

EDF 시스템의 동적 특성 연구를 위한 모델링 개발

Development of Modeling for Dynamic Response of EDF System

한 규 승* 박 선 규** 이 인 원***
Han, Kyu Seung Park, Sun Kyu Lee, In Won

Abstract

The purpose of this study was to estimate that the relations of weathering speed and shear strength of granite soil by tracing the weathering depth of granite soil from the very moment of its cutting. The results obtained this follows :

This paper is about seismic performance of the EDF(Electricite De France) system, that is among various base isolator. A rational modeling of EDF system has been presented that used Nlink element. We get theoretical solutions of equation of motion of the system and compared with numerical solutions using a finite element program. The unification modeling is made by comparing with behavior using Newmark- β method when input earthquake acceleration data. Thus, a verified modeling will apply bridge structures or multi-degree-of-freedom systems.

요 지

본 논문에서는 여러 면진장치 중의 하나인 EDF(Electricite De France) 시스템의 거동 특성에 대해서 연구하였다. 우선, 범용 유한요소 프로그램의 요소인 Nlink element를 사용하여 합리적인 EDF 시스템의 모델링 기법을 제시하였다. 그리고, 조화함수를 외력으로 주었을 때 시스템의 운동방정식의 이론해와 유한요소 프로그램을 통한 수치해를 서로 비교하여 모델링의 타당성을 검증하였다. 또, Newmark- β 법을 이용하여 실제 지진 가속도를 입력하였을 때의 거동을 비교함으로써 모델링의 타당성을 검증하였다. 이렇게 검증된 모델링을 실제 교량이나 다자유도 구조물에 적용할 수 있다.

핵심 용어 : EDF 시스템, 면진장치, 이론해, 수치해, Newmark- β 법

keywords : EDF System, Base Isolator, Theoretical Solution, Numerical Solution, Newmark- β Method

* 경화엔지니어링 구조부
** 성균관대학교 토목공학과 부교수
*** 한국과학기술원 토목공학과 교수

●본 논문에 대한 토의를 2001년 3월 31일까지 학회로 보내
주시면 2001년 6월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

전 세계적으로 강진활동의 증가로 인하여 면진장치를 사용한 내진설계가 활발히 이루어지고 있으며 우리나라도 최근에 와서 많은 연구와 도입이 되고 있다(고현무 등, 1997 ; 김두훈, 1995). 면진장치의 주목적은 구조물에 전달되는 지진의 파괴적인 에너지를 감소시키는 것으로 구조물이 유연한 횡강성과 에너지 소산능력을 갖도록 한다. 여기서 지진의 이력에너지를 소산시키는 방법으로서 점성 댐퍼를 이용한다거나 마찰을 이용할 수 있다.

본 논문에서는 마찰을 사용한 면진장치 중의 하나인 EDF(Electricite de France) 시스템에 관해서 연구하였다. EDF 시스템은 프랑스 원자력 발전소의 설계 기준으로 채택될 만큼 중요하게 쓰이고 있고, 많은 연구가 되고 있다(L. Su 등, 1989 ; R. Guéraud 등, 1985). 그러나, 국내에서는 아직 도입단계 전이며, 이에 대한 해석이라든가 연구가 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 EDF 시스템의 유한요소 프로그램의 적용을 위해 합리적인 모델링을 제시하고자 한다. 해석 프로그램으로 범용프로그램인 SAP2000을 사용하였다. 외력을 조화함수의 형태로 주었을 때, 시스템의 운동 방정식의 해와 유한요소 해석 프로그램을 이용한 수치해를 비교하여, 모델링의 타당성을 검증하였다. 또한, Newmark- β 를 사용하여 실제 지진 가속도를 입력하였을 때의 거동을 비교하여 모델링의 합리성을 입증하였다.

2. EDF 시스템의 운동 방정식

Fig. 1-(a)은 EDF 시스템의 전체적인 형태를 상세히 그린 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄성거동을 하는 네오프렌 적층판 위에 마찰판이 놓여 있고 그 위에 상부구조물이 놓여 있는 형태를 띤다. 이런 EDF 시스템은 중소 지진시에는 네오프렌에 의한 탄성거동을 보이다가 강진과 같이 탄성범위를 넘는 영역에서는 마찰판에서 미끄러짐이 일어나서 구조물을 지진력으로부터 보호한다(Fig. 1-(b)). 마찰판에 의해 전달되는 최대 전단력의 크기는 반침에 의해 가해지는 수직력과 마찰판의 마찰계수를 곱해서 구한다. 상부 구조물의 질량에 대한 고유주기는 약 1초 정도로 하여 설계할 것을 추천하고 있다(L. Su 등, 1989 ; R. Guéraud 등, 1985).

EDF 시스템의 역학적 해석모델은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 변위는 상부 마찰판의 변위 x_2 와 하부변위 x_1 으로 구분된다.

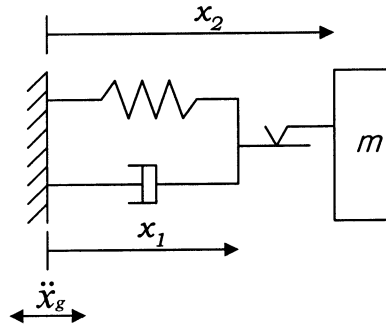


Fig. 2 EDF의 해석모델

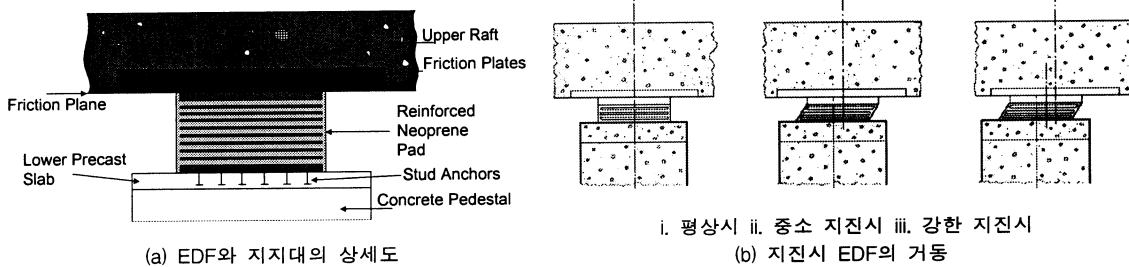


Fig. 1 EDF 시스템의 상세도와 거동

운동방정식은 상부마찰판의 정지 상태 여부에 따라서 달라진다. 상부마찰판이 정지상태일 때는 탄성적인 거동을 하므로 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}_1(t) + c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기서, m : 상부구조물의 질량

c : 감쇠계수

k : 스프링 계수

$f_0 \sin(\omega t)$: 외부 입력 하중

f_0 : 작용하중의 진폭

ω : 입력 하중의 가진주파수

x_1 : 마찰판 아래 부분의 변위

또, 상부마찰판이 미끄러짐 상태일 때는 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = \mu mg \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)}{|\dot{x}_2 - \dot{x}_1|} \quad (2)$$

여기서, μ : 마찰계수

g : 중력가속도

\dot{x}_1 : 마찰판 아래 부분의 속도

\dot{x}_2 : 마찰판 상부의 속도

위 식(2)은 네오프렌 적층판 부분의 운동방정식이며, 상부의 마찰판 부분에서의 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$m\ddot{x}_2(t) + \mu mg \frac{(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)}{|\dot{x}_2 - \dot{x}_1|} = f_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

여기서, \ddot{x}_2 : 상부 마찰판의 가속도

2.1 상부 마찰판이 정지상태일 때의 거동 ($t < t_1$)

상부마찰판의 마찰력이 외력보다 클 때에는 스프링과 댐퍼에 의해서 거동이 지배되므로 식(1)로 나타내어진다. 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서 네오프렌 적층판은 탄성적인 거동을 한다.

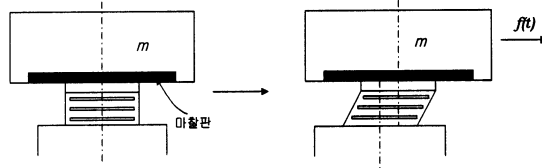


Fig. 3 EDF의 거동($t < t_1$)

미분방정식인 식(1)을 변위, 속도, 가속도에 대해서 풀면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며, 해의 형태는 homogeneous solution과 particular solution의 합으로서 나타내어진다.

마찰판의 미끄러짐이 없기 때문에 $x_1 = x_2$ 이다.

$$x_1(t) = e^{-\xi \omega_n t} [A_1 \cos(\omega_D t) + B_1 \sin(\omega_D t)] + C_1 \cos(\omega t) + D_1 \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\dot{x}_1(t) = e^{-\xi \omega_n t} [(-\xi \omega_n A_1 + B_1 \omega_D) \cos(\omega_D t) - (\xi \omega_n B_1 + A_1 \omega_D) \sin(\omega_D t)] + D_1 \omega \cos(\omega t) - C_1 \omega \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\ddot{x}_1(t) = e^{-\xi \omega_n t} [(\xi^2 \omega_n^2 A_1 - 2\xi \omega_n \omega_D B_1 - \omega_D^2 A_1) \cos(\omega_D t) + (\xi^2 \omega_n^2 B_1 + 2\xi \omega_n \omega_D A_1 - \omega_D^2 B_1) \sin(\omega_D t)] - C_1 \omega^2 \cos(\omega t) - D_1 \omega^2 \sin(\omega t) \quad (6)$$

여기서, ξ : 임계감쇠비(Critical Damping Ratio)

ω_n : 구조물의 고유주기

$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ (감쇠자유진동수)

상수 C_1 과 D_1 는 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{f_0}{k} \frac{-2\xi\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (7)$$

$$D_1 = \frac{f_0}{k} \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \quad (8)$$

여기서, $\beta = w/w_n$

이제 식(4)의 일반해에 초기변위와 속도인 $x_0 = x(0)$, $v_0 = \dot{x}(0)$ 을 적용하면 미지계수 A_1 와 B_1 을 구할 수 있다.

$$A_1 = \frac{f_0}{k} \frac{2\xi\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} + x_0 \quad (9)$$

$$B_1 = \frac{f_0}{k} \frac{2\xi^2\beta - \beta(1-\beta^2)}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2} \frac{w_n}{w_D} + \frac{v_0 + x_0\xi w}{w_D} \quad (10)$$

마찰판이 미끄러지기 전까지 즉, 상부 마찰판이 정지해있는 동안의 시간은 다음과 같이 구한다. 상부 마찰판이 미끄러지는 순간의 자유물체도를 Fig. 4처럼 나타낼 수 있고, 식(3)으로부터 다음 식처럼 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}_2(t) + \mu mg = f_0 \sin(\omega t) \quad (11)$$

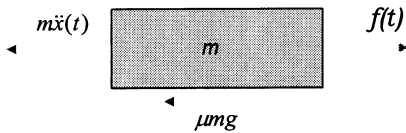


Fig. 4 상판의 자유물체도

위의 식(11)과 식(6)을 연립하여 상부마찰판이 정지해있는 동안의 시간 t_1 을 구할 수 있다.

2.2 상부마찰판이 미끄러질 때의 거동 ($t_1 < t < t_2$)

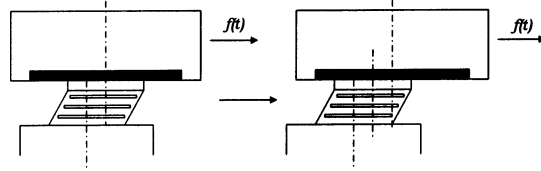


Fig. 5 EDF의 거동 ($t_1 < t < t_2$)

외력이 탄성범위를 넘어서면, 즉 마찰력보다 커지면, 상부 마찰판에서 미끄러짐이 발생하여 변위를 일으킨다. 이때 마찰판 아래 받침부의 운동방정식은 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = \mu mg \quad (12)$$

$$x_1(t) = \frac{\mu mg}{k} + E_1 e^{-\frac{k}{c}t} \quad (13)$$

E_1 은 식(4)에서 $x_1(t_1)$ 에 의해 정해지는 계수이다.

한편, 상부마찰판의 가속도, 속도, 변위는 식(11)의 미분방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\ddot{x}_2(t) = \frac{f_0}{m} \sin(\omega t) - \mu g \quad (14)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{f_0}{\omega m} \cos(\omega t) - \mu g t + E_2 \quad (15)$$

$$x_2(t) = -\frac{f_0}{\omega^2 m} \sin(\omega t) - \frac{\mu g}{2} t^2 + E_2 t + E_3 \quad (16)$$

초기조건 $x_2(t_1) = x_{2(1)}(t_1)$, $\dot{x}_2(t_1) = \dot{x}_{2(1)}(t_1)$ 을 이용하여 E_2 과 E_3 를 구할 수 있다.

여기서, 아래첨자 (1)은 앞 부분의 구간 1을 의미한다. 상부마찰판의 속도가 0일 때, 즉 $\dot{x}_2(t) = 0$ 을 이용하여 시간 t_2 를 구할 수 있다.

2.3 반대방향으로 운동할 때의 거동 (상부마찰판 정지)($t_2 \leq t \leq t_3$)

Fig. 6과 같이 운동의 방향이 처음과 반대가 되면서, 시간(t_3) 까지 상부 마찰판이 정지해 있게 된다. 이때는 구간 1에서처럼 댐퍼와 스프링에 의해서 움직임이 지배된다.

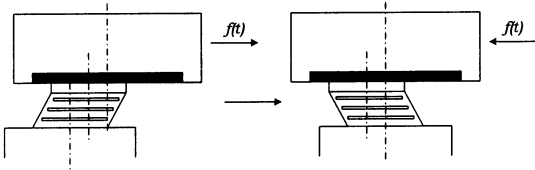


Fig. 6 EDF의 거동($t_2 \leq t \leq t_3$)

이 때의 해는 식(1)로부터 구할 수 있다.

$$x_1(t) = e^{-\xi w_n t} [A_2 \cos(w_D t) + B_2 \sin(w_D t)] + C_2 \cos(wt) + D_2 \sin(wt) \quad (17)$$

A_2 와 B_2 는 초기조건 $x_1(t_2) = x_{1(2)}(t_2)$, $\dot{x}_1(t_2) = \dot{x}_{1(2)}(t_2)$ 으로 구해지는 상수이며, $C_2 = C_1$, $D_2 = D_1$ 이다. 아래첨자 (2)는 구간 2를 의미한다.

한편, 상부마찰판은 미끄러짐 변위가 그대로 남아 있으므로 $x_1 \neq x_2$ 이다. 식(17)로부터 x_2 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_2(t) = [x_{2(2)}(t_2) - x_{1(2)}(t_2)] + x_1(t) = [x_{2(2)}(t_2) - x_{1(2)}(t_2)] + e^{-\xi w_n t} [A_2 \cos(w_D t) + B_2 \sin(w_D t)] + C_2 \cos(wt) + D_2 \sin(wt) \quad (18)$$

여기서, $[x_{2(2)}(t_2) - x_{1(2)}(t_2)]$ 가 마찰판 상하부 변위의 차, 즉 잔류변위가 된다. 그리고, 속도, 가속도는 다음과 같다.

$$\dot{x}_2(t) = e^{-\xi w_n t} [(-\xi w_n A_2 + B_2 w_D) \cos(w_D t) - (\xi w_n B_2 + A_2 w_D) \sin(w_D t)] + D_2 w \cos(wt) - C_2 w \sin(wt) \quad (19)$$

$$\ddot{x}_2(t) = e^{-\xi w_n t} [(\xi^2 w_n^2 A_2 - 2\xi w_n w_D B_2 - w_D^2 A_2) \cos(w_D t) + (\xi^2 w_n^2 B_2 + 2\xi w_n w_D A_2 - w_D^2 B_2) \sin(w_D t)] - C_2 w^2 \cos(wt) - D_2 w^2 \sin(wt) \quad (20)$$

t_3 은 t_1 을 구했던 방법과 유사하게 구할 수 있다. 전체적인 식의 형태는 식(11)을 따르지만 마찰항의 부호는 반대가 된다. 이것은 운동의 방향이 반대가 되었기 때문이다. 마찰판의 자유물체도는 Fig.7과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}(t) - \mu mg = f_0 \sin(wt) \quad (21)$$

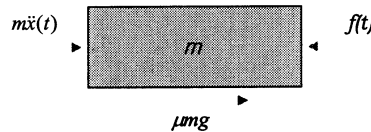


Fig. 7 상판의 자유물체도

2.4 상부마찰판이 다시 미끄러질 때의 운동 ($t_3 \leq t$)

Fig. 8은 외력이 마찰저항력보다 더 커져 다시 미끄러질 때의 운동상태를 보여주고 있다.

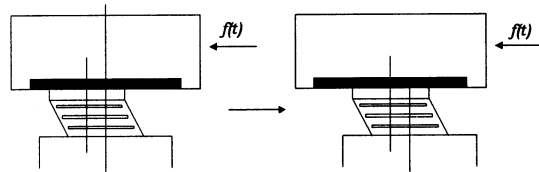


Fig. 8 EDF의 변위($t_3 \leq t$)

이 때, 마찰판 하부 받침부의 운동방정식은 식(2)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = -\mu mg \quad (22)$$

$$x_1(t) = \frac{\mu mg}{k} + F_1 e^{-\frac{k}{c}t} \quad (23)$$

여기서, F_1 은 초기조건 $x_1(t_3) = x_{1(3)}(t_3)$ 으로 정해지는 계수이다. 한편, 상부마찰판의 가속도, 속도, 변위는 식(21)의 미분방정식로부터 구할 수 있다.

$$\ddot{x}_2(t) = \frac{f_0}{m} \sin(\omega t) + \mu g \quad (24)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{f_0}{\omega m} \cos(\omega t) + \mu g t + F_2 \quad (25)$$

$$x_2(t) = -\frac{f_0}{\omega^2 m} \sin(\omega t) + \frac{\mu g}{2} t^2 + F_2 t + F_3 \quad (26)$$

초기조건 $x_2(t_3) = x_{2(3)}(t_3)$, $\dot{x}_2(t_3) = \dot{x}_{2(3)}(t_3)$ 을 이용하여 F_2 와 F_3 을 구할 수 있다.

여기서, 아래첨자 (3)은 구간 3을 의미한다.

3. 수치해를 위한 모델링

EDF 시스템을 표현하기 위하여 범용유한요소 해석 프로그램의 Nlink Element를 사용하였다. Nlink Element는 본 논문에서 사용한 유한요소 해석프로그램의 한 요소로서 비선형 거동을 나타내 주는 요소로 많이 쓰이고 있다(Computers and Structures, Inc., 1997).

EDF 시스템은 기본적으로 탄성받침 부분과 마찰판 부분이 직렬로 연결된 형태이므로, 우선 순수 마찰만 고려하기 위하여 Nlink Element의 Isolator2 property를 사용하였고, 탄성받침 부분은 Damper property를 사용하였다(Fig. 9, 10).

원래 Isolator2 property는 곡면과 마찰을 동시에 가지는 요소를 표현하는 데 쓰이는 요소이므로 마찰만 고려해주기 위해서 radius(곡률반경)와 k를 수정해줄

필요가 있다. 우선 평면으로 나타내주기 위해 radius를 0으로 만들고, k항의 값을 상당히 크게 하여 강성을 크게 해준다. 그래서 Fig. 9처럼 순수하게 마찰만 고려되는 요소가 된다.

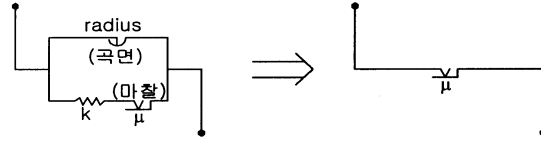


Fig. 9 마찰부의 모델링

Damper property는 스프링(k)과 댐퍼(c)가 직렬로 연결된 형태를 띠고 있다. 그래서 탄성받침의 스프링항과 댐퍼항을 병렬로 모델링하기 위해서 각각의 k와 c의 값을 상대적으로 상당히 키워서 Fig. 10처럼 표현해 주었다.

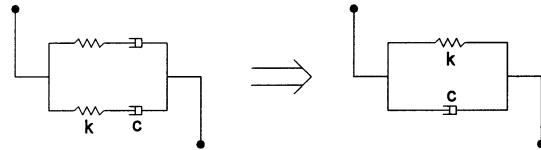


Fig. 10 탄성받침부의 모델링

상부마찰판과 하부 탄성받침 부분을 연결하기 위하여 Rigid Link를 사용하였으며, 전체적으로는 하부의 탄성받침 부분과 상부의 마찰판이 직렬로 연결된 형태이다. 대략적인 그림은 Fig. 11와 같다.

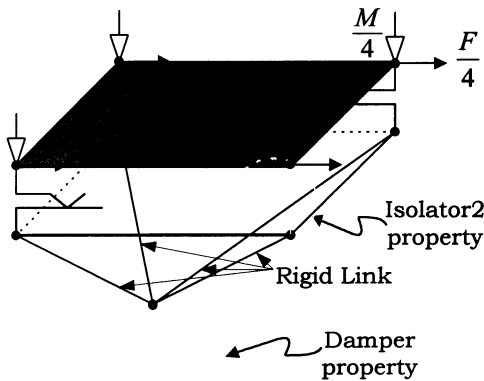
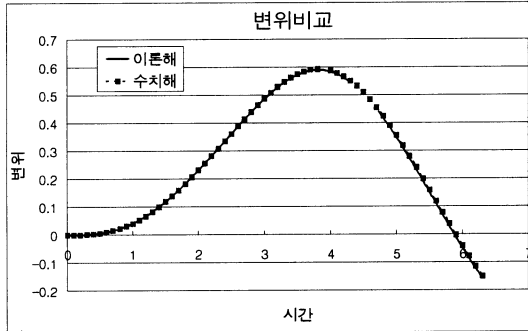


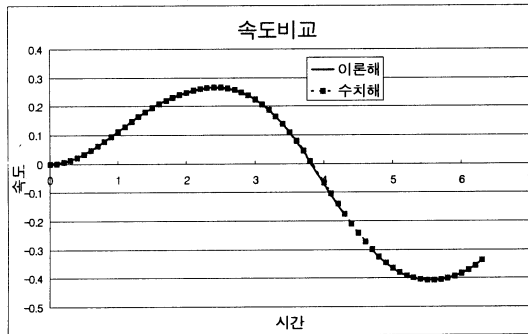
Fig. 11 EDF 시스템의 모델링

Isolator2 property라고 쓰여진 부분이 마찰을 표현한 부분이고 Damper property라고 쓰인 부분이 하부의 탄성받침 부분을 나타낸다.

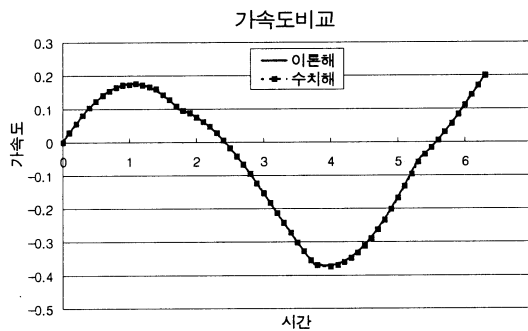
4. 모델링의 검증



(a) EDF 시스템의 변위 비교



(b) EDF 시스템의 속도 비교



(c) EDF 시스템의 가속도 비교

Fig. 12. EDF 시스템의 이론해와 수치해의 비교

4.1 이론해와 수치해의 비교

이제 위에서 제시한 모델링을 통하여 해석한 해와 운동방정식을 통하여 구한 이론해의 비교를 통해 모델링을 검증하려 한다. 임의의 무차원 물성치 $m=1$, $c=0.5$, $k=0.5$, $\mu=0.02$, $f_0=0.3$, $w=1$ 에 대하여 이론해와 수치해를 변위, 속도, 가속도에 대해서 비교하여 다음 Fig. 12-(a)~(c)와 같은 결과를 얻었다. 각각의 변위와 속도, 그리고 가속도에 대하여 비교한 결과 Fig. 12-(a)~(c)처럼 잘 일치하였다.

4.2 Newmark- β 법에 의한 수치해 비교

위에서 비교했던 물성치를 가지고 실제 지진인 EI Centro 지진(1940, N00W, 0.348g) 가속도를 입력했을 때의 거동에 대해서 비교하였다. EDF 시스템 운동방정식의 외력항에 지진가속도를 대입하여 일일이 손으로 방정식을 풀기에는 한계가 있으므로, 여러 동적해석을 위한 수치 기법 중에서 Newmark- β 법을 이용하여 해를 구하여 비교하였다. Newmark- β 법은 가속도가 미소구간에서 선형으로 변한다고 가정하는 선형가속도법(linear acceleration method)의 일종이며, 수치적으로 안정성을 보완한 방법이다(Chopra, 1995). Newmark- β 법을 이용하여 해를 구하여 비교한 양상은 다음 Fig. 13과 같다. 그림에서 보듯이 본 연구에서 제시한 EDF 시스템의 모델링이 잘 맞음을 알 수 있다.

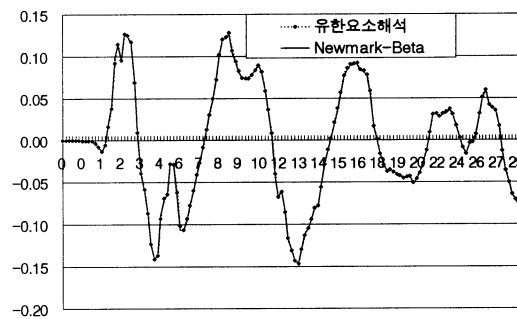


Fig. 13 Newmark- β 법에 의한 변위 비교

5. 구조물의 적용 예

5.1 해석 구조물

연구에 사용된 교량은 서해안 고속도로 당진~서천 간 제 15공구(청소~내항)에 건설된 동진교이다. 교량 형식은 PC박스 거더교이고 ILM 공법에 의한 15경간 연속교이다. 교폭은 12.145m이며 교량의 전체 길이는 725m이고 0.03%의 중구배가 있다. Fig. 14에서는 동진교의 전체적인 유한요소 모델을 보여주고 있다. Pot Bearing으로 모델링할 경우 7번 교각을 힌지로 두고 나머지 교각과 교대를 물러단으로 모델링하였다(이승우, 1998).

기존의 연구^{8),9)}에 의하면 EDF 시스템의 설계시 주기를 약 1sec, 감쇠비 10%, 마찰계수 0.2로 쓰고 있으며, 이를 본 논문에 적용하였다. 그리고, 설계주기와 감쇠비를 이용하여 수평강성값과 감쇠값을 도출할 수 있었다.

5.2 입력지진

El Centro(1940, N00W)지진 가속도 성분을 사용하여 해석하였다. El Centro 지진은 최대 가속도가 0.348g이며 에너지가 1~4Hz에 집중되는 표준적인

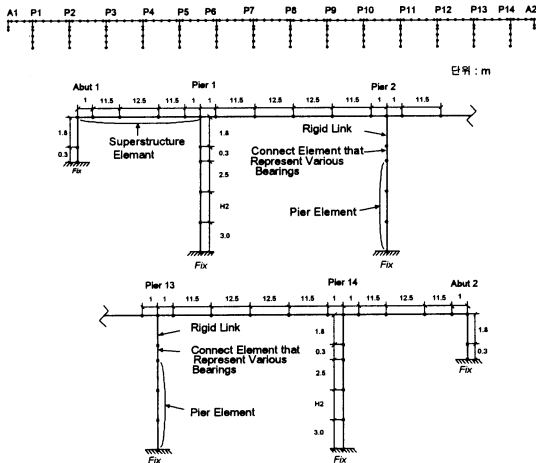


Fig. 14 동진교의 유한요소모델

강진이다. 우리나라는 대부분의 지역의 지반이 양호하므로 El Centro 지진과 같은 고주파 성분을 가진 지진이 발생할 확률이 크다. Fig. 15은 El Centro 지진의 시간에 따른 가속도 시간 이력을 보이고 있다.

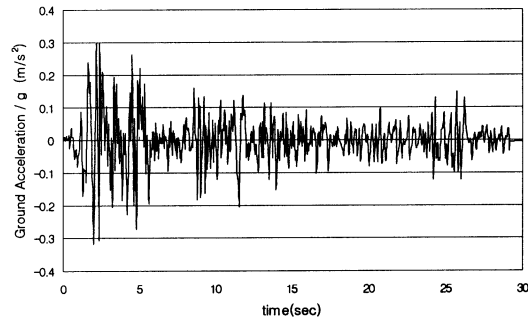


Fig. 15 El Centro 지진의 가속도 시간 이력

5.3 해석 결과

El Centro 지진을 교축방향(종방향)으로 가진하여 Fig. 16과 Fig. 17-(a)~(d)의 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 16은 EDF 시스템을 사용하여 모델링한 교량의 7번 교각 상판 부분의 시간에 따른 이력 곡선을 구하여 도시한 것이다. Fig. 17-(a)~(d)는 교량의 받침을 Pot Bearing과 EDF 시스템을 사용하여 모델링했을 때의 응답을 비교한 것으로서, 상판의 최대변위와 교각 상단의 최대변위, 교각 하단부분의 최대 전단력, 교각 하단 부분의 최대 모멘트를 비교한 그래프이다.

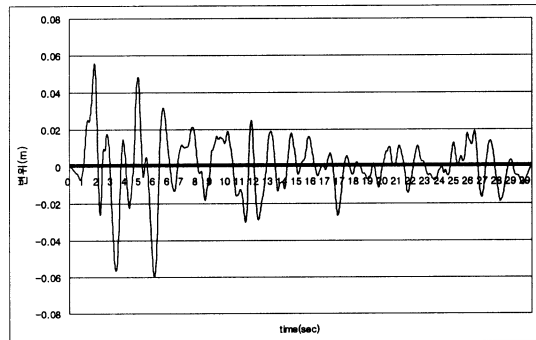
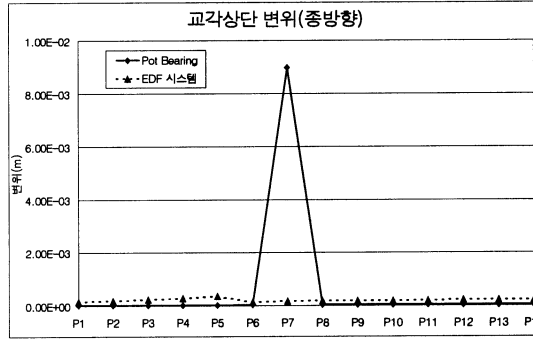
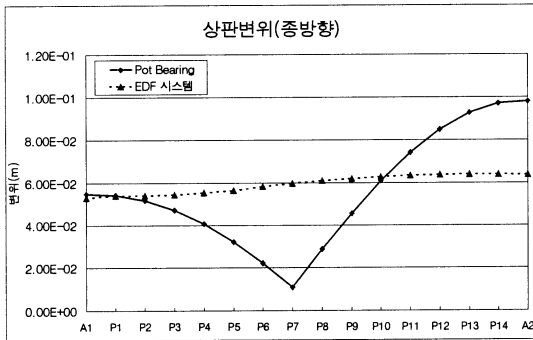
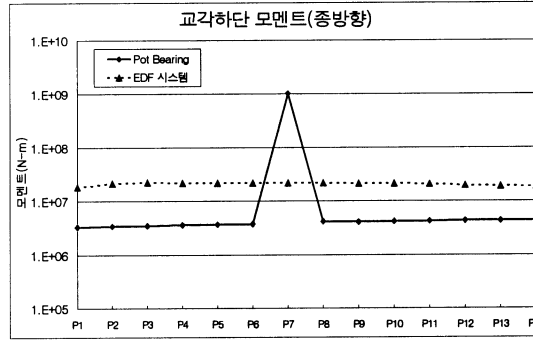
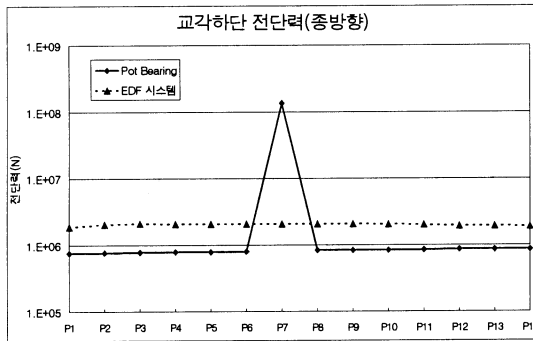


Fig. 16. 7번 교각 상판의 시간에 따른 변위



(a) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할때 상판의 최대 변위 비교

(b) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할때 교각 상단의 최대변위 비교



(c) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할때 교각하단의 최대전단력 비교

(d) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할때 교각하단의 최대모멘트 비교

Fig. 17 EDF 시스템과 Pot Bearing의 응답비교

Fig. 17-(a)에서 EDF 시스템으로 모델링한 경우 상판의 최대변위가 Pot Bearing으로 모델링한 경우 보다 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 지진하중에 대해 그만큼 유연하게 대처한다는 것을 의미한다. 이것은 Fig. 17-(b)~(d)에서 잘 설명되고 있다. Fig. 17-(b)~(d)를 살펴보면 Pot Bearing의 경우 7번 교각에 응답이 집중되는 현상을 보였지만 EDF 시스템을 사용하였을 경우에는 응답이 상대적으로 전 교각에 골고루 분배되었기 때문이다.

6. 결론

최근 들어 강진의 증가로 인하여 면진장치의 관심과 연구가 집중되고 있다. 본 연구에서는 여러 면진장치 중에서 EDF 시스템의 연구를 수행하였으며, 유한요

소 해석 프로그램의 적용을 위하여 합리적인 모델링을 제시하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 조화함수 형태의 하중을 입력하였을 때 시스템의 운동방정식을 통한 이론해와 본 연구에서 제시한 모델링을 적용한 유한요소 해석 프로그램을 통한 수치해를 비교해본 결과 서로 잘 일치하였다.
- (2) 실제 지진 가속도를 입력하였을 때의 거동을 Newmark- β 법을 사용한 경우의 거동과 비교해본 결과 서로 잘 맞았다.
- (3) 이를 통하여 본 연구에서 제시한 모델링이 타당하다고 할 수 있으며, 이를 바탕으로 본 연구에서 제시한 EDF 시스템의 모델링을 실제 교량구조물에 적용하여 해석할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 고현무, 김용길, 박원석(1997) 감진장치를 이용한 교량의 내진설계. 국제내진학술 세미나, 대한토목학회, pp. 1-38.
2. 김두훈(1995) 지진을 고려한 구조물의 면진/제진 기술 개발 현황. 한국소음진동공학회지, 제5권, 제1호, pp. 11-20.
3. 박규식, 오주원, 이인원(1999), "여러 가지 기초분리 장치의 내진성능 연구," 대한토목학회 학술 발표회, 구조/원자력, pp.581-584.
4. 박규식, 오주원, 이인원(1999), "여러 가지 기초분리 장치의 내진성능에 관한 비교 연구," 한국지진공학회 추계 학술대회 논문집, pp.236-243.
5. 이승우(1998) 면진장치를 이용한 다경간 연속교의 내진성능 연구. 석사학위논문, 한국과학기술원.
6. 전규식(1999) 교량의 면진설계(국내사례를 중심으로). 국제내진학술 세미나, 한국지진공학회, pp. 1-52.
7. Anil K. Chopra(1995) Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.
8. L. Su, G. Ahmadi and I. G. Tadjabakhsh(1989) A comparative study of performances of various base isolation systems, Part I : Shear beam structures. Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 18, pp. 11-33.
9. R. Guéraud , J.-P. Noël-Leroux, M. Livolant and A. P. Michalopoulos(1985) Seismic isolation using sliding-elastomer bearing pads. Nuclear Engineering and Design, Vol. 84, pp. 363-377.
10. Compures and Structures, Inc.(1997) SAP2000 v6.1 volume 1, USA

(접수일자 : 2000년 11월 26일)