

# 특집 3 [슈퍼컴퓨팅의 산업체 응용 동향과 사례]

## 구조 해석 기술의 동향과 슈퍼컴퓨터 활용 사례

[글] 윤태호\*, 김호윤  
\*한국과학기술정보연구원 가상설계분석실  
thyoon@kisti.re.kr  
한국과학기술정보연구원 가상설계분석실  
hoyoonkim@kisti.re.kr

### 1. 서론

중소·중견기업에서의 제품개발을 위한 설계 검토 시간 단축은 제품 출시에 맞춰 사전 해당 시장 선점을 위해 필수적으로 요구되는 항목이다. 제품 판매를 위해서는 설계제품에 대한 실험을 수행하여 사용상의 문제점을 사전에 충분히 검토 및 개선해야만 한다. 하지만 해당 설계안의 검토를 위해 목업(mock-up) 제작 및 시험 장치의 구비 등에 시간뿐 만 아니라 비용의 문제가 따르게 된다. 따라서 실험 이외에 공학해석 시뮬레이션의 도움을 빌려 신속하고도 적은 비용으로 개발하고자 하는 제품 설계에서의 문제점이나 형상 및 재료의 개선점을 사전 확보하는 해석 기술은 중소·중견기업에게 효과적 제품 개발을 이끌도록 하는 대체 수단이 될 수 있다.

한국과학기술정보연구원의 가상설계분석실은 과학기술정보협의회(ASTI; <http://www.astinet.kr/>) 소속뿐만이 아닌 국내 중소·중견기업을 대상으로 제품 기술개발 지원을 위해 매년 슈퍼컴퓨팅 기술을 활용한 설계지원 컨설팅으로 주로 구조와 유동을 중심으로 한 공학해석의 모델링과 시뮬레이션을 수행한다. 이 중 구조해석이 필요한 제품 개발 기술지원의 경우 금속재, 복합재 및 고무재 등의 여러 재료에 따른 선형 및 비선형 정적 강도해석 또는 동적 거동해석, 피로해석, 진동모드해석, 좌굴해석 및 충돌해석 등으로

분류해 볼 수 있다. 제품 개발 시 물리 모사의 다양한 구조 변형 현상에 대해 본 분류를 기준으로 구조 해석을 위한 모델링 및 시뮬레이션이 요구된다.

본 기고에서는 지금까지 가상설계분석실에서 지원 하였던 구조해석 사례를 소개하고 여러 중소·중견 기업에서 개발하고자 하는 제품에 대해 공학해석 적용이 가능한지를 사전 검토할 수 있도록 기술자료로서 소개하고자 하였다. 추가적으로 물리모사의 정확성을 향상시키고 시험에 버금갈 수 있는 수준으로 시뮬레이션을 지원하였던 일체형 도어빔 및 원액기 착즙의 기술 개발에 사용된 슈퍼컴퓨팅 기술의 사례를 상세히 다루었다.

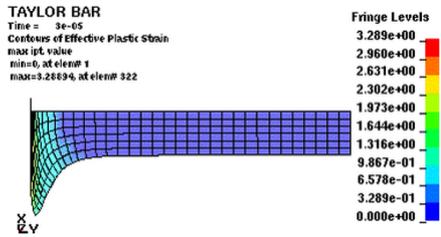
### 2. 구조해석 해법 소개

구조물에 대해 힘이나 열을 통한 외력의 하중 작용으로 변위와 변형율, 응력의 변화를 확보하기 위해 편미분 방정식을 푸는 수치해석 방법이 구조해석이다. 메쉬 기반인 유한요소방법(FEM; Finite Element Method)과 무메쉬 기반인 DEM(Discrete Element Method)이나 SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 방식 등이 구조 해석을 위한 해결 방법으로 사용되고 있다.

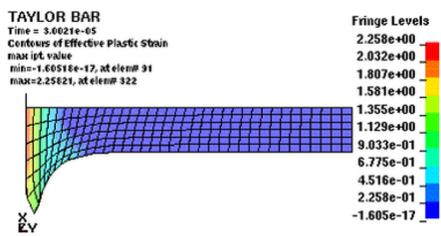
최근 클러스터 컴퓨터 또는 슈퍼컴퓨터 자원 및 병렬컴퓨팅 해석 코드 확장 등의 병렬컴퓨팅 기술의 진일보에 의해 구조해석이 유체의 압력 분포 결과와 구조해석 결과의 이음매 없는(seamless) 구조-유체 연동(FSI; Fluid-Structure Interaction)에 대한 해석과 고체-유체의 다상(multi-phase) 해석으로의 적용까지 효과적인 계산이 가능토록 구조해석 기술은 발전을 거듭하고 있다.

#### 2.1 구조해석 방법

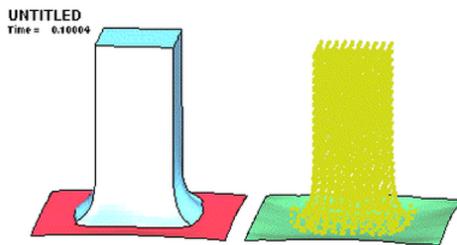
구조해석 방법을 위한 유한요소해석(FEA; Finite Element Analysis)은 1950년대부터 최초 구조해석에서부터 적용되기 시작하였다. 구조해석을 위해서는 유한요소방법으로 연속체에 대한 이산화를 위해 메쉬라고 하는 면 형상에 대한 2차원인 삼각형이나 사각형 요소와 입체 형상에 대한 3차원인 사면체, 육면체 등의 요소로 잘게 분할하는 모델링 방법이 이용된다. 유한요소 정식화의 수치해석을 위한 지배방정식은 가상변위법(virtual displacement method), 에너지법(energy method), 직접강성법(direct stiffness method) 등의 방법이 사용된다. 미소변위의 해석뿐



(a) 라그랑지안 방식 (메쉬 기반)



(b) ALE 방식 (메쉬 기반)



(c) SPH 방식 (무메쉬 기반)

그림 1. 구조해석의 수치기법 종류  
(<http://www.dynaexamples.com/>)

만이 아닌 시간 변화에 따른 충돌 등의 대변위가 동반되는 해석 범위까지 아우어글래스 모드(hourglass mode) 회피, 요소재생성(remeshing), 요소소멸(element erosion) 및 요소분리(element split) 등의 다양한 방식의 메쉬 기반 문제해결 방법들이 활용되어 최근까지도 지속적으로 발전되어 왔다. 물체의 변형이 크게 발생하는 문제에 대해서는 메쉬 기반의 라그랑지안과 오일러리안 방식을 혼합하는 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)방식이 사용되거나 크랙과 같은 분야에 적용하기 위해 XFEM(extended FEM)이 사용되기도 한다. 그리고 병렬컴퓨팅 기술

의 진일보에 의해 최근에는 구조해석을 1억 자유도 이상의 문제에 대해서도 신속하게 풀 수 있도록 물리 모사의 정밀도 향상을 통한 정합성을 이루고자 하는 기술로 발전되었다.

FEM 방식에 비해 계산 시간의 부담이 상대적으로 크지만 DEM이나 SPH와 같이 무메쉬 기반의 구조해석들이 점차 대변형 및 관통, 폭발 등이 발생하는 해석과 FSI, 구조-유체 상변화 영역까지 해석 범위를 확대되었다. 무메쉬 방식들은 고체나 구조물의 이산화를 위해 요소 메쉬 구성이 아닌 파티클의 집합을 사용하는 방식으로 커널함수(kernel function)와 같은 방정식을 직접적으로 적용하고 있다. 그림 1에서는 메쉬 기반의 FEM해석을 수행할 수 있는 라그랑지안 방식과 ALE 방식 그리고 무메쉬 기반인 SPH 방식에 대한 사각단면의 테일러 충돌 시뮬레이션을 LS-DYNA 소프트웨어의 예제로 소개하였다.

그리고 컴퓨팅 파워의 급신장에 따라 고체의 단일 상에서의 관통과 같은 분야뿐만 아니라 FSI 문제 해결 방법에 메쉬 기반과 무메쉬 기반의 결합을 통한 SPH-FEM와 SPH-FVM(Finite Volume Method), 무메쉬 방법들의 연동을 위한 DEM-SPH 등의 하이브리드 코드를 적용한 방식의 해석 범위 확장이 활발하게 연구되고 있다.

이러한 해석 방법의 변화는 중소·중견기업에서 개발하고자 하는 설계 프로세스 상에서 제품의 물리 모사 수준의 정합성을 확보하고자 할 때 계산 효율성을 높여 개발 검토의 신뢰성을 가져다 줄 수 있는 방법으로 발전될 것이다.

## 2.2 구조해석용 소프트웨어

외산용 구조해석 상용소프트웨어의 경우는 범용성을 갖춘 ABAQUS, ANSYS 및 LS-DYNA가 대표적으로 연구현장에서 활용되고 있으며 대부분의 구조해석 분야에서 모두 동등한 수준에서 활용될 수 있도록 모듈화 서비스 되고 있다.

우선 ABAQUS 소프트웨어의 경우 다쏘시스템에 인수 합병된 소프트웨어로 기본적인 선형 정적해석 이외에 비선형 정적거동과 내연적 방법의 시간변화

**특집 3 [슈퍼컴퓨팅의 산업체 응용 동향과 사례]**

동적거동에 주로 초점을 맞춰 서비스를 시작하였으며, 외연적 동적 거동에 대한 해석으로 그 범위를 넓혔다. 현재 삼성전자 등의 대기업을 비롯해 전 세계적으로 많은 사용자 층을 확보하고 있는 특징을 갖고 있다.

ANSYS 소프트웨어의 경우 국내·외 대학교 구조 해석 교육에서 많이 활용했던 소프트웨어로 구조-전기 등의 다중 물리에 활용하는데 유용한 것으로 알려져 있었다. 현재는 사용 편의성을 대폭 개선한 워크벤치(Workbench) 모듈을 서비스하여 사용자 층을 대폭 확대하였다.

LS-DYNA의 경우 외연 적분 방식으로 충돌 거동을 다루는 해석을 최초 시작하여 점차 내연 적분 방식으로 해석범위를 확장하였으며, 솔버 위주로의 개발을 수행하고 있으며, 대규모 병렬컴퓨팅 환경에서 유용한 것으로 알려져 있다.

이와는 다르게 유럽을 중심으로 Code\_Aster 등의 비용이 들지 않는 오픈 소스 기반의 구조해석 솔버의 코드들이 보급 중에 있다. 기존 상용소프트웨어가 다룰 수 있는 대부분의 영역에 대한 해석이 가능한 수준으로 개발이 이어져오고 있다. 그리고 오픈 소스 코드인 Salome-Meca로 사용자 편의성을 제공하기 위한 전처리기가 포함되어 사용성이 한층 나아졌다. 하지만 한국과학기술정보연구원에서 지원하는 ezSIM 플랫폼에서 사용하는 방법 이외에 아직까지는 중소·중견기업에서는 코드 설치 및 사용 복잡성과 기술지원을 받기 어려운 점으로 인해 활용이 거의 없는 것으로 판단된다.

국산 구조해석 소프트웨어의 경우는 대표적으로 MIDAS IT의 NFX라는 소프트웨어가 범용성이 확보되도록 개발되어 국내뿐 만이 아니라 해외에서도 사용자층을 확대해 가고 있다. 또한 인튜이션소프트웨어의 VisualFEA와 주로 다물체동역학에 활용하는 평선베이의 RecurDyn 소프트웨어도 국내·외로 저변층을 확장해 가고 있다. 그리고 연구실 수준에서 무료로 사용이 가능한 서울대 항공우주구조연구실의 IPSAP이 항공우주연구원을 중심으로 일부 중소·중견기업에 활용되기도 하였다.

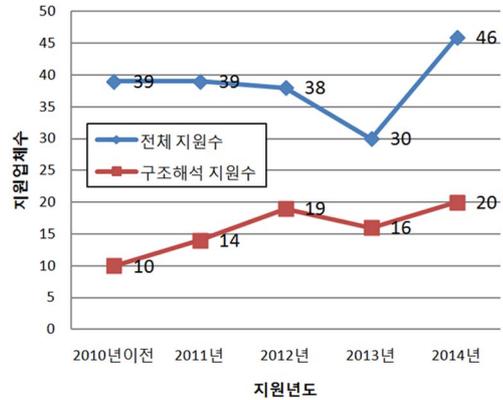


그림 2. 구조해석 지원 업체수(연도별)

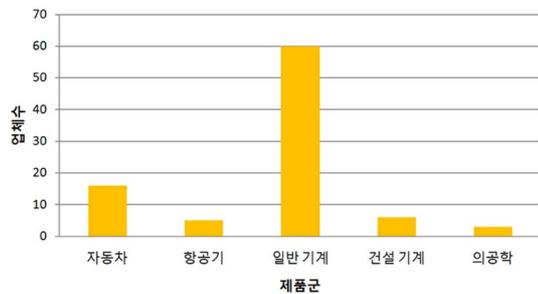


그림 3. 구조해석 지원 업체수(제품군별)

### 3. 구조해석 사례 소개

#### 3.1 제품군에 대한 분류

그 동안 가상설계분석실에서 모델링과 해석 지원을 수행하였던 중소·중견기업의 개발 제품군에 대해 그림 2에서와 같이 전체 지원수와 구조해석 지원수를 연도별로 분류해 보았다. 대체적으로 구조해석이 전체 지원 기업 중 50% 전후로 활용도가 높은 편이었다. 다음으로 그림 3과 같이 지원 요청한 제품개발 분야별 업체수를 살펴보면 자동차, 항공기, 일반기계, 건설기계와 의공학의 5개 그룹으로 크게 나뉘 볼 수 있으며, 그 중 일반기계의 업체수가 60개로 가장 많이 분포하고 있음을 알 수 있다.

제품군 중 항공기 적용 분야에 대한 사례로 살펴보면 그림 4에서와 같이 티타늄 금속재료 부품에 대

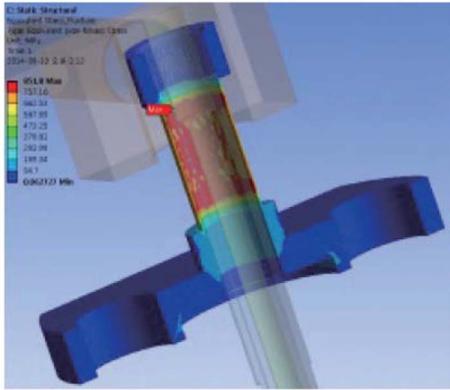


그림 4. 항공용 티타늄 부품의 응력 해석

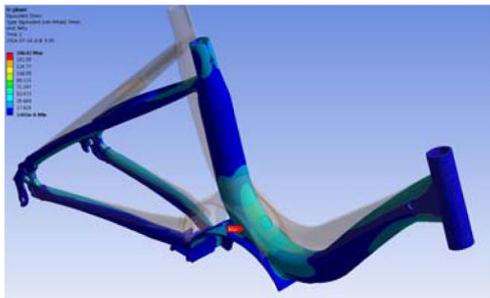


그림 5. 자전거 프레임의 정적 구조해석

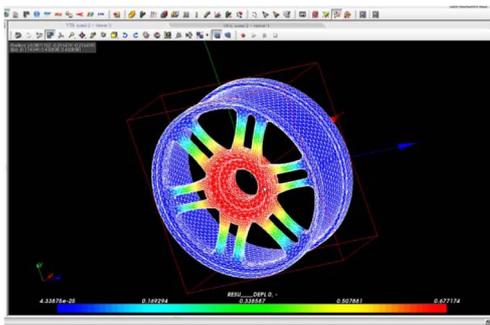


그림 6. 자동차 휠의 정적 구조해석

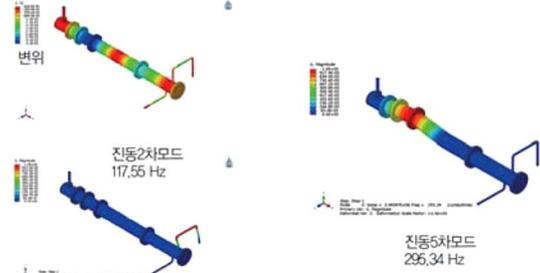


그림 7. 해양플랜트용 파이프의 진동해석

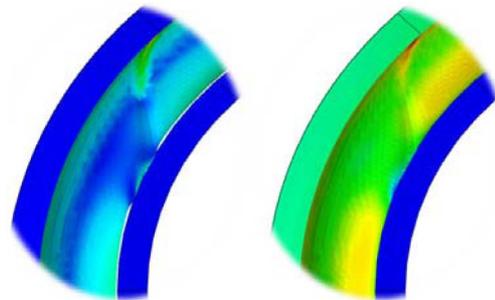


그림 8. 동관 파이프 내 고무오링의 공간차폐 (왼쪽: 초기, 오른쪽: 변형 후)

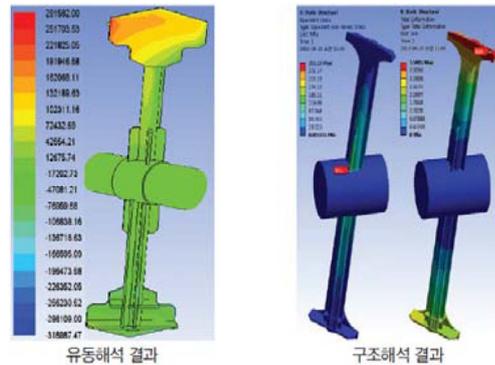


그림 9. 가속분노 이용 비료생산 교반기 샤프트 유체-구조연성해석

한 피로해석에 대해 ANSYS 소프트웨어로 수행한 결과가 있었다. 그리고 일반기계 분야 중에서는 전자 자전거에 대한 강도해석으로 그림 5에서와 같은 정적 구조해석을 마찬가지로 ANSYS를 사용해 수행한 바가 있었다.

### 3.2 해석별 지원 분류

그 동안 중소·중견기업을 위한 직·간접 해석 지원 사례들은 구조해석 소프트웨어를 기준으로 ANSYS 소프트웨어를 통한 지원이 57%로 가장 많은 부분을 차지하였다. LS-DYNA와 ABAQUS는

**특집 3 [슈퍼컴퓨팅의 산업체 응용 동향과 사례]**

각각 10% 미만으로 지원되었고, 오픈소스 기반인 Code\_Aster 코드를 사용한 사례도 5%를 차지하였다. 그림 6에서는 Code\_Aster 솔버를 사용한 Salome-Mech로부터 자동차 바퀴 휠에 대한 정적 강도해석 해석결과를 보여주고 있다.

구조해석에서는 시간의 반영 여부에 따라 동적해석과 정적해석으로 구분한다. 정적해석에 대한 비선형성의 경우 재료, 구조, 접촉조건 3가지로 나타나게 되어 선형해석과는 구분하게 된다. 구조해석의 목적에 따른 분류의 경우 강도해석, 열변형해석, 진동 모드해석, 피로해석, 좌굴해석, 충격해석과 강체운동 해석으로 나뉠 수 있다. 그 동안 가상설계분석실의 구조해석에 지원 중 선형 정적해석으로 수행된 강도해석 지원이 전체 구조해석 지원 중 67%의 가장 높은 해석목적에 해당되었다. 그림 7에서는 해양 플랜트용 파이프의 해석 목적 중 진동모드를 수행하였던 결과를 보여주고 있다. 그림 8에서는 초탄성재질로서 고무링을 사용한 동관 수도 파이프 이음 위치에서의 누수 체크 및 차폐에 대한 동적 해석을 수행한 결과이다. 그림 9에서는 비료를 생산하는 교반기에서의 샤프트와 패들 지지대에 작용하는 유동에 의한 압력으로부터 응력을 계산한 일방향(one-way) FSI에 대한 해석지원을 소개하였다. 이러한 일방향 FSI해석은 앞으로는 물리모사의 정합성을 높이기 위한 유연체 구조물에 대한 양방향(two-way) 유체-구조연동 해석지원 방향으로 그 서비스 범위를 넓혀가게 될 것이다.

**4. 슈퍼컴퓨팅 활용 성과**

슈퍼컴퓨터를 사용한 공학 해석 소프트웨어의 계산 기술은 제품의 물리현상에 대한 모사 수준이 실제와 가장 가깝도록 정합성을 향상시킨 시뮬레이션으로 발전시켜 갈 수 있는 원동력이다.

**4.1 슈퍼컴퓨팅 기술 지원**

TOP500(<http://www.top500.org>)에서는 매년 전 세계 슈퍼컴퓨터에 대한 계산 성능을 순위로 집계하여 국가 경쟁력을 제고 할 수 있도록 하고 있다. 국가

간 슈퍼컴퓨터 경쟁 개발은 컴퓨터 활용 모사 수준을 높이고 신속한 계산 능력으로 적기적소에 결과를 제시할 수 있도록 해 슈퍼컴퓨팅의 활용 영역을 넓히는 모티브로 작동되고 있다.

KISTI 슈퍼컴퓨터는 주로 학교와 연구소에 집중되어 천문, 물리, 화학 등의 기초과학에 대한 대규모의 연구 해석에 활용하고 있었지만 점차 가상설계분석실을 중심으로 국가 산업 근간인 중소·중견 제조기업에 그 사용 범위를 넓혀 가고 있다. 최근 KISTI에 도입 예정인 슈퍼컴퓨터 5호기에서는 중소·중견기업의 산업체 지원을 위한 자원이 할당되도록 계획될 만큼 산업체에서의 모델링 및 시뮬레이션 수요는 앞으로 기하급수적으로 늘어날 것이라고 예견되고 있다.

슈퍼컴퓨팅을 활용한 모델링과 시뮬레이션은 대량의 자원 사용이 가능함에 따라 물리 모사의 정합성



(a) 시험수행 전



(b) 시험수행 후

그림 10. 일체형 도어빔 장착 도어모듈 충격 시험/시뮬레이션

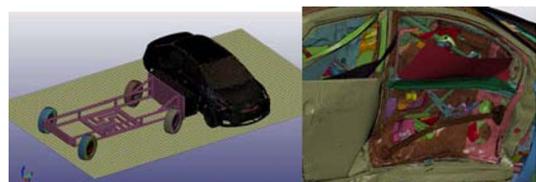


그림 11. YARIS 완성차에 일체형 도어빔 적용시의 FMVSS 214 측면 충돌 시뮬레이션

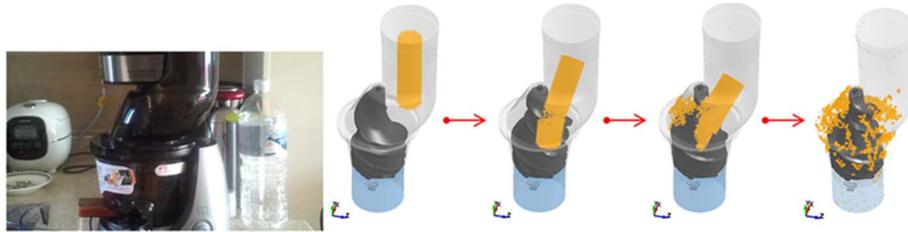


그림 12. SPH방식을 이용한 원액기 착즙 모사

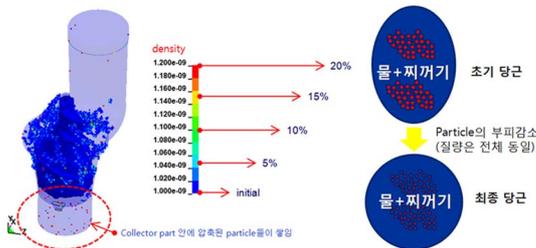


그림 13. 파티클 밀도에 의한 원액기 착즙 계산 방법

을 향상시킬 수 있어 제품 일부분의 상대적인 설계안에 대한 수치 비교 우위만을 검토하였던 방법에서 발전하여 완제품의 실험을 대체할 수 있는 수준의 가상시험으로까지 근접하게 되었다. 또한 업체의 경쟁력을 확보하기 위한 제품 개발 주기의 단축이 빨라지는 특성 상 제품 설계를 위한 신속한 해석 결과를 담보해야 할 경우에는 꼭 필요한 기술로 평가 받게 되었다. 다음의 두 종류 제품 개발 모델의 정합성 향상 사례를 통해 다른 중소·중견기업들에서도 제품 기술 개발의 시너지를 높이는 계기가 될 것이다.

#### 4.2 일체형 도어빔 기술 개발

20세기는 자동차의 고성능이 초점이었다면 21세기는 친환경이 타겟이다. 이는 연료의 화학 구성성분의 환경오염 물질의 정제 필요성 이외에도 연비에 대한 효율을 높여 CO<sub>2</sub>를 줄이는 기술까지를 필요로 하고 있어 부품 경량화가 화두다. 그리고 차량 성능과 친환경 조건이 동등하다면 소비자는 저렴한 가격의 합리적 자동차를 구매할 것으로 완성차 생산 공정의 개선을 통해 생산비의 비용 절감 기술도 확보

되어야 한다. 이와 같이 시대가 요구하는 조건에 합리적으로 맞추기 위한 기술들은 발 빠르게 추진되고 있으며, 이 흐름을 완성차와 함께 협력 부품 업체에서도 기술 개발을 일체화하여 유지해야만 전 세계를 대상으로 하는 완성차의 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다. 이를 위해 해당 제품을 생산하는 중소·중견기업의 제품 공정 개선 및 동등 성능의 경량화가 가능한 신기술 고장력강의 일체형 도어빔 기술 개발에 드는 시간과 비용 문제를 해결해야 한다. 다양한 도어빔 설계조건에서 최적의 충돌 성능을 갖는 도어빔을 개발하기 위해 재료시험과 그림 10에서와 같이 도어모듈 실험, 슈퍼컴퓨터를 이용한 모델링과 LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션으로 완성차 부분품인 도어 모듈의 측면 충돌 적합성을 검증하였다. 그리고 그림 11에서와 같이 최종적으로 완성차 측면충돌 시험의 가상시험까지 확장하여 평가할 수 있는 기술로 진행할 수 있게 되었다.

#### 4.3 원액기 착즙 기술 개발

바쁜 현대 직장인들을 위해 간편하게 영양소의 파손 없이 과일즙을 갈아 마실 수 있도록 하는 제품이 나와 준다면 행복한 하루를 약속받게 될 것이다. 잘게 잘라야만 하는 과일의 착즙 방식 제품에서 통째로 과일을 착즙할 수 있는 원액기로의 기술 우위적인 제품 개발을 하여 내수뿐 만 아닌 해외 시장까지 성공적인 판로를 개척할 수 있다. 하지만 전 세계 시장을 선점하기 위한 소비자의 만족도를 높일 수 있도록 다양한 과일의 착즙되는 양을 최대로 높일 수 있는 적합한 스크류의 형상을 찾고자 하는 시도가 필요할 것이다. 이를 위해 가상설계분석실에서는 그림 12에서와 같이 고체상태인 과일을 유체 상

태의 과일층 상태로 상변화하는 실제 현상의 물리 모사 수준을 확보하고 착즙량을 계산할 수 있는 슈퍼컴퓨팅을 사용한 과일의 모델링 및 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 또한 그림 13에서와 같이 과일 착즙량 계산 방법을 활용해 현재 본격적으로 통째 과일의 착즙률을 향상시킬 수 있는 적합 스크류 형상 기술 개발을 진행 중에 있다.

## 5. 결 론

성공적인 중소·중견기업의 제품개발 지원을 위해 한국과학기술정보연구원은 매년 지원업체에 대한 선발을 통해 슈퍼컴퓨팅 활용 모델링과 시뮬레이션을 지원해 주는 사업을 수행하고 있다.

본 기고에서는 제품개발을 위해 구조해석을 활용하고자 하는 중소·중견기업뿐만 아니라 구조해석을 위한 수치해석에 관심을 갖고 있는 학·연 대상자들에게 구조해석과 관련된 전반적인 해석기술 동향을 제공하고자 하였다. 이를 위해 가상설계분석실에서 그동안 지원하였던 중소·중견기업에서의 구조해석 분야에 대한 지원사례를 분류하여 소개하였다. 그리고 슈퍼컴퓨팅 기술을 활용해 개발 제품의 물리 모사의

정합성을 높일 수 있는 정밀 수치해석을 통한 개발 적용 성공 사례를 상세하게 다루었다.

따라서 신규 중소·중견기업에서 성공적인 제품개발을 단기간에 적은 비용으로 구조해석을 활용할 수 있도록 하는 R&D 개발방향에 대한 적절한 기술 정보가 될 것으로 기대해 본다.

## 참고문헌

1. 김재성, 김호윤, 윤태호 외 4인, 슈퍼컴퓨팅 M&S 지원사업 성과사례집, 한국과학기술정보 연구원, ISBN 978-89-294-0640-0, 2014.12, P226.
2. 임재혁 외 3인, “항공우주산업 구조해석 소프트웨어 기술동향”, 항공우주산업기술동향, 7권 2호, 2009, pp.59-67.
3. 윤태호 외 4인, “중소·중견기업을 위한 사용자 친화형 웹 기반 ezSIM 플랫폼 개발”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제20권 1호, 2015, pp.65-74.
4. Klaus-Jürgen Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, 1995, P1029.
5. G. R. Liu, M. B. Liu, Smoothed Particle Hydrodynamics- a meshfree particle method, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 981-238-456-1, 2003, P445.