

고진공 터보분자 펌프의 설계 및 해석기술

이우영* · 국정한* · 박종권** · 구분학***

Analysis for Design of a High Vacuum Turbomolecular Pump

Woo Young Lee*, Jeong Han Kook*, Jong Kwon Park**, and Bon Hak Koo***

ABSTRACT

In modern manufacturing, new applications and technologies demand smaller, and functional devices to replace large systems. As miniaturization becomes a necessity, many companies are interested in small pumps for use in creating ultra-high vacuum, but past efforts to develop such systems have failed due to problems with vibration, stress, heat and power consumption. This paper shows analysis-based design techniques for high vacuum turbomolecular pump by finite element analysis.

Key words : Turbomolecular Pump(터보분자펌프), Semiconductor(반도체), Finite Element Analysis(유한요소해석), Modal Analysis(모드해석), Stress and Deformation(응력과 변형)

1. 서 론

반도체 산업의 급속한 발전과 더불어 진공산업의 중요성이 부각되고 있으며 아울러 이와 관련한 핵심 설계 및 제조기술은 고부가 가치를 창출하는 것으로 업계에서 인식되고 있다. 최근 진공을 만들어 주는 펌프의 능력이 초 고진공(10^{-8} Pa)이상으로 까지 확대되고 펌프 크기의 소형화 및 효율의 증가 또한 상당한 수준으로 향상되고 있는 추세이다. 첨단 진공산업은 세계적인 관점에서 볼 때 유럽, 미국 및 일본을 주축으로 개발되어 보급되고 있는 실정이며, 국내는 초기기술 단계인 oil rotary vacuum pump, blower pump, oil diffusion pump가 개발되어 있으나 주로 $10E-5$ torr 이하의 저진공용 펌프로써 일반 산업용으로만 적용되고 있고 반도체용으로는 적용되지 못하고 있는 실정이다. 특히 국내에서 개발된 펌프 중에는 oil diffusion pump가 가장 진공도가 높다고 하겠으나 oil을 사용하는 구조이므로 청정을 필요로 하는 환경적인 고집적 반도체 공정 등에는 사용할 수 없게 되어있다. 국외의 경우에는 터

보 분자펌프(TMP)가 20여년 전부터 개발되어 실용화되고 있으며 현재는 steel ball bearing type의 터보 분자 펌프에 이어 자기 부상형 터보 분자펌프($10E-8$ torr)가 개발되어 사용함으로써 고집적 반도체 생산을 실현 시키고 있다. 즉, 자기부상형 터보 분자 펌프의 국내 생산기술은 전무한 상태이나 일본은 OSAKA, SEIKO, SEIKI, SHIMADZU 등의 회사와 독일은 LEYBOLD, BALZERS, 프랑스는 ALCATEL에서 생산하고 있고, 이중에 일본 제품이 국내 시장을 대부분 점유하고 있는 것으로 알려져 있다. 최근 국내에서도 정부의 연구지원에 힘입어 기존의 펌프 제조업체를 중심으로 대학 및 연구소가 활발한 산학연 연구과제를 수행하고 있다. 본 논문에서는 자기부상형 터보 분자펌프의 설계 및 해석의 핵심 기술을 소개하고 특히 역학적 측면에서의 해석방법을 기술하고자 한다.

2. 고진공터보 분자펌프의 핵심기술

2.1 관련기술의 현황

토리첼리의 수은주 실험 이후로 발전되어온 진공기술은 근자에 이르러 우주시대의 개막과 더불어 많은 진공 문제를 야기하고 있고, 이를 해결하는 과정을 통해 급진적인 발전을 보이고 있으며, 더욱이 활용분야의

*한국기술교육대학교 기계공학부 교수

**한국기계연구원 책임연구원

***제일진공(주) 이사

다양성과 산업기술상의 중요성에 힘입어 그 정도를 높여가고 있다.

일반적으로 진공펌프는 점성효과를 이용한 vapor ejector pump, 확산효과를 이용한 vapor diffusion pump, 분자를 쳐내는 turbo molecular pump, 이온화효과를 이용한 ion pump, chemical sorption을 이용한 cryopump 등으로 분류할 수 있으며, 여기서 turbo molecular pump는 탄화수소 화합물이 없는 진공을 생성시키면서 구성요소가 간단한 반면 폭 넓은 진공대역을 충족하기 때문에 산업계와 연구계의 주요 첨단 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 즉, TMP는 작동원리상 공기분자의 밀도가 매우 낮은 희박가스 상태에서 회전날개의 고속회전에 의해서 공기분자를 쳐내는 작용에 의해 작동 됨으로써 날개의 상하 압력차에 의한 공기력 보다도 날개의 고속회전이 매우 중요시된다. TMP의 주요 적용분야는 반도체 산업(CVD, Sputtering, Etching, Asher, Ion implantation)을 비롯하여 원자핵 기술, 표면 물리학, 가스분석, 코팅기술 등의 분야이다.

2.2 터보분자 펌프의 핵심 기술

고진공 펌프의 개발을 위해 요구되는 핵심 기술로는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

- 1) 진공펌프 rotor/stator blade 시스템의 설계 기술
 - 고속 cascade blade의 유체 분자유동 해석기술
 - 펌프의 고정날개에 대한 열변형 해석기술
 - 고속 회전날개의 원심응력 및 변형 해석기술
 - pumping 효율 증대 기술
- 2) 진공펌프 구동요소 설계 기술
 - 고속 고정밀 회전 시스템 설계기술
 - 회전체 동역학 해석 및 강체 시스템 해석기술
 - 펌프의 각 요소부품의 속도 안정화를 위한 설계기술
- 3) 고진공펌프의 종합설계 및 제조 엔지니어링 및 SI 기술, 시스템 상태감시 및 진단을 위한 제어기술
- 4) 신뢰성과 평가기술

2.3 TMP 시스템의 구조

TMP의 전 시스템은 TMP와 펌프를 구동시키는 주파수 변환기 및 그 주변장치로 구성된다.

2.3.1 TMP 구조

TMP는 회전자, 고정자, 회전깃, 유도모터등으로 구성되며 진공용기내의 공기분자를 회전자의 끝단에 부착된 회전깃으로 펌프의 외부로 밀어내도록 고안된 구조이다. 1개의 회전자의 깃은 1개의 고정자와 조합하

여 1단의 압축단을 형성하게 된다. 일반적으로 회전체는 직렬로 연결된 10 내지 20단의 회전 깃을 지지한다. 회전축의 한쪽 끝단은 3상 유도 모터의 회전 축에 연결되며 베어링에 의해서 지지된다. 펌프의 내벽에 부착된 고정 깃은 회전자의 회전 깃과 함께 공기분자를 외부로 밀어내는 기능을 갖는다.

2.3.2 주파수 변환기

주파수 변환기는 TMP를 작동시키기 위한 전원 공급장치로서 TMP의 유도모터를 고속(50,000 rpm 이상)으로 회전시키기 위한 기능을 갖는다.

2.3.3 주변장치

주변장치로는 보조펌프, 냉각장치, 가열장치, 환기장치, 진동감쇠 벨로우즈, 진공계기 등을 들 수 있다.

3. TMP 구조설계를 위한 해석기술

3.1 해석기술의 개요

최근 컴퓨터의 처리 능력이 급속히 신장되고 역학적인 해석 도구의 능력 또한 매우 탁월해짐에 따라 복잡한 TMP 구조의 안정성을 해석을 통하여 설계에 반영시키려는 시도가 활발해 지고 있다. 구조의 크기는 소형화시키면서 회전자의 회전 속도를 100,000에서 250,000 rpm 까지 높이기 위해서는 다음과 같은 해석이 반드시 수반되어야 한다.

- 1) 마그네틱 베어링의 static analysis
- 2) 날개 깃들의 modal analysis
- 3) 회전체 전체에 대한 modal and harmonic analysis
- 4) blade roter의 full modal analysis
- 5) blade roter의 stress analysis
- 6) 시스템의 정적인 thermal analysis

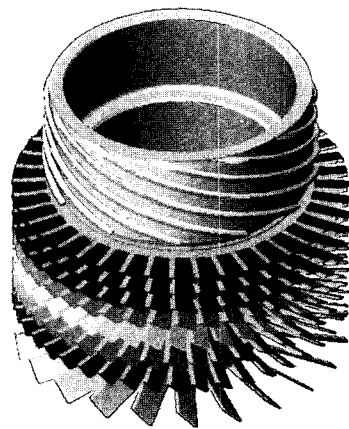


Fig. 1. 3Dimensional Model of TMP rotor.

3.2 고속 회전시의 원주응력 해석

본 연구에서는 회전자의 회전속도를 20,000 rpm으로부터 40,000 rpm 까지 증가시켜 가면서 다단 블레이드의 구조 안정성 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 도구는 상용 유한요소해석 툴인 ANSYS를 사용하였다. Fig. 1은 해석 대상의 3차원 모델 형상이고, Fig. 2는 해석의 편의를 위해 1/8로 절단한 해석 모델이다. 또한, Fig. 3 및 Fig. 4는 해석결과로서 40,000 rpm에서 응력분포와 변형량을 나타낸 예이다.

3.3 회전자의 진동해석

고속회전을 하는 로테이터의 동적 안정성은 시스템의 성능 및 수명을 좌우하는 매우 중요한 사항이다. TMP의 경우 다음의 3가지 관점에서 진동의 영향을 검토하여야 한다.

3.3.1 Blade Vibrations

터보기계류에서 통상적으로 검토되는 진동으로 한 개의 회전 날이 고유진동수와 일치하면서 진동을 일으킬 때 날 끝의 부딪힘 또는 고주기 피로(high cycle fatigue)에 영향을 미친다.

3.3.2 Rotor Dynamic Vibrations

로터와 베어링을 포함하는 회전계에 대하여 진동해석을 수행하는 것으로 베어링과 하우징의 강성에 의한 동특성의 영향을 판단한다. 이 경우 불안정 진동이 발생하게 되면 로터의 편심에 의하여 로터와 하우징과의 충돌을 일으킬 수 있으며 고주기 피로파괴가 발생할 수 있다.

3.3.3 Bladed Rotor Vibrations

어떤 경우에는 회전 날들과 로터 구조간에 상호작용에 의한 과도 진동이 발생할 수 있다. 이 경우에도 날 끝과 하우징의 부딪힘 또는 고주기 피로 파괴가 예상될 수 있다.

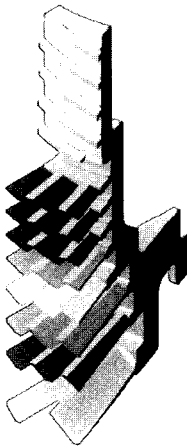
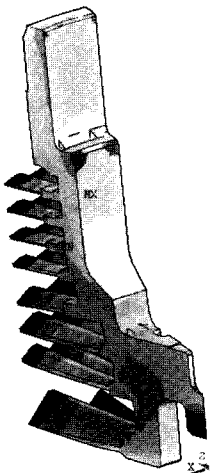
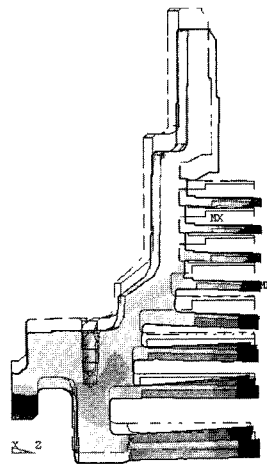


Fig. 2 1/8 Part Model of TMP rotor.



```
ANSYS 5.5.1
JUN 25 2001
23:55:22
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.023841
SMN =76.146
SMX =44496
76.146
5012
9947
14883
19819
24754
29690
34625
39561
44496
```

Fig. 3. Stress distribution at 40,000 rpm.



```
ANSYS 5.5.1
JUN 25 2001
23:59:02
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
SEQV (AVG)
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.023841
SMN =76.146
SMX =44496
76.146
5012
9947
14883
19819
24754
29690
34625
39561
44496
```

Fig. 4. Displacement at 40,000 rpm.

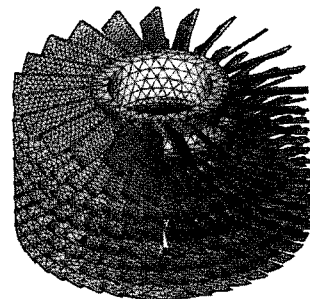
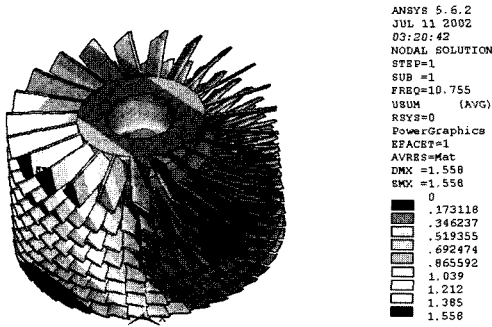
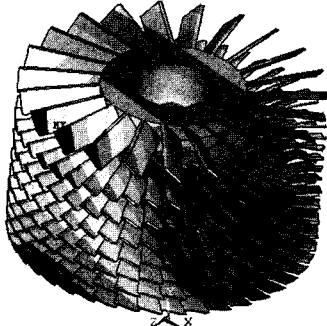


Fig. 5. Blade-rotor mesh generation.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) First mode shape, (b) First mode shape.

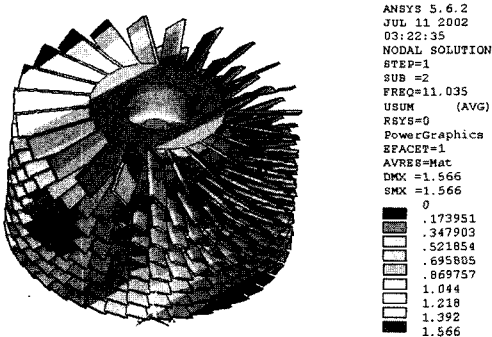


Fig. 7. Second mode shape.

Fig. 5는 Blade Rotor system의 모드해석을 위한 요소망 생성을 보여주고 있으며 Fig. 6, 7, 8은 첫 번째부터 세 번째까지의 모우드 형상을 보여주고 있다.

3.4 회전자의 열 변형 해석

금속재료는 열에 의해 고유 특성에 따라 응력과 변형을 일으키게 된다. 고속회전을 하는 로터의 경우 자체적으로 많은 열을 일으키며 온도가 상승함에 따라 로터의 변형이 하우징과 어떤 상태에 놓이지는 지를 면밀히 검토하여 설계에 반영하여야 하는데 본 연구의

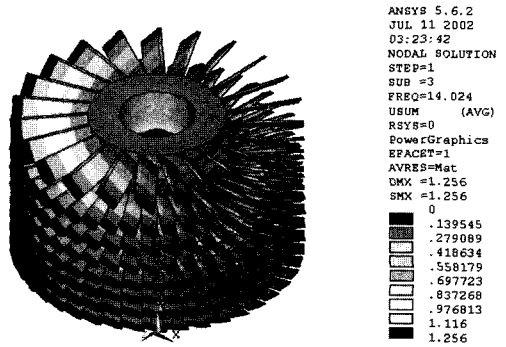


Fig. 8. Third mode shape.

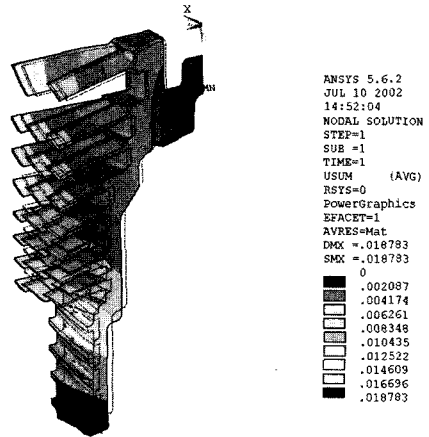


Fig. 9. Displacement at 150 deg.

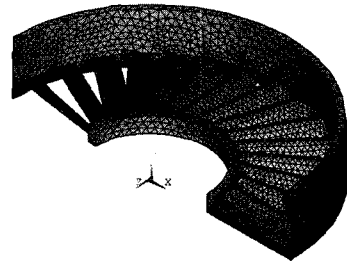


Fig. 10. Mesh generation for Stator, half model.

예에서는 로터의 온도를 각각 50도에서 150도 까지 여러 단계에 놓인다고 가정하고 이때의 응력과 변형량을 계산하여 보았다.

Fig. 9는 1/16 대칭 모델을 사용하여 해석한 결과의 예를 보여주고 있다.

3.5 스테이터의 충격 해석

운전중인 펌프의 로터가 어떠한 외부 요인에 의하여

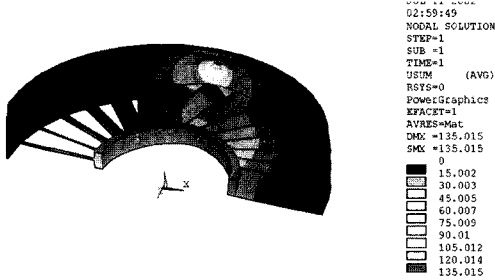


Fig. 11. Stress distribution for stator.

파손된 조각이 스테이터에 충돌할 경우 펌프 내부면의 심각한 손상을 야기시키게 된다. Fig. 10은 해석을 위한 스테이터의 1/2 요소망 생성 그림이고, Fig. 11은 40,000 rpm 회전시 3 g 질량의 로터 파편이 스테이터에 충돌했을 경우의 응력분포를 나타낸 것이다.

4. 결 론

지금까지 고진공 자기부상형 터보분자 펌프의 기술 동향, 개발시 요구되는 핵심기술 및 설계시 반영해야

할 주요 해석 내용들을 필자의 해석 결과들을 바탕으로 기술하였다. 앞서서도 언급하였지만 우리나라도 산학연의 활발한 개발 활동에 힘입어 머지않아 우리나라 자체 기술에 의한 독자적인 TMP가 출현하리라 확신하며 이는 반도체 산업의 중요한 견인차 역할을 할 수 있으리라 기대해 본다.

감사의 글

본 글은 산자부 산업기술개발사업의 일환으로 수행된 연구결과 중 일부를 게재하였으며 본 과제를 지원해주신 산자부 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. ANSYS Solutions, Fall (2001).
2. 이우영외, “자기부상형 고진공 터보분자 펌프 개발 1차년도, 2차년도, 3차년도 보고서”, 2000, 2001, 2002.
3. 박종권의, “자기부상형 고진공 터보분자 펌프 개발 워크샵 자료” (2000).