

한반도 평남분지 남서부 지역의 지진활동

이희경^{1,2} · 강태섭^{1,*}

¹부경대학교 지구환경시스템과학부

²포항시청 지진대책국

요 약

평남분지 서부는 한반도 다른 지역에 비해 지진의 활동도가 비교적 높은 지역이다. 2009년 1월부터 2019년 6월까지 이 지역에서 발생한 규모(M_L) 2.0 이상의 지진 48개를 분석하였다. 각 관측소에서 지진파 도착 시간의 관측값과 계산값 사이의 잔차가 최소화되는 지점을 결정할 때까지 반복적으로 계산하는 알고리즘을 사용하여 진원을 재결정하였다. 진원 정보와 재결정 과정에서 도출한 최적 1차원 속도 모델을 이용하여, 실제파 초동 극성법에 의한 단층면해를 결정하였다. 상당수의 지진이 정단층 성분을 포함하는 북서-남동 방향 주향을 갖는 좌수향 수평이동단층과 관련이 있다. 단층면해의 압축축과 인장축 자료를 이용하여 응력 역산을 수행하였다. 연구 지역의 최대주응력은 고각의 북서-남동 방향으로 작용하며, 이 방향은 한반도 광역 최대수평주응력 방향과 상이하다. 이러한 응력의 교란은 평남분지 퇴적 환경에서 발달한 약한 전단강도를 갖는 단층들로 인하여, 광역 응력 방향과 분지의 국지 응력 사이에 국지적인 응력장 분리가 발생한 것이 원인이다.

주요어: 평남분지, 지진활동, 단층면해, 응력 역산, 응력장 교란

Heekyoung Lee and Tae-Seob Kang, 2019, Seismic activity in the southwestern region of the Pyeongnam Basin of the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 415-429

ABSTRACT: The western region of the Pyeongnam Basin has relatively higher earthquake activity than the rest of the Korean Peninsula. We analyzed 48 earthquakes in the area, with a magnitude (M_L) of 2.0 or more, from January 2009 to June 2019. The hypocentral parameters were re-determined using an iterative algorithm that repeats the calculation until the residual error between the observed and calculated arrival time of a seismic phase at each station is minimized. Using the hypocenters and the optimal 1-D velocity model derived from this process, the focal mechanisms were determined using the first-motion polarities of body waves. Many earthquakes are associated with left-lateral strike-slip faults, with a strike in the NW-SE direction and a normal faulting component. A stress inversion was performed using data of the pressure and tensional axes from the focal mechanisms. The maximum principal stress in the study area acts in the NW-SE direction with high angles of plunge and differs from the maximum horizontal principal stress in the rest of the Korean Peninsula. This stress perturbation is caused by the detachment of a small local stress from the regional stress field due to the presence of weak faults with low shear strength that develop in the sedimentation environment of the Pyeongnam Basin.

Key words: Pyeongnam Basin, seismic activity, focal mechanism, stress inversion, stress perturbation

(Heekyoung Lee, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea and Earthquake Countermeasure Bureau, Pohang City Hall, Pohang 37683, Republic of Korea; Tae-Seob Kang, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)

1. 서 언

한반도 북부 지역의 지진활동은 역사지진 목록과 계기지진 관측을 통하여 잘 알려져 있으며, 남부 지역에 비하여 지진활동도가 전반적으로 낮은 편이다. 그

러나 평안도 서부 지역은 한반도 북부의 다른 지역에 비하여 지진활동도가 비교적 높은 지역으로, 피해를 일으킬 수 있는 진도 V 이상 지진이 상대적으로 많이 분포하고 중소규모의 지진활동이 긴 역사기록을 통해 확인되었다(Korea Meteorological Administration,

* Corresponding author: +82-51-629-6632, E-mail: tskang@pknu.ac.kr

2012). 이 지역은 지질학적으로 평남분지에 속하며, 한반도에서 지진활동이 가장 뚜렷한 지역 가운데 하나이다(그림 1). 이 지역에서 발생한 가장 대표적인 지진으로 평양 남부에서 발생한 1952년 3월 19일 규모(M_w) 6.2의 지진을 들 수 있다(Kang and Jun, 2011). 이 지진은 1905년 한반도에서 지진계를 이용한 지진관측을 시작한 이래 가장 큰 규모의 지진임에도 불구하고 당시 전란으로 인하여 한반도에서 이루어진 지진 관측은 불가능하였을 것으로 추정되며, 따라서 지진 관측 기록을 비롯한 상세한 정보는 파악하기 어렵다. 그러나 중국, 러시아, 일본 등의 주변국에서 운영된 지진관측소의 아날로그 기록이 일부 확인되어,

이들 원시 지진파형 자료와 국제지진센터(International Seismological Centre, 2018, database last accessed in July 2019)의 연보를 통하여 비교적 구체적인 단층면해를 포함한 지진원 요소를 결정할 수 있었다. 또한 1982년 2월 14일 규모(M_w) 5.3 지진은 1978년 기상청의 지진관측 이후 이 지역에서 발생한 가장 큰 지진이며, Jun and Kulháněk (1991)은 이 지진에 대한 원거리 지진자료의 모멘트 텐서 역산을 통하여 단층면해를 결정하였다. 이들 두 지진을 제외하면, 한반도 북부 지역의 특정한 지진이나 지진군의 특성에 대한 체계적인 연구는 매우 제한적이다.

한반도는 판 경계부 지역에서 발생하는 지진에 비

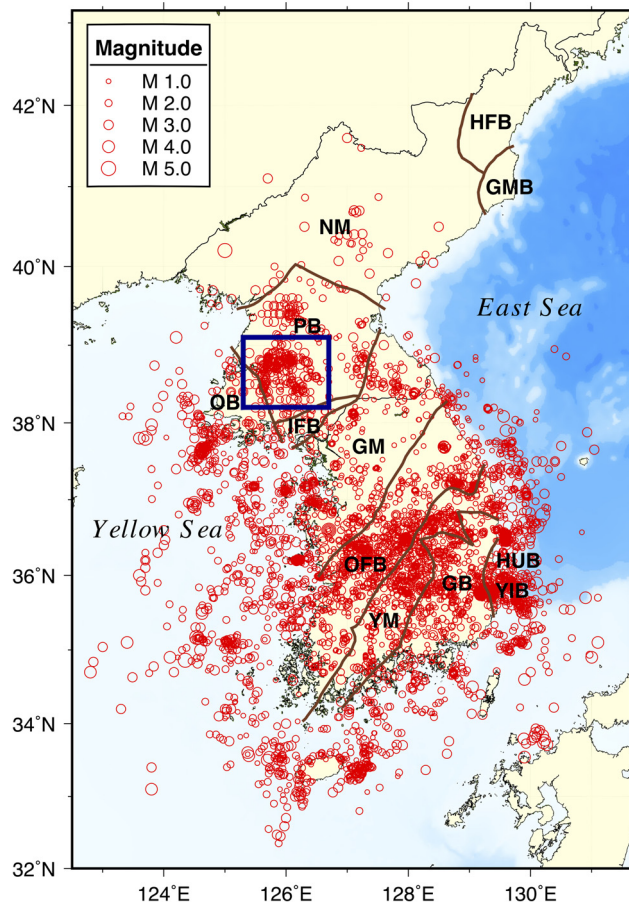


Fig. 1. Seismic activity in the Korean Peninsula since 1978 (Korea Meteorological Administration, 2019, database last accessed in July 2019). The blue box indicates the study area. The major tectonic boundaries are adopted from the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2001), and are depicted by a thick solid line; HFB (Hambuk Fold Belt), GMB (Gilju-Myeongcheon Basin), NM (Nangnim Massif), PB (Pyeongnam Basin), OB (Ongjin Basin), IFB (Imjingang Fold Belt), GM (Gyeonggi Massif), OFB (Okcheon Fold Belt), YM (Yeongnam Massif), GB (Gyeongsang Basin), HUB (Hupo Bank and Basin), YIB (Yeonil Basin).

해 지진 활동도가 상대적으로 낮고, 규모 또한 작으며, 지진발생 시공간적 분포가 산포하는 전형적인 판 내부 지진의 특징을 보인다. 그러나 2016년 경주지진 (M_L 5.8), 2017년 포항지진(M_L 5.4)과 같은 지진의 발생은 한반도에서도 대규모 지진재해의 가능성에 대한 우려를 불러일으키기에 충분한 근거가 되었다. 이러한 판 내부 지진 발생 특성을 이해하기 위해서는 광역적인 응력장 체제와 미소지진 활동에 대한 정확한 양상을 파악하여야 한다. 특히 미소지진 활동의 진원 분포 및 단층면해 등과 같은 지진원 요소 정보는 해당 지역의 지진 발생 원인을 규명하기 위한 지진 지체구조 연구 또는 지진재해도 평가 등의 목적에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 또한 이러한 정보는 지표면에 노출된 단층과의 연관성뿐만 아니라, 지표에 노출되지 않은 현생 지진활동 유발 단층이 발달하는 방향에 대한 가장 직접적인 단서가 될 수 있다. 미소지진 발생 양상은 판 경계부에서 먼 지역에서도 향후 발생 가능한 대규모 지진의 시·공간적인 잠재적 특성에 관해 정보를 제공해 줄 수 있다.

한반도 남부 지역에서 1978년 홍성 지진을 계기로 아날로그 지진 관측망이 구축되고, 1997년 이후 디지털 지진계의 도입과 지진 관측망의 점진적인 확충으로 고품질의 지진관측 자료 확보를 통한 상세한 지진 분석이 가능해졌다. 지진 관측망 밀도의 증가로 보다 작은 규모의 지진도 감지할 수 있으며 지진원 요소 분석의 정밀도 또한 높아졌다. 한편 한반도에서 본격적인 지진 관측 연구가 이루어진 역사는 약 20여년 정도에 불과하며, 직접적으로 자료 확보가 가능한 광역 지진 관측망 분포가 한반도 남부 지역에 치우쳐 있다. 이러한 지진 관측 환경은 한반도 북부 지역의 지진활동에 대한 분석 정보의 불확실성이 상대적으로 큰 원인이 된다. 또한 지진활동을 해석하는데 필요한 해당 지역의 지질학적 정보는 대부분 과거 일제 강점기 조사 자료에 기초한 지질도와 관련 문헌에 의존하고 있고, 최근의 조사 자료에 대한 접근은 매우 제한적이고 간접적일 수밖에 없다. 이러한 활용 가능한 정보의 한계는 이 지역의 현생 지진 활동과 지진지체구조 환경의 연계 해석을 어렵게 한다.

한반도 및 주변 지역에서 발생하는 지진들은 대부분 주향이동 단층과 일부 역단층 성분이 포함된 운동 특성을 보인다(Kim *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2010; Jun and Jeon, 2010; Rhie and

Kim, 2010; Hong and Choi, 2012). 황해도 및 서해 해역 일부에서 발생하는 지진의 경우, 이례적으로 정단층 운동에 의한 단층면해 분석 결과가 제시되었다(Jun, 1991; Jun and Kulhánek, 1991; Cipar, 1996; Rhie and Kim, 2010; Hong and Choi, 2012; Lee *et al.*, 2014; Soh *et al.*, 2018). 특히, 한반도 남부 지역의 광역 지진 관측망에서 기록한 지진자료의 파형 역산(Rhie and Kim, 2010; Hong and Choi, 2012) 또는 초동 극성 분석(Lee *et al.*, 2014)에 의하여 결정된 단층면해 가운데, 평남분지에서 발생한 일부 지진에 대하여도 이러한 정단층 운동 성분이 우세한 결과를 확인할 수 있다.

이 연구는 한반도에서 지역적인 지진활동이 가장 뚜렷하고, 한반도 계기지진 시기 동안 규모 5.0 이상의 지진이 발생한 평남분지의 지역적인 현생 응력장과 지진활동에 대한 이해를 증대하려는 목적에서 수행되었다. 2009년 1월부터 2019년 6월까지 평남분지에서 발생한 규모(M_L) 2.0 이상 지진의 진원을 재결정하였다. 초동 극성 분석에 의한 단층면해를 결정하여, 각 지진의 단층운동 특성을 파악하였다. 평남분지에 작용하는 현생 응력장을 파악하기 위하여 단층면해 결정 결과를 이용한 응력장 역산을 수행하였다. 이 결과를 이용하여 연구지역의 지진활동과 관계된 국지적인 응력 환경을 해석한다.

2. 지 질

연구 지역은 북쪽으로 낭림육괴, 남쪽으로 경기육괴와 경계를 이루는 평남분지의 서부 지역에 해당한다(그림 2). 평남분지의 지질은 기반암의 분포와 주변 지층과의 관계에 대한 전반적인 소개(The Geological Society of Korea, 1999)와 퇴적 층서에 관한 연구(Lee *et al.*, 2013a, 2013b) 등을 참고할 수 있다. 평남분지는 시생대와 원생대 지층들로 이루어진 기반암 위에 고생대 이후 지층들이 퇴적되어 형성되었다. 중생대 삼척기 말에서 쥐라기 초에 이르는 기간 동안 발생한 송림조산운동은 한반도 북부지역에 큰 영향을 미친 대규모 지각변동이다. 송림조산운동으로 평남분지의 기반암과 상부 지층이 심한 습곡작용과 층상단층운동 및 변성작용과 마그마 관입운동의 영향을 받았다. 이후 중생대와 신생대를 거치면서 북북동-남남서 방향의 지구형 분지들이 부분적으로 중첩되어 평남분

지의 상부를 형성하였다. 평남분지의 중앙을 가로질러 북북동-남남서 방향으로 예성강단층이 발달하고 있다(그림 2). 예성강단층을 경계로 평남분지의 동부와 서부에서 습곡축과 단층 방향이 서로 다른 양상을 나타낸다. 분지 서부에는 중생대 퇴적분지를 동남동-서북서 방향이 우세하게 가로지르는 구월산단층, 남강단층, 대동강단층, 은울-태탄단층, 재령강단층 등과 동서 방향의 습곡축이 우세하게 발달한다. 분지 동부에는 예성강단층과 거의 평행하게 북북동-남남서 방향이 우세한 고미탄단층, 임진강단층, 추가령단층 등과 북동-남서 방향의 습곡축이 우세하게 발달한다. 이 밖에도 대보조산운동과 재령강조산운동의 영향으로 북동 방향과 북서 방향의 단층들이 분지 내에 광범위하게 발달하고 있다.

3. 자료와 분석

3.1 지진 파형

기상청 온라인 발표 지진목록(Korea Meteorological Administration, 2019, database last accessed in July 2019)을 토대로 2009년 1월부터 2019년 6월까지 평남분지 서부에서 발생한 지진 자료 중 규모(M_L) 2.0 이상의 지진 48개를 선별하였다(표 1). 지진원 요소를 결정하기 위하여 기상청과 한국지질자원연구원이 운영하고 있는 광역 지진관측망에서 기록된 초당 100 샘플수의 지진 파형 자료를 수집하였다. 지진 파형의 대부분은 광대역 속도 기록이며, 일부 단주기 속도 및 가속도 기록도 사용하였다(그림 3). 분석에는 최초 지진목록에서 확인할 수 있는 각 지진의 진앙

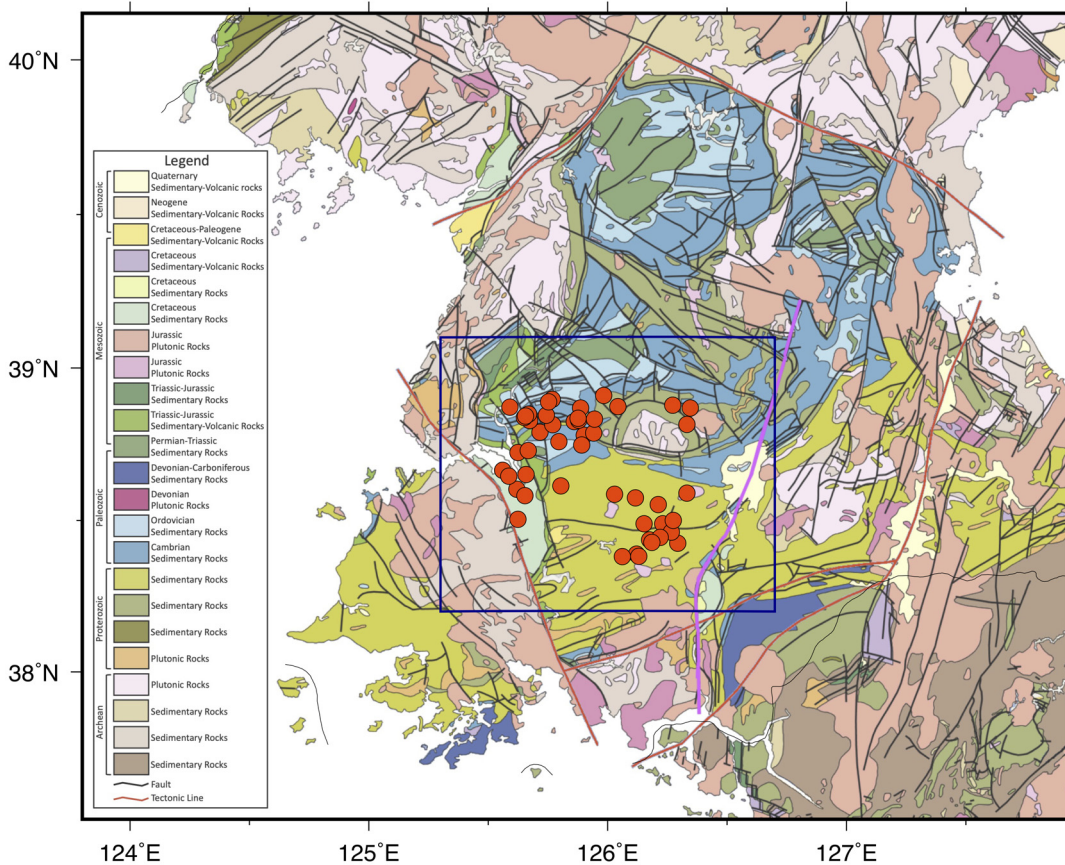


Fig. 2. Geological map of the Pyeongnam Basin adopted from the Tectonic Map of Korea (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2001). The magenta line indicates the Yeseonggang Fault which runs along the NNE-SSW direction through the Pyeongnam Basin. The tectonic domains are indicated in Fig. 1. The study area indicated by the blue box lies between the Yeseonggang Fault in the east and the tectonic boundary with the Ongjin Basin in the west. The solid red circles indicate the events that were analyzed.

Table 1. Origin time, locations, and parameters of the focal mechanisms obtained in this study. The magnitude is adopted from the online catalog of the Korea Meteorological Administration (<http://necis.kma.go.kr>; database last accessed in July 2019).

| No. | Origin time (LT; UT+9h) | | Lat. (°N) | Lon. (°E) | Depth (km) | Mag. (M _L) | Fault plane 1 | | | Fault plane 2 | | | P-axis | | T-axis | | Data | |
|-----|-------------------------|------------|-----------|-----------|------------|------------------------|---------------|-----|------|---------------|-----|------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| | yyyy-mm-dd | hh:mm:ss | | | | | Strike | Dip | Rake | Strike | Dip | Rake | Trend | Plunge | Trend | Plunge | Loc. | Foc. |
| 1 | 2019-06-23 | 13:15:10.4 | 38.790 | 125.716 | 11 | 2.4 | 71 | 50 | 83 | 261 | 40 | 98 | 166 | 5 | 297 | 83 | 5 | 15 |
| 2 | 2019-06-23 | 05:26:24.2 | 38.828 | 125.673 | 10 | 3.4 | 240 | 36 | -73 | 39 | 56 | -102 | 272 | 76 | 138 | 10 | 8 | 41 |
| 3 | 2019-06-22 | 05:49:36.6 | 38.849 | 125.669 | 7 | 3.4 | 268 | 51 | -34 | 22 | 64 | -136 | 241 | 49 | 142 | 8 | 8 | 52 |
| 4 | 2019-06-22 | 05:44:00.6 | 38.838 | 125.651 | 12 | 2.7 | 89 | 45 | 36 | 333 | 66 | 129 | 35 | 12 | 289 | 53 | 6 | 16 |
| 5 | 2019-06-21 | 13:20:40.0 | 38.872 | 125.591 | 15 | 2.5 | 121 | 50 | 57 | 347 | 50 | 123 | 234 | 0 | 324 | 65 | 5 | 14 |
| 6 | 2019-05-17 | 11:08:29.0 | 38.489 | 126.231 | 5 | 2.4 | 53 | 53 | -65 | 195 | 44 | -120 | 22 | 70 | 126 | 5 | 6 | 16 |
| 7 | 2019-02-13 | 05:16:12.0 | 38.898 | 125.768 | 15 | 2.7 | 72 | 51 | -34 | 185 | 64 | -136 | 45 | 49 | 306 | 8 | 5 | 9 |
| 8 | 2018-11-25 | 02:58:35.0 | 38.780 | 125.902 | 19 | 2.2 | 73 | 50 | 4 | 340 | 87 | 140 | 34 | 25 | 289 | 29 | 5 | 12 |
| 9 | 2018-09-27 | 12:24:33.0 | 38.651 | 125.658 | 13 | 2.4 | 107 | 52 | 51 | 340 | 52 | 129 | 223 | 0 | 313 | 60 | 5 | 8 |
| 10 | 2018-01-01 | 18:34:59.1 | 38.389 | 126.121 | 10 | 2.1 | 286 | 46 | -76 | 86 | 46 | -104 | 275 | 80 | 6 | 0 | 5 | 7 |
| 11 | 2017-12-12 | 10:06:06.2 | 38.381 | 126.061 | 7 | 2.5 | 347 | 50 | -57 | 121 | 50 | -123 | 324 | 65 | 54 | 0 | 4 | 10 |
| 12 | 2017-08-16 | 00:35:27.7 | 38.603 | 125.620 | 29 | 2.5 | 30 | 38 | -36 | 149 | 69 | -123 | 19 | 54 | 263 | 18 | 5 | 10 |
| 13 | 2017-08-07 | 20:53:09.5 | 38.665 | 125.560 | 15 | 2.6 | 163 | 81 | 34 | 68 | 56 | 170 | 291 | 17 | 31 | 30 | 5 | 18 |
| 14 | 2017-06-14 | 02:43:48.0 | 38.382 | 126.130 | 12 | 2.2 | 263 | 55 | -84 | 73 | 35 | -99 | 196 | 79 | 349 | 10 | 9 | 22 |
| 15 | 2017-04-09 | 14:12:46.6 | 38.878 | 126.273 | 12 | 2.4 | 259 | 32 | -49 | 33 | 67 | -112 | 269 | 62 | 140 | 18 | 5 | 22 |
| 16 | 2017-04-08 | 23:13:13.2 | 38.646 | 125.586 | 13 | 2.1 | 356 | 64 | -16 | 93 | 76 | -153 | 317 | 29 | 223 | 7 | 6 | 5 |
| 17 | 2017-03-21 | 23:19:48.1 | 38.586 | 126.029 | 11 | 2.4 | 63 | 42 | -67 | 214 | 52 | -109 | 65 | 74 | 317 | 5 | 6 | 13 |
| 18 | 2017-02-10 | 18:01:35.4 | 38.614 | 125.804 | 4 | 2.6 | 144 | 86 | 55 | 48 | 35 | 173 | 263 | 32 | 23 | 39 | 6 | 11 |
| 19 | 2017-01-17 | 16:06:55.6 | 38.825 | 125.860 | 4 | 2.8 | 109 | 58 | 48 | 349 | 51 | 137 | 227 | 4 | 323 | 55 | 7 | 14 |
| 20 | 2016-12-30 | 15:04:40.1 | 38.815 | 125.770 | 8 | 2.5 | 344 | 67 | -46 | 96 | 48 | -149 | 301 | 48 | 44 | 11 | 5 | 14 |
| 21 | 2016-12-29 | 05:53:13.1 | 38.759 | 125.796 | 14 | 2.6 | 69 | 52 | 27 | 322 | 69 | 139 | 19 | 11 | 279 | 44 | 7 | 13 |
| 22 | 2016-08-18 | 22:21:11.6 | 38.846 | 125.743 | 15 | 2.6 | 311 | 70 | -52 | 65 | 42 | -149 | 264 | 50 | 14 | 16 | 8 | 15 |
| 23 | 2016-07-09 | 13:16:48.3 | 38.748 | 125.891 | 7 | 2.6 | 54 | 73 | 18 | 318 | 73 | 162 | 186 | 0 | 276 | 25 | 6 | 20 |
| 24 | 2016-06-25 | 03:24:53.0 | 38.869 | 125.887 | 11 | 2.6 | 96 | 42 | 31 | 341 | 70 | 128 | 45 | 16 | 294 | 50 | 6 | 19 |

Table 1. continued.

| No. | Origin time (LT; UT+9h) | | Lat. (°N) | Lon. (°E) | Depth (km) | Mag (M _L) | Fault plane 1 | | | Fault plane 2 | | | P-axis | | T-axis | | Data | |
|-----|-------------------------|------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------|---------------|-----|------|---------------|-----|------|--------|--------|--------|--------|------|------|
| | yyyy-mm-dd | hh:mm:ss | | | | | Strike | Dip | Rake | Strike | Dip | Rake | Trend | Plunge | Trend | Plunge | Loc. | Foc. |
| 25 | 2016-03-14 | 05:17:04.9 | 38.829 | 125.879 | 13 | 3.1 | 322 | 69 | -41 | 69 | 52 | -153 | 279 | 43 | 19 | 10 | 7 | 21 |
| 26 | 2016-02-28 | 16:52:38.6 | 38.836 | 125.876 | 7 | 2.5 | 318 | 75 | -48 | 64 | 44 | -158 | 269 | 44 | 18 | 19 | 7 | 15 |
| 27 | 2016-01-23 | 07:14:02.1 | 38.425 | 126.294 | 11 | 2.4 | 291 | 82 | -50 | 30 | 41 | -168 | 237 | 39 | 351 | 26 | 6 | 18 |
| 28 | 2015-01-06 | 13:06:39.6 | 38.462 | 126.267 | 14 | 2.8 | 84 | 71 | 5 | 353 | 85 | 161 | 40 | 10 | 307 | 17 | 6 | 21 |
| 29 | 2014-11-15 | 03:31:38.2 | 38.816 | 126.332 | 6 | 2.5 | 4 | 83 | -45 | 100 | 46 | -170 | 312 | 36 | 61 | 24 | 7 | 22 |
| 30 | 2014-06-21 | 08:29:30.9 | 38.787 | 125.941 | 13 | 2.6 | 344 | 75 | -48 | 90 | 44 | -158 | 295 | 44 | 44 | 19 | 4 | 13 |
| 31 | 2013-12-04 | 06:28:05.9 | 38.723 | 125.625 | 13 | 2.4 | 319 | 67 | -63 | 85 | 35 | -138 | 267 | 59 | 29 | 18 | 4 | 13 |
| 32 | 2013-12-02 | 20:02:58.1 | 38.574 | 126.116 | 7 | 2.8 | 346 | 52 | -51 | 113 | 52 | -129 | 320 | 60 | 50 | 0 | 9 | 17 |
| 33 | 2013-11-20 | 21:07:11.0 | 38.436 | 126.176 | 11 | 2.1 | 291 | 75 | -48 | 38 | 44 | -158 | 242 | 44 | 351 | 19 | 8 | 14 |
| 34 | 2013-11-16 | 22:32:45.6 | 38.582 | 125.654 | 10 | 2.1 | 347 | 45 | -36 | 104 | 66 | -129 | 327 | 53 | 221 | 12 | 7 | 15 |
| 35 | 2013-08-11 | 04:19:36.1 | 38.489 | 126.153 | 8 | 2.3 | 108 | 86 | 50 | 14 | 40 | 174 | 229 | 29 | 344 | 36 | 7 | 18 |
| 36 | 2013-07-01 | 11:24:54.1 | 38.869 | 126.346 | 12 | 3.0 | 337 | 68 | -28 | 79 | 64 | -156 | 297 | 35 | 28 | 2 | 5 | 18 |
| 37 | 2012-06-12 | 09:01:25.7 | 38.843 | 125.656 | 11 | 2.1 | 157 | 84 | 40 | 61 | 51 | 172 | 283 | 22 | 27 | 32 | 6 | 13 |
| 38 | 2012-06-05 | 08:18:40.5 | 38.444 | 126.220 | 13 | 2.1 | 347 | 50 | -57 | 121 | 50 | -123 | 324 | 65 | 54 | 0 | 7 | 15 |
| 39 | 2012-01-19 | 15:42:58.6 | 38.552 | 126.212 | 7 | 2.7 | 107 | 48 | 39 | 348 | 62 | 131 | 51 | 8 | 310 | 54 | 5 | 18 |
| 40 | 2011-09-28 | 13:20:03.5 | 38.500 | 126.275 | 10 | 2.6 | 306 | 64 | -56 | 69 | 41 | -139 | 263 | 57 | 12 | 13 | 6 | 14 |
| 41 | 2011-09-08 | 01:56:38.7 | 38.910 | 125.983 | 14 | 3.2 | 317 | 70 | -52 | 71 | 42 | -149 | 270 | 50 | 20 | 16 | 4 | 16 |
| 42 | 2011-08-15 | 06:10:40.0 | 38.504 | 125.624 | 5 | 3.2 | 80 | 70 | 15 | 344 | 76 | 159 | 33 | 4 | 301 | 24 | 8 | 20 |
| 43 | 2011-07-05 | 02:13:28.3 | 38.590 | 126.332 | 15 | 2.3 | 336 | 51 | -43 | 96 | 58 | -132 | 311 | 55 | 215 | 4 | 4 | 16 |
| 44 | 2011-03-06 | 11:04:39.4 | 38.730 | 125.668 | 11 | 2.9 | 326 | 61 | -42 | 80 | 54 | -143 | 289 | 49 | 24 | 4 | 5 | 12 |
| 45 | 2010-08-24 | 03:59:44.0 | 38.833 | 125.945 | 15 | 2.5 | 36 | 31 | -17 | 140 | 81 | -120 | 21 | 45 | 255 | 30 | 5 | 16 |
| 46 | 2010-04-16 | 19:56:11.0 | 38.874 | 126.043 | 14 | 2.2 | 58 | 45 | 0 | 328 | 90 | 135 | 23 | 30 | 273 | 30 | 5 | 11 |
| 47 | 2009-07-17 | 13:14:05.6 | 38.428 | 126.185 | 5 | 2.5 | 342 | 48 | -63 | 124 | 48 | -117 | 324 | 70 | 53 | 0 | 7 | 14 |
| 48 | 2009-01-09 | 20:53:19.6 | 38.889 | 125.753 | 15 | 3.2 | 333 | 57 | -33 | 82 | 63 | -143 | 300 | 45 | 207 | 4 | 5 | 12 |

으로부터 거리가 가까우며 가능한 한 넓은 방위각 분포를 유지할 수 있는 지진관측소들을 선별하고 이들 관측소에서 기록한 지진파형을 사용하고자 하였다. 이들 가운데 비교적 파형의 신호대 잡음비가 높고 극성이 명확히 구분되는 것으로 판단되는 자료들만을 사용하여 수동으로 지진파 위상의 도달시각을 측정하고 초동의 극성을 결정하였다.

3.2 진원 결정

지진원의 정확성은 지진파 속도구조와 지진관측소 분포 및 지진 파형 등과 같은 자료의 품질 뿐만 아니라, 진원 요소 결정에 사용되는 역산 알고리즘에 의하여 좌우된다. 연구 지역에 대하여, 이들 지진원 결정에 영향을 주는 각 요소의 여건에 대하여 살펴볼 필요가 있다. 먼저, 한반도 북부 지역에 대하여 지역 지진관측망 등을 통한 직접적인 근거리 지진관측으로부터 얻은 지각 속도구조 관련 정보는 지금까지 알려진 바가 없다. 이 지역의 속도구조 연구는 한반도 남부와 중국 및 일본 지역의 광역 상시 또는 임시지진관측망의 연속기록을 이용한 지진배경잡음 상호상관을 통한 표면파 분산 분석으로부터 얻은 한반도 북

부의 각각 내륙과 동해 해역을 대표하는 1차원 속도 모델이 유일하다(Lee *et al.*, 2019). 이 가운데 내륙 모델은 한반도 북부 내륙 지역 전체에 대한 평균적인 모델이기 때문에, 평남분지와 같이 세부 지역의 속도 구조 변화에 따른 불확실성을 고려하여야 한다. 다음으로, 진앙 결정의 정확도는 인접 관측소 사이의 최대 사잇각을 의미하는 방위각 공백에 의하여 큰 영향을 받는다. 이 연구에서 활용하는 지진관측망은 지리적으로 한반도 남부 지역에 한정되어 있다. 연구 지역인 평남분지 서부에서 발생한 지진에 대하여, 한반도 남부 지역의 지진관측망을 구성하는 지진관측소 분포로부터 방위각의 포괄 범위는 대략 N90° ~ N270° 이내로 제한된다(그림 3). 따라서, 평남분지 서부 지진에 대한 한반도 남부 지역 지진관측망의 방위각 공백은 180° 이상이다. 이러한 상황에서 진앙의 정확도는 심각하게 저하될 수 밖에 없다. 또한, 진앙거리에 따른 지진파 진폭의 감소는 지진파형의 신호대 잡음비를 저하시킨다. 연구지역의 대상 지진들로부터 각 지진관측소까지의 진앙거리는 대부분 100 km 이상이다. 이 경우에 지진 파형의 초동 위상은 대부분 모호한 임계굴절파인 Pn파이다. 이 지진파 위상의 진

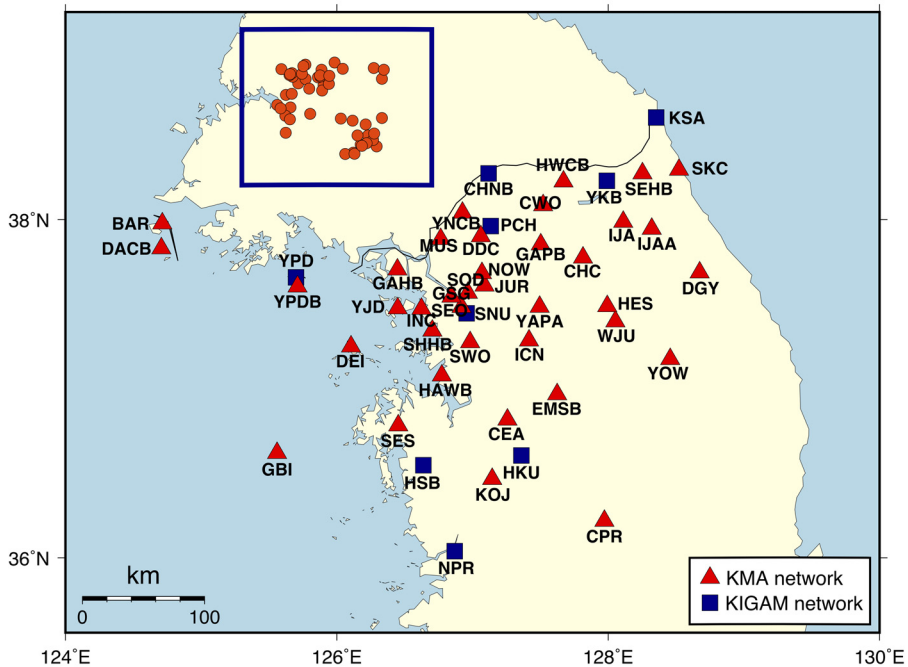


Fig. 3. Seismograph stations used in this study. The blue box indicates the study region with the events (red solid circle) that were analyzed.

Table 2. The optimum 1-D velocity model derived by iteratively inverting the hypocentral parameters of earthquakes in the Pyeongnam Basin using the VELELLIPSE program.

| Top of layer (km) | P-wave velocity (km/s) | S-wave velocity (km/s) |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 5.72 | 3.20 |
| 6 | 6.02 | 3.37 |
| 18 | 6.32 | 3.53 |
| 33 | 7.95 | 4.44 |

폭은 이후에 도착하는 다른 지진파 위상에 비하여 상대적으로 작아서 낮은 신호대 잡음비를 보이기 쉽고, 따라서 초동 도착 시간을 측정하기가 어려워져 오차가 커질 수 있다.

한반도 북부 지역의 미소지진 활동을 남부 지역의 지진관측망을 통하여 관측하고 지진원 요소를 결정하고자 할 때, 이러한 열악한 조건들이 결정 결과의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 평남분지 서부지역에서 발생한 지진에 대하여, 진원요소 결정에 널리 사용되는 HYPOELLIPSE 프로그램(Lahr, 1999)을 기반으로 각 지진관측소에서 기록한 지진파 위상의 주시 오차가 최소화되는 지점을 결정할 때까지 반복 계산하는 알고리즘을 적용한 VELELLIPSE 프로그램(Kim *et al.*, 2014)을 사용하여 지진의 진앙과 깊이 및 진원시를 결정하였다. 기존 HYPOELLIPSE는 주어진 1차원 속도 모델에 대하여 역산을 하기 때문에, 결정된 지진원 요소는 사용한 속도 모델의 정확성에 크게 영향을 받는다. 이에 비하여, VELELLIPSE는 지진원 요소 결정 반복 역산 과정에서 주시 오차가 감소하는 방향으로 1차원 속도 모델을 수정한다. 반복 역산은 주시 오차가 더 이상 감소되지 않는 단계에서 종료된다. 직전 단계에서 수정된 속도 모델은 사용된 모든 관측소의 지진파 위상 주시 오차를 최소화한 모델이기 때문에, 최종 단계에서 산출된 결과들을 최적 1차원 속도 모델과 최종 지진원 요소로 결정한다. 이 방법은 한반도 북부 지역과 같이 관측망 포괄 범위가 편향되어 있거나 속도 구조가 불확실하고 지진파 위상 도착시간에 오차가 큰 환경에서 특히 유용하게 사용될 수 있음이 다양한 시험 결과로부터 밝혀졌다(Kim *et al.*, 2014).

3.3 단층면해와 응력 역산

단층면해는 지진 발생 지점에서 단층의 움직임을 평사투영망에 투영하여 기하학적인 형태를 구현한 것

으로, 지진관측소에서 기록한 지진파 위상의 극성과 진폭 및 파형으로부터 단층의 움직임을 역산한 결과이다. 지진의 단층면해를 이용하여 단층운동 특성과 지진 발생 메커니즘 및 응력장에 대한 추정이 가능하다. 지진 파형으로부터 실체파(P, SH, SV파) 초동의 극성과 진폭비를 이용하여 단층 운동의 주향과 경사 및 미끄럼각에 대한 격자탐색을 수행하는 FOCMEC(Snoke, 2003) 프로그램을 이용하여 단층면해를 결정하였다. 이 방법에는 단층 운동이 시작되는 진원의 위치와 어떤 지진관측소를 향한 최초 방출 지진 에너지의 전파 경로를 따른 진원에서의 출발각에 대한 정보가 필요하다. VELELLIPSE를 이용하여 결정된 진원과 이 결과에 상응하는 최적 1차원 속도 모델을 이용하여 각 지진으로부터 지진 파형을 이용하는 모든 지진관측소에 이르는 파선의 출발각을 결정할 수 있다.

한편, 이 연구에서 사용되는 실체파 초동은 대부분 Pn 위상이다. 임계굴절파인 Pn 위상은 직접파인 Pg 위상에 비하여 진원 깊이와 속도 모델에 덜 민감하다. 이러한 경우에, 진원 깊이와 속도 모델의 차이는 출발각에 크게 영향을 미치지 않는다. 그러므로 이 연구 결과로부터 단층면해에 포함되어 있는 불확실성에서 진원 깊이와 속도 모델보다는 진앙의 후방위각 오차가 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다. 다시, 진앙은 깊이에 따른 지각 속도 변화보다는 지진파 위상의 파선 변수(ray parameter; 또는 수평역속도, horizontal slowness)에 더 민감하기 때문에, 지진원 요소 결정시 속도 모델의 중요성보다 정확한 지진파 위상 도착 시간의 측정이 강조되어야 한다.

실체파 초동 극성을 이용하여 단층면해를 구할 때, 진원을 중심으로 관측소가 다양한 방위각으로 고르게 분포되어 있는 경우에 보다 정확한 단층면해 분석 결과를 얻을 수 있다. 어느 지진관측망에 대하여 지진 규모가 클수록 원거리에서도 실체파 초동이 명

확히 구분되는 지진 파형들이 많지만, 지진 규모가 작아질수록 이용할 수 있는 지진 파형의 수가 상대적으로 작아지며 관측소 분포가 고르지 못하게 될 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하는 대안으로 실체파 초동 극성과 더불어 실체파 위상들 사이의 진폭비(예를 들어, SH/P 진폭비 등)을 추가하여 단층면해를 결정할 수도 있다.

평남분지 서부 지역에서 발생하는 지진의 단층면해를 이용하여 지진활동과 연관된 단층 운동의 유형을 분류하는 것은 이 지역의 지진 발생 기작을 이해하기 위하여 중요하다. 단층 운동의 유형은 Frohlich (1992)가 제안한 방법을 사용하였다. 이 방법은 삼각 다이어그램을 통하여 단층의 유형을 나타낸다. 각 지진의 단층면해로부터 주단층면과 보조단층면 구분의 모호성에 반하여 항상 일의적인 결정이 가능한 P축, T축, 그리고 B축의 경사각을 이용하여 단층면해를 주향이동단층, 정단층, 역단층으로 분류할 수 있다. 단층면해의 진원구를 4등분하는 두 절단면이 교차하는 선분 방향의 B축 경사각이 60°를 초과하면 주향이동단층, P축의 경사각이 60°를 초과하면 정단층, T축의 경사각이 50°를 초과하면 역단층으로 분류한다. 그 밖의 범주에 해당하는 단층면해는 주향이동단층과 정단층 및 역단층 운동 가운데 2개 또는

3개의 성분이 결합되어 있는 단층 운동 유형으로 분류한다.

단층면해 정보를 이용한 응력 역산 프로그램인 MSATSI (Hardebeck and Michael, 2006; Lund and Townend, 2007; Martínez-Garzón *et al.*, 2014)를 이용하여 평남분지 서부 지역의 지진활동과 관계되는 현생 응력장을 파악하고, 그 결과를 한반도 광역 응력장 방향과 비교하였다. 또한 단층면해의 P축 방향에 대한 분포 분석을 통하여, 이 지역에서 지진 발생 깊이에서의 지하 단층의 우세한 방향과 지표 지질을 통해 파악할 수 있는 선구조 방향성을 대비하였다.

4. 결과

4.1 진원과 속도 모델

기상청 발표 지진 목록을 기초로, 이 연구를 통해 결정된 지진원 정보를 표 1에 정리하였다. 이 목록에서 지진 규모는 기상청 발표 값을 그대로 활용하였으며, 그 범위는 최소 M_L 2.1이며, 최대 M_L 3.4이다. 지진원 요소는 모두 육안으로 초동 도착시간 측정과 단층면해 분석을 위한 극성 판별이 비교적 명확한 지진 파형들을 대상으로 결정되었다(그림 4).

지진의 단층면해 분석을 위하여 초동의 극성과 더

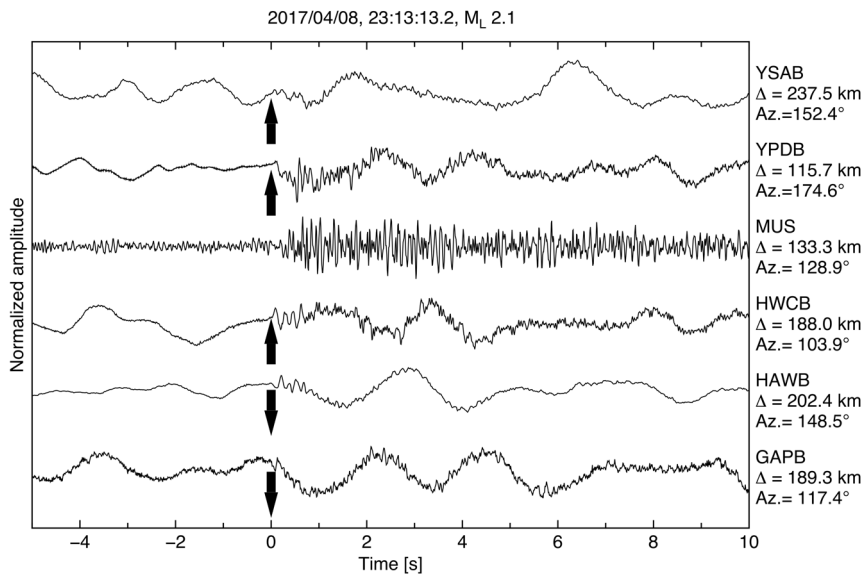


Fig. 4. Example of seismograms for the smallest event (M_L 2.1) analyzed in this study (No. 16 in Table 1). The vertical component of each station is shown with code, epicentral distance (Δ), and azimuth. The seismograms are aligned with the P-wave arrival times at each station which are marked with the arrow indicating the first-motion polarity.

불어 출발각에 대한 정보가 필요하다. 출발각은 진원 깊이와 주어진 속도 모델로부터 결정할 수 있다. 연구 지역에 대하여 각 지진의 진원 결정을 위한 VELELLIPSE 알고리즘의 반복 역산 최종 단계에서 분석에 사용한 모든 지진관측소의 주시 오차를 최소가 되도록 하는 최적 1차원 속도 모델 48개의 각 층에 대한 평균을 구하여 최종적인 하나의 최적 모델을 결정하였다. 현재까지 한반도 북부 지역에 대하여 알려진 유일한 1차원 속도 모델인 Lee *et al.* (2019)의 내륙 모델을 이 연구에서 얻은 최적 모델과 비교하였다(그림 5). P파와 S파 모두 두 모델에서 전반적으로 유사한 값을 보여준다. 약 30 km 이상에서 최적 모델의 상부 층과 속도가 상대적으로 뚜렷하게 대비되는 경계면을 모호면으로 상정하였고, 이 경계면 깊이는 Lee *et al.* (2019)의 내륙 모델의 경우보다 더 깊고 맨틀에 해당하는 반무한 층의 속도도 더 빠른 것이 특징이다. 한편 이 연구에서 초동 극성을 판별하는데 사용된 지진파의 대부분이 모호면 임계굴절파인 Pn파 위상이므로, 두 모델 사이의 출발각에는 큰 차이가 없을 것으로 기대할 수 있다.

4.2 단층면해

결정된 지진원 요소를 토대로 지진 파형의 초동 극성 판별 결과와 최적 1차원 속도 모델을 사용하여 각 지진의 단층면해를 분석하였다. 한반도 남부 지역에 위치한 지진관측망의 지진 파형만을 사용하여

분석하였기 때문에 진앙을 중심으로 고른 지진관측소 방위각 분포를 기대하기 어렵다. 따라서 지진관측소의 방위각 범위를 최대한으로 하는 지진관측소 자료를 사용하여 가능한 최적의 단층면해를 분석하고자 하였다. 분석에는 최소 5개에서 최대 52개의 지진관측소 자료가 사용되었으며, 대부분 10 ~ 20개이다. 하나의 지진에 대하여 분석한 복수의 단층면해를 얻는 경우, 주향에 대한 중간값을 이용하여 지진을 대표하는 단층면해로 결정하였다(그림 6; 표 1).

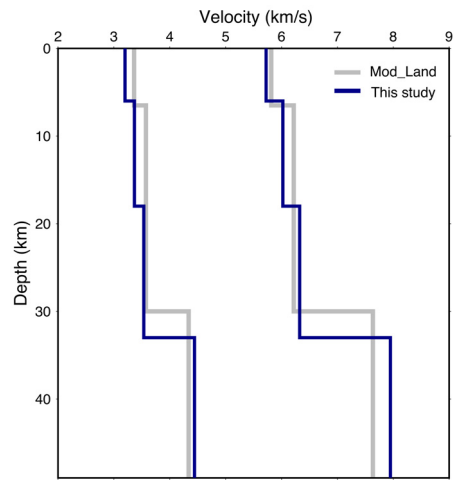


Fig. 5. Comparison of the optimum 1-D velocity model in this study (blue line) with the 1-D velocity model of the inland north Korean Peninsula from Lee *et al.* (2019) (gray line).

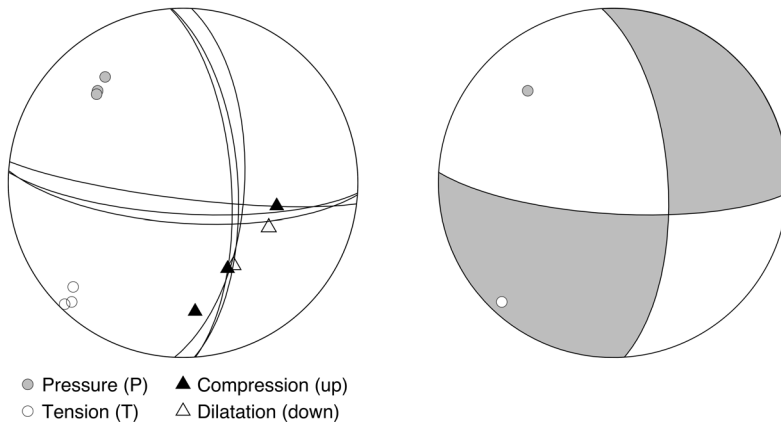


Fig. 6. Example of the focal-mechanism determination for the smallest event (M_L 2.1) analyzed in this study (No. 16 in Table 1). (Left) Multiple focal mechanism solutions from the P-wave first-motion polarities in the vertical component. (Right) The representative solution for the event which was selected as the one with the median strike from the multiple solutions in the left.

기상청 목록을 토대로 과거 지진활동과 이 연구에서 결정한 48개의 단층면해를 도시하였다(그림 7). 주향이동단층과 역단층 및 정단층 운동 성분이 복합적인 다양한 단층면해 분포를 확인할 수 있다. 한반도의 전반적인 양상(Soh *et al.*, 2018)에 비하여 이 지

역에서 정단층 운동 성분을 포함한 지진이 두드러지게 나타난다는 것이 하나의 특징이다. 보다 구체적으로 Frohlich (1992)의 삼각 다이어그램을 통해 단층의 유형을 분류하여 연구 지역에서 우세한 단층 운동 유형을 파악하고자 하였다(그림 8). 삼각 다이

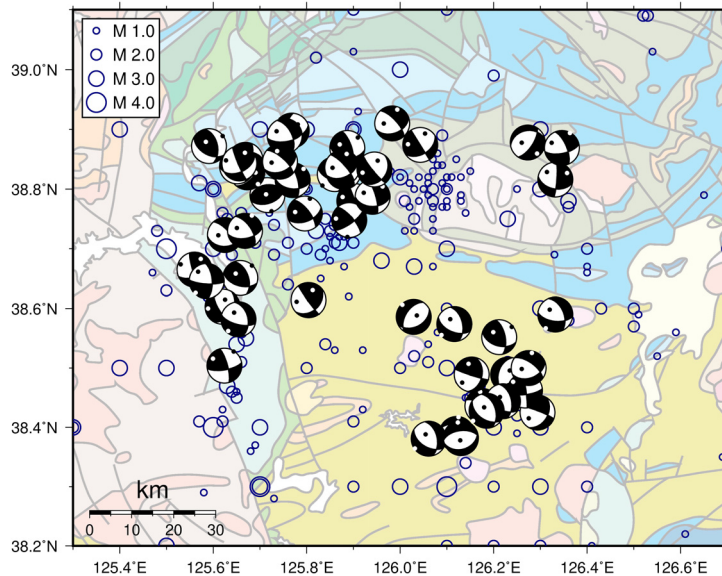


Fig. 7. Focal mechanism solutions analyzed in this study. The instrumental seismicity (open circle) is shown on the geological map and is explained in Fig. 2.

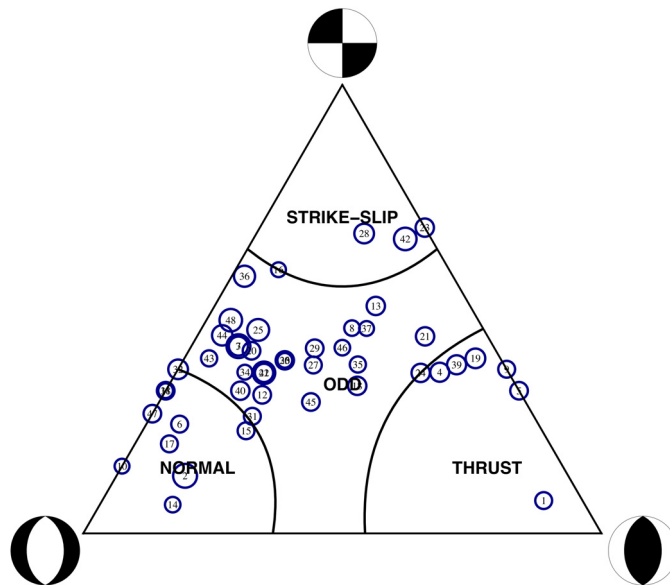


Fig. 8. Classification of faulting mechanisms using the triangular diagram. The encircled numbers correspond to the event numbers in Table 1.

어그램에서 세 꼭짓점은 각각 주향이동단층과 정단층 및 역단층을 나타낸다. 이 범주에 속하지 않는 단층면해는 2개 혹은 3개의 단층 운동 성분이 결합된 유형이다. 총 48개 지진의 단층면해 가운데, 전반적으로 정단층 운동 성분이 우세하게 포함된 단층면해가 주로 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 응력장

제한된 영역에서 충분한 P축과 T축 방향에 대한 자료를 사용할 수 있을 때, 응력 역산을 통해 3개의 주응력 방향과 이들 사이의 상대적인 크기(응력비, $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$)를 추정하여 더욱 신뢰할 만한 응력 상태를 파악할 수 있다(Angelier, 1984; Gephart and Forsyth, 1984). 연구 지역의 응력 상태를 평가하기 위하여 MSATSI 프로그램을 이용한 48개 지진의 단층면해로부터 P축과 T축을 역산하여 연구 지역의 응력장을 계산하였다. 그림 9은 표 1에 제시한 단층면해의 P축 및 T축 정보를 이용한 응력 역산 결과이며, 95%의 신뢰한계와 최적의 주응력 축 모델을 나타낸다. 주응력축인 σ_1 , σ_2 , 그리고 σ_3 의 선주향과 선경사는 각각 (171°, 76°), (329°, 14°), (61°, 5°)이다. 최대주응력이 매우 고각을 나타내고 있기 때문에($\sigma_1 \sim \sigma_1$), 전반적인 단층면해 분포에서 볼 수 있는 것처럼 정단층 운동이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 그러나 국지적인 주향이동 단층 운동을 수용할 수 있도록 최대주응력 σ_1 이 저각으로 바뀌면서 최소주응력 σ_3 에 관하여 회전하는 상태를

보여준다(그림 9). 이러한 양상은 수평적으로 최소주응력 σ_3 방향에서 수직 확장 균열이 발달하여 주향이동단층과 정단층 운동 성분의 결합으로 나타나는 전달인장(transtension) 응력 체제의 특징을 설명한다. 최소주응력 σ_3 의 동북동 방향 선주향은 한반도 광역 응력장 방향과 유사하다. 그러므로 그림 7의 단층면해 분포로부터 연구 지역에서 발생하는 지진활동은 북서-남동 방향의 주향과 상대적으로 고각의 경사를 갖는 단층면과 주로 관계된다. 한편, 최적 응력비 R 은 0.61을 나타내는데, 이 값은 근소하게 전달압축(trans-pressure) 응력 체제와 관련된 응력비의 범위(0.5 < R < 1)에 포함된다. 그러나 전반적으로 응력비가 전체 범위(0 < R < 1)에 걸쳐서 분포하고 있고, 부분적으로 전달인장(transtension) 응력 체제에 해당하는 응력비의 범위(0 < R < 0.5)를 보이는 등, 이 지역에서의 주응력 방향은 매우 교란되어 있는 상태라고 볼 수 있다.

5. 토의 및 결론

평남분지에서는 북서 방향으로 급한 경사를 가지는 예성강 단층과 동부의 북북동 주향의 단층이 우세하나, 대보조산운동과 재령강조산운동의 영향으로 북동 방향과 북서 방향의 단층들이 분지 내 광범위하게 발달하고 있다(The Geological Society of Korea, 1999). 직접적인 조사의 어려움으로 인하여, 이 연구에서 다룬 소규모 지진(M_L 2.1 ~ 3.4)들이 이 지역에

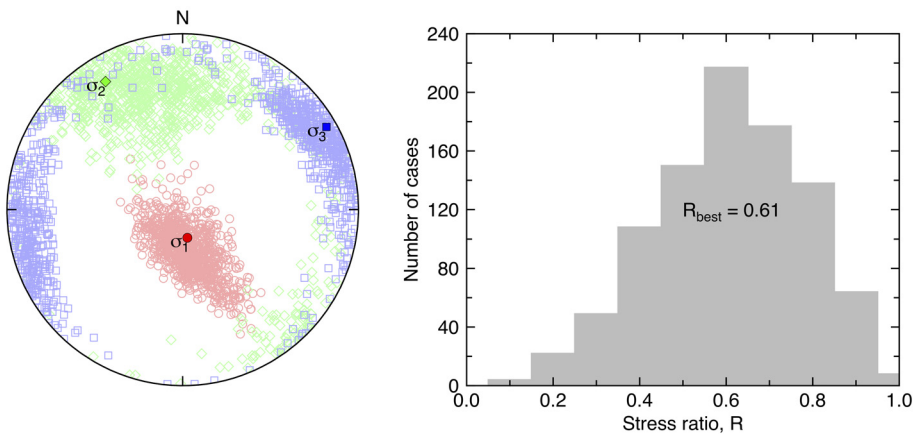


Fig. 9. Results of stress inversion using the pressure and tensional axes from the focal mechanisms: Principal stress model (left) and histogram of stress ratio (right).

발달하고 있는 특정 단층과 관련이 있음을 판단하기는 어렵다. 그러나 과거의 지진활동을 바탕으로, 최근 발생한 지진의 지진원 요소와 단층면해 및 이들 결과를 이용한 응력장 역산에 의하여 이 지역 하부의 단층 운동의 특성과 연관된 응력의 방향과 상태에 관한 지진학적 해석을 시도하였다.

2009년 1월부터 2019년 6월까지 평남분지 서부 지역에서 발생한 지진 가운데 규모(M_L) 2.0 이상의 48개 내륙 지진을 분석한 결과, 깊이 5 ~ 15 km 범위에서 지진이 주로 발생하였다. 실체파 초동 극성 분석법을 이용하여 단층면해를 역산한 결과, 이 지역에서 주향이동단층과 정단층 및 역단층 운동 성분이 혼재하는 단층 운동 특성을 보였다. 특히, 정단층 운동 성분이 우세한 지진이 다수 포함되어 있는 결과는 평남분지 서부 지역이 한반도 대부분의 지역과 매우 다른 지역적인 응력 상태의 영향을 받고 있음을 추정하게 한다.

응력 역산 결과, 단층면에 최대주응력이 고각으로 북서-남동 방향으로 가해져 있는데, 이 결과는 연구 지역의 지진활동이 우세하게 정단층 운동 성분과 결합되어 있는 좌수향 주향이동단층 운동과 연관된 것으로 해석된다. 세 개 주응력 방향 사이의 상대적인 응력 크기는 평남분지 서부 지역의 응력 상태가 전달 압축과 전달인장 응력 체제가 혼재되어 있는 특징을 보여준다. 한반도에 작용하는 현생 응력은 최대수평주응력(σ_{Hmax})이 동북동-서남서 방향인 주향이동단층 체제가 우세한 상태이다(Soh *et al.*, 2018). 그러므로 평남분지 서부 지역에서 발생하는 지진활동이 한반도에서 우세한 응력장 체제와 부합하지 않는 단층운

동 성분을 갖는다는 것은 한반도에 작용하는 수평응력의 크기가 지역적으로 불균질함을 의미한다. 응력의 불균질성은 지역적인 단층 전단강도의 차이에 기인한다(Chang *et al.*, 2010). 특히, 평남분지 서부 지역에서 정단층 운동 성분을 갖는 지진활동 분포는 이 지역에서 수평응력 상태가 상대적으로 낮을 가능성을 시사한다.

연구 지역인 평남분지의 기반암 깊이에 대한 정보를 파악하기 어려운 한계가 있기 때문에, 퇴적분지 내부에서 발생하는 지진과 기반암을 절단하는 단층과 연관된 지진 사이의 응력장 변화를 구분하여 설명할 수는 없다. 그럼에도 불구하고, 국지적인 응력 교란은 광역 응력장으로부터 역학적으로 분리된 지역에서 더 큰 것으로 가정할 수 있다. 특히 퇴적분지에서는 역학적으로 약한 증발 잔류암이나 빠른 퇴적으로 인한 과압밀 상태의 지층과 관계된 약한 단층이 기반암에 작용하는 광역 응력장을 상부 지층에 제대로 전달하지 못하게 하여, 퇴적층과 기반암 사이가 응력장의 유리 상태에 놓임으로써 더 작은 국지적인 응력 상태가 우세하게 될 수 있다(그림 10; Bell, 1996).

광역 응력장에 대한 국지 응력장의 영향은 광역 응력장의 크기 및 상대적인 방향과 관계되며, 수평응력의 크기가 비슷하거나 광역 응력 방향에 대하여 국지적으로 작은 응력이 고각으로 작용하는 지역에서 국지 응력장의 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Tingay *et al.*, 2005). 평남분지 서부 지역에서 국지적인 고각의 북서-남동 방향 최대주응력과 한반도 광역 최대수평주응력($\sigma_{Hmax} \sim \sigma_1$) 방향의 거의 수직적인 관

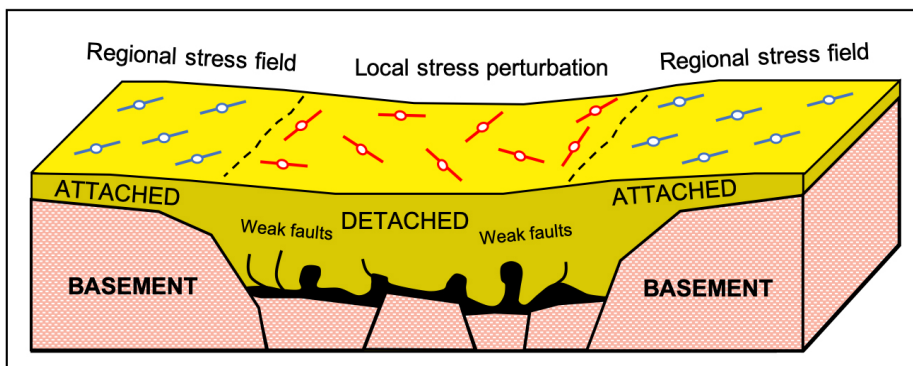


Fig. 10. Schematic diagram to interpret the local stress perturbation in the Pyeongnam Basin between the Nangnim and Gyeonggi massifs along with the relatively homogeneous regional stress field (figure modified from Bell, 1996).

계는 이러한 설명을 잘 뒷받침한다. 또한 평남분지의 고생대 퇴적 환경과 그에 따른 약한 전단강도를 갖는 단층의 분포는 이 지역에서 국지적인 응력의 영향이 한반도의 다른 지역에 비하여 상대적으로 크게 작용하는 주요 국지 응력 원인이다. 따라서 평남분지 서부 지역의 소규모 지진활동과 이들 지진에 대한 단층면해 분석 결과가 보여주는 지역적인 응력 교란 상태는 현생 광역 응력장에 대한 평남분지의 퇴적 환경과 지질 구조의 반응에 의한 결과이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음. 지진 자료 수집과 분석 과정에서 부경대학교 지구물리연구실 이승구, 김셋별, 김민욱, 김령이, 허다빈, 안병석, 설동협, 김민욱, 권기백의 도움이 있었다. 제 1저자의 한국원자력안전기술원 인턴 과정에서 이 연구 결과를 정리할 수 있도록 도움을 준 임창복, 노명현, 심택모, 최호선, 박선정 박사님께 감사를 드린다. 또한 이 논문에 대하여 상세한 지적을 해주신 심사위원께도 감사를 드린다.

REFERENCES

- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835-5848.
- Bell, J.S., 1996, In situ stresses in sedimentary rocks (Part 2): Applications of stress measurements. *Geoscience Canada*, 23, 135-153.
- Chang, C., Lee, J.B. and Kang T.-S., 2010, Interaction between regional stress state and faults; Complementary analysis of borehole in situ stress and earthquake focal mechanism in southeastern Korea. *Tectonophysics*, 485, 164-177.
- Cipar, J.J., 1996, Earthquake focal mechanisms in north-eastern China and Korea determined by the grid search algorithm. *Environmental Research Papers*, No. 1197, Phillips Laboratory.
- Frohlich, C., 1992, Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75, 193-198.
- Gephart, J.W. and Forsyth, D.W., 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11), 9305-9320.
- Hardebeck, J.L. and Michael, A.J., 2006, Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B11), B11310, doi:10.1029/2005JB004144.
- Hong, T.-K. and Choi, H., 2012, Seismological constraints on the collision belt between the North and South China blocks in the Yellow Sea. *Tectonophysics*, 570-571, 102-113.
- International Seismological Centre, 2018, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk> (last access: July 2019).
- Jun, M.-S., 1991, Body wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korea Peninsula and Yellow Sea. *Tectonophysics*, 192, 345-357.
- Jun, M.-S. and Jeon, J.-S., 2010, Focal mechanism in and around the Korea Peninsula. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 13, 198-202 (in Korean with English abstract).
- Jun, M.-S. and Kulhánek, O., 1991, Source parameters of earthquakes in and around the Korean Peninsula deduced from spectral analysis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 65, 255-266.
- Kang, T.-S. and Jun, M.-S., 2011, Determination of source parameters for the 19 March 1952 Pyeongyang earthquake. *Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstract)*, Jeju, October 26-29, 56 p (in Korean).
- Kim, S.-K., Jun, M.-S. and Jeon, J.-S., 2006, Recent research for the seismic activities and crustal velocity structure. *Economic and Environmental Geology*, 39, 369-384 (in Korean with English abstract).
- Kim, W., Hong, T.-K. and Kang, T.-S., 2014, Hypocentral parameter inversion for regions with poorly known velocity structures. *Tectonophysics*, 627, 182-192.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2001, *Tectonic Map of Korea (1:1,000,000)*.
- Korea Meteorological Administration, 2012, *Historical Earthquake Records in Korea (2 ~ 1904)*. Yale Press, Seoul, 279 p (in Korean).
- Korea Meteorological Administration, 2019, *National Earthquake Comprehensive Information System (NECIS)*. <http://necis.kma.go.kr> (last access: July 2019).
- Lahr, J.C., 1999, revised 2012, HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.
- Lee, D.-J., Choi, Y.-M., Lee, D.-C., Lee, J.-G., Kwon, Y.-K., Lin, C. and Choh, S.-J., 2013a, Upper Ordovician and

- Silurian deposits in the Pyeongnam Basin: 1. Songrim Conglomerate and its paleogeographic implication. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 5-15 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.-J., Choi, Y.-M., Lee, D.-C., Lee, J.-G., Kwon, Y.-K., Lin, C. and Choh, S.-J., 2013b, Upper Ordovician and Silurian deposits in the Pyeongnam Basin: 2. Sangsori and Koksan series. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 181-195 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.J., Kyung, J.B. and Chi, H.C., 2014, Fault plane solutions of the recent earthquakes in the northern part of the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35, 354-361.
- Lee, S.-J., Rhie, J., Kim, S., Kang, T.-S. and Cho, C.S., 2019, 1-D velocity model for the North Korean Peninsula from Rayleigh wave dispersion of ambient noise cross-correlations. *Journal of Seismology*, accepted
- Lund, B. and Townend, J., 2007, Calculating horizontal stress orientations with full or partial knowledge of the tectonic stress tensor. *Geophysical Journal International*, 170, 1328-1335.
- Martínez-Garzón, P., Kwiatak, G., Ickrath, M. and Bohnhoff, M., 2014, MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling and a visualization tool. *Seismological Research Letters*, 85, 896-904.
- Park, J.-C., Kim, W., Chung, T.W., Baag, C.-E. and Ree, J.-H., 2007, Focal mechanisms of recent earthquakes in the southern Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 169, 1103-1114.
- Rhie, J. and Kim, S., 2010, Regional moment tensor determination in the southern Korean Peninsula. *Geosciences Journal*, 14, 329-333.
- Snoke, J.A., 2003, FOCMEC: FOCal MECHANISM determinations. In: Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C., and Kisslinger, C. (eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, San Diego, 1629-1630.
- Soh, I., Chang, C., Lee, J., Hong, T.-K. and Park, E.-S., 2018, Tectonic stress orientations and magnitudes, and friction of faults, deduced from earthquake focal mechanism inversions over the Korean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 213, 1360-1373.
- The Geological Society of Korea, 1999, *Geology of Korea*. Sigma Press, Seoul, 802 p (in Korean).
- Tingay, M., Müller, B., Reinecker, J., Heidbach, O., Wenzel, F. and Fleckenstein, P., 2005, Understanding tectonic stress in the oil patch: The World Stress Map Project. *The Leading Edge*, 24, 1276-1282.

Received : August 14, 2019

Revised : August 24, 2019

Accepted : August 26, 2019