

진공용 공기베어링 배기시스템의 최적설계

김경호[#], 박천홍^{*}, 이후상^{*}, 김승우^{**}

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

Gyungho Khim[#], Chun-Hong Park^{*}, Husang Lee^{*} and Seung-Woo Kim^{**}

ABSTRACT

This paper presents the optimal design of an exhaust system of a vacuum-compatible air bearing using a genetic algorithm. To use the air bearings in vacuum conditions, the differential exhaust method is adopted to minimize the air leakage, which prevents air from leaking into a vacuum chamber by recovering air through several successive seal stages in advance. Therefore, the design of the differential exhaust system is very important because several design parameters such as the number of seals, diameter and length of an exhaust tube, pumping speed and ultimate pressure of a vacuum pump, seal length and gap(bearing clearance) influence on the air leakage, that is, chamber's degree of vacuum. In this paper, we used a genetic algorithm to optimize the design parameters of the exhaust system of a vacuum-compatible air bearing under the several constraint conditions. The results indicate that chamber's degree of vacuum after optimization improved dramatically compared to the initial design, and that the distribution of the spatial design parameters, such as exhaust tube diameter and seal length, was well achieved, and that technical limit of the pumping speed was well determined.

Key Words : Vacuum-compatible air bearing (진공용 공기베어링), Differential exhaust system (차동배기시스템), Optimal design (최적 설계), Genetic algorithm (유전 알고리즘), Degree of vacuum (진공도)

기호설명

a_i = circumference length of the i^{th} seal ($i=1, \dots, n$)
 C_{si} = conductance of the i^{th} seal
 C_{ti} = conductance of the i^{th} exhaust tube
 d_c = diameter of the chamber exhaust tube
 d_i = diameter of the i^{th} exhaust tube
 g_i = i^{th} constraint condition

h = bearing clearance (=seal gap)
 H = thickness of porous pad
 k_z = permeability coefficient of porous media
 L = maximum length of seal region
 L_x = length of a porous pad
 L_y = width of a porous pad
 l_{si} = length of the i^{th} seal
 l_{tc} = length of the chamber exhaust tube

☞ 접수일: 2006년 11월 22일; 게재승인일: 2007년 4월 11일

교신저자: 한국기계연구원 지능기계연구센터

E-mail: gyungho@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7105

* 한국기계연구원 지능기계연구센터

** 한국과학기술원 기계공학과

- l_{ii} = length of the i^{th} exhaust tube
- n = the number of exhaust stages
- P_c = chamber pressure
- P_i = pressure of the i^{th} exhaust groove
- P_s = supply pressure
- P_{pi} = inlet pressure of the i^{th} exhaust pump
- P_{ui} = ultimate pressure of the i^{th} exhaust pump
- $P_i(\bar{x})$ = penalty function of the i^{th} constraint condition
- Q_0 = mass flow rate from the porous pad
- Q_{leak} = leakage rate from the air bearing
- Q_{outgas} = outgassing rate
- S_c = pumping speed of the chamber exhaust pump
- S_i = pumping speed of the i^{th} exhaust pump
- S_{eff} = effective pumping speed
- w_i = penalty constant of the i^{th} constraint condition
- \bar{x} = solution vector

1. 서론

현재, 극자외선 노광장비, 전자빔 노광장비와 같은 차세대 노광장비나 전자빔을 이용한 고밀도 광학미더어 스탬퍼 등에서는 웨이퍼나 디스크의 정밀한 이송을 위하여 진공환경에서 구동 가능한 공기베어링에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁴ 공기베어링을 진공환경에서 사용하기 위해서는 베어링에서 발생한 공기의 누출량(leakage)을 최소로 하여 고진공도를 유지할 필요가 있으며, 많은 연구들에서 이 문제를 해결하기 위하여 차동배기시스템(differential exhaust system)을 공통적으로 도입하고 있다.¹⁻¹⁰ 즉, 공기베어링에서 배출되는 공기가 진공환경을 유지하는 챔버로 누출되는 것을 최소로 하기 위하여 베어링 주위에 여러 개의 시일(seal)을 순차적으로 설치하고, 각각의 시일 사이에 위치하는 배기슬롯(groove)에 진공펌프를 연결하여 배기하는 방식을 취하고 있다. 따라서 진공용 공기베어링에서 차동배기시스템의 설계는 챔버의 진공도 및 나아가 진공챔버 내에서 이루어지는 공정의 품질을 좌우하는 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 이와 관련된 설계변수로는 컨덕턴스(conductance)에 영향을 주는 각 배관의 직경과 길이, 시일의 길이 및 간극, 배기단계의 수, 진공펌프의 배기속도(pumping speed) 및 도달압력(ultimate pressure) 등이 포함된다. 그러나 아직까지 이들의

설계방법을 다룬 연구는 매우 미흡한 실정이다.

저자들은 진공용 공기베어링의 성능해석 방법을 다룬 연구¹¹를 수행한 바 있으며, 본 논문은 전편에 이어 차동배기 시스템을 구성하는 설계변수들의 최적화에 대해 다루고 있다. 이는 각 설계변수들이 서로 연계되어 있어 챔버의 진공도를 향상시키기 위해선 주어진 제한 조건하에서 각 변수들을 적절히 배분할 필요가 있을 뿐만 아니라, 차동배기에 사용된 진공펌프의 종류와 용량 등을 선정 시 무조건 큰 것이 아닌 현재 시스템에 가장 적당한 펌프를 최적의 용량으로 선정할 필요가 있기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 최적화 작업을 유전 알고리즘(genetic algorithm: GA)을 도입하여 수행하였으며, 그 적용방법 및 최적화 결과에 대해 분석하고, 이론적으로 검증하였다.

2. 진공용 공기베어링 구조 및 설계변수의 영향분석

2.1 진공용 공기베어링의 구조

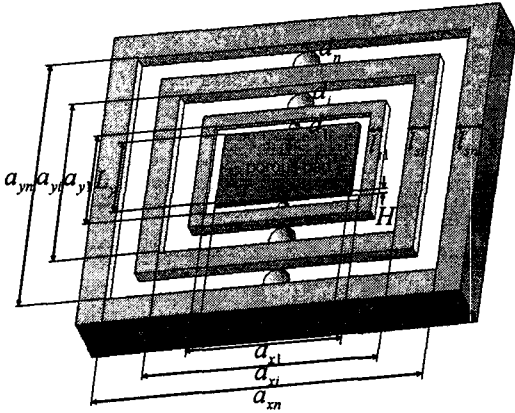
본 연구에서 해석 대상으로 사용한 진공용 공기베어링은 Fig. 1에서 보는 것처럼 공기베어링 주위에 차례대로 여러 개의 배기슬롯을 설치한 차동배기시스템을 통하여 배기시키는 구조로 되어 있다. 1 차 배기는 외부 대기에 직접 연결하는 자연배기나 진공펌프를 이용한 강제배기 모두 가능하며, 이는 베어링의 부하용량이나 강성 등의 정적 성능과 누출량 등을 종합적으로 고려하여 결정한다. 2 차 이상의 배기는 모두 진공펌프를 이용한 강제배기가 이루어지며, 배기슬롯의 압력에 따라 로타리펌프(Rotary pump)나 터보분자펌프(Turbo molecular pump)가 사용된다. 챔버에는 로타리 펌프로 백업된 터보분자펌프를 연결하여 챔버 내를 고진공으로 유지하게 된다.

2.2 설계변수의 영향 분석

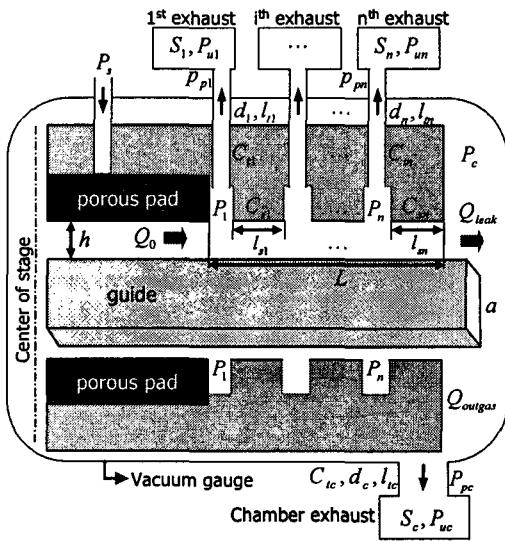
Fig. 1에서 보는 바와 같이, 진공용 공기베어링에는 많은 설계변수들이 존재하고, 이 변수들을 어떻게 설계했느냐에 따라 챔버의 진공도는 상당히 달라진다. 설계변수로는 배기단계의 수, 배관의 직경 및 길이, 시일의 길이 및 간극, 진공 펌프의 배기속도 및 도달압력 등이 있다. 이들 설계변수에 의한 영향을 분석하기 위해서는 누출량 해석을 수행해야 하며, 이에 대한 것은 저자들의 전편은

문에서 자세하게 기술되었다.¹¹

Table 1 은 설계변수의 영향을 분석하기 위한 다공질 공기베어링, 시일용 패드 및 배기시스템의 기본적인 변수값을 나타낸 것이며, 해석대상에 따라 변수값을 변화시켜가며 그 영향을 분석하였다.



(a) Vacuum-compatible air bearing and dimensional parameters



(b) Differential exhaust system for air bearing

Fig. 1 Structure of vacuum-compatible air bearing system

Table 1 Design parameters for theoretical analysis

	Pumping speed S_i (m^3/s)	Ultimate pressure P_{ui} (Pa)	Tube dia. d_i (mm)	Tube length l_i (mm)
Exhaust	1st	1.1×10^{-2}	1.0×10^{-1}	4
	2nd	1.6×10^{-2}	1.0×10^{-1}	10
	3rd	2.0×10^{-1}	1.0×10^{-7}	10
	Chamber	4.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	152
Seal pad	Length, l_{si} (mm)		5, 8, 10	
	Circumferential length (mm)	a_{xi}	58, 88, 124	
		a_{yi}	38, 68, 104	
	Clearance, h (μm)		10	
Porous bearing	Dimension, $L_x \times L_y \times H$ (mm)		50 \times 30 \times 5	
	Clearance, h (μm)		10	
	Permeability, k_z (mm^2)		7.5×10^{-9}	
	Supply pressure, P_s (Pa)		4×10^5	

Fig. 2 는 배기단계를 3 차까지 설정하고, 3 차 배관의 직경(d_3)을 주변수로 하여 배관의 직경과 베어링 간극(h), 그리고 배기펌프의 용량(S_3)이 챔버의 진공도(P_c)에 미치는 영향을 분석한 것이다. 예상할 수 있듯이, 배관의 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 값만 증가시키는 것은 의미가 없으며, 각 변수들의 최적화된 조합이 필요한 것을 확인할 수 있다. Fig. 2 에서 P_s 는 공급압력, S_c 와 P_{uc} 는 각각 진공챔버에 연결된 펌프의 배기속도와 도달압력을 의미한다.

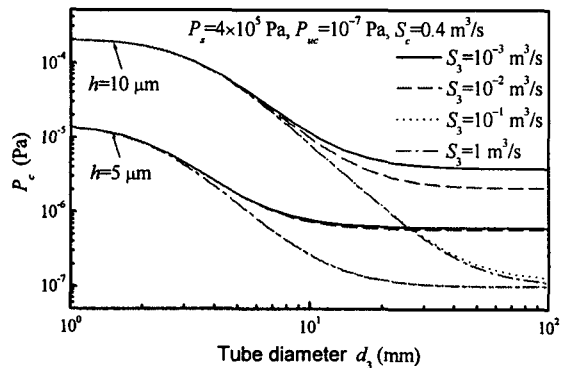


Fig. 2 Effect of tube diameter, bearing clearance and pumping speed

Fig. 3는 3차 배기펌프의 도달압력(P_{u3})에 의한 영향을 살펴본 것으로, 큰 용량의 배기펌프를 사용하더라도 도달압력이 높은 펌프를 사용하게 되면 고진공도를 달성할 수 없음을 알 수 있으며, 이는 배기단계가 증가할수록(즉, 챔버에 가까운 배기슬롯일수록) 배기펌프의 용량보다는 도달압력에 주의해서 펌프를 선정해야 함을 의미한다.

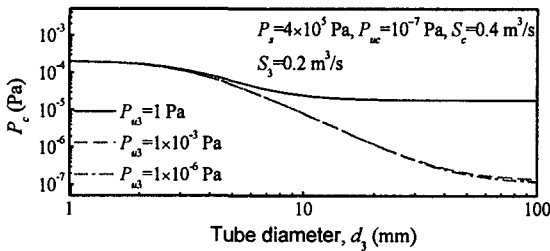


Fig. 3 Effect of ultimate pressure

Fig. 4는 3차 시일 길이(l_{s3})의 영향을 살펴본 것으로, 시일의 길이가 길수록 베어링 간극을 통해 흐르는 공기의 저항이 커져 유량은 감소하므로 진공도가 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 진공도를 높이기 위해서 시일의 길이를 무한정 증가시킬 수는 없다. 공수회수부의 제한된 길이 내에서 시일의 길이를 증가시키면 배관 직경이 작아지기 때문에 이들의 최적화된 조합이 필요한 것이다. 물론 시일의 길이와 배관 직경을 동시에 증가시킬 수도 있으나, 이 경우 시스템이 전체적으로 커져야만 하며, 또한 베어링 공기회수부의 길이가 다공질 패드부에 비해 상대적으로 커지게 되어 동적으로 불안정해질 가능성도 증가하게 된다.

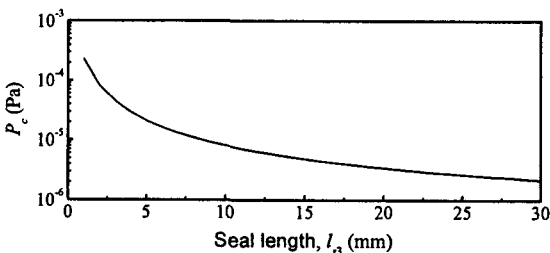


Fig. 4 Effect of seal length

3. 유전 알고리즘을 이용한 최적설계

3.1 목적함수 및 설계변수의 선택

진공용 공기베어링의 설계에서 가장 중요한 것은 주어진 조건하에서 누출량을 최소로 하여 챔버의 진공도를 높이는 것이다. 따라서 본 최적화 문제의 목적함수는 챔버의 압력으로, 이를 최소화하는 것으로 정하였다.

진공용 공기베어링은 많은 설계변수들이 존재하며, 이들에 의한 영향을 2.2장에서 간단하게 살펴본 결과, 설계변수들의 최적화가 필요함을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 변수 모두를 최적화할 변수로 설정할 필요는 없다. 최적화에 사용할 변수로는 주어진 조건하에서 변수들끼리 서로 연계되어 있어서 각 변수들의 값이 서로에게 영향을 주는 경우에 한한다. 따라서 이런 조건에 해당되는 변수인 각 배기단계에서의 시일의 길이, 배관의 직경만을 최적화 변수로 설정하였다. 더불어 펌프의 배기속도는 배관의 컨덕턴스에 관련된 유효배기속도에 관계될 뿐만 아니라, 더 이상의 진공도 향상이 없는 펌프의 기술적 한계값을 결정하기 위해 최적화 변수로 설정하였다. 최적화에서 제외된 나머지 변수들은, 예를 들어 베어링 간극은 베어링의 부하용량이나 강성을 고려해서 우선적으로 결정되어야 하며, 배관의 길이는 주어진 상황에서 최대한 짧게 설치하면 되는 것이다. 한편, 배기단계의 개수를 최적화 변수로 설정할 경우 배기단계의 수에 따라 최적화 할 변수들의 개수가 달라지는 가변 최적화 문제가 되기 때문에 이를 배제하였다. 즉, 본 논문에서의 최적화는 배기단계의 수가 결정된 상태에서의 다른 변수들의 최적화에 대해서만 다루고 있다.

3.2 제약조건의 설정

제약조건은 크게 공간적 제약조건과 펌프의 기술적 제약조건으로 구분되는데, 공간적 제약조건이란 공기회수부의 전체 길이를 제한하는 것으로 베어링의 동적 안정성 및 물리적 공간 크기를 고려하여 결정된다. 식 (1)은 공간적 제약조건을 나타내고 있다.

$$g_0: \sum_{i=1}^n (l_{si} + d_i) \leq L \quad (1)$$

여기서 l_{si} 는 i 번째 배기단계에서의 시일의 길이, d_i 는 i 번째 배관의 직경, n 은 배기단계의 개수, L 은 공기회수부의 최대 길이를 의미한다.

펌프의 기술적 제약조건이란 진공펌프의 배기 속도를 증가시키더라도 더 이상 유효배기속도의 증가를 기대할 수 없는, 즉 챔버 진공도의 향상을 기대할 수 없는 배기속도의 한계를 설정하는 것이다. 이는 배관의 컨덕턴스를 고려한 유효배기속도 (S_{eff})의 개념으로부터 식 (2) 와 Fig. 5 에 의해 주어질 수 있다.¹²⁻¹³

$$S_{eff} = \frac{C_i}{1 + C_i/S} \quad (2)$$

배관의 컨덕턴스(C_i)는 배관의 직경과 길이가 주어지면 결정되는 값으로, C_i / S 가 0.01 이하가 되면 유효배기속도는 0.99 C_i 이상이 되어, 현 상태에서의 최대 유효배기속도값인 C_i 의 99 % 이상을 사용하게 되므로 펌프 용량이 증가하더라도 더 이상의 진공도 향상을 기대할 수 없다. 따라서 펌프의 기술적 한계는 식 (3)과 같이 $C_i / S \geq 0.01$ 로 주어져야 한다. 여기에서 C_i 는 고정된 값이 아니고 최적화 과정에서 배관의 직경에 따라 매번 계산되는 값이므로 S 도 매번 달라지게 된다.

$$g_i : C_i / S_i \geq 0.01 \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, n$$

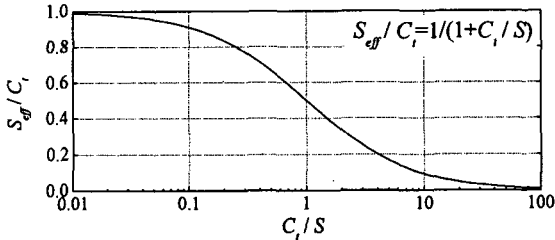


Fig. 5 Effective pumping speed according to ratio of conductance to original pumping speed

이상의 기술적 한계는 단지 펌프의 용량면에서만 살펴본 것이고, 펌프의 종류나 도달압력에 대한 것은 전혀 고려가 되지 않았다. 펌프의 종류나 도달압력은 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 펌프 입구부의 압력(P_{pi})에 의해 결정되므로, 본 논문에서는 최적화 과정 중 계산된 펌프 입구부의 압력에 따라 펌프의 종류 및 도달압력을 설정해 주도록 하였다.

따라서 식 (4)와 같이 최적화 과정에서 계산된 펌프 입구부의 압력이 1.5 Pa 이상이라면 로타리 펌프와 로타리 펌프의 도달압력인 6.5×10^{-2} Pa 를 사용해야 하며, 그 이하라면 터보분자 펌프와 1.0×10^{-7} Pa 의 도달압력을 사용해야 한다. 여기서 로타리 펌프의 배기속도의 범위는 현재, 여러 회사의 카탈로그를 참고하여 최대 3.3×10^{-2} m³/s 로 설정하였고, 터보분자 펌프인 경우는 최대 4.0×10^{-1} m³/s 로 설정하였다. 따라서 펌프의 기술적 제약조건은 단순히 펌프용량의 기술적 한계뿐 아니라 어떤 종류의 펌프를 얼마의 용량으로 할 것인가를 결정해 주는 것이다.

$$S_i = \begin{cases} 0 < S_i \leq 3.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} & \text{if } P_{pi} > 1.5 \text{ Pa} \\ 0 < S_i \leq 4.0 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{ui} = \begin{cases} 6.5 \times 10^{-2} \text{ Pa} & \text{if } P_{pi} > 1.5 \text{ Pa} \\ 1.0 \times 10^{-7} \text{ Pa} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, n$$

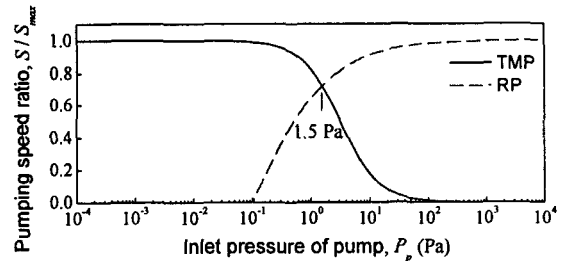


Fig. 6 Pumping speed of turbo molecular pump(TMP) and rotary pump(RP) according to inlet pressure

한편, 진공용 공기베어링에서는 다공질 패드에서 발생하는 압력 이외에 1 차 배기슬롯의 압력만이 베어링의 정적성능에 영향을 주게 된다. 2 차 이상의 배기슬롯부는 압력이 매우 낮기 때문이다. 따라서 차동배기부(다수의 시일이 설치되는 부분)의 최적설계시 1 차 배기슬롯의 압력이 중요하게 되는데, 전편 논문¹¹의 결과에서 알 수 있듯이 1 차 배기슬롯의 압력(다공질 패드의 경계압력)이 낮아질수록 부하용량과 강성은 증가하므로 특별히 1 차 배기슬롯의 압력이나 유량에 제약을 가할 필요는 없다. 이는 1 차 배기부에 직접 진공펌프를 연결하여 배기하는 것이 유리하다는 것을 의미하는 것이지만, 1 차 배기부에 직접 진공펌프를 연결

하는 경우, 비교적 높은 압력이 진공펌프를 통과하게 되므로 진공펌프에 다소 무리가 갈 수 있고, 다공질 베어링 설계 시 기존의 해석틀 대신 경계압을 고려한 새로운 해석틀을 코딩하여 사용해야 함에 주의할 필요가 있다.

3.3 유전 알고리즘의 선택 및 동작과정

3.1 절에서 정의된 진공용 공기베어링의 최적화 문제에서는 목적함수인 챔버의 압력이 설계변수들의 내재적인 형태로 존재하므로 도함수를 이용한 최적화 기법을 적용하기가 어렵다. 또한 본 논문에서의 최적화 문제와 같이 제약조건이 가해진 경우, 도함수를 이용하기 위해선 제약조건을 고려하여 도함수를 구해야 하는데, 그 과정이 복잡할 뿐만 아니라, 때때론 불가능할 경우도 발생한다. 따라서 본 최적화 문제에서는 도함수가 필요 없는 최적화 기법 중 여러 비선형 문제에서 그 유용함이 검증된 실수코딩 유전알고리즘을 선택하였다.¹⁴⁻¹⁵ 유전 알고리즘은 최적화 과정 중 어떤 도함수도 필요로 하지 않으며, 단지 목적함수의 값만을 필요로 한다.

유전 알고리즘은 유전학과 자연진화를 흉내 낸 적응 탐색법으로, 동작과정은 Fig. 7 과 같다. 초기에, 해의 집단이 형성되어 각 개체에 대한 목적함수가 계산되고, 이로부터 상대적인 강점과 약점을 나타내는 적합도(fitness)가 평가된다. 적합도 함수는 초기에는 해의 다양성을 충분히 유지하기 위해 개체간 상대적인 적합도의 영향을 줄여주고 후기에는 그 영향을 크게 하기 위해 정규화(normalization)하여 사용하였으며, 본 논문에서는 정규화 방법으로 scaling window 법을 사용하였다.

재생산(reproduction) 연산자는 적합도 값에 따라 더 적합한 개체들을 선택하여 다음 세대의 집단을 형성하게 해주는 것으로, 본 논문에서는 구배와 비슷하여 적합한 영역 내에서 지역적 탐색이 가능한 하이브리드(hybrid) 재생산 연산자를 채택하였다.¹⁶ 교배(crossover)는 개체들 사이의 정보 교환을 가능하게 해주는 것으로, 산술적 교배(arithmetical crossover)를 이용하였으며, 돌연변이(mutation)는 유전자를 임의로 변경하여 집단에 다양성을 추구하는 것으로, 본 논문에서는 동적 돌연변이(dynamic mutation)를 채택하여 초기에는 전공간을 균등한 확률로 탐색하다가 세대수가 증가할수록 매우 지역적으로 탐색할 수 있게 하였다.

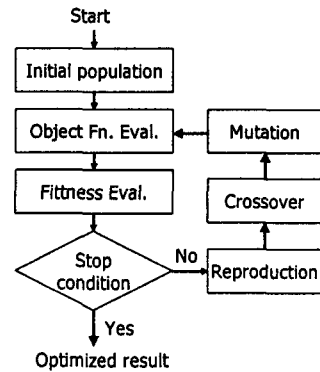


Fig. 7 Optimization process using the genetic algorithm

이와 같이 유전 알고리즘은 매 세대마다 재생산, 교배, 돌연변이를 거치면서 새로운 해 집단이 형성되고 최적의 해가 발견될 때까지 이런 과정은 반복된다. 유전 알고리즘은 해의 집단을 유지함으로써 여러 방향으로 탐색을 추구하게 하고 이로부터 전역해(global solution)를 구해준다.

3.4 제약조건의 취급

제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역(feasible region)과 부적합한 영역(infeasible region)으로 구성되기 때문에 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 되면 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있다.¹⁴

벌점은 제약조건을 위반한 정도를 평가하여 주어지며 위반 정도가 심할수록 벌점도 크게 부과되므로 다음 세대에서 선택될 가능성이 배제되어 점차 적합한 영역으로 해가 수렴하게 된다. 식 (5)는 공간적 제약조건과 펌프의 기술적 제약조건을 위반한 경우에 대한 벌점함수를 나타낸다.

$$P(\bar{x}) = \sum_{i=0}^n P_i(\bar{x}) \tag{5}$$

where,

$$P_0(\bar{x}) = \begin{cases} w_0 \left[\sum_{i=1}^n (l_{ii} + d_i) - L \right] & \text{if } \sum_{i=1}^n (l_{ii} + d_i) - L > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_i(\bar{x}) = \begin{cases} w_i (S_i / C_{ii}) & \text{if } C_{ii} / S_i < 0.01 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$i = 1, \dots, n$

여기서 $P_i(\bar{x})$ 는 각 제약조건에 대한 벌점함수이며, w_i 는 각 제약조건에 주어지는 벌점상수로서, 각 벌점함수간에 차수를 맞춰주기 위해 $P_0(\bar{x})$ 를 기준으로 $w_i (i=1, \dots, n)$ 값들을 매번 조정하여 나머지 벌점함수들인 $P_i(\bar{x})$ 가 같은 차수를 갖도록 하였다. 따라서 각 벌점함수들은 거의 동일한 비율로 목적함수에 영향을 미치게 되고, 특정 벌점함수가 지배적으로 작용하여 최적화에 실패하는 것을 방지하도록 하였다.

4. 최적설계 결과

4.1 설계 조건

위와 같은 최적화 방법을 실제로 적용하기 위하여, Fig. 1(b)의 모델에 대해서 최적화 할 변수 이외의 값은 Table 2의 기본치수를 이용하여 최적화를 수행하였다. 배기단계의 개수는 3 차로 고정하였으며, 본 논문에서는 다공질 베어링의 유량까지도 고려하여 최적화가 이루어지므로 베어링의 치수나 개수도 중요한 변수가 된다. 다공질 베어링은 수직, 수평방향으로 각각 1 개씩 양면지지형의 박스 형태로 설정하였다. 공간적 제약조건은 최대 50 mm 로 설정하였으며, a 는 시일의 둘레 길이로써, 여기서는 가이드 레일의 둘레길이와 일치한다. Table 2에 주어지지 않는 변수들의 값은 최적화에 의해 결정되는 값들이다. Table 3는 유전 알고리즘에 사용된 연산자와 제어 파라미터들의 값을 나타낸다. 제어 파라미터들의 값은 여러 번의 테스트를 통해 가장 좋은 결과를 내는 값들로 설정하였다.

4.2 최적화 결과

Fig. 8은 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. 특히, 동적 돌연변이의 사용으로 초기에는 전역적 탐색을 하다가 세대가 거듭될수록 매우 지역적으로 탐색하는 특징을 그대로 나타내고 있다. 일반적으로 이와 같은 현상을 방지하고 유전 알고리즘의 성능을 향상하기 위해 엘리트 전략 (elitist strategy)을 사용하나, 본 최적화에서는 제약조건에 의한 벌점함수

의 사용으로 최적화가 이루어지지 않은 채 해가 초기에 수렴하는 것을 방지하기 위해 엘리트 전략을 채택하지 않았다. 따라서 최적화 도중에 이와 같은 목적함수의 변동이 나타난 것이다.

Table 2 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_{ii} (mm)
<i>i</i> -th exhaust (<i>i</i> =1, ..., 3)	-	-	-	1000
Chamber exhaust	4×10^{-1}	1×10^{-7}	40	1000
Dimensions of seal pad				
Length of <i>i</i> -th seal, l_{si} (mm) (<i>i</i> =1, ..., 3)				-
Circumferential length of <i>i</i> -th seal, a_i (mm)				200
Maximum length of seal region, L (mm)				50
Dimensions of porous pad				
Porous pad (mm)	Vertical		50×30×5	
	Horizontal			
Number of pads (double pads)	Vertical		2	
	Horizontal		2	
Bearing clearance (Seal gap), h (μm)				10
Permeability of porous material, k_p (mm ²)				7.5×10^{-9}
Supply pressure, P_s (N/m ²)				4×10^5

-- : determined by optimization

Table 3 Operators and control parameters for the GA

Population size	50
Maximum generation	300
Fitness function	Scaling window
Reproduction operator	Hybrid
Crossover operator	Arithmetical
Crossover rate	0.9
Mutation operator	Dynamic
Mutation rate	0.1
Elitist strategy	Not adopted

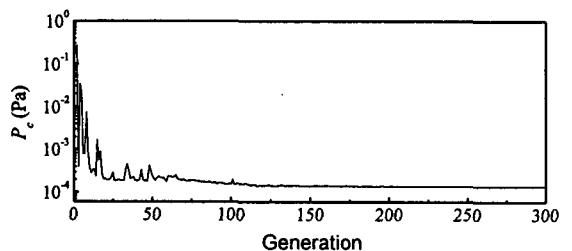


Fig. 8 Objective function during optimization process

Fig. 9 는 각 설계변수들의 최적화된 결과로써, 세대가 진행됨에 따라 모두 수렴하는 것을 볼 수 있다. 특이할만한 점은 진공챔버에 가깝게 위치한 시일의 길이나 배관의 직경이 커진다는 것인데, 이는 배기단계가 늘어날수록 압력이 감소하여 분자유동상태로 넘어가므로 효과적인 배기가 이루어 지려면 시일의 컨덕턴스는 작아지는 반면, 배관의 컨덕턴스는 커져야 하기 때문이다.

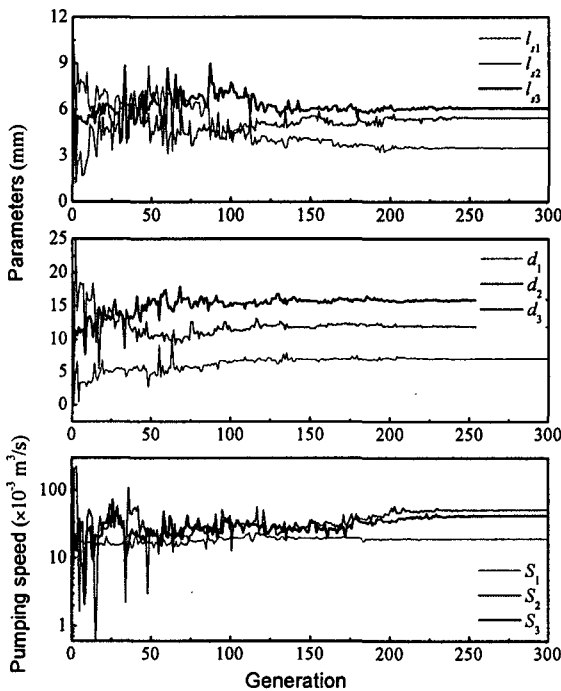


Fig. 9 Optimized result of design parameters

Fig. 9 의 결과에 따르면 1 차, 2 차 그리고 3 차 펌프의 배기속도는 각각 19.4, 52.0, 43.6 ($\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)이다. 각 펌프의 종류는 Fig. 10 의 펌프 입구 압력에 의해 결정되는데, 1 차 펌프는 입구부의 압력이 1.5 Pa 이상이므로 로타리 펌프를 사용해야 한다. 또한 2 차와 3 차 펌프는 입구 압력이 1.5 Pa 이하이므로 터보분자펌프를 사용해야 하며, 특히 3 차의 경우는 배기속도는 크지 않지만 입구부 압력이 낮으므로 로타리 펌프는 사용 불가능하고 터보분자펌프를 사용해야만 한다는 것을 말해 준다. 한편, 2 차 펌프의 배기속도는 초기에 변동성이 심한데, 이것은 2 차 배기의 경우 로타리 펌프와 터

보분자펌프의 사용 영역에 동시에 위치하므로 (펌프 입구부 압력이 1.5 Pa 근처) 넓은 영역을 탐색 하면서 나온 결과이며, 결국 터보분자펌프를 사용해야 하는 것으로 나타나고 있다.

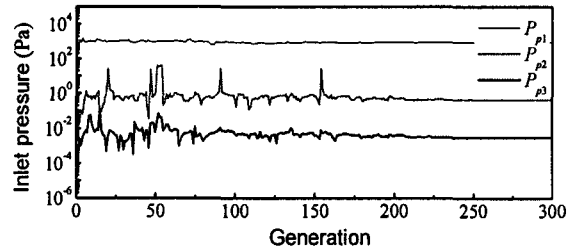


Fig. 10 Variation of inlet pressure of each vacuum pump

Fig. 11 은 최적화 과정에서 제약조건의 만족여부를 알아보기 위하여 공간적 제약조건 ($\sum(l_{si}+d_i) \leq 50 \text{ mm}$)과 펌프의 기술적 제약조건 ($C_i/S_i \geq 0.01$)을 도출해 본 것으로, 200 세대 이후에서는 모두 제약조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 한편, C_{11}/S_1 의 값은 0.28 정도로 C_{22}/S_2 나 C_{33}/S_3 에 비해 크게 나오고 있는데, 이는 1 차 배기에서는 펌프 입구부의 압력이 높아 로타리 펌프를 사용할 수 밖에 없고, 이에 의해 1 차 펌프 배기속도의 최대값이 제한되었기 때문이다.

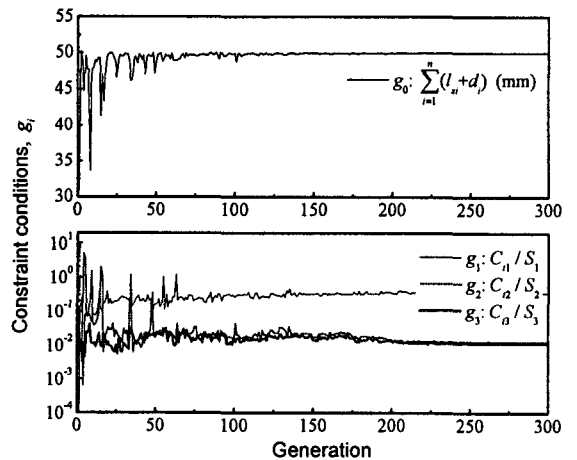


Fig. 11 Satisfaction of constraint conditions

4.3 최적화 검증

Table 4 는 초기설계에 대해 최적설계 후의 설계값 및 목적함수인 챔버의 압력을 비교한 결과이

Table 4 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)	$S_1 (\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ P_{u1} (Pa)	$S_2 (\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ P_{u2} (Pa)	$S_3 (\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ 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}
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}

다. 초기설계는 공간제약조건 하에서 설계가 이루어졌으나, 펌프의 기술적 제약조건은 적용될 수 없으므로 비교적 큰 용량의 펌프를 이용하였다. 최적설계 후의 챔버의 압력은 초기설계에 비해 상당히 작은 용량의 펌프를 사용했음에도 불구하고 진공도가 높게 나타나고 있어, 공간 설계변수들의 배분이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 12 는 최적화 수행 이후, 각 배기단계에서 진공펌프의 배기속도에 따른 챔버의 진공도변화를 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.

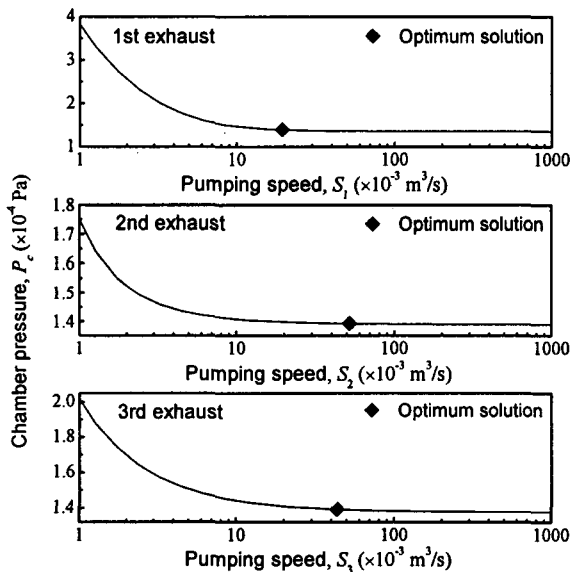


Fig. 12 Verification of optimization result in pumping speed

5. 결론

진공용 공기배어링을 사용하기 위해서는 진공 환경으로의 누출량을 최소로 하기 위해 차동배기 시스템을 이용하는 것이 일반적이며, 이와 관련된 변수들의 설계 방법에 따라 챔버의 진공도는 크게 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 이런 설계 변수들의 최적화를 위해 유전알고리즘을 적용하여 여러 제약조건하에서의 설계변수들의 최적화 방법 및 그 결과에 대해 분석하였다. 최적화 결과, 배관의 직경이나 시일의 길이와 같은 공간설계변수들의 배분이 제한된 공기회수부의 길이 내에서 잘 배분되어 챔버의 진공도가 향상됨을 알 수 있었으며, 배기용 진공펌프의 종류 및 용량 등이 최적으로 결정될 수 있음을 이론적인 검증을 통하여 확인할 수 있었다.

이와 같이, 본 논문에서 제시한 최적화 기법은 각 공간설계변수들의 배분 및 진공펌프의 기술적 한계값을 제시해 줌으로써, 진공용 공기배어링 배기시스템의 설계 시 상당히 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Novak, W. T. and Watson, D., "Nikon Electron Projection Lithography System: Mechanical and Metrology Issues," Proceeding of the ASPE, Vol. 22, pp. 517-520, 2000.
2. Wada, Y., "Electron Beam Lithography with Rotation Stage," JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 318-321, 2004.
3. Takeda, M., "Future Optical Disc Technology using Electron Beam Lithography," JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 322-325, 2004.
4. 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.

5. Trust, D., “Using Air Bearings in Vacuum to Control Stage Vibration,” Semiconductor International, pp.165-168, 2002.
6. Yokomatsu, T. and Furukawa, M., “Static Pressure Bearing,” US Patent No. US 4,749,283, 1988.
7. Watson, D. C. and Novak, W. T., “Air Bearing Linear Guide for Use in a Vacuum,” US Patent No. US 6,467,960, 2002.
8. Higuchi, A., Kato, T. and Iwaski, K., “Slide Apparatus and Its Stage Mechanism for Use in Vacuum,” US Patent No. US 6,510,755, 2003.
9. Sogard, M. R. and Spicer, D. F., “Air Bearing Operable in a Vacuum Region,” US Patent No. US 6,126,169, 2000.
10. Sogard, M. R., “Fluid Bearing Operable in a Vacuum Region,” US Patent No. US 6,402,380, 2002.
11. Khim, G., Park, C. H., Lee, H. and Kim, S. W., “Performance Analysis of a Vacuum-Compatible Air Bearing,” Journal of the KSPE, Vol. 23, No. 10, pp. 102-112, 2006.
12. Roth, A., “Vacuum Technology (2nd, revised edition),” North-holland, pp. 62-88, 1982.
13. Bae, S. H., In, S. R., Jung, K. H., Lee, Y. B. and Shin, Y. H., “Vacuum Engineering,” The Korea Economic Daily Business Publication, pp. 61-116, 2000.
14. Jin, K. K., “Genetic Algorithms and Their Applications,” Kyowoosa, 2002.
15. Michalewicz, Z., “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs [Third, Revised and Extended Edition],” Springer, 1999.
16. Pham, D. T. and Jin, G., “Genetic Algorithm using Gradient-like Reproduction Operator,” Electronics Letters, Vol. 31, No. 18, pp. 1558-1559, 1995.