

연료전지 버스용 공기공급시스템 개발

박창호¹⁾, 조경석²⁾, 김우준³⁾, 오창훈⁴⁾

한라공조(주) 기술연구소

Development of Air Supply System for FCEV Bus

Changho Park, Kyungseok Cho, Woojune Kim, Changhoon Oh

R&D Center, Halla Climate Control Corp, 1689-1 Sinil-dong, Daedeok-gu, Daejeon, Korea

Key words : FCEV(연료전지자동차), Turbo Blower(터보 블로워), Centrifugal Compressor (원심 압축기), Impeller (임펠러), Volute (볼루트)

Abstract : FCEV uses electric energy generated from the reaction between Hydrogen and Oxygen in fuel cell stack as driving force. As fossil fuels are exhausted, fuel cell is regarded as a potent substitute for next generation energy source, and thus, most of car-makers make every efforts to develop fuel cell electric vehicle (FCEV). In addition, fuel cell is also beneficial in aspect of environment, because only clean water is produced during chemical reaction process instead of harmful exhausted gas. Generally, Hydrogen is supplied from high-pressured fuel tank, and air blower (or compressor) supplies Oxygen by pressurizing ambient air. Air blower which is driven by high speed motor consumes about 7-8 % of energy generated from fuel cell stack. Therefore, the efficiency of an air blower is directly linked with the overall performance of FCEV. This study will present developing process of an air blower and its consisting parts respectively.

1. 서론

연료전지 자동차는 수소와 산소의 반응 과정에서 생성되는 전기 에너지를 동력으로 이용하는 운송 장치이다. 연료전지는 화석에너지 고갈에 따른 대체 에너지로 주목받고 있으며, 전기 생성을 위한 화학 반응시 배기가스가 전혀 없고 물만 배출되므로 환경적인 측면에서도 현실적인 대안으로 평가받고 있다. 일반적으로 수소는 차량에 장착된 고압 수소 탱크로부터 공급되고, 산소는 대기 중의 공기를 압축하여 공급한다. 모터로 구동되는 공기 블로워는 연료전지 스택에서 생성된 전기의 약 7-8% 가량을 소모하므로 공기 블로워의 고효율화는 차량의 고성능화와 직결된다. 본 논문에서는 연료전지 차량용 공기 블로워 및 구성 부품의 개발에 대해 논의하고자 한다.

2. 주요 부품 설계

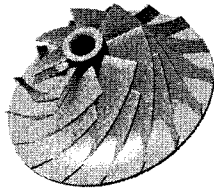
원심형 공기 블로워의 구성품은 크게 임펠러, 볼루트, 고속 모터 및 하우징으로 구분된다. 본 장에서는 주요 구성품의 설계 과정 및 고려 사항에 대해 설명 하겠다.

2.1 임펠러

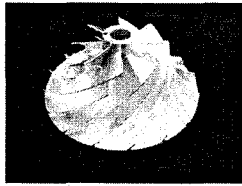
임펠러는 공기 블로워의 핵심 부품으로 고속 회전하면서 작동 유체의 운동 에너지를 증가시킨다. 입구에서 수직방향으로 들어온 공기가 출구에서는 방사 방향으로 배출되므로, 효과적으로 유동 방향을 바꿀 수 있는 설계가 요구된다. 또한, 임펠러의 출구로 갈수록 압력이 증가하므로 역압력 구배에 따른 역류를 방지하기 위해 블레이드의 급격한 터닝은 피해야 한다.

본 연구에서는 유동 해석을 통해 임펠러 크기 및 블레이드 형상에 따른 성능 및 유동장 특성을 예측하였고, 시스템 크기와 작동 조건을 고려하여 임펠러를 설계하였다. 임펠러 설계시 고려한 주요 인자는 블레이드의 입출구 각도, 외곽 지름, 출구 높이 등이다. 블레이드는 회전방향의 반대방향으로 굽은 Backward Sweep 방식을 채택하였는데, 이 방식은 출구의 절대 속도가 작아지므로 효율이 증가하는 장점이 있다.

설계안으로 최종 채택된 임펠러는 직경 100mm, 블레이드 높이가 35mm 이며 8개의 주 블레이드와 8개의 스플리터를 갖는다.



<그림 1. Φ100 Impeller Modeling>

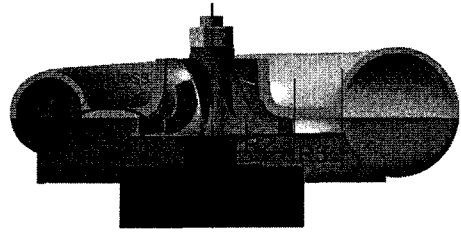


<그림 2. Φ100 Impeller 가공품>

2.2 볼루트/디퓨저

작동 유체가 임펠러에서 얻은 운동에너지는 디퓨저와 볼루트를 통과하면서 압력으로 변환된다. 디퓨저는 베인의 유무에 따라 베인 디퓨저와 베인리스 디퓨저로 구분되고, 베인의 형상에 따라 Airfoil 디퓨저 Channel 디퓨저 등으로 나뉜다. 일반적으로 디퓨저에 베인이 있는 경우가 효율이 좋으나, 안정 작동 영역은 좁아진다. 이것은 회전 수 및 유량에 따라 임펠러 출구에서의 유동각과 베인의 설치각에 차이가 발생하기 때문이다. 연료 전지 차량용 공기 블로워는 주행 조건에 따라 작동 영역이 넓게 변하므로 베인리스 디퓨저가 적합한 것으로 판단된다. 또한, 베인리스 디퓨저는 제작이 간단한 장점도 있다.

디퓨저의 성능은 입구와 출구의 면적비에 의해 결정되나, 전체 시스템의 크기를 고려하여 적정 수준을 정한다. 본 연구에서 설계한 베인리스 공간은 입구 지름 100mm, 출구 지름 130mm 이다.



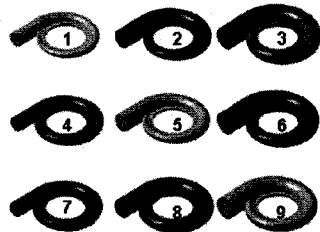
<그림 3. Vaneless Diffuser>

볼루트는 디퓨저를 통과한 유동을 모아서 출구로 내보내는 원형의 스크롤이다. 또한, 유동 수집 기능 외에도 디퓨저에서 충분히 회복되지 못한 운동에너지를 압력으로 변환하는 기능도 수행한다. 볼루트는 임펠러와 함께 압축부를 구성하는 핵심 부품임에도 불구하고, 볼루트의 설계 방법에 대해 공개된 연구 자료는 극소수에 불과하다. 따라서 본 연구에서는 볼루트의 주요 설계 변수를 설정하고, 다구짜 실험 계획법에 근거한 유동해석을 실시하여 형상 최적화를 시도하였다.

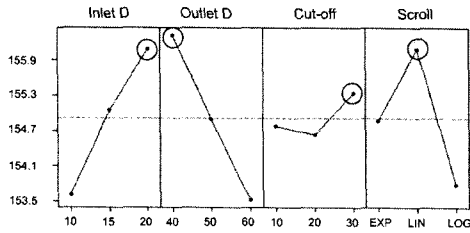
볼루트 설계에 사용된 주요 설계 변수는 볼루트 시작부 지름, 볼루트 출구 지름, 컷오프 위치, 스크롤의 전개 방식의 4가지이다. 각각 3가지 수준에 대해 다구짜 L9 Matrix 분석을 수행하였다. 설계 수준 및 해석에 사용된 볼루트의 3D 모델링과 결과는 다음과 같다.

<표 1. Taguchi L9 Matrix for Volute Optimization>

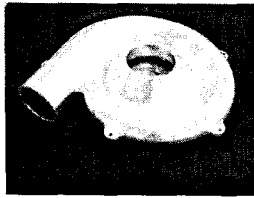
No.	Inlet D	Outlet D	Cutoff	Scroll
1	10	40	10	EXP
2	10	50	20	LIN
3	10	60	30	LOG
4	15	40	20	LOG
5	15	50	30	EXP
6	15	60	10	LIN
7	20	40	30	LIN
8	20	50	10	LOG
9	20	60	20	EXP



<그림 4. 다구짜 L9 해석용 모델링>

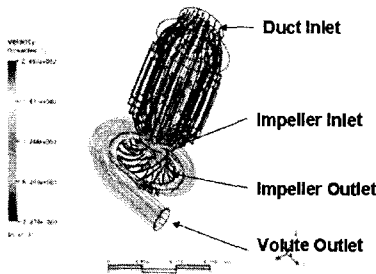


<그림 5. 분석 결과>



<그림 6. Volute 시제품>

앞서 설계한 임펠러 및 볼루트를 포함한 전체 시스템의 유동해석을 실시하였다. 회전수는 50,000 RPM, 입구는 대기조건, 출구는 유량 0.1 kg/s (약 5000 SLPM) 으로 설정하였다. 계산에 사용된 전체 격자수는 약 100만개 이다.



<그림 7. Full System CFD Analysis>

<표 2. Full System 해석 결과>

	P	Prstl	T	Total	Max
Duct Inlet	101,126	101,328	299.8	300.0	0.05
Impeller Inlet	98,336	99,910	298.6	298.9	0.17
Impeller Outlet	135,383	163,678	330.5	348.8	0.52
Volute Outlet	154,478	155,359	348.1	348.8	0.09

디퓨저 및 볼루트의 성능은 압력 회복계수 Cp 와 유동 손실 계수 K 로 나타낸다. 압력 회복 계수는 임펠러에서 받은 운동에너지가 압력에너지로 전환되는 정도를 수치화 한 것이고, K 는 디퓨저/볼루트를 통과하면서 생기는 손실량을 나타낸다.

각각의 정의는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{p_2 - p_1}{p_{01} - p_1}$$

; pressure recovery coefficient

$$K = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{01} - p_1}$$

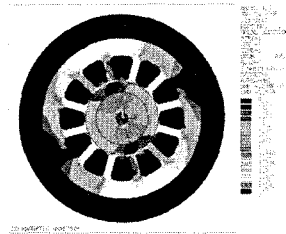
; total pressure loss coefficient

해석을 통해 얻은 디퓨저-볼루트 시스템의 Cp 는 0.67, K 는 0.29 수준이다.

전체 시스템 유동 해석 결과 50,000 RPM 구동시 볼루트 출구 압력은 약 154kPa 로 예측되었다. 해석에서 고려되지 않은 기계 효율 및 팁 간극 관리에 의한 손실을 고려할 때 50,000 RPM 을 약간 상회하는 회전수에서 요구 성능을 만족할 것으로 판단된다.

2.3 BLDC 모터/컨트롤러

설계 목표에 도달하기 위해서 필요한 축 동력은 50,000RPM 구동시 약 7kW 수준이다. 현재 시판되고 있는 모터 중 고속 회전 및 고효율을 동시에 만족하는 제품이 없는 관계로 신규 개발을 추진하였다. 또한, 차량 장착이 용이하도록 DSP 소자와 IGBT를 이용한 전용 소형 컨트롤러를 개발 하였다.



<그림 8. 전자기장 해석 결과>

모터 축은 고속으로 회전하기 때문에 안정성 확보를 위한 동특성 해석이 필수적이다. 동특성 해석은 베어링부를 구속하고 있는 경우와 구속하고 있지 않은 경우에 대해서 모두 실시하였으며, 이를 통해 축의 지름, 재질 및 연결부의 형상을 결정하였다. 그림9 에서 동특성 해석의 일례를 보여주고 있다. Critical Speed 가 회전 속도의 2 배수 이상에서 존재하므로 회전 속도의 변화에도 구조적 안정성에 문제가 없는 것으로 판단된다.

Leadcase #: SC 1,Mod#1, #2459,548817Hz

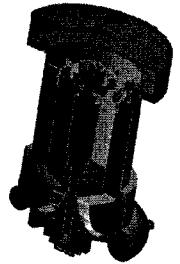


<그림 9. 회전체 동특성 해석>

3. 시제품 제작 및 평가

3.1 시제품 제작

공기 블로워 시제품은 공기가 모터를 냉각하면서 흡입되는 구조로 설계하였다. 모터의 스테이터와 결합된 방열핀으로 모터의 열은 방출된다. 가혹 조건 동작시 모터의 성능 및 수명은 발열에 민감하므로 냉각구조 최적화에 대한 지속적인 개선이 필요하다.

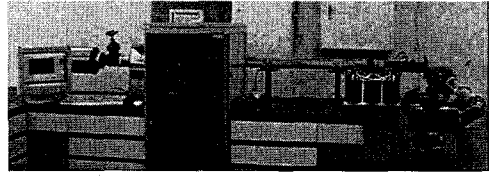


<그림 10. 시제품 컨셉>

3.2 성능평가

3.2.1 시험설비구축

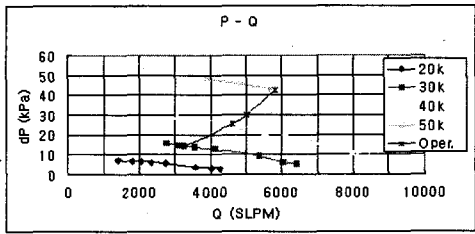
시제품의 성능 평가를 위해 간이 풍량 측정 장비를 구축하였다. 시료의 입출구 덕트에서 온도, 압력, 유량을 측정하여 성능을 평가한다. 후류에는 댐퍼를 설치하여 작동 조건을 변화할 수 있게 하였고, 데이터는 Labview로 수집되어 처리된다.



<그림 11. 간이 풍량 시험 장비>

3.2.2 성능평가결과

시제품의 성능 평가 결과 약 50,000 RPM에서 압력비 1.45, 유량 5,000 SLPM 으로 측정되었다. 압축부 설계부에서 언급한 바와 같이 탭에서의 유동 손실 및 마찰에 의한 손실로 설계보다 압력이 낮게 측정된 원인으로 판단된다. 설계 타겟인 1.5bar/5000SLPM 은 52,200 RPM 에서 달성하였다.



<그림 12. 성능 평가 결과>

4. 결론

연료전지 차량용 공기공급 시스템을 설계 및 제작 후 평가를 실시하였다. 성능 평가 결과 설계 회전수보다 약간 높은 52,200 RPM에서 프로젝트 성능 목표 1.5bar, 5000 SLPM 을 달성하였다. 향후 시스템의 고효율화 및 안정성 확보에 관한 추가 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 신재생에너지 기술개발사업 “버스용 (200kW급) 고분자 연료전지시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] K. Hillewaert and R.A. Van den Braembussche, 1999, “Numerical Simulation of Impeller-Volute Interaction in Centrifugal Compressors,” Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 603-608
- [2] David Japikse and Nicholas C. Baines, 1994, “Introduction to turbomachinery,” Concept ETI.
- [3] David Japikse, 1996, “Centrifugal Compressor Design and Performance,” Concept ETI.
- [4] S.L. Dixon, 1998, “Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery,” Butterworth Heinemann Publications