

# ANSYS Workbench를 이용한 해석 성공 사례

# 티타늄 터빈 블레이드의 피로 수명에 대한 신뢰성과 강건설계



ANSYS Werkbench DesignXplerer는 DesignSimulation, DesignMedeler에서의 변수와 다양한 CAD 모델의 설계 변 수를 이용하여 최적화를 수행하며, 최적점에서의 값을 다시 원본 데이터에 반영할 수 있다. 이번 호에서는 DesignXplerer를 활 용한 부품의 수명 신뢰도 산출과 강건설계 사례를 소개한다.

DesignXplorer는 네 가지 최적화 기법을 제공한다.

- 실험 계획법을 이용하는 최적화(Design of Experiments : DOE)
- 변분법을 이용하는 최적화(Variational Technology : VT)
- Six Sigma 기법을 이용하는 최적화(Design for Six Sigma : DFSS)
- 강건설계(Robust Design)



DesignXplorer는 그림과 같이 입력 매개변수가 특정한 값을 가지는 것 이 아닌 분포를 가질 때, 결과 또한 분포로서 나오게 된다. 예를 들어 모델 은 반드시 공차를 가지게 되며, 또한 하중을 1N을 가한다 해도 실제로는 1 ±0.01의 하중이 적용될 것이다. 이 때 결과 역시 어떤 분포를 가지고 나



태성에스엔이의 ANSYS 기술자원 담당 및 프로젝트 컨설팅 엔지니어이다. E-Mail | sijeong@tsne.co.kr 홈페이지 | http://www.tsne.co.kr 오게 된다. 실제 생산현장에서의 산포를 DesignXplorer를 이용하 여 적용하고 결과를 평가할 수 있는 것이다.

# DesignXplorer가 제공하는 최적화 기법 실험 계획법을 이용하는 최적화

설계 변수의 개수에 따라(ANSYS Workbench-Simulation, CAD 등) 반응 표면을 생성하기 위한 추출점(design point)를 정하 는 방법으로, DOE(Design of Experiments)는 효율적인 최적화 를 위해서 최소의 추출점을 이용하여 최적의 반응 표면을 만들 수 있도록 한다.

DesignXplorer의 DOE는 해석에 필요한 변수의 개수와 값을 중 심합성법(CCD : Central Composite Design)을 이용하여 뽑는다. 추출점에서의 유한요소 해석이 모두 끝나면 하드포인트를 연결하여 반응 표면을 생성하고, 이 곡선을 이용하여 최적 설계가 이루어진다.



▲ 실험계획법

#### 변분법을 이용하는 최적화(Variational Technology : VT)

VT법은 response surface를 얻기 위한 다양한 입력 파라미터 정보가 필요하게 된다. 그러나 VT법은 DOE와 다르게 한 번의 유 한요소 해석 결과만 필요하다.

VT법은 반응표면 생성 시에 요소의 모핑과 테일러(Taylor) 시리 즈를 이용한다. 커브 피팅의 정밀도는 사용된 테일러 시리즈의 도 함수의 차수에 좌우된다.

#### Six Sigma 기법을 이용하는 최적화

앞서 언급한 두 가지 방법(DOE와 VT)은 각각의 해석 모델에 있 어서 입력값은 고정되어 있다고 가정한다.(예를 들어, 탄성계수 = 30e6 psi, 두께 = 0.25mm 등) 하지만 실제 세계의 모든 입력 값은 일정한 편차나 분산을 가지게 된다.(물성치의 편차나 치수 공차 등) 따라서 일반적으로 이러한 편차에 대한 영향을 설계에 반영하기 위 해서 안전계수를 도입하게 된다.

DFSS(Design for Six Sigma DFSS)는 입력 변수의 편차나 변 동을 최적 설계에 반영할 수 있다. 전형적인 예는 다음과 같다.

- 입력 파라미터 값의 편차에 따라 어느 component에 failure가 일어날 것인가?
- 어느 입력 파라미터가 응답 파라미터에 미치는 영향이 가장 클 것인가?
- 입력 값의 scattering에 의한 결과로 출력 값의 범위는 얼마나 될 것인가?



▲ Design fer Six Sigma(DFSS)

#### 강건설계(Robust Design)



강건설계는 제품의 가공과정에 서 품질을 저하시키는 외란 (variation)에 무관한 제품을 만드 는 것이다. 설계자가 외란의 잠재 적 요인을 이해하고 외란에 대한 민감성을 없애는 것에서 강건설계 는 수행된다. DesignXplorer에서 는 'Design for Six Sigma' 혹은

#### 8건걸게

'Reliability-based Optimization' 과 같은 의미로 사용된다.

## 예제 해석 과정 모델 불러오기

Ansys Workbench는 대부분의 범용 3D CAD와 플러그인 방식 을 지원하고 있다. CAD 설치 후 ANSYS Workbench를 설치하게 되면 CAD의 메뉴 바에 'ANSYS 10.0'이 자동으로 메뉴로 구성이 된다. 따라서 ANSYS Workbench를 띄우지 않고, 바로 CAD에서 작업중인 모델을 해석으로 오픈시켜 해석 작업 시 모델을 다시 한 번 확인해야 한다거나 하는 번거로움이 없다. 또한 CAD 툴에서 공



통 확장자로 쓰이는 파일들은 CAD 없이 열 수 있다.

불러올 파일은 'ComBlade.agdb'의 DesignModeler 파일로, 해석환경인 시 뮬레이션으로 불러오도록 한다.(다른 CAD에서도 변수 부분을 파라미터로 정 의 후 불러오면 된다.)

그림은 DesignModeler 혹은 다른 CAD에서 작업한 것이다. 블레이드에서 X, Y 방향의 각도를 주어 모델링하는 부 분을 파라미터로 정의한다. X, Y 방향의 각도는 DS\_xtilt, DS\_ytilt 로 주어진다.





그림과 같이 CAD 파라미터가 생성된 것을 볼 수 있다. CAD에서 파라미터로 작업하면 ANSYS Workbench는 그 파라미터를 불러 온다. 파라미터의 변화에 따라 모델이 변경된다.

모델을 부른 후 가장 먼저 하는 것이 단위 설정이다. 불러온 모델 에 대하여 앞으로 부여할 하중이나 구속조건 등의 단위를 설정한 다. ANSYS Workbench는 자동으로 치수를 변환해 준다. 만약 변 위를 20mm로 부여를 했는데 센티미터로 바꾸게 되면 자동으로 2cm로 변환된다.

# 물성치 정의



물성치는 그림과 같이 'Titanium Alloy RD'를 사용하였다. ANSYS Workbench의 'Engineering DATA' 에서 그림과 같이 물성치를 정의한다. 다음 그림에서 블레이드의 필렛(fillet) 부분에 'Refinement'를 적용한다.



#### 하중 및 경계 조건

그림과 같이 파란색 부분에 'Frictionless' 조건을 부여한다. 이 경 우 수직방향으로는 구속이 되고 평면 방향으로는 구속하지 않는다.





노란색 부분과 같이 Y 방향만 구속한다.



Z축에서 381mm를 축으로 733.04 rad/s의 각속도를 적용한다.



# 메시 사이즈 설정

메시를 생성하기 위해 다음과 같이 mapped와 refinement를 사용한다.

다음 그림에서 블레이드의 넓은 면에 'Mapped Meshing'을 적 용한다.



#### 해석 실행

해석 준비가 완료되면 Solve 아이콘을 클릭한다. 이것은 초기값 이 다음과 같을 때 해석하는 것이다.

#### ■ DS\_Xtilt = 1.5(X의 각도)

- DS\_Ytilt = 1.0(Y의 각도)
- DS\_rootrad = 0.25



# 해석 결과



등가응력을 블레이드의 표면 에서 본다.

E - Katigue	Tool	>
Details of 'Fatigue Tool'		4
- Materials		_
Fatigue Strength Factor (Kf)	0.5	
- Loading		
Туре	Zero-Based	
Scale Factor	2,	
- Definition		
Display Time	End Time	
- Options		
Analysis Type	Stress Life	
Mean Stress Theory	None	
Stress Component	Equivalent (Von Mises)	
- Life Units		
Units Name	cycles	
1 cycle is equal to	1, cycles	

'Fatigue Tool'을 추가하여 피로수명을 본다.

피로수명을 보면 최소수명이 1.591회가 나온 것을 볼 수 있다. 이 값을 그림과 같이 'P'를 정의하여 파라미터로 만든다.



CAD Para ds\_xtilt ds\_ytilt

이 모델에서 파라미터는 위의 그림과 같이 최소 피로 수명을 파라미터로 한다. 다음 그림에서도 CAD 파라미터 3개가 있다.

4개의 파라미터를 이용하여 다음 과정에서 강건설계를 수행한다.

# 강건설계 수행 과정

ANSYS Workbench의 'Project' 메뉴로 가서 'New DesignXplorer study'를 실행한다.

🙀 [Project] 🗙 👩 CompBlade [Simulation]		
File Tools Help	🔣 Data 🕜	
Simulation Tasks	Name	File
G Open	😽 Unsaved Project	
New DesignXplorer VT study	🔞 CompBlade_original.agdb	
Parametric Geometry Updates	🕒 Model	

#### CAD 파라미터 범위 지정

다음 그림과 같이 DesignXplorer가 실행되며 CAD 파라미터가 DesignXplorer로 들어온 것을 볼 수 있다. 초기에는 3개의 파라미 터 중에 그림과 같이 2개만 활성화한다. X와 Y의 각도가 변경되는 경우 DS Xtilt와 DS Ytilt의 범위를 지정하여 피로수명 값이 초기 의 값보다 커지는 설계안을 찾는다.

Views P Parameters	Simulation Parameter Type				
🕞 Automatic Design Points	Design Variabl	e 💌			
	Parameter C	lassification:			
Parameters					
Input Parameters	Continuoue	-			
Image: ds_xtilt         Image: width of the state           1.35 ← 1.5 → 1.65         1.15           Initial Value = 1.5         1.5	Parameter Properties:				
ds_ytilt     0.9 ← 1. → 1.1					
Initial Value = 1.	Property	Value			
🗖 ds_rootrad 🛛 🖉	Lower Bound	1.35			
0.225 ← 0.25 → 0.275 Initial Value = 0.25	Upper Bound	1.65			
	Initial Value	1.6061			
Response Parameters	Current Value	1.6061			

#### 실험계획법 수행

Automatic Design Points CCDType: Auto Defined Summary Design Point Design Point 2 Design Point 3 Design Point 4 Design Point 6 Design Point 7 Design Point 8 Design Point 9

실험계획법에 의해 2개의 변수가 있을 때

# 9개의 해석할 데이터가 생성된다.

9개의 데이터에 대해 해석을 수행한다.

the At	😝 Run 👻	🕜 Stop	Publish Report
	🔰 Solve /	Automatic D	esign Points

#### 결과 보기

'Response' 메뉴로 반응표면을 본다. 위의 9개의 입력과 출력을 이용하여 반응표면을 만든다. X. Y 각도의 변화에 따라 수명결과를 볼 수 있다.





#### Geal Driven Optimization 수행



위의 반응 표면 식에 1,000번을 샘플링하여 최소수명에 대한 최적화를 수행한다.

			and the second se				
1	💦 CompBlade	e [Project]	🕒 CompBla	ade [Simulation] 🗙	CompBlade [DesignXplorer]		
1	Details of "Geo	metry"		Cometry Ca	The Delet Marce		
-	Definition			Outline for "Comp	Jedates Lies Circulation December Values		
	Source	E:\Robust W	/orkshop\Run2\	Project P+	Jpdate: Use Simulation Parameter Values		
	Туре	DesignMode	ler	🗄 🎯 Model 🍑	Spade. Use desined y raidineed values		
	Length Unit	Inches		Ge Recent Geometry			
+	Bounding B	ох		E Mesn	Tom Piess		
+	Mass Prope	rties			ment		
+	Statistics						
+	Preferences	5					
-	CAD Parameters						
	ds_xtilt	1.58					
	ds vtilt	0.9					

#### Six Sigma 해석의 수행(1)

위의 최적해로 나온 DS\_Xtilt=1.58, DS\_Ytilt=0.9 값은 실제 생 산현장에서는 공차를 가진다. 이 상태에서 Six Sigma 해석을 수행 하여 현재 불확실성(공차)이 있을 때의 최소 피로수명의 분포를 파 악해보자.(DS\_rootrad는 고정된 상태임)

DS\_Xtilt와 DS\_Ytilt가 그림과 같이 Gauss 분포를 가질 때 결과 를 해석해 보자.

Prebability Density Function



결과는 다음 그림과 같이 나온다. 최적화로 나온 결과는 3만 8,000회 정도의 수명이 나왔지만 공차를 적용했을 때 수명이 그림 과 같이 분포로 나온다. 그런데 왼쪽을 보면 수명이 722회인 부분 이 나왔다.



#### Six Sigma 해석의 수행(2)

DS\_rootrad를 포함하여 Six Sigma 해석을 수행해 보자. 먼저 실험계획법으로 15회를 해석하여 반응표면 모델을 만든

# 최적화 해석의 결과

X, Y 각도의 변화에 따른 최적화된 수명결과를 볼 수 있다. X의 각도를 1.5895, Y 각도를 0.96667로 하는 경우 최소 수명이 38,188이 된다.

초기의 X의 각도를 1.5, Y 각도를 1.0으로 할 때 1,591회에 비해 24배 수명이 증가했다.



#### 모델의 수정

앞에서 나온 최적값으로 모델을 수정해 보자.

다음 그림과 같이 시뮬레이션으로 가서 DS\_Xtilt=1.58, DS\_Ytilt=0.9로 수정 후 'Update' 메뉴를 선택하면 모델이 수정 된다.

다.(3개의 인자이므로 15회의 실험값이 나온다.) 각 3개의 인자는 다음과 같은 분포를 가진다.





이 반응 표면 모델(식)에 몬테카를로법으로 1,000번을 샘플링한다.

그 다음 해석을 수행한다.

🚽 Run 👻	G Stop	Publish Report
🔰 Solve .	Automatic D	esign Points

#### Six Sigma 해석의 결과

다음 그림과 같이 최소 피로수명의 분포가 나온다. 그림에서 'Probability'는 확률을 말한다.

최소 피로 수명 값 4,621회가 나올 확률이 1e-3이다. 즉 0.1%의 파괴 확률을 의미한다. 만일 이 모델을 4,621회 사용 후 정비나 교 환을 하면 99.9% 안전하다는 의미이다.



#### 강건설계 수행



그림과 같이 강건 설계를 수행해 보자. 이전에 Six Sigma 해석에서 행했던 1,000번의 샘플링에 100번을 더 수행하는 것이 된다.

#### 강건설계 결과

해석 결과 DS\_rootrad는 0.29995의 값이 되고 최소피로수명 값 은 6,409가 되었다.

이전의 Six Sigma 해석의 결과가 최소피로수명 값이 4,621에서 강건설계를 통해 6,409로 증가한 것이다. 터빈 모델의 경우 4,621 회 운전 후 정비해야 하던 것을 6,409회 운전 후 정비해도 되게 된 것이다. 이 경우 경비의 절감이 클 것이다.

RD San	nple Set	2								
<ul> <li>A Goals D these point</li> </ul>	riven Study uses a ts.	calculated set of s	ample desig	gn points.	Click the "	Generate S	Sample Desi	igns" but	ion to gene	rate
Input Param Click rows in	eter Goals this table to assign	n design goals to ir	iput parame	ters.						
Name	Lower Bound	Upper Bound	Target	Desired	Value	Importar	nce			
ds_rootrad	0.2	0.3		No Pref	erence	Default				
Click rows in Name Value of Life Life Minimun	this table to assign Minimum @ Sigm n Mean (SSA Sam	n design goals to re a-Level = -3.0902 ( ple Set 2)	esponse par SSA Sampl	ameters. le Set 2)	Defining a Target	Desirer Maximu Maximu	e is optional. <b>d Value</b> um Possible um Possible	Impo Defai Defai	ult ult	Trade( On On
Candidate D	or update candida	te designs based o	in the currer	nt goals	G Can	A atabi	C Cand	idate B	C Can	lidato (
ds rootrad	1				0.29995	-	0.28995	-	0 27995	
Value of Life	Minimum @ Sigm	a-Level = -3.0902 (	SSA Sampl	le Set 2)	6404.9	***	6045.9	**	5689.8	**
Life Minimun	Mean (SSA Sam	(C to 2 ala			20522	-	37914	-	20000	-

## 결론

	초기 설계안	첫번째 최적설계안	첫번째 최적안의 공차적용 결과	Six Sigma 해석	강건설계
최소 피로 수명	1,591회	38,188회	722회 이하 부분 발생	4,621회 에서 0.1% 파괴 확률 발생	6,404회 에서 0.1% 파괴 확률 발생