

빗물펌프장 펌프시방의 최적결정에 관한 연구 (II)

김민호*, 김성원**

Key Words : 빗물펌프장, 진단, 진동, 주파수, 공진, 캐비테이션, 볼텍스

1. 서론

수방(水防)기간에만 가동되는 빗물펌프장은 가동시간이 극히 적기는 하지만 고장 발생시 막대한 경제적 손실과 함께 시민의 생존을 위협할 수도 있기 때문에 어떠한 경우라 할지라도 가동 중 고장이 발생하면 안 되는 절대적인 전제를 안고 있다.

고장이 발생하지 않도록 하기 위해 가장 우선되어야 할 과제는 양질(良質)의 펌프가 설치되어야 한다는 것이다. 그 이후 주기적인 상태감시를 통해 펌프를 최적한 상태로 유지하는 것이 필수적이다. 우선 양질의 펌프가 도입되기 위해서는 기존에 적용하고 있는 시방서로서는 부족한 부분이 있고, 보다 발전된 수력학적 검토와 함께 신뢰성의 기준이 도입되어야 할 것으로 보인다. 펌프의 관리는 주기적인 상태 감시를 위한 관리 규정과 함께 데이터베이스 시스템을 갖춘 발전된 운영 시스템을 도입하여 빗물펌프장 관리에 필요한 Know-how가 축적될 수 있는 기반을 마련하는 것이 중요하다.

이에 본 연구에서는 A빗물펌프장 4호기 펌프에 대한 정밀 진단결과 분석을 통해 빗물펌프의 운전안전성 제고를 위한 시방결정 개선방안 제안하고자 한다.

2. 정밀 진단결과 분석

아래의 분석 결과는 A빗물펌프장 4호기 펌프에 대한 사례로써 수력학적인 부분의 검토는 빗물펌프장 펌프시방의 최적결정에 관한 연구(I)에서 이루어진 바 있으며, 본 연구에서는 정밀 진동분석에 관한 부분만 언급하기로 한다. 진단대상 4호기 펌프는 1997년 설치된 토출구경 1000mm의 입축사류펌프로써, 시방점은 전양정 11m, 토출량 140m³/min, 회전수 445rpm, 동력 450Hp이다.

2.1 진동측정점

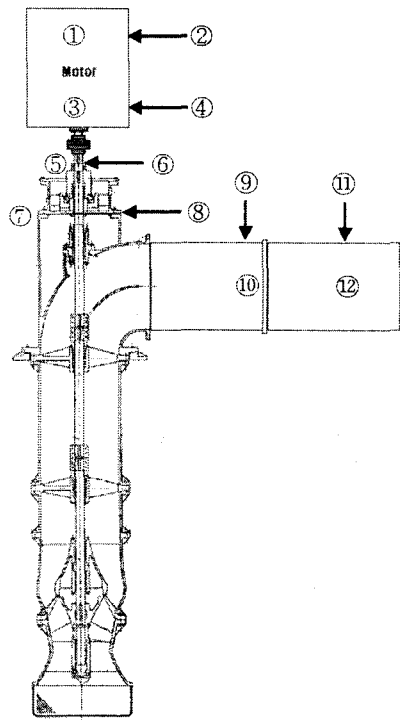


그림 1 진동측정점

표 1 진동측정점

순서	측정위치
①	모터 반부하측 전면 방향
②	모터 반부하측 측면 방향
③	모터 부하측 전면 방향
④	모터 부하측 측면 방향
⑤	펌프 부하측 전면 방향
⑥	펌프 부하측 측면 방향
⑦	펌프 베이스 전면 방향
⑧	펌프 베이스 측면 방향
⑨	앞 토출 배관 수직
⑩	앞 토출 배관 수평
⑪	뒤 토출 배관 수직
⑫	뒤 토출 배관 수평

* (주)나다에스앤브이

** 중소기업진흥공단 펌프에너지기술실

E-mail : * kmh@nadasnv.co.kr

** pump@sbc.or.kr

2.2 펌프의 운전범위 및 수력학적 안전성 분석

2.2.1 관리상태 분석

대체로 청결을 유지하고 있으며, 수방기간이 되어 펌프를 가동하기 이전에는 반드시 윤활을 점검하는 등 관리 상태에 특별한 문제를 발견할 수 없었다.

2.2.2 설치상태 분석

설치상태 분석에서 가장 중요한 것은 기초와 베이스의 구분이다. 베이스는 기계가 설치되는 장착면을 이루고 있는 부분으로 변형이 발생되지 않도록 하기 위해 높은 강성이 요구되는 부분이며, 기초는 구조물이라 할 수 있다.

본 설비의 베이스와 기초의 상태를 분석한 결과 베이스와 기초 사이에 균열이 발생하여 있으며, 육안으로 충분히 확인할 수 있을 정도의 틈새가 있었다. 설치 초기에 존재하고 있던 약간의 틈새가 진동에 의해 기초를 이루고 있는 콘크리트 구조물의 점진적인 파손에 이르고 있다는 것을 짐작할 수 있다. 그동안 불평형 진동이 높다는 이유로 여러 번 Balancing을 실시하였다는 것으로 짐작해 볼 때 베이스와 기초의 틈새가 증가할수록 구조물의 강성이 저하하게 되고 점차 펌프의 고유진동수에 가까워 지면서 공진이 발생한 것으로 추측된다. 주파수 분석 단계에서 이 부분에 대한 정밀 측정이 이루어져야 할 것이다.

2.3 총진동값 분석

표2는 총진동값에 의한 기계상태 판단의 기준으로 제시하고 있는 ISO 10816-3 규격의 강지치부분이다. 본 빗물펌프장에서 사용하고 있는 펌프의 규격은 그룹 3 조건에 해당한다.

표 3은 본 빗물펌프장에서 사용되는 펌프의 진동을 측정된 값을 나타낸 표로서 펌프의 상태는 다양한 운전영역에서 측정하여 측정된 진동값의 최고값을 기준으로 한다. 따라서 본 설비의 상태는 영역 D(기계에 손상을 입힐 정도로 충분히 심각한 것으로 간주)에 속한다고 할 수 있다. 본 펌프설비의 진동분포 특징은 내수위 EL 6.6m의 경우 베어링 하우징에서 측정된 진동 ①~⑥의 상태는 안정적이라 할 수 있으나 베이스에서 측정된 ⑦, ⑧ 진동은 과다한 것을 알 수 있다. ①~⑥의 총진동값이 안정적이라는 것은 1X 진동의 주 원인이 되는 회전축의 상태 즉, 불평형 및 측정될 불량에 관한 문제는 크지 않은 것을 나타내고 있는 것이다. 다만 ⑦, ⑧ 부분은 진동을 발생시키는 요소(가진력)과

표 2 ISO 10816-3(강지치) 규격

영역 경계	진동속도(mm/s, rms)			
	그룹1	그룹2	그룹3	그룹4
A/B	2.3	1.4	2.3	1.4
B/C	4.5	2.8	4.5	2.8
C/D	7.1	4.5	7.1	4.5
그룹1 : 대형기계(300kW~50MW), 전기기계(축 높이 H≥315), 슬리브 베어링 지지, 120~15,000rpm 그룹2 : 중형기계(15kW~300kW), 전기기계 (축높이 160≤H≤315), 구름베어링지지, 600rpm이상 그룹3 : 원심, 혼류 또는 축류펌프(15kW이상), 슬리브 또는 구름베어링지지 그룹4 : 원심, 혼류 또는 축류펌프 (15kW이상, multivane 회전차와 연결된 구동장치) 구름베어링 지지				
영역 A : 새로 설치된 기계의 진동은 보통 이 영역에 속한다.				
영역 B : 제한 없이 장시간 운전이 허용될 수 있는 것으로 간주한다.				
영역 C : 장기간의 연속운전은 만족스럽지 않은 것으로 간주되며, 보수조치를 위한 적절한 기회가 생길 때까지 제한된 기간동안 운전할 수 있다.				
영역 D : 이 영역내의 진동값은 보통 기계에 손상을 입힐 정도로 충분히 심각한 것으로 간주한다.				

표 3 진동측정점의 총진동값

측정점	내수위 EL 6.6m		내수위 EL 5.76m	
	총진동 (mm/s,rms)	1X(7.42Hz) (mm/s0-pk)	총진동 (mm/s,rms)	1X(7.42Hz) (mm/s0-pk)
①	0.73	0.44	0.81	0.31
②	1.01	0.34	1.21	0.90
③	0.61	0.12	1.02	0.37
④	0.47	0.04	0.79	0.18
⑤	1.59	1.23	(14.09)	(19.88)
⑥	1.07	0.76	1.60	1.06
⑦	(7.80)	(10.99)	(13.77)	(19.41)
⑧	(5.69)	(7.73)	(10.58)	(14.91)
⑨	2.05	0.92		
⑩	(9.80)	(13.66)		
⑪	1.41	1.34		
⑫	(5.53)	(7.71)		

* ()안의 진동은 ISO 10816-3 그룹3 강지치 기준에서 이상상태를 나타내는 진동이다.

전혀 무관한 것으로 에너지가 창조되지 않기 때문에 이 부분의 진동은 베어링 하우징에서의 진동보다 작아야 한다. 하지만 보는 바와 같이 이 부분의 진동이 더 큰 것은 공진에 의한 것이라고 판단할 수 있다. 내수위 EL 5.7m의 경우는 내수위 EL 6.6m의 경우와 많이 다르다. ⑦, ⑧부분에서의 구조 공진의 크기는 더욱 커

지고 있으며 ⑤번 펌프 부하측 전면 방향의 진동은 급격하게 상승하고 있는 형태를 보인다. 이는 내수위가 낮아지면서 수면으로부터 공기가 유입되어 회전차에 부하 변동을 주면서 1X 진동성분이 급격히 증가하고 있는 것으로 보인다. ⑤, ⑥번의 측정결과에서 전면방향과 측면방향의 높은 진동차이는 공진의 전형적인 특징을 나타내고 있으며, ⑦, ⑧ 에서 방향에 따른 편차가 크긴 하지만 ⑤, ⑥번에 비해 크지 않은 것은 구조적인 제약 때문일 것으로 판단된다.

⑨, ⑩의 배관 진동으로도 공진이 발생했다는 것을 확인할 수 있다. ⑪, ⑫의 진동과 비교할 때 공진발생의 원인은 펌프자체에 기인하며, 배관의 공진이 펌프에 영향을 미친 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 특히 본 설비의 공진 주파수는 7.42Hz (445rpm)으로 대략 건물의 고유진동수와도 가깝다고 볼 수 있어서 즉시 이에 대한 보강 작업이 요구되고 있다.

2.4 주파수 분석

2.4.1 고주파 영역 분석

고주파 영역 분석은 5,000Hz 까지의 범위로 하였고 보는바와 같이 4,000~8,000Hz 범위에서의 진동은 나타나지 않고 있다. 약하기는 하지만 3,000Hz 주위에서 폭넓게 진동이 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 캐비테이션이 발생하고 있을 때 발생하는 전형적인 진동패턴이다. 대체로 고주파 진동은 멀리 전달되지 않으며, 특히 전달계통에 절단면이 있는 경우 대부분 소멸되어 버리는 특성을 갖고 있으나 약하긴 하지만 진동이 전달되고 있다는 것은 캐비테이션 발생의 강도가 심각하다는 것을 나타낸다. 캐비테이션은 펌프의 설계나 최적 운전 여부를 판단할 수 있는 중요한 지표가 되므로 정확한 진단이 요구된다. 하지만 빗물펌프장에 설치된 대부분의 펌프는 외부에 드러난 부위를 측정하여 캐비테이션의 발생 여부를 정확히 분간하거나 그 정도를 판단하기 어렵기 때문에 실제 캐비테이션이 발생하고 있는 회전차 장착부위의 진동을 측정하기 위해서는 설비 분해시 펌프하부에 센서를 설치하여 두는 것이 필요하다.

그림 2와 그림 3은 동일한 설비의 동일한 위치에서 내수위 차이를 변경하여 분석한 결과이다. 두 그래프에서 가장 큰 차이를 보이는 것은 내수위 5.7m에서 발생되고 있는 높은 1X 진동이라 할 수 있다. 일반적으로 1X 진동은 불평형에 의한 진동으로 알려져 있으나 불평형 량은 회전체 내에 내재되어 있는 것으로 운전

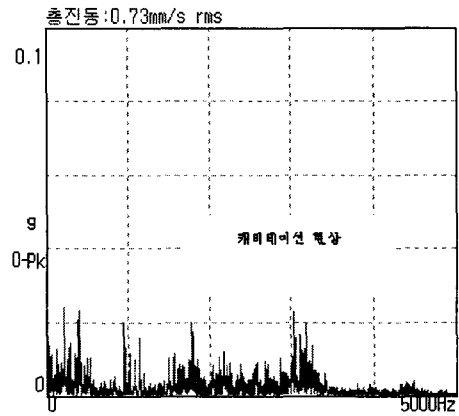


그림 2 내수위 6.6m

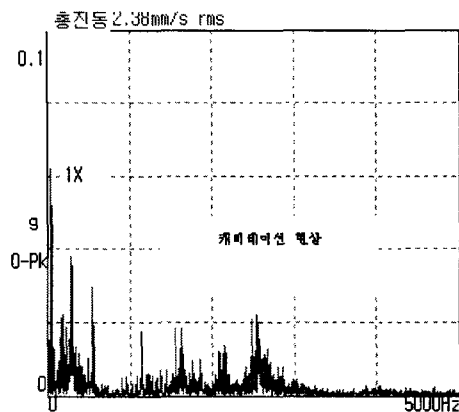


그림 3 내수위 6.6m

조건의 차이에 의해 증가하거나 감소할 수 없다. 따라서 이와 같은 진동의 차이는 낮은 수위차에 의해 공기가 회전차 날개면에 빨려들어 오면서 발생하는 볼텍스 현상에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 더구나 공진이 발생되고 있고 그 공진주파수가 건물의 고유진동수와 유사한 상황에서 이와 같은 현상은 위험한 결과를 초래할 수 있다는 것을 명심해야 한다.

볼텍스는 단순히 특정한 내수위 이하에서만 발생하는 현상이므로 운전조건을 적절히 규제함으로써 해결할 수 있을 것이다.

2.4.2 저주파 영역 분석

저주파 진동분석의 목적은 펌프의 가공 및 설치상태 결함을 확인하는데 그 목적이 있다. 대부분의 가공불량은 불평형과 헐거움으로 나타나며, 설치 불량과 결과는 구조공진과 측정렬 불량 그리고 Softfoot의 발생으로 나타난다.

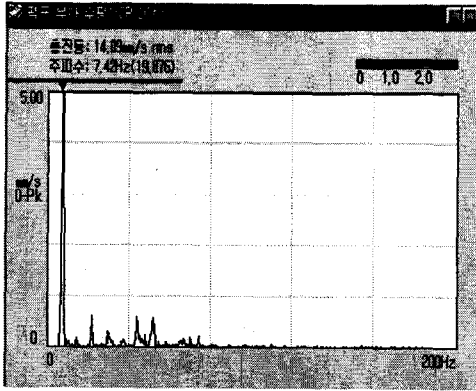


그림 4 펌프부하전면 (내수위 5.7m)

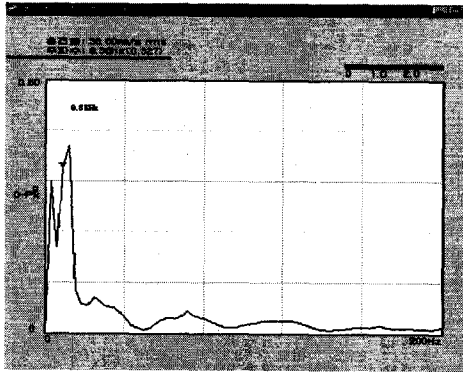


그림 5 Hammering Test 결과

그림 4는 저주파분석을 위한 그래프로써 고주파 분석을 위해 가속도로 표시한 그림 2,3과 달리 모든 진폭을 속도값으로 환산한 그래프이다.

원래 1X 진폭은 19.88mm/s 0-pk로 큰 값이나 최대값을 5mm/s로 제한하였다. 엔지니어에게는 그래프를 눈에 익숙하게 하여 진동값이 크지, 적은지를 한눈에 알아볼 수 있도록 하는 것이 중요하고 또한 5mm/s 정도의 진동은 그 자체로 충분히 큰 값이며, 더 크다고 하는 것은 의미가 없다. 또한 최대진폭의 크기를 그때그때마다 최대 peak에 고정할 경우 1X이외의 여타 주파수의 진동에 대해서는 크기에 대한 감각이 없어지기 때문에 그래프의 창을 5mm/s 또는 중요설비의 일상적인 진동기준에 맞게 고정하는 것이 좋다. 그림 4에서 보는 바와 같이 1X 진폭(7.42Hz)은 공진에 의해 대단히 큰 값을 나타내고 있다. 이 같은 상황에서는 진폭 자체는 그다지 중요하지 않다. 진폭보다는 이 진동이 실제 공진에 의한 유발된 진동인지 또는 여하히 공진을 제거할 수 있는가 하는 것이 오히려 중요한 부분이다.

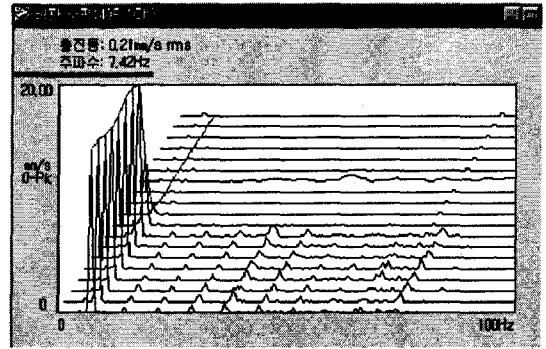


그림 6 정지시 Waterfall 그래프

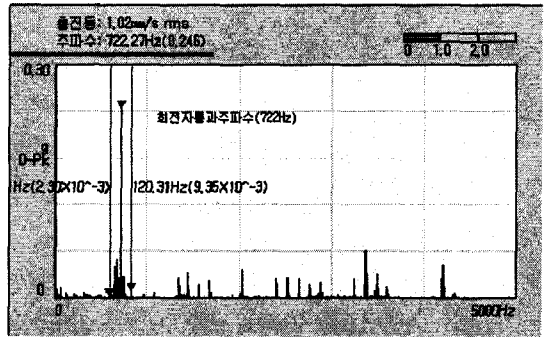


그림 7 3호기 모터진동분석

여러가지 상황에서 공진에 대한 확신이 들기는 했으나 확인이 필요하였다. 현장에서 대형 펌프의 고유진동수를 확인하기 위해 충분히 가진할 수 있는 여건이 되지 않았으나 공진 여부 확인을 위한 Hammering Test를 실시하였다. 아래의 그림 5는 펌프 베이스에서 Hammering Test를 실시한 결과로서 9.38 Hz에서 peak가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 신뢰성이 다소 부족하기는 하지만 이상에서 유추할 수 있는 것은 펌프의 운전 주파수 (7.42Hz)는 설비 구조물의 고유진동수는 9.38 Hz에 근접해 있기 때문에 공진이 발생하고 있는 것으로 추측할 수 있다.

초기 설치시부터 견고하게 설치되지 못한 관계로 공진에 의한 높은 진동이 발생되었고 이로인해 콘크리트 기초가 파손 되면서 고유진동수는 점차 저하되어 공진점이 가까이 접근되고 있는 것으로 판단 할 수 있다.

2.5 결함 분석

2.5.1 기계적 결함 분석

그림 6은 펌프를 정지하면서 발생하는 진동 신호를 시간에 따라 증첩한 그래프로써 기계가 정지됨에 따라 진동이 급격히 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는

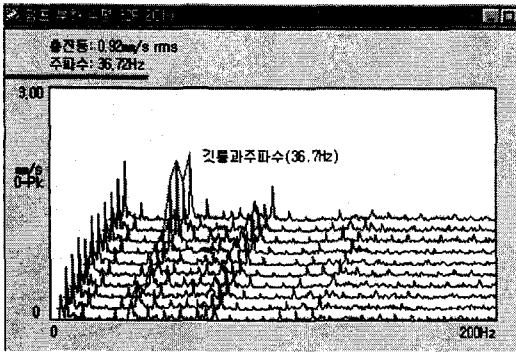


그림 8 펌프 부하 전변의 Waterfall 그래프

주파수가 조금만 바뀌어도 진동이 급격히 감소한다는 공진의 전형적인 특징을 보이고 있는 것이라 할 수 있다.

2.5.2 전기적 결함 분석

그림 7은 전기적인 결함분석의 설명을 위해 3호기 모터에서 측정된 진동 결과를 예로 들었다. 위 그림에서 가장 높게 나타나고 있는 722Hz 진동은 회전자 봉통과 주파수로서 모터의 회전자와 고정자 간의 전기적인 간섭에 의해 발생하는 전기적인 진동 신호로써 주파수는 회전자 봉의 개수와 회전주파수의 곱으로 나타난다. (RBPF = 회전자 바(bar) 개수 X rpm)

자세히 살펴보면 회전자 봉 통과 주파수(RBPF = $97 \times 7.42\text{Hz} = 722\text{Hz}$)의 측면에 120Hz의 측대역 성분을 동반하고 있음을 알 수 있다. 이는 진동성분이 변조되고 있다는 것을 나타내고 있는 것이며, 그 정도의 심각성을 나타내는 증거로 사용된다. 특히 측대역 성분인 120Hz는 본 진동의 원인이 전기적인 결함에 의해 발생된 것을 나타내고 있다.

회전자봉 통과주파수와 그 배수성분은 회전자봉의 개방 또는 헐거움을 나타내는 지표라고 할 수 있다.

2.5.3 수력학적 결함 분석

그림 8은 펌프의 상태를 시간에 따른 변화를 표현한 Waterfall 그래프 이다. 위에서 36.7Hz는 펌프의 회전차 깃통과 주파수로서 회전차의 깃수(5개)와 회전속도의 곱으로 $7.42\text{Hz} \times 5 = 36.72\text{Hz}$ 임을 나타낸다. 일반적으로 이 깃통과 주파수는 회전차와 토출구의 간격에 기인하는 것으로 운전상황에 따라 크게 변하지 않는 것이 보통이나 위 그래프에서 깃통과 주파수 성분이 불규칙적으로 크게 변화하는 요인은 유체에 의한 진동 성분으로 볼 수 있다. 특히 캐비테이션이나 볼텍스가 발생될 경우 회전차의 깃의 간격 및 각도 불량이 발생되면서 불규칙한 변화를 나타낼 수 있다.

3. 펌프의 운전안전성 제고를 위한 시방 제안

고장 발생에 따른 막대한 경제적·정신적 손실을 생각할 때 빗물펌프장의 설비는 어떠한 경우에도 고장이 발생되어서는 안 된다는 것이 전제되어야 한다. 전술한 바와 같이 이렇게 되기 위해서는 우선 좋은 설비라도 도입되도록 시방을 개선할 필요가 있으며, 주기적인 상태감시와 정밀진단을 통해 설비의 상태를 확인할 수 있는 관리 규정의 제정이 시급하다.

시방의 개선이나 규정의 제정을 위해서는 전문가 집단에 의한 많은 연구가 진행되어야 할 것이나 본 연구에서는 운전안전성 제고를 위해 반드시 포함되어야 할 몇 가지 기본적인 사항에 대해 언급 하고자 한다.

3.1 진동규격 도입

기계의 신뢰성 제고를 위해서는 시방서 내에 진동을 규제하는 항목이 도입되어야 한다. 진동의 규제는 설치 후 시운전을 통해 측정된 진동으로 하며, 단순한 총진동값에 의한 상태 판단이 아니라 주파수 분석을 통해 결함의 요인을 기계적, 전기적, 수력학적인 진동으로 구분하고 각각의 진동규제를 설정하여야 한다.

진동의 측정은 설계점, 최대 유량점 및 최대 부하점에서 실시하고 모든 베어링 하우스의 수직, 수평, 축방향에서 실시하며, 각각의 운전조건에서 각각 측정된 어떠한 진동 결과도 진동의 규제를 만족해야만 한다.

3.1.1 기계적 진동 규제

불평형 기준은 ISO의 허용불평형량 기준에 따르되 측정렬불량 및 Softfoot의 허용기준을 마련하고, 구조공진의 발생은 원초적으로 허용되어서는 안된다. 공진의 정확한 분석을 위해 회전축의 위험속도와 구조물의 고유진동수는 설계 단계에서 미리 확보하도록 한다.

3.1.2 전기적 진동 규제

위에서 밝힌 바와 같이 신규설비의 경우 봉통과 주파수와 같은 전기적인 진동은 있어서는 안된다. 일반적으로 발생하는 전기적 진동(120Hz)의 적절한 규제가 도입되어야 한다.

3.1.3 수력학적 진동 규제

수력학적인 진동은 설계불량 또는 적절한 운전조건을 맞추지 못해 발생하는 것으로 이에 의한 진동이 근본적으로 발생되지 않도록 해야 한다. 진동의 측정은 반드시 회전차가 설치된 부분에 가깝게 센서를 설치해야 하고 설계점 및 가용 운전범위에서 캐비테이션이나 볼텍스 등 수력학적 이상현상이 발생되지 않도록 한다.

3.2 관리 규정 도입

좋은 설비가 도입되는 것만큼 설비의 관리도 중요하다 할 것이다. 사람과 마찬가지로 기계의 경우도 고장이 나지 않기 위해 할 수 있는 유일한 방법은 주기적인 건강진단 밖에 없다. 이를 위해서는 각각의 설비에 적합한 진단기준이 확보되어야 하고, 설비의 운전속도 및 제원에 따른 적절한 센서의 선정과 측정 위치선정 등에 주기적인 상태분석이나 정밀진단에 관한 상세한 매뉴얼의 확보도 중요하다.

3.2.1 관리 시스템의 확보

모든 관리는 기존에 축적된 수 많은 자료에 의해 발전되고 보완될 수 있는 체계를 확립해야 한다. 이를

위해 모든 펌프의 제원과 운전 이력, 고장 및 수리에 관한 모든 정보는 Database에 축적되고 관리 되어야 한다.

3.2.2 경고설정

펌프를 수리하는 기준은 단순히 총진동값에 의하지 말아야 한다. 그 이유는 베어링 초기 손상이나 고주파의 발생은 총진동값에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 각각의 중요한 주파수를 분석하여 고장 원인에 따라 가중치를 두어 관리 되어야 하며, 진동의 크기 이외에 동일한 사양의 설비간 진동 비교, 도입시와 비교한 상대 판정 그리고 이와 같은 정적인 기준 이외에 진동의 증가 속도 등을 통한 동적인 진동기준을 확보하는 것이 중요하다.