

각이 진 평행 홈 펌프 실의 누설량 특성 해석

최복성[†] · 하태웅[‡]

경원대학교 기계·자동차공학과 대학원

Leakage Characteristic of Angled-Circumferential-Groove-Pump Seal with CFD Analysis

BokSung Choi[†] and TaeWoong Ha[‡]

Graduate School, Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University

(Received January 15, 2009; Revised February 24, 2009; Accepted February 28, 2009)

Abstract – In order to improve leakage characteristic, angled-circumferential-groove pump seal is suggested. CFD analysis using FLUENT has been performed to predict leakage and determine an optimum slanted-groove angle α which yields the best leakage reduction. The optimum value of α ranges from 45° to 60° and depends on the pressure difference of seal and number of grooves for the same groove geometry. The maximum leakage reduction ratio increases as increasing the pressure difference of angled-circumferential-groove pump seal with the optimum value of α .

Key words – leakage(누설량), angled-circumferential-groove seal(각이 진 평행 홈 실), centrifugal pump(원심펌프), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

실(seal)은 고성능 유체기계의 회전부인 로터(rotor)와 고정부인 하우징(stator) 사이의 틈새를 이루는 기계요소로 비압축성 작동유를 사용하는 원심 펌프의 경우 임펠러 입구부에 위치한 마모 실(wearing seal), 다단 펌프인 경우 단과 단 사이에 위치하는 중간 단 실(inter-stage seal), 마지막 단 임펠러의 출구부에 위치하는 밸런스 피스톤(balance piston)등이 있다. 실의 주된 기능은 임펠러의 회전에 의해 압력이 높아진 작동유가 역류하거나 외부로 누출되는 것을 최소화하여 유체기계의 효율을 향상시키는 것과 실의 틈새에서 발달되는 유체력에 의한 회전축계의 불안정 진동을 저감하도록 하는데 있다.

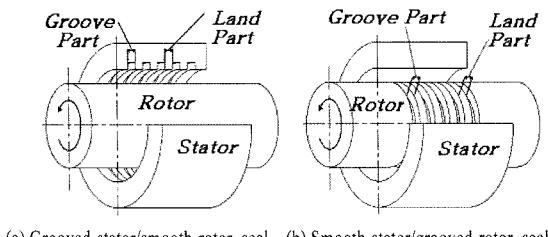
실을 통한 누출 유량을 최소화하기 위해서는 실 틈새를 작게 하면 되나 로터의 진동에 의해 한계가 있어

실을 통한 작동유의 유로를 미로화하여 흐름저항을 증가시키는 방향으로 설계되고 있다. Fig. 1은 고성능 펌프에 일반적으로 사용되고 있는 평행 홈 실(groove seal)을 보여주고 있다. 실 틈새의 유로를 미로가 되도록 하우징(Fig. 1(a))이나 로터 면(Fig. 1(b))에 홈을 원주 방향으로 평행하게 형성한 것으로 홈 형상인 홈의 깊이(B), 홈의 너비(L_g)와 랜드 부의 너비(L_l) 및 홈의 수에 따라 우수한 밀봉 특성을 보이고 있다. 또한 홈의 펌프작용에 의해 누설유량을 최소화하도록 홈을 축 방향에 대하여 비틀림 각(β)을 갖도록 형성한 Fig. 2와 같은 나선 홈 펌프 실이 사용되기도 한다.

본 연구에서는 평행 홈 실의 누설량을 저감시키고자 Fig. 3과 같이 홈을 작동유체의 흐름방향에 대하여 일정각도(α) 만큼 기울여 설계할 경우에 대한 누설량 특성을 해석하고 최적한 기울기 각을 제시하고자 한다. 작동유체가 압축성 가스인 가스터빈의 경우에 일반적으로 사용되고 있는 래버린스 실에서 누설량을 줄이기 위한 하나의 설계 방안으로 래버린스 이를 작동유체의 흐름

[†]주저자 · 책임 저자 : becks82@kyungwon.ac.kr

[‡]교신 저자 : twha@kyungwon.ac.kr



(a) Grooved-stator/smooth-rotor seal (b) Smooth-stator/grooved-rotor seal

Fig. 1. Circumferential-groove seals.

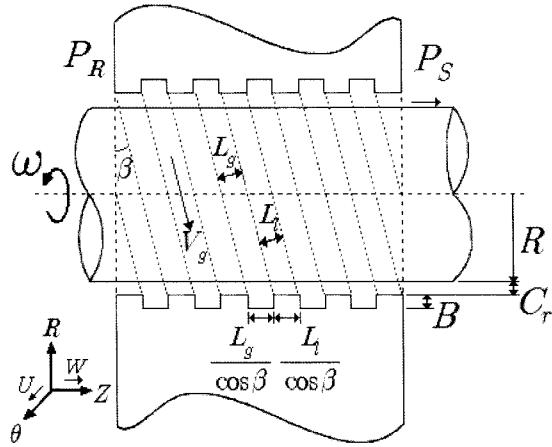


Fig. 2. Spiral-groove seal[10].

방향에 대하여 $40\sim50^\circ$ 정도 기울인 각이 진 래버린스 실(angled labyrinth seal)이 실제 사용되고 있어 고성능 펌프에 사용되는 평행 흄 실의 경우도 흄의 기울기에 따라서 누설량 저감 효과를 얻을 수 있을 것이라는 점이 본 연구의 동기라 할 수 있다.

흄 실의 누설량 및 유체력 해석을 위한 이론적 연구는 Black and Cochran[1]에 의해 처음 시도된 이후 많은 이론 및 실험적 연구 결과[2-10]가 발표되었다. 주로 bulk-flow 모델에 기초한 해석법으로 Iwatsubo and Sheng[5]은 랜드(land)부와 흄(groove)부 각각에 제어체적을 설정한 two-control-volume 해석 방법과 실험결과를 발표했으며, Florjancic[8]과 Marquette and Childs[9]는 랜드 부와 흄 부를 형상 또는 유선에 따라 주 흄 부와 와류(cavity) 부로 나누어 각각 제어체적을 설정하는 three-control-volume 해석방법을 개발하여 흄 실을 통한 누설량과 동특성계수의 예측에 많은 진전을 보였다. Ha and Lee[11]는 Marquette and Childs의 three-control-volume 해석방법을 사용하여 평행 흄 실의 해석 코드를 개발하고 Iwatsubo

and Sheng의 실험결과와 Marquette and Childs의 해석 결과와의 비교를 통하여 개선됨을 보인 바 있다. 최근에는 흄 실의 누설량 예측에 상용 CFD 패키지를 사용한 연구 결과가 발표되고 있다. 누설량을 저감시키기 위해 비접촉식 실의 형상이 복잡해지면서 bulk-flow 모델에 기초한 해석법에 어려움이 있고 그 해석 결과의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있어 단순화 가정을 하지 않고 난류 모델링을 사용한 완전한 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 CFD 해석법의 적용이 컴퓨터 환경의 발달로 활발해지고 있다. 하[12]는 평행 흄 실의 누설량 예측에 FLUENT를 사용한 2D CFD 해석법을 제시하고 기존의 bulk-flow 모델에 기초한 해석법 및 실험결과와 비교를 통하여 CFD 해석법의 활용 가능성을 검증하였다. 또한, 하[13]는 흄 부에서 주 흄부의 유선이 흄 부로 파고드는 유선 분리각(penetration angle)을 CFD 해석을 통해 결정하고, three-control-volume 해석법에 기초한 Ha and Lee[11]의 해석코드에 적용하여 개선된 평행 흄 실의 누설량 및 로터 다이나믹 특성계수(동특성계수) 예측 결과를 발표하였다.

본 연구에서 제시된 각이 진 평행 흄 실의 누설량 해석을 위해서 상용 CFD 해석 소프트웨어인 FLUENT를 사용한 해석법을 제시하고 누설량 저감을 위한 최적한 기울기 각을 흄의 형상 및 운전조건에 대하여 분석하고자 한다.

2. CFD를 사용한 각이 진 평행 흄 실의 누설량 해석

Fig. 3에 나타낸 각이 진 평행 흄 실의 누설 특성을 해석하기 위해서는 주어진 실의 입구(P_R)/출구(P_S)압력 조건에 따른 각이 진 흄 실 내부의 유동장을 정확히 해석해야 되는데 흄이 기울기 각 α 를 갖고 있어 기존의 주된 실 해석 방법인 bulk-flow 모델을 사용하는데는 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 최근 컴퓨터 환경의 급속한 발달로 보편화되고 실 해석의 유용성이 검증된[12] FLUENT를 이용한 2D CFD 해석법을 사용하고자 한다.

Fig. 4는 1개의 흄을 갖는 흄 실 형상에 대하여 기울기 각 α 의 정의를 보여주고 있다. 실 입구부로부터 유동 방향으로 기울어 진 각을 $+\alpha$, 유동 방향의 반대 방향으로 기울어 진 각을 $-\alpha$ 로 정의하고 $-60^\circ\sim+60^\circ$ 범위에서 15° 간격으로 α 각에 따른 누설량 특성을 해

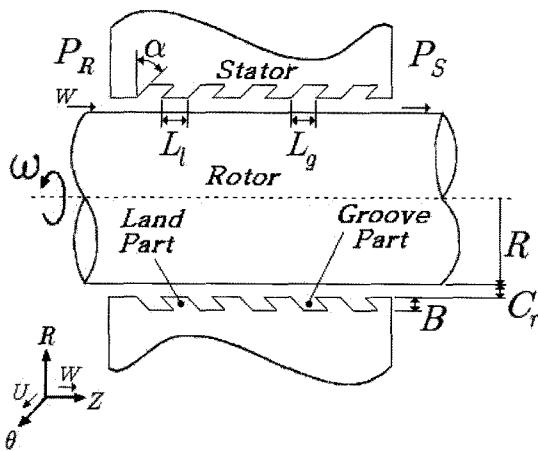
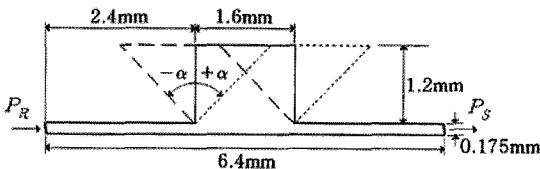


Fig. 3. Angled-circumferential-groove seal.

Fig. 4. Definition of angle α .

석해 보고자 한다. 또한 흄의 수와 운전조건인 실의 입구(P_R)와 출구(P_S)압력차(ΔP)를 파라미터로 누설특성을 해석하고 최소누설특성을 보이는 α 각을 결정하고자 한다.

FLUENT[14]는 비압축성압축성, 2차원·3차원 유동의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT과 solver 및 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다. FLUENT는 SIMPLE과 SIMPLEC 알고리듬에 기초한 완전내연기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법(FVM : Finite Volume Method) 코드로 벡터량과 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid)를 사용한다. 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group)모델 등을 선택적으로 사용할 수 있으며 대류항을 계산하기 위한 격자점간의 보간은 power-law법, 2차 상류차분법, 고차상류차분법인 QUICK법 등을 선택할 수 있다.

기울어진 흄 실의 유동장을 FLUENT solver를 사용하여 해석하기 위해 전처리 장치인 GAMBIT을 사용하여 격자를 생성하였다. 본 연구에서는 기울어진 흄 형상에 대하여 Fig. 5에 나타낸 것처럼 삼각형 격자를

Table 1. Geometry and operating conditions of grooved seal

Pressure difference ($P_R - P_S$)	5.88~69.98 (bar)
Groove length(L_g)	1.6 (mm)
Groove depth(B)	1.2 (mm)
Land part length(L_l)	1.6 (mm)
First land part length	2.4 (mm)
Last land part length	2.4 (mm)
Groove seal total length	6.4~35.2 (mm)
Number of groove	1~10
Groove angle(α)	-60~+60(degree)
Clearance of groove seal(C_r)	0.175 (mm)
Radius of groove seal(R)	35.2 (mm)
Rotor speed	500 (RPM)
Density	998.2 (Kg/m ³)
Absolute viscosity	0.001 (N·s/m ²)

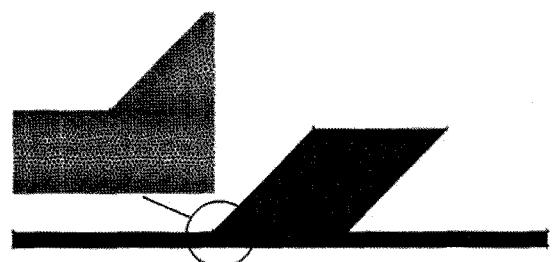


Fig. 5. Mesh generation for angled-groove seal using GAMBIT.

사용하고 벽면 균치와 유동이 분리되는 흄의 상단영역에는 조밀하게 격자를 생성하였다. 격자수에 따른 의존성을 보이지 않도록 충분히 많은 수의 격자를 생성하여, Fig. 4와 같은 형상에 대하여 생성된 격자수는 $\alpha=0^\circ$ 인 경우 77,376개, $\pm 15^\circ$ 인 경우 76,390개, $\pm 30^\circ$ 인 경우 77,432개, $\pm 45^\circ$ 인 경우 79,012개, $\pm 60^\circ$ 인 경우 83,290개이다. FLUENT solver를 사용하여 2D, axis-symmetric, swirl 유동에 대한 비압축성 유동해석을 하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ RNG 모델을 사용하였으며 수렴판정(continuity and velocity)은 잔류항의 총합이 10^{-5} 이하가 되는 시점으로 하였다.

3. 각이진 평행 흄 실의 누설량 특성

Table 1은 Fig. 3에 나타낸 대상 실에 대한 형상 및 운전조건을 보여주고 있다. 작동유체는 물이며 로터의 직경은 70.4 mm, 회전속도는 500 rpm, 실의 길이는 흄의 수가 많아질수록 길어진다. Fig. 4 및 Fig.

Table 2. Results of leakage data for α and number of grooves with $\Delta P = 69.98$ bar, unit : kg/s

	Groove angle α				
	0°	+15°	+30°	+45°	+60°
1 groove	3.3725	3.3628	3.3524	3.3405	3.3379
reduction ratio [%]		-0.29	-0.60	-0.95	-1.03
2 groove	2.9779	2.9647	2.9492	2.9345	2.9342
reduction ratio [%]		-0.44	-0.96	-1.46	-1.47
3 groove	2.7088	2.6959	2.6806	2.6628	2.6615
reduction ratio [%]		-0.48	-1.04	-1.70	-1.75
4 groove	2.4909	2.4775	2.4610	2.4443	2.4450
reduction ratio [%]		-0.54	-1.20	-1.87	-1.84
5 groove	2.3043	2.2894	2.2734	2.2565	2.2603
reduction ratio [%]		-0.65	-1.34	-2.07	-1.91

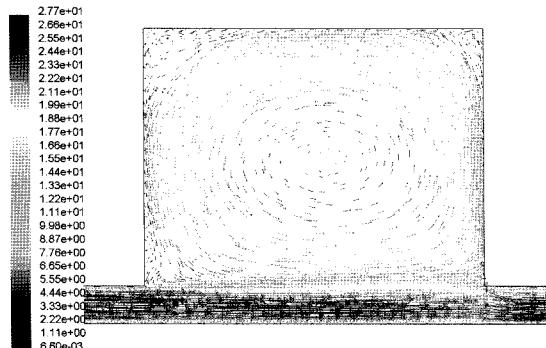


Fig. 6. Velocity vectors of 1 groove seal for $\alpha=0^\circ$ with $\Delta P=5.88$ bar.

5에 나타낸 1개의 흄을 갖는 각이 진 평행 흄 실의 경우에 대하여 실 입구와 출구의 압력차(ΔP)가 5.88 bar인 운전조건에서의 해석결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6은 $\alpha=0^\circ$, Fig. 7은 $\alpha=45^\circ$ 인 경우의 속도장의 해석 결과로, 흄 부 내에 저압부가 형성되어 큰 와류부를 형성하며, 랜드 부의 주류가 흄 부로 파고들어가는 유선분리 현상이 흄 부의 상단에 형성됨을 보이고 있는 점은 유사하나 $\alpha=45^\circ$ 의 경우 유선 분리 각이 더 커서 주류가 흄 부로 파고들어가는 현상이 커져 누설량이 저감됨을 보이고 있다. $\alpha=0^\circ$ 인 경우의 누설량은 0.9094 kg/s이며 $\alpha=45^\circ$ 인 경우의 누

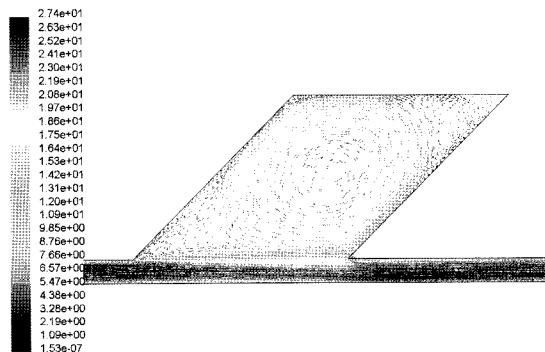


Fig. 7. Velocity vectors of 1 groove seal for $\alpha=45^\circ$ with $\Delta P=5.88$ bar.

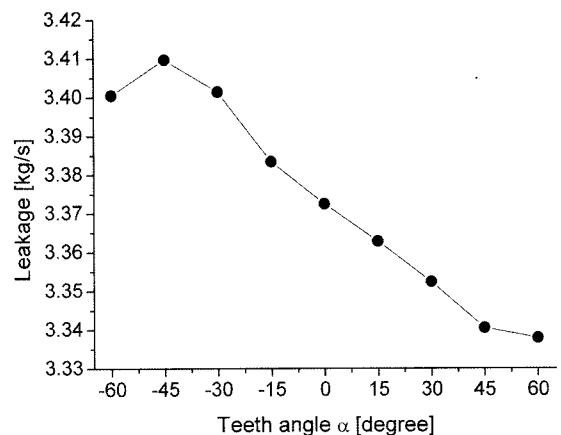


Fig. 8. Leakage vs. α for 1 groove seal with $\Delta P=69.98$ bar.

설량은 0.9047 kg/s로 약 0.5%의 누설량 저감을 보여 흄의 기울기 각 α 가 누설량 저감에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

α 각에 따른 누설량의 영향을 분석하고 최대의 누설량 저감을 일으키는 α 각을 찾기 위해 우선 Fig. 4의 1개 흄을 갖는 흄 실에 대하여 $\alpha=-60^\circ$ 에서 $\alpha=+60^\circ$ 까지 15° 증가시키며 해석하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 $\Delta P=69.98$ bar인 경우로, α 각이 흄방향의 역방향인 -60° 인 경우는 누설량이 $\alpha=0^\circ$ 인 평행 흄 실의 경우보다 증가함을 보이며, α 각이 흄방향인 $+60^\circ$ 인 경우는 누설량이 감소하여 $\alpha=+60^\circ$ 최대의 누설 저감을 보였다. 결국 누설량 저감 효과를 얻기 위해서는 각이 진 흄 실의 기울기 각이 흄방향으로 기울어져야함을 알 수 있으며 $\alpha=0^\circ$ 인 평행 흄 실에 대하여 최대 누설량 저감은 $\alpha=+60^\circ$ 에서 1.03%

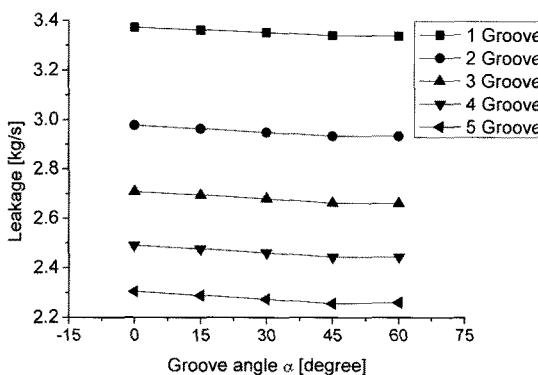


Fig. 9. Leakage vs. α for number of grooves with $\Delta P = 69.98$ bar.

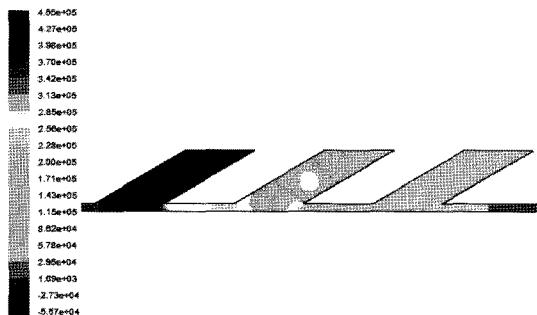


Fig. 10. Pressure distributions of 3 groove seal for $\alpha=60^\circ$ with $\Delta P=5.88$ bar.

의 최대 누설량 저감율을 보였다.

Table 2와 Fig. 9는 각이 진 평행 흄 실의 흄의 수가 증가됨에 따라서 최대의 누설량 저감을 일으키는 기울기 각 α 를 분석하기 위한 해석결과로 Fig. 4의 대상 실 형상에 같은 크기의 흄을 1개~5개까지 증가시키고, 누설량 감소를 야기하는 α 각의 범위(0° ~ 60°)에 대하여 $\Delta P=69.98$ bar의 운전조건으로 해석하였다. Fig. 9는 Table 2의 데이터를 그림으로 나타낸 것으로, 흄의 수가 증가하면 실의 길이가 증가됨으로 흄의 수가 증가될수록 누설량이 감소됨을 보이고 있으며 최대 누설량 저감은 흄의 수가 3개 이하에서는 α 각이 60° 에서, 3개 이상에서는 45° 에서 나타남을 보여 최대 누설량 저감이 일어나는 기울기 각은 흄의 수와 운전조건에 따라 다를 수 있음을 알 수 있다. 또한 최대 누설량 저감율(reduction ratio)은 흄의 수가 증가할수록 커져 흄이 1개인 경우 1.03%로부터, 흄이 2개인 경우 1.47%, 흄이 3개인 경우 1.75%, 흄이 4개인 경우 1.87%, 흄이 5개인 경우 2.07%까지 증가함을 보였다.

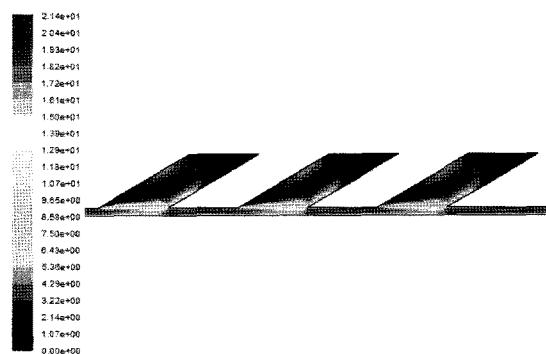


Fig. 11. Velocity contours of 3 groove seal for $\alpha=60^\circ$ with $\Delta P=5.88$ bar.

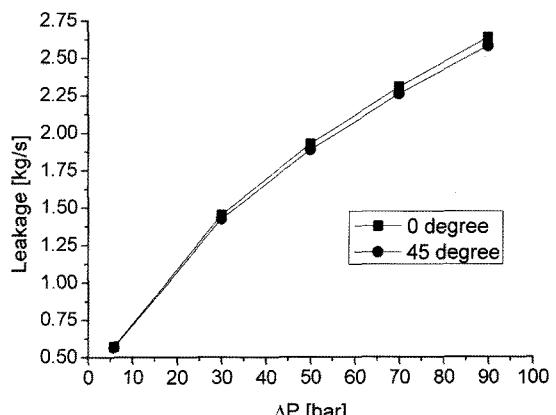


Fig. 12. Maximum leakage deduction ratio vs. ΔP for 5 grooved seal with $\alpha=45^\circ$.

Fig. 10과 Fig. 11은 3개의 흄을 갖는 각이 진 평행 흄 실에 대하여 $\Delta P=5.88$ bar의 운전조건에서 최대 누설량 저감이 일어나는 $\alpha=60^\circ$ 경우의 압력분포와 유동장 해석결과를 보여주고 있다.

Fig. 12는 ΔP 의 증가에 따른 최대 누설량 저감율을 분석하기 위하여 5개의 흄을 갖는 각이 진 흄 실에 대하여 $\alpha=0^\circ$ 경우와 최대의 누설량 저감을 보이는 $\alpha=45^\circ$ 인 경우에 대하여 $\Delta P=5.88$ bar로부터 $\Delta P=89.99$ bar까지 증가시켜 해석한 결과이다. ΔP 가 증가함에 따라서 누설량은 증가함을 보이며 $\alpha=0^\circ$ 인 경우의 누설량에 대한 최대 누설량 저감율은 ΔP 가 증가함에 따라서 증가하여 $\Delta P=89.99$ bar에서 2.18%의 저감율을 보이고 있다. 각이 진 평행 흄 실로부터 얻을 수 있는 누설량 저감율은 ΔP 가 작은 경우에는 미소하며, ΔP 가 큰 고성능의 펌프 경우에는 비교적 큰 효율증대 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

고성능 원심 펌프의 비접촉식 환상 실에 누설량 저감 효과가 큰 평행 흠 실이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 더 큰 누설량 저감 효과를 얻기 위한 방법으로 각이 진 평행 흠 실을 제안하고 누설량에 대하여 FLUENT를 사용한 CFD 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 흠의 기울기 각 α 는 누설량에 중요한 요소로 α 각이 1) 흠방향의 역방향인 -각인 경우는 누설량이 $\alpha=0^\circ$ 인 평행 흠 실의 경우보다 증가함을 보이며, α 각이 흠방향인 +각인 경우는 누설량이 감소함을 보였다.

2) 최대 누설량 저감을 일으키는 기울기 각 α 는 같은 흠 형상에 대하여 흠의 수와 운전조건인 ΔP 에 따라서 다름을 보였으며, $\Delta P=69.98\text{bar}$ 인 경우 흠의 수가 3개 이하에서는 α 각이 60° 에서, 3개 이상에서는 45° 에서 나타남을 보였다. 또한 최대 누설량 저감율은 흠의 수가 증가할수록 커져 흠이 5개인 경우 2.07%까지 증가함을 보였다.

3) 동일한 흠 형상 실에 대하여 ΔP 가 증가함에 따라서 각이 진 평행 흠 실의 최대 누설량 저감율은 증가함을 보여 ΔP 가 큰 고성능의 펌프 경우에는 2.0% 이상의 비교적 큰 효율증대 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4) 각이 진 평행 흠 실은 가공이 어려운 단점이 있지만 고성능 펌프에 적용할 경우 무시할 수 없는 정도의 효율증대 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 흠 실의 형상과 운전조건에 따라 본 연구에서 제시한 CFD해석 방법으로 최적의 기울기 각 α 와 누설량을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- Black, H. F. and Cochran, E. A., 1973, "Leakage and Hybrid Bearing Properties of Serrated Seals in Centrifugal Pumps", presented at the 6th International Conference on Fluid Sealing, Munich, Germany, G5-61 - G5-70.
- Childs, D. W. and Kim, C. H., "Testing for Rotordynamic Coefficients and Leakage : Circumferentially-Grooved Turbulent Annular Seals", in Proceedings of the Second IFTOMM International Conference on Rotordynamics, Tokyo, Japan, pp. 609-618, 1986.
- Nordmann, R., Dietzen, F. J., Janson, W., Frei, A. and Florjancic, S., "Rotordynamic Coefficients and Leakage Flow of Parallel Grooved Seals and Smooth Seals", Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbomachinery, NASA CP No. 2338, proceedings of a workshop held at Texas A&M University, pp. 129-153, 1986.
- Kim, C. H. and Childs, D. W., "Analysis for Rotordynamic Coefficients of Helically-Grooved Turbulent Annular Seals", ASME Journal of Tribology, Vol. 109(1), pp. 136-143, 1987.
- Iwatsubo, T. and Sheng, B., "Evaluation of Dynamic Characteristics of Parallel Grooved Seals by Theory and Experiment", in Proceedings of the Third IFTOMM International Conference on Rotordynamics, Lyon, France, pp. 313-318, 1990.
- Iwatsubo, T., Sheng, B. and Ono, M. "Experiment of Static and Dynamic Characteristics of Spiral Grooved Seals", Rotordynamic Instability Problems in High-Performance Turbo-machinery, NASA CP No. 3122, proceedings of a workshop held at Texas A&M University, pp. 223-234, 1990.
- Kilgore, J. J. and Childs, D. W., "Rotordynamic Coefficients and Leakage Flow of Circumferentially Grooved Liquid-seals", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 112, pp. 250-256, 1990.
- Florjancic, S., "Annular Seals of High Energy Centrifugal Pumps: A New Theory and Full Scale Measurement of Rotordynamic Coefficients and Hydraulic Friction Factors", Ph.D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1990.
- Marquette, O. R. and Childs D. W., "An Extended Three-Control-Volume Theory for Circumferentially-Grooved Liquid Seals", ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 276-285, 1996.
- 하태웅, 이안성, "흡 펌프 실의 누설 및 로터다이나믹 해석", 유체기계저널, Vol. 6, No. 1, pp. 14-22, 2003.
- Ha, T.W. and Lee, A. S., "A Rotordynamic Analysis of Circumferentially- Grooved Pump Seals Based on a Three-Control- Volume Theory", KSME International Journal, Vol. 14, No. 3, pp. 261-271, 2000.
- 하태웅, "CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설량 예측", 유체기계저널, Vol. 9, No. 3, pp. 14-21, 2006.
- 하태웅, "CFD를 사용한 평행 흠 펌프 시일의 해석 개선", 윤활학회지, Vol. 24, No. 6, pp. 291-296, 2008.
- Fluent User's Guide Ver. 6.3.