

## CFD를 활용한 브러쉬 실의 회전체동특성 해석

박대성\* · 하태웅\*\*†

### Rotordynamic Characteristic Analysis of Brush Seal Using CFD

Dae-Sung Park\*, Tae Woong Ha\*\*†

Key Words : Rotordynamic Characteristic(회전체동특성), Brush Seal(브러쉬실), Brush Element(브러쉬 요소), Porosity(공극율), CFD(전산유체역학), FLUENT

#### ABSTRACT

To improve the efficiency of steam turbines, this study examines the application of a brush seal with bristles having a minimum clearance in the rotor. To maximize the reduction of leakage, a hybrid seal was employed to replace one or two of the labyrinth teeth with bristles. In the design of the brush or hybrid seal, a dynamic coefficient prediction method was developed to evaluate vibration characteristics, in addition to the use of a leakage prediction method. In this paper, we propose a 3D computational fluid dynamics (CFD) analytical method based on dynamics analysis using the relative coordinate system, assuming that the bristle element is a porous medium and comparing the results with published experimental results. With the exception of K (direct stiffness), the dynamic characteristics of the brush seal with the bristles contacted with the rotor, k (cross coupled stiffness), C (damping), and c (cross coupled damping), were quite small and the vibration characteristics of the brush seal were relatively unaffected. Compared to the experimental results, 3D CFD analytical results of the hybrid seal revealed that K was 17.5% smaller, k was 3% larger, and C was 10% larger.

#### 1. 서 론

최근 스팀터빈의 효율 향상 노력의 한 방법으로 회전체인 로터와 고정체인 다이어프램과 실 링(seal ring) 사이의 간극에서 발생하는 적지 않은 누설량을 저감시키기 위해 브러쉬 실(brush seal)이 적용되고 있다. 실 링에는 래버린스 실이 주로 적용되어 왔으나 래버린스 실 중간에 로터와 최소간극을 갖는 브러쉬 요소를 설치한 하이브리드 실이 개발되었고 성능이 매우 우수한 것으로 알려져, 하이브리드 실의 설계 국산화를 위한 해석 기술 개발이 필요한 시점이 되었다.

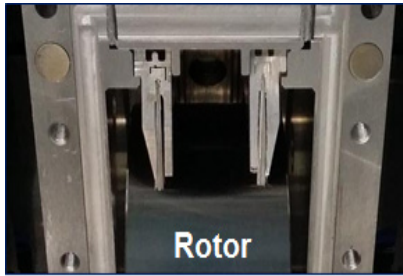
스팀터빈과 가스 터빈의 효율 및 진동 안정성에 영향을 주는 다양한 실의 누설량 예측 및 회전체 진동특성 해석은 독자적인 설계 기술 확보를 위한 중요 요소로 많은 연구 개발이 수행되어 왔고, 최근에는 전문 소프트웨어와 컴퓨터 사양의 발달로 전산유체역학(CFD)에 기초한 해석법의 활용이 대부분이

되다.  $Ha^{(1)}$ 는 터보기계의 다양한 실의 누설량예측에 CFD 활용방법을 제시하였고, 다양한 형상의 래버린스 실의 누설량<sup>(2)</sup> 및 회전체동특성 계수(rotordynamic coefficients) 예측<sup>(3)</sup>에 상용 소프트웨어인 FLUENT를 활용한 CFD 해석법을 제시하였다. 브러쉬 실의 우수성을 실험적으로 밝히고 증기터빈 적용 사례와 브러쉬 실의 누설특성과 관련된 많은 연구<sup>(4-6)</sup>가 진행되어왔다. Bayley and Long<sup>(7)</sup>과 Sharatchandra and Rhode<sup>(8)</sup>는 브러쉬 실의 누설량 예측을 위하여 브러쉬 실의 강모인 브리스틀의 형상을 직접 고려하지 않고 Darcian porous medium으로 가정한 누설량 해석법을 제시하였다. Kim and Ha<sup>(9)</sup>는 Darcian porous medium으로 가정한 브러쉬 요소의 누설량 예측에 사용된 다공질 매질(porous medium)의 점성저항계수(viscous resistance coefficient)와 관성저항계수(inertial resistance coefficient)의 결정법으로 실험적 방법과 CFD 해석적 방법을 제시하고 CFD 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 Picture of brush seal (Ref.<sup>(12)</sup>)

을 통한 계수 결정법의 타당성을 입증하였다. 또한 Park and Ha<sup>(10)</sup>는 스팀터빈의 하이브리드(브러쉬+래버린스)실에 대한 누설량 예측을 CFD를 활용하여 수행하고 실험결과와 비교 입증하였는데, 하이브리드 실이 기존에 사용되고 있는 래버린스 실보다 누설량을 80% 더 저감함을 보였고, 브리스틀 와이어 직경, 공극율, 및 폭 두께에 따른 누설 특성을 제시하였다.

본 연구에서는 최근 스팀터빈에 적용되고 있는 하이브리드 실의 설계 기술 확보를 위해서 브러쉬 실 또는 래버린스+브러쉬 형태의 하이브리드 실의 진동 안정성을 예측할 수 있는 회전체동역학적 특성 해석법을 제시하고자 한다. 실의 3D CFD 해석을 위해서는 Kim and Ha<sup>(11)</sup>가 제시한 상대좌표계를 사용한 로터의 휘돌림운동 정의를 사용하고, Park and Ha<sup>(10)</sup>가 제시한 브러쉬 요소를 다공질 매질로 가정한 해석법을 활용하여 브러쉬 실 또는 하이브리드 실의 회전체동역학적 특성을 나타내는 회전체동특성계수인 강성계수(K), 연성강성계수(k), 감쇠계수(C), 및 연성감쇠계수(c) 결정방법을 제시하고자 한다.

## 2. 브러쉬 실의 동특성 3D CFD 해석

### 2.1 브러쉬 실의 형상 및 운전조건

Fig. 1은 해석 대상 브러쉬 실의 모습<sup>(12)</sup>을 보여주고 있으며, Table 1은 브러쉬 실의 형상 및 운전조건을 나타내고 있다. 좌우 두 개의 브러쉬 실이 설치되어 있고 각 각의 브러쉬 실은 앞판(front plate)과 뒷판(back plate) 사이에 강모(bristle) 다발이 위치하며, 로터와의 사이에 간극이 0으로 설치되어 있다. 스팀이 중앙 입구부에서 유입되어 양쪽 브러쉬를 통해 유출되는 구조이며, 뒷판과 로터표면 사이의 높이(fence height)는 1.78 mm이다.

### 2.2 브러쉬 실의 동특성 해석법

Fig. 2와 Fig. 3는 로터의 휘돌림 운동에 따라서 로터에 발생하는 유체력 성분을 동특성 계수로 나타낸 것이다. e는

Table 1 Brush element geometry and operating condition (Ref.<sup>(12)</sup>)

Geometry	
Rotor diameter	150 mm
Diameter of brush element	0.127 mm
Fence Height	1.78 mm
Thickness of bristle	1.27 mm
Operating condition	
Fluid	Steam
Inlet pressure	8.4 bar
Outlet pressure	5.3 bar
Inlet loss coefficient	0.5
Outlet loss coefficient	1.05
Inlet Temperature	202°C
Outlet Temperature	179°C
Rotor speed	16900 rpm

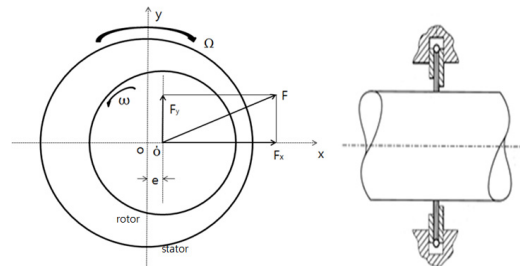


Fig. 2 Rotor reaction forces due to whirling motion in relative coordination system

회전체의 휘돌림 진폭,  $\omega$ 는 회전체의 회전속도, K는 강성계수, C는 감쇠계수, k는 연성강성계수, c는 연성감쇠계수를 의미한다. C와 k는 회전체 동역학적인 관점에서 실의 안정성과 관련이 있다. 여기서 k는 회전체의 불안정성을 발생시키는 요인이 되며, C는 회전체의 안정성을 나타낸다. K와 c는 회전체의 임계속도에 영향을 주는 요소이다. 따라서 실에 대한 회전체동특성 계수의 정확한 예측은 전체 회전체 시스템의 진동특성 해석에 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 작동유체는 스팀 및 공기로 질량의 영향이 매우 작기 때문에 이에 대한 영향을 무시하고자 한다. 실의 고정체와 회전체 틈새에서 발생한 유체력은 식 (1)과 같이 휘돌림 회전속도  $\Omega$ 의 함수로 나타낼 수 있으며, 여러 휘돌림 회전속도에 대한 실 틈새에서의 동압력(P)를 CFD 해석을 사용해 구하고, 식(2)에 정의된 것처럼 실 전체 영역에 대한 적분을 수행하여 유체력 성분( $F_x$ 와  $F_y$ )을 구하여 회전체동특성계수를 결정할 수 있다. Fig. 2에 나타난 것처럼 비회전체인 스테이터를 휘돌림 회전속도의 반대방향으로 회전시키는 상대좌표계를 가정하면 CFD 해석에서 유동영역이 변화하지 않는 정상상태해석이 가능하기 때문에 본 논문에서는 해석소요 시간의 단축을 위해서 상대좌표계를 활용하여 동특성 계수 해석을 진행하였다.

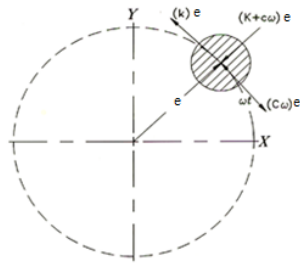


Fig. 3 Physical forces meaning of rotordynamic coefficients

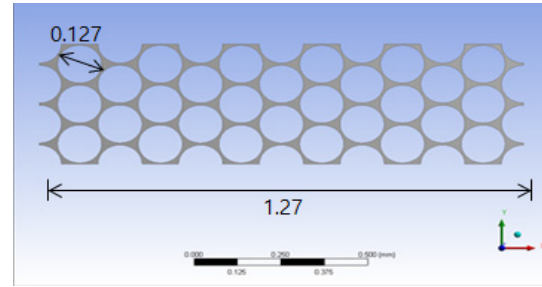
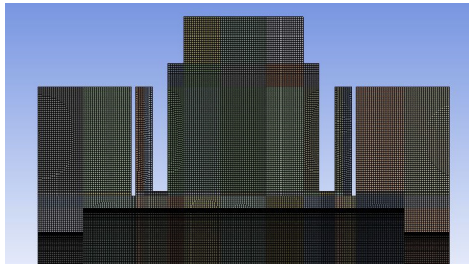
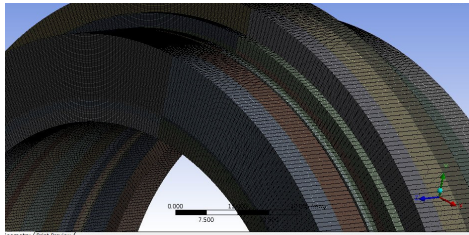


Fig. 5 Cross section of bristle (unit : mm)



(1) 2D view at y-z coordinate



(2) 3D view

Fig. 4 Mesh of Brush seal for CFD analysis

Table 2 Brush element operating condition

Operating Condition	
Fluid	Steam
Inlet Pressure	8.4 bar
Outlet Pressure	7.8, 7.2, 6.5, 5.9, 5.3 bar
Inlet loss coefficient	0.5
Outlet loss coefficient	1.05
inlet Temperature	202 °C
outlet Temperature	179 °C

해석을 하기 위해서는 식(3)<sup>(14)</sup>에 나타난 Darcian 압력강하 모델을 만족시키는 점성저항계수( $\alpha$ )와 관성저항계수( $C_2$ )를 알아야한다. 즉 브러쉬 실에 사용된 브러쉬 요소의 형상 및 운전조건에 맞는 계수들을 CFD 해석 시 입력해 주어야한다. 본 논문에서는 Kim and Ha<sup>(9)</sup>가 제시한 CFD 해석을 통한 저항계수 결정법을 사용하였다.

$$-\frac{F_x}{e} = K + c\Omega \quad (1)$$

$$-\frac{F_y}{e} = -k + C\Omega$$

$$-F_x = R \int_0^l \int_0^{2\pi} P_i \cos \theta d\theta dz$$

$$-F_y = R \int_0^l \int_0^{2\pi} P_i \sin \theta d\theta dz \quad (2)$$

## 2.3 격자생성

Fig. 4는 ANSYS workbench mesh를 이용하여 동특성 계수를 해석하기 위해 3D 모델로 격자를 구성한 모습이다. Fig. 4(1)에서와 같이 격자를 edge sizing기법을 적용하여 단면에서 사각격자를 구성하고 3D 격자로 밀어내는 sweep 기법을 적용하였다. Fig. 4(2)는 총 230만개의 육면체 격자 생성 모습을 보여주고 있다.

## 2.4 브러쉬 요소의 Porous medium coefficient 결정

브러쉬 요소를 다공질 매질로 가정하고 누설량 및 동특성

$$\Delta p = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n v^2 + \frac{1}{\alpha} \Delta n v \mu \quad (3)$$

여기서  $\rho[\text{kg/m}^3]$ 는 작동유체의 밀도,  $\Delta n[\text{m}]$ 은 porous medium의 두께,  $v[\text{m/s}]$ 는 유체의 속도,  $\mu[\text{kg/m}\cdot\text{s}]$ 는 점도,  $1/\alpha$ 은 점성저항계수,  $C_2$ 는 관성저항계수이다.

브러쉬 실의 브리스틀 형상에 대한 prous medium coefficients를 해석적으로 결정하기 위하여 Fig. 5는 브리스틀 형상에 대한 2D 모델을 보여주고 있다.

브리스틀 직경은 0.127 mm이며 18%의 공극률을 갖도록 배열하였다. 가로 방향으로서는 brush seal의 두께인 1.27 mm, 세로방향으로는 원주길이를로 periodic 조건을 사용하여 모델링하였다. 브러쉬 실의 운전조건은 Table 2와 같다.

Table 2에 나타난 압력강하 조건에 대하여 유동장 해석을 하고 평균유속을 계산하여 그 결과를 식(3)를 사용한 곡선맞춤을 하여 점성저항계수와 관성저항계수를 결정하였다. 해석시 난류모델은 Standard k- $\epsilon$  모델을 사용하였고, 수렴 판단은 k와  $\epsilon$ 의 잔차 항과 x, y, z방향의 속도가  $10^{-5}$ 이하일 경우로 하였다. Fig. 6은 해석결과로 압력강하와 속도의 그래프로 나타냈으며, 식(2)의  $C_2$ 와  $1/\alpha$ 계수를 결정하면 각 각

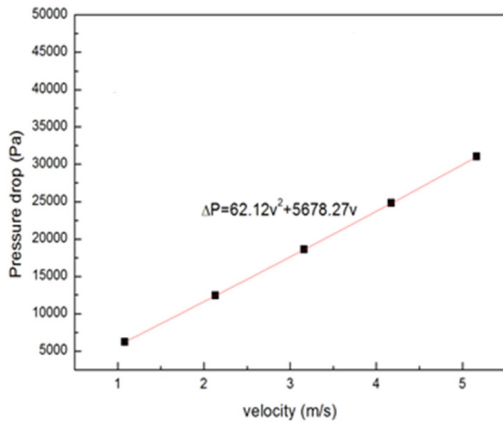


Fig. 6 2D CFD result of pressure drop vs. velocity for bristle

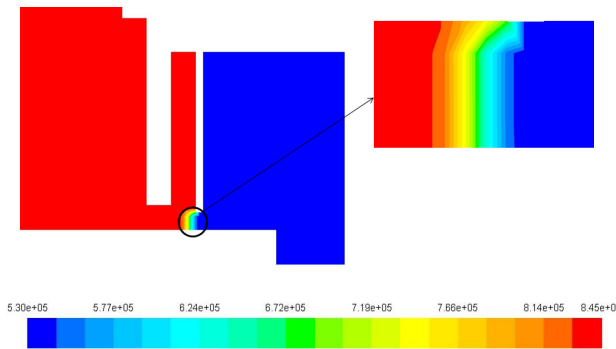


Fig. 7 Brush seal 3D CFD result of pressure distribution (x=0 mm)

$8.7 \text{ e}^4(1/m)$ 와  $2.0 \text{ e}^{11}(1/m^2)$ 이다.

## 2.5 CFD 해석

본 연구에서는 브러쉬 실의 동특성 해석을 위해서 상용소프트웨어인 FLUENT<sup>(13-14)</sup>를 사용하여 3D CFD 해석을 수행하였다. ANSYS workbench<sup>(13)</sup>를 사용하여 격자(Fig. 4)를 생성하였으며, Intel Xeon CPU E5-2630 2.30 GHz와 64GB DDR3 RAM의 사양을 갖는 PC를 이용해 해석을 수행하였다.

Table 1에 나타낸 운전조건에 대하여 브러쉬 실 내 유동장을 해석하였다. 3D 해석 시 지배방정식으로 압축성 RANS equations, 에너지방정식, 이상기체상태방정식을 사용하였다. 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$  난류 모델과 pressure based solver (PBS)를 사용였고, 대류항 계산을 위한 격자점간 보간법은 2차 상류차분법을 사용하였다. 상대좌표계를 사용한 해석방법으로 휘돌림 속도 0, 3380, 6760, 10140, 13520, 16900 rpm 6가지에 대한 해석을 수행하고 각 각의 경우에 대한 유체가진력  $F_x$ 와  $F_y$ 를 계산하였다. 이 때  $e$ (휘돌림 진폭)은 Fence height의 0.01배로 가정하였고, 수렴 판단기준으로는 실입·출구부의 누설량,  $k$  및  $\epsilon$  잔류항 값이  $10^{-5}$ 으로 하였다.

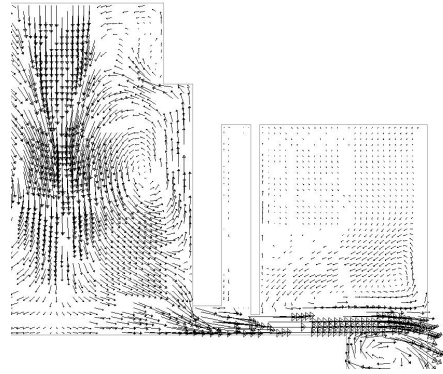


Fig. 8 Brush seal result of Distribution of velocity (x=0 mm)

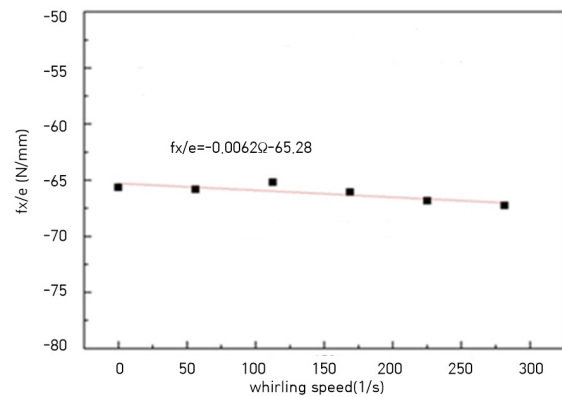


Fig. 9 Brush seal 3D CFD result of  $F_x/e$  vs. whirling speed

## 2.6 브러쉬 실의 동특성 CFD 해석 결과

Fig. 7은 브러쉬 실의 3D CFD 해석 결과로 압력분포를 보여주고 있으며, Fig. 8은 속도분포를 나타내고 있다. Fence height와 로터 사이 간극의 브리스틀을 통과하며 유속과 압력이 급격히 감소됨을 보임으로써 누설유량을 감소시킬 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 9-10은 휘돌림 속도에 따른  $F_x/e$ 와  $F_y/e$ 의 결과를 보여주고 있다. 식(1)과의 곡선맞춤을 통해서 결정된 동특성 계수(K,C,k,c) 결과를 Table 3에 나타내었다. 강성계수 K 이외의 동특성계수 C, k, 및 c는 강성계수 K에 비해 값이 매우 작아 무시할 수 있는 수준이기 때문에, 브러쉬 실의 브리스틀만의 동특성은 다른 강성 요소와 비교할 때 회전체 시스템에 주는 진동 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

## 3. 하이브리드 실의 동특성 3D CFD 해석

### 3.1 하이브리드(브러쉬+래버린스) 실의 형상 및 운전 조건

본 절에서는 앞 절에서 제시한 브러쉬 실의 해석법을 이용하여 브러쉬 실과 래버린스 실이 결합된 하이브리드 실의 3D



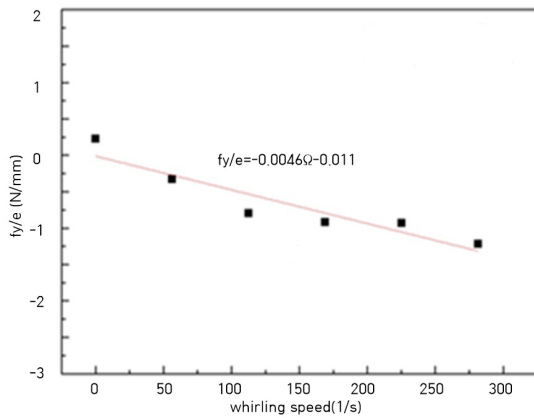


Fig. 10 Brush seal 3D CFD result of  $F_y/e$  vs. whirling speed

Table 3 Result of rotordynamic coefficients for brush seal

Rotordynamic coefficients	Result of 3D CFD
Direct Stiffness K	65.28 N/mm
Cross coupled Stiffness k	-0.011 N/mm
Damping C	0.0046 N·s/mm
Cross coupled Damping c	0.0062 N·s/mm

CFD해석을 수행하고 기 발표된 실험결과와의 비교를 통해 브러쉬 실 해석법의 타당성을 검증하고자 한다. Fig. 11은 해석 대상인 Pugachev<sup>(15)</sup>의 하이브리드 실 형상이다. Hi-Lo type의 래버린스 실에 뒤 Hi 래버린스 이 대신에 브러쉬 브리스틀을 장착한 하이브리드 실을 보여주고 있다. Table 4는 하이브리드 실의 형상 및 운전조건이다.

### 3.2 하이브리드 실의 동특성 CFD 해석

하이브리드 실의 CFD 해석은  $Ha^{(3)}$ 의 래버린스 실 3D CFD 해석법과 앞절에서 설명한 브러쉬 실의 3D CFD 해석법을 활용하여 수행하였다. 다만 Porous medium coefficient 결정법을 앞 절에서 사용한 해석적 방법을 사용하지 않고 Pugachev<sup>(15)</sup>의 이론적 결정식을 사용하였다.

#### 3.2.1 Porous medium coefficient 결정

브러쉬 요소인 브리스틀을 다공질 매질로 가정한 해석을 수행하기 위하여 Pugachev<sup>(15)</sup>는 식 (4)과 같이 다공질 매질의 압력강하를 정의 하였다. 식 (4)의 점성저항계수( $a$ )와 관성저항계수( $b$ )는 식 (5)<sup>(16)</sup>를 사용하여 결정할 수 있으며, 이때 방향성을 고려하여 n(축)방향과 s(원주)방향의 계수를 구분하여 결정하였다. 또한, z(반경)방향의 계수는 n방향과 동일하게 설정하였다. 식 (5)의 공극률( $\varepsilon$ )은 식 (6)에 정의 되어 있으며 여기서  $b_b$ 는 브리스틀 팩의 두께,  $d$ 는 브리스틀의 직경,  $N$ 은 브리스틀의 밀도,  $\varphi$ 는 lay angle을 의미한다.

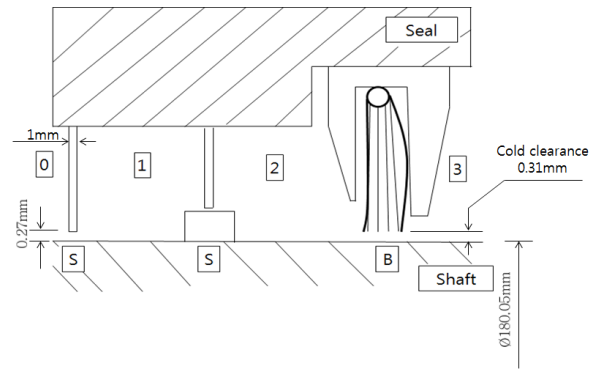


Fig. 11 Geometry of hybrid seal (Ref.<sup>(15)</sup>)

Table 4 Hybrid seal geometry and operating condition<sup>(15)</sup>

Geometry	
Rotor diameter	180.05 mm
Bristle diameter	70 $\mu m$
Density of bristle	200 bristles/mm
Lay angle of bristle	45 °
Operating Condition	
Fluid	air
Inlet Pressure	2 bar
Outlet Pressure	1 bar
Inlet loss coefficient	0.5
Outlet loss coefficient	1.05
Temperature	20°C
Rotor speed	750 rpm

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} = a_i \mu v_i + b_i \rho |v_i| v_i \quad (4)$$

$$a_n = 80C, \quad a_s = 32\varepsilon C, \quad C = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2} \quad (5)$$

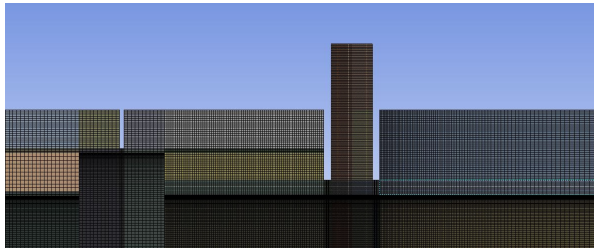
$$b_n = 1.16D, \quad b_s = 0, \quad D = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 d} \quad (6)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi d^2 N}{4b_b \cos \varphi}$$

본 절에서 사용된 브러쉬 실의 브리스틀에 대한 계수들을 위 식을 사용하여 계산한 결과는  $a_n(a_z)=7.2 \text{ e}^{11}$ ,  $a_s=6.8 \text{ e}^{10}$ ,  $b_n(b_z)=1.9 \text{ e}^6$ , alc  $b_s=0.0$ 이다.

#### 3.2.2 CFD 해석

Fig. 12는 하이브리드 실의 3D CFD 해석을 위한 격자생성 모습을 보여주고 있다. ANSYS workbench mesh를 이용하여 총 2100만개의 육면체 격자를 생성하였으며, 해석 방법은 앞 절의 브러쉬 실 동특성 해석방법과 기본적으로 동일하여, 난류모델은 SST 난류 모델과 pressure based solver



(1) 2D view at y-z coordinate



(2) 3D view

Fig. 12 Mesh of hybrid seal for CFD analysis

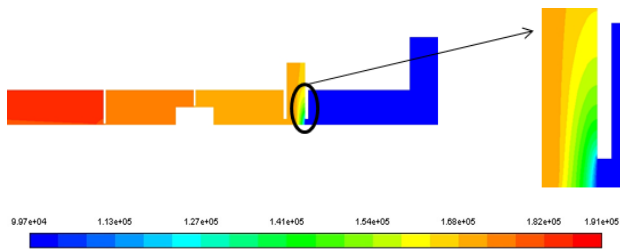


Fig. 13 Hybrid seal 3D CFD result of pressure distribution (x=0 mm)

(PBS)를 사용였고, 대류항 계산을 위한 격자점간 보간법은 2차 상류차분법을 사용하였다.

Table 4의 운전조건에 대한 동특성 해석을 수행한 결과로 Fig. 13-14는 하이브리드 실의 압력분포와 속도분포를 보여주고 있다. 브리스틀 팩을 지날 때 압력이 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, 래버린스 cavity에서의 와류 형성과 래버린스 이와 로터 간극에서의 제트류에 따른 압력강하와 브리스틀과 브리스틀/로터 사이 간극에서의 속도손실로 누설량이 저감되는 현상을 볼 수 있다. 식(1)과의 곡선맞춤 (Fig. 15-16)을 통해서 결정된 동특성 계수(K,C,k) 결과를 Table 3에 나타내었다. 3D CFD해석 결과는 Pugachev<sup>(15)</sup>의 실험결과와 비교적 잘 일치하여 본 논문의 브러쉬 실 해석법의 타당성을 입증하였다. K는 17.5% 작게, k는 3% 크게, C는 10% 크게 예측됨을 보였다.

#### 4. 결 론

스팀터빈의 효율향상을 위해 브리스틀을 로터에 최소 간극으로 설치하는 브러쉬 실이 적용되고 있고, 누설량 저감을

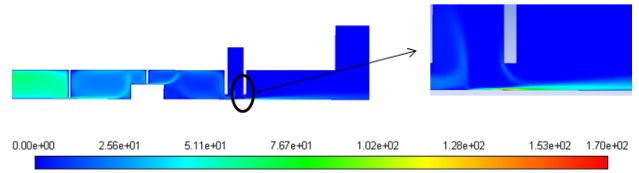


Fig. 14 Hybrid seal result of Distribution of velocity (x=0 mm)

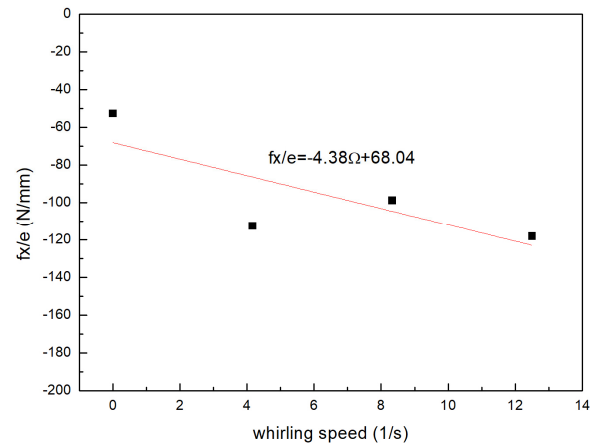


Fig. 15 Hybrid seal 3D CFD result of  $F_x/e$  vs. whirling speed

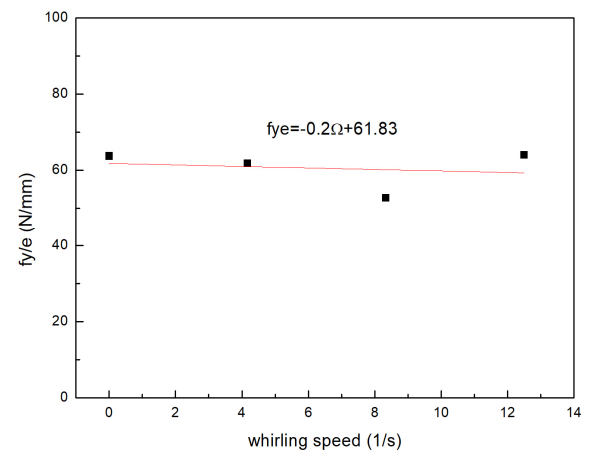


Fig. 16 Hybrid seal 3D CFD result of  $F_y/e$  vs. whirling speed

Table 5 Result of rotordynamic coefficients for hybrid seal

Rotordynamic coefficients	Result of 3D CFD	Result of experimental <sup>(15)</sup>
Direct Stiffness K	68.04 N/mm	80 N/mm
Cross coupled Stiffness k	61.83 N/mm	60 N/mm
Damping C	0.2 N·s/mm	0.18 N·s/mm

극대화하기 위해서 기존의 래버린스 실에 래버린스 이 중 한 두개에 대신 브리스틀을 설치하는 하이브리드 실이 사용되고 있다. 이들 브러쉬 실 또는 하이브리드 실의 설계를 위해서는 누설량 예측법과 더불어 진동 특성인 동특성계수 예측

법의 개발이 요구된다. 본 논문에서는 브리스틀 요소를 다공질 매질로 가정하고, 상대좌표계를 사용한 동특성 해석법을 기초로 3D CFD 해석법을 제안하고 그 결과를 기 발표된 실험결과와 비교 분석하였다.

브리스틀을 로터에 접촉시킨 브러쉬 실의 동특성 해석 결과  $K$ 를 제외한  $k$ ,  $C$ ,  $c$ 는 매우 작은 값을 나타내어 브러쉬 실의 진동특성 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 래버린스 실에 브리스틀이 삽입된 하이브리드 실의 3D CFD 해석 결과는 실험결과와  $K$ 는 17.5% 작게,  $k$ 는 3% 크게,  $C$ 는 10% 크게 예측됨을 보여 본 논문의 브러쉬 실 해석법이 타당함을 보였다.

## References

- (1) 하태웅, 2006, "CFD를 사용한 터보기계 비접촉식 실의 누설량 예측," 유체기계저널 Vol. 9, No. 3, pp. 14~21.
- (2) 하태웅, 2006, "CFD를 사용한 복잡한 형상을 갖는 래버린스 실의 누설량 예측," 윤활학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 66~72.
- (3) 하태웅, 2015, "3D CFD를 활용한 관통 래버린스 실의 회전체동역학적 해석," 한국 유체기계학회 논문집, Vol. 18, No. 1, pp. 44~50.
- (4) Gorelov, G. M., Reznik, V. E. and Tsibizov, V. I., 1988, "Experimental Study on Brush Seal Flow Characteristics and Comparison with a Labyrinth Seal (in Russian)," Izvestiya VUZov, Aviatsionnaya Tekhnika, Vol. 31, No. 4, pp. 43~46.
- (5) Pastrana, R. M., Wolfe, C. E., Turnquist, N. A. and Burnett, M. E., 2001, "Improved Steam Turbine Leakage Control with a Brush Seal Design," Proceedings of the 30th Turbomachinery Symposium, Houston, USA, pp. 33~38.
- (6) Hendricks, R. J., Braun, M. J., Canacci, V. and Mullen, R. L., 1990, "Brush Seals in Vehicle Tribology," Paper IX(i), Proceedings of the 13th Leeds-Lyon Symposium on Tribology.
- (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) 김결, 하태웅, 2017, "CFD를 활용한 브러쉬 요소의 누설 유량 예측 해석," 한국유체기계학회 논문집, Vol. 20, No. 2, pp. 11~16.
- (10) 박대성, 하태웅, 2017, "CFD를 활용한 스팀터빈 하이브리드(브러쉬+래버린스) 실의 누설특성 해석," 한국유체기계학회 논문집, Vol. 20, No. 5, pp. 5~12.
- (11) 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, No 5, pp. 2037~2043.
- (12) 지식경제 기술혁신 사업 최종보고서, 2017, "발전용 증기터빈 효율향상을 위한 Brush Seal 개발", 산업통상자원부.
- (13) ANSYS Flunet v14 User Guide.
- (14) ANSYS Flunet v14 Theory Guide.
- (15) Pugachev, A. O. and Deckner, M., 2010, "CFD Prediction and Test Results of Stiffness and Damping Coefficients for Brush-labyrinth Gas Seals," Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22667.
- (16) Prostler, S., 2005, "Modellierung und numerische Berechnung von Wellenabdichtungen in Bürstenbauart," Doctoral Thesis, University of Bochum,