

구조해석을 이용한 제연용 축류팬 설계에 관한 연구

국정근¹, 조병관^{2*}

¹한국기술교육대학교 기계설계공학과, ²한국기술교육대학교 기계공학부

A Study on Design of Axial Flow Fan for Smoke Ventilation using Structural Analysis

Jeong-Keun Kook¹, Byung-Kwan Cho^{2*}

¹Department of Mechanical Design Engineering, Korea University of Education and Technology

²Department of Mechanical Engineering, Korea University of Education and Technology

요약 산업이 발전함에 따라 지하 공간을 활용하는 시설물이 급증하고 지하 공간에 대한 환기방식이 점차 환기유로를 직접 활용하는 방식으로 변경됨에 따라 화재가 발생하는 극한의 상황에서 제연 및 배기는 매우 중요하다. 현재는 환기팬을 벨트 구동식으로 적용하기에는 고온에 매우 취약하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 벽부형으로 제작하는 제연용 축류팬의 날개의 익형 설계와 허브의 설계를 3차원 모델링 프로그램을 통해 설계하고, CAE 프로그램인 Ansys Workbench를 활용하여 운전조건에 대한 정적구조해석과 고온 신뢰성 검토를 위한 열응력해석으로 통해 제연용 축류팬의 구조안전성을 검증하여 설계하였다. 설계된 제연용 축류팬의 고온 신뢰성 시험을 공인인증기관에서 실시하여 구조안전성을 확보하였다.

Abstract As industry develops, the number of facilities utilizing underground spaces is increasing, and the ventilation method for underground spaces is gradually changing to a method that directly utilizes ventilation channels. Currently, there is a disadvantage in that the ventilation fan is very vulnerable to high temperatures to be applied as a belt drive type. In this study, an airfoil design for the blades and hub of a wall-mounted axial flow fan for smoke control were designed through a 3D modeling program. A static structural analysis and high-temperature reliability review were conducted using the CAE program Ansys Workbench. Through thermal stress analysis, the structural safety of the fan was designed and verified. The high-temperature reliability test of the fan was conducted by an authorized certification institution to secure structural safety.

Keywords : Axial Flow Fan, CAE, Maximum Stress, Maximum Deformation, Thermal Stress, Tip Clearance

1. 서론

근래에 지하 공간의 활용이 증가하면서 지하 공간 환기를 위한 환기 방식 연구가 활발히 진행되고 있다. 지하 주차장이나 및 각종 시설은 기계식 환기 방식이나 덕트식 환기 방법과 제트팬(Jet fan)을 이용한 환기방식을 사

용하고 있다. 이러한 방법들은 건축비 및 공사방식의 어려움으로 인해 사용이 제한적이고 장애물에 대한 환기 기류에 대한 간섭으로 인해 점차 새로운 기술을 요구하게 되었다[1,2].

지하 공간의 화재에 대응하기 위한 제연형 축류팬(Axial flow fan for Smoke Ventilation)의 요구 조건

본 논문은 한국생산기술연구원과 금성풍력 기술연구소의 도움과 2021년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진행 과제 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Byung-Kwan Cho(Korea Univ. Education and Technology)

email: chobk@koreatech.ac.kr

Received January 19, 2023

Revised February 16, 2023

Accepted March 3, 2023

Published March 31, 2023

으로 화재로 인한 내열성과 축류팬의 구조안전성 확보가 필요하나 에너지 절감 기술 및 날개 형상을 이용한 공력 성능 극대화를 위한 날개(Blade) 및 가이드 베인(Guide vane)의 설계 방법 연구와 축류팬의 구조역학적 연구는 유체-구조 연성해석기법을 이용해 플라스틱 날개의 진동 특성과 소음특성에 대한 연구가 이루어졌다[3-5].

본 논문은 구조해석을 이용한 제연용 축류팬 설계에 관한 연구로 벽부형 제연용 축류팬의 설계 요구사항에 따라 날개에 대한 형상과 체결방법에 따른 구조안전성에 대한 연구를 위해 3차원 모델링 프로그램인 SolidWorks를 이용해 제연용 축류팬을 설계하였으며, 상용 CAE(Computer Aided Engineering) 도구인 Ansys Workbench를 통해 구조안전성을 검증하였다. 축류팬 설계에 검증 결과를 반영하였으며, 공인시험을 통해 구조안전성을 확인하였다.

2. 제연용 축류팬 설계

2.1 설계사양 및 운전조건

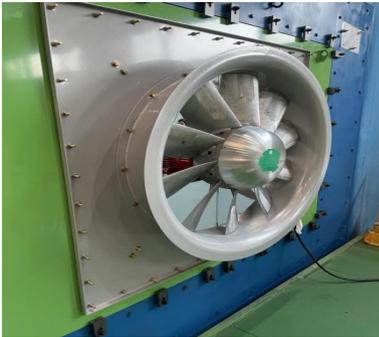


Fig. 1. Picture of Axial fan for ventilation smoke

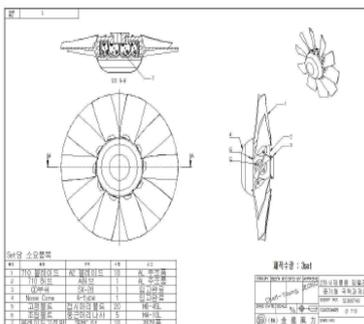


Fig. 2. Design of Axial fan for ventilation smoke

본 연구에서는 제연용 축류팬에 대한 시제품은 Fig. 1 과 같다. 주요 구성부는 날개(Blade), 허브(Hub), 허브 캡(Hub cap)으로 구성되어 있으며, 설계사양에서 중요한 것은 날개의 형상과 허브의 직경이 중요한 인자이다. Fig. 2는 제연용 축류팬의 설계도면을 나타낸다.

Fig. 3은 3차원 CAD 프로그램인 SolidWorks를 이용하여 각 부품에 대한 설계를 완성하여 조립한 모델이다[6].

Fig. 4는 조립한 모델의 각 구성부품의 분해도이다. 날개와 허브를 연결시키는 허브 멍치는 날개와 일체형으로 설계하였으며, 허브와 날개를 고정하기 위해 플레이트와 볼트를 이용해 조립한다.

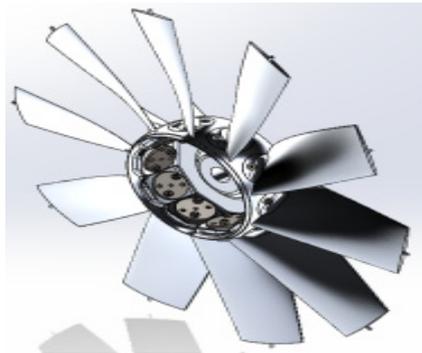


Fig. 3. 3D Model of Axial fan for ventilation smoke



Fig. 4. 3D Model exploded view for Axial fan for ventilation smoke

Table 1은 제연용 축류팬의 설계사양을 나타낸다. 허브비(Hub tip ratio)는 축류팬의 전체 직경 대비 허브 직경의 비로 축류팬의 전체 직경 710mm와 허브의 직경 290mm로 허브비는 0.4로 설정하였다.

Table 1. Design specifications of Axial fan for ventilation smoke

Spec.	Unit	Value
Impeller hub diameter	mm	290
Impeller shroud diameter	mm	710
Tip clearance	mm	5
Number of impeller blade	EA	10
Hub tip ratio	-	0.4
Rational speed	RPM	1,185
Flow rate	m ³ /min	400

허용간극(Tip Clearance)은 5mm로 설정하였는데, 허용간극은 임펠러(Impeller)와 외통과의 간극으로 정의한다. 보통 허용간극을 최소로 줄여 공력성능을 개선하는 것이 축류팬의 설계목적이다. 운전조건은 1,185rpm의 회전조건으로 유량은 400 m³/min으로 설정하였다 [7].

2.2 재료 물성치

제연용 축류팬의 날개와 허브는 알루미늄 주조에 널리 사용하는 AC4C-T6를 적용하고, 축과 허브와 날개를 고정하는 볼트 및 기타 부품에 대해서는 일반강의 재질인 SS400를 사용한다. 각 재료에 대한 물성치는 Table 2와 같다[8].

Table 2. Materials of impeller sections

Property	Unit	Value	
		Blade & Hub	Shaft & Etc component
Density	kg/m ³	2,600	7,800
Modulus of Elasticity	GPa	72.4	160
Poisson's Ratio	-	0.33	0.33
Coefficient of thermal expansion	/°C	7.14 × 10 ⁻⁸	2.5 × 10 ⁻⁸
Melting temperature	°C	644-816	1,400
Tensile Strength, Yield	MPa	152	230
Compress Yield Strength	MPa	185	41.5

3. 구조해석

3.1 구조해석 지배방정식

x-y-z 직교좌표계에서의 3차원 탄성체에 대한 평형방

정식은 Eq. (1)과 같이 3개의 편미분방정식으로 정의할 수 있다[9,10].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Normal Stress in Cartesian coordinate system

응력은 후크의 법칙(Hook's law)으로부터 수직 및 전단응력 6개의 요소로 분류할 수 있다. Eq. (2)는 응력에 후크 법칙에 의한 응력을 산출하는 위한 행렬(Matrix)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [C] \{\epsilon\} \\ \{\sigma\}^T &= [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{xz} \ \tau_{yz}] \\ \{\epsilon\}^T &= [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, [C]는 탄성행렬로서 영탄성계수(Young's modulus)와 프아송비(Poisson ratio)에 의해서 변화하는 값으로 정의한다.

Eq. (2)에서의 변형률(ε)과 전단응력(γ)의 성분들은 특성에 따라 탄성체의 변위(Displacement)로 나타낼 수 있으며, 이는 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다[7].

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} ; \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} ; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 유한요소모델 및 경계조건

구조해석을 수행하기 위해 제연용 축류팬의 모델을 1/10의 대칭조건으로 해석용 모델링 작업을 수행하고 격자를 작성한 유한요소모델은 Fig. 5와 같다. 해석결과를 검증하기 위해 최대응력 집중부위에 대한 요소 크기를 변경하며 응력 수렴성을 확인해 결정된 유한요소모델의 요소수(Element number)는 708,499개, 절점수(Node number)는 1,161,050개로 생성하였다.

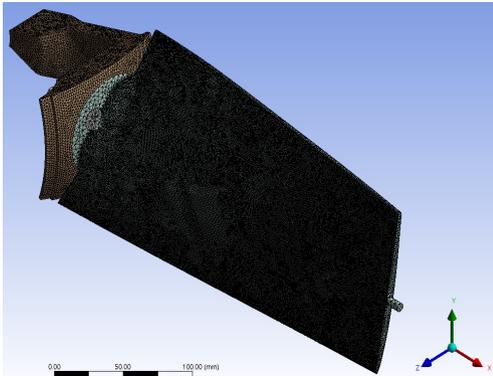


Fig. 5. Finite element model of Axial fan for ventilation smoke

Fig. 6은 해석용 모델에 경계조건을 부여한 그림이다. 경계조건은 1/10 대칭조건을 절단면에 적용하였으며, 회전조건(Rotational velocity)은 기준축을 선택하여 1,185rpm으로 회전하는 조건을 부여하였다. 고정조건(Fixed support)은 축의 중심면을 선택하여 부여하였다.

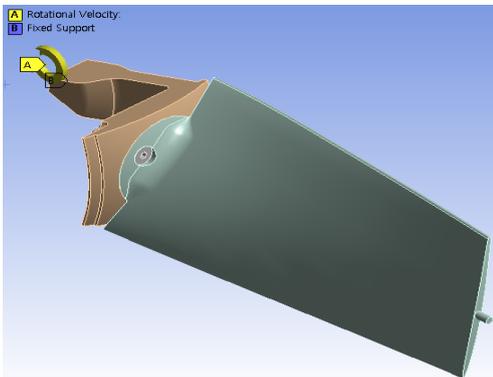


Fig. 6. Boundary condition of Axial fan for ventilation smoke

4. 열응력해석

4.1 열응력해석 지배방정식

열응력해석 재료조건은 등방성(Isotropic)의 고체를 기준으로 3차원 에너지보존을 미분방정식으로 정의할 수 있고, 에너지보존에 대한 지배방정식은 Eq. (4)와 같다 [9,10].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) - Q = 0 \quad (4)$$

ρ : mass density

c : specific heat

k : thermal conductivity

Q : internal heat generation rate

T : temperature

t : time

지배방정식을 이용하여 응력과 변형률의 관계를 나타내면 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [C] \{\epsilon - \epsilon_o\} \\ \{\sigma\}^T &= [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{xz} \ \tau_{yz}] \\ \{\epsilon\}^T &= [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}] \\ \{\epsilon_o\}^T &= [\alpha \Delta T \ \alpha \Delta T \ \alpha \Delta T \ 0 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (5)$$

α : coefficient of thermal expansion

ΔT : temperature difference

4.2 열하중 경계조건

열하중 경계조건은 Fig. 7과 같다. 경계조건은 축류팬의 모든 표면에 300℃를 적용하였다.

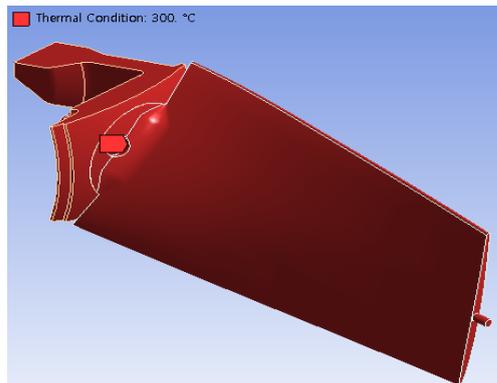


Fig. 7. Thermal load condition of Axial fan for ventilation smoke

5. 해석결과

5.1 구조해석 결과

제연용 축류팬의 구조적 안전성을 평가하기 위해 최대응력(Max. Von-Mises stress)과 안전율(FOS : Factor of Safety)을 산출하게 된다. 제연용 축류팬의 전체모델에 대한 최대응력과 각 구성요소들에 대한 최대응력을 이용하여 안전율을 각각 산출하였다. Fig. 8은 최대응력을 나타내며, Eq. (6)은 안전율에 대한 산출식이다[11-14].

$$FOS = \frac{\text{Material Tensile Stress} (\sigma_{\text{material}})}{\text{Maximum Stress} (\sigma_{\text{max}})} \quad \text{--- (6)}$$

Fig. 8은 정적구조해석으로 도출된 최대응력을 나타낸다. Fig. 8(a)는 제연용 축류팬의 전체모델에 대한 결과이고 Fig. 8(b)와 (c)는 날개의 최대응력은 전체 및 응력 집중 부위를 나타낸다. Fig. 8(d)는 허브에 대한 최대

응력을 나타낸다.

최대응력은 날개에서 발생하고 응력이 집중되는 부위는 날개와 허브몽치가 만나는 지점으로 단면적이 급격히 줄어드는 부위에서 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 9(a)~(d)는 최대응력을 기준으로 안전율을 나타낸다. 안전율은 최대응력 부위에서 가장 작은 수치를 보이게 된다.

Fig. 10은 최대변형 결과를 나타낸다. 제연용 축류팬의 설계상의 허용간극(5mm)로 설계를 수행하게 되는데, 변형의 결과를 도출하여 축류팬의 날개와 외통 부위의 간섭 여부를 확인하기 위한 결과이다. 전체 변형은 0.136mm로 나타나는 것을 확인하였다. X방향(축 반경방향)에 결과 0.027mm와 Y방향(축 반경방향)은 0.076mm로 외통과의 간섭여부를 확인하였다. Z방향으로는 0.122mm로 회전에 따른 축방향 변형임을 확인하였다.

Table 3은 최대응력 및 안전율, 최대변형에 대한 결과를 나타낸 것이다.

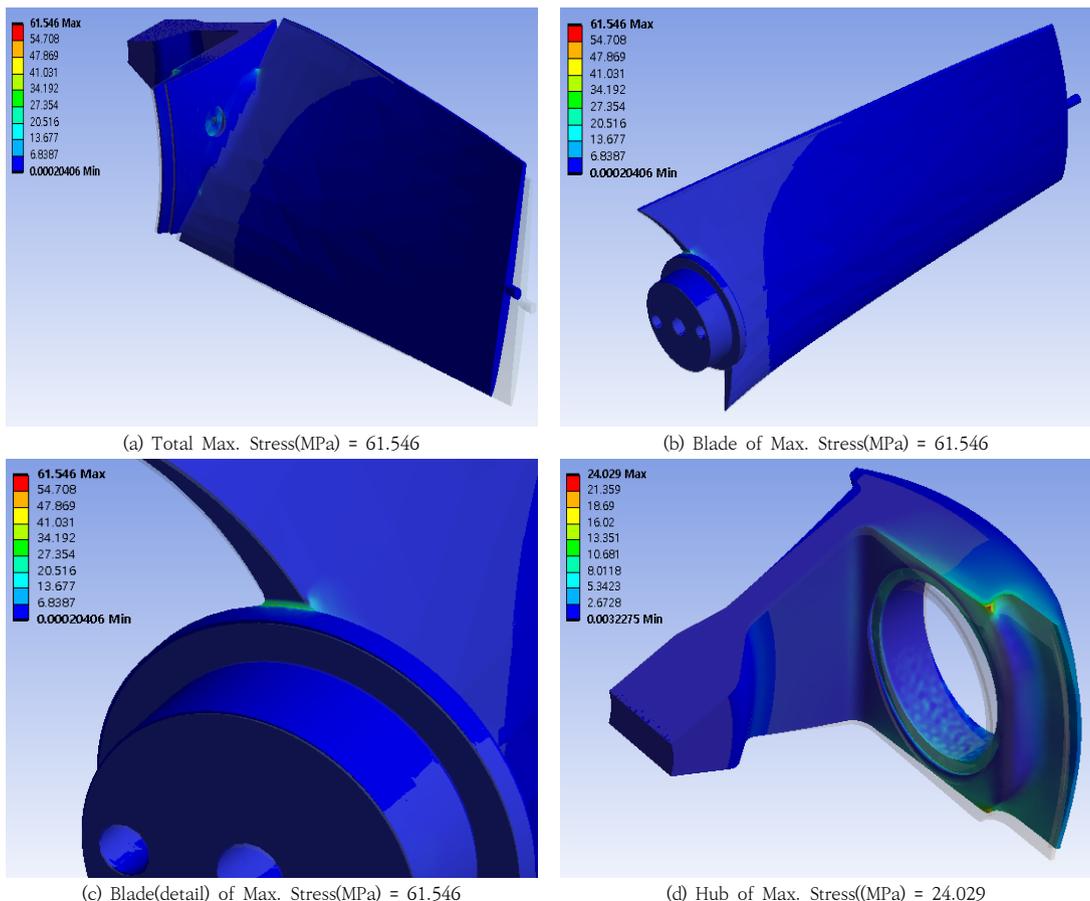


Fig. 8. Maximum stress of axial fan for ventilation smoke

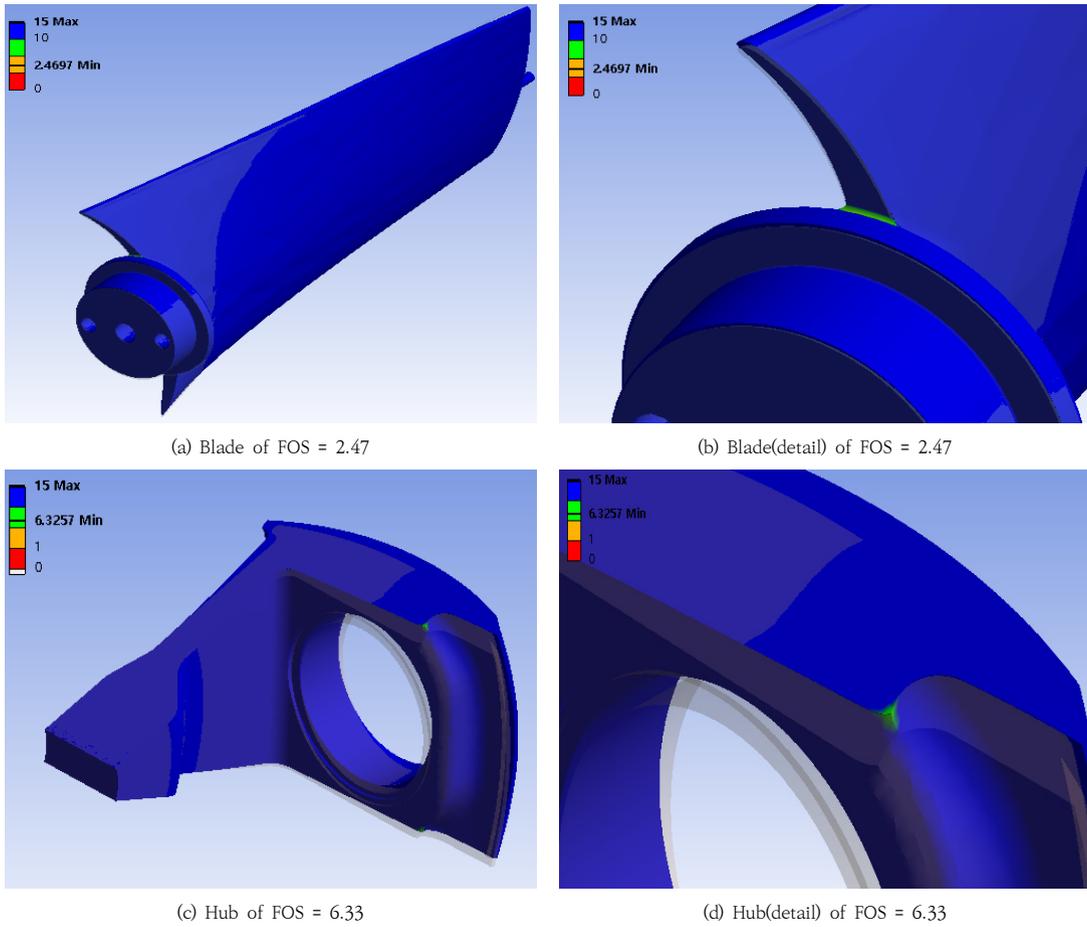
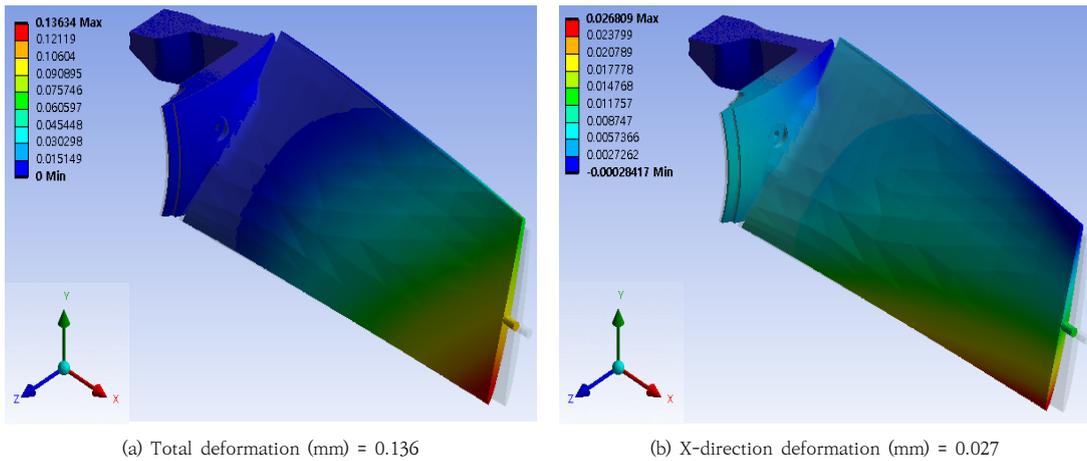


Fig. 9. FOS of axial fan for ventilation smoke



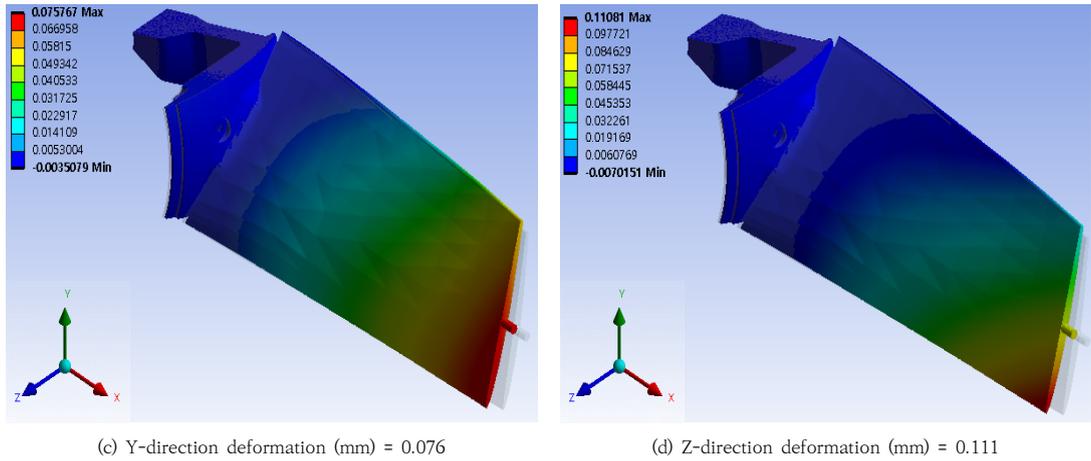


Fig. 10. Maximum deformation of axial fan for ventilation smoke

Table 3. Max. stress & max. deformation of axial fan for ventilation smoke

Component	Maximum stress (MPa)	Factor of safety (FOS)	Maximum deformation (mm)			
			Total	X-direction	Y-direction	Z-direction
Total	61.546	2.47	0.136	0.027	0.076	0.111
Blade	61.546	2.47				
Hub	24.029	6.33				

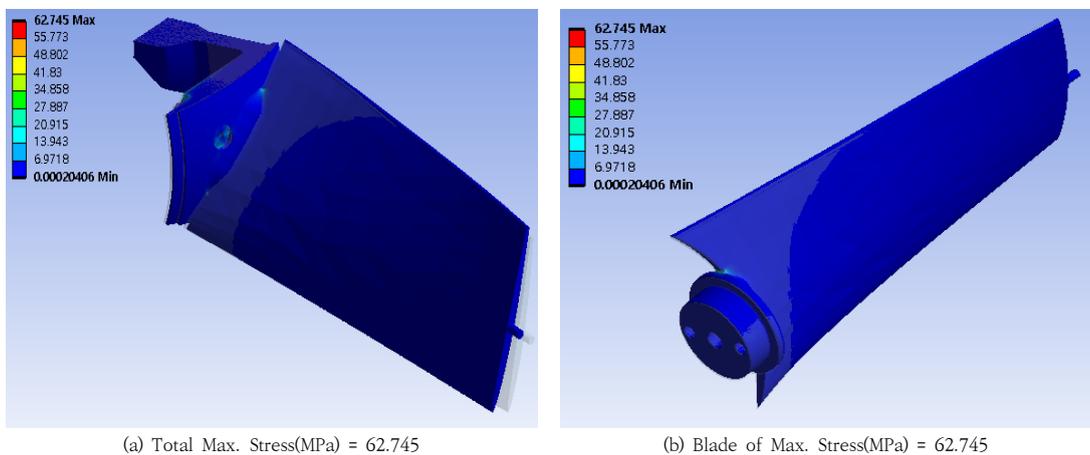
5.2 열응력해석 결과

Fig. 11은 열하중을 반영하여 도출된 최대응력을 나타낸다. Fig. 11(a)~(d)는 제연용 축류팬의 전체모델에 대한 결과와 날개의 최대응력, 허브에 대한 최대응력을 나타낸다.

최대응력은 정적구조해석에서의 결과와 동일한 위치

인 날개와 허브몽치가 만나는 지점에서 발생됨을 확인하였다. 최대응력은 정적구조해석의 최대응력 대비 약 2%가 증가한 62.745 MPa의 수치를 보이게 된다.

Fig. 12(a)~(d)는 최대응력을 기준으로 안전율을 나타내며 정적구조해석 대비 약 2%가 감소한 결과가 도출되었다.



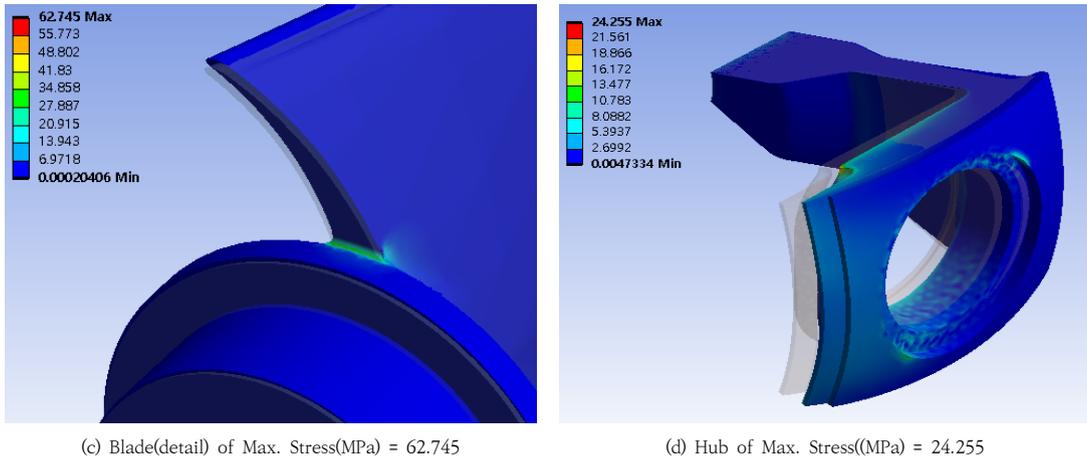


Fig. 11. Maximum stress of axial fan for ventilation smoke (Thermal stress)

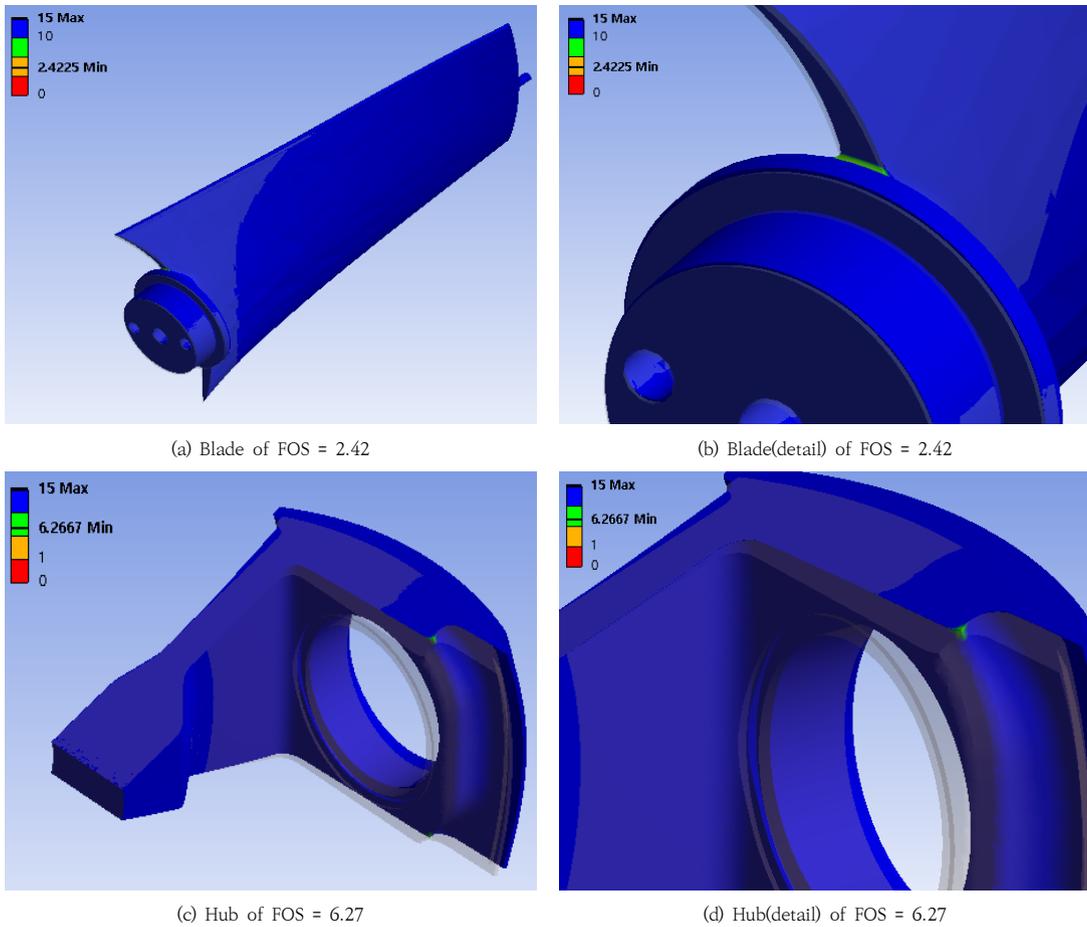
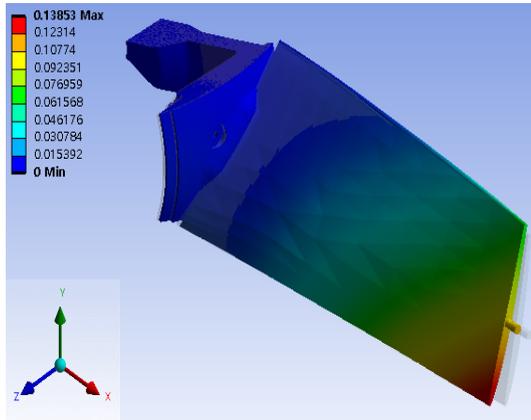


Fig. 12. FOS of axial fan for ventilation smoke (Thermal stress)

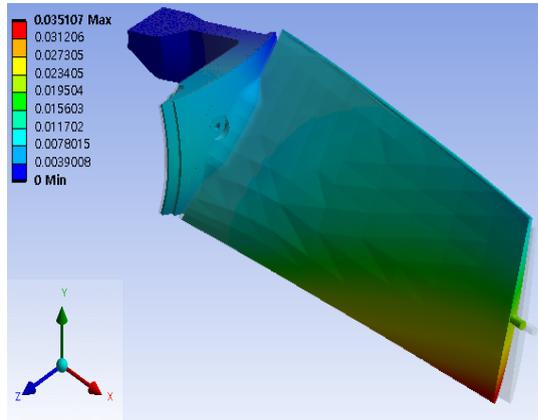
Fig. 13은 열하중을 반영한 변형 결과를 도출한 그림이다. 정적구조해석과의 결과를 비교할 때 큰 변화가 발생하지는 않았다. 전체모델에서의 변형은 0.139mm, X방향(축 반경방향)에 결과 0.035mm와 Y방향(축 반경방

향)은 0.075mm, Z방향으로는 0.112mm으로 외통과의 간섭은 없을 것으로 판단된다.

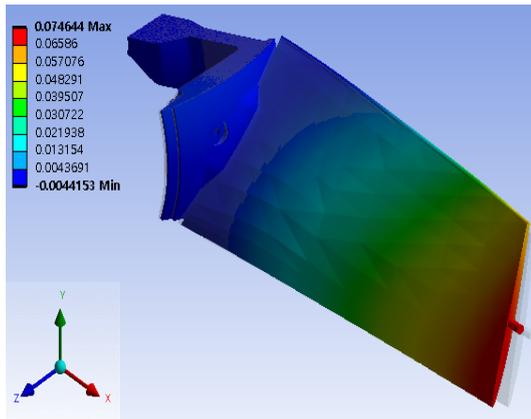
Table 4는 열하중을 포함한 최대응력 및 안전율, 최대변형에 대한 결과를 나타낸다.



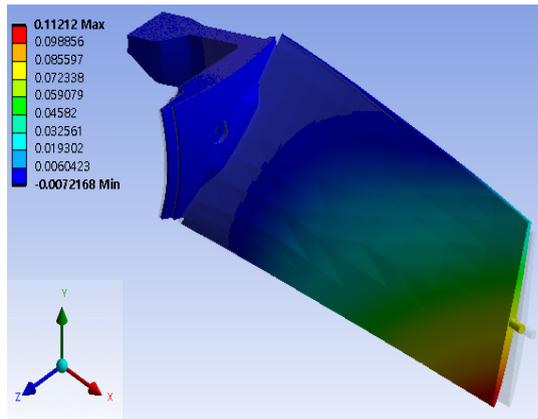
(a) Total deformation (mm) = 0.139



(b) X-direction deformation (mm) = 0.035



(c) Y-direction deformation (mm) = 0.075



(d) Z-direction deformation (mm) = 0.112

Fig. 13. Maximum deformation of axial fan for ventilation smoke (Thermal stress)

Table 4. Max. stress & max. deformation of axial fan for ventilation smoke (Thermal stress)

Component	Maximum stress (MPa)	Factor of safety (FOS)	Maximum deformation (mm)			
			Total	X-direction	Y-direction	Z-direction
Total	62.745	2.42	0.139	0.035	0.075	0.112
Blade	62.745	2.42				
Hub	24.255	6.27				

6. 고온 운전 시험

6.1 시험장치 조건

Fig. 14는 고온에 대한 한계시험 장치를 나타내었다. 제연용 축류팬은 300℃에서 2시간 이상 정상운전상태를 유지해야 하는 규정[소방방제청 고시(NFSC 501A), 한국 설비기술협회(SPS-KARSE B 0052)]에 의거하여 시험을 실시하였다. 시험장치는 챔버(Chamber)내에 축류팬을 설치하고 공기(Air)를 순환하는 방식에 열을 가하여 실험하였다.

Fig. 15는 고온시험 후에 모터의 변색상태를 나타내며, Fig. 16은 고온시험 후의 제연용 축류팬의 상태를 나타낸다.



Fig. 14. High temperature limit reliability test



Fig. 15. discoloration of the motor



Fig. 16. High temperature test of axial fan for ventilation smoke

축류팬의 상온상태에서의 시험과 고온에서의 시험을 통해 제연용 축류팬과 외통과의 간섭여부를 확인한 결과 설계된 허용간극에서의 간섭은 없는 것으로 확인되었다.

고온 상태에서의 시험에서도 제연용 축류팬은 변형 및 파손이 발생하지 않았으며, 이는 구조해석 및 열응력해석을 통한 검증에서 파손이 발생하지 않는다는 검증 결과를 시험을 통해 확인할 수 있었다.

7. 결론

- (1) 정적구조해석을 통해 검증한 결과는 최대응력이 61.546 MPa으로 날개와 허브몽치에서 발생함을 확인하였으며, 안전율은 2.47~6.33으로 제연용 축류팬의 운전상태에서의 파손위험성은 낮은 것으로 판단할 수 있었다. 최대변형도 0.027~0.136mm로 허용간극 5mm에는 크게 미치지 않는 결과를 도출하였다..
- (2) 열하중을 적용한 열응력해석에서 최대응력은 62.745 MPa, 안전율은 2.42~6.27으로 나타났다. 최대변형은 0.035~0.139mm로 정적구조해석에 비해서 증가하였으나 그 수치는 미미함을 확인하였다.
- (3) 상온상태의 운전조건과 고온상태에서의 운전상태에서 제연용 축류팬의 파손이나 허용간극 이상의 변형이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 허용간극을 5mm로 설계하였으나, 향후에는 간극을 줄여 공력성능을 향상할 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 본 연구의 목적은 제품의 공력성능을 위한 허용간극과 제품의 안전성 확보를 위해 시제품 제작 전에 구조해석 및 열영역해석을 실시하였으며, 그 결과를 바탕으로 시제품을 제작하였다. 시제품에 대한 공인시험[T2021-04016, 한국기계전기전자시험연구원]에서 파손이 발생하지 않는 것을 확인하였고 향후에 유한요소해석을 통해 제품의 구조 안전성에 대한 예측의 방법으로 활용할 계획이다.

References

- [1] K.Y. Lee, 2020, "Research trends in the field of blowers and ventilation systems in 2019", The KSFJ Journal of Fluid Machinery 23(2), 2020.4, 67-72(6 pages). DOI: <https://doi.org/10.5293/kfma.2020.23.2.067>
- [2] S. H. Yang, K. Y. Kim, M. W. Hoe, 2018, "Effects of Geometric Parameters on Aerodynamic Performance of a High Pressure Axial Flow Fan," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 6, pp. 32~38. DOI: <https://dx.doi.org/10.5293/kfma.2018.21.6.032>
- [3] S. G. Lee, K. Y. Lee, S. H. Yang, Y. S. Choi, 2019, "A Study on Performance Characteristics of an Axial Fan with a Geometrical Parameters of Inlet Hub Cap," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 4, pp. 5~12. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2019.22.4.005>
- [4] C. Lee, H. S. Kim, H. G. Kil, 2019, "Evaluation on the Blade Vibration Characteristics of a Plastic Axial Flow Fan Using Flow-Structure Coupled Analysis Technique," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 5, pp. 21~27. DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2019.22.5.021>
- [5] D. H. Kim, Y. J. Park, H. G. Kil, C. Lee, "A Study on the Design of Pod Type Circular Silencer with Two Air Layers for High Pressure Axial Fan", Proceedings of the KFMA Annual Meeting, pp.212-213, Jul. 2019.
- [6] David Planchard, 2021, Sdc Pubns, "Engineering Graphics with SOLIDWORKS 2021".
- [7] C. Y. Jeong, K. Y. Lee, J. K. Kook, 2022, "Design And Test Results of Wall Mounted Axial Flow Fan for Smoke Ventilation", The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 25, No. 3, June 2022, pp.21~27 (7 pages) . DOI: <http://doi.org/10.5293/kfma.2022.25.3.021>
- [8] www.matweb.com
- [9] David V. Hutton, 2006, "Fundamentals of Finite Element Analysis".
- [10] James M. Gere, Barry J. Goodno, 2014, "Mechanics of Material - SI Edition".
- [11] Pramote Dechaumphai, S. Sucharitpatskul, 2018, "Finite Element Analysis with ANSYS Workbench".

- [12] Timoshenko, 1970, McGraw-Hill, "Theory of Elasticity".
- [13] Norman E. Dowling, 2015, "Mechanical Behavior of Materials (Engineering Method for Deformation, Fracture, and Fatigue)".
- [14] David V. Hutton, 2006, "Fundamentals of Finite Element Analysis".

국 정 근(Jeong-Keun Kook)

[정회원]



- 2002년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2004년 8월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2021년 8월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계설계공학과 교수

<관심분야>

구조해석 (기계 분야)

조 병 관(Byung-Kwan Cho)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1992년 2월 ~ 1993년 1월 : 현대자동차 제품개발연구소 과장
- 1993년 1월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

동역학 (차량/기계 분야)