(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년02월09일
(11) 등록번호 10-1828020
(24) 등록일자 2018년02월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 17/16 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G06F 17/16 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0039195
(22) 출원일자 2017년03월28일
심사청구일자 2017년03월28일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020150053017 A

(73) 특허권자
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 신선로 365 (용당동, 부경대학교)
(72) 발명자
강현규
부산광역시 남구 용소로 45, 4308B (대연동)
정형빈
부산광역시 남구 용소로 45, 4308B (대연동)
(74) 대리인
오위환, 나성곤, 정기택

전체 청구항 수 : 총 15 항 심사관 : 이복현

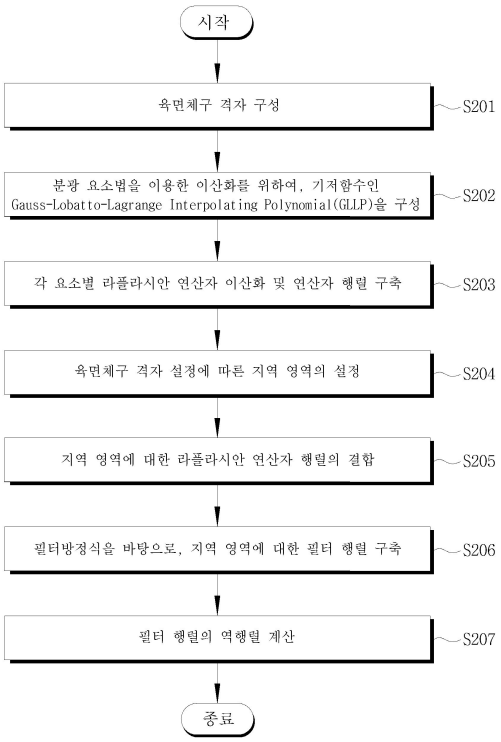
(54) 발명의 명칭 **분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법**

(57) 요 약

본 발명은 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높인 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 육면체구 격자 구성을 하는 육면체구 격자구성부;분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성부;GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축부;N_l x N_l 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정부;각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합부;지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축부;를 포함하는 것이다.

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	KMIPA2015-5130
부처명	기상청
연구관리전문기관	한국기상산업진흥원
연구사업명	기상기술개발 사업
연구과제명	각운동량 분석을 통한 열대저기압의 역학적 특성 연구
기 여 율	1/1
주관기관	부경대학교 산학협력단
연구기간	2016.05.01 ~ 2017.04.30

공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

육면체구 격자 구성을 하는 육면체구 격자구성부;

분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성부;

GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축부;

$N_l \times N_l$ 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정부;

각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합부;

지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 상기 육면체구 격자구성부는,

요소와 격자점의 개수를 사용자가 지정하고, 육면체구의 각 면을 유한한 개수의 요소로 나누고, 각 요소내에서 격자점이 정의되는 육면체구 격자 구성을 하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서, 각 요소마다 구축된 이산 필터 행렬 연산자를 미리 역산해두고, 이를 계산 시 활용하도록 하는 역행렬 계산부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치.

청구항 4

제 1 항에 있어서, 상기 지역 영역 설정부에서,

결합요소수 N_l은 $FLOOR[6^{-1}N_e+N^{-1}]$으로 주어지며, 여기서 FLOOR는 바닥 함수인 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치.

청구항 5

육면체구 격자 구성을 하는 단계;

분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성 단계;

GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축 단계;

$N_l \times N_l$ 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정 단계;

각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합 단계;

지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산

자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 각 요소마다 구축된 이산 필터 행렬 연산자를 미리 역산해두고, 이를 계산 시 활용하도록 하는 역행렬 계산 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 7

제 5 항에 있어서, 육면체구 격자 구성을 하는 단계에서,

육면체구의 한 면에서 단일 방향으로 요소수를 N_e 로 정의하고, 나누어진 요소의 경계는 이웃하는 요소의 경계와 그 값을 공유하고 육면체구상의 라플라시안 연산자는,

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial x^1}\left[\sqrt{G}G^{11}\frac{\partial}{\partial x^1}+\sqrt{G}G^{12}\frac{\partial}{\partial x^2}\right] + \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial x^2}\left[\sqrt{G}G^{21}\frac{\partial}{\partial x^1}+\sqrt{G}G^{22}\frac{\partial}{\partial x^2}\right]$$ 으로 정의되고,

여기서, G는 육면체구의 metric tensor, x^1 과 x^2 는 육면체구 격자의 동서 및 남북 지역 좌표를 각각 나타내는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 육면체구 라플라시안 연산자는 육면체구 분광요소법으로 이산화되고,

육면체구에서 정의되는 적분 가능한 함수를 ψ 로 정의하면, 한 요소 내에서 다항 기저함수 전개는,

$$\psi(x^1,x^2)=\sum_{k=0}^{N}\sum_{l=0}^{N}\psi(x_k^1,x_l^2)h_k(x^1)h_l(x^2)$$ 이고,

여기서, h는 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)이며, N은 기저함수의 차수를 의미하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 9

제 5 항에 있어서, GLLIP 구성 단계에서,

GLLIP는 $$h_k(x^i)=\frac{(x^i-1)(x^i+1)P_N'(x^i)}{N(N+1)(x^i-x_p)P_N(x_p)},\ i=1\ \text{or}\ 2$$ 으로 정의되고,

여기서, P는 르젠드르 함수를 나타내는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 10

제 5 항에 있어서, 연산자 행렬 구축 단계에서,

라플라시안 연산자에 대해 기저함수를 곱한 후 한 요소에 대해 적분하여 이산 라플라시안 연산자 행렬을 구하고 와도-유선함수의 관계를 이용한 행렬방정식으로 나타내면,

$\mathbf{LZ} = \boldsymbol{\psi}$ 이고,

여기서, L은 이산 라플라시안 연산자 행렬, Z와 $\boldsymbol{\psi}$는 각각 벡터를 의미하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 11

제 5 항에 있어서, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축 단계에서,

필터 방정식은,

$\left[1 + (-1)^q \nu \nabla^{2q}\right] w = g$ 으로 정의되고,

여기서, g는 주어진 함수로서 필터링을 해야 할 함수이며, w는 필터링 처리된 함수를 각각 나타내고, ν는 필터 계수, q(양의 정수)는 필터의 차수(order)를 각각 나타내는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서, 지역 영역의 이산 라플라시안 연산자 행렬($\mathbf{L}_l$)을 바탕으로, 필터방정식을 행렬방정식으로 표현하면,

$$\mathbf{H}_l \mathbf{w} = \mathbf{g}$$
$$\mathbf{H}_l \equiv \left[\mathbf{I} + (-1)^q \nu \mathbf{L}_l^q\right]$$ 이고,

여기서, $\mathbf{H}_l$은 고차 필터행렬을 의미하는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서, 필터링의 수행과정은 고차 필터행렬을 역산하여 주어진 함수와의 행렬-벡터 곱을 통해 이루어지고,

$\mathbf{w} = \mathbf{H}_l^{-1} \mathbf{g}$ 인 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 14

제 13 항에 있어서, 고차 필터행렬의 역행렬은 미리 계산하여 필터링 수행시마다 반복적으로 사용하고,

필터링 수행 후에는 육면체 격자 중앙에 위치한 요소만 남기고, 각 결합요소마다 계산이 끝나면 남겨진 요소들은 그 경계값을 공유하여 이웃한 요소들의 경계와 평균한 값을 갖는 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

청구항 15

제 13 항에 있어서, 필터링에 의한 진폭감소비율은 주어진 해상도 N_e와 N에 따른 가장 작은 규모의 성분이 그 절반이 되도록 설정하고,

필터의 차수(q)와 진폭감소비율(r)을 정하면,

$v = \frac{1}{rx\alpha}$ 에 의해 결정되고,

여기서, $x = 6^{-q}$, $\alpha = (4/\Delta_{\min})^2$ 이며, $\Delta_{\min}$ 은 주어진 N_e 와 N 에 따른 지구 반지름으로 무차원화 된 최저 격자 간격인 것을 특징으로 하는 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 분광요소법 디지털 필터에 관한 것으로, 구체적으로 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높인 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 수치일기예보모델(numerical weather prediction model)은 현재 또는 과거의 일기 조건으로부터 미래의 날씨를 예측하기 위해 대기 및 해양의 역학 방정식, 물리 모수화식 등을 계산하는 수학적 모델이다.

[0003] 수치일기예보모델의 중요한 구성요소인 역학 코어(dynamic core)부는, 대기 중의 바람, 온도, 기압, 습도, 엔트로피 등의 물리량들을 다수의 편미분 관계식을 포함한 지배 방정식으로 기술(describe)하며, 상기 지배 방정식의 해를 수치적으로 풀이하는 부분이다.

[0004] 상기 역학 코어부의 수치 계산을 위해서는, 상기 지배 방정식을 구성하는 변수들의 위치 정보와 함께, 상기 편미분 관계식의 수치적 풀이를 위한 계산법이 필요하다. 상기 변수들의 위치 정보는 지구 상의 수평, 연직 위치를 지시하기 위한 임의의 구면격자 좌표계로부터 얻어질 수 있다.

[0005] 예를 들어, 상기 변수들의 수평 위치를 지시하기 위하여 통상적인 위도 및 경도의 수평 좌표계가 사용될 수 있다. 또한, 상기 변수들의 연직 위치를 지시하기 위하여 기압 고도, 해수면고도 등의 연직 좌표계가 사용될 수 있다.

[0006] 한편, 상기 편미분 관계식의 수치적 풀이를 위한 계산법으로는 분광요소법(spectral element method)이 사용될 수 있다.

[0007] 분광요소법은 전체의 계산 공간을 요소(element) 단위로 구분하고, 각각의 요소에서 르장드르(Legendre) 다항식 또는 라그랑지(Lagrange) 다항식을 전개함으로써, 편미분 관계식의 수치 해(numerical solution)를 계산하는 방법이다.

[0008] 최근에는, 위도 및 경도의 수평 좌표계가 갖는 극 지역 및 적도 지역의 격자 분포의 편차를 해결하기 위하여, 육면체구 격자(cubed-sphere grid)를 사용하여 수치 해를 계산하는 기술들이 개발되고 있다.

[0009] 육면체구 격자에 분광요소법을 적용하는 경우, MPI(message passing interface) 계산-통신 방법에 의해, 다수의 요소들에 대하여 요소 내부 계산 및 요소 간의 통신을 수행할 수 있다.

[0010] 이와 같이 최근 육면체구 분광요소법을 이용한 수치모델이 많이 개발되고 있으며, 이에 따라 육면체구 분광요소법 모델 또는 격자자료의 잡음을 제거하기 위한 기술이 요구되고 있다.

[0011] 육면체구 분광요소법을 이용한 명시적(explicit) 잡음 제거 방법이 많이 이용되고 있으나, 때에 따라 부정확하며 불안정하다. 특히, 고차수 필터링(high-order filtering)시에는 그 정도가 매우 심각해 진다.

[0012] 따라서, 육면체구 격자상의 자료를 규모에 따른 분리 및 잡음(noise)을 고속으로 처리하여 격자자료 및 수치예보자료의 품질을 향상시킬 수 있도록 하는 새로운 기술의 개발이 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0013] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제10-2015-0053017호

(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-1491022호

(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 제10-2015-0053018호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0014] 본 발명은 이와 같은 종래 기술의 분광요소법 디지털 필터의 문제를 해결하기 위한 것으로, 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높인 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0015] 본 발명은 육면체구 분광요소법을 이용한 묵시적(implicit) 잡음 제거 방법을 도입하여 안정적이고 정확한 필터링이 가능하도록 한 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0016] 본 발명은 지역 영역에 대한 묵시적 잡음 제거 방법을 사용하여 전구영역에 대한 묵시적 잡음 제거 방법보다 더 높은 계산 효율로 필터링을 수행할 수 있도록 한 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0017] 본 발명은 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높이고, 이를 육면체구 격자자료 및 육면체구 분광요소 수치모델에 효율적으로 적용할 수 있도록 한 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0018] 본 발명은 육면체구 격자상의 자료를 규모에 따른 분리 및 잡음(noise)을 고속으로 처리하여 격자자료 및 수치예보자료의 품질을 향상시킬 수 있도록 한 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0019] 본 발명은 육면체구 분광요소법을 이용함으로써 높은 병렬 확장성(parallel scalability)이 보장되고 고해상도 육면체구 격자자료의 등방적 필터링이 가능하도록 한 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0020] 본 발명의 목적들은 이상에서 언급한 목적들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0021] 이와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치는 육면체구 격자 구성을 하는 육면체구 격자구성부;분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성부;GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축부;$N_l \times N_l$ 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정부;

각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합부;지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축부;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0022] 여기서, 상기 육면체구 격자구성부는, 요소와 격자점의 개수를 사용자가 지정하고, 육면체구의 각 면을 유한한 개수의 요소로 나누고, 각 요소내에서 격자점이 정의되는 육면체구 격자 구성을 하는 것을 특징으로 한다.

[0023] 그리고 각 요소마다 구축된 이산 필터 행렬 연산자를 미리 역산해두고, 이를 계산 시 활용하도록 하는 역행렬 계산부를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0024] 그리고 상기 지역 영역 설정부에서, 결합요소수 N_l은 $\mathrm{FLOOR}[6^{-1}N_e+N^{-1}]$으로 주어지며, 여기서 FLOOR는 바닥 함수인 것을 특징으로 한다.

[0025] 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법은 육면체구 격자 구성을 하는 단계;분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성 단계;GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축 단계;N_l x N_l 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정 단계;각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합 단계;지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0026] 여기서, 각 요소마다 구축된 이산 필터 행렬 연산자를 미리 역산해두고, 이를 계산 시 활용하도록 하는 역행렬 계산 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

[0027] 이와 같은 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법은 다음과 같은 효과를 갖는다.

[0028] 첫째, 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높일 수 있다.

[0029] 둘째, 육면체구 분광요소법을 이용한 묵시적(implicit) 잡음 제거 방법을 도입하여 안정적이고 정확한 필터링이 가능하도록 한다.

[0030] 셋째, 지역 영역에 대한 묵시적 잡음 제거 방법을 사용하여 전구영역에 대한 묵시적 잡음 제거 방법보다 더 높은 계산 효율로 필터링을 수행할 수 있도록 한다.

[0031] 넷째, 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높이고, 이를 육면체구 격자자료 및 육면체구 분광요소 수치모델에 효율적으로 적용할 수 있도록 한다.

[0032] 다섯째, 육면체구 격자상의 자료를 규모에 따른 분리 및 잡음(noise)을 고속으로 처리하여 격자자료 및 수치예보자료의 품질을 향상시킬 수 있도록 한다.

[0033] 여섯째, 육면체구 분광요소법을 이용함으로써 높은 병렬 확장성(parallel scalability)이 보장되고 고해상도 육면체구 격자자료의 등방적 필터링이 가능하도록 하여 분광요소법을 사용하는 유체역학, 지구과학 등 다양한 분야에 응용하는 것이 가능하다.

도면의 간단한 설명

[0034] 도 1은 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치의 구성도

도 2는 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법을 나타낸 플로우차트

도 3은 4x4개의 요소와 4x4의 격자로 나누어진 육면체구(왼쪽)와 육면체(오른쪽)구성도

도 4는 8x8 개의 요소로 나누어진 육면체 격자 구성도

도 5는 육면체구의 면 중앙(왼쪽)과 모서리(오른쪽)에 위치한 요소의 결합된 이산 라플라시안 연산자 행렬 형태를 나타낸 구성도

도 6은 본 발명에 따른 육면체구 격자자료를 위한 분광요소법 디지털 필터링 적용 전후의 지형 자료

도 7은 육면체구 분광요소 천수모델로 모의된 7일째의 와도장 구성도

도 8은 (a)5x5개 요소로 결합된 지역 영역 고차 필터, (b) 3x3 요소로 결합된 지역 영역 고차 필터, (c) 전구 고차 필터의 해상도에 따른 RMSE.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0035] 이하, 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법의 바람직한 실시 예에 관하여 상세히 설명하면 다음과 같다.

[0036] 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법의 특징 및 이점들은 이하에서의 각 실시 예에 대한 상세한 설명을 통해 명백해질 것이다.

[0037] 도 1은 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치의 구성도이고, 도 2는 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법을 나타낸 플로우 차트이다.

[0038] 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법은 육면체구 분광요소법을 이용한 지역 영역 고차 필터를 구성하여 계산의 효율성과 안정성을 높인 것으로, 육면체구 분광요소법을 이용한 묵시적(implicit) 잡음 제거 방법을 도입하여 안정적이고 정확한 필터링이 가능하도록 한 것이다.

[0039] 또한, 본 발명은 육면체구 분광요소법을 이용함으로써 높은 병렬 확장성(parallel scalability)이 보장되고 고해상도 육면체구 격자자료의 등방적 필터링이 가능하도록 한 것이다.

[0040] 이하의 설명에서 육면체구 분광요소법을 사용한 격자자료를 기준으로 설명하였으나, 분광요소법만을 사용한 격자자료에도 응용 가능함은 당연하다.

[0041] 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치는 도 1에서와 같이, 요소와 격자점의 개수를 사용자가 지정하여 육면체구의 각 면을 유한한 개수의 요소로 나누고, 각 요소내에서 격자점이 정의되는 육면체구 격자 구성을 하는 육면체구 격자구성부(10)와, 분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 GLLIP 구성부(20)와, GLLIP를 이용하여, 라플라시안 연산자를 전개하고 이를 한 요소에 대해 적분하여 각 요소별 이산 라플라시안 연산자 행렬을 얻는 연산자 행렬 구축부(30)와, 고차 필터의 정확도와 계산 효율성을 고려하여, $N_l \times N_l$ 개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 라플라시안 행렬을 구성하는 지역 영역 설정부(40)와, 각 요소에 대하여 정의된 결합 요소영역을 따라 이산 라플라시안 연산자 행렬을 결합하는 연산자 행렬 결합부(50)와, 지역 영역에 대한 이산 라플라시안 연산자 행렬을 이용하여, 필터 방정식에 이를 대입하고 이산 필터 행렬 연산자 행렬을 구축하는 필터 행렬 구축부(60)와, 각 요소마다 구축된 이산 필터 행렬 연산자를 미리 역산해두고, 이를 계산 시 활용하도록 하는 역행렬 계산부(70)를 포함한다.

[0042] 그리고 지역 영역 설정부(40)에서 결합요소수 N_l은 $\mathrm{FLOOR}[6^{-1}N_e+N^{-1}]$으로 주어지며, 여기서 FLOOR는 바닥 함수를 의미한다. 결합 영역은 도 4에서와 같다.

[0043] 그리고 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 방법은 도 2에서와 같이, 육면체구 격자 구성 단계(S201)와, 분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)을 구성하는 단계(S202)와, 각 요소별 라플라시안 연산자 이산화 및 연산자 행렬 구축 단계(S203)와, 육면체구 격자 설정에 따른 지역 영역의 설정 단계(S204)와, 지역 영역에 대한 라플라시안 연산자 행렬의 결합 단계(S205)와, 필터방정식을 바탕으로, 지역 영역에 대한 필터 행렬을 구축하는 단계(S206)와, 필터 행렬의 역행렬 계산 단계(S207)를 포함한다.

[0044] 이와 같은 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법의 각 단계의 처리 과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

[0045] 육면체구는 육면체를 구에 투영하여 얻을 수 있으며, 육면체구의 각 면을 유한한 개수의 요소로 나누어 각 요소내에서 스펙트럴법을 적용하는 분광요소법을 사용한다.

[0046] 도 3은 4x4개의 요소와 4x4의 격자로 나누어진 육면체구(왼쪽)와 육면체(오른쪽)구성도이다. 붉은선은 육면체구의 면을, 푸른선은 육면체구의 요소를 각각 나타낸다.

[0047] 도 3에서 육면체구의 한 면에서 단일 방향으로 요소수를 N_e로 정의한다.

[0048] 나누어진 요소의 경계는 이웃하는 요소의 경계와 그 값을 공유한다.

[0049] 육면체구상의 라플라시안 연산자는 수학식 1에서와 같이 주어진다.

수학식 1

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial x^1}\left[\sqrt{G}G^{11}\frac{\partial}{\partial x^1}+\sqrt{G}G^{12}\frac{\partial}{\partial x^2}\right] + \frac{1}{\sqrt{G}}\frac{\partial}{\partial x^2}\left[\sqrt{G}G^{21}\frac{\partial}{\partial x^1}+\sqrt{G}G^{22}\frac{\partial}{\partial x^2}\right]$$

[0050]

[0051] 여기서, G는 육면체구의 metric tensor, x^1과 x^2는 육면체구 격자의 동서 및 남북 지역 좌표를 각각 나타낸다. 육면체구 라플라시안 연산자는 육면체구 분광요소법으로 이산화된다. 육면체구에서 정의되는 적분 가능한 함수를 ψ로 정의하면, 한 요소 내에서 다항 기저함수 전개는 다음과 같다.

수학식 2

$$\psi(x^1,x^2)=\sum_{k=0}^{N}\sum_{l=0}^{N}\psi(x_k^1,x_l^2)h_k(x^1)h_l(x^2)$$

[0052]

[0053] 여기서, h는 GLLIP(Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial)이며, N은 기저함수의 차수를 의미한다.

[0054] GLLIP는 수학식 3에서와 같이 정의된다.

수학식 3

$$h_k(x^i)=\frac{(x^i-1)(x^i+1)P_N'(x^i)}{N(N+1)(x^i-x_p)P_N(x_p)},\ i=1\ \text{or}\ 2$$

[0055]

[0056] 여기서, P는 르젠드르 함수를 나타낸다. 라플라시안 연산자에 대해 기저함수를 곱한 후 한 요소에 대해 적분하여 이산 라플라시안 연산자 행렬을 구할 수 있다.

[0057] 이를 와도-유선함수의 관계를 이용한 행렬방정식으로 나타내면 수학식 4에서와 같다.

수학식 4

$$\mathbf{LZ}=\boldsymbol{\psi}$$

[0058]

[0059] 여기서, L은 이산 라플라시안 연산자 행렬, Z와 $\boldsymbol{\psi}$는 각각 벡터를 의미한다.

[0060] 기저함수의 차수가 N으로 주어질 때, 한 요소내의 총 격자점 수는 $(N+1)^2$으로 주어진다. 따라서 $N=3$일 때, 한 요소내의 격자점 수는 16개가 되며 이는 곧 벡터의 길이가 된다.

[0061] 이산 라플라시안 연산자의 행렬은 16x16의 크기를 가지는 full matrix가 된다.

[0062] 그리고 지역 영역 고차 필터 행렬의 구축 과정은 앞서 구축한 각 요소에 대한 이산 라플라시안 연산자를 일정 개수의 요소에 대해 결합하여 고차 필터 행렬을 구축하는 것이다.

[0063] 일 예로, 고차 필터의 정확도와 계산 효율성을 고려하여, 5x5개의 요소를 결합해 지역 영역에 대한 고차 필터

행렬을 구성한다.

[0064] 육면체 격자상에서 결합요소의 구성에 관한 일 예는 도 4에서와 같다.

[0065] 도 4는 8x8 개의 요소로 나누어진 육면체 격자 구성을 나타낸 것으로, 푸른색 요소는 결합되는 요소의 범위를 나타내며, 붉은색 요소는 그 중심을 의미하며 실제 필터링이 수행되는 요소이다.

[0066] 붉은색으로 색칠된 (3,3)의 요소를 중심으로 주변의 푸른색으로 색칠된 요소들이 결합된다.

[0067] 5x5개의 요소를 결합하면 벡터의 길이는 256개가 되며, 따라서 결합된 이산 라플라시안 연산자의 크기는 256x256 이 된다.

[0068] 도 5는 결합된 이산 라플라시안 연산자 행렬을 나타낸 것이다.

[0069] 도 5는 육면체구의 면 중앙(왼쪽)과 모서리(오른쪽)에 위치한 요소의 결합된 이산 라플라시안 연산자 행렬 형태를 나타낸 것으로, 0이 아닌 행렬 성분은 검은 점으로 표시하였다.

[0070] 블록 대각(block diagonal) 형태를 띄며 육면체구의 꼭지점에 위치한 행렬은 그 위치상의 특성으로 인하여 다른 형태로 나타난다.

[0071] 이렇게 결합된 이산 라플라시안 연산자를 고차 필터를 구성하는데 이용한다.

[0072] 고차-라플라시안 필터 방정식은 수학식 5에서와 같다.

수학식 5

[0073] $$\left[1+(-1)^{q}\nu\nabla^{2q}\right]w=g$$

[0074] 여기서, g는 주어진 함수로서 필터링을 해야 할 함수이며, w는 필터링 처리된 함수를 각각 나타내고, ν는 필터 계수, q(양의 정수)는 필터의 차수(order)를 각각 나타낸다.

[0075] 앞서 구축한 지역 영역의 이산 라플라시안 연산자 행렬($\mathbf{L}_l$)을 바탕으로, 고차 필터방정식을 행렬방정식으로 표현하면 수학식 6에서와 같다.

수학식 6

[0076] $$\mathbf{H}_l\mathbf{w}=\mathbf{g}$$
$$\mathbf{H}_l\equiv\left[\mathbf{I}+(-1)^{q}\nu\mathbf{L}_l^{q}\right]$$

[0077] 여기서, $\mathbf{H}_l$은 고차 필터행렬을 의미한다. 따라서 지역 영역의 이산 라플라시안 연산자를 구축하였다면, 고차 필터행렬은 간단히 구축할 수 있다.

[0078] 필터링의 수행과정은 고차 필터행렬을 역산하여 주어진 함수와의 행렬-벡터 곱을 통해 이루어진다.

수학식 7

[0079] $$\mathbf{w}=\mathbf{H}_l^{-1}\mathbf{g}$$

[0080] 그리고 고차 필터행렬의 역행렬은 미리 계산해두고, 필터링 수행시마다 반복적으로 사용할 수 있다.

[0081] 필터링 수행 후에는 도 4의 중앙에 위치한 (3,3)의 요소만 남기고, 각 결합요소마다 계산이 끝나면 남겨진

(3,3)의 요소들은 그 경계값을 공유한다.

[0082] 즉, 이웃한 요소들의 경계와 평균한 값을 가지게 된다. 필터링에 의한 진폭감소비율은 주어진 해상도 즉, N_e와 N에 따른 가장 작은 규모의 성분이 그 절반이 되도록 설정한다.

[0083] 필터의 차수(q)와 진폭감소비율(r)을 정하면, 다음의 수학식 8에 의해 결정된다.

수학식 8

[0084] $$v = \frac{1}{rx\alpha}$$

[0085] 여기서, $x = 6^{-q}$, $\alpha = (4/\Delta_{\min})^2$ 이며, $\Delta_{\min}$은 주어진 N_e와 N에 따른 지구 반지름으로 무차원화 된 최저 격자 간격이다.

[0086] 이와 같은 구성을 갖는 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 육면체구 격자로 내삽된 지형자료에 적용하여 필터링 성능을 확인하면 다음과 같다.

[0087] 사용된 지형자료는 미국 해양대기청인 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 지형자료를 사용하였으며, 본래 위경도 좌표상에서 제공되는 지형이지만 이를 육면체구 격자로 내삽하였다.

[0088] 내삽 후 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 적용하여 지형자료를 평활화하였으며, 이때 $N_e = 30$, $N = 3$, $q = 1$, $r = 0.1$ 로 설정하였다.

[0089] 평활화 후 시각적 용이성을 위하여 다시 육면체구 격자에서 위경도 격자로 내삽하여 그 결과를 비교하였다.

[0090] 도 6은 지형자료의 평활화 전과 후의 결과를 비교한 것이다.

[0091] 평활화 이후 해안선의 형태가 완만해졌으며, 작은 섬들은 제거가 된 것을 확인할 수 있다.

[0092] 이는 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 적용하는 것에 의해 육면체구 격자자료의 평활화가 정확하게 수행되는 것을 의미한다.

[0093] 그리고 육면체구 분광요소 모델의 수치잡음 제거를 위한 필터로서의 활용에 관하여 설명하면 다음과 같다.

[0094] 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법을 육면체구 분광요소 천수모델의 수치잡음 제거를 위한 필터로 적용하였다.

[0095] 지형위를 흐르는 바람장을 모의하는 천수모델 표준실험 5번을 선택하여, 지형을 실제 관측지형으로 교체하여 더 많은 수치잡음이 발생하도록 설정하였다.

[0096] 매 시간 스텝마다 본 제품을 적용하여 모델의 수치잡음을 제거하였다. 수평해상도는 전구 약 1도에 해당하는 $N_e = 30$ 와 $N = 3$ 으로, 고차 필터는 $q = 1$, $r = 0.25$ 로 설정하였다.

[0097] 7일 동안 실험을 수행하여 기존에 많이 사용되는 명시적 점성처리방법 및 육면체구를 구성하는 모든 요소를 연결하는 전구 묵시적 점성처리 방법(전구 고차 필터)과 그 결과를 비교하였다.

[0098] 도 7은 육면체구 분광요소 천수모델로 모의된 7일째의 와도장 구성도이다.

[0099] (a)는 본 발명이 적용된 지역 영역 고차필터, (b)는 전구 고차 필터, (c)는 명시적 점성 처리 방법을 도입한 육면체구 분광요소 천수모델로 모의된 7일째의 와도장이고, 단위는 s^{-1} 이며, 등치선 간격은 $8\times10^{-6}s^{-1}$이다.

[0100] 종래 기술에서 육면체구 분광요소 모델에 많이 사용되고 있는 명시적 점성처리 방법은 수치잡음을 제대로 제거하지 못하여 일부 영역에서 수치잡음이 발생하고 와도장이 왜곡되어 있는 것을 확인할 수 있다.

[0101] 이에 비하여 본 발명이 적용된 지역 영역 고차 필터와 전구 고차 필터의 결과에서는 그러한 수치잡음이 말끔히

제거된 것을 확인할 수 있다.

[0102] 본 발명이 적용된 지역 영역 고차 필터는 비교 대상인 전구 고차 필터와 그 결과가 매우 유사한 것을 확인할 수 있는데, 이는 두 필터가 동일한 방식으로 구현되기 때문이다.

[0103] 하지만, 결합되는 요소수의 차이로 인하여 계산시간에서는 상당한 차이를 보인다.

[0104] 지역 영역 고차 필터는 전구 고차 필터에 비하여 결합되는 요소수가 작기 때문에, 계산시간에서 이점을 가지게 된다.

[0105] 표 1은 지역 영역 고차 필터와 전구 고차 필터의 필터행렬 역산 시간과 필터 수행 시간을 해상도에 따라 각각 비교한 것이다.

[0106] 표 1은 수평해상도에 따른 필터행렬의 역산시간과 필터 수행 시간을 나타낸 것으로, 필터 수행 시간은 100회의 필터를 적용한 시간을 측정한 것이다.

[0107] LIMP는 지역 영역 고차 필터, GIMP는 전구 고차 필터를 각각 의미한다.

표 1

[0108]

N_e / N	필터행렬의 역산시간(s)		필터 수행 시간(s)	
	LIMP	GIMP	LIMP	GIMP
20 / 3	4.39	59.87	0.34	0.81
30 / 3	8.45	200.60	0.72	1.75
40 / 3	17.50	488.80	1.07	2.57
50 / 3	26.60	1255.61	1.64	3.96
60 / 3	38.93	2889.68	2.34	5.64

[0109] 필터행렬의 역산시간 경우, $N_e = 60$ 일 때 지역 영역 고차 필터에서 약 74배 정도 계산 시간이 감소하였다. 또한 필터 수행 시간의 경우, 약 2.4배 정도 계산 시간이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[0110] 그리고 도 8은 (a)5x5개 요소로 결합된 지역 영역 고차 필터, (b) 3x3 요소로 결합된 지역 영역 고차 필터, (c) 전구 고차 필터의 해상도에 따른 RMSE이다.

[0111] 본 발명에 따른 지역 영역 고차 필터는 전구 고차 필터 대비 높은 계산 효율을 가지고 있음과 동시에, 5x5개의 요소를 결합함으로써 그 정확성 또한 전구 고차 필터와 상응하도록 구성하였다.

[0112] 여기서 오차 수렴률은 Rossby-Haurwitz wave를 해석해(analytic solution)로서 사용하여 RMSE를 계산하였다. 지역 영역 고차 필터와 전구 고차 필터는 오차의 절대적인 크기뿐만 아니라, 오차의 수렴률 또한 매우 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 그러나 3x3개의 요소가 결합된 경우, 오차의 절대적인 크기도 클 뿐만 아니라 오차 수렴률도 약 2차 정도로 매우 낮게 나타났다.

[0113] 이는 본 발명에 따른 분광요소법 디지털 필터를 이용한 육면체구 격자자료 처리를 위한 장치 및 방법이 이전에 사용되는 명시적 점성처리 방법과 비교하여 더 안정적인 점성처리 성능을 보였을 뿐만 아니라, 전구 고차 필터와 비교하여 정확도를 유지하였으며 더 고속으로 처리 가능한 것을 의미한다.

[0114] 이상에서의 설명에서와 같이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 본 발명이 구현되어 있음을 이해할 수 있을 것이다.

[0115] 그러므로 명시된 실시 예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 하고, 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구 범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0116] 10. 육면체구 격자구성부 20. GLLIP 구성부

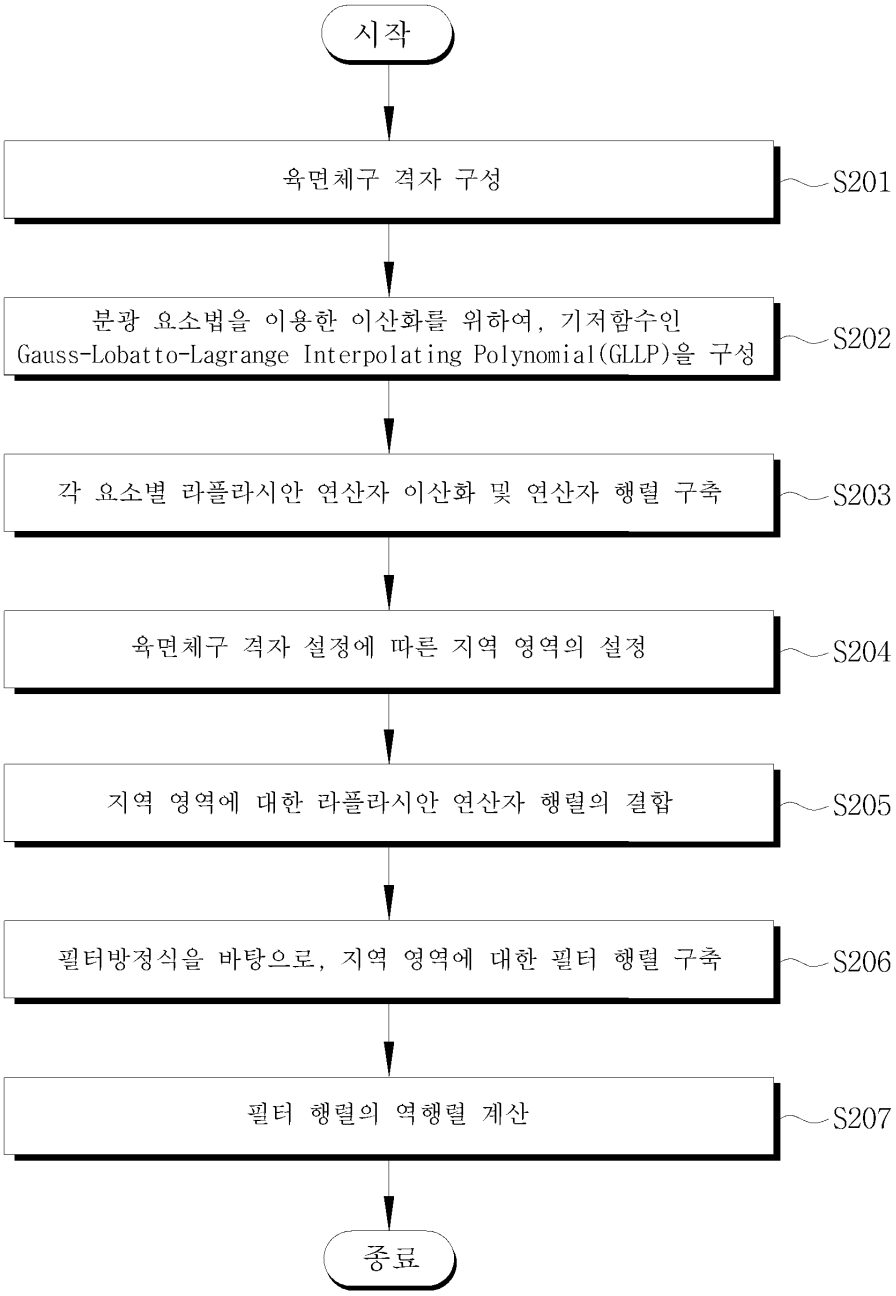
30. 연산자 행렬 구축부
40. 지역 영역 설정부
50. 연산자 행렬 결합부
60. 필터 행렬 구축부
70. 역행렬 계산부

도면

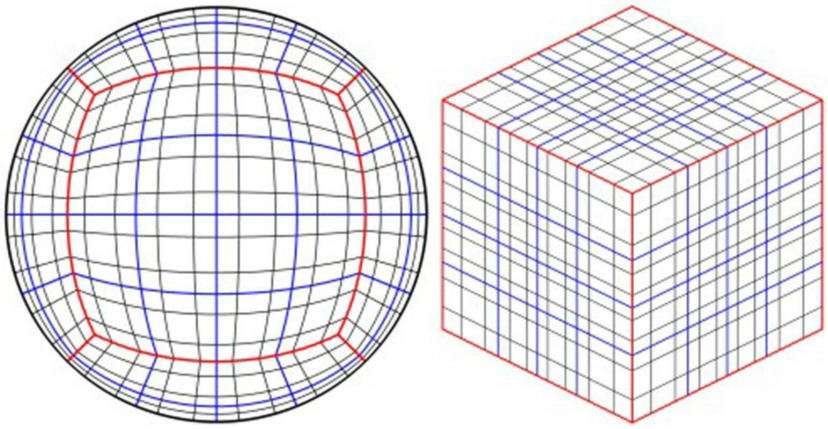
도면1



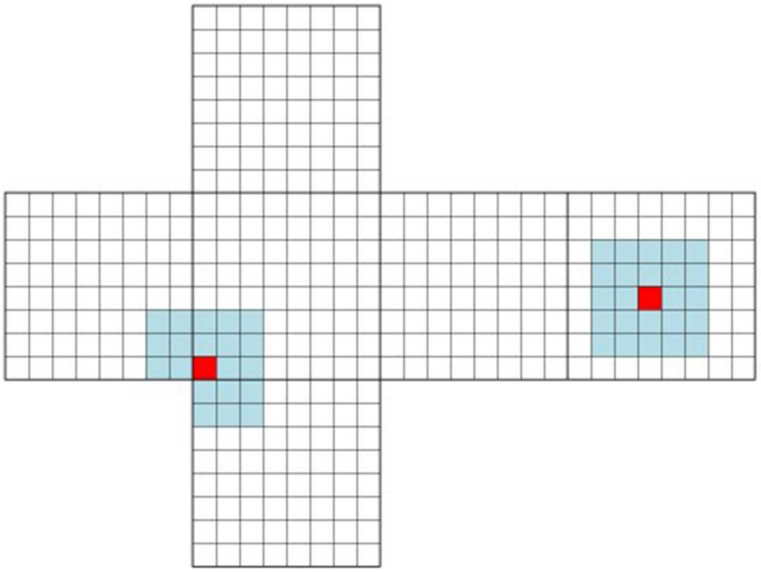
도면2


시작
육면체구 격자 구성
S201
분광 요소법을 이용한 이산화를 위하여, 기저함수인 Gauss-Lobatto-Lagrange Interpolating Polynomial(GLLP)을 구성
S202
각 요소별 라플라시안 연산자 이산화 및 연산자 행렬 구축
S203
육면체구 격자 설정에 따른 지역 영역의 설정
S204
지역 영역에 대한 라플라시안 연산자 행렬의 결합
S205
필터방정식을 바탕으로, 지역 영역에 대한 필터 행렬 구축
S206
필터 행렬의 역행렬 계산
S207
종료

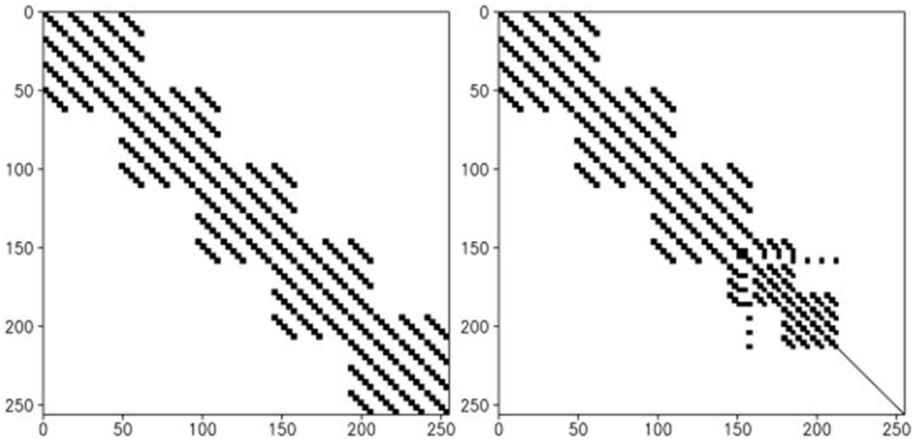
도면3



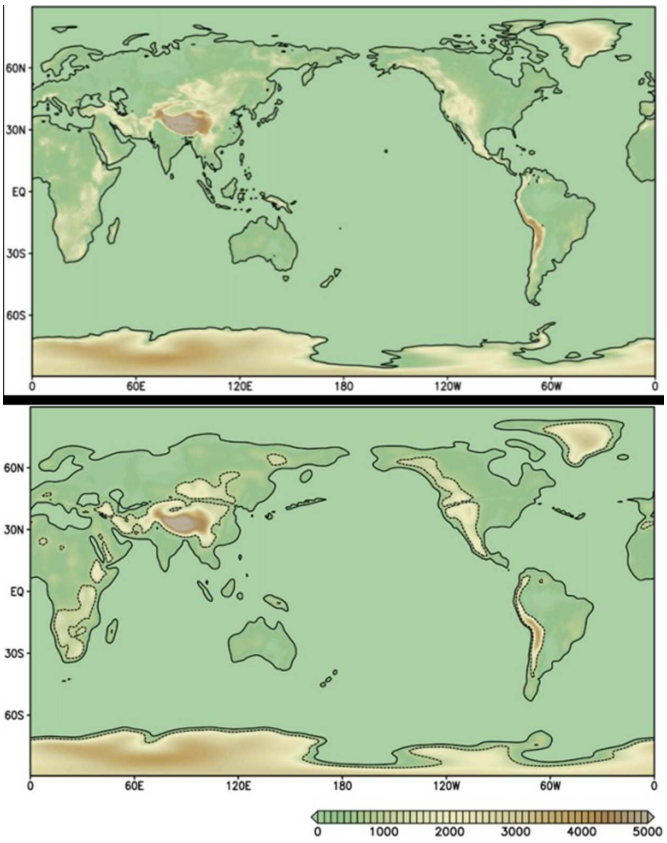
도면4



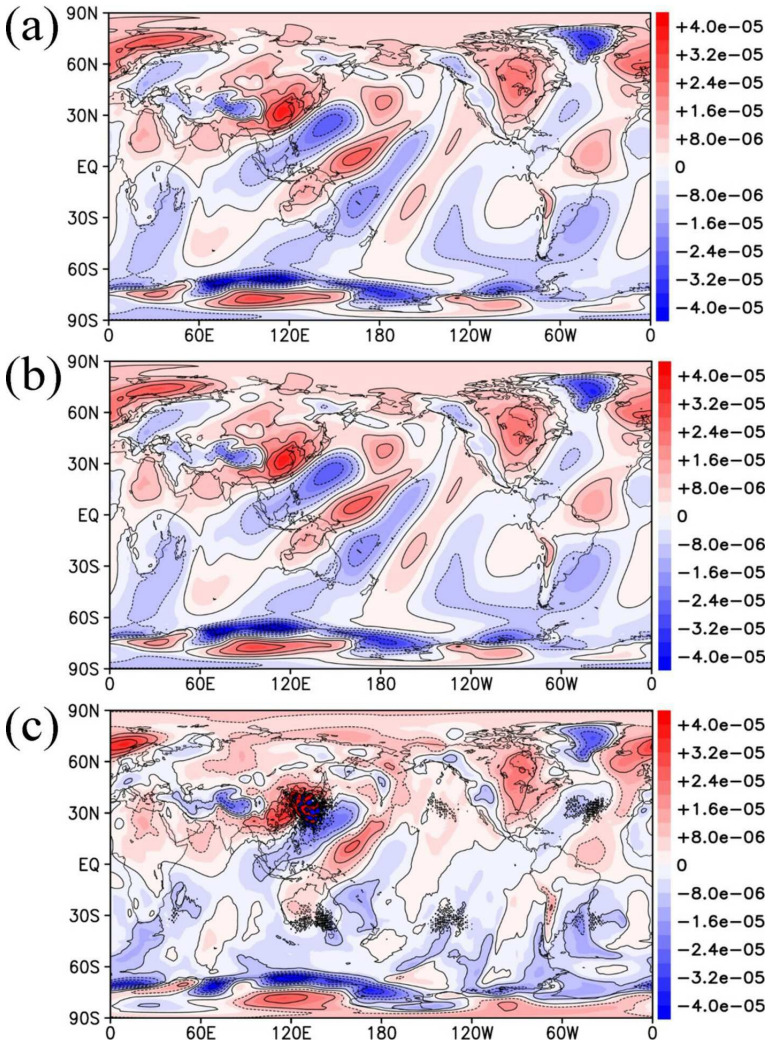
도면5


0
50
100
150
200
250
0
50
100
150
200
250
0
50
100
150
200
250
0
50
100
150
200
250

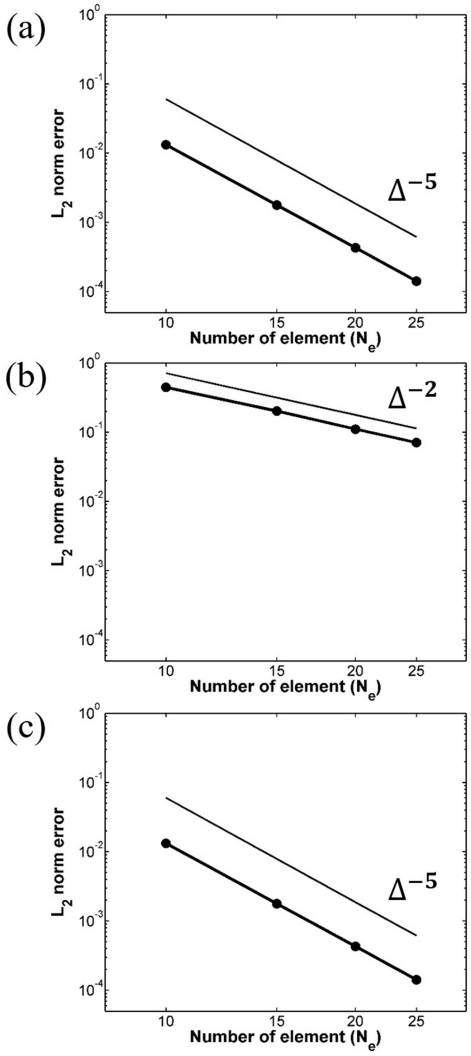
도면6


60N
30N
EQ
30S
60S
0
60E
120E
180
120W
60W
0
0
1000
2000
3000
4000
5000

도면7


(a)
(b)
(c)
90N
60N
30N
EQ
30S
60S
90S
0
60E
120E
180
120W
60W
+4.0e−05
+3.2e−05
+2.4e−05
+1.6e−05
+8.0e−06
0
−8.0e−06
−1.6e−05
−2.4e−05
−3.2e−05
−4.0e−05

도면8


(a)
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
L_2 norm error
Δ^{-5}
10
15
20
25
Number of element (N_e)
(b)
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
L_2 norm error
Δ^{-2}
10
15
20
25
Number of element (N_e)
(c)
10^0
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
L_2 norm error
Δ^{-5}
10
15
20
25
Number of element (N_e)