

원자력 발전소에 사용되는 향온향습기의 안전관련 기기검증을 통한 최적 모델 개발

서옥환* · 이영섭†

*한라대학교 기계자동차공학부 · 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과
(2004. 3. 2. 접수 / 2006. 2. 12. 채택)

Development of An Optimum Model Using Safety-Related Equipment Qualification for the Air Conditioner in the Nuclear Power Plant

Ukhwan Sur* · Yeongseop Lee†

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Halla University
Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University
(Received March 2, 2004 / Accepted February 12, 2006)

Abstract : The damage of important equipments for the nuclear power plant by the earthquake brings the loss of human lives and economic losses. Therefore safety-related equipment of nuclear power plant must be proved that function must be designed and structural integrity so that it can be maintained also from accident condition of various kinds. In this study, the computer room air conditioner to be delivered at the nuclear power plant applied to this qualification, try to develop an optimum model. This model ended up with good results which were under suitably allowable conditions about structurally safe earthquake.

Key Words : equipment qualification, dynamic analysis, required response spectrum, allowable stress

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 보호되어야 하며, 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 내진 검증(Sismic Qualification) 및 내환경 검증(Environmental Qualification)이라 하고 두 과정을 합하여 통상 기기 검증(Equipment 또는 Component Qualification)이라 한다.

일반적으로 기계기기에 대한 성능 검증은 기기의

* To whom correspondence should be addressed.
autobahn95@lycos.co.kr

운전성, 내압력 건전성 및 지진 부하에 대한 구조적 건전성 확보를 위한 내진 검증이 주된 관심사였던 반면, 전기기기는 재질의 취약성으로 인하여 내진 검증과 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 부분은 지진 발생에 대비하는 내진 검증 및 내환경 검증이므로 본 연구에서는 원자력 발전소에 납품되는 향온향습기에 이 검증을 중점적으로 적용하였다. 이 기기 검증은 해석, 시험 및 두 가지 방법을 조합한 방법이 사용된다. 본 연구는 유한요소해석을 통하여 향온향습기의 진동에 대한 구조적 안전성을 확보하는 모델을 제시하고자 한다.

2. 기기의 기본사항 및 해석방법

2.1. 기본사항

본 연구에 사용된 원자력 발전소의 안전 관련 기기는 향온향습기이다.

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

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

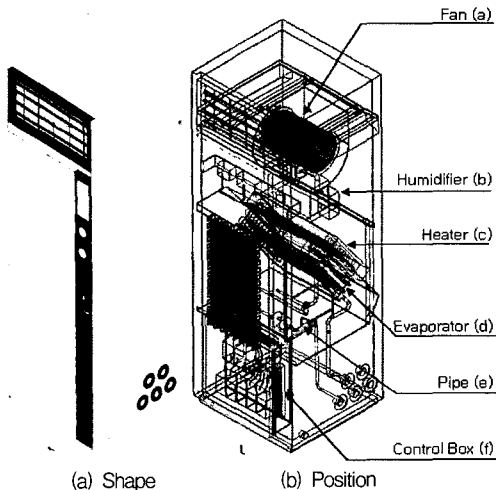


Fig. 1. The shape and positions of components of the air conditioner.

Table 1. Weight summary for computer 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

2.2. Mode 주파수 해석

모델이 일정한 Stiffness 및 질량효과, No Damping 및 자유진동 상태라고 가정하면 모델의 자유진동 주파수해석을 위한 운동방정식은 다음과 같이 주어진다¹⁾.

$$[M] \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + [K]u = 0 \quad (1)$$

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

$$u = \psi_i \cos \omega_i t \quad (2)$$

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

식 (2)를 식 (1) 대입하면

$$-\omega_i^2 [M] + [K] \psi_i = 0 \quad (3)$$

그러므로 위 식으로부터 자유진동 주파수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

여기서, f_i 는 자유진동 주파수이다.

Table 2. Material properties of the finite elements

	Structural Steel	Brass	Anchor Bolts
Young's Modulus (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

2.3. 기기의 예비해석

기기검증에서 가장 바람직한 것으로는 대상 구조물 전체를 실험하는 것이지만 이 경우 완제품을 미리 만들어야 한다는 점과 하자 발생 시 제품의 설계변경이 어렵다는 점 때문에 유한요소 해석 프로그램 사용하면 예비 해석을 통해 전체 구조물에 대한 구조적 안전성 평가 및 쉽게 구조물의 재구성이 용이하다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서의 예비해석은 MSC. visual-Nastran for Windows 2001³⁾(이하 N4W)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 선택하였다. 주파수가 33Hz²⁾ 이상일 때는 RRS(Required Response Spectrum)상에서의 ZPA(Zero Period Acceleration)값을 정적하중으로 적용하는 등가 정적 해석을 적용하였고, 주파수가 33Hz 이하일 때는 동적해석 방법을 사용하였다.

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

2.4. 예비해석 결과

2.4.1. 주파수 해석

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 된다⁷⁾.

Table 3은 주파수 해석결과이다. 이 데이터를 보면 Mode^{1,2)}의 주파수가 33Hz보다 훨씬 작은 3.96Hz로 나타났다. 따라서 기기의 주파수가 33Hz 이하이므로 기기는 유연성을 보이며 적용되는 검증방법은 동적해석 방법을 사용하였다.

2.4.2. 정적해석 및 동적해석

Table 4는 예비해석 후 각각의 구조물에 대한 최대 응력값을 나타낸 것이다. 데이터를 살펴보면, Fan Section에서 가장 큰 응력이 발생하며 값은 572.969 [MPa]로서 허용응력 248.217[MPa]보다 크음을 알 수 있었다. 또한, 가슴기가 위치한 부분에서의 응력값도 허용응력 범위를 넘어 구조적으로 불안전성을 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 the components of the 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 손상됨이 없이 제 기능을 수행할 수 있도록 모델 수정이 필요하다고 사료된다.

3.1. 수정

모델 변형의 인자로는 두께, 형상비, 재료특성치, 구조물의 위치 등이 있다. 본 논문에서는 위와 같은 요인을 중심으로 모델을 수정하였다.

Fig. 2는 Fan의 위치를 아래로 변경시킴으로써 무게중심을 낮추고 대신 Control Box는 위로 이동시켰다. Fan이 아래로 변경되었기 때문에 공기의 흐름을 원활하게 하기위해 Pipe를 지지하고 있던 Plate를 제거하고(Fig. 1에서 Pipe를 지지하고 있는 Plate (e)) 대신 Fig. 2의 Pipe section (e) 부분으로 변경하였다.

예비 해석의 결과 Fan 및 Humidifier 부분이 구조적으로 불안정하다.

Moment of Inertia값이 증가하면 보다 큰 하중을 견딜 수 있으므로, Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 Fan을 지지하고 있는 (a), (b), (c), (d) Beam의 Mo-

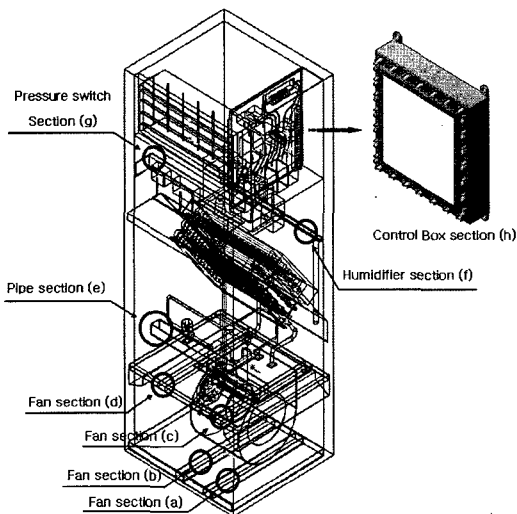


Fig. 2. Model of post-location change.

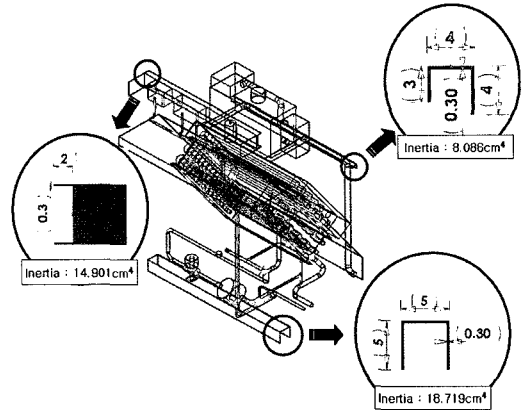


Fig. 3. The value of moment of inertia for section (e),(f),(g).

Table 5. The values of moments of inertia in original and modification

Location	Original / Moment of Inertia [cm ⁴]	Modification / Moment of Inertia [cm ⁴]
Fan Section (a)	4.153	15.198
(b)	3.472	10.375
Pipe Section (e)	-	18.719
Humidifier Section (f)	0.517	8.086
Pressure Switch Section (g)	-	14.901

ment of Inertia값을 증가시키기 위해 두께와 형상을 수정하고, Fig. 3과 같이 Moment of Inertia 값을 증가시키기 위해 Humidifier를 지지하고 있는 (f)부분 그리고 Pressure Switch를 지지하고 있는 (g)부분의 Beam의 두께와 형상을 수정하였다.

Table 5는 Fig. 2에서 표시한 형상의 Moment of Inertia값을 수정 전과 수정 후의 값으로 나타낸 것이다. 데이터에서 Pipe, Switch Section에서 수정 전의 값이 없는 이유는 Plate 형상에 Beam을 보강하였거나 교체하였기 때문에 수정 후의 값만 존재한다.

3.3. 모델 수정 후 해석결과

Table 6은 모델 수정 전과 모델 수정 후 각각의 구조물에 대한 최대 응력값을 허용응력값과 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 6. A stress comparison of the model of original and modification

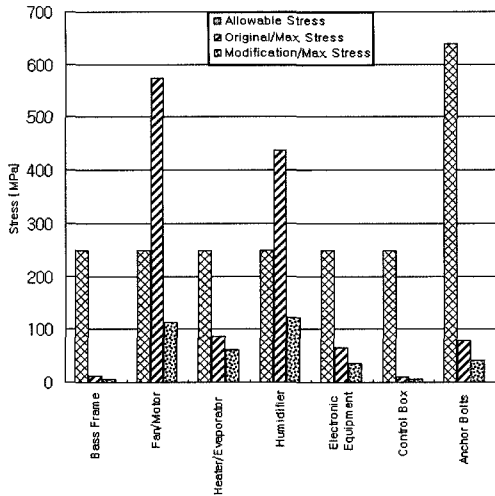


Fig. 4(a)와 4(b)는 모델 수정 전과 수정 후, 유한 요소해석을 통한 응력값을 Contour Style로 보여주고 있다.

두 그림에서도 보면 알 수 있듯이 수정 전 모델(Fig. 4(a))의 Max. Stress값은 572.969[MPa]이지만, 수정 후 모델(Fig. 4(b))의 Max. Stress값이 121.441[MPa]임으로 최대 응력값이 매우 감소했음을 알 수 있다. 또한 다른 모든 구조물에서의 최대 응력값도 모델 수정 전의 경우와 비교해 보면 상당히 안정적임을 알 수 있다.

Table 7은 각각 모델의 안전계수를 나타낸 것이다. AISC 허용 안전계수 1.67을 기준^{5,6)}으로 적용한다면 향온향습기 수정 모델도 모든 위치에서 충분한 안전계수를 보이고 있다.

이것은 향온향습기의 초기 모델이 구조적으로 매우 불안정적임으로 모델의 구조변경 및 두께, 형상비의 수정이 필요함을 나타내고 있는 것이다.

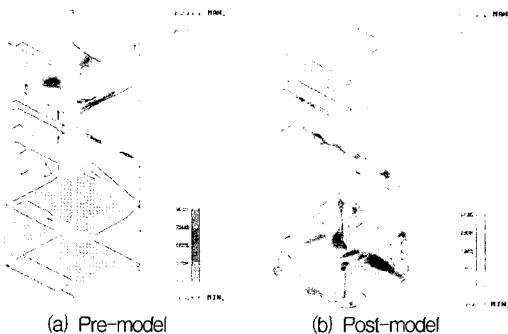


Fig. 4. The contour style of Pre(a) and Post(b)-model Modification.

Table 7. 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 향온향습기는 안전등급에 해당되는 기기이므로 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 초과하는 부분을 확인하였고, 이 부분의 두께, 형상비, 위치 등을 수정하였다.

2) 수정 모델의 최대응력이 재료의 허용범위 이내였으며, 안전계수 기준을 만족하여 좋은 결과를 보였다.

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. 5-24~5-97, 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.