



**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

Siemens Digital Industries Software

## 기어박스 엔지니어링 생산성 향상

### 소개

변속기 엔지니어는 다중 물체 시뮬레이션 환경에서 기어박스를 모델링하고 매개변수를 지정하는 지루한 프로세스에 익숙합니다. 모델 준비에 보통 며칠이 소요되며, 그 후 비선형 역학을 수치로 시뮬레이션 해 NVH (소음, 진동, 불쾌감), 과도 및 내구성 해석 위한 시스템 수준 부하를 얻고, 이러한 속성을 고려해 설계를 최적화해야 합니다.

본 백서에서는 변속기의 다중 물체 시뮬레이션 모델을 설정하는 사용자 환경을 혁신하고 생산성을 대폭 향상시키는 버티컬 애플리케이션인 Simcenter 3D Motion Transmission Builder를 소개합니다. 엔지니어는 Simcenter 3D Transmission Builder를 사용해 초기 설계부터 정확한 시뮬레이션을 단 1시간 만에 진행시킬 수 있습니다.

Siemens Digital Industries Software의 다중 물체 연구팀은 드라이브 트레인 시뮬레이션을 위한 수치적 방식을 재정립하는 데 상당한 노력을 기울였습니다. 새로운 솔버 아키텍처는 사용자가 필요한 계산 시간과 원하는 예측 용량 수준 (표준, 해석, 고급)에 따라 세 가지 기어 접촉 충실도에 맞춰 동적 다중 물체 시뮬레이션을 할 수 있도록 설계되었습니다. 설계 엔지니어는 이러한 유연성을 활용해 원하는 성능 엔지니어링 예측에 적합한 모델 정확도를 선택할 수 있습니다. 본 백서에서는 관련 산업 사례를 예로 들어 기능을 설명합니다.

# 목차

개요.....	3
배경: 기어박스 설계 엔지니어링 .....	4
<b>Simcenter 3D Transmission Builder .....</b>	<b>5</b>
변속기 시스템 솔빙 .....	7
표준 방법 .....	7
해석 방법 .....	8
고급 방법 .....	8
고급 경험적 .....	8
고급 FE 프리프로세서 .....	8
<b>결과.....</b>	<b>9</b>
모션 해석 방법: 프로파일 수정해석 .....	9
모션 해석 방법: 전체 변속기 동역학 해석 .....	10
모션 고급 FE 프리프로세서: 유연성, 마찰력, 실험 검증 ..	11
<b>결론.....</b>	<b>12</b>
<b>감사의 말.....</b>	<b>13</b>
<b>참조.....</b>	<b>13</b>

# 개요

최근 몇 년 간 효율성, 소음 및 신뢰성 측면에서 성능을 향상시키기 위해 시스템 수준에서 변속기를 해석하기 위한 많은 노력이 전개됐습니다. 최대 과제는 비선형 시스템 동역학을 충분히 상세하면서도 효율적인 계산 방식으로 포착하는 것입니다. 기어박스를 설계한 후 설계 엔지니어는 다중 물체 시뮬레이션을 사용해 NVH, 과도, 내구성 및 기타 해석을 통해 시스템 거동을 정확하게 예측해야 합니다. 최근까지 다중 물체 시뮬레이션 모델을 구축하는 것은 지루하고 오류가 발생하기 쉬운 수작업 프로세스였습니다. 비교적 복잡한 모델의 모델링과 매개변수화, 반복은 숙련 작업자라도 며칠이 소요될 수 있는 작업입니다.

본 백서는 전체 변속기의 다중 물체 시뮬레이션 모델을 효율적으로 생성하기 위한 버티컬 애플리케이션인 Simcenter 3D Transmission Builder를 소개합니다. 이 애플리케이션은 다중 물체 시뮬레이션 프로세스에 사용하는, 심층적이면서도 사용이 편리한 기어박스별 기능을 갖췄습니다. 사용자는 완벽한 모델 구조 개요를 유지하면서 Siemens Digital Industries Software의 Simcenter™ 포트폴리오 일부인 Simcenter 3D Motion 소프트웨어에서 시뮬레이션을 해 상세 해석을 수행할 수 있습니다. Simcenter 3D Transmission Builder는 사용하는데 많은 전문성을 요하지 않으면서 다중 물체 시뮬레이션 모델을 설정하는 과정의 생산성을 크게 향상시킵니다. 한 시간 내에 많은 모델을 만들 수 있습니다. 그림 1에 워크플로가 나와 있습니다.

Simcenter 3D Transmission Builder는 새 기어 접촉 요소와의 인터페이싱도 제공합니다. Simcenter 3D Motion의 몇 가지 혁신 요소도 이 백서에서 소개합니다. 접촉 감지 방법은 마이크로 지오메트리 수정, 정렬 오류, 팁 접촉, 웨징 등의 효과를 동적으로 설명하기 위해 비선형 FE (유한 요소) 솔버에 맞게 재설계되고 검증됐습니다. 벨기에 KU Leuven 및 이탈리아 칼라브리아 대학과 협력해 개발한 새로운 FE 프리프로세서를 사용한, 새로운 공식에 기반한 이 고급 방법은 유연성이 유발하는 경량 기어, 대류 커플링 효과 등과 같은 다양한 현상을 감안하도록 확장됐습니다. 또한 동적 다중 물체 시뮬레이션 환경에서 경량 기어와 링 기어를 효율적으로 해석하기 위해 모델 순서 감소 (MOR)에 기반한 새로운 방법을 채택했습니다.

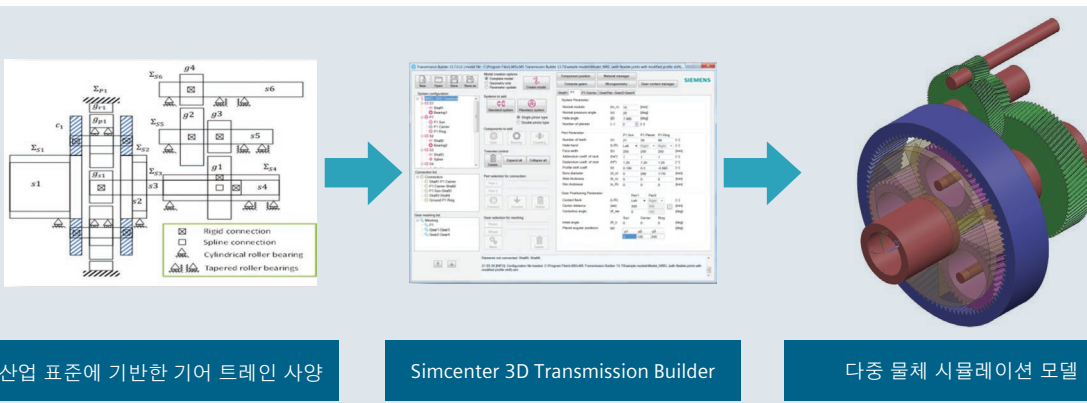


그림 1: 워크플로 - 기어 설계 사양에 따라 엔지니어는 Simcenter 3D Transmission Builder를 사용해 변속기 레이아웃을 빠르고 정확하게 정의하고 다중 물체 시뮬레이션 모델을 만들 수 있습니다.

# 배경: 기어박스 설계 엔지니어링

환경 문제에 대한 인식이 강화되면서 업계는 엄격한 에너지 효율 및 배출 목표 설정에 나섰습니다. 제조사는 성능 향상을 요구하는 고객과 효율 향상을 요구하는 규제 기관의 상충되는 입장을 조화시켜 설계를 개선해야 상황에 처했습니다. 기계 변속기는 자동차 및 풍력 에너지 적용 사례에서 전체 6~8%에 달하는 상당한 에너지 손실을 초래합니다. 최근 연구<sup>1, 2</sup>에 따르면 변속기 손실을 50% 가량 크게 줄여 자동차 분야에서 930만 톤의 CO2 배출을 감축할 수 있는 가능성이 있지만, 이는 손실 현상과 이 배출량이 내구성, 소음과 같은 중요한 성능 속성에 미치는 영향을 고려하지 않은 것입니다. 이를 조화시킬 수 있는 해법은 변속기 설계 엔지니어링 프로세스에서 시스템 수준 동역학을 얼마나 잘 예측할 수 있는지에 달려 있습니다.

변속기 시스템의 기본 구성 요소는 기어, 베어링, 샤프트, 그리고 지지 구조입니다. 이들 구성요소는 모두 서로 연결되어 있으며, 지지 구조는 베어링 접점과 기어 메시 생성에 상당한 영향을 미쳐 변속기 오류를 유발합니다. 에너지 손실의 약 70%는 기어 트레인에서, 30%는 베어링에서 발생합니다.

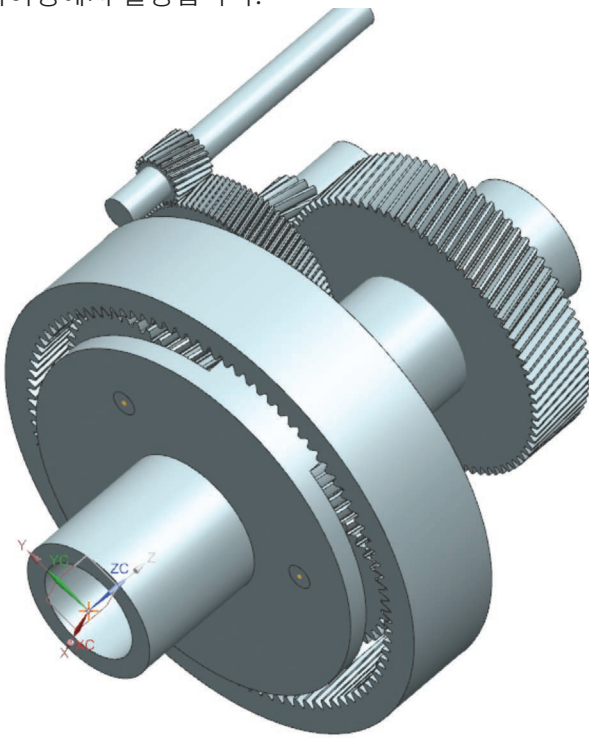


그림 2: 변속기 예 - 하나의 유성 단계와 두 개의 헬리컬 단계를 가진 풍력 터빈의 3단 기어박스.

그러므로 기어박스는 자동차 (승용차, 트럭, 버스), 풍력 터빈, 헬리콥터 등 다양한 분야에서 중요한 설계 엔지니어링 과제를 제시합니다. 가장 중요한 과제는 비선형 시스템의 동역학을 충분히 상세하면서도 효율적인 계산 방식으로 포착하는 것입니다. 변속기 설계자는 두 소프트웨어 솔루션 제품군 중에 하나를 선택해 설계와 시뮬레이션을 지원할 수 있습니다. 첫 번째 제품군은 기어박스 설계를 대상으로 하며, 설계 프로세스에 사용할 수 있는 기어박스별 노하우를 제공합니다. 그러나 특정 시뮬레이션 기능이 부족하며, 특히 시스템 수준 동역학과 관련한 부분이 그렇습니다. 두 번째 제품군에는 Simcenter 3D Motion과 같은 범용 다중 물체 시뮬레이션 툴이 포함되어 있습니다. 이 툴에서는 드라이브 트레인 지오메트리를 조인트, 축 시스템, 바디, 힘 요소 등의 시뮬레이션별 요소와 함께 생성해야 합니다. 이러한 환경이 갖춰져야 현실적인 시간 내에 충분히 정확한 예측을 해 비선형 역학, 소음과 진동 및 내구성 성능을 예상할 수 있습니다. 최근까지 다중 물체 시뮬레이션 툴로 전체 변속기 모델을 만드는 것은 지루하고 오류가 발생하기 쉬운 수작업 프로세스였습니다. 비교적 복잡한 모델의 모델링과 매개변수화, 반복은 숙련 작업자라도 며칠이 소요될 수 있는 작업입니다. 설계 엔지니어는 이 백서에서 설명하는 향상된 기능을 활용해 다중 물체 시뮬레이션 환경에서 시뮬레이션 모델을 효율적으로 설정하고, 정확한 시뮬레이션에 기반해 설계를 효과적으로 예측하고 최적화할 수 있습니다.

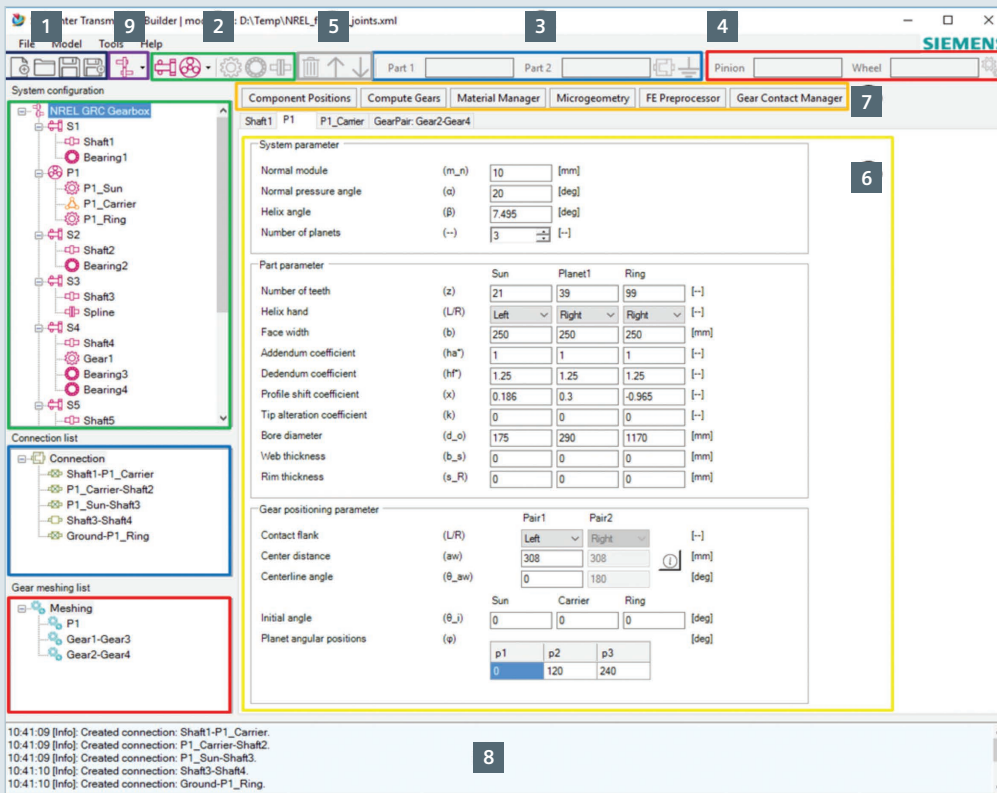
그림 2에 표시된 기어 박스는 발전기와 결합된 증속기로 750kW 풍력 터빈에 사용되는 기어 박스입니다. 이 모델은 사용이 쉬운 Simcenter 3D Transmission Builder로 몇 분 만에 생성되었습니다.



# Simcenter 3D Transmission Builder

Simcenter 3D Transmission Builder는 Simcenter 3D Motion에서 복잡한 변속기 시스템을 구축할 수 있는 사용이 간편한 인터페이스를 제공합니다. 솔버, FE 프리프로세서와 바로 연결돼 있어 기본 지오메트리와 토폴로지를 쉽게 설정할 수 있고 자동 단계화를 수행합니다. 이로 인해 Simcenter 3D Transmission Builder는 모델 생성 시간을 대폭 단축합니다.

그림 3은 Simcenter 3D Transmission Builder의 기본 창 레이아웃을 보여줍니다.



- 1 기본 I/O: 시스템 구성 파일 시작하기 (새로 만들기), 저장하기, 다른 이름으로 저장하기, 열기
- 2 시스템 구성: 시스템 및 구성 요소 추가 및 관리
- 3 연결: 구성 요소 간 연결 정의
- 4 메시 생성: 메시 생성 기어 쌍 정의
- 5 제어: 각 트리 보기에서 추가된 시스템, 연결 또는 메시 생성 노드 이동 또는 삭제
- 6 구성 요소 사양: 시스템과 구성 요소 속성 관리
- 7 계산: 공간 및 기어 사양에서 구성 요소 위치 계산, 재료 속성, 마이크로 지오메트리, FE 프리 프로세서 및 기어 접점 관리
- 8 로그 창: 사용자가 수행한 작업 및 경고/오류 메시지 표시
- 9 Simcenter 3D Motion 연결: Simcenter 3D Motion에서 모델 생성/업데이트

그림 3: Simcenter 3D Transmission Builder의 기본 창 레이아웃.

Simcenter 3D Transmission Builder는 기어박스 설계와 관련된 결정을 내릴 때 사용자의 워크플로를 면밀히 따르며, 해석과 시뮬레이션으로 이러한 결정을 돕습니다. 사용자는 변속기 레이아웃 설정으로 시작해 샤프트, 기어, 베어링 등을 정렬하고, 스퍼, 나선, 유성 기어 시스템의 기어 메시 생성 조건을 정의합니다. 그 다음 ISO 21771 표준<sup>4</sup>에 따른 기어 지오메트리 계산이 수행되며, 표준에 따라 변속기 설계 변수에서 기어 지오메트리를 생성합니다. 그러면 Simcenter 3D Transmission Builder가 Simcenter 3D Motion에서 3D 지오메트리 모델을 생성합니다. 그 다음 간단한 클릭 (그림 4 참조)으로 기어 마이크로 지오메트리가 생성됩니다. 여기에는 프로파일과 플랭크 선 수정 또는 그 조합, 기어 접촉 모델 입력이 포함됩니다.

그런 다음 Simcenter 3D Transmission Builder를 사용해 구성 요소 초기 각도, 자동 기어 단계화, 조인트 (베어링 및 커플링), 구속 조건 등과 같은 초기 조건과 경계 조건을 생성할 수 있습니다. 마지막으로 사용자가 기어 접촉 관리자로 기어 접촉 모델과 상호 작용하면 변속기 시스템을 솔빙할 준비가 완료되며, 이 모든 작업이 보통 한 시간 내에 이뤄집니다.

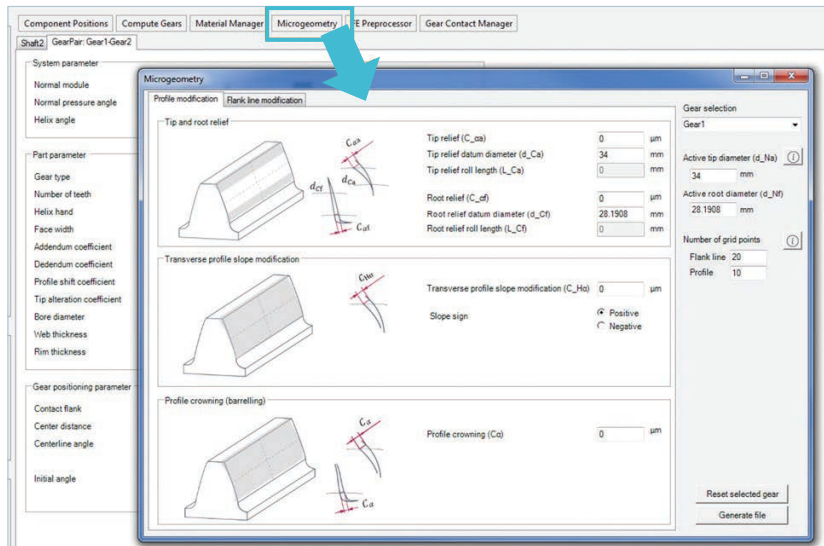


그림 4: 마이크로 지오메트리 생성.

# 변속기 시스템 솔빙

새 기어 접촉 요소가 수행하는 주요 작업은 접촉 감지, 필요한 변위 계산, 변위를 부하로 변환 등으로 구성됩니다. 다중 물체 솔버가 기어 접촉을 정확하게 고려해 시스템 수준 부하를 계산하고 내구성과 NVH 거동을 계산합니다. 그림 5는 새 기어 접촉 요소가 동적으로 포착하는 가장 중요한 기하학적 효과를 보여줍니다.

변위를 부하로 변환하기 위해 세 가지 등급의 방법을 사용할 수 있습니다.

- 표준 (사용자 입력 옵션이 있는 ISO 표준 기반)
- 해석 (ISO + Cai)
- 고급 (경험적 또는 FE 프리프로세서)

이러한 방법은 범용 다중 물체 소프트웨어인 Simcenter 3D Motion 솔버 내의 최신 개체 지향 프레임워크에서 구현되었습니다. 최근에는 베어링, 베벨 및 하이포이드 기어, 그리고 유사한 프레임워크 내 스플라인 연결까지 그 기능을 확장하는 데 주력하고 있습니다.

## 표준 방법

표준 방법은 드라이브 트레인의 전반적인 거동이 중요한 경우에 사용하기 위한 것입니다. 강성은 일정하며 ISO 공식을 통해 계산됩니다.<sup>5</sup> 이 방법에 의해 계산된 기어 쌍 메시 생성 강성은 해석된 기어 쌍의 실제 강성에 대한 정성적 근사치입니다. 그러나 공진 해석과 복잡한 드라이브 트레인의 첫 번째 설계 반복에 상당히 유용할 수 있습니다. 특히 기어 바디의 유연성이 관련이 없는 경우 더욱 그렇습니다. 마이크로 지오메트리 수정이나 팁 접촉은 허용되지 않습니다. 톱니 간 접촉이 정의돼 있지 않기 때문입니다- 접촉 쌍의 전체 거동만 모델링됩니다. 정렬 오류는 평균적인 수준으로 허용됩니다. 강성은 부하에 따라 달라지지 않으므로 부하 증가에 따른 비선형 강성 효과는 고려 대상이 아닙니다.

이 간단한 방법은 접촉 강성 및/또는 측정된 변속기 오류(TE)를 파악하면 더 정확해질 수 있습니다. 이 방법의 가장 큰 장점은 사용이 편리하다는 것과 계산 속도가 빠르다는 것입니다.





접촉 모델링 = 접촉 감지 ⇒ 필요한 변위 계산 ⇒ 변위를 부하로 변환						
대상	평면 내 상대적 변환 	축방향 상대적 변환 	회전 정렬 오류 	프로파일 수정/오류 	플랭크 선 수정/오류 	메시 단계화 
관련 항목	부하에 따른 반발 편심률로 인한 주파수 측파대	기어 래들 (헬리컬 기어)	시스템 수준 동역학 기어 화인 나사 부하 ⇒ 내구성	기어 화인 오류로 인한 주파수 측파대 '고스트' 소음	기어 화인 나사 부하 ⇒ 내구성	유성 변속기 다중 메시 생성
기어 요소	✓	✓	✓	✓	✓	✓

그림 5: 기어 접촉 요소는 동역학, 소음, 내구성과 같은 시스템 수준의 변속기 거동 예측과 관련된 모든 접촉 감지를 지원합니다.

### 해석 방법

이 해석 방법은 치아 마감, 정렬 오류, 마이크로 지오메트리에 대한 매개변수 방식의 연구, 부피가 큰 기어에 대한 정성적 NVH 연구 (공식에 반영돼 있는 강성 가변성으로 인해 기어 화인 포착 가능), 시스템 수준 현상의 역학 검증에 이르는 여러 분야에 사용할 수 있습니다. 이 방법은 기어의 부피가 크고 기어 내부 동역학 (예: 경량 기어)이 무관한 경우 정량적으로 정확합니다.

이 방법을 사용하면 표준 방법에 비해 상당한 강화 효과를 누릴 수 있습니다. ISO 톱니 짝 강성<sup>5</sup>과 스퍼 및 나선 기어의 톱니 쌍에 굽힘 강성을 제공하도록 설계된 특정 공식<sup>6,7</sup>을 통합하는 데 강성 함수가 사용됩니다. 이 방법을 사용하면 접촉 감지의 정확도가 현저히 향상됩니다. 특히 정확한 동적 정렬 불량 해석을 위해 개발된 슬라이싱과 새로운 접촉 감지 기술이 이 방법에 포함돼 있습니다. 요청 시 쿨롱 마찰도 고려됩니다. 사용자는 슬라이싱 방식을 사용해 순간 축방향 겹침이 분할되는 여러 슬라이스를 선택할 수 있습니다. 기어 접촉 쌍 내 각 슬라이스에 대한 접촉 감지 기능은 마이크로 지오메트리, 순간 정렬 오류, 잠재적 웨징을 고려해 아주 효율적으로 수행됩니다.

경험상 정렬 오류 및 마이크로 지오메트리 수정이 해석과 관련 있는 경우, 슬라이스 수를 늘려야 하지만, 보통 5~20개 정도라면 계산 성능에 큰 영향을 미치지 않으며 대부분의 용도에 그대로 사용할 수 있습니다.

### 고급 방법

이 새로운 방법을 사용하면 정확도가 한층 높아질 수 있습니다. 구현된 고급 방법은 두 가지, 고급 경험적 방법과 고급 FE 프리프로세서입니다.

#### 고급 경험적 방법

이 등급에서 잘 알려진 방법은 제안된<sup>8, 10</sup>이며, 고급 경험적 방법으로 새로운 기어 접촉 요소에 구현돼 있습니다. 스퍼 및 나선 기어의 대략적인 FE 모델에서 일련의 표로 작성된 벌크 강성 곡선이 생성돼<sup>8</sup> 바디와 톱니 유연성을 한층 자세히 설명하는 데 사용됩니다. 비선형 해석 공식<sup>9</sup> 덕분에 로컬 접촉 규격이 고려됩니다. 이 방법은 부하에 관련된 톱니 굽힘과 비선형 강성이 중요한 기어의 시스템 수준 시뮬레이션을 위해

개발됐습니다. 이 방법은 기어-바디의 유연성이 영향을 미치지 시작할 때 기어 화인에 관련된 정성적 연구와 민감도 해석 시 권장하는 방법이지만, 경량 기어나 링 기어에서는 권장하지 않습니다. 이 방법을 사용하면 인벌류트 프로파일과 톱니 너비를 따른 강성 변화와 같은 효과를 포착할 수 있습니다. 예를 들어 기어의 측면 가장자리에서 발생하는 접촉은 기어 중앙의 접촉에 비해 "더 부드럽습니다". 이 방법의 계산 부하는 해석 방법의 부하와 비슷합니다.

#### 고급 FE 프리 프로세서

경량 기어, 링 기어 유연성, 기어 부피 변형이 매우 중요한 경우, 예를 들어 기어 블랭크의 구멍으로 인해 동적 변속기 오류(DTE)에서 축파대가 발생하면 이전 방법보다 훨씬 높은 수준의 충실도가 필요합니다. 이 경우 고급 FE 프리 프로세서 방법을 사용합니다. Siemens Digital Industries Software의 연구 및 기술 개발(RTD) 팀은 탄탄한 이론적 연구<sup>8, 9, 10</sup>와 모델 순서 감소 필드에서 가져온 고급 숫자 기술<sup>11, 12, 13</sup>을 통합해 이 새롭고 독특한 방법을 구현했습니다. 사용자는 이 고급 방법을 쉽게 사용할 수 있으며 알고리즘이 그 배후에서 고급 수치를 계산합니다. 고급 FE 프리 프로세서 방법은 FE 프리 프로세서 툴과 Simcenter Nastran® FE 패키지의 이점을 활용합니다. 이 툴은 편리한 인터페이스와 연결돼 있으며, 스퍼와 나선 기어의 매개변수 방식 FE 메시는 물론 다중 물체 솔버 내 계산에 필요한 강성 데이터도 생성할 수 있습니다. 이 방법은 경량 기어와 링 기어, 비선형 접촉 규격을 비롯해 기어-바디의 변위를 아주 세부적으로 고려하는 FE 기반 톱니 강성 데이터가 결합돼 있어 상당히 강력합니다. 슬라이스와 톱니 사이의 대류성 커플링 항은 자동으로 반영됩니다. 이 방법으로 경량 바디와 크게 변형될 수 있는 바디를 포함해 스퍼와 나선, 내부와 외부 등 모든 종류의 실린더형 기어를 시뮬레이션할 수 있습니다. MOR의 사용과 효율적인 구현으로 비슷한 수준의 상세 정보를 제공하는 다른 기술에 비해 메모리 사용량을 줄이고 계산 부담도 크게 줄일 수 있습니다. 기본 FE 메시와 슬라이스 수에 따라 이 방법은 계산 상 비용이 더 많이 들지만, 보통 상대적으로 거친 메시와 제한된 수의 슬라이스를 사용하면 정확도와 계산 성능 간 최적의 균형을 맞출 수 있습니다.



# 결과

이 섹션에서는 결과에 대해 설명하고 새 기어 접촉 요소의 몇 가지 기능을 살펴봅니다. 특히 해석 방법의 기능을 보여주기 위해 부하 증가에 따른 마이크로 지오메트리 수정 효과와 풍력 터빈 기어박스 전체 동역학 해석이 사용됩니다. 고급 방법의 잠재력을 보여주는 데는 검증 테스트가 사용됩니다.

## 모션 해석 방법: 프로파일 수정 해석

기어박스는 마이크로 지오메트리 수정이 시스템의 작동 조건에 최적이 되도록 설계하는 것이 중요합니다. 이는 해석 방법을 사용해 구현할 수 있습니다. Simcenter 3D Transmission Builder를 사용하면 손쉽게 동일한 나선 기어 두 개의 모델을 만들고 원하는 마이크로 지오메트리 수정을 적용할 수 있습니다. 여기서 기어의 톱니는 50개이며, 법선 모듈은 2.71, 나선 각도는 25.2도입니다. 마이크로 지오메트리의 경우 최대 10 $\mu$ m의 팁과 루트

릴리프, 4 $\mu$ m의 리드 크라운을 만들어 양쪽 기어에 적용했습니다. 특히 기어 화인을 최소화하는 원하는 공칭 토크에서 정적 변속기 오류(STE)를 최소화하기 위해 마이크로 지오메트리 수정이 적용되었습니다. 그림 6에서 8개의 슬라이스만 사용하는 해석 방법으로 이러한 효과를 아주 분명하게 포착할 수 있음을 볼 수 있습니다. 두 기어 중 하나는 일정한 토크로 구동되며, 다른 기어는 10rpm으로 일정하게 속도를 유지하기 위해 점성 댐핑 요소로 저항합니다. 여러 개의 토크가 적용되며 STE는 그림 6에 나와 있습니다. 낮은 토크에서는 적용된 프로파일 수정에 의해 정해진 전형적인 모양이 포착됩니다. 또한 STE는 20Nm의 정격 토크에서 최소에 도달하는 반면, 헬리컬 기어에 대해 자주 보고되는 전형적인 준 사인 곡선 형태로 더 높은 토크에서 더욱 증가합니다.

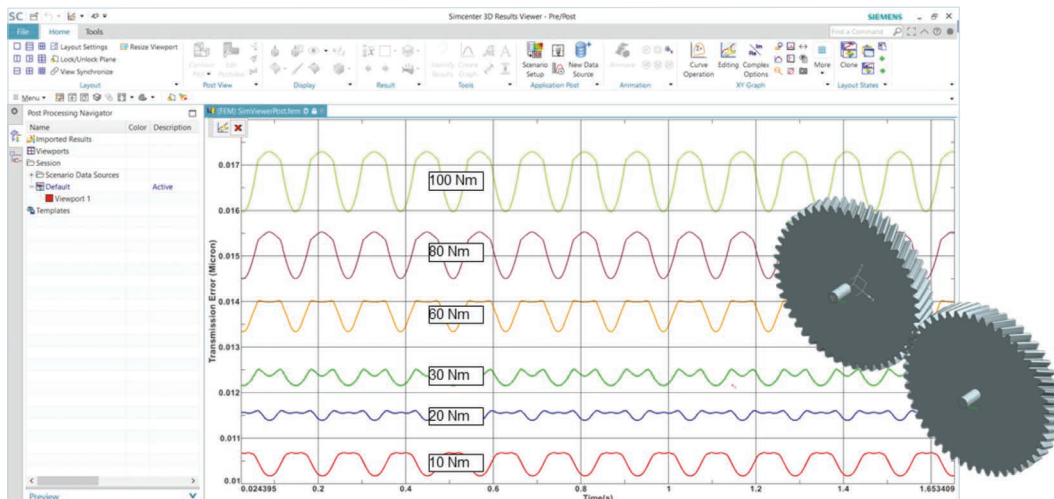


그림 6: 부하 증가로 프로파일과 리드가 수정됨에 따른 준정적 변속기 오류.

**모션 해석 방법: 전체 변속기 동역학 해석**

기어 부하 시뮬레이션을 활용해 기어박스를 해석 해 기어에서 발생하는 여기에 반응하는 시스템 동역학의 주파수 콘텐츠를 평가할 수 있습니다. 두 번째 예로, Simcenter 3D Transmission Builder를 사용해 2단계 자동차 변속기를 만들었습니다. 이 모델은 최대 350Nm의 입력 토크로 Simcenter 3D 모션에서 시뮬레이션됩니다. 20초의 시뮬레이션 시간 중 0~2,500RPM 범위의 출력 속도로 시뮬레이션을 진행합니다.

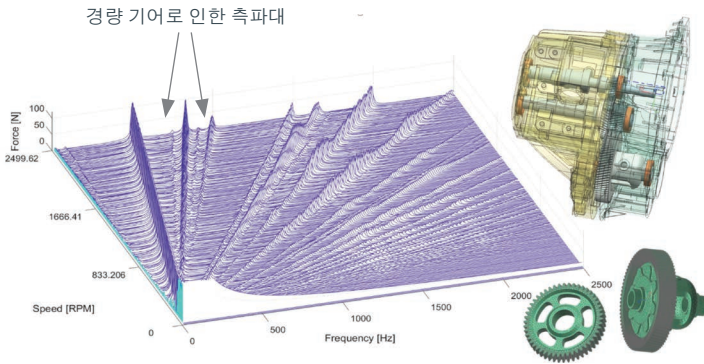


그림 7: 2단 변속기의 런업 시뮬레이션에서 생성된 베어링 힘 주파수 스펙트럼

그림 7은 베어링 중 하나에서 동적 힘 응답을 보여줍니다. 결과는 주파수 영역에서 후처리 돼 순서를 시각화합니다. 예상 대로 그래프에는 두 개의 메인 메시 생성 순서와 두 기어 단계의 해당 메시 생성 주파수가 표시됩니다. 이와 같은 동일한 순서의 높은 고조파에는 진폭이 더 작은 몇 개의 피크가 있습니다.

그림 7의 하단에 표시된 것과 같이 기어는 경량 구멍으로 설계되었습니다. 이제 Simcenter 3D Motion 솔버를 사용해 얇은 림과 구멍이 기어 힘 여기에 미치는 영향을 평가할 수 있습니다. 이는 기어 접촉에서 베어링 반력으로 전파되는 그림 7의 폭포 다이어그램에 표시된 전형적인 측 파대에서 명확히 볼 수 있습니다. 이는 방법 검증에 대해 설명하는 다음 섹션에 자세히 설명돼 있습니다.

Simcenter 3D 환경 내에서 임시 다중 물체 시뮬레이션의 결과를 음향 애플리케이션으로 쉽게 가져올 수 있습니다. 이렇게 하면 그림 8에 표시된 워크플로 전체를 실행할 수 있습니다. 이 프로세스를 사용해 설계 변경의 영향 (예: 마이크로 지오메트리 수정)을 변속기 하우징 근처 마이크 음압 수준과 같은 기본 메트릭으로 해석할 수 있습니다.

시작 부분 (기어 힘)에서 전송 경로 (베어링 및 유연한 하우징 구조)를 거쳐 리시버 (마이크 배열)까지 이러한 방식으로 전체 전송 경로를 처리할 수 있습니다. 이 방법으로 설계를 최적화하고 덜컹임이나 끼익 소리와 같은 NVH 현상을 완화하기 위해 이러한 하위 시스템 수정을 쉽게 해석할 수 있습니다.

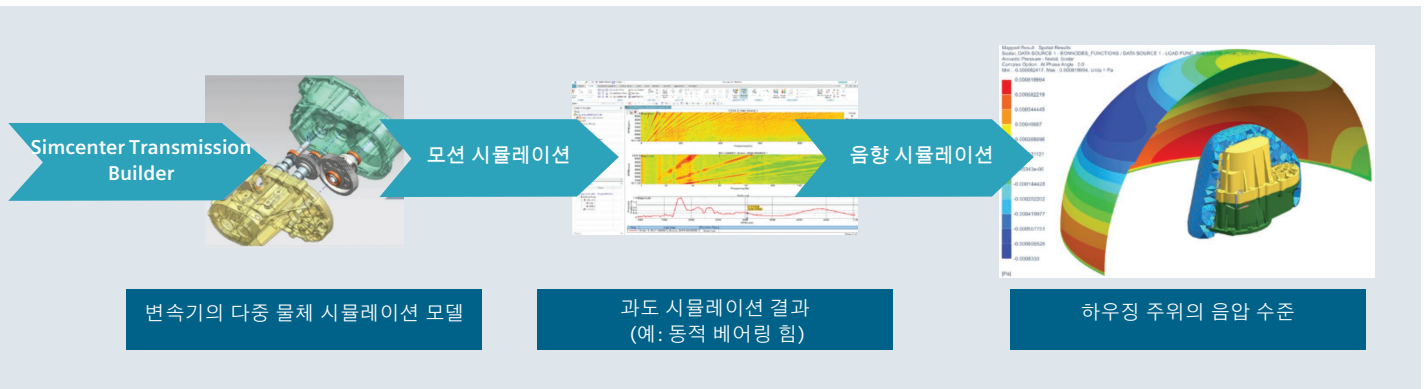


그림 8: 기어박스의 음향 방식을 평가하는 일반적인 워크플로

**모션 고급 FE 프리프로세서: 유연성, 마찰, 실험 검증**

개별 톱니 접촉과 테스트 데이터의 심층적인 상관 관계를 보면 기어의 시뮬레이션 기반 설계에서 유연성과 마찰의 영향을 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있습니다. 이 과정은 세 번째 예에서와 같이 새로운 고급 FE 프리프로세서를 사용해 수행할 수 있습니다. 고급 FE 프리 프로세서 방법과 그 기반이 되는 FE 프리 프로세서는 Siemens RTD가 KU Leuven 및 칼라브리아 대학교와 함께 개발한 것입니다. 그림 9는 스퍼 기어 한 쌍의 부하 증가에 따른 변속기 오류의 변화를 보여줍니다. 이러한 기어를 개발된 수치 모델을 검증하는 데 사용되는 자체 기어 테스트 리그<sup>14, 15</sup>에 물리적으로 장착했습니다. 테스트한 기어는 톱니 57개, 법선 모듈 2.6, 중앙 거리 150mm입니다. 두 기어 모두 각각 5 $\mu$ m와 10 $\mu$ m의 포물선 크라우닝 수정을 했습니다.

기어 중 하나는 3개의 일자형 구멍으로 제조됐으며, 이는 기어 림 구조의 강성을 크게 낮춥니다. 이로 인해 구멍에 대한 톱니 위치에 따라 변속기 오류 곡선이 또 다시 달라지게 됩니다.

그림 9의 결과는 전체 회전 중 변속기 오류를 보여주며, 림 설계로 인한 변동이 강조돼 있습니다. 엔지니어는 새로운 고급 FE 프리프로세서 방법을 사용해 기어 유연성, 구조 경량화, 마찰 효과 및 마이크로 지오메트리 수정 등의 중요한 커플링을 비롯한 복잡한 현상을 원활하게 포착할 수 있습니다.

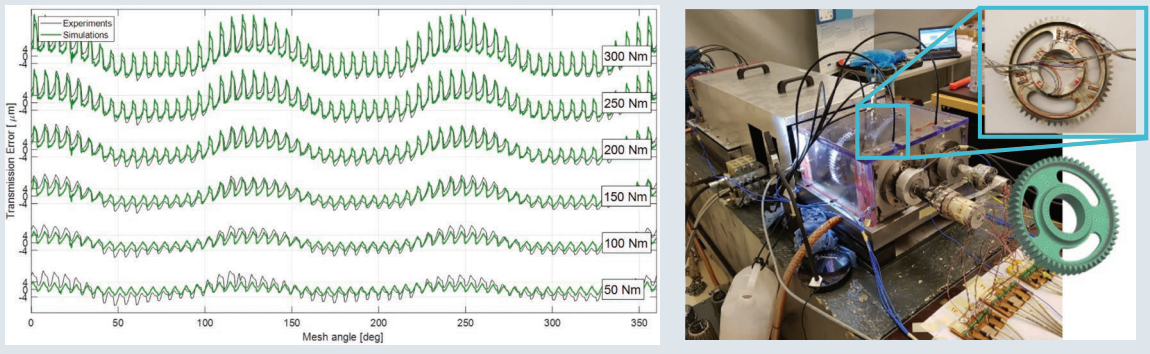


그림 9: Simcenter 3D Motion 고급 FE 프리 프로세서 방법을 사용한 변속기 오류의 실험적 검증 - 부하 증가 시 마이크로 지오메트리와 마찰의 영향

# 결론

Siemens Digital Industries Software는 기어박스 설계 엔지니어링을 위한 시뮬레이션을 보다 폭 넓게 사용할 수 있게 만들기 위한 다음 단계를 개발했습니다. Simcenter 3D Motion Transmission Builder를 사용하면 산업 애플리케이션에 있는 다양한 복잡성을 처리할 수 있는 포괄적 접촉 방법 중 하나를 선택해 모델을 쉽게 만들 수 있어 생산성을 높일 수 있습니다. 이 산업에 관련된 여러 결과를 소개하고 다뤘습니다. FE 프리프로세서를 메시 생성에 사용할 수 있으며, 고급 FE 프리프로세서 방법은 제공된 정확성에 대해 매우 뛰어난 계산 성능으로 NVH (기어, 화인, 래틀)와 연결된 출력에 대한 정확성 및 내구성 해석과 관련해 전례 없는 기능을 제공한다는 점을 보여줬습니다. 베벨, 하이포이드 기어, 베어링, 윤활, 스플라인 및 링 기어 타원화와 같은 영역에서 후속 연구와 개발이 계속 진행되고 있습니다.

## 감사의 말

이 결과를 도출한 연구는 프로젝트 150394, "ECO-파워트레인" (환경 효율적인 파워트레인 엔지니어링을 위한 혁신적 NVH 테스트와 시뮬레이션 방법)을 위한 VLAIO (Flanders Innovation and Entrepreneurship)에서 후원 받았으며, 유럽 위원회의 제7차 프레임워크 프로그램 FP7/2007-2013의 피플 프로그램 (Marie Curie Actions)으로부터도 REA 승인 계약 번호 324336 DEMETRA: "기계 변속기의 설계: 효율성, 소음 및 내구성 최적화"에 의거해 후원 받았습니다. DEMETRA는 Siemens Digital Industries Software와 칼라브리아 대학교/KU Leuven) 간 산학 지식 전수 및 직원 교환 프로그램으로 구성돼 있습니다. DEMETRA R&D 네트워크는 기계 변속기의 설계 엔지니어링을 위한 혁신적인 방법론과 워크플로를 개발하고 있습니다. <http://www.fp7demetra.eu>를 참조하십시오.

## 참조

1. F. Joachim et al., "How to Minimize Power Losses in Transmissions, Axles and Steering Systems," VDI International Conference on Gears, 2011.
2. A. Grunwald, "Systematic Optimization of Gear Boxes for Hybrid and Electric Vehicles In Terms of Efficiency, NVH and Durability," 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2011.
3. NREL, NREL Data Catalog, <http://www.nrel.gov/>.
4. International Organization for Standardization, "ISO 21771. Gears – Cylindrical involute gears and gear pairs – Concepts and geometry," 2007.
5. International Organization for Standardization, "ISO 6336-1. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors," 2006.
6. Y. Cai, T. Hayashi, "The Linear Approximated Equation of Vibration for a Pair of Spur Gears (Theory and Experiment)," *Journal of Mechanical Design* 116.2 (1994): 558-564.
7. Y. Cai, "Simulation on the Rotational Vibration of Helical Gears in Consideration of the Tooth Separation phenomenon (a New Stiffness Function of Helical Involute Tooth Pair)," *Journal of Mechanical Design* 117.3 (1995): 460-469.
8. L. Vedmar, "On the Design of External Involute Helical Gears," Ph.D. thesis, Lund Technical University, 1981.
9. C. Weber, K. Banaschek, G. Niemann, *Formänderung und Profilrücknahme bei gerad-und schrägverzahnten Rädern*, F. Vieweg, 1955년.
10. A. Andersson, L. Vedmar, "A Dynamic Model to Determine Vibrations in Involute Helical Gears," *Journal of Sound and Vibration* 260.2 (2003): 195-212.
11. T. Tamarozzi, G.H.K. Heirman, W. Desmet, "An On-line Time Dependent Parametric Model Order Reduction Scheme with Focus on Dynamic Stress Recovery," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 268 (2014): 336-358.
12. N. Cappellini, T. Tamarozzi, B. Blockmans, J. Fiszer, F. Cosco, W. Desmet, "Semi-analytic Contact Technique in a Non-linear Parametric Model Order Reduction Method for Gear Simulations," *Meccanica - An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017.
13. T. Tamarozzi, P. Jiranek, A. Rezayat, and S. Shweiki, "An efficient hybrid approach to gear contact simulation in multibody systems leveraging reduced order models." 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6) – 15 June 2018, Glasgow, UK
14. A. Palermo, A. Toso, G. Heirman, R. Cedra, M. Gulinelli, D. Mundo, W. Desmet, "Structural Coupling and Non-linear Effects in the Experimental Modal Analysis of a Precision Gear Test Rig," *Proceedings of the International Gear Conference*, 2014.
15. A. Dabizzi, G. Heirman, A. Palermo, S. Manzato, E. Di Lorenzo, S. Shweiki, A. Toso, "Multibody Modeling of a High Precision Gear Test Rig and Correlation to Experiments," International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA), 2016.



## Siemens Digital Industries Software

### 본사

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 972 987 3000

### 미주 지역

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 314 264 8499

### 유럽 지역

Stephenson House  
Sir William Siemens Square  
Frimley, Camberley  
Surrey, GU16 8QD  
+44 (0) 1276 413200

### 아태 지역

Unit 901-902, 9/F  
Tower B, Manulife Financial Centre  
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong  
Kowloon, Hong Kong  
+852 2230 3333

## Siemens Digital Industries Software 소개

Siemens Digital Industries Software는 엔지니어링, 제조 및 전자 설계가 미래와 만나는 디지털 엔터프라이즈를 실현하기 위한 혁신에 박차를 가하고 있습니다. Siemens Digital Industries Software의 솔루션은 규모를 막론한 모든 기업이 조직에 새로운 인사이트와 기회, 혁신을 촉진할 자동화 수준을 제공하는 포괄적 디지털 트윈을 생성할 수 있도록 지원합니다. Siemens Digital Industries Software 제품과 서비스에 대한 자세한 내용을 보려면 [sw.siemens.com/software](https://sw.siemens.com/software)를 방문하시거나 [LinkedIn](#), [Twitter](#), [Facebook](#), [Instagram](#) 계정을 팔로우해 주십시오. Siemens Digital Industries Software – Where today meets tomorrow.

## siemens.com/software

© 2019 Siemens. 관련 Siemens 상표 목록은 [여기](#)서 확인할 수 있습니다. 기타 모든 상표는 해당 소유자에 귀속됩니다.

76896-82384-C6-KO 9/20 LOC