

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

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

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

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

*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

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

### 1. 서 론

공기 포일 베어링으로 지지되는 원심 압축기는 공기를 베어링의 윤활제로 사용하기 때문에 별도의 윤활 시스템이 필요하지 않다. 따라서 압축 공기에 오일 함유의 우려가 없어 청결한 공기를 공급할 수 있고, 저마찰에 의해 동력 손실이 매우 적어 저전력의 시스템이라는 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 단축시키며, 따라서 공기 포일 베어링으로 지지되는 압축기의 설계를 위해서는 로터-베어링 시스템의 신뢰성 향상을 통한 내구성 확보와 공력 요소의 안정성에 대한

\* 한국과학기술연구원 트라이블로지 연구센터

\*\* 한국과학기술연구원 열·유동제어 연구센터

책임저자 E-mail : lyb@kist.re.kr

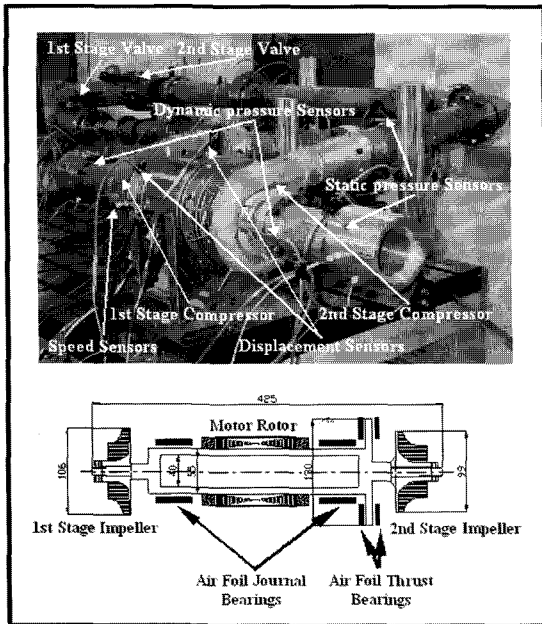


Fig. 1 A Turbo-compressor with Air Foil Bearings

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 대용량 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 공역학적 불안정성 (aero-dynamic instability)은 선회 실속 (rotating stall) 및 서지 (surge) 등의 현상에 의해 발생한다. 실속은 외부 유동의 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 안전운전영역의 한계로 인해 설계점 이하의 저유량에서의 공역학적 불안정성으로 나타나며 압축기 전체에서의 주기적인 압력 변동과 기계적인 진동, 소음을 동반한다. 이러한 요동은 압축기의 성능저하뿐만 아니라 압축기에 주기적인 부하를 가하게 되어 고속 회전하는 회전축을 포함한 시스템 전체에 악영향을 미치게 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 등<sup>[3]</sup>은 산업용 압축기에서 임펠러 회전 주파수, 다양한 유량 등에 따라 발생하는 선회실속 셀 수, 셀의 전파속도 등의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Kim 등<sup>[4]</sup>은 단단 축류형 압축기에서의 선회실속 (rotating stall) 및 서지 (surge)로 인해 압축기의 공역학적 불안정성이 발생함을 실험을 통해 증명한 바 있다.

한편, 이용복 등<sup>[5-9]</sup>은 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 등<sup>[10-11]</sup>은 공역학적 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 터보 원심압축기에서 나타나는 공역학적 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향을 실험을 통해서 규명하고, 아울러 공역학적 불안정성이 회전체동역학적 안정성에 미치는 연성 효과를 분석하여 고속회전 터보기계에서 운전 안전성을 향상시키는 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

실험에 사용된 터보 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 압축비 1.7을 나타낸다. 로터는 범프 포일 타입의 2개의 공기 포일 저널 베어링과 1개의 스러스트 베어링으로 지지된다. 공기 포일

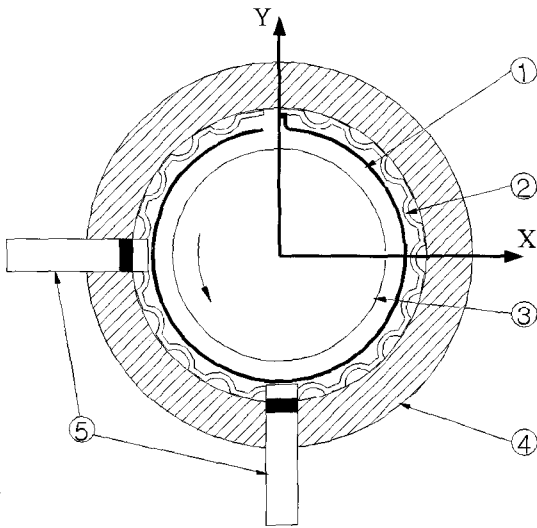


Fig. 2 Air foil journal bearing with displacement sensors:  
 ① top foil    ② bump foil    ③ journal  
 ④ bearing sleeve    ⑤ displacement sensors

베어링의 설계를 위해 KIST에서 자체 개발한 베어링 해석 프로그램 (SPAB)을 사용하였으며 회전체 해석을 통해 로터의 안정성을 확인하였다.

본 연구에서는 터보 압축기의 2단 직렬 압축 성능을 고찰하기에 앞서 안정성 확인을 위해 두개의 단단 압축기에 대해서 실험을 수행하였다. 1단 압축기는 베인 디퓨저를, 2단 압축기는 베인리스 디퓨저를 사용하였으며 각 단의 토출부에는 유량조절 밸브를 설치하여 유량 및 그에 따른 압축비 조절이 가능하다. 압축기의 유입부와 토출부에서 유량노즐과 K형 열전대를 이용하여 각 유량과 온도를 측정하였으며 공력 불안정성을 측정하기 위하여 고주파 압력센서를 슈라우드 케이싱 벽에 설치하였다. 로터의 회전속도와 진동치를 측정하기 위하여 각각 속도 센서와 변위 센서를 설치하였다. Fig. 2는 공기 포일 베어링의 개략도이다. 공기 포일 베어링은 빔프 타입을 사용하였으며 서로 수직하여 설치된 변위 센서에 의해서 로터의 진동을 측정할 수 있다. Fig. 3은 슈라우드 벽에 설치된 고주파 압력센서와 데이터 수집의 흐름도를 보여준다. 압축기의 불안정 특성을 측정하기 위한 비정상 압력측정시스템은 고주파용 압력센서 (Kulite, XCS-062), 앰프 (Instruments Division, 2260), A/D board (DT3010/32), 신호분석기 (Analogic, D6500E) 등으로 이루어지며 센서는 로터의 축방향과 수평으로 1단 압축기 디퓨저 출구 ( $r/r_2=1.63$ ), 2단 압축기 디퓨저 ( $r/r_2=1.43$ ) 원주 방향 90°간격에 각

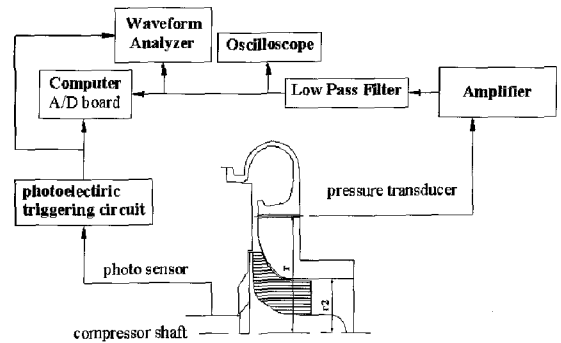


Fig. 3 Data acquisition flow with dynamic pressure

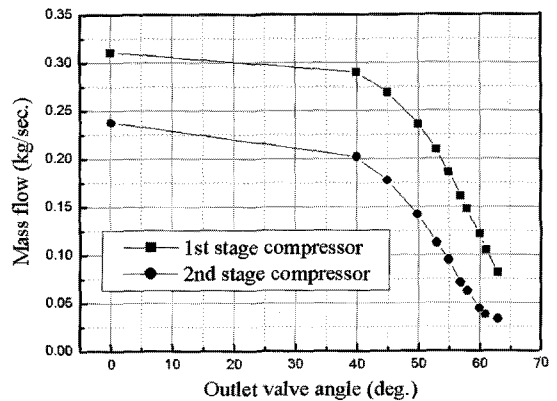


Fig. 4 Mass flow with outlet valve angle position at 39,000rpm

각 1개씩 장착하여 총 4개의 신호를 동시에 측정하였다.

## 2.2 실험 방법

본 실험장치는 1단 압축기 출구와 2단 압축기 입구를 덕트 연결하면 2단의 다단 원심압축기가 가능하게 설계되었다. 본 실험은 각단의 압축기에서 발생하는 공력 불안정성이 회전축에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 두개의 단단 압축기의 입구 덕트에 벨마우스 (bellmouth)를 설치하였으며, 압축된 공기는 각 단의 스크롤 (scroll)과 출구 덕트를 경유한다. 원심 압축기의 성능을 측정하기 위해 여러 회전수에서 각 압축기 유량조절밸브의 각도를 동일하게 줄여가면서 실험을 수행하였다. 그리고 정격운전속도 39,000 rpm에서의 유량감소에 따른 공역학적 불안정성의 발생과 그에 따른 회전축의 진동을 측정하여 상관관계를 비교 분석하였다. 압축기가 39,000 rpm으로 작동될 때 밸브 각도에 따른 각 압축기의 유량을 Fig. 4에 나타내었다.

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

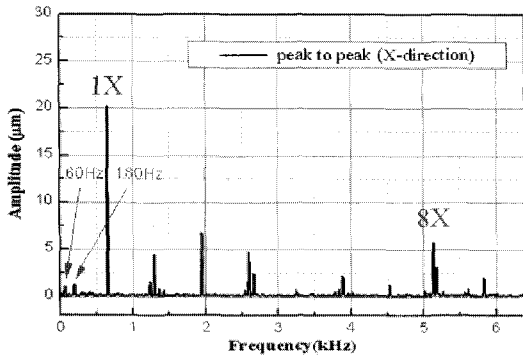


Fig. 5 Journal vibration spectrum at 39,000 rpm with open valve (valve angle: 0 deg.)

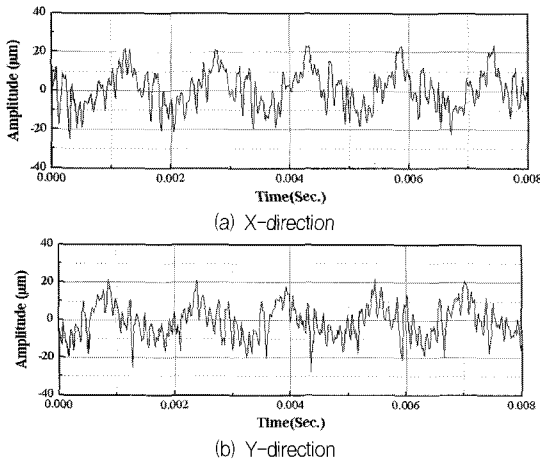


Fig. 6 Journal vibration at 39,000 rpm with open valve (valve angle: 0 deg.)

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 로터다이나믹스(rotordynamics)

Fig. 5는 터보 압축기 양단의 밸브를 모두 개방한 상태 (valve angle: 0 deg.)에서 39,000 rpm으로 운전할 때의 로터의 진동을 측정된 결과이다. 회전축의 1X 성분인 약 650 Hz에서 발생하는 가진력은 로터의 불균형질량에 의한 진동 성분으로 20.3  $\mu\text{m}$ 의 진동크기 (peak to peak)를 나타낸다. 이는 그 정수배의 주파수로 로터를 가진하게 되며 고주파 영역으로 갈수록 크기가 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 한편, 5.2 kHz에서 나타나는 8X 성분은 그 크기가 5.8  $\mu\text{m}$ 로 다시 커졌는데, 이는 로터의 질량불균형과 임펠러의 메인 블레이드에 의해 공역학적으로 가진되는 성분의 조합 (로터의 불균형 질량 (1)+임펠러의 메인 블레이드의

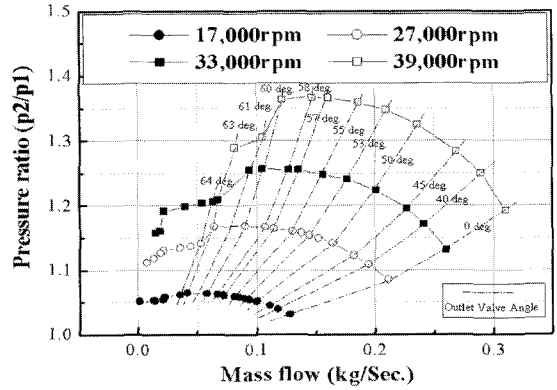


Fig. 7 1st stage compressor performance

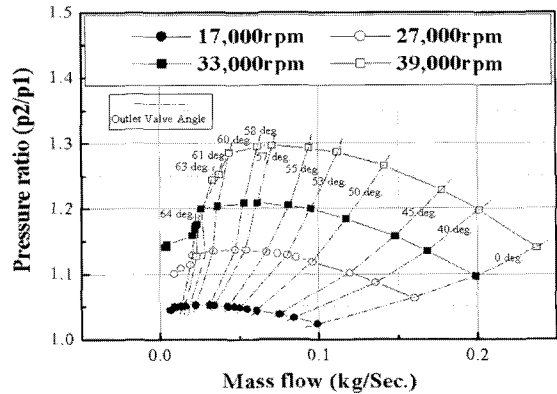


Fig. 8 2nd stage compressor performance

개수 (7))에 의해 나타난 영향으로 사료되며 로터의 진동에는 지배적인 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 회전 주파수보다 작은 주파수 성분으로 60 Hz와 180 Hz의 성분들은 60 Hz의 정수배 성분으로 전기적 노이즈에 의해 유발된 것이며 1X 성분과 비교할 때 매우 작다.

Fig. 6은 압축기가 Fig.5에서와 같은 조건으로 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

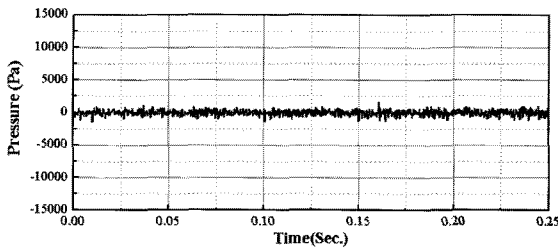
Fig. 7은 터보 압축기의 1단 압축기 성능곡선이다. 성능곡선은 유량에 따른 압력비의 결과를 보인 것으로 유량이 감소함에 따라 압력이 상승하다가 특정 유량 이하부터는 압력이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 압축기의 운전 속도인 39,000 rpm에서 최대 압력비는 1.37, 유량은 0.12kg/s임을 알 수 있다. Fig. 8은 2단

압축기의 결과로 1단 압축기의 성능곡선과 비슷한 경향을 나타내는데 최대 압력비와 유량은 39,000rpm에서 각각 1.3과 0.071 kg/s이다. 2단 압축기에서는 1단 압축기에 비하여 유량과 압력비가 작으며 특히 불안정성 발생유량에 도달한 후에 압력비는 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 이러한 차이는 2단 압축기의 디퓨저가 1단의 디퓨저와는 달리 베인리스 타입을 사용하였기 때문인 것으로 사료된다.

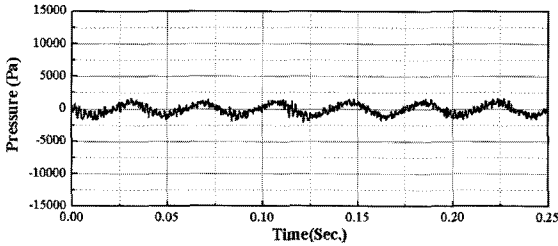
### 3.3 공역학적 불안정성

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 압축기의 1단 압축기와 2단 압축기에서 발생하는 압력요동 (pressure fluctuation)의 변화를 나타낸 것으로 유량조절밸브를 이용하여 유량을 감소시킴에 따라 측정된 결과이다. Fig. 9에서 유량조절밸브가 완전 개방된 상태에서는 특별한 압력요

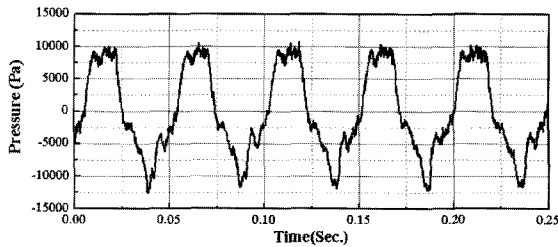
동이 보이지 않아 공역학적 불안정성이 발견되지 않았다. 그러나 밸브의 각도를 60도로 하여 유량을 감소시켰을 때에는 뚜렷한 파형의 압력요동이 발생하기 시작하였으며 유량을 더 감소시켜 밸브위치가 63도에 이르렀을 때에는 압력요동의 진폭이 더욱 증가하여 최대 약 22,600 Pa (peak to peak)을 나타내었다. Fig. 10에서도 비슷한 경향을 보이는데 밸브각도 0도에서는 특정한 신호의 변동이 보이지 않지만 밸브의 각도가 60도에 이르렀을 때에는 압력요동이 발생하게 되는데 이때의 압력요동은 1단 압축기에서의 경우와는 달리 파형이 뚜렷하지 않았다. 그러나 밸브 각도가 63도에 이르면 특정한 주기를 갖는 파형의 진폭이 크게 증가하여 Fig. 9의 (c)와 비슷한 경향을 보이며 진폭은 최대 약 18,000 Pa (peak to peak)의 값을 갖는다. Fig. 11은 유량의 감소에 따른 1단 압축기에서의 압력요동을 주파수 영역에서 관찰한 결과이다. 압력요동은 밸브각도



(a) Mass flow: 0.3106kg/Sec. [valve angle: 0 deg.]

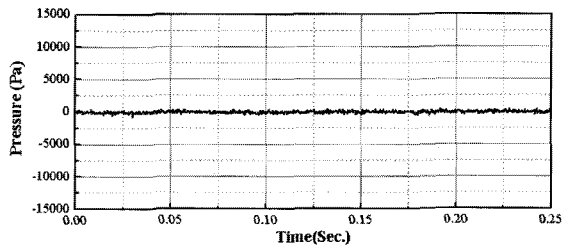


(b) Mass flow: 0.1216kg/Sec. [valve angle: 60 deg.]

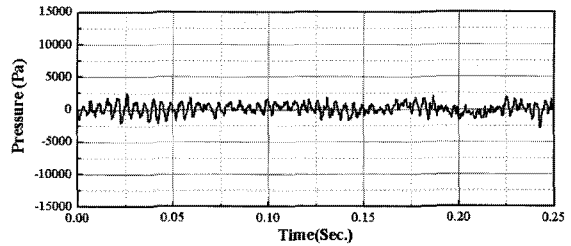


(c) Mass flow: 0.0815kg/Sec. [valve angle: 63 deg.]

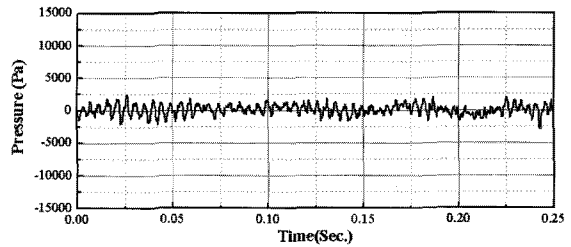
Fig. 9 1st compressor pressure fluctuation at 39,000rpm



(a) Mass flow: 0.2375kg/Sec. [valve angle: 0 deg.]



(b) Mass flow: 0.0442kg/Sec. [valve angle: 60 deg.]



(c) Mass flow: 0.0328kg/Sec. [valve angle: 63 deg.]

Fig. 10 2nd compressor pressure fluctuation at 39,000rpm

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

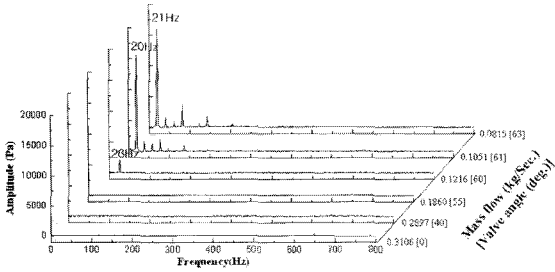


Fig.11 Pressure fluctuation spectrum with mass flow (1st compressor, 39,000 rpm)

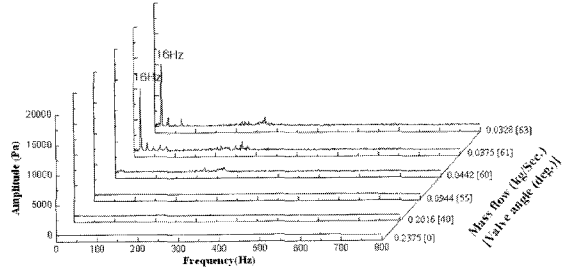


Fig.12 Pressure fluctuation spectrum with mass flow (2nd compressor, 39,000 rpm)

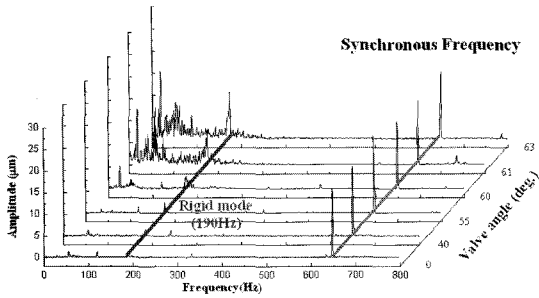
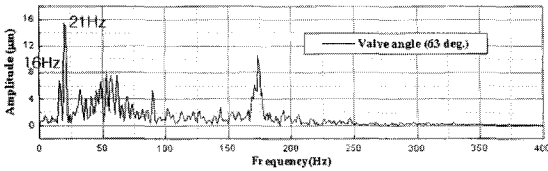


Fig.13 Journal vibration spectrum with valve angle position (Y-direction at 39,000 rpm)

60도에서 26Hz의 정수배 성분으로 발생하기 시작하였고, 밸브 각도가 61도와 63도로 증가함에 따라 각각 20Hz와 21Hz의 정수배 성분에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 2단 압축기에서의 결과로 압력요동이 발생하는 주파수는 밸브 각도 61도에서부터 뚜렷해져 61도와 63도에서 동일하게 16Hz의 정수배 주파수에서 발생하였다.

유량감소에 따른 압력요동의 주파수 분석 결과는 특정 압력요동이 뚜렷하게 발생하는 각 압축기의 유량이 각 압축기의 성능곡선인 Fig. 7과 Fig. 8에서 갑작스런 압력강하가 발생하는 유량 (밸브각도: 61 deg.)과 일치함을 보여준다. 이러한 결과는 본 실험에 사용된 터보 압축기에서 특정 유량 이하의 저유량으로 인한 압축공기의 불안정 유동과 그에 따른 주기적인 압력변동에 의해 압력요동이 나타나게 됨을 보여준다. 아울러 실험과정에서 각 압축기의 입구부에서는 불안정 유동에 따른 유동의 주기적인 역류현상을 관찰할 수 있

었으며 입·출구 덕트를 포함한 압축기 전체에 매우 큰 기계적 진동을 수반하였다.

### 3.4 공력 불안정성이 로터의 진동에 미치는 영향

Fig. 13에 각 압축기의 유량조절밸브 각도에 따른 Y축의 로터의 진동 결과를 나타내었다. 650Hz에서 발생한 성분은 로터의 불균형 질량에 의한 진동으로 유량에 따라 14.6µm ~ 17.5µm의 진폭으로 그 변동량의 차이가 2.9µm로 매우 작아 공역학적 불안정성에 의한 영향이 거의 없었다. 그러나 200Hz 이하의 주파수 영역에서는 밸브각도에 의한 유량의 감소에 따라 특정 성분들이 발생하는 것을 보여준다. 이러한 현상은 밸브개도 60도에 이르러서 27Hz에서 5.0µm의 크기로 발생하기 시작하여 61도에서부터 뚜렷해지는데 61도에서는 16Hz와 20Hz의 주파수에서 각각 4.5µm와 11.9µm의 크기로, 63도에서는 16Hz와 21Hz의 주파수에서 각각 6.8µm와 14.8µm로 뚜렷하게 나타났다. 이러한 주파수는 각 압축기의 공역불안정에 의해 발생하는 압력요동 주파수와 일치하여 공역학적 불안정성이 회전축의 비정상 진동을 유발함을 보여준다. 또한 밸브각도 63도에서의 주파수분석 결과는 2단에 비해 더 큰 압력요동을 갖는 1단 압축기에 의해서 발생한 21Hz에서의 로터의 진폭 (14.8µm)이 2단 압축기에 의한 16Hz에서의 진폭 (6.8µm)의 약 220%의 값을 갖는 것을 보여주며, 따라서 공역불안정성에 의한 압력요동이 클수록 로터의 비정상 진동에 더 큰 영향을 주게 됨을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig 15는 유량조절 밸브각도가 각각 0도와 63도일 때의 로터의 진동 궤적 (orbit)을 나타낸 결과이다. 밸브각도 0도에서의 진동 궤적은 궤도가 일정하며 궤적의 크기가 직경 약 20µm 내외인 반면 밸브각도를 63도로 하여 유량을 감소시켰을 때의 로터의 진동은 그 궤도가 불규칙하여 전체 궤적의 직경이 약

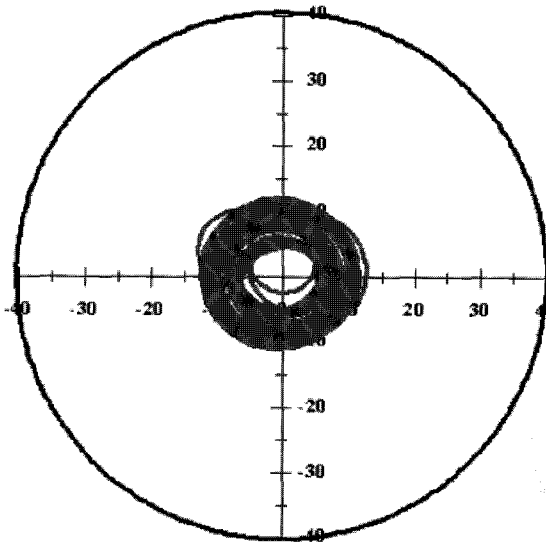


Fig. 14 Journal orbital vibration at 39,000 rpm (1st compressor mass flow: 0.3106 kg/Sec., 2nd compressor mass flow: 0.2375 kg/Sec.) [valve angle: 0 deg.]

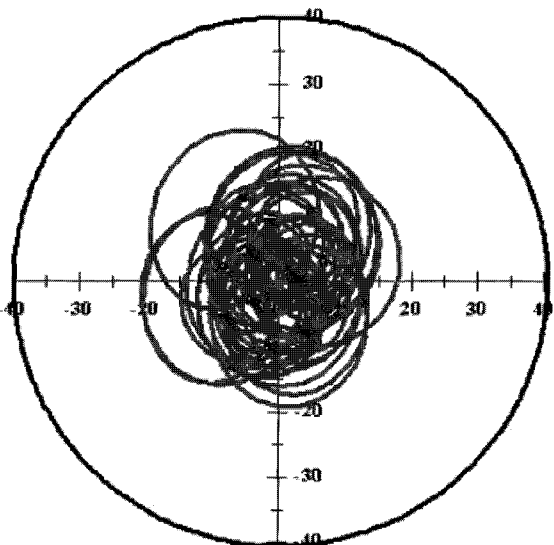


Fig. 15 Journal orbital vibration orbit at 39,000 rpm (1st compressor mass flow: 0.0815 kg/Sec., 2nd compressor mass flow: 0.0328 kg/Sec.) [valve angle: 63 deg.]

40 $\mu$ m 까지 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 공역학적 불안정성으로 인해 로터가 불규칙한 궤도를 따라 회전하게 되어 진동폭이 증가함을 보여준다. 로터의 저주파 진동과 그로 인한 진동폭의 증가는 베어링의 윤활두께의 감소, 회전축과의 접촉으로 인한 베어링의 마모 발생 및 파손으로 이어져 압축기 시스템의 운전 안전성을 크게 악화시킬 수 있다. 따라서 본 실험에 사용된 공기 포일 베어링을 고감쇠의 공기 포일 베어링으로 대체함으로써 압축기의 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 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 불균형 질량으로 인한 진동의 크기는 회전 주파수 650Hz에서 20.3 $\mu$ m (peak to peak, X-direction)였으며 로터의 진동에 가장 지배적으로 작용하였다.
- 2) 압축기의 성능곡선 상의 압력강하가 시작되는 저유량에서부터 공력 불안정성에 따른 압력요동 (pressure

fluctuation)이 발생하기 시작하는 것을 확인하였으며 유량을 더 감소시킴에 따라 30Hz 이내의 임의의 주파수와 그 정수배의 주파수 영역에서 발생하는 압력요동의 진폭은 증가하였다.

- 3) 주파수 분석을 통해 압력요동이 발생하는 유량에서의 압력요동의 주파수와 회전축의 비정상 진동 주파수가 정확히 일치하는 것을 알 수 있으며 따라서 공력 불안정성이 회전축의 진동에 영향을 미침을 확인하였다.
- 4) 유량조절 밸브각도 63도에서의 회전축의 진동은 그 궤도가 일정하지 않아 0도에 비하여 약 2배 증가한 진동폭 (orbit)을 나타내었으며 따라서 공역학적 불안정성이 회전축의 진동을 증가시킴을 알 수 있다.
- 5) 고속회전 터보기계의 안정성 향상을 위해 설계 시에 공력 요소와 로터-베어링 시스템간의 연성작용을 고려하는 것이 바람직하며, 이는 차후 공기 포일 베어링의 감쇠력 향상을 통해 공역학적 불안정성으로 인한 회전축의 비정상 진동발생을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사

업 중 중점국가연구개발사업(기체설비요소기술개발)과 KIST-2000 연구프로그램으로 지원되어 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Lee, Y.-B., Kim, T.-H., Kim, C.-H., Lee, N.-S., and Jang, G.-H., 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 연구개발 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) Kim, Kuk H., and Fleeter, Sanford, 1994, "Compressor Unsteady Aerodynamics Response to Rotating Stall and Surge Excitations," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 5, pp. 608~708.
- (5) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2001, "공기유회환 디퓨저포일 저어널 베어링의 회전축 부상 특성에 관한 연구," 유회환학회지 Vol. 17, No 4, pp. 290~296.
- (6) 이용복, 이남수, 최동훈, 김창호, 2001, "공기유회환 범프 저어널 베어링의 부상 특성에 관한 연구," 유회환학회지 Vol. 17, No 6, pp. 441~446.
- (7) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 최동훈, 2002, "범프 포일 베어링들의 동적 계수에 관한 실험적 연구," 유회환학회지 Vol. 18, No 1, pp. 42~48.
- (8) 이용복, 김태호, 김창호, 이남수, 장건희, 2002, "공기유회환 범프포일 저널 베어링의 내구성 특성에 관한 연구," 유회환학회지 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, "Rotor-dynamic 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, "Rotor-dynamic Forces Due to Turbine tip Leakage: Part II-Radius Scale Effects and Experimental Verification," Journal of Turbomachinery, Vol. 119, pp. 704~713.