

진동신호를 이용한 펌프의 고장진단 연구

정원식* · 이신영** · 정태진** · 이종길**

Fault Diagnosis of a Pump by Using Vibrational Signals

Won Sik Chung, Sin Young Lee, Tae Jin Chung and Jong Kil Lee

Key Words: Fault Diagnosis(고장진단), Vibrational Signals(진동신호), Critical Condition(가혹조건), Pump(펌프), Acoustic Measurement(음향측정)

Abstract

We must maintain the maximum operation capacity for production facilities and find properly out the fault diagnosis of the possessing equipments rapidly so as to decrease a loss caused by its failure. In this paper, we performed the fundamental study which develops a system of fault for a individually using pump widely or a pump as parts of the other machines. For each normal products, artificially transformed products, and working products under critical condition, we experimented in vibration, compared and analysed. Some faults showed into characteristic vibrations and other faults did not show consistent characters.

1. 서 론

현대의 경쟁 환경에서 고객의 단기 납기 요구에 부응하기 위하여, 제조업체는 보유하고 있는 생산 설비의 가동률을 극대화함으로써 제조의 리드타임을 단축할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 효율적인 공정 관리 및 설비 운용이 필요한데, 특히 보유 설비의 가동 능력을 최대로 유지하고, 설비 고장 시 신속하게 문제를 해결하여 손실을 줄여야 한다.

본 연구에서는 여러 기계에 부속품으로 또는 단독으로 많이 사용되는 펌프에 고장진단 시스템을 개발하는 연구를 수행하고자 하였다. 펌프는

전동기 부분과 펌프부분으로 나누어지며 기계부와 전기전자부를 포함하는 복합적인 기계요소이다. 따라서 기계 시스템의 고장진단을 연구하는 1차적인 대상이 되기에 충분하다고 고려되었다.

정상적인 펌프 및 블레이드에 인공적인 불균형 마모를 준 경우, 축에 변형을 가한 경우 및 펌프에 흡입되는 물에 모래를 혼입한 경우에 대하여 진동 및 소음을 조사하였다.

2. 발생 신호에 의한 이상진단 연구

2.1 기계의 고장별 상태 계측

기계의 고장이 발생하면 대부분의 경우 고장 부위 또는 고장 내용에 따라서 정상 상태와 다른 상태를 나타내게 된다. 여러 가지 고장이 발생한 기계에 대하여 작동시 발생하는 진동/변위 등의 신호를 계측함으로써 고장별 발생하는 상태를 자료화하고자 하였다.

기계의 이상진단을 위한 시작품으로 펌프를 구입하고, 측정 장비로는 Data Physics사의

* 군산대학교 대학원 기계공학과

** 군산대학교 기계공학부

DP104-100 FFT analyser, 계측센서로는 Dytran 3136A 2 set를, 신호증폭기로는 Dytran 4102C를 각각 사용하였다. 본 연구에서는 고장별 상태를 조사하기 위하여 Fig. 1과 같이 펌프 블레이드를 일부분 갈아낸 것과 Fig. 2와 같이 펌프축 부분 회전자의 냉각핀에 일부 변형을 가한 두 펌프에 대하여 진동을 측정하고 정상상태의 펌프 진동과 비교하였다.

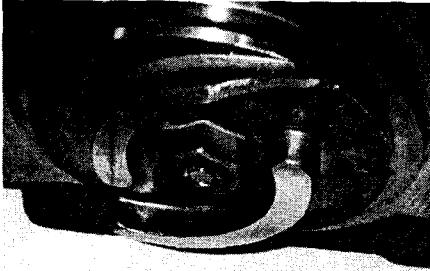


Fig. 1 Unevenly ground of blade

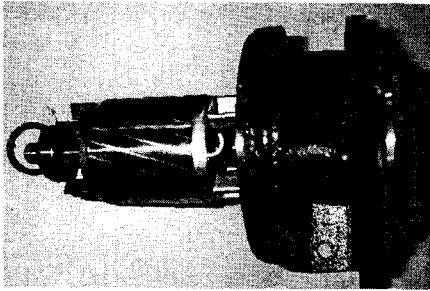
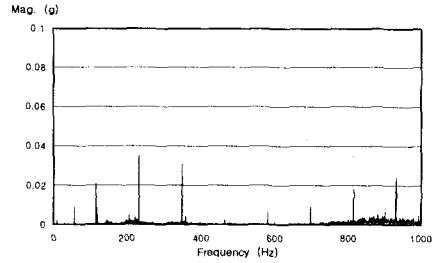


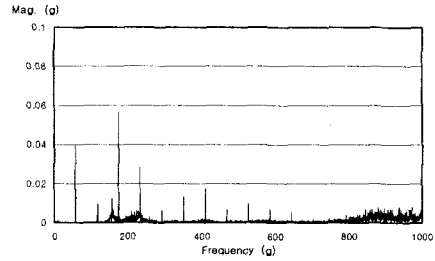
Fig. 2 Bending of cooling fin

진동신호는 베어링을 부착한 하우징 부분과 펌프 케이스의 블레이드 부분에서 각각 수직 수평 방향으로 4지점을 측정하였다. Fig. 3에서와 같이 정상상태 펌프의 진동과 비교할 때 블레이드의 일부를 불균형 마모시킨 펌프의 진동은 전체적으로 진폭이 크고 피크를 나타내는 피크 주파수의 개수도 증가하였으며 157Hz 부근에서 새로 피크가 발생하였다. 또한, 회전주파수(f_s)의 $3f_s$ 에 해당하는 피크가 크게 발달하였으며 800Hz~1000Hz 사이의 잔피크들도 다소 증가하였다. 축의 휨 일부를 굽힌 펌프 진동의 경우는 변형량이 전체의 질량에 비하여 작은 이유로 인하여 전체 진폭은 큰 차이를 나타내지 않고 있고 고주파수 영역에서 몇 개의 피크가 새로이 발달되는 것을 볼 수 있었으나 이것 역시 전체 진동에는 큰 영향을 줄

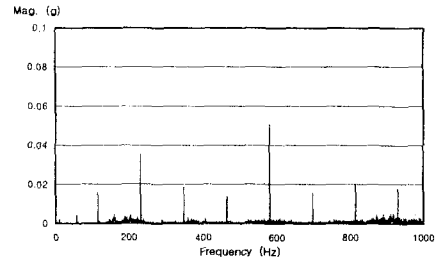
수 있는 정도는 아니었다.



(a) Vibrations of a pump in normal condition



(b) Vibrations of a pump with unevenly ground blade



(c) Vibrations of a pump with deformed fin in shaft

Fig. 3 Horizontal vibration at Mortor side

Fig. 4는 세 펌프의 저주파수 영역, 특히 회전 주파수(f_s) 주변의 영역에서의 주파수 성분을 비교한 그림이다. 세 경우 모두 회전주파수 이후에는 두각을 나타내는 피크들이 모두 그의 배수 성분들이었다. 회전하는 블레이드에 오류가 발생한 경우 불평형 회전에 상응하는 회전 오류 주파수 58.13Hz가 크게 증가하는 것을 볼 수가 있다. 또한 0.18 f_s 에 해당하는 10.63Hz에서 surge에 의한 것으로 보이는 명확한 피크가 보이며 60Hz에서 전류 맥동에 의한 피크도 관찰된다.

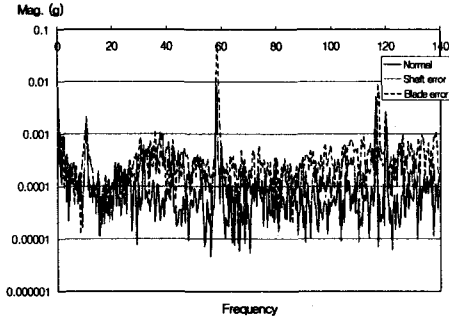


Fig. 4 Comparison of vibration

2.2 가혹조건 하의 상태 계측

펌프의 이상적인 사용에 있어서는 물만을 흡입하는 것으로 볼 수 있으나, 사용조건에 따라서는 이물질이 흡입하여 펌프 내에 이물질이 혼입될 수 있다. 이러한 상황을 시뮬레이션하기 위하여 채를 사용하여 선별된 입도를 가진 모래를 물통에 적당량 투입하고, 펌프에 흡수되는 물에 모래가 혼입되었을 때의 진동을 측정하였다. Fig. 5는 가는 모래(모래 A)가 혼입되었을 때의 진동 상태를, Fig. 7은 상대적으로 굵은 모래(모래 B)가 혼입되었을 때의 진동을 나타낸다. 모래의 혼입하였을 경우의 초기 상황은 일정한 패턴을 보여주지 않았다. 매 2~6시간 경과시 마다 발생하는 진동을 측정하였으며 가는 모래와 굵은 모래 각각의 경우 다른 양상을 나타내었다.

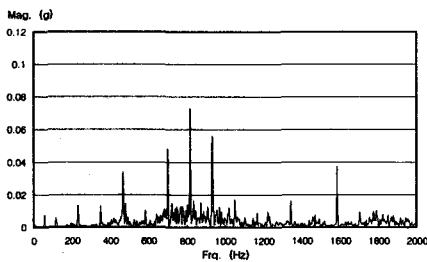


Fig. 5 Vibrations of a pump under fine sand included at beginning

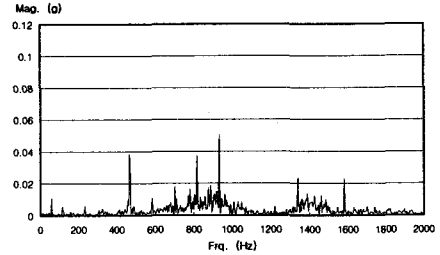


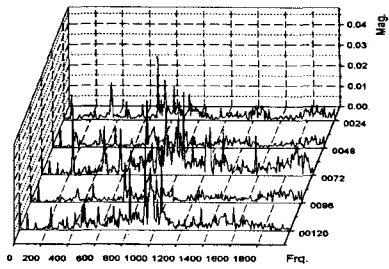
Fig. 6 Vibrations of a pump under coarse sand included at beginning

또한, 펌프에 흡입되는 물에 모래가 혼입되면 블레이드 및 벽체에 마모가 촉진되는 것이 예상되므로 모래 A(75~300 μ m) 및 모래 B(300~800 μ m)를 혼입한 펌프를 구동하여 가면서 구동 시간에 따른 펌프 진동의 변화 양상과 블레이드의 질량감소를 측정하였다. Table 1은 사용시간에 따른 블레이드의 질량변화를 나타내고, Fig. 8 및 Fig. 9는 사용시간의 경과에 따른 펌프 진동을 나타낸다. 사용시간에 따른 블레이드의 마모량이 차이가 나는 것은 시간이 경과함에 따라 모래 입자의 거칠기가 감소하는 때문으로 해석된다. 이것을 피하기 위하여 72시간 경과 후 새로운 모래로 교체하고 실험을 진행하였다.

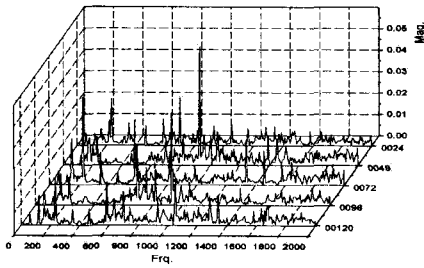
Table 1 Mass change for the case sand included (unit: gram)

	모래 A	모래 B
시작	322	323
24시간	322	317
48시간	321	317
72시간	321	316
96시간	320	309

가혹 조건의 시간에 따른 상태 변화 중 가는 모래를 사용한 경우에 대하여 실험 시간의 경과에 따른 주파수별 피크치의 변화를 조사하였다. Fig. 10은 피크를 나타내는 주파수별로 작성된, 시간에 따른 피크치의 변화를 나타낸다.

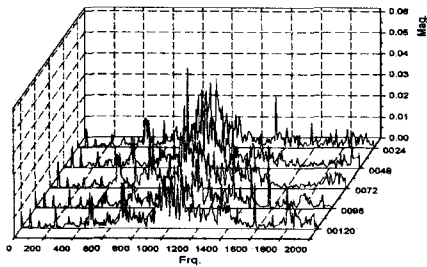


(a) Vertical vibration

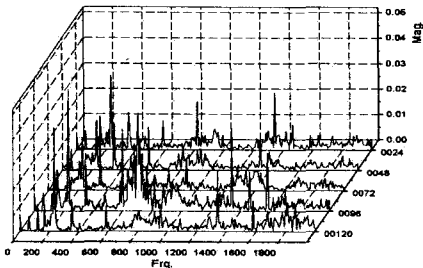


(b) Horizontal vibration

Fig. 8 Vibrations of a pump under fine sand included

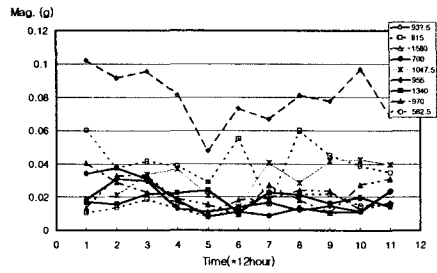


(a) Vertical vibration

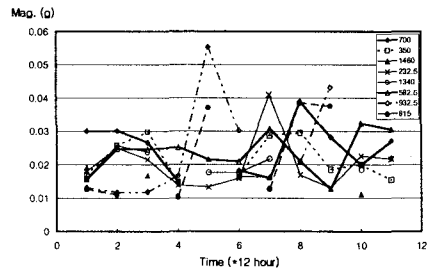


(b) Horizontal vibration

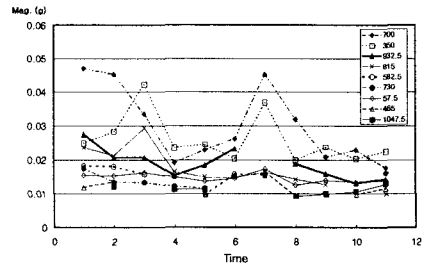
Fig. 8 Vibrations of a pump under coarse sand included



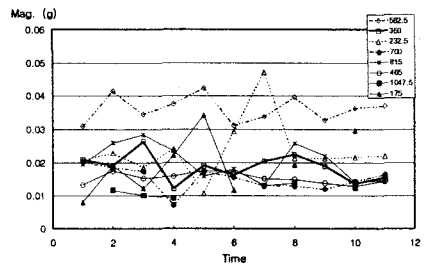
(a) Vertical vibration at motor side



(b) Horizontal vibration at motor side



(c) Vertical vibration at blade side



(d) Horizontal vibration at blade side

Fig. 9 Magnitude at peak frequencies vs. testing time

3. 주파수 응답함수 측정

모터 측의 수직 및 수평 가진, 블레이드 케이싱 측의 수직 및 수평 가진에 의한 가속도 응답을 통하여 주파수 응답함수를 측정하였다. 주파수 응답함수를 분석한 결과, 고유진동수는 Table 2와 같이 산출되었다. 고유진동수와 작동시의 상태에 의한 피크 진동수를 비교한 결과 직접적인 연관성이 산출되지 않았다.

Table 2 Natural frequencies of a pump system

Mode	Frequency(Hz)	Remarks
1	46.25	
2	77.5	
3	96.25/105	various
4	150	
5	155/156.25	various
6	170	
7	203.75	
8	360/361.25	various
9	475/495	various
10	590/592.5	various
11	750/765	various
12	822.5/825	various

4. 음압 측정

가속도계를 이용한 진동측정 외에 또 다른 진동계측의 방법으로 소음측정을 이용한 펌프의 상태자료화를 시도하였다. 기계의 사용 중 발생하는 소리는 기계진동과 마찬가지로 기계의 작동 상황에 따라 특징적인 상황을 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11은 정상상태의 펌프 작동시의 음압측정 결과에 대한 각각의 이상 발생에 따른 음압측정의 결과의 비교 그래프이다. Fig. 10은 정상적인 상태에서 발생하는 음압과 모래를 혼입하는 경우의 음압을 비교한 것이다. 모래를 혼입하는 경우의 음압이 전체적으로 높은 레벨을 나타내고 있으며, 12~200Hz 대역에서는 피크 부분의 음압이 큰 차이를 나타내었고 1250~20000Hz에서는 전체적으로 높은 음압을 나타내었다. Fig. 11은 정상적인 상태에서 발생하는 음압과 블레이드를 불균형하게 마모시킨 펌프에서 발생하는 음압을 각각

측정한 후 비교한 것이다. 음압의 피크가 발생하는 주파수는 거의 동일하고 20~32Hz대역이 최고의 음압을 나타내었으며 전체적으로 높은 음압레벨을 나타내었다.

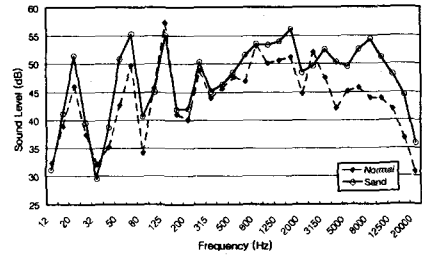


Fig. 10 Noise with normal condition vs. sand included

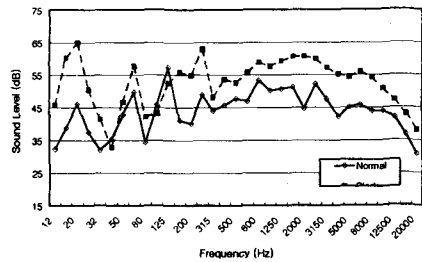


Fig. 11 Noise with normal condition vs. ground blade

5. 결론

기계의 이상진단을 위한 시작품으로 펌프를 대상으로 하였고, 정상적인 기계와 인위적으로 변형을 준 제품 및 가속화 마모를 발생시킨 제품에 대하여 각각 진동실험을 수행하였으며 그 결과치를 비교 분석하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 블레이드의 일부를 불균형 마모시킨 펌프의 진동은 전체적으로 진폭이 크고 피크를 나타내는 피크 주파수의 개수가 다소 많은 데 비하여, 펌프 회전자의 냉각 휠 일부를 굽힌 펌프 진동의 경우는 전체 진폭은 큰 차이를 나타내지 않았다. 블레이드에 오류가 있는 경우는 불평형 회전에 의한 회전 주파수에서의 피크 증가가 뚜렷이 나타났다.

(2) 모래를 혼입하였을 경우의 초기 상황은 일정한 패턴을 보여주지 않았고 가는 모래와 굵은

모래 각각의 경우 다른 양상을 나타내었다. 가는 모래보다 굵은 모래를 사용한 경우가 블레이드 및 펌프 벽면의 마모가 빠른 속도로 진행되었고, 시간이 경과함에 따라 모래의 날카로운 모서리가 동글어져 블레이드의 마모속도가 감소하였다.

(3) 시간의 경과에 따른 피크 주파수별 진동 진폭의 변화 양상을 고찰하기 위한 그래프를 도시하였다. 이 그래프로부터 피크 주파수별로 시간의 경과에 따른 변화가 다른 것을 알 수 있다.

(4) 충격 가진에 의한 고유진동수 및 주파수 응답함수를 산출하여 진폭이 큰 주파수와 비교하였다. 그 결과 두 주파수간에 큰 상관관계를 보이지 않았고 작동시의 진폭이 큰 주파수는 강제 진동에 기인하였다.

(5) 정상적인 상태에서 발생하는 소음과 모래를 혼입하는 경우의 소음을 비교한 결과, 모래를 혼입하는 경우의 소음이 전체적으로 높은 레벨을 나타내고 있으며, 12~200Hz 대역에서는 피크 부분의 소음이 큰 차이를 나타내었고 1250~20000Hz에서는 전체적으로 높은 소음을 나타내었다. 정상적인 상태에서 발생하는 소음과 블레이드를 불균형하게 마모시킨 펌프에서 발생하는 소음을 각각 측정 후 비교한 결과, 소음의 피크가 발생하는 주파수는 거의 동일하고 20~32Hz대역이 최고의 음압을 나타내었으며 전체적으로 높은 소음을 나타내었다.

- Vibration and Acoustics, Vol. 123, pp. 84~91.
- (5) Y.D.Chen et al, 1995, "Fault Features of Large Rotating Machinery and Diagnosis Using Sensor Fusion," Journal of Sound and Vibration, Vol. 188(2), pp. 272~242.
 - (6) 井上紀明, 2000, "설비진단 기술," 자동차기술, 2000년 5월호, pp. 55~63.
 - (7) 서동규 외, 1999, "공작기계 고장 진단 전문가 시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제16권, pp. 217~224.
 - (8) 양보석, 1996, "기계의 진동상태감시를 위한 순서," 한국소음진동공학회지, 제6권, pp. 394~409.
 - (9) 배범원 외, 2000, "진동신호를 이용한 기어체인의 고장진단," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, pp. 1731~1739.
 - (10) 윤종호 외, 1995, "회전기계 볼베어링의 자동진단 시스템에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, pp. 1787~1798.

참고문헌

- (1) 윤상운, 1996, 신뢰성 분석, 서울: 자유아카데미.
- (2) M. Staroswiecki, 2000, "Quantitative and Qualitative Models for Fault Detection and Isolation," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14-3, pp.301~325.
- (3) D.C.Zimmerman et al, 1996, "An Experimental Study of Structural Health Monitoring Using Incomplete Measurements," ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 118, pp. 543~550.
- (4) T.A.Duffey et al, "Vibration-Based Damage Identification in Structures Exhibiting Axial and Torsional Response," ASME, Journal of