

토양 깊이별 연간 토양온도 추정모형 설정

엄기철

세종데이터연구소장

Development of the estimation models for annual soil temperature according to soil depth

Eom, Ki Cheol

Director General, Sejong Data Research Institute, Suwon, Korea

ABSTRACT

This study focus on development of the estimation models for yearly bare soil temperature (T_s) according to soil depth (z) and examined the difference between them [$dT(z_1-z_2)=T_s(z_1)-T_s(z_2)$] using data collected from 23th May 2023 to 23th May 2024 in Sandy Loam. Principle results are as follows: (1) The deeper of the soil depth, the higher of the annual maximum, average and minimum soil temperature, where as the smaller of the annual range. (2) The deeper of the soil depth, the smaller of standard deviation of the annual soil temperature. (3) The differential of soil temperature to soil depth (dT/dz) for annual maximum, average and minimum soil temperature was 0.015°C , 0.049°C and $0.110^\circ\text{C}/\text{cm}$, respectively. (4) The cation process of the models were based on the error analysis criteria with the view point of accuracy, precision and association. (5) The estimation models for T_s at the depth according to Julian date were developed as a sine functions (MTs10: model for 10 cm, MTs20: model for 20 cm, MTs30: model for 30 cm) all judged 『Fit well』. (6) The estimation models for dT between the T_s of the soil depth according to Julian date were developed as a sine functions [(MdTs(10-20): model for 10-20 cm, MdTs(20-30): model for 20-30 cm, MdTs(10-30): model for 10-30 cm)] all judged 『Fit』. In summary, this study successfully developed estimation models for T_s and dT , employing sine function regression approaches. The models were rigorously evaluated for the change of soil temperature using error analysis criteria, providing valuable insights into annual soil temperature dynamics according to soil depth in Sandy Loam.

Key words : Trigonometric Function Model, Fitness, Precision, Association, Relative Sensitivity

1. 서론

토양온도(T_s)는 작물 생육과 수량에 매우 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이며(Lal and Shukla, 2004). T_s 는 불포화 토양의 작용에 결정적인 영향을 미친다는 많은 연구가 있다(Delage, 2013; Hashemi et al., 2022; Pham and Sutman, 2023; Pham et al., 2023; Thota and Vahedifard, 2021), T_s 는 토양수분에도 큰 영향을 미친다(Chi et al.,

2020; Li et al., 2018; Urqueta et al., 2018). 따라서 T_s 는 토양수분과 식물의 농업적 한발을 예측하는 데도 이용되고 있다(Ferreira and Duarte, 2019; Muro et al., 2018). 또한 토양 경도에 미치는 T_s 의 영향 연구(Garcia et al., 2023), 토양 유기물의 형성에 미치는 T_s 의 영향 연구(Li et al., 2024), 토양 구조에 미치는 T_s 의 영향 연구(Lupattelli et al., 2024), 토양 호흡에 미치는 T_s 의 영향 연구(Lloyd and Taylor, 1994; Ning et al., 2020) 등이 있

†Corresponding author : kceom6578@hanmail.net (Nongminhoikoan 205, 92, Suseong-ro, Paldal-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16432, Korea. Tel. +82-31-291-3346)

ORCID 엄기철 0000-0002-8098-4876

며, 특히, 작물 생육에 미치는 영향은 기온보다 T_s 가 더 크다는 연구 결과도 있다(Chakraborty et al., 2021). T_s 는 태양열 등 수열 인자와 복사열 등 방출 인자의 영향을 받고 토층 간 열 이동이 일어나므로 토양 깊이 별 T_s 는 어떻게 변하는지 구명할 필요가 있다. 그러나 이들을 측정할 원 데이터(raw data) 또는 상관 분석 등에 의하여 개략적인 변화성은 파악이 되지만, 이들만 가지고는 온도의 변화성을 계량적으로 산정하기 어려우므로, 모델링(modeling)이라는 과정을 통하여 실측치에 근거한 추정모형을 설정하고 설정된 모형을 분석하여 그 변동성을 계량적으로 파악할 수 있으므로 온도 변화와 관련한 모델링 연구가 많이 수행되고 있다(Derradji and Aiche, 2014; Fu et al., 2018; Islam et al., 2021). 또한, 어떤 물체의 온도 등을 측정할 경우 그 측정치와 모형에 의한 추정치는 오차를 포함하고 있다. 이 오차가 참값과 어느 정도 변이를 나타내는가를 판단하는 것이 정확도(accuracy) 분석이나 자연현상의 측정에는 대부분 경우 진정한 참값을 알 수 없으므로, 모형에 의한 추정치가 실측치와 비교하여 어느 정도 오차를 포함하고 있는가에 근거하여 그 모형의 적절성(fitness)을 판단하게 된다. 일반적으로 모형의 적절성은 다음과 같은 세 가지의 관점(Liemohn et al., 2021)에서 판단하게 된다. 첫째, 정확도(accuracy)의 관점이다. 이를 판단하는 지표로서는 평균제곱근 편차(root mean square error, RMSE: Wang and Li, 2010; Zhang et al., 2021), Nash & Sutcliffe 계수(NSE: Nash and Sutcliffe, 1970) 등이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 RMSE를 정확도의 지표로 삼고 산출하였다. 둘째, 정밀도(precision)의 관점이다. 정밀도 분석은 오차 분석 이론에 바탕을 두고 상대 정밀도(relative sensitivity, RS)를 지표로 삼으며 (Goodman, 1960; Mandel, 1964a, 1964b; Shein et al., 2013), 모형에 의한 추정치 표준편차(standard deviation, STD)의 실측치 STD에 대한 비율인 실측치 기준 표준편차 비율(ratio of standard deviation, RSTD)을 지표로 삼기도 한다(Liemohn et al., 2021). 본 연구에서는 RSTD와 RS 두 가지를 정밀도의 지표로 삼고 산출하였다. 셋째, 상호관련성(association) 관점이다. 변량 간의 상관관계를 분석하여 결정계수(coefficient of determination: R^2)를 지표로 삼아 통계적 유의성이 인정되는가를 판단하게 된다. 하지만 모형의 검증을 위해서 R^2 하나에만 근거하여 상호관련성 관점에서만 모형의 적절성을 판단하는 것은 올바른 모형검증이라고 할 수 없다(Krause et al., 2005; Legates and McCabe, 1999). 또한, 현재까지의 토양온도

관련 연구에서 토양 깊이 간 온도 차이(dT)에 대한 연구 결과는 찾아보기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 dT 도 하나의 연구대상으로 삼고 그 변화양상을 구명코자 하였다. 본 연구는 나지 토양의 깊이별 T_s 를 측정하고, T_s 변화에 대한 시계열 분석을 수행함과 동시에 토양 깊이 간 T_s 의 온도 차이(dT)에 대한 시계열 분석을 수행함과 동시에 이들에 대한 적절한 추정모형(Model)의 함수 형태를 선정하고 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정하여 모형을 설정하였으며, 각 추정모형의 RMSE, R^2 , RSTD, RS 등을 산출하여 모형의 적절성을 검증하고, 설정된 모형들을 분석하여 T_s 및 dT 의 변동성을 구명코자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 전라북도 완주군 이서면 반교리 707-19 농촌진흥청 국립원예특작과학원 시험 포장(동경 147.033677도, 위도 35.840791도)의 기상 관측 장치(ENCOSYS, W W Norton & Company, USA)가 설치된 지점의 나지 포장에서 수행되었다. 포장의 토성은 사양토(SL: Sandy Loam)이었다. 포장의 T_s ($^{\circ}C$)를 측정하기 위한 센서(TEROS12, T12-00109142, METER, USA)를 각각 지하 10, 20 및 30 cm에 설치하였고 Data logger (ZL6 series, ZENTRA Cloud, METER, USA)를 통하여 10분 간격으로 자동 수집한 후 무선통신 시스템을 이용하여 Serve에 송신된 데이터를 이용하였다. 본 연구에 사용된 데이터는 2023년 5월 23일부터 2024년 5월 23일까지 일 년 동안 T_s 가 일 평균 T_s 에 가장 근접하는 범위에 해당되는 시각인 10:00(Eom et al., 1990)의 T_s 를 연구대상으로 삼았다. Julian date 값은 본 연구의 1년간 조사 기간 중 2023년 5월 23일부터 2023년 12월 31일까지는 본래의 Julian date 값으로 표현하였으며, 2024년 경우에는 1월 1일을 367일로 하여 2024년 5월 23일까지의 값을 표현하였다. T_s 및 dT 에 대한 추정모형(MTsi 및 MdTsi)을 각각 식 (1)의 trigonometric function 형태인 sine-wave model로 선정(Derradji and Aiche, 2014; Eom et al., 2014; Islam et al., 2021; Lal and Shukla, 2004; Paul et al., 2004; Xu et al., 2020)하고 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정하였다.

$$MTsi \text{ 및 } MdTsi = y_0 + a \cdot \sin[(2\pi \cdot X/b) + c] \quad (1)$$

단, i : 토양온도 및 토양 온도 차이의 해당 토양 깊이 (cm)

X: Julian date

y_0 , a , b , c : 계수

여기서 y_0 는 모형 전체의 값에 영향을 미치는 절편으로써 보정 계수이며 a 는 변화 진폭, b 는 변화 주기, c 는 변곡점의 시기와 관련된 계수이다.

모형검증을 위한 지표로 삼은 RMSE는 식 (2), RMSE의 실측치 STD에 대한 비율인 실측치 기준 RMSE 비율(the ratio of RMSE to STD of measurement, RRMSEM)은 식 (3), RMSE의 모형에 의한 추정치 STD에 대한 비율인 추정치 기준 RMSE 비율(the ratio of RMSE to STD of estimation, RRMSEE)는 식 (4), RSTD는 식 (5)와 같이 산정하였다(Moriasi et al., 2007; Naseri et al., 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)(E_i - M_i)}{n}} \quad (2)$$

단, E_i : 모형에 의한 추정치(Estimated value)

M_i : 실측치(Observed value)

n : sample 수

$$RRMSEM = (RMSE / STD \text{ of measured value}) \quad (3)$$

$$RRMSEE = (RMSE / STD \text{ of estimated value}) \quad (4)$$

$$RSTD = (STD \text{ of estimated value} / STD \text{ of measured value}) \quad (5)$$

이 경우 정확도 관점에서 RRMSEM와 RRMSEE의 두 가지 값이 모두 0.5 이하이면 그 모형이 『매우 적절함』(『Fit well』), 한 가지 값이라도 0.5-1.0이면 그 모형이 『적절함』(『Fit』)이라고 판정한다. 또한, 정밀도 관점에서 RSTD의 값이 1.0 이하이면 그 모형이 『매우 적절함』 또는 『적절함』이라고 판정한다(Liemohn et al., 2021). 정밀도 관점의 또 다른 기준인 T_a 과 T_s 및 dT 의 실측치 (M)에 대한 추정모형에 의한 추정치 (E)의 상관관계에 대한 상대정밀도(relative sensitivity of estimation to measurement, $RS[E/M]$) 분석은 식 6부터 식 9까지의 과

정을 통하여 분석하였으며, 이 경우 $RS[E/M]$ 값이 클수록 정밀도가 높다(『매우 적절함』 또는 『적절함』)고 판정한다(al Irsyard et al., 2019; Goodman, 1960). 또한 본 연구에서 상호관련성 관점에서 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정한 추정모형의 R^2 값이 0.9 이상이면 『매우 적절함』이라고 판정하였다.

$$E = a \cdot M \quad (6)$$

$$RS[E/M] = [(dE/dM) / (S_E / S_M)] \quad (7)$$

$$(S_E / S_M) = (a^2 / R^2) \quad (8)$$

$$RS[E/M] = a / (a^2 / R^2) = (R^2/a) \quad (9)$$

단, S_E : E 의 표준오차 (Standard error)

S_M : M 의 표준오차 (Standard error)

R^2 : M 에 대한 E 의 직선 회귀 식에 대한 결정계수

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 깊이 별 토양온도 변화양상 및 시계열 변화 추정모형 설정

나지 토양의 연중 토양 깊이 별 T_s 의 경시적 변화양상을 볼 때(Fig. 1, Table 1), 전체 경향은 세 토양 깊이 모두 sine-wave 형태를 보였다. 토양 깊이 10, 20 및 30 cm의 연간 T_s 변화양상을 보면; 연 최고 온도는 각각 30.9, 30.4 및 30.6°C를 나타내어 10 cm에서 가장 높았으나, 연 평균 온도는 각각 15.29, 15.79 및 16.26°C를 나타내어 토양 깊이가 깊을수록 높았다. 연 최저온도는 각각 0.4, 1.8 및 2.6°C를 나타내어 토양 깊이가 깊을수록 높았다. 연 최고 온도와 최저온도의 차이인 연교차 온도(range)는 각각 30.50, 28.60 및 28.00°C를 나타내어 토양 깊이가 깊을수록 range는 작았다. 연간 T_s 의 표준편차(STD: Standard deviation)는 각각 9.136, 8.513 및 8.380°C를 나타내어 토양 깊이가 깊을수록 STD는 작았다. 또한, 단위 토양 깊이 당 연간 토양온도 변화량 $[(dT/dZ)^\circ C/cm]$ 은 최대 토양온도, 평균 토양온도 및 최저 토양온도 경우 각각 0.015, 0.049 및 0.110°C/cm이었다. 이와 같은 결과는 러시아 한대 지역에서 토양 깊이 40 cm와 4.4 m의 연 최저 토양온도 변화량을 측정한 Islam et al. (2021)의 연구 결과

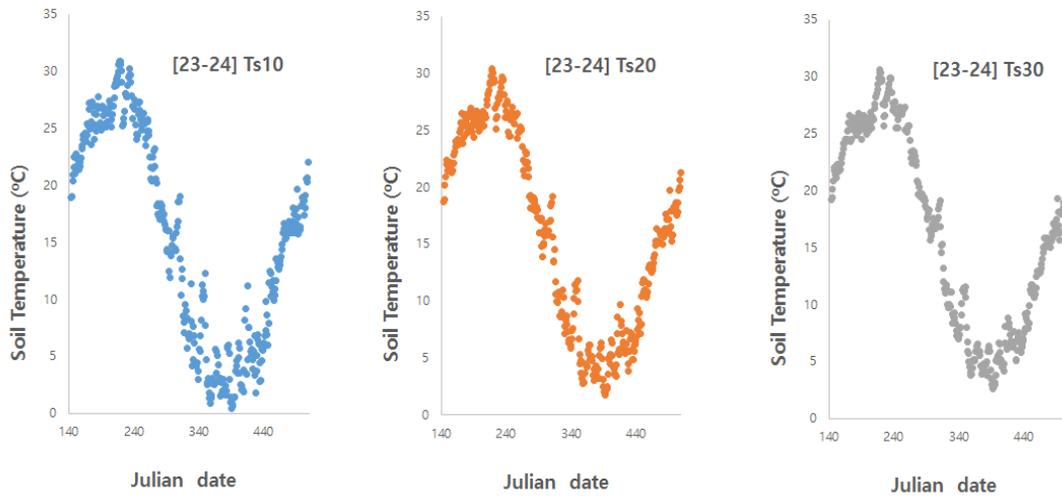


Fig. 1. Changes in soil temperature of the soil depth for 10 cm (Left), 20 cm (Middle) and 30 cm (Right) as a function of Julian date, respectively

Table 1. The statistics of the annual soil temperature at soil depth 10 cm, 20 cm and 30 cm, respectively

Statistics	Soil depth (cm)		
	10	20	30
Maximum soil temperature (°C)	30.9	30.4	30.6
Average soil temperature (°C)	15.29	15.79	16.26
Minimum soil temperature (°C)	0.4	1.8	2.6
Range (°C)	30.5	28.6	28.0
Standard deviation (°C)	9.14	8.51	8.38
Standard error (°C)	0.478	0.445	0.438
The Julian date for maximum soil temperature	218	219	219
The Julian date for minimum soil temperature	391	393	393
dT/dz for maximum soil temperature (°C/cm)		0.015	
dT/dz for average soil temperature (°C/cm)		0.049	
dT/dz for minimum soil temperature (°C/cm)		0.110	

[(dT/dz)=0.035oC/cm]보다 높았다(Fig. 1 및 Table 1).

또한, Ts의 시계열 변화에 대하여 four parameter sine function을 이용하여 토양 깊이별 토양 오도의 변화 추정 모형을 설정하고 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정하여 모형을 설정한 결과는 토양 깊이 10 cm (MTs10), 20 cm (MTs20) 및 30 cm (MTs30)의 경우 각각 식 (10), 식 (11) 및 식 (12)와 같다.

$$MTs10: Ts = 15.13 + 12.69 \sin[(2\pi \cdot JD / 356.0) - 2.136] \quad (10)$$

$$MTs20: Ts = 15.68 + 11.90 \sin[(2\pi \cdot JD / 357.8) + 4.120] \quad (11)$$

$$MTs30: Ts = 16.15 + 11.77 \sin[(2\pi \cdot JD / 357.7) + 4.081] \quad (12)$$

즉, 토양 깊이가 깊을수록 모형의 y 절편은 높았고, 진폭은 낮았으며, 변화 주기는 별 차이가 없었다.

MTs10 모형 검증결과(Fig. 2 및 Table 2), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 2.00이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.219와 0.225로서 두 가지 모두 0.5 이

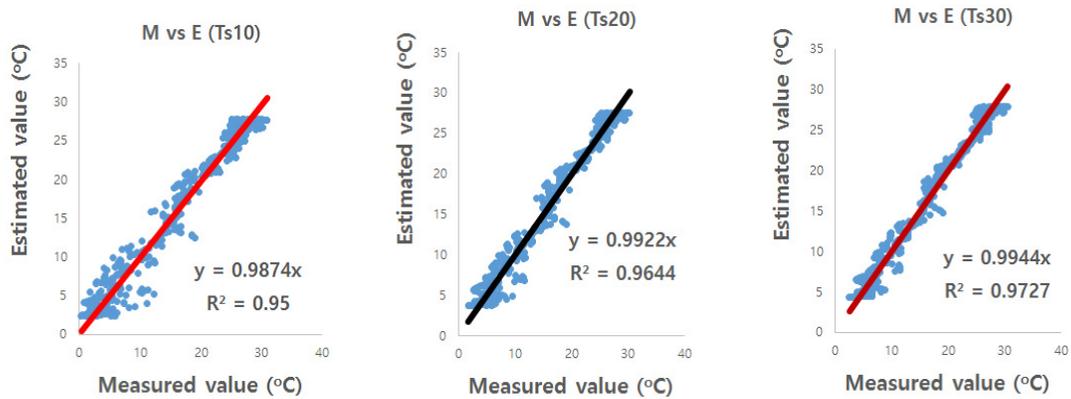


Fig. 2. Relationship between measured and estimated value by the MTs10 (Left: at soil depth 10 cm), MTs20 (Middle: at soil depth 20 cm) and MTs30 (Right: at soil depth 30 cm) for soil temperature, respectively

Table 2. The parameters and indices of measured (M) and estimated value (E) to verify the accuracy, precision and association of the MTs10 (model for 10 cm soil depth), MTs20 (model for 20 cm soil depth) and MTs30 (model for 30 cm soil depth) for the annual soil temperature, respectively

MTs10				MTs20				MTs30			
Parameter	Value	Index	Value	Parameter	Value	Index	Value	Parameter	Value	Index	Value
$\Sigma(M-E)^2$	1,467	$R^2(\text{model})$	0.952	$\Sigma(M-E)^2$	917	$R^2(\text{model})$	0.965	$\Sigma(M-E)^2$	686	$R^2(\text{model})$	0.973
N	366	RMSE	2.00	N	366	RMSE	1.58	N	366	RMSE	1.37
STD(M)	9.136	RRMSEM	0.219	STD(M)	8.513	RRMSEM	0.186	STD(M)	8.380	RRMSEM	0.163
STD(E)	8.913	RRMSEE	0.225	STD(E)	8.364	RRMSEE	0.189	STD(E)	8.267	RRMSEE	0.166
$R^2(E/M)$	0.950	RSTD	0.976	$R^2(E/M)$	0.964	RSTD	0.983	$R^2(E/M)$	0.973	RSTD	0.987
a(E/M)	0.987	RS(E/M)	0.963	a(E/M)	0.992	RS(E/M)	0.972	a(E/M)	0.994	RS(E/M)	0.979

하이였다. 이를 기준으로 하여 『매우 적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.976으로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.963으로서 『매우 적절함』으로 판정되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R2값은 0.952로서 0.9 이상이었으며 통계적으로 고도의 유의성이 인정되어 『매우 적절함』으로 판정되었다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MTs10 모형은 『매우 적절함』으로 판단되었다.

MTs20 모형 검증결과(Fig. 2 및 Table 2), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 1.58이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.186과 0.189로서 두 가지 모두 0.5 이하이었다. 이를 기준으로 하여 『매우 적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.983으로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.972로서 『매우 적절함』으로

판정되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R2값은 0.965로서 0.9 이상이었으며 통계적으로 고도의 유의성이 인정되어 『매우 적절함』으로 판정되었다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MTs20 모형은 『매우 적절함』으로 판단되었다.

MTs30 모형 검증결과(Fig. 2 및 Table 2), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 1.37이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.163과 0.166으로서 두 가지 모두 0.5 이하이었다. 이를 기준으로 하여 『매우 적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.987로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.979로서 『매우 적절함』으로 판정되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R2값은 0.973으로서 0.9 이상이었으며 통계적으로 고도의 유의성이 인정되어 『매우 적절함』으로 판정되었

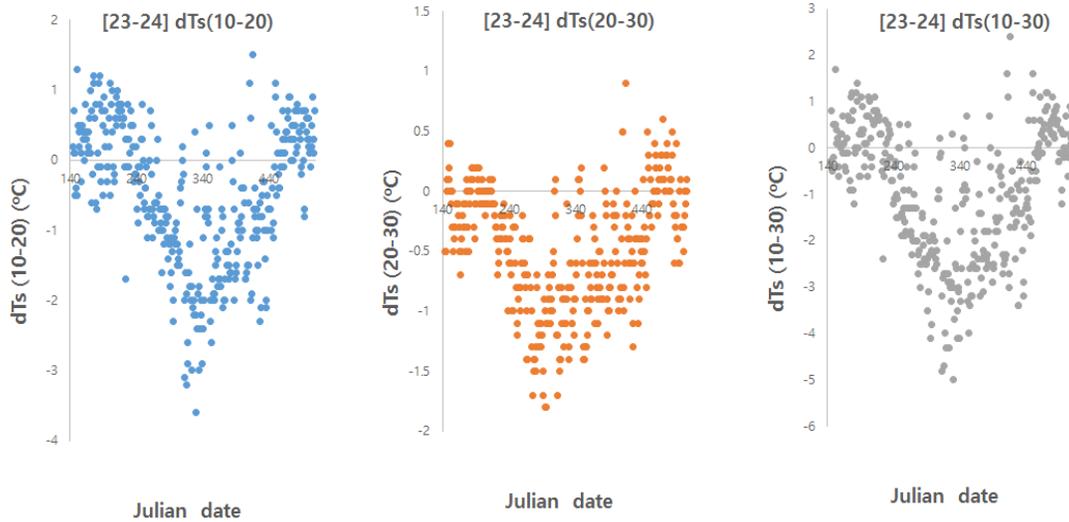


Fig. 3. Changes in soil temperature difference between soil depth for 10–20 cm (Left), 20–30 cm (Middle) and 10–30 cm (Right) as a function of Julian date, respectively

Table 3. The statistics of the soil temperature difference between soil depth for MdTs(10–20) (Ts for 10 cm–Ts for 20 cm), MdTs(20–30) (Ts for 20 cm–Ts for 30 cm) and MdTs(10–30) (Ts for 10 cm–Ts for 30 cm) from 2023.05.23. to 2024.05.23., respectively

Statistics	MdTs (10-20)	MdTs (20-30)	MdTs (10-30)
Maximum difference (°C)	1.5	0.9	2.4
Average difference (°C)	-0.49	-0.47	-0.96
Minimum difference (°C)	-3.6	-1.8	-5.0
Range (°C)	5.10	2.70	7.40
Standard deviation (°C)	0.990	0.501	1.422
Standard error (°C)	0.052	0.026	0.074
The Julian date for maximum difference	416	416	416
The Julian date for minimum difference	330	296	330

다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MTs30 모형은 『매우 적절함』으로 판단되었다.

3.2. 토양 깊이 간 토양온도 차이의 변화양상 및 시계열 변화 추정모형 설정

토양 깊이 간 dTs 즉 토양 깊이 10과 20 cm의 온도 차이[dTs(10-20) = Ts10-Ts20], 토양 깊이 20과 30 cm의 온도 차이[dTs(20-30) = Ts20-Ts30] 및 토양 깊이 10과 30 cm의 온도 차이[dTs(10-30) = Ts10-Ts30]의 연 변화양상을 보면(Fig. 3 및 Table 3); 연간 dTs의 최댓값과 최솟값의 차이인 범위(range)는 각각 5.10, 2.70 및 7.40°C를 나

타내었고 연간 STD는 각각 0.990, 0.501 및 1.422°C를 나타내어 토양 깊이에 따른 일정한 경향은 보이지 않았다.

또한, dTs의 시계열 변화에 대하여 four parameter sine function을 이용하여 토양 깊이별 토양온도 차이의 변화 추정모형을 설정하고 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정하여 모형을 설정한 결과 dTs(10-20), dTs(20-30) 및 dTs(10-30)의 경우 각각 식 (13), 식 (14) 및 식 (15)와 같았으며, 연간 변화양상의 전체 경향은 세 경우 모두 sine-wave 형태를 보였다(Fig. 4).

$$\text{MdTs(10-20): } Ts = -0.612 + 1.035 \sin[(2\text{Pi} \cdot \text{JD} / 318.8) - 2.118] \quad (13)$$

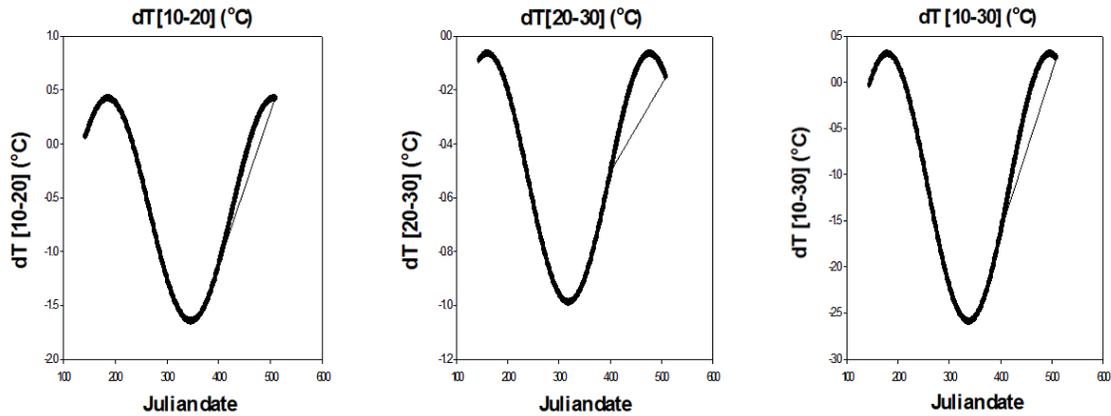


Fig. 4. The estimation models for the soil temperature difference between soil depth for 10–20 cm (Left), 20–30 cm (Middle) and 10–30 cm (Right) as a function of Julian date, respectively

$$\text{MdTs}(20-30): T_s = -0.527 + 0.462 \sin\left[\frac{2\pi \cdot \text{JD}}{317.3}\right] + 4.676 \quad (14)$$

$$\text{MdTs}(10-30): T_s = -1.141 + 1.450 \sin\left[\frac{2\pi \cdot \text{JD}}{317.7}\right] - 1.975 \quad (15)$$

즉, 토양 깊이 간 온도 차이모형의 y 절편, 진폭 및 변화 주기는 토양 깊이와 관련하여 일정한 경향을 보이지 않았다.

MdTs(10-20) 모형 검증결과(Fig. 5 및 Table 4), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 20.64이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.650과 0.857로서 두 가지 모두 0.5-1.0

이었다. 이를 기준으로 하여 『적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.759로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.0.778로서 『적절함』으로 판정되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R²값은 0.576로서 0.9 이하이었으며 통계적으로 유의성이 인정되어 『적절함』으로 판정되었다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MdTs(10-20)은 『적절함』으로 판단되었다.

MdTs(20-30) 모형 검증결과(Fig. 5 및 Table 4), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 0.37이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.734와 1.083로서 『적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.678로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.229로서 『적절함』으로 판정

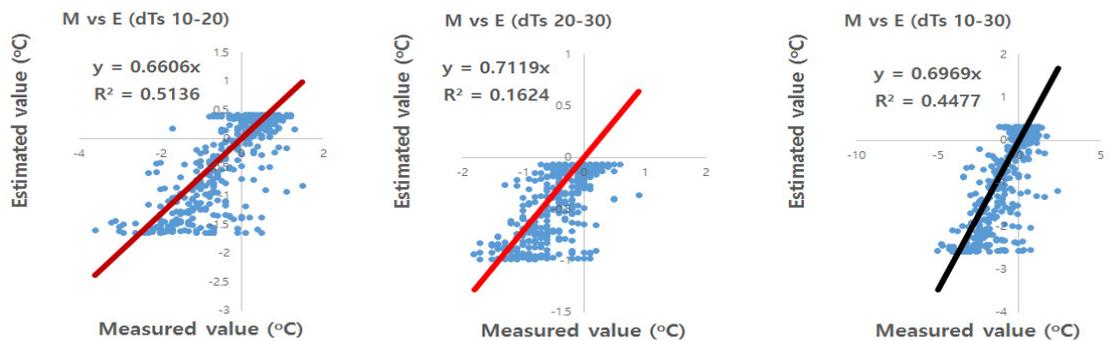


Fig. 5. Relationship between measured and estimated value by the MdTs(10–20) (Left: Ts for 10 cm–Ts for 20 cm), MdTs(20–30) (Middle: Ts for 20 cm–Ts for 30 cm) and MdTs(10–30) (Right: Ts for 10 cm–Ts for 30 cm) for the soil temperature difference between soil depth, respectively

Table 4. The parameters and indices of measured (M) and estimated value (E) to verify the accuracy, precision and association of the MdTs(10-20) (Ts for 10 cm-Ts for 20 cm), MdTs(20-30) (Ts for 20 cm-Ts for 30 cm) and MdTs(10-30) (Ts for 10 cm-Ts for 30 cm) for the soil temperature difference between soil depth, respectively

Parameter	MdTs(10-20)			Parameter	MdTs(20-30)			Parameter	MdTs(10-30)		
	Value	Index	Value		Value	Index	Value		Value	Index	Value
$\Sigma(M-E)^2$	151.7	$R^2(\text{model})$	0.576	$\Sigma(M-E)^2$	49.4	$R^2(\text{model})$	0.459	$\Sigma(M-E)^2$	326.3	$R^2(\text{model})$	0.558
N	366	RMSE	0.64	N	366	RMSE	0.37	N	366	RMSE	0.94
STD(M)	0.990	RRMSEM	0.650	STD(M)	0.501	RRMSEM	0.734	STD(M)	1.422	RRMSEM	0.664
STD(E)	0.751	RRMSEE	0.857	STD(E)	0.339	RRMSEE	1.083	STD(E)	1.062	RRMSEE	0.889
$R^2(E/M)$	0.514	RSTD	0.759	$R^2(E/M)$	0.163	RSTD	0.678	$R^2(E/M)$	0.448	RSTD	0.747
a(E/M)	0.661	RS(E/M)	0.778	a(E/M)	0.712	RS(E/M)	0.229	a(E/M)	0.697	RS(E/M)	0.643

되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R2값은 0.459로서 0.9 이하이었으며 통계적으로 유의성이 인정되어 『적절함』으로 판정되었다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MdTs(20-30)은 『적절함』으로 판단되었다.

MdTs(10-30) 모형 검증결과(Fig. 5 및 Table 4), 정확성 관점에서 볼 때, RMSE는 0.94이었으며, RRMSEM과 RRMSEE는 각각 0.664와 0.889로서 두 가지 모두 0.5-1.0 이었다. 이를 기준으로 하여 『적절함』으로 판정되었다. 정밀도 관점에서 볼 때, RSTD는 0.747로서 1.0 이하이었으며, RS[E/M]는 0.643으로서 『적절함』으로 판정되었다. 상호관련성 관점에서 볼 때, 모형의 계수에 대한 R2값은 0.558로서 0.9 이하이었으며 통계적으로 유의성이 인정되어 『적절함』으로 판정되었다. 이와 같은 결과에 따라 종합적으로 볼 때, MdTs(10-30)은 『적절함』으로 판단되었다.

본 연구 결과의 모델들은 나지에서 토심 30 cm까지의 토성이 sandy loam인 제한적인 조건에서 가능하다는 한계점이 있음을 밝혀준다. 다만, 조건이 다른 경우의 실험에서 토심 별 토양온도의 변화양상 차이 등을 구명할 경우 비교 고찰의 주요 참고 결과가 될 것으로 사료 되며, 또한, 본 연구 결과는 토심 별 열 이동연구에 주요 연구 결과로 활용될 수 있다고 사료 된다.

4. 결론

본 연구는 전북 완주에 소재한 농촌진흥청 국립원예특작과학원의 사양토 시험 포장의 나지 토양에서 2023년 5월 23일부터 2024년 5월 23일까지 매일 10:00에 측정된 토양온도(Ts) 및 토양 깊이 간 온도 차이(dT)를 분석하여

구명한 결과는 다음과 같다.

첫째, 연 최고 온도는 10 cm에서 가장 높았으나, 연 평균 온도는 토양 깊이가 깊을수록 높았고 연 최저온도는 토양 깊이가 깊을수록 높았으며 연 최고 온도와 최저온도의 차이인 연교차 온도(range)는 토양 깊이가 깊을수록 작았다.

둘째, 연간 Ts의 표준편차(STD: Standard deviation)는 토양 깊이가 깊을수록 작았다.

셋째, 단위 토양 깊이당 연간 토양온도 변화량 [(dT/dZ)°C/cm]은 최대 토양온도, 평균 토양온도 및 최저 토양온도 경우 각각 0.015, 0.049 및 0.110°C/cm이었다.

넷째, Ts의 시계열 변화에 대하여 four parameter sine function을 이용하여 토양 깊이별 토양 온도의 변화 추정 모형을 설정하고 최소제곱법에 따라 오차가 최소인 계수를 산정하여 모형을 설정한 결과는 토양 깊이 10 cm (MTs10), 20 cm (MTs20) 및 30 cm (MTs30)의 경우 각각 식 (16), 식 (17) 및 식 (18)과 같았다.

$$MTs10: Ts = 15.13 + 12.69 \sin[(2\pi \cdot JD / 356.0) - 2.136] \quad (16)$$

$$MTs20: Ts = 15.68 + 11.90 \sin[(2\pi \cdot JD / 357.8) + 4.120] \quad (17)$$

$$MTs30: Ts = 16.15 + 11.77 \sin[(2\pi \cdot JD / 357.7) + 4.081] \quad (18)$$

즉, 토양 깊이가 깊을수록 모형의 y 절편은 높았고, 진폭은 낮았으며, 변화 주기는 별 차이가 없었다.

다섯째, Ts의 시계열 변화에 대한 추정모형들의 검증 결과 MTs10, MTs20 및 MTs30 모두 『매우 적절함』으로 판단되었다.

여섯째, 토양 깊이 간 dTs 즉 토양 깊이 10과 20 cm의 온도 차이[dTs(10-20) = Ts10-Ts20], 토양 깊이 20과 30 cm의 온도 차이[dTs(20-30) = Ts20-Ts30] 및 토양 깊이 10과 30 cm의 온도 차이[dTs(10-30) = Ts10-Ts30]의 연간 변화양상의 전체 경향은 세 경우 모두 sine-wave 형태를 보였으며 각각 식 (19), 식 (20) 및 식 (21)과 같았다.

$$\text{MdTs}(10-20): Ts = -0.612 + 1.035 \sin[(2\pi \cdot JD / 318.8) - 2.118] \quad (19)$$

$$\text{MdTs}(20-30): Ts = -0.527 + 0.462 \sin[(2\pi \cdot JD / 317.3) + 4.676] \quad (20)$$

$$\text{MdTs}(10-30): Ts = -1.141 + 1.450 \sin[(2\pi \cdot JD / 317.7) - 1.975] \quad (21)$$

일곱째, dTs의 시계열 변화에 대한 추정모형들의 검증 결과 세 경우 모두 『적절함』으로 판단되었다.

결론적으로 볼 때, 이 모델의 적절함은 나지 토양에서 완주지역의 강수 및 기상조건에서 토양온도 측정 센서 TEROS12를 이용하여 2023년 5월 23일부터 2024년 5월 23일까지의 일 년간 측정된 결과에 근거하여 적절하다는 것을 밝혀두는 바이다. 토양 깊이 10, 20 및 30 cm의 각각 시계열에 대한 Ts 추정모형인 MTs10, MTs20 및 Mts30 모두 『매우 적절함』으로 판단되었다, 토양 깊이 간 토양온도 차이의 추정모형인 MdTs(10-20), MdTs(20-30) 및 Mds(10-30) 모두 『적절함』으로 판단되었다,

사사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(공동과제명: 지역별 재배 적지 발작물 작부체계 실태조사, D/B 구축 및 경제성 분석, 공동과제 번호: PJ01528904)의 지원에 의해 수행되었습니다.

Reference

al Irsyard MI, Halog A, Nepal R. 2019. Renewable

energy projections for climate change mitigation: An analysis of uncertainty and errors. *Renew Energy* 130: 536-546.

Chakraborty PK, Banerjee S, Nath R, Samanta S. 2021. Assessing congenial soil temperature and its impact on root growth, grain yield of summer rice under varying water stress condition in Lower Gangetic Plain of India. *J Saudi Soc Agric Sci* 21(2): 98-107.

Chi Y, Sun J, Sun Y, Liu S, Fu Z. 2020. Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China. *Glob Ecol Conserv* 23: e01092.

Delage P. 2013. On the thermal impact on the excavation damaged zone around deep radioactive waste disposal. *J Rock Mech Geotech Eng* 5(3): 179-190.

Derradji M, Aiche M. 2014. Modeling the soil surface temperature for natural cooling of buildings in hot climates. *Procedia Comput Sci* 32: 615-621.

Eom KC, Lee BK, Kim YS, Eom HY. 2014. Daily changes in red-pepper leaf surface temperature with air and soil surface temperatures (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 47(5): 345-350.

Eom KC, Son ER, Ryu KS. 1990. Changes in evapotranspiration and soil water status to vinyl mulching (in Korean with English abstract). *Korean J Soil Sci Fert* 23(2): 100-106.

Ferreira LS, Duarte DHS. 2019. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. *Urban Clim* 27: 105-123.

Fu XI, Yu ZB, Ding YJ, Tang Y, Lu HS, Jiang XI, Ju Q. 2018. Analysis of influence of observation operator on sequential data assimilation through soil temperature simulation with common land model. *Water Sci Eng* 11(3): 196-204.

Garcia LM, Pinyol NM, Lloret A, Soncco EA. 2023. Influence of temperature on residual strength of clayey soils. *Eng Geol* 323: 107220.

Goodman LA. 1960. On the exact variance of products. *J*

- Am Statist Ass 55(292): 708-713.
- Hashemi A, Sutman M, Abuel-Naga H. 2022. Thermomechanical response of kaolin clay-concrete interface in the context of energy geostructures. *Can Geotech J* 60(3): 380-396.
- Islam MA, Lubbad R, Amiri SAG, Isaev V, Shevchuk Y, Uvarova AV, Afzal MS, Kumar A. 2021. Modelling the seasonal variations of soil temperatures in the Arctic coasts. *Polar Sci* 30: 100732.
- Krause P, Boyle DP, Base F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv Geosci* 5: 89-97.
- Lal R, Shukla MK. 2004. Soil temperature and heat flow in soils. In: *Principles of soil physics*. New York: Marcel Dekker. p. 515-555.
- Legates DR, McCabe GL Jr. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour Res* 35(1): 233-241.
- Li C, Ran M, Song L, Zhang Y, Li A, Shi W, Li W, Cheng J, Zhao B, Luo Y, et al. 2024. Temperature effects on cropland soil particulate and mineral-associated organic carbon are governed by agricultural land-use types. *Geoderma* 448: 116942.
- Li X, Zhou Y, Asrar GR, Zhu Z. 2018. Creating a seamless 1 km resolution daily land surface temperature dataset for urban and surrounding areas in the conterminous United States. *Remote Sens Environ* 206: 84-97.
- Liemohn MW, Shane AD, Azari AR, Petersen AK, Swiger BM, Mukhopadhyay A. 2021. RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. *J Atmos Sol-Terr Phys* 218: 105624.
- Lloyd J, Taylor JA. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct Ecol* 8(3): 315-323.
- Lupattelli A, Salciarini D, Cecinato F, Veveakis M, Freitas TMB, Webb PJB. 2024. Temperature dependence of soil-structure interface behaviour in the context of thermally-activated piles: A review. *Geomech Energy Environ* 37: 100521.
- Mandel J. 1964a. The mathematical framework of statistics part II. In: *The statistical analysis of experimental data*. New York: John Wiley & Sons. p. 58-77.
- Mandel J. 1964b. The comparison of methods of measurement. In: *The statistical analysis of experimental data*. New York: John Wiley & Sons. p. 363-389.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50(3): 885-900.
- Muro J, Strauch A, Heinemann S, Steinbach S, Thonfeld F, Waske B, Diekkruger B. 2018. Land surface temperature trends as indicator of land use changes in wetlands. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 70: 62-71.
- Naseri F, Azari M, Dastorani MT. 2021. Spatial optimization of soil and water conservation practices using coupled SWAT model and evolutionary algorithm. *Int Soil Water Conserv Res* 9(4): 566-577.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J Hydrol* 10(3): 282-290.
- Ning S, Song J, Ru J, Zhou Z, Zhang J, Liu X, Hui Y, Ma Y, Wan S. 2020. Nonadditive and legacy effects of spring and autumn warming on soil respiration in an old-field grassland. *Ecosystems* 24(2): 421-433.
- Paul KJ, Polglase PJ, Smethurst PJ, O'Connell AM, Carlyle CJ, Khanna PK. 2004. Soil temperature under forests: A simple model for predicting soil temperature under a range of forest types. *Agric For Meteorol* 121(3-4): 167-182.
- Pham TA, Hashemi A, Sutman M, Medero GM. 2023. Effect of temperature on the soil-water retention characteristics in unsaturated soils: Analytical and experimental approaches. *Soils Found* 63(3): 101301.
- Pham TA, Sutman M. 2023. A simplified method for bearing-capacity analysis of energy piles integrating temperature-dependent model of soil-water characteristic curve. *J Geotech Geoenviron Eng* 149(9): 04023080.

- Shein EV, Dembovetsky AV, Panina SS. 2013. Modeling soil water movement under low head ponding and gravity infiltration using data determined with different methods. *Procedia Environ Sci* 19: 553-557.
- Thota SK, Vahedifard F. 2021. Stability analysis of unsaturated slopes under elevated temperatures. *Eng Geol* 293: 106317.
- Urqueta H, Jodal J, Herrera C, Wilke HG, Medina A, Urrutia J, Custodio E, Rodriguez J. 2018. Land surface temperature as an indicator of the unsaturated zone thickness: A remote sensing approach in the Atacama Desert. *Sci Total Environ* 612: 1234-1248.
- Wang XC, Li J. 2010. Evaluation of crop yield and soil water estimates using the epic model for the loess plateau of China. *Math Comput Model* 51(11-12): 1390-1397.
- Xu C, Qu JJ, Hao X, Zhu Z, Gutenberg L. 2020. Surface soil temperature seasonal variation estimation in a forested area using combined satellite observations and in-situ measurements. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 91: 102156.
- Zhang T, Huang JC, Lei Q, Liang X, Lindsey S, Luo J, Zhu AX, Bao W, Liu H. 2021. Empirical estimation of soil temperature and its controlling factors in Australia: Implication for interaction between geographic setting and air temperature. *Catena* 208: 105696.