

## 보 고

# 물리 기반 유한 단층 미끌림 역산을 위한 CInterface (COMSOL-PyLith Interface) 개발

김민수 · 소병달\*

강원대학교 지구물리학과

## Development of a CInterface (COMSOL-PyLith Interface) for Finite Source Inversion using the Physics-based Green's Function Matrix

Minsu Kim and Byung-Dal So\*

Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

### 요 약

유한 단층 미끌림 역산에는 지진 변위 측정 자료와 그린 함수 행렬(Green's function matrix)을 주로 사용한다. 그린 함수 행렬은 일반적으로 오키다 모형(Okada, 1985)을 기반으로 한다. 그러나 최근 물리 기반 지진 모델링을 활용하여 그린 함수 행렬을 제작하고 유한 단층 미끌림 역산을 수행하는 연구가 활발하다. 물리 기반 지진 모델링은 다양한 물성(탄성, 점탄성, 탄소성 등)을 고려하여 현실적인 환경에서 지진을 모사할 수 있다는 장점이 있다. 물리 기반 유한요소 소프트웨어 PyLith는 단층을 구성하는 절점을 두 개로 나누어 지진을 모사할 수 있으므로 지진 모사 모델링에 적합하다. 하지만 PyLith는 격자망 생성 기능을 자체 제공하지 않아, 모형 내부에 수십~수백 개의 소단층과 관측점을 설정해야 하는 유한 단층 미끌림 역산 수행에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 소단층과 관측점을 포함한 수치 모형을 제작하고, 지진 모사 모델링을 수행하여 그린 함수 행렬을 제작하는 일련의 과정을 연계하여 유한 단층 미끌림 역산의 편리성을 높이기 위해 CInterface (COMSOL-PyLith Interface)를 개발하였다. CInterface는 COMSOL의 격자 생성 능력과 PyLith의 지진 모사 능력을 결합하여 그린 함수 행렬을 자동으로 생성할 수 있다. CInterface는 간단한 변수들로 모형 및 단층 정보를 조절할 수 있고, 지하 탄성 이상체와 GPS 관측점을 자유롭게 배치할 수 있다. 또한, 그린 함수 행렬을 생성하는 복잡한 과정을 간소화하여 더욱 편리하게 유한 단층 미끌림 역산을 할 수 있게 한다.

### 주요어

유한 단층 미끌림 역산, PyLith, COMSOL

### ABSTRACT

Finite source inversion is performed with a Green's function matrix and geodetic coseismic displacement. Conventionally, the Green's function matrix is constructed using the Okada model (Okada, 1985). However, for more realistic earthquake simulations, recent research has widely adopted the physics-based model, which can consider various material properties such as elasticity, viscoelasticity, and elastoplasticity. We used the physics-based software PyLith, which is suitable for earthquake modeling. However, the PyLith does not provide a mesh generator, which makes it difficult to perform finite source inversions that require numerous subfaults and observation points within the model. Therefore, in this study, we developed CInterface (COMSOL-PyLith Interface) to improve the convenience of finite source inversion by combining the processes of creating a numerical model including sub-faults and observation points, simulating earthquake modeling, and constructing a Green's function matrix. CInterface combines the grid generator of COMSOL with PyLith to generate the Green's function matrix automatically. CInterface controls model and fault information with simple parameters. In addition, elastic subsurface anomalies and GPS observations can be placed flexibly in the model. CInterface is expected to enhance the accessibility of physics-based finite source inversions by automatically generating the Green's function matrix.

Received: 21 September 2023; Revised: 25 October 2023; Accepted: 13 November 2023

\*Corresponding author

E-mail: [bdso@kangwon.ac.kr](mailto:bdso@kangwon.ac.kr)

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

©2023, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**KEYWORDS**

Physics-based modeling, finite source inversion, PyLith, COMSOL

**서 론**

지진 발생 시 단층 미끌림 양의 분포와 방향을 추정하는 것은 지진 발생 주변 지역 지진 위험도 평가에 중요하다. 또한, 추정된 미끌림 분포는 지진 모사 수치 모델링(예: 지진 후 변형, 지진 해일; Muto *et al.*, 2016; Pararas-Carayannis, 2014)의 입력 자료로 사용되기 때문에 정확한 분포를 파악해야 한다. 그러나 지진 발생 시 단층면에서의 미끌림 양은 시공간적으로 불균질하므로 정확한 미끌림 분포를 알아내기는 어렵다. 지하 단층면의 미끌림 분포는 직접적인 관측에 제약이 있기 때문에, 지표 변위 정보를 제공하는 측지 자료(예: GPS, InSAR; Pollitz *et al.*, 2011; Pedersen *et al.*, 2003; Song and Lee, 2019)에 기반한 유한 단층 미끌림 역산을 통해 추정할 수 있다.

유한 단층 미끌림 역산은 그린 함수 행렬(Green's function matrix)과 관측된 지표 변위 벡터 사이의 선형 방정식의 해를 통해 단층 미끌림 양 벡터를 도출한다. 그린 함수 행렬은 일반적으로 해석적인 오카다 모형(Okada, 1985)을 사용한 지진 모사 모델링을 통해 제작된다(Wang *et al.*, 2013; Crowell *et al.*, 2012). 오카다 모형은 탄성 반 무한 공간을 가정하여 지표 관측 지점에서 지진 변위를 계산하는 방법이다. 그러나 최근에는 물리 기반 정방향 모델링(physics-based forward modeling)으로 그린 함수 행렬을 제작하여 유한 단층 미끌림 역산을 수행하는 시도가 증가하고 있다(Kyriakopoulos *et al.*, 2013; Tung and Masterlark, 2016). 물리 기반 정방향 모델링은 탄성 반 무한 공간에서 지진을 모사하는 오카다 모형과는 달리 점탄성, 탄소성 등 다양한 물질뿐만 아니라 지하 구조의 불균질한 물성과 지표 고도 등을 적용할 수 있어 실제 지구와 유사한 환경을 모사할 수 있는 것이 장점이다.

물리 기반 유한요소 소프트웨어인 PyLith (Aagaard *et al.*, 2013)는 단층을 구성하는 절점(node)들을 두 개로 분리하여 지진을 모사할 수 있어 지진 모사 모델링에 적합하다. 물리 기반 정방향 모델링을 수행하기 위해서는 수치 모형과 격자망이 필수지만, PyLith는 자체적으로 격자망 생성 기능을 제공하지 않으므로 우리는 COMSOL Multiphysics® (이하 COMSOL)의 격자망 생성기를 활용하여 격자망이 포함된 수치 모형을 제작하였다. COMSOL은 그래픽 유저 인터페이스(Graphic User Interface)를 지원하여 수치 모형을 시각화 할 수 있으며, 격자의 형태(정렬 격자, 비정렬 격자, 사면체 격자, 육면체 격자 등)와 크기 등을 편리하게 조절할 수 있다. 그러나 유한 단층 미끌림 역산은 수치 모형에 수십~수백 개의 소단층과 관측 지점들을 필요로 하며, 사용자가 GUI COMSOL을 사용하여 설정하기에는 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 이를 극복하고

유한 단층 미끌림 역산을 용이하게 수행하기 위하여, 본 연구에서는 non-GUI COMSOL을 통해 수치 모형 격자망을 생성하고 PyLith와 호환되는 매쉬 포맷으로 변환한 후, 소단층의 개수만큼 정방향 지진 모델링을 수행하였다. 이를 통해 유한 단층 미끌림 역산에 필요한 그린 함수 행렬을 제작하는 일련의 과정을 연계하여 수행할 수 있는 COMSOL-PyLith Interface (CPInterface)를 개발하였다.

CPInterface는 수치 모형 내부에 탄성 물성이 주변과 상이한 이상체를 설정할 수 있는 기능이 있어서 다양한 지하 구조(암맥, 암상, 암염 돔 등)를 반영하여 그린 함수 행렬 제작이 가능하다. 또한, 실제 지역을 대상으로 유한 단층 미끌림 역산을 수행하기 위해 수치모형 표면에 GPS 관측점들을 설정할 수 있다. 본 연구는 CPInterface로 2015 M<sub>w</sub> 8.3 Illapel 지진의 수치 모형 제작 및 그린 함수 행렬을 구축하여 유한 단층 미끌림 역산을 수행하고, 기존 연구 결과와 비교하여 CPInterface의 그린 함수 행렬 제작 능력을 확인하였다.

**COMSOL – PyLith interface (CPInterface)**

본 연구에서는 COMSOL의 격자망 생성기와 PyLith의 지진 모사 능력을 결합하여 유한 단층 미끌림 역산에 사용되는 그린 함수 행렬을 제작하는 COMSOL-PyLith 인터페이스(CPInterface)를 개발하였다. 인터페이스는 1) COMSOL에 격자 생성을 위한 자바스크립트 생성, 2) non-GUI COMSOL을 사용하여 자바스크립트로 수치 모형 격자망 구축, 3) 구축된 격자망 파일을 PyLith에 사용 가능한 파일 형식으로 변환, 4) PyLith로 3차원 지진 모사 모델링을 소단층 개수만큼 수행하여 지진 변위 계산, 5) 계산된 지표 지진 변위들로 그린 함수 행렬 생성, 총 다섯 단계로 구성되어 있다. 수치 모형 생성 단계(1, 2 단계)에서 CPInterface는 수치 모형의 크기, 단층 정보(길이, 깊이, 주향, 경사), 관측 지점들의 위치를 반영하여 매쉬를 제작한다. 4, 5 단계에서 유한 단층 역산을 위해 하나의 단층면을 여러 개의 소단층으로 나누고, 각각의 소단층을 단위 미끄러짐(즉 1 m)으로 지진을 모사하여 지진 변위를 계산한다.

COMSOL은 전체 도메인을 생성한 후 단층과 관측점들을 설정하고 격자망을 적용하여 수치 모형을 생성한다. Fig. 2의 domain\_size는 전체 모형의 가로, 세로, 높이를 의미하며, 모형 표면의 중심 좌표는 (0, 0, 0)으로 고정되어 있다(Fig. 3a의 빨간 점). Fig. 2의 fault\_wid와 fault\_hei는 단층의 길이와 높이로, 단층 중심의 좌표는 fault\_coor (x, y, z)이다(Fig. 3b). 단층의 주향과 경사는 dip\_angle, strike\_angle로 설정할 수 있으며, 수치 모형의 +X, +Y 방향은 각각 동쪽과 북쪽을 나타낸

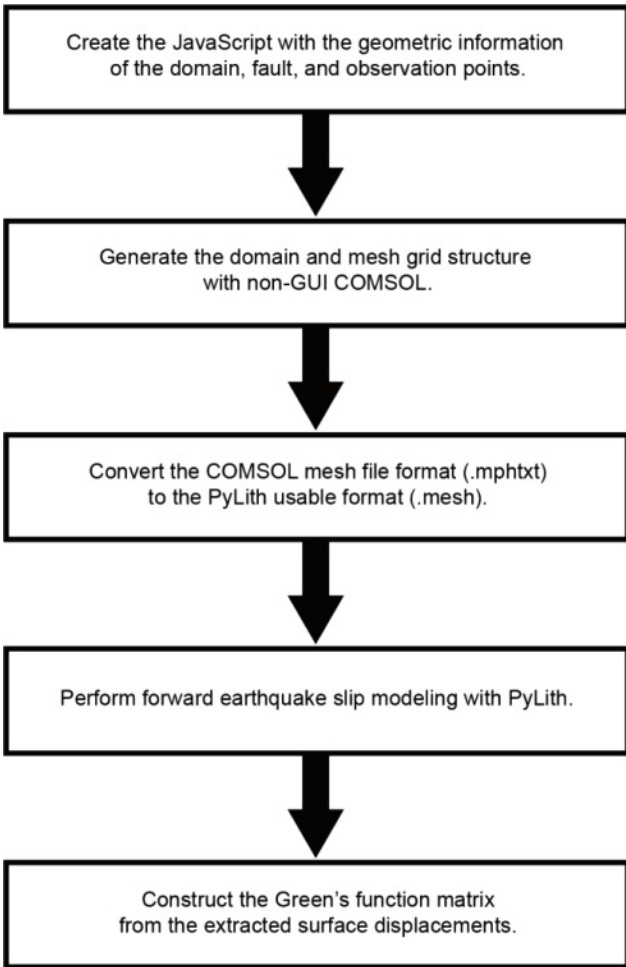


Fig. 1. Flow chart of the CPInterface.

```
##### Model Setup #####
domain_size = [1000e3, 1000e3, 1000e3] # Size of Domain [X, Y, Z]

fault_coor = [0, 0, 60e3] # Fault Center Coordinate [X, Y, Z]

fault_hei=100e3 # Height of Fault
fault_wid=100e3 # Width of Fault

x_num=4 # Number of sub-fault along Strike
y_num=4 # Number of sub-fault along Dip

strike_angle=45 # Strike Angle
dip_angle=45 # Dip Angle

GPS=np.loadtxt('GPS_station.txt') # GPS_station location file

##### Anomaly #####
anomaly = 'on' # "on" = anomaly / "off" = no anomaly

anomaly_size = [300e3, 300e3, 40e3] # Size of Anomaly [X, Y, Z]
anomaly_coor = [0, 0, -130e3] # Anomaly Center Coordinate [X, Y, Z]

##### Properties #####
domain_density = 2700; anomaly_density = 3000; # Density
domain_nu = 0.25; anomaly_nu = 0.25; # Nu (Poisson's ratio)
domain_E = 83e9; anomaly_E = 130e9; # E (Young's modulus)
```

Fig. 2. The portion of the CPInterface that adjusts the model parameters such as size of domain, fault, and anomaly, angle of strike and dip, and properties of anomaly and remaining materials.

다. 계산된 지진 변위를 관측하기 위한 GPS 관측점들은 위치 정보가 (X, Y) 형태로 저장된 GPS\_station.txt 파일을 입력받

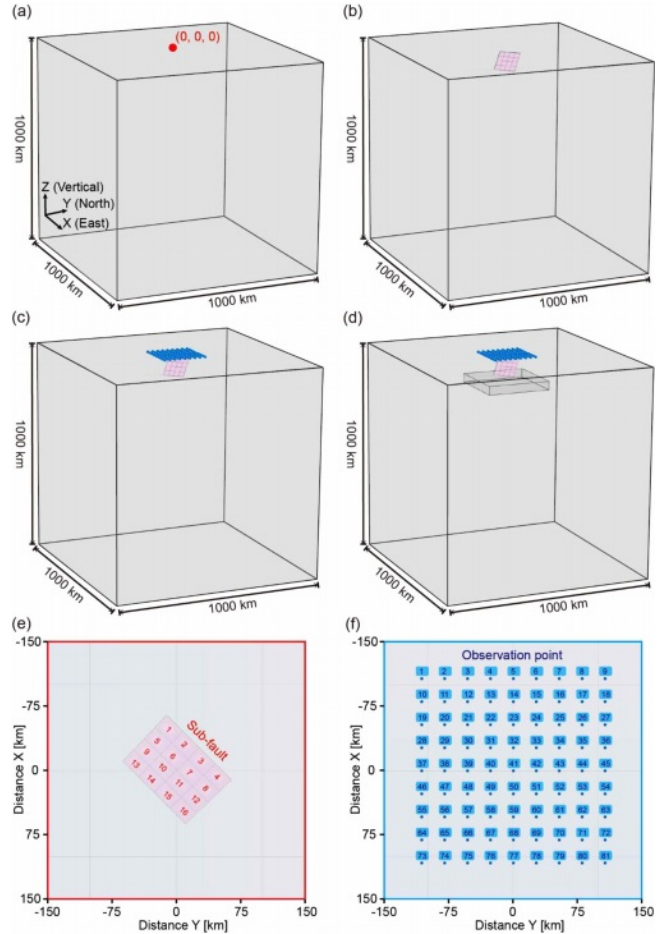
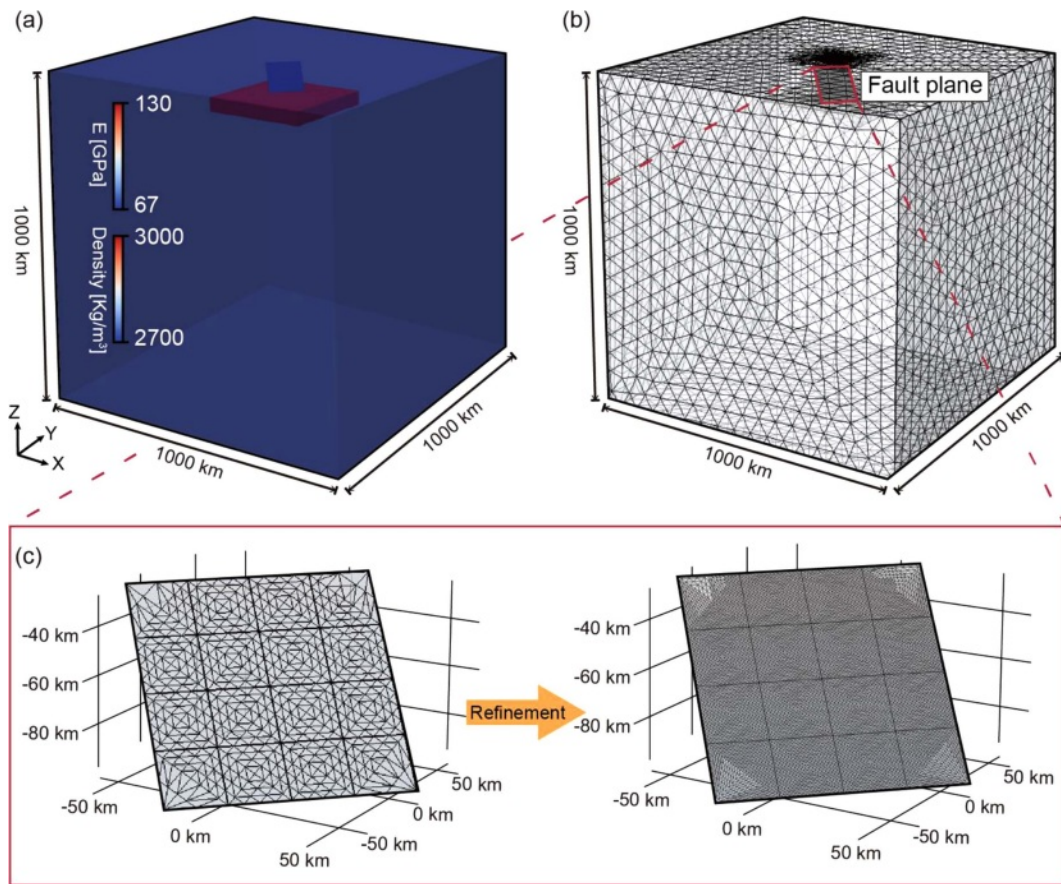


Fig. 3. Numerical model generation using CPInterface: (a) create the domain, (b) set the fault inside the model, (c) define the observation points on the surface of the model, and (d) set the subsurface elastic anomaly. (e and f) Top view of the surface with fault plane and observation points.

아 모형 표면에 배열된다(Fig. 3c). 예를 들어, X와 Y 방향으로 각각 -100 km~100 km 사이에 25 km 간격으로 총 81개 관측점 위치 정보를 설정한 경우 Fig. 3f와 같이 배열된다. 탄성 이상체를 설정할 필요가 있는 경우, anomaly = "on"으로 설정하고 이상체의 크기(anomaly\_size)와 중심 좌표(anomaly\_coor)를 입력하면 모형 내부에 육면체가 생성된다(Fig. 3d). 모형 내부에 설정된 단층은 주향 방향으로 x\_num개, 경사 방향으로 y\_num개 소단층으로 나누어진다(Fig. 3e, 총 x\_num × y\_num 개 소단층).

CPInterface는 수치 모형과 이상체의 물성을 밀도, 포아송 비 (Poisson's ratio), 영률(Young's modulus)로 입력할 수 있다. 입력된 물성은 matprops.spatialdb 파일에 밀도, S파 속도, P파 속도로 변환 및 저장되어 PyLith의 물성 자료로 사용된다(단, 탄성 이상체는 anomaly.spatialdb 파일). CPInterface는 시각화를 위해 제작한 모형 정보를 포함한 mesh.vtk 파일을 생성하며, 오픈소스 시각화 소프트웨어 ParaView (<http://www.paraview.org>).



**Fig. 4.** Mesh structure of the model. (a) Visualization of the model using ParaView. The red box represents an elastic anomaly. (b) Tetrahedral grid of the numerical model (c) Node distribution on a fault plane before (left) and after (right) applying mesh refinement.

org)를 활용하여 격자망과 탄성 이상체의 위치 등을 확인할 수 있다. vtk 파일은 수치 모형의 밀도, 포아송 비, 영률과 격자망의 형태 정보를 포함하고 있다. 또한, ParaView의 다양한 기능을 활용하여 모형 내부 이상체의 형태를 투명하게 확인할 수 있다(Fig. 4a).

수치 모형의 격자 형태는 사면체(tetrahedral)로 구성되며, 설정된 단층, 관측점, 이상체의 형태 및 위치가 유지된 상태로 격자망이 생성된다(Fig. 4b). CPInterface는 단층이 미끄러지며 급격한 지진 변위가 발생하는 단층면과 주변부를 재세분화(refinement)하여 격자의 크기를 축소시켰다(Fig. 4c).

이제, 아래 두 개의 명령어를 통해 non-GUI COMSOL을 실행하여 자바스크립트를 사용해 매쉬 파일을 생성한다.

```
os.system("comsol compile green_mesh.java")
os.system("comsol batch -inputfile green_mesh.class")
```

생성된 매쉬 파일 포맷(.mptxt)은 PyLith에 사용 가능한 형식의 파일(.mesh)로 변환되어 지진 모사 모델링에 사용된다. 지진 모사 모델링은 각 소단층마다 별개의 모델링 과정이 수행되며, 계산된 변위장은 dislocationX\_t1000000.vtk (X는 소단층 번호) 파일로 저장된다. 그린 함수 행렬은 각 소단층에 의해 발생한 관측점에서의 지진 변위로 구성되며, 행은 관측

점, 열은 소단층 번호를 나타낸다.

탄성 이상체의 유무에 따른 그린 함수 행렬의 차이를 비교하기 위해 균질한 모형(Fig. 3c)과 탄성 이상체가 포함된 비균질한 모형(Fig. 3d)의 그린 함수 행렬을 비교하였다. Fig. 5의 좌측 열(Figs. 5a, 5d, and 5g)과 중앙 열(Figs. 5b, 5e, and 5h)은 각각 균질한 모형과 비균질한 모형의 그린 함수 행렬을 나타내며, 우측 열(Figs. 5c, 5f, and 5i)에는 두 모형 간의 차이를 표시하였다. 두 모형의 그린 함수 행렬은 유사해 보이지만 최대 약 1%의 차이를 보였다. CPInterface의 탄성 이상체 설정 기능을 사용한다면, 보다 현실적인 지진 모사 모델링을 통해 이질적인 물성의 영향이 반영된 그린 함수 행렬을 제작할 수 있을 것이다.

### 적용 사례

#### 수치 모형 설정

본 연구에서 개발한 CPInterface를 사용하여 2015년 9월 16일 칠레에서 발생한  $M_w$  8.3 Illapel 지진을 대상으로 유한 단층 미끌림 역산을 수행하였다. Illapel 지진 수치 모형의 크기는  $4500 \text{ km} \times 6500 \text{ km} \times 2000 \text{ km}$ 이며, 내부에 길이 320

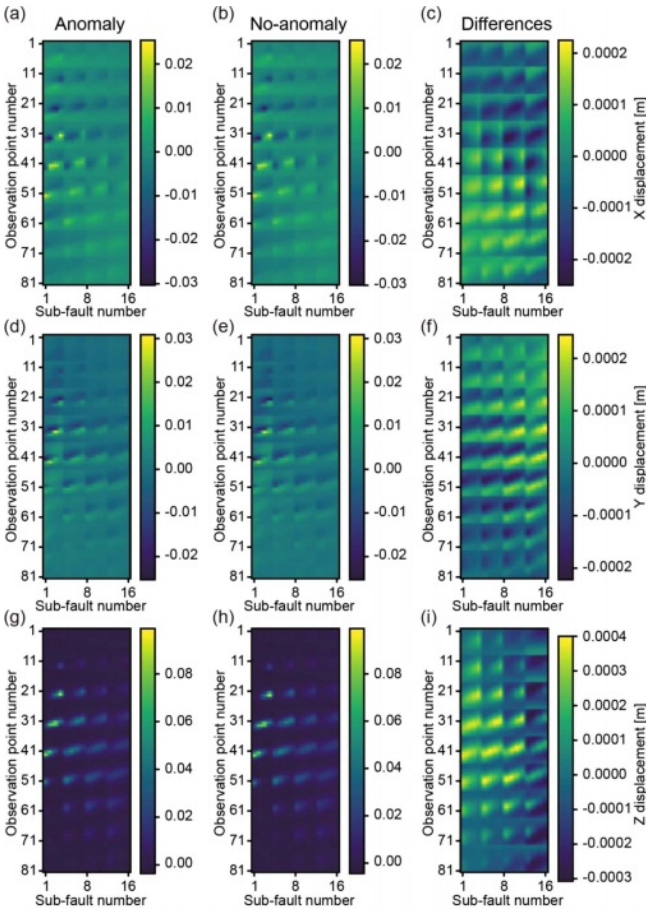


Fig. 5. Green's function matrix of a model with anomaly (left column), a model without anomaly (middle column), and the differences between both (right column) in the x (top row), y (middle row), and z (bottom row) directions.

km, 높이 160 km인 단층을 포함하고 있다(Fig. 6a). 미지질조사국(USGS; United States Geological Survey)에서 제공하는 Illapel 지진의 단층 정보를 반영하여 단층의 주향과 경사는 각각 N6°E와 19°E, 단층 중심 깊이는 33km로 설정하였다. 그린 함수 행렬 제작을 위해 단층은 주향 방향으로 25개, 경사 방향으로 18개로 분할하여 총 450개 소단층으로 구성하였다. Nevada Geodetic Laboratory (Nevada Bureau of Mines and Geology, Univ. of Nevada, Reno, <http://geodesy.unr.edu/index.php>)에서 제공하는 GPS 관측 데이터 중 지진 변위가 관측된 123개 GPS 관측점들을 수치 모형 상부에 설정하였다(Fig. 6b). 수치 모형의 격자망은 802,274개 절점과 4,644,045개 사면체로 구성되어 있다. 수치 모형 내에 설정된 450개 소단층으로 각각 지진 모사 모델링을 수행하고, GPS 관측점에서의 지진 변위 값으로 그린 함수를 제작하여 유한 단층 미끌림 역산을 수행하였다.

방법론

유한 단층 미끌림 역산은 스무딩 파라미터( $\lambda$ ; Wang *et al.* 2013)와 라플라스 연산자(L; Masterlark, 2003)가 추가된 NNLS (non-negative least square) 알고리즘을 사용하여 단층 미끌림 분포를 추정한다(식 1). NNLS 알고리즘은 단층면에서 지진 미끌림이 한 방향으로만 존재한다고 가정하여 양수 값으로만 구성된 미끌림 분포를 추정하는 방법이다(Lawson and Hanson 1995).

$$\begin{pmatrix} G \\ \lambda^2 L \end{pmatrix} \mathbf{s} = \begin{pmatrix} \mathbf{d} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

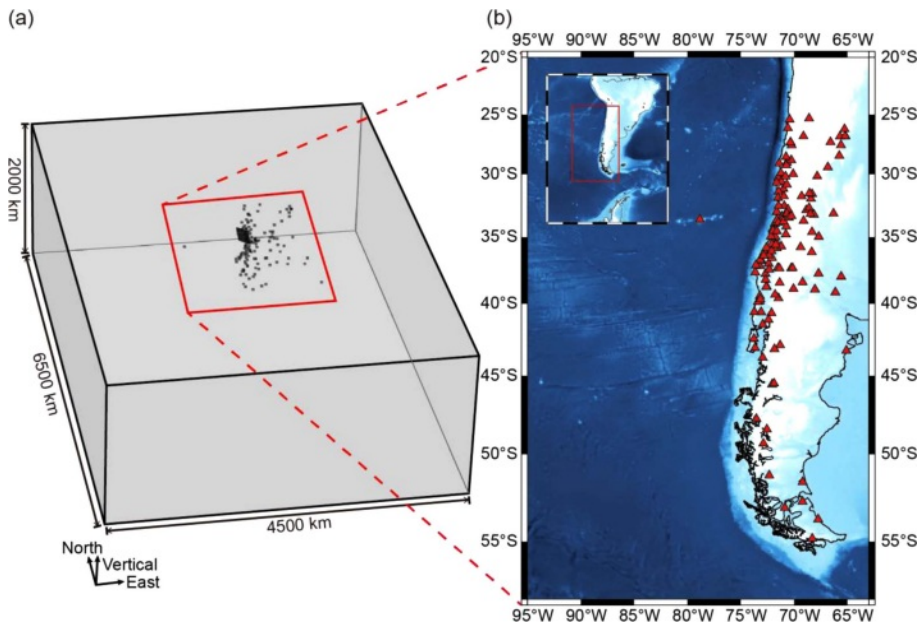


Fig. 6. (a) The model with the GPS stations (gray dots) and the fault plane. (b) Map view of the 2015  $M_w$  8.3 Illapel earthquake. The red triangles indicate a GPS station that recorded the coseismic surface displacement.

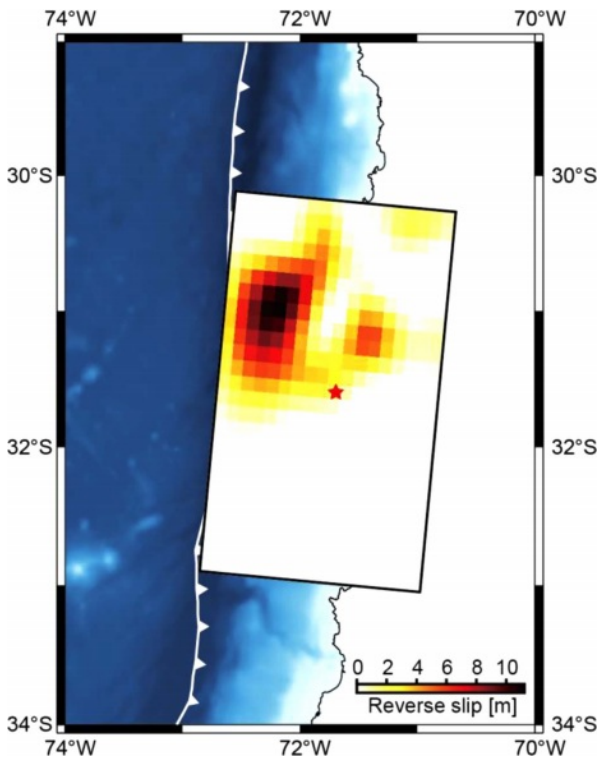


Fig. 7. The estimated slip distribution of the Illapel earthquake. The red star indicates the location of the mainshock.

G는 그린 함수 행렬,  $\mathbf{s}$ 는 단층 미끌림 분포 벡터,  $\mathbf{d}$ 는 지진 발생 시 관측된 지진 변위로 구성된 벡터이다. 스무딩 파라미터( $\lambda$ )는 잔차( $\|\mathbf{G}\mathbf{s}_\lambda - \mathbf{d}\|_2$ )와 결과( $\|\mathbf{s}_\lambda\|_2$ )의 놈(norm)으로 그려지는 L-curve를 통해 선택된다(Hansen and O’Leary, 1993). 라플라스 연산자는 인접한 소단층 사이에서 단층 미끌림 양이 급격하게 변하는 것을 방지하는 데 사용된다.

**유한 단층 미끌림 역산 결과**

Fig. 7은 CPInterface로 제작한 그린 함수 행렬과 123개 GPS 관측소에서 획득한 수평 및 수직 지진 변위 데이터를 사용하여 추정된 2015년  $M_w$  8.3 Illapel 지진의 단층 미끌림 분포이다. Fig. 7의 단층면 중심의 빨간색 별은 진원을 나타낸다. 역산 과정에서 L-curve를 이용해 최적의 스무딩 파라미터 값( $\lambda=0.9$ )을 선택하였다(Fig. 8). NNLS 알고리즘을 활용하여 역산을 수행하였기 때문에, 미끌림의 양은 0보다 큰 값으로만 나타났다. 추정된 Illapel 지진 단층 미끌림 양의 최댓값은 11.48 m로, GPS, InSAR, 지진해일 데이터 복합 역산 결과 (10.4 m; Okuwaki *et al.*, 2017)와 원거리 지진 데이터를 사용한 역산 결과(11 m; Williamson *et al.*, 2017)와 유사한 값을 보였다. 단층 미끌림 값이 최댓값인 소단층은 진원의 북서쪽에 위치하는데, 이는 기존 연구의 분포와 일치한다.

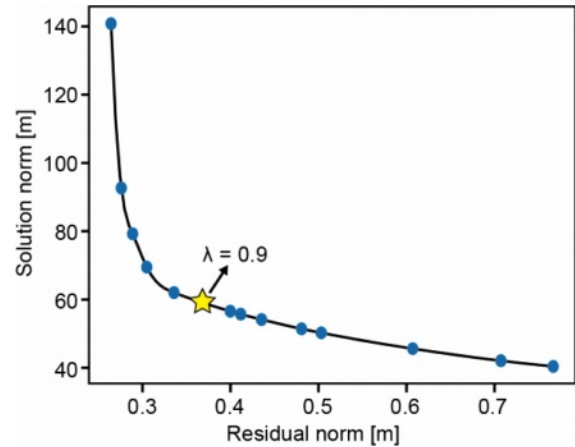


Fig. 8. L-curve for selecting the optimal smoothing parameter (yellow star).

**토의 및 결론**

본 연구에서는 COMSOL의 격자망 생성기와 PyLith의 지진 모사 능력을 결합하여 유한 단층 미끌림 역산에 사용하는 그린 함수 행렬을 제작하는 COMSOL-PyLith 인터페이스(CPInterface)를 개발하였다. CPInterface는 수치 모형의 생성, 격자망 구축, 파일 형식 변환, 지진 모사 모델링, 그린 함수 행렬 제작 총 다섯 단계로 구성되어 있다. 사용자는 수치 모형의 크기, 단층 정보, 관측 지점들의 위치 등을 입력할 수 있고, 탄성 이상체의 유무도 설정할 수 있어 다양한 조건에서의 그린 함수 행렬이 제작 가능하다. 사용자는 CPInterface의 이러한 기능을 통해 보다 편리하게 유한 단층 미끌림 역산을 수행할 수 있다.

우리는 CPInterface를 사용한 유한 단층 미끌림 역산을 통해 2015년에 발생한  $M_w$  8.3 Illapel 지진의 미끌림 분포를 추정하였다. 역산에는 123개 GPS 관측소에서 기록된 수직, 수평 방향 지진 변위를 사용하였다. 역산 결과, 진원의 북서쪽 방향에서 최대 11.48 m의 지진 미끌림이 추정되었다. 단층 미끌림 분포의 최대 미끌림 양과 그 위치가 기존 연구와 유사하게 추정되었음을 확인하였다.

본 연구에서 제작한 CPInterface는 직육면체 형태의 탄성 이상체와 하나의 단층만을 설정할 수 있으며, 모형 상부 표면은 고도 없이 평평하게 설정된다. 따라서 두 개 이상의 단층에 의해 발생한 지진들을 대상으로 사용하기에는 적합하지 않으며, 직육면체 이외의 지하 탄성 이상체 형태(구형, 원판형 등)로는 구현할 수 없다. 향후 두 개 이상의 단층, 굴곡진 단층면을 설정할 수 있는 기능과 탄성 이상체 형태의 다양성 및 고도를 반영 가능하도록 기능을 확장하고 개선한다면 보다 범용적으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 “행정안전부 방재안전분야 전문인인력 양성”사업과 한국연구재단의 중점연구소지원 사업(NRF-2019R1A6A1A03033167)과 중견연구지원 사업(NRF-2022R1A2C1009742), 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) (No. 20226A10100030), 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2023-00254680, RS-2023-00259686).

## Data Availability Statement

본 연구에서 개발한 CPInterface는 <https://github.com/GeoCoderMS/CPInterface> 에서 확인할 수 있습니다.

## References

- Aagaard, B. T., Knepley, M. G., and Williams, C. A., 2013, A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 3059-3079. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50217>
- Crowell, B. W., Bock, Y., and Melgar, D., 2012, Real-time inversion of GPS data for finite fault modeling and rapid hazard assessment, *Geophysical Research Letters*, **39**, L09305. <https://doi.org/10.1029/2012GL051318>
- Hansen, P. C., and O’Leary, D. P., 1993, The Use of the L-Curve in the Regularization of Discrete Ill-Posed Problems, *SIAM Journal on Scientific Computing*, **14**(6), 1487-1503. <https://doi.org/10.1137/0914086>
- Kyriakopoulos, C., Masterlark, T., Stramondo, S., Chini, M., and Bignami, C., 2013, Coseismic slip distribution for the Mw 9 2011 Tohoku-Oki earthquake derived from 3-D FE modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(7), 3837-3847. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50265>
- Lawson, C. L., and Hanson, R. J., 1995, Solving least squares problems. SIAM. <https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611971217.bm>
- Masterlark, T., 2003, Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a subduction zone: Sensitivities to homogeneous, isotropic, Poisson-solid, and half-space assumptions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **108**, 2540. doi: 10.1029/2002JB002296
- Muto, J., Shibazaki, B., Iinuma, T., Ito, Y., Ohta, Y., Miura, S., and Nakai, Y., 2016, Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, **43**(10), 4971-4978. <https://doi.org/10.1002/2016GL068113>
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**(4), 1135-1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
- Okuwaki, R., Yagi, Y., Aránguiz, R., González, J., and González, G., 2017, Rupture process during the 2015 Illapel, Chile earthquake: zigzag-along-dip rupture episodes, The Chile-2015 (Illapel) earthquake and tsunami, 23-32. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-57822-4\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-57822-4_3)
- Pararas-Carayannis, G., 2014, The Great Tohoku-Oki earthquake and tsunami of March 11, 2011 in Japan: A critical review and evaluation of the tsunami source mechanism, *Pure and Applied Geophysics*, **171**(12), 3257-3278. doi: 10.1007/s00024-013-0677-7
- Pedersen, R., Jónsson, S., Árnadóttir, T., Sigmundsson, F., and Feigl, K. L., 2003, Fault slip distribution of two June 2000 Mw6.5 earthquakes in South Iceland estimated from joint inversion of InSAR and GPS measurements, *Earth and Planetary Science Letters*, **213**(3), 487-502. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00302-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00302-9)
- Pollitz, F. F., Brooks, B., Tong, X., Bevis, M. G., Foster, J. H., Bürgmann, R., Smalley Jr., R., Vigny, C., Socquet, A., Ruegg, J., Campos, J., Barrientos, S., Parra, H., Soto, J. C. B., Cimbaro, S., and Blanco, M., 2011, Coseismic slip distribution of the February 27, 2010 Mw 8.8 Maule, Chile earthquake, *Geophysical Research Letters*, **38**, L09309. doi: 10.1029/2011GL047065
- Song, S. G., and Lee, H., 2019, Static Slip Model of the 2017 Mw 5.4 Pohang, South Korea, Earthquake Constrained by the InSAR Data, *Seismological Research Letters*, **90**(1), 140-148. doi: 10.1785/0220180156
- Tung, S., and Masterlark, T., 2016, Coseismic slip distribution of the 2015 Mw7.8 Gorkha, Nepal, earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data for slip within a 3-D heterogeneous Domain, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 3479-3503. <https://doi.org/10.1002/2015JB012497>
- Wang, C., Shan, X., Wang, C., Ding, X., Zhang, G., and Masterlark, T., 2013, Using finite element and Okada models to invert coseismic slip of the 2008 Mw 7.2 Yutian earthquake, China, from InSAR data, *Journal of Seismology*, **17**, 347-360. doi: 10.1007/s10950-012-9324-5
- Williamson, A., Newman, A., and Cummins, P., 2017, Reconstruction of coseismic slip from the 2015 Illapel earthquake using combined geodetic and tsunami waveform data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122**, 2119-2130. <https://doi.org/10.1002/2016JB013883>