

원자력 발전소용 펌프의 내지진해석에 관한 연구

서영수* · 손효석* · 전형식** · 정희택***

A Study on the Seismic Analysis of Nuclear Power Plant Pumps

Young-Soo Seo*, Hyo-Sok Son*, Hyong-Sik Chun**, Hee-Taeg Chung***

Key Words: Vertical Pump(수직형펌프), 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. 서 론

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 노즐하중, 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 제약이 받게 된다.^(4,5)

본 연구에서는 구조적 안전성 뿐만 아니라 운전성이 요구되는 설계된 대형 수직형펌프와 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, 공진에 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, 운전성

* 회원, 효성에바라(주) 기술연구소

** 회원, UVCon 엔지니어링

*** 회원, 경상대 기계공학과(항공기부품연구센터)

에 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 내진 검증은 수학적 모델은 가능하나 현실적으로 시험이 불가능한 경우에 사용한다. 해석절차는 기기의 구조 및 동적 특성에 따라 1) 정적해석(Static Analysis), 2) 단순동적해석(Simplified Dynamic Analysis), 3) 상세동적해석(Detailed Dynamic Analysis)등의 해석 방법이 있다. Fig. 1은 원자력 기기의 내진해석 절차를 나타낸 것이다.⁽⁶⁾

본 연구에서 사용된 해석이론을 설명하면 다음과 같다.

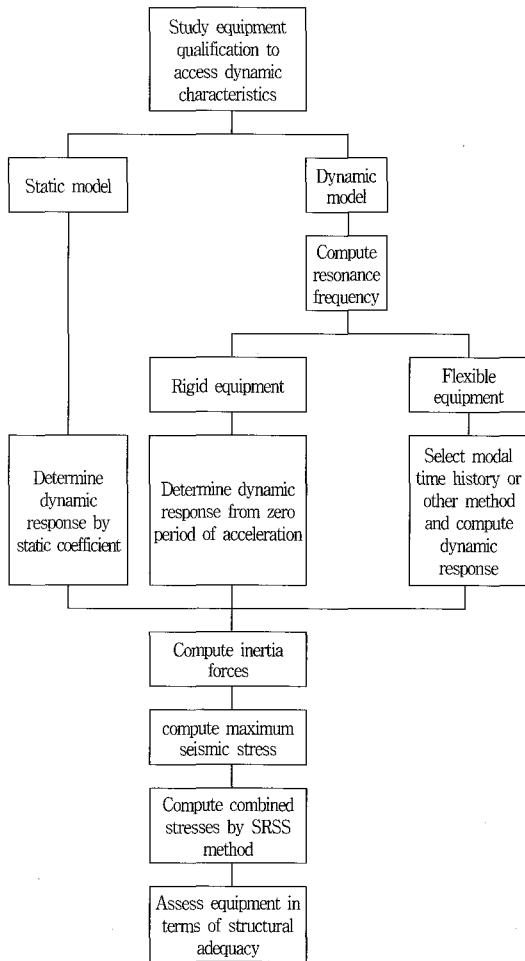


Fig. 1 Seismic analysis procedure for safety-related equipments

2.1. 정적해석(Static Analysis)

기기의 무게중심에 작용하는 동적하중에 의하여 발생하는 응력과 변형을 계산하는 과정을 말하며 이때 작용하는 동적하중의 크기는 상세 혹은 단순동적해석에 의하여 계산되는 것보다 더 높은 응력과 변형을 발생할 수 있도록 선택하여야 하며 응답곡선의 영주기(Zero Period) 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.

2.2. 단순동적해석(Simplified Dynamic Analysis)

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 응답곡선의 최대치에 1.5배를 적용한다.

2.3. 상세동적해석(Detailed Dynamic Analysis)

가요성 기기의 경우 정적해석으로 판정기준을 만족하지 못하거나 고유진동수 결과 고차 모드의 관계를 고려하지 못할 경우에 사용되며 다음의 해석방법이 있다.

- (1) 응답스펙트럼법(Response Spectrum Method)
- (2) 시간이력법(Time History Method)
 - 1) 모드중첩법(Method of Modal Superposition)
 - 모달해석, 복소수 주파수 응답법
 - 2) 직접적분법(Method of Direct Integration)
 - Newmark β 법, Houbolt 법, Wilson θ 법 등

본 논문에서는 정적해석과 단순동적해석을 각각 적용하였다.

3. 적용결과

3.1. 적용모델

본 연구에서는 원자력 안전등급 펌프의 동적특성

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	1025 kw, 10 poles	22 kw, 2 poles

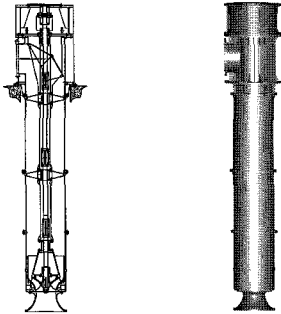


Fig. 2 Sectional drawing of essential service water pump

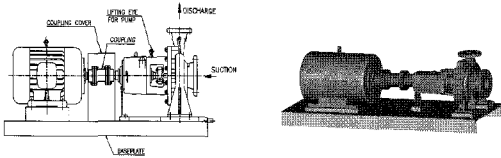


Fig. 3 Outline drawing of gas stripper pump

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

3.2 해석결과(1) : ESWP펌프의 경우

컴퓨터 해석을 통하여 내지진해석을 수행하는 첫 번째 단계로 Fig. 1에서와 같이 기기가 강성(rigid)인지 가요성(flexible)인지 판단하기 위하여 고유진동수를 조사할 필요가 있다.

특히, 수직형펌프는 고유진동수가 낮기 때문에 공진이 발생할 가능성이 매우 높으며 진동의 발생으로 인하여 펌프 또는 기초에 손상을 줄 수도 있다. 이 같은 진동의 원인으로는 회전체의 불균형, 기초나 파이프 배관에 의한 외력의 작용, 베어링에 의한 진동, 유체력에 의한 압력의 변화등 복잡한 형태로 나타날 수 있다.

Fig. 4(a)는 수직형의 필수냉각수펌프의 고유진동수를 계산하기 위해서 펌프케이싱과 모터가 결합된 구조물의 유한요소모델링을 나타낸 그림이다. 상용구조해석 소프트웨어인 ANSYS⁽⁷⁾를 사용하여 구조물의 진동 특성을 해석하였다. 펌프 부분은 쉘요소 3차원 모델링을 하였고 모터는 리드주파수(reed frequency)를 이용하여 빔요소로 결합하였다. 모터의 질량중심에서의 모터 리드주파수를 이용한 빔의 단면계수는 식 (1)과 같다.

$$I = \frac{\omega^2 mL^3}{3E} \tag{1}$$

여기서,

- I : 관성모우먼트(m⁴)
- ω : 모터의 리드주파수(rad/s)
- m : 모터의 질량(kg)
- L : 모터의 무게중심거리(m)
- E : Young's Modulus(N/m²)

Fig. 4(b)는 필수 냉각수펌프의 케이싱에 대한 고유진동수 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 당사 경험에 의하면 대형 수직형펌프의 경우 진동원인의 대부분은 케이싱에 발생하는 것으로 알려져 있다.^(8,9) Fig. 4(b)의 해석결과에서 보는 바와 같이 첫 번째 고유진동수(9.768 Hz)가 회전주파수인 720 rpm(12 Hz)와 비교하여 약 81%정도인 것을 알 수 있다.

Fig. 5(a)는 회전축계의 유한요소 모델링을 나타낸 것으로 펌프 회전차와 모터 회전자(rotor)는 집중질량법을 사용하였고 축계는 베어링 지지점을 기준으로 관성모멘트와 면적을 가지는 빔요소로 모델링 하였다. 펌프축의 수운할 베어링과 모터축의 볼베어링 강성은 k_{xx} , k_{zz} 의 2방향으로 고려하였다. 본 연구에서는 회전체에 작용하는 유체의 감쇠력 및 웨어링의 강성특성은 고려하지 않는다. 수운할 베어링의 강성은 8.75×10^5 kN/m이며 볼베어링 강성은 8.75×10^8 kN/m 이다.

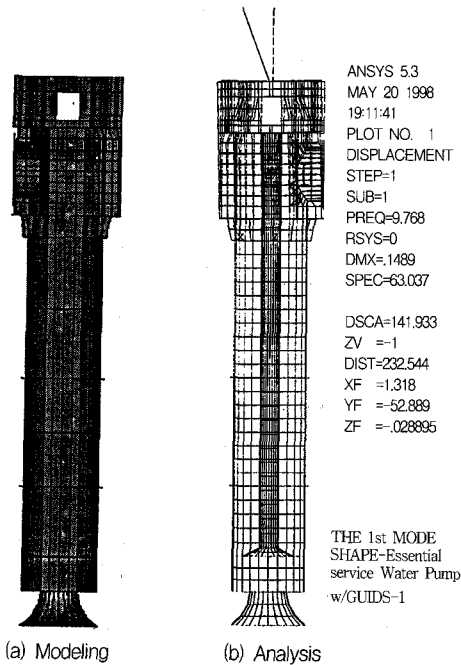


Fig. 4 Finite element simulation for casing of ESWP using ANSYS

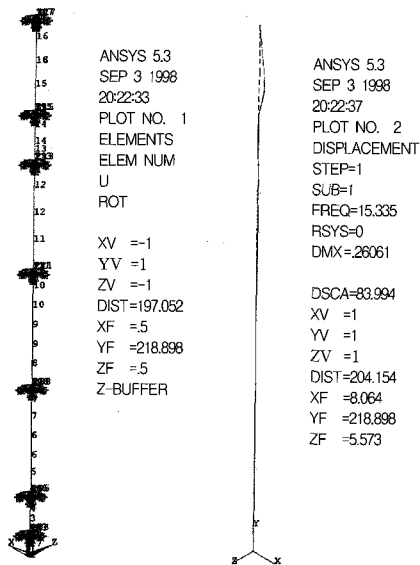


Fig. 5 Finite element simulation for shaft system of ESWP using ANSYS

Fig. 5(b)는 필수 냉각수펌프의 회전축에 대한 고유 진동수 즉, 비감쇠 위험속도 해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 축계의 고유진동수에 의한 공진을 피하기 위해서는 축의 위험속도를 운전회전수와 비교하여 80% 이하 또는 120% 이상 되도록 설계할 필요가 있다. Fig. 5(b)의 해석결과에서 보는 바와 같이 첫 번째 고유진동수(15.345 Hz)가 회전주파수인 720 rpm(12 Hz)와 비교하여 120% 이상인 것을 알 수 있다.

수직형펌프의 고유진동수해석을 케이싱과 회전축에 대하여 각각 수행하였다. 케이싱 고유치 해석의 경우 수위의 변화에 의한 물의 부가질량 등에 관한 영향과 회전축의 경우 베어링 및 회전차 위어링의 감쇠변화에 의한 영향 등에 관한 고려가 추가로 요구된다.

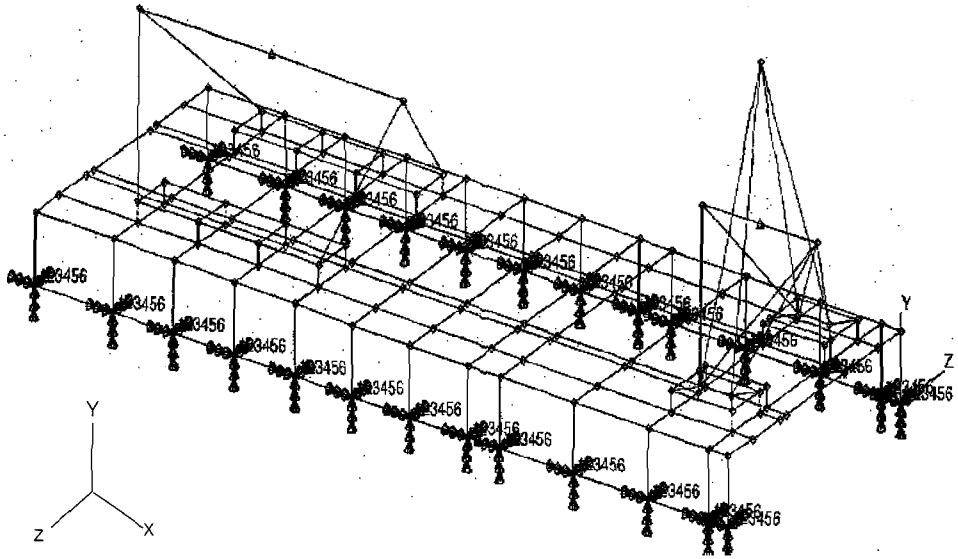
3.3. 해석결과(II): GSP의 경우

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 쉘 요소(QUAD4 ELEMENT)로 유한요소 모델링을 하였다. 펌프의 질량은 9.2 kg이며 모터의 질량은 18.6 kg이다. Fig. 6(b)의 해석결과에서 보는 바와 같이 첫 번째 고유진동수가 약 103.65 Hz이며 운전주파수(60 Hz)와 비교하면 공진에 의한 영향은 없다고 할 수 있다.

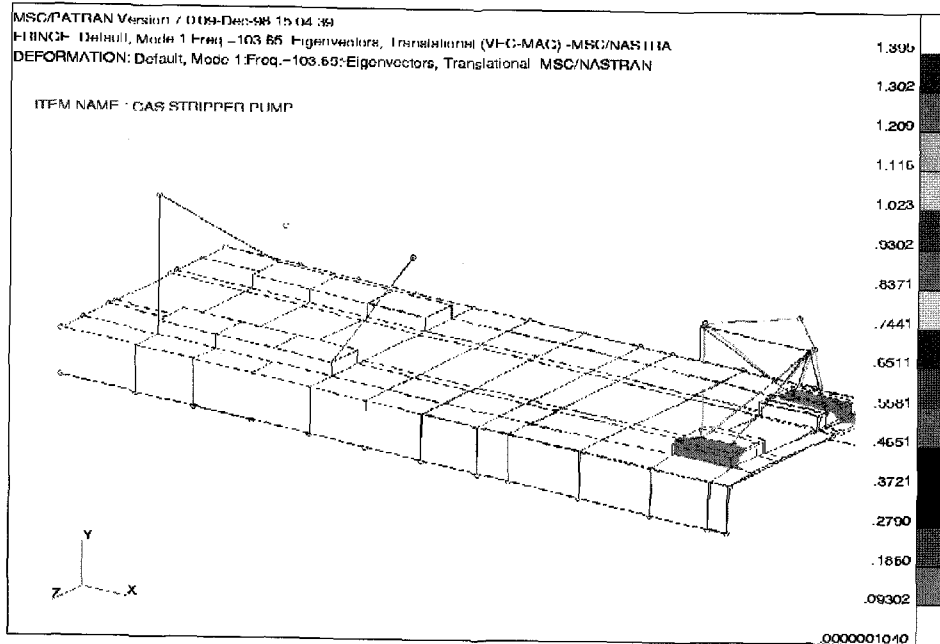
향후 회전축에 대한 위험속도의 해석과 펌프의 경우 흡·토출 노즐에 작용하는 노즐하중을 고려할 경우 펌프의 솔리드 요소를 사용한 수학적 모델과 유한요소 해석이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

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



(a) Modeling



(b) Analysis

Fig. 6 Finite element simulation for casing of GSP using NASTRAN

(1) 수직형 펌프의 경우 공진에 대한 영향을 조사하기 위하여 케이싱과 회전축에 대해서 각각 해석을 수행한 결과 펌프의 운전속도와 비교하여 공진영역을 벗어나 설계되어 있음을 알 수 있다. 또한, 지

진력을 고려한 내진해석 방법중 단순동적해석으로 펌프의 구조적 안전성을 검토할 수 있다.

(2) 통상적으로 강성기기로 분류된(33 Hz이상) 수평형 원심펌프의 경우에도 공진영역을 회피하여 설계되

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