

원자력 발전소용 펌프의 내지진해석에 관한 연구

손효석* · 전형식** · 정희택***

Seismic Analysis of Nuclear Power Pumps

H. S. Son* · H. S. Chun** · H. T. Chung***

Key Words : Vertical Pump(입형펌프), Horizontal Pump(수평형 펌프), Seismic Qualification(내진검증), Resonant frequency(공진주파수)

ABSTRACT

The pump safety related to the functions in nuclear power plants must be designed to meet load conditions considering seismic requirements. In order to satisfy both structural integrity and operability of these pumps, the initial step in the seismic qualification is to establish the resonant frequencies of the structure. Applications are made to the design of the vertical and horizontal type pump. Computational results are analyzed with respect to the dynamic characteristics and are compared to the expected design requirements.

1. 서론

원자력 발전소에 설치되어 운용되는 기기중 안전등급으로 분류되는 펌프는 지진과 같은 가상적인 사고에 대비하여 기기 설계에 대한 적합성이 요구된다. 이러한 과정을 내진검증이라고 하며 이를 보증하는 방법에는 시험, 해석, 혹은 시험과 해석의 조합에 의한 것이 있다.^(1,2,3)

원자력용 펌프와 같은 기기의 경우에 시험에 의한 방법으로 내진검증을 수행하기 위해서는 가진대(Shaking Table)위에 현장에 설치되는 동일조건으로 기기를 설치하여 고유진동수 탐색(Resonance Frequency Search)과 노출하중, 지진하중을 가한 상태에서 기기의 구조적 안전성을 시험하게 된다. 그러나, 대형 펌프와 같은 유체를 수송하는 기기의 경우에 시험으로 검증을 수행하기 위해서는 설치조건, 가진대의 규모 등 많은 제약을 받게된다.^(4,5)

본 연구에서는 구조적 안전성 뿐만 아니라 운전성이 요구되는 설계된 대형 입형펌프와 수평형 원심펌프를 유한요소법을 사용하여 내진해석의 첫 번째 단계인 고유진동수 해석을 수행하여 이들 기기의 동적특성인 공진에 대한 영향을 조사하였다.

2. 해석 이론

지진의 특성은 지면, 구조물, 기기의 구조적 특성에 따라 상호작용에 의한 거동을 하며, 공진(Resonance)에 의해 증폭되는 현상을 나타낸다. 따라서 해석을 이용한 안전등급 기기의 내진검증은 기기가 위치하는 건물 바닥이나 벽의 층응답곡선(FRS:Floor Response Spectra)을 이용하여 기기의 거동을 분석하고 기기에 작용하는 지진 및 각종 부하에 대한 구조적 건전성, 내압력 건전성, 운전성에 대한 설계의 적합성을 보증하는 과정을 말한다. 내진 검증에서 고려되어야 할 부하는 정상조건 부하(Normal Service Load), 운전부하(Operating Load), 기기 진동과 같은 동적 부하(Dynamic Load), 지진 부하(Seismic Load)등이다. 컴퓨터 해석을 통한 내진검증은 수학적 모델은 가능하나 현실적으로 시험이 불가능한 경우에 사용

* 회원, 효성에바라(주) 기술연구소

** 회원, UVCon 엔지니어링

*** 회원, 경상대 기계공학과
(항공기부품기술연구센터)

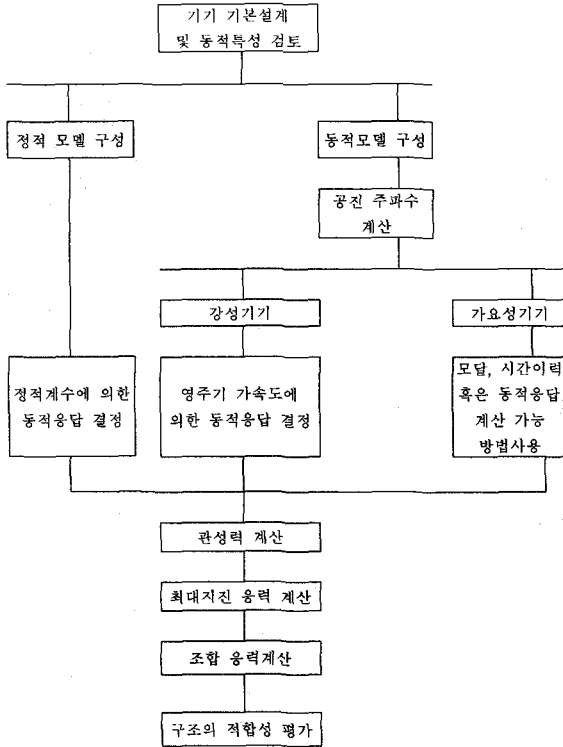


Fig. 1 안전등급 기기의 내진해석 절차

한다. 해석절차는 기기의 구조 및 동적 특성에 따라 1) 정적해석(Static Analysis), 2) 단순동적해석(Simplified Dynamic Analysis), 3) 상세동적해석(Detailed Dynamic Analysis)등의 해석방법이 있다. Fig. 1은 원자력 기기의 내진해석 절차를 나타낸 것이다.⁽⁶⁾

본 연구에서 사용된 해석이론을 설명하면 다음과 같다.

2.1 정적해석

기기의 무게중심에 작용하는 동적하중에 의하여 발생하는 응력과 변형을 계산하는 과정을 말하며 이때 작용하는 동적하중의 크기는 상세 혹은 단순 동적해석에 의하여 계산되는 것보다 더 높은 응력과 변형을 발생시킬 수 있도록 선택하여야 하며 응답곡선의 영주기 가속도에 해당 기기의 질량을 곱하여 결정한다. 또한 기기에 작용하는 정상조건 부하(Normal Service Load), 운전부하(Operating Load), 동적 부하(Dynamic Load), 지진 부하(Seismic Load)등에 의한 응력과 변형의 총응답은 제곱합의 제곱근(Square Root of Sum of Squares, SRSS)법을 이용하여 최대값을 얻을 수 있다.

Table 1. Specification for Essential Service Water Pump & Gas Stripper Pump

Type Specification	Essential Service Water Pump (Vertical Type)	Gas Stripper Pump (Horizontal Type)
Capacity	5905 m ³ /hr	31.8 m ³ /hr
Total Head	44.8 m	96 m
RPM	720 rpm	3600 rpm
Motor Power	1375 hp, 10poles	30 hp, 2poles

2.2 단순동적해석

Fig. 1에서 보는 바와 같이 가요성기기의 경우 해석방법은 정적해석과 동일하나 적용가속도 크기의 차이로 구별된다. 적용 가속도의 크기는 기기의 기본고유진동수(Fundamental Natural Frequency)에 해당하는 응답곡선의 가속도에 1.5배를 곱하여 구할 수 있으며 기본고유진동수를 알지 못할 경우에는 총응답곡선의 최대치에 1.5배를 적용한다.

3. 적용 결과

3.1 적용모델

본 연구에서는 원자력 안전등급 펌프의 동적특성 및 지진에 의한 구조적 건전성과 운전성을 평가하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 해석대상 모델은 안전관련 기기실의 공기조화용 기기에 냉각수를 공급하는 수직형의 필수냉각수 공급펌프(Essential Service Water Pump, ESWP)와 수평형 원심펌프의 잔열제거펌프(Gas Stripper Pump, GSP)이다. 표 1에 필수냉각수 공급펌프와 잔열제거펌프의 사양을 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3은 ESWP와 GSP의 단면외형을 각각 나타낸 것이다.

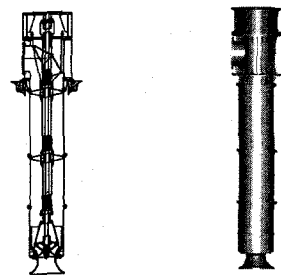
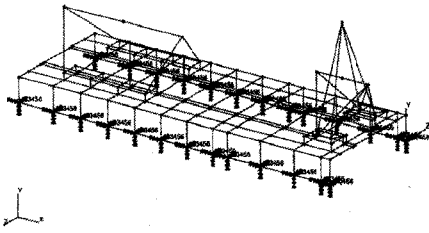
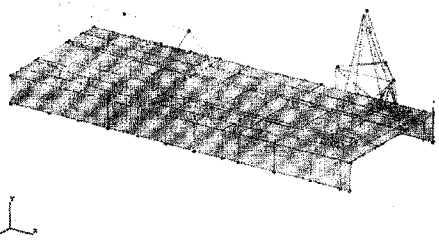


Fig. 2 Sectional Drawing of Essential Service Water Pump



(a) Modeling



(b) Analysis

Fig. 6 Finite Element Simulation for Casing of GSP using NASTRAN

감쇠변화에 의한 영향등에 의한 고려가 추가로 요구된다.

3.3 해석결과(II): GSP의 경우

Fig. 6은 NASTRAN 소프트웨어⁽¹⁰⁾를 사용하여 수평형 잔열제거펌프의 유한요소 모델링을 나타낸 것이다. 내진해석의 첫 번째 단계로 기기의 고유진동수를 계산하기 위해서 펌프와 모터 및 베이스플레이트를 결합하였다. 본 유한요소 모델링은 펌프설치시 그라우팅(grouting)을 고려하지 않은 경우이다. 펌프와 모터는 회전축의 중심에서 펌프와 모터를 집중질량법(Lumped Mass Method)으로 베이스플레이트는 쉘요소(QUAD4 ELEMENT)로 유한요소 모델링을 하였다. 펌프의 무게는 198 lb 이며 모터의 무게는 401 lb 이다.

향후 회전축에 대한 위험속도의 해석과 펌프의 경우 흡·토출 노즐에 작용하는 노즐하중을 고려할 경우 솔리드 요소를 사용한 수학적 모델과 유한요소해석이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

원자력 발전소용 펌프를 내진해석의 첫 번째 단계인 고유진동수에 관한 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입형펌프의 경우 케이싱과 회전축에 대한 해석결과 운전속도에 대한 공진영역을 벗어나 설계된 것을 알 수 있었다.
- (2) 통상적으로 강성기기로 분류된 수평형 원심 펌프의 경우에도 공진영역을 회피하여 설계되어 있는 것을 알 수 있다.

본 연구는 국내 원자력 발전소의 안전등급 기기인 펌프의 국산화에 필수적인 내진검증을 해석으로 시도한데 의의가 있으며 해석결과에 대한 신뢰도 향상 및 설계검증 자료로서의 활용을 위한 노력이 요구된다.

참고문헌

- (1) ASME-QME-1995, "Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plants"
- (2) ASME Section III, Division I, Appendices N, "Dynamic Analysis Methods", 1995
- (3) Wyle Report, "Seismic Simulation on a Motor-Driven Pump Assembly", 1998
- (4) 김용한·양보석외 2인, "터빈·발전기 축계의 지진응답해석, 한국동력기계공학회, '98추계학술대회논문집 pp. 157~163
- (5) 최 병근, 양 보석, 김 진욱, "임의 기초여진에 의한 보일러 급수펌프의 동적 응답 해석 및 평가, 유체기계개발협의회, 1997, pp.173~177
- (6) 신 광복, 이 영옥, "기기검정 해설과 업무소개", 전력기술 통권제2호, 1990
- (7) ANSYS 5.3 User's Manual, 1996
- (8) 전 형식, "Dynamic Qualification Report for the Essential Service Water Pump", 효성 EBARA(주) 용역보고서, 1998
- (9) 최 원호, "영광원자력 해수펌프의 고진동 원인 분석과 대책", 효성중공업 연구개발보고서, 1991
- (10) MSC/NASTRAN 69 Linear Static Analysis User's Guide, 1996