

## 축류 블레이드의 스택킹 방식에 의한 구조 안정성 연구

정철영<sup>\*†</sup> · 고희환<sup>\*</sup> · 박준영<sup>\*\*</sup>

### The Study of Structural Stability by Stacking Method of the Axial Blade

Cheol-young Jeong<sup>\*†</sup>, Hee-Hwan Ko<sup>\*</sup>, Jun-Young Park<sup>\*\*</sup>

Key Words : Blade(날개), Stacking Method(스택킹 방법), Structural Stability(구조 안정성), Axial Fan(축류 송풍기), Structural Analysis(구조해석)

#### ABSTRACT

This study is to confirm the deformation of blade when the location of stacking is moving. Also, it desire to determine the most stable location of stacking from the analysis. In the previous study, it is Known that moving the location of stacking is not influence to the aerodynamic performance. In this study SolidWorks premium 2010 SP4 is used for structure analysis. In reference blade and other 3 model analysis, the two mesh type is used, one is standard mesh type in SolidWorks, the other is curvature-based mesh type. The result of curvature-based mesh type is more stable than one of the standard mesh type regardless of mesh size, the number of mesh. The deformation of blade tip is the smallest, when the location of stacking is identical to the center of gravity of the blade section profile. So, if possible is design, this study recommends that the location of stacking is identical to the center of gravity the blade.

#### 1. 서 론

송풍기는 주변에서 흔하게 접할 수 있는 기계장치로서 여러 가지 용도 및 응용기법들을 통하여 분류된다. 유체 유동에 따라 축류형 송풍기(Axial Fan), 원심형 송풍기(Centrifugal Fan), 사류형 송풍기(Mixed Flow Fan) 등으로 나누며 날개 형상에 따라 몇 가지 형식으로 분류된다. 이중 축류 송풍기는 송풍기 회전축과 공기의 흐름방향이 평행선상의 일치된 흐름을 가지는 송풍기를 말한다. 축류 송풍기는 임펠러(Impeller), 케이싱(Casing), 구동부(Driving Part) 등으로 구성되며 임펠러의 회전속도가 유체의 속도를 증가시켜 이송시키는 구조를 가진다.

축류형 송풍기는 대유량, 저 압력의 성능을 가지며 일반 제조공정, 발전설비 및 보일러 공기공급용, 광산 및 터널의 급배기 환기용, 건물의 공기조화 등을 비롯하여 산업사회 전반에 광범위하게 사용되고 있다. 이렇게 넓은 범위의 영역을 차지하고 있는 송풍기 사용 특성상 국가적 에너지 사용량이

크고 효율개선에 따른 에너지 절감효과가 크게 기대되는 유체 기계이다.

에너지 절감 및 사용목적에 적합한 송풍기를 제작하기 위하여 수많은 송풍기 제작사와 학계의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한, 1900년대 초기부터 연구되어진 익형들의 적절한 조합 및 변형방법들을 통한 새로운 날개형상의 구현이나 최적화를 통한 성능 향상을 위한 연구들이 주를 이루고 있다. 박준영 등<sup>1)</sup>은 3차원 수치해석기법을 통하여 일정형상의 블레이드가 캠버형상이 바뀔 때 따라 송풍기의 성능이 어떻게 바뀌는지에 대하여 연구하였으며, 김재우 등<sup>2)</sup>은 3차원 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)방정식을 통한 환기용 축류 송풍기의 유동특성 및 모터의 위치가 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 권순국<sup>3)</sup> 등은 발전용 저압 터빈의 최종 끝단 블레이드에 대해 유체-구조 연성해석(FSI Fluid Structure Interaction)을 통하여 NACA Rotor 37 블레이드의 정상 FSI 해석과 동적 FSI 해석간 뒷전 변형량의 변화가 있음을 확인하였다. 또한, 정강일<sup>4)</sup> 등은 중력의 영향이 고려된 풍력 발전용 회전 블레이드가 회전에 의하여 고유진동수가 약간 변경됨을 연구하였다. 이기상 등<sup>5)</sup>은 NACA65 계열의 블레이드 단면형상을 레디얼 베이스 신경회로망(Radial Basis

\* (주)귀뚜라미범양냉방 공조기술연구소

\*\* 한국기계연구원

† 교신저자, E-mail : heavyfan@krb.co.kr

Neural networks) 기법을 이용하여 최적화하여 전압효율을 향상시키는 연구를 하였다. 박준영 등<sup>6)</sup>은 본 연구에 적용된 블레이드 스택킹 중심축의 위치변화가 송풍기 성능에 미치는 영향을 연구하여 스택킹 중심축의 변화가 발생하여도 성능에는 영향이 미미한 것을 선행연구를 통하여 확인하였다.

본 연구는 스택킹 중심축의 변화가 발생하여도 공력 성능의 영향이 미미하다면 스택킹 중심축 위치가 변경됨에 따라 블레이드의 구조 안정성이 어떻게 변경되는지를 통하여 가장 안정된 형상을 찾고자 하였으며 해석기법에 적용된 메쉬 격자의 모양에 따른 변화를 확인하고자 하였다.

## 2. 구조해석

### 2.1 해석대상

해석대상 블레이드는 축류 송풍기의 공력설계의 기본모델 Fig. 1을 기준으로 삼았으며, 각각의 스택킹(Stacking) 방법에 따라 Fig. 2의 (a)는 기준모델의 형상을 (b)는 익형선단(Leading Edge)을 중심으로 (c)는 무게중심점(Center of Gravity)을 중심으로 (d)는 익형후단(Trailing Edge)을 중심으로 적층된 모델을 보여주고 있다. 각각의 모델에서 익형선단의 인입각(Incidence Angle) 및 설치각(Stagger Angle)은 동일한 각도를 가지도록 설정하였다.

### 2.2 블레이드 재질속성

해석 대상 블레이드의 재질은 일반적으로 주조 블레이드

에 많이 쓰이고 있는 알루미늄 합금으로 재질기호는 AC4C-T6(ASM B26 356.0-T6)로 설정하였다. 알루미늄 합금 소재로서 구조성이 우수하고 가공성 및 기계적 성질이 우수한 소재로 블레이드 구조에 널리 쓰이고 있다. 구조방식에 따라 사형구조, 금형구조, 저압구조, 중력구조 등으로 나뉘고 있으며 제품 상용화시 대개의 경우 금형구조로 사용되는 것이 일반적이다. 그러나 사형구조와 금형구조의 구조방식에 따라 기계적 성질의 변화가 발생되며 본 연구에서는 기계적 성질이 보다 우수한 금형 구조 방식의 속성을 적용하여 해석을 하였다. 적용된 속성은 Table 1과 같다.

### 2.3 적용 메쉬

솔리드 워크스 2010<sup>7)</sup>은 구조해석을 위하여 표준메쉬 및 곡률기반 메쉬의 2가지 메쉬 방법을 제공하고 있다. 따라서 본

Table 1 The mechanical properties of aluminum AC4C-T6(ASM B26 356.0-T6)

Property Items	Value	Unit
Modulus of elasticity	72,400	MPa
Poisson's ratio	0.330	
Shear modulus	27,200	MPa
Mass density	2,680	kg/m <sup>3</sup>
Tensile stress	228	MPa
Compressive stress	185	MPa
Tensile yield stress	152	MPa

\* Reference of SolidWorks material properties

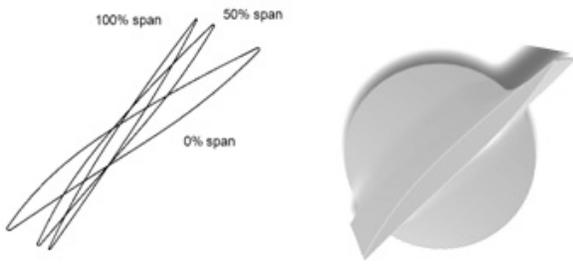


Fig. 1 Reference blade profile and model

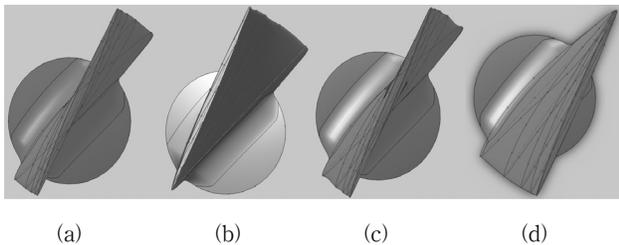


Fig. 2 (a) Reference (b) Leading edge (c) Center of gravity (d) Blade configuration of trailing edge according to the stacking method

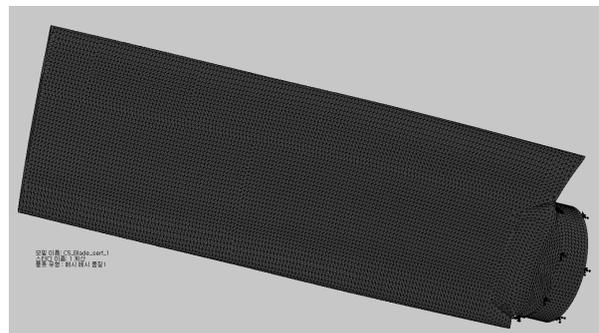


Fig. 3 Standard mesh applied to geometry

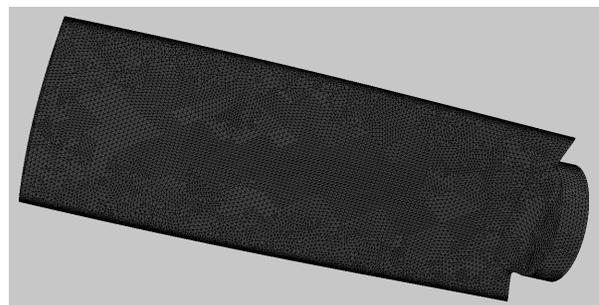


Fig. 4 Curvature-based mesh applied to geometry

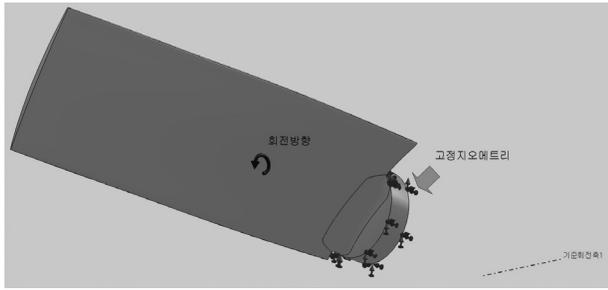


Fig. 5 Boundary conditions and load setting configuration

연구에서는 각 메쉬방법에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 확인하고 차후 블레이드의 구조강성 해석시 어떠한 메쉬를 적용하는 것이 좋을지를 판단하기 위하여 2가지 메쉬방법을 모두 적용하여 해석하였다.

Fig. 3은 표준메쉬를 적용한 형상을 보여주고 있으며 Fig. 4는 곡률기반 메쉬를 적용한 형상이다.

곡률기반 메쉬의 경우 표준메쉬 방식보다 곡률발생부위에 촘촘한 격자삽입을 보이고 있으며 그에 따라 격자수가 상당 부분 증가되는 것을 확인할 수 있다.

또한, 격자크기의 변화에 따른 변화를 확인하기 위하여 최대격자의 크기를 60mm, 50mm, 40mm, 30mm, 20mm, 10mm, 5mm, 2.5mm로 각각 제한한 후 기준모델에 적용하여 해석하였다.

2.4 구속조건 및 하중조건

구속 및 하중조건은 블레이드하부의 보스 부분을 고정한 후 송풍기 본래의 회전 중심을 기준으로 회전축을 설정하였다. 회전 방향은 블레이드 앞전이 회전 방향에 일치 되도록 반시계 방향으로 하였으며 원심력 하중은 송풍기 설계 회전수인 860rpm으로 설정하였다.

Fig. 5는 각 설정된 구속 조건 및 원심력 하중조건을 보여주고 있다.

3. 해석결과

3.1 격자 크기 변화에 따른 변형량 해석결과

메쉬크기에 따른 변형량 변화는 기준모델만 적용 해석하였다. 이는 격자크기에 따라 변형량이 변화된다면 허용 변화량을 결정하고 해석의 정밀도를 결정하기 위하여 수행되었다.

해석결과 표준메쉬나 곡률기반메쉬의 경우 모두 5mm 정도의 크기에서 변형량의 결과가 잘 일치하고 있으며 그보다 작은 2.5mm의 격자크기는 계산시간이 많이 소요되고 컴퓨터의 메모리 및 부하를 증가시킬 뿐 정확도가 크게 향상되지 않음을 확인하였다.

곡률기반메쉬의 경우에는 격자의 크기가 작아질수록 하중에 대한 변형량이 일정하게 증가하는 경향이 보이고 있으나

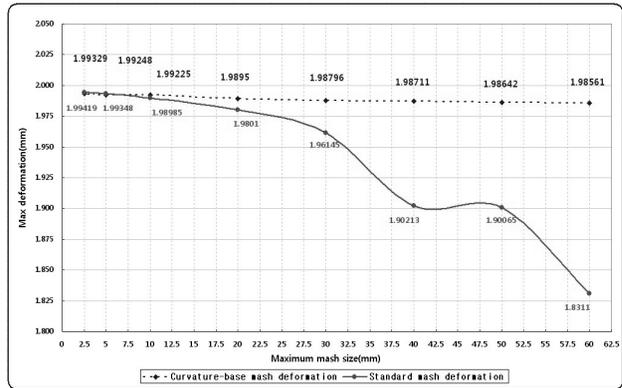


Fig. 6 The deformation to mesh size

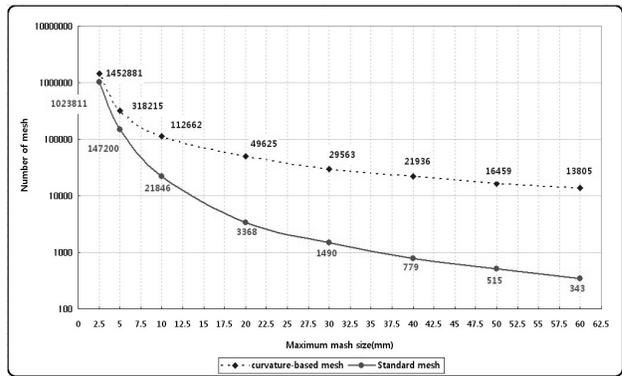


Fig. 7 The number of mesh to mesh size

표준메쉬의 경우에는 어느 부분에서 변형량이 변화가 일정하지 않은 부분이 발생된다. 이는 메쉬격자의 작성과정에서 모델원래의 형상보다 크게 메쉬가 작성되어 응력변형 면적이 커진 것으로 추측된다.

Fig. 6은 표준메쉬 및 곡률기반 메쉬의 격자 크기별 변형량을 보여주는 그래프로서 실선곡선은 표준기반 메쉬의 변형량을 점선 곡선은 곡률기반 메쉬의 변형량을 각각 표시하고 있다.

Fig. 6은 표준메쉬는 20mm의 격자크기에서 변형량이 줄어드는 현상을 보이고 있다. 변화량은 0.16mm 정도이다. Fig. 7은 메쉬크기에 따른 격자수를 나타내고 있으며 메쉬크기에 따라 격자의 수는 기하급수적으로 증가됨을 볼 수 있다. 최대 메쉬크기를 2.5mm로 제한한 경우에 격자수는 곡률기반 메쉬는 약 145만개를 보이고 있으며 표준격자의 경우에는 약 100만개의 격자수를 보여준다. 최대메쉬의 크기를 5mm로 제한한 경우에는 곡률기반 메쉬는 약 21%정도로 격자수가 감소를 보이고 있으며 표준메쉬는 약 14% 정도로 감소하였음을 알 수 있다. 해석에 소요된 시간은 약 8배의 시간이 소요되어 시간상의 제약 및 컴퓨터 사양 등을 고려하고 Fig. 6 와 Fig. 7의 2가지 표를 분석한 결과 변형량의 변화가 거의 일치되는 5mm 크기의 메쉬를 기준으로 고정한 후 나머지 3개의 모델의 메쉬 방법을 곡률기반 메쉬와 표준메쉬

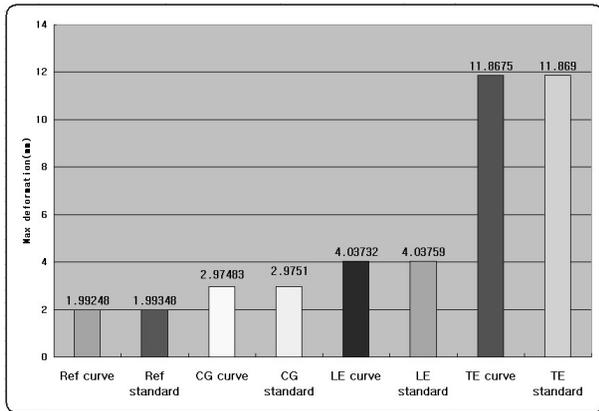


Fig. 8 The deformation to changes in stacking position

로 구분하여 해석하였다.

### 3.2 스택킹 위치 변화에 따른 변형량 해석결과

Fig. 8은 기준 블레이드, 스택킹 중심이 각 블레이드 섹션 단면의 무게중심에 위치한 경우, 익형 선단에 스택킹중심이 위치한 경우, 익형 후단에 스택킹중심이 위치한 경우를 각각 곡률기반메쉬와 표준메쉬의 변형량을 표시한 그래프이다.

Fig. 8을 분석한 결과 곡률기반메쉬의 변형량이 조금 더 작게 해석되고 있다. 또한, 회전 중심원점 및 스택킹중심이 일치하는 경우 송풍기 회전에 의한 원심력으로 블레이드의 변형이 가장 작게 나타나는 것을 확인하였다.

### 3.3 스택킹 위치 변화에 따른 응력변화 결과

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 스택킹 위치가 익형선단에 위치한 모델과 익형 후단에 위치한 모델의 변형도이다.

Fig. 9는 스택킹 위치가 익형선단에 위치한 모델로서 흐린 음영부분의 원래 모델이 그림에서 오른쪽으로 변형된 모습을 보여주고 있다.

Fig. 10은 스택킹 위치가 익형후단에 위치한 모델로서 흐린 음영부분의 원래 모델이 그림에서 왼쪽으로 변형된 모습을 보여주고 있다. 스택킹 위치가 익형선단에 위치한 모델과 익형 후단에 위치한 모델의 변형 방향이 서로 다르게 나타났다. 이는 보스부의 중심점과 블레이드 끝단(Blade Tip)의 무게중심이 블레이드의 압력 면과 부압 면으로 블레이드 단면 중심과 엇갈려 위치하기 때문인 것으로 판단되며, 변형으로 인한 블레이드 날개 뿌리부분(Blade Root)의 응력도 좌, 우 부분으로 분포양상이 달라짐을 Fig. 11과 Fig. 12를 통해 확인된다.

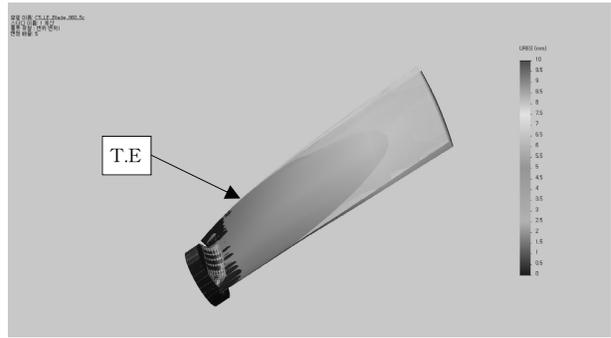


Fig. 9 The stacking blade deformation of leading edge

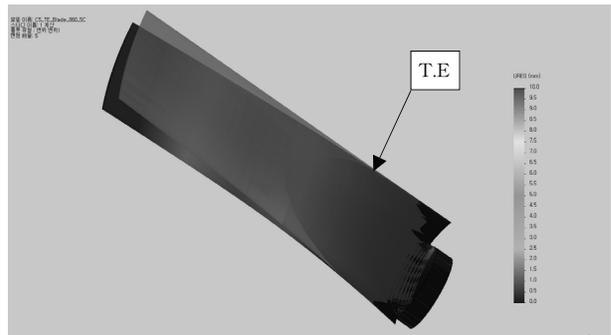


Fig. 10 The stacking blade deformation of trailing edge

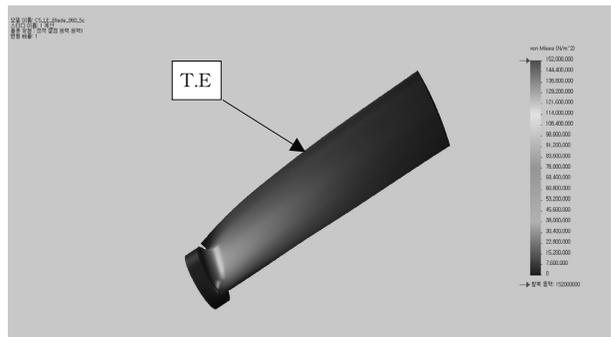


Fig. 11 The stacking blade stress distribution of leading edge

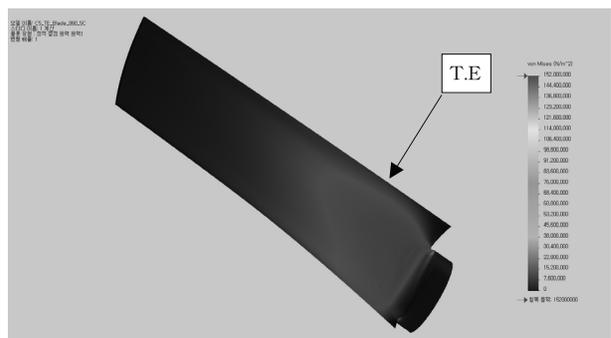


Fig. 12 The stacking blade stress distribution of trailing edge

Table 2 Comparison of natural frequency according to changes of stacking position

Item	Ref	CG	LE	TE
1st	37.117	37.856	37.201	35.82
2nd	165.39	170.9	166.80	167.33
3rd	212.98	213.18	211.92	208.52
4th	335.88	340.45	333.51	336.19

### 3.4 스택킹 방법에 따른 고유진동수 변화

각 스택킹 모델별 고유 진동수(Natural Frequency)는 Table 2와 같다.

Table 2의 결과와 같이 주파수의 변화는 크지 않았으나 무게중심을 기준으로 스택킹된 블레이드 모델의 고유진동수가 가장 높게 산출되었다. 다음의 Fig. 13부터 Fig 16까지는 고유 진동수 차수별 변형 모드를 보여준다.

Fig. 13은 1차 고유 진동수에서의 변형모드를 보여주고 있다. 블레이드의 좌우 방향으로 흔들림이 발생된다. Fig. 14는 2차 고유 진동수의 변형모드로 블레이드 중간부분의 급격한 휨이 발생됨을 알 수 있다. 그러나 대개 산업용 축류 송풍기의 회전수는 3600rpm을 넘지 않음으로 2차 고유진동수에 의한 공진 발생 가능성은 적다고 판단된다. Fig. 15는 3차 고유 진동수에서의 변형모드로서 블레이드 뿌리부분을 중심으로 블레이드의 비틀림 진동이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 16은 4차 고유 진동수에서의 변형 모드로 블레이드 중심부분에는 휨이 발생되고 블레이드 끝부분에는 비틀림 발생되고 있다.

## 4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 스택킹 위치가 각 블레이드 형상의 무게중심점과 가까울수록 변형량이 가장 작게 된다.
- 2) 축류 송풍기의 블레이드처럼 곡률이 많은 경우에는 곡률기반 메쉬가 보다 적은 메쉬 수를 가져도 정밀한 변형 값을 도출하는 것으로 판단된다.
- 3) 메쉬의 크기 변화에 따른 변형량의 변화는 곡률메쉬가 보다 안정적이다.
- 4) 블레이드의 고유 진동수는 스택킹 위치가 변경되는 경우에도 큰 차이가 발생하지 않는다.
- 5) 차후 블레이드 스핀 테스트(Spin Test) 및 인장시험 등을 통한 구조안정성 확인과 인장변형률 관계는 실질 검증이 필요할 것으로 판단된다.

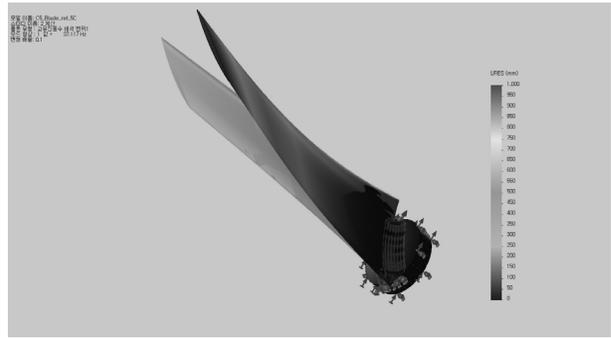


Fig. 13 First natural frequency mode

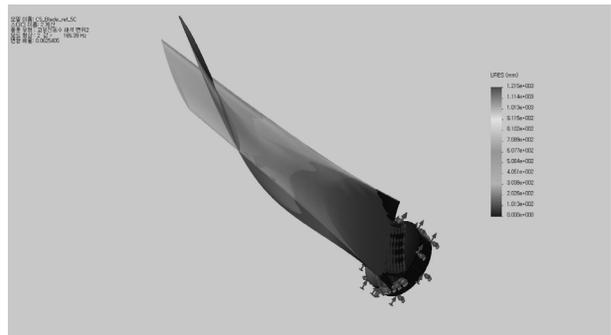


Fig. 14 Second natural frequency mode

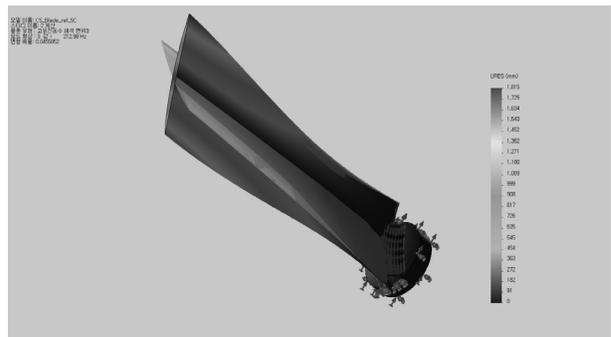


Fig. 15 Third natural frequency mode

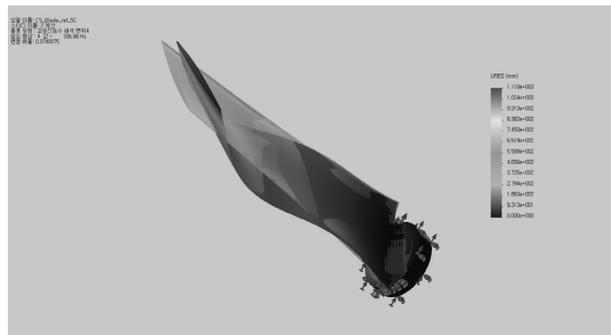


Fig. 16 Fourth natural frequency mode

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업 중 고효율 저소음 송풍기개발 국책과제지원으로 수행되었습니다.

-[과제번호 : 10031698]

## 참고문헌

- (1) 박준영, 한상조, 최범석, 정철영, 고희환, 2010, “캠버 라인이 가역송풍기 성능에 미치는 영향,” 유체기계공업학회, 유체기계공업학회 연구개발발표회 논문집, pp. 388~389.
- (2) 김재우, 김진혁, 김광용, 2009, “환기용 축류송풍기의 유동 해석 및 모터 위치에 따른 성능 특성 연구,” 유체기계공업학회, 유체기계공업학회 연구개발발표회, pp. 353~358.
- (3) 권순국, 이영신, 배용채, 2008, “발전용 저압터빈 최종단 블레이드의 정적 유체-구조 연계해석,” 대한기계학회, 대한기계학회논문집 A권, 제34권 제8호, pp. 1067~1074.
- (4) 정강일, 유홍희, 2010, “중력의 영향이 고려된 회전블레이드의 동적 안정성 해석,” 한국소음진동공학회, 한국소음진동공학회논문집 제20권 제11호, pp. 1052~1057.
- (5) 이기상, 김광용, 최재호, 2008, “익형의 형상최적화를 통한 고효율 축류송풍기 설계,” 유체기계공업학회, 유체기계저널, 제11권 제2호(통권47호) pp. 46~54.
- (6) 박준영, 한상조, 최범석, 정철영, 고희환, 2010 “스테킹 방법이 가역송풍기의 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회, 대한기계학회 추계 학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 3393~3396
- (7) SolidWorks, 2010, premium sp4.