

제어봉 구동장치의 동적 특성을 고려한 최적설계

Optimal Design of CEDM considering the Dynamic Characteristics

김 인 용* 진 춘 언* 김 민 규**
Kim, In-Yong Jin, Choon-Eon Kim, Min-Gyu

ABSTRACT

The dynamic characteristics of Control Element Drive Mechanism (CEDM) in Korea Standard Nuclear Power Plant was reviewed as a secondary mass in a simplified two degree of freedom system, while the reactor vessel as a primary mass. The design improvement stratege to minimize each displacement amplitude of these primary and secondary masses was proposed. According to this stratege the designs of CEDM components, the shroud and the pressure housing, respectively, were changed using optimization technique.

1. 서 론

원자력발전소에서 사용되는 제어봉 구동장치 (Control Element Drive Mechanism, CEDM)는 제어봉을 삽입하거나 인출함으로써 노심의 반응도를 제어하는 역할을 한다. 그림 1은 한국표준형 원자력발전소의 원자로와 원자로 상부 헤드에 설치된 CEDM의 형상을 단순화 한 것이다. 이 CEDM들은 가늘고 긴 외팔보의 형상을 하고 있어 지진과 같은 동적 하중에 취약한 구조를 갖고 있으며, 동시에 CEDM의 동적 거동은 원자로의 동적 거동과 커플되어 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 CEDM의 동적 응답을 줄이기 위한 설계 변경은 곧 원자로에 대한 동적 영향을 의미하게 되므로, 우선 두 구조물의 상호 동적 특성을 이해한 후 설계 개선 방향을 정립해야 할 것이다.

C. E. Jin [1]은 원자로와 CEDM을 2 자유도의 질량-댐퍼-스프링 계로 단순화한 후, Tsai [2]의 curve fitting 기법을 이용하여 두 질량간의 상호 동적 영향을 고찰하였다. 이때 원자로는 주 질량 (primary mass)으로, CEDM은 2차 질량 (secondary mass)으로 고려되었는데, CEDM의 동적 특성에 따라 두 질량의 동적 응답을 모두 감소시킬 수 있음이 확인되었다.

본 논문에서는 C. E. Jin [1]의 원자로와 CEDM의 상호 동적 영향에 대한 연구 결과를

* 한국전력기술주식회사 주임연구원

** 한국전력기술주식회사 연구원

검토하고, 두 질량의 동적 응답을 모두 감소시킬 수 있는 설계 개선 방향을 제시하도록 한다. 또한 제시된 방향에 따라 CEDM의 부품을 최적화 기법을 이용하여 설계 변경하여 봄으로써, 그 유용성을 확인하도록 한다.

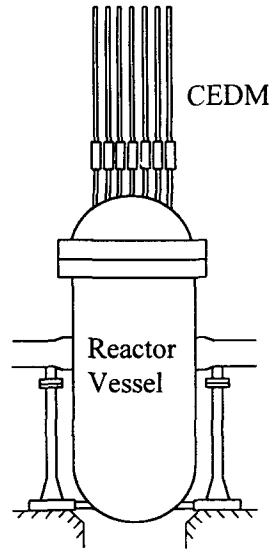


그림 1. 한국 표준형 원자력발전소의 원자로와 CEDM

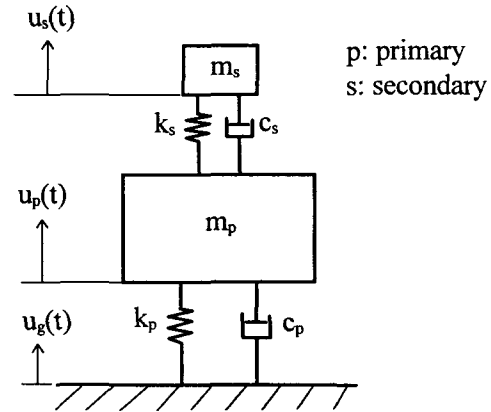


그림 2. 원자로와 CEDM의 2 자유도계 모델

2. CEDM의 동적 특성

한국 표준형 원자력발전소에서 사용되는 CEDM의 2차 고유진동수는 원자로의 1차 고유진동수와 매우 근접하고 있으며, 원자로에 대한 총 CEDM의 질량비는 0.07이다. CEDM의 2차 모드와 원자로의 1차 모드만을 고려하면, 그림 2와 같이 단순화된 2 자유도계를 통하여 상호 동적 영향을 알 수 있다. 여기서 첨자 p와 s는 각각 1차 질량(원자로)와 2차 질량(CEDM)을 의미하며, m, k, c는 각각 질량, 강성도, 감쇠계수를 의미하는데, 원자로와 CEDM의 감쇠비(\$\xi\$)는 각각 0.03과 0.02로 알려져 있다. 입력 변위가 조화함수 형태이고 진폭 H가 고정되어 있다면, 응답 변위 \$U_p\$ 및 \$U_s\$의 H에 대한 비는 각각 다음과 같다.

$$\frac{|U_p|}{H} = \frac{r^2 \sqrt{[f^2(1+\mu) - r^2]^2 + 4r^2 f^2 \xi_s^2 (1+\mu)^2}}{\sqrt{[\mu f^2 r^2 - (r^2 - 1)(r^2 - f^2) + 4r^2 f \xi_p \xi_s]^2 + 4r^2 [\xi_s f(r^2 + \mu r^2 - 1) + \xi_p (r^2 - f^2)]^2}}$$

$$\frac{|U_s|}{H} = \frac{r^2 \sqrt{r^4 + 4r^2 f^2 \xi_s^2 (1+\mu)^2}}{\sqrt{[\mu f^2 r^2 - (r^2 - 1)(r^2 - f^2) + 4r^2 f \xi_p \xi_s]^2 + 4r^2 [\xi_s f(r^2 + \mu r^2 - 1) + \xi_p (r^2 - f^2)]^2}}$$

여기서 \$r = \omega/\omega_p\$, 진동수비 \$f = \omega_s/\omega_p\$, 질량비 \$\mu = m_s/m_p\$이며, \$\omega, \omega_p, \omega_s\$는 각각 가진진동수, 1

차 질량의 고유진동수, 2차 질량의 고유진동수이다. 위 식으로부터, 특정한 μ 에 대해 f 에 따른 m_p 의 최대변위 중에서 최소값을 구하면 그림 3의 μ - f 곡선을 얻게 되는데, 이 곡선이 μ 가 정해졌을 때 계의 변위 응답을 최소로 하게 하는 f 를 결정하는 곡선이 된다. 그림 4는 μ 가 0.06, 0.07, 0.08 및 0.09로 주어졌을 경우, f 에 대한 1차 및 2차 질량의 최대 변위 응답비를 표시한 것인데, 특정한 설계에 대한 계의 동적 특성을 파악할 수 있다. 예를 들면, 현재의 CEDM 설계는 $\mu=0.07$, $f=1.0$ 인데, 이는 그림 4의 점 a에 해당한다. 이를 설계 변경하여 점 b ($\mu=0.08$, $f=0.93$)로 옮긴다면, 1차 및 2차 질량의 응답을 각각 18% 및 8% 씩 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3. 설계 개선 방향

CEDM은 구조적 특성상 횡방향 동적 하중에 취약한 데, 현재 진행 중인 차세대 원자로의 경우 지진하중이 0.2g에서 0.3g로 증가되므로 설계 개선이 필연적이다. 그러나 상대적으로 질량이 큰 원자로의 설계를 변경한다는 것은 무리이므로 자연히 크거나 비용이 작은 CEDM의 설계를 변경하여 전체 계의 거동을 개선하여야 한다.

앞에서 제시된 그림 3 및 4로부터 설계 개선 방향을 다음과 같이 결정할 수 있다.

1) f 의 값을 0.93 부근으로 감소시킨다. 이렇게 함으로써 원자로 및 CEDM의 응답을 모두 감소시킬 수 있기 때문이다. 이때 원자로의 1차 고유진동수를 증가시키기는 곤란하므로 CEDM의 2차 고유진동수를 감소시키는 방안을 찾는다.

2) CEDM의 질량은 가능한 감소시키지 않는다. μ 가 감소하면 CEDM의 응답이 커질수 있기 때문이다.

3) 개선 결과를 가능한 그림 3의 μ - f 곡선과 일치시키도록 한다. 즉, 새로 얻어진 μ 와 f 의 교점이 원자로의 최대 응답 변위를 최소로 하게 하는 점이 되도록 한다는 것이다.

4. CEDM 부품 설계변경에 의한 최적 설계

그림 5는 CEDM의 구조를 단순하게 표현한 것이다. 본 논문에서는 CEDM 부품의 기능 및 기하학적 형태를 고려하여 CEDM의 동적 특성 결정에 영향이 큰 압력 하우징의 단면 형상을 변경하여 설계 개선을 시도한다. 설계변수로 압력 하우징의 외경을 정하였는데, 하우징 내경은 제어봉과의 관계를 고려하여 변수로 취하지 않았다. 이 하우징은 내압을 받는 부품이므로, 현재 치수를 최소치로 정하였으며, 최대치는 모터 하우징과의 기하학적 연계요건으로부터 구하였다.

우선 압력 하우징의 외경을 단순하게 변경시키면서 앞에서 제시한 최적의 μ - f 곡선과 비교하여 보았다 (그림 6). 외경이 증가할수록 최적 곡선에 가까워지긴 하나, 주어진 조건내에서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다.

다음 단면을 9개 구간으로 나누어, 각 구간에서의 외경이 각각 독립적으로 변하는 경우에 대해서 시도하여 보았다. 이때 최적설계 기법을 이용하여 최소의 f 값을 갖는 외경 값을 구하였으며, ANSYS [3]의 OPT routine을 사용하였다. 그림 7은 초기 설계조건 (현재의 CEDM 설계)인 $\mu=0.07$ 와 $f=1.0$ 으로부터 수렴해 나가는 과정을 보여 준 것인데, 최적 설계 조건은 $\mu=0.076$, $f=0.936$ 으로 수렴하였다. 이는 최적의 μ - f 곡선과 일치하지는 않으나 상

당히 근접하고 있음을 알 수 있으며, 1차 질량의 변위 응답비는 11.6에서 10.5로 9.5% 감소하였으며, 2차 질량의 변위 응답비는 44.5에서 41.9로 5.8% 감소하였다. 그림 8은 최적 조건에서의 압력 하우징의 형상을 보여주고 있다.

5. 결 론

한국 표준형 원자력발전소의 원자로와 CEDM의 동적 응답을 감소시키기 위하여, 두 구조물을 2 자유도계로 단순화하여 상호 동적 영향을 검토하여, 설계 개선은 고유진동수비 f 를 0.93 부근으로 수렴시키고, 질량비 μ 는 감소시키지 않아야 하며, 제시된 최적의 μ - f 곡선과 일치하는 방향으로 해야 함을 제안하였다. 이에 따라 압력 하우징의 외경을 최적화하여 제안된 방법이 유용함을 확인하였다.

추후 CEDM의 다른 부품에 대한 설계 변경도 시도하여 더 최적화된 설계를 얻도록 할 것이며, 전체 원자로계통 해석에 적용하여 실제의 변위나 응력의 개선으로 입증함으로써, 지진하중이 증가되는 차세대 원자로 설계에 적용하도록 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Jin, I. Y. Kim, T. M. Shin, T. S. Choi, "Dynamic interaction effects between reactor vessel and CEDM", 14th SMiRT (to be published)
- [2] H. C. Tsai, "Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993.
- [3] ANSYS user's manual for revision 5.2, Swanson Analysis Systems, Inc., 1996.

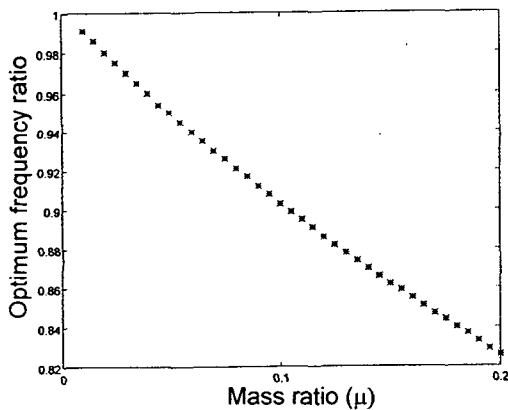


그림 3. $\xi_p=0.03$ 및 $\xi_s=0.02$ 일 경우 질량비(μ)에 대한 최적 진동수비 (f)

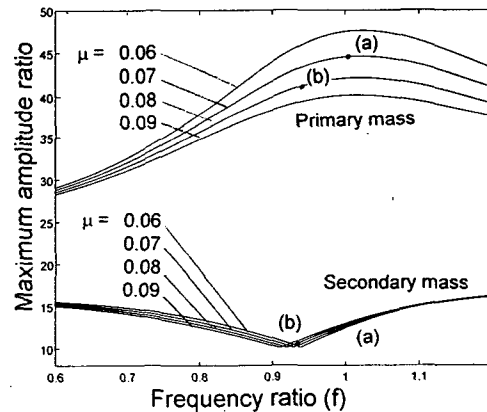


그림 4. 질량비별 1차 및 2차 질량의 최대 증폭비

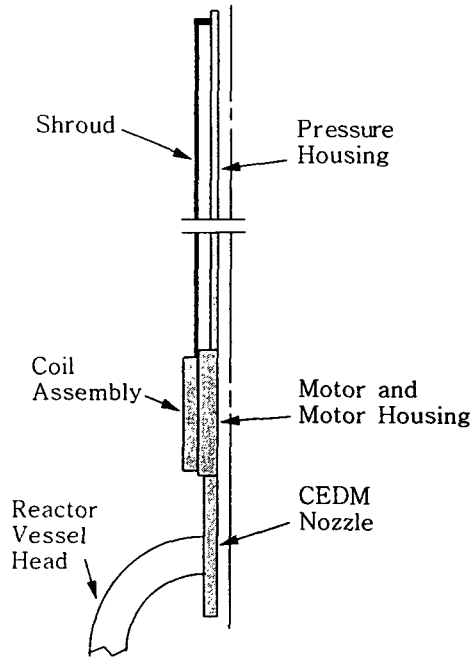


그림 5. CEDM 구조 (개략도)

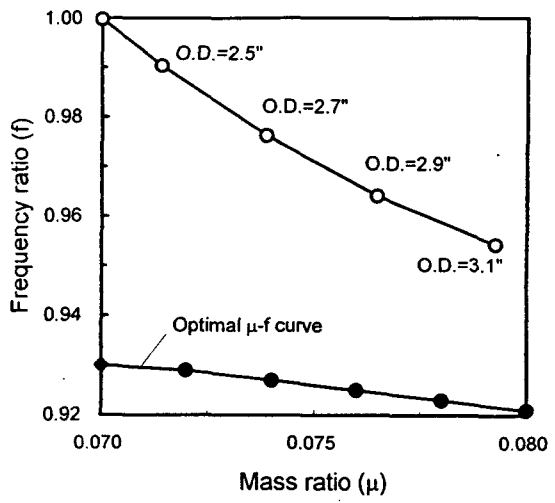


그림 6. CEDM 압력 하우징 외경의 단순 변경에 따른 질량비 및 진동수비

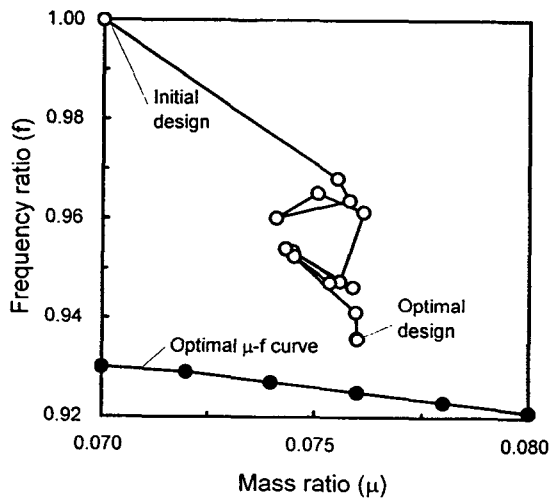


그림 7. CEDM 압력 하우징 외경의 최적 설계 이력

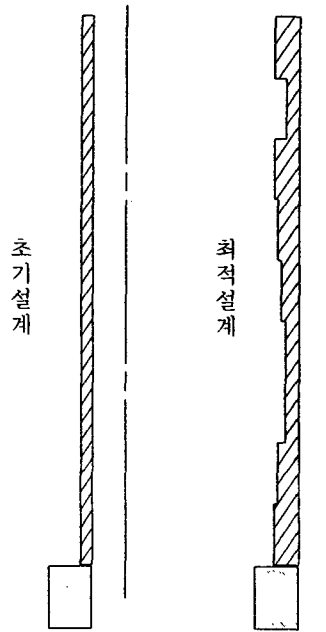


그림 8. CEDM 압력하우징의 초기설계 및 최적설계 형상