

# 한반도 지진재해예측을 위한 HAZUS의 강진동 감쇠식 비교연구

## Attenuation Relations in HAZUS for Earthquake Loss Estimations in Korea

강수영<sup>1)</sup> · 김광희<sup>2)</sup> · 석봉출<sup>3)</sup> · 유해수<sup>4)</sup>

Kang, Su Young · Kim, Kwang-Hee · Suk, Bong-Chool · Yoo, Hai-Soo

**국문 요약 >>** 정확한 지진재해 예측을 위해서는 대상지역 특성을 고려하여 개발한 강진동 감쇠식을 사용해야 한다. 본 연구에서는 한반도의 감쇠식에 관한 기존연구에서 제시한 여러 감쇠식 및 지진자료를 비교한 후 그 유형이 가장 유사한 관계식을 선별하였다. 지진재해예측을 위한 HAZUS에서는 미국을 서부와 중동부로 구분한 강진동 감쇠식을 지원하는데, 앞서 선별한 국내 감쇠식과 부합하는 미국의 감쇠식 종류를 알아보았다. 이번 연구는 향후 HAZUS를 이용하여 한반도의 지진재해를 예측하고자 할 때, 우리나라의 감쇠현상과 가장 유사한 미국의 강진동 감쇠식을 사용함으로써 신뢰성 높은 재해예측에 효과적인 영향을 줄 것으로 기대한다.

**주요어** 강진동 감쇠식, 감쇠현상, 지진, 재해, HAZUS

**ABSTRACT >>** Strong motion attenuation relationship represents a comprehensive trend of ground shakings at sites with distances from the source, geology, local soil conditions, and others. It is necessary to develop an attenuation relationship with careful considerations of characteristics of the target area for reliable seismic hazard/risk assessments. In the study, observed ground motions from the January 2007 magnitude 4.9 Odaesan earthquake and the events occurring in the Gyeongsang provinces are compared with the previously proposed ground attenuation relationships in the Korean Peninsula to select most appropriate one. In the meantime, a few strong ground motion attenuation relationships are proposed and introduced in HAZUS, which have been designed for the Western United States and the Central and Eastern United States. The selected relationship from the ones for the Korean Peninsula has been compared with attenuation relationships available in HAZUS. Results of the study will increase the reliability of seismic hazard/risk assessments using HAZUS in the Korean Peninsula.

**Key words** Attenuation Relations, Earthquake, Hazards, Risks, HAZUS

### 1. 서론

미국지역의 자연재해를 예측하고 평가하는 대표적인 시스템인 HAZUS(HAZARD U.S.)는 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Science)에 의해 1997년에 처음 개발되었고, GIS(Geographic Information Systems) 기술을 토대로 구축된 시스템으로서 그 성능이 꾸준히 향상되고 있다(FEMA<sup>1)</sup>). HAZUS는 지진자료와 지역별 기본 입력자료를 이용하여

대상지역의 지진피해를 물리적 재해, 경제적 손실, 그리고 사회적 영향으로 나누어 산출하고, 재해위험예측과 피해저감계획 수립에 있어 의사결정 지원수단으로 중요한 역할을 하고 있다(Kircher et al.<sup>2)</sup>). 현재, 미국지역뿐만 아니라 세계 여러 국가에서는 이 시스템을 시험적 단계를 거쳐 이미 사용하고 있거나, 자국의 실정에 맞게 시스템을 변형하여 사용하고 있다(e.g. Colombia(Carmen<sup>3)</sup>), Switzerland(FEMA<sup>4)</sup>), Turkey(Kaplan and Yilmaz<sup>5)</sup>), etc.). 강익범과 박정호<sup>6)</sup>와 강수영 등<sup>7)</sup>은 이 시스템이 우리나라에서도 활용이 가능하다는 것을 선행연구에서 이미 밝힌바 있다.

지진동의 크기와 주파수 특성, 지진규모와 거리에 따라 달라지는 지진재해를 예측하기 위해서는 지역별 토질과 지반특성 등 여러 조건에 따라 변화하는 지진파의 특성, 즉 감쇠현상을 고려하여야 한다(Campbell<sup>8)</sup>). 이러한 특정지역의 감쇠현상과 지진동의 관계를 식으로 도출하고 적용하여 지진동 정도를 추정함으로써, 그 지역의 지진재해를 예측할

<sup>1)</sup> 한국해양연구원 연구원

(대표저자: sukang@kordi.re.kr)

<sup>2)</sup> 정회원·한국해양연구원 선임연구원

(교신저자: kwanghee@kordi.re.kr)

<sup>3)</sup> 한국해양연구원 책임연구원

<sup>4)</sup> 한국해양연구원 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 29일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 9. 5 / 심사종료일 : 2007. 10. 31)

수 있다. 따라서 우리나라 특정지역의 지진재해를 예측하고자 할 때에는 우리나라 지역특성에 맞는 강진동 감쇠식을 개발하여 적용하는 것이 가장 적합하다.

미국의 경우, 지역별 특성을 고려하여 유도한 여러 강진동 감쇠식이 있는데, 이를 이용하여 보다 신뢰성 있는 지진재해를 예측한다. HAZUS를 이용하여 지진재해를 예측하는 여러 방법 중에서 지진동 지도(ShakeMap)를 사용하는 방법은 대상지역의 특정 감쇠식을 지진동 지도에 적용하여 제작한 후 HAZUS에서 이용된다. 그러나 이 방법은 자체적으로 ShakeMap을 작성할 수 있는 기술이 수반되어야 하며, 그렇지 않을 경우에는 미국의 USGS(U.S. Geological Survey)의 도움으로 작성된 ShakeMap을 제공 받아 사용할 수 있다. 이 방법은 USGS의 협력자가 우리나라의 지진특성과 감쇠식을 충분히 이해하도록 하는 정보전달에 많은 시간이 소요된다. HAZUS의 또 다른 지진재해예측 방법인 결정론적 방법은 미국지역의 감쇠식만을 적용할 수 있다. 따라서 이 방법을 이용하여 우리나라의 지진재해를 예측하기 위해서는 미국의 여러 강진동 감쇠식 중에서 우리나라의 지진과 감쇠현상의 유형과 가장 유사한 감쇠식을 선별하여 적용함으로써 보다 현실성 있는 피해규모를 산정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하여 우리나라의 지진재해를 예측할 때 보다 신뢰성 높은 재해예측 결과를 얻기 위해, 국내 실측지진을 토대로 한 우리나라의 강진동 감쇠식과 미국의 지진 특성을 반영하여 유도된 식을 일정한 지진조건에서 적용하여 거리에 따라 나타나는 최대지반가속도 또는 응답스펙트럼의 양상을 비교한 후 미국의 관계식 중에서 우리나라의 감쇠식에 보다 유사한 식을 찾아보기로 한다. 이는 향후 우리나라의 지진재해예측을 위한 HAZUS의 결정론적 방법 활용에 있어서 유용한 정보를 제공할 것이라 사료된다.

## 2. 강진동 감쇠식

지진이 발생하면 특정지역의 지반과 지질의 특성에 따라 지진동이 다른 양상으로 발생하는데, 이는 일반적으로 진원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감쇠되고 이밖에 지질, 지각구조, 지역별 지반특성 등의 여러 변수에 따라 다르게 나타난다(김성균 등<sup>9)</sup>). 이렇게 지역에 따라 상이하게 반응하는 지진동의 감쇠특성을 식으로 표현한 것이 강진동 감쇠식이며, 일반적으로 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 응답스펙트럼을 분석하여 거리에 따른 식으로 작성한다(FEMA<sup>10)</sup>).

미국의 경우에는 Rocky 산맥을 중심으로 서부(Western United States, WUS)와 중동부(Central and Eastern United

States, CEUS)로 나누고 각 지역특성을 고려하여 여러 강진동 관계식을 제시하였다. HAZUS-MH MR2를 이용하여 지진재해를 산출할 때에는 서부의 경우에는 8개의 강진동 감쇠식을, 중동부의 경우에는 5개의 관계식을 적용할 수 있다(FEMA<sup>10)</sup>). 또한 지역별로 구분한 각각의 식에 가중치를 주고 조합하여 새롭게 도출한 강진동 감쇠식을 적용할 수도 있다. 이러한 관계식을 같은 조건의 지진에 적용하였을 때, 일반적으로 미국 중동부 지역의 지진동 크기가 서부보다 강하게 나타난다(FEMA<sup>10)</sup>).

본 연구에서는 HAZUS에서 지원하는 여러 감쇠식 중에서 가중치를 주어 조합한 식과 미국의 특정지역을 위한 감쇠식을 제외하고, 서부식은 Boore et al.<sup>11)</sup>, Campbell and Bozorgnia<sup>12)</sup>, Sadigh et al.<sup>13)</sup>, Abrahamson and Silva<sup>14)</sup>를 고려하고, 중동부식은 Atkinson and Boore<sup>15)</sup>, Toro et al.<sup>16)</sup>, Campbell<sup>8)</sup>을 중점으로 고려한다. 서부지역을 대상으로 개발된 식에서 Boore et al.<sup>11)</sup>의 식은 천부지진을 대상으로 개발되었고, National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP)에서 상부 30m 지반의 전단파 속도를 고려하여 분류한 Site Classes에 따라 서로 다르게 적용할 수 있다. Campbell and Bozorgnia<sup>12)</sup>의 식은 모멘트 규모 5.0 이상의 지진과 거리 60km 이상의 조건에서 적용하는 것이 가장 적절하고, NEHRP의 Site Classes를 고려하였다. Sadigh et al.<sup>13)</sup>과 Abrahamson and Silva<sup>14)</sup>의 식은 Soft Rock과 Deep Firm Soil로 구분하여 적용할 수 있고, 규모 4.0 이상의 지진에서 사용하는 것이 좋다.

중동부지역의 경우, Atkinson and Boore<sup>15)</sup>의 감쇠식은 Rock Site의 강진동, 응답스펙트럼과 비교할 수 있는 지진동 데이터를 이용하여 추계학적인 지진동 모델에서 유도되었고, 0.5~1.0Hz의 응답주파수와 규모 5.5 이상의 지진 조건에서 감쇠커브의 형상이 가장 잘 표현된다. 이 식에서 작은 규모의 지진은 15~30km의 거리에서 가장 적절하게 표현된다(Atkinson and Boore<sup>15)</sup>). Toro et al.<sup>16)</sup> 감쇠식 또한 추계학적인 지진동 모델에서 유도된 식으로서, 두 지역(Mid-continent, Gulf)과 두 규모 단위(moment magnitude, Lg-wave magnitude)로 세분화되었다. 이 식은 1.0~35.0Hz의 주파수와 1~500km의 거리, 지진 규모 5.0~8.0의 지진에 적용하는 것이 가장 적합하다(Toro et al.<sup>16)</sup>). Campbell<sup>8)</sup>의 식은 미국 서부지역 지진의 경험식을 이용하여 중동부의 최대지반가속도와 가속응답스펙트럼을 계산하도록 조합한 식으로서, 규모 5.0 이상, 70km 이상의 거리에서 적용하는 것이 가장 좋다. 중동부 또는 서부지역을 위한 감쇠식은 일반적으로 규모 5.0 이상과 주파수 1.0Hz 이상에 적용하는 것이 가장 적합하고, 근거리와 원거리에서는 감쇠현상이 과소 또는 과

대평가되는 경향이 있다.

한반도의 지진동 관계식은 지진자료와 부지특성을 이용하여 식을 유도한 사례가 있다. 본 연구에서 고려하는 감쇠식 중 노명현과 이기화<sup>(17)</sup>의 연구에서는 한반도 남동부 지역의 지진요소를 이용하여 최대지반가속도 및 의사속도 응답스펙트럼에 관한 예측공식을 무작위 진동이론을 적용하여 유도하였다. 박동희 등<sup>(18)</sup>의 연구에서는 한반도 남동부 일대에서 발생하는 지진자료를 분석하고, 발생 가능한 지반진동과 주파수에 따른 특성을 추계학적인 모사법을 통하여 유추한 후 거리에 따른 식을 도출하였다. 또한 연관희 등<sup>(19)</sup>의 연구발표에서는 원전부지를 대상으로 실측된 지진의 특성을 이용하여 응답스펙트럼을 도출한 후 강진동 감쇠식을 유도하였다. 이 밖에 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 연구에서는 한반도 남동부에서 관측된 지진기록을 이용하여 스펙트럼 감쇠상수와 응력강하상수를 계산한 후 추계학적 모사법을 이용하여 진원거리에 따른 지진동 감쇠공식을 유도하였다.

### 3. 지진요소의 설정과 적용방법

지진재해는 지진동 및 주파수 특성, 지진의 규모와 거리에 따라 달라지므로(박동희 등<sup>(21)</sup>), 본 연구에서는 감쇠식 적용에 필요한 지진의 규모, 거리, 주파수, 진원의 깊이를 고려하였다. 우선, 지진의 규모설정은 강진( $M=6.7$ ), 중진( $M=4.9$ ), 약진( $M=3.0$ )으로 구분하였다. 지진파는 거리가 증가함에 따라 감쇠가 되고, 감쇠는 보통 주파수에 의존한다(김성균과 김명수<sup>(22)</sup>). 실제 지진파의 중심주파수는 약 10Hz까지 이고(이덕기 등<sup>(23)</sup>), 미국의 일부 감쇠식은 1.0Hz 이상의 지진에 적절함을 고려하여, 이번 연구에서 고려하는 주파수는 1.0, 5.0, 10.0Hz로 임의 설정하였다. 거리는 대부분 지진피해가 약 100km 안에서 발생하므로(노명현과 이기화<sup>(17)</sup>), 120km까지 참고하였다. 진원의 깊이와 지반 또는 지질의 특성은 감쇠식에서 적용하도록 분류되어 있을 경우, 진원의 깊이는 10km로 설정하고 지질은 Site B(Rock)와 Site D(Deep Firm Soil)를 적용하였다.

강진 규모 6.7의 설정 근거로서 삼국사기에 따르면, 서기 779년 경주에서 발생했던 지진은 역사상 가장 큰 인명피해를 유발하였고, 규모는 약 6.7 정도로 추정된다(이기화와 진영근<sup>(24)</sup>; 이기화<sup>(25)</sup>; 이기화와 김정기<sup>(26)</sup>; Chiu and Kim<sup>(27)</sup>). 중간규모( $M=4.9$ )는 최근 발생한 2007년 1월 20일 강릉으로부터 서남쪽 29km 떨어진 지점, 깊이는 약 10~15km, 규모 4.9의 유감지진(오대산 지진)을 한국지질자원연구원에서 분석한 지진자료를 고려하였다(한국지질자원연구원<sup>(28)</sup>). 약진( $M=3.0$ )의 경우는 2001년부터 2005년까지 발생한 지진

중 경상남북도 내륙에서 발생한 지진을 토대로 하였다(기상청<sup>(29,33)</sup>). 이들의 실측자료는 최대지반가속도 값을 수직성분(U-D), 두 개의 수평성분(E-W와 N-S)으로 나누어 기록하였는데, 본 연구에서는 두 개의 수평성분을 기하평균(Geometric Mean)하여 최대지반가속도를 구하였다.

적용방법은 중진과 약진의 실측자료를 토대로 주파수별로 우리나라의 감쇠현상을 적절하게 잘 표현한 국내 강진동 감쇠식을 먼저 선별한다. 비록 중간규모나 약진의 실측자료를 토대로 선별한 감쇠식이지만, 강진에서도 잘 부합한다는 가정으로 미국의 감쇠식과 비교하여 가장 유사한 유형으로 나타나는 미국의 강진동 감쇠식을 선별한다.

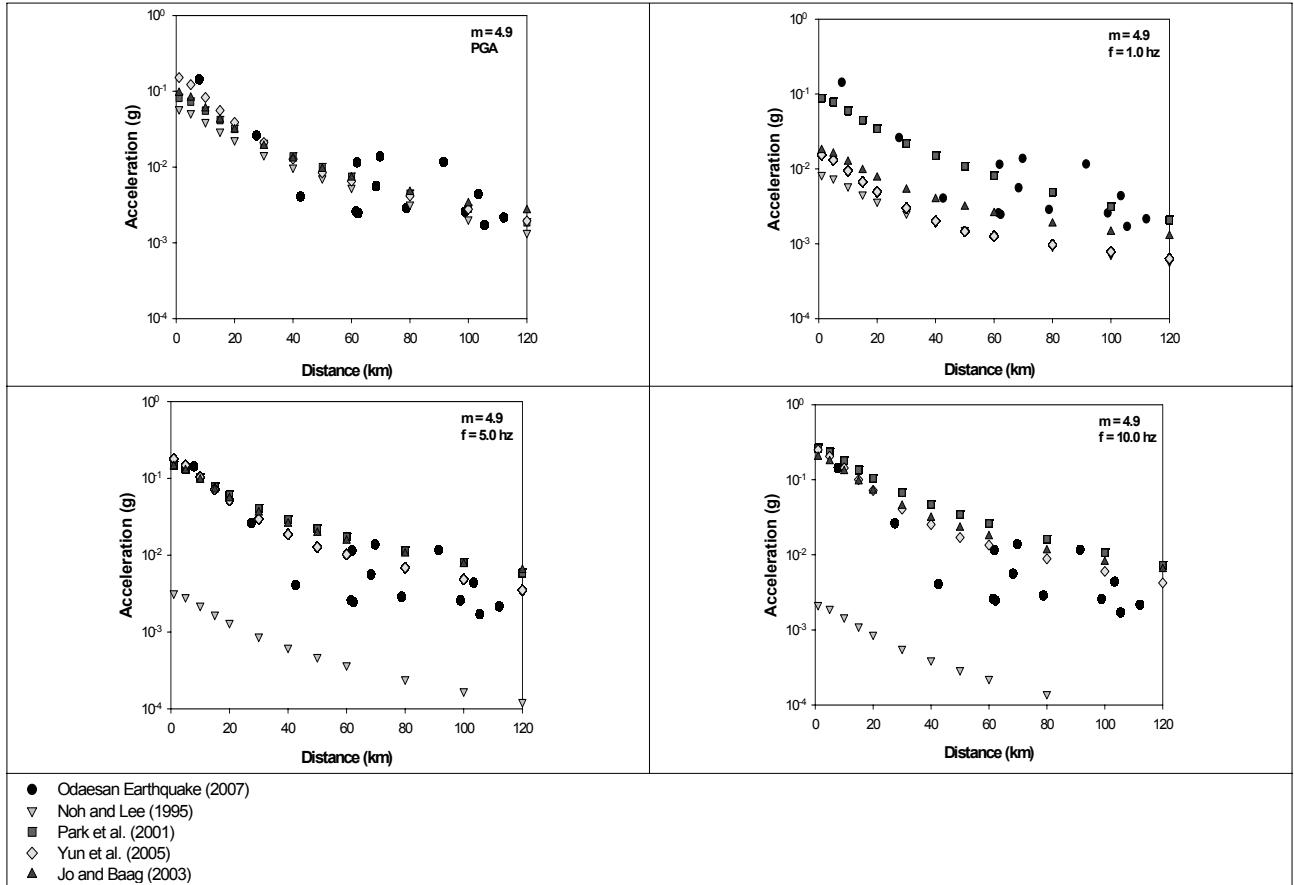
## 4. 결과

### 4.1 규모 4.9의 지진(2007년 1월 오대산 지진)

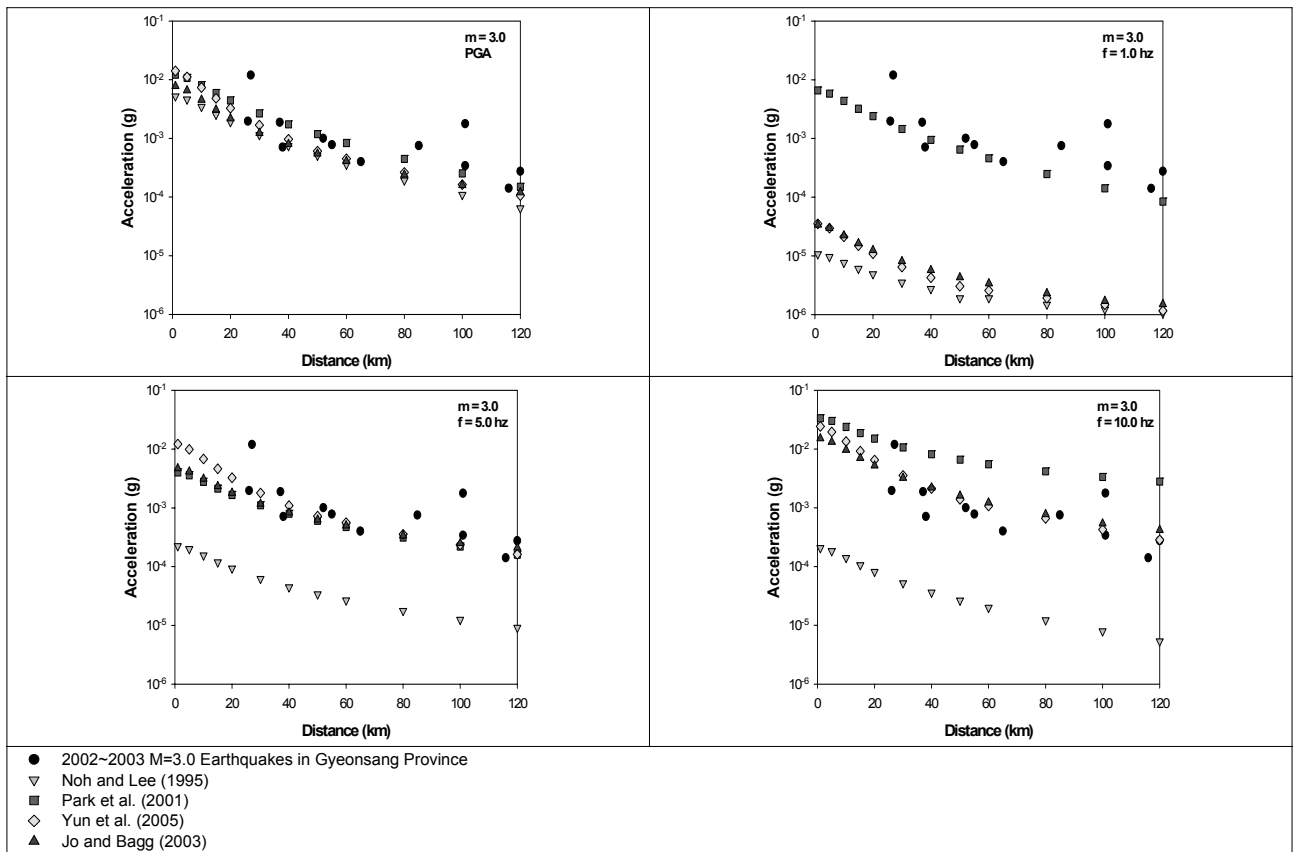
강원도 평창군 도암면 지역에서 2007년 1월 20일 규모 4.9(기상청, 규모 4.8)의 지진이 발생하였는데, 인명피해는 없었지만 전국에서 감지할 수 있는 정도로 큰 유감지진이였다(한국지질자원연구원<sup>(28)</sup>; 기상청<sup>(34)</sup>). 이 오대산 지진과 같은 지진규모를 국내 강진동 감쇠식에 적용하여 얻은 최대지반가속도 또는 응답스펙트럼의 값을 비교하여 보았다. 그 결과, 최대지반가속도는 네 가지 국내 강진동 감쇠식에서 모두 비슷한 양상을 보였고, 또한 실측자료와도 적절히 부합하였다. 1.0Hz의 주파수에서는 박동희 등<sup>(18)</sup>의 식 적용에서 실측자료와 비슷하였다. 그러나 주파수가 증가함에 따라 연관희 등<sup>(19)</sup>과 박동희 등<sup>(18)</sup>, 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식 적용에서 실측자료와 유사하고, 특히 연관희 등<sup>(19)</sup>의 식 적용이 가장 잘 부합하였다(Figure 1).

### 4.2 규모 3.0의 지진(2002~2003년 경상남북도 지진)

최근 2001년부터 2005년 사이에 발생한 지진은 경상남북도에서 가장 많이 발생하였고, 본 연구에서는 2003년 3월 1일 지진(경주 남동쪽 약 10km, 규모 3.0)과 2002년 10월 20일 지진(경남 하동 북서쪽 약 15km, 규모 3.0)을 고려하였다(기상청<sup>(30,31)</sup>). 이들의 지진과 같은 지진규모를 기존의 국내 감쇠식에 적용하여 얻은 최대지반가속도 또는 응답스펙트럼 값을 실측치와 비교하였다. 최대지반가속도에서는 네 가지 식에서 모두 실측자료와 유사한 유형으로 나타났다. 그러나 1.0Hz의 주파수에서는 박동희 등<sup>(18)</sup>의 식 적용에서만 실측자료와 유사하였고, 주파수가 증가함에 따라 연관희 등<sup>(19)</sup>과 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식 적용에서, 특히 연관희 등<sup>(19)</sup>의 식을 적용하였을 때 가장 유사함을 발견할 수 있다(Figure 2).



〈Figure 1〉 Comparisons of observed strong motions due to the Odaesan earthquake with different attenuation functions for M 4.9



〈Figure 2〉 Comparisons of observed ground motions due to the earthquakes in the Gyeongsang provinces with different attenuation functions for M 3.0

### 4.3 규모 6.7의 지진(서기 779년 경주지진)

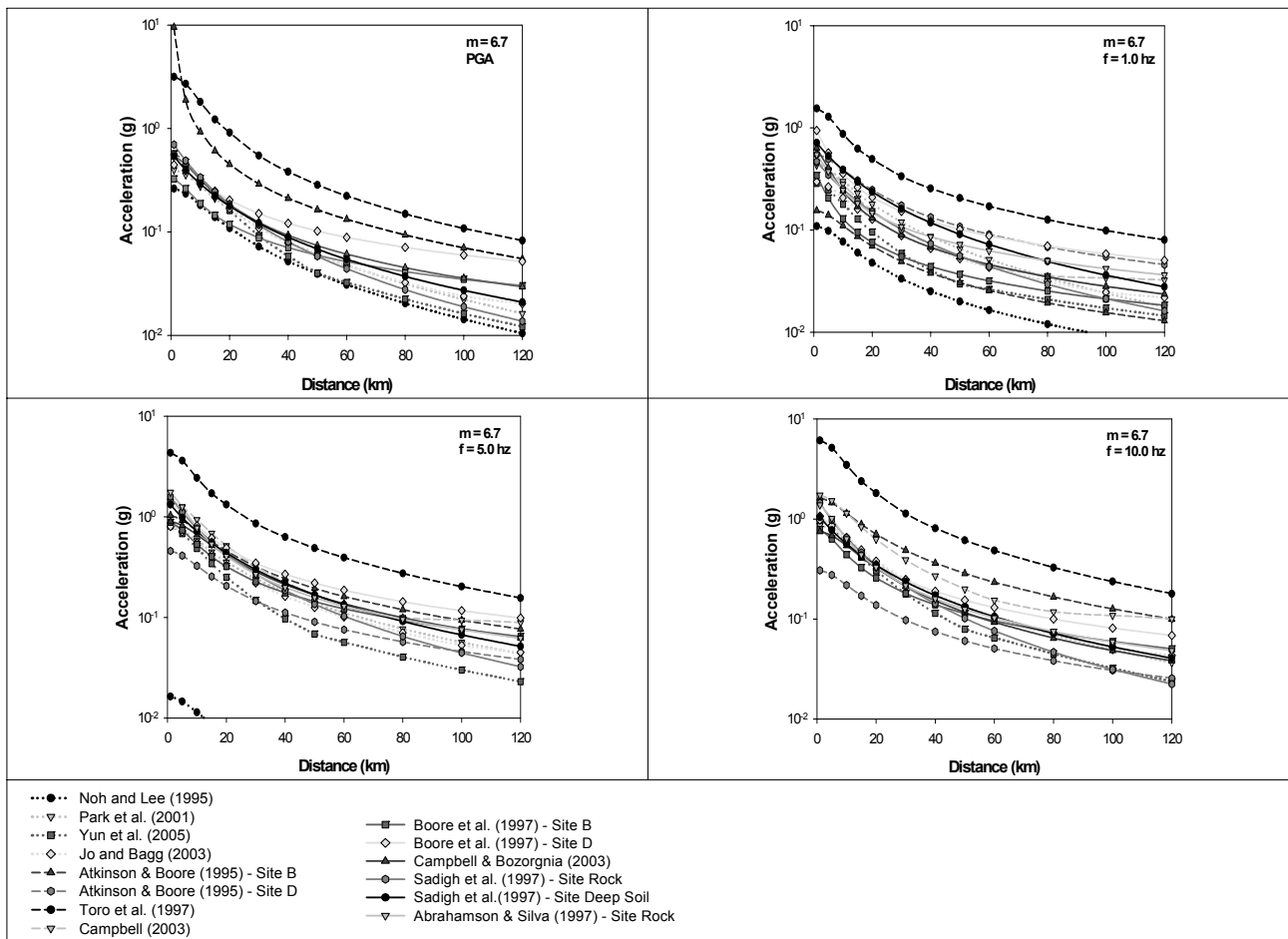
강진의 경우에는 미국과 국내의 강진동 감쇠식에 규모 6.7을 적용하여 보았다. 앞의 결과에 따르면, 최대지반가속도의 경우 네 가지 식에서 모두 실측자료와 유사하였다. 주파수가 1.0Hz일때는 박동희 등<sup>(18)</sup>의 식이 실측자료와 유사하였고, 주파수가 증가함에 따라 연관희 등<sup>(19)</sup>과 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식에서 비슷한 유형으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 낮은 주파수에서는 박동희 등<sup>(18)</sup>의 감쇠식을, 높은 주파수에서는 연관희 등<sup>(19)</sup>과 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 감쇠식을 중점으로 살펴보았다.

규모 6.7 지진의 최대지반가속도를 살펴보면, 연관희 등<sup>(19)</sup>과 노명현과 이기화<sup>(17)</sup>의 식과 유사한 미국의 감쇠식은 없다. 반면에 박동희 등<sup>(18)</sup>의 식은 Sadigh et al.<sup>(13)</sup>의 Site B (Rock)를 적용하였을 때 거리에 따라 가장 비슷한 최대지반가속도 유형을 보였다. 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식 적용에서는 Sadigh et al.<sup>(13)</sup>의 Site D(Deep Soil)을 적용하였을 때 가장 유사한 유형을 보인다. 1.0Hz에서 박동희 등<sup>(18)</sup>의 식 적용과 가장 유사한 미국의 감쇠식을 살펴보면 Sadigh et al.<sup>(13)</sup>의 Site B(Rock)를 적용하였을 때 가장 근사하였다.

주파수 증가에 따른 연관희 등<sup>(19)</sup>의 식과 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식 적용과의 관계를 살펴보면, 5.0Hz에서 연관희 등<sup>(19)</sup>의 식 적용 결과와 유사한 관계식이 없다. 그러나 10.0Hz에서는 연관희 등<sup>(19)</sup>의 식 적용 결과는 Sadigh et al.<sup>(13)</sup>의 Site B(Rock)와 Site D(Deep Soil) 적용에서 가장 비슷하였고, 조남대와 박창업<sup>(20)</sup>의 식에서는 Sadigh et al.<sup>(13)</sup>의 Site D(Deep Soil) 적용한 결과와 가장 유사함을 나타냈다(Figure 3).

### 5. 결론 및 토의

한반도에서는 최근 물리적/인명적 재해를 유발할 정도로 큰 지진이 발생하지 않았다. 그러나 크고 작은 지진이 꾸준히 발생하고 있고, 또 2007년 1월 강원도 오대산 지역에서 발생한 지진은 우리나라에서도 피해를 유발할 수 있는 지진이 발생할 수 있다는 위험성을 시사하고 있다. 따라서 우리나라도 재해가 발생하기 전에 지역별로 안정성 확보와 피해 저감계획 수립에 지속적인 노력이 필요하다. 이를 위해서는 보다 정확한 지진재해를 예측해야 하는데 지진재해 예측방법으로는 여러 유형이 있지만, 이번 연구에서는 미국과 여러 국가에서 많이 사용하고 있는 HAZUS의 결정론적 방법



〈Figure 3〉 Ground shaking with different attenuation functions at magnitude 6.7

을 이용한다는 전제로 진행하였다. 우선은 지진재해를 예측하기 위해서는 지역별로 다른 양상으로 나타나는 감쇠현상을 이해해야 한다. HAZUS에서도 미국 지역을 서부와 중동부로 나누어 지역별 감쇠현상을 고려한 강진동 감쇠식을 사용할 수 있도록 시스템이 구축되어 있다. 본 연구에서는 HAZUS에서 지원하는 강진동 감쇠식과 우리나라의 강진동 감쇠식, 그리고 2007년 오대산 지진을 비롯한 여러 지진의 실측자료를 일정한 지진요건에 맞추어 적용한 후 비교하였다.

본 연구의 결과에서는 우리나라의 실측자료를 토대로 도출된 감쇠식이 미국 서부의 일부 관계식 적용결과와 비슷한 유형으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 임의로 몇몇 지진요소와 표면적인 계산식만을 수렴하였으므로, 연구방법과 지역별 특성, 그리고 보다 풍부한 지진요소를 달리 고려한다면 그 결과는 달라질 수도 있다. 예를 들면, 정태웅<sup>(35)</sup>의 한국 남동부 지각의 지진파 감쇠구조 비교연구에서는, 지진비활동 지역인 미국 중동부 지역과 비슷하다고 하였다. 반면에 김준경과 강익범<sup>(36)</sup>의 연구에서는 한반도 남동부 지각 천부와 심부의 비탄성 감쇠율값은 미국의 서부지역과 유사하다고 하였고, 김준경<sup>(37)</sup> 연구에서도 지진파 감쇠 평균값이 미국 서부지역과 유사하다고 하였다. 그 외, 김성균 등<sup>(38)</sup>은 한반도에서 거리에 따른 비탄성적 감쇠는 미국 서남부보다 낮고, 북동부보다 높다고 하였다. 따라서 우리나라의 감쇠현상을 미국지역과 비교함에 있어서 여러 이견이 있음을 알 수 있으므로, 향후 이를 규명하는 연구도 필요하다고 사료된다.

이번 연구의 취약점으로는 우리나라에서 계기지진이 시작된 이후 국내에서 발생한 강진이 관측된 사례가 없으므로, 약진 또는 중진의 관측치로 얻어진 국내 감쇠식을 강진에서도 잘 부합한다는 가정을 들 수가 있다. 강진동 감쇠식은 최대지반가속도 또는 주파수에 따라 적용상수가 달라진다. 이번 연구결과에 의하면 최대지반가속도를 위한 상수를 감쇠식에 적용하였을 때에는 국내 감쇠식에 의한 최대지반가속도와 실측자료가 유사하게 나타났지만, 각기 다른 주파수에 따른 상수를 국내 감쇠식에 적용할 때에는 실측자료와 부합하는 응답스펙트럼의 결과가 상이함을 알 수 있다. 결론적으로 주파수와 지진규모가 달라짐에 따라 실측자료와 부합하는 국내 관계식이 다르게 선별되는 것에서 알 수 있듯이, 이들이 강진에서도 잘 일치한다는 가정은 설득력이 부족하다. 따라서 약진 또는 중진에 관한 감쇠식이 강진의 경우에도 적용이 가능한지 여부는 앞으로 더 많은 데이터를 이용한 심화연구가 필요하다.

본 연구의 궁극적인 목적은 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하여 지진재해를 예측할 때 미국의 여러 강진동 감쇠식 중에서 우리나라의 지진동 유형과 가장 유사한 관계식을 살

펴봄으로써 신뢰성 높은 결과생산에 도움을 주고자 하는 것이다. 이번 연구에서 고려한 여건아래에서, 우리나라 강진에 의한 지진재해를 예측할 때 HAZUS의 결정론적 방법을 이용하기 위해서는 미국 서부식인 Sadigh et al.<sup>(13)</sup> 식의 Site Class B(Rock) 또는 Site Class D(Deep Soil)를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 또한 앞서 언급한 이번 연구의 취약점을 보완하기 위해서는 미국의 감쇠식 중에서 선별된 국내 관계식과 비교적 유사한 더 많은 관계식을 적용하여 피해를 범위로 표현하는 방법도 생각할 수가 있겠다. 이 방법은 지진피해를 감소시키기 위해 수립해야 하는 재해저감계획에 현실적으로 그리고 효과적으로 지원할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국해양연구원 PE97605, PE97914, PM43301의 지원으로 수행되었습니다. 논문 심사과정에서 조언을 주신 세분 심사위원께 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. FEMA, "Multi Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model," *HAZUS-MH MR2 User Manual*, Federal Emergency Management Agency 2006.
2. Kircher, C.A., Whitman, R.V. and Holmes, W.T., "HAZUS Earthquake Loss Estimation Methods," *NATURAL HAZARDS REVIEW*, Vol. 7, No. 2, 2006, pp. 45-59.
3. Carmen, S.D., "Earthquake Risk Assessment of Quibdo City, Northwestern Colombia using HAZUS: It is the HAZUS Methodology Applicable in other Countries?," *AGU Fall Meeting 2006*, San Francisco, December, 2006.
4. FEMA, "HAZUS Annual Progress and Utilization Report for Fiscal Year 2004," *FEMA 493*, Federal Emergency Management Agency, January, 2005, pp. 66.
5. Kaplan, H. and Yilmaz, S., "Preliminary Seismic Risk Assessment of Urban Building Stocks: A Case Study for Denizli-Turkey," *Journal of Science and Technology*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 106-124.
6. 강익범, 박정호, "HAZUS를 이용한 충남지역의 지진피해 연구", 한국도시방재학회, Vol. 2, No. 2, 2002, pp. 73-83.
7. 강수영, 김광희, 김동춘, 민동주, 유해수, 석봉출, "지진재해예측을 위한 HAZUS와 ShakeMap의 한반도에서의 적용가능성 연구", 한국지리정보학회지, Vol. 10, No. 1, 2007, pp. 47-59.
8. Campbell, K.W., "Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground-Motion (Attenuation)," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 3, 2003, pp. 1012-1033.

9. 김성균, 전명순, 김준경, “경상분지에서의 P파 감쇠”, 지질학회지, Vol. 35, No. 3, 1999, pp. 223-228.
10. FEMA, “Multi Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model,” *HAZUS-MH MR2 Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency 2006.
11. Boore, D.M., Joyner, W.B. and Fumal, T.E., “Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work,” *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 128-153.
12. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y., “Updated Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 1, 2003, pp. 314-331.
13. Sadigh, K, Chang, C.Y., Egan, J, Makdisi, F. and Youngs, R.R., “Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes based on California Strong Motion Data,” *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 180-189.
14. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J., “Empirical Response Spectral Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes,” *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 94-127.
15. Atkinson, G.M. and Boore, D.M., “Ground-Motion Relations for Eastern North America,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 1, 1995, pp. 17-30.
16. Toro, G.R., Abrahamson, N.A. and Schneider, J.F., “Model of strong ground motions from earthquakes in central and easter North America: best estimates and uncertainties,” *Seismological Research Letter*, Vol. 68, 1997, pp. 41-57.
17. 노명현, 이기화, “한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(II): 예측공식의 개발”, Jour. Geol. Soc. Korea, Vol. 31, No. 3, 1995, pp. 175-187.
18. 박동희, 이정모, 박창엽, 김준경, “한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇠식”, 지질학회지, Vol. 37, No. 1, 2001, pp. 21-30.
19. 연관희, 박동희, 최원학, 장천중, 이대수, “원전부지 고유 지진동감쇠식 개발 및 비교평가 연구”, 한국지진공학회, 한국지진공학회 2005년도 Workshop, 2005.
20. 조남대, 박창엽, “한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 추정 및 강지진동의 체계학적 모사”, 한국지진공학회, Vol. 7, No. 6, 2003, pp. 59-70.
21. 박동희, 연관희, 장천중, 최원학, 이대수, “후쿠오카 지진('05.3.20, M=7.0)의 지진동 감쇠특성 분석”, 지구물리, Vol. 8, No. 3, 2005, pp. 109-113.
22. 김성균, 김명수, “주파수 영역에서의 인공지진과 자연지진의 식별”, 자원환경지질, Vol. 36, No. 3, 2003, pp. 201-212.
23. 이덕기, 오석훈, 윤용훈, 양준모, “광대역 관측소 하부 암석의 고주파수 탄성파 속도 및 감쇠상수에 대한 연구”, 지구물리, Vol. 5, No. 3, 2002, pp. 165-174.
24. 이기화, 진영근, “양산단층의 구역화: 경상분지내 주요 단층대의 지구물리학적 연구”, 지질학회지, Vol. 27, No. 4, 1991, pp. 434-449.
25. 이기화, “한반도의 역사지진자료”, 지구물리, Vol. 1, No. 1, 1998, pp. 4-22.
26. 이기화, 김정기, “한반도 주요 지체구조구별 지진학적 특성”, 지구물리, Vol. 3, No. 2, 2000, pp. 91-98.
27. Chiu, J.M. and Kim, S.G., “Estimation of Regional Seismic Hazard in the Korean Peninsula Using Historical Earthquake Data between A.D. 2 and 1995,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, 2004, pp. 269-284.
28. 한국지질자원연구원, 지진연구센터, “2007년 1월 20일 월정사 지진 자료”, 한국지질자원연구원, 대전, 2007.
29. 기상청, “2001 지진연보”, 기상청, 2002, pp. 53.
30. 기상청, “2002 지진연보”, 기상청, 2003, pp. 111.
31. 기상청, “2003 지진연보”, 기상청, 2004, pp. 115.
32. 기상청, “2004 지진연보”, 기상청, 2005, pp. 102.
33. 기상청, “2005 지진연보”, 기상청, 2006, pp. 103.
34. 기상청, “2007년 1월 20일 강원지역 지진관련 정보”, 기상청 2007.
35. 정태웅, “한국 남동부 지각의 P파와 S파 감쇠구조 비교연구”, Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 22, No. 2, 2001, pp. 112-119.
36. 김준경, 강익범, “한반도 남동부 지진의 지각매질 특성 및 지진원 특성 변수 연구”, 한국도시방재학회, Vol. 2, No. 1, 2002, pp. 135-141.
37. 김준경, “후쿠오카 지역에서 발생한 12개 지진의 지진원 및 지진파 감쇠에 관한 연구”, 한국지진공학회, Vol. 11, No. 1, 2007, pp. 89-97.
38. 김성균, 김수경, 지현철, “한반도 남부에서의 주파수별 가속도 최대진폭의 감쇠”, 지질학회지, Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 237-250.