

고압 다단 펌프 시일의 누설 및 동특성에 관한 연구

°곽현덕*, 이용복*, 김창호*, 이봉주**

Leakage and Dynamic Characteristics of High Pressure Multi-Stage Pump Seals

°Hyun-Duck Kwak*, Yong-Bok Lee*, Chang-Ho Kim* and Bong-Ju Lee**

Key words : Wear Ring, Leakage, Instability, Labyrinth Seal, Damper Seal and Helically Grooved Seal

ABSTRACT

As related to *rotordynamics*, dynamic characteristics of the wear ring seal in high pressure multi-stage pump is calculated in the cases of labyrinth, damper and helically grooved types. The results show that the labyrinth seal type has superior performance in the view point of leakage. However, in terms of *rotordynamics* view point, the damper seal type gains acceptable separate margin in critical speed range, while it has slightly inferior leakage performance compared to labyrinth seal type.

1. 서론

고압 다단 펌프(high pressure multi-stage pump)는 발전소 및 화학 플랜트 등에서 냉각수의 순환 및 보일러의 급수 등의 목적으로 광범위하게 사용된다. 최근에 들어 펌프의 성능이 향상되어 시스템이 고속화, 고압화됨에 따라 회전부의 안정성

문제가 크게 대두되고 있다. 특히, 유체력에 기인하는 wear ring 부의 자려 진동 현상으로 인해 펌프의 운전이 제한되는 사례⁽¹⁾가 보고된 바 있다.

고압 다단 펌프는 다수의 임펠러(impeller)로 구성되며, wearing ring 은 각 임펠러로 유입되는 작동 유체의 밀봉을 위해 사용된다. 일반적으로 펌프에 사용되는 시일 요소는 작동 유체의 누설을 방지하는 것 외에 유체의 감쇠력을 이용하여 시스템에 안정성을 확보하는 목적으로도 사용되며 대형, 고속 펌프일수록 시일 요소의 감쇠는 펌프의 안정적인 운전에 큰 영향을 미치게 된다. 특히, wear

* 한국과학기술연구원 트라이블로지 연구센터

** (주) 한돌 펌프

ring 시일의 경우 선속도가 interstage 시일에 비해 크기 때문에 펌프의 굽힘 모드(bending mode)에 의한 마모량이 가장 크다. 이에 본 논문에서는 양정 2000m 급의 고압 다단펌프에 사용되는 wear ring 시일에 대하여 형상에 따른 누설량(leakage)과 불안정성(instability)의 상관관계를 고찰하고자 한다.

2. 고압 다단 펌프의 구조 및 작동 조건

Fig. 1 은 본 논문에 적용된 고압 다단 펌프의 개략도를 나타내고 있다. 펌프는 총 17 단(stage)으로 구성되며 단과 단 사이에 작동 유체의 누설을 방지하기 위한 interstage 시일과 임펠러에서 압축된 유체의 기밀성을 유지하기 위한 wear ring 시일이 있다. 또한, 반경 방향의 하중지지를 위해 펌프 양단에 2개의 강제 급유식 유체 베어링을 사용하였으며, 임펠러(impeller)에서 유발되는 축 방향 하중지지를 위해서는 밸런스 슬리브(balance sleeve)와 스러스트 베어링(thrust bearing)을 적용하였다. 한편, Table 1 은 펌프의 작동 조건을 나타내고 있다.

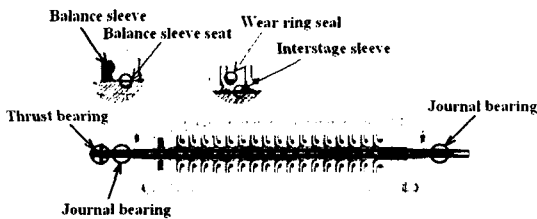


Fig. 1 High pressure multi-stage pump

Table 1 Operating condition of multi-stage pump

| | |
|-----------------------------|------|
| 최고 토출 압력, bar | 226 |
| 최고 흡입 압력, bar | 26 |
| 최대 토출량, m ³ /min | 1.5 |
| 펌프 회전수, RPM | 3580 |
| 단수 | 17 |
| 양정, m | 2000 |

3. 시일의 누설 및 동특성의 해석

일반적으로 시일은 베어링에 비해 큰 틈새를 가지고 있고, 입구와 출구의 압력차가 비교적 크게 존재하기 때문에 흐름이 난류이다. 따라서, 본 논문에서는 시일의 동특성 해석을 위해 Kim^[2]과 Childs^[3]가 제안한 "Hirs' bulk-flow model"^[4]과 "fine-groove theory"^[5]에 기초한 지배방정식과 표면의 형상에 따른 실험 계수를 이용한 방법을 통하여 시일의 누설량 및 동특성 계수를 해석하였다. 시일의 지배 방정식은 축 방향 및 반경 방향 운동량 방정식과 연속 방정식으로 이루어지며 섭동법(perturbation method)을 이용하여 시일의 누설량 및 동특성 계수를 추출하였다.

보통 시일의 누설량 및 동특성 계수는 작동 유체의 조건이나 입구 및 출구 틈새, 시일 양단의 압력 강하량에 따라 변할 뿐 아니라 시일 표면의 형상에 따라라도 민감하게 변화한다. 따라서, 본 논문에서는 wear ring 시일의 표면 형상이 labyrinth, damper, helically grooved (5, 25, 45 degrees)인 경우에 대하여 시일의 특성 및 전체 시스템의 동특성 변화를 관찰하였다. 시일 표면 형상에 따른 실험 계수 및 입구 손실 계수는 Kim이 제안한 값을 사용하였으며, Table 2^[2] 와 같다

Table 2 Inlet-loss coefficients and empirical turbulent coefficients

| Seals | Inlet loss coefficient | m_{sr} | n_{sr} |
|---------------------------|---|-----------------|----------------|
| labyrinth ($\beta = 0$) | 5.2599 | -0.072 | 0.8285 |
| Damper | 0.5 | -0.343(m_s) | 1.961(n_s) |
| Helically grooved | 5.2599-0.1240 β + 0.0007 β^2 | -0.072 | 0.8285 |

(β : helix angle in stator)

발전소나 화학 플랜트에서 사용되는 고압 다단 펌프는 작동 온도가 150 °C 이상의 고온이다. 물의 밀도가 온도에 따라 급격하게 변화하는 것을

감안한다면 상온에서의 시일의 특성과 고온에서의 특성이 크게 다를 것으로 예상되며, 이는 전체 시스템의 동특성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 논문에서는 시일의 특성 해석에 147 °C 에서의 물의 밀도 및 점도 값을 사용하였다. Fig. 2 및 Table 3 는 wear ring 시일과 interstage 시일의 개략도와 시일의 동특성 해석 위해 사용된 입력값을 나타내고 있다. 한편, 압력강하는 wear ring 시일에서 단단압력의 70%, interstage 시일에서 단단압력의 30%, balance sleeve 에서 펌프 전체 압력의 50%가 작용한다고 가정하였다.

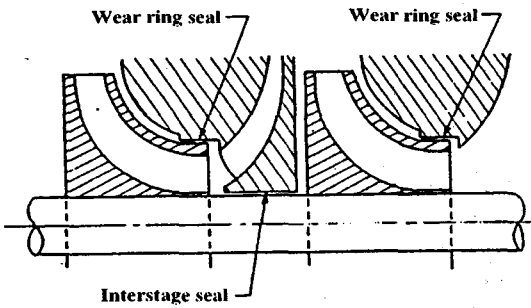


Fig. 2 Wear ring and interstage seals

Table 3 Seal and lubricant properties

| | balance sleeve | wear ring | interstage |
|-----------------------------|----------------|-----------|------------|
| Pressure drop(bar) | 100.00 | 8.23 | 3.53 |
| Seal length(mm) | 86.00 | 14.00 | 22.00 |
| Radius of rotor(mm) | 37.50 | 31.00 | 14.00 |
| Inlet clearance(mm) | 0.175 | 0.200 | 0.240 |
| Outlet clearance(mm) | 0.175 | 0.200 | 0.240 |
| Absolute viscosity(Pa-s) | 0.000188 | | |
| Density(kg/m ³) | 924 | | |

4. 고압 다단 펌프의 임계속도의 해석

본 논문에서는 회전체 진동 해석을 위해 Myclestad^[6] 와 Prohl^[7] 에 의하여 회전축의 횡 진동

에 적용된 이후에 Lund^[8] 등에 의하여 베어링에 의한 영향 등이 첨가된 전달 매트릭스법을 사용하였다. Fig. 3 는 해석에 적용된 모델을 보이고 있다. 총 23개의 축 요소, 20개의 Disk 요소 및 베어링 요소로 모델링 되었으며, Table 4 는 각 disk 요소의 질량 및 극관성 모멘트(polar moment of inertia)를 나타내고 있다.

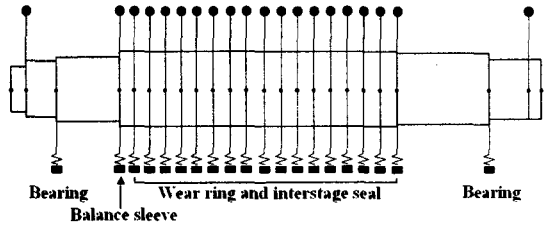


Fig. 3 Modeling of multi-stage pump

Table 4 Mass properties of disks

| | mass(kg) | $I_p(kg-m^2)$ | $I_t(kg-m^2)$ |
|----------------|----------|---------------|---------------|
| 1단 impeller | 4.52 | 0.0168 | 0.0085 |
| 2-17단 impeller | 4.5 | 0.0159 | 0.0079 |
| balance disk | 9.26 | 0.0162 | 0.0080 |
| thrust collar | 2.3 | 0.0018 | 0.0009 |
| coupling | 8.4 | 0.0212 | 0.0108 |

Fig. 3 과 같이 모델 링 된 로터-베어링 계는 회전축의 축계 행렬(shaft matrix)과 베어링 성분이 포함된 질량 행렬(mass matrix)로 구분되며, Fig. 4 로부터 평형 관계식을 유도하여 매트릭스의 형태로 정리하면 각 요소를 연결하는 field matrix 와 point matrix를 얻을 수 있으며, 이에 전달 매트릭스법을 적용하면 계의 전체 전달 매트릭스(overall transfer matrix), $[U]_n$ 를 얻을 수 있으며 식(1)과 같이 표현된다.

$$\{X\}_n^R = [U]_n \{X\}_1^L \quad (1)$$

식(1)에 고유치 문제(eigen-value problem)를 적용하게 되면 전체 시스템의 고유 진동수(natural

frequency) 및 고유 모드(natural mode)를 구할 수 있게 된다. 고유치 문제의 해결은 Murphy^[9]가 제안한 다항식 법을 이용하였으며, 다항식의 해를 구하기 위해서는 bairstow 방법을 사용하였다

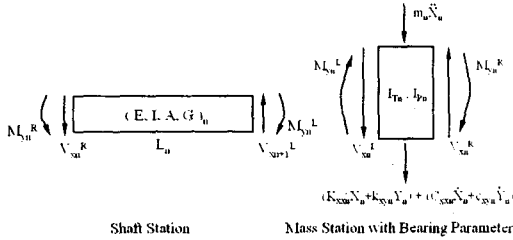


Fig. 4 Force and moment diagram of shaft and concentrated mass

5. 해석 결과

5.1 Wear ring 시일의 형상에 따른 누설량 및 불안정성 계수

일반적으로 펌프에 사용되는 시일에서 누설 특성은 펌프의 효율에 직접적으로 영향을 미치게 된다. Fig. 5 는 wear ring 시일의 형상에 따른 누설량을 회전속도에 따라 도시한 것이다. 회전속도가 증가함에 따라 모든 시일의 누설량이 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보이며, 누설 특성은 labyrinth 시일의 경우가 가장 우수한 것을 알 수 있다. helically grooved 시일의 경우 홈의 회전각(helix angle)이 증가함에 따라 누설량이 급격히 증가하나, 동시에 회전속도에 따른 누설량의 감소폭도 커지는 경향을 보이고 있다. 전체적으로 damper 시일의 경우가 누설량 측면에서는 가장 취약한 것을 알 수 있다.

일반적으로 회전하는 시스템의 안정성을 고려한다면, 휘돌림(whirling)을 유발하는 연성 강성(cross-coupled stiffness, k)를 감소시키고 감쇠(direct damping, C)를 증가시키는 것이 바람직하다.

다. 시일 요소에서의 안정성을 나타내는 지표로는 불안정성 계수(instability parameter, $f = k/Cw$)를 사용하는데, 이는 시일을 불안정화 하는 힘과 안정화하는 힘의 비(ratio)로, 값이 작을수록 시일이 안정하다는 것을 의미한다. 그러나, 펌프와 같이 회전 방향의 휘돌림(forward whirling)이 유발되는 시스템에서는 음의 연성 강성에서 기인하는 음의 불안정성 계수는 시일에서 유발되는 힘이 시스템을 안정화시키는 방향으로 작용한다는 것을 의미한다. 이는 음의 연성 강성이 시스템의 휘돌림을 억제하는 힘으로 작용하기 때문이다.

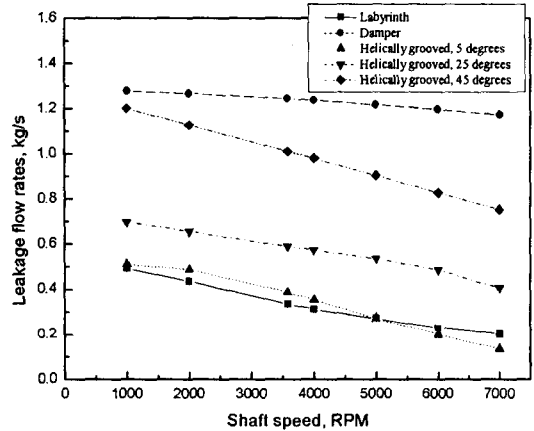


Fig. 5 Leakage mass flow rates versus rotating speed

Table 5 Instability parameter, f

| seal type | instability parameter, $f=k/Cw$ |
|-------------------------------|---------------------------------|
| labyrinth | 0.49 |
| damper | 0.46 |
| helically grooved, 5 degrees | 0.28 |
| helically grooved, 25 degrees | -0.23 |
| helically grooved, 45 degrees | -0.63 |

Table 5 는 무차원화 된 불안정성 계수를 나타내고 있으며, Helically grooved(5 degrees) 시일이 가장 작은 값을 보이고 있다. Helically grooved(25 and 45 degrees) 시일의 경우 불안정성 계수가 음

의 값을 나타내고 있는데, 이는 시일의 연성 강성이 음의 값을 가지기 때문에 일어난 현상으로 앞서 기술한 바와 같이 안정성 측면에서는 helically grooved(45 degrees)형상의 시일이 다른 형상의 시일보다 우수한 것을 알 수 있다.

5.2 고압 다단 펌프의 임계 속도

펌프의 임계 속도와 운전 속도의 분리 여유(separate margin)는 20%이상 확보하는 것이 일반적이므로^[10] 운전 속도가 3580 RPM 인 본 논문에 적용된 펌프의 경우, 임계 속도가 2864 RPM 에서 4296 RPM 사이에 위치하지 않아야 한다. Fig. 6 은 wear ring 시일의 종류에 따른 고압 다단 펌프의 임계 속도(critical speed)를 나타내고 있으며, Table 6 은 1차 임계 속도 및 분리 여유를 정리한 값이다. 모든 형상의 시일에 대해서 2차 임계 속도는 모두 7500 RPM 이상으로 충분한 분리 여유를 확보하고 있으나, 1차 임계 속도의 경우 labyrinth 와 helically grooved(25 degrees) 시일의 경우 각각 4012 와 3690 RPM 으로 분리 여유를 확보하고 있지 못하다. 따라서, 본 연구에 적용된 펌프의 경우 wear ring 시일의 형상이 labyrinth 이거나 helically grooved(25 degrees)일 경우 과도 진동이 발생할 수 있으며 이로 인한 시일의 과도한 마모나 펌프의 성능저하가 일어날 가능성이 있다.

Table 6 Critical speed variation due to wear

| seal type | 1st critical speed(RPM) | separate margin (%) |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------|
| labyrinth | 4012 | 12.06 |
| damper | 5376 | 50.16 |
| helically grooved, 5 degrees | 4416 | 23.35 |
| helically grooved, 25 degrees | 3690 | 3.07 |
| helically grooved, 45 degrees | 5502 | 53.68 |

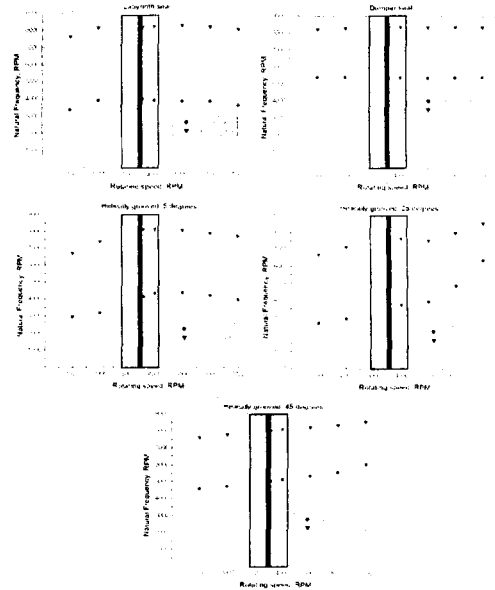


Fig. 6 Critical speed map for each seals

6. 결론

고압 다단 펌프에 사용되는 wear ring 시일의 형상에 따른 시일의 누설, 불안정성 및 전체 펌프 시스템의 동특성의 변화를 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Wear ring 시일의 누설 특성은 labyrinth 형상의 시일이 가장 유리하나, 시일의 불안정성 측면에서는 helically grooved(45 degrees) 형상의 시일이 가장 유리하다.
2. 임계 속도의 해석 결과 damper 와 helically grooved(45 degrees) 형상의 시일이 가장 큰 분리 여유를 확보하고 있으며, labyrinth 나 helically grooved(5 degrees) 형상의 시일을 사용할 경우 적절하지 못한 분리 여유로 인해 과도 진동이 발생할 가능성이 있다.

7. 후기

본 연구는 과학기술부의 “2000년도 연구 확산사업 개발 연구”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

8. 참고 문헌

[1] “다단 터빈 펌프 wear ring 부 유체력에 의한 자러진동”, JSME, v-BASE databook, pp.184-185

[2] Chang-Ho, Kim., D. W. Childs, “Analysis for Rotordynamic Coefficients of Helically-Grooved Turbulent Annular Seals”, ASME, J. of Tribology, Vol. 109, pp. 136-143, Jan., 1987

[3] D. W. Childs, Chang-Ho, Kim, “Analysis and Testing for Rotordynamic Coefficients of Turbulent Annular Seals With Different Directionally-Homogeneous Surface-Roughness Treatment for Rotor and Stator Elements”, ASME, J. of Tribology, Vol. 107, pp. 296-306, July, 1985

[4] Hirs, G. G., “A Bulk-Flow Theory for Turbulent Film Flow”, ASME J. of Lubrication Technology, pp. 137-145, Apr., 1973

[5] Boostsma, J., “Liquid-Lubricated Spiral Groove Bearings”, Ph. D. thesis, Technology University, Delft, Nov., 1975

[6] Myclestad, N.O., 1944 “A New Method for Calculating Natural Modes of Uncoupled Bending Vibration of Airplane Wings and Other Type Beams”, Journal of Aeronautics, Vol. 11, pp. 153-162.

[7] Prohl, M.A., 1945 “A General Method for Calculating Critical Speeds of Flexible Rotors”, ASME Journal of Applied Mechanics, pp. 142-148.

[8] Lund, J.W., 1975, “Stability and Damped Critical Speeds of A Flexible Rotor in Fluid-Film Bearings”, Journal of Engineering for Industry, ASME-73-DET-103

[9] Murphy, B.T. and Vance, J.M., 1982, “An Improved Method for Calculating Critical Speeds and Rotordynamic Stability of Turbomachinery”, Journal of Engineering for Power, ASME-82-GT-294

[10] American Petroleum Institute Standard, revised 1979, section DYNAMICS, API 617