

연료전지용 연료승압 블로어 내부유동장 평가

최가람*, 장춘만**

Internal Flow Analysis of a Fuel Pressurized Blower for Fuel Cell System

Ka-Ram Choi* and Choon-Man Jang**

Abstract

This paper describes an internal flow characteristics of a fuel pressurized blower, used for 1kW domestic fuel cell system. To analyze the flow field inside the diaphragm cavity, compressible unsteady numerical simulation is introduced. SST model with scalable wall function is employed to estimate the eddy viscosity. Moving mesh system is applied to the numerical analysis for describing the volume change of a diaphragm cavity in time. Throughout numerical simulation with the modeling of the inlet and outlet valves in a diaphragm cavity, unsteady nature of an internal flow is successfully analyzed. Force variations on the lower plate of a diaphragm cavity are evaluated in time. It is found that the driving force at the suction stage of a diaphragm cavity is more necessary than that at the discharging stage.

Key words

Fuel cell system(연료전지), Diaphragm blower(다이어프램 블로어), Numerical analysis(수치해석), Unsteady analysis(비정상 해석), Fuel pressurized blower(연료승압 블로어)

(접수일 2011. 7. 29, 수정일 2011. 8. 23, 게재확정일 2011. 8. 23)

* 한국건설기술연구원

■ E-mail : krchoi@kict.re.kr ■ Tel : (031)910-0601 ■ Fax : (031)910-0246

** 한국건설기술연구원

■ E-mail : jangcm@kict.re.kr ■ Tel : (031)910-0494 ■ Fax : (031)910-0246

1. 서론

최근 들어 가정용 연료전지는 고효율 신재생 에너지로서 주목을 받고 있으며, 1kW급의 경우 종합효율이 82%에 달하고 있다. 가정용 연료전지는 2008년 정부의 신성장 동력사업으로 선정되었으며, 지식경제부에서는 그린홈 100만 가구 보급사업을 통해 지금까지 170가구에 연료전지를 시범적으로

보급하고 있다. 연료전지의 세계시장규모는 2030년까지 1500억불 규모로 예측되고 있으며 2040년에는 1일 1100만 배럴 가량의 석유를 대체할 전망이다. 현재 연료전지 시장의 선두는 일본으로서 핵심장비에 대한 통합기술개발과 함께 일반보급을 위한 가격저감 연구 및 모니터링 사업이 진행되고 있다.

가정용 연료전지는 전기에너지를 발생시키는 전지본체, 도시가스로부터 수소를 생성하는 연료처리계, 전지본체에서 직

류를 교류로 변환하는 전력 변환계 및 회전기계 등의 보조기기로 구성된다. 연료전지의 생산대수 증가와 함께 보조기기의 가격 비중도 증가하며, 연간 1만대 생산 기준으로 볼 때 전체 시스템 가격의 47%를 보조기기가 차지한다⁽¹⁾.

국내 연료전지의 기술개발과 보급/확대를 위해서는 보조기기의 국산화를 통한 가격저감과 효율 및 소음특성 개선에 대한 연구개발이 요구된다. 보조기기에는 블로어, 펌프, 그리고 유량계 등이 있으며 연료전지의 공기, 가스 그리고 냉각수 공급용으로 사용되어지고 있는 핵심 요소부품이다. 1kW급 가정용 연료전지의 보조기기로 사용되고 있는 연료전지용 블로어에는 도시가스를 공급하는 연료승압 블로어를 비롯하여 공기를 스택(stack)에 공급하는 선택산화, 버너 및 캐소드 공기 블로어가 있다. 각각의 블로어 작동법으로는 다이어프램식을 포함하여 스�크류식, 벨로우즈식, 터보식 및 프란자식 등이 있다.

본 연구에 사용된 다이어프램식 연료승압 블로어는 고압의 기체를 일정 유량으로 이송할 수 있으며, 현재까지 블로어의 내부 유동장에 대한 연구 사례는 거의 없는 실정이다. 최가람⁽²⁾ 등은 다이어프램식 연료승압 블로어 모델을 이용하여 수치해석과 실험을 통한 다이어프램 캐비티의 중형비에 따른 성능특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 3차원 비정상 수치해석을 통하여 1kW급 가정용 연료전지용 블로어로서 가장 많이 사용되고 있는 다이어프램 방식의 연료승압 블로어의 내부유동장 특성에 대해 분석하였다. 또한 구동모터의 입력 동력과 밀접한 관계를 갖는 다이어프램 하판의 일량을 고찰하여, 저에너지 운전을 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 연료승압 블로어

가정용 연료전지 블로어로는 대부분 용적형이 사용되고 있으며, 저유량 고정압의 특성을 가진다. 용적형 블로어에는 다이어프램 방식, 플런지 방식 및 베로즈 방식 등이 있으며, 본 연구에서는 구조가 간단하여 가격저감에 효과적인 다이어프램 방식을 갖는 블로어를 대상으로 하였다. 용적형 블로어는 일반적으로 토출 측에 맥동이 발생하여 시스템 내부로 공기 공급이 불연속적으로 이루어지는 단점이 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 연료승압 블로어의 외형도 및

내부 단면도를 S나타낸다. 그림에서와 같이, 주요 구성부품으로는 구동 모터, 다이어프램 캐비티(그림에서 점선부분) 및 흡입/토출 덕트 등이 있다.

Table 1. Specification of a test blower at operating condition

Name	Value
Flow rate	4lpm
Pressure	15kPa
Rotational frequency of driving motor	2400rpm

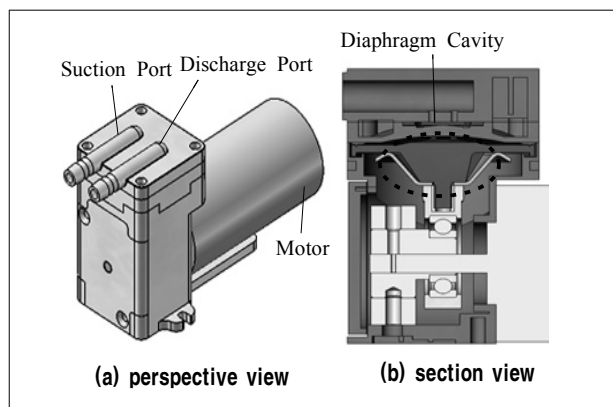


Fig. 1 Test fuel pressurized blower

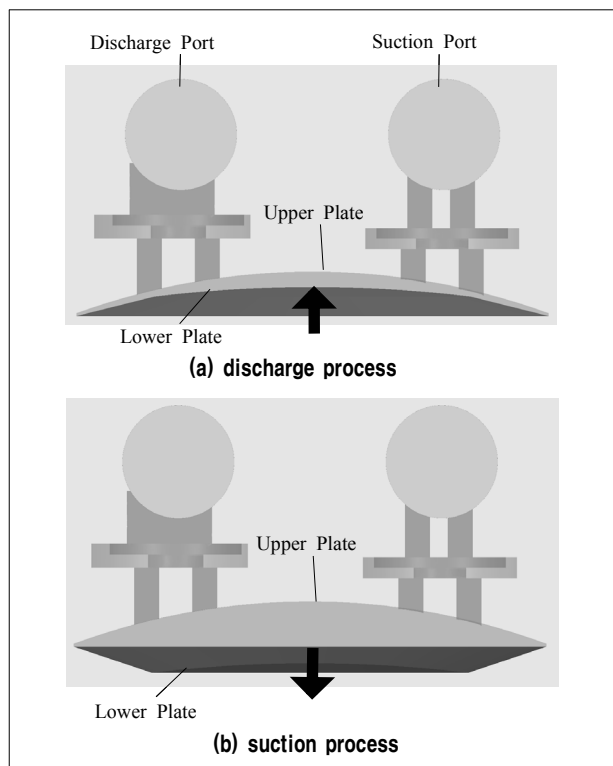


Fig. 2 Section view of diaphragm cavity

Table 1은 운전점을 기준으로 한 연료승압 블로어의 사양을 나타낸다. 본 연료승압 블로어는 정격운전조건에서 유량 및 압력이 각각 4lpm 및 15kPa을 갖는다. 구동 모터의 회전수는 2400rpm이며, 이는 연료승압 블로어 다이어프램의 1회전 시간인 0.025 초에 해당한다.

Fig. 2는 연료승압 블로어의 다이어프램 캐비티(diaphragm cavity) 단면을 나타낸다. 상판(upper plate)은 고정되며, 다이어프램 캐비티 하판(lower plate)은 모터의 회전운동으로 축과 연결된 편심캠에 의해 상하운동으로 전환된다. 즉 편심축에 의해 캐비티의 하판은 시간에 따라 사인곡선적(sinusoidal)인 상하 변이량을 갖는다⁽³⁾.

Fig. 3은 연료전지 블로어의 성능평가를 위한 실험장치를 나타낸다⁽²⁾. 성능측정용 블로어 토출측에 압력센서를 장착하여 블로어의 압력을 측정하였다. 유량측정 센서와 시험용 블로어 사이에 댐퍼를 설치하여 다이어프램 방식의 연료전지 블로어의 유량측정에서 발생하는 맥동류를 균일하게 하였다.

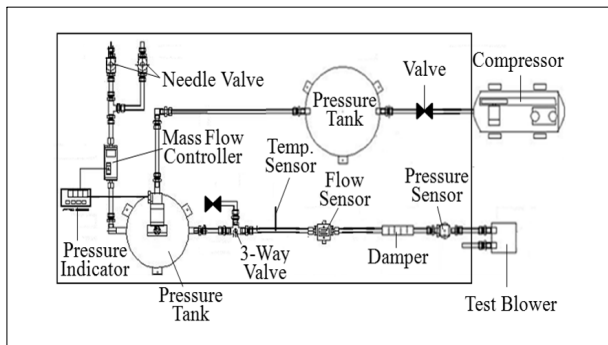


Fig. 3 Layout of experimental apparatus

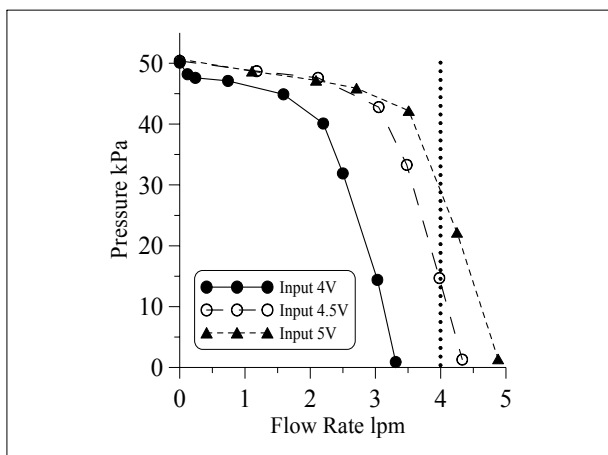


Fig. 4 Performance curves of a test blower

하류측에는 압력조절용 탱크를 설치하여 블로어 시스템 설치시의 작동조건을 구현하였으며, 비례제어 방식에 의한 유량/압력 조절시스템을 설치하여 일정한 압력조건이 유지되도록 하였다. 블로어 성능시험에서 유량변동은 하류측에 설치한 3방 밸브의 제어를 통해 조절하였으며, 모터의 제어전압을 기준으로 유량변화에 따른 압력 및 유량측정을 실시하였다. 연료승압 블로어의 성능 시험 결과는 Fig. 4에 나타낸다. 즉 모터의 제어전압(control voltage)을 1~5V로 전환시켜 가면서 유량에 따른 압력특성을 측정하고, 제어전압에 따른 압력특성은 비례적으로 변화하며 유량이 증가함에 따라 압력은 감소하였다. 또한 연료승압 블로어의 정격운전조건에서의 유량 및 압력은 실제 시스템 작동조건과 같이 각각 4lpm 및 15kPa을 만족하였다.

3. 수치해석 모델링 및 해석방법

연료승압 블로어는 구동모터의 회전중심과 편심을 갖는 회전캠에 의해 구동모터의 회전운동이 직선운동으로 변환되어 작동된다. 즉 다이어프램 캐비티 하판의 수직운동에 의해 캐비티 내부가 압축과 팽창을 반복하며 압축된 공기를 토출한다. 이러한 원리를 고려하여 수치해석에서도 다이어프램 블로어 캐비티의 상판은 고정하고 하판은 주기적으로 수직운동을 하도록 모델링하였다.

이전 연구⁽³⁾에서는 공기의 완전 흡입과 토출 시에 수치해석의 안정화를 위해 시간간격을 변화시켰지만 본 연구에서는 시간간격(5E-04sec)을 짧게 하여 매 계산주기마다 시간간격을 일정하게 설정하였다.

공기 흡입 시에는 캐비티의 하판이 하강하며 토출 시에는 캐비티의 하판이 상승한다. 따라서 공기가 흡입되면 토출포트는 닫히고 공기의 토출 시에는 흡입포트가 닫히는 조건으로 흡입/토출 밸브를 모델링하였다.

연료승압 블로어의 내부유동장 특성을 수치적으로 평가하기 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-12⁽⁴⁾를 사용하였다. 난류모델로는 전단응력이송(shear stress turbulence)모델을 사용하였다. 이동격자(moving mesh)를 이용한 비정상(unsteady) 수치해석을 통해 연료승압 블로어 다이어프램 캐비티의 실제 운동을 수치적으로 모사하였다.

수치해석 영역은 맥동으로 인한 불균일한 토출흐름을 고려

하여 Fig. 5(a)에서와 같이 흡입/토출덕트 끝단에 원통형의 덕트를 연결하여 설정하였다.

Fig. 5는 본 수치해석에서 사용한 계산격자의 전체 영역 및 측면도 등을 나타낸다. 즉 계산격자는 Hexa, Tetra, Prism Mesh가 혼합되어 있는 Hybrid Mesh를 사용하였고, 총 Node 수는 1,088,409개다.

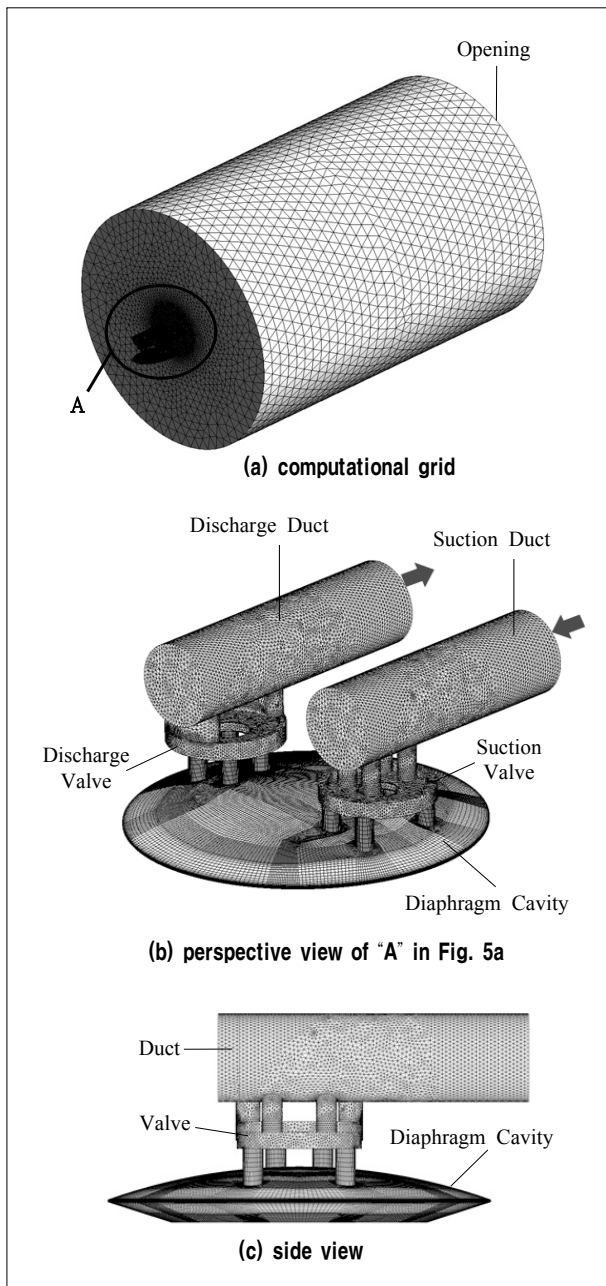


Fig. 5 Computational grid system

수치해석의 경계조건으로 흡입구와 토출구를 연결한 원형 덕트 끝단에 Opening 조건을 설정하였다. 또한 공기 흡입 시에는 토출부 밸브가 닫히는 조건을, 토출 시에는 흡입부의 밸브가 막히는 조건으로 설정하였다. 연료승압 블로어 다이어프램 캐비티의 내부유동장의 비정상해석을 위한 초기조건으로 속도, 압력 및 온도를 각각 0m/s, 1atm 및 25°C로 설정하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 연료전지용 블로어의 내부유동장 특성을 평가하기 위해 3차원 비정상 수치해석을 수행하였다.

Fig. 6은 주기조건에 따른 유량변화를 나타내며, 총 9주기분의 시간에 대하여 나타낸다. 초기 2주기는 수치계산의 안정성을 위하여 다이어프램 캐비티 하판의 이동거리를 점진적으로 증가시켰으며, 이에 상응하는 유량증가를 나타낸다. 2주기를 지난 이후에는 완전 흡입 및 토출 상태가 이루어지면서 유량이 정상적인 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 흡입 및 토출 시의 최대 질량유량은 약 0.0004kg/s이다.

Fig. 7은 연료승압 블로어 다이어프램 캐비티 하판이 흡입과 토출에 의해 받는 힘의 시간분포를 나타내고 있다. 캐비티 하판이 수직이동을 하면서 받는 힘의 방향은 하판 이동과는 반대로 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 토출상태에서 캐비티 하판에 최대로 가해지는 힘은 약 2.5N이고, 흡입상태에서

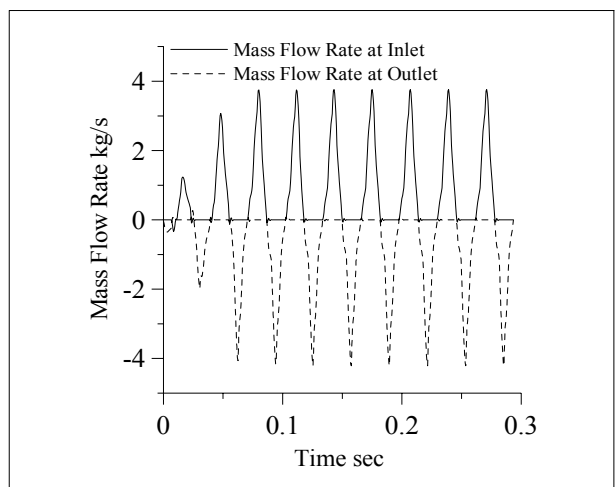


Fig. 6 Variation of mass flow rate in time

최대로 가해지는 힘은 약 5.5N이다. 즉 흡입 시가 토출 시보다 약 2배 이상의 힘이 하판에 작용함을 알 수 있다.

Fig. 8은 연료승압 블로어 캐비티 내부에서의 절대압력 변

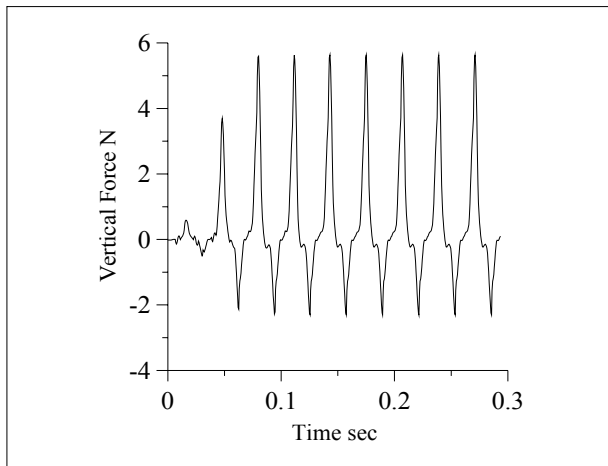


Fig. 7 Force distribution on the lower plate of a diaphragm cavity

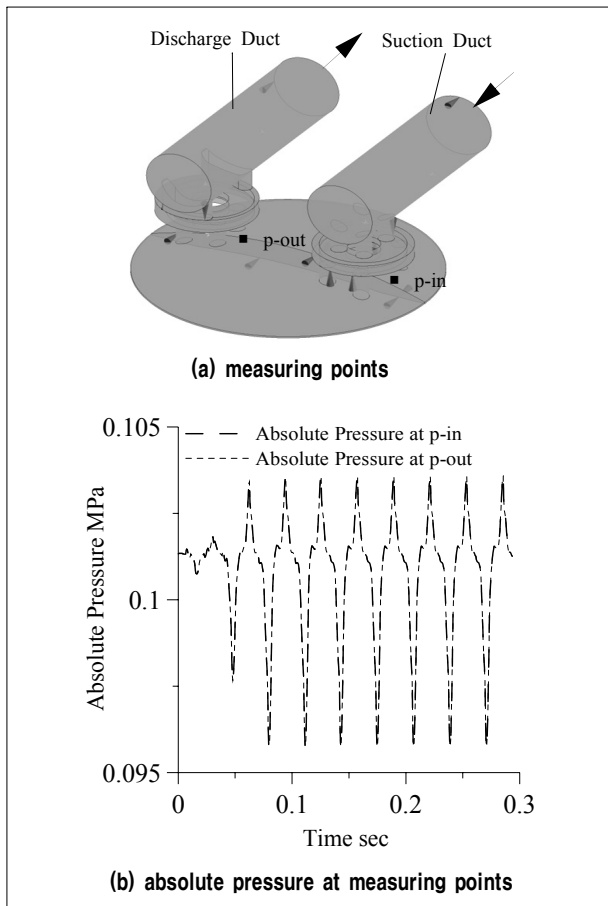


Fig. 8 Absolute pressure inside diaphragm cavity

화를 시간에 따라 나타내었다. 그림에서와 같이 캐비티 내부에 총 2개의 압력계측지점을 설정하였다. 초기조건으로 압력을 1atm으로 설정하였기 때문에 절대압력변화의 초기 값은 101,325Pa에서 시작된다.

캐비티 내부에서 흡입포트와 토출포트 아래 부분에 각각 설정한 계측지점(흡입: p-in, 토출: p-out)에서는 처음 2주기 동안은 계산의 안정성을 위하여 이송거리를 점진적으로 증가시킴으로써 압력이 점차적으로 증가하지만, 2주기 후 계산에서는 정상적인 압력변화를 나타내고 있다.

Fig. 9 및 Table 2는 다이어프램 블로어 캐비티 하판의 한 주기(0.024sec) 동안의 흡입 및 토출상태에 따른 수직이동

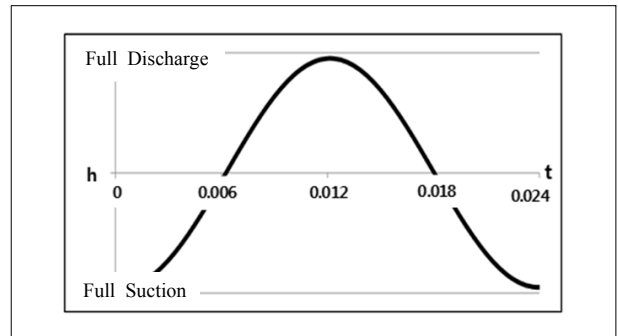


Fig. 9 Vertical displacement of the lower plate of a diaphragm blower

Table 2. Condition of the blower cavity

Time (s)	Condition
0	Full Suction
0,006	1/2 Discharge
0,012	Full Discharge
0,018	1/2 Suction
0,024	Full Suction

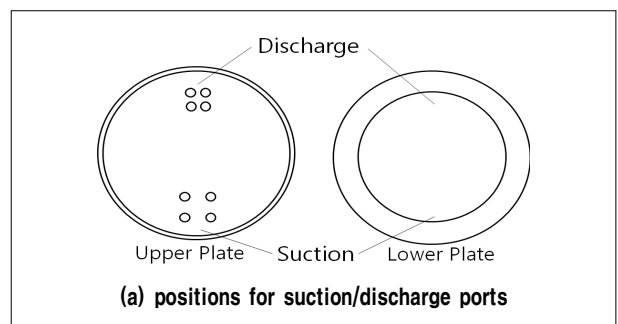


Fig. 10 Unsteady flow pattern on the bottom of a diaphragm cavity

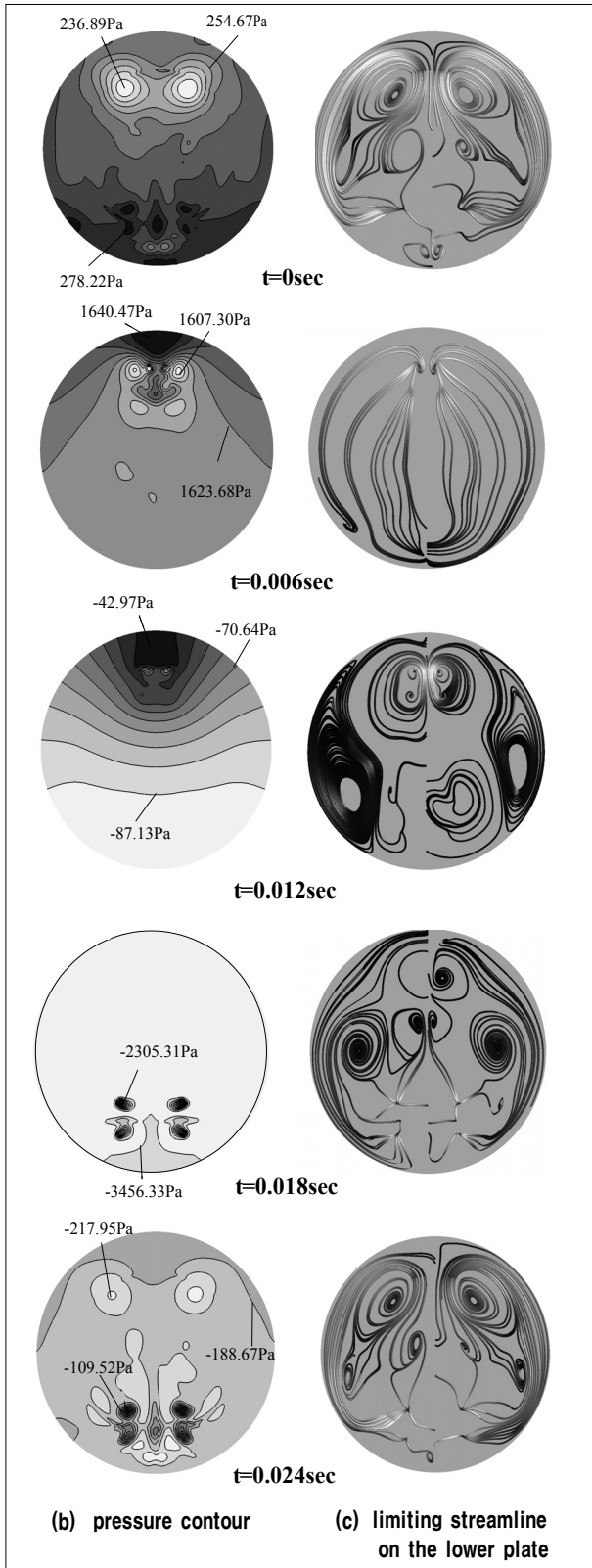


Fig. 10 Unsteady flow pattern on the bottom of a diaphragm cavity

위치를 나타낸다. Table 2에서와 같이 시간 0 sec를 완전 흡입상태로 하여 0.012sec에서는 완전 토출상태가 되고, 다시 0.024sec에서는 완전 흡입상태로 돌아온다.

Fig. 10은 블로어 캐비티의 흡입/토출변화에 따른 내부유동장 특성을 나타낸다. 그림에서 왼쪽에는 압력분포를 오른쪽에는 캐비티 하판에서의 한계유선을 각각 나타낸다. 그림에 나타난 시간은 Fig. 9 및 Table 2에 각각 대응한다.

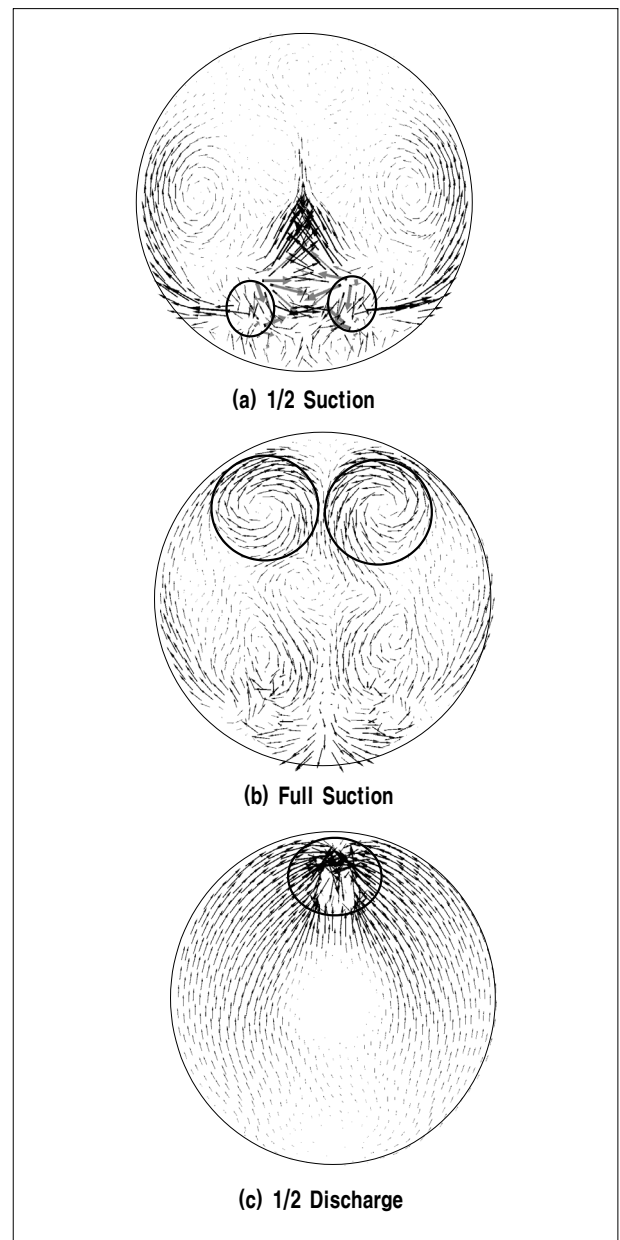


Fig. 11 Velocity vectors near the bottom of a diaphragm cavity

먼저 토출하는 단계($t=0\sim 0.012\text{sec}$)부터 시작되는 캐비티 내부에서 토출구 부분 압력이 높아 지면서 유동장이 형성되는 과정을 확인할 수 있다. 다음의 흡입 단계($t=0.012\sim 0.024\text{sec}$)에서는 캐비티 내부의 흡입구 부분에서 압력이 높아지고, 유동이 발달하는 것을 알 수 있다. 특히 흡입 시에는 압력이 흡입구 부분에 집중되고 유속이 최대값(36.82m/s)을 나타낸다.

Fig. 11은 주기조건에 따른 유동의 방향을 나타낸다. 흡입하는 단계(1/2 suction)에서는 흡입구부분에서 유동이 발생하여 캐비티 내부로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있다. 다음 완전 흡입상태(full suction)에서는 캐비티 내부에 넓은 범위에 걸쳐 선회류(circulation flow)가 존재한다. 다시 토출하는 단계(1/2 discharge)에서는 전체 유동이 토출구 부분으로 집중적으로 이동하는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 비정상 수치해석을 통하여, 흡입과 토출에 따른 다이어프램 캐비티 내부에서의 유동장 특성을 파악할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 1kW급 가정용 연료전지의 연료승압 블로어에 대한 3차원 비정상 수치해석을 수행함으로써 다음과 같이 다이어프램 캐비티 내의 내부유동장의 특성을 고찰하였다.

- (1) 다이어프램 캐비티 및 입구/출구포트에 대한 수치해석 모델을 개발하여 적용하고, 캐비티의 거동을 이동격자(moving mesh)를 이용한 비정상(unsteady) 수치해석을 통하여 연료승압 블로어의 다이어프램 캐비티 내부유동장

- 의 특성과 소요 동력에 대한 시간특성을 각각 평가하였다.
- (2) 다이어프램 캐비티 하판에 작용되는 동력특성을 주기조건에 따라 나타낸 결과, 흡입 시가 토출 시보다 약 2배 이상의 힘이 캐비티 하판측에 작용함을 알 수 있었다.
- (3) 한 주기 동안 공기가 흡입 및 토출되면서 수직방향으로 이동하는 캐비티 하판에 나타나는 압력분포, 유선분포를 그리고 유동의 이동변화를 수치해석을 통하여 확인하였으며, 완전 흡입시에는 토출 시와는 달리 넓은 범위에 걸쳐 선회류(circulation flow)가 존재함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국에너지자원기술기획평가원(지식경제부) 신재생에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Nagata, 2006, "Development of BOP for 1kW Fuel Cell System", Toshiba Report.
- [2] Choi, K. R., Jang, C. M. and Tak, B. Y., 2011, "Optimization of a Cavity in the Diaphragm Blower", Proceeding of 2011 KSME Spring Conference on Fluids Engineering Division, pp. 121-122.
- [3] Jang, C. M. and Lim, S. J., 2010, "Performance Analysis of Diaphragm Blower for Fuel Cell", Proceeding of 2010 SAREK Conference, pp. 1006-1011.
- [4] CFX-12 User Manual, 2009, Ansys inc.

최 가 람



2009년 울산대학교 조선공학과 공학사
2011년 울산대학교 해양공학과 공학석사

현재 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실 석사후과정연구원
(E-mail : krchoi@kict.re.kr)

장 춘 만



1984년 인하대학교 기계공학과 공학사
1986년 인하대학교 기계공학과 공학석사
2000년 큐슈대학교 기계에너지공학과 공학박사

현재 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실장
(E-mail : jangcm@kict.re.kr)