



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년05월04일
(11) 등록번호 10-2529183
(24) 등록일자 2023년04월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01W 1/10 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G01W 1/10 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0020338

(22) 출원일자 2021년02월16일

심사청구일자 2021년02월16일

(65) 공개번호 10-2022-0117396

(43) 공개일자 2022년08월24일

(56) 선행기술조사문헌

양은경 외 1명. A comparison of variational, ensemble-based, and hybrid data assimilation methods over East Asia for two one-month periods. Atmospheric Research. 2021.02, Vol.249, [2020년 9월 12일 온라인 공개]*

Massimo Bonavita 외 2명. EnKF and Hybrid Gain Ensemble Data Assimilation. Part II: EnKF and Hybrid Gain Results. MONTHLY WEATHER REVIEW. 2015.12.01, Vol.143, Issue.12, pp.4865-4882*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

김현미

서울특별시 서대문구 연세로 50, 대기과학과 (신초동, 연세대학교)

양은경

서울특별시 서대문구 연세로 50, 대기과학과 (신초동, 연세대학교)

(74) 대리인

특허법인우인

전체 청구항 수 : 총 4 항

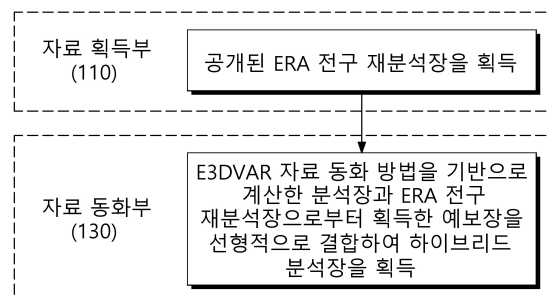
심사관 : 정향남

(54) 발명의 명칭 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치

(57) 요약

본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치는, WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 획득된 분석장을 기 공개된 고품질의 ERA5 전구 재분석장으로부터 획득된 예보장과 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하고, 이를 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득함으로써, 최첨단의 자료 동화 기술과 예보 성능이 뛰어난 수치 예보 모델이 없다고 하더라도, 이미 무료로 제공되고 있는 고품질의 자료를 활용함으로써 자체 모델/기술의 성능이 상대적으로 제한적인 작은 규모의 연구 기관이나 개인이 고해상도의 고품질의 재분석 자료를 생산할 수 있다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류
G01W 2201/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711111064
과제번호	2017R1E1A1A03070968
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	전략공모
연구과제명	하이브리드 앙상블-변분 자료동화 방법을 이용한 기후변화-기상재해 분석 및 예측의
불확실성 정량화(4/5)	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	연세대학교 산학협력단
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28
공지예외적용	: 있음

명세서

청구범위

청구항 1

공개된 ERA5 전구 재분석장을 획득하는 자료 획득부; 및

WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 분석장을 계산하고, 상기 자료 획득부를 통해 획득된 상기 ERA5 전구 재분석장을 미리 설정된 시간 동안 적분하여 예보장을 획득하며, 상기 분석장과 상기 예보장을 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하는 자료 동화부;

를 포함하는 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치.

청구항 2

제1항에서,

상기 자료 동화부는,

상기 ERA5 전구 재분석장을 6시간 동안 적분하여 상기 예보장을 획득하는,

동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치.

청구항 3

제2항에서,

상기 자료 동화부는,

수학적식 $X_{AdvHG}^a = \alpha X_{ERA5}^{f(6h)} + (1-\alpha)X_{E3DVAR}^a$ 을 통해 상기 하이브리드 분석장을 획득하며, 상기 X_{AdvHG}^a 는 상기 하이브리드 분석장을 나타내고, 상기 $X_{ERA5}^{f(6h)}$ 는 상기 예보장을 나타내며, 상기 X_{E3DVAR}^a 는 상기 분석장을 나타내고, 상기 α 는 미리 설정된 가중치를 나타내는,

동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치.

청구항 4

제3항에서,

상기 자료 동화부를 통해 획득된 상기 하이브리드 분석장을 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득하는 기상 재분석부;

를 더 포함하는 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득하기 위한 자료 동화를 수행하는, 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 재분석 자료는 과거의 대기 상태의 참값을 추정하여 재현해낸 고품질의 기후 자료로, 기상, 기후 분야뿐만 아니

라 다양한 산업 분야에서도 널리 활용되고 있다.

- [0003] 선진국의 기상 현업 기관들은 약 20년 전부터 전 지구 영역에 대한 재분석 자료를 생산해오고 있지만, 전 지구 영역의 재분석 자료는 해상도가 낮아, 각 지역마다 고해상도 재분석 자료의 필요성이 대두되고 있다.
- [0004] 이에, 북미, 유럽, 북극, 남아시아 지역에서는 이미 지역 재분석 자료가 생산되었거나 생산을 위해 준비 중인 반면, 아시아 지역에서는 고해상도 지역 재분석 자료가 없는 실정이다.
- [0005] 따라서, 지역 규모의 상세한 특성을 구현해낼 수 있는 고해상도의 동아시아 지역 재분석 시스템의 구축이 필요한 상황이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0006] 본 발명이 이루고자 하는 목적은, WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 획득된 분석장을 기 공개된 고품질의 ERA5 전구 재분석 장으로부터 획득된 예보장과 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하고, 이를 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득하는, 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치를 제공하는 데 있다.
- [0007] 본 발명의 명시되지 않은 또 다른 목적들은 하기의 상세한 설명 및 그 효과로부터 용이하게 추론할 수 있는 범위 내에서 추가적으로 고려될 수 있다.

과제의 해결 수단

- [0008] 상기의 목적을 달성하기 위한 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치는, 공개된 ERA5 전구 재분석장을 획득하는 자료 획득부; 및 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 분석장을 계산하고, 상기 자료 획득부를 통해 획득된 상기 ERA5 전구 재분석장을 미리 설정된 시간 동안 적분하여 예보장을 획득하며, 상기 분석장과 상기 예보장을 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하는 자료 동화부;를 포함한다.
- [0009] 여기서, 상기 자료 동화부는, 상기 ERA5 전구 재분석장을 6시간 동안 적분하여 상기 예보장을 획득할 수 있다.
- [0010] 여기서, 상기 자료 동화부는, 수학적식 $X_{AdvHG}^a = \alpha X_{ERA5}^{f(6h)} + (1-\alpha)X_{E3DVAR}^a$ 을 통해 상기 하이브리드 분석장을 획득하며, 상기 X_{AdvHG}^a 는 상기 하이브리드 분석장을 나타내고, 상기 $X_{ERA5}^{f(6h)}$ 는 상기 예보장을 나타내며, 상기 X_{E3DVAR}^a 는 상기 분석장을 나타내고, 상기 α 는 미리 설정된 가중치를 나타낼 수 있다.
- [0011] 여기서, 상기 자료 동화부를 통해 획득된 상기 하이브리드 분석장을 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득하는 기상 재분석부;를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0012] 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치에 의하면, WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 획득된 분석장을 기 공개된 고품질의 ERA5 전구 재분석장으로부터 획득된 예보장과 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하고, 이를 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득함으로써, 최첨단의 자료 동화 기술과 예보 성능이 뛰어난 수치 예보 모델이 없다고 하더라도, 이미 무료로 제공되고 있는 고품질의 자료를 활용함으로써 자체 모델/기술이 상대적으로 제한적인 작은 규모의 연구 기관이나 개인이 고해상도의 고품질의 재분석 자료를 생산할 수 있다.
- [0013] 본 발명의 효과들은 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치를 설명하기 위한 블록도이다.

도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 자료 동화 과정을 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시 예를 상세히 설명한다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시 예를 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다.

[0016] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.

[0017] 본 명세서에서 "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위한 것으로, 이들 용어들에 의해 권리범위가 한정되어서는 아니 된다. 예를 들어, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다.

[0018] 본 명세서에서 각 단계들에 있어 식별부호(예를 들어, a, b, c 등)는 설명의 편의를 위하여 사용되는 것으로 식별부호는 각 단계들의 순서를 설명하는 것이 아니며, 각 단계들은 문맥상 명백하게 특정 순서를 기재하지 않는 이상 명기된 순서와 다르게 일어날 수 있다. 즉, 각 단계들은 명기된 순서와 동일하게 일어날 수도 있고 실질적으로 동시에 수행될 수도 있으며 반대의 순서대로 수행될 수도 있다.

[0019] 본 명세서에서, "가진다", "가질 수 있다", "포함한다" 또는 "포함할 수 있다"등의 표현은 해당 특징(예: 수치, 기능, 동작, 또는 부품 등의 구성요소)의 존재를 가리키며, 추가적인 특징의 존재를 배제하지 않는다.

[0020] 또한, 본 명세서에 기재된 '~부'라는 용어는 소프트웨어 또는 FPGA(field-programmable gate array) 또는 ASIC과 같은 하드웨어 구성요소를 의미하며, '~부'는 어떤 역할들을 수행한다. 그렇지만 '~부'는 소프트웨어 또는 하드웨어에 한정되는 의미는 아니다. '~부'는 어드레싱할 수 있는 저장 매체에 있도록 구성될 수도 있고 하나 또는 그 이상의 프로세서들을 재생시키도록 구성될 수도 있다. 따라서, 일 예로서 '~부'는 소프트웨어 구성요소들, 객체지향 소프트웨어 구성요소들, 클래스 구성요소들 및 태스크 구성요소들과 같은 구성요소들과, 프로세스들, 함수들, 속성들, 프로시저들, 서브루틴들, 프로그램 코드의 세그먼트들, 드라이버들, 펌웨어, 마이크로코드, 회로, 데이터 구조들 및 변수들을 포함한다. 구성요소들과 '~부'들 안에서 제공되는 기능은 더 작은 수의 구성요소들 및 '~부'들로 결합되거나 추가적인 구성요소들과 '~부'들로 더 분리될 수 있다.

[0022] 이하에서 첨부한 도면을 참조하여 본 발명에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치의 바람직한 실시예에 대해 상세하게 설명한다.

[0024] 먼저, 도 1 및 도 2를 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치에 대하여 설명한다.

[0025] 도 1은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치를 설명하기 위한 블록도이고, 도 2는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 자료 동화 과정을 설명하기 위한 도면이다.

[0026] 도 1을 참조하면, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 데이터 산출을 위한 자료 동화 장치(이하 '자료 동화 장치'라 한다)(100)는 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 획득된 분석장을 기 공개된 고품질의 ERA5 전구 재분석장으로부터 획득된 예보장과 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득하고, 이를 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득한다.

[0028] 이를 위해, 자료 동화 장치(100)는 자료 획득부(110), 자료 동화부(130) 및 기상 재분석부(150)를 포함할 수 있

다.

- [0029] 자료 획득부(110)는 유럽 중기 예보 센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)를 통해 기 공개된 ERA5 전구 재분석장을 획득한다.
- [0030] 여기서, ERA5 전구 재분석장은 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서 제공하는 4DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 생성되어, 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)를 통해 외부로 공개된다.
- [0032] 자료 동화부(130)는 도 2에 도시된 바와 같이, E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 분석장을 계산하고, 자료 획득부(110)를 통해 획득된 ERA5 전구 재분석장을 미리 설정된 시간 동안 적분하여 예보장을 획득하며, 분석장과 예보장을 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 획득한다.
- [0033] 여기서, E3DVAR 자료 동화 방법은 미국 국립 대기 환경 연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발한 커뮤니티 모델인 WRF 모델 기반으로 하는 변분법(3-Dimensional Variational data assimilation, 3DVAR)과 앙상블 기반의 자료 동화 방법(ensemble Kalman filter, EnKF)을 결합한 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법을 말한다.
- [0034] 이때, 자료 동화부(130)는 ERA5 전구 재분석장을 WRF 모델에서 6시간 동안 적분하여 예보장을 획득할 수 있다.
- [0035] 즉, 자료 동화부(130)는 아래의 [수학식 1]을 통해 하이브리드 분석장을 획득할 수 있다.

수학식 1

[0036]
$$X_{AdvHG}^a = aX_{ERA5}^{f(6h)} + (1-a)X_{E3DVAR}^a$$

- [0037] 여기서, X_{AdvHG}^a 는 하이브리드 분석장을 나타낸다. $X_{ERA5}^{f(6h)}$ 는 예보장을 나타낸다. X_{E3DVAR}^a 는 E3DVAR로부터 획득된 분석장을 나타낸다. a 는 미리 설정된 가중치를 나타낸다.

- [0039] 기상 재분석부(150)는 자료 동화부(130)를 통해 획득된 하이브리드 분석장을 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득할 수 있다.

- [0042] 그러면, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 자료 동화 과정에 대하여 보다 자세하게 설명한다.

- [0043] 재분석 자료에서 자료 동화 방법의 중요성

- [0044] 동아시아 지역 재분석 자료를 생산하기 위해서는 먼저 동아시아 지역 재분석 시스템이 구축되어야 한다. 재분석 자료는 장기간의 기후 데이터이기 때문에, 이 장기간의 데이터를 생산하는 동안 시스템이 일관성 있게 유지되지 않으면 의도치 않은 잘못된 잡음이 포함되어 데이터의 가치가 떨어질 수 있다. 따라서, 초기에 결정된 재분석 시스템, 즉 수치 예보 모델 및 자료 동화 시스템은 장기간의 재분석 자료를 생산하는 동안 일관성 있게 유지되어야 하므로, 시스템을 구축할 당시에 가장 첨단화된 기술뿐만 아니라 높은 분석/예보 성능을 보유한 재분석 시스템을 선정해야 고품질의 재분석 자료를 생산할 수 있다.

- [0045] 실제로 재분석장을 생산하고 있는 선진국들의 기상 관련 기관들은 과거 1세대의 재분석 자료는 이미 생산하였지만, 컴퓨터 용량 및 계산 속도가 크게 향상되고 수치 예보 모델/자료 동화 기술이 지속적으로 발전된 덕분에 이전보다 더 고도화된 재분석 시스템의 구축이 가능해져서 다음 세대의 재분석 자료를 생산하였거나 생산하고자 계획하고 있다. 이처럼 재분석 자료의 품질을 좌우하는 요소들은 수치 예보 모델, 초기 조건, 관측 자료 등이 있는데, 본 발명에서는 그 중 초기 조건을 생산하는데 사용되는 자료 동화와 관련하여 혁신적이고 효율적인 방법을 새롭게 제안하여 동아시아 지역 재분석 시스템을 구축하고자 한다.

- [0047] 전통적인 하이브리드 자료 동화 방법

- [0048] 앙상블 기반 자료 동화 방법은 앙상블 예보로부터 불확실성에 관한 정보를 제공하기 때문에 자료 동화 분야에서 변분법(variational data assimilation method)과 양대 산맥을 이루며 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 앙상블 기반 자료 동화 방법과 변분법의 장점을 결합한 하이브리드 앙상블-변분 방법이 각광받고 있으며, 전 세계적으로 기상 현업 및 연구 기관에서 널리 사용되고 있다. 하지만, 아직까지는 동아시아 지역에서 장기간에서의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법의 성능에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 이에, 본 발명에서는 미

국 국립 대기 환경 연구소(NCAR)에서 개발한 커뮤니티 모델인 WRF 모델을 기반으로 하는 변분법(3DVAR)과 앙상블 기반의 자료 동화 방법(EnKF)을 결합한 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법(E3DVAR)을 이용하였다.

[0049] 전통적인 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법은 변분법의 자료 동화 방법을 기반으로 하여 분석장과 배경장의 차이, 분석장과 관측장의 차이로 계산되는 비용 함수를 최소화하는 분석장을 찾는 방법이다. 이때, 하이브리드 방법에서는 변분법에서 사용되는 기후학적, 통계적으로 계산된 배경 오차 공분산에 앙상블 기반의 시공간적으로 변화하는(flow-dependent) 배경 오차 공분산을 반영하도록 하여 기존의 변분법과 차별화를 둔다([수학식 2]). 즉, 기존의 변분법과 구조는 동일하지만, 기후학적으로 계산하여 시간에 따라 변하지 않는 배경 오차 공분산([수학식 2]의 B)과 앙상블 예보장의 스프레드 정도에 기반한 배경 오차 공분산([수학식 2]의 P^f)을 서로 가중치를 주어 선형적으로 결합하는 방법이다.

수학식 2

$$J^b = J_s^b + J_e^b = \frac{1}{2} \delta X^T [(1-\beta)B + \beta P^f \circ C]^{-1} \delta X$$

[0050]

[0052] 기존의 하이브리드 게인 방법

[0053] 하이브리드 게인 방법(hybrid gain method)은 전통적인 하이브리드 자료 동화 방법이 개발된 이후에 최근에 새롭게 등장한 방법론으로 Penny(Penny, S. G. 2014: The hybrid local ensemble transform Kalman filter. Monthly Weather Review, 142(6), 2139-2149. 참조)가 처음 제안하였다. 기존의 하이브리드 자료 동화 방법에서는 통계적으로 구한 배경 오차 공분산과 앙상블 멤버들의 스프레드 정도에 기반하여 계산한 배경 오차 공분산에 대해 서로 가중치를 주어 선형적으로 결합하는 반면, 하이브리드 게인 방법은 변분법과 앙상블 기반의 자료 동화 방법으로 생산된 각각의 분석장을 선형적으로 결합하여 하이브리드 분석장을 생산하는 새로운 알고리즘이다([수학식 3]).

수학식 3

$$X_{Hybrid}^a = \alpha X_{det}^a + (1-\alpha)X'^a$$

[0054]

[0055] 여기서, X'^a 는 앙상블 기반의 자료 동화 방법으로 업데이트된 앙상블 평균 분석장을 나타낸다. X_{det}^a 는 변분법으로 업데이트된 분석장을 나타낸다.

[0056] [수학식 3]은 일반적인 하이브리드 게인 방법에서 특정 계수를 적용할 때 구해지는 식이다. 이 방법이 하이브리드 게인 방법이라고 불리는 이유는 다음과 같다.

[0057] 일반적인 하이브리드 게인 방법은 [수학식 4]와 [수학식 8]에 나와 있는 것처럼, 변분법과 앙상블 기반의 자료 동화 방법에서 계산된 각각의 칼만 게인 매트릭스(Kalman gain matrix)를 가중치에 따라 결합하는 방법이다([수학식 4] ~ [수학식 6]). 자료 동화 과정에서 칼만 게인 매트릭스는 배경장으로부터 분석장을 업데이트할 때, 앙상블 평균 배경장과 관측의 차이($y^0 - HX'^b$)인 관측 증분(observation innovation)에 가중치를 얼마나 줄지를 결정하고 필터의 안정성을 결정하는 역할을 한다(Brett, C. E., K. F. Lam, K. J. H. Law, D. S. McCormick, M. R. Scott, and A. M. Stuart, 2013: Accuracy and stability of filters for dissipative PDEs. Physica D: Nonlinear Phenomena, 245(1), 34-45. 참조).

수학식 4

$$^K = \beta_1 K + \beta_2 K^B + \beta_3 K^B H K$$

[0058]

수학식 5

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

수학식 6

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

[수학식 4]에서 특정 계수 ($\beta_1=1, \beta_2=\alpha, \beta_3=-\alpha$)를 적용하면 [수학식 7] 및 [수학식 8]을 얻을 수 있고, [수학식 8]은 [수학식 3]과 대수적으로(algebraically) 동등하다(Penny, S. G. 2014: The hybrid local ensemble transform Kalman filter. Monthly Weather Review, 142(6), 2139-2149. 참조).

수학식 7

$$\hat{K} = K + \alpha K^B (1 - HK)$$

수학식 8

$$X_{Hybrid}^a = X'^b + \hat{K} (y^0 - H X'^b)$$

미국의 국립 환경 예측 센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)의 전구 해양 자료 동화 시스템(Global Ocean Data Assimilation System, GODAS)은 이 하이브리드 게인 방법을 사용하도록 구축되었다(Penny, S. G., D. W. Behringer, J. A. Carton, and E. Kalnay, 2015: A hybrid global ocean data assimilation system at NCEP. Monthly Weather Review, 143(11), 4660-4677. 참조). 또한, 전세계에서 가장 뛰어난 예보 성능을 보유한 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서도 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)의 앙상블 기반의 자료 동화 방법(EnKF)과 변분법(4DVAR)에 기반한 하이브리드 게인 앙상블 자료 동화 시스템(Hybrid Gain Ensemble Data Assimilation, HG-EnDA)을 구축하였고, 하이브리드 게인 앙상블 자료 동화 시스템(HG-EnDA)이 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)의 변분법(4DVAR) 및 앙상블 기반 자료 동화 방법(EnKF)보다 성능이 훨씬 향상되었음을 검증한 바 있다(Bonavita, M., M. Hamrud, and L. Isaksen, 2015: EnKF and hybrid gain ensemble data assimilation. Part II: EnKF and hybrid gain results. Monthly Weather Review, 143(12), 4865-4882. 참조).

배경 오차 공분산을 선형적으로 결합하는 대신 게인 매트릭스를 결합하는 하이브리드 게인 방법은 독립적으로 각각 존재하는 변분법 및 앙상블 기반의 자료 동화 시스템을 크게 수정하지 않고도 더 나은 품질의 하이브리드 분석장을 만들 수 있다. 따라서, 가까운 미래에는 변분법 및 앙상블 기반의 자료 동화 시스템의 장점을 모두 활용하기 위해 간단하고 실용적인 방법으로써 하이브리드 게인 방법이 사용될 수 있을 것으로 보인다(Houtekamer, P. L., and F. Zhang, 2016: Review of the ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. Monthly Weather Review, 144(12), 4489-4532. 참조).

본 발명에 따른 자료 동화 방법

본 발명은 WRF 모델 기반의 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 계산한 분석장을 기 공개된 고품질의 ERA5 전구 재분석장을 WRF 모델에서 적분한 예보장과 선형적으로 결합한 새로운 자료 동화 방법을 제시한다.

즉, 본 발명은 기존의 하이브리드 게인 방법에서 응용된 방법인 첨단 하이브리드 게인(Advanced hybrid gain, AdvHG) 자료 동화 방법을 새롭게 제안한다. 기존의 하이브리드 게인 방법은 전통적인 하이브리드 자료 동화 방

법이 개발된 이후에 최근에 새롭게 등장한 방법으로, 변분법과 앙상블 기반의 자료 동화 방법으로 생산된 각각의 분석장을 선형적으로 결합하여 새로운 하이브리드 분석장을 생산하는 방법이다.

- [0070] 본 발명은 기존의 하이브리드 계인 방법을 응용하여 1) 이미 존재하는 고품질의 재분석 자료를 사용함으로써 비용을 절감할 뿐만 아니라, 2) 최첨단의 기술들을 적용하여 위성 자료를 포함하는 동화 가능한 모든 관측 자료들을 동화한 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)의 정확도 높은 재분석 자료를 사용할 수 있는 효율적인 방법, 즉 위의 [수학식 1]과 같이 첨단의 하이브리드 계인 알고리즘(AdvHG)을 제안한다.
- [0071] 본 발명에서 제안한 첨단의 하이브리드 계인 방법(AdvHG)이 기존의 하이브리드 계인 방법과 다른 점은 다음과 같다.
- [0072] 1) 하이브리드 계인 방법에서는 앙상블 기반의 자료 동화 방법의 분석장을 보통 EnKF 계열의 자료 동화 방법을 사용하는 반면, 본 발명에 따른 첨단의 하이브리드 계인 방법(AdvHG)은 하이브리드 앙상블-변분 자료 동화 방법인 E3DVAR의 분석장을 사용한다.
- [0073] 2) 변분법 자료 동화 방법으로 계산된 분석장을 사용하는 대신, 본 발명에 따른 첨단의 하이브리드 계인 방법(AdvHG)은 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서 제공하는 4DVAR 자료 동화 방법에 기반한 ERA5 전구 재분석장의 6시간 예보장을 사용한다. ERA5 재분석장은 WRF 모델과 다른 수치 예보 모델을 사용하고 WRF보다 저해상도에서 생산되기 때문에, WRF 모델과 수평/연직 해상도 측면에서 일관성 있는 자료를 만들고 더 균형을 갖춘 하이브리드 분석장을 생산하기 위해 ERA5의 6시간 예보장을 사용한다.
- [0074] 3) 본 발명에 따른 첨단의 하이브리드 계인 방법(AdvHG)은 자체적으로 구축한 자료 동화 방법(E3DVAR)에 의해 계산된 분석장에 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서 제공하는 고품질의 ERA5 재분석 자료를 선형적으로 결합하여 사용한다. 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서 제공하는 최신의 고품질의 자료(최첨단의 기술을 적용하여 현재 사용 가능한 모든 위성 자료를 동화)를 사용할 수 있다는 측면에서 매우 효율적이고 재분석 결과의 성능이 좋은 방법이다.
- [0075] 본 발명에서 ERA5 분석장을 사용하지 않고 6시간 예보장을 사용한 이유는 다음과 같다.
- [0076] - ERA5 분석장은 약 30-km의 수평 해상도를 가지는 반면, E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 계산된 분석장은 12-km의 해상도를 가지며 연직 레벨도 다르기 때문에, 이에 대한 조정이 필수적이다.
- [0077] - 그러나, 해상도뿐만 아니라 수치 예보 모델 자체가 다르므로 인해 이 둘의 분석장을 결합하는 과정에서 균형이 깨지거나 잡음이 발생할 수 있다.
- [0078] - 이를 방지하고자, 본 발명에서는 ERA5 분석장 대신 WRF 모델을 사용해 6시간 예보장을 생산한 후, 이를 E3DVAR 자료 동화 방법을 기반으로 계산된 분석장과 선형적으로 가중치를 주어 하이브리드 분석장을 생산한다.
- [0079] 예측성과 관련하여 높은 수준의 기술을 가지고 있는 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)는 ERA5 전구 재분석장을 생산하고 있는데, 현 시점에서 ERA5 전구 재분석장은 세계에서 가장 정확도가 높은 전구 재분석장으로 알려져 있다. 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)에서 ERA5 전구 재분석장을 생산하는데 사용되는 수치 예보 모델 및 자료 동화 방법은 월등한 예보 성능을 보유하고 있고, 또한, 일반적인 종래의 관측뿐만 아니라 특히, 전처리 과정도 어려운 각종 위성 자료들을 매우 잘 활용하고 있다.
- [0080] 본 발명은 최초로 이렇게 기존에 존재하는 고품질의 자료를 활용하는 자료 동화 방법을 제안하였으며, 최초로 이 방법을 기반으로 동아시아 지역 재분석 시스템을 구축한다.
- [0081] 본 발명에 따른 첨단의 하이브리드 계인 방법(AdvHG)은 현존하는 모든 위성관측 자료를 동화하는 최첨단의 자료 동화 기술과 예보 성능이 뛰어난 수치 예보 모델이 없다고 하더라도, 이미 무료로 제공되고 있는 고품질의 자료를 활용함으로써 자체 모델/기술의 성능이 상대적으로 제한적인 작은 규모의 연구 기관이나 개인이 고해상도의 고품질의 재분석 자료를 생산할 수 있다는 가능성을 제시해주는 실용적이고 혁신적인 방법이다.
- [0083] 본 발명에 따른 동아시아 지역 기상 재분석 시스템
- [0084] 본 발명에 따른 자료 동화 방법을 기반으로 동아시아 지역 기상 재분석 데이터를 획득하기 위한 시스템을 구축할 수 있다.
- [0085] 즉, 본 발명에 따른 첨단의 하이브리드 계인 자료 동화 방법(AdvHG)을 사용하여 WRF 모델 기반의 동아시아 지역 재분석 시스템(East Asia Regional Reanalysis, EARR)을 구축하였으며, 6시간 마다 순환/예측을 수행하며 종래

의 관측을 동화하여 2017년 ~ 2018년에 대해서 동아시아 지역 재분석장 및 재예측장을 생산하고 이에 대한 검증을 수행하였다. 그리고, 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)의 ERA5 재분석장의 이전 세대인 ERA-Interim(ERA-I) 재분석장도 함께 검증을 수행하였다.

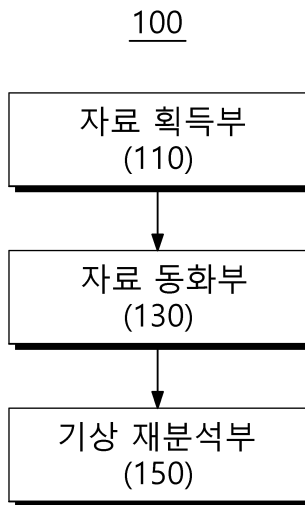
- [0086] 검증 결과, 상층 변수에 대해서는 ERA5가 EARR보다 성능이 뛰어나기는 하지만, 그 차이가 ERA5와 ERA-I의 차이만큼 크지 않았음이 확인되었다.
- [0087] 또한, EARR이 겨울철에는 ERA-I보다는 성능이 뛰어나고, 여름철에는 EARR이 ERA-I와 비슷한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.
- [0088] 그러나, 이와는 대조적으로 EARR의 강수 재예측장은 1월과 7월 모두 ERA5의 강수 재예측장과 WRF 기반의 ERA5 강수 예측장보다 정확도가 높음을 확인하였다. 7월에 E3DVAR의 강수 예측장이 EARR의 강수 재예측장보다 더 정확하게 모의되기는 했지만, 그 차이가 크지 않고, 1월에는 EARR의 강수 재예측장이 E3DVAR의 강수 예측장보다 성능이 개선되었다.
- [0089] 따라서, EARR의 상층 변수를 사용하여 분석을 수행할 때는 상층 변수의 불확실성을 고려할 필요가 있으나, EARR의 강수 재예측장은 1월과 7월 모두 ERA5의 강수 (재)예측장보다 정확도가 높은 것을 확인할 수 있었다.
- [0090] 따라서, 본 발명에서 생산된 고해상도 동아시아 지역 재분석장은 기상 및 기후 분야뿐만 아니라 산업, 경제, 사회 등 전 분야에 걸쳐 다양하게 활용될 것으로 전망된다.
- [0093] 이상에서 설명한 본 발명의 실시예를 구성하는 모든 구성요소들이 하나로 결합하거나 결합하여 동작하는 것으로 기재되어 있다고 해서, 본 발명이 반드시 이러한 실시예에 한정되는 것은 아니다. 즉, 본 발명의 목적 범위 안에서라면, 그 모든 구성요소들이 하나 이상으로 선택적으로 결합하여 동작할 수도 있다. 또한, 그 모든 구성요소들이 각각 하나의 독립적인 하드웨어로 구현될 수 있지만, 각 구성요소들의 그 일부 또는 전부가 선택적으로 조합되어 하나 또는 복수개의 하드웨어에서 조합된 일부 또는 전부의 기능을 수행하는 프로그램 모듈을 갖는 컴퓨터 프로그램으로서 구현될 수도 있다. 또한, 이와 같은 컴퓨터 프로그램은 USB 메모리, CD 디스크, 플래쉬 메모리 등과 같은 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 매체(Computer Readable Media)에 저장되어 컴퓨터에 의하여 읽혀지고 실행됨으로써, 본 발명의 실시예를 구현할 수 있다. 컴퓨터 프로그램의 기록 매체로서는 자기기록매체, 광기록매체 등이 포함될 수 있다.
- [0094] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 수정, 변경 및 치환이 가능할 것이다. 따라서, 본 발명에 개시된 실시예 및 첨부된 도면들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예 및 첨부된 도면에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

- [0095] 100 : 자료 동화 장치,
110 : 자료 획득부,
130 : 자료 동화부,
150 : 기상 재분석부

도면

도면1



도면2

