

후쿠오카 지진('05. 3. 20, M=7.0)의 지진동 감쇠특성 분석

박동희¹⁾, 연관희¹⁾, 장천중¹⁾, 최원학¹⁾, 이대수¹⁾

¹⁾한전 전력연구원 구조연구실, dpark@kepri.re.kr

Ground Motion Evaluation from the Fukuoka Earthquake

Donghee Park¹⁾, Kwanhee Yun¹⁾, Chun-Joong Chang¹⁾
Weon-Hack Choi¹⁾, Dae-Soo Lee¹⁾

¹⁾Structural engineering Lab., Korea Electric Power Research Institute

요약 : 강진이 발생시 국내 지진동 수준 및 감쇠특성을 간접적으로 유추하기 위하여 2005년 3월 20일 발생한 규모 7.0의 후쿠오카 지진의 감쇠특성을 산정하고 그 결과의 적합성 여부를 알아보았다. 일본 방재과학 기술연구소에 운영중인 시추공 지진관측소 KIK-net 기록의 지반운동(PGA, SA)과 기존에 전력연구원에서 개발한 고리원전 부지에 대한 지반운동 감쇠식의 지반운동(PGA, SA)을 비교해 본 결과 잘 부합되었으며, 이로부터 고리원전 감쇠식이 강진에 대한 지진동을 비교적 적합하게 평가함을 확인할 수 있었다. 또한 시추공 KIK-net 자료의 응답스펙트럼과 일본의 원전 설계스펙트럼인 오사키 스펙트럼을 비교한 결과 후쿠오카 지진의 진동 수준이 낮게 평가되었다. 이는 전 세계에서 발생하는 강진 자료를 이용한 경험적인 응답스펙트럼이라고 할지라도 부지특성에 따라 부합되지 않을 수도 있음을 시사하고 있어 부지고유 응답스펙트럼의 개발이 필요함을 재차 확인하였다.

주요어 : 후쿠오카 지진, 지진동감쇠식, 최대지반가속도, 스펙트럼가속도, 응답스펙트럼

Abstract : The ground-motion (GM) attenuation relations available in Korea has required the validation process for large earthquakes since most of them were developed based on small earthquake database. The Fukuoka earthquake (M=7.0) that occurred near the Korean Peninsula provides invaluable data to indirectly evaluate the attenuation characteristics of the strong GM in Korea. The GM levels (PGA, SA) obtained from the KIK-net downhole stations near the epicenter (R<100km) are reasonably predicted by the GM attenuation relation developed by KEPRI in 2003 for the Kori NPP site, the result of which validates the use of KEPRI GM attenuation relation for predicting GM induced by future large earthquakes. Also, the comparison between the Osaki spectra and response spectra of KIK-net downhole data reveals that the amplitude levels of Osaki spectra are higher than the spectra from KIK-net stations which are believed to be installed at the seismic basement.

Keywords : fukuoka earthquake, attenuation equation, PGA(Peak Ground Acceleration), SA(Spectral Acceleration), response spectrum

1. 서론

2005년 3월 20일 10시 53분경에 발생한 후쿠오카 지진은 규모 7.0(Mj, 일본 기상청 규모)의 강진으로 진원지는 후쿠오카 북서쪽 해역이다. 이 지진은 한반도와는 진앙거리 200km에 불과한 지역에서 발생한 지진으로 조밀한 지진관측망을 운영하고 있는 일본은 물론 국내 대부분의 관측소에서 S/N비가 좋게 기록되어 강진자료가 전무한 국내 지진학적 환경에서 강진특성을 추정할 수 있는 간접적인 단서를 제공할 수 있다.

한전 전력연구원에서는 강진의 특성을 유추하기 위하여, 미소지진 분석으로 산정된 지진원특성, 감쇠특성을 근거로 하여 고리 원전부지에 대해 확률론적으로 감쇠식을 도출한 바 있다(과학기술부 보고서, 2003). 그러나 규모 5.2 이상의 계기지진기록이 없는 국내에서는 그 이상의 규모에 대하여서는 기 도출된 지진감쇠식의 적용여부를 확인할 수 없는 실정이다.

이번 연구에서는 강진 시 피해를 유발시킬 수 있는 근거리에 대한 감쇠특성을 유추하기 위하여 일본 내 진앙거리 100km 이내의 시추공 가속도 지진관측 자료를 이용하여 진앙 거리에 따른 최대지반 가속도의 감쇠양상과, 고유진동수별 최대지반 가속도의 감쇠양상을 분석하였으며, 또한 이 결과를 기존에 개발된 전력연구원 고리원전 감쇠식과 비교함으로써 감쇠식의 타당성을 간접적으로 검증해 보았다.

2. 후쿠오카 지진의 일반 특성

일본 기상청 발표에 의하면 후쿠오카 지진은 33.739 °E 130.176 °N, 깊이는 9.2km에서 발생한 지진으로 규모는(M_j , 일본 기상청 규모)는 7.0이며, 일본 방재과학기술연구소(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 이하 NIED)에서 발표한 모멘트규모(M_w)는 6.6이다. NIED에서 운영중인 Hi-Net 및 F-net 관측망의 자료에 의한 단층해는 109~122/90으로 서북서-동남동의 단층면에 의한 주향 이동 단층이다. 이 진앙지를 따라서 약 40km의 범위에서 서북서-동남동의 주향을 따라 다수의 여진이 분포하고 있으며 여진분포로부터 단층면의 크기는 길이 40km, 넓이 20km에 이르는 것으로 파악되고 있다. 이 지역에서는 과거 1700년(규모 7.0), 1898년(규모 6.0), 1929년(규모 5.1) 등 몇 차례에 걸친 중, 대규모 지진이 발생한 이력이 있지만 일본 내에서는 그다지 지진활동이 활발하지 않은 지역에 해당된다. 수백차례의 여진 중 국내에서 진동이 감지된 여진은 10회에 이른다.

3. 일본의 지진 관측망 운영현황 및 지진자료

일본은 세계적으로 지진활동이 가장 활발한 곳으로, 지진관측과 관련한 인프라가 잘 갖추어져 있다. 특히, 1995년 1월 발생한 한신대지진(M_j 7.2) 이후 지진관측 인프라를 재정비하기 시작하여 2005년 현재 NIED, 기상청, 각 대학 등에서 다양한 목적으로 조밀한 지진관측망을 운영중이다. Table 1은 이번 연구에서 이용한 NIED에서 운영하는 관측망의 구성과 특성을 나타내었다. Hi-net과 KIK-net은 동일한 관측소에 깊이를 달리하여 설치된 관측소이며, KIK-net은 시추공 및 자유장에 가속도가 설치되어 있다. 본 연구에서는 진앙거리 100km 이내의 관측소의 KIK-net 시추공 관측소(평균심도 170m, 표준편차 56m)의 가속도 기록을 분석에 이용하였다. Table 2에는 본 연구에 이용된 KIK-net 관측소의 ID와 진앙거리 및 북을 기준으로 한 방위각을 나타내었다.

Table 1. NIED 지진관측망 구성 및 현황

관측망명	관측소수	센서위치	센서종류	기 타
K-net(강진동관측망)	1000	자유장	가속도계	• 일본 전역을 25km 간격
Hi-net(고감도지진관측망)	700	시추공	속도계	• 미소지진을 감지할 목적
KiK-net(기반지진동관측망)	700	자유장/시추공	가속도계	• Hi-net과 동일한 위치
F-net(광대역지진관측망)	70	지하	가속도계/속도계	• 광대역속도계/가속도계

Table 2. 진앙거리 100km 미만의 KIK-net 관측소ID, 진앙거리, 방위각

관측소ID	진앙거리	방위각	관측소ID	진앙거리	방위각	관측소ID	진앙거리	방위각
FKOH09	33	69	FKOH01	72	76	FKOH10	82	128
KFOU03	50	128	YMGH08	73	56	YMGH02	89	63
SAGH01	52	-136	SAGH02	76	-154	FKOH06	90	98
SAGH03	55	169	SAGH05	77	-176	NGSH03	93	-155
SAGH04	63	151	FKOH05	81	106	KMMH01	93	143
FKOH04	64	110	YMGH07	81	61	YMGH06	99	73

* 는 단층해 결과 구해진 주향인 109~122/90의 $\pm 30^\circ$ 값을 가지는 관측소를 나타냄

4. 지진동 감쇠특성

4.1. 관측점에서의 지진동 크기

중, 대규모의 지진으로 인한 피해는 지반운동의 크기 및 주파수 특성에 따라 좌우되며 지진의 규모와 거리에 따라서 달라진다. 즉 어떤 지점에서의 지반운동의 크기(OBS)는 식 (1)과 같이 지진원함수($E(M, t)$), 수진지역까지의 전달함수($D(R, t)$), 부지특성($S(t)$)이 중첩된 결과이다.

$$OBS(M, R, t) = E(M, t) * D(R, t) * S(t) \quad (1)$$

동일한 지진에 대하여 각기 다른 관측소에서 기록된 파형(OBS)은 진원특성인, $E(M, t)$ 가 동일한데 비하여 $D(R, t)$ 와 $S(t)$ 의 차이에 의하여 다른 지진동 크기 및 특성을 가지게 된다. $S(t)$ 는 부지 증폭특성으로 관측소별 부지특성을 보정하거나, 부지특성이 최소화된 암반이나, 시추공의 기록에서는 제거될 수 있는 항이다. $D(R, t)$ 는 기하학적 감쇠와 $Q(f)$ 가 중첩된 것이지만, 근거리에서 $Q(f)$ 에 의한 특성은 큰 상이점을 보이지 않는다.

4.2. 고리원전 지진동 감쇠식

지진동 감쇠식이란 지반운동 수준을 지진의 규모와 거리의 함수로 표현한 것으로 특정지역의 감쇠특성을 하나의 식으로 나타낼 수 있다. 국내와 같이 강진자료가 없는 경우에는 미소지진으로부터 구하여진 지진원 특성, 지진파 감쇠특성 등을 이용하여 확률론적인 방법으로 감쇠식을 도출한다. 이미 국내에는 여러 개의 지진동 감쇠식이 제시되어 있는데, 그 중 한전 전력연구원에서 고리 원전부지에 대해 도출된 식을 식(2)에 나타내었다. 이는 40bar의 응력강하량과 $Q = 348f^{0.54}$, $\kappa_0 = 0.01$, $R_0 = 50km$ 에 대하여 개발된 식이다.

$$\ln y = 4.5621 + 0.04638 \cdot M + (-3.27048 + 0.21070 \cdot M) \cdot \ln(R + \exp(3.2)) - 0.13303 \cdot (M - 6)^2$$

$$(M = \text{moment magnitude, } R = \text{epicentral distance, } \sigma_{\ln y} = 0.8830) \quad (2)$$

앞서 언급한 바와 같이 미소지진으로부터 강지진동을 추정하기 위해서는 미소지진에 대한 모델파라미터를 강지진의 모델파라미터로 외삽(extrapolation) 시켜야 한다. 그러나 강진 자료가 없는 경우 외삽과 관련하여 많은 불확실성이 따르게 된다. 따라서 고리원전 지진동 감쇠식의 경우에도 강진에 대한 적합성이 확인되어야 할 필요가 있다.

4.3. 지진동 감쇠특성

일반적으로 거리에 따른 지진동의 감쇠양상을 알기 위해서는 최대지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration), 최대지반 속도(PGV, Peak Ground Velocity), 스펙트럼 가속도(SA, Spectral Acceleration) 등을 분석하게 된다. 본 연구에서는 후쿠오카 지진의 감쇠특성을 분석하기 위하여 먼저, 진앙거리 500km 이내의 일본의 KIK-net 지표 관측자료와 K-net 자료 및 국내 관측자료의 PGA값을 비교하였다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 K-net기록과 KIK-net 지표 기록에 비하여 국내의 관측소의 PGA값이 약간 큰 경우가 있는데 이는 국내관측소의 경우 부지효과로 인하여 진폭이 다소 증폭되었을 것으로 생각된다.

감쇠특성 분석시 후쿠오카 지진에 대한 국내관측 자료만을 이용할 경우 실제 강진이 발생했을시 피해를 입게 되는 근거리에 대한 정보를 알 수가 없다. 국내의 경우 실측 강진 자료는 없지만, 앞서 설명한 고리원전 감쇠식을 통하여 강진 발생시 근거리에서의 PGA값을 예상할 수 있다. 일반적으로 강진의 근거리 기록은 감쇠특성상 큰 상이점을 보이지 않는다. 따라서 고리원전 부지에 대하여 작성한 지진모멘트 4.5, 5.5, 6.5의 감쇠식과 100km 이내의 근거리 일본 자료를 이용하여 근거리 감쇠특성을 비교하여 보았다. 고리원전 지진동 감쇠식은 부지증폭효과가 없는 경우에 대하여 개발된 감쇠식이므로, 부지효과가 거의 발생하지 않는 KIK-net 시추공 자료와 비교하였다. 그 결과 후쿠오카 본진($M_w=6.6$)과 2개의 여진($M_w=5.4$, $M_w=4.8$)의 경우 국내에서 제시된 감쇠식과 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며, 이를 통하여 고리원전 감쇠식이 강진에도 비교적 적합하게 계산되었음을 확인할 수 있었다.

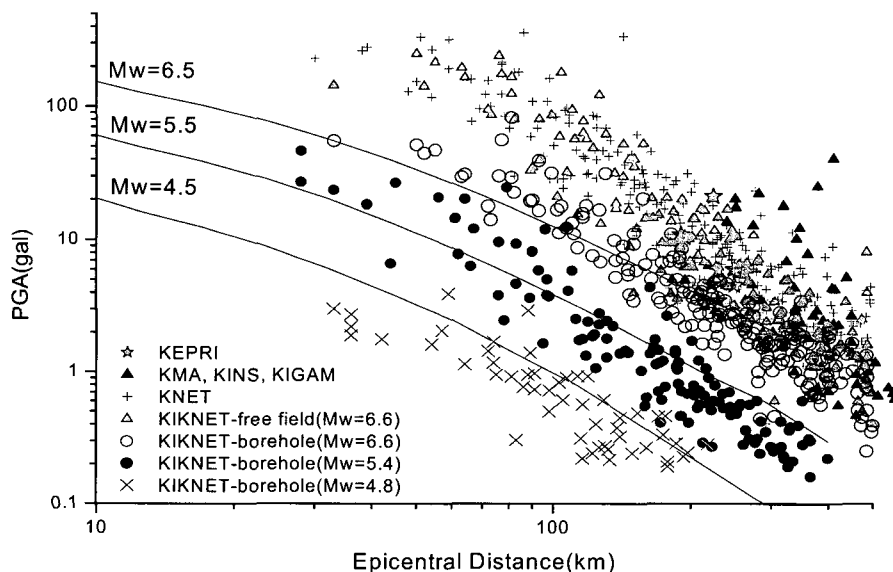


Fig. 2. 후쿠오카 지진의 국내기록 및 K-NET, KIK-net 관측 망에 기록된 PGA의 감쇠특성 비교

두 번째로, 고유진동수별 지진동 감쇠특성을 비교하기 위하여 5% 감쇠에 대한 후쿠오카 본진의 SA와 고리 원전 감쇠식 산정시 구하여진 SA를 Fig 2에 도시, 비교하였다. 그림에서 실선은 고리 원전에 대하여 구하여진 SA이고, □, ■은 후쿠오카지진의 SA로 특히, □는 Table 2의 단층의 주향(109~122°)±30°에 해당되는 관측소에서의 기록이다.

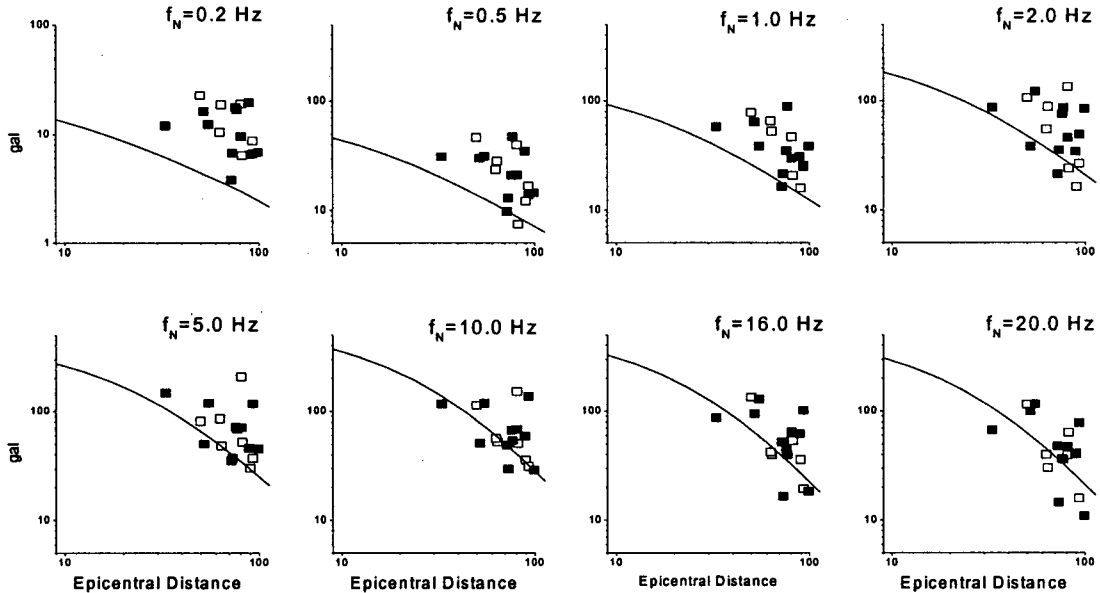


그림 3. 고유주파수별 PGA의 감쇠양상. - : 고리원전 SA □, ■은 후쿠오카 지진의 SA(□ Table 2의 단층해±30°에 해당되는 관측소의 값)

8개의 고유주파수에 관하여 진앙거리별 최대지반가속도 값을 도시해 본 결과, 2Hz 미만의 저주파수 대역에서는 후쿠오카 본진의 SA 수준이 고리 감쇠식 산정된 SA보다 큰 것을 알 수 있으며 고유주파수 5 Hz 이상에서는 진폭수준이 비교적 일치함을 알 수 있다. 특히 2Hz 미만의 저주파수 대역에서는 근거리 일수록 □관측소가 크게 증폭되는 양상을 보인다. 이는 고리원전 감쇠식의 경우 지진원 스펙트럼의 작성시에 지진원을 점진진모델로 가정하여 추정하였는데, 후쿠오카 지진과 같이 지진의 규모가 큰 경우 도입되는 단층지진원 모델을 이용하면 단층이 파열 진행방향에 따라 저주파수 대역에서 근거리 효과에 의해 증폭현상이 발생한다는 것이 알려져 있다(Sommerville, 1997). □관측소는 단층의 주향방향에 주로 분포하는 관측소로 단층지진원 효과에 의하여 저주파 대역에서 지진동 값이 크게 증폭된 것으로 추정된다.

다음으로, 후쿠오카 지진의 스펙트럼 형상 및 진폭 수준을 기존 일본의 스펙트럼과 비교하기 위하여 일본의 원전 설계응답스펙트럼으로 이용되고 있는 Osaki 스펙트럼과 비교하였다. Osaki 스펙트럼은 일본 및 해외 84개 지진가속도 기록을 바탕으로 작성된 것으로 암반 노두에 대한 값이다. Fig. 4는 진앙거리 45km, 150km에 대한 오사키 스펙트럼과, 후쿠오카 지진의 응답스펙트럼(RS_h)을 비교하여 도시한 것으로 Osaki 스펙트럼의 진폭수준이 RS_h보다 크게 평가되어 있음을 알 수 있다. Osaki 스펙트럼과 같이 응답 스펙트럼을 작성시에 전 세계의 강진자료를 이용하는 경우가 많은데, Fig. 4의 비교에서 알 수 있듯이 동일한 규모의 강진자료라고 할지라도, 부지특성에 따라 스펙트럼의 형상이나, 진폭의 수준은 달라진다. 따라서 응답스펙트럼의 작성시 부지특성을 반영하여야 하며,

지진환경이 다른 지역에서 발생한 강진의 경험적인 감쇠식을 그대로 사용하는 데에는 많은 문제점을 가지게 된다.

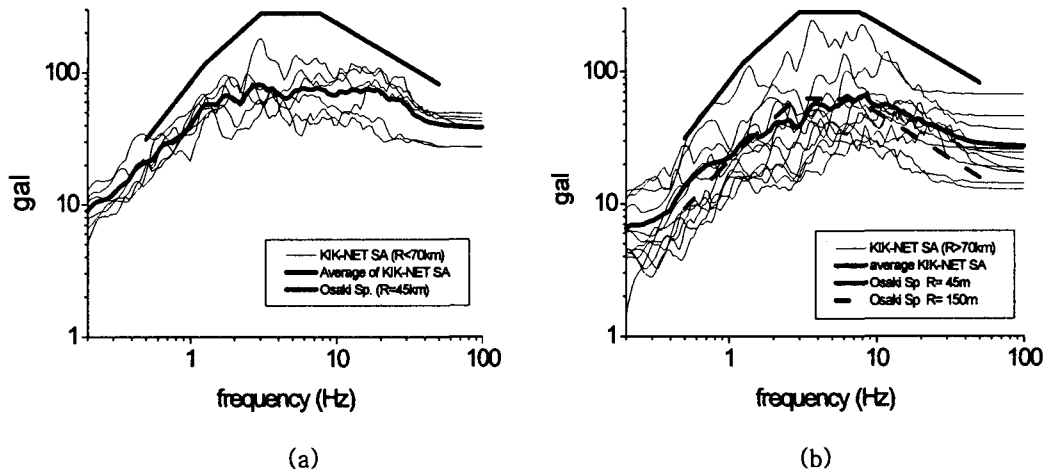


Fig 4. KIK-net 지진의 SA와 Osaki 스펙트럼의 비교. (a) 진앙거리 70Km 이내 (b) 진앙거리 70km 이상

5. 결론

2005년 3월 20일 발생한 규모 7.0의 후쿠오카 지진의 감쇠특성을 분석하여 국내에 영향을 미치는 강진의 감쇠 특성을 간접적으로 유추하는데 이용하였다. 일본 KIK-net 관측망의 시추공기록의 지반운동(PGA, SA)와 기존에 전력연구원에서 개발한 고리원전 부지에 대한 지반운동 감쇠식의 지반운동(PGA, SA)를 비교해 본 결과 비교적 잘 부합되었으며, 이로부터 고리원전 감쇠식이 강진에 대한 지진동을 적합하게 평가함을 확인할 수 있었다. 또한 시추공 KIK-net 자료의 응답스펙트럼과 일본의 원전 설계스펙트럼인 오사키 스펙트럼을 비교한 결과 후쿠오카 지진의 진동 수준이 낮게 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2005년도 원자력연구개발 중장기계획사업 “원전부지 최대지진력 평가연구” 과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 과학기술부 보고서, 2003, 지진안전성 평가기반 기술개발, KINS-GR-255, 2, 1066-1075.
- 일본방재과학기술연구원 홈페이지 <http://www.bosai.go.jp>
- 한국전력공사 전력연구원 보고서, 2000, 한반도 지질 및 지진특성이 고려된 부지고유 내진설계 응답스펙트럼 기술개발, TR.97NJ30.J2001.054, 36-38.
- Sommerville, P.G., Simth, N.F., Graves, R.W. and Abrahamson, N.A., 1997, Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letters*, 68, 199-222.