

의류 건조기 성능 향상과 공력소음 저감을 위한 원심팬의 날개 형상 최적화

Blade shape optimization of centrifugal fan for improving performance and reducing aerodynamic noise of clothes dryer

최진호,¹ 유서윤,¹ 정철웅,^{1†} 김민규,² 이광호²

(Jinho Choi,¹ Seo-Yoon Ryu,¹ Cheolung Cheong,^{1†} Min-kyu Kim,² and Kwangho Lee²)

¹부산대학교 기계공학부, ²에코에너지기술연구소

(Received March 27, 2019; accepted May 13, 2019)

초 록: 본 연구의 목표는 의류 건조기용 원심팬과 덕트 및 하우스 등을 포함한 공기배출 시스템의 유량 성능 향상 및 공력소음을 저감하기 위한 것이다. 전산유체역학과 FW-H(Ffowcs-Williams and Hawkings) 방정식에 기초한 음향상사법을 이용하여 유동 및 소음 특성을 고찰하였다. 유량과 소음성능 최적화 설계를 위해 반응표면기법을 활용하였다. 설계 인자로 원심팬의 날개 입구각, 출구각을 고려한 2인자 중심합성계획법을 채택하였다. 도출된 최적설계안은 덕트와 하우스에서 감소된 난류에너지 분포를 나타냈으며 결과적으로 유량의 증가와 공력소음이 감소됨을 확인하였다. 최종적으로 최적설계안을 기초로 제작한 시제품에 대한 실험을 통하여 4.2% 유량이 증가함을 확인하였다.

핵심용어: 공력소음, 원심팬, 의류 건조기, 전산유체역학, 최적설계, 팬 유량 성능

ABSTRACT: The purpose of this study is paper is to improve the flow performance and to reduce the aerodynamic noise of air discharge system consisting of a centrifugal fan, ducts and a housing for the clothes dryer. Using computational fluid dynamics and acoustic analogy based on FW-H (Ffowcs-Williams and Hawkings) Eq., air flow field and acoustic fields of the air discharge system are investigated. To optimize aerodynamic performance and aerodynamic noise, the response surface method is employed. The two factors central composite design using the inflow and outflow angles of fan blades is adopted. The devised optimum design shows the reduction of turbulent kinetic energy in the ducts and the housing of the system, and as a result, the improved flow rate and reduce noise is confirmed. Finally, the experment using the proto-type manufactured usign the optimum design shows the increase of flow rate by 4.2%.

Keywords: Aerodynamic noise, Centrifugal fan, Clothes dryer, Computational fluid dynamics, Optimization design, Fan flow performance

PACS numbers: 43.28.Ra, 43.28.Py

1. 서 론

의류 건조기는 꾸준히 수요가 증가하고 있는 가전 제품으로 관련 제조사의 주력 상품중의 하나로 자리 매김하고 있다. 건조기의 특성상 소비자들은 건조기의 성능과 더불어 소음을 주요 성능지표중의 하나로

인식하고 있기 때문에, 제조사에서는 이를 향상시키려는 연구를 진행하고 있다. 이러한 건조기의 종류는 습기를 가진 공기를 외부로 배출하는 방식에 따라 직접적으로 건조기로부터 대기 중으로 배출하는 배기 방식과 응축하여 물로 배출하는 전기 방식이 으로나 늘 수 있으며, 배기 방식에서는 공기 배출 성능을 크게 좌우하는 부분 중 하나가 바로 팬 시스템이다.

본 연구에서는 건조기의 건조 성능을 향상시키고 소음을 저감하기 위하여 기존의 원심팬의 유량 성능

†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)

을 향상시켜 건조기의 배출 성능을 증가시키고 아울러 팬 유동 소음을 저감을 시키고자 한다. 이와 관련된 연구로 Shin *et al.*^[1] 등은 냉장고의 냉동실 냉기 순환용 원심팬을 대상으로 전산유체역학을 통해 유량 성능을 분석하고, 팬으로부터 발생하는 와류를 저감함으로 유동 성능을 향상시킨 바 있다. 또한 최적화 설계 기법으로 반응표면법을 이용해 원심팬의 입구각, 출구각 및 내경 형상을 인자로 날개형상 최적설계에 대한 연구를 진행하였다.^[2] Ryu *et al.*^[3]은 축류팬 시스템의 주요 유량 성능 요소인 오리피스 최적설계를 통해 팬 시스템에 대한 기여도를 분석하였으며, Kim *et al.*^[4]은 원심팬 시스템에서의 하우징 형상변경을 통해 정제 유동 개선을 수행하였다. 특히 팬 시스템의 유동소음과 관련해서는, Lee *et al.*^[5]은 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용한 전산유체역학 수치 해석 자료를 기반으로 이른바 복합전산공력음향학(Hybrid Computational Aeroacoustics)을 통해 유동장과 음향장을 분리하여 축류팬의 유동 특성 및 소음을 예측하는 연구를 진행하였고, Heo *et al.*^[6]은 복합전산공력음향학을 원심팬에 적용하여 소음을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 하지만 기존의 연구대상인 팬 등은 비교적 간단한 형상들로 구성되어 있어 입출구의 복잡한 덕트 형상에 따른 입출구 영향은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 배기식 건조기에 사용되는 공기배기시스템의 유동 성능 및 공력소음 저감을 위해 선행연구들을 기반으로 배기식 건조기에 사용되는 원심팬의 형상을 최적 설계함으로써 그 성능을 향상시키고자 한다. 최적화 기법으로 반응표면기법(Response Surface Method)을 이용하였으며, 주요 설계 인자로는 팬 날개 입구각, 출구각 형상을 선정하였다. 이를 통해 최적 설계 인자를 도출하여 원심팬 형상 최적화를 수행 후, 최적 설계 형상팬을 적용한 팬 시스템에서의 유동 성능 향상과 공력소음 저감 결과를 제시하였다.

II. 대상 시스템과 수치해석검증

2.1 대상 배기시스템과 수치해석기법

본 연구에서는 팬 시스템의 유동 특성을 파악하기 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUENT를 사용

하였으며 3차원 비압축성 RANS(Reynolds averaged Navier-stokes) 방정식을 지배방정식으로 수치 해석을 수행하였다. 해당 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \rho u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_j u'_i} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

난류의 거동을 해석하기 위한 난류 모델로는 RNG k-ε 모델을 사용하였다.^[2,7] 대상 건조기의 배기 시스템은 Fig. 1에서 제시하였으며, 원심팬 형상은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 지름은 193 mm, 높이 76.5 mm, 입구각 109°, 출구각 138°, 폭 2.7 mm의 형상을 가진 20개의 날개로 구성되어 있다. 대상 원심팬은 건조기 운용 시 적용되는 1800 r/min의 회전 속도를 가진

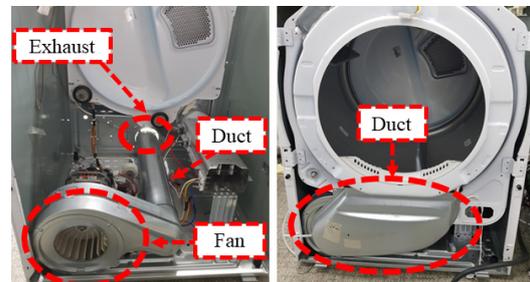


Fig. 1. Fan system of clothes dryer: fan, housing, inlet duct, and exhaust duct.



Fig. 2. CAD model of target centrifugal fan.

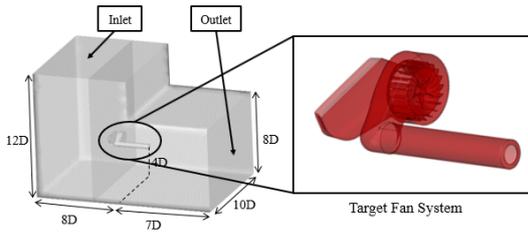


Fig. 3. Computational domain of fan system.

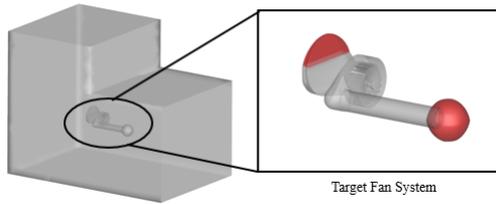


Fig. 4. Integral surface for application of FW-H equation.

다. 수치 해석을 위해 사용된 영역은 Fig. 3과 같이 대상 팬 시스템 전체적인 유동 흐름을 잘 파악할 수 있도록 충분한 부피를 가진 전체 계산영역을 구성하였으며 경계조건은 시스템의 입구 및 출구에 대기압 조건인 무부하 조건으로 설정하여 기존 및 다양한 형상의 팬이 적용된 팬 시스템을 수치 해석하였다. 총 격자수는 약 2,000 만 개 이상의 격자들로 구성하였다. 또한 소음 성능을 분석하기 위해 FW-H(Ffowcs-Williams and Hawkings) 모델을 이용해 음향장을 분석하였다.

Fig. 4에서 대상 팬 시스템에 대하여 소음예측을 위하여 잡은 FW-H 방정식의 적분면을 도시하였다. 팬뿐만 아니라 입출구 덕트 시스템의 영향을 고려하기 위하여 입출구에 적분면을 위치시켰다. 적분면은 팬 시스템의 유동소음원을 충분히 포함할 수 있도록 덕트 입구에서는 팬 반경 R 의 호 형태, 출구에서는 $2R$ 의 지름을 갖는 구형의 형태로 구성하였다.

2.2 수치해석기법의 검증

본 연구에서 이용된 전산유체역학의 신뢰성을 검증하기 위해 Vane 유량계를 통해 기존 원심팬의 유량에 대한 실험을 진행하였다. 사용된 Vane 유량계는 Vane flowmeter으로 직경 70 mm의 재원을 가진다. 전체 실험은 Fig. 5에 나타난 도식과 같은 구성으로

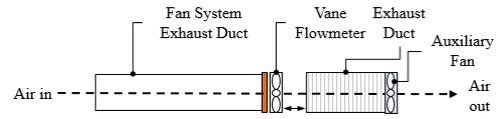


Fig. 5. Schematics of flow rate experiment.

진행되었으며, 팬 시스템의 출구 덕트에 Vane 유량계를 설치하고 후면 보조 팬을 설치하여 유동의 흐름을 제어하여 유량 성능을 측정하였다. 실험 조건은 수치 해석의 경계 조건과 동일하게 무부하 측정을 진행하였으며 그 결과 기존 팬 시스템의 수치 해석 유량과 비교하여 약 10.4%의 오차를 확인하였다. 복잡한 형상을 수치 해석을 위해 격자를 생성하는 과정에서 단순화를 진행한 것을 고려하고 실험값의 오차를 고려할 때, 팬 형상에 따른 유동 성능의 경향성 판단에 충분한 정확도로 판단된다.

III. 팬 날개 최적화

3.1 최적화 기법 및 설계 변수

유동 및 소음 성능 향상을 위해 반응표면기법의 중심합성계획법을 통해 최적화 설계를 수행하였다. 대상 설계인자는 유량 및 소음 성능에 영향을 미치는 팬 날개의 입구각, 출구각을 선정하여 연구를 진행하였다.^[3] Fig. 6을 통해 설계 변수에 대해 β_1 은 입구각, β_2 는 출구각을 각각 확인할 수 있다. 입구각과 출구각의 각도 범위는 대상 원심팬의 형상인 전향의

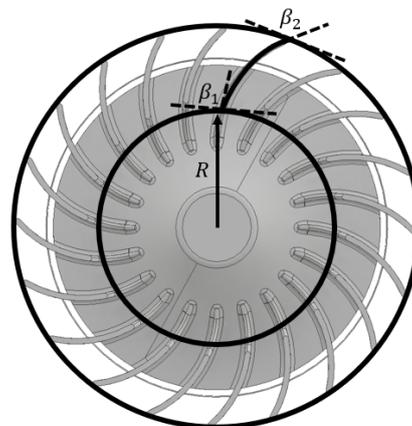


Fig. 6. Optimization design factors.

형 원심팬에 있어 적합한 각도 범위를 적용하였다.^[7]

입구각, 출구각의 최적화 설계 인자 범위는 Table 1에서 확인할 수 있다. 최적화 기법인 반응표면분석법은 다양한 실험 인자들이 어떠한 반응 변수에 영향을 미치는 상황 시에 반응의 변화가 이루는 반응 표면에 대한 분석법을 의미한다. 따라서 본 연구는 출구각, 입구각을 설계 인자로 고려한 2인자 중심합성계획법을 채택해 유량과 소음레벨을 반응 변수로 삼아 반응 변화에 대한 반응 표면을 분석하여 최적 설계 인자를 찾는 방법을 사용하였다. 중심합성계획법을 위해 고려된 모델은 총 9가지이며 설정된 인자와 레벨을 Table 2에서 확인할 수 있다.

팬의 경우 유량성능과 동시에 소음성능도 중요하기 때문에 적절한 반응 변수의 선정이 필요하다. 동일한 반지름을 가진 원심팬의 경우 유량은 r/min 에 비례하고 소음레벨의 차이는 r/min 의 5-6 거듭제곱의 로그값에 비례한다.^[2] 즉 회전속도 변화율에 따른 유량변화율보다 음향에너지 변화율이 훨씬 더 민감하다. 따라서, 같은 속도로 회전하였을 때 유량이 최대화 되도록 기존 팬 형상을 변경하였을 경우, 유량이 최대화된 팬의 회전속도를 낮추어 유량보다 큰 비율로 소음을 저감할 수 있다. Shin *et al.*^[2]은 가정용 냉장고에 사용되는

Table 1. Blade inlet & outlet angle parameter.

	Range
Inlet blade angle [°]	94 ~ 124
Outlet blade angle [°]	123 ~ 153

Table 2. Blade inlet & outlet angle parameter.

case	Level		
	-1	0	1
β_1 [°]	94	109	124
β_2 [°]	123	138	153

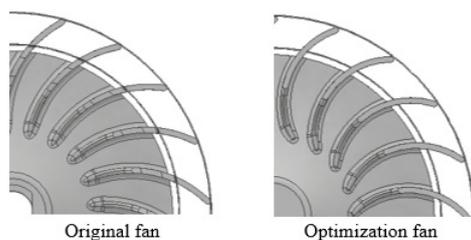


Fig. 7. Comparison of original & optimized fan blade.

원심팬에 대하여 같은 방법으로 반응표면법을 이용하여 원심팬의 성능과 소음을 최적화하는 연구를 수행하였다. 본 연구에서도 같은 방법을 적용하여 유량을 반응 인자로 설정하여 최적화를 수행하였다.

각 모델의 팬들은 앞장에서 기술한 가상 팬 테스트 시스템에 적용하여 수치 해석을 진행하였다. 최적화 결과 유량에 대한 회귀방정식을 다음식과 같이 도출할 수 있었다.

$$VFR = 2.6341 + 0.0232\beta_1 + 0.0266\beta_2 + 0.0131\beta_1^2 + 0.0219\beta_2^2 - 0.0041\beta_1\beta_2 \quad (3)$$

Eq. (3)에서 나타낸 것과 같이 유량을 목적 함수로 선정하였으며 입구각 및 출구각을 의미하는 두 가지 변수와 목적 함수인 유량의 상관성을 확인할 수 있다. 도출된 회귀방정식에서 유량이 최대가 되는 인자인 입구각과 출구각을 도출하였다. Fig. 7은 기존 및 최적화 팬 모델의 날개 형상의 비교를 확인할 수 있다.

3.2 최적화 팬 유동 및 소음 분석

본 절에서는 기존 및 최적 설계 팬의 수치해석을 진행하였고 변화된 팬의 형상에 따른 유동 특성을 확인하기 위해 유동장 및 유량 특성을 분석하였다. 최적 형상 팬이 적용된 배기 시스템에서의 유량은 기존 대비 약 4.56% 증가한 결과를 예측하였다. Fig. 8에서 수치해석 결과 기존 모델과 최적 모델의 속도장을 비교하였다. 기존보다 최적형상의 팬 날개 주위의 유체 속도가 증가함을 알 수 있다. 팬 날개 입구각 및 출구각의 변화에 따라 주위 유동 흐름 영향을 관찰하기 위해 접선 방향 속도와 반경 방향 속도를 분석하였다. Fig. 9는 접선 방향 속도를 나타내며 Fig. 10은 반경 방향 속도를 나타낸다. 해당 결과를 통해 최적화 팬 날개 형상이 원을 따라 더 기울어짐으로 인해 접선 방향 속도가 증가하고 반경 방향 속도가 줄어드는 경향을 알 수 있었다. 따라서 증가된 팬 날개의 입구각 및 출구각이 반경 방향 및 접선 방향의 유동 흐름에 영향을 미치고 결과적으로 개선된 효과를 통해 유동을 원활히 배출한다는 것을 분석하였으

며, 이는 유량 성능을 향상시키는 인자로 작용함을 알 수 있었다. 추가적으로 수치 해석을 통해 예측된 비정상 유동장 정보를 바탕으로 소음레벨을 예측하였다. Fig. 11에서 예측한 소음레벨을 도시하였다. 유동해석에 사용한 격자의 정밀도와 시간 간격을 고려

하여 4,000 Hz 대역까지를 관심주파수로 설정하였다. 대부분의 주파수영역대에서 최적화 팬이 낮은 소음레벨을 보이는 것을 확인할 수 있으며 전체 소음레벨은 약 2.4 dBA 감소하는 것으로 예측되었다. 이러한 소음 저감의 원인을 분석하기 위해 기존 팬과 최적형상의 팬 사이의 난류 운동 에너지 분포를 Fig. 12에서 비교하였다. Fig. 12의 난류운동 에너지를 통해 최적 팬 형상이 적용된 모델이 기존 팬 시스템

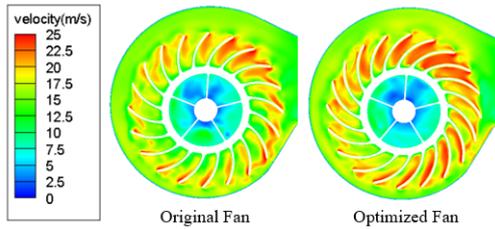


Fig. 8. Comparison of velocity magnitude.

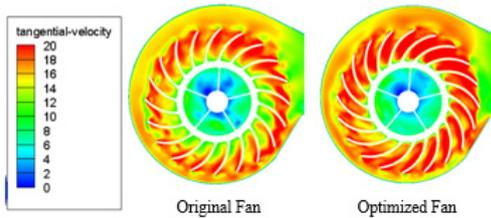


Fig. 9. Comparison of tangential-velocity.

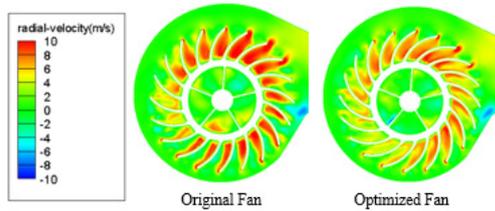


Fig. 10. Comparison of radial-velocity.

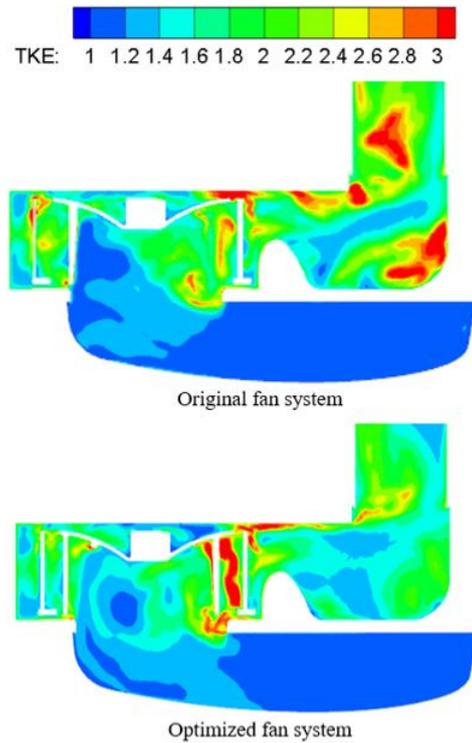


Fig. 12. Turbulent kinetic energy of fan system.

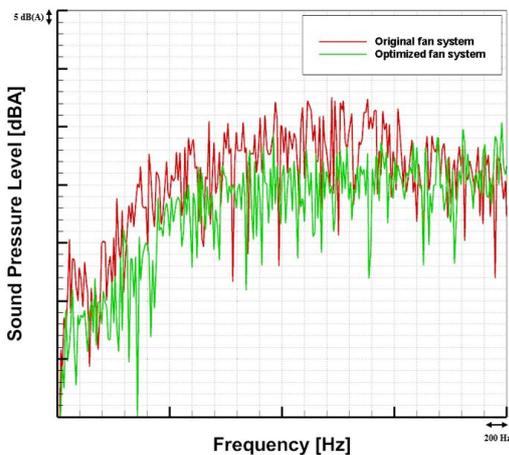


Fig. 11. Comparison of sound pressure spectrum.

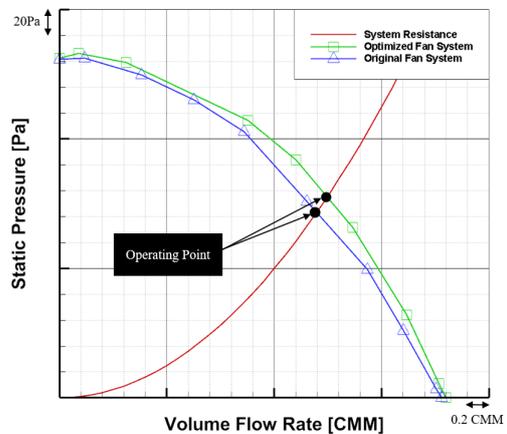


Fig. 13. Comparison of P-Q curve experiment.

템에 비해 팬 주위 및 덕트 내 난류 운동 에너지가 저감되었음을 알 수 있다. 따라서 최적 형상의 팬이 유동성능을 증가시킬 뿐만 아니라 공력소음도 저감시킴을 확인할 수 있다.

마지막으로, 최적 형상의 날개를 적용한 팬 시제품을 제작하고 유량을 측정하기 위해 실험을 진행하였다. 수치해석방법의 검증 때와는 다르게 다양한 작동조건에서 유량성능을 검증하기 위해서 팬 테스트를 이용하여 P-Q 곡선을 측정하였다. 사용한 팬 테스트는 650·650·1650(W·D·L) mm 크기 챔버를 가지며 측정 유량 범위는 1,000 CMH까지 측정이 가능하다. P-Q 곡선으로부터 비교 지점은 수치 해석의 경계 조건인 무부하 조건 및 100 Pa 지점에서의 그 수준을 파악하였다. 그 결과 기계실 저항 곡선과 P-Q 곡선이 만나 실제 작동 영역인 Operating Point에서의 유량이 4.2% 증가함을 Fig. 13을 통해 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 건조기에 사용되는 팬 시스템의 유동 및 소음 성능 향상을 위해 팬 최적화 연구를 수행하였다. 최적화 기법으로 반응표면법의 중심합성계획법을 통해 팬 날개 입구각과 출구각을 인자로 두어 최적 날개 형상을 도출하였고 시스템에 적용하였다. 이를 전산유체역학을 기반으로 유동 성능 및 소음 성능을 분석하여 유량은 4.56% 증가, 소음은 2.4 dBA 저감함을 예측하였다. 최적형상을 기초로 제작한 시제품에 대한 실험을 통해 작동점에서 유량이 약 4.2% 향상됨을 확인하였다. 향후 소음성능의 추가 검증과 유량과 소음 성능의 추가 향상을 위하여 반지름 인자를 추가한 최적설계를 진행할 예정이다.

감사의 글

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

References

1. 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).
2. D. Shin, H. Heo, C. Cheong, T. Kim, and J. Jung, "Performance-noise optimization of centrifugal fan using response surface method" (in Korean), Trans. Korean Soc. Mech. Eng., **41**, 165-172 (2017).
3. S. Ryu, S. Kim, C. Cheong, and J. Kim, "Optimization of flow performance by designing orifice shape of outdoor unit of air-conditioner" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 371-377 (2017).
4. J. Kim, S. 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).
5. S. Lee, S. Heo, C. Cheong, S. Kim, and M. Seo, "Computation of internal BPF noise of axial circulating fan in refrigerators" (in Korean), Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., **19**, 454-461 (2009).
6. 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).
7. P. B. Frank, *Fan Handbook* (McGraw-Hill, Inc, New York, 1998), pp. 7.1-7.58.

저자 약력

▶ 최 진 호 (Jinho Choi)



2017년 2월: 경상대학교 기계공학 학사
2018년 9월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학 석사 과정

▶ 유 서 윤 (Seo-Yoon Ryu)



2016년 2월: 계명대학교 기계자동차 공학
과 학사
2018년 2월: 부산대학교 기계공학 석사
2018년 2월 ~ 현재: 부산대학교 기계공학
부 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 민 규 (Min-kyu Kim)



2014년 2월: 부산대학교 기계공학 학사
2016년 2월: 부산대학교 기계공학 석사
2016년 3월 ~ 현재: ㈜에코에너지기술연구소 선임연구원

▶ 이 광 호 (Kwangho Lee)



2007년 2월: 부산대학교 기계공학 학사
2009년 2월: 부산대학교 기계공학 석사
2013년 8월: 부산대학교 기계공학 박사
2011년 3월 ~ 현재: ㈜에코에너지기술연구소 책임연구원