

DNDC 지역별 구동을 위한 입력자료 생성 도구 개발

현신우¹, 황우성¹, 유희진¹, 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원
(2021년 1월 8일 접수; 2021년 2월 23일 수정; 2021년 2월 26일 수락)

Development of an Input File Preparation Tool for Offline Coupling of DNDC and DSSAT Models

Shinwoo Hyun¹, Woosung Hwang¹, Heejin You¹, Kwang Soo Kim^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Korea

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received January 8, 2021; Revised February 23, 2021; Accepted February 26, 2021)

ABSTRACT

The agricultural ecosystem is one of the major sources of greenhouse gas (GHG) emissions. In order to search for climate change adaptation options which mitigate GHG emissions while maintaining crop yield, it is advantageous to integrate multiple models at a high spatial resolution. The objective of this study was to develop a tool to support integrated assessment of climate change impact by coupling the DSSAT model and the DNDC model. DNDC Regional Input File Tool(DRIFT) was developed to prepare input data for the regional mode of DNDC model using input data and output data of the DSSAT model. In a case study, GHG emissions under the climate change conditions were simulated using the input data prepared by the DRIFT. The time to prepare the input data was increased by increasing the number of grid points. Most of the process took a relatively short time, while it took most of the time to convert the daily flood depth data of the DSSAT model to the flood period of the DNDC model. Still, processing a large amount of data would require a long time, which could be reduced by parallelizing some calculation processes. Expanding the DRIFT to other models would help reduce the time required to prepare input data for the models.

Key words: Greenhouse gas, Crop growth, Gridded simulation, Model coupling, Object-oriented programming



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 언

기후변화를 야기하는 온실가스는 농업생태계에서도 상당량이 배출된다(Gregorich *et al.*, 2005). 주요 온실가스인 CO₂, CH₄ 와 N₂O의 전체 배출량 중 25%, 65% 및 90%가 농업 생태계에서 배출되고 있다(Duxbury, 1994). 국내의 경우, 농업 분야에서의 온실가스 배출량은 전체의 3.2%로 적은 비율이지만 그 잠재성을 무시할 수는 없다(Myeong, 2014). 특히, 농업 생태계의 비생물학적 요소인 토양은 탄소와 질소의 저장소임과 동시에 배출원이기도 하다. 전 세계적으로 토양 호흡으로 인한 CO₂ 배출량은 화석연료 연소에 의한 배출량보다 11배 많다(Raich *et al.*, 2002). 토양에 축적된 유기 탄소 중 많은 양이 토양 상부 1m 이내에 저장되어 있다(Batjes, 1996). 또한, 토양에 축적된 탄소는 작물 재배로 인해 배출이 가속될 수 있다(Kasimir-Klemetsson, 1997). 따라서, 토양에서의 온실가스 배출량을 추정하여 온실가스 감축을 위한 작물 재배관리 기법들을 평가하고 적용하는 것이 요구된다.

토양에서 유래하는 온실가스 배출량을 추정하기 위해 토지 이용에 따른 고정된 배출 계수가 사용되어 왔다(Jeong *et al.*, 2014a). 그러나, 작물, 토양, 기후 및 재배 관리법에 따라 배출량에 차이가 있다. 따라서, 특정 지점별로 배출량을 추정하는 것이 국가적인 배출량 산정에 신뢰도를 높일 수 있다. 특히, 토양 모형을 사용할 경우, 농업 생태계 내에서 유래하는 온실가스 배출량을 재배 관리 방법에 따라 추정할 수 있어 온실가스 감축을 위한 대책 수립을 지원할 수 있다. 해외에서는 COUP (Jansson and Moon, 2001), DNDC (Li *et al.*, 1992), DAYCENT (Parton *et al.*, 1998), EXPERT-N (Engel and Priesack, 1993) 등 토양으로부터 온실가스 배출량을 추정할 수 있는 모형들이 사용되고 있다. 예를 들어, Del Grosso *et al.*(2005)는 미국내 온실가스 배출량 산정을 위해 지역 특이적 정보가 반영되는 DAYCENT 모형을 사용할 것을 제안하였다. Pathak *et al.*(2005)는 인도 벼 재배지의 온실가스 배출량을 DNDC 모형을 사용하여 추정하였다. 여러 토양 모형들 중 DNDC 모형은 국내에 도입되어 널리 사용되고 있다(Hwang *et al.*, 2015; 2017). 예를 들어, Jeong *et al.*(2014b)은 DNDC 모형을 이용하여 국내 16개 지자체를 대상으로 논에서의 온실가스 배출량을 평가하였다.

DNDC 모형은 작물의 생육 과정을 비교적 단순하

게 모의하기 때문에, 온실가스 배출량을 추정할 때 작물 재배 조건을 정밀하게 고려하기 어렵다. 예를 들어, DNDC는 출수기를 특정할 수 없는 단순한 생장곡선을 활용하여 작물의 생육을 추정한다(Li *et al.*, 1994). 반면, 온도와 일장 조건에 따라 변화하는 품종별 출수기 차이를 모의할 수 있는 작물 생육 모형들은 DNDC 모형이 가지는 단점을 보완할 수 있다. 예를 들어, 시비 및 관개와 같은 작물의 재배관리는 생육 시기에 크게 영향을 받기 때문에(Hyun and Kim, 2017), 출수기와 같은 생물계적 요소를 온실가스 배출량 추정에 반영하는 것이 중요하다. 또한, 기후변화 적응을 위한 재배관리 방법을 도출하기 위해서는 DSSAT 모형과 같이 과정 기반 작물모형을 사용하는 것이 유리하다.

온실가스 배출량을 최소화하면서 수량을 높일 수 있는 최적의 재배 관리 방법을 탐색하기 위해 여러 모형들을 연계한 작물 생육 및 온실가스 배출량 모의가 수행되어 왔다(Jiang *et al.*, 2019). 예를 들어, Tian *et al.*(2018)은 작부 체계에 따라 분류된 중국 9개 지역을 대상으로 DNDC, DSSAT 및 AEZ 모형들을 연계하여 얻어진 모의를 통해 수량 감소 없이 온실가스 배출량을 감축할 수 있는 재배 관리 방식을 제안하였다. 특히, 작물 모형을 토양 모형과 연계할 경우, 작물 생육 조건에 따른 온실가스 배출량 차이를 보다 현실적으로 반영하는 것이 가능하므로, 온실가스 저감을 위한 농업분야 대응 방안을 도출하기 위해 도움을 줄 수 있다.

국내 농경지를 대상으로 온실가스 배출량을 최소화하면서도 높은 수준의 수량을 얻기 위한 기후변화 적응 대책을 도출하기 위해, 상세한 공간적 규모에서 모형들을 구동하는 것이 유리하다. 특히, 농가 규모가 작은 국내 농업 조건을 반영하기 위해 고해상도 격자 자료를 사용하여 작물 모형이나 온실가스 배출 모형들이 구동되고 있다. 예를 들어, 국내에는 공간해상도를 1km²로 설정하여 DNDC 모형을 구동한 연구 결과들이 보고되고 있다(Min *et al.*, 2018). 그러나, 고해상도의 공간적 모의를 위해 입력자료를 준비하는 것은 상당한 노력이 소요된다(Kim *et al.*, 2020). 예를 들어, DNDC 모형은 일별 기상자료, 토양자료 및 재배관리 자료들이 개별적으로 저장된 입력파일들에 의존한다. 따라서, 이들 입력자료들을 개별 격자점별로 생성하기 위해 상당한 노력과 시간이 요구된다.

본 연구에서는 DSSAT모형과 DNDC모형을 연계하여 상세한 공간 규모에서 기후변화 영향평가를 수행

할 수 있도록 지원하기 위한 도구를 개발하고자 하였다. 특히, DSSAT모형의 입력자료로부터 DNDC 모형의 입력자료를 자동으로 생산할 수 있는 도구를 개발하여 이들 모형의 연계를 지원하고자 하였다. DNDC와 DSSAT 모형들의 연계를 통해, 보다 통합적인 농업 환경 모의를 수행할 수 있을 뿐 아니라, 앞으로 DNDC를 이용하는 연구자들에게 입력자료를 준비하기 위해 소요되는 시간과 노력을 절감시킬 수 있을 것이다. 또한, 이러한 도구의 기능을 확장하여, DSSAT 모형과 DNDC 모형뿐만 아니라 다른 농업 생태계의 생물학적 요인의 동태를 모의할 수 있는 모형과의 연계를 지원할 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. DNDC 모형의 입력파일 구성

DNDC 모형은 농업 생태계에서의 탄소와 질소의 순환을 모의하기 위한 모형이다. 입력자료는 기상자료, 토양자료 및 재배관리자료 등이 요구되며, ASCII 텍스트 형식의 파일들을 사용한다. 모형을 구동하는 방식에 따라 사용되는 입력파일의 구성에 차이가 있다. 예를 들어, 지점별로 모의를 할 경우 해당 지점에 대한 기상자료 파일과 나머지 정보를 저장하고 있는 파일이 각각 요구된다. 반면, 격자별로 모의를 수행하기 위해서는 재배관리별로 별도의 입력파일이 사용되며, 개별 파일에는 각 격자점들에 대한 지점 번호와 해당 지점에 대한 재배관리 정보가 탭으로 구분된 테이블 형태로 저장된다(Table 1).

기상 입력파일은 일 단위 기상자료를 사용하며, 자료의 가용도에 따라 입력변수가 변경될 수 있다(Fig. 1A). 예를 들어, 기상자료를 확보하기 어려운 지역에 대해서는 날짜, 일별 평균 기온($^{\circ}\text{C}$) 및 강수량(cm)만으로도 입력자료를 구성할 수 있다. 최저기온 및 최고기온($^{\circ}\text{C}$) 자료가 수집될 수 있는 경우 평균기온을 대체하여 사용할 수 있으며, 일사량(MJ m^{-2}), 상대습도(%) 및 풍속(m s^{-1})에 대한 자료들이 활용 가능한 경우 이들 기상 요소들을 추가하여 기상 입력 파일을 구성할 수 있다. 기상자료에는 모의 대상 년도의 모든 날짜에 대한 자료가 포함되어야 한다.

토양자료는 기본적으로 0~10 cm에 대한 정보가 요구되며, 격자별 일반적인 정보를 저장하는 Climate Soil 파일에 포함된다(Fig. 1B). 격자 단위에서 모의를 수행할 경우 지점별 모의에 비하여 적은 양의 정보가 요구되어, 토양유기탄소(kg C kg^{-1}), 점토함량, pH, 용적밀도(g cm^{-3})에 대한 자료만으로도 모의가 가능하다. 또한, 경사도와 토양 염도(salinity)에 대한 자료들이 추가적으로 사용할 수 있으며, 나머지 변수들에 대한 값은 모형에서 제공하는 기본값을 사용한다(Gilhespy *et al.*, 2014).

DNDC 모형은 복잡한 형태의 재배관리와 작부체계가 사용되는 농경지에서도 모의가 가능하도록 개발되었기 때문에 재배관리와 관련한 입력자료에는 여러 정보가 하나의 값으로 저장된다. 예를 들어, 하나의 격자 내에서 여러 작물이 재배되는 것을 상정하여 모의가 수행될 수 있기 때문에, 재배관리 종류에 따라 개별 파일이 사용되고, 각각의 파일 내에 격자별 및 작물별

Table 1. List of parameters included in input files for the DNDC model in the region mode

Input file type	Parameters(variables)
Climate	Daily weather data including temperature, precipitation, wind speed, radiation, and humidity
ClimateSoil	Grid ID, climate file name, N deposition, soil properties for each grid cell
CropArea	Acreage of cropping system
CropParameter	Maximum yield, thermal degree days to maturity, and water requirement for each crop
Fertilization	Fertilizer application date, type, and rate
Flooding	Start date, end date and method of flooding
Irrigation	Irrigated percent for upland crop
ManureAmendment	Manure application date, CN ratio, and rate
PlantingHarvestDates	Planting and harvest dates
ResidueManagement	Fraction of above ground residue
Tillage	Tillage date and method

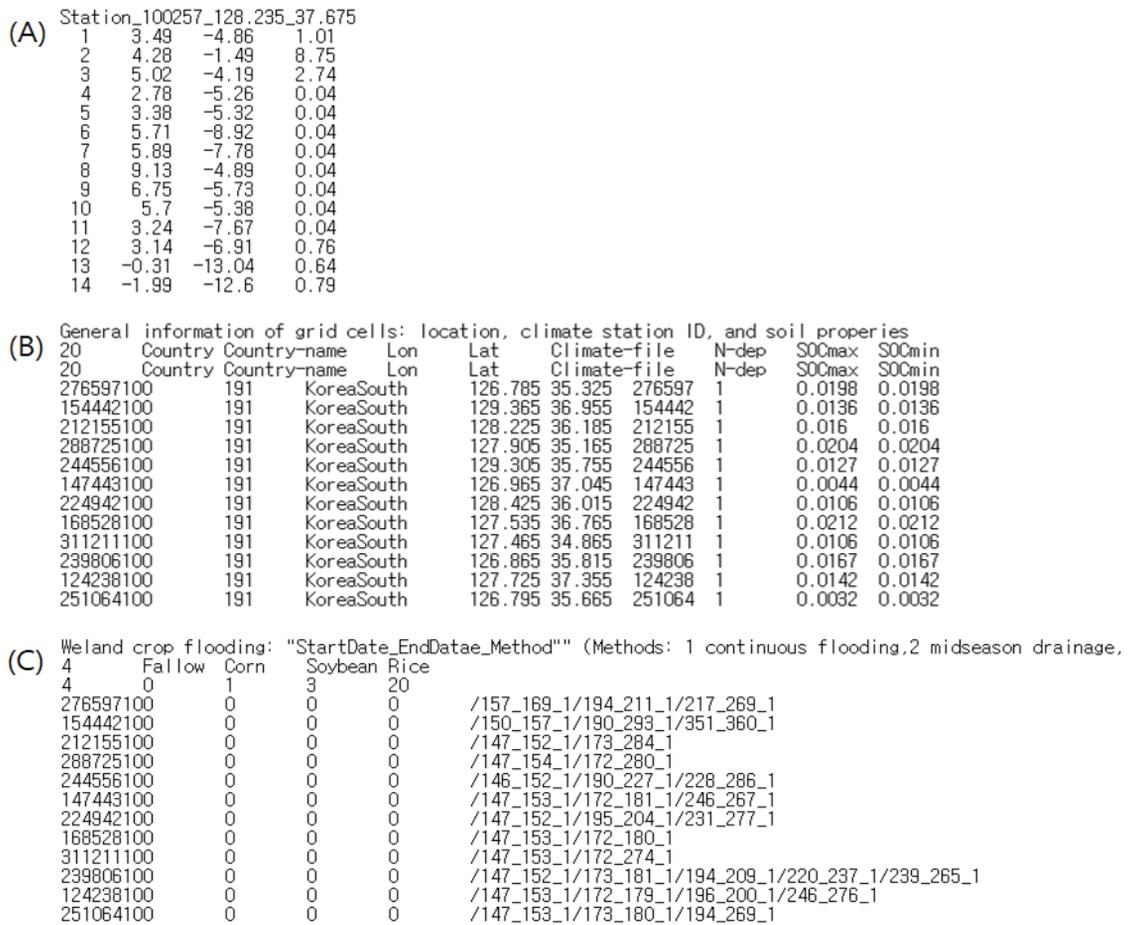


Fig. 1. Sample of input files for the DNDC model. (A) - (C) represent climate file, ClimateSoil file, and Fertilization file, respectively.

로 설정값들이 저장된다(Fig. 1C). 또한, 여러번에 걸쳐 수행되는 재배관리를 반영하기 위해 구분자 문자(delimiter)를 사용하여 재배관리 입력값을 구성한다. 예를 들어, 세 기간에 나누어 담수를 한 경우 “/157_169_1/194_211_1/217_269_1”로 나타낼 수 있다. 여기에서 ‘/’는 각각 개별 재배관리를 구분하기 위해 사용되며, ‘_’는 재배관리의 여러 설정값을 구분하기 위해 사용된다. 문자열에 포함된 수치는 재배관리 파일에 따라 서로 다른 정보를 의미하며, 담수관리에 대한 경우 순서대로 담수 시작시기, 담수 종료시기 및 담수 방법을 나타낸다.

2.2. DSSAT 모형의 입력파일 구성

작물 생육 과정을 상세하게 모의하는 DSSAT 모형은 주요 식량작물인 벼와 옥수수를 포함한 40여개의

작물에 대한 생육 모의를 지원한다(Jones *et al.*, 2003). 개별 작물별로 작물 생육을 모의하는 모듈들이 DSSAT 모형에 포함되어 있다. 이들 모듈들은 기상, 토양 및 재배관리 모듈과 자료를 교환할 수 있도록 통합되어 있다. 작물의 생육과 관련된 과정들을 구체적으로 모의하기 위해 복잡한 구조를 가진 기상, 토양, 재배관리 등의 입력 자료가 사용된다. 모형을 구동하기 위해서는 기상 입력파일, 토양 입력파일과 함께 작물의 특성을 반영하기 위한 종, 생태형 및 품종 모수에 대한 입력파일이 사용된다. 또한, 복잡한 재배관리 정보가 저장된 생육 모의 제어 설정 파일이 요구된다. 탭을 사용하여 자료를 구분했던 DNDC모형과는 다르게, DSSAT의 입력자료들은 고유한 형식을 가지고 있으며, 각각의 변수마다 정해진 너비에 맞춰 자료가 저장된다.

(A) *WEATHER DATA : X243

```

@ INSI      LAT      LONG  ELEV  TAV  AMP REFHT WNDHT
X243      35.7     126.7  12  14.2  28.3 -99.0 -99.0
@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
16001  5.5   8.6  -1.1  0.0
16002  5.6  12.6  1.6   0.0
16003  9.9  12.7  2.5   0.0
16004  10.0  8.5  -0.1  0.0
16005  5.7   3.7  -2.3  0.0
16006  4.4   5.7  -4.3  0.0
16007  5.6   3.2  0.3   0.0
16008  5.5   3.5  -1.9  0.5
16009  5.9   6.2  0.1   0.0
16010  10.4  7.6  -1.6  0.0
16011  10.3  3.5  -3.2  0.0
16012  9.7   2.5  -6.4  0.1
16013  3.3   2.2  -2.0  6.5
16014  9.1   2.8  -2.3  1.0
16015  6.2   6.7  -2.0  0.5
16016  11.0  9.2  -2.5  0.0
16017  3.2   4.6  0.4   4.5
16018  4.2   3.7  -4.9  0.5
16019  3.3  -3.4  -9.1  9.0
    
```

(B) *536F000000 RDASOILDB -99 160 RDASOILSERIES

```

@SITE  COUNTRY  LAT  LONG  SCS  FAMILY
KOREA  KOREA     -99  -99  So
@ SCOM  SALB  SLUT  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
R  0.14  6.0  0.60  73.0  1.00  1.00  IB001  IB001  IB001
@  SLB  SLMH  SLLS  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLS1  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC  SADC
14  A  0.154  0.297  0.497  1.000  0.23  1.23  1.81  27.1  39.3  -99.0  -99  4.4  3.7  19.6  -99
26  BAt  0.192  0.323  0.453  0.670  0.23  1.37  0.77  34.5  29.6  -99.0  -99  4.5  3.8  16.0  -99
38  Bt1  0.185  0.309  0.433  0.527  0.23  1.43  0.58  33.1  26.8  -99.0  -99  4.5  3.7  16.2  -99
56  Bt2  0.189  0.284  0.418  0.391  0.43  1.47  0.58  29.7  23.2  -99.0  -99  4.7  3.9  13.5  -99
160  C  0.156  0.263  0.396  0.115  0.43  1.54  0.21  26.5  20.9  -99.0  -99  4.5  3.7  13.6  -99
@  SLB  SLPX  SLPT  SLPO  CAC03  SLAL  SLFE  SLMN  SLBS  SLPA  SLPB  SLKE  SLMG  SLNA  SLSU  SLEC  SLCA
14  -99  -99  -99  -99  -99  -99  -99  36.2  -99  -99  1.1  1.3  0.1  -99  -99  -99
26  -99  -99  -99  -99  -99  -99  -99  29.5  -99  -99  1.3  1.1  0.1  -99  -99  -99
38  -99  -99  -99  -99  -99  -99  -99  20.2  -99  -99  1.1  0.7  0.1  -99  -99  -99
56  -99  -99  -99  -99  -99  -99  -99  34.9  -99  -99  2.0  1.1  0.1  -99  -99  -99
160  -99  -99  -99  -99  -99  -99  -99  33.0  -99  -99  1.9  1.0  0.1  -99  -99  -99
    
```

(C) *TREATMENTS -----FACTOR LEVELS-----

```

@N R O C TNAME ..... CU FL SA IC MP MI MF MR MC MT ME MH SM
1 1 0 0 BUAN2018 Chuchung 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1
2 1 0 0 BUAN2018 GLUE 2 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1

*CULTIVARS
@C CR INGENO CNAME
1 RI NK0003 CHUCHUNG
2 RI GL0001 GLUE

*FIELDS
@L ID_FIELD WSTA.... FLSA FLOB FLDT FLDD FLDS FLST SLTX SLDP ID_SOIL FLNAME
1 BUAN001 X2431801 -99 0 DR000 0 0 00000 CL 125 536F000000 JB
@L .....XCRD .....YCRD .....ELEV .....AREA .SLEN .FLWR .SLAS FLHST FHDUR
1 ..... 0 ..... 0 ..... 0 ..... 0 0 0 0 -99 -99

*PLANTING DETAILS
@P PDATE EDATE PPOP PPOE PLME PLDS PLRS PLRD PLDP PLWT PAGE PENV PLPH SPRL
1 18144 -99 55.56 -99 T H 30 0 5 0 30 25 3 0

*IRRIGATION AND WATER MANAGEMENT
@I EFIR IDEP ITHR IEPT IOFF IAME IAMT IRNAME
1 1 50 50 100 IB001 IRO01 100 -99
@I IDATE IROP IRVAL
1 18139 IRO10 200
1 18139 IRO08 7
1 18139 IRO09 250
1 18139 IRO11 50

*FERTILIZERS (INORGANIC)
@F FDATE FMCD FADC FDEP FAMN FAMP FAMK FAMC FAMO FOCD FERNAME
1 18139 FE005 AP012 15 55 0 0 -99 -99 -99 Control
1 18154 FE005 AP012 1 22 0 0 -99 -99 -99 Control
1 18189 FE005 AP012 1 33 0 0 -99 -99 -99 Control
    
```

Fig. 2. Sample of input files for the DSSAT model. (A) - (C) represent weather file, soil file, and experimental file, respectively.

기상입력파일은 기상자료가 수집된 지역에 대한 정보를 저장하는 지역정보 부분과 수집된 기상자료를 저장하는 기상정보 부분으로 구성되어 있다(Fig. 2A). 지역정보 부분에서는 위도(°), 경도(°), 고도(m)에 대한 위치 정보와 연평균 기온(°C), 연교차(°C) 및 CO₂ 농도(ppm) 등의 생육 모의 대상 지점에 대한 일반적인 정보를 포함하고 있다. 기상정보 부분에 포함되는 기상자료는 일 단위의 자료가 수록되며, 일사량(MJ m⁻²), 최고기온(°C), 최저기온(°C) 및 강수량(mm) 등의 기상변수가 필수적으로 포함되어야 한다. 또한, 기상자료로부터 발생하는 작물 생육 모의 결과의 불확도를 감소시키기 위해 광합성 유효복사(moles m⁻²), 이슬점 온도(°C) 및 풍속(km/d)에 대한 자료가 추가적으로 사용될 수 있다(Ahuja *et al.* 2016).

토양 입력파일에는 토양이 가지는 일반적 특성과 층별 특성을 나타내는 정보가 저장되어 있다(Fig. 2B). 토양 종류별로 토양분류값, 경사도, 알베도 등이 입력파일에 포함되어 있다. 또한, 토성이나 용적밀도와 같은 물리적인 특성과 유기탄소, pH 등의 화학적인 특성들이 토양층별로 저장된다. 토양 내 수분장력과 같은 모수들도 층별로 저장되어 있다.

작물 재배관리에 대한 정보는 생육 모의를 제어하기 위해 사용되는 입력파일인 X 파일에 저장된다(Fig. 2C). X 파일에 저장되는 품종, 파종 조건, 시비 및 관개관리 등의 재배관리 정보들은 종류에 따라 서로 다른 형식을 가지고 있으며, 이를 통해 상세한 설정이 가능하다. 예를 들어, 관개 설정을 위해, 관개일자, 관개방식, 관개량을 지정할 수 있다. 또한, 논조건을 모의하고자 할 경우, 관개방식을 변경하여 논둑 높이, 침투속도, 논갈이 깊이 등을 설정할 수 있다. 각 재배관리 설정값들은 지정된 번호를 사용하여 관리된다. 또한, 모의를 수행하고자 하는 재배관리 설정 번호들을 조합하여 다양한 처리 조건에서 모의를 수행할 수 있다. 예를 들어, 품종을 달리 하는 생육모의를 수행하기 위해 두가지 처리를 설정할 때, 1번 처리와 2번 처리 설정값에 각각 1번 품종과 2번 품종을 지정하고, 나머지 재배관리 설정번호는 동일하게 부여한다(Fig. 2C).

2.3. 격자별 DNDC 구동을 지원하기 위한 입력 파일 생성 도구의 설계

본 연구에서는 DSSAT 모형과 DNDC 모형을 연계하여 온실가스 배출량 모의를 수행하는 조건을 상정하여 입력자료 생성 도구를 설계하였다. 예를 들어,

격자별로 구동된 DSSAT 모형의 출력값의 일부를 DNDC 모형의 입력값으로 사용하는 것으로 모형간 연계구조를 설정하였다. 이러한 연계 방식은 수치기상모형의 대기모형과 지면모형이 오프라인(offline) 모드로 연결되는 것과 유사한 구조를 가지고 있다. 이를 위해, 작물 생육 조건에 따른 토양 온실가스 배출량 모의를 수행할 때, DSSAT 모형과 DNDC 모형의 기상, 토양 및 재배관리 입력값이 동일하게 설정되어야 한다. 특히, 작물 생육 모의가 선행하여 수행되어야 하기 때문에 DSSAT 모형의 입력자료가 우선하여 준비된다. 따라서, 개별 모형에 사용될 입력자료를 생성하기 위해 노력과 시간 절감을 최대화할 수 있도록 DSSAT 모형의 입력자료를 활용하여 DNDC 모형의 입력자료를 생성하는 방식으로 도구를 설계하였다. 또한, DSSAT 모형을 구동하여 얻어진 결과값의 일부가 DNDC 모형의 입력자료로 사용될 수 있도록 도구를 설계하였다.

입력자료를 준비할 때 소요되는 노력과 시간은 처리해야 하는 격자들의 갯수에 비례하여 증가한다. 본 연구에서는 DNDC 입력자료 생성 도구의 자료구조 및 처리방식을 설계할 때, 다량의 입력자료를 처리할 수 있는 기능을 추가하였다. 예를 들어, 복잡한 구조를 가진 입력값들을 메모리에 저장하고 처리하기 위해, 여러 변수들을 하나의 변수이름으로 처리할 수 있는 struct 와 같은 자료형을 기반으로 자료구조를 설계하였다. 격자자료를 사용하여 온실가스 배출량을 모의할 경우, 입력자료의 공간적 해상도와 공간적 범위에 따라 처리해야 하는 자료의 양에 차이가 발생한다. 따라서, 특정되지 않은 크기의 격자자료 처리를 수행하기 위해, 동적으로 메모리를 할당할 수 있는 linked list와 같은 자료구조를 활용하였다.

본 연구에서는 DNDC 모형뿐만 아니라 다른 모형의 입력자료 생성을 지원할 수 있도록 입력파일 생성 도구를 설계하였다(Fig. 3). 특히, 도구의 확장성을 높이기 위해 객체지향적 설계방식을 사용하였다. 이를 위해, 일정한 특성과 기능들을 가진 객체를 우선 생성하고, 객체들 간의 상호작용을 정의하는 방식으로 자료처리 도구를 설계하였다. 특히, 특정 클래스의 특성과 기능들을 추가적인 소스코드 작성없이 다른 클래스에서도 사용할 수 있는 상속 기능을 활용하여 도구를 설계하였다.

일반적인 모형의 입력자료를 처리하기 위한 추상적인 기능을 가진 ModelFileManager 클래스를 정의하였다. 예를 들어, 지점단위에서 구동되는 모형들의 입출력

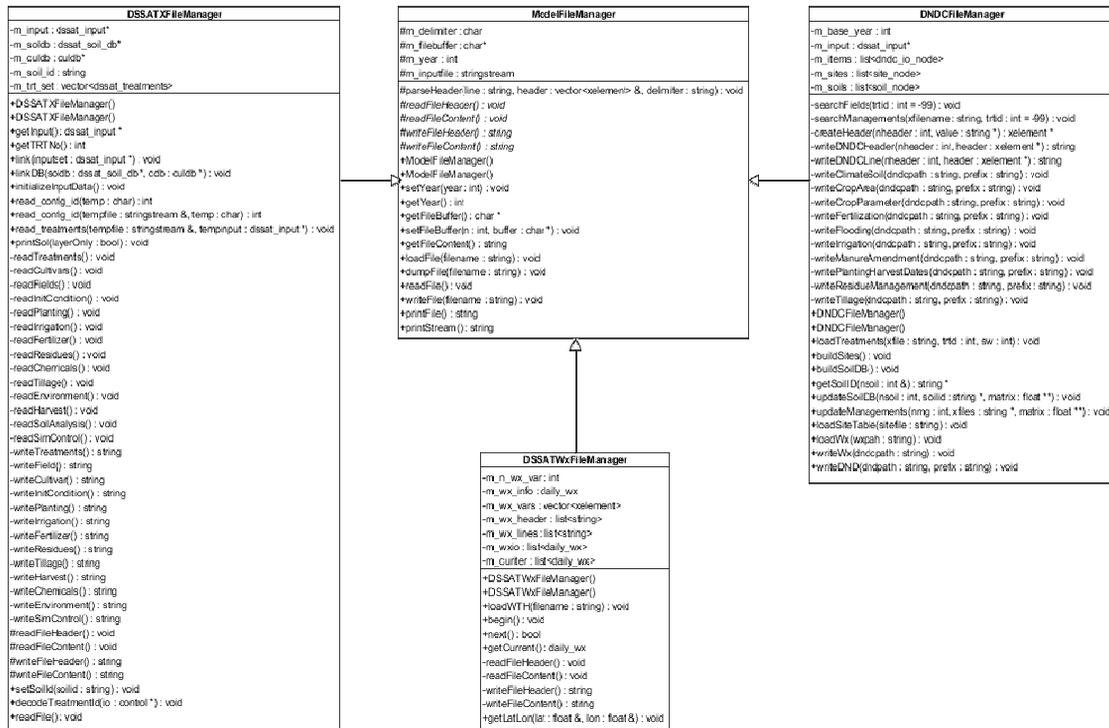


Fig. 3. Class diagram of ModelFileManager, DSSATWxFileManager, DSSATXFileManager, and DNDCFileManager.

자료들은 대체로 평이한 ASCII 형식의 파일에 저장되며, 자료부분과 자료를 설명하는 헤더부분으로 구분된다. 따라서, 일반적인 모형 입력자료에서 헤더와 자료를 구분해서 읽는 readFileHeader 및 readFileContent 멤버함수가 ModelFileManager 클래스에 정의되었다.

개별 모형의 입력자료를 처리하기 위해 ModelFileManager 클래스로부터 상속된 클래스들을 정의하였다. 예를 들어, DSSAT 모형의 입력자료를 처리하기 위해 DSSATWxFileManager 및 DSSATXFileManager 클래스를 ModelFileManager 클래스의 특성과 기능을 상속받아 정의되었다. DSSATWxFileManager 클래스는 DSSAT 모형의 기상파일들을 처리할 수 있도록 설계되었다. 특히, DSSAT 모형의 기상파일에는 자료의 유무에 따라 새로운 열(column)이 추가되는데, 이를 처리할 수 있도록 하는 멤버함수들이 정의되었다. 예를 들어, 기상파일의 지역정보 부분과 기상정보 부분을 분리하여 읽어오는 loadWTH 멤버함수가 정의되었으며, ModelFileManager 클래스로부터 상속된 readFileHeader 및 readFileContent 멤버함수가 DSSAT 모형의 기상파일 형식에 맞추어 재정의(overri-

ding) 되었다. DSSATXFileManager 클래스는 DSSAT 모형의 X 파일을 처리하는 기능을 가진 클래스로, 재배관리별로 서로 다른 형식을 가진 자료들을 읽을 수 있도록 설계되었다. 예를 들어, 품종, 파종일 및 시비 관련 설정값들을 각각 읽기 위해 readCultivar, readPlanting 및 readFertilizer 멤버함수들이 정의되었다. 또한, 개별 재배관리 처리 함수들을 호출하여 X 파일에 포함되는 모든 재배관리 관련 설정값들을 읽을 수 있도록 read_input 함수를 정의하였다.

DNDC 모형의 입력자료를 처리하기 위해서 ModelFileManager 클래스로부터 상속된 DNDCFileManager 클래스를 정의하였다. DNDCFileManager 클래스에는 DSSAT 모형의 입력자료로부터 읽어온 자료들을 전달받아 DNDC 모형의 입력자료를 생성하는 기능들이 포함되었다. 우선, 두 모형 간 자료 연계를 위한 loadTreatments 함수와 loadWx 함수가 정의되었다. loadTreatments 함수는 DSSATXFileManager 클래스로부터 재배관리 자료를 제공받는 것으로 설계되었다. loadWx 함수는 DSSATWxFileManager 클래스를 통해 기상자료를 전달받는 기능을 가진다(Fig. 4

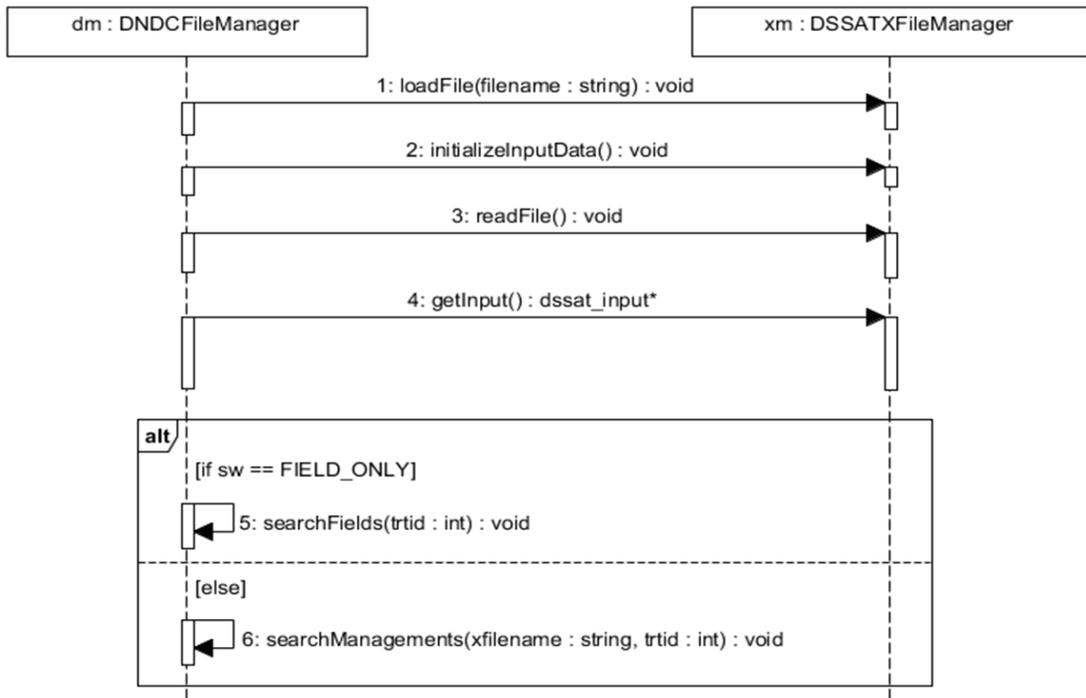


Fig. 4. Sequence diagram for loadTreatments.

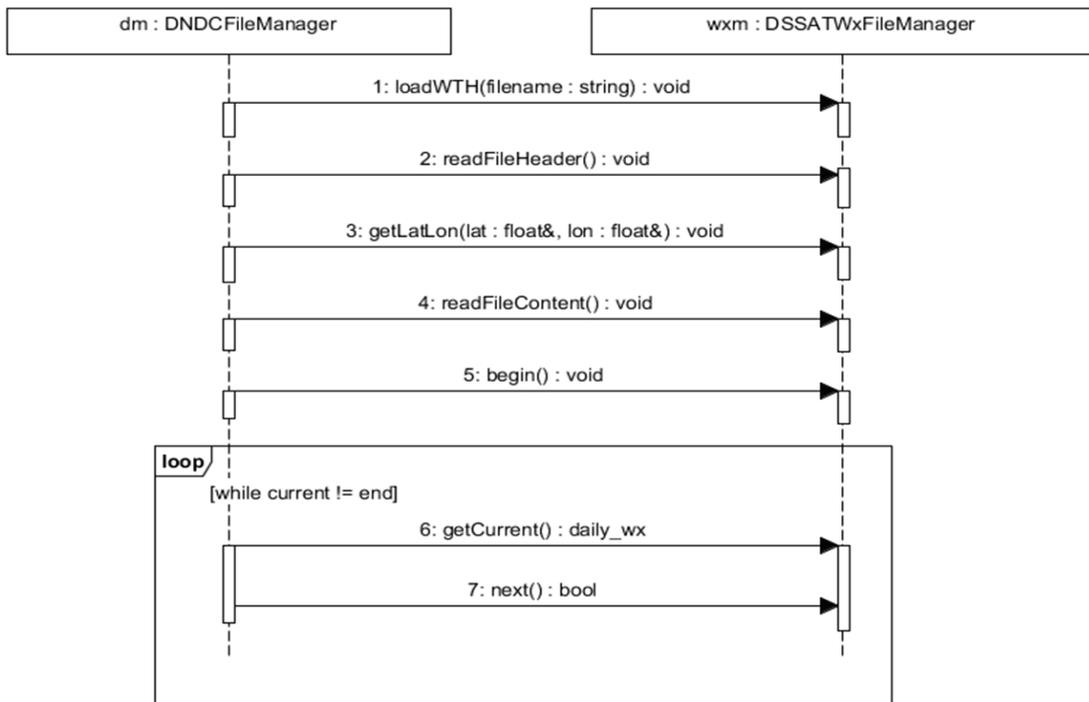


Fig. 5. Sequence diagram for loadWx.

and Fig. 5). 이렇게 전달받은 자료들을 DNDC 모형의 입력자료에 맞추어 정리할 수 있는 DNDCFileManager 클래스의 멤버함수들이 정의되었다. 예를 들어, X 파일에서 설정된 처리번호에 대하여 각각의 재배관리 정보를 연결하기 위한 searchManagements, buildSoilDB 및 buildSite 멤버함수가 정의되었다. X 파일로부터 불러온 토양이름에 대하여 유기물 및 점토 함량 등의 실제 토양 자료를 연결하는 updateSoilDB 함수가 정의되었다. 또한, DNDC 모형의 개별 입력자료를 생성하는 writeWx 및 writeClimateSoil 등과 같은 11개의 멤버함수가 정의되었다.

2.4. 격자별 DNDC 입력자료 생성 도구의 구현

객체 지향 언어인 R과 C++을 사용하여 DNDC 모형의 격자형 입력자료를 생성하기 위한 도구(DNDC Regional Input File Tool, DRIFT)를 구현하였다. R을 사용할 경우, DRIFT를 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 R 패키지 형태로 보급할 수 있는 장점이 있다. 또한, R은 자료분석을 위해 사용될 수 있는 다양한 내장함수들이 제공된다. 특히, 테이블 형태로 저장되어 있는 DSSAT 모형의 토양 입력자료 및 출력자료들을 읽고, 그로부터 자료를 추출하는 기능을 R을 사용하여 구현하였다.

농업생태계의 여러 과정들을 모의하기 위해 사용되는 모형은 각기 다른 입출력 변수들이 사용되기 때문에, 모형 간 연계를 위해 자료들을 변환하는 기능이 요구된다. 예를 들어, DSSAT 모형의 일별 담수깊이 자료를 DNDC 모형의 입력값인 담수기간으로 전환하는 것이 필요하다. DRIFT에서는 R에 내장되어있는 hclust 함수를 활용하여 클러스터 분석을 통해 자료의 전환을 수행하는 기능을 구현하였다.

개별 모형의 입력자료에 대한 파일 입출력을 수행하는 클래스들과 클래스로부터 생성된 인스턴스들을 활용하는 함수들을 구현하기 위해 C++를 사용하였다. C++는 상속과 같은 복잡한 구조를 가진 클래스들을 구현할 수 있으며, 다른 언어와 연계를 위한 기능들이 개발되어 있다. 또한, 동적 메모리 할당을 통해 정확한 개수가 정해지지 않은 격자형 자료를 처리할 수 있다. 예를 들어, DSSATWxFileManager 클래스, DSSATXFileManager 클래스 및 DNDCFileManager 클래스를 C++을 사용하여 구현하였다. 또한, 해당 클래스들을 사용하여 DNDC 모형의 입력자료를 생성하는 buildDNDCInput 함수와 DSSAT모형의 X 파일로부터 불

Table 2. Number of cells for each decade

RCP ¹	RCP 4.5			RCP 8.5		
Dec ²	2030s	2050s	2080s	2030s	2050s	2080s
N ³	342	353	318	296	289	491

1. RCP represents representative concentration pathway
2. Dec indicates decades
3. N indicates the number of cells

러온 토양 이름의 목록을 R로 전달하는 getSoilName 함수를 구현하기 위해 C++를 사용하였다.

2.5. 사례연구

기후변화 조건에서 격자별 작물 생육모의를 위해 생성된 DSSAT 모형의 입력자료 및 출력자료를 사용하여 DNDC 모형의 입력자료를 생성하였다. 남한 지역을 대상으로 하였으며, RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오 조건에서 2030년대(2026-2035), 2050년대(2046-2055) 및 2080년대(2076-2085)에 대한 모의를 수행하기 위한 입력자료를 생성하였다. 연대별로 모의 대상 지점의 개수가 차이가 있었으며, 평균적으로 약 350개의 격자점이 모의 지점으로 사용되었다(Table 2).

DRIFT의 입력자료로 사용되는 DSSAT 모형의 입력파일들을 준비하였다. 모의 대상 지점들에 대한 기상입력 파일과 토양입력 파일 및 X 파일들을 생성하였다. DSSAT 모형의 기상자료는 기상청으로부터 수집된 1km 공간해상도를 가진 미래 기후변화 시나리오 자료에서 모의 대상 격자점에 위치한 일별 기온, 강수량 및 일사량을 추출하였다. 토양입력 파일은 Yoo and Kim(2017)이 개발한 KSISPT(Korean Soil Information System Processing Tool)을 활용하여 농촌진흥청 휴토타입에서 제공하는 토양통 자료를 DSSAT 모형의 토양 입력파일 형태로 전환하였다. 지점별로 3가지 품종에 대하여 각각 10번의 파종과 3가지 시비량 조건을 조합하여 총 90가지의 재배관리 시나리오를 구성하였다(Table 3). 각 품종별로 이러한 재배관리 시나리오가 설정된 DSSAT X 파일을 생성하였다.

DRIFT를 구동하는 과정에 소요되는 시간을 측정하였다. DRIFT는 크게 DSSAT 모형의 입력파일 및 출력파일들로부터 DNDC 입력파일을 만들기 위해 자료를 추출 및 변환하는 과정과 추출된 자료들을 사용하여 DNDC 모형의 입력자료를 생성하는 과정으로 이루어져 있다. 또한, 연도별 및 품종별로 입력자료를 각각 생성한 이후, 품종에 따라 나누어진 파일들을 합

Table 3. Management options used for case study

Management	Options
Cultivar	Early, Medium, Medium-late
Transplanting (DOY ¹)	90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180
Fertilizer (kg/ha)	90, 110, 130

1. DOY represents day of year

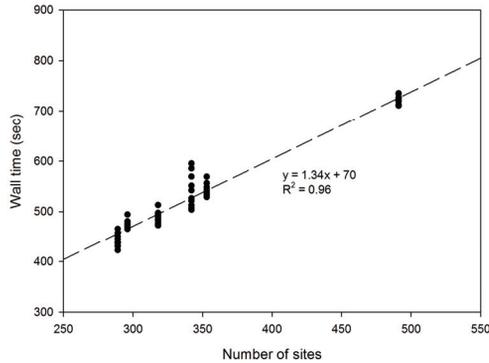


Fig. 6. Distribution of wall time and the number of sites for each year.

치는 과정을 수행하였다. 도구를 구동하는 동안 각각의 과정에서 소요되는 시간을 측정하였다.

생성된 입력자료를 사용하여 미래 기후변화 조건에서의 온실가스 배출량을 모의하였다. 특히, 논의 담수 조건에서 발생하는 주요 온실가스인 메탄 및 아산화질소의 배출량이 계산되었다. 개별 온실가스별 배출량은 다음과 같이 이산화탄소 상당량(CO₂-eq)으로 환산하였다:

$$CO_2\text{-eq} = GWP_{CH_4} * CH_4 + GWP_{N_2O} * N_2O \text{ (Eq. 1)}$$

여기서 CH₄와 N₂O는 각각 메탄과 아산화질소의 배출량을 나타내며, GWP(Global Warming Potential)는 각각의 온실가스가 지구온난화에 기여하는 정도를 이산화탄소로 환산한 지수이다. 본 연구에서는 IPCC 제 5차 평가보고서에 따라 메탄과 아산화질소에 대한 GWP 값으로 각각 28 및 265를 사용하였다(IPCC, 2013).

III. 결과 및 고찰

DRIFT의 연도별 구동시간은 처리 대상 지점의 개수에 비례하여 증가하였다(Fig. 6). 특히, 처리 지점 개수는 연도별 구동시간 변이의 96%를 설명할 정도로

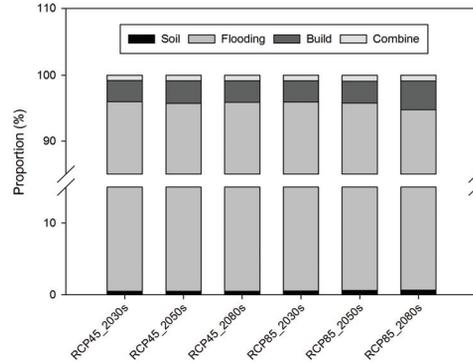


Fig. 7. Average proportion of each process in the total running time for each decade.

매우 높은 상관 관계를 보였다. 예를 들어, 연도별 구동 시간은 평균적으로 약 535초가 소요되었으나, 처리 지점 수가 많았던 RCP 8.5 시나리오 조건에서의 2080년대 기간에 대해서는 평균적으로 723초가 소요되었다. 처리 지점 개수가 동일한 연도에 대한 구동시간의 차이가 발생하였으나, 각각의 연도에 대한 연도별 구동시간의 변이계수는 6% 수준이었다.

총 구동 시간 중 담수기간을 계산하는 시간이 대부분을 차지하였다(Fig. 7). 평균적으로 담수기간을 계산하기 위해 총 구동시간의 95% 정도가 소요되었다. 예를 들어, RCP 8.5 시나리오 조건에서 2076년의 입력 자료를 3개의 품종에 대해 생산하기 위해 소요된 총 구동시간은 726 초였다. 이 중 94%(683초)에 해당하는 시간이 담수기간을 계산하는 과정에서 소요되었다. 담수기간을 계산하는 과정은 개별 지점별로 이루어지며, 지점별 담수기간을 계산하는 시간은 평균적으로 약 0.47초 정도였다. 특히, 품종별로 평균적으로 소요되는 시간이 다르게 측정되었다(Fig. 8). 예를 들어, 중생종을 처리하기 위해 사용된 시간은 조생종보다 약 10% 정도 많았다.

담수기간을 계산하기 위한 시간 이외의 나머지 구동시간은 DSSAT모형의 입력자료 및 출력자료를 처리하는 과정, DNDC 모형의 입력 파일을 품종별로

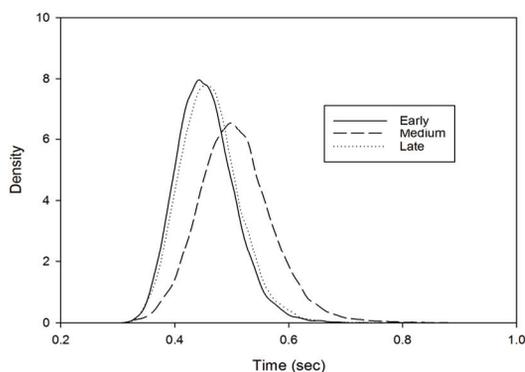


Fig. 8. Distribution of wall time to calculate flooded period for each grid cell. Solid line, dashed line, and dotted lines represent the cultivars for early, medium, and medium-late maturing group, respectively.

생성하는 과정 및 품종별 DNDC 모형의 입력 파일을 취합하는 과정에서 소요되었다. 특히, 전체 구동시간 중에서 각각의 과정이 차지하는 시간은 평균적으로 0.5%, 3.4%, 및 0.8% 이었으며, DNDC 모형의 입력 파일을 생성하는 과정에서 가장 많은 시간이 소요되었다.

DNDC 구동 결과 두 RCP 시나리오 조건에서 모두 미래로 갈수록 온실가스 배출이 늘어날 것으로 모의되었다(Fig. 9). 온실가스 배출량의 변화는 기후변화 시나리오에 따라 서로 다른 경향이 나타났다. 예를 들어, RCP 4.5 시나리오 조건에서는 2050년대에는 증가하지만, 그 이후로는 정체되는 것으로 나타났다. 반면, RCP 8.5 시나리오 조건에서는 2050년대에는 그다지

증가하지 않지만, 2080년대에는 크게 증가하는 것으로 모의되었다. 이로 인해, 온실가스 배출량은 RCP 8.5 시나리오 조건에서 RCP 4.5 시나리오 조건에 비해 평균적으로 20% 정도 더 많은 것으로 모의되었다.

본 연구를 통해 DSSAT 모형과 DNDC 모형을 연계하여 온실가스 배출량을 모의할 수 있다는 것을 보여주었다. 특히, DSSAT 모형에서는 작물의 성장과 큰 관련이 있는 질소 동태는 모의되지만, 메탄에 대한 모의는 되지 않는다. 논인 경우 메탄이 온실가스 배출량의 대부분을 차지하기 때문에(Kim *et al.*, 2002; Meijide *et al.*, 2017), 모형 간 연계를 통해 모의를 통해 작물 성장과 온실가스 배출량을 모두 고려할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 사례연구로써 파종일과 시비량을 변화시켜 모의를 수행하였으나, 작물 생산 및 온실가스 발생에 크게 관여하는 요인으로 관개 관리가 주목받고 있다(Min *et al.*, 2018; Meijide *et al.*, 2017). DRIFT는 DSSAT과 DNDC 모형들을 연계하여 관개관리 방식에 따른 모의를 수행하기 위해 필요한 입력자료를 생성할 수 있도록 지원할 수 있다.

담수기간을 계산하는 과정이 구동 시간의 대부분을 차지하고 있었으며, 추가적인 연구를 통해 이 과정에 소요되는 시간을 줄일 필요가 있을 것이다. 본 연구에서는 DNDC 모형의 입력자료를 생성하는 데 연도별로 약 500초의 시간이 소요되었으나, 이는 상당히 적은 지점에 대하여 도구를 구동한 결과이며, 격자점이 증가할 경우 상당히 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다. 담수기간을 계산하기 위해 지점별로 일별 자료를 처리하는데, 지점별로 계산 과정이 독립적으로 이

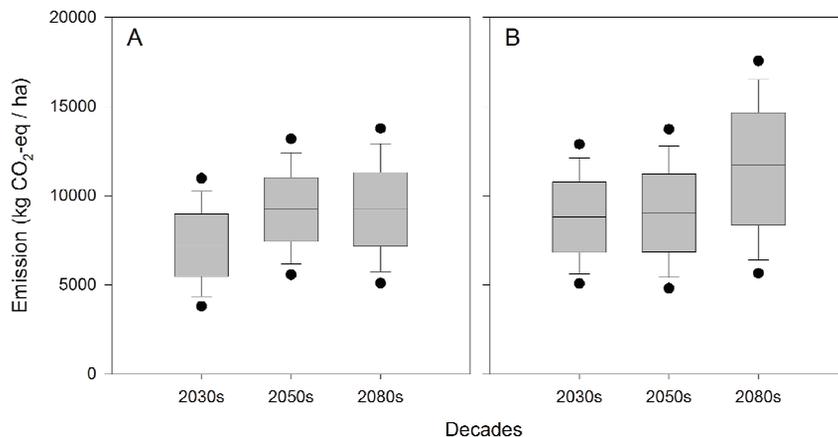


Fig. 9. Greenhouse gas emission(kg CO₂-eq / ha) for each decade under (A) RCP 4.5 scenario and (B) RCP 8.5 scenario. Dots below and above the box represent 5% and 95% percentile, respectively.

루어지기 때문에 병렬화를 통해 구동시간을 줄일 수 있을 것이다. 품종에 따라 담수기간을 계산하는 시간의 분포가 다르게 나타나는 것은 품종 별로 달라지는 생육기간에 따라 처리해야 하는 일별 자료의 양의 차이로 인한 것으로 예상되었다.

ModelFileManager를 상속하여 DSSAT 모형과 DNDC 모형의 입력자료를 처리하는 클래스를 정의한 것과 같이 후속연구에서 DRIFT가 지원하는 모형들을 확대해 나가야 할 것이다. 모의를 수행하고자 하는 모형의 종류와 지점의 개수가 증가할수록 입력자료를 준비하기 위해 많은 시간이 요구된다. 특히, 여러 종류의 모형들을 연계하여 모의를 수행할 때, 요구되는 연구자의 노력은 상당히 증가할 것으로 예상된다. 복잡한 입출력 자료들을 효과적으로 처리할 수 있는 DRIFT의 개발을 통해 연구자들이 자료의 분석에 집중할 수 있도록 지원할 것이다. 예를 들어, Qian *et al.*(2019)는 3 종류의 모형을 사용하여 캐나다 지역에 대한 모의를 수행하였으며, Asseng *et al.*(2019)은 32개의 밀 모형을 사용하여 60개 지역에 대한 모의를 수행하였다. DRIFT가 이러한 모형들까지 호환성이 확대될 경우, 입출력자료의 변환을 최소한의 노력으로 단기간안에 수행할 수 있어 농업생태계의 복잡한 과정들을 모의할 수 있는 모형간 연계를 확대시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 기후변화에 따른 농업 분야 영향 평가를 위해 사용될 수 있는 모형들을 구분하고 이들 모형의 입출력 자료를 분석한 결과가 DRIFT에 적용될 수 있도록 추가적인 개발 및 보완이 진행되어야 할 것이다.

적 요

농업 생태계는 주요 온실가스의 배출원 중 하나로, 농경지에서의 온실가스 배출량을 최소화하면서 최적의 수량을 얻기 위한 기후변화 적응옵션을 도출하기 위해서는, 상세한 공간적 규모에서 여러 모형들을 연계하여 구동하는 것이 유리하다. 본 연구에서는 DSSAT 모형과 DNDC 모형을 연계하여 상세한 공간 규모에서 기후변화 영향평가를 수행할 수 있도록 지원하기 위한 도구를 개발하고자 하였다. 객체 지향 언어인 R과 C++을 사용하여 DNDC 모형의 격자형 입력자료를 생성하기 위한 DRIFT (DNDC Regional Input File Tool)을 구현하였다. 기후변화 조건에서 격자별 작물 생육모의를 위해 생성된 DSSAT 모형의 입력자

료 및 출력자료를 사용하여 DNDC 모형의 입력자료를 생성하였다. 생성된 입력자료를 사용하여 미래 기후변화 조건에서의 온실가스 배출량을 모의하였다. 입력자료를 생성하는 시간은 격자 지점의 수에 비례하여 증가하였다. 그 중, DSSAT 모형의 담수 깊이 자료를 DNDC 모형의 담수 기간으로 변환하는 과정에서 시간이 비교적 오래 걸렸으나, 그 외의 입력자료를 생성하는 데에는 짧은 시간만이 소요되었다. 본 연구에서는 비교적 적은 지점을 대상으로 하였으나, 대량의 자료를 처리하고자 할 경우 일부 계산과정을 병렬화함으로써 구동시간을 줄일 필요가 있을 것이다. 이후 다른 모형들에 대한 확장을 통해 모형 간 연계를 위한 입력 자료 생성에 소요되는 시간을 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품기술기획평가원 농촌현안 해결 리빙랩 프로젝트사업(120099-03)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahuja, L. R., L. Ma, and T. A. Howell, 2016: *Agricultural system models in field research and technology transfer*, CRC press.
- Asseng, S., P. Martre, A. Maiorano, R. P. Rötter, G. J. O'Leary, G. J. Fitzgerald, C. Girousse, R. Motzo, F. Giunta, and M. A. Babar, 2019: Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global change biology* **25**(1), 155-173.
- Batjes, N. H., 1996: Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European journal of soil science* **47**(2), 151-163.
- Del Grosso, S. J., A. R. Mosier, W. J. Parton, and D. S. Ojima, 2005: DAYCENT model analysis of past and contemporary soil N₂O and net greenhouse gas flux for major crops in the USA. *Soil and Tillage Research* **83**(1), 9-24.
- Duxbury, J. M., 1994: The significance of agricultural sources of greenhouse gases. *Fertilizer research* **38**(2), 151-163.
- Engel, T., and E. Priesack, 1993: Expert-N-A Building Block System of Nitrogen Models as Resource for Advice, Research, Water Management and Policy, *Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection*, Springer, 503-507.

- Gilhespy, S. L., S. Anthony, L. Cardenas, D. Chadwick, A. del Prado, C. Li, T. Misselbrook, R. M. Rees, W. Salas, and A. Sanz-Cobena, 2014: First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution. *Ecological modelling* **292**, 51-62.
- Gregorich, E., P. Rochette, A. VandenBygaart, and D. Angers, 2005: Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research* **83**(1), 53-72.
- Hwang, W., Y.-S. Kim, H. Min, J.-G. Kim, K. Cho, and S. Hyun, 2017: Evaluating the applicability of the DNDC model for estimation of CO₂ emissions from the paddy field in Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **35**(1), 13-20.
- Hwang, W., M. Park, Y.-S. Kim, K. Cho, W.-K. Lee, and S. Hyun, 2015: Analysis of greenhouse gas emission models and evaluation of their application on agricultural lands in Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* **2**(2), 185-190.
- Hyun, S., and K. S. Kim, 2017: Estimation of heading date for rice cultivars using ORYZA (v3). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **19**(4), 246-251.
- IPCC, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 659-740.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*, IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Jansson, P.-E., and D. S. Moon, 2001: A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. *Environmental Modelling & Software* **16**(1), 37-46.
- Jeong, H. C., J. S. Lee, E. J. Choi, G. Y. Kim, S. U. Seo, and K. H. So, 2014a: A comparison of the changes of greenhouse gas emissions to the develop country-specific emission factors and scaling factors in agricultural sector.
- Jeong, H. C., J. S. Lee, E. J. Choi, G. Y. Kim, S. U. Seo, and K. H. So, 2014b: Evaluation of greenhouse gas emissions using DNDC model from paddy fields of 16 local government levels.
- Jiang, R., W. He, W. Zhou, Y. Hou, J. Yang, and P. He, 2019: Exploring management strategies to improve maize yield and nitrogen use efficiency in northeast China using the DNDC and DSSAT models. *Computers and Electronics in Agriculture* **166**, 104988.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 235-265.
- Kasimir-Klemedtsson, Å., L. Klemedtsson, K. Berglund, P. Martikainen, J. Silvola, and O. Oenema, 1997: Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil use and management* **13**, 245-250.
- Kim, G.-Y., S.-I. Park, B.-H. Song, and Y.-K. Shin, 2002: Emission characteristics of methane and nitrous oxide by management of water and nutrient in a rice paddy soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **21**(2), 136-143.
- Kim, J., J. Park, S. Hyun, D. H. Fleisher, and K. S. Kim, 2020: Development of an automated gridded crop growth simulation support system for distributed computing with virtual machines. *Computers and Electronics in Agriculture* **169**, 105196.
- Li, C., S. Frolking, and T. A. Frolking, 1992: A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **97**(D9), 9759-9776.
- Li, C., S. Frolking, and R. Harriss, 1994: Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global biogeochemical cycles* **8**(3), 237-254.
- Meijide, A., C. Gruening, I. Goded, G. Seufert, and A. Cescatti, 2017: Water management reduces greenhouse gas emissions in a Mediterranean rice paddy field. *Agriculture, ecosystems & environment* **238**, 168-178.
- Min, H., M.-S. Kim, J.-G. Kim, and W. Hwang, 2018: DNDC modeling for greenhouse gases emission in rice paddy of South Korea and the effect of flooding management change and RCP 8.5 scenario. *Ecology and Resilient Infrastructure* **5**(3), 189-198.
- Myeong, S., 2014: Agriculture under UNFCCC and

- its policy implications. *Journal of Climate Change Research* **5**(4), 313-321.
- Parton, W. J., M. Hartman, D. Ojima, and D. Schimel, 1998: DAYCENT and its land surface submodel: description and testing. *Global and Planetary Change* **19**(1-4), 35-48.
- Pathak, H., C. Li, and R. Wassmann, 2005: Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model.
- Qian, B., X. Zhang, W. Smith, B. Grant, Q. Jing, A. J. Cannon, D. Neilsen, B. McConkey, G. Li, and B. Bonsal, 2019: Climate change impacts on Canadian yields of spring wheat, canola and maize for global warming levels of 1.5 C, 2.0 C, 2.5 C and 3.0 C. *Environmental Research Letters* **14**(7), 074005.
- Raich, J. W., C. S. Potter, and D. Bhagawati, 2002: Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology* **8**(8), 800-812.
- Tian, Z., Y. Niu, D. Fan, L. Sun, G. Fischer, H. Zhong, J. Deng, and F. N. Tubiello, 2018: Maintaining rice production while mitigating methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in China: Evaluating tradeoffs by using coupled agricultural systems models. *Agricultural Systems* **159**, 175-186.
- Yoo, B. H., and K. S. Kim, 2017: Preparation of soil input files to a crop model using the Korean soil information system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **19**(3), 174-179.