

루츠형 중진공펌프 국산화 개발

탁봉열^{*†} · 김병덕^{**} · 양해경^{***} · 한기영^{*} · 이소아^{*}

Development of Localized Roots Type Medium-Vacuum Pump

Bong-Yeol Tak^{*†}, Byung-duk Kim^{**}, Hea-Gyeong Yang^{***}, Gi-Young Han^{*}, So-A Lee^{*}

Key Words : Rootz type(루츠형), Vacuum pump(진공펌프), Medium vacuum(중진공), Pumping speed(배기속도), Ultimate vacuum(도달진공도), Performance test(성능시험)

ABSTRACT

Due to a roots type medium vacuum pump is operated in condition of $1 \sim 10^{-3}$ torr vacuum, it could be applied for production and process of industrial parts, such as precise processing, vaporization, enrichment, separation, casting, metaling, welding, transportation. Therefore, the demand of this pump is increasing nowadays in our industrial markets of semiconductor, electric, electronic, automobile, material, environmental and transporting industries. However, the pumps are almost imported, because the domestic pumps are inferior in fields of vacuum range as under 10^{-1} torr, relevant techniques(design, fabrication, casting, test, etc.) to the imported ones.

In this study, essential parts of the development pump are designed with using of CFD and 3D decodes, FEM for analysing strength and deformation, generated heat, vibration and noise control, and are casted with using of mechanochemistry techniques for decreasing of weights, increasing of heat resistances and abrasion durability of materials for pump caing and impellers especially. Besides, in order to achieve ultimate vacuum around 10^{-3} torr, this pump is compesed of 6 stages, among which 1st stage is operated separately from remained stages. Additionally, a test rig for prototype pumps($300\text{m}^3/\text{h}$ and $2,500\text{m}^3/\text{h}$) is designed and procured as to apply for multi-staged rootz type vacuum pump, with modification of the test method recommended by KS B 6314 "Positive-displacement oil-sealed rotary vacuum pumps".

1. 서 론

정부의 부품소재기술개발사업의 일환으로 수행된 본 연구는 수입에 의존하고 있는 루츠형 중진공(진공도 $1 \sim 10^{-3}$ torr) 펌프를 국산화하는데 목적을 두었다. 이러한 중진공펌프는 2007년을 기준으로 할 때 1,500억원/년 정도로 대부분 수입에 의존하고 있으며, 수요량은 우리나라 수출을 주도하고 있는 반도체, 전기·전자, 금속·화학 등의 관련 산업 발달로 매년 10% 이상 신장되고 있다.^{(1),(2)}

중·진공펌프의 수요량이 증대되고 있음에도 불구하고 이들 펌프를 전량 수입에 의존하며, 그 가운데 일본 의존도는 40%

이상인 것으로 보아 대일무역 역조 개선대상 품목이라 할 수 있다. 중진공펌프를 포함한 부가가치가 높은 기계류 부품을 수입에 의존하고 있는 것은 국내 기계·소재산업의 생산기반을 취약하게 할 뿐만 아니라 원천기술 확보를 어렵게 하고 있다. 본 연구에서는 국내 수요가 많은 배기속도 $2,500\text{m}^3/\text{h}$, 도달진공도 10^{-3} torr인 진공펌프를 국산화하는 것을 목표로 구성 부품의 설계를 위해 수행한 강도해석, CFD해석, 축계진동해석 및 볼베어링 하중계산 등을 수행하여 시작품을 설계하였으며, 3차년도 연구를 계속하여 시작품 제작 후 확보된 시험장치를 활용하여 자체시험 후 공인기관에서 품질인증 시험을 수행할 예정이다. 시험방법은 유희진 진공펌프 성능시험기준(KS B 6314)⁽³⁾을 토대로 다단 루츠형 중진공펌프를 시험할 수 있도록 시험방법과 평가방법을 다소 수정한 것을 이용할 것이다. 한편, 개발된 시작품($2,500\text{m}^3/\text{h}$ 와 $300\text{m}^3/\text{h}$)을 국내 굴지의 철강공장 현장에 설치하여 적용가능성을 확인할 예정이다.⁽⁴⁾

* 디에이치엠(주)

** 한국기계연구원

*** TIE기술사사무소

† 교신저자, E-mail : master@dh-m.co.kr

2. 본 론

2.1 루츠형 중진공펌프 구성

개발된 루츠형 중진공펌프는 7.5 kW x 3,500 rpm인 전동기가 펌프케이싱에 볼트로 조립된 상태로 구동하며, 1차로 공기를 흡입하는 단단펌프는 5단의 다단펌프와 연결되어 압축된 공기를 공급한다. 2개의 날개를 갖는 1단과 3개의 날개를 갖는 2~6단으로 각각 독립적으로 구성되는 두 대의 펌프는 펌프본체인 케이싱 내부에 루츠 임펠러 2개가 타이밍기어에 의해 반대방향으로 회전하면서 이루어지는 배기용적에 의해 흡입된 공기가 압축 후 배출되면서 외부로부터 유입되는 공기가 차단될 때 흡입측에 진공을 형성한다. 단단 펌프는 펌프 케이싱 중간의 수랭 벽과 공기 입·출구 통로를 형성하는 분리 벽이 없지만, 다단의 경우 구동축과 피동축에 각각 5개의 임펠러를 갖고 임펠러 중간에 4개의 분리벽을 가지며, 다단 펌프의 입구관은 단단 펌프의 출구관과 플랜지로 연결된다. 이들 펌프는 펌프케이싱 내부에 맞물려서 루츠형 임펠러를 맞물려서 회전시키는 구동축과 타이밍기어를 거쳐 구동축 회전방향과 반대방향으로 회전하는 피동축, 펌프케이싱(본체)의 양단에 설치되는 중간케이싱, 전동기 반대방향에 설치되어 타이밍기어를 내장시키는 기어박스, 각각의 중간케이싱에 설치되어 구동축과 피동축을 지지하는 베어링과 이를 고정시키고 밀봉 씌를 내장시키는 베어링하우징, 각각의 타이밍기어에 볼트로 조립되어 베어링과 타이밍기어를 윤활하도록 윤활유를 공급하는 오일펌프 휠, 기어박스 하단에 위치하며 윤활유를 냉각시키는 수랭식 오일냉각기로 구성되며 중간케이싱과 기어박스는 펌프케이싱에 볼트로 조립된다.

2.2 루츠형 중진공펌프 특성

루츠형 중진공펌프는 회전 용적형 펌프의 일종이며, 압축 과정에서의 발열 때문에 열팽창계수를 고려한 재질선택은 물론, 중간케이싱과 임펠러 사이의 간극을 정밀하게 유지하여 흡배기 압력차를 최대화 해야 하며, 고속회전에 따른 소음 및 진동, 베어링 윤활문제 등을 고려해야 한다. 따라서 펌프의 구성부품인 케이싱과 임펠러의 정밀주조 및 가공기술, 베어링 및 밀봉 씌의 윤활기술, 운동부의 불평형력 감소를 위한 발란싱과 축계장치의 진동·소음저감기술 등이 확보되어야 한다. 열변형에 대처하고 임펠러와 케이싱 사이의 0.1~0.15 mm 정도로 유지되는 간극의 변화를 최소화하기 위해 주물 조직에 금속간 화합물을 투입하는 메카노케미스트리 기술이 활용되어야 한다.

2.3 루츠형 중진공펌프 국산화 기술 연구 내용

2.3.1 펌프의 구성 및 축계 강도해석

중진공펌프의 진공도를 높이기 위하여 기존 단단 루츠형

임펠러를 1단의 단단 펌프와 5단의 다단펌프로 독립되게 구성하여 임펠러 구동축의 길이를 800 mm 이내로 제한하여 지지베어링간 거리를 축소하였다. 다단 루츠형 진공펌프 구성에 대한 기존특허에 저촉되지 않도록 하는 회피설계를 위해 지름이 동일한 여러 임펠러의 폭을 일정한 비율로 축소시키고, 케이싱이 상·하부로 분리된 구조로 하여 가공은 물론 분해·조립이 용이하도록 구성하였다. 펌프의 중량 감소를 위해 회전속도를 3,500 rpm으로 고속 운전할 때 발생하는 불평형력이나 반복적인 흡·배기 압력변동 과정에서 발생하는 열에 의해 변형될 가능성이 높은 임펠러, 타이밍기어 및 케이싱에 대해 정격운전 조건에서의 유체유동, 변형, 진동모드 등을 검토하기 위해 설계단계에서 유한요소 해석프로그램인 Ansys를 이용하여 강도 및 구조해석을 수행하였다. 그 결과 SCM440의 재료인 축계는 단단 펌프와 다단펌프의 케이싱 내면과 분리벽 사이의 간극이 1~2단 0.15 mm, 3~6단 0.1 mm를 유지하는데 충분한 여유가 있음을 알 수 있었다. 회전수 3,500 rpm에 비해 다소 높은 60 Hz에서 날개 끝단의 등가 부가응력은 8.02 MPa, 다단 임펠러의 경우 6.37 MPa, 기어 200 MPa 정도 였다. 참고로 임펠러를 포함한 구동축계 강도가 단단 펌프에 비해 비교적 낮은 것으로 판단되는 다단 펌프의 구동축 및 기어에 대한 유한요소 모델 및 등가 부가응력에 대한 해석결과를 보이면 Fig.1과 2에 보인다.

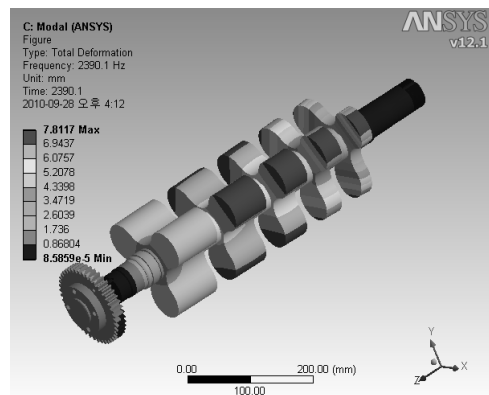


Fig. 1 The maximum displacement quantity from rated speed(Impeller)

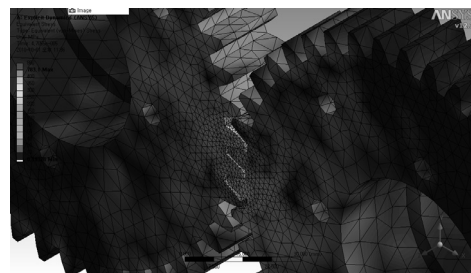


Fig. 2 The maximum displacement quantity from rated speed(Gear)

2.3.2 케이싱 내부의 유동해석(공력설계)

진공펌프의 케이싱 내부에서 일어나는 유체유동을 Table 1에 보인 환경조건에서 2차원으로 해석하였다.

케이싱 중앙단면의 압력분포와 유체의 축방향 흐름 패턴을 참고로 보이면 Fig.3 과 Fig.4 와 같다. 유동해석 결과는 유속은 X축 206.9 m/s, Y축 37.3 m/s, Z축 70.8 m/s 이며, 유체의 온도는 391.7(K)로 약 100(K) 정도가 상승됨을 알 수

Table 1. Environmental condition for flow analysis

Section	Condition
Environmental condition of heat flow	Static equilibrium : 101325 Pa, Temperature : 293.2 K
Velocity vector	Does with X-Y directions all 0 m/s
Turbulent flow distribution and length	2%, 0.000541670243 m
Number of basic partitions (X/Y/Z)	12/10/4
Number of total partitions	68,768
Fluid average pressure(Pa)	8.76183 x 10 ⁶ / 8.76183 x 10 ⁶
Fluid average temperature(K)	294.997
Fluid average density(kg/m ³)	997.113
Fluid mass flow rate (kg/s)	-54.08
Fluid volume flow rate(m ³ /s)	-0.0542362

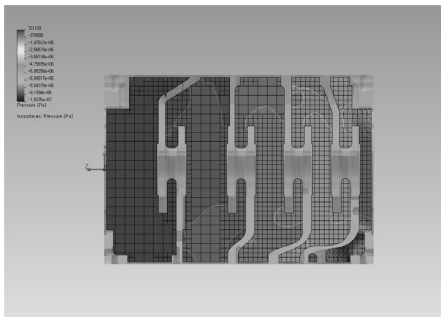


Fig. 3 Pressure distribution chart at casing midsection

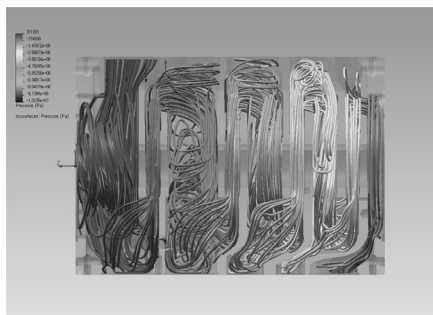


Fig. 4 Wheel track distribution chart of fluid flow in pump casing

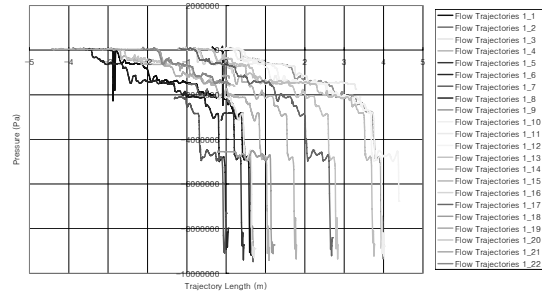


Fig. 5 Pressure variation along shaft length

Table 2 Results from flow analysis

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	-5.91894e+08	721103
Temperature [K]	288.478	391.711
Velocity [m/s]	0	224.211
X-Component of Velocity [m/s]	-212.831	207.878
Y-Component of Velocity [m/s]	-90.9267	37.315
Z-Component of Velocity [m/s]	-143.575	70.7802
Fluid Temperature [K]	288.478	391.711
Shear Stress [Pa]	0	169464
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	944.937	998.662

있다. 축의 길이방향으로 분포된 압력은 Fig.5에 보이는 바와 같이 입구 측인 2단에서 가장 높은 진공을 나타내고 점차 압력이 증가되어 대기압에 가까워 됨을 알 수 있다.

Table 2의 해석결과를 토대로 시작품을 설계하는데 있어 유체의 온도상승을 저감시키기 위해 케이싱의 냉각면적을 최대로 하여 냉각수로 강제냉각하고, 부하운전 중 펌프 흡·토출통로에 와류가 발생하지 않도록 하였다. 소음을 저감하기 위해 흡입소음기 설치와 토출구에서의 임펠러와 케이싱의 접촉시간을 연장하도록 배출구를 가급적 축소하고, 유동경로와 내부관로의 모서리부분을 가급적 둥글게 주조하도록 하였다.

2.3.3 축계장치 진동해석기술

다단 진공펌프의 경우 구조가 단단 펌프에 비해 복잡하고 축간 거리가 길어져서 정격부하 운전 중 축계의 위험속도 여부를 확인하기 위해 이에 대한 진동해석을 통하여 고유진동수와 진동모드를 구하고, 지지 베어링에서의 불평형 진동에 의한 내구성을 개선해야 하는지를 검토하였다. 구동축에는 전동기와 연결되는 커플링, 2개의 임펠러를 맞물리게 하여 상호 반대방향으로 회전시키는 타이밍기어, 임펠러를 지지하는 2개의 베어링이 설치되므로 설계도면을 근거로 진동계산 모델을 Fig. 6과 같이 작성하였다. 이를 이용하여 임펠러

도시험, 도달진공도시험, 내구수명시험 및 진동·소음시험이 가능하게 하였다.

시험 챔버의 용량은 KS B 6314⁽³⁾의 경우 펌프 1회전 용적의 2배 이상인 84 L를 권장하고 있다. 시작품(2,500 m³/h x 3,500 rpm)의 1회전 당 배출용적이 11.9 L/rev로이므로 아래의 계산식에서 도달진공도에 요구되는 시간 $t=3(\text{min})$ 으로 하여 성능인자 측정에 충분한 시간을 유지하기 하도록 84 L로 하였다. 시험장치의 내구수명을 연장하고 중진공 영역에서 누설량을 최소로 유지하기 위해 시험 챔버와 모든 배관은 SUS316 스테인리스강으로 제작하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 국내 수요는 증가하지만 여전히 수입에 의존하고 있는 루츠형 중진공펌프를 국산화하는데 있어 핵심 부품인 케이싱과 임펠러의 설계와, 조립된 펌프의 성능시험에 필요한 기술을 개발목표인 2,500m³/h x 10⁻³torr의 배기 속도와 진공도를 유지하는 시작품을 개발하는데 활용한 예를 소개하였다.

중진공 영역의 루츠형 진공펌프는 기계 및 전자부품의 정밀가공, 소결·증발·건조공정이 요구되는 소재·화학·환경산업 등에 활용되므로 이를 국산화하여 수입대체는 물론 진공이용기술의 활성화가 기대된다.

본 연구를 통해 확보된 성능시험 장치는 중진공펌프 생산 업체에서 제품개발이나 완제품에 대한 자체시험에 활용함으로써 제품의 신뢰성 확보와 성능향상에 기여할 것으로 판단된다. 현재 개발 중인 펌프는 구성부품의 설계가 완료되어 주조품과 단조품 인 펌프케이싱, 임펠러, 커버, 타이밍기어를 제작하고 있으며, 개발된 제품은 국내 수요업체 현장에 설치되어 적용시험을 수행할 예정이다. 조립상태인 다단펌프의 외형도를 참고로 보이면 Fig. 10과 같다.



Fig. 10 Feature of assembled prototype vacuum pumps (2,500m³/h)

후 기

본 논문은 지식경제부와 한국산업기술평가관리원의 부품소재기술개발사업 지원을 받아 수행한 연구이다.

참고문헌

- (1) 김광영, 김동수, 2000, 진공기술, 한국기계연구원 소보, 機械와 材料, 12권1호.
- (2) 성대진, 2010, 진공의 기초, 한국표준과학원 진공센터 세미나자료.
- (3) 한국산업규격 KSB6314, 기름회전 진공펌프 성능시험 방법, 2002.
- (4) 지식경제부, 건·습식 공용 2,500m³/h/10⁻³torr/15 kW급 중진공펌프 개발 년차 보고서, 2010.10.
- (5) Kazuma Ito, Katsuaki Usui, Model EV-S Series Dry Vacuum Pump, Ebara Engineering Review NO. 227, 2010.4.
- (6) ISO 281-2007, Rolling bearing-Dynamic load ratings and rating life.