

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.8.711>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

실험계획법을 이용한 날개 없는 선풍기의 노즐 형상 최적 설계

정시영* · 이종수** · 윤재현**†

* 동양미래대학교 기계공학부, ** 연세대학교 기계공학부

Optimal Nozzle Design of Bladeless Fan Using Design of Experiments

Jeong Siyoung*, Lee Jongsoo** and Yoon Jaehyun**†

* School of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae Univ.,

** School of Mechanical and Engineering, Yonsei Univ.

(Received December 5, 2016 ; Revised April 10, 2017 ; Accepted April 11, 2017)

Key Words: Bladeless(날개 없는 선풍기), Coanda Effect(코안다 효과), Computational Fluid Dynamics(전산유체 해석), Design of Experiments(실험계획법), Analysis of Mean(평균분석)

초록: 날개 없는 선풍기는 특유의 형태로 인한 안전성과 청소의 간편함, 심미성으로 제품화에 성공하였다. 그러나 기존 선풍기에 비해 약한 바람과 모터에 의한 소음과 같은 단점은 구매력을 감소시키는 주요인이며, 따라서 모터의 속도를 증가시키지 않고 바람의 세기를 증가시키는 방안이 필요하다. 본 연구에서는 질량유량에 영향을 주는 인자, 수준을 선정하고 이를 실험계획법인 직교배열표를 이용하여 실험 점을 배치하였다. 질량유량의 값은 전산유체해석 프로그램인 ANSYS FLUENT를 사용하여 질량유량의 값을 확인하였으며, 평균분석을 통해 질량유량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 노즐 간격임을 확인할 수 있었다. 또한 예측 모델 식을 통해 얻은 질량유량의 값과 전산유체해석의 질량유량의 값이 가장 큰 값으로 일치하는 것을 나타내었다. 본 연구를 통해서 모터의 속도를 증가시키지 않더라도 형상 변화를 통해 질량유량의 증가시킴을 확인할 수 있었다.

Abstract: Bladeless fan is becoming increasingly popular owing to its advantages, such as improved safety, easy to clean, and attractive shape. However, many people are reluctant to purchase it because of several disadvantages, such as noise and moderate wind; therefore, research on how improve wind generation without increasing the motor speed is required. This study investigates the optimization of the shape of the nozzle and nearby surface using CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, ANSYS fluent. The results are analyzed by ANOM (analysis of mean) and interaction analysis; therefore this study suggests the variables of affecting Coanda effect and satisfy the govern equation, the conservation of momentum. The optimal combination was found through a predictive equation. In this study, factors and levels that affect the mass flow rate were selected and experimental points were arranged using the orthogonal array table. The value of the mass flow rate was confirmed by ANSYS fluent, which is a CFD program. Through the ANOM, it was confirmed that the nozzle distance is the most influential parameter affecting the mass flow rate. Furthermore, the mass flow rate obtained from the predictive equation and the mass flow rate from the CFD correspond to the largest values. Results from this study confirmed that the mass flow rate is increased by a change in the shape, even if the motor speed did not increase.

- 기호설명

 k : 교란운동에너지 ε : 소멸률 ρ : 유체 밀도 v : 유체 속도 p : 압력 μ : 유체 밀도 τ : 응력텐서 Q : 체적유량† Corresponding Author, yunjh00@yonsei.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

- m : 질량유량
 n : 면적에 수직한 단위벡터
 \bar{y} : 모든 결과 값의 평균
 \bar{y}_n : n번째 인자 결과 값의 평균

1. 서 론

날개 없는 선풍기는 선풍기가 발생시킨 유동을 주변 공기에 따라 움직이며, 풍량이 증폭되는 Air Multiplying System을 이용, 날개를 사용하지 않고 노즐과 공기가 따라 흐르는 벽면으로 이루어진 형태의 디자인이 가능하며, 그로 인해 얻은 심미성과 안정성을 장점으로 소비자에게 다가갔다. 그러나 날개 없는 선풍기는 기존 선풍기에 비해 높은 출력, 회전수의 모터를 사용하여야 하며, 이 때문에 특정 출력 이상에서 고주파의 소음이 발생하고, 풍량이 기존 선풍기보다 적다는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 상기 언급된 단점을 보완하기 위하여 상용유동해석코드(ANSYS FLUENT)를 통해 노즐 및 벽면 형상을 설계하고, 실험계획법을 통해 실험 점을 배치하였으며, 평균분석을 통해 날개 없는 선풍기의 유량에 영향을 주는 인자를 확인하고 유량을 최대화 할 수 있는 형상을 설계하고자 한다.

2. 연구 목표

2.1 기존 연구 현황

날개 없는 선풍기(Bladeless Fan)는 1980년 도쿄 시바우라전기(현 Toshiba社)에서 최초로 개발 및 특허출원(昭 56-167897)되었지만, 모터 소형화 실패 및 고가의 제품으로 인해 실용화에 실패한 채로 특허가 만료되었다. 이후 날개 없는 선풍기는 2009년 영국 Dyson社에서 새로이 특허를 출원,⁽¹⁾ 양산에 성공하였고, 국·내외 다수의 기업에서 제품화 되고 있다. 기존 선풍기와는 달리 날개를 사용하지 않는 특유의 구조로 인한 아름다운 디자인과, 날개에 의한 사고를 우려하는 소비자에게 안전성으로 어필하며 기존 선풍기보다 고가임에도 불구하고, 시장 경쟁력을 확보하고 있다.⁽²⁾ 가장 먼저 양산화에 성공한 Dyson社와 타사 간 특허권 침해건으로 분쟁 중이나, 원천 기술인 코안다 효과(Coanda Effect)를 이용한 유동의 방향 조절 및 주변 공기를 끌어온다는 개념은 Toshiba社의 특허에 있으므로 Fig. 1과 같이 세부 디자인을 바꾸는 수준에서 제품이 개발·판매되는 실정이다. 또한, 모



Fig. 1 Comparison of Toshiba Patent, Dyson Air Multiplier™, and Nova bladeless fan⁽¹⁾

터 등을 이용해 발생시킨 유동보다 더 큰 유동을 코안다 효과를 이용해 발생시키는 기구에 대한 발상은 Toshiba社의 특허 이전에도 여러 번 논의되는 기술이었다.^(3,4)

관련 연구 현황으로는, 환형 슬릿 노즐 형상에서 슬릿의 폭과 접선 방향 속도에 대한 연구와 날개 없는 선풍기와 일반 선풍기의 전력 소모량 및 풍량에 대한 비교, 노즐 폭에 대한 코안다 효과 발생에 대한 실험, 순환 제어 날개에 대한 코안다 효과의 발생에 대한 수치해석적 연구 등이 있다.⁽⁵⁻⁸⁾

2.2 연구의 필요성

날개 없는 선풍기는 특유의 형태로 인한 장점으로 상품화에 성공하였지만, 단점 또한 명확하다. 내부 공간에 고압을 형성하기 위해서 고풍력·고회전의 모터를 사용하여야 하며, 이로 인해 고주파의 소음이 발생한다. 또한, 이렇게 만들어진 바람이 기존 날개를 이용한 선풍기보다 적기 때문에 더욱 강한 바람을 원하는 소비자에게 외면받기도 한다. 따라서 본 연구에서는 기존 대비 풍량을 늘리거나 모터 회전수를 줄일 수 있는 최적 설계를 연구함으로써 상기한 단점을 보완하려 한다.

2.3 연구의 목표

앞서 서술한 날개 없는 선풍기의 주요 문제점은 풍량의 부족과 모터의 고속회전으로 인한 소음이었다. 이 두 단점 모두 모터의 출력이 일정할 때 사람이 받을 수 있는 풍량을 높이는 것으로 해결이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 일정한 질량유량의 공기를 유입, 노즐 및 주변 부품의 형상에 의해 증폭되는 질량유량을 측정하여, 각 설계 변수별 경향성을 및 최고의 유량을 낼 수 있는 형상을 도출하고자 한다.

2.4 날개 없는 선풍기의 원리

날개 없는 선풍기의 원리는 다음 Fig. 2에서 보



Fig. 2 Mechanism of bladeless fan⁽⁹⁾

여지듯이 5가지 Step으로 설명할 수 있다. Step 1은 주변의 공기를 흡입구로 흡입하는 입구 부분이며, Step 2는 Step 1의 입구에서 공기가 흡입될 수 있도록 임펠러의 회전으로 주변의 공기를 흡입시키면서 고리모형의 팬 내부로 공기를 내보내는 출구가 된다. Step 3은 팬 내부로 들어온 공기들이 팬의 노즐을 통해 공기가 분출되어 나가면서 뒤쪽에 있는 공기들을 빨아들인다. Step 4는 노즐에서 분출되는 공기와 뒤쪽의 공기가 합쳐져 팬의 앞쪽으로 나와 기존 앞에 있는 공기와 다시 한번 합쳐져 흐르게 된다. 또한 Step 3과 Step 4에서는 공기가 노즐의 작은 틈에서 공기가 분출되면서 코안다 효과가 발생하게 된다. 따라서 속도가 증가하면서 압력이 감소하게 되어 상대적으로 높은 압력의 공기들이 뒤쪽에서 진행 방향 쪽으로 합쳐지게 되어 전방의 공기와 다시 한번 합쳐져 분출하게 된다. Step 5는 입구와 출구의 전체 과정을 보여주게 된다.⁽⁹⁾

2.5 코안다 효과

날개 없는 선풍기는 코안다 효과로 작동 원리를 설명할 수 있다. 유체가 벽면 근처를 지날 때, 유체는 점성에 의해 Fig. 3과 같이 벽면 쪽으로 굽어 흐르게 된다. 유체를 굽게 하는 이 힘은 유체의 압력 강하로, 주변의 유체를 벽면 방향으로 끌어오도록 작용한다.

날개 없는 선풍기의 경우, 이 코안다 효과에 의해 발생한 낮은 압력은 주변 공기를 끌어와 더 큰 유동을 만든다. 이 유동은 전방으로 향하며 다시 점성에 의해 주변 공기를 끌고 나감으로써 본래 주입된 공기보다 많은 풍량을 사용자에게 전달하게 된다.^(10~12)

날개 없는 선풍기는 위 서술한 코안다 효과에

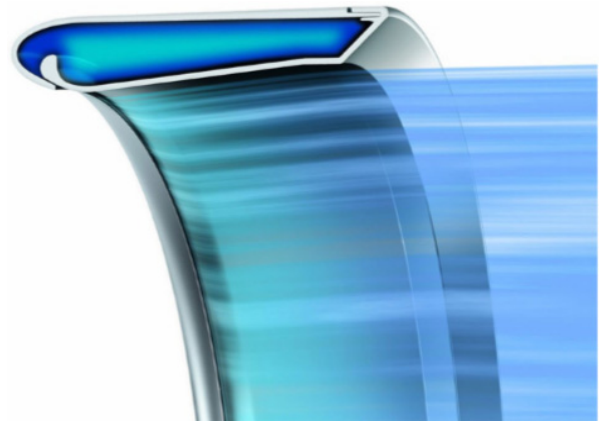


Fig. 3 Coanda Effect^(10,11)

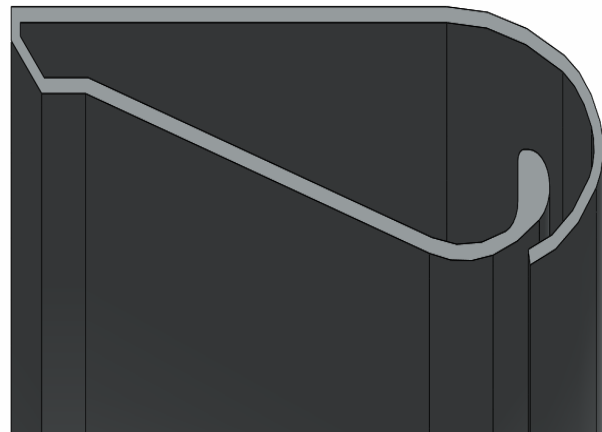


Fig. 4 Sectional of bladeless fan

의해 주변 공기를 끌어들이며 유량을 증폭시키지만, 이 또한 베르누이 방정식으로 대표되는 에너지 보존 법칙에 귀속된다. 따라서 본 연구에서는 노즐을 벗어나는 유동의 속도와, 코안다 효과가 발생할 수 있는 형상을 설계 변수로 하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 형상설계 및 유동해석 방법

3.1 형상 설계

유동 해석 시뮬레이션에 앞서, 날개 없는 선풍기의 기본적인 형상을 3차원 캐드 프로그램(Solid works)을 통해 설계하였으며, 날개 없는 선풍기의 단면 형상은 Fig. 4와 같다. 형상은 Dyston社의 특허자료의 도면을 참고하여, 날개 없는 선풍기의 치수는 14인치로 선정하였으며, 코안다 효과에 영향을 주는 영향 인자 4가지를 선정하여 설계 변수로 선정하였다.^(12,13) 선정된 4가지 변수는 베르누이 방정식에 의해 흡입된 공기가 나가는 노즐 간

Table 1 Range of each factor

	Factor A (mm)	Factor B (°)	Factor C (mm)	Factor D (mm)
Level 1	1	13	4.2	8.8
Level 2	1.5	15	7.2	9.8
Level 3	2	17	10.2	10.8

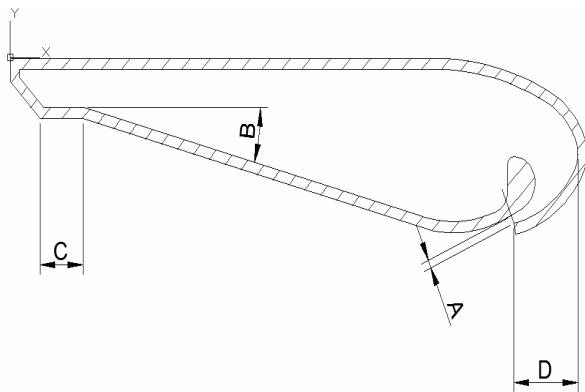


Fig. 5 2D CAD drawing and factor of bladeless fan

격(A)과 내부 벽 간격(D), 코안다 효과에 의해 발생하는 압력을 낮출 수 있도록 하는 날개 없는 선풍기의 안쪽 면의 디퓨저 각도(B)와 가이드 부 길이(C)로 선정하였으며, 3차원 캐드를 통해 모델링한 팬의 단면 형상은 Fig. 4에 나타내었으며, 팬 형상의 도면 및 변수는 Fig. 5, 변수의 수준은 Table 1에 나타내었다.

3.2 실험계획법

실험계획법이란 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가에 대하여 실험을 계획하는 것이다.⁽¹⁴⁾

본 연구에서는 실험횟수를 최소화할 수 있는 실험계획법인 직교 배열표를 사용하였다. 4인자 3수준의 직교배열 표의 경우 인자 수준의 모든 조합의 경우 81회의 실험 횟수를 9회 줄여 주는 장점이 있다.

3.3 유동해석 유동장 격자 및 수치해석 모델

유동해석을 위하여 유동장은 가로 0.6m, 세로 0.6m의 정사각형 형태로 유동량을 확인 하기 위하여 사용자가 선풍기의 바람을 맞는 거리인 1m로 몸체 기준으로 각각 1m로 생성하였으며, 유동장의 치수는 Fig. 6에 나타내었다. 기존 날개 없는 선풍기의 공기 흡입부분을 단순화 하여 아랫부분에 공

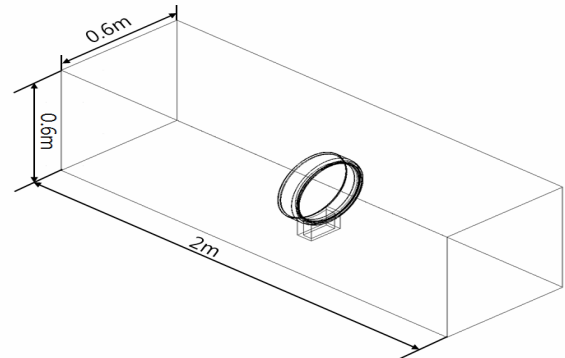
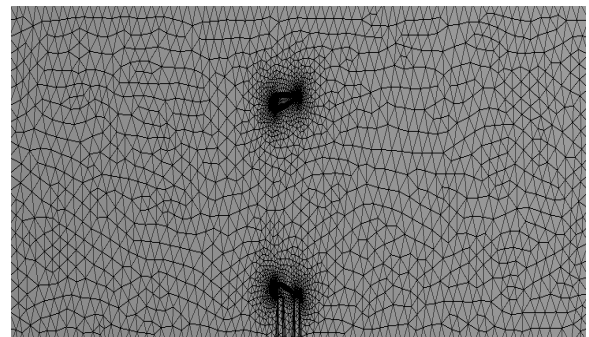
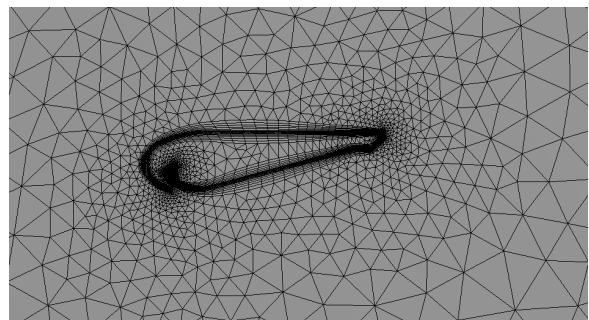


Fig. 6 Size of fluid domain



(a) Mesh generation of fluid domain



(b) Inflation mesh of fanbladless surface

Fig. 7 CFD mesh generation

기가 들어갈 수 있는 부분을 입구 조건으로 부여하였으며, 유한한 공간을 묘사하기 위하여 입구 부분을 제외한 6면체에는 출구 조건을 부여하였다. 또한, 날개 없는 선풍기의 몸체는 강제로 선정하였다.

해석을 위해 격자는 Fig. 7(a)와 같이 삼각형 격자로 생성하였으며 유체가 날개 없는 선풍기 외부로 나가는 노즐부에는 노즐부 최소 간격 1mm 이하의 격자로 조밀한 격자를 설정하였다.

날개 없는 선풍기의 내부와 외부의 격자를 설정하기 위하여 격자 크기, 인플레이션 층의 개수, 인

Table 2 Grid case study

	Grid size	Inflation	
		Number of layer	Growth rate
1	5.2e-4	3	1.1
		5	1.2
		7	1.3
2	1.5e-4	3	1.1
		5	1.2
		7	1.3
3	0.5e-4	3	1.1
		5	1.2
		7	1.3

플레이션 성장률을 조정하여 선정하였다. 전산유체해석에서 점성 계층의 해석을 하고자 하는 경우 인플레이션 조건을 설정한다. 본 연구의 대상인 날개 없는 선풍기는 코안다 효과에 의해 발생하는 압력을 통해 주변의 공기를 끌어와 큰 유동 흐름을 만들게 되므로 보다 정확한 수렴을 위해 인플레이션 조건을 주었다. 인플레이션 층의 수는 Fig. 7(b)에서 보이듯이 벽면의 수직 방향으로 격자를 생성하여 경계 부분의 격자 조밀도를 증가시켜, 벽면의 유동 흐름의 계산 수렴성을 높이며, 성장률은 벽면에서부터 인접 격자크기 사이에서의 비율을 정의 한다. 격자 크기, 인플레이션 층의 개수, 성장률은 Table 2와 같이 변화시켜 계산한 결과 2와 3 사이의 질량유량의 계산 결과가 2% 미만의 결과 값을 보이며, 인플레이션 층의 변화에도 질량유량의 변화는 나타나지 않았다. 외부 유동장의 격자는 유동 흐름의 계산에 영향이 낮음으로 날개 없는 선풍기의 강체에서 멀어질수록 격자의 크기는 점점 커지는 격자로 설정하여, 2의 조건으로 인플레이션의 층의 수는 5, 성장율 1.2로 총 4,301,098개의 격자가 생성되었다.

격자 생성은 날개없는 선풍기의 내부 최소 간격을 기준으로 생성하였으며, 질량유량의 값이 변화가 없는 최소 격자 조건을 선정하여, 해석 시간을 단축할 수 있었다.

본 연구에서 사용되는 유체는 일반적인 대기로써, 온도 변화가 거의 없고 노즐 주변부에서 난류가 핵심적으로 작용할 것으로 판단되어 k-ε 점성 모델을 사용하였다.

점성에 의한 주변 공기의 끌려옴은 식 (1) 운동량 보존 법칙을 만족하는 형태로 시뮬레이션이 가능하게 된다. 이때, 점성에 의한 영향은 식 (2)에서 발생한다.⁽¹³⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho\bar{q} + \bar{f} \quad (1)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla\bar{v} + \nabla\bar{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I \right] \quad (2)$$

3.4 유동해석 초기 조건

날개 없는 선풍기의 유동해석을 위하여 상용해석 프로그램인 ANSYS FLUENT를 사용하였다. 초기 임펠러를 통해 흡입되어 오는 공기량을 묘사하기 위하여 입구 부분에 속도 조건으로 일반적인 날개 없는 선풍기의 흡입 유속 4m/s로 하였으며, 본 연구의 목적은 동일한 유속에 의해 형상이 변함에 따라 동일한 구간에서 질량유량의 변화를 확인하는 것으로 내부의 유동 저항력은 고려하지 않았다. 출구 부분은 대기압 조건으로 설정하였다.

난류 조건으로는 밀도 1.225kg/m³, 점성 1.7894e⁻⁵ kg/ms, 난류 강도 5%로 설정하였다. 본 연구의 대상은 날개 없는 선풍기의 질량유량에 영향을 주는 인자들을 변화시킴으로써 질량유량의 값을 확인하는 것이 본 연구의 목적으로 비정상상태가 아닌 정상상태로 해석을 진행하였다. 실험계획법의 총 9회의 실험 모두 동일한 조건으로 날개 없는 선풍기의 질량유량의 값을 도출하고자 하였다.

4. 유동해석 결과 및 데이터 분석

4.1 유동해석 결과

날개 없는 선풍기의 형상 변화에 따라 동일한 공기량이 유입되었을 때, 사용자가 선풍기 바람을 맞는 1m 지점에서 질량 유량의 값을 확인하기 위하여 전산유체 해석을 시행하였다.

날개 없는 선풍기의 형상 설계를 통하여 전산유체 해석을 통해 질량 유량을 구하는 식은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = \int_s \rho(v \cdot n) dA = \int_s \rho v_n dA \quad (3)$$

만일 밀도가 일정하다면 적분 밖으로 나올 수 있으며, 그 결과는 정비례의 식이 된다. 본 연구에서는 밀도의 변화는 없다고 가정하였기 때문에 질량 유량의 식을 다시 표현하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \int_s (v \cdot n) dA = \int_s v_n dA \quad (4)$$

$$\dot{m} = \rho Q \quad (5)$$

Table 3 CFD based mass flow rate calculation in orthogonal array table

	A	B	C	D	Result (kg/s)
1	1	1	1	1	16.10e ⁻²
2	1	2	2	2	12.33e ⁻²
3	1	3	3	3	15.32e ⁻²
4	2	1	2	3	12.10e ⁻²
5	2	2	3	1	11.62e ⁻²
6	2	3	1	2	12.90e ⁻²
7	3	1	3	2	8.86e ⁻²
8	3	2	1	3	10.29e ⁻²
9	3	3	2	1	9.83e ⁻²

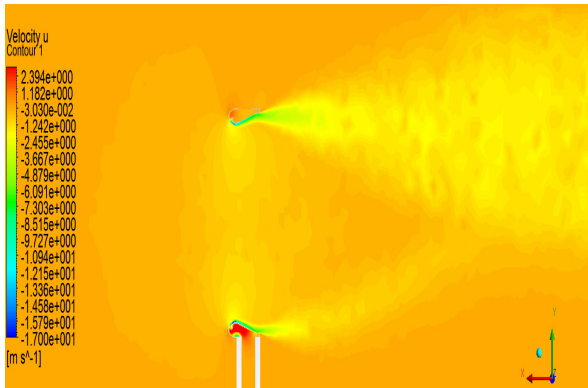


Fig. 8 Velocity distribution of maximum value (DOE #1 in Table 2)

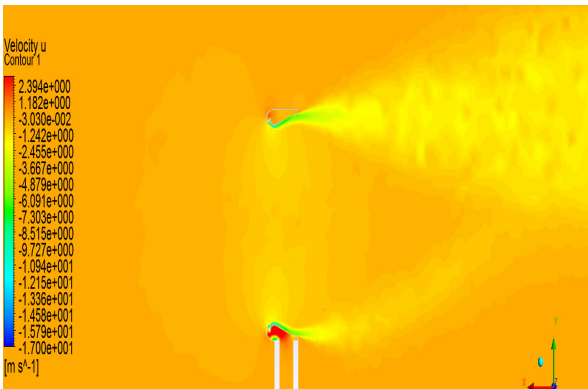


Fig. 9 Velocity distribution of minimum value (DOE #7 in Table 2)

직교배열표를 이용하여 배치한 실험 점 9회의 전산유체해석을 통해 질량유량의 값을 확인할 수 있었다.⁽¹³⁾ 9회의 실험에 대한 질량유량의 결과 값은 Table 3에 나타내었으며, Fig. 8, Fig. 9는 직교배열표의 최대 질량유량의 값과 최소 질량유량의 값을 나타내는 속도 분포를 나타낸다.

최댓값을 나타내는 Fig. 8과 최솟값을 나타내는

Table 4 Factor effects from ANOM

Factor	Level	Mass flow rate (kg/s)
A	1	14.58e ⁻²
	2	12.21e ⁻²
	3	9.66e ⁻²
B	1	12.35e ⁻²
	2	11.41e ⁻²
	3	12.69e ⁻²
C	1	13.10e ⁻²
	2	11.42e ⁻²
	3	11.93e ⁻²
D	1	12.52e ⁻²
	2	11.36e ⁻²
	3	12.57e ⁻²

Fig. 9의 속도 분포를 비교해보면, 모델 주변의 공기가 코안다 효과에 의한 공기의 유입이 됨을 확인할 수 있으며, 질량유량의 차이는 모델의 중앙의 속도 분포에서 공기 유입의 차이가 있음을 보인다. 또한 베르누이 원리에 의해 날개 없는 선풍기의 중앙에 흐르는 유속에 따라 압력이 낮아지게 되고, 코안다 효과가 발생하게 된다. 이에 따라 질량유량의 변화가 생기게 되는 것으로 보여진다.

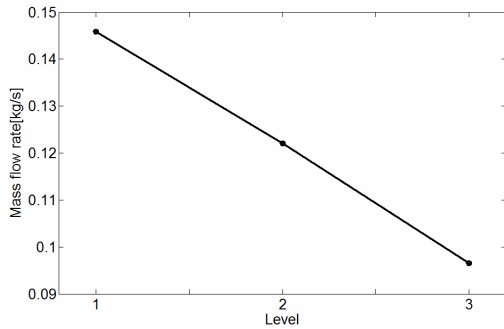
4.2 평균분석

본 연구에서는 날개 없는 선풍기의 팬의 형상 변화에 따른 성능을 확인하고자 하였다. 실험계획법의 직교배열표를 통해 각 인자의 영향도를 규명하기 위하여 평균 분석법을 사용하였다.⁽¹⁵⁾ 평균 분석은 설계변수의 각 수준별 응답함수의 평균값을 구하여 주어진 시스템을 분석하는 기법으로 주요 인자 판별, 인자의 최적수준 조합 도출, 시스템의 경향 파악 등에 사용된다. 본 연구에서는 평균 분석을 통해 주요 인자를 판별하였으며, Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다.

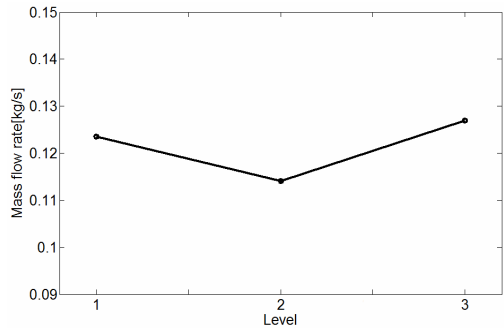
평균 분석을 나타내는 Fig. 10에서 날개 없는 선풍기의 성능에 영향을 가장 많이 받는 인자는 노즐 간격으로 보인다. 그 외의 인자들도 성능에 영향을 주지만, 3개의 수준에서 비교적 작은 영향을 가지는 것으로 보인다. 이러한 분석을 통해서 인자의 최적 수준 조합을 예측모델 식을 통해 얻을 수 있었다.

$$\bar{y} = \frac{(A_1 + A_2 + A_3 \dots A_N)}{N} \tag{6}$$

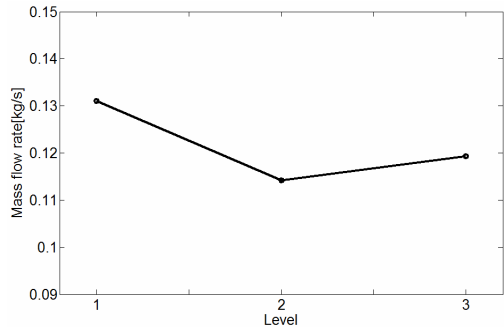
$$y_{predicted} = \bar{y} + (\bar{y}_A - \bar{y}) + (\bar{y}_B - \bar{y}) + (\bar{y}_C - \bar{y}) + \dots \tag{7}$$



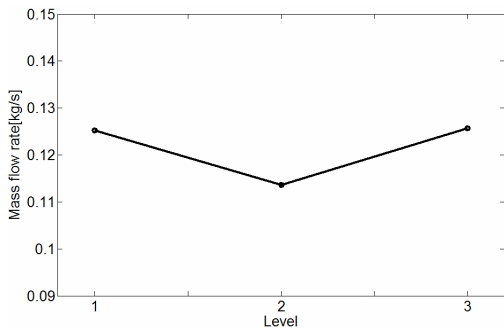
(a) Factor A



(b) Factor B



(c) Factor C



(d) Factor D

Fig. 10 Factor effects

식 (6)은 Table 4에 대한 모든 질량유량 값의 평균값을 나타내며, 식 (14)는 최적인자 배열에 대한 값을 확인할 수 있는 식으로 각 인자의 최대 응답을 나타내는 수준의 값에 대한 관계식으로 표현된다. 최적인자 배열이전의 값은 Table 1에서 A-1, B-

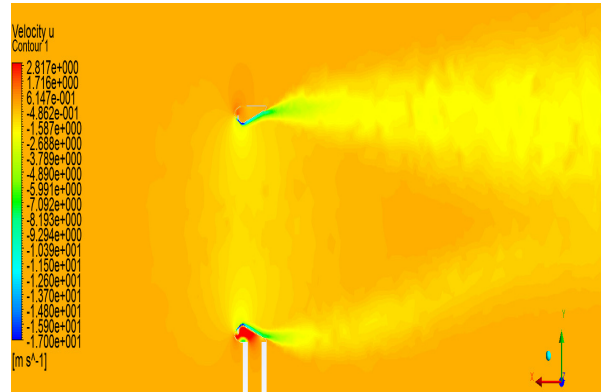


Fig. 11 Velocity distribution of optimal value

1, C-1, D-1의 인자 수준으로 조합된 형상이 최대 성능을 나타냄을 보였다. 최적 수준 조합을 도출하기 위해 평균분석을 통해 예측모델 식을 사용하였으며, 예측모델 식을 통해 얻은 최적 인자 수준은 A-1, B-3, C-1, D-3로 나타났다. 여기서 얻은 최적 인자 조합을 다시 모델링 하여 컴퓨터 전산유체 해석을 통해 검증하였으며, 예측모델 식을 통해 얻은 질량유량의 값은 $16.48e^2\text{kg/s}$, 컴퓨터 전산유체 해석을 통해 얻어진 값은 $16.93e^2\text{kg/s}$ 로 두 값이 유사함을 확인할 수 있었다. 최적의 조합의 유동 흐름의 속도 분포는 Fig. 11에 나타내었으며, 코안다 효과에 의한 공기 유입이 많은 것을 확인할 수 있었다.

4.3 교호작용 분석

교호작용이란 2개 이상의 설계 파라미터의 특정한 수준 조합에서 일어나는 효과를 교호작용이라 한다. 즉, 설계 파라미터들이 독립적으로 반응에 영향을 미치지 않고, 서로 종속적으로 영향을 주는 것을 말한다. 인자 간의 교호작용은 Fig. 12에 나타내었으며, 질량 유량에 영향이 가장 큰 노즐 간격 변화에 대한 인자 간의 교호작용을 표현하였다. Fig. 12(a), (b)는 노즐 간격 변화에 디퓨저 각도와 가이드 부 길이 변화에 교호작용이 나타나지 않음을 보인다. 반면에 Fig. 12(c)는 내부 벽 간격과의 교호작용을 나타낸 것으로 노즐간격 변화에 영향을 주는 것으로 보인다. 이는 Table 1에서 실험점 1의 A-1, B-1, C-1, D-1의 조합에서 모든 변수의 파라미터들이 가장 작은 조건에서 큰 질량유량을 보임에도 최적 조합에서는 A-1, B-3, C-1, D-3으로 가장 큰 질량유량이 나타남을 보이고 있다. 이는 Fig. 12(c)에서와 같이 노즐 간격 변화에 따라 내부 벽의 변수에 영향을 주는 것으로 보이며, Fig. 10의 결과의 타당성을 보인다.

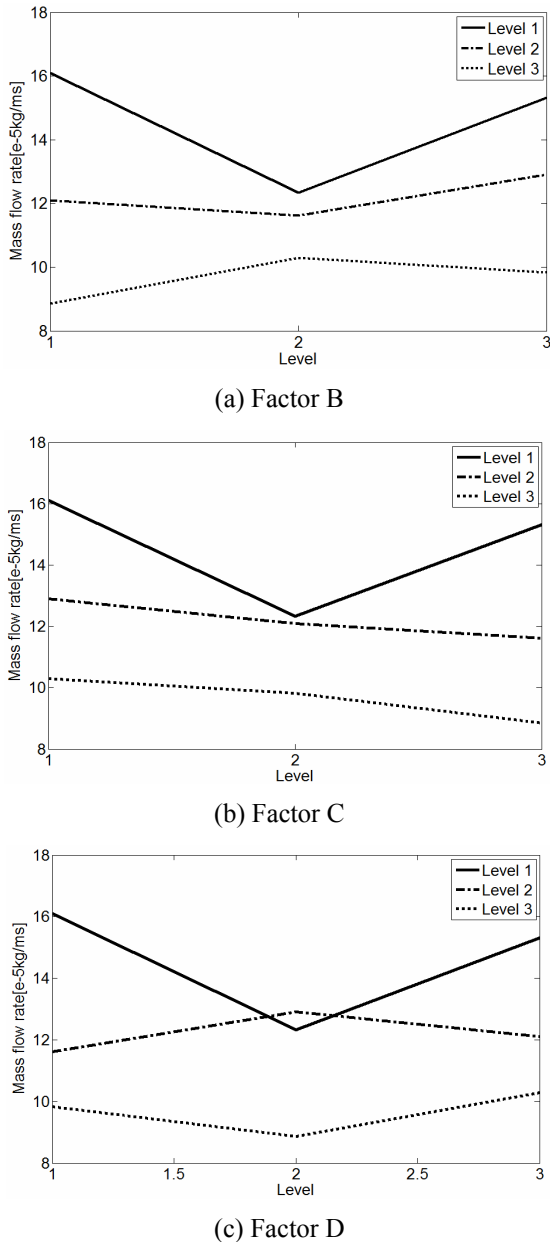


Fig. 12 Factor interaction with factor A

5. 결론

본 연구에서는 날개 없는 선풍기의 팬의 형상을 변화하여 최적의 성능 즉, 질량유량의 최대화를 수행하였다. 전산유체역학 상용 코드인 ANSYS FLUENT를 사용하였으며, 3차원 캐드 프로그램인 Solid work를 통해 형상을 설계하였다. 최적의 성능을 낼 수 있는 팬의 형상을 설계하기 위하여 질량유량에 영향을 주는 4개의 인자를 선정하였고, 각각 3수준으로 선정하여, 직교배열표를 통해 실험 점을 배치하였다. 실험 점들의 전산유체해석 결과를 평균분석을 통해 임펠러를 통해 일정하게

흡입된 공기가 나가는 노즐의 간격이 질량유량에 가장 큰 영향을 주는 인자로 평균분석을 통해 확인할 수 있었다. 평균 분석을 통해 최적 인자 조합인 A-1, B-3, C-1, D-3을 예측모델 식을 통해 질량유량이 최대화임을 확인할 수 있었으며, 전산유체 해석 검증 결과 예측모델의 값과 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 질량유량 변화는 베르누이 원리와 코안다 효과에 의해 날개 없는 선풍기의 벽면에 발생하는 압력 변화에 따라 질량유량의 변화를 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 날개 없는 선풍기의 고출력, 고회전의 고성능 모터를 사용하지 않더라도 팬의 설계 변경만으로도 선풍기의 유량의 변화를 확인할 수 있었으며, 기존 선풍기의 바람 세기에 못 미치던 수치를 해결할 수 있는 가능성을 제기하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20163030024420)

참고문헌

(References)

- (1) Gammackm, P. D., 2011, "Fan Assembly," US2012/0082561A1.
- (2) Thilmany, J., 2011, "The Bladeless Fan," *Mechanical Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 16~16.
- (3) Coanda, H., 1962, "Device for Imparting Movement to Gases," U.S. Patent No. 3,047,208.
- (4) Morcaski, Z., 1974, "Fluid Device Using Coanda Effect," Patent No. 3,795,367.
- (5) Cho, W. B., Baek, S. C. and Kim, H. D., 2004, "The Effect of Annular Slit on a Compressible Spiral Jet Flow," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 2029~2034.
- (6) Chung, S. T., Yi, H. C., Nam, T. J., Lee, Y. A., Jeon, E. J. and Park, J. W., 2012, "The Study of Optimization Using Method by Comparison and Analysis the Diversity Pans," *Korean Society for Precision Engineering*, pp. 1291~1292.
- (7) Lee, D., Lee, S., Kim, B. and Kwon, S., 2007, "A Study on Jet Characteristic using a Coanda Effect in a Constant Expansion Rate Nozzle," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 706~713.
- (8) Park, J. j. and Lee, S. H., 2000, "A Numerical Study on a Circulation Control Foil using Coanda Effect," *The Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, No. 2, pp. 70~76.

- (9) Jafari, H., Afshin, H., Farhanieh, B. and Bozorgasareh, H., 2015, "Numerical Aerodynamic Evaluation and Noise Investigation of a Bladeless Fan," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 1, pp. 133~142.
- (10) Lasse, C. H. and Simon, H. T., 2014, "Flow Characteristics of the Dyson Air Multiplier," *Computational Fluid Dynamics using Ansys Fluent*, ver. 14.5.7.
- (11) Panitz, T. and Wasan, D. T., 1972, "Flow Attachment to Solid Surfaces: The Coanda Effect," *AIChE Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 51~57.
- (12) Yoon, J. and Lee, J., 2015, "A Study on Nozzle Shape Design of Bladeless Fan Using CFD," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 409~410.
- (13) Fitton, N. G., Nicolas, F. and Gammack, P. D., 2011, "Fan," US8348629 B2.
- (14) Yoon, J. and Lee, J., 2014, "Optimal Shape Design of Quad-Copter Blade using Design of Experiments," *Korean Society of Precision Engineering*, pp. 89~89.
- (15) Yoon, J. and Lee, J., 2015 "Approximate Multi-Objective Optimization of a Quadcopter through Proportional-Integral-Derivative Control," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 39, No. 7, pp. 673~679.