

프로세스 고속 경량 원심 압축기의 로터다이나믹 안정성 강화를 위한 설계해석 - Part I: 베어링 설계의 영향

이 안 성[†]

한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 시스템다이나믹스연구실

Design Analysis to Enhance Rotordynamic Stability of High-Speed Lightweight Centrifugal Compressor - Part I: Effects of Bearing Designs

An Sung Lee[†]

*Dept. of System Dynamics Research, Mechanical Systems Research Div.
Korea Inst. of Machinery and Materials*

(Received October 2, 2013 ; Revised November 7, 2013 ; Accepted November 11, 2013)

Abstract – Part I of this study analyzed the effects of tilting pad bearing designs to reduce the stiffness of the bearings used in a process high-speed lightweight centrifugal compressor intended for a domestic refinery use. This was done in an attempt to enhance the robustness of its rotordynamic stability against possible aerodynamic cross-coupled stiffness. The bearing design variables reviewed were the clearances, LBPs, LOPs, and preloads. The results showed that there was practically no difference between the LBP and LOP designs in terms of the bearing stiffness, because the compressor rotor was lightweight and the bearings had relatively high preloads. Increasing both the machined and assembled clearances in bearing designs has resulted in the bearing stiffness being greatly reduced. In addition, it has been confirmed that an additional reduction in the bearing stiffness can be obtained for given fixed machined clearances by decreasing the preloads, i.e., by increasing the assembled clearances.

Keywords – process compressor (프로세스 압축기), rotordynamic stability (로터다이나믹 안정성), effects of bearing design (베어링 설계의 영향), tilting pad bearing (틸팅 패드 베어링), reducing bearing stiffness (베어링 강성 감소), bearing clearance (베어링 틈새)

1. 서 론

정유석유화학 플랜트의 핵심 프로세스 가스 압축기에는 고속에서 운전되는 관통 유동(through-flow)을 갖는 다단 원심 압축기가 흔히 적용된다. 이들 프로세스 압축기의 주요 제작사들은 압축기의 설치 공간을 줄이면서도 공정에서 요구되는 압력과 유량을 만족하고 효율 제고를 통한 에너지 절감을 달성하는 한편, 압축기

장비의 가격 경쟁력을 높이기 위해, 압축기 로터를 보다 경량 고속화하는 설계를 채택하고 있다. 이때, 필연적으로 따르는 설계적 또는 현장 운전시의 문제점이, 고속 유연 압축기 로터-베어링 시스템의 로터다이나믹 안정성을 확보하는 것이다.

로터다이나믹 안정성을 높이는 방법으로, 일차적으로, 고속에서 저어널 베어링의 오일 휠 또는 휩에 따른 불안정 진동을 제거하기 위해 베어링의 연성 강성(cross-coupled stiffness)이 원천적으로 발생되지 않는 틸팅 패드 베어링이 채용된다. 그러나 베어링 자체의 불안정 유발 인자가 제거되었다 하더라도, 고속의 프로세스 압

[†]Corresponding author : aslee@kimm.re.kr

© 이 논문은 한국윤활학회 2013년도 추계학술대회(2013. 10. 16~18 히든베이 호텔) 발표논문임.

축기에서는 임펠러와 디퓨저, 그리고 밸런스 피스톤과 임펠러 아이-시일 등에서 공기역학적(aerodynamic) 부작용에 의한 연성 강성의 불안정 인자가 발생하게 된다. 공기역학적 연성 강성은 압축비 또는 가스 밀도가 증가할수록 그리고 운전속도가 증가할수록 더욱 증가하게 된다. 따라서, 시스템으로서 전체 로터다이나믹 안정성을 확보하기 위해서, 발생 가능한 공기역학적 연성 강성을 충분히 여유 있게 상쇄할 수 있는 틸팅 패드 저어널 베어링을 설계하거나, 밸런스 피스톤에 스월 브레이크(swirl brake) 또는 반-스월 주입(anti-swirl injection) 장치를 설치하게 된다.

참고로, 당초 설치후 운전시 로터다이나믹적으로 안정된 진동을 보인 프로세스 압축기가 정기정비 해체 조립후 또는 촉매 등을 포함한 가스 조성 등의 가능한 경미한 상태 변화에 민감하게 반응하여 아동기(subsynchronous) 높은 불안정 진동을 나타내어 운전정지(trip) 되는 사례가 현재 국내 정유 플랜트에서도 종종 발생하고 있다. 이는 압축기 상태 변화에 따른 공기역학적 연성 강성의 증가가 당초 적용된 틸팅 패드 베어링의 안정성 설계여유를 초과했기 때문으로 추정된다.

Nicholas[1]는 틸팅 패드 저어널 베어링의 설계에 따른 동특성의 영향을 보고하였으며, API 684[2]는 틸팅 패드 저어널 베어링의 설계와 함께 압축기의 로터다이나믹 불안정 가진력을 감소 또는 제거시키는 일반 설계지침을 기술하고 있다. Nicholas 외[3]는 제로 예압(zero preload), 센터 피봇(또는, 제로 오프셋), LOP(load on pad, 패드 위 부하)의 틸팅 패드 베어링 설계가 고속 압축기에 가장 안정된 로터다이나믹 특성을 제공한다고 보고하였다. Kocur 외[4]는 틸팅 패드 저어널 베어링과 가스 라비린스 시일의 동특성 및 로터 안정성에 대한 그 영향을 조사하였다. 특히, Kocur와 Nicholas[5]는 1차 위험속도를 넘어 고속으로 운전하는 프로세스 압축기의 로터다이나믹 안정성을 위해 1차 모드에서 베어링의 충분한 스퀴즈 감쇠(squeeze damping) 작용이 가능하도록 베어링 위치에서 로터의 충분한 움직임이 있어야 한다, 다시 말해, 베어링의 강성이 너무 강하면 아니 된다고(즉, 연한 베어링 강성설계의 중요성을) 강조하였다. 한편, Lee[6, 7]는 저속에서 운전되는 프로세스 대형 모터-발전기의 진동 및 불균형 민감도 저감을 목적으로, 틸팅 패드 저어널 베어링의 틸트 감소 및 예압 증가를 통한 베어링 설계개선을 수행하고 그에 따른 베어링 강성의 강화 및 로터다이나믹 진동특성 개선 효과를 보고하였다.

본 Part I 연구는 국내에 설치 예정인 프로세스 고속 경량 원심 압축기를 대상으로 가능한 공기역학적 연성 강성에 대비한 압축기의 로터다이나믹 안정성 설계를 보다 강화할 목적으로, 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향을 해석하고자 한다. 여기서 검토되는 베어링 설계변수는 틸트, 예압, LBP(load between pad, 패드 사이 부하), LOP이다. 한편, 계속해서, Lee[8] Part II 연구는 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향에 따른 로터다이나믹 안정성의 설계개선 확인 해석을 다룬다.

2. 해석 모델

본 연구에서 안정성 설계 검토될 국내 정유플랜트 설치 예정인 프로세스 고속 경량 8단 원심 압축기 로터-베어링 시스템의 로터다이나믹 FE(유한요소) 모델과 그 정적 해석결과가 Fig. 1에 함께 나타나 있다. 압축기의 설계속도가 9538 rpm이고 로터의 질량이 238 kg인 전형적인 고속 경량 로터를 나타낸다. 틸팅 패드 저어널 베어링 #1, 2에서 부하는 각각 1095, 1237 N이다. 두 베어링의 설계는 동일하며, OD(original design, 원 설계) LBP 5-패드 틸팅 패드 베어링의 설계 데이터가 Table 1에 주어져 있다.

압축기 로터-베어링 시스템의 로터다이나믹 안정성을 보다 강화할 목적으로 주어진 OD LBP 5-패드 틸팅 패드 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향을 해석하고자 하며, 이를 위해 검토되는 설계

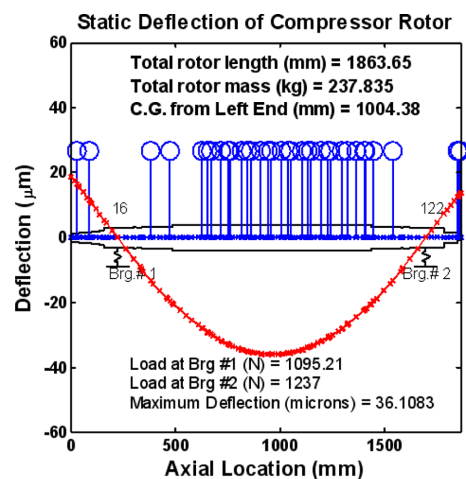


Fig. 1. FE rotordynamic model of a compressor rotor-bearing system and its static analysis result.

Table 1. Design data of OD LBP 5-pad tilting pad journal bearing

Bearing type	LBP 5-Pad
Journal dia. (mm)	89.0 nominal
Bearing length (mm)	40.64
Pad angle (deg.)	60
Pivot offset	0.5
Dia. machined clearance (mm)	0.190
Preload (m)	0.440
Oil type	ISO VG 46
Oil inlet temp. (deg. C)	43

변수는 틈새, LBP, LOP, 그리고 예압이다. 설계변수의 변경 또는 변화에 따라서 명명된 틸팅 패드 베어링 설계의 종류는 OD외에 RD1, RD2, RD3, RD4, RD5로 Table 2에 정의 기술되어 있다. OD는 LBP 원 설계, RD1은 베어링의 가공과 조립 틈새 모두 각각 11, 10 μm 증가된 LBP 설계, RD2는 LOP 설계로 OD와 동일한 베어링의 가공과 조립 틈새를 갖으며, 그리고 RD3는 베어링의 가공과 조립 틈새 모두 각각 11, 10 μm 증가된 LOP 설계이다. 한편, RD4는 0.190 mm의 고정된 가공 틈새에서 예압이 감소하는 LBP 설계이고, RD5는 0.201 mm의 고정된 가공 틈새에서 예압이 감소하는 LBP 설계이다. 베어링의 설계 해석에는 열-해석이 적용되는 상용 ARMD S/W가 사용되었으며, 여기서, 해석결과는 #1 베어링의 강성에 대해서만 검토된다.

3. 베어링 설계해석 결과 및 토의

3-1. OD 대비 RD1

Fig. 2는 OD LBP 베어링의 개략 기하형상을 나타

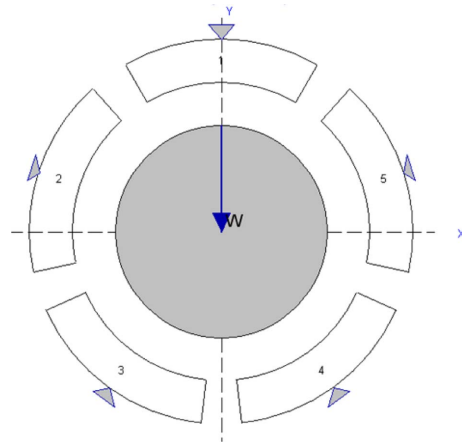


Fig. 2. Schematic geometry of OD LBP bearing.

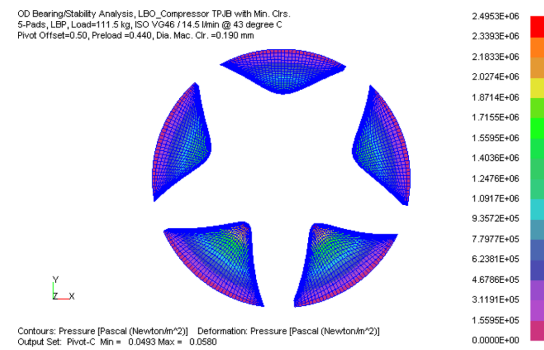


Fig. 3. Pressure distribution of OD LBP bearing design at 9538 rpm.

낸다. 9538 rpm에서 OD LBP 베어링 설계의 압력분포가 Fig. 3에 보여 있다. OD 설계가 $m=0.440$ 으로 비교적 높은 예압을 갖는 관계로 1개의 상부 패드를 포함한 모든 패드에 높은 압력이 발생하고 있다. 회전 속도의 증가에 따른 OD와 RD1 설계의 강성이 Fig.

Table 2. Definitions of designated bearing designs depending on their design variable revisions or changes

Designated bearing design	Definition (or Description)
OD	Original design of LBP
RD1	LBP with both machined and assembled clearances increased by 11, 10 μm , respectively
RD2	LOP but with same machined and assembled clearances as OD
RD3	LOP with both machined and assembled clearances increased by 11, 10 μm , respectively
RD4	LBP with fixed machined clearance of 0.190 mm but decreasing preloads
RD5	LBP with fixed machined clearance of 0.201 mm but decreasing preloads

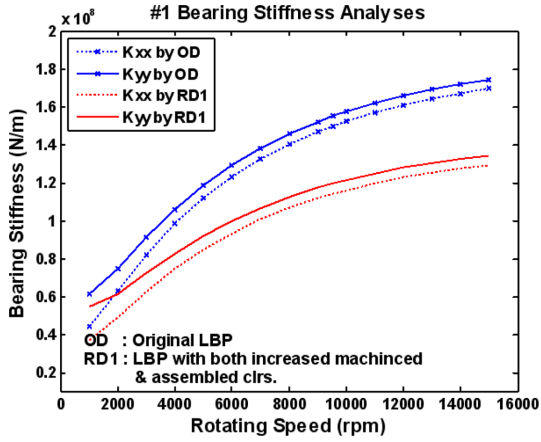


Fig. 4. Stiffnesses of OD vs. RD1 as a function of rotating speed.

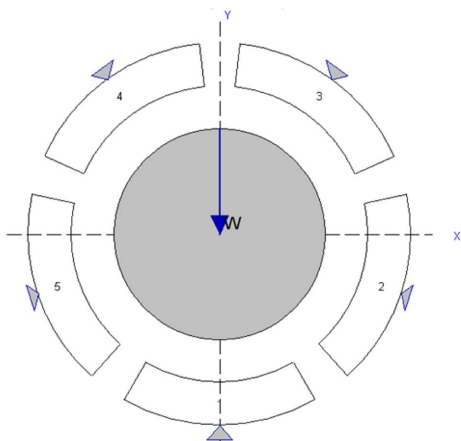


Fig. 5. Schematic geometry of RD2 LOP bearing.

4에 나타나 있으며, 회전속도가 3000 rpm을 넘어 증가함에 따라 베어링 틈새 증가의 영향으로 RD1의 강성이 OD에 비해 크게 감소되는 것을 볼 수 있다.

3-2. OD 대비 RD2

Fig. 5는 RD2 LOP 베어링의 개략 기하형상을 나타낸다. 9538 rpm에서 RD2 LOP 베어링 설계의 압력분포가 Fig. 6에 보여 있다. RD2 설계 역시 $m=0.440$ 으로 비교적 높은 예압을 갖는 관계로 2개의 상부 패드를 포함한 모든 패드에 높은 압력이 발생하고 있다. 회전속도의 증가에 따른 OD와 RD2 설계의 강성이 Fig. 7에 나타나 있으며, 회전속도가 3000 rpm을 넘어 증가함에 따라 예상과 달리 LBP와 LOP에 관계없이 OD와 RD2의 강성이 거의 동일한 것을 볼 수 있다.

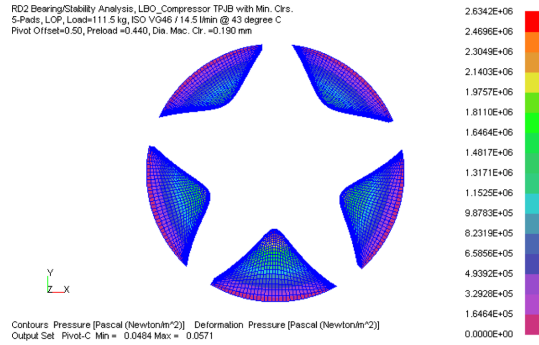


Fig. 6. Pressure distribution of RD2 LBP bearing design at 9538 rpm.

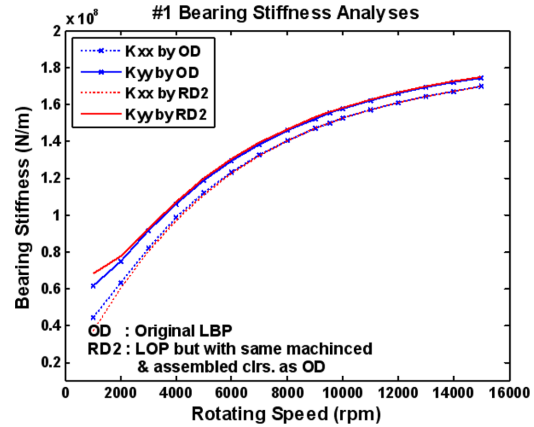


Fig. 7. Stiffnesses of OD vs. RD2 as a function of rotating speed.

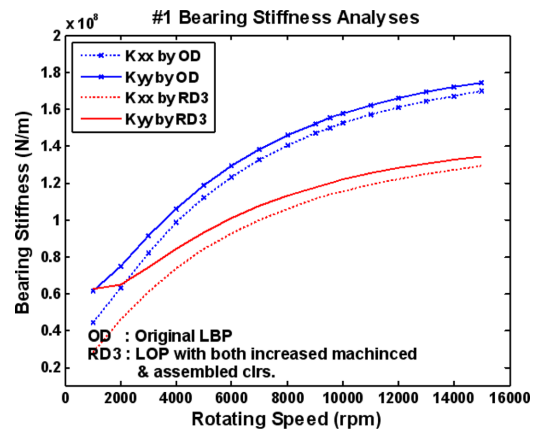


Fig. 8. Stiffnesses of OD vs. RD3 as a function of rotating speed.

이는 해석 대상 압축기 로터가 매우 경량이고 베어링이 높은 예압을 가져 LBP와 LOP의 설계에 따른 베

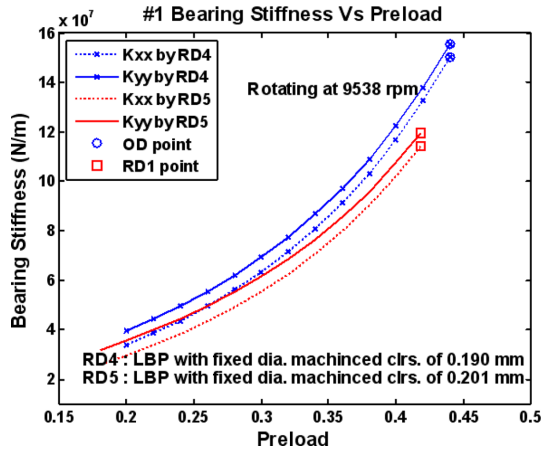


Fig. 9. Stiffnesses of RD4 vs. RD5 as a function of preload at 9538 rpm.

어링 강성의 차이가 없기 때문으로 추론된다.

3-3. OD 대비 RD3

회전속도의 증가에 따른 OD와 RD3 설계의 강성이 Fig. 8에 나타나 있으며, 회전속도가 3000 rpm을 넘어 증가함에 따라 RD3의 강성이 OD에 비해 RD1과 동일한 수준에서 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉, RD3와 RD1의 강성이 거의 동일한 것으로 검토된다. 여기서, RD3의 강성이 OD에 비해 크게 감소된 것은 베어링 틈새 증가만의 영향이고, RD3와 RD1의 강성이 동일한 것은 마찬가지로 LBP와 LOP의 설계에 따른 베어링 강성의 차이가 없기 때문으로 추론된다.

3-4. RD4 대비 RD5

설계 회전속도 9538 rpm에서 예압의 감소에 따른 모두 LBP 설계인 RD4와 RD5의 강성이 OD와 RD1 강성 설계점과 함께 Fig. 9에 나타나 있다. RD4와 RD5 모두 주어진 고정된 베어링의 가공 틈새에 대해서도 예압이 감소함에 따라, 다시 말해, 베어링의 조립 틈새가 증가함에 따라 추가적으로 베어링의 강성이 모두 감소함을 볼 수 있다. 그리고 $m=0.25$ 이상의 예압 조건 모두에서 베어링의 가공 틈새가 $11 \mu\text{m}$ 정도 더 증가된 RD5가 RD4보다 더 낮은 강성 값을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 Part I 연구에서는 국내에 설치 예정인 프로세스

고속 경량 프로세스 원심 압축기를 대상으로 가능한 공기역학적 연성 강성에 대비한 압축기의 로터다이아믹 안정성 설계를 보다 강화할 목적으로, 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향을 해석하였다. 여기서 검토된 베어링 설계변수는 틈새, LBP, LOP, 예압이었다. 해석결과, 고속에서 운전되는 압축기 로터가 경량이고 베어링이 비교적 높은 예압을 갖는 관계로 LBP와 LOP 설계의 베어링 강성 차원에서의 차이점은 없었다. 베어링의 가공과 조립 틈새 모두 각각 $11, 10 \mu\text{m}$ 증가한 베어링 설계가 베어링 강성의 큰 감소를 가져왔다. 또한, 주어진 베어링의 가공 틈새에 대해 예압을 감소시키기에 따라, 즉, 베어링의 조립 틈새를 증가시키기에 따라 추가적으로 보다 감소된 베어링의 강성을 얻을 수 있음이 확인되었다.

한편, 계속해서, Part II 연구[8]는 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향에 따른 로터다이아믹 안정성의 설계개선 확인 해석을 다룬다.

References

- [1] Nicholas, J. C., "Tilting Pad Bearing Design," Proceedings of the 23rd Turbomachinery Symposium, pp. 179-194, 1994.
- [2] API Recommended Practice 684, *API Standard Paragraph Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals, and Rotor Balancing*, Chap. 2 & 3, 2005.
- [3] Nicholas, J. C., Gunter, E. J., and Barrett, L. E., "The Influence of Tilting Pad Bearing Characteristics on the Stability of High Speed Rotor-Bearing Systems," *Topics in Fluid Film Bearing and Rotor Bearing System Design and Optimization*, ASME, pp. 55-78, 1978.
- [4] Kocur, J. A., Nicholas, J. C., and Chester, C. L., "Surveying Tilting Pad Journal Bearing and Gas Labyrinth Seal Coefficients and their Effect on Rotor Stability," Proceedings of the 23rd Turbomachinery Symposium, 2007.
- [5] Kocur, J. A., and Nicholas, J. C., 2007, "Rotordynamic Lateral and Stability Analyses for Equipment Reliability," 36th Turbomachinery Symposium Short Course.
- [6] Lee, A. S., "Journal Bearing Design Retrofit for Process Large Motor-Generator - Part I: Bearing Performance Analysis," *Journal of the KSTLE*, Vol. 28, No. 5, pp. 197-202, 2012.
- [7] Lee, A. S., "Journal Bearing Design Retrofit for Process Large Motor-Generator - Part II: Rotordynam-

- ics Analysis,” Journal of the KSTLE, Vol. 28, No. 6, pp. 265-271, 2012.
- [8] Lee, A. S., “Design Analysis for Enhancing the Rotordynamic Stability of High-Speed Light-Weight

Process Compressor - Part II: Improvements of Rotordynamic Stability,” Submitted for publication in the Journal of the KSTLE, 2013.