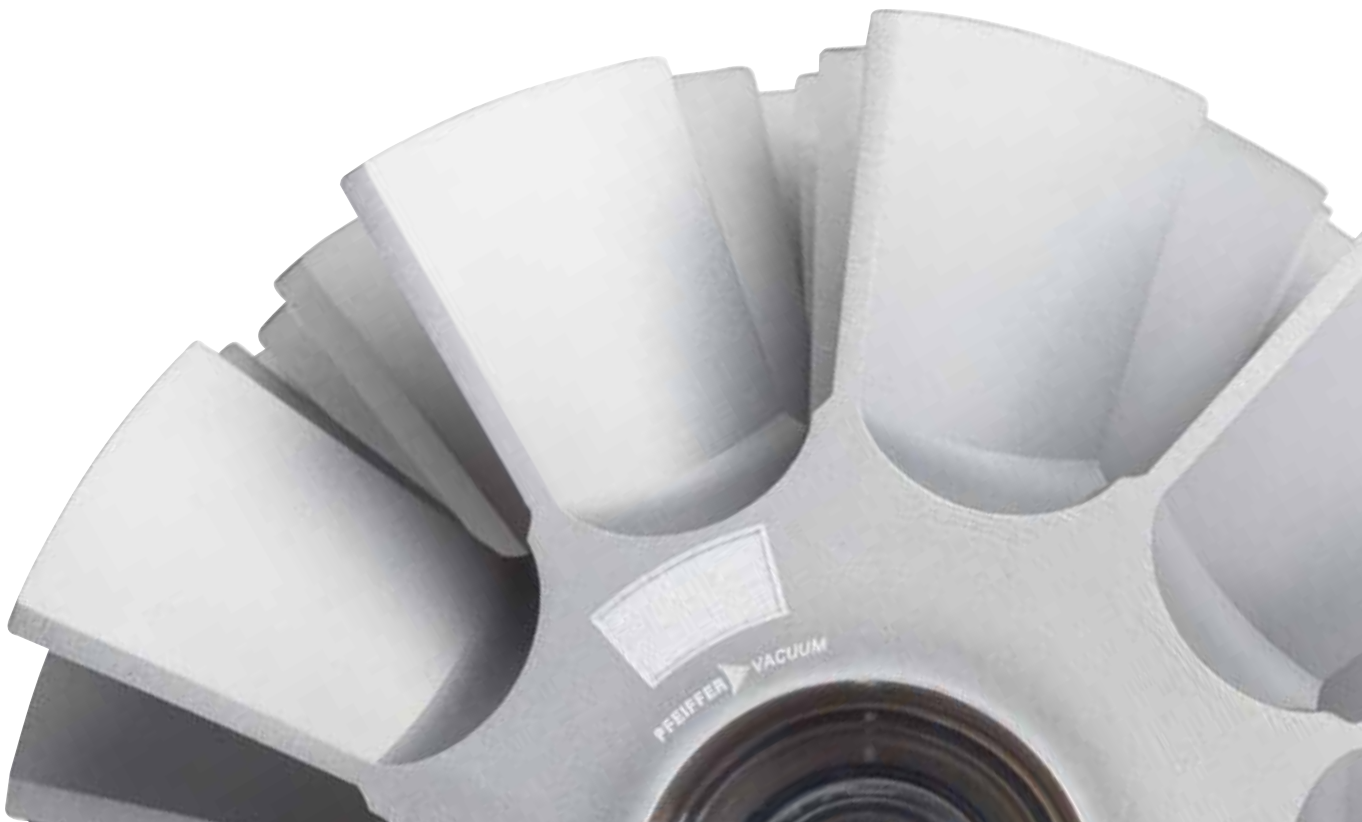


밸런싱 기술의 획기적인 발전: Laser Balancing™은 터보 펌프 의 작동을 훨씬 더 효율적으로 만듭니다.

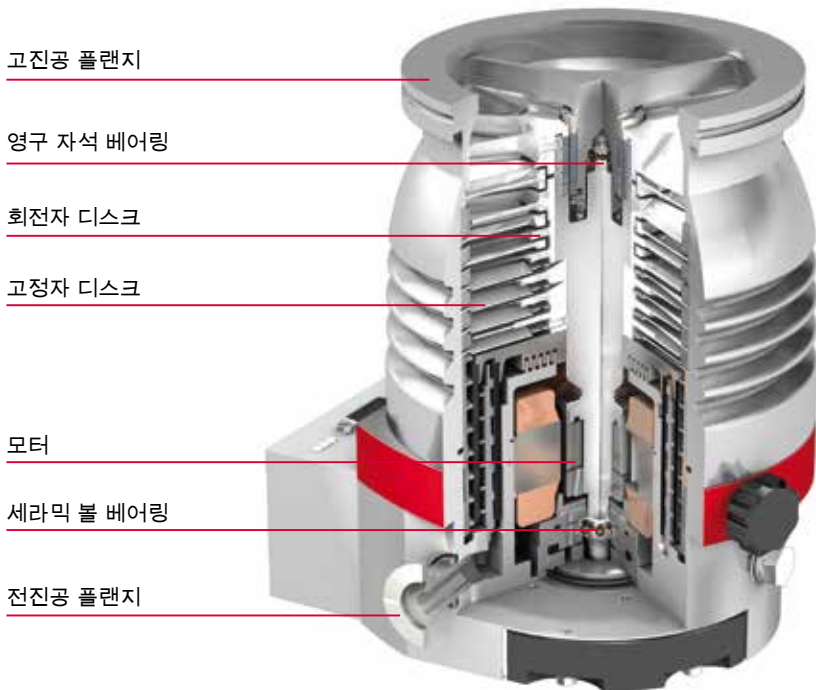
1958년 발명 이후 터보 분자 펌프(약칭으로 터보 펌프)는 고진공 기술의 원동력으로 간주되어 왔습니다. 안정적인 진공 생성 덕분에 반도체 생산 산업 및 기타 산업에서 없어서는 안 되는 요소가 되었습니다. 그 당시 13년 동안 Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik GmbH(오늘날 Pfeiffer Vacuum GmbH)의 기술



실험실의 책임자였으며, 이것의 발명가인 빌리 베커(Willi Becker)는 그 때만 해도 63년 후 레이저 광선이 터보 펌프를 더욱 획기적으로 만들 것이라고는 꿈에도 생각하지 못했습니다. 이는 레이저 밸런싱이 터보 펌프의 사용 수명과 성능을 증가시키는 밸런싱 기술의 가장 효율적인 최신 방식이기 때문입니다. 레이저 밸런싱은 예전에 빌리 베커가 터보 펌프를 발명한 회사인 Pfeiffer Vacuum에서 개발되어 특허를 취득했습니다.

터보 펌프의 구조

지금까지도 터보 펌프는 oil-free 고진공 및 초고진공 생성에 필수적인 것으로 남아 있습니다. 발명된 직후부터 이는 진공 생성을 위한 기존 펌핑 원리를 점진적으로 대체해왔습니다. 1960년대에 고진공에 대한 수요가 점점 더 증가하기 시작하면서 터보 펌프는 다양한 응용 분야에서 고진공 및 초고진공 생성을 위한 표준으로 빠르게 자리 잡았습니다. 이것의 사용 없이는 반도체 제조 또는 코팅의 많은 공정 단계가 가능하지 않을 것입니다.



고진공 플랜지

영구 자석 베어링

회전자 디스크

고정자 디스크

모터

세라믹 볼 베어링

전진공 플랜지

그림 1: 영구 자석 베어링과 볼 베어링이 있는 로터 샤프트 베어링 배열을 보여주는 하이브리드 베어링 터보 펌프의 단면 모델.

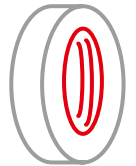
터보 펌프의 설계는 터빈의 설계와 유사합니다. 펌프 내부에는 여러 개의 회전자 디스크가 샤프트에 장착되어 있습니다(그림 1). 그들 사이에는 블레이드 방향으로 로터 블레이드의 방향으로 거울 반전된 고정자 디스크가 있습니다. 그 결과, 펌핑될 기체 분자가 개별 터보 단계를 따라 고진공 플랜지에서 전진공 플랜지로 전달됩니다. 터보 펌프의 로터는 brushless 3상 동기식 모터에 의해 구동됩니다. 이로써 최대 1500Hz에 달하는 매우 높은 회전 주파수를 달성할 수 있습니다. 로터 샤프트 베어링은 고진공 측면의 영구 자석 베어링과 전진공 측면의 고성능 볼 베어링으로 구성됩니다. 볼 베어링은 최소한으로 윤활되더라도 펌프는 oil-free 진공을 생성합니다.

매우 빠른 속도와 결합될 때, 특히 터보 펌프 로터의 균형을 맞추는 것은 기술적인 과제입니다.

기계 공학에서 거의 발견되지 않는 하이브리드 베어링은 베어링 및 밸런싱 기술에 대한 특성을 나타내며 일반적인 베어링 기술과 차별화됩니다. 매우 빠른 속도와 결합될 때 터보 펌프 로터의 밸런싱은 특히 기술적인 도전이 됩니다. 이는 특히 밸런싱 품질이 터보 펌프의 사용 수명 및 성능에 큰 영향을 미치기 때문입니다.

로터 밸런싱의 배경

실제로 모든 회전 구성품은 어느 정도의 언밸런스를 보이므로, 이를 완전히 피할 수는 없습니다. 나중에 가능한 한 적은 진동으로 작동할 수 있도록 적절한 조치를 취하여 훨씬 빠르게 회전하는 로터의 언밸런스를 줄이는 것이 필수적입니다. 가장 잘 알려진 과정은 아마도 자동차 타이어의 밸런싱 과정일 것입니다. 휠이 불균형을 보이는 경우, 핸들의 진동을 통해 이를 분명히 알 수 있습니다. 이러한 물리적 현상은 원심력이라고도 알려져 있습니다. DIN ISO 정의에서는, 로터의 언밸런스를 불균형한 원심력으로 인해 순환력 및 움직임이 베어링으로 전달되는 상태에서 설명됩니다.



육안으로 볼 때 대칭으로 보이는 본체조차도 실제로 질량 분포에서는 약간의 편차를 보입니다. 이러한 편차는 예를 들어 구성품의 제조 공정이나 원료 밀도의 불균질성의 결과로 발생할 수 있습니다. 언밸런스라는 용어는 이러한 고르지 않은 질량 분포를 설명합니다. 다른 원인은 디자인 또는 조립에서 유래할 수 있습니다. 또한 마모나 침전물로 인해 작동 중 언밸런스가 발생할 수도 있습니다. 언밸런스의 상태는 축방향 확장이 최소 수준인 디스크 모양의 로터를 예시로 사용하여 설명할 수 있습니다(그림 2). 이 로터는 각주파수로 회전합니다. 각각의 질량 입자는 반경의 함수로서 원심력을 생성하며, 방향은 다음으로 정해집니다:

$$\vec{F}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2$$

등식 1

모든 개별 원심력의 벡터 합은 결과적으로 원심력이며 이는 로터의 베어링에 작용합니다.

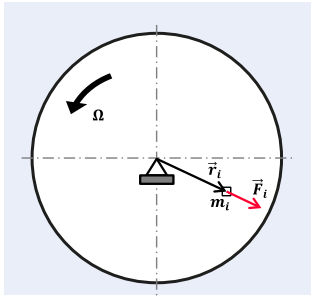


그림 2: 디스크 모양의 로터에서 각 질량 입자는 원심력을 생성합니다. 완전히 균형 잡힌 질량 분포로 회전하는 동안 모든 원심력이 상쇄됩니다.

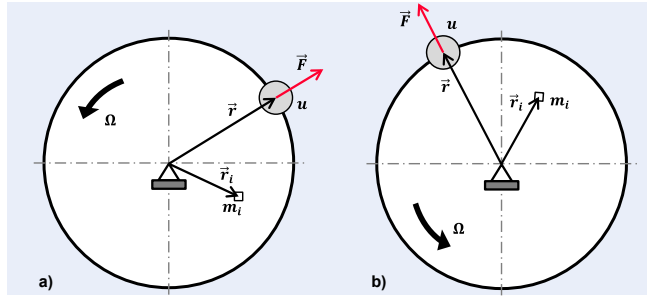


그림 3: 디스크형 로터의 불평형 상태는 하나의 불평형으로 설명할 수 있습니다(a). 회전으로 인해 순환하는 원심력으로 인해 진동이 발생합니다(b)

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2$$

Equation 2

현재 결과적으로 원심력이 있다면, 로터에 언밸런스가 있는 것입니다(그림 3). 이 상태는 단일 언밸런스로 설명할 수 있으며, 이는 결과적으로 원심력에 해당합니다.

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2 = u \cdot \vec{r} \cdot \omega^2$$

Equation 3

등식의 양변에서 속도의 영향을 제거하면 이 언밸런스 계산을 위한 다음 공식이 생성됩니다:

$$\begin{aligned} \vec{U} &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \\ &= u \cdot \vec{r} \end{aligned}$$

Equation 4

여기서 언밸런스는 kg - m 또는 일반적으로 g - mm로 주어집니다.

예시에 기반해 보면, 언밸런스가 있는 본체를 회전시키면 바람직하지 않은 회전력이 생긴다는 것이 분명합니다(그림 3b). 그 결과 발생하는 힘은 회전 속도와 언밸런스의 크기에 따라 달라집니다. 이로 인해 베어링에 추가 부하가 발생하고 마모 정도가 커집니다. 또한 베어링을 통해 기계적으로 연결된 기타 구성품뿐만 아니라 하우징에도 전송되는 진동이 발생합니다. 이러한 진동으로 인해 또한 손상도 발생할 수 있습니다.

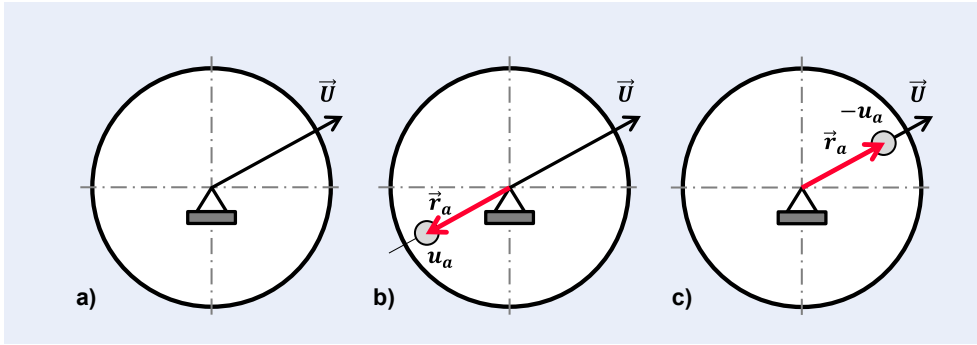


그림 4: 디스크 모양의 로터가 다음의 언밸런스를 보입니다(a). 이것은 반대 방향 (b)으로 추가 질량을 적용하거나 동일한 각도 위치에서 질량을 제거하여 수정할 수 있습니다(c)

터보 펌프의 로터는 최대 90,000rpm 속도까지 도달합니다.

터보 펌프의 로터는 분당 최대 90,000회 또는 초당 1,500회의 속도까지 도달합니다. 결과 힘은 속도가 증가함에 따라 2차식으로 증가하므로(등식 3), 언밸런스 최소화에 대한 요구 사항은 매우 까다롭습니다. 불과 몇 밀리그램 범위에서 조금이라도 밸런스가 깨지면 펌프 작동에 큰 영향을 미칠 수 있습니다. 따라서 로터가 원활하게 돌아가면서 터보 펌프가 손상 없이 수년 간 작동하는 데 좋은 밸런스 품질이 중요합니다. 또한 밸런싱은 진공 챔버와 고객의 응용 분야로 전달되는 진동을 최소화합니다.

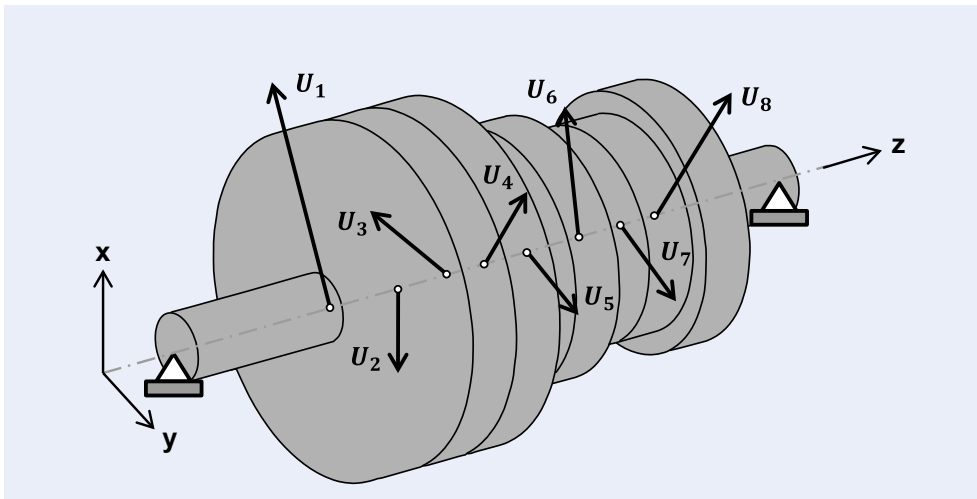


그림 5: 일반 로터의 언밸런스 상태는 이 예시에서 각각의 경우에 고유한 언밸런스 벡터를 갖는 8개의 디스크 모양 로터 요소에 의해 설명되며, 각 로터 요소는 각각의 경우 고유한 불균형 벡터를 가집니다

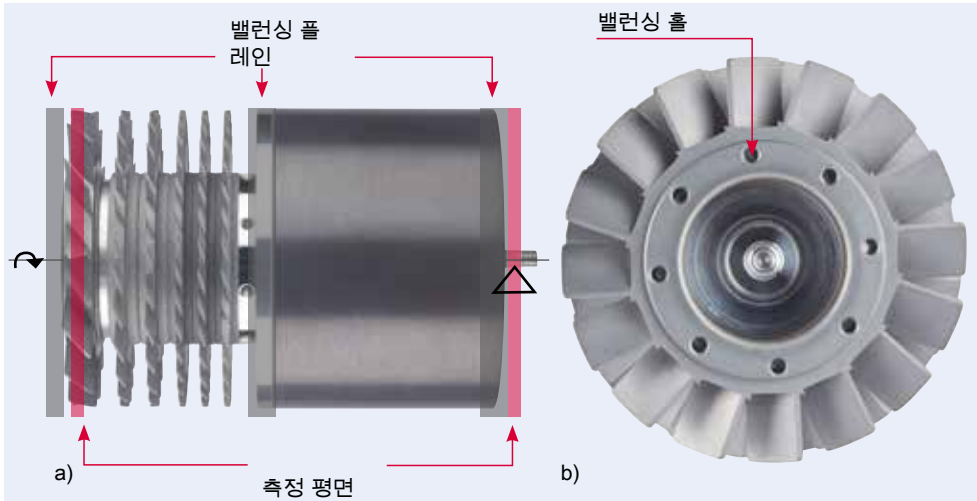


그림 6: 기존의 균형 잡힌 터보 펌프 로터의 그림: a) 측정 및 밸런싱 플레인의 위치, b) 밸런싱 웨이트를 수용하기 위한 해당 구멍이 있는 회전 축에 수직인 밸런싱 플레인 그림

기존의 로터 밸런싱

기술적으로, 현재 언밸런스 없이 로터를 제조하는 것은 불가능합니다. 언밸런스 발생에 대해 설명되는 원인은 모든 로터에 자체 언밸런스 분포가 있음을 분명히 밝힙니다. 심지어 시리즈 생산에서도 그렇습니다. 언밸런스 허용 오차는 로터의 질량 분포가 제대로 되었는지 여부를 결정합니다. 로터의 질량 분포의 확인 및 보정은 밸런싱 프로세스에 의해 설명됩니다. 언밸런스는 로터 축에 수직인 보정 평면(그림 4)에서 질량을 사용 또는 제거하여 보정할 수 있으므로 다음 내용이 성립합니다.



$$\vec{U} + u_a \cdot \vec{r}_a = 0$$

Equation 5

등식 5에서 보정 질량과 보정 반경의 곱이 기존 로터의 불균형과 일치해야 함은 분명합니다. 이 경우, 질량 분포의 보정은 언밸런스의 동일한 각위치에서 또는 반대 방향에서 발생할 수 있습니다.

기존의 밸런싱 기술에서는 추가 질량이 사용되어 보정이 되며, 이는 자동차 타이어 밸런싱과 유사한 과정입니다. 여기에서 밸런싱 웨이트는 언밸런스 반대편의 특수 구멍에 나사로 고정됩니다(그림 4b). 널리 사용되는 또 다른 방법은 머시닝 공정을 이용해 언밸런스의 동일한 각위치에서 질량을 제거하는 질량 보정입니다(그림 4c). 이 공정에는 예를 들어 재료 연삭이나 드릴링 또는 밀링을 통한 제거가 포함됩니다.

로터는 일정한 축방향 길이를 가지므로, 이제 일반 로터의 언밸런스 상태가 3차원적으로 고려됩니다. 로터 축을 따라 무한한 수의 언밸런스가 발생할 수 있습니다. 실제 언밸런스는 실제로 측정할 수 없으므로 일반 로터가 여러 개의 로터 요소로 분해됩니다. 이는 차례로 디스크 모양의 로터에 해당합니다(그림 5). 따라서 일반 로터의 불균형 상태는 모든 로터 요소의 유한한 수의 불균형 벡터에 의해 합리적인 정확도로 설명됩니다. 그러면 질량 균형이 언밸런스 상태에 따라 하나 이상의 보정 평면(밸런싱 플레인이라고도 함)에서 수행됩니다.

기존의 밸런싱에서 로터는 특수 밸런싱 시스템에 장착되며 특수 고정 밸런싱 속도로 가속화됩니다. 언밸런스로 인해 베어링에 원심력이 생성되어 그 결과로 로터가 진동하게 됩니다. 거리 센서의 도움으로 두 베어링 위치의 측정 평면에서 진동에 의해 발생하는 반경 방향 편향이 측정됩니다(그림 6a). 결과적인 불균형 벡터는 독점 계산 알고리즘과 소위 영향 계수 행렬 A의 도움으로 방사형 편향에서 결정됩니다.

$$\vec{U} = -A^{-1} \cdot \vec{r}$$

Equation 6



이러한 계수는 초기 단계에서 로터에 따라 여러 테스트 언밸런스에 나사를 조여 결정해야 합니다. 이러한 목적을 위해, 질량을 알고 있는 특정 테스트 웨이트가 로터의 정의된 위치에 장착되고 그 반응이 측정됩니다. 개별 측정의 반경 방향 편향과 나사로 조인 테스트 언밸런스를 이용하여, 개별 영향 계수가 포함된 필요한 매트릭스를 계산할 수 있습니다. 그러면 이는 밸런싱 시스템과 주어진 실제 로터로부터 시스템을 설명합니다. 이는 형상 또는 디자인이 동일한 모든 시리즈 로터에 유효합니다.

전체적인 언밸런스를 줄이기 위해 회전 축을 따라 축에 수직인 여러 밸런싱 플레인으로 나눕니다. 밸런싱 웨이트를 수용하기 위해 로터에서 이러한 평면 주위에 방사상으로 드릴로 구멍이 나 있습니다. 밸런싱 홀의 정의된 위치를 고정 위치 밸런싱이라고 합니다. 밸런싱 알고리즘은 각각의 밸런싱 플레인에 대해 밸런싱 웨이트를 결정하며 일반적으로 이를 두 개의 구성품으로 각각 나눕니다. 밸런싱 웨이트는 개별 평면의 둘레를 따라 수동으로 조여집니다. 로터의 고르지 않은 질량 분포가 감소되며 나머지 언밸런스가 남습니다. 따라서 명시된 공차가 유지됩니다. 언밸런스는 전체 프로세스 과정에서 다른 속도에서 결정되고 점진적으로 보정됩니다. 이는 진동이 감소된 상태에서 로터가 공칭 속도로 작동할 수 있게 합니다.

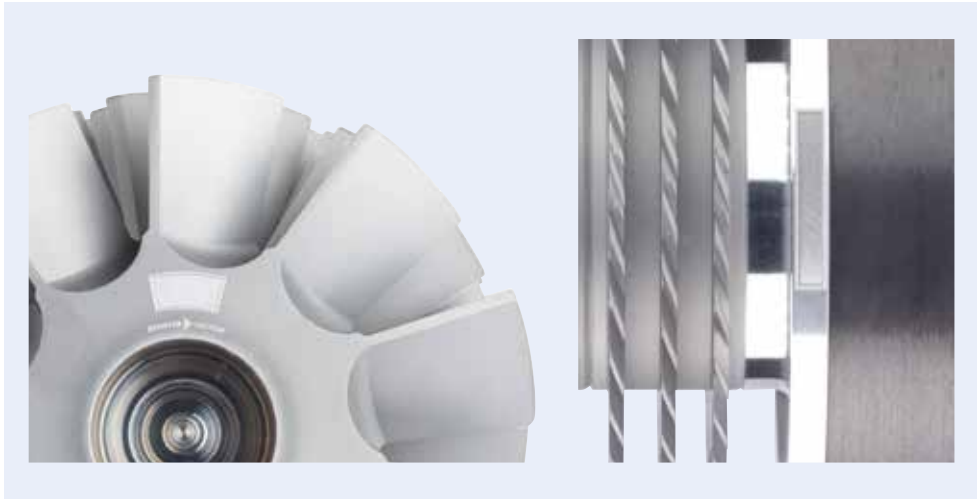
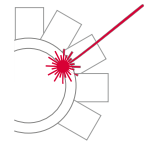


그림 7: 두 개의 다른 밸런싱 플레인에서 레이저 어블레이션 후 세그먼트 형상의 사진.

레이저 밸런싱 방법

터보 펌프에 대한 요구 사항은 1차 속성과 2차 속성으로 나뉩니다. 1차 속성은 펌프 성능과 관련이 있긴 하지만, 지난 10년 동안 2차 속성 영역에서도 터보 펌프에 대한 응용 분야 요구 사항이 증가해왔습니다. 따라서 고속 로터는 지속적으로 추가 개발되어야 합니다. 여기에는 무엇보다도 로터의 사용 수명, 진동에 의한 방출 소음 및 구성품과 표면의 탈기 거동과 관련된 청결도가 포함됩니다. 진동에 의한 방출 소음은 펌프 하우징에서 방출되는 소리 및 진동입니다. 진동에 의한 방출 소음 증가의 주요 원인은 로터 불균형입니다. 새로운 레이저 밸런싱 시스템은 이 문제를 해결하고 터보 펌프 로터가 훨씬 더 효율적으로 밸런싱될 수 있도록 합니다. 기존의 밸런싱 프로세스는 밸런싱 홀과 웨이트를 분배함으로써 최적화되었습니다. 밸런싱 프로세스의 완전한 자동화도 여기서 또한 핵심적인 역할을 합니다.



먼저 밸런싱할 로터가 자동화된 레이저 밸런싱 시스템에 장착됩니다. 시스템 내부에서 레이저가 특수 챔버 안으로 캡슐화됩니다. 이는 레이저 방사선으로 인한 환경 위험이 없음을 의미합니다. 불균형 측정 및 결정을 위한 개별 단계뿐만 아니라 질량 밸런싱도 다른 속도에서 반복적으로 수행됩니다.

이를 통해 모든 속도 범위에서 정밀하고 효과적으로 밸런싱된 로터를 얻을 수 있습니다. 기존의 밸런싱에서와 같이 베어링 근처의 두 측정 평면에서 거리 측정 센서를 이용해 터보 펌프 로터의 반경 방향 편향이 측정됩니다. 언밸런스가 고급 밸런싱 알고리즘에 의해 결정된 후 질량 밸런싱이 뒤바뀝니다. 재료는 언밸런스 벡터의 동일한 각위치에서 레이저에 의해 제거됩니다. 따라서 고르지 않은 질량 분포가 보정됩니다. 고에너지 펄스 레이저 광선은 밸런싱 플레인의 로터 재료를 증발 및/또는 승화와 함께 응용 방출이 일어날 정도로 국지적으로 가열합니다. 이 과정에서 재료가 원주를 따라 임의의 지점에서 정의된 세그먼트 형상의 형태로 제거될 수 있습니다(그림 7).

고에너지 펄스 레이저 광선은 밸런싱 플레인의 로터 재료를 증발 및/또는 승화와 함께 응용 이 일어날 정도로 국지적으로 가열합니다.

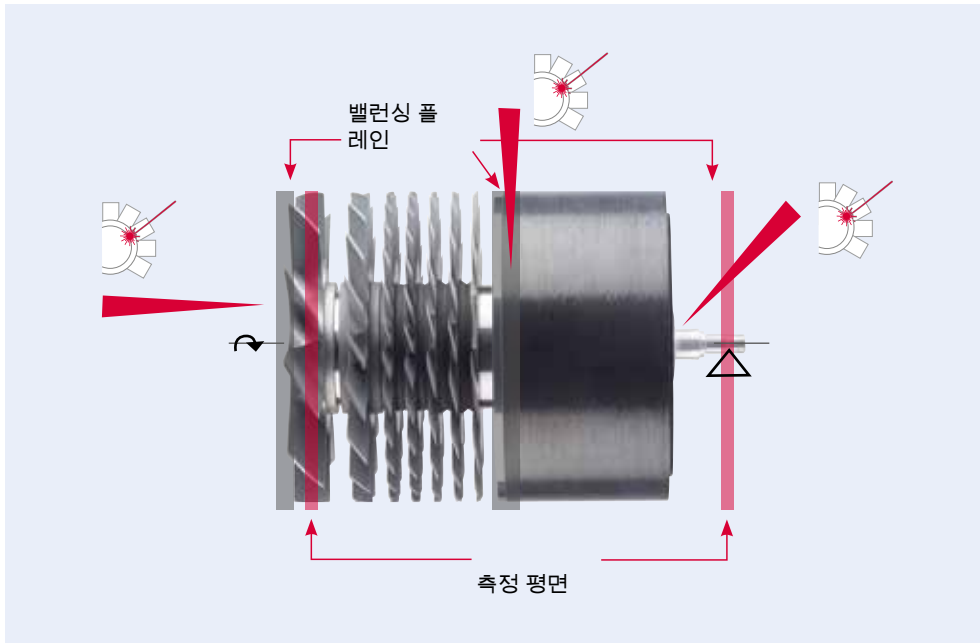
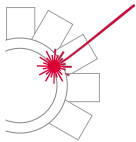


그림 8: 레이저 빔 방향의 개략도뿐만 아니라 밸런싱 플레인 및 측정을 보여주는 레이저 밸런싱 터보 펌프 로터의 그림.



등급이 지정된 밸런싱 웨이트를 나사로 조이거나 질량이 밀링되거나 드릴로 제거되는 기존의 밸런싱과 비교할 때, 레이저 어블레이션은 훨씬 더 정밀하게 작동합니다. 그 결과 상당히 낮은 잔류 언밸런스를 달성할 수 있습니다. 재료 속성은 영향을 받지 않습니다. 레이저에 대해 이동할 수 있는 미러 시스템과 조합하면, 단일 공정 레이저라도 다른 밸런싱 플레인에 도달합니다(그림 8). 그 결과 새로운 로터의 디자인과 밸런싱 플레인의 정의 및 정렬이 더욱 유연해졌습니다.

기하학적으로 정의된 밸런싱 홀의 부재와 레이저의 정밀성에 의해 첫 번째 밸런싱 패스에서 어블레이션 세그먼트의 모든 위치가 허용됩니다. 이는 개별 밸런싱 플레인의 필요한 각위치에서 정확하게 고르지 않은 질량 분포를 보정합니다. 후속 밸런싱 패스 내에서 밸런싱 시스템의 알고리즘은 이미 처리된 어블레이션 세그먼트를 고려하고 그에 따라 추가 세그먼트를 배치합니다. 전체 속도 범위에 걸친 잔류 언밸런스가 허용 오차에 따라 보정되는 즉시, 로터가 자동화 시스템에서 제거됩니다.

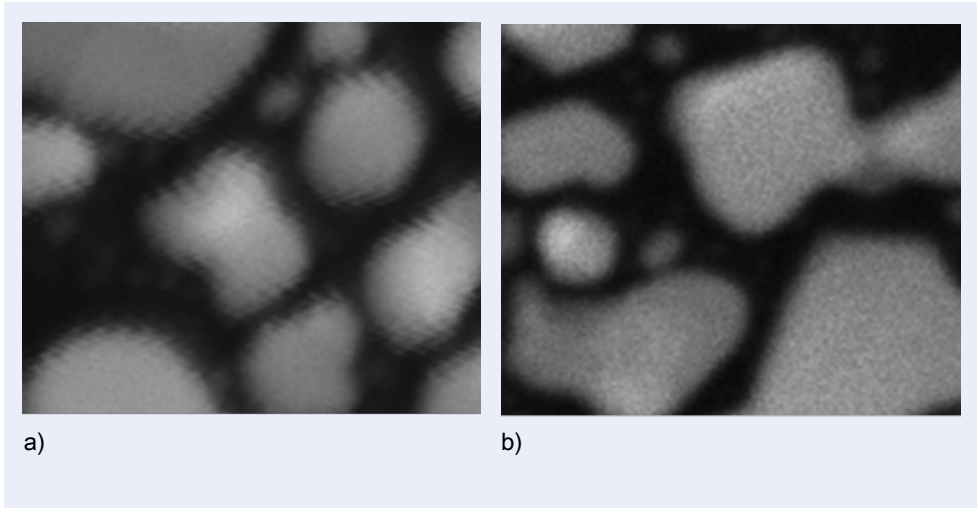


그림 9: 터보 펌프가 통합된 전자 현미경의 이미지 두 개 비교: a) 고진공(HV) 플랜지의 경우 진동이 더 심해(~20nm) 고배율에서 이미지가 흐려짐, b) 진동이 작은 경우에는(~5nm) 이미지가 더 선명함(사진 제공: TESCAN(테스칸), 체코 공화국)

레이저 밸런싱 방법의 장점

터보 펌프가 통합된 많은 장치 및 응용 분야에서 로터의 낮은 진동 및/또는 조용한 움직임이 작동의 전제 조건입니다. 따라서 레이저 밸런싱 로터는 해당 응용 분야 영역에 대한 주요 발전을 나타냅니다. 기본적인 계산 알고리즘과 조합되면, 최신 자동 밸런싱 시스템에서 잔류 불균형의 보다 효율적인 보정을 보장합니다. 잔류 언밸런스가 감소하면, 로터의 밸런싱 품질 등급에도 영향을 미칩니다. 이러한 맥락에서 밸런싱 품질이 높은 균형이 잘 잡힌 로터는 밸런싱 품질 등급 G의 양이 적음을 의미합니다. ω : 로터의 속도[Hz]; m: 로터의 질량 [kg] 및 G: 일반적으로 mm/s 단위.

$$G = U_{Rest} \cdot \frac{\omega}{m}$$

Equation 7

레이저 밸런싱 로터가 있는 터보 펌프는 사용 수명이 더 길고 펌프 하우스에 더 적은 진동을 전달합니다.

언밸런싱 허용 오차를 기반으로 했을 때, 이는 잔류 언밸런스를 줄여 밸런싱 등급을 약 50%까지 줄입니다. 따라서 언밸런싱에 의해 유발된 원심력이 최소화됩니다. 로터 재료, 특히 베어링이 응력을 덜 받습니다. 이러한 이유 때문에 레이저 밸런싱 로터가 있는 터보 펌프는 사용 수명이 더 길습니다.



또한 낮은 진동이 베어링을 통해 펌프 하우징으로 전달됩니다. 이는 작동 중 펌프의 소음 방출과 터보 펌프에 기계적으로 연결된 민감한 구성품 또는 프로세스에 긍정적인 영향을 미칩니다. 레이저 어블레이션 시 생성된 입자는 프로세스 동안 이미 추출되고 여과됩니다. 또한, 이어서 레이저 밸런싱 로터를 세정하면 표면 청결도를 최대한 높일 수 있습니다.

응용 분야 예시로는 실험실 워크스테이션에서 벤치탑 장치로 사용되는 이온 이동성 질량 분석기가 있습니다. 이러한 맥락에서 통합 터보 펌프의 저소음 작동이 필요합니다. 또 다른 예시는 진동 최적화 로터와 진동에 의한 낮은 방출 소음을 통해서만 선명한 고해상도 이미지를 가능하게 하는 전자 현미경입니다(그림 9).



설명된 혁신적인 레이저 밸런싱의 장점은 기존의 밸런싱 로터와 비교했을 때 레이저 밸런싱 로터의 기술 발전을 보여줍니다. 로터 수명이 연장되고 터보 펌프의 진동 및 소음 방출이 감소되면서, 공정은 진공 기술의 또 다른 이정표를 제시하고 새로운 터보 펌프 로터의 디자인에 유연성 확장을 제공합니다.

Your Success. Our Passion.

We give our best for you every day –
worldwide!

완벽한 진공 솔루션을 찾고 계
십니까 당사로 문의하십시오.

파이퍼베콤 GmbH
본사 · 독일
전화: +49 6441 802-0



Errors excepted. All data subject to change without prior notice. PI 0538 PKO (Juniv. 2022/0)

Follow us on social media
#pfeiffervacuum



www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  **VACUUM**