

계단형 래버린스 실의 1차원 설계식에 관한 연구

권정우* · 안 준**†

A Study on the One-dimensional Design Equation of a Stepped Labyrinth Seal

Jeong Woo Kwon*, Joon Ahn**†

Key Words : Labyrinth seal(래버린스 실), Step height(계단부 높이), Mass flow rate(질량유량), Discharge coefficient(토출 계수)

ABSTRACT

The performance of Labyrinth seal for sealing the secondary flow path of a gas turbine was predicted using Flomaster, a 1-dimensional code. First, the predictive ability of the straight-through seal module built into Flomaster was verified by comparing it with experimental data. The discharge coefficient was confirmed through the isentropic mass flow rate and the actual mass flow rate found in Martin's equation. The validity of the prediction using the one-dimensional code was verified through the straight-through seal, and the discharge coefficient according to the geometric variables was predicted using the stepped seal module built into the Flomaster. The performance of the seal predicted by the one-dimensional code was verified by comparing the results obtained with the three-dimensional CFD (computational fluid dynamics) data. Among the design variables of the stepped seal, the most important variable is the step height, but the effect is reduced above a certain height, so the design equation of the one-dimensional code could be used.

1. 서 론

브레이튼 사이클을 기반으로 만들어진 유체 기계인 가스 터빈은 현재 항공기, 선박의 엔진이나 전력생산의 원동기로 널리 사용되고 있다. 주요 응용분야에서 시스템의 효율이 매우 중요하며 사이클 효율을 높이기 위해서는 터빈 입구 온도를 높여야 한다.⁽¹⁾ 그러나 터빈 입구 온도는 재료에 의해 제한을 받으므로 이를 극복하기 위해서 냉각 유체를 공급하여 블레이드의 내부와 외부를 냉각시킨다.^(2,3) 이때 사용되는 냉각 유체는 압축기에서 추가되어 이차유로(Secondary Air System)를 거쳐 블레이드에 공급된다. 이차유로는 축을 포함한 회전부와 슈라우드 측의 정지부가 혼합된 구조로 구성되고, 회전을 위해서는 필연적으로 회전부와 정지부 사이에 간극이 존재해야한다. 이때 간극을 통해서 냉각유체의 유출이 생기게 되므로 이를 적절히 밀봉해야 한다. 밀봉 방식 중에서 널리 사용되는 방식이 본 연구에서 다루는 래버린스 실

(Labyrinth Seal)이다.

래버린스 실은 회전부와 정지부 그리고 이빨 구조물(Tooth)과 공동(Cavity)로 이루어져 있으며 표준적인 형태는 유동방향으로 같은 형태의 구조물이 반복되는 직선형 래버린스 실이다. 직선형 래버린스 실에 대하여 Zhao 등⁽⁴⁾은 래버린스 실의 6개의 매개변수를 설정하여 변수에 따른 토출계수를 측정하였고, Wittig 등⁽⁵⁾은 래버린스 실의 난류유동을 시뮬레이션하기 위한 유한차분 코드를 개발하여 실험과 비교하였다. Zhao 등⁽⁶⁾은 앞서 논의했던 변수들 외에 공동에 따른 누출효과를 추가적으로 발표하였다.

직선형 실에 비해 밀봉성능을 개선하기 위해서 엇갈림(Staggered) 또는 계단형(Stepped) 실을 사용하기도 한다. Kim 등⁽⁷⁾은 계단형 실의 간극의 크기에 따른 토출계수의 영향이 직선형 실보다 적은것을 확인하였고, Ugur⁽⁸⁾은 계단형 실의 토출 및 동적계수에 대한 이론적 연구를 통해 운동량 방정식을 제시했다.

* 국민대학교 일반대학원(Graduate School, Kookmin University)

** 국민대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Kookmin University)

† 교신저자, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아

The KFSM Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 5, October 2023, pp.53~60(Received 14 Jul. 2023; revised 11 Aug. 2023; accepted for publication 27 Aug. 2023)

한국유체기계학회 논문집: 제26권, 제5호, pp.53~60, 2023(논문접수일자: 2023.07.14, 논문수정일자: 2023.08.11, 심사완료일자: 2023.08.27)

가스터빈의 이차유로 시스템은 매우 복잡하여 전체 시스템에 대한 실험이나 3차원 전산유체 해석은 어렵다. 하지만 부품의 상호 간섭을 고려하거나 부품 해석의 경계조건 확보를 위한 정보가 필요하다. 이때 1차원 코드는 유용한 도구가 된다. 1차원 코드는 3차원 해석과 실험을 진행하기 이전에 초기단계의 설계를 용이하게 하여 비용을 절감하고 개발 시간 소요를 절감시키는 장점을 가지고 있다. 또한 가스터빈과 같이 매우 복잡한 내부 구조를 가지고 있는 기계의 경우에는 3차원 해석이 어렵지만, 1차원 코드는 간단하게 Network를 만드는 것만으로도 해석이 가능하기 때문에 사용하는 데에 부담이 적다. 1차원 코드는 3차원 효과를 고려하기 위해 부품에 대한 설계식을 포함하는 모듈을 갖는다. 본 연구에서는 가스터빈 2차 유로를 구성할 때 가장 불확실성이 큰 레버린스 실 모듈을 검증하고자 한다. 먼저 문헌으로 공개된 실험 자료를 통해 레버린스 실의 성능 자료를 확보하고 1차원 유동해석 프로그램인 Flomaster의 레버린스 실 모듈의 예측 성능을 가스터빈 2차유로의 운전 조건에서 검증하였다.

계단형 레버린스 실에 대한 검증에 앞서 직선형 레버린스 실에 대한 비교 연구를 수행하였다. 다음으로 계단형 레버린스 실에 대한 해석을 수행하였다. Chun 등⁽⁹⁾은 계단형 레버린스 실에서 계단의 위치, 높이, 이빨 간격, 간극 등의 기하 변수들에 대해 3차원 유동해석을 수행하여 계단 높이가 가장 큰 영향을 주는 것을 보였다. 그러나 1차원 해석 코드인 Flomaster의 계단형 레버린스 실 모듈에는 계단의 높이를 입력변수로 채용하지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 Chun 등⁽⁹⁾이 수행한 기하 변수에 대하여 Flomaster 모듈을 이용한 해석을 수행하고 기하 변수에 따른 토출계수를 비교하였다. 이를 통해 기하 변수의 영향이 모듈의 설계식으로 적절히 예측되는지를 평가하고 기존의 레버린스 실의 설계식에 대한 예측 신뢰성을 얼마나 확보할 수 있는지 확인하고자 하였다.

2. 1차원 해석 기법 및 코드 검증

Martin⁽¹⁰⁾은 레버린스 실의 토출계수를 예측하는 실험식을 처음으로 발표하였다. 레버린스 실의 토출계수는 동일한 유동단면적을 가진 유로를 등엔트로피 과정으로 통과하는 유체의 등엔트로피 질량유량에 대한 실제 질량유량비로 표현이 된다. 등엔트로피 식과 토출 계수 식은 다음과 같이 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{id} = \frac{P_i A_c}{\sqrt{T_i}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{id}} \quad (2)$$

등엔트로피 과정을 가정한 이상적인 질량유량을 구하는 식 (1)에서 P_i 는 레버린스 실 입구의 압력, T_i 는 입구의 온도, P_o 는 출구의 압력을 각각 의미한다. A_c 는 레버린스 실의 단면적, k 는 비열비, R 은 기체상수를 의미한다. 레버린스 실의 성능인 토출계수는 식 (2)에서 얻을 수 있다.

식 (2)의 실제 질량유량은 실험이나 전산해석을 통해 얻어야 한다. 본 연구에서는 1차원 유동해석 프로그램인 Flomaster를 사용하여 실제 질량유량을 예측하고 실험 및 3차원 전산해석으로 얻은 유량과 비교하였다. 1차원 유동해석 프로그램은 유동이 흘러가는 방향으로만 해석을 수행하므로 해석하는 지배방정식은 다음과 같은 1차원 질량보존 및 운동량 보존식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + g\rho + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) \quad (4)$$

식 (3)은 1차원 질량 보존식이고, 식 (4)는 1차원 운동량보존식이다. 두 식 모두 압축성 정상 상태에 대한 방정식이다. Flomaster와 같은 1차원 시뮬레이션 코드에서는 시스템을 구성하는 부품으로 유동이 흐르는 네트워크를 구성하고 네트워크상에서 모델링으로 연결된 각 구성품에 대하여 질량보존과 운동량 보존을 해석한다.

계단형 실을 연구하기에 앞서 Flomaster 코드의 검증을 위해 직선형 레버린스 실에 대한 해석을 진행하여 예측한 토출계수를 실험과 비교하였다. Flomaster에 내장되어있는 직선형 레버린스 실 모듈에서 채택한 기하 형상은 Fig. 1과 같다.

Flomaster의 직선형 레버린스 실 모듈이 채택하고 있는 설계식은 Vermes⁽¹¹⁾의 실험식에서 취하였다. 사다리꼴 형태의 이빨을 채택하고 있고 2차원 구조에서 이빨의 피치(S), 윗변의 길이(L), 간극 (C)을 설계 변수로 사용한다. 직선형 레버린스 실의 경우에 이빨 형상으로 직사각형 또는 삼각형도 채용하고 있는데 본 연구에서는 이와 같은 기하 변수의

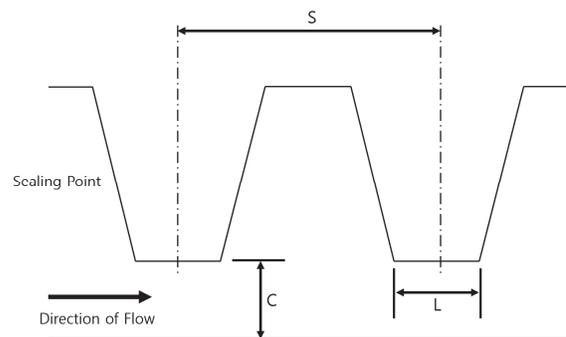


Fig. 1 Straight-Through Labyrinth Seal by Vermes⁽¹¹⁾

영향을 배제하기 위하여 Vermes⁽¹¹⁾과 같은 형상을 갖는 Prasad 등⁽¹²⁾의 실험자료를 비교 대상으로 선정하였다. Prasad 등⁽¹²⁾이 채택한 기하 형상은 Fig. 2에 제시하였다.

Flomaster에 Fig. 2에 제시한 Prasad 등⁽¹²⁾의 형상 정보를 입력하고 실험을 수행한 입구, 출구 조건을 Table 1과 같이 입력하였다.

식 (5)~(7)는 Flomaster의 직선형 래버린스 실 모듈에 내장되어 있는 Vermes⁽¹¹⁾ 설계식이다.

$$\frac{\dot{m} \sqrt{R \cdot T_1}}{P_1 \cdot A \cdot K} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2}{N - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}} \cdot F_{\infty} \quad (5)$$

$$F_{\infty} = \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha}} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{8.52}{\frac{S-L}{C} + 7.23} \quad (7)$$

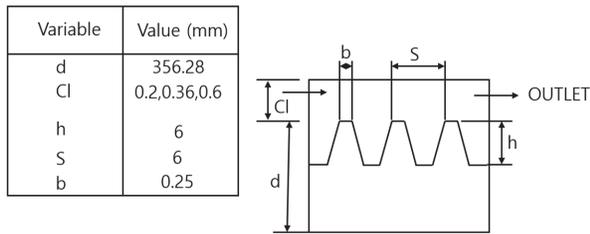


Fig. 2 Straight-Through Labyrinth Seal by Prasad⁽¹²⁾

Table 1 Experimental Data for a Straight-Through Labyrinth Seal, Cl = 0.36 mm

Case No.	Upstream Pressure P ₀ (kPa)	Downstream Pressure P ₁ (kPa)	Pressure Ratio (P ₀ /P ₁)	Mass flow rate \dot{m} (kg/s)
1	91.386	91.107	1.0031	0.005675
2	94.355	91.293	1.0357	0.016526
3	100.695	92.503	1.0886	0.027303
4	108.793	93.806	1.1596	0.038118
5	118.66	95.761	1.2391	0.048392
6	136.252	98.181	1.378	0.064613
7	149.563	101.625	1.4717	0.075427
8	163.432	104.976	1.5568	0.086414
9	179.349	110.096	1.657	0.098391
10	202.155	113.54	1.7805	0.113736
11	218.351	117.449	1.8591	0.124596
12	228.497	120.428	1.8974	0.130575

식 (5)에서 P₁은 입구의 압력, P₂는 출구의 압력, S는 핀 피치 길이, L은 이빨의 두께, C는 간극을 각각 의미한다. Fig. 2에서 변수로 지정된 이빨의 높이는 변수로 고려하지 않는 것을 확인할 수 있다. Vermes⁽¹¹⁾는 식 (6)에 제시한 F_∞라는 운동 에너지 계수 (Kinetic energy factor)를 사용하여 잔류 운동 에너지 이월의 상대적인 양을 고려하였다. 식 (7)에 제시한 경계층 이론을 기반으로 도출한 실험인자 α가 운동 에너지 계수를 결정하게 된다.

Castelli⁽¹³⁾ 등에 의하면 Vermes⁽¹¹⁾의 설계식은 레이놀즈 수(Reynolds number)의 범위가 2400~5600 일 때, 다른 설계식에 비해서 좋은 성능을 보이는 것으로 밝혀졌다. 그러므로 위의 레이놀즈 수 범위가 Vermes⁽¹¹⁾의 설계식을 사용하는 최적범위가 되며, 래버린스 실의 기하학적 특성 때문에 α는 1보다 클 수 없다. 따라서 식 (7)에서 S는 항상 C, L보다 크다. 따라서 α=1일 경우 S > 1.29C + L는 항상 참이 된다.

Flomaster에서 래버린스 실을 시뮬레이션하기 위해서는 모듈을 이용하여 네트워크를 구성해야 한다. 래버린스 실 시뮬레이션을 위한 Flowmaster 네트워크를 Fig. 3에 나타내었다.

유동 네트워크의 입구와 출구에 Table 1에 제시한 압력을 부과하기 위하여 선회류를 포함한 압력 모듈을 배치하였다. 두 개의 압력 모듈 사이에 직선 래버린스 실 모듈을 배치하고 점성 손실을 고려하기 위해 Fig. 3에 녹색으로 표시된 손실 (Discrete Loss) 모듈을 배치하였다. 유사한 연구를 수행한 Park⁽¹⁴⁾과 Chao⁽¹⁵⁾의 논문에서 손실 모듈을 배치하여 예측 성능을 높인 사례를 참조하였다.

Flomaster의 손실 모듈 (Fig. 4)은 다중 흐름 경로 기능을 모델링 하는것에 사용되는데, 손실이 있다는 가정하에 질량 유량의 조절이 가능한 구성품이다. 손실 모듈은 모든 손실 경로(Loss Path)는 동일한 것으로 가정을 하고 사용하게 된다. 가스터빈에는 터빈의 정지부의 둘레 주위에 많은 체결부가 있다. 이 체결부는 이차 유로의 한 영역에서 다른 구역으로 돌출되며 머리(Head)쪽에서 샹크(Shank)쪽으로 볼트를 가로질러 큰 압력강하를 유발할 수 있다. 이로 인해 볼트 구멍을 통한 누설유동이 발생한다. 손실 모듈은 이러한 손실을 동일한 흐름 경로의 패턴으로 정확한 형상 정보가 부재한 경우에 모델링 하는 것이 주요 기능이다. 손실 모듈에서 질량 유량을 보상하는 식을 식 (8)에 나타내었다.

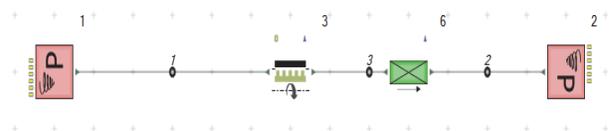


Fig. 3 Straight-Through Labyrinth Seal Network in Flomaster

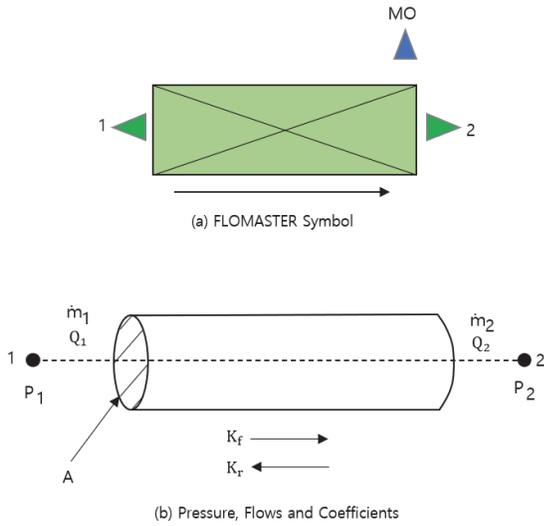


Fig. 4 Discrete Loss Module

$$\dot{m} = \frac{-\dot{m}}{P_1 - W \cdot P_2} \cdot P_1 + \frac{\dot{m} \cdot W}{P_1 - W \cdot P_2} \cdot P_2 \quad (8)$$

식 (8)의 W 는 가중계수(Weighting factor)를 의미한다. 가중계수는 압력비와 임계 압력비 사이의 관계를 기반으로 한다.

Prasad 등⁽¹²⁾의 실험값을 기준으로 손실 모듈을 사용한 네트워크와 사용하지 않은 네트워크의 상대오차(Relative error)를 비교하여 손실 모듈 성능을 확인해본다. 위 과정에서는 Prasad 등⁽¹²⁾의 질량유량을 참값(Ture Value)으로 두고, 이론값(Observed Value)을 Flomaster로 계산하여 상대오차를 계산하였다. 상대오차의 식을 식 (9)에 나타내었다.

$$\frac{|V_{Ture} - V_{Observed}|}{V_{Observed}} * 100\% \quad (9)$$

Fig. 5에 나와있는 것처럼 극 초반에는 입구와 출구의 압력차가 매우 적기 때문에 손실이 거의 없음에도 손실 모듈을 통해서 손실이 있다는 가정하에 계산을 진행했기 때문에 오히려 오차율이 높지만, 압력차가 높아짐에 따라서 손실의 발생에 따라서 손실 모듈을 사용한 네트워크의 경우가 사용하지 않은 네트워크보다 전체적으로 상대오차가 작기 때문에, 손실 모듈을 사용해야 하는 이유를 충분히 설명할 수 있다.

Flomaster로 예측한 직선형 래버린스 실의 누설유량을 실험⁽¹²⁾ 자료와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Table 1에 정리한 것과 같이 실험을 수행한 상류, 하류의 압력비 1~2 범위 일 때 래버린스 실에서 발생하는 누설 유량이 1차원 코드인 Flomaster로 실험과 거의 유사하게 예측되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 1차원 코드의 사용 타당성을 확인하고 1차원 코드에서 고려하지 않은 직선형 래버린스 실에서 이빨

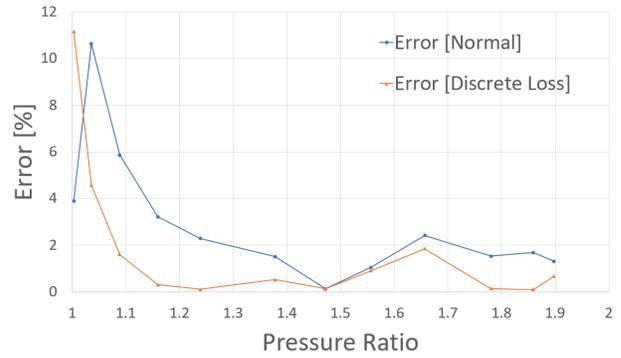


Fig. 5 Error of Network

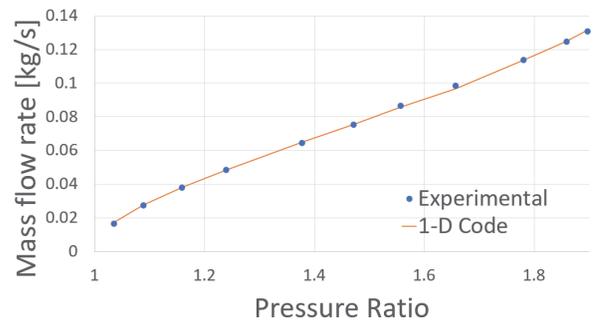


Fig. 6 Mass Flow Rate of Straight-Through Seal

의 높이는 해석을 수행한 조건에서는 래버린스 실의 성능에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 다만, Du⁽¹⁶⁾ 등에 의하면 핀의 높이가 높아질수록 토출 계수가 증가한다는 실험결과가 나와 위와 같은 핀의 높이의 영향을 받지 않는 것은 1차원 코드에서 한정된 가정이다. 이는 식 (1)과 Fig. 1에 나와있는 것처럼 계산 변수에 핀의 높이가 없기 때문이다.

3. 계단형 래버린스 실의 1차원 해석

3.1 계단형 래버린스 실의 설계식 분석 및 검증

계단형 래버린스 실은 직선형 래버린스 실에 비해 누설 유량을 줄이는 성능을 더 높이는 것으로 보고되어 왔다.^(7,8) 계단형 래버린스 실은 계단에서 유동의 박리 재부착이 발생하는데 이때 발생한 박리 기포가 하류의 이빨까지 이어질 때 밀봉 성능이 높아졌다.⁽⁹⁾

계단형 래버린스 실은 계단이 존재하여 계단의 위치, 높이 등 직선형 래버린스 실에서는 없는 새로운 기하 변수가 발생한다. 이 중에는 계단의 높이가 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인된 바 있다.⁽⁹⁾ 1차원 코드인 Flomaster에는 계단형 래버린스 실 모듈이 내장되어 있고 내장 함수는 Vermes⁽¹¹⁾의 실험식을 사용한다. Vermes⁽¹¹⁾가 실험을 수행한 형상은 Fig. 7와 같다.

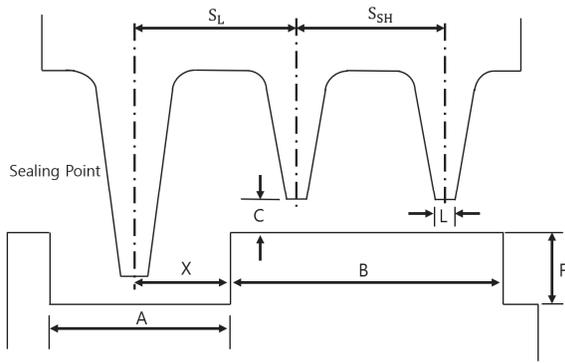


Fig. 7 Stepped Labyrinth Seal by Vermes⁽¹¹⁾

Vermes⁽¹¹⁾는 Martin⁽¹⁰⁾의 식을 기반으로 하여 계단형 실의 질량유량에 대한 다음과 같은 실험식을 도출하였다.

$$\frac{\dot{m} \sqrt{R \cdot T_1}}{P_1 \cdot A \cdot K} = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2}{N' - \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}} \quad (10)$$

$$N' = (y' + 2 - \alpha) \cdot N^* \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{8.52}{\frac{S_{SH} - L}{C} + 7.23} \quad (12)$$

$$y' = (1 + \xi) + \left(\frac{C}{t}\right)^2 \quad (13)$$

식 (10)는 질량유량을 기본으로 하여 가상 실 개수 (Virtual Number of Seal) N' 를 적용하여 만들어낸 식이다. 가상 실 개수 N' 은 식 (11)으로 구한다. 식 (11)의 N^* 는 실의 개수인 N 일 때 $N/3$ 으로 구한다.

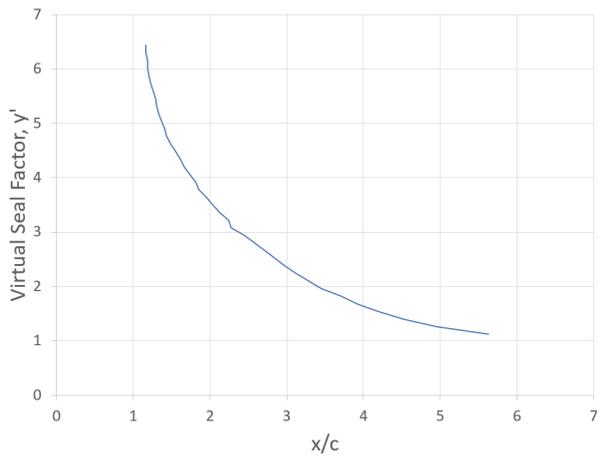


Fig. 8 Virtual Seal Factor for Stepped Labyrinth Seal

y' 는 가상 실 계수(Virtual Seal Factor)로서 식 (12)과 같이 정의된다. 식 (12)에서 ξ 는 굴절 손실 계수 (Elbow Loss Factor)를 의미하고, C 는 간극, s 는 토출 제트의 폭(width of exhausting jet)을 의미한다. 결과적으로 y' 는 Vermes⁽¹¹⁾가 제시한 Fig. 7의 계단형 실의 구조에서 X/C 에 따라 변화하는데 그 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

계단형 래버린스 실의 경우는 축방향 길이(Axial distance)인 X 와 간극인 C 에 값에 따라서 누설효과가 변하게 되는 것을 확인할 수 있다. 계단형 래버린스 실의 모델의 검증을 위해서 Kwanka⁽¹⁷⁾의 실험과 Flomaster의 계산을 비교해보았다. Kwanka⁽¹⁷⁾가 채택한 기하 형상과 조건은 Fig. 9, Table 2에 정리하였다.

Flomaster의 기준 형상인 Vermes⁽¹¹⁾ (Fig. 7)와 Kwanka⁽¹⁷⁾의 형상 (Fig. 9)을 비교해 보면 이빨의 형태에서 차이가 있다. Vermes⁽¹¹⁾는 사다리꼴 형태, Kwanka⁽¹⁷⁾는 직사각형 이빨을 사용하였는데 Yang 등⁽¹⁸⁾에 의하면 이 두가지 형상의 누설유량은 거의 유사한 것으로 알려져 있어 식 (7)에서 L 로

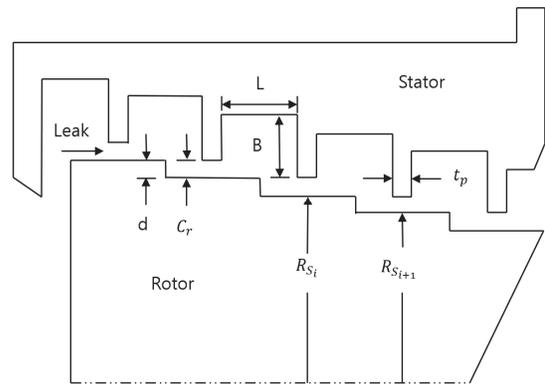


Fig. 9 Stepped Labyrinth Seal by Kwanka⁽¹⁷⁾

Table 2 Geometrical Parameters of Stepped Seal

Seal operating conditions	
Fluid	Air
Exit Pressure	1.01 bar
Inlet temperature	300 K
Shaft rotational speed	750 rpm
Gas constant	287 N · m/kg · K
Seal geometrical conditions	
Number of teeth (N)	5
Height of steps (d)	1.5 mm
Shaft radius (R_s)	90 mm
Radial clearance (C_r)	0.5 mm
Tooth pitch (L)	9.2 mm
Tooth height (B)	7.5 mm
Tooth width (t_p)	0.8 mm

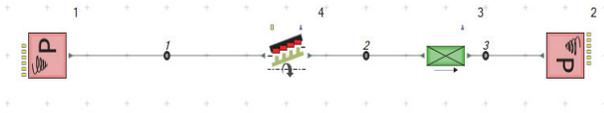


Fig. 10 Stepped Labyrinth Seal Network in Flomaster

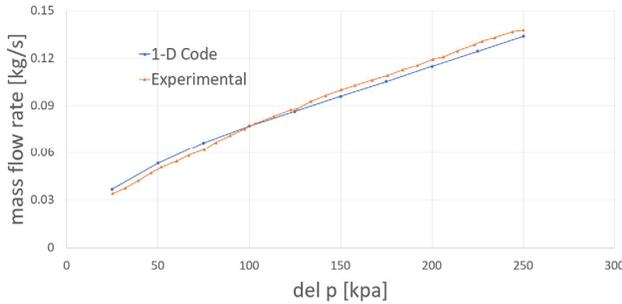


Fig. 11 Mass Flow Rate of Stepped Seal

반영하여 Flomaster 해석을 수행하였다. 계단형 래버린스 실의 유동 네트워크는 직선형 래버린스 실과 마찬가지로 선 회류를 포함한 압력 모듈을 상류, 하류에 배치하고 중간에 래버린스 실 모듈과 손실 모듈을 추가하여 Fig. 10와 같이 구성하였다.

Flomaster로 예측한 계단형 래버린스 실의 누설유량을 실험자료와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 상대오차가 모든 구간에서 5% 이내의 값을 가지게 되어 계단형 래버린스 실의 성능을 유사하게 예측할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

하지만 Chun 등⁽⁹⁾의 3차원 CFD 결과에서는 이빨의 간격, 계단의 위치에서는 토출계수가 크게 변화하지 않았으나 계단의 높이에 따라 토출계수가 크게 변하였다. 그러나 Flomaster에서 채택한 Vermes⁽¹¹⁾의 식인 식 (10)~(13)에는 계단 높이가 반영되어 있지 않다. 이 문제를 해결하기 위하여 Chun 등⁽⁹⁾의 형상에 대하여 Flomaster로 토출계수를 예측하여 계단 높이의 영향을 비교하였다.

Chun 등⁽⁹⁾은 Wittig 등⁽⁵⁾의 직선형 래버린스 실 실험의 토출계수와 3-D CFD의 계산 결과를 비교했다. 여러 난류 모델을 비교하여 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 기반의 난류 모델인 k-ε 모델이 실험의 토출계수와 오차율이 0.7%로 실험값과 잘 맞는 것을 확인했고, Kim⁽¹⁹⁾ 등은 Wittig 등⁽⁵⁾의 계단형 래버린스 실에 대해서 k-ε 모델과 LES(Large Eddy Simulation) 모델의 계산을 비교하여 토출 계수의 차이가 거의 없음을 확인하였다. 따라서 RANS로 LES와 유사한 수준으로 잘 예측할 수 있음을 알아내었다.

3.2 계단형 래버린스 실의 계단 높이 효과

Chun 등⁽⁹⁾이 3차원 CFD를 수행한 형상은 Fig. 12과 같다.

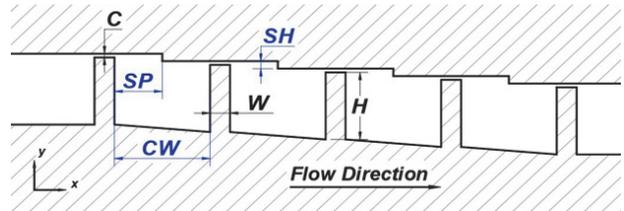


Fig. 12 Stepped Labyrinth Seal by Chun⁽⁹⁾

Table 3 Geometrical Parameters of Stepped Seal

Geometry Parameter	Stepped Seal
Number of teeth (N)	5
Clearance (C)	0.5 mm
Tooth width (T)	2.5 mm
Tooth height (H)	10.5 mm
Cavity width (CW)	3.5 - 33.5 mm
Step height (SH)	0 - 5.6 mm
Step position (SP)	0.15 - 10.35 mm

Table 4 Boundary Conditions of Numerical Analyses

Surface	Boundary Condition
Inlet	Pressure inlet, 300 K, 202,650 Pa
Outlet	Pressure outlet, 300 K, 101,325 Pa
Shaft	0 RPM, adiabatic wall
Casing	0 RPM, adiabatic wall

Chun 등⁽⁹⁾이 3차원 CFD를 수행한 래버린스 실의 형상 조건을 Table 3,4에 정리하였다.

Chun 등⁽⁹⁾은 CW와 SH를 각각 무차원화 (Nondimensionalization) 되어 CW*와 SH*로 표현되었고, SP는 공동의 폭으로 무차원화 되어 SP*로 표현되었다. 유동 네트워크는 이전의 실험인 Fig. 10와 같이 구성하였다.

Flomaster로 예측한 압력비 2인 조건에서의 주요 변수인 CW*, SP*, SH*를 바꾸며 토출계수를 Fig. 11에 제시하였다.

Fig. 13(a)에 오렌지색으로 표시된 3차원 CFD 결과에서는 무차원화 된 공동부의 폭인 CW* (Fig. 13 참조)가 23 이하에서 토출계수가 소폭 감소하고, 23 이상에서 급격히 증가 후 일정하게 수렴하는 모양세를 보이고 있다. 하지만 1차원 code에서는 오히려 CW*가 증가할수록 토출 계수가 조금씩 감소하는 모양세를 보여 반대의 상황을 보이고 있다. CW*가 30 이하인 구간에서 오차율이 10% 이내이고, 30 이상인 구간에서는 거의 차이가 없다. 이는 식 (10)~(13)을 통해 확인할 수 있다. S_{SH}는 CW*가 증가함에 따라서 커지게 되고, 결국 질량유량이 감소하는 결과가 나오게 된다. 1차원 code를 통해서 CW*의 변화에 대한 토출계수는 일정한 값에서 사용하는 데에 무리가 없음을 확인하였다.

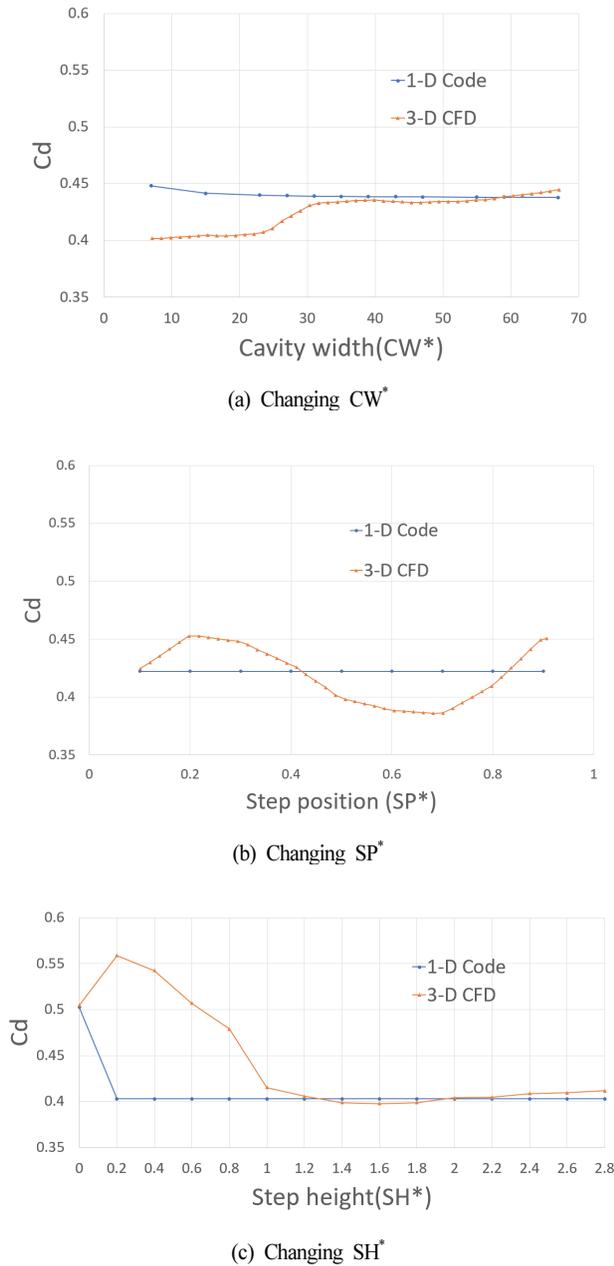


Fig. 13 Discharge Coefficient of Stepped Seal

Fig. 13(b)의 3차원 결과에서는 무차원화 된 계단의 위치인 SP^* (Fig. 13 참조) 가 0.1~0.2 에서 토출계수가 증가하다가 0.2~0.7 까지 감소하고 다시 0.7 이상에서는 증가하는 모습을 보여주고 있지만, 1차원 code에서는 하나의 값으로만 계산이 되어진다. 하지만 전체적인 오차율은 10% 이내의 값을 가지고 있어 초기설계에 도움을 줄수 있는 수준이다.

Fig. 7의 축방향 길이인 변수 X 가 SP^* 에 해당하지만, X 는 축방향홈길이 (Axial groove length)에 해당하는 A 의 값의 절반인 $A/2 = X$ 로만 계산이 되기 때문에 같은 값이 나올 수 밖에 없다.

Fig. 13(c)의 3차원 CFD 결과에서는 계단 높이인 SH^* (Fig. 13 참조)가 1 이내에서 계단 효과가 현저히 감소하여

토출계수가 30%까지 증가하는 것을 예측했으나 1차원 code는 이를 예측하지 못하는 것을 관찰할 수 있다. $SH^* = 0$ 일 때는 직선형 래버린스 실과 같은 형상이 되어서 직선형 래버린스 실 컴포넌트를 사용하여 계산을 진행하였고, 그 외의 값에서는 계단형 래버린스 실 컴포넌트에서 변경 가능한 Fig. 7의 A (Groove axial length)와 S (Fin pitch)가 모든 SH^* 에서 동일하기 때문에 $SH^* = 0.2-2.8$ 에서는 동일한 값을 계산하게 되어 오차가 크게 발생하였다.

계단의 높이가 간극의 2.4배 이상이 되는 $SH^* = 1.2$ 이상의 영역에서는 Flomaster로 예측한 토출계수가 3차원 CFD 예측 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 계단형 래버린스 실이 직선형 래버린스 실에 비해 토출계수 저감 효과를 보이는 영역에서는 Vermes⁽¹¹⁾ 실험식이 성능을 적절히 예측함을 확인하였다. 따라서 계단 높이를 포함하여 새로운 설계식을 개발하는 것보다 기존의 설계식을 활용하면서 설계 변수를 입력할 때 계단의 높이가 간극의 2.4배 되도록 입력을 유도하는 방향이 합리적인 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 1차원 코드로 가스터빈 래버린스 실의 작동 조건에서 밀봉성능이 적절히 예측되는지 검토하였다. 직선형 래버린스 실에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 실험자료와 비교하였고 계단형 래버린스 실에 대해서는 계단 높이의 영향을 3차원 CFD 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 직선형 래버린스 실에서의 실험값과 Flomaster의 계산값의 차이는 거의 없으며, 가스터빈에서 직선형 래버린스 실의 밀봉 성능은 래버린스 실과 저장체 모듈을 조합한 1차원 코드로 적절히 예측할 수 있었다.
- 2) 실의 계단부 높이가 간극보다 2.4배이상 이 되어야 Vermes⁽¹¹⁾ 설계식으로 계단형 래버린스 실의 밀봉 성능을 적절히 예측할 수 있었다. 계단부 높이를 간극의 2.4배 이상이 되도록 하는 설계 지침이 프로그램에서 제시될 것을 제안한다.
- 3) Vermes⁽¹¹⁾ 식에서 고려하지 않는 래버린스 실의 이빨의 높이는 가스터빈 2차 유로 조건에서도 밀봉 성능에 큰 영향을 미치지 못하였다.

이번 해석에서는 축의 회전 효과를 고려하지 않았으나 상하류의 선회량을 설정하여 회전 효과를 고려하는 해석에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD220004JD).

References

- (1) Boyce, M.P., 2011, "Gas Turbine Engineering Handbook," Elsevier, Amsterdam.
- (2) Goldstein, R.J., Eckert, E.R.G. and Ramsey, J.W., 1968, "Film Cooling with Injection Through Holes: Adiabatic Wall Temperatures Down-Stream of a Circular Hole," ASME J. Eng. Power, Vol. 90, No. 4, pp. 384~393.
- (3) Ahn, J, Song, J.C. and Lee, J.S, 2021, "Fully Coupled Large Eddy Simulation of Conjugate Heat Transfer in a Ribbed Channel with a 0.1 Blockage Ratio," Energies, Vol. 14, No. 8. p. 2096.
- (4) Zhao Y. and Wang C., 2021, "Shape Optimization of Labyrinth Seals to Improve Sealing Performance," Aerospace, Vol. 8, No. 4, p. 92.
- (5) Wittig, S., Schelling, U., Kim, S. and Jacobsen, K., 1987, "Numerical Predictions and Measurements of Discharge Coefficients in Labyrinth Seals," Proceedings of the ASME Turbo Expo, Paper No. 87-GT-188.
- (6) Zhao, W., Nielsen, T.K., and Billdal, J.T., 2010, "Effects of Cavity on Leakage Loss in Straight-through Labyrinth Seals," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 12, No. 1, p. 012002.
- (7) Kim, T.S. and Cha, K.S., 2009, "Comparative Analysis of the Influence of Labyrinth Seal Configuration on Leakage Behavior," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No.10, pp. 2830~2838.
- (8) Yücel, U., 2004, "Calculation of Leakage and Dynamic Coefficients of Stepped Labyrinth Gas Seals," Applied Mathematics and Computation, Vol. 152, No. 2, pp. 521~533.
- (9) Chun, Y.H. and Ahn, J., 2022, "Optimizing the Geometric parameters of a Stepped Labyrinth Seal to Minimize the Discharge Coefficient," Processes, Vol. 10, No. 10, p. 2019.
- (10) Martin, H.M., 1908, "Labyrinth Packings," Engineering Vol. 85, pp. 35~36.
- (11) Vermes, G., 1961, "A Fluid Mechanics Approach to the Labyrinth Seal Leakage Problem," ASME J. of Engineering for Power, pp. 161~169.
- (12) Prasad, B.V.S.S.S., Manavalan, V.S. and Rao, N., 1997, "Computational and Experimental Investigations of Straight-through Labyrinth Seals," Proceedings of the ASME Turbo Expo, Paper No. 97-GT-326.
- (13) Castelli, N., Bacci, T., Picchi, A., Winchler, L., Facchini, B., 2023, "Experimental Assessment of Correlative Approaches for the Prediction of Leakage Flow through Labyrinth Seals," Applied Sciences Vol. 13, No. 12
- (14) Park, S.Y., Kim, J.H., Park, P.G., and Yu, B.I., 2009, "Analysis on the Filling Mode of Liquid Oxygen to the Launch Vehicle Using Flowmaster," Proceedings of the KSPE Fall Annual Meeting, pp. 335~338.
- (15) Fang, C., Cai, B.H., Ma, S.H., and Li, B., 2018, "Simulation and Experimental Study on Flow and Heat Transfer of Ship Central Cooling System," MATEC Web of Conferences, Vol. 213, p. 04001.
- (16) Du, F.Q., Ji, H.F., Shuai, H.S., Zhang, B., Wang, D., Lu, H.Y., Deng, M.C, 2013, "Orthogonal experiment of effect of fin geometrical parameters on leakage of straight-labyrinth seals," J. Aerosp. Power, Vol. 28, No. 4, pp. 825~831.
- (17) Kwanka, K., 2000, "Dynamic Coefficients of Stepped Labyrinth Gas Seals," ASME. J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 122, No. 3, pp. 473~477.
- (18) Yang, J., Zhao, F., Zhang, M., Liu, Y., and Wang, X., 2021, "Numerical Analysis of Labyrinth Seal Performance for the Impeller Backface Cavity of a Supercritical CO₂ in Radial Flow Turbine," Computer Modeling in Engineering & Sciences, Vol. 126, No. 3, pp. 935~953.
- (19) Kim, J.H. and Ahn, J, 2021, "Large Eddy Simulation of Leakage Flow in a Stepped Labyrinth Seal," Processes, Vol. 9, No. 12, p. 2179.