

韓半島의 地震活動과 動的解析을 위한 最大地盤加速度값의 算定

Seismicity and the Peak Ground Acceleration Values
for Aseismic Designs in Korea

劉 哲 秀*
Yu, Chul Soo

Abstract

The strain release associated with historical and instrumental earthquake data are analyzed. In addition, the relationship between engineering intensity and cumulative frequency of earthquake occurrence is investigated. Based on the study, a seismic zoning map of the Korean peninsula is constructed. For each seismic zone, a peak ground acceleration value is determined for the aseismic designs of two types of structures. First type is general structures like buildings and the second type is special structures like nuclear power plants.

要 旨

韓半島에서 歷史地震과 計器地震 記錄에 의한 變形에너지 放出量이 산정되었다. 또한, 地震發生 震度와 累積頻度の 관계를 산출하였다. 本研究의 主된 目的으로서 韓半島의 地震危險圖를 작성하였다. 그리하여 地震危險圖의 各 區域에서 두 種類 構造物의 耐震設計를 위한 最大地盤加速度를 결정하였다. 첫번째 형태는 건물이나 교량과 같은 一般 構造物이고 두번째 형태는 原子力發電所와 같은 特殊構造物이다.

1. 序 論

자연에 의한 재해중에서 파괴규모가 엄청나게 큰 地震에 의한 피해가 최근에 세계적으로 빈번해지고 있다. 현대의 一般 構造物의 대형화와 산업발달로 인한 특수 構造物의 建設, 그리고 많은 공업단지의 造成으로 인하여 비록 大規模 地震發生 確率이 작다고 할지라도 그에 대한 대책이 없을 경우에 입게 될 社會的 損失은 실로 막대하다. 따라서 地震이 많이 발생하는 나라는 물론이고 地震危險이 그다지 크지 않은 여러 나라에서도 構造物 設計時 그 나라의 실정에 적합

한 耐震設計를 의무화하여 만약의 사태발생시의 피해를 最小化시키려는 노력을 하고 있다. 現存 耐震規定을 가진 나라는 34 개국에 달하고 있다. 하지만 우리 나라에서는 地震에 의한 피해가 近世에 들어와서 적었던 관계로 地震이 일반의 관심대상이 되지 못하였다. 그러나 세계적으로 18세기 중엽부터 19세기까지 休止期 상태에 있던 地震活動이 20세기에 들어와서 점차 활발해짐에 따라⁽¹⁾ 세계 각지에서 地震에 의한 피해가 자주 보도되고, 우리 나라에서도 최근 홍성지진(1978)과 지리산지진(1936) 등 強震이 발생하여 우리 나라에서 각 構造物에 대한 耐震設計의 필요성이 증대되고 있다.

* 正會員·高麗大學校 工科大學 教授, 土木工學科

發生確率は 작고 그에 따른 荷重이 큰 地震荷重의 특수성을 고려할 경우에 耐震設計는 여러 일반적인 荷重에 대한 構造設計와 다른 目的을 갖고 있다⁽¹⁾. 이와 같은 目的을 고려하여 設計地震力을 결정하기 위한 方法으로서 實際觀測된 波形이나 여러 實測 波形을 조합한 人工波形을 이용하는 경우와 地盤運動의 특성과 地盤構造物의 振動특성 등을 고려하여 작성된 유사한 區域들에 따라 地震危險 區域을 나눈 地震危險圖과 그에 따른 最大地盤加速度를 設定하는 경우가 있다.

우리 나라의 경우에 實測 波形의 비신뢰성과 設計應答 스펙트럼 작성의 어려움 등 여러가지 한계에 의해, 本 研究에서는 우리 나라에서 여러 構造物의 設計地震力을 산정하기에 적합한 工學的 地震危險圖을 地震活動을 고려하여 設定하고 그에 따른 最大地盤加速度를 確率개념을 도입하여 산정하고자 한다.

2. 韓半島에서 地震活動

일반적으로 韓半島가 地震安定 地帶로 인식되어 왔지만 歷史地震과 計器地震 자료를 살펴보면 크고 작은 地震活動이 계속되어 왔다. 韓半島 地震活動의 歷史的 記錄은 A.D. 2년부터 나타나고 計器에 의한 記錄은 1905년부터 시작되었다. 이러한 歷史地震과 計器地震에 의한 韓半島에서 地震發生回數는 1985년 6월까지 2,729회에 달하고 있다^(1,2). 板 構造論에 의하면 韓半島는 유라시아板 內에 위치하여 태평양板이 日本 海溝에서 유라시아板 밑으로 비스듬히 침강하고 오스트레일리아—인도板이 히말리아 산맥에서 유라시아 板과 충돌함에 따라 이 板들의 相對運動으로 震源깊이가 70 km 미만인 淺發地震이 주로 발생된다. 또한 세계적인 地震추세와 같이 韓半島에서도 15세기부터 17세기까지 地震活動이 활발한 후에 18세기 중엽부터 地震休止期에 들어 갔다. 그러나 최근 20세기 중엽부터 다시 활발한 地震活動을 南部지역과 西部지역에서 觀測할 수 있다. 이것을 地震에너지의 蓄積과 放出관계로 설명하면 200여년의 地震休止期 동안에 蓄積된 탄성변형에너지가 최근에 放出되고 있다고 할 수 있다. 그림 1은 韓半島

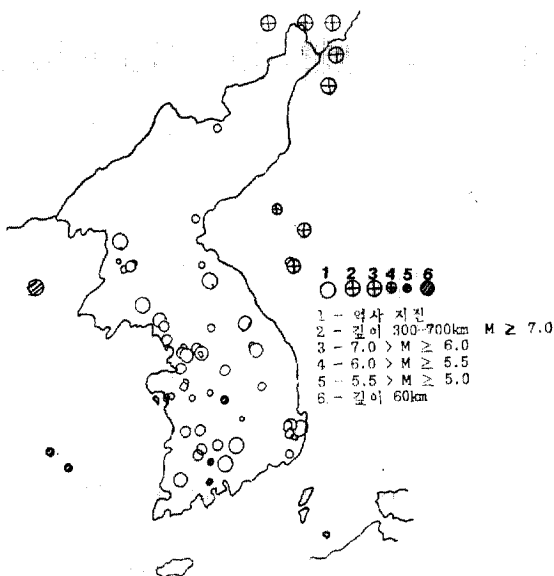


그림 1. 韓半島에서 歷史地震과 計器地震

에서 大規模 歷史地震과 計器地震을 나타내고 있다⁽³⁾.

韓半島의 地震活動은 대체로 지역별특성을 나타내고 있다. 이러한 현상을 고려하여, 韓半島에서 地震性格을 다음 3가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 발생된 地震들이 해안선을 따라 境界面에서 線狀分布하는 동해안 地震帶로서 대체로 深部 地震들이 分布한다. 둘째, 서해안地震帶는 震源의 깊이가 60km 이하인 淺部 地震으로서 震度가 JMAⅢ 이하인 微震들이지만 發生 頻度면에서는 동해안보다 매우 높다. 셋째, 남부地震帶로서 強震, 微震 등이 많이 발생하는 지역이다. 여기서, 서해안地震帶와 남부地震帶는 斷層線을 따라서 應力集中 현상과 관계있다고 할 수 있다.

3. 變形에너지 放出 調査

地震은 地殼의 일부가 힘을 받아 變形되었다가 일정한 한계에 이르면 蓄積된 彈性變形에너지의 돌발적인 放出로 인하여 振動을 일으켜 전파해 나가는 현상이라 할 수 있다⁽⁴⁾. 따라서 地震의 크기와 地震의 放出에너지의 相互關係를 고려하여 變形에너지 放出에 따른 地震의 크기

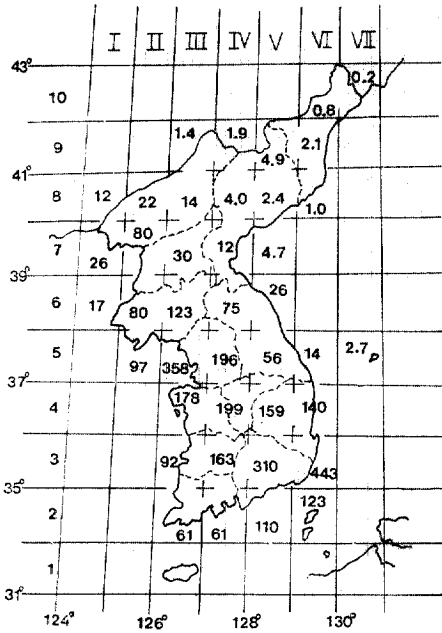


그림 2. 累積 變形에너지 放出量(規模 4기준, AD 2~1985)

를 추측할 수 있다.

韓半島에서 變形에너지 放出 調査를 위해 위도 1°, 경도 1°의 크기로 70개 구간으로 나누었다. 그리고 각 구간에서의 地震 資料를 震度別로 합산하여 規模(magnitude)와 放出에너지量과의 관계식인 $\log E = 11.8 + 1.5M$ 에 의해 變形에너지 放出量이 산출되었다. 構造物에 손상을 주는 정도인 規模 4 이상의 地震의 영향을 고려하여 變形에너지 放出量을 나타내기 위해 相對數值 개념인 $N-4$ 치를 도입하여 나타내면 각 구간별 變形에너지 放出量은 그림 2와 같다.

그림 2에서 관찰할 수 있듯이 行政區域上으로 경상도지방과 황해도 남부를 포함하는 경기도 연안지방이 變形에너지 放出이 가장 많다. 變形에너지 放出이 많다는 것은 地殼 構造의 運動이 相對的으로 활발하다는 것을 말해주므로 地震危險이 크다는 것을 알 수 있다.

4. 地震危險圖와 地震 發生頻度

4.1 地震危險圖(Seismic Zoning Map)

耐震設計를 위해서는 유사한 地震 發生 特性

을 갖는 區域別로 임의 地域을 구분해 주는 地震危險圖가 필요하다. 地質學的, 地震學的 정보로부터 地震危險圖는 여러 등급으로 나누어 진다. 가장 큰 등급으로서 地震危險圖는 地震動의 여러 震度가 발생했거나 기대할 수 있는 地域 혹은 場所를 정해준다^(4,8). 세계 여러 나라에서 사용되고 있는 地震危險圖는 地質的 要素, 地震의 頻度와 規模, 歷史的 震度, 그리고 세계 다른 지방의 地震으로부터 오는 主觀的 外挿法(extrapolation)에 기초를 두고 있다. 지도상에서 危險은 相對的 혹은 確率의 상태이다.

地震危險圖를 작성하는 방법으로서 震度 감쇠식의 이용이나 變形에너지 분배에 의한 경우가 있다. 그림 3은 Gutenberg-Richter式에 의한 地震, 再發 頻度を 계산한 統計的 方法으로 變形에너지 분배를 이용하여 작성된 韓半島의 地震危險圖이다.

한편, 韓半島의 地震危險圖에서 각 區域의 變形에너지 放出量을 산정하여 美國 Algermisson⁽⁷⁾이 산정한 美國 여러 地域의 變形에너지 放出量과 비교하면 표 1과 같다.

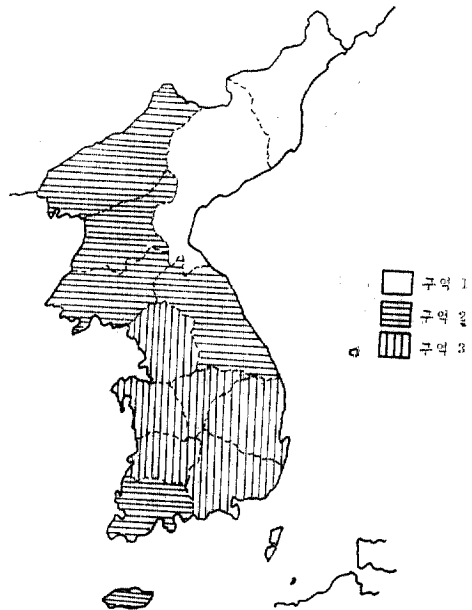


그림 3. 地震危險圖

표 1. 韓半島와 美國의 變形에너지 放出比較
(1985년當 9,600 km²에서의 規模 4 기준)

地 域	變形에너지 放出量
III-5 (韓國)	358
II-6 (韓國)	80
IV-7 (韓國)	12
Pacific West (美國)	1755
Rocky Mountain (美國)	292
Eastern (美國)	108
Central Plain (美國)	20

4.2 각 區域의 震度-頻度 관계

地震 特性을 나타내는 데는 變形에너지 放出量과 더불어 震度-頻度 관계가 중요하다.

震度-頻度 관계식은 Richter의 식으로 표시할 수 있다.

$$\log N = a - b I_{mm}$$

여기서, I_{mm} : 震度

N : I_{mm} 이상의 累積頻度

a, b : 상수

震度-頻度 관계를 조사하기 위해 지진자료는 AD 2~1982년의 歷史地震과 計器地震 자료를 사용하여 각 區間別 再來期가 500년인 震도가 5 이상의 區間에 대하여 그림 4에 震도와 함께 나

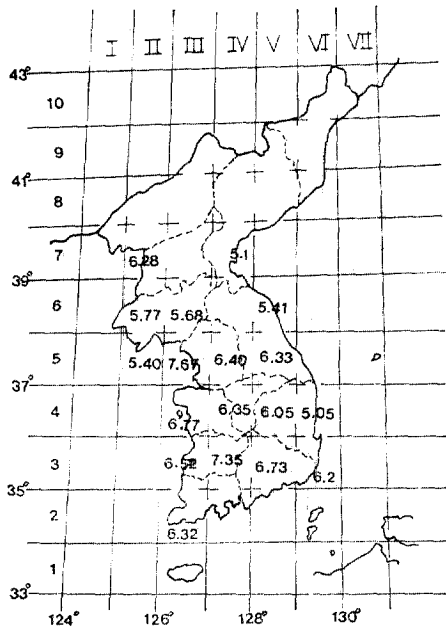


그림 4. 再來期 500年인 震度分布

타냈다. 그림 4에서 중부 이남의 地域은 대부분 6 이상의 震度를 보여 주고 있다. 이는 그림 2의 累積變形에너지 放出量과 다소 차이를 보여주고 있지만 중부 이남 地域에서 地震危險이 他 地域에 비해 높다는 것에 一致하고 있다.

표 2는 우리나라와 美國의 地震 再發 크기를 비교한 것이다. 표 2에 의하면 우리나라에서 地震危險圖의 區域 3에 있는 III-5 區間은 美國의 중부 일부 地域이나 동해안 地域보다 強震 再發 가능성이 높다고 할 수 있다.

표 2. 우리나라와 美國의 地震再發生 크기 比較

地 域	震 度			
	V	IV	VI	VII
III-5 (韓國)	22.8	10.9	5.2	2.5
III-2 (韓國)	4.5	1.9	0.8	0.4
IV-7 (韓國)	1.5	0.7	0.3	0.2
Calif & Nevada (美國)	207.6	57.6	15.3	3.3
Nebraska, Kansas (美國)	9.5	3.0	0.9	0.2
East Coast (美國)	8.7	2.3	0.6	0.2

5. 最大 地盤加速度

(Peak Ground Acceleration)

5.1 一般 構造物

耐震設計를 目的으로 각 區域의 設計震度を 결정할 때 어느 기간 동안에 어느 정도의 發生 確率을 갖는 震度を 設計震度로 하는가가 매우 중요하다.

一般 構造物에서 耐震設計를 目的으로 사용하는 震도는 50년 이내에 非超過確率 90%인 震度이다. 따라서 地震 發生이 우발적이고 Poisson 分布를 갖는다고 가정하면 再來期 T_r 년 中 k 년째까지 地盤加速度 a_k 이하인 것이 發生할 累積確率인 非超過確率は 다음식으로 구할 수 있다⁽¹²⁾.

$$C_k(a_k) = \frac{1}{e^{k/T_r}} \quad (5-1)$$

식 (5-1)을 이용하여 구한 再來期는 약 500년 정도가 된다. 즉, 50년 내에 非超過確率が 90%인 震도는 再來期 50년인 震도와 같다^(8,11).

또한, 設計震度を 결정하는 데에는 再來期와 더불어 基準 面積이 중요하다. 設計震度란 再

來期 T_r 년에 어느 基準面積내에 한번 超過發生 할 수 있는 震度を 말한다. 한 地震區域내에서 地震의 頻度는 面積에 비례한다고 가정할 때 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\log N = a - bI_{mm} \quad (5-2)$$

여기서, I_{mm} ; 設計 震度

N ; 面積 A_r 에서 T_r 년 동안에 발생할 累積頻度

a, b ; 상수

따라서 再來期 T_r 년 동안 基準面積 A_r 에서 발생할 地震의 頻度 N' 는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$N' = \frac{N' \times A_r \times T_r}{A_r \times T_r} \quad (5-3)$$

식 (5-3) 에 $N'=1$ 을 대입하면 T_r 년 동안 A_r 의 基準 面積에 한번 超過할 수 있는 設計震度を 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{mm} = \frac{a + \log A_r T_r - \log A_r T_r}{b} \quad (5-4)$$

그림 5의 (a)는 10,000 km² 의 面積에 再來期 500 년인 一般 構造物의 각 區域에 대한 震度-頻度 관계 그래프이다.

設計震도가 결정되면 이것으로부터 耐震設計에 직접적으로 필요한 最大地盤加速度를 다음과 같은 震度-加速度 관계식으로 산출할 수 있다⁽¹³⁾.

$$\log a_h = 0.014 + 0.30I_{mm}$$

이와 같이 구한 韓半島에서 각 地震危險區域에 대한 一般 構造物의 最大地盤加速度는 표 3 과 같다.

표 3. 우리 나라에서 각 構造物의 最大地盤加速度 (g: 중력가속도)

地 域	最大 地盤加速度	
	一般 構造物	原子力發電所
區 域 1	0.03	0.04
區 域 2	0.10	0.13
區 域 3	0.20	0.28

5.2 原子力 發電所

原子力 發電所 建設에 있어서 耐震設計는 地震에 의해 노출되는 放射線 物質로 인한 피해로

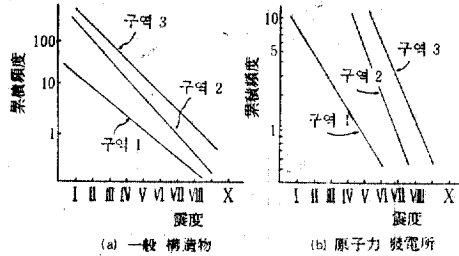


그림 5. 各地域에 대한 震度-頻度

부터 인접지역 거주민들의 생명과 건강을 보호하는데 중요한 의미가 있다. 따라서 一般 構造物보다 더 큰 安全性을 유지해야 한다.

原子力 發電所의 耐震設計에서 SSE (Safe Shutdown Earthquake)에 대한 單位年當 發生 確率은 정확하게 정의되어 있지 않다. 美國의 ANS (American Nuclear Society)에 의하면 임의 地域에서 SSE의 發生 確率을 單位年當 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 의 發生 確率을 제시하고 있다. 또한, IAEA (International Atomic Energy Agency)는 임의 地域에서 SSE의 發生 確率을 單位年當 10^{-4} 를 정의하고 있다. IAEA에 의해 우리나라에서 原子力 發電所의 耐震設計를 위한 最大地盤加速度를 산정하기 위해 韓半島에서 적절한 面積인 800 km² 를 基準으로 하여 再來期 10,000 년을 고려하였다. 그에 따른 우리 나라의 각 地震區域에서의 地震 再發 震度-頻度 관계 그래프가 그림 5의 (b)와 같이 산출되었다.

이와 같은 震度-頻度 관계와 震度-加速度 관계를 나타낸 Trifunac 과 Brady 의 관계식⁽¹³⁾ 을 이용하여 最大地盤加速度를 표 3 과 같이 산정하였다.

표 3에서 알 수 있듯이 우리 나라에서 地震區域 3의 原子力 發電所에 대한 最大地盤加速度는 0.28 g 가 산정되었다. 이것은 우리나라 地震區域 3보다 다소 地震活動이 적은 美國 동해안 地域의 ANS에서 제시한 SSE 값인 0.2 g 보다 비례적으로 크게 산정된 적절한 값이라 할 수 있다.

현재, 우리 나라의 地震區域 3이나 그 인접 地域에 建設된 原子力 發電所의 最大地盤加速度는

0.2 g 로 設計되어 있는데 이는 本 研究에서 산정한 0.28 g 에 비하여 약 30% 정도 작은 값이므로 앞으로 建設되는 原子力 發電所의 경우에 0.28 g 를 적용하여 設計하도록 推薦하고 싶다.

6. 結 論

우리 나라에서 地震活動과 地震危險을 조사, 분석하고 構造物의 耐震設計에 필요한 地震危險圖과 그에 따른 最大地盤加速度를 산출하였다. 그리하여 本 研究에서는 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 우리 나라에서 地震活動은 무시할 정도가 아니며 그 크기에 있어서 美國의 地震危險區域 2 인 중부 일부 地域이나 동해안 地域보다 큰 것으로 나타났다.
2. 變形에너지 放出量 調査와 각 區域別 震度-頻度 關係를 조사한 결과, 그 크기와 분포가 대체로 일치하여 그에 의해 耐震設計에 필요한 地震危險圖를 산출 하였다.
3. 一般 構造物과 原子力 發電所의 耐震設計를 위해 地震危險圖의 각 區域에 따른 最大地盤加速度를 確率개념을 도입하여 나타내었다. 그 결과, 最大地盤加速度가 一般 構造物일 경우에 區域 1 에서 0.03 g, 區域 2 에서 0.10 g, 區域 3 에서 0.20 g 가 산정되었고 原子力 發電所의 경우에 區域 1 에서 0.04 g, 區域 2 에서 0.13 g, 區域 3 에서 0.28 g 가 산정되었다.

參 考 文 獻

1. 김 소구 등, 홍성지진의 현황조사 연구, 과학기술처 1979.
2. 박 수희, "한국의 유감지진", 한국기상학회지, 제 5 권 제 7 호, 1969.

3. 박 수희, 지진과 방재, 신광출판사, 1982.
4. 金 昭九, 地震學, 博英社, 1987.
5. Chulsoo Yu, "Engineering Seismic Zoning for the Korean peninsula", *Proceeding of the First East Asian Conference on Structural Engineering & Construction*, 1986. Volume 2, Bangkok, Thailand,
6. Chulsoo Yu, "Seismic Risk for Nuclear Power Structures in Korea", *Proceedings of US-Korea Joint Seminar/Workshop on Critical Engineering System*, Seoul, Korea, 1986.
7. Aglermisson, S.T., "Seismic Risk Studies in the United States", *Proc. of the Fourth World Conf. on Earthquake Eng.*, Chile, 1969.
8. Donovan, N.C. et al, "Development of Expectancy Maps and Risk Analysis", *J. Struc. Div., ASCE*, August, 1978.
9. Rustanovich, D.M., Masaitis, V.L., Ch'on Heng Suk, "Physics of Solid Earth, the Seismicity of Korea and Aspects of its Seismotectonics and Seismic Zoning", *Izr. Geophys. Ser.*, 1961.
10. James, M.L., Smith, G.M., Wolford, J.C., *Applied Numerical Method for Digital Computation with Fortran and CSMP*, 2nd Ed., Happer & Row, 1977.
11. Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, June, 1978.
12. Richter, C.F., *Elementary Seismology*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, 1958.
13. Trifunac, M.D. and Erady, A.G., "On the correlation of Seismic Intensity Scale with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion", *Bull. of Seis.Society of Am.*, Vol. 65, No. 1, 1975.

(接受 : 1988. 1. 9)