

에어컨 실외기 냉각팬 시스템의 오리피스 형상 설계를 통한 유량 성능 최적화

Optimization of flow performance by designing orifice shape of outdoor unit of air-conditioner

유서윤,¹ 김상현,¹ 정철웅,[†] 김종욱,² 박병일,² 박세민²

(Seo-Yoon Ryu,¹ Sanghyeon Kim,¹ Cheolung Cheong,^{1†} Jong-Uk Kim,² Byeong Il Park,² and Se Min Park²)

¹부산대학교 기계공학부, ²LG전자

(Received October 20, 2017; revised October 30, 2017; accepted November 29, 2017)

초 록: 에어컨의 성능은 분리형 실외기의 냉각 성능과 밀접한 관련이 있으며, 그에 따라 대다수의 관련 선행 연구에서는 실외기 내부 축류팬의 단독 성능에 대한 연구를 진행하였다. 하지만 축류팬을 제외한 실외기 내부 여러 구성요소의 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 여러 요소 중 팬 오리피스가 실외기 유동 성능에 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 고정밀 유동장 해석을 위해 약 1800만 개의 격자로 구성된 가상 팬 테스터를 개발하고, V-LES의 일종인 비정상 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 CFD(Computational Fluid Dynamics) 기법에 기초하여 해석하였다. 수치 해석의 유효성을 확인하기 위해서 실험을 통해 측정된 실외기 시스템의 P-Q 곡선을 가상 팬 테스터를 사용한 수치 해석 결과와 비교하였다. 유효성을 검증한 수치 기법을 이용하여 실외기 유량 성능을 최대화할 수 있는 오리피스 형상 최적 설계를 수행하였다.

핵심용어: 에어컨, 분리형 실외기, 축류팬, 가상 팬 테스터, 전산유체역학

ABSTRACT: The performance of an air conditioner is closely related to the cooling performance of a split-type outdoor unit so that, in most of the relevant preceding studies, the independent performance of an axial fan in an outdoor unit has been studied. However, there is a lack of research on the effects of other components in an outdoor units was rarely investigated. Therefore, in this paper, the effects of the fan orifice among other parts on the flow performance of the outdoor unit was numerically investigated. A virtual fan tester consisting of 18 million grids was developed for highly resolved flow simulation. The unsteady RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) equations are numerically solved by using finite-volume CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques. In order to verify the validity of the numerical methods, the predicted P-Q curve of the cooling fan in a full outdoor unit is compared with the measured one. Optimization of orifice shape was carried out for maximum flow performance of the outdoor unit using the validated numerical method.

Keywords: Air-conditioner, Split type outdoor unit of air-conditioner, Axial fan, Cooling fan, Computational fluid dynamics

PACS numbers: 43.28.En, 43.28.Js

1. 서 론

에어컨은 열을 제거하여 공기를 냉각시키고, 습도

를 낮추어 실내의 공기질을 제어하는데 사용한다. 쾌적한 실내환경에 대한 관심의 증대와 더불어 에어컨의 수요는 꾸준히 증가하는 추세이다. 소비자들이 에어컨을 구매할 때 성능과 더불어 소음이 가장 중요한 지표 중 하나로 인식되고 있다.

에어컨에서 발생하는 소음은 설치 위치에 따라 예

[†]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)

어컨 실내기에서 발생하는 소음과 분리형 실외기에서 발생하는 소음으로 나눌 수 있다. 에어컨의 성능은 분리형 실외기의 냉각 성능에 크게 의존하며 이러한 냉각성능은 팬의 풍량 성능과 밀접한 관련이 있다. 따라서 고성능 에어컨을 위해서는 고풍량의 팬이 필요하다. 하지만 일반적으로 팬의 풍량 증가는 소음 증가와 직결된다. 따라서 에어컨의 성능 향상과 저소음을 통한 시장경쟁력 확보를 위해서는 고성능/저소음 팬의 개발이 필수적이다.

에어컨 실외기에는 주로 축류팬이 사용되며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. Jiang *et al.*^[1]은 Fukano's model과 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통해 예측된 광대역 소음장과 실험 결과의 비교를 통하여 분리형 에어컨 실외기의 축류팬의 소음 성능에 대한 연구를 진행하였다. Zhao *et al.*^[2]은 축류팬의 형상을 변경시켜 CAA(Computational AeroAcoustics) 방법과 CFD 기법을 사용하여 영향도를 분석하였다. Gue *et al.*^[3]은 날개 표면 형상 및 이중익 추가를 통해 축류팬의 저소음화에 대한 연구를 수행하였다. Lee *et al.*^[4]은 H-CAA(Hybrid-Computational Aeroacoustics) 방법을 사용하여 가정용 냉장고에 사용되는 축류팬의 소음 예측을 수행하였다.

이러한 선행연구와 같이 팬의 소음성능을 대상으로 직접적으로 개선할 수도 있으나, 팬의 주된 기능은 유량의 제어에 있고 소음과 유량은 일반적으로 팬 회전속도에 근사적으로 비례하기 때문에 팬의 유동 성능의 개선은 동일한 유량에서 소음개선을 의미한다. 따라서, 실용적인 관점에서 유량성능 향상에 대한 연구도 진행되고 있는데 대표적으로 Shin *et al.*^[5]은 냉장고 냉기순환용 팬의 성능향상을 통해 소음저감을 실현하였다. 같은 맥락에서 Huang *et al.*^[6]은 에어컨 실외기의 deflecting ring의 형상에 따른 유동 성능 변화에 대한 연구를 진행하였다.

이와 같이, 에어컨 실외기에 대한 연구는 축류팬의 단독 성능 또는 소음 성능에 집중한 연구가 대부분이다. 하지만 동일한 팬이라도 에어컨 실외기 시스템의 구조에 따라 실외기 성능에 미치는 영향도 달라지기 때문에 실외기 전체 시스템에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 에어컨 실외기 전체 시스템의 유량성능 향상을 위하여 기존 팬 형상은 유지

하면서 축류팬의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 오리피스를 대상으로 최적설계를 수행하고 그 결과를 제시하였다.

II. 대상 실외기 시스템

분리형 에어컨 실외기의 시스템은 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 실외기는 크게 냉각용 축류팬, 오리피스, 모터 및 모터 마운트, 히트 싱크로 구성되어 있다. 해석의 편이성을 위하여 실험과 계산모델 모두 형상이 복잡한 열교환기와 팬출구 그릴은 고려하지 않았다. 축류팬의 지름은 400 mm이며, 3개의 날개를 가진다. 실외기의 냉각용 축류팬은 1000 r/min으로 회전한다.

본 연구의 대상이 되는 오리피스 구조는 Fig. 2에 나타낸 것과 같다. 오리피스 구조는 역할에 따라 크게 세 가지 구간으로 나눌 수 있다. 첫째, 유동이 유입되는 입구이다. 이 구간은 유동을 흡입하는 구간으로 흡입 유동의 박리 현상을 저감하고, 축류팬에 의해 발생하는 역류 유동을 방지할 수 있는 형상 설계가 필요하다. 둘째, 직선의 형상인 neck 구간이다. 이 구간은 유동이 발달하는 구간이며 유량 증가에 중요

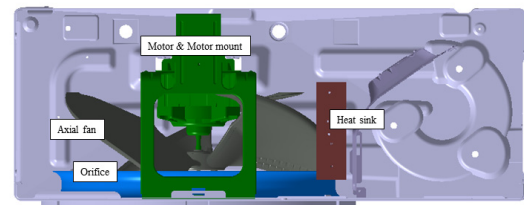


Fig. 1. Geometry of outdoor unit of air-conditioner.

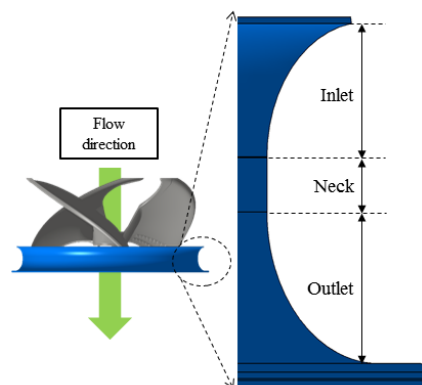


Fig. 2. Geometry of orifice shape.

한 역할을 한다. 셋째, 토출 유량의 방향을 결정하는 출구 구간이다. 입구에서 손실된 압력이 회복되는 구간으로 diffuser의 역할을 하며, 직선의 형상이 성능에 유리하다.

III. CFD 기법을 이용한 수치 해석

3.1 수치 기법

본 연구에서는 실외기의 냉각 팬에 의한 유동특성을 보다 정밀하게 분석하기 위해, CFD를 이용하여 수치적인 분석을 실시하였다. 실외기에서의 유동 성능을 예측하기 위해 다음 식과 같은 3차원 비압축성 비정상 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_j u_i} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Eqs. (1)과 (2)의 지배방정식을 수치적으로 해석하기 위해 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 사용하였으며, Reynolds 응력항에 의한 영향은 RNG k- ϵ 난류 모델을 사용하였다.

3.2 VFT

본 연구에서는 실외기의 냉각 팬의 실제 풍량 실험 조건을 수치적으로 모사하기 위하여 VFT(Virtual Fan Tester)를 설계하여 해석 도메인으로 사용하였다. 실제 팬 테스트 실험은 대상 팬의 입·출구단의 압력 차에 따라 유량이 측정된다. 따라서 실험 환경 모사를 위해 Fig. 3과 같이 입구와 출구에 압력 경계 조건을 부여한 수치 영역을 설정하고 수치 해석을 수행하였다. VFT는 실제 팬의 풍량 실험 결과와 수치 해석 결과의 비교를 통해 유효성을 검증할 수 있다. 비교 결과는 Fig. 4와 같으며, 두 결과가 유사한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 결과를 비

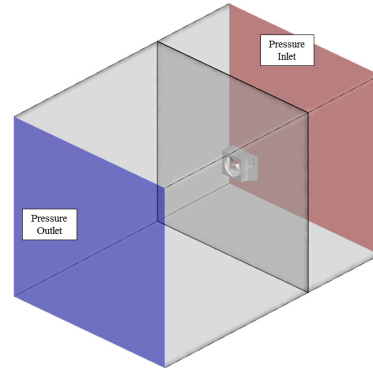


Fig. 3. Computational domain of VFT.

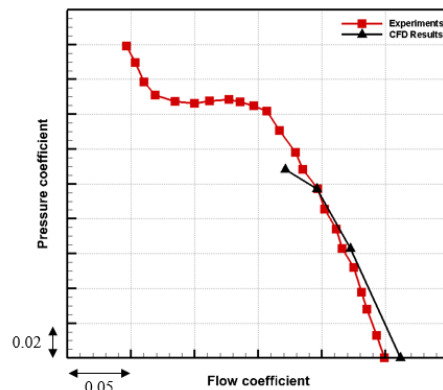


Fig. 4. Comparison of predicted characteristics curve with experimental results.

교한 결과, 실제 작동점에서 약 1.9% 유동 계수 간의 오차를 가지는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 사용된 수치 기법 및 해석 영역의 유효성을 검증하였다.

3.3 유동해석결과 분석

앞 절에서 소개한 유효성이 검증된 VFT 도메인을 사용하여 유동해석결과를 추가적으로 분석하였다. 참고로 해석결과는 모델링에서 생략한 열교환기와 그릴의전체 시스템에 대한 추가 유동저항을 고려한 압력손실 경계조건에서 수행하였다. Fig. 5에서 히트 싱크의 유동 속도장을 도시하였다. 히트 싱크 부근에서는 유동손실로 작용하는 와류 구조가 생성되지 않고 히트싱크의 형상을 따라 유동이 가이드되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에서는 팬 날개의 끝단과 오리피스 사이의 속도장을 나타내었다. 유동장 내의 속도 벡터의 분포를 통해 오리피스와 날개 끝 사이

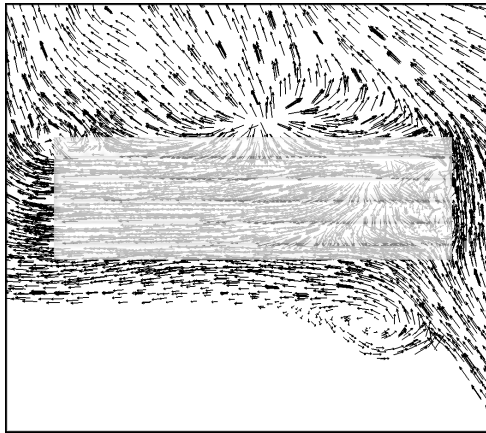


Fig. 5. Vector fields of fluid velocities of heat sink (Top view).

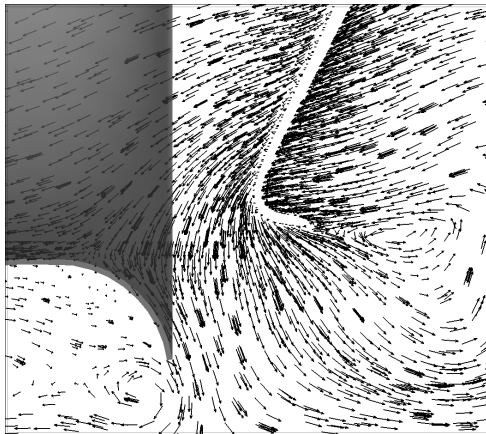


Fig. 6. Vector fields of fluid velocities on right section of fan and fan blade.

에서 생성되는 와류 및 역류 구조를 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 기존의 오리피스 형상이 역류 유동의 발생을 효과적으로 억제하지 못하며 토출 유동에 대하여 순기능을 하지 못한다는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 팬의 유량 손실을 유발하여 실외기의 냉각 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 효율 또한 감소시키게 된다.

IV. 오리피스 형상 최적화

3절의 결과를 통해 오리피스 형상과 주변의 와류 구조의 문제점을 확인하였으며, 그에 따라 본 연구에서는 이같은 문제점을 개선하기 위해 반응표면법을 사용한 오리피스 형상 최적 설계를 수행하였다.

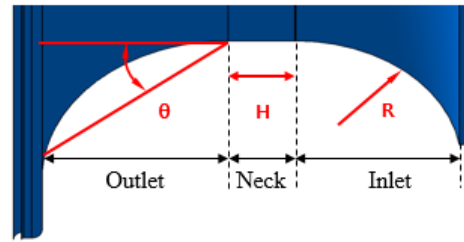


Fig. 7. Design parameters for optimization of orifice shape.

Table 1. Factors and levels.

Factors	Level		
	-1	0	1
R (mm)	12.3	18	23.7
H (mm)	8	27.5	47
θ (°)	13.1	28.8	44.5

반응표면법은 여러 독립 변수가 복합적인 작용을 함으로서 어떠한 종속 변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 변화가 이루는 반응 표면에 대한 통계적인 분석법이다. 본 연구에서는 다음식과 같은 2차 회귀 모형을 사용하여 최적 설계를 수행하였다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j, \tag{3}$$

여기서 η는 종속 변수, β는 회귀상수, x는 독립변수이다. Eq. (3)을 바탕으로 수치실험을 통해 회귀상수를 결정하면 독립 변수의 최대값을 갖도록 종속 변수를 결정함으로써 최적설계를 도출할 수 있다.

오리피스 형상 최적화에 사용된 설계인자는 Fig. 7에 나타낸 것과 같다. 2절에서 설명한 오리피스의 역할에 따라 세 구간을 대표하는 독립적인 설계인자를 선정하였다. 각 설계인자의 설계 가능범위와 값은 Table 1에 나타내었으며, 구조적 한계상 가능한 극한 값을 고려하여 선정하였다. 또한 본 연구의 목적인 성능 최적화를 위해, 실외기 성능을 대표하는 토출 유량을 목적 함수로 사용하였다. 참고로 팬 날개와 오리피스 사이의 간극이 작아질 수록 팬 유량성능이 향상된다는 것은 잘 알려져 있지만 현장에서는 조립 오차에 따라 일정한 값이 이하로는 작게 할 수 없기 때문에 본 연구에서는 설계인자로 고려하지 않았다.

유량에 대한 오리피스 형상 최적화를 위해 총 15개의 경우에 대한 수치 해석을 진행하였다. 모든 경우의 수치 해석 결과를 사용하여 최적 설계를 진행하였다. 그 결과 Eq. (4)와 같은 목적함수인 유량에 대한 2차 예측식을 도출하였다. 또한 최적화 과정에서 확인한 세 가지 변수의 유량에 대한 영향도를 Fig. 8에 나타내었다. 선정된 설계 범위 내에서 세 변수 중, 입구 형상을 나타내는 R(mm)은 유량의 최대값을 포함하는 경향성을 나타내었다. 하지만 오리피스의 neck 형상을 나타내는 H(mm)와 출구 형상을 나타내는 θ (°)의 분포는 설정영역경계에서 유량의 최대값을 가지고 있는데, 이러한 결과는 설계 가능 범위 내에서 neck 구간의 길이가 길수록, outlet에서의 토출 면적 변화가 작을수록 유량이 증가한다는 것을 나타낸다. 이는 내부 설계 범위를 고려하였을 때 도출할 수 있는 최적의 결과임을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 VFR &= -0.951R^2 + 0.057\theta^2 + 0.158H^2 \\
 &\quad - 0.574R\theta - 0.394RH - 0.629\theta H \\
 &\quad + 0.154R + 0.538\theta + 1.076H + 39.945
 \end{aligned} \quad (4)$$

최적 설계의 결과를 바탕으로 설계 가능 범위 내에서 실외기의 토출 유량을 최대화시킬 수 있는 오리피스의 최적 형상을 선정하였다. 각 오리피스의

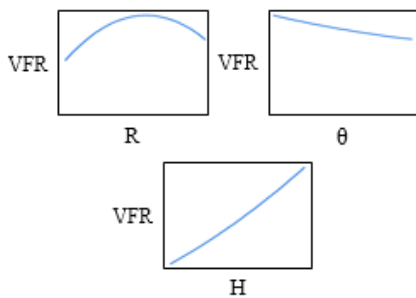


Fig. 8. Relation between flow rate and each design factors.

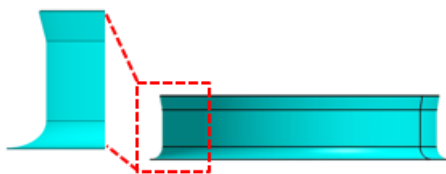
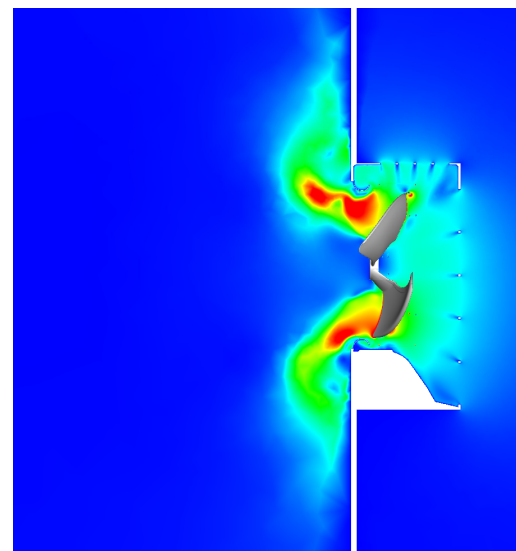


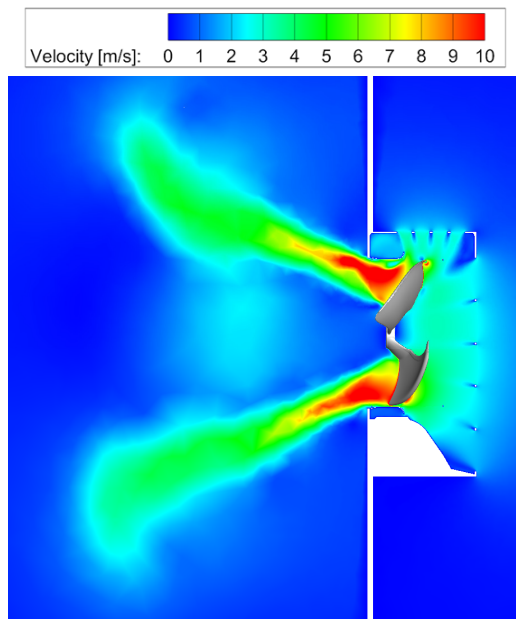
Fig. 9. Optimized shape of orifice.

구간별 최적 설계값은 $(R, H, \theta) = (19.2, 55, 10)$ 이며 형상은 Fig. 9에 나타내었다. 또한 위의 예측 식을 통해 최적 설계된 오리피스의 토출 평균유량은 기존 오리피스 형상을 통해 토출되는 유량과 비교하여 약 4.6% 증가한 값을 확인하였다.

본 연구에서는 최적 설계된 오리피스의 영향을 검증하기 위해 수치해석을 실시하였다. 그 결과는 Figs. 10와 11에 나타내었다. Fig. 10의 속도장 분포를 통해 오리피스의 긴 neck 구간, 토출부의 직선 형상 및



(a) Original model



(b) Optimized model

Fig. 10. Contours of velocity magnitude.

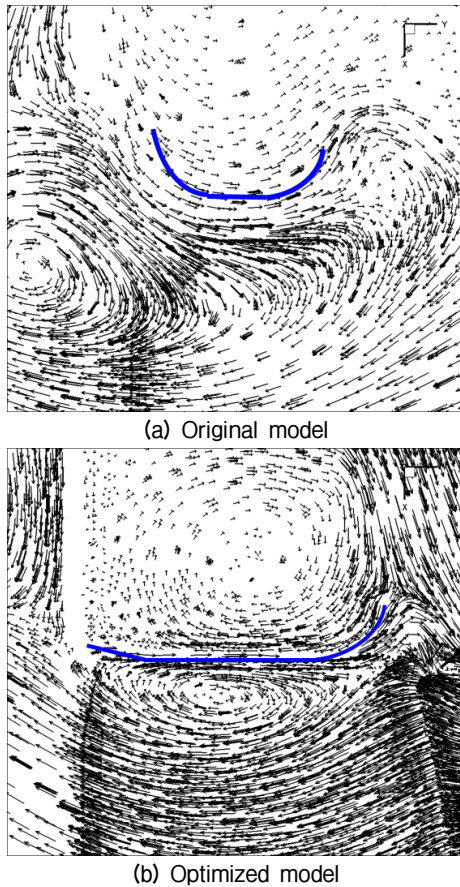


Fig. 11. Vector fields of fluid velocities.

neck 구간 대비 면적 변화의 감소의 영향으로 토출 유량의 유속 감소가 방지된 것을 확인하였다. 또한 Fig. 11의 벡터장 분포를 통해 오리피스 입구 형상과 블레이드 팁 사이에서 발생하는 역류 유동이 감소되는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 분리형 에어컨 실외기의 냉각팬 시스템의 유량 성능에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 수치 해석에 앞서, 실제의 실험 환경을 모사하여 보다 정확한 수치 해석 결과를 도출하기 위해 VFT를 설계하여 수치 도메인으로 사용하였다. 또한 오리피스의 역할에 따라 형상을 세 구간으로 나누어 각 구간을 대표하는 설계 변수를 사용하여 형상 최적화를 수행하였다. 그 결과, 기존 대비 4.6% 개선된 성능을 가지는 최적의 오리피스 형상을 도출하였다. 또한

최적 모델에 대한 수치 해석을 수행하여 팬 블레이드와 오리피스 사이에서 발생하는 와류 구조를 방지하고 유속 및 압력의 손실을 최소화시켜 유량 성능을 향상시킬 수 있는 설계임을 검증할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 본 연구는 2016년도 산업통장자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지 인력양성사업 「육해상 풍력터빈 신뢰성 및 발전량 향상을 위한 O&M 기술 고급트랙」으로 지원받아 수행한 인력양성 성과임(No. 20164030201230).

References

1. C. L. Jiang, J. P. Chen, Z. J. Chen, J. Tian, H. OuYang, and Z.H. Du, "Experimental and numerical study on aeroacoustic sound of axial flow fan in room air conditioner," *Appl. Acoust.* **68**, 458-472 (2007).
2. X. Zhao, J. Sun, and Z. Zhang, "Prediction and measurement of axial flow fan aerodynamic and aeroacoustic performance in a split-type air-conditioner outdoor unit," *Int. J. Refrig.* **36**, 1098-1108 (2013).
3. F. Gue, C. Cheong, and T. H. Kim, "Development of low-noise axial cooling fans in a household refrigerator," *J. Mech. Sci. Technol.* **25**, 2995-3004 (2011).
4. S. Lee, S. Heo, and C. Cheong, "Prediction and reduction of internal blade-passing frequency noise of the centrifugal fan in a refrigerator," *Int. J. Refrig.* **33**, 1129-1141 (2010).
5. D. Shin, S. Ryu, C. Cheong, T. 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).
6. H. Huang, Z. Wang, and Z. Liu, "Investigation of aerodynamic performance of small axial flow fan coupled with deflecting ring," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C-J. Eng. Mech. Eng. Sci.* **231**, 1839-1848 (2017).
7. V. Kolár, "Brief notes on vortex identification," 8th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics, 23-28 (2011).
8. R. C. K. Leung and R. M. C. So, "Noise generation of blade-vortex resonance," *J. Sound Vib.* **245**, 217-237 (2001).

저자 약력

▶ 유 서 윤 (Seo-Yoon Ryu)



2016년 2월: 계명대 기계자동차공학부 학사
2016년 3월 ~ 현재: 부산대 기계공학부 석사과정

▶ 박 세 민 (Se Min Park)



1995년: 부산대학교 기계공학부 학사
1997년: 부산대학교 기계공학부 석사
현재: LG전자

▶ 김 상 현 (Sanghyeon Kim)



2011년 2월: 부산대 기계공학부 학사
2013년 2월: 부산대 기계공학부 석사
2013년 3월 ~ 현재: 부산대 기계공학부 박사과정

▶ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)



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

▶ 김 종 욱 (Jong-Uk Kim)



1998년: 한국과학기술원 기계공학과 학사
2000: 한양대학교 기계공학부 석사
2011: 부산대학교 기계공학부 박사
2011년 ~ 현재: LG전자

▶ 박 병 일 (Byeong Il Park)



1990년: 부산대학교 기계공학부 학사
2003년: 부산대학교 지능기계시스템 석사
현재: LG전자