

프로세스 고속 경량 원심 압축기의 로터다이나믹 안정성 강화를 위한 설계해석 – Part II: 로터다이나믹 안정성 개선

이 안 성[†]

한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 시스템다이나믹스연구실

Design Analysis for Enhancing Rotordynamic Stability of Process High-Speed Light weight Centrifugal Compressor – Part II: Improvements to Rotordynamic Stability

An Sung Lee[†]

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

(Received November 2, 2013 ; Revised December 14, 2013 ; Accepted December 25, 2013)

Abstract – In this Part II study, rotordynamic stability analyses were carried out to confirm improvements to the stability of a process high-speed lightweight centrifugal compressor, depending on the effects of tilting pad journal bearing designs. The bearing design variables considered were the clearances, LBPs, LOPs, and preloads. The results showed that the rotordynamic stability of the subject compressor rotor-bearing system improves exactly in accordance with the effects of the bearing design variables, which were determined in the preceding Part I study, owing to reduced bearing stiffnesses. Specifically, it was confirmed that the stability of the rotor system can be greatly improved by increasing both the machined and assembled bearing clearances, but there were no stability improvements by simply changing from an LBP to an LOP design. In addition, it was confirmed that for given fixed machined bearing clearances, the stability can be additionally improved by decreasing the preloads, i.e., by increasing the assembled clearances. In conclusion, it may be necessary to improve the designs of the original tilting pad bearings to obtain a sufficient margin of rotordynamic stability against a possible aerodynamic cross-coupled stiffness in a process high-speed centrifugal compressor. Thus, increasing the machined and assembled bearing clearances and decreasing the preload could be effective solutions.

Keywords – process compressor (프로세스 압축기), improvement of rotordynamic stability (로터다이나믹 안정성 개선), LogDec (대수감소율), 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 갖

는 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,

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

©이 논문은 한국윤활학회 2013년도 추계 학술대회(2013. 10. 16~18/여수) 발표논문임.

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 압축기에서는 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 전체로터다이나믹 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 축매 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) 작용

이 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 진동 특성 개선 효과를 보고하였다.

선행 Lee[8] 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 해석하였다. 검토된 베어링 설계변수는 틸트, 예압, LBP(load between pad, 패드 사이 부하), LOP이었다. 본 Part II 연구는 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향에 따른 로터다이나믹 안정성의 설계개선 확인 해석을 다룬다.

2. 해석 모델

본 연구에서 안정성 설계 검토된 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

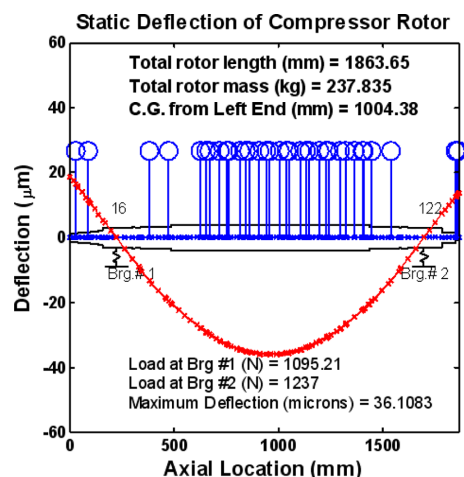


Fig. 1. FE rotordynamic model of a compressor rotor-bearing system and its static analysis result.

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

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

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 변수는 틸새, LBP, LOP, 그리고 예압이다. 설계변수의 변경 또는 변화에 따라서 명명된 틸팅 패드 베어링 설계의 종류는 OD외에 RD1, RD2, RD3, RD4, RD5

로 Table 2에 정의 기술되어 있다. OD는 LBP 원 설계, RD1은 베어링의 가공과 조립 틸새 모두 각각 11, 10 μm 증가된 LBP 설계, RD2는 LOP 설계로 OD와 동일한 베어링의 가공과 조립 틸새를 갖으며, 그리고 RD3는 베어링의 가공과 조립 틸새 모두 각각 11, 10 μm 증가된 LOP 설계이다. 한편, RD4는 0.190 mm의 고정된 가공 틸새에서 예압이 감소하는 LBP 설계이고, RD5는 0.201 mm의 고정된 가공 틸새에서 예압이 감소하는 LBP 설계이다.

로터다이나믹 안정성 설계해석에는 FEM과 행렬법

Basic LogDec Analysis with OD Bearings

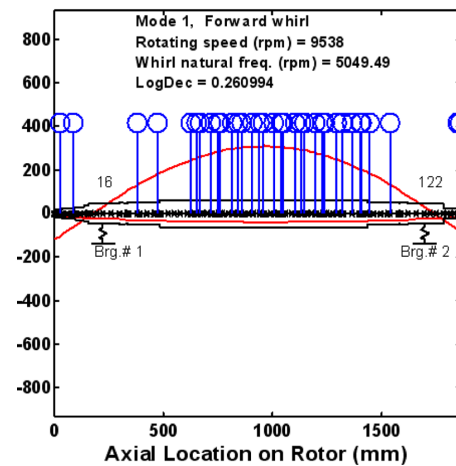


Fig. 2. Basic LogDec analysis at 9538 rpm with OD bearing design, resulting $\delta = 0.261$.

Aero LogDec Analysis with OD Bearings

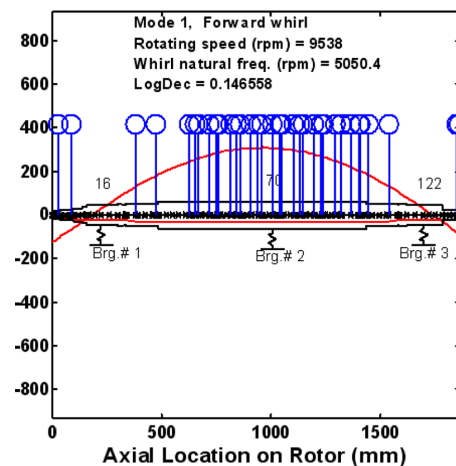


Fig. 3. Aero LogDec analysis for Q_i at 9538 rpm with OD bearing design, resulting $\delta_i = 0.147$.

(Matrix Method)에 기반한 자체개발 코드(in-house code)가 사용되었다. Basic LogDec(logarithmic decrement, 대수감소율) 안정성 해석에서는 베어링의 동특성만이 고려되었고, Aero LogDec 안정성 해석에서는 임펠러에서 예상되는 공기역학적(aerodynamic) 연성 강성의 전체 합(Q_A)을 로터 중간에 부가하여 수행되었다(API 617 Level 1 Stability Analysis[9] 참조). Fig. 2와 3은 OD에 대한 설계속도 9538 rpm에서의 안정성 해석결과로, Fig. 2는 베어링의 동특성만을 고려한 Basic LogDec 해석을 그리고 Fig. 3은 $Q_A=1.322 \times 10^6$ N/m를 로터 중간의 Brg. #2로 부가하여 수행한 Aero LogDec 해석을 나타낸다. 공기역학적 연성 강성, Q_A ,을 부가함에 따라 LogDec이 0.261에서 0.147로 크게 감소함을 볼 수 있다.

3. 로터다이나믹 안정성 해석결과 및 토의

3-1. OD 대비 RD1

회전속도의 증가에 따른 OD와 RD1 설계에 대한 Basic LogDec이 Fig. 4에 나타나 있으며, 전 회전속도 범위에서 RD1이 OD에 비해 크게 향상된 LogDec 값, 즉, 크게 향상된 로터다이나믹 안정성을 제공함을 볼 수 있다. 따라서 베어링의 틈새 증가를 통해 베어링의 강성을 감소시킨 RD1의 LBP 베어링 설계가 로터 시스템의 안정성을 크게 향상시키며 확인된다. 한편, 회전속도가 4000 rpm을 넘어 증가함에 따라 OD와 RD1 설계 모두 LogDec이 계속적으로 감소하는 결과를 보이며, 즉, 고속화에 따른 불안정성의 증가를

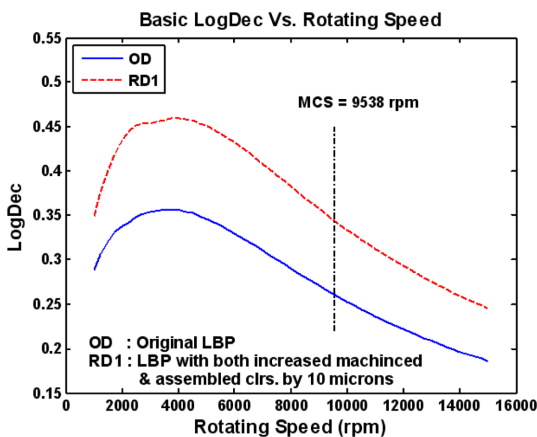


Fig. 4. Basic LogDecs for OD vs. RD1 as a function of rotating speed.

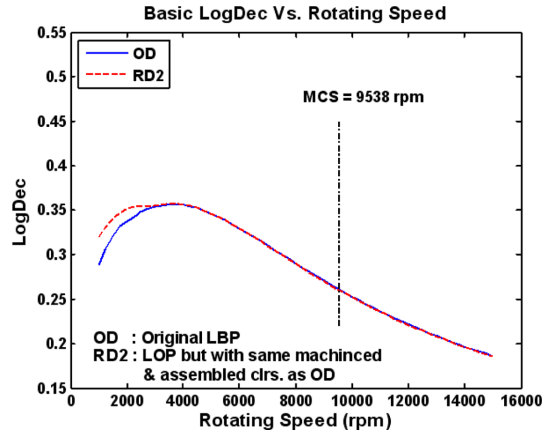


Fig. 5. Basic LogDecs for OD vs. RD2 as a function of rotating speed.

보이며, 설계속도 9538 rpm에서 OD와 RD1 설계에 대한 LogDec은 각각 0.261과 0.344이다.

3-2. OD 대비 RD2

회전속도의 증가에 따른 OD와 RD2 설계에 대한 Basic LogDec이 Fig. 5에 나타나 있으며, 회전속도가 4000 rpm을 넘어 증가함에 따라 OD와 RD2가 거의 동일한 LogDec을 제공함을 볼 수 있다. 즉, 대상 경량 압축기 로터의 경우, 4000 rpm 이상의 고속에서 단순 LBP에서 LOP로 베어링 설계변화에 따른 베어링의 강성 감소효과가 없기 때문에 RD2의 단순 LOP 베어링 설계가 로터 시스템의 안정성을 보다 향상시키지 못 함이 확인된다.

3-3. OD 대비 RD3

회전속도의 증가에 따른 OD와 RD3 설계에 대한 Basic LogDec이 Fig. 6에 나타나 있으며, 회전속도가 4000 rpm을 넘어 증가함에 따라 RD3에 대한 Basic LogDec이 OD에 비해 Fig. 4의 RD1과 동일한 수준에서 크게 향상된 LogDec을 제공함을 볼 수 있다. 이는 Fig. 7의 RD3와 RD1에 대한 LogDec의 직접 비교로부터 확인될 수 있으며, 회전속도가 4000 rpm을 넘어 증가함에 따라 RD3와 RD1이 거의 동일한 LogDec을 제공하고 있다. 다시 말해, 대상 압축기 로터의 경우, 4000 rpm 이상의 고속에서 RD3와 RD1 설계와 같이 베어링의 틈새가 동일하게 증가되면서 LBP에서 LOP로 설계변화에 따른 베어링 강성의 차이가 없기 때문에 동일한 LogDec이 얻어진 것으로 추론

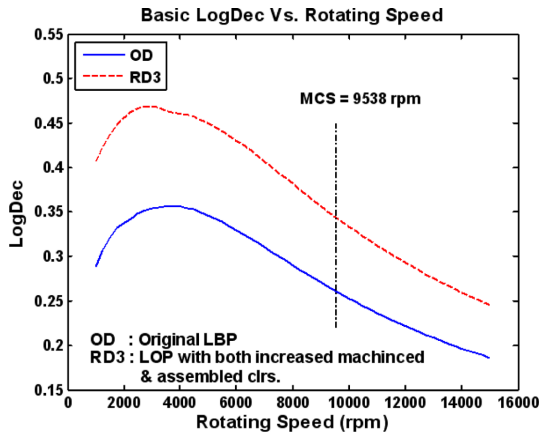


Fig. 6. Basic LogDecs for OD vs. RD3 as a function of rotating speed.

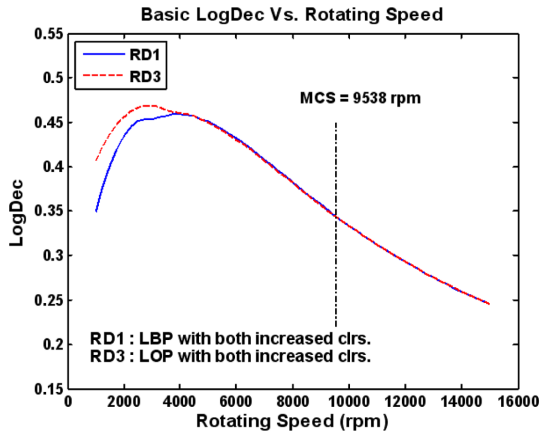


Fig. 7. Basic LogDecs for RD1 vs. RD3 as a function of rotating speed.

된다.

3-4. RD4 대비 RD5

설계속도 9538 rpm에서 예압의 변화에 따른 모두 LBP 설계인 RD4와 RD5에 대한 Basic과 Aero LogDec 이 OD와 RD1 설계점에 대한 LogDec과 함께 각각 Fig. 8과 9에 나타나 있다. Fig. 9의 Aero LogDec 해석에서는 $Q_A=1.322 \times 10^6$ N/m의 공기역학적 연성 강성이 고려되었다. Fig. 8과 9로부터 RD4와 RD5 모두 주어진 고정된 베어링의 가공 틈새에 대해서도 예압이 감소함에 따라, 다시 말해, 베어링의 조립 틈새가 증가함에 따라 베어링의 강성이 모두 감소해서 추가적으로 향상된 LogDec을 제공함이 확인된다. 또한, 예압

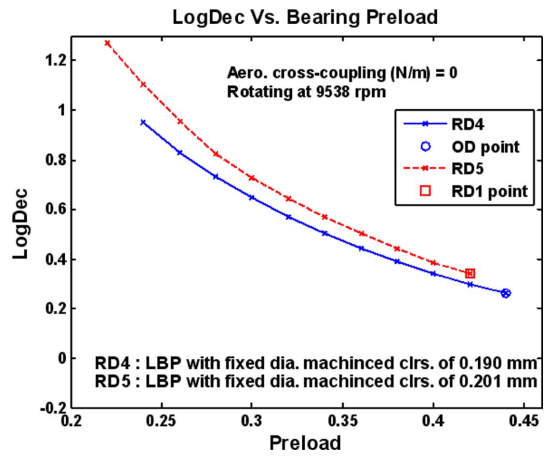


Fig. 8. Basic LogDecs for RD4 vs. RD5 as a function of preload at 9538 rpm.

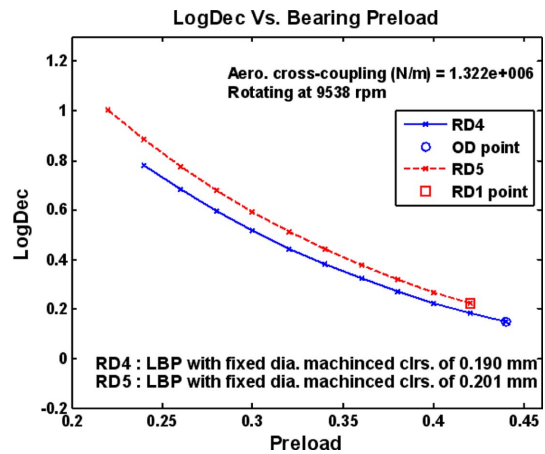


Fig. 9. Aero LogDecs for RD4 vs. RD5 as a function of preload at 9538 rpm.

Table 3. LogDecs predicted at 9538 rpm for OD, RD1, RD2, and RD3 bearing designs, depending on three different values of aerodynamic cross-coupled stiffness

	1st LogDecs at 9538 rpm where $Q_A = 1.322 \times 10^6$ N/m		
	0	Q_A	$2Q_A$
OD	0.261	0.147	0.032
RD1	0.344	0.226	0.107
RD2	0.260	0.146	0.032
RD3	0.344	0.226	0.107

에 따른 Basic과 Aero LogDec의 경향이 동일함이 확인된다.

한편, Table 3에는 0, Q_1 , $2Q_1$ 의 공기역학적 연성 강성을 고려한 설계속도에서 예측된 OD, RD1, RD2, RD3에 대한 LogDec이 종합적으로 주어져 있다. 앞선 해석 결과로부터 예상된 바와 같이 LBP와 LOP에 대한 차이가 발생하지 않아 각 공기역학적 연성 강성에 대해 OD와 RD2, 그리고 RD1과 RD3가 실질적으로 동일한 LogDec을 제공하였다. 공기역학적 연성 강성이 0에서 $2Q_1$ 로 증가함에 따라 OD에 대한 LogDec이 0.261에서 0.032로 급격하게 크게 감소하기 때문에 가능한 공기역학적 불안정성에 대비한 충분한 여유 확보차원에서 원 틸팅패드 베어링의 설계개선이 필요하며, 이때 베어링 틸새 증가의 RD1 설계를 통해 $2Q_1$ 에 대해서도 LogDec이 0.107로 얻어져 상당히 향상된 로터다이나믹 안정성을 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 Part II 연구는 틸팅 패드 저어널 베어링의 설계 변수의 영향에 따른 프로세스 고속 경량 원심 압축기의 로터다이나믹 안정성의 설계개선 확인 해석을 수행하였다. 여기서 검토된 베어링 설계변수는 틸새, LBP, LOP, 예압이었다. 해석결과, 선행 Part I 연구[8]에서 밝혀진 베어링의 강성을 감소시키는 베어링 설계변수의 영향에 정확히 일치하여 해석대상 압축기 로터-베어링 시스템의 로터다이나믹 안정성이 향상되었다. 구체적으로, 베어링의 가공과 조립 틸새 모두의 증가를 통해 로터 시스템의 안정성이 크게 향상됨이 확인되었으며, 그러나 단순 LBP와 LOP 베어링 설계 차이에 따른 안정성의 향상효과는 없었다. 또한, 주어진 베어링의 가공 틸새에 대해 예압을 감소시킴에 따라, 즉, 베어링의 조립 틸새를 증가시킴에 따라 추가적으로 로터시스템의 안정성이 향상됨이 확인되었다. 결론적으로, 프로세스 고속 경량 원심 압축기의 가능한 공기역학적 연성 강성에 대비한 충분한 로터다이나믹 안정성 여유 확보차원에서 원 틸팅패드 베어링의 설계개선이 필요할 수 있으며, 이때 베어링의 가공과 조립 틸새

증가 그리고 예압 감소가 효과적인 개선방안이 된다.

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 C. L. Chester, "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," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 5, pp. 197-202, 2012.
- [7] Lee, A. S., "Journal Bearing Design Retrofit for Process Large Motor-Generator - Part II: Rotordynamics Analysis," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, 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 I: Effects of Bearing Design Variables," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 29, No. 6, 2013.
- [9] API Standard 617, *Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry*, 7th Ed., Chap. 2, 2002.