

<Short Note>

현생화분을 이용한 화석화분기반의 정량적 고기후 복원:
연구방법 소개 및 사례연구

이재영^{1,2} · 전창표^{1,*} · 이상헌^{1,2} · 김동욱^{1,3}

¹한국지질자원연구원 국토지질연구본부

²과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

³부산대학교 지질환경학과

요 약

1980년대 이래 화분화석은 과거의 기후를 정량적으로 복원하는 지시자로 널리 사용되고 있다. 그러나 아직 화분화석을 이용하여 한반도의 고기후를 정량적으로 복원하는 연구는 미흡한 상태이다. 화분화석기반의 정량적인 고기후 복원을 위해서는 현생화분 군집 자료와 정확한 기후 자료 및 현생화분 군집의 특성에 따른 최적의 방법론 선택이 필요하다. 본 연구에서는 지리산의 현생화분 군집 자료와 WorldClim2.1 기후 자료를 이용하였다. 지리산의 현생화분 자료를 바탕으로 정량적인 기후를 생산하는 방법인 Modern Analogue Techniques (MAT)와 Weighted Averaging-Partial Least Squares regression (WA-PLS)을 비교한 결과, WA-PLS가 더 우수한 것으로 확인되었다. WA-PLS에서 생산된 화분-기후 전달함수를 지리산 왕등재늪에서 보고된 화석화분 자료에 적용하여 과거 1,000년 동안의 고기후를 정량적으로 복원하였다. 복원된 연평균기온은 6.5~9.3℃, 연강수량은 1,550~1,770 mm의 범위를 각각 가진다. 복원된 연평균기온은 약 AD 1150년부터 떨어지기 시작하며, 이 시기는 소빙기로 추정된다. 강수량은 소빙기로 추정되는 시기에 증가하며 동아시아의 소빙기 시기 강수량의 특성과 비교해본 결과, 지리산 지역은 장주기성 엘니뇨현상에 영향을 받은 것으로 판단된다.

주요어: 고기후 복원, 기후 보간법, 소빙기, WA-PLS, MAT

Jaeyoung Lee, Chang-Pyo Jun, Sangheon Yi and Dongwook Kim, 2020, Pollen-based quantitative paleoclimate reconstruction: Brief methodological introduction and case study. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 5, p. 587-603

ABSTRACT: Since the 1980s, fossil pollen-based quantitative paleoclimate reconstruction (PqPR) has been conducted on the basis of modern pollen-climate relationships, however few this work was carried out in Korea. The PqPR requires not only the modern pollen assemblages and climate data, but also the selection of appropriate quantitative techniques. We analyzed modern pollen assemblages of surface sediment collected along every 100 m altitude from the Mt. Jiri. We compared the spatially interpolated weather data using R package Meteoland with results obtained by bilinear interpolation of WorldClim2.1 dataset. The results showed that WorldClim2.1 dataset was better appropriate for the mountains in Korea. Additionally, Weighted Averaging-Partial Least Squares (WA-PLS) for PqPR more outperform than Modern Analogue Techniques (MAT) by comparing the statistical performance of MAT and WA-PLS. From the pollen records of the Wangdeungjae moor of Mt. Jiri, the PqPR using by the transfer function over the last millennium was performed. The mean annual temperature (T_{ann}) ranged from 6.5 to 9.3℃, and the annual precipitation (P_{ann}) from 1,550 to 1,770 mm. The T_{ann} decreased abruptly at AD 1150, while the Pann increased distinctly, reflecting wet conditions during the Little Ice Age (LIA). The wet LIA is likely to be caused by the long-term El Niño southern oscillation (ENSO).

Key words: paleoclimate reconstruction, climate interpolation, little ice age, WA-PLS, MAT

(Jaeyoung Lee, Chang-Pyo Jun, Sangheon Yi and Dongwook Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Jaeyoung Lee and Sangheon Yi, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea; Dongwook Kim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 42641, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-42-868-3414, E-mail: cpjun@kigam.re.kr

1. 서 론

기후변화는 생태계의 변화에 영향을 주는 아주 중요한 요인이다. 화분학(palynology)은 퇴적층에 함유된 화분, 포자 등을 추출하여 연구하는 미고생물학의 한 분야로 기후변화를 추정할 수 있는 유용한 학문이다. 이러한 장점으로 현재까지 한국에서도 화석화분을 대상으로 다양한 정성적인 연구가 진행되었다(Yi *et al.*, 2008; Yi and Kim, 2009; Yoon and Hwang, 2011; Park *et al.*, 2019).

모식물이 자연 기후환경에 지배를 받음으로써 식물이 생산하는 화분 역시 퇴적 당시의 지역적인 기후환경을 반영한다. 표층 시료의 현생화분은 현재의 기후를 직접적으로 반영하고 있으므로 서로 대비시켜 전달 함수를 생산해내고, 이를 제4기 화석화분 자료에 적용시켜 과거의 기후를 정량적으로 재구성하는 방법이 활발히 연구되었다(e.g., Prentice *et al.*, 1996; Davis *et al.*, 2003; Herzschuh *et al.*, 2010).

한반도에서는 강원도, 경상도 및 제주도의 산지에서 현생화분군집을 이용해 정량적인 고온도 수치 자료를 복원한 연구가 이루어졌지만(Park, 2011; Park and Park, 2014), 강수량에 대한 정량적 복원은 이루어지지 않았다. 보다 더 정확하고 정밀한 고기후 복원을 위해서는 현재의 기후를 반영할 수 있는 정확하고 풍부한 현생화분 군집 자료가 필수적이다.

그러나 아직까지 한반도의 현생화분 자료는 다소 부족한 상황이다. 또한 고기후의 정량적 복원을 위해서는 현생화분 군집과 대응하는 정확한 기후자료가 필요하다. 이를 위해서는 한반도 특성에 맞는 기후 보간 자료가 필요한데, 30년 평년의 100 m 해상도의 보간법은 아직 한반도에서 연구된 바가 없다.

이미 동아시아의 경우 한반도를 제외한 거의 모든 지역에서 현생화분에 대한 정보 자료가 구축(D/B)되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다(Zheng *et al.*, 2014). 한반도의 현생화분 정보 자료가 구축된다면 동아시아 광역적인 고기후 연구에 많은 기여를 할 것으로 생각된다. 앞서 언급한 바와 같이 정확하고 정밀한 정량적 고기후 복원을 위해서는 한반도에 적합한 고해상도의 보간법이 필요하며 한반도의 기후를 반영할 수 있는 충분히 많은 현생화분 군집 자료가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 100 m 고해상도 보간법을 분석한 후, 한반도의 특성에 적합한 보간법을 선정하여 간략하게 소개하고자 한다. 또한 선정된 방법을 지리산 왕등재늪에서 발표된 화석화분 자료에 적용하여 정량적 고기후 복원의 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 연구지역 및 방법

한반도 남부에 위치하는 지리산(그림 1)의 표층

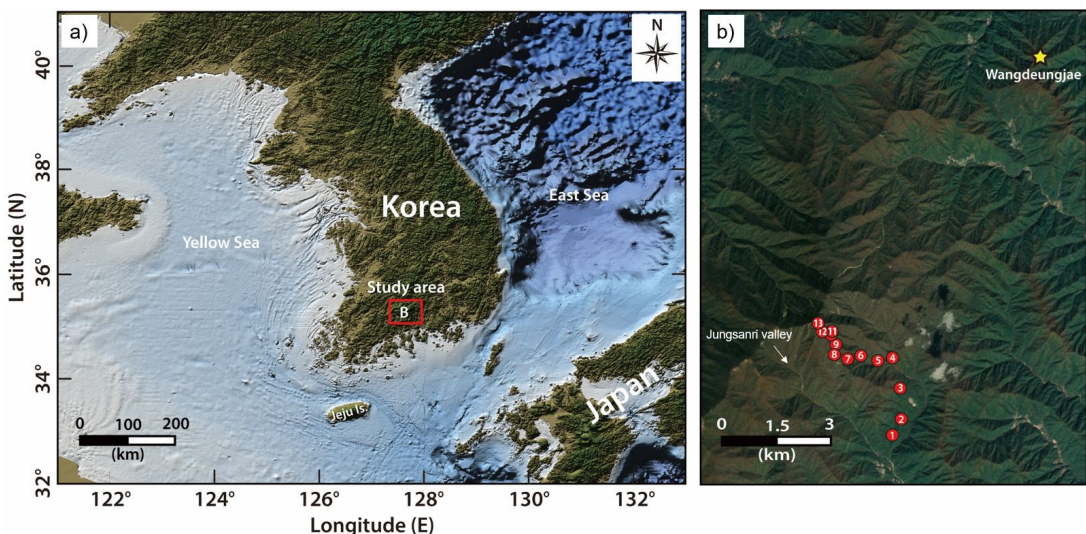


Fig. 1. (a) Location map of the Korean Peninsula showing the study area. (b) Sampling site, Jungsanri valley and Wangdeungjae moor in Mt. Jiri.

Table 1. Modern pollen sampling coordinates, elevation and T_{ann} , P_{ann} by WorldClim2.1 downscaling in this study. Ji S represents Jirisan southface. Ji S (B) indicates samples taken from bamboo forest.

No.	Sample name	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Elevation (m)	Tann (°C)	Pann (mm)
1	Ji S 700	35°18'33.51"	127°45'6.84"	703.9	9.68	1539.54
2	Ji S 800	35°18'46.76"	127°45'14.48"	821	9.53	1550.22
3	Ji S 900	35°19'11.74"	127°45'13.87"	908.4	8.98	1596.18
4	Ji S 1000	35°19'37.58"	127°45'4.94"	1010.7	8.28	1650.21
5	Ji S 1100	35°19'36.09"	127°44'51.02"	1111.1	8.03	1669.31
6	Ji S 1200	35°19'40.63"	127°44'33.22"	1205.1	7.62	1699.56
7	Ji S 1300	35°19'38.12"	127°44'19.95"	1307	7.41	1713.34
8	Ji S 1400	35°19'40.84"	127°44'6.8"	1407.5	7.14	1733.15
9	Ji S 1500	35°19'46.77"	127°44'7.51"	1494	6.93	1749.21
10	Ji S (B) 1600	35°19'52.98"	127°44'2.62"	1598.4	6.67	1765.51
11	Ji S 1600	35°19'53.65"	127°44'2.76"	1601.4	6.67	1765.51
12	Ji S 1700	35°20'8.6"	127°43'55.46"	1697.6	6.26	1789.76
13	Ji S 1800	35°20'7.08"	127°43'51.47"	1807.5	5.99	1806.06

퇴적물을 이용하여 화분분석을 실시하였다. 지리산은 한반도의 경상남도 함양군, 산청군, 하동군, 전라남도 남원시와 구례군에 걸쳐 분포하며 해발고도는 1,915 m이다. 고도에 따라 온대 남부림부터 고산대림이 관찰되며 식생 변화가 뚜렷하게 나타난다(Kim *et al.*, 1991). 지리산의 최근 5년(2006~2010) 간의 연평균기온과 연강수량은 각 13°C, 1,520.9 mm이다(Gwon *et al.*, 2013).

2.1 표층시료 채집 및 화분분석

현생화분과 기후요소의 관계를 파악하기 위해서는 퇴적물에 포함된 화분이 국지적인 식생을 잘 반영해야만 한다. 본 연구에서는 인위적인 식재 등의 인간 활동 영향이 적은 700~1,800 m 지점의 비등산로를 선정하여 주변 식생의 화분을 반영하도록 임관층(canopy layer)이 열려있고 교목과 관목의 밀도가 높지 않은 지점에서 100 m 고도 간격으로 시료를 채취하였다(표 1). 표층 퇴적물의 채취는 사각 금속틀(10×10×2.5 cm)을 이용하여 동일한 부피의 시료를 채취하였다.

건조된 3 g의 시료는 표준화분 실험절차(Moore *et al.*, 1991)에 따라 박편을 제작하였다. 염산(30% 농도)과 불산(45%) 반응 처리를 통해 석회질과 규질 물질을 제거하였으며, 수산화칼륨(10%)을 이용해 불필요한 섬유질이나 부식 물질을 제거하였다. 화분

의 입자크기보다 크거나 작은 입자를 제거하기 위해 100 μ m와 10 μ m 금속 체로 습식 체질하였다. 화분 입자의 농집도를 높이기 위해 초산 분해와 비중처리를 추가 진행하였다. 농집된 화분 입자는 에탄올(99%)을 이용해 잔여 수분을 제거한 후 글리세린 젤리를 이용하여 슬라이드 박편을 제작하였다. 각 시료의 화분 농집도는 석송속 포자(*Lycopodium*, 27,637 spores/tablet) 2알을 첨가하여 계산하였다.

2.2 고해상도 기후 자료 생산

표층 퇴적물을 채취한 지점의 기후자료는 두 가지 방법을 적용하여 추정하였다: 1) WorldClim2.1 기후 자료(Fick and Hijmans, 2017)를 이중선형보간법(bilinear interpolation)을 통해 얻은 값과, 2) 기상 관측소에서 측정된 기후 자료를 Meteoland 패키지를 사용하여 공간 보간한 값. 두 개의 독립적인 방법을 통해 얻어진 평년 기후 값은 416개의 방재기상관측(Automated Weather Station, AWS) 지점에서 2005~2015년 동안 관측된 자료를 이용하여 비교·검증하였다.

WorldClim2.1은 1970~2000년 동안 전 세계 60,000여 개의 기상 관측소에서 측정된 기후 값과 지형 요소를 고려하여 스플라인 기법으로 보간한 기후 데이터 세트이다. 전 지구를 대상으로 최대 1 km 해상도의 기온, 강수량, 일사량, 증기압 및 풍속에 대한 기

Table 2. AMS ^{14}C dating and calibrated dates from Wangdeungjae moor Core (Lee, 2005).

Core depth (cm)	Material	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C age (yr BP)	*Calibrated age (yr BP)
5	Bulk sediments	-24.09	modern	modern
10	Bulk sediments	-23.51	530±40	554±60
14	Bulk sediments	-21.99	760±40	694±40

*Calibrated age by Clam R (Blaauw, 2010)

후 자료를 제공한다. 본 연구에서 채취된 시료들의 최소 거리는 약 160 m 떨어져 있으므로 보간법에 사용되는 공간격자(spatial grid)가 중첩되지 않도록 이중선형보간법을 이용해 100 m 해상도의 기후자료로 재생산하였다. 이중선형보간법은 R 소프트웨어(R Core Team, 2020)에서 raster 패키지(Hijmans, 2020)를 이용하였다.

기상 관측소에서 측정된 기상 관측 값은 Meteoland R 패키지(De Cáceres *et al.*, 2018)를 이용하여 100 m 해상도의 기후자료로 공간 보간 하였다. 1970~2000 년 동안 62개의 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS, 1970~2000) 지점에서 측정된 기후 자료를 활용하였고 국토지리정보원에서 제공하는 90 m 해상도의 수치표고모델(DEM)을 이용하여 지형 요소에 따른 기후 구배를 함께 고려 하였다. Meteoland 패키지의 알고리즘은 역 거리 가중 보간법(Inverse distance weighted method; IDW)과 유사하며 가우시안 필터를 사용한다.

2.3 화석화분 자료 및 정량적 복원 기법

본 연구에서 과거 기후의 정량적 복원을 위해 지리산 왕등재능(35°23'40" N, 127°47'30" E)에서 보고된 화석화분 자료(Kim and Lee, 2005; Lee, 2005)를 사용하였다. 화석화분의 연대는 퇴적토의 5, 10, 14 cm 부분을 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)를 이용한 방사성탄소연대 추정법(^{14}C)으로 실시하였다(Lee, 2005). 측정된 연대는 Clam R 패키지(Blaauw, 2010)를 이용하여 보정하였다(표 2). 본 연구에서 5 cm 이하의 현대 시료는 제외하였다.

신뢰도 높은 기후 복원을 위해서는 현생화분 자료의 특성에 따라 적절한 정량적 복원 기법이 필요하다. 정량적 복원 기법에는 군집 접근법과 다변량 보정 접근법이 있다(Birks *et al.*, 2010). 군집 접근법은 분류군들의 상대적인 풍성도를 고려하여 고기후를 복원하는 기법이다. 대표적으로 Modern Analogue

Techniques (MAT)가 있다. 다변량 보정 접근법은 현재 존재하는 분석대상의 모든 분류군에 대해 통계적으로 추정하는 접근법이다. 대표적으로 Weighted Averaging-Partial Least Squares (WA-PLS)가 있다.

본 연구에서는 서로 다른 접근법 중 한반도에 더 적합한 고기후 복원 기법을 알아보기 위해 MAT와 WA-PLS를 적용 후 비교하였다. 비교를 위한 신뢰성 평가는 Leave-one-out cross validation (LOOCV)을 이용하였다. 정량적 복원 기법에 사용된 모든 분석은 rioja R 패키지(Juggins, 2017)를 이용하였다.

3. 결 과

3.1 지리산 현생화분

13개의 표층 퇴적물에서 69 분류군의 화분과 포자가 산출되었다. 본 연구에서는 포자를 제외한 화분의 총 합을 100%로 보정하여 분석하였다. 표층 퇴적물의 현생화분 군집은 전체적으로 수목의 비율이 우세하지만, 1,300m 지점과 1,700 m 이상 정상부에서 미약하게 감소한다(그림 2). 이엽 소나무속(*Pinus* subgen. *Diploxylon*)은 700~900 m 지점에서 우점(35~50%)하지만 고도가 높아질수록 10~20%로 감소한다. 반면 오염 소나무속(*Pinus* subgen. *Haploxylon*)은 900m 지점을 제외하고는 저고도에서 낮은 산출량(3~5%)을 보이지만, 고도가 높아질수록 증가(10%)하는 경향을 보인다(Plate I, Fig. A, D, E). 낙엽형 참나무속(*Quercus* subgen. *Lepidobalanus*)은 전체적으로 풍부하게 산출되며 1,000~1,600 m 지점에서 우점(20~45%)한다. 오리나무속(*Alnus*, 10%)은 대부분의 시료에서 풍부하게 산출되며 서어나무속(*Carpinus*, 4%), 자작나무속(*Betula*, 5%), 물푸레나무속(*Fraxinus*, 5%) 역시 900 m 이하의 저고도를 제외하고 전체적으로 풍부하게 산출된다. 가문비나무속(*Picea*, 5%), 전나무속(*Abies*, 5%), 진달래과(*Ericaceae*, 5%)는 1,600 m 이상의 아고산대에서 풍부하게 산출된다(Plate I,

Fig. B, C, O). 초본식물의 경우, 화본과(Poaceae, 3%), 쭉쭉속(*Artemisia*, 2%)은 풍부하지는 않지만 전 구간에서 산출되는 반면에 국화과(Asteraceae, 7%)와 십자화과(Cruciferae, 5%)는 1,300 m 이상의 고도에서 주로 산출된다(그림 2).

3.2 기후 보간법

WorldClim2.1 기후 자료의 이중선형보간법을 통해 얻어진 값과 Meteoland 패키지를 이용해 평년

기후자료(1970~2000년)를 공간 보간한 결과를 검증하기 위하여 AWS 기상데이터(2005~2015년)와 비교하였다(그림 3, 4). AWS 기상데이터에서 관측된 연평균기온과 비교하였을 때 0.6°C 이하의 차이를 보이는 지점이 WorldClim 2.1 기후 자료가 Meteoland 패키지보다 더 많으며 0.9°C 이상의 차이를 보이는 지점의 경우, 그 반대의 양상을 보인다(그림 3a). 따라서 WorldClim2.1 기후 자료의 이중선형보간법을 통해 얻어진 값이 AWS 관측값과의 차이가 더 작으

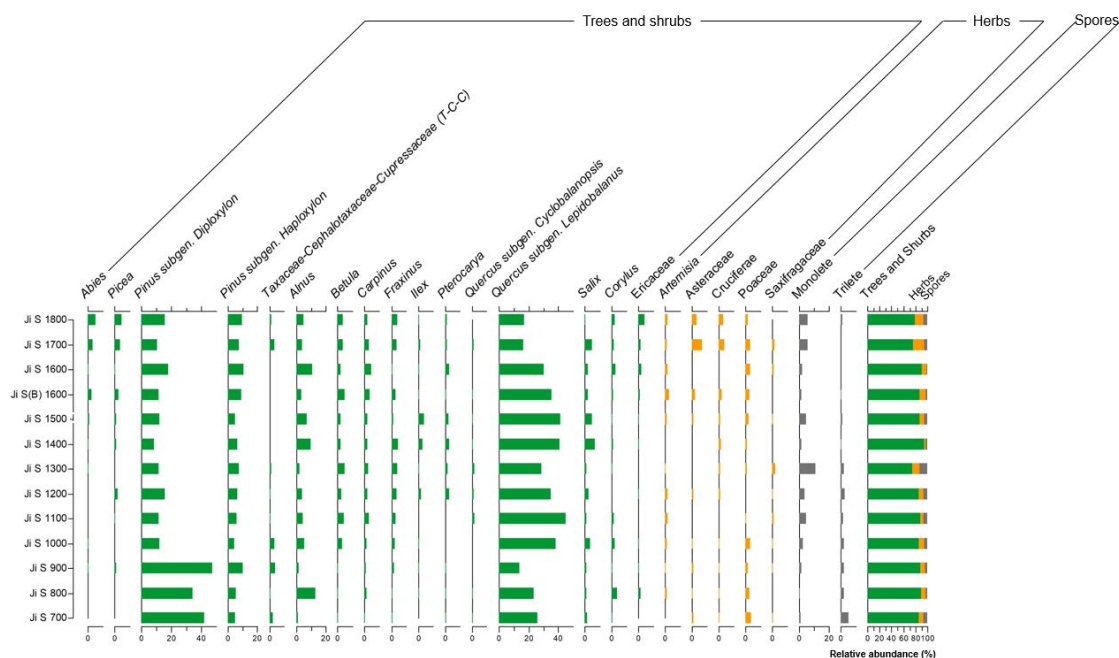


Fig. 2. Pollen diagram for selected taxa (sum >10%) in this study.

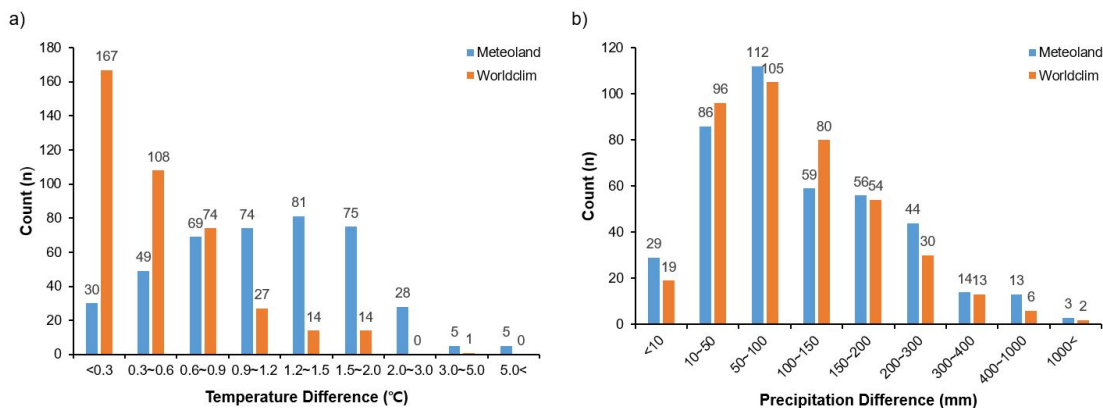


Fig. 3. Comparison of the predictive Meteoland and WorldClim2.1 downscaling in Korea. (a) Number of differences in mean annual temperature (T_{ann}) and (b) in annual precipitation (P_{ann}), respectively.

므로 실제 기후 값을 잘 모사하는 것으로 나타났다. Meteoland 패키지에서 공간 보간한 평년기후자료는 서울, 부산, 대구 등 도심지역과 태백산맥 지역의 연평균온도를 비교적 정확하게 예측하였지만 제주도 지역을 포함한 나머지 지역에서는 오차가 증가하는 경향을 보인다(그림 4a). 반면 WorldClim2.1 기

후 자료는 도심지역에서 연평균온도의 오차가 다소 증가하였지만 전체적으로 관측 값과 유사하게 나타났다(그림 4a).

연강수량은 두 보간 방법을 통해 얻어진 오차 값이 유사하게 나타났다(그림 3b). Meteoland 패키지에서 산출한 연강수량은 분지지형에서 비교적 정확

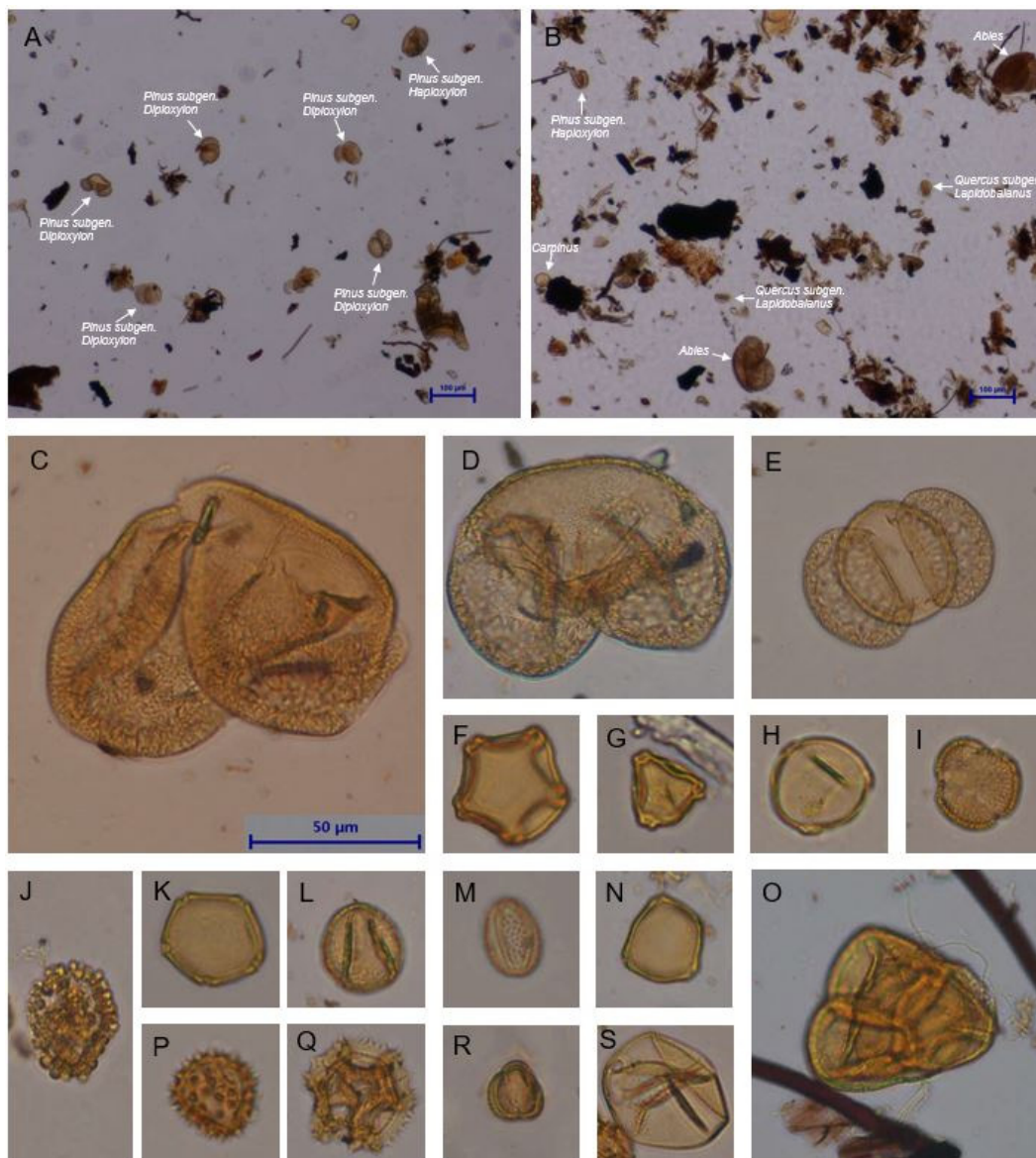


Plate I. Microscopic photos of palynofacies (A-B, $\times 100$), aboreal pollen (C-O, $\times 400$) and nonaboreal pollen (P-S, $\times 400$). A, Palynofacies (sample Jiri S 800, altitude 800 m). B, Palynofacies (sample Jiri S 1600, altitude 1600 m). C, *Picea*. D, *Pinus subgen. Haploxylon*. E, *Pinus subgen. Diploxylon*. F, *Alnus*. G, *Betula*. H, *Carpinus*. I, *Fraxinus*. J, *Ilex*. K, *Pterocarya*. L, *Quercus subgen. Lapidobalanus*. M, *Salix*. N, *Corylus*. O, *Ericaceae*. P & Q, *Asteraceae*. R, *Artemisia*. S, *Poaceae*.

한 반면에 태백산맥, 지리산, 한라산 등 고도가 높은 지역에서는 관측값과의 오차가 증가하였다(그림 4b). WorldClim2.1 기후 자료 역시 산간 지형에서 오차 값이 증가하는 것으로 나타났지만 Meteoland 패키지에서 산출된 값에 비해 관측된 기후 값을 잘 모사하는 것으로 나타났다(그림 4b).

3.3 정량적 복원 기법 비교 및 화분 기반 기후자료 생산

WorldClim2.1 기후 자료의 이중선택정보간법을 통해 얻어진 기후 값과 표층 퇴적물의 화분 군집을 이용하여 MAT와 WA-PLS의 통계적 신뢰도를 검증하였다(표 3). MAT 기법을 통해 얻어진 연평균기온(T_{ann})의 평균 제곱근 오차(root mean square error)는 0.63°C , 최대 편향(maximum bias)은 0.92

Table 3. Model performance statistics as assessed by leave-one-out cross-validation for the first five components of WA-PLS and MAT pollen-climate transfer functions in Mt. Jiri. The selected models are shown in bold.

Model	T_{ann}			P_{ann}		
	RMSE ($^{\circ}\text{C}$)	r^2	Max. bias ($^{\circ}\text{C}$)	RMSE (mm)	r^2	Max. bias (mm)
MAT	0.63	0.773	0.92	45.76	0.777	71.43
WA-PLS comp1	0.41	0.873	0.58	31.07	0.866	42.89
WA-PLS comp2	0.22	0.964	0.26	16.44	0.963	17.76
WA-PLS comp3	0.14	0.985	0.22	10.43	0.985	4.77
WA-PLS comp4	0.05	0.997	0.08	3.94	0.998	5.56
WA-PLS comp5	0.02	0.999	0.05	1.11	0.999	1.78

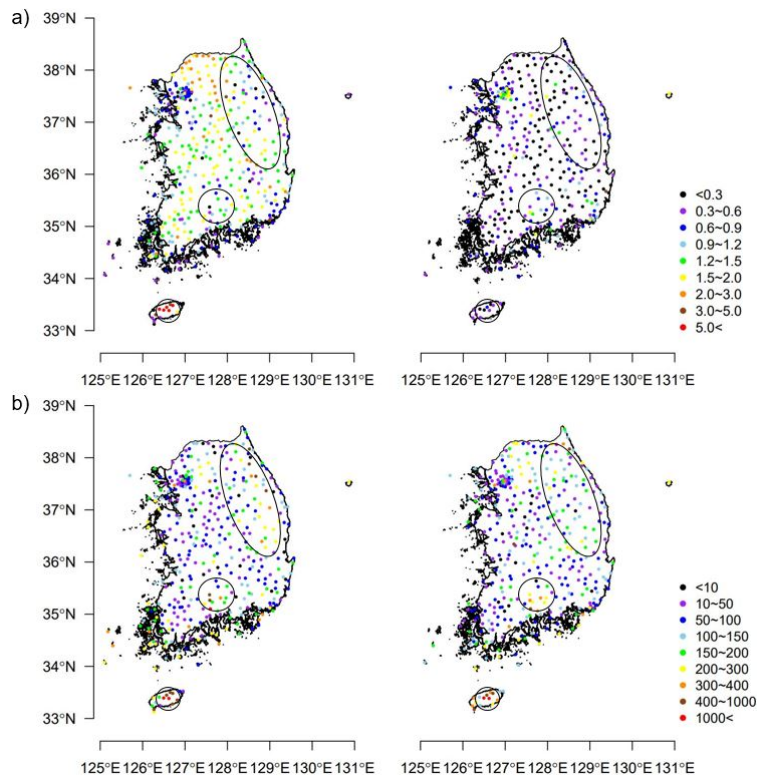


Fig. 4. Comparison of difference in spatial distributions between the climate value estimated by Meteoland/WorldClim2.1 downscaling and observed AWS. (a) Difference ($^{\circ}\text{C}$) of T_{ann} between Meteoland (left)/WorldClim2.1 (right) and AWS. (b) Difference (mm) of P_{ann} between Meteoland (left)/WorldClim2.1 (right) and AWS. Black circle is high elevation mountainous region.

℃이며 결정계수(r^2)는 0.773이다. 연강수량(P_{ann})의 평균 제곱근 오차는 45.76 mm, 최대 편향은 71.43 mm이며, 결정계수는 0.777이다. WA-PLS의 경우 5 번째의 요소가 가장 신뢰성이 있으며 연평균기온의 평균 제곱근 오차는 0.02℃, 최대 편향은 0.05℃이며 결정계수는 0.999이다. 연강수량의 평균 제곱근 오차는 1.11 mm, 최대 편향은 1.78 mm이며 결정계수는 0.999이다.

MAT의 산점도(그림 5a, 6a)를 보면 연평균기온과 강수량 모두 낮은 값에서 과대평가되며 높은 값에서 과소평가되는 경향이 보인다. 연평균기온의 잔차는 -1.0~1.0℃의 범위를 가지며, 연강수량의 잔차는 -80~80 mm의 범위를 가진다. 반면에 WA-PLS의 산점도(그림 5b, 6b)는 예측 값과 관측 값 사이에 강한 상관관계를 보여주며, 잔차 역시 거의 존재하지 않는다. 이는 지리산 현생화분을 통한 전달 함수는 MAT보다 WA-PLS가 더 적합함을 보여준다.

WA-PLS를 통해 도출한 전달 함수를 지리산 왕등재늪의 화석화분 데이터에 적용하여 과거 1000년

동안의 온도와 강수량을 복원하였다(그림 7). AD940~1150년 동안 8.5~9.3℃ 이던 기온은 1150년 이후 6.5℃까지 급감하였다. 1300년 이후로는 상승과 하강을 반복하지만 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 강수량은 1150년 이후 1,760 mm까지 급격히 증가하고 이후 꾸준히 감소하는 경향을 보인다.

4. 토 의

4.1 고도별 화분 산출과 식생 비교

지리산 중산리 계곡에서 실시한 식생조사 결과에 따르면 해발 고도 700~1,000 m에서는 졸참나무군락, 1,000~1,400 m은 신갈나무군락, 1,400 m 이상 지역에서는 구상나무-신갈나무군락이 나타난다(Yun *et al.*, 2010). 1,300 m 이상부터는 분비나무와 구상나무 등의 아고산식물종이 관찰되기 시작한다. 표층 퇴적물에서 분석한 현생화분 군집에서도 고도 변화에 따른 이러한 식생변화가 잘 관찰된다(그림 2). 예를 들어, 참나무속 화분은 1,000~1,600 m에서 풍부

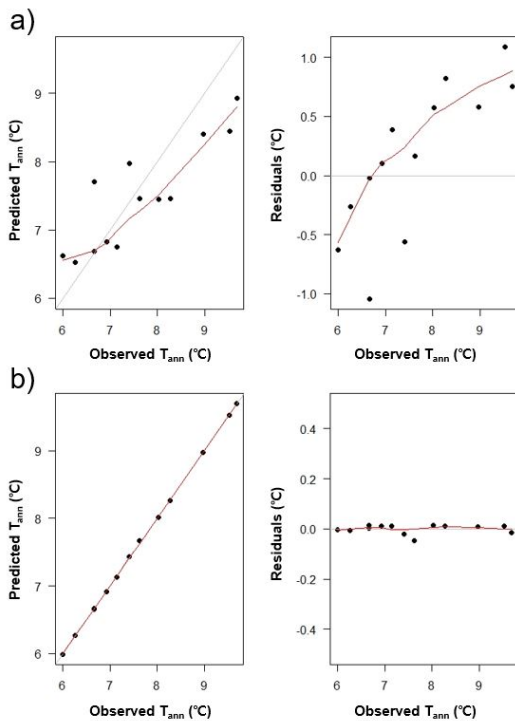


Fig. 5. Scatter plot of (a) Observed T_{ann} (°C) vs. MAT estimated T_{ann} (°C) and residuals (°C), (b) Observed T_{ann} (°C) vs. WA-PLS estimated T_{ann} (°C) and residuals (°C).

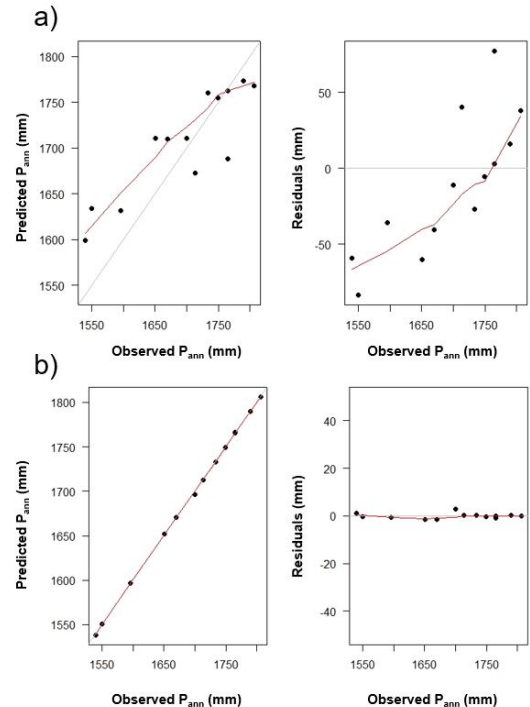


Fig. 6. Scatter plot of (a) Observed P_{ann} (mmmm) vs. MAT estimated P_{ann} (mmmm) and residuals (mmmm), (b) Observed P_{ann} (mm) vs. WA-PLS estimated P_{ann} (mmmm) and residuals (mmmm).

하게 산출된다. 해당 구간에서의 참나무속 화분은 졸참나무와 신갈나무, 굴참나무 등에서 기원한 것으로 판단된다. 전나무속과 가문비나무속 화분은 1,600 m 이상에서 풍부하게 산출되며 구상나무-신갈나무 식생 군락을 반영한 것으로 보인다. 하지만 700~900 m에서는 이엽 소나무속 화분이 우점하는 반면에 현재 식생은 졸참나무와 굴참나무가 우점하고 있다.

일반적으로 소나무속의 화분 생산능력(Pollen Productivity Estimates, PPEs)은 참나무속의 화분 생산능력보다 뛰어나다. 중국의 동북지역에서 소나무속의 화분 생산량이 참나무속의 화분 생산량의 3~5배에 달했다(Li *et al.*, 2015). 또한, Zhang *et al.* (2020)은 소나무속, 가문비나무속, 자작나무속 등의 수목류는 산악 지형에서 기후변화에 대응하여 수직적인 이동이 활발한 것으로 보고하였다. 비록 본 연구에서 현생화분 채집지역의 식생에 대한 정밀한 조사의 부족으로 저고도에서 소나무속이 참나무속에 비해 우세하게 나오는 명확한 이유는 파악할 수 없지만, 현생화분 시료와 식생조사를 실시한 위치의 지역적 차이 혹은 소나무속과 참나무속의 화분 생산능력과 화분의 수직적 분산 능력의 차이에 의한 것으로 생각된다.

하지만 참나무속과 소나무속 모두 풍매화로 모식물로부터 화분의 수평 이동거리(Relevant Source Area of Pollen, RSAP)는 3 km를 넘는다(Hellman *et al.*, 2009). 표층시료 채집 위치와 식생조사 구간인

중산리 계곡은 최대 약 2.5 km 거리이다(그림 1). 따라서 본 연구에서 900 m 이하의 저고도에서 식생조사와 달리 이엽 소나무속이 참나무속보다 풍부하게 산출되는 이유는 두 모식물의 화분 생산능력과 수직적 분산 능력 차이에 의한 것이라고 추정된다.

4.2 정량적 전달함수 생산 기법 비교

13개의 표층 퇴적물을 대상으로 MAT와 WA-PLS의 통계적 신뢰도를 분석한 결과 WA-PLS가 우수한 것으로 확인되었다. 이는 두 기법이 내포하고 있는 가정과 고유한 특성에 따른 것으로 보인다. MAT는 서로 다른 식물 군집들이 각각의 화분 군집을 나타내며 각 군집마다 정의하는 기후요건이 다르다는 가정을 기반으로 한다. 현생화분 군집들에서 기후 값의 가중평균을 취하여 유사한 화석화분 군집에 적용하여 과거 기후를 추론한다(Overpeck *et al.*, 1985; Guiot, 1990). MAT는 현생식물의 생육조건을 바탕으로 하기 때문에, 기후에 맞는 적절한 식생이 자라지 않거나, 현생식물과 유사체가 존재하지 않는 경우 사용이 제한적이며(Zheng *et al.*, 2014), 넓은 범위의 기후요소에 대응하는 많은 현생화분 데이터가 필요하지만 계산과정이 간단하고 직관적인 장점을 가져서 고기후를 복원하는데 널리 사용되고 있다(Nakagawa *et al.*, 2002; Birks and Seppä, 2004; Zheng *et al.*, 2014).

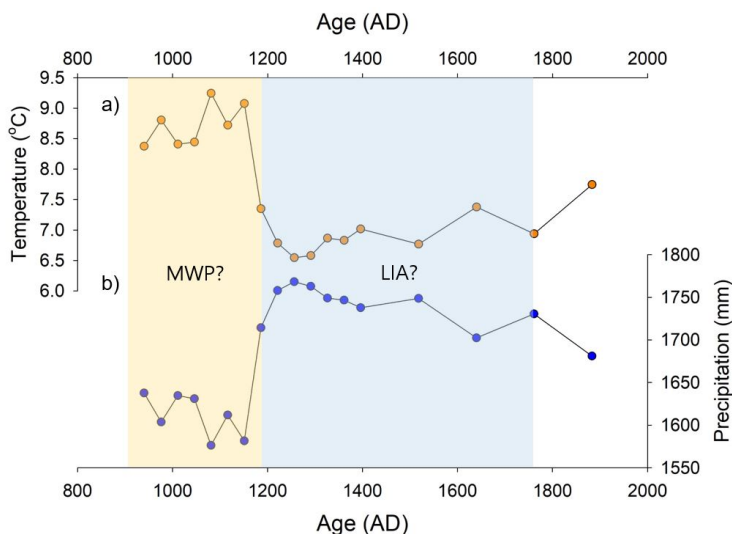


Fig. 7. Pollen-based quantitative paleoclimate reconstruction (PqPR) from the Wangdeungjae moor pollen records; T_{ann} (a) and P_{ann} (b).

Table 4. Paleohydroclimate records in fig. 8. Site numbers are ordered from east to west for each wetness (modified from Cheng *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2017).

Site no.	Site name	Lat. (°N)	Long. (°E)	Proxies used	Wetness	Reference
1	Wangdeungjae Moor	35.39	127.79	Pollen	Wet	This study
2	Mulyoungari Swamp	33.37	126.68	Pollen, diatom, $\delta^{13}\text{C}$, CN, TS	Wet	Park <i>et al.</i> , 2017
3	Kaiike Lake	30.85	129.87	Sediment δD	Wet	van Soelen <i>et al.</i> , 2016
4	Southern Okinawa Trough	24.80	122.49	Diatom	Wet	Li, D.L. <i>et al.</i> , 2011
5	Dalu Lake	24.75	121.70	Pollen, Diatom, Grain size	Wet	Wang <i>et al.</i> , 2014
6	Tsifong Lake	24.50	121.60	Diatom, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$, Magnetic susceptibility	Wet	Wang <i>et al.</i> , 2013
7	Hainan Island	19.30	110.67	Coral $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$	Wet	Deng <i>et al.</i> , 2016
8	Huguangyan Maar Lake	21.15	110.28	TOC, Biogenic silica, TN	Wet	Chu <i>et al.</i> , 2002
9	Longgan Lake	29.96	116.13	Pollen	Wet	Tong <i>et al.</i> , 1997
10	Tengernur Lake	40.47	110.67	Grain size, Pollen	Wet	Zhao <i>et al.</i> , 2011
11	Badain Jaran Desert	39.55	102.37	Chloride concentrations in unsaturated zone	Wet	Gates <i>et al.</i> , 2008; Ma and Edmunds, 2006
12	Daihai Lake	40.55	112.66	Pollen	Moderate	Xu <i>et al.</i> , 2010b
13	Ximencuo Lake	33.38	101.11	TOC and TN	Moderate	Pu <i>et al.</i> , 2013
14	San-No-Megata Lake	39.93	139.70	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	Dry	Yamada <i>et al.</i> , 2010
15	Xiaolongwan Lake	42.30	126.35	Sediment $\delta^{13}\text{C}$	Dry	Chu <i>et al.</i> , 2009
16	Shihua Cave	39.83	115.67	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$ & $\delta^{13}\text{C}$	Dry	Hou <i>et al.</i> , 2003
17	Gouchi Lake	37.75	107.52	Pollen	Dry	Meng <i>et al.</i> , 2009
18	Foyechi Pond	33.95	107.73	Pollen	Dry	Tong <i>et al.</i> , 1996
19	Wanxiang Cave	33.32	105.00	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Dry	Zhang <i>et al.</i> , 2008
20	Huangye Cave	33.58	105.12	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Dry	Tan <i>et al.</i> , 2011
21	Heshang Cave	30.45	110.42	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Dry	Hu <i>et al.</i> , 2008
22	Lower Huai River and Yangtze River Basin	32.36	117.84	Historical documents	Moderate-Wet	Man, 2009
23	Southern China	27.50	117.00	Historical documents	Moderate-Wet	Zheng <i>et al.</i> , 2006
24	Dongge Cave	25.28	108.08	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Moderate-Wet	Wang <i>et al.</i> , 2005
25	Dajiuhu Peatland	31.48	110.06	Pollen	Moderate-Wet	He <i>et al.</i> , 2003
26	Jiuxian Cave	33.57	109.10	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Moderate-Wet	Cai <i>et al.</i> , 2010
27	Foye Cave	33.67	109.08	Speleothem $\delta^{13}\text{C}$	Moderate-Wet	Paulsen <i>et al.</i> , 2003
28	Korea	38.32	127.00	History	Moderate-Dry	Kim and Choi, 1987
29	North China	36.40	115.12	Historical documents	Moderate-Dry	Man, 2009
30	Gonghai Lake	38.90	112.23	Magnetical parameters	Moderate-Dry	Liu <i>et al.</i> , 2011
31	Tianchi Lake	35.26	106.31	Sediment redness	Moderate-Dry	Zhou <i>et al.</i> , 2010
32	Furong Cave	29.23	107.90	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Moderate-Dry	Li, H.-C. <i>et al.</i> , 2011
33	Zhijin Cave	26.66	105.68	Speleothem $\delta^{18}\text{O}$	Moderate-Dry	Kuo <i>et al.</i> , 2011

WA-PLS는 통계적 전달함수이며 이론이 나온 이후로 지속적으로 수정되고 있다(ter Braak and Juggins, 1993; Birks, 1998). WA-PLS는 각 화분 분류군이 기후 변수 중 특정 값에서 최적의 성장을 보이며 특정 값에서 벗어날수록 감소한다고 가정한다(Xu *et al.*, 2010a). WA-PLS는 지배적인 화분 분류군이 좁은 기후 범위에 있을 때 적합하지만 현재 화분 분류 연구는 속(Genus) 또는 과(Family)의 수준으로 광범위한 환경 내성을 지니고 있으며 화분 분류군에 생태학적으로 부적합한 환경 변수는 재구성하지 못하는 한계가 있다(Xu *et al.*, 2010b). 그러나 간단하면서도 강력한 방법으로 오랜 기간 다양한 지역에서 사용되었다(Seppa *et al.*, 2004; Park, 2011; Liu *et al.*, 2020).

본 연구에서 WA-PLS가 MAT와 비교하였을 때 월등한 성능을 보여준다(표 3). 이는 앞서 말한 것처럼 현생화분 데이터의 부족으로 MAT가 충분한 현생화분 군집 데이터와 기후 데이터를 확보할 수 없어 성능이 제한된 것으로 추정된다. 반면 WA-PLS의 경우 지리산이라는 좁은 기후 범위와 참나무속과 소나무속의 우점종으로 이루어진 데이터로 인해 예측 결과가 우수한 것으로 추정된다.

4.3 지리산 왕등재늪 정량적 고기후 복원

과거 1000년 동안의 고기후 복원은 많은 연구자들에 의해 연구되고 있으며 특히 소빙기에 대한 다양한 연구들이 존재한다(Mann *et al.*, 2008; 2009; Yan *et al.*, 2011; Cheng *et al.*, 2015; Oppo *et al.*, 2009; Park, 2018; Zhang *et al.*, 2018). 중세온난기는 약 950~1250년의 기간 동안 지속된 온난한 시기이며 소빙기는 중세온난기 이후 기온이 감소하는 불안정한 시기였다. 그러나 지역에 따라 다양한 양상으로 나타나므로 전 지구적인 현상인가에 대해서는 아직 의견이 다양하다(Mann *et al.*, 2009). 지리산 현생화분을 이용하여 고기후를 복원한 본 연구의 결과에 따르면, 약 1150년부터 급격히 기온이 감소한다(그림 7). 이는 기존의 다른 연구에서 중세온난기가 끝난 후 기온이 급감하는 시기와 비슷하다(Mann *et al.*, 2008; Oppo *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2012). 특히 한반도 중부의 동해안 석호에서 분석한 정량적 화분 분석 연구의 소빙기와 일치한다(Park, 2011).

왕등재늪에서 중세온난기로 추정되는 시기에 강

수는 낮았으며 기온의 감소와 동시에 강수량이 증가하였다. 이는 일반적으로 알려진 동아시아 내륙의 소빙기 강수량 감소(Xiao *et al.*, 2008; Chu *et al.*, 2009)와는 다른 양상을 보이고 있다. 최근 다양한 프록시를 이용해 연구한 결과 동아시아 내륙과 달리 해안에서는 소빙기 동안 강수가 증가(Cheng *et al.*, 2015; Park, 2017)하는 경향이 확인되었다(그림 8). 이는 태평양 해수의 영향을 받는 인도네시아, 동태평양 지역과 비슷한 양상을 보이며(그림 9), 본 연구와도 상당부분 일치한다. 태평양 해수의 온도는 장주기성 엘니뇨현상과 밀접한 시기에 동태평양의 해수의 온도가 상승(하강)하고 이에 따른 증가된(감소된) 수증기로 인해 강수는 증가(감소)하는 관계를 가진다. 엘니뇨가 강하(약하)면 반대로 서태평양의 해수면 온도가 하강(상승)하며 수증기가 감소하여(증가하여) 여름철 열대성 저기압의 세력이 약해(강해)지고 강수는 감소(증가)한다(Kug *et al.*, 2010). 또한 동시기에 북서태평양은 온도가 상승(하강)하여 서태평양 지역에 반시계방향(시계방향)의 기류가 형성되어 태풍의 이동을 방해(용이하게)한다(Son *et al.*, 2016; Park, 2018). 동태평양 갈라파고스 지역의 강수가 증가할 때 서태평양 지역의 강수가 감소하며, 반대의 경우도 동일한 것을 확인할 수 있다(그림 9). 이러한 경향이 지리산의 고산 늪지에서도 보이는 것으로 보아 한반도 남부의 지리산 동쪽 일대 역시 장주기성 엘니뇨현상에 영향을 받는 것으로 추정된다. 하지만 지리산은 해안까지 약 90 km의 거리가 있으며 내륙 산간지역이다. 중국 내륙의 해안까지의 거리가 800 km 이상인 지점들은 소빙기에 강수가 감소하였지만, 내륙일지라도 해안까지의 거리가 300~400 km 떨어진 중국의 지역들은 소빙기에 강수가 증가하였다(그림 8). 이러한 것으로 보아 장주기성 엘니뇨현상에 의한 영향이 아주 광범위하며 해안과의 거리가 있는 지역에도 충분히 영향을 미칠 수 있다고 여겨진다. 따라서 지리산을 비롯한 한반도 남부의 내륙 산간 지역들 역시 충분히 해양의 영향을 받을 수 있다고 생각한다.

지리산 왕등재늪에서 복원한 고기후는 중세온난기의 마지막과 소빙기의 기후변화 추세를 반영하고 있다. 하지만 단순히 강수와 기온이 반대로 나타나는 양상을 보이며 중세온난기에서 소빙기로 넘어가는 큰 이벤트 외의 작은 변동들은 반영하지 않는다

(그림 7). 또 왕등재늪과 기존 연구(Mann *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011)의 소빙기의 시작 시기 및 최저 온도 시기에 차이가 존재한다. 이는 코어시료의 연대자료 부족, 현생화분 데이터의 부족 때문인 것으로 보인다. 시추코어의 연대자료는 해당 시대의 정확한 고

기후 해석에 중요한 자료로 활용되므로 향후 해당 지역에서 보다 정밀한 고기후 복원을 위해서는 더 많은 연대 자료가 필요하다. 또한 지리산은 고도가 상승하면서 일정하게 기온은 감소하고 강수는 증가한다. 다양한 지역에 대한 기후정보가 아닌, 단일한

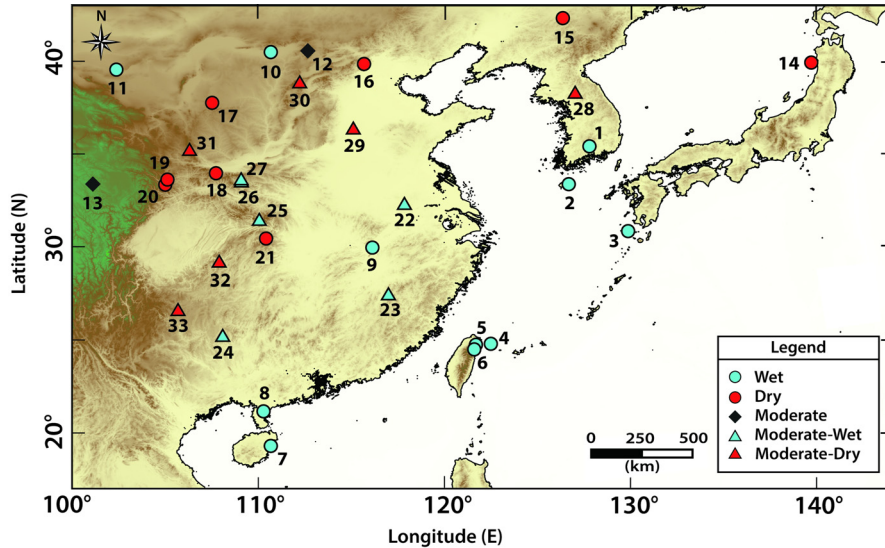


Fig. 8. Location of wetness records from the multi-proxy data during LIA. Blue, red, and black color represents wet, dry, and moderate, respectively (modified from Cheng *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2017). Information of the sites is given in Table. 4.

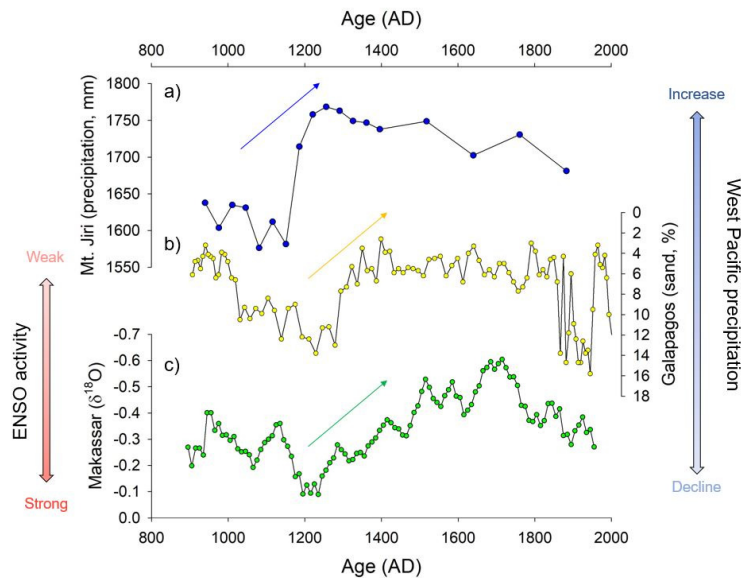


Fig. 9. ENSO driven wetness variability reconstruction from (a) PqPR of Mt. Jiri, Korea, (b) sand (%) reversal records of El Junco Lake, Galapagos (Conroy *et al.*, 2008), and (c) $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ of marine sediment cores from Makassar Strait, Indonesia (Oppo *et al.*, 2009).

산에 대한 일률적인 기후 정보가 현생화분 데이터와 대응되어 기온과 강수가 단순히 반대의 양상으로 나타나게 하는 원인이 된다. 또한 현생화분과 화석화분 간 대응하는 종의 수가 적으면 적을수록 일정 종의 환경 특성에 의존하게 되어 분석 결과에 왜곡이 일어날 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 다양한 지역의 다양한 기후 값과 현생화분 군집에 대한 데이터가 필수적이다.

5. 결 론

한반도 남부 지리산 지역의 현생화분을 바탕으로 고기후를 정량적으로 복원하는 연구를 수행하였다. 한반도의 기후를 고해상도로 보간하는 방법에서는 WorldClim2.1에서 제공하는 기후 자료를 이중선형 보간법으로 다운 스케일링하는 방법이 Meteoland 패키지보다 더 정확하게 평가되었다. WorldClim2.1 보간법으로 생산한 연평균기온, 연강수량 자료와 지리산 현생화분 자료를 바탕으로 기후 전달함수를 생성하는 MAT과 WA-PLS를 실행한 결과, WA-PLS가 더 적합한 기법인 것으로 평가되었다.

획득된 전달함수를 지리산 왕등재늪의 화석화분에 적용시킨 결과, 약 1,150년이 중세온난기와 소빙기의 경계 시기인 것으로 추정되었다. 왕등재늪은 해발 960 m 지점의 고산습지이며 비교적 내륙에 위치하지만, 장주기성 엘니뇨의 영향으로 소빙기에 강수가 증가했던 것으로 판단된다. 본 연구와 기존 연구의 소빙기 최저 온도 시기가 다른 것은 아마도 연대 자료의 해상도에 기인한 것으로 생각된다. 또한 현생화분 데이터 수에 의존하는 화분군집 변수와 기후 변수의 부족으로 정량적인 고기후 복원에 왜곡을 일으켰을 가능성도 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 향후 연구 지역에서의 신뢰성 있는 연대자료 기반의 화분화석 분석이 수행되어야 하며 충분한 한반도의 현생화분 자료를 구축하여 데이터베이스화 시켜야 할 것이다.

WorldClim2.1 기후 자료를 이용하여 한반도에 서도 고해상도 기후 자료를 생산할 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 향후 화분뿐만 아니라 다양한 프록시 자료를 이용한 고기후 복원에 매우 기여할 것으로 기대된다. 또한 WA-PLS는 높은 신뢰도를 보였으며 이는 한반도의 현생화분 자료와 기후 자료를

이용하여 정량적 고기후 자료를 복원할 수 있다는 것을 의미한다. 향후 추가 연구를 통해 한반도 남부 지역 뿐만 아니라 전역의 현생화분 자료를 획득할 수 있다면 한반도의 고기후 복원에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요과제인 “지질 기록체를 활용한 한반도 아열대화 규명 연구: 중기 홀로세 기후-특성 평가(GP2017-013)와 국토지질조사 및 지질도·지질주제도 작성 발간(GP2020-003)”의 일환으로 수행되었다. 이 논문의 심사과정을 통하여 논문의 질적 향상에 도움을 주신 익명의 심사위원께 진심으로 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Birks, H.J.B., 1998, Numerical tools in paleolimnology-Progress, potentialities, and problems. *Journal of Paleolimnology*, 20, 307-332.
- Birks, H.J.B., Heiri, O., Seppä, H. and Björne, A.E., 2010, Strengths and Weaknesses of Quantitative Climate Reconstructions Based on Late-Quaternary. *The Open Ecology Journal*, 3, 68-110.
- Birks, H.J.B. and Seppä, H., 2004, Pollen-based reconstructions of late-Quaternary climate in Europe-progress, problems, and pitfalls. *Acta Palaeobotanica*, 44, 317-334.
- Blaauw, M., 2010, Methods and code for ‘classical’ age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5, 512-518.
- Cai, Y., Tan, L., Cheng, H., An, Z., Edwards, R.L., Kelly, M.J., Kong, X. and Wang, X., 2010, The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. *Earth Planetary Science Letters*, 291, 21-31.
- Cheng, J., Che, F., Feng, S., Huang, W., Liu, J. and Zhou, A., 2015, Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: spatial patterns and possible mechanisms. *Quaternary science reviews*, 107, 98-111.
- Chu, G., Liu, J., Sun, Q., Lu, H., Gu, Z., Wang, W. and Liu, T., 2002, The ‘Mediaeval warm period’ drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China. *The Holocene*, 12, 511-516.
- Chu, G., Sun, Q., Wang, X., Li, D., Rioual, P., Qiang, L., Han, J. and Liu, J., 2009, A 1600 year multiproxy record

- of paleoclimatic change from varved sediments in Lake Xiaolongwan, northeastern China. *Journal of geophysical research*, 114, D22108.
- Conroy, J.L., Overpeck, J.T., Cole, J.E., Shanahan, T.M. and Steinitz-Kannan, M., 2008, Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1166-1180.
- Davis, B.A.S., Brewerb, S., Stevenson, A.C. and Guiot, J., 2003, The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1701-1706.
- De Cáceres, M., Martin-StPaul, N., Turco, M., Cabon, A. and Granda, V., 2018, Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes. *Environmental Modelling and Software*, 108, 186-196.
- Deng, W., Liu, X., Chen, X., Wei, G., Zeng, T., Xie, L. and Zhao, J.-X., 2016, A comparison of the climates of the medieval climate anomaly, little ice age, and current warm period reconstructed using coral records from the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 264-275.
- Fick, S.E. and Hijmans, R.J., 2017, WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302-4315.
- Gates, J.B., Edmunds, W.M., Ma, J.Z. and Sheppard, P.R., 2008, A 700-year history of groundwater recharge in the drylands of NW China. *The Holocene*, 18, 1045-1054.
- Guiot, J., 1990, Methodology of the last climatic cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 80, 49-69.
- Gwon, J.-H., Sin, M.-K., Kwon, H.-J. and Song, H.-K., 2013, A study on the forest vegetation of Jirisan national park. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 16, 93-118 (in Korean with English abstract).
- He, B., Zhang, S. and Cai, S., 2003, Climatic changes recorded in peat from the Dajiu Lake basin in Shennongjia since the last 2600 years. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23, 109-115 (in Chinese with English abstract).
- Hellman, S., Bunting, M.J. and Gaillard, M.-J., 2009, Relevant source area of pollen in patchy cultural landscapes and signals of anthropogenic landscape disturbance in the pollen record: A simulation approach. *Review of Paleobotany and Palynology*, 153, 245-258.
- Herzschue, U., Birks, H.J.B., Mischke, S., Zhang, C. and Böhner, J., 2010, A modern pollen-climate calibration set based on lake sediments from the Tibetan Plateau and its application to a Late Quaternary pollen record from the Qilian Mountains. *Journal of Biogeography*, 37, 752-766.
- Hijmans, R.J., 2020, raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.3-7 <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Hou, J.Z., Tan, M., Cheng, H. and Liu, T.S., 2003, Stable isotope records of plant cover change and monsoon variation in the past 2200 years: evidence from laminated stalagmites in Beijing. *China Boreas*, 32, 304-313.
- Hu, C., Henderson, G.M., Huang, J., Xie, S., Sun, Y. and Johnson, K.R., 2008, Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266, 221-232.
- Juggins, S., 2017, rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version 0.9-21 (<http://cran.r-project.org/package=rioja>).
- Kim, G.S. and Choi, I.S., 1987, A preliminary study on long-term variation of unusual climate phenomena during the past 1000 years in Korea. *The Climate of China and Global Climate*. In: Ye, D., Fu, C., Chao, J. and Yoshino, M. (Eds.), Springer, New York, 30-37.
- Kim, J.G. and Lee, Y.W., 2005, Recent vegetation history and environment changes in Wangdeungjae moor of Mt. Jiri. *The Korean Journal of Ecology*, 28, 121-127.
- Kim, J.S., Kim, G.T. and Joo, H.R., 1991, The actual vegetation of nature ecology conservation area in Mt. Chiri. *Korean journal of Environment and Ecology*, 5, 9-24.
- Kug, J.-S., Ahn, M.-S., Sung, M.-K., Yeh, S.-W., Min, H.-S. and Kim, Y.-H., 2010, Statistical relationship between two types of El Niño events and climate variation over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 46, 467-474 (in Korean with English abstract).
- Kuo, T.-S., Liu, Z.-Q., Li, H.-C., Wan, N.-J., Shen, C.-C. and Ku, T.-L., 2011, Climate and environmental changes during the past millennium in central western Guizhou, China as recorded by stalagmite ZJD-21. *Journal of Asian Earth Science*, 40, 1111-1120.
- Lee, Y.W., 2005, Recent vegetation history and environmental changes in Wangdeungjae moor of Mt. Jiri. M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, 46 p (in Korean with English abstract).
- Li, D.L., Jiang, H., Li, T.G. and Zhao, M.X., 2011, Late Holocene paleoenvironmental changes in the southern Okinawa Trough inferred from a diatom record. *Chinese Science Bulletin*, 56, 1131-1138.
- Li, H.-C., Lee, Z.-H., Wan, N.-J., Shen, C.-C., Li, T.-Y., Yuan, D.-X. and Chen, Y.-H., 2011, The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in an aragonite stalagmite from Furong Cave, Chongqing, China: a 2000-year record of monsoonal climate. *Journal of Asian Earth Science*, 40, 1121-1130.
- Li, Y., Nielsen, A.B., Zhao, X., Shan, L., Wang, S., Wu, J., Zhou, L., 2015, Pollen production estimates (PPEs) and

- fall speeds for major tree taxa and relevant source areas of pollen (RSAP) in Changbai Mountain. *Review of Paleobotany and Palynology*, 216, 92-100.
- Liu, J.B., Chen, F.H., Chen, J.H., Xia, D.S., Xu, Q.H., Wang, Z.L. and Li, Y.C., 2011, Humid medieval warm period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China. *Chinese Science Bulletin*, 56, 2464-2474.
- Liu, L., Wang, W., Chen, D., Niu, Z., Wang, Y., Cao, X. and Ma, Y., 2020, Soil-surface pollen assemblages and quantitative relationships with vegetation and climate from the Inner Mongolian Plateau and adjacent mountain areas of northern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 543, 109600.
- Ma, J. and Edmunds, W.M., 2006, Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran desert ecosystem, Inner Mongolia. *Journal of hydrology*, 14, 1231-1243.
- Man, Z.M., 2009, Research on climate change during historical times in China. Shandong Education Press, Ji'nan.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S. and Ni, F., 2008, Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 13252-13257.
- Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. and Ni, F., 2009, Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and medieval climate anomaly. *Science*, 326, 1256-1260.
- Meng, H.W., Ma, Y.Z., Wang, W. and Sang, Y.L., 2009, Vegetation and environment change based on high resolution pollen records of the last 2400 years in Dingbian, Shaanxi Province, China. *Quaternary Science*, 29, 931-942 (in Chinese with English abstract).
- Moore, P.D., Webb, J.A. and Collinson, M.E., 1991, Pollen analysis, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 216 p.
- Nakagawa, T., Tarasov, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y., 2002, Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*, 21, 2099-2113.
- Oppo, D.W., Rosenthal, Y. and Linsley, B.K., 2009, 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool. *Nature*, 460, 1113-1116.
- Overpeck, J.T., Webb, T. and Prentice, I.C., 1985, Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research*, 23, 87-108.
- Park, J., 2011, A modern pollen-temperature calibration data set from Korea and quantitative temperature reconstructions for the Holocene. *The Holocene*, 21, 1125-1135.
- Park, J., 2018, The Link between Late Holocene Climate Variability in the Korean Peninsula and Tropical Pacific SSTs. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, 24, 121-134 (in Korean with English abstract).
- Park, J., Han, J., Jin, Q., Bahk, J. and Yi, S., 2017, The link between ENSO-like forcing and hydroclimate variability of coastal East Asia during the last millennium. *Scientific Reports*, 7, 8166.
- Park, J.J., Park, J.H., Yi, S., Kim, J.C., Lee, E. and Choi, J., 2019, Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8.2 ka, 4.2 ka, and 2.8 ka BP events, and societal responses on the Korean peninsula. *Scientific Reports*, 9, 10806.
- Park, J.J. and Park, J.N., 2014, Pollen-based temperature reconstructions from Jeju Island, South Korea and its implication for coastal climate of East Asia during the late Pleistocene and early Holocene. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Paleoeecology*, 417, 445-457.
- Paulsen, D.E., Li, H.-C. and Ku, T.-L., 2003, Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 22, 691-701.
- Prentice, I.C., Guiot, J., Huntley, B., Jolly, D. and Cheddadi, R., 1996, Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*, 12, 185-194.
- Pu, Y., Nace, T., Meyers, P.A., Zhang, H., Wang, Y., Zhang, C.L. and Shao, X., 2013, Paleoclimate changes of the last 1000-yr on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau recorded by elemental, isotopic, and molecular organic matter proxies in sediment from glacial Lake Ximencuo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 379-380, 39-53.
- R Core Team, 2020, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>.
- Seppä, H., Birks, J.B., Odland, A., Poska, A. and Veski, S., 2004, A modern pollen-climate calibration set from northern Europe: developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions. *Journal of Biogeography*, 31, 251-267.
- Shi, F., Yang, B., Ljunqvist, F.C. and Yang, F., 2012, Multi-proxy reconstruction of Arctic summer temperatures over the past 1400 years. *Climate Research*, 54, 113-128.
- Son, H.-Y., Park, J.-Y. and Kug, J.-S., 2016, Precipitation variability in September over the Korean Peninsula during ENSO developing phase. *Climate Dynamics*, 46,

- 3419-3430.
- Tan, L., Cai, Y., An, Z., Edwards, R.L., Cheng, H., Shen, C.-C. and Zhang, H., 2011, Centennial to decadal-scale monsoon precipitation variability in the semi-humid region, northern China during the last 1860 years: Records from stalagmites in Huangye cave. *The Holocene*, 21, 287-296.
- ter Braak, C.J.F. and Juggins, S., 1993, Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): An improved method for reconstruction environmental variables from species assemblages. *Hydrobiologia*, 269, 485-502.
- Tong, G.B., Shi, Y., Wu, R.J., Yang, X.D. and Qu, W.C., 1997, Vegetation and climatic quantitative reconstruction of Longgan Lake since the past 3000 years. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 17, 53-61 (in Chinese with English abstract).
- Tong, G.B., Zhang, J.P., Fan, S.X., Zhao, J.B., Wang, G.H., Wang, Y.H., Wang, L.X. and Cui, J., 1996, Environment changes at the top of Taibai Mountain, Qinling since 1 ka ago. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 16, 95-104 (in Chinese with English abstract).
- van Soelen, E.E., Ohkouchi, N., Suga, H., Damsté, J.S.S. and Reichert, G.J., 2016, A late Holocene molecular hydrogen isotope record of the East Asian Summer Monsoon in southwest Japan. *Quaternary Research*, 86, 287-294.
- Wang, L.-C., Behling, H., Lee, T.-Q., Li, H.-C., Huh, C.-A., Shiau, L.-J. and Chang, Y.-P., 2014, Late Holocene environmental reconstructions and their implications on food events, typhoon, and agricultural activities in NE Taiwan. *Climate of the Past*, 10, 1857-1869.
- Wang, L.-C., Behling, H., Lee, T.-Q., Li, H.-C., Huh, C.-A., Shiau, L.-J., Chen, S.-H. and Wu, J.-T., 2013, Increased precipitation during the Little Ice Age in northern Taiwan inferred from diatoms and geochemistry in a sediment core from a subalpine lake. *Journal of Paleolimnology*, 49, 619-631.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A. and Li, X., 2005, The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic. *Climate Science*, 308, 854-857.
- Xiao, J., Si, B., Zhai, D., Itoh, S. and Lomatidze, Z., 2008, Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian Monsoon variability. *Journal of Paleolimnology*, 40, 519-528.
- Xu, Q., Li, Y., Bunting, M.J., Tian, F. and Liu, J., 2010a, The effects of training set selection on the relationship between pollen assemblages and climate parameters: Implications for reconstructing past climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 289, 123-133.
- Xu, Q., Xiao, J., Li, Y., Tian, F. and Nakagawa, T., 2010b, Pollen-based quantitative reconstruction of Holocene climate changes in the Daihai Lake area, Inner Mongolia, China. *Journal of Climate*, 23, 2856-2868.
- Yamada, K., Kamite, M., Saito-Kato, M., Okuno, M., Shinozuka, Y. and Yasuda, Y., 2010, Late Holocene monsoonal-climate change inferred from lakes Ni-no-Megata and San-no-Megata, northeastern Japan. *Quaternary International*, 220, 122-132.
- Yan, H., Sun, L., Oppo, D., Wang, Y., Xie, Z., Liu, X. and Cheng, W., 2011, South China Sea hydrological changes and Pacific Walker Circulation variations over the last millennium. *Nature Communications*, 2, 293.
- Yi, S. and Kim, J.-Y., 2009, Pollen indication of Holocene vegetation and environments in the Sacheon-dong archaeological site, Cheongju, Chungbuk province. *Journal of the paleontological Society of Korea*, 25, 63-76 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., Kim, J.-Y., Yang, D.-Y., Kim, J.C., Nahm, W.-H. and Yun, H.-S., 2008, Palynological implication for environmental changes in the Hanam area, Gyeonggi Province since the Last Glacial Maximum. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 673-684 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-O. and Hwang, S., 2011, Pollen analysis at loc. Seonggeon and paleo-environmental changes on the royal district in gyeongju. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 513-525 (in Korean with English abstract).
- Yun, J.-H., Kim, J.-H., Oh, K.-H. and Lee, B.-Y., 2010, Vertical distribution of vascular plants in Jungsanri, Mt. Jiri by temperature gradient. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 24, 680-707 (in Korean with English abstract).
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R.L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., Liu, J., Tan, M., Wang, X., Liu, J., An, C., Dai, Z., Zhou, J., Zhang, D., Jia, J., Jin, L. and Johnson, K.R., 2008, A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322, 940-942.
- Zhang, R., Tian, F., Xu, Q., Zhou, X., Liu, X. and Cao, X., 2020, Representation of modern pollen assemblage to vertical variations of vegetation and climate in the Yadong area, eastern Himalaya. *Quaternary International*, 536, 45-51.
- Zhang, W., Yan, H., Liu, C., Cheng, P., Li, J., Lu, F., Ma, X., Dodson, J., Hejnis, H. and An, Z., 2018, Hydrological changes in Shuangchi Lake, Hainan Island, tropical China, during the Little Ice Age. *Quaternary International*, 487, 54-60.
- Zhao, Z.L., Wang, Y., Yao, P.Y., Chi, Z.Q. and Guan, Y.Y.,

- 2011, Environmental changes recorded by lacustrine sediments since Late Holocene in central inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 30, 1251-1255 (in Chinese with English abstract).
 - Zheng, J.Y., Wang, W.C., Ge, Q.S., Man, Z.M. and Zhang, P.Y., 2006, Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 17, 579-592.
 - Zheng, Z., Wei, J., Huang, K., Xu, Q., Lu, H., Tarasov, P., Luo, C., Beaudouin, C., Deng, Y., Pan, A., Zheng, Y., Luo, Y., Nakagawa, T., Li, C., Yang, S., Peng, H. and Cheddadi, R., 2014, East Asian pollen database: modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. Journal of Biogeography, 41, 1819-1832.
 - Zhou, A.F., Sun, H.L., Chen, F.H., Zhao, Y., An, C.B., Dong, G.H., Wang, Z.L. and Chen, J.H., 2010, High-resolution climate change in mid-late Holocene on Tianchi Lake, Liupan Mountain in the Loess Plateau in central China and its significance. Chinese Science Bulletin, 55, 2118-2121.
-
- Received : September 14, 2020
Revised : September 18, 2020
Accepted : September 18, 2020