

# 반도체/디스플레이 공정급 건식진공펌프 개발 개요

이상훈<sup>a</sup> · 노명근<sup>a\*</sup> · 김병욱<sup>b</sup> · 이안성<sup>b</sup>

<sup>a</sup>(주)엘오티베컴, 안성 456-370

<sup>b</sup>한국기계연구원, 대전 305-600

(2010년 5월 11일 받음, 2010년 6월 15일 수정, 2010년 6월 23일 확정)

반도체소자 및 디스플레이 제조공정의 핵심 환경인 진공을 형성 유지하기 위한 건식진공펌프는 높은 성능과 신뢰성을 필요로 한다. 건식진공펌프의 개발을 위해서는 다양한 고려와 세밀한 기술적 검토가 필요하다. 본고에서는 반도체 및 디스플레이 제조 공정용 건식진공펌프 개발 과정을 단계별로 소개하고 향후 기술발전 방향에 대해 소개하고자 한다.

주제어 : 건식진공펌프, 진공펌프, 반도체, 디스플레이

## I. 서 론

진공 기술은 식품산업 등 일반 산업 분야를 비롯하여 반도체소자, 디스플레이, 우주항공 분야 등 고정정 공정 상태를 요구하는 첨단 산업분야 등 정보(IT), 나노(NT), 바이오(BT), 환경(ET) 기술 등 전 산업분야에 걸쳐 그 중요성이 더욱 증대되고 있다. 17세기 경 처음 진공이라는 현상이 발견된 이후 진공관련 기술의 발전은 다양한 형태의 진공펌프 개발을 거듭하며 인류 기술 발전에 이바지해 왔다. 우리는 다양한 기체 분자들의 구성인 공기로 둘러싸인 대기권의 환경에서 살아가고 있다. 대기압보다 낮은 압력 상태를 의미하는 진공 환경의 조성은 주변의 자연적인 대기 상태에 비하여 희박기체 환경을 조성하는 것으로 자연현상에 반하는 방향으로 진행되어야 한다. 따라서 일상 및 산업분야에서 인위적인 진공 형성을 위해서는 주변 환경과 격리되는 밀폐공간과 밀폐 공간 내에 존재하는 기체분자들을 배기시키는 수단이 필요하다. 인위적인 배기를 위해서는 외부의 에너지원을 이용한 기체 분자들의 이동이 필요하며 이를 위한 다양한 형태의 진공펌프가 개발되어 사용되고 있다.

진공펌프는 기체 분자들을 배기시키는 방식이나 그 사용 영역 및 형태 등에 따라 다양한 방식으로 분류된다. 기체의 배기 방식에 따라 크게 진공용기 내의 공기를 펌프를 통해 완전히 외부로 내보내는 가스배출방식(gas transfer type)

펌프와 용기 내의 공기를 펌프 내의 특정 공간이나 물질 내에 붙잡아 두면서 그 분자운동을 제한하는 가스흡착방식(gas adsorption type)의 펌프로 나눈다. 사용되는 진공 영역에 따라 크게 대기압으로부터  $10^{-1}$  Pa 정도의 범위에서 사용되는 저진공 펌프,  $10^{-1}$  Pa 이하의 중진공 영역으로부터 초고진공 내지 극고진공 영역까지 작동하는 고진공 펌프류로 구분된다 [1]. 대기부터 저진공 영역에서는 기체 분자들은 점성류의 유체 흐름적 특성을 지니고 있어 기체의 압축현상이 유효하여 적절한 방법을 이용한 압축과 배출과정을 통하여 기체의 이송과 대기 방출이 이루어진다. 중진공 이하 고진공의 희박상태에서는 기체 분자들이 개별적 분자운동 현상을 보이는 분자류의 특성을 지니게 되어 개별적 기체 분자들을 대상으로 물리적 운동 부여와 확률적 이동 방향을 부여하는 방법으로 배기 작용을 수행하여야 한다 [2]. 따라서 흡착 방식을 이용하는 대표적 펌프인 게터펌프, 이온펌프, 크라이오 펌프 등은 고진공, 초고진공, 극고진공 조건을 형성하기 위해 사용되며 회전식펌프, 터보펌프, 확산펌프로 대표되는 기체 이송식 펌프들은 주로 중저진공 범위를 위해 사용된다. Table 1에는 산업분야 별 세부 응용 영역과 요구되는 진공 수준에 대하여 간략히 정리하였다. 본고에서는 반도체 및 디스플레이 제조 공정에 필수적인 진공펌프 중 가장 폭넓게 사용되는 건식진공 펌프를 중심으로 개발 시 고려사항과 개발 프로세스를 간략히 소개하고자 한다.

\* [전자우편] nmk@lotvacuum.com

Table 1. Vacuum market segmentation.

	Markets	Typical operating pressure (mbar)
Rough vacuum	Packaging, printing and paper handling, pick-up and conveying, medical	>1
Process vacuum	Chemical, petrochemical, pharmaceutical, plastics, food, beverage, textile, paper, ceramics, freeze drying	>10 <sup>-2</sup>
Industrial vacuum	Vacuum metallurgy, vacuum heat treatment, laser technology, electron tubes, TV tube, lamps and bulbs, industrial leak detection, refrigeration and air conditioning, automotive	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-6</sup>
Semiconductor process vacuum	Silicon semiconductor, compound semiconductor, TFT-LCD displays, MEMS, process equipment, manufacturers and end users for PVD/CVD, etching, ion implantation, crystal pulling etc.	1~10 <sup>-8</sup>
Thin-film deposition (non-semiconductor)	Glass/web/optical coating, data storage (CD, DVD etc.), thin film heads, surface coating, display coatings (OLED, FED, PDP etc.), solar (photovoltaics, thermal)	10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-8</sup>
Instrumentation manufactures	Mass spectrometers, electron microscopes, leak detectors, surface analysis, gas analysis, metrology/inspection, defect review systems for semiconductor, focused ion beam system, electron beam systems, X-ray analysis, MRI and NMR	10 <sup>-6</sup> ~10 <sup>-10</sup>
R&D	Universities, government labs, scientific research, laboratories, space simulation	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-11</sup>

## II. 진공 시장 현황

전 산업 분야에 걸쳐 핵심기술로 광범위하게 이용되고 있는 진공 관련 기술은 그 중요성이 점점 높아져 왔다. 특히 집적도 향상이 지속적으로 요구되는 반도체 제조 산업 등 첨단기술 및 고정정 요건이 요구되는 산업 분야에서 그 중요성은 절대적이라 할 수 있다. 80년대 이후 진공기술의 응용분야가 다양화됨에 따라 해당 시장규모도 지속적으로 증대되는 추세이다. 2007년 International Statistics on Vacuum Technology (ISVT)의 보고에 따르면 펌프, 펌핑 시스템, 진공 분석기기, 진공 파트 등을 포함하는 진공 부품 관련 세계 시장규모는 50억 US 달러를 형성하여 2006년 대비 약 12% 수준의 성장을 보였다. 국가별로는 미국과 일본이 각각 27% 정도의 최대 시장을 형성하고 있다. 아시아 시장이 차지하는 규모는 전체의 약 50%이며 국내의 경우 10~15% 수준의 높은 시장규모를 지니고 있는 것으로 추정된다. 2004년 이후 전체 진공부품 시장규모의 50% 이상을 진공펌프가 지속적으로 유지하고 있는데 2007년 기준 약 25억 달러 시장을 형성하고 있다.

진공부품 시장에서 산업분야별로 차지하는 규모를 살펴보면 반도체산업 분야가 약 40% 이상으로 가장 큰 시장을 점유하고 있다(Fig. 1). 일반적으로 반도체 공정에서는 건식진공펌프, 터보분자펌프, 크라이오펌프 등이 주로 사용

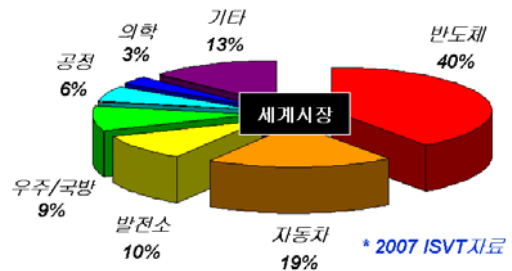


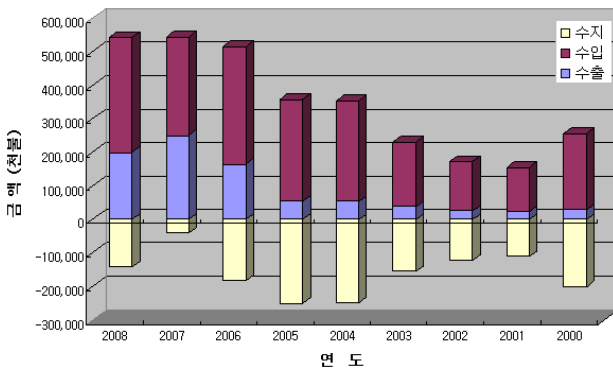
Figure 1. Global vacuum component market (Total : 5 billion US\$).

되는데, 이 중 건식진공펌프 시장이 약 70% 이상으로 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 건식진공펌프의 비중이 높은 이유는 저진공 공정 환경에서의 사용뿐만 아니라 고진공의 공정환경이 필요하여 고진공펌프가 사용되는 경우에도 이의 정상작동을 위해서 반드시 고진공펌프 뒷단을 중진공으로 유지해야 하는데 이를 위한 저진공펌프가 필요하기 때문이다. 반도체/디스플레이 제조공정에서 사용되는 진공펌프 중 대다수를 차지하고 있는 저진공(rough vacuum)용 건식진공펌프는 요구되는 배기 특성에 따라 다양한 형식의 펌프들이 적용되고 있다. 현재 국내 주요 반도체 제조사에서 사용되고 있는 건식진공펌프의 대표적인 제조사와 진공펌프의 주요 형태는 Table 2와 같다.

국가적 주력 산업인 반도체/디스플레이 산업분야에서의 건식진공펌프의 중요성에도 불구하고 국내 관련 기술적,

Table 2. Suppliers of dry pump for semiconductor processes.

Company	Country	Pump Type
LOT Vacuum	Korea	Screw
Edwards	England	Roots/Hook & Claw
Adexen	France	Roots/Multi-stage
Ebara	Japan	Roots/Multi-stage
Kashiyama	Japan	Screw
Busch	German	Screw



\* 자료추출 범위: 수출입 품목기준 (품목류: 진공펌프 류, HD No. 기준), 8414.10 진공펌프, 8414.10.1000 항공기의 것, 8414.10.9000기타, 8414.10.9010 반도체 제조용 기기의 것, 8414.10.9090기타

Figure 2. The statistics for annual export and import of vacuum pump (Source: The import/export data by Korea Customs Service).

생산적 수준은 그 시장의 규모와 중요성에 비하여 매우 낮은 편으로 반도체 및 디스플레이 공정에 사용되는 진공펌프의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다. 반도체 및 디스플레이 제작 공정에 사용되는 진공펌프의 경우 진공 수준의 안정적 유지와 장시간의 연속운전 상태에서의 안정성은 매우 중요하다. 이와 관련된 기계적 신뢰성 확보 요구가 타 산업분야에 비하여 매우 높은 수준으로 국내 기업들의 시장 진출이 매우 저조한 실정이다. 한 예로 2000~2008년 사이의 관세청 수출입 자료에 의하면 2000년 이후부터 2008년까지 전체 진공펌프류에 대한 전체 무역액은 지속적인 증가 추세에 있으나 만성적인 무역적자현상을 보여 수입의존도가 매우 높은 제품군임을 나타내고 있다 (Fig. 2). 더욱이 제시된 수출입자료의 경우 품목류 번호에 의해 구분되어진 자료로서 반도체용 진공펌프의 경우 진공펌프라는 분류 구분 대신 부품으로 분류되어 공정장비와

같이 수입되는 경우가 많아 반도체/디스플레이용 진공펌프의 실제 수입의존도는 더욱 높을 것으로 판단된다.

### III. 반도체/디스플레이 제조공정에서의 진공펌프

현재 반도체/디스플레이 소자 제조공정에 사용되는 대다수 중/저진공 진공펌프는 과거 오일 밀봉 형식의 진공펌프 대신 청정도가 크게 개선된 건식진공펌프가 차지하고 있다. 건식진공펌프는 기체를 이송하는 구조체에 밀봉유를 사용하지 않기 때문에 반도체 소자 등의 미세회로 형성 과정에서 문제가 되는 기화된 밀봉유의 비산 및 역류로 인한 제조 소자의 불량률을 원천적으로 배제시킬 수 있다.

반도체 제조는 매우 다양한 공정들이 순차적으로 진행되는데, 생산성 향상과 나아가 효율적 소자 집적도 증가를 위해서는 해당 공정에 따라 최적화된 형태, 성능 및 특성들을 갖는 진공펌프들의 개발 필요성이 대두되고 있다. 반도체 공정은 일부 과정을 제외하고는 대부분 위험성이 높은 독성 가스를 사용하여 높은 공정 온도에서의 화학반응을 이용하므로 반응 시 많은 양의 공정부산물물이 발생하여 진공펌프 내로 유입된다. 따라서 일반적인 진공펌프와 달리 해당 조건에서도 충분한 펌핑성능과 신뢰도를 확보할 수 있는 진공펌프의 개발이 필요하다. 현재 반도체 및 디스플레이 공정에 사용되는 건식진공펌프들은 도달진공도, 배기속도 등 기본적인 배기성능뿐 아니라 제조공정의 특성에 따라 그 특징점을 다음과 같이 차별화하고 있다.

#### 1. Clean Process

공기 등 순수 기체 성분 또는 소량의 수분이 포함된 반응성 낮은 기체를 배기하는 공정으로 Load Lock 등과 같은 웨이퍼 이송(transfer) 챔버, 분석장비 등의 배기에 해당한다. 상대적으로 진공펌프에 가해지는 배기조건이 수월하고 이송 가스들의 상변이(phase transition)가 거의 없어 질소 퍼지 등의 적용을 하지 않는 것이 일반적이다.

#### 2. Light and Midium Process

Etching, PVD, Ashing 공정과 같은 일부 반응성 가스 또는 침식성 가스를 사용하는 공정에 해당한다. 진공펌프

내로 고체상의 부산물이 가스와 함께 유입되거나 펌프 내에서 펌핑가스의 상변이가 일부 발생하는 경우이다. 반도체/디스플레이 공정에서 사용되는 진공펌프의 경우 20 slm 이하 수준의 소량 질소 퍼지 등을 사용하여 반응성 가스의 상변이 방지와 부산물의 이송을 유도한다.

### 3. Harsh Process

CVD, ALD 공정 등과 같이 박막을 형성하는 공정으로 다량의 고체입자와 많은 경우 부식성 기체의 발생이 필연적으로 이루어진다. 이러한 고체성 부산물 또는 기체 부산물이 직접적으로 진공펌프로 유입되어 진공펌프의 기구적 문제를 발생 시키는 경우가 많다. 해당 공정에 사용되는 진공펌프는 유입되는 고체 부산물의 배출을 용이하게 하고 펌프 내에서의 상변이를 방지하기 위해 다량(100 slm 수준 이하)의 질소 등 불활성 기체 퍼지를 하거나 펌프 내부 온도, 압력 등을 최적화하는 방법이 적용된다.

Table 3은 반도체 공정에서 다양한 공정 성격에 따라 사용에 적합한 건식진공펌프 형태를 제시한다 [3].

## IV. 건식진공펌프의 개발 과정 및 고려 사항

### 1. 건식진공펌프의 개발 과정

건식 진공펌프의 개발과정은 제조사 별 또는 진공펌프의 형태에 따라 다소 차이가 있지만 기본적인 과정은 유사하

Table 3. Dry pump application matrix.

Application	Pump type		
	Clean	Moderate	Harsh
General air evacuation	○	○	○
Load lock	○	○	○
PVD (sputter)	○	○	○
Ion implant	○	○	○
Ashing	×	○	○
Etching (nonmetal)	×	× or ○	○
Etching (metal)	×	×	○
CVD (metal)	×	×	○
CVD (silicon)	×	×	○
CVD (nitride)	×	×	○

기에 스크루형 건식진공펌프 개발과정을 예로 설명하고자 한다. 대부분의 기계 및 시스템 개발과 마찬가지로 건식진공펌프의 경우도 기획, 설계, 예측, 가공, 조립 및 성능시험 등 일련의 과정을 거쳐 이루어진다. 초기 개발과정을 통하여 제작되는 시제품에서 성능 자료를 확보한 후 이에 바탕한 보완 설계/제작 과정을 반복적으로 진행한 후 양산체계를 염두에 둔 시양산 과정을 거쳐 최종 설계를 완성하게 된다. 이 과정에서 펌프의 실제 공정 환경에서의 운전 안정성 확인은 필수이며 이를 위하여 실 제조공정에 투입하여 장기간에 걸친 운전 중 나타나는 문제점을 찾아 설계를 보완하는 과정을 거친 후 비로소 실질적인 시장 진입을 위한 양산으로 전환된다. 따라서 개발 시작 후 양산까지 평균 3~5년 정도 걸리는 경우가 많다. 새로운 건식진공펌프 개발 과정을 단계별로 구분하면 다음과 같다.

#### 1.1. 개발기획단계

개발을 위한 초기 단계로 기본적인 개발 대상에 대한 사항과 방법을 결정한다. 이를 위하여 시장에서 요구되는 사항 및 적용 목표공정에 대한 관련 자료를 수집/검토하여 적합한 개발 방향을 선정한다.

#### 1.2. 기본설계 단계

기획 과정에서 선정된 개발 방향을 기반으로 적합한 형태의 기구적 구조를 결정하며 이에 대한 기본 설계를 진행하는 단계이다. 이 단계에서는 목적하는 도달진공도, 배기 용량, 필요소비전력 등 성능 조건에 근거한 진공펌프 회전체(rotor) 및 고정체(rotor housing)의 형상 및 크기를 중심으로 기본 설계를 진행한다. 이 과정에서 구조적, 열역학적, 기계적 모사와 해석이 수행되어진다.

#### 1.3. 상세 설계 단계

기본 설계 과정을 통하여 결정된 진공펌프의 주요 구성 부품 및 sub-system에 대한 상세한 설계를 진행하는 단계로서 세밀한 정보와 해석과정을 통하여 얻어진 결과를 설계에 반영한다. 이 단계는 개발 펌프의 가장 중요한 설계인자들을 설정하는 과정으로 정확하고 엄밀한 고려가 이루어지지 못하면 전반적인 개발 일정의 지연 발생 등 시행착오를 발생시키는 요인이 된다. 따라서 정확한 정보의 활용과 검토가 필요하며 열해석을 통한 회전체와 고정체 또는 회전체 간의 간극(clearance) 사항을 계산하고 펌프성능을 추정하게 된다. 특히 건식 진공펌프의 경우 각 회전자 사이 또는 회전자와 펌프몸체 내면 간의 간극사항이 매우 중요한 설계 요소이다. 이는 오일 밀봉식 진공펌프와 달리 기체

의 압축이송 능력과 배기부로부터 펌프 입구 측으로의 기체 역류의 용이성이 고정체와 회전체 표면사이에 형성되는 미세간극의 크기에 의해 좌우되기 때문이다. 결과적으로 진공펌프의 배기속도 및 도달진공도 등 펌프의 성능은 언급된 미세간극의 조절을 통한 제어정도에 좌우된다. 실질적인 펌프 운전 상황에서는 모터 동작 시 외부에게 주어진 전기에너지로부터 변환된 열에너지, 기체 배기 과정에서 발생하는 압축열, 내부 기구들의 운동에 따른 마찰열 등 다양한 열에너지의 발생, 축적 및 발산이 펌프 내에서 복합적으로 일어난다. 결과적으로 펌프의 주요 구성 부품들의 열팽창 현상이 복잡하게 일어나므로 정확한 미세간극의 예측은 쉽지 않은 문제이다. 또한 이러한 열팽창 현상은 펌프의 각 구성 부품의 재질, 위치 및 냉각 여부 등 다양한 조건에 의해 차이를 보인다. 반도체/디스플레이 공정에 사용되는 건식진공펌프의 경우 대부분 수냉식 냉각시스템을 이용하여 펌프 몸체의 온도를 일정한 상태로 유지하는 방식을 사용하기 때문에 펌프의 회전자와 몸체 간의 비균일적 열팽창 경향성은 증가하게 된다. 설계단계에서 최적의 내부간극을 결정하기 위해서는 위 언급된 다양한 원인들에 의한 비 균일적 열팽창 요인에 대한 세심한 검토가 이루어져야 하므로 다양한 모사(simulation) 프로그램을 사용한 반복적인 열해석과 보완설계를 반복하게 된다. Fig. 3은 특정 건식진공펌프의 개발 시 펌프몸체(housing)에 상이한 냉각 구조를 채용함에 따라 달라지는 온도분포를 열해석 과정을 통하여 얻은 결과이다.

저진공 영역에 사용되는 건식진공펌프는 기본적으로 다양한 기구적 형상을 갖는 회전자가 밀폐된 공간에서의 회

전을 통하여 기체를 압축 및 이송하게 된다. 현재 반도체/디스플레이 제조 공정의 경우 공간적 효율성 등을 이유로 펌프의 소형화를 추구하면서 상대적으로 높은 배기성능을 동시에 요구하고 있다. 이러한 이유로 대부분의 건식진공 펌프 개발에서 진공펌프의 효율성 향상은 매우 중요한 요소이며 이를 만족하기 위한 방법으로 이전에 비해 회전자의 회전속도를 수천 rpm 수준으로 증가시키는 경우가 보편적이다. 일반적으로 빠른 속도의 회전 운동이 이뤄질 경우 회전자의 지지축인 베어링 관련 이슈, 회전에 의한 원심력의 증가, 회전자 축 방향으로의 휘어짐 현상 등 다양한 문제가 야기되어 진공펌프의 기본성능, 안정성 및 수명적인 측면에 직접적인 영향을 미치므로 설계 시 깊이 고려해야 할 요소이다. 따라서 회전체 설계 단계에서 다양한 동역학적 해석 과정을 거치는 것이 중요하다. Fig. 4는 상세 설계과정을 통하여 얻어진 회전체에 대한 동역학적 해석 결과를 보여 주며, 이를 통하여 제작 이전에 최종 부품 설계 요소들의 타당성 검증과 베어링 등 주요 부품들에 대한 안정성 판단이 가능하다. 해당 동역학적 해석 단계에서는 회전체의 모델링, 베어링 작용하중 해석, 로터다이나믹 설계 해석, 위험속도 및 모드 해석, 횡진동 설계해석, 불균형 응답 해석, 로터-트레인 비틀림 진동 설계 해석 등과 같은 항목들이 다양하게 검토될 수 있다 [4,5].

상세 설계 및 이를 바탕으로 한 열역학적, 동역학적 해석 등 다양한 검증 작업을 통하여 발견된 문제 사항들에 대한 보완 설계를 진행하고, 기계적 특성 예상치 및 수정, 보완에 따른 진공성능 예측치를 복합적으로 비교 반영하여 비로소 최종 설계를 완성되게 된다. 이러한 작업은 원하는 설

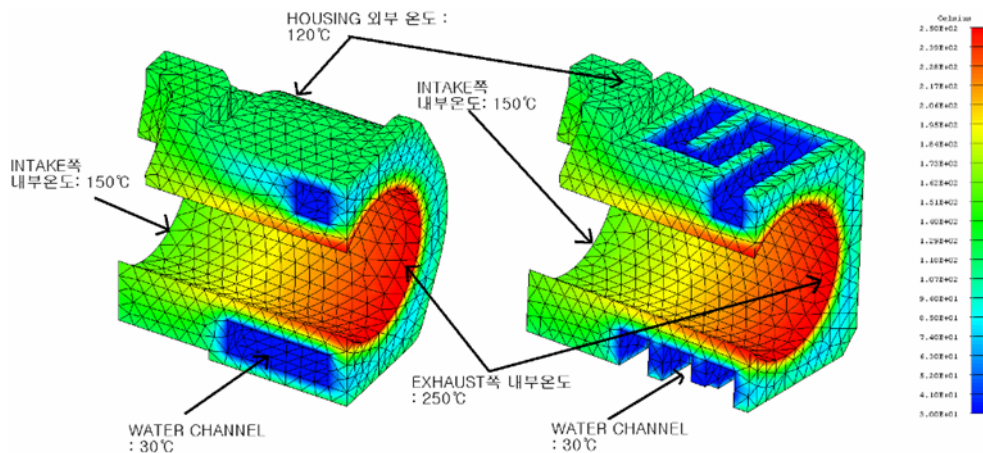


Figure 3. The temperature distribution of rotor housings with different cooling design.



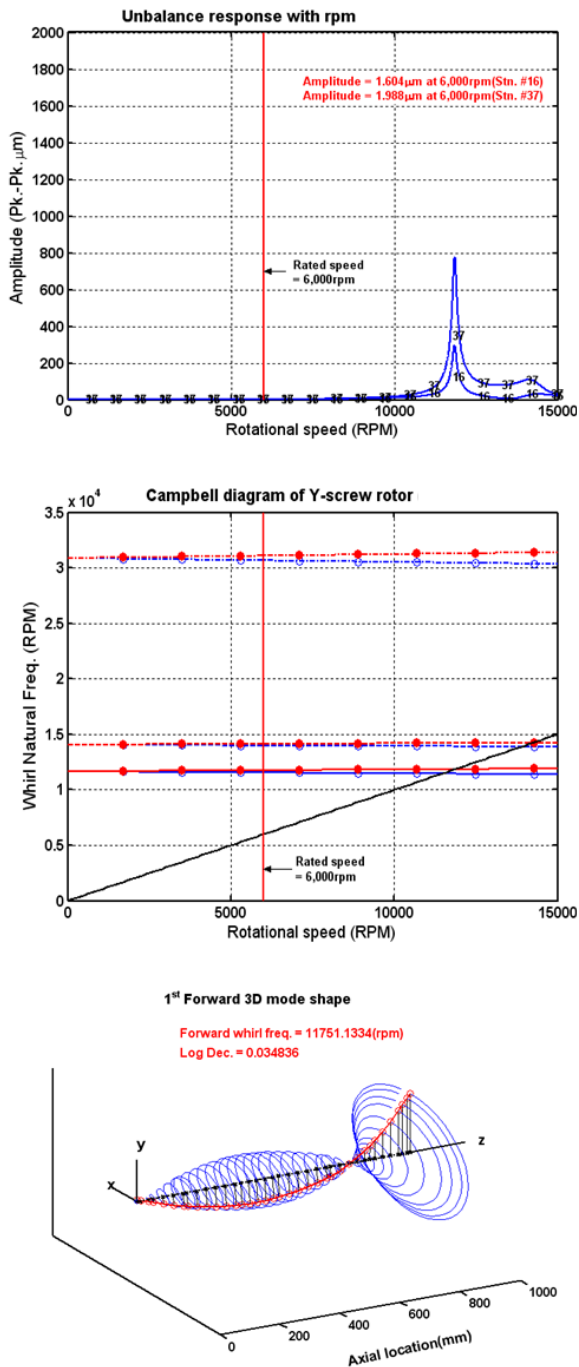


Figure 4. The results of rotor-dynamic analysis for a dry vacuum pump

계 특성치를 확보하기까지 보완설계와 해석을 반복 수행함으로써 실제 부품 및 진공펌프 시제품 제작 단계에서의 문제 발생 확률을 최소화한다.

**1.4. 주요 모듈 및 부품 제작**

본 단계에서는 실질적인 펌프 제작을 위한 상세 설계사항에 준한 부품들의 가공과 제작이 이루어지는 단계로 각

부품의 정확한 가공과 품질 확인이 필수적인 단계이다. 현재의 건식진공펌프들은 실제 운전에서 열적인 환경과 고속회전에 의한 동적 운동을 수행하므로 미세한 가공오차가 있을 경우 펌프구동의 안정성에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 특히 가공과정에서 발생하는 무게 불균일(mass unbalance), 축중심 오차(miss-alignment) 등은 회전체의 회전속도 증가에 따라 동적 운동 불균일성을 증가시켜 심각한 문제를 야기한다. 따라서 제작되는 모든 회전체들은 필연적으로 정밀한 균등질량보정(balancing) 과정을 거치게 된다. 이외에도 회전체, 펌프 몸체를 비롯한 주요 부품들은 3차원 측정기 등 정밀 측정기기를 통한 검사과정을 거치게 된다. 부품 가공 단계에서는 체계화되고 엄격한 생산, 품질 검사 및 관리가 매우 중요한 사항이다.

**1.5. 조립 및 시제품 제작**

최종적인 품질 확인을 통과한 모듈과 부품을 이용하여 건식 진공펌프를 조립하는 단계로 규정화된 절차에 따른 조립이 이루어진다. 대부분의 건식진공펌프는 200~500개 수준의 다양한 부품들로 구성되는데 많은 부분이 조립자의 수작업에 의해 이루어진다. 특히 간극 조정 및 구동기어의 위치 선정 등 펌프 특성에 민감히 영향을 미치는 요소가 많아 조립자의 세심한 관찰과 숙련도를 요구하게 된다. 반도체/디스플레이 공정에 사용되는 건식진공펌프는 신뢰성 확보와 펌프의 상태에 대한 지속적인 모니터링이 필요하므로 다양한 보드 및 센서들이 사용되고 있으며 최종적으로 이들 진장품들의 조립을 거쳐 시제품이 완료되게 된다.

**1.6. 성능 시험 및 데이터 수집**

제작되어진 건식진공펌프에 대해서는 펌프의 기본 성능과 기 적용된 설계 특성 확인을 위해 종합적인 시험을 수행하게 된다. 성능시험 단계에서 측정되어지는 항목들에 대한 객관성 확보를 위해 ISO 등 국제 규격에 준한 엄격한 측정 방법이 적용된다. 이 단계에서 측정되는 주요한 측정 항목들로는 도달진공도(ultimate pressure), 배기속도, 소비 전력 특성, 도달시간(tact time), 냉각수 특성, 소음/진동 특성, cut-in pressure, 잔류기체 분석, 구동 모터 회전속도, 펌프의 내, 외부 온도 특성, 펌프 운전 중의 각 지점에서의 압력 특성 등 매우 다양하다. 이외에도 내구성 평가 등 필요한 추가 항목들에 대한 관찰이 수행되고 얻어진 많은 자료들을 분석하여 필요시 수정, 보완 설계 과정을 거치게 된다. 이를 바탕으로 설계사항 및 펌프 성능의 합당성을 검토하며 반복적 보완 과정을 통하여 최종적인 개발 완료



Figure 5. Performance evaluation systems for dry vacuum pump.

를 확정하게 된다. Fig. 5는 개발 건식진공펌프의 성능 측정을 위해 국제 표준 규격에 준하여 구축되어진 종합 성능 평가 시스템과 소음진동 측정실을 보여주고 있다. 최종적인 개발펌프의 성능에 대한 객관성을 유지하기 위해서는 한국표준과학연구원 등 공신력 있는 기관에서의 표준화된 절차에 의한 평가를 동시에 수행하는 것이 중요하다.

이상에서 서술되어진 개발 과정들은 신뢰성 있는 건식진공펌프 개발을 위한 필수적인 단계를 개략적으로 요약한 것이다. 실제 개발 과정에서는 상기 내용 이외 다양하고 세부적인 사항들이 요구되고 수행되어진다. 특히 반도체 및 디스플레이 공정에 사용되는 진공펌프는 공기 등 일반적인 청정(clean) 기체 펌핑뿐만 아니라 다양한 물질과 공정에 따라 수반되는 다수의 부산물들에 대한 영향성도 고려하여야 하기에 실제 적용 목표인 공정의 특성을 최대한 고려하여 펌프개발에 반영시켜야 한다. 더불어 현장에서 요구되는 문제 및 개선 사항도 반영할 필요가 있으므로 종합적이

고 복합적인 고려를 통한 개발과정이 수행되어야 한다.

## 2. 반도체, 디스플레이 공정용 건식진공펌프의 개발 시 고려사항

진공펌프를 개발하는 과정에서 고려되어야 할 기본적인 요인으로는 펌프를 이용하여 궁극적으로 얻을 수 있는 최저 압력 상태를 나타내는 도달진공도, 펌프의 최적 사용 압력 범위, 시간당 기체를 배기 시킬 수 있는 척도를 나타내는 배기속도 등이다. 이와 더불어 펌프가 사용되어질 실제 적용 공정에서의 요구 사항 또는 주변 환경 요인들인 소음, 진동, 소비전력, 편의성, 기체의 종류 및 특성, 기체의 유입량, 공정 시간 등 다양한 요인들을 최대한 고려하여야 한다. 그러나 현실적으로 모든 공정에 대한 정확한 조건 정보들을 수집하고 이를 적용하기에는 한계가 있으며 설사 충분한 정보를 확보하더라도 이를 모든 펌프에 적용하기는 현실적으로 어려움이 많다. 따라서 반도체/디스플레이용 건식진공펌프를 개발하는 단계에서 사용되는 공정의 기본 특성과 사용자의 요구사항을 최대한 파악한 후 타당한 핵심 요소들을 결정하여 개발스펙에 반영시키는 것이 중요하다. 반도체소자 제조 공정에서와 같이 다양한 반응성 물질을 사용할 때 빈번히 발생하는 상변이 관련 문제나 공정비용과 관련한 에너지 소비 절감 등과 같은 문제들에 대응한 설계 검토는 현재 건식진공펌프 설계에서 우선적으로 고려되고 있는 핵심 요소이다.

### 2.1. 공정가스의 상변환 방지 방법

반도체 및 디스플레이 제조 공정에서는 공정 챔버 내 진공상태에서 다양한 종류의 가스들이 관여된 물리, 화학적 반응이 이루어진 후 진공펌프 시스템에 의해 챔버 밖으로 이들 가스들이 배출된다. 이 과정에서 반응 물질들이 배관 및 펌프를 지나게 되는데, 각 지점에서의 온도, 압력 상태에 따라 자연스럽게 상변이가 나타날 수 있다. 이 경우 펌프로 유입되는 부산물 등의 영향으로 펌프 운전이 심각한 문제점이 발생할 수 있다. 건식진공펌프를 개발하는 단계에서는 해당 문제점을 최대한 예상하고 이에 대한 대응책을 설계에 반영하여야 한다. 현재 사용되고 있는 반도체 및 디스플레이 공정용 건식진공펌프들은 펌프내부에서의 상변화 문제를 방지하기 위해 크게 온도제어와 분압제어 방법을 적용하여 사용하고 있다. 기본적으로 물질특성에 의해 정해지는 기체-액체 상평형도(P-T diagram) 상에서 공정 물질들을

기체상으로 유지시켜 진공펌프에서의 원활한 배기 상태를 유지하는 개념이다 [6]. 물질의 상을 기체상으로 유지하기 위해서는 해당물질이 지니는 포화증기선의 기체영역에 위치하도록 대상물질의 온도 및 압력 상태를 유지시켜야 하므로 펌프내부의 온도 및 압력 정보를 계산 또는 실측 과정을 통하여 확보하고 이를 바탕으로 운용 시 펌프 내부 온도를 설정하게 된다. 실질적인 건식진공펌프에서는 이러한 온도 조절을 통한 제어뿐 아니라 퍼지 가스를 적절한 위치에 투입하여 공정 가스의 분압(partial pressure)을 낮춤으로써 펌프 내부에서의 액상 또는 고상으로의 상변화 현상을 방지한다. 퍼지 기체로는 일반적으로 비활성, 비응축성 가스인 질소를 사용함으로써 공정가스와의 부수적인 화학반응을 방지하고 퍼지가스의 내부 응축을 배제시킨다. 특정 부위에 필요한 양의 퍼지가스 도입은 효율적인 상변화 방지 효과를 달성 할 수 있을 뿐만 아니라 공정부산물로 발생하는 입자성 물질의 종말속도를 극복함으로써 효과적인 고체성 입자의 이송을 촉진시킬 수 있는 장점을 지닌다. 반면에 퍼지가스의 사용은 추가적 부속품의 사용비용과 운영비용의 발생이라는 단점을 동시에 지닌다. 따라서 퍼지 가스 도입은 공정 특성에 따라 적절한 수준에서 결정된다.

## 2.2. 소비전력 저감을 위한 방법

진공 펌프의 운영에 필요한 전기에너지는 진공펌프의 배기 속도와 배기구의 압력 등에 비례한다. 현재 반도체 및 디스플레이 제조공정은 생산 효율의 증대를 위하여 공정가스의 사용량 증가 및 지속적인 기관의 대형화가 진행되고 있어 높은 배기용량을 가지는 대형 건식 진공펌프에 대한 수요가 점점증하고 있는 실정이다. 대용량의 배기 능력을 부여하기 위해서는 필연적으로 사용 에너지 증가가 수반되는데 운용비용이나 환경친화적 관점에서 볼 때 저소비전력 제품에 대한 소비자의 요구가 점점증하므로 큰 배기능력과 고에너지효율을 갖는 제품의 확보가 필요하다. 따라서 건식진공펌프를 개발하는 단계에서 다양한 설계요소들을 종합적으로 검토하여 높은 배기 성능과 동시에 사용되는 소비전력의 최소화가 가능한 설계치를 찾아내기 위해 다양한 기술의 반영이 이뤄진다. 반도체 제조공정에서 진공펌프에 의한 소비전력 절감 방안은 기 보고되었는데 [7] 본고에서는 소비전력 저감을 위해 건식진공펌프 설계 시 고려하여야 할 요소를 두 방향으로 기술하였다.

### - 기계/기구 설계 시 고려 요소

펌프 시스템은 자연현상을 역행하는 방향으로 물질을 이

동시키는 기계장치이므로 에너지의 소비를 피할 수 없다. 진공펌프 작동 시 필요한 에너지는 크게 이상적인 기체의 흡입, 압축, 배기 과정의 일을 위한 부분과 기계 동작과정에서 소모되어 열 및 소리 등으로 변환되어 사라지는 부분으로 나누어 볼 수 있다.

기체 및 유체를 압축, 배기하는 과정은 한 번의 압축과정을 거치는 1단 압축 경우보다 단계적으로 단 별로 기체를 압축하는 다단압축 방법이 에너지 효율 면에서 유리하다. 이는 동일한 펌핑용량을 가정할 경우 1단 압축 형식을 갖는 스크루형 펌프보다 여러 단에 걸쳐 순차적으로 압축을 해 나가는 다단형 펌프 구성이 에너지 사용효율 관점에서 상대적으로 우월함을 의미한다. 비록 다단 형태의 진공펌프에는 상대적으로 저용량의 구동 모터 적용이 가능한 장점이 있지만 설계 시 펌프의 최종 형태를 결정하기 전 적용 공정 특성에 따라 추가적으로 고려되어야 할 요소가 있다. 공정 부산물이 다량으로 생성되어 이송 유체와 동반하여 유입되는 CVD 공정의 경우 다단루츠 구성에서는 진공상태에서의 낮은 기체밀도에 기인한 낮은 유체흐름에 의해 단과 단을 지나는 고체입자의 이송 능력이 크게 떨어지는 구조적 한계가 있다. 이 경우 기계적 이송능력이 우수한 스크루형 진공펌프의 채용이 공정의 안정적 진행에 상대적으로 유리하다.

건식 진공펌프의 경우 회전자의 회전운동에 의해 배기가 이루어지며 이러한 회전자들은 펌프 몸체에 베어링(bering), 씰(seal) 등에 의해 접촉되고 지지되어진다. 이러한 구조에서 모터동작을 통해 전해지는 에너지는 회전자의 회전운동 뿐 아니라 마찰열, 소음 및 진동 등 다양한 형태의 에너지로 전환되며 외부로 전달되어 소멸되어지게 된다. 따라서 에너지 효율 제고를 위해서는 회전체의 무게를 줄여 필요한 회전운동에너지의 절대량을 줄여줌과 동시에 기계적 마찰을 줄여 에너지 저감이 가능한 설계적 접근이 필요하다. 이는 진공펌프의 설계 단계에서 최적의 구성 부품 및 구조 선정을 통하여 달성될 수 있다.

### - 전기/전자 기구 설계 시 고려 요소

진공펌프의 기계/기구적 설계에서 최소의 에너지 소비를 달성할 수 있는 구조가 적용된 경우에도 펌프의 최종적인 에너지 효율은 사용 모터 및 구동방식 등 적용된 전기/전자 기구 설계 요소에 따라 크게 좌우된다. 진공펌프 회전자의 구동을 위해서는 외부 전기 에너지를 이용한 전기모터의 사용이 필수적이다. 일반적으로 모터는 고유한 효율



을 지니고 있으며 모터의 효율 정도에 따라 소비전력의 범위가 정해지게 된다. 따라서 고효율의 모터를 사용함으로써 모터에서의 에너지 손실량을 최소화시킬 수 있다. 최근에는 에너지 효율이 높은 영구자석을 이용한 동기모터의 채택이 늘고 있는 추세이다. 반도체/디스플레이 공정의 특성상 유해성 또는 부식성 화학가스의 사용이 빈번하므로 이러한 물질들의 모터부위를 통한 펌프 외부로의 유출을 원천적으로 방지할 수 있는 밀봉구조를 갖는 고효율 모터의 채용이 필수적이다.

반도체/디스플레이 공정에서 진공펌프는 특별한 이유가 없는 한 지속적인 동작을 하게 된다. 이는 진공펌프가 가동을 하지 않을 경우 공정챔버로의 오염물의 역류 현상이나 펌프의 정지 후 재가동 시 공정 안정화를 위한 시간의 소요 등 에너지의 소비를 발생시키는 하나의 원인이 되기 때문이다. 이를 위해 공정상태에 따라 펌프의 회전 속도를 가변하는 방안이 고려되고 있다. 이는 공정이 진행되지 않는 시점에는 진공펌프의 회전속도를 낮추어 상대적으로 소비되는 전력의 소비량을 줄이고자 하는 방법이다. 인버터를 이용할 경우 펌프를 구동시키는 모터의 회전 속도를 자유자재로 변화시켜 펌프에 가해지는 부하에 적합한 회전속도를 유지할 수 있어 항상 일정한 회전속도로 운전되는 펌프에 비해 에너지 사용량을 절감시킬 수 있다. 또한 펌프의 정지 및 초기 구동시 발생하는 과전류 발생 현상과 이로 인한 과열을 손쉽게 방지시킬 수 있다.

이상과 같이 진식진공펌프 개발 시 고려하여야 할 주요 설계 요소들을 정리하였는데, 언급한 모든 기술들이 동시에 사용되는 경우보다 해당 공정 특성에 따라 적용 여부가 결정되는 게 보편적이다. 에너지 효율제고 관점에서 인버터 구동, 가변주파수 구동, 고효율 모터 채용에 의한 저소비전력 추구, 회전속도 가변을 위한 인버터와 통신을 비롯한 제어시스템의 개발, 기계적 마찰 손실 저감을 위한 관련 부품 설계 등을 고려해 볼 수 있다. 그러나 진공펌프 설계에서 무조건적인 소비전력 절감이 최우선되어야 함을 의미하는 것은 아니다. 펌프로의 기체 유입에 따른 부하가 큰 load-lock 공정이나 고체성 부산물의 유입이 많은 공정에서는 충분한 부하 기체의 배기와 기계적 고체 물질 이송능력 향상을 위해 일반적인 공정에 비해 상대적으로 높은 힘을 지니는 구동 모터가 필요하다. 따라서 공정별 적합한 특성을 지니는 진공펌프를 선정하는 것이 매우 중요하며 개

발 과정에서도 이러한 측면이 충분히 고려되어야 한다.

## V. 맺음말

이상 진식진공펌프 개발 과정을 간략히 기술하였으나 실질적인 개발 과정은 보다 복잡하고 많은 단계들로 구성되어 있으며 각 단계에서 다양한 접근과 고려가 필요하다. 반도체 및 디스플레이 제조공정에 사용가능한 높은 신뢰성을 갖는 진식진공펌프를 완성하기 위해서는 수많은 시행착오와 개발시간, 비용이 요구된다. 따라서 해당 제품의 개발부터 실제 공정 적용 및 시장 진입까지 소요되는 기간이 길어 개발 초기에 선정한 사항들이 개발 완료시점의 시장상황과 차이가 발생하는 경우도 종종 있다. 그러므로 개발 완료 시점의 시장상황에 대한 전망이 매우 중요하며 개발 진행 단계에서 시장의 요구사항을 지속적으로 모니터링하여 제품 개발에 반영하는 것이 중요하다. 국내 기술에 기반한 세계적 경쟁력을 갖는 진공펌프 설계/제조기술 확보는 반도체, 디스플레이 및 기타 핵심 진공관련 산업분야 등에 필수적인 주요 부품기술의 확보를 의미하며 관련된 고부가가치 장비의 국산화에 기여하여 경쟁력 제고와 함께 국가적 산업 경쟁력을 향상시키기 위한 필수사항이다.

## 참고문헌

- [1] 배석희, 인상렬, 정광화, 이영백, 신용현, *진공공학* (한국경제신문, 서울, 2004), pp.153-157.
- [2] 김홍배, 손상희, *진공의 기초* (전자재료사, 서울, 2002), pp. 29-34.
- [3] Philip A. Lessard, *J. Vac. Sci. Technol. A* **18**, 1888 (2000).
- [4] 김병옥, 이안성, 노명근, *유체기계저널* **10**, 47 (2007).
- [5] 김병옥, 이안성, 노명근, *한국소음진동공학회 논문집* **10**, 967 (2007).
- [6] 노명근, 황태경, 박제우, *한국진공학회지* **17**, 292 (2008).
- [7] 주장현, 김효배, 김중조, *한국진공학회지* **17**, 278 (2008).

## Development of Dry–Vacuum–Pump for Semiconductor/Display Process

S. Y. Lee<sup>a</sup>, M. Noh<sup>a\*</sup>, B. O. Kim<sup>b</sup>, and A. S. Lee<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*LOT Vacuum Co., Anseong 456-370*

<sup>b</sup>*Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-600*

(Received May 11, 2010, Revised June 15, 2010, Accepted June 23, 2010)

The excellent performance and stability of dry-vacuum-pump is essential to create and maintain high quality vacuum condition in semiconductor and display process. The development of dry-vacuum-pump needs systematic consideration for target application as well as delicate mechanical issues. Here, we introduce a development procedures of dry-vacuum-pump for semiconductor-process-class.

Keywords : Dry vacuum pump, Vacuum pump, Semiconductor, Display

\* [E-mail] nmk@lotvacuum.com