

패드 선단 테이퍼를 갖는 수직 수직 원통형 터빈 가이드 베어링의 성능향상 - 테이퍼 각도와 길이의 영향

이안성¹ · 장선용² · 박수만^{3,*}

¹한국기계연구원 시스템다이내믹스연구실
²대동메탈공업(주) 기술연구소, ³전력연구원 창의미래연구소

Performance Improvement of Cylindrical Turbine Guide Bearings with Pad Leading-Edge Tapers for Vertical Hydro-Power Application: Effects of Taper Angle and Length

An Sung Lee¹, Sun-Yong Jang² and Soo Man Park^{3,*}

¹Dept. of System Dynamics Research, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), Daejeon, Korea
²R&D Center, Daedong Metal Industry Co., Ltd. (DMB), Busan, Korea

³Creative Future Laboratory, Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), Daejeon, Korea
(Received October 19, 2017; Revised December 31, 2017; Accepted January 5, 2018)

Abstract – Cylindrical turbine guide bearings (TGBs) with simple plain pads have conventionally been used in vertical hydro-power turbine-generator applications in order to provide turbine runner shafts with smooth rotation guides and supports. To overcome low-load/low-eccentricity performance drawbacks, such as very low film stiffness and lack of design credibility in the stiffness values themselves, of conventional cylindrical TGBs, the introduction of a rotational-directional leading-edge taper to each partitioned pad, simply pad leading-edge taper, has been found to be very effective in enhancing their design-application availability and usefulness. In this study, we investigate the effects of taper angle and length for given taper heights in detail in order to systematically establish the effectiveness of design on the performance improvement of vertical hydro-power application cylindrical TGBs with pad leading-edge tapers. The analysis results with 4-Pad×1-Row cylindrical TGBs show that the lubrication performance of the cylindrical TGBs is optimized with an approximate taper angle ratio of 0.8 and taper length ratio of 0.9. We conclude that the introduction of pad leading-edge tapers along with the optimization of taper designs can be very effective in improving the overall operation reliability of cylindrical TGBs and the rotordynamic characteristics of vertical hydro-power turbine-generator rotor-bearing systems as well, to which the TGBs are applied.

Keywords – cylindrical turbine guide bearing(원통형 터빈 가이드 베어링), pad leading-edge taper(패드 선단 테이퍼), taper angle(테이퍼 각도), taper length(테이퍼 길이), performance improvement(성능향상)

1. 서 론

수직 수직형 터빈발전기에는 터빈 러너 축의 원활한

회전 안내 및 지지를 위해서, 전통적으로, 수직 원통형 터빈 가이드 베어링(TGB, turbine guide bearing)이 널리 사용되고 있다. 여기서, 원통형 TGB는 설계 및 제작이 용이하고, 특히, 반경방향 설치 공간이 최소화되는 장점을 가지고 있다.

수직 원통형 TGB는 제작의 편리성 및 윤활유의 원활한 유입을 위해, 베어링의 직경에 따라서, 4개 이상 복

*Corresponding author: sooman.park@kepco.co.kr
Tel: +82-42-865-5502, Fax: +82-42-865-5409
http://orcid.org/0000-0001-6164-1627

© 2018, Korean Tribology Society

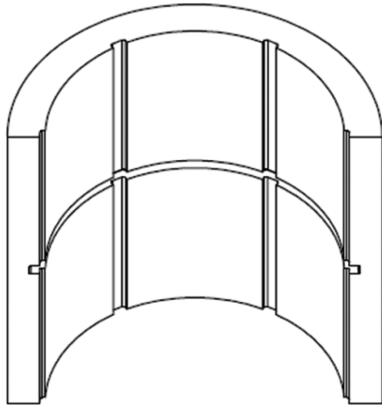


Fig. 1. A half geometry of 6-Pad×2-Row simple plain pad cylindrical TGB.

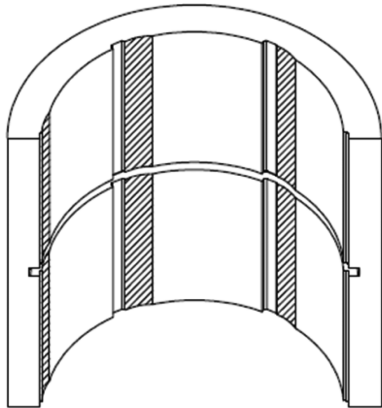


Fig. 2. A half geometry of 6-Pad×2-Row leading-edge tapered-pad cylindrical TGB.

수의 축방향 홈(groove)를 갖는 분할된 축-순환 대칭 패드로 설계된다. 또한, 원통형 TGB는 1개-열 설계 또는, 흔히, $L/D \gg 1.5$ 의 소위 긴-원통형으로 설계되기 때문에, 마찬가지로, 제작의 편리성 및 윤활유의 원활한 유입 순환을 위해 원주방향의 깊은 홈을 갖는 복수-열의 분할된 설계를 채택하기도 한다.

그러나, Fig. 1에 보여진 것과 같은 단순 평편한 패드를 갖는 기존 수직 원통형 TGB는 언급된 장점들 및 다양한 축방향 또는 원주방향 패드 분할 설계에도 불구하고, 예외 없이, 무부하 조건에서 0의 압력생성 및 0의 유막강성은, 물론, 저편심/저부하 조건에서 유막강성이 매우 낮은 단점을 갖고 있다. 또한, 기존 수직 원통형 TGB는, 어느 정도의 유막강성이 발생하는 편심/부하 범위에서도 실제 작용하는 부하를 정확히 예측하

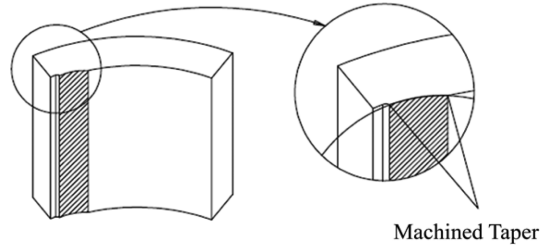


Fig. 3. Improved pad design with a straight leading-edge taper, magnified from Fig. 2.

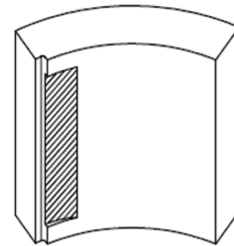


Fig. 4. Improved pad design with a side-walled leading-edge taper.

기 어렵기 때문에, 강성값 자체에 대한 설계적 신뢰성이 부족하고 설계변수에 의한 체계적인 정량적 강성값 제어가 어려운 점 등 실용적인 회전체동역학 설계 적용성에 있어 한계를 보인다.

한편, 위에 언급된 기존 수직 원통형 TGB의 저부하/저편심 운전조건에서의 성능 단점을 근본적으로 향상하여 원통형 TGB의 설계 적용 활용성을 높이기 위한 목적으로, Lee 외[1]은 Fig. 2에 보인 것과 같은 분할된 각 패드의 회전방향 선단에 테이퍼 설계의 도입이 매우 유용함을 밝힌 바 있다. 이러한 성능향상 패드 선단 테이퍼 설계는 일직선 테이퍼(straight taper, Fig. 3) 또는 측면 벽을 갖는 테이퍼(side-walled taper, Fig. 4) 형태일 수 있다.

Pai 외[2]는 긴 3-축방향 홈을 갖는 단순 원통형 가이드 베어링의 유동특성을 CFD를 이용하여 해석하였다. Pai와 Hargreaves[3]은 긴 3-축방향 홈 및 그 이상 복수 축방향 홈을 갖는 단순 원통형 가이드 베어링에 대한 윤활 해석기법 및 해석, 실험 결과를 소개하였다. Gao 외[4]는 단순 긴 원통형 가이드 베어링의 수치해석을 수행하여, 편심률, 회전속도, 직경에 따른 부하용량 결과를 보고하였다. 특히, Lee와 Jang[5]은, 패드 선단 테이퍼의 공학 기술적 유용성을 확인하기 위하여, 주어진 15°의 테이퍼 각도에 대해 일직선 선단 테이퍼-패드(straight leading-edge tapered-pad) 설계를 채용한 4-

Pad×4-Row 수직 원통형 TGB를 대상으로 Reynolds 방정식의 수치해석을 통해 윤활성능 설계해석을 수행하였다. 해석 결과, 원통형 TGB의 각 패드 선단에 테이퍼 설계를 도입함으로써 저부하/저편심 조건에서 부하값에 관계없이 신뢰성 있는 일정한 큰 평균 직접강성을 얻을 수 있으며, 또한, 테이퍼 높이를 설계변수로 하여 평균 직접강성을 제어할 수 있음이 확인되었다.

본 논문에서는 패드 선단 테이퍼를 갖는 수직 원통형 터빈 가이드 베어링의 성능향상 설계효과를 체계적 및 정량적으로 강화·확립 하고자, 4-Pad×1-Row 수직 원통형 TGB를 대상으로, 주어진 테이퍼 높이에 대해, 테이퍼 각도와 테이퍼 길이의 영향을 상세히 연구하고자 한다.

2. 해석모델 및 기본해석

윤활성능 설계해석 대상 패드 선단 테이퍼를 갖는 4-Pad×1-Row 수직 원통형 TGB의 설계해석 데이터가 Table 1에 정리되어 있다. 패드 선단 테이퍼 설계의 베어링 윤활성능에 대한 영향은, 주어진 테이퍼 높이에 대해, 테이퍼 각도 비와 테이퍼 길이 비에 의해 분석된다. 테이퍼 각도 비는 패드 각도에 대한 테이퍼 각도의 비 그리고 테이퍼 길이 비는 패드 길이에 대한 테이퍼 길이의 비다. 여기서, 테이퍼 길이 비=1.0은 일직선 (straight) 테이퍼를 그리고 테이퍼 길이 비가 1.0보다 작은 경우는 측면 벽을 갖는 테이퍼(side-walled taper)

Table 1. Design analysis data of 4-Pad×1-Row cylindrical TGBs with pad leading-edge tapers

Bearing type	4-Pad×1-Row cylindrical turbine guide bearing with pad leading-edge tapers
Pad leading-edge taper	Straight or side-walled
Pad diameter	380 mm
Pad length	160 mm
Diametral clearance	0.48 mm
Pad angle	70°
Taper angle ratio	0.1 ~ 0.9
Taper length ratio	0.6 ~ 1.0
Taper height	0.4, 0.8 mm
Oil type	ISO VG 46
Rotating speed	514 rpm

를 나타낸다. 따라서, 70°의 패드 각도에 대해, 테이퍼 각도 비=0.2는 테이퍼 각도=14°를 나타낸다. 베어링의 윤활성능 해석에는 Reynolds 방정식의 수치해석에 기반한 상용 S/W인 ARMD가 적용되었다.

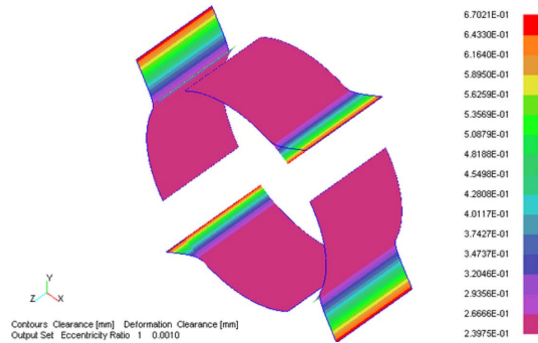
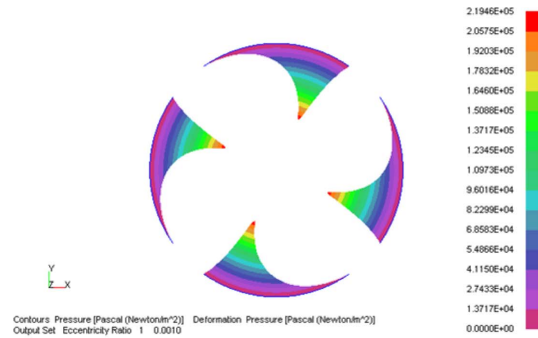
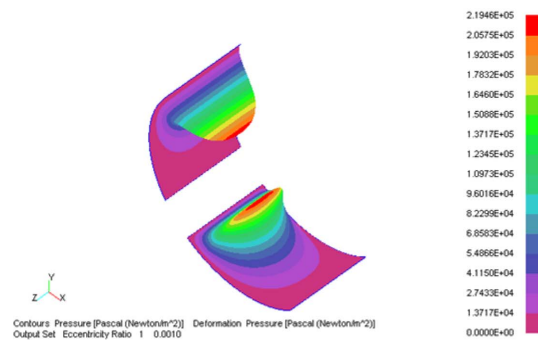


Fig. 5. A clearance distribution model of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.2 and a taper length ratio=1.0 at a taper height=0.4 mm.



(a)



(b)

Fig. 6. Generated pressure distributions of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.2 and a taper length ratio=1.0 at a taper height=0.4 mm: (a) an axial view and (b) a see-through view of 2 pads.

Fig. 5는, 테이퍼 높이=0.4 mm에서, 테이퍼 각도 비=0.2 그리고 테이퍼 길이 비=1.0을 갖는 4-Pad×1-Row 원통형 TGB의 윤활성능 수치해석을 위해 생성된 전체 베어링의 기하형상에 걸친 베어링 틈새 분포 모델을 나타낸다. 그림에서 패드 선단의 테이퍼 부가 큰 틈새 분포로 나타나 있다. 25 N의 저부하 조건(이때, 계산된 편심률은 eccentricity ratio=0.001이며, 실제적으로 무부하 조건에 해당)에서 원통형 TGB 내에 생성된 압력 분포가 Fig. 6에 보여진다. Fig. 6(a)로부터 전체 4-패드에 걸쳐 압력이 회전 대칭으로 거의 동일한 압력분포를 가지며, Fig. 6(b)로부터 압력의 피크부가 패드의 선단 쪽에서 발생하는 것이 관찰된다.

Fig. 7은, 테이퍼 높이=0.4 mm에서, 테이퍼 각도 비=0.8 그리고 테이퍼 길이 비=1.0을 갖는 4-Pad×1-Row 원통형 TGB의 베어링 틈새 분포 모델을 보여준다. 그림의 틈새 분포 모델로부터 테이퍼 부가 원주를 따라 크게 확장된 것이 관찰된다. 이때 25 N의 저부하에서

TGB 내에 생성된 압력분포가 Fig. 8에 보여지며, 생성 압력의 피크 부가 후단(trailing-edge) 쪽으로 이동한 것이 관찰된다.

한편, Fig. 9는, 테이퍼 높이=0.4 mm에서, 테이퍼 각도 비=0.2 그리고 테이퍼 길이 비=0.6(side-walled taper)를 갖는 4-Pad×1-Row 원통형 TGB의 베어링 틈새 분포 모델을 보여준다. 그림의 틈새 분포 모델로부터 측면 벽(side-walls)의 영향으로 테이퍼 길이가 패드 (폭) 길이를 따라 크게 축소된 것이 관찰된다. 이때 25 N의 저부하에서 TGB 내에 생성된 압력분포가 Fig. 10에 보여지며, 패드 선단에서 길이 방향의 피크 압력 발생 부가 Fig. 6(b) 대비 축소된 것이 관찰된다.

3. 해석결과 및 토론

3-1. 테이퍼 각도 비의 영향

25 N의 저부하와 테이퍼 길이 비=1.0에서, 테이퍼 각

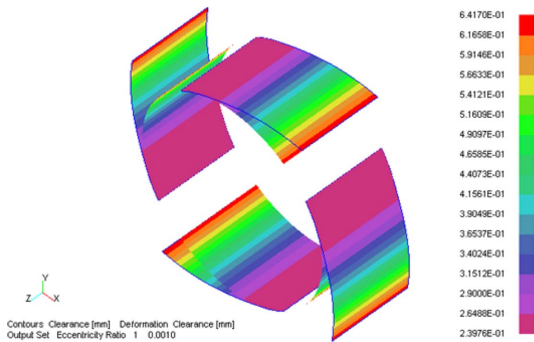


Fig. 7. A clearance distribution model of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.8 and a taper length ratio=1.0 at a taper height=0.4 mm.

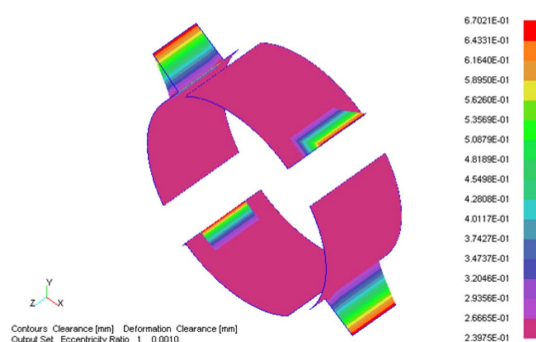


Fig. 9. A clearance distribution model of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.2 and a taper length ratio=0.6 at a taper height=0.4 mm.

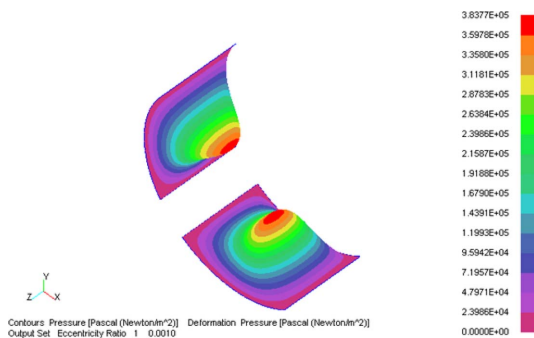


Fig. 8. Generated pressure distribution of 2 pads of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.8 and a taper length ratio=1.0 at a taper height=0.4 mm.

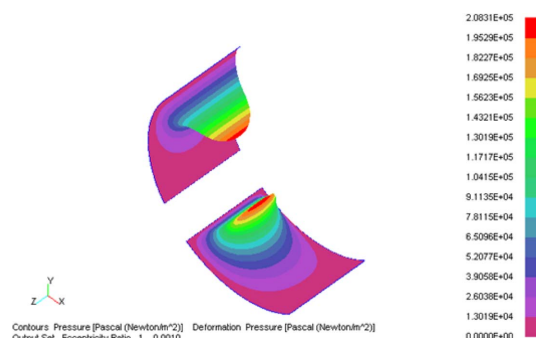


Fig. 10. Generated pressure distribution of 2 pads of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB with a taper angle ratio=0.2 and a taper length ratio=0.6 at a taper height=0.4 mm.

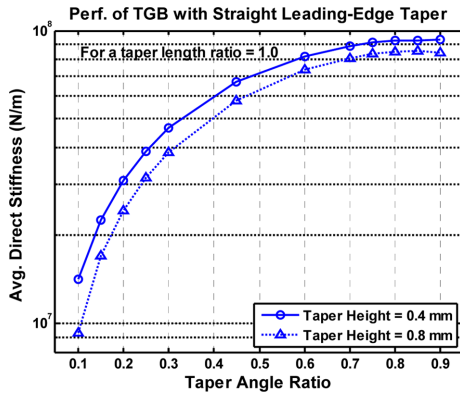


Fig. 11. Average direct stiffness vs. taper angle ratio of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at a load of 25 N and a taper length ratio=1.0, for taper heights=0.4 and 0.8 mm.

도 비에 따른 평균 직접강성(average direct stiffness)의 해석결과가, 테이퍼 높이=0.4, 0.8 mm에 대해, Fig. 11에 보여진다. 평균 직접강성은, 테이퍼 높이=0.4, 0.8 mm 모두에 대해, 테이퍼 각도 비가 0.1로부터 증가함에 따라 급격히 증가하기 시작하여 0.8 이상에서 최대값에 수렴하는 특성을 보인다.

3-2. 테이퍼 길이 비의 영향

25 N의 저부하와 테이퍼 각도 비=0.2에서, 테이퍼 길이 비에 따른 평균 직접강성의 해석결과가, 테이퍼 높이=0.4, 0.8 mm에 대해, Fig. 12에 보여진다. 평균 직접강성은, 테이퍼 높이=0.4, 0.8 mm 모두에 대해, 테이퍼 길이 비가 0.6으로부터 증가함에 따라서 완만하게

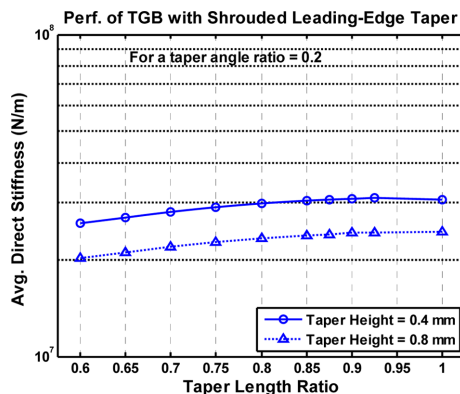


Fig. 12. Average direct stiffness vs. taper length ratio of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at a load of 25 N and a taper angle ratio=0.2, for taper heights=0.4 and 0.8 mm.

증가하기 시작하여 0.9 이상에서 최대값에 수렴하는 특성을 보인다.

3-3. 테이퍼 설계 최적화

3.1과 3.2의 테이퍼 각도와 길이 비의 평균 직접강성에 대한 각각의 영향분석으로부터, 테이퍼 각도와 길이를 조합한 최적 테이퍼 설계는, 테이퍼 가공의 안정성을 고려하여, 테이퍼 각도 비=0.8과 테이퍼 길이 비=0.9로 선정될 수 있다.

이제, 테이퍼 각도와 길이 비의 세가지 다른 설계 조합, 즉, taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9에서, 테이퍼 높이=0.4 mm에 대한, 25 N의 저부하에서부터 7,000 N의 고부하까지의 부하 범위에 따른 4-Pad×1-Row TGB의 편심률, 동력손실(power loss), 위험질량(critical mass[5]), 최대압력(max. pressure), 그

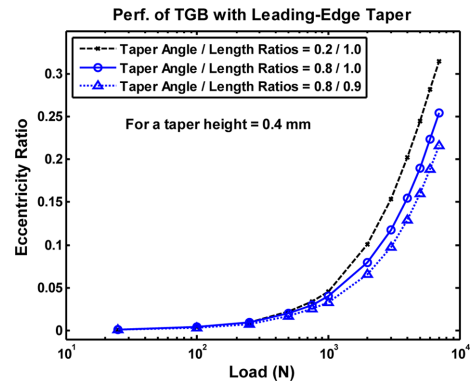


Fig. 13. Eccentricity ratio vs. load performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

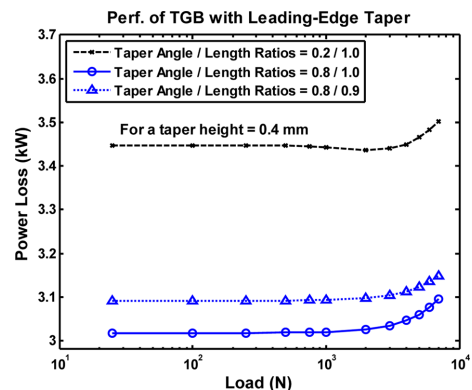


Fig. 14. Power loss vs. load performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

리고 평균 직접강성의 종합 성능해석 결과가 Figs. 13~17에 보여진다.

Fig. 13의 부하 대비 편심률 성능으로부터, 전 부하 구간에 걸쳐 taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9의 선행 순서에서 편심률이 더 큰 것으로 나타났다. 이로써 taper angle/length ratios=0.8/0.9의 테이퍼 설계조합이 가장 큰 부하 용량을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 14의 부하 대비 동력손실 성능으로부터, 전 부하 구간에 걸쳐 taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/0.9, 0.8/1.0의 선행 순서에서 동력손실이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 테이퍼 설계가 가장 최적화되지 못한 taper angle/length ratios=0.2/1.0의 설계조합이 다른 설계조합에 비해, 상대적으로, 가장 현저하게 큰 동력손실을 갖는다.

Fig. 15의 부하 대비 베어링의 동적 안정성을 지시하는 위험질량 성능으로부터, 전 부하 구간에 걸쳐 taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9의 후행 순서에서 위험질량이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 테이퍼 설계가 가장 최적화되지 못한 taper angle/length ratios=0.2/1.0의 설계조합이, 상대적으로, 가장 현저하게 낮은, 즉, 열등한 위험질량을 갖는다.

Fig. 16의 부하 대비 최대 발생압력 성능으로부터, 전 부하 구간에 걸쳐 taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9의 후행 순서에서 최대 발생압력이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 테이퍼 설계가 가장 최적화되지 못한 taper angle/length ratios=0.2/1.0의 설계조합이, 상대적으로, 가장 현저하게 낮은 최대 발생압력을 갖는다.

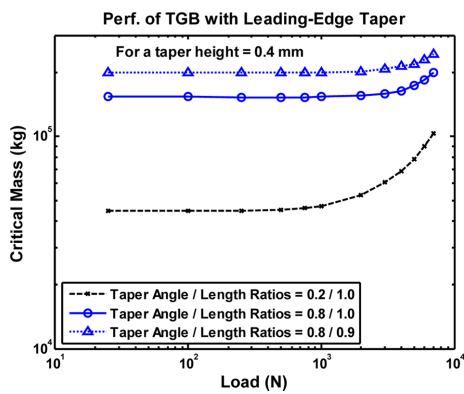


Fig. 15. Critical mass vs. load performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

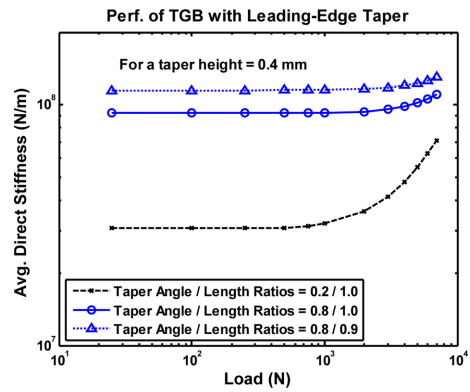


Fig. 17. Average direct stiffness vs. load performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

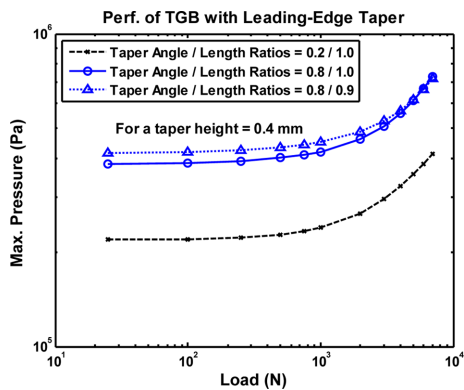


Fig. 16. Max. Pressure vs. load performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

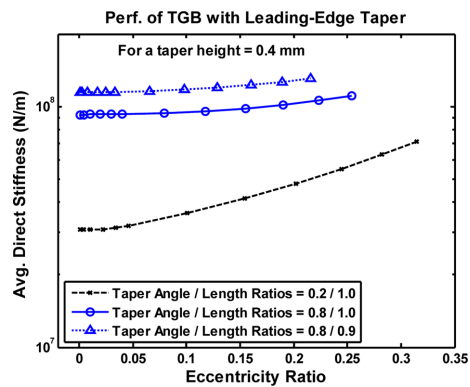


Fig. 18. Average direct stiffness vs. eccentricity ratio performance of 4-Pad×1-Row cylindrical TGB at different combinations of taper angle/length ratios, for a taper height=0.4 mm.

Fig. 17의 부하 대비 평균 직접강성 성능으로 부터, 전 부하 구간에 걸쳐 taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9의 후행 순서에서 평균 직접강성이 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 테이퍼 설계가 가장 최적화 되지 못한 taper angle/length ratios=0.2/1.0의 설계조합이, 상대적으로, 가장 현저하게 낮은 평균 직접강성을 갖는다.

한편, Fig. 18은 편심률에 따른 평균 직접강성 성능을 보인다. 고려된 전 편심률 구간에 걸쳐, 마찬가지로, taper angle/length ratios=0.2/1.0, 0.8/1.0, 0.8/0.9의 후행 순서에서 평균 직접강성이 더 큰 것으로 나타났으며, taper angle/length ratios=0.8/0.9의 테이퍼 설계조합이 평균 직접강성 측면에서 가장 우수하다.

이상의 결과들로부터, 패드 선단 테이퍼를 수력 수직 원통형 TGB의 설계에 도입할 때, 테이퍼의 가공 안정성을 고려하여 선정된 테이퍼 각도 비=0.8과 테이퍼 길이 비=0.9의 테이퍼 설계조합이 원통형 TGB의 종합 유효성을 최적화시키는 것으로 평가된다. 또한, 테이퍼 각도 비가 테이퍼 길이 비 보다 원통형 TGB의 종합 유효성능 최적화에 더 중요한 설계 인자임이 확인된다.

5. 결 론

본 논문에서는 패드 선단 테이퍼를 갖는 수력 수직 원통형 터빈 가이드 베어링의 성능향상 설계효과를 체계적으로 강화·확립하고자, 주어진 테이퍼 높이에 대해, 테이퍼 각도와 테이퍼 길이의 영향을 상세히 연구하였다. 4-Pad×1-Row 수직 원통형 TGB를 대상으로 유효성능 설계해석을 수행한 결과, 테이퍼 각도 비=0.8과 테이퍼 길이 비=0.9 부근에서 원통형 TGB의 종합 유효

활성능이 최대화됨이 밝혀졌다. 또한, 테이퍼 각도 비가 테이퍼 길이 비 보다 원통형 TGB의 종합 유효성능 최적화에 더 중요한 설계 인자임이 확인되었다.

본 논문에서 언급된 패드 선단 테이퍼의 설계 도입과 함께 테이퍼 설계 최적화는 수직 원통형 TGB가 적용되는 수력 수직형 터빈발전기 로터 베어링 시스템의 회전체동역학 특성을 비롯한 TGB의 종합 운전 신뢰성을 향상시키는데 큰 효과가 있는 것으로 평가된다.

References

- [1] A. S. Lee, S.-Y. Jang, S.-Y. Kim, "A Low-Load Performance Improvement Design for Cylindrical Turbine Guide Bearings in Hydro-Power Applications", Proceedings of the 7th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering, ISFMFE 2016, Jeju, Korea, 18-22 October, 2016.
- [2] R. Pai, D. J. Hargreaves, R. Brown, "Modelling of Fluid Flow in a 3-Axial Groove Water Bearing using Computational Fluid Dynamics", Proceedings of the 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide Univ. Adelaide, Australia, 10-14 December 2001, pp. 331-334, 2001.
- [3] R. Pai and D. J. Hargreaves, "Chapter 13 Water Lubricated Bearings", *Green Tribology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, pp. 347-391, 2012.
- [4] G. Gao, Z. Yin, D. Jiang and X. Zhang, "Numerical Analysis of Plain Journal Bearing under Hydrodynamic Lubrication by Water", *Tribology International*, Vol. 75, pp. 31-38, 2014.
- [5] A. S. Lee and S.-Y. Jang, "Low-Load/Low-Eccentricity Performance Improvement Designs for Hydro Power Application of Cylindrical Turbine Guide Bearings - Introduction of Pad Leading-Edge Tapers", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 2, pp. 65-70, 2017.