

공조용 압축기 축 거동 측정용 베어링 내장형 센서

김지운, 안형준*, 김지영, 한동철**, 윤정호***, 황인수***

서울대학교 기계항공공학부 대학원, *서울대학교 정밀기계설계 공동연구소, **서울대학교 기계항공공학부, ***(주)캐리어

The built-in sensor bearing to measure shaft behavior of compressor for air-conditioning

Jee-woon Kim, Hyeong-joon Ahn*, Ji-young Kim, Dong-chul Han, Jeong-ho Yun** and In-su Hwang**

School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National Univ., *Institute of Advanced Machinery and Design, Seoul National Univ., **Carrier Ltd. Korea.

Abstract - We developed a built-in sensor bearing to measure the rotor motion of a rolling piston type compressor for the air conditioner. Because of needs for the high efficiency and long life span of compressor, and the usage of alternative refrigerants, the operating condition of the compressor becomes more severe. The accurate measurement of the rotor motion of the compressor can contribute greatly to the design and analysis of the hydrodynamic bearing. However, it is difficult to measure accurately the shaft behavior of small compressor because of the small space for the sensor mount, high temperature and pressure of compressor, oil mixed with refrigerant, and electromagnetic noise of the motor. To overcome these difficulties, we develop the cylindrical capacitive sensor that is built in the hydrodynamic bearing and calibrate the built-in sensor bearing indirectly through measuring the oil relative permittivity. We measured the rotor motion as well as suction and discharge pressures in various conditions. The several experimental results show that the developed built-in sensor bearing can measure the rotor motion not only in steady state but also in transient state.

Key words : Built-in sensor bearing, Small rotary compressor, Cylindrical capacitive sensor (CCS), Rotor motion of rolling piston type compressor

1. 서론

최근 들어 산업 각 분야에 있어 냉동, 공조 시스템의 급속한 수요와 각광은 이 분야의 핵심기술에 대한 연구 개발을 그 어느 때보다도 절실하게 필요로 하고 있다. 특히 냉동 공조 시스템의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분은 공조 냉동용 냉매 압축기라고 할 수 있다. 근래에 이 압축기의 고 효율화, 장수명화 및 대체 냉매의 사용으로 인해 운전 조건이 가혹해 지는 추세이어서 압축기 내의 동 수압 베어링의 윤활조건이 매우 중요하게 되었다. [1]

공조용으로 많이 사용되고 있는 회전식 압축기

는 Fig. 1과 같이 편심된 롤러와 미끄럼 베인의 상대 운동을 이용하여 냉매를 고압으로 압축시키는 장치로서 밀폐된 압축기 용기 내에 내장된 모터를 동력원으로 사용한다. 모터의 전자기적인 견인 하중과 압축된 냉매에 의한 큰 불평형 하중이 저널 베어링에 작용하게 된다. 그리고 공조 냉동용 냉매 압축기의 윤활에서 가장 특징적인 것은 윤활유 속에 냉매가 다량 용해되어 있고, 압축기내의 온도와 압력, 그리고 축 회전수 등의 변화에 따라 윤활 조건이 달라진다는 것이다. 또한 프레온 가스에 의한 오존층 파괴 등의 환경 문제로 압축기에 대체냉매를 사용하게 되어 베어링 내 유막의 파괴에 기인한 베어링의 손상 등이

발생할 수 있다. [2] 따라서 베어링 작동조건을 판별할 수 있는 동수압 베어링 내의 축 거동 측정이 매우 중요하다.

그러나 소형 회전식 압축기는 설치 공간 협소, 고온 고압, 냉매 용해 오일, 모터의 잡음 등으로 인해 축 거동을 정확히 측정하는 것은 매우 어렵다. 축, 베어링 및 롤러 사이의 접촉을 전기적으로 측정하는 연구는 있었지만 베어링 내의 축 거동 측정에 관한 연구는 이루어진 바가 없다. [3]

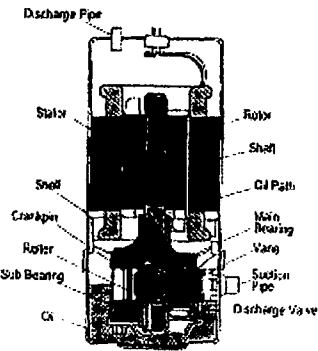


Fig. 1. Small rotary compressor.

본 연구에서는 공조용 소형 압축기의 축 거동을 측정하기 위하여 베어링 내장형 원통형 정전용량 변위 센서를 직접 개발하고 제작하였다. 또한 개발된 센서에 적합한 내압 단자, 삼동축선 및 센서 앰프 등을 제작하여 실험 장치를 구성하였다. 과도 상태 및 정상 상태에서의 축의 회전 궤적과 흡입 및 토출 압력을 실험을 통하여 측정하였다.

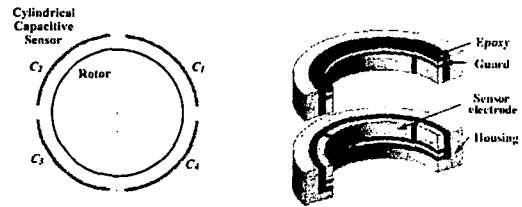
2. 베어링 내장형 센서

2.1 원통형 정전용량 센서

정전용량 변위 센서는, 다른 방식의 변위 센서에 비해 높은 분해능을 가지므로 미소 구간 초정밀 측정 및 제어 시스템에 널리 사용된다. 정전용량 센서는 일반적으로, 측정면적 대 대상 면적의 거리의 비가 클수록 높은 정밀도와 분해능을 가진다. 또한, 측정면적 대 측정면 표면조도의 비가 클수록 형상오차의 평균화 효과가 커진다. [4] 따라서, 기존의 4면식 원통형 정전용량 센서는 차동 측정방식을 유지하면서 동시에 센서 측정면적을 최대화하기 위해 아래 Fig. 2. a)와 같이 설계되었다. 측정된 변위는 아래의 식 (1)을 통해 얻어지

며, 그 구조는 Fig. 2. b)에서와 같이, 4개의 센서 판, 가드, 그리고 절연을 위한 에폭시 접착제로 이루어진다.

$$\begin{aligned} X &= \text{gain}(C_1 + C_4 - C_2 - C_3) \\ Y &= \text{gain}(C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \end{aligned} \quad (1)$$



a) Schematics b) Elements

Fig. 2. Cylindrical Capacitive Sensor.

원통형 정전용량 변위 센서(Cylindrical capacitive sensor)는 형상오차의 평균화효과와 높은 분해능 등의 이점으로 Chapman [5]에 의해 처음 소개되었다. 안형준 [6]은 원통형 정전용량 변위 센서의 수학적 모델링을 통해 형상오차에 의한 오차특성을 밝혔으며, 프로브형 센서와의 비교를 통해 원통형 정전용량 변위 센서의 우수함을 이론 및 실험을 통해 정량적으로 입증하였다.

2.2 베어링 내장형 센서의 설계

공조용 압축기 축 거동 측정을 위한 베어링 내장형 센서를 설계할 때 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

1) 선형성을 보장하기 위한 여유 틈새가 있어야 한다. 동수압 베어링의 반경 방향 틈새는 수십 마이크로 미터 이하이고 베어링 내에서의 축의 궤적을 크기는 수 마이크로이다. 따라서 이런 조건하에서 원통형 정전용량 센서의 선형성을 보장하려면 센서 장착부분의 반경 방향 틈새는 일정 이상 보장하는 것이 필요하다. 따라서 축의 언더컷 부분에 원통형 정전용량 센서를 장착하도록 한다.

2) 센서 및 가드의 반경 방향 두께가 보장되어야 한다. 가공 시에 센서가 잘 분리되고 기계 가공에 의한 변형을 최소화하기 위해 센서 및 가드의 반경 방향 두께를 일정 이상 보장 한다. 또한 배선을 위해 센서와 가드 사이에 일정 이상의 간극을 두어야 한다. 위의 이러한 사항을 고려하여 센서 및 가드의 반경 방향 크기가 결정된다.

3) 오일 흡을 고려하여 설계하여야 한다. 오일

홈이 지나가는 곳을 고려하여 4면 센서의 각도 크기와 틈새의 위치를 결정한다.

4) 합침 재료와의 접촉 면적이 크고 접착이 잘 되어야 한다. 반경 방향이나 축 방향으로 여러 가지 센서 및 가드의 형상에 변화를 주어 기계 가공 시 작용하는 하중을 견디고 합침 재료와의 결합력을 증가시키기 위한 설계가 필요하다.

5) 베어링과 조립을 고려하여야 한다. 베어링과 센서를 조립할 때 베어링 면과 절연이 되어야 하고 동시에 베어링과의 동심도를 보장할 수 있어야 한다. 따라서 이러한 사항을 고려한 설계가 필요하다.

2.3 베어링 내장형 센서의 제작

1) 베어링 가공

위 설계 사항을 고려하여 가공된 베어링, 센서, 가드 및 지그를 아래 Fig. 3에 나타내었다.

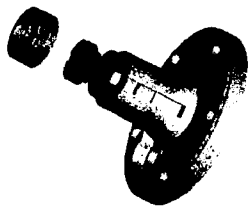


Fig. 3. Bearing, sensor, guard, and jig.

2) 배선

고온에서 잘 견디는 직경이 작은 테프론 피복 선을 센서 선으로 선정하였다. 네 개의 선이 동일한 전자기적 성질을 가지도록 방향성 없이 꼬았으며 망사선을 두 번 입혀서 삼동축 선으로 제작하였다. 이렇게 제작한 선을 센서와 가드에 용접한다. 센서와 가드에 삼동축선이 용접된 형상을 Fig. 4에 나타내었다.



Fig. 4. Sensor and guard wiring.

3) 조립

센서와 가드에 선을 용접한 후 지그와 함께 베어링에 합침 한다. 이해를 돕기 위해 가조립된 상태를 Fig. 5에 나타내었다.

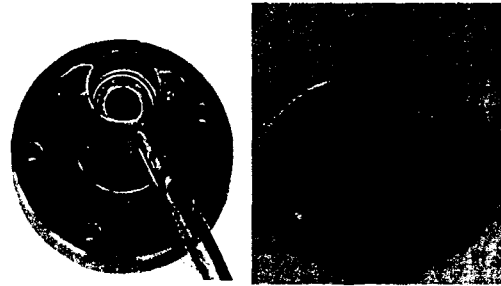


Fig. 5. Assembled sensor, guard, jig in bearing.

4) 합침

베어링에 센서를 합침하기 위한 재료는 고온, 고압에서도 접착력을 상실해서는 안되며 변형을 일으키지 말아야 한다. 위의 조건을 만족시키는 합침재료인 3M 2214 Hi-Dense를 사용한다. 그 접착 특성을 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1. 합침재료 2214 Hi-Dense

최적경화조건			박리강도 (kg/25mm)	
시간(분)	온도(°C)	압력(kg/cm ²)		
60	121	0.7		22.25
전단강도(kg/cm ²)				
-55°C	24°C	82°C	121°C	177°C
210	315	315	119	14

5) 후가공

합침 한 베어링을 고온에서 충분히 경화하고 후가공하여 완성된 베어링 내장형 센서는 Fig. 6. a)에 나타내었다. 베어링 내장형 센서의 단면을 Fig. 6. b)에 나타내었다. 단면에서 센서와 가드는 잘 볼 수 있지만 지그와 베어링 사이의 공차가 매우 작고 같은 재질이기 때문에 지그와 베어링은 구분하기 어렵다. 센서에는 센서 선을 용접했던 흔적을 볼 수 있다. 센서면 사이의 간극이 비교적 넓은 데 이 간극으로 센서면의 면적과 센서의 분해능이 줄어들지만 오일 홈이 그 사이로 지

나가기 때문에 이를 좁게 할 수 없다.

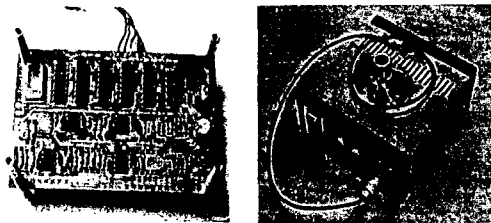


a) Bearing b) Cross-section
Fig. 6. Built-in sensor bearing.

2.4 베어링 내장형 센서 앰프

정전용량의 검출에 여러 가지가 있으나 원통형 정전용량 센서에 가장 적합한 전하전달법을 사용하였다. 전하전달법은 아날로그 스위치를 이용하여 미지의 정전용량을 충전하고 방전시켜 얻어진 전류를 적분하여 미지의 정전용량에 비례하는 전압을 얻는 방식이다. [7]

제작된 센서 앰프의 회로와 앰프 박스는 Fig. 7에 나타내었다.



a) Circuit board b) Amplifier box
Fig. 7. Sensor amplifier for detecting capacitance.

3. 베어링 내장형 센서의 보정

일반적으로 변위 센서를 보정할 때는 일정한 분해능을 가지는 직선 운동 장치를 이용하여 센서의 이득 값을 보정한다. 하지만 베어링과 축 사이의 공차가 수십 마이크로미터이기 때문에 서브 마이크론의 분해능을 가지는 직선 운동 장치가 필요하고 직각도 또한 정확히 맞추어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 일반적인 변위 센서의 보정 방법을 적용하기가 매우 어렵다.

원통형 정전용량 센서는 센서나 축의 형상을 정확히 알고 있을 경우 실험에서 얻은 이득 값과

이론적인 센서의 이득 값이 거의 일치한다. 그러나 압축기 속에서 측정할 경우 오일이나 냉매의 조건이 변화하고 이에 따른 오일 냉매 혼합물의 유전율이 달라질 것으로 예상되므로 이에 대한 보상이 필요하다. 따라서 엄밀한 보정은 매우 어렵지만 오일의 유전율이 온도에 따라서 크게 변하지 않고 냉매 혼합물에 의해서도 오일의 유전율이 크게 변하지 않는다고 가정하고 공기와 비교하여 간접적으로 오일의 유전율을 보정한다면 비록 엄밀하지는 않지만 거의 실제와 가까운 정확한 계적의 크기를 얻을 수 있을 것이다.

오일의 유전율을 얻기 위해서 아래의 Fig. 8과 같은 실험을 수행한다. 공기 중과 오일 속에서 축을 끼운 상태와 안 끼운 상태에서 각각 센서의 정전용량을 측정한다. 측정된 정전용량을 아래의 식 (2)에 대입하면 오일의 상대 유전율을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{oil} = \frac{\sum_{n=1}^4 C_n \Big|_{oil \text{ rotor}} - \sum_{n=1}^4 C_n \Big|_{oilr}}{\sum_{n=1}^4 C_n \Big|_{air \text{ rotor}} - \sum_{n=1}^4 C_n \Big|_{airr}} \quad (2)$$

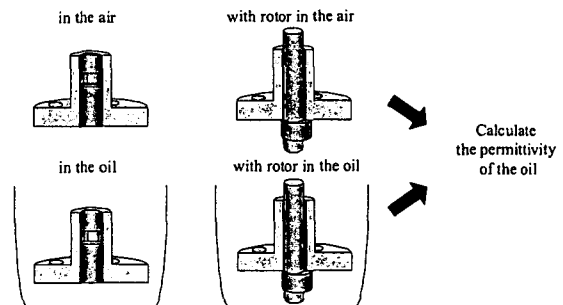


Fig. 8. Experiment for oil permittivity.

구해진 오일의 상대 유전율(ϵ_{oil})은 대략 1.6이다.

앞에서 구한 상대 유전율과 베어링 및 로터의 형상을 이용하여 $\pm 0.01mm$ 범위에서 센서의 이득 값을 구하였다. 센서와 로터 사이의 간극에 비해 로터의 운동 범위가 매우 작으므로 매우 우수한 선형성을 가지고 있다. 센서의 이득값은 Fig. 9에서와 같이 $640 V/mm$ 이다.

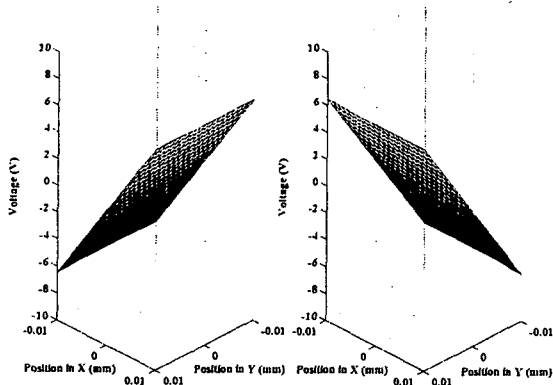


Fig. 9. Simulation of measuring the rotor displacement.

4. 실험

4.1 실험 장치

압축기는 내구성 시험계에 의하여 흡입, 토출 압력이 일정하게 제어되고 작동 상태를 감시할 수 있다. 실험용 볼트 셀의 압축기에는 베어링에 내장된 정전용량 변위 센서와 토출 및 흡입 압력을 측정하는 압력 센서가 장착된다. 변위 센서와 압력 센서는 밀봉단자를 통하여 볼트 셀에서 센서 증폭기로 연결된다. 센서 증폭기의 신호를 다시 디지털 오실로스코프로 받아 축의 거동과 압력의 변동을 측정하며 이를 파일로 기록한다. 실험 장치의 개략도는 Fig. 10과 같으며 센서가 장착된 압축기가 조립된 볼트셀 그리고 실험 장치의 사진은 Fig. 11에 나타내었다.

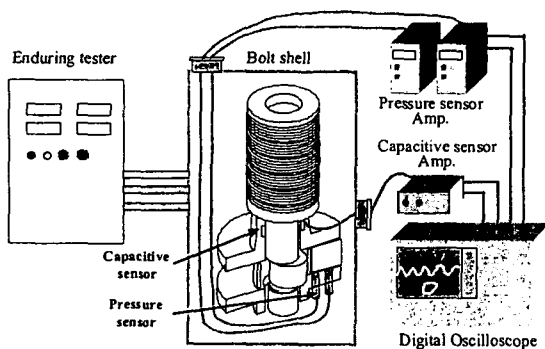


Fig. 10. Schematic of experimental setup.



Fig. 11. Photos of experimental setup.

선들을 실험 장치 밖으로 오일의 누설 없이 연결하기 위해서는 고압에서도 견딜 수 있는 내압 단자가 필요하다. 여기에 정전용량 센서의 특성을 고려한 삼동축선 기능을 수행할 수 있어야 한다. 그러나 상용품 중에서 이러한 사양을 만족하는 내압단자는 없기 때문에 아래의 Fig. 12와 같이 고압에도 견딜 수 있는 단자를 고안하였다. 금속판의 양측에 엔지니어링 프라스틱을 이용하여 단자와 쇠판을 절연하고 단자는 테프론 브라켓과 오일 실을 이용하여 양쪽에서 밀봉한다.

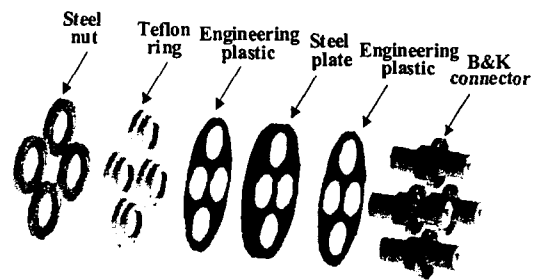


Fig. 12. Schematic of pressure resistive connector.

4.2 천이 응답 측정

3분 ON-OFF의 경우는 Low Ambient란 조건으로서 0.05 초의 샘플링으로 약 30분에 걸쳐 압축기가 ON/OFF될 때의 축 변위 및 흡입 토출 압력 데이터를 측정하였다. 우선 약 30분간 측정된 데이터를 Fig. 13에 나타내었다.

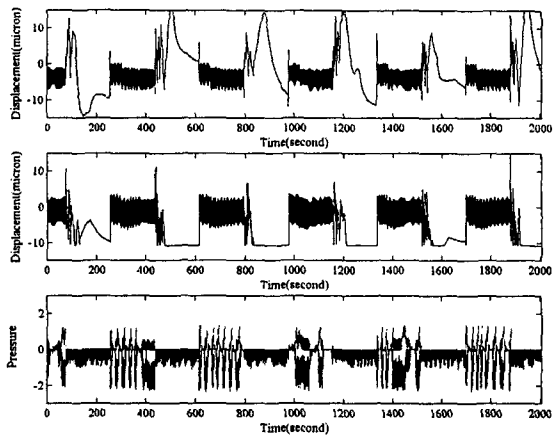
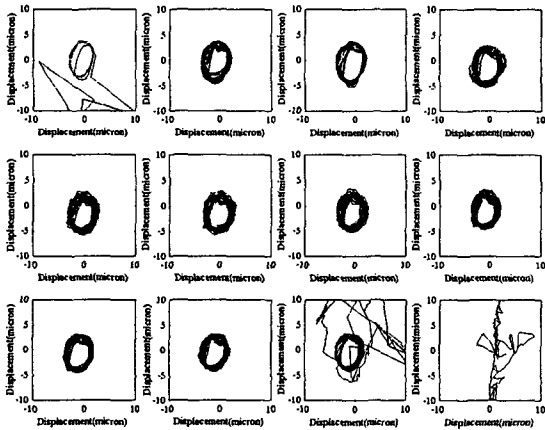
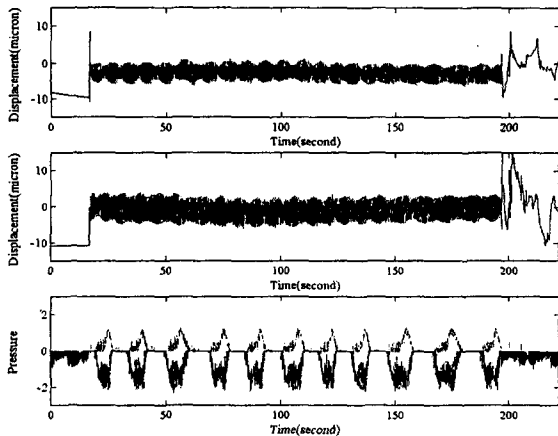


Fig. 13. ON-OFF data in 3 minute during 30 minutes.



a) Rotor orbits



b) Time signal

Fig. 14. Data of ON-OFF in 3 minute.

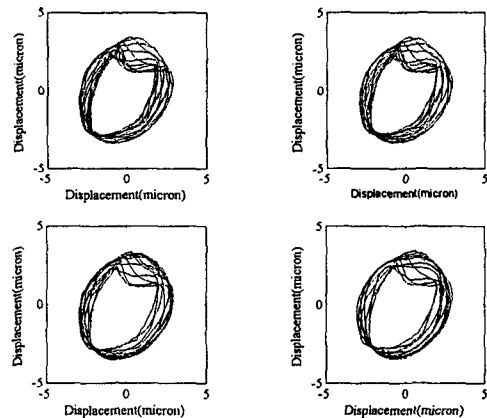
3분간의 ON-OFF 데이터에서는 기동 및 정지

시의 축과 압력의 천이 응답을 볼 수 있다. 시간 축에서 응답을 볼 경우 축의 거동을 직관적으로 알 수 없기 때문에 여러 가지 ON-OFF 사이의 데이터 중에서 한 데이터를 Fig. 14에 나타내었다. 축의 궤적은 형성되는 압력에 따라서 변동한다. 압력의 변동에 따라서 축의 거동 또한 매우 불안정하며 축과 베어링이 접촉하고 있음을 간접적으로 알 수 있다. 이렇듯 압력에 따른 축 궤적의 변동 뿐 아니라 축과 베어링의 접촉에 의한 궤적의 변화도 훌륭하게 잘 측정됨을 알 수 있다.

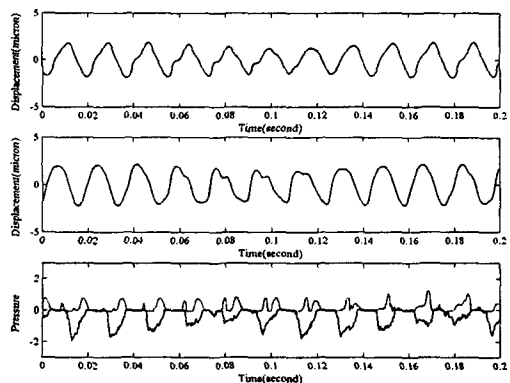
4.3 정상상태 응답 측정

1) MDP(Maximum delta pressure)

MDP 시험에서 여러 번 궤적을 측정하였고 그 측정된 궤적을 Fig. 15. a)에 나타내었다. 그리고 시간에 따른 축의 변위와 압력을 Fig. 15. b)에 나타내었다. 앞서서와 같이 토출 압력의 형성에 따라서 축의 궤적이 크게 달라짐을 알 수 있다.



a) Rotor orbits

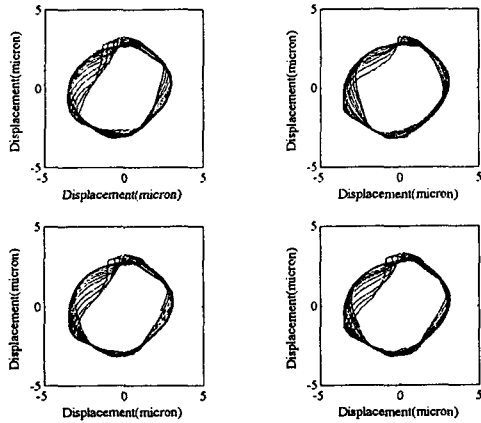


b) Time signal

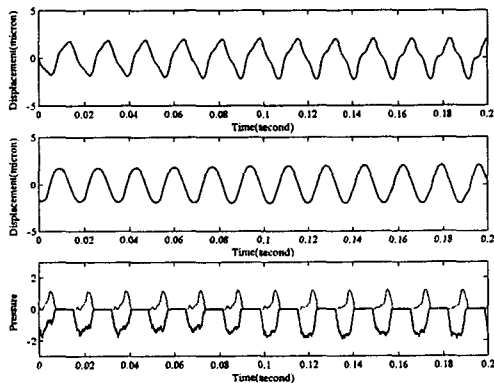
Fig. 15. Data of MDP test.

2) MPR(Maximum pressure ratio)

MPR 시험에서 여러 번 궤적을 측정하였고 그 측정된 궤적을 Fig. 16. a)에 나타내었다. 그리고 시간에 따른 축의 변위와 압력을 Fig. 16. b)에 나타내었다.



a) Rotor orbits



b) Time signal

Fig. 16. Data of MPR test.

5. 결론

본 연구에서는 공조용 소형 압축기 축 거동 측정하기 위하여 원통형 정전용량 베어링 내장형 센서를 설계하고 제작하였다. 제작된 베어링 내장형 센서를 오일의 상대 유전을 측정을 통해 간접적인 보정을 수행하였다. 그리고 이를 실제 압축기에 장착하고 흡입 및 토출 압력과 함께 여러 가지 조건에서 압축기 축 궤적을 측정하였다. 같은 조건에서도 형성되는 토출 및 흡입 압력의 변화에 따라서 축 궤적이 많이 변화함을 알 수 있었다. 그리고 개발된 베어링 내장형 센서로 정상

상태 뿐 아니라 천이 상태의 축 궤적도 훌륭하게 측정됨을 확인하였다. 따라서 개발된 베어링 내장형 센서를 이용한 축 궤적의 측정을 통해 압축기의 안정적인 운전을 보장할 수 있는 저널베어링의 설계에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 (주)캐리어의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] S. K. Padhy, "Mathematical Modeling and Experimental Validation of a Rotary Compressor for Dynamics, Lubrication, and Heat Transfer", Ph.D thesis, College of Engineering of West Virginia University, 1992.
- [2] M. Hayano, T. Fukuda, etc, "Performance Evaluation of 2-cylinder Rotary Compressor for R410a", The International Symp. in HCFC Alternative Refrigerants, 1996.
- [3] M. Ozu and T. Itami, "Some Electrical Observations of Metallic Contact between Lubricated Surfaces under Dynamic Conditions of Rotary Compressor", Proceedings of the 1980 Purdue Compressor Technology Conference, July 23-25, pp.105-111, 1980.
- [4] S.M.Huang, R.G.Green, A.Plaskowski, M.S.Beck, "A High Frequency Stray-immune Capacitance Transducer based on the Charge Transfer Principle", IEEE Trans. Instru. Meas., Vol. 37 (3), pp. 368-373, 1988.
- [5] P. D. Chapman, "A Capacitive based Ultra-precision Spindle Error Analyser," J. of Precision Eng., Vol. 7, No. 3, July, pp. 129-137, 1985.
- [6] H.J. Ahn, S. Jeon, and D.C. Han, "Error Analysis of the Cylindrical Capacitive Sensor for Active Magnetic Bearing Spindles", J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME, Vol. 122, pp. 102-107, 2000.
- [7] A. H. Slocum, Precision Machine Design, Prentice-Hall, Inc., 1992.