

경주 지진 여진의 진원 깊이 연구

정태웅* · 모하메드 자파르

세종대학교 에너지자원공학과

Hypocentral Depth Determination of Gyeongju Earthquake Aftershock Sequence

Tae Woong Chung* and Muhammad Zafar Iqbal

Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University

요 약: 2016년 9월 12일 경주지진(규모 5.8)의 103개 여진의 진원 깊이를 HYPO71과 HYPOINVERSE를 이용한 진원 재결정을 통하여 역산하였다. 한반도에서 지역에 따라 변화하는 속도를 나타내는 7개 모델을 비교한 분석에서 전구간 선형가중치를 둔 HYPO71이 HYPOINVERSE에 비해 진앙 부근 모델이 잔차가 더 적은, 바람직한 결과를 얻었다. 규모가 큰 지진과 S파 진앙거리가 짧은 지진자료는 진원깊이 불확실성이 비교적 작게 관찰되었다.

주요어: 경주지진, 여진, HYPO71, 진원깊이 불확실성

Abstract: Hypocentral depths of 103 aftershocks of the 12 September 2016 Gyeongju earthquake (ML 5.8) were inverted by epicentral relocation, using HYPO71 and HYPOINVERSE. From the comparison of seven models that reflect regional velocity structure in the southern Korean Peninsula, HYPO71 with linear weighting over the whole range showed less residuals than HYPOINVERSE for the model near the epicenter. Less uncertainties of focal depths were observed for the events with large magnitude and short range of the closest S-phase distance.

Keywords: Gyeongju earthquake, aftershocks, HYPO71, HYPOINVERSE, uncertainty of focal depth

서 론

지진원의 깊이는 진원요소 중 하나로 기본적으로 중요한 정보이다. 근래 감쇠구조의 고유치 분리 연구에서 이전에 무시되어 왔던 진원 깊이가 매우 큰 변수임이 밝혀져서(Chung and Asep, 2014) 깊이에 대한 정량적인 측정의 필요성이 제기되고 있다. 그러나 위치(진앙)에 비하여 진원 깊이는 정확하게 측정하는 것이 어려워 현재 기상청(<https://quake.kigam.re.kr/pds/db/db.html>)도 예비적인 분석결과보다 신뢰성 있는 값을 얻기 위한 진원재결정(relocation) 작업이 필요하다.

진원재결정은 관측점 자료가 많은 지진에 대하여 신뢰성 있는 모델을 적용하여 이루어지는데, 한반도에서는 Chung and

Kyung (2013)이 Chang and Baag (2006)의 1차원 모델을 바탕으로 진원재결정을 행한 바 있다. 그런데, 두 축선에 의한 한반도 굴절과 탐사(Fig. 1(a))에 의하면 지역에 따른 큰 속도변화가 관찰된 바 있다(Cho *et al.*, 2006; 2013). 이 속도변화를 참조하여 Asep and Chung (2016, 이하 AC-16)은 한반도에서 7개의 속도구조모델(Fig. 1(b), (c))을 수립하여 각 모델에 대하여 관측점 자료가 다수 확보된 지진의 진원깊이를 정량적으로 역산 평가하였으며, 깊이와 감쇠상수의 연관성을 규명하였다.

한편 2016년 9월 12일 20:32:54 (이하 모두 한국시간)에 중 규모 지진(M_L 5.8) 이 한반도 남동부 경주지역(35.76N, 129.19E; 이하 모두 기상청 발표자료)에 발생하였다(Fig. 1a). 본진에 48 분 앞서(19:44:32) 규모 5.1의 전진이 거의 같은 장소에서 발생하였는데 두 지진의 규모는 1905년 한반도에서 기 관측이 시작된 이래 인정되고 있는 남한 육지지진 중 최대 규모로 평가된다. 또한 규모 4.5의 여진이 본진 발생 이후 1 주일 후(19일 20:33:58)에 발생하였다. 본진이 발생한지 두 달이 지난 최근에도 규모 3.3의 지진이 12월 12일 17:53:17과 14일 17:20:34에 연달아 발생하여 규모 3.0 이상 4.0 미만 21회, 규모 1.5 이상 3.0 미만 530회의 여진이 12월 16일 14:49:00 현재 관측되고 있다.

본 연구는 9월 12일부터 11월 3일까지 100여 차례 이상 경

Received: 30 December 2016; Revised: 20 February 2017;

Accepted: 21 February 2017

*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: 209, Keungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

©2017, 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.

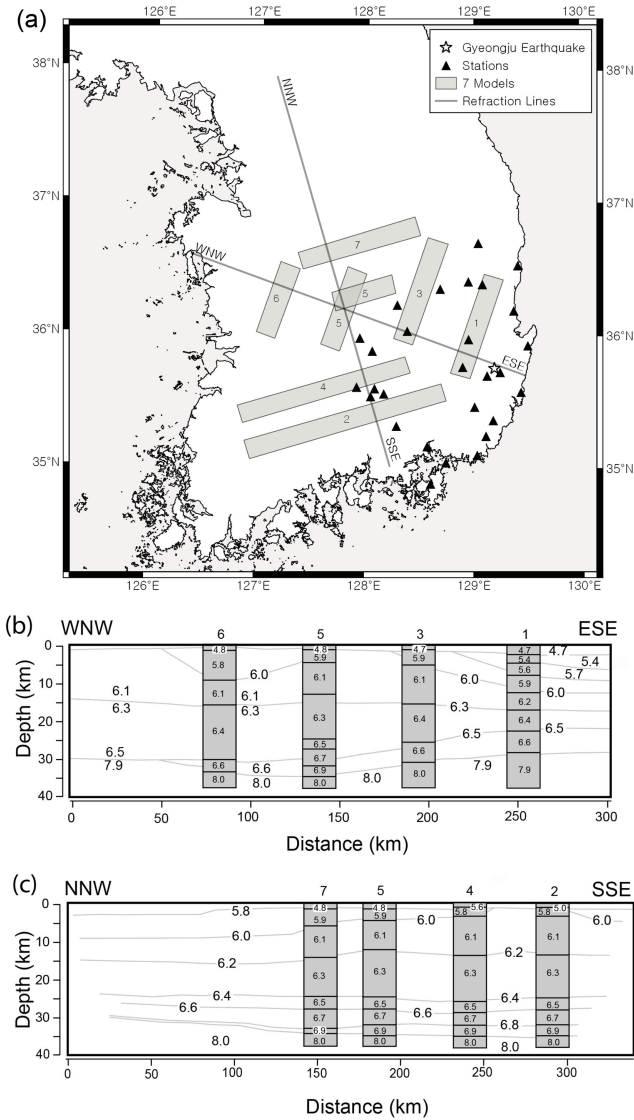


Fig. 1. (a) Map showing Gyeongju earthquake, 2 refraction lines, 7 models, and seismic stations. (b, c) velocity structure obtained from two lines (Fig. 1(a)), showing models from 1 to 7 (diagram after Asep and Chung, 2016).

주에서 발생한 지진에 대하여 AC-16의 방법으로 정량적인 깊이를 구하였다.

해석 방법

AC-16에서 정량적인 깊이는 굴절과 실험 두 축선(Cho *et al.*, 2006; 2013)의 7개 지점에서 속도층 모델(모델 5 지점에서 두 축선이 교차)을 구축하였는데(Fig. 1(b), (c)), 7개 모델은 축선의 수직방향, 즉 2차원적으로 확장된 모델영역(Fig. 1(a))을 형성하여 이 영역 내에서는 동일한 속도구조를 갖는 것으로 가정하였다.

본 연구의 103 지진 자료(Table 1)는 거리 120 km 이내의

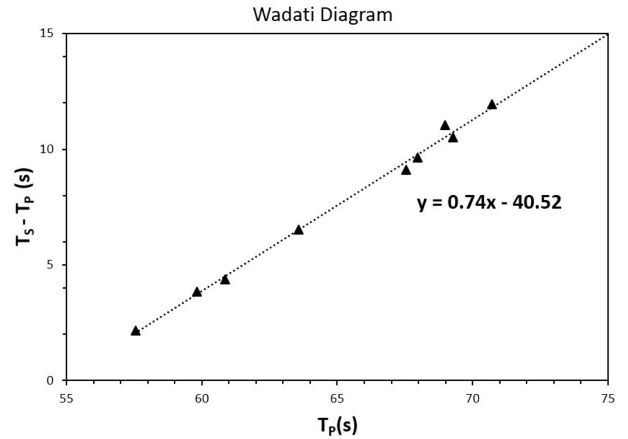


Fig. 2. Example of Wadati diagram used to obtain for S-wave velocity in 7 models.

P파와 S파의 초동을 대상으로 HYPO71 (Lee and Lahr, 1975)을 이용하여 7개의 모델에 대하여 진원 재결정 역산을 시행하였다. HYPO71에 입력되는 S파 속도 모델은 Wadati 다이어그램(Wadati, 1933), 즉 P파 주시시간에 대한 초기미동 지속시간의 분포에 대한 최소자승 직선의 기울기가 $V_p/V_s - 1$ 임을 이용하였다(Fig. 2).

HYPO71은 지금도 널리 쓰이고 있는 반면, 깊이에 대한 신뢰도가 이후에 나온 진원탐사 프로그램에 비하여 떨어진다는 지적이 있다(Liernert *et al.*, 1986). 이러한 문제는 다음과 같이 깊이를 고정하여 진앙과 진원시를 일일이 구하는 역산을 통하여 극복하였다. 즉, 0.5 km에서 30 km까지의 진원 깊이를 0.5 km 간격으로 나누어 60개의 깊이에 대하여 HYPO71을 시행, 각 깊이에 대한 진앙과 관측값과 계산값의 주시 잔차가 최소가 되는 깊이를 조사하였다. 이러한 역산 방법은 최근 인도에서 다수의 관측망 자료를 이용하여 1 km 깊이구간으로 행해진 바 있다(Saikia *et al.*, 2014). 이 연구는 최소 잔차가 되는 하나의 깊이를 결정한 반면, 본 연구는 잔차의 범위를 고려하여 최소 잔차값과의 차이가 0.05초 이내가 되는 좌우 잔차값 범위를 깊이의 신뢰구간으로 정하였다. 0.05초 잔차값 차이는 AC-16에서 진원의 깊이에 대한 신뢰도를 구분하는데 정량적인 오차범위의 차이를 제시하였으며, 이를 바탕으로 신뢰할만한 진원깊이 빈도분포 모델을 얻을 수 있었다. 본 연구(Fig. 3)에서도 최소값 근방이 편평한 E9과 뽕족한 E20이 각각 9.5 km와 16.2 km의 신뢰구간 중앙값 D_M 에 대하여 ± 4.0 km와 ± 0.8 km의 신뢰구간(Uncertainty)값의 차이를 보여 주고 있다.

아울러 본 연구에서는 HYPOINVERSE (Klein, 2002)를 HYPO71과 동일한 방법으로 시행하여 그 결과를 비교하였다. 본 연구에서 HYPOINVERSE와 HYPO71의 차이점은 거리에 따른 가중치 부여인데, HYPO71은 거리 상한치와 하한치를 정하여 하한치보다 가까운 거리는 1, 상한치보다 먼 거리는 0의 가중치를 부여하여 상하한치 거리 사이는 선형적인 가중치

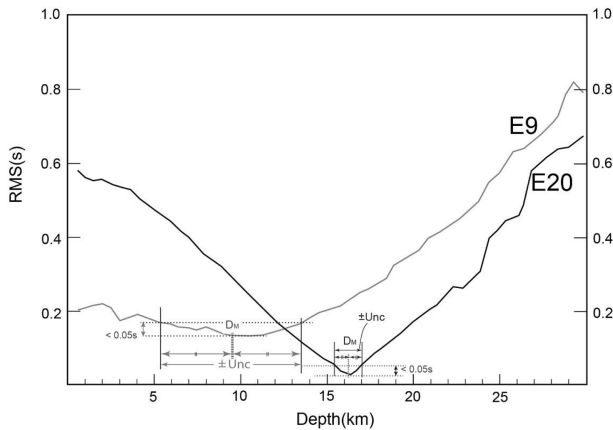


Fig. 3. Example showing focal depth uncertainty (\pm Unc) and median depth (D_M) for earthquakes E9 (gray line) and E20 (black line). The residuals with less than the minimum value plus 0.05 were selected as the uncertainty.

를 부여한다. 반면에 HYPOINVERSE는 두 번째로 가까운 관측거리(코드명 DMIN2)에 의해 결정되는데, DMIN2가 정해진 기준치보다 멀면 DMIN2에서 1, DMIN2의 1.5배에서 0의 가중치를 코사인 taper 함수로 적용하고 기준치가 멀면 기준치에

대해 동일한 적용을 시행한다. 즉, 본 연구에서는 대부분의 자료에서 DMIN2가 80 km 이내이므로 80 km 거리까지 가중치 1, 그리고 80 km의 1.5배 되는 120 km에서 0이 되도록 80 ~ 120 km 사이의 40 km 거리구간에 코사인 taper 함수 가중치를 두었다.

역산결과

먼저 HYPO71에서 상한치 거리 120 km 까지 전구간을 선형처리(정확히는 하한치 거리 5 km 부여)하여 각 7개 모델에 대한 최소잔차 값을 구하여 이 값들의 최소값이 0.02초 이상 크지 않으면 지리적으로 가장 가까운 영역의 모델 1을 최적값으로 정하였다. 모델 1이 0.02초 이상 클 경우 최소값보다 0.02초 이내로 클 경우 모델 2를 최적값으로 하였고, 모델 1, 2가 최적값이 안되는 경우에는 나머지 모델 중 최소값을 갖는 모델을 최적값을 정하였다. 그 결과, 103개 지진 중 최다인 44 지진의 최적값이 모델 1에, 그 다음에 37 지진 최적값이 모델 2에 해당되고, 17 지진 최적값이 모델 3에, 5 지진 최적값이 모델 6에 해당되는 것으로 나타났다(Table 1).

HYPOINVERSE의 경우는 모델 1이 10개, 모델 2가 87개,

Table 1. Analyzed parameters of aftershocks of the Gyeongju earthquake.

Event No	Time		Location		M_L	Best model		D_M (km)		\pm Unc (km)		Close S Dist (km)
	m-d	h:m:s	Lat ($^{\circ}$ N)	Lon ($^{\circ}$ E)		H ₇₁	I _{NV}	H ₇₁	I _{NV}	H ₇₁	I _{NV}	
E1	Sep-12	19:44:32	35.77	129.19	5.1	1	2	17.8	18.8	1.8	2.8	7.8
E2	Sep-12	20:04:19	35.77	129.18	2.5	2	2	18.8	8.0	7.2	7.0	59.1
E3	Sep-12	20:10:50	35.77	129.18	3.1	1	2	12.2	7.3	2.2	5.7	56.9
E4	Sep-12	20:32:54	35.76	129.19	5.8	1	1	14.8	14.8	1.8	0.8	7.8
E5	Sep-12	20:43:31	35.76	129.19	2.4	2	2	13.5	15.8	2.0	2.2	5.3
E6	Sep-12	20:44:02	35.76	129.18	2.5	2	1	20.0	11.0	2.0	2.5	5.3
E7	Sep-12	20:46:28	35.76	129.17	2.4	2	2	12.2	14.5	1.2	3.0	5.0
E8	Sep-12	20:47:41	35.81	129.23	2.2	2	2	10.8	12.5	1.8	2.5	6.4
E9	Sep-12	20:47:55	35.76	129.19	2.9	1	1	9.5	12.0	4.0	3.0	4.5
E10	Sep-12	21:00:35	35.77	129.18	2.5	1	6	17.8	18.2	2.8	2.2	4.9
E11	Sep-12	21:09:19	35.77	129.19	2.2	1	2	16.5	6.5	3.0	4.5	23.5
E12	Sep-12	21:20:48	35.78	129.18	2.8	2	2	15.0	14.8	1.5	1.2	9.1
E13	Sep-12	21:33:57	35.76	129.02	2.3	1	2	17.0	15.5	1.0	1.5	0.2
E14	Sep-12	21:38:35	35.76	129.19	2.6	1	1	17.8	15.5	1.2	0.5	5.7
E15	Sep-12	21:54:34	35.76	129.16	2.2	2	1	13.5	11.2	1.0	0.2	3.4
E16	Sep-12	21:58:30	35.76	129.10	2.0	1	2	14.5	16.2	2.0	2.8	3.0
E17	Sep-12	22:06:22	35.77	129.19	2.1	3	2	15.2	14.0	1.8	1.5	7.5
E18	Sep-12	22:13:14	35.76	129.19	2.4	3	2	15.5	16.5	1.5	3.5	8.5
E19	Sep-12	22:17:35	35.76	129.18	2.5	2	3	15.0	16.8	1.5	1.2	8.0
E20	Sep-12	22:22:50	35.76	129.18	2.2	1	2	16.2	14.8	0.8	1.8	4.8
E21	Sep-12	22:23:27	35.77	129.18	2.4	1	2	17.0	15.0	0.5	1.5	6.3
E22	Sep-12	22:47:16	35.77	129.19	2.1	2	2	19.8	16.0	2.2	2.5	19.9
E23	Sep-12	23:18:27	35.76	129.17	3.0	1	2	18.8	16.5	1.2	2.0	7.9
E24	Sep-12	23:52:30	35.75	129.18	3.1	1	2	16.5	15.2	1.5	2.8	9.8
E25	Sep-13	0:07:43	35.76	129.19	2.2	1	2	17.0	16.0	1.0	2.5	9.3
E26	Sep-13	0:10:05	35.76	129.18	2.0	1	2	15.2	17.8	1.2	2.8	6.9
E27	Sep-13	0:21:37	35.76	129.19	2.5	1	2	18.5	1.2	1.5	0.2	8.3

Table 1. Continued.

Event No	Time		Location		M_L	Best model		D_M (km)		\pm Unc (km)		Close S Dist (km)
	m-d	h:m:s	Lat ($^{\circ}$ N)	Lon ($^{\circ}$ E)		H_{71}	I_{NV}	H_{71}	I_{NV}	H_{71}	I_{NV}	
E28	Sep-13	0:37:10	35.78	129.20	3.3	3	2	15.2	16.2	2.2	2.2	10.8
E29	Sep-13	0:45:50	35.76	129.18	2.2	2	2	14.8	15.2	1.8	3.2	9.4
E30	Sep-13	1:03:39	35.77	129.17	2.0	2	2	14.5	14.8	2.0	2.2	7.1
E31	Sep-13	1:35:51	35.75	129.17	2.3	2	4	14.2	0.5	1.8	0.0	7.2
E32	Sep-13	1:58:39	35.77	129.18	2.5	1	2	15.5	14.2	1.0	3.2	9.2
E33	Sep-13	3:11:21	35.75	129.17	2.1	2	2	12.0	13.8	1.0	2.8	6.5
E34	Sep-13	4:13:31	35.78	129.19	2.1	2	2	15.2	15.5	2.2	2.5	8.2
E35	Sep-13	4:41:59	35.76	129.17	2.1	2	3	14.8	14.5	3.2	0.0	6.9
E36	Sep-13	4:56:59	35.77	129.19	2.0	1	1	16.0	18.5	2.0	1.5	7.6
E37	Sep-13	5:15:54	35.77	129.18	2.0	2	2	11.5	11.8	2.0	1.8	15.7
E38	Sep-13	6:15:29	35.77	129.18	2.3	1	2	17.2	19.0	1.2	1.0	8.3
E39	Sep-13	7:03:27	35.77	129.19	2.1	6	2	17.8	16.8	1.2	2.8	7.1
E40	Sep-13	7:47:42	35.77	129.18	2.4	2	2	11.8	15.2	1.8	14.8	9.7
E41	Sep-13	8:24:47	35.76	129.17	3.3	3	2	1.5	9.8	1.0	8.8	55.1
E42	Sep-13	8:47:57	35.76	129.17	2.3	1	2	15.0	14.8	1.0	1.8	5.8
E43	Sep-13	10:01:27	35.78	129.19	2.3	3	2	15.2	16.8	3.2	1.8	7.9
E44	Sep-13	10:58:45	35.76	129.18	2.0	2	2	13.5	14.8	1.5	2.2	3.8
E45	Sep-13	12:27:05	35.78	129.19	2.2	3	2	15.2	15.5	2.8	2.5	10.6
E46	Sep-13	13:09:09	35.77	129.17	2.3	2	2	11.5	14.5	0.0	1.0	3.3
E47	Sep-13	13:16:04	35.77	129.17	2.4	2	3	12.8	15.0	1.2	2.0	3.8
E48	Sep-13	14:31:42	35.76	129.18	3.0	1	2	13.8	17.0	1.8	3.5	5.5
E49	Sep-13	14:41:41	35.76	129.17	2.1	2	2	12.8	14.2	0.8	2.2	5.0
E50	Sep-13	16:02:48	35.76	129.20	2.5	1	2	16.8	17.8	1.2	2.2	7.2
E51	Sep-13	16:21:33	35.75	129.17	2.0	1	2	17.0	18.5	1.5	4.5	0.2
E52	Sep-13	16:52:11	35.75	129.18	2.5	1	2	17.0	18.2	1.5	2.8	4.2
E53	Sep-13	17:15:37	35.77	129.18	2.0	3	2	13.2	15.0	1.2	3.5	4.0
E54	Sep-13	18:54:03	35.76	129.18	2.1	3	2	13.2	14.0	2.2	2.5	3.7
E55	Sep-13	21:49:09	35.76	129.17	2.1	3	2	14.2	15.5	1.8	2.5	7.6
E56	Sep-13	23:08:28	35.73	129.36	2.3	6	2	12.5	7.2	3.5	5.8	16.2
E57	Sep-14	0:48:41	35.75	129.18	3.0	3	2	15.2	15.0	2.2	2.5	7.0
E58	Sep-14	1:37:02	35.77	129.18	2.1	3	2	14.8	15.2	1.2	2.8	5.5
E59	Sep-14	3:55:17	35.76	129.18	2.4	1	2	16.5	17.0	1.5	2.5	9.0
E60	Sep-14	4:43:47	35.77	129.17	2.1	1	3	16.0	15.8	1.0	0.2	8.6
E61	Sep-14	12:38:10	35.78	129.19	2.2	1	2	13.2	15.2	1.2	1.2	7.2
E62	Sep-14	16:47:16	35.77	129.18	2.1	1	2	13.0	16.5	1.0	3.0	4.2
E63	Sep-14	17:27:14	35.77	129.17	2.3	1	2	16.8	17.2	0.8	2.2	6.8
E64	Sep-14	22:31:31	35.76	129.17	2.4	1	2	14.0	13.0	6.5	8.5	49.7
E65	Sep-15	3:22:28	35.76	129.18	2.8	2	2	11.2	15.8	0.8	3.2	20.4
E66	Sep-15	19:47:25	35.77	129.19	2.2	1	1	18.8	19.5	5.8	1.5	59.6
E67	Sep-15	20:48:25	35.76	129.19	2.6	1	2	10.5	9.2	3.5	8.8	56.4
E68	Sep-16	5:31:09	35.78	129.19	2.2	1	1	10.5	16.8	8.5	2.2	60.6
E69	Sep-16	15:13:18	35.76	129.17	2.3	6	2	6.8	6.2	6.2	5.8	57.4
E70	Sep-16	19:15:46	35.76	129.18	2.0	2	2	14.2	16.2	1.2	2.2	3.8
E71	Sep-16	21:14:24	35.76	129.18	2.2	1	1	19.8	25.5	3.8	1.5	11.0
E72	Sep-18	16:27:54	35.76	129.17	2.4	1	2	14.8	15.0	1.8	2.5	7.6
E73	Sep-19	9:17:59	35.76	129.17	2.1	1	2	18.0	18.0	1.5	4.0	5.8
E74	Sep-19	20:33:58	35.74	129.18	4.5	1	2	16.8	18.0	1.2	3.5	4.3
E75	Sep-20	9:58:17	35.76	129.20	2.4	3	2	15.2	16.2	1.2	2.8	8.9
E76	Sep-20	20:03:27	35.77	129.19	2.1	1	2	17.5	13.2	2.0	1.2	9.5
E77	Sep-21	0:59:11	35.76	129.18	2.1	1	2	17.0	11.0	2.0	1.0	5.2
E78	Sep-21	3:36:51	35.77	129.18	2.9	2	2	12.2	15.0	1.2	2.0	8.5
E79	Sep-21	11:36:41	35.78	129.15	2.2	1	2	18.8	13.0	1.8	1.0	6.8
E80	Sep-21	11:53:54	35.75	129.18	3.5	3	2	2.0	6.2	1.5	5.8	56.1
E81	Sep-22	0:01:30	35.76	129.18	2.3	1	2	16.0	16.0	2.0	3.0	6.9

Table 1. Continued.

Event No	Time		Location		M_L	Best model		D_M (km)		\pm Unc (km)		Close S Dist (km)
	m-d	h:m:s	Lat ($^{\circ}$ N)	Lon ($^{\circ}$ E)		H_{71}	I_{NV}	H_{71}	I_{NV}	H_{71}	I_{NV}	
E82	Sep-22	3:22:32	35.76	129.18	2.1	2	2	12.8	14.0	1.2	2.0	4.2
E83	Sep-23	18:21:42	35.76	129.18	2.1	2	2	14.2	15.2	1.8	2.2	6.6
E84	Sep-24	19:56:21	35.79	129.19	2.5	6	2	15.0	16.0	2.0	3.0	10.9
E85	Sep-28	16:34:30	35.76	129.18	3.1	3	2	16.2	16.0	3.8	2.5	23.2
E86	Sep-28	21:10:34	35.77	129.17	2.7	2	2	18.0	13.5	3.5	3.0	21.0
E87	Sep-30	11:09:47	35.76	129.18	2.1	2	2	16.2	14.8	2.8	4.2	22.0
E88	Sep-30	18:06:36	35.76	129.16	2.3	2	2	19.8	14.5	2.2	3.0	19.8
E89	Sep-30	21:52:49	35.75	129.18	2.2	2	2	19.0	16.8	3.0	2.8	21.5
E90	Oct-01	17:00:34	35.76	129.18	2.3	1	2	21.0	17.8	2.0	5.8	58.5
E91	Oct-02	20:53:07	35.75	129.19	3.0	1	2	12.5	23.5	7.0	2.5	58.1
E92	Oct-04	15:16:44	35.76	129.19	2.6	3	2	16.8	17.8	2.2	3.2	7.2
E93	Oct-07	17:17:58	35.77	129.23	2.2	1	2	18.8	12.5	2.2	4.0	9.5
E94	Oct-10	22:59:10	35.75	129.18	3.3	3	2	2.5	7.5	2.0	7.0	56.9
E95	Oct-12	0:29:36	35.76	129.18	2.9	1	1	26.5	17.8	3.5	7.8	74.2
E96	Oct-14	8:20:58	35.76	129.19	2.3	2	2	13.2	14.5	1.8	3.0	4.3
E97	Oct-20	12:17:07	35.76	129.19	2.4	2	2	16.8	16.0	2.2	2.5	5.9
E98	Oct-21	12:47:49	35.75	129.17	2.6	2	2	12.8	14.2	1.8	2.2	4.1
E99	Oct-23	3:00:04	35.78	129.20	2.7	2	2	13.5	14.2	3.0	4.8	0.2
E100	Oct-25	19:57:37	35.70	129.37	2.4	2	2	17.0	10.2	6.0	9.8	40.6
E101	Nov-03	3:46:06	35.75	129.18	2.1	2	2	14.8	15.2	2.2	2.2	26.6
E102	Nov-03	10:02:26	35.76	129.19	2.3	3	2	16.2	17.5	1.2	3.0	9.0
E103	Nov-03	10:36:23	35.76	129.19	2.3	2	2	5.0	15.8	4.5	1.8	7.6

모델 3이 4개, 모델 4와 6이 각각 1개씩의 최적모델이 도출되었다(Best model, Table 1). 비교를 위해 HYPO71의 하한치에 80 km, 상한치에 120 km를 부여하면 모델 1, 3의 개수는 불변이고 모델 2와 6이 각각 28, 14개로 변동되었다. 이로부터 HYPO71의 전구간 선형가중치 모델이 지리적으로 설정된 지각구조에 잘 부합되는 것으로 판단된다.

깊이의 신뢰구간은 규모가 작은 지진에서 불확실성(uncertainty)이 큰 값이 나타나는데(Fig. 4(a)), 이는 지진 규모가 작을수록 관측점이 적어져서 위치가 불확실해지는 것으로 기인된다. 특히 선형가중치를 적용한 HYPO71 분석에서는 규모가 3.1 이상 큰 지진에서는 진원 깊이 불확실성이 ± 2.0 km/s 이하로 비교적 작았다.

지진 깊이의 불확실성도 대체로 HYPOINVERSE로 구한 경우가 가장 크고 선형가중치 HYPO71이 가장 작은 것으로 나타난다(Fig. 4(a)). 진원 깊이의 불확실성은 S파 최소거리(Close S Dist, Table 1)에 크게 의존하는 것으로 알려졌으며(Gomberg *et al.*, 1990), 이러한 경향이 본 연구에서도 나타났는데 즉, 대체로 거리가 30 km 이내에서는 5 km 이하의 비교적 작은 불확실성을 보이고 있다(Fig. 4(b)). Table 1에 나타난 50 km 이상의 먼 S파 최소거리는 가까운 관측 자료가 누락된 경우이다.

마지막으로 진원깊이 가능구간을 합산하였는데(Fig. 5), 이를 위해 먼저 각 지진 깊이에 대하여 불확실성 범위를 진원깊이 가능대역으로 삼는다. 예를 들면 10 km 깊이 지진의 불확

실 구간이 2 km라고 할 때 진원깊이 가능대역은 8, 9, 10, 11, 12 km의 구간에 걸치게 되며, 불확실구간 값이 클수록 긴 진원깊이 가능대역이 된다. 30 km 깊이 범위의 각 깊이(0.1 km 간격)에 해당되는 진원깊이 가능대역은 각 깊이에서 한번의 지진으로 간주된다. 그리하여 30 km 깊이 범위에 대하여 진원깊이 가능대역을 합산하면 Fig. 5와 같은 깊이에 따른 지진빈도 그래프를 얻게 된다. 최대빈도로 규격화한 Fig. 6은 HYPO71이 선형가중치인 경우 깊이 13 ~ 17 km, 80 ~ 120 km 가중치인 경우 깊이 15 ~ 18 km, HYPOINVERSE는 깊이 14 ~ 17 km에 여진발생이 집중되는 모습이며 세 경우 거의 비슷한 양상의 지진 발생빈도 분포를 나타내고 있다.

지각에 대한 지진 발생빈도 분포는 지진유발층(seismogenic layer)의 규명을 위해 매우 중요한 정보이다. 통상 지진유발층은 수 많은 지진자료를 취합하여 얻어내고 있으나(예; Omuralieva *et al.*, 2012), AC-16에서는 정량적인 해석을 바탕으로 불과 50 여개의 지진으로 11 km 깊이에서 최대빈도를 나타내는 지진유발층(seismogenic layer)의 모습과 흡사한 결과를 얻은 바 있다. 본 연구에서 얻어진 지진빈도 그래프는 최대빈도 깊이가 AC-16에서 얻어진 깊이 11 km 보다 5 km 정도 깊은 값을 보인다.

토의 및 결론

HYPO71은 각 속도층 속도가 일정한 모델만 계산 가능한

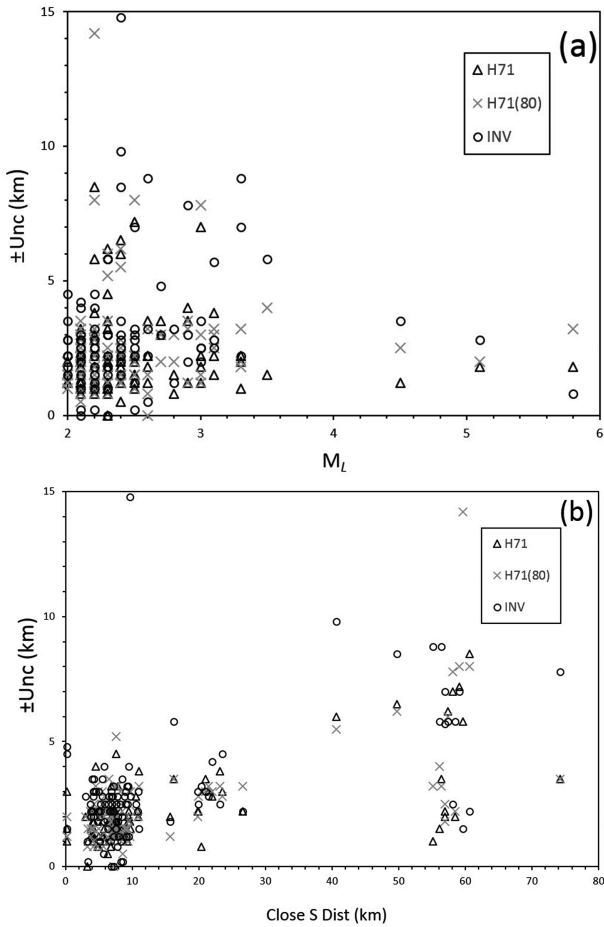


Fig. 4. Comparison diagrams of focal depth uncertainty for HYPO71 with linear weighting over the whole range, HYPO71 weighted from 80 km, and HYPOINVERSE (a) Uncertainty vs. magnitude (b) Uncertainty vs. closest S distance

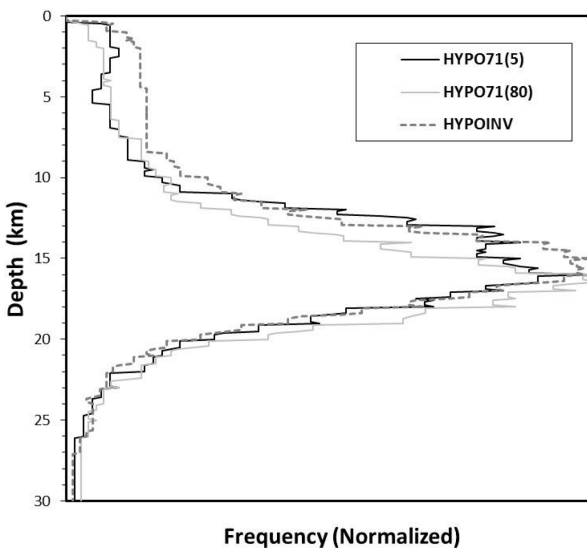


Fig. 5. Normalized distribution of uncertainty of focal depth obtained for HYPO71 with linear weighting over the whole range, HYPO71 weighted from 80 km, and HYPOINVERSE.

점 등 HYPOINVERSE에 비해 불편한 점이 있으나, AC-16 연구와 같이 지역적으로 속도가 변화하는 모델을 사용하는 경우에는 원점부터 거리 선형가중치를 둔 HYPO71이 진앙에 가까운 모델에서 잔차가 적다는 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 규모가 작은 지진은 진원 깊이 불확실성이 큰 값이 나타났으며, 선형가중치를 둔 HYPO71에서 가장 가까운 S파 진앙거리는 30 km 이내에서는 4.5 km 이하의 비교적 작은 진원 깊이 불확실성을 보이고 있다. 정확한 진원의 깊이는 지진의 깊이에 따른 빈도분포와 연관된 지진유발층을 규명하는데 필수적이다. 지진빈도 그래프는 세 방법이 비슷한 발생빈도 분포 양상을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 기상산업진흥원 KMIPA2015-7080의 지원으로 이루어졌음을 밝힙니다.

References

Asep, N. R., and Chung, T. W., 2016, Depth dependent crustal scattering attenuation revealed by using single or few events in South Korea, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **106**, 1499-1508.

Asep, N. R., Chung, T. W., Yoshimoto, K., and Son, B., 2015, Separation of intrinsic and scattering attenuation using single event source in South Korea. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **105**, 858-872.

Chang, S.-J., and Baag, C.-E., 2006, Crustal structure in southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 856-870.

Cho, H.-M., Baag, C.-E., Lee, J. M., Moon, W. M., Jung, H., Kim, K. Y., and Asudeh, I., 2006, Crustal velocity structure across the southern Korean Peninsula from seismic refraction survey. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06307.

Cho, H.-M., Baag, C.-E., Lee, J. M., Moon, W. M., Jung, H., and Kim, K. Y., 2013, P and S-wave velocity model along crustal scale refraction and wide-angle reflection profile in the southern Korean peninsula, *Tectonophysics*, **582**, 84-100.

Chung, M.-K., and Kyung, J. B., 2013, Source characteristics of the recent earthquakes for seven years in the southwestern region of the Korean Peninsula, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **34**, 59-68.

Chung, T. W., and Asep, N. R., 2014, Multiple lapse time window analysis of the Korean Peninsula with considering focal depth, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **16**, 293-299.

Gomberg, J. S., Shedlock, K. M., and Roecker, S. W., 1990, The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **80**, 1605-1628.

Kim, K.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Kim, Y.-H., Park, Y., Kang, S. Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C. H., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.-J., Cho, S., Woo, J.-U., Lee, S.-H., and Kim, J., 2016, The 12 September 2016 Gyeongju

- earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks, *Geosciences Journal*, **20**, 753-757.
- Klein, F. W., 2002, *User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes*, U. S. Geological Survey Open-File Report 02-171, 123 p.
- Lee, W. H. K., and Lahr J. C., 1975, *HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes*, U. S. Geological Survey Open File Report 75-311, 113 p.
- Liemert, B. R., Berg, E., and Frazer, L. N., 1986, HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **76**, 771-783.
- Omuralieva, A. M., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J., and Okada, T., 2012, Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan island and its implication for seismogenesis, *Tectonophysics*, **518-521**, 93-105.
- Saikia, U., Rai, S. S., Subrahmanyam, M., Dutta, S., Bose, S., Borah, K., and Meena, R., Accurate location and focal mechanism of small earthquakes near Idukki Reservoir, Kerala: implication for earthquake genesis, *Current Science*, **107**, 1885-1891.
- Wadati, K., 1933, On the travel time of earthquake waves (part II), *Geophysical Magazine*, **7**, 101-111.