

파형 변환·합성을 이용해서 한반도 주변 해역 지진 분석을 위한 신속 정확한 분석 기술

김소구* · 박상표

한양대학교 지구해양학과

Fast and Accurate Analyzing Technology for Earthquakes in the Seas around the Korean Peninsula Using Waveform Format Conversion and Composition

So Gu Kim* and Sang Pyo Pak

Dept. of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

현재 한국의 지진 관측은 1905년도에 시작된 이후로 계속적인 지진 관측망 확충과 새로운 장비의 도입으로 선진국 못지않은 장비를 보유하고 있지만, 지진의 관측과 분석에 있어서는 그 수준이 미흡한 것이 현실이다. 특히, 동해안 지진원인자 분석에 있어서 시간이 많이 소요되기 때문에 지진 정보나 지진 해일 경보를 발령하는데 어려움이 있다. 이번 연구에서는 일본에서 사용하는 지진 관측망(JMA), 한국 지진 관측망(KMA), 그리고 국제 관측망(IRIS) 지진 관측소의 파형 포맷을 하나의 공통 파형 포맷으로 변환 합성하고 공유 분석 프로그램인 FESNET(극동 지진 관측망 분석 체계)를 구축하여 2004년 5월 29일과 6월 1일에 발생한 울진 지진과, 2005년 3월 20일에 발생한 일본 후쿠오카 지진의 분석에 응용하였다. 분석결과 어느 한쪽 관측망(KMA, JMA)을 사용하는 것보다 이들 모든 관측망을 활용하는 FESNET을 이용할 때 더 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

주요어 : 파형 포맷 변환 합성, 진원인자, 지진 조기 경보, 지진해일 조기 경보, FESNET

The seismological observation of Korea began in 1905, and has been run with continuous earthquake network of observation, expanding to the advanced country, but still has some problems in accuracy and speed for report. There are many problems to announce the early warning system for earthquakes and tsunami in the East Sea because most events in the East Sea occur outside the seismic network. Therefore multi-waveform data conversion and composition from the surrounding countries such as Korea, Japan and Far East Russia are requested in order to improve more accurate determination of the earthquake parameters. We used FESNET(Far East Seismic Network) technology to analyze the May 29 and June 1 Earthquakes, and the March 20, 2005 Fukuoka Earthquake in this research, using the data sets of KMA, Japan(JMA/NIED) and IRIS stations. It was found out that use of FESNET resulted in more better outputs than that of a single network, either KMA or JMA stations.

Key words : waveform conversion composition, hypocenter parameter, earthquake early warning system, tsunami early warning system, FESNET.

서 론

현재 한반도주변의 해역에서는 매년 지진이 자주 일어나고 있지만, 이러한 지진은 대부분 한반도에 설치된

지진 관측망(KMA 및 KIGAM)의 밖에서 일어난다. 지진원이 관측망의 바깥에 위치한 경우 진원인자 값이 오차가 매우 커지게 되는데, 이는 관측망 내에 위치하여 있을 때보다 진원이 관측망 밖에 위치하여 있을 때 특

*Corresponding author: sogukim@hanmail.net

히 깊이에서 오차가 크기 때문이다(Kim & Lee, 1995; Naoshi & Mitsushiro, 1987).

한국 주변해역에서 발생하는 지진의 진원인자를 정확하게 결정하기 위해서는 한국 주변해역(동해, 서해 및 남해)를 둘러싼 형태의 지진 관측망이 필요하지만, 주변 국가에 지진계를 설치하는 것은 비용과 시간적인 면에서 어려움이 있다. 이에, 한국 주변 해역에서 일어난 해양지진의 정확한 진원분석을 위해 한국 주변국가(중국, 일본, 러시아 등)의 지진 관측망을 공동으로 사용하고, 한국 주변 국가의 지진데이터를 사용할 필요가 있다.

이번 연구에서는 KMA, 일본의 JMA와 NIED, IRIS(MDJ, ERM, YSS, INCN 관측소) 관측소 데이터에 FESNET(Far East Seismic Network)을 사용하여, Ulsin 지진(05/29/2004, 06/01/2004)과 Fukuoka 지진(03/20/2005)에 적용하여 분석한 결과와, KMA, JMA 발표 결과를 비교하여, 한국 주변해역에서 일어나는 지진의 진원인자의 관측망 분포(일본과 한국) 차이에 따른 결과값의 차이를 비교하고 양측 관측망을 동시에 이용할 수 있는 FESNET 기술의 중요성을 살펴보는 데 목적이 있다.

데이터의 취득 및 변환

이번 실험에서 2004년 5월 29일과 2004년 6월 1일에 발생한 울진 지진과 2005년 3월 20일에 발생한 Fukuoka 지진의 데이터는 KMA와 IRIS, 그리고 NIED(일본 방재과학기술연구원)에서 제공한 데이터를 사용하였다. 2004년 5월 29일 울진지진의 분석에 사용된 각각의 관측망 데이터는 KMA 관측소 30개소와 일본 방재 과학기술 연구소에서 제공한 일본 관측소 30개소를 사용하였고, 2004년 6월 1일의 울진지진에서는 KMA 관측소 19개소와 일본 방재과학기술연구소에서 제공한 일본 관측소 19개소를 사용하였다. 2005년 3월 20일 일본 Fukuoka 지진의 진원 분석에는 역시 KMA 관측소 9개소와 IRIS 관측소 4개소, 일본 관측소 26개소의 데이터를 사용하였다(Fig. 1).

각 관측망에서 제공하는 데이터 포맷은 KMA에서는 mini-SEED format, IRIS에서는 SAC 혹은 SEED format, NIED에서는 WIN format으로 되어 있기 때문에, 이들 다른 format으로 되어 있는 Waveform Data를 동일한 알고리즘으로 분석하기 사용하기 위해서, FESNET 시스템을 구축하여, 데이터의 변환과 합성의 일련의 과정을 Fig. 2에서와 같은 구조에서 한번에 실행할 수 있도록 하였다.

데이터의 처리

하나의 포맷으로 합성된 데이터의 처리는 AR(Auto-regressive) 기법(Morita, Y. and H., Hamaguchi, 1984)을 이용한 Off-line Data의 Auto-picking으로 각각의 P·S파의 도착시각을 결정하였으며, 이때 STA/LTA (Short Term Average/Long Term Average)의 비는 2.5로 하여 실행하였다.

이때 P파와 S파의 도착 시각을 결정하는 방법으로는 비선형역산방법을 사용한 Maximum-likelihood 추정법(Naoshi & Mitsushiro, 1987)을 사용하였다. 이 방법을 적용한 이유는 다른 기존의 Least Square 방법에 비하여 지진 관측망 밖에 위치한 지진에 대한 오차의 신뢰도가 높기 때문이다(Naoshi & Mitsushiro, 1987). Auto-picking에 의해 결정된 P파와 S파의 도착시각으로 진원 위치를 결정한 후 계산된 이론적인 P파와 S파의 도착시각 차가 가장 큰 데이터를 제거하고, 다시 반복적으로 계산하여 진원을 결정하며, 각각의 위도, 경도, 진원 깊이에 대한 오차거리를 km단위로 표시한다. 진원 계산 시 Picking Data와 함께 Initial Value(초기 위도, 초기 경도, 초기 진원 깊이)와 속도 구조의 데이터를 사용한다. 지각 모델은 Fig. 3에서와 같은 모델을 사용하였으며, 울진 지진의 진원 분석에서는 한국형 모델(Kim and Lee, 1996)을 사용하였으며, 후쿠오카 지진의 진원 분석에서는 일본형 모델(Aoki et al., 1972)을 사용하였다.

지진의 규모 계산에는 진폭 데이터가 있을 경우와 진폭 데이터가 없고 지진 지속시간 데이터만 있을 경우, 그리고, 두 데이터 모두 없을 경우로 구분할 수 있다. 진폭 데이터가 존재하는 경우에는 1971년 Watanabe(1971)가 제안한 규모 공식을 사용한다.

$$0.85M_A - 2.50 = \log(\text{AMP} \times 100.0) + 1.73 \log r \quad (r < 200)$$

$$0.85M_A - 2.50 = \log(\text{AMP} \times 100.0) + 1.73 \log r + 0.0015(r - 200) \quad (r \geq 200)$$

여기서, M_A 는 규모, AMP는 수직성분에서의 최대진폭(m/sec)이며, r은 진앙거리(km)이다.

진폭데이터가 없고 지진 지속시간 데이터만 있는 경우에는 1976년 Tsumura(1967)가 제안한 규모공식을 사용한다.

$$MD = -2.36 + 2.85 \log D \quad (r < 200)$$

$$MD = -2.36 + 2.85 \log D + 0.0014 \times r \quad (r \geq 200)$$

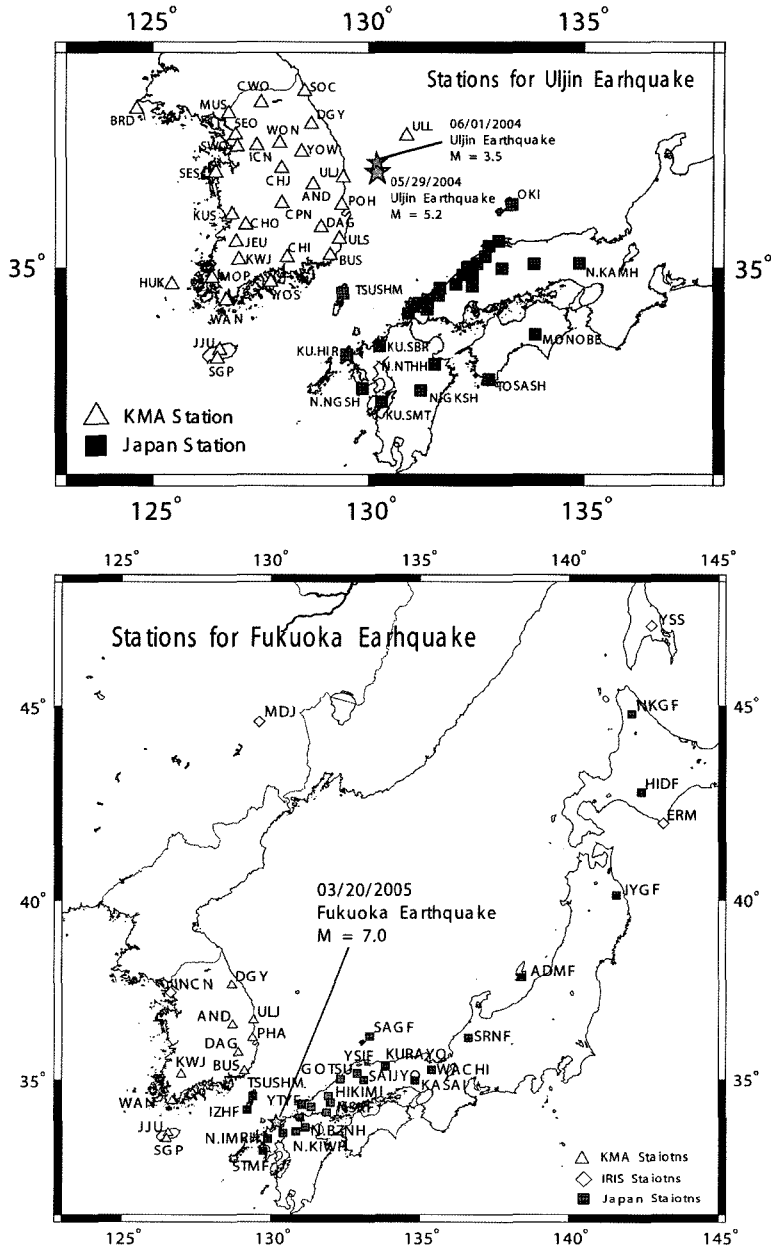


Fig. 1. Used Stations for the Uljin Earthquakes(upper) and the Fukuoka Earthquake(lower).

여기서 M_D 는 지속규모(duration magnitude)이고, D 는 지속시간(sec)이다.

결과 및 논의

KMA 자료, Japan 자료 그리고 KMA와 Japan Data

를 모두 이용한 3가지의 경우에 대해 한국 모델(Kim and Lee, 1996)을 사용하여 울진 지진(06/01/2004와 05/29/2004)의 분석을 행하였다(Table 1). 또한, 일본모델을 사용해서 데이터의 변환·합성 후 처리 분석한 FESNET에 의한 결과와 KMA, JMA 각 기관에서 발표한 결과를 각각 비교하였다(Table 2).

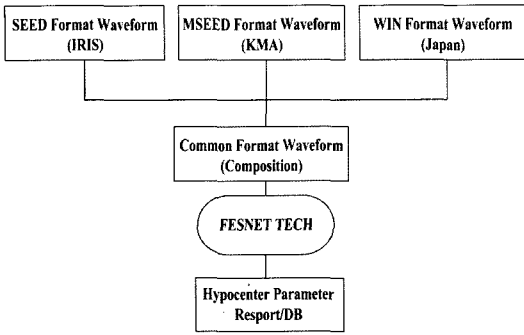


Fig. 2. Program Flowchart.

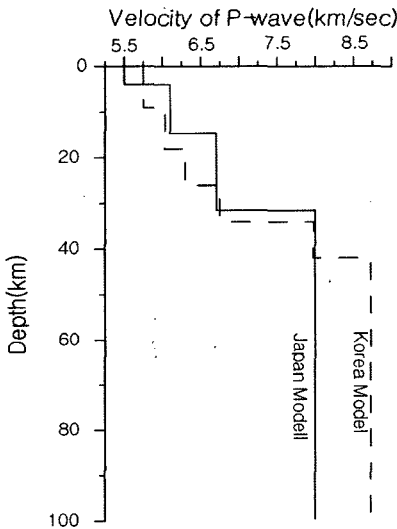


Fig. 3. Crustal Structure of P-wave velocity.

Figs. 4와 5는 한국형 지각모델 (Kim and Lee, 1996)을 사용해서 분석한 울진지진 결과이다. Figs. 6, 7, 그리고 8은 일본형 지각 모델(Aoki *et al.*, 1972)을 사용하여 울진지진과 Fukuoka 지진을 분석한 결과이다. 울진 지진의 경우 Fig. 4b), Fig. 5b), Fig. 6b), Fig. 7b)에서 일본의 관측소 데이터만을 사용하였을 때 실제 진원 위치보다 일본에 가까운 위치에 진원이 위치하는 것처럼 계산되었다. 일본 데이터만 사용하였을 때 진원의 위치가 일본과 가까운 곳에서 일어난 지진인 것 같은 결과가 나오지만, 일본과 KMA 데이터를 함께 사용하여 분석한 결과, 진원의 위치가 울진 근해에 위치하였다. 마찬가지로 Fig. 8a)에서 KMA 관측소 데이터를 사용하여 후쿠오카 지진의 분석을 행하였을 때도 울진 지진의 경우와 반대로 실제 진원위치보다 한국 쪽에 가깝게 진원 위치가 결정되었다.

결론 및 논의

이번 연구에서 한반도 주변 국가의 지진 데이터를 사용한 결과 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있었다. Table 1에서 한국 모델을 사용한 후쿠오카 지진에 대한 분석이 빠진 이유는 한국 모델을 적용하여 후쿠오카 분석을 행하였을 때, 오차값이 커서 계산이 되지 않았다.

또한, Table 2에서 울진 지진과 후쿠오카 지진에 대한 연구 결과와 KMA와 JMA에서 분석한 발표 결과를 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 KMA에서는 진원 깊이를 2005년 6월에 간행된 지진연보에서 발표하였다. 이것은 지진이 발생한지 1년이 지난 뒤에야 진원 깊

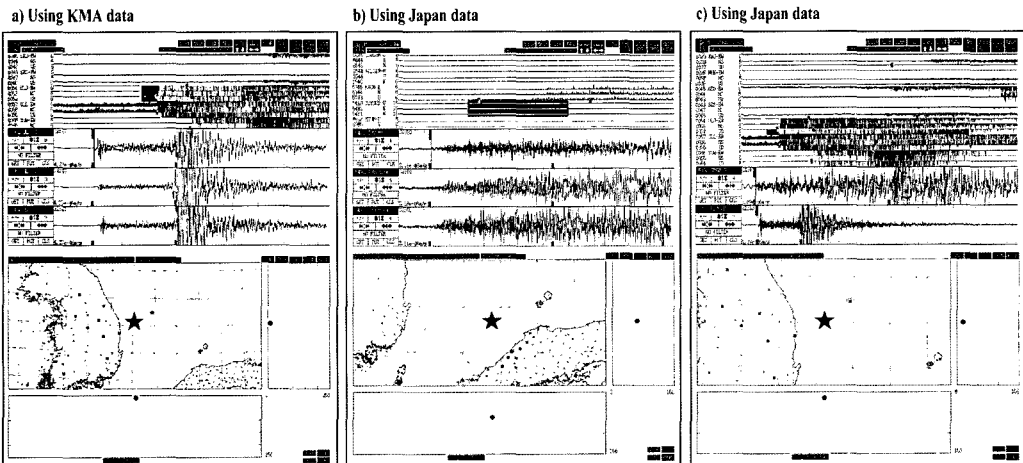


Fig. 4. Result of Ulsjin Earthquake(05/29/2004) by the Korean model(Kim and Lee, 1996).

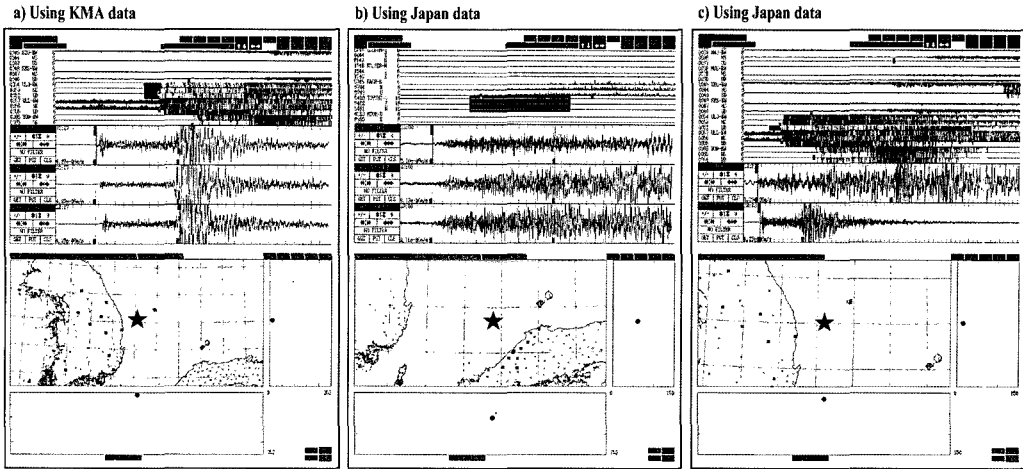


Fig. 5. Result of Uljin Earthquake(06/01/2004) by the Korean model(Kim and Lee, 1996).

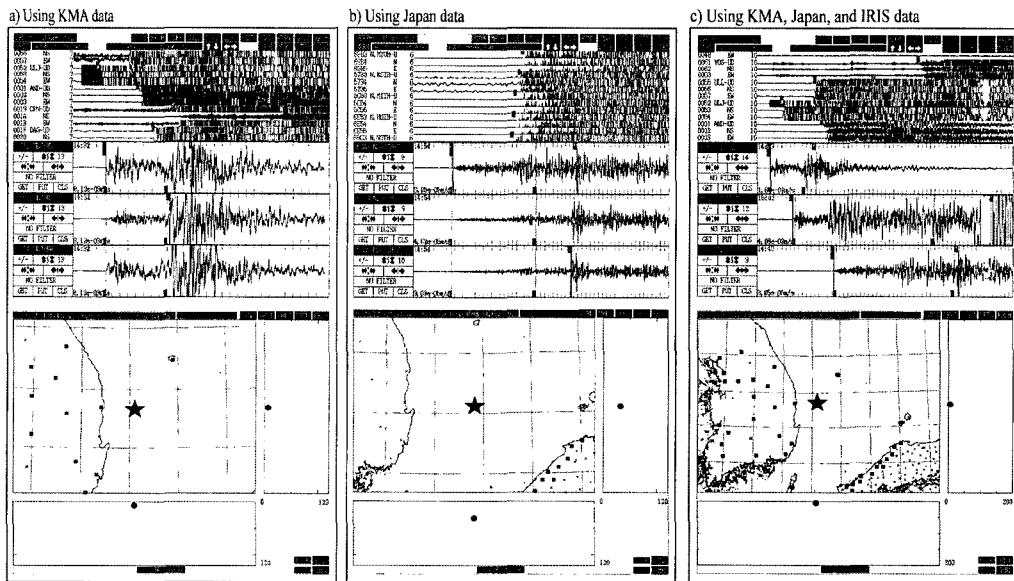


Fig. 6. Result of Uljin Earthquake(05/29/2004) by the Japanese model(Aoki *et al.*,1972).

이에 대한 정보를 공개한 것으로 다른 국의 지진 연구 기관에 비하여 매우 늦은 편이다. 또한, 울진 지진 (05/29/2004)의 경우 이번 연구 결과에서의 진원시가 KMA와 JMA에서 발표한 진원시보다 늦은 것을 알 수 있으며, 진앙위치 비교에서 이번 연구와 JMA 연구 결과를 비교하면 진앙오차가 JMA가 더 작지만, JMA의 진원 깊이는 43 km이며, 이번 연구 결과는 약 6.2 km 정도로 나왔지만 한국모델을 사용하였을 경우에는 10.9 km로,

그리고 울진 여진(06/01/2004) 경우에는 14.8 km로 결정되었다. 이번 연구 결과가 한반도쪽에 가까운 울진지진인 경우에는 한국형 모델을 이용할 때 더 정확하다고 말할 수 있다. 후쿠오카 지진의 경우 진원 깊이가 KMA는 미발표였으며, JMA에서는 9.2 km, FESNET 결정은 11.7 km, 미국의 NEIC에서는 10.0 km로 결정하였다 (Table 2). Fig. 8에서 일본모델에서도 후쿠오카지진의 진앙은 KMA Data만 사용 할 때는 한반도 쪽으로 있

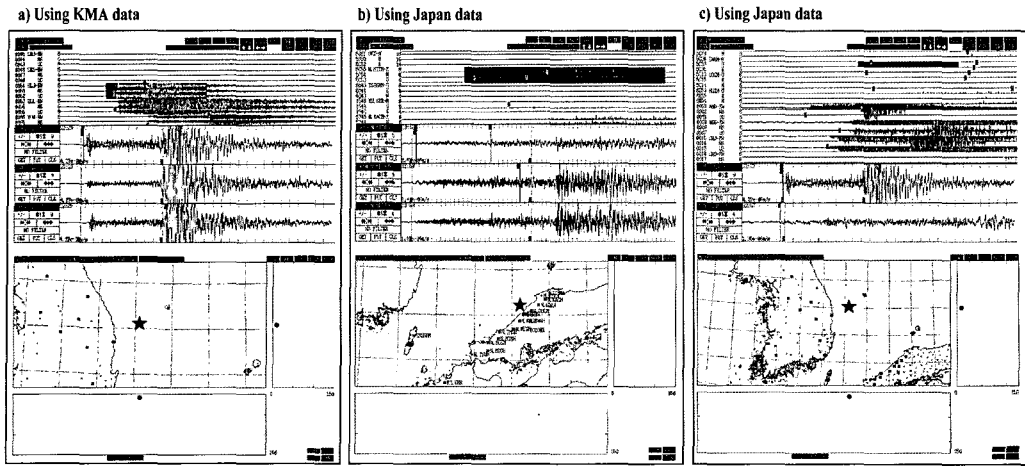


Fig. 7. Result of Uljin Earthquake(06/01/2004) by the Japanese model(Aoki *et al.*,1972).

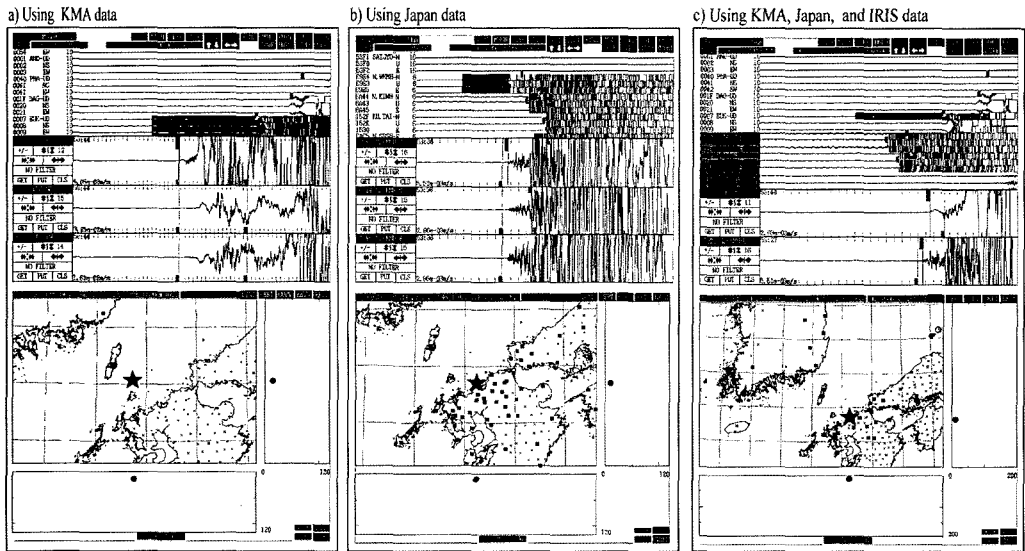


Fig. 8. Result of Fukuoka Earthquake(03/20/2005) by the Japanese model(Aoki *et al.*,1972).

지만, JMA Data만 쓸 때는 일본쪽으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 그리고, FESNET 사용하였을 때 지진규모가 NEIC 규모와 거의 일치함을 볼 수 있다. 이것은 지진 관측망의 분포가 진원의 위치를 결정하는데 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 후쿠오카 지진에서 이번 연구와 JMA에서 발표한 결과는 거의 비슷하며, 이번 연구 결과에서 오차범위가 JMA에서 발표한 오차보다 작은 것을 알 수 있다.

울진 지진과 후쿠오카 지진의 연구 결과 한국 주변

해역에서 일어난 지진의 분석은 어느

하나(혹은 한 국가)의 관측망만을 이용하여 분석하는 것 보다, 주변 국가의 관측망을 공동으로 사용하여 결정하는 것이 더 정확한 진원 인자 결정을 할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 지진 조기경보체계 및 지진해일 조기경보체계를 확립하고, 빠른 시간 내에 신속 정확한 진원인자 분석을 위해서는 일본뿐만 아니라 중국 및 러시아 등 주변 국가의 관측망을 공동으로 사용하도록 개발한 FESNET 기술을 적용 한다면, 더욱 빠른 시간 내에

Table 1. Result of the report of FESNET, KMA and JMA using the Korean model(Kim and Lee, 1996).

a) Uljin Earthquake(05/29/2004)

	Origin Time		Epicenter	Depth	M
KMA data	05/29/2004	19:14:25.461	36.694°N (± 0.921 km) 130.113°E (± 0.812 km)	7.699 km (± 1.201 km)	4.5
JMA data	05/29/2004	19:14:39.793	36.105°N (± 2.552 km) 131.080°E (± 3.399 km)	47.6370 km (± 6.637 km)	4.3
FESNET	05/29/2004	19:14:25.542	36.672°N (± 1.164 km) 130.164°E (± 0.764 km)	10.926 km (± 3.273 km)	5.0

b) Uljin Earthquake(06/01/2004)

	Origin Time		Epicenter	Depth	M
KMA data	06/01/2005	20:22:18.543	37.090°N (± 1.225 km) 130.136°E (± 1.029 km)	10.2710 km (± 1.543 km)	3.1
JMA data	06/01/2005	20:22:44.034	35.705°N (± 3.636 km) 131.776°E (± 3.843 km)	60.890 km (± 62.123 km)	2.4
FESNET	06/01/2005	20:22:18.577	37.009°N (± 0.847 km) 130.202°E (± 0.565 km)	14.835 km (± 1.272 km)	3.2

Table 2. Result of the report of FESNET, KMA and JMA using the Japanese model, a) the result of Uljin Earthquake(05/29/2004), b) Uljin Earthquake(06/01/2004), and c) the Fukuoka Earthquake(03/20/2005).

a) Uljin Earthquake(05/29/2004)

	Origin Time		Epicenter	Depth	M
FESNET	05/29/2004	19:14:25.266	36.671°N (± 0.686 km) 130.142°E (± 0.529 km)	6.150 km (± 0.529 km)	5.3
KMA	05/29/2004	19:14:24.000	36.800°N 130.200°E	12 km (06/2005 Report)	5.2
JMA	05/29/2004	19:14:24.990	36.724°N (± 0.580 km) 130.160°E (± 0.460 km)	43.000 km	5.1

b) Uljin Earthquake(06/01/2004)

FESNET	06/01/2004	20:22:19.106	37.093°N (± 0.873 km) 130.202°E (± 0.054 km)	18.983 km (± 1.393 km)	3.2
KMA	06/01/2004	20:22:45.500	36.600°N 130.000°E	unknown	3.5
JMA	06/01/2004	20:22:18.650	37.018°N (± 0.103 km) 130.288°E (± 0.075 km)	46.000 km	3.6

c) Fukuoka Earthquake(03/20/2005)

FESNET	03/20/2005	10:53:41.100	33.663°N (± 0.089 km) 130.245°E (± 0.054 km)	11.700 km (± 0.100 km)	6.5
KMA	03/20/2005	10:53:47.000	33.900°N 130.200°E	unknown	7.0
JMA	03/20/2005	10:53:40.320	33.739°N (± 0.380 km) 130.176°E (± 0.320 km)	9.200 km (± 3.000 km)	7.0
NEIC	03/20/2005	10:53:41.000	33.807°N 130.131°E	10.000 km	6.5 (Mw)

정확한 진원 인자를 결정할 수 있으므로 한반도 주변에서 발생하는 지진 및 지진 해일을 신속, 정확 하게 대응 할 수 있기 때문에 그 피해를 최소화 할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국기상청(KMA)과 한양대학교, 그리고

일본방재과학기술연구소(NIED)의 도움으로 이루어 졌다.

참 고 문 헌

- Aoki, H., Tada, T., Y., Ooida, T., Mauramatu, I., Shimamura, H., and Furuya, I., 1972, Crustal structure in the profile across central Japan as derived from explosion seismic observations, *J. Phys. Earth.*, 20, pp.197-223.
- Kim, S. G. and Lee, S. K., 1995, Determination of Hypocenter parameters outside the Seismic Array Using a Single Station of Three-component, *J. of Eng. Geol.*, 5(2), pp.59-74.
- Kim, S. G. and Lee, S. K., 1996 Seismic Velocity Structure in the Central Korean Peninsula Using the Artificial Explosions, *Bulletin of Seismological Association of the Far East*, 2(1), pp.4-17.
- Morita., Y. and H. Hamaguchi, 1984, Automatic detection of onset time of seismic waves and its confidence interval using the autoregressive model fitting(in Japanese), *J. Seismo. Soc. Jpn.*, 37, pp.281-293.
- Naoshi H. and Mitsushiro M., 1987, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planetary Int.*, 47, pp.50-61.
- Tsumura, K., 1967, Determination of earthquake magnitude from total duration of oscillation, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 45, pp.7-18.
- Watanabe, H., 1971, Determination of earthquake magnitude at regional distance in and near Japan(in Japanese), *J. Seismol. Soc. Jpn.*, 32, pp.281-296.

2006년 3월 23일 원고접수, 2006년 6월 15일 게재승인

김소구

한양대학교 과학기술대학 지구해양과학과
426-791, 안산시 상록구 사1동 1271번지
Tel: 031-400-5532
Fax: 031-400-5532
e-mail: sogukim@hanmail.net

박상표

한양대학교 과학기술대학 지구해양과학과
426-791, 안산시 상록구 사1동 1271번지
Tel: 031-400-4153
Fax: 031-400-5532
e-mail: psp007@hanmail.net