

임의 기초여진에 의한 입형펌프의 동적 응답해석

여 운 동

부산수산대학 대학원
(1989년 11월 27일 접수)

Analysis on the Dynamic Response of Vertical Pumps subjected to Arbitrary Foundation Excitation

Woon-Dong YEO

National Fisheries University of Pusan, Graduate school

(Received November 27, 1989)

It is important in design of vertical pumps to consider arbitrary foundation excitation in addition to rotor vibration due to unbalance. In this study, a model of a vertical pump was developed for the analysis of its dynamic response. The vertical pump was modeled with lumped masses and springs which represent mult-cylindrical and rotor structure. A dynamic simulation program was developed and numerical calculation on the above mentioned problems were carried out.

서 론

여진력이 기초부에 작용하여 기계구조물이 진동하는 소위 기초여진 문제에 관해서는 일반적인 회전기계에 대한 지진응답, 자동차, 함정, 건설 현장등 특수한 환경하에서의 회전기계에 대한 충격응답등, 회전기계의 신뢰성을 검토하는데 중요한 문제이며 지금까지 많은 연구가 실시되고 있고 불평형응답과는 다른 취급이 필요하다.

이러한 진동이 문제로 되는 것은 회전체의 고유 진동수가 낮은 기계이지만 최근에는 외력의 주파수와와의 관계에서 고유진동수가 그리 낮지 않은 회전체를 갖는 기계에 대해서도 동적거동을 예지하는 것이 요구되고 있다.

입형펌프는 발전 플랜트등의 운전상 중요한 기기로서 사용되고 있다. 대부분의 경우 편지지로 진구조를 갖고 있기 때문에 고유 진동수가 평형

펌프에 비해 비교적 낮다. 또한 회전체(rotor)부, 컬럼(column)부 및 배럴(barrel)부 등의 다층 구조로 되어 복잡한 단면형상을 하고 있다.

그리고 각부 상호간에 물이 채워져 있으므로 펌프의 진동에 의해 상호 간섭을 일으켜 복잡한 진동을 하게 된다.

이러한 입형펌프에서는 회전축을 포함한 구조물로서의 불평형 진동이나 위험속도에 대한 검토 이외에 기초부에 작용하는 지진등의 외력에 대한 검토를 하여 지진등에 의한 파손에 대해 기기의 성능을 정상적으로 유지하도록 설계할 것이 요구된다.

입형펌프의 진동해석으로 McDonald¹⁾는 실제 입형펌프에 대해 물의 부가질량을 고려하여 질량행렬의 비대각항이 무시될 수 없음을 보고하고 있다. Matsushita²⁾ 등은 입형펌프 거더(guarder)부의 비선형성을 고려하여 축계의 가진시의 거동을 해석하였으며, 이외에도 많은 연구가 이루어

어지고 있다^{3~5)}. 그러나 대부분의 연구가 단순모델이거나 입형펌프의 전체적인 응답해석보다는 부분적인 특성을 대상으로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 입형펌프를 회전체, 컬럼 및 배럴, 그리고 수운할 베어링으로 지지된 3층 구조물의 각부분 상호간에 발생하는 유체력을 고려한 선형 모델로서 수학적 모델을 작성하였다.

유체에 의한 압력효과를 Fritz⁶⁾의 제안식에 의해 물의 부가질량으로, 그리고 임펠러 및 라이너링의 동적계수를 Yang⁷⁾등의 식을 이용하여 산출함으로써 입형펌프의 고유치 해석과 불평형 진동 응답을 해석하였다⁸⁾.

본 연구에서는 외부로 부터 임의의 외력이 기초에 가하여진 경우의 시간응답해석을 직접 적분법인 Newmark- β 법을 이용하여 구하고, 입형펌프의 동적응답특성을 명확히 하였다.

이론 해석

일반적으로 회전축을 지지하는 구조물의 강성이 회전축이나 베어링 강성보다 크면 구조물은 회전체의 진동특성에 영향을 미치지 않는다.

그러나 입형펌프와 같이 낮은 강성을 갖는 구조물로 지지된 회전축계는 회전축과 구조물의 연성계로서 해석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 문헌⁸⁾에 따라 입형펌프를 회전축과 지지구조물을 고려하여 모델링하고 해석을 수행하였다.

1. 구조물의 모델화

본 연구의 대상은 원자로 정지시의 냉각에 필요한 잔류예열제거펌프와 같은 안정성과 신뢰성을 요구하는 대형 입형펌프로써 Fig. 1(a)에 그 형상을 나타내었다.

모델링으로서 펌프를 집중질량과 강성으로 치환하고 각 절점에 대해 운동방정식을 유도한다. Fig. 1(b)에 강성-질량계로 치환한 모델을 나타내었다.

모델은 31개의 절점으로 되어 있고, 좌측으로부터 배럴부, 컬럼부, 회전체부이다. 배럴부는

플랜지에 의해 기초에 고정되어 있다.

회전체부는 컬럼부의 미케니컬 시일, 수운할베어링, 라이너 링으로 지지되어 있다. 그리고 배럴부와 컬럼부 하단에는 상호지지부(guarder)가 설치되어 있으며, 이는 조립상의 요구에 따라 필요하다. 이 부분은 충돌이나 소성 변형등에 의한 진동에너지를 흡수하는 감쇠로서 작용하는 장점을 갖고 있다.

2. 해석 방법

본 해석에서 집중 질량은 회전축의 축심상에 있는 것으로 간주하여 축에 관해 완전 대칭으로 가정한다. 지지부는 플랜지로부터 탄성지지 되어 있고 압축및 회전 운동에 대한 강성을 고려하고 있다. 미케니컬 시일, 수운할 베어링 및 회전차에 대해서는 압축 변형만을 고려하고 회전에 의한 강성은 고려하지 않는다. 펌프내의 물은 배럴과 회전체가 진동할때, 그 진동에 의해 유체가 배제되어 압력효과를 나타낸다. 이 유체력은 진동하는 물체의 상대가속도에 비례하는 형으로 표현되며 Fritz의 방법에 따라 부가질량으로서 계산시에 질량행렬에 포함시킨다. 그리고 수운할 베어링은 베어링 틈새 내의 흐름이 주방향과 축 방향이고 이를 동시에 고려해야하므로 통상의 유막 베어링의 계산방법을 적용하는 것이 불가능하므로 동적계수는 Yang의 방법에 의해 계산한 후 강성 및 감쇠행렬에 포함시킨다.

3. 운동방정식

Fig. 1(b)의 집중질량 모델의 각 절점에서의 운동 방정식을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \dots\dots (1)$$

여기서 [M]은 질량행렬, [C]는 감쇠행렬, [K]는 강성행렬, {F}는 유체력이고, {X}와 {U}는 각각 [M]의 절대변위 및 상대변위이다.

유체력 {F}는 문헌(6)으로부터

$$\{F\} = \{F_1, F_2, F_3, F_4\} \dots\dots\dots (2)$$

여기서

임의 기초여전에 의한 입형펌프의 동적 응답해석

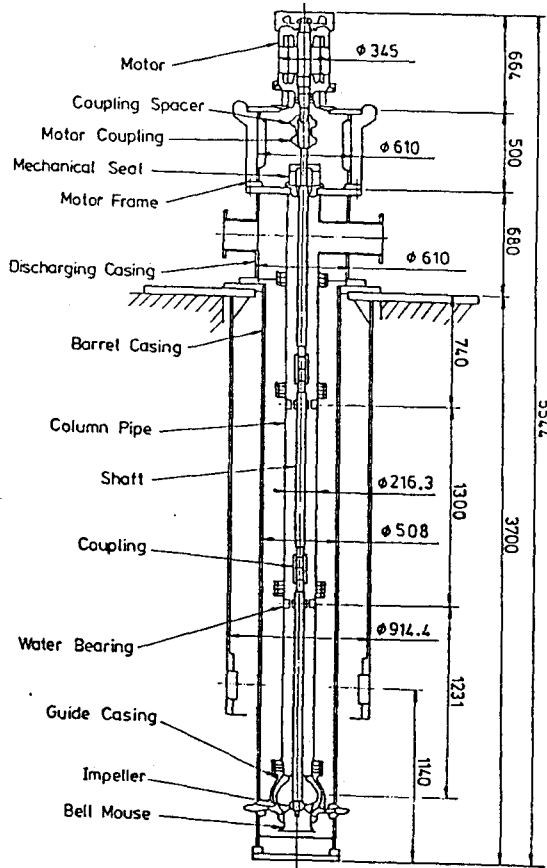


Fig.1(a). Vertical pump.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= -M_{H13}\ddot{X}_1 + (M_1 + \hat{M}_{H13})\ddot{X}_3 \\
 F_2 &= -M_{H24}\ddot{X}_2 + (\hat{M}_2 + M_{H24})\ddot{X}_4 \\
 F_3 &= (\hat{M}_1 + M_{H13})\ddot{X}_1 - (\hat{M}_1 + \hat{M}_3 + M_{H13})\ddot{X}_3 \\
 F_4 &= (\hat{M}_2 + M_{H24})\ddot{X}_2 - (\hat{M}_2 + \hat{M}_4 + M_{H24})\ddot{X}_4
 \end{aligned}$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 운동방정식을 변환하면

$$[\hat{M}]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \dots\dots (3)$$

여기서

$$[\hat{M}] = \begin{bmatrix} (M_1 + M_{H13}) & 0 & -(\hat{M}_1 + M_{H13}) & 0 \\ 0 & (\hat{M}_2 + M_{H24}) & 0 & -(M_2 + M_{H24}) \\ -(\hat{M}_1 + M_{H13}) & 0 & (\hat{M}_3 + \hat{M}_1 + \hat{M}_3 + M_{H13}) & 0 \\ 0 & -(\hat{M}_2 + M_{H24}) & 0 & (M_4 + \hat{M}_2 + \hat{M}_4 + M_{H24}) \end{bmatrix}$$

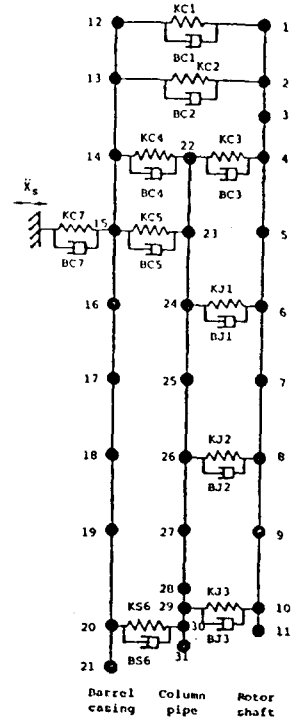


Fig.1(b). Lumped mass model for dynamic analysis.

이다.

4. 시간응답해석

다자유도 진동계의 시간 응답해석에는 직접적분법과 모드(modal)적분법이 이용된다. 일반적으로 직접적분법은 보호장치(guarder)가 있는 비선형계에도 이용할 수 있고 정확하지만, 차원수가 크고 계산시간이 많이 걸리는 단점도 있다. 한편 모드 직접적분법은 차원이 작고 효과적이지만, 이용하는 모드수에 의해 정도가 좌우되며 비선형계에서는 적분이 발산하는 경우도 있다.

본 해석의 대상인 입력펄프는 조립상의 요구와 방진면에서 유리한 보호장치를 설치하고 있고 진동의 증대에 따라 이부분의 충돌 가능성을 고려해야하므로 직접적분법을 이용하여 시간응답특성을 구한다.

절대가속도는 지지가속도 $\{\ddot{X}_s\}$ 와 상대가속도 $\{\ddot{U}\}$ 의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\{\ddot{X}\} = \{\ddot{U}\} + \{\ddot{X}_s\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

식(3)에 식(4)을 대입하면 횡방향의 가진에 관한 최종 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[\hat{M}_n]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{m\}\{\ddot{X}_s\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서

$$\{m\} = \{(M_1 - \hat{M}_1)(M_2 - \hat{M}_2)(M_3 - \hat{M}_3) \dots (M_n - \hat{M}_n)\}^T$$

식(5)는 집중질량계에 대해 다음과 같이 일반화 된다.

$$[\hat{M}_n]\{\ddot{U}\} + [C_n]\{\dot{U}\} + [K_n]\{U\} = -\{m_n\}\{\ddot{X}_s\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서

$$\{m_n\} = \{(M_1 - \hat{M}_1)(M_2 + \hat{M}_2) \dots (M_{n-1} - \hat{M}_{n-1})(M_n + \hat{M}_n)\}^T$$

$$\hat{M}_i = r^2 l_i, \quad \hat{M}_{i+1} = R^2 l_i, \quad \hat{M}_{Hi} = M_i \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} \quad (i=1, 3, 5 \dots n-1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

유체의 부가질량은 식(7)과 같이 표현된다. 식(6)에 의해 나타내지는 행렬 $[\hat{M}_n]$ 는 유체질량효과를 포함하고 있다. 펄프의 외부가진(지진동)에 의한 관성력은 $\{m_n\}$ 에 비례하며

$$\{m_n\}\{\ddot{X}_s\} = [\hat{M}_n]\{\ddot{X}_s\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

인 관계가 있고 이것을 식(6)에 이용하면 지진동의 외부가진에 대한 시간응답을 구할 수 있다.

최종의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[\hat{M}_n]\{\ddot{U}\} + [C_n]\{\dot{U}\} + [K_n]\{U\} = -[\hat{M}_n]\{\ddot{X}_s\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

식(9)를 Newmark- β 법을 이용하여 수치적분

하였으며, 본 계산에서는 $\beta=1/4$ 을 채용하였다.

수치계산 예

Fig. 2는 본 연구에 사용된 입력가속도의 종류를 나타낸다. 즉 지진동의 검증시험에 이용되는 연속 정현파, 공진 정현3파, 정현 비트파 및 랜덤파이다.

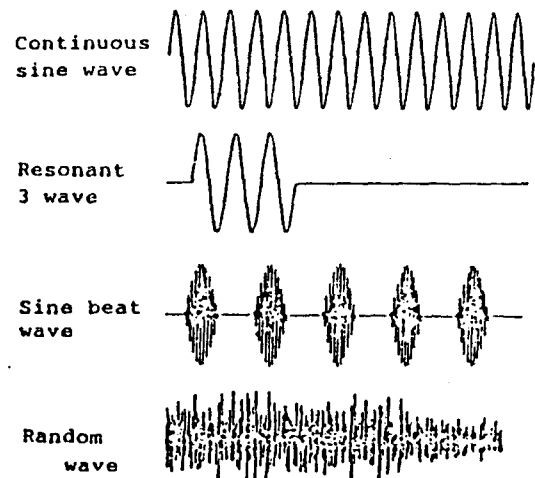


Fig. 2. Input acceleration.

연속 정현파의 경우 가속도의 크기와 진동수를 여러 종류로 변화시켰으며, 그중 지진 진동의 탁월 주파수로 고려되고 있는 4Hz와 10Hz에 대해 중심으로 계산을 수행하였다. 공진 정현3파는 변전기, 고압가스설비 등의 구조계 응답에 대해 비교적 엄격한 평가를 하도록 하는 일종의 인공지진진동으로 계의 1차 고유진동수인 7.7Hz의 진동수로서 3파를 구성하였고, 정현비트파의 경우는 10Hz와 12Hz의 진동수를 갖는 두 파형을 합성하였다.

그리고 랜덤파는 구간(0, 1)에서 두개의 독립된 일정한수 U_1, U_2 를 발생시키고, 이 때

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

인 평균 0, 분산 1의 정규난수 X를 구하여 입력 가속도로 사용하였다. 또한 해양 표면파에 의한 입

력가속도를 구하기 위해 단순한 수학적 모델을 이용한 Airy의 미소진폭과 이론에 따른 심해파의 수평 가속도 \bar{U} 는 다음과 같이 표현된다⁹⁾.

$$\bar{U} = -\bar{a}\omega^2 e^{kz} \cos(KX - \omega t)$$

여기서 $K=2\pi/L$, L 은 파장, \bar{a} 는 진폭으로 $\bar{a} = \frac{H}{L}$, H 는 파고이며, X , Z 는 해수표면으로부터의 수평 및 수직좌표이다.

해수표면의 경우 $Z=0$ 이므로 위 식은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\bar{U} = -\bar{a}\omega^2 \cos(KX - \omega t) \dots\dots\dots(10)$$

Fig. 3은 연속정현파의 가진으로 입력 가속도 $a=1500\text{mm/s}^2$ 에 진동수가 각각 10Hz 및 20Hz 의 경우 입형 펌프의 진동형태를 나타낸다. 10Hz 의 경우는 1차 모우드로서 펌프 끝단에 해당되는 절

점 11, 21, 31에서 비교적 큰 진동진폭을 나타내고 있으며 20Hz 의 경우는 2차 모우드로서 중앙부에 해당하는 절점 5, 16, 23에서 진폭이 크다.

Fig. 4는 입력가속도가 비교적 큰 980mm/s^2 의 경우 회전차의 변위 파형의 예이다. 여진주기의 5/4배 되는 시간에서 최대 진폭에 도달한 후 절차 정상상태에 접근하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 여진 진동수의 변화에 따른 절점 11과 21의 최대 변위 및 이에 도달할 때까지의 시간을 여진진동수로 무차원화 한것이다.

제1차 및 2차 고유진동수의 7.7Hz 와 17.1Hz 에서 공진이 발생하여 최대 진폭이 되고 이때까지의 시간도 역시 진동 변위 곡선과 유사한 양상을 보이고있다.

Fig. 6은 절점 20과 30사이에 거더를 설치한 경

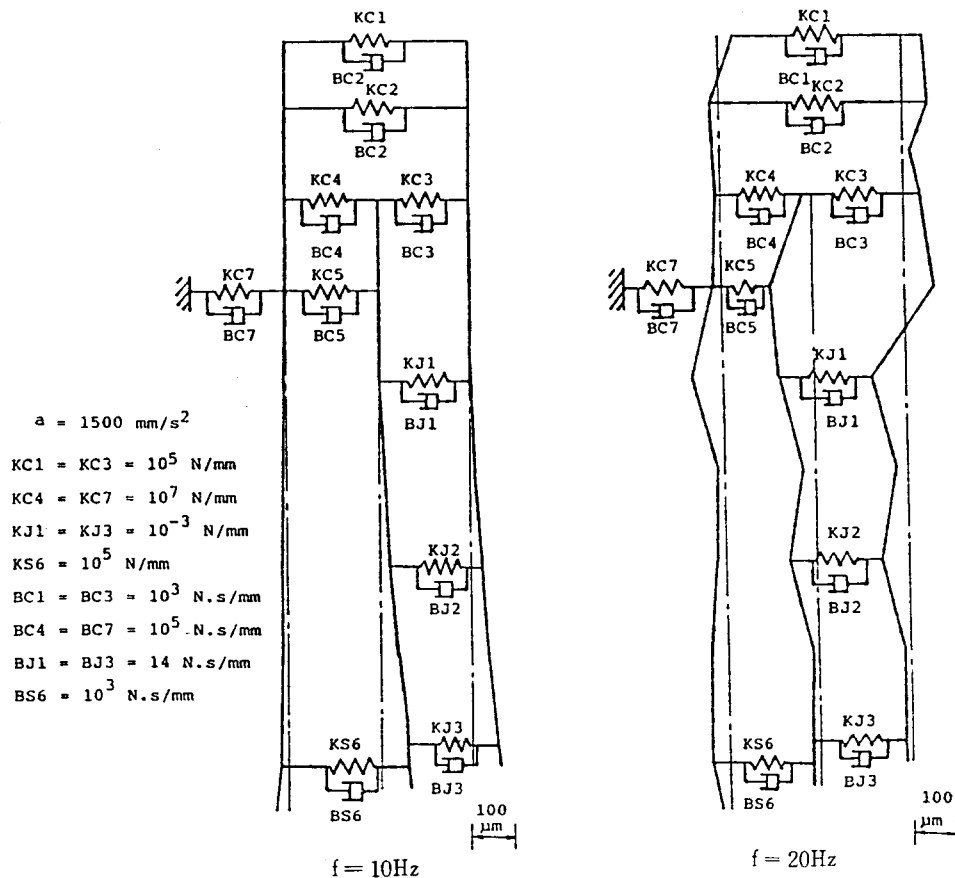


Fig.3. Mode shapes.

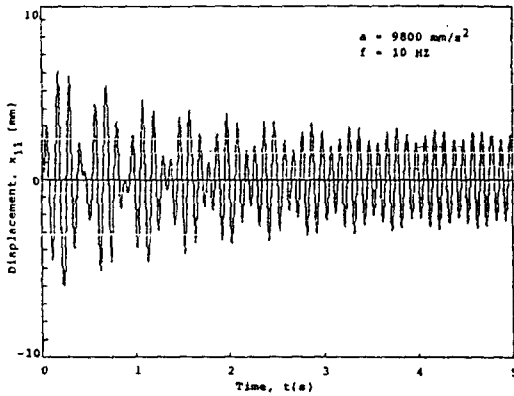


Fig. 4. A plot of displacement versus time for continuous sine wave.

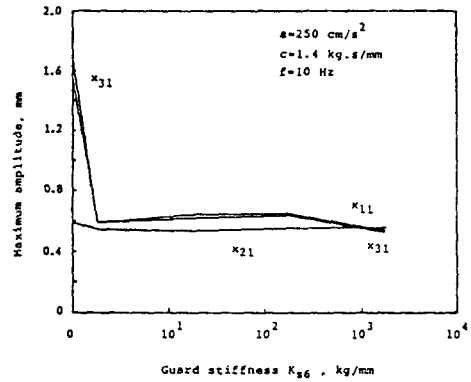


Fig. 6. Effect of guard stiffness.

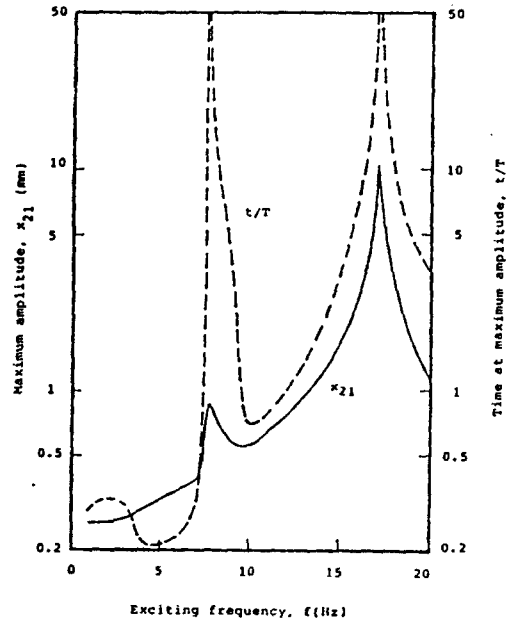
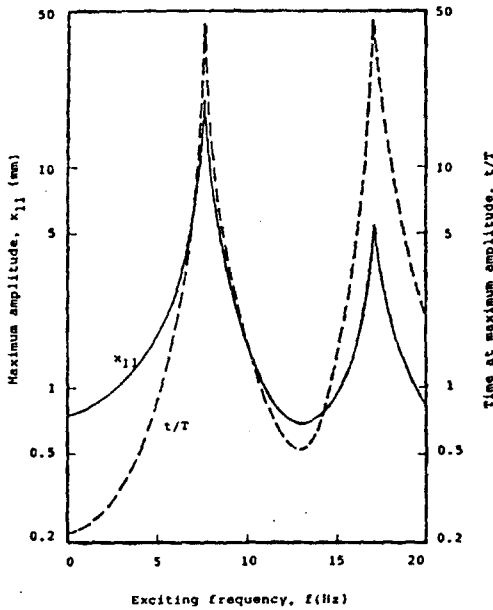


Fig. 5. Maximum amplitude and time for continuous sine wave excitation.

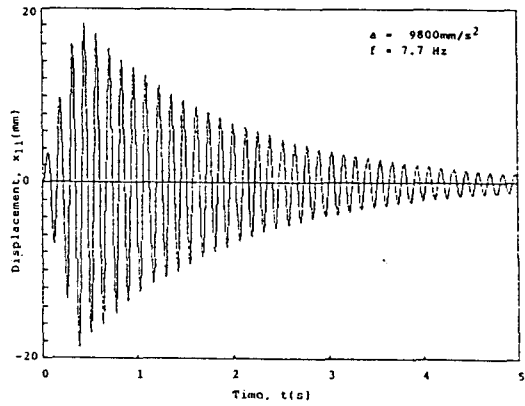
우, 거더의 강성(KS 6)의 증가에 따른 최대진폭의 변화를 나타낸다. 거더를 설치하지 않는 경우에 비해 진동변위는 크게 감소하는 특성을 보인다.

Fig. 7(a)은 입력가속도 9800mm/s^2 에 1차 고유진동수 7.7Hz 의 진동수를 갖는 공진 3파로 여진되었을 때의 회전차의 진동변위를 나타낸 것이다. 변위는 급속히 증가하여 $8/3T$ 에서 최대로

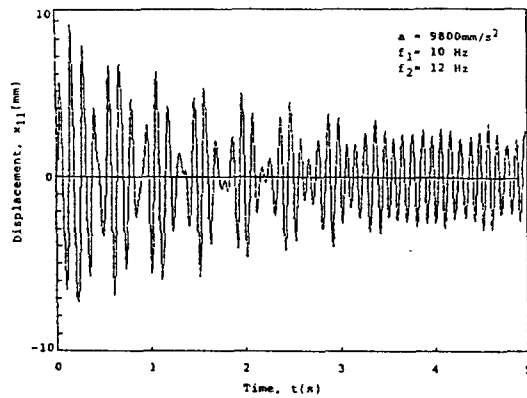
된후 지속적으로 감소하는 양상을 보이나 다른 여진형태에 비해 최대진폭이 매우 큼을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 입력 가속도 9800mm/s^2 , 진동수 10Hz , 12Hz 인 두파를 합성한 비트파의 경우로서 $5/4T$ 에서 최대로 된 후 맥놀이를 하며 정상상태로 수렴한다.

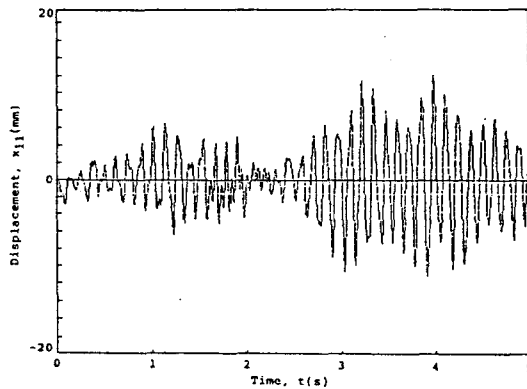
Fig. 7(c)는 랜덤파의 입력 가속도가 기초에 작



a) For resonant 3 wave



b) For sine beat wave



c) For Random wave

Fig.7. The plots of displacement versus time.

용한 경우의 회전차의 변위를 나타낸다. 비교적 큰 진폭 변화가 발생하고 있다.

Fig.8은 식(10)의 입력가속도가 펌프의 기초에 작용할 경우 파고 1m에 주기가 각각 5s와 10s의 경우에 진동변위를 나타낸 것이다. 주기가 작은 경우는 과도상태가 오래동안 지속되며, 점차로 정상상태에 접근하고 있고 최대 진폭도 매우 큼을 알 수 있다.

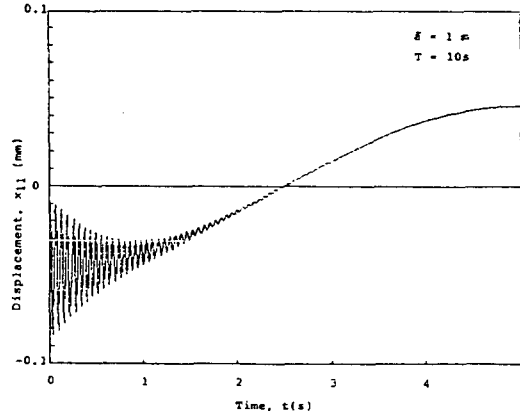
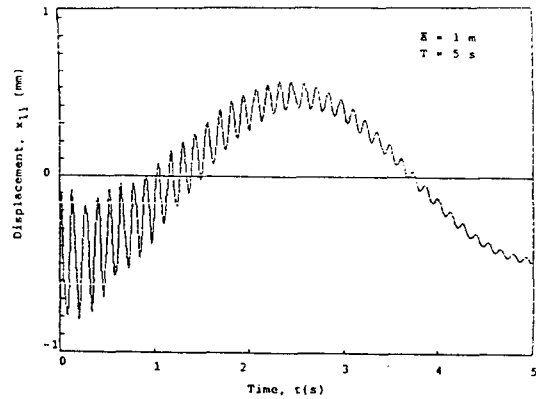


Fig.8. Displacement curves for ocean wave.

결론

본 연구에서는 입형펌프의 기초부에 4종류의 여진력이 작용하는 경우의 입형펌프 각부분에 진동변위, 속도 및 가속도에 대한 시간응답특성을 해석하였으며, 여진형태에 따른 입형펌프의 거

동을 구명하였고, 진동 해석 프로그램을 개발하였다.

신박용 뿐만 아니라 해저광물 채취용 수중펌프 및 육상발전 플랜트 등에 사용되는 각종 입형 펌프의 기초여진 문제에 대한 과도응답을 평가함으로써 동적거동을 예지할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. McDonald, C.K. (1976): Seismic Analysis of Vertical Pumps Enclosed in Liquid Filled Containers. ASME Publication.
2. Matsushita, O., et al. (1981): Seismic Response Analysis of Rotating Machinery JSME Publication No. 317.
3. Kovats, A. (1962): Vibration of Vertical Pumps. J. of Eng. for Pow., ASME, 195-203
4. Darlow, H., et al. (1978): Critical Speeds and Response of a Large Vertical Pump. ASME Publication.
5. Niwa, H., et al. (1986): Seismic Response on Vertical Pumps. Trans. JSME 52 (480), 2076-2083.
6. Fritz, R.J. (1972): The Effects of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids. J of Eng. for Ind., ASME, 167-173.
7. Yang, B.S. (1984): The Effects of Seal for Vibration and Stability of Hydraulic Machines. Dr. Thesis, Kobe Univ.
8. Yang, B.S., et al. (1989): Dynamic Response Analysis of Vertical Pumps. Trans. KSME 13(3), 362-372.
9. 천중근(1988) : 파동론.