

# 고압 이단 링블로워의 삼차원 유동해석 및 성능평가

이 기 돈<sup>1</sup>, 김 광 용<sup>\*2</sup>

## FLOW ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF HIGH PRESSURE DOUBLE STAGE RING BLOWER

K.D. Lee<sup>1</sup> and K.Y. Kim<sup>\*2</sup>

*In the present work, flow analysis has been performed for side channel type double stage ring blower by solving three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equation. Shear stress transport model is used as turbulent closure. The commercial CFD code CFX 11.0 is used for the calculations. Each of two stage is calculated separately and the second stage inlet flow is same as the first stage outlet flow so that consecutive calculation is possible. Velocity and pressure fields have been analyzed at the mid-plane between blades. The numerical results are validated with experimental data for head coefficients at different flow coefficients.*

**Key Words :** 링블로워(Ring Blower), 사이드채널형(Side Channel Type), 스트리퍼(Stripper), 재생형 유체기계(Regenerative Turbomachinery), 전산유체역학(CFD)

### 1. 서 론

링블로워는 고압의 공기이송을 위해 산업용 기계 등에 사용되고 있는 기계장치로서 그 용도에 따라 매우 다양한 사양을 가지고 설계 제작되고 있다. 링블로워는 사이드 채널이라고 불리는 임펠러 내부의 통로에서 흡입구를 통해 흡입된 기체가 임펠러의 회전운동에 의해 가압되는 과정을 거친다. 이단 블로워의 경우 1단에서 압축된 기체를 동일한 구조의 2단에서 재차 압축하게 된다.

이러한 사이드 채널형의 링블로워는 재생형 유체기계라고 불리며 작은 유량에서 큰 양정을 낼 수 있는 장점이 있으나, 양정을 상승시키는 과정에서 발생하는 마찰과 임펠러와 채널 사이에서 발생하는 와동으로 인해 효율이 매우 낮다.

재생형 블로워에 관련된 연구로 Choi et al.[1]은 사이드 채널형 연료펌프의 날개 개수, 사이드채널의 단면적, 임펠러와 펌프 외벽 사이의 간극 등의 변화에 따른 펌프의 성능예측을

수행하여 실험값과 비교하였다. Sim et al.[2]은 CFD를 이용하여 연료전지용 수소 재순환 블로워의 스트리퍼 간극, 케이싱 중심의 직경값, 케이싱 이격거리, 채널 폭과 케이싱 깊이 등의 변화에 따른 성능을 평가하였다.

본 연구에서 해석한 이단 링블로워(Fig. 1, 2)는 2개의 임펠러가 직렬로 장착되어 임펠러의 회전에 의해 흡입된 공기가 두 개의 단을 차례로 거치면서 반복되는 원심력에 의해 압력이 상승된다.

본 연구에서는 삼차원 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)

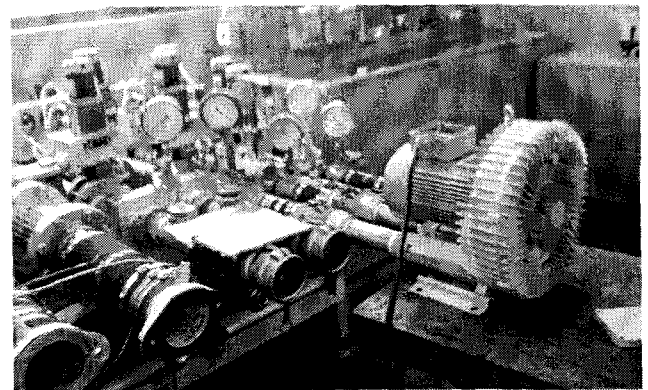


Fig. 1 Ring blower test facility

접수일: 2007년 11월 26일, 심사완료일: 2007년 12월 12일.

1 학생회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 인하대학교 기계공학과

\* Corresponding author, E-mail: kykim@inha.ac.kr

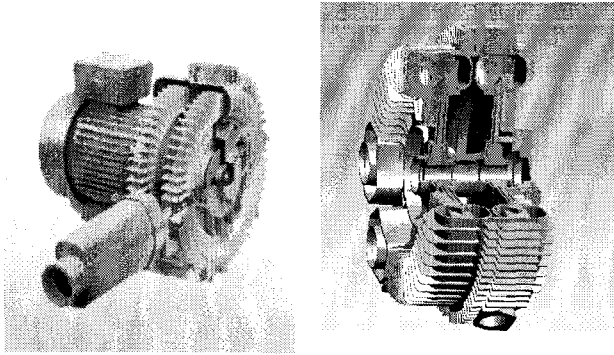


Fig. 2 Geometry of ring blower

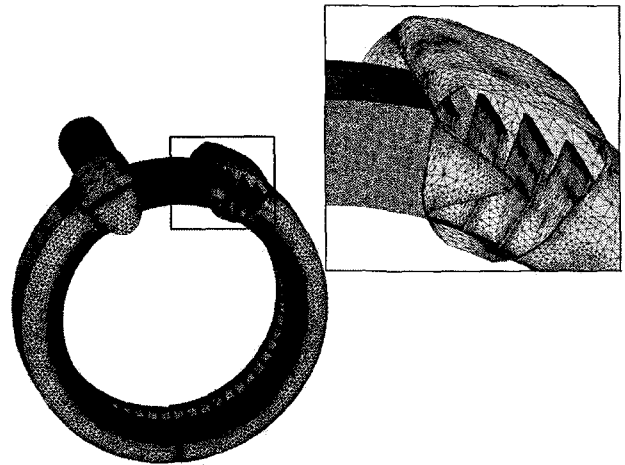


Fig. 4 Computational grids for analysis

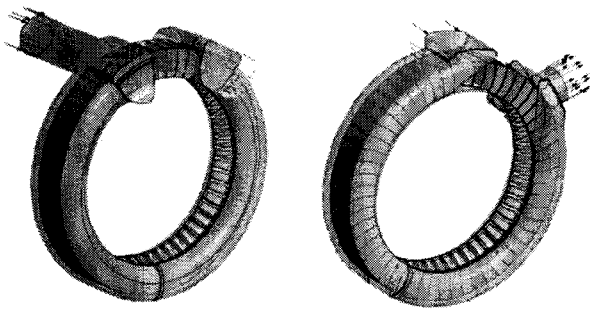


Fig. 3 Shapes of computational domain

해석을 통해 링블로워 내의 유동특성을 분석하기 위한 수치 해석을 수행하였으며, 유동해석을 통해 얻어진 결과를 성능시험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 그리고 스트리퍼영역 간극의 크기가 다른 두 모델에 대한 수치해석을 통해 성능을 비교 평가하였다.

## 2. 유동해석방법

### 2.1 링블로워 형상 및 계산영역

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 사이드 채널형 2단 링블로워를 대상으로 하였다. 실제 제품의 3차원 정밀측정을 통해 얻어진 데이터를 이용하여 계산영역을 설정하였다. 계산영역은 회전하는 매우 많은 날개의 임펠러와 정지하고 있는 케이싱영역 및 입출구부 그리고 고압부에서 저압부의 누설 유동을 고려해야 하는 매우 복잡한 유동영역을 포함하고 있다. 전체 영역을 하나의 계산영역으로 설정할 경우 수렴성이 떨어지고 계산시간이 과다하게 소요될 것으로 예상되어 Fig. 3과 같이 각 단을 분리하여 두 개의 계산영역을 설정하였다. 첫 번째 단을 해석한 뒤, 그로부터 얻은 출구의 정보를 두 번째 단의 입구조건으로 부여함으로써 연속적인 반복계산이 가능하게 하였다.

### 2.2 계산격자

계산에 사용된 격자계는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 사면체의 비정렬 격자계로 구성하였다. 격자의 의존성을 제거하기 위한 격자 의존성 테스트는 총 100만~140만개의 격자수 사이에서 이루어졌으며, 그 결과 최적격자수는 125만개로 결정되었다. 첫 번째 단의 출구정보를 두 번째 단의 입구정보로 부여하기 위해 첫 번째 단의 출구부와 두 번째 단의 입구부는 사면체 격자의 한 번의 길이를 8mm로 동일하게 구성하였다.

### 2.3 수치해석 및 경계조건

본 연구에서는 상용코드인 ANSYS사의 CFX-11.0[3]을 사용하여 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 계산하였다. 난류모델은 SST[4]모델을 사용하였다. SST모델은 k-ε모델과 k-ω모델의 장점을 결합한 모델로서, 벽 근처에서는 k-ω모델이 사용되며, 나머지 영역에서는 k-ε모델이 사용된다.

일반적으로 터보유체기계에서는 계산 시간 단축을 위하여 하나의 임펠러 즉 단일 채널에 대하여 주기조건을 적용하여

Table 1 Condition for numerical calculation

Rotational speed		3,500 rpm
Working fluid		Air
Inlet	First stage	Total Pressure 0 Pa Temperature 298 K
	Second stage	Outlet Profile of First stage
Outlet		Mass flow
Turbulent closure		SST model
Number of impeller blades		55

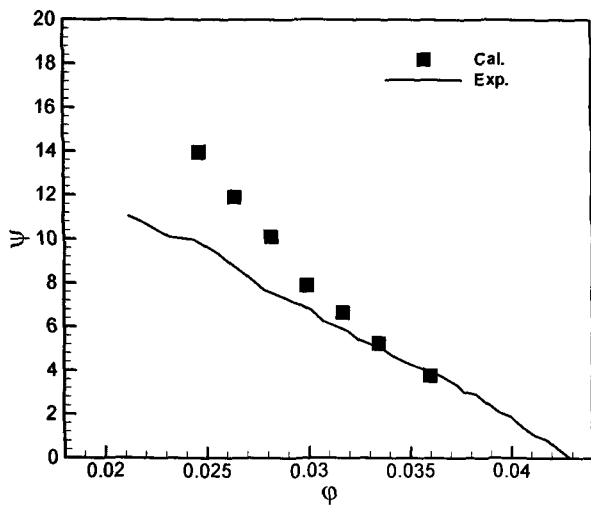


Fig. 5 Comparison between computational and experimental data for performance curve

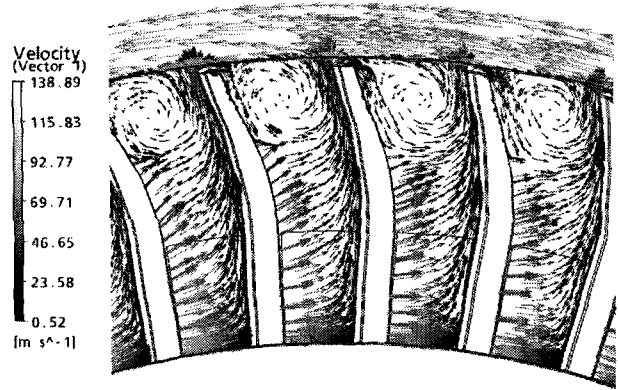
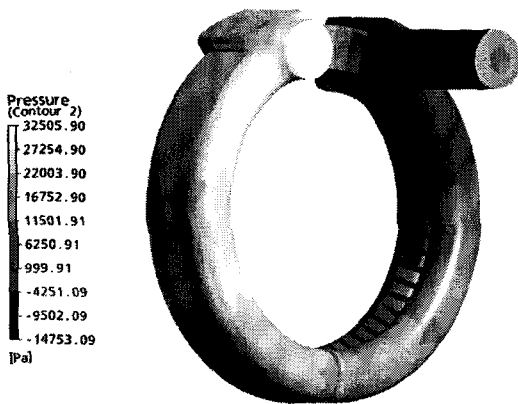
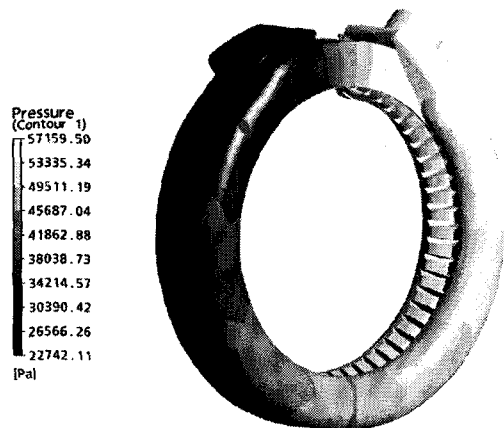


Fig. 7 Velocity vectors at impeller cross section



(a) First stage



(b) Second stage

Fig. 6 Pressure distributions on casing surfaces

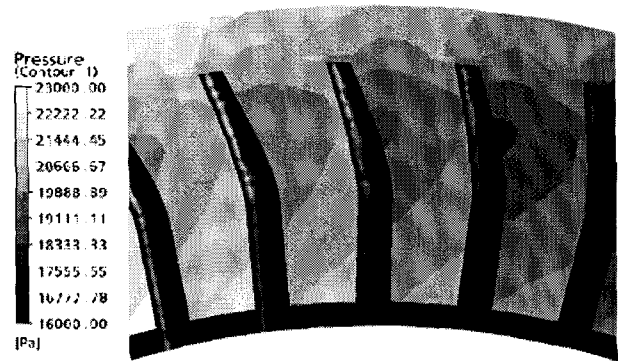


Fig. 8 Pressure distribution at impeller cross section

해석을 수행하지만, 링블로워의 입출구부의 구조상 주기경계 조건을 적용하기가 불가능하기 때문에 임펠러 채널 전체에 대하여 격자를 구성하여 해석을 수행하였다. 또한 각단을 회전하는 Rotating Frame과 회전하지 않는 Stationary Frame으로 나누었고, 회전좌표계와 정지좌표계 사이의 경계면 처리는 링블로워 특성상 임펠러는 회전방향에 대하여 압력이 계속 증가하므로 회전좌표계 격자면에서의 계산 값을 평균해서 절대좌표계에 입력하는 Mixing Plane 방식을 적용하지 않고, 회전좌표계 격자면에서의 계산 값을 그대로 정지좌표계 입력값으로 사용하는 방식인 Frozen-Rotor 방식을 적용하였다[2].

계산을 위한 조건들은 Table 1과 같이 주었으며, 출구 유량을 조절하여 변화된 압력 상승값을 계산 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

성능시험결과[5]와 수치해석결과의 비교를 위해 유량과 압력을 수두계수( $\psi = \Delta P / (\rho N^2 D^2)$ ) 및 유량계수( $\phi = Q / (ND^3)$ )로 무차원화 하여 성능곡선(performance curve)을 얻었으며, 그

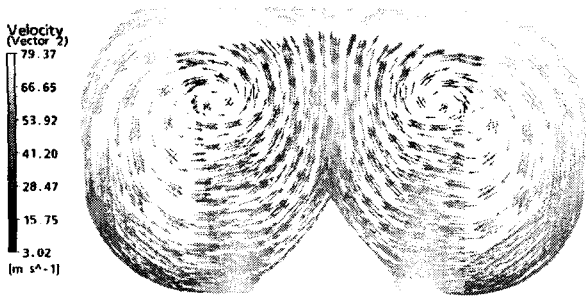


Fig. 9 Velocity vectors at mid plane between blades

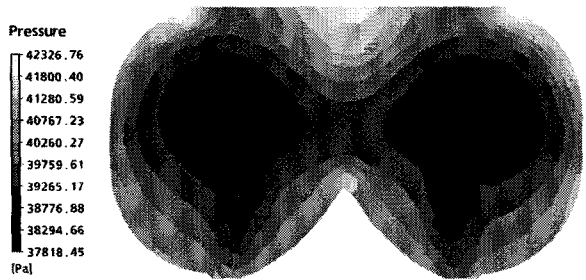


Fig. 10 Pressure distribution at mid plane between blades

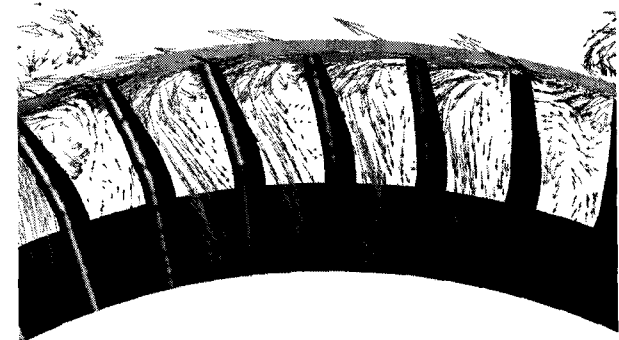
결과를 Fig. 5에 제시하였다. 수치해석의 결과를 시험결과와 비교해보면 고유량 영역에서는 수두계수의 유동해석결과가 시험결과에 접근하는 경향을 보이고 있으나, 저유량 영역에서는 수치해석이 실험결과 높게 예측함을 알 수 있다. 유동해석을 위해 링블로워의 내부유로를 모델링하는 과정에서 형상의 일부가 단순화되었고, 실제 모델의 유로표면은 상당한 거칠기를 가지고 있으나 유동해석에서는 이러한 거칠기가 고려되지 않았다. 또한 성능실험에서 발생할 수 있는 회전속도 측정 오차 등의 이유로 인해 저유량 영역에서 수치해석을 통해 얻은 수두계수의 값이 실제 성능실험값보다 크게 나타나는 것으로 사료된다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 링블로워 각단의 표면에서의 정압분포를 나타내고 있으며, 그림에서 나타내는 바와 같이 정압이 회전하는 원주 방향에 따라 지속적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 7에서는 임펠러 단면 내 유동장의 속도벡터를 보여준다. 그림을 통해 임펠러 상단 부분에서 발생하는 큰 와동(vortex)을 확인할 수 있으며, 이러한 와동이 연속적으로 발생하면서 압력손실이 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 압력손실이 발생함은 Fig. 8에 나타난 유동단면의 압력분포를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 6에 보여 지는 원형 링의 하단에 위치한 임펠러 날개 사이에서 날개와 평행한 단면의 속도벡터를 나타



(a) Gap 0.4mm



(b) Gap 1.0mm

Fig. 11 Velocity vectors at stripper cross section

내고 있다. 이 단면에서의 유동은 케이싱 바깥부분에서 임펠러의 반경이 작은 쪽으로 들어와 임펠러의 반경이 큰 쪽으로 흘러 다시 케이싱 방향으로 올라가는 양상의 큰 순환유동이 존재함을 보여주고 있다. Fig. 10에서는 임펠러 날개 사이 단면의 압력분포를 확인할 수 있다. 여기서는 앞에서 언급한 큰 순환유동으로 인해 중심부의 압력이 낮고 벽면으로 향할수록 압력이 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 6의 원형 링 상단부에 위치한 입구부와 출구부 사이는 다른 부분과 달리 누설유동을 방지하기 위해 임펠러 날개와 케이싱 사이의 간격이 좁게 설계되어 있는데 이 부분을 스트리퍼 영역이라고 한다. 이 영역에서 임펠러와 케이싱의 간극(이하 스트리퍼영역 간극)은 압력 손실에 큰 영향을 끼친다. 따라서 이 영향을 평가하기 위해, 스트리퍼영역 간극의

크기를 0.4mm와 1.0mm로 변화시켜 유동해석을 수행하여 효율과 수두를 구하였으며, 효율은 폴리트로픽 효율로 계산하였다. 기체의 상태변화는  $PV^n = \text{constant}$ 라는 관계식으로 나타낼 수 있으며, 압축기의 압축과정은 일반적으로 이 관계식을 따르는 폴리트로픽 변화를 나타낸다. 따라서 링블로워의 경우

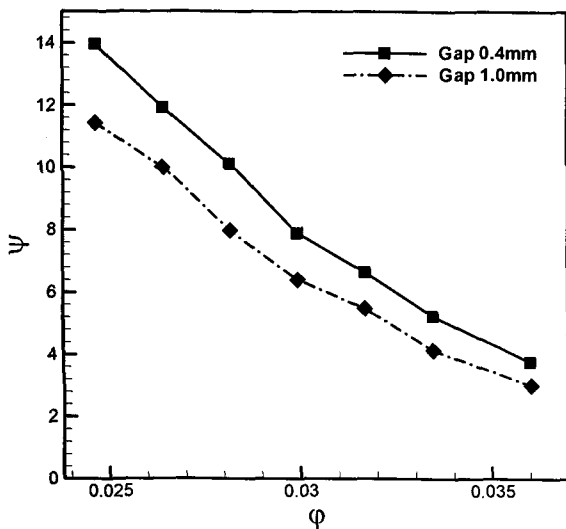


Fig. 12 Performance curve with variable stripper clearance

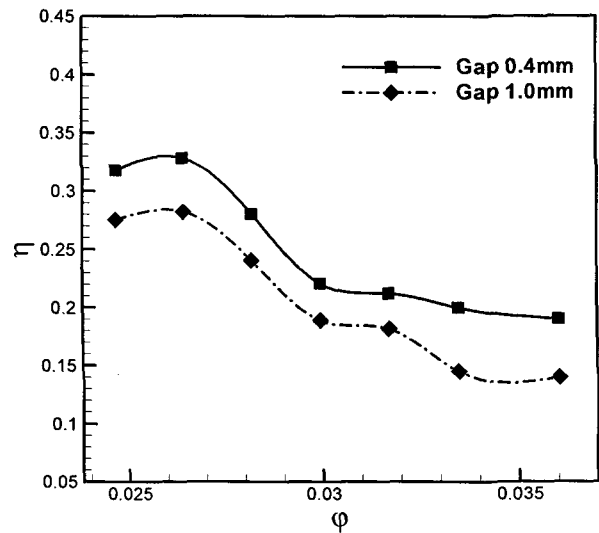


Fig. 13 Polytropic efficiency to variable stripper clearance

입구에서 출구까지의 폴리트로픽 압축과정을 가정하면 외부 열전달을 무시할 수 있는 경우 블로워 입구와 출구에서의 전압과 전온도로부터 폴리트로픽 효율을 구할 수 있다[6].

Fig. 11은 간극의 크기가 다른 두 모델에 대한 스트리퍼 영역에서의 속도벡터를 보여주고 있다. 그림을 통해 스트리퍼 영역으로 흐르는 누설유동을 확인할 수 있으며, 간극의 크기가 0.4mm인 경우에 비해 1mm인 경우에 출구부를 지나는 고압의 유체에 대한 상당히 많은 양의 누설이 발생하였다.

Fig. 12, 13은 스트리퍼 영역 간극의 크기가 0.4mm와 1.0mm인 두 모델의 성능곡선과 효율을 나타낸다. 효율은 스트리퍼 영역 간극의 크기가 1.0mm일 때에 비해 0.4mm일 때가 전 유량영역에 걸쳐서 0.5~0.7정도 높게 측정되었으며, 수두계수 역시 1~3정도 높은 결과를 보였다. 따라서 Fig. 11에 나타난 누설유동의 차이는 압력손실로 이어져 성능에 영향을 끼침을 알 수 있다.

간극의 감소로 인해 효율 및 수두계수가 증가하는 결과를 얻었다는 것은 이 간극의 최적치가 존재한다는 것을 의미하므로 수치최적화를 통해 이 간극의 최적치를 구하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고압 이단 링블로워의 내부 유동장의 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 수치해석결과와 성능시험결과와의 비교에서 계산치는 측정치에 비해 저유량 영역에서는 큰 차이를 보이고 있으나 고유량영역으로 갈수록 일치하는 경향을 나타내었다. 해석결과를 통해 임펠러 날개 사이에서 상단

부에서 반복적으로 발생하는 강한 와동과 회전방향에 수직하는 단면 내에서 발생하는 큰 순환유동을 통한 압력 및 유동장의 특성을 확인할 수 있었으며, 스트리퍼영역 간극의 크기에 따른 해석 결과, 간극의 크기가 1mm일 경우에 비해 0.4mm일 때, 효율과 수두계수가 각각 0.5~0.7과 1~3만큼 증가하였으며, 이로부터 간극은 누설유동으로 인해 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 황해전기의 2007년도 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힌다.

#### 참고문헌

- [1] 2003, 최영석, 이경용, 강신형, "사이드채널형 연료펌프의 성능예측," *유체기계저널*, 제6권, 제2호, pp.29-33.
- [2] 2005, 심창열, 이경훈, 홍창욱, 김영수, "연료전지용 수소 재순환 블로워의 유동 및 성능의 수치적 평가," *한국자동차공학회 추계학술대회논문집*, Vol.11, pp.1395-1400.
- [3] 2006, *CFX-11.0 Solver Theory*, Ansys inc.
- [4] 2001, Menter, F. and Esch, T., "Elements of Industrial Heat Transfer Predictions," *16th Bazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Uberlandia, Brazil.
- [5] 2007, 황해전기 링블로워 성능시험 보고서
- [6] 1989, 강신형, *유체기계*, 희중당.