

제어봉 구동장치의 동적 특성을 고려한 최적설계

Optimal Design of CEDM considering the Dynamic Characteristics

김 인 용*
Kim, In-Yong

진 춘 언*
Jin, Choon-Eon

요 약

제어봉 구동장치(CEDM)의 동적 거동은 원자로의 동적 거동과 연동되어 있어, 두 구조물 간의 상호 동적 특성을 이해한 후 CEDM의 설계 개선 방향을 정립해야 한다. 원자로와 CEDM을 각각 1차 질량 및 2차 질량으로 하는 2자유도계로 단순화하여 상호 동적 영향을 검토하고, 두 질량의 응답을 모두 감소시키는 최적의 μ - f 곡선을 제시하였다. 설계 개선은 고유진동수비 f 를 가능한 0.93 부근으로 수렴시켜야 하며, 질량비 μ 는 감소시키지 않아야 하고, 제시된 최적의 μ - f 곡선에 접근시키는 방향으로 해야 함을 제안하였다. 이에 따라 CEDM의 부품들의 설계를 최적화하여 원자로와 CEDM의 변위 응답비를 각각 10.5 ~ 19.7%와 6.3 ~ 3.4% 씩 모두 감소시킬 수 있었다.

Abstract

The dynamic characteristics of Control Element Drive Mechanism(CEDM) for Korea Standard Nuclear Power Plant are studied with the CEDM modeled as a secondary mass in a simplified two degree of freedom system, while the reactor vessel as a primary mass. The optimal μ - f curve is developed to reduce the response amplitudes of both primary and secondary masses. In order to improve a design it is proposed that the natural frequency ratio, f , should be converged to 0.93, the mass ratio, μ , should not be reduced, and the result should be converged to the optimal μ - f curve. Optimal design for CEDM components has been carried out and the response amplitude ratios of reactor are reduced 10.5 ~ 19.7% while those of CEDM are reduced 6.3 ~ 3.4%.

Keywords : CEDM, reactor vessel, vibration absorber, response amplitude reduction, optimal design

1. 서 론

원자력발전소에서 사용되는 제어봉 구동장치(control element drive mechanism, CEDM)는 제어봉을 삽입하거나 인출함으로써 노심의 반응도를 제어하는 역할을 한다. Fig. 1은 한국표준형 원자력발전소의 원자로와 원자로 상부 헤드에

설치된 CEDM의 형상을 단순화 한 것이다. 이 CEDM들은 가늘고 긴 수직 외팔보의 형상을 하고 있어 지진과 같은 동적 하중에 취약한 구조를 갖고 있으며, 동시에 CEDM의 동적 거동은 원자로의 동적 거동과 연동되어 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 CEDM의 동적 응답을 줄이기 위한 설계 변경은 곧 원자로에도 동적 영향을 주는 것

* 정회원·한국전력기술주식회사 기계설계처, 주임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 1997년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

을 의미하게 되므로, 우선 두 구조물의 상호 동적 특성을 이해한 후 설계 개선 방향을 정립해야 할 필요가 있다.

C. E. Jin, et al¹⁾은 원자로와 CEDM을 각각 1차 질량(primary mass)과 2차 질량(secondary mass)으로 하는 2 자유도의 질량-댐퍼-스프링 계로 단순화한 후, Tsai²⁾의 curve fitting 기법을 이용하여 두 질량간의 상호 동적 영향을 고찰하였다. 이는 CEDM이 본래 기능상 역할 이외에 원자로의 진동 흡수장치 (vibration absorber) 역할을 하는 사실에 착안한 것인데, CEDM의 동적 특성의 개선에 의해 두 질량의 동적 응답을 모두 감소시킬 수 있음이 확인되었다. 이후 이를 이용한 CEDM 설계 최적화 연구가 진행³⁾되었다.

본 논문에서는 원자로와 CEDM의 상호 동적 영향에 대한 연구 결과¹⁾를 검토하고, 두 구조물의 동적 응답을 동시에 감소시킬 수 있는 설계 개선 방향을 제시하도록 한다. 또한 제시된 방향에 따라 CEDM의 부품을 최적화 기법을 이용하여 설계 개선하여 봄으로써, 그 유용성을 확인하도록 한다.

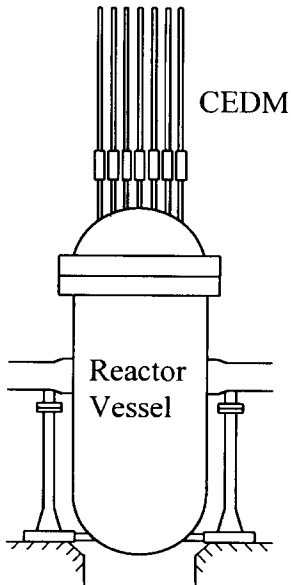


Fig. 1 Descriptive view of CEDM and reactor vessel

2. CEDM의 동적 특성

현재 한국 표준형 원자력발전소에서 사용되는 CEDM의 2차 고유진동수는 원자로의 1차 고유진동수와 매우 근접하여 서로의 동적 특성에 영향을 주고 있는데, 이 두 모드만을 고려하여 Fig. 2와 같이 질량, 점성 댐퍼 및 스프링으로 단순화된 2 자유도계로 가정하면 두 구조물 간의 상호 동적 영향을 쉽게 이해할 수 있다. 여기에서 첨자 p와 s는 각각 1차 질량(원자로)과 2차 질량(CEDM)을 의미하며, m, k, c는 각각 질량, 강성도, 감쇠 계수를 의미하며, $u_p(t)$, $u_s(t)$, $u_g(t)$ 는 각각 1차 질량, 2차 질량, 지반의 시간에 따른 변위를 의미한다. 현재 사용중인 두 구조물의 설계 특성값들은 다음과 같다.

원자로에 대한 CEDM의 질량비 (μ) = 0.07

원자로 감쇠비(ξ_p) = 0.03

CEDM 감쇠비(ξ_s) = 0.02

원자로에 대한 CEDM의 진동수비(f) = 1.0

입력 변위가 조화함수 형태이고 진폭 H가 고정되어 있다면, 각 질량의 응답 변위 U_p 및 U_s 의 H에 대한 비, 즉 증폭율은 각각 다음과 같이 표시된다.

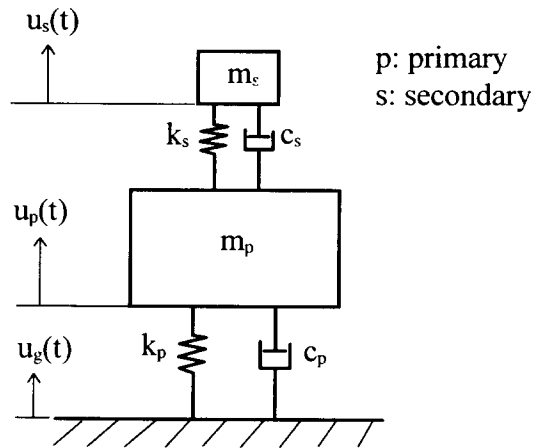


Fig. 2 Two degree of freedom system representing CEDM and reactor vessel

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

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

여기에서 $r = \omega/\omega_p$, 진동수비 $f = \omega_s/\omega_p$, 질량비 $\mu = m_s/m_p$ 이며, ω , ω_p , ω_s 는 각각 가진진동수, 1차 질량의 고유진동수, 2차 질량의 고유진동수이다. 식 (1) 및 (2)로부터, 특정한 μ 에 대해 f 에 따른 m_p 의 최대변위 중에서 최소값을 제공하는 f 를 구하여 μ - f 평면상에 표시하면 Fig. 3과 같은 곡선을 얻게 된다. 이 곡선이 μ 가 정해졌을 때 원자로의 변위 응답을 최소로 하게 하는 f 를 결정하는 최적 μ - f 곡선이다. Fig. 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 각 질량들의 동적 특성을 파악할 수 있다. 예를 들면, 현재의 CEDM 설계는 $\mu=0.07$, $f=1.0$ 인데, 이는 Fig. 4의 점(a)에 해당한다. 이를 설계 변경하여 $\mu=0.08$, $f=0.93$ 인 점(b)로 옮긴다면, 1차 질량의 응답 증폭율(U_p/H)은 12.61에서 10.43으로 17.3% 감소하고, 2차 질량의 응답 증폭율(U_s/H)은 44.49에서 40.90으로 8.1% 감소하여, 전체적으로 설계 개선됨을 알 수 있다.

3. 설계 개선 방향

CEDM은 구조적 특성상 횡방향 동적 하중에 취약하여, 현재 개발 중인 차세대 원자로의 경우 지진 지반 가속도가 0.2g에서 0.3g로 증가⁴⁾되므로 설계 개선이 필연적이다. 그러나 상대적으로 질량이나 설계비용이 큰 원자로의 설계를 변경한다는 것은 무리이므로, 자연히 크거나 비용이 작은 CEDM의 설계를 변경하되 원자로에 대한 동적 하중을 증가시키지 않도록 하여, 전체 계의 거동을 개선하는 것이 바람직 하다.

앞에서 제시된 Fig. 3 및 Fig. 4를 검토하여 설계개선 방향을 다음과 같이 제시한다.

- 1) f 의 값을 0.93 부근으로 감소시킨다. 설계 변경을 하더라도 μ 를 크게 바꾸기는 곤란하므로, 현재의 m 값 근처에서 원자로 및 CEDM의 응답을 모두 감소시킬 수 있는 f 값이 0.93 근처이기 때문이다. 이때 원자로의 1차 고유진동수를 증가시키기가 어려우므로 CEDM의 2차 고유진

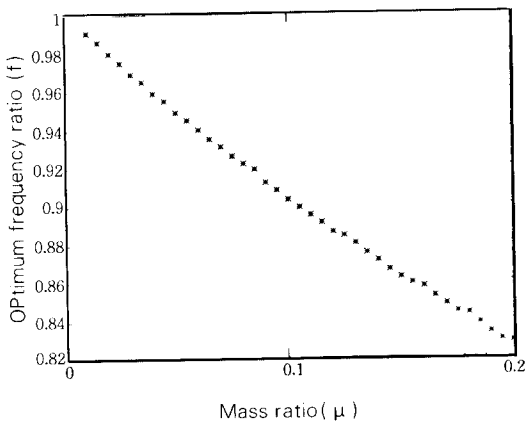


Fig. 3 Relationship between optimum frequency ratio and mass ratio

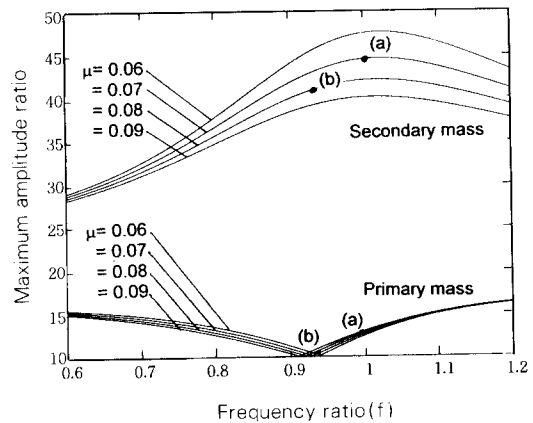


Fig. 4 Maximum amplitude ratios for various mass ratios

동수를 감소시키는 방안을 찾는다.

2) CEDM의 질량은 가능한 감소시키지 않는다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, m 이 감소하면 원자로의 응답은 감소하나 CEDM의 응답은 증가할 수도 있기 때문이다.

3) 개선 결과를 가능한 Fig. 3의 μ - f 곡선과 일치시키도록 한다. CEDM의 응답이 감소하는 대신 원자로의 응답이 증가하지 않아야 하므로, 가능한 새로 얻어진 μ 와 f 의 교점을 원자로의 최대 응답 변위를 최소로 하는 점에 수렴시키는 것이 두 구조물 모두에 유리하기 때문이다.

4. CEDM 부품 설계변경에 의한 최적 설계

앞에서 제시한 설계 개선 방향에 따라 CEDM을 설계변경하여 원자로와 CEDM의 응답 개선 여부를 확인하여 보도록 한다. 설계 변경 방법은, CEDM이 최적의 동적 특성을 갖도록 하는 부품 사양을 구하기 위해서, 각 부품의 치수를 설계변수로 하고 원하는 CEDM의 동적 특성을 목적함수로 하는 최적설계 기법을 사용하는 것이다. 동특성 해석 및 최적설계에는 범용 전산코드 ANSYS[®]를 사용하였다.

Fig. 5는 CEDM의 구조를 단순하게 표현한 것인데, 본 논문에서는 CEDM 부품의 기능 및 기하학적 형태를 고려하여 CEDM의 동적 특성 결정에 영향이 큰 압력 하우징과 슈라우드의 단면 형상을 각각 변경하여 설계 개선을 시도하고자 한다.

4.1 압력 하우징

압력 하우징은 제어봉 구동축의 통로로서, 현재 설계사양은 다음과 같다.

외경	2.375 inch
내경	1.875 inch
길이	약 175 inch
내압	2250 psi

우선 압력 하우징의 외경을 현재의 설계로부터 3.1 inch까지 일률적으로 변경시키면서 앞에서 제시한 최적 μ - f 곡선과 비교(Fig. 6)하여 보았는데, 외경이 증가할수록 최적 곡선에 가까워지고 있는 것을 알 수 있다. 외경이 3.1 inch인 경우는 $\mu=0.079$ 와 $f=0.954$ 에 해당하는데, 이는 원자로와 CEDM의 변위 응답비가 각각 현재의 설계조건에 비해 각각 10.5%와 6.3%씩 감소(Table 1)하였음을 보여주는 것이다.

Table 1 Optimization results

Case	μ	f	U_p/H	U_s/H
Initial design	0.07	1.0	12.61	44.49
O.D.=3.1 inch (pressure housing)	0.079	0.954	11.29	41.70
Optimal design (pressure housing)	0.076	0.938	10.56	41.88
Optimal design(shroud)	0.07	0.93	10.13	42.99

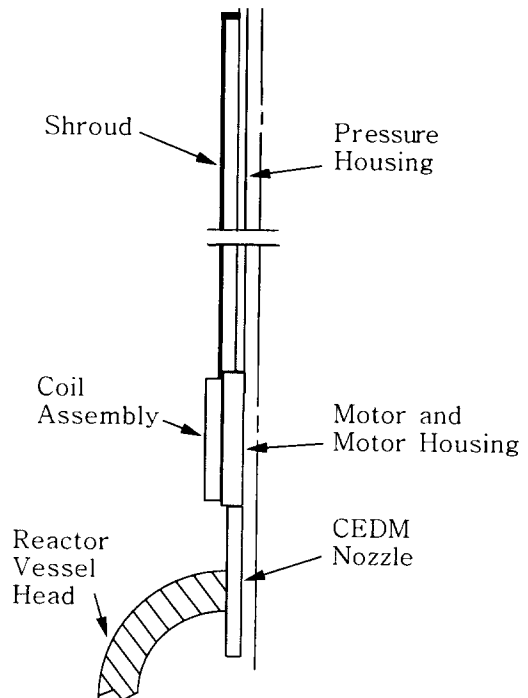


Fig. 5 Configuration of CEDM

다음에는 압력 하우징을 길이 방향으로 9개 구간으로 나누어 각 구간이 독립적인 외경을 갖는 경우에 대해서 최적화를 시도, 다음과 같이 0.93에 가장 근접한 f 값을 구하는 문제로 정의하여 보았다.

$$\text{Minimize } [f-0.93]^2 \quad (3)$$

$$\text{subject to } d_0 \leq d_i \leq d_{\max} \quad (i=1,2, \dots, 9)$$

$$\mu \geq 0.07$$

여기에서 d_i 는 설계변수로서 각 9개 구간에서의 외경이다. 압력 하우징의 내경은 내부에 설치되는 구동축과의 관계를 고려하여 고정된 값을 사용하였다. 또한 3절의 개선 방향 (2)로 제안된 것과 같이 CEDM의 질량을 감소시키지 않기 위하여 현재의 설계치수를 외경의 하한치 d_0 로 정하였으며, 외경의 상한치 d_{\max} 는 모터 하우징과의 기하학적 연계요건으로부터 구하였다. 원자로의 설계는 변경하지 않으므로 f 와 μ 는 다음과 같이 d_i 만의 함수가 된다.

$$f = \omega_s(d_i)/\omega_p \quad (4)$$

$$\mu = m_s(d_i)/m_p \quad (5)$$

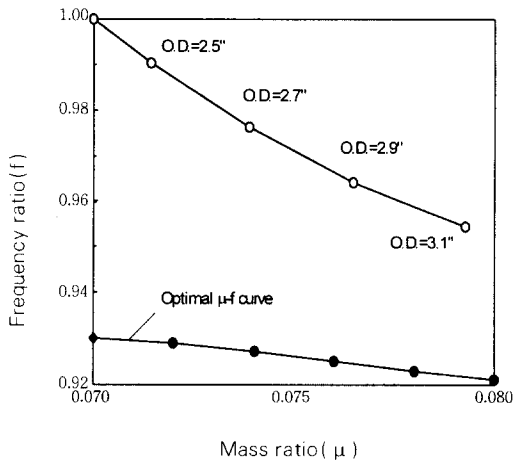


Fig. 6 Relationship between frequency ratio and mass ratio according to the various pressure housing outdiameters

식 (3)으로 정의된 문제를 풀기 위하여 우선 CEDM의 유한요소 모델을 만든 후 ANSYS로 모드해석을 수행하고, 후처리 과정에서 2차 고유진동수 ω_s 와 질량 m_s 를 추출한다. 이로부터 식 (4) 및 (5)에 따라 f 와 μ 를 계산하여 역시 ANSYS의 최적화 과정으로부터 새로운 d_i 를 얻는다.

Fig. 7은 초기 설계조건(현재의 CEDM 설계)인 $\mu=0.07$ 과 $f=1.0$ 으로부터 수렴해 나가는 과정을 보여 준 것인데, 최적 설계조건은 $\mu=0.076$, $f=0.936$ 으로 수렴하였으며, 이는 최적의 μ - f 곡선과 일치하지는 않으나 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. Table 1에서는, 원자로의 변위 응답비는 16.3% 감소하였고 CEDM의 변위 응답비는 5.9% 감소하였음을 보여주고 있다. Fig. 8은 압력 하우징의 초기설계 및 최적설계 형상을 비교하여 보여주고 있는데, 초기 외경 2.375 inch는 최적설계 후 2.4 ~ 3.2 inch로 분포되어 나타났다.

4. 2 슈라우드

슈라우드는 하부의 코일 집합체를 취급하면서 전기 케이블을 지지하는 역할을 하고 있는데, 현재 설계사양은 다음과 같다.

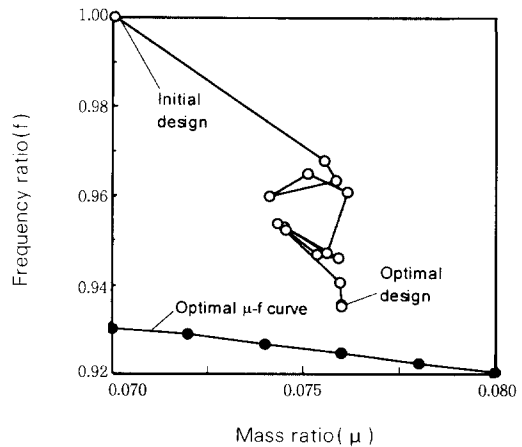


Fig. 7 History of optimization of CEDM pressure housing

외경 7.0 inch
 두께 0.109 inch
 길이 약 178 inch

슈라우드의 얇은 관 형태를 하고 있으므로 여러 구간으로 나누어 외경이나 두께를 서로 다르게 하기가 현실적으로 곤란하다. 따라서 슈라우드 외경 d 와 두께 t 를 설계변수로 정하여 최적설계를 시도하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } [f-0.93]^2 && (6) \\ &\text{subject to } d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \\ &\quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \\ &\quad \mu \geq 0.07 \end{aligned}$$

설계변수의 상한과 하한은 모터 하우징이나 압력

하우징과의 간섭이 발생하지 않거나 체결에 지장이 없도록 하는 기하학적 조건으로부터 구하였다. 원자로의 설계는 변경하지 않으므로 f 와 μ 는 다음과 같이 d 와 t 의 함수가 된다.

$$f = \omega_s(d,t)/\omega_p \tag{7}$$

$$\mu = m_s(d,t)/m_p \tag{8}$$

최적설계 과정은 앞의 4.1항과 동일하다.

Fig. 9는 초기 설계조건으로부터 수렴해 나가는 과정을 보여 준 것인데, 최적 설계조건은 Table 1에서와 같이 $\mu = 0.0701$, $f = 0.9307$ 로 수렴하였다. 이는 최적의 μ - f 곡선과 거의 일치하는 것으로, 원자로의 변위 응답비는 19.7%, CEDM의 변위 응답비는 3.4% 감소한 것이다. Fig. 10은 슈라우드의 초기설계 및 최적설계 형상을 비교하여 보여주고 있는데, 최적설계된 외경 및 두께는 각각 6.0 inch 및 0.130 inch이다.

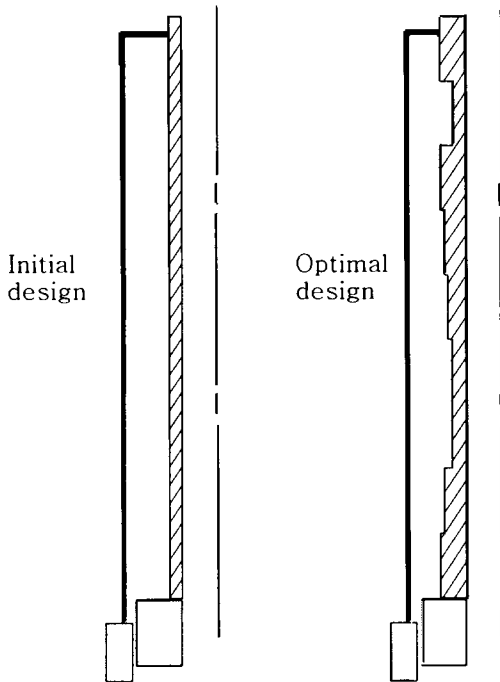


Fig. 8 Initial design and optimal design of CEDM pressure housing

4.3 최적설계 결과 검토

설계변경을 한 세 경우 모두가 현재의 초기 설계조건에 비해 개선된 것으로 나타났으나, 그 정도가 조금씩 차이가 나고 있다. 2차 질량인 CEDM의 응답비는 압력하우징의 외경을 단순 증가 시켰을 때에 감소 효과가 제일 크다. 1차

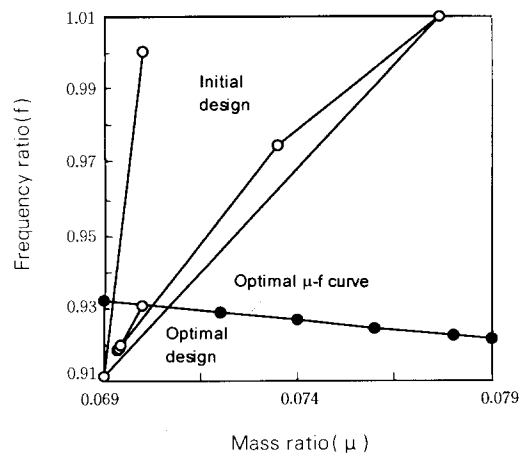


Fig. 9 History of optimization of CEDM shroud

질량인 원자로의 응답비는 슈라우드를 최적설계 하였을 때 감소 효과가 제일 큰데, 1차 질량의 최소 응답비를 위주로 구성된 최적 μ - f 곡선에 가장 가깝게 수렴하였기 때문이다. 질량의 증가가 거의 없는 상태에서 응답비 감소가 큰 슈라우드 최적설계의 개선 효과는 매우 이상적인 것으로 보이며, 3절에서 제시한 개선 방향이 유용함을 입증하고 있다. 압력 하우징을 최적설계 하였을 경우는 원자로와 CEDM의 응답비가 각각 최대 감소치에 근접하는 좋은 결과를 보이고 있어 설계 개선에 유리한 것으로 보인다.

그러나 위 결과들로부터 어느 것이 실제 설계에 가장 좋다고 단정하기는 곤란하며, 변위나 응력에 대한 상세 해석이 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

한국 표준형 원자력발전소의 원자로와 CEDM의 동적 응답을 감소시키기 위하여, 두 구조물을

2 자유도계로 단순화하여 상호 동적 영향을 검토하고 최적설계기법을 도입하여 설계 개선 가능성을 연구하였다. 설계 개선은 원자로보다는 CEDM의 설계 변경으로 하되 고유진동수 f 를 0.93 부근으로 수렴시키고, 질량비 μ 는 감소시키지 않아야 하며, 제시된 최적의 μ - f 곡선과 일치하는 방향으로 해야 함을 제안하였다. 이에 따라 CEDM의 부품인 압력 하우징과 슈라우드의 설계를 최적화하여 원자로와 CEDM의 응답비가 모두 감소함을 보임으로써 제안된 방법이 유용함을 확인하였다.

추후 CEDM의 다른 부품 및 부품 조합에 대한 설계 변경을 시도하여 더 최적화된 설계를 얻도록 할 것이며, 전체 원자로계통 지진해석에 적용하여 실제의 변위나 응력이 개선됨을 입증함으로써, 지진하중이 증가되는 차세대 원자로 설계 등에 적용할 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", Proceedings of the 14th Int'l Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lyon France, Aug. 1997.
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. 김인용, 진춘언, 김민규, "제어봉 구동장치의 동적 특성을 고려한 최적설계", 1997년도 분 학술발표회 논문집, 제10권 제1집, 한국전산구조공학회, 1997.
4. 차세대원자로 기술개발 (I) 보고서, 차세대 원자로 기술, 제 1권 차세대 원전 기본요건, 한국전력공사 전력기술연구원, 1994.
5. ANSYS user's manual for revision 5.2, Swanson Analysis Systems, Inc., 1996

(접수일자 : 1997. 5. 22)

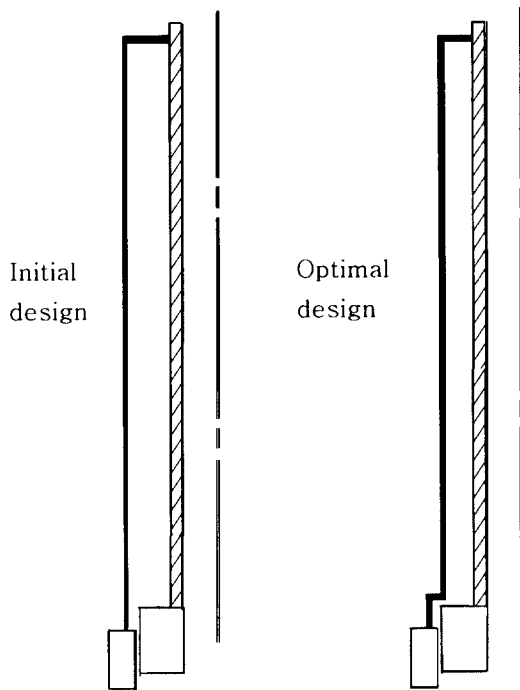


Fig. 10 Initial design and optimal design of CEDM shroud