

## 누설량 저감을 위한 래버린스 실의 설계개선 및 해석

하 태 웅<sup>†</sup>

경원대학교 기계·자동차공학부

### Leakage Analysis and Design Modification of the Combination-Type-Staggered-Labyrinth Seal

Tae Woong Ha<sup>†</sup>

*Dept. of Mechanical-Automotive Engineering, Kyungwon University*

**Abstract** – Leakage reduction through annular type labyrinth seals of steam turbine is necessary for enhancing their efficiency. In this study, modified geometry of the original combination-type-staggered-labyrinth seal has been suggested and numerical analysis for leakage prediction has been carried out for the modified-combination-type-staggered-labyrinth seal both based on bulk-flow model and using the CFD code of FLUENT. The theoretical analysis based on bulk-flow model yields leakage reduction of the modified combination type staggered labyrinth seal by about 11%. Comparing with the result of Bulk-flow model analysis, the leakage result of CFD analysis shows reasonable agreement within 9.8% error.

**Key words** – leakage, combination-type-staggered-labyrinth seal, bulk-flow model, CFD, FLUENT.

#### 1. 서 론

Fig. 1은 초초임계압(*ultra super critical*) 스팀터빈에 사용되고 있는 비접촉식 환상 밀봉장치인 조합형 엇갈린 래버린스 실(*combination-type-staggered-labyrinth seal*)로 증기의 교축작용(*throttling process*)을 이용하여 누설 유량을 감소시키도록 설계되어 있다. 실을 통한 누설 유량저감은 스팀터빈의 효율 향상을 위해 매우 중요한 요소로 다양한 노력이 시도되고 있으며 래버린스의 형상이 유동의 저항을 증가시킬 수 있도록 보다 복잡하게 설계되고 있다. 하 등[1]은 Fig. 1 실에 대하여 *bulk-flow* 모델에 기초한 이론적 해석을 통하여 누설량과 동특성 계수를 예측하였다.

또한 하[2]는 Fig. 1 실에 대하여 FLUENT를 사용한 수치해석(CFD)을 수행하여 누설량을 예측한 결과 *bulk-flow* 모델 해석법과 7.1% 이내로 비교적 잘 일치됨을 보여 복잡한 형상의 실 누설량 예측에 CFD 해석의 적용 가능성을 보여주었다. 또한, 실 내부 유동장에 대한 상세한 결과로부터 누설 유량을 저감시킬 수 있

는 설계 개선에 대한 제안으로 동일한 실 길이 내에 보다 많은 오리피스스를 이루는 래버린스 스트립 수를 갖는 형상이 바람직 할 것임을 제시하였다.

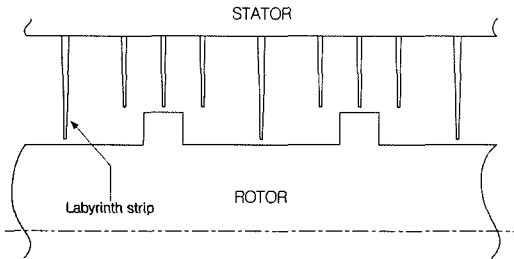
본 연구에서는 Fig. 1의 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 저감을 위하여 Fig. 2와 같이 짧은 래버린스 스트립이 모두 오리피스스를 이루도록 로터의 돌출부인 랜드 부 길이를 확장한 형상으로 설계 개선을 제안하였다. 이 때 랜드 부의 시작과 끝은 긴 래버린스 스트립과 짧은 래버린스 스트립의 중간 위치로 설계되었다. 개선된 실에 대하여 기 발표된 래버린스 실의 *bulk-flow* 모델 해석을 확대 적용하여 누설량 예측 기법을 개발하고 누설량 저감 효과를 확인하고자 하며, FLUENT를 사용한 CFD 해석을 수행하여 *bulk-flow* 모델 해석 결과를 비교 검증하고자 한다.

#### 2. 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설 유량 해석

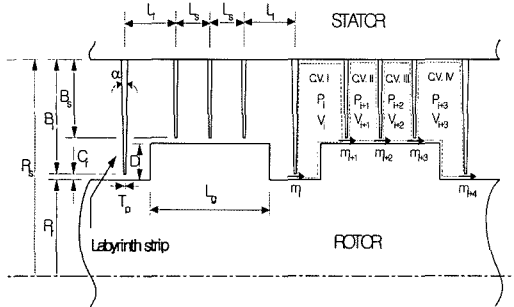
##### 2-1. Bulk-flow 해석 모델

비접촉식 압축성 실의 누설 유량을 예측하기 위해서는 로터(회전부)와 스테이터(비 회전부) 면으로 이루어

<sup>†</sup>주저자·책임저자 : twha@kyungwon.ac.kr



**Fig. 1. Original configuration of combination-type-staggered-labyrinth seal.**



**Fig. 2. Modified configuration of combination-type-staggered-labyrinth seal and control volume.**

지는 환상의 실 틈새 유동을 정확히 규명하여야 되는데 일반적으로 실의 틈새는 매우 작고 난류 유동이며 형상이 복잡하기 때문에 해석의 어려움이 있다. 지금까지 사용되어온 누설 유량을 예측하기 위한 주된 해석 방법은 윤탁이론에 근거한 bulk-flow 해석 모델이다. 관통 래버린스 실의 유체력 해석을 위한 이론적 연구는 Alford[3]에 의해 처음 시도된 이후 많은 연구 결과[4-8]가 발표되었다. 특히, Iwatsubo[4]는 래버린스 공동(cavity)에 한 개의 제어체적을 설정한 one-control-volume model을 사용하여 간략화된 해석결과를 제시하였고, 최근 Scharrer[7]와 하 등[8]은 래버린스 실에서 유체의 흐름형상을 고려한 two-control-volume model 해석을 통하여 개선된 결과를 보여주었다. 계단식 래버린스 실에 대하여, Scharrer[9]는 Childs and Scharrer [6]의 관통 래버린스 실의 해석방법을 확장하여 Blasius 마찰계수 식을 사용한 해석결과를 발표하였으며, 최근 Ha[10]는 Moody 마찰계수 식을 사용한 개선된 해석 결과를 제시하였다. 또한 하[11]는 엇갈린 래버린스 실의 누설량과 유체력을 나타내는 동특성계수들을 예측할 수 있는 해석 기법을 개발하고 그 결과를 발표하였다. Fig. 1의 조합형 엇갈린 래버린스 실에 대하여도 하 등[2]은 오리피스를 형성하는 2개의 래버린스 스트

립과 부가된 래버린스 스트립을 둘러싼 래버린스 공동을 하나의 제어체적으로 설정하는 one-control-volume model 해석법을 제시하였다.

본 연구의 대상인 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실에 대하여 bulk-flow 모델에 기초한 해석 기법을 개발하기 위하여 Fig. 2에 나타난 것처럼 오리피스를 이루는 2개의 래버린스 스트립으로 형성된 공동을 하나의 제어체적으로 설정하였다.  $R_s, R_r, B_s, B_r, L_s, L_r, L_g, D, T_p, \alpha, C$ 은 각각 스테이터 부의 반경, 로터 부의 반경, 긴 래버린스 스트립의 길이, 짧은 래버린스 스트립의 길이, 긴 래버린스 스트립과 짧은 래버린스 스트립 사이의 피치(pitch), 짧은 래버린스 스트립들 사이의 피치, 회전부 단의 폭, 회전부 단의 높이, 래버린스 스트립 선단부의 두께, 래버린스 스트립의 경사각, 실 간극을 나타내며, 사용된 변수  $P, V, m$ 은 각각 제어체적의 압력, 원주방향 유속, 질량 흐름율을 나타낸다. 각 변수의 아래첨자는  $n$ 번째 제어체적을 의미한다. 제어체적 I과 IV는 축대칭을 이루며 계단식 래버린스 실의 제어체적과 모양이 같고, 제어체적 II와 III은 동일하며 관통 래버린스 실의 제어체적과 모양이 같다. 식 (1)은 단위 원주방향 폭에 대한 각 제어체적의 연속방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i A_i) + \frac{1}{R_m} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho_i A_i V_i) + \frac{R_{i+1}}{R_m} m_{i+1} - \frac{R_i}{R_m} m_i = 0 \quad (1)$$

여기서  $\rho_i$ 는 밀도,  $A_i$ 는 제어체적의 원주방향 단면으로 제어체적의 형상에 따라 다르게 정의되며,  $R_m$ 은  $(R_s + R_r)/2$ 로 정의된다. 힘의 평형 조건으로부터 원주방향 운동량 방정식을 유도하면 식(2)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_i A_i \frac{\partial}{\partial t}(V_i) + \frac{\rho_i V_i A_i}{R_m} \frac{\partial V_i}{\partial \theta} + \frac{R_{ri}}{R_m} m_i (V_i - V_{i-1}) \\ = -\frac{A_i}{R_m} \frac{\partial P_i}{\partial \theta} + a_{ri} \tau_{ri} - a_{si} \tau_{si} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에 포함된  $a_{sr}$ 과  $a_{rs}$ 은 스테이터 부와 로터 부의 전단응력이 작용되는 무차원화된 제어표면 길이이며 제어체적에 따라서 다르게 정의된다.  $\tau_{si}$ 와  $\tau_{ri}$ 는 각각 스테이터 부 표면의 원주방향 전단응력과 로터 부 표면의 원주방향 전단응력을 나타내고 Moody의 마찰계수 식을 사용하여 정의하였다. 식 (1)-(2)에 포함된 밀도는 압축계수(compressibility factor)  $Z$ 를 포함하는 실제 기체에 대한 상태방정식에 의해 식 (3)과 같이 압력 항으로 표현될 수 있다. 여기서  $R$ 은 기체상수,  $T$

는 온도이다.

$$\rho_i = \frac{P_i}{ZRT} \quad (3)$$

누설 유량을 나타내는 질량흐름율( $m_i$ )은 Neumann[12]의 실험식에 의해 식 (4)로 정의하였다. 이때 kinetic energy carryover factor[13] ( $\mu_{2i}$ )는 식 (5)로 정의되며 실의 로터 부 단높이( $D$ )가 실간극( $C_r$ )보다 훨씬 큰 제어체적 I과 IV에서는 1.0으로 정의된다. Flow coefficient [14] ( $\mu_{1i}$ )은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\gamma$ 는 비열비이다.

$$m_i = \mu_{1i}\mu_{2i}H_i \sqrt{\frac{P_{i-1}^2 - P_i^2}{ZRT}} \quad (4)$$

$$\mu_{2i} = \frac{1}{(1-\varepsilon)^{1/2}}$$

$$\varepsilon = \frac{8.52}{\left(\left(\frac{L_s - T_B}{C_r}\right) + 7.23\right)} \quad (5)$$

$$\mu_{1i} = \frac{\pi}{\pi + 2 - 5s_i + 2s_i^2}$$

$$s_i = \left(\frac{P_{i-1}}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \quad (6)$$

개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설 유량을 구하기 위하여, 우선 식 (4)와 식 (1)를 사용하여 실의 입구압력과 출구압력 조건으로부터 각 제어체적의 압력분포와 누설유량을 반복(iteration) 방법에 의해 구한다. 또한 원주방향 운동량 방정식인 식 (2)를 주어진 입구에서의 원주방향 유속조건으로부터 수치해석기법을 사용하여 해를 구하여 각 제어체적의 원주방향 유속을 구한다. 실 입구부와 출구부의 압력차가 일정량 이상이 되면 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 마지막 제어체적 출구에서 유속이 마하 1에 가까워지며 더 이상의 유량증가가 일어나지 않는 질식(choke) 현상이 일어난다. 질식 현상이 일어날 경우 실의 마지막 래버린스 스트림에서의 누설 유량은 식 (7)과 같이 Fliegner [15]의 식을 사용하여 구한다. 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설 유량 해석에 대한 자세한 설명은 하 등[1]의 논문에 나타나 있으며, 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 경우도 이와 유사하다.

$$\dot{m}_{NC} = \frac{0.667\mu_2}{\sqrt{ZRT}} P_{NC} H_{NC} \quad (7)$$

### 2-2. CFD 해석

Bulk-flow 해석법에서는 실의 틈새 방향으로 속도구배가 없는 평균 유속의 흐름을 가정하여 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 CFD(Computational Fluid Dynamics)기법을 사용하는 데, 해석의 어려움과 컴퓨터 성능의 한계 등으로 활발히 진행되지 못했으나 요즘에는 컴퓨터와 난류해석 기법의 발달로 범용 소프트웨어가 개발되어 그 활용 가능성이 커지고 있다. 최근 하[16]는 터보기계의 비접촉식 실인 평실, 그루브 실, 관통 래버린스 실 및 엇갈린 래버린스 실의 누설량에 대하여 FLUENT를 사용한 CFD해석 기법을 제시하고, bulk-flow 모델 해석 결과와 잘 일치함을 보여 실의 누설량 예측에 CFD 활용의 가능성을 확인하였다.

FLUENT[17]는 비압축성·압축성, 2차원·3차원 유동의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT과 solver 및 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다. FLUENT는 SIMPLE과 SIMPLC 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  $k-\varepsilon$  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.

본 연구에서는 범용 전산 열·유체 해석용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 Fig. 2에 나타난 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실에 대한 유동 해석을 통한 누설 유량 예측 결과를 제시하고자 한다.

### 3. 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설 유량 해석 결과

본 절에서는 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설 저감 효과를 확인하고, bulk-flow 모델에 기초한 예측 결과와 FLUENT를 사용한 CFD 해석 결과를 비교 분석하고자 한다. Fig. 2에 나타난 대상 실의 누

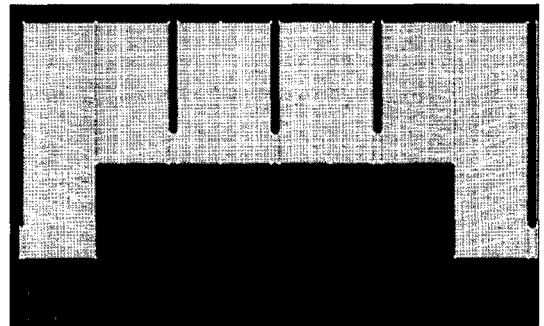
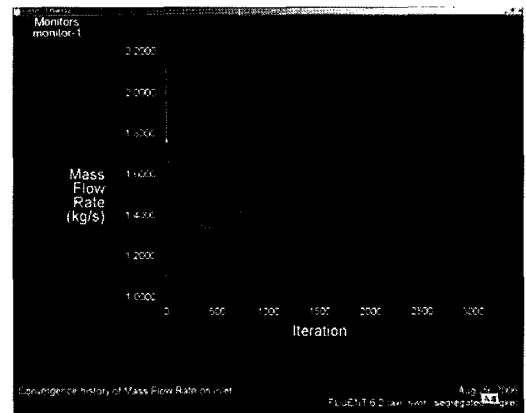
**Table 1. Input data for the analysis of modified-combination-type-staggered-labyrinth seal**

Seal geometry (Teeth-on-stator)	
Radius of seal stator ( $R_s$ )	344.299 (mm)
Radius of seal rotor ( $R_r$ )	336.425 (mm)
Tooth height(long one) ( $B_l$ )	6.858 (mm)
Tooth height(short one) ( $B_s$ )	3.683 (mm)
Tooth pitch ( $L_l$ )	4.7752 (mm)
Tooth pitch ( $L_s$ )	3.175 (mm)
Step height ( $D$ )	3.175 (mm)
Step width ( $L_g$ )	3.429 (mm)
Tooth tip width ( $t_p$ )	0.254 (mm)
Strip angle ( $\alpha$ )	0.3838 (rad)
Clearance of seal ( $C_s$ )	1.016 (mm)
Number of throttling teeth ( $NT$ )	17
Seal length	63.6 (mm)
Operating condition (steam)	
Reservoir pressure	22.8 bar
Sump pressure	19.4~3 bar
Inlet swirl ratio ( $V_{in}/(R_s \cdot \omega)$ )	0.0
Rotor speed	3600 (RPM)
Reservoir temperature	742 (K)
Kinematic viscosity (air) ( $\nu$ )	$1.71 \times 10^{-6}$ ( $m^2/s$ )
Gas constant ( $R$ )	287.06 ( $J/(kg \cdot K)$ )
Specific heat ratio ( $\gamma$ )	1.4
Compressibility factor ( $Z$ )	1.0

설 유량을 해석하기 위한 형상 및 운전 조건이 Table 1에 제시되어 있는데 로터의 랜드 부 길이가 확장된 것을 제외한 모든 형상과 운전 조건은 원래의 조합형 엇갈린 래버린스 실과 동일하게 설정되었다. 래버린스 스트립이 스테이터에 있는 teeth-on-stator의 경우로 작동 유체는 압축성 유체인 공기를 사용하고 실 입구의 압력은 22.8 bar, 로터의 회전수는 3600 rpm이다. 긴 래버린스 스트립이 5개, 짧은 래버린스 스트립이 12개로 이루어져 있으며 오리피스를 이루는 스트립 수는 17개로 원래의 조합형 엇갈린 래버린스 실의 경우(9개)보다 8개가 증가되었다. 실의 총 길이는 63.6 mm, 실의 틈새 깊이는 1.016 mm이다.

Bulk-flow 모델에 기초한 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 예측은 2.1절에 제시된 지배방정식

및 해석 기법에 따라 개발된 해석 코드(ADSTSEAL.FOR)를 사용하였다. CFD 해석을 위해서 유동장은 로터와 스테이터 면으로 둘러싸인 환상 틈새로 축대칭의 형상임으로 2차원(2D), 축대칭(axis symmetric)을 가정하고 틈새 깊이 및 길이 방향으로 0.05 mm의 정방형 격자(271,987개)를 GAMBIT을 사용하여 생성하였다. Fig. 3은 실 내부에 형성된 격자의 모습을 보여주고 있으며 오리피스를 이루는 래버린스 스트립의 틈새부에는 길이방향으로 20개의 격자가 형성되었다. FLUENT solver를 사용하여 2D, axis-symmetric, swirl 유동에 대한 압축성 유동해석을 하였으며, 로터의 회전에 따른 유동장의 회전유동을 moving reference frame을 사용하여 정의하였다. 난류모델은  $k-\epsilon$  RNG 모델을 사용하였으며 수렴판정을 위해서 잔류항의 총합이  $10^{-5}$  이하가 되도록 설정하였고, 누설유량을 모니터링(Fig. 4)하여 수렴시점을 판정 하였다. ADSTSEAL과 CFD 해석은 Intel Pentium 4(2.6 GHz CPU, 1.6 GB RAM) 개인

**Fig. 3. Mesh generation for modified-combination-type-staggered-labyrinth seal using GAMBIT.****Fig. 4. Convergence history of mass flow rate on inlet (reservoir pressure : 22.8 bar, sump pressure : 13 bar).**

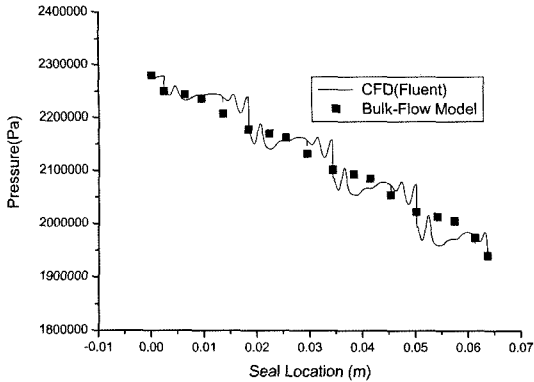


Fig. 5. Pressure distribution vs. seal location (reservoir pressure : 22.8 bar, sump pressure : 19.4 bar).

용 컴퓨터로 수행되었다.

Fig. 5는 실의 위치에 따른 정압력 분포에 대하여 FLUENT의 해석 결과와 bulk-flow 모델 해석 결과를 비교하고 있다. 여기서 실 위치 0m는 실 입구부를 나타낸다. CFD 해석은 실 내부 유동장에서의 압력 및 속도 분포에 대하여 실의 길이 방향으로 격자크기인 0.05 mm 간격으로 63.6 mm까지 상세한 결과를 제공하기 때문에 Fig. 5에 선으로 상세한 압력분포가 나타나 있다. 그러나 bulk-flow 모델의 해석은 16개의 제어체적이 설정되어 각 제어체적 당 평균압력이 계산됨으로 사각형 점으로 압력분포가 그려져 있다. CFD 해석 결과와 bulk-flow 모델의 해석 결과가 비교적 잘 일치함을 보이고 있다.

Fig. 6은 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 FLUENT 해석을 통한 유동장의 유속 결과를 보여주고 있다. 실 입구압력(reservoir pressure)이 22.9 bar, 실의 출구압력이 19.4 bar인 경우의 속도 벡터를 나타



Fig. 6. Velocity contours of modified-combination-type-staggered-labyrinth seal (m/s).

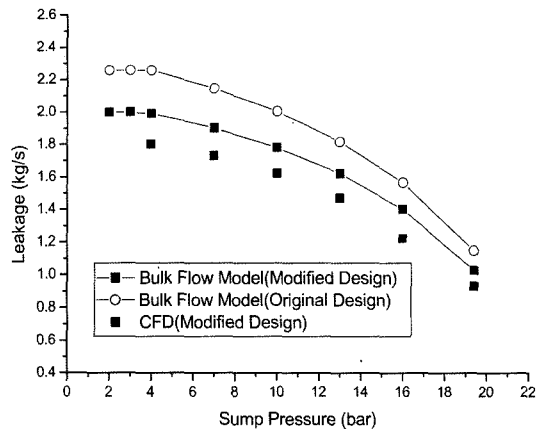


Fig. 7. Comparison of leakage prediction between modified-combination-type-labyrinth seal and original-combination-type-labyrinth seal with bulk-flow model and CFD analysis.

내며 래버린스 공동(cavity)에 형성된 외류와 래버린스 스트립 끝단 틈새부에서의 흐름 상태를 잘 파악할 수 있다. 실의 하류로 갈수록 유동 저항에 의해 압력은 떨어지고 유속은 증가함을 알 수 있다. 특히 오리피스 를 이루는 래버린스 스트립 틈새에서 주된 고충작용이 일어나 누설 유량의 감소를 유발함을 알 수 있다.

Fig. 7은 개선된 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 저감 효과를 보여주고 있다. 실 입구 압력을 22.8 bar로 일정하게 유지시키며 실 출구의 압력을 2 bar에서 19.4 bar까지 변화 시켰을 때 개선된 조합형 래버린스 실의 누설량(사각형 모양)은 원래 조합형 래버린스 실의 누설량(원형 모양)보다 11.39%-10.37%까지 감소됨을 보였다. 동일한 실 길이와 운전 조건에서 오리피스를 이루는 래버린스 스트립 수를 8개 증가시키도록 로터의 랜드 부를 확장한 결과 약 11% 정도의 누설량이 저감되어 누설특성이 개선되었음을 확인하였다. bulk-flow 모델에 기초한 해석 결과는 출구압력이 감소함에 따라서 누설 유량이 증가함을 보였으며 출구압력이 약 3.8 bar 이하에서는 질식현상(choke)이 일어나 누설 유량이 더 이상 증가하지 않음을 보였다. Bulk-flow 모델의 해석 결과를 검증해보기 위해서 시도된 FLUENT를 사용한 해석 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 역시 출구압력이 감소함에 따라서 누설 유량이 증가함을 보였으나 질식현상이 일어나는 출구압력 이하에서는 해를 구할 수 없었다. 전반적으로 CFD 해석 결과가 bulk-flow 모델 해석 결과보다 누설 유량을 작게 예측함을 보였으며, 그 차이는 출구압력이 작아질수록

(압력차가 커질수록) 약간 커지는 경향을 나타냈으며, 최대 9.8%의 오차로 비교적 잘 일치함을 보였다.

#### 4. 결 론

실을 통한 누설 유량 저감은 스팀터빈의 효율 향상을 위해 매우 중요한 요소로 다양한 노력이 시도되고 있으며 래버린스의 형상이 유동의 저항을 증가시킬 수 있도록 보다 복잡하게 설계되고 있다. 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 저감을 위하여 짧은 래버린스 스트립이 모두 오리피스를 이루도록 로터의 돌출부인 랜드 부 길이를 확장한 형상으로 설계 개선을 제안하였다. 개선된 실에 대하여 bulk-flow 모델 해석을 확대 적용하여 누설량 예측 기법을 개발하고 누설량 저감 효과를 확인하고자 하였으며, FLUENT를 사용한 CFD 해석을 수행하여 bulk-flow 모델 해석 결과를 비교 검증하고자 하였다.

Bulk-flow 모델 해석 결과 개선된 조합형 래버린스 실은 조합형 래버린스 실보다 누설량이 약 11%정도 감소됨을 보여 누설특성이 개선되었음을 확인하였다. FLUENT를 사용한 CFD 해석의 결과는 최대 9.8% 이내로 bulk-flow 모델의 누설 유량 결과보다 작게 예측되어 비교적 잘 일치됨을 보였다. 본 연구의 결과로부터 스팀터빈 실의 누설특성을 향상시키기 위하여 개선된 조합형 래버린스 실이 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나 실의 설계에는 누설 유량 저감뿐만 아니라 실을 통한 회전체 진동 안정성의 향상 또한 중요한 요소임으로 개선된 조합형 래버린스 실의 동특성 해석에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 연구는 2006년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

#### 참고 문헌

1. 하태웅, 이용복, 김승중, 김창호, “스팀 터빈용 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 및 동특성 해석,” 유체기계저널, 제7권 제6호, pp. 45-54, 2002.
2. 하태웅, “CFD를 사용한 복잡한 형상을 갖는 래버린스 실의 누설량 예측,” 윤활학회지, 제22권 제2호, pp. 66-72, 2006.

3. Alford, J. S., “Protecting Turbomachinery from Self-Excited Rotor Whirl,” *ASME Trans. Journal of Engineering for Power*, October pp. 333-344, 1965.
4. 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.
5. Jenny, R. J., Wyssmann, H. P. and Pham, T. C., “Prediction of Stiffness and Damping Coefficients for Centrifugal Compressor Labyrinth Seals,” ASME 84-GT-86. Presented at the 29th International Gas Turbine Conference and Exhibit, Amsterdam, The Netherlands, June 4-7, 1984.
6. Childs, D. W. and Scharrer, J. K., “An Iwatsubo Based Solution for Labyrinth Seals: A Comparison to Experimental Results,” *ASME Trans. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, April Vol. 108, pp. 325-331, 1986.
7. Scharrer, J., “A Comparison of Experimental and Theoretical Results for Labyrinth Gas Seals,” Ph. D. Dissertation, Texas A&M University, 1987.
8. 하태웅, 이안성, “압축기용 라비린스 실의 동특성 해석,” 한국소음진동공학회지, 제8권 제5호, pp. 849-855, 1998.
9. Scharrer, J. K., “Rotordynamic Coefficients for Stepped Labyrinth Gas Seals,” *ASME/ASLE Tribology Conference*, Paper No. 88-Trib-42, 1988.
10. 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.
11. 하태웅, “엇갈린 래버린스 실의 누설량 및 동특성 해석,” 윤활학회지, 제18권 제1호, pp. 24-33, 2002.
12. Neumann, K., “Zur Frage der Verwendung von Durchblickdichtungen in Dampfturbinebau,” *Maschinen-technik*, Vol. 13, No. 4, 1964.
13. Vermes, G., “A Fluid Mechanics Approach to the Labyrinth Seal Leakage Problem,” *ASME Journal of Engineering for Power*, Vol. 83, No. 2, April pp. 161-169, 1961.
14. Gurevich, M. I., “The Theory of Jets In an Ideal Fluid,” Pergamon Press, London, England, pp. 319-323, 1966.
15. John, J. E. A., “Gas Dynamics,” Wylie, 1979.
16. 하태웅, “CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설량 예측,” 유체기계저널, 제9권 제3호, pp. 14-21, 2006.
17. Fluent User's Guide Ver. 6.2.