

# 가스터빈 압축기용 허니컴 래버린스 실의 실제 운전조건에 따른 누설량 특성 분석

임 셋 별, 김 민 규, 강 울 호, 박 원 규\*

부산대학교 기계공학부

## HONEYCOMB LABYRINTH SEAL LEAKAGE CHARACTERISTIC ANALYSIS WITH ACTUAL OPERATING CONDITIONS ON THE COMPRESSOR OF GAS TURBINE

S.B. Lim, M.K. Kim, Y.H. Kang and W.G. Park\*

School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Recently, There are many studies in progress in order to improve the efficiency of the gas turbine. Leakage in losses of the gas turbine account for the largest proportion. Seal is a sealing device to reduce the flow from leaking by the pressure difference inside the turbine. Compressor has another value according to the shape and pressure conditions in each stage. Thus, it is necessary to seal design for boundary conditions in order to minimize leakage. At the actual operating conditions of the compressor, numerical analysis of honeycomb labyrinth seal was performed in accordance with pressure, temperature, rotor speed for CFD. As a result, when the temperature increases, the leakage is decreased. Also, when the pressure increases linearly with increased leakage, and there was no effect of the rotation speed.

**Key Words :** 가스터빈(Gas Turbine), 전산유체역학(CFD), 래버린스 실(Labyrinth Seal), 허니컴 실(Honeycomb Seal), 누설량(Leakage), 압축성유동(Compressible Flow), 밀봉성능(Sealing performance)

### 1. 서 론

가스터빈(Gas turbine)은 고온·고압의 연소가스로부터 에너지를 추출하는 회전 동력기관으로 단위 무게 당 생산할 수 있는 동력이 크기 때문에 항공기와 발전 산업용으로 다양하게 사용된다. 가스터빈은 크게 압축기(Compressor), 연소기(Combustor), 터빈(Turbine)으로 구성되어 있으며, 압축기에서 나온 고압 공기에 연료를 분사하여 혼합되어 연소함으로써 발생한 고온·고압의 연소가스가 팽창할 때 생기는 힘을 이용하여 압축기와 동축으로 연결된 터빈이 구동된다. 그 쓰임에 따라 앞서 언급한 바와 같이 추력이나 압축 공기의 형태를 얻어 항공기의 추진기관으로 사용되거나, 발전기로 회전력을 전달하여 전력을 생산하기도 한다.

가스터빈의 효율은 각 구성품의 효율과 압력비(Pressure ratio), 터빈 입구 온도(Turbine inlet temperature, TIT), 사이클 구성 등에 의해 영향을 받는다. 터빈에서 발생하는 에너지 손실은 가스터빈의 효율에 직결되며, 누설량이 에너지 손실 중 가장 큰 비율을 차지한다. 따라서 터빈 내부의 각 단 사이의 압력 차이에 의한 누설을 방지하기 위한 밀봉기술로, 여러 종류의 실이 다양한 형태로 설계되어 사용되고 있다. 가스터빈의 압축기와 터빈의 로터(rotor)와 스테이터(stator) 사이에 위치하는 기계요소인 실의 주된 역할은 틈새를 통한 누설량을 최소화하여 압축기와 터빈의 효율을 증가시키는데 있다. 압축기와 터빈에 주로 사용되는 실은 래버린스 실인데, 래버린스 실은 회전체의 동역학적 불안정성을 일으킬 가능성이 있어 최근에는 허니컴 실과 래버린스 실이 조합된 구조에서 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2,4,6,7].

허니컴 래버린스 실을 통과하는 유체의 유동은 복잡한 스월이 발생하는 난류 유동이며, 틈새가 작고 형상이 복잡하기 때문에 해석에 어려움이 있다. 현재까지 실에서의 누설량을 예측하기 위한 방법으로는 다양한 형태로 고안된 장비를 통

Received: December 8, 2015, Revised: December 31, 2015,

Accepted: December 31, 2015.

\* Corresponding author, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.4.102>

© KSCFE 2015

해 실험적으로 누설량을 측정하는 방법, 공학적인 이론을 통하여 도출한 계산식을 이용하는 방법, 실의 공동을 한 개 또는 두 개의 제어체적으로 단순화 하여 누설량을 해석하는 Bulk-flow 모델 해석방법 그리고 유체유동의 지배방정식을 이산화하여 수치해석을 수행하는 방법 등이 있다. 최근에는 컴퓨터 및 상용 CFD 코드의 발달로 인해 주로 CFD를 이용하여 seal에서의 유동특성을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Childs et al.[1]은 허니컴 실이 래버린스 실보다 누설량 및 회전체 동역학적 특성이 우수하다는 실험적 결과를 발표하였다. 허니컴 실은 누설량 감소 및 안정성 향상뿐 아니라 rotor와 stator의 rubbing시 파손을 완화할 수 있다고 나타내었다. Yan et al.[2]은 허니컴과 래버린스가 조합된 계단형 실에 대한 전산 해석을 수행하였다. 동일한 간극에서 허니컴의 유무와 유동의 방향이 convergent와 divergent인 경우에 대한 유체역학적 특성을 해석하였다. 이 연구에서는 결과를 압력비에 따라 누설량의 변화를 나타내었다. 누설량은 압력비가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. Rohde et al.[3]은 기존의 수치해석 코드를 사용하여 흡을 판 래버린스 실의 누설량을 예측하고, 실험과 비교하였다. 래버린스 실에 특별한 흡을 설계함으로써 누설량이 약 20% 감소함을 나타내었다. Stocker et al.[4]은 2차원 허니컴 실에서의 속도와 압력을 실험을 통하여 측정하고, 누설량을 계산하여 여러 형상의 허니컴 실의 성능을 비교하였다. Ha[5]는 조합형 엇갈린 래버린스 실의 누설량 예측 연구를 진행하였다. 압력차 또는 로터의 회전속도에 따른 래버린스 실의 누설량 변화를 비교하였다. Bulk flow 모델에 기초한 이론적 해석과 FLUENT를 사용한 CFD 해석 수행 결과를 비교하였다. Luis et al.[6]은 실의 형태에 따라 입구온도, 압력비, 회전속도를 변화시키며 누설량의 변화를 실험을 통하여 예측하였다. 그 결과, 온도가 증가함에 따라 누설량은 감소하고, 압력비가 증가함에 따라 누설량은 증가하며 회전속도에 따른 누설량의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. Li et al.[7]은 허니컴 실의 깊이, 간극, 허니컴 셀의 직경, 압력비에 따른 누설량의 변화를 CFD 해석을 통하여 예측하였다. 간극과 허니컴 셀이 증가함에 따라 누설량이 증가하였다. 압력비가 증가함에 따라 누설량이 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. Ha[8]는 압축기, 터빈 등 터보기계에서 사용되고 있는 다양한 비접촉 실의 누설량을 예측하기 위하여 CFD를 사용한 해석 방법을 제시하고, 그 결과를 기존의 이론적 해석 및 실험 결과와 비교, 분석하였다. CFD 해석 결과는 기존의 bulk-flow 모델 해석 결과와 5% 이내의 오차를 보였고, 복잡한 형상의 실 내부 유동장을 파악할 수 있다고 확인되었다. Ha[9]는 누설량 저감을 위하여 기존의 래버린스 실에 로터의 돌출부인 랜드 부 길이를 확장하여 설계를 개선

하여 CFD 해석을 하였고, 그 결과를 bulk-flow 모델과 비교하였다. 수정된 모델에서 누설량이 기존 모델에 비하여 약 11% 정도 저감되어 누설특성이 개선되었다. 또한, CFD 해석 결과와 bulk-flow 모델의 오차는 최대 9.8%로 나타났다.

가스터빈 압축기는 각 단에서 압력, 온도 등이 다른 수치를 나타낸다. 따라서 각 단별로 동일한 sealing 설계로는 누설량을 최소화하기 위한 예측이 힘들 것이며, 저압영역에서 고압영역까지 경계조건에 적합한 sealing 설계가 필요하다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 가스터빈 압축기의 저압, 고압 영역에서 실제 운전조건인 압력, 온도에 따른 허니컴 래버린스 실의 유동해석을 수행하고 그에 따른 누설량 특성 분석을 진행하였다.

## 2. 해석방법

### 2.1 지배방정식

로터가 고속으로 회전하고 허니컴 실과 래버린스 실 사이의 제트 유동이 마하수 0.3 이상이므로, 허니컴 래버린스 실 내부의 유동을 3차원 압축성 정상유동으로 간주하였다. 수치해석을 위해 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식을 사용하였고, 그 식을 식 (1), (2), (3)에 기술하였다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \left( \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \overline{\rho u_j' T'} \right] \quad (3)$$

### 2.2 해석모델

압축기와 터빈에서의 seal은 360도 모두 동일한 형상을 가지는 환형이다. 하지만 환형 전체를 해석 영역으로 설정하게 되면, 허니컴의 모델링에 큰 어려움이 있고 격자의 수가 현저히 늘어나기 때문에 현재의 시스템으로는 해석에 많은 어려움이 있다. 따라서 선행된 많은 연구에서와 같이 허니컴의 직

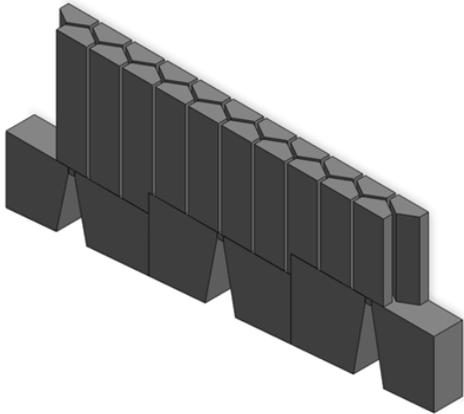


Fig. 1 3D geometry of honeycomb labyrinth seal

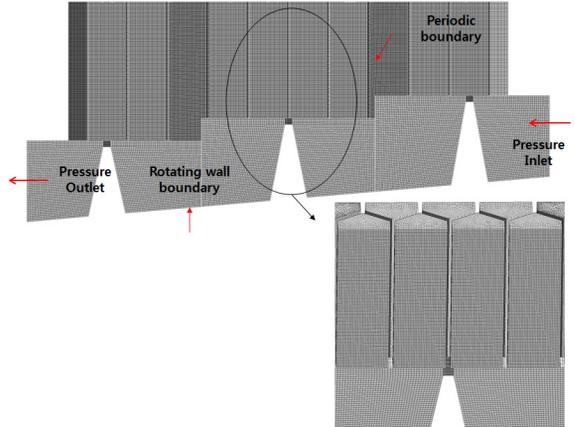


Fig. 3 Grid and boundary condition

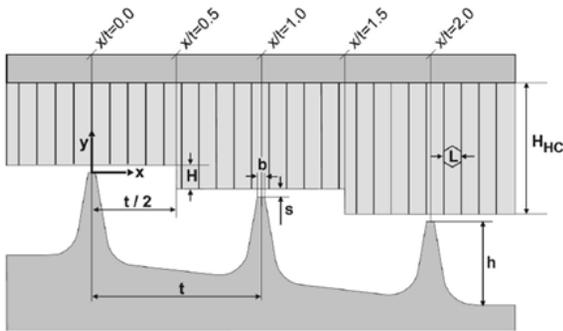


Fig. 2 Geometry of honeycomb labyrinth seal[10]

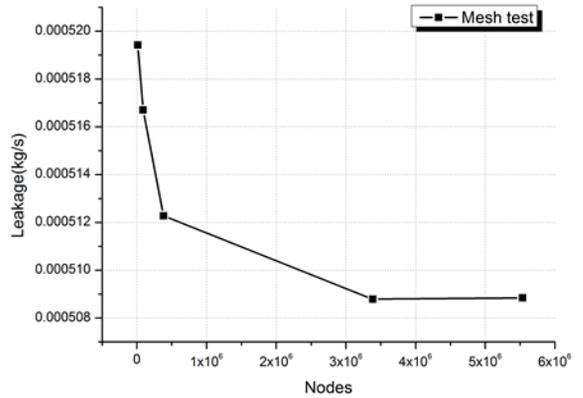


Fig. 4 Leakage with number of grid

경에 해당하는 일정한 두께를 가지는 절단면을 해석영역으로 하고 periodic 조건으로 해석을 수행하게 되면 환형 전체의 해석과 거의 동일한 결과가 도출 된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 해석을 수행할 허니컴 래버린스 실의 형상은 Schramm et al.[10]과 동일한 모델이며 전체 시스템 형상을 Fig. 1에, 계산 형상과 수치를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 래버린스 실은 teeth가 3개이며, 스텝이 존재하는 실의 형태를 가지고 있다. 허니컴 실 또한, 래버린스 실의 스텝에 따라 단

Table 1 Geometric parameters of the honeycomb labyrinth seal[10]

Geometry	
Fin pitch(t)	28 mm
Fin height(h)	12.88 mm
Tip thickness(b)	1.316 mm
Honeycomb cell depth(H <sub>HC</sub> )	24.08 mm
Honeycomb diameter(L)	6.44 mm
Clearance(s)	3.192 mm
Number of labyrinth teeth	3

차를 가지는 구조이다.

### 2.3 격자 생성 및 경계조건

허니컴 실과 래버린스 실 사이의 간극에서의 격자는 육면체(hexa) 격자를 생성하였고, 유동을 자세하게 관찰하고자 조밀하게 생성하였다. 또한, 해석모델은 빠른 속도로 회전하기 때문에 벽면 근처에서의 점성 영향이 충분히 고려되도록 scalable wall function을 사용하였고, 그 조건으로 벽면 격자에 대하여 y+가 11.06 이상이 되도록 회전하는 벽면 근처의 격자도 조밀하게 생성하였다. 본 해석에 사용한 격자와 경계조건을 Fig. 3에 나타내었다. 경계조건은 해석모델의 입구에 pressure inlet, 출구는 pressure outlet, 회전하는 로터의 벽면에는 rotating wall로 설정하였고, 절단면에는 periodic boundary condition을 설정하였다.

격자수에 따른 누설량의 수렴도를 확인하기 위하여, 격자

수 10,000 ~ 5,500,000의 범위에서 해석을 수행하였다. 격자수가 증가함에 따라 누설량 값이 수렴함을 보였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 격자 민감도 분석 결과, 약 340만 개 이상에서 누설량이 0.0005087 kg/s 로 수렴하는 것을 확인할 수 있었고, 본 연구에서 사용한 해석모델의 격자수는 약 550만 개 이다.

**2.4 수치해석방법**

터보기계 내부의 3차원 난류 유동은 심한 압력구배, 압축성 효과, 유동 박리, 유선 곡률과 회전 등으로 인하여 매우 복잡한 유동 특성을 가지고 있다. 이러한 모든 효과를 고려한 난류모델은 정립된 바 없으며, 압축성 유동해석에 있어서 많은 난류 모델 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 허니컴 래버린스 실 내의 유체는 이상기체로 가정하여 해석을 수행하였고 선행된 많은 연구에 따라 Standard k-ε 모델을 사용하였다. 해석은 상용 코드인 Ansys FLUENT 15.0을 사용하였고, 자세한 사항은 Table 2에 나타내었다.

**2.5 수치해석방법의 검증**

본 연구에서는 수치해석방법의 검증을 위하여 래버린스 실과 허니컴이 추가된 래버린스 실에서의 간극변화에 따른 누설량을 본 연구와 동일한 모델인 Schramm et al.[10]의 실험값과 비교하였다.

비교 결과를 간극과 허니컴 직경의 비에 따른 누설계수의 비로 나타냈으며, Fig. 5는 실험값과 해석값을 비교하여 나타낸 그래프이다.

그래프에서 ξ는 허니컴 래버린스 실과 래버린스 실의 상대적인 누설량의 비를 나타내는 값으로, 항상 1보다 큰 값을 가지며, 허니컴 직경에 비해 간극의 비가 클수록 작은 값을 가진다. 그 식은 다음과 같다.

$$\xi = \frac{C_{D,Honeycomb}}{C_{D,Labyrinth}} \tag{4}$$

또한, 누설계수  $C_D$ 는 누설특성을 나타내기 위해서 등엔

Table 2 Operating Condition

Operating Condition	
Software	ANSYS FLUENT 15.0
Fluid	ideal gas
Turbulence model	Standard k-ε
Inlet temperature	300K
Outlet static pressure	101,325 Pa
Pressure ratio	1.1
Seal clearance	1.204, 1.988, 3.192 mm

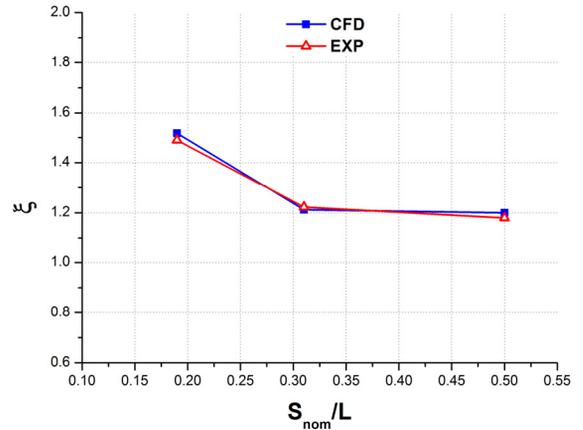


Fig. 5 Comparison of the leakage increase parameter between the present CFD results and the experimental data

트로피 조건에서의 이상적인 누설량 계산식을 이용하여 누설량을 무차원수로 나타낸 것이다. 누설계수 식은 다음과 같다.

$$C_D = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ideal}} \tag{5}$$

등엔트로피 조건에서의 이상적인 누설량 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{P_i A}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k}{R_G(k-1)} (\pi^{-2/k} - \pi^{-(k+1)/k})} \tag{6}$$

Schramm et al.[10]의 실험값과 CFD 해석값을 비교한 결과, 실험값과 해석값의 오차((ξ<sub>CFD</sub> - ξ<sub>EXP</sub>)/ξ<sub>EXP</sub>)가 2.5% 이내로, 거의 일치하는 것으로 보아 본 수치해석 방법이 타당함을 알 수 있다.

**3. 수치해석결과**

**3.1 입구 온도 변화에 따른 누설량 예측**

가스터빈 압축기의 출구 압력이 저압, 고압일 때 입구 온도에 따른 허니컴 래버린스 실의 누설량을 예측하기 위한 연구를 수행하였고, 그 결과 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 본 해석의 유동 조건은 압력비는 1.1, 로터의 회전속도는 3600 rpm으로 고정하였고, 온도는 263 ~ 573K로 설정하였다.

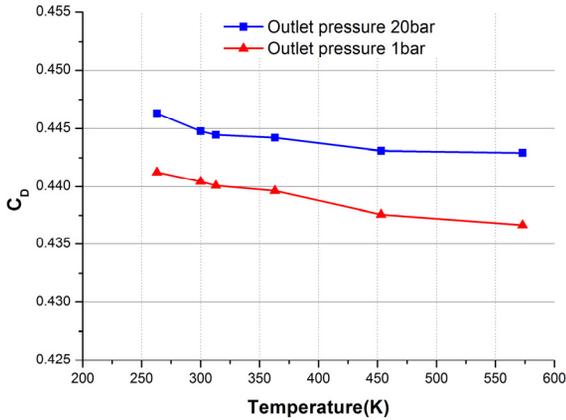


Fig. 6 Discharge coefficient with temperature

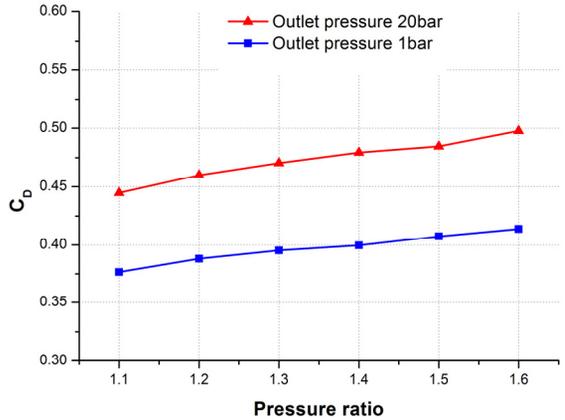


Fig. 9 Discharge coefficient with pressure ratio

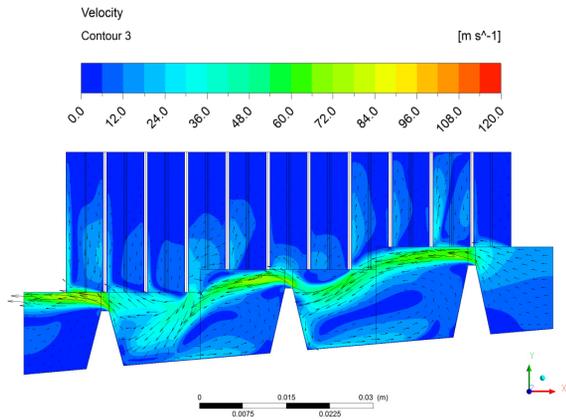


Fig. 7 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, T = 263K)

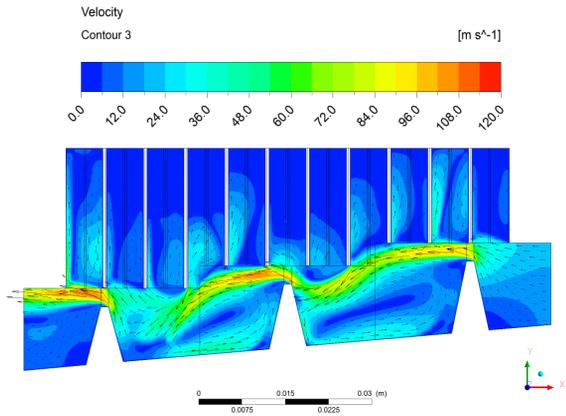


Fig. 8 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, T = 573K)

Fig. 6에 나타난 그래프를 보면, 온도가 증가할수록 누설계수는 감소하는 것을 알 수 있으며, 두 그래프에서 같은 경향을 보이지만, 출구 압력이 저압(1bar)일 때보다 고압(20bar)인 영역에서 누설계수는 대략 1 ~ 1.5% 차이를 보였다. 또한, 그래프에서 263K의 저온에서보다 573K의 고온에서 누설계수가 약 1% 이내 감소의 적은 오차로 본 연구의 해석이 허니컴 래버린스 실의 누설특성을 잘 나타냄을 확인할 수 있다. Fig. 7, 8은 출구 압력이 저압인 조건에서 온도가 263K일 때와 573K일 때의 속도 분포와 속도 벡터를 나타내었다. 속도 분포를 보면 래버린스 실을 통과하는 제트 유동이 래버린스 공동부(cavity)에서 recirculation 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입구 온도가 더 높을 때 유체의 밀도가 더 작아지게 되고, recirculation 영역에서 회전 유동의 강도가 강해지는 것을 볼 수 있다.

### 3.2 압력비에 따른 누설량 예측

가스터빈 압축기의 출구 압력이 저압, 고압일 때 압력비에 따른 허니컴 래버린스 실의 누설량을 예측하기 위한 연구를 수행하였고, 그 결과 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 본 해석의 유동 조건은 온도는 300K, 로터의 회전속도는 3600 rpm으로 고정하였고, 압력비는 1.1 ~ 1.6로 설정하였다.

Fig. 9에 나타난 그래프를 보면, 압력비가 증가함에 따라 누설계수가 약 18 ~ 20%로, 선형적으로 증가하였다. 또한, 두 그래프를 비교해보면, 같은 경향을 보이지만 출구 압력이 저압(1bar)일 때보다 고압(20bar)인 영역에서 누설계수가 약 9 ~ 11% 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (5), (6)에 따라 누설계수는 입구 압력에 비례하여 증가하기 때문이다. Fig. 10, 11은 출구 압력이 고압인 조건에서 압력비가 1.1일 때와 1.6일 때의 속도 분포와 속도 벡터를 나타내었

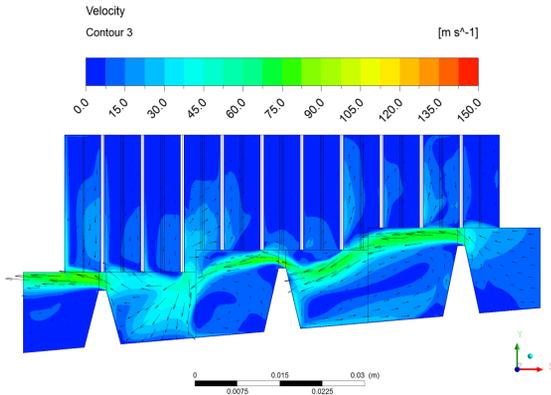


Fig. 10 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, pressure ratio = 1.1)

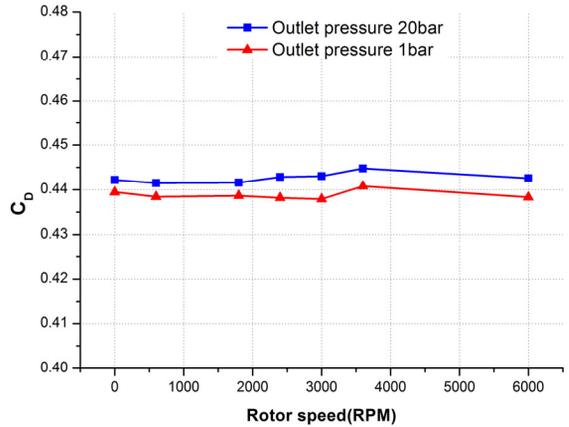


Fig. 12 Leakage with rotor speed at low outlet pressure

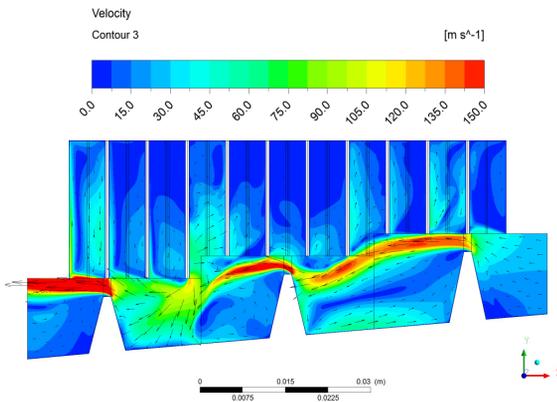


Fig. 11 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, pressure ratio = 1.6)

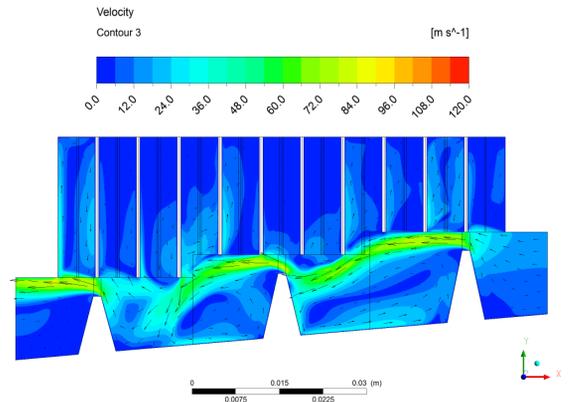


Fig. 13 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, rotor speed = 0 rpm)

다. 속도 분포를 보면 래버린스 실을 통과하는 제트 유동이 래버린스 공동부에서 recirculation 유동이 발생되는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 회전속도에 따른 누설량 예측

가스터빈 압축기의 출구 압력이 저압, 고압일 때 회전속도에 따른 허니컴 래버린스 실의 누설량을 예측하기 위한 연구를 수행하였고, 그 결과 그래프를 Fig. 12에 나타내었다. 본 해석의 유동 조건은 압력비는 1.1, 온도는 300K로 고정하였고, 로터의 회전속도는 0 ~ 6,000 rpm으로 설정하였다.

Fig. 12에 나타난 그래프를 보면, 0 ~ 6,000 rpm 까지 누설 계수에 오차가 1% 이내로 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 두 그래프에서 같은 경향을 보이지만, 출구 압력이 저압(1bar)일 때보다 고압(20bar)인 영역에서 누설계수의 오차가 약 0.1%인 것을 확인할 수 있다. 또, Fig. 13, 14에 나타난 속

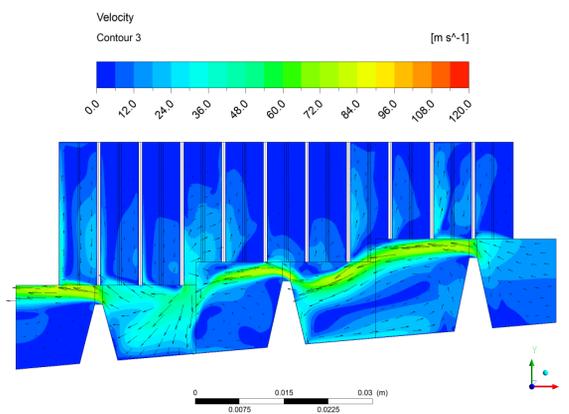


Fig. 14 Velocity contours and distributions in the honeycomb labyrinth seal(outlet pressure = 20bar, rotor speed = 6,000 rpm)

도분포와 속도벡터에서도 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 회전속도가 로터의 벽면에서만 고속으로 회전하므로, 허니컴 래버린스 실 내의 누설에는 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 따라서, 회전속도는 누설 특성을 해석하는데 민감한 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

가스터빈에서 발생하는 손실에서 누설이 에너지 손실 중 가장 큰 비율을 차지하고 있으며, 이를 저감하기 위하여 터보 기계에서 주로 사용하는 허니컴 래버린스 실은 누설량을 감소시킴으로써 효율을 높이기 위한 중요한 장치로 사용되고 있다. 따라서 누설량 예측을 위하여 CFD를 이용한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 가스터빈 압축기의 각 단별로 누설량 특성을 분석하기 위하여 저압에서 고압영역까지 실제 운전조건에서 허니컴 래버린스 실의 유동해석을 수행하고 그에 따른 누설량 특성 분석을 진행하였다. 출구 절대압력이 저압, 고압일 때 각 유동조건에 따른 누설량 해석을 수행하였다.

- (1) 온도에 따른 누설량 해석 결과, 온도가 증가함에 따라 누설량은 감소하는 경향을 보였고 누설량은 온도에 의하여 민감한 변화를 가지는 것을 알 수 있다.
- (2) 압력비에 따른 누설량 해석 결과, 압력비가 증가함에 따라 큰 압력강화로 인하여 누설계수가 약 18 ~ 20%로 선형적으로 증가하였고, 압력에 따라 민감한 변화를 보였다.
- (3) 회전속도에 따른 누설량 해석 결과, 회전속도가 변화하여도 누설계수는 크게 변하지 않았으며, 이 결과를 보았을 때, 로터의 벽면에서만 빠르게 회전하므로 허니컴 래버린스 실 내에서는 로터의 회전속도가 누설량에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

가스터빈 압축기 설계시에 활용하기 위한 데이터베이스를 구축하기 위하여 해석을 수행하였으며, 향후 압축기에 사용되는 허니컴 래버린스 실의 동특성 계수 예측을 위한 연구의 기초 연구로 활용될 수 있을 것이다.

#### References

[1] 1989, Childs, D., Elrod, D. and Hale, K., "Annular

Honeycomb Seals: Test Results for Leakage and Rotordynamic Coefficients; Comparison to Labyrinth and Smooth Configurations," *ASME J. Tribol.*, Vol.111, pp.293-301.

- [2] 2009, Yan, X., Li, J., Song, L. and Feng, Z., "Investigation on the Discharge and Total Temperature Increase Characteristic of the Labyrinth Seals with Honeycomb and Smooth Lands," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol.131, No.041009-1.
- [3] 1993, Rhode, D.L., Ko, S.H. and Morrison, G.L., "Experimental and Numerical Assessment of an Advanced Labyrinth Seal," *STLE Tribology transactions*, Vol.37, pp.743-750.
- [4] 1977, Stocker, H.L., Cox, D.M. and Holle, G.F., "Aerodynamic Performance of Conventional and Honeycomb Lands," *Detroit Diesel Allison*, NASA CR-135307.
- [5] 2006, Ha, T.W., "Prediction of Combination Type Staggered Labyrinth Seal Leakage Using CFD," *Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol.22, No.2, pp.66-72.
- [6] 2010, Luis, S.A. and Zachary, A., "Comparison of Leakage Performance in Three Types of Gas Annular Seals Operating at a High Temperature(300°C)," *Tribology Transactions*, Vol.53, No.3, pp.463-471.
- [7] 2010, Li, J., Kong, S., Yan, X., Obi, S. and Feng, Z., "Numerical Investigations on Leakage Performance of the Rotating Labyrinth Honeycomb Seal," *Gas Turbines: Structures and Dynamics of the ASME*, Vol.132, No.6, pp.1-11.
- [8] 2006, Ha, T.W., "Prediction of Non-Contact-Type Seal Leakage Using CFD," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.9, No.3, pp.14-21.
- [9] 2007, Ha, T.W., "Leakage Analysis and Design Modification of the Combination-Type-Staggered-Labyrinth Seal," *Journal of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol.23, No.2, pp.43-48.
- [10] 2002, Sachramm, V., Willenborg, K., Kim, S. and Witting, S. "Influence of a Honeycomb Facing on the Flow Through a Stepped Labyrinth Seal," *Transactions of the ASME*, Vol.124, pp.140-146.