



<Short Note>

한반도 기후민감성 상록활엽수 지시종 현생화분의 형태분류학적 특성

이은미^{1,2} · 이상현^{1,3,*} · 조경남² · 김용미³

¹한국지질자원연구원 지질환경연구본부

²강원대학교 지질학과

³과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

요 약

본 연구에서는 한반도 기후민감성 상록활엽수 지시종인 동백나무(*Camellia japonica* Linne)와 구실잣밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai)에 대한 현생화분의 주요 형태분류학적 특징을 데이터베이스화 하였다. 현생화분의 형태학적 연구는 화석화분 감정(identification)의 중요한 핵심요소(criteria)로 활용되며 화석지표종과의 비교 감증을 통해 보다 정확하고 정밀한 감정을 가능하게 한다. 이를 위해 채집된 2종의 현생화분은 글리세린 젤리 봉합제를 사용하여 광학현미경 분석이 수행되었으며(동백나무: 25 개체, 구실잣밤나무: 25 개체), 주로 적도면도(equatorial-oblique view)를 기준으로 $\times 1,000$ 배율에서 화분의 형태(shape, P/E ratio), 크기(size), 표면무늬(ornamentation), 외벽두께(wall thickness), 외벽구조(exine structure), 화분관구(apertures) 등을 측정하였다. 본 연구의 자료와 다른 주변국들의 자료를 비교분석한 결과, 동종일지라도 화분의 크기 및 표면무늬 등은 각 지역마다 다소 상이하게 나타나며, 특히 한반도 남한지역에서 채집한 동백나무와 구실잣밤나무의 화분은 크기면에서 다른 주변국에 비해 크고 넓은 분포범위를 가진다. 따라서 화분의 형태적 특징이 지리적 또는 환경적 요인에 영향을 받는지를 확인할 필요가 있다. 향후 동일한 실험절차에 따라 연구 대상범위를 확대하여 국내 다른 지역에서 추가적인 현생화분의 형태학적인 비교분석을 수행 할 예정이다. 이러한 분석기반 자료는 향후 한반도 남해안 지역의 홀로세 동안 고식생 및 고환경 복원연구에 유용하게 활용될 것으로 생각된다.

주요어: 현생화분, 화분형태학적 특징, 기후민감성 지시종

Eunmi Lee, Sangheon Yi, Kyoung-nam Jo and Yongmi Kim, 2017, Modern pollen morphological taxonomic characteristics of climate-sensitive species in Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 6, p. 833-844

ABSTRACT: An identification of species level in Quaternary pollen analysis is strongly requested to reconstruct more reliable vegetation history. The precise morphological analysis of the modern pollen plays an important role to taxonomically identify the fossil pollen grains. We here have built the database of detailed pollen morphological taxonomic characteristics of climate-sensitive species such as *Camellia japonica* Linne and *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai from the mother plants in the southern part of the Korean Peninsula. We quantitatively analyzed all diagnostic features including shape, size, ornamentation, wall thickness, aperture and so on by Light Microscope (LM) and Scanning Electron Microscope (SEM) observation. 25 pollen grains of each 2 species were morphologically analyzed in the equatorial view. Especially pollen size of *Camellia japonica* Linne and *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai in this study area are a larger and a wider size range than that of these taxa from the neighbor countries. In the future, it will be necessary to carry out the morphological comparative analysis of additional modern pollen in different areas of South Korea under the same experimental procedure to figure out whether pollen morphological features are affected by geographical or environmental factors even in the homogeneous species. The results can help to improve an accuracy of palynomorph analysis enabling the species-level identification. Therefore, more reliable reconstruction of paleo-vegetation change and climate history based on species-level palynomorph analysis could be conducted from the Holocene sediments of the southern part of South Korea.

* Corresponding author: +82-42-868-3135, E-mail: shyi@kigam.re.kr

Key words: modern pollen, pollen morphology, climate-sensitive species

(Eunmi Lee and Sangheon Yi, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Eunmi Lee and Kyoung-nam Jo, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Sangheon Yi and Yongmi Kim, Dept. of Petroleum Resources Technology, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea)

1. 서 론

포자·화분은 내구성이 강한 스포로폴레닌(sporopollenin, $C_{90}H_{142}O_{27}$)이란 복합유기질 껍질로 싸여 있어 퇴적물 내 보존이 용이하다(Brooks and Show, 1978). 따라서 퇴적층으로부터 추출된 이들의 군집 조성은 과거 식생 및 기후복원에 중요한 지시자(proxy)로 활용될 수 있다. 특히, 분류학적 관점에서 하위 종 단위(species-level)의 화분감정(identification)은 고해상도의 자료를 산출하여 보다 신뢰성 있는 과거 식생 및 기후변화 자료를 생산할 수 있다. 이를 위한 현생화분의 형태학적 연구는 화석화분 감정의 중요한 핵심요소(criteria)로 활용되며 화석지표종과의 비교 검증을 통해 보다 정확하고 정밀한 감정을 가능하게 한다.

본 연구에서는 한반도 남해안 지역의 과거 홀로세 동안의 식생 및 기후를 복원하고자 하며 더 나아가 남한지역의 기후변화에 따른 상록활엽수림의 북한계지의 이동을 추적하고자 한다. 이를 위해 한국 지질자원연구원의 주요사업인 “지질 기록체를 활용한 한반도 아열대화 규명 연구: 중기 홀로세 기후-지표환경 특성 평가” 과제의 일환으로 한반도 남해안 동-서 지역을 대상으로 총 81개의 시추코어 퇴적물을 획득하였다. 따라서 본 논문에서 수행한 현생화분의 형태분류학적 분석은 고해상도의 과거 식생 복원을 위한 예비연구로서, 산출된 결과는 향후 남해안 지역의 코어퇴적물의 화석화분 분석에 활용하고자 한다.

우선적으로 남해안 지역에서 개화시기별 현생 난대수목의 화분 총 88종(106개 시료)을 채집하고 이 가운데 기후민감성 상록활엽수 지시종인 동백나무(*Camellia japonica* Linne), 구실갯밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai) 2종에 대한 화분 형태학적 특징(morphological characteristics)을 데이터베이스화 하였다. 국내 화분 형태학적 자료는 그간 몇몇 식물학자들에 의해 만들어진 일부 화분도감(예, Chang and Rim, 1979; Chang, 1986)등에 국한

되며, 이 또한 자세한 형태적 특징 등이 기술되지 않아 정밀한 화석화분 감정에 활용하기에는 큰 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 현생화분의 정밀한 현미경 사진과 중요한 형태분류학적 특징 등에 관한 자료를 정량적으로 제시하고자 한다. 이를 통해 지금까지 난제로 남았던 화석 지표종들에 대하여 종 단위의 현미경 감정이 가능해짐으로써 향후 현미경 분석과 이를 기반으로 한 식생천이와 기후변화 복원의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 남한지역 난온대 상록활엽수의 생육분포 특성

한반도 주요 식생분포는 크게 1) 남해안을 따라 분포하고 있는 난온대 상록활엽수림, 2) 최북단 고산지대 아한대 침엽수림, 3) 1)과 2) 사이 온대 낙엽 활엽수림 3가지로 구분할 수 있다(Yim, 1977b). 연구지역에 속하는 남한지역의 난온대 상록활엽수림은 북위 36° 이남, 동경 $126^{\circ}\sim 128^{\circ}$ 사이에 집중되어 남해안, 제주도, 울릉도 등 주로 도서지역 및 해안인접 사면에 분포하고 있다. 상록활엽수의 종 다양성은 위도·경도가 증가함에 따라 감소하는데(Choi, 2012), 즉 위도가 높아짐에 따라 생육범위가 제한적이며, 생육 가능한 해발고도 또한 낮아진다. 또한 상록활엽수의 종 다양성은 지역에 따라 큰 차이를 보여준다. 내륙에서는 남해안 지역에서 종 다양성이 높은 반면, 도서지역의 경우는 제주도와 울릉도에서 가장 낮은 단위식생이 분포한다(Koo *et al.*, 2001; Choi, 2012).

최근 한반도의 온난화로 인하여 난온대 상록활엽수의 생육분포 범위는 점차 확대되고 있다. 이러한 변화를 정량적으로 예측하고 여러 기후요소들과의 연관성을 밝히기 위한 연구가 각기 다양한 분야에서 활발히 진행되고 있다. Yun *et al.* (2011)은 난온대 상록활엽수림 분포에 영향을 주는 기후요인은 강수보다는 온도이며, 그 중에서도 최한월 최저기온(TMC,

mean minimum temperature of the coldest month)이 주요 요인으로 작용한다고 보고하였다(Park, 2016). 강수요인으로는 동계강수량(PRW, winter precipitation) 보다는 하계강수량(PRS, summer precipitation)이 더 크게 작용하였다. Koo *et al.* (2001)의 연구결과에서도 한국의 경우 식물 생육에 영향을 미칠 만큼 수분부족 현상이 크게 나타나지 않기 때문에 상록활엽수의 분포는 강수량과는 관련이 적다고 보고하였다.

또한, 한반도 내 148개 기상관측소의 자료를 토대로 온량지수(WI, warmth index)와 한랭지수(CI, coldness index)를 계산하여 도시한 결과, 이들이 한반도 내 5개의 주요 산림대 경계와 일치하는 경향을 보였다(Yim, 1968; Yim and Kira, 1975)(그림 1). 이 또한, 온도지수(thermal index)가 한반도 내 자연 식생 분포를 결정하는데 중요한 역할을 하고 있음을

알 수 있게 한다(Yim and Kira, 1975). 특히, 연구지역인 난온대림(warm temperate forest zone)의 북쪽 경계는 한랭지수 $-10^{\circ}\text{C} \cdot \text{month}$ 값의 등치선과 잘 일치하는데, 이는 겨울철의 추위 즉 한랭지수가 한반도의 난온대 상록활엽수종의 지리적 분포 한계지를 구분하는데 밀접한 관계가 있음을 보여준다(Yim, 1977b). 또한, Koo *et al.* (2001)의 연구결과에서도 한반도에 자생하는 남방계 난대성 상록활엽수의 분포는 최한월 기온이 주로 영향을 미치는 것으로 나타나며, 그 기온 조건은 1월 평균기온 -4°C , 1월 평균 최저기온 -9°C 이다.

한반도의 상록활엽수림은 후박나무(*Machilus thunbergii* Siebold & Zucc.), 붉가시나무(*Cyclobalanopsis acuta* Thunb.), 구실잣밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai), 동백나무(*Camellia japonica* Linne)

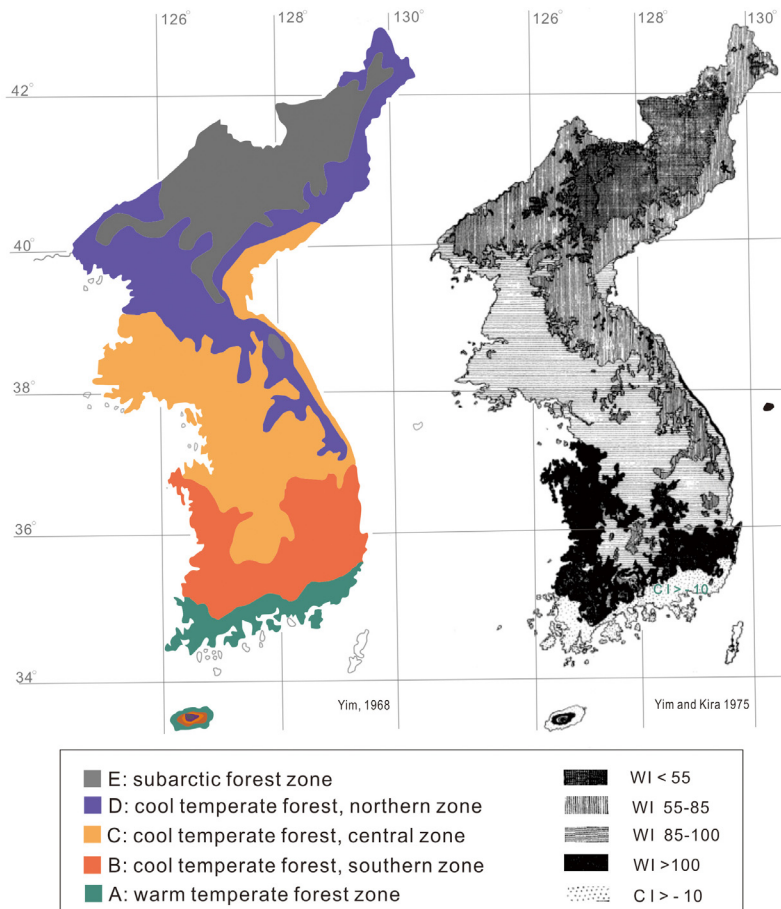


Fig. 1. Modern Vegetation map of Korea showing closely in correspondence with the thermal zones (modified from Yim, 1968; Yim and Kira, 1975).

Table 1. Main plant communities of warm temperate evergreen broad-leaved forest in Korea. DF: Dominant Forest, F: Forest.

Korean major plant in warm temperate evergreen broad-leaved forest (Choi, 2012)	Climate-sensitive Biological Indicator Species* (National Institute of Biological Resources, 2010)	Korean major plant community** (Yang and Shim, 2007)	Warm temperate evergreen broad-leaf species in southern most parts of Korea Peninsula (Yim, 1977a)
<i>Machilus thunbergii</i> D.F.	<i>Machilus thunbergii</i>	<i>Quercus acuta</i> F.	<i>Quercus glauca</i> Thunb., <i>Q. myrsinaefolia</i> Blume
<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> D.F.	<i>Camellia japonica</i>	<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> F.	<i>Q. acuta</i> Thunb., <i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> Nakai
<i>Cyclobalanopsis acuta</i> D.F.	<i>Daphniphyllum macropodum</i>	<i>Camellia japonica</i> F.	<i>Machilus thunbergii</i> Siebold and Zucc., <i>Actinodaphne lancifolia</i> Meissn.
<i>Quercus glauca</i> D.F.	<i>Neolitsea sericea</i>	<i>Machilus thunbergii</i> F.	<i>Neolitsea sericea</i> Koidz., <i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.
<i>Actinodaphne lancifolia</i> D.F.			<i>Ilex integra</i> Thunb, <i>Euonymus fortunei</i> Handel-Mazzetti var. <i>radicans</i> Rehd., <i>Camellia japonica</i> Linne

*Evergreen broad-leaved tree are selected only among 44 plant taxa

**Evergreen broad-leaved forests are selected only among the total 17 major plant communities

등이 우세하게 나타나며, 이는 일본 남서부의 난온대 상록활엽수림과 유사한 식생분포를 보인다(Yim, 1977b). 이러한 상록활엽수림의 온량지수와 한랭지수 값의 범위는 각각 85~180°C·month, 0~10°C·month이며, 북한계지는 한반도 최남단 해안으로 보고된 바 있다(Kira, 1948). 일반적으로 상록활엽수림의 분포기준은 연평균 기온 11~15°C, 한랭지수 -10~-15°C·month, 연평균 강수량 900~1,500 mm로 알려져 있다(Tatsuo, 1976).

2.2 기후민감성 상록활엽수 지시종 선정 및 생육특성

전 세계적으로 상록활엽수림은 동아시아, 호주, 뉴질랜드, 유럽, 북아메리카 및 남아메리카 등 주로 위도 30°~40°의 온난 습윤한 난온대 기후지역에 걸쳐 분포하고 있다(Wang, 1961; Song, 1988). 이 가운데 동북아시아 난온대 지역에 속하는 지역은 한반도 남해안 일대, 일본 큐슈 이남, 중국 남부 동해안 지역으로 주로 동백나무속(*Camellia*), 구실잣밤나무속(*Castanopsis*), 가시나무속(*Cyclobalanopsis*), 돌참나무속(*Lithocarpus*), 녹나무과(Lauraceae) 등이 분포한다(Kira, 1945). 남

북한 전역에 걸쳐 한반도에 자생하는 상록활엽수는 61속 132종이다(Koo, 2001).

한반도 남해안 일대에 주로 분포하고 있는 난온대 상록활엽수림의 주요 식물군락은 표 1과 같다. 대표적인 예로 2010년 국가생물자원관(National Institute of Biological Resources, NIBR)은 기후변화에 민감해 지속적인 조사 관리가 필요한 100종을 국가 기후변화생물지표종(CBIS: Climate-sensitive Biological Indicator Species)으로 선정하였다. 선정기준은 자생식물 33,253종(NIBR, 2008)을 대상으로 학술조건(뚜렷한 지리적인 분포역을 보이는 종, 확실한 분류 및 생태가 잘 알려져 있는 종, 기후변화에 대한 연구 결과가 많은 종)과 경제성/용이성(관찰이 용이한 종, 개체수가 많은 종(집단을 이루는 종), 사회·경제·문화면에서 중요한 종) 등의 기준을 단계별로 점수화한 후 최종 선정하였다. 이 가운데 후박나무가 객관성과 대표성을 가지는 기후변화 생물지표로서 가장 높은 점수를 받았다.

후박나무는 난온대 상록활엽수 중에서 상대적으로 넓은 분포역을 가지며 고위도까지 분포한다(Lee

Table 2. Collection information of modern pollen specimens.

Taxa	Collection date	Collection site
<i>Camellia japonica</i> Linne	March 22, 2016	Yudalsan Botanical Garden, Mokpo
<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> Nakai	May 4, 2016	Wando Arboretum

and Choi, 2010). 하지만 최근 기후변화로 인해 서쪽 자생북한계지가 전라북도 부안군 격포리(35°38'N) (Cultural Heritage Administration, 1962b)에서 인천광역시 옹진군 대청도로 북상하였다(Lee and Choi, 2010). 이 외에도 붉가시나무와 참식나무의 서쪽 자생북한계지는 각각 전라남도 함평군(35°04'N)과 전라남도 영광군 불갑면 모악리(35°11'N)였으나(Cultural Heritage Administration, 1962a, 1962c), 최근 인천시 옹진군 도서지역에서 새로운 자생지가 확인되었다(Lee and Choi, 2010).

본 연구에서는 남해안 지역 내 상대적으로 큰 규모의 식물군락을 이루면서 선행 연구 등에서 기후지표로서 많이 활용된 후박나무(*Machilus thunbergii* Siebold and Zucc.), 동백나무(*Camellia japonica* Linne), 붉가시나무(*Cyclobalanopsis acuta* Thunb.), 구실잣밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai)를 한반도 남부지역 기후민감성 상록활엽수 지시종으로 선정하였다. 이들 4종은 향후 남해안 지역의 코어 퇴적물을 이용한 화석화분 분석 시, 주요 지시종으로 활용하고자 한다. 본 논문에서는 동백나무와 구실잣밤나무 2종에 대한 화분형태학적 분석을 우선적으로 수행하였다.

2.3 시료 및 방법

채집된 현생화분(표 2)은 현미경 분석을 위해 10% 농도 수산화나트륨(NaOH) 반응처리, 습식체질(sieve), 아세트산분해(acetolysis), 탈수작용(dehydration in Tert-butyl alcohol, TBA)등의 실험 순서로 진행되었으며 각 단계마다 종류수로 3차례씩 세척하였다. 10% 농도 수산화나트륨 반응처리와 아세트산분해 단계에서는 90℃의 중탕기(warm water bath)에서 4분 동안 열처리하였고, 아세트산분해 단계에서는 아세트산 무수물(C₄H₆O₃, acetic anhydride)과 황산(H₂SO₄, concentrated sulphuric acid)을 9:1로 섞은 혼합액을 각 샘플마다 4~5 ml를 주입하였다. 2종의 지시종은 광학현미경(LM)과 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 형태학적 분석이 이루어졌다. 광학현미

경 관찰을 위한 박편제작 시, 봉합제(mounting medium)는 실리콘 오일(silicone oil)과 글리세린 젤리(glycerin jelly)를 사용하였으며 실리콘 오일 봉합제를 사용한 박편의 경우, 커버 글라스(cover glass) 가장자리는 파라핀 왁스(paraffin wax)를 사용하여 고정시켰다. 실리콘 오일은 글리세린 젤리와 달리 유동성이 있어 현미경 관찰 시, 커버 글라스를 살짝 움직이면 화분을 다양한 각도에서 원하는 부위의 형태적 특징을 관찰할 수 있는 장점이 있다. 하지만 광학현미경 분석 시 실리콘 오일은 글리세린 젤리에 비해 낮은 해상도를 가지기 때문에 정밀한 형태적 특징을 관찰하는데는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 글리세린 젤리 봉합제를 사용하여 광학현미경 분석을 수행하였으며(동백나무: 25 개체, 구실잣밤나무: 25 개체), 주로 적도면도(equatorial-oblique view)를 기준으로 ×1,000배율에서 형태(shape, P/E ratio), 크기(size), 표면무늬(ornamentation), 외벽두께(wall thickness), 외벽구조(exine structure), 화분관구(apertures) 등을 측정하였다. 주사전자현미경 관찰을 위한 시료는 따로 소분하여 보존병(vial)에 TBA와 함께 보관하였으며, 이후 금가루 코팅(gold coating)하여 박편을 제작하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 지시종의 생육 및 화분 형태분류학적 특징

화분의 형태학적 특징은 크게 크기(size), 형태(shape), 화분관구(aperture), 외벽구조(exine structure), 표면무늬(ornamentation) 등이 있으며 이는 광학현미경 상에서 화분감정 시, 중요한 분류 기준으로 사용된다. 대표적인 화분형태학적 특징은 그림 2에 요약하여 제시 하였다.

3.1.1 동백나무

차나무과(Theaceae) 동백나무속(*Camellia*)에 속하는 동백나무(*Camellia japonica* Linne)는 국내 상록 활엽수림의 주요 수종 중 하나로 주로 해안가 산지에

생육하는 높이 약 7 m의 상록활엽교목(evergreen broad-leaved shrub)이다(NIBR, 2017b). 국내에는 경상북도 울릉도와 남·서 해안 산지 등에 자생하며 일본, 중국에도 분포한다(Lee *et al.*, 2010; NIBR, 2017b). 난온대성 상록활엽수 가운데 온대지역까지 분포하는 동백나무는 중요한 기후지표로도 잘 알려져 있다(Ohashi *et al.*, 2006a, 2006b; Chung *et al.*, 2011).

총 25개체에 대한 동백나무의 화분 형태학적 분석 결과, 크기는 중립으로 단립이며 대칭형이다(그림 2). 측정된 극축 P (polar axis)과 적도축 E (equatorial axis) 길이는 각각 $36.3 \sim 55.4$ (47.5 ± 4.57) μm $\times$ $34.0 \sim 45.5$ (39.6 ± 3.27) μm 로, 화분의 크기와 형태는 다양한 범위에 분포한다(그림 3). 가장 높은 빈도 분포를 보이는 극축과 적도축 구간은 각각 $45 \sim 55$ μm 와 $38 \sim 42$ μm 로 나타난다(그림 3). 화분의 형태는 극면도(polar view)에서는 원형(circular), 아원형(semi-circular)이며, 적도면도(equatorial view)에서는 Erdtman (1952) 기준에 따라 편구형(oblate-spheroidal, n=1), 장구형(prolate-spheroidal, n=10), 아장형(sub-prolate, n=8), 장형(prolate, n=6) 총 4개의 형태를 보인다(그림 2). 화분관구는 tri-colpo-

late로 관찰되며 표면무늬는 주름모양형태(rugulate)로 광학현미경과 주사전자현미경 상에서 모두 뚜렷하게 관찰된다(그림 4). 선행연구(Chang, 1986; Park *et al.*, 2000)에 의하면, 동백나무의 표면무늬는 망상구조(reticulate) 또는 우상돌기(verrucate)로 보고되었지만, 본 연구 결과에서는 보다 불규칙한 형태의 주름모양 형태로 관찰되었다.

광학현미경 상에서 동백나무의 외벽구조는 그림 4와 같이 나타난다. 외벽은 외층(sexine)과 내층(nexine)으로 구성되는데(그림 2) 동백나무의 외층과 내층은 비슷한 두께로 관찰되며 층 경계는 뚜렷하게 나타난다(그림 4). 각 층의 길이를 측정한 결과(표 3), 외층의 두께는 내층보다 다소 두껍게 나타나며 각 층의 두께는 극축 부근으로부터 적도축 부근으로 올수록 더 작아지는 경향을 보인다(그림 4).

3.1.2 구실잣밤나무

참나무과(Fagaceae) 모밀잣밤나무속(*Castanopsis*)에 속하는 구실잣밤나무(*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai)는 표고 200~700 m의 주로 해안 및 산기슭에서 자라는 상록활엽교목(evergreen broad-leaved

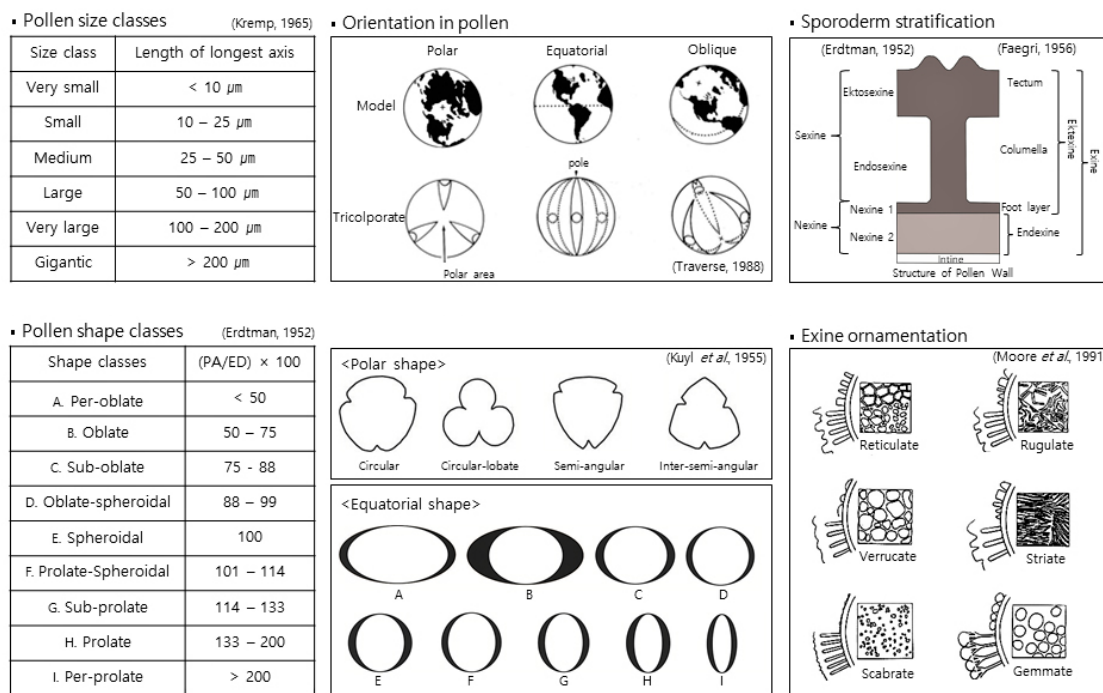


Fig. 2. Morphological characteristics of pollen grains.

tree)으로 높이는 약 15 m, 지름은 약 1 m이다(Kwon, 2004; NIBR, 2017a). 우리나라 서·남해 도서 및 제주

도에 자생하며, 일본, 중국, 대만, 인도, 자바 등지에 분포한다(NIBR, 2017a). 구실잣밤나무는 현재 국내

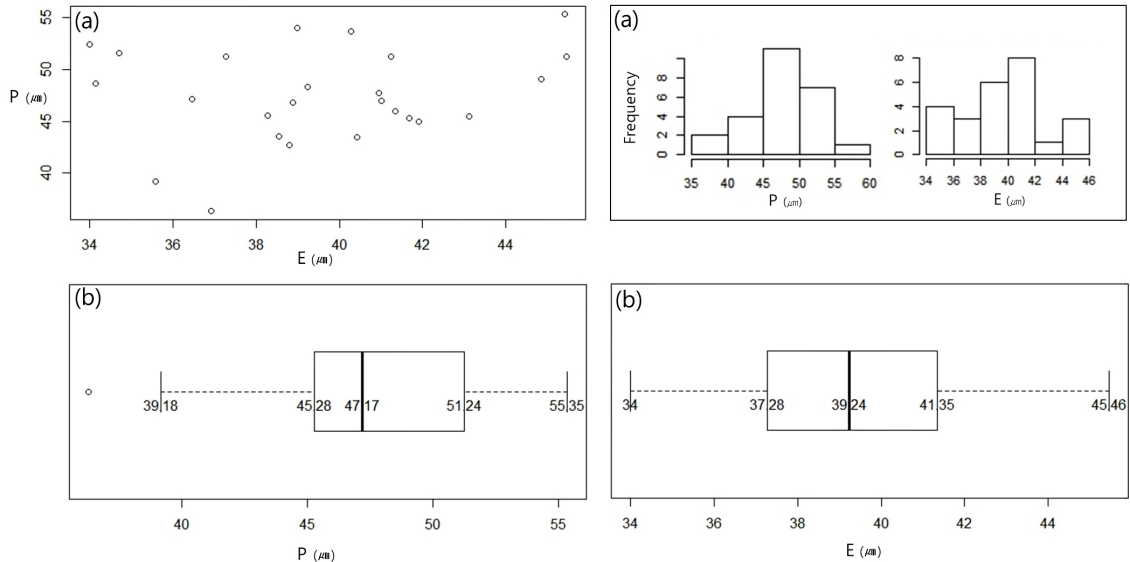


Fig. 3. (a) The size distribution of *Camellia japonica* Linne, (b) Boxplot of the values of length of polar axis (P, μm) and equatorial axis (E, μm).

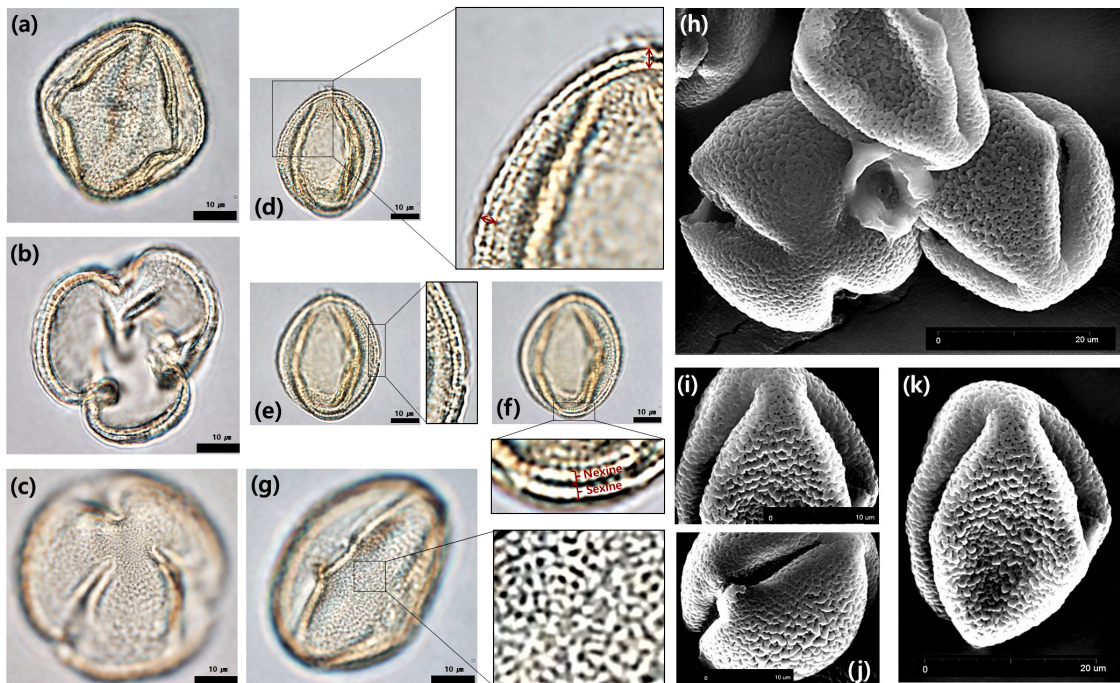


Fig. 4. *Camellia japonica* Linne. (a)-(g): Light microscope photomicrographs, (h)-(k): Scanning electron microscope photomicrographs. (a): Equatorial view, (b): Polar view, (c): Oblique view, (d)-(f): Wall thickness, (g): Rugulate ornamentation.

난대 상록활엽수 가운데 붉가시나무(1,824 ha), 중가시나무(1,711 ha) 다음으로 넓은 분포면적(1,311 ha)을 차지하고 있으며 지역별 분포면적은 제주, 전남, 경남 순으로 나타난다(Korea Forest Research Institute, 2014).

총 25개체에 대한 구실잣밤나무의 화분 형태학적 분석 결과, 크기는 소립으로 단립이며 대칭형이다(그림 2). 측정된 극축 P (polar axis)과 적도축 E (equatorial axis) 길이는 각각 $21.3 \sim 30.7$ (25.8 ± 3.08) $\mu\text{m} \times 13.23 \sim 19.4$ (16.8 ± 1.40) μm 으로 화분의 크기와 형태는 다양한 범위 내 분포한다(그림 5). 가장 높은 분포를 보이는 극축과 적도축 구간은 각각 $22 \sim 24$ μm 와 $16 \sim 18$ μm 로 나타난다(그림 5). 화분의 형태는 극면도(polar view)에서는 원형(circular)이며, 적도면도(equatorial view)에서는 Erdtman (1952) 기준에 따라 아장형(sub-prolate, $n=1$), 장형(prolate, $n=24$)으로 대부분 장형(prolate)형태이다(그림 2). 화분관구는 tri-col-

polate이며, 주사전자현미경 상에서 표면무늬는 굵은 주름모양형태(coarsely rugulate)로 관찰되지만, 광학현미경 상에서는 표면무늬를 관찰하기가 어렵다(그림 6).

구실잣밤나무의 외벽구조를 살펴보면, 외층(sexine)과 내층(nexine)의 경계는 뚜렷하게 관찰된다(그림 6). 각 층의 길이를 측정한 결과(표 3), 동백나무와 마찬가지로 외층의 두께는 내층보다 다소 두꺼우며 각 층의 두께는 극축 부근으로부터 적도축 부근으로 오히려 더 작아지는 경향을 보인다(그림 6). 이러한 특징은 향후 정밀분석을 통해 실제 각 층 사이의 두께차이가 존재하는지 혹은 현미경 상에서의 굴절률 차이 인지를 확인 할 필요가 있다.

3.2 주변국과의 화분형태학적 비교특성

그림 7은 본 연구결과와 주변국인 일본 및 중국 등으로부터의 채집한 현생화분의 형태학적 분석결

Table 3. Wall thickness of *Camellia japonica* Linne and *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai.

Taxa	Wall layer	Polar area	Between P and E	Equatorial area
<i>Camellia japonica</i> Linne	Sexine	1.104 ± 0.11	1.071 ± 0.13	1.011 ± 0.12
	Nexine	1.071 ± 0.11	1.050 ± 0.12	1.020 ± 0.14
<i>Castanopsis cuspidata</i> var. <i>sieboldii</i> Nakai	Sexine	0.815 ± 0.14	-	0.736 ± 0.13
	Nexine	0.797 ± 0.15	-	0.734 ± 0.14

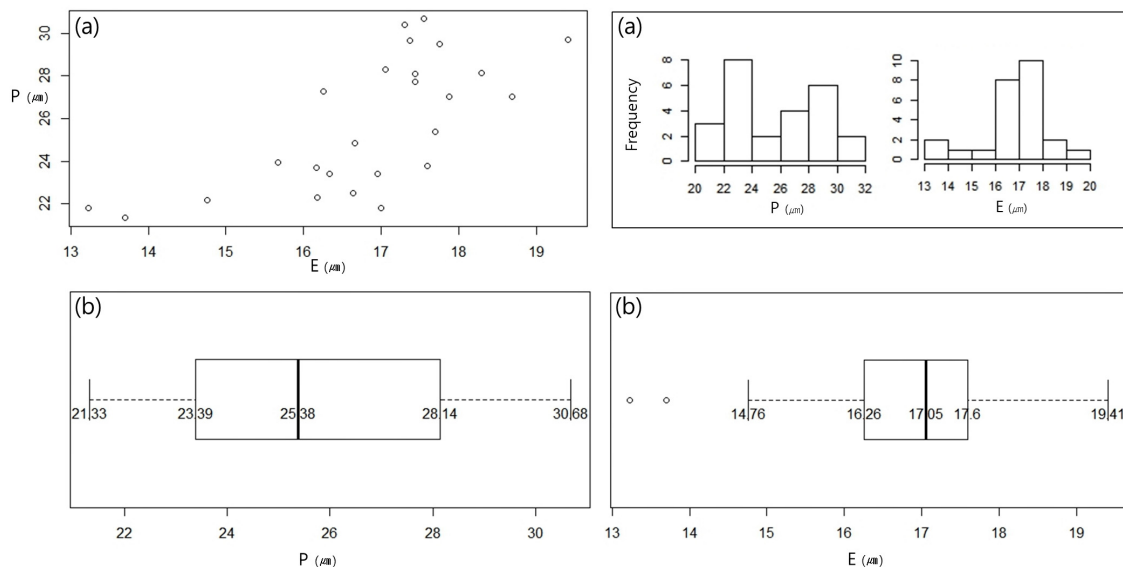


Fig. 5. (a) The size distribution of *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai. (b) Boxplot of the values of length of polar axis (P, μm) and equatorial axis (E, μm).

과를 비교한 자료이다. 각 지역에 따라 화분의 크기 및 표면무늬 등은 동일하거나 다소 차이가 있다. 동백나무의 표면무늬 경우 중국과 일본 지역은 본 연구결과와 같은 주름모양형태로 관찰되지만, 대만과 국내 해남지역은 각각 망상구조, 우상돌기형태(verrucate)로 관찰된다. 구실잣밤나무의 경우 적도면상에서의 화분 형태는 한국과 일본 모두 아장형~장형(sub-prolate~prolate)이며 표면무늬 또한 망상구조가 관찰된다.

가장 큰 차이점은 화분의 크기이다. 즉, 극축과 적도축의 길이는 2종 모두가 각 연구지역마다 다르게 나타난다. 동백나무의 경우 본 연구지역의 화분크기가 다른 지역에 비해 가장 크고 넓은 분포 값을 보인다(그림 7a). 예외적으로 중국 광시지역의 동백나무의 적도축의 평균값은 $54.7 \mu\text{m}$ 로 $39.6 \pm 3.27 \mu\text{m}$ 의 평균값을 가지는 목포지역에 비해 크다.

본 연구지역(완도)의 구실잣밤나무의 극축과 적도축의 길이는 각각 약 $21 \sim 31 \mu\text{m}$, $13 \sim 20 \mu\text{m}$ 의 분포 범위를 보인다. 이에 비해 일본의 3개 지역에 대한 구실잣밤나무의 극축과 적도축의 길이는 각각 약 $14 \sim 21 \mu\text{m}$, $11 \sim 14 \mu\text{m}$ 의 분포범위로, 크기면에서 완

도지역의 화분과는 뚜렷하게 구별된다(그림 7b). 예외적으로 일본 오카야마지역 화분의 적도축 길이는 $13 \sim 18 \mu\text{m}$ 로 본 연구결과와 비슷한 분포 값을 보인다.

일반적으로 화분의 크기는 실험과정 중에서 화학적 전처리 또는 봉합제, 탈수작용 등에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Meltsov *et al.*, 2008). 따라서 화분형태를 비교분석 할 경우 동일한 표준실험절차에 따라 실험과정을 수행하는 것이 매우 중요하다. 본 연구결과와 비교분석한 자료들은 모두 같은 아세트산 분해 전처리 방법과 글리세린 젤리 봉합제를 사용하였다. 따라서 향후 국내 다른 지역으로부터 추가적으로 채집한 현생화분도 동일한 실험절차에 따라 형태학적인 비교분석을 수행할 필요가 있다.

4. 결 론

한반도 기후민감성 상록활엽수 지시종인 동백나무와 구실잣밤나무에 대한 현생화분의 주요 형태분류학적 특징은 다음과 같다.

전라남도 목포에서 채집한 동백나무의 화분 크기

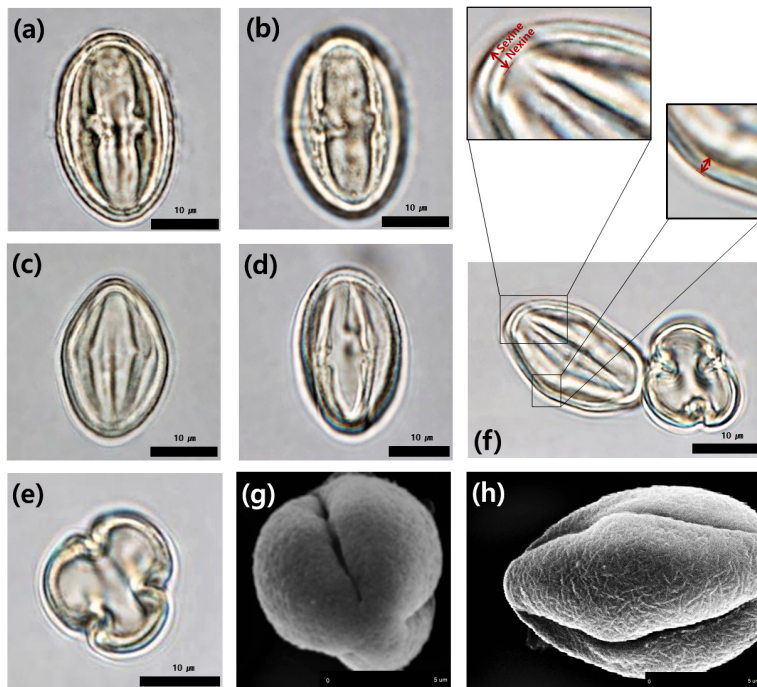
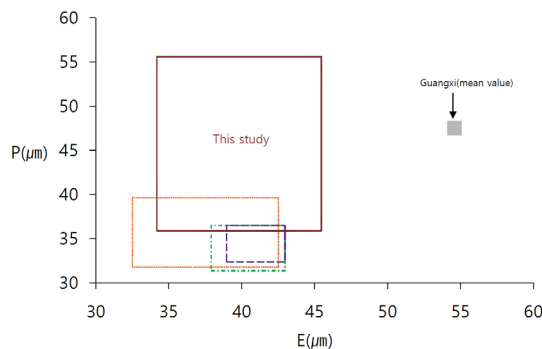


Fig. 6. *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai. (a)-(f): Light microscope photomicrographs, (g)-(h): Scanning electron microscope photomicrographs. (a)-(d): Equatorial view, (e): Polar view, (f): Wall thickness, (g): Oblique view, (h): Coarsely rugulate.

(a)

	Kunigami Okinawa, Japan (Fujiki and Ozawa, 2007)	Guangxi, China (Zavada and Wei, 1993)	Taitung, Taiwan* (Huang, 1972)	Haenam, South Korea (Chang, 1986)	Mokpo, South Korea (This study)
Polar axis, μm	32.5-40.0 (36.6 $\pm$ 1.8)	Average 47.5	32-37	33-37	36.3-55.4 (47.5 $\pm$ 4.57)
Equatorial diameter, μm	32.5-42.5 (37.3 $\pm$ 1.8)	Average 54.7	38-43	39-43	34.0-45.5 (39.6 $\pm$ 3.27)
P/E	Oblate-spheroidal, Spheroidal, Prolate-Spheroidal, Sub-prolate 88-115 (mean 98)	Oblate to spherical to slightly prolate	Sub-oblate to oblate-spheroidal	-	Oblate-spheroidal Prolate-spheroidal Sub-prolate Prolate 98-154 (mean 121)
Shape	-	-	-	Semi-circular	Circular Semi-circular
Ornamentation	Rugulate	Perforate, Scabrate to rugulate	Reticulate	Verrucate	Rugulate
Observation	LM	LM	LM	LM	LM
Legend					

**Camellia japonica* L. var. *hozanensis* (Hay.) Yam.

(b)

	Kunigami Okinawa, Japan (Fujiki and Ozawa, 2007)	Okayama city, Japan (Miyoshi, 1983)	Japan (Shimakura, 1973)	Wando, South Korea (This study)
Polar axis, μm	16.3-20.0 (18.0 $\pm$ 0.8)	17-21	14-18	21.3-30.7 (25.8 $\pm$ 3.08)
Equatorial diameter, μm	10.8-13.8 (12.3 $\pm$ 0.6)	13-18	11-13	13.23-19.4 (16.8 $\pm$ 1.40)
P/E	Prolate 137-158 (146)	Sub-prolate 128	-	Sub-prolate, Prolate (mostly) 128-176 (153)
Shape	Circular	Circular, Slightly trilobate	-	Circular
Ornamentation	Rugulate	Angled-stringy-rugulose	-	Coarsely rugulate
Observation	LM	SEM	LM	LM
Legend				

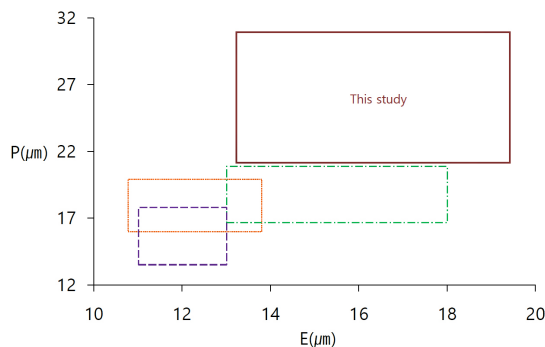


Fig. 7. A comparison of pollen morphological analyses. (a) *Camellia japonica* Linne, (b) *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai. LM: light microscope, SEM: scanning electron microscope.

는 $36.3\sim 55.4 \times 34.2\sim 45.5 \mu\text{m}$ 로 중립이며 한반도 주변국들의 동종에 비해 더 크고 넓은 분포범위를 가진다. 화분의 형태는 극면도상에서 원형(circular)~아원형(semi-circular)이며 적도면도상에서는 주로 장구형(prolate-spheroidal), 아장형(sub-prolate)으로 관찰된다. 광학현미경 상에서 외층과 내층의 경계는 뚜렷하게 관찰되며 각각의 두께는 약 $1 \mu\text{m}$ 내외이다. 표면무늬는 주름모양 형태로 광학 및 주사전자현미경 상에서 모두 뚜렷하게 관찰된다.

전라남도 완도에서 채집한 구실잣밤나무의 화분 크기는 $21.3\sim 30.7 \times 13.23\sim 19.4 \mu\text{m}$ 로 소립이며 한반도 주변국들의 동종에 비해 더 크고 넓은 분포범위를 가진다. 화분의 형태는 극면도상에서는 원형(circular)이며 적도면도상에서는 주로 장형(prolate)으로 관찰된다. 광학현미경 상에서 외층과 내층의 경계는 뚜렷하며 각각의 두께는 약 $0.7\sim 0.8 \mu\text{m}$ 내외이다. 주사전자현미경 분석결과 표면무늬는 굵은 주름모양 형태(coarsely rugulate)로 관찰된다. 광학현미경상에서 표면무늬 관찰은 어렵다.

본 연구의 자료와 다른 주변국들의 자료를 비교분석한 결과, 동종일지라도 화분의 크기 및 표면무늬 등은 각 지역마다 다소 상이하게 나타난다. 따라서 우선적으로 한반도 다른 여러 지역 현생화분 분석을 통하여 화분 형태적 특징이 지리적 또는 환경적 요인에 영향을 받는지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

현생화분의 정밀한 형태학적 분석 자료는 화석화분의 종 단위(species level) 감정에 매우 중요하게 활용되어 신뢰할 수 있는 자료를 생산할 수 있다. 따라서 한반도 주요 수종에 대한 화분의 형태학적 자료를 지속적으로 구축하고 정량화하는 것은 매우 중요하고도 절실하다. 이러한 분석기반 자료는 향후 한반도 남해안 지역의 홀로세 동안 고식생 및 고환경 복원연구에 유용하게 활용될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요과제인 “지질기록체를 활용한 한반도 아열대화 규명 연구: 중기홀로세 기후-특성 평가(GP2017-013)”의 일환으로 수행되었다. 또한 이 논문은 부분적으로 2017년도 정부재원 한국연구재단 기초연구실 사업(No. NRF-2015R1A4A1041105)의 지원을 받았다. 심사과정에서 조

언과 건설적인 비판을 통하여 논문의 질적 향상에 많은 도움을 주신 고영구 교수님과 익명의 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Brooks, J. and Shaw, G., 1978, Sporopollenin: A review of its chemistry, palaeochemistry and geochemistry. Grana, 17(2), 91-97, doi: 10.1080/00173137809428858.
- Chang, N.K., 1986, Illustrated Flora and Fauna of Korea, vol. 29 POLLENS. Ministry of Education, 899 p (in Korean with English abstract).
- Chang, N.K. and Rim, Y.D., 1979, Morphological studies on the pollen flowering plants in Korea. Seoul National University Press, 62 p + 137 pl (in Korean with English abstract).
- Choi, B.-K., 2012, Syntaxonomy and Syngelography of Warm-Temperate Evergreen Broad-leaved Forests in Korea. Ph.D. thesis, Keimyung University, Daegu, 148 p (in Korean with English abstract).
- Chung, J.-M., Jung, H.-R. and Moon, H.-S., 2011, Spreading Pattern of Evergreen Broad-leaved Trees in Forest Community adjacent to the *Camellia japonica* Stands. Journal of Agriculture & Life Science, 45(6), 89-94 (in Korean with English abstract).
- Cultural Heritage Administration, 1962a, http://www.cha.go.kr/korea/heritage/search/Culresult_Db_View.jsp?mc=NS_04_03_01&VdkVgwKey=16,01120000,36 (October 11, 2017).
- Cultural Heritage Administration, 1962b, http://www.cha.go.kr/korea/heritage/search/Culresult_Db_View.jsp?mc=NS_04_03_01&VdkVgwKey=16,01230000,35 (October 11, 2017).
- Cultural Heritage Administration, 1962c, http://search.cha.go.kr/srch_new/search/search_top.jsp?searchCnd=&searchWrd=&home=total&mn=&gubun=search&query=%EB%B6%89%EA%B0%80%EC%8B%9C%EB%82%98%EB%AC%B4&x=16&y=11 (October 11, 2017).
- Erdtman, G., 1952, Pollen Morphology and Plant Taxonomy. Angiosperms. Almqvist and Wiksell, Stockholm. 539 p.
- Fægri, K., 1956, Recent trends in palynology. The Botanical Review, 22, 639-664.
- Fujiki, T. and Ozawa, T., 2007, The Pollen Flora of Ryukyu, Japan. Aqua Coral Planning, 155 p.
- Huang, T.-C., 1972, Pollen Flora of Taiwan. National Taiwan University Press, 276 p + 177 pls.
- Kira, T., 1945, A New Classification of Climate in Eastern Asia as the Basis of Agricultural Geography. Horticultural Institute, Kyoto University, 23 p (in Japanese).
- Kira, T., 1948, On the altitudinal arrangement of climatic zones in Japan. Kanti-Nogaku, 2, 143-173 (in Japanese).

- Koo, K.-A., Kong, W.-S. and Kim, C.-K., 2001, Distribution of evergreen broad-leaved plants and climatic factors. *Journal of the Korean Geographical Society*, 36(3), 247-257 (in Korean with English abstract).
- Korea Forest Research Institute, 2014, Resource characteristics and evaluation of major plants in southern part of the Korea. Research Report of Korea Forest Research Institute, 574, 104 p (in Korean).
- Kremp, O.W., 1965, *Morphologic Encyclopedia of Palynology*. University of Arizona Press, Tucson, 263 p.
- Kuyl, O.S., Muller, J. and Waterbolk, H.T., 1955, The application of palynology to oil geology with reference to Western Venezuela. *Geologie en Mijnbouw, New Series*, 17, 49-75.
- Kwon, Y.S., 2004, A Study on the *Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* NAKAI forest community structure. Master thesis, Chonnam National University, Gwangju, 40 p (unpublished) (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-H. and Choi, B.-H., 2010, Distribution and Northernmost Limit on the Korean Peninsula of Three Evergreen Trees. *Korean Journal of Plant Taxonomy*, 40(4), 267-273 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.S., Lee, K.-H. and O.C., 2010, New Woody Plant Flora of Korea. Research Information Center, 519 p (I) + 539 p (II) (in Korean).
- Meltsov, V., Poska, A. and Saar, M., 2008, Pollen size in *Carex*: The effect of different chemical treatments and mounting media. *Grana*, 47(3), 220-233, doi: 10.1080/00173130802435970.
- Miyoshi, N., 1983, Pollen morphology of the genus *Castanopsis* (Fagaceae) in Japan. *Grana*, 22(1), 19-21, doi: 10.1080/00173138309429909.
- Moore, P.D., Webb, J.A. and Collinson, M., 1991, *Pollen Analysis*. Blackwell, London, 216 p.
- National Institute of Biological Resources (NIBR), 2008, Biological Resources Data. Gyoungseong Publisher, Seoul, 227 p (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR), 2010, Selection criteria of CBIS (Climate-sensitive Biological Indicator Species) in Korea. Ministry of environment, South Korea, 11 p (in Korean).
- National Institute of Biological Resources (NIBR), 2017a, https://species.nibr.go.kr/home/mainHome.do?cont_link=009&subMenu=009002&contCd=009002&ktsn=120000060561 (October 10, 2017).
- National Institute of Biological Resources (NIBR), 2017b, https://species.nibr.go.kr/home/mainHome.do?cont_link=009&subMenu=009002&contCd=009002&ktsn=120000060937 (October 10, 2017).
- Ohashi, H., Sasaki, Y. and Ohashi, K., 2006a, The northernmost limit of distribution of *Quercus acuta* Thunb. (Fagaceae). *Journal of Japanese Botany*, 81, 173-187 (in Japanese).
- Ohashi, H., Sasaki, Y. and Ohashi, K., 2006b, The northernmost limit of distribution of *Neolitsea sericea* (Blume) Koidz. (Lauraceae) on the Pacific side of Japan. *Journal of Japanese Botany*, 81, 248-249 (in Japanese).
- Park, S., 2016, Distribution of warm temperate evergreen broad-leaved trees change due to climate change. Master thesis, Kyung Hee University, Seoul, 160 p (unpublished) (in Korean with English abstract).
- Park, H.Y., Sun, B.Y., Kim, T.J. and Oh, H.W., 2010, Pollen of Korea I Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), KOREA, 307 p (in Korean).
- Shimakura, M., 1973, *Palynomorphs of Japanese plants*. Special Publications from the Osaka Museum of Natural History, vol. 5, 60 p (in Japanese with English summary).
- Song, Y.C., 1988, Broad-leaved evergreen forests in Central Japan in comparison with Eastern China. *Geobotanik Institute, ETH, Stiftung Rübel, Zürich*, 98, 197-224.
- Tatsuo, K., 1976, *Land Ecosystem: Introduction (Lecture of Ecology 2)*, Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 166 p.
- Traverse, A., 1988, *Paleopalynology*. Unwin Hyman, Boston, 600 p.
- Wang, C.W., 1961, *The Forests of China with a Survey of Grassland and Desert Vegetation*. Beijing, Maria Moors Cabot Foundation and Harvard University, 313 p.
- Yang, K.-C. and Shim, J.-K., 2007, Distribution of Major Plant Communities Based on the Climatic Conditions and Topographic Features in South Korea. *Korean Journal of Environmental Biology*, 25(2), 168-177 (in Korean with English abstract).
- Yim, K.B., 1968, *Jorimhak Wonron (Principles of Silviculture)*. Hyangmunsa, Seoul, 492 p (in Korean).
- Yim, Y.J., 1977a, Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. III. Distribution of tree species along the thermal gradient. *Japanese Journal of Ecology*, 27, 177-189.
- Yim, Y.J., 1977b, Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate. *Japanese Journal of Ecology*, 27, 269-278.
- Yim, Y.J. and Kira, T., 1975, Distribution of forest vegetation and climate in the Korean Peninsula. I. Distribution of some indices of thermal climate. *Japanese Journal of Ecology*, 25, 77-88.
- Yun, J.-H., Nakao, K., Park, C.-H., Lee, B.-Y. and O, K.-H., 2011, Change Prediction for Potential Habitats of Warm-temperate Evergreen Broad-leaved Trees in Korea by Climate Change. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 25(4), 590-600 (in Korean with English abstract).
- Zavada, M.S. and Wei, Z.-X., 1993, A Contribution to the Pollen Morphology of *Camellia* (Theaceae). *Grana*, 32 (4-5), 233-242, doi: 10.1080/00173139309429986.

Received : October 16, 2017

Revised : November 16, 2017

Accepted : November 17, 2017