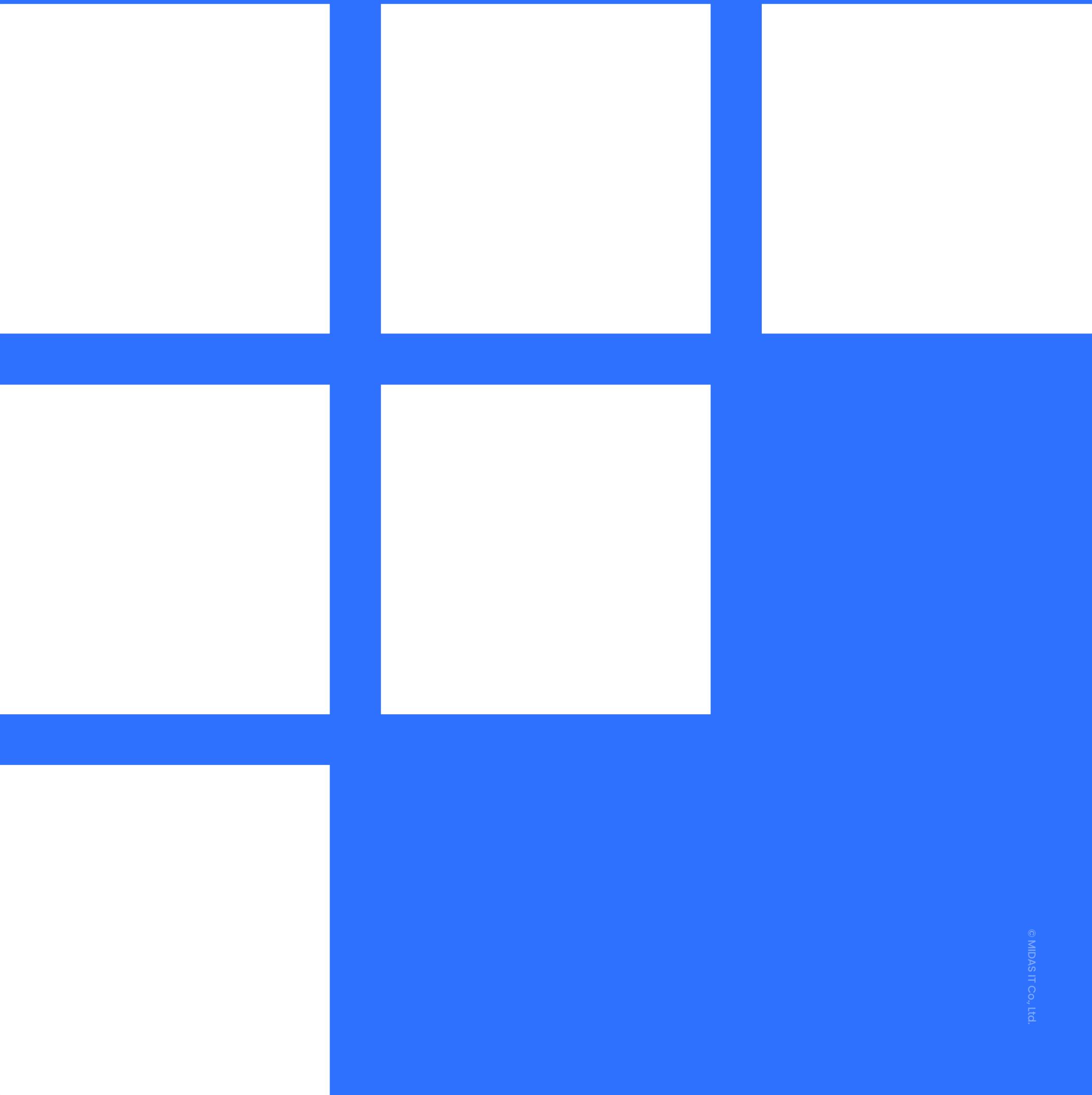


# 메시프리 알고리즘과 활용 백서



## 1. 머리말

수년에 걸쳐 CAD (Computer-Aided Design) 시스템은 와이어 프레임 또는 면 기반의 모델에서 솔리드 모델과 파라메트릭 기반 모델까지 개발되었으며, 생산성 및 기하 형상의 완성도가 비약적으로 발전해 왔습니다. CAE(Computer-Aided Engineering) 시스템은 물리적 해석 범위는 지속적으로 발전해 왔으나, 주요 수치해석 모델의 근간이 되는 요소는 약 50년 전에 개발된 빔, 셸 또는 솔리드 형상을 이용한 요소망 생성 기법에 머물러 있습니다. 이러한 차이로 인하여 CAD 기하 형상의 완성도는 비약적으로 높아지고 있으나, 요소망을 이용하여 모델을 구성하고자 하는 경우에는 생성된 CAD 모델을 간략하게 만들거나, 이상화 모델 또는 단순한 형태로 변환하려는 노력을 많이 하고 있습니다. 일반적인 FEM 기법의 범용 소프트웨어는 보다 상세하게 설계된 CAD 모델을 수치 해석 모델에 적합한 단순한 모델로 만들 수 있는 기능 제공에 많은 관심을 가지고 개발을 해 왔습니다. 해당 기능은 복잡하게 설계된 기존 모델을 효과적으로 단순하게 만들어주고 있으나, 해당 기능을 원활하게 사용하기 위한 학습 시간이 필요하고 다양한 경험을 보유한 해석 전문가가 필요한 노동 집약적인 작업입니다.

결론적으로 CAE 시스템은 컴퓨터 상에서 양산 전 제품에 발생 가능한 많은 문제점을 발견하고 이를 개선해야 하는 활동에 집중되어야 하나, 현실은 완성된 CAD 모델을 시뮬레이션에 적합한 모델로 간략화하는 작업과 요소망 생성을 하는 데 많은 시간을 소모하고 있는 실정입니다. 특히, 이러한 FEM 기반의 소프트웨어는 해석 모델 구성에 많은 시간이 소요되기 때문에 설계 변경이 많은 개념 및 기본 설계 단계에서 적극적인 활용을 어렵게 만들고 있습니다.

midas MeshFree는 설계 엔지니어에 의해서 완성된 CAD 모델 원형을 그대로 활용하여, 사용자가 요소망 생성 없이 시뮬레이션을 할 수 있는 기법으로 개발된 구조해석용 소프트웨어입니다. midas MeshFree는 간략화 작업과 노동 집약적인 요소망 생성 작업 없이 빠르고 직관적으로 해석을 수행할 수 있습니다. 요소망을 생성하지 않는 작지만 새로운 변화는 시뮬레이션의 환경을 크게 변화시키고 있습니다. 개념 및 초기 설계 단계에서 설계 엔지니어를 중심으로 설계한 원본 CAD 형상을 그대로 활용하여 빠르고 효율적으로 분석할 수 있으며, 성능 검토 후 빠른 의사 결정으로 통해 설계에 보다 개선된 사항을 반영할 수 있습니다. 본 기고에서는 최신의 해석 알고리즘이 midas MeshFree에 대해 소개하고자 합니다.

## 2. MeshFree Algorithm

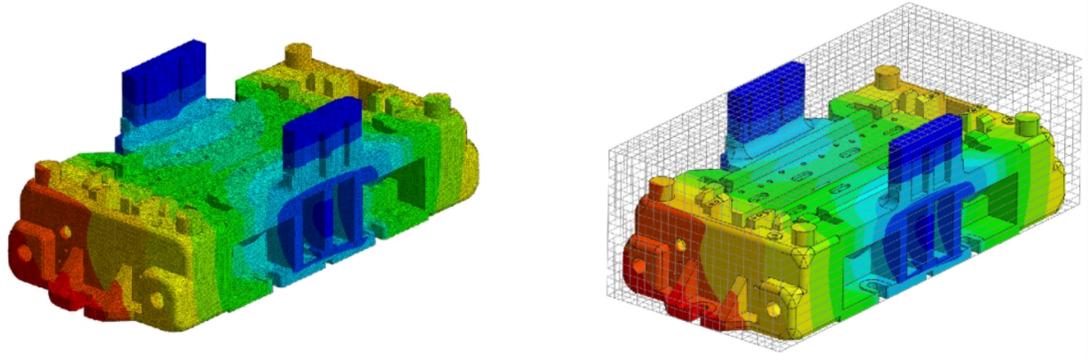


그림. 1 FEM 요소망과 IBM 그리드

midas MeshFree는 경계무격자법 (Implicit boundary method/ IBM)을 이용하여 시뮬레이션을 수행합니다. 경계무격자법 (IBM)과 기존 유한요소법(FEM)은 공통적으로 시뮬레이션 대상 모델을 절점(node)으로 연결된 요소로 분할하여, 모사하기 위한 물리 현상의 근사해(approximate solution)를 구하는 방법입니다.

둘의 차이점은 FEM은 실제 해석 도메인의 경계와 요소의 경계가 일치하도록 요소망(mesh)을 생성하는 과정이 필요한 데 반해, IBM은 해석 모델의 경계와 무관한 정규 격자(Structured grid)를 사용한다는 점입니다(그림 1). 따라서 IBM은 사용자에게 의한 요소생성 (mesh generation) 과정이 불필요하며, 요소 생성이 어려운 부분을 간략화하는 작업 없이 3차원 CAD 형상을 직접 해석 할 수 있다는 장점이 있습니다. FEM 사용자는 복잡한 모델의 해석을 위하여 대부분의 시간과 노력을 전처리 단계에서 보내므로, 언급된 IBM의 강점은 매우 크다고 볼 수 있다.

Analysis Type	Nodal degrees of freedom	Derived Quantities
Structural	Translational displacements (u, v, w)	Strain Stress
Heat Transfer	Temperature	Temperature gradient Heat flux

표 1 IBM 해석군별 자유도

기본적인 솔루션의 구조는 FEM 과 마찬가지로 IBM해석은 절점마다 물리적 현상을 모사하는데 필요한 물리량을 자유도 (degree of freedom)로 아래 표와 같이 가지며, 전체 시스템은 유한한 자유도로 갖게 된다. 구조해석으로 국한하였을 때, 격자내부의 변위는 FEM 형상함수(shape function)를 기저로 하는 선형 조합으로 표현됩니다. 여기서, N은 형상함수 행렬 그리고 는 요소 자유도 벡터입니다. IBM 해석에서는 정확도 및 계산 비용을 고려하여 각 격자에 대응하는 요소로 20개의 절점을 갖는 FEM 육면체를 활용합니다. 따라서 N은 20 절점 육면체 요소의 형상함수가 됩니다.

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \mathbf{N}\mathbf{X}_g$$

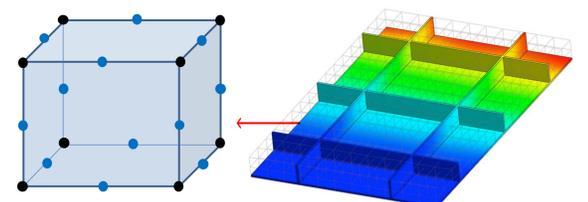


그림. 2 IBM 그리드 및 대응 요소 (20 절점 육면체)

일반적으로 경계면에 자유도를 가지지 않는 무요소방법들은 공통적으로 경계조건을 만족시키는데 어려움을 겪고 있습니다. IBM은 경계조건, 접촉조건, 강제조건과 같은 특수 변위조건을 정확히 만족시키기 위하여 특수한 솔루션의 구조를 가정하여 구현됩니다. 경계조건은 해당 경계에서 0이 되는 특수 함수 (D-function)를 이용하여 다음과 같이 가정합니다.

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = D\mathbf{u}_g + \mathbf{u}_a = D\mathbf{N}\mathbf{X}_g + \mathbf{u}_a$$

여기서  $\mathbf{u}$ 는 경계면에 지정된 값이며,  $D$ 는 그림. 3과 같이 경계면에서 0이 되는 함수입니다. 접촉조건 및 강제조건 또한 특수 함수를 이용하여 해당 조건을 만족하는 형태로 솔루션을 가정하여 적용합니다.

IBM해석은 체적적분(volume integration)을 통해 해석 대상의 강성 및 질량을 계산하며, 면적분(Surface integration)을 통해 면에 작용하는 경계 및 하중을 계산합니다. 격자 크기에 비해 작은 기하학적 피쳐 또는 엄밀한 적분을 통해 아래 그림. 4와 같이 계산합니다. 체적 적분은 부호가 고려된 사면체 분할 적분 방법(signed-tetrahedral integration)을 이용하며, 주어진 격자에 의한 자유도 내에서 총 강성 및 총 질량은 정확히 계산됩니다. 하지만 국부적인 결과를 확인하기 위해서는 국부적인 변형을 지원할 수 있는 기저가 필요하기 때문에 충분히 작은 격자를 사용할 필요가 있습니다.

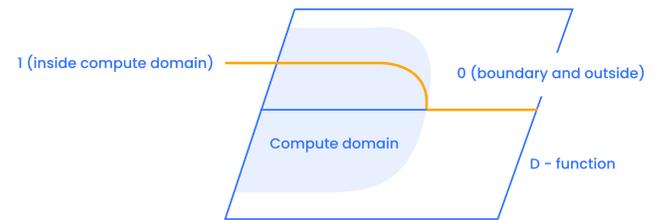


그림. 3 IBM 그리드 및 대응 요소 (20절점 육면체)

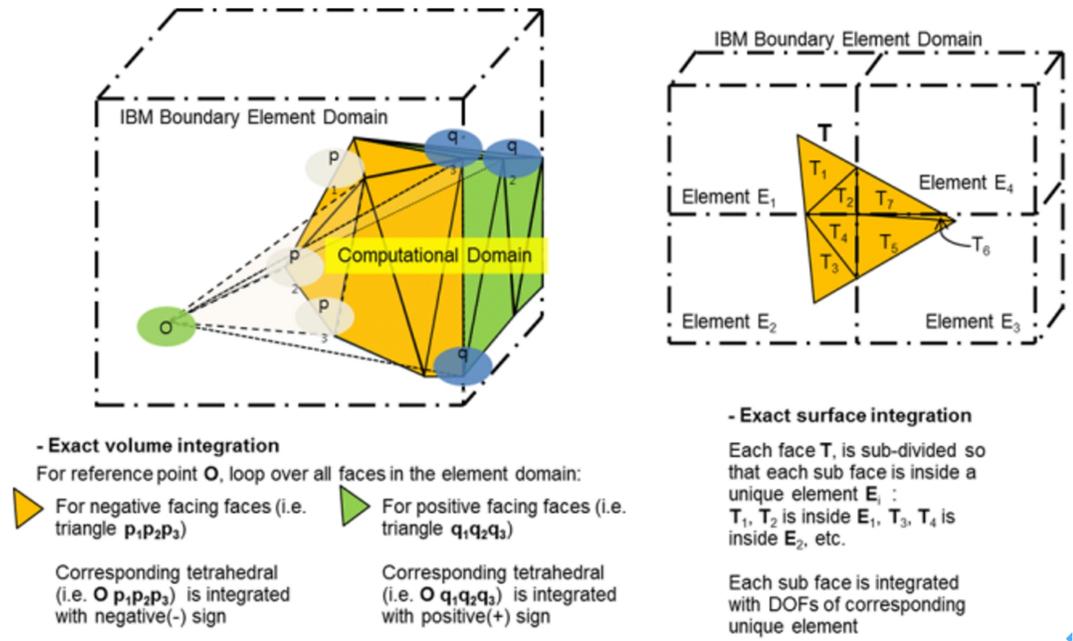


그림. 4 IBM 체적/면 적분법

반면, 이러한 작은 피쳐에 대한 국부적인 결과가 중요하지 않다고 판단되는 경우, 즉 FEM 해석처럼 격자 생성 시 간략화를 통해 제거해도 물리적 현상을 모사하는 데 문제가 없다고 판단되는 경우에는 전체 격자를 생성하는 데 있어서 작은 피쳐에 대한 추가적인 고려는 필요하지 않습니다. 이러한 상황에서 FEM은 간략화 과정을 통해 질량 및 강성이 완전히 제거되는데 반해 IBM에서는 작은 피쳐에 대한 질량 및 강성이 반영되므로 보다 정밀한 해석이 가능합니다.

### 3. 설계단계 CAE와 MeshFree

CAE의 목표는 제품의 제반 성능을 정량적으로 예측하고, 설계에 적용하여 최적설계를 달성하는 것입니다. 설계 단계 CAE는 설계 초기 단계인 기획 및 기본 설계 단계에서 성능을 분석하여, 양산 후 발생 가능한 문제점을 사전에 찾아내고, 이를 개선하는 것을 목적으로 합니다. 즉, Zero Mock-up Design을 추구하여 시제품을 제작하지 않고 제품을 설계, 검증 그리고 최적설계를 달성하고자 하며, 이 과정에서 중요하게 여겨지고 있는 것이 CAE이며, 최근 들어 4차 산업혁명과 디지털 트윈에 대한 개념이 대두되면서 CAE 도입은 날이 갈수록 필수로 느껴지고 있습니다. 그럼에도 불구하고, 기존 FEM 기반의 CAE 프로세스는 경험과 지식을 갖춘 전문인력이 필요한 상황이며, CAE 인프라 구축의 고비용을 고려하면, 필요성에 비해 접근성은 상당히 떨어지는 것이 현실입니다. midas MeshFree는 기존 FEM 기반의 해석 프로세서에서 가장 많은 노동력과 경험이 필요했던 부분인 간략화 과정 및 요소망 생성 작업을 제거함으로써 설계 엔지니어가 직관적으로 사용할 수 있도록 개발되었습니다. midas MeshFree의 개발 개념은 설계단계 CAE를 적극적으로 지원하고, 설계 엔지니어가 빠르게 제품을 학습하여 설계 과정 중에서 자신이 설계한 제품을 성능을 빠르게 파악하는 것으로 다음과 같은 원칙을 기반으로 개발하였습니다.

- No geometry cleanup and simplifications
- No mesh generation by user
- No failed analysis
- Performance and accuracy comparable to finite element method

일반적인 CAE 해석 프로세스



MeshFree CAE 해석 프로세스

그림 5. 해석 프로세스 혁신

midas MeshFree는 CAD 모델을 직접 이용하며 해석을 수행하기 위해서는 3D CAD 불러오기, 하중/경계조건 정의, 마지막으로 해석 실행 및 결과 분석인 3단계의 프로세스만으로 해석 결과를 도출할 수 있는 사용 편의성을 제공합니다. 또한, 상용 CAD와의 연계성을 강화하여 CAD에서 정의한 재료 정보를 자동으로 불러올 수 있으며, 설계 변경된 모델도 최소한의 작업으로 해석을 수행하여 결과를 확인할 수 있는 Auto-Update 기능을 제공하고 있습니다. 단순히 설계 엔지니어가 간단하게 시뮬레이션을 수행하는 것을 목적으로 하는 것이 아니라, 결과를 분석하고 이를 빠르게 설계에 반영하여 변경된 성능을 빠르게 분석할 수 있도록 개발하였으며, 기업 내에서 최소의 노력으로 설계단계 CAE 프로세스를 구축할 수 있도록 개발하였습니다.



## 4. MeshFree 해석 기능

midas MeshFree 솔버는 강성 및 강도를 검토할 수 있는 선형 및 비선형 정적 해석, 진동 특성을 분석할 수 있는 모드 및 동해석(과도, 주파수, 랜덤진동, 응답 스펙트럼), 온도 하중에 대한 영향을 파악할 수 있는 정상/비정상 상태 열전달 해석을 제공하고 있으며, 설계 제품의 수명을 검토할 수 있는 피로해석과 최적 설계 안을 도출할 수 있는 위상 최적 설계 기능까지 제공하고 있으며, 주요 해석 기능은 그림. 7에 나타내었습니다. 현재 상용 적으로 사용하는 무요소 방법들은 공통적으로 경계조건을 만족시키는 어려움과 비선형성에 의해 강성을 갱신하여 해석에 반복적으로 반영해야 하는 방식에 어려움을 겪고 있습니다. MeshFree는 체적 적분 기법을 통해 해석 대상의 강성을 계산하며, Update Lagrangian 기법을 이용하여 다양한 비선형성에 의해 갱신되는 강성을 반영할 수 있도록 개발하였습니다.

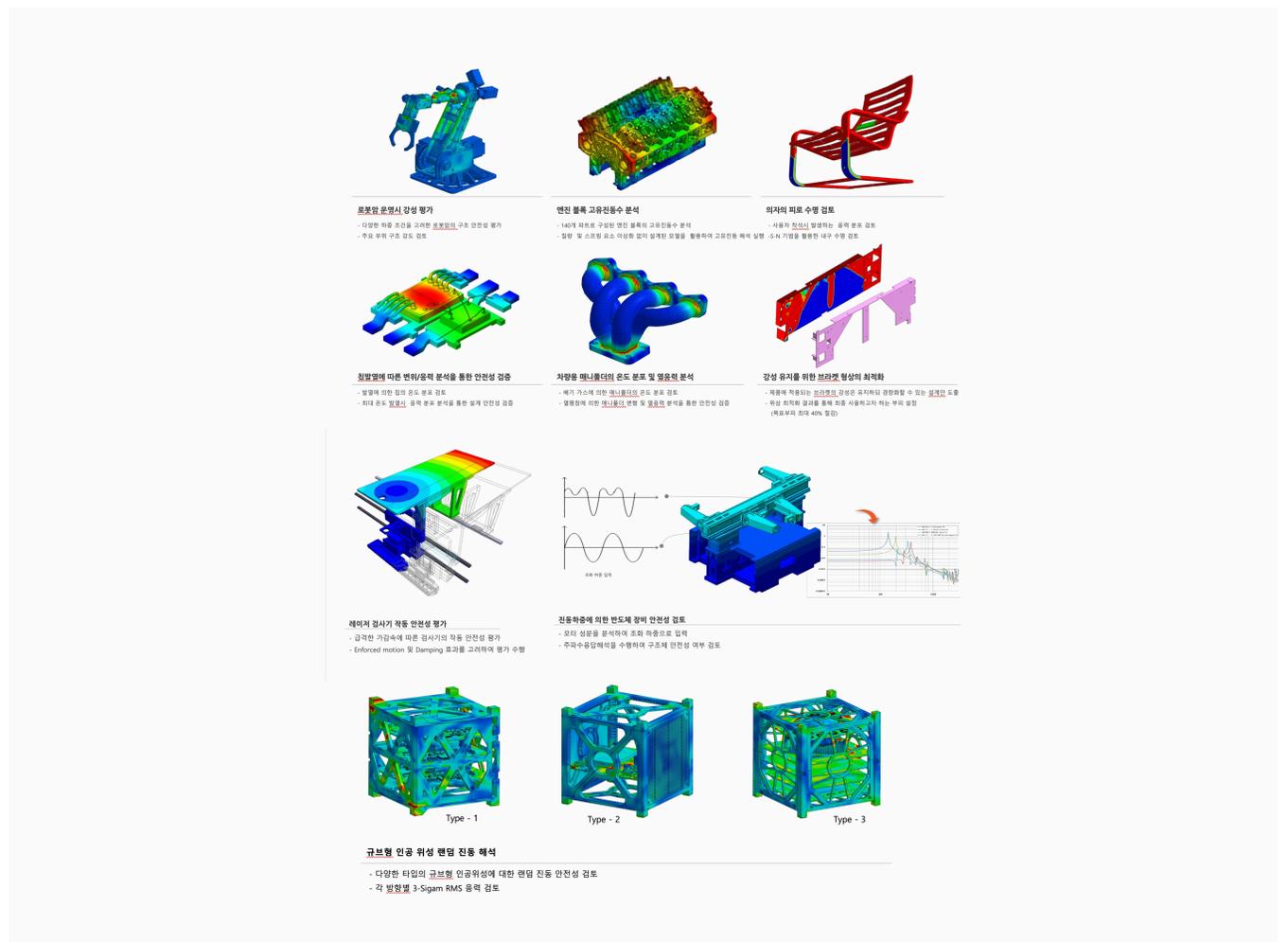


그림. 7 MeshFree 주요 해석 기능

midas MeshFree에서 제공하는 비선형성은 대변형, 대회전이 유발되는 기하학적 비선형 문제, 탄소성 모델의 항복 이후 성능과 고무와 같은 초탄성 재료의 성능을 검토할 수 있는 재료 비선형, 그리고 공간상의 두 물체가 서로 맞닿을 수 있으나, 관통할 수 없다는 조건을 기본 가정으로 하는 접촉 비선형 문제를 검토할 수 있습니다.

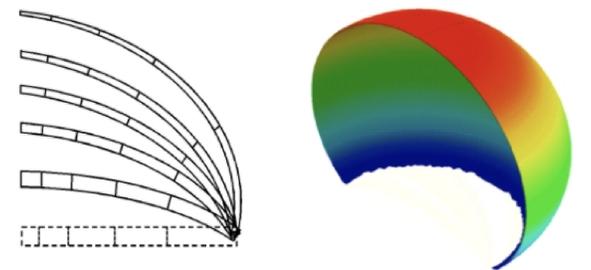


그림 8. 초탄성 재료를 이용한 기하학적 비선형 해석

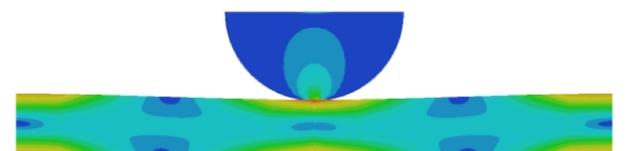


그림 9. 접촉비선형 해석

## 5. 맺음말

midas MeshFree의 정렬격자 기반의 최신 해석 기술은 모델 간략화 및 이상화 없이 3D CAD 원형을 그대로 해석할 수 있는 기술이며, 강성, 강도, 진동, 열전달 및 열응력, 내구수명 그리고 최적화 기술까지 제공하고 있어 초기 설계단계에서 다양한 설계 안에 대한 제품의 성능을 설계 엔지니어를 중심으로 검토할 수 있는 혁신적인 해석 기술입니다. midas MeshFree는 설계 초기 단계에서 제품의 제반 성능을 정량적으로 예측하고 최적 설계를 달성할 수 있도록 지원하여 설계 시간 및 비용을 절감하고 혁신적인 설계안을 도출할 수 있도록 개발된 제품입니다.