

진공기술의 현재와 미래

Current and future trends in vacuum process technology

Stephen Ormrod and Nigel Schofield
주장현 역

이 자료는 Solid State Technology, 2009년 10월 호에 실린 기사 내용을 원저자의 승인 하에 번역·게재된 것입니다.

내용들

- 서론
- Key applications driving process technology
- Current vacuum technology
- Future pumping technology
- Conclusion

서론

전자 소자의 도입으로 인하여 사라지기는커녕, 진공 배기 기술(vacuum pumping technology)은 오늘날 최소한 70여 개의 일반 제조 응용 분야에서 중요한 지원 기능을 수행할 뿐만 아니라 많은 산업 분야에서 활용되고 있다. 특히, 반도체, 평판 디스플레이, 태양전지 제조 그리고 과학 기기 분야가 진공 기술에 대한 최근의 발전을 이끌고 있으며 당분간은 이런 추세가 계속 지속될 것으로 생각된다. 이 글은 진공 기술의 미래를 설명하고 필요할 것으로 생각되는 설계 변경에 대해 요약-설명한 것이다.

20세기 시작 즈음에 산업 공정 기술로서 진공이 이용되기 시작하였는데 특히 전구의 발명에 의해 진공 기술이 활발하게 이용되기 시작하였다. 진공관(vacuum tube)에 의존하는 라디오와 텔레비전의 도입은 이러한 요구를 넓히는 계기가 되었다. 1950년대와 1960년대에는 많은 산업 분야에서 트랜지스터의 이용 확대가 이루

어지면서 특히 전자 산업 분야에서 진공 공정이 필요없을 것이라고 예측되었다. 그러나, 21세기 초 첫 번째 10년이 끝날 즈음에서 진공 공정 기술은 여전히 잘 살아 남았고 역설적으로 전자 산업이 진공 기술을 이끄는 엄청난 동인이 되었다.

오늘날, 진공 부품(진공 부품을 이용하는 진공 시스템과는 달리) 시장은 약 60억 달러이며 지속적으로 여전히 성장하고 있다. 진공 배기와 진공 배기 서비스는 시장의 3분의 2를 차지하고 이중 반도체 제조 분야가 단일 분야로는 가장 크다.

진공 부품에 대한 현재의 수요 중 대략 절반 정도가 놀라울 일도 아니지만 아시아 지역에서 일어나고 있다.

Key applications driving process technology

70개 이상의 일반 산업 응용 분야가 진공 공정을 이용하고 있고 주기적으로 새로운 분야가 생기고 있다. 이 분야들은 다시 수 백 개의 세부 분야로 나누어 지는데

〈저자 약력〉

Stephen Ormrod holds a PhD in electronic engineering from the U. of Nottingham, UK, and is chief technology officer at Edwards, Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 9LW United Kingdom; (stephen.ormrod@edwardsvacuum.com)

Nigel Schofield holds a mechanical engineering degree from Imperial College, London, and is a core technology manager at Edwards.



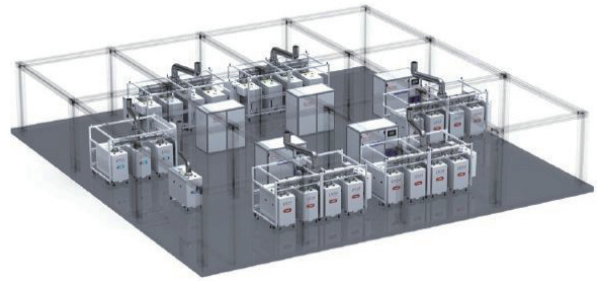
서로 매우 다른 요구 사항들이 필요하다. 특히 전자, 평판디스플레이, 태양 전지 그리고 과학 기기 분야는 향후 진공 기술 발전을 주도할 것이다.

반도체. 소자 크기의 감소와 웨이퍼 크기의 증가는 더 많은 가스 질량 유량(throughput)을 배기하여야 할 필요와 다양한 전구체와 공정 부산물의 증가에 대응하기 위한 fab내 진공 기술 필요를 확대시키고 있다. 이러한 현상은 공정에 적합한 진공과 더 큰 용량의 진공 펌프 필요성을 계속 증가시킬 것이다. 또한, 반도체 공정들에 대한 새로운 물질의 도입뿐만 아니라 새로운 물리적 공정들, 즉 원자층 증착(ALD : Atomic Layer Deposition)은 배기 과정에서 해결해야 할 많은 문제점들을 유발하고 있다.

평판 디스플레이. 대형, 평판 스크린, TFT-LCD TV의 광범위한 적용은 계속적으로 대형 진공 펌프 필요성을 유발하고 있다. 최신 Gen 10 라인들은 장비하나 당 1분 동안 2백만 리터의 질량 유량을 배기하기 위해 40대의 펌프들을 이용하고 있다. 이러한 진공 펌프들은 이미 평판 디스플레이 제조 공정 조건에 대응하기 위해 그 크기가 두 배가 되었음에도 불구하고 추가로 3배 또는 4배 더 커져야 할 필요가 있다.(그림 1 참조)

태양전지 제조. 더욱 편리한 전력 원(power source)이면서 에너지 비용 측면에서 태양광 발전이 주목을 받음에 따라 태양 전지 제조에서 배기 용량이 더 큰 진공 펌프와 대처하기 어려운 화학 반응과 그 반응물들에 적용할 수 있는 진공 펌프 필요성 측면이 또 다른 기술 주도 요인이 될 것이 분명하다. 태양 전지 제조가 반도체, 평판 디스플레이 그리고 일반 산업 응용 분야에 이미 사용되고 있는 진공 제품들에 대한 수요 증가를 촉진함과 동시에 태양 전지 응용 분야의 특별한 요구 사항들에 적합한 성능을 요구하고 있다. 예를 들면, 단일 chamber에서의 SiH_4 를 이용한 증착용 진공 펌프 세트는 대용량의 수소(H_2) 배기라는 요구 사항과 함께 매우 강한 내부식성을 요구하는 서로 모순된 요구 사항들 양쪽을 모두 충족시켜야 한다.

과학 기기 분야. 이 분야에서는 수요가 많은 질량 분석 장비가 진공 기술 발전의 견인 요인이다. 현재 사



[Fig. 1] A 2 million L/min pump set for a typical Gen-10 flat-panel tool.

용되고 있는 진공 펌프들은 증가되는 큰 질량 유량(throughput)에 대응하기 위해 가동 범위 끝까지 사용 조건이 확대되고 있다. 이러한 진공 펌프들은 그 크기가 거의 같은 상태를 대략 유지하는 반면 흡입구 배기 속력은 거의 두 배 그리고 전체 펌프 질량 유량은 10배 정도 많아지고 있다. 진공 펌프 비용 역시 줄어들고 있다.

Current vacuum technology

20세기 중반까지 거의 모든 1차 펌프들로 오일 밀봉 회전 베인 방식(oil-sealed rotary vane mechanism)을 이용하였다. 20세기가 끝날 무렵까지 반도체 산업이 진공 배기 기술 변화 필요성을 견인하였다. 반도체 공정에 사용되는 강한 화학 물질들(aggressive chemicals)은 윤활과 밀봉을 위해 사용된 오일들을 공격하는 경향이 있고 이로 인하여 결국 진공 펌프가 멈춰서게 되었다. 이러한 문제는 건식 회전 진공 펌프와 자기 부상 터보 분자 펌프의 개발을 촉진하였다.

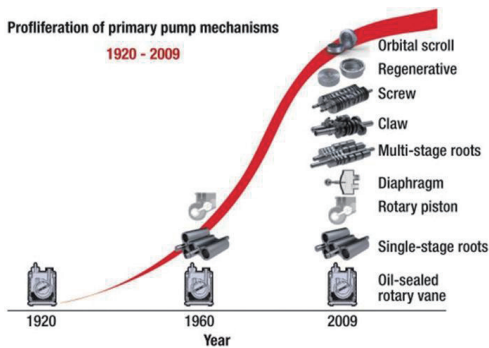
건식 회전 펌프들은 극도로 엄격한 구동 간극(running clearance)과 실용적인 진공도를 얻기 위한 여러 개의 단(multiple stage)을 필요로 한다. 그러나, 이런 건식 진공 펌프의 사용으로 인하여 오일 회전식 펌프를 사용할 때에 비해 추가적으로 발생하는 비용은 반도체 제조 공정에 건식 진공 펌프를 도입하여 얻어지는 이점들에 의해 상쇄되고도 남는다. 건식 진공 펌프는 다양한 배기 메커니즘 - Roots, Claw, Screw 그리고 Scroll- 을 이용한다. 이러한 메커니즘들은 새로운 개념이 아니고 현대적인 가공 능력이 이런 메커니즘들을 수용할 수 있는 수준의 비용으로 생산할 수 있게 만들었다.

이런 배기 메커니즘들 각각은 성공적으로 채용되어 왔으며 각각은 특정 분야 별로 서로 장단점들을 갖고 있

다. 예를 들면, scroll pump은 훨씬 작은 크기로 경제적인 측면에서 작게 만들 수 있다는 것이 독특한 장점이다.

터보 분자 펌프들은 빠르게 회전하는 날개들(blades)을 이용하여 가스 분자들의 방향을 바꾸고 이 가스 분자들이 직렬로 배열된 여러 개의 단을 통과하여 압력이 증가될 수 있도록 한다.

오일 윤활 방식을 이용한 초기 터보 분자 펌프들은 반도체 제조 과정의 식각 공정에 광범위하게 이용되어 왔다. 식각 공정에서 생기는 산(acid)들은 오일 성질에 영향을 주고 수 주일 간격으로 잦은 배기 문제를 야기한다. 이 문제는 자기 베어링을 도입하여 펌프 구동 샤프트를 부상하고 윤활 오일 필요성을 제거함으로써 해결되었다.



[Fig. 2] Three snapshots in time.

도입된 최신 1차 배기 메커니즘은 regenerative pump로써 한 개의 고속 회전자를 이용하여 기체에 운동량을 전달하고 기체를 몇 개의 단을 통해 대기압까지 압축한다. 음파나 플라즈마를 이용하는 다른 비이송식 배기 메커니즘(non-displacement pumping mechanism)을 생각할 수도 있지만, regenerative pump가 성공적으로 상품화될 수 있을 것으로 보여진다.

Future pumping technology

미래 기술 발전을 예측하는 것은 항상 위험성이 따른다. 그러나 분명한 진공 기술 추세가 있는데, 특히 샤프트 회전 속도, 배기 소비 전력 관리 그리고 컴퓨터 모델링 분야에 대해서는 어느 정도 확신을 가질 수 있다.

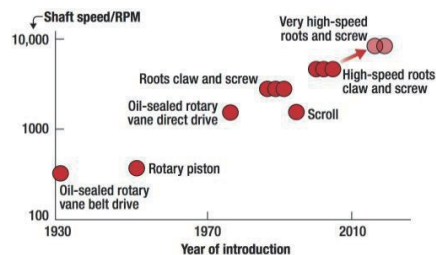
샤프트 회전 속도. 건식 진공 펌프가 처음 도입되었을 때, 이 펌프들은 대략 3,000에서 3,600rpm으로 구동

하였다. 오늘날의 건식 진공 펌프들은 전자 소자들(예를 들면 인버터 등)을 이용하여 claw, screw 그리고 다단 Roots 펌프들의 경우 통상 6,000rpm으로 더 빨리 구동할 수 있다.

펌프의 회전 속도를 증가시킴으로써 많은 이점들을 얻을 수 있다. 내부에서의 리크를 줄이면서 펌프와 모터를 더 작게 만드는 것이 가능하며 이는 필요한 펌프 내부 단(stage) 수를 줄일 수 있게 해 준다. 이런 이점들을 모두 합치면 전체 펌프 비용을 줄일 수 있다.

역사적으로, 펌프 샤프트 속도는 점진적으로 증가되어 왔다.(그림 3). 그러나, 특정한 배기 기술에 의해 얻을 수 있는 최대 회전 속도에는 기본적인 한계가 있다. 이 한계는 재질이나 베어링 기술때문이 아니라 컨덕턴스(conductance)에 의해 결정된다. 한 공간으로 가스가 흘러갈 수 있게 하는 데는 시간이 걸리며 특히 낮은 압력에서는 더 많이 걸린다.

각각의 배기 메커니즘은 채워야 할 체적의 모양과 크기 측면에서 서로 다른 특성을 갖는다. 좁고 구멍 형상의 흡입구 그리고 길고 얇은 체적 공간을 갖는 scroll 메커니즘은 비어있는 체적을 채우는 데 있어 가장 느린 배기 메커니즘의 하나이다. 이 펌프의 성능은 샤프트 회전 속도를 증가시키는 것에 비례하여 증가되지 않는데 대부분의 scroll 펌프들은 1500rpm 정도에서 구동된다. 반면에 Roots 메커니즘은 매우 큰 흡입구 직경과 짧은 체적 길이를 가지고 있어 비어 있는 공간을 빠르게 채울 수 있고 더 빠른 샤프트 회전 속도를 효과적으로 이용할 수 있게 해 준다.



[Fig. 3] Shaft speeds for primary pumping mechanisms.

Roots와 screw 펌프들의 컨덕턴스 한계(최대치)는 대략 15,000rpm 정도에서 얻어진다. 그러나, 이런 속도를 얻기 위해서는 재질, 베어링 그리고 드라이버의 점진적인 향상이 필요할 것이다. 향후 10년 정도 내에 현재

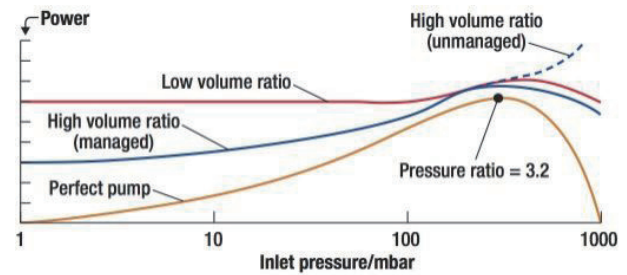


의 1차 배기 메커니즘들 대부분 컨덕턴스로 인한 한계에 도달할 것이며, Roots와 screw 메커니즘들은 다른 메커니즘에 비해 생존 가능성이 높음을 증명할 수 있을 것이다.

터보 분자 펌프 컨덕턴스는 blade speed와 기체 분자 속도에 의해 결정된다. 터보 분자 펌프의 성능은 일차적으로는 베어링과 회전자가 견딜 수 있는 최대 회전 속도에 의해 결정되어 왔다. 진공 펌프 산업에서는 더 가볍고 증가된 회전 속도를 견딜 수 있는 더 강한 재질을 찾고 있다. 이 펌프는 질량이 큰 기체들에 대해 컨덕턴스 최대치까지 도달한 반면에 질량이 작은 기체들 예를 들면 수소(H₂)의 경우 아직 최대치에 도달하지 못했다. 이를 위해서는 아직 더 많은 시간이 필요할 것이다.

소비전력 관리. 진공 펌프 소비전력은 펌프 운용 비용 발생의 주요 요인 가운데 하나이다. 진공 펌프가 소비하는 전력량은 체적비(volume ratio)와 흡입구 압력에 관계된다. 완벽한 진공 펌프(가변 체적비와 손실이 없는)는 그림 4에서 초록색처럼 구동하게 된다. 흡입구 압력이 대기압 상태일 때, 해당 펌프는 기체를 단지 한 곳에서 다른 한 곳으로 압축없이 이동만 시킴으로 일(work) 또는 전력이 필요하지 않다. 낮은 압력에서는 해당 펌프가 단지 소수의 분자들을 배기함으로써 소비 전력이 거의 필요하지 않고 이 분자들을 대기압까지 다시 압축하기 위해서 소비 전력이 역시 거의 필요하지 않다. 그러나, 대기압과 낮은 압력 사이에서는 상당한 양의 에너지가 필요한데 공기를 배기하는 경우 대략 300mbar 정도에서 많은 소비전력이 필요하다.

펌프 설계자가 겪는 문제는 소비전력이 초록색 곡선처럼 되도록 만들기 위해서는 펌프 전체에 걸쳐 압력비에 맞추어 내부 체적비를 조정하여야 한다는 것과 이것이 항상 변한다는 것이다. 실제로 오일 밀봉식 회전 베인 펌프는 배기구에 non-return valve를 장착하여 이런 것들을 훌륭하게 달성할 수 있다. 샤프트가 고속으로 회전하는 건식 진공 펌프는 non-return valve를 사용할 수 없는데 그 이유는 이 밸브가 너무 느리게 작동하기 때문이다. 건식 진공 펌프의 여러 개의 단(multiple stage)들은 펌프 전체에 걸쳐 고정된 체적 비를 효과적으로 구현 - 큰 흡입구 단 다음에 작은 배기구 단을 연결 - 할 수 있다. 통상적인 약 3 : 1 정도의 적은 체적비에서 배기구단은 상대적으로 크고 따라서 진공 펌프가



[Fig. 4] Power consumption is a function of inlet pressure and volume ratio. Power consumption reaches a maximum for air at a pressure ratio of 3.2, about 300mbar.

대기압에서 초기 배기할 때 제약 요인이 되지 않는다. 이렇게 만들어 줌으로써 과부하 상태(overload)를 막을 수 있지만 결과적으로 소비 전력 곡선이 항상 높아진다.(그림 4의 붉은 색 곡선 참고). 어떤 진공 펌프가 대부분의 구동 상태를 낮은 압력을 유지하는 경우는 분명히 낭비적인 요소가 강하다.

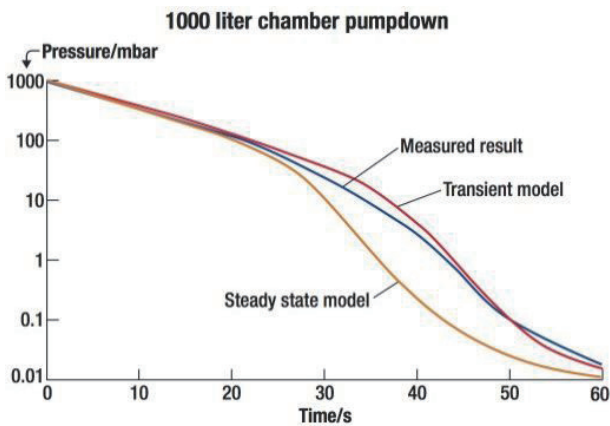
최신 건식 진공 펌프들은 낮은 압력에서 그림 4의 푸른 색 곡선처럼 낮은 압력에서 낮은 소비 전력을 갖도록 높은 체적 비율을 적용하고 있다. 그러나, 이로 인해 생기는 높은 흡입구 압력(점선의 푸른 색 곡선)에서의 과부하 문제를 조절할 필요가 있다. 과부하를 방지하기 위해서, 구동 전자 소자들은 소비전력을 제한하고 높은 압력에서 펌프의 회전 속도를 늦추게 된다. 이렇게 하면 과부하 방지 기능이 잘 작동하지만 배기 속력이 줄어든다는 문제가 있다. 또 다른 해결 방안은 배기 메커니즘에 blow-off valve를 장착하여 작은 배기 단에 의한 제약을 완화하고 배기 속력을 유지하는 것이다. 높은 압력에서의 과부하를 해결함으로써 큰 체적 비를 달성할 수 있고 이로 인하여 소비 전력이 개선되기 때문에 미래의 펌프들은 큰 체적비를 갖는 쪽으로 설계될 것이다. 따라서, 실용적인 미래의 펌프들은 이론적인 곡선에 더욱 가까운 소비 전력 특성을 갖게 될 것이다.

진공 배기에 대한 컴퓨터 모델링. 우리는 컴퓨터를 이용하여 정교하게 진공 chamber 체적, 배관 컨덕턴스, 벽으로부터의 outgassing 그리고 펌프에서의 흡입 등을 모사할 수 있다. 또한 난류, 층류, 천이류 그리고 분자류에서 서로 다른 영역에서 흐름 양상을 예측할 수 있다. 이런 것들을 모두 함께 고려하여 전체 진공 시스템의 성능을 예측하는 일련의 방정식들을 풀 수 있다.

통상적으로, 이러한 과정은 한 공정 chamber의 배기 과정(pump-down)이 될 수 있는데 처음에는 난류 그리고 증류와 outgassing이 막대한 영향을 주는 천이류를 지나는 것까지 모사할 있다. 그 결과물은 pump-down curve일 것이다. 이 데이터의 정밀도는 중요한데 특히 과도한 배기에 소요되는 비용(필요 이상으로 큰 펌프 용량을 적용하거나 펌프 대수를 늘리는 것등)을 줄이는 것이 중요한 대용량 배기 시스템의 경우 매우 중요하다.

이러한 복잡한 모델은 일시적(transient) 뿐만 아니라 지속적 상태를 유지하는 조건들도 계산하며 단열팽창에 의한 냉각과 Roots blower의 감속과 재가속 등에 대한 모사가 가능하다. 이러한 효과들이 pump-down time을 길어지게 함으로 정교한 모델을 만들기 위해서는 반드시 고려되어야 한다.

그림 5는 최신 모델링 결과(붉은 색)와 실제 성능(푸른 색)을 비교하고 있다. 노란색은 transient effect가 고려되지 않은 초창기 에드워드의 모델링 결과이다. 모델링은 이제 신뢰할 수 있는 방법으로 성능을 예측하고 있으며 최적화된 진공 시스템의 설계와 소비 전력 최소화에 더욱 많이 이용될 것이다.



[Fig. 5] Computer modeling(red line) compared to actual performance(blue line)

컴퓨터 모델링(모사)을 같은 방식으로 진공 펌프 단(stage)에도 적용할 수 있다. 단(stage) 크기, 구동 간극, 리크, 컨덕턴스등과 같은 변수들이 고려될 수 있다. 이를 통해 설계와 소비 전력 그리고 배기 속력 곡선 등의 성능 최적화에 대한 모사가 가능하다. 이런 방식으로,

loadlock 배기나 수소(H₂) 배기 과정 등의 특정 이용 분야에 필요한 진공 펌프 설계가 가능해진다.

CONCLUSION

미래의 진공 펌프들은 더욱 신뢰성이 향상될 것이고 유지 보수 전까지 오랜 동안 사용될 수 있을 것이다. 진공 펌프들은 가동하는데 있어 더욱 안전해지고 fab 공간을 덜 차지하며 더욱 깨끗하게 그리고 소비 전력이 덜 들뿐만 아니라 더 낮은 소음, 진동 그리고 열 발생량이 적어질 것이다. 또한 향상된 내부식성을 가지며 필요에 따라 뜨거운 상태로 가동될 수 있게 될 것이다. 결과적으로 진공 펌프는 더욱 더 환경 친화적이 될 것이며 청결하게 가동되고 소비 전력이 적게 필요해져 이산화탄소 배출량 감소에 도움을 줄 것이다. 또한, 더 많이 재활용된 물질들을 사용할 것이며 소모품 사용량이 줄어들어 전체 펌프 비용이 절감되는데 도움을 줄 것이다. 아울러 진공 펌프들은 세정, 수리 그리고 재조립 등이 더욱 쉬워질 것이다.

기술 발전은 더 빠른 샤프트 회전 속도, 성능 향상을 위해 배기 메커니즘의 확산 그리고 메커니즘의 조합을 가능하게 한다. 마지막으로 진공 펌프들은 새로운 물질들이 사용되고 성능 향상과 시스템 및 구동 비용 절감을 위한 향상된 모델링이 가능하게 된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 글의 저자들은 약 95년 전에 진공 회사로 Edwards를 설립한 F.D. Edwards에게 경의를 표하고자 한다.

References

- [1] International Statistics on Vacuum Technology (ISVT) and Edwards estimates; ISVT participants (AVEM, JVIA and EVTA) represent approximately 80% of the global market.