

폐수처리용 기계적 증기 재압축 터보 송풍기 개발에 관한 연구

김일겸¹, 박우철^{1*}, 손상석², 김용남³

¹강원대학교 기계시스템공학부, ²순천향대학교 기계공학과, ³한국송풍기 엔지니어링

A Study on Development of Mechanical Vapor Recompression Turbo Blower for Wastewater Treatment

Il-Gyoum Kim¹, Woo-Cheul Park^{1*}, Sang-Suk Sohn², Young-Nam Kim³

¹School of Mechanical System Eng., Kwangwon National University

²Dept. of Mechanical Eng., Soon Chun Hyang University

³Korea Fan Engineering

요약 본 연구는 폐수처리용 MVR 터보 송풍기를 개발하기 위하여 CFD 해석을 수행하여 성능을 검토하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다. 유동에 대한 송풍기의 구조적 안정성에 대하여 검토하기 위하여 FSI 해석을 수행하였으며, 모드 해석을 수행하여 송풍기의 운전조건에 대한 동적 안정성을 검토하였다. 유동해석을 수행하여 개발하고자 하는 터보 송풍기의 운전조건에 적합한 임펠러의 blade 수는 Main blade가 16개이고, Splitter blade는 Main blade 중간에 1개인 것으로 나타났다. 효율은 해석값이 87.3%로 나타났으며, 실험값은 87.7%로 나타나, 실험값 기준으로 약 0.5 % 정도 작게 예측되었다. 유동-구조연성 해석 결과는 안전계수가 케이스는 약 2.1 이상이고 임펠러는 15 이상으로 나타났으며, 최대변위가 케이스는 약 1.05 mm이고 임펠러는 0.02mm로 나타나 구조적으로 안전한 것으로 판단된다. 모드 해석에 의하면 케이스와 임펠러의 1차 모드의 고유진동수는 각각 70.30 Hz와 142.67 Hz이다. 터보 송풍기 회전에 의한 가진 주파수는 53.63 Hz이므로 고유 진동수가 가진 주파수에 비하여 크게 나타나고 있어, 공진 현상에 대하여 안정적인 것으로 판단된다.

Abstract In this study, to develop an MVR turbo blower for wastewater treatment, fluid-structure interaction analysis and modal analysis were performed to predict the performance of the turbo blower, and the performance of the turbo blower was confirmed through experiments. The fluid analysis results showed that the number of impeller blades suitable for the operating conditions of the turbo blower to be developed was 16 for the main blade and one for the splitter blade in the middle of the main blade. Regarding efficiency, the analysis and experimental values were 87.3% and 87.7%, respectively, which was predicted to be approximately 0.5% smaller based on the experimental value. FSI analysis showed that the safety factor was approximately 2.1 or more for the case and 15 or more for the impeller, and the maximum displacement was approximately 1.05mm for the case and 0.02mm for the impeller, which is considered structurally safe. Modal analysis showed that the natural frequencies of the case and the first mode of the impeller were 70.30Hz and 142.67Hz, respectively, and the resonance frequency of the turbo blower was 53.63Hz. Because the natural frequency is larger than the resonance frequency, it is judged to be stable against the resonance phenomenon.

Keywords : CFD, FSI, Modal Analysis, MVR, Turbo Blower

본 논문은 중소벤처기업부 2021년도 창업성장기술개발사업 전략형(S3159415) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Woo-Cheul Park(Kwangwon National Univ.)

email: wchpark@kwangwon.ac.kr

Received November 4, 2022

Revised December 5, 2022

Accepted January 6, 2023

Published January 31, 2023

1. 서론

수용액에서 순수한 물을 분리하는 방법에는 증류법(Distillation), 역삼투압법(Reverse Osmosis, RO), 전기 이온법 등이 있다. 이중 증류법의 원리를 기초로 하여 연구 개발된 것이 기계적 증기 재압축(Mechanical Vapor Recompression, 이하 MRV) 증기 농축장치이며, 이 시스템의 가장 큰 특징은 증발과 농축과정에서 에너지를 절감하기 위하여 자체에서 증발시킨 증기를 재압축하여 엔탈피를 상승시켜 그 온도 차이를 이용하여 열교환을 시켜 원액을 증발하게 하는 것이다. 이를 통하여 폐증기의 약 90%를 회수하여 재사용함으로써 에너지비용을 절감할 수 있다. 에너지 비용 절감을 위하여 MRV 시스템은 수처리 장비, 화학공정 장비, 해수담수화 장비 등에 적용되어 사용되고 있다[1-3].

Fig. 1은 전통적인 방법인 열에너지를 이용하여 증발하는 방식과 MVR을 이용하여 증발하는 방식을 비교한 그림이다.

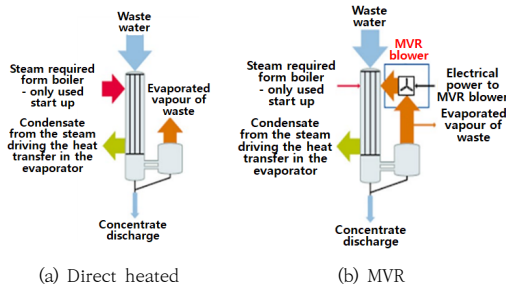


Fig. 1. The two different evaporation operations

다양한 분야에 적용되어 사용하고 있는 MVR용 터보 송풍기는 대부분 수입에 의존하고 있어 국산화 개발이 시급한 실정이다. 송풍기에 관한 기존 연구로는 송풍기 성능 파악 또는 성능 향상을 위한 축류 송풍기의 구조해석[4]과 유동-구조해석[5]에 대한 연구가 있으며, 터보 송풍기의 유동해석[6,7]과 유동-구조해석[8]에 대한 연구가 수행되었다.

본 연구에서는 폐수처리용 MVR 터보 송풍기를 개발하기 위하여 CFD 해석을 수행하여 성능을 검토하였으며, 이를 실험을 통한 결과와 비교하였다. 유동에 대한 송풍기의 구조적 안정성에 대하여 검토하기 위하여 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction, 이하 FSI) 해석을 수행하였다. 또한, 모드 해석을 수행하여 송풍기의 운전조건에 대한 동적 안정성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 유동 해석

개발하고자 하는 MGR 터보 송풍기는 작동유체가 수증기(Steam)이고, 요구 성능은 풍량 31.5 m³/s, 전압 9.68 kPa, 회전수 3,218 rpm, 입구온도 72 °C에서 효율 87%이상이다. 요구 성능을 만족하는 터보 송풍기를 설계하고, 설계 자료를 활용하여 수치해석을 수행하여 성능을 예측하였다. 수치해석은 상용코드인 ANSYS CFX 13.0을 사용하였다. 난류 모델은 유동의 박리현상 해석에 유용한 전단응력 이송모델(Shear Stress Transport model)을 사용하였으며, 회전과 정지 도메인의 경계는 Frozen rotor interface를 적용하였다.

Fig. 2는 개발하고자 하는 터보 송풍기의 3D 모델과 주요부의 명칭을 나타낸 것이며, 임펠러의 크기는 ϕ 1530 mm이다. Fig. 3은 수치해석을 수행하기 위한 모델링과 경계조건을 나타낸 것으로 일반유동이 발생하는 Inlet 도메인, Outlet 도메인, Stator 도메인과 회전유동이 발생하는 Rotor 도메인의 4개의 도메인으로 구성하였다.

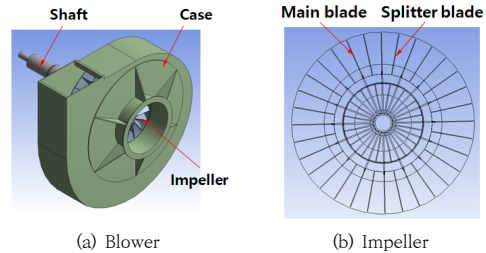


Fig. 2. Shape of MVR blower

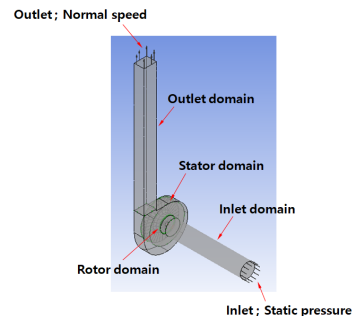


Fig. 3. Analysis domains and boundary conditions

최적의 Main blade 수를 알아보기 위하여 Splitter blade 수가 Main blade 사이에 1개가 있는 것을 기준

으로 Main blade의 수를 14, 15, 16, 17, 18개의 5종류로 다르게 모델링하여 CFD 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 유량 31.5 m³/s, 회전수 3,218 rpm, 증기(steam) 입구온도 72 °C 조건에서 Splitter blade가 Main blade 사이에 1개 있을 경우에 Main blade의 개수 변화에 따른 송풍기의 성능과 효율을 나타낸 것이다. 축동력은 임펠러의 토크를 계산한 후 각속도를 곱하여 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 축동력과 전압은 Main blade의 수가 증가함에 따라 증가하나 효율은 Main blade의 수가 16개일 때 최대값인 87.3 %로 나타낸 후 blade 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 주어진 송풍기의 운전조건에서 최적의 Main blade 수는 16개임을 알 수 있다. Fig. 5는 Main blade 수가 16개이고 Splitter blade가 Main blade 사이에 1개일 경우에 대하여 임펠러 중앙에서의 상대속도를 나타낸 것이다.

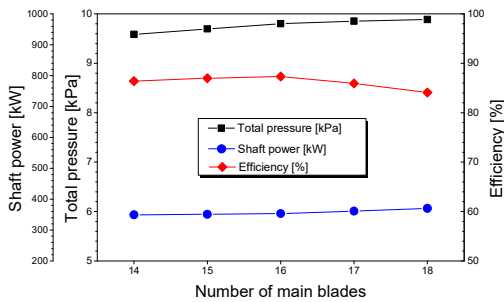


Fig. 4. Performance according to the number of main blades (splitter blade=1)

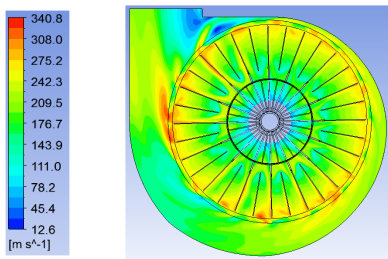


Fig. 5. Contour of absolute velocity at impeller center (main blades = 16, splitter blade = 1)

최적의 Splitter blade 수를 알아보기 위하여 Main blade 수가 16개일 경우 각각의 Main blade 중앙에 Splitter blade의 수를 달리하여 모델링하고 CFD를 수행하였다. Splitter blade의 개수는 0, 1, 2, 3개로 하였다. Fig. 6은 유량 31.5m³/s, 회전수 3218 rpm, 증기

(steam) 입구온도 72 °C 조건에서 Main blade의 수가 16개일 경우에 대하여 Main blade 중앙에 Splitter blade 수에 따른 송풍기 성능을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 축동력과 전압은 Splitter blade의 수가 증가함에 따라 증가하나 효율은 Splitter blade의 수가 1개일 때 최대값인 87.3 %를 나타낸 후 Splitter blade의 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 최적의 Splitter blade 수는 1개임을 알 수 있다.

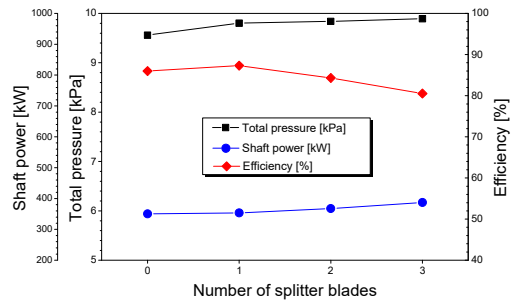


Fig. 6. Performance according to the number of splitter blades (main blades=16)

Fig. 7은 Main blade 수는 16개이고, Splitter blade 수가 1개인 터보 송풍기의 유량에 따른 성능곡선에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 송풍기의 운전조건은 회전수 3,218 rpm, 입구온도는 72 °C이다. 그림에 나타낸 바와 같이 전압은 유량 30 m³/s 이후 유량 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내며, 효율은 유량이 증가함에 따라 증가하지만, 유량 31.5 m³/s 일 때 최고의 효율을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내고 있다.

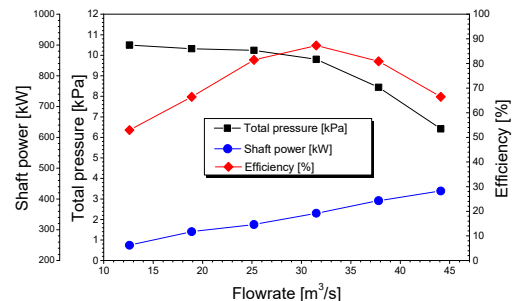


Fig. 7. Turbo blower performance curve for MVR

Fig. 8은 송풍기 성능을 실험하기 위하여 제작한 송풍기와 성능평가를 위한 실험을 하기 위하여 설치된 장치를 나타낸 사진이다. 송풍기 성능시험은 KS B6311 송풍

기의 수행 방법에 준하여 수행하였으며, 성능시험 검증을 위하여 한국산업기술시험원의 시험성적서(22-056468-01-1)를 발급받았다.

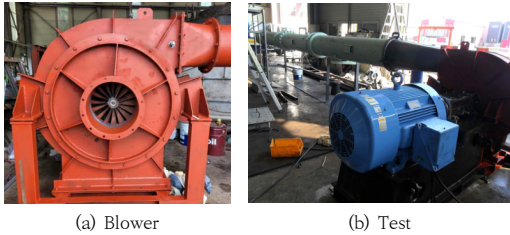


Fig. 8. Photos of the blower and the performance tester for MVR

Table 1은 실험 결과와 해석 결과를 비교한 것이다. 동일한 운전조건에서 해석에 의한 효율은 87.3%로 나타났으며, 실험 결과값은 87.7%로 나타났다. 이는 실험 결과를 기준으로 해석 결과의 차이가 약 0.5 % 정도로 매우 작게 나타나고 있는데, 이를 통하여 해석이 타당하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison of experimental and analysis results.

Item	Experiment	Analysis
Gas temperature [°C]	72.0 (Steam)	
Flow rate [m ³ /s]	31.5	
Impeller speed [rpm]	3,218	
Shaft power [kW]	350.0	353.6
Total pressure [kPa]	9.68	9.80
Efficiency [%]	87.7	87.3

2.2 구조해석

송풍기의 케이스와 임펠러의 구조 건전성을 예측하기 위하여 구조해석을 수행하였다. 송풍기의 운전조건에 대한 유동 해석에서 도출된 케이스 벽면과 임펠러에 작용하는 압력을 구조해석의 하중조건으로 사용하는 단방향 FSI 해석을 적용하여 유동 압력에 의한 응력과 최대변위를 구하였다. 또한, 송풍기에 대하여 모드 해석을 수행하여 송풍기 운전 조건에서의 진동현상에 대하여 고찰하였다.

해석에 적용한 재료는 염소에 의한 부식 환경에서 뛰어나고 기계적 강도가 뛰어나 해수담수화 설비에 특히 많이 사용되는 UNS S32750(Alloy 2507) Stainless steel을 사용하였으며, 기계적 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Material properties of the case and the impeller

Material	UNS S32750(Alloy 2507) stainless steel
Density [kg/m ³]	7,800
Elastic modulus [GPa]	210
Poission's ratio	0.27
Tensile ultimate strength [MPa]	860
Tensile yield strength [MPa]	590

Fig. 9는 구조해석과 모드해석을 수행하기 위한 송풍기 해석모델과 경계조건을 나타낸 것이다. 케이스의 경우는 입구 배관과 출구 배관과 연결되는 부분과 바닥에 고정되는 부분에 고정지지 조건을 부여하였으며, 임펠러는 동력축과 연결되는 부분에 고정지지 조건을 부여하였다.

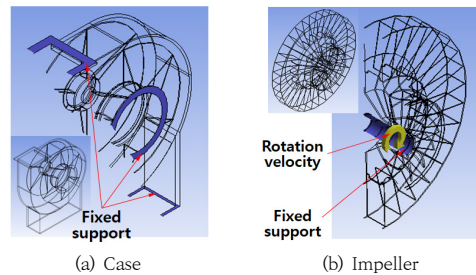


Fig. 9. Model and boundary condition for FIS and modal analysis

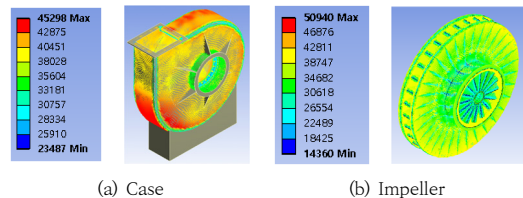


Fig. 10. Imported pressure[Pa] for FSI analysis

Fig. 10은 Main blade 16개와 Splitter blade 1개인 임펠러에 대하여 유량 31.5 m³/s, 증기(steam) 입구 온도 72 °C, 회전수 3,218 rpm에 대한 유동 해석을 통하여 도출된 유동 압력을 케이스와 임펠러에 작용하는 구조 해석의 압력 하중으로 적용한 것을 나타낸 것이다. 케이스의 경우 앞면과 뒷면에 비하여 원주 방향의 벽면에 높은 압력하중을 나타내고 있다. 임펠러의 경우, 케이스

에 비하여 대체적으로 낮은 압력 하중 분포를 나타내고 있으나, 최대 압력 하중은 케이스보다 크게 나타나고 있다. 그러나 최대 압력의 분포영역은 매우 국소적으로 임펠러의 뒷면에 나타난다.

Fig. 11은 케이스에 대한 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 100 MPa 이하의 낮은 응력 분포를 나타내고 있으며 흡입구 반대편의 중앙부에서 높은 응력 분포를 나타내고 있으며, 최대응력은 292.7 MPa이다. 압력 하중에 의한 변형도 흡입구 반대편의 중앙부에서 주로 발생하며, 최대 변위는 1.05 mm이다. 안전계수는 2.1 이상으로 나타나 케이스는 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

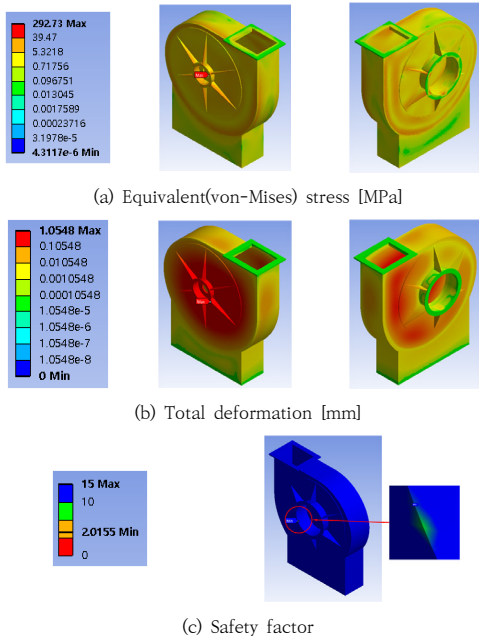


Fig. 11. Results of FSI analysis for case

Fig. 12는 임펠러에 대한 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 응력은 주로 흡입구에서 발생하지만, 최대응력은 흡입구 반대편의 축에서 발생하며 크기는 25.6 MPa로 매우 낮은 값이다. 임펠러에 발생하는 변형은 반경 방향으로 커지는 경향을 나타내지만, 최대변위는 임펠러의 끝단에서 0.023 mm로 매우 작게 나타나고 있다. 안전계수는 15 이상으로 나타나 임펠러는 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

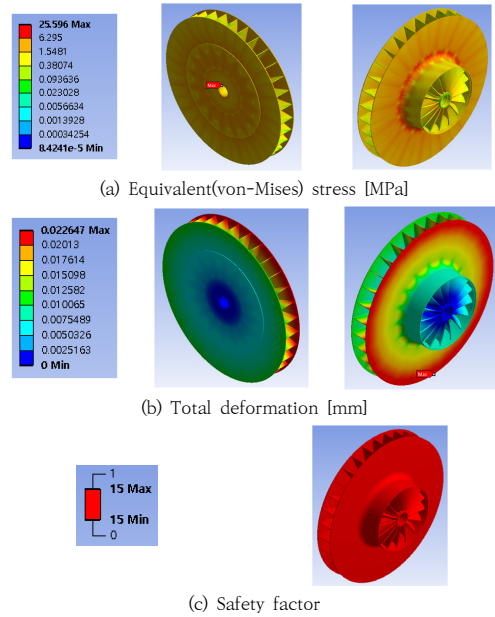


Fig. 12. Results of FSI analysis for impeller

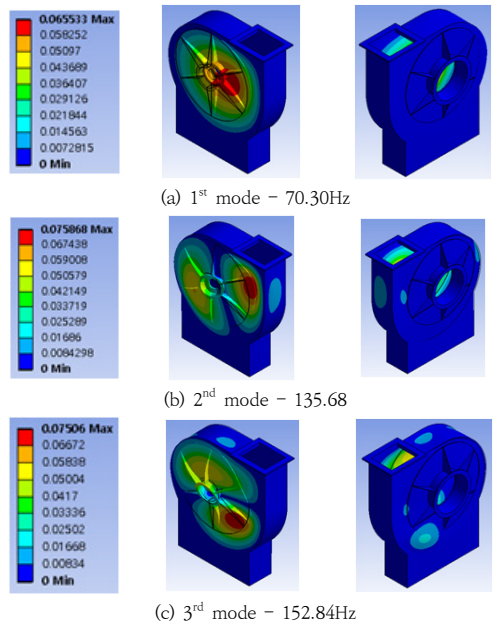


Fig. 13. Total deformation [m] of modal analysis results for case

Fig. 13과 Fig. 14는 송풍기의 케이스와 임펠러에 대한 모드 해석 결과를 나타낸 것이다. 개발하고자 하는 터보 송풍기의 회전속도는 3,218 rpm 이므로, 송풍기 회

전으로 발생하는 가진 주파수는 53.63 Hz로 고려할 수 있다. Fig. 13에 나타난 바와 같이 케이스의 낮은 차수의 모드 형상은 주로 케이스 흡입구 반대편에서 발생한다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 임펠러의 1차 모드는 흡입구 방향의 구조물에서 발생하고, 나머지 모드는 임펠러 전체에서 나타나고 있다. 케이스와 임펠러의 각 모드별 진동수는 Table 3과 같다. 케이스와 임펠러의 1차 모드의 진동수가 송풍기 회전의 가진 주파수에 비하여 크게 나타나고 있어 송풍기 운전에 의한 공진 현상에 대하여 안정적인 것으로 판단된다.

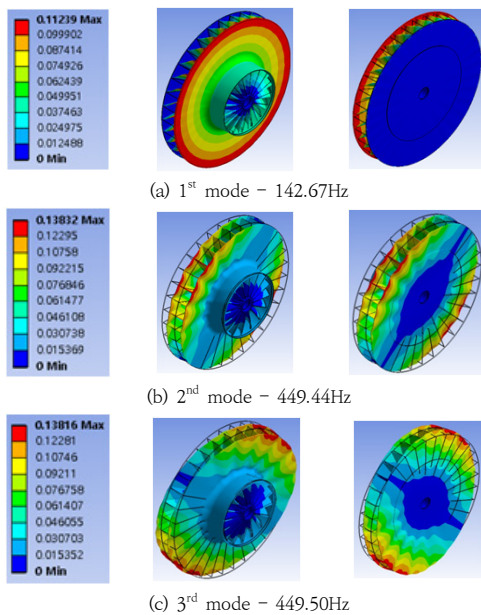


Fig. 14. Total deformation [m] of modal analysis results for impeller

Table 3. Modal frequencies in parts

mode \ parts	Case	impeller
1st mode [Hz]	70.30	142.67
2nd mode [Hz]	135.68	449.44
3rd mode [Hz]	152.84	449.50

3. 결론

본 연구에서는 작동유체가 수증기(Steam)이고, 성능은 풍량 31.5 m³/s, 전압 9.68 kPa, 회전수 3,218

rpm, 입구온도 72 °C에서 효율 87 % 이상이며, 임펠러의 크기는 φ1530 mm인 MVR 터보 송풍기를 개발하기 위하여 CFD 해석을 수행하여 성능을 검토하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다. 유동에 대한 송풍기의 구조적 안정성에 대하여 검토하기 위하여 FSI 해석을 수행하였으며, 모드 해석을 통하여 송풍기의 운전에 대한 구조적 안정성을 검토하였다. 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 개발하고자 하는 터보 송풍기의 운전조건에 적합한 임펠러의 blade 수는 Main blade가 16개이고, Splitter blade는 Main blade 중간에 1개인 것으로 나타났다.
- (2) 개발하고자 하는 터보 송풍기의 운전조건에 효율은 해석값이 87.3 %로 나타났으며, 실험값은 87.7 %로 나타나, 실험값 기준으로 약 0.5 % 정도 작게 나타나 해석이 타당하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.
- (3) 유동-구조연성 해석 결과는 안전계수가 케이스는 약 2.1 이상이고 임펠러는 15 이상으로 나타났으며, 최대변위가 케이스는 약 1.05 mm이고 임펠러는 0.02 mm로 나타나 유동 압력에 대하여 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.
- (4) 개발하고자 하는 터보 송풍기의 회전속도는 3218 rpm 이므로 가진 주파수는 53.63 Hz이다. 케이스와 임펠러의 1차 모드의 고유진동수는 각각 70.30 Hz와 142.67 Hz 이므로 고유 진동수가 가진 주파수에 비하여 크게 나타나 가진에 의한 공진 현상에 대하여 안정적인 것으로 판단된다.

References

- [1] Y.S. Lee, J.T. Park, "Waste Heat Recovery in Evaporation Plants by MVR System", Air-conditioning and refrigeration engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 36-45, 1990.
- [2] C. M. Lee, J. Y. Lim, R. Yun, "Investigation of MVR and TVR in Chemical Processes by Using Waste Steam", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No.4, pp.201-206, 2015. DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2015.27.4.201>
- [3] Y. M. Kim, W. G. Chun, D. K. Kim, "A Study on the Development of MVR Desalination Plant and Its Performance Analysis", Journal of Energy Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 59-65, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2016.25.3.059>
- [4] J. K. Kook, B. K. Cho, "A Study on Structural

Characteristics of Axial Fans Operating Speed Using Finite Element Analysis, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 2, pp. 593-601, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.2.593>

- [5] S. C. Kim, "Optimal Design using Flow-structure Interaction Analysis Method of Engine Generator Cooling Fan", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 24, No. 3, pp. 47-53, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.7842/kgas.2020.24.3.47>
- [6] J. Y. Park, M. R. Park, S. C. Hwang, K. Y. Ahn, "A Effects of Impeller Blade Thickness on Performance of a Turbo Blower", Journal of fluid machinery, Vol. 13, No. 4, pp. 5-10, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/KFMA.2010.13.4.005>
- [7] T.G. Park, H.T. Chung, J.Y. Park, B.I. Sung, "Numerical Prediction of the Optimal Stagger Angles for a High-Power Turbo Blower", Journal of computational fluids engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 75-81, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2011.16.3.075>
- [8] T.G. Park, H.T. Chung, H.B. Kim, J.Y. Park, "Numerical Study on the Aerodynamic Performances of the Turbo Blower Using Fluid-Structure Interaction Method", Journal of Power System Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 35-40, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.9726/kspse.2011.15.6.035>

김 일 검(II-Gyoun Kim)

[정회원]



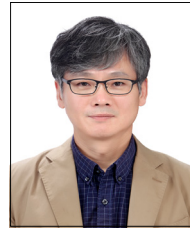
- 1988년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계과 (공학사)
- 1990년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2010년 10월 : 강남필터(주) 연구소장
- 2012년 1월 ~ 2018년 2월 : 첨단기공(주) 연구소장
- 2016년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 기계시스템공학부 강사

<관심분야>

유체기계, 산업기계설비, 공기조화

박 우 철(Woo-Cheul Park)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

지능형 구조물 및 시스템, 진동 및 소음, 친환경기계설비

손 상 석(Sang-Suk Sohn)

[정회원]



- 1983년 2월 : 인하대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 인하대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 9월 ~ 2012년 1월 : 삼성 전자 종합기술원 상무
- 2012년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 교수

<관심분야>

유체기계, 공기조화

김 용 남(Young-Nam Kim)

[정회원]



- 2018년 8월 : 한국방송통신대학교 첨단공학부 메카트로닉스과 (공학사)
- 1984년 7월 ~ 2014년 9월 : (주)동양 플랜트사업본부 공장장
- 2014년 10월 ~ 현재 : (주)한국송풍기 엔지니어링 대표이사

<관심분야>

유체기계