

원전용 냉동공조 시스템 내진설계 및 검증

Seismic Design and Qualification for Nuclear HVAC System

이준근[†] · 윤기조^{*} · 김종운^{*} · 안성우^{*} · 이남기^{*} · 이희남^{**}
Joon-Keun Lee[†], Ki-Jo Youn^{*}, Jong-Wun Kim^{*}, Sung-Woo Ahn^{*},
Namki Lee^{*} and Hui-Nam Rhee^{**}

(Received August 27, 2024 ; Revised November 14, 2024 ; Accepted December 9, 2024)

Key Words : Seismic Qualification(내진검증), Response Spectrum(응답 스펙트럼), RRS(요구응답 스펙트럼), TRS(시험응답 스펙트럼), Modal Analysis(모드해석), Dynamic Similarity(동적 유사성)

ABSTRACT

This paper proposes an efficient seismic qualification method for representative HVAC systems in nuclear power plants, following the guidelines of US NRC Regulatory Guide 1.10, IEEE-344, and ASME Section III. Through structural and geometrical similarity analysis, candidate items for qualification were grouped using dynamic similarity principles, significantly streamlining the process. For large-scale equipment where seismic testing is impractical, a combined approach of seismic analysis and testing was employed. Seismic analysis included modal analysis and response spectrum analysis, while seismic tests were conducted on active components such as driving motors, fans, compressors, and control panels. Input seismic loadings accounted for response amplification due to the equipment's modal properties, incorporating specified margins to ensure conservative qualifications. The combined stresses derived from these procedures were confirmed to be below allowable limits, with a stress ratio under 0.8. Additionally, no mechanical or electrical failures were observed in the seismic analyses or tests. Consequently, the authors verified the safety and reliability of the HVAC system for use in safety-related nuclear applications.

기 호 설 명

- v : 시스템 절대변위
- w : 시스템 상대변위
- \ddot{z} : 지진과 가속도
- ϕ_r : 모드벡터
- η_r : 모드변위
- μ_r : 모드기여도
- ξ_r : 모드감쇠

1. 서 론

최근 유럽을 중심으로 탄소 배출이 거의 없는 친환경 에너지로 원자력발전이 다시 주목 받고 있다. 여기에 인공지능, 데이터센터, 히트펌프, 전기 차 등 electrification시대로 본격 진입하면서 안정적인 에너지 지원을 필요로 하는 수요와 맞물리면서 IEA(international energy agency)에서는 세계 원자력 발전량은

[†] Corresponding Author ; Member, LG Electronics, Technology Fellow
E-mail : joonkeun.lee@lge.com

^{*} LG Electronics, Dept. of Nuclear Development PJT, Researcher

^{**} Suncheon National University, Dept. of Aero-Space Eng., Professor

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2024 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Gun Woo Noh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

2040년까지 약 46% 늘어날 것으로 예측하였다. 그러나 주지의 사실과 같이 원자력 발전소에서 작동되는 기기 중 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진과 같은 설계사고 조건(design basis accident) 하에서도 그 고유한 기능이 유지되어야 하며 이에 대한 일련의 검증과정을 기기검증이라고 한다⁽¹⁾. 원전에 사용되는 주요 HVAC(heating, ventilating and air conditioning) 기기는 Fig. 1과 같이 reactor, fuel, aux, turbine 빌딩의 냉난방과 공조를 주목적으로 설치되며 비상시에는 방사능으로부터 오염된 공기를 필터링하여 각 빌딩에 공급하는 역할도 하고 있다. 이중 대표적인 HVAC기기는 냉동기(chiller)와 AHU(air handling unit), 팬(fan)을 들 수 있다.

2. 내진해석

기기검증은 Fig. 2와 같이 내진검증과 내환경검증, 그리고 전자파 내성에 대한 검증인 EMC(electro magnetic compatibility) 검증으로 구분된다. 이 논문에서는 가장 많은 시간과 비용을 필요로 하는 내진검증의 효율적인 검증방안을 제시하는 것으로 한다.

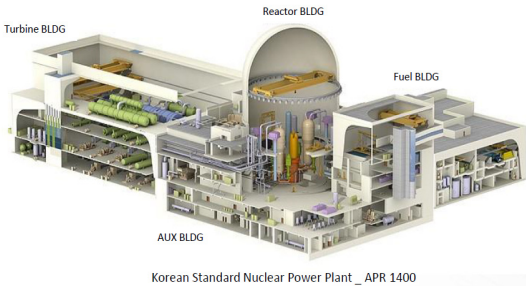


Fig. 1 Korean standard nuclear power Plant-APR1400

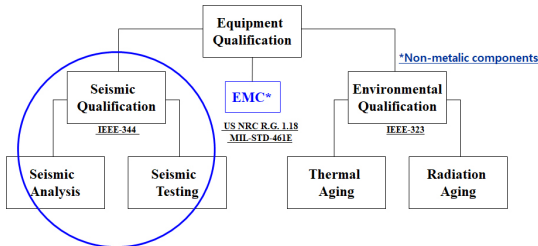


Fig. 2 Classification of equipment qualification

2.1 내진해석 절차 및 모델링

(1) 내진해석 절차

대상기기의 내진검증은 기기의 동적 특성에 따라 해석방법이 달라지게 된다. 통상적으로 지진하중의 임계주파수(cut-off frequency)는 33 Hz이므로⁽²⁾, 기기의 1차 global 모드가 33 Hz 이하이면 지진하중에 의한 탄성모드가 발생하므로 각 모드 별 발생하는 응력의 제곱합의 총 제곱근을 계산(square roots of sums of square: SRSS)하여 응력을 계산한다⁽³⁾. 반면 기기의 1차 모드가 33 Hz 이상이면 지진하중의 임계주파수 이상에서 모드가 형성되므로 대상기기는 주어진 지진하중 조건하에서 강체운동을 하게 된다. 이 경우에는 33 Hz 임계주파수의 가속도(zero period acceleration)을 이용하여 정적해석을 수행하게 된다. Fig. 3은 이러한 내진해석의 과정에 대한 flow chart이다. 먼저 검증대상기기를 확인하고 유사한 형상의 구조끼리 grouping하고 각 그룹 내에서 고유진동수가 가장 낮고 무거운 기기를 대표모델을 선정하게 된다. 이를 대상으로 모드해석을 시작하여 flow chart의 순서대로 내진해석을 진행하게 된다.

(2) 내진해석 모델링

내진해석용 모델링에서 가장 중요한 부분은 실제 대상기기의 무게 및 부피는 물론 기기의 글로벌 동특성이 잘 반영될 수 있어야 한다. Fig. 4는 공조기 fan의 3D 모델링 형상이다. 그림에서 보는 바와 같이 fan casing, fan base, fan support 등이 지진하중에 의한 베이스 흔들림

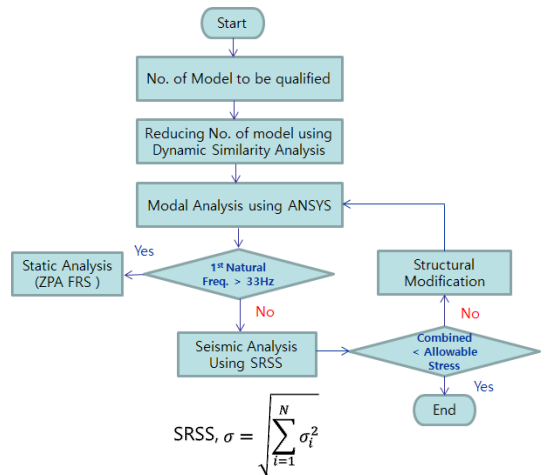


Fig. 3 Flow chart for seismic analysis

의 영향을 가장 많이 받을 수 있는 구조이므로 글로벌 모드의 특성을 잘 표현할 수 있도록 실제 형상과 물리적 결합조건을 충분히 반영하여 모델링을 개발한다.

2.2 내진해석 결과

(1) 모드해석 결과

Fig. 5는 대상기인 fan의 1차~3차 모드해석 결과이다. 만일 임계 주파수인 33 Hz 이내에 추가적인 모드가 있을 경우 모든 모드를 포함해야 한다. 이는 모델링 수준에 따라 다수의 로컬모드가 추가로 발생할 수 있으며 이는 실제의 응력보다 과대하게 계산될 수 있음을

의미한다. 따라서 임계주파수 내에서 글로벌 모드에 의한 응력특성이 반영될 수 있도록 모델링 되어야 한다. 대형 냉동기의 경우에도 우선 모드해석을 통해 지진하중에 의한 취약부위를 사전 검토하게 되는데 이는 냉동기 특성상 상단에 설치된 압축기와 배관의 동적 특성이 가장 먼저 모드형태로 나타날 수 있기 때문이다. Fig. 6(a)는 냉동기의 1차 모드 형상이다. 이는 압축기가 셸 위에 장착되는 형태이므로 일종의 lumped mass 역할을 하게 되고 이를 지지하는 배관의 동특성이 반영되어 1차 모드가 형성된다고 할 수 있다. Fig. 6(b)는 이러한 모드특성이 반영된 SSE 하중에 의한 응력분포이다.

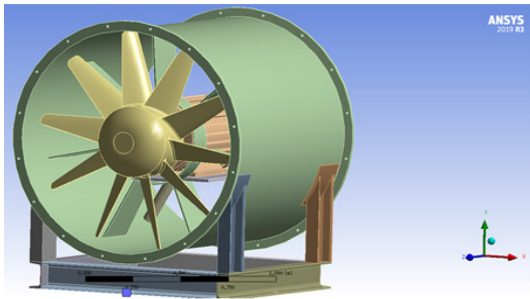
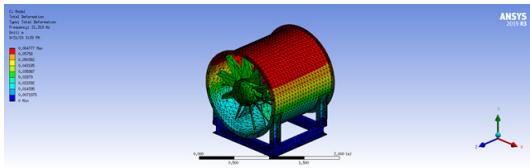
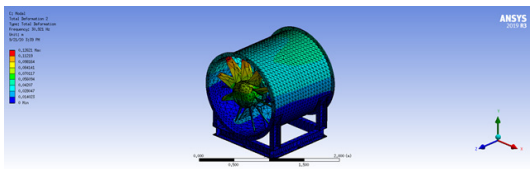


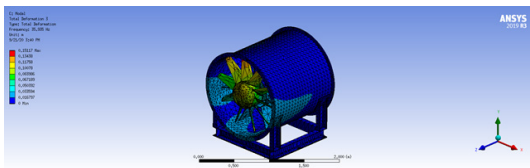
Fig. 4 3D modeling of fan for seismic analysis



(a) First mode shape(21.3 Hz)



(b) Second mode shape(30.9 Hz)

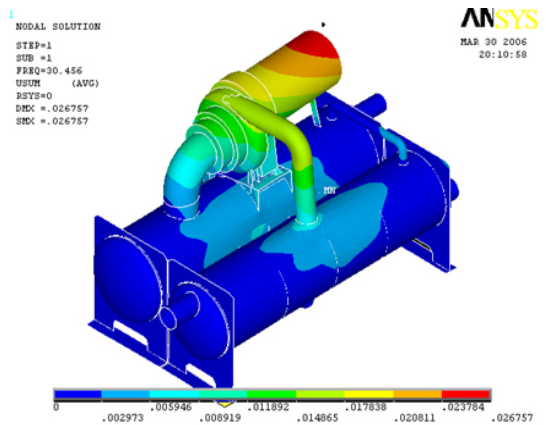


(c) Third mode shape(35.9 Hz)

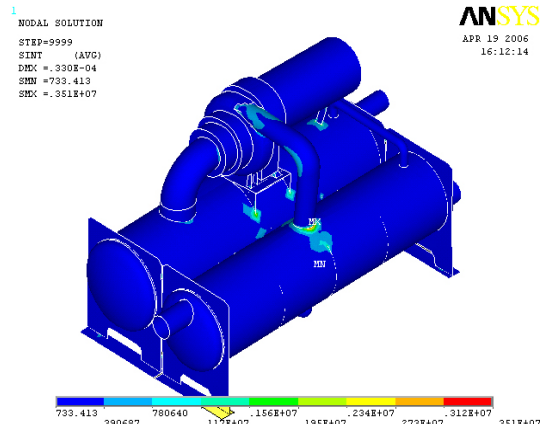
Fig. 5 Fundamental mode shapes of fan

(2) 지진하중 입력조건

지진하중은 스펙트럼 형태로 주어지며 컷오프 주파수

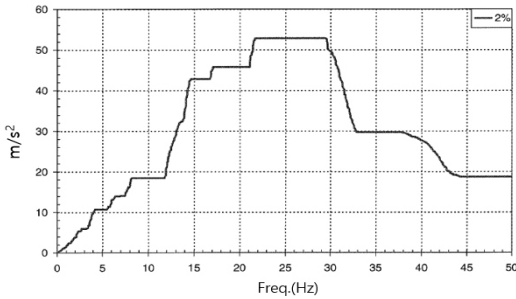


(a) First mode shape(30.5 Hz)

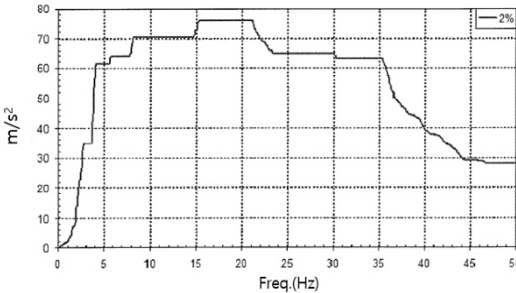


(b) Stress distribution due to SSE

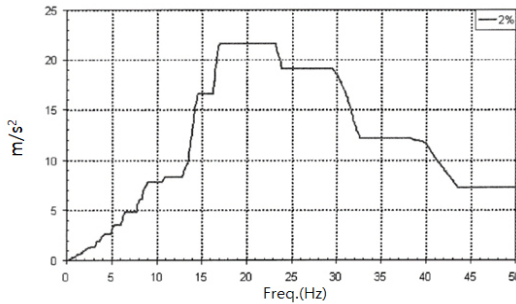
Fig. 6 First mode shape and stress distribution



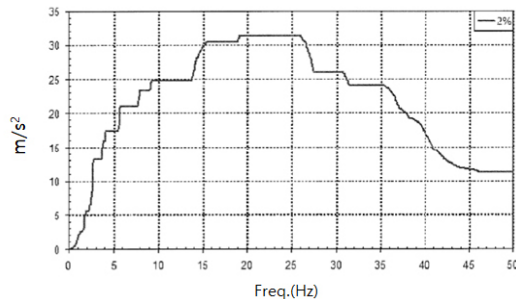
(a) Seismic load of SSE level, elevation 0.0 and lower



(b) Seismic load of SSE level, elevation 0.0 and higher



(c) Seismic load of OBE level, elevation 0.0 and lower



(d) Seismic load of OBE level, elevation 0.0 and higher

Fig. 7 Seismic spectrum loads

Table 1 Stress summary due to each seismic loadings

(a) Stress due to upset conditions(OBE loads)			
Location	Node No.	Stress intensity [Pa]	Allowable stress [Pa]
Nozzle	8119	1.0810171e+007	KSD3515
	8189	1.4768367e+007	1.97000e+008
Condensor pipe	20382	3.3284000e+006	KSD3515
	20384	1.8277800e+006	1.97000e+008
Motor saddle	6161	3.0753800e+006	KSD430
	6938	8.5883000e+006	1.65000e+008
Maximum stress	21495	1.561600e+008	KSD430 1.65000e+008
(b) Stress due to faulted conditions(SSE loads)			
Location	Node No.	Stress intensity [Pa]	Allowable stress [Pa]
Nozzle	8119	1.0818442e+007	KSD3515
	8189	1.4774453e+007	2.35000e+008
Condensor pipe	20382	4.2602000e+006	KSD3515
	20384	2.3759800e+006	2.35000e+008
Motor saddle	6161	3.1988400e+006	KSD430
	6938	9.4367000e+006	1.96000e+008
Maximum stress	21495	1.5690000e+008	KSD430 1.96000e+008

인 33 Hz 이내에서 최대가속도를 형성하게 된다. Fig. 7은 내진해석에 적용된 인도원전(Kudankulam 3&4)의 SSE, OBE 지진하중 스펙트럼으로 수평, 수직 공용으로 적용되는 값이다. 일반적으로 스펙트럼은 세 방향(수평, 수직)으로 구분되며 특히 수평방향의 지진하중이 대상 기기의 지진안전성에 더 큰 영향을 미치게 된다. 지진하중은 크게 OBE(operating basis earthquake)와 SSE(safety shutdown earthquake)로 구분되며⁽²⁾, OBE는 발전소 수명 40년 동안 5회 정도 발생하는 규모의 지진이며, SSE는 1회 발생하는 매우 큰 규모의 가상지진을 의미한다. 따라서 내진시험을 실시할 경우 OBE 지진하중에 의한 피로효과를 반영하기 위해 OBE 5회 시험 후 SSE 1회 시험을 순차적으로 진행하게 된다. Table 1은 각각 OBE, SSE 지진하중을 포함하는 응력해석 결과이며 최대응력은 허용응력대비 80% 수준임을 확인하였다.

3. 내진시험

3.1 시험 입력하중 도출

(1) 요구 응답 스펙트럼 도출

내진시험에 필요한 요구응답스펙트럼(required re-

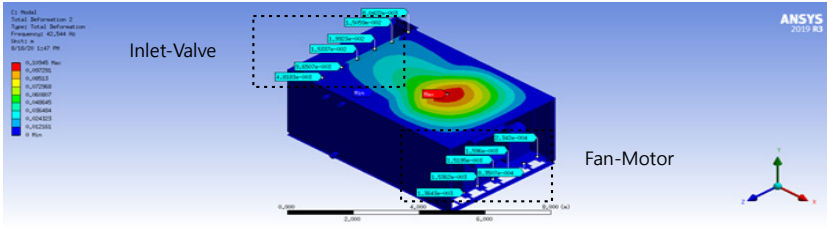


Fig. 8 1st mode shape and active components locations

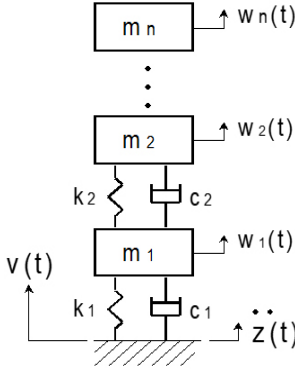


Fig. 9 Schematic of n-th D.O.F. System subject to base excitation

response spectra)은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저 대상기기 전체를 가진 테이블에 직접 설치하여 내진시험을 진행할 경우에는 앞서 Fig. 7과 같은 지진하중 스펙트럼을 기준으로 내진시험을 실시하게 된다. 그러나 Fig. 8과 같은 8 m 이상의 대형 AHU 기기의 경우 직접 가진 테이블에서 가진 할 수 없으므로 모터와 액추에이터 같은 능동기기(active components)를 중심으로 별도의 내진시험을 실시하게 된다. 이때 모 기기가 지진하중 주파수 범위 내에서 탄성 거동을 한다면 이로 인한 증폭비를 반영해서 RRS를 도출해야 한다⁽⁴⁾. Fig. 9는 기초 가진운동을 하는 n개의 자유도를 갖는 시스템이다. 모드벡터의 직교성을 이용하면 식 (1)과 식 (2)를 전개할 수 있다.

$$[m]\{\ddot{v}\} + [c]\{\dot{v}\} + [k]\{v\} = 0 \tag{1}$$

$$[m]\{\ddot{w}\} + [c]\{\dot{w}\} + [k]\{w\} = -[m]\{\ddot{z}\}$$

$$w = \phi\eta = \sum \phi_r \eta_r \tag{2}$$

모달벡터의 직교성과 하모닉 가정을 이용하여 식 (2)를 전개하면 식 (3)과 식 (4)와 같이 전개된다.

$$\ddot{\eta}_r + 2\xi_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_r^2 \eta_r = \phi_r^T [m] \ddot{z} = \mu_r \ddot{z}$$

$$\eta_r = H_r e^{i\omega t}, z = Z e^{i\omega t} \tag{3}$$

$$-\omega^2 H_r + i\omega \xi_r \omega_r H_r + \omega_r^2 H_r$$

$$= -\omega^2 \phi_r^T [m] Z = -\omega^2 \mu_r Z = -\mu_r Z_A \tag{4}$$

식 (4)로부터 구한 각 주파수별 변위를 다시 모드합을 이용해서 구하면 상대좌표 w에서의 특정자유도에서 변위를 구할 수 있고 여기에 기초부의 지진가속도 Z_A를 더하면 식 (5)와 같은 목표 자유도에서의 지진하중을 고려한 RRS를 도출할 수 있다^(5,6).

$$\{\ddot{V}\} = \{\ddot{W}\} + \{Z_A\} \tag{5}$$

Table 2는 대상기기인 AHU의 고유진동수를 포함한 동특성이며, Table 3은 식 (5)의 inlet valve와 fan-motor 위치에서 RRS를 구하기 위한 모드벡터이다.

Fig. 10은 3.1절의 RRS 도출방법을 통해 구한 AHU 기기의 inlet 밸브와 fan-motor 위치에서의 OBE, SSE RRS를 보여주며, 기초부위의 스펙트럼 대비 Table 2와 Table 3과 같은 AHU 기기의 동특성에 의해 1차 모드 이상의 주파수에서 주어진 스펙트럼 하중보다 높은 값을 형성하고 있음을 알 수 있다. 실제 실험에 있어서도 Fig. 10과 같은 기기의 동특성이 반영된 RRS를 적용해서 대상부품의 내진시험을 실시하게 된다⁽⁷⁾.

3.2 내진 실증시험

(1) 내진시험 및 검증

내진시험을 통한 내구성 검증을 위해 Fig. 11과 같

Table 2 Modal properties of AHU equipment

X-direction						
Mode	Freq. [Hz]	Participation Factor	Ratio	Effect. Mass	Mass Fraction.	Mass Ratio
1	39.8	-24.70	0.590	609.82	0.232	0.54E-01
2	42.5	12.86	0.307	165.39	0.295	0.14E-01
3	45.0	8.29	0.198	68.68	0.322	0.60E-02
4	48.4	41.88	1.000	1753.79	0.989	0.15
5	51.2	3.90	0.093	15.24	0.996	0.13E-02
6	53.7	3.34	0.080	11.18	1.000	0.98E-03
Sum				2624.09		0.23
Y-direction						
1	39.8	-25.78	0.384	664.66	0.109	0.58E-01
2	42.5	67.06	1.000	4497.10	0.843	0.394
3	45.0	-24.09	0.359	580.19	0.938	0.51E-01
4	48.4	-7.39	0.110	54.61	0.947	0.48E-02
5	51.2	-0.44	0.007	0.19	0.947	0.17E-04
6	53.7	-17.97	0.268	323.00	1.000	0.28E-01
Sum				6119.75		0.54
Z-direction						
1	39.8	4.67	0.301	21.83	0.52E-01	0.19E-02
2	42.5	12.35	0.797	152.59	0.415	0.13E-01
3	45.0	-15.50	1.000	240.31	0.986	0.21E-01
4	48.4	-0.59	0.038	0.346	0.987	0.30E-04
5	51.2	0.05	0.003	0.28E-02	0.987	0.24E-06
6	53.7	-2.37	0.153	5.60	1.000	0.49E-03
Sum				420.67		0.036

Table 3 Modal vectors at target locations

Inlet valve location						
Node No.	70066	69668	123261	113175	112091	123288
Mode 1	5.25E-04	6.76E-04	1.25E-03	1.16E-04	9.08E-04	4.79E-04
Mode 2	4.18E-3	9.65E-03	1.53E-02	1.99E-02	1.51E-02	8.04E-03
Mode 3	6.36E-3	5.26E-04	1.02E-03	1.34E-03	9.82E-04	1.29E-03
Mode 4	1.39E-3	2.73E-03	5.03E-03	6.00E-03	2.88E-03	2.78E-03
Mode 5	1.03E-3	7.16E-04	1.18E-03	1.41E-03	1.27E-03	8.92E-04
Fan-motor Ass'y location						
Node No.	381965	381781	381597	381413	381229	26056
Mode 1	4.82E-03	5.81E-03	5.79E-03	5.83E-03	3.25E-03	8.28E-04
Mode 2	4.18E-03	9.65E-03	1.53E-02	1.99E-02	1.51E-02	8.04E-03
Mode 3	1.26E-03	1.70E-03	1.62E-03	1.60E-03	9.34E-04	1.76E-04
Mode 4	7.99E-04	9.08E-04	8.93E-04	7.02E-04	5.22E-04	2.35E-04
Mode 5	5.84E-05	7.58E-05	7.74E-05	6.94E-05	4.59E-05	1.45E-05

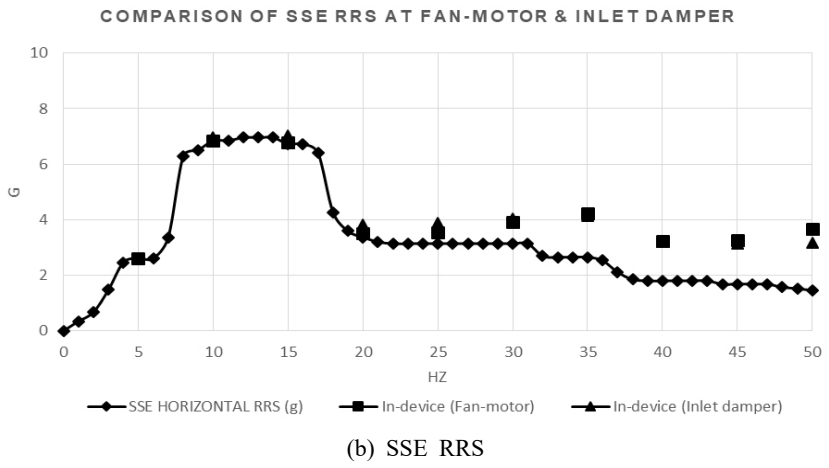
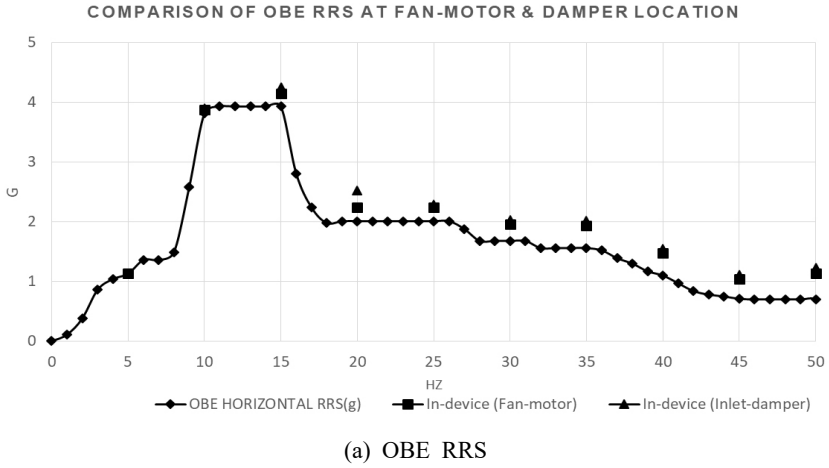
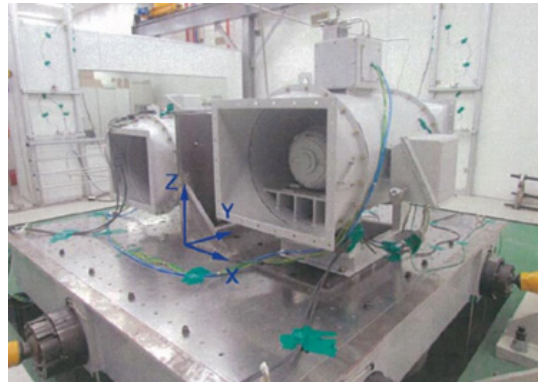


Fig. 10 RRS for inlet valve and fan-motor locations



(a) Turbo chiller on the shake table with nozzle load



(b) Fan on the shake table

Fig. 11 Experimental set-up for seismic test

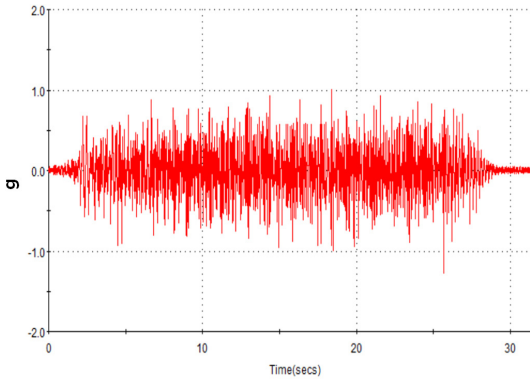
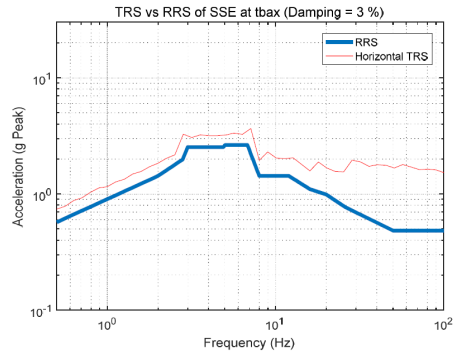
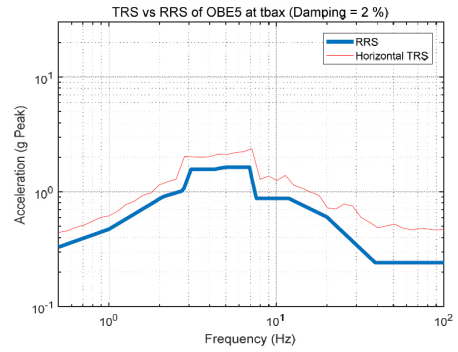


Fig. 12 Time history for seismic test

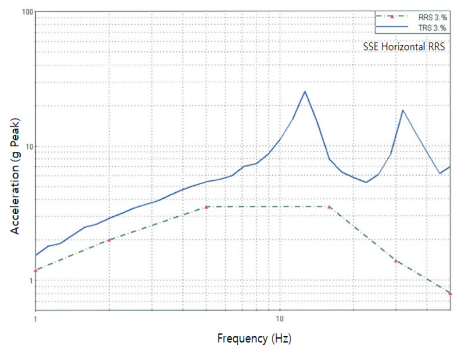
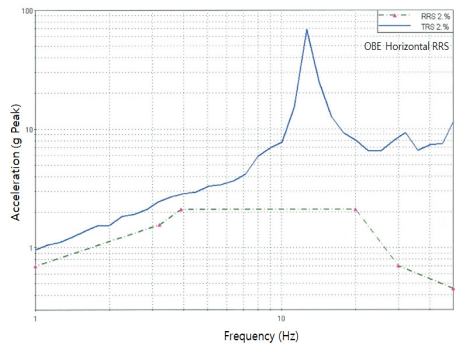
이 대상기기를 직접 가진 테이블에 장착하고 시험을 진행하게 된다. Fig. 11은 대형 냉동기와 공조용 fan에 대한 시험사례이다. 안전등급 기기의 시험에 있어 중요한 점은 정상 작동 상태에서 내진실험을 진행하며, 정상운전상태에서 발생할 수 있는 각종 노즐배관 하중 및 내압력 조건을 모사하여 시험을 진행한다. 내진시험 중에도 기기의 손상이 없음은 물론 정상작동 범위 내에서 기기의 성능이 나오는 것을 각종 출력 신호를 통해 모니터링 하고 분석하여 최종 시험 성공 여부를 확인하게 된다.

(2) 내진시험 결과

안전등급 기기의 경우, 정상작동 조건에서 지진하중시험을 진행하여 정상작동 함을 외관이나 각종 기능의 출력시험을 모니터링 하여 확인하게 된다. 이와 병행하여 가진 시험에 필요한 RRS가 충분히 반영되었는지 즉, 실험응답스펙트럼(test response spectrum)이 RRS를 충분히 포괄하고 있는지 여부를 최종 파악해야 한다. 내진시험은 정상운전 조건시 발생하는 각종 배관 하중 및 내압력 조건을 유지한 상태에서 OBE 하중 5회, SSE 시험 1회를 실시하는데 지진파형은 각 3축으로 랜덤해야 하며⁽⁸⁾, Fig. 12와 같이 약 30초간 실험을 연속해서 진행한다. 내진시험 직전에는 지진하중 임계 주파수까지 공진검색(sine sweep) 시험을 실시하여 검증대상기기의 고유진동수가 범위에 있으며 이 내진시험의 성공가능성을 미리 예측하게 된다. Fig. 13은 내진시험 시 모니터링 한 전체 냉동기와 공조 fan의 TRS와 시험입력 값인 RRS를 비교한 것이며, TRS가 내진시험에 필요한 RRS를



(a) RRS and TRS comparison for chiller



(b) RRS and TRS frequency comparison for fan

Fig. 13 OBE and SSE RRS and TRS comparison

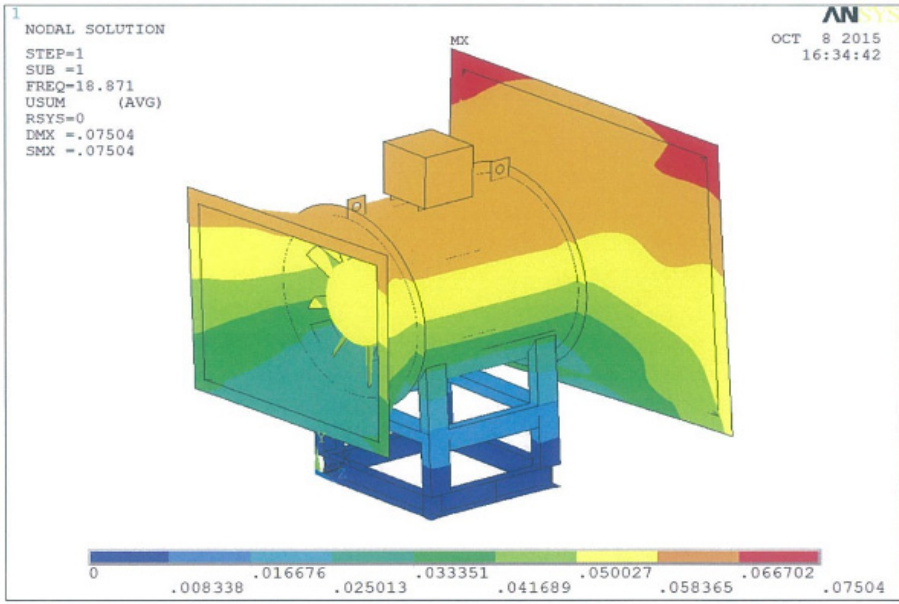


Fig. 14 First mode shape of fan

충분히 포괄하는지 여부를 확인하게 된다. 냉동기의 경우 Fig. 6과 같이 1차 모드가 30 Hz 이상이므로 33 Hz 임계주파수내의 내진시험 중 위험성은 미약하다고 판단되었다. Fan의 경우 Fig. 13(b)와 같이 TRS 자체는 RRS를 충분히 포괄하긴 하지만 15 Hz 대역의 모드특성에 의해 TRS가 증폭됨을 확인할 수 있다. 따라서 내진시험 전에 Fig. 14와 같은 모드해석 및 내진해석을 통해 예상 공진 주파수 및 주어진 지진하중에 의한 구조 안전성 확보 여부를 사전에 평가하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 경계조건 및 전체 기기와의 해석모델 정합성 확보과정을 거쳐 향후 대형 능동기기의 기기검증도 해석적인 방법으로 효율적으로 가능하리라 판단된다. 내진시험 시에는 IEEE 344 기준에 따라 입력 값인 RRS에 10% 마진을 더하고 Fig. 13과 같이 실증 내진시험을 통해 가진 테이블에서 모니터링 한 TRS가 RRS에 마진을 준 스펙트럼을 포괄하는지 여부와 내진시험 동안의 주요 기능의 정상작동과 구조적 손상여부를 확인함으로써 내진시험의 최종 성공여부를 판단하게 된다.

4. 결 론

이 연구에서는 고도의 안전성을 요구하는 원자력발

전소용 안전등급 냉동공조 기기의 효율적인 내진검증 방안에 대하여 제안하였다. 기기의 대형화 및 고속화, 다양화에 따른 검증상의 리스크와 기간 및 비용 최소화 관점에서 해석과 능동기기 위주의 실증 테스트를 조합하는 방안을 제시하였다. 원자력기기의 용량증가 및 대형화와 더불어 향후 내진해석의 비중이 점차 높아질 것으로 예상되는 바 해석의 신뢰성 확보를 위해 해석모델의 정합성 확보가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 실험을 통해 파악한 기기의 동특성을 해석모델에 지속 반영 중에 있으며 이를 바탕으로 해석모델의 정합성을 지속 향상시킬 계획이다. 아울러 기 검증된 국내의 원전 PJT에 대한 해석/시험 결과의 D/B 구축과 함께 후속 과제 대응을 위해 이를 기반으로 하는 원전기기의 최적화된 내진검증 프로세스 정립이 필요할 것으로 생각된다.

원자력기기의 특성상 지진을 포함한 가혹한 환경조건에서 정상 작동함을 입증하기 위해서는 지금까지는 각 케이스 별 실증시험과 이에 따른 많은 비용과 시간이 소요되었으나 이 논문에서 제안하는 해석과 시험을 조합하는 방법과 이러한 결과물들에 대한 D/B 구축을 통해 정합성을 확보하고 기기검증 수행업무에 적극 활용한다면 다양한 원전사업진출에 좀더 능동적으로 진출할 수 있을 것으로 판단된다.

References

(1) Korea Electric Association, 2020, Standard for Seismic Qualifying of Equipment for Nuclear Power Generating Stations, Korea Electric Association, KEPIC END 2000, Seoul, Korea.

(2) Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2013, IEEE Standard for Seismic Qualification of Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE 344-2013, NY, United States.

(3) United States Nuclear Regulatory Commission, 1992, ASME Appendix N, Dynamic Analysis Method, United States Nuclear Regulatory Commission, N-1200, MD, United States.

(4) Craig, R. R. Jr., 1992, Structural Dynamic: An Introduction to Computer Methods, John Wiley & Sons,

NY, United States, pp. 497~512.

(5) Byeon, H.-S. and Lee, J., 2002, Seismic Qualification of the Main Control Board for Nuclear Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 11, pp. 856~863.

(6) Lee, J., Kim, J.-Y. and Rhee, H. N., 2002, Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plant Ulchin 5&6, Transactions of the KSME A, Vol. 26, No. 7, pp. 1376~1383.

(7) Byeon, H. S., Kim, Y. C. and Lee, J. K., 2004, Development of Response Spectrum Generation Program for Seismic Analysis of the Nuclear Equipment, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 755~762.

(8) Inman, D. J., 1989, Vibration with Control Measurement and Stability, Prentice-Hall, NJ, United States, pp. 183~192.