

APR 1400급 원자로냉각재펌프의 내진해석

Seismic Analysis of APR1400 Grade Reactor Coolant Pump

안창기† · 유제용* · 박진석* · 함지웅**

Chang gi Ahn† , Je Yong Yu* , Jin Seok Park* and Ji Woong Ham**

Key Words :Reactor Coolant Pump(RCP), Structural safety, FEM(Finite Element Method), Dynamic events, Seismic analysis

ABSTRACT

RCP(Reactor coolant pump) must be designed to preserve it's functions on normal or abnormal environments and seismic event same as operating basis earthquake(OBE) and safe shutdown earthquake(SSE). Generally, there are static and dynamic analytical method which can be applied by a floor response spectrum or time history analysis for the seismic qualification.

Initially, It was accomplished a detailed structural FE-model for finite element analysis on the bases of 3-dimensional solid model which was made by the RCP drawing. As the result of dynamic characteristic using the detailed FE-model, it's shown about 12Hz natural frequency of 1st bending mode shape and maximum displacement has 11mm with the structural bending by single-point response spectrum(SPRS) method at all elevation. But maximum displacement has 7.6mm by multi-point response spectrum(MPRS) method which was applied to the three floor response spectrum at each elevation. Therefore, On a large heighten structures as RCP, The application by SPRS method causes to be more conservative results.

Finally, A simplified equivalent beam model which was developed by use of iteration of detailed FE-model is shown the result more similar with those of natural frequencies and SPRS analysis. And maximum equivalent stress and displacement of the simplified beam has verified with 180MPa and 7.1mm each at 15sec as results by SSE time history method.

1. 서 론

원자로발전소의 핵심 구조물, 계통 및 부품(SSC : Structure, System, Component)의 구조적 건전성은 발전소의 성능 및 안전성과 직결된다. 따라서 격납건물, 원자로, 안전관련 기기 등은 설계, 제작 및 운영 중에 지진 등과 같은 자연재해, 기기의 진동,

재료의 부식 등으로 인한 열화, 손상에 대해 구조적 건전성이 유지되어야 한다. 특히 원자로발전소와 같은 중요한 산업기반 시설들은 지진에 의하여 엄청난 재산피해와 수많은 인명피해를 유발할 수 있다는 점에서 원자로발전소의 시설과 기기는 지진과 같은 자연재해로부터 보호되어야 하고 가상적 사고의 환경 조건에서도 해당 기기의 구조적 안전성을 유지하여야 하며 동시에 안전관련 기능을 충분히 수행하여 설계, 제작, 시공 및 운전의 전반에 대하여 엄격한 품질보증 요건과 성능검증이 요구된다. 더욱이 원자로발전소에 납품되는 설비 또는 안전등급에 해당되는 기기는 정상, 비정상 환경과 지진발생과 같은 설계기준 사고조건에서도 그 기능이 유지될 수 있도록

† 안창기; 정회원, 충남대학교 기계공학과

E-mail : shckan@gmail.com

Tel : 010-8802-7899

* 한국 원자력 연구원

** 충남대학교 기계공학과

설계되어야 하며 이러한 일련의 입증과정을 내진검증이라고 한다.

내진검증은 일반적으로 시험적인 방법과 해석적인 방법으로 구분된다. 시험적 방법은 해석적 방법 보다는 더 정확한 방법이라 할 수 있으나, 수치해석적인 방법은 제작하고자 하는 기기 및 구조물에 대하여 보수적인 유한요소모델을 완성하여 산정된 지진하중을 적용하여 실제 기기의 완성품이 제작되지 않은 초기 설계 단계에서 내진해석을 수행할 수 있는 장점을 지닌다. 또한, 수치 해석의 방법은 해당 기기 및 시험장비의 크기에 제약을 받지 않는 조건에서 구조물에 대한 동특성 해석 및 내진평가를 수행할 수 있기 때문에 매우 효율적이고 경제적인 내진검증의 방법이라 할 수 있다. 그리고 수치해석을 이용한 내진검증을 위해서는 대상 기기의 동특성을 확인하고 지진하중의 적용 방법에 따라 정적해석(Static analysis) 또는 동적해석(Dynamic analysis)을 적용할 수 있으며 동적해석의 방법에는 응답스펙트럼해석(Response spectrum analysis)과 시간이력해석(Time history analysis)등의 방법을 적용할 수 있다^[2].

내진 1등급 기기로 분류되고 있는 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump) 구조물은 현재 여러 기관에서 국산화를 추진하고 있으므로 해당 기기의 동적 기술개발과 지지구조물이 동특성에 미치는 영향력을 파악하고 구조물이 설치될 지역 또는 위치에서 지진 발생 중 또는 발생 후에 기기의 고유기능을 유지할 수 있는지에 대한 검증을 평가하고자 한다.

2. 원자로냉각재펌프 구조물에 대한 해석

2.1 동특성 해석

(1) 상세모델에 대한 동특성 해석

원자로냉각재펌프를 구성하고 있는 구조물은 본체 케이싱을 받치고 있는 스키투를 중심으로 4개의 하부 수직지지대와 2개의 수평지지대가 스키투를 고정하는 구조이다. 그리고 본체 케이싱의 하부에는 흡입배관과 케이싱 측면으로 출구배관이 용접된다. 또한, 상부에는 페데스탈과 전동기 및 받침대가 설치되고 전동기 받침대의 측면에는 2개의 수평지지대와 완충기가 조립되고 내부에는 회전체 시스템이 설

치된다.

그러므로 조립된 상태의 냉각재펌프의 상세한 솔리드요소로 이루어진 유한요소모델의 3차원 형상은 Figure 1에 나타내었으며 247,126개의 요소로 이루어져 있고 펌프구조물을 구성하는 전체의 중량은 약 188톤에 해당된다.

결과적으로 제작사의 제안된 설계도면에 의하여 완성된 유한요소모델의 동특성 결과를 Table 1에 나타내었다.

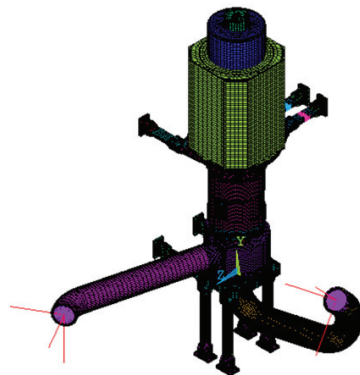


Figure 1. Finite element model of RCP assembly using detailed solid element

또한, 해당 주파수에 따른 1차 굽힘 모드와 비틀림 모드에 대한 모드형상을 Figure 2와 Figure 3에 나타내었다.

Table 1. Frequency results of RCP structures using detailed FE-model

Mode No.	Frequency [Hz]	Mode shapes
1 st	12.3	1 st Bending mode
2 nd	12.9	1 st Bending mode
3 rd	20.2	1 st Shaft bending mode
4 th	24.2	Vertical mode
5 th	30.4	2 nd Shaft bending mode
6 th	40.2	Torsional mode

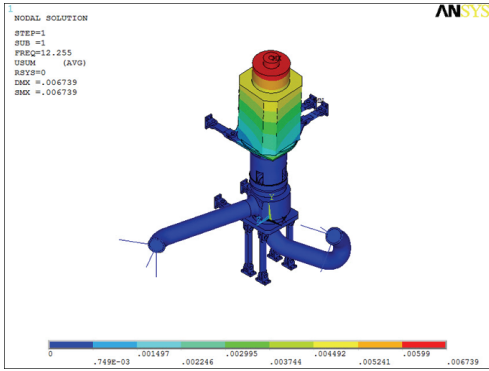


Figure 2. 1st bending mode shape of freq. 12.3Hz

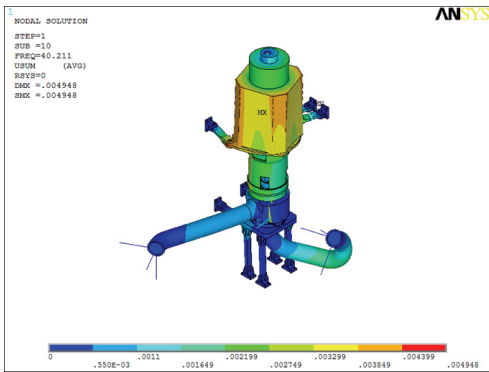


Figure 3. Torsional mode shape of freq. 40.2Hz

(2) 등가 단순 빔 모델 개발

원자로냉각재펌프의 구조적 형상을 등가 빔 요소를 사용하여 유한요소모델로 표현할 경우는 고정 구조물 수직 빔 모델과 회전축계 구조물에 해당하는 빔 모델이 수직방향으로 겹쳐진 형상이므로 Figure 2에 나타난 펌프 구조물의 3차원 형상은 매우 단순한 등가 빔 요소가 적용된 1,571개의 요소로 이루어져 있다.

등가 빔 유한요소모델에 대한 병합 및 커플링 조건은 받침대와 지지대의 연결 조인트 지점에 회전 방향을 제외한 병진방향(UX, UY, UZ)의 자유도를 커플링하여 동일한 거동을 모사하였다. 또한, 고정 구조물 시작 빔 모델과 회전축계 구조물의 빔 모델은 베어링의 지지 강성을 적용하기 위하여 스프링 요소 (COMBIN14)를 사용하여 연결되어 있다.

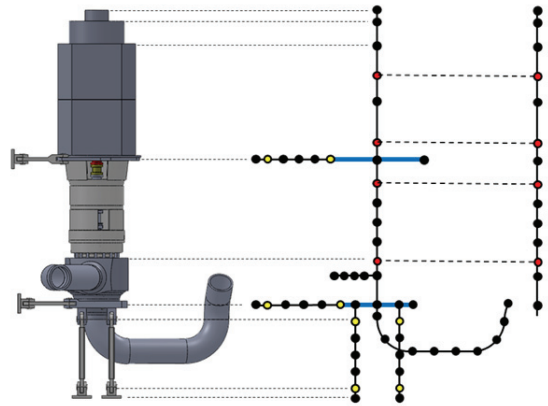


Figure 4. Finite element model of RCP assembly using equivalent beam element

등가 단순 빔을 이용한 유한요소모델의 동특성 결과를 Table 2에 나타내었으며 1차 굽힘 모드와 비틀림 모드에 대한 모드형상을 Figure 5와 Figure 6에 나타내었다.

Table 2. Frequency results of RCP structures using equivalent beam FE-model

Mode No.	Frequency [Hz]	Mode shapes
1 st	12.4	1 st Bending mode
2 nd	12.7	1 st Bending mode
3 rd	20.3	1 st Shaft bending mode
4 th	24.5	Vertical mode
5 th	29.1	2 nd Shaft bending mode
6 th	40.7	Torsional mode

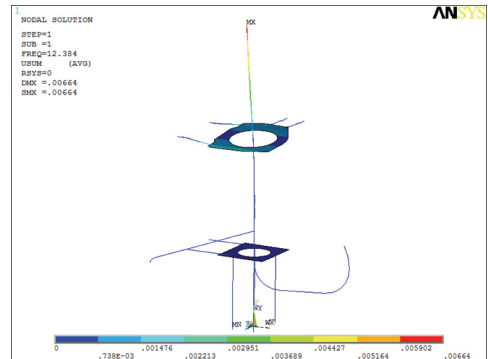


Figure 5. 1st bending mode shape of freq. 12.4Hz

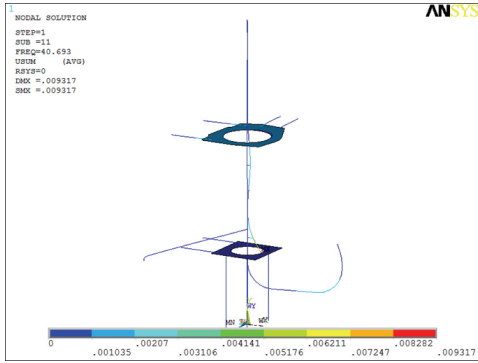


Figure 6. Torsional mode shape of freq. 40.7Hz

2.2 스펙트럼 해석법을 이용한 내진검증

상세모델과 등가 단순 빔 모델에 대해 스펙트럼 해석법을 적용하여 최대변위와 응력수준을 비교하였다. 스펙트럼 해석을 수행하기 위해 Figure 7과 같은 층응답스펙트럼 하중을 적용하였다.

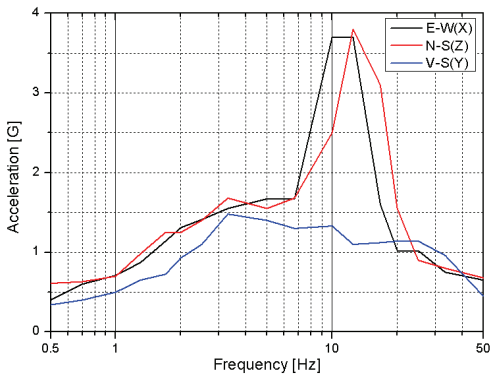


Figure 7. Floor spectrum curve for single point response spectrum analysis

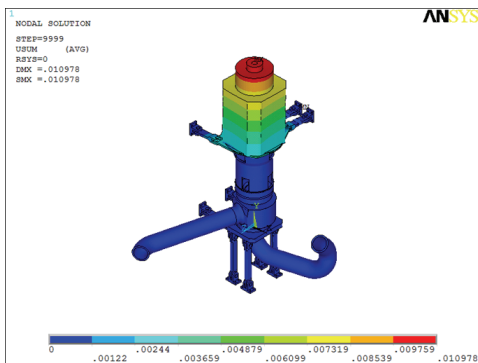


Figure 8. Displacement results of single point response spectrum analysis using detailed FE-model

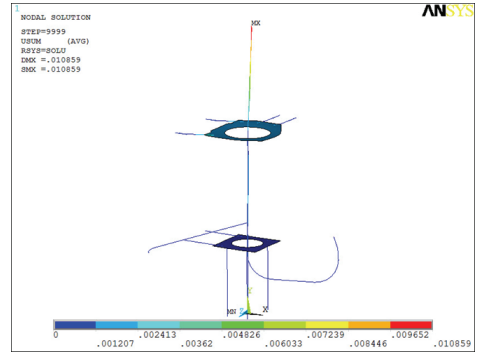


Figure 9. Displacement results of single point response spectrum analysis using equivalent beam FE-model

Table 3. Stress and displacement result of single point response spectrum analysis using detailed solid and equivalent beam FE-model

Component	Max. stress intensity [MPa]		Max. displacement [mm]	
	Detailed FE-model	EQV-beam FE-model	Detailed FE-model	EQV-beam FE-model
Lower vertical supporters	6.7	6.01	1.04	0.85
Lower horizontal supporters	13.4	13.9	0.93	0.77
Skirt	124.0	115.0	1.06	0.90
Upper horizontal supporters	42.5	33.3	3.16	2.94

상세모델과 등가 단순 빔 모델에 대하여 적용된 층응답스펙트럼에 의한 내진해석의 결과를 각 모델의 경우에 대한 최대 응력 강도 및 최대 변위 결과를 비교하였으며 Table 3에 나타내었다.

또한, 상세모델과 등가 단순 빔 모델에 대해 스펙트럼 해석법을 적용하였을 때의 원자로냉각재펌프 구조물의 최대 변위 결과를 Figure 8과 Figure 9에 나타내었다.

2.3 시간이력법을 이용한 내진검증

등가 빔 유한요소모델에 대하여 시간이력법을 적용하여 내진해석을 수행하였다. 시간이력 해석을 수행하기 위한 하중 이력은 안전정지지진(SSE) 조건에 대한 시간이력하중을 수직 및 수평방향으로 적용한

경우와 운전기준지진(OBE) 조건에 대한 시간이력하중을 적용한 경우에 대해 시간이력해석을 수행한다. 안전정지지진 조건에 대한 시간이력하중을 Figure 10에 나타내었다. Figure 10의 (a)는 X축의 방향인 수평방향으로의 시간이력하중에 대한 입력 값이고, (b)는 Y축의 방향인 수직방향으로의 시간이력하중에 대한 입력 값이다. (c)는 Z축의 방향인 수평방향으로의 시간이력하중에 대한 입력 값을 나타낸다. 운전 기준지진 조건의 시간이력하중을 Figure 11에 나타내었으며 운전정지지진 조건의 경우와 같이 수직 및 수평방향에 대한 시간이력하중의 입력 값을 나타낸다.

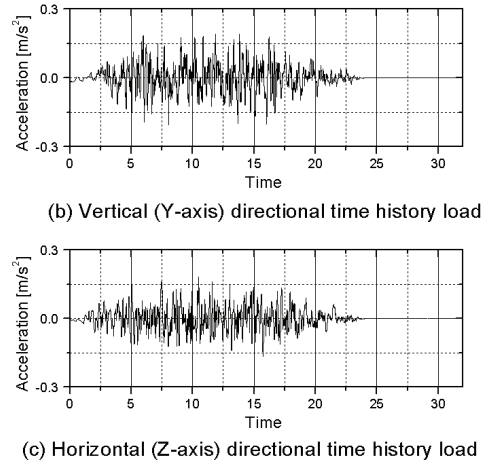
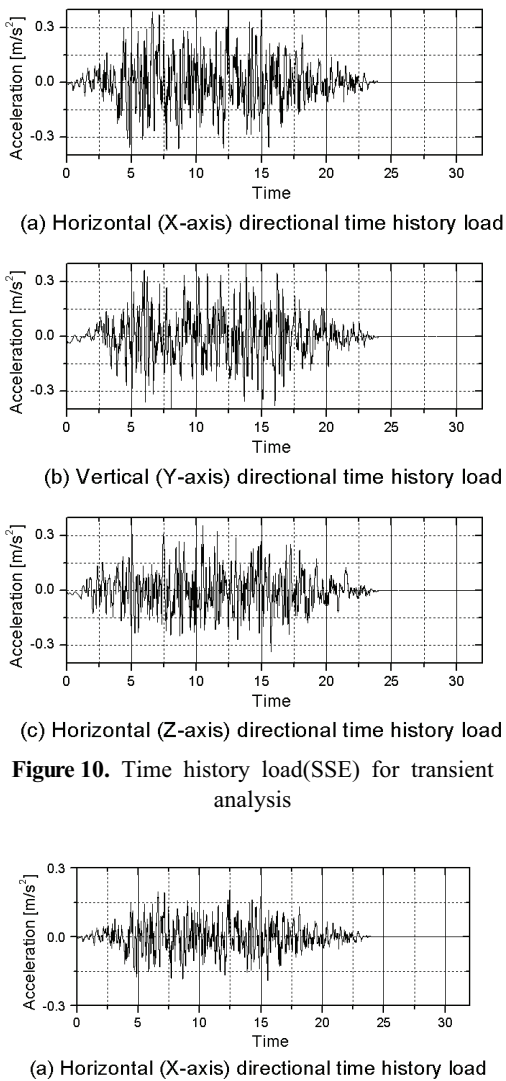


Figure 11. Time history load(OBE) for transient analysis

등가 빔 유한요소모델에 대하여 시간이력법을 적용하여 안전정지지진 조건에 대한 원자로냉각재펌프 구조물의 최대응력 및 변위결과를 Figure 12에 나타내었다. Figure 12의 (a)는 원자로냉각재펌프 구조물의 최대응력결과를 나타내며 (b)는 변위결과를 나타낸다.

등가 빔 유한요소모델에 대하여 시간이력법을 적용하여 운전기준지진 조건에 대한 원자로냉각재펌프 구조물의 최대응력 및 변위결과를 Figure 13에 나타내었다. Figure 13의 (a)는 원자로냉각재펌프 구조물의 최대응력결과를 나타내며 (b)는 변위결과를 나타낸다.

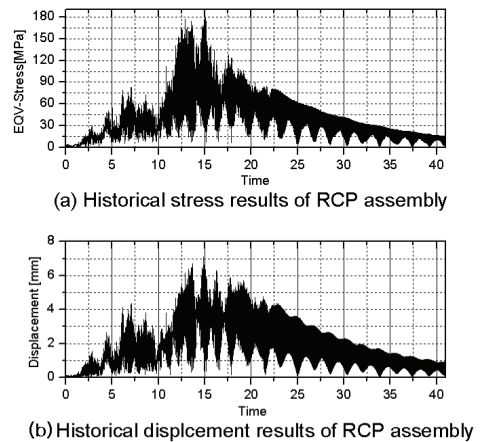
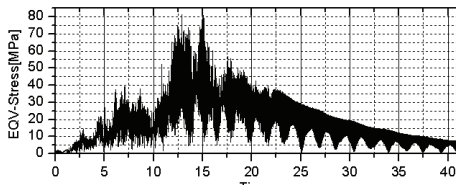
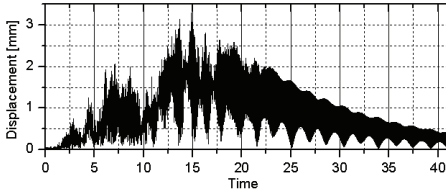


Figure 12. Stress and displacement results by time history seismic load (SSE)



(a) Historical stress results of RCP assembly



(b) Historical displacement results of RCP assembly

Figure 13. Stress and displacement results by time history seismic load(OBE)

3. 결 론

변경된 설계안에 대하여 원자로냉각재펌프 구조물의 동특성 해석을 수행하기 위하여 유한요소모델을 수정하였으며 펌프 내부에 회전체 축계 시스템을 포함하여 구조물의 동특성 결과를 도출하였다. 또한, 원자로냉각재펌프는 배관을 통하여 증기발생기 및 원자로와 연결되어 있는 구조물이므로 펌프의 흡입 및 토출배관의 지지조건에 대한 타당성을 검증하여 보다 상세한 원자로냉각재펌프 구조물의 동특성 해석을 수행하였다.

원자로냉각재펌프 구조물에 대하여 상세 유한요소모델과 등가 단순 빔 요소를 적용한 유한요소모델을 적용하여 동특성 해석을 수행한 결과, 1차 굽힘 모드의 진동주파수가 약 12(Hz)이며 수직방향의 모드는 24(Hz)이고 펌프의 회전방향에 대한 비틀림 모드는 40(Hz)에서 나타나고 있다.

그리고 상세 유한요소모델을 이용하여 단일스펙트럼해석법(Single point response spectrum method)을 적용한 내진해석의 결과는 최대변위가 약 11(mm)이고 다중스펙트럼해석법(Multi point response spectrum method)의 경우는 7.5(mm)의 최대변위가 도출되었다. 그리고 단일스펙트럼해석을 수행하기 위하여 상부 지지대 위치에서의 최대 층응답스펙트럼 하중을 펌프 구조물의 하부까지 모두 적용하는

하중 조건은 매우 보수적인 해석결과로 판단된다.

또한, 단순 등가 빔 모델을 이용하여 시간이력해석법(Time history analysis method)을 적용한 내진해석의 결과를 살펴보면, 상부 전동기의 최대변위가 약 7.1(mm)이고 전동기 지지판재의 연결 볼트 부위에서 최대 등가응력이 129(MPa)이다. 이러한 결과 값은 다중스펙트럼해석법의 결과와 매우 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std. 344-1987, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", 1987
- [2] ANSYS Inc, Theory Reference Manual Volume III, 2003