

원자력 발전소용 입형 사류펌프의 동적해석에 관한 연구 A Study on Dynamic Analysis of Vertical Mixed-Flow Pump for Nuclear Power Plants

서영수·임우섭·정희택

Y. S. Seo, W. S. Lim and H. T. Chung

Key Words : Vertical Mixed Flow Pump(입형사류 펌프), Normal Mode Analysis(고유진동수 해석), Seismic Qualification(내진검증), Finite Element Modeling(유한요소 모델링)

Abstract : This study introduces the seismic qualification of safety related equipments for nuclear power plants to verify the possibility of resonance in regard to the operating speed and the structural integrity due to external piping nozzle loads as well as seismic dynamic loads using El-Centro earthquake, which was occurred in the 1940's previously. As a first step, it is necessary to investigate the natural frequency of the vertical mixed flow pump in order to determine whether static or dynamic equipment comparing with seismic cut-off frequency, 33hz. Also the normal mode analysis was carried out with the introduction of seismic restraint at the middle of vertical pump to increase the natural frequency. In terms of design structural integrity, the application of static analysis with normal, upset and faulted nozzle loads event was presented for the comparison of material allowable stress. Also the dynamic analysis was performed to show the design adequacy through the application to the case of El-Centro earthquake.

1. 서 론

입형 사류 펌프는 발전플랜트, 석유 화학 플랜트, 담수화 플랜트 및 농업 관개용, 광산용, 저양정의 산업용수용, 상하수도용, 일반 공장의 용수용, 선박용 등에 널리 사용되고 있다. 횡형 원심펌프와 비교하여 설치 면적을 적게 차지하는 장점이 있지만 질량이 큰 모타가 펌프의 상단에 설치되는 구조이기 때문에 진동문제를 야기 시킬 수 있다. 또한 펌프의 하부는 외팔보와 같은 지지형태의 구조로서 펌프의 고유 진동수가 상대적으로 낮아 공진문제와 같은 동력학적 문제의 요인이 될 수 있다.

입형 펌프의 구조 진동에 관한 초기 연구는 1962년 Kovats는 유체에 잠겨 있는 펌프 칼럼의 공진에 대한 영향과 토출 배관의 지지강성 크기 변화에 대한 펌프의 고유진동수의 특성을 규명하였고¹⁾, Pottie 등은 원자력 발전소의 입형 냉각수 펌프에

대한 동적응답 실험과 해석을 통하여 공진 회피방안을 연구하였다.²⁾ 국내에서는 이호성 등³⁾은 입형 축류펌프를 양단에 집중 질량으로 수학적 모델링을 구성하고 펌프의 기초 지지부의 회전 강성도를 추가하여 연구를 수행하였다. 양보석⁴⁾은 원자력 발전소의 정지시에 냉각수를 공급하는 입형펌프의 동적응답해석 및 유체의 부가질량에 의한 영향을 평가하기 위해 연구를 수행하였다. 최수용⁵⁾은 발전소용 입형펌프의 기초강성에 대한 민감도 및 해수레벨 변화에 의한 펌프 구조물계의 고유진동수 변화에 대한 영향을 고찰하였으며, 엘센트로 지진파에 의한 응답스펙트럼 및 시간이력 해석의 실시하였다.

지금까지의 입형펌프의 동적응답에 관한 선행연구들은 일반적인 구조 진동특성의 연구 결과를 잘 제시하고 있지만, 정확한 동적 거동을 알기 위해서는 펌프 구조물의 구성을 이루는 하부 양수관, 축보 호관 등을 포함한 상세 유한요소 모델링으로 동적 해석을 실시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 구조해석 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 상용 해석 프로그램인 Nastran⁶⁾을 사용하여 주요 부품에 대한 유한요소 모델링을 구성하였다. 기기의 정확한 동적거동을 알

접수일 : 2006년 8월 23일, 채택확정 : 2006년 10월 2일
정희택(책임저자) : 경상대학교 기계공학과
E-mail : htchung@gsnu.ac.kr Tel. : 055-751-6165
서영수, 임우섭 : 효성EBARA(주) 기술연구소

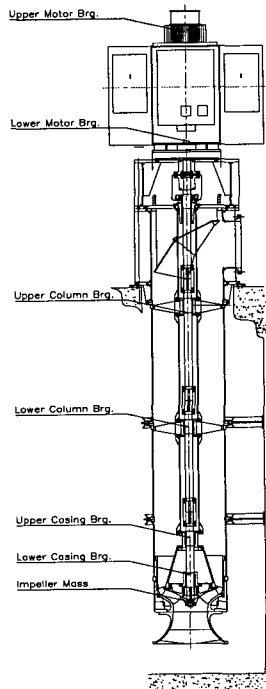
기 위해서는 상부 구조물 및 하부 양수관에 대하여 전체적인 모델을 만들어 해석을 수행해야 한다. 긴 외팔보의 형태로 지지되는 하부의 양수관이 상대적으로 강성이 높은 상부의 모타 지지 구조물에 비해 유연하기 때문에 운전진동수에 대해 하부 구조물이 공진과 같은 진동의 많은 영향을 받을 것으로 예상된다. 또한 펌프의 토출노즐에 작용하는 노즐력, 모우먼트 및 자중에 의한 구조적 안전성과 외부 동적 하중에 대한 펌프의 동적 응답 특성을 규명하고자 한다.

2. 구조와 설계사양

2.1 구성요소와 구조

Fig. 1은 본 해석 대상의 원자력 발전소 안전등급 용 입형 사류펌프의 외형 및 단면 구조를 나타내고 있다. 입형 사류펌프는 크게 다음과 같이 세 부분으로 구성된다.

- (1) 흡입관, 안내케이싱, 축보호 양수관, 외부 양수관으로 구성되는 하부 구조물
- (2) 토출곡관, 모타 지지대의 상부구조물
- (3) 임펠러, 슬리브 베어링, 베어링 스파이더, 주축, 중간축, 구동축, 리지드 분할 커플링, 커플링의 회전축계 및 구동기



Part Name	Material type
Suction bell mouth	A351 Gr.CF3M
Wear ring	A351 Gr.CF3M
Bearing case	A351 Gr.CF3M
Guide case	A351 Gr.CF3M
Shaft	A479 Tp.XM-19
Column pipe	SA240 Tp.316L
Shaft tube	A312 Tp.316L
Packing box	SA351 Gr.CF3M
Muff c/pling	A479 Tp.XM-19
Split ring	A479 Tp.XM-19
Journal b/g	Thordon(SXL)
Base plate	SA240 Tp.316L
Rigid c/pling	A182 Tp.F6a
Motor Stool	A516 Gr.70
Key	A479 Tp.316
O-ring	Rubber
Stud bolts	SA193 Gr.B8M
Stud nuts	SA194 Gr.8M
Seismic restraints	SA240 Tp.316L

Fig. 1 Vertical mixed flow pump for ESW system

2.2 설계 사양

본 연구대상인 입형 사류펌프에 대한 설계사양 및제원을 Table 1에 나타내었다. 펌프 유체는 상온의 해수를 이송하는 원자력 발전소 필수 냉각시스템의 일부를 구성하는 기기이다. 원자력 기계기술의 등급 분류에 따라 3등급에 해당하는 기기로서 내진 등급은 카테고리 I이며 내진해석이 필수적으로 요구된다.⁷⁾

Table 1 Design specification of ESWP

Service name	essential service water pump
Quality class	Q
Pump fluid	sea water
Design pressure	689kPa
Design temperature	32.2°C
Capacity	7,950m ³ /hr
Total head at rated	45m
NPSH required	1.9m
RPM (Frequency)	720 (12Hz)
Motor	1300hp, 60Hz
Specific gravity	1.0
Seismic category	I

원자력 펌프의 내진 검증은 가상의 지진하중을 고려한 기기의 구조적 건전성의 입증과 동시에 운전 안전성을 실험, 해석적 기법, 실험 및 해석적 기법의 보완, 과거의 경험적 데이터에 의한 방법 등으로 나누어진다. 실험에 의한 기법은 설계 지진 시물레이션의 구현과 동시에 펌프의 운전 안정성을 입증하기 위한 막대한 실험장비의 구축과 기술적으로 많은 문제점이 있다.⁸⁻⁹⁾ 또한 펌프와 같은 회전기계의 경우 가상적인 지진하중의 작용과 동시에 펌프의 운전성을 실험적으로 평가해야 하는 어려움이 있다. 해석적 기법은 기본 설계 단계에서 기기의 수학적 모델을 구성하여 유한요소법과 같은 수치기법의 도입으로 고유진동수 해석, 응력해석 및 변형해석을 실시한다. 실험 및 해석적 기법을 혼용하는 경우, 정현파를 사용하여 기기의 공진 주파수 탐색, 다중 주파수 가진 실험을 수행하며 외부 작용하중에 대한 해석을 실시하여 보완하게 된다.

3. 해석기법

3.1 유한요소 모델링

Fig. 2는 흡입관, 안내케이싱, 하부 양수관, 축보호관, 토출 곡관 및 모타대로 구성된 3차원 모델링과 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 2차원 셸 요소

(shell element)를 적용하였으며, 경계조건은 현장 설치 조건과 유사할 수 있도록 펌프의 기초 볼트 체결부위의 병진과 회전으로 구속하였다. 또한 펌프의 고유진동수 및 지진하중으로부터 강성을 증가하기 위한 목적으로 설치 예상되는 내진 보강대의 경계조건은 y축 방향의 병진과 회전을 구속하였다. 유한 요소 모델은 1918개의 요소와 1892개의 절점으로 구성되어 있다. 좌표축은 펌프의 토출 중심을 원점으로 토출 방향이 x축, 토출 수직 방향이 y축이다.

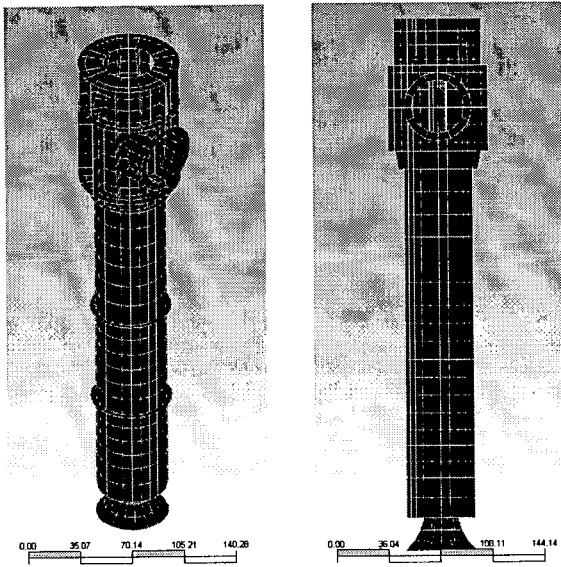


Fig. 2 Finite element model of ESWP

3.2 하중 조건

하중조건은 기기의 자중, 설계압력, 운전하중, 노즐하중, 운전기준 지진(Operating Basis Earthquake, OBE), 안전정지 지진(Safety Shutdown Earthquake, SSE)으로 구분한다. 정상(normal), 고장(upset), 정지(faulted)운전조건에 따라 기기의 하중조건은 다르게 적용하게 된다. Table 2에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서는 보수적인 결과를 얻을 수 있도록 하중 조건이 가장 높은 정지(faulted)운전조건을 적용하였다.

Table 2 Nozzle loads condition of ESWP

Normal loads	Resultant Force(Fr)	186kN
	Resultant Moment(Mr)	338kN-m
Upset loads	Resultant Force(Fr)	205kN
	Resultant Moment(Mr)	300kN-m
Faulted loads	Resultant Force(Fr)	300kN
	Resultant Moment(Mr)	659kN-m

3.3 지진하중

응답 스펙트럼 해석을 위한 지진하중의 종류 및 감쇠율의 적용조건을 Table 3에 나타내었다. 지진 가속도의 스펙트럼은 1940년 미국 캘리포니아 엘센트로 지역에서 발생한 절대가속도의 3% 감쇠율 지진파형을 적용하였다.¹⁰⁾ 엘센트로 지진파형은 내진 해석 분야의 많은 참고문헌에서 인용되고 있다.¹¹⁾ x, y, z의 각 성분 방향이 입형 사류 펌프의 미치는 영향을 파악하기 위해 동서 방향(east-west), 북남 방향(north-south), 수직 방향(vertical) 성분의 절대가속도를 각각 고려하여 해석을 실시하였다.

Table 3 Seismic load condition of ESWP

Vertical (y-direction)	Elcentro absolute acceleration (3% damping)
Horizontal (x, z-direction)	Elcentro absolute acceleration (3% damping)

3.4 응답스펙트럼법

지진에 의한 지반의 운동과 같은 동적하중에 대해 단자유도 구조물이 가지는 변위, 속도 및 가속도의 응답은 감쇠율이 일정한 경우에 고유진동수에 따라 변하게 된다. 하나의 주어진 지진 가속도 기록에 대해서 응답스펙트럼이 구해지면 그것을 이용하여 다자유도 구조물의 최대 거동을 예측할 수 있으며, 모드별 최대 거동은 모드조합의 방법에 따라 최대 거동을 예측할 수가 있다. 주어진 진동계를 수치적 모델로 이산화된 구조물로 가정하여 동특성을 행렬형태로 표현하는 것이 가능하다. 다자유도 구조물에서 지진하중을 받는 경우에 대한 운동방정식을 행렬형태로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

구조물의 동적특성을 기술하기 위해서 고유진동수와 대응하는 고유모드에서 질량과 강성행렬에 대해 직교성의 성질을 이용하여 일반화된 좌표계(generalized coordinate)로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$[\Phi]^T [M][\Phi]\{\ddot{q}\} + [\Phi]^T [C][\Phi]\{\dot{q}\} + [\Phi]^T [K][\Phi]\{q\} = -[\Phi]^T [M][I]\{\ddot{u}_g\} \quad (2)$$

Rayleigh 감쇠 계수 또는 모드별 감쇠율을 사용하여 구한 감쇠행렬을 사용하면, 질량행렬, 강성행렬 및 감쇠행렬은 직교하며, 각 모드 좌표계에 대해 식(3)과

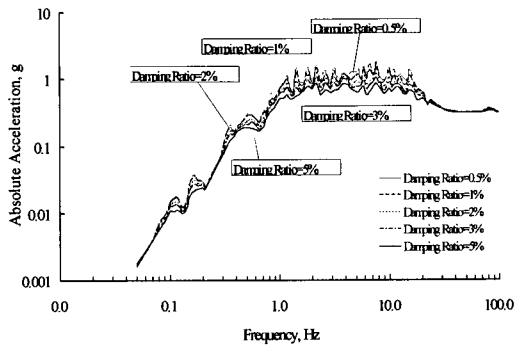
같이 일계 상미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_i \ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + k_i q_i = Q_i \quad (3)$$

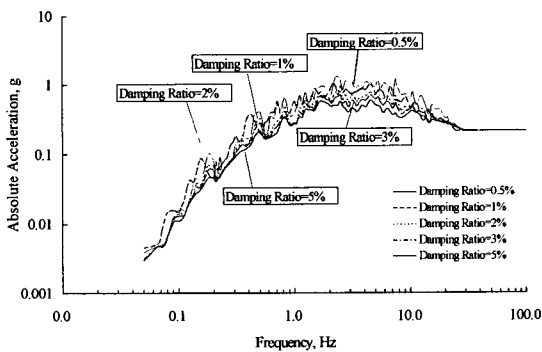
다자유도의 일반화 비연계성의 방정식은 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = Q_i / m_i = -\Gamma_i \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

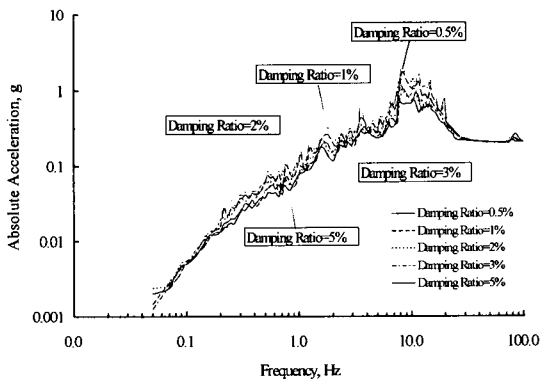
Fig. 3은 1940년 미국 캘리포니아 엘센트로 지역에서 발생한 절대가속도 응답 스펙트럼을 계의 감쇠율이 0.5%, 1%, 2%, 3%, 5%일 경우 가속도 응답 스펙트럼을 나타내었다.



(a) north-south direction



(b) east-west direction



(c) vertical direction

Fig. 3 Absolute acceleration of El-Centro earthquake

Table 4 Effects of seismic supports on normal mode shape

Mode	Description of mode	Natural Frequency [Hz]	
		Without support	With support
1	Bending mode of lower column in discharge direction	15.527	37.490
2	Bending mode of lower column in discharge perpendicular direction	15.557	37.502
3	Bending mode of shaft protection column	38.196	49.579
4	Bending mode of shaft protection column	38.210	49.673
5	Bending mode of shaft protection column	61.766	54.382
6	Bending mode of shaft protection column	61.830	60.283
7	Bending mode of motor stool	63.809	60.88
8	Twisting mode of motor stool	64.100	61.117

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 고유진동수

외팔보의 형태로 지지되는 펌프의 하부 양수관 구조물은 계의 특성상 매우 유연성이 크다고 할 수 있으며, 동적 거동의 대부분은 하부 양수관이 지배적이라고 할 수 있다. 또한, 입형 사류 펌프는 용도의 특성상 많은 유량의 유체를 이송하기 위한 목적으로 사용되기 때문에 낮은 진동수로 운전하게 된다. 따라서 기본 설계 단계에서 구조 공진의 관점에서 필수적으로 검토해야 하며 운전주파수와 비교하여 안정성을 확보할 수 있어야 한다.

펌프 하부 양수관에 내진 보강대가 없는 경우와 설치한 경우에 대해 각각의 고유진동수를 해석하여 그 결과를 비교하였다. 보강대가 설치되는 위치의 하부 양수관 플랜지에 구속조건을 추가하였으며, 나머지 경계조건 및 물성치는 동일하게 해석을 실시하였다.

각 고유 진동 모드에서의 주파수 특성은 Table 4에 나타나 있다. Fig. 4는 1차 굽힘모드에서의 고유진동수 해석 결과를 설치전과 설치후를 비교한 것이다.

하부 양수관에 보강대가 없는 경우의 1차 고유진동수는 15.527 Hz이며, 고유모드의 형상은 하부 양수관의 X방향(토출방향)으로 굽힘모드를 나타내었다. 전형적인 외팔보의 굽힘 진동 모드 현상과 일치하고 있음을 알 수 있다. Table 1의 펌프 사양에 제시된 회전 주파수(12 Hz)와 비교하여 1차 고유진동

수는 약25%의 범위를 벗어나 있으며 설계 기준에 적합함을 알 수 있다.

보강대의 설치된 경우에는 1차 고유진동수가 37.49Hz이고 축보호관의 굽힘 모드는 국부적으로만 발생한다. 지진보강대가 없는 경우와 비교하면 고유진동수 증가 효과를 확인할 수 있으며 굽힘 모드도 개선되었음을 알 수 있다.

의 원인으로 작용한다.¹¹⁾ 따라서, 설계 단계에서 충분한 강도와 강성을 확보할 수 있도록 펌프에서 발생하는 변형과 응력을 예측하는 것이 필요하다고 판단된다.

Fig. 5는 펌프 자중(dead weight), 노즐하중(nozzle loads), 설계압력(design pressure)이 작용하는 경우에 대한 Von-Mises 응력 분포 결과를 각각 나타낸 것이다.

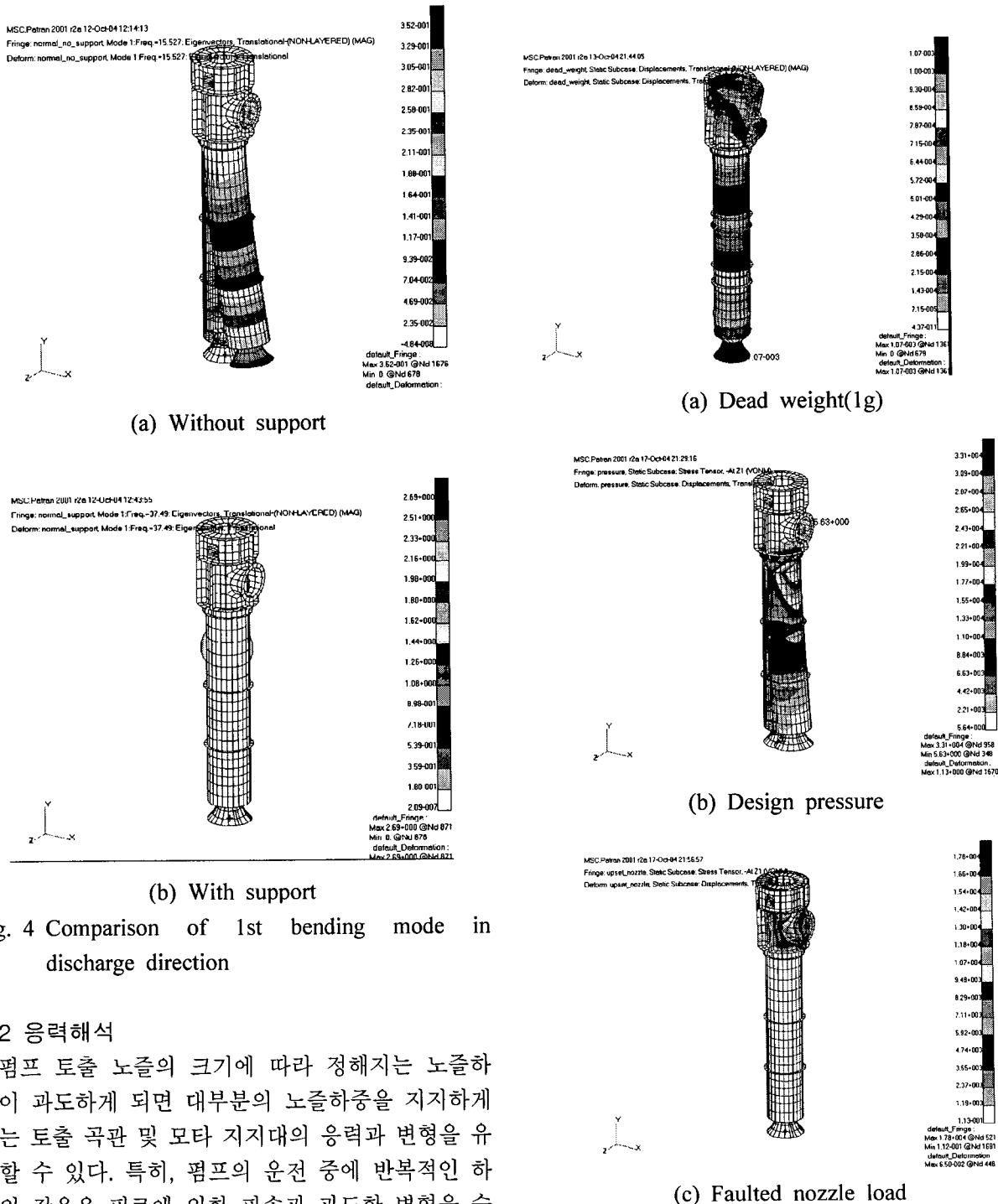


Fig. 4 Comparison of 1st bending mode in discharge direction

4.2 응력해석

펌프 토출 노즐의 크기에 따라 정해지는 노즐하중이 과도하게 되면 대부분의 노즐하중을 지지하게 되는 토출 곡관 및 모터 지지대의 응력과 변형을 유발할 수 있다. 특히, 펌프의 운전 중에 반복적인 하중의 작용은 피로에 의한 파손과 과도한 변형을 수반하게 되며, 허용 크기 이상으로 변형이 증가하게 되면 축의 정렬상태를 흐트리게 되며 과도한 진동

Fig. 5 Stress analysis on nozzle loads and design pressure

Fig. 5(a)와 같이 펌프의 자중을 고려한 경우, 최대응력은 국부적으로 곡률이 가장 크게 나타나는 토출 노즐과 접하는 부위에서 발생하였다. 이때의 응력 값은 1.24MPa로 재료의 허용응력과 비교하여 낮은 결과로 설계 허용 한도 이내로 충분한 강도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

펌프와 같은 회전기기류는 노즐하중의 영향으로 축 정렬등과 같은 문제점을 일으키지 않도록 과도한 노즐하중이 작용하지 않도록 해야 한다. Table 2에 나타난 바와 같이 정지(faulted) 상태가 가장 엄격한 하중 조건이 된다. Fig. 5(b)의 해석 결과, 토출 곡관의 끝단에서 최대 응력, 214Mpa이 작용하였다. 이 수치는 재료의 허용 응력을 초과하고 있으므로, 충분한 강도를 확보하기 위해서는 곡관의 두께를 증가 시키거나 리브 등의 보강으로 이 부근의 강성을 보장하는 구조설계의 수정이 요구된다.

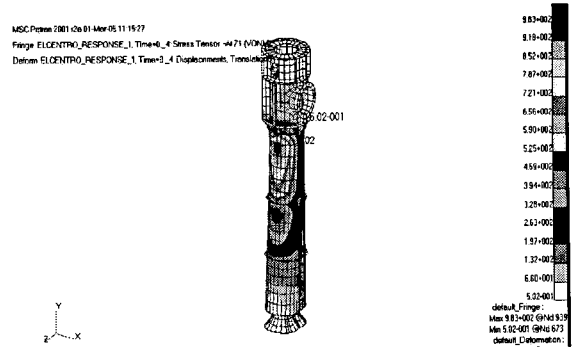
펌프의 내압에 의한 응력 해석에는 통상 정격 토출 양정의 1.5배를 설계압력으로 설정한다. Table 1의 설계압인 689kPa을 적용한 결과는 Fig. 5(c)와 같다. Fig. 5(b)의 노즐하중의 경우와 유사하게 토출 고관 부근에서 최대 응력이 발생하고, 이 값은 133Mpa로 재료의 허용강도보다 작다.

4.3 응답스펙트럼 해석

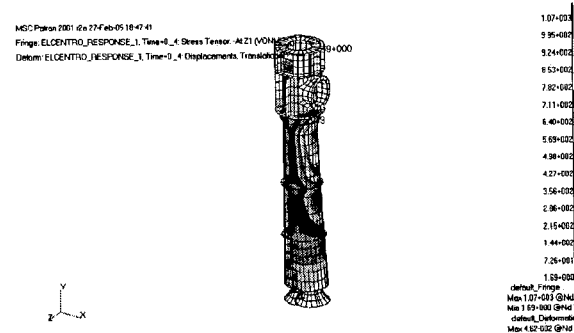
본 연구에서는 3% 감쇠율의 절대 가속도 스펙트럼을 지진하중 조건으로 적용하였다. 해석 방법은 MSC/NASTRAN에서 제공하는 Large Mass Method를 사용하였다.⁶⁾ 즉 하나의 절점에 가상의 큰 질량을 부여하고 가속도 스펙트럼을 적용하여 시스템이 지반에 고정된 동일한 상태를 모사하는 방법 중의 하나이다. 입형 사류펌프를 지지하는 기초 볼트의 절점들과 가상의 한 개 절점에 강체요소로 자유도를 구속하였으며 내진보강대가 없는 경우에 해석을 실시하였다. 3%의 임계 감쇠율(critical damping ratio)을 0Hz 에서 1000Hz 범위의 주파수 구간에 적용하였다.

Fig. 6은 SRSS(square root of square sum)의 모드합성 방법¹³⁾을 사용하여 von-mises응력분포 결과를 나타내었다. 응답 스펙트럼 해석 결과, 수직 성분 방향의 가속도 스펙트럼에 의한 발생응력 -Fig. 6(c)은 수평방향 성분(동서방향-Fig. 6(a), 남북방향 -Fig. 6(b))과 비교하여 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 또한, 수평방향의 성분 가속도에 의한 응력의 발생크기도 재료의 허용응력 한도 이내임을 알 수

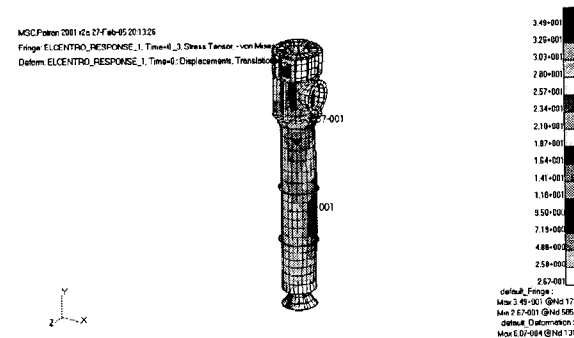
있었다. 응답스펙트럼에 의한 동적 해석 결과, 각각의 응력 조합 조건에서도 재료의 허용 한도를 초과하지 않으며, 구조적인 강도를 확보하고 있음을 확인하였다.



(a) North-south direction



(b) East-west direction



(c) Vertical direction

Fig. 6 Von-Mises stress contour of absolute acceleration of response spectrum analysis

5. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소에 설치되는 입형 사류펌프의 구조적 안전성을 평가하기 위해 해석적인 방법을 도입하였으며, 과거에 발생한 경험적 지진자료를 이용하여 설계초기 단계에서 입형 사류펌

프의 동적 거동 및 진동특성을 평가하기 위해 동적 해석을 실시하였다.

제시된 설계 사양 및 제원에 대한 고유진동수 해석 및 응력 해석 결과를 요약하여 다음과 같다.

- 1) 고유진동수 해석 결과, 하부 양수관의 진동수 특성파 모드를 확인할 수 있으며, 진동수 증가를 위한 보강 방안을 제시하였다.
- 2) 제반 하중 조건에서의 응력 해석을 실시하여 주요 부품의 설계 허용 응력과 비교하였고, 허용 강도를 초과하는 토출 곡관 부위의 설계 보안을 판단하였다.
- 3) 경험적 지진자료에 근거한 동적해석을 통해 지진 하중의 영향을 해석한 결과, 본 설계 사양의 안정성을 검증하였다.

이상과 같이 본 연구에서는 원자력 안전등급의 입형 필수 냉각 해수 펌프의 구조적 건전성을 평가하기 위해서 해석적 방법으로 펌프 구조물의 정적 및 동적 특성을 분석하였다. 또한, 개념 및 설계 초기 단계에서 해석적인 방법으로 기기의 구조적 건전성 확보를 위한 해석 절차와 일부 결과를 제시하였다. 향후 해석적인 결과의 검증을 위해 모달 테스트(modal test)와 같은 실험적 기법의 도입으로 해석 정밀도를 향상할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. A. Kovats, 1962, "Vibration of Vertical Pumps", Trans. ASME, J. Engineering for Power, Vol. 84, No. 2, pp.193 ~ 203.
2. K. Pottie, 2003, "Seismic Analysis on Modified Service Water Pumps", Proceedings of the twentieth international pump users sym., Texas A&M university.
3. 이호성, 이장무, 1981, "수직 축류펌프 모형의 진동해석", 한국항공우주공학회, 제9권 제1호, pp. 38 ~ 45.
4. 양보석, 1994, "대형 입형펌프의 진동문제", 한국소음진동공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 163 ~ 168.
5. 최수용, 1993, "발전소용 입축펌프의 내진해석", 한국소음진동공학회, 추계학술대회논문집, pp. 163 ~ 168.
6. D. N. Herting, 1997, "MSC/NASTRAN

Advanced Dynamic Analysis User's Guide", MSC Corporation.

7. ASME QME-1, 1994, "Qualification of Active Mechanical Equipment Used in Nuclear Power Plants".
8. 정희택, 서영수, 권진희, 1999, "원자력 발전소용 펌프의 내진 해석에 관한 연구", 유체기계저널, 제2권 제2호, pp. 13-18.
9. 정희택, 서영수, 권진희, 1999, "내진을 고려한 원심펌프의 구조해석에 관한 연구", 대한기계학회, 추계학술대회 논문집, pp. 928-935.
10. Earthquake Research Center, 1941, "Comprehensive Surveys on El Centro earthquake-1940", Technical Report, California Technology University.
11. W. E. Nelson, 1992, "Pump Vibrations", 9th International Pump User Symposium, Texas A&M University.
12. T. Shimzu and H. Teshiba, 1986, "Analysis of Nozzle Loads for Process Pump", 3rd International Pump User Symposium, Texas A&M University.
13. 윤자걸, 1991, "A Study of the Mode Combination Methods in the Response Spectrum Analysis for the Seismic Design", 서울대학교 석사학위 논문.