



로봇청소기용 에어 펌프 내부 유동 해석

김재원,^{*1} 석인호²

INTERNAL FLOWS IN AIR PUMP OF ROBOT CLEANER

J.W. Kim^{*1} and I.H. Seok²

Traditional vacuum cleaner adopts a highly rotating centrifugal impeller for generating suction region at lower pressure. The rotational speed is very high at 35,000 to 40,000 rpm and accessory structure such as a circular brush at the base plate of the cleaning devices is equipped for gathering dusts. Highly rotating impeller is effective for low pressure generation but causes noise problems. Recently, the unwanted noise is removed by installation of air-pump, instead of a centrifugal impeller, and the internal flows of the modified system are estimated in numerical and experimental approach, respectively.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 에어펌프(AirPump), 임펠러(Impeller), 청소기(Cleaner), 유동해석(Flow Analysis)

1. 서 론

최근 가전제품의 개발 추세는 소형화 고성능화와 더불어 사용자의 편의성 또한 중요한 개발 과제가 되고 있다. 가전제품 중 진공청소기(Vacuum Cleaner)는 소형화 및 고성능화뿐만 아니라 무인 청소기까지 개발될 정도로 기술이 성숙되었지만 진공청소기의 큰 소음은 여전히 문제점이 되고 있다. 무인 진공청소기인 로봇진공청소기(Robot Cleaner)도 기존의 진공청소기와 같은 방식으로 내부의 원심 팬(Centrifugal Fan)을 35,000~40,000RPM 정도의 고속회전으로 청소기 내부와 외부의 압력차를 발생시켜 먼지 등을 흡입하는 방식을 사용하고 있다. 흡입 방식은 많은 공기를 빠르게 흡입하므로 모터 소음 외에도 공기를 흡입하면서 내부 유로에서 발생하는 유동소음(Flow induced noise)[1]과 팬 소음이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 흡입식 청소기의 소음을 감소시키고 성능을 개선한 에어 펌프(Air Pump)방식 로봇 청소기의 내부 유로와 팬에 대해서 수치해석을 수행하고, 내부의 유동 현상과 압력 변동 등

을 분석했다. 또한 로봇청소기의 성능적인 측면을 확인하기 위해 3,000mm X 3,000mm[2]의 제작된 공간에서 먼지제거 성능 시험을 병행했다.

에어펌프방식에 의한 청소성능과 원심 송풍기에 의한 흡입 성능의 비교에서는 KS기준에 의한 비교 실험 결과 그 성능은 유사 하였다. 그러나 흡입 성능을 결정하는 압력 차이의 크기는 펌프방식의 청소기 구조가 원심 송풍기 채택의 청소기에 비해 불리한 것이 확인되었다.

2. 본 론

2.1 로봇 청소기의 구조

로봇청소기는 제조사마다 각각 다른 회전 브러쉬(Brush) 모양을 가지고 있고, 구조나 외형 또한 제조사마다 각각 조금씩 틀린 모양을 하고 있지만, 작동 원리는 동일하다. 회전 브러쉬(Brush)가 로봇청소기의 바닥면에 위치하여 먼지 등을 흡입구 쪽으로 이송시키는 역할을 하며, 이송된 먼지 등은 내부에 위치한 원심 팬의 회전으로 흡입되는 공통적인 작동 원리를 가지고 있다. Fig. 1에 제조사마다 다른 로봇청소기의 회전 브러쉬를 나타내었고, Fig. 2에 로봇청소기의 작동원리를 나타내었다.

1 정회원, 선문대학교 기계공학과

2 학생회원, 선문대학교 대학원, 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: jwk@sunmoon.ac.kr

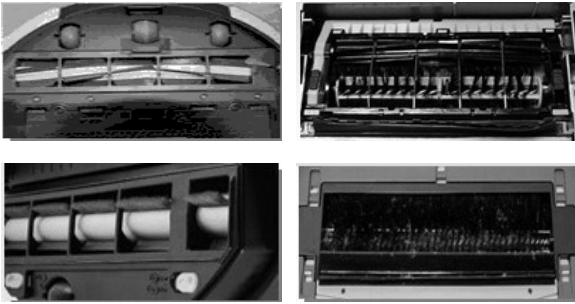


Fig. 1 Photos to show inlet duct of arr pump vacuum cleaner

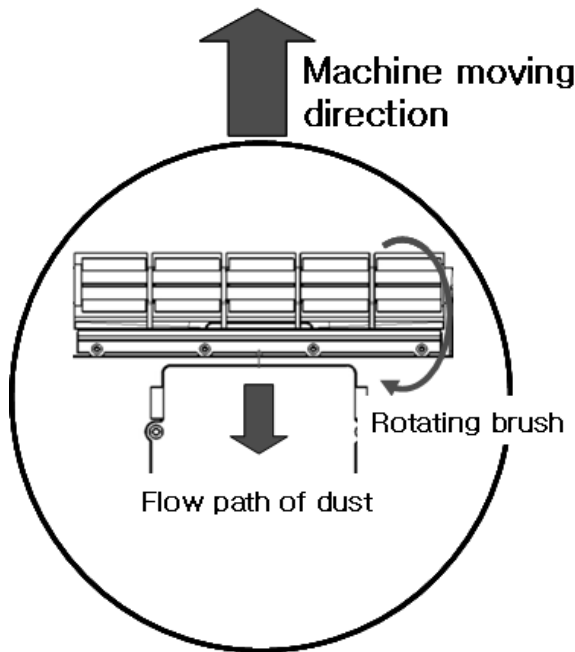


Fig. 2 Flow path of dust

2.2 수치해석

에어 펌프형 로봇청소기의 유동해석을 위하여 상용 CFD코드인 SC/Tetra 7.0[3]를 사용하였다. 본 연구는 에어 펌프 팬과 내부 유로의 유동 및 압력 변동을 예측 및 해석하기 위한 것이기 때문에 해석영역에서 회전 브러시를 제외하고, 팬과 유로, 작동 유체인 공기에 대해서만 수치해석을 실시하였으며, 주요 재원을 Table. 1에 나타내었다.

2.2.1 지배방정식 및 난류모델

지배 방정식으로는 연속 방정식과 운동량 방정식이 사용되었으며, 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{2}$$

정확한 난류 현상을 예측할 수 있는 모델이 개발되지 않았기 때문에 난류 모델로는 보편적으로 가장 많이 쓰이는 난류 모델인 Standard k-ε을 선정하였고, Standard k-ε 모델은 난류운동에너지와 소산율의 수송을 지배하는 다음과 같은 k와 ε에 관한 두 개의 미분방정식이 적용된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) \\ &= \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) \\ &= C_{\epsilon_1} \frac{\rho \epsilon_2}{k} - C_{\epsilon_2} \frac{\rho \epsilon_2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$P = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \tag{5}$$

여기서, 난류 모델식의 주요 상수는 아래와 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_\epsilon = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

Table 1 Geometry of Air Pump

Item	Dimension [mm]
Fan outer diameter	30.25
Fan inner diameter	19
Number of blades	4

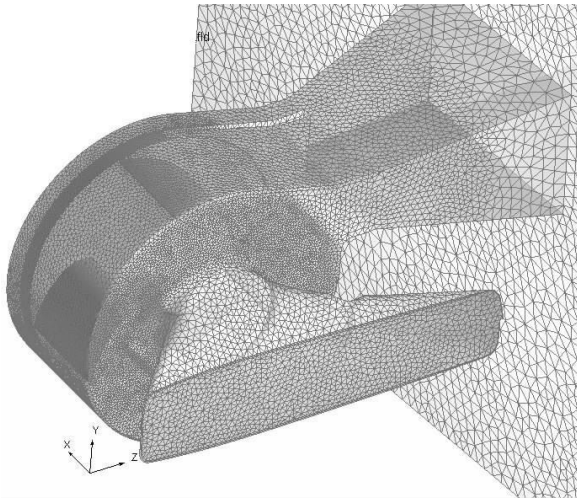


Fig. 3 Computational tetrahedral mesh for pump housing

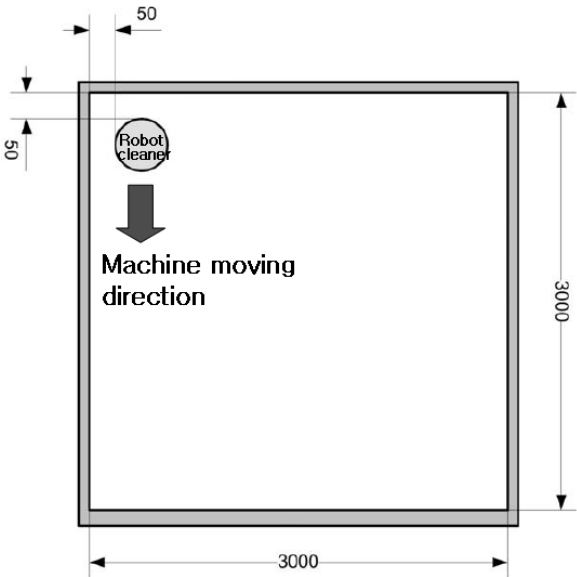


Fig. 4 Dimension of vacuum cleaner performance test region

2.2.2 해석조건 및 계산격자

본 연구에서는 팬에 회전조건을 주기 위하여 Moving element[4] 조건을 팬에 인가하였다. 또한 병행된 실험에서 측정하여 얻어진 6900RPM을 팬의 회전조건에 인가하였고, 정상상태(Steady State), 비압축성유동으로 가정하여 해석을 수행하였다. 입구(Inlet)에는 대기압조건(Static Pressure)을 인가하였고, 출구(Outlet)에는 Natural Outflow 조건을 인가하였다. 또한 압력 및 속도 보정을 위하여 SIMPLEC(Semi-Implicit Method of Pressure-Linkd Equation Consistent) 알고리즘[5]을 사용하였다.

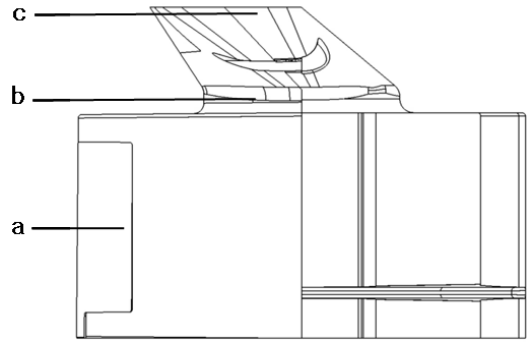


Fig. 5 Positions of pressure and velocity measurements

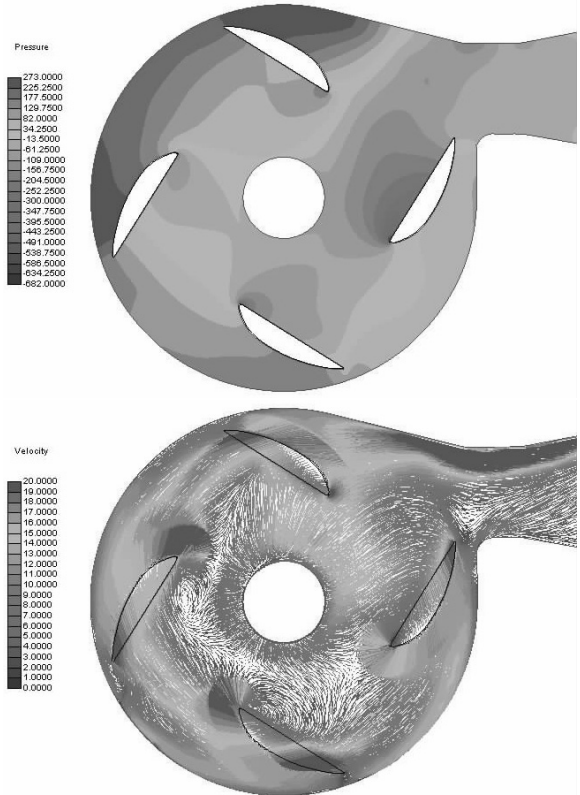


Fig. 6 Distribution of flow and pressure on a cross section a

전산해석에 사용된 격자의 구성은 사면체(Tetrahedron) 격자와 프리즘(Prism) 격자로 분할하여 구성하였으며, 격자가 구성된 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

프리즘 격자는 팬의 블레이드(Blade) 및 팬의 회전으로 발생하는 유동에 접하는 케이싱(Casing)의 벽면에 얇은 프리즘 레이어(Prism Layer)를 삽입하여 큰 속도의 기울기에 대한 해

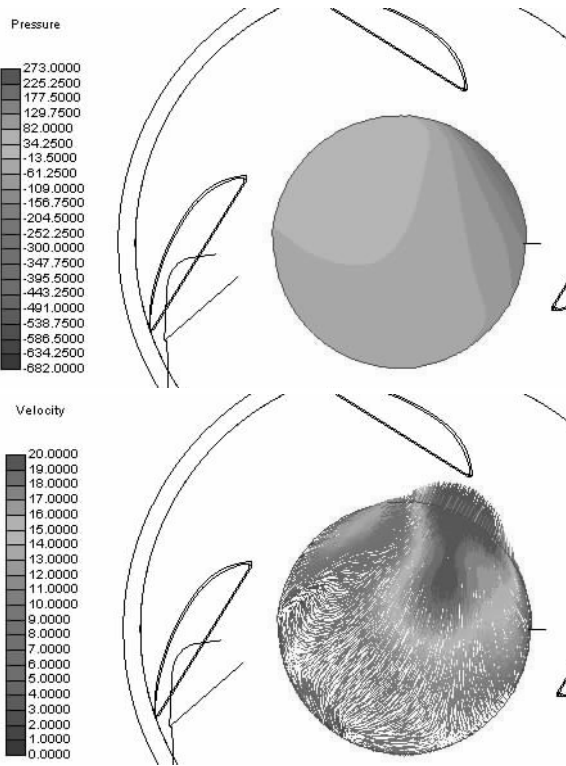


Fig. 7 Same as Fig. 6 except for b

석의 안정성을 보강하기 위한 것이다 그 이외의 영역에 대해서는 사면체 격자로 구성되어 있다. 격자수는 팬의 경우 약 1,000,000개 케이싱의 경우에는 약 2,000,000개로 이루어져 총 약 3,000,000여개의 격자로 이루어져있다.

2.3 성능실험

성능실험은 KS 규격에 의거하여 실험을 수행하였다.

성능실험이 수행되는 공간은 Fig. 4와 같이 3,000mm X 3,000mm의 크기의 목재로 제작하였고 제작된 공간의 바닥 또한 목재로 제작하였으며, 실험 방법은 바닥에 모래를 고르게 뿌리고, 10분 동안 로봇청소기를 가동한 후 바닥에 남아있는 모래를 수거, 수거한 모래의 무게를 측정하여 로봇 청소기의 성능실험을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 수치해석 결과

수치해석 결과를 Fig. 5에 나타난 위치의 단면에서 측정하였다. Fig. 6은 단면 a에서 나타난 유동분포와 압력분포이다.

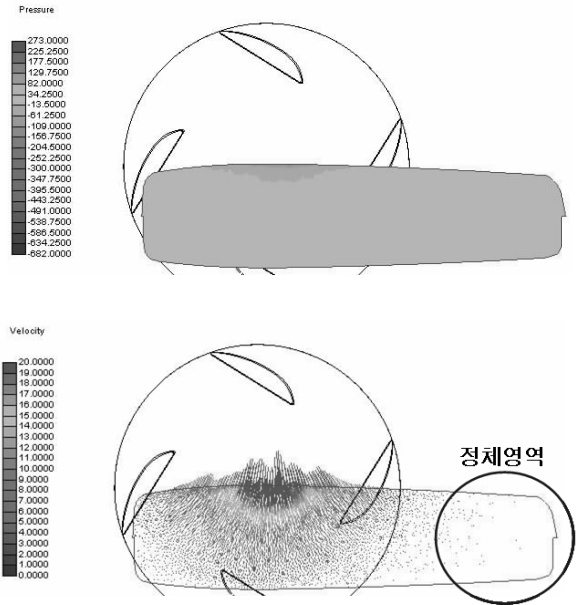


Fig. 8 Same as Fig. 6 except for c

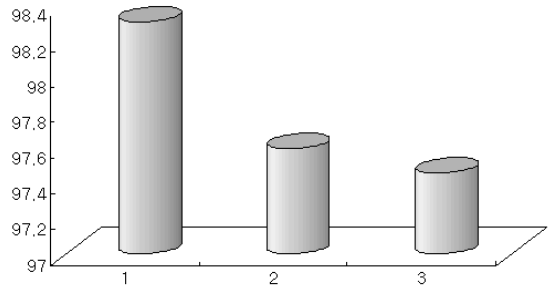


Fig. 9 성능실험 결과

에어펌프 팬 블레이드 끝부분의 속도가 가장 높았고, 팬의 회전 방향으로 유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 압력분포의 경우는 팬의 회전의 영향으로 팬 중심에서 압력이 낮아지는 것을 볼 수 있었지만, 팬 중심의 일부분과 출구영역을 제외한 부분은 약 50Pa 이상의 압력을 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 단면 b와 c에 해당되는 입구영역의 유동분포와 압력분포를 나타낸 것으로 입구의 오른쪽에서 정체 현상이 발생하는 것을 관찰할 수 있었고, 압력분포는 단면 b에 가까워질수록 낮아지고, 유동분포는 단면 b에 가까워질수록 빨라지는 것으로 나타났다.



3.2 성능실험 결과

3회에 걸친 성능실험결과 흡입률은 1회에 98.3% 2회에 97.6% 3회에 97.5%로 평균 흡입률 96.8%의 성능을 보여주었다. 이 성능실험 외에 먼지 무게에 대한 흡입률을 알아보기 위해 약 3g정도의 무게를 가진 쇠붙이 조각에 대한 흡입유무를 실험하였다. 그 결과 흡입식 로봇청소기가 흡입하지 못하는 쇠붙이를 에어펌프 방식의 청소기는 흡입하는 것을 보여주었다.

4. 결 론

본 연구는 기존의 흡입식 원심 팬이 아닌 에어펌프 팬을 가진 로봇청소기의 내부 유동 및 압력에 대한 고찰을 위해서 상용 프로그램인 SC/Tetra를 이용하여 수치해석을 수행하였고, 성능에 대한 실험을 KS규격에 의거하여 실험을 수행하였다. 이와 같은 수치해석과 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 입구영역 유동분포에서 정체영역을 확인할 수 있었고 이는 유로 경사각으로 인한 정체로 유로 개선을 통해 정체현상을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.
- 2) 수치해석 결과 입구영역의 압력과 펌프 하우징영역의 압력을 비교했을 때, 압력차가 기존의 흡입식 청소기에 비해 적은 것[6]으로 나타났다. 이로 인해 흡입에 의존한 청소가 아니라는 것을 예상할 수 있다.
- 3) 청소성능실험결과 평균 96.8%의 성능을 보였으며 기존의 흡입식 청소기의 성능과 동등 또는 향상되었음을 알

수 있고, 무게에 대한 청소성능실험에서는 흡입식 청소기가 흡입할 수 없는 무게의 쇠붙이를 흡입하는 것으로 나타났다.

- 4) 흡입식 로봇청소기는 흡입한 먼지 외에 공기를 배출시킬 수 있는 배기구가 필요하지만 에어펌프 방식의 로봇청소기는 먼지 배출구외에 공기 배출구가 없으므로 공기가 배출될 때 발생하는 유동소음 측면에서 유리할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 2004, Kim, J.Y. and Kwac, L.K., "The Flow Analysis for Vibration and Noise Diagnostic of Vacuum Cleaner Fan Motor," *Transactions of the Korean Society Machine Tool Engineers*, Vol.13, pp.56-63.
- [2] 2006, "KS B 6934, 가정용 청소 로봇의 성능 측정 방법" pp.1-17.
- [3] 2007, SC/Tetra Version7, *User guide basics of CFD Analysis*
- [4] 2007, SC/Tetra Version7, *Solver reference*
- [5] 1995, Versteeg, H.K. and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Comp. Math. In app. Mech. And Eng.*, Vol.3, pp.268-289.
- [6] 2002, Park, C.W. and Lee, S.J., "Fluid Dynamic Study on the Improvement of Vacuum Cleaner Suction Nozzle Performance," *KSME*, pp.1826-1830.