

CFD를 활용한 브러쉬 요소의 누설유량 예측 해석

김 결* · 하태웅**†

CFD Analysis of Leakage Prediction for Brush Element

Kyul Kim*, Tae Woong Ha**†

Key Words : Brush Element(브러쉬 요소), CFD(전산유체역학), FLUENT, Leakage(누설유량), Porous Medium(다공성 매질)

ABSTRACT

The accurate prediction of leakage flow through the brush element of brush seal at the steam turbine is important to find optimum design parameters for increasing an efficiency. In this study, CFD analysis method using commercial software FLUENT is proposed to predict leakage through the brush element. Since the brush element has a complex three-dimensional shape with many bristle assemblies, it is difficult to analyze the flow field. Therefore, if the brush element is assumed to be porous medium region, the analysis time can be shortened. Two determination methods of resistance coefficients of the Darcian porous medium equation are suggested. By comparing the 2D and 3D CFD analysis results for the leakage of the brush element using the two resistance coefficient determination methods, the effectiveness of the analysis for the porous medium assumption is proved.

1. 서 론

스팀터빈의 Packing ring seal은 주로 다양한 형상의 래버린스 실(labyrinth seal)이 적용되어 왔다. 그러나 요즘에 해외 선진 스팀터빈 제작업체들은 브러쉬 요소(brush element)를 래버린스 실의 중간부에 삽입함으로써 회전축과 비회전부 사이의 반경방향 간극(clearance)을 없애거나 최소화 시켜줄 수 있는 브러쉬 실(brush seal)을 개발하여 적용하고 있다. 이 브러쉬 실은 기존의 래버린스 실에 비해 누설유량을 상당히 줄일 수 있어 스팀터빈의 열소비를 개선할 수 있다. 최근 국내에서도 브러쉬 실 설계 및 제작 기술을 확보하여 스팀터빈에 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 유체기계의 실은 회전축과 비회전부 사이의 틈새를 이루는 기계요소로, 누설유량을 최소화함으로써 효율향상을 이루고 틈새유동으로부터 발생된 유체의 가진력이 불안정화 자력진동(self-excited vibration)을 유발하지 않도록 설계하여 진동 안정성 향상을 꾀하고 있다.

보편적으로 펌프와 같은 비압축성 유체를 사용하는 유체

기계의 실(seal)로써는 평실(plain seal)⁽¹⁾, 및 그루브 실(grooved seal)^(2,3) 등이 사용되고 있으며, 스팀터빈 및 가스 터빈 같은 압축성 유체를 사용하는 유체기계에는 다양한 형상의 래버린스 실^(4,5), 및 허니콤 실(honeycomb seal)⁽⁶⁾ 등이 사용되고 있고, 이들 실의 누설유량 및 동특성계수 예측을 위한 다양한 해석법이 제시되어 왔다.

본 연구에서는 브러쉬 요소의 누설유량 예측을 위한 CFD 해석법을 제시하고자 한다. Fig. 1은 스팀터빈의 래버린스 실 중간에 삽입되는 브러쉬 실이며, 이는 크게 세부분인 앞판(front plate), 브리스틀 팩(bristle pack), 뒷판(back plate)으로 구성되어 있다. 브리스틀 팩은 강모(brush element)를 여러 겹으로 겹쳐놓고 끝단을 용접하여 제작되는데 강모의 밀도에 따라서 공극이 형성되며, 이를 통해서 누설이 발생한다.

여기서 브러쉬 요소를 통과하는 유체의 누설특성을 규명하기 위해서는 브러쉬 요소의 전, 후에 추가되는 압력 차이에 따른 유체 유동을 명확하게 해석해야 한다.

그러나 브러쉬 요소는 원형단면을 갖는 다수의 강모 집합체로 복잡한 3차원 형상을 가지고 있기 때문에 유동장 해석

* 가천대학교 대학원 기계공학과(department of mechanical engineering, graduate school, Gachon University)

** 가천대학교 기계공학과(department of mechanical engineering, Gachon University)

† 교신저자, E-mail : twha@gachon.ac.kr

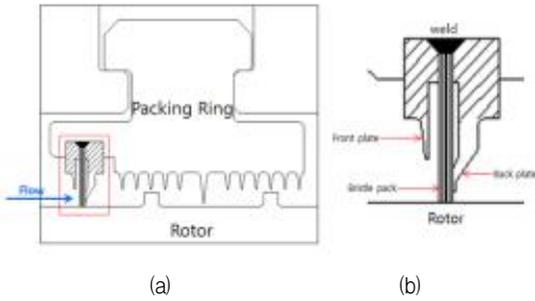


Fig. 1 Brush seal and Brush bristle pack

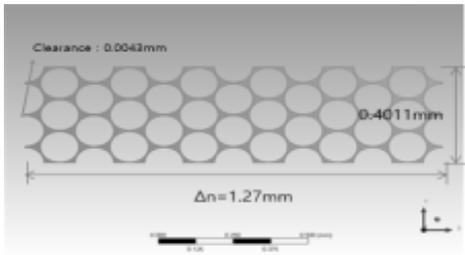


Fig. 2 Brush element geometry

에 어려움이 있다. 따라서 향후에 래버린스 실과 조합된 브러쉬 실의 유동특성 해석을 용이하게 할 수 있도록 전산유체역학(CFD) 범용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 브러쉬 요소의 누설특성 예측 방법을 제안하고자 한다.

Bayley and Long⁽⁷⁾과 Sharatchandra and Rhode⁽⁸⁾는 브러쉬 요소를 Darcian 다공성 매질(porous medium)으로 가정한 누설유량 해석법을 제시하였고, Chew and Hogg⁽⁹⁾는 non-Darcian 다공성 매질 모델을 사용한 연구 결과를 제시하였다. Li, J., Obi, S., Feng, Z.⁽¹⁰⁾는 브러쉬 실과 회전체 사이의 틈새의 크기에 따른 누설유량 분석을 하였다. Yahya Dogu and Mahmut F. Aksit.^(11,12)는 Front plate와 backing plate의 배열 형태에 따른 유동공간에서의 압력영향을 연구하였고 Diego Lelli, John W. Chew and Paul Cooper.⁽¹³⁾는 CFD를 사용한 3D 강모 굽힘(bristle bending) 모델의 해석법을 제안하였다.

본 연구에서는 브러쉬 요소를 통과하는 유량을 예측하기 위해서 브러쉬 요소를 다공성 매질로 가정하고 Bayley and Long⁽⁷⁾의 Darcian porous medium 모델을 사용한 누설유량 예측법을 제안하고자 한다. 이 때 예측 모델에 사용되는 저항계수들의 결정방법으로 CFD 해석 과 실험결과로부터 결정하는 방법을 제시하고, 브러쉬 요소의 설계변수에 따른 누설특성 결과를 제시하고자 한다.

2. 브러쉬 요소를 통과하는 유동 해석 모델

브러쉬 요소를 Darcian 다공성 매질로 가정한 압력강하 모델은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Brush element geometry and operating condition

Geometry	
Diameter of brush element	0.127 mm
Length of brush element	1.27 mm
Height of brush element	1.78 mm
Wide of brush element	0.4011 mm
Clearance	0.0043 mm
Operating condition	
Fluid	Air
Inlet pressure	3.0 bar
Density	3.6703 kg/m ³
Viscosity	0.00001789 kg/m·s
Outlet pressure	2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0 bar
Temperature	288 K

$$\Delta P = C \frac{1}{2} \rho \Delta n v^2 + \frac{1}{\alpha} \Delta n \mu v \quad (1)$$

여기서 ρ =밀도(kg/m³), Δn =porous medium 두께(m), μ = 점성계수(kg/m·s), v =유동속도(m/s)이다. 점성저항계수(viscous resistance(1/α))와 관성저항계수(Inertial-resistance (C))의 결정이 중요한데 본 연구에서는 유동해석을 위한 상용소프트웨어인 ANSYS Fluent^(14,15)를 사용하여 점성저항계수와 관성저항계수 결정 방법을 제시하고 실험결과로부터 결정된 두 저항계수를 비교 분석하였다.

3. 브러쉬 요소의 형상을 반영한 CFD 누설유량 해석 및 저항계수 결정

원형단면의 강모 집합체인 브러쉬 요소 3차원 형상에 대하여 CFD 해석을 하는 것은 형상의 복잡성 때문에 컴퓨터 메모리 용량 및 해석시간 문제로 어려움이 많다. 그러므로 브러쉬 요소를 다공성 매질 영역으로 가정한다면 해석 시간을 단축할 수 있다. 특히 래버린스 실의 중간에 브러쉬 요소가 삽입된 브러쉬 실(Fig. 1 (a))의 누설유량 해석을 위해서는 형상의 복잡성 때문에 브러쉬 요소를 다공성 매질 영역으로 가정하지 않으면 해석이 불가능할 수도 있다.

본 절에서는 2D CFD 해석법을 활용한 다공성 매질 모델의 점성저항계수(1/α)와 관성저항계수(C)의 결정 방법을 제시하고자 한다. Fig. 2는 직경이 0.127 mm인 강모로 구성된 공극률 18%를 갖는 브러쉬 요소의 단면을 보여주고 있다. 여기서 공극률은 유동장 전체 면적에서 브러쉬 요소가 있는 부분을 제외한 면적 비이다. 누설유량 해석을 위한 형상조건 및 운전조건이 Table 1에 나타나있다.

본 2D CFD해석에서는 공극에 68,000개의 격자를 생성하고 standard k-ε 난류모델을 사용하였다. 해석의 수렴성 판단은 잔류항의 총합이 10⁻⁵ 이하가 되는 시점으로 하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 Case 1에 대한 정압분포와 속도벡터의 결과를 나타내고 있으며, Table 2는 6개 case에 대한 누설유량

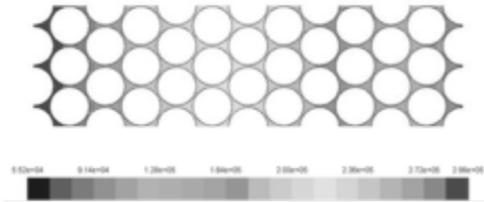


Fig. 3 Contour of static pressure for case 1

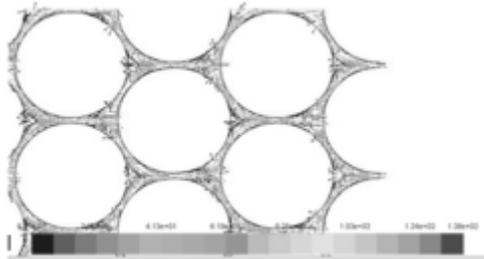


Fig. 4 Velocity distribution for case 1

Table 2 Results of leakage and average velocity for various ΔP using 2D CFD analysis

Case	ΔP [bar]	Leakage [kg/s]	interior average velocity [m/s]
1	0.5	1.8998E-03	6.8506
2	1.0	3.0666E-03	12.004
3	1.5	3.8548E-03	16.218
4	2.0	4.4006E-03	19.643
5	2.5	4.7766E-03	22.543
6	3.0	5.0205E-03	24.735

결과와 저항계수 결정을 위한 공극에서의 평균속도(average velocity)를 보여주고 있다.

Fig. 5는 Table 2의 6개 case에 대한 ΔP vs. 평균유속 (interior average velocity)의 그래프로 Darcian 다공성 매질의 압력강하 모델인 식 (1)에 대한 회귀분석을 통한 점성저항 계수와 관성저항계수의 결정 방법을 보여주고 있다. 여기서 결정된 $C=152638.36$ [1/m] 이고 $1/\alpha=202685279630$ [1/m²]이다.

Fig. 6은 Table 2의 6개 case에 대하여 브러쉬 요소 형상을 반영한 2D CFD 누설유량 해석결과(●)와 브러쉬 요소를 다공성 매질 영역으로 가정한 CFD 해석 결과(■)를 비교해 보이고 있다. 두 경우의 누설유량의 차이는 1.79~7.18%로 크지 않아 브러쉬 요소의 복잡한 형상을 반영하지 않고 다공성 매질 영역으로 설정하여 해석하려는 본 연구의 방법이 효과적임을 알 수 있다.

4. 브러쉬 요소에 대한 누설유량 실험결과에 기초한 저항계수 결정 방법

본 절에서는 브러쉬 요소를 관통하는 누설 유량에 대한 실험결과로부터 다공성 매질의 압력강하 모델 식(1)의 저항계

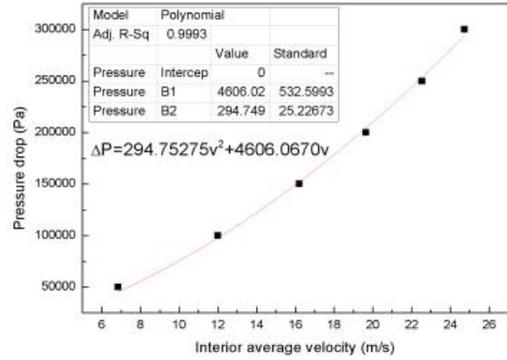


Fig. 5 ΔP vs. v curve-fitting to decide resistance coefficients based on CFD analysis by Eq (1).

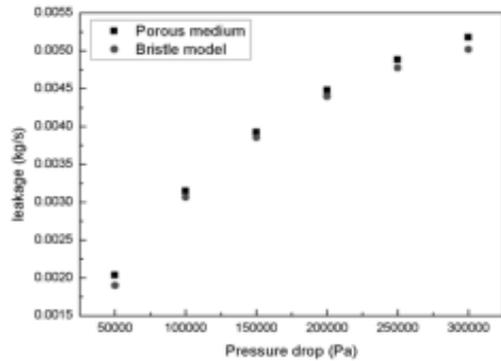


Fig. 6 Comparisons of leakage between bristle model and porous medium model analysis based on CFD analysis

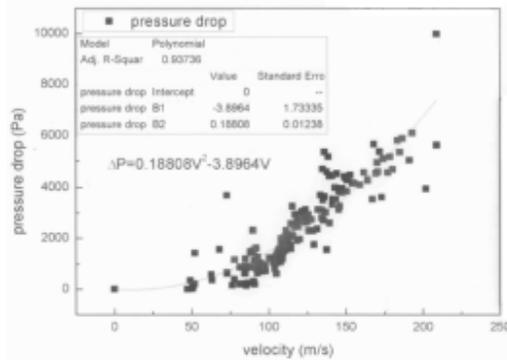


Fig. 7 ΔP vs. v curve-fitting to decide resistance coefficients based on experimental results by Eq (1)[16]

수들을 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 불행히도 사용 가능한 발표된 브러쉬 요소에 대한 누설유량 실험 결과가 없어, 참여기관⁽¹⁶⁾에서 진행되고 있는 실험결과와 일부분을 사용하여 점성 저항계수와 관성 저항계수 결정방법을 제시하고자 한다.

Fig. 7의 ■는 공기를 사용한 참여기관의 실험 결과로 공극률 18%인 브러쉬 요소를 사용하고, 입구압력 약 3×10^5 Pa에 대하여 여러 압력차(ΔP)에 대한 누설유량 데이터로부터 산출된 평균속도(v) 그래프를 보여주고 있다. 실선(-)은

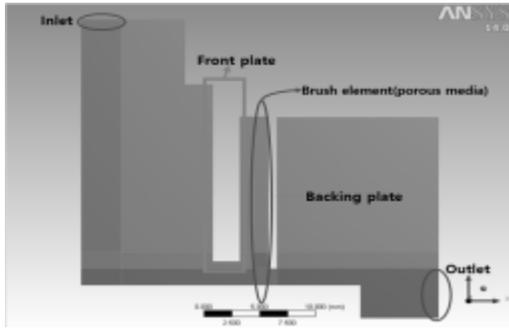


Fig. 8 Grid generation for brush seal

Table 3 Comparisons of leakage between experimental results and porous medium model analysis based on experiment

	Inlet pressure [Pa]	Outlet pressure [Pa]	Pressure drop [Pa]	Experiment [kg/s]	CFD [kg/s]
1	328461	326709	1752	0.1027	0.1250
2	332014	329644	2369	0.1052	0.1368
3	345068	342269	2798	0.1110	0.1471

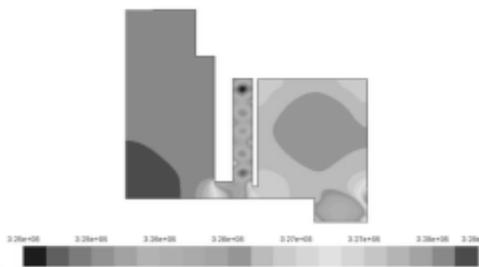


Fig. 9 Contour of static pressure for case 1

Darcian 다공성 매질의 압력강하 모델인 식(1)로 회귀분석한 결과로 점성 저항계수는 -171,455,878.85, 관성저항계수는 49.34이다.

Fig. 8은 참여기관의 실험장치인 브러쉬 요소 형상에 대한 2차원 유동장을 나타내고 있다. Axis-symmetry 조건을 사용하고, 65,895개의 사각격자를 생성하였으며, standard k-ε 난류 모델을 사용하였다. Table. 3은 3개 case에 대하여 누설유량 실험결과와 다공성 매질 영역으로 가정하여 해석한 CFD 해석결과를 나타내고 있는데 실험결과와 17.8% ~ 25%의 오차를 보였다. 오차가 비교적 큰 것은 Fig. 7에서 알 수 있는 것처럼 사용한 실험결과가 동일 압력강하 조건에서 한 개의 유속이 아니라 여러 유속을 나타내는 데이터들이 혼재하여 회귀분석을 통한 계수결정시 정확성이 떨어지는 문제점에 기인된 것으로 판단된다. 결국, 브러쉬 요소에 대한 정확한 $\Delta P-v$ 실험결과를 사용할 수 있다면 이 실험결과로부터 Darcian 다공성 매질의 저항계수들을 결정하고 다공성 매질 영역으로 가정한 CFD 해석이 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 9, 10은 Table 3의 case1에 대한 다공성 매질 영역의

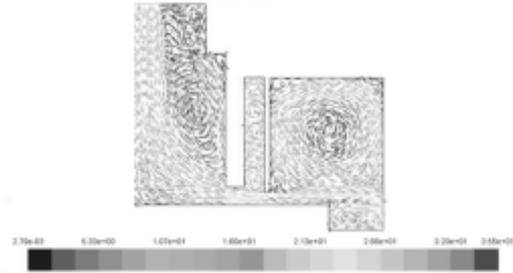


Fig. 10 Velocity distribution for case 1

Table 4 Brush element geometry and operating condition for various porosity

Geometry		
Diameter of brush element	0.127 mm	
Length of brush seal	1.27 mm	
Clearance	15%	0.0043 mm
	18%	0.0067 mm
	21%	0.009 mm
Operating Condition		
Fluid	Air	
Inlet Pressure	3.0bar	
Outlet Pressure	1.5, 2.0, 2.5bar	
Porosity	15%, 18%, 21%	
Inlet loss coefficient	0.5	
Outlet loss coefficient	1.05	
Temperature	288K	

로 가정한 CFD 해석 결과로 압력 분포도 및 속도 분포도를 나타내고 있다. 압력분포는 유체가 브러쉬 요소를 지나가면서 압력강하가 급격하게 나타나는 것을 알 수 있고, 속도벡터를 보면 다공성 매질로 가정한 브러쉬 부분을 지나가며 공극에 따른 단면감소로 속도가 급격히 증가됨을 알 수 있다.

5. 브러쉬 요소의 공극률에 따른 누설유량 특성 해석

브러쉬 요소를 통한 누설유량을 저감하기 위해서는 강모의 밀도를 더욱 조밀하게 함으로써 공극률(porosity)을 작게 설계할 수 있다. 따라서 브러쉬 요소의 공극률은 브러쉬 설계 시 중요한 요소가 된다. 본 절에서는 동일한 크기의 강모 직경에 대하여 강모배열 간격을 다르게 해 3가지의 공극률(15%, 18%, 21%)을 갖는 브러쉬 요소에 대한 누설유량 특성을 파악해 보고자 한다. Table 4는 3가지 공극률을 갖는 브러쉬 요소의 누설유량 해석을 위한 형상조건 및 운전조건을 나타내고 있다. 여기서 강모간격(clearance)은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 공극률에 따른 강모와 강모 사이의 간격을 나타낸다. Fig. 11은 브러쉬 요소에 대한 2D CFD 결과로 브러쉬 요소를 다공성 매질 영역으로 가정하고 저항계수들은 3절에 설명한 방법을 따라서 결정하였다. 또한 격자의 생성 및 FLUENT 해석방법도 3절에서 설명한 방법과 동일하다. 압

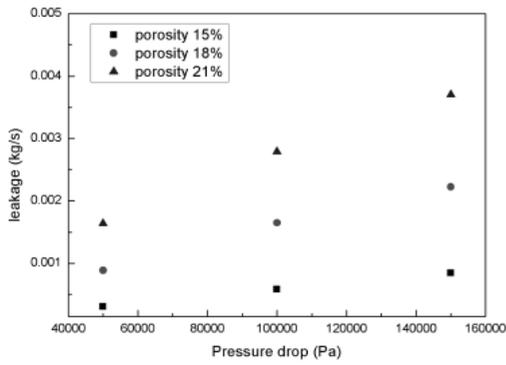


Fig. 11 Leakage vs. porosity for brush element

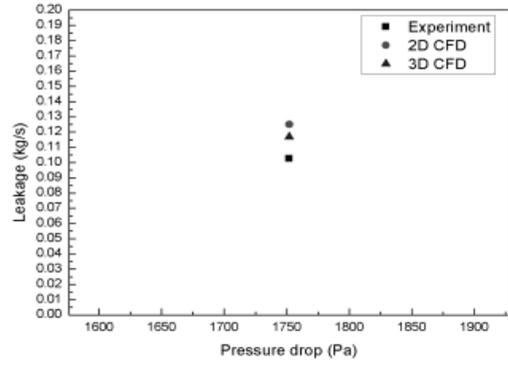


Fig. 13 Comparisons of leakage results between 2D, 3D and experiment

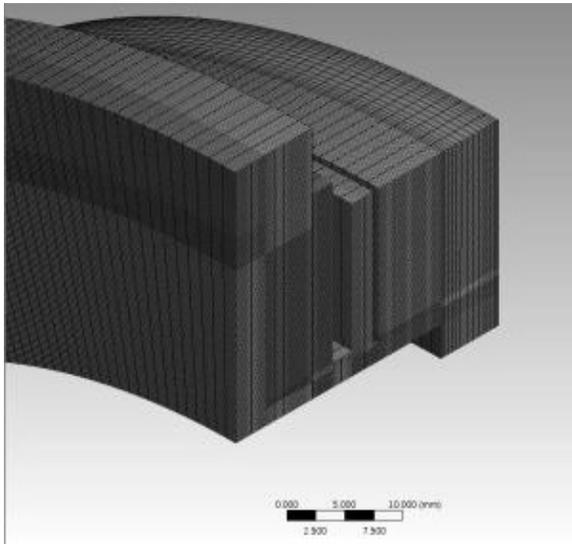


Fig. 12 3D Mesh generation for computational domain

력강하 값이 증가할수록 누설 유량은 증가하며, 같은 압력강하 값에 대하여는 공극률이 증가할수록 누설유량이 증가함을 볼 수 있다. 압력강하 값이 1×10^5 Pa일 경우 공극률이 6% 증가했을 때 누설유량은 3.79배 증가함을 보이고 있어 브러쉬 요소를 통한 누설유량 저감율은 브러쉬 요소의 밀도로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

6. 3D 모델링을 통한 2D해석 결과와의 비교

본 연구에서는 기본적으로 브러쉬 요소의 2D CFD 해석을 진행하였다. 그러나 실제 브러쉬 요소는 3D 형상임으로 3D 해석이 필요하다. 3D 해석의 경우 많은 격자 생성의 필요성, 긴 해석시간의 소요, 및 수렴의 어려움 등으로 2D 해석 결과와 3D 해석 결과에 큰 차이가 없다면 2D 해석이 훨씬 경제 적일 수 있다. 본 절에서는 Table 3에 나타낸 참여기관⁽¹⁶⁾ 실험 중 case 1에 대하여 3D 해석을 수행하고 2D 해석 결과 및 실험결과와 비교해 보고자 한다.

Fig. 12는 3차원 해석을 위한 격자 생성 모습을 보여주고

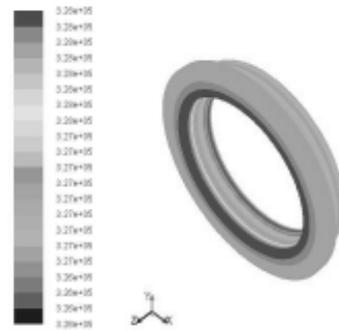


Fig. 14 Contour of static pressure result for 3D analysis

있다. Aspect ratio 6.56을 갖는 338만개의 격자를 생성하고, standard k-ε 난류모델을 사용하여 해석을 수행한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 역시 3D 누설유량 해석 결과가 2D 누설유량 해석 결과보다 실험 결과에 더 근사함을 보이고 있어 누설유량의 정확한 해석을 위해서는 3D 해석이 필요하다. 그러나 3D 해석 결과와 2D 해석 결과의 차이는 약 6.6%로 브러쉬 요소의 누설유량 해석만을 위해서는 다공성 매질 영역으로 가정된 2D 해석을 수행하는 것이 효율적일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 3D 해석 결과로 압력분포 결과를 보여주고 있다.

7. 결 론

브러쉬 실을 통하여 누설유량을 감소시키는 것은 스팀터빈의 효율성을 높일 수 있는 중요한 요소로 정확한 누설유량 예측 방법을 찾는 것이 필요하다. 브러쉬 요소를 통과하는 누설유량을 예측하기 위해서 브러쉬 강모 형상을 반영한 3D CFD 해석에는 많은 격자 생성의 필요성, 긴 해석시간의 소요, 및 수렴의 어려움 등이 따른다. 따라서 본 연구에서는 브러쉬 요소를 다공성 매질(porous medium)로 가정한 CFD 해석법을 제안하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) Darcian 다공성 매질 모델의 점성저항계수와 관성저

항계수를 강모형상을 반영한 CFD 해석에 기초해 결정하고, 이 계수를 사용하여 다공성 매질로 가정한 누설 유량을 해석한 결과는 강모형상을 반영한 CFD 해석 결과와 1.79 ~ 7.18%의 차이를 보였다.

- (2) Darcian 다공성 매질 모델의 점성저항계수와 관성저항계수를 실험 결과에 기초해 결정하고, 이 계수를 사용하여 다공성 매질로 가정한 누설유량 해석결과는 17.8% ~ 31.17%의 오차를 보였다. 오차가 비교적 큰 것은 사용된 실험결과가 동일 압력강하 조건에서 한 개의 유속이 아니라 여러 유속을 나타내는 데이터들이 혼재하여 회귀분석을 통한 계수 결정시 정확성이 떨어지는 문제점에 기인된 것으로 판단된다.
- (3) 공극률이 브러쉬 요소의 누설유량에 미치는 영향은 공극률이 작아질수록 적어지고, 압력강하 값이 작을수록 적어짐을 보였다.
- (4) 3D 누설유량 해석 결과는 2D 누설유량 해석 결과보다 실험 결과에 더 근사함을 보였으나 3D 해석 결과와 2D 해석 결과의 차이는 약 6.6 %로 크지 않았다.

후 기

본 연구는 2015년은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131010101770)

References

- (1) Childs, D. W., 1983, "Dynamic Analysis of Turbulent Annular Seals Based on Hirs' Lubrication Equation," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 437~444
- (2) Ha, T. W. and Lee, A. S., 2000, "A Rotordynamic Analysis of Circumferentially-Grooved Pump Seals Based on a Three-Control-Volume Theory", *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 261~271.
- (3) Kim, S. H. and Ha, T. W., 2016, "Prediction of Leakage and Rotordynamic Coefficients for the Circumferential-Groove-Pump Seal Using CFD Analysis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 2037~2043.
- (4) Ha, T. W., 2001, "Rotordynamic Analysis for Stepped-Labyrinth Gas Seals Using Moody's Friction-Factor Model," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 9, pp. 1217~1225.
- (5) Ha, T. W., 2006, "Prediction of Combination-Type-Staggered-Labyrinth Seal Leakage Using CFD," *Journal of the KSTLE*, Vol. 22, No. 2, pp. 66~72.
- (6) Ha, T. W. and Childs, D. W., 1994, "Annular Honeycomb-stator Turbulent Gas Seal Analysis Using a New Fiction-Factor Model Based on Flat Plate Tests," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 352~360.
- (7) Bayley, F. J. and Long, C. A., 1993, "A Combined Experimental and Theoretical Study of Flow and Pressure Distributions in a Brush Seal," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 115, pp. 404~410.
- (8) Sharatchandra, M. C. and Rhode, D. L., 1996, "Computed Effects of Rotor-induced Swirl on Brush Seal Performance - Part 1 Leakage Analysis," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 912~919.
- (9) Chew, J. W. and Hogg, S. I., 1997, "Porosity Modeling of Brush Seals," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 769~775.
- (10) Li, J., Obi, S., and Feng, Z., 2009, "The effects of clearance sizes on labyrinth brush seal leakage performance using a Reynolds - averaged Navier - Stokes solver and non- Darcian porous medium model," *Proc. IMechE Vol. 223 Part A*.
- (11) Yahya Dogu and Mahmut F. Aksit, 2006, "Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields-Part1 : Front Plate Configurations," *ASME Journal of Turbo machinery*, Vol. 128, pp. 367~378.
- (12) Yahya Dogu and Mahmut F. Aksit, 2006, "Effects of Geometry on Brush Seal Pressure and Flow Fields-Part2 : Backing Plate Configurations," *ASME Journal of Turbo machinery*, Vol. 128, pp. 379~389.
- (13) Diego Lelli, John W. Chew, and Paul Cooper, 2006, "Combined Three Dimensional Fluid Dynamics and Mechanical Modeling of Brush Seals," *ASME Journal of Turbo machinery* Vol. 128, pp. 188~195.
- (14) ANSYS Fluent v14 User Guide.
- (15) ANSYS Fluent v14 Theory Guide.
- (16) 지식경제 기술혁신 사업 연차보고서, 2015, "발전용 증기 터빈 효율향상을 위한 Brush Seal 개발," 한국 에너지 기술 평가원.