



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월31일
(11) 등록번호 10-2749308
(24) 등록일자 2024년12월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01W 1/08 (2006.01) G01W 1/02 (2022.01)
G01W 1/10 (2006.01) G01W 1/14 (2006.01)
G01W 1/18 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01W 1/08 (2013.01)
G01W 1/02 (2022.01)
(21) 출원번호 10-2021-0180365
(22) 출원일자 2021년12월16일
심사청구일자 2021년12월16일
(65) 공개번호 10-2023-0091334
(43) 공개일자 2023년06월23일
(56) 선행기술조사문헌
Sunghee Kim 외 8명. High-resolution modeling and prediction of urban floods using WRF-Hydro and data assimilation. Journal of Hydrology. 2021.07, Vol.598, < 인터넷:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169421002833?via%3Dihub> 1부.*
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
(72) 발명자
김연주
서울특별시 양천구 목동동로 130, 1426-803
김예리
울특별시 서대문구 연희로15안길 32-8, 1층
(74) 대리인
김인철

전체 청구항 수 : 총 14 항

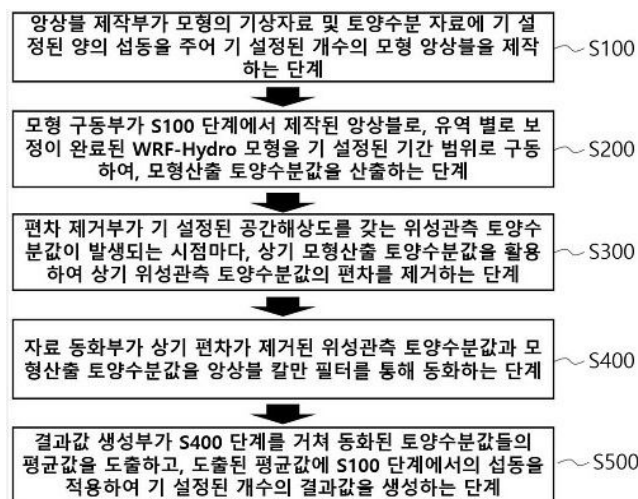
심사관 : 이형우

(54) 발명의 명칭 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모델의 성능을 향상시키는 자료동화 방법으로서, 상기 컴퓨팅장치는 앙상블 제작부(100)가 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 단계(S100), 모형 구동부가 S100 단계에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 단계(S200), 편차 제거부가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 발생하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 단계(S300), 자료 동화부가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터를 통해 동화하는 단계(S400), 결과값 생성부가 S400 단계를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 S100 단계에서의 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 단계(S500)

대표도 - 도1



상블을 제작하는 S100 단계; 모형 구동부(200)가 S100 단계에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 S200 단계; 편차 제거부(300)가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 S300 단계; 및 자료 동화부(400)가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 S400 단계;를 포함하여 수행하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법이다..

(52) CPC특허분류

- G01W 1/10 (2013.01)
- G01W 1/14 (2013.01)
- G01W 1/18 (2013.01)
- G01W 2201/00 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

Eunkyo Seo 외 2명. Assimilation of SMAP and ASCAT soil moisture retrievals into the JULES land surface model using the Local Ensemble Transform Kalman Filter. Remote Sensing of Environment. 2021.02, Vol.253, < 인터넷:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720305952> 1부.*

Zhongbo Yu 외 5명. A multi-layer soil moisture data assimilation using support vector machines and ensemble particle filter. Journal of Hydrology. 2012.12.19., Vol.475, pp.53-64, < 인터넷:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169412007135> 1부.*

PEYMAN ABBASZADEH. Toward hyper-resolution hydrologic data assimilation systems for improved predictions of hydroclimate extremes. The University of Alabama. 2020, < 인터넷:https://ir.ua.edu/handle/123456789/7048> 1부.*

Kristi R. Arsenault 외 12명. The Land surface Data Toolkit (LDT v7.2) - a data fusion environment for land data assimilation systems. Geoscientific Model Development. 2018.09.05, Vol.11, Issue.9, pp.3605-3621, < 인터넷:https://gmd.copernicus.org/articles/11/3605/2018/> 1부.*

X L Yao 외 3명. A new continuous fusion method of remote sensing data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018.07.21, < 인터넷:https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/191/1/012130> 1부.*

Michiel Pezij 외 6명. State updating of root zone soil moisture estimates of an unsaturated zone metamodel for operational water resources management. Journal of Hydrology X. 2019.07, Vol.4, < 인터넷:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589915519300240> 1부.*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

이 발명을 지원한 국가연구개발사업	
과제고유번호	1615012228
과제번호	163540
부처명	국토교통부
과제관리(전문)기관명	국토교통과학기술진흥원
연구사업명	국토교통기술촉진연구(R&D)
연구과제명	기후위기 대응 탄소중립 시대를 위한 도시 그린인프라의 탄소흡수 증대 및 물·열순환 개선 평가 기술 개발
기여율	50/100
과제수행기관명	연세대학교 산학협력단
연구기간	2021.04.01 ~ 2021.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업	
과제고유번호	1711143439
과제번호	2020R1A2C2007670
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	머신러닝 기반 우리나라 및 아시아 지역 규모 지면모형 고도화를 통한 생태수문 가
예측 향상 및 가뭄영향 예측 기술 개발	
기여율	50/100
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모형의 성능을 향상시키는 자료동화 방법으로서, 상기 컴퓨팅장치는

양상블 제작부가 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동을 주어 기 설정된 개수의 모형 양상블을 제작하는 S100 단계; 모형 구동부가 S100 단계에서 제작된 양상블로, 구역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 S200 단계; 편차 제거부가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 S300 단계; 및 자료 동화부가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 양상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 S400 단계;를 포함하여 수행하며,

결과값 생성부가 S400 단계를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 S100 단계에서의 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 S500 단계;를 더 포함하여 수행하며,

S100 단계에서 상기 기상자료 중 강우, 단파복사 및 장파복사와 상기 토양수분 자료 중 6개로 구분된 토양층에 변수 별 상관계수를 고려하여 기 설정된 표준편차를 가지는 12개의 섭동을 생성하여 각 변수들에 섭동을 주며, 상기 6개로 구분된 토양층은 지면에서 지하 2m까지의 구간을 6개층으로 구분한 것이며,

S100 단계에서 제작되는 모형 양상블은 12개인 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분 자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 2

삭제

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

청구항 1에 있어서,

S200 단계에서 구동되는 WRF-Hydro 모형의 토양층은 6개의 층으로 구비되는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

S300 단계에서

상기 기 설정된 공간해상도는 3km, 9km 및 36km의 3가지로 구비되는 다중 공간해상도인 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

S300 단계에서 Grid-CDF와 MonthlyGrid-CDF를 적용하여, 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 8

청구항 7에 있어서,

상기 Grid-CDF는 격자별로 생성된 단일 CDF를 적용하며,

MonthlyGrid-CDF는 격자별로 생성된 월별 다중 CDF를 적용하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 각 CDF는 공간해상도를 고정하며, 시간해상도를 상이하게 하고, 다음 수학적 식 1을 통해 CDF 매칭의 시간해상도의 영향을 분석하여 편차를 제거하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

[수학적 식 1]

$$G-CDF_{model}(x') = G-CDF_{smap}(x)$$

$$MG-CDF_{model}(x') = MG-CDF_{smap}(x)$$

(여기서, G는 격자를 뜻하는 Grid를 나타낸다. MG는 MonthlyGrid로 월별 격자를 나타낸다. x는 SMAP의 기본 토양수분 값을 의미한다. x'는 CDF 매칭이 완료된 후의 보정된 SMAP 토양수분 값을 의미한다. G-CDF_{model}는 격자별로 생성한 WRF-Hydro 모형의 단일 누적분포함수를 나타낸다. G-CDF_{smap}는 격자별로 생성한 SMAP 토양수분 자료의 단일 누적분포함수를 나타낸다. MG-CDF_{model}은 격자별로 생성한 WRF-Hydro 모형의 월별 누적분포함수를 나타낸다. MG-CDF_{smap}는 격자별로 생성한 SMAP 토양수분 자료의 월별 누적분포함수를 나타낸다.)

청구항 10

청구항 1에 있어서,

S400 단계는

모형 앙상블이 N개인 때에, 모형을 통해 다음 수학적 식 2와 같이 N개의 모형산출 토양수분값이 산출되며,

모형산출 토양수분값을 바탕으로, 다음 수학적 식 3을 이용하여 모형의 오차공분산 행렬을 계산하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

[수학적 식 2]
$$x^f = [x_1^f, x_2^f, \dots, x_N^f]$$

(여기서, x^f 는 예측모델상태앙상블(forecast model state ensemble)을 나타낸다. N은 앙상블의 번호를 나타낸다.)

$$P^f = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j^f - \overline{x^f})(x_j^f - \overline{x^f})^T$$

[수학적 식 3]

(여기서, P^f 는 모델오차공분산(model state forecast error covariance)을 나타낸다. N은 모델 앙상블 개수를 나타낸다. j는 앙상블 번호를 나타내며 1부터 N개까지 적용된다. T는 행렬의 전치를 의미한다. x_j^f 는 j번 앙상블 모델 예측값을 나타내며, $\overline{x^f}$ 는 1번부터 N번까지의 앙상블 모델 예측값의 평균값을 나타낸다.)

청구항 11

청구항 10에 있어서,

S400 단계는 동화시킬 위성자료를 바탕으로, 다음 수학적 식 4를 이용하여 위성관측 토양수분값의 오차공분산 행렬을 계산하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (d_j - \bar{d})(d_j - \bar{d})^T$$

[수학적 식 4]

(여기서, R은 측정오차공분산(observation covariance matrix)을 나타낸다. N은 모델 앙상블 개수를 나타낸다. j는 앙상블 번호를 나타내며 1부터 N개까지 적용된다. d는 위성 관측값(observation data)을 나타낸다. 위성 관측값의 개수는 앙상블 칼만 필터 적용을 위해 모델의 앙상블 개수와 일치시켜야 한다. 따라서, 일정한 표준편차를 가지고 전체 평균이 0이 되도록 하는 perturbation을 제작하여 하나의 위성값을 N개의 위성값으로 전개시킨다. 여기서 d_j 는 전개된 j번 위성관측값이다. \bar{d} 는 전개된 N개의 위성자료의 평균값으로 전개되기 전의 위성자료값과 동일하게 된다.)

청구항 12

청구항 11에 있어서,

S400 단계는 다음 수학적 식 5를 이용하여 칼만 계인을 산출하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성 관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

[수학적 식 5]

$$K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1}$$

(여기서, K는 칼만계인(Kalman gain)을 나타낸다. P^f 는 모델오차공분산(model state forecast error covariance)을 나타낸다. H는 위성값과 모델값의 차원을 연결시켜주는 선형 연산자(linear operator)이다.

H^T 는 행렬 계산을 위해 전치된 선형 연산자(linear operator)이다.)

청구항 13

청구항 12에 있어서,

S400 단계는 다음 수학적 식 6을 바탕으로 모형산출 토양수분값과 위성관측 토양수분값을 동화하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

$$x_j^a = x_j^f + K(d_j - Hx_j^f)$$

[수학적 식 6]

(여기서, x_j^a 는 j번 분석모델상태앙상블(analysis model state ensemble)을 나타낸다. x_j^f 는 j번 예측모델상태 앙상블(forecast model state ensemble)을 나타낸다. K는 칼만계인(Kalman gain)을 나타낸다. d_j 는 수학적 식 4에서 전개된 j번 위성관측값이다. H는 위성값과 모델값의 차원을 연결시켜주는 선형 연산자(linear operator)이다.)

청구항 14

청구항 13에 있어서,

S400 단계는 다음 수학적 식 7과 같이 동화된 N개의 토양수분값을 생성하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를

가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

[수학식 7]
$$x^a = [x_1^a, x_2^a, \dots, x_N^a]$$

(여기서, x^a 는 분석모델상태앙상블(analysis model state ensemble)을 나타낸다. 여기서 N은 앙상블 개수를 나타낸다.)

청구항 15

청구항 1에 있어서,

상기 컴퓨팅장치는 S500 단계에서 생성된 결과값을 모형의 다음 구동을 위한 초기 모형산출 토양수분값으로 입력한 후, 상기 S100 단계부터 S500 단계까지를 반복수행하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

청구항 16

하드웨어와 결합되어, 청구항 1에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법을 컴퓨터에 의해 실행시키기 위하여 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

청구항 17

데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모델의 성능을 향상시키는 자료동화 시스템으로서,

모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동(perturbation)을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 앙상블 제작부; 상기 앙상블 제작부에서 제작된 앙상블로, 구역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 모형 구동부; 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 편차 제거부; 및 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 자료 동화부;를 포함하며,

상기 자료 동화부를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 앙상블 제작부에 따른 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 결과값 생성부를 더 포함하며,

앙상블 제작부에서 상기 기상자료 중 강우, 단파복사 및 장파복사와 상기 토양수분 자료 중 6개로 구분된 토양층에 변수 별 상관계수를 고려하여 기 설정된 표준편차를 가지는 12개의 섭동을 생성하여 각 변수들에 섭동을 주며, 상기 6개로 구분된 토양층은 지면에서 지하 2m까지의 구간을 6개층으로 구분한 것이며,

앙상블 제작부에서 제작되는 모형 앙상블은 12개인 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값의 자료동화 시스템.

청구항 18

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자료동화 방법 및 시스템에 관한 것이다. 구체적으로는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 종래의 WRF-hydro 다중 공간해상도 SMAP 토양수분 자료동화 연구의 경우 1, 9, 36km 의 공간해상도를 가진 SMAP 토양수분 자료를 동화하였고, 그 중 1km 자료에 한해서만 CDF 편차 제거 방법을 적용하였다.

[0003] 토양수분 자료동화 연구에서 모델값과 동화시키는 관측값 간의 편차를 제거하는 것이 매우 중요하게 다뤄지고

있고, 다수의 연구 결과에 따르면 적용한 기법에 따라 모델 성능에 크게 영향을 미치게 된다.

[0004] 보편적으로 적용되는 기법에는 CDF 매칭 기법이 있으며, 종래 기술의 경우에는 하나의 CDF 기법만을 적용하였기 때문에 연구자가 설정한 시간적, 공간적 범위 등에 대해 종속적인 결과가 도출되었고, 이에 대한 깊이 있는 토의는 이루어지지 않은 문제점이 있었다.

[0005] 또한, 전 지구를 대상으로 적용되는 CDF 기법은 약 200km의 반지름을 가지는 공간 범위를 기준으로 CDF를 산출한 것이기 때문에, 모형의 격자별로 상이한 토양수분 경향을 정확히 반영하지 못하는 문제점이 있었다.

[0006] 이러한 문제점을 해결하기 위한 종래기술로서, CDF 매칭을 세분화하여, 서로 다른 2가지 CDF 매칭의 영향을 분석하였다. 전체 연구 지역을 바탕으로 단일 CDF를 산출하고, 전체 연구 지역의 격자 별로 월별 CDF를 산출하였다. 이러한 종래기술의 경우, 격자 별로 월별 산출한 CDF 매칭 기법을 적용하였을 시 다른 기법들 보다 우수한 성능 향상을 보여주었다. 하지만, 비교한 2가지 CDF의 경우 공간적 범위가 일정하지 않기 때문에 시간적 범위의 차이로 인한 성능 향상임을 증명하는 것에는 부족함이 존재하는 문제점이 제기되었다.

[0008] 이에, 본 발명은 상기의 문제점을 해결하기 위하여, 2가지 CDF의 공간적 범위를 격자 별로 일치시킨 후, 시간적 단위를 상이하게 하여 전체 연구 기간을 고려한 Grid-CDF (G-CDF) 와 이를 월별로 세분화한 MonthlyGrid-CDF (MG-CDF) 를 산출하였다. 이를 통해 공간 해상도별 자료동화의 영향뿐만 아니라 시간해상도별 CDF기법의 영향을 분석하고자 하였다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) (문헌 1) 한국등록특허공보 제10-1540299호 (2015.07.23)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법 및 시스템은 다음과 같은 해결과제를 가진다.

[0011] 첫째, 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분 자료를 활용하여 WRF-Hydro 자료 동화 시스템을 구축하고자 한다.

[0012] 둘째, 토양 수분 자료 동화를 통해 WRF-Hydro 모형의 토양수분 및 유출량 예측력을 향상시키고자 한다.

[0013] 셋째, 자료 동화에 영향을 미치는 위성관측 자료의 특성과 CDF 기법의 영향을 분석하고자 한다.

[0014] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급한 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0015] 본 발명은 데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모형의 성능을 향상시키는 자료동화 방법에 관한 것이다.

[0016] 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법에 있어서, 상기 컴퓨팅장치는 앙상블 제작부가 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 S100 단계; 모형 구동부가 S100 단계에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 S200 단계; 편차 제거부가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 S300 단계; 및 자료 동화부가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 S400 단계;를 포함하여 수행할 수 있다.

[0017] 본 발명에 있어서, 결과값 생성부가 S400 단계를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균

값에 S100 단계에서의 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 S500 단계;를 더 포함하여 수행할 수 있다.

- [0018] 본 발명에 있어서, S100 단계에서 상기 기상자료 중 강우, 단파복사 및 장파복사와 상기 토양수분 자료 중 6개로 구분된 토양층에 변수 별 상관계수를 고려하여 기 설정된 표준편차를 가지는 12개의 섭동을 생성하여 각 변수들에 섭동을 주는 것이 가능하다.
- [0019] 본 발명에 있어서, S100 단계에서 제작되는 모형 앙상블은 12개인 것이 가능하다.
- [0020] 본 발명에 있어서, S200 단계에서 구동되는 WRF-Hydro 모형의 토양층은 6개의 층으로 구비되는 것이 가능하다.
- [0021] 본 발명에 있어서, S300 단계에서 상기 기 설정된 공간해상도는 3km, 9km 및 36km의 3가지로 구비되는 다중 공간해상도인 것이 가능하다.
- [0022] 본 발명에 있어서, S300 단계에서 Grid-CDF와 MonthlyGrid-CDF를 적용하여, 위성관측 토양수분값의 편차를 제거할 수 있다.
- [0023] 본 발명에 있어서, 상기 Grid-CDF는 격자별로 생성된 단일 CDF를 적용하며,
- [0024] MonthlyGrid-CDF는 격자별로 생성된 월별 다중 CDF를 적용할 수 있다.
- [0025] 본 발명에 있어서, 상기 각 CDF는 공간해상도를 고정하며, 시간해상도를 상이하게 하고, 수학적 1을 통해 CDF 매칭의 시간해상도의 영향을 분석하여 편차를 제거할 수 있다.
- [0026] 본 발명에 있어서, S400 단계는 모형 앙상블이 N개인 때에, 모형을 통해 다음 수학적 2와 같이 N개의 모형산출 토양수분값이 산출되며, 모형산출 토양수분값을 바탕으로, 수학적 3을 이용하여 모형의 오차공분산 행렬을 계산할 수 있다.
- [0027] 본 발명에 있어서, S400 단계는 동화시킬 위성자료를 바탕으로, 수학적 4를 이용하여 위성관측 토양수분값의 오차공분산 행렬을 계산할 수 있다.
- [0028] 본 발명에 있어서, S400 단계는 수학적 5를 이용하여 칼만 계인을 산출할 수 있다.
- [0029] 본 발명에 있어서, S400 단계는 수학적 6을 바탕으로 모형산출 토양수분값과 위성관측 토양수분값을 동화할 수 있다.
- [0030] 본 발명에 있어서, S400 단계는 수학적 7과 같이 동화된 N개의 토양수분값을 생성할 수 있다.
- [0031] 본 발명에 있어서, 상기 컴퓨팅장치는 S500 단계에서 생성된 결과값을 모형의 다음 구동을 위한 초기 모형산출 토양수분값으로 입력한 후, 상기 S100 단계부터 S500 단계까지를 반복수행할 수 있다.
- [0033] 한편, 본 발명은 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다. 구체적으로 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법을 컴퓨터에 의해 실행시키기 위하여 컴퓨터가 관독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다.
- [0035] 또한, 본 발명은 데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모델의 성능을 향상시키는 자료동화 시스템으로 구현될 수 있다.
- [0036] 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값의 자료동화 시스템은 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동(perturbation)을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 앙상블 제작부; 상기 앙상블 제작부에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 모형 구동부; 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 편차 제거부; 및 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 자료 동화부;를 포함한다.
- [0037] 본 발명에 있어서, 상기 자료 동화부를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 앙상블 제작부에 따른 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 결과값 생성부를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0038] 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법 및 시스템은 다음과

같은 효과를 가진다.

- [0039] 첫째, 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분 자료를 활용하여 WRF-Hydro 자료 동화 시스템을 구축하는 효과가 있다.
- [0040] 둘째, 토양 수분 자료 동화를 통해 WRF-Hydro 모형의 토양수분 및 유출량 예측력을 향상시키는 효과가 있다.
- [0041] 셋째, 자료 동화에 영향을 미치는 위성관측 자료의 특성과 CDF 기법의 영향을 분석하는 효과가 있다.
- [0042] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

- [0043] 도 1은 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법의 순서도이다.
- 도 2는 본 발명에 따른 자료동화 방법의 모식도이다.
- 도 3은 G-CDF와 MG-CDF의 SMAP 토양수분 편차 보정 과정을 나타낸다.
- 도 4는 본 발명에 따른 자료동화 시스템의 구성도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0044] 이하, 첨부한 도면을 참조하여, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예를 설명한다. 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 이해할 수 있는 바와 같이, 후술하는 실시예는 본 발명의 개념과 범위를 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 형태로 변형될 수 있다. 가능한 한 동일하거나 유사한 부분은 도면에서 동일한 도면부호를 사용하여 나타낸다.
- [0045] 본 명세서에서 사용되는 전문용어는 단지 특정 실시예를 언급하기 위한 것이며, 본 발명을 한정하는 것을 의도하지는 않는다. 여기서 사용되는 단수 형태들은 문구들이 이와 명백히 반대의 의미를 나타내지 않는 한 복수 형태들도 포함한다.
- [0046] 본 명세서에서 사용되는 "포함하는"의 의미는 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소 및/또는 성분을 구체화하며, 다른 특정 특성, 영역, 정수, 단계, 동작, 요소, 성분 및/또는 군의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.
- [0047] 본 명세서에서 사용되는 기술용어 및 과학용어를 포함하는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 일반적으로 이해하는 의미와 동일한 의미를 가진다. 사전에 정의된 용어들은 관련기술문헌과 현재 개시된 내용에 부합하는 의미를 가지는 것으로 추가 해석되고, 정의되지 않는 한 이상적이거나 매우 공식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0048] 본 명세서에서 사용되는 방향에 관한 표현, 예를 들어 전/후/좌/우의 표현, 상/하의 표현, 종방향/횡방향의 표현은 도면에 개시된 방향을 참고하여 해석될 수 있다.
- [0049] 본 발명은 수공학분야의 기후변화 적응기술로 지면모형 기반 토양수분 위성자료를 활용하여 모델의 성능을 향상시키기 위한 자료동화 방법에 관한 것이다.
- [0050]
- [0051] 토양수분(soil moisture)은 토양입자나 공극사이에 양적으로 내포되어 중력에 역행하여 스며들어 있는 물을 의미한다.
- [0052] 토양수분은 이와 같이 일정 부피의 토양 내에 함유된 수분의 부피를 나타내는 수치로서, 수리학에서 물의 순환을 이해하는 데 필요한 주요 데이터다.
- [0053] 토양 내의 수분은 비와 눈, 진눈깨비, 우박 등으로부터 공급되며, 토양에 흡수되어 포화 상태에 도달하면 지하수를 충전하고 식물이나 지표층을 통해 증발되어 대기로 돌아간다. 이렇게 물이 증발되고 응결되는 과정에서 열에너지가 흡수되고 발산됨으로써 날씨와 기후가 변화할 수 있다. 토양 내의 수분은 또한 광합성의 원료이자 체내 영양소를 운반하는 매개가 되므로 식물의 성장에 꼭 필요한 것이기도 하다.

- [0054] 토양수분은 농업생산성의 지표가 될 뿐만 아니라, 강수량의 정보와 함께 정확한 날씨와 기후를 예측하는 데 핵심적인 역할을 한다. 토양수분의 데이터는 일반적으로 땅 밑에 토양수분 센서를 묻어 측정할 수 있다. 그러나 이 방법은 국지적인 각 지점의 수치만 제공할 뿐, 광범위한 영역에서 토양수분의 분포 상태를 제공하지는 못한다.
- [0056] 토양수분을 측정하는 또 다른 방법은 유럽우주항공국(ESA, Europe Space Agency)의 SMOS(Soil Moisture and Ocean Salinity) 위성을 이용하는 것이다. SMOS 위성은 우주로부터 토양수분뿐 아니라 해양의 염도를 측정하기 위해 지난 2009년 발사된 위성으로, L 밴드 라디오미터를 통해 지구 토양 전체에 걸쳐 지표 밑 5cm 깊이의 수분 함유율을 측정한다. 그러나 SMOS 위성의 경우, 위성에서 지표를 관측하는 하나의 픽셀을 의미하는 공간해상도가 50km에 달해 오차가 크다는 단점이 지적되고 있다.
- [0058] 본 발명에 따른 위성관측 자료는 전술한 SMOS 위성 등 다양한 기상위성을 통해 취득할 수 있을 것이다.
- [0059] 다만, 본 명세서에서는 미항공우주국(NASA)의 SMAP(Soil Moisture Active Passive) 위성의 관측자료를 일 실시예로 하여 본 발명을 설명하고자 한다. SMAP 위성은 우주에서 지구의 토양수분을 측정하고 토양의 결빙과 해빙 상태를 관찰하기 위한 것이다.
- [0061] 자료동화(Data Assimilation)는 모형의 산출값에 관측값을 동화시켜 모형의 성능을 향상시키는 기법이다. 본 발명에서 사용된 모형은 미국 국립대기과학연구소에서 개발한 WRF-Hydro 모형이다.
- [0063] 동화시킨 위성관측값으로는 미국 NASA에서 개발한 3가지 공간해상도 (3, 9, 36km) 를 가진 SMAP 토양수분 위성 자료를 사용하였다.
- [0064] 자료동화를 실시하기 전, 모델값과 관측값 간의 편차 (bias)를 제거하는 것이 중요하다. 자료 간의 누적분포함수(CDF:Cumulative Distribution Function) 매칭을 편차 제거에 활용한다. 토양수분 자료동화는 앙상블 칼만 필터(EnKF:Ensemble Kalman Filter)를 통해 동화된다. 앙상블 칼만 필터(EnKF) 적용을 위해서는 모형의 앙상블이 요구되며, 모형에 필요한 기상자료 중 강우(precipitation), 단파복사 (shortwave radiation), 장파복사 (longwave radiation)와 모형의 6개 토양변수에 일정량의 섭동 (perturbation)을 주어 12개의 앙상블을 제작하였다.(도 2 모식도 참조)
- [0067] 이하에서는 도면을 참고하여 본 발명을 설명하고자 한다. 참고로, 도면은 본 발명의 특징을 설명하기 위하여, 일부 과장되게 표현될 수도 있다. 이 경우, 본 명세서의 전 취지에 비추어 해석되는 것이 바람직하다.
- [0069] 도 1은 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법의 순서도이다.
- [0071] 본 발명은 데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모형의 성능을 향상시키는 자료동화 방법에 관한 것이다.
- [0072] 본 발명에 있어서, 상기 컴퓨팅장치는 앙상블 제작부(100)가 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동(perturbation)을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 S100 단계; 모형 구동부(200)가 S100 단계에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형 산출 토양수분값을 산출하는 S200 단계; 편차 제거부(300)가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 S300 단계; 및 자료 동화부(400)가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 S400 단계;를 포함하여 수행할 수 있다.
- [0073] 본 발명에 있어서, 결과값 생성부(500)가 S400 단계를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 S100 단계에서의 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 S500 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0075] 이하에서는 본 발명에 따른 S100 단계를 설명하고자 한다.
- [0076] 본 발명에 따른 S100 단계는 앙상블 제작부(100)가 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동 (perturbation)을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 단계이다.
- [0077] 기상자료 중 강우, 단파복사 및 장파복사와 상기 토양수분 자료 중 6개로 구분된 토양층에 변수 별 상관계수를 고려하여 기 설정된 표준편차를 가지는 12개의 섭동을 생성하여 각 변수들에 섭동을 주는 것이 가능하다. S100

단계에서 제작되는 모형 앙상블은 12개인 것이 가능하다.

- [0079] 참고로, 본 발명에 있어서, '6개로 구분된 토양층'은 모든 단계에 적용될 수 있다.
- [0081] 일 실시예로서, 모형의 기상자료(forcing)와 토양수분(soil moisture, SM)자료에 일정량의 섭동(perturbation)을 주어, 12개의 모형 앙상블을 제작할 수 있다.
- [0082] 본 발명에 따른 섭동 과정에는 NASA GMAO (Global Modelling and Assimilation Office)에서 개발한 섭동 방법론을 적용하였다. 기상자료 중 강우 (precipitation), 단파복사 (shortwave radiation), 장파복사 (longwave radiation) 와 6개 토양층에 변수 별 상관계수를 고려하여 일정한 표준편차를 가지는 12개의 섭동 (perturbation)을 생성하여 각 변수들에 섭동을 주었다.
- [0084] 이하에서는 본 발명에 따른 S200 단계를 설명하고자 한다.
- [0085] 본 발명에 따른 S200 단계는 모형 구동부(200)가 S100 단계에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 단계이다.
- [0086] S200 단계에서 구동되는 WRF-Hydro 모형의 토양층은 6개의 층으로 구비될 수 있다.
- [0087] 일 실시예로서, 유역별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 12개의 앙상블로 2017년부터 2019년까지의 기간범위에 대해 구동시킬 수 있다. S200 단계에서 구동되는 WRF-Hydro 모형의 토양층은 보다 정확한 동화를 위해 기존의 4개의 층에서 6개의 층을 가지도록 하였다.
- [0088] 참고로, 토양층은 지면에서 지하 2m까지를 의미하며, 본 발명은 이러한 0~2m의 구간을 4개층으로 구분한 것이 아니라, 6개층으로 구분한 것을 의미한다.
- [0090] 본 발명에 있어서, WRF-Hydro 모형에는 유출, 수로, 토양과 관련된 파라미터들이 존재하며 해당 값은 모형의 결과값에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 각각의 파라미터들을 연구 지역이 되는 유역별 특성을 반영할 수 있게끔 보정하는 과정이 필요하다. 일 실시예로서, 연구 지역은 소양강댐, 충주댐, 섬진강댐으로 3개의 유역별로 모형 보정 작업을 진행한 바 있다. WRF-Hydro 모형은 하천유출량을 산출할 수 있으며, 유출량을 목적값으로 하여 목적함수가 최대의 성능을 나타내는 파라미터값을 찾았다. 해당 파라미터값을 모형에 입력하여 모형 구동에 반영하는 것이 유역별로 보정을 완료하는 것이다. 따라서, 유역별로 모형에 입력된 파라미터값이 상이하게 된다.
- [0093] 이하에서는 본 발명에 따른 S300 단계를 설명하고자 한다.
- [0094] 본 발명에 따른 S300 단계는 편차 제거부(300)가 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 단계이다.
- [0095] S300 단계에서는 상기 기 설정된 공간해상도는 3km, 9km 및 36km의 3가지로 구비되는 다중 공간해상도인 것이 바람직하다.
- [0096] S300 단계에서는 Grid-CDF와 MonthlyGrid-CDF를 적용하여, 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하며, 상기 Grid-CDF는 격자별로 생성된 단일 CDF를 적용하며, MonthlyGrid-CDF는 격자별로 생성된 월별 다중 CDF를 적용할 수 있다.
- [0098] 일 실시예로서, 상기 3가지 SMAP 자료가 존재하는 시점마다 모형산출 토양수분값과 SMAP 위성관측 자료값을 2가지 Grid-CDF와 MonthlyGrid-CDF를 바탕으로 편차를 제거한다. 매칭에는 2017년부터 2019년까지의 모형의 토양수분 CDF와 SMAP의 CDF를 적용한다.
- [0099] 종래 기술의 경우 격자 보다 더 넓은 공간 범위를 기준으로 단일 CDF를 생성하였으나, 본 발명에서는 격자별 토양수분의 경향을 정확히 반영하기 위해 격자별로 CDF를 산출하였다. 또한, CDF의 공간해상도를 고정하고, 시간해상도를 상이하게 한 2가지 CDF를 적용함으로써 CDF 매칭의 시간해상도의 영향을 분석하였다.
- [0101] 본 발명에 있어서, 각 CDF는 공간해상도를 고정하며, 시간해상도를 상이하게 하고, 다음 수학적 식 1을 통해 CDF 매칭의 시간해상도의 영향을 분석하여 편차를 제거할 수 있다.

수학식 1

$$G-CDF_{model}(x') = G-CDF_{smap}(x)$$

$$MG-CDF_{model}(x') = MG-CDF_{smap}(x)$$

[0102]

[0103] 여기서, G는 격자를 뜻하는 Grid를 나타낸다. MG는 MonthlyGrid로 월별 격자를 나타낸다. x는 SMAP의 기본 토양수분 값을 의미한다. x'는 CDF 매칭이 완료된 후의 보정된 SMAP 토양수분 값을 의미한다. G-CDF_{model}는 격자별로 생성한 WRF-Hydro 모형의 단일 누적분포함수를 나타낸다. G-CDF_{smap}는 격자별로 생성한 SMAP 토양수분 자료의 단일 누적분포함수를 나타낸다. MG-CDF_{model}은 격자별로 생성한 WRF-Hydro 모형의 월별 누적분포함수를 나타낸다. MG-CDF_{smap}는 격자별로 생성한 SMAP 토양수분 자료의 월별 누적분포함수를 나타낸다.

[0105] 상기의 과정을 통해 SMAP 위성관측 자료(x)는 편차가 보정되어, WRF-Hydro 모형에 가까워진 SMAP 자료(x)로 변환될 수 있다.

[0107] 도 3은 G-CDF와 MG-CDF의 SMAP 토양수분 편차 보정 과정을 나타낸다.

[0108] 종래의 MG-CDF와 달리, G-CDF는 격자별 SMAP 토양수분의 전체 연구 기간 동안의 변동성을 반영할 수 있기 때문에 보다 간편하고 정확한 방법임을 알 수 있다.

[0110] 종래에는 위성자료와 모델 간의 편차를 보정하기 위하여, CDF 매칭방법인 Global-CDF(전체 연구 지역의 모든 격자들을 바탕으로 한 단일 CDF)와 MonthlyGrid-CDF(전체 연구 지역의 격자별 월별 CDF, MG-CDF)가 활용되었다.

[0111] 하지만, 본 발명에서는 추가로 Grid-CDF(전체 연구지역의 격자별 CDF 산출, 이하 'G-CDF'라 함)를 제시하였다. 본 발명에서는 G-CDF와 이를 월 단위로 세분화한 MG-CDF를 적용하였다.

[0112] 본 발명을 통해 Grid-CDF 기법이 MonthlyGrid-CDF 기법보다 더 나은 성능을 보임을 확인하였으며, 시간해상도가 높은 위성자료를 동화시켰을 때 가장 크게 성능이 향상되었다.

[0115] 이하에서는 본 발명에 따른 S400 단계를 설명하고자 한다.

[0116] 본 발명에 따른 S400 단계는 자료 동화부(400)가 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 단계이다.

[0117] S400 단계에서는 앙상블 칼만필터가 적용되며, 모형산출 토양수분값과 CDF 매칭이 완료된 SMAP 위성관측 토양수분값은 앙상블 칼만 필터를 통해 동화될 수 있다.

[0119] S400 단계에 있어서, 모형 앙상블이 N개인 때에, 모형을 통해 다음 수학식 2와 같이 N개의 모형산출 토양수분값이 산출되며, 모형산출 토양수분값을 바탕으로, 다음 수학식 3을 이용하여 모형의 오차공분산 행렬을 계산할 수 있다.

수학식 2

$$x^f = [x_1^f, x_2^f, \dots, x_N^f]$$

[0120]

[0121] 여기서, X^f는 예측모델상태앙상블(forecast model state ensemble)을 나타낸다. N은 앙상블의 번호를 나타낸다.

[0123] 일 실시예로, N=12이면 다음의 수학식 2-1로 나타낼 수 있다.

[0124] [수학식 2-1]

$$x^f = [x_1^f, x_2^f, \dots, x_{12}^f]$$

[0125]

수학식 3

$$P^f = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j^f - \overline{x^f})(x_j^f - \overline{x^f})^T$$

[0127]

[0128] 여기서, P^f 는 모델오차공분산(model state forecast error covariance)을 나타낸다. N은 모델 앙상블 개수를 나타낸다. j는 앙상블 번호를 나타내며 1부터 N개까지 적용된다. T는 행렬의 전치를 의미한다. x_j^f 는 j번 앙상블 모델 예측값을 나타내며, $\overline{x^f}$ 는 1번부터 N번까지의 앙상블 모델 예측값의 평균값을 나타낸다.

[0131] S400 단계는 동화시킬 위성자료를 바탕으로, 다음 수학식 4를 이용하여 위성관측 토양수분값의 오차공분산 행렬을 계산할 수 있다.

수학식 4

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (d_j - \overline{d})(d_j - \overline{d})^T$$

[0132]

[0133] 여기서, R은 측정오차공분산(observation covariance matrix)을 나타낸다. N은 모델 앙상블 개수를 나타낸다. j는 앙상블 번호를 나타내며 1부터 N개까지 적용된다. d는 위성 관측값(observation data)을 나타낸다. 위성 관측값의 개수는 앙상블 칼만 필터 적용을 위해 모델의 앙상블 개수와 일치시켜야 한다. 따라서, 일정한 표준편차를 가지고 전체 평균이 0이 되도록 하는 perturbation을 제작하여 하나의 위성값을 N개의 위성값으로 전개시킨다. 여기서 d_j 는 전개된 j번 위성관측값이다. \overline{d} 는 전개된 N개의 위성자료의 평균값으로 전개되기 전의 위성자료값과 동일하게 된다.

[0135] S400 단계는 다음 수학식 5를 이용하여 칼만 계인을 산출할 수 있다.

수학식 5

$$K = P^f H^T (H P^f H^T + R)^{-1}$$

[0136]

[0137] 여기서, K는 칼만게인(Kalman gain)을 나타낸다. P^f 는 모델오차공분산(model state forecast error covariance)을 나타낸다. H는 위성값과 모델값의 차원을 연결시켜주는 선형 연산자(linear operator)이다.

H^T 는 행렬 계산을 위해 전치된 선형 연산자(linear operator)이다.

[0139] S400 단계는 다음 수학식 6을 바탕으로 모형산출 토양수분값과 위성관측 토양수분값을 동화할 수 있다.

수학식 6

$$x_j^a = x_j^f + K(d_j - Hx_j^f)$$

[0140]

[0141] 여기서, x_j^a 는 j번 분석모델상태앙상블(analysis model state ensemble)을 나타낸다. x_j^f 는 j번 예측모델상태 앙상블(forecast model state ensemble)을 나타낸다. K는 칼만게인(Kalman gain)을 나타낸다. d_j 는 수학식 4에서 전개된 j번 위성관측값이다. H는 위성값과 모델값의 차원을 연결시켜주는 선형 연산자(linear operator)이다.

[0143] S400 단계는 다음 수학식 7과 같이 동화된 N개의 토양수분값을 생성할 수 있다.

수학식 7

$$x^a = [x_1^a, x_2^a, \dots, x_N^a]$$

[0144]

[0145] 여기서, x^a 는 분석모델상태앙상블(analysis model state ensemble)을 나타낸다. N은 앙상블 개수를 나타낸다.

[0147] 일 실시예로, N=12이면 다음의 수학식 7-1로 나타낼 수 있다.

[0148] [수학식 7-1]

$$x^a = [x_1^a, x_2^a, \dots, x_{12}^a]$$

[0149]

[0152] 본 발명에 있어서, 컴퓨팅장치는 S500 단계에서 생성된 결과값을 모형의 다음 구동을 위한 초기 모형산출 토양수분값으로 입력한 후, 상기 S100 단계부터 S500 단계까지를 반복수행할 수 있다.

[0155] 한편, 본 발명은 자료동화 방법뿐 아니라, 자료동화 시스템으로 구현될 수도 있다. 이는 전술한 자료동화 방법과 실질적으로 동일한 발명으로서 발명의 카테고리가 상이하다. 따라서, 공통되는 구성은 자료동화 방법의 구성을 차용하는 것으로 하여 구체적인 설명을 생략하고, 본 자료동화 시스템의 요지 위주로 설명하고자 한다.

[0157] 도 4는 본 발명에 따른 자료동화 시스템의 구성도이다.

[0158] 도 4에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 자료동화 시스템은 앙상블 제작부(100), 모형 구동부(200), 편차 제거부(300), 자료 동화부(400) 및 결과값 생성부(500)를 포함한다.

[0159] 구체적으로, 본 발명은 데이터베이스 및 연산기능을 가진 제어서버를 이용하는 컴퓨팅장치에 의해 수행되며, 위성 관측값과 모형 산출값을 동화시켜 모델의 성능을 향상시키는 자료동화 시스템으로서, 모형의 기상자료 및 토양수분 자료에 기 설정된 양의 섭동(perturbation)을 주어 기 설정된 개수의 모형 앙상블을 제작하는 앙상블 제작부(100); 상기 앙상블 제작부(100)에서 제작된 앙상블로, 유역 별로 보정이 완료된 WRF-Hydro 모형을 기 설정된 기간 범위로 구동하여, 모형산출 토양수분값을 산출하는 모형 구동부(200); 기 설정된 공간해상도를 갖는 위성관측 토양수분값이 존재하는 시점마다, 상기 모형산출 토양수분값을 활용하여 상기 위성관측 토양수분값의 편차를 제거하는 편차 제거부(300); 및 상기 편차가 제거된 위성관측 토양수분값과 모형산출 토양수분값을 앙상블 칼만 필터(EnKF)를 통해 동화하는 자료 동화부(400);를 포함한다,

[0161] 본 발명에 있어서, 자료 동화부(400)를 거쳐 동화된 토양수분값들의 평균값을 도출하고, 도출된 평균값에 앙상블 제작부(100)에 따른 섭동을 적용하여 기 설정된 개수의 결과값을 생성하는 결과값 생성부(500)를 더 포함할 수 있다.

[0164] 또한, 본 발명은 컴퓨터프로그램으로 구현될 수도 있다. 구체적으로 본 발명은 하드웨어와 결합되어, 본 발명에 따른 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법을 컴퓨터에 의해 실행시키기

위하여 컴퓨터가 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다.

[0165] 본 발명의 실시예에 따른 방법들은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 판독 가능한 프로그램 형태로 구현되어 컴퓨터로 판독 가능한 기록매체에 기록될 수 있다. 여기서, 기록매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 기록매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 예컨대 기록매체는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CDROM, DVD와 같은 광 기록매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치를 포함한다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어를 포함할 수 있다. 이러한 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

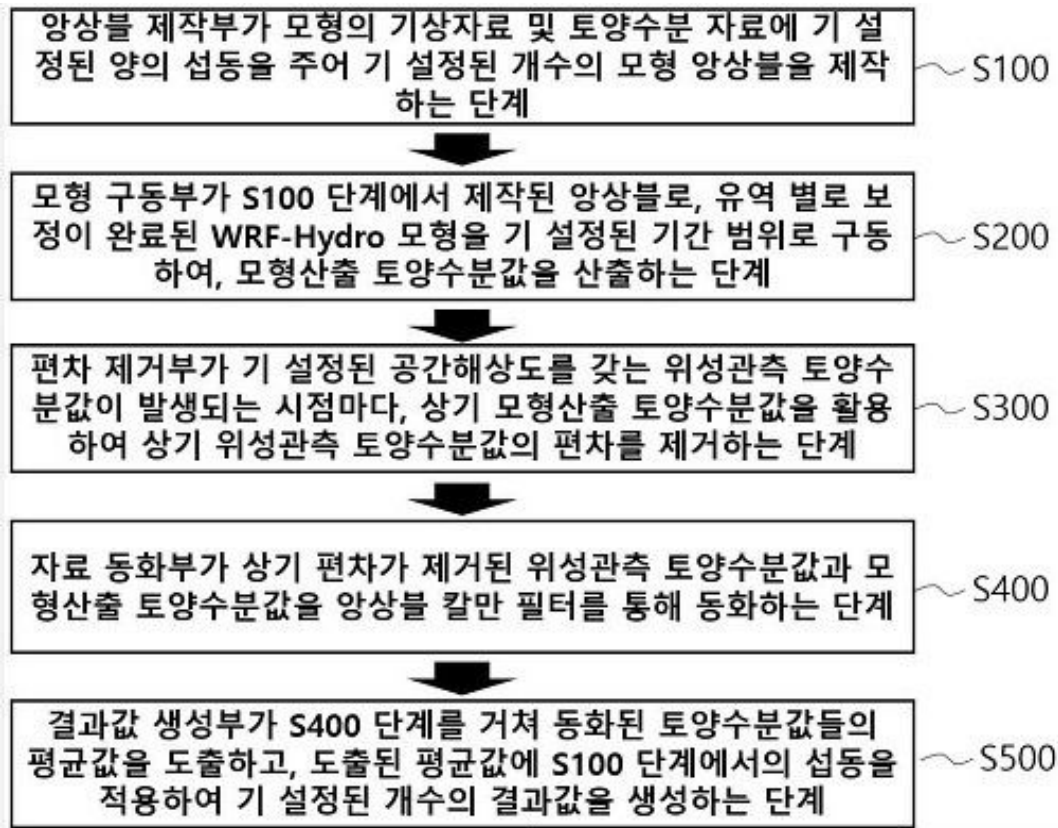
[0167] 본 명세서에서 설명되는 실시예와 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 예시적으로 설명하는 것에 불과하다. 따라서, 본 명세서에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이므로, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아님은 자명하다. 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당업자가 용이하게 유추할 수 있는 변형예와 구체적인 실시 예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

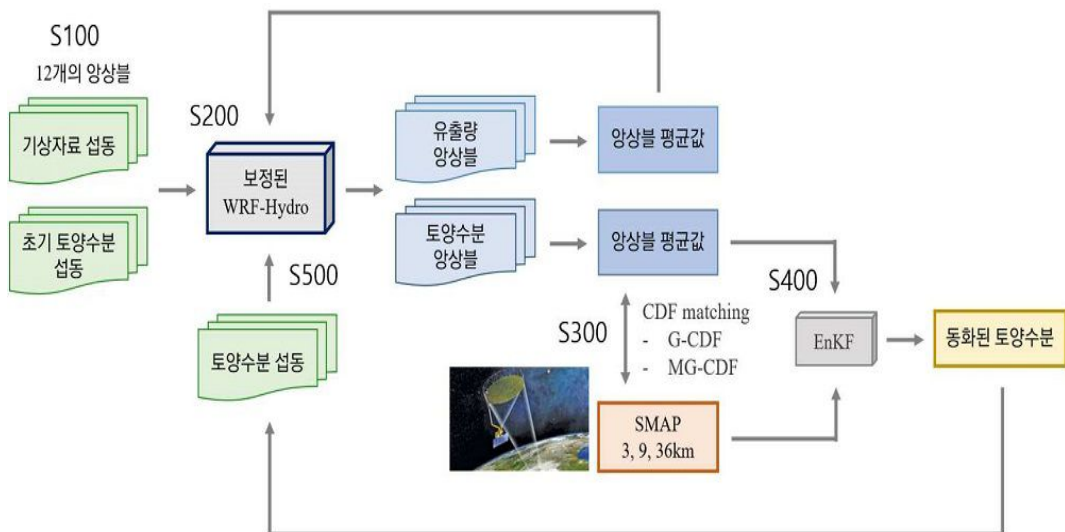
- [0168] 100 : 양상블 제작부
- 200 : 모형 구동부
- 300 : 편차 제거부
- 400 : 자료 동화부
- 500 : 결과값 생성부

도면

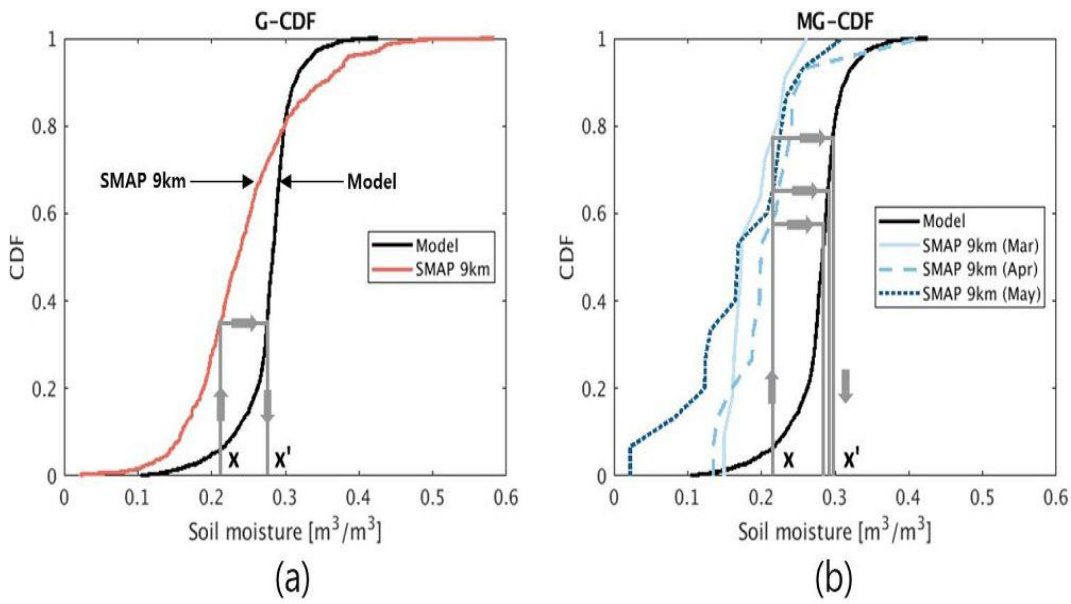
도면1



도면2



도면3



도면4



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 15

【변경전】

청구항 2에 있어서,

상기 컴퓨팅장치는 S500 단계에서 생성된 결과값을 모형의 다음 구동을 위한 초기 모형산출 토양수분값으로 입력한 후, 상기 S100 단계부터 S500 단계까지를 반복수행하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.

【변경후】

청구항 1에 있어서,

상기 컴퓨팅장치는 S500 단계에서 생성된 결과값을 모형의 다음 구동을 위한 초기 모형산출 토양수분값으로 입력한 후, 상기 S100 단계부터 S500 단계까지를 반복수행하는 것을 특징으로 하는 다중 공간해상도를 가진 위성관측 토양수분자료의 WRF-Hydro 자료동화 방법.