

가스터빈 래버린스 실 기초연구 동향

이수인* · 강영준* · 김동현** · 곽재수*†

Basic Research Trends on Labyrinth Seal of Gas Turbine

Soo In Lee*, Young Jun Kang*, Dong Hyun Kim**, Jae Su Kwak*†

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Labyrinth seal(래버린스 실), Straight solid seal(직선 솔리드 실), Stepped solid seal(스텝 솔리드 실), Straight honeycomb seal(직선 허니콤 실), Stepped honeycomb seal(스텝 허니콤 실)

ABSTRACT

Labyrinth seal is a device that reduces leakage flow between rotating and stationary structures by placing a number of tooth. In this paper, the published literature on the labyrinth seal since 1960s was reviewed and summarized. The labyrinth seals were classified according to their configurations into straight solid, stepped solid, straight honeycomb, and stepped honeycomb seals. In the early years, only experimental techniques were used. However, since the 2000s, PIV(Particle Image Velocimetry), LDV(Lase Doppler Velocimetry), and computational analytical techniques were performed in parallel to measure local pressure and flow field. Various correlations for labyrinth seals were presented and effects of seal parameters on the leakage flow were also discussed. Overall, the leakage flow was mainly influenced by the number of teeth, seal clearance, tooth tip thickness and front inclination angle.

기호 설명

A 간극 면적(area of tooth clearance) [mm^2]
 C 간극(seal clearance) [mm]
 C_d 토출계수(discharge coefficient)
 $C_{d,con}$ 최적형상 토출계수(optimized discharge coefficient)
 $C_{d,new}$ 기존형상 토출계수(conventional discharge coefficient)
 f 앞전 각도 보정계수(front inclination correction factor)
 h 이빨높이(heigh of tooth) [mm]
 H 계단높이(heigh of step) [mm]
 k carry-over factor
 k_1 (new carry-over factor)
 k_2 (carry-over factor by Zimmermann)
 K 오리피스 간극 상수(clearance factor of orifice)
 L 이빨 끝 너비(tip width of tooth) [mm]
 m 상수(constant)
 \dot{m} 질량유량(mass flow rate) [kg/s]
 \dot{m}_{actual} 측정질량유량(actual mass flow rate) [kg/s]

\dot{m}_{ideal} 이론질량유량(ideal mass flow rate) [kg/s]
 n 상수(constant)
 N 이빨 개수(number of tooth)
 Nu 누셀 수(Nusselt number)
 P 정압(static pressure) [Pa]
 P_0 입구 정압(inlet static pressure) [Pa]
 P_i i 번 째 이빨 정압 [Pa]
 R 기체상수(specific gas constant) [$KJ/kg \cdot K$]
 Re 레이놀즈 수(Reynolds number)
 t 이빨 간격(pitch) [mm]
 T 온도(temperature) [K]
 T_0 입구온도(inlet temperature) [K]

그리스문자

α 이빨 각도(degree of tooth) [degree]
 β gland factor

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 (School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

** 한화에어로스페이스 항공우주연구소 민수엔진개발팀 (Commercial Engines Development Team, Aerospace R&D Center, Hanwha Aerospace)

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

- γ 비열비(specific heat ratio)
- θ 열확산율(thermal diffusivity) [m^2/s]
- \mathcal{L} 잔류에너지 상수(residual energy factor)
- Φ 유량계수(flow function) [$kg\sqrt{K}/kNs$]
- π 압력비 P_0/P_∞ (pressure ratio)
- ρ 밀도(density) [kg/m^3]

1. 서 론

가스터빈의 성능향상을 위해 회전부와 정지부 사이에서 발생하는 누설유동을 억제하여 손실을 줄이려는 노력이 지속되고 있다. 래버린스 실은 가스터빈의 2차 유동 시스템에 적용되는 매우 중요한 기술 중 하나이며, 회전부품과 정지부품사이에서 생기는 간극에서 큰 압력구배가 존재할 때 생기는 누설유동을 줄이기 위해 적용된다. 누설유동을 감소시키기 위한 최신 기술들이 지속적으로 발달되어 왔음에도 불구하고 비교적 고전적인 기법인 래버린스 실은 단순한 구조, 내열성, 넓은 압력 범위에서 적용될 수 있다는 이유로 여전히 널리 쓰이고 있다. 회전 블레이드 팁 실에 적용되는 래버린스 실은 여러 개의 이빨을 설치하여 유동 저항을 증가시킴으로써 기밀성능을 최대화시키는 방식으로 설계가 이루어진다.

수십 년 동안 가스터빈 성능 향상에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라 래버린스 실에 대한 정확한 누설유동 예측 또한 중요성이 대두되고 있다. 래버린스 실의 기밀특성은 팁 이빨 개수, 팁 형상, 팁 간극에 따라 달라진다. 또한 실제 엔진 구동 시 발생하는 열팽창과 원심력에 의해 팁 간극, 팁 형상이 엔진 작동조건에 따라 달라진다. 따라서 래버린스 실을 적용하기에 앞서 다양한 팁 형상의 매개변수 및 유동 조건에서의 기밀특성에 대한 데이터 구축을 하는 것은 필수적이다. 그러나 가스터빈에 적용되는 래버린스 실에 대한 국내 연구는 드문 실정이고, 해외에서도 제한적인 형상과 압력비에 대한 연구 결과만 공개된 실정이다. 따라서 본 논문에는 항공기용 가스터빈의 블레이드 팁에 적용할 래버린스 실 기밀 특성 실험 연구를 수행하기에 앞서, 1960년대부터 최근까지 진행된 가스터빈 엔진에 적용되는 래버린스 실 분야의 해외 학술대회 및 학회지에 발표된 논문을 조사, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 다양한 래버린스 실 형상에 대한 연구

2.1.1 직선 솔리드 실에 관한 연구

Fig. 1은 전형적인 직선 솔리드 실의 형상을 나타낸 것이

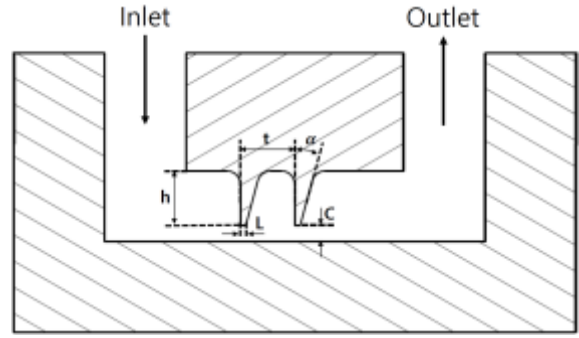


Fig. 1 Schematic of straight solid labyrinth seal

며, 일반적으로 특정한 각도를 갖는 여러 개의 이빨을 반복적으로 배치한다. 누설유량은 이빨 높이, 간격, 각도, 간극 등의 형상매개변수에 따라 크게 달라진다.

Vermes 등⁽¹⁾은 직선 솔리드 실에 대한 형상매개변수(이빨 높이, 간격 등)에 따른 질량유량을 예측할 수 있는 해석적 모델을 개발하고 식 (1)~(2)와 같은 상관식을 도출하였다. 그 결과 팁 간극이 작을수록 상관식 대비 작은 오차를 가지는 것을 확인하였으며, 기밀 성능에 대한 래버린스 실의 초기 연구 데이터를 정립하였다.

$$\dot{m} = 24.82K \frac{A}{\sqrt{RT_0}} \frac{P_0}{\sqrt{1-\mathcal{L}}} \beta \quad (1)$$

여기서,

$$\beta = \sqrt{\frac{1-(P_i/P_0)^2}{N-\ln(P_i/P_0)}} \quad (2)$$

Stocker 등⁽²⁾은 직선 솔리드 실, 계단 솔리드 실 등 다양한 실 형상에 대해 실험적 연구를 진행하여 형상변수에 대한 기밀특성을 파악하고 연구 초기 단계의 실험 데이터를 발표하였으며 이는 최근까지도 많은 연구자들에 의해 인용되고 있다.

Zimmermann 등⁽³⁾은 Hodkinson 등⁽⁴⁾이 제안했던 직선 솔리드 실 식 (3)~(4)에 새로운 인자를 적용하여 수정된 식 (5)~(6)을 제안하였다.

$$\dot{m} = k_2 \cdot C_d \cdot m_{ideal} \quad (3)$$

여기서,

$$k_2 = k_1 \cdot k \quad (4)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{N}{N-1}} \quad (5)$$

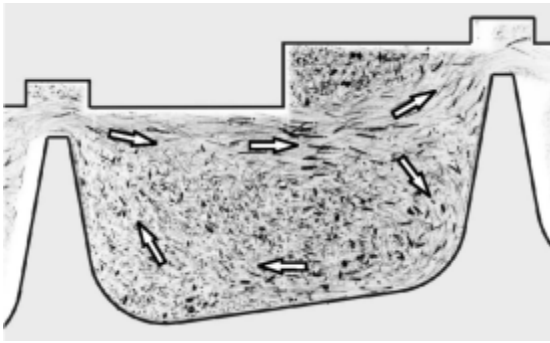


Fig. 2 Visualization of flow through a labyrinth seal with steps⁽⁵⁾

$$k = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{N-1}{N} \cdot \frac{C/t}{C/t+0.02}}} \quad (6)$$

가스터빈 엔진이 작동할 때 로터는 열팽창으로 인해 길이 변화가 발생하고 이로 인해 로터와 터빈 케이싱 사이의 틈 간극 또한 변한다. 과도한 열팽창이 이루어지게 되면 틈 간극은 작아지고 로터와 터빈 케이싱 사이에 심한 마모가 발생해 부품손상이 일어나게 된다. 이러한 경우에 대비하여 Denecke 등⁽⁵⁾은 가느다란 홈을 설치하여 Fig. 2와 같은 틈과 여유 공간을 갖는 새로운 형상에 대하여 기밀특성 연구를 진행하였다.

Kim 등⁽⁶⁾은 Fig. 3, 5의 직선 솔리드 실, 계단 솔리드 실에 대하여 다양한 압력비와 틈 간극에 대해 실험적, 수치적 연구를 진행하였다. 그 결과 직선 솔리드 실은 틈 간극에 따라 유동 특성이 크게 변하지 않았지만 계단 솔리드 실은 틈 간극에 따라 유동특성이 크게 변화함을 보였다.

Micio 등⁽⁷⁾은 이빨의 개수가 많은 래버린스 실 형상에서 이빨 간격, 틈 간극, 압력비에 따른 토출계수를 실험적으로 측정하였고 PIV기법을 이용한 틈 형상에 따른 유동가시화를 진행하여 누설유동의 속도장을 측정하였다. 그 결과, 다양한 형상 변수에 대한 유동장 특성 파악과 토출계수 및 기밀성능에 대한 평가가 이루어졌다. 또한 Fig. 4와 같이 실험 결과를 식 (7)~(9) 로 기반으로 비교 및 검증하였다.

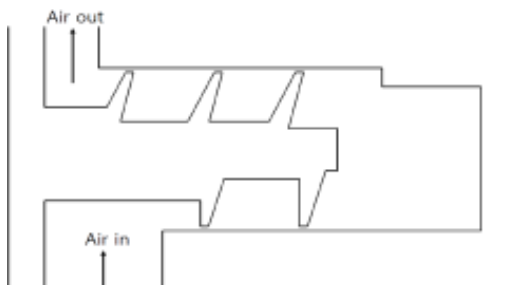


Fig. 3 Straight solid double-sided labyrinth seals⁽⁶⁾

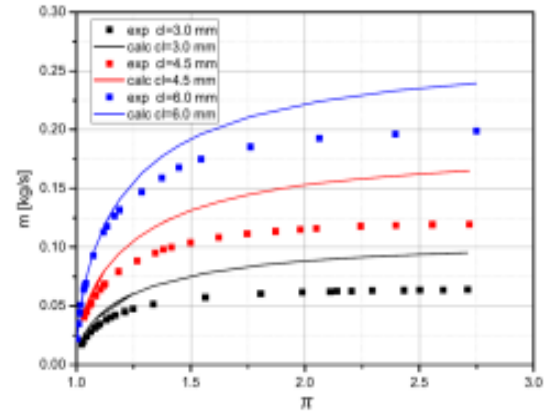


Fig. 4 Mass flow rate versus pressure ratio⁽⁷⁾

$$\dot{m} = C_d \cdot k \cdot A \sqrt{\frac{P_i^2 - P_{i+1}^2}{RT}} \quad (7)$$

여기서,

$$C_d = \frac{\pi}{\pi + 2 - 5x + 2x^2} \quad \text{where} \quad x = \left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \quad (8)$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{1-\theta}} \quad \text{where} \quad \theta = \frac{8.52}{t/C + 7.23} \quad (9)$$

Liu 등⁽⁸⁾은 WS(Winglet-shroud) 틈에서 누설을 더욱 줄이기 위해 추가로 두 개의 이빨을 틈에 설치하였다. 이 형상에 대해 실험 결과와 전산해석적 결과 모두 기밀성능이 향상됨을 보였다.

Dogu 등⁽⁹⁾은 전산해석적 기법을 통하여 둥근모양의 이빨과 사다리꼴 마찰 홈이 있는 래버린스 실의 누설에 대해 연구하였다. 마모에 의해 둥글어진 이빨 주위에 매끄러운 흐름이 형성되어 마모되기 전보다 더 많은 누설이 일어남을 전산해석을 통해 확인하였다. 또한 매개변수인 사다리꼴 형상 마찰 홈의 기하학적 치수(폭, 깊이, 벽 각)는 누설에 큰 영향을 미치는 것을 보였다.



Fig. 5 Stepped solid double-sided labyrinth seals⁽⁶⁾

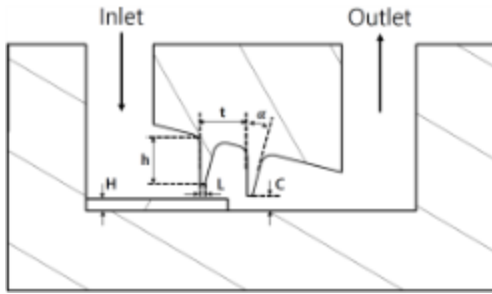


Fig. 6 Schematic of stepped solid labyrinth seal

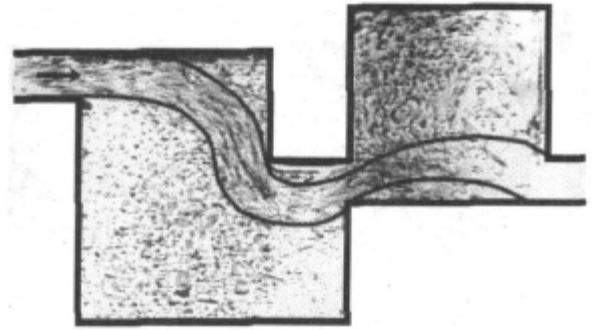


Fig. 8 Visualization images of the throughflow path⁽¹¹⁾

2.1.2 계단 솔리드 실에 관한 연구

Fig. 6은 전형적인 계단 솔리드 래버린스 실의 구조를 나타낸 것으로, 누설 유동은 계단의 형태와 실의 배치 등에 따라 달라진다.

Wittig 등⁽¹⁰⁾은 계단 래버린스 실의 누설유동 특성뿐만 아니라 열전달에 대한 연구를 실험적, 전산해석적으로 진행하여 직선 솔리드 래버린스 실과 비교 분석하였다. 실험은 정상상태 조건에서 수행되었고 팁 형상, 압력비에 따른 온도 분포와 열전달 계수를 전산해석으로 계산하고 실험 결과와 비교 및 검증하였다. 그 결과, 계단 래버린스 실의 누설수에 대한 상관식을 식 (10)과 같이 도출하였다.

$$Nu = n Re^n \left(\frac{t}{C}\right)^m \quad (10)$$

Rhode 등⁽¹¹⁾은 Fig. 7과 같은 새로운 환형 홈이 추가된 계단 래버린스 실에 대해 연구하였으며 Fig. 8과 같이 유동가시화를 통해 실 구조에 따른 유동장 변화를 관찰하였다.

Willenborg 등⁽¹²⁾은 다양한 레이놀즈 수 범위에서 계단 솔리드 실의 기밀특성에 대해 실험적 연구를 진행하였는데, 낮은 레이놀즈 수 영역에서는 레이놀즈 수가 증가할수록 토출계수 또한 증가하였고, 높은 레이놀즈 수 영역에서는 토출계수의 변화가 거의 없이 일정하게 나타났다. 또한 실험 장치의 스케일에 따른 실험결과의 영향에 관한 연구도 같이 진행하였는데 실험장치의 스케일이 클수록 실험 데이터의

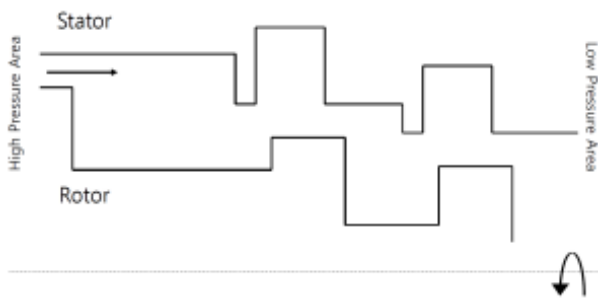


Fig. 7 New annular groove stepped labyrinth seal⁽¹¹⁾

정확도가 높음을 보였다.

Michaud 등⁽¹³⁾은 계단 래버린스 실의 누설유동을 유동가시화, 압력 측정, PIV를 이용해 연구했다. 모델 구성은 6가지로 기본 설계에서 계단 높이와 이빨위치 및 각도를 바꾸었다. PIV기법을 통해 계단 래버린스 실 누설유동의 물리적 이해를 제공하였고 식 (11)~(13)을 사용하여 누설유동에 대한 매개변수의 영향을 비교, 분석하였다.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{ideal} = A \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} P_1 \rho_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\Phi = \frac{\dot{m} \sqrt{T_1}}{P_1 A} \quad (13)$$

Vakili 등⁽¹⁴⁾은 실험적 기법과 해석적 기법 모두 사용하여 입·출구 압력비와 계단 높이에 따른 계단 솔리드 실의 유량계수와 압력 분포를 측정하였다. 또한 PIV기법을 사용하여 유동장을 측정하고 전산해석결과와 비교하였다. 압력비가 2에서 10에서 증가함에 따라 유량계수가 증가하지만 초킹된 이후에는 유량계수가 일정해지는 것을 확인하였다. 계단 높이가 커질수록 누설유동은 감소하였지만 그 영향은 크지 않음을 보였다.

Kuwamura 등⁽¹⁵⁾은 래버린스 실에서 공동 형상의 최적화를 통해 와류형상을 제어했다. 실험은 실제 스팀터빈의 운전 조건에서 수행되었다. 또한 전산해석, PIV실험도 병행하였으며, 공동 안의 와류 중심이 이빨 끝의 높이와 같을 때 하강 유동이 강해져 누설유동이 가장 감소함을 보였다. 식 (14)는 Martin 방정식⁽¹⁸⁾을 기반으로 수정된 상관식이고 $C_{d,new}$, $C_{d,con}$ 의 비를 통해 실의 성능을 평가하였다. 결과적으로 최적 형상이 기존 형상의 실보다 토출계수를 30%까지 감소시킴을 보였다.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{AP_{in}} \sqrt{RT_{in}} / \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{1}{\pi}\right)^2}{N + \ln \pi}} \quad (14)$$

Kang 등(16)은 팁의 이빨개수, 간극에 따른 계단 솔리드 실, 직선 허니콤 실의 기밀특성을 알아보기 위해 Fig. 9의 실험 장치를 사용하여 실험적 연구를 수행하였고, 수치해석적 연구 또한 진행하였다. Fig. 10은 실험 결과이며 이빨 개수가 많을수록 계단 솔리드 실, 직선 허니콤 실 모두에서 누설유동에 대한 기밀성능이 우수함을 확인하였다. 같은 팁형상일 경우 허니콤 실보다 솔리드 실의 기밀성능이 우수함을 확인하였다. 또한 솔리드 실과 허니콤 실 두 경우 모두 팁 간극이 감소할수록 누설유동이 감소함을 보였다.

Zhang 등(17)은 가스터빈에서 일반적으로 사용되는 두 가지 종류 래버린스 실의(아래로 향하는 계단 래버린스와 위로 향하는 계단 래버린스) 누설 특성에 대한 매개변수(실 간극, 이빨 끝 두께, 이빨 개수, 이빨 앞 각도)의 영향을 실

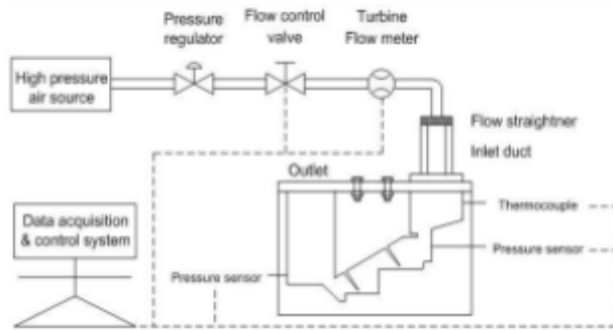


Fig. 9 Test facility⁽¹⁶⁾

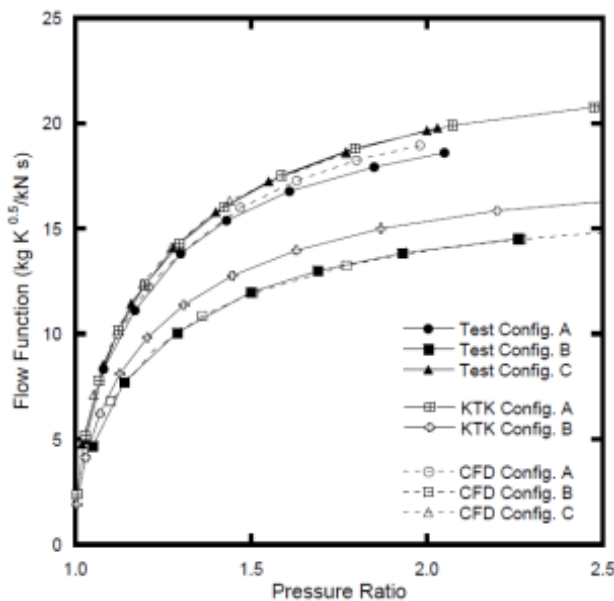


Fig. 10 Flow function with pressure ratio (Solid, C=6.0mm)⁽¹⁶⁾

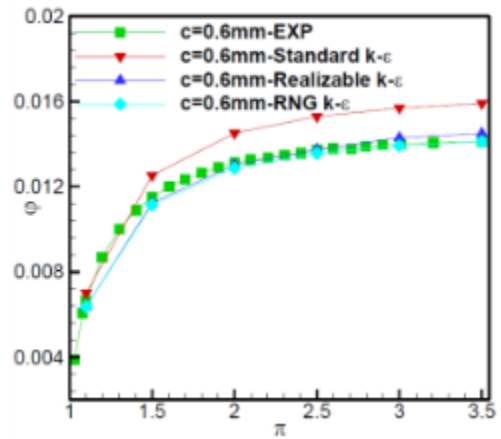


Fig. 11 Comparison between the calculated and measured flow function⁽¹⁷⁾

험적, 전산해석적으로 분석했으며 Fig. 11과 같은 결과를 얻었다.

더불어 Martin⁽¹⁸⁾ 방정식을 기반으로 실험 결과 값을 통해 식 (15)를 도출하였다. 누설 손실에 대한 축적 영향을 배제하기 위해 실제 항공기 엔진 블레이드의 사이즈로 실험하였다. 이빨의 기울기, 팁 간극이 증가할수록 유량계수가 감소하였으며, 이빨 두께가 증가할수록 유량계수가 증가함을 보였다.

$$\phi = f\left(\frac{L}{C}\right)^{0.15} \left(1 - 0.8 \frac{N-1}{N}\right)^{-0.056} \sqrt{\frac{1 - \pi^{-2}}{N}} \quad (15)$$

MacCalman 등(19)은 Fig. 12와 같은 고압터빈 단에 사용될 커튼 실과 래버린스 실 조합에 대해 연구하였다. 기본적인 무차원 비율이 사용되었고 단순한 환형 실험 기구를 사용하여 실험적으로 검증하였다. 또한 고압 증기터빈 단의 작동 조건으로 전산해석기법을 사용하여 설계를 최적화하였다.

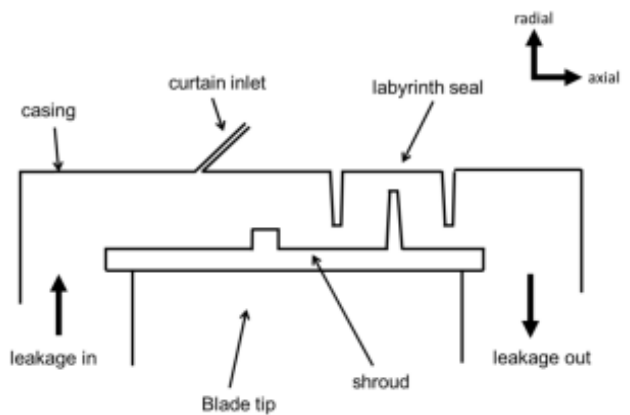


Fig. 12 Sketch of a steam turbine shroud cavity design containing a fluidic curtain seal⁽¹⁹⁾

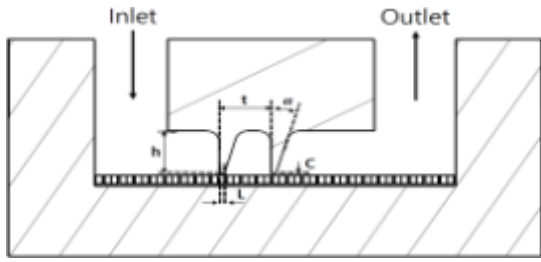


Fig. 13 Schematic of straight honeycomb labyrinth seal

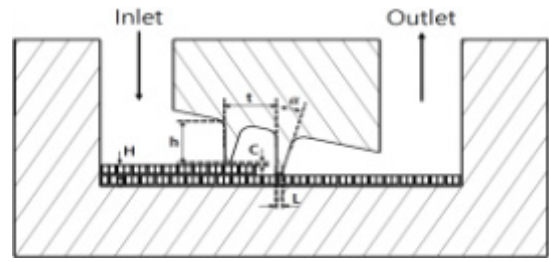


Fig. 16 Schematic of stepped honeycomb labyrinth seal

2.1.3 직선 허니콤 실에 관한 연구

래버린스 실의 기밀성능 향상을 위해 적용되는 허니콤 실은 넓은 분야에 걸쳐 사용되고 있음에도 불구하고 문헌을 통해 연구 데이터가 발표되는 경우는 매우 드물다. Fig. 13은 솔리드 바닥 대신 허니콤을 부착한 형태로 허니콤 형상의 변화에 따라 유동장과 누설유량이 변한다.

Stocker 등⁽²⁰⁾은 다양한 형상의 솔리드 실과 허니콤 실에 대한 실험을 진행하였다. 최적 형상의 허니콤 실의 경우 솔리드 실에 비해 누설 유량을 20%까지 감소시키는 것을 확인하였다. 또한 허니콤 셀의 깊이에 따른 영향을 분석하여 허니콤 사이즈에 따른 최적의 셀 깊이를 도출하였다.

Wroblewski 등⁽²¹⁾은 서로 다른 바닥형상을 가진 래버린스 실의 최적 형상을 제시했으며 Fig. 14의 형상을 포함한 4가지(허니콤 바닥, 압축된 허니콤 바닥, 마름모꼴 바닥, 솔리드 바닥)를 다루었다. 토출계수를 최소화하기 위한 매개변수는 래버린스 실의 기하학적 형상(팁 이빨의 높이, 위치, 두께, 각도)이며, 전산해석을 통해 최적화 형상모델을 선정했으며, Fig. 15와 같이 최적형상에서의 속도장을 계산하여 분석하였다. 적용된 바닥 종류에 따라 유량계수 값이 달라졌으며, 기준 허니콤 래버린스 실에 대해 유량계수가 최적형상 허니콤의 경우 17%, 압축된 허니콤의 경우 12.2%, 마름모꼴 형상의 경우 18%, 솔리드 실의 경우 17% 감소됨을 보였다.

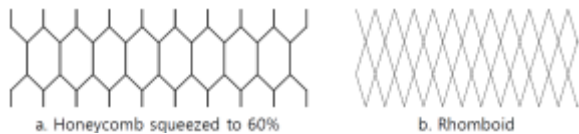


Fig. 14 Example of stepped honeycomb seal⁽²¹⁾

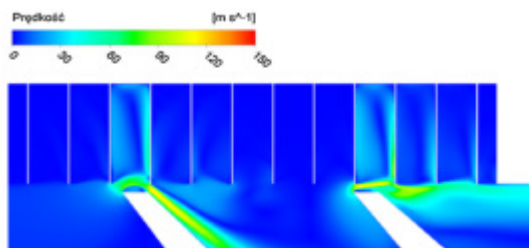


Fig. 15 Velocity contours in the honeycomb seal⁽²¹⁾

2.1.4 계단 허니콤 실에 관한 연구

Fig. 16과 같이 허니콤 래버린스 실과 계단 구조를 동시에 적용하는 연구도 진행되었다.

Schramm 등⁽²²⁾은 LDV를 이용하여 실험적으로 계단 허니콤 래버린스 실에 대해 다양한 팁 간극, 허니콤 형상에 따른 유동특성을 측정하고 유한차분법과 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 전산해석적인 연구를 진행하였다. 식 (16)을 이용하여 유동특성을 파악하였으며 이론적인 질량유량 \dot{m}_{ideal} 은 등엔트로피 조건에서 식 (17)을 통해 구하였다. 실험 결과는 입·출구 압력비가 높아질수록 토출계수가 증가하는 경향을 보였으며 1978년 Stocker 등⁽²⁾이 발표한 실험결과와 높은 일치성을 보였다.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ideal}} \tag{16}$$

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{P_0 A}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{R(\gamma-1)} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \tag{17}$$

Willenborg 등⁽²³⁾은 Fig. 17과 같은 계단 허니콤 실에 대해 LDV를 이용하여 실험적 연구를 진행하였다. 솔리드 실에서는 팁 간극이 기밀특성에 미치는 영향이 크게 나타났지만 허니콤 실에서는 팁 간극에 의한 의존도가 낮은 것을 확인하였다.

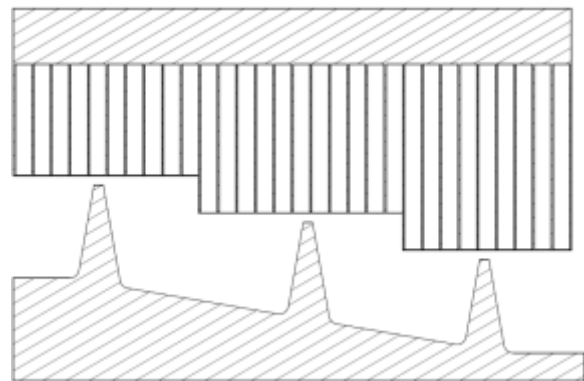


Fig. 17 Stepped honeycomb labyrinth seal geometry⁽²³⁾

Choi 등⁽²⁴⁾은 3D 유동장인 허니콤 래버린스 실을 2D 모델로 접근하기 위한 방법을 개발하여 계산시간을 줄이는 방법을 제안하였고 실험을 통해 얻은 측정값과 비교 및 검증하였다.

3. 결 론

2000년대 이전까지는 실험적인 방법으로 유량계수, 토출계수 등을 측정하였지만, 최근에 들어서는 PIV, LDV등의 유동 가시화 기법 또는 전산해석 기반의 연구수행이 활발하게 이루어지고 있어 유량계수, 토출계수 뿐만 아니라 래버린스 실의 형상에 따른 유동장 특성까지 파악하고 있다.

하지만 항공기용 가스터빈 블레이드 팁에 적용되는 래버린스 실에 대한 연구는 해외에 비해 국내 연구는 활발하지 않다. 또한 높은 압력비와 다양한 형상에 대한 실험적 연구는 여전히 부족하며 허니콤 래버린스 실은 전산해석적 기법을 이용한 연구가 주를 이루고 있는 상황이다. 따라서 래버린스 실을 설계 및 적용하기 위해서는 넓은 범위의 압력비에서 실 성능에 대한 다양한 매개변수(팁 간극, 이빨 수, 실 형상, 바닥 형상)의 영향을 실험적으로 연구한 데이터 베이스가 필요한 실정이다. 나아가 실험과 전산해석 기법의 상호 보완을 통한 상관식 도출이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 항공우주부품기술개발사업의 지원(과제번호: 20002700)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Vermes, G., 1960, "A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem", ASME Gas Turbine Power and Hydraulic Divisions Conference and Exhibit, pp. V001T02A012-V001T02A012.
- (2) Stocker, H. L., 1978, "Determining and improving labyrinth seal performance in current and advanced high performance gas turbines," AGARD Seal Technol. in Gas Turbine Eng, 22 p(SEE N 79-11056 02-07).
- (3) Zimmermann, H., Wolff, K. H., 1998, "Air System Correlations: Part 1—labyrinth seal," ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, pp. V004T09A048-V004T09A048.
- (4) Hodkinson, B., 1939, "Estimation of the Leakage through a Labyrinth Gland," Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, 141(1), 283-288.
- (5) Denecke, J., Schramm, V., Kim, S., and Wittig, S., 2003, "Influence of rub-grooves on labyrinth seal leakage,"

- Transactions of the ASME-T-Journal of Turbomachinery, 125(2), 387-393.
- (6) Kim, T. S., Kang, Y., and Moon, H. K., 2009, "Aerodynamic Performance of Double-Sided labyrinth seal," In Fluid Machinery and Fluid Mechanics, pp. 377-382.
- (7) Micio, M., Facchini, B., Innocenti, L., and Simonetti, F., 2011, "Experimental Investigation on Leakage Loss and Heat Transfer in a Straight Through labyrinth seal," ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, pp. 967-979.
- (8) Liu, Y., Zhang, M., Zhang, T., Zhang, M., and He, Y., 2016, "Effect of Winglet-Shroud Tip With labyrinth seal on Aerodynamic Performance of a Linear Turbine Cascade," Journal of Fluids Engineering, 138(7), 071103.
- (9) Dogu, Y., Sertçakan, M. C., Gezer, K., Kocagül, M., Arıcan, E., and Ozmusul, M. S., 2017, "Leakage Degradation of Straight labyrinth seal Due to Wear of Round Tooth Tip and Acute Trapezoidal Rub-Groove," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 139(7), 072506.
- (10) Wittig, S., Jacobsen, K., Schelling, U., and Kim, S., 1988, "Heat transfer in stepped labyrinth seal," Journal of engineering for gas turbines and power, 110(1), 63-69.
- (11) Rhode, D. L., Johnson, J. W., and Broussard, D. H., 1996, "Flow visualization and leakage measurements of stepped labyrinth seal: part 1—annular groove," ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, pp. V001T01A042-V001T01A042.
- (12) Willenborg, K., Kim, S., and Wittig, S., 2001, "Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal," Journal of Turbomachinery, 123(4), 815-822.
- (13) Michaud, M., Vakili, A., Meganathan, A., Zielke, R., Shuster, L., and Terrell, J., 2008, "An experimental study of labyrinth seal flow," In International Joint Power Generation Conference collocated with Turbo Expo, pp. 497-504.
- (14) Vakili, A. D., Meganathan, A. J., Michaud, M., and Radhakrishnan, S., 2005, "An experimental and numerical study of labyrinth seal flow," ASME Turbo Expo, pp. 1121-1128.
- (15) Kuwamura, Y., Matsumoto, K., Uehara, H., Ooyama, H., Tanaka, Y., and Nishimoto, S., 2013, "Development of new high-performance labyrinth seal using aerodynamic approach," ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, pp. V05BT25A005-V05BT25A005.
- (16) Kang, Y., Kim, T. S., Kang, S. Y., and Moon, H. K., 2010, "Aerodynamic performance of stepped labyrinth seal for gas turbine applications," ASME Turbo Expo, pp. 1191-1199.
- (17) Zhang, L., Zhu, H. R., Liu, C. L., and Tong, F., 2016, "Experimental and Numerical Investigation on Leakage Characteristic of stepped labyrinth seal," ASME Turbo Expo:

- Turbomachinery Technical Conference and Exposition, pp. V05AT15A016–V05AT15A016.
- (18) Martin, H. M., 1908, “Labyrinth packings,” *Engineering*, Vol. 85, pp. 35–36.
- (19) MacCalman, J., Hogg, S., and Ingram, G., 2018, “Application of Fluidic Curtains to Turbine Rotor Tip Seal Geometries,” *ASME Turbo Expo : Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, pp. V008T29A017–V008T29A017.
- (20) Stocker, H. L., Cox, D. M., and Holle, G. F., 1977, “Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seal with solid–smooth abradable and honeycomb lands,” *gas turbine engines*.
- (21) Wróblewski, W., Frączek, D., and Marugi, K., 2018, “Leakage reduction by optimization of the straight–through labyrinth seal with a honeycomb and alternative land configurations,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 725–739.
- (22) Schramm, V., Willenborg, K., Kim, S., and Wittig, S., 2000, “Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal,” *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, pp. V003T01A092–V003T01A092.
- (23) Willenborg, K., Schramm, V., Kim, S., and Wittig, S., 2002, “Influence of a honeycomb facing on the heat transfer in a stepped labyrinth seal,” *Journal of engineering for gas turbines and power*, 124(1), 133–139.
- (24) Choi, D. C., and Rhode, D. L., 2003, “Development of a 2–D CFD approach for computing 3–D honeycomb labyrinth leakage,” *ASME Turbo Expo, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*, pp. 965–975.