2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 제어봉구동장치의 비선형 특성을 고려한 안정성 해석 및 설계요건 도출

Stability and Design Requirements Analyses Considering Nonlinear Dynamic Characteristics of SMART CEDM

김동옥, 김종인, 김지호, 허형, 장문희

한국원자력연구소 동력로기술개발팀
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 연구에서는 일체형원자로 SMART 에 사용되는 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 비선형특성을 고려한 안정성해석을 수행하였다. 선형펄스모터형 제어봉구동장치는 구조적인 특성에 기인하는 비선형 거동특성을 갖고 있어 충격하중 및 지진 하중과 같은 각종 동하중에 대한 안정성 평가에 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 비선형 운동방정식을 유도하고 위상평면에서 안정성을 분석하고 수치해석법을 이용하여 충격하중 및 지진하중에 대한 응답특성을 분석하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 안정성 측면에서 요구되는 설계요건을 도출하였다.

Abstract

Stability analysis is presented considering nonlinear dynamic characteristics of LPM type CEDM for integral reactor SMART being developed by KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute). The structure of LPM type CEDM is simple and very compact so that it can be used in the integral reactor with boron free core design. However there is no simple way to guarantee its stability to external load such as impacts and earthquakes, since the dynamic characteristics of LPM are nonlinear. In this paper, a nonlinear dynamic equation of motion of LPM type CEDM is derived and investigated on the stability using phase plane approach and the response characteristics of the CEDM to impact loads and earthquakes using numerical method. The results give nonlinear design regions that guarantee the stability. Based on that, design requirements for stability and optimal design points are discussed.

1. 서 론

한국원자력연구소에서 개발중인 일체형원자로 SMART 에는 무붕산노심 특성상 49 개의 제어봉구동장치가 장착된다. 제어봉구동장치는 원자로의 핵반응도를 조절하는 기기로 조종신호에 따라 제어봉을 일정량 삽입 혹은 인출하는 기능을 하며 비상시 제어봉을 신속히 노심에 삽입하여 핵반응을 정지시키는 역할을 한다. 현재 개발중인 SMART 제어봉구동장치는 선형펄스모터를 사용하며 매우 가늘고 긴 형상을 하고 있다. 선형펄스모터형 제어봉구동장치[1]에는 기어와 같은 기구학적 동력전달부가 없으며 선형으로 배열된 4 조의 권선이 순차적 여자되어 모터의 가동부를 수직방향으로 구동하도록 되어 있다[2]. 또한 가동부가 움직이지 않는 조건에서는 전자기력으로 모든 중량을 지지하도록 되어있다. 이처럼 모든 동작이 전자기력에 의해 이루어지므로 기계적인 손실이 적고 빠른 응답속도를 얻을 수 있다. 또한 전체 형상이 매우 단순해 작은 공간에서 구현이 가능하다는 점 또한 큰 장점이다. 그러나 브레이크와 같은 기계적인 구속이 없으므로 외부에서 가해지는 수직방향으로 과도한 동하중이 가해질 경우 모터부에서 탈조가 발생할 가능성이 있다는 단점을 갖고있다. 이를 방지하기 위해서는 외부하중에 대한 선형펄스모터의 응답특성을 정확히 규명하여 운전 중 발생할 수 있는 하중에 대해 안전성이 확보되도록 설계하여야 한다. 외부하중에 대한 SMART 제어봉구동장치 선형펄스모터의 응답거동은 비선형성이 매우 강해 일반적인 선형해석의 결과를 설계에 적용할 수 없으므로 정확한 특성을 파악하기 위해서는 비선형 응답해석이 필수적이다.

본 논문에서는 선형펄스모터형 제어봉구동장치의 비선형 운동방정식을 이용해 장치의 동적 안정성을 분석하고 적합한 설계요건을 제시하고자 한다. 이를 위해 위상평면을 이용한 안정성 분석을 수행하였으며 수치해석법을 이용해 대표적 동하중인 충격하중과 지진하중에 대한 응답특성 분석을 수행하였다. 이와 함께 시스템 감쇠가 안정성과 응답특성에 미치는 영향을 분석하고 설계요건을 제시하였다. 본 논문에서 고려한 설계변수는 제어봉구동장치 가동부의 감쇠 값이다. 제어봉구동장치 가동부의 감쇠량은 가동부가 갖는 공극을 조절함으로써 변경할 수 있다.

2. 비선형 동특성 분석

2.1 비선형 운동방정식

선형펄스모터형 제어봉구동장치는 가늘고 긴 파이프 형태의 여러 부품들이 동심원통형태로 배치 조립되며 부품들 사이의 공간은 원자로의 일차냉각수인 물로 채워진다. 제어봉그룹을 가동하는 것은 고정자와 가동자 그리고 4 조의 권선으로 이루어진 선형펄스모터이며 내부유체와 공극에 의해 감쇠력이 제공된다. 제어봉구동장치 선형펄스모터의 개념도를 그림 1에 표시하였다[3]. 그림에 표시된 좌표계를 이용해 비선형 운동방정식을 구하면 다음과 같다. 여기서 감쇠는 점성감쇠로 가정하였다.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + F_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} y\right) = -mg \qquad (1)$$

여기서 m, c, F_0 는 각각 가동부의 질량, 점성감쇠 계수, 선형펄스모터의 최대 추력이다. 또한 T 는 선형펄스모터의 4 스텝 당 이송거리이고 g 는 중력가속도(9.81m/s)이다. 해석의 편의를 위해 위 운동방정식에

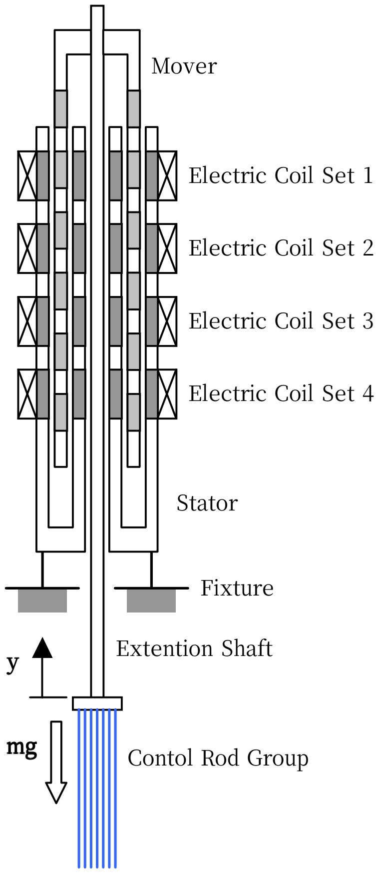

그림 1. SMART 제어봉구동장치 구조 개념도

무차원 변수를 도입하여 다음과 같은 식으로 변환하였다[4,5,6].

$$\ddot{u} + 2\varsigma\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 \sin u = -\frac{2\pi}{T}g \qquad (2)$$

여기서 무차원 변위 u 와 고유진동수 그리고 감쇠비는 다음과 같이 정의 된다.

$u = \frac{2\pi}{T}y$: 무차원 변위

$\omega_n = \sqrt{\frac{2\pi}{T}\frac{F_0}{m}}$: 선형 고유진동수

$\varsigma = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{T}{2\pi m F_0}}$: 시스템 감쇠비

현재 설계단계에서 확정된 값으로부터 다음 수치를 구할 수 있다.

$T = 16mm$: 4 스텝 당 이송거리

$F_0 = 100kgf$: 선형펄스모터 최대 추력

$m = 70kg$: 가동부 총 질량

$\omega_n = 74.2 rad/s$: 선형 고유진동수

$c_{cr} = 10390 Ns/m$: 시스템 임계감쇠량

운동방정식에서 감쇠비는 현재 설계단계에서 사용 가능한 설계변수이다. 본 논문에서는 감쇠비의 설정에 관한 설계요건을 도출하고자 한다. 다음절에서는 감쇠비에 따른 제어봉구동장치의 거동특성을 분석하였다.

2.2 상태공간 해석

일반적으로 비선형 미분방정식으로 표현되는 시스템의 동적특성은 상태공간에서 구한 해를 이용해 분석할 수 있다. 이는 다양한 속도와 변위의 초기 값에서 시작하는 시스템의 거동을 파악하는데 매우 용이한 방법이다. 상태공간이라 함은 상태변수로 표현되는 공간을 의미하는 것으로 일반적으로 시스템의 속도와 변위를 상태변수라 한다. 본 논문에서는 수치적인 방법을 이용해 상태공간에서의 시스템 거동을 몇 가지 감쇠 값에 대하여 구하고 그림 2에 그 결과를 나타내었다. 수치해석법으로는 널리 알려진 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

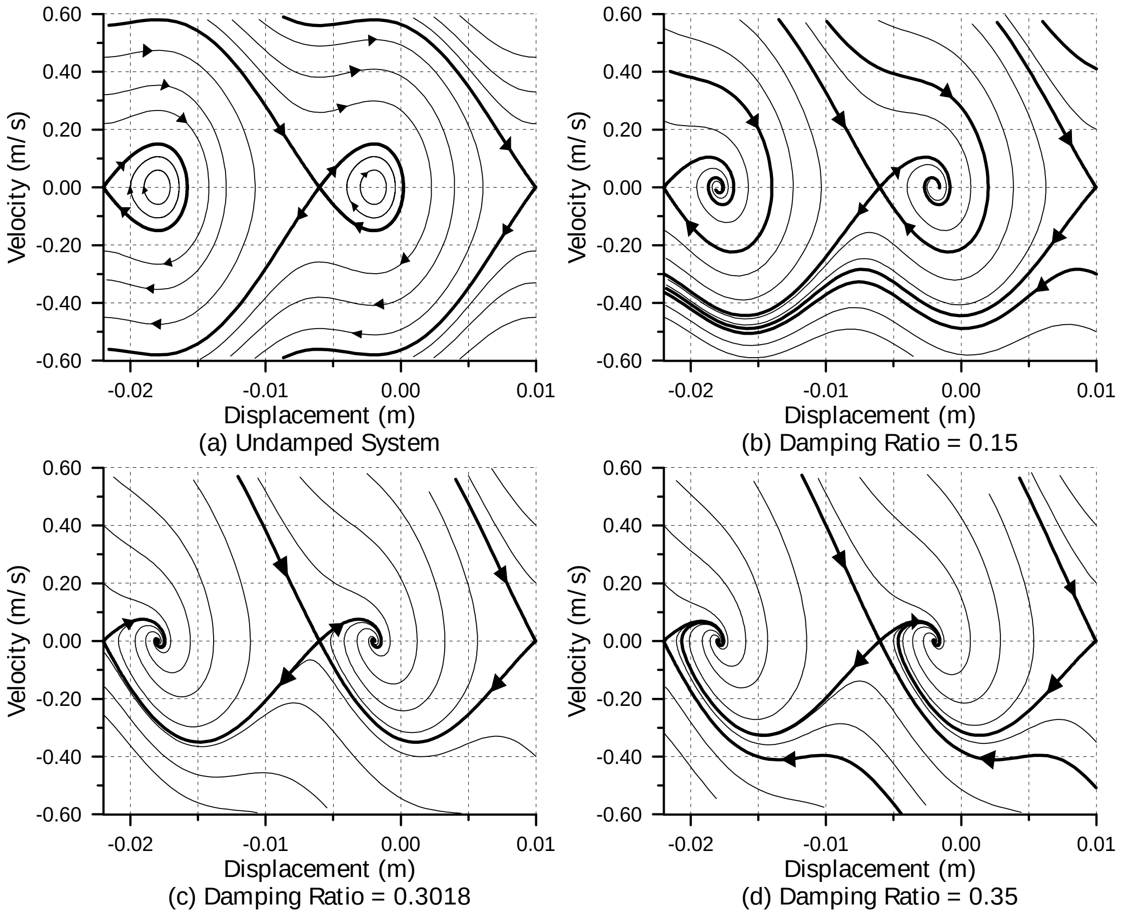

그림 2. 상태공간에서 표현된 감쇠비에 따른 시스템의 거동특성

그림 2는 위치와 속도로 표현되는 초기조건이 주어지고 외부로부터의 가진이 없는 경우 시간이 지남에 따라 시스템의 위치와 속도가 어떠한 형태로 변하는지를 보여주는 그림이다. 그림 2에서 가로축은 제어봉구동장치 가동부의 위치를 나타낸 것이며 세로축은 속도를 나타낸 것이다. 등고선처럼 표현된 각 그림의 굵은 실선과 가는 실선은 모두 시간에 따른 위치와 속도의 변화를 나타낸 것으로 각 실선은 주어진 초기 값에 대한 시스템의 거동을 나타낸 것이다. 위치와 속도의 초기값이 주어지면 이는 그림의 평면 위에 한 점에 대응되며 시간이 지남에 따라 변하는 위치와 속도가 실선으로 표현된 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시스템의 감쇠에 따라 시스템의 거동특성이 달라진다. 그러나 감쇠비에 상관없이 일정한 상태를 유지하는 두 가지 점이 있다. 이는 각각 다음과 같이 표현되는 센터점과 새들점이다.

$$(y, \dot{y})_{center} = (-1.975 \pm nT, 0) \qquad \text{: 센터점}$$

$$(y, \dot{y})_{saddle} = (-6.024 \pm nT, 0) \qquad \text{: 새들점}$$

여기서 n 은 영을 포함하는 양의 정수이다. 센터점은 제어봉구동장치 가동자의 정적평형 조건을 의미하는 것이기도 하다. 그림에서 굵은 실선은 새들점을 지나는 경우의 거동을 나타낸 것이다.

그림 2의 (a)는 감쇠가 없는 경우를 나타낸 것으로 센터점 주변에선 동심원 형태를 하고있는 반면 그림의 상단에서 시작한 가는 실선은 센터점을 우회해 아래 쪽으로 이어지고 있음을 알 수 있다. 이는 센터 주변에서 초기조건을 갖는 경우 시스템은 일정한 진폭으로 진동하는 반면 센터에서 멀리 떨어진 초기조건을 갖는 경우 시간이 지남에 따라 시스템의 속도와 변위는 마이너스 쪽으로 점차 증가한다는 것을 의미한다. 시간이 지남에 따라 초기조건으로부터의 변위가 무한히 증가하는 해를 불안정해(unstable solution)라 하고 변위가 점차 줄어들거나 시간에 상관없이 일정한 변위를 유지하는 해를 안정해(stable solution)라 한다.

감쇠비가 0.15 인 경우의 해를 보여주는 그림 2의 (b)를 보면 일정한 진폭으로 무한히 진동하는 해는 없으며 진폭이 점차 감소하여 센터로 수렴하는 안정해와 일정 수준의 속도로 무한히 발산하는 불안정해가 존재함을 알 수 있다. 감쇠가 없는 시스템에 비하여 안정해가 차지하는 영역이 넓어졌으며 불안정해의 경우 속도가 무한히 증가하지는 않는다. 즉 감쇠비가 0.15 인 경우 불안정해에 해당하는 낙하속도는 –4.0m/s 를 기준으로 물결 치듯 변하면서 일정한 수준을 유지하게 된다. 이처럼 다양한 초기 값으로부터 시작한 불안정해가 정상상태에서 일정한 형태로 수렴하는 경우 최종 해의 형태를 어트랙터(attractor)라 한다. 감쇠비 0.3018 이상의 경우 불안정해는 존재하지 않으며 어트랙터 역시 사라짐을 그림 2의 (c)와 (d)에서 알 수 있다.

3. 안정성 해석

본 장에서는 앞에서 구성한 제어봉구동장치의 운동방정식을 이용해 충격하중과 지진하중에 대한 제어봉구동장치의 거동특성을 분석하고 감쇠비에 관한 설계요건을 도출하였다. 여기서 충격하중과 지진하중은 제어봉구동장치의 설치점인 원자로덮개에서 정의되는 것으로 가정하였다. 그러나 이는 실제조건과 다소의 차이가 있는 가정이다. 실제 경우에 있어서 충격하중과 지진하중은 모두 원자로가 설치되는 기초부에서 정의되는 하중이며 제어봉구동장치는 원자로지지구조물과 원자로를 거쳐서 전달되는

하중을 받게 되므로 하중형태가 변하게 된다. 그러나 현재 설계단계에서는 지지구조물과 원자로의 특성이 명확하게 파악되지 않아 제어봉구동장치가 최종적으로 받게 되는 하중형태를 알 수 없으므로 충격하중과 지진하중이 여과 없이 제어봉구동장치에 전달된다고 가정하였다.

3.1 충격하중에 대한 안정성

원자력발전소를 설계함에 있어서 고려해야 하는 충격하중은 원자로 격납건물 외부에 가해지는 항공기 등의 충돌과 기타 사고에 의한 것이다. 격납건물에 가해진 충돌 및 기타 충격하중은 원자로 용기 지지구조물과 원자로 용기를 통해 제어봉구동장치에 전달된다. 제어봉구동장치에 가해지는 충격하중의 크기가 심각한 경우 제어봉구동장치는 제어봉을 원자로에 삽입하여 원자로를 신속히 정지시킬 수 있어야 한다. 그러나 일정 수준이하의 충격하중이 전달되는 경우 제어봉구동장치는 원자로의 운전상태를 안정적으로 유지할 수 있어야 한다.

충격하중에 대한 제어봉구동장치의 안정성 해석은 제어봉구동장치가 설치되는 원자로 압력용기 상부덮개부의 충격속도를 바탕으로 이루어진다. 본 논문에서는 반파형의 조화함수 꼴을 갖는 충격속도 이력을 이용하였다. 그림 3은 이러한 충격속도 이력을 보여주는 것으로 최대 속도 V_0를 갖으며 지속시간은 조화함수의 반주기로 $0.5T_i$인 경우를 표시한 것이다.

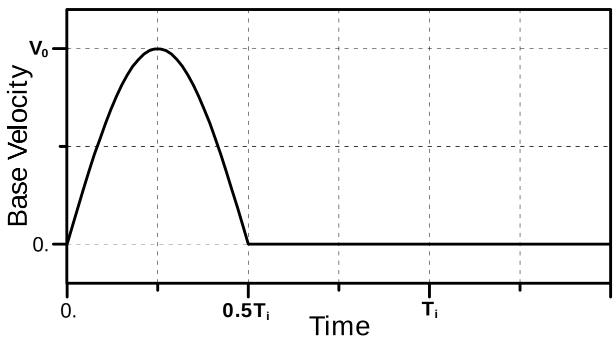

그림 3. 외부 충격하중으로 인한 제어봉구동장치 설치부의 충격속도

충격하중에 대한 안정성을 알아보기 위해 제어봉구동장치 설치부인 원자로 압력용기 상부덮개에 그림 3과 같은 형태의 충격속도 이력이 가해진 경우 충격이 지나간 후 제어봉구동장치 가동부의 응답이 안정해인지 불안정해인지를 검사하였다. 충격하중의 크기와 지속시간 그리고 시스템의 감쇠비의 영향을 알아보기 위해 다양한 조건에서 해를 구하고 이를 그림으로 표현하였다.

그림 4는 충격하중에 대한 제어봉구동장치의 안정성을 감쇠비에 따라 보여주는 그림이다. 그림에서 가로축은 조화함수로 표현된 충격하중의 주기를 시스템의 선형 고유주기(T_n=0.0847sec)로 정규(normalize)한 것이며 세로축은 최대 충격속도이다. 그림에서 빗금친 영역은 안정영역을 의미하는 것으로 주어진 충격하중 후에도 가동부의 응답이 안정해를 갖는 영역이다. 이는 충격하중 후에도 원자로의 운전상태를 안정적으로 유지할 수 있는 조건을 나타내는 것이다. 안정영역 밖에 해당하는 조건은 충격하중 후 제어봉이 삽입되어 원자로를 정지시키는 조건에 해당한다. 충격하중이 가해지기전인 초기조건은 그림 2에서 정적평형 상태를 의미하는 센터점으로 하였다.

그림 4에서 알 수 있듯이 감쇠비가 클수록 안정영역의 넓이역시 크게 나타난다. 그러나 감쇠비 증가에 비해 안정영역의 넓이 증가는 그다지 크지 않다. 충격하중의 주기가 선형 고유주기의 25%이하인 경우는 충격속도의 크기에 관계없이 모든 경우에서 안정영역에 포함된다. 즉 시스템 감쇠 값의 증가를 통해서 충격하중에 대한 제어봉구동장치의 운전 안정성을 증가시킬 수는 있으나 큰 효과를 기대하기는 어렵다. 또한 매우 짧은 충격하중은 시스템의 안정성에 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

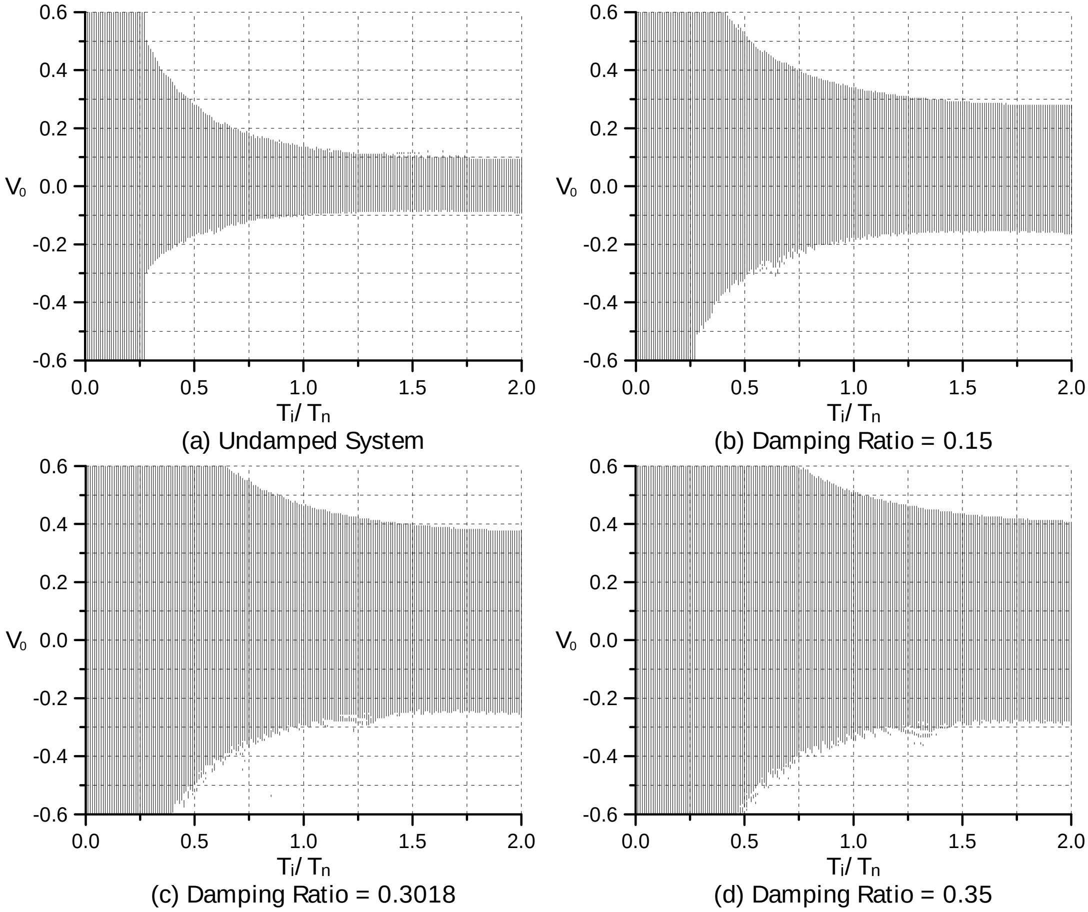

그림 4. 충격하중에 대한 안정영역에 미치는 감쇠비의 영향

3.2 지진하중에 대한 안정성

지진하중에 대한 안정성 평가는 원자력 구조물의 설계과정에서 매우 중요한 단계이다. 지진하중 역시 충격하중의 경우와 동일한 개념의 요건이 만족되어야 한다. 즉 일정 수준이하의 지진하중 하에서는 원자로의 운전이 안정적으로 유지되어야 하며 그 이상의 지진에서는 원자로를 신속히 정지시킬 수 있어야 한다. 일반적으로 최대 지진가속도 0.15g 이하에서는 원자로의 운전상태가 안정적으로 유지 되야 한다는 요건(OBE)을 사용한다. 본 절에서는 제어봉구동장치의 지진하중에 대한 안정성 해석을 수행하고 적절한 안정성을 확보하기 위한 시스템의 감쇠비 요건을 도출하였다. 해석에 사용한 지진하중 시간이력으로는 지진해석에 널리 이용되고 있는 El-Centro 지진에서 상하방향 지진신호를 이용하였다. 그림 5는 가속도 신호로 표현된 El-Centro 수직방향 지진의 시간이력을 나타낸 것이다.

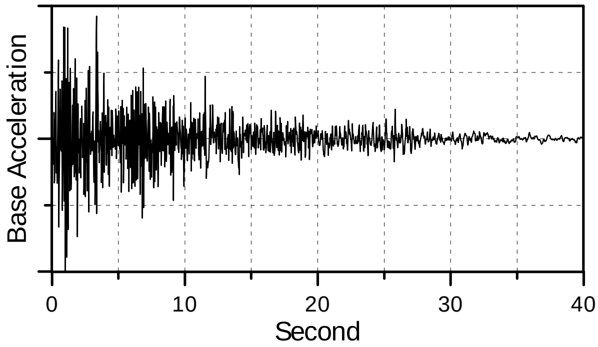

그림 5. 수직방향 El-Centro 지진가속도 시간이력

지진하중에 대한 안정성 평가를 위해 지진가속도의 최대 값과 시스템의 감쇠비를 달리하면서 제어봉구동장치 가동부의 응답을 수치해석을 통해 구하였다. 그림 6은 해석결과를 종합한 것으로 가로축은 감쇠비를 세로축은 중력가속도의 단위로 표현된 최대 지진가속도이다. 그림에서 빗금 친 영역은 안정영역을 나타내는 것으로 주어진 조건에서 지진하중이 완전히 지나간 후에도 제어봉구동장치 가동부가 안정적인 상태를 유지하는 경우를 나타낸다. 그림을 보면 안정영역의 형태가 규칙적이지는 않지만 전반적으로 감쇠비가 증가함에 따라 이에 비례하여 허용 가능한 최대 지진가속도역시 증가함을 알 수 있다.

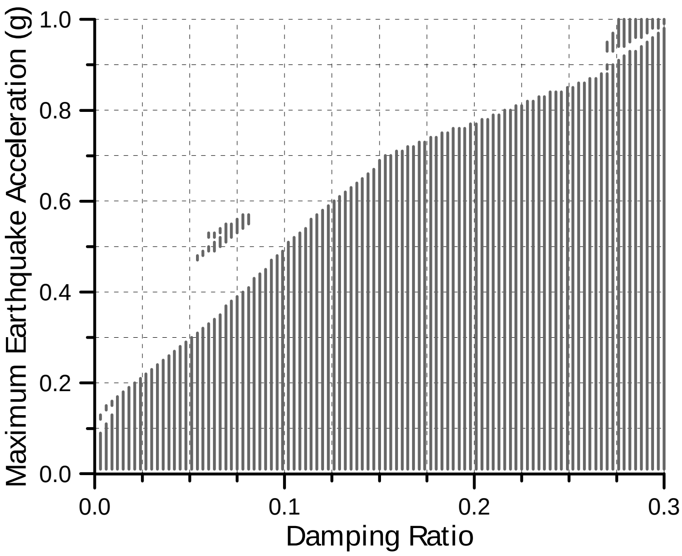

그림 6. 제어봉구동장치 가동부 감쇠비와 최대 지진가속도에 대한 안정영역 해석결과

원자력 발전소의 운전 안정성 유지에 대한 최대 허용 지진가속도를 0.15g 로 한다는 점을 바탕으로 그림 6에서 이러한 요건을 만족하는 제어봉구동장치의 감쇠비를 찾는다. SMART 제어봉구동장치의 경우 최대 허용 지진가속도가 0.15g 가 되기 위해서는 감쇠비가 0.04 이상 되어야 보수적으로 요건을 충족할 수 있을 것으로 본다.

4. 결론

본 논문에서는 SMART 제어봉구동장치의 수직방향에 대한 비선형 운동방정식을 유도하고 상태공간에서의 해를 바탕으로 감쇠항이 제어봉구동장치의 운동 안정성에 중요한 영향을 주는 인자임을 확인하였다. 또한 수직방향 충격하중과 지진하중에 대한 안정성 확보를 위해 제어봉구동장치가 확보해야 할 감쇠량에 대하여 조사하였다. 감쇠량이 충격하중에 대한 안정성에는 별 영향을 주지 않는 반면 지진하중에 대한 안전성 확보를 위해서는 매우 중요함을 확인하였다. 최대 가속도 0.15g 인 지진하중에 대한 운전 안정성을 보수적으로 확보하기 위해서 제어봉구동장치의 감쇠비는 0.04 이상이 되어야 한다는 설계요건을 도출하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 도면, SMART-CD-DW620-00, Rev.00, CEDM 집합체 도면

[2] 도면, SMART-CE-DW620-02, Rev.00, 선형펄스모터 집합체

[3] 김용완 외 다수. “일체형원자로 기기개발 및 검증시험,” KAERI 기술보고서 (KAERI/RR-1889/98)

[4] Guckenheimer J., and Holmes P. (1983). *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, & Bifurcations of* Harris C.M. (1961). Shock and Vibration Handbook, McGRAW-HILL

[5] Wiggins S. (1990). *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag, New York

[6] William H. (1992). Numerical *Recipes in Fortran*, Press Syndicate, University of Cambridge *Vector Fields*, Springer-Verlag, New York