간행물 등록번호
NNIBR-2021-0000231-10

담수균류자원 미발굴종 탐색–2단계 3차년도

The Survey and Discovery of Freshwater Fungal Resources

담수생물연구본부 미생물연구실 균류연구팀

국립낙동강생물자원관

담수균류자원 미발굴종 탐색 - 2단계 3차년도

담수생물연구본부 미생물연구실 균류연구팀

고재덕, 문혜연, 박상규, 천원수, 서민정, 오유선, 박영환

The Survey and Discovery of Freshwater Fungal Resources

Jaeduk Goh, Hye Yeon Mun, Sangkyu Park, Wonsu Cheon, Min-Jeoung Seo, Yusun Oh, Young-Hwan Park

Freshwater Bioresources Research Department
Fungi Research Team
Nakdonggang National Institute of Biological Resources

2021

국립낙동강생물자원관

목 차

목차 ····· i
표 목차 ····· iii
그림 목차 ····· iv

초록 ····· 1
Ⅰ. 서 론 ····· 2
1. 연구사업의 필요성 ····· 2
2. 연구사업의 목표 ····· 3
Ⅱ. 연구방법 ····· 4
1. 담수균류자원 미발굴종 탐색 ····· 4
가. 담수균류자원 조사·발굴 ····· 4
나. 담수균류자원 확보, 동정, 표본 제작 ····· 4
다. 신종/미기록종 탐색 ····· 5
2. 낫균속 기확보자원 재분류 ····· 5
가. 연구대상 선정 ····· 5
나. 분자계통분석 ····· 5
3. 호상균류 연구 ····· 6
가. 연구대상 균류 확보 ····· 6
나. 배양조건 탐색 ····· 6
4. 담수균류자원 조사발굴 현황 분석 ····· 7
가. 기확보자원 조사발굴 현황 분석 ····· 7
Ⅲ. 연구결과 및 고찰 ····· 8
1. 담수균류자원 조사·발굴 ····· 8
가. 담수균류자원 신종(후보)·미기록종 발굴 ····· 8
나. 2021년 담수균류자원 종 목록 ····· 14
다. 특이서식지 균류다양성 ····· 24
2. 낫균속 기확보자원 재분류 ····· 26
3. 호상균류 심화연구 ····· 28

4. 2015년~2020년 담수균류 조사발굴 현황 분석 ····· 29
Ⅳ. 결론 ····· 31
1. 결론 ····· 31
2. 활용방안 ····· 31
Ⅴ. 참고문헌 ····· 32

<부록(별책)>

1. 2021년 발굴 신종(후보)·미기록종 기록지 ····· 1

<표 목차>

표 1. 프라이머 정보 ····· 6
표 2. 실험대상 균류 목록 ····· 6
표 3. 2021년 발굴 신종(후보) 및 미기록종 목록 ····· 9
표 4. 자낭균문 균류 목록 ····· 14
표 5. 담자균문 균류 목록 ····· 20
표 6. 뮤코로마이코타 균류 목록 ····· 22
표 7. 모티에렐로마이코타 균류 목록 ····· 22
표 8. 키크셀로마이코타 균류 목록 ····· 22
표 9. 난균문 균류 목록- ····· 23
표 10. 폐탄광지역 채집정보 ····· 24
표 11. 탄광지역에서 분리된 균주의 다양성지수 ····· 25
표 12. 낫균속 기확보 균류 분석 결과 ····· 26

<그림 목차>

그림 1. 2021년 신종(후보)·미기록종의 분류체계 분포 현황 ····· 8
그림 2. *Chalara* sp. nov. NNIBRFG33080의 형태 및 계통도 ····· 11
그림 3. *Apiotrichum* 속 미기록종 균주의 형태 ····· 12
그림 4. 2021년 균류다양성(좌) 및 현장조사지점 ····· 14
그림 5. 폐탄광 지역의 채집지 환경 ····· 24
그림 6. 폐탄광지역의 균류 다양성 ····· 25
그림 7. 다양한 호상균류의 형태적 모습 ····· 28
그림 8. 호상균류 CBS665.73 균주의 배지별 온도별 생장 ····· 28
그림 9. 중권역 기반 수계별 조사지점(좌)과 수계별 중권역 조사현황(우-위), 지점별 속수(우-아래) ····· 29
그림 10. 수계별 다양성 지수 ····· 29
그림 11. 채집시기별 균주 수(좌)와 다양성지수(우) ····· 30
그림 12. 속별 지점당 출현율(appearance rate) ····· 30

초록

2021년 담수균류자원 미발굴종 탐색 연구는 국내 수계 대권역 중 영산강과 섬진강 수계를 중심으로 지천, 본류, 기수역 등과 특이서식지(탄광 지역) 등 53개 지점의 현장조사를 수행하고, 환경시료에서 분리된 담수균류를 대상으로 이루어졌다. 현장조사에서는 조사지점의 수질환경요인을 측정하고, 여러 환경시료를 채취하였다. 담수환경시료에서 순수분리된 균주는 형태학적 특성과 분자계통 분석을 토대로 동정하였다. 그 결과, 총 3,554 균주가 분리되었으며 이들은 각각 6개 문, 14개 강, 45개 목, 115개 과, 261개 속에 속하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구를 통해 발굴한 균류 자원 중에는 신규발굴 자원이 다수 포함되어 있는데, 미기록종 44종과 신종(후보) 2종을 발굴할 수 있었다. 또한 순수분리한 균을 대상으로 총 4,000점의 표본(배양체, 건조표본)과 이에 대한 유전자정보 2,000건을 확보하였다. 발굴자원 중 배양체 300주는 추후 다른 연구과제에서 소재로 사용가능하도록 내부기탁을 완료하였다.

미발굴종 발굴 효율을 높이고 확보자원의 다양성을 증대하기 위해 본 사업에서는 연차별로 집중발굴분류군을 선정하여 연구를 진행하고 있다. 이에 따라, 올해는 호상균류의 배양조건 확립을 위한 연구를 수행하였으며, 담수환경 출현율이 높은 낫균속 기확보자원에 대한 재동정을 실시하였다. 이러한 결과를 바탕으로 낫균속에서는 미기록종을 9종 발굴하였다.

다양한 담수환경에서의 균류 서식 정보의 축적은 향후 미발굴종 탐색 시 효율성을 제고할 수 있으며, 신규 발굴 담수균류자원의 국가생물종 목록 등재 및 확증표본 확보·수장을 통해 국가생물주권 확보에 기여할 수 있다. 확보자원 중 기초유용성이 검증된 자원에 대해서는 작물보호제 개발, 대체소재 발굴 등 차년도 산업화 관련 연구에 소재로 제공되어 담수균류의 바이오소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

Ⅰ. 서 론

1. 연구사업의 필요성

전 세계적으로 생물다양성은 인류의 생존에 있어서 매우 중요한 가치로 부상하였지만, 서식지 훼손과 환경오염, 기후변화 등의 요인에 의해 심각한 위협을 받고 있다. 지구생명보고서(WWF 2018)는 1970년에서 2014년 사이에 생물종 개체 수의 60%가 감소하였으며, 담수생태계의 생물종 개체 수는 83%가 감소하였다고 보고하였다. 이러한 위협이 제기됨에 따라 세계 각국은 생물다양성의 중요성과 경제적 가치를 인식하고, 2010년 제10차 생물다양성협약 당사국 총회에서 생물유전자원의 접근과 이익 공유에 관한 국제적 협의를 포함하는 나고야의정서가 채택되어, 2014년 10월에 발효되었다. 나고야의정서의 이행은 생물유전자원의 무분별한 이용을 방지하고 생물자원 제공국과 이익을 공유함으로써 생물자원의 보존과 지속가능한 이용을 촉진할 것으로 예상된다(한국바이오안전성정보센터 2011). 해외의 생물자원에 대한 의존도가 높은 우리나라는 해외 생물자원을 대체할 고유의 생물자원을 발굴하고, 아직 보고되지 않은 생물자원을 탐색하여 활용 가능성을 새로이 연구할 필요성이 대두되었다.

이에 따라 국내에서는 제4차 국가생물다양성전략에서 생물다양성 주류화, 생물다양성 위험요인 관리, 생물다양성 보전 및 증진 등 6대 추진전략을 수립하고, 각 전략별 실천목표를 설정, 시행함으로써 생물다양성 보전과 생태가치 제고를 실현하여 국가경제 활성화에 기여하고자 하였다(관계부처 합동 2018).

담수균류는 담수환경에 서식하는 다양한 생물종들의 일차 분해자로서의 생태적 기능을 담당하는 중요한 분류군이다(Gessner et al. 2007, Gulis et al. 2005). 균류는 지금까지 10만종 이상이 알려져 있으나, 실제 지구상에는 최소한 100만종 이상의 균류가 서식하고 있을 것으로 추정된다(Watkinson et al. 2015). 현재까지 국가생물종목록에 기재된 균류는 총 5,616종으로 알려져 있다(환경부 국립생물자원관, 2021). 국내에서 균류의 연구는 거의 육상 생태계에 서식하는 종들을 대상으로 분류와 생태, 생명공학 분야의 연구가 수행되었다. 담수 생태계에 서식하는 균류에 대한 연구는 주로 북미와 유럽의 연구자들에 의해 1970년대부터 수행되었으며, 국내에서는 2015년부터 국립낙동강생물자원관의 연구진을 시작으로 담수균류의 다양성 관련 연구를 수행해오고 있다.

지금까지 밝혀진 담수환경 유래 균류는 3,000여종(Shearer et al. 2007)으로 토양 유래 균류나, 식물병원균 등 육상균류에 비해 밝혀진 종수가 매우 적다. 담수균류는 약 20,000종이 다양한 서식환경에 존재할 것으로 예측되는데(Gessner and van Ryckegem 2003), 국내에서는 국립낙동강생물자원관에서만 보유하고 있으며, 이는 담수균류 확충을 위한 자원관의 역할이 중요함을 보여준다. 새로운 균류 분류군을 탐색하는 연구의 큰 어려움은 환경으로부터 순수 분리하는 균주의 수에 비해 신종(후보) 또는 미기록종의 수가 매우 작다는 것이다. 자원관에서 수행한 담수균류자원 미발굴종 탐색 연구의 경우에 시료 전처리 방법의 개선, 특이서식지 조사 등의

노력에도 불구하고 전체 순수 분리한 균주들 중에서 신종(후보) 또는 미기록종의 비율은 약 2%에 그쳤다. 따라서 본 연구에서는 신종 및 미기록종 발굴의 효율성을 높이기 위해 연차별로 집중발굴분류군을 선정하여 최신분류체계를 적용하고, 희귀균류에 심화연구를 통해 균류자원의 다양성을 확대하면서 종 발굴 효율을 제고하고자 한다.

균류는 다양한 환경조건에서 변이가 많은 생활사를 영위하며 균체의 생장을 위해 다양한 분해 효소와 유기산, 항생물질 등을 생산하므로 생물 산업의 소재로서 활용 가치가 매우 높은 것으로 보고되어 있으나 담수균류의 생리활성 물질에 대한 연구는 육상균류 종들에 비해 거의 연구되지 않았다(Jones et al. 2014). 따라서 담수균류에 대한 연구는 새로운 종의 탐색과 함께 생물 산업의 소재 개발을 위한 유용성을 탐색하고 활용 및 실증화 연구가 연계될 필요가 있다. 이러한 소재로서의 활용도 제고를 위해서 내부기탁을 증가하여 자원의 순환율 제고를 도모하였다.

또한, 본 사업이 2단계의 마지막 해인만큼 중장기 계획수립이 필요한 바, 이제까지의 조사 발굴 사업에 대한 전반적인 현황 분석이 시급하다. 따라서 연구결과 현황에 대반 분석을 통해 해당 사업의 개선안을 강구하고자 한다.

2. 연구사업의 목표

다양한 담수환경에 서식하는 균류자원을 영산강·섬진강 수계 및 탄광 지역을 중심으로 조사하고, 순수 분리한 담수균류를 대상으로 신종(후보) 및 미기록종을 발굴하며 표본을 확보하고자 하였다. 정량적인 목표는 ①담수환경 균류자원 순수분리 2,000균주, ②신종(후보) 및 미기록종 발굴 46종, ③표본 확보 4,000점, ④ 균류자원 유전자정보 확보 2,000건, ⑤ 배양체 기탁 300주이다. 종 발굴의 효율 제고를 위해서는 기확보자원 중 낫균속 균류에 대한 재분류를 수행하고, 호상균류의 최적 배양조건을 탐색하고자 하였다.

Ⅱ. 연구내용 및 방법

1. 담수균류자원 미발굴종 탐색

가. 담수균류자원 조사·발굴

(1) 조사지점 및 시기

조사지점은 총 53지점으로 좌표와 해당 수계에 대한 정보는 담수생물자원관리시스템에 입력하였다. 조사는 2월부터 9월까지 이루어졌으며, 현장조사에서는 시료채취와 수질환경요인 측정이 이루어졌다. 수질환경요인은 수질측정기로 측정하였으며, 수온, pH, 용존산소(DO, mg/ml, %), 전기전도도를 측정하였다.

(2) 시료채취 방법

담수균류의 순수분리를 위해 채취하는 시료형태는 담수시료, 유기물시료, 담수퇴적물 등으로 구분할 수 있다. 시료 채취는 조사지점의 환경 및 조사 시기에 따라 채집할 수 있는 종류가 한정되나, 1차적으로 담수필터 시료는 모든 장소에서 채집하였다. 채집한 시료는 모두 아이스박스에 담아 냉장상태(4℃)를 유지하여 실험실로 운반하고, 시료에 따라 전처리과정을 거친 후 균류를 순수분리 하였다.

나. 담수균류자원 확보, 동정, 표본 제작

(1) 균류자원 순수분리

균류자원을 순수분리할 때, 시료별 분리방법이 다르게 적용된다. 시료별 전처리 과정을 거치고, 계대배양을 통해 균류를 순수분리하면, ITS 시퀀싱과 형태관찰을 통해 균류 종 동정을 한다. 순수분리로 확보된 자원은 이후 생물표본 형태로 보관한다.

(2) 담수균류자원 분류 및 동정

(가) 분자계통학적 분류

기본적으로 internal transcribed spacer(ITS) 영역을 증폭한 후 염기서열 분석을 한다. 염기서열 정보는 NCBI Blast를 통해 분석하며 similarity(98% 이하는 신종(후보)로 간주)를 근거로 1차 종 동정을 한다. Blast 분석 결과에서 유사한 종 간 구별이 어려운 경우, 해당 균류별로 분류체계 마커로 쓰이는 rRNA의 LSU, SSU, *beta tubulin*, *EF1a*, *RPB2* 등을 추가적으로 염기서열 분석을 수행한다.

(나) 형태학적 분류

도감, 참고문헌 등을 이용하여 균사생장, 포자형태, 크기, 포자격벽 유형, 분지유형 등에 따라 분류한다. 분생포자의 형태를 확실히 관찰하여야 한다.

(3) 담수균류자원 유전자원 확보 및 표본 수장

균류의 생물표본은 배양체, 건조표본, 생체시료의 3종류를 제작한다. 표본정보는 담수생물

자원관리시스템에 입력되며, 실물표본은 국립낙동강생물자원관 유전자원수장고에 보관하도록 한다. 배양체는 한천이 포함된 배지에서 자라는 균주의 균사를 콜크보러를 이용하여 블록으로 만들어 20%글리세롤 용액에 분주하여 동결 보존하도록 한다. 또한, 신종(후보) 및 미기록종의 화상자료(균사생장 사진 또는 현미경 사진)를 참고자료로 제공한다.

다. 신종/미기록종 탐색

(1) 신종/미기록종 1차 탐색

확보한 균류자원의 ITS 정보를 NCBI Blast 또는 UNITE DB에서 검색하여 1차 종동정을 한다. 종명은 indexfungurum을 기준으로 정명, 분류정보를 기재한다. 동정한 결과를 바탕으로 국가생물종목록(species.nibr.go.kr)에서 신종/미기록종 여부를 확인한다.

(2) 신종/미기록종 2차 탐색 : 형태관찰, 계통수 작성

신종/미기록종 후보종의 형태를 관찰하고 화상자료로 남긴다. 관련 문헌정보를 수집하여 신종/미기록종이 맞는지 확인한다. 이와 동시에 근연종의 유전정보를 수집하여 계통수를 작성한다. 필요하면 추가적인 유전정보를 확보하여 적용한다.

(3) 국가생물종목록 등재

발굴한 신종/미기록종을 국가생물종목록에 임시 등록한다. 관련 논문이 출판되어 정보를 입력하면 임시등록정보는 공식적으로 국가생물종목록에 등재된다.

2. 낫균속 기확보자원 재분류

가. 연구대상 선정

(1) 연구대상 선정

2015년~ 2020년에 확보한 909 균주의 Fusarium 속 균류자원의 ITS/LSU 정보와 PDA 배지에서의 균사생장 형태를 재검토하여 200균주를 선정하였다.

(2) 최신분류체계가 적용된 DNA 바코드 정보 확보

참고문헌 조사를 통해 다양한 DNA 바코드 정보를 확보하였으며, 염기서열 정보는 fasta, excel 파일로 정리하여 구분하였다.

나. 분자계통분석

(1) 바코드 정보 확보

200균주의 DNA를 추출하여, 표1의 정보에 따라 PCR 및 시퀀싱을 통해 바코드 정보를 확보하였다.

표 1 프라이머 정보

유전자 영역	프라이머 이름	염기서열 정보('5 →'3)
ITS	ITS1	TCCGTAGGTGAACCTGCGG
	ITS4	TCCTCCGCTTATTGATATGC
LSU	LR0R	ACCCGCTGAACTTAAGC
	LR7R	GCAGATCTTGGTGGTAG
TUB	Bt2a	GGTAACCAAATCGGTGCTGCTTTCG
	Bt2b	ACCCTCAGTGTAGTGACCCTTGGCG
EF1	EF1-983F	GCYCCYGGHCAYCGTGAYTTYAT
	EF1-1567R	ACHGTRCCRATACCACCRATCTT
RPB1	Fa	CAYAARGARTCYATGATGGGWC
	G2R	GTCATYTGDGTDGCDGGYTCDCC
RPB2	5F	GAYGAYMGWGATCAYTTYGG
	7CR	CCCATRGCTTGYTTRCCCAT

(2) 분자계통분석

확보한 정보를 바탕으로 NCBI에서 BlastN 분석을 실시하였으며, MEGA7 프로그램을 사용하여 단일분자계통 또는 다중분자계통을 실시하였다.

3. 호상균류 연구

가. 연구대상 균류 확보

(1) Westerdijk Institute - KNAW에서 분양받은 호상균류 목록

호상균류의 배양조건 및 형태의 관찰을 위해 Westerdijk Institute - KNAW에서 11개 균주를 분양받아 실험에 사용하였다. (표2 참고)

표 2 실험대상 균류 목록

No.	CBS No.	Species
1	CBS 124.41	*Rhizophlyctis rosea*
2	CBS 454.65	*Phlyctochytrium africanum*
3	CBS 455.65	*Phlyctochytrium palustre*
4	CBS 663.73	*Entophlyctis confervae-glomeratae*
5	CBS 665.73	*Spizellomyces acuminatus*
6	CBS 667.73	*Phlyctochytrium californicum*
7	CBS 668.73	*Spizellomyces plurigibbosus*
8	CBS 675.73	*Chytridium confervae*
9	CBS 809.83	*Powellomyces hirtus*
10	CBS 122106	*Kappamyces laurelensis*
11	CBS 122107	*Boothiomyces macroporosum*

나. 배양조건 탐색

호상균류의 배양조건을 탐색하기 CMA, ARCH, PmTG, mPmTG의 배지를 실험에 사용하였다. 배지의 조성은 다음과 같다.

* CMA(Corn meal agar): BD 211132 17g/l(corn meal infusion 2g/l, agar 15g/l)
* ARCH(Archimycetes agar): peptone 2g/l, malt extract 3g/l, glucose 5g/l, agar 8g/l
* PmTG agar: peptonized milk 1g/l, tryptone 1g/l, glucose 5g/l, agar 10g/l
* mPmTG: peptonized milk 0.4g/l, tryptone 0.4g/l, glucose 2g/l, agar 10g/l

(2) 배양 온도

호상균류의 온도에 대한 배양조건을 알아보기 위해 5, 15, 20, 25℃의 온도에서 배양하였다.

4. 담수균류자원 조사발굴 현황 분석

가. 기확보자원 조사발굴 현황 분석

(1) 조사발굴 현황자료 확보

담수균류자원관리시스템을 통해 2020년까지 입력된 채집지 정보와 표본정보를 확보, 지점별 균류 목록을 정리하였다.

(2) 다양성 분석

최종 확보된 목록을 기준으로 속 기준 다양성 지수(Shannon's index)를 계산하였다.

(가) Shannon's diversity index(H')를 이용하여 분리한 균의 다양성 분석

$$H' = -\sum_{i=1}^{R} p_i \ln p_i$$

(나) Pielou evenness index(J')를 이용하여 분리한 균의 균등도 분석

$$J' = \frac{H'}{\ln S}$$

(다) Menhinick's index(D_{mn})를 이용하여 분리한 균의 풍부도 분석

$$D_{mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

p_i = 해당속의 균주 수/전체 균주수
S = 전체 속수
N = 속별 균주수

Ⅲ. 연구결과 및 고찰

1. 담수균류자원 조사·발굴

가. 담수균류자원 신종(후보)·미기록종 발굴

2021년 담수균류자원 미발굴종 탐색을 통해 발굴된 46종의 신종(후보) 및 미기록종의 균류자원을 발굴하였다(표 3, 부록 1). 이 목록에는 2개의 신종(후보)과 44개의 미기록종이 포함되어 있다.

전체적으로는 46종 중 37종이 자낭균으로, 담자균류는 미기록종 6종이 발견되었고, 뮤코로마이코타와 모티에엘로마이코타, 난균류에서 각각 1종의 미기록종이 발견되었다. 가장 많은 신규자원이 속한 목은 자낭균문의 Hypocreales(동충하초목)으로 *Trichoderma*, *Fusarium* 등의 속에서는 각각 3종 이상의 미기록종이 발견되었다. *Fusarium* 속은 기확보자원의 재동정을 통해 발굴된 것으로, 최근 분류체계 개편으로 종 분화 및 균학적 특성이 새롭게 정립된 종들이 많다. 또한 Hypocreales 목은 유용자원으로서도 가치가 높아 앞으로의 활용도 기대된다. 다음으로 신규자원이 많은 목은 Pleosporales 목으로, 총 13개의 미발굴종이 발견되었다. 전체적으로는 5문 10강 16목 24과 30속으로 다양한 분류군에서 신규자원이 발굴되었다.

분리원으로 보면, 담수필터에서 63%(29/46)가 발굴되어 전년대비 크게 증가하였다. 그 다음이 담수퇴적물 23.9%(11/46), 담수침전식물체 8.7%(4/46)의 순으로 나타났으며, 담수동식물내생진균이 2종 발굴된 것이 올해의 성과이다.

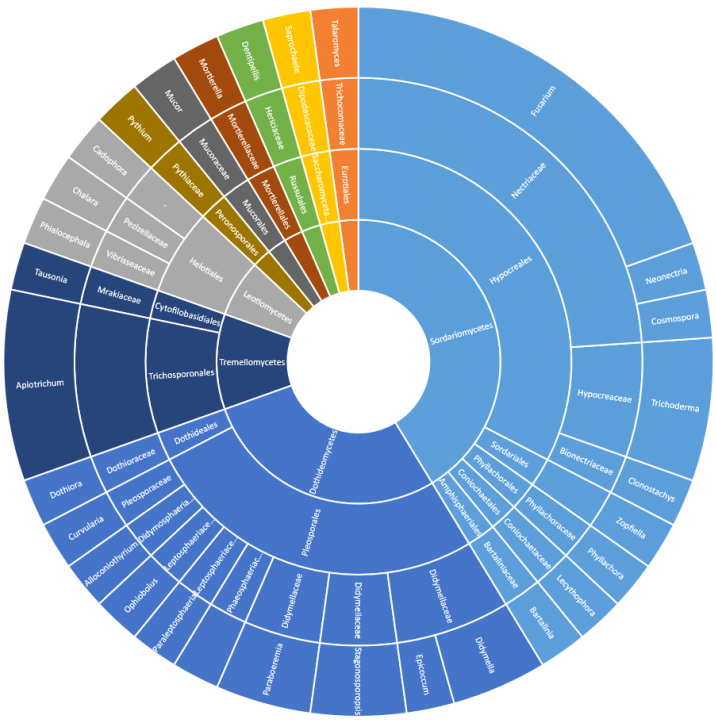

그림 1 2021년 신종(후보)·미기록종의 분류체계 분포 현황

표 3. 2021년 발굴 신종(후보) 및 미기록종 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Species	No. strain
1	Ascomycota	Dothideomycetes	Dothideales	Dothioraceae	*Dothiora prunorum*	NNIBRFG 34965
2	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	*Didymella macrophylla*	NNIBRFG 34665
3	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	*Didymella prosopidis*	NNIBRFG 31896
4	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	*Epicoccum endophyticum*	NNIBRFG 33822
5	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	*Paraboeremia litseae*	NNIBRFG 37670
6	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	*Paraboeremia putaminum*	NNIBRFG 33715
7	**Ascomycota**	**Dothideomycetes**	**Pleosporales**	**Didymosphaeriaceae**	***Alloconiothyrium* sp. nov.**	**NNIBRFG 34420**
8	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	*Stagonosporopsis lupini*	NNIBRFG 31917
9	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	*Stagonosporopsis loticola*	NNIBRFG 31832
10	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	*Ophiobolus cirsii*	NNIBRFG 37668
11	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	*Paraleptosphaeria dryadis*	NNIBRFG 32923
12	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	*Setophaeosphaeria citricola*	NNIBRFG 33812
13	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	*Curvularia americana*	NNIBRFG 34923
14	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae	*Talaromyces veerkampii*	NNIBRFG 33520
15	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	-	*Cadophora fastigiata*	NNIBRFG 33135
16	**Ascomycota**	**Leotiomycetes**	**Helotiales**	**Pezizellaceae**	***Chalara* sp. nov.**	**NNIBRFG 33080**
17	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Vibrisseaceae	*Phialocephala dimorphospora*	NNIBRFG 32054
18	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Dipodascacaceae	*Saprochaete quercus*	NNIBRFG 33183
19	Ascomycota	Sordariomycetes	Amphisphaeriales	Bartaliniaceae	*Bartalinia pondoensis*	NNIBRFG 37430
20	Ascomycota	Sordariomycetes	Coniochaetales	Coniochaetaceae	*Lecythophora luteoviridis*	NNIBRFG 37000
21	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Bionectriaceae	*Clonostachys solani*	NNIBRFG 31945
22	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	*Trichoderma albofulvopsis*	NNIBRFG 34099
23	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	*Trichoderma hunanense*	NNIBRFG 33378
24	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	*Trichoderma rufobrunneum*	NNIBRFG 31924
25	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Cosmospora obscura*	NNIBRFG 37669
26	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium annulatum*	NNIBRFG 313
27	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium bulbicola*	NNIBRFG 23124
28	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium californicum*	NNIBRFG 1829

No.	Phylum	Class	Order	Family	Species	No. strain
29	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium citri*	NNIBRFG 2088
30	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium cugenangense*	NNIBRFG 3047
31	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium falciforme*	NNIBRFG 2576
32	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium kyushuense*	NNIBRFG 2150
33	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium multiceps*	NNIBRFG 6002
34	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Fusarium vanettenii*	NNIBRFG 25936
35	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	*Neonectria obtusispora*	NNIBRFG 34966
36	Ascomycota	Sordariomycetes	Phyllachorales	Phyllachoraceae	*Phyllachora phyllostachydis*	NNIBRFG 34669
37	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Lasiosphaeriaceae	*Zopfiella pilifera*	NNIBRFG 33411
38	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Hericiaceae	*Dentipellis rhizomorpha*	NNIBRFG 34498
39	Basidiomycota	Tremellomycetes	Cytofilobasidiales	Mrakiaceae	*Tausonia pullulans*	NNIBRFG 33181
40	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	*Apiotrichum chiropterorum*	NNIBRFG 36995
41	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	*Apiotrichum domesticum*	NNIBRFG 32938
42	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	*Apiotrichum dulcitum*	NNIBRFG 33144
43	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	*Apiotrichum laibachii*	NNIBRFG 36991
44	Mortierellomycota	Mortierellomycetes	Mortierellales	Mortierellaceae	*Mortierella hyalina*	NNIBRFG 32795
45	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Mucoraceae	*Mucor laxorrhizus*	NNIBRFG 37671
46	Oomycota	Oomycetes	Pythiales	Pythiaceae	*Pythium longipapillum*	NNIBRFG 35094

(1) 신종(후보)

신종(후보)은 총 2종이며, 모두 자낭균문에 속한다. *Chalara* 속은 Leotiomycete강 Helotiales목 Pexixellaceae과에 속하는 속이다. 1844년에 처음으로 발견된 *Chalara* 속은 현재 143개 종이 알려져 있으나 KTSN에는 속도 등록되어 있지 않다. *Chalara* sp. nov. NNIBRFG33080은 문경 공평지역의 폐탄광의 담수에서 분리한 균으로 생장이 매우 느리며 콜로니의 앞면은 옅은 회색이고, 뒷면은 옅은 노란색으로 방사형의 배지가 갈라진(sulcate) 형태로 생장하며, 포자는 잘 생성하지 않는다. ITS 염기서열을 바탕으로 계통도를 작성한 결과, *Chalara* 속 내의 다른 종과는 같은 clade에 묶이지 않았으나 *Chalara* sp. TMS-2011 균주와 같은 clade를 형성하였다 (그림 2). 하지만 TMS-2011 균주가 아직 보고되어 있지 않아 신종후보군으로 분류되었다.

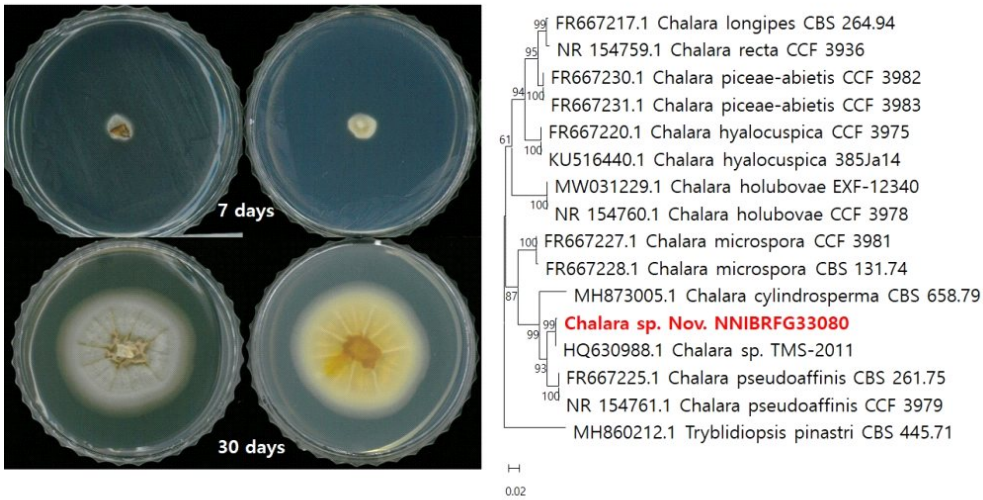

그림 2 *Chalara* sp. nov. NNIBRFG33080의 형태 및 계통도

(2) 미기록종

2021년에 발굴한 균류자원의 발굴 비율 대비 미기록종은 전년도와 비슷하게 자낭균에 집중되어 있다. 자낭균문 중 가장 많은 부분을 차지하는 강은 Sordariomycetes 강으로 43%(19/44)를 차지하고 있으며, 다음으로 많은 것은 Dothideomycetes 강으로 27%(12/44)가 발견되었다. 목 수준에서는 Hypocreales(동충하초목)이 36%(16/44), Pleosporales 목이 25%(11/44)로 다수로 나타났다.

가장 많은 신규 균류가 발굴된 목인 Hypocreales는 예전부터 기능이 보고된 종이 많이 분포하는 것으로 알려져 있다. *Fusarium* 속은 식물병원균으로 유명하며, 독소색소 등 2차대사산물 합성이 많이 연구되어 있는 분류군이다. 올해에는 기존 확보된 균류에 대해 최신분류체계를 적용하는 연구를 수행하여 9종의 미기록종을 발굴하는 성과가 있었다. *Trichoderma* 속 균류는 항균활성과 식물생장촉진능 등 생물방제제 소재로 잘 알려져 있어 앞으로도 생물소재로서 활용이 기대된다.

전년도에 비해 담자균의 증가에 기여한 것은 효모의 발굴이다. 그 중에서 *Apiotrichum* 속에 속하는 종들이 다수 발굴되었다. *Apiotrichum* 속은 39개 종이 보고되어 있으며, KTSN에 등록된 종은 2개 종이다. *Apiotrichum* 속은 담자균문에 속하는 속으로서, Tremellomycetes강 Trichosporonales목 Trichosporonaceae과에 속한다. *Apiotrichum* 속 미기록 3종은 광주의 도심 하천의 담수에서 분리되었다. *A. dulcitum*은 2015년에 *Trichosporon dulcitum*에서 *A. dulcitum*으로 재명명 되었으며, 생장이 느리며, 포자가 동그란 모양과 약간 타원형으로 7-12um정도의 크기이다. *A. laibachii* 역시 *T. laibachii*에서 *A. laibachii*로 재명명 되었으며, 생장이 빠르고, 포자가 동그랗고 3-7um정도이다. *A. chiropterorum*은 2020년에 일본의 박쥐 서식 동굴에서 분리한 것으로 최초 보고 되었으며, 포자가 길쭉한 막대모양으로 5-10um 등 다양한 크기이다 (그림 3).

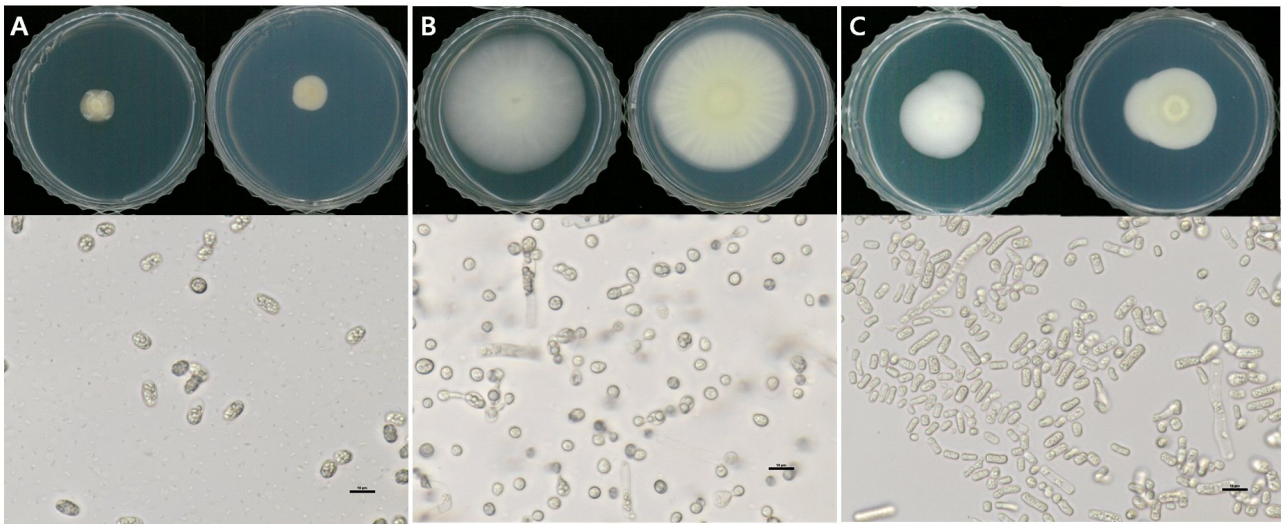

그림 3 *Apiotrichum* 속 미기록종 균주의 형태. A: *A. dulcitum* NNIBRFG33144, B: *A. laibachii* NNIBRFG36991, C: *A. chiropterorum* NNIBRFG36995.

*Setophaeosphaeria citricola*는 2018년 오스트레일리아에서 핑거라임(*Citrus australasica*)의 잎으로부터 분리되어 보고되었으며, 이름은 숙주인 감귤류 과일(citrus)에서 유래되었다(Crous PW et al., 2018). 그 외에 중국의 *Rohdea chinensis*의 잎과 줄기로부터 분리보고(An C et al., 2020)되었으며, 지금까지 보고된 Setophaeosphaeria 속은 *S. badalingensis, S. citri, S. citricola, S. hemerocallidis, S. microspora, S. sidae*가 있다.

*Talaromyces veerkampii*는 푸른곰팡이인 페니실리움과 유사한 속으로 빗자루 모양의 분생자 자루를 가진 곰팡이이다. Talaromyces는 청록색, 녹색, 황록색 등의 색소를 띄며, 배지에 따라 다른 색을 보이기도 한다. 항생물질이나 발효 등에 사용되는 것으로도 잘 알려져 있는 속이다. 본 연구에서 발견된 *Talaromyces veerkampii*는 다양한 종류의 이차대사산물을 생산하는 것으로 알려져 있다 (Visagieet al., 2015).

*Clonostachys solani*는 오래전에 영국에서 최초로 발견되어 *Spicaria solani*로 명명되었다가 이후 유전자 분석 및 분류체계의 변화를 통해 *Clonostachys*속으로 재분류되었다. *Clonostachys* 속에는 여러 유용균류가 속해있는데, 대표적인 예로 다양한 작물에 병해를 일으키는 식물병원균으로 알려져 있는 *Rhizoctonia solani*에 대한 항균성능을 보유한 *Clonostachys rosea*가 있다. 이번에 국내에서 새로 발견된 *Clonostachys solani* 또한 양배추의 뿌리를 가해하는 고자리파리를 방제할 수 있는 효능이 보고되어 향후 생물학적 방제에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.(Razinger et al., 2014)

*Pythium longipapillum*는 2019년 이란에서 벼의 종자, 뿌리 등의 부패병징에서 처음 분리되었으나, 직접적인 병원성은 없는 것으로 보고되어 있다(Fatemeh and Reza, 2019). *Pythium* sp. 의 많은 종들은 국내외에 식물병원균으로 보고되어 있다. 국내에서도 *P. ultimum* 을 비롯한 20여종이 벼, 고추 등의 종자 및 모종 등에 병을 발병시키는 것으로 보고되어 있다. 국내외에서 *Pythium longipapillum*에 의한 식물병은 아직 보고된바가 없는 것으로 보아 식물조직을 분해하는 부생균으로 판단된다. 그러나 *Pythium* sp. 의 많은 종들이 병원균으로 알려져 있으므로 돌발병해에 대한 지속적인 관리가 필요할것으로 판단된다.

전반적으로 활용가능성이 기대되는 종이 다수 발견되었고, 병원균으로 보고되었던 종이나, 특이서식지에서 발견되었던 종들도 여럿 포함되어 있어 유용성과 생태적 중요성 두 가지 측면에서 발굴종의 다양성을 확대할 수 있었다.

나. 2021년 담수균류자원 종 목록

2021년 조사발굴 결과, 총 3,554점의 담수균류가 분리되었다. 이들의 분류군을 비교한 결과, 자낭균문(Ascomycota)에 속하는 균이 대부분으로 전체의 87%를 차지하였고, 그 다음이 담자균문(Basidiomycota) 5.5%, 뮤코로마이코타(Mucoromycota) 4.0%, 모티에엘로마이코타(Mortierellomycota) 1.0%, 난균문(Oomycota) 0.8%로 나타났다(그림 5).

2021년에 발굴된 담수균류자원은 총 6문 14강 45목 115과 261속에 속하는 것을 알 수 있었다. 전년 대비 자낭균문 비율 90%에서 88%로 감소했고 신규로 확보된 문도 존재한다. 기존에 자원관에서 보유하지 못했던 분류군이 26속이나 추가적으로 확보되어, 전반적으로 표본 다양성이 증가되었다. 발굴된 담수균류자원은 다양한 형태의 4,000점의 표본으로 제작하였으며, 관련 정보는 담수생물자원관리시스템(https://fbp.nnibr.re.kr/bioresource/)에 입력하였다.

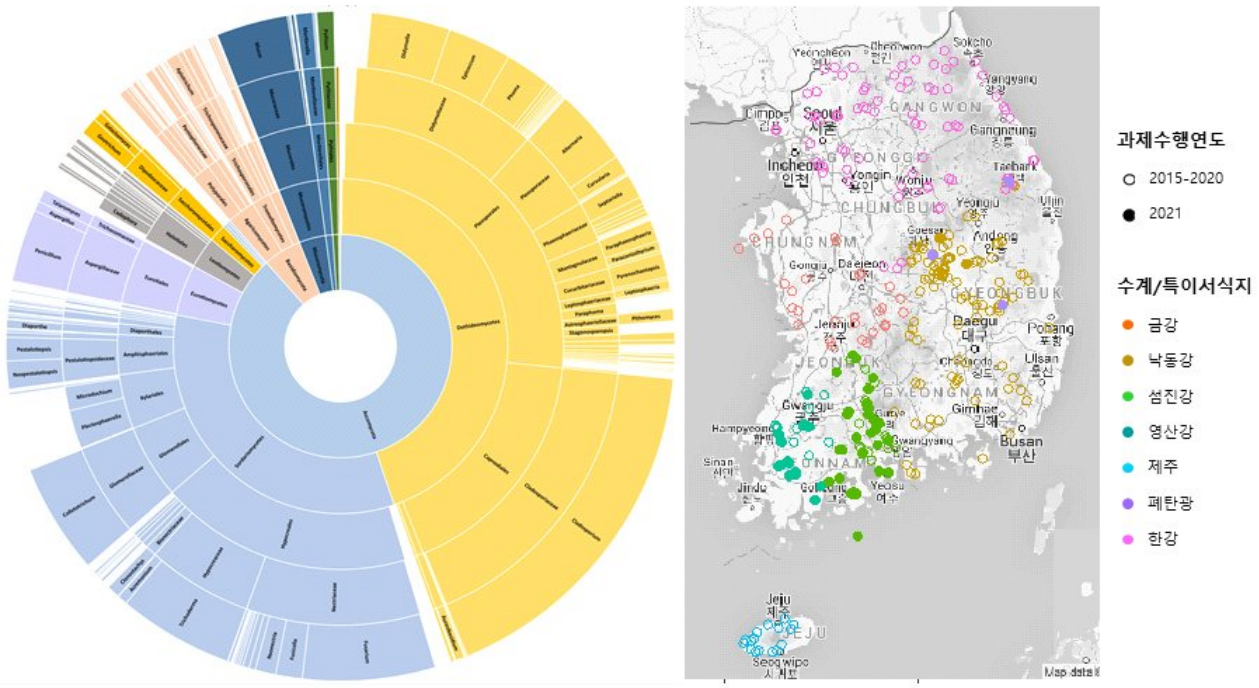

그림 4 2021년 균류다양성(좌) 및 현장조사지점

(1) 자낭균문 (Ascomycota)

자낭균문은 총 3,149개 균주가 분리되어 전체의 약 87%를 차지하였다(표 2). 6강 28목 84과 273속이었으며, *Cladosporium* 속이 10.8%로 가장 많았고, 그 다음으로 *Fusarium*(5.7%) 속, *Trichoderma* 속(8.0%), 순이었다.

표 4. 자낭균문 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Ascomycota	-	-	-	-	6
2	Ascomycota	-	-	-	Acrodontium	2
3	Ascomycota	-	-	-	Exosporium	1

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
4	Ascomycota	-	-	-	Filosporella	10
5	Ascomycota	-	-	-	Gyoerffyella	1
6	Ascomycota	-	-	-	Knufia	10
7	Ascomycota	-	-	-	Lunulospora	1
8	Ascomycota	-	-	-	Trematophoma	1
9	Ascomycota	-	-	-	Tricellula	2
10	Ascomycota	Dothideomycetes	-	-	-	6
11	Ascomycota	Dothideomycetes	-	-	-	1
12	Ascomycota	Dothideomycetes	-	-	Monodictys	2
13	Ascomycota	Dothideomycetes	Botryosphaeriales	Botryosphaeriaceae	Microdiplodia	1
14	Ascomycota	Dothideomycetes	Botryosphaeriales	Botryosphaeriaceae	Phyllosticta	1
15	Ascomycota	Dothideomycetes	Capnodiales	Cladosporiaceae	Cladosporium	608
16	Ascomycota	Dothideomycetes	Capnodiales	Davidiellaceae	Davidiella	1
17	Ascomycota	Dothideomycetes	Capnodiales	Mycosphaerellaceae	Ramichloridium	3
18	Ascomycota	Dothideomycetes	Capnodiales	Teratosphaeriaceae	-	1
19	Ascomycota	Dothideomycetes	Dothideales	Dothioraceae	Aureobasidium	16
20	Ascomycota	Dothideomycetes	Dothideales	Dothioraceae	Dothiora	1
21	Ascomycota	Dothideomycetes	Microthyriales	Microthyriaceae	Paramicrothyrium	1
22	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	-	20
23	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Anguillospora	5
24	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Clavariopsis	3
25	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Ochrocladosporium	2
26	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Paraphoma	24
27	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Periconia	9
28	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Pyrenochaeta	2
29	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Setomelanomma	1
30	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Shiraia	2
31	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	-	Stagonosporopsis	19
32	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Amniculicolaceae	Amniculicola	4
33	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Astrosphaeriellaceae	Pithomyces	21
34	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Caryosporaceae	Caryospora	13
35	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Cucurbitariaceae	Neocucurbitaria	5
36	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Cucurbitariaceae	Pyrenochaetopsis	42
37	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Cyclothyriellaceae	Massariosphaeria	2
38	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	-	20
39	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Allophoma	1
40	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Boeremia	3
41	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Didymella	135
42	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Epicoccum	109
43	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Juxtiphoma	4

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
44	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Leptosphaerulina	7
45	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Neoascochyta	5
46	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Neodidymella	6
47	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Nothophoma	3
48	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Paraboeremia	3
49	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Phoma	79
50	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Pseudoascochyta	1
51	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Similiphoma	3
52	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymellaceae	Vacuiphoma	2
53	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymosphaeriaceae	-	3
54	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymosphaeriaceae	Montagnula	1
55	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Didymosphaeriaceae	Pseudopithomyces	3
56	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Lentitheciaceae	Lentithecium	1
57	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Lentitheciaceae	Tingoldiago	2
58	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Lentitheciaceae	Towyspora	8
59	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	Coniothyrium	4
60	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	Leptosphaeria	15
61	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	Ophiobolus	2
62	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	Paraleptosphaeria	2
63	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Leptosphaeriaceae	Peyronellaea	1
64	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Lindgomycetaceae	Hongkongmyces	1
65	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Lophiostomataceae	Lophiostoma	2
66	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Massarinaceae	-	3
67	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Montagnulaceae	Microsphaeropsis	5
68	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Montagnulaceae	Paraconiothyrium	16
69	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Montagnulaceae	Paraphaeosphaeria	37
70	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Neopyrenochaetaceae	Neopyrenochaeta	5
71	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Nigrogranaceae	Nigrograna	1
72	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	-	1
73	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Didymocyrtis	2
74	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Neosetophoma	7
75	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Ophiosphaerella	1
76	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Phaeosphaeria	12
77	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Phaeosphaeriopsis	7
78	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Piniphoma	1
79	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Septoriella	42
80	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Setophaeosphaeria	2
81	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Setophoma	7
82	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Phaeosphaeriaceae	Stagonospora	3
83	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	-	1

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
84	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	Alternaria	130
85	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	Bipolaris	3
86	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	Curvularia	32
87	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pleosporaceae	Exserohilum	1
88	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Pyrenochaetopsidaceae	-	1
89	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Sporormiaceae	Westerdykella	2
90	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Thyridariaceae	Parathyridaria	1
91	Ascomycota	Dothideomycetes	Pleosporales	Torulaceae	Torula	2
92	Ascomycota	Dothideomycetes	Tubeufiales	Tubeufiaceae	-	1
93	Ascomycota	Dothideomycetes	Tubeufiales	Tubeufiaceae	Letendraea	6
94	Ascomycota	Dothideomycetes	Venturiales	Sympoventuriaceae	Scolecobasidium	1
95	Ascomycota	Eurotiomycetes	-	-	-	3
96	Ascomycota	Eurotiomycetes	Chaetothyriales	Cyphellophoraceae	-	1
97	Ascomycota	Eurotiomycetes	Chaetothyriales	Herpotrichiellaceae	Exophiala	1
98	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Aspergillaceae	-	1
99	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Aspergillaceae	Aspergillus	17
100	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Aspergillaceae	Penicillium	124
101	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae	Paecilomyces	1
102	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae	Talaromyces	22
103	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae	Thermoascus	1
104	Ascomycota	Eurotiomycetes	Eurotiales	Trichocomaceae	Thysanophora	1
105	Ascomycota	Eurotiomycetes	Onygenales	-	-	1
106	Ascomycota	Eurotiomycetes	Onygenales	Onygenaceae	Aphanoascus	1
107	Ascomycota	Leotiomycetes	-	-	-	2
108	Ascomycota	Leotiomycetes	-	Myxotrichaceae	Oidiodendron	1
109	Ascomycota	Leotiomycetes	-	Myxotrichaceae	Pseudogymnoascus	7
110	Ascomycota	Leotiomycetes	Chaetomellales	Chaetomellaceae	Chaetomella	2
111	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	-	-	9
112	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	-	Cadophora	25
113	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	-	Lemonniera	10
114	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	-	Tetracladium	7
115	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Dermateaceae	Gloeosporium	1
116	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Dermateaceae	Mollisia	1
117	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Dermateaceae	Neofabraea	1
118	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Helotiaceae	Articulospora	6
119	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Helotiaceae	Ascocoryne	1
120	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Helotiaceae	Dimorphospora	1
121	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Helotiaceae	Helicodendron	1
122	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Helotiaceae	Neobulgaria	5
123	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Hyaloscyphaceae	Cistella	1

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
124	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Pezizellaceae	Chalara	4
125	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Sclerotiniaceae	Botrytis	8
126	Ascomycota	Leotiomycetes	Helotiales	Tricladiaceae	Tricladium	5
127	Ascomycota	Leotiomycetes	Thelebolales	-	Thelebolus	1
128	Ascomycota	Leotiomycetes	Thelebolales	Pseudeurotiaceae	Pseudeurotium	8
129	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	-	Candida	1
130	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Dipodascaceae	-	1
131	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Dipodascaceae	Galactomyces	16
132	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Dipodascaceae	Geotrichum	30
133	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Dipodascaceae	Saprochaete	1
134	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Metschnikowiaceae	Metschnikowia	1
135	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Saccharomycetaceae	Debaryomyces	2
136	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Saccharomycetaceae	Pichia	7
137	Ascomycota	Saccharomycetes	Saccharomycetales	Trichomonascaceae	Zygoascus	1
138	Ascomycota	Sordariomycetes	-	-	-	18
139	Ascomycota	Sordariomycetes	-	-	Phialemoniopsis	1
140	Ascomycota	Sordariomycetes	-	-	Pleurophragmium	1
141	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Apiosporaceae	Arthrinium	6
142	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Cephalothecaceae	Phialemonium	3
143	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Plectosphaerellaceae	Brunneochlamydosporium	2
144	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Plectosphaerellaceae	Furcasterigmium	1
145	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Plectosphaerellaceae	Gibellulopsis	2
146	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Plectosphaerellaceae	Lectera	1
147	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Plectosphaerellaceae	Phialoparvum	1
148	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Amphisphaeriaceae	Discosia	9
149	Ascomycota	Sordariomycetes	-	Amphisphaeriaceae	Monochaetia	4
150	Ascomycota	Sordariomycetes	Amphisphaeriales	Bartaliniaceae	Bartalinia	2
151	Ascomycota	Sordariomycetes	Amphisphaeriales	Pestalotiopsidaceae	Neopestalotiopsis	47
152	Ascomycota	Sordariomycetes	Amphisphaeriales	Pestalotiopsidaceae	Pestalotiopsis	40
153	Ascomycota	Sordariomycetes	Chaetosphaeriales	Chaetosphaeriaceae	Chloridium	1
154	Ascomycota	Sordariomycetes	Chaetosphaeriales	Chaetosphaeriaceae	Chloridium	1
155	Ascomycota	Sordariomycetes	Coniochaetales	Coniochaetaceae	Coniochaeta	4
156	Ascomycota	Sordariomycetes	Coniochaetales	Coniochaetaceae	Lecythophora	3
157	Ascomycota	Sordariomycetes	Cordanales	Cordanaceae	Cordana	1
158	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	-	Tubakia	1
159	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	Diaporthaceae	Diaporthe	15
160	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	Diaporthaceae	Phomopsis	2
161	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	Gnomoniaceae	Apiognomonia	1
162	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	Togniniaceae	Phaeoacremonium	3
163	Ascomycota	Sordariomycetes	Diaporthales	Valsaceae	Cytospora	5

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
164	Ascomycota	Sordariomycetes	Glomerellales	Glomerellaceae	Colletotrichum	188
165	Ascomycota	Sordariomycetes	Glomerellales	Glomerellaceae	Glomerella	1
166	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	-	3
167	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Cephalosporium	1
168	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Emericellopsis	12
169	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Ilyonectria	2
170	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Myrothecium	1
171	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Sarocladium	2
172	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	-	Stilbella	2
173	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Bionectriaceae	Clonostachys	22
174	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Bionectriaceae	Ovicillium	1
175	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Clavicipitaceae	Keithomyces	1
176	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Clavicipitaceae	Metapochonia	1
177	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Clavicipitaceae	Metarhizium	4
178	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Clavicipitaceae	Pochonia	1
179	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Cordycipitaceae	Akanthomyces	1
180	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Cordycipitaceae	Beauveria	5
181	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Cordycipitaceae	Cordyceps	2
182	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Cordycipitaceae	Lecanicillium	2
183	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Cordycipitaceae	Samsoniella	1
184	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	-	1
185	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	Acremonium	17
186	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	Hypocrea	1
187	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Hypocreaceae	Trichoderma	197
188	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	-	1
189	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Aquanectria	11
190	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Cosmospora	4
191	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Cylindrodendrum	1
192	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Dactylonectria	2
193	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Flagellospora	1
194	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Fusarium	226
195	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Fusicolla	45
196	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Gibberella	1
197	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Macroconia	1
198	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Nectria	11
199	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Neocosmospora	2
200	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Neonectria	35
201	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Paracremonium	6
202	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Pseudocosmospora	1
203	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Thelonectria	3

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
204	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Nectriaceae	Volutella	4
205	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Ophiocordycipitaceae	Purpureocillium	2
206	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Ophiocordycipitaceae	Tolypocladium	1
207	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Sarocladiaceae	Parasarocladium	1
208	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Stachybotryaceae	Albifimbria	2
209	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Stachybotryaceae	Myxospora	3
210	Ascomycota	Sordariomycetes	Hypocreales	Stachybotryaceae	Paramyrothecium	2
211	Ascomycota	Sordariomycetes	Microascales	Microascaceae	Graphium	1
212	Ascomycota	Sordariomycetes	Microascales	Microascaceae	Trichurus	1
213	Ascomycota	Sordariomycetes	Phyllachorales	Phyllachoraceae	Phyllachora	3
214	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Chaetomiaceae	Botryotrichum	1
215	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Chaetomiaceae	Chaetomium	4
216	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Chaetomiaceae	Humicola	2
217	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Chaetomiaceae	Trichocladium	8
218	Ascomycota	Sordariomycetes	Sordariales	Lasiosphaeriaceae	Zopfiella	1
219	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	-	-	2
220	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	-	Dendrophoma	1
221	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	-	Microdochium	49
222	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	-	Plectosphaerella	79
223	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	Diatrypaceae	Diatrypella	1
224	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	Diatrypaceae	peroneutypa	1
225	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	Microdochiaceae	-	1
226	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	Robillardaceae	Robillarda	4
227	Ascomycota	Sordariomycetes	Xylariales	Xylariaceae	Annulohypoxylon	2

(2) 담자균문 (Basidiomycota)

담자균은 총 195개 균주(5.49%)로 전년보다 크게 증가하였다. 균주 대비 속이 다양한 편으로 58개 균주에 4강 14목 28과 44속으로 나타났다 (표 3). 강별 분포는 전년도와 유사하게 Agriomycetes가 81%로 우점으로 나타나며, 그 다음이 Tremellomycetes (19%)로 나타났다. Microbotryomycetes 강과 Ustilaginomycetes 강은 각각 1균주씩 나타났다. *Irpex* 속이 가장 많았으며, 그 다음으로 *Peniophora, Apiotrichum, Trametes* 순이었다.

표 5. 담자균문 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Basidiomycota	-	-	-	-	1
2	Basidiomycota	Agaricomycetes	-	-	-	1
3	Basidiomycota	Agaricomycetes	Agaricales	Cyphellaceae	Chondrostereum	1
4	Basidiomycota	Agaricomycetes	Agaricales	Physalacriaceae	Cylindrobasidium	1
5	Basidiomycota	Agaricomycetes	Agaricales	Psathyrellaceae	Coprinellus	5
6	Basidiomycota	Agaricomycetes	Agaricales	Schizophyllaceae	Schizophyllum	8

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
7	Basidiomycota	Agaricomycetes	Agaricales	Tricholomataceae	Clitocybe	1
8	Basidiomycota	Agaricomycetes	Atheliales	Atheliaceae	Athelia	3
9	Basidiomycota	Agaricomycetes	Cantharellales	Ceratobasidiaceae	Ceratobasidium	1
10	Basidiomycota	Agaricomycetes	Cantharellales	Ceratobasidiaceae	Rhizoctonia	2
11	Basidiomycota	Agaricomycetes	Corticiales	-	-	1
12	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Fomitopsidaceae	Fomitopsis	1
13	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Ganodermataceae	Ganoderma	2
14	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Irpicaceae	Irpex	14
15	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Meruliaceae	Bjerkandera	1
16	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Meruliaceae	Emmia	3
17	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Meruliaceae	Phlebia	2
18	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae	Ceriporia	3
19	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae	Crepatura	1
20	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae	Phanerochaete	6
21	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae	Phlebiopsis	2
22	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Phanerochaetaceae	Porostereum	1
23	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Polyporaceae	Cerrena	1
24	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Polyporaceae	Dichomitus	1
25	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Polyporaceae	Perenniporia	2
26	Basidiomycota	Agaricomycetes	Polyporales	Polyporaceae	Trametes	8
27	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Echinodontiaceae	Echinodontium	1
28	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Hericiaceae	Dentipellis	1
29	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Peniophoraceae		7
30	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Peniophoraceae	Peniophora	14
31	Basidiomycota	Agaricomycetes	Russulales	Stereaceae	Stereum	1
32	Basidiomycota	Microbotryomycetes	-	-	-	1
33	Basidiomycota	Microbotryomycetes	-	-	Sampaiozyma	16
34	Basidiomycota	Microbotryomycetes	Kriegeriales	Camptobasidiaceae	Glaciozyma	1
35	Basidiomycota	Microbotryomycetes	Leucosporidiales	Leucosporidiaceae	Leucosporidium	4
36	Basidiomycota	Microbotryomycetes	Microbotryales	Ustilentylomataceae	Ustilentyloma	1
37	Basidiomycota	Microbotryomycetes	Sporidiobolales	Sporidiobolaceae	Rhodotorula	5
38	Basidiomycota	Microbotryomycetes	Sporidiobolales	Sporidiobolaceae	Sporobolomyces	5
39	Basidiomycota	Tremellomycetes	-	-	-	2
40	Basidiomycota	Tremellomycetes	Cystofilobasidiales	Cystofilobasidiaceae	Cystofilobasidium	3
41	Basidiomycota	Tremellomycetes	Cystofilobasidiales	Cystofilobasidiaceae	Guehomyces	1
42	Basidiomycota	Tremellomycetes	Cystofilobasidiales	Mrakiaceae	Tausonia	13
43	Basidiomycota	Tremellomycetes	Tremellales	-	Hannaella	5
44	Basidiomycota	Tremellomycetes	Tremellales	Bulleraceae	Bullera	1
45	Basidiomycota	Tremellomycetes	Tremellales	Bulleribasidiaceae	Vishniacozyma	5
46	Basidiomycota	Tremellomycetes	Tremellales	Tremellaceae	Papiliotrema	1
47	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	Apiotrichum	22

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
48	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	Cutaneotrichosporon	1
49	Basidiomycota	Tremellomycetes	Trichosporonales	Trichosporonaceae	Trichosporon	10
50	Basidiomycota	Ustilaginomycetes	Ustilaginales	Ustilaginaceae	Ustilago	1

(3) 뮤코로마이코타(Mucoromycota)

Mucoromycota에 속하는 균류는 총 142개 균주로서 전체의 4.00%를 차지한다(표). 2강 2목 5과 7속으로 85.9%가 Mucor 속이었다.

표 6. 뮤코로마이코타 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Choanephoraceae	Poitrasia	1
2	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Lichtheimiaceae	Rhizomucor	5
3	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Mucoraceae	Actinomucor	3
4	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Mucoraceae	Amylomyces	1
5	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Mucoraceae	Gongronella	2
6	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Mucoraceae	Mucor	122
7	Mucoromycota	Mucoromycetes	Mucorales	Rhizopodaceae	Rhizopus	2
8	Mucoromycota	Umbelopsidomycetes	Umbelopsidales	Umbelopsidaceae	Umbelopsis	7

(4) 모티에렐로마이코타(Mortierellomycota)

Mortierellomycota에 속하는 균류는 총 36개 균주로서 Mortierella 속(80.5%), Podila 속(8.3%), Entomortierella 속(5.5%), Linnemannia 속(5.5%) 순으로 나타났다.

표 7 모티에렐로마이코타 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Mortierellomycota	Mortierellomycetes	Mortierellales	Mortierellaceae	Entomortierella	2
2	Mortierellomycota	Mortierellomycetes	Mortierellales	Mortierellaceae	Linnemannia	2
3	Mortierellomycota	Mortierellomycetes	Mortierellales	Mortierellaceae	Mortierella	29
4	Mortierellomycota	Mortierellomycetes	Mortierellales	Mortierellaceae	Podila	3

(5) 키크셀로마이코타(Kickxellomycota)

자원관 미보유 분류균인 키크셀로마이코타 문에 속하는 1개 균주가 분리되었다.

표 8. 키크셀로마이코타 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Kickxellomycota	Ramicandelaberomycetes	Ramicandelaberales	Ramicandelaberaceae	Ramicandelaber	1

(6) 난균문(Oomycota)

난균문은 총 30개 균주가 분리되었으며, 2개 종이 발견되었다. 난균문에서는 Phythium 속이 96%로 가장 많이 나타났다.

표 9. 난균문 균류 목록

No.	Phylum	Class	Order	Family	Genus	#
1	Oomycota	Oomycetes	Pythiales	Pythiaceae	Pythium	29
2	Oomycota	Oomycetes	Saprolegniales	Leptolegniaceae	Aphanomyces	1

다. 특이서식지 균류다양성

(1) 채집지역

폐탄광 지역의 균류 다양성 및 신종/미기록종 발굴을 위해 태백의 성원탄광 자연정화시설, 군위의 고로석산 정화시설, 울진의 금장광산 유실방지 옹벽 앞 하천에서 채집하였다. 문경탄전은 1930년대에 남한에서 가장 먼저 생긴 탄광으로서, 문경 및 상주 북동부 일대에 위치하며, 채집 지점은 갱내수(침출수) 수질 조사지점으로 갱도 입구 중 하나이다. 채집한 폐탄광 지역 중 태백, 군위, 울진에 위치한 폐탄광은 비소 등의 중금속 오염이 높은 것으로 보고되어 있다.

성원탄광 및 고로석산의 경우 자연정화시설을 설치하여 폐탄광에서 유출되는 탄광수를 정화하고 있으며, 금장광산의 경우 다량의 중금속이 유출된 적이 있어 오염물이 유출되지 않도록 옹벽을 세워 방지하고 있다.

표 10 폐탄광지역 채집정보

채집지명	주소	자원종류	채집환경
성원탄광	강원도 태백시 화전동	석탄	정화시설
고로석산	경북 군위군 고로면 석산리	금, 아연, 연, 은	정화시설
금장광산	경북 울진군 온정면 선구리	금, 동, 아연, 연, 은	유실방지옹벽 앞 하천
문경탄전	경북 문경시 공평동	석탄	침출수 수질 조사지점

그림 5 폐탄광 지역의 채집지 환경

(2) 폐탄광지역에서 분리된 균류의 다양성

폐탄광 지역에서 분리된 균류의 다양성을 조사한 결과, 고로석산에서 채집한 시료의 다양성이 가장 높았으며, 금장광산 시료의 경우 분리된 균주수가 비교하기에는 너무 적어 다양성이 가장 떨어지는 것으로 나타났다. 폐탄광 지역에서 채집한 시료에서는 균류의 분리율이 다른 지역시료에 비해 현저하게 낮게 나타났다.

전체적으로 폐탄광 지역에서 분리된 균류 중 *Cladosporium* 속의 비율이 가장 높았으며, 그 다음이 *Trichoderma* 속 순이었고, 금장광산과 문경탄전에서는 접합균류의 비율도 높게 나타났다.

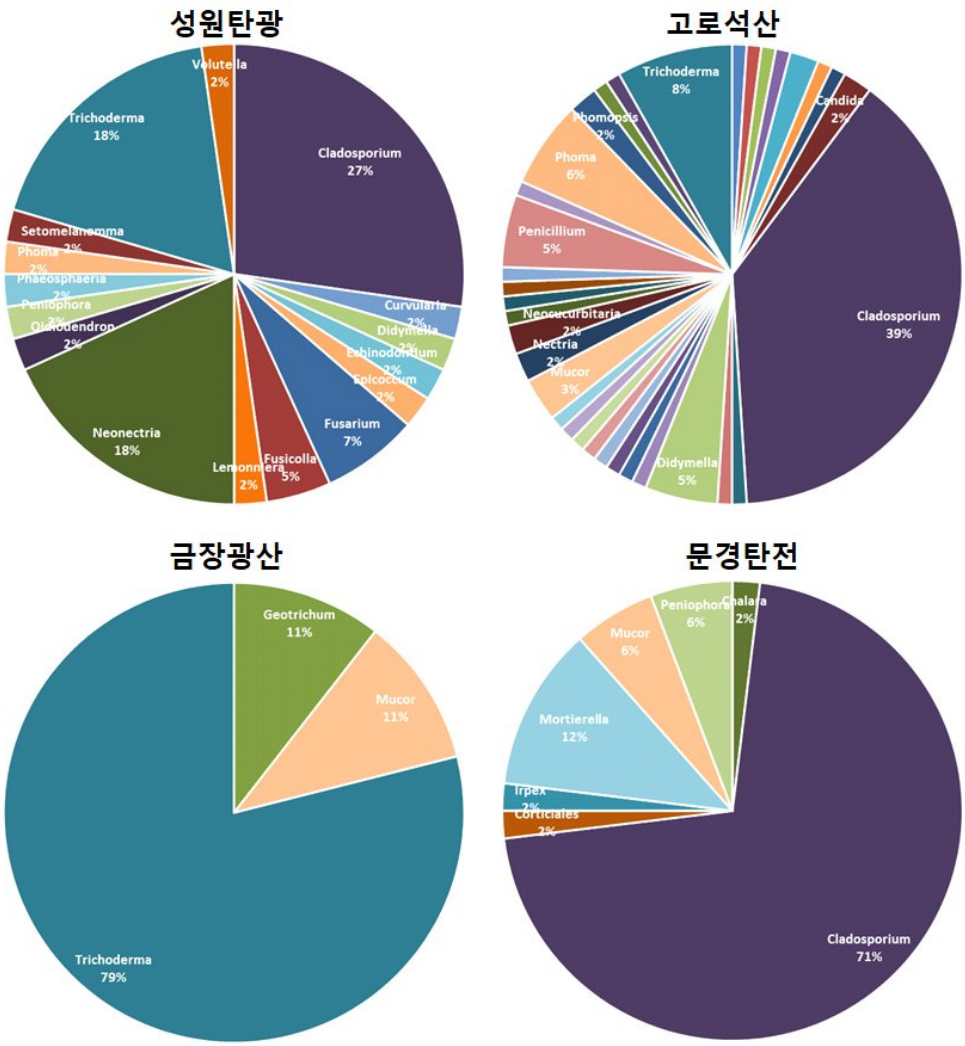

그림 6 폐탄광지역의 균류 다양성

표 11. 탄광지역에서 분리된 균주의 다양성지수

Diversity index	Munkyeong	Taebaek	Hwasun
H(Shannon's diversity index)	3.12	2.87	2.88
EH(equitability)	0.70	0.73	0.64
Simpson's index	0.072	0.063	0.091
Evenness index	1.11	1.78	0.99

2. 낫균속 기확보자원 재분류

(1) 균주 선정 및 유전정보 확보

실험에 사용한 기확보자원은 2015년부터 2020년까지 확보한 자원 중 *Fusarium* 속 909균주 중 200균주를 선정하여, 기존의 ITS 외 *LSU*, *TUB*, *RPB1*, *RPB2*, *TEF1* 등의 유전정보를 추가로 확보하였다.

(2) 분류군별 마커 적용 및 분자계통 분석 결과

Fusarium 속의 분류는 1차적으로 ITS로 그룹을 나누고, 각 그룹별로는 *TEF1*, *RPB2*, *RPB1* 기반 계통수분석을 통해 분석하였다(Lombard *et al.*, 2019; Yilmaz *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2019; Xia *et al.*, 2019). 확보한 단일마커와 다중마커를 활용한 재분류 결과는 아래의 표 12에 나타나있으며, 이 연구를 통해 미기록종 9종을 발굴하였다.

표 12. 낫균속 기확보 균류 분석 결과

NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species
5	*Fusarium* sp.	2157	*Fusarium fujikuroi*	6815	*Fusarium andiyazi*	26324	*Fusarium andiyazi*
188	*Fusarium* sp.	2158	*Fusarium fujikuroi*	15043	*Fusarium cugenangense*	26351	*Fusarium californicum*
189	*Fusarium* sp.	2217	*Fusarium* sp.	15044	*Fusarium cugenangense*	26616	*Fusarium* sp.
248	*Fusarium annulatum*	2219	*Fusarium* sp.	15124	*Fusarium* sp.	26693	*Fusarium graminearum*
264	Fusarium sp.	2224	*Fusarium* sp.	15159	*Fusarium* sp.	26711	*Fusarium cugenangense*
313	***Fusarium annulatum***	2261	*Fusarium* sp.	15166	*Fusarium* sp.	26712	*Fusarium delphinoides*
319	*Fusarium vorosii*	2262	*Fusarium* sp.	20656	*Fusarium delphinoides*	27041	*Fusarium stilboides*
324	*Fusarium* sp.	2265	*Fusarium* sp.	20779	*Bisifusarium* sp.	27366	*Fusarium asiaticum*
372	*Fusarium* sp.	2266	*Fusarium* sp.	20988	*Fusarium californicum*	27397	*Fusarium californicum*
439	*Fusarium graminearum*	2269	*Fusarium* sp.	20997	*Fusarium vorosii*	27441	*Fusarium asiaticum*
548	*Fusarium armeniacum*	2277	*Fusarium proliferatum*	21013	*Fusarium solani*	27551	*Rodentomyces sp.*
549	*Fusarium armeniacum*	2284	*Fusarium solani*	21018	*Fusarium merismoides*	27574	*Fusarium nanum*
1483	*Fusarium* sp.	2285	*Fusarium solani*	21992	*Fusarium ipomoeae*	27626	*Fusarium tanahbumbuense*
1501	*Fusarium* sp.	2342	*Fusarium* sp.	22185	*Fusarium* sp.	27628	*Fusarium sporotrichioides*
1511	*Fusarium citri*	2350	*Fusarium* sp.	22217	*Fusarium vorosii*	27648	*Fusarium asiaticum*
1515	*Fusarium citri*	2359	*Fusarium* sp.	22702	*Scolecofusarium ciliatum*	28305	*Fusarium* sp.
1535	Fusarium sp.	2360	*Fusarium* sp.	22772	*Fusarium* sp.	28864	*Fusarium luffae*
1538	*Fusarium vorosii*	2427	*Fusarium commune*	23028	*Fusarium vorosii*	28865	*Fusarium asiaticum*
1543	Fusarium sp.	2435	*Fusarium commune*	**23124**	***Fusarium bulbicola***	28866	*Fusarium* sp.
1544	Fusarium sp.	2436	*Fusarium armeniacum*	23135	*Fusarium luffae*	28867	*Fusarium* sp.
1546	*Fusarium vorosii*	2455	*Fusarium* sp.	23141	*Fusarium luffae*	28868	*Fusarium* sp.
1641	*Fusarium californicum*	2487	*Fusarium oxysporum*	23220	*Fusarium commune*	28869	*Fusarium* sp.
1664	*Fusarium* sp.	2490	*Fusarium cugenangense*	23310	*Fusarium cerealis*	28870	*Fusarium* sp.
1665	*Fusarium* sp.	2492	*Fusarium* sp.	23347	*Fusarium cugenangense*	28871	*Fusarium inflexum*
1666	*Fusarium* sp.	2493	*Fusarium solani*	23363	*Fusarium commune*	28904	*Fusarium* sp.

NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species	NNIBRFG No.	Species
1669	*Fusarium* sp.	2515	*Fusarium oxysporum*	23444	*Fusarium commune*	28907	*Fusarium* sp.
1758	*Fusarium* sp.	**2576**	***Fusarium falciforme***	23644	*Fusarium oxysporum*	28933	*Fusarium* sp.
1795	*Fusarium citri*	2597	*Fusarium merismoides*	23761	*Fusarium commune*	28976	*Fusarium californicum*
1796	*Fusarium citri*	2600	*Fusarium merismoides*	23763	*Fusarium commune*	29062	*Fusarium* sp.
1797	*Fusarium lateritium*	2636	*Fusarium fujikuroi*	23768	*Fusarium commune*	30526	*Fusarium vorosii*
1816	*Fusarium* sp.	2645	*Fusarium* sp.	23794	*Fusarium vorosii*	30528	*Fusarium* sp.
1829	***Fusarium californicum***	2956	*Fusarium fujikuroi*	23810	*Fusarium* sp.	30531	*Fusarium* sp.
1871	*Fusarium* sp.	2968	*Fusarium fujikuroi*	23814	*Fusicolla* sp.	30574	*Fusarium lateritium*
1873	*Fusarium* sp.	3000	*Fusarium fujikuroi*	23858	*Fusarium* sp.	30616	*Fusarium sp.*
1874	*Fusarium* sp.	3023	*Fusarium fujikuroi*	24097	*Fusarium culmorum*	30621	*Fusarium asiaticum*
1899	*Fusarium vorosii*	3025	*Fusarium equiseti*	24149	*Fusicolla* sp.	30623	*Fusarium asiaticum*
1926	*Fusarium* sp.	3033	*Fusarium oxysporum*	24180	*Fusicolla* sp.	30626	*Fusarium* sp.
2063	*Fusarium solani*	3044	*Fusarium cugenangense*	24210	*Fusarium nanum*	30644	*Fusarium* sp.
2087	*Fusarium tanahbumbuense*	**3047**	***Fusarium cugenangense***	24213	*Fusarium nanum*	31012	*Fusarium mangiferae*
2088	***Fusarium citri***	3048	*Fusarium luffae*	25764	*Fusarium* sp.	31021	*Fusarium luffae*
2102	*Fusarium tanahbumbuense*	3162	*Fusarium commune*	25769	*Fusarium armeniacum*	31026	*Fusarium fujikuroi*
2145	*Fusarium proliferatum*	3184	*Fusarium commune*	25861	*Fusarium citri*	31051	*Fusarium fujikuroi*
2146	*Fusarium proliferatum*	4083	*Rodentomyces reticulatus*	**25936**	***Fusarium vanettenii***	31056	*Fusarium incarnatum*
2148	*Fusarium proliferatum*	4914	*Fusarium fujikuroi*	26011	*Fusarium fujikuroi*	31060	*Fusarium asiaticum*
2149	*Fusarium proliferatum*	4927	*Fusarium concentricum*	26014	*Fusarium* sp.	31563	*Fusarium sporotrichioides*
2150	***Fusarium kyushuense***	5073	*Fusarium concentricum*	26167	*Fusarium concentricum*	31729	*Fusarium solani*
2151	*Fusarium kyushuense*	5463	*Fusarium* sp.	26222	*Fusarium andiyazi*	31875	*Fusarium falciforme*
2152	*Fusarium fujikuroi*	**6002**	***Fusarium multiceps***	26280	*Fusarium proliferatum*	31999	*Fusarium* sp.
2154	*Fusarium fujikuroi*	6007	*Fusarium concentricum*	26292	*Fusarium citri*	32001	*Fusarium* sp.
2155	*Fusarium fujikuroi*	6793	*Fusarium oxysporum*	26316	*Fusarium fujikuroi*	32101	*Fusarium* sp.

3. 호상균류 심화연구

(1) 호상균류의 형태적 관찰

확보한 호상균류의 현미경하에서의 형태적 특징을 관찰하였다. 그림 ..은 3주동안 20℃에서 ARCHA와 PDA 배지에서 배양한 플레이트 상에서의 콜로니의 형태 및 유주자와 유주포자의 모습을 관찰할 수 있었다. 유주자의 크기는 종에 따라 다양하였으며, 편모도 관찰할 수 있었다.

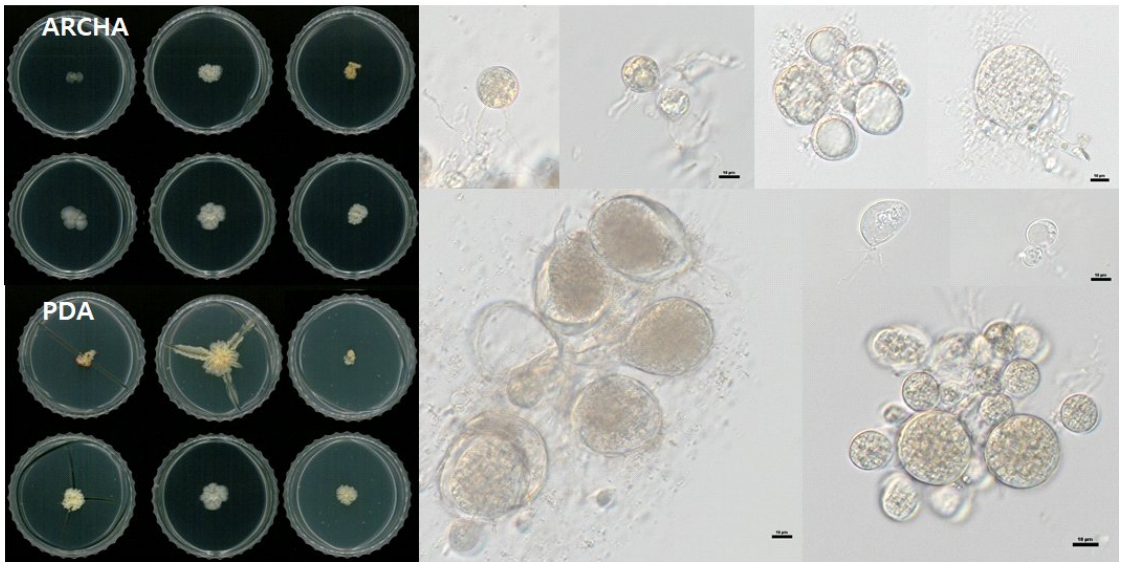

그림 7 다양한 호상균류의 형태적 모습

(2) 호상균류의 배양적 특징

호상균류의 콜로니의 형태는 일반 균류와는 다르게 기중균사를 형성하지 않았으며, 생장이 매우 느리다. 호상균류의 온도 및 배지에 따른 배양조건을 탐색한 결과, 매우 느리게 생장하였으나, 25℃의 온도에서 가장 높게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 4종의 배지에서는 비슷한 양상을 보였는데, CMA의 경우 사상형 균류의 형태로 생장하는 것을 관찰할 수 있었다.

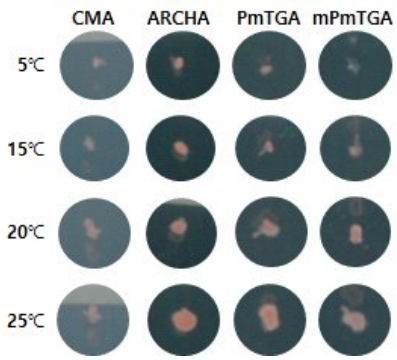

그림 8 호상균류 CBS665.73
균주의 배지별 온도별 생장

4. 2015년~2020년 담수균류 조사발굴 현황 분석

(1) 조사지점별 다양성 분석

담수생물자원관리시스템(https://fbp.nnibr.re.kr/bioresource/)에 입력된 표본정보(배양체)와 채집지정보를 추출하여 다양성 지수 산출에 사용하였다. 아래 그림과 같이 중권역 기반으로 보았을 때 76%가 완료되었으며, 수계별/지점별 발견된 속수에서 큰 차이를 보이지 않았다.

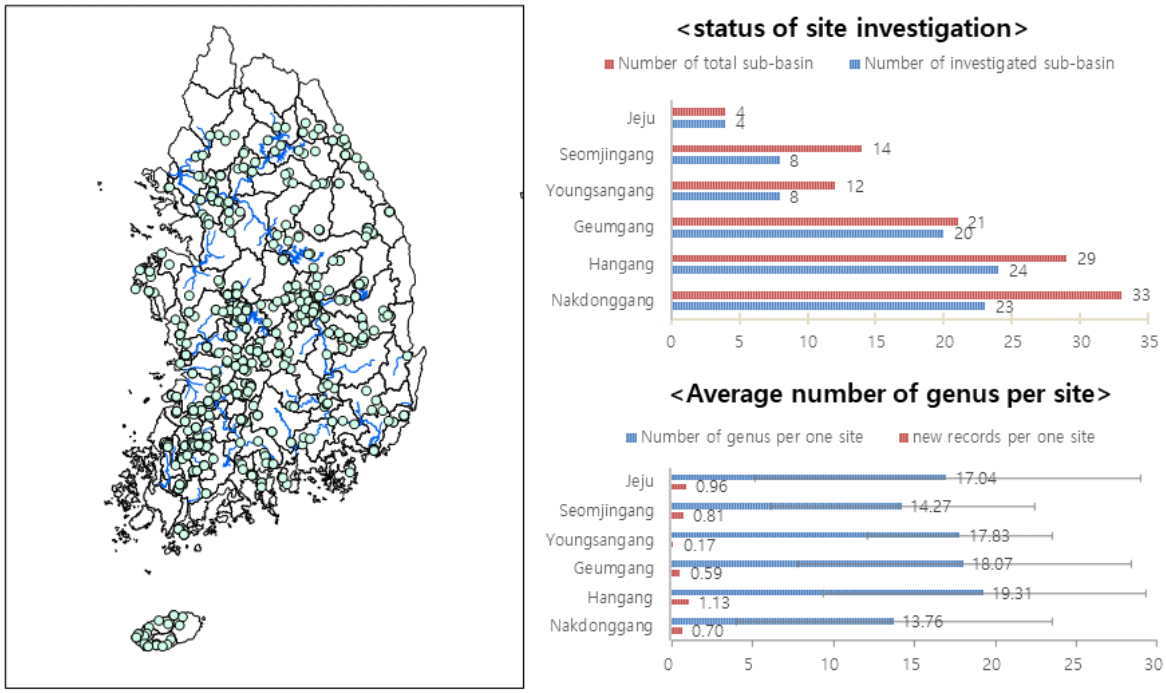

그림 9 중권역 기반 수계별 조사지점(좌)과 수계별 중권역 조사현황(우-위), 지점별 속수(우-아래)

수계별로 산출된 다양성지수를 비교했을 때, 수계별 특이점은 발견되지 않았으며, 일반적으로 지점당 분리된 균주수에 비례하여 속수와 다양성지수가 나타났다. 그러나 신종미기록종의 수와 다양성지수는 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 다양성 상위지점 10지점을 선발하였는데, 이들은 공통적으로 평균 15도 안팎의 수온과 자연환경이 잘 보존된 지역으로 나타났다.

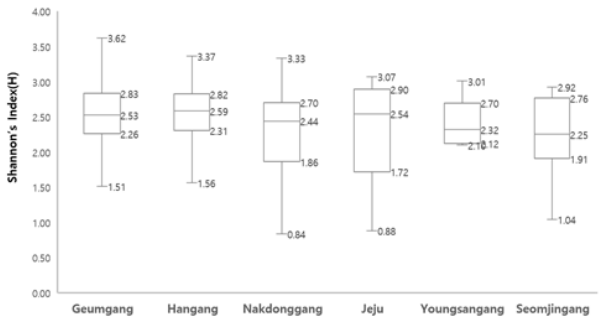

그림 10 수계별 다양성 지수

(2) 채집시기별 다양성 분석

채집시기별로 균주 수, 속 수, 다양성지수를 비교했을 때, 시기별 다양성지수에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다(그림 9). 다양성이 높은 시기는 2~5월로 나타났는데, 이는 다양성지수 상위지점의 평균온도가 15도 안팎으로 다른 지점들에 비해 낮게 나타난 것과 유사한 결과로 보인다. 이 결과를 고려하면, 향후에는 현장조사 시기를 가을, 겨울로 확대하는 것이 필요할 것으로 보인다.

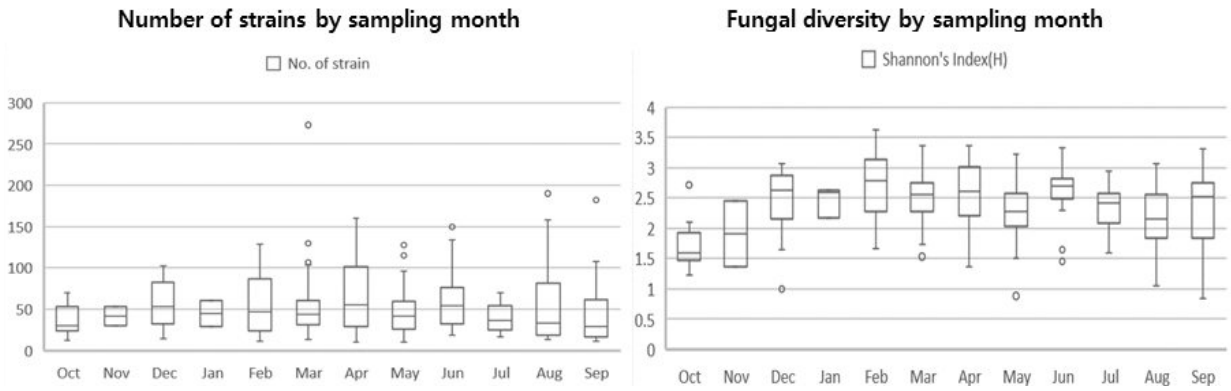

그림 11 채집시기별 균주 수(좌)와 다양성지수(우)

(3) 담수환경 출현율 분석

조사발굴된 자원의 분류정보를 통해 지점당 속별 출현율을 산출하였다. 그림 10에서 보듯이 지점당 출현율이 50%이상인 균류는 Cladosporium, Fusarium, Penicillium, Trichoderma 4속으로 앞의 2개 분류군은 공기중에서, 뒤의 2개는 토양중에서 우점하는 것으로 알려진 균류이다. 또한 이들은 분류체계 개편이 잦은 분류군으로, 향후 이들에 대한 바코드 정보 구축이 종 발굴에 도움이 될 것으로 보인다. 담수환경에서의 출현율은 시료의 특성과도 밀접한 관련이 있으며, 균주의 채집지 및 분리정보는 향후의 조사발굴에서 기초정보로 사용할 예정이다.

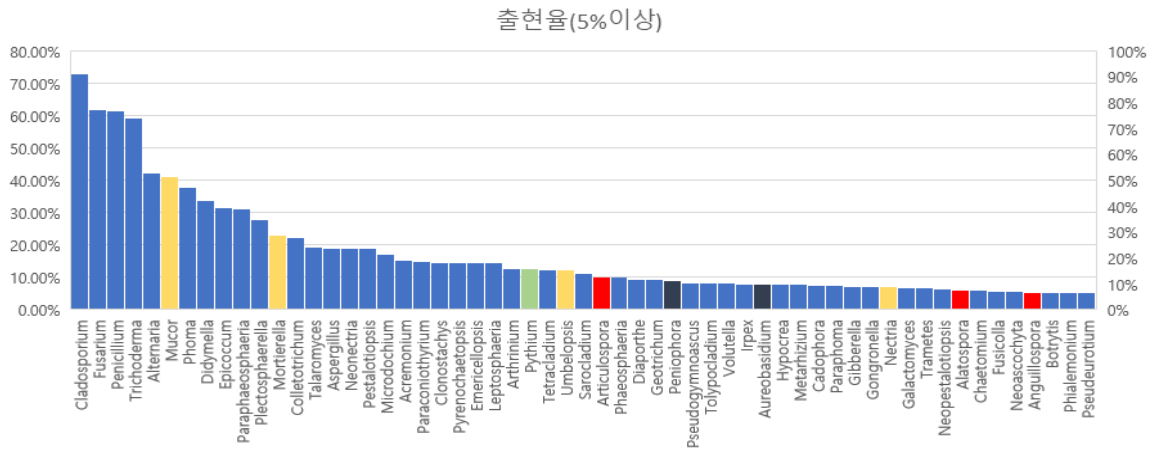

그림 12 속별 지점당 출현율(appearance rate)

Ⅳ. 결론

1. 결론

본 연구는 담수균류자원 다양성을 확보하기 영산강 및 섬진강 수계를 중심으로 지천, 본류, 기수역 등과 특이서식지(탄광 지역)를 조사하고, 담수 환경시료로부터 균류자원을 순수 분리하였다. 그 결과, 총 3,554 균주가 분리되었으며 이들은 각각 6개 문, 14개 강, 45개 목, 115개 과, 261개 속에 속하는 것으로 밝혀졌다. 또한 순수 분리한 균을 대상으로 총 4,000점의 표본(배양체, 건조표본)을 확보하고, 이에 대한 유전자정보를 확보하였다. 본 연구를 통해 발굴한 균류자원 중에는 미기록종 44종과 신종(후보) 2종 등의 신규발굴 자원이 다수 포함되어 있다. 본 연구에서 발굴한 신규 발굴자원에는 이전 연구에서 효소활성 또는 항균 활성을 보이는 등 유용성을 보인 균류가 많아 향후 후속연구를 통해 바이오산업 후보소재로 발전할 수 있는 잠재력이 큰 것으로 보인다.

담수균류자원 조사발굴은 생물다양성 보전과 미래먹거리인 미생물소재 발굴을 위해 필수적인 연구사업이다. 이 연구에서 확보된 자원이 여러 다른 과제와 연계하여 효율적으로 활용되고, 궁극적으로 자원의 순환을 높일 수 있도록 꾸준히 내부기탁을 진행하고 있다. 당해연도에는 신종미기록종을 포함한 300주의 배양체에 대해 자원은행에 내부기탁 절차를 완료하였다.

종 발굴 효율을 높이고 확보자원의 다양성을 증대하기 위해 전년도에 이어 집중발굴분류군인 호상균류의 배양방법을 연구하고, 낫균속 기확보자원에 대한 재분류를 실시하였다. 이에 따라, 낫균속 200균주의 재동정이 완료되었으며, 다양한 유전자 바코드 정보를 확보하고, 분자계통분석을 통해 9종의 미기록종을 발굴하여, 올해의 종 발굴 성과목표에 기여하였다.

조사발굴 사업의 연차가 누적됨에 따라 조사발굴 현황 분석 및 이를 기반으로 하는 중장기 계획 수립의 시급성이 높아졌다. 이에 본 연구에서는 이전의 조사발굴 연구의 현황을 분석하고, 지점과 수계별 다양성을 분석하였다. 또한 담수출현율이 높은 균류와 시료형태에 따라 특이적으로 발견되는 균류에 대해 기초서식정보를 확보할 수 있었다. 이와 같은 이전연구결과 분석을 통해 현재까지 진행된 연구사업의 문제점을 발견, 개선방안을 강구하였다. 이 자료를 바탕으로 중장기 담수균류 조사발굴 계획을 수립하였으며, 차년도에는 이에 따라 연구사업을 수행할 예정이다.

2. 활용방안

본 연구에서 발굴된 신종(후보)·미기록종은 국가생물종 목록 등재를 통해 국가생물주권 확립에 기여할 수 있다. 배양체 내부기탁을 통해 자원은행에 보존된 균주는 작물보호제 개발, 대체소재 연구, 인공화합물 저감소재 발굴 등 실용화연구에 연계하여 활용도를 제고할 수 있다. 담수균류의 DNA 바코드 정보는 향후 국내 균류연구진들이 공유가능한 신뢰도 높은 데이터베이스를 구축할 때 다방면에서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

Ⅴ. 참고문헌

관계부처 합동. (2018). 제4차 국가생물다양성전략. 환경부, 대한민국.

관계부처 합동. (2020). 2020년도 국가생물다양성전략 시행계획. 환경부, 대한민국.

환경부 국립생물자원관. (2021). 2020 국가생물종목록

An, C., Ma, S., Shi, X., Xue, W., Liu, C., & Ding, H. (2020). Isolation, diversity, and antimicrobial activity of fungal endophytes from *Rohdea chinensis* (Baker) N.Tanaka (synonym Tupistra chinensis Baker) of Qinling Mountains, China. PeerJ, 8, e9342.

Crous, P. W., Schumacher, R. K., Wingfield, M. J., Akulov, A., Denman, S., Roux, J., Braun, U., Burgess, T. I., Carnegie, A. J., Váczy, K. Z., Guatimosim, E., Schwartsburd, P. B., Barreto, R. W., Hernández-Restrepo, M., Lombard, L., & Groenewald, J. Z. (2018). New and Interesting Fungi. 1. Fungal systematics and evolution, 1, 169 - 216.

Gessner, M.O., Gulis, V., Kuehn, K.A., Chauvet, E., Suberkropp, K. (2007) Fungal decomposers of plant litter in aquatic ecosystems. In: Kubieck, C.P., Druzhinina, I.S. (eds.) The Mycota, Volume IV. Environmental and Microbial Relationships. Second Edition. Springer, Berlin, Germany. pp. 301-324.

Gulis, V., Marvanová, L., Descals, E. (2005) An illustrated key to the common temperate species of aquatic hyphomycetes. In: Graça, M.A.S., Bärlocher, F., Gessner, M.O. (eds.) Methods to Study Litter Decomposition: A Practical Guide. Springer, Dordrecht, Netherlands. pp. 153-167.

Herrera CS, Rossman AY, Samuels GJ, Chaverri P (2013) *Pseudocosmospora*, a new genus to accommodate Cosmospora vilior and related species. Mycologia 105, 1287-1305.

James TY, Letcher PM, Longcore JE, Mozley-Standridge SE, Porter D, Powell MJ, Griffith GW, Vilgalys R. 2006. A molecular phylogeny of the flagellated fungi (Chytridiomycota) and description of a new phylum (Blastocladiomycota). Mycologia, 98(6), 860-871.

Jankowiak, R., Ciach, M.A., Bilański, P., & Linnakoski, R. (2019). Diversity of wood-inhabiting fungi in woodpecker nest cavities in southern Poland. Acta Mycologica.

54(1), 1126

Lombard, L, Sandoval-Denis, M, Lamprecht, SC, Crous, PW. (2019). Epitypification of *Fusarium oxysporum* - clearing the taxonomic chaos. Persoonia. 43:1-47

Simmons DR, James TY, Meyer AF, Longcore JE. 2009. Lobulomycetales, a new order in the Chytridiomycota. Mycological research, 113(4), 450-460.

Yilmaz, N., Sandoval-Denis, M., Lombard, L., Visagie1, C.M., Wingfield1, B.D., Crous P.W. (2021). Redefining species limits in the *Fusarium fujikuroi* species complex. Persoonia. 46:129-162

Visagie, C. M., Yilmaz, N., Frisvad, J. C., Houbraken, J., Seifert, K. A., Samson, R. A., & Jacobs, K. (2015). Five new Talaromyces species with ampulliform-like phialides and globose rough walled conidia resembling T. verruculosus. Mycoscience. 56(5):486-502.

Wang, MM, Chen, Q, Diao, YZ, Duan, WJ, Cai, L. (2019). *Fusarium incarnatum-equiseti* complex from China. Persoonia. 43:70-89

WWF (2018) Living Planet Report 2018: Aiming higher. Grooten, M. and Almond, R.E.A. (eds.) WWF, Gland, Switzerland.

Xia, JW, Sandoval-Denis, M, Crous, PW, Zhang, XG, Lombard, L. (2019). Numbers to names - reappraisal of the *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex. Persoonia. 43:186-221