

터어빈 블레이드의 통계적 파괴 분석

조재웅^{1*}

Statistical Fracture Analysis of Turbine blade

Jae-Ung Cho^{1*}

요 약 본 연구에서는 통계적 파괴 분석으로서 turbine blade에서의 피로 수명이 최소화되는 최적 설계안을 도출하는 데에 있다. 그 방법으로는 최소한의 피로 수명이 나오는 설계안을 위해 먼저 fillet radius를 고정한 후, 실험 계획법을 통하여 turbine blade에서의 최적의 X 와 Y 위치를 찾는다. 또한 six sigma analysis로서 X 와 Y 인자에서의 공정에 대한 불확실성을 계산한다. 그리고 robust design을 사용하여 주어진 불확실성 상태에서 최적의 fillet radius 값을 결정하여 최대의 von Mises 응력은 20%가 작아지고 피로수명이 두 배가 되는 최적의 설계를 할 수가 있었다.

Abstract The optimum design of turbine blade at minimized fatigue life can be derived by the statistical fatigue analysis in this study, The optimum value of positions in the axes of X and Y at turbine blade can be found by design of experiments on the condition that the value of fillet radius is fixed to minimize the fatigue life. The degree of uncertainty about process at the factors in the axes of X and Y can be calculated by six sigma analysis. The optimum value of fillet radius is determined by utilizing the robust design at uncertain condition. It is concluded that maximum von Mises stress can decreased by 20% and the fatigue life can be double.

Key Words : optimum design, fatigue life, von Mises stress, design of experiments, uncertainty, six sigma analysis, robust design

1. 서론

국내 대부분의 설계최적화기술[1] 및 알고리즘 개발의 경우, 자체개발 CAE 프로그램[2]과 최적화 알고리즘을 직접 연결하여 적용하였다. 이러한 경우, 최적설계 이론 및 프로그램에 대하여 설계자의 충분한 지식이 요구되므로 산업체가 대학 및 연구소에 위탁하여 개발하는 경우가 많았다. 국내 산업현장에서 최적화기술의 활용도를 보면 고가의 CAD/CAE 도구를 도입하여 설계에 적용하고 있으나 대부분 한 분야에서의 적정설계 또는 설계변수 변화에 의한 시뮬레이션기반 설계방법이 주종을 이루고 있다. 산업체에서 많은 상용 CAE 도구들을 도입하였으나 최적화기법을 이들 프로그램과 연결하기가 용이하지 않았다. 더욱이 설계해의 신뢰성[3] 및 효율성을 고려하는 다분야통합 최적설계 기술은 개발되지 못하고 있는

실정이며, 최적화기법을 제공하는 몇몇 상용 프로그램을 사용하는 경우에도 내장된 최적화기법의 수준이 미흡한 실정이다. 다분야통합형 설계문제의 경우, 부서간의 설계 결과에 대한 의견 교환이 필요하므로 상당한 시간과 노력을 요하는 타협 과정을 통하여 적정한 설계결과를 도출하고 있는 실정이다. 따라서 요즘은 최적설계가 실용화에 접어 들어간다고 말할 수 있는 시기이다. PC, 워크스테이션, 슈퍼컴퓨터의 출현으로 설계자가 이용할 수 있는 컴퓨터 자원은 대폭 늘어 났으며 유한요소법, 경계요소법 등 이용 가능한 수치 해석법도 다양해져서 최적설계 분야도 활발해져 가고 있다[4]. 실제적인 최적화를 위한 시스템 최적화 프로그램의 연구개발이 CAD/CAE 시스템의 개발과 병행하여 활발하게 추진되어 범용 최적화 프로그램이 속속 개발되었다. 또한 형상 최적설계 문제가 크게 대두되고 설계민감도의 해석 방법에 대한 관심이 높아져 여러 시스템에 대한 효율적인 설계민감도 계산법에 대한 연구가 활발하게 진행되었고 설계민감도 해석 기능을 갖춘 유한요소 패키지의 개발도 가능하게 되었다.

¹공주대학교 기계·자동차공학부

*교신저자: 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

따라서 최적설계는 기어라든가 디젤 엔진에 대한 피스톤 또는 원자력 구조물 등, 모든 분야에 대하여 해석 프로그램 중의 하나인 ANSYS로 해석한다[5]. 모델 자체를 물성치나 하중으로서 매개변수로 만들고 최적점으로서 목적(wish)변수로 하여 일정한 범위내(demand)에 있어야 하는데 이 관계를 상태 변수로 하여 이들 인자들은 설계 (design) 변수가 된다. 따라서 본 연구에서는 터빈 블레이드 설계의 모델 자체를 매개 변수로 하는 목적 함수, 상태 변수, 설계 변수로 만들고 초기 설계안을 만들고 목적하는 기능을 설계 변수들을 최소화시키는 상태변수를 만족하면서 목적함수를 찾아 가는 것이다. 주어진 요구 사항들의 조건을 만족하면서 최소화시키거나 최대화시키는 최적화된 설계를 수행하거나 그 설계 영역을 탐색할 수 있다. 또한 초기안으로서 최적화된 설계안을 찾는 데 주어진 요구 사항들의 조건을 만족하면서 최소화시키거나 최대화시킬 수 있다. 본 연구에서는 목적하는 기능을 설계 변수들로 하여 최소화시켜 그 상태변수를 만족하면서 목적함수를 찾아 감으로써 터빈 블레이드의 피로 수명이 최소화되는 설계안을 도출할 수 있었다.

2. 본론

2.1 유한요소모델

본 연구에서의 해석모델로서 터빈 블레이드의 유한 요소분할 모양과 치수(단위:cm)는 그림 1과 같다.

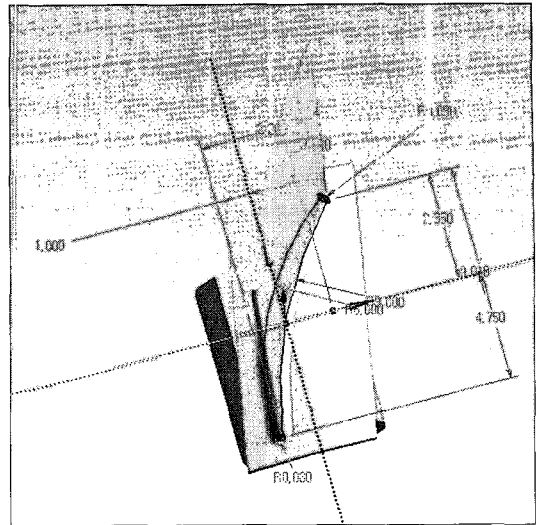
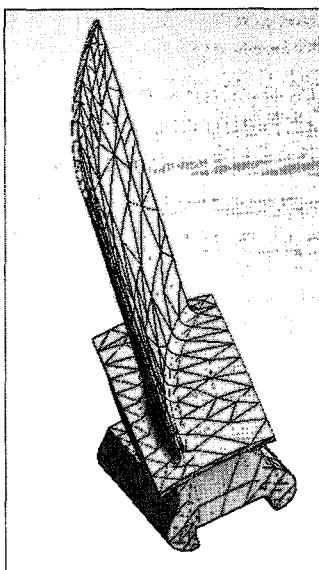


그림 1. 터빈의 유한요소분할 모양과 치수(단위:cm)

절점들과 요소들의 개수는 각각 7522 및 4274이다. 그림 2에서와 같이 그 구속 조건은 아래쪽 날개의 바닥면과 그 양측면이 마찰이 없이 고정되어 있고 원점의 중심으로부터 날개의 바닥면의 중심까지의 거리는 0.5m가 되고 회전 속도는 755 rad/sec이다. 터빈 재료는 구조용 강으로서 이 물성치는 표 1과 같다[6]. 또한 체적은 $5.1562e-004 \text{ m}^3$ 및 무게는 4.0476 kg이다.

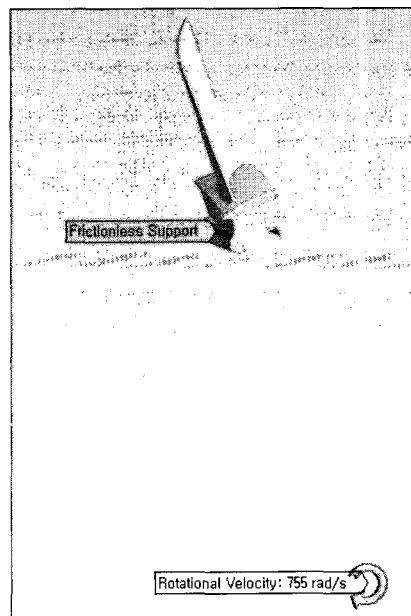


그림 2. 터빈의 회전 및 구속조건

표 1. 터어빈 재료의 물성치

| Structural Properties | |
|-----------------------|--|
| Young's Modulus | 2×10^5 MPa |
| Poisson's Ratio | 0.3 |
| Mass Density | 7.85×10^{-6} kg/mm ³ |
| Stress Limits | |
| Tensile Ultimate | 250 MPa |
| Compressive Ultimate | 250 MPa |

2.2 설계안 도출

피로수명이 최소화 되는 설계안[7.8]을 도출하는데에 있어서.

1. 최소한의 피로수명이 나오는 설계안을 위해 먼저 fillet radius를 고정한 후, turbine blade에서의 최적의 X 와 Y 위치를 찾는다.
2. six sigma analysis에서 X 와 Y 인자의 공정의 불확실성을 계산한다.
3. robust design을 사용하여 주어진 불확실성 상태에서 최적의 fillet radius 값을 결정

그림 3에서와 같이 터어빈 날개 각도의 회전 위치로서 X, Y 축상의 초기값들로서 위쪽 날개의 중앙부에서의 축방향 및 접선 방향의 휨 양 및 날개의 중앙부에서의 필렛의 반경을 각각 초기값으로 하여

$xtilt = 3.81 \text{ cm}$
 $ytilt = 2.54 \text{ cm}$
 $radius = 0.635 \text{ cm}$

으로 정했다.

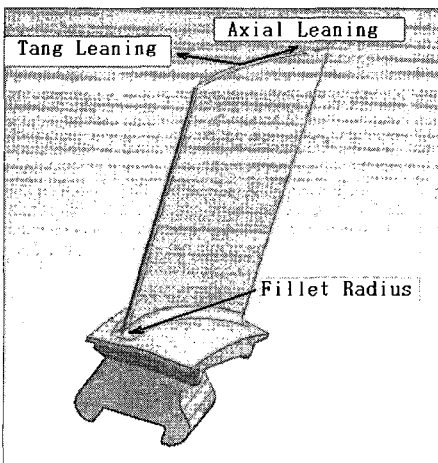


그림 3. 터어빈 날개 각도의 회전 위치들 및 중앙부의 필렛 반경

피로 사이클은 회전속도에 적용하여 sine파의 형태로 되어 주어진 회전속도인 755 rad/sec를 배율 1로 하여 그림 4와 같이 적용되고 있다[9]. 초기값으로 해석하여 그림 5에서와 같이 최소의 피로 수명은 1335 cycle로 계산되었고, 그림 6에서와 같이 최대의 equivalent von Mises stress는 1.0303×10^3 MPa이 되었다.

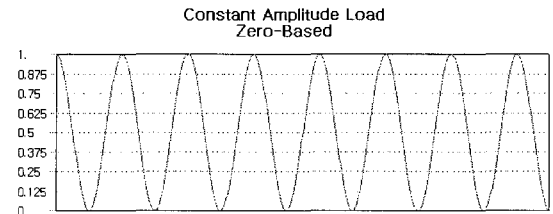


그림 4. 피로 사이클의 유형

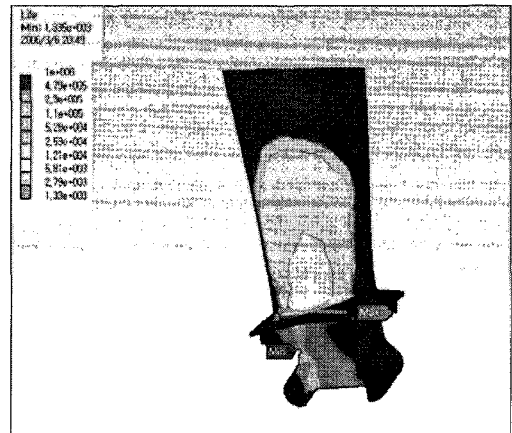


그림 5. 초기 값으로서의 터어빈 블레이드의 피로 수명 (xtilt = 3.81 cm, ytilt = 2.54 cm, radius = 0.635 cm)

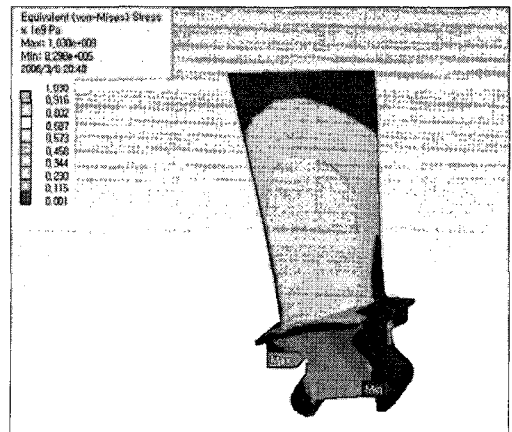


그림 6. 초기 값으로서의 터어빈 블레이드의 equivalent von Mises stress (xtilt = 3.81 cm, ytilt = 2.54 cm, radius = 0.635 cm)

입력 파라미터 (ANSYS workbench - simulation, CAD 등)에 대하여 계산된 solution(design point)을 factorial 방법을 이용하여 response surface를 만들게 된다. 실험계획법(design of experiments 또는 DOE)방법은 최적해를 선정하기 위하여 입력 파라미터들을 어떻게 결정해야 하는지 등의 정보를 제공하게 된다. DOE 연구로서는 turbine blade 각도의 회전 위치로서 X, Y 축상의 초기값들로서 xtilt 및 ytilt를 설계 변수들로 정한다. 그리고 response surface를 위한 9번의 해석 후, 그림 7 및 그림 8과 같이 반응 결과를 볼 수 있는데, 그림 7은 최소의 수명에 대한 확률을 나타낸 것이다. 그림 8은 xtilt 및 ytilt의 설계 변수들에 대한 최소 수명에 대하여 3차원의 관계로 나타내었다.

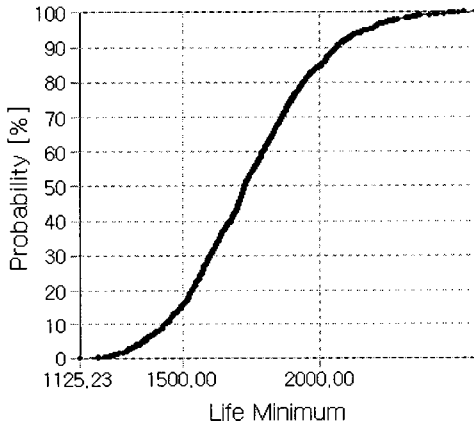


그림 7. 최소의 수명에 대한 확률

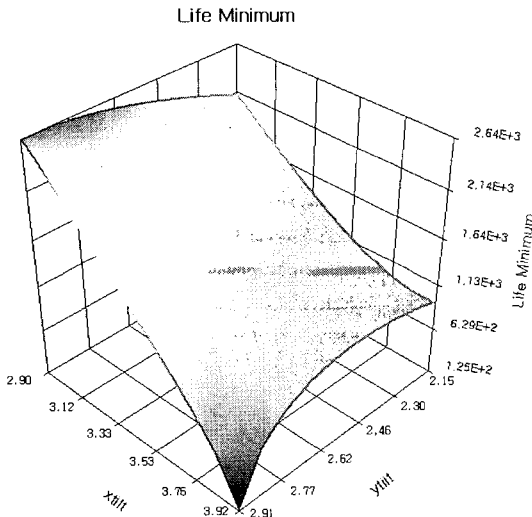


그림 8. xtilt(cm) 및 ytilt(cm)의 설계 변수들에 대한 최소 수명

1000개의 sample들을 선택하여 수행함으로써 최적화로서 나온 결과는 xilt = 2.9 cm, ytilt = 2.54 cm의 값이 되었다. 또한 six sigma analysis를 수행하여 현재의 불확실성이 있을 때의 분포를 파악한다. six sigma design으로서 해석하여 최적화를 실행함으로써 파라미터 정보들도 확인할 수 있다. 이 상태에서 fillet radius는 10%의 변화를 주어서 다시 15번 해석하고 그 결과로서 표 2와 같은 확률표를 얻었다. 입력 파라미터의 상한치 및 하한치를 정의하여 최적화해석을 하여 2568 cycle인 최대의 피로 사이클을 얻었다. 그러나 설계변수들인 xtilt 및 ytilt 값들은 불확실성을 포함하고 있어 표 2와 같이 피로 사이클이 1125 cycle 이하로도 나옴을 알 수 있다.

표 2. 확률표

| × | Life Minimum | Probability |
|---|--------------|-------------|
| | 1125.2 | 9.0526e-004 |
| ☑ | 1197.4 | 4.0315e-003 |
| | 1197.4 | 4.0348e-003 |
| | 1269.5 | 1.3478e-002 |
| | 1341.6 | 3.559e-002 |
| | 1413.7 | 7.7402e-002 |
| | 1485.9 | 0.14352 |
| | 1558. | 0.2335 |
| | 1630.1 | 0.34133 |
| | 1702.2 | 0.45732 |
| | 1774.4 | 0.57111 |
| | 1846.5 | 0.6751 |
| | 1918.6 | 0.76482 |
| | 1990.7 | 0.83771 |
| | 2062.8 | 0.89343 |
| | 2135. | 0.9335 |
| | 2207.1 | 0.96061 |
| | 2279.2 | 0.97787 |
| | 2351.3 | 0.98822 |
| | 2423.5 | 0.99406 |
| | 2495.6 | 0.99717 |
| | 2567.7 | 0.99872 |

여기서 1197 cycle은 파괴될 확률이 0.4%의 값밖에 안되는 값이므로 최소의 fatigue life를 1197 cycle로 정하고 이를 만족하는 최적해를 구하게 된다. 또한, xtilt 및 ytilt의 설계 변수 값이 어떤 분포를 가진 상태(불확실성)로서 fillet radius를 포함시켜 해석하는 강건설계(robust design)를 행한다.

최소가 되는 최대의 피로 사이클은 1178 cycle이 되었고 최적값이 되는 fillet radius는 0.26138이 되었다. 그리고 그림 5 및 6과 같이 해석 초기에는 최소의 피로 수명

은 약 1335 cycle이며 최대의 equivalent von Mises stress는 1.0303×10^3 MPa이었지만, 본 해석에 있어서 최적의 설계변수들인 $x_{tilt} = 2.9$ cm, $y_{tilt} = 2.54$ cm, $radius = 0.664$ cm로서 최종적으로 피로 해석을 다시 수행하면 그림 9와 같이 최소의 피로 수명은 2544 cycle이 되었고 그림 10에서와 같이 최대의 equivalent von Mises stress는 8.1596×10^2 MPa이 되었다. 터어빈 블레이드에서의 최대의 von Mises 응력은 20%가 작아지고 피로수명은 두 배가 되는 최적의 설계를 할 수가 있었다.

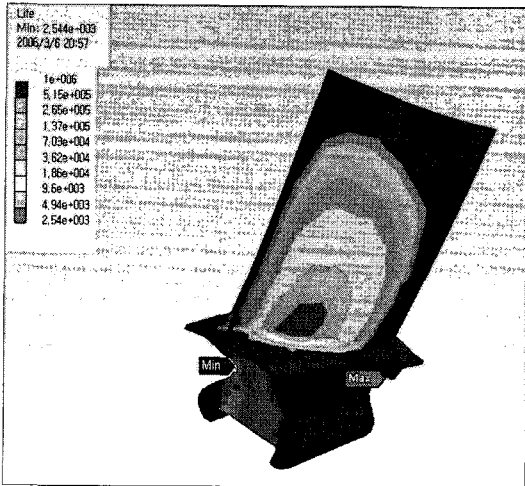


그림 9. 최적 값으로서의 터어빈 블레이드의 피로 수명 ($x_{tilt} = 2.9$ cm, $y_{tilt} = 2.54$ cm, $radius = 0.664$ cm)

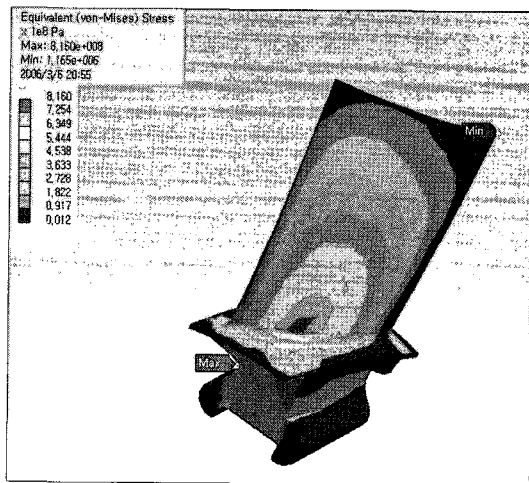


그림 10. 최적 값으로서의 터어빈 블레이드의 equivalent von Mises stress ($x_{tilt} = 2.9$ cm, $y_{tilt} = 2.54$ cm, $radius = 0.664$ cm)

3. 결론

본 연구에서는 통계적 파괴 분석으로서 터어빈 블레이드에서의 피로 수명이 최소화되는 최적 설계안을 도출하는 데에 있다. 이 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최소한의 피로 수명이 나오는 설계안을 위해 먼저 fillet radius를 고정 후, 실험 계획법을 통하여 turbine blade의 최적의 X 와 Y 위치를 찾는다.
- (2) six sigma analysis로서 X 와 Y 인자에서의 공정에 대한 불확실성을 계산한다.
- (3) robust design을 사용하여 주어진 불확실성 상태에서 최적의 fillet radius 값을 결정한다.
- (4) 터어빈 블레이드에서의 최대의 von Mises 응력은 20%가 작아지고 피로수명은 두배가 되는 최적의 설계를 할 수가 있었다.

참고문헌

- [1] 이태희, "[신뢰성 재료의 미래] 신뢰성기반 최적설계," 기계저널 제45권 2호, pp.86-89, 2005.
- [2] 지준근, 이동민, "고속설계시스템에 의한 AC 서보시스템의 속도관측기 및 속도제어기 설계," 한국산학기술학회논문지, Vol.6, No.6, pp.453-456, 2005.
- [3] S. Tanaka, M. Ichikawa, S. Akita, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," Eng. Frac. Mech., Vol.20, pp.501-513, 1984.
- [4] S. Y. Han, S. Y. Song, "Shape Optimization of Structures in Opening Mode," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.141-149, 2002.
- [5] John Swanson, "Design Space," Ansys Workbench, Ansys, Inc., 2005
- [6] Lampman, S. R. editor, "Fatigue and Fracture," ASM Handbook, ASM International, Vol.19, 1996.
- [7] D. A. Hancq, A. J. Walters, J. L. Beuth, "Development of an Object Oriented Fatigue Tool," Engineering with Computers, Vol.16, pp.131-144, 2000.
- [8] J. Bannantine, J. Comer, J. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," New Jersey, Prentice Hall, 1990.
- [9] U.S. Dept. of Defense, "Metallic materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures," MIL-HDBK-5H, 1988.

조재웅(Jae-Ung Cho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과(공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계·자동차공학부 교수

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가,
피로 또는 충돌시 동적 해석