

임펠러 스플리터 날개 최적 설계를 통한 무선진공청소기 팬 모터 단품의 공력 소음 저감

Aerodynamic noise reduction of fan motor unit of cordless vacuum cleaner by optimal designing of splitter blades for impeller

김건우,¹ 유서윤,² 정철웅,^{2†} 서성진,³ 장철민,³ 설한신⁴

(Kunwoo Kim,¹ Seo-Yoon Ryu,² Cheolung Cheong,^{2†} Seongjin Seo,³ Cheolmin Jang³, and Hanshin Seol⁴)

¹부산대학교 스마트융합공학부, ²부산대학교 기계공학부, ³LG 전자, ⁴선박해양플랜트 연구소

(Received October 7, 2020; accepted November 12, 2020)

초 록: 본 논문에서는 무선진공청소기용 팬 모터 단품으로부터 방사되는 공력소음을 저감하기 위하여 팬 모터 단품 내부의 기존 임펠러에 스플리터 날개를 설계하였다. 우선, 팬 모터 단품, 특히 임펠러의 유동장을 분석하기 위하여 전산 유체역학 기법을 사용하여 비정상, 비압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 수치적으로 해석하였다. 예측한 유동장 결과를 입력값으로 Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H) 적분 방정식을 풀어 임펠러로부터 방사되는 소음을 수치적으로 예측하였다. 예측한 음압스펙트럼과 측정값의 비교를 통하여 수치해석방법의 유효성을 검증하였다. 예측한 유동장 결과에 대한 추가 분석을 통하여 임펠러 날개 사이에서 강한 와류가 형성되는 것을 확인하였다. 와류는 유동에는 손실로 소음에는 소음원으로 작용하기 때문에 기존 임펠러에 스플리터 형상을 추가 설계하여 와류를 억제하고자 하였다. 스플리터의 길이와 위치를 설계 인자로 선정하였으며, 다구찌 기법을 사용하여 각각의 설계 인자가 공력소음에 미치는 영향도를 살펴보았다. 이 결과로부터 최소소음을 나타내는 스플리터의 최적 위치와 길이를 결정하였다. 최종 선정된 설계안에 대한 추가 해석을 통하여 소음성능이 개선됨을 확인 하였다.

핵심용어: 무선진공청소기, 공력소음, 임펠러, 스플리터, 복합전산공력음향학

ABSTRACT: In this study, noise radiated from a high-speed fan-motor unit for a cordless vacuum cleaner is reduced by designing splitter blades on the existing impeller. First of all, in order to investigate the flow field through a fan-motor unit, especially impeller, the unsteady incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations are numerically solved by using computational fluid dynamic technique. With predicted flow field results as input, the Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) integral equation is solved to predict aerodynamic noise radiated from the impeller. The validity of the numerical methods is confirmed by comparing the predicted sound pressure spectrum with the measured one. Further analysis of the predicted flow field shows that the strong vortex is formed between the impeller blades. As the vortex induces the loss of the flow field and acts as an aerodynamic noise source, supplementary splitter blades are designed to the existing impeller to suppress the identified vortex. The length and position of splitter are selected as design factors and the effect of each design factor on aerodynamic noise is numerically analyzed by using the Taguchi method. From this results, the optimum location and length of splitter for minimum radiated noise is determined. The finally selected design shows lower noise than the existing one.

Keywords: Cordless vacuum cleaner, Aerodynamic noise, Impeller, Splitter, Hybrid computational aeroacoustics

PACS numbers: 43.28.Ra, 43.28.Py

†Corresponding author: Cheolung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63 beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7640)



Copyright©2020 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

제품의 기능성과 함께 사용자 편의를 고려한 가전 제품군에 대한 관심이 증가함에 따라 무선진공청소기에 대한 수요가 급증하고 있다. 무선진공청소기의 유량 성능과 소음 성능은 각각 기능성과 편의성을 대표하는 소비자의 중요한 구매지표이기 때문에 관련 제조업체에서는 고성능, 저소음 팬을 개발하여 무선진공청소기의 성능개선에 큰 노력을 기울이고 있다. 팬은 유입되는 유동과 토출되는 유동의 상대적인 각도에 따라 크게 원심팬, 축류팬, 사류팬(mixed-flow fan)으로 분류할 수 있다. 원심팬은 고압 영역에서 축류팬은 저압 영역에서 주로 사용된다. 무선진공청소기의 경우 고압, 고유량 특성으로 인하여 원심팬과 축류팬의 특성을 모두 지닌 사류팬을 많이 사용하고 있다.

Lee *et al.*^[1]은 가정용 냉장고의 원심팬에서 발생하는 내부 공력소음을 예측하기 위하여 복합전산공력 음향학(Hybrid Computational AeroAcoustics, HCAA) 방법을 사용하여 팬의 대표적인 순음성분인 날개 통과주파수(Blade-Passing Frequency, BPF)를 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다. 이러한 순음성분과 더불어 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식에 기반한 수치해석법의 한계인 광대역소음을 예측하기 위하여 Heo *et al.*^[2-4]은 통계적난류합성방법의 일종인 Fast Random Particle Mesh(FRPM) 방법과 연계한 일련의 방법을 제시하여 원심팬에서 효율적으로 광대역소음을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 이러한 원심팬 공력소음 예측방법에 기초하여 Heo *et al.*^[5,6]은 원심팬 날개와 팬 하우징 볼루트(Volute)의 상화작용에 따른 소음원을 분석하고, 뒷전형상을 기울인 S자 형상을 도입하여 소음을 저감할 수 있다는 것을 보였다. 또한 Shin *et al.*^[7,8]과 Choi *et al.*^[9]는 이러한 수치해석방법과 최적화기법을 연계한 날개와 허브 설계를 통하여 고성능 원심팬 개발을 성공적으로 수행하였다. Kim *et al.*^[10]은 자동차 시트 냉각용 원심팬 개발에 이러한 방법론을 적용하여 고성능, 저소음 원심팬을 개발하였다.

축류팬의 경우에는 기본적으로 원심팬에서 개발된 공력소음해석방법을 적용할 수 있으나, 보다 복

잡한 유동구조로 인하여 관련된 설계인자가 많아서 저소음 축류팬 개발에 있어서 정립된 설계이론의 부족으로 대상팬에 따라서 다양한 접근 방법들이 적용되고 있다. Heo *et al.*^[11]은 가정용 냉장고 기계실 냉각을 위한 축류팬의 하우징 쉬라우드 형상 개선을 통하여 고성능, 저소음 축류팬을 개발하였으며, Ren *et al.*,^[12] Ryu *et al.*,^[13] Park *et al.*^[14]은 이를 최적화 설계 기법과 연계하여 각각 냉장고 기계실과 에어컨 실외기 냉각용 축류팬의 하우징 오리피스 구조에 적용하여 고성능, 저소음 축류팬을 개발하였다.

본 논문의 대상인 무선진공청소기에 사용되는 사류팬의 경우, 앞서 기술한 바와 같이 원심팬과 축류팬의 특성을 혼합하고 있으며 설계관점에서의 복잡성은 원심팬과 축류팬의 중간에 위치하는 것으로 이해할 수 있다. Kim *et al.*^[15]은 무선진공청소기 내부에 위치한 팬 모터 단품의 유량성능과 소음성능을 수치 및 실험적으로 분석하고 2차원 형상의 원심팬날개 최적설계에 사용되는 방법^[7,9]을 확장하여 임펠라 허브쪽 날개 입출구각을 변수로 반응표면분석법의 2인자 중심 합성계획법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 이러한 임펠라 주날개의 형상설계를 통한 접근 방법은 주어진 팬 성능 목표값을 가지고 최초 설계시에 유용한 방법으로 활용할 수 있지만, 기 개발된 임펠라의 특정한전영역을 대상으로는 간편하게 스플리터 날개를 추가하여 성능을 개선하는 사례들이 보고되고 있다.

Lee *et al.*^[16]은 스플리터의 코드길이 및 피치방향 위치가 원심압축기의 효율 및 유동특성에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다. Omer *et al.*^[17]은 기존 임펠라의 쉬라우드, 허브 곡선을 이용하여 스플리터를 설계하였으며 압축기의 효율을 향상 시킨 바 있다. Jawad *et al.*^[18]은 임펠라 날개 사이에 두 개의 스플리터를 적용하여 원심압축기의 압력비와 유량성능을 개선하였다. Davood와 Mohammad^[19]는 원심펌프의 효율과 유량성능을 개선하기 위한 스플리터의 최적 위치를 수치적, 실험적으로 분석한 바 있다.

본 논문에서는 이러한 선행연구들을 바탕으로 무선진공청소기 팬 모터 단품에 사용되고 있는 기존 임펠라에 스플리터 형상을 추가하여 소음 성능을 개선하고자 한다. 실험계획기법에 많이 활용되는 다구

찌 기법을 이용하여 스플리터의 설계인자가 공력소음에 미치는 영향을 수치적으로 분석하고 최적설계안을 최종적으로 제시하였다.

2절에서는 수치기법 및 계산 영역 설정을 통해 기존 팬 모터 단품의 소음성능을 수치적으로 확인하였다. 3절에서는 스플리터의 설계인자를 설정하고, 다구찌 기법을 사용하여 각 설계인자에 따른 영향도를 분석하였다. 4절에서는 최종적으로 설계된 스플리터를 적용하여 기존 팬 모터 단품과 비교하였다.

II. 수치해석

2.1 대상 팬 모터 단품

본 연구는 무선진공청소기 내부에 위치한 팬 모터 단품을 대상으로 하였다. 팬 모터 단품의 구조는 Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같다. 본 연구의 대상이 되는 팬 모터 단품은 디퓨저, 코일 등의 모터 내부 부품과 회전축을 기준으로 고속으로 회전하며 공기를 흡입하고 배기시키는 임펠라를 포함한다. 대상 팬 모터 단품의 회전속도는 84,000 r/min이며 임펠라의 형상은 Fig. 1(b)에 나타내었다. 임펠라 날개의 개수는 9개이다.

2.2 수치기법 및 해석 영역

본 연구에서는 수치해석의 정확도를 높이고자 실제 실험 환경을 모사한 가상 팬 테스트를 설계하여 수치해석 영역으로 사용하였다. Fig. 2에 설계된 계산 영역을 나타내었다. 또한, 입구 및 출구면에 압력 경계조건을 부여하여 실제 실험환경과 동일하게 하였으며 압력 저항에 따른 유량 성능의 변화를 예측

하고자 하였다.

대상 임펠라를 수치적으로 분석하기 위하여 선행 연구^[15]에서 임펠라의 유량성능과 소음성능을 예측하기 위하여 사용된 수치기법을 이용하였다. 유동해석을 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)에 기초한 비정상 RANS 방정식을 계산하였고, Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H) 모델을 이용하여 유동해석 결과를 기반으로 유동소음원에 대한 분석을 실시하였다.^[15] 수치해석은 ANSYS fluent 19.1 상용 프로그램을 사용하여 수행하였다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 수치 해석의 효율성을 고려하여 격자 미세화 연구를 수행하였다. 본 연구는 공력 소음 저감을 목표로 하고 있으며, 팬에서 발생하는 지배적인 소음인 날개통과주파수(Blade Passing Frequency, BPF)가 임펠라의 고속회전에 따라 고주파인 12,600 Hz에서 발생한다. 따라서 수치기법의 감쇠를 고려하여 BPF에 해당하는 파장에 10개의 격자

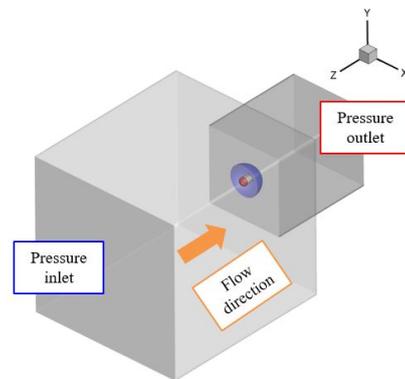


Fig. 2. (Color available online) Computational domain for CFD.

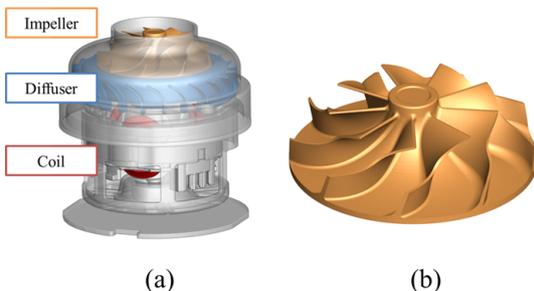


Fig. 1. (Color available online) (a) Fan-motor unit for cordless vacuum cleaner (b) target impeller in fan-motor unit.

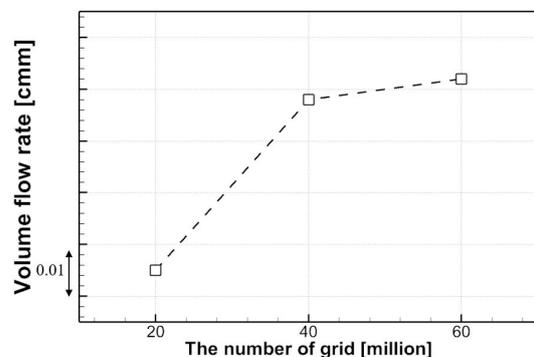


Fig. 3. Result of grid refinement study.

가 들어갈 수 있도록 구성하였다. 파장과 주파수는 다음의 관계를 가진다.

$$c = f \cdot \lambda, \tag{1}$$

여기서 c 는 소리의 속도(340 m/s)이고, λ 는 파장의 길이를 나타낸다. BPF가 12,600 Hz임을 고려하면, 한 파장의 길이는 약 0.027 m이다. 이때, 한 파장 안에 격자가 최소 10개에서 최대 20개 들어갈 수 있도록 2,000만개, 4,000만개, 6,000만개의 격자를 구성하였다. Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 4,000만개와 6,000만개의 격자를 사용할 때 유량 성능의 결과가 유사함을 확인하였다. 4,000만개의 격자를 사용한 경우 임펠라에서 FW-H 적분면까지의 격자크기는 1 mm 미만이며 한 파장 안에 20개의 격자가 들어갈 수 있도록 구성하였다. 일반적으로 소음원이 되는 와류의 대류속도는 음속보다 작기 때문에 12,600 Hz의 고주파 소음을 예측하는데 격자의 정밀도가 충분하다고 판단되고 추가적으로 수치 비용을 고려하여 이후 본 연구에서의 모든 유동해석은 4,000만개의 격자를 구성하여 수치해석을 수행하였다.

2.3 수치기법 검증

팬 성능 시험기와 반무향실에서의 유량과 소음 측정을 통해 기존 팬 모터 단품의 유량과 소음 성능을 실험적으로 평가하였다. 실험을 통해 측정된 팬 모터 단품의 유량 및 소음 성능을 수치 해석 결과와 비교하여 본 연구에서 사용된 수치 해석 방법 및 계산 영역에 대한 유효성을 검증하였다.

유량성능에 대한 수치해석 유효성 검증 결과를 Table 1에 나타내었다. 선행연구^[15]을 기반으로 무선진공청소기의 시스템 저항곡선과 실험적으로 측정된 P-Q곡선을 이용하여 팬 모터 단품의 작동점을 확인한 후 무부하 상태와 작동점을 포함한 3가지 조건

Table 1. Differences between the results of experiment and CFD in flow performance.

	P_1 (Free delivery)	$\frac{P_2}{P_3}$ $(\frac{P_3}{2})$	P_3 (Operating)
Error (%)	14.2	14.9	15.7

에서의 수치 해석 결과를 실험결과와 각각 비교하였다. 각 지점에서의 오차는 약 15%이며, 실험 결과와 비교하여 수치해석 결과가 동일 압력에서 유량성능을 높게 예측하는 경향을 확인하였다. 이는 격자모델링을 하면서 일부 유로 구조를 단순화하여 실제 유로저항을 고려하지 못한 점에서 기인하는 것으로 사료된다. 하지만 정압 변화에 따른 유량의 경향성이 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 상대적 유량비교를 위한 도구로서는 사용된 수치기법 및 해석 영역이 유효하다고 판단할 수 있다.

소음성능은 FW-H 방정식을 사용하여 팬 모터 단품으로부터 방사되는 소음레벨을 예측하였다. 관심 주파수는 날개 통과주파수와 가청 주파수를 고려하여 20,000 Hz까지로 설정하였으며 Fig. 4에 예측된 소음레벨을 나타내었다. 하지만 음압레벨의 전체적인 분포는 실험으로 측정된 값과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 날개통과주파수인 12,600 Hz에서의 소음도 실험과 동일하게 수치해석 결과에서 예측되었다. 다만, 실험으로 측정된 값은 회전불평형에 의해서 회전주파수와 그 배수 성분들에서 순음성분이 발생하고 있지만, 수치적으로 예측된 음압스펙트럼은 이를 포함하지 않고 있다. 이러한 회전주파수 성분 등의 차이로 인하여 실험에서 측정된 값보다 수치적으로 예측된 전체 음압레벨은 약 8 dBA 낮게 예측되었다. 하지만 본 연구의 목적이 임펠라의 공력소음저감임을 감안할 때, 본 수치방법의 설계도구로서의 유효성은 충분한 것으로 판단된다. 유효성이 검증된 수치해석 방법과 계산 영역을 사용하여 이후 새롭게 설계된 스플리터 형상을 수치적으로 분석하고 기존 모델과 비교하였다.

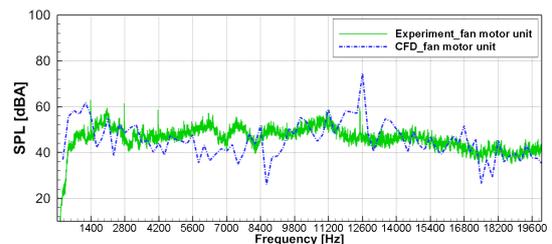


Fig. 4. (Color available online) Validation of flow performance.

III. 스플리터 설계인자 분석

3.1 스플리터 형상 설계

본 절에서는 무선진공청소기 팬 모터 단품의 소음 성능을 개선하기 위하여 기존 임펠라에 스플리터 형상을 적용하였다. 일반적으로 스플리터는 주 날개의 뒷전 쪽에 압력면과 흡입면 사이의 통로에 위치하게 되며, 주 날개로부터 발생한 와류를 억제하여 통로에서의 유동 손실 영역을 개선하기 위해 적용된다.^[16] 기존 임펠라에서 발생하는 와류 분포와 소음 원을 개선하기 위하여 스플리터를 고안하였고 스플리터의 길이와 위치를 주요한 설계인자로 고려하여 스플리터 형상을 설계하였다.

우선, 스플리터의 길이는 Fig. 5와 같이 기존 임펠라 날개의 쉬라우드 곡선을 기준으로 하여 설계하였다. 주변 구조물과 기존 임펠라의 형상을 고려하여 50%~75%로 범위를 설정하였다.

그리고 스플리터 위치에 대한 설계범위를 Fig. 6에 나타내었다. 스플리터와 허브를 잇는 필렛(fillet) 형상을 고려하여 설계범위를 선정하였고, 기존 임펠라 날개의 압력면과 흡입면의 중간지점을 0°으로 하여 -5.7°~5.7°로 범위를 설정하였다.

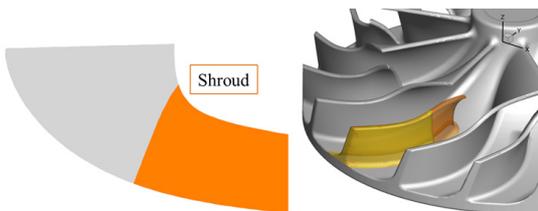


Fig. 5. (Color available online) The length of splitter blades.

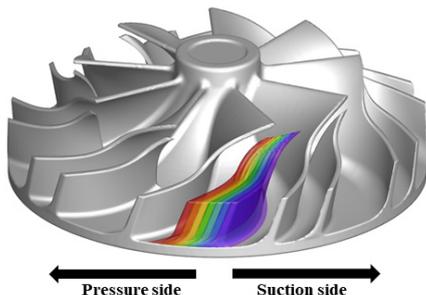


Fig. 6. (Color available online) The position of splitter blades.

3.2 다구찌 기법 적용

본 연구에서는 다구찌 기법을 이용하여 각 설계인자의 최적상태를 분석하였다. 다구찌 기법은 일본의 다구찌 겐이치(Taguchi genichi) 박사가 개발한 방법으로 외부환경 잡음을 고려하여 강건한 설계를 하는 실험계획법이다.^[20] Table 2에 나타낸 것과 같이 2개의 설계인자를 각각 3수준으로 선택하였고, 선행연구^[21]를 기반으로 다구찌 기법을 이용하여 각 설계인자의 최적상태를 분석하였다. 목적함수를 소음성능으로 설정하였으므로 다구찌 실험방법의 변수설계 방식 중 망소특성을 이용하여 설계인자를 평가하였다. 신호대 잡음비인 S/N비(Signal to Noise Ratio)를 통하여 설계인자의 상태를 분석하게 되는데, 망소특성의 S/N비는 다음과 같이 정의된다.

$$S/N = -10 \times \log\left(\frac{Y^2}{n}\right), \quad (2)$$

여기서 Y는 각 설계인자별 측정 결과이고 n은 측정 개수를 나타낸다. Eq. (2)와 같이 정의된 S/N비가 가장 큰 조건을 선택함으로써 산포가 적으면서 잡음의 영향이 최소화되는 설계인자의 조건을 정하게 된다. 이를 통해 각 설계인자의 어떤 수준이 소음 성능에 더 큰 영향을 미치는지 확인할 수 있다.

Table 3와 Fig. 7에 각 설계인자별 S/N비를 나타내었다. 망소특성에 따라 S/N비의 절대값이 가장 작은 변수를 선택한다면, 스플리터 길이는 3수준이고 스플리터 위치는 2수준이다. 따라서 스플리터가 기존

Table 2. Levels of each design factors for Taguchi method.

case	Level		
	1	2	3
Length (%)	50	62.5	75
Position (°)	-5.7	0	5.7

Table 3. S/N ratio of each design factors for the noise performance.

	Level		
	1	2	3
S/N (Length)	-37.74	-37.51	-37.33
S/N (Position)	-37.69	-37.31	-37.58

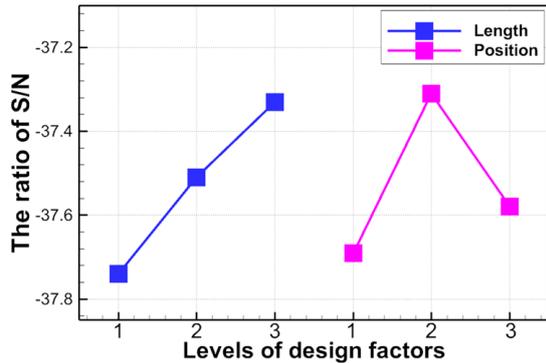


Fig. 7. (Color available online) Factor effect of S/N ratio for the noise performance.

블레이드 길이의 75%이며, 기존 블레이드의 정중앙에 위치할 때 팬 모터 단품의 소음성능이 최적화됨을 확인하였다.

다음 절에서 다구찌 기법으로 도출된 스플리터의 최적 형상을 적용하여 유량 성능 및 소음 성능을 수치적으로 확인하고, 기존 팬 모터 단품과 비교 분석을 수행하였다.

IV. 최적 스플리터 적용 모델

4.1 개선 모델 유동장 분석

스플리터의 최적 설계인자를 적용한 모델에 대하여 2.2절에서 설명한 수치방법에 기초하여 수치해석을 진행하였다. 이때, 와류의 분포는 소음원을 개선하기 위한 주요한 인자로 작용한다. 따라서, 임펠라 주변에서의 와류 분포를 확인하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8(a)와 같이 기존 임펠라에서는 날개의 급격한 곡률 변화로 인해 강한 와류가 발생하였고 날개 끝단에서 길게 유지되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 날개 사이에 최적 설계된 스플리터를 적용함으로써 이러한 와류 형상은 Fig. 8(b)와 같이 개선되었다.

또한, Kim *et al.*^[15]은 임펠라 주날개 사이에서 발생하는 와류의 분포를 확인하기 위하여 날개 스패의 각각 25%, 50%, 75%의 위치에서 와류강도를 계산하였고, 이때 날개 스패의 50% 위치에서 와류가 가장 크게 발생하는 것을 확인한 바 있다. 따라서, 임펠라 날개 스패의 50% 위치의 평면을 가상으로 만들

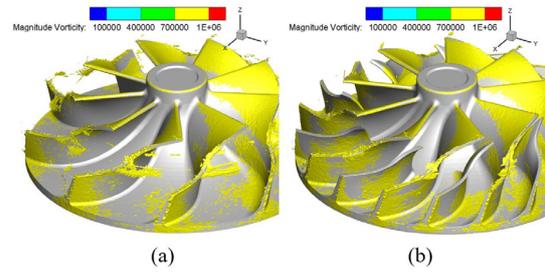


Fig. 8. (Color available online) Iso-contour of vorticity magnitude on (a) original model and (b) optimized model.

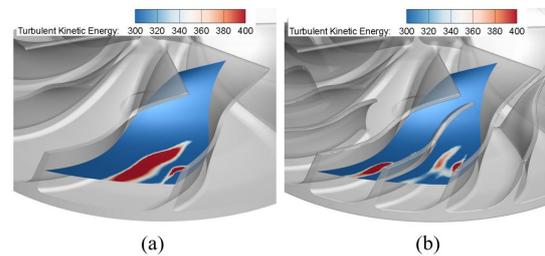


Fig. 9. (Color available online) Turbulent kinetic energy on (a) original model and (b) optimized model.

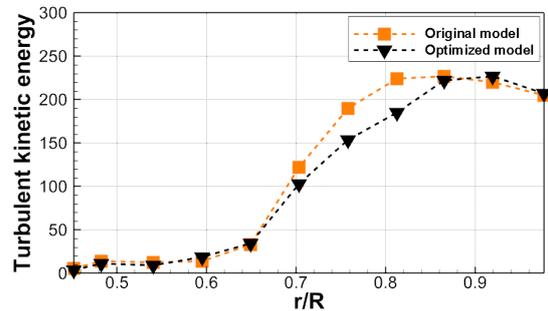


Fig. 10. (Color available online) Distribution of turbulent kinetic energy in (a) original model and (b) optimized model.

어 각 평면에서의 난류에너지 분포를 Fig. 9에서 나타내었다. 기존에 주날개 사이에 넓게 분포하던 난류운동에너지가 스플리터 날개와 주날개 사이에 위치하며 그 분포범위가 작아진 것을 확인할 수 있다. 정량적인 비교를 위하여 Fig. 10에서 Fig. 9의 평면상에 위치한 난류운동에너지를 모두 더하여 반경반향에 대해서 나타내었다. $r/R = 0.7 \sim 0.8$ 에서 가장 크게 난류 강도가 작아졌는데, 스플리터가 적용됨에 따라 날개 사이의 유로가 변하게 되었고 이에 따른 감소인 것으로 확인된다. 날개 사이에서 강하게 발생하고 있던 난류가 스플리터 적용모델에서는 약 7% 감

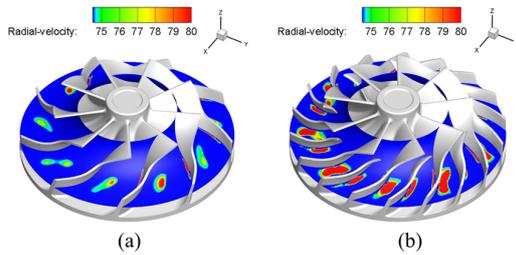


Fig. 11. (Color available online) Radial velocity of (a) original model and (b) optimized model.

소하였다.

이와 같이 임펠라를 통하는 유동의 와류와 난류강도가 감소함에 따라 소음 성능이 개선됨을 수치적으로 확인할 수 있었다.

하지만, 수치해석 결과 최적 스플리터 적용 모델에서 유량은 약 2.3% 감소하였다. 이는 스플리터를 적용함으로써 임펠라에서 토출되는 유로의 면적이 7.7% 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

이에 임펠라 날개 스펠 50% 위치에서 반지름 방향 속도 성분을 확인하였다. Fig. 11에서 나타낸 것과 같이 유동이 스플리터를 지나면서 속도가 증가하는 것을 확인하였고, 기존 모델 대비 속도가 약 3.3% 증가하였다. 따라서, 스플리터를 적용하면 임펠라를 통과하는 유속은 증가하지만, 토출 면적이 감소하여 전체적인 유량은 감소함을 확인하였다.

4.2 개선 모델 소음 성능 분석

다음은 개선 모델에 대한 소음 성능을 예측하고 이를 기존 모델과 비교하였다. 기존 모델과 스플리터 적용 모델의 음압레벨 분포를 1/3옥타브 밴드를 적용하여 Fig. 12에 도시하였다. 최적 스플리터 적용 모델에서 유량은 약 2.3% 감소하였다. 하지만 소음 성능은 기존 모델보다 약 6.8 dBA 개선되었다. 관심 주파수 영역 전체에서의 소음 성능을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 3,000 Hz에서 6,000 Hz의 주파수 영역에서는 소음이 7.6 dBA 증가하는 경향이 있었다. 하지만 6,000 Hz 이후의 고주파 영역에서는 소음이 크게 감소하였다. 특히 날개 통과 주파수인 12,600 Hz에서의 소음은 약 13.2 dBA 감소하였다. BPF 성분의 소음은 고속으로 회전하는 회전체에서 방사되는 소음 중 가장 지배적인 소음이며, 본 연구의 관심주

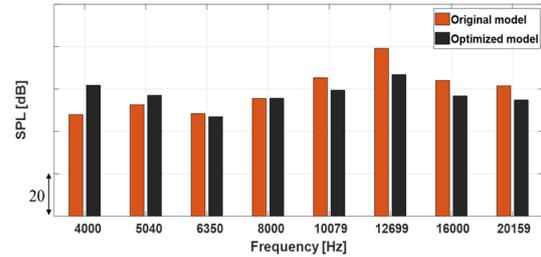


Fig. 12. (Color available online) Comparison of noise performance.

Table 4. Comparison of noise performance in targeted frequency range.

	$SPL_{original} - SPL_{optimized}$ [dBA]
~ 3,000 Hz	-3.2
3,000 Hz ~ 6,000 Hz	+7.6
6,000 Hz ~ 12,600 Hz	-6.9
12,600 Hz	-13.2

파수 대역이다. 4.1절에서 확인한 바와 같이 최적 설계된 스플리터가 기존 임펠라에 설치됨에 따라 날개 사이에서 발생하는 와류 및 난류운동에너지를 개선하였고, 이러한 개선된 유동 현상 때문에 BPF 성분의 소음이 저감된 것으로 판단된다. 또한, BPF성분의 소음 저감이 전체 음압레벨 감소에 기여한 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 음향파위는 임펠라 날개 끝 회전속도의 약 5-6 거듭제곱에 비례하여 회전속도에 따른 음향에너지의 변화율은 유량의 변화율 보다 훨씬 더 민감하다. 즉, 음향파위는 회전속도의 5거듭제곱에 비례하고, 유량은 회전속도에 비례한다는 팬 법칙을 사용하여 스플리터 적용 팬 모터의 회전속도를 기존 팬 모터와 같은 유량을 발생시킬 때까지 증가시키면 소음은 0.5 dB 증가하여 결국 동일유량에서 약 6.3 dBA 감소하는 결과를 보일 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 고속으로 회전하는 무선 진공청소기용 팬 모터 단품의 소음 성능을 개선하기 위한 스플리터의 최적 설계 방향을 제시하였다. 먼저 RANS 방정식과 FW-H 방정식을 기반으로 팬 모터 단품의 유량성능과 임펠라로부터 방사되는 소음을 수치적

으로 예측하였다. 예측된 결과를 실험적으로 측정된 결과와 비교하여 수치방법의 유효성을 판단하였다. 유효성이 판단된 수치 기법을 기반으로 다구찌 기법을 사용하여 스플리터의 각 설계 인자가 공력소음에 미치는 영향도와 설계인자의 최적상태를 분석하였다. 스플리터의 주요 설계인자로 스플리터의 길이와 위치로 선정하였고, 이 2개의 설계인자를 각각 3수준으로 선택하였다. 다구찌 기법으로 도출된 스플리터의 최적 형상을 적용한 결과, 유량은 2.3% 감소하지만 소음이 기존 대비 약 6.8 dBA 감소되는 결과를 나타내었다. 이를 팬 법칙에 따라 동일유량으로 조건으로 변경 시 약 6.3 dBA 감소할 것으로 기대된다. 최적설계안을 기반으로 이후 시제품을 제작하여 실험검증을 수행하고, 설계안에 대한 유효성을 확인할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 선박해양플랜트 연구소의 연구과제인 “미래 잠수함 저소음 추진기 특화연구실”의 연구 결과 중 일부이다.

References

1. S. Lee, S. Heo, and C. Cheong, “Prediction and reduction of internal blade-passing frequency noise of the centrifugal fan in a refrigerator,” *IJR*, **33**, 1129-1141 (2010).
2. S. Heo, C. Cheong, and T.-H. Kim, “Unsteady fast random particle mesh method for efficient prediction of tonal and broadband noises of a centrifugal fan unit,” *AIP Advances*, **5**, 097133 (2015).
3. S. Heo, D. Kim, and C. Cheong, “Broadband noise prediction of the ice-maker centrifugal fan in a refrigerator using hybrid CAA method and FRPM technique” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **31**, 391-398 (2012).
4. S. Heo, D. Kim, C. Cheong, and T.-H. Kim, “Prediction of internal broadband noise of a centrifugal fan using stochastic turbulent synthetic model” (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **21**, 1138-1145 (2011).
5. S. Heo, C. Cheong, and T.-H. Kim, “Development of low-noise centrifugal fans for a refrigerator using inclined S-shaped trailing edge,” *Int. J. Refrigeration*, **34**, 2076-2091 (2011).
6. S. Heo, D. Kim, and C. Cheong, “Analysis of relative contributions of tonal noise sources in volute tongue region of a centrifugal fan” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **33**, 40-47 (2014).
7. D. Shin, S. Heo, C. Cheong, T.-H. Kim, and J. Jung, “Performance/noise optimization of centrifugal fan using response surface method,” *Trans. KSME-A*, **41**, 165-172 (2017).
8. D. Shin, S. Y. Ryu, C. Cheong, T. H. Kim, and J. Jung, “Development of high-performance/low-noise centrifugal fan circulating cold air inside a household refrigerator by reduction of vortex flow” (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **26**, 428-435 (2016).
9. J. Choi, S. Y. Ryu, C. Cheong, M. K. Kim, and K. Lee, “Blade shape optimization of centrifugal fan for improving performance and reducing aerodynamic noise of clothes dryer” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **38**, 321-327 (2019).
10. J. Kim, S.-Y. Ryu, C. Cheong, D. Jang, and M. An, “Development of high performance and low noise compact centrifugal fan for cooling automotive seats” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **37**, 396-403 (2018).
11. S. Heo, M. Ha, T.-H. Kim, and C. Cheong, “Development of high-performance and low-noise axial-flow fan units in their local operating region,” *JMST*, **29**, 3653-3662 (2015).
12. G. Ren, S. Heo, T. H. Kim, and C. Cheong, “Response surface method-based optimization of the shroud of an axial cooling fan for high performance and low noise,” *JMST*, **27**, 33-42 (2013).
13. S. Y. Ryu, S. Kim, C. Cheong, S. M. Park, J. W. Kim, and B. I. Park, “Optimization of flow performance by designing orifice shape of outdoor unit of air-conditioner” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **36**, 371-377 (2017).
14. S. M. Park, S. Y. Ryu, C. Cheong, J. W. Kim, B. I. Park, Y. C. Ahn, and S. K. Oh, “Optimization of the orifice shape of cooling fan units for high flow rate and low-level noise in outdoor air conditioning units,” *Applied Sciences*, **9**, 5207 (2019).
15. K. Kim, S.-Y. Ryu, C. Cheong, S. Seo, and C. Jang, “Optimal design of impeller in fan motor unit of cordless vacuum cleaner for improving flow performance and reducing aerodynamic noise” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **39**, 379-389 (2020).
16. B. J. Lee, D. H. Kim, and J. T. Chung, “Numerical study on effects of splitter chord length and pitchwise location on the flow characteristics in a transonic centrifugal compressor” (in Korean), *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, **19**, 5-11 (2016).
17. O. F. Atac, J. E. Yun, and T. Noh, “Aerodynamic

- design optimization of a micro radial compressor of a turbocharger,” *Energies*, **11**, 1827 (2018).
18. L. H. Jawad, S. Abdullah, R. Zulkifli, and W. M. F. W. Mahmood, “Numerical investigation on the effect of impeller trimming on the performance of a modified compressor,” *CFD Letters*, **5**, 174-184 (2013).
 19. K. Davood and R. T. Mohammad, “The optimum position of impeller splitter blades of a centrifugal pump equipped with vaned diffuser,” *FME Transactions*, **46**, 205-210 (2018).
 20. G. Taguchi, “Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology,” *IEEE Transactions on Reliability*, **44**, 225-229 (1995).
 21. J. K. Kim, “Experimental study on the optimum design of the flow-path system for a low noise indoor package air-conditioner” (in Korean), *J. Mechanical Science and Technology*, **28**, 1277-1283 (2014).

▶ 서 성 진 (Seongjin Seo)



2011년 2월 : 울산대학교 기계자동차공학 석사
2018년 ~ 현재 : (주) LG 전자 선임연구원

▶ 장 철 민 (Cheolmin Jang)



2011년 2월 : 부산대학교 조선해양공학 학사
2017년 ~ 현재 : (주) LG 전자 선임연구원

저자 약력

▶ 김 건 우 (Kunwoo Kim)



2019년 2월 : 부산대 기계공학부 학사
2019년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 스마트융합공학과 석사 과정

▶ 설 한 신 (Hanshin Seol)



1998년 2월 : 부산대학교 항공우주공학 학사
2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 석사
2005년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 박사
2005년 3월 ~ 현재 : 선박해양플랜트 연구소 책임연구원

▶ 유 서 윤 (Seo-Yoon Ryu)



2016년 2월 : 계명대학교 기계자동차공학과 학사
2018년 2월 : 부산대학교 기계공학 석사
2018년 2월 ~ 현재 : 부산대학교 기계공학부 박사과정

▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)



1997년 2월 : 서울대학교 항공우주 학사
1999년 2월 : 서울대학교 기계항공 석사
2003년 2월 : 서울대학교 기계항공 박사
2003년 3월 ~ 2004년 8월 : 서울대학교 기계항공 BK21 박사후연구원
2004년 9월 ~ 2005년 5월 : Post-Doctoral Research Associate, ISVR, University of Southampton, UK
2005년 6월 ~ 2006년 2월 : 한국표준과학연구원 선임연구원
2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 기계공학부 교수
2011년 8월 ~ 2012년 7월 : Visiting Professor, ISVR, University of Southampton, UK