

유한요소해석을 이용한 가변익 송풍기 상사모델에 대한 구동 특성 분석과 구조안전성에 대한 연구

국정근*† · 조병관**

A Study of Driving Characteristics and Structural Safety of Scaled Model of Variable Pitch Axial Flow Fan Using Finite Element Analysis

Jeong-Keun Kook*†, Byung-Kwan Cho**

Key Words : Axial Fan(축류팬); Variable Pitch(가변피치); Static Structure Analysis(정적구조해석); FEA(유한요소해석)

ABSTRACT

The purpose of this study is to verify the kinematic movement of the variable blade mechanism design for a scaled model of a variable pitch axial flow fan with a capacity of 55 kW and to verify structural safety according to the blade setting angle. The design of the variable pitch mechanism was performed using SolidWorks and the kinematic verification of the slider crank movement was performed through Motion Simulation. The structural safety of each component by the impeller and variable pitch mechanism was verified by deriving the maximum stress according to the blade setting angle using Ansys Workbench.

1. 서론

축류팬(Axial Fan)은 지하 공간 및 밀폐 공간에서의 환기 및 제연을 위해 다양한 분야에 사용되는 중요한 설비이다. 폐쇄된 공간에서 에너지 효율을 극대화하기 위한 방법으로 가변익 송풍기에 대한 기대가 높아지고 있다. 가변익 송풍기는 정격운전속도로 평상시 운전을 유지하면서 필요에 따라 날개(Blade)의 설치각도(Setting Angle)를 변경하여 에너지 효율을 극대화하기 위한 송풍기 기술이다.

가변익 시스템을 구동하기 위해 기구학적 링크 구조에 대한 설계가 이루어지고 링크 구조를 통해 날개 설치각도 변경이 이루어지고 날개 설치각도가 변경된 상황에서 구조적인 안전성이 보장되어야 한다.

본 연구에서는 55kw급 가변익 송풍기 개발 과정에서 설계 확정 전에 공력 성능 및 안정적 동작 여부의 공인성적시험을 위해 2/3 스케일(Scale)의 축소 상사모델을 제작하여야 한다. 공인시험 제품 제작을 위해 축소 상사모델에 대한 가변익 링크구조를 상용 3D CAD 프로그램인 SolidWorks를

이용해 3D 모델링을 수행하고 SolidWorks의 기구학 해석 프로그램인 Motion Simulation으로 날개 설치각도의 변경에 대한 기구학 거동을 검증하였다. 임펠러의 날개 설치각도별로 구조안전성을 평가하기 위해 CAE 상용프로그램인 Ansys Workbench R2022으로 응력(Stress)과 변형(Deformation)을 계산하여 정격운전속도에 따른 파손위험성과 변형에 의한 임펠러와 외통과의 간섭여부를 확인하였다.

2. 응력과 변형률에 대한 지배방정식⁽¹⁻⁴⁾

유한요소해석으로 응력과 변형률의 값을 구하기 위한 방정식은 요소의 강성행렬을 통해 쉽게 계산할 수 있다. 강성행렬은 재료의 특성인 탄성계수(Elastic modulus)와 프아송비(Poisson ratio)를 계산하기 위해 미분방정식으로 나타낸 무한하게 작은 dx 와 dy 의 요소로 계산되는데 각 절점에서 응력의 평형으로 표현하고 여기에 x 방향과 y 방향에 대한 응력 작용의 평형방정식을 계산하게 된다.

4절점에 평면 요소에 대한 행렬 형태의 형상함수 $N_i = N_i(\xi, \eta)$

* 한국기술교육대학교 기계설계공학과(Department of Mechanical Design Engineering, Korea Univ. of Education and Technology)

** 한국기술교육대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Education and Technology)

† 교신저자, E-mail : lijang@koreatech.ac.kr

는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \end{aligned} \quad (1)$$

일반적인 응력 평형의 미분방정식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{Eh}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial x \partial y} \right] + X &= 0 \\ \frac{Eh}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial^2 \nu}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \nu}{\partial y^2} + \frac{1+\nu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] + Y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

미분방정식을 이용하여 유한요소 강성행렬에 대한 구성은 식 (3)과 같다.

$$[K] = \text{Det}J [B]^T [D] [B] \quad (3)$$

미분된 형상함수 $[B]$ 와 절점 형상함수 $[D]$ 는 식 (4)와 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[D] = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (2)와 식 (5)를 식 (3)에 대입하면 전체 강성행렬 $[K]$ 를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (6)$$

사면체 요소의 4절점 형태는 식 (6)을 통해 식 (7)로 표현할 수 있다.

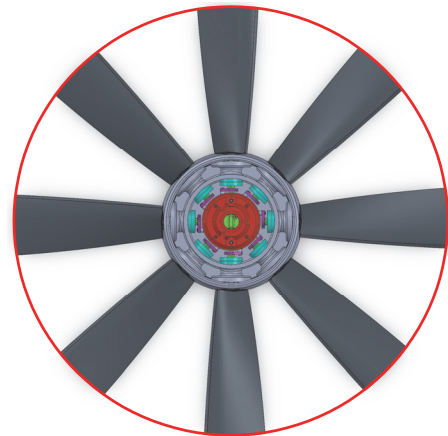
$$[K] = \text{Det}J_g [B]_g^T [D] [B]_g \quad (7)$$

식 (7)은 일반적인 강성행렬에 대한 지배방정식으로 유한요소해석에서 구하고자 하는 응력, 변형률에 대한 값을 도출할 수 있는 미분방정식으로 유한요소를 활용한 구조해석에서 널리 사용하고 있다.

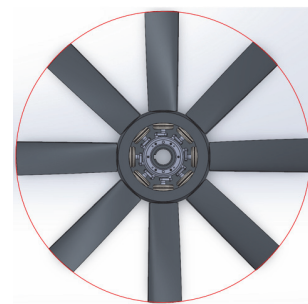
3. 축류팬 사양

Fig. 1 (a)는 임펠러의 직경이 1,500mm인 55kW 축류형 송풍기의 모델이다. 허브(Hub)와 날개 및 가변익을 구동시키기 위한 링크 구조가 2중 구조의 허브 안에 구성되어 있다. 2중 허브 구조의 설계는 날개 설치각도 변화를 위해 링크구조의 강성과 굽힘에 대한 변형을 최소화하고자 설계된 결과이다. Fig. 1 (b) 55kW 가변익 송풍기 임펠러의 축소 상사모델은 2/3의 축소 설계하였으며, 직경 1,000mm의 크기와 허브 직경이 축소되어 단일 구조의 허브 안에 링크 구조를 구성하게 되며, 링크 구조의 길이가 전체적으로 감소함에 따라 링크 구조 강성에 영향이 없을 것으로 사료된다.

축소 상사모델 임펠러의 설계 사양은 Table 1과 같다. 설계사양은 55kW 가변익 송풍기의 축소 상사모델로 전체적인 크기의 변화는 고려되었지만, 운전조건 및 허브비(Hub ratio)는 동일하게 적용하였다.



(a) Variable pitch impeller



(b) Scaled Model of Variable pitch Axial Fan

Fig. 1 System of axial fan

Table 1 Design specifications of scaled model variable

Specifications	Unit	Value
Impeller hub diameter	mm	320
Impeller shroud diameter	mm	1,000
Tip Clearance	mm	5
Number of impeller blade	ea	8
Hub Tip Ratio	-	0.32
Rotational speed	rpm	1,185

4. 임펠러 기구학적 해석

4.1. 3D 모델링⁽⁵⁾

Fig. 2는 축소 상사모델을 상용 3D CAD 프로그램인 SolidWorks로 설계한 그림이다. 설계된 임펠러(Impeller)는 날개가 8매이고 날개에 각각의 가변의 링크 시스템이 적용되어 있으나 중앙의 직선운동을 하는 플레이트(Plate)에 의해 동시에 작동하는 시스템으로 구성하였다.

4.2. 기구학적 해석 경계조건

Fig. 3은 기구학적 해석을 위해 설계한 링크 구조를 보여 주고 있다. 임펠러의 가변의 구동 메카니즘은 슬라이더-크랭크 구조로 직선운동 행정(Stroke)을 왕복운동으로 변경하여 날개 설치각도가 변화하는 구조로 설계되었다. Fig. 3 (a)는 날개의 시위선(Chord line)과 허브 중심선의 수직선과 일치하는 위치를 날개 설치각도의 시작점으로 설정한 그림이다. Fig. 3 (b)는 날개의 시위선과 허브 중심선이 평행하게 되는 위치로 날개 설치각도의 최대각이 구현되도록 설계한

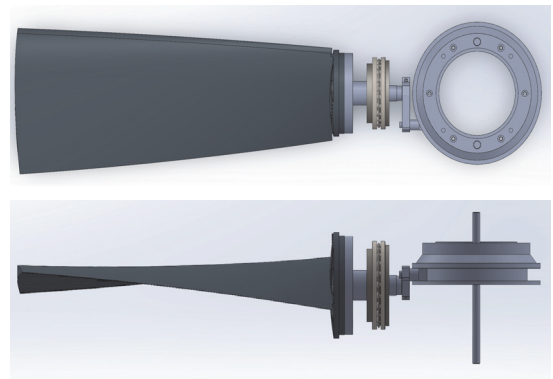


Fig. 2 3D Modeling of Scaled of Variable pitch Impeller

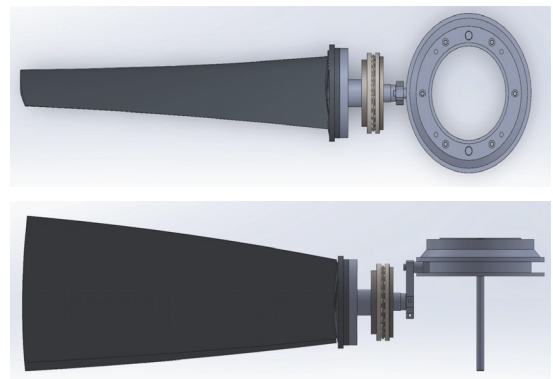
그림이다. 가변의 임펠러의 효율 성능 설계점을 고려한 날개 설치각도를 구현하기 위해 플레이트의 행정을 32mm로 설정하여 해석을 수행하였다.

4.3 해석결과

Fig. 4는 플레이트 행정에 따른 날개 설치각도의 변화를 나타내는 그래프이다. 플레이트가 32mm를 운동하게 되면 날개 설치각도는 최대 약 45도까지 변화하는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Start of Link



(b) End of Link

Fig. 3 Variable pitch link system

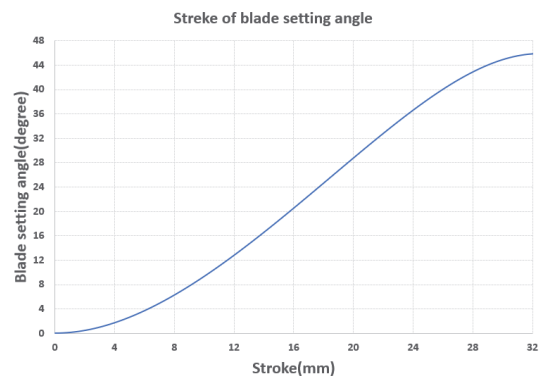


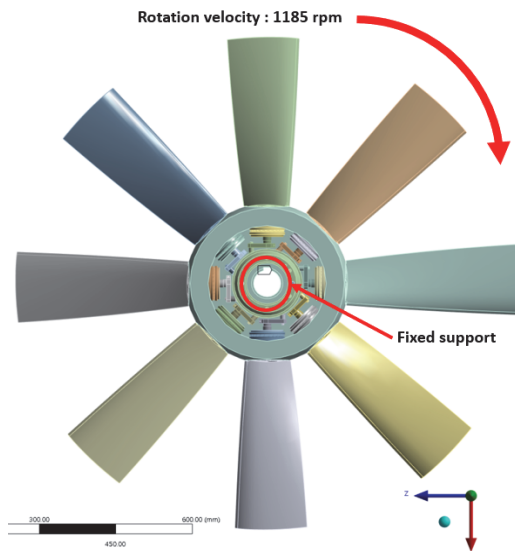
Fig. 4 Graph of stroke blade setting angle

날개 설치각도에 변화율은 플레이트가 1mm의 이동하게 되면 약 1.4도씩 날개 설치각도가 변형이 되는 것을 확인하였다.

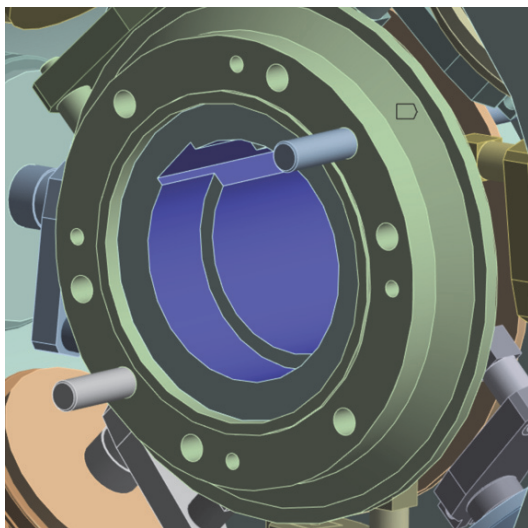
5. 임펠러 구조해석

5.1. 경계조건^(7,8)

Fig. 5 (a)는 임펠러의 고정조건(Fixed support)과 회전 조건(Rotation condition)에 대해 나타낸 그림이다. 임펠러의 중심면에 고정조건을 부여하고 임펠러 중심축을 회전축으로 하여 시계방향으로 1,185rpm으로 회전하는 조건을 부여하였다. Fig. 5 (b)는 고정조건을 부여한 면을 도시한 것이다.



(a) Rotation condition and fixed support



(b) Detail of fixed support

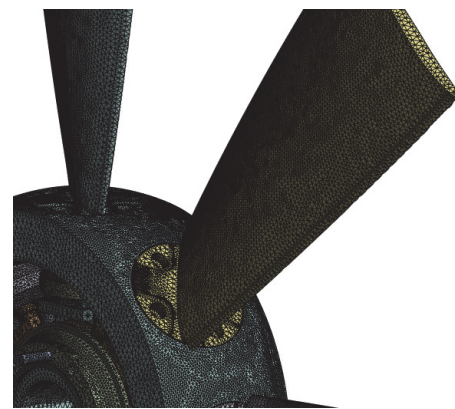
Fig. 5 Boundary condition

로 임펠러의 회전축의 5개의 안쪽 면을 고정한 그림이다.

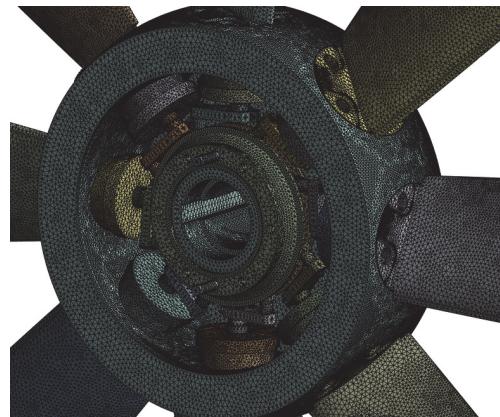
5.2. 유한요소모델

Fig. 6은 임펠러의 유한요소모델을 생성한 그림이다. 날개의 형상을 최적화하기 위해 요소의 크기를 2mm로 설정하여 절점(Nodes)은 2,337,708개, 요소(Elements)는 1,315,785개로 구성하였다.^(9,10)

날개 설치각도 변경에 따른 구조해석을 수행하기 위해 행정 5mm의 변화에 따른 날개 설치각도를 Table 2에 나타내었다.



(a) Blade of detail view

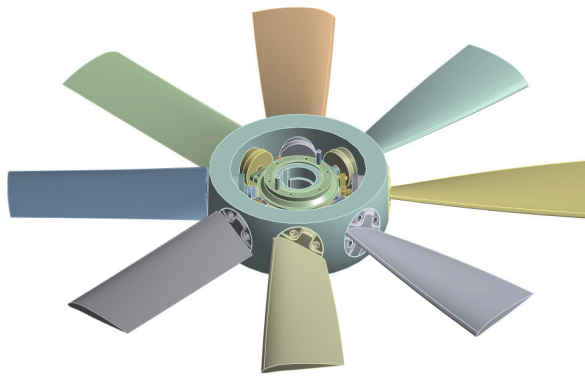


(b) Hub of detail view

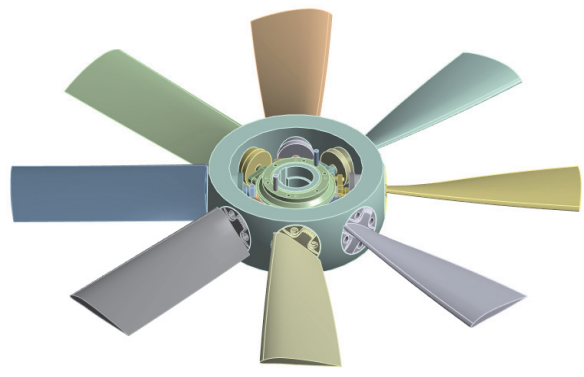
Fig. 6 Finite element shape of operating speed

Table 2 Stroke of the Blade setting angle

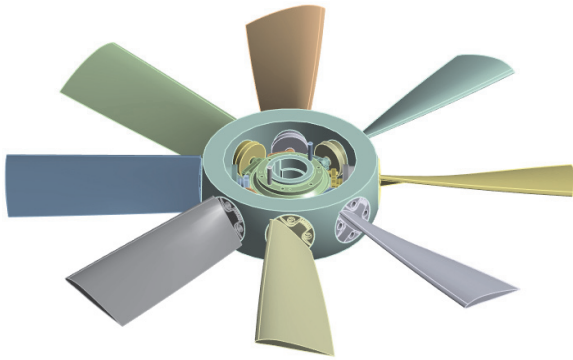
Stroke (mm)	Blade setting angle (degree)
0	0
5	7.5
10	15
15	22.5
20	30
25	37.5
30	45
35	52.5



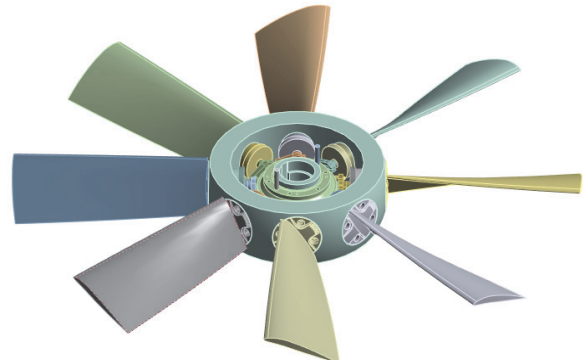
(a) Blade setting Angle 0 degree



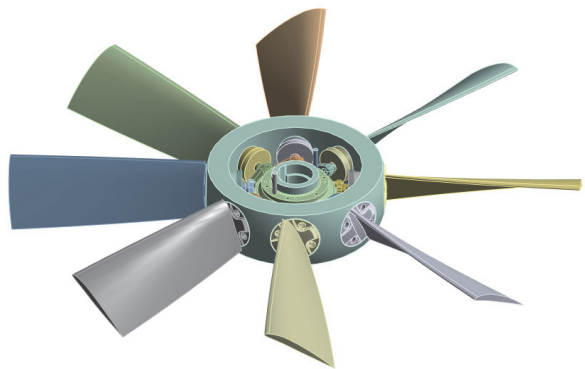
(b) Blade setting Angle 7.5 degree



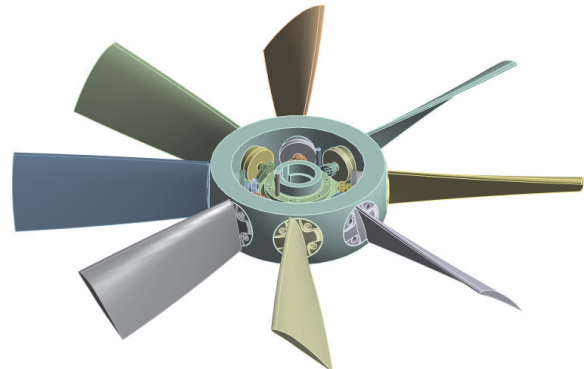
(c) Blade setting Angle 15 degree



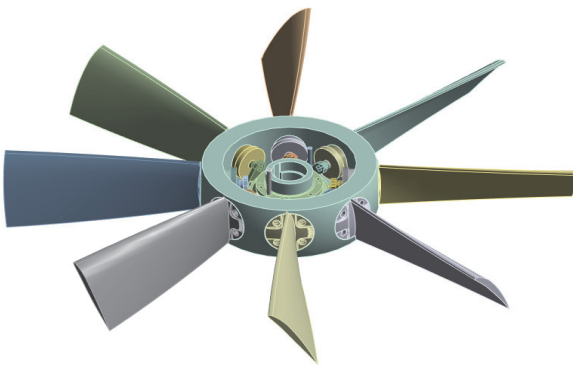
(d) Blade setting Angle 22.5 degree



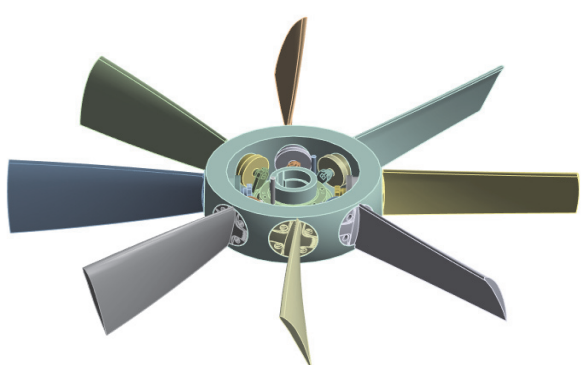
(e) Blade setting Angle 30 degree



(f) Blade setting Angle 37.5 degree



(g) Blade setting Angle 45 degree



(h) Blade setting Angle 52.5 degree

Fig. 7 Model for each blade setting angle

Fig. 7 (a)~(h)는 날개 설치각도에 따른 유한요소모델을 도시한 그림으로 0도에서 7.5도의 간격으로 총 8개의 모델을 생성한 것을 보여준다.

5.3 최대응력 해석결과

Table 3에 날개 설치각도에 따른 최대응력(Von-Mises stress)을 표로 나타내었다. 최대응력은 날개 설치각도가 0도, 15도, 22도, 30도에서 70MPa 이하의 값을 보이는 것을 확인할 수 있고, 7.5도, 37.5도, 45도, 52.5도는 70MPa 이상의 최대응력값을 보이는 결과를 도출하였다. 날개 설치각도가 증가함에 따라 최대응력이 선형적으로 증가할 것으로 예상하였으나, 선형적으로 증가하는 구간은 30도에서 37.5도 사이에서 증가하고 다른 날개 설치각도에서는 최대응력의 선형적 변화를 확인하기 어려웠다. 최대응력의 변화가 불규칙적으로 발생하는 이유는 가변의 링크 시스템에서의 크랭크 기구 역할을 담당하는 부품이 허브 축과 날개 축의 사이의 각을 형성하면서 최대응력 부위가 변화하는 것으로 사료된다.

Fig. 8은 날개 설치각도별 응력의 변화 추이를 그래프로 나타내었다. 가변의 송풍기의 임펠러 설계조건은 최대 변화각은 45도까지 변화하도록 설계하였고, 45도 이상에서는 급격하게 최대응력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Maximum Von-Mises Stress impeller

Blade setting angle (degree)	Maximum Von-Mises stress (MPa)
0	69.448
7.5	72.776
15	68.828
22	65.746
30	69.038
37.5	70.656
45	72.649
52.5	80.365

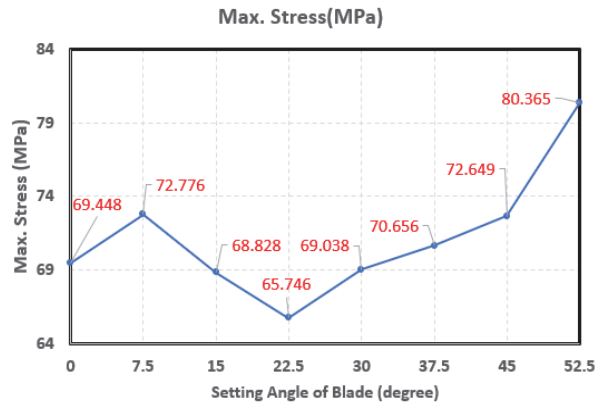
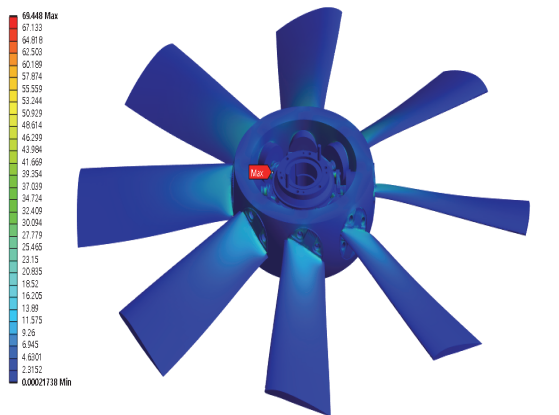
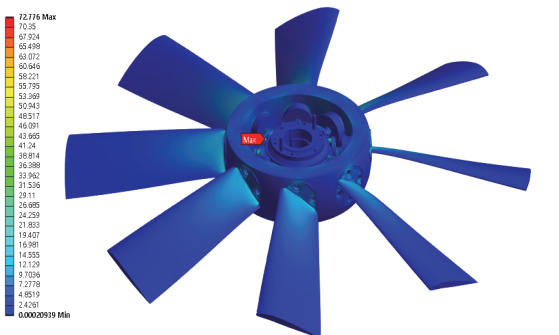
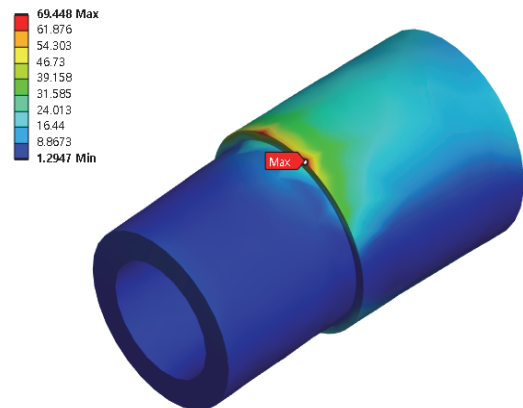


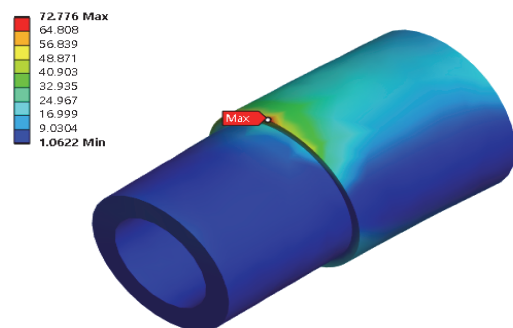
Fig. 8 Maximum Von-mises stress of Impeller (MPa)



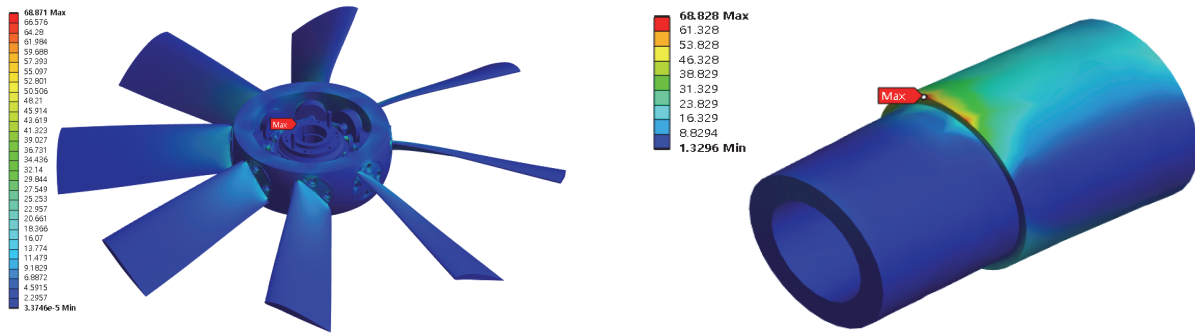
(a) Blade setting Angle 0 degree = 69.448



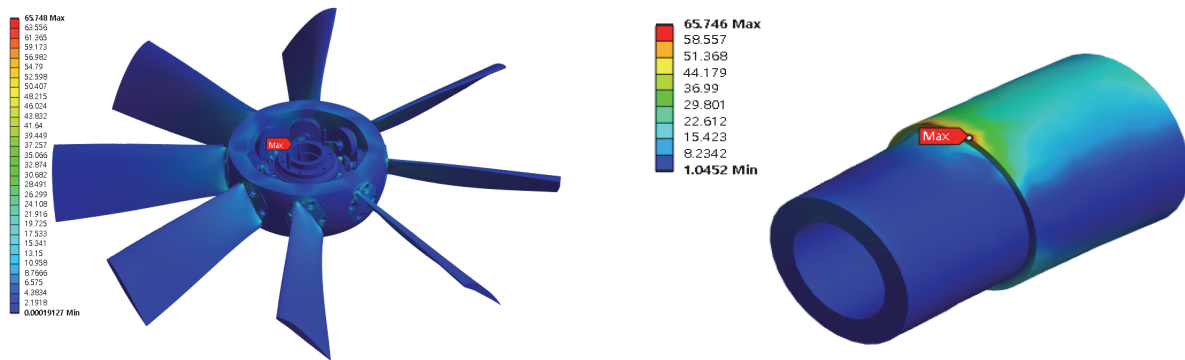
(b) Blade setting Angle 7.5 degree = 72.776



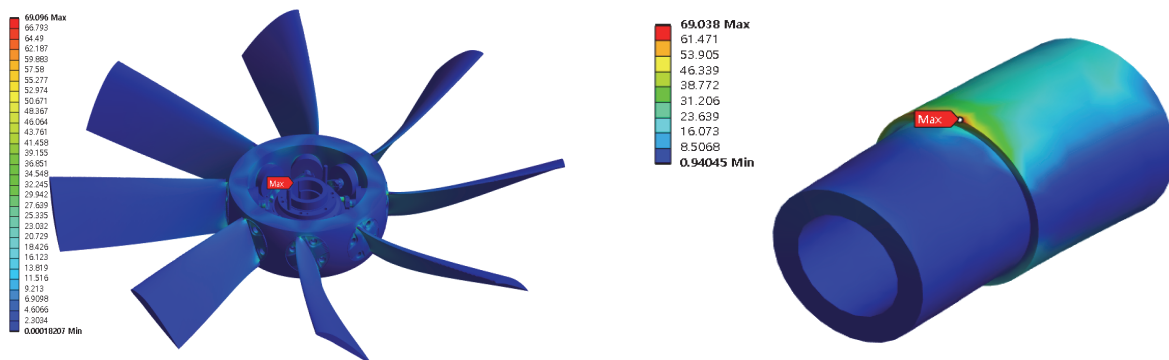
유한요소해석을 이용한 가변익 송풍기 상사모델에 대한 구동 특성 분석과 구조안전성에 대한 연구



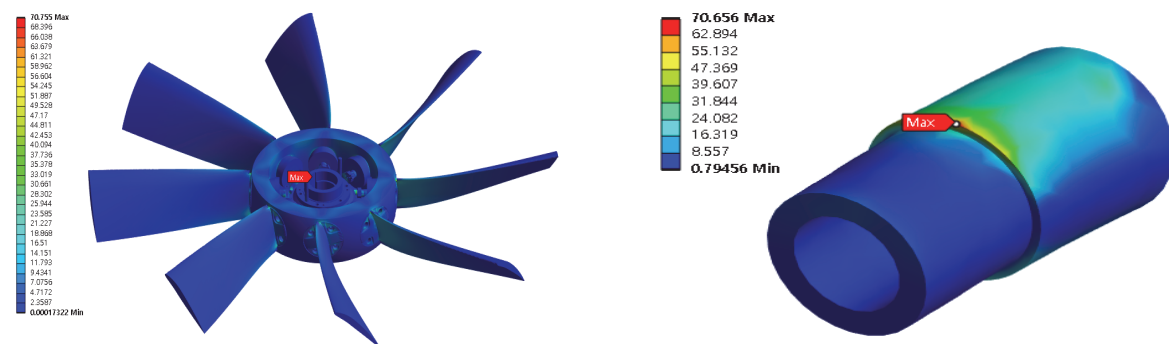
(c) Blade setting Angle 15 degree = 68.828



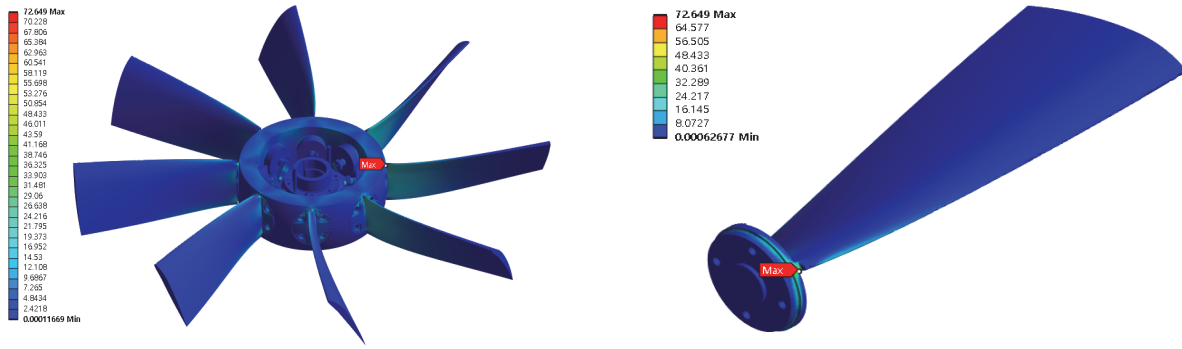
(d) Blade setting Angle 22.5 degree = 64.746



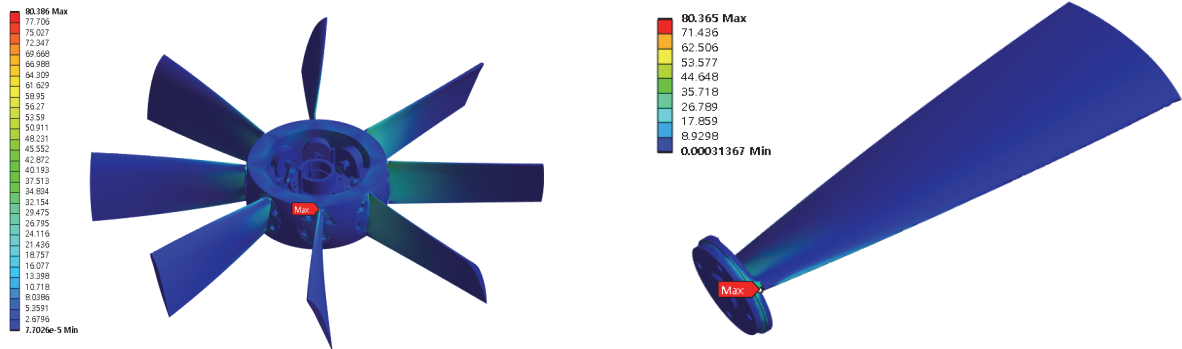
(e) Blade setting Angle 30 degree = 69.038



(f) Blade setting Angle 37.5 degree = 70.656



(g) Blade setting Angle 45 degree = 76.649



(h) Blade setting Angle 52.5 degree = 80.365

Fig. 9 Maximum Von-Mises stress of impeller (MPa)

Fig. 9는 날개 설치각도별 응력에 대한 그림을 나타내었다. Fig. 9 (a)~(f)의 최대응력이 발생하는 부품은 링크 구조의 슬라이더와 크랭크를 연결시켜 주는 역할을 하는 링크 핀으로서 직경이 감소하는 부위에서 공통적으로 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 9 (g)~(h)는 최대응력이 날개 몸체와 날개의 경계면 노치(Notch) 부위에 발생하였다. 최대응력이 발생하는 위치가 날개 설치각도가 45도 이상이 되었을 때 변화되는 것은 Fig. 3에서 도시한 바와 같이 링크 구조물의 각도가 변화함에 따라 임펠러의 무게 중심이 변화하면서 링크 핀에서 날개 몸체로 응력이 이동하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 가변의 송풍기의 임펠러의 메커니즘에 대한 구동 특성에 대한 분석과 가변의 메커니즘에서의 슬라이드 크랭크 기구적인 운동에서 날개 설치각도를 각도별로 추출하여 구조해석을 수행하고 각도별 구조안전성 판단을 위해 최대응력을 산출하여 비교하였다. 날개 설치각도는 슬라이더 역할을 하는 플레이트의 축방향으로 행정 변화를 5mm로 하였을 때 각 날개 설치각도에 대한 수치를 정리하였고, 날개 설치각도는 7.5도씩 변화하는 것을 기준으로 하여 8개의 해석 형태를 추출하게 되었다.

가변의 임펠러의 경계조건은 동일하게 임펠러 중심을 고

정하고 시계방향으로 1,185rpm으로 회전하는 조건을 부여하였다. 본 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 날개 설치각도와 플레이트 행정 변화 비율은 1.5:1로 구동되는 것을 확인하였다.
- 2) 날개 설치각도별 최대응력은 날개 설치각도 7.5도에 비해 22.5도까지 감소하는 것을 확인하였고, 22.5도 이상의 날개 설치각도부터는 최대응력이 증가함을 확인하였다. 날개 설치각도가 증가함에 따라 최대응력이 선형적으로 변화할 것으로 예상했으나 가변의 링크 기구의 링크의 위치의 각도변화에 따라 원심력에 의한 임펠러의 무게중심이 변화하면서 나타난 결과로 사료된다.
- 3) 가변의 임펠러의 최대응력이 발생하는 부위에 대한 변화는 날개 설치각도가 0도부터 37.5도까지는 가변의 링크 부품의 동일한 위치에 나타나게 되고 45도부터 52.5도까지는 날개 몸체부의 노치부에서 발생하는 결과가 나타났다. 이것은 날개 설치각도가 커짐에 따라 날개의 무게중심이 임펠러의 축방향으로 이동하면서 생기는 현상으로 판단된다.
- 4) 가변의 임펠러의 날개 설치각도에 따른 최대응력은 65.746~80.365MPa로 임펠러 허브와 구성부품의 재료 항복응력이 220MPa 이상으로 임펠러 운전상태에서 구조 안전성은 확보된 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2021202080026B).

References

- (1) Jeong-Keun Kook, Byung-Kwan Cho, 2019, "A Study on Structural Characteristics of Axial Fans Operating Speed Using Finite Element Analysis", "Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 22, No. 2, pp. 593-601.
- (2) Timoshenko, 1970, McGraw-Hill, "Theory of Elasticity".
- (3) Martin H. Sadd, 2021, Academic Press, "Elasticity Theory, Application, and Numerics".
- (4) Norman E. Dowling, 2015, "Mechanical Behavior of Materials (Engineering Method for Deformation, Fracture, and Fatigue)".
- (5) Willian Howard, 2022, McGraw Hill, "Introduction to Solid Modeling Using SOLIDWORKS".
- (6) Norman E. Dowling, 2015, "Mechanical Behavior of Materials (Engineering Method for Deformation, Fracture, and Fatigue)".
- (7) James M. Gere, Barry J. Goodno, 2014, "Mechanics of Material - SI Edition".
- (8) Huei-Huang Lee, 2021, Sdc Pubns, "Finite Element Simulations with Workbench 2021".
- (9) David V. Hutton, 2006, "Fundamentals of Finite Element Analysis".
- (10) Pramote Dechauphai, S. 2018, Alpha Science, "Finite Element Analysis wity ANSYS Workbench".