

## RESEARCH NOTE

## 덕유산 구상나무(*Abies koreana*) 근권에서 분리한 국내 미기록 균류 3종 보고

김민정<sup>1</sup>, 유영현<sup>2</sup>, 홍지원<sup>3</sup>, 박종명<sup>4</sup>, 백창기<sup>1\*</sup><sup>1</sup>단국대학교 바이오융합대학 환경원예·조경학부 환경원예학과, <sup>2</sup>국립생물자원관 생물종다양성연구과, <sup>3</sup>경북대학교 자연과학대학 생물학과, <sup>4</sup>인천상수도사업본부 맑은물연구소

## Three Unreported Fungi Isolated from the Rhizosphere of *Abies koreana* on Mount Deogyu

Minjeong Kim<sup>1</sup>, Young-Hyun You<sup>2</sup>, Ji Won Hong<sup>3</sup>, Jong Myong Park<sup>4</sup>, and Chang-Gi Back<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Department of Environmental Horticulture, Dankook University, Cheonan, 31116, Korea<sup>2</sup>Species Diversity Research Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, Korea<sup>3</sup>Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea<sup>4</sup>Public Health Research Officer, Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarters, Incheon 21316, Korea\*Corresponding author: [plantdoctor@dankook.ac.kr](mailto:plantdoctor@dankook.ac.kr)

### ABSTRACT

Korean fir (*Abies koreana*), an endangered alpine conifer native to Korea, has recently experienced severe dieback on Mount Deogyu owing to climate change-induced thermal and water stress. As rhizosphere microbial communities play a vital role in tree health and stress resistance, this study aimed to isolate and identify previously unrecorded fungal species from the rhizosphere of *A. koreana*. Soil samples were collected from natural stands on Mt. Deogyu, and fungi were isolated using the dilution plating method on Potato Dextrose Agar medium. The isolates were identified based on morphological characteristics and phylogenetic analyses of internal transcribed spacer regions and large-subunit ribosomal DNA sequences. Three fungal species—*Mucor fusiformisporus*, *Mortierella turficola*, and *Entomortierella sugadairana*—were identified for the first time in Korea. These species are saprotrophic members of Mucoromycota and Mortierellomycota, which participate in organic matter decomposition, phosphorus solubilization, and nutrient cycling in cold forest soils. Members of the Mortierellaceae family are plant growth-promoting fungi that maintain high enzymatic activity in subalpine environments, contributing to nutrient availability through mechanisms such as phosphate solubilization and siderophore production. This study provides baseline taxonomic information on the fungal diversity associated with *A. koreana*. Furthermore, the identification of cold-adapted and phosphorus-solubilizing fungi suggests their potential as valuable microbial resources for future conservation and restoration strategies for this endangered species.

**Keywords:** *Abies koreana*, *Entomortierella*, *Mortierella*, *Mucor*, Rhizosphere OPEN ACCESS

pISSN : 0253-651X

eISSN : 2383-5249

Kor. J. Mycol. 2026 March, 54(1):65–76  
<https://doi.org/10.4489/kjm.2026.54.1.7>**Received:** December 19, 2025**Revised:** March 24, 2026**Accepted:** March 30, 2026

© 2026 THE KOREAN SOCIETY OF MYCOLOGY.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구상나무(*Abies koreana*)는 한국에서 자생하는 상록침엽수로, 주로 해발 1,000–1,900 m의 아고산대에 분포하며, 한라산과 지리산, 덕유산 등이 대표적인 서식지로 알려져 있다[1,2]. 1980년대 이후 지난 40여 년간 구상나무의 집단 고사 현상이 보고되고 있으며, 2011년에는 국제자연보호연맹(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)이 구상나무를 멸종위기종(Endangered, EN)으로 분류하였다[2–4]. 이러한 쇠퇴현상은 이상 기후로 인한 기온 상승이 구상나무의 생장에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으며[5], 쇠퇴하는 개체들은 건강한 개체들에 비해 광합성 능력과 수분이용 효율이 저하되는 등, 수분 스트레스와 관련된 생리적 문제를 겪는 것으로 확인되었다[6].

한편, 근권(rhizosphere)은 식물 뿌리를 둘러싼 수 밀리미터의 토양으로, 복잡한 생물학적·생태학적 과정이 일어나는 곳이다[7]. 특히 외생균근균(ectomycorrhizal fungi)은 기주 식물의 세포 밖에서만 존재하는 균으로, 이러한 공생균류는 식물의 양분 흡수, 수분 이용 효율 증대, 환경 스트레스 저항성 향상 등의 핵심적인 역할을 수행한다[8,9].

최근 Jeong 등은 한라산 구상나무 자생지에서 건강한 나무와 고사한 나무의 토양 진균 군집을 비교 분석한 결과, 고사한 구상나무 토양에서는 자낭균문(Ascomycota)의 비율이 높게 나온 반면, 담자균문(Basidiomycota)의 풍부도는 급격히 감소하는 양상을 보였다. 특히 외생균근균인 *Russula*, *Sebacina*, *Phenoliferia* 속은 건강한 구상나무 토양에서만 통계적으로 유의한 풍부도를 보였으며, 고사한 구상나무 토양에서는 이들의 풍부도가 현저히 낮게 나타났다[2]. 또한, You 등은 한라산, 지리산, 덕유산의 구상나무 자생지에서 생존 개체와 고사 개체의 근권 및 근면(rhizoplane)의 진균 군집을 분석한 결과, *Clavulina*, *Beauveria*, *Tomentella* 속이 건강한 구상나무에서 외생균근 형성과 병해충 방제를 통해 구상나무의 생장 및 생존에 기여한다는 가능성을 제시하였다[10]. 이는 외생균근균이 구상나무의 건강과 관련이 있음을 시사하며, 실제로 한라산 토양을 분석한 선행 연구에서도 *Clavulina* 속이 건강한 구상나무 개체의 토양에서는 63%의 우점도를 보였으나 고사 개체의 토양에서는 10%로 급격히 감소하였다[11]. Ko 등은 지리산 세석대피소 인근의 구상나무 자생지, 재배지, 고사지의 근권 진균 군집을 계절별로 비교 분석하였다. 그 결과, 자생지 근권에서는 Agaricomycetes강에 속하는 외생균근균이 사계절 내내 약 70%에 달하는 상대적으로 높은 풍부도를 유지하며 안정적인 군집 구조를 보인 반면, 재배지와 고사지에서는 이들의 우점도가 현저히 낮았고 계절에 따른 변동성도 더 크게 나타났다[12]. 이러한 연구 결과들은 외생균근균 군집이 구상나무의 건강 상태 및 생존에 핵심적인 역할을 수행함을 시사한다. 특히, 구상나무 자생지에서 안정적으로 형성된 외생균근균 네트워크는 구상나무가 극한 환경에서도 생존할 수 있도록 돕는 중요한 기반이 될 수 있다[2,10,12].

근권에는 외생균근균뿐만 아니라 사상균, 효모, 내생균, 병원균 등 다양한 진균이 공존하며, 이들은 뿌리 삼출물(root exudates)을 탄소원으로 이용하면서 토양 미생물 군집 구조와 영양분 순환을 조절한다[7,8]. 일반적인 근권 진균은 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 리그닌 등 복잡한 유기물을 분해하여 탄소와 질소를 무기화하고, 일부 종은 식물호르몬(IAA) 생산, siderophore 생성, 병원균 길항 등 다양한 기작을 통해 기주 식물의 생장과 스트레스 내성을 촉진하는 것으로 보고되었다[8,13–16]. 특히 본 연구에서 보고한 *Mucor* 및 *Mortierellaceae* 계통의 진균들은 토양, 낙엽, 동물 배설물 등 다양한 기질에서 발견되는 대표적인 부생균으로, 유기물 분해 과정의 초기 단계에서 빠

르게 균사를 확장하여 선구 분해자로 기능하는 것으로 알려져 있다[17–19]. 이 가운데 *Mortierella* 및 *Entomortierella* 속 진균은 인산 가용화, IAA와 같은 식물호르몬 생산, siderophore 생성 등을 통해 식물의 인 흡수와 성장을 촉진하는 식물생장촉진균류(plant growth-promoting fungi)로도 주목 받고 있으며[13–16,20], 적설기와 저온 환경에서도 높은 성장률과 효소 활성을 유지하여 고산대설원 토양의 탄소 및 영양분 순환에 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 보고되었다[20–24].

이에 본 연구에서는 구상나무 자생지의 근권 토양으로부터 진균을 분리하고 형태학적 및 분자계통학적 분석을 통해 국내 미기록종 3종을 동정하였으며, 이들의 분류학적 특성, 형태적 특징, 계통학적 위치를 상세히 보고하고자 한다. 본 연구 결과는 구상나무 근권의 진균 다양성에 대한 기초 분류 정보를 제공함과 동시에, 향후 미기록종 진균의 생태적 기능 규명 및 구상나무 보전·복원 전략 수립을 위한 미생물 자원 확보에 기여할 것으로 기대된다.

2024년도에 덕유산에 있는 구상나무 근권에서 채취한 토양 시료를 사용하여 단계희석도말법으로 진균을 분리하였다. 토양 시료 2 g과 멸균수 20 mL를 넣고 볼텍스 믹서(Vortex Mixer VMI, LABTron, Seoul, Korea)로 균일하게 혼합하였다. 현탁액은 멸균수를 이용하여  $10^{-3}$  g/mL 농도가 되도록 단계적으로 희석하였다. 최종으로 희석된 용액은 ampicillin( $100 \mu\text{g/mL}$ )이 첨가된 potato dextrose agar (PDA, BD Difco™, America, New Jersey) 배지에  $50 \mu\text{L}$  씩 도말평판법을 통해 접종하였다. 접종된 배지를  $25^\circ\text{C}$  배양기에서 3–4일간 배양한 후, 형성된 진균 균총을 PDA배지에 순수 분리하여  $25^\circ\text{C}$  배양기에서 7일간 배양하였다. 배양된 진균의 미세구조는 광학현미경(Eclipse TE2000 Inverted Microscope, Nikon, Tokyo, Japan)을 사용하여 관찰하였다.

분리 균주의 분자생물학적 동정을 위해서 cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) 추출법을 이용하여 genomic DNA를 추출하였으며 internal transcribed spacer (ITS) regions 및 large subunit ribosomal DNA (LSU) 프라이머[25–27]를 이용하여 PCR을 진행하였다. 이후 National Center for Biotechnology Information (NCBI)에 있는 Basic Local Alignment Search Tool (BLAST)를 통해 NCBI 데이터베이스에 등록되어 있는 균류들과 상동성을 비교하였다. 계통수는 MEGA X[28] 프로그램을 이용하여 작성하였다.

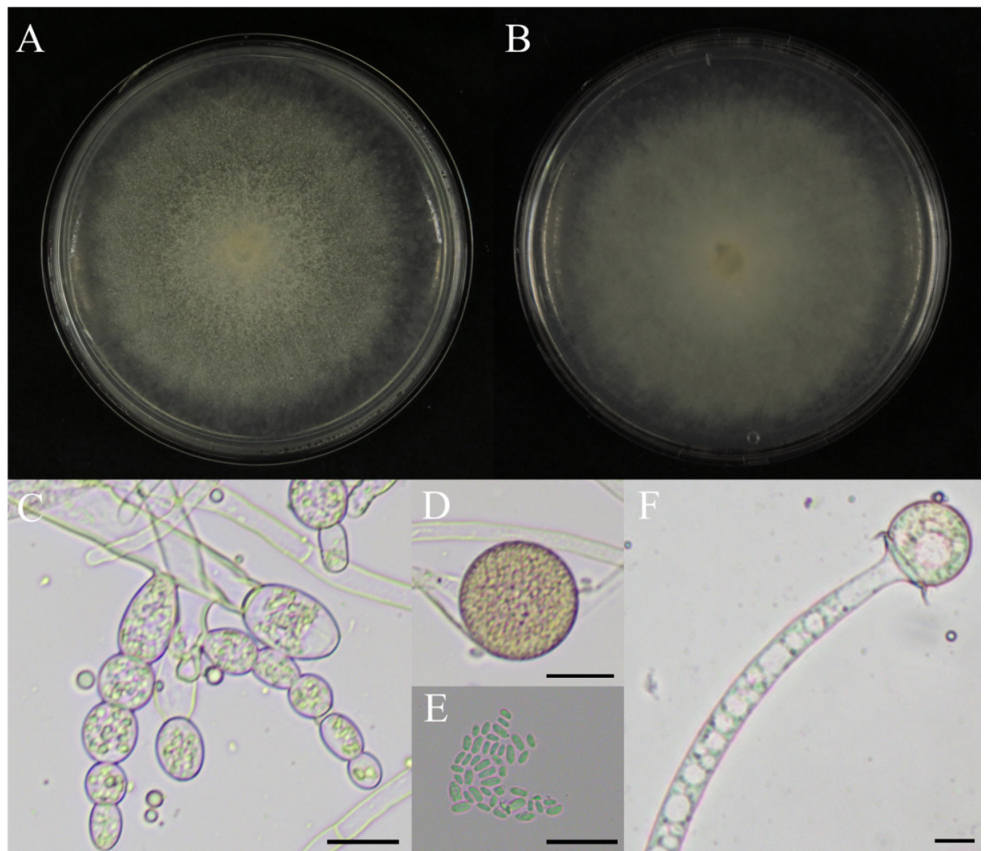
### ***Mucor fusiformisporus* H. Zhao, Y.C. Dai, Yuan Yuan & X.Y. Liu, Fungal Diversity 123: 72 (2023) (FN570931) (Fig. 1 & 2)**

**형태학적 특성:** PDA 배지에서  $25^\circ\text{C}$ 에서 7일간 배양하였을 때, 균총은 80–90 mm로 빠르게 성장하였다. 초기에는 흰색의 공중균사(aerial hyphae)가 풍부하게 성장하였으며, 점차 담황색(Marguerite Yellow)으로 변했다. 어린 균사에는 격벽이 없으나 성숙해지면서 격벽이 형성되었다. 포자낭포자(Sporangiospores)는 방추형(fusiform)이며, 무색 또는 거의 무색이고(hyaline or subhyaline) 표면은 매끄럽다. 포자 크기는  $3.5\text{--}6 \mu\text{m} \times 1.4\text{--}3.7 \mu\text{m}$ 였다(Fig. 1).

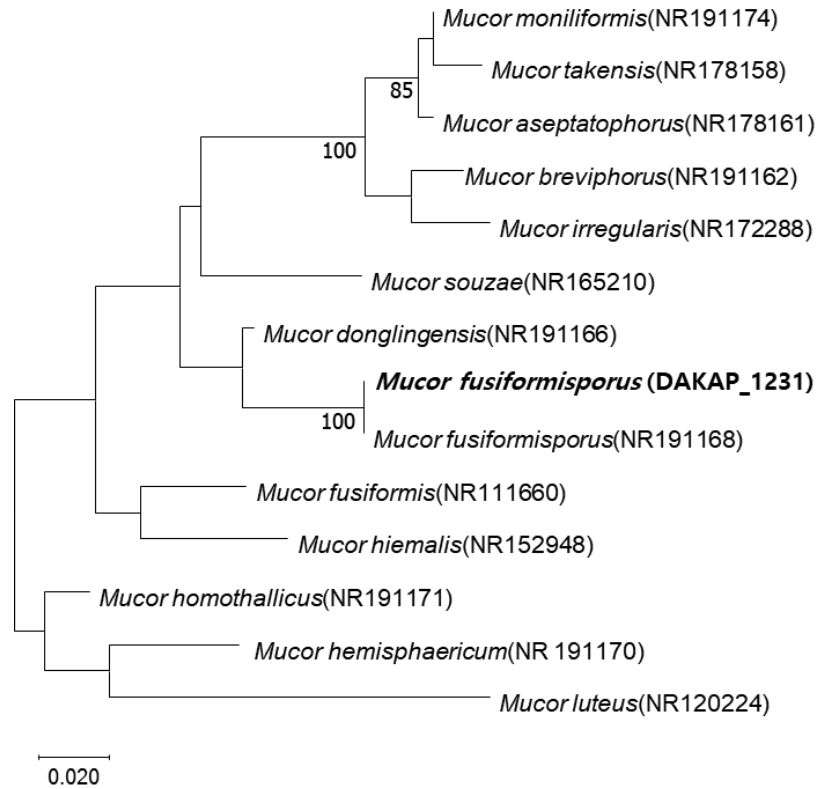
**표본 정보:** 전라북도 무주군 설천면 삼공리 덕유산( $35^\circ51'13''\text{N}$   $127^\circ44'48''\text{E}$ ), NIBRFGC000515082, ITS: PX517491, LSU: PX517495

**비고:** DAKAP\_1231 균주는 ITS 영역의 염기서열을 이용하여 계통 분석을 수행한 결과, *Mucor fusiformisporus* NR191168 균주와 계통수 상에서 동일한 그룹(clade)에 속하는 것으로 확인되어, 최종적으로 *Mucor fusiformisporus*로 동정되었다(Fig. 2).

**고찰:** *Mucor fusiformisporus*가 속한 *Mucor* 속은 토양, 동물 배설물, 낙엽, 부식질 등 매우 다양한 기질에서 발견되는 편재성(ubiquitous) 진균이다[17,19]. 이들은 PDA와 같은 배지에서 매우 빠른 균사 성장 속도를 보이며, 초기 백색의 솜털 같은 균층은 포자낭이 발달하면서 점차 황색 및 암회색으로 변하는 특징을 갖는다[18]. *Mucor* 속의 가장 중요한 생태적 기능은 유기물 분해이다. 이들은 빠른 성장 속도를 바탕으로 유기물 분해 과정의 선구종(pioneer species)으로 작용하며, 특히 분변 분해(dung decomposition)의 초기 단계를 담당하는 것으로 알려져 있다[17]. Ding 등은 *Mucor* 속 균주들이 복잡한 형태의 유기화합물을 단순한 형태로 분해하는 능력을 평가하였으며, 이러한 분해 활동은 탄소와 질소의 순환을 촉진하고 다른 분해자들이 후속적으로 유기물을 이용할 수 있도록 환경을 조성한다[18]. *Mucor* 속은 대부분 25°C에서 최적 성장을 보이는 중온성(mesophilic)이나, 4-30°C의 넓은 온도 범위에서 활성을 유지하며 일부 종은 37-42°C의 고온에서도 생장이 가능하다[18]. 이러한 넓은 온도 적응성은 계절적 변동이 큰 온대 산림 환경에서 중요한 생존 전략이 될 수 있다. *M. fusiformisporus*가 구상나무가 생육하는 아고산대 근권에서 분리되었다는 사실은, 이 종이 침엽수 근권 환경에 적응되어 있음을 시사한다. 근권은 뿌리 삼출물로 인해 탄소원이 풍부한 'hot spot'이므로, 이러한 환경에서 유기산, 당류 등을 빠르게 이용하는 1차 분해자로서 기능할 것으로 추정된다[17].



**Fig. 1.** Morphology of *Mucor fusiformisporus*. A, B: Colonies on potato dextrose agar; C: Chlamydospores; D: Sporangia; E: Sporangiophores; F: Columella. Scale bar, C-E: 20 µm; F: 10 µm.



**Fig. 2.** Neighbor-joining phylogenetic tree of the genus *Mucor* based on sequences of the internal transcribed spacer region of rDNA. The numbers at the nodes represent bootstrap values (%) from 1,000 replications (values below 80% were removed). The fungal strain isolated in this study, *Mucor fusiformisporus* DAKAP\_1231, is indicated in bold. The scale bar represents a genetic distance of 0.020.

### ***Mortierella turficola* Gams W, and H, Persoonia 9: 141–156 (1976) (Fig. 3 & 4)**

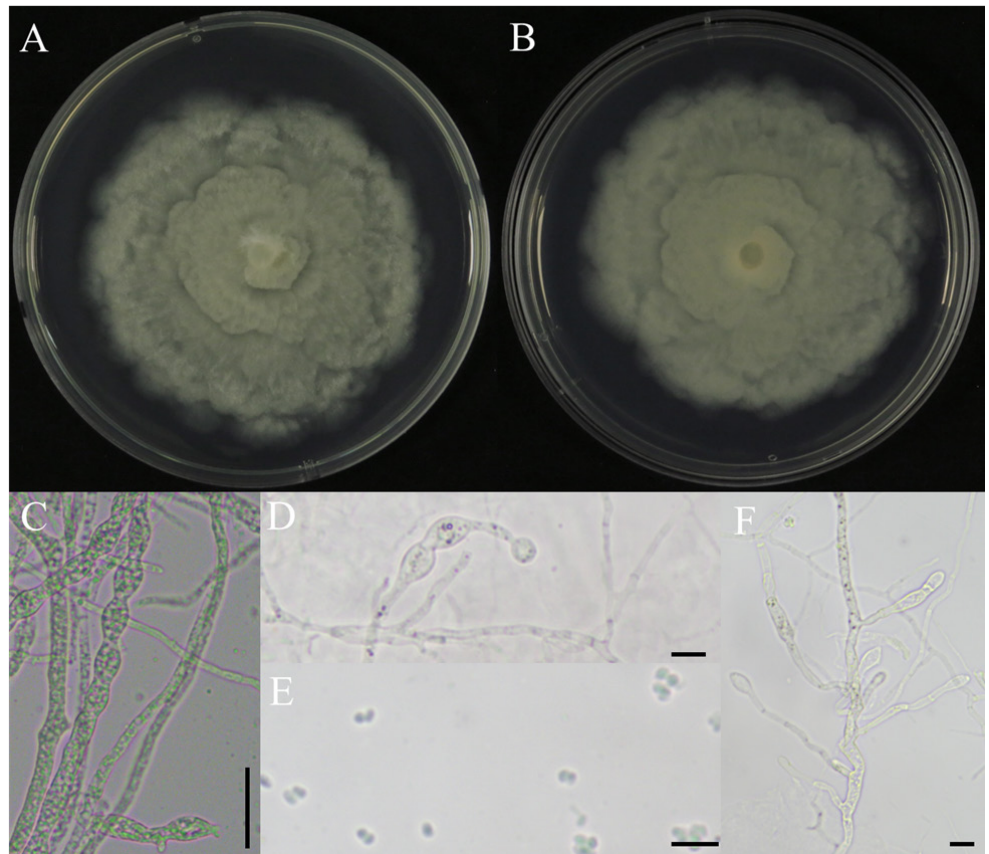
**형태학적 특성:** PDA 배지에서 25°C에서 7일간 배양하였을 때, 균층은 70–80 mm로 빠른 성장 속도를 보였다. 초기에는 흰색을 띠다가 점차 담황색으로 변했으며, 공중 균사는 다소 적게 형성되었다. 포자낭포자(Sporangiospores)는 구형(globose)이고 매끄러운 표면을 가지고 있으며, 직경은 2.4–3 µm였다. 후막포자(Chlamydospores)는 관찰되지 않았다(Fig. 3).

**표본 정보:** 전라북도 무주군 설천면 삼공리 덕유산(35°51'13"N 127°44'48"E), NIBRFGC000515083, ITS: PX517492, LSU: PX517494

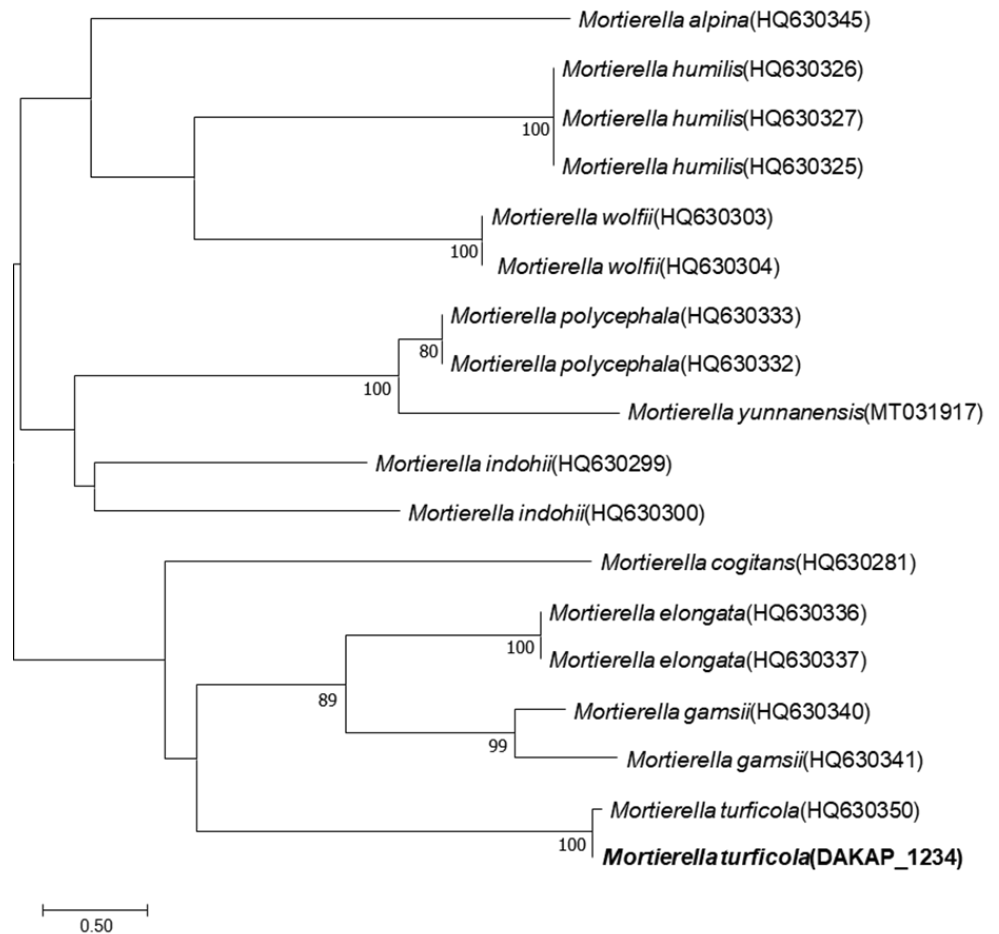
**비고:** DAKAP\_1234 균주는 LSU rDNA 영역의 염기서열을 이용하여 계통 분석을 수행한 결과, *Mortierella turficola* 균주(HQ630350)와 계통수 상에서 동일한 그룹에 속하는 것으로 확인되어, 최종적으로 *Mortierella turficola*로 동정되었다(Fig. 4).

**고찰:** *Mortierella* 속의 가장 중요한 생태적 기능 중 하나는 인산 가용화(phosphorus solubilization)이다[19]. 인(P)은 식물 생장의 필수 다량원소이지만, 토양 내 대부분은 불용성 무기인[Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, FePO<sub>4</sub> 등] 또는 유기인 형태로 존재하여 식물이 직접 흡수할 수 없으나 인산 가용화 미생물

(Phosphate-Solubilizing Microorganisms, PSMs)은 이러한 불용성 인을 가용성 형태로 전환하여 식물이 인을 흡수할 수 있도록 도와준다[13,19]. Sang 등의 연구에 따르면, *M. turficola*는 유기산 분비를 통해 PKO 배지에서 7종의 유기산(숙신산, 젖산, 아세트산, 옥살산, 타르타르산, 말산, 시트르산 등)을 분비하며, 이 중 숙신산, 젖산, 아세트산의 혼합물이 주요 인 용해 역할을 담당하는 것으로 추정된다고 보고되었다. 이 유기산들은 프로톤화(protonation)와 킬레이트화(chelation) 기작을 통해 인산염을 용해시킨다[19]. *M. turficola*의 이러한 능력은 실질적으로 식물 성장 촉진을 도와주며, *M. capitata*를 옥수수에 접종한 결과 바이오매스를 약 35% 증가시키고 토양 유효인 함량을 약 28% 향상시키고, 인회석(rock phosphate) 용해를 통해 식물의 인 흡수를 증가시킨 것을 확인하였다[14,15]. 또한 *Mortierella* 속은 인 영양 개선 외에도 IAA 등 식물 호르몬 생산, 근권 세균 군집 재구성, 그리고 Siderophore 생산을 통한 철( $Fe^{3+}$ ) 획득 능력 등 다양한 성장 촉진 기작을 보유하고 있다[13,14,16]. *Mortierella* 속은 저온에 잘 적응하는 특징 또한 가지고 있으며, 적설기에도 식물 뿌리 주변에서 상당량의 바이오매스를 형성하고 4-8°C에서 효소 활성을 활발하게 유지한다[20,21]. 이러한 저온 적응성은 세포막 불포화지방산 함량 증가, 저온 활성 효소 및 동해방지 단백질 생산 등의 기작에 기인하며[20], 고산대 환경에서 *Mortierella*가 겨울철에도 유기물 분해와 영양분 순환을 지속하는 핵심 미생물로 기능하게 한다[21].



**Fig. 3.** Morphology of *Mortierella turficola*. A, B: Colonies on potato dextrose agar; C: Vegetative hyphae; D: Sporangia; E: Sporangiophores; F: Columella. Scale bar, C, D, F: 20  $\mu$ m; E: 10  $\mu$ m.



**Fig. 4.** Neighbor-joining phylogenetic tree of the genus *Mortierella* based on sequences of the internal transcribed spacer region of rDNA. The numbers at the nodes represent bootstrap values (%) from 1,000 replications (values below 80% were removed). The fungal strain isolated in this study, *Mortierella turficola* DAKAP\_1234, is indicated in bold. The scale bar represents a genetic distance of 0.50.

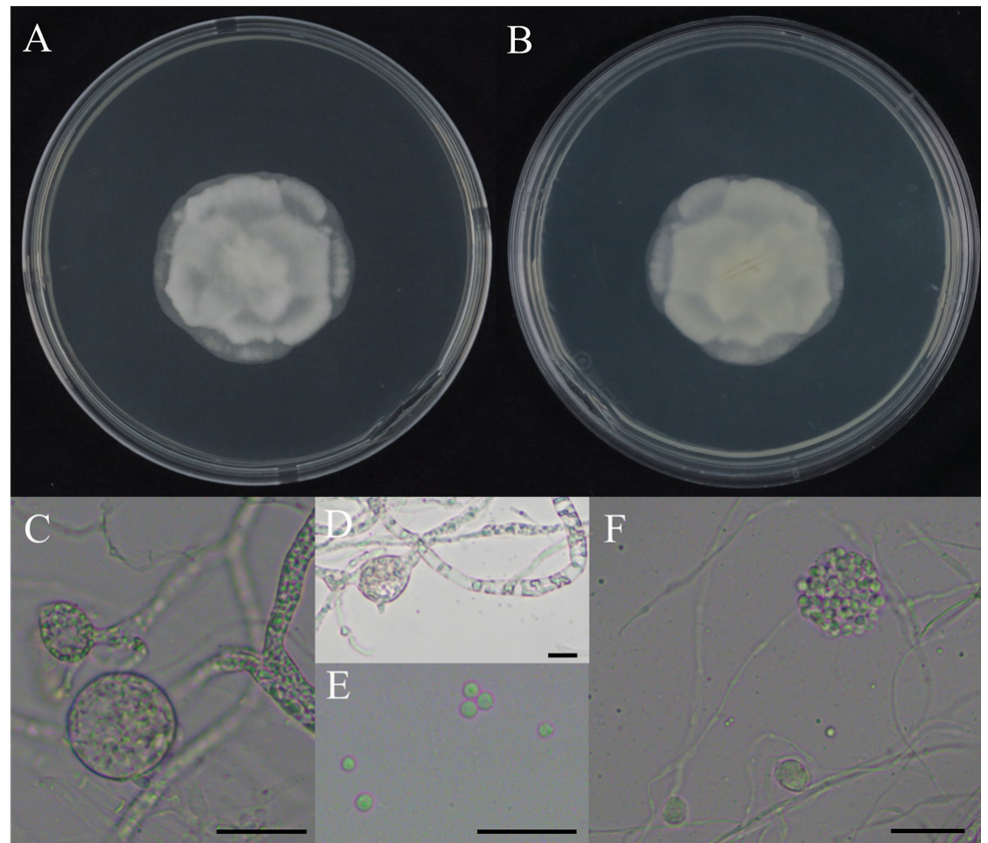
### ***Entomortierella sugadairana* Y. Takash., Degawa & K. Narisawa, Mycoscience 59: 201–204 (2018) (MB 822148) (Fig. 5 & 6)**

**형태학적 특성:** PDA 배지에서 25°C에서 7일간 배양하였을 때, 균총은 40–45 mm로 중간 속도로 성장하였다. 흰색의 솜털 같은 공중균사가 방사형으로 퍼지며 자랐다. 포자낭은 포자낭병의 끝에 구형(globose)으로 형성되었다. 포자낭포자는 구형 또는 아구형(subglobose)이며, 무색이고 표면은 매끄럽다. 포자 직경은 2.1–3.7  $\mu\text{m}$ 였다(Fig. 5).

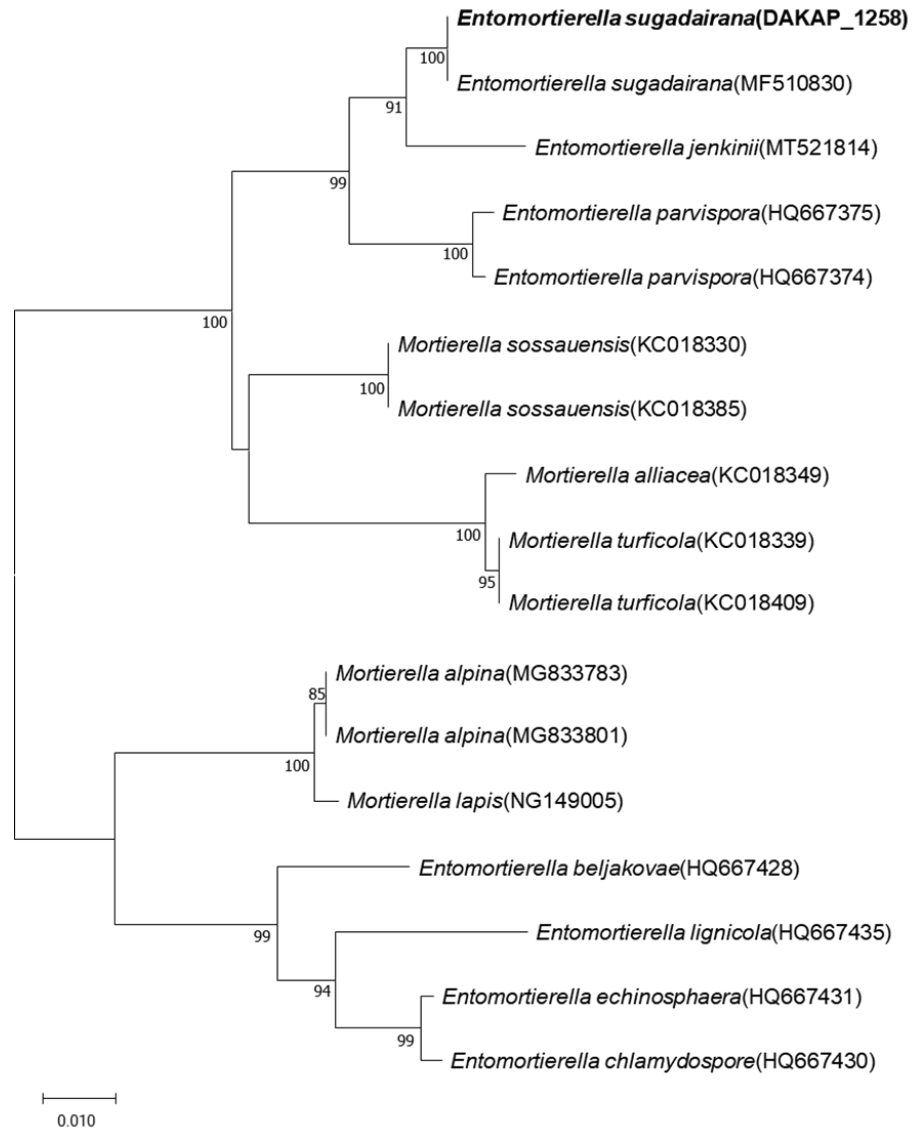
**표본 정보:** 전라북도 무주군 설천면 삼공리 덕유산(35°51'13"N 127°44'48"E), ITS: PX517490, LSU: PX517493

**비고:** DAKAP\_1258 균주는 LSU 영역의 염기서열을 이용하여 계통 분석을 수행한 결과, *Entomortierella sugadairana*의 균주(MF510830)와 계통수 상에서 동일한 그룹에 속하는 것으로 확인되어, 최종적으로 *Entomortierella sugadairana*로 동정되었다(Fig. 6).

**고찰:** *Entomortierella sugadairana*의 특징은 저온 적응성과 계절에 무관하게 분포한다는 것으로, 이 종은 16°C에서 최적의 생장을 보이며 4-25°C의 넓은 온도 범위에서도 생장이 가능하나, 30°C에서는 생장하지 않는 저온성(psychrotolerant) 진균의 특성을 보인다[22]. 이러한 저온 활성은 저온에서도 유지가능한 세포막, 저온 활성 효소, 얼음 결정 억제 물질 생산 등의 생리적 기작에 기인하며, 눈이 쌓인 토양에서도 유기물 분해를 지속하게 하는 원동력이 된다[22,23]. 또한, *E. sugadairana*는 스위스 알프스, 일본, 베트남 등지의 *Pinus*, *Picea*, *Abies* 속이 우점하는 아고산대-고산대 산림 토양에서 반복적으로 분리되었으며, 침엽수림 토양에 특화된 경향을 보였다[26,28,29]. 이러한 환경은 강산성(pH 4.0-5.5), 높은 C/N비율, 그리고 폴리페놀 등 2차 대사산물이 풍부한 침엽수 낙엽층이 두텁게 쌓인 특징을 가지며, 이는 구상나무의 서식 환경과 유사하다[22]. *E. sugadairana*는 이러한 환경에서 부생균으로서 유기물 분해 및 영양분 순환에 기여한다. Takashima 등에 따르면, 너도밤나무의 썩은 가지에서도 *E. sugadairana*가 분리되었으며, 이는 목질 조직을 분해하는 능력이 있음을 시사한다. Mortierellaceae과 균류들은 일반적으로 셀룰라제, 자일라나아제, 리그닌 분해효소(laccase 등)를 생산하여 식물 세포벽 구성 성분을 분해하며, 특히 리그닌 함량이 높아 분해가 느린 침엽수 낙엽을 효율적으로 분해하여 침엽수림 생태계의 영양분 순환에 핵심적인 역할을 하고, 또한 이들은 유기물 분해 과정에서 CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup> 등을 방출하여 식물이 이용 가능한 영양분을 공급하고 토양 비옥도를 증진시킨다[22].



**Fig. 5.** Morphology of *Entomortierella sugadairana*. A, B: colonies on potato dextrose agar; C, D: sporangia; E, F: sporangiospores. Scale bar, C-F: 20  $\mu$ m.



**Fig. 6.** Neighbor-joining phylogenetic tree of the genus *Entomortierella* based on sequences of the large subunit ribosomal DNA region. The numbers at the nodes represent bootstrap values (%) from 1,000 replications (values below 80% were removed). The fungal strain isolated in this study, *Entomortierella sugadairana* DAKAP\_1258, is indicated in bold. The scale bar represents a genetic distance of 0.010.

## 적요

구상나무(*Abies koreana*)는 기후변화로 인해 쇠퇴하고 있는 한국 고유의 아고산대 침엽수이다. 최근 구상나무의 생존과 근권 미생물이 밀접한 관련이 있음이 보고되고 있으나, 진균 자원에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 2024년 덕유산 구상나무 자생지의 근권 토양으로부터 진균을 순수 분리하여 동정하고자 하였다. 채취한 토양 시료를 단계희석도말법을 이용하여 Ampicillin이 첨가된 PDA 배지에 도말하였으며, 분리된 균주들은 형태적 특성 관찰 및 ITS, LSU rDNA 염기서열을 이용한 분자계통학적 분석을 통해 동정하였다. 그 결과, *Mucor fusiformisporus*,

*Mortierella turficola*, *Entomortierella sugadairana* 3종이 국내 미기록종으로 확인되었다. 본 논문은 각 균주의 형태적 특성을 기술하였으며, 계통수 분석을 통해 이들의 분류학적 위치를 확인하였다. 본 연구는 구상나무 근권의 진균 다양성에 대한 기초 분류 정보를 제공하며, 특히 인산 가용화 및 저온 적응성을 가진 균주들은 향후 구상나무 보전 및 복원을 위한 유용 미생물 자원으로서의 잠재력을 가질 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by grants from the National Institute of Biological Resources (NIBR), funded by the Ministry of Environment (MOE) of Korea (Nos. NIBR202505101 and NIBR201701106).

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declared no potential conflicts of interest.

## REFERENCES

1. Ihm BS, Lee JS, Kim MH, Kim HS. A comparative study on the habitat of *Abies koreana* Wilson between Mt. Jiri and Mt. Halla. *Plant Res* 2000;3:138–47.
2. Jeong M, Tagele SB, Kim MJ, Ko SH, Kim KS, Koh JG, Jung DR, Jo Y, Jung Y, Park YJ, et al. The death of Korean fir (*Abies koreana*) affects soil symbiotic fungal microbiome: Preliminary findings. *Front For Glob Change* 2023;5:1114390. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1114390>
3. Kim YS, Chang CS, Kim CS, Gardner M. Korea fir (*Abies koreana*). The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T31244A9618913 [Internet]. Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources; 2011 [cited 2025 Dec 18]. Available from <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T31244A9618913.en>
4. Koo KA, Kim DB. Review forty-year studies of Korean fir (*Abies koreana* Wilson). *Korean J Environ Ecol* 2020;34:358–71. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2020.34.5.358>
5. Koo KA, Park WK, Kong WS. Dendrochronological analysis of *Abies koreana* W. at Mt. Halla, Korea: Effects of climate change on the growths. *Korean J Ecol* 2001;24:281–8.
6. Lim JH, Woo SY, Kwon MJ, Chun JH, Shin JH. Photosynthetic capacity and water use efficiency under different temperature regimes on healthy and declining Korean fir in Mt. Halla. *J Korean Soc For Sci* 2006;95:705–10.
7. Bais HP, Weir TL, Perry LG, Gilroy S, Vivanco JM. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annu Rev Plant Biol* 2006;57:233–66. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
8. Rodriguez RJ, Redman RS, Henson JM. The role of fungal symbioses in the adaptation of plants to high stress environments. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 2004;9:261–72. <https://doi.org/10.1023/B:MITI.0000029922.31110.97>
9. Jeon SM, Ka KH. Cultural characteristics of Korean ectomycorrhizal fungi. *Kor J Mycol* 2015;43:1–12. <https://doi.org/10.4489/KJM.2015.43.1.1>

10. You YH, Park JM, Ku YB, Jeong TY, Lim K, Shin JH, Kim JS, Hong JW. Fungal microbiome of alive and dead Korean fir in its native habitats. *Mycobiology* 2024;52:68–84. <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2307117>
11. Kim CS, Jo JW, Lee H, Kwag YN, Cho SE, Oh SH. Comparison of soil higher fungal communities between dead and living *Abies koreana* in Mt. Halla, the Republic of Korea. *Mycobiology* 2020;48:364–72. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1811193>
12. Ko YM, Gang GH, Jung DH, Kwak YS. Comparative analysis of rhizosphere fungal communities in Korean fir trees. *Mycobiology* 2024;52:287–97. <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2397857>
13. Sang Y, Jin L, Zhu R, Yu XY, Hu S, Wang BT, Ruan HH, Jin FJ, Lee HG. Phosphorus-solubilizing capacity of *Mortierella* species isolated from rhizosphere soil of a poplar plantation. *Microorganisms* 2022;10:2361. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122361>
14. Ozimek E, Hanaka A. *Mortierella* species as the plant growth-promoting fungi present in the agricultural soils. *Agriculture* 2021;11:7. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010007>
15. Li F, Zhang S, Wang Y, Li Y, Li P, Chen L, Jie X, Hu D, Feng B, Yue K, et al. Rare fungus, *Mortierella capitata*, promotes crop growth by stimulating primary metabolisms related genes and reshaping rhizosphere bacterial community. *Soil Biol Biochem* 2020;151:108017. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108017>
16. Osorio Vega NW, Habte M, León Peláez JD. Effectiveness of a rock phosphate solubilizing fungus to increase soil solution phosphate impaired by the soil phosphate sorption capacity. *Rev Fac Nac Agron Medellín* 2015;68:7627–36. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n2.50950>
17. Nguyen TTT, Jeon YJ, Mun HY, Goh J, Chung N, Lee HB. Isolation and characterization of four unrecorded *Mucor* species in Korea. *Mycobiology* 2020;48:29–36. <https://doi.org/10.1080/12298093.2019.1703373>
18. Ding ZY, Ji XY, Li F, Liu WX, Wang S, Zhao H, Liu XY. Unveiling species diversity within early-diverging fungi from China IX: Four new species of *Mucor* (Mucoromycota). *J Fungi* 2025;11:682. <https://doi.org/10.3390/jof11090682>
19. Schipper MAA. On *Mucor mucedo*, *Mucor flavus* and related species. *Stud Mycol* 1975;10:1–33.
20. Hussein KA, Joo JH. Zinc ions affect siderophore production by fungi isolated from the *Panax ginseng* rhizosphere. *J Microbiol Biotechnol* 2019;29:105–13. <https://doi.org/10.4014/jmb.1712.12026>
21. Kuhnert R, Oberkofler I, Peintner U. Fungal growth and biomass development is boosted by plants in snow-covered soil. *Microb Ecol* 2012;64:79–90. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-0001-y>
22. Telagathoti A, Probst M, Peintner U. Habitat, snow-cover and soil pH affect the distribution and diversity of Mortierellaceae species and their associations to bacteria. *Front Microbiol* 2021;12:669784. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.669784>
23. Telagathoti A, Probst M, Mandolini E, Peintner U. Mortierellaceae from subalpine and alpine habitats: New species of *Entomortierella*, *Linnemannia*, *Mortierella*, *Podila* and *Tyroliaella* gen. nov. *Stud Mycol* 2022;103:25–58. <https://doi.org/10.3114/sim.2022.103.02>
24. Wagner L, Stielow B, Hoffmann K, Petkovits T, Papp T, Vágvölgyi C, de Hoog GS, Verkley G, Voigt K. A comprehensive molecular phylogeny of the *Mortierellales* (Mortierellomycotina) based on nuclear ribosomal DNA. *Persoonia* 2013;30:77–93. <https://doi.org/10.3767/003158513x666268>

25. White TJ, Bruns TD, Lee SB, Taylor JW. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ, editors. PCR protocols: A guide to methods and applications. San Diego: Academic Press; 1990. p. 315–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1>
26. Gardes M, Bruns TD. ITS primers with enhanced specificity for basidiomycetes - application to the identification of mycorrhizae and rusts. *Mol Ecol* 1993;2:113–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.1993.tb00005.x>
27. O'Donnell K. *Fusarium* and its near relatives. In: Reynolds DR, Taylor JW, editors. The fungal holomorph: Mitotic, meiotic and pleomorphic speciation in fungal systematics. Wallingford: CAB International; 1993. p. 225–33.
28. Kumar S, Stecher G, Li M, Knyaz C, Tamura K. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Mol Biol Evol* 2018;35:1547–9. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>
29. Takashima Y, Degawa Y, Ohta H, Narisawa K. *Mortierella sugadairana*, a new homothallic species related to the firstly described heterothallic species in the genus. *Mycoscience* 2018;59:200–5. <https://doi.org/10.1016/j.myc.2017.10.004>