한국정밀공학회지 제 25권 12호 pp. 132-138 December 2008 / 132
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 25, No. 12, pp. 132-138

전자빔 마스터링을 위한 공기베어링 응용 고진공 회전테이블의 설계 및 진공특성 평가

Design and Evaluation of a Rotation Table using Air Bearings for Electron Beam Mastering

✉김경호[1], 송창규[1], 박천홍[1]
✉Gyungho Khim[1], Chang-Kyu Song[1] and Chun-Hong Park[1]

1 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM)
✉ Corresponding author: gyungho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7105

Manuscript received: 2008.7.1 / Revised: 2008.8.27 / Accepted: 2008.9.11

Recently, mastering processes for high density optical disc such as Blu-ray disc rely on electron beams, which are operable in only vacuum. In the mastering process, one of the most important tasks is to design precision stages for providing precise positioning of the works with respect to the source in a high vacuum environment. In this paper, we have developed a precision rotation table usable in the electron beam mastering. The rotation table adopted air bearings for a high positioning repeatability and velocity stability. The air leakage from the air bearings has been minimized by employing the differential exhaust scheme using three steps of air drain. The design parameters such as diameters of exhaust lines, seal lengths, and pumping speeds were decided according to the optimization method using genetic algorithm. The performance on the vacuum level of the rotation table was evaluated experimentally and theoretically. The results indicate that a vacuum level of 10^{-4} Pa is achieved with operation of air bearings in a vacuum chamber, which is sufficient for the electron beam mastering.

Key Words: Rotation Table (회전테이블), Air Bearings (공기베어링), Electron Beam Mastering (전자빔 마스터링), Blu-ray Disc (블루레이 디스크), Vacuum Environment (진공환경)

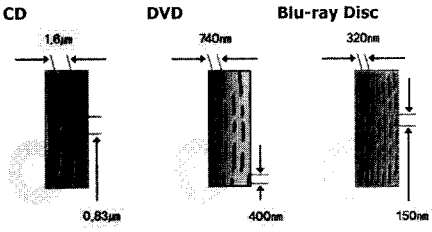
1. 서론

고화질의 Full HD(High Definition)급 영상을 저장하기 위해서는 DVD(Digital Versatile Disc)보다 훨씬 큰 용량이 필요함에 따라 Blu-ray 디스크로 불리는 새로운 저장매체가 등장하게 되었다. Blu-ray 디스크는 기존의 DVD 보다 미세한 패턴을 형성하여 한 층당 25 GB 를 저장할 수 있으며, 이러한 미세한 패턴을 읽기 위해서 DVD 와는 달리 405 nm 청자색 레이저 픽업을 사용한다 (그림 1). 한편, 영화나 음반 디스크의 대량 생산을 위해서는 기준이 되는 마스터(master) 디스크가 필요한데, 이를 만드는 과정을 마스터링이라 한다. 기존의 CD(Compact Disc)나 DVD 가 대기환경에서 아르곤 레이저 등을 이용해 마스터링이 이루어진 반면, 25GB 이상의 Blu-ray 디스크는 보다 미세한 패턴 가공을 위해서 훨씬 파장이 짧은 전자빔을 이용하여 진공환경에서 마스터링이 이루어져야 한다.[1-4]

전자빔을 이용한 Blu-ray 디스크 마스터링은 반도체 노광 공정과 비슷하며, 10^{-3} Pa 이상의 고진공[2]

챔버내에서 정밀하게 이송하는 직선-회전 테이블 위에 놓인 시편에 전자빔을 조사하여 패턴을 가공하는 것이다. 따라서 직선-회전 테이블이 얼마나 정밀하게 이송하였는가에 따라 패턴의 정밀도가 결정된다. Blu-ray 디스크와 같이 나선형 패턴의 경우, 직선테이블보다는 회전테이블의 정밀도가 상대적으로 중요하며, 따라서 회전테이블은 정밀도가 뛰어난 공기베어링을 이용하여 제작되고 있다. 전자빔을 이용하므로 진공환경은 필수이며, 정밀도를 위해선 공기베어링을 사용해야 하므로 공기베어링을 진공환경에서 사용하는 것이 큰 관심사였으며, 대부분은 차동배기(differential exhaust)를 [5,6] 도입하여 이 문제를 해결하고 있다.

본 논문에서는 전자빔을 이용한 Blu-ray 마스터링 장비와 같이 10^{-3}Pa 이상의 고진공 환경에서 사용할 수 있는 회전테이블을 설계하였다. 회전테이블은 공기베어링을 사용하였으며, 차동배기시스템을 최적설계하여 공기베어링으로부터의 누출량을 최소로 하고 고진공이 유지되도록 하였다. 제작된 회전테이블의 전자빔 마스터링 장비에의 사용가능성을 진공특성 측면에서 평가하였다.



	CD (1st gen.)	DVD (2nd gen.)	Blu-ray (3rd gen.)
Capacity	650 MB	4.7 GB	25 GB
Track pitch	1.6 μm	0.74 μm	0.32 μm
Minimum pit length	0.83 μm	0.4 μm	0.15 μm
Laser wavelength (λ)	780 nm, red	635 nm, red	405 nm, blue-violet
Numerical Aperture (NA)	0.45	0.6	0.85
Resolution	352×240	720×480 (SD)	1920×1080 (Full HD)
Mastering	Laser Beam Recorder (LBR)		Electron Beam Recorder (EBR)

Fig. 1 Comparison of CD, DVD and Blu-ray disc

2. 고진공 회전테이블 설계

2.1 전자빔 마스터링 장비

개발중인 Blu-ray 디스크 마스터링 장비의 구조를 Fig. 2 에 나타내었다. 이 장비는 전자빔을 이용하여 마스터 디스크를 위한 패턴을 가공하는 장비로써, 크게 직선테이블과 회전테이블, 전자빔 경통으로 이루어져 있으며, 모든 공정은 진공환경에서 이루어진다. 직선테이블은 기본적으로 직선베어링과 리니어모터 및 고분해능의 리니어스케일에 의해 피드백되며, 스케일과 시편 가공면의 높이 차이에서 오는 아베오차를 제거하기 위해 시편과 동일한 높이에서 레이저 피드백을 받을 수 있도록 하였다. 회전테이블의 틸트 오차 등에서 기인한 전자빔의 포커스 오차는 별도의 높이센서(height sensor)를 설치하여 보상이 가능하도록 하였다. 전자빔 경통은 고에너지 전자빔이 마그네틱 렌즈에 의해 편향되어 시편에 도달하며, 경통 하단부의 빔블랭커(beam blanker)를 통해 고속으로 전자빔을 차단하여 임의의 패턴을 가공할 수 있다.

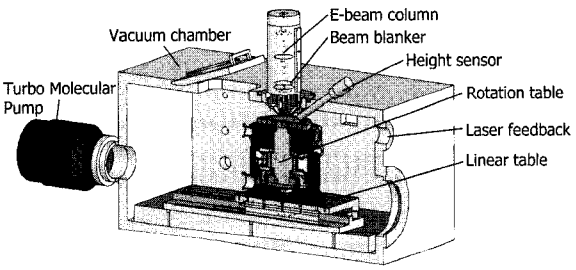


Fig. 2 Structure of a blu-ray disc mastering device

2.2 회전테이블 설계

전자빔 마스터링에 필요한 회전테이블은 미세한 패턴 형성을 위해 매우 높은 수준의 회전정밀도(랜덤오차 기준 수 nm-rms)와 속도안정성(표준편차 기준 ~10^{-5} %)을 요구하므로 [1] 다공질 공기베어링을 이용하여 비접촉으로 구동하는 방식을 채택하였다. 마그네틱베어링 또한 진공에서 사용할 수 있는 하나의 후보이긴 하지만 회전정밀도를 포함한 모든 성능이 센서의 피드백에 의한 제어성능에 달려있으며 전자기장 차폐 문제와 열발생의 가능성이 있으므로, 이와 같은 문제가 발생하지 않고 기계적인 정밀도를 보장해 주는 공기베어링을 사용하게 되었다. 공기베어링을 사용할 때 가장 문제가 되는 공기의 누출에 의한 챔버 진공도 저하 문제는 차동배기를 도입하여 해결하고자 하였다. 이는 공기베어링 주위에 라비린스 시일(labyrinth seal)을 설치하고 각 시일 사이의 배기홈마다 진공펌프로 배기하여 압력을 순차적으로 낮추는 방식이다. 각 배기홈 사이의 시일은 간극이 수 μm 에 불과할 정도로 매우 작기 때문에 이곳으로의 유량의 흐름은 거의 발생하지 않고, 대부분은 배기홈에서 진공펌프에 연결된 배관을 통해 챔버 외부로 배출되어 진공챔버 내부로의 누출을 최대한 억제

하게 된다.[7] 따라서 공기베어링에서 발생하는 0.2 ~ 0.3MPa 정도의 압력은 차동배기를 거치면서 차례대로 낮아져 최종적으로 챔버와 접하는 곳에서는 10^{-3} Pa 이상의 고진공으로 유지되는 것이다.

본 연구에서 3 단계의 차동배기가 적용된 회전테이블의 구조는 Fig. 3 과 같다. 회전모터 및 엔코터 전원, 신호선, 공기베어링에 공급되는 압축공기라인은 회전테이블 하단 옆면에 설치된 벨로즈를 통하여 진공챔버 외부로 직접 연결되어 있다. 따라서 이 벨로즈 내부는 진공이 아닌 대기압 상태이며, 또한 공기베어링에서 발생된 공기가 배출되는 1 차 배기라인의 역할을 한다. 이와 같은 구조에서는 회전테이블에 사용되는 모터나 엔코더를 진공용이 아닌 일반 대기용으로 사용해도 되며, 회전테이블 상단부에서만 차동배기를 수행해도 되는 장점이 있다. 만약 이런 구조를 택하지 않으면, 베어링 하단부에서도 차동배기를 위한 추가적인 시일 구조가 필요하여, 이는 회전테이블을 높이 방향으로 커지게 하여 비틀림 오차 및 동적 불안정성의 원인을 추가로 제공하게 된다.

2 차와 3 차 배기는 진공펌프를 이용하여 강제적으로 배기가 이루어진다. 차동배기시스템을 구성하는 설계변수들 – 시일길이(l_s), 배관직경(d), 펌프용량(S) 등은 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용한 최적설계를 통해 결정되었다. 시일길이 및 배관 직경은 클수록 배기성능이 향상되므로 가능한 한 크게 설계하는 것이 유리하나, 진공시일부 길이(67mm)는 제한되어 있으므로 제한된 길이 내에서 이들을 최적으로 배분할 필요가 있다. 또한 진공펌프도 큰 용량의 배기속도를 사용하는 것이 유리하지만, 펌프의 배기속도는 배관의 컨덕턴스에 의해 제한되므로 무작정 큰 용량의 펌프를 사용하는 것은 비효율적이다. 배관의 컨덕턴스를 고려하여 최적의 배기속도와 펌프의 종류를 결정해야만 한다. 이런 관점에서 최적설계가 수행되었으며, 이에 대한 자세한 방법은 저자의 논문 [8,9] 에서 이미 소개되었으므로 여기서는 설계결과만을 제시하였다.

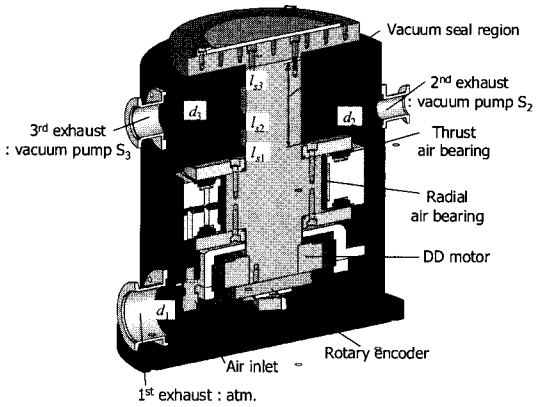


Fig. 3 Structure of a vacuum-compatible rotation table

Table 1 Initial condition for optimization

		Pumping speed (m^3/s)	Ultimate pressure (Pa)	Tube diameter (mm)	Tube length (mm)
Exhaust	i-th exhaust	*	*	*	2000
	Chamber	5.5×10^{-1}	1.3×10^{-8}	40	200
Seal	i-th seal length, l_{si} (mm)				*
	Circumference length (mm)				58π
	Seal gap (μm)				10
	Length of vacuum seal region ($l_{s1}+l_{s2}+l_{s3}+d_2+d_3$) (mm)				67

* : determined by optimization

최적설계시 사용된 조건들은 Table 1 과 같으며, Table 2 는 최적설계를 통해 최종적으로 결정된 변수들의 값을 보여주고 있다. 최적화를 통해 결정된 챔버의 압력은 2.3×10^{-5}Pa 로 전자빔을 사용하기에 충분한 압력이며, 시일길이 및 배관직경도 제한 조건인 67mm 내에서 배분된 것을 알 수 있다.

Table 2 Optimization result

Chamber pressure (Pa)	Seal length of i-th exhaust line, l_{si} (mm)			Diameter of i-th exhaust line, d_i (mm)			Pumping speed of i-th vacuum pump, S_i (m^3/s)			Inlet pressure of i-th vacuum pump, P_{pi} (Pa)		
	l_{s1}	l_{s2}	l_{s3}	d_1	d_2	d_3	S_1	S_2	S_3	P_{p1}	P_{p2}	P_{p3}
2.3×10^{-5}	4.8	10.2	11.6	19.7	16.2	24.2	atm.	2.45×10^{-2}	6.19×10^{-2}	atm.	40.7	3.8×10^{-3}

2 차와 3 차 배기에 사용된 진공펌프의 종류는 펌프 입구부 압력(P_p)을 예측하여 1.5Pa 이상이면 로터리펌프(RP)를, 이하이면 터보분자펌프(TMP)를 사용하도록 하였다. 1 차 배기라인의 직경(d_1)은 이 최적화에서는 제한조건에 들어가지 않으므로 큰 의미는 없으나, 19.7mm 보다는 커야 자연배기가 원활히 수행될 수 있음을 해석결과는 말해준다.

한편, 최적설계를 통해 결정된 10^{-5}Pa 의 진공도는 공기베어링에서의 누출량만을 대상으로 한 것이며, 실제 시스템에서는 진공챔버 내부표면에서의 기체방출(outgassing)에 의한 영향이 추가되므로 이보다는 진공도가 저하될 것으로 예상된다. 또한, Table 2 에서 결정된 설계변수들의 값은 10^{-5}Pa 대의 진공도를 달성하기 위한 하나의 조합일 뿐이며, 동등한 진공도를 달성하기 위한 설계변수들의 다른 조합이 존재할 것이다.

3. 회전테이블의 진공특성 실험

3.1 회전테이블 실험장치 제작

2.2 장의 최적설계에 의해 제작된 회전테이블은 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 회전테이블은 표면강도를 향상시키기 위해 알루미늄 7075 를 아노다이징 처리하여 제작하였다. 회전테이블은 Aerotech 사의 슬롯리스 다이렉트 드라이브 (S130-39) 모터를 선정하여 코깅에 의해 발생하는 회전정밀도 저하 현상과 속도변동을 최대한 억제할 수 있도록 하였다. 또한 Delta Tau 사의 Turbo PMAC2 보드와 Sony 사의 각도엔코더(BH-20), Varedan 사의 LA400 리니어 앰프를 사용하였다. 1000rpm 이상의 고속구동을 위하여 제어기는 엔코더 신호를 사인파로 입력받아 내부에서 체배를 수행하며, 현재 최고분해능은 0.03arcsec (38,707,200cnts/rev)이다.

Fig. 4 Vacuum-compatible rotation table

고진공 회전테이블의 진공특성 평가를 위해 제작된 진공챔버는 Fig. 5 와 같다. 진공챔버는 추후 Blu-ray 디스크 마스터링 장비에 활용할 수 있도록 설계되었으며, 우선 회전테이블만을 설치하여 그 성능을 평가하였다. 진공챔버는 고진공 환경을 위해 터보분자펌프로 배기하고, 터보분자펌프의 고속회전에 의한 진동을 줄이기 위해 챔버에 직결하지 않고 벨로즈를 이용한 완충영역을 설정하였다. 또한 진공챔버는 방진테이블 위에 설치하여 외부 진동을 차단하였다.

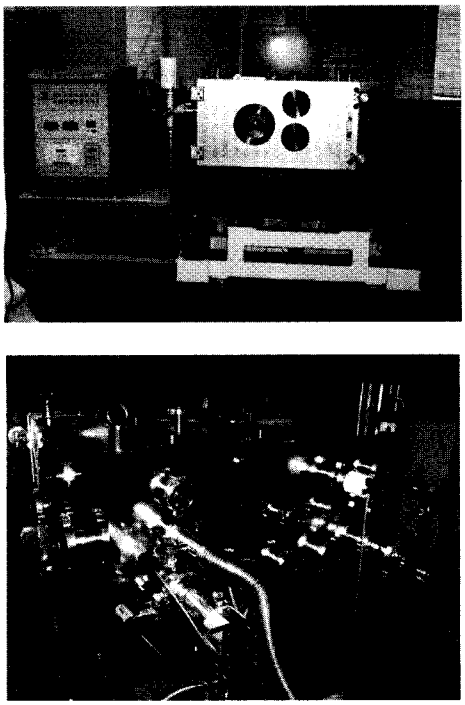


Fig. 5 Vacuum chamber system

Table 3 는 실제 실험에 사용된 회전테이블 배기 시스템을 정리한 것으로, Table 1 에서의 최적설계 조건과 다른 것이 몇 개 있다. 배관은 실제 시스템을 구축하면서 배기성능을 최대한 달성하기 위해, 회전테이블 외부에서는 가능한 한 큰 직경을 가진 배관을 사용하였다. 물론 최적설계를 통해 결정된 배관직경은 회전테이블 내부의 진공 시일부에서는 그대로 사용되었다. 또한 진공챔버에 연결된 터보분자펌프도 8 인치 입구부를 그대로 사용하여 처음보다 상당히 커진 것을 알 수 있다. 한편 시일간극은 10μm 로 설계되었으나 가공정밀도의 문제로 17μm 로 비교적 크게 제작되었다. 시일 간극 측정 방법에 대한 것은 다음 장에서 간단히 설명하기로 한다. 기타 시일길이 등은 최적설계대로 제작되었다.

Table 3 Specification of exhaust system

	Pumping speed (m^3/s)	Ultimate pressure (Pa)	Tube dia. / length (mm)
1st exhaust	Open to atm.		(40/75) + (63/1000) + (4/400) in serial
2nd exhaust	2.6×10^{-2}	6.5×10^{-2}	(16/133) + (40/2460) in serial
3rd exhaust	7.7×10^{-2}	5.1×10^{-7}	(24/148) + (63/1200) in serial
Chamber	5.5×10^{-1}	1.3×10^{-8}	(150/770)
1st seal length (mm)			5
2nd seal length (mm)			10
3rd seal length (mm)			12
Circumference length (mm)			58π
Seal gap (μm)			17
Maximum length of seal region (mm)			67

한편, 1 차 배관을 항상 대기에 노출시키면 초기 배기시에 챔버의 압력을 고진공으로 낮추는데 매우 오랜 시간이 소요된다. 따라서 Fig. 6 과 같이 배관 끝단에 피드쓰루우(feedthrough) 및 밸브를 설치하여 1 차 배기통로를 대기와 차단할 수 있도록 하였다. 따라서 진공챔버를 충분히 고진공으로 배기시킨 후, 공기베어링을 사용할 경우에만 1 차 배기통로를 대기에 노출시켜 배기시간을 단축시킬 수 있도록 하였다. Fig. 7 은 진공챔버 내부에 설치된 회전테이블을 보여준다.

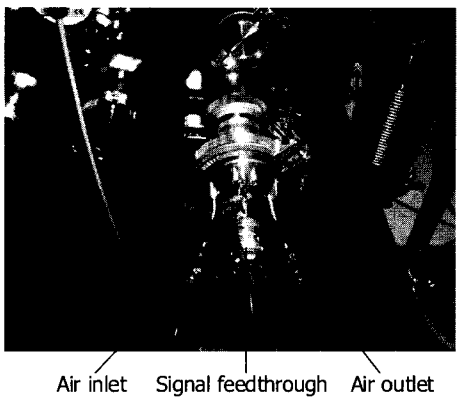


Fig. 6 Feedthroughs for the 1st exhaust

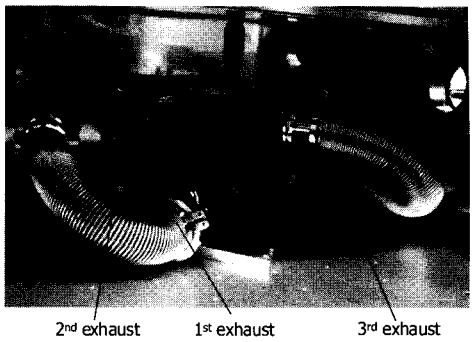


Fig. 7 Rotation table installed in a vacuum chamber

3.2 기체방출률 측정

진공챔버의 진공도에 영향을 주는 요소로는 공기베어링으로부터의 누출량뿐만 아니라 챔버 내부 표면으로부터의 기체방출량이 있다. Fig. 8 은 챔버 내부의 기체방출량을 평가하기 위해 28 시간 동안 배기한 후, 펌프를 끄고 챔버내에서 발생되는 기체방출에 의해 챔버내부의 압력이 얼마나 증가하는지를 측정한 것이다. 시간에 따른 압력증가률은 3.873×10^{-5}Pa/s 로, 여기에 챔버내적($0.296m^3$)을 곱하면 기체방출률(1.145×10^{-5}Pa·m^3/s)을 근사적이지만 실험적으로 구할 수 있다.

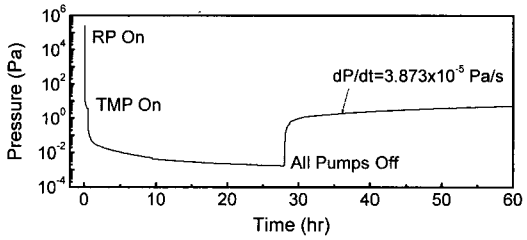


Fig. 8 Measurement of outgassing rate

3.3 진공특성 평가 및 분석

Fig. 9 는 공기베어링 작동 전후의 챔버 진공도의 변화를 살펴본 것이다. 공기베어링을 가동하지 않은 상태로 진공챔버를 29 시간동안 배기한 후, 공기베어링을 가동하기 위한 사전준비로써 2, 3 차 진공펌프(RP)를 1 시간동안 작동시켰다. 이후 0.4MPa 의 압축공기를 공급하여 공기베어링을 가동시켰다. 챔버의 압력은 공기베어링 작동 전 4.7×10^{-4}Pa 에서 공기베어링 작동 직후 5.1×10^{-4}Pa 로 거의 압력증가를 보이지 않고 있다. 1 시간 후 3 차 배기라인에 연결된 터보분자펌프(TMP)가 작동하기에 충분한 압력임을 확인하고 터보분자펌프를 가

동시켰다. 시간이 지남에 따라 챔버압력은 계속 낮아져 공기베어링을 작동시킨지 5 시간 후에는 4.3×10^{-4}Pa 의 진공도를 달성하여 전자빔을 사용하기에 충분히 낮은 압력임을 확인하였다. 또한 공기베어링을 작동시킨 후에도 이전과 다름없이 시간에 따라 압력이 낮아지는 기울기는 변하지 않고 있는데, 이것은 공기베어링에서 누출되는 유량이 10^{-4}Pa 대의 진공도에는 전혀 문제가 되지 않음을 의미하는 것이다. 따라서 배기를 계속하면 챔버의 압력은 더욱 낮아질 것으로 판단된다.

Fig. 10 은 2 차와 3 차 배기라인의 중간 위치에서의 압력을 측정한 것으로, 공기베어링 작동 전후의 압력변화를 명확히 알 수 있다. 특히 공기베어링 작동 후 2 차, 3 차 그리고 챔버의 압력(32 시간 기준)은 각각 325, 6.7×10^{-2}, 4.8×10^{-4}Pa 로 차동배기가 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

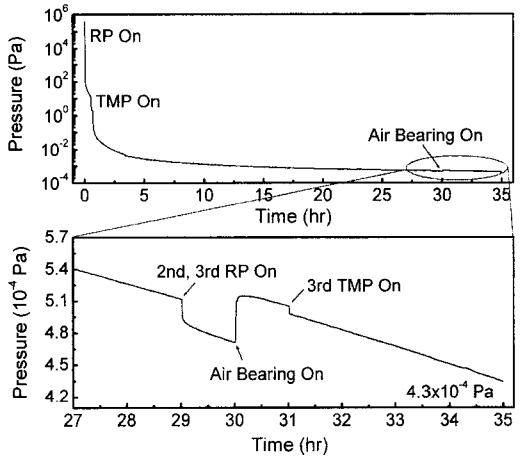


Fig. 9 Pressure variation of chamber after air bearing was turned on

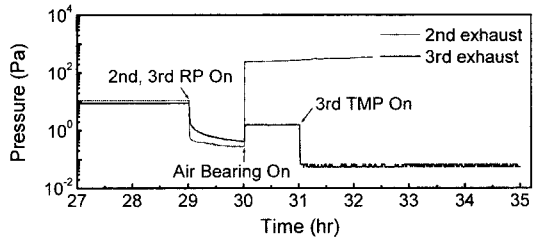


Fig. 10 Pressure variation of the 2nd and 3rd exhaust lines after air bearing was turned on

공기베어링이 작동한 후 궁극적으로 달성가능한 챔버의 진공도를 이론적으로 평가하기 위해 차동배기스템의 시일간극을 측정하였다. 시일간극은 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 회전축의 외경을 마이크로미터로 측정하고, 진공시일 부분의 내경을 이미 측정된 회전축 외경에 대해 실린더 게이지를 이용하여 상대적으로 측정하는 방법을 이용하였다. 이렇게 측정된 값은 초기 설계간극인 10μm 에 비해 다소 커진 17μm 로 나타났다. 이는 알루미늄의 아노다이징 표면처리 두께를 고려한 가공상의 어려움으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 11 Measurement of seal gap

Fig. 12 는 측정된 시일 간극과 Table 3 의 값을 이용하여 챔버의 진공도를 이론적으로 예측한 결과로, 공기베어링으로 들어가는 유량(Q_0)은 유량계로 직접 측정한 값을 이용하였다. 해석결과, 매우 오랜 시간 배기를 한다면 챔버는 궁극적으로 5.3×10^{-5}Pa 의 진공도를 달성할 수 있으며, 공기베어링으로터 챔버 내부로 누출되는 양(Q_{leak})은 7.7×10^{-7}Pa·m^3/s 인데 반해, 3.2 장에서 챔버 내부에서의 기체방출량은 1.1×10^{-5}Pa·m^3/s 로 측정되어, 현재 시스템에서 진공도를 지배하는 것은 챔버 내부에서의 기체방출량임을 알 수 있다. 따라서 이보다 고진공 환경이 필요하다면, 공기베어링의 재설계를 통한 누출량 감소보다는 챔버 내부에서의 기체방출량을 줄이는 것이 훨씬 효과적이며, 이같은 기체방출량이 전혀 없다면 챔버 진공도는 궁극적으로 3.7×10^{-6}Pa 를 달성할 수 있는 것으로 예측되었다.

Fig. 13 은 공기베어링 구동중 발생하는 챔버 진공도의 변화를 회전테이블의 속도를 100rpm 에서 300rpm 으로 증가시키면서 측정한 결과이다. 회전속도가 빨라짐에 따라 압력이 다소 증가하고는 있지만, 속도가 300rpm 이라 하더라도 챔버 압력은 겨우 8×10^{-6}Pa 정도만 증가하고 있으며, 이를 로그함수 (100 $\log(P/P_0)$, P : 베어링 구동중 측정된 압력, P_0 : 베어링 정지시 측정된 압력)를 이용[10]하여 나

타내어도 0.5% 에 지나지 않는다. 따라서 공기베어링 구동중 발생하는 챔버의 압력증가는 전자빔 마스터링에 필요한 진공도 영역에서는 무시가능하다고 할 수 있다.

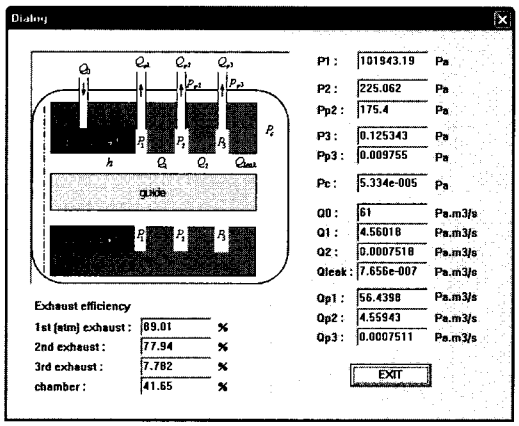


Fig. 12 Theoretical analysis on vacuum level

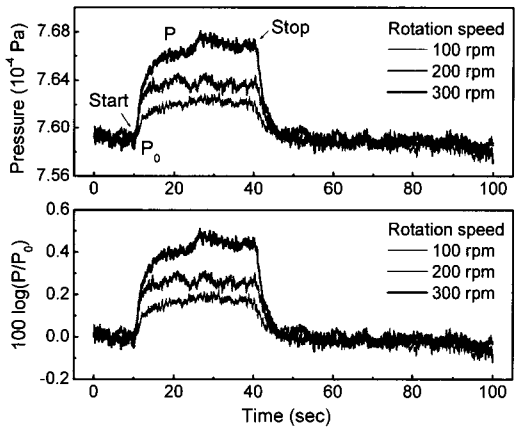


Fig. 13 Pressure rise during bearing movement

4. 결론

전자빔을 이용한 Blu-ray 디스크 마스터링 장비와 같이 고진공 환경에서 사용할 수 있는 회전테이블을 설계하여 평가하였다. 회전테이블은 회전정밀도 및 속도안정성을 위해 공기베어링을 적용하였으며, 진공챔버로의 누출량을 최소로 하여 고진공 환경이 유지될 수 있도록 차동배기시스템을 도입하고 이를 최적화하였다. 진공챔버 내에서의 실험결과, 공기베어링이 작동한 후 챔버의 진공도는 10^{-4}Pa 대로, 전자빔 마스터링 공정에 충분히 사용할 수 있음을 확인하였다. 향후 회전테이블의 정밀도 및 구동특성, 직선테이블과의 동기제어특성을 평가하고, 마스터링 장비를 구축하여 미세패턴을 가공할 예정이다.

참고문헌

1. Kojima, Y., Kitahara, H., Kasono, O., Katsumura, M. and Wada, Y., "High Density Mastering Using Electron Beam," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 37, pp. 2137-2143, 1998.
2. Furuki, M., Takeda, M., Yamamoto, M., Aki, Y., Kawawe, H., Koizumi, M., Takashima, S., Miyokawa, T. and Date, N., "Electron Beam Recording with a Novel Differential Pumping Head Realizing More than 50 GB/Layer Capacity Disc," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 42, pp. 759-763, 2003.
3. Wada, Y., "Electron Beam Lithography with Rotation Stage," Journal of JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 318-321, 2004.
4. Takeda, M., "Future Optical Disc Technology Electron Beam Lithography," Journal of JSPE, Vol. 70, No. 3, pp. 322-325, 2004.
5. 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.
6. Yokomatsu, T. and Furukawa, M., "Static Pressure Bearing," US Patent No. US 4749283, 1988.
7. 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, pp. 103-112, 2006.
8. Khim, G., Park, C. H., Lee, H. and Kim, S. W., "A Vacuum-Compatible Air Bearing: Design Analysis and Optimization," Key Engineering Materials, Vol. 339, pp. 37-44, 2007.
9. Khim, G., Park, C. H., Lee, H. and Kim, S. W., "Optimal Design of an Exhaust System of a Vacuum-Compatible Air Bearing," Journal of KSPE, Vol. 24, No. 6, pp. 86-95, 2007.
10. Khim, G., Park, C. H., Lee, H. and Kim, S. W., "Analysis of Additional Leakage Resulting from the Feeding Motion of a Vacuum-Compatible Air Bearing Stage," Vacuum, Vol. 81, No. 4, pp. 466-474, 2006.