

기기검증을 통한 안전관련 기기의 최적 모델 개발

이영섭 · 서옥환*

강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 · *한라대학교 기계공학과

1. 서론

원자력 발전소는 구조물(Structure), 계통(System), 기기(Equipment/Component)의 세 가지 기본요소로 이루어지며, 다량의 방사능 물질을 포함하고 있다.

익히 알고 있듯이 지진에 의한 피해는 말할 것도 없이 대단히 막대할 것이다. 특히 원자력 발전소와 같은 중요한 산업 기반 시설들은 지진에 의해 자칫 잘못하면 엄청난 인명피해 및 경제적 손실을 유발 할 것이기 때문에 원전 사고로 인한 인간의 건강 및 안전과 환경 보호를 위하여 원전의 안전 관련시설 및 설비는 사고를 초래할 수 있는 자연 환경이나 재해로부터 보호되고, 환경 요인이나 가상적 사고 조건(Postulated Accident Condition)에서도 구조적 건전성(Structural Integrity)을 유지하고 동시에 안전 관련 기능(Safety-Related Function)을 충분히 수행할 수 있도록 법률적으로 요구되며 설계, 제작, 시공, 시험 및 운전의 전반에 대하여 엄격한 품질 보증 요건과 각종 설계 및 기술 기준을 적용하도록 법적으로 규제되고 있다.

특히 원전의 안전 관련 기기(Safety-Related Equipment)는 정상 또는 비정상 환경 조건(Normal/Abnormal Environmental Condition)과, 지진 사고, LOCA(Loss of Coolant Accident, 냉각재 손실사고)와 같은 설계 기준 사고(DBA/DBE:Design Basis Accident/Event)조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하며, 또한 이러한 설계 조건에 대한 기기 설계의 적합성이 입증되어야 한다.

이러한 일련의 입증 과정을 각각 내진검증(Seismic Qualification) 및 내환경 검증(Environmental Qualification)이라 하고 두 과정을 합하여 통상 기기 검증(Equipment 또는 Component Qualification)이라 한다.

일반적으로 기계기기에 대한 성능검증은 기기의 운전성, 내압력 건전성 및 지진 부하에 대한 구조적 건전성 확보를 위한 내진검증이 주된 관심사였던 반면, 전기기기는 재료의 취약성으로 인하여 내진검증과 내환경 검증이 모두 요구된다.

위에서 언급한 전기기기의 검증기술은 열적 노후화, 가동 노후화 비내진 진동 노후화 및 방사선 노후화의 유형으로 구분되는 환경 분야, 내진 분야 및 Post-seismic(LOCA) 분야가 있으나 가장 중요한 부분이 지진 발생에 대비하는 내진 검증 및 내환경 검증이므로 본 연구에서는 원자력 발전소에 납품되는 항온항습기에 이 검증을 증점적으로 적용하였다. 이 기기 검증은 해석에 의한 방법, 시험 및 두 가지 방법을 조합한 방법이 사용된다. 이 중에 해석에 의한 방법을 이용하여 유한요소 모델의 해석 및 단계별 응용 설계, 조립을 거쳐 최적화 모델을 개발하려고 한다.

2. 기기의 기본사항 및 해석방법

2.1 기본사항

본 연구에 사용된 원자력 발전소의 안전 관련 기기는 항온항습기이다.

항온항습기 모델은 W65 * D60 * H190(Cm)로 Frame Work, Evaporator, Heater, Humidifier, Fan, Control Box, Pipe Section, Condenser등으로 구성되어 있으며 4개의 Anchor Bolts로 바닥에 고정되어 있다.

Fig. 1은 항온항습기의 형상과 구조물의 위치를 나타낸 것이며 Table 1은 각각의 구조물에 대한 중량 데이터를 보여주고 있다.

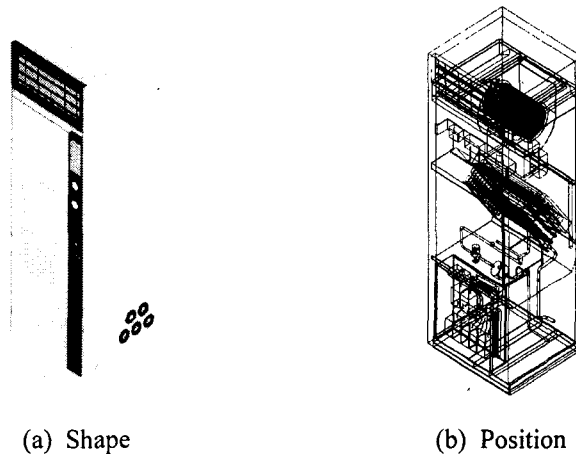


Fig. 1. The shape(a) and position(b) of a structure in computer room air conditioner

2.2 Mode 주파수 해석

모델이 일정한 Stiffness 및 질량효과, No Damping 및 자유진동 상태라고 가정하면 모델의 자유진동 주파수해석을 위한 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$[M] \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + [K] u = 0 \quad (2.1)$$

여기서 [K]는 구조 Stiffness Matrix, [M]은 질량 Matrix 그리고 {u}는 모델의 진동치를 나타낸다.

$$u = \phi_i \cos \omega_i t \quad (2.2)$$

여기서 ϕ_i 는 ith Natural Frequency의 Mode Shape를 대표하는 Eigenvector, ω_i 는 ith 자유진동수 주파수 그리고 t는 시간을 각각 나타낸다.

식 (2.2)을 식 (2.1) 대입하면

$$-\omega_i^2 [M] + [K] \phi_i = 0 \quad (2.3)$$

그러므로 위 식으로부터 자유진동 주파수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2.4)$$

여기서, f_i 는 자유진동 주파수이다.

2.3 기기의 예비해석

기기검증에서 가장 바람직한 것으로는 대상 구조물 전체를 실험하는 것이 바람직하지만 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자발생시 제품의 설계변경이 어렵다는 점 때문에 유한요소 해석 프로그램을 사용하면 예비해석을 통해 전체 구조물에 대한 구조적 안전성 평가 및 쉽게 구조물의 재구성이 용이하다는 이점이 있다.

따라서 본 논문에서의 예비해석은 MSC. visualNastran for Windows 2001 (이하 N4W라고 한다.)을 가지고 수행하였다.

먼저 예비해석을 수행하기 전에 구조물의 형상을 Plate, Beam, Mass 요소들을 사용하여 유한요소 모델을 생성하였고, Mass는 사용자가 공급한 중량 데이터(Table 1)를 기준으로 Lump Mass System으로 나타내었다.

Structure, Pipe Section, Anchor Bolts에 사용한 재료인 Steel, Brass의 물성치 값은 Table 2와 같다.

예비해석에 적용되는 검증방법은 먼저 주파수 해석을 통해 기기의 주파수를 구하고 이 값이 33Hz 이하나 이상이나 따라 적용되는 응력 해석 방법을 선택한다. 주파수가 33Hz 이상일 때는 RRS(Required Response Spectrum)상에서의 ZPA(Zero Period Acceleration)값을 정적하중으로 적용하는 등가 정적 해석을 적용하고, 주파수가 33Hz

Table 1. Weight summary for computer room air conditioner

Item	Weight (Kg)
Evaporator	10
Heater	6.905
Humidifier	5.991
Fan	26
Control Box	2.433
Solenoid Valve	0.325
Filter Dryer	0.273
Sight Glass	0.068
Expansion Valve	0.253
HPS (고압압력 스위치)	0.257
LPS (저압압력 스위치)	0.361
Condenser	0.089
Frame Work (Plate, Beam)	109.046
Total	162

Table 2. Material properties of the finite element

	Structural Steel	Brass	Anchor Bolts
Young's Modules (N/cm ²)	20.6×10 ⁶	10.3×10 ⁶	0.68×10 ⁶
Density (Kg/cm ³)	2159×10 ⁻⁶	2352×10 ⁻⁶	0
Poisson's Ratio	0.278	0.333	0.3

이하일 때는 동적해석 방법을 사용하여야 한다.

마지막으로 동하중의 영향을 배제한 정적하중(Dead Weight)을 적용하는 정적해석을 수행하게 된다. 정적해석에 사용된 구속조건은 모델이 4개의 Anchor bolts로 바닥에 고정되어 있으므로 이 부분을 모든 방향에 대해 고정시키고 정적하중(Dead Weight) 조건을 Y방향으로 1.0g를 제공하였다.

2.4 예비해석 결과

지진의 특성은 지면, 구조물 그리고 기기가 구조적 특성에 따라 상호작용에 의한 거동을 하며, 공진(Resonance)에 의해 증폭되는 현상을 나타낸다. 또한 지진파의 지배적 성분은 거의 대부분이 33Hz 이내에 나타나므로 기기검증에서는 33Hz가 중요한 수치가 된다.

Table 3은 주파수 해석결과이다. 이 데이터를 보면 Mode 1의 주파수가 33Hz보다 훨씬 작은 3.96Hz로 나타났다. 따라서 기기의 주파수가 33Hz 이하이므로 기기는 유연성을 보이며 적용되는 검증방법은 동적해석 방법을 사용하게 된다.

Table 4는 예비해석 후 각각의 구조물에 대한 최대 응력값을 나타낸 것이다. 데이터를 살펴보면, Fan Section에서 가장 큰 응력이 발생하며 값은 572.969 [MPa]로서 허용 응력 248.217 [MPa]보다 크음을 알 수 있었다. 또한, 가슴기가 위치한 부분에서의 응력값도 허용응력 범위를 넘어 구조적으로 불안정성을 보이고 있다고 할 수 있다.

Table 3. The result of frequency analysis

Analysis Type : Frequency [Hz]			
Mode	Set Value	Mode	Set Value
1	3.9603	20	9.5067
2	4.1803	30	12.3437
3	4.4003	40	14.4201
4	4.6203	50	16.4531
5	4.8403	60	20.8936
6	5.4467	70	25.0311
7	5.7493	80	28.5786
8	6.0519	90	32.3266
9	6.3544	100	36.5314
10	6.657	110	42.2995

Table 4. Summary of max.stresses at computer room air conditioner

Element No.	Location	Max. Stress (MPa)	Allowable Stress (MPa)
2829	Base Frame	11.274	248.217
2077	Fan/Motor Section	572.969	248.217
866	Heater/Evaporator Section	86.107	248.217
2671	Humidifier Section	438.091	248.217
3430	Electronic Equipment	65.872	248.217
703	Control Box	9.732	248.217
3222	Anchor Bolts	78.941	639.850

3. 결과 및 고찰

예비해석 결과를 토대로 보면 Fan, Humidifier Section에서 쉽게 변형이 발생하여 지진과 같은 자연 재해 및 동적 메카니즘에 대해 모델이 구조적으로 불안정하다고 판단된다. 따라서 가상적 사고조건에서도 구조적 안전성을 유지하고 동시에 기기가 손상됨

이 없이 제 기능을 수행할 수 있도록 모델 수정이 필요하다고 사료된다.

3.1 모델 수정 후 해석결과

Table 5는 모델 수정 전과 모델 수정 후 각각의 구조물에 대한 최대 응력값을 허용 응력값과 비교하여 나타낸 것으로 데이터 값을 보면 모델 수정 후의 최대응력이 발생한 Humidifier Section의 응력값은 121.441 [MPa]이다. 이와 같이 모든 구조물에서 모델 수정 후의 응력값이 허용응력 범위내에 존재하므로 구조적으로 안정하다고 판단된다.

Table 6은 각각 모델의 안전계수를 나타낸 것이다. AISC 허용 안전계수 1.67을 기준으로 적용한다면 향온향습기 모델의 모든 위치에서 충분한 안전계수를 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

이것은 본 연구에서 수행한 원전 안전관련 기기 즉, 향온향습기의 초기 모델이 구조적으로 매우 불안정적임으로 모델의 구조변경 및 두께, 형상비의 수정이 필요함을 나타내고 있는 것이다.

또한 전기기기가 집약되어 있는 Control Box의 위치 및 방폭구조로 교체함으로 구조적으로 안정성을 보이며 정상 및 운전조건하에서 온도, 습도 방사선등의 환경인자의 영향에서도 제 기능을 정상적으로 수행할 수 있다고 판단된다. 그리고 유지보수가 용이하여 경제적 이점과 전기적, 기계적 및 열적으로도 충분한 저항력을 보이므로 정상 시 및 사고 시에도 안정적이라고 생각된다.

Table 5. A stress comparison of the model of original and modification

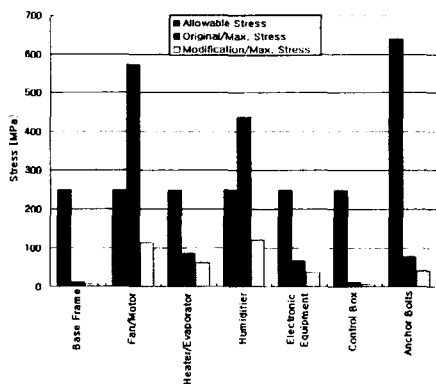


Table 6. Summary of stresses and factors of safety

Location	Allowable Stress	Original/Max. Stress	Modification/Max. Stress	F.S
Base Frame	248.217	11.274	6.011	41.294
Fan/Motor	248.217	572.969	113.335	2.19
Heater/Evaporator	248.217	86.107	61.916	4.009
Humidifier	248.217	438.091	121.441	2.044
Electronic Equipment	248.217	65.875	36.45	6.81
Control Box	248.217	9.732	5.19	47.826
Anchor Bolts	639.85	78.941	41.644	15.365

4. 결론

원자력 발전소에서 가동되는 기기중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 사고조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록 설계되어야 하기 때문에 이에 대한 본 논문은 기기검증을 통해 다음과 같은 결과를 바탕으로 최적 모델을

개발할 수 있으며 경비절감효과 및 원전사업에 수익성을 확보할 수 있다.

1. 예비해석 결과 초기 모델의 최대응력이 허용응력을 초과함을 확인할 수 있었다. 따라서 변형이 쉽게 일어날 수 있는 부분을 예측하여 이 부분의 두께, 형상비, 위치 변경 및 수정을 수행하였다.
2. 모델 수정 후 해석 결과 응력과 안전계수가 허용 범위 내에 존재하므로 구조적 안전성을 파악하였다.
3. Control Box의 부품 교환 및 유지보수, 환경조건을 고려하여 위치 및 부품을 수정하였고, 방폭구조로 교체한 Control Box의 최적화 모델이 전기적, 기계적 및 열적등의 환경인자에도 충분히 저항력을 보이며 구조적 안전성에도 영향을 미치지 않으므로 방폭구조로 수정함에 대해 적절하였다.

참고문헌

1. Uniform Building Code (UBS), edition, International Conference of Building Officials, 1979.
2. General Design Criteria, SF-2000-GG.
3. MSC.User's Guide V4.5, Analysis Reference, pp.7-1~7-8, 1998.
4. American Institute of Steel Construction, Manual of Steel Construction, Specification and Codes, pp. 5-2 4~5-97, 1991.
5. Charles G. Salmon, John E. Johns on, Steel Structures, Steels and Properties, pp. 41~69, 1990.
6. Walter D.Pilkey, Stress, Strain and Structural Matrices, Stress and Strain, pp. 84~135, 1994.
7. 한국소음진동공학회지 제9권 제3호, pp.535, 1999.