

250kW급 MCFC 연료전지 시스템용 공기공급장치 개발

박 준영*, 황 순찬**, 박 무룡***, 김 영철****, 안 국영*****

Development of an Air Supply System in 250 kW MCFC Fuel Cell System

JunYoung Park*, SoonChan Hwang**, MooRyong Park***, YoungChul Kim****, and KookYoung Ahn*****

Key Words : Air Supply System(공기공급장치), Aerodynamic Design(공력 설계), Performance(성능), Turbo Blower(터보블로워), Fuel Cell(연료전지)

Abstract

This study is concerned with development of air supply system in 250kW MCFC fuel cell system. The turbo blower is decided as an air supply system to increase the efficiency of fuel cell system. The turbo blower consists of an impeller, two vaneless diffuser, a vaned diffuser and a volute. The cascade diffuser is used to raise the efficiency of turbo blower. An aerodynamic design was done by applying the repeating design procedure including a meanline design, a 3D geometry generation and fluid dynamic calculation. It is confirmed from meanline and 3D flow analysis results that the operating range is enough and design requirements are successfully achieved. The performance test results were also included in this paper.

1. 서론

화석연료의 고갈문제와 국제적인 고유가 상황, 원자력발전소 건설부지 확보의 어려움, 원자력 폐기물 문제 등의 대두로 수소 에너지에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 제2세대 연료전지로 불리는 용융탄산염형 연료전지(MCFC)는 천연가스 및 석탄 가스화 연료를 사용하여 복합발전이 가능하기 때문에 화석연료 발전 방식을 대체할 수 있는 저공해 고효율의 새로운 발전기술로 각광받고 있으며 100 kW 이상의 대형 분산발전 시스템 위주로 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

Fig. 1은 MCFC 발전시스템의 구성도를 보여준다. 그림에서 보여지듯이 연료전지 발전시스템은 연료전지 스택(stack)과 주변 시스템(연료개질부, 연료/산화제 공급부, 열교환부, 전력변환부 등)으로 구성된다. 이때 각각의 시스템은 독립적이 아니라 전체 시스템의 열 및 에너지 효율 제고를 위하여 열적, 물질적으로 상호 연결되어 운전하게 되며, 따라서 각 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어는 스택과 연동하여 작동하도록 개발되고 있다. 스택을 제외한 나머지 구성요소들을 통상 BOP (Balance of Plant) 라 부르며, 이 BOP는 전체 시스템 가격의 70% 가량을 차지한다. 따라서 BOP 각 구성부품의 가격을 낮추고, 내구성을 높이며, 소형화/경량화를 달성하는 기술의 개발이 매우 중요하다. 특히 상업화를 위해서는 제작단가의 하락 및 운전시간의 증가는 필수적인 요소이다. 일반적인 내연기관과 달리 연료전지 스택은 스

로 공기를 공급할 수 있는 장치가 없으므로 외부에서 공기를 공급해주는 장치가 필요하게 된다. 이를 위한 공기공급기의 형태로써 연료전지 시스템의 운전압력과 요구 공기량에 따라 다양한 종류의 블로워 및 압축기가 개발 적용되어 왔다.

하니웰[1]은 기존의 터보 과급기의 기술을 기반으로 공기 포일 베어링, 모터 드라이버, 스택에서의 배기가스를 이용하여 효율향상을 실현한 110,000 rpm에서 운전되는 원심형 압축기/팬창기를 개발하여 50 kW급의 고분자 전해질 연료전지 자동차에 적용하였다. PADT[1](Phoneix Analysis and Design Technologies)사는 30,000 rpm의 운전속도와 낮은 압력비, 그리고 BLDC 모터로 구성되는 구조의 터보 블로워를 개발하였다. 또한, R&D Dynamics[1]에서는 공기포일 베어링을 사용하여 140,000 rpm까지 구동하는 공기 블로워를 설계하였다.

한편, 국내에서는 연료전지 시스템용 공기 공급기에 대한 연구 개발이 최근 활발히 진행중이다. 권 혁률등[2]은 차량용 연료전지 시스템의 공기공급기로 터보 블로워를 개발하여 성능시험을 수행하였으며 한국기계연구원[3,4], 삼성테크윈[5]과 엔텔[6]에서도 연료전지 시스템의 공기공급기를 개발하고 있다. 그러나, 국내에서 연료전지 시스템용으로 터보기계가 개발되어 성공적으로 시스템에 적용된 경우는 아직 없다.

본 연구에서는 250kW급 MCFC용 연료전지 발전시스템에 적용 가능한 BOP 중에서 공기공급장치의 선정, 설계 및 성능해석 과정에 대하여 언급하고 성능시험 결과를 제시하고자 한다.

2. 설계 및 해석

2.1 설계사양

* 한국기계연구원, jypark@kimm.re.kr
** 한국기계연구원, schwang@kimm.re.kr
*** 한국기계연구원, mrpark@kimm.re.kr
**** 한국기계연구원, yckim@kimm.re.kr
***** 한국기계연구원, kyahn@kimm.re.kr

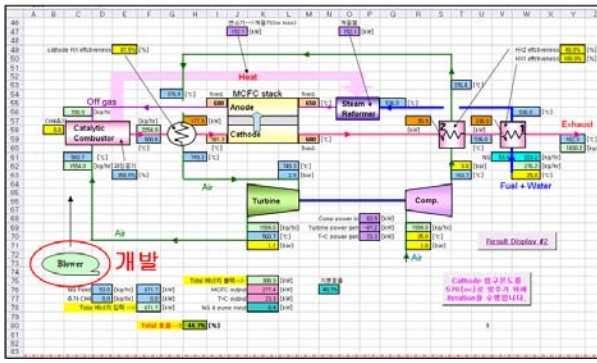


Fig. 1 250kW MCFC system

Table 1 Design requirements

Item	Unit	Value
Inlet Temperature	K	298
Inlet Pressure	MPa	0.1
Mass Flow Rate	kg/s	0.3
Pressure Ratio		1.074

Table 2 1D Design results

Item	Unit	Value
Impeller		
날개 수		9+9
출구 각	Deg	-40
팁 간격	mm	0.5
Diffuser		
날개 수		13
Blade Inlet Angle	Deg	64
Blade Exit Angle	Deg	59

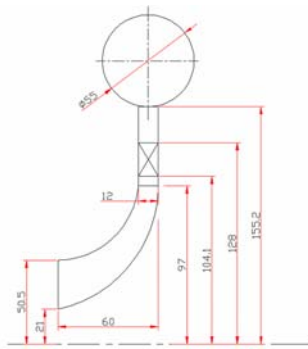


Fig. 2 Meridional view

250 kW MCFC 연료전지 시스템에 대한 사이클 해석을 통해 공기공급장치 설계 사양이 결정되었다. Table 1은 공기공급장치의 설계 사양을 보여준다. 주어진 설계사양을 만족하면서 가능한 높은 효율을 달성하기 위해 공기공급장치로 터보 블로워를 선택하였다. 터보블로워는 다른 형식의 블로워에 비해 제작이 간단하고, 상대적으로 효율이 높고 유지보수가 쉬운 장점이 있으나 블로워의 성능이 설계자의 능력에 크게 좌우된다. 주어진 설계 사양을 토대로 1차원 설계와 3차원 형상설계 그리고 성능해석을 반복적으로 수행하였다.

2.2 1차원 설계 및 성능해석

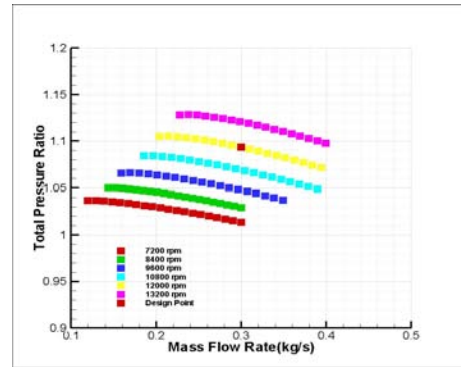


Fig. 3 Total pressure ratio from 1D performance analysis

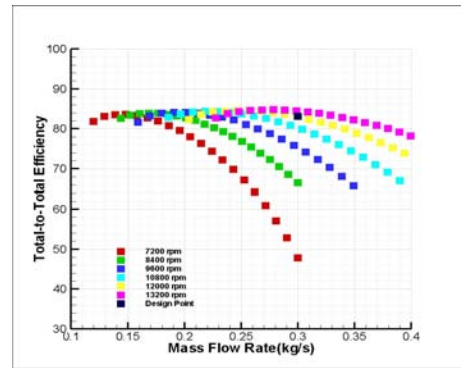
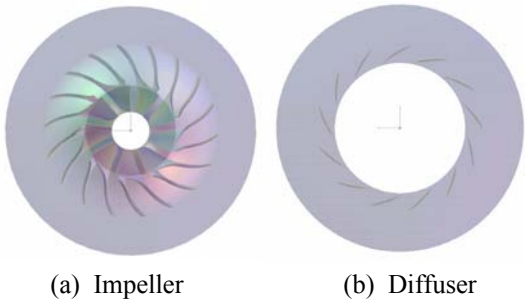


Fig. 4 Efficiency from 1D performance analysis

Table 1에 제시된 설계조건을 토대로 NREC의 PREDIG[7] 프로그램을 이용하여 1차원 공력설계를 수행하였다. 이때 작동유체인 공기의 물성치를 구하기 위하여 이상기체 상태 방정식을 이용하였다. 블로워의 효율을 높이기 위해 임펠러 쉬라우드 입구에서 상대마하수가 최소가 되도록 입구에서의 팁 반경을 결정하였으며, 높은 효율과 넓은 운전영역을 확보하기 위해 Low Solidity Diffuser를 채택하였다. Table 2는 1차원 형상 설계의 결과를 보여주고, Fig. 2는 1차원 설계 결과의 자오면 형상을 보여준다. Fig. 3과 4는 1차원 성능해석에 의한 설계된 블로워의 탈 설계점에서의 성능예측곡선이며 충분히 안정적인 운전영역을 확보함을 보여준다.

2.3 3차원 형상설계 및 성능해석

본 연구에서는 AEA사의 Bladegen[8]을 이용하여 임펠러와 디퓨저의 형상설계를 수행하고 설계된 임펠러와 디퓨저의 설계 건전성을 평가하기 위해 유동해석 전용 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX 11.0[9]을 사용하여 3차원 점성 압축성 유동해석을 수행하였다. Fig. 5와 6은 Bladegen을 이용해 설계된 임펠러와 디퓨저의 3차원 형상을 보여준다. 성능해석을 위한 격자계는 ANSYS TurboGrid 11.0[9]을 이용하여 H-형태 정렬 격자계를 만들었다. Fig. 6은 사용된 격자계를 보여주며 사용된 격자수는 임펠러, 디퓨저 각각 270,000개, 127,000개이며 난류유동을 계산하기 위해 k-w sst 모델을 사용하였다. 경계 조건으로 임펠러 입구에서 전압과 전온도를 고정하였으며 출구에서는 질량 유량을 고정하였다. 임펠러와 디퓨저사이의 경계면은 혼합면 기법을 이용하여 처리하였다. Fig. 7은 50% 스팬지점에서 임펠러와 디퓨저 블레이드에 작용하는 부하를 보여준다. 임펠러에서는 전연에



(a) Impeller (b) Diffuser
Fig. 5 3D geometry of impeller and diffuser

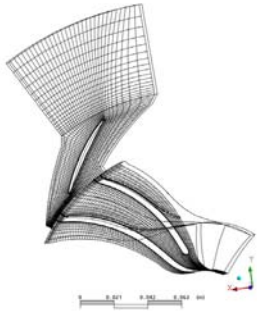
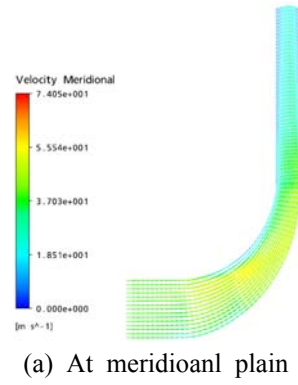
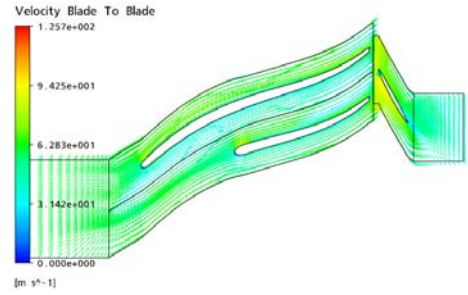


Fig. 6 Grid system

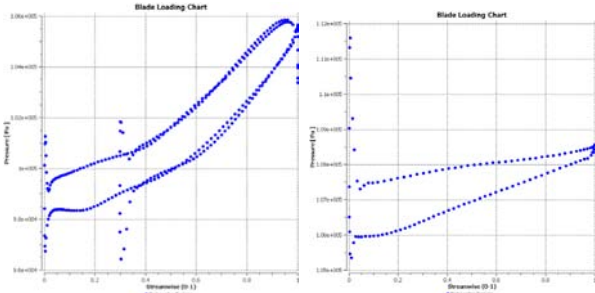


(a) At meridional plain



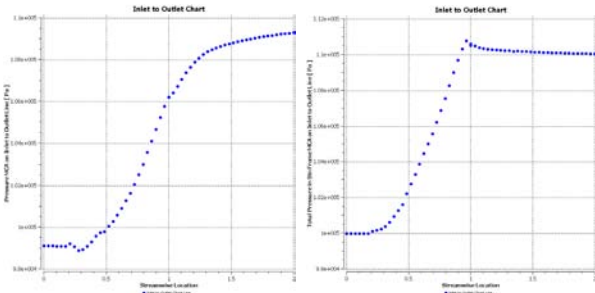
(b) Blade-to-blade plain

Fig. 9 Relative velocity vector



(a) Rotor (b) Stator

Fig. 7 Blade loading distribution in 50% span



(a) Static pressure (b) Total pressure

Fig. 8 Static and total pressure distribution from inlet to outlet

서 부하가 조금 크게 작용하나 전반적으로 균일하게 작용함을 확인 할 수 있다. 디퓨저에서는 전연쪽이 후연에 비해 부하가 크게 작용하며 전반적으로 설계 의도가 잘 반영되었다. Fig. 8은 임펠러 입구에서 디퓨저 출구까지 각 단면에서 질량 평균한 정압 및 전압분포를 보여준다. 임펠러 통로내에서 전압의 고른 상승이 나타나며 임펠러 출구부근에서 주유동과 후류의 혼합에 의한 전압손실이 크게 발생함을 확인 할 수 있다. 전반적으로 설계 의도대로 임펠러 통로 내부에서 전압 상승이 원활하게 이루어

Table 3 Performance prediction results

	Mass flow rate	전압비	효율(%)
1차원 성능해석	0.3	1.099	88
3차원 성능해석	0.3	1.1	84

어짐을 확인 할 수 있다. Fig. 11은 50% 스펠 blade-to-blade 단면과 자오면에서의 상대속도 분포를 보여준다. 통로내에서 박리현상없이 블레이드를 따라 유동이 형성됨을 보여준다. 임펠러와 디퓨저에 대한 3차원 성능해석 결과가 Table 3에 제시되어있다. 설계점에서 1차원 설계결과와 3차원 해석결과는 전압비는 서로 거의 일치하며 효율에 차이가 있다. 효율에 있어서의 이러한 차이는 형상설계 시 블레이드 두께를 1차원 설계시에 비해 조금 두껍게 한 것에 기인한 것으로 판단된다.

3. 성능시험

3.1 성능시험 장치

시험장치와 시험방법은 KS B 6311과 KS B 6350에 따라 수행하였다. 블로워 성능측정 시스템의 입구에는 흡입노즐을 설치하여 유량을 측정하였고, 흡입상태에서의 대기조건의 온도와 압력을 측정하였다. 또한, 볼류트 출구부에서 압력과 온도를 측정하여 블로워 성능을 평가하였다. 유량측정용 흡입노즐은 KS B 6311과 KS B 6350에 규정한 형상으로 제작 하였으며 흡입노즐에서의 압력측정은 Furness 사의 마이크로 마노메타 FCO-510으로 측정하였다. 압력 및 온도신호를 Agilent 사의 DAQ 시스템인 HP34970을 이용하여 측정하였다. 효율을 평가하기 위해 Yokogawa사의 WT1600 파워미터를 이용하여 인버터 입구와 출구에서 소요동력을 측정하였다. Fig 10은 전체 블로워 시스템의 개략도를 Fig. 11은 성능시험을 위해 조립된 블로워를 보여준다. 블로워 구동모터는 최고회전수 17,000rpm의 3상 2극 BLDC 고

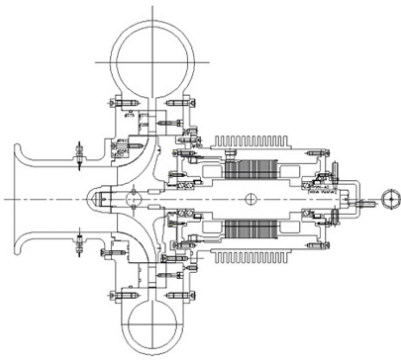
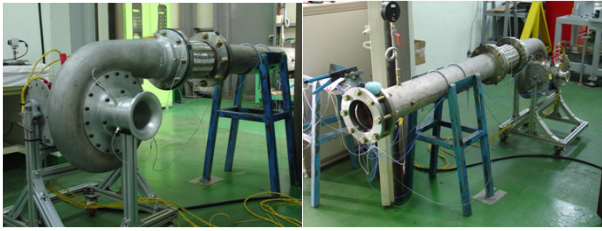


Fig. 10 Turbo blower system layout



(a) Inlet region of blower (b) Outlet region of blower

Fig. 11 Performance test rig

속 모터를 사용하였고, 회전수 조절을 위해 인버터를 사용하였다. 또한, 출구에 밸브를 설치하여 유량을 조절하였다.

3.2 성능시험 결과

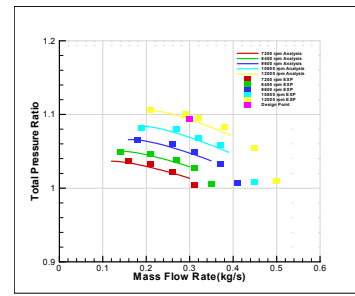
Fig. 12는 성능시험 결과를 보여준다. Fig. 12 (a)는 유량변화에 따른 전압비를 보여준다. 회전수 증가와 유량 감소에 따른 전압 상승 특성이 성능시험 결과에서 잘 나타난다. 또한, 안정적인 운전영역을 확보하며 설계유량에서 1차원 설계값과 거의 비슷한 결과를 확보하였다. Fig 12 (b)는 공력구성품과 구동모터의 소요 동력을 이용한 효율을 보여준다. 1차원 설계 및 3차원 성능해석 결과에 비해 효율이 상당히 낮게 나타난다. 이러한 차이는 구동 모터의 적합성 및 공력부품 가공에서의 정밀도 차이에 기인하는 것으로 판단되며 이에 대한 정확한 분석이 필요하다. Fig. 12 (c)는 블로워 전체 시스템(공력구성품, 모터 및 인버터)의 소요 동력을 이용한 효율이다. Fig. 12(b)와 (c)의 결과로부터 인버터에서 대략 5%정도의 효율감소가 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 블로워 시스템에서 공력구성품의 효율 향상뿐만 아니라 구동시스템 및 제어 시스템에서의 효율 향상에 관한 많은 연구가 필요하다.

4. 결론

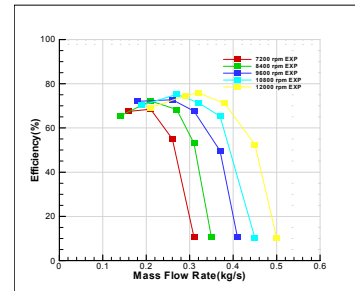
250 kW급 MCFC 연료전지 발전 시스템용 공기공급장치인 터보 블로워를 개발하여 블로워의 성능이 설계요구사항을 잘 만족함을 확인하였으며 임펠러 블레이드 두께 조절 및 인버터 개선을 통한 성능향상이 필요함을 확인하였다.

후기

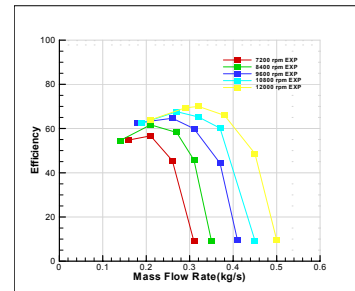
본 연구는 전력산업 연구개발 사업의 지원을 통하여 수행되었습니다.



(a) Total pressure ratio



(b) Efficiency with aero-components and moter



(c) Efficiency with aero-components, moter and Inverter

Fig. 12 Test results

참고문헌

- [1] Thomas Clark and Michael Arner, 2002, "Motor Blower Technologies for Fuel Cell Automotive Power Systems," FY2002 Progress Report.
- [2] 권혁률 등, 2005, "연료전지 자동차용 터보 블로워 개발," 한국 신·재생 에너지학회 춘계학술 대회논문집, pp. 345-348.
- [3] 박준영 등, 2006, "연료전지 시스템용 소형 터보 블로워 개발," 대한기계학회 춘계학술 대회논문집, pp. 3320-3324.
- [4] 박준영 등, 2006, "연료전지 시스템용 원심압축기 공력설계에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술 대회논문집, pp. 2139-2144.
- [5] 전승배, 2004, "연료전지용 터보 공기공급 발전장치," 유체기계연구개발 발표회 논문집, pp. 232-239.
- [6] 최문창, 2004, "터보기계의 수소연료전지용 공기공급기 적용," 유체기계연구개발 발표회 논문집, pp. 97.
- [7] NREC, PREDIG, Version 4.1
- [8] AEA Technology Engineering Software Inc., CFX-Bladegen, Version 4.1.
- [9] ANSYS CFX and Turbo Grid, Version 11.1.