

# 회전브러시가 장착된 진공청소기 흡입장치의 난류유동에 대한 수치해석

박 태 선

경북대학교 기계공학부

## NUMERICAL STUDY OF TURBULENT FLOW IN A INTAKE PART OF VACUUM CLEANER WITH ROLLING BRUSH

Tae Seon Park

Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

*Turbulent flows in a intake part of vacuum cleaner are studied by RANS simulations. The governing equations are solved by the SIMPLE algorithm based on the finite volume method of the unstructured grid system. The predicted results show that the suction performance is closely related to the variation of flow structure in the intake part. In order to investigate for the cleaning of bedclothes and carpet without sticking, several design changes are applied. The introduction of a solid cylinder in the intake part changes vortical structures significantly. Based on this result, a new design with spiral brushes is proposed. The design shows a good behavior for the suction performance and the flow control.*

**Key Words :** 진공청소기(Vacuum Cleaner), 흡입장치(Intake Part), 회전브러시(Rolling Brush), 흡입효율(Suction Efficiency)

### 1. 서 론

진공청소기의 흡입장치는 공기와 다양한 크기의 먼지가 고속으로 흡입되는 곳으로 유체역학적으로 매우 복잡한 구조를 가지고 있다. 또한 흡입력을 좋게 하기 위하여 흡입구는 작지만 먼지 흡입을 좋게 하기 위하여 넓은 접촉면적을 가지고 있는 경우가 일반적이다. 이러한 흡입장치의 형상은 청소기 본체에 각종 먼지가 수거되어야 하기 때문에 일정직경의 파이프 유도로 연결되어 있다. 따라서 1차 흡입구와 먼지수집을 위한 유도로 사이의 형상차이로 흡입장치의 연결부분에 다양한 3차원적인 유동구조가 존재한다[1]. 그러므로 이런 형상에 대한 유동분석은 전산유체역학적인 관점에서 도전적인 과제의 하나로 생각되어 질 수 있다. 참고문헌을 조사해 본 결과 진공청소기의 흡입장치에 대한 3차원 난류해석은 거의 찾아

보기 어려운 실정으로 본 연구결과가 진공청소기 흡입장치설계에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

보통 알러지 질환을 유발할 수 있는 진드기와 같은 미세벌레들은 카펫, 침구류 등에 많이 서식한다. 이런 벌레들을 일반가정에서 보유하고 있는 진공청소기로 제거하기 위해서는 카펫, 침구류 등에서 청소가 가능한 흡입장치로 바꾸어주어야 한다. Fig. 1에서 보면 두 종류의 흡입장치가 있는데 흡입장치 A의 경우 카펫이나 침구류 등을 청소하고자 할 때 그림처럼 달라붙어 입구가 막히는 현상이 발생하여 원활한 청소가 어려운 문제점이 있다. 흡입장치 B는 이러한 문제점을 해결하고자 흡입장치를 원통형태로 설계한 경우인데 흡입장치 A보다 입구가 막히는 현상은 현저히 감소하였지만 흡입력이 현저히 감소되는 문제점이 나타났다[1]. 이것은 카펫이나 침구류가 달라붙지 않기 위해 흡입력을 감소시키는데 설계의 초점이 맞추어져 청소성능이 감소된 결과이다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 여러 설계안에 대한 전산해석을 수행하고자 한다.

본 연구의 목적은 전산해석을 통하여 Fig. 1과 같은 진공청소기 흡입장치의 효율적인 형상설계를 결정하는데 있다. 이러한 목적을 위해 기존 흡입장치에 대한 3차원 난류유동 특

Received: March 6, 2012, Revised: May 9, 2012,

Accepted: May 14, 2012.

E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.2.058>

© KSCFE 2012

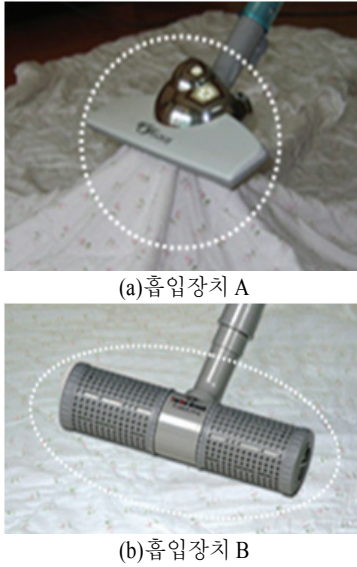


Fig. 1 Intake parts of vacuum cleaner

성을 파악하여 청소기의 효율성에 좋지 않은 영향을 주는 인자를 살펴보고자 한다. 비효율성을 야기하는 인자들을 제거하기 위하여 설계변경을 실시하고 변경된 형상에 대해 전산해석을 수행한다. 해석된 결과로부터 효율적인 흡입장치 형상을 결정하고자 한다.

## 2. 수치해석방법

비정상 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식, 그리고 난류모형에 따른 난류방정식이 사용되었다. Fluent[2]를 이용한 해석이기 때문에 자세한 수식은 생략하기로 한다. 형상의 복잡성으로 인해 비정렬격자계 기반의 유한체적법이 선택되었다.

Fig. 1의 흡입장치 B에 대한 예비해석을 통해 먼지의 이동 경로를 살펴보고, 효율을 증대시키기 위하여 변경된 형상에 대해 유동구조를 분석하게 된다. 난류모형은 표준  $k-\epsilon$  모델 [3], 압력-속도의 연계는 SIMPLE 알고리즘, 대류항차분법은 2차 정확도의 Second Order Upwind 등이 선택되었다. Fig. 2와 같이 경계조건은 먼지가 흡입되는 단면이 입구조건이고 흡입장치와 진공청소기가 연결되는 부분이 출구조건으로 설정되었다. 입구는 먼지흡수를 좋게 하기 위해 바닥면과 접촉이 이루어지는 곳에 중앙과 좌우로 설계되었으며 입구형상은 사각형 형태이다. 진공청소기 흡입장치에서 유동은 대기압과 부압 사이의 압력차이로 발생되기 때문에 입구/출구는 압력경계조건을 이용하였다. 입구와 출구사이의 압력차이는 청소기 작동

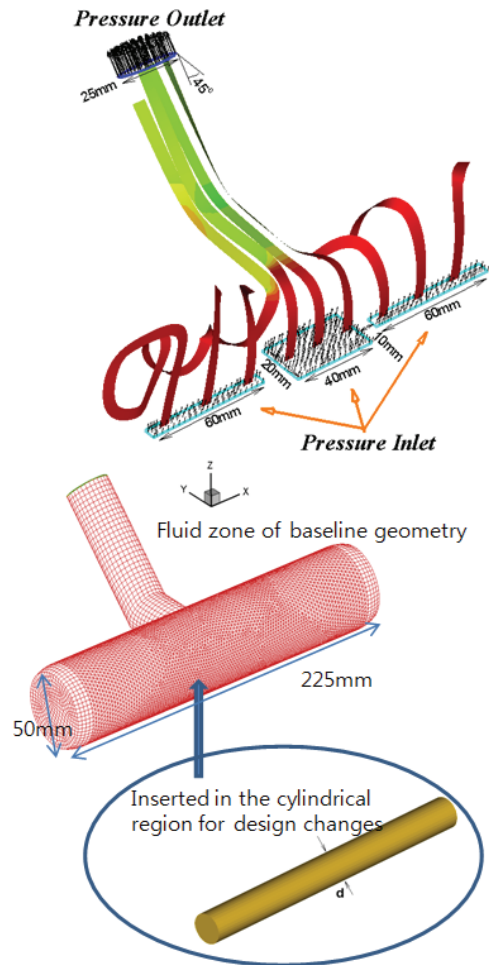


Fig. 2 Computational domain and grid system (The baseline geometry has the fluid zone without a inserted cylinder)

출력에 따라 조절이 되기 때문에 일정한 조건이 아닌 일정범위를 가지게 된다. 본 연구에서는 흡입장치에 대한 CFD 해석을 통하여 형상설계검토를 수행하는 것이 주목적이기 때문에 출구속도가 약 20 m/sec가 되는 일정조건을 선택하였다. 그 결과 입구에서 게이지 압력은 0 Pa이고 출구에서 압력은 -500 Pa로 설정하였다. 그럼에 나타난 원봉은 흡입장치의 효율성을 검토하기 위하여 형상변경을 위한 것이다. 즉 흡입장치 B에서 원봉에 해당되는 부피가 제거된 형태로 형상이 변경되었는데 원봉의 직경변화에 따른 유동구조 분석이 이루어졌다.

Fig. 3은 본 해석에 앞서 Fig. 2와 같은 형상에 대해 압력과 속도크기를 격자해상도에 따른 변화를 나타내었다. 입구에서 원봉을 지나 출구로 연결되는 파이프부분의 중심축을 따

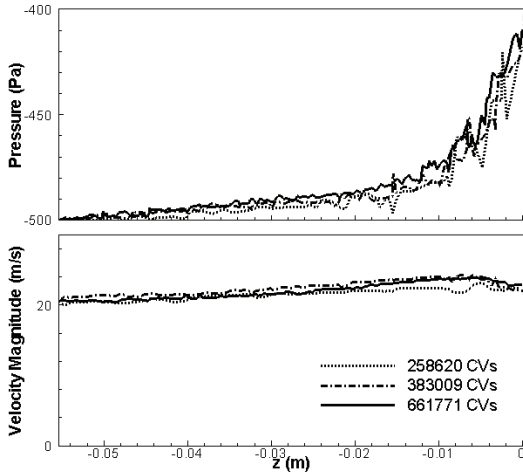


Fig. 3 Pressure and velocity magnitudes for different grid resolutions

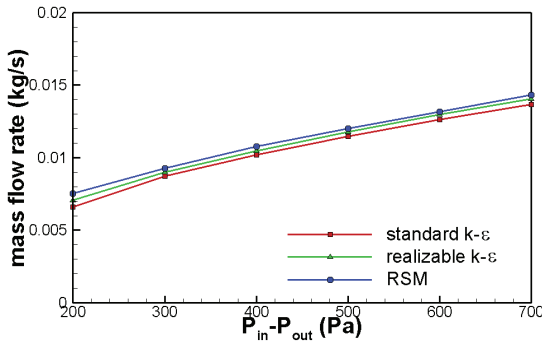


Fig. 4 Comparison of the predicted mass flow rate

라 얻어진 결과이다. 결과에서 보면 압력이 진동하는 거동을 보여주고 있는데 물리적인 현상이 아니고 Fluent[2]에서 압력 분포를 추출할 때 보간방법의 부정확성으로 발생한 문제점으로 생각된다. 전체적인 변화에서 커다란 차이를 보이고 있지 않고, 25만개 격자계와 38만개 격자계의 차이보다 38만개와 66만개의 차이가 작게 나타남을 알 수 있다. 이런 결과로부터 66만개 격자계의 해상도를 약간 높은 상태인 100만개 정도의 격자계이면 진공청소기 흡입장치 내부의 중요한 유동구조를 적절히 해석할 수 있을 것으로 판단하였다. 이후 설계변경을 검토하기 위한 모든 계산은 격자수 100만개 수준의 격자계에서 수행되었다.

진공청소기의 성능에서 가장 중요한 변수는 질량유량이기 때문에 Fig. 4에 입구와 출구사이의 압력차이를 변화시켜가면서 얻어진 출구면의 질량유량 변화를 나타내었다. 난류모델의 의존성을 살펴보기 위하여 3종류의 난류모델 즉 표준  $k-\epsilon$

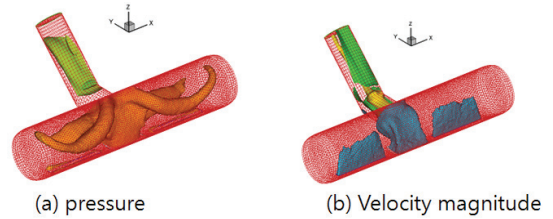


Fig. 5 Pressure and velocity magnitudes for the baseline geometry without a inserted cylinder

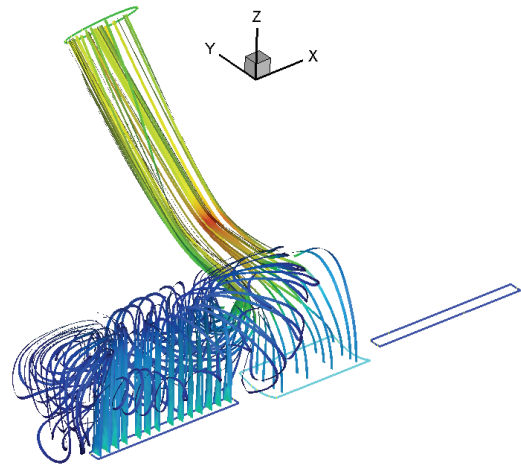


Fig. 6 Predicted pathlines for the baseline geometry without a inserted cylinder

[3], realizable  $k-\epsilon$ [4], 레이놀즈응력모형[5]을 이용하여 해석하였다. 그림에서 보면 질량유량의 변화는 압력구배의 차이에 따라서 거의 선형적으로 나타나고 있고 난류모델에 의한 차이는 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 원통내부에서는 재순환유동이 3차원적으로 존재하기 때문에 모델들의 결과가 매우 다르게 나타난다. 흡입장치 내부의 국부적인 난류성분에 의해서 흡입장치의 성능이 좌우되는 것이 아니기 때문에 평균유동의 변화만 살펴봐도 성능분석을 위한 결과를 충분히 얻을 수 있을 것으로 생각한다. 따라서 형상설계변화에 대한 유체역학적인 검토는 표준  $k-\epsilon$  모델[3]로 계산이 수행되었다.

### 3. 결과 및 토론

압력차이가 500 Pa로 주어진 경계조건에서 출구면에서의 평균속도( $U_b$ )는 약 20 m/sec이고 공기에서 작동되기 때문에 출구직경기준 레이놀즈수는 38,000이다. 이 조건은 특별한 의

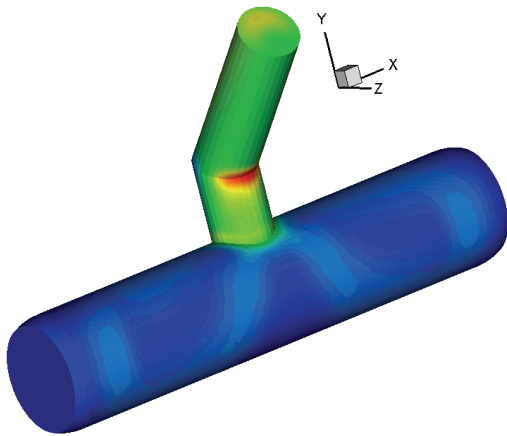


Fig. 7 Contours of velocity magnitude for the baseline geometry without a inserted cylinder

미는 없고 청소기의 출력을 높이면 변하는 조건이기 때문에 설계검토를 위해 적절히 선택된 값이다. 기본형상에 대한 압력분포와 속도크기가 일정한 면을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 흡입장치 B의 기본형상을 보면 바닥면과 접촉이 이루어지는 곳에 3개의 먼지 흡입구를 설치하였다. 이런 형태는 바닥면으로부터 먼지를 좀 더 많이 또한 효율적인 흡수를 목적으로 한다. 기본형상에 대한 해석결과를 보면 형상이 먼지흡입에 비효율적인 특징을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서 압력분포와 속도크기 변화를 살펴보면 고압부분이 원통형상 좌우로 퍼져있고 출구와 직선상에 있는 흡입구에서의 유동이 흡입유동의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 먼지의 이동경로를 살펴보기 위해 유적선을 Fig. 6에 나타내었다. 기하학적인 특징에 의해서 진공청소기 연결파이프를 중심으로 좌우에 복잡한 재순환유동이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 7에 벽면과 인접한 면에서 속도크기를 살펴보아도 중앙흡입유동이 강하고 3차원적인 유동구조를 확인할 수 있다. 결과적으로 좌우 흡입구의 상층부에서는 재순환유동이 발생되기 때문에 먼지 제거에는 비효율적인 공간으로 생각할 수 있다. 그렇지만 흡입장치는 넓은 면적에 대하여 흡입력이 영향을 미치는 것이 효율적이기 때문에 흡입구는 넓게 하는 것이 좋다. Fig. 5와 Fig. 6에서 속도크기, 압력분포, 유적선등에서 살펴보았듯이 진공청소기로 공기의 흡입은 대부분이 중앙흡입구에서 발생하고 있고 좌우에서는 흡입성능이 감소되고 있다. 이것은 중앙흡입구의 형상설계가 흡입효율에 가장 중요한 인자임을 보여주는 것이고 중앙흡입구에서 멀어질수록 흡입성능이 떨어지지 않도록 형상설계를 결정하는 것이 가장 중요한 설계조건으로 생각된다. 즉 중앙흡입구외에 좌우의 흡입구가 존재하는 설계형태에서 흡입성능의 형태를 좋게

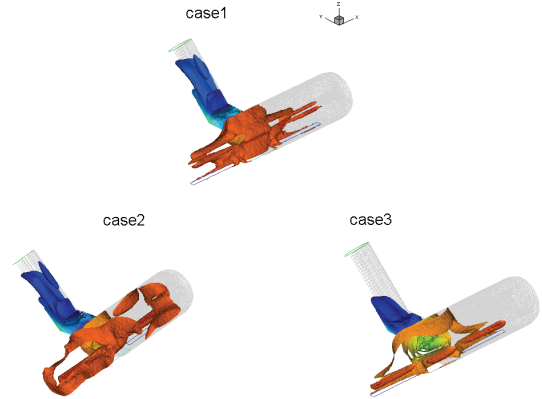


Fig. 8 Predicted pressure distributions for the modifications with a inserted cylinder

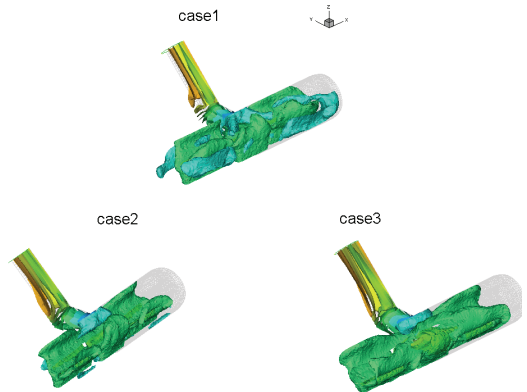


Fig. 9 Comparison of z-velocities for the modifications with a inserted cylinder

하는 방안을 찾을 필요가 있다.

흡입장치 B에 대한 난류유동 해석결과를 토대로 원통내부의 유동속도를 증가시키고 재순환유동을 감소시키기 위하여 흡입장치 원통형상 (직경, 50mm)에 원봉을 삽입하는 설계를 도입하였다(Fig. 2 참조). 원봉의 삽입은 원통내부의 불필요한 공간을 제거함으로써 질량보존법칙에 의해서 유속의 증대를 기대할 수 있다. 그렇지만 내부원봉의 삽입은 유동을 방해하는 성질로 인해 역압력구배 (adverse pressure gradient)가 존재할 수 있고 이는 압력손실로 작용하여 주어진 전체 차압에서 설정된 속도가 발생하지 않을 수 있다. 이러한 단점을 분석하기 위하여 내부원봉의 직경을 10 mm (case 1), 20 mm (case 2), 30 mm (case 3)로 설계변경하면서 해석을 수행하였다.

Fig. 8에 내부원봉의 직경변화에 따른 압력변화, Fig. 9에 바닥면에 수직인 방향인 z-방향 속도분포, Fig. 10에 유적선을 나타내었다. 흡입장치 내부에 존재했던 흡입성능을 감소시킬



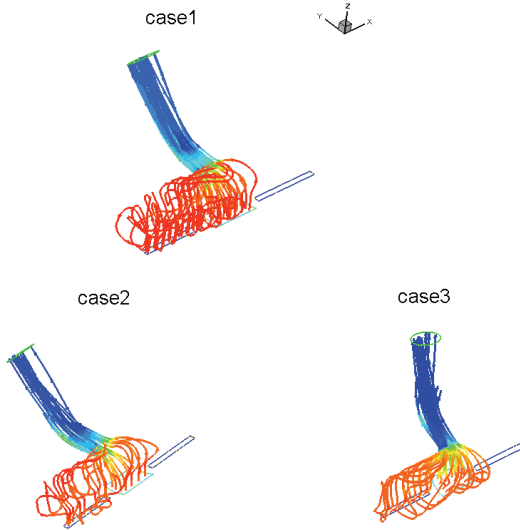


Fig. 10 Pathlines of suction flows for the modifications with a inserted cylinder

가능성이 있는 3차원 유동구조가 내부원봉의 영향에 의해서 매우 다르게 나타나고 있다. 압력 및 속도분포 또한 Fig. 4에서 보았던 출구와 직선상에 있는 흡입구에서의 유동이 지배적이지 않음을 알 수 있다. 내부원봉의 직경크기에 상관없이 좌우 흡입구에서도 z-방향 속도가 중앙흡입구와 유사한 크기를 보여주고 있다. 이것은 흡입장치 B의 원통공간에서 원봉에 해당되는 공간을 제거하면 중앙, 좌우 흡입구에서 비슷한 정도의 흡입성능을 얻을 수 있다는 것을 보여주는 것으로 생각된다. Fig. 10의 유적선을 보면 내부원봉의 영향에 의해서 중앙흡입구에 집중되었던 흡입유동이 양쪽 흡입구에서도 적절하게 발생되고 있음을 볼 수 있다. 내부원봉의 크기가 증가할수록 Fig. 6에서 나타났던 원통상층부에서의 3차원적인 재순환유동은 점진적으로 사라짐을 알 수 있다. 내부원봉이 없는 경우 흡입장치 내부의 재순환유동이 3차원적으로 복잡하게 발생하지만 내부원봉의 도입에 의해서 3차원적인 재순환 유동의 발생을 최소화할 수 있음을 보여주는 결과이다. 결과적으로 흡입장치의 원통형 공간에 역흐름이 최소화된 단순유동을 많은 영역에서 유도할 수 있는 설계방법으로 생각된다. 이러한 설계방법은 원통형상의 상층부 형상을 균일한 직경의 원봉이 아닌 중앙흡입구 양쪽의 형상을 중앙에서 멀어질수록 부피가 감소되는 형태로 할 경우 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

앞선 결과에서 흡입장치의 원통형 형상으로 인하여 진공청소기로 흡입되는 중앙흡입구 양쪽공간에 흡입성능을 저해하는 3차원 와유동구조가 발견되었다. 이런 와유동구조는 형상에 주로 기인하기 때문에 흡입장치 효율성을 향상시키기 위

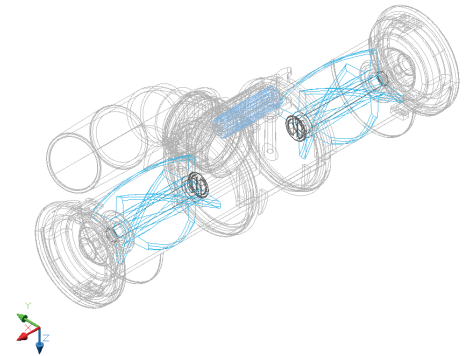


Fig. 11 New design A with spiral brushes substituting for the inserted cylinder

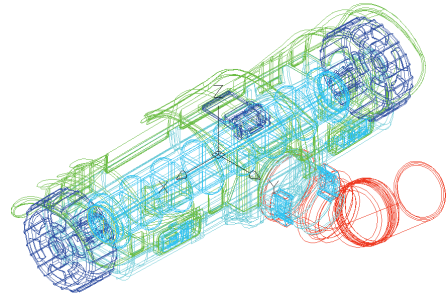


Fig. 12 New design B with a rolling brush substituting for the inserted cylinder

하여 원통공간 (직경 50 mm)에 원봉을 삽입하였다. 선택된 3가지 (삽입원봉의 직경: 10 mm, 20 mm, 30 mm) 경우에 대한 해석결과 30mm의 경우 3차원 와유동구조가 현저하게 감소하여, 원통공간의 최적화가 적절하게 이루어 질수 있음을 보여주었다. 이러한 해석결과를 바탕으로 Fig. 11과 Fig. 12와 같은 새로운 형태의 설계가 수행되었다. Fig. 11은 흡입장치 B 형상에 먼지이동에 도움을 주는 나선형 회전브러시를 삽입한 형태이고, Fig. 12는 회전브러시의 형상을 변경하고 유량조절을 위한 추가의 공기흡입구가 도입된 설계사양이다.

Fig. 13과 Fig. 14에서 수정된 형상에 대해 해석된 결과를 살펴보면 기존제품에서 중앙흡입구 양쪽공간에 존재하는 흡입성능을 저해하는 3차원 와유동구조가 수정설계안 A와 B의 경우 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 그렇지만 수정설계안 A의 경우 나선형 회전브러시의 도입으로 인한 기하학적인 특징에 의해서 중앙흡입구에서 흡입된 유체가 양쪽 방향으로 순환하는 유동이 발생하고 있다. 회전브러시가 안내깃의 역할을 하기 때문에 나타난 현상으로 이러한 특징은 중앙에서 흡입된 먼지가 혼합된 유체가 청소기로 흡입되는 성능이 저하될 수 있는 원인을 제공한다. 그렇지만 수정설계안 B의 경우

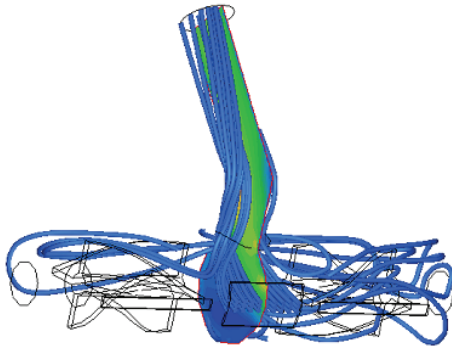


Fig. 13 Predicted pathlines (New design A)

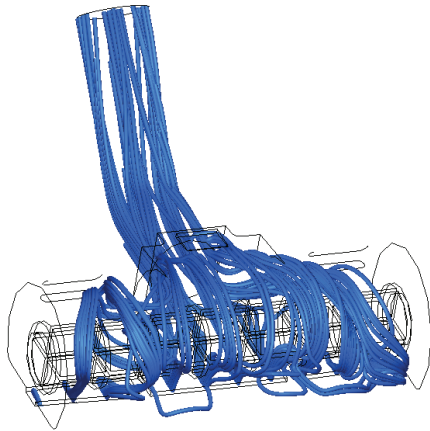


Fig. 14 Predicted pathlines (New design B)

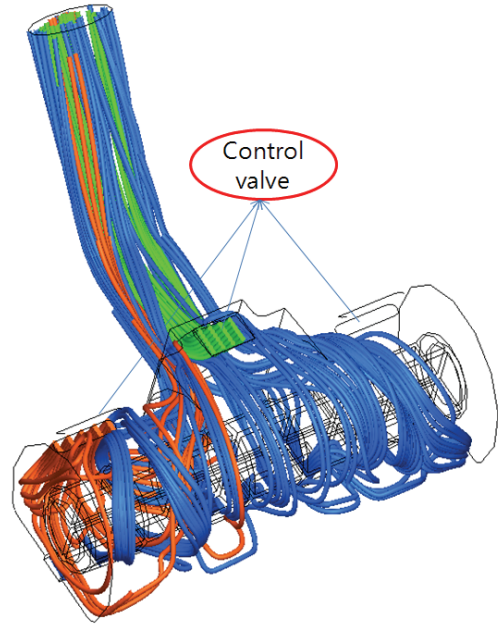


Fig. 15 Predicted pathlines with the opened control valves (New design B)

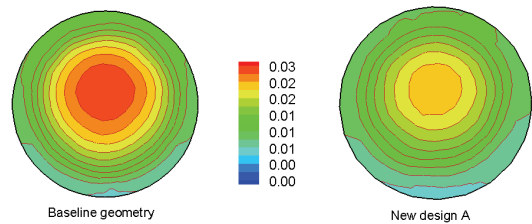


Fig. 16 Comparison of turbulent kinetic energy at outlet ( $P_{in} - P_{out} = 500Pa$ , standard  $k-\epsilon$ )

는 수정설계안 A와는 다른 유동구조를 보여주고 있다. 즉 수정설계안 A에서 나타났던 중앙흡입구에서 양쪽방향으로 순환하는 유동구조는 사라지고 원통형상을 따라서 회전하는 유동 형태를 보여주고 있다. 수정설계안 A보다 먼지의 이동경로가 단순해질 것으로 예상할 수 있다. 결과적으로 수정설계안 B는 먼지 흡입구에서 원통공간으로 들어온 유체가 원통공간에서 정체되지 않고 대부분 청소기로 흡입되는 특징을 가지고 있는 것으로 판단된다. Fig. 15는 유량조절을 위해 원통 상층부에 유량조절용 입구를 설치한 경우이다. 유량조절을 위한 공기흡입구에서는 유체가 밖으로 유출되지 않고 흡입되는 특징을 보여주고 있다. 이 유량조절용 입구가 열려 있을 경우 흡입력을 감소시킬 수 있고 카펫이나 침구류가 강한 흡입력에 의해서 달라붙는 문제점을 보안 할 수 있을 것으로 판단된다. 벨프개폐에 따라 5 m/sec의 조절능력을 보여주었다.

Fig. 16은 흡입장치 B와 수정설계안 B의 출구면에서 난류 운동에너지( $k/U_b^2$ )의 분포를 나타낸 것이다. 흡입장치 B의

경우가 큰 난류운동에너지를 나타내고 있는데 이것은 3차원 유동구조에 의한 유동변형률 증가로 난류에너지의 생성이 커진 것에 기인한다. 흡입장치 B, 수정설계안 A, 수정설계안 B에 대해서 Fig. 17에 입구와 출구사이의 압력차이에 대한 출구면의 질량유량 변화특징을 나타내었다. 여기서 수정설계안 B는 유량조절흡입구가 닫혀있는 상태의 결과이다. 흡입장치 B와 수정설계안 A는 거의 비슷한 흡입성능을 보여주고 있고 수정설계안 B는 50%이상의 흡입성능증가를 보여주고 있다. 이결과로부터 수정설계안 B의 형태가 원통형 형태의 흡입장치에서 흡입효율을 높일 수 있는 설계안으로 생각할 수 있다. 흡입장치 B(basic design)은 카펫이나 침구류가 달라붙지 않는 출력범위가 넓은 형상설계이다. 수정설계안 B에서 유량조절 흡입구를 열면 입구면적의 증가로 질량유량이 감소하게

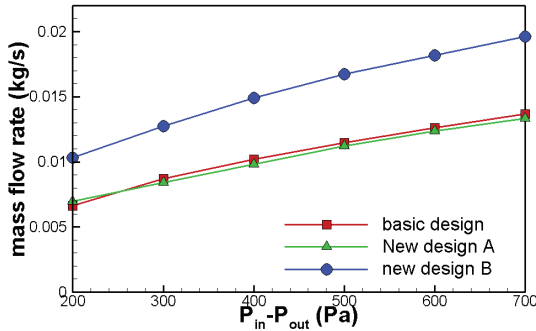


Fig. 17 Comparison of the predicted mass flow rate for different designs (standard  $k-\epsilon$ )

된다. 감소폭은 작동조건에 따라 달라지기 때문에 정량화하기 어렵지만 Fig. 17에서 흡입장치 B(basic design)의 질량유량 값으로 접근해갈 것이다. 따라서 카펫이나 침구류 청소시 달라붙지 않을 정도의 유량조절흡입구의 열린면적을 조절할 수 있을 것이고, 적절한 범위에서 청소가 가능한 설계안으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 진공청소기 흡입장치에 효율적인 형상설계를 결정하기 위하여 3차원 난류유동 해석을 수행하였다. 설계 목표는 일반청소기 흡입장치로는 청소하는데 어려움이 있는 카펫과 침구류에 효율적인 기능을 보여줄 수 있는 형상을 찾아주는데 있었다.

넓은 작동조건에서 카펫과 침구류에 달라붙지 않는 기본형상(흡입장치 B)은 3차원적인 와류동구조로 인해 흡입성능이 좋지 않게 나타났다. 이런 문제점을 해결하기 위해 원통내부의 공간을 원봉형태로 제거하는 방안을 고려하였다. 원봉의 직경이 증가할수록 기본형상에서 문제가 되었던 3차원 유동구조는 점진적으로 사라졌다. 이런 결과를 토대로 원통형 내부에 회전브러시가 있는 수정설계안 B를 생각하였다. 이 설계안은 50%이상의 흡입성능 증가가 나타났고 유량조절흡입구의 설치로 카펫과 침구류를 청소할 때 달라붙지 않은 영역을 확대할 수 있는 설계안으로 판단되었다.

#### 참고문헌

- [1] 2007, Park, T. S., "Flow Structures of Roller Brush in a Suction Device for Mites,"(in Korean) *Technical Innovation Project of Small and Medium Business Administration*.
- [2] Fluent Inc. ([www.fluentusers.com](http://www.fluentusers.com))
- [3] 1974, Launder, B. E. and Spalding, D. B., "the numerical computation of turbulent flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, pp.269-289.
- [4] 1995, Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., "A New  $k-\epsilon$  Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," *Computers & Fluids*, Vol.24(3), p.227-238.
- [5] 1975, Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W., "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech.*, Vol.68, p.537-566.