

Honeycomb Seal의 유동 특성 해석

홍은표* · 허남건**

A Numerical Study on Flow Characteristics of a Honeycomb seal

E. Hong*, N. Hur**

Key Words: honeycomb seal(허니콤실), CFD(전산유체역학), friction factor(마찰계수)

ABSTRACT

Honeycomb seals are used widely in gas turbines due to their good sealing performance and rotor-dynamic stability. Three-Dimensional complex flows in a honeycomb seal were analyzed in the present study. Friction factors were computed to predict the performance of a honeycomb seal based on pressure drop results for various honeycomb cell geometry and Reynolds numbers. Computed results for friction factor are compared to the available experimental data. Unlike in the experiment, where "Friction-Factor Jump" phenomena are reported for some cases, computed results show no jump phenomena. The friction factors, however, are in good agreement with the experiment in no-jump cases.

1. 서 론

터보기계의 고정자와 회전자 사이에서 작동 유체의 유실이 발생할 경우 기계의 효율이 떨어지게 된다. 이러한 작동 유체의 유실을 줄이기 위하여, 작은 간극을 가지는 압력 실(seal)을 사용하는데, 여기에는 라비린스실(labyrinth seal)과 허니콤실(honeycomb seal)등이 있다. 라비린스 실은 고정자에 볼록한 요철을 주기적으로 만들어 유실되는 유체의 흐름을 방해하는 구조를 가지고 있다.

Wittig등^[1]은 계단식 라비린스실에서의 간극유동과 열전달에 대하여 실험과 수치해석을 수행하였는데, 압력과 형상에 변화를 주었을 때 내부의 온도를 측정하여 열전달 계수를 구하고 수치해석 결과와 비교하였다.

Brownell등^[2]은 홀로그래픽 광학기법을 사용하여 라비린스실 내부에서의 농도장을 측정하였는데, 실험 장치는 실제 항공용 캐스터빈에 쓰이는 라비린스실로써 간극이 0.25mm인 작은 크기였다.

작동 유체가 압력실을 통과할 때 실의 작은 간극과 실에 작용하는 높은 압력 때문에 고정자와 회전자 사이에 반발력이 작용하게 되고, 이 반발력은 회전자의

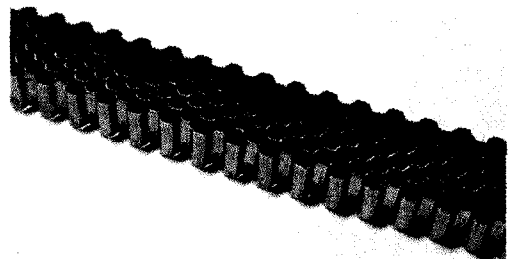


Fig. 1. Honeycomb seal

* 서강대학교 대학원 기계공학과 hong@euler.sogang.ac.kr

** 서강대학교 기계공학과 nhur@ccs.sogang.ac.kr

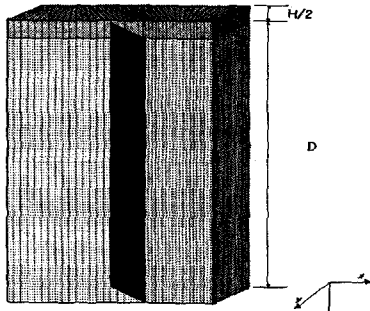


Fig. 2. Computational grid of a two-cell honeycomb seal

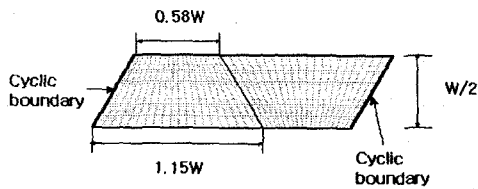


Fig. 3. Computational grid of a two cell honeycomb seal

동적 안정성을 떨어 뜨리는 결과를 초래한다.

허니콤실(honeycomb seal)은 유체유실의 감소와 회전자의 동적 안정성 면에서 라비린스실보다 뛰어난 성능을 보여 준다. 허니콤실은 Fig. 1과 같이 벌집 모양의 미세한 셀(cell)로 구성되어 있는데, 이 셀들이 복잡한 유동경로를 생성하여 작동 유체의 흐름을 방해한다.

Stocker등^[3]은 허니콤실에서의 속도와 압력을 2차원 측정장치로 측정하였고, Elrod등^[4]은 평평한 회전자와 허니콤 고정자사이의 마찰계수를 측정하였다. Childs와 Ha^[5]는 허니콤 표면 사이에서의 마찰계수를 측정하여 허니콤의 형상의 변화에 따른 성능을 연구하였는데, 특정한 허니콤의 형상에서 Reynolds수가 높아질 때 마찰계수가 급등하는 현상을 보였다. Ha등^[6]은 이러한 특정 형상에서의 마찰계수의 급등 현상은 유동공진과 관련이 있음을 언급하였다. Schramm^[7]은 계단식 라비린스실에서의 유동장을 수치해석과 실험을 통하여 연구하였는데, 이 연구에서는 허니콤의 성능을 연구하기 위하여 계단식 라비린스실 위의 고정자에 허니콤실과 평평한 판을 설치하여 실험과 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 3차원 수치해석을 통하여 허니콤실 내부의 복잡한 유동을 예측하여 수치해석에 의한 허니콤실의 유동형태의 변화에 따른 마찰계수 급등현상을 예측하고자 하였다. 또한, 허니콤실의 간극, 셀의 깊이,

셀의 넓이에 따른 마찰계수를 구하여 실험자료와 하여 수치해석에 의한 허니콤실의 마찰계수 예측성능을 검토하고자 하였다.

2. 수치해석방법

2.1. 수치 해석

본 연구에서는 STAR-CD^[8]를 사용하였으며 Childs와 Ha^[5]의 실험결과와 비교하기 위하여 압축성 유동해석을 수행하였다. 해석에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 난류계산을 위해 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다.

2.2. 허니콤 모델 및 계산 격자

Childs와 Ha^[5]의 실험은 7.6cm(길이)×6.4cm(넓이)의 허니콤 플레이트가 작은 간극을 중심으로 상·하로 맞붙어 있는 허니콤실에서 이루어졌다. Fig. 1은 실제 허니콤 플레이트이다. 실험에서의 허니콤 플레이트는 각각 1.57mm, 0.79mm, 0.41mm의 폭을 가진 허니콤셀이 사방으로 연결되어 있는 판의 구조를 이루고 있다. Fig. 2는 허니콤실의 계산 격자이다. 위 부분이 유동이 지나가는 간극을 나타낸 것이고, 아래는 유동 손실이 발생하는 허니콤실의 내부이다. 육각기둥의 깊이가 셀 깊이(depth)이고, 육각형의 한 면에서 마주보는 면까지의 거리가 폭(width)이다. 자세한 실험 장치 및 측정 방법은 Childs와 Ha^[5]에 나타나 있다. 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 각각 대칭 경계조건을 사용하여 반쪽 셀 2개를 연결하여 계산하였다. 2개셀 격자의 수는 각각 x, y, z -방향으로 40, 25, 100개 씩, 총 100,000개이다.

2.3. 경계조건 및 계산

허니콤실의 간극 x-방향 전·후의 입·출구에서는 사이클릭(cyclic) 경계조건을 주었고, 질량유량을 주어 계산하였으며, 입구에서는 모두 압력 17.9bar를 주었다. 셀2개 사이에는 배플(baffle)로 셀 경계를 구분하였다. 허니콤의 1개 셀은 중앙을 기준으로 대칭을 이루므로 셀의 중앙면에 대칭경계조건을 주었고, 간극부분은 y-방향으로 통해 있으므로, 양끝단에 대칭경계조건을 주었다.

Table. 1. Honeycomb seal geometry for computation

case No	W (mm)	D (mm)	H (mm)	Reynolds No
1	1.57	2.29	0.25	14000
2	0.79	2.29	0.25	14000
3	0.41	2.29	0.25	14000
4	0.79	3.81	0.51	14000
5	0.79	3.05	0.51	14000
6	0.79	2.29	0.51	14000
7	0.79	3.05	0.25	14000
8	0.79	3.05	0.38	14000 ~ 40000
5	0.79	3.05	0.51	14000

계산은 본연구실에서 보유하고 있는 Silicon Graphics사의 ORIGIN2000(4xR10k, 2GB Memory, 56GB Storage)에서 단일 CPU로 수행하였고, 2개셀 격자는 평균 400분, 10개셀 격자는 평균 15시간이 걸렸다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 허니콤실의 간극, 셀 깊이, 셀 넓이에 대하여 수치 해석을 수행하고, 각각의 마찰계수를 구하였다. 마찰계수는 계산결과 얻은 압력강하로부터 아래식과 같이 계산하였다.

$$f = \frac{HAP}{L\rho U^2} \quad (1)$$

여기서 H는 Clearance(H), L은 Width(W)이다. 수치해석에서 얻은 ΔP 를 대입하여 마찰계수를 구하였다.

Table. 1은 수치 해석을 수행한 case를 나타낸 표이다. Childs와 Ha^[5]의 실험 자료와 비교하기 위해서 case1, 2, 3은 허니콤실의 셀 크기변화에 따른 특성을, case4, 5, 6은 셀 깊이 변화에 따른 특성을, 그리고, case7, 8, 5는 간극 변화에 따른 특성을 해석하기 위한 경우이다.

case8은 Childs와 Ha^[5]의 실험에서 Reynolds수가 증가할 때 마찰계수가 급등한 경우이다. 실험과 비교하기 위하여 Reynolds수를 14,000에서 40,000까지 변화시켜 계산을 수행하였다. 나머지 case는 Reynolds 수가 40,000인 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

3.1. Reynolds수의 영향

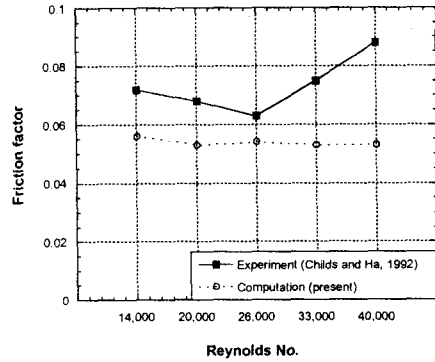


Fig. 4. Effect of Reynolds number on friction factor for case 8

파이프내의 유동에서 마찰계수는 상대 거칠기와 Reynolds수의 함수이다. 상대 거칠기는 돌기의 지름에 대한 절대 거칠기의 비다. 허니콤실에서의 절대 거칠기는 표면의 마찰이 아닌 구멍에 의해 영향을 받기 때문에 허니콤 실의 마찰계수는 Reynolds수와 허니콤형상의 함수라고 할수 있다.

실험에서는 마찰계수의 변화가 두 가지 성향을 보이고 있다. 하나는 Reynolds 수에 대하여 변화가 작은 경우이고, 다른 하나는 Reynolds 수에 따라서 변화가 급격하게 일어나는 경우이다.

Fig. 4는 case8에 대한 마찰계수의 실험값과 수치해석값을 비교한 그래프이다. 실험 결과에서는 Reynolds수가 14,000과 26,000사이에서 줄어 들었다가 다시 증가하는 마찰계수 점프 현상이 일어나는 것을 볼수 있다. 그러나, 수치 해석 결과에서는 Reynolds수의 변화에 대하여 변화가 그리 크지 않음을 보여주고 있다. Ha등^[7]은 마찰 계수의 점프 현상이 유동공진 현상에 기인한 것이라고 설명하였다. 이러한 유동공진 현상은 비정상상태 유동해석을 통하여 해석이 가능하나 유동 형

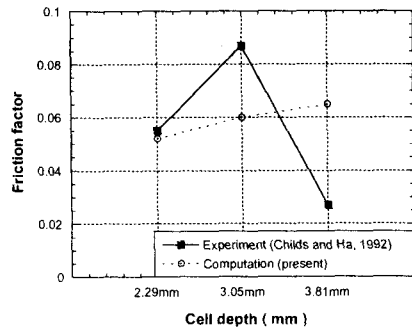


Fig. 5. Effect of cell depth on Friction factor

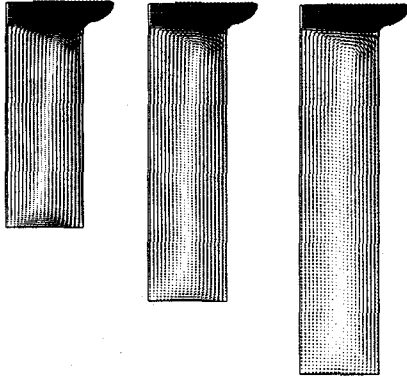


Fig. 6. Velocity vector plot at symmetry plane

태에 근본적인 변화가 있다면 정상상태 유동해석으로도 예측이 가능할 것이다. Reynolds수에 따른 마찰계수의 점프현상은 셀 내부에서의 유동패턴과 깊은 연관이 있을 것이다. 즉, Lid-driven cavity 문제에서 Reynolds 수가 증가하면 유동패턴이 변하는 현상과 유사하리라고 생각된다. 따라서 Reynolds 수의 변화에 따라 허니콤실 내부의 유동형태가 변하게 되어, 즉, 여러개의 회전유동으로 나뉘게 되어 마찰계수가 갑자기 커지게 될 것이다. 본 연구에서는 예상했던 이러한 변화를 볼 수 없었으며, 그림에서와 같이 Reynolds수의 변화에 무관하게 마찰계수는 거의 일정한 값을 가짐을 보였다. 전반적인 마찰계수의 값은 마찰계수 점프현상이 일어난 경우를 제외하고는 약 30%이내의 범위로 실험결과를 예측하는 것을 볼 수 있다.

3.2. 셀 깊이의 영향

Fig. 5는 셀의 깊이에 대한 실험과 수치해석을 비교한 그래프이다. 셀의 깊이가 2.29mm, 3.05mm, 3.81mm에 대하여 마찰계수를 비교하였다. 수치해석 결과에서는 셀의 깊이가 증가함에 따라서 마찰계수도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 셀의 깊이가 깊어지면 셀 내부로 유입된 유체가 셀 내부에서 머무는 시간이 길어지고, 그 만큼 셀 내부에서 손실되는 에너지양이 늘어나기 때문이다.

실험 결과에서는 깊이가 3.81mm일 때 보다 깊이가 2.29mm, 3.05mm 일 때 마찰계수가 훨씬 크게 나타나고 있다. 실험에서 깊이가 2.29mm, 3.05mm일 때 마찰계수 점프현상이 있는 case이기 때문에 마찰계수가 높다고 볼 수 있고, 마찰계수 점프 현상이 있는 case에

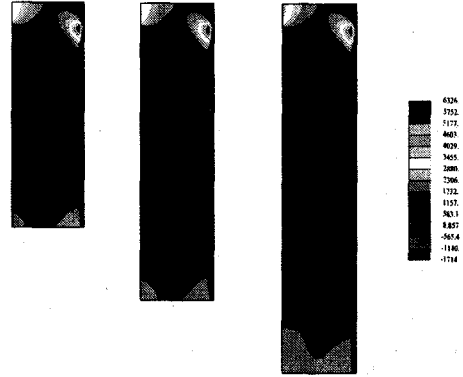


Fig. 7. Pressure contour plot at symmetry plane

도, 깊이가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 셀 깊이에 따른 셀 중앙 단면에서의 속도와 압력을 비교한 그림이다. 그림에서 간극의 유동에서 빠른 속도를 보이고 셀 내부로 유입된 유체가 셀 내부를 순환하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 단면의 깊이가 증가하면서 중앙의 속도가 낮은 구역이 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 하지만 여기에서도 기대했던 셀 내부 유동이 분할되는 현상은 볼 수 없었다.

3.3. 간극의 영향

간극은 마찰계수에 있어서 매우 중요한 인자이다. Fig. 8의 수치해석 결과는 간극이 0.38mm에서 0.51mm로 넓어질 때 마찰계수가 서서히 커지는 증가하는 것을 보여주고 있다. 실험에서는 간극이 0.38mm, 0.51mm, 두 case 모두 0.25mm인 case와 비교하여 마

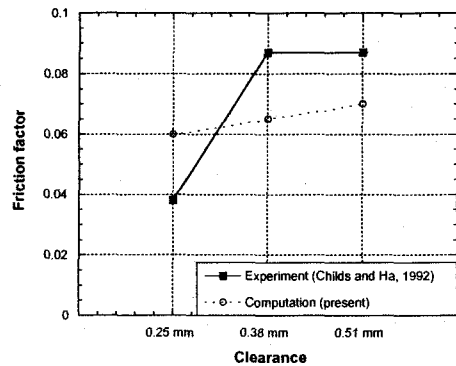


Fig. 8. Effect of seal clearance on friction factor

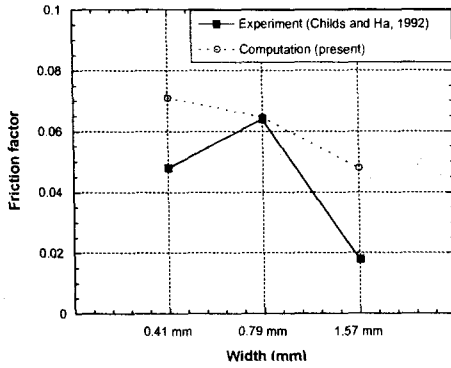


Fig. 9. Effect of cell width on friction factor

찰계수가 급격히 커진 것을 보여주고 있는데, 이 두 case는 실험에서 마찰계수 점프 현상이 있었던 case이다. 하지만 수치해석에서는 간극이 커짐에 따라 조금씩 증가하는 패턴만 볼 수 있었다.

3.4. 셀 너비의 영향

Fig. 9에서는 셀의 폭이 0.79mm일 때 가장 큰 마찰계수값을 보여주고, 수치해석 결과에서는 전반적으로 큰 값을 보여주고 있으며, 0.79mm에서 1.57mm로 증가하면서 마찰계수가 감소함을 보여주고 있다. 수치해석 값이 Childs와 Ha^[5]의 연구에서 셀의 깊이가 3.05mm이고, 간극이 0.25mm인 경우에는 넓이가 0.51mm일 때 가장 큰 마찰계수값을 보였다. 하지만 전반적으로 넓이가 증가하면 마찰계수가 작아지는 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

허니콤실 내부의 3차원 유동을 수치해석을 통하여 예측하고, Reynolds수, 셀의 깊이, 셀의 넓이, 간극에 따른 마찰계수를 구하여 실험 결과와 비교하였다. 본 연구의 결과 계산에 의한 마찰계수는 실험값을 비교적 잘 예측하는 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 셀의 넓이가 감소하고, 셀의 깊이가 증가함에 따라서 마찰계수가 커지는 경향을 보였다. 또한 실험에서 일어난 마찰계수 점프현상을 해석하여 설명하고자 하였으나, 실

험과 같은 결과를 얻지 못하였으며, Reynolds수의 변화에 따라 마찰계수의 값은 거의 일정함을 알 수 있었다. 향후 비정상상태 유동해석 등에 의해 마찰계수 점프현상 규명을 위한 지속적인 연구가 진행될 예정이다.

참고 문헌

- (1) Wittig, S., Schelling U., Jacobsen, K. and Kim, S., 1988, "Numerical Prediction and Measurements of Discharge Coefficients in Labyrinth Seals," ASME 87-GT-188, Gasturbine Conference at Anaheim, May 31.
- (2) Brownell, J. B., Millward, J. A. and Parker, R. J., 1988, "Non Intrusive Investigations Into Life-Size Labyrinth Seal Flow Fields," ASME Paper 88-GT-45.
- (3) Stocker, H. L., Cox, D. M., and Holle, G. F., 1977, "Aerodynamic Performance of Conventional and Honeycomb Lands," Detroit Diesel Allison, NASA CR-135307.
- (4) Elrod, D. A., Childs, D. W., and Nelson, C. C., 1990, "An Annular Gas Seal Analysis Using Empirical Entrance and Exit Region Friction Factors," ASME Journal of Tribology, Vol. 111, pp. 293~301.
- (5) Childs, D. W., Ha, T. W., 1992, "Friction-Factor Data for Flat-Flate Tests of Smooth and Honeycomb Surfaces," ASME Journal of Tribology, Vol. 114, pp. 722~730.
- (6) Ha, T. W., Morrison, G. L., and Childs, D. W., 1991, "Friction-Factor Characteristics for Narrow Channels with Honeycomb Surfaces," STLE-ASME Tribology conference. No. 91-Trib-21.
- (7) Schramm, V., Willenborg, K., Kim, Wittig, S., 2000, "Influence of a Honeycomb Facing on The Flow through a Stepped Labyrinth Seal," Proc. ASME Turboexpo 2000, 2000-GT-0291.
- (8) Computational Dynamics Limited, STAR-CD manual version 3.0, 1996.