

저주파 기계 감시: 측정 고려사항

Wilcoxon Research, Inc.

Richard M. Barrett Jr., Senior Application Engineer

번역: 인코시스(주) 배효영

산업용 기계의 저주파 감시에는 특수한 센서, 측정장비 및 기술이 필요합니다. 저주파 진동을 측정할 때 최대의 목표는 센서와 측정장치에서의 전기적 노이즈를 최소화하는 것입니다. 센서는 반드시 낮은 노이즈 특성을 가진 회로를 내장하여 깨끗한 진동 신호를 제공하여야 하고, 측정장치의 노이즈 보다 훨씬 큰 신호 출력을 제공하여야 합니다. 또한, 센서의 안정화 시간, 측정장치 설정 및 데이터 수집 시간이 고려되어야 합니다. 마지막으로, 적절한 센서의 취급 및 설치 기술은 측정된 데이터의 품질을 보장하는데 도움이 됩니다.

1. 저주파 측정 개요

저주파 진동 감시는 예지보전 프로그램의 일부분입니다. 저속 기계의 손상은 심각한 기계의 손상을 초래하여, 생산 손실과 작업자의 안전을 위협할 수 있습니다. 새로운 센서, 측정장치 및 분석 기법이 저주파 측정에 이용 가능합니다.

저주파 상태 감시에는 0.1Hz ~ 10Hz (6~600cpm) 범위의 진동 측정이 요구됩니다. 제지용 기계, 냉각탑 및 저속 교반기 등이 이러한 응용 분야입니다. 기어박스, 압축기 및 다른 고속 회전 기계에서도 낮은 주파수 범위에서 손상이 발생하는 경우도 있습니다. 많은 구조물 및 지구 물리학적 측정에도 매우 낮은 주파수 측정용 장치 및 기법이 필요합니다.

저주파 응용 기술은 일반적인 기계 감시보다 더 복잡한 특성을 가지고 있습니다. 진동 진폭과 기계의 상태에 대한 가속도, 속도 및 변위 간의 관계는 측정 기법과 데이터 분석으로 대별됩니다. 10Hz (600cpm) 이하의 움직임은 가속도로 볼 때 매우 작은 진동을 발생하며, 속도로는 중간 정도의 크기, 변위에서는 비교적 큰 진폭을 나타냅니다. (그림 1 참조) 낮은 회전수에서 가속도 측정에는 특수한 구조의 센서와 낮은 노이즈 회로가 필요합니다.

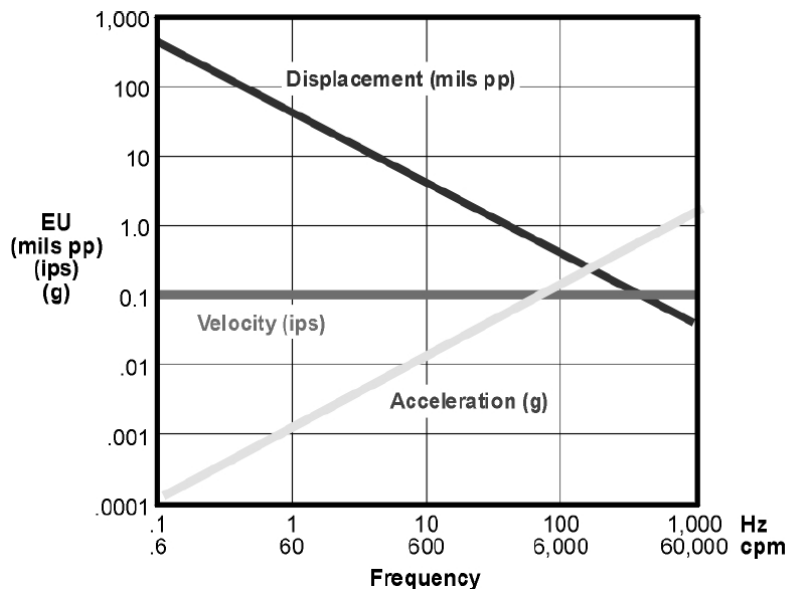


그림 1. 동일 속도에서 변위, 속도, 가속도 간의 관계

저주파는 일반적으로 속도 (in/s) 또는 변위 (mils pp)로 표현합니다. 가속도 측정값은 적분 회로를 이용하거나 소프트웨어를 사용하여 변환합니다. 진동은 속도센서나 비접촉식 변위센서를 이용하여 측정할 수 있습니다. 그러나 이런 센서들은 압전형 가속도 센서에 비해 다양성이 부족합니다.

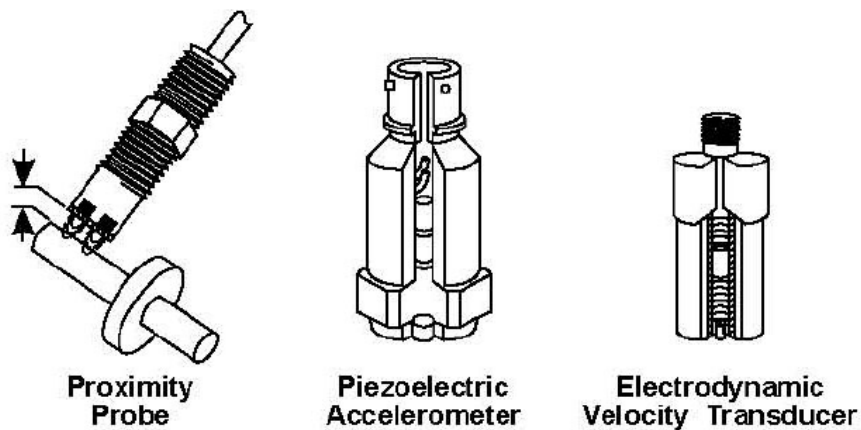


그림 2. 센서의 종류

그림 3에 펌프에서 측정된 값의 예가 있습니다. 가속도 센서의 출력이 가속도, 속도 및 변위로 표시되었습니다. 변위 데이터는 저주파에서 가장 큰 진동이 관측되었으나 10,000cpm (167Hz) 이상에서는 감도가 낮아졌습니다. 가속도로 표현된 데이터는 매우 넓은 주파수 범위의 데이터를 제공합니다.

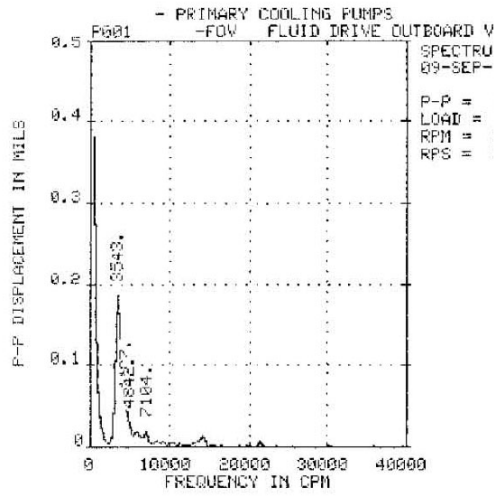
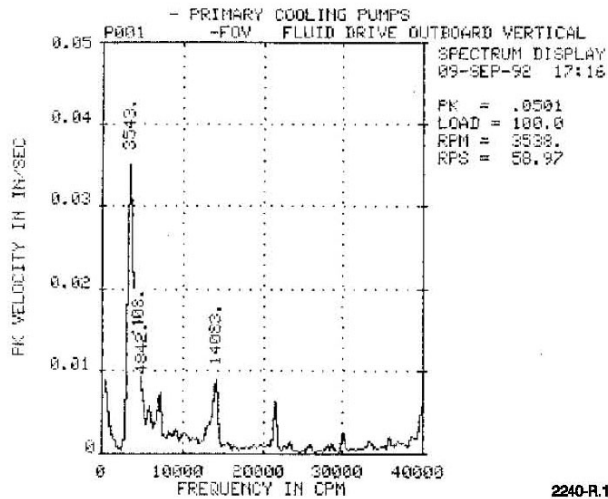
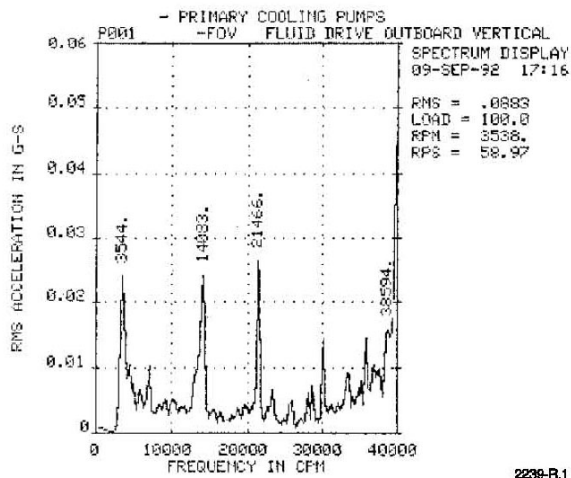


그림 3.a 가속도 측정 값을 이중 적분하여 변위로 표시



2240-R.1

그림3.b 가속도 측정치를 적분하여 속도로 표시



2239-R.1

그림3.c 가속도 측정치를 가속도로 표시

2. 저주파 측정 장치

2.1 저주파수에서의 센서들

압전 세라믹 가속도계는 대부분의 저주파 측정용으로 사용됩니다. 적절히 선정된 센서는 속도 또는 변위로 변환할 수 있는 충분한 크기의 신호를 생성합니다. 다른 종류의 센서와 비교해 볼 때, 가속도계는 주파수와 진폭에 대해 광범위한 측정 범위를 제공합니다. 내장된 회로는 케이블 포설과 관련된 문제를 제거하고 다양한 출력 및 필터 기능을 제공합니다.

비접촉식 변위 센서는 (Eddy Current) DC (0Hz)까지의 낮은 주파수에 대한 강한 변위 출력 신호를 제공합니다. 변위 센서는 비접촉 방식으로 축 표면과 설치 위치간의 상대적인 움직임을 측정합니다. 변위 센서는 충격에 대한 절대 진동은 측정할 수 없으며, 높은 주파수에서는 매우 제한적으로 사용될 수 있습니다. 또한, 센서의 설치가 매우 까다롭고 정확히 일치하는 특수 케이블 및 신호 처리장치가 필요합니다. (그림 4 참조)

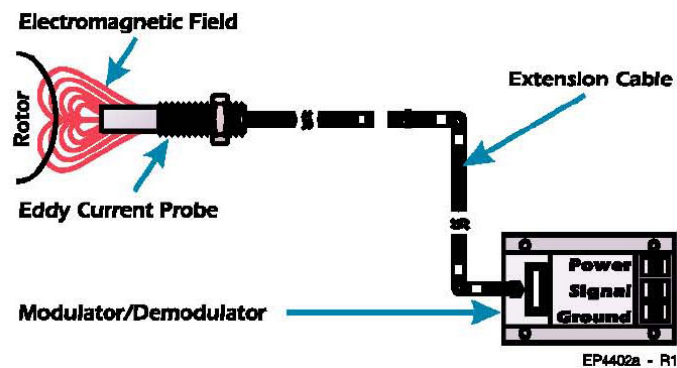


그림 4. 비접촉식 변위센서 (Eddy Current)

전자기식 속도 센서 역시 저주파수에 대해 매우 강한 신호를 생성할 수 있습니다. 그러나 측정 감도는 센서의 공진 주파수 이하에서 선형성이 상실됩니다. 일반적인 공진점은 8~14Hz (480~840cpm)으로, 출력 신호는 급격히 감소되고 감도도 감소합니다. 전자기식 센서는 설치 방향에 매우 민감한 특성을 가지고 있으며, 내부에 움직이는 기계적인 요소를 내장하고 있으므로 마멸과 피로 현상을 수반합니다.

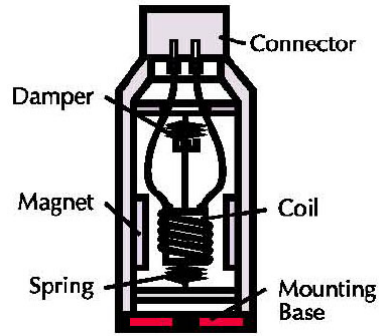


그림 5. 전자기식 속도 센서의 기본 구조

압전형 속도센서(PiezoVelocity Transducer, PVT)는 적분기가 내장된 저주파용 가속도계입니다. 압전형 속도센서는 전자기식 속도 센서와 비교해 볼 때 더 넓은 주파수 범위를 가집니다. (그림 6 참조) 그러나, 압전형 속도센서도 주파수 및 진폭상으로 극저주파용 가속도 센서만큼 낮은 주파수를 측정할 수는 없습니다. 그 이유는, 낮은 주파수의 적분에는 내장된 앰프에 더 높은 증폭 계수가 요구되기 때문입니다. PVT 센서는 통상 1.5Hz (90cpm) 이하의 주파수를 제거하도록 필터를 사용합니다.

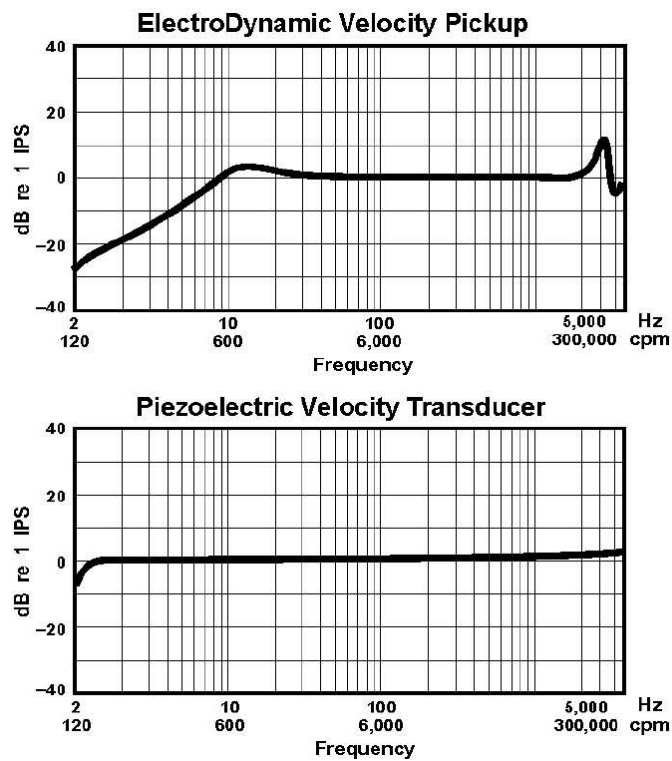


그림 6. 속도 센서의 출력 특성 비교

PVT 센서는 매우 강한 출력 신호를 측정장치로 제공합니다. 1.5 ~ 12Hz (90~720cpm)

주파수 범위에서 100mV/ips의 감도를 가진 속도센서는 500mV/g의 감도를 가진 가속도 센서보다 더 높은 전압 출력을 제공합니다. PVT 센서는 많은 저주파 측정용 환경에 그 특성이 최적화되어 있습니다.

2.2 시스템 선택 기준

저주파용 센서 및 측정 장치의 선택에는 주파수 특성 및 진동 진폭 정보가 필요합니다. 최저 주파수는 센서의 최저 대역 필터 이상이어야 하며, 측정장치는 이러한 응용에 적합하여야 합니다. 기계의 진동 경보치 및 최저 진동 측정치에 대한 요구 사항은 측정 시스템의 전기적인 노이즈 특성을 고려하여 결정합니다. (첨부 참조)

센서의 감도는 감시 장치에 적절한 전압을 제공하도록 선정되어야 합니다. 설치 환경, 케이블 포설, 전원 공급과 같은 모든 다른 시스템 특성은 아래 표1과 같이 평가되어야 합니다.

선정 기준	검토 대상
주파수 범위	기계의 회전 속도
최대 측정 범위	경보치
센서 감도	데이터 수집 장치 입력 특성
케이블, 전원 공급 등	환경 조건

표1. 저주파 측정 시스템 선정 기준

2.3 저주파용 가속도계

저주파용 가속도계는 전기적 노이즈는 최소화하고 측정장치로의 출력 전압은 최대화합니다. 가속도 감지용 소자는 큰 질량으로 구동되는 압전 세라믹 크리스탈을 내장하고 있습니다. 내장 앰프는 감지용 소자에서 생성되는 전하 신호를 조절하고 표준 전압 출력을 제공합니다. 감지용 소자에서 생성된 전하 출력과 앰프는 전기적 노이즈와 저주파 진동을 구별할 수 있도록 설계됩니다. 그림 7a, 7b 및 7c는 일반적인 저주파용 가속도계의 설계 형태입니다. 압축형 및 전단형 가속도계들이 산업용으로 많이 사용됩니다. 굽힘형은 쉽게 깨질 수 있으며, 특수한 지진 측정 시험용으로 사용됩니다.

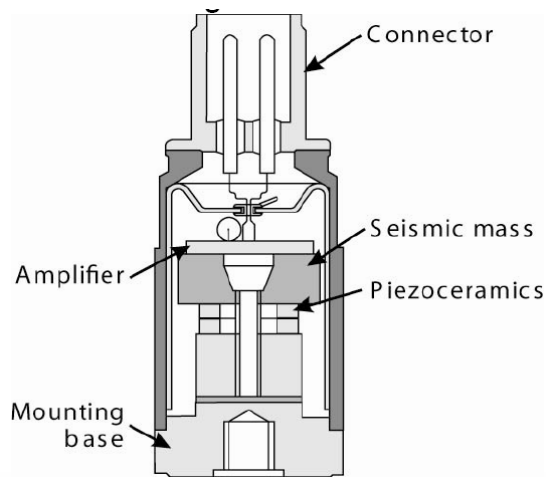


그림 7a. 압축형 저주파용 가속도계

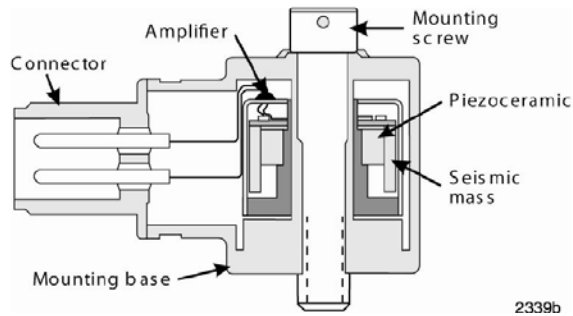


그림 7b. 전단형 저주파용 가속도계

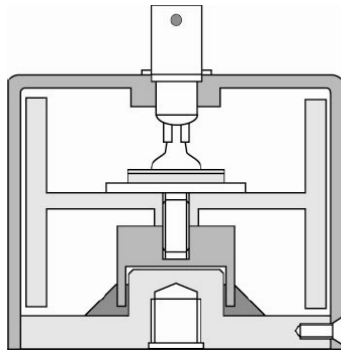


그림 7c. 굽힘형 저주파용 가속도계

압전 센서는 고주파 통과 필터를 사용하여 DC 및 DC에 인접한 신호를 제거합니다. (그림 8 참조) 필터는 센서 하우징의 열팽창에 의한 순간적인 낮은 주파수를 제거합니다. 필터의 코너 주파수는 검교정된 센서 감도(500mV/g, 100mV/ips 등)의 71% (-3dB)가 되는 지점으로 정의됩니다. 단일 극 필터의 코너 주파수 이하의 신호는 주파수가 반감될 때마다 절반으로 감소됩니다. 만약 2극 필터를 사용하였다면, 주파수가 반감될 때마다 1/4로 감소됩니다.

저주파용 가속도계는 단순히 주파수 응답만으로 선택될 수 없습니다. 일반 목적용 센서에서 사용하는 넓은 범위의 필터는 저주파 응답을 생성할 수 없습니다. 저주파를 측정하는 수많은 센서들이 낮은 회전 속도의 기계들에 적용할 수 없는 이유는 내장된 전자 회로의 노이즈 때문입니다. 이러한 특징은 많은 수정으로 만들어진 가속도계에서 특히 심각하게 나타납니다.

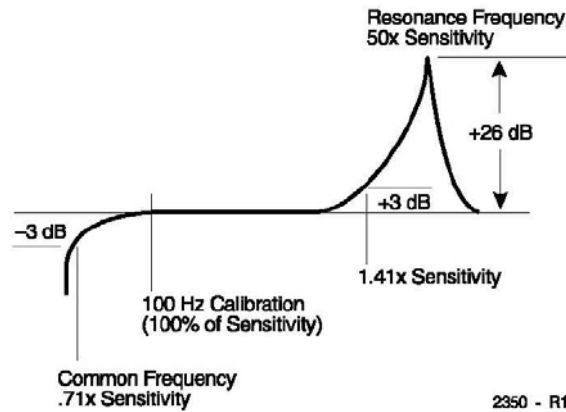


그림 8. 고주파 통과 필터가 내장되지 않은 가속도계에서의 일반적인 응답

저주파용 가속도계는 고주파 과전류에 매우 민감하게 반응하기 때문에 저주파 통과 필터를 사용하여 고주파 신호를 감쇠시킵니다. 고주파 과전류 출력은 기계적 또는 전기적 원인에 의해 생성될 수 있습니다. 저주파용 가속도계는 공진을 감쇠시키고 앰프의 손상을 방지하기 위해 반드시 과전류 보호 회로를 내장하여야 합니다. 특정한 기계에는 고주파 신호를 취득하기 위해 기계적인 필터를 사용할 수도 있습니다. 속도 센서는 기본적으로 고주파를 필터하며 과전류에 덜 민감합니다.

2.4 측정장치

감시 장치의 선택은 응답과 전자회로의 노이즈 측면에서 센서의 선택과 유사합니다. 신호 입력 설계는 측정장치의 주파수 응답에 의해 결정되며 신호 처리 고려사항에 영향을 받을 수 있습니다. 일단 측정장치가 선택되면 측정 시스템은 평가될 수 있습니다.

대부분의 압전형 가속도계는 AC 진동 신호를 전송할 수 있도록 DC 바이어스 전압을 출력합니다. 측정장치는 AC 진동신호를 측정하기 전에 반드시 DC 바이어스 전압을 제거하여야 합니다. DC 신호를 제거하기 위해 필터링(Filtering)과 차동 보상(Differential Cancellation) 기법 두 가지 입력 회로가 사용됩니다.

필터 입력 회로를 사용할 때, 분석자는 반드시 코너 주파수와 필터 극수를 결정하여야 합니다. 그 후, 측정장치 및 센서 필터는 시스템으로 고려될 수 있습니다. 예를 들어, 센

서와 측정장치가 동일한 코너 주파수를 사용하였다면, 코너 주파수에서의 10mils pp의 진동신호는 단지 5mils pp (71%의 71% = 50%)가 측정됩니다. 어떤 응용 분야에서는 경보치가 진폭 오차를 보상하도록 설정될 수도 있습니다.

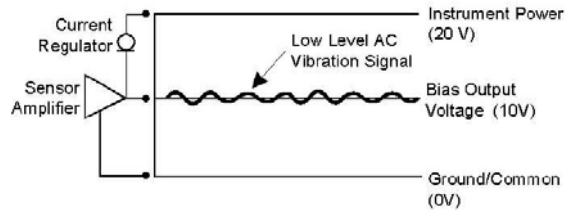


그림 9. DC 바이어스 전압 제거

많은 측정장치는 직접 커플된 차동 입력 방식을 사용합니다. 차동 입력은 센서의 바이어서 출력 전압과 신호로부터 이를 제거한 신호를 감지합니다. 이러한 기법은 0Hz까지 측정 가능하도록 하며, 측정장치의 저주파 신호 감쇠 효과를 제거합니다. 그러나 차동 입력은 반드시 가속도계의 신호를 가속도로 측정하여야 합니다. 데이터 수집 장치상의 아날로그 적분기는 AC 커플링 (필터) 신호를 받아 들이고 매우 낮은 주파수 감쇠가 가능하도록 합니다. 차동 입력을 사용한 신호의 적분은 디지털 방식 또는 분석 시 소프트웨어적인 방식으로 가능합니다.

아날로그 방식의 적분기를 사용하는 장점은 고주파 신호에 대한 기본적인 감쇠 기능입니다. 이러한 기능은 측정장치에서 측정 대역으로 사용되는 고주파 신호의 높은 진폭을 방지함으로써 저주파수에 대한 신호 대비 노이즈 비 (Signal to Noise Ratio, S-N ratio)를 향상시킵니다. 저주파 응답과 측정장치의 노이즈 사이의 단점은 사용할 적분 방법을 결정합니다.

3. 시스템 노이즈 고려사항

3.1 신호 대비 노이즈 비 (Signal to Noise Ratio)

신호 잡음은 저주파 진동 측정에서 가장 먼저 고려되어야 할 사항입니다. 노이즈는 주파수 데이터를 모호하게 하고 진폭을 왜곡하며 측정치를 사용할 수 없도록 할 수 있습니다. 적분이 수행되는 경우, 저주파 노이즈는 “Ski Slope” 반응으로 알려진 매우 큰 값으로 증폭됩니다.

저주파 분석의 첫 번째 법칙은 “진동 측정의 신호 대비 노이즈 비를 최대화”하는 것입니다.

다. 진동 신호는 바다 한가운데 배와 같고 해수면은 측정치의 노이즈 수준과 동일합니다. 수면으로부터 더 높이 떠있는 배와 같이 노이즈 수준으로부터 더 높은 신호가 이용 가능하며 쉽게 수평선에서 관측 가능합니다. 물에 잠긴 배는 관측이 불가능한 것과 같은 이치입니다.

두 번째 법칙은 “처음 취득되지 않은 신호는 후처리 과정을 통해 재 생성하는 것은 불가”하다는 것입니다. 바다 위의 배가 잠수된 후 찍은 사진에서 아무리 사진의 품질을 향상시켜도 배를 발견할 수 없는 것과 같은 이치입니다.

노이즈는 세가지 요인의 조합으로 나타나는데, 센서의 회로 노이즈, 측정장치의 전기 노이즈 및 환경적인 노이즈가 그것입니다. (그림 9 참조) 센서의 전자회로에 의한 노이즈는 압전 소자의 전하 출력과 앰프의 설계와 직접적인 관계가 있습니다. 측정장치의 노이즈는 전자회로 설계, 적분 방법 및 센서로부터의 전압 입력으로 결정됩니다. 환경적인 노이즈는 자연적으로 발생하는 전기적 또는 기계적인 다양한 외부 요인에 기인합니다.

3.2 센서 노이즈

모든 앰프들은 저항, 다이오드 및 트랜지스터와 같은 다양한 전기적인 노이즈 요인을 내포하고 있습니다. 저항들은 존슨 (Johnson, White) 노이즈를 생성합니다. 이 것은 불충실한 스테레오 시스템에서 잘 알려진 “톡톡 하는 소리 (Crackle)”로 잘 알려져 있습니다. 트랜지스터 및 다른 소자들은 쇼트키 (Schottky, 1/f) 노이즈를 생성합니다. 쇼트키 노이즈는 주파수가 감소하면 증가하며, 그림 10에서 표시한 것과 같이 최저 주파수 측정 범위를 결정합니다. 가속도계에서 저주파수 노이즈는 회로의 증폭 계수에 비례하며, 압전 소자의 전하 감도와 반비례합니다.

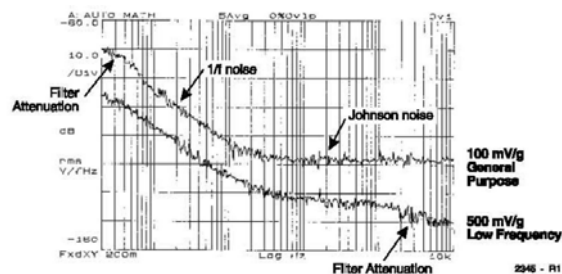


그림 10. 100mV/g, 500mV/g 센서에 대한 노이즈 도표

전압 감도를 증가 시키기 위해 증폭 계수의 증가는 측정장치 노이즈에 대한 영향을 감소 시킵니다. 그러나 센서에서의 신호 대비 노이즈 비는 변하지 않습니다. 위의 예로 돌아가서, 배가 운하에 있는 경우 수위를 올려서 제방에서 보기 쉽게 할 수 있으나 수면 위로

나타나 있는 배의 형태는 변화가 없는 것과 같은 이치입니다.

측정 소자의 전하 출력 (앰프 이전의 출력)을 높이면 증폭 계수를 감소시킬 수 있으며, 신호 대비 노이즈 비를 증가시킬 수 있습니다. 전하 감도 증가는 질량의 추가 또는 전하 출력 재료의 추가를 통해서만 가능합니다. 저주파수 측정에 사용되는 압전 세라믹은 측정 소자 조립체에서 전하 출력이 최대가 될 수 있도록 설계되어야 합니다.

최신 압전 세라믹 재료는 가속도계용으로 특별히 설계되어 있습니다. 표2에 나타난 것과 같이 Lead Zirconate Titanate (PZT)의 전하 출력은 수정보다 150배 높습니다. 이러한 특성은 강건한 구조와 광범위한 주파수 범위가 필요한 산업용 환경에서 압전 세라믹 센서가 강한 저주파 신호를 제공하도록 합니다. 저주파용 수정 가속도계는 매우 큰 질량이 필요하거나 힘 모드 설계가 필요합니다. 큰 질량을 사용하는 경우 매우 낮은 공진점이 나타나고, 힘 모드 설계는 손상되기 쉬운 특징을 가집니다.

압전 재료	전하출력 (pC/N)
Lead Zirconate Titanate (PZT)	350
Lithium Niobate	21
Polyvinylidene Flouride (PVDF)	22
Quartz	2.2

표2. 압전 감도 비교표

3.3 측정장치 노이즈

측정장치가 시스템 전체 노이즈에 미치는 영향은 전자회로 설계, 측정 범위 및 설정에 따라 변화합니다. 측정장치의 소자들도 존슨과 쇼트키 노이즈를 생성합니다. 측정범위에서 고려하여야 하는 사항은 센서 출력과 측정장치 신호처리 요구 조건을 맞추는 것입니다. 설정 요소는 적분, 해상도 및 평균화 등이 고려되어야 합니다.

측정장치내의 아날로그 적분기는 일반적으로 저주파 노이즈를 증가시키고 신호 대비 노이즈 비를 낮추는 경향이 있습니다. 적분기 회로는 저주파 신호를 증폭하고 고주파 신호를 감쇠 시키는 방법으로 가속도 신호를 속도 신호로 변환합니다. 저주파수 증폭 계수 역시 증폭되고 가속도계와 측정장치 모두에서 저주파 노이즈가 두드러지게 됩니다. 가속도 신호에서 변위로 이중 적분에는 더 큰 증폭과 더 많은 노이즈가 발생합니다. 저주파수 노이즈의 적분은 “Ski Slope” 현상의 가장 큰 원인이 됩니다.

압전형 속도센서 (적분기 내장형 가속도계) 및 고풍력 (500mV/g) 가속도계는 측정장치

입력으로 높은 전압을 제공함으로써 현격한 저주파 반응을 향상시킬 수 있습니다. 높은 입력 전압은 측정장치 내부의 노이즈 영향을 최소화함으로써 신호 대비 노이즈 비를 향상시킬 수 있습니다. 압전형 속도센서는 고주파 신호가 측정장치로 입력되기 전에 감쇠시킴으로써 측정 범위에 대한 노이즈 저감 효과도 부가적으로 제공합니다. 표3은 일정한 0.3ips 진동에 대한 다양한 종류의 센서에서 전압 출력을 도표화한 것입니다. 그림 11은 그림으로 표시한 센서 비교입니다.

	1.5Hz (90 cpm)	10Hz (600 cpm)	100Hz (6,000 cpm)	10,000Hz (600,000 cpm)
Displacement (mils)	32	5	0.5	0.5
Velocity (ips)	0.3	0.3	0.3	0.3
Acceleration (g)	0.007	0.05	0.5	0.5
100mV/g Accelerometer (V)	0.0007	0.005	0.05	0.5
500mV/g Accelerometer (V)	0.0035	0.025	.025	2.5
100mV/ips PiezoVelocity (V)	0.03	0.03	0.03	0.03

표 3. 변위, 속도, 가속도에 대한 진동 센서별 출력 전압 비교

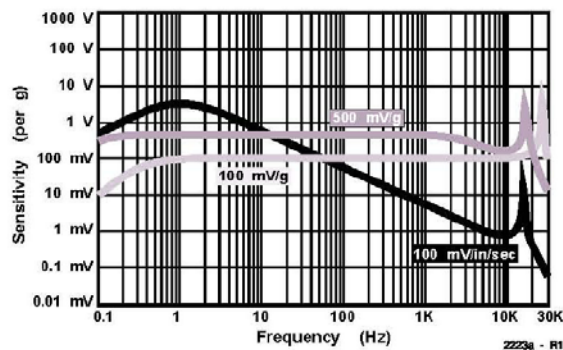


그림 11. 표준형, 저주파형, 압전형 속도 센서에 대한 주파수 응답

고정밀 측정장치의 해상도는 주파수 증폭 노이즈를 저감시킴으로써 신호 충실도를 향상시킵니다. 전자 증폭 회로의 노이즈는 일반적으로 불규칙하게 발생하나, 센서 주파수 노이즈는 주어진 주파수 범위에 대한 노이즈 평균 에너지를 측정함으로써 결정됩니다. 주파수 증폭 노이즈는 전압에 대한 측정 주파수 범위의 제곱근을 제공한 것을 단위로 사용합니다. 대부분의 특성 시험에서 주파수 범위는 1Hz를 사용합니다. 만약 해상도가 증가하

고 측정 주파수 범위가 1Hz 이하가 되면 노이즈는 감소될 것입니다.

예를 들어, 주어진 센서의 주파수 노이즈가 2Hz에서 2.0 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이며, 측정장치의 해상도가 0~10Hz (0~600cpm)에 대해 1600라인으로 설정되었다면, 측정 최소 간격은 다음과 같습니다.

$$(10\text{Hz}-0\text{Hz})/1600\text{line} = 0.00625\text{Hz} (0.375\text{cpm})$$

센서에 대한 주파수 노이즈 향상은 다음과 같습니다.

$$(2.0\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}})(0.00625\text{Hz})^{1/2}=0.158 \mu\text{g}$$

이 방법의 단점은 데이터 수집 시간을 많이 요구한다는 것입니다. 표4는 이에 대한 예제입니다.

해상도	400	800	1600	3200
저주파 센서의 회로 주파수 노이즈 (1 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	0.16 μg	0.08 μg	0.04 μg	0.02 μg
데이터 수집 시간	40초	80초	160초	320초
4회 평균치 데이터 수집 시간	160초	320초	640초	1280초
8회 평균치 데이터 수집 시간	320초	640초	1280초	2560초

표 4. 0-10Hz 주파수 범위에서의 해상도 효과

평균 회수의 증가는 불규칙한 노이즈 신호 효과를 감소시킴으로써 노이즈를 감소시킵니다. 시간이 경과할수록 불규칙 신호는 감소되고 규칙적인 신호는 크게 나타납니다. 해상도를 높이는 것과 같이, 평균 회수를 더할수록 데이터 수집 시간은 길어 집니다. 동기화 평균 기법은 기준 주파수와 관련이 없는 비조화 신호를 제거함으로써 신호 대비 노이즈 비를 향상시킵니다.

3.4 환경적인 노이즈

환경적인 노이즈는 측정 계통과 직접적으로 또는 간접적으로 영향을 미치는 모든 종류의 외적 신호에 기인합니다. 노이즈 원은 시험 대상 기계, 근처의 기계 또는 공장의 구조물과 환경 조건으로부터 발생하는 전기적 또는 기계적 신호에 의해 발생합니다. 극 저주파 진동 측정은 일반적인 측정보다 환경적인 노이즈에 민감합니다.

3.4.1 간접적 원인: 고주파 진동 노이즈

간접적인 노이즈는 고주파와 측정 시스템이 상호 작용하여 발생시키는 저주파 간섭 현상이 원인입니다. 펌프 캐비테이션, 제지용 건조기 증기 누출, 압축기의 공기 누출 등은 간

접적인 기계 노이즈의 좋은 예입니다. 이러한 요인들은 높은 진폭의 고주파 진동(HFVN)을 발생시키며, 저주파수 왜곡 현상을 발생시킬 수 있을 정도로 센서에 내장된 앰프에 과부하를 발생시킬 수 있습니다. 이런 종류의 간섭은 “Washover” 왜곡으로 알려져 있으며 상호 간섭에 의한 왜곡 형태입니다. 통상 이 신호는 “Ski Slope”로 과장되어 나타납니다.

펌프 캐비테이션은 물속에 생성된 공기방울이 압착되면서 발생하는 HFVN을 발생시킵니다. 그림 12에서 보여주는 스펙트럼은 500mV/g 출력의 저주파용 가속도계를 사용하여 측정된 일반적인 펌프의 데이터입니다. 첫 번째 플롯은 정상적인 펌프로부터 측정된 것이며, 두 번째 플롯은 펌프 캐비테이션에 의해 발생된 Washover 왜곡이 있는 Ski Slope를 보여줍니다.

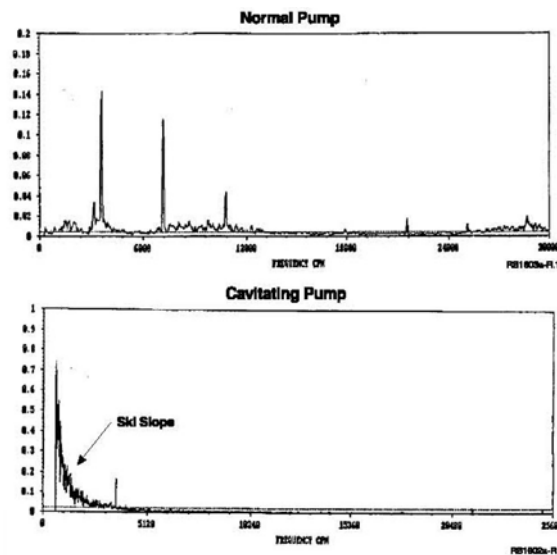


그림 12. 캐비테이션이 발생하는 펌프에서의 스펙트럼 왜곡

기체의 누출은 HFVN을 발생하는 다른 형태의 요인입니다. 제지용 기계에는 증기로 가열되는 건조용 캔과 고압의 싨이 설치되어 있습니다. 싨에서 누출이 진행되는 경우, 증기 출구에서는 매우 높은 진폭의 노이즈가 발생합니다. 캐비테이션과 유사하게 “Hiss”라고 명명되는 현상은 저주파 왜곡을 생성시킬 수 있는 가속도계 앰프에 과부하 현상을 유발합니다. 여기서, 이러한 현상이 실제 기계에서 발생하고 있다면 반드시 수리 작업이 필요합니다.

저주파 가속도계는 일반적으로 일반용 가속도계보다 HFVN과 Washover 왜곡에 더 민감합니다. 이러한 현상은 센서 자체의 낮은 공진 주파수와 높은 감도에 기인합니다. 압전형 속도센서는 HFVN을 감쇠시킴으로써 Washover 왜곡 현상을 제거합니다.

3.4.2 간접적인 요인: 전기적인 노이즈

전자기 에너지의 방사, 정전기의 방전과 같은 간접 전기 현상은 측정 시스템에 직접적인 노이즈를 유발합니다. 무선 장치, 점화용 케이블 또는 고전압 코로나 방전이 있는 기계 근처에 설치된 센서 또는 근처의 센서 결선용 케이블은 저주파 간섭 현상을 고려하여야 합니다. 적절한 보호가 없는 경우 센서의 앰프는 고주파 신호를 정류하여 저주파 왜곡 현상을 발생시킵니다. 이러한 경우 센서 앰프가 AM 라디오 수신기와 같이 동작하지 않도록 이러한 현상을 방지할 수 있는 과부하 제거 회로는 매우 중요합니다. 이러한 현상은 자동차에서 AM 라디오를 청취할 때, 엔진 회전수가 증가할 때 잡음이 증가하는 현상과 같습니다.

3.4.3 직접적인 노이즈 요인

직접적인 환경 요인은 측정 지점에서의 기계적인 저주파에 의해 발생합니다. 주원인은 순간적인 센서의 열팽창과 저주파 진동원과의 간섭 현상입니다.

순간적인 열팽창은 센서 하우징이 낮은 주파수로 팽창하는 것이 원인입니다. 잦은 초진기 현상의 발생으로 기계적인 변형 신호가 압전 센서 소자로 전달되는 것입니다. 순간적인 열팽창에 의한 잘못된 신호의 민감도는 센서의 변형 감도와 필터 코너 주파수와 직접적인 관계가 있습니다. 저주파 측정용 센서는 순간적인 열 변형을 방지하기 위해 낮은 변형 감도를 가지도록 설계하여야 합니다.

기계와 장치 주변에서의 울림에 의한 직접적인 진동 노이즈는 많은 측정 환경에서 저주파 측정을 제한할 수 있습니다. 저주파 에너지는 대부분의 구조물을 통해 쉽게 전파될 수 있습니다. 극 저주파에서, 전달 전송 노이즈는 측정 간섭 현상을 야기합니다. 실험실에서 매우 양호한 구조물 격리 장치를 사용하는 경우에도 교통량이 많은 지역에서는 불충분할 수 있습니다. 어떤 종류의 매우 낮은 주파수 측정은 한밤중에 수행되어야 하는 경우도 있습니다.

그림 13에 나타난 스펙트럼은 저주파 측정에서 환경적인 노이즈 영향을 나타냅니다. 500mV/g 가속도계와 차동 입력 데이터 수집장치를 사용하여 비누 공장의 교반기 감속기에서 측정된 진동 데이터입니다. 감속기 진동은 실험실에서 저주파 가진기로 모의 실험되었습니다. 축 진동 출력은 19cpm (0.32Hz)에서 2.4mils로 측정되었습니다. 변위값으로의 적분은 측정 후 소프트웨어를 이용하여 수행되었습니다. 실험실과 공장에서 수집한 스펙트럼을 비교해 보면 공장의 환경에 의한 노이즈 증가가 명확히 나타납니다. 이 적용에서 측정장비 및 센서의 시스템 노이즈는 측정 요소가 아닙니다.

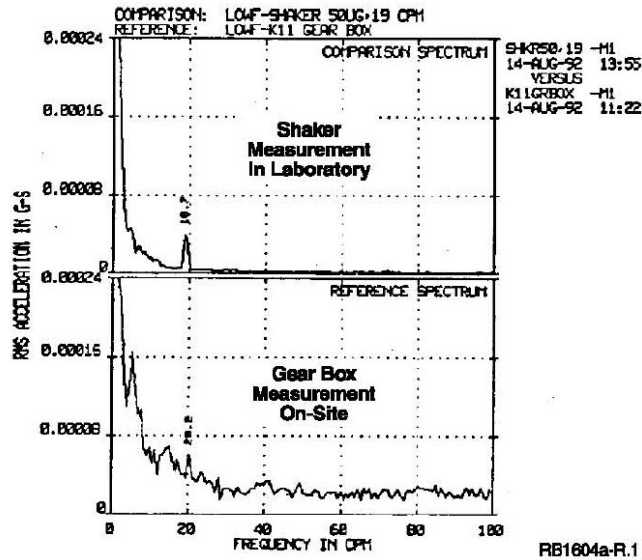


그림 13. 실험실과 공장에서 측정한 스펙트럼의 비교

4. 실질적인 측정에서의 고려사항

4.1 측정 시간에 대한 고려사항

저주파 측정은 본질적으로 매우 천천히 진행됩니다. 1회의 평균치 측정 시간은 해상도 나누기 측정 범위와 같습니다. 측정 해상도가 1600라인이고 0~10Hz (0~600cpm)의 주파수 범위를 가진다면 데이터를 취득하는데 소요되는 시간은 160초입니다. 이 값에 평균화 횟수를 곱하여 총 데이터 수집 시간을 산출합니다. (표3 참조) 중첩기법은 데이터 수집 시간을 절약할 수 있는 매우 좋은 기법입니다. 50% 중첩은 데이터의 품질은 유지하면서 데이터 측정 시간을 절반으로 감소시킬 수 있습니다.

6~8회 이상의 평균치를 취한 이후에는 신호의 품질 향상은 무의미합니다. 그러나, 실제적인 한계치는 분석자의 인내심에 있습니다. 상기에서 측정한 교반기 예에서 600cpm (10Hz) 범위에 대해 6회 평균과 1600라인 해상도를 사용하였으며 50% 중첩 기법을 적용하였을 때 데이터 수집에 11분이 소요되었습니다.

저주파 신호와 노이즈는 진폭이 변화할 수 있으며, 측정 시간을 자동으로 증가 시킵니다. 측정장치에서 실시간 데이터를 표시할 수 있고 측정 시간을 선택할 수 있다면 수동으로 설정하기 바랍니다. 수동 데이터 측정 시간 설정은 데이터 수집 시간을 감소시킬 수 있으며, 아동기(Sub-synchronous) 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있습니다.

4.2 회전수 추종

저주파 데이터 측정에서 회전수 추종 기술이 필요할 수 있습니다. 많은 저속 기계들은 작은 회전 관성과 시간에 대해 회전속도가 변화합니다. 변화는 저주파 데이터를 변화시키고 주파수 해상도를 심각하게 훼손시킬 수 있습니다. 해상도 증가를 통해 주파수 노이즈 향상은 회전수 변화에 의한 주파수 왜곡이 분해능 보다 넓을 때 효과가 없어질 것입니다.

회전 속도에 의한 데이터 수집과 회전수에 동기화된 주파수 변환 기법은 매우 강력한 도구입니다. 회전수 추종은 측정장치가 회전수 변화를 추적할 수 있도록 하며, 회전수의 조화파를 측정합니다. Waterfall 플롯을 사용하면, 비동기 주파수와 비조화파 신호를 명확히 구별할 수 있습니다.

4.3 엔벨로핑

엔벨로핑 기술은 베어링 충격으로 인한 고주파 진동 노이즈에서 베어링 손상 관련 주파수 정보를 추출하는데 효과적입니다. 제지 기계의 롤과 펠트 손상으로 인한 반복을 정보도 감지할 수 있습니다. 일반적인 엔벨로핑 기술은 가속도 및 속도 엔벨로핑, 진폭 복조, 스파이크 에너지, 스펙트럼 및 스펙트럼 방사 에너지 (Spectrum and Spectral Emitted Energy, SEE®) 등의 정보를 제공합니다.

각 기술들은 고주파 측정범위에 존재하는 성분을 격리하기 위해 엔벨로핑 필터를 사용합니다. 기계 조립체 내에서 금속과 금속간의 접촉에 의한 HFVN은 저주파 손상 신호를 전송하는 주파수 역할을 합니다. 엔벨로핑 된 HFVN은 손상에 대한 성분을 향상시키기 위해 정류되고 저주파 정보만 남도록 필터 됩니다.

4.4 측정장비의 시작과 안정화 시간

측정장비에 전원을 공급하고 안정화 되는 시간은 많은 저주파 측정에서 하나의 요소가 됩니다. 이 두 가지 경우에서 바이어스 출력 전압의 변경은 매우 큰 저주파 신호로 해석됩니다. 변화하는 신호는 자동 범위를 연장시키고, 첫 번째 몇몇 데이터를 손상시켜 심각한 “Ski Slope” 스펙트럼을 생성시킬 수 있습니다.

전원 공급은 바이어스 전압이 인가되고 최종 안정적인 위치까지 도달하는 시간입니다. 저주파용 가속도계의 전원 공급 시간은 설계에 따라 다르지만 1~8초 정도가 소요됩니다. 다중 송신 방식의 전원 시스템은 스펙트럼 손상을 방지하기 위해 데이터 수집 전에 시간

지연을 활용합니다. 연속적인 전원공급 시스템에서는 이러한 요소를 고려할 필요가 없습니다.

안정화 시간은 휴대형 데이터 수집장치를 이용하는 경우 더 큰 문제를 발생할 수 있습니다. 안정화 시간은 앰프의 바이어스 전압이 충격에 의한 과부하로부터 복원되는데 소요되는 시간입니다. 저주파 가속도계는 2초~5분까지 복원시간이 필요합니다. 자석식 고정방법을 사용하는 저주파 센서에서 이 문제가 가장 심각하게 발생합니다. 과부하 보호 회로를 내장한 센서는 그렇지 않은 센서에 비해 복원 시간이 훨씬 짧습니다. 저주파 센서의 높은 감도 때문에 보호되지 않은 앰프는 충격에 의한 과부하로 영구적인 손상을 입을 위험성이 있습니다.

4.5 고정 방법

저주파 진동 측정에는 나사를 이용한 방식이 권고됩니다. 자석이나 이동식 팁은 저주파로 센서가 움직일 수 있으며 측정을 방해합니다. 손으로 잡고 데이터를 취득하는 경우 측정자의 손 또는 케이블의 흔들림에 의해 측정이 방해될 수 있습니다. 나사를 이용하여 센서를 구조물에 영구 설치하는 것은 기계의 표면에서 전달되는 진동만 측정하는 것을 보장합니다. 손으로 잡고 있는 방식의 데이터 측정은 낮은 고정 공진점을 나타내고 FHVN 왜곡에 더 민감해 질 수 있습니다.

5. 저주파 측정의 응용

5.1 베어링 감시

구름요소 베어링은 제기용 기계의 롤러, 교반기 및 석재 분쇄기와 같은 매우 낮은 회전수의 기계에 사용됩니다. 어떤 종류의 기계들의 회전속도는 12rpm (0.2Hz) 정도로 낮은 경우도 있습니다.

일반적으로 손상 주파수 성분들은 회전수 보다 높은 주파수이며, 대부분의 시스템이 측정할 수 있는 범위 내에 있습니다. 그러나 1x, 2x, 3x 회전수 정보는 불균형, 오정렬 및 기계적인 이완 등을 진단하는데 중요한 정보입니다. 측정장비는 저속에서 회전수 추종에 의해 데이터 수집을 할 수 있어야 하며, 동기화 평균 기능이 있어야 합니다.

슬리브 베어링이 매우 저속의 기계에 적용되는 경우도 있습니다. 대형 압단기의 크랭크 베어링은 11rpm (0.18Hz) 정도로 낮게 운전됩니다. 베어링의 마멸, 간극 증가는 이완의

원인이 되며 2x 크랭크 회전수가 발생할 수 있습니다. 유체 유동 불안정에 의한 진동은 0.42~0.48x 회전수에서 발생합니다.

5.2 기어 아조화파 (Sub-harmonics)

기어 감시는 일반적으로 고주파 측정 응용 분야로 분류됩니다. 그러나, 최근의 기어 조합 주파수보다 낮은 주파수 정보의 연구를 통해 기어 조합 주파수의 아조화파가 기어 치차 손상 및 마멸과 긴밀한 관계가 있음이 밝혀졌습니다. 저주파의 기어 조합 아조화파는 구름요소 베어링의 손상 주파수와 같이, 자연적인 진동이 아닙니다. 이러한 주파수 성분들은 표면에 결함이 있거나 손상이 진전된 경우에만 나타납니다.

기어 조합 아조화파 진동은 기어와 피니언 치차의 각 접촉에 문제가 있는 불규칙 치차 문제와 관계 있습니다. 불규칙 치차 주파수 (f_{HT})는 다음 공식에 의해 구할 수 있습니다.

$$f_{HT} = (f_{GM})(N_A)/(T_{GEAR})(T_{PINION})$$

여기서

$$f_{GM} = \text{기어 조합 주파수 (피니언 치차수} \times \text{피니언 회전주파수) 또는} \\ \text{(기어 치차수} \times \text{기어 회전수)}$$

$$N_A = \text{Unique Assembly Phases}$$

$$T_{GEAR} = \text{기어 치차수}$$

$$T_{PINION} = \text{피니언 치차수}$$

Unique Assembly Phases (N_A)는 각 기어 조합에서 치차의 수에 대한 최소 공배수입니다. 예를 들어, 피니언이 18개의 치차를 가지고 있으면, 3x3x2의 소수를 가지며, 기어의 치차가 30개라면 5x3x2의 소수를 가집니다. 여기서 공통 숫자는 2, 3이 됩니다. 이들의 곱이 최소 공배수이므로 $N_A=6$ 이 됩니다. 기어의 회전수가 900rpm (15Hz)이면, 기어 조합 주파수는 27,000cpm (450Hz)가 됩니다.

불규칙 치차 주파수는 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$(15\text{Hz})(6)/(30(18)) = 0.83\text{Hz} (50\text{cpm})$$

실제 불규칙 치차 기어에 대한 불규칙 치차 주파수 ($N_A = 1$)는, 피니언 회전수 나주가 기어 치차의 수입니다. (기어 회전수 / T_{PINION})

5.3 냉각탑

냉각탑은 발전소와 공정산업에 사용됩니다. 구조는 일반적으로 모터로 구동되는 축이 감속기에 연결되고 감속기가 송풍기를 구동합니다. 송풍기는 대형 벤츄리 탑의 상부에 위

치하며, 냉각수가 통과하면서 냉각됩니다. (그림 14 참조) 심각한 냉각탑의 손상은 손상된 기어 및 송풍기 날개에 의해 발생되며, 생산 손실과 높은 정비 비용을 초래합니다.

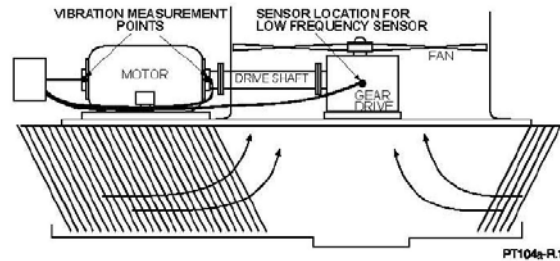


그림 14. 냉각탑의 주요 센서 설치 위치

전통적인 냉각탑의 감시는 진동 스위치 또는 주기적인 가속도계를 이용한 모터의 진동 측정이었습니다. 진동 스위치는 손상된 기계를 정지시키는데 있어 매우 불안정한 성능을 나타냅니다. 주기적인 측정은 모터에서의 베어링 및 커플링 상태를 분석하는데 적절하지만 기어박스과 송풍기에 대해서는 제한된 정보를 제공합니다. 능동적인 냉각탑의 감시에는 기어박스에 영구적으로 저주파 센서를 설치하는 것이 필요합니다.

냉각탑의 영구적인 센서 설치에는 3가지 고려사항이 있습니다. 물에 항상 접촉하며, 부식성 환경, 매우 낮은 회전 속도 및 다양한 지지 구조물 및 강성입니다. 송풍기의 회전수는 통상 90~900rpm (1.5~15Hz)에서 운전되며, 가장 중요한 손상 주파수는 1x (불균형), 2x (이완)입니다.

송풍기 날개의 균열이 진행되는 경우 블레이드 통과 주파수가 관측될 것입니다. (통상 송풍기 회전수 x 날개수)

송풍기에서 권고되는 진동 경보치는 9.5mils pp입니다. 주어진 송풍기의 회전수가 150rpm (2.5Hz)이며, 1x 경보치는 작은 속도값을 생성할 것입니다. (0.075ips) 가속도값은 더욱 작은 값을 지시합니다. (0.003g) 매우 낮은 노이즈 특성을 가진 500mV/g 압전 세라믹 가속도 또는 저주파용 압전형 속도센서(PVT)가 대부분의 냉각탑에 설치하도록 권고됩니다.

아래의 플롯은 저주파 측정에서 센서와 측정장비 노이즈에 대한 효과를 나타냅니다. 스펙트럼은 제철소의 냉각탑에 설치된 다양한 센서로부터 취득된 것입니다. 송풍기의 회전수는 118.69rpm (1.98Hz)였으며, 1x 진폭은 0.02ips 또는 0.00065g 었습니다. 그림 15a의 스펙트럼은 25mV/ips 저주파용 PVT를 사용하여 냉각탑에서 측정된 것입니다.

다음과 같은 요소에 의해 Ski Slope 현상이 관측되지 않았습니다.

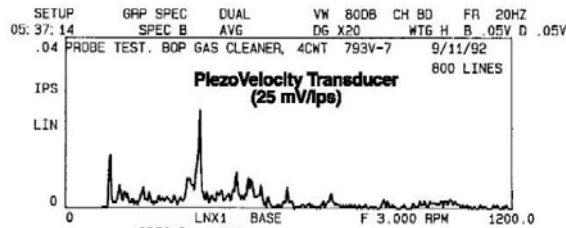
- 1) PVT 센서의 낮은 노이즈 특성 회로 ($275 \mu\text{ips}/\sqrt{\text{Hz}}$, $S/N = 70$)
- 2) 측정장치로의 높은 전압 출력 ($0.02 \text{ ips} \times 25\text{mV}/\text{ips} = 0.5\text{V}$)
- 3) 센서 내의 고주파 필터 (-3dB 코너 주파수 = 0.7Hz , 42 cpm)

그림 15b의 스펙트럼은 $500\text{mV}/\text{g}$ 출력의 저주파용 압전 세라믹 가속도계를 이용하여 측정된 데이터입니다. 작은 크기의 Ski Slope 현상이 다음과 같은 요인에 의해 발생하였습니다.

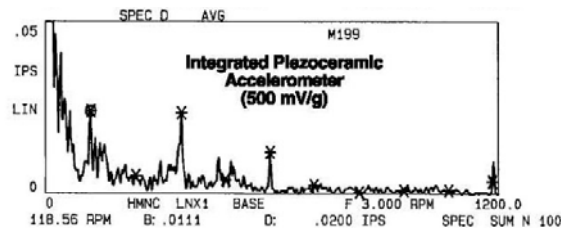
- 1) 가속도계 내의 낮은 노이즈 회로 ($2 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, $S/N = 325$)
- 2) 측정장치로의 중간 정도 전압 출력 ($650 \mu\text{g} \times 500\text{mV}/\text{g} = 325 \mu\text{V}$)

그림 15c의 스펙트럼은 $500\text{mV}/\text{g}$ 출력의 수정 가속도계를 이용하여 측정된 데이터입니다. 매우 큰 Ski Slope가 센서의 앰프 노이즈에 의해 발생되었습니다.

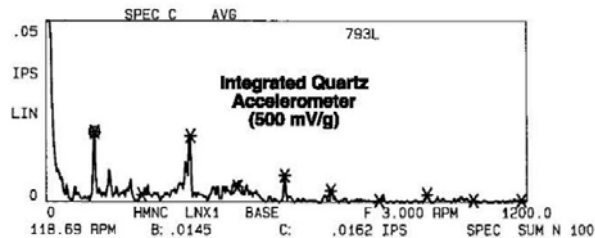
- 1) 수정 센서의 높은 전자회로 노이즈 (정확한 값은 미상)
- 2) 그림 15b와 같은 전압 출력이 측정 장치로 입력



15a. 압전형 속도 센서를 이용하여 측정된 냉각탑 데이터



15b. 고풍력 저주파용 가속도계를 이용하여 측정된 냉각탑 데이터



15c. 수정 가속도계를 이용하여 측정된 냉각탑 데이터

6. 결론

저주파 진동에 대한 상태 감시에서 진동센서 및 측정장치의 선택과 사용에는 상당한 주의가 필요합니다. 저속 회전 기계에서의 낮은 가속도 진폭은 일반적인 측정장치와 기법의 한계를 벗어납니다. 측정값에 대한 신호 대비 노이즈 비를 향상하는데 데이터의 수집 시간과 노력을 최대한 활용하는 집중적인 노력이 필요합니다.

특별히 설계된 저주파용 압전 세라믹 센서들이 대부분의 측정에 권고됩니다. 압전 세라믹 센서들은 산업용 응용분야에서 필요로 하는 광범위한 주파수 범위와 진폭에 대한 뛰어난 성능을 제공합니다. 이러한 센서들은 낮은 노이즈 회로를 사용하여 측정장치로 높은 출력을 제공하며, 환경에 의한 영향을 최소화합니다.

측정장치는 저주파를 처리할 수 있는 규격과 측정 범위의 제품을 선택하여야 합니다. 적절한 측정장치의 설계 및 설정은 시스템 노이즈와 데이터 수집 시간을 최소화합니다. 특별한 기법 등을 사용하면 더욱 데이터의 신뢰성을 향상시킬 수 있습니다.

저주파 활용분야 및 기법들은 지속적으로 개발되고 향상되고 있습니다. 저주파 상태감시에 대한 시스템적인 접근은 최종 목적을 만족시킬 수 있도록 도움이 될 것입니다.

Bibliography

1. Barrett, Richard, "Industrial Vibration Sensor Selection: Piezo-Velocity Transducers (PVT)", Proc. 17th annual meeting, Vibration institute, June 1993, p135-140.
2. Schloss, Fred, "Accelerometer Overload", Sound & Vibration, January, 1989.
3. Druif, Dave, "Extremely Low Frequency Measurement Techniques", Test Report, Computational Systems Incorporated, 1992.
4. Grant, Doug las C., "Low Frequency Performance of Piezoelectric Accelerometers", Proc. 14th annual meeting, Vibration Institute, June 1990, p89-92.
5. Technology for Energy, "Very Low Frequency Data Collection", TEC Trends, Jan/Feb 1993.
6. Schloss, Fred, "Accelerometer Noise", Sound & Vibration, March 1993, p22-23.
7. Robinson, James C.; LeVert, Francis E.; Mott, J.E.; "Vibration Data Acquisition of Low Speed Machinery (10 rpm) Using a Portable Data Collector and a Low Impedance Accelerometer", P/PM Technology, May/June 1992, p32-36.
8. Judd, John E., "Sensor Noise Considerations in Low Frequency Machinery Vibration Measurements", P/PM Technology, May/June 1992, p26-30.
9. Computational Systems, Inc., "Selection of Proper Sensors for Low Frequency Vibration Measurements", Noise & Vibration Control Worldwide, October 1988, p256.
10. Seeber, Steve, "Low Frequency Measurement Techniques", MidAtlantic Infrared Services.
11. Chandler, John K., "Overlap Averaging: A Practical Look", Sound & Vibration, May 1991, p24-29.
12. Shreve, Dennis, "Special Considerations in Making Low Frequency Vibration Measurements", P/PM Technology, April 1993, p18-19.
13. SKF Condition Monitoring, "Acceleration Enveloping in Paper Machines", Application Note CM3024-EN, April 1993.
14. Robinson, Janes C. LeVert, Francis E.; Mott, J.E.; "The Acquisition of Vibration Data from Low-Speed Machinery", Sound & Vibration, May 1992, p22-28.
15. Berry, James E., "Advanced Vibration Analysis Diagnostic & Corrective Techniques", Discussion of vibration diagnostic chart, Piedmont Chapter #14 of Vibration Institute, Technical Associates of Charlotte, Inc., May 27, 1993.
16. Croix, Rick; Suarez, Steve; Crum, Coco; "Monitoring Systems for Cooling Tower and Process Cooler Fans", DataSignal Systems Technical Bulletin.
17. Bernhard, D.L., "Cooling Tower Fan Vibration Monitoring", IRD Mechanalysis, Cooling Tower Institute 1986 Annual Meeting, January 1986.
18. Murphy, Dan, "Cooling Tower Vibration Analysis", The Marley Cooling Tower Company, Maintenance Technology, July 1991, pp29-33.