

임의 기초여진에 의한 보일러 급수펌프(BFP)의 동적 응답 해석 및 평가

최병근* (부경대 대학원), 양보석 (부경대 공대), 김진욱 (KIMM)

1. 머리말

여진력(exciting force)이 기초부에 작용하여 기계 구조물이 진동하는 기초여진 문제에 관해서는 일반적인 회전기계에 대한 지진응답, 자동차, 건설현장 등 특수한 환경하에서의 회전기계에 대한 충격응답 등, 회전기계의 신뢰성을 검토하는데 중요한 문제이며 지금까지 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 진동이 문제로 되는 것은 회전체의 고유진동수가 낮은 경우이지만, 최근에는 외력 주파수와와의 관계에서 고유진동수가 그리 낮지 않은 회전체 기계에 대해서도 동적거동을 예측하는 것이 요구되고 있다.

구조물에 작용하는 외력의 대부분은 시간적으로 불규칙하게 변동하고, 그 진폭을 확정적으로 취하는 것은 일반적으로 곤란하다. 그 중에서도 특히 지진 운동은 예측곤란한 비재현성을 갖는 외력으로, 한번 발생하면 기계 구조물에 큰 피해를 일으킨다.

지진에 의한 여진력이 가해졌을 때 기계 구조물의 동적응답을 구하는 경우, 지진운동은 일반적으로 기초에 가속도의 형태로 주어진다. 이것은 지반의 변위나 속도파형이 계기의 정도상의 문제 때문에 측정이 곤란하고, 과거의 지진기록이 가속도파형으로 측정되어 있기 때문이다. 그래서 이 측정된 지진가속도에 대해서는 여러 가지 해석이 되어져 있고, 진폭, 여진지속시간, 주파수성분의 특징은 지진운동의 충격 크기, 진앙거리, 진원의 깊이, 지진운동의 메카니즘, 지반성향 등의 여러 가지 조건이 조합된 것으로 생각되어지고 있다. 그러나 그러한 조건의 관련성은 그다지 명확하게 되어 있지 않다.

구조물에 작용하는 지진운동에 대한 동적해석을 고려할 때 그 방법으로서 결정론적 방법과 확률론적 방법이 고려되고 있다. [5] 결정론적 방법은 진동법, 수정진동법 등의 과거의 강진기록의 data에서 추출한 통계적 자료를 기초로한 것이다. 확률론적 방법은 지진하중의 규모와 발생확률 및 파형특성을 과거의 data에 의거해서 model화 하고, 장래의 내진 안전성을 정량적으로 평가하려는 것이다.

본 연구에서는 응답해석의 대상으로 보일러 급수 펌프(boiler feed water pump, BFP)를 들어 rotor-

bearing-seal-impeller system으로 모델링하고, 기초 여진력의 가속도는 지진의 검증시험에 이용되는 연속정현파, 공진 정현 3파, 공진 정현 2파, 랜덤파, 인공지진파의 5종류를 이용하여 보일러 급수 펌프의 동적 응답해석을 수행하고 안전성을 평가 하였으며, 시간응답해석 프로그램을 개발하였다.

2. 이론해석

Fig. 1은 본 연구의 대상인 보일러 급수 펌프의 개략도이며, Table 1은 펌프의 주요 사양을 나타낸다.

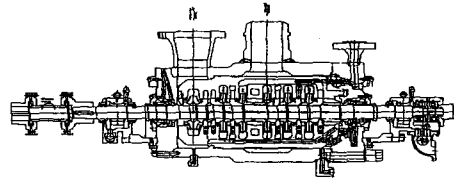


Fig. 1 Schematic diagram of boiler feed water pump

Table 1 Principle data for BFP

축 길이(mm)	2706
단수	6
임펠러 직경(cm)	29.69(1단) 36.25(2~6단)
비중량(γ)	0.8857×10^{-3}
베어링 형식	pressure dam
단단 양정(m)	396.3(1단) 590.7(2~6단)
단단 유량(m^3/s)	0.150(1단) 0.299(2~6단)
회전체 중량(kg)	491.2
시일 수	9
작동유체 및 온도	water 175.7°C
운전속도(rpm)	5820

Rotor-bearing-seal-impeller system은 일반적으로 Fig. 2와 같이 강체원판요소, 강성과 분포질량의 축

요소, 그리고 베어링과 시일요소로 모델링할 수 있다. Fig. 2와 같이 계의 운동은 두 개의 좌표축으로 나타낼 수 있다. $F(XYZ)$ 는 고정좌표계이고, $R(xyz)$ 는 X 축에 대한 회전좌표계이다.

회전축계에 대한 유한요소모델은 많은 논문 [1, 2, 3]에 개재되어 있으므로, 자세한 내용은 여기서는 생략한다.

고정좌표계에 대한 BFP의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = -[M]a \quad (1)$$

여기서 M 은 질량행렬, C 와 K 는 베어링과 시일의 특성을 고려한 감쇠 및 강성행렬이고, a 는 여진가속도이다. 본 연구에서는 선형가속도법을 일반화한 Newmark β 법을 이용하여 운동방정식을 simulation한다. Newmark β 법은 Δt 사이의 가속도의 변화가 선형으로 변화하는 것으로 가정한 선형가속도법에 변화를 더해 Δt 사이의 변화를 여러 가지 형태로 바꿀 수 있게 한 것이다. 본 방법에서는 $\beta = 1/4$ 를 사용하였다.

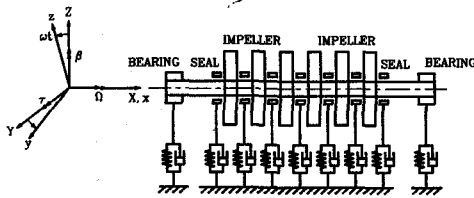


Fig. 2 Vibration analysis model

3. 기초여진응답

본 연구에서는 기초여진응답을 평가하기 위해 식 (1)의 입력 가속도를 다음과 같이 5가지의 종류를 이용하여 응답특성을 구한다.

- 1) 연속정현파
- 2) 공진 정현 3파
- 3) 공진 정현 2파
- 4) 랜덤파

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 입력가속도의 종류를 나타낸다. 즉 지진의 검증시험에 이용되는 연속정현파, 공진 정현 2파, 공진 정현 3파 및 랜덤파이다.

연속 정현파의 경우, 가속도의 크기와 진동수를 여러종류로 변화시켰으며, 공진 정현 2파, 3파는 변

전기, 고압가스설비 등의 구조계응답에 대해 비교적 엄격한 평가를 하도록 하는 일종의 인공지진파로서 계의 1차 고유진동수로서 정현 2파와 정현 3파를 구성하였다.

그리고 랜덤파는 구간 (0, 1)에서 두 개의 독립된 일정한수 U_1, U_2 를 발생시키고, 이때

$$\dot{X} = (-2 \ln U_1)^{-1/2} \cdot \sin(2\pi U_2) \quad (2)$$

인 평균 0, 분산 1의 정규난수를 구하여 입력 가속도로 사용하였다.

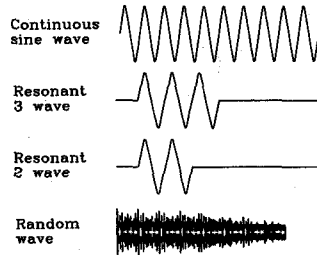


Fig. 3 Acceleration wave of base excitation

Fig. 4는 입력가속도가 818 cm/sec^2 이고 진동수가 계의 운전속도인 97 Hz의 연속정현파로 가진시킨 경우, coupling축 베어링의 응답이다. 여진주기 부근에서 최대진폭에 도달한 후 정상상태로 이동함을 알 수 있다.

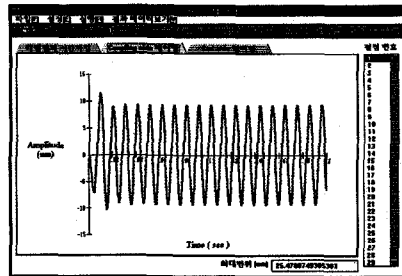


Fig. 4 Displacement curve for continuous sine wave

Fig. 5와 6은 입력가속도 818 cm/sec^2 에 1차 고유진동수 53 Hz의 공진 정현 2파와 3파로 가진한 경우의 coupling축 베어링의 응답이다. 변위는 증가하여 1.85T와 2.2T에서 최대가 된 후 감소하는 양상을 보이나, 다른 여진형에 비해 최대진폭이 약 $15 \mu\text{m}$ 로 크음을 알 수 있다.

Fig. 7은 랜덤파의 입력 가속도가 기초에 작용한 경우의 응답을 나타낸다. 비교적 큰 진폭변화가 발생하고 있다.

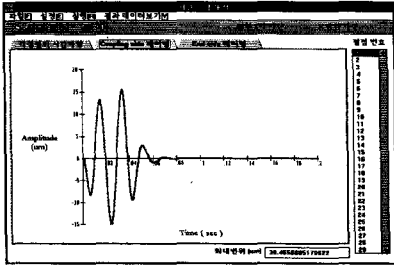


Fig. 5 Displacement curve for resonant 2 wave

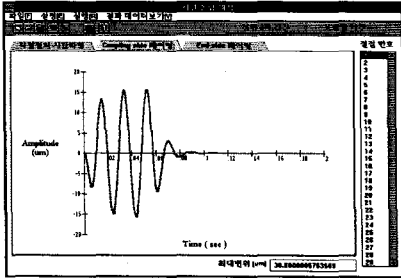


Fig. 6 Displacement curve for resonant 3 wave

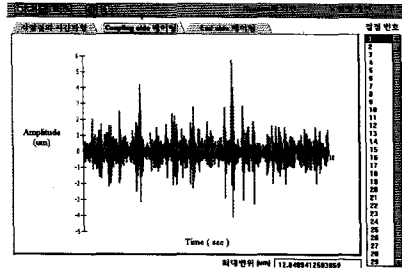


Fig. 7 Displacement curve for random wave

4. 지진응답

본 연구에서는 확률적 방법을 이용하여 펌프의 각 절점에서의 동적 응답을 구한다. 과거에 측정되었던 많은 지진기록은 일반적으로는 견고한 기반위에서 기록되었다. 진앙거리에 가까운 지진운동에는 그 가속도 기록의 주요 움직임의 발생시각 및 전지속시간에 있어서 공통된 특징을 준다. 그 주요 움직임은 지진발생 후 12~25초 사이에 발생하고 그후 전지속시간 30초 정도에서 서서히 감소해 간다.

여기서는 구조물에 최대 응답치를 주는 주요 움직임을 white noise를 이용하고, 주파수 특성이 없는 인공지진파로써 사용한다.

4.1 인공지진파의 작성

지진파의 시간응답특성에 이용한 모의 입력 지진 운동은 power spectrum 특성이 절대가속도형으로 되도록 밀도함수를 다음 식으로 표시한다.

$$G(\omega) = \frac{(1+4\zeta_g^2\omega^2/\omega_g^2)}{(1-\omega^2/\omega_g^2)^2+4\zeta_g\omega^2/\omega_g^2} g(t) \quad (3)$$

ω_g : 탁월 각진동수 rad/sec (= f_g Hz)

ζ_g : peak의 예리함을 나타내는 수치

$g(t)$ 는 지진이 갖는 power에 관계하는 양으로 power level로 불려진다. 여기서는 power level로써 식 (4)로 표시된 것을 이용한다.

$$g(t) = G^2(1-e^{-t/T}) \quad (4)$$

그러면 1 자유도 선형계가 기초부에 외란을 받을 때의 절점의 가속도의 주파수 응답 함수와 white noise $\ddot{w}(t)$ 를 받았을 때에 spectrum 밀도함수가 식 (3)으로 되는 것 같은 선형계의 주파수응답 함수의 유사성 때문에 모의 지진파의 가속도 $\dot{f}(t)$ 는 미분방정식

$$\ddot{Z} + 2\zeta_g\omega_g\dot{Z} + \omega_g Z = -\sqrt{g(t)}\ddot{w}(t) \quad (5)$$

를 수치적분 하여

$$\dot{f}(t) = \dot{Z} + \sqrt{g(t)}\ddot{w}(t) \quad (6)$$

로부터 계산할 수 있다.

여기서 이용한 white noise는 식 (2)와 같이 구간 (0, 1)에서 두 개의 독립한 일정난수 U_1, U_2 를 발생시켜 구한 평균 0, 분산 1의 정규난수를 시간간격 Δt 마다 열거해서 근사 white noise를 작성하였다. Fig. 8은 인공 지진파의 작성예를 나타낸다.

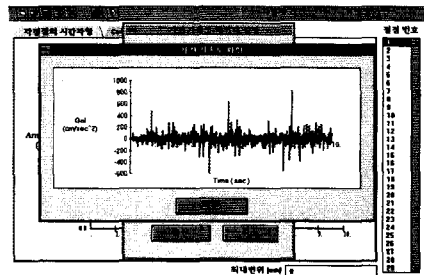


Fig. 8 Artificial earth wave

4.2 지진응답의 계산에

Fig. 9는 실제 보일러 급수 펌프축계에 Fig. 8의 인공지진파의 입력가속도가 기초에 작용한 경우의 응답을 나타낸다. 횡축은 지진파가 가해진 시간(sec)을 나타내고 종축은 진동변위(μm)를 나타낸다. 인공지진파가 가해진 후 10초동안의 coupling부분의 응답을 나타낸 것이다. 그림에서 알수 있듯이 지진발생 후 비교적 큰 진폭의 변화가 발생하고 있고, 약 4초 부근에서 펌프 coupling부분의 진동이 약 $5\mu\text{m}$ (편진폭)로 최대가 되고 약 1.5초와 8.7초 부근에서 진폭이 $4\mu\text{m}$ 을 초과함을 알 수 있다.

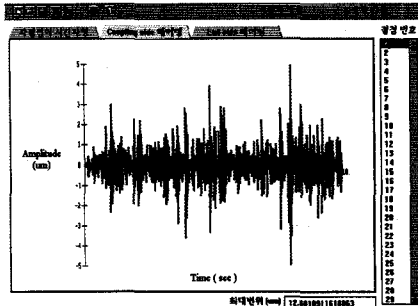


Fig. 9 Displacement curve for earth wave

5. 평가

Table 2는 지진응답에 대한 평가를 나타낸다. 여진 응답의 각 경우와 총 불평형응답을 더한 계의 총 응답이 모두 API 610, EPRI, API 617과 ISO 7919의 규격을 만족하고 있고, 최소 설계튼새인 시일부의 설계튼새의 75%를 초과하지 않아야 하는 부가기준도 만족하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 회전기계의 신뢰성을 검토하는데 중요한 문제가 되는 기초여진에 대해 이론해석을 수행하였고 Newmark β 법을 이용하여 수치 simulation을 수행하였다. 수치 simulation 시 여진 입력가속도는 지진의 검증시험에 이용되는 연속정현파, 공진정현 2파, 공진 정현 3파, 랜덤파 및 인공지진파를 사용하였다. 연속 정현파의 경우 가속도의 크기와 진동수를 여러종류로 변화시켰으며 공진 정현 2파, 3파는 변진기기, 고압가스설비 등의 구조계응답에 대해 비교적 엄격한 평가를 하도록 하는 일종의 인공지진 진동으로 계의 1차 고유진동수로서 정현 2파와 정현 3파를 구성하였다. 그리고 rotor-bearing-seal-impeller 모델의 펌프축계에 대한 시간응답해석 프로그램을 개발하였다.

Table 2 Seismic response evaluation($N = 5820 \text{ rpm}$, $SF = 10$)

API 610		EPRI / API 617		ISO 7919	
$y = \frac{8 \times 6350}{2} \frac{SF}{N} \times 10^{-6}$ $= 87 (\mu\text{m } p-p)$		$y = \frac{448}{2} \frac{SF}{N^2}$ $= 132 (\mu\text{m } p-p)$		$y = 9000 / \sqrt{N}$ $= 117.97 (\mu\text{m } p-p)$	
여진응답 (μm)		불평형 응답 (μm)		총응답 (y)	판정
연속 지진파	25.5	기계적 불평형(N) 유체적 불평형(N/2) 유체적 불평형(NZ)	0.9 34.82 19.96	81.18	합격
공진 정현 2파	30.47			86.15	합격
공진 정현 3파	30.8			86.48	합격
랜덤파	12.85			68.53	합격
인공지진파	12.6	합계	55.68	68.28	합격
부가기준	최소 튜브부(시일부)의 설계튼새의 75% 이하 $C = 275 (\mu\text{m})$ $C_{ac} = 275 \times 0.75 = 206.25 (\mu\text{m})$			$y < C_{ac}$	합격

7. 참고문헌

- (1) H. D. Nelson and J. M. McVaugh, "The Dynamics of Rotor-Bearing Systems Using Finite Elements", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry pp. 71~75. May 1976
- (2) M. Rajan, H. D. Nelson and W. J. Chen, "Parameter Sensitivity in the Dynamics of Rotor-Bearing Systems", Trans. ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design Vol. 108. April 1986
- (3) M. Rajan, S. D. Rajan, H. D. Nelson and W. J. Chen, "Optimal Placement of Critical Speeds in Rotor-Bearing Systems", Trans. ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design Vol. 109. April 1987
- (4) 양보석외 2명, "임의 기초여진에 의한 입형펌프의 동적 응답 해석", 박용기관학회 춘계학술대회, 1989
- (5) M. Kimura and M. Izumi, "A Method of Artificial Generation of Earthquake Ground Motion", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, 867~874. 1989
- (6) C. K. Rao and S. Mirza, "Seismic Analysis of High-Speed Rotating Machinery", Nuclear Engineering and Design 111, 395~402. 1989