

진공용 공기베어링 배기시스템의 최적설계

*김경호¹, 박천홍¹, 이후상¹, 김승우²

¹ 한국기계연구원 지능기계연구센터, ² 한국과학기술원 기계공학과

Optimal Design of an Exhaust System of a Vacuum-Compatible Air Bearing

*G. Khim¹, C. H. Park¹, H. Lee¹, S. W. Kim²

¹ Intelligent Machine Systems Center, KIMM, ² Dep. of Mech. Eng. KAIST

Key words : Vacuum-compatible air bearing, Differential exhaust system, Optimal design, Genetic algorithm

1. 서론

현재, 극자외선 노광장비, 전자빔 노광장비와 같은 차세대 노광장비나 전자빔을 이용한 고밀도 광학미디어 스탬퍼 등에서는 웨이퍼나 디스크의 정밀한 이송을 위하여 진공환경에서 구동 가능한 공기베어링에 대한 연구가 진행되고 있다.^{1,2} 공기베어링을 진공환경에서 사용하기 위해서는 베어링에서 발생한 공기의 누출량(leakage)을 최소로 하여 고진공을 유지할 필요가 있으며, 많은 연구들에서 이 문제를 해결하기 위하여 차동배기시스템(differential exhaust system)을 공통적으로 도입하였다.^{1,3} 따라서 차동배기시스템의 설계는 챔버의 진공도를 결정하는 매우 중요한 작업으로, 저자 등은 이미 이에 대한 성능해석방법을 제안한 바 있다.⁴ 본 논문에서는 이러한 차동배기시스템의 설계변수들인 씰의 간극, 배기관의 직경 및 길이, 진공펌프의 용량과 도달압력 등의 최적화를 위하여 유전알고리즘을 도입하고, 그 적용방법 및 결과에 대해 분석하였다.

2. 진공용 공기베어링 구조 및 설계변수의 영향 분석

2.1 진공용 공기베어링의 구조

본 연구에서 해석 대상으로 사용한 진공용 공기베어링은 Fig. 1 에서 보는 것처럼 공기베어링 주위에 차례대로 여러 개의 배기슬롯을 설치한 차동배기시스템을 통하여 배기시키는 구조로 되어 있다. 각 배기슬롯에 진공펌프를 연결하여 진공챔버 내부로의 누출을 최소로 유지하며, 챔버에는 별도의 터보분자펌프를 연결하여 챔버 내를 고진공으로 유지하게 된다.

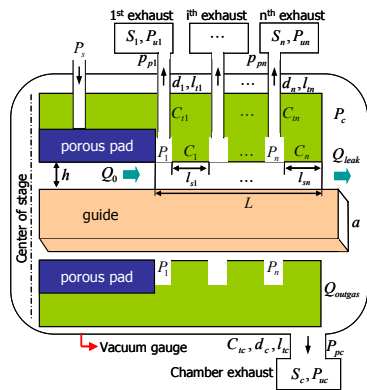


Fig. 1 Structure of vacuum-compatible air bearing system

2.2 설계변수의 영향분석

Fig. 2 는 배기단계를 3 차까지 설정하고, 3 차 배기관의 직경을 주변수로 하여 배기관의 직경과 베어링 간극(씰의 간극), 그리고 배기펌프의 용량이 챔버의 진공도에 미치는 영향을 분석한 것이다. 예상할 수 있듯이, 배기관의 직경이 커질수록, 베어링 간극이 작아질수록, 펌프의 용량이 증가할수록 진공도가 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 배관 직경과 펌프 용량 사이의 관계에서 볼 수 있듯이, 이들 변수들은 서로에게 영향을 미치므로, 하나의 설계변수 값만

증가시키는 것은 큰 의미가 없으며, 각 변수들의 최적화된 조합이 필요한 것을 확인할 수 있다.

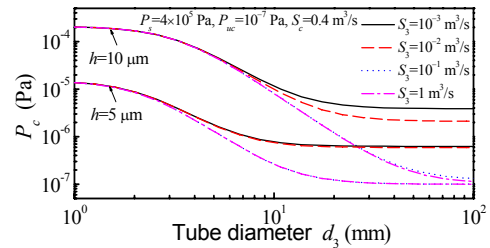


Fig. 2 Effect of design parameters on vacuum level

3. 유전알고리즘을 이용한 최적설계

3.1 목적함수 및 설계변수의 선택

본 최적화 문제의 목적함수는 챔버의 압력(P_c)으로, 이를 최소화하는 것으로 정하였다. 최적화 할 변수로는 주어진 조건하에서 변수들끼리 서로 연계되어 있어서 각 변수들의 값이 서로에게 영향을 주는 경우에 한정하여, 이에 해당하는 각 배기단계마다의 씰의 길이, 배관의 직경만을 최적화 변수로 설정하였다. 펌프의 배기속도는 배관의 컨덕턴스에 관련된 배기효율에 관계될 뿐만 아니라, 더 이상 진공도 향상이 없는 펌프의 기술적 한계값을 결정하기 위해 최적화 변수로 설정하였다. 단, 배기단계의 수를 최적화 변수로 설정할 경우 이에 따라 최적화 변수들의 개수가 변화하는 가변 최적화 문제가 되기 때문에 이를 배제하였다.

3.2 제약조건의 설정

제약조건은 크게 공간적 제약조건과 펌프의 기술적 제약조건으로 구분되는데, 공간적 제약조건이란 공기회수부의 전체 길이를 제한하는 것으로, $\sum(l_{si} + d_i) \leq L$ 과 같이 주어진다. 여기서, l_{si} 와 d_i 는 i 번째 배기단계에서의 씰의 길이와 배관의 직경을, L 은 공기회수부의 최대 길이를 의미한다.

펌프의 기술적 제약조건이란 진공펌프의 배기속도를 증가시키더라도 더 이상 챔버 진공도의 향상을 기대할 수 없는 배기속도의 한계를 설정하는 것이다. 이는 배관의 컨덕턴스를 고려한 유효배기속도(S_{eff})의 개념으로부터 주어질 수 있다.⁵ 즉, Fig. 3로부터, C/S_p 가 0.01 이하가 되면 유효배기속도는 $0.99C$ 이상이 되어 펌프 용량이 증가하더라도 더 이상 진공도 향상을 기대할 수 없다. 따라서 펌프의 기술적 한계는 $C/S_p \geq 0.01$ 로 주어져야 한다. 여기서 C 는 배관의 컨덕턴스, S_p 는 진공펌프의 배기속도이다.

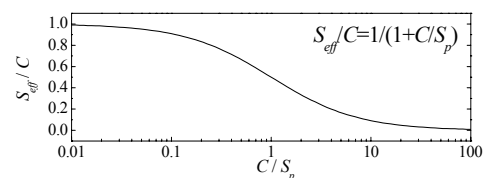


Fig. 3 Effective pumping speed with conductance

Table 3 Comparison of chamber pressure between initial and optimal design

	Chamber pressure (Pa)	l_{s1} (mm)	l_{s2} (mm)	l_{s3} (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	S_1 (l/s) P_{u1} (Pa)	S_2 (l/s) P_{u2} (Pa)	S_3 (l/s) P_{u3} (Pa)
Initial design	3.21×10^{-4}	5	10	10	5	10	10	33 1.0×10^{-1}	200 1.0×10^{-7}	400 1.0×10^{-7}
Optimal design	1.39×10^{-4}	3.5	5.5	6.1	7.0	11.9	16.0	19.4 1.0×10^{-1}	52.0 1.0×10^{-7}	43.6 1.0×10^{-7}

한편, 사용해야 하는 펌프의 종류나 도달압력은 펌프 입구부의 압력에 의해 결정되므로, 본 논문에서는 최적화 과정 중 계산된 펌프 입구부의 압력에 따라 펌프의 종류 및 도달압력을 설정해 주도록 하였다.

3.3 유전알고리즘의 선택 및 제약조건의 취급

본 최적화 문제에서 목적함수인 챔버의 압력은 설계변수들의 내재적인 형태로 존재하며, 제약조건이 가해진 경우이므로 도함수가 필요없는 최적화 방법중 하나인 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용하였다.⁶ 유전 알고리즘은 최적화 과정 중 어떤 도함수도 필요로 하지 않으며, 단지 목적함수의 값을 필요로 한다. 한편, 제약조건을 가지는 최적화 문제를 다루기 위하여 벌점함수를 이용하였다. 벌점은 제약조건을 위반한 정도를 평가하여 주어지며 위반 정도가 심할수록 벌점도 크게 부가되므로 다음 세대에서 선택될 가능성이 배제되어 점차 적합한 영역으로 해가 수렴하게 된다.

4. 최적설계 결과

4.1 설계조건

최적화는 Fig. 1의 모델에 대해서 최적화 할 변수 이외의 값은 Table 1의 기본치수를 이용하여 수행하였으며, 배기단계의 수는 3차로 고정하였다. Table 1에 주어지지 않은 변수들의 값은 최적화에 의해 결정되는 값들이다.

Table 1 Specification of parameters in exhausting system

	Pumping speed S_i (m ³ /s)	Ultimate pressure P_{ui} (Pa)	Tube diameter d_i (mm)	Tube length l_{ti} (mm)
i^{th} exhaust ($i=1, \dots, 3$)	-	-	-	1000
Chamber exhaust	4×10^{-1}	1.0×10^{-7}	40	1000
Dimensions of seal pad				
Length of i^{th} seal, l_{s_i} (mm) ($i=1, \dots, 3$)	-			
Circumferential length of i^{th} seal, a_i (mm) ($i=1, \dots, 3$)	200			
Maximum length of seal region, L (mm)	50			
Dimensions of porous pad				
Porous pad (mm)	Vertical	50×30×5		
	Horizontal	50×30×5		
Number of pads (double pads)	Vertical	2		
	Horizontal	2		
Bearing clearance (Seal gap), h (μm)	10			
Permeability of porous material, k_c (mm ²)	7.5×10^{-9}			
Supply pressure, P_s (N/m ²)	4.0×10^5			

4.2 최적화 결과

Fig. 4는 목적함수인 챔버의 압력을 세대(generation)가 진행됨에 따라 나타낸 것으로, 300세대 후 1.39×10^{-4} Pa 까지 달성할 수 있는 것으로 나타났다. 중간에 목적함수의 값이 요동치는 부분은 해의 집단을 사용한 유전알고리즘의 전역탐색(global search)에 의한 특징을 나타낸다.

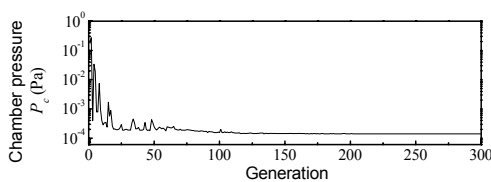


Fig. 4 Objective function during optimization process

4.3 최적화 검증

Table 3에서는 최적설계 전, 후의 결과를 비교하였다. 초기설계에서는 펌프의 기술적 제약조건이 적용될 수 없으므로 비교적 큰 용량의 펌프를 이용하였다. 최적설계 후의 챔버의 압력은 초기설계에 비해 상당히 작은 용량의 펌프를 사용했음에도 불구하고 진공도가 높게 나타나 공간변수들의 배분이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 5는 최적화 수행 이후, 각 배기단계에서 진공펌프의 배기속도에 따른 챔버의 진공도 변화를 보여주는 것이다. 기술적 제약조건이 가해진 최적화 결과와 비교해 볼 때, 최적화된 배기속도 이상에서는 진공도 향상이 거의 없는 것으로 나타나 기술적 제약조건을 통한 최적화가 잘 수행되었음을 확인할 수 있다.

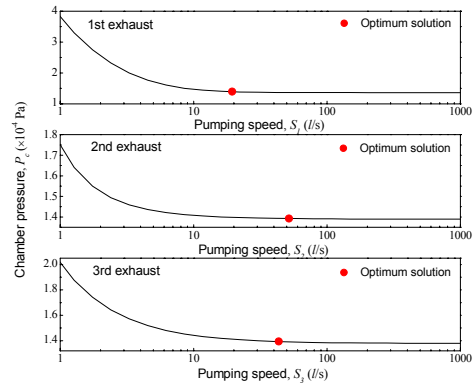


Fig. 5 Verification of optimization result in pumping speed

5. 결론

진공용 공기베어링을 사용하기 위해서는 진공환경으로의 누출량을 최소화 하기 위해 차동배기시스템을 이용하는 것이 일반적이며, 이와 관련된 변수들의 설계 방법에 따라 챔버의 진공도는 크게 달라진다. 따라서 본 논문에서는 이런 설계변수들의 최적화를 위해 유전알고리즘을 적용하여 여러 제약조건하에서의 설계변수들의 최적화 방법 및 그 결과에 대해 분석하였다. 최적화 결과, 배관의 직경이나 설의 길이와 같은 공간설계변수들의 배분이 제한된 설용 패드의 길이 내에서 잘 배분되어 챔버의 진공도가 향상됨을 알 수 있었으며, 배기용 진공펌프의 종류 및 용량 등이 최적적으로 결정될 수 있음을 이론적인 검증을 통하여 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Wada, Y., "Electron Beam Lithography with Rotation Stage," JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 318-321, 2004
2. Ohtsuka, M., Furukawa, M. and Higomura, M., "The Vertical Traverse Stage in Vacuum Condition," JSME International journal series III, Vol. 33, No. 1, pp. 61-64, 1990.
3. Watson, D. C., and Novak, W. T., "Air Bearing Linear Guide for Use in a Vacuum," US Patent No. US 6,467,960, 2002.
4. Khim, G, Park, C. H., Lee, H., and Kim, S. W., "Performance Analysis of a Vacuum-Compatible Air Bearing," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 10, 2006. (in Korean)
5. Roth, A., "Vacuum Technology (2nd, revised edition)," pp. 62-88, North-holland, 1982.
6. Jin, K. K., "Genetic Algorithms and Their Applications," Kyowoosa, 2002. (in Korean)