

섭입대의 형태가 지진 후 변형에 미치는 영향에 관한 유한 요소 수치 모사 연구

김현섭 · 김민수 · 김나원 · 소병달[‡]
강원대학교 지구물리학과

Numerical investigation for the effect of the subducting slab geometry on the postseismic deformation using finite element method

Hyeon-Seob Kim · Minsu Kim · Nawon Kim · Byung-Dal So[‡]

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

요 약

측지 기법의 발달은 지진 주기에 대한 지표의 연속적인 시계열 변위 관측으로 이어졌고, 이에 따라 정밀한 지진 및 지진 후 변위 정보가 제공되었다. 한편, 지구동역학적 연구는 지진 단층이 있는 지각 하부 맨틀의 점탄성 응력-변형률 관계를 바탕으로 지진 후 변형을 설명했다. 특히, 지진 및 지진 후 변형이 광범위하게 나타나는 메가스러스트 지진은 판 경계뿐만 아니라 판 내부의 맨틀 점성도를 추정할 수 있게 해준다. 본 연구는 메가스러스트 지진에 따라 발생하는 근거리/원거리 영역의 지진 후 변형을 유한 요소 수치 모사하였으며, 섭입대의 기하학적 형태(즉, 섭입 슬랩 각도)와 맨틀 점성도가 점탄성 완화에 미치는 영향을 분석했다. 수치 모사 결과, 지진 1년 후 상판의 대부분 지역에서 바다 방향의 지진 후 수평 변위가 발생했다. 수치 모형에서 설정한 슬랩각이 클수록, 맨틀 점성도가 작을수록 지진 후 수평 변위가 커짐을 확인했다. 이러한 경향성은 메가스러스트 지진으로부터 원거리(~1000 km)에 있는 측지점에서도 일관적으로 나타났다. 예를 들어서, 슬랩각이 50°, 맨틀 점성도가 10^{18} Pa·s 일 때 수평 변위는 11.5 cm인 반면, 20°와 10^{19} Pa·s 일 때는 수평 변위가 0.9 cm로 매우 작았다. 우리는 지진 후 점탄성 완화가 단층으로부터 거리가 매우 먼 지역에서도 섭입 슬랩의 각도에 의해 교란될 수 있다는 것을 수치 모사를 통해 주장한다. 본 연구는 원거리 지역의 맨틀 점성도를 지진 후 변형 역산을 이용해 추정하기 위해서는, 정밀한 섭입 슬랩의 형태를 포함해 수치 모사를 수행해야 함을 제안한다.

주요어: 지진 후 변형, 메가스러스트 지진, 유한 요소법, 점탄성 완화, 맨틀 점성도

ABSTRACT: The geodetic techniques enable the observation of time-series surface displacement during an earthquake cycle, which provides accurate coseismic and postseismic information. Many geodynamic studies have tried to explain the postseismic deformation of the mantle beneath the seismic fault based on viscoelastic stress-strain relation. Megathrust earthquakes generating coseismic and postseismic deformation throughout a wide area provide a chance to invert the mantle viscosity beneath the intraplate region and plate boundaries. In this study, we performed a series of finite element numerical simulations of near- and far-field postseismic deformation associated with megathrust earthquakes to investigate the effects of mantle viscosity and subducting slab geometry (i.e., slab angle) on viscoelastic relaxation. We found the seaward postseismic horizontal displacement in most areas in the overriding plate one year after the earthquake. Our model showed that the smaller mantle viscosity and larger slab angle lead to the larger postseismic horizontal displacement. This trend is maintained even in the remote geodetic station located ~1000 km far from the megathrust fault. For instance, the horizontal displacement is 11.5 cm when the slab angle = 50° and mantle viscosity = 10^{18} Pa·s. In contrast, the displacement is extremely small as 0.9 cm with the slab angle = 20° and mantle viscosity = 10^{19} Pa·s. We demonstrate that the slab angle can influence the postseismic relaxation in distant locations from the fault. Furthermore, we

[‡]Corresponding author: +82-33-250-8582, E-mail: bdso@kangwon.ac.kr

suggest that the postseismic deformation model for estimating the mantle viscosity of remote regions should consider the detailed geometry of the subducting slab.

Key words: postseismic deformation, megathrust earthquake, finite element method, viscoelastic relaxation, mantle viscosity

1. 서론

최근 30년간, 레이더 간섭기법(InSAR; Interferometry Synthetic Aperture Radar)과 상시GPS (Continuous Global Positioning System) 등의 측지 기술은 지진 주기에서 발생하는 지표의 연속적인 변위 정보를 제공했다(Ryder *et al.*, 2014). 지구동역학 연구는 측지 자료와 수치 모사 기법을 바탕으로, 지진 주기 내 여러 단계에서 발생하는 변형에 대한 시공간적 특성을 재현하고, 이를 바탕으로 지각과 맨틀의 물성과 변형 사이의 관련성을 추정했다(e.g., Barbot *et al.*, 2009; Lavecchia *et al.*, 2016). 지진 주기는 변형 양상에 따라 크게 3 단계이며, 단층이 파열하며 발생하는 “지진 변형”(cosismic deformation), 이후 시간에 따라 변형 속도가 감소하는 “지진 후 변형”(post-seismic deformation), 다음 지진 전까지 원거리 판 구조 응력(far-field tectonic stress)이 단층에 지속적으로 축적되는 “지진 간 변형”(interseismic deformation)으로 나뉜다(Wang *et al.*, 2012; Govers *et al.*, 2018). 지진 간 변형이 단층에 응력을 주로 축적하고 이에 따라 단층이 파열하기 때문에(Loveless and Meade, 2011), 지진 발생 및 위험도를 예측하기 위해서 지진 간 변형이 집중적으로 연구되어 왔다(Manaker *et al.*, 2008). 뿐만 아니라, 지진 후 변형도 지진 직후 짧게는 ~1년(Diao *et al.*, 2014)에서 길게는 ~50년(Ding and Lin, 2014) 기간 동안 지속되며, 지진 변형이 발생한 단층 주변에 여진 및 본진을 촉발하는 것으로 알려져 있다(Melnick *et al.*, 2017). 지진 후 변형은 공간적으로도 1000 km 이상 떨어진 판 내부까지 광범위하게 관찰된다(Shestakov *et al.*, 2012).

기존 수치 모사 연구는 지진 후 변형이 관측된 측지 자료를 설명하기 위해 다양한 기작을 제안했다. 첫째, 공탄성 반발(poroelastic rebound) 기작에 따르면 지진으로 인해 공극 내 유체가 이동하면서 발생하는 탄성 반발이 지진 후 변형을 발생시킨다(Jónsson *et al.*, 2003). 둘째, 지진 후 미끌림(after-slip)은 단층면의 속도 및 상태 의존성 마찰(rate-and-state friction)

에 따른 단층 파열면 주변부의 미끌림을 설명한다(Scholz, 1998). 마지막으로 점탄성 완화(viscoelastic relaxation)는 암석권과 상부 맨틀의 점탄성 거동이 상부 지각에 전달되어 지표 변형을 발생시킨다(Freed *et al.*, 2006). 지진 후 변형은 각 기작의 물리적 현상을 조절하는 투수계수, 마찰계수, 점성도 등의 물성에 따라 시공간적으로 복잡하게 발생한다. 이 복잡성을 극복하기 위해, 기존 연구에서는 개별 또는 다양한 기작의 조합으로 지표 변형을 설명하였다(Barbot and Fialko, 2010). 예를 들어, 1992년 미국 캘리포니아에서 발생한 M_w 7.3 랜더스 지진(Landers earthquake) 후 변형은 1개월 동안 단층 주변에서 공탄성 반발과, 지진 이후 3.5년간 단층으로부터 ~60 km 이내 영역에서 지진 후 미끌림이 발생했다(Peltzer *et al.*, 1998). 2013년 미국 알래스카에서 발생한 M_w 7.5 크레이그 지진(Craig earthquake)은 지진 후 1.6년간 근거리 영역에서 지진 후 미끌림과 지진 후 관측 기간(~7년) 동안 근원거리 영역에서 점탄성 완화 변형이 일어났다(Tian *et al.*, 2021).

점탄성 완화는 다른 지진 후 변형 기작에 비해 원거리 영역과 장기간에 걸친 변형을 설명할 수 있다(Pollitz *et al.*, 2017). 점성과 탄성의 거동이 동시에 나타나는 점탄성 물질은 점성도와 전단계수의 비인 점탄성 이완시간(viscoelastic relaxation time)에 따라 물질에 축적된 응력이 지수적으로 감쇠한다. 지진 주기 관점에서 본다면, 지진 변형으로 단층이 파열하여 방출된 응력은 점탄성 물질인 하부 지각과 맨틀에 전파되고, 이후 시간이 지남에 따라 응력 완화와 그에 따른 점탄성 포행이 탄성체인 상부 지각을 변형시켜, 측지학적 변형이 지표면에서 관측되는 것이다. 점탄성의 유변학적 특성인 점성도는 온도와 압력에 의해 조절되어 암석권과 맨틀의 취성-연성 강도 곡선을 추정할 수 있게 한다(Burov, 2011). 또한, 점성도는 섭입대의 섭입 속도 및 섭입 양상을 결정하고(Butterworth *et al.*, 2014), 지각의 후빙기 반등 속도를 조절하는(Postglacial rebound; James *et al.*, 2000) 등 암석권과 연약권의 지구동역학적 거동

을 설명하는 주요한 요소다. 점탄성 완화에 의한 지진 후 하부 지각과 맨틀의 변형 속도는 점성도에 의존하며, 이는 상부 지각의 변형 속도를 조절하게 된다(Vergnolle *et al.*, 2003). 따라서, 지진 후 점탄성 완화 연구에서는 측지 자료에 기록된 지진 후 변위를 도출하는 수치 모형의 결과를 역산하여 점성도를 추정했다(Riva *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2014).

최근 지진 후 점탄성 완화 연구는 지진 후 변형의 시간 의존성을 모사하기 위해 응력과 변형률 사이의 관계를 표현하는 다양한 수학적 점탄성 모형을 도입했다. 암석의 다양한 점탄성 거동을 설명하기 위해 각각 탄성과 점성을 나타내는 스프링과 대쉬팟(dash-pot)의 합성구조인 점탄성 모형을 제시했다. 특히 널리 사용되는 맥스웰 모형(Maxwell body)은 스프링과 대쉬팟이 직렬구조로 연결되어 있다. 지진 후 변형 수치 모사 연구는 점탄성 완화를 모사하기 위해 탄성 상부 지각과 점탄성 하부 지각 및 점탄성 맨틀로 구성된 층서 모형을 제시했고(Cohen, 1980; Wen *et al.*, 2012; Tian *et al.*, 2020), 섭입대 지역의 경우 추가적으로 탄성 해양판의 섭입을 포함한 모형을 사용했다(Sun and Wang, 2015). 수치 모형에 섭입 해양판이 포함되는 경우, 지표면의 지진 후 수직/수평 변형의 방향과 크기가 변하였으며, 이 결과는 실제 섭입대 지역에서 관찰된 측지 자료의 지진 후 변형 분포와 근사했다(Pollitz *et al.*, 2008; Johnson and Tebo, 2018). 넓은 반경을 가진 지진 변형을 발생시키는 섭입대 메가스러스트 지진(megathrust earthquake; Bilek and Lay, 2018)은 단층 주변 및 원거리의 판 내부에도 지진 후 변형을 유도한다(Ruiz and Madariaga, 2018). 단층 주변에서 판 내부까지 이르는 광범위한 영역에서 관찰되는 지진 후 변형은 해당 지역의 암석권에서 점탄성 완화가 발생했음을 의미하며, 그 완화의 정도가 맨틀 점성도에 의존함을 이용하여 하부 점성도 구조를 추정할 수 있다(Li *et al.*, 2018). 정량적으로 추정된 암석권의 유변학은 판 내부의 지체구조 및 구조지질학적 현상을 규명하는데 추가적인 정보를 제공한다. 그러나, 원거리 영역에 대한 지진 후 점탄성 완화 연구는 부족한 GPS 자료와 작은 지진 후 변형 때문에, 근거리 영역의 점탄성 완화 연구에 비해 미흡하다.

본 연구에서는 유한 요소법을 사용한 2차원 섭입대 모형을 개발하여 섭입대의 형태와 점성도 분포

구조에 따른 지진 후 점탄성 완화 변형이 원거리 측지점의 변위에 미치는 영향을 분석했다. 유한 요소법은 섭입대에서 발생하는 지진과 지진 후 변형을 수치 모사하기 위해 주로 사용되었다(Masterlark *et al.*, 2001; Yamasaki and Houseman *et al.*, 2012). 지진 후 변형을 모사하기 앞서 정밀한 지진 변형 모사는 필수적이며, 본 연구는 지진 모사가 가능한 파이썬(Python)기반의 유한 요소 소프트웨어인 PyLith를 사용했다(Aagaard *et al.*, 2013). 우리는 메가스러스트 지진을 수치 모사하여 광범위한 영역의 지진 및 지진 후 변형을 계산했다. 지진 후 맨틀의 점탄성 거동 흐름에 대한 섭입대의 구조적인 역할을 평가하기 위해 슬랩각과 점성도 분포를 조절하여 수치 모형의 지진 후 지표 변위의 양상을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 지배방정식

본 연구에서 지진 변형 및 지진 후 점탄성 완화를 모사하기 위해 이산화된 지배방정식은 평면 변형률(plane strain) 가정에 바탕을 둔 2차원 준정적(quasi-static) 운동량 보존 방정식(식 1)이다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (i, j = 1, 2) \quad (1)$$

σ_{ij} 와 x_j 는 각각 코시 응력 텐서(Cauchy's stress tensor)와 공간 좌표로, 첨자 i 와 j 는 공간적 방향을 나타낸다. 본 연구에서는 단층 파열에 의한 지각의 중력 변화가 작다고 가정하여, 중력을 고려하지 않았다(예, Ueda *et al.*, 2003). 변위장(displacement field, u_i)를 구하기 위해 식 (2)와 같이 변형률 텐서와 변위 사이의 관계를 정의했다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

수치 모형에 적용된 물성은 탄성 상부 지각과 탄성 섭입 슬랩, 점탄성 맨틀로 응력과 변형률(탄성), 그리고 응력과 변형률 속도(점탄성) 사이 조성관계(constitutive relation)를 각각 도입했다. 식 (3)은 선형 탄성 조성 관계로 탄성을 적용한 영역(즉, 상부 지각

과 섭입판)에서 응력과 변형률 관계를 정의된다.

$$\sigma_{ij} = \left(K - \frac{2}{3} G \right) \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} \quad (3)$$

ϵ_{ij} 은 변형률 텐서이며 G 와 K 는 각각 전단 탄성 계수와 체적 탄성 계수다. 편차 응력 텐서(deviatoric stress tensor, τ_{ij})는 코시 응력 텐서와 압력(pressure, P)의 차로 정의한다(식 4).

$$\tau_{ij} = \sigma_{ij} - P \delta_{ij}, \text{ where } P = \frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (4)$$

δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta), σ_{kk} 는 응력 텐서의 아인슈타인 서메이션(Einstein summation) 표기를 따른다. 편차 변형률 텐서(deviatoric strain tensor, e_{ij})는 변형률 텐서와 체적 변형률 텐서(volumetric strain tensor, ϵ_{vol})로 구성되어 있다(식 5).

$$e_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon_{vol} \delta_{ij}, \text{ where } \epsilon_{vol} = \epsilon_{kk} \quad (5)$$

점탄성을 적용한 영역은 맥스웰 점탄성 모델의 조성 방정식을 적용하였으며, 편차 응력 및 편차 변형률 속도(de_{ij}/dt) 사이의 관계식은 식 (6)과 같다.

$$\tau_{ij} + \frac{\eta}{G} \frac{d\tau_{ij}}{dt} = \eta \frac{de_{ij}}{dt} \quad (6)$$

t 와 η 는 각각 시간과 점성도를 의미한다. 본 연구에서 사용한 PyLith는 유한 요소 기법의 틀에서 지진을 모사하기 위해 영역 분해법을 사용하며 이 기법에서는 영역 내 단층 표면을 내부 마찰 경계로 간주한다(Aagaard *et al.*, 2013).

2.2 수치 모형 설정

우리는 섭입대의 메가스러스트 지진 변형 및 지진 후 변형을 수치 모사하기 위해 탄성 상부 지각과 탄성 섭입 슬랩, 점탄성 맨틀을 포함한 수치 모형을 개발했다(그림 1c). 수치 모형의 전체 크기는 가로 2600 km, 깊이 500 km이며, 상부 지각과 슬랩은 기존 연구에서 제시한 유효 탄성 두께(effective elastic

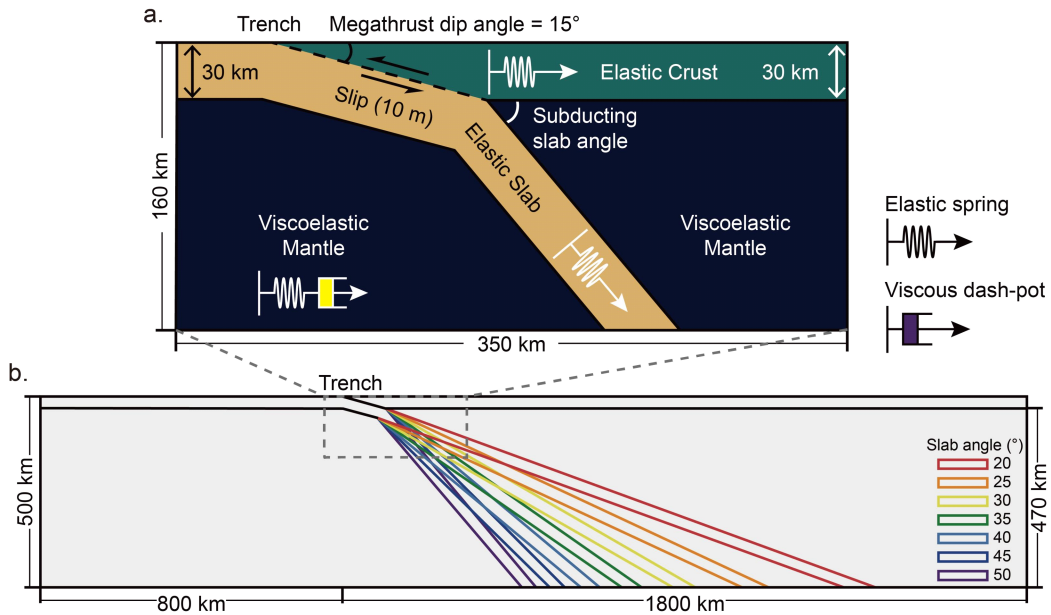


Fig. 1. Model set-up. (a) shows the zoomed-up zone of the dashed rectangle in (b). The spring and dash-pot represent elastic and viscous behaviors, respectively. The numerical model consists of the elastic overriding upper crust, subducting slab, and viscoelastic mantle. The black dashed line and arrows indicate the megathrust fault plane and reverse slip, respectively. (b) displays the entire domain of this study. The colors exhibit the shape of subducting slabs corresponding to the various slab angles.

Table 1. Parameter descriptions and values.*

Descriptions	Symbols	Crust	Subducting slab	Mantle	Unit
Poisson ratio	ν	0.25	0.25	0.25	-
Shear modulus	μ	40	52	52	GPa
Maxwell viscosity	η	-	-	10^{18} - 10^{19}	Pa·s

*Pollitz *et al.*, 2011.

thickness; Royden and Husson, 2006)를 참고하여 30 km로 구성하였고, 맨틀의 두께는 470 km로 충분히 크게 설정했다. 수치 모형의 상부에는 자유 경계(free surface), 양 측면에는 미끄럼 경계(free slip), 하부에는 고정 경계(no slip)를 도입했다.

메가스러스트 지진이 발생할 단층면은 상부 지각과 섭입된 슬랩 사이에 표면으로부터 30 km깊이까지 정의했다. 수치 모형에 모사한 지진은 일반적인 메가스러스트 단층의 경사각과 지진 미끄럼을 참고하여 각각 15°와 10 m를 적용하였고(Suzuki *et al.*, 2011), 수치 모형에 해당하는 단층면의 상반과 하반은 역단층 방향으로 각각 강제로 5 m씩 이동한 후 고정되었다(그림 1a). 기존 단층 연구에서 2차원 단층 모형의 지진 규모를 측정하기 위해 변환된 식을 참고하여(Muldashev and Sobolev, 2020), 계산된 본 연구의 수치 모형에 모사한 지진 규모는 M_w 8.9로 2011년 도호쿠 지진의 지진 규모(M_w 9.0)와 유사하다. 본 연구에서는 슬랩각과 맨틀 점성도를 조작 변인으로 설정하고, 이것이 지진 후 변형에 미치는 영향을 비교했다. 따라서, 변인에 상관없이 동일한 지진 변형이 발생하도록 모형을 구축할 필요가 있다. 이를 위해서, 본 연구에서 계산한 모든 수치 모형에서, 단층의 경사각은 15°로 고정했으며 슬랩과 맨틀에 동일한 탄성 계수를 부여했다. 점탄성 물질인 맨틀에는 맥스웰 모형을 적용하였다.

우리는 섭입대의 형태가 지진 후 변형에 미치는 영향을 확인하기 위해 섭입 슬랩 각도를 조절하여 실험을 진행했다. 깊이 30 km에서 500 km까지 위치한 슬랩은 현실적인 각도인 20°에서 50°(Kim *et al.*, 2014; Halpaap *et al.*, 2019) 사이 범위에서 5° 간격의 슬랩각으로 조절하였으며, 맨틀 물질의 점성도는 10^{18} Pa·s에서 10^{19} Pa·s 범위의 점성도(예, Bürgmann and Dresen, 2008)를 적용하였다. 수치 모형에 적용된 상세한 물성은 표 (1)에 기술되어 있다.

3. 결 과

우리는 슬랩각이 달라지더라도 동일한 지진 변형을 발생시키기 위해서, 섭입판과 맨틀에 동일한 수치의 탄성 물성(즉, 전단계수와 포아송 비; Poisson's ratio 등)을 적용했다. 그림 2a는 슬랩각이 35°인 섭입대를 포함한 기본 모형으로써, 10 m의 미끄럼을 가했을 때 표면에서 측정한 지진 변형의 수직 변위(빨간색 선)와 수평 변위(파란색 선)를 보여준다. 맨틀 점성도는 10^{19} Pa·s로 설정했다. 섭입판과 상판(overriding plate)에서 각각 양수(오른쪽 혹은 육지 방향)와 음수(왼쪽 혹은 바다 방향) 값을 가지는 수평 변위는, 메가스러스트 지진을 지시한다. 상판의 수평 변위는 바다 방향으로 최대 ~8.36 m를 보이고, 해구로부터 멀어질수록 크기가 감소하면서 ~1000 km 떨어진 지점에서는 바다 방향으로 ~0.07 m 변위만이 관찰되었다. 섭입판의 최대 표면 수평 변위는 육지 방향으로 1.26 m로 상판의 수평 변위에 비해 작은 값을 가지며, 이는 기존 지구물리학 연구(예, Briggs *et al.*, 2014)와 수치 모사 연구(예, Hashima *et al.*, 2016)와 유사한 경향이다. 상판에서는 해구에서 최대 상승 변위 2.58 m, 해구에서 육지 방향으로 ~120 km 떨어진 지점에서 최대 하강 변위 -1.7 m가 발생했다. 그림 2b와 2c는 각각 지진 발생 직후와 지진 발생 1년 후의 수평 변위와 수직 변위를 5,000배 과장한 수치 모형 위에 도시된 2차 편향 응력 불변량(second invariant deviatoric stress, τ_{II})의 공간적 분포를 보여준다. 해구 주변 상판에서는 바다 방향의 큰 수평 변위가 관찰되고 해구 후방에서는 하강 변위가 보이는데, 이는 실제 지진 변형에 관한 측지 자료와 유사하다(Sun *et al.*, 2014). 지진 발생 직후의 응력 분포(그림 2b)는 지진에 의해 판 경계에서부터 1,500 km 거리에 이르는 광범위한 영역에서 맨틀의 응력이 증가했음을 지시한다. 예를 들

어, 판 경계 근처의 맨틀은 최대 9.9 MPa 증가했으며, 1,500 km 거리에서도 11.8 kPa 증가했다. 그림 2c는 지진 발생 1 년 후의 응력 분포로, 판 경계 근처에서 응력이 8.4 MPa로 감소하여 맨틀 영역에서 점탄성 완화가 발생했음을 지시한다.

우리는 탄성 섭입대의 기하학적 형태가 지진 후 변형에 미치는 영향을 분석하고자, 슬랩각이 서로 다른 모형에서 지진 후 변형을 계산했다. 그림 3a-d는 맥스웰 모델의 점성도가 10^{19} Pa·s 일 때, 수치 모사를 통해 도출된 단층 주변의 변형을 확대하여 보여준다. 그림 3의 1행과 2행은 각각 지진 변형과 지진 후 변형을 나타내며, 1열과 2열은 슬랩각이 각각 20° 와 50° 일 때의 수치 모형 결과이다. 배경색은 지

진 변위(그림 3a와 3b)와 지진 1년 후 변위(그림 3c와 3d)의 벡터 크기를 의미하며, 검은색 화살표는 지진 변형과 지진 후 변형의 크기와 방향을 표시해준다. 지진 변형은 슬랩각이 서로 다름에도 지진 변위의 크기와 방향이 동일하다(그림 3a와 3b). 이는 우리가 맨틀과 섭입판의 탄성 물성을 동일하게 설정해서 나타나는 현상으로, 지진 후 변형을 분석함에 있어 지진 변형의 효과를 배제시켰음을 의미한다. 슬랩각이 다르더라도, 단층 아래 부분의 하강과 상판의 강한 바다 방향 수평 변위를 포함하는 형태의 지진 후 변형이 공통적으로 나타난다(그림 3c와 3d). 슬랩각이 20° 로 작은 모형(그림 3c)에서는, 단층 하부 맨틀의 하강 변위(최대 8.5 cm)와 상부 지각의 수

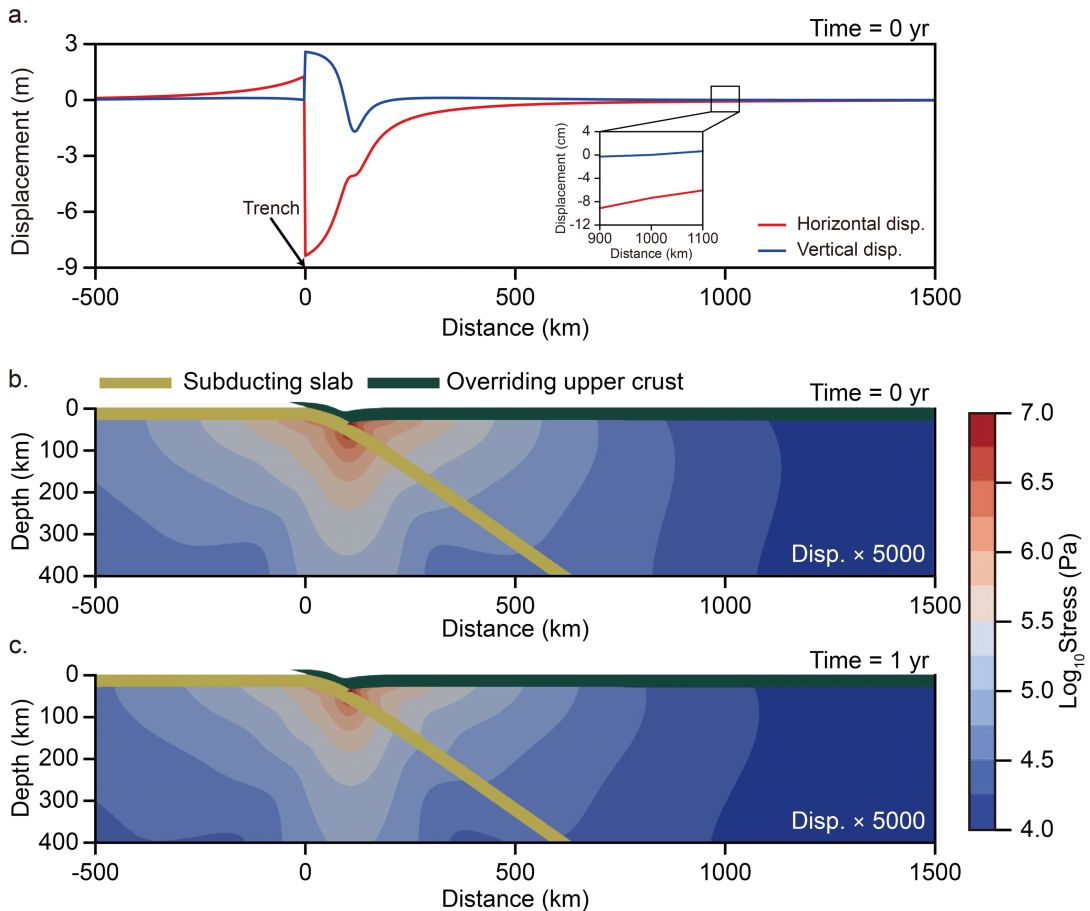


Fig. 2. Coseismic surface displacement and postseismic stress of mantle. (a) show the coseismic horizontal (red lines) and vertical (blue lines) displacements measured along the surface. (b) and (c) display respectively the coseismic and postseismic deformation exaggerated by 5000 of the numerical models with slab angle = 35° and mantle viscosity = 10^{19} Pa·s. The colors in (b) and (c) indicate the stress distributions.

평 변위(최대 7 cm)의 크기가 유사하다. 반면 슬랩 각이 50° 로 큰 경우(그림 3d), 상부 지각 및 맨틀의 바다 방향의 수평 변위가 최대 10.3 cm로 최대 3.7 cm 단층 주변 맨틀의 하강 변위보다 더 우세하다. 이 결과는 슬랩각이 클수록, 지진 후 변형의 측지학적 자료와 직결되는 상판의 상부 지각과 맨틀의 수평 방향 거동이 활발해진다는 것을 의미한다.

그림 4a-d에는 맨틀의 점탄성 거동에 슬랩각이 미치는 영향을 비교하기 위해, 지표의 지진 후 변위를 도시했다. 그래프의 색은 슬랩각(20° - 50°)을 의미한다. 그림 4의 1열과 2열은 각각 해구로부터 근거리 영역(0-500 km)과 원거리 영역(500-1000 km)의 지진 후 변위를 보여주며, 1행과 2행은 각각 수평과 수직 변위이다. 근거리 수평 변위(그림 4a)는 모든 슬랩각 모형에서 해구로부터 ~100 km 이내 영역은 육지 방향의 변위, ~100 km 밖의 영역은 바다 방향의 변위가 나타난다. ~100 km 이내 영역과 바깥의 영역이 서로 다른 방향의 지진 후 수평 변위를 보이는 이유는, 두 영역이 각각 섭입 슬랩 아래 존재하

는 맨틀 점탄성 거동(즉, 육지 방향 변위)과 위에 존재하는 맨틀의 점탄성 거동(즉, 바다 방향 변위)에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 모든 수치 모형의 해구로부터 150-200 km 거리정도 떨어진 영역에서 최대 바다 방향의 지진 후 수평 변위가 발생하는데, 이는 해당 거리에 있는 점탄성 맨틀이 메가스러스트에서 가장 가깝기 때문이다. 또한, 수평 지진 후 변위가 슬랩각이 커질수록 증가하는 경향성이 보인다. 예를 들어서, 슬랩각이 20° (그림 4a의 빨간색)와 50° (그림 4a의 보라색)일 때 200 km 떨어진 위치에서 각각 7.3 cm와 9.5 cm의 바다 방향 수평 변위가 도출되었다. 슬랩각이 클수록 섭입 슬랩 위에 존재하는 맨틀의 양이 많아지고, 이에 따라 해구 방향으로 거동하는 점탄성 지진 후 변형의 총량도 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 경향성은 원거리 영역에서도 유지된다. 1000 km 거리에서 슬랩각이 20° 일 때는 0.91 cm의 바다 방향 수평 변위가, 50° 일 때는 1.27 cm의 변위가 계산된다(그림 4b).

근거리 수직 변위의 크기는 모든 모형(그림 4c)에

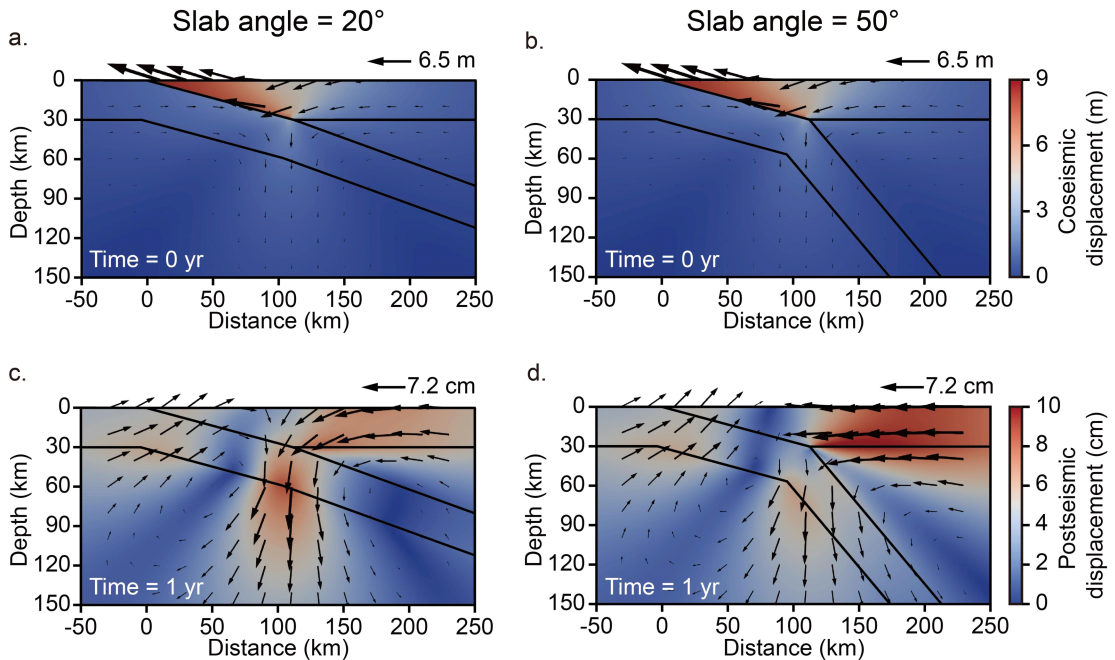


Fig. 3. Spatial distribution of coseismic and postseismic deformation around the fault. The black line presents the boundaries among crust, subducting slab, and mantle. The colors describe the magnitude of coseismic (a and b) and postseismic displacements (c and d). The black arrows indicate the magnitude and direction of coseismic and postseismic displacements. The left and right columns show the coseismic and postseismic displacements of models, in which the slab angles of 20° and 50° are applied, respectively.

서 해구로부터 100 km 이내 영역에서는 슬랩각이 낮을수록 작아지지만(그림 4c의 확대 영역 참조), 100 km 바깥 영역에서는 슬랩각이 낮을수록 커진다. 특히, 해구로부터 ~120 km 지점에서는 슬랩각이 낮을수록 수직 변위가 대폭 커지면서, 슬랩각이 20°(그림 4c의 빨간색), 50°(그림 4c의 보라색)일 때의 수직 변위는 각각 -3.37 cm와 0.3 cm로 큰 차이가 있다. 슬랩각에 따른 지진 후 변위의 차이는 원거리 영역에서는 미미함을 확인했다(그림 4d). 원거리 지진 후 변형의 경우 수직 운동에는 슬랩각의 영향이 거의 없으나, 슬랩각이 증가할수록 수평 변위의 크기가 증가하는 경향성을 보인다. 본 연구에서는 메가스러스트 단층면의 경사에 일반적으로 널리 사용되는 15°(Briggs *et al.*, 2014)의 저각을 적용했다. 이에 따라, 수평 방향 지진 변형이 수직 방향에 비해 더 크게 발생하므로 원거리 영역의 슬랩각에 따른 수직 방향 지진 후 변위의 차이가 작은 것으로 판단된다. 기존 측지학적 연구는 메가스러스트 지진 후 변형을 분석 시, 해구로부터 ~1000 km 이상 떨어진

상판에 위치한 GPS 정점에서는 수직 변위의 신호대 잡음비가 크기 때문에 고려하지 않은 반면, 수평 변위는 비교적 뚜렷하게 관측되어 우선적으로 분석한다(Wang *et al.*, 2009; Klein *et al.*, 2016). 따라서 우리는 슬랩각과 점성도에 따른 원거리 영역의 지진 후 변위를 분석함에 있어 수평 변위에 집중하였다.

맨틀 점성도가 지진 후 변형에 미치는 효과를 확인하기 위해서 슬랩각을 특정한 값으로 고정하고 맨틀의 점성도를 10^{18} - 10^{19} Pa·s로 변경하며 수치 모사했다. 그림 5a-f는 점성도에 따른 지진 1년 후 지표 변위를 보여주며 선의 색은 점성도를 의미한다. 그림 5의 행은 각각 섭입대 각도 20°(상단)와 35°(중간), 50°(하단)를, 열은 수평 변위(1열)와 수직 변위(2열)를 나타낸다. 수평 변위(그림 5a, 5c, 5e)는 점성도에 관계없이 -500 km에서 100 km 사이 영역에서는 육지 방향(양수) 변위가, 100 km 바깥쪽 영역에서는 바다 방향(음수) 변위가 발생한다. 이때, 점성도가 낮을수록 모든 방향의 변위 크기가 증가했다. 점성도가 10^{18} Pa·s (그림 5a의 빨간색 선), 10^{19}

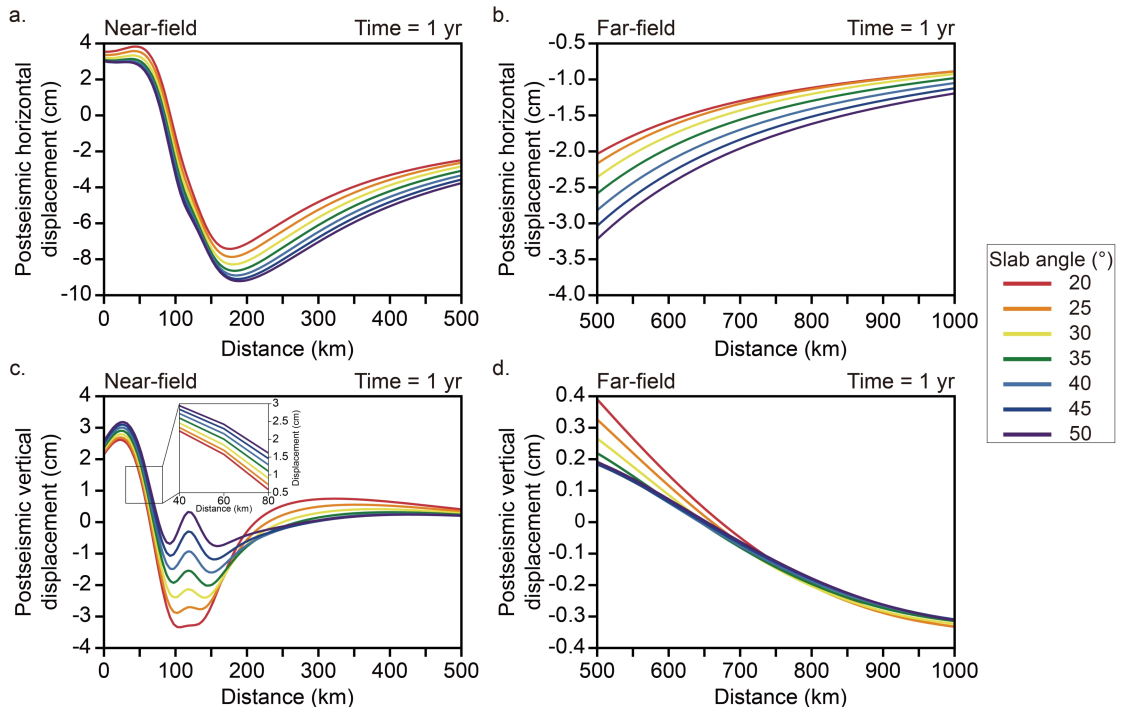


Fig. 4. Postseismic surface displacement depending on the subducting slab angle one year after the earthquake. The top and bottom rows show the horizontal and vertical displacements, respectively. The left and right columns present the near-field and far-field displacements, respectively. The colors indicate the slab angles.

Pa·s (그림 5a의 보라색 선)일 때, 최대 수평 변위는 각각 35.8 cm와 6.71 cm 이다. 수직 변위(그림 5b, 5d, 5f) 역시, 점성도가 낮을수록 변위의 크기가 증가하는 경향성이 명확하게 확인된다. 점성도를 다르게

설정해도 전체적인 거동의 양상은 비슷하지만, 그 크기가 달라지는 우리의 결과는 섭입대의 구조가 변위의 변형 양상을 조절하지만, 점탄성 거동의 속도는 맨틀 점성도에 의해 조절된다는 것을 암시한다.

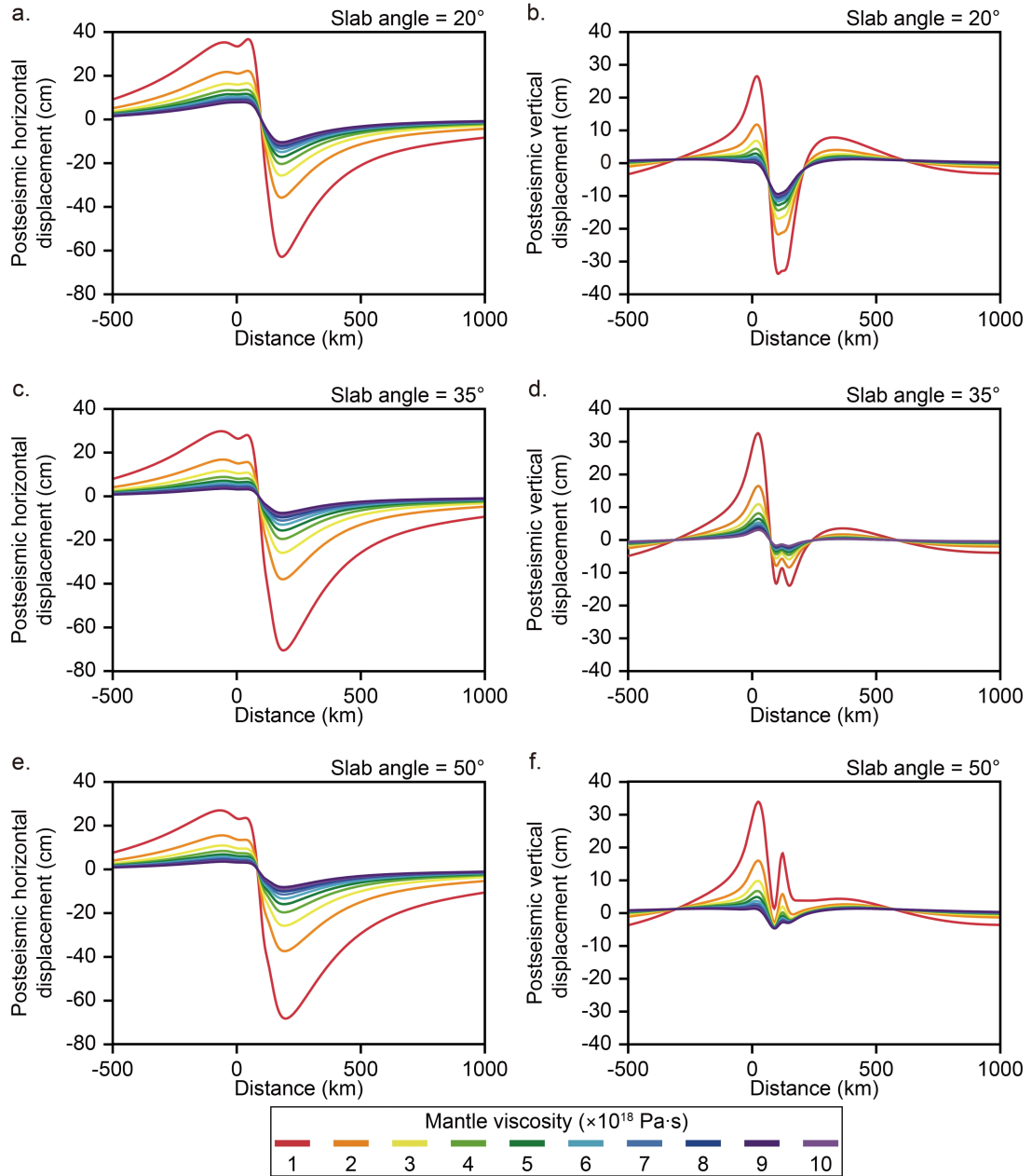


Fig. 5. Postseismic surface displacement depending on the subducting slab angle and mantle viscosity. We illustrate the postseismic surface displacements one year after the earthquake, which are calculated with a wide range of the slab angle and mantle viscosity. The slab angles are 20° (a and b), 35° (c and d), and 50° (e and f). The left and right rows mean the horizontal and vertical displacements, respectively. The colors of the lines refer to the mantle viscosity.

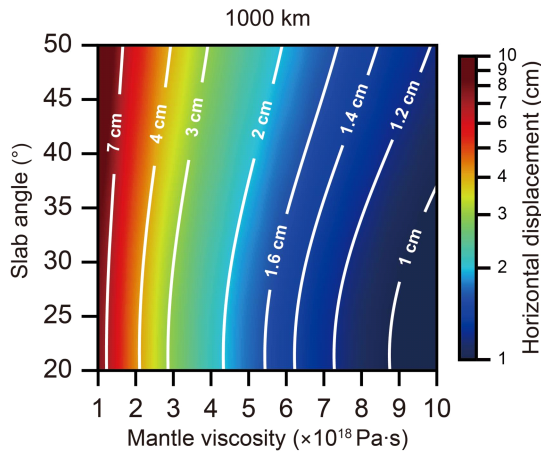


Fig. 6. The distribution of postseismic horizontal displacement one year after the earthquake with various subducting slab angles (20° - 50°) and mantle viscosity (10^{18} Pa·s- 10^{19} Pa·s). The white lines indicate iso-displacement contours. The colors display the accumulated postseismic displacement for one year.

그림 6에는 해구로부터 1000 km 떨어진 지점에서 넓은 범위의 슬랩각(20° - 50°)과 맨틀 점성도(10^{18} - 10^{19} Pa·s)에 따른 지진 1년 후 수평 변위를 도시했다. 세로축은 슬랩각, 가로축은 맨틀 점성도이며, 색은 지진 1년 후 수평 변위의 크기를 나타낸다. 슬랩각이 클수록, 맨틀 점성도가 낮을수록 변위의 크기가 증가했다. 그림 6에 해당하는 슬랩각과 맨틀 점성도의 범위에서, 맨틀 점성도가 낮아짐에 따라 증가하는 수평 변위 크기가 슬랩각을 크게 할 때의 수평 변위 증가량 보다 크다. 이는 맨틀 점성도가 지진 후 수평 변위의 크기를 조절하는 주된 요인임을 암시한다. 그럼에도 불구하고, 섭입대의 각도가 변함에 따라 수평 변위가 변하는 정도를 무시할 수는 없다. 예를 들어, 진원으로부터 ~1000 km 지점에 위치한 GPS 정점에서 지진 후 1.4 cm의 수평 변위가 발생했다면, 20° 와 50° 의 슬랩각을 정의한 수치 모형에서는 맨틀 점성도를 각각 $\sim 6 \times 10^{18}$ Pa·s와 $\sim 8 \times 10^{18}$ Pa·s로 추정하게 될 것이다. 이는, 맨틀 점성도 추정 연구에서 있어, 섭입대의 형태가 지진 후 변형에 미치는 영향을 반드시 고려해야 함을 의미한다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 불연속적인 지진 변형 모사가 가

능한 유한 요소 소프트웨어 PyLith를 이용해 메가스러스트 지진 및 지진 후 변형을 재현하고, 섭입대의 기하학적 형태에 따른 지표의 지진 후 변위 양상을 비교했다. 슬랩각이 클수록 슬랩 위에 존재하는 맨틀의 점탄성 거동에 큰 영향을 받으면서 표면의 바다 방향 수평 변위가 증가하고, 슬랩각이 낮을수록 슬랩 아래 위치한 맨틀의 영향이 커지면서 단층 주변에 수직 하강 변위가 발생했다. 맨틀 내부에서 슬랩각이 일정한 단순화된 섭입판을 가정하여 수치 모사를 진행했음에도 불구하고, 슬랩각이 맨틀의 점탄성 완화 변형 양상을 조절하고 결과적으로 근거리/원거리 표면 지진 후 변위에 영향을 미침을 확인했다. 실제 섭입대는 해양판의 퇴적물 두께, 섭입 및 후퇴 속도, 섭입 기간 등 다양한 요인에 의해 깊이에 따라 복잡한 슬랩각을 갖는다(예, Keum and So, 2021). 깊이에 따라 복잡하게 변하는 섭입대의 기하학적 구조에 따라 지진 후 점탄성 완화 거동은 더 복잡하게 나타날 것으로 예상되며, 정밀한 섭입판의 형태를 포함하지 않은 지진 후 변형 수치 모사는 왜곡된 지진 후 변위 재현과 부정확한 맨틀 점성도 추정으로 이어질 수 있다.

2011년 3월 11일 M_w 9.0 도호쿠 지진(Tohoku earthquake)은 메가스러스트 지진으로, 지진 변형 및 지진 후 변형이 한반도를 포함한 유라시아판 동부 전역에서 관측되었다(Baek *et al.*, 2012; Shao *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2018). 메가스러스트 단층으로부터 원거리 지역에서 지진 후 변형이 관측되었다는 것은, 지진 후 변형을 수치 모사함으로써 판 내부에 위치한 한반도와 동해의 하부 맨틀 점성도를 추정할 기회를 얻었음을 의미한다. 도호쿠 지진과 지진 후 변형이 한반도에 미치는 영향에 대한 연구는 활발하게 진행되어왔다(Baek *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018). 그러나, 도호쿠 지진 후 변형에 대한 측지 자료와 수치 모사를 비교하여 한반도 하부 맨틀의 유변학에 대해 정량적으로 평가한 연구는 진행된 바가 없다. 도호쿠 지진 및 지진 후 변형을 수치 모사하여 한반도 측지 자료에 관측된 변형을 설명한다면, 한반도와 그 일원 하부의 맨틀 유변학을 추정할 수 있을 뿐만 아니라, 도호쿠 지진에 의해 발생한 한반도 하부 암석권의 시간에 따른 응력장 변화를 정량적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 “행정안전부 방재안전분야 전문인력 양성”사업과 한국연구재단 중견연구지원사업(2022R1A2C1009742), 중점연구소지원 사업(2019R1A6A1A03033167), 한국해양과학기술원의 지원을 받아 수행되었습니다(PEA0084).

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.
- Ansari, K. and Bae, T., 2020, Contemporary deformation and strain analysis in South Korea based on long-term (2000-2018) GNSS measurements. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 391-405.
- Baek, J., Shin, Y., Na, S., Shestakov, N.V., Park, P. and Cho, S., 2012, Coseismic and postseismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data. *Terra Nova*, 24, 295-300.
- Barbot, S. and Fialko, Y., 2010, A unified continuum representation of post-seismic relaxation mechanisms: semi-analytic models of afterslip, poroelastic rebound and viscoelastic flow. *Geophysical Journal International*, 182, 1124-1140.
- Barbot, S., Fialko, Y. and Bock, Y., 2009, Postseismic deformation due to the M_w 6.0 2004 Parkfield earthquake: Stress-driven creep on a fault with spatially variable rate-and-state friction parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114.
- Bilek, S.L. and Lay, T., 2018, Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, 14, 1468-1500.
- Briggs, R.W., Engelhart, S.E., Nelson, A.R., Dura, T., Kemp, A.C., Haeussler, P.J., Corbett, D.R., Angster, S.J. and Bradley, L., 2014, Uplift and subsidence reveal a non-persistent megathrust rupture boundary (Sitkinak Island, Alaska). *Geophysical Research Letters*, 41, 2289-2296.
- Bürgmann, R. and Dresen, G., 2008, Rheology of the Lower Crust and Upper Mantle: Evidence from Rock Mechanics, Geodesy, and Field Observations. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 36, 531-567.
- Burov, E.B., 2011, Rheology and strength of the lithosphere. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1402-1443.
- Butterworth, N.P., Talsma, A.S., Müller, R.D., Seton, M., Bunge, H., Schubert, B., Shephard, G.E. and Heine, C., 2014, Geological, tomographic, kinematic and geodynamic constraints on the dynamics of sinking slabs. *Journal of Geodynamics*, 73, 1-13.
- Cohen, S.C., 1980, Postseismic viscoelastic surface deformation and stress: 1. Theoretical considerations, displacement, and strain calculations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85, 3131-3150.
- Diao, F., Xiong, X., Wang, R., Zheng, Y., Walter, T.R., Weng, H. and Li, J., 2014, Overlapping post-seismic deformation processes: Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Mw 9.0 Tohoku (Japan) earthquake. *Geophysical Journal International*, 196, 218-229.
- Ding, M. and Lin, J., 2014, Post-seismic viscoelastic deformation and stress transfer after the 1960 M 9.5 Valdivia, Chile earthquake: effects on the 2010 M 8.8 Maule, Chile earthquake. *Geophysical Journal International*, 197, 697-704.
- Freed, A.M., Bürgmann, R., Calais, E., Freymueller, J. and Hreinsdóttir, S., 2006, Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for post-seismic relaxation processes and lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111.
- Govers, R., Furlong, K.P., van de Wiel, L., Herman, M.W. and Broerse, T., 2018, The Geodetic Signature of the Earthquake Cycle at Subduction Zones: Model Constraints on the Deep Processes. *Reviews of Geophysics*, 56, 6-49.
- Halpaap, F., Rondenay, S., Perrin, A., Goes, S., Ottemöller, L., Austrheim, H., Shaw, R. and Eeken, T., 2019, Earthquakes track subduction fluids from slab source to mantle wedge sink. *Science Advances*, 5, eaav7369.
- Hashima, A., Becker, T.W., Freed, A.M., Sato, H. and Okaya, D.A., 2016, Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku-oki earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan. *Earth, Planets and Space*, 68, 1-15.
- Hong, T., Lee, J., Park, S. and Kim, W., 2018, Time-advanced occurrence of moderate-size earthquakes in a stable intraplate region after a megathrust earthquake and their seismic properties. *Scientific Reports*, 8, 13331.
- James, T.S., Clague, J.J., Wang, K. and Hutchinson, I., 2000, Postglacial rebound at the northern Cascadia subduction zone. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1527-1541.
- Johnson, K.M. and Tebo, D., 2018, Capturing 50 years of postseismic mantle flow at Nankai subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 10091-10106.
- Jónsson, S., Segall, P., Pedersen, R. and Björnsson, G., 2003, Post-earthquake ground movements correlated to pore-pressure transients. *Nature*, 424, 179-183.
- Keum, J. and So, B., 2021, Effect of buoyant sediment overlying subducting plates on trench geometry: 3D

- viscoelastic free subduction modeling. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093498.
- Kim, S., Ree, J., Yoon, H.S., Choi, B. and Park, P., 2018, Crustal Deformation of South Korea After the Tohoku-Oki Earthquake: Deformation Heterogeneity and Seismic Activity. *Tectonics*, 37, 2389-2403.
- Kim, Y., Abers, G.A., Li, J., Christensen, D., Calkins, J. and Rondenay, S., 2014, Alaska Megathrust 2: Imaging the megathrust zone and Yakutat/Pacific plate interface in the Alaska subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 1924-1941.
- Klein, E., Fleitout, L., Vigny, C. and Gaud, J.D., 2016, Afterslip and viscoelastic relaxation model inferred from the large-scale post-seismic deformation following the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake (Chile). *Geophysical Journal International*, 205, 1455-1472.
- Lavecchia, G., Castaldo, R., de Nardis, R., De Novellis, V., Ferrarini, F., Pepe, S., Brozzetti, F., Solaro, G., Cirillo, D. Bonano, M., Boncio, P., Casu, F., De Luca, C., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Pepe, A., Zinno, I. and Tizzani, P., 2016, Ground deformation and source geometry of the 24 August 2016 Amatrice earthquake (Central Italy) investigated through analytical and numerical modeling of DInSAR measurements and structural-geological data. *Geophysical Research Letters*, 43, 12389-12398.
- Li, S., Bedford, J., Moreno, M., Barnhart, W.D., Rosenau, M. and Oncken, O., 2018, Spatiotemporal variation of mantle viscosity and the presence of cratonic mantle inferred from 8 years of postseismic deformation following the 2010 Maule, Chile, earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 3272-3285.
- Loveless, J.P. and Meade, B.J., 2011, Spatial correlation of interseismic coupling and coseismic rupture extent of the 2011 Mw= 9.0 Tohoku-oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38.
- Manaker, D.M., Calais, E., Freed, A.M., Ali, S.T., Przybylski, P., Mattioli, G., Jansma, P., Pr  petit, C. and De Chabali  r, J.B., 2008, Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean. *Geophysical Journal International*, 174, 889-903.
- Masterlark, T., DeMets, C., Wang, H.F., Sanchez, O. and Stock, J., 2001, Homogeneous vs heterogeneous subduction zone models: Coseismic and postseismic deformation. *Geophysical Research Letters*, 28, 4047-4050.
- Melnick, D., Moreno, M., Quinteros, J., Baez, J.C., Deng, Z., Li, S. and Oncken, O., 2017, The super-interseismic phase of the megathrust earthquake cycle in Chile. *Geophysical Research Letters*, 44, 784-791.
- Muldashev, I.A. and Sobolev, S.V., 2020, What Controls Maximum Magnitudes of Giant Subduction Earthquakes?. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2020GC009145.
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F. and Hudnut, K., 1998, Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103, 30131-30145.
- Pollitz, F., Banerjee, P., Grijalva, K., Nagarajan, B. and Bürgmann, R., 2008, Effect of 3-D viscoelastic structure on post-seismic relaxation from the 2004 M= 9.2 Sumatra earthquake. *Geophysical Journal International*, 173, 189-204.
- Pollitz, F.F., Bürgmann, R. and Banerjee, P., 2011, Geodetic slip model of the 2011 M9.0 Tohoku earthquake. *Geophysical Research Letters*, 38.
- Pollitz, F.F., Kobayashi, T., Yarai, H., Shibazaki, B. and Matsumoto, T., 2017, Viscoelastic lower crust and mantle relaxation following the 14-16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence. *Geophysical Research Letters*, 44, 8795-8803.
- Riva, R., Aoudia, A., Vermeersen, L., Sabadini, R. and Panza, G.F., 2000, Crustal versus asthenospheric relaxation and post-seismic deformation for shallow normal faulting earthquakes: the Umbria-Marche (central Italy) case. *Geophysical Journal International*, 141, F7-F11.
- Royden, L.H. and Husson, L., 2006, Trench motion, slab geometry and viscous stresses in subduction systems. *Geophysical Journal International*, 167, 881-905.
- Ruiz, S. and Madariaga, R., 2018, Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56.
- Scholz, C.H., 1998, Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391, 37-42.
- Shao, Z., Zhan, W., Zhang, L. and Xu, J., 2016, Analysis of the far-field co-seismic and post-seismic responses caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 411-424.
- Shestakov, N.V., Takahashi, H., Ohzono, M., Prytkov, A.S., Bykov, V.G., Gerasimenko, M.D., Luneva, M.N., Gerasimov, G.N., Kolomiets, A.G., Bormotov, V.A., Vasilenko, N.F., Baek, J., Park, P. and Serov, M.A., 2012, Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. *Tectonophysics*, 524-525, 76-86.
- Sun, T. and Wang, K., 2015, Viscoelastic relaxation following subduction earthquakes and its effects on afterslip determination. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 1329-1344.
- Sun, T., Wang, K., Iinuma, T., Hino, R., He, J., Fujimoto, H., Kido, M., Osada, Y., Miura, S. and Ohta, Y., 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature*, 514, 84-87.
- Suzuki, W., Aoi, S., Sekiguchi, H. and Kunugi, T., 2011, Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake (M9.0) inverted from strong-motion data. *Geophysical Research Letters*, 38.

- Tian, Z., Freymueller, J.T. and Yang, Z., 2020, Spatio-temporal variations of afterslip and viscoelastic relaxation following the Mw 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 532, 116031.
- Tian, Z., Freymueller, J.T. and Yang, Z., 2021, Postseismic Deformation due to the 2012 Mw 7.8 Haida Gwaii and 2013 Mw 7.5 Craig Earthquakes and its Implications for Regional Rheological Structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020197.
- Ueda, H., Ohtake, M. and Sato, H., 2003, Postseismic crustal deformation following the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake, northern Japan: Evidence for a low-viscosity zone in the uppermost mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108.
- Vergnolle, M., Pollitz, F. and Calais, E., 2003, Constraints on the viscosity of the continental crust and mantle from GPS measurements and postseismic deformation models in western Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108.
- Wang, K., Hu, Y. and He, J., 2012, Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth. *Nature*, 484, 327-332.
- Wang, L., Wang, R., Roth, F., Enescu, B., Hainzl, S. and Ergintav, S., 2009, Afterslip and viscoelastic relaxation following the 1999 M 7.4 İzmit earthquake from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 178, 1220-1237.
- Wen, Y., Li, Z., Xu, C., Ryder, I. and Bürgmann, R., 2012, Postseismic motion after the 2001 Mw 7.8 Kokoxili earthquake in Tibet observed by InSAR time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117.
- Yamasaki, T. and Houseman, G.A., 2012, The signature of depth-dependent viscosity structure in post-seismic deformation. *Geophysical Journal International*, 190, 769-784.
- Zhao, Q., Fu, G., Wu, W., Liu, T., Su, L., Su, X. and Shestakov, N.V., 2018, Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake. *Geophysical Journal International*, 214, 1774-1782.

Received : May 2, 2022
Revised : May 24, 2022
Accepted : May 25, 2022