

## 3차원 CFD를 사용한 환상 실의 누설량 예측

석희수\* · 하태웅†

경원대학교 기계·자동차공학과

### Prediction of Annular Type Seal Leakage Using 3D CFD

Hee Soo Seok<sup>†</sup> and Tae Woong Ha<sup>\*</sup>

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

(Received February 20, 2009; Revised April 27, 2009; Accepted April 30, 2009)

**Abstract** – Precise leakage prediction for annular type seals of turbomachinery is necessary for enhancing their efficiency and various prediction methods have been developed. As the seal passage is designed intricately, the analysis based on Bulk-flow concept which has been mainly used in predicting seal leakage is limited. In order to improve the seal leakage prediction, full Navier-Stokes Equations with turbulent model derived in the seal flow passage have to be solved. In this study, 3D CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis has been performed for predicting leakage of various non-contact type annular seals using FLUENT. Compared to the results by Bulk-flow model analysis, experiment, and 2D CFD analysis, the result of 3D CFD analysis shows improvement in predicting seal leakage, especially for the parallel grooved pump seal.

**Keywords** – leakage(누설), plain seal(평 실), eccentric plain seal(편심된 평 실), grooved seal(그루브 실), labyrinth seal(래버린스 실), bulk-flow model(벌크흐름 모델), FLUENT

#### 1. 서 론

비접촉식 환상 실(seal)은 임펠러의 회전으로 압력이 상승된 작동유체의 역류나 누설을 제한하는 기계요소이다. 이 비접촉 실의 설계 목표는 실을 통한 누설량을 감소시켜 터보기계의 효율을 높이며, 실을 통한 불안정화 유체력을 감소시켜 터보기계 시스템의 안정성을 향상시키는데 있다. 오늘날의 터보기계들은 고 출력화, 소형화, 고 효율화를 추구함으로써 축의 회전속도는 빨라지고 실의 틈새는 작아지며 실의 형상이 복잡해지고 있다. 이런 이유로 실에 대한 누설 유량 및 회전체 진동 특성에 대한 예측은 터보기계의 효율 및 안정성을 위한 설계에 중요한 요소로 여겨지고 있다.

터보기계에서 효율을 향상시키기 위하여 누설 유량을 최소화하는 것이 필요하다. 이에 따라 실의 틈새 간격을 줄이거나 실의 표면에 홈(groove)을 또는 이

(tooth)를 만들어 넣는 등 유체 흐름에 저항을 증가시키는 다양한 설계가 적용되고 있다. 비압축성 유체를 사용하는 터보펌프에서는 평실(plain seal), 평행 홈 실(grooved seal), 플로팅 링 실(floating ring seal) 등이 주로 사용되고 있으며, 압축성 유체를 사용하는 압축기나 터빈 등에서는 여러 형상의 래버린스 실이 주로 사용되고 있다. 실 누설량 예측을 위한 이론적 해석방법은 윤희이론을 기본으로 한 Bulk-flow model 해석법 [1-5]과 수치해석기법(CFD)을 사용한 해석방법 [6-10]이 있다.

Bulk-flow model을 사용한 해석방법은 단순화된 모델로 실 틈새 방향의 유속과 유동장 내부에서의 점성 마찰 손실을 무시함으로써 계산시간이 짧고 실을 통한 유체가진력을 나타내는 동특성 계수들의 예측도 가능한 장점이 있다. 하지만 실의 형상이 복잡해지면서 Bulk-flow model을 이용한 해석 방법의 적용은 점차 제한적이다. CFD를 사용한 해석 방법은 과거 해석의 어려움과 오랜 계산시간이 걸리는 단점이 있었지만 최근에 와서는 컴퓨터의 발달과 범용 소프트웨어가 개발되어 이

<sup>†</sup>주저자 : shs11@kyungwon.ac.kr

<sup>\*</sup>책임저자 : twha@kyungwon.ac.kr

기법을 통한 해석 활용성이 점점커지고 있다.

기 발표된 CFD를 사용한 실의 누설량 해석[9-10]은 2차원(2D) 해석법으로 본 연구에서는 실 틈새의 유동을 실제 흐름과 가장 근사하게 묘사하기 위하여 CFD 해석 소프트웨어인 FLUENT를 사용한 3차원(3D) 해석을 수행하여 실의 누설량을 예측하고 그 결과를 기존에 발표되었던 Bulk-flow model을 사용한 해석 결과 및 FLUENT를 사용한 2차원 해석결과와 비교 분석해 보고자 한다.

## 2. 3D CFD 해석법

Bulk-flow model 해석법에서는 실의 틈새 방향으로 속도구배가 없는 평균 유속의 흐름을 가정하여 유동장 내부에서의 점성마찰손실은 무시하고 단지 실의 표면 마찰손실만을 고려하여 난류 흐름의 지배방정식을 단순화하였으나 실제 실 틈새 방향의 유동은 속도분포를 이루기 때문에 유동장을 정의하기 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 난류모델을 사용하여 유도된 완전한 지배방정식의 해를 구하여야 한다. 이렇게 유도된 지배방정식은 복잡하며 해를 구하기가 어렵기 때문에 CFD기법을 사용하는데 최근에는 범용 소프트웨어가 개발되어 비교적 쉽게 해를 얻을 수 있어 연구가 활발히 이루어지고 있다.

터보 기계에 사용되는 비접촉식 실은 환상의 작은 틈새를 이루는 구조로 되어 있기 때문에 지금까지는 축대칭 흐름을 가정한 2D 해석을 하였다. 이것은 컴퓨터 용량의 한계 및 계산시간 단축 면에서 매우 유용한 해석방법으로 여겨진다. 그러나 실제 사용되는 비접촉식 실은 축 정렬 어긋남이나 축의 휨 현상에 의해 편심된 상태로 운전되는 것이 일반적이다. 이 경우는 축대칭의 가정이 이루어 질 수 없어 3D 해석을 하여야 정확한 분석이 가능하다. 또한 흡이나 이를 갖는 평행 흡 실 및 래버린스 실의 경우 비교적 큰 공간을 갖는 흡부나 래버린스 내부의 유동이 매우 복잡하므로 3D 해석이 더욱 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 편심을 고려한 평실의 3D CFD 해석을 통한 누설량의 예측 및 펌프용 평행 흡 실과 압축기용 래버린스 실의 누설량에 대한 3D CFD 해석을 수행하고자 한다.

본 연구에 사용된 FLUENT[11]는 SIMPLE과 SIMPLEC 알고리즘에 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-ε 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.

## 3. 3D CFD를 사용한 실의 누설량 해석

### 3-1. 편심 된 평실

실제 사용되는 펌프 및 터보기계들은 조립과정에서 축 정렬 어긋남이 발생할 수 있으며, 로터의 자중과 임펠러의 하중에 의하여 로터는 스테이터의 중심에 위치하지 못하고 어느 정도 편심된 위치에서 미세한 휘돌림 현상을 갖고 움직인다. 따라서 실을 통한 보다 정밀한 누설량을 예측하기 위해서는 로터의 편심을 고려한 3D 해석이 필요하다.

Fig. 1은 편심 된 평실의 단면 형상을 보여주고 있으며 Table 1은 편심된 평실의 형상 및 물음 작동유체로한 운전조건을 나타내고 있다. 원주방향으로 θ각에 따라서 틈새 깊이가 달라짐으로 축대칭 가정을 할 수 없어 3D 해석이 요구된다. 본 연구에서는 3차원 FLUENT해석 방법을 사용하여 편심율( $\epsilon = \epsilon_0 / (R_0 - R)$ )에 따른 편심 된 평실의 누설량을 해석하고 기 발표된 San Andres[12]의 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정

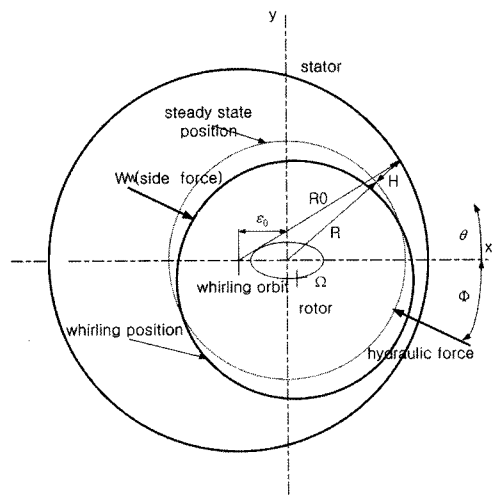


Fig. 1. Cross section of eccentric plain seal [3].

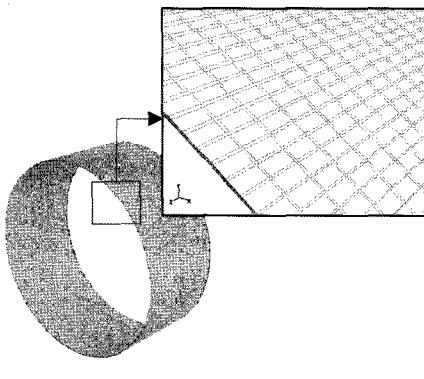
**Table 1. Geometry and operating conditions for the eccentric plain annular pump seal [3]**

Seal geometry	
Seal diameter	76.29 (mm)
Seal length	34.93 (mm)
Seal clearance	0.11(mm)
Surface relative roughness	0.001
Operating condition	
Pressure difference	6.89 MPa
Rotor speed	10200 rpm
Eccentricity ratio ( $\epsilon$ )	0.0-0.5
Inlet swirl ratio ( $V_{in}/(R_s\omega)$ )	0.0
Inlet loss coefficient	0.1
Kinematic viscosity ( $\nu$ )	$1.14 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$

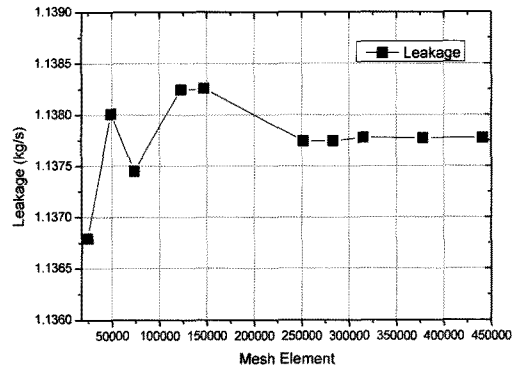
식을 사용한 해석 결과와 Marquette 등[13]의 실험 결과와 비교한 하[10]의 2D FLUENT 해석결과를 비교 분석하고자 한다.

Fig. 2는 Fig. 1에 나타난 편심 된 평실의 3D 해석을 위해 GAMBIT을 사용하여 생성한 3차원 격자를 보여주고 있다. 육면체(hexagon) 격자를 사용하였으며 편심율에 따라서 격자수에 따른 누설량 해석 결과의 수렴성을 검토하여 격자수를 결정하였다. Fig. 3은 편심율이 0.05인 경우로 250,000개 이상에서 거의 일정한 누설량을 보임으로 컴퓨터의 메모리 한계와 처리속도를 고려하여 250,000개로 결정하였다. FLUENT를 사용한 해석 시 +X 축 방향( $\theta=0^\circ$ )이 최소 틈새를 이루는 정상상태 유동(steady-state flow)에 대하여 해석하였고, 난류 모델은  $k-\epsilon$  standard model과 Enhanced Wall treatment를 사용하였다. 수렴판정은 잔류오차(residual)가  $10^{-4}$  이하가 되는 시점으로 하였다.

Table 2는 편심율이 없는( $\epsilon=0$ ) 경우에 대한 평실의



**Fig. 2. Grid generation of eccentric plain seal for  $\epsilon=0.05$ .**



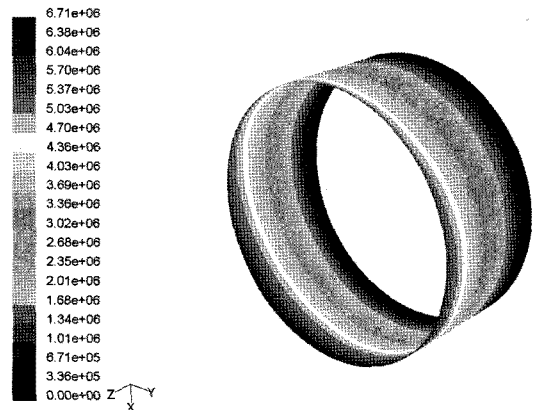
**Fig. 3. Grid dependency on leakage for  $\epsilon=0.05$ .**

**Table 2. Comparison of plain seal leakage for  $\epsilon=0$**

Method of Analysis	Leakage (kg/s)
2D FLUENT(Theory)[10]	1.056
3D FLUENT(Theory)	1.126
San Andres(Theory)[12]	1.118
Ha(Theory)[3]	1.16
Marquette(Experiment)[13]	1.09

3D FLUENT 해석 결과를 기 발표된 결과와 비교하여 보여주고 있다. 3D FLUENT 해석 결과는 하[10]의 2D FLUENT 해석 결과가 Marquette[13]의 실험값보다 약 3.1% 작게 예측됨을 보인 반면에 약 3.3% 크게 예측하고 있어 실험값에 대한 오차는 2D FLUENT 해석과 비슷한 결과를 보였다. 또한 3D FLUENT 해석 결과는 하[3]의 Bulk-flow model 해석 결과 보다는 실험값에 더 근사함을 보였으며, San Andres[12]의 CFD 해석 결과와 매우 유사함을 보였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 편심율이 0.5( $\epsilon=0.5$ )인 편심 된



**Fig. 4. Pressure distribution in eccentric plain seal for  $\epsilon=0.5$ .**

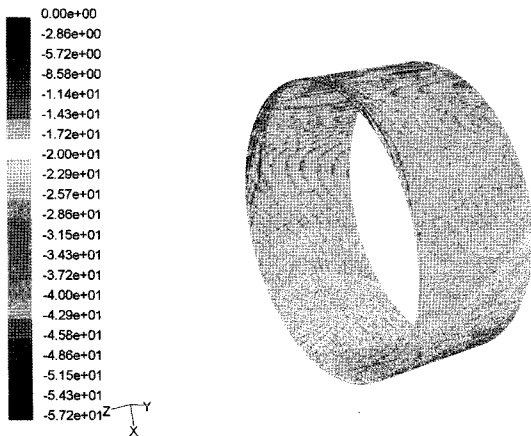


Fig. 5. Velocity contour in eccentric plain seal for  $\epsilon = 0.5$ .

평실의 3D FLUENT 해석 결과로 각 각 압력분포와 유속 벡터를 보여주고 있다. +X 축 방향( $\theta = 0^\circ$ )이 최소 틈새를 이루는 편심상태로 +X 방향( $\theta = 0^\circ$ )의 압력이 틈새가 커지는 -X 방향( $\theta = 180^\circ$ )에 비해 높은 것을 알 수 있으며 실의 출구부(-Z 방향)로 갈수록 압력이 낮아짐을 보이고 있다. 또한 최소 틈새부의 유속이 더 빠른 3차원 유동장 결과를 Fig. 5에서 볼 수 있다.

Fig. 6은 편심 된 평실의 누설량 결과로 3D FLUENT 해석 결과와 기 발표된 결과와의 비교를 나타내고 있다. 편심율이 증가할수록 누설량이 증가하는 경향을 보이며, 3D FLUENT 해석 결과는 Marquette [13]의 실험값보다 약 3.1%~6.1% 크게 예측됨을 보였다. 그렇지만 하[3]의 Bulk-flow model 해석 결과 보다는 실험값에 더 근사함을 보였으며, San Andres[12]

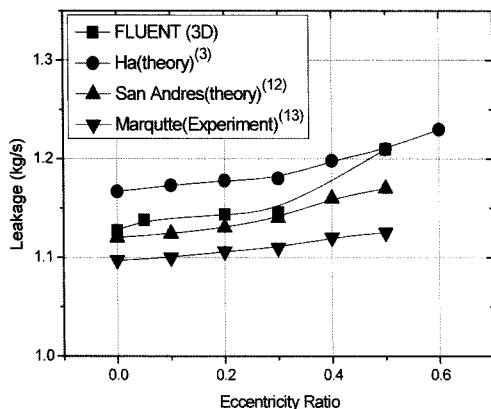


Fig. 6. Comparisons of leakage for eccentricity ratio.

의 CFD 해석 결과와  $\epsilon = 0.5$ 인 경우를 제외하고 매우 유사함을 보였다.

### 3-2. 평행 홈 실

평행 홈 실은 로터나 스테이터 면에 홈을 새겨 평실 보다 누설량 저감을 위하여 고안된 것으로 펌프용 비 접촉 실에 널리 사용되고 있다. Fig. 7은 홈의 수가 10개 이며 홈이 스테이터에 새겨진 물을 작동 유체로 사용하는 대상 평행 홈 펌프 실을 보여주고 있다. 평행 홈 실의 정확한 누설량 예측을 위한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으며, 본 연구에서는 3D FLUENT 해석을 수행하고 기 연구발표 결과인 Iwatsubo and shung[14]의 실험 결과, Ha and Lee[4]의 Bulk-flow model에 기초한 three-control volume 해석 결과 및 하[15]의 2D CFD 해석 결과와 비교 분석을 통하여 3D 해석의 필요성을 검토하고자 한다.

Table 3은 Fig. 7에 나타난 대상 평행 홈 실의 형상 및 운전조건을 보여주고 있다. 3D FLUENT 해석을 위해 GAMBIT을 사용한 육면체 3D 격자를 생성하였다. Fig. 8은 1개 홈 주변의 격자 생성 모습을 보여주고 있는데 홈의 깊이 방향 및 축 방향으로 각각 12개의 격자를 생성하였고, 홈 상부와 로터 사이에는

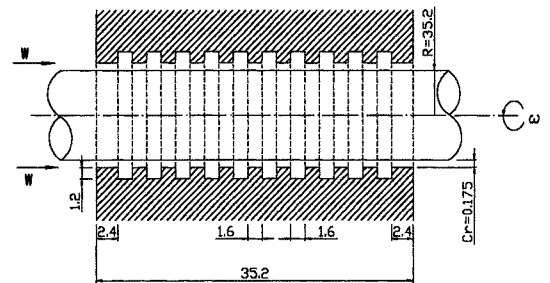


Fig. 7. Geometry of parallel groove pump seal (Unit: mm) [4].

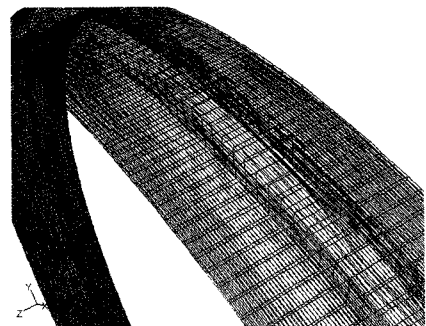


Fig. 8. Grid generation of parallel groove pump seal.

**Table 3. Geometry and operating conditions for parallel groove pump seal [15]**

Seal geometry	
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	35.2(mm)
Number of groove	10
Clearance of groove seal( $C_r$ )	0.175(mm)
Radius of groove seal(R)	35.2(mm)
Operating condition	
Pressure difference	5.88(Bar)
Rotor speed	500(RPM)
Density	998.2(Kg/m <sup>3</sup> )
Absolute viscosity	0.001(N·s/m <sup>2</sup> )

4개의 격자를 생성하여 총 격자수는 415,200개를 생성하였으며 3D FLUENT 해석방법은 편심된 평실의 경우와 동일하다.

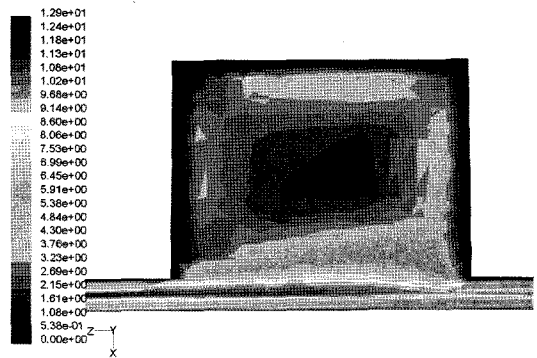
Table 4는 Table 3에 제시된 운전조건에 대한 3D FLUENT 누설량 해석 결과와 기 발표된 연구결과와의 비교를 보여주고 있다. 3D FLUENT 해석 결과는 2D FLUENT 해석 결과 보다 Iwatsubo and shung[14]의 실험 결과에 더 근접하여 2.4% 이내의 오차를 보였고, Ha and Lee[4]의 Bulk-flow model에 기초한 three-control volume 해석 결과 보다 크게 개선됨을 보였다. Fig. 9는 3D FLUENT 해석 결과로 4번째 홈부의 속도 벡터를 보여주고 있다.

**3-3. 래버린스 실**

래버린스 실은 작동유체가 압축성 유체인 공기나 가스로서 압축기나 터빈에 가장 일반적으로 사용되는 비접촉식 실이다. Fig. 10은 래버린스 실 중 가장 단순한 형상인 관통 래버린스(see-through labyrinth) 실을 보여주고 있다. 관통 래버린스 실을 통한 정밀한 누설

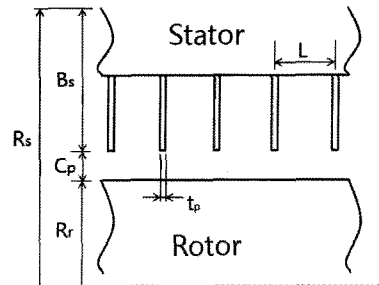
**Table 4. Comparison of parallel groove pump seal leakage**

Method of Analysis	Leakage(kg/s)
3D FLUENT(Theory)	0.488
2D FLUENT(Theory)[15]	0.476
Ha and Lee(Theory)[4]	0.433
Iwatsubo and shung(Exp.)[14]	0.5



**Fig. 9. Velocity contour for 4th groove at X-Z plane in parallel groove pump seal.**

량 예측을 위해 지속적인 노력이 진행되어 왔다. 본 연구에서는 3D FLUENT 해석을 수행하고 하 등[5]의 Bulk-flow model에 기초한 해석 결과와 하[10]의 2D FLUENT 해석 결과를 비교 분석해 보고자 한다. 래버



**Fig. 10. Geometry of see-through labyrinth seal.**

**Table 5. Geometry and operating conditions for see-through labyrinth seal [10]**

Labyrinth seal geometry	
Radius of seal stator ( $R_s$ )	75.6(mm)
Radius of seal rotor( $R_r$ )	68.3(mm)
Tooth height(short one) ( $B_s$ )	3.175(mm)
Tooth pitch(L)	2.175(mm)
Tooth tip width( $t_p$ )	0.152(mm)
Clearance of seal( $C_r$ )	0.127(mm)
Number of labyrinth teeth(NT)	5
Operating condition	
Reservoir pressure	7.09-3.04 (bar)
Sump pressure	1.014 (bar)
Inlet swirl ratio( $V_{in}/(R_s\omega)$ )	0.0
Rotor speed	20,000(RPM)
Temperature	300(K)
Kinematic viscosity(air)( $\nu$ )	0.0000023(m <sup>2</sup> /s)

린스 실의 경우는 활용할 수 있는 실험결과가 없어 3D 해석의 적합성을 판단하기가 쉽지 않았다. Table 5는 Fig. 10의 해석 대상 실의 형상과 공기를 작동 유체로 하는 운전조건을 보여주고 있다. Fig. 11에 나타난 것처럼 3D FLUENT 해석을 위해 GAMBIT을 사용한 육면체 3D 격자를 생성하였다. 이(tooth)의 틈새 방향으로 2개의 격자를 생성하였고, 이의 깊이와 이 사이의 간격 부분에는 각각 8개의 격자를 생성하였다. 또한 원 둘레에 300개의 격자를 생성하여 총 격자수는 243,600개의 격자를 형성하였으며 3D FLUENT 해석방법은 편심 된 평실의 경우와 동일하다.

Fig. 12는 Table 5에 제시된 운전조건에 대한 3D FLUENT 해석 결과로 입구압력이 3.04 bar~7.09 bar 범위에서의 누설량을 기 연구 결과인 하 등[5]의 Bulk-flow model에 기초한 해석 결과와 하[10]의 2D FLUENT 해석 결과를 비교하여 보여주고 있다. 3D FLUENT 해석 결과는 2D 해석 결과보다 작게 예측되었으며 Bulk-flow model 해석 결과와 보다 근접

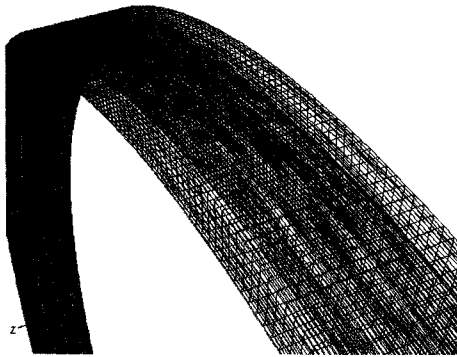


Fig. 11. Grid generation for see-through labyrinth seal.

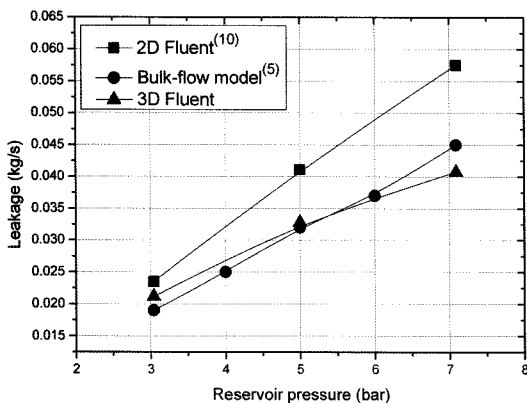


Fig. 12. Comparisons of leakage for see-through labyrinth seal.

한 결과를 보였다. 이 경우에는 유용한 실험결과가 없어 3D 해석의 직접적인 평가를 하기에 어려움이 있다.

#### 4. 결 론

비접촉식 실을 통한 누설량을 줄이는 것은 터보기계의 효율성을 높이기 위한 중요한 요소로서 정확한 누설량 예측을 위해 지속적인 연구가 진행되고 있다. 가장 일반적인 방법인 단순화된 모델을 사용하는 Bulk-flow model 해석법은 계산 시간이 비교적 짧은 것이 큰 장점이지만 실의 형상이 점차로 복잡해지면서 사용에 제한적이 되었다. 최근에 활발히 연구되는 CFD 해석방법은 2차원(2D) 해석이 주를 이루어 왔으나 컴퓨터 환경의 발달과 범용 소프트웨어의 개발로 3D 해석이 가능해졌다.

본 연구에서는 편심을 고려한 평실의 누설량, 펌프용 평행 홈 실, 및 압축기용 래버린스 실의 보다 정밀한 누설량 예측을 위해 FLUENT를 사용한 3D CFD 해석을 수행하고 기 연구결과와의 비교를 통해 3D 해석의 필요성을 평가한 결과 다음과 같았다.

(1) 편심이 없는( $\epsilon=0$ ) 경우에 대한 평실의 3D FLUENT 누설량 결과는 2D FLUENT 해석 결과가 실험 결과 보다 약 3.1% 작게 예측됨을 보인 반면에 약 3.3% 크게 예측됨을 보여 실험 결과에 대한 오차는 비슷한 결과를 보였다.

(2) 편심된 평실의 3D FLUENT 해석 결과는 실험 결과 보다 약 3.1~6.1% 크게 예측됨을 보였으며 Bulk-flow model 해석 결과 보다는 실험 결과에 더 근접함을 보였다.

(3) 평행 홈 펌프 실의 경우, 3D FLUENT 해석 결과는 2D FLUENT 해석과 Bulk-flow model에 기초한 three-control volume 해석 결과 보다 개선됨을 보여 실험 결과에 2.4%의 오차를 보였다.

(4) 압축기용 래버린스 실의 경우, 3D FLUENT 해석 결과는 2D 해석 결과 보다 작게 예측되었으며 Bulk-flow model 해석 결과와 보다 근접한 결과를 보였으나 유용한 실험결과가 없어 3D 해석의 직접적인 평가를 하기에 어려움이 있었다.

#### 참고문헌

1. Hirs, G. G., "A Bulk-flow Theory for Turbulence in Lubricating Films," *ASME Journal of Lubrication*

- Technology*, Vol, 105, pp. 137-146, 1973.
2. Childs, D., "Dynamic Analysis of Turbulent Annular Seals Based on Hirs' Lubrication Equation," *Journal of Lubrication Technology*, Vol 105, pp. 437-444, 1993.
  3. 하태웅, "편심된 펌프 실의 누설 및 회전체 동역학적 해석," *유체기계저널*, Vol. 4, No. 2, pp. 15-21, 2001.
  4. 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.
  5. 하태웅, 이안성, "압축기용 라비린스 시일의 동특성 해석," *한국소음진동공학회지*, Vol. 8, No. 5, pp. 849-855, 1998.
  6. 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.
  7. 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.
  8. 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-298, 1998.
  9. 하태웅, "CFD를 사용한 복잡한 형상을 갖는 라비린스 실의 누설량 예측," *윤활학회지*, Vol. 22, No. 2, pp. 66-72, 2006.
  10. 하태웅, "CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설량 예측," *유체기계저널*, Vol. 9, No. 3, pp. 14-21, 2006.
  11. FLUENT User's Guide Ver. 6.3
  12. San, Andres, L., "Analysis of Variable Fluid Properties, Turbulent Annular Seals," *ASME Journal of Tribology*, pp. 694-702, 1991.
  13. Marquette, O. R., Childs D. W., and San Andres L., "Eccentricity Effects on the Rotordynamic Coefficients of Plain Annular Seals: Theory Versus Experiment," *Journal of Tribology*, Vol, 119, pp. 443-448, 1997.
  14. 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.
  15. 하태웅, "CFD를 사용한 평행 홈 펌프 시일의 해석 개선," *윤활학회지*, Vol. 24, No. 6, pp. 291-296, 2008.