

## 구조물의 비선형 거동해석을 위한 지진시간이력의 기준선 조정

신태명, 이규만, 김인용  
한국원자력연구소

### 요 약

지진시 미끄럼 등과 같이 전형적인 비선형거동을 하는 구조물에 대한 동적해석을 수행하는 경우 먼저 입력지진의 가속도 시간이력에 대한 기준선 조정이 필요할 때가 있다. 인공적으로 작성된 지진기록의 경우 때로 가속도 시간이력을 적분하여 속도 및 변위 시간이력을 얻었을 때 증가하는 형태로 나타나 이로 인하여 비선형응답이 비정상적으로 커질 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 바닥이 마찰거동을 하는 구조물에 대해 간단히 모델하여 이러한 예를 보였으며 또한 주로 사용되는 기준선 조정방법들의 응답영향을 비교하였다. 그 결과 입력지진의 기준선 조정을 하지 않는 것이 항상 보수적인 결과만을 보여 주지 않는다는 점과 기준선 조정의 방법에도 표준화가 필요하다는 점을 파악할 수 있었다.

### 1. 서론

원자력발전소 구조물 설계에 있어서 지진하중은 대부분의 경우 설계에 영향을 주는 가장 중요한 요소중의 하나이다. 이러한 지진하중에 대한 내진설계의 목표는 실제지진시 구조물의 거동을 정확히 예측하고 이에 대비하여 안전한 설계를 하는 것이다. 그러나, 해석대상 구조물의 모델링, 구조해석 방법 등에 있어서는 공학의 발전과 함께 실제와 많이 접근해 가고 있지만 앞으로 발생할 지진의 정확한 예측은 계속되는 숙제일 뿐 아직도 통계적인 방법을 벗어나지 못하고 있다.

설계용 입력지진을 정하는 방법에는 실제 지진기록을 이용하거나 인공적으로 지진기록을 만들어 사용하는 두가지 방법이 있는데, 국내와 같이 적절한 기록지진이 없는 경우 규제지침서(예: Reg Guide 1.60)에서 제시하는 방법에 따라 인공지진 시간이력을 작성하여 사용하고 있다. 주어진 허용기준을 만족하도록 작성된 인공지진의 가속도 시간이력은 일반적으로 주파수 특성 및 에너지 관점에서 과거의 실제 대형지진들과 유사하면서 동시에 보수적인 형태로 나타난다. 그런데, 이를 시간 적분하여 구해지는 속도 또는 변위 시간이력이 때로는 아주 비정상적으로 나타날 수가 있다.

속도 또는 변위가 구조물 거동에 주요인자가 되는 경우에는 이러한 지진기록을 실제 지진특성에 가깝도록 수정하여야 한다. 이는 가속도 시간이력의 기준선 즉, 시간축을 상하로 약간 평행이동

하거나 또는 시간함수의 형태로 보정해 줌으로써 가능한데 이것을 입력지진의 기준선 조정 (Baseline Correction)이라 한다.

기준선 조정에 의한 가속도 값의 변화는 경험적으로 볼 때 5% 이내에 불과하기 때문에 대부분의 원전구조물에 대해 수행하는 선형해석의 경우에는 거의 필요로 하지 않는다. 그러나 일부 구조물들 중에서 비선형거동이 그 응답에 지배적인 영향을 미치거나 중요한 설계인자가 되는 경우에는 이와 달리 기준선 조정이 필요할 때가 있다. 본 논문에서는 이러한 예로서 지진시 미끄럼 거동을 하는 3 가지 간단한 구조물 모델의 지진해석을 수행하여 입력지진의 기준선 조정방법이 응답에 미치는 영향을 분석하고 그 방법의 적용 및 표준화의 필요성을 이야기하고자 한다.

## 2. 입력지진의 기준선 조정

### 2-1 기준선 조정의 필요성

실제로 발생하는 지진을 측정하는 경우, 여러가지 오차요인의 개재로 인하여 왜곡된 시간기록을 얻을 수도 있으나 이러한 요인을 분석하여 프로그램화된 데이터 처리방법에 의해 보정해 줌으로써 보다 실제에 가깝도록 수정된 지진기록을 만들어 사용하고 있다<sup>(1)</sup>.

인공지진 시간기록을 작성하는 경우에도 허용기준의 만족을 위한 데이터 처리과정에서 속도 및 변위 시간이력이 실제특성과 아주 달라질 수 있다. 예로서 국내 울진 3,4 호기 원전설계시 실제로 사용되었던 격납건물의 지반에 대한 수정입력지진의<sup>(2)</sup> 속도 및 변위시간이력(Fig. 1-a)을 계산해보면 종속도나 종변위가 시간에 따라 비현실적으로 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 입력지진을 사용하여 비선형 해석을 하는 경우에는 그 응답 또한 비현실적으로 커지게 하는 요인이 될 수 있으며 보수적이라 하더라도 이로 인하여 설계에 불합리한 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 이러한 경우, 가속도 시간이력을 기준선 조정하여 속도나 변위특성을 현실화함으로써 불필요한 보수성을 줄일 수 있다.

### 2-2 기준선조정방법

설계용 입력지진의 기준선 조정에 대하여 관련 요건이나 방법 등을 규정하는 인허가상의 규제 지침이나 표준등이 아직 구체적으로 제시되어 있지 않아 설계회사들의 경우 각자 나름대로의 기준선조정 방법을 사용하고 있는데 본 논문에서는 아래의 3 가지를 예로서 비교하여 보았다.

#### A. 구조해석용 전산코드 ABAQUS 에서 사용하는 방법<sup>(3)</sup>

Newmark 가 제안한 방법으로 속도시간이력의 제곱평균을 최소화하는 조건을 만족하는 보정함수를 2 차함수로 하여 구한 뒤 이를 원래 가속도이력에서 빼주어 수정된 가속도 시간이력을 만드는 방법이다. 참고로 Fig.1-b 에 이 방법에 의하여 기준선 조정된 입력지진의 시간이력을 나타내었다. 종속도나 종변위가 영(0)이 되지는 않으나 전반적으로 속도 및 변위특성이 실제 지진기록들과 유사함을 알 수 있다.

#### B. ABB-CE 사의 방법

지진기록의 종속도 및 종변위가 영이 되도록 하는 조건을 만족하는 보정함수를 1 차함수로 하여 가속도 시간이력을 수정하는 방법이다. 이 방법에 의하면 Fig. 1-c 에서 보듯이 속도와

변위의 최종값이 실제와 같이 거의 영으로 조정되는 것을 알 수 있다. 그러나 변위특성이 다소 한쪽으로 치우쳐 있고 그값이 비교적 크게 나타나고 있다.

C. 단순화된 방법

필자가 본 논문에서 응답영향을 비교하기 위하여 시도한 방법으로 가속도 시간이력의 제곱평균을 최소화하는 조건을 만족하되 보정함수로서 간단한 상수식을 사용하여 가속도 시간이력을 보정하는 방법이다. 이 방법은 가속도 시간이력의 시간축 이동만으로 조정하는 방법으로 Fig. 1-d 에서 보이듯이 속도이력은 방법 A 와 유사하나 변위이력은 다소 한쪽으로 치우치는 경향을 보이고 있다. 그러나 변위값이 방법 B 보다 작게 유지되고 있음을 알 수 있다.

참고로 아래 Table 1 에는 Fig. 1-a 의 지진시간이력에 대해 위에서 설명한 3 가지 방법의 기준선 조정을 수행할 때 결정되는 실제의 보정함수를 보이고 있다.

Table 1. 울진 3,4 호기 입력지진에 대한 기준선 조정방법별 보정함수 (단위: cm/sec<sup>2</sup>)

기준선 조정방법	계산된 보정함수
A	$-7.59 - 0.924 t + 0.0346 t^2$
B	$14.42 - 0.339 t$
C	$-11.92$

Fig.1을 통하여 알 수 있듯이 입력지진의 기준선 조정을 하면 가속도 시간이력에는 거의 눈에 띄는 변화를 주지 못하지만 속도와 변위이력은 크게 변경시킨다.

3. 해석모델 및 해석방법

Fig.2 에는 비선형 거동해석을 위한 모델로서 지반위에 놓인 마찰거동을 하는 강성체(Fig.2-a), 바닥 마찰거동을 하는 1 자유도 스프링-댐퍼계(Fig. 2-b), 그리고 5 층 건물내에서 마찰거동을 하는 1 자유도 스프링-댐퍼계(Fig. 2-c)를 대상으로 전술한 원래의 입력지진 및 기준선 조정된 지진 등의 4 가지 입력을 적용하여 각각의 지진응답을 조사하였다. 스프링-댐퍼계는 시간응답을 비교한 경우 그 고유진동수가 약 7 Hz (예: 사용후연료 저장대), 감쇠비를 약 4% 로 가정하여 계산하였다<sup>(4),(5)</sup>. 또한 건물내의 계에 대해서는 먼저 건물을 층별로 동일 집중질량으로 모델하고 건물모델의 감쇠비는 2%, 강성값은 1 차 고유진동수가 약 3.3Hz 가 되도록 맞추었다. 건물내 1 자유도계는 층 대비 질량비를 0.01, 감쇠비 4%, 그리고 강성값은 그 고유진동수가 0~20Hz 가 되도록 변경해 가면서 각 경우의 최대응답을 계산하였다. 그리고 수치적분 및 응답계산을 위해 FORTRAN 프로그램 및 6 차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

4. 해석결과 및 분석

Fig. 3 은 상술한 3 가지 모델에 대하여 3 가지 기준선조정방법에 의한 입력지진을 적용하였을 때 시간에 대한 미끄럼 변위응답을 비교하여 보이고 있다. Fig. 3-a 는 강성체의 미끄럼 상대변위

를 나타내는데 이 경우 기준선 조정이 되지 않은 입력지진에 비해 기준선 조정을 한 입력지진의 응답이 약 5 배 정도로 나타난다는 것을 알 수 있다. 이는 기준선 조정에 의해 가속도 축이 어느 한쪽으로 적은양 이동되면서 미끄럼을 유발시키는 입력 가속도값이 소폭 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3-b 는 지반에 놓인 1 자유도계의 미끄럼 변위응답으로서 대체로 Fig. 3-a 와 유사하지만 기준선 조정을 한 경우와 안한 경우의 응답비는 약 5 배에서 1.5 배 정도로 감소하였으며 계의 공진 영향에 의해 전반적으로 응답이 커지는 경향을 보였다.. Fig. 3-c 는 5 층 건물 모델내에서 1 자유도계의 미끄럼 변위를 비교한 것으로 앞의 경우들과 달리 기준선 조정을 하지 않은 경우에 비해 기준선 조정을 한 경우의 미끄럼 변위가 약 1/4 정도로 감소하는 것을 알 수 있다. 앞 Fig. 3-a, 3-b 에서는 지진작용시간 후반부에서 미끄럼이 없던 것이 Fig. 3-c 에서는 오히려 건물을 통과하면서 증폭된 입력의 영향으로 이 부분에서 변위가 크게 증가하기 때문이다.

Fig. 4 는 앞의 Fig. 3-c 에서와 같은 조건이되 고유진동수를 0 Hz로부터 20 Hz 까지 0.1 Hz 씩 변경해 가면서 그 최대응답들을 구한 것이다. Fig. 4-a 는 고유진동수별로 5 층 건물내 1 자유도계 바닥의 최대 절대가속도를 보여주는 그림으로 가속도 응답에 대해서는 몇구간을 제외하고 전반적으로 기준선 조정의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 4-b 는 1 자유도계의 고유진동수별로 최대 미끄럼 변위를 보이고 있는데 대부분의 주파수 구간에서 기준선 조정을 하지 않은 경우가 상당히 큰 응답을 보이고 있다. 기준선 조정을 하게 되면 방법 B의 경우 약 1/3 정도로 응답이 감소하고 방법 C, A의 순으로 더 적게 나타나며 방법 A의 경우 약 1/5 정도로 감소하는 것을 보여준다. 미끄럼에 의한 주파수 공진영향이 약 4.8Hz 근처에서 가장 크게 나타나며 약 1.8~2.6Hz 근처에서는 기준선 조정의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

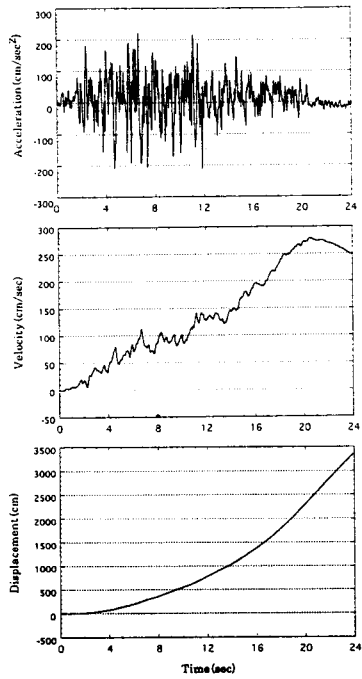
## 5. 결론

이상과 같이 기준선 조정방법별 입력지진의 특성을 살펴보고 3 가지 대상모델을 이용하여 그 비선형 미끄럼 응답을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

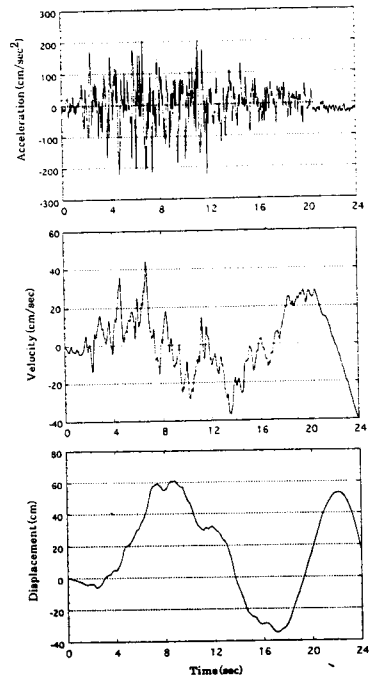
- 1) 지진시 마찰거동에 의한 미끄럼변위를 보다 정확하게 계산하기 위하여 입력지진의 기준선조정이 필요하며, 기준선조정을 하지 않은 경우에 비보수적인 결과를 얻을 수도 있다.
- 2) 기준선 조정방법에 따라 비선형 응답의 계산값이 약 50%이상 차이가 날 수도 있으므로 보수성과 신뢰성 측면에서 표준화된 방법을 선정하여 적용하는 것이 바람직하다.

## 참 고 문 헌

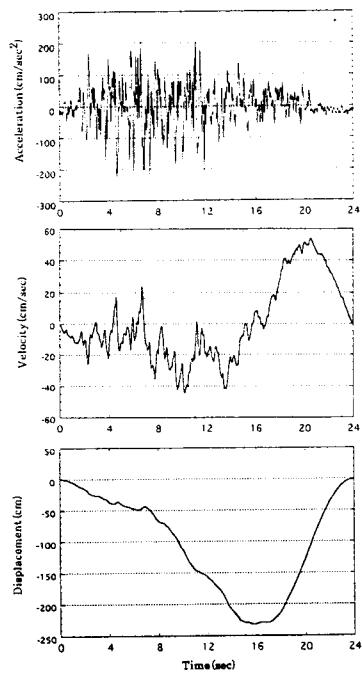
1. Housner, G. W. and Jennings, P. C., "Earthquake Design Criteria", EERI, California Institute of Technology, 1982.
2. KOPEC Document No. 9-310-C455-001, Rev.01, "Containment Building Seismic Report", 1993.
3. ABAQUS Program Version 5.4, "Baseline Correction of Accelerograms", 1994.
4. 이규만, 신태명, "사용후핵연료 저장력의 비선형지진해석", 92 추계원자력학회 논문집(1), 1992.
5. 신태명, 김인용, "가압경수형 원자력발전소 비고정식 고밀도 저장대의 지진해석방법에 대한 검토", 한국원자력학회지 Vol.27, No.1, 1995.



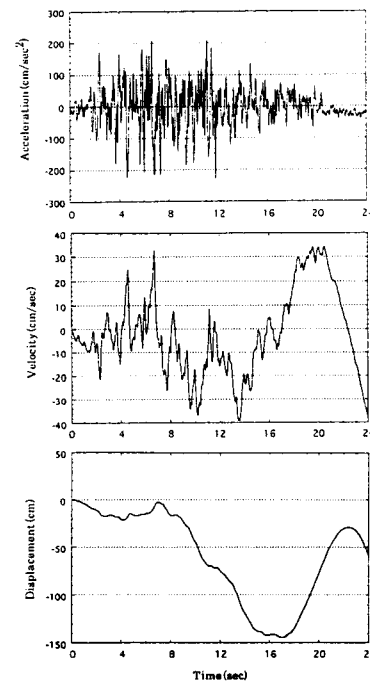
a) Raw Data



b) 방법 A



c) 방법 B



d) 방법 C

Fig.1 기준선조정 방법별 울진 3&4 호기 입력지진의 가속도, 속도, 변위시간이력

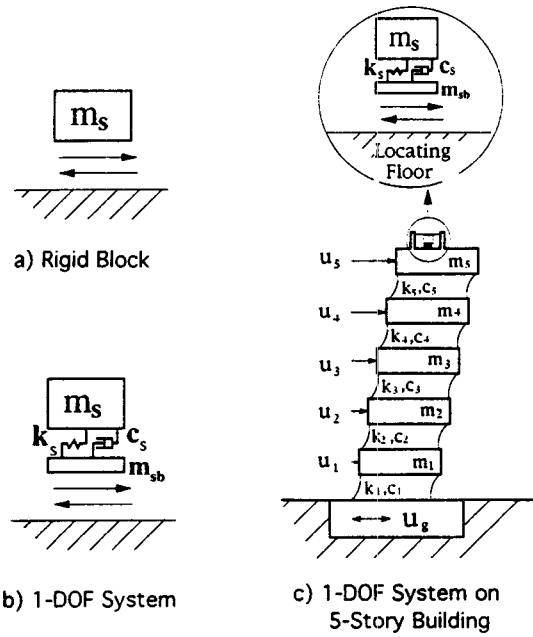
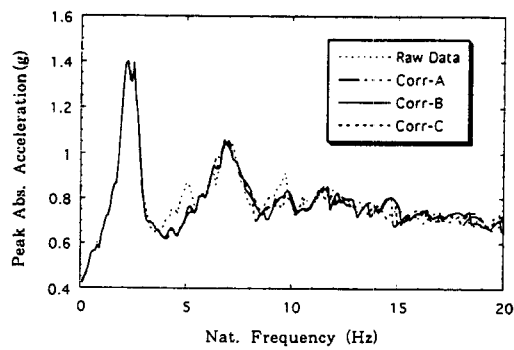
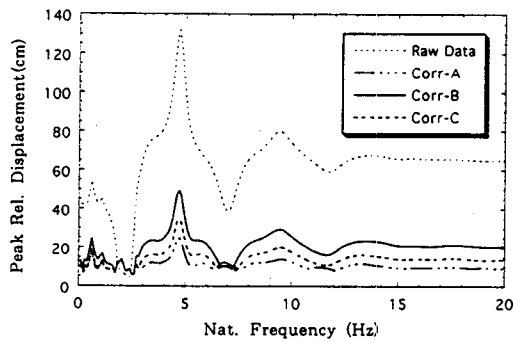


Fig. 2 마찰거동을 하는 해석대상 비선형 모델

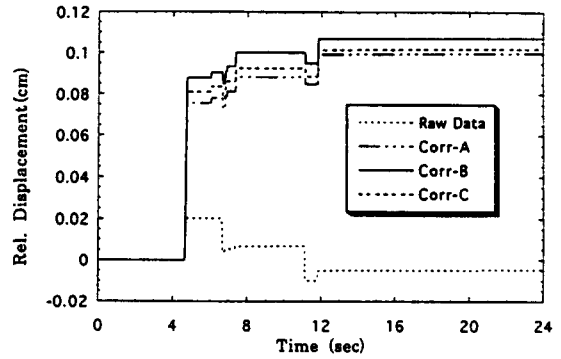


a) Acceleration of System Base

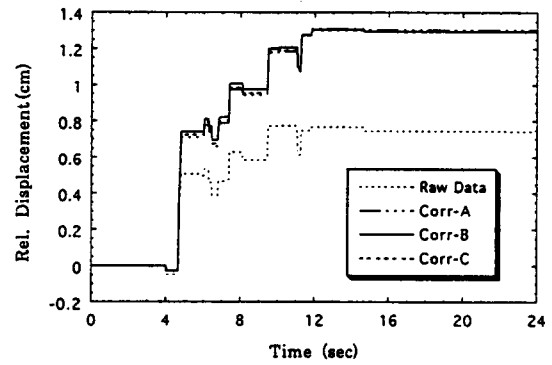


b) Sliding Displacement of System Base

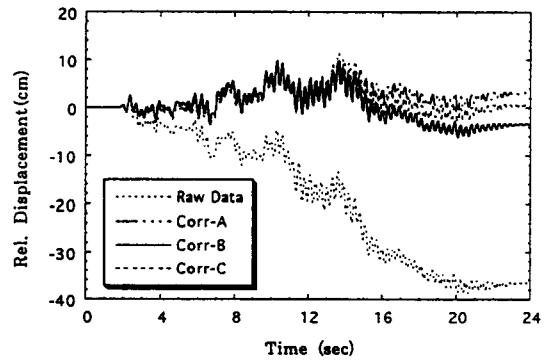
Fig. 4 5층건물내 1자유도계 모델의 고유진동수에 따른 최대응답



a) Sliding Displacement of Rigid Block



b) Sliding Displacement of 1-DOF System



c) Sliding Displacement of 1-DOF System on 5-story Building Model

Fig. 3 기준선조정 방법별 미끄럼 변위시간이력