

# 고부하 터보차저의 열변형 최적화

저자



이학석사 마이클 베르너  
(Michael Werner)

독일 뮌헨에 위치한 다쏘시스템  
독일 지사의 SIMULIA 최적화  
전략팀 소속 최적화 포트폴리오  
기술 전문가



공학박사 플로리안 유레카  
(Florian Jurecka)

독일 뮌헨에 위치한 다쏘시스템  
독일 지사의 SIMULIA 전략 담당  
이사

현대식 터보차저는 높은 열응력을 견뎌낼 수 있어야 합니다.

다쏘시스템은 터보차저 하우징의 주요 부위를 신속하고 효율적으로 분석하여 최적화할 수 있는 시뮬레이션 방법을 개발했습니다.

## 응력을 고려한 설계

탄소배출량 감소와 에너지 효율성 개선을 위한 성능 개선이 중시됨에 따라 자동차 개발에서 터보차저가 차지하는 비중이 커졌습니다. 배기용 터보차저 개발에서 성능 개선의 필요성이 커지면서 형상 및 재료와 관련된 설계 요건들이 자연스럽게 한계에 이르렀습니다. 따라서 시뮬레이션과 최신 최적화 솔루션의 도움으로 높은 수준의 응력과 변형률을 견딜 수 있는 터보차저를 설계하는 일이 갈수록 중요해지고 있습니다. 적절한 재료 사용과 배치 구성이 부품 수명에 상당히 중요한 역할을 합니다.

그와 같은 취지에서 실험을 통해 증명하던 터빈 하우징에 열 피로 수명 예측을 SIMULIA Abaqus 를 이용하여 수행합니다.

터빈 하우징의 열팽창은 전체 배기 온도의 변화에 따라 부위마다 다른 속도로 반응하며, 그로 인해 발생한 과도 열변형 응력이 주기적으로 발생하고, 최악의 경우 균열을 유발하기도 합니다. 그런 이유 때문에 강도 측정과 더불어 풀림 시험 등으로 경계조건에 대한 민감도, 초기 균열, 형상, 열역학 및 재료 측면에서 터보차저의 내구성을 확인해야 합니다.

최적화 솔루션인 SIMULIA Tosca Structure를 이용하면 필요한 기준을 충족할 수 있습니다. 설계 최적화는 부품 표면의 세세한 부분을 자동으로 개선하므로 열변형으로 인한 악영향을 줄이고 자체 피로 성능을 향상시켜 재료 수명을 늘릴 수 있습니다.

임계 영역에 대한 국부적 해석만으로는 부족한 경우가 많은데, 이런 이유로 두

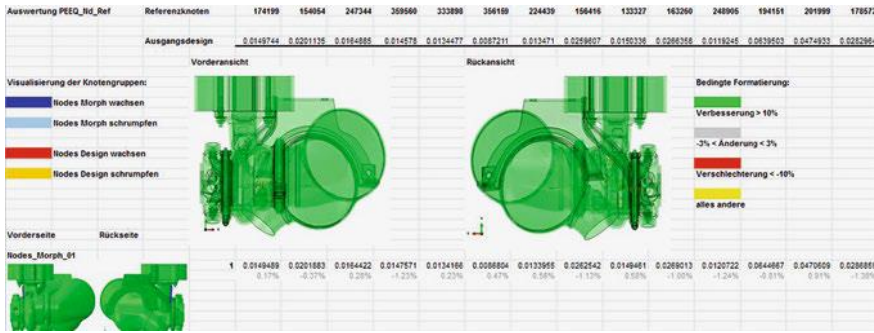


그림 1. 민감도 연구용 평가 예

단계에 걸친 최적화 기법이 효과적인 것으로 입증됐습니다. 두 단계에 걸친 최적화 기법은 일단 민감도 연구를 통해 터보차저의 주요 상관관계를 파악하여 긍정적 영향을 활용하고 부정적 영향을 제거하는 데 유용합니다. 그리고 나서 이와 같이 설계 구간 전체에서 최적화된 형상을 토대로 국부적 형상 최적화를 실시하여 개선의 여지가 남아 있는 부위를 세부적으로 개선할 수 있습니다.

### 터보차저 설계 최적화

배기용 터보차저 개발에 수반되는 난제를 극복하려면 표면 설계를 최대한 자유롭게 수정할 수 있는 최적화 도구가 필요합니다. 이와 같은 표면 설계의 유연성은 논파라메트릭 최적화 도구로 확보할 수 있습니다. 논파라메트릭 최적화 도구를 이용하면 설계 구간의 모든 부위를 빠짐없이 바로 수정할 수 있습니다. 반면에 파라메트릭 기법을 이용할 경우 하우징의 CAD 형상이 우선적인 기초 요소로 구성되므로 목표 성능을 만족하기 어렵습니다. 형상 설계를 적절하고 유연하게 수행하려면 자유표면이 필요합니다. 또한 성공적인 최적화 절차를 도출하려면 접촉부와 같은 비선형성이 반영된 사실적 모델링과 기존 시뮬레이션 모델을 재사용할 수 있어야 합니다. 장시간의 시뮬레이션이 필요한 경우에는 최적성 기준을 토대로 하는 최적화 도구가 유용합니다.

### 설계 구간 전체 최적화

두 단계로 구성된 최적화 과정의 첫 단계에서는 열변형이 발생하는 터빈 하우징의 물리적 거동 해석을 하고, 이어 실험계획법(DoE)을 통해 각 부위의 두께 변화에 대한 민감도를 분석합니다. 이런 방법으로 상관관계와 상보적 영향도를 확인하여 형상을 설계 구간 전체에서 최적화하는 데 활용하고 반영할 수 있습니다.

### 몰핑(Morphing)

여러 종류의 하중과 경계조건(유동, 온도, 초기응력)을 이용하여 산술적 민감도를 도출할 수도 있지만, 최적화 알고리즘에는 필요가 없습니다. 실험계획법에서는 유한차분법을 적용하여 표면 형상을 부위별로 세분화한 후 일정 양만큼 조금씩 형상 범위를 넓혀 나갑니다. 이런 형상은 Tosca Structure로 몰핑 됩니다. 그리고 앞서 설명한 시뮬레이션 절차를 통해 몰핑 결과를 분석하여 평가하고, 이 결과를 토대로 가장 유리한 변분 조합을 구합니다. 하나의 표면이 형상 변경 되는 과정을 형상 몰핑이라고도 합니다.

### 설계 변경 성과 평가

각 설계 변수들은 등가소성변형률(PEEQ)을 토대로 평가됩니다. 이때 설계 변수들을 대상으로 임계 영역에 해당하는 개별 설계 부위와 추적 부위에 대한 시스템 응답을 확인하고 평가합니다. 이렇게 얻은 값을 수정되지 않은 원본 형상의 결과와

함께 사용하여 유한차분을 산정합니다. 예를 들어, 표면이 1mm 증가한다고 가정했을 때 이는 다음과 같이 해석될 수 있습니다. 변경된 부위에서 양수로 나타나는 값은 적용된 형상 변화를 통해 개선된 성능과 감소된 부하를 의미 합니다. 경험적인 관점에서 보면 거동은 보통 선형 특성을 가지고 있기 때문에, 면의 증가에 따라 저하된 성능이 있다면, 일반적으로 크기를 줄이면(예: 재료의 1mm 제거) 다시 개선됩니다.

이처럼 터보차저 하우징에서 관찰된 상보적 영향을 활용하여 전반적 성과를 개선하려면, 각 부위에 추가로 재료를 사용하는 것이 최선인지 혹은 제거하는 것이 최선인지 결정할 수 있습니다. 다수의 긍정적 영향과 부정적 영향이 동시에 존재하는 부위는 최소한의 형상 변경만으로도 전체적으로 바람직하지 않은 결과로 이어질 수 있기 때문에 수정하지 않는 것이 최선입니다.

### 터보차저 모핑

최적화 도구는 지정된 형상 변경을 실행하고 병렬 클러스터 환경에서 분석을 한 후 성능 평가 결과를 산출합니다. 그리고 나서 성능 평가 결과를 조건문 형식의 스프레드시트로 변환합니다(그림 1 참조).

### 변수 조합을 통한 설계 구간 전체 최적화

실험계획법은 설계를 결정할 때 필요로 하는 민감도를 얻는 데 효과적입니다. 이 정보를 이용하여 목표 성능에 긍정적인 방향으로 조합함으로써 설계 구간 전체에서 최적화된 하우징 설계를 도출할 수 있습니다.

따라서 모핑 설계 변경도에 반영된 모든 부위의 성과를 평가해야 합니다. 일단 긍정적 영향만 유발하거나 부정적 영향만 유발하는 설계 변수를 찾는 작업이 선행됩니다. 이를 명확한 설계 변경(확대 또는 축소) 지표로 삼을 수 있기 때문입니다. 이 작업을 통해 재료가 추가 또는 제거 할 표면 부위 목록이 산출됩니다. 모핑 설계 변수들을 이런 식으로 조합하면 설계 구간 전체에서 개선된 열변형을 확인할 수 있습니다. 임계 부위의 개선 효과를 주도하고 비임계 부위의 성능



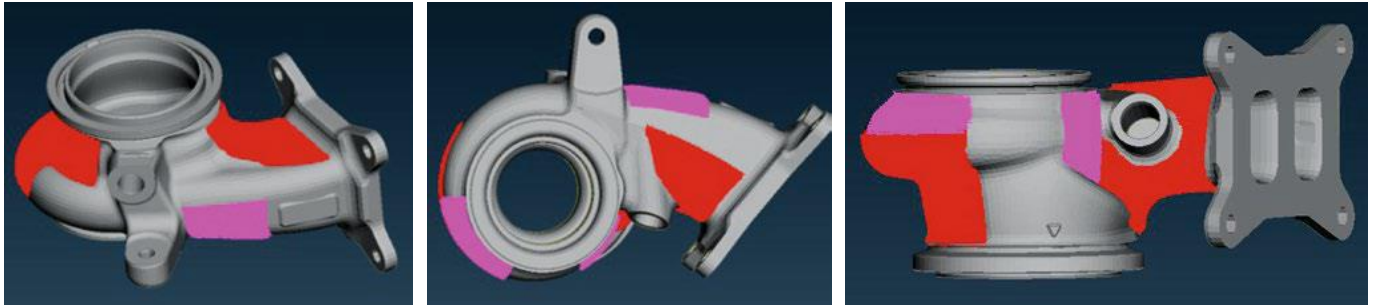


그림 2. 설계 구간 전체에서 최적화된 설계(축소: 적색 부위, 확대: 분홍색 부위)

저하를 최소화할 수 있는 추가적인 설계 변경을 고려하면, 설계 구간 전체에서 최적화된 모핑 설계 변경으로 한층 더 개선할 수 있습니다. 이때, 불변성 임계 부위에 각별히 관심을 기울여 증명된 경험적 근거로 이를 개선할 수 있습니다. 그렇기 때문에 설계 변수를 선택하고 평가하는 데는 경험과 엔지니어링 지식이 중요한 역할을 합니다. 결론적으로, 약간의 변경만으로 설계 구간 전체에서 상당히 개선된 설계 결과를 얻을 수 있습니다(그림 2 참조).

#### 국부 최적화

첫 번째 최적화 단계가 끝나면 표면의 두께 변경을 통해 터보차저 하우징 설계가 설계 구간 전체에서 개선 됩니다. 두 번째 최적화 단계에서는 직접 수정할 수 있는 나머지 주요 부위를 살펴 봐야 합니다. 이 과정에는 Tosca Structure의 전통적인 형상 최적화가 사용됩니다. 최적화 목적은 구조성을 고려하여 최소한의 두께를 확보하는 한편, 설계 구간의 등가소성변형률을 최소화하는 데 있습니다. 논파라메트릭 기법은 자유표면 구현 방식을 이용하여 설계 구간의 모든 설계 부위를 빠짐없이 수정함으로써 설계 유연성을 극대화하는 데 효과적입니다. 또한 접촉부 및 비선형성과 같은 모든 모델링 세부 정보와 함께 열해석 및 구조해석 결과를 직접적으로 활용할 수 있습니다. 그림 3, 그림 4, 그림 5, 그림 6은 터보차저 설계의 최종 최적화 결과를 보여주고 있습니다.

#### 설계공학에 최적화 결과 반영

CAD 엔지니어링 설계 단계에서 최적화 결과의 반영 수준에 따라 최종적인 최적화 작업의 성패가 결정됩니다. 이를 위해서는 전산 엔지니어와 설계 엔지니어의 긴밀한 공조가 필요합니다. 설계 구간 전체에서 수정한 형상 부위는 CAD 형상에 간단하게 반영할 수 있습니다. 국부적 설계 최적화 결과는 Tosca Structure에서 STL(Standard Tessellation Language) 형식으로 내보낼

수 있습니다. 이때, 표면은 글로벌 엔진 좌표계를 통해 설계 영역에 구성됩니다. 덕분에 꼭 맞는 측정값을 바로 기존의 CAD 모델에 적용할 수 있습니다.

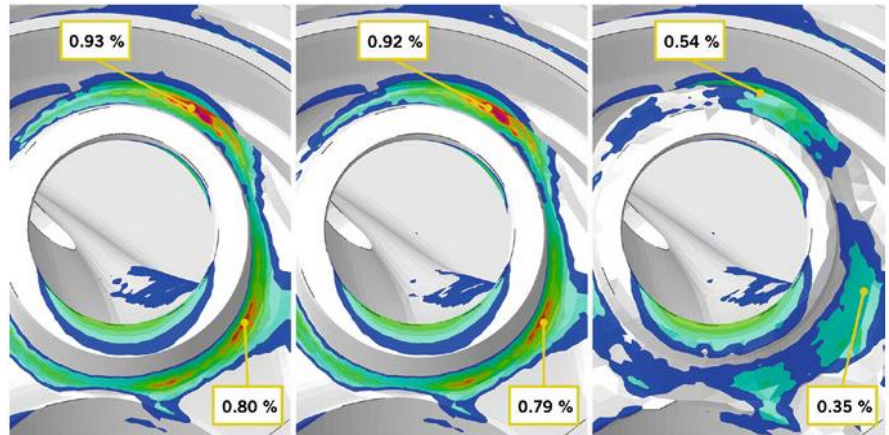


그림 3. 웨이스트게이트 최적화(왼쪽: 원본, 중간: 설계 구간 전체 최적화 완료, 오른쪽: 국부적 최적화 완료, 적색: 높은 등가소성변형률, 청색: 낮은 등가소성변형률)

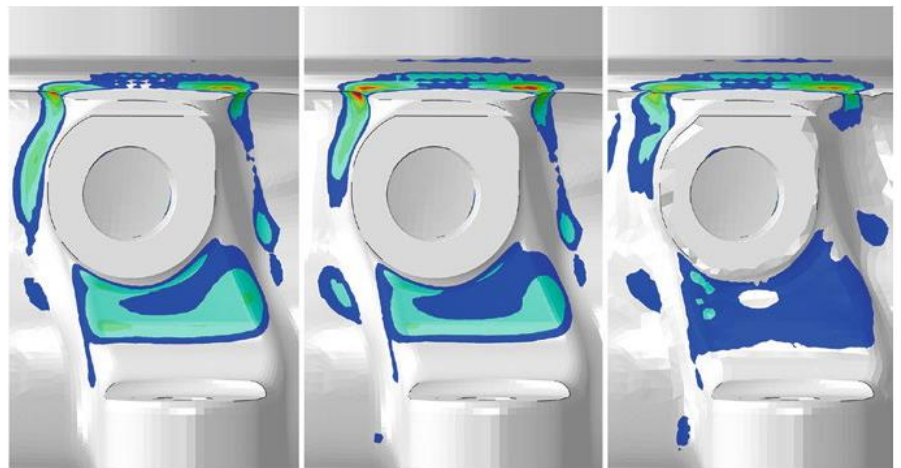


그림 4. 파이프 구멍과 소켓 헤드의 연결부 최적화(왼쪽: 원본, 중간: 설계 구간 전체 최적화 완료, 오른쪽: 국부적 최적화 완료, 적색: 높은 등가소성변형률, 청색: 낮은 등가소성변형률)

이제 설계 엔지니어는 새로운 형상을 기존 설계 모델에 중첩시켜 CAD 모델에 최적화 솔루션이 제시한 형상에 맞출 수 있습니다. 최적화된 복합 표면 형상을 파라메트릭 형상 재현 방식으로 구현하는 것은 성능 개선에 큰 도움이 되지 않습니다. 고부하 터보차저

하우징의 경우, 0.1mm가 심각한 균열을 유발할 수도 있습니다. 따라서 최대한 정확하게 최적화된 형상을 구현하는 작업이 절대적으로 필요합니다. 최적화가 필요한 임계 부하 발생 부위의 표면에 적용할 CAD 모델이 사전에 준비되면 작업 절차가 간소화됩니다.

## 요약

SIMULIA Tosca Structure를 이용한 열변형 최적화는 개발 과정에서 터보차저를 한층 더 개선하는 데 결정적인 역할을 합니다. 먼저 민감도 연구를 통해 터보차저의 뚜렷한 상보적 효과를 파악하여 긍정적 영향을 활용하고 부정적 영향을 해소하는데 유용하게 사용할 수 있습니다. 그리고 나서 이와 같이 설계 구간 전체에서 최적화된 형상을 토대로 국부적 형상 최적화를 실시하여 개선의 여지가 남아 있는 부위를 세부적으로 개선할 수 있습니다. 이와 같이 더욱 효율적인 개발 과정을 통해 성능과 수명이 향상된 배기용 터보차저를 개발하고, 시뮬레이션 및 최적화 기술을 지속적으로 활용하면 시험과 초기 비용을 절감할 수 있습니다.

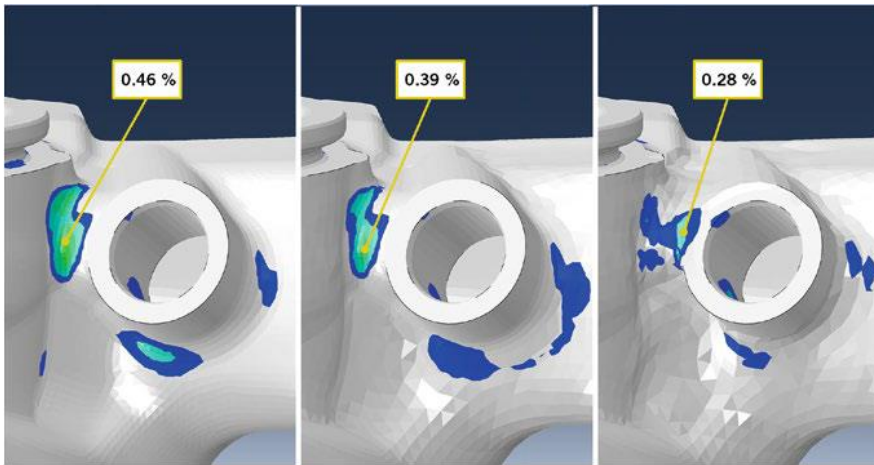


그림 5. 램다 센서 최적화(왼쪽: 원본, 중간: 설계 구간 전체 최적화 완료, 오른쪽: 국부적 최적화 완료, 녹색: 높은 등가소성변형률, 청색: 낮은 등가소성변형률)

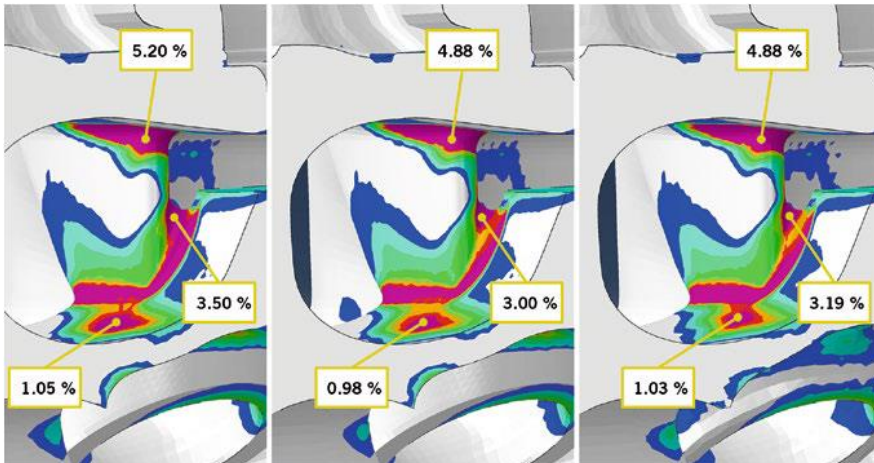


그림 6. 텅 최적화- 형상 변경 없이 개선(왼쪽: 원본, 중간: 설계 구간 전체 최적화 완료, 오른쪽: 국부적 최적화 완료, 적색: 높은 등가소성변형률, 청색: 낮은 등가소성변형률)