

CFD를 사용한 스팀터빈용 각이 진 패킹 링 실의 누설량 예측

하태웅[†] · 강정현

경원대학교 기계 · 자동차공학과

Leakage Analysis of Angled-Labyrinth-Packing-Ring Seal for Steam Turbine Using CFD

Tae Woong Ha[†] and Jung Hyun Kang

Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University

(Received July 4, 2009; Revised August 20, 2009; Accepted August 28, 2009)

Abstract – An angled labyrinth seal is used for the diaphragm-packing-ring seal design of steam turbine due to its leakage reduction characteristic. CFD analysis using FLUENT has been performed to predict leakage and determine an optimum slanted angle which yields the best leakage reduction. Results show that the optimum value of slanted angle is -30° independent of number of labyrinth teeth, inlet pressure, and tooth height to pitch ratio. 3D CFD analysis has been performed for predicting leakage of the angled labyrinth seal. Comparing with the result of 2D CFD analysis, 3D CFD analysis shows 1.4% smaller.

Keywords – leakage(누설), angled labyrinth seal(각이 진 래버린스 실), steam turbine(스팀 터빈), diaphragm packing ring seal(다이아프램 패킹 링 실), CFD(전산유체역학), FLUENT

1. 서 론

패킹 링 실(packing ring seal)은 스팀 터빈의 로터 축이 케이싱을 관통하는 부위의 그랜드 패킹(grand packing)과 다이아프램(diaphragm)의 축 관통부에서 스팀의 누설량을 최소화하여 터빈 블레이드(blade)로 최대의 스팀을 통과시켜 회전력을 최대로 얻기 위한 기계요소이다. 발전 터빈의 효율 향상과 에너지 절감에 큰 역할을 하는 기계부품으로 누설량을 줄이기 위한 설계에 많은 노력이 이루어지고 있다. 패킹의 종류로는 래버린스(labyrinth) 패킹, 탄소(carbon) 패킹, 수밀봉(water seal) 패킹이 있으나 주로 사용되고 있는 것은 래버린스 패킹이다.

Fig. 1은 스팀 터빈의 다이아프램 패킹 링 실을 보여 주고 있는데, 래버린스 패킹은 증기의 교축(throttling) 작용을 이용하여 날카로운 이(strip)를 회전부 또는 고

정부에 차례로 배열하여 증기누설 통로에 확대부와 협소부를 만들고 증기가 협소부를 통과할 때 교축되고, 확대부에서 압력이 감소하는 것이 반복되어 누설 증기량을 감소시킨다. 래버린스 패킹의 경우 누설량을 저감시키기 위해 복잡한 형상의 래버린스를 형성하게 되는데 Fig. 2는 대표적인 세가지 형상을 보여주고 있다. 관통 래버린스(see-through or straight labyrinth)는 같은 길이의 이를 배열한 형상으로 가장 단순하며 세형상 중 가장 누설량이 많고, 엇갈린 래버린스(staggered or hi-low labyrinth)는 긴 이와 짧은 이를 조합하여 반복 배열한 형상으로 가장 누설량이 작은 특성이 있다. 관통 래버린스 실의 누설량을 저감시키기 위한 노력으로 이를 일정 각도만큼 기울인 각이 진 래버린스(angled or slanted labyrinth) 실이 사용되고 있는데, 누설량은 엇갈린 래버린스와 관통래버린스의 중간 정도의 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 각이 진 래버린스 실에 대하여 누설량을 최소로 할 수 있는

[†]주저자 · 책임저자 : twha@kyungwon.ac.kr

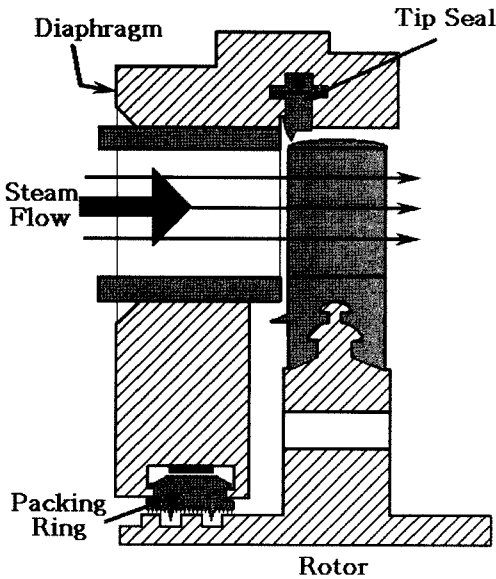


Fig. 1. Diaphragm packing ring seal of steam turbine.

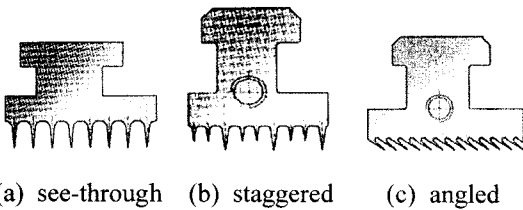


Fig. 2. Labyrinth packing ring seals.

실의 형상 설계를 위한 해석법의 개발을 목표로 한다.

압축성 유체를 사용하는 터보기계에 주로 사용되는 다양한 형상의 래버린스 실의 누설 유량을 예측하기 위한 이론적 해석기술은 윤환 이론에 근거한 Bulk-flow 개념을 사용한 해석방법[1-7]과 수치해석 기법(CFD)을 사용한 실 틈새의 난류유동 해석방법[8-13]이 있다. Bulk-flow model을 사용한 해석방법은 단순화된 모델로 지금까지 래버린스 실의 주된 해석법이었으나, 실의 형상이 복잡해지고, 컴퓨터와 난류해석 기법의 발달로 범용 소프트웨어가 개발되어 CFD 해석법의 활용 가능성이 커지고 있다. 하[11-13]는 Fig. 2의 (a)와 (b)에 나타난 관통 래버린스와 다양한 형상의 엇갈린 래버린스 실의 누설량을 FLUENT를 사용하여 2차원 CFD 해석 방법을 제시하고 그 결과를 발표하였다. 본 연구에서는 기 발표된 래버린스 실의 CFD 해석방법을 확장해서, Fig. 2의 (c)에 나타난 각이진 래버린스 실에 대하여 누설량과 관계되는 운전조건 및 형상조건, 즉 래버린스 잇수(NT), 실 입구압력(Pr), 및 이의 높이

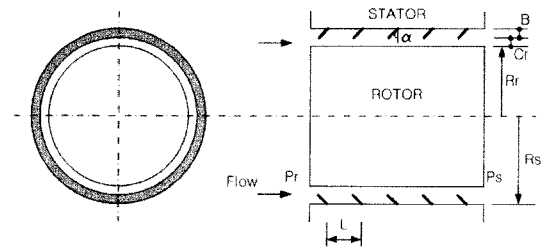


Fig. 3. Geometry of angled labyrinth seal.

와 피치 비(B/L)에 대한 이의 기울기 각(α)에 따른 누설량의 영향을 CFD 해석법을 사용하여 분석해 보고, 누설량을 최대 감소시키는 형상을 제시해 보고자 한다.

2. 각이진 래버린스 실의 2D CFD 해석법

2-1. 각이진 래버린스 실의 형상 및 운전조건

Fig. 3은 본 연구의 대상인 각이진 래버린스 실의 형상을 보여주고 있다. 5개의 래버린스 이가 기울기 각 α 만큼 실 입구(고압부, Pr) 방향으로 기울어져 있으며, 래버린스 이의 피치는 L, 이 높이는 B, 실 틈새 깊이는 Cr, 로터 반경은 Rr, 스테이터 반경은 Rs, 실 입구 압력은 Pr, 실 출구 압력은 Ps로 나타내었다. 각이진 래버린스 이의 형상은 Fig. 2에 나타난 것처럼 끝이 뾰족하고 이 뿌리 부가 상대적으로 두꺼운 사다리꼴 모양을 하고 있다. 그러나 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 이의 두께(t)가 일정한 사각형 형상으로 가정하였다. 기울기 각 α 는 실 입구방향을 (-)각, 실 출구방향을 (+)각으로 정의하므로 Fig. 3은 $-\alpha$ 의 기울기를 갖는 각이진 래버린스 실의 형상을 보이고 있다.

Table 1은 각이진 래버린스 실의 형상 및 운전조건을 나타내고 있다. 각이진 래버린스 실이 스팀 터빈의 패킹 링에 주로 활용되고 있으나 해석의 편의를 위해 작동 유체를 공기로 가정하고 해석하였다. Table 1의 운전조건은 하[11]의 관통 래버린스 실($\alpha=0$ 인 경우)의 해석 조건과 동일하다. 각이진 래버린스 실에서 최소 누설량을 주는 기울기 각 α 에 영향을 줄 수 있는 요소로는 래버린스 이의 수(NT), L, B, 입구압력(Pr) 및 압력차 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 1에서 NT=3~7, L=1.45~4.35 mm, B=2.54~3.81 mm, Pr=7.09~28.09 bar의 범위로 해석을 수행하고 영향을 분석하였다.

2-2. FLUENT를 사용한 2D CFD 해석

FLUENT[14]는 비압축성압축성, 2차원3차원 유동의

Table 1. Geometry and operating conditions of angled labyrinth seal[11]

Angled labyrinth seal geometry	
Radius of seal stator(Rs)	75.6(mm)
Radius of seal rotor(Rr)	68.3(mm)
Tooth height(B)	3.175(mm)
Tooth pitch(L)	2.175(mm)
Tooth tip width(t)	0.152(mm)
Clearance of seal(Cr)	0.127(mm)
Number of labyrinth teeth(NT)	5
Operating condition	
Reservoir pressure(Pr)	7.09 bar
Sump pressure(Ps)	1.014 bar
Inlet swirl ratio(Vin/(Rs ω))	0.0
Rotor speed(ω)	20,000(RPM)
Temperature	300(K)
Kinematic viscosity (air) (ν)	0.0000023(m ² /s)

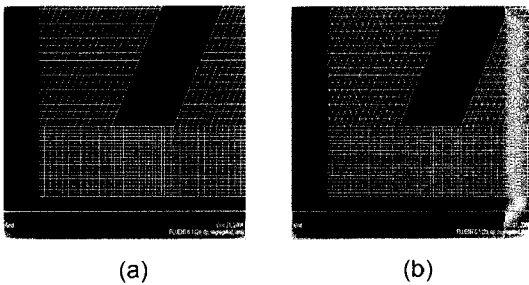


Fig. 4. 2D Grid generation for angled labyrinth seal.

수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT과 solver 및 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다. Fig. 4는 각이 진 래버린스 실의 2차원 해석을 위하여 GAMBIT을 사용한 격자 생성모습을 보여주고 있다. $-30^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$ 에 대하여는 Fig. 4(a)와 같은 사각형 격자를 사용하였으며 그 이상의 기울기 각을 갖는 경우에는 격자의 skewness가 커져 Fig. 4(b)와 같은 삼각형 격자를 혼합하여 사용하였다. 각이 진 래버린스 실 내의 주된 흐름부인 실 틈새 깊이부에는 보다 조밀한 사각형 격자를 생성하였고, Fig. 5에 나타난 것과 같이 격자 수에 따른 수렴성을 검토하여 적절한 격자 수를 선택하였다. Fig. 5는 Fig. 3과 Table 1의 $\alpha = -30^{\circ}$ 인 각이 진 래버린스 실에 대하여 격자 수에 따른 누설량의 수렴성을 보여주고 있는데 격자를 약 290,000개 이상을 사용할 경우 거의 동일한 누설량을 예측하고 있어 290,756개의 격자를 선택하였다. FLUENT solver를 사용하여 이차원, 축대칭, 회전 (swirl) 유동에 대한 압축성 유동해석을 하였으며, 로터

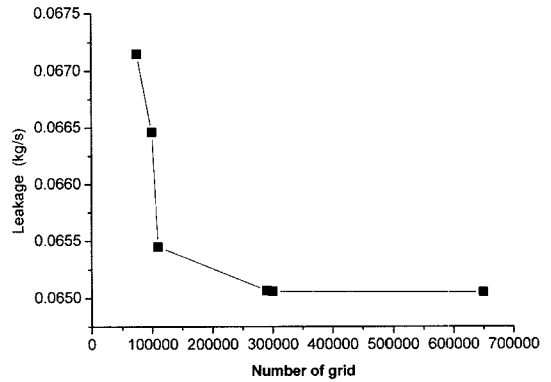


Fig. 5. Leakage vs. number of grid.

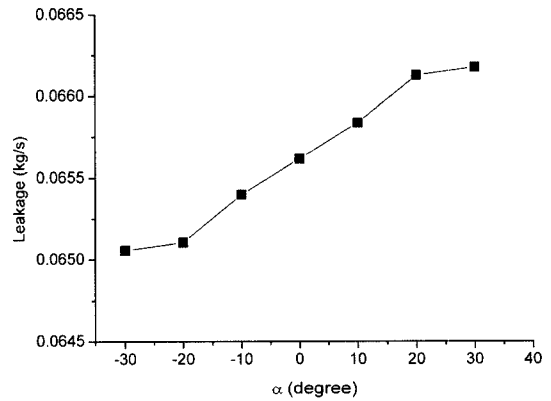


Fig. 6. Leakage vs. α.

의 회전에 따른 유동장의 회전유동을 moving reference frame을 사용하여 정의하였다. 난류모델은 k-ε RNG 모델을 사용하였으며 수렴판정을 위해서 잔류항의 총합이 10^{-5} 이하가 되도록 설정하였고, 누설유량을 모니터링 하여 수렴시점을 판정 하였다.

3. 각이 진 래버린스 실의 CFD 해석결과

3-1. 기울기 각(α)에 따른 누설특성

Fig. 6은 Table 1의 운전조건에서 α에 따른 누설량 특성을 보여주고 있다. Fig. 3에서 정의된 것처럼 (-) 각은 래버린스 이가 실의 입구 방향으로 기울어 진 경우로 실의 출구 방향으로 기울어졌을 때보다 누설량 저감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 $\alpha = -30^{\circ}$ 와 $\alpha = 30^{\circ}$ 경우의 속도 벡터를 나타낸 CFD 해석 결과로 -30° 경우는 이의 기울기 방향이 흐름방향과 역방향을 이룸으로써 로터와 래버린스 이 끝단부가 이루는 주 흐름부에서 래버린스 공동 안

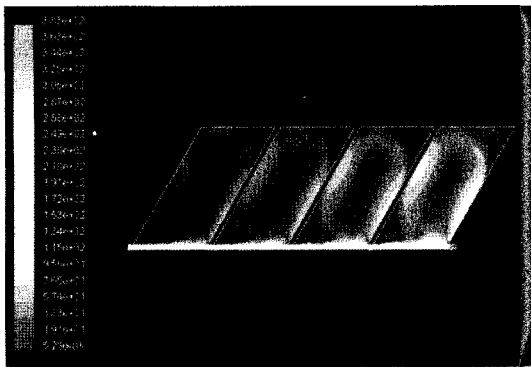


Fig. 7. Velocity field for $\alpha=-30^\circ$.

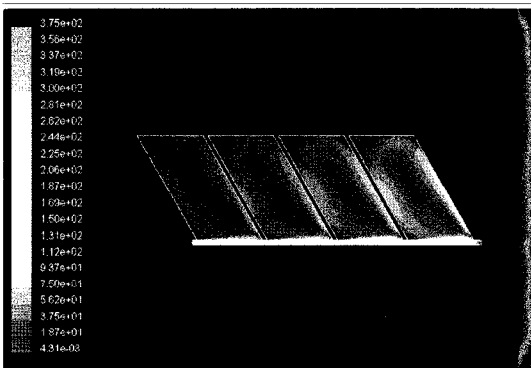


Fig. 8. Velocity field for $\alpha=30^\circ$.

으로 파고드는 흐름성분이 30°인 경우보다 강하게 형성되어 공동 안에서 강한 와류를 형성함으로써 흐름 저항을 증가시켜 누설량이 저감되는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 이후의 연구는 누설량 저감 효과가 있는 형상인 α 각이 (-)인 경우에 한정하여 수행하고자 한다.

3-2. 래버린스 잇수와 기울기 각(α)에 따른 누설 특성

각이진 래버린스 실은 누설량 저감이 목적임으로 최대 누설량 저감을 일으키는 경사각 α 가 설계시 중요한 정보가 된다. Fig. 9는 Table 1의 운전조건에서 래버린스 잇수 NT=3~7에 대하여 $\alpha=0^\circ\sim 50^\circ$ 따른 누설량 특성을 보여주고 있다. NT가 증가할수록 누설량은 감소하며, NT에 관계없이 $\alpha=-30^\circ$ 에서 최소 누설량을 보이고 있다. Fig. 10의 $\alpha=-50^\circ$ 경우의 CFD 해석 결과와 Fig. 8의 $\alpha=-30^\circ$ 경우를 비교해 보면 α 가 30°보다 커질 경우 로터와 래버린스 이 끝단부가 이루는 주 흐름부에서 래버린스 공동 안으로 파고드는 흐름이 공동 안으로 깊이 파고들지 못해 30°인 경우보다 누설량을 더 저감시키지 못하는 것으로 설명할 수 있다.

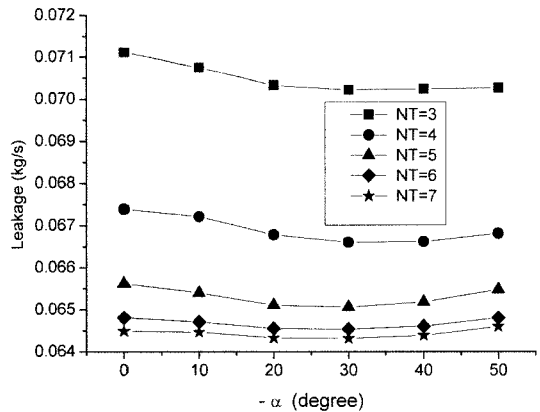


Fig. 9. Leakage vs. α with number of teeth.

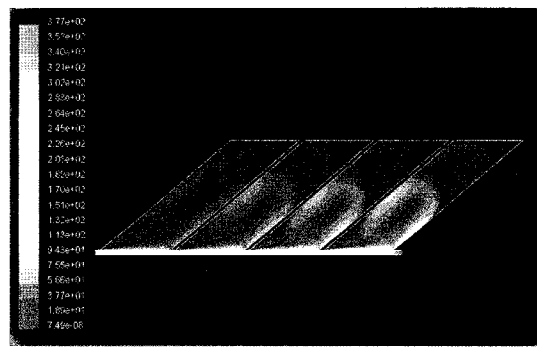


Fig. 10. Velocity field for $\alpha=-50^\circ$.

Table 2. Maximum leakage reduction ratio comparing with see-through seal for number of teeth

NT	α for minimum leakage(degree)	Maximum leakage reduction ratio(%)
3	30	1.26
4	30	1.21
5	30	0.85
6	30	0.41
7	30	0.28

Table 2는 래버린스 잇수에 따른 최소 누설량을 일으키는 α 와 see-through 실($\alpha=0^\circ$)과 비교한 최대 누설량 저감비율을 나타내고 있다. 최대 누설량 저감 비율은 NT=3 일 경우 1.26%이며, NT가 커질수록 저감비율은 낮아짐을 보였다. 최대 누설량 저감 비율이 크지 않은 것으로 나타났으나 이는 운전조건에 따라서 달라질 수 있으며, 이정도도 스팀터빈의 효율 향상에 기여하는 바가 작지 않기 때문에 실제 스팀터빈의 설

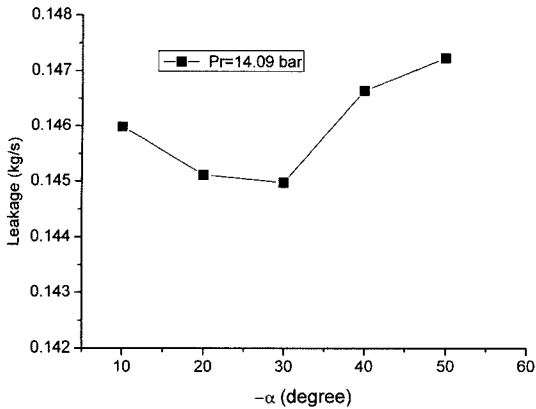


Fig. 11. Leakage vs. α with Pr = 14.09 bar.

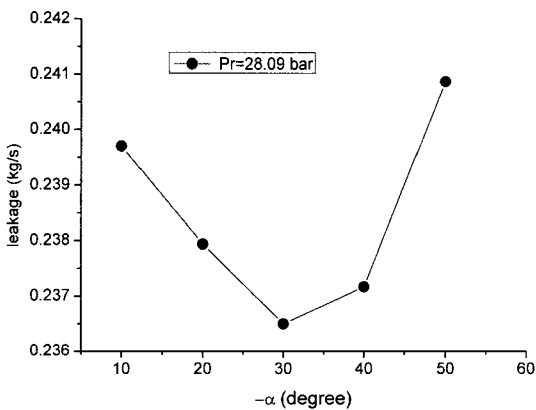


Fig. 12. Leakage vs. α with Pr = 28.09 bar.

계에 적용되고 있다.

3-3. 실 입구압력(Pr)과 기울기 각(α)에 따른 누설 특성

각이 진 래버린스 실의 최대 누설량 저감을 일으키는 경사각 α 는 실의 운전 조건에 따라서 달라질 가능성이 있다. 운전 조건 중 입구압력의 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 Table 1의 운전조건에서 압력차 ($\Delta P = P_r - P_s$)를 6.07 bar로 일정하게 유지하면서 입구압력을 14.09 bar와 28.09 bar로 하여 해석하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 실 입구압력이 각각 14.09 bar와 28.09 bar인 경우로 입구압력이 높아질수록 누설량은 증가하며, 입구 압력과 관계없이 $\alpha = -30^\circ$ 에서 최대의 누설량 저감을 보였다.

3-4. 래버린스 이의 B/L(높이/피치)비와 기울기 각(α)에 따른 누설 특성

각이 진 래버린스 실의 최대 누설량 저감을 일으키는

Table 3. Test cases with B/L

Case	B(mm)	NT	L(mm)	B/L
1	2.540	3	4.35	0.584
2	2.540	4	2.90	0.876
3	2.540	5	2.175	1.168
4	2.540	6	1.74	1.460
5	2.540	7	1.45	1.752
6	3.175	3	4.35	0.730
7	3.175	4	2.90	1.095
8	3.175	5	2.175	1.460
9	3.175	6	1.74	1.825
10	3.175	7	1.45	2.190
11	3.810	3	4.35	0.876
12	3.810	4	2.90	1.314
13	3.810	5	2.175	1.752
14	3.810	6	1.74	2.190
15	3.810	7	1.45	2.628

는 경사각 α 는 래버린스 이의 형상 조건에 따라서 달라질 가능성이 있다. 래버린스 이의 B/L(높이/피치)비의 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 동일한 실 길이(8.7 mm)에 NT=3~7, 이 높이(B)=2.54 mm, 3.175 mm, 및 3.81 mm를 선정하여 CFD 해석을 수행하였다. Table 3은 해석 case를 나타내고 있으며 B/L=0.584~2.628의 범위이다.

Table 3의 15가지 B/L비 경우에 대하여 $\alpha = -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ, -50^\circ$ 경우의 2D CFD 해석 결과 각이 진 래버린스 실의 최대 누설량 저감을 일으키는 경사각 α 는 래버린스 이의 형상 조건인 B/L비에 관계없이 $\alpha = -30^\circ$ 임을 확인하였다.

3-5. 3D 모델링을 통한 2D 해석 결과의 검증

지금까지 컴퓨터 메모리 용량의 한계 및 계산시간을 고려하여 해석의 편의상 2D CFD 해석을 수행하여 각이 진 래버린스 실의 최대 누설량 저감을 일으키는 경사각 α 와 래버린스 이의 형상 및 운전 조건에 따른 경사각 α 에 대한 누설특성 해석을 수행하였다. 본 절에서는 각이 진 래버린스 실에 대한 3D 모델링을 수행하고 2D 해석 결과와 비교하여 2D 해석의 유용성을 보이고자 한다.

Fig. 13은 5개 이를 갖는 $\alpha = 0^\circ$ 와 $\alpha = -30^\circ$ 각이 진 래버린스 실에 대하여 3D 해석을 위한 격자 생성 모

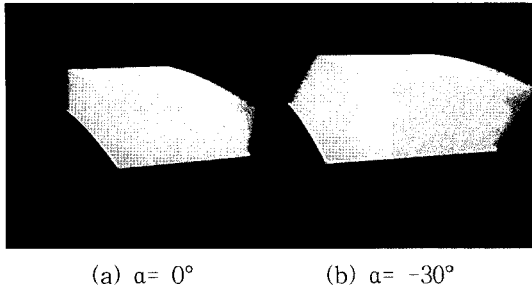


Fig. 13. 3D Grid generation for angled labyrinth seal with $\alpha=0^\circ$ and $\alpha=-30^\circ$.

Table 4. Comparisons of leakage between 2D and 3D analysis

$\alpha(^{\circ})$	2D leakage(kg/s)	3D leakage(kg/s)
0	0.065616	0.064667
-30	0.065057	0.064109

습을 보여주고 있다. 각이진 래버린스 실은 축 대칭을 이루고 있으므로, 컴퓨터 메모리 용량을 고려하여 실의 중심축을 기준으로 10° 부분만을 대상으로 격자를 형성하고, FLUENT의 Periodic Repeats 기능을 사용하여 3D 해석을 수행하였다.

Table 4는 2D와 3D 해석의 누설량 결과를 비교하여 나타내고 있는데, 3D 해석의 경우 2D 해석보다 약 1.4% 정도 누설량을 작게 예측함을 보여 2D 해석으로도 각이진 래버린스 실의 누설량을 충분히 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

스팀터빈의 다이어프램 패킹 링 실에 각이진 래버린스 실이 누설량을 줄여 효율을 증대시키고자 사용되고 있다. 본 연구에서는 이의 기울기 각(α), 운전조건 및 이의 높이와 피치 비(B/L)에 대한 각이진 래버린스 실의 누설량 특성을 CFD 해석법을 사용하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 이의 기울기 각(α)은 누설량에 중요한 요소로 실 입구방향인 (-)각인 경우가 $\alpha=0^\circ$ 인 래버린스 실의 경우보다 누설량이 감소함을 보였고, 그 반대인 실 출구방향인 (+)각인 경우 누설량이 증가함을 보였다.

2) 최대의 누설량 저감율을 주는 기울기 각은 래버린스 잇수($NT=3\sim 7$), 이의 높이와 피치 비($B/L=0.584\sim 2.628$), 및 실 입구압력($Pr=7.06\sim 28.06$ bar)

에 관계없이 $\alpha=-30^\circ$ 일 경우였다.

3) 3D CFD 해석 결과는 2D 해석보다 약 1.4% 정도 누설량을 작게 예측함을 보여 2D 해석으로도 각이진 래버린스 실의 누설량을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

4) 각이진 래버린스 실은 가공이 어려운 단점이 있지만 스팀터빈의 다이어프램 패킹 링 실에 적용할 경우 무시할 수 없는 정도의 효율증대를 얻을 수 있을 것으로 기대되며, 최대의 누설량 저감을 얻기 위해서는 기울기 각 α 를 약 -30° 설계하면 될 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 2009년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

참고문헌

- Iwatsubo, T., "Evaluation of Instability Forces of Labyrinth Seals in Turbines or Compressors", NASA CP 2133 Proceedings of a workshop at Texas A&M University 12-14 May Entitled Rotordynamic Instability Problems in High Performance Turbomachinery, pp. 139-167, 1980.
- Childs, D. W. and Scharrer, J. K., "An Iwatsubo Based Solution for Labyrinth Seals: A Comparison to Experimental Results", *ASME Trans. J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 325-331, 1986.
- Scharrer, J., "A Comparison of Experimental and Theoretical Results for Labyrinth Gas Seals", Ph. D. Dissertation, Texas A&M University, 1987.
- 하태웅, 이안성, "압축기용 래버린스 실의 동특성 해석", 한국소음진동공학회지, Vol. 8, No. 5, pp. 849-855, 1998.
- Ha, T. W., "Rotordynamic Analysis for Stepped-Labyrinth Gas Seal Using Moody's Friction-Factor Model", *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 9, pp. 1079-1089, 2001.
- 하태웅, "엇갈린 래버린스 실의 누설량 및 동특성 해석", *유타학회지*, Vol. 18, No. 1, pp. 24-33, 2002.
- 하태웅, 이용복, 김승중, 김창호, "스팀 터빈용 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 및 동특성 해석", *유타기계저널*, Vol. 7, No. 6, pp. 45-54, 2002.
- Dietzen, F. J. and Nordmann, R., "Calculating Rotordynamic Coefficients of Seals by Finite-Difference Techniques, the 4th Workshop on Rotordynamic Instability Problems in High Performance Turbomachinery, pp. 77-98, 1986.

9. Park, S. Y. and Rhode D., "CFD Solution Allowing Modeling Improvement to the Bulk Flow Rotordynamic Code of Dr. Childs for Grooved Seals", Texas A&M University, TRC-SEAL -6-98, 1998.
10. Moore, J., Palazzolo, A., and Na U. J., "CFD Modeling for Dynamic Coefficients of Labyrinth Seals and Impeller Leakage Paths", Texas A&M University, TRC-SEAL-2-98, 1998.
11. 하태웅, "CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설량 예측", 유체기계저널, Vol. 9, No. 3, pp. 14-21, 2006.
12. 하태웅, "CFD를 사용한 복잡한 형상을 갖는 래버린스 실의 누설량 예측", 윤활학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 66-72, 2006.
13. 하태웅, "누설량 저감을 위한 래버린스 실의 설계 개선 및 해석", 윤활학회지, Vol. 23, No. 2, pp. 43-48, 2007.
14. Fluent User's Guide Ver. 6.2.