한국지진공학회 논문집 | 제14권 제2호 (통권 제72호) | 2010년 4월, pp. 49~56
DOI 10.5000/EESK.2010.14.2.049

일본 기상청 계측진도의 국내 활용

Application of the JMA instrumental intensity in Korea

김혜림[1] · 김성균[2] · 최강룡[3]
Kim, Hye Lim · Kim, Sung Kyun · Choi, Kang Ryong

국문 요약 >> 계기에 의한 진도산정은 보통 PGA와 진도와의 경험적인 관계식으로부터 계산되어 왔다. 그러나 일본 기상청은 지진에 의한 피해의 정도는 관측된 PGA보다는 진도와 상관이 더 크다는 점에 착안하여, 지진 계측기에 의해 실시간으로 진도를 산정(JMA 계측진도)함으로서 지진재해를 좀 더 정확히 평가하는 방안을 채택하고 있다. 이 연구의 목적은 국내에서의 JMA 계측진도의 실제적인 활용방안을 제시하는 것이다.

한반도는 강진의 발생빈도가 낮기 때문에 사용할 수 있는 강진자료가 충분치 않다. 따라서 한반도의 지진원 특성과 감쇠특성에 맞는 강진동을 추계학적인 방법으로 합성하였다. 이러한 방법으로 합성된 강진자료에 대하여 JMA 계측진도를 포함한 6개의 공학적 지진동 상수들을 계산하였다. 다음으로 계산된 상수들 사이의 경험적인 관계식을 결정하였으며, 이 상수들을 몇 개의 그룹으로 분류하기 위한 군집분석을 수행하여 지진동 상수들을 분류하였다. 그 결과, JMA 가속도 (a_0)는 스펙트럼 진도와 유사한 그룹으로 분류되었으며, CAV(Cumulative Absolute Velocity)와는 비교적 관계가 먼 그룹으로 나타났다. JMA 계측진도는 지진재해 평가에 있어서 다른 하나의 평가척도로서 사용이 기능할 것으로 생각된다. 한편 지진재해의 예측에 활용이 가능한 PGA와 a_0에 대한 감쇠식이 모멘트 규모와 진원거리의 함수로 유도되었다.

주요어 JMA계측진도, CAV, 군집분석, 감쇠식

ABSTRACT >> In general, the seismic intensity deduced from instrumental data has been evaluated from the empirical relation between the intensity and the PGA. From the point of view that the degree of earthquake damage is more closely associated with the seismic intensity than with the observed PGA, JMA developed the instrumental seismic intensity (JMA instrumental intensity) meter that estimate the real-time seismic intensity from the observed strong motion data to obtain a more correct estimate of earthquake damage. The purpose of the present study is to propose a practical application of the JMA instrumental intensity in Korea. Since the occurrence of strong earthquakes is scarce in the Korean Peninsula, there is an insufficiency of strong motion data. As a result, strong motion data were synthesized by a stochastic procedure to satisfy the characteristics of a seismic source and crustal attenuation of the Peninsula. Six engineering ground motion parameters, including the JMA instrumental intensity, were determined from the synthesized strong motion data. The empirical relations between the ground motion parameters were then analyzed. Cluster analysis to classify the parameters into groups was also performed. The result showed that the JMA acceleration (a0) could be classified into similar group with the spectrum intensity and the relatively distant group with the CAV (Cumulative Absolute Velocity). It is thought that the a0 or JMA intensity can be used as an alternative criterion in the evaluation of seismic damage. On the other hand, attenuation relation equations for PGA and a0 to be used in the prediction of seismic hazard were derived as functions of the moment magnitude and hypocentral distance.

Key words JMA instrumental intensity, CAV, Cluster analysis, Attenuation equation

1. 서 론

한반도는 지리적으로 인접한 북동 중국이나 서남일본에 비하여 지진활동이 활발하지 않은 편이며, 큰 규모 지진의 발생빈도도 낮다. 기상청에 의하면, 1978년부터 2006년까지 30년간에 관측된 규모 3.0이상의 지진 수는 총 304회로서 연평균 대략 10회에 해당하며, 규모 5이상의 지진은 5회

[1] 광주지방기상청, 공무원
[2] 정회원 · 전남대학교 지구환경과학부, 교수
(교신저자: kimsk@chonnam.ac.kr)
[3] 한국원자력안전기술원, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2009. 12. 21 / 수정일 2010. 2. 9 / 게재확정일 : 2010. 2. 9)

에 불과하다. 그러나 과거 역사기록을 조사해 보면 성곽이 붕괴되고, 100여명이 사망할 정도의 파괴적인 지진이 발생한 기록이 있다. 또한 1905년 이래의 계기지진을 조사해 보면, 1952년에 평양 남쪽에서 발생한 규모 6.3의 강서지진과 같은 강력한 지진이 발생한 기록도 있다. 한반도는 지진학적으로 판 내부에 속하며, 발생지진도 판 내부지진의 특성을 갖고 있다. 따라서 판 경계지진에 비하여 지진의 시공간 분포가 불규칙적이므로, 예측이 쉽지 않으며 지진발생 빈도가 낮고 우발적이라 할 수 있다. 따라서 이와 같은 판내부 지진의 특성 때문에 지진에 대한 대비가 소홀하기 쉽다.

한편, 현대사회는 지진과 같은 자연재해에 대하여 대단히 취약하다 할 수 있다. 인구의 도시집중, 산업시설의 밀집 등은 지진과 같은 재해가 발생했을 때 재해의 증폭이 쉽고 장기적으로 그 파급효과가 크게 나타나게 되어, 오랜 기간 동안 국가경제에 큰 타격을 줄 수 있기 때문이다.

위에서 지적한 바와 같이 피해지진의 발생 가능성과 재해의 증폭 및 파급효과를 생각할 때 지진에 대한 사전 대비가 필요함은 자명하다. 지진발생 그 자체를 인공적으로 억제할 수는 없으며, 어떤 지역 내에서 발생 가능한 지진을 단기적으로 미리 예측한다는 것도 현재로서는 불가능하다. 따라서 지진에 의한 피해를 경감시키기 위한 연구가 필요하다. 주요 산업시설 및 발전소 부지내에는 강진동에 대하여 실시간으로 대응하기 위하여 가속도계가 설치되어 있으며, 시스템의 가동중단 여부는 통상 시계열로 얻어지는 가속도 값이 특정값을 초과하는가, 그렇지 않은 가를 판단기준으로 한다. 따라서 이 경우는 지진동의 주파수 특성이나 지진력(에너지)은 전연 고려되지 않기 때문에 구조물과 설치되어 있는 시스템에 피해를 주지 않는 가속도 값에도 가동을 중단하게 되는 경우도 발생할 수 있다. 예를 들면, 2007년 1월 20일에 발생한 오대산 지진(규모 4.8) 발생시에 15.3km 떨어진 대관령 관측소에서의 최대 지반가속도(PGA)는 0.157g에 달했다. 이 값은 국내 원전의 OBE 가속도를 초과하지만, 진앙지 부근을 비롯한 거의 모든 지역에서 큰 피해는 발생하지 않았다. 따라서 PGA만으로 지진동의 특성을 평가한다는 것은 적절하지 않다고 할 수 있다.

위와 같은 문제점을 개선하기 위해서 단순히 PGA만을 사용하지 않고, 지진동의 특성과 피해의 정도를 잘 반영하는 지진동 상수들을 사용하는 방안이 대두되고 있다. 일본 기상청은 지진에 의한 피해의 정도는 관측된 PGA보다는 진도와 상관이 더 크다는 점에 착안하여, 지진 계측기에 의해 실시간으로 진도를 산정함으로서 지진재해를 경감시키는 하는 방안을 채택하고 있다.

이 연구에서는 JMA 계측진도를 포함한, 최대 지반가속도(PGA), RMS 진폭, 스펙트럼 진도, Arias 진도, 누적 절대속도(CAV)의 6가지 공학적 지진동 상수들을 선정하여 이 상수들 사이의 경험적인 관계식을 결정할 예정이다. 또한 이 상수들을 몇 개의 그룹으로 분류하기 위한 군집분석을 수행하여 지진동 상수들을 분류한다. 이러한 결과를 토대로 일본의 진도 계측방식을 국내에 적용하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지진동 상수들의 정의

지진동 평가변수에는 진도(Intensity), 최대지반가속도(PGA), RMS 가속도, 응답스펙트럼 가속도, 스펙트럼 진도, Arias 진도 및 누적절대속도(CAV) 등이 있다. 진도는 지진동에 대한 인체의 느낌, 구조물의 응답 및 지반의 피해 등을 기준으로 하여 설정한 척도로서, MM진도(Modified Mercalli Intensity)가 가장 널리 사용되고 있다. 일본 기상청 진도(Japan Meteorological Agency Intensity: JMA Intensity)는 일본 기상청에 의해 도입된 진도로서 종래에는 주로 인체감각이나 피해를 종합하여 진도를 결정하여 왔다. 그러나 1994년 4월부터 진도계에 의한 계측진도(Instrumental Intensity)로 진도관측을 전환하였다. 이러한 계측진도를 사용함으로서 좀 더 객관적으로 진도를 평가할 수 있게 되었으며, 무인관측이 가능해짐에 따라 다수의 관측소의 자료를 신속히 수집하여 지진발생과 동시에 실시간으로 진도도(Intensity Map)를 작성할 수 있게 되었다.[1] 일본 기상청 계측진도는 종래의 진도 에 대한 정의와 같으며 현재 10등급으로 나누어져 있다. 그 정의는 표 1과 같다.[2]

일본 기상청 계측진도는 다음과 같은 과정을 거쳐 결정된다.[3]

1) 먼저 3성분 가속도 기록을 Fourier 변환한다.
2) 다음으로 3개의 필터의 곱으로 구성된 다음 식과 같은 대역통과 필터 $F(f)$ 를 Fourier 변환된 3성분 스펙트럼 진폭에 각각 곱한다.

$$F(f) = F_1(f)\,F_2(f)\,F_3(f) \tag{1}$$

Period-effect Filter: $F_1(f)=(1/f)^{1/2}$

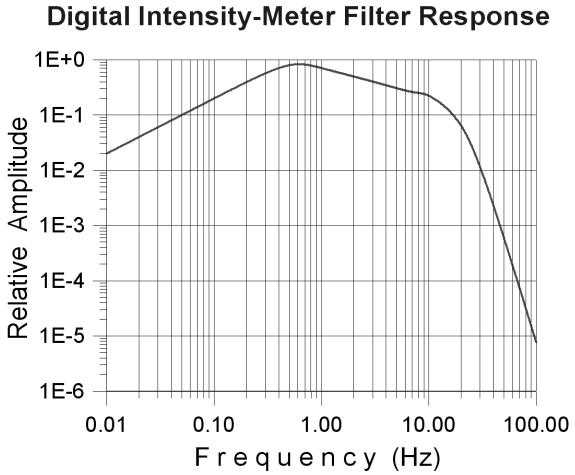
High-cut Filter: $F_2(f)=(1+0.694x^2+0.24x^4+0.0557x^6+0.009664x^8+0.00134x^{10}+0.000155x^{12})^{-1/2}$ $(x=f/f_c)$

Low-cut Filter: $F_3(f)=(1-\exp(-f/f_0)^3)^{1/2}$, $f_0 = 0.5\,Hz$, $f_c = 10\,Hz$

3) 3성분의 스펙트럼을 Fourier 역변환하여 다시 가속도

〈표 1〉 JMA 진도 설명

JMA Seismic Intensity Scale	*Explanation*
7	In most buildings, wall tiles and windowpanes are damaged fall. In some cases, reinforced concrete-block walls collapse.
6+ (upper)	In many buildings, wall tiles and windowpanes are damaged and fall. Most unreinforced concrete-block walls collapse.
6- (lower)	In some buildings, wall tiles and windowpanes are damaged and fall.
5+ (upper)	In many cases, unreinforced concrete-block walls collapse and tombstones overturn. Many automobiles stop due to difficulty to drive. Occasionally, poorly installed vending machines fall.
5- (lower)	Most people try to escape from a danger. Some people find it difficult to move.
4	Many people are frightened. Some people try to escape from a danger. Most sleeping people awake.
3	Felt by most people in the building. Some people are frightened.
2	Felt by many people in the building. Some sleeping people awake.
1	Felt by only some people in the building.
0	Imperceptible to people.



〈그림 1〉 JMA 계측진도 계산을 위한 대역통과 필터

기록으로 변환한후, 3성분을 vector 합성하여 하나의 성분으로 나타낸다.

4) 하나의 성분으로 합성된 가속도 기록의 진폭이 특정의 값 a_0 보다 큰 값을 갖는 시간의 합이 0.3 sec, 즉 지속시간이 0.3초가 되는 진폭 a_0 를 결정한다.
5) 이 방법으로 결정된 진폭 a_0 를 다음 식에 넣어 JMA 진폭 I_{JMA} 를 결정한다.

$$I_{JMA} = 2.0 \log a_0 + 0.94 \tag{2}$$

그림 1에 대역 통과필터를 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 이 필터는 구조물의 피해에 민감한 0.5~10Hz 범위를 강조하며, 특히 10Hz 이하를 감소시키고 있다.

최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration: PGA)는 가장 널리 사용되고 있는 지진동 평가 상수로서 측정이 용이하고 취급이 간편하다는 장점이 있으나 지진동의 주파수 특성이나 지진력의 크기를 그대로 반영하지 않는다는 단점이 있다.

한편 제곱근 평균 가속도(Root-mean-square acceleration) a_{rms} 는 다음 식에 의하여 정의된다.

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t}\int_o^t [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_o} \tag{3}$$

여기서 $a(t)$: 가속도 시간기록, t : 지진동 지속시간이 상수는 지진동에 의하여 발산된 에너지의 시간에 대한 평균적인 값을 나타낸다. 또한 지진동 지속시간 효과를 포함하기 때문에 공학적 목적에 유용하나, 짧은 시간에 걸친 고주파의 큰 진폭값에 영향을 받는다는 약점이 있다. 이 상수는 모든 주파수의 에너지의 합을 나타내기 때문에 주파수의 정보를 갖고 있지 않으며 지속시간의 정의에 따라 그 값이 변화한다.[4]

Arias 진도(Arias Intensity) I_a 는 Arias[5]가 제안한 진도로서 다음 식에 의하여 정의 된다.

$$I_{aX} = \frac{2\pi}{g}\int_o^t [a_X(t)]^2 dt \tag{4}$$

여기서 I_{aX} : X(E-W) 방향의 Arias Intensity
$a_X(t)$: X방향의 가속도 시간기록
t : 지진동 지속시간

이 상수는 지진동 종료시 비감쇠 단진동에 의하여 저장된

단위질량당 총에너지를 뜻하며, $I_a = I_{aX} + I_{aY}$ (I_{aX}, I_{aY}: E-W 및 N-S방향의 Arias Intensity)로 나타낼 수도 있다.

한편 스펙트럼 진도(Spectrum Intensity) SI는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$SI = \frac{1}{2.4}\int_{0.1}^{2.5}[S_V(T,\xi)]dT \quad (5)$$

여기서 $S_V(T,\xi)$: 주기 T, 감쇠계수 ξ 일 때의 속도응답 스펙트럼 값

이 스펙트럼진도는 Housner[6]에 의하여 도입된 지진동 상수로서 Housner 진도로도 불리며, 진동에 취약한 구조물의 피해에 맞도록 적분구간이 설정되어 있다. 가속도 응답스펙트럼에서 최대응답가속도(Maximum Acceleration Response Spectrum Amplitude)는 구조물의 내진 안전성과 관련하여 사용되고 있는 지진동 상수이다.

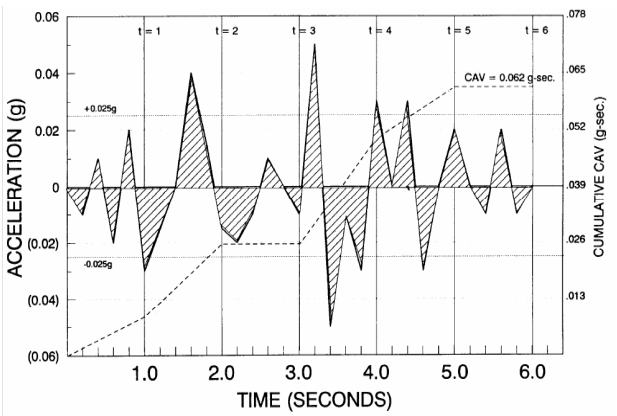
누적절대속도 CAV는 EPRI[7]에 의하여 제안되었으며, 다음 식으로 표현된다.

$$\mathrm{CAV} = \sum_{\mathrm{I}=1}^{\mathrm{N}} H(\mathrm{pga}-0.025)\int_{t_i}^{t_{i+1}}|a(t)|dt \quad (6)$$

여기서 N: 가속도 기록에서의 1초-시간창의 수

$H(x)$: Heaviside 함수

pga: 시간창 I 에서의 최대지반가속도



〈그림 2〉 CAV 계산예의 모식도

$|a(t)|$: 가속도 시간기록의 절대치

이 상수는 절대가속도의 적분값으로서 구조물에 손상을 주는 일정 크기 이상의 진폭을 가진 속도를 누적하여 계산한다(그림 2 참조). 따라서 보수적인 내진 안전성이 요구되는 원자력발전소와 같은 시설물에 널리 적용되고 있다.

2.2 강진동 모사

앞에서 언급한 바와 같이, 한반도는 인접한 북동 중국이나 서남일본에 비하여 지진활동이 활발하지 않은 편이며, 큰 규모 지진의 발생빈도도 낮아 이용 가능한 지진자료, 특히 큰 규모의 지진자료는 극히 제한적이다. 따라서 모사 또는 합성과 같은 방법으로 한반도의 지진특성에 맞는 강진동을 얻을 수밖에 없다.

이 연구에서는 Boore[8]의 추계학적 모사법을 이용하여 시간영역에서 강진동을 모사하였다. 강진동 모사에 있어서의 주요 입력상수들은 한반도 지진특성에 관한 최근의 연구를 참조하여 선정되었다. 선정된 주요 입력상수들은 표 2와 같다. 위의 입력상수들을 이용하여, 15개의 모멘트 규모(4.0, 4.25, 4.5, 4.75, 5.0, 5.25, 5.5, 5.75, 6.0, 6.25, 6.5, 6.75, 7.0, 7.25, 7.5) 에 대하여 진원거리 1~200km 구간을 20등분하여 강진동을 모사하였다. 이 방법으로 얻어진 강진동 자료의 수는 15×21=315개이다.

2.3 지진동 상수들 사이의 관계

전 항에서 모사된 강진동 자료를 이용하여 6개의 지진동 상수 즉, 1) JMA 계측진도를 계산하기 위한 가속도(a_0), 2) PGA, 3) RMS 진폭, 4) CAV, 5) Arias 진도, 6) Spectrum 진도를 계산하였다. 또한 지진동 상수들을 계산하여 그들 사이에 어떤 관계가 있는가를 조사하였다. Shabestari et al.[12]은 미국 서부지역에서 관측된 강진동에 대한 JMA 가속도 a_0와 조사된 MM진도와의 사이에 다음과 같은 경험식을 유도하였다.

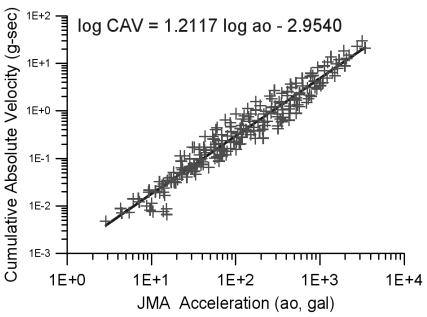
$$MMI = 3.93\log a_0 - 1.17 \quad (7)$$

〈표 2〉 강진동 모사를 위한 주요 입력 상수

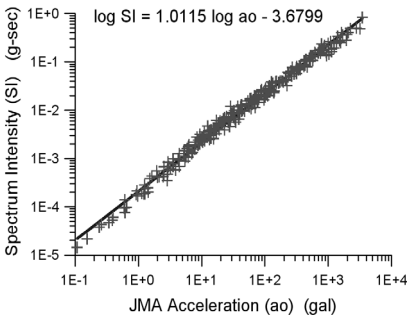
입력상수	값	참고문헌
Stress Drop (응력강하량)	100 bar	김성균 · 김병철[9]
K (스펙트럼 감쇠상수)	0.016	조남대 · 박창업[10]
Q (감쇠식)	$Q = 452.8f^{0.61}$	김서영 · 김성균[11]
Geometrical Spreading Factor (기하계수) n	$n = 1.0$ for $R \le 85km$ $n = 0.5$ for $R > 85km$	김서영 · 김성균[11]

〈표 3〉 지진동 상수 관계식의 계수

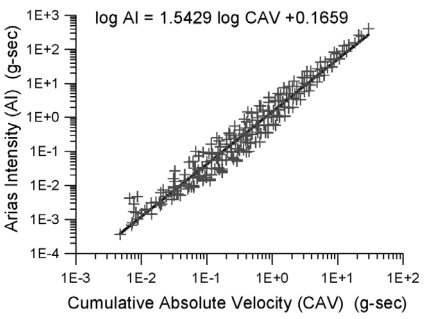
Y \ X		1	2	3	4	5	6
1. Acceleration to decide JMA Intensity	a	1.0000	0.9908	0.9491	0.7746	0.5043	0.9704
	b	0.0000	2.5369	3.0493	2.4128	2.3328	3.6012
2. Peak Ground acceleration	a	0.9613	1.0000	0.9565	0.6537	0.4895	0.9292
	b	-2.4822	0.0000	0.5152	-0.1732	-0.2333	0.9720
3. RMS Amplitude	a	1.0032	1.0421	1.0000	0.6638	0.5103	0.9696
	b	3.1307	-0.5416	0.0000	-0.7255	-0.7845	0.4739
4. Cumulative Absolute Velocity(CAV)	a	1.2117	1.2210	1.1941	1.0000	0.6170	1.1853
	b	-2.9540	0.1113	0.7634	0.0000	-0.1262	1.4360
5. Arias Intensity	a	1.9667	1.9674	1.8826	1.5429	1.0000	1.9079
	b	-4.5992	0.4073	1.4219	0.1659	0.0000	2.4820
6. Spectrum Intensity	a	1.0115	0.9982	0.9560	0.7720	0.5099	1.0000
	b	-3.6799	-1.1176	-0.6015	-1.2470	-1.3207	0.0000



〈그림 3〉 CAV와 JMA 가속도의 관계



〈그림 4〉 JMA 가속도와 스펙트럼 진도의 관계



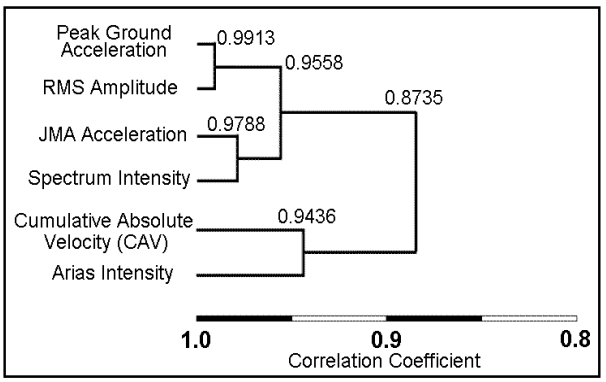
〈그림 5〉 CAV와 Arias 진도의 관계

이 연구에서는 위 식을 이용하여 JMA가속도로부터 MM 진도를 계산하였다.

모사된 315개의 강진동 자료에 대하여 계산된 강진동 상수들 사이의 관계를 $\log Y = a\log X + b$ 의 선형함수로 가정하여 각 상수들 사이의 관계식을 추정하였다. 표 3에 이 관계식의 계수를 제시하였다. 여기서 JMA 계측진도는 연속적인 관측량이 아니기 때문에, 또한 진도가 아닌 진도를 결정하기 위한 가속도(식 (2)의 a_0)를 진도 대신 나타내었다. 왜냐하면, JMA 진도는 불연속적인 양이지만, 가속도는 연속적인 양이기 때문에 수치적 취급에 있어 편리하기 때문이다.

그림 3, 4, 5에 JMA가속도와 CAV와의 관계, JMA가속도와 Spectrum 진도와의 관계, CAV와 Arias 진도와의 관계를 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 JMA 가속도는 Spectrum 진도와 상관이 크고, CAV는 Arias 진도와 상관이 큰 것으로 나타났다.

위에서는 지진동 상수들 사이에 선형적인 관계를 가정하여 이들 사이의 관계를 분석해 보았다. 그 결과 Arias 진도와 CAV, JMA 가속도와 스펙트럼 진도사이에 상관이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 상관이 큰 상수들 사이에는 서로 대신 사용함이 가능함을 의미한다. 다음으로 지진동 상수들을 통계학적인 기법으로 군집분석을 수행하였다. 군집분석은 대상(개체 또는 변수)들 사이에 서로 연관성이 큰 대상을 동질집단으로, 연관성이 작은 대상을 이질 집단으로 분류하는 통계적 기법이다. 보통 분류는 상호 유사성(similarity)에 의하여 이루어지며, 유사성의 척도로서는 m 차원의 Euclidian 거리 또는 상관계수가 사용된다.[13),(14)] 이 연구에서는 그 척도로서 상관계수를 사용하



〈그림 6〉 지진동 상수들 사이의 계통도

였다. 분류방법은 먼저 유사성의 정도가 가장 큰 두 개의 대상을 묶어, 하나의 대상으로 통합한다. 다음으로 두 개의 대상과 다른 대상과의 유사성의 값을 평균한 후, 다시 가장 큰 값을 가진 대상을 묶는다. 이와 같은 과정을 반복하면 모든 대상이 분류된다.

위의 방법에 따라 군집분석을 수행한 결과를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, PGA-RMS 진폭, Arias 진도-CAV, JMA 가속도-스펙트럼 진도가 우선적으로 상호 관련성이 큰 대상으로 묶이게 되며, 최근 미국 원자력 발전소의 강진동 평가상수로서 중요시 되고 있는 CAV와 JMA 진도는 서로 다른 집단에 속한다고 볼 수 있다. 따라서 JMA 가속도는 CAV와는 별개로 추가의 평가조건으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

2.4 지진동 상수의 감쇠

큰 규모의 지진이 발생했을 때, 어떤 지역에서 어느 정도의 에너지를 가진 지진파가 전달되어 어느 정도의 피해를 입게 될까를 예측하기 위해서는 지진동의 감쇠식이 필요하다. 이 연구에서는 PGA 및 JMA 가속도가 어떻게 감쇠하는가를 예측하는 감쇠식을 지진규모와 진원거리의 함수로 유도하였다. 감쇠식의 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$\ln Y = c_0 + c_1 R - b \ln R$$
$$c_i = X_0^i + X_1^i (M-6) + X_2^i (M-6)^2 + X_3^i (M-6)^3 \quad (8)$$

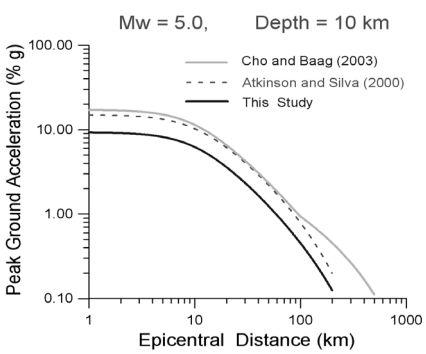
여기서 M: 모멘트규모, R: 진원거리

위 식은 지진규모의 3차식으로 규모가 거리를 입력하여 지진동 상수를 원하는 장소에서 구할 수 있는 예측식이다. 이 식에 맞춰 구한 상수들을 표 4에 제시하였다.

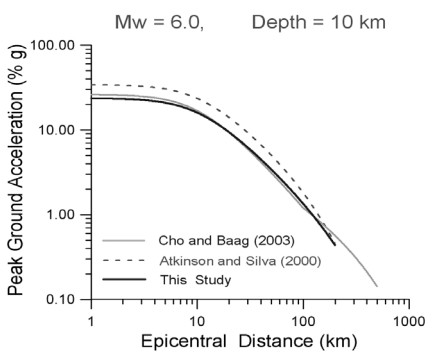
위의 계수들을 대입하여 각각의 지진동 상수에 대한 감쇠곡선을 얻을 수 있다. 그림 7, 8, 9에 각각 지진규모 5, 6, 7에 대한 감쇠곡선을 다른 연구와 비교하여 도시하였다. 이 연구에서의 감쇠곡선은 국내지진에 대하여 Jo and Baag[10]이 얻은 감쇠식과 미국 서부지역에 대한 Atkinson and Silva[15]의 중간 정도를 나타내고 있다. 또한 그림 10에는 모멘트 규모 5, 6, 7에 대응하는 JMA 가속도의 감쇠와 MM진도의 하한값이 도시되어 있다. 그림에서 규모와 진원거리가 주어지면 MM진도를 예측할 수 있으며, 이러한 예측이 어떤 지역에 대하여 실시간으로 이루어진다면 재해에 대한 직적 대비가 가능하게 되어 결과적으로 재해경감에 기여할 수 있게 된다. Reg. Guide 1.166[16]에서는 강진 발생 후, Response Spectrum, CAV 및 장치의 가동여부를 평가

〈표 4〉 지진동 감쇠상수

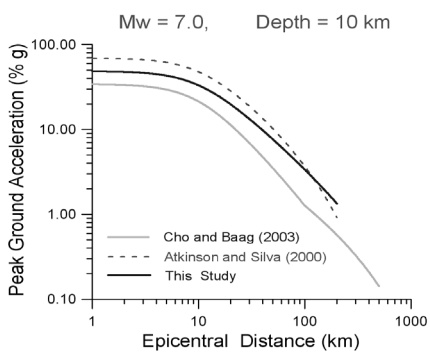
coefficient	PGA	JMA acceleration	CAV
X_0^0	0.1513597E+01	-0.1585928E+01	0.7712265E+00
X_1^0	0.8966798E+00	0.1798488E+01	0.1775738E+01
X_2^0	-0.9737223E-01	-0.1291439E+00	-0.5230469E-01
X_3^0	-0.2079751E-01	-0.8974919E-01	-0.2545419E-01
X_0^1	-0.1442872E-02	0.2541028E-02	-0.3053401E-01
X_1^1	0.1055586E-02	0.8188868E-03	0.4235030E-02
X_2^1	0.1219790E-03	-0.1901788E-02	0.3657246E-02
X_3^1	0.2869758E-03	-0.9664526E-04	0.2722815E-03
b	0.1246264E+01	0.1037352E+01	0.8240668E+00



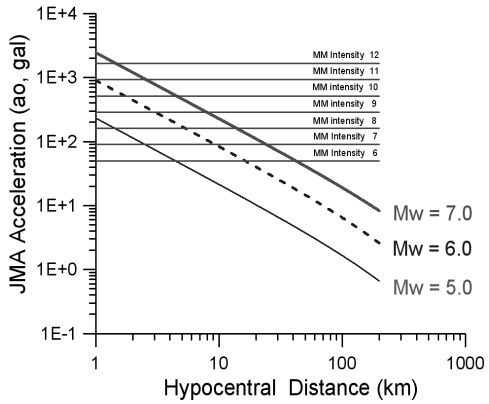
〈그림 7〉 모멘트 규모 5.0에 대한 감쇠 비교



〈그림 8〉 모멘트 규모 6.0에 대한 감쇠 비교



〈그림 9〉 모멘트 규모 7.0에 대한 감쇠 비교



〈그림 10〉 JMA 가속도의 감쇠와 MM진도

하도록 규정하고 있다. 즉 강진 발생후 지진피해를 일으킬 수 있는 최소 CAV (0.16g-sec)의 초과여부를 평가조건으로 채택할 수 있다.[17] CAV값 0.16g-sec에 대응되는 JMA 가속도 a_0는 표 3 또는 그림 3의 a_0-CAV의 경험적 관계로부터 62.6gal을 얻을 수 있다. 따라서 이 최소 CAV(0.16 g-sec)에 대응하는 JMA 가속도 a_0 (~62.6 gal)의 초과여부를 추가의 평가조건으로 부여함으로서 주요 시설물의 내진안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

1. 이 연구에서는 한반도의 지진원 특성에 맞는 강진동 315개를 추계학적 기법으로 모사하여, 이 강진자료를 이용하여 정확한 정의에 따라 상수들이 계산되었다. JMA 계측진도는 불연속적인 양이기 때문에 이 계측진도대신에 진도를 결정하기 위한 가속도(a_0)를 직접 사용하였다.
2. 이와 같이 계산된 상수들 사이의 경험적인 선형 관계식을 결정하였다. 또한 이 상수들을 몇개의 그룹으로 분류하기 위한 군집분석을 수행하였으며, 이 분석에서는 유사성의 척도로서 상관계수를 사용하였다.
3. 그 결과, JMA 가속도 a_0는 스펙트럼 진도와 유사한 그룹으로 분류되며, CAV와는 비교적 관계가 먼 그룹으로 나타났다.
4. PGA, JMA가속도, CAV에 대한 감쇠식이 지진규모와 진원거리의 함수로 유도되었으며, 이 식은 지진재해의 예측에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
5. 강진 발생 후, 지진피해를 일으킬 수 있는 최소의 CAV (0.16 g-sec)에 대응하는 JMA 가속도(~62.6 gal)의 초과여부를 새로운 추가의 평가조건으로 부여함으로서 주요 시설물의 내진안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 원자력연구개발사업 "가동원전 구조물 내진성능 재평가 규제기술개발"의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Japan Meteorological Agency, "*http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html*".
2. Kashima, T., "*http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/soa2000/soa.htm*".
3. Karim, K.R., and Yamazaki, F., "Corelation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 1191-1212, 2002.
4. Danciu, L., and Tselentis, G.-A., "Engineering ground motion parameters attenuation relationships for Greece," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 97, 162-183, 2007.
5. Arias, A., "A measure of earthquake intensity, in Seismic Design of Nuclear Power Plants," *Edited by Hansen, R., MIT Press, Cambridge, Massachusettes*, 438-483, 1970.
6. Housner, G.W., "Spectrum intensities of strong motion earthquakes," *in Proceedings of Symposium on Earthquake and Blast Effects Structures, C.M. Feigen(Editors), Los Angeles*, 21-36, 1952.
7. EPRI(Electric Power Research Institute), "Standardization of the cumulative absolute velocity," *EPRI TR-100082s*, 1991.
8. Boore, D.M., "SMSIM - Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3 - A Revision of OFR 96-80-A," U.S. *Geological Survey*, 55, 2005.
9. 김성균, 김병철, "한반도 지진의 지진원 상수," 한국지구과학회지, 제29권, 2호, 117-127, 2008.
10. 조남대, 박창업, "한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 추정 및 강지진동의 추계학적 모사," 한국지진공학회논문집, 제7권, 6호, 59-70, 2003.
11. 김서영, 김성균, "국내 광대역 지진관측소의 부지증폭 특성," *한국지구과학회지*, 제30권, 7호, 610-623, 2009.
12. Shabestari, K.T., and Yamazaki, F., "A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, 711-723, 2001.
13. Davis, J.C., *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons Inc., *New York, U.S.A.*, 550, 1973.
14. Reghunath, R., Murthy, T.R.S., and Raghavan, B.R., "The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnatake, India," *Water Research*, Vol. 36, 2437-2442, 2002.

15. Atkinson, G.M. and Silva, W., "Stochastic Modeling of California Ground Motions," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90, 255-274, 2000.
16. U.S. NRC, "Regulatory guide 1.166 Pre-earthquake planning and immediate nuclear power plant operator post-earthquake actions," *U.S. Nuclear Regulatory Commission*, 1997.
17. McCann, M.W., "Development of U.S. NRC OBE exceedance criteria for NPPs," *International Workshop on Technical issues of Post-earthqwuake Procedure for NPPs organized by KEPRI, NETEC, KHNP, and KOPEC*, 2009.