

원심 블로어 출구 유동의 정량적 가시화 연구

도훈승* · 김성준* · 박승하** · 김형범*+

Quantitative Visualization of Outlet Flow of the Centrifugal Blower

Xin Cheng Tu, Sung-Jun Kim, Seung Ha Park and Hyoung-Bum Kim

Abstract. The outlet flow of the centrifugal blower were quantitatively visualized using particle image velocimetry. Because the centrifugal blower is one of the key parts of electric vehicle battery cooling system, the quantitative information of centrifugal blower is necessary to design and optimize the cooling system. The effect of different inlet flow condition to the outlet flow was investigated in this study. Two different inlet ducts were used. One is the straight inlet and the other is a bended one. The results clearly showed the outlet flow asymmetry in both inlet ducts. When the blower has the bended inlet, the flow rate decreases due to the increase of the head loss.

Key Words: Flow Visualization(유동가시화), Centrifugal Blower(원심 블로어), Particle Image Velocimetry(입자화상속도계), Outlet flow (출구 유동)

1. 서론

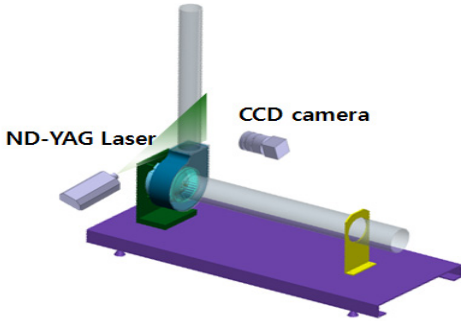
우수한 연비 및 CO₂를 포함한 공해 물질 배출 절감 등의 특징으로 많은 관심을 받고 있는 전기 자동차(electric vehicle)는 다양한 종류가 개발되어 현재 시판되고 있다. 전기 자동차들은 내연 기관과 모터, 배터리가 장착된 하이브리드 전기 자동차(hybrid electric vehicle)와 내연기관을 제거하여 모터-배터리 시스템만으로 동작되는 EV(electric vehicle)로 크게 구별되어 진다. 이러한 HEV와 EV에는 니켈수소전지(Nickel metal hydride, NiMH)와 Li-ion(Lithium ion) 전지가 대표적으로 사용된다. 배터리가 주동력원인 EV에서는 Li-ion 전지가 주로 사용되고 부동력원인 HEV에서는 니켈수소전지 위주로 사용이 되고 있다.⁽¹⁾ 개발 역사가 긴 내연 기관 및 구동부에 비하여 상대적으로 개발 역사가 짧은 배터리 시스템의 특성상, 배터리 시스템이 전기 자동차의 성능 향상에 기여하는 바가 현재는 더 크다. 이러한 이유로 전기 자동차용 배터리의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 연구로부터 전기 자동차에 사용되는 배터리의 수명과 성능은 주위 온도가 큰 영향을 주는 것

이 이미 알려졌다. 일반적으로 50°C 이상의 온도에서는 배터리 수명 및 충전 효율이 낮아지고, Li-ion 배터리의 경우에는 고온에서의 폭발 가능성으로 인하여 더욱 정밀한 온도 제어가 필요하다.^(2, 3) 이를 위하여 HEV를 포함한 EV에는 수냉 혹은 공냉을 이용한 배터리 냉각장치가 사용되고 있다.⁽⁴⁾ 형상이 제한된 공간에 많은 양의 배터리 셀을 집적하는 전기 자동차의 특성상, 냉각 장치의 경량화 및 최적 형상 설계는 매우 중요하다. 본 연구는 1차로 수행되었던 EV용 배터리 시스템의 공랭식 냉각장치의 원심 블로어의 입구측 유동장의 유속 측정 연구⁽⁵⁾의 후속으로 실제 배터리 셀을 냉각하게 되는 출구측 유동을 정량적으로 가시화하였다. 이 결과는 전기 자동차용 배터리 냉각 장치 설계에 매우 유용하리라 기대된다.

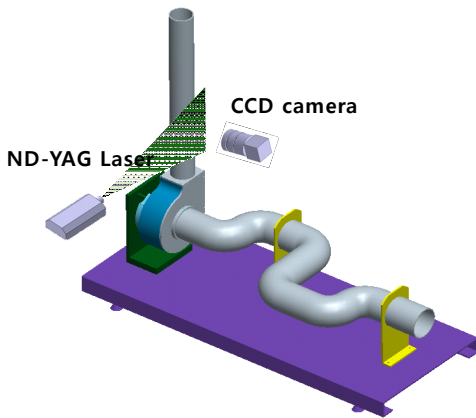
2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 배터리 시스템의 공랭식 냉각을 위한 원심 블로어의 출구측 유동장을 정량적으로 관찰하였다. 실험 조건은 기존 연구⁽⁵⁾에서 진행되었던 두 가지 입구 조건, 완전 발달된 관 유동 및 실제 차량에서의

제한된 공간으로 인해 갖는 복잡한 형상을 모사하기 위한 총 6개의 90° 굽힘관으로 이루어진 곡관 모델에서 블로어의 출구 유동을 측정하였다.



(a) Straight duct model



(b) bended duct model

Fig. 1. Experimental apparatus of centrifugal blower model

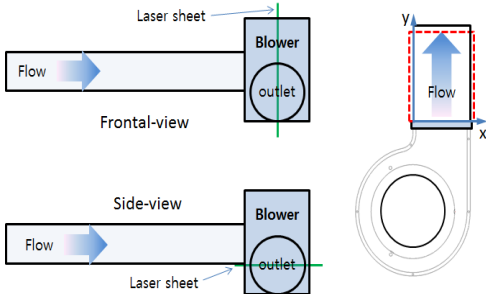


Fig. 2. Measurement sections of inlet region with the coordinate system

실험에 사용된 모델을 Fig.1에 나타내었다. 원심 블로어의 유량 조절은 펄스폭 변조(PWM) 모터를 이용하여 제어하였다. 본 연구에서는 PWM duty 30%, 60%와 80% 조건의 3 가지 모터 속도에서 출구부 유동장을 측정하였다. 입구 및 출구측에 사용된 관은 내경이 60 mm인 아크릴 관을 사용하였다.

측정 단면은 원심 블로어의 출구측에서 Fig. 2에서와 같이 두 수직 단면(frontal-view, side-view)에서 측정이 이루어졌다. 유동의 정량적 유동가시화를 위해 PIV (particle image velocimetry) 실험을 수행하였다. 1,600×1200 pixel의 해상도를 가지는 CCD 카메라와 Dual-head 형 Nd:YAG 레이저가 동기화 장치(delay generator)를 이용하여 연계되어 동작된다. 출구부의 측정 단면에서 400장의 순간 속도장⁶⁾을 획득하고, 앙상블 평균(ensemble average)하여 유동장을 측정하였다. 일반적인 상호상관기법의 PIV 알고리즘을 사용하여 순간 속도 벡터를 획득하고 계산에 사용되는 최종적인 조사 영역을 50% 중첩된 16x16 pixel 로 고정하였다. 이때 측정된 속도 벡터의 공간해상도는 약 1x1 mm²이다. 산탄 입자는 라스킨 노즐을 이용하여 생성된 올리브 오일 액적(droplet)을 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 직관 입구부

Fig.3은 전면(frontal-view) 측정영역에서의 앙상블 평균된 속도장 결과이다. 속도의 크기를 제외하고 전체적인 유동 구조는 블로어 팬 속도에 영향을 받지 않아, PWM duty 30, 80%의 결과만을 제시하였다. 반시계 방향으로 회전하는 블로어 임펠러에 의해 그림에서부터 평균 속력이 관의 중심을 기준으로 대칭이 아닌 좌측으로 휘는 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 임펠러에 의해 발생한 원주방향 속도 성분(그림에서는 음의 x축 방향 속도)에 의해 나타나는 현상이다. 이로 인하여 블로어의 출구에서는 x=0.03-0.045 m 위치에서 가장 운동량이 큰 유체가 나타나고, 출구의 하류로 나아가면서 운동량이 큰 유체는 관의 왼쪽에 편중된다. 이로 인하여 관의 오른쪽에서는 음의 y축 방향 속도가 존재하는 재순환 구간이 생기는 것을 알 수 있다.

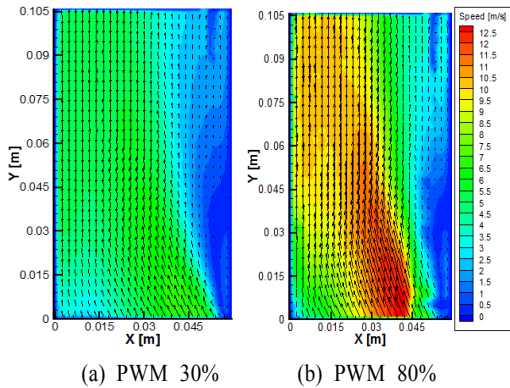


Fig. 3. Ensemble averaged velocity fields of the frontal-view measurement with straight inlet

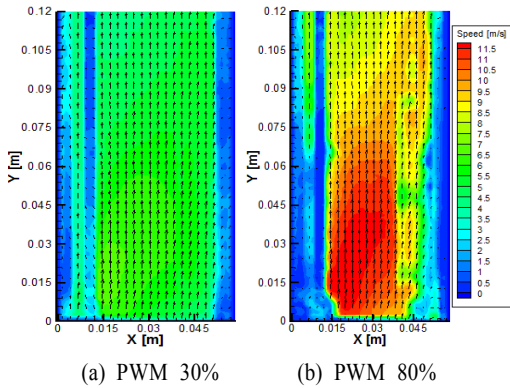


Fig. 4. Ensemble averaged velocity fields of the side-view measurement with straight inlet

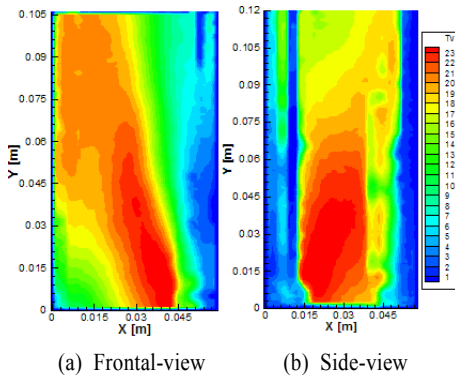


Fig. 5. Vertical turbulence intensity fields of top and side-view measurement at PWM duty 80% with straight inlet

이러한 유동 구조는 속도의 크기를 제외하고 블로어 팬의 회전 속도에 상관없이 유사한 형태를 가지고 나타났다.

측면(side-view)에서의 평균 속도장 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 관의 벽면 가까이에서는 굴절률 차이에 의한 영상 왜곡의 영향으로 정확한 속도장을 측정하지 못하였다.

측면부에서는 전면부 측정과 달리 관 내부 위치에 따른 운동량 차이는 크지 않았지만 분포는 반대의 경향을 보여주었다. 운동량이 가장 큰 구간은 출구 직후에서는 $x=0.015\sim0.03$ m에 위치하다가 관의 하류로 나아가면서 오른쪽으로 이동하는 현상을 보여준다. 이러한 현상은 블로어의 임펠러 및 출구 위치의 상대적인 차이 때문으로 생각된다.

하류로 나아가면서 전체적으로 낮은 운동량을 가지는 이유는 전면부 결과에서 예상할 수 있듯이 큰 운동량을 가지는 유체가 왼쪽으로 치우치면서 관 중심부에서의 운동량이 줄어들기 때문이다.

Fig. 3과 Fig. 4의 평균 속도장 결과로부터 얻은 속도장 분포는 제한된 공간으로 완전 발달된 출구 유동 조건을 만들지 못하는 경우에 최적의 냉각 조건을 찾을 수 있도록 정보를 제공한다.

Fig. 5에 열전달에 영향을 주는 유동 특성의 하나인 난류 강도 분포를 나타내었다. 난류 강도의 분포도 평균 속도장 결과와 동일하게 전면부에서는 관 하류로 나아가면서 왼쪽으로 큰 값이 치우치는 형태를 가지고, 측면부에서는 반대로 오른쪽으로 치우치는 형태를 가지는 것을 알 수 있었다.

3.2 곡관 입구부

블로어 입구의 형상이 다를 경우, 출구 유동의 변화를 관찰하기 위하여, 블로어에 곡관 입구부를 설치하고 동일한 출구 위치에서 속도장을 측정하였다. 기존 연구에서는 직관 및 곡관 입구부에 의해 블로어에 들어가는 입구부 유동이 크게 다른 것을 알 수 있었다.⁽⁵⁾ Fig. 6은 곡관 입구에서 출구의 전면부 평균 속도장 결과이다.

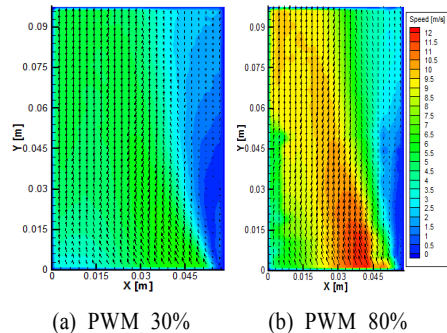


Fig. 6. Ensemble averaged velocity fields of the frontal-view measurement with bended inlet

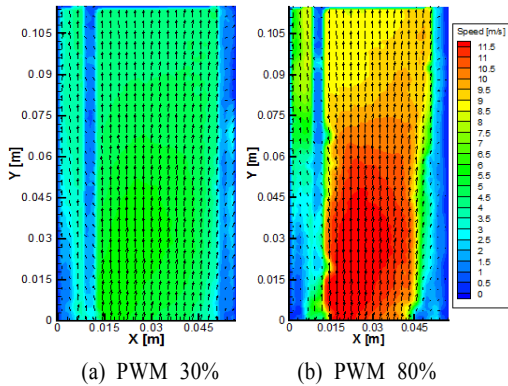


Fig. 7. Ensemble averaged velocity fields of the side-view measurement with bended inlet

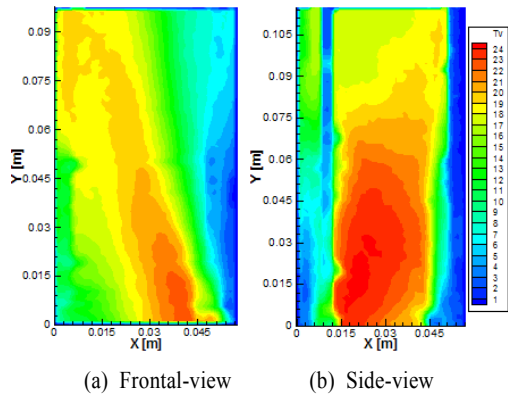


Fig. 8. Vertical turbulence intensity contours of top and side-view measurement at PWM duty 80% with bended inlet

전체적인 유동 구조는 직관 입구부 결과와 동일하게 전 면부에서는 출구의 하류로 나아가며 운동량이 큰 유체가 왼쪽으로 치우치는 현상을 보여준다. 이는 Fig. 7에서 하류로 나아가면서 오른쪽으로 치우치는 측면부 결과와 함께 블로어 출구의 유동 구조는 입구부 형상에 크게 영향을 받지 않음을 의미한다.

Fig. 8의 수직 방향 난류 강도의 분포도 평균 속도장 결과와 마찬가지로 곡관 및 직관 입구부에 의한 차이가 크지 않음을 보여준다. 입구 조건에 따른 차이를 확인하기 위하여 출구 하류의 $y=0.03, 0.075$ m가 되는 위치에서의 수직 방향 속도 및 난류 강도를 선 그래프로 나타내었다.

x축 방향 평균 속도는 수직 방향(y축) 속도의 최대 1%, 난류 강도의 경우에는 최대 약 10% 이하의 작은 값을 가져 냉각에 큰 영향을 주는 수직 방향 성분만을 비교하였다.

Fig. 9는 전면부에서의 수직 방향 평균 속도 및 난류 강도의 비교이다. 직관과 곡관 입구에 따른 차이는 속도 구

배의 경우, 매우 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 입구 부 차이에 따른 속도 및 난류 강도의 차이는 곡관을 입구 부 형상으로 가졌을 경우에 유속 및 난류 강도가 직관과 비교하여 바깥쪽 벽 근처를 제외하고는 전체적으로 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

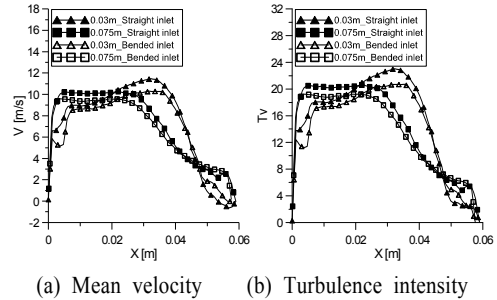


Fig. 9. Comparison of frontal-view mean vertical velocity and turbulence intensity between straight and bended inlet at RPM duty 80%

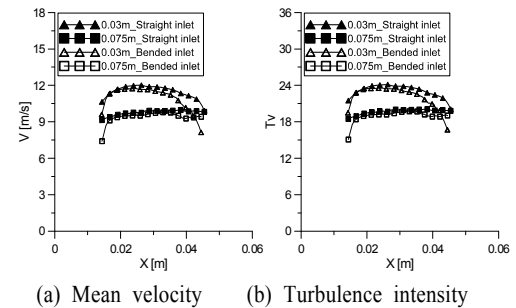


Fig. 10. Comparison of side-view mean vertical velocity and turbulence intensity between straight and bended inlet at RPM duty 80%

평균 속도 비교에서 블로어 출구 직후에서 나타나는 음의 속도는 출구관의 오른쪽에 재순환 영역이 나타남을 의미한다. $y=0.075$ m로 나아가면서 관의 중심을 기준으로 상대적으로 큰 운동량을 가지는 관의 왼쪽 영역($x<0.03$)과 낮은 운동량을 가지는 오른쪽 영역으로 구분된다. 관의 왼쪽 영역에서는 속도 분포가 평탄하게 나타나지만 오른쪽에서는 큰 속도 구배를 가진다.

난류 강도 비교도 평균 속도장 결과와 같이 출구 직후에서는 $x=0.035$ m 지점에서 최대값이 나타나 하류로 나아가면서 관의 왼쪽은 높은 난류강도를 가지는 구간이 나타나고 반면 오른쪽에서는 낮은 난류 강도를 가지게 된다. 블로어 팬의 속도가 작을수록(RPM duty 30, 60%), 직관 및 곡관 입구부에 따른 속도 및 난류 강도의 차이가 더 크게 나타났다.

Fig. 10은 측면에서의 직관 및 곡관 입구부에 따른 출구 속도장 및 난류 강도 결과 비교이다. Fig. 4와 7의 속도장 결과에서 알 수 있듯이 상대적으로 전면부에서의 값과 비교하여 작은 속도 및 난류 강도 구배를 가지는 것을 알 수 있다. 출구 직후에서는 상대적으로 왼쪽 구간에서 평균 속도 및 난류 강도가 큰 값을 가지나 관의 하류로 나아가면서 관의 오른쪽의 값이 더 커지는 현상을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 전기 자동차에 사용되는 냉각장치 설계 및 전산 해석 결과의 검증에 위해 원심 블로어의 출구부에서의 속도장 변화를 정량적으로 측정하였다. 연구 결과로부터 직관 및 곡관 입구부에 따른 유동장의 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 동일한 블로어 팬의 회전수에서 곡관 입구부를 가질 경우에 직관 입구부와 비교하여 작은 평균 속도 및 난류 강도값을 가졌는데 이는 곡관 입구부에서의 상대적으로 큰 수두 손실에 의한 결과로 해석된다. 속도 크기를 제외하고 속도 및 난류 강도의 분포는 직관 및 곡관에 따른 차이가 없었다.

전면부 측정 결과로부터 원심 블로어의 출구에서 블로어 팬의 원주 방향 속도에 의해 운동량이 큰 유체가 하류로 나아가면서 왼쪽으로 향하는 것을 보여준다. 이로 인해 출구 직후에서는 관의 오른쪽 벽면 근처에서 재순환 영역이 생기는 것을 알 수 있다. 반면 측면부 측정결과에서는 임펠러와 출구의 상대적 위치 차이에 의해 큰 운동량을 가지는 유체가 하류로 나아가면서 오른쪽으로 분포하는 것을 알 수 있었다.

위 유동장 정보는 냉각을 위한 블로어 출구의 최적 배치를 결정하는 데 유용하게 사용되리라 기대된다.

후 기

본 연구는 2013년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업 (2012-048078), 기초연구사업 (2013-024622)과 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구 지원(08GASPLANTC04)으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Pollet, B. G., Staffell, I. and Shang, L. L., 2012, "Current Status of Hybrid, Battery and Fuel Cell Electric Vehicles: From Electrochemistry to Market Prospects," *Electrochimica Acta*, Vol. 84, pp.235~249.
- (2) Sato, N., 2001, "Thermal Behavior Analysis of Lithium-ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles", *J. Power Source*, Vol.99, pp.70~77.
- (3) Smith, K. and Wang, C.-Y., 2006, "Power and Thermal Characterization of a Lithium-ion Battery Pack for Hybrid-electric Vehicles", *J. Power Source*, Vol.160, pp.662~673.
- (4) Dinger, A., Martin, R., Mosquet, X., Rabl, M., Rizoulis, D., Russo, M. and Sticher, G., 2009, *Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020*, Boston Consulting Group.
- (5) Jeong, T. S., Tu, X.C, Kim, S.J., Jang, H.W., Kim, J. K and Kim, H. B., 2013, "Quantitative visualization of inlet flow of the centrifugal blower", *Trans. of KSV*, Vol.11, pp.27~33.
- (6) Adrian, R. J. and Westerweel, J., 2011, *Particle image velocimetry*, Cambridge press, London.