

# 공기 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기의 공력 불안정성이 로터에 미치는 진동 영향

김태호\* · 이용복\* · 김창호\* · 김광호\*\* · 이남수\*\*\*

## Rotordynamic Effects Due to Aerodynamic Instability in a Turbo-compressor with Air Foil Bearings

Tae-Ho Kim\*, Yong-Bok Lee\*, Chang-Ho Kim\*,  
Kwang-Ho Kim\*\*, Nam-Soo Lee\*\*\*

*Key Words:* Turbo-compressor(터보 압축기), Air Foil bearing(공기 포일 베어링), Rotor-bearing system(회전자 베어링 시스템), Rotordynamics(회전체동역학), Aerodynamic Instability(공력 불안정성)

### ABSTRACT

Oil-free turbo-compressor supported by compliant foil bearings which remove oil-contamination by elimination of the conventional ball bearing and oil lubrication systems is presented. Turbo-compressor makes two individual air compression with two impellers at operating speed, 39,000rpm. In this study, the rotordynamic effects caused by aerodynamic instability were investigated with variable mass flow rate. Correlation between frequencies of pressure fluctuation in two diffusers and those of excitation forces on rotor were clearly developed in aerodynamic unsteady region. Thus, these results show that it is beneficial to design high speed rotating turbomachinery considering coupling effect between aerodynamic instability and rotordynamic force.

### 1. 서론

공기 포일 베어링으로 지지되는 원심 압축기는 회전축의 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 별도의 윤활 시스템이 필요하지 않다. 따라서 압축 공기에 오일 함유가 없으므로 청결한 공기를 공급할 수 있고, 저 마찰에 의해 동력 손실이 매우 적어 저전력의 시스템이

라는 장점을 갖는다. 그러나 공기 포일 베어링은 타 베어링에 상대적으로 하중 지지능력과 감쇠력이 작기 때문에, 공기 포일 베어링으로 지지되는 압축기의 경우 급격한 외부 충격 및 입구부로 유입되는 불안정한 외부유동으로 인해 압축기의 탈설계점 운전이 발생하게 된다. 특히, 이로 인한 저유량의 압축에서는 주기적인 유동의 압력변동을 수반하게 되어 압축기 전체의 기계적인 진동을 야기하게 된다. 이러한 공역학적 불안정성은 공력 요소뿐만 아니라 회전체를 지지하는 베어링 요소에 치명적으로 작용하여 제품의 수명을 단축시

\* 한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

\*\* 한국과학기술연구원 열·유동제어 연구센터

\*\*\* 한양대학교 기계설계공학과

E-mail : taeho21c@kist.re.kr

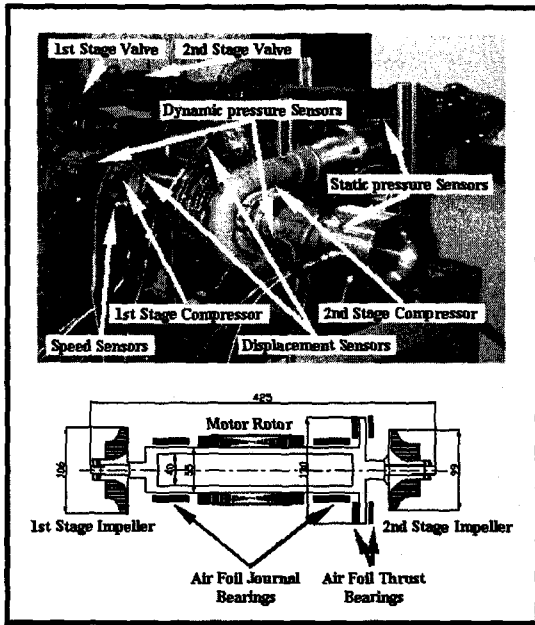


Fig. 1 A Turbo-compressor with Air Foil Bearings

키며, 따라서 공기 포일 베어링으로 지지되는 압축기의 설계를 위해서는 로터-베어링 시스템의 신뢰성 향상을 통한 내구성 확보와 공력 요소의 안정성에 대한 연구가 상호 연성작용을 고려하여 수행되어야 한다.

로터-베어링 시스템의 가진 현상은 로터의 불균형 질량(mass unbalance)의 과다, 베어링에서 발생하는 유체역학적 동압의 교란(perturbation) 및 축의 오정렬(misalignment), 등에 의해서 발생되며, 특히 고속으로 회전하는 고용량 압축기의 경우, 이로 인한 기계적인 손상은 운전의 안전성에 치명적이다. 따라서 로터의 밸런싱(balancing)을 통한 불균형 질량의 감소와 베어링의 감쇠력 향상 등을 통하여 로터-베어링 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다.<sup>(1)</sup>

공력 요소에 의해 발생하는 공기역학적 불안정성(aerodynamic instability)은 선회 실속(rotating stall) 및 서지(surge) 등의 현상을 발생한다. 실속은 외부유동의 경우 날개 양력의 급격한 감소로 나타나며, 압축기의 경우와 같은 내부유동의 경우 임펠러에서의 압력상승 저하, 디퓨저에서 압력회복의 붕괴 등으로 나타나게 되는데 두 경우 모두 경계층의 박리에 의해 발생한다. 서지는 토출 유량의 감소에 의한 유동의 주기적인 불안정 현상으로 인해 발생하며, 회전하는 로터를 포함한 시스템 전체를 가진하게 된다.

공력 불안정성에 대한 연구로 이두열<sup>(2)</sup>은 베인 디퓨저를 장착한 원심압축기에 대한 실험적 연구를 통해 압력강하 천이영역의 발생과 선회실속(rotating stall)의 특성을 연구한 바 있으며, Seide<sup>(3)</sup> 등은 산업용 압축기에서 임펠러 회전 주파수, 다양한 유량 등에 따라 발생하는 선회실속셀 수, 셀의 전파속도 등의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Kim<sup>(4)</sup> 등은 다단 축류형 압축기에서의 선회실속(rotating stall) 및 서지(surge)로 인해 압축기의 공력학적 불안정성이 발생할 수 있음을 통해 증명한 바 있다.

한편, 이용복<sup>(5-9)</sup> 등은 공기 포일 베어링에 대한 이론 및 실험을 통해 로터의 부상 특성, 하중지지 능력, 내구성 및 동특성을 연구하였다. 또한 이러한 연구를 바탕으로 공기 포일 베어링으로 지지되는 이단 압축기의 동력학적 설계 및 운전 특성에 관한 연구를 수행한 바 있다. 그리고 Song<sup>(10-11)</sup> 등은 공력학적 안정영역에서 터보기계의 비대칭 터빈 팁 틈새(asymmetric turbine tip clearance)에 의해 발생하는 압축공기의 비대칭 누설이 로터에 가진력으로 작용하게 됨을 규명하였다.

로터-베어링 시스템과 공력 요소의 안정성은 고속 터보기계의 신뢰성을 좌우하는 중요한 요소기술로 활발한 연구를 통해 많은 발전을 이루었다. 그러나 이들 각각의 요소로부터 발생하는 불안정 성분들의 연성 작용에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 공기 포일 베어링으로 지지되는 이단 원심압축기에서 나타나는 공력학적 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향을 실험을 통해서 규명하고, 아울러 공력학적 불안정성이 회전체동역학적 안정성에 미치는 연성 효과를 분석하여 고속회전 터보기계에서 운전 안전성을 향상시키는 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

실험에 사용된 이단 원심압축기를 Fig. 1에 나타내었다. 압축기는 중앙에 위치한 4상 3극, 75kW의 유도전동기에 의해 직접 구동되며 로터 양단에 설치된 2개의 임펠러를 이용하여 정격 운전속도 39,000rpm에서 압축을 수행한다. 터보 압축기는 이단 압축을 수행하였을 때 유량 200m<sup>3</sup>/h에서 1.7bar의 압축비를 나타낸다. 로터는 범프 포일 타입의 2개의 공기 포일 저널

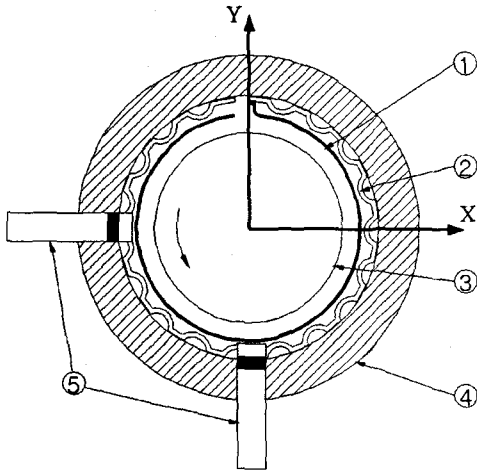


Fig. 2 Air Foil Journal bearing with displacement sensors

- ① top foil      ② bump foil      ③ journal
- ④ bearing sleeve      ⑤ displacement sensors

베어링과 1개의 스톱 베어링으로 지지된다. 공기 포일 베어링의 설계를 위해 KIST에서 자체 개발한 베어링 해석 프로그램(SPAB)을 사용하였으며 회전체 해석을 통해 로터의 안정성을 확인하였다.

압축기의 1st stage compressor는 베인 디퓨저를, 2nd stage compressor는 베인리스 디퓨저를 사용하였으며 각 단의 압축 공정은 단독 모드로 운전되어 토출되는 압축공기의 유량을 2개의 밸브 시스템으로 조절이 가능하다. 압축기의 인두서 유입부와 디퓨저 토출부에는 정압 센서를 설치하였으며 공력 불안정성을 측정하기 위하여 디퓨저 내부에 동압 센서를 장착하였다. 로터의 회전속도와 진동치를 측정하기 위하여 각각 속

Table 1. Mass Flow Rate with Valve Angle Position

Valve angle (degree)	1st stage comp. mass flow(kg/s)	2nd stage comp. mass flow(kg/s)
0	0.3106	0.2375
40	0.2897	0.2016
45	0.2687	0.1772
50	0.2358	0.1418
53	0.2094	0.1121
55	0.1860	0.0944
57	0.1607	0.0710
58	0.1471	0.0620
60	0.1216	0.0442
61	0.1051	0.0375
63	0.0815	0.0328

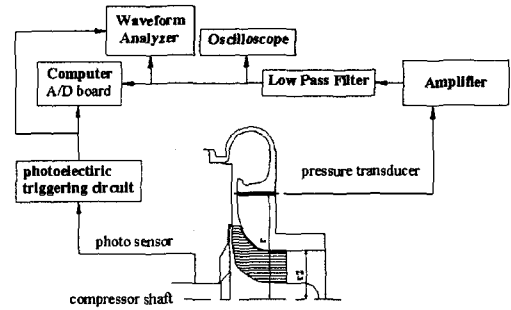


Fig. 3 Data Acquisition Flow with Dynamic pressure

도 센서와 변위 센서를 설치하였다. Fig. 2는 공기 포일 베어링의 개략도이다. 공기 포일 베어링은 범프 타입을 사용하였으며 서로 수직하여 설치된 변위 센서에 의해서 로터의 진동을 측정할 수 있다. 디퓨저에 설치된 동압 센서와 데이터 수집의 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다. 동압 센서는 로터의 축방향과 수평으로 양단의 디퓨저 내부에 설치하였으며 1st stage 디퓨저와 2nd stage 디퓨저에서의  $r2/r$ 의 값이 각각 1.63과 1.43가 되는 곳에 위치한다.

## 2.2 실험 방법

유량변화 시 발생하게 되는 공력 불안정성이 터보 압축기의 회전축에 미치는 영향을 규명하기 위하여 압축기에 장착된 두 개의 임펠러를 이용하여 두 개의 독립적인 압축을 수행하였으며 각 단의 토출관로에 설치된 두 개의 밸브를 일정한 간격으로 동시에 개폐하면서 로터의 진동치와 압축기의 정압 및 동압특성을 관찰하였다. 압축기를 정격 속도인 39,000rpm으로 운전할 때 밸브 각도에 따른 각 단의 유량을 Table 1에 나타내었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 로터다이나믹스(rotordynamics)

Fig. 4는 터보 압축기 양단의 밸브를 모두 개방한 상태(valve angle: 0 deg.)에서 39,000rpm으로 운전할 때의 로터의 진동을 측정된 결과이다. 회전수의 1X성분인 약 650Hz에서 발생하는 가진력은 로터의 불균형질량에 의한 진동 성분으로 20.3 $\mu$ m의 진동크기(peak to peak)를 나타낸다. 이

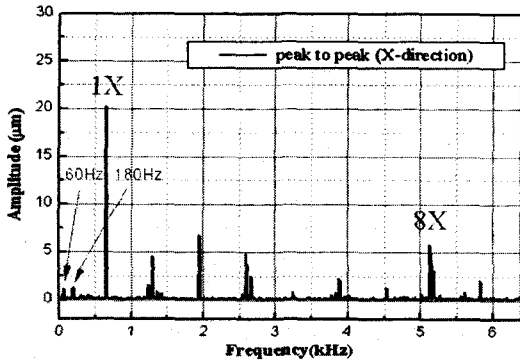


Fig. 4 Journal Vibration FFT at 39,000rpm

힘은 그 정수배의 주파수로 로터를 가진하게 되는데 이 때 정수배 성분들은 고주파 영역으로 갈수록 크기가 점차 작아져 4.55kHz (7×synchronous frequency)에서는 1.3µm를 나타낸다. 그러나 약 5.2kHz 근처에서 나타나는 8X 성분은 그 크기가 5.8µm로 다시 커졌는데, 이 주파수는 로터의 회전주파수×8(임펠러의 메인 블레이드의 개수(7)+로터의 불균형 질량(1))의 성분임을 알 수 있다. 한편 회전 주파수보다 작은 주파수 성분으로 60Hz와 180Hz의 성분들이 나타나는데, 이들은 60Hz의 정수배 성분으로 전기적 노이즈에 의해 유발된 것으로 1X 성분과 비교할 때 매우 작다.

Fig. 5는 압축기가 Fig.4에서와 같은 조건으로

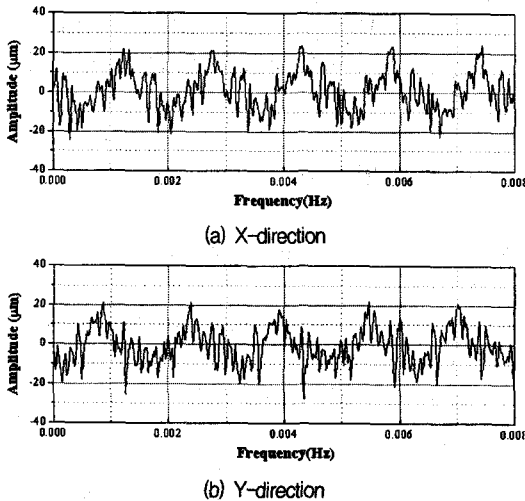


Fig. 5 Journal Vibration at 39,000rpm with open valve

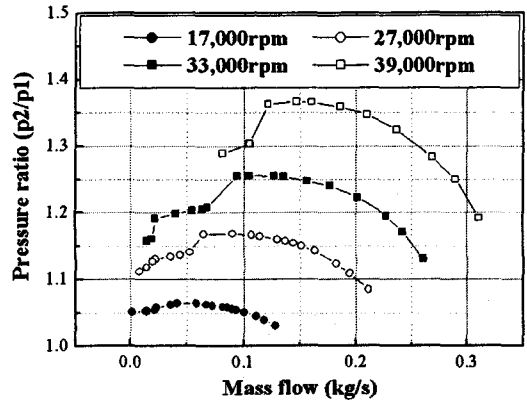


Fig. 6 1st stage compressor performance

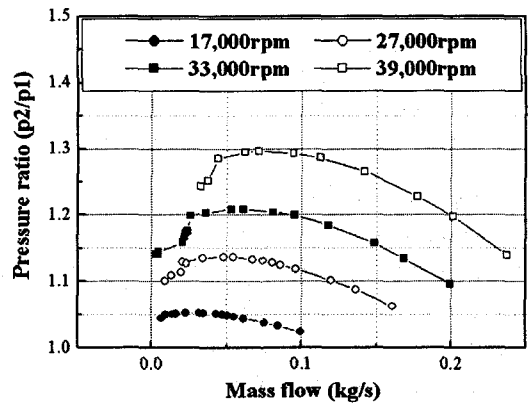
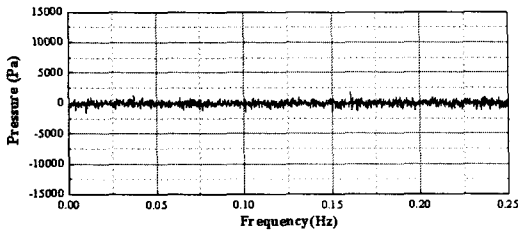


Fig. 7 2nd stage compressor performance

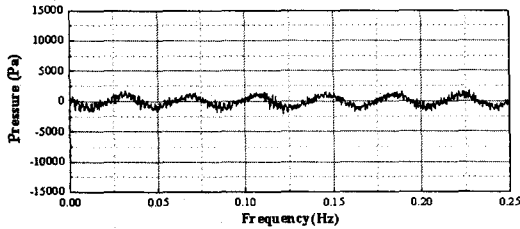
운전될 때의 시간영역에서 본 로터의 X축과 Y축의 진동 결과이다. 그래프로부터 터보 압축기의 진동은 로터의 불균형 질량에 의해서 유발된 가진력이 지배적임을 알 수 있다.

### 3.2 터보 압축기의 성능

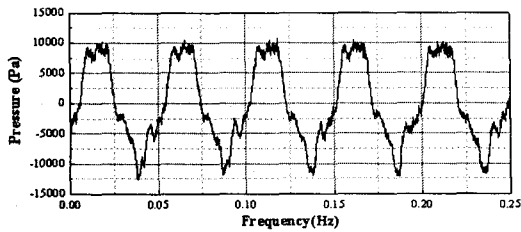
Fig. 6은 원심 압축기의 1st stage 압축 성능곡선이다. 성능곡선은 유량에 따른 입구부와 토출부의 압력비의 결과를 보인 것으로 유량이 감소함에 따라 압력이 상승하다가 특정 유량 이하부터는 압력이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 압축기의 운전 속도인 39,000rpm에서 최대 압력비는 1.37, 유량은 0.12kg/s임을 알 수 있다. Fig. 7은 2nd stage 압축의 결과로 1st stage의 성능곡선과 비슷한 경향을 나타내는데 최대 압력비와 유량은 39,000rpm에서 각각 1.3과 0.071kg/s이다. 2nd stage 압축에서는 1st stage 압축에 비하여



(a) valve angle position: 0deg.



(b) valve angle position: 60deg.



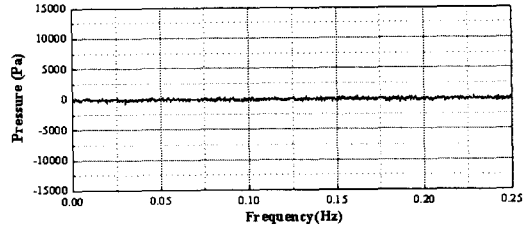
(c) valve angle position: 63deg.

Fig.8 1st compressor dynamic pressure at 39,000rpm

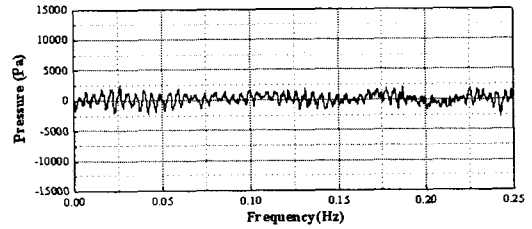
유량과 압력비가 작으며 특히 불안정성 발생유량에 도달한 후에 압력비는 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 이러한 차이는 2nd stage의 디퓨저가 1st stage와는 달리 베인리스 타입을 사용하였기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3 공력학적 불안정성

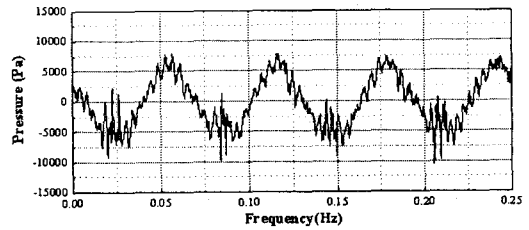
Fig. 8과 Fig. 9는 각각 압축기의 1st stage 압축과 2nd stage 압축 시에 압력요동(pressure fluctuation)을 나타낸 것으로 밸브의 각도를 0도, 60도, 63도로 변화시켜 유량을 감소시키기에 따라 측정된 결과이다. Fig. 8에서 밸브각도가 0도(완전개방)일 때는 특정한 신호의 변동이 보이지 않



(a) valve angle position: 0deg.



(b) valve angle position: 60deg.



(c) valve angle position: 63deg.

Fig.9 2nd compressor dynamic pressure at 39,000rpm

아 불안정 압력이 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 밸브의 각도가 60도에 이르렀을 때에는 뚜렷한 파형의 압력요동이 발생하였으며 유량을 감소시켜 밸브위치가 63도에 이르렀을 때에는 압력요동의 진폭이 더 증가하여 최대 약 22,600Pa (peak to peak)을 나타내었다. Fig. 9에서도 비슷한 경향을 보이는데 밸브각도 0도에서는 특정한 신호의 변동이 보이지 않지만 밸브의 각도가 60도에 이르렀을 때에는 압력요동이 발생하게 되는데 이때의 압력요동은 1st stage 압축에서의 경우와는 달리 파형이 뚜렷하지 않았다. 그러나 밸브 각도가 63도에 이르면 특정 주파수의 진폭이 매우 증가하여 Fig. 8의 (c)와 비슷한 경향을 보이며 진

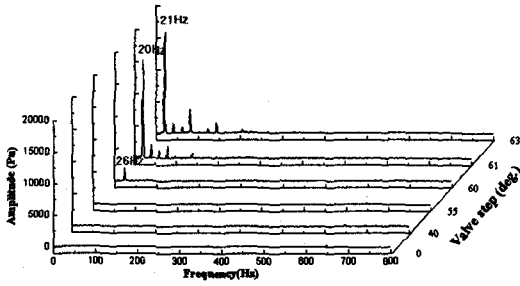


Fig.10 Dynamic pressure FFT as valve angle position (1st stage at 39,000rpm)

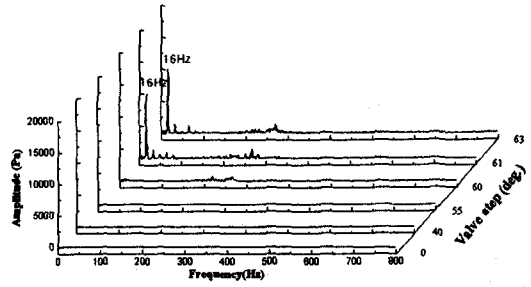


Fig.11 Dynamic pressure FFT as valve angle position (2nd stage at 39,000rpm)

폭은 최대 약 18,000Pa (peak to peak)까지 증가한다. Fig. 10은 밸브각도에 따른 1st stage 압축에서의 압력유동을 주파수 영역에서 관찰한 결과이다. 압력유동은 밸브각도 60도에서 26Hz의 정수배 성분으로 발생하기 시작하였고, 밸브 각도가 61도와 63도로 증가함에 따라 각각 20Hz와 21Hz의 정수배 성분에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 2nd stage 압축에서의 결과로 압력유동이 발생하는 주파수는 밸브 각도 61도에서부터 뚜렷해져 61도와 63도에서 동일하게 16Hz의 정수배 주파수에서 발생하였다.

### 3.4 공력 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향

Fig. 12에 압축기의 밸브 각도에 따른 로터의 진동 결과를 나타내었다. 로터의 불균형 질량에 의한 진동

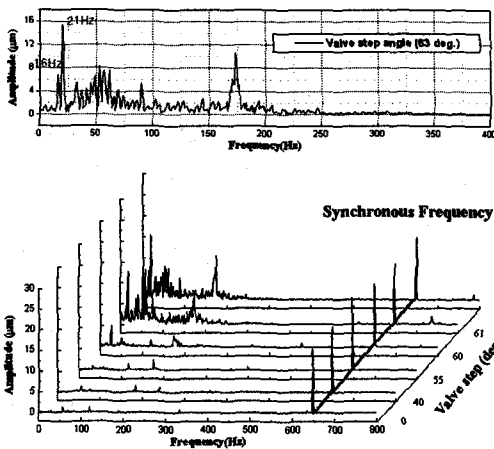


Fig.12 Journal Vibration FFT as valve angle position (X-direction at 39,000rpm)

은 밸브각도에 관계없이 동일하게 650Hz에서 발생하였으며 밸브각도에 따라 최소 14.6µm, 최대 17.5µm의 진폭을 갖는다. 밸브각도 0도에서는 로터의 회전주파수에서만 진동이 발생하였으나 유량을 감소시켜 밸브 각도가 60도에 이르면 27Hz의 정수배의 주파수에서 새로운 가진력이 발생하며 밸브 각도 61도에서는 16Hz와 20Hz의 정수배의 주파수에서, 63도에서는 16Hz와 21Hz의 정수배의 주파수에서 가진력이 발생하였다. 밸브각도 63도에서의 FFT 결과는 21Hz에서의 로터의 진폭이 14.8µm로 16Hz에서의 진폭 6.8µm에 비하여 약 120% 더 큼을 보여준다. 특히 유량 감소 시에 로터를 가진하는 주파수가 Fig. 10과 Fig. 11에서의 압력유동 주파수와 정확히 일치하는 것을 알 수 있는데 이러한 결과는 공력 불안정성의 발생이 고속회전하는 로터에 가진력으로 작용하게 됨을 보여준다.

Fig. 13과 Fig 14는 밸브 각도가 각각 0도와 63도 일 때의 로터의 진동 궤도(orbit)를 나타낸 결과이다. 밸브 각도 0도에서의 진동의 직경이 중심에서 약 20µm 내의 영역에서 발생한 반면 밸브각도 63도에서의 로터의 진동궤도는 직경이 약 40µm까지 증가하여 공력 불안정성으로 인해 로터 진동의 저주파 진동이 야기됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 범프 타입(bump type)의 포일 베어링으로 지지되는 터보 압축기에서 공력 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향을 실험을 통해 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 공력 불안정성이 발생하지 않은 구간에서 로터의

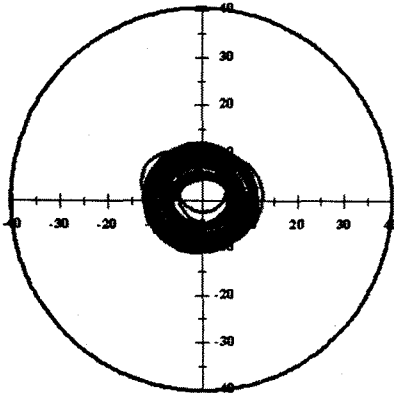


Fig.13 Journal Vibration orbit at 39,000rpm  
(valve angel : 0deg.)

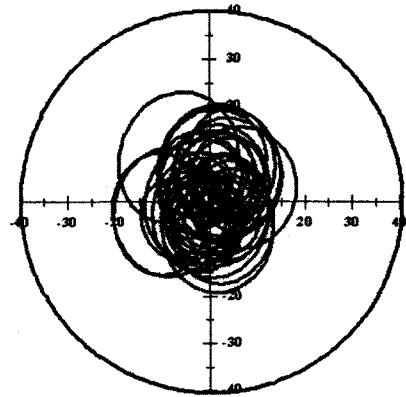


Fig.14 Journal Vibration orbit at 39,000rpm  
(valve angel : 63deg.)

불균형 질량으로 인한 진동의 크기는 회전 주파수 650Hz에서 20.3 $\mu$ m(peak to peak)였으며 로터의 진동에 가장 지배적으로 작용하였다.

2) 공력 불안정성은 유량을 감소시킴에 따라 30Hz 이내의 임의의 주파수와 그 정수배의 주파수 영역에서 발생하였으며 압력유동(pressure fluctuation)의 진폭은 유량이 감소함에 따라 증가하였다.

5) 주파수 분석을 통해 디퓨저 내부의 압력요동과 로터의 가진력이 발생하는 벨브각도와 주파수가 모두 정확히 일치하는 것을 알 수 있으며 따라서 공력 불안정성이 로터에 가진력으로 작용하게 됨을 알 수 있다.

6) 벨브각도 63도에서의 로터의 진동 궤도(orbit) 범위는 0도에 비하여 2배 정도 증가하였으며 공력학적 불안정성이 로터의 진동을 유발함을 알 수 있다.

7) 고속회전 터보기계의 안정성 향상을 위해 설계 시에 공력 요소와 로터-베어링 시스템간의 연성작용을 고려하는 것이 바람직하며, 이는 차후 공기 포일 베어링의 감쇠력 향상을 통해 공력 불안정성으로 인한 로터의 진동을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Yong-Bok Lee, Tae-Ho Kim, Chang-Ho Kim, Nam-Soo Lee, and GunHee Jang, 2002, "Flexible Rotor Supported by Viscoelastic Foil Bearings Beyond the Bending Critical Speed", 6th IFToMM Proceedings-Volume 2, pp. 944-951, Australia
- (2) 이두열, 강창식, 신유환, 김광호, 2001, "원심압축기 베인 디퓨저에서의 선회실속 특성", 유체기계 연구 개발 발표회 논문집, pp. 99~105
- (3) Seidel, U., Chen, J., Jin, D., and Rautengerg, M., 1991, "Experimental Investigation of Rotating Stall Behaviour Influenced by Varying Design and Operation Parameters of Centrifugal Compressors," 91-YOKOHAMA-IGTC-93, pp. I-89~I-98
- (4) Kuk H. Kim and Sanford Fleeter, 1994, "Compressor Unsteady Aerodynamics Response to Rptating Stall and Surge Excitations", Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, pp.608~708
- (5) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2001, "공기유향 다엽포일 저어널 베어링의 회전축 부상 특성에 관한 연구", 윤활학회지 Vol. 17, No 4, pp. 290~296
- (6) 이용복, 이남수, 최동훈, 김창호, 2001, "공기유향 범프 저어널 베어링의 부상 특성에 관한 연구",

윤희학회지 Vol. 17, No 6, pp. 441~446

- (7) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, “범프 포일 베어링들의 동적 계수에 관한 실험적 연구,” 윤희학회지 Vol. 18, No 1, pp. 42~48
- (8) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2002, “공기유희 범프포일 저널 베어링의 내구성 특성에 관한 연구,” 윤희학회지 Vol. 18, No 2, pp. 153~159
- (9) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, “이단 압축기의 동력학적 설계 및 운전 특성에 관한 연구,” 유체기계저널 제5권 제1호, pp. 55~61

(10) Song, S. J., Martinez-Sanchez, M, 1997, “Rotordynamic Forces Due to Turbine tip Leakage: Part I -Blade Scale Effects”, Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp. 695~703

(11) Song, S. J., Martinez-Sanchez, M, 1997, “Rotordynamic Forces Due to Turbine tip Leakage: Part II -Radius Scale Effects and Experimental Verification”, Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp. 704~713