

原子力構造물의 地震解析에 使用되는 入力運動에 대한 考察

Assessment of Input Motion for the Seismic Analysis of Nuclear Structures

朴 榮 基*
Park, Hyung Ghee
劉 哲 秀**
Yu, Chul Soo

Abstract

The acceleration levels and durations of seismic inputs for nuclear power plant design are surveyed. Among those inputs, two artificial acceleration time histories with same acceleration level and duration are selected and their characteristics are studied by calculating response spectra and spectrum intensity. The selected time histories which have the duration of 24 sec. satisfy the design response spectra of US Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.60. One of the selected time histories is improved to have the duration of 15 sec. without significant changes in the other characteristics. A case study of a plane model with 3 lumped masses is done using three time histories, i.e. two selected and one improved time histories. It is found that the improved curve gives almost the same results as the original one and reduces the computer time by about half, whereas two selected time histories give the results with same trend but much different magnitudes each other. It is claimed, however, that the improved time history is not the optimal one, but very economical in practical applications.

要 旨

原子力 構造물의 耐震解析에 使用되어온 入力運動의 가속도 크기와 持續時間을 調查하였다. 그 중 數值化된 자료를 얻을 수 있었던 持續時間 24 秒인 두 개의 人工加速度-時間履歷曲線에 대하여 加速度應答스펙트럼과 스펙트럼強度를 계산하여 特性을 파악하고, 持續時間 이외의 다른 特性이 크게 다르지 않도록 加速度 曲線 하나를 改善시켜 지속시간 15 秒의 다른 人工加速度-時間履歷曲線을 만들었다. 24 秒의 두 曲線과 改善시킨 曲線을 각각 原子力 5,6 號機 部品冷却建物の 모델에 入力시켜 地震解析을 遂行하였다. 24 秒의 原 曲線과 이로부터 改善시킨 曲線을 使用한 結果는 거의 同一하였으나, 24 秒의 두 曲線을 使用한 結果는 그 傾向은 같으나 큰 差異를 보였다. 또한 本 研究에서 使用한 모델에 改善시킨 曲線의 使用이 컴퓨터 利用時間을 약 절반으로 줄일 수 있음을 알았다.

*正會員·仁川大學 助教授, 土木工學科

**正會員·高麗大學校 工科大學 教授, 土木工學科

1. 序 論

商業 운전 중 핵분열 物質을 保有하게 되는 原子力發電所를 어떠한 경우에라도 安全하도록 設計하기 위하여 地震荷重에 대하여는 時間履歷曲線法에 의한 構造物의 動作解析이 要求되어지고 있다⁽¹⁾. 時間履歷曲線法으로 動的解析을 한다면 入力運動의 지속시간에 따라서 컴퓨터 使用時間과 容量이 좌우된다. 實務에서 使用되는 入力運動의 持續時間은 設計地震의 크기가 0.2g 以上인 경우에 대개 20秒 이상이 된다^(2,3,4,5,6,7,8). 그러므로, 入力運動이 構造物에 미치는 影響의 變化를 극소화하도록 妥當性있게 持續時間을 줄일 수 있는 方案이 講究된다면 所要될 經費를 節減시킬 수 있다. 또한 原子力發電所의 安全性 確保라는 側面에서도 入力運動이 地震解析 結果에 미치는 影響을 評價할 必要가 있다.

構造物의 地震解析 結果에 미치는 入力運動의 影響에 관한 研究로서는 Biggs⁽⁹⁾가 制限된 地震動의 記錄에 의하여 決定된 入力運動을 使用한 解析 結果에 대한 不確實性을 指摘한 후, Singh 和 Chu⁽¹⁰⁾ 등은 設計應答스펙트럼을 만족하는 두 개의 獨立된 加速度-時間履歷曲線을 El Centro의 1934年 地震(E-W 成分)과 1940年 地震(N-S 成分)記錄으로부터 修正하여 만들고, 이를 入力運動으로 使用하여 얻은 應答스펙트럼이 서로 크게 다르다는 것을 發表하였다. 1976년에 Stoykovich는 時間履歷曲線法, Biggs 方法⁽⁹⁾ 및 Kapur-Shao 方法⁽¹²⁾을 使用하여 間接적으로 美國

原子力規制委員會 規制指針 1.60⁽¹³⁾의 地面設計 應答스펙트럼을 만족하는 加速度-時間履歷曲線을 使用한 解析 結果에 큰 差異가 있을 수 있음을 밝혔다.

本 研究에서는 原子力 構造物의 耐震設計에 通常적으로 使用되어온 入力運動의 加속도 크기와 持續時間을 調査하고, 그 중 數值化된 자료의 入手가 可能했던 原子力 5,6號機 設計⁽¹⁴⁾에 使用된 持續時間 24秒의 人工加速度-時間履歷曲線의 特性을 파악한 후 그 特性이 크게 變하지 않도록 妥當性있게 지속시간을 15秒로 줄인 새로운 加速度-時間履歷曲線을 만들었다. 原 曲線과 改善시킨 曲線을 使用하여 原子力 5,6號機 部品冷却建物の 地震解析을 각각 遂行하고 解析 結果에 미치는 入力運動의 影響 평가를 바닥應答스펙트럼을 基準으로 하였다. 이는 바닥應答스펙트럼이 原子力發電 安全關聯 系統의 構造物, 器機 및 部品の 耐震設計時에 地震荷重으로 入力되어지기 때문이다.

2. 原子力 構造物 設計에 使用된 入力運動

同一한 耐震設計 規定을 만족하도록 設計된 수 개의 原子力發電所에 대하여 安全停止地震의 크기와 入力運動의 持續時間을 조사하여 表 1에 정리하였다. 조사 대상이 된 發電所는 美國 內의 原子力發電所 엔지니어링을 遂行하는 代表的 會社인 Bechtel, S&W, Ebasco, UE&C, TVA, G/C 등이 設計한 發電所 등이며, 原子力 9,10號機를 設計한 佛蘭西의 Sofinel의 경우도 함께 수록

表 1. 各 發電所의 安全停止地震의 加속도 크기와 入力運動의 持續時間

發電所 名	엔지니어링 會社	安全停止地震크기	持續時間	비고
Korea Nuclear Unit # 5,6,7,8	Bechtel, U.S.A.	0.20 g	24.0 sec	
North Anna # 1,2	Stone & Webster, U.S.A.	0.12 g	10.24 sec	
St. Lucie # 1	Ebasco, U.S.A.	0.10 g	20.0 sec	
Seabrook # 1,2	United Engineers & Constructor, U.S.A.	0.20 g	15.0 sec	
Yellow Creek # 1	Tennessee Valley Authority, U.S.A.	0.30 g	40.0 sec	
Korea Nuclear Unit # 2	Gilbert Commonwealth, U.S.A.	0.20 g	30.0 sec	
Korea Nuclear Unit # 9,10	Sofinel, France	0.20 g	30.0 sec	

하였다.

조사 결과에 의하면 實際 設計에 使用되는 入力運動의 持續時間은 設計地震의 크기가 0.2g 以上인 경우에 대개 20秒 以上이 된다.

調査된 入力運動의 數值化된 자료를 모두 얻을 수 없었기 때문에 그 資料의 入手가 가능했던 原子力 5,6號機의 水平成分을 나타내는 加速度-時間履歷曲線 H-1 과 H-2 를 使用하여 그 曲線의 特性을 파악하였다. 曲線 H-1 과 H-2 를 그림 1 과 그림 2 에서 보였다.

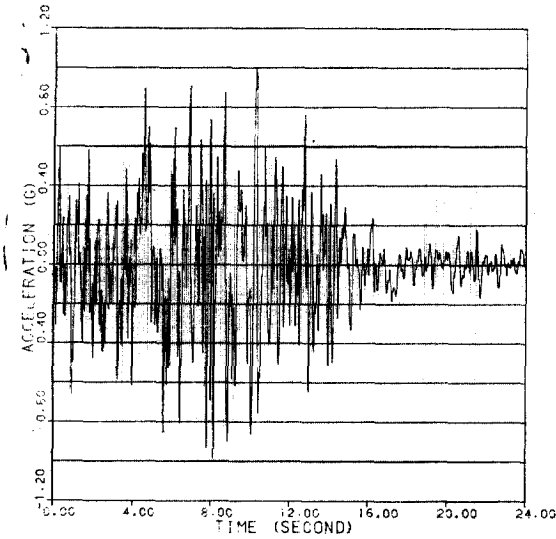


그림 1. 加速度-時間履歷曲線 H-1

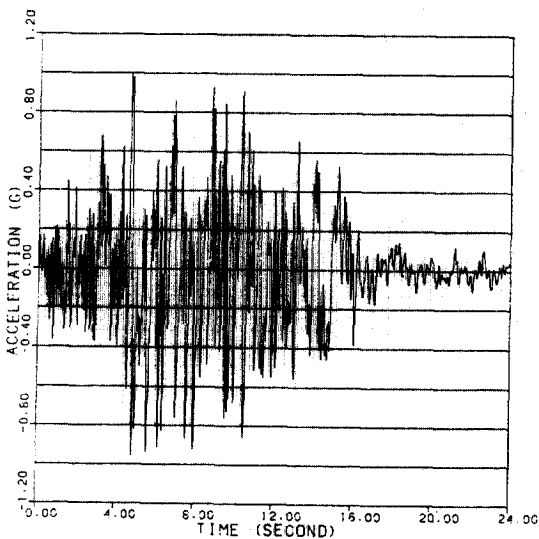


그림 2. 加速度-時間履歷曲線 H-2

또한, 曲線 H-1 의 特性이 크게 변하지 않도록 그 影響이 무시될 수 있을 것으로 판단되는 部分을 잘라내어 妥當性있게 持續時間을 줄여 改善시킨 加速度-時間履歷曲線 H-3 은 그림 3 에 보인 바와 같다.

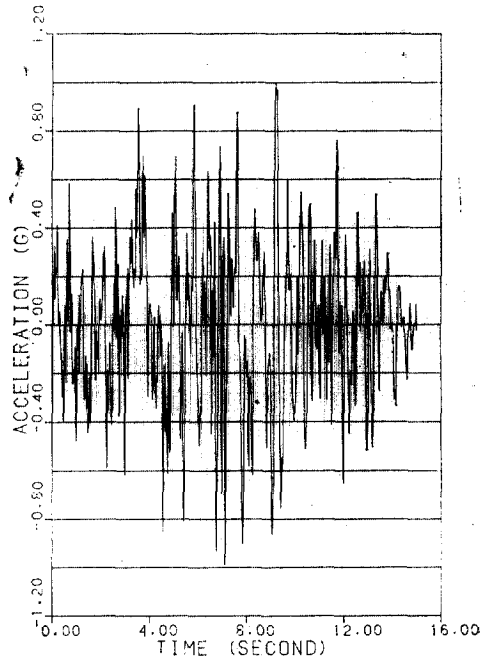


그림 3. 加速度-時間履歷曲線 H-3

3. 入力運動의 特性

加速度-時間履歷曲線 H-1, H-2 와 H-1 을 改善시킨 H-3 의 特性을 應答스펙트럼과 스펙트럼 強度를 계산하여 파악하였다.

3.1 應答스펙트럼

美國 原子力規制委員會 內規⁽¹⁾는 規制指針 1.60 의 地面設計應答스펙트럼을 만족시키는 發電所 建設 예정부지에서 記錄된 加速度-時間履歷 曲線을 地震解析에 使用하던가 또는 人爲的으로 만든 曲線을 利用하도록 제시하고 있다. 이 때, 人工加速度-時間履歷曲線의 應答스펙트럼은 地面設計應答스펙트럼을 抱絡하는 것을 原則으로 하고 있으나 다섯 振動數 以下에서는 스펙트럼 값의 差異가 10% 이내일 경우는 許容되고 있다. 스펙트럼 값을 계산해야할 振動數는 表 2 에 보

表 2. 스펙트럼 값을 計算해야 할 振動數

진동수 범위 (cps)	진동수 중분 (cps)
0.2~3.0	0.10
3.0~3.6	0.15
3.6~5.0	0.20
5.0~8.0	0.25
8.0~15.0	0.50
15.0~18.0	1.0
18.0~22.0	2.0
22.0~34.0	3.0

인 바와 같다.

加速度—時間履歷曲線으로부터 應答스펙트럼 計算은 그림 4와 같은 支持部 加速度 $\ddot{u}(t)$ 를 받는 自由度가 1인 減衰 構造物의 運動方程式을 푸는 문제이다⁽¹⁵⁾.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}(t) \quad (1)$$

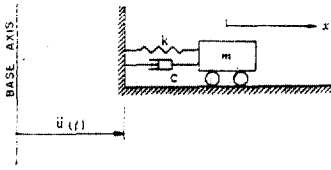


그림 4. 支持部 加速度 $\ddot{u}(t)$ 를 받는 自由度가 1인 減衰 構造物의 모델

그리고, 支持部의 加速度 $\ddot{u}(t)$ 를 그림 5와 같이 部分的으로 線型이라고 가정하면, 運動方程式 (1)은 區間 $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ 에서

$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{u}_{i1} - \frac{\Delta\ddot{u}_{i1}}{\Delta t_i}(t-t_i) \quad (2)$$

$$\text{여기서 } \xi = \frac{c}{2m\omega}$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$$

$$\Delta\ddot{u}_{i1} = \ddot{u}_{i+1,1} - \ddot{u}_{i1}$$

式(2)의 一般解는

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \quad (3)$$

여기서

$$x_c(t) = e^{-\xi\omega(t-t_i)} \left[\frac{A}{\omega_D} \sin \omega_D(t-t_i) \right]$$

$$x_p(t) = -\frac{\ddot{u}_{i1}}{\omega^2} + \frac{2\xi}{\omega^3} \frac{\Delta\ddot{u}_{i1}}{\Delta t_i} - \frac{1}{\omega^2} \frac{\Delta\ddot{u}_{i1}}{\Delta t_i} (t-t_i)$$

$$A = \dot{x}_i + \xi\omega x_i + \xi \frac{\ddot{u}_{i1}}{\omega} + \frac{1}{\omega^2} \frac{\Delta\ddot{u}_{i1}}{\Delta t_i} (1-2\xi^2)$$

$$B = x_i + \frac{\ddot{u}_{i1}}{\omega^2} - \frac{2\xi}{\omega^3} \frac{\Delta\ddot{u}_{i1}}{\Delta t_i}$$

質量 m 의 相對加速度 $\ddot{x}(t)$ 는 式(2)로부터 求할 수 있다.

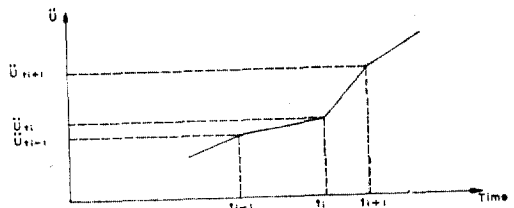


그림 5. 支持部 加速度 $\ddot{u}(t)$ 의 部分 線型函數假定

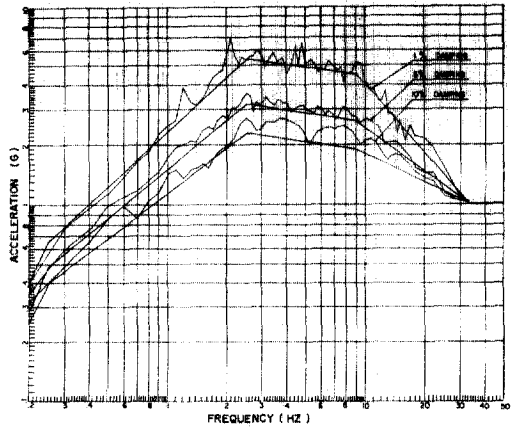


그림 6. 加速度—時間履歷曲線 H-1의 減衰率 1.5, 10%에 대한 加速度應答스펙트럼

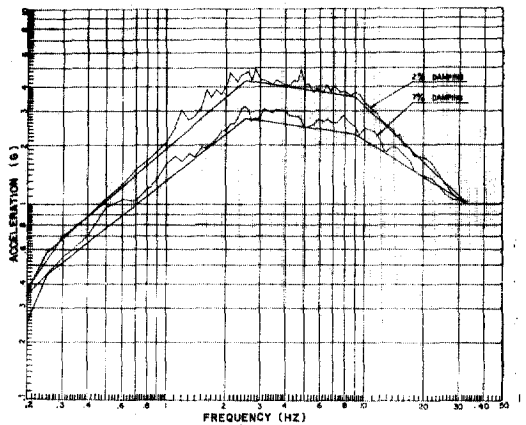


그림 7. 加速度—時間履歷曲線 H-1의 減衰率 2.7%에 대한 加速度應答스펙트럼

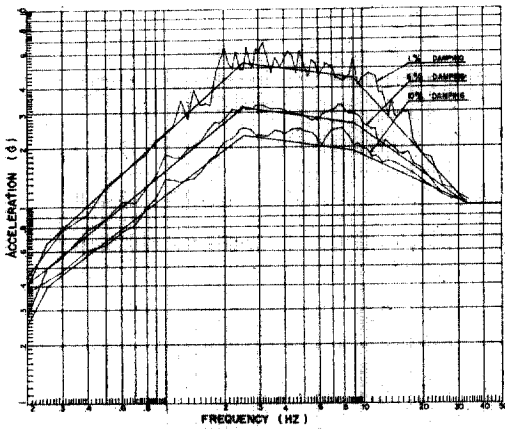


그림 8. 加速度—時間履歴曲線 H-2의 減衰값 1, 5, 10%에 대한 加速度應答스펙트럼

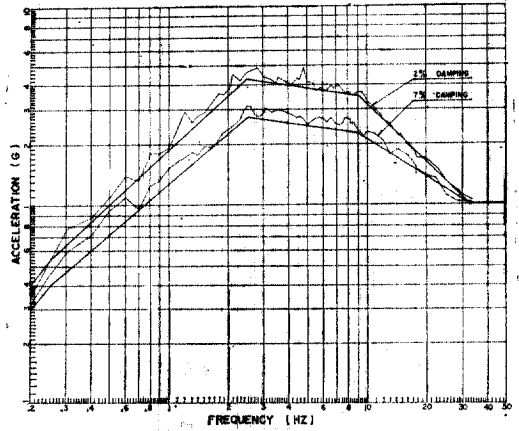


그림 11. 加速度—時間履歴曲線 H-3의 減衰값 2, 7%에 대한 加速度應答스펙트럼

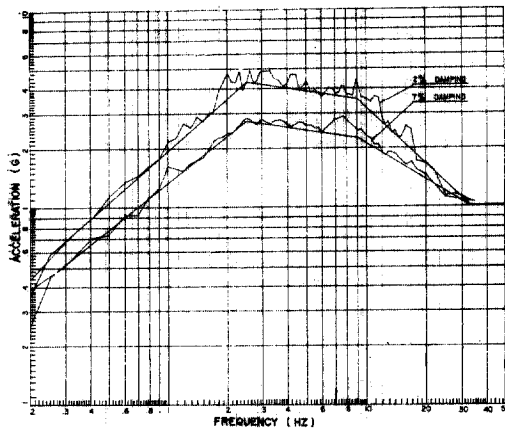


그림 9. 加速度—時間履歴曲線 H-2의 減衰값 2, 7%에 대한 加速度應答스펙트럼

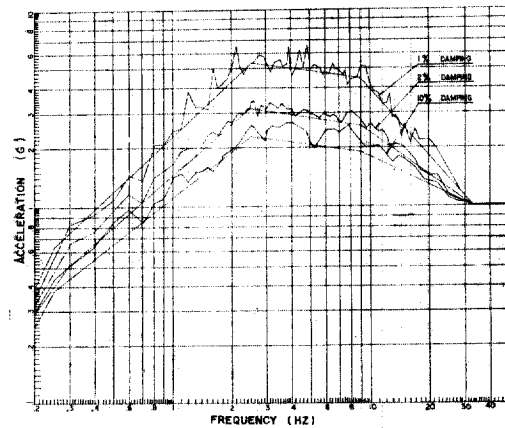


그림 10. 加速度—時間履歴曲線 H-3의 減衰값 1, 10%에 대한 加速度應答스펙트럼

曲線 H-1, H-2와 H-3의 減衰값 1, 2, 5, 7, 10%에 대한 各各의 加速度應答스펙트럼을 計算하여 耐震設計 規定의 地面設計應答스펙트럼과 比較한 結果를 그림 6에서 그림 11까지 보였다.

3.2 스펙트럼強度

Housner⁽¹⁶⁾는 서로 다른 入力運動을 比較하는 基準으로서 스펙트럼強度를 제안하였다. 스펙트럼強度는 減衰값 $\beta=20\%$ 의 速度應答스펙트럼 曲線의 周期 0.1~2.5 sec 사이의 面積으로 定義된다.

$$(SI)_\beta = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\beta, T) dT \quad (4)$$

여기서 T : 周期

β : 減衰값

$(SI)_\beta$: 減衰값 β 의 스펙트럼強度

$S_v(\beta, T)$: 速度應答스펙트럼

本 研究에서는 대부분의 原子力 構造物의 固有 周期 範圍인 0.03~5.0 sec 사이의 스펙트럼強度를 또한 計算하여 比較하였다.

加速度—時間履歴曲線 H-1, H-2와 H-3의 減衰값 20%에 대한 速度應答스펙트럼을 計算하여 그림 12에서 보였으며, 이 스펙트럼으로써

表 3. 加速度—時間履歴曲線의 스펙트럼強度

스펙트럼強度 計算 周期範圍	H-1	H-2	H-3
0.1 sec~2.5 sec	146.60	130.92	142.70
0.03 sec~5.0 sec	428.90	386.85	425.10

더 계산한 스펙트럼 강도를 표 3에 수록하였다. 과 같다.

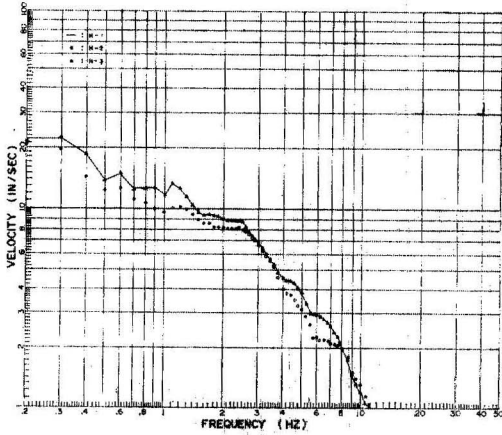


그림 12. 加速度—時間履歷曲線 H-1, H-2, H-3의 減衰값 20%에 대한 速度應答스펙트럼 (ZPA=0.2g의 경우)

4. 入力運動의 影響 評價

建設 中에 있는 그림 13과 같은 原子力 5.6號機의 安全關聯 構造物인 部品冷却建物の 南北方向 모델을 使用하여 構造物 舉動에 미치는 入力運動의 影響을 評價하였다.

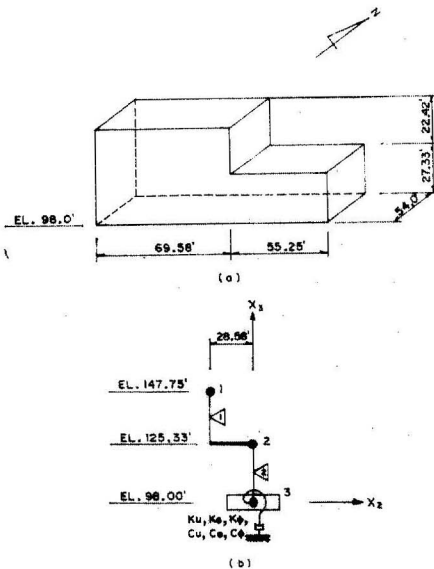


그림 13. 原子力 5.6號機 部品冷却建物과 南北方向의 모델

모델의 部材 및 集中質量 데이터는 各各 표 4와 표 5에서 보였으며, 地盤스프링常數는 표 6

表 4. 모델의 部材斷面 性質

部材 번호	단면적 (FT ²)	유효전단면적 (FT ²)	단면 2 차모멘트 (FT ⁴)		비고
			X ₂	X ₃	
1	2.44	0.3935	314.0	1340.0	
2	925.3	179.7	129268.0	856530.0	

表 5. 모델의 集中質量

節點 번호	質量 (K-SEC ² /FT)	질량 2 차모멘트 (K-FT-SEC ²)		비고
		X ₂	X ₃	
1	22.54	—	15849.0	
2	121.972	42669.90	225419.2	
3	232.7	69983.10	388968.6	Base Mat

表 6. 地盤 스프링常數

	스프링常數	비고
X ₁ -Translation	7.152×10 ⁷ K/FT	K _u
X ₂ -Rocking	8.304×10 ¹⁰ K-FT/RAD	K _r
Torsion	2.436×10 ¹¹ K-FT/RAD	K _t

曲線 H-1, H-2와 H-3를 모델에 各各 入力시키고, 積分間隔 Δt를 0.005 秒로 한 直接積分의 結果로 얻은 質量節點 1 (EL 147.75 FT)에서의 加速度—時間履歷曲線으로 計算한 入力運動 方向의 竝進에 대한 加速度의 스펙트럼값을 減衰값 1, 4, 10%에 대하여 各各 그림 14에서 그림 16까지 보였다.

解析 結果에 대한 考察로 H-1을 改善시킨 H-3의 結果가 H-1의 結果와 거의 同一하다는 事實이 관찰되었다. 이는 應答스펙트럼 作成이 다만 스펙트럼값만 考慮의 對象으로 하고 그 값의 發生時刻는 考慮되지 않기 때문이며, 또한 線型 彈性解析에 의하기 때문인 것으로 判斷된다. 反面에 曲線 H-1과 H-2를 使用한 結果는 그 傾向은 같으나 큰 差異가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 參考文獻 (9), (10), (11)에서 指摘되었듯이 耐震設計 規定의 地面設計應答스펙트럼을 만족시키는 加速度—時間履歷曲線은 無限히 많을 수

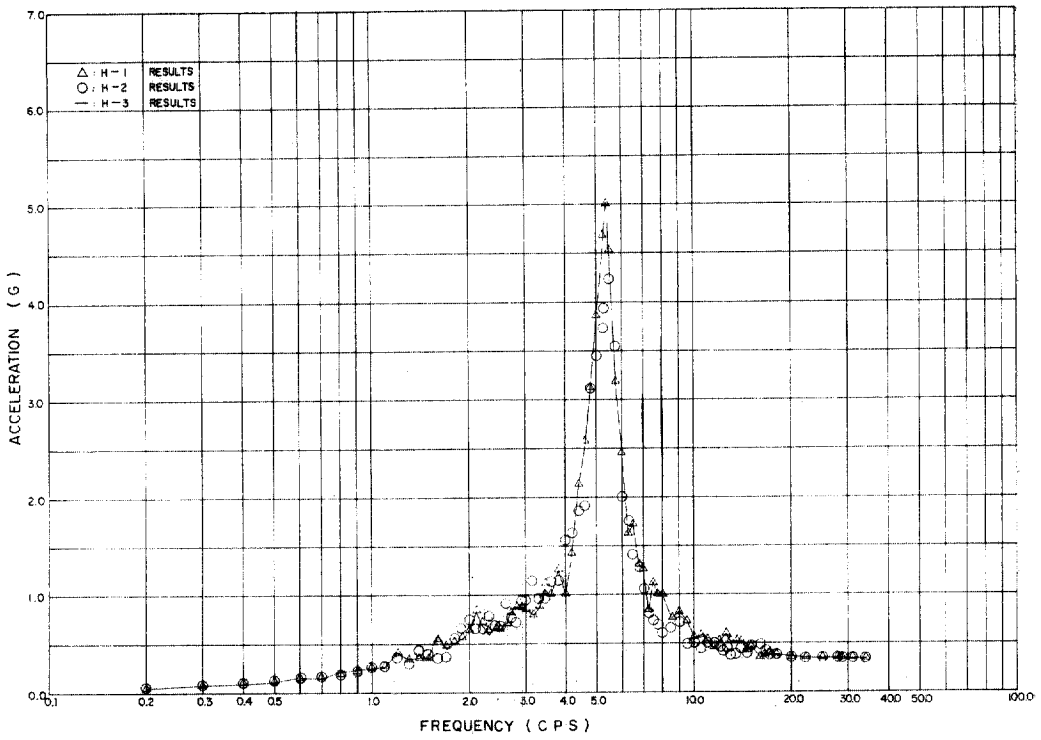


그림 14. 모델의 節點 1(EL 147.75 FT)의 減衰率 1%에 대한 加速度應答스펙트럼

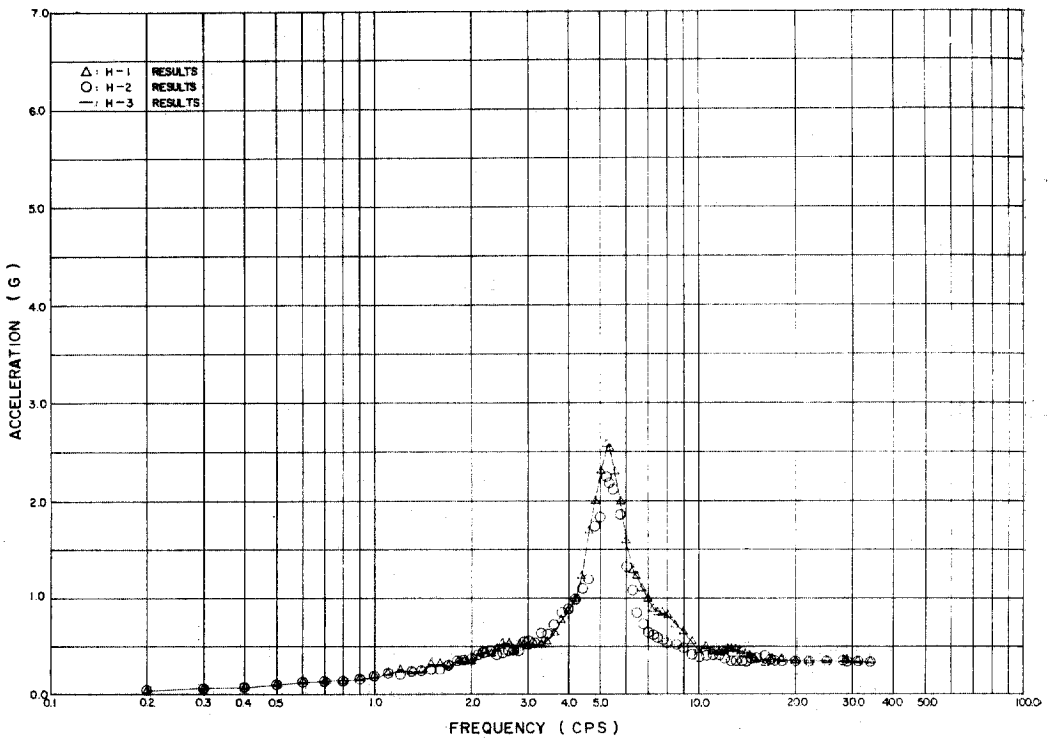


그림 15. 모델의 節點 1(EL 147.75 FT)의 減衰率 4%에 대한 加速度應答스펙트럼

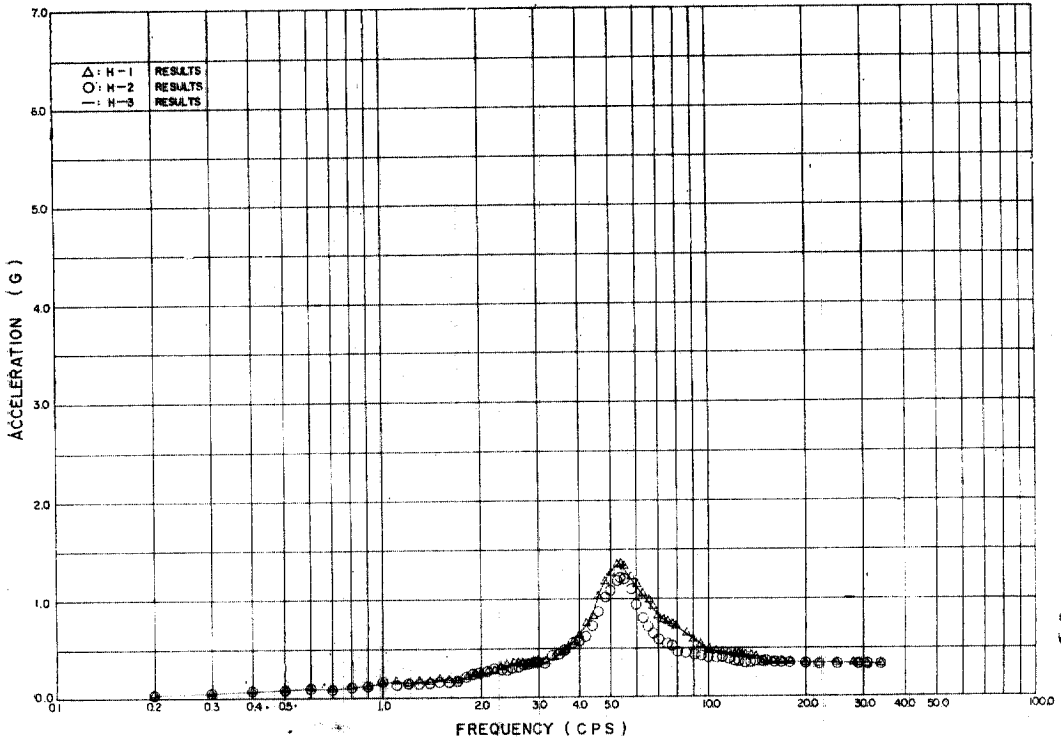


그림 16. 모델의 節點 1(EL 147.75 FT)의 減衰값 10%에 대한 加速度應答스펙트럼

있음을 알 수 있었다.

積分間隔을 0.005 秒로 하여 H-1 과 H-3 을 入力시켜 地震解析을 하였을 때 所要된 中央演算裝置(韓國에너지研究所에 設置된 CDC 78-18) 使用時間은 持續時間이 24 秒인 H-1 의 境遇에 891.5 秒가 되는데 비하여 15 秒인 H-3 는 487.4 秒로 H-1 의 55%에 지나지 않았다. 이 結果로부터 非線型解析이 要求되지 않을 때는 H-3 를 入力運動으로 하여 地震解析을 한 境遇가 H-1 을 入力으로 한 境遇보다 經濟的임을 알 수 있다.

다.

改善시킨 曲線을 使用한 結果는 原 曲線의 結果와 거의 同一하면서도 所要된 컴퓨터 使用時間은 약 절반으로 줄어들었다. 反面에 24 秒의 두 曲線을 使用한 結果는 그 傾向은 같으나 큰 差異가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 安全關聯 배관 設計 時에 地震荷重은 特性을 달리 하는 溫度荷重과 조합되므로 安全性 確保라는 側面에서 構造物 地震解析에 使用되는 入力運動에 대한 보다 깊은 研究가 要望된다.

5. 結 論

本 論文에서는 原子力 構造物 地震解析에 使用된 入力運動의 가속도 크기와 지속시간에 대한 調査가 遂行되었다. 그 중에서 數值화된 資料 入수가 可能했던 原子力 5,6 號機 耐震設計에 使用된 24 秒의 入力運動의 特性을 파악하고, 지속시간을 제외한 다른 特性은 거의 同一한 새로운 曲線을 만들고 同一한 모델에 原 曲線과 改善시킨 曲線을 各各 入力시켜 地震解析을 하였

參 考 文 獻

1. US Nuclear Regulatory Commission, SRP 3.7. 1, Seismic Design Parameters, Rev. 1, 1981.
2. Bechtel, KNU #5,6 & KNU #7,8 FSAR, Sect. 3.7.1, 韓國電力公社.
3. Stone & Webster, North Anna #1,2 Docket No. 50338-62, Virginia Electric & Power Co.
4. Ebasco, St. Lucie #1 Docket No. 50335-47, 77, Florida Power & Lighting Co.
5. United Engineers & Constructor, Seabrook #1,

- 2 Docket No. 50443-12, 27, Public Service Co. of New Hampshire.
6. Tennessee Valley Authority, *Yellow Creek #1 PSAR, Sect. 3.7.1*, Tennessee Valley Authority.
 7. Gilbert Commonwealth, *KNU #2 FASR, Sect 3.7.1*, 韓國電力公社.
 8. Sofinel, *KNU #9, 10 PSAR, Sect. 3.7.1*, 韓國電力公社.
 9. Biggs, J.M., "Seismic Response Spectra for Equipment Design in Nuclear Power Plants", *Proceedings of 1st International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Paper K1/4, 1971, pp.329~342.
 10. Singh, M.P., Singh, S. and Chu, S.L., "Stochastic Concepts in Seismic Design of Nuclear Power Plants", *Proceedings of 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Paper K1/4, 1973, pp.1~14.
 11. Stoykovich, M., "Development and Use of Seismic Instructure Response Spectra in Nuclear Plants", *Nuclear Engineering and Design*, Vol 38, 1976, pp.253~266.
 12. Kapur, K.K. and Shao, L.C., "Generation of Seismic Floor Response Spectra for Equipment Design", *Proceedings of the Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities*, ASCE, 1973, pp.29~71.
 13. US Nuclear Regulatory Commission, *RG 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, Rev. 1, 1973.
 14. Bechtel, *Floor Response Spectra, Components Cooling Water Building for KNU #5, 6*, Design Report No. 3-C-ZA-310, 1981.
 15. Tsai, N.C. and Jennings, P.C., "Digital Calculations of Response Spectra from Strong-Motion Eathquake Records", California Institute of Technology, 1968, pp.4~10.
 16. Housner, G.W., "Spectrum Intensities of Strong Motion Earthquake and Blast Effects on Structures", Earthquake Engineering Institute, 1952.

(接受：1985. 4. 24)