Soc Biotechnol Bioeng J* 32: 174-178.

Korea Rural Economic Institute. 2018. Agricultural Outlook. pp. 586-587.

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2021. Production performance of special crops.

Moon YH, Kim HS, Kim CH, Cho WG, Yoo YB, Shin PG, Cho SJ. 2015. Effect of dietary supplementation of fermented spent mushroom substrates from *Pleurotus eryngii* on Hanwoo steers. *J Mushrooms* 13: 108-113.

Moon YH, Shin PG, Cho SJ. 2012. Feeding value of spent mushroom (*Pleurotus eryngii*) substrate. *J Mushroom Sci Prod* 10: 236-243.

Schirtt H, Vidi S, Pleissner D. 2021. Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composite. *J Cleaner Prod* 313: 127910.

Stamets P. 2001. Mycova: helping the ecosystem through mushroom cultivation. <http://www.fungi.com>.

Vandelook S, Elsacker E, Van Wylick A, De Laet L, Peeters E. 2021. Current state and future prospects of pure mycelium materials. *Fungal Biol Biotechnol* 8: 20.

Williams BC, McMullan JT, McCahey S. 2001. An initial assessment of spent mushroom compost as a potential energy feedstock. *Bioresour Technol* 79: 227-230.