Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 9 pp. 425-435, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.9.425
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

오픈소스 솔버(Calculix, Code_Aster)를 통합한 구조해석 시뮬레이션 전·후처리기 개발

서동우, 김재성*, 김명일
한국과학기술정보연구원 가상설계센터

Pre/Post processor for structural analysis simulation integration with open source solver (Calculix, Code_Aster)

Dong-Woo Seo, Jae-Sung Kim*, Myung-Il Kim
Division of M&S Center, KISTI

요 약 구조해석은 대기업뿐 만 아니라 중소·중견기업에서도 제품 납품을 위한 인증절차의 강화 및 개념설계에서 상세설계로 진행되는 프로세스에서의 시간 단축을 위해 시험과 함께 필수 절차로 활용되고 있다. 적은 비용으로 활용이 가능한 오픈소스 솔버는 자동으로 전처리 데이터를 생성해주는 상용 솔버와 다르게 격자와 같은 입력데이터가 문제가 있을 경우 계산단계에서 오류나 실패하는 경우가 빈번하게 발생할 수 있기 때문에 비 전문가가 활용하기가 어렵다. 본 논문에서는 기존의 구조해석 오픈소스 솔버(Caculix, Code_Aster)를 이용하여 사용자가 손쉽게 기계적 구조 문제의 분석에 활용이 가능한 전·후처리기를 개발하였다. 특히, 3D 모델, 격자, 시뮬레이션 조건, 결과 정보 분석 등의 각 단계에서 오픈소스 솔버에 따라서 상이한 형태의 데이터를 분석하고 그에 맞는 정확한 정보를 추출 및 생성하는 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 또한, 오픈소스 솔버의 계산 정확도를 높이고 오류를 방지하기 위하여 솔버 특성에 맞는 격자를 생성해주고 격자 모델의 자동 힐링 기능을 개발하였다. 마지막으로 해당 시스템의 정확성을 검증하기 위하여 사용소프트웨어와 비교한 검증 결과와 활용 결과를 설명한다.

Abstract Structural analysis is used not only for large enterprises, but also for small and medium sized ones, as a necessary procedure for strengthening the certification process for product delivery and shortening the time in the process from concept design to detailed design. Open-source solvers that can be used atlow cost differ from commercial solvers. If there is a problem with the input data, such as with the grid, errors or failures can occur in the calculation step. In this paper, we propose a pre- and post-processor that can be easily applied to the analysis of mechanical structural problems by using the existing structural analysis open source solver (Caculix, Code_Aster). In particular, we propose algorithms for analyzing different types of data using open source solvers in order to extract and generate accurate information,such as 3D models, grids and simulation conditions, and develop and apply information analysis. In addition, to improve the accuracy of open source solvers and to prevent errors, we created a grid that matches the solver characteristics and developed an automatic healing function for the grid model. Finally, to verify the accuracy of the system, the verification and utilization results are compared with the software used.

Keywords : Calculix, Code_Aster, Open Source, Structural Analysis

1. 서론

급격하게 변화하여 경쟁이 과열되고 있는 국제 시장 환경에서의 경쟁력 확보를 위하여‘첨단 IT기술과 설계/제조기술의 활용’을 통해 기존 생산방식의 혁신을 도모하고 이를 바탕으로 우수한 제품을 양산하는 것이 기업

본 연구는 (2017년도) 한국과학기술정보연구원(KISTI) 주요사업 과제로 수행한 것입니다.
*Corresponding Author : Jae-Sung Kim(KISTI)
Tel: +82-10-8164-3416 email: jaesungkim@kisti.re.kr
Received August 21, 2017 Revised September 14, 2017
Accepted September 15, 2017 Published September 30, 2017

의 핵심 전략으로 제시되고 있다. 이러한 추세에 힘입어, 글로벌 기업들을 중심으로 제품의 양산 이전에 시공간의 제약조건을 뛰어넘어 가상공간에서 제품의 설계 및 생산과 관련한 일련의 작업들을 수행하는 새로운 형태의 설계/제조 환경을 적극적으로 도입하여 실용화에 주력하고 있는 것은 주지의 사실이다. 이러한 글로벌 경제 심화와 함께, 고객요구 조건의 다양화 등 빠르게 변화하는 경쟁환경의 정점에 서 있는 국내 제조 중소기업의 경쟁력을 높이기 위해서는 중소기업에 적합한 형태의 디지털 생산기술 개발이 매우 중요하다[1,3].

CAE는 Computer Aided Engineering의 약자로 컴퓨터를 이용하여 설계된 제품의 거동을 시뮬레이션하고 해석하는 기술이다. 각 부품 및 완성품의 형상, 물성 등 실제 시작품이 가지고 있는 모든 정보를 가지고 있어 설계된 제품의 사용조건을 시뮬레이션하며 요구조건, 성능, 수명을 평가하고, 제품의 조립에 문제가 없는지 평가함으로써 최적의 설계를 얻고자 하는 것에 목적을 두고 있다[1,2,4,8]. 이러한 CAE는 새로운 제품 설계/제조환경의 구축에 있어서 핵심적인 도구로 활용되고 있다. 일반적으로 CAE 시스템은 컴퓨터를 통해 모델링된 가상의 공간에서 설계 및 해석을 수행함에 따라 기존의 오프라인에서의 물리적 실험 테스트 기능을 최소화하고 디지털화된 환경에서 설계 및 검증이 가능하게 한다. 따라서 CAE해석은 시뮬레이션 시간과 프로토타입 수를 줄여, 기업의 생산성 향상을 위한 필수적인 과정으로 활용되고 있다.

특히 구조해석은 대기업뿐 만 아니라 중소·중견기업에서도 제품 납품을 위한 인증절차의 강화 및 개념설계에서 상세설계로 진행되는 프로세스에서의 시간 단축을 위해 시험과 함께 필수 절차로 활용되고 있다. 현재 국내에서 활용되는 해석 소프트웨어로는 ABAQUS[16], ANSYS [7], LS-DYNA[14]등의 구조해석 소프트웨어가 있으나 대부분 외산으로 전·후처리기 및 단일 솔버의 라이선스 비용이 크고 중소·중견기업 입장에서 해당 소프트웨어의 도입뿐 만 아니라 매년 지불해야 하는 유지보수비에 대한 부담이 크다[6].

비용구조가 비싼 상용 소프트웨어 대비 구조해석 문제에 대해 무료 혹은 적은 비용으로도 적합한 결과 도출이 가능한 오픈 소스 기반 구조해석 코드로는 대표적으로 Code_Aster[6,15]와 Calculix[10]의 구조해석 솔버를 활용하는 방법이 유럽을 중심으로 점차 활성화되고 있다[5]. 오픈소스 솔버는 자동으로 전처리 데이터를 생성해주는 상용 솔버와 다르게 격자와 같은 입력데이터가 문제가 있을 경우 계산단계에서 오류나 실패하는 경우가 빈번하게 발생할 수 있기 때문에 비 전문가가 활용하기가 어렵다. 본 논문에서는 기존의 구조해석 오픈소스 솔버(Calculix, Code_Aster)를 이용하여 사용자가 손쉽게 활용이 가능한 Fig. 1과 같은 기능을 가진 전·후처리기를 개발하였다. 특히 3D모델, 격자, 시뮬레이션 조건, 결과정보 분석 등의 각 단계에서 해당 오픈소스 솔버에 따라

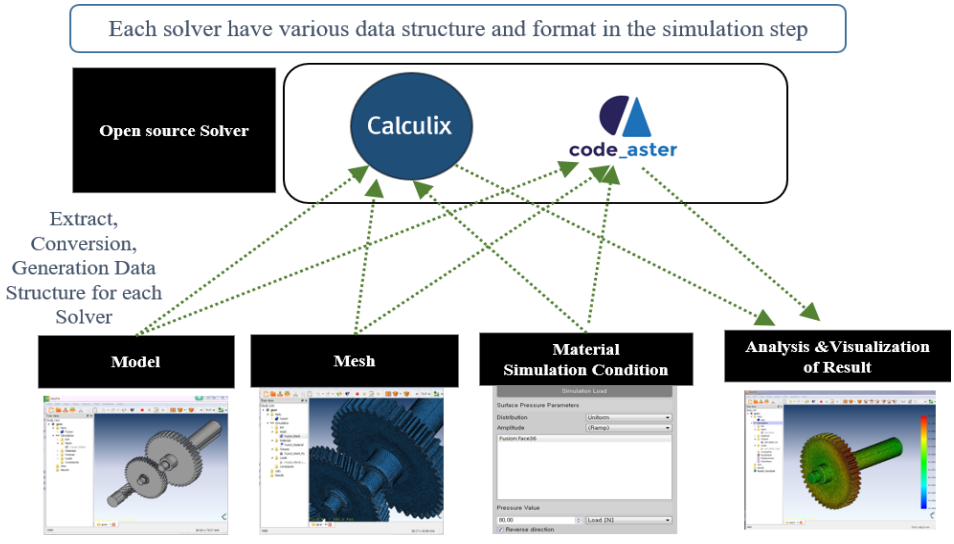


Fig. 1. The proposed pre/post processor integrated various open source solver

서 상이한 형태의 데이터를 분석하고 그에 맞는 정확한 정보를 추출 및 생성하는 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 또한, 오픈소스 솔버의 계산 정확도를 높이고 오류를 방지하기 위하여 솔버 특성에 맞는 격자를 생성해주고 격자 모델의 자동 힐링 기능을 개발하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안된 전·후처리기 시스템의 기능을 살펴본다. 3장에서는 제안된 전·후처리기 시스템의 모듈 구현을 위한 방법론과 개발 결과 등을 다룬다. 4장에서는 구현된 시스템을 설명하고 활용 사례를 보여준다. 5장에서는 해당 시스템의 정확성을 검증한 결과를 설명한다. 마지막으로 6장에서는 결론과 향후 과제를 제안하였다.

2. 시스템 구성 개요

2.1 오픈소스 구조해석 솔버

2.1.1 Caculix

Calculix은 Abaqus와 유사한 입력형식을 사용하는 무료 오픈 소스 유한 요소 해석 소프트웨어로써, 독일 MTU Aero Engine에 근무하던 엔지니어링 Guido Dhondt가 개발한 솔버(CCX)와 Klaus Wittig가 개발한 전/후처리기 (CGX)로 구성되어있다(Fig. 2). 소프트웨어는 리눅스 운영체제로 개발되었다. CalculiX의 주요 유한요소 해석 기능은 Table. 1과 같다.

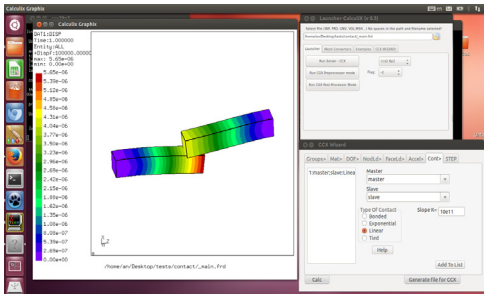


Fig. 2. Calculix Pre·Post Processor

Table 1. Coverages of Calculix Solver

Analysis Type	Function
Static	Linear
	Nonlinear geometric nonlinearities material nonlinearities
Frequency	Linear
Dynamic	Linear transient modal dynamics steady state dynamics harmonic periodic loading non-harmonic periodic loading
	Nonlinear implicit explicit
Buckling	Linear
Heat Transfer	steady state
	transient
Coupled thermomechanical analysis	steady state
	transient
steady-state networks Laplace and Helmholtz problems by analogy	Electrostatics Seepage flow Inviscid incompressible flow Lubrication Linear acoustics Shallow water waves Diffusion mass transfer

2.1.1 Code_Aster

Code_Aster는 1989년부터 개발된 무료 오픈 소스 유한 요소 해석 소프트웨어로써 프랑스 전력공사인 EDF 센터에서 원자력 설계의 안정성 검증을 위해서 개발한 구조 및 열역학 시뮬레이션 소프트웨어이다. 명령 파일 편집기인 Eficas를 제공하고 있으며 Fig. 3의 ASTK를 활용하여 생성한 해석 명령어를 솔버로 연동 처리하는 구조를 가지고 있다.

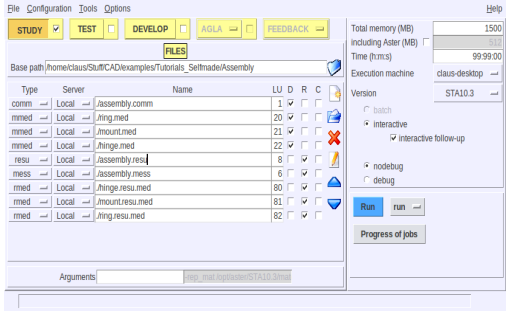


Fig. 3. Code Aster GUI

Code_Aster는 높은 수준의 병렬화를 지원하고 있어서 유럽에서는 대규모 문제를 해석하는데 일부분 활용하고 있다 Code_Aster의 주요 유한요소 해석 기능은 Table. 2와 같다.

Table 2. Coverages of Code_Aster Solver

Anlysis Type	Function
Static	Linear
	Nonlinear geometric nonlinearities material nonlinearities
Dynamic	Linear
	Nonlinear
Fracture	Damage
	Fatigue
Soil-Structure	Fluid Structure
	Soil-Fluid-Structure
Thermal	Stationary
	Transient
	Linear

그러나 위의 오픈 소스기반 코드의 경우 라이선스 비용이 발생되지 않지만 중소·중견기업에서 직접 해당 소스를 활용하는 것은 불가능하고 자동으로 전처리 데이터를 생성해주는 상용 솔버와 다르게 격자와 같은 입력데이터가 문제가 있을 경우 계산단계에서 오류나 실패하는 경우가 빈번하게 발생할 수 있기 때문에 비전문가가 사용할 수 없으므로 활용성이 매우 떨어지는 상황이다. 따라서 본 논문에서는 위의 구조해석 솔버의 전처리/후처리 단계를 통합 구성하여 사용자가 손쉽게 활용이 가능한 전·후처리기 시스템을 개발하였다.

3. 오픈소스 솔버(Calculix, Code_Aster) 를 통합한 구조해석 전 · 후처리 시스템

제안한 전·후처리 시스템은 오픈소스 구조 해석기를 바탕으로 중소기업 제품의 선형/비선형 구조해석 문제를 지원하도록 개발되었다. 제안된 시스템은 데이터 관리자, 자동 격자 생성기, 시뮬레이션 조건 관리자, 전/후처리 뷰어 모듈로 구성되며 각 모듈의 세부사항은 Fig. 4와 같다. 특히 각 모듈은 각 단계에서 생성되는 데이터를 솔버 각각의 특성에 맞도록 추출, 생성, 변환처리 해주는 역할을 한다. 이를 통해서 상이한 형태의 오픈소스 솔버의 전처리부터 후처리까지의 단계를 지원해준다.

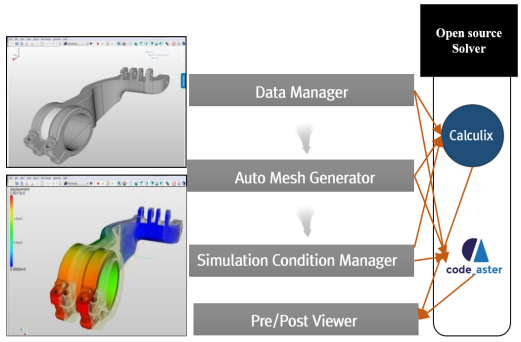


Fig. 4. System Module

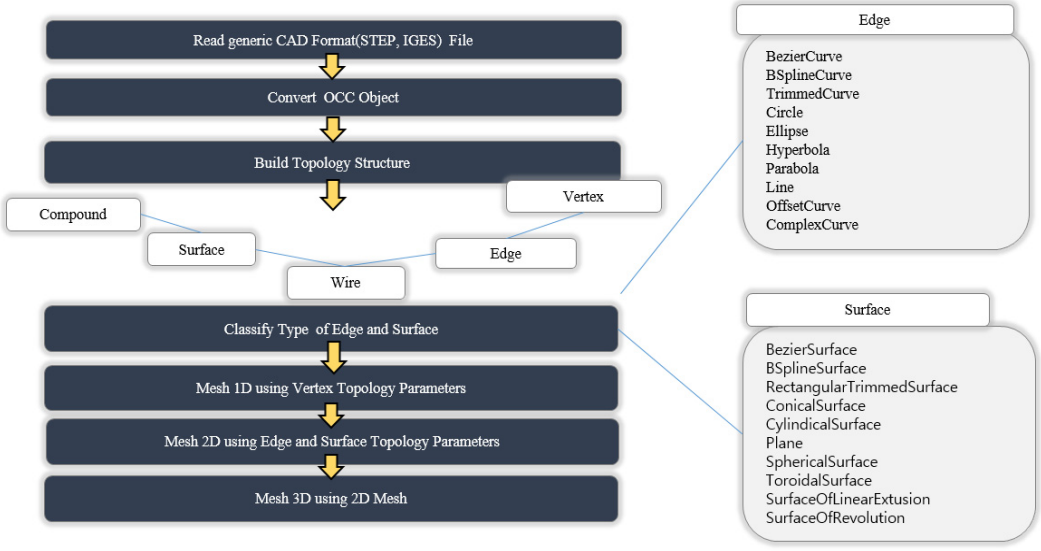


Fig. 5. Geometry based Mesh Generation Process

자동격자 생성기는 OpenCASCADE[9]와 CM2[17]를 활용하여 개발되었으며 형상이 가지고 요소를 활용하여 Fig. 6~11 프로세스처럼 최하위 요소인 Vertex부터 Edge, Surface 순으로 1D, 2D 격자요소들을 만들고 각 요소들의 공통부분을 통합하고 2차원상에서 만들어진 격자 요소들을 UV맵핑을 통해서 3D형상이 가지고 있는 3차원 공간으로 사상시킴으로써 최종 삼각형으로 구성된 3차원 Surface 격자를 생성한다. 마지막으로 3차원 Surface 격자 요소를 이용하여 내부가 채워진 4면체 볼륨 격자들을 생성하여 내부를 채움으로써 해석이 가능한 격자모델을 만든다. 이를 통해 각 솔버에 적합한 C3D8, C3D8I, C3D20 격자 요소를 생성해준다.

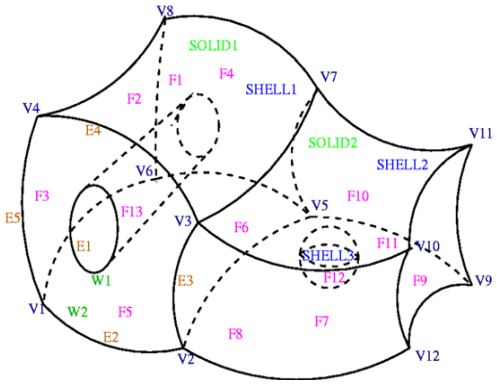


Fig. 6. BRep in Open CASCADE

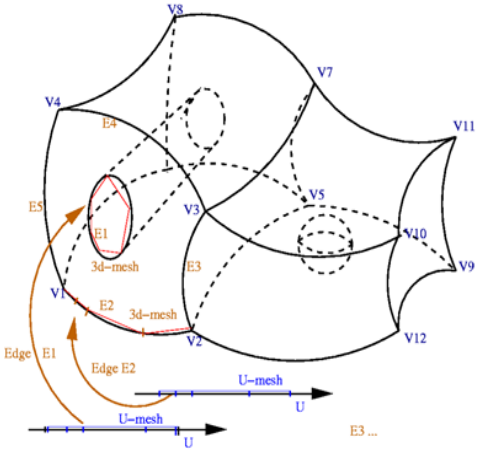


Fig. 7. Creation of U-Mesh and 3D-Mesh for each EDGE

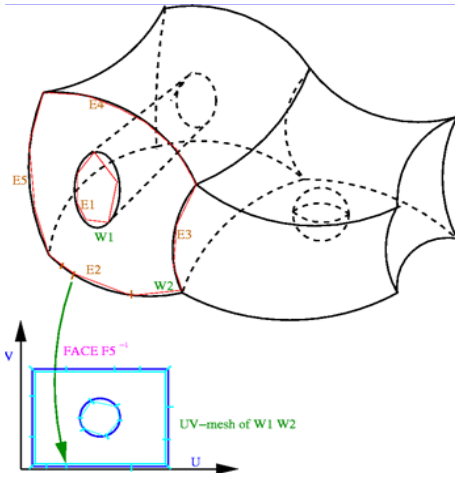


Fig. 8. Hole in Parametric UV space

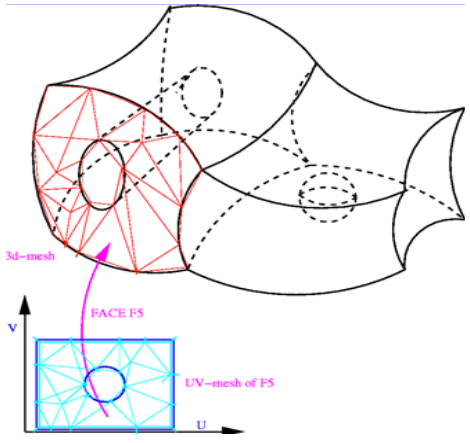


Fig. 9. Hole in Surface

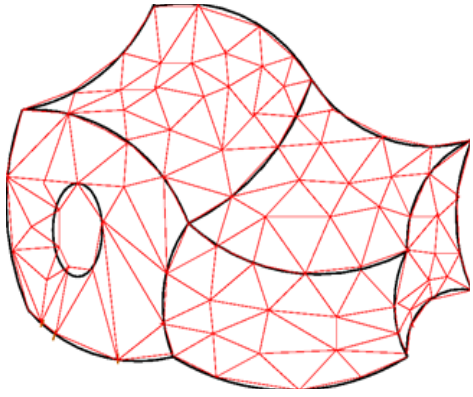


Fig. 10. Mesh of the Shape

상용 SW 솔버들은 계산 수행을 위한 격자 요소가 일부분 문제가 있더라도 이를 자동으로 수정해주는 기능을 내부적으로 포함하고 있다. 하지만 오픈소스 솔버는 시뮬레이션 계산시 가장 중요한 격자와 같은 입력데이터가 문제가 있을 경우 해석 계산에 오류가 생기거나 수렴이 안되어 중단되는 등의 전처리 단계에서 정확한 데이터를 생성해야 하는 큰 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 Fig. 12와 같은 방법으로 Gap, Hole, T-Joint, Sliver 등의 요소를 Free Edge를 기준으로 탐색하고 해당 요소에 의해서 야기된 공백, 겹침 등의 요소 정보를 수정함으로써 문제가 없는 격자 요소로 변환해준다. 이러한 과정을 통해서 해당 격자 요소의 문제점을 보완해줌으로써 오픈소스 솔버의 해석의 정확도와 계산 오류를 방지해주고 활용성을 높여준다.

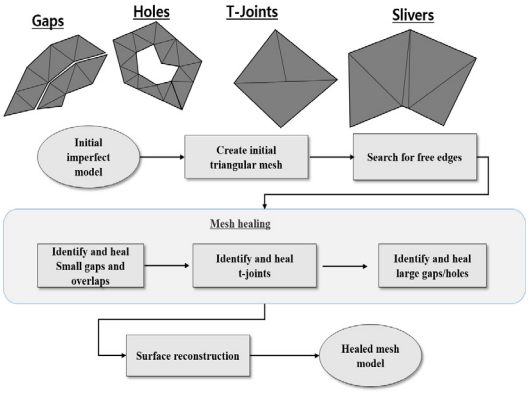


Fig. 11. Mesh Repair Process

시뮬레이션 조건 관리자는 Fig. 13과 같이 사용자가 원하는 해석 수행을 위한 재질, 형상고정, 하중, 접촉 조건을 설정하고 4면체 볼륨 격자로부터 해당 조건과 부합되는 요소 정보를 추출하는 기능을 담당한다.

해당 정보를 각 솔버에서 운용 가능한 형태에 적합하도록 데이터가 추출, 생성, 변환된다. Material 의 young's Module 이나 Contact 의 Spring Coefficient 와 같은 파라미터들은 솔버마다 표현하는 방법이 상이하고 복잡하다. 따라서 일반 사용자가 솔버의 특성을 공부하여 생성하기 어려운 부분을 자동으로 관련 정보를 추출하고 변환하여 생성해준다. 최종적으로 CalculiX에서 호환되는 .INP 파일과 Code_Aster에서 호화되는 .UNV와 .Med 형태로 추출 및 생성처리 하여 연동 정보가 생성된다.

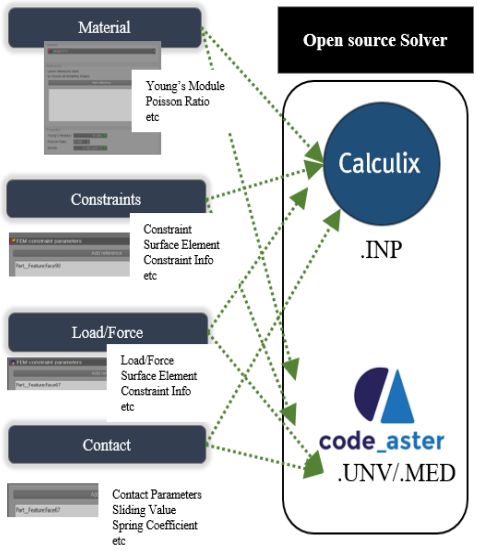


Fig. 12. Extract and Generate Simulation Condition Information

Table. 13과 Table 14는 Code_Aster와 Calculix의 형태에 맞게 생성된 Boundary Condition 스크립트 일부를 보여준다.

Table 3. Example of Code_Aster Simulation Condition Script

```
DEBUT();
MSleeve=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=193000,NU=0.
29,),);
MTube=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(E=200000,
NU=0.29,),);
MAIL=LIRE_MAILLAGE(FORMAT='MED',);
MAIL=MODI_MAILLAGE(reuse =MAIL,
MAILLAGE=MAIL,
ORIE_PEAU_3D=_F(GROUP_MA='load',),);
MODE=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MAIL,
AFFE=_F(TOUT='OUI',  PHENOMENE='MECANIQUE',
  MODELISATION='3D',),);
MATE=AFFE_MATERIAU(MAILLAGE=MAIL,
AFFE=(_F(GROUP_MA='Sleeve',
MATER=MSleeve,),_F(GROUP_MA='Tube',MATER=MT
ube,),),);
CHAR=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODE,
DDL_IMPO=(_F(GROUP_MA='holdz',
DZ=0.0,),F(GROUP_MA='hold3d',
DX=0,DY=0,  DZ=0,),),
PRES_REP=_F(GROUP_MA='load',PRES=300,),);
CHAR2=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MODE,
LIAISON_MAIL=_F(GROUP_MA_MAIT='Tube',
GROUP_MA_ESCL='fits'
TYPE_RACCORD='MASSIF',),);
RESU=MECA_STATIQUE(MODELE=MODE,
CHAM_MATER=MATE, EXCIT=(_F(CHARGE=CHAR,),
F(CHARGE=CHAR2,),),);
```

Table 4. Example of Calculix Simulation Condition Script

```
*SOLID SECTION, ELSET=Part1, MATERIAL = ABS
**MATERIAL, NAME=ABS
*ELASTIC, TYPE = ISO 2.0e+09,0.39400
*NSET, NSET = NRBE2CF_1
 2          4          6          8
*RIGID BODY,NSET = NRBE2CF_1,REF NODE =
237,ROT NODE = 238
**************************
**STEP - PROCEDURE1 - DOWNWARD
DISPLACEMENT
 **************************
*STEP, NLGEOM, INC = 100
* STATIC, DIRECT 0.01, 1.0
Boundary
NSPC_1,1, 1, 0.0
NSPC_1,2, 2, 0.0
NSPC_1,3, 3, 0.0
*CLOAD
```

시뮬레이션 관리자를 위한 오픈소스 GUI인터페이스는 QT[12]를 이용하여 개발되었으며 시뮬레이션을 위한 재질과 모델의 고정과 특정 영역에 대한 하중 등을 사용자가 지정할 수 있도록 하며 지정된 영역의 노드와 4면체 볼륨정보를 Matrix로 추출하여 솔버에서 계산이 가능하도록 해준다.

특히, 오픈소스 솔버와 연동하여 운용하기 위하여 기존에 격자생성기로부터 생성된 정보와 형상 정보가 연결되지 않은 영역을 연결하여 정보를 추출하여 오픈소스 솔버에 형태에 맞는 정보를 생성하기 위하여 Fig. 14와 같이 CM2[17]의 기본 생성격자의 색상정보를 추적하여 면과 격자 요소와의 연결성 정보를 구축하는 방법을 이용하였다.

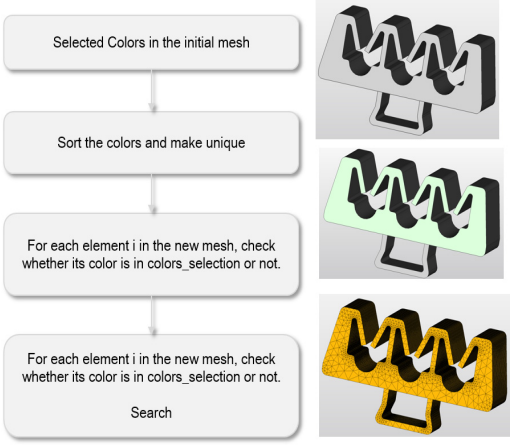


Fig. 13. Geometry and Mesh Connection

오픈소스 솔버(Calculix, Coder_Aser)는 상이한 결과 형태를 가지고 있으며 주 응력, 변위 등의 해석결과를 검토하기 위해서는 해당 데이터를 직접 분석하고 계산 처리해야 한다. 뿐만 아니라 상이한 형태의 솔버에 따른 가시화를 처리하기가 매우 어렵기 때문에 사용자가 이를 활용하는 일이 매우 어렵다.

따라서 본 논문에서 제안하는 오프소스 솔버를통합하는 후처리는 Fig. 15와 같이 상이한 오픈소스 솔버에서 계산된 결과의 구문을 분석하여 해석 결과 분석을 위한 데이터(Node, Element, Vector, Scalar) 등의 추출하고 이를 토대로 주 응력, 변위 등의 분석결과를 계산 처리해 줌으로써 사용자가 손쉽게 활용할 수 있도록 도와준다. 또한 CAD 데이터 관리자로부터 획득한 형상요소들을 효율적으로 자원을 관리하고 3차원으로 가시화할 수 있도록 Coin3D[11] Scene Graph 로 변환 및 가시화하는 역할을 한다.

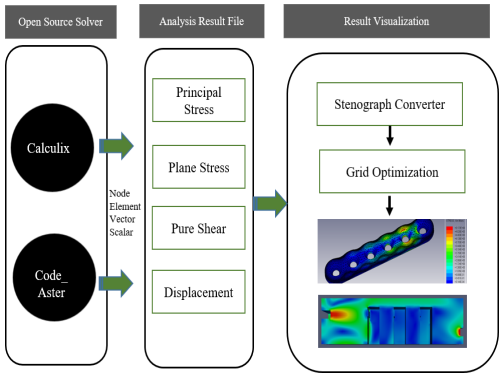


Fig. 14. Rendering Optimization

5. 구현결과

구현결과에서는 제시된 시스템을 바탕으로 KISTI 가상설계센터에서 기존에 상용S/W를 활용하여 지원한 기업의 모델을 대상으로 개발된 프로그램을 제공하고 이를 토대로 실무자들의 평가와 상용 S/W와의 비교결과를 비교하였다. 본 연구에서는 개발된 소프트웨어의 전체적인 기능의 구현된 결과를 설명하고 실제 현업에서 실무자들이 활용한 결과와 상용 S/W 와의 비교결과를 설명한다.

먼저 STEP AP203, IGES5.3 등의 산업체 표준 모델 정보를 분석하여 OCC 오픈소스 커널과 연동처리처리를

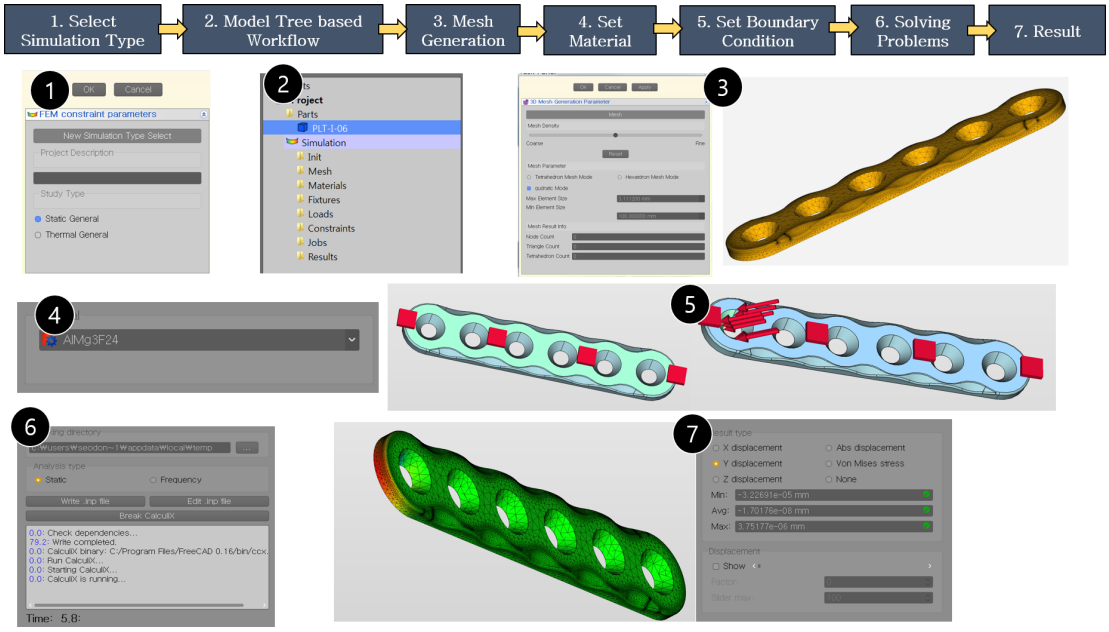


Fig. 15. Results of Implementation

한다. 분석된 CAD 파일의 요소 정보를 CAD 데이터관리를 통해서 CAD 모델이 가지고 있는 세부 정보들을 분석하고 해당 정보를 전·후처리기 뷰어에 연동한다.

시뮬레이션 수행을 위해서 Fig. 16과 같이 시뮬레이션 타입을 설정하고 구조해석을 위한 시뮬레이션을 시작하다. 시뮬레이션을 위한 타입 선정이 끝나면 왼쪽 작업창에 시뮬레이션을 위해서 필요한 격자, 물성치, 고정, 하중, 해석결과 등의 정보 트리가 생성되고 사용자가 해당 작업을 수행할 수 있는 기본 작업창이 수행된다. 생성된 작업 트리를 통해서 절차에 대한 지식이 없는 사용자들로 트리 목록의 순서를 따라서 작업할 수 있는 손쉬운 기능 제공한다.

사용자는 불러온 모델의 해석 수행을 위한 격자를 아래와 같은 인터페이스를 통해서 생성할 수 있으며 해석 목적에 따라서 격자의 조밀화 정도를 결정하여 격자를 생성한다. 격자정보를 생성한 후 해석 수행을 위한 여러 가지 조건을 설정한다. 먼저 모델에 대한 물성치를 선택하여 설정한다.

그 이후에 해석 수행을 위한 고정과 하중 등의 조건을 입력 처리한다. 고정과 하중 등의 입력처리는 형상에서 해당되는 영역을 사용자가 클릭하여 요소를 선택하게 함으로써 조건을 손쉽게 추가 및 삭제할 수 있는 인터페이스를 제공한다. 또한 부여된 조건에 대한결과를 화면에 표시해줌으로써 사용자들이 직관적으로 이해하고 활용할 수 있는 환경을 제공해준다.

사용자는 해석 조건을 설정한 후 이를 실제적으로 해석기가 계산할 수 있는 준비가 완료된다. 사용자가 솔버에 연동처리하기 위하여 솔버 연동 버튼을 클릭하면 연동되어 처리된다.

시스템은 솔버에서 생성된 결과를 이용하여 응력, 주응력, 변위 등의 정보를 분석하여 화면에 3차원으로 표시해줌으로서 사용자가 해석된 결과를 검토할 수 있게 해준다.

실제 실무에서 제품 시뮬레이션을 통한 정확성을 검토하기 위하여 Fig. 17과 같이 과거 M&S을 지원했던 420개 기업을 대상으로 설명회를 개최하여 그중에서 2개의 업체를 선정하였다. 소프트웨어의 사용자는 CAD 설계 지식이 있는 설계 엔지니어를 선정하였으며 해당 소프트웨어에 대하여 20분간 설명하고 실제 회사에서 개발되고 있는 제품에 대한 시뮬레이션을 수행하도록 하였다. 이를 통해서 수행된 부국산업 외 1개의 기업의 골접합용 모델(Table. 5)와 스웨이징 타입 브레이크 튜브 모델(Table. 6)에 활용해본 결과이다. 그 결과는 상용 S/W와 비교하여 경향 수준이 비슷하여 실제 문제에 활용이 가능하다.

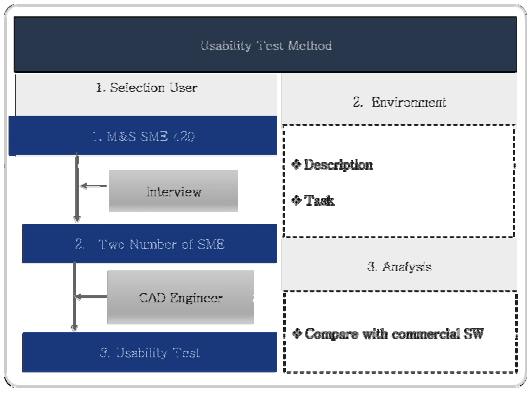


Fig. 16. Results of Implementation

Table 5. Case1 of Application

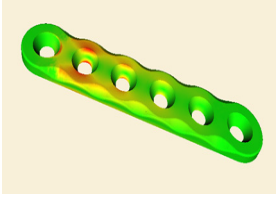
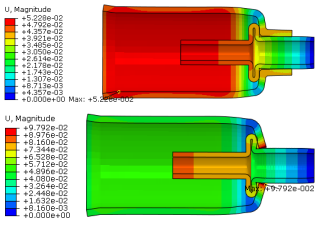
Object	Strength Analysis for Bone Joining System
Compared SW	Midas-NFX
Result	 S/W : Ansys 0.1%
Discussion	The result shows stress and displacement patterns similar to those of commercial S/W. It is considered that the result of this type is suitable for the purpose of comparing the structural performance of two models.

Table 6. Case2 of Application

Object	Structural characteristics of swaging type brake tube connector		
Compared SW	Midas-NFX		
Result			
	No	Type	Result	Error
	1	Maximum Stress[Mpa]	0.421	2%
		Maximum Displacement [mm]	0.14	2%
	2	Maximum Stress[Mpa]	0.693	2%
		Maximum Displacement [mm]	0.17	2%
Discussion	As with commercial S / W results for two model comparisons, Case 1 model shows the most structural stability			

5. 요소 별 정확성 검증

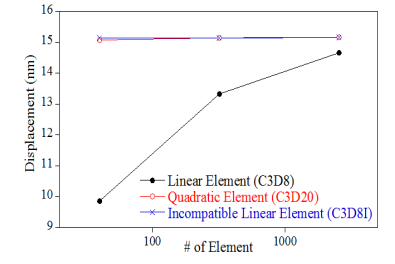
위의 활용 예에서는 해석 정확도의 수준이 높은 전처리 작업을 통해서 활용된 결과이기 때문에 다양한 요소 형태와 개수에 따른 정확성을 검증하기 위하여 구조해석의 가장 기본적인 해석방법인 선형 정적해석에 대해 여러 가지 해석 모델을 이용하여 추가적으로 검증하였다. Fig. 18은 Cantilever Beam과 해석 조건을 나타낸다. Beam의 크기는 100mm×5mm×10mm이고 재료 물성은 일반적인 alloy steel의 물성(E=210GPa, ν=0.3)을 이용하였다. 한쪽 끝은 세 방향의 자유도를 모두 고정하고 하중은 1N의 하중을 축 방향과 수직 방향으로 적용 하였다. 요소 개수를 40, 320, 2560개로 변화시켜가며 해석을 수행하였고 사용한 요소의 종류는 8-node brick 요소(C3D8), incompatible 8-node brick 요소(C3D8I), 20-node brick 요소의 3가지 이다. CalculiX는 C3D8, C3D8I, C3D20 요소, Midas NFX는 C3D8, C3D20 요소, Code_Aster는 C3D8, C3D8I, C3D20 요소, Midas NFX[18]는 C3D8, C3D20 요소를 사용하여 해석하였고 수치적분 방법은 모두 full integration을 이용하였다.

Table. 6은 수직 하중과 축방향 하중에 의해 계산된 변위를 나타낸다. Table. 6에서와 같이 해석에 사용된 요소의 종류 및 개수, 적분 방법을 동일하게 설정한 경우 해석된 변위의 값이 모든 솔버에서 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 19는 요소의 종류와 개수에 따른 최대 변위의 변화를 나타낸다. 구조물의 거동이 수직 하중에 의한 휨이 지배적인 경우에 선형 요소를 사용하면 변위가 요소의 개수에 민감하게 변화하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 구조물이 축방향 하중을 받는 경우에는 요

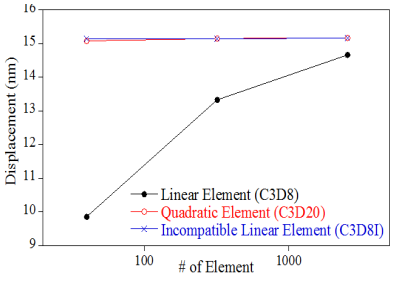
Table 7. Evaluation

# of Element		Vertical Force			Axial Force		
		Midas-NFX	CalculiX	Code-Aster	Midas-NFX	CalculiX	Code-Aster
Linear (C3D8)	40	9.853E-06	9.853E-06	9.853E-06	9.476E-09	9.476E-09	9.476E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
	320	1.333E-05	1.333E-05	1.333E-05	9.493E-09	9.493E-09	9.493E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
	2560	1.466E-05	1.466E-05	1.466E-05	9.500E-09	9.500E-09	9.500E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
Linear (C3D8I)	40	-	1.514E-05	1.514E-05	-	9.485E-09	9.485E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
	320	-	1.514E-05	1.514E-05	-	9.497E-09	9.497E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
	2560	-	1.516E-05	1.516E-05	-	9.501E-09	9.501E-09
			0.0%	0.0%		0.0%	0.0%
Quadratic (C3D20)	40	1.508E-05	1.508E-05		9.496E-09	9.496E-09	
			0.0%			0.0%	
	320	1.515E-05	1.515E-05		9.501E-09	9.501E-09	
			0.0%			0.0%	
	2560	1.517E-05	1.517E-05		9.503E-09	9.503E-09	
			0.0%			0.0%	

소의 종류 및 개수에 따라 계산된 변위가 상대적으로 민감하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 휨에 의한 변형을 1차식으로 근사하기 어렵고 축방향력에 의한 변형은 1차식으로 근사하기 쉽기 때문이다. 따라서 구조물이 휨에 의한 거동이 지배적인 경우 incompatible 선형 요소(C3D8I) 혹은 2차식 요소(C3D20)를 사용해야 안정적이고 정확한 결과를 기대할 수 있다.



(a) Normal Force



(b) Axial Force

Fig. 17. Variation of maximumdisplacement according to type and number of elements

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 기존의 구조해석 오픈소스를 용하여 중소기업에서 손쉽게 활용이 가능한 다음과 같은 특징을 가진 전·후 처리기를 개발하였다.

1) 형상처리, 격자 생성, 해석결과 가시화 등의 구조해석 전/후처리기
2) 해석시 오류와 실패를 방지하기 위한 해석 데이터의 힐링 및 전처리 기능
3) 상이한 구조해석 솔버의 특성에 맞는 형태의 해석 입력 데이터 추출 및 생성

마지막으로 실제 중소기업 제품에 적용해봄으로써 상용 S/W와 그 결과를 비교하여 활용성을 보여주었다. KISTI에서 과거에 상용 S/W를 활용하여 지원하였던 실제 제품모델을 대상으로 상용 S/W와 개발된 프로그램의 응력 등의 수치를 비교하였으며 그 결과 비슷한 정확도를 보여주고 비슷한 경향성을 보여줌으로써 프로그램의 높은 유용성을 보여주었다. 추후에는 유체해석 기능을 추가적으로 개발하고 클라우드 환경을 활용함으로써 언제 어디서나 해당 프로그램을 산업체에서 활용할 수 있는 환경을 개발할 예정이다.

References

[1] R, Suri,. and Hidebrant, R., *Modeling Flexible*

Manufacturing System, Journal of Manufacturing Systems, vol. 3, no. 1, pp. 27-38, 1997.

[2] J. H. Lim, K. W. Kim, S. W. Kim, D. S. Hwang, Technology Trends on Structural Analysis Software in Aerospace Industry, *Current industrial and technological trends in aerospace*, vol. 7, no. 2, pp. 59-67, 2009.

[3] Bang, Integration of PDM System and Web-based CAE Supporting System for Small and Medium Enterprises, *MSC Software 2013 Regional User Conference,* 2013.

[4] H. W. Park, D. W. Seo, S. M. Lee, T. H. Yoon, Resource Integration System for c-MES Platform Technology of Design Supporting, *Annual Spring Conference, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers,* 2014.

[5] Simscale Web service page, http://www.simscale.de/

[6] CodeAster Web service page,http://www.code-aster.org/

[7] Ansys Workbench homepage, http://www.ansys.com/

[8] N. Frish, D. Rose, O. Sommer, T. Ertl, "Visualization and Pre-processing of Independent Finite element Meshes for Car Crash Simulations", *The Visual Computer*, vol. 18, pp. 236-249, 2002. DOI: https://doi.org/10.1007/s003710100144

[9] Open CASCADE, https://www.opencascade.com/

[10] Calculix, http://www.calculix.de/

[11] Coin3D, https://bitbucket.org/Coin3D/

[12] QT, https://www.qt.io/

[13] LS-DYNA, http://www.lstc.com/products/ls-dyna

[14] Code_Aster, http://www.code-aster.org/

[15] Abaqus, http://www.3ds.com/ko/products-services/simulia/products/abaqus/

[16] CM2, http://www.computing-objects.com/en/meshtools.html

[17] NFX, http://www.nfx.co.kr/

서 동 우(Kil-Dong Hong) [정회원]

- 2008년 2월 : 전남대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2012년 9월 : 전남대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원

<관심분야>
VR/AR based post-processing, Digital Product Design, Collaboration Interaction, Service Strategy

김 재 성(Jaesung Kim) [정회원]

- 1999년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2013년 2월 : 한국과학기술정보연구원 선임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 책임연구원

<관심분야>
Modeling & Simulation, 제품설계, 슈퍼컴퓨팅, 제조혁신

김 명 일(Myungil Kim) [정회원]

- 2000년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술정보연구원 선임연구원

<관심분야>
Modeling & Simulation, 슈퍼컴퓨팅, 과학기술연구망