고압축 터보 펌프:
기능 원리 및 응용 분야

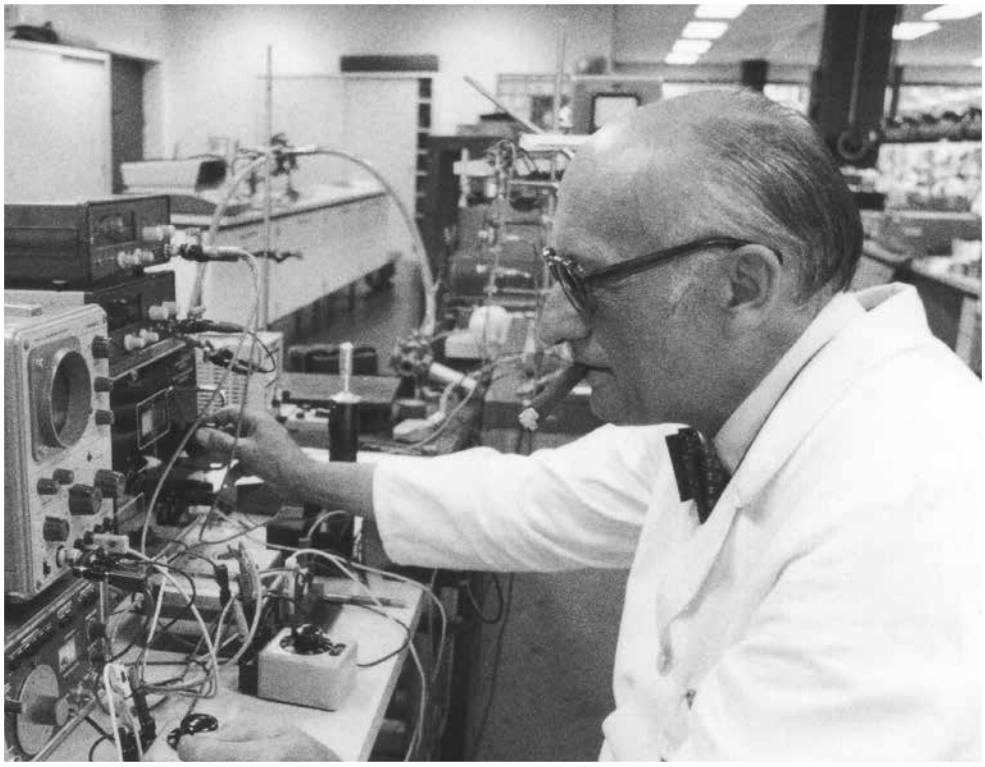
파이퍼 베큠 역사의 주요한 이정표는 1955년의 터보 펌프 발명이었습니다. 그때부터 약 3,400명의 회사 직원이 진공 기술의 지속적인 개선을 위해 노력해왔습니다. 가장 최근에는 레이저 밸런싱 기술의 발명을 통해 이를 이루었습니다. 이로써 훨씬 더 긴 사용 수명과 진동 및 소음 방출의 현저한 감소가 보장됩니다. 그렇지만 일단 처음부터 시작해보겠습니다. 클래식 터보 펌프 기능 원리의 기초는 무엇입니까? 그리고 귀하의 응용 분야에 적합한 (배압) 펌프를 어떻게 선택하십니까?

PFEIFFER VACUUM

터보 펌프의 발명

최초의 터보 펌프는 1955년에 발명되었습니다. 그 당시 빌리 베커 박사(Dr. Willi Becker)는 13년 동안 Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik GmbH(현 파이퍼 베큠) 기술 실험실의 책임자였습니다. 그는 오일이 오일 확산 펌프의 펌프 하우징으로 역류하는 것을 방지하는 방법과 관련된 질문에 관심이 있었습니다. 이러한 목적으로 그는 회전하는 팬 휠 형태의 배플을 사용했습니다. 이 설정을 사용하면 기체 입자가 심한 전도도 손실 없이 압력 경도 방향으로 흐르게 됩니다. 반대 방향으로 역류하는 오일 분자는 회전하는 팬 휠에 의해 반사됩니다. 이를 통해 분자가 고진공 측면에 도달하는 것을 막습니다.

추가 연구에서 베커 박사는 이 설정이 확산 펌프에서 오일 역류를 줄였을 뿐만 아니라 더 낮은 총 압력을 생성한다는 사실을 알아냈습니다. 그런 다음 그는 회전자-고정자 조합과 여러 펌프 단계를 연이어 적용했습니다. 이 설정을 위해 그는 벨트로 구동되어 16,000rpm의 속도에 도달하는 회전자인 이중 흐름 버전을 사용했습니다. 무게가 62kg이고 펌프 속도가 900 m³/h인 이 펌프는 1956년에 특허를 취득했으며 오늘날 모든 터보 펌프의 전신이었습니다. 이는 1958년 벨기에 나뮈르(Namur)에서 개최된 IVC(International Vacuum Congress)에서 처음으로 발표되었습니다. 이 발명이 없었다면 우리의 현대 생활은 상상도 할 수 없었을 것입니다. 터보 펌프가 없으면 수많은 코팅 공정뿐만 아니라 반도체 생산을 위한 많은 제조 단계도 가능하지 않을 수 있기 때문입니다.



빌리 베커 박사(Dr. Willi Becker), 1958년 Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik GmbH (오늘날 파이퍼 베큠) 실험실에서

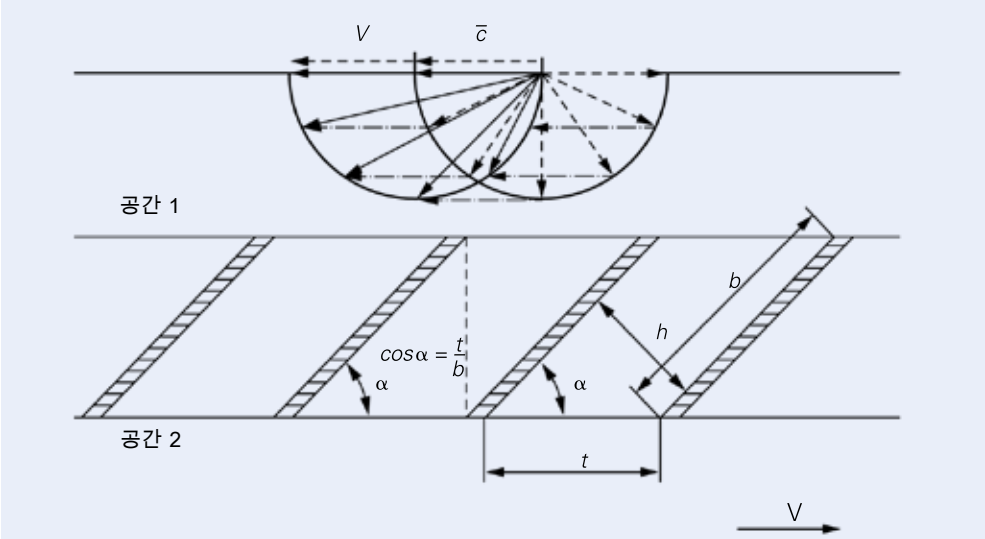


그림 1: 터보 펌프의 기능 원리

기능 원리 및 압축비

터보 펌프는 어떻게 작동합니까? 빠르게 회전하는 블레이드에서 펌핑될 기체 분자로의 운동량 전달은 회전자 및 고정자 블레이드 배열 펌핑 동작의 기반입니다 (그림 1). 블레이드와 부딪치는 분자들은 그곳에 흡착되었다가 잠깐의 시간이 지나면 다시 블레이드에서 떨어져 나갑니다. 베인 속도 v는 열 분자 속도 c에 합산됩니다. 열 분자 속도 c는 분자가 펌프를 나가는 속도입니다. 펌프에서는 분자 흐름이 우세해야 합니다. 그렇지 않으면 블레이드에 의해 전달된 속도 성분이 다른 분자와의 충돌로 인해 손실될 수 있습니다. 그러므로 평균 자유 경로 T는 채널 높이 h보다 커야 합니다. 가스의 펌핑 도중 운동량 수송식 펌프에서 역류를 유발하는 역압이 발생합니다. S_0 는 배압이 없는 펌프 속도를 의미합니다. 이는 배압이 증가할수록 감소하며 다음 최대 압축비 K에서 값 0에 도달합니다.

압축비 K_0 는 게데 [1]에 따라 추정할 수 있습니다. 광학 밀도가 높은 블레이드 구조 (그림 1)의 경우, 다음과 같이 게데의 공식이 적용됩니다.

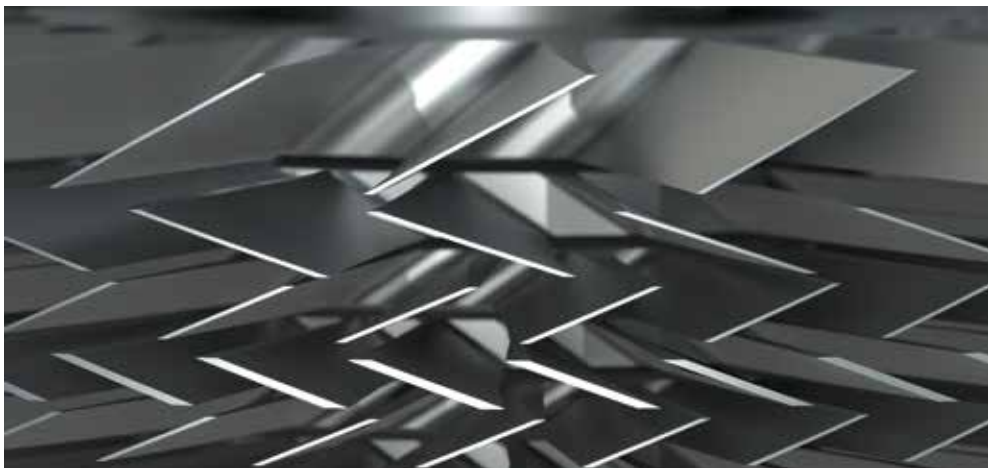


그림 2: 회전자 및 고정자 블레이드의 배열

$$K_0 = \frac{p_V}{p_A} = \exp\left(\frac{vL}{\bar{c} \cdot g \cdot h}\right)$$

게데의 공식

실제 경우,

p_V = 전진공 압력
p_A = 흡입 압력
v = 블레이드 속도
c– = 평균 열 분자 속도
L = 채널 길이
h = 채널 높이
g = 채널 높이의 배수로 평균 충격 거리를 지정하기 위한 계수(1 < g < 3)

공식 바꾸기 v x v – cos α, L x b + h x t – sin α 그래프에서, 다음과 같은 내용을 얻을 수 있습니다.

$$K_0 = \exp\left(\frac{v \cdot b}{\bar{c} \cdot g \cdot t \cdot \tan \alpha}\right).$$

게데의 추정에 따라 블레이드는 광학 밀도가 높은 것으로 가정하며 따라서 cos α = t/b 조건을 충족시킵니다(그림 1 참조). 더 넓은 블레이드 간격의 경우, 이는 압축 감소를 의미합니다.

$$K_0 = \exp\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{v}{\bar{c}}\right)$$

기하학적 비율은 그림 1에서 나온 것입니다. 계수 g 는 1과 3 사이입니다[2]. 따라서 K_0 는 블레이드 속도 v 따라 기하급수적으로 증가하며,

$$\bar{c} = \sqrt{=\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}.$$

R 은(는) 일반적인 기체 상수이고,
T 은(는) 열역학적 온도이며
M 은(는) 분자 질량입니다.

예를 들어 질소의 압축비는 수소의 압축비보다 훨씬 높습니다..

펌프 속도 계산

펌프 속도 S_0 는 흡입 면적에 비례합니다. A 및 블레이드의 평균 순환 속도 v, 즉 회전 속도. 블레이드 각도 α를 고려하면 다음과 같은 내용을 얻을 수 있습니다.

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha = \frac{1}{4} \cdot A \cdot v \cdot \sin 2\alpha$$

플랜지의 유입구 전도도를 고려하고

$$L_F = \frac{\bar{c}}{4} \cdot A$$

최적의 블레이드 각도인 45°라고 생각했을 때, 무거운 기체(분자량 > 20)에 대한 터보 펌프의 유효 펌프 속도 Seff는 다음 공식에 의해 대략적으로 계산됩니다.

$$S_{eff} = \frac{S_0 + L_F}{S_0 \cdot L_F} = \frac{A \cdot v}{4 \cdot \left| \frac{v}{\bar{c}} + 1 \right|}$$

유효 펌프 속도를 최상위 디스크의 블레이드 유입구 영역으로 나누고 계수 df ≈ 0.9를 이용해 블레이드 두께로 막히는 영역을 고려하여, 터보 펌프의 최대 특정 펌프 속도 SA를 얻습니다(예시 기체를 질소로 했을 때에 대한 곡선이 그림 2에 표시됨).

$$S_A = \frac{S_{eff}}{A} = d_f \cdot \frac{v}{4} \cdot \left| \frac{v}{\bar{c}} + 1 \right|^{-1}$$

특정 펌프 속도는(는) 그림 3의 Y축에 표시되며 평균 블레이드 속도 v=π-f-(R_a+R_i)는 순환 주파수 f 를 나타내는 X축과 블레이드의 외부(R_a) 및 내부(R_i) 반경에 표시됩니다. X축 위의 선택된 지점에서 위쪽으로 수직 이동했을 때, 곡선과의 교차점이 펌프의 최대 특정 펌프 속도S_A 를 나타냅니다. 입력 디스크의 블레이드 영역을 곱함: 펌프 속도를 제공합니다.

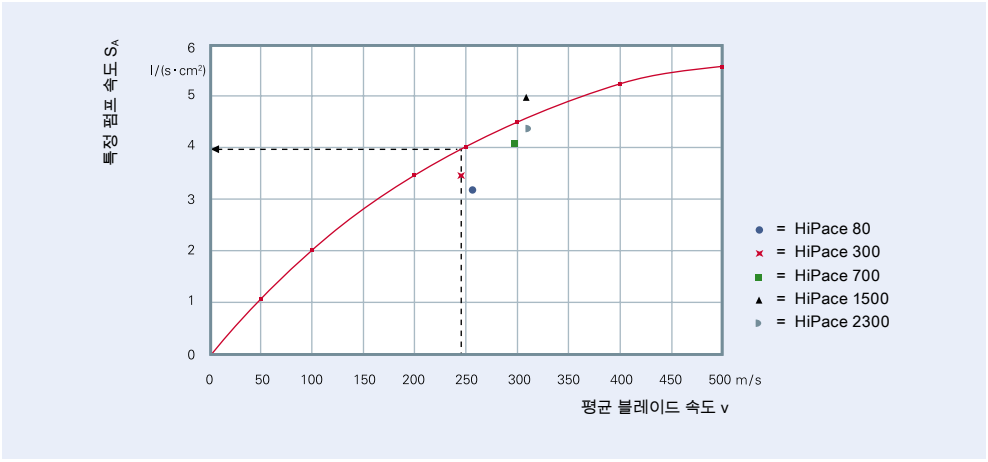


그림 3: 터보 펌프의 특정 펌프 속도.

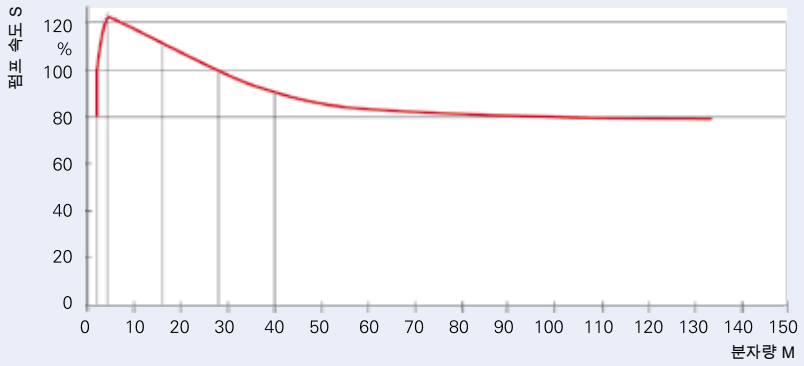


그림 4: 상대적인 분자량에 따른 펌프 속도.

그림 3에 입력된 지점은 표시되어 있는 Pfeiffer Vacuum 펌프의 측정값에서 결정됩니다. 지점이 곡선보다 훨씬 위에 있는 것은 물리적으로 불가능합니다. 이러한 방식으로 결정된 펌프 속도는 가벼운 기체의 값에 대해 아직 아무 것도 드러내는 바가 없습니다. 예를 들어 수소의 경우(그림 4). 터보 펌프가 최종 압력이 낮은 경우를 위해 설계된 경우, 다른 블레이드 각도의 펌프 단계가 사용되며 점진적 변화는 수소의 최대 펌프 속도에 맞게 최적화됩니다. 이로 인해 수소(약 1,000)와 질소 둘 모두에 대해 충분한 압축비를 가지는 펌프가 제공됩니다. 공기 중의 높은 질소 분압 때문에 압축비는 대략 10^9과 같아야 합니다.. 회전자 및 고정자 디스크로 구성된 순수 터보 펌프의 경우, 약 10^{-2} hPa의 전진공 압력이 분자 흐름으로 인해 필요합니다(그림 5).

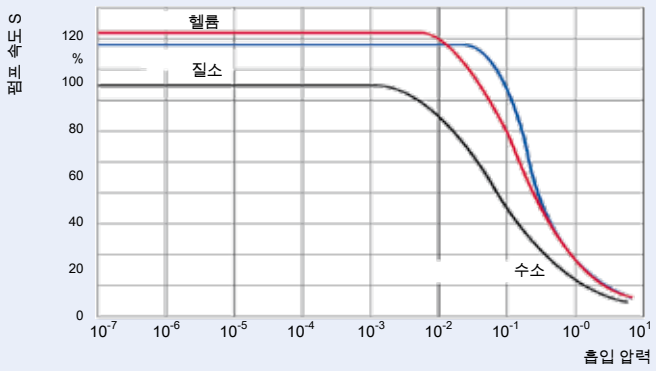


그림 5: 흡입 압력에 따른 펌프 속도.

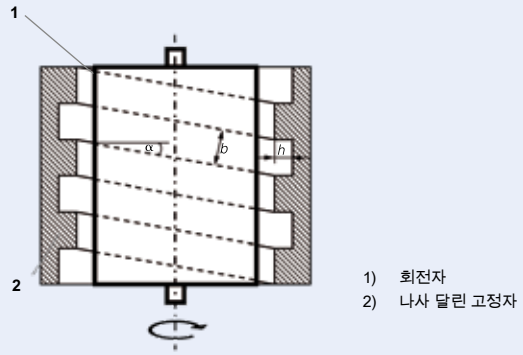


그림 6: Holweck 단계의 작동 원리.

Holweck 단계의 특성

Holweck 단계(그림 6)는 나선 권선형 펌프 채널이 있는 다단계 게데 분자 펌프입니다. 펌프 채널로 들어가는 기체 분자는 회전자의 회전으로 인해 채널에 우선적으로 정해진 방향으로 속도를 받습니다. 역류 손실은 Holweck 채널을 분리하는 망과 회전자 사이의 간격 때문에 발생합니다. 역류를 최소화하기 위해서는 간격 너비가 작게 유지되어야 합니다.

원통형 슬리브(1)는 Holweck 단계의 회전자로 사용되며, 이는 고정자(2)의 나선형 채널에서 회전합니다. 고정자가 회전자의 외부 및 내부 모두에 배열되면, 2개의 Holweck 단계를 하나의 펌프에 쉽게 통합할 수 있습니다. 이런 식으로, 펌핑된 기체 입자는 먼저 회전자 외부의 고정자 채널을 통해 운반된 다음에 회전자 내부의 추가 고정자 채널을 통해 뒤로 이동합니다. 그곳에서 수집 채널을 통과하여 배압 펌프로 이동합니다. 최신 터보 펌프에는 가끔 펌프 속도 S_0 가 동일한 다음과 같은 "접히는" Holweck 단계가 여러 개 있습니다.

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot v \cdot \cos \alpha$$

여기에서, b – h 는 채널 단면적이며 v – cos α 는 채널 방향의 속도 성분입니다. 채널 길이 L 및 속도 v – cos α

$$K_0 = \frac{v \cdot \cos \alpha \cdot L}{c \cdot g \cdot h} \quad mit\, 1 < g < 3$$

에 따라 압축비가 증가합니다.

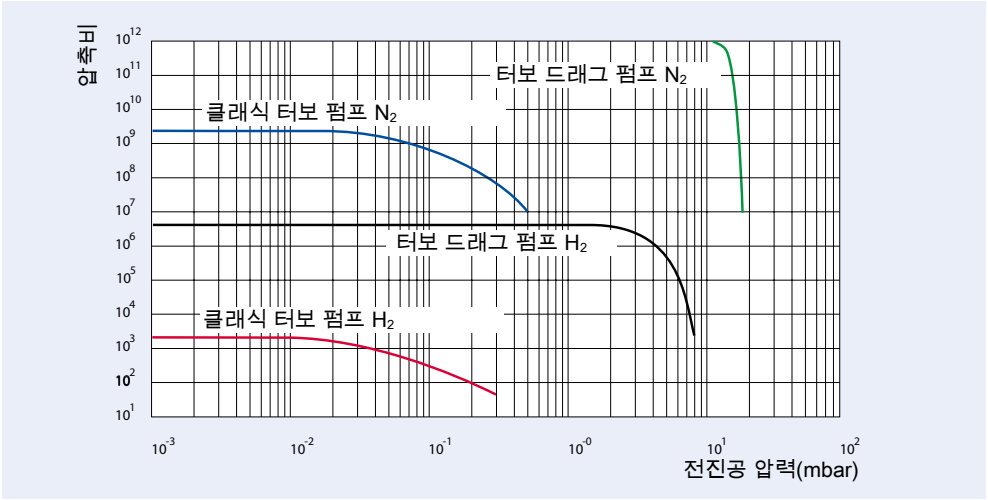


그림 7: 순수 터보 및 터보 드래그 펌프의 압축비.

오늘날 터보 펌프에는 0.5~5hPa 사이의 최종 압력 및 다이어프램 펌프와의 터보 펌프 비율을 구축하기 위한 Holweck 단계가 장착되어 있습니다. 이를 "터보 드래그 펌프"라고 합니다. 터보 펌프의 높은 사전 압축 때문에, Holweck 단계를 위한 낮은 기본 압력을 생성하는 데 적은 펌프 속도로도 충분합니다. 결과적으로 전달 채널, 특히 채널 높이 및 회전자까지의 거리가 매우 작게 유지될 수 있으며 분자 흐름은 1 hPa 범위까지 낮게 유지될 수 있습니다. 질소에 대한 압축비는 동시에 필수 계수 10^3만큼 증가합니다.

그림 9에서 압축비 곡선이 약 10의 2제곱만큼 더 높은 압력으로 이동하는 것을 볼 수 있습니다. 기체 처리량, 전진공 호환성 및 입자 허용치 사이의 절충안이 높은 기체 처리량을 위해 설계된 터보 펌프에서 만들어집니다. 이 경우 Holweck 단계에서 갭 거리는 조금 더 큰 치수입니다.

그림 8: 다이어프램 펌프가 있는 HiCube Eco 터보 펌프

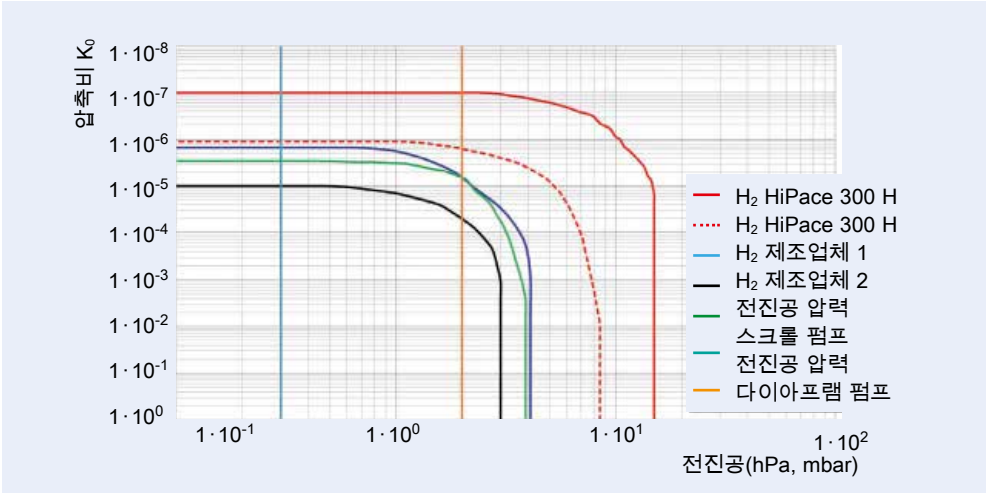


그림 9: 수소에 대한 순수 터보 및 터보 드래그 펌프의 압축비.

적합한 배압 펌프 선택

터보 펌프와 배압 펌프의 압축은 가장 낮은 압력 범위를 관통할 수 있도록 하는 데 중요한 역할을 합니다. 이는 특히 수소와 같은 가벼운 기체에 적용됩니다. 이전의 UHV 응용 분야에서 배압 펌프는 이미 다음과 같은 정도의 낮은 압력을 제공해야만 했습니다. 10^{-2} hPa. 터보 펌프의 압축비는 이에 기반할 수 있습니다. 로터리 베인 펌프, 다단계 루츠 펌프 또는 펌핑 스테이션과 같은 배압 펌프는 이러한 낮은 배압을 제공할 수 있습니다. 로터리 베인 펌프가 더 저렴한 옵션이지만 부정확한 작동의 경우에는 특히 터보 펌프가 꺼질 때 오일 역류의 위험이 있습니다. 매우 낮은 배압 진공을 생성하는 건식 배압 펌프 또는 펌핑 스테이션은 훨씬 더 비싸고 상대적으로 많은 공간을 요구하여 많은 응용 분야에서 단점으로 작용합니다. 여기서의 이상적인 솔루션은 작고 저렴한 건식 배압 펌프를 사용하는 것입니다.

그림 10: 배압 펌프 – DuoLine 로터리 베인 펌프 및 ACP 다단계 루츠 펌프.

대부분의 터보 펌프는 만능입니다. 양호한 압축 외에도, 넓은 펌프 속도 범위와 높은 기체 처리량을 제공합니다. 그러나 극히 일부의 UHV 응용 분야에서만 높은 기체 처리량이 그 역할을 합니다. 여기에서는 그 대신에 가벼운 기체에 대한 우수한 압축비 및 펌프 속도가 중요합니다. 최대 압축 값에 맞게 최적화된 터보 펌프의 Holweck 범위는 불가피하게 펌프의 기체 처리량도 감소시킵니다. 그러나 이는 언급된 응용 분야의 경우 부수적으로 중요한 부분입니다. 그렇지만 배압 펌프와 터보 펌프의 전체 압축비의 대부분을 터보 펌프로 전달할 수 있다는 사실은 큰 장점이 됩니다. 그러므로 압축에 최적화된 Holweck 단계가 있는 터보 펌프는 동일한 최종 압력을 달성하기 위해 훨씬 더 높은 배압에 대해 방전할 수 있습니다. 따라서 압축에 최적화된 Holweck 단계가 있는 터보 펌프를 사용할 때 소형 다이어프램 펌프로도 초고진공을 생성하기에 충분합니다(그림 9, 표 1 참조).

Backing pump	Type	Fore vacuum pressure (hPa)	Final pressure (hPa)
two-stage rotary vane pumpe	Duo 6	0.003	$2.47 \cdot 10^{-11}$
Diaphragm pump (2 stage)	MVP 015-2	3.000	$2.75 \cdot 10^{-11}$
Diaphragm pump (3 stage)	MVP 020-3	1.300	$2.65 \cdot 10^{-11}$
Multi-stage Roots pump	ACP 15	0.032	$2.56 \cdot 10^{-11}$

표 1: HiPace 300 H로 생성된 다양한 배압 펌프에 따른 최종 압력.

그림 11: HiPace 300 H 터보 펌프

이러한 최적화된 터보 펌프는 높은 진공 호환성을 가지므로 다이어프램 펌프는 의심할 나위 없이 인터벌 모드에서 여전히 작동할 수 있습니다. 배압 진공 압력이 허용할 수 없을 정도로 높은 값에 도달하는 경우에만 켜야 합니다. 다양한 응용 분야에서 다이어프램 펌프가 총 시간의 10% 미만으로 작동하는 것으로 나타났습니다. 그 결과로 발생하는 에너지 절약뿐만 아니라, 배압 펌프의 열 복사가 더 낮은 점과 궁극적으로 실험실에서 작동 시 사실상 소음이 거의 없는 점도 과소평가해서는 안 되는 요소입니다.

또한 극도로 낮은 압력을 유지하기 위해(그림 9 및 표 1 참조) 터보 펌프의 다운스트림에 일반적으로 연결되는 이온 게터 펌프가 더 이상 필요하지 않습니다.

따라서 최신 터보 펌프에서 Holweck 단계의 지능형 상호 연결을 통해, 특히 가벼운 기체에 대해 압축이 훨씬 증가할 수 있습니다. 단순하고 작은 배압 펌프는 낮은 UHV 범위에서 매우 낮은 압력을 생성하는 데 사용할 수 있습니다. 과거에 사용했던 옵션과 비교하면 이는 매우 큰 장점에 해당합니다. 그러나 이러한 솔루션의 한계를 지적하는 것 또한 역시 중요합니다. 고압축 터보 펌프는 기체 부하가 큰 경우에는 덜 적합하다고 볼 수 있습니다.

2021년 파이퍼 베큠은 레이저 밸런싱 기술을 도입했습니다. 이는 터보 펌프 회전자의 훨씬 더 효율적인 균형을 제공하는 새로운 방법입니다. 밸런싱 웨이트를 밸런싱 홀에 나사로 고정하는 대신, 고에너지 레이저 광선을 이용하여 재료를 제거합니다. 따라서 질량 밸런싱이 뒤바뀝니다. 이 방법은 잔류 언밸런스를 훨씬 더 낮추어 진동 및 소음 방출을 줄이고 볼 베어링의 수명을 연장합니다. 따라서 파이퍼 베큠의 터보 펌프를 더욱 효율적으로 사용할 수 있습니다. 이 기술은 특허를 취득했으며 전 세계 시장에서 고유한 기술입니다.

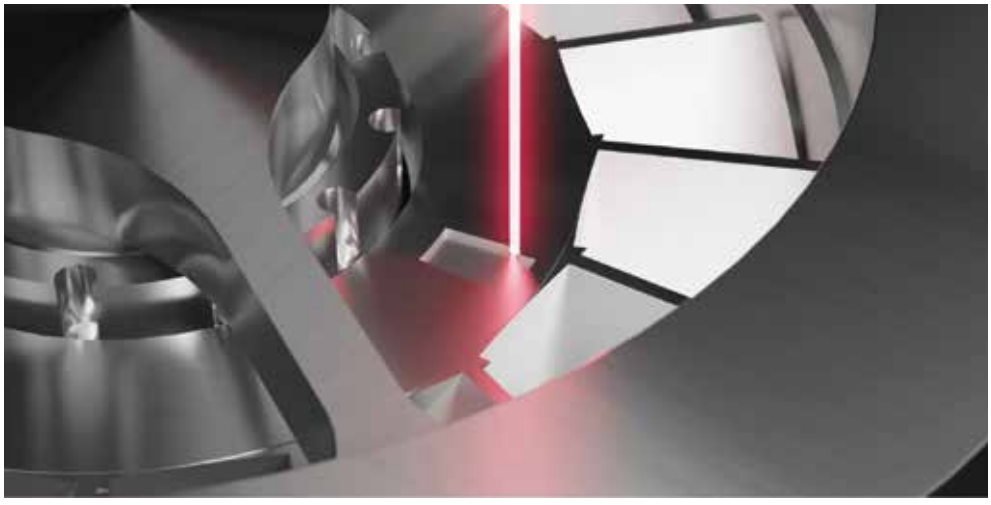


그림 12: 레이저 어블레이션의 선도 업체인 파이퍼 베큠은 나노 그램 범위에서 회전자의 균형을 맞출 수 있습니다.

Your Success. Our Passion.

We give our best for you every day – worldwide!

완벽한 진공 솔루션을 찾고 계십니까 당사로 문의하십시오.

파이퍼베큠 GmbH
본사 · 독일
전화: +49 6441 802-0

Errors excepted. All data subject to change without prior notice. PI 0539 PKO (Junw 2022/0)

Follow us on social media
#pfeiffervacuum

www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER VACUUM