



타이어 CAE 해석 소개

An Introduction to Computer Aided Engineering of Tire



곽현구 • 한국타이어
Hyun-gu Kwak • Hankook Tire Co. Ltd.



김주환 • 한국타이어
Joo-hwan Kim • Hankook Tire Co. Ltd.

우리는 참으로 급격히 변화되고 있는 사회를 살고 있다. 이와 같은 변화에는 다양한 이유가 있을 수 있겠지만, 컴퓨터의 발달과 함께 쏟아져 나온 다양한 소프트웨어로 인해 우리 생활이 빠르게 변화 했음은 부인할 수 없는 사실이다. 컴퓨터와 그 소프트웨어는 우리 생활 분야 전반에 걸쳐 다양한 형태로 이용되고 있는데, 이들이 제조분야에 적용된 것 중 하나가 CAE (Computer Aided Engineering) 기법이다. 이렇게 CAE가 제품 개발에 활용되면서, 제품 설계 단계에서부터 제품의 성능을 예측할 수 있게 되어 개발 시간의 단축과 함께 개발·제조 비용의 절감을 달성할 수 있게 되었다.

컴퓨터를 활용하는 CAE 기법은 제조업 분야 중 하나인 타이어 산업에서도 활발하게 그 적용이 이루어지고 있다. 자동차의 개발 기간이 단축되고 소비자들의 다양한 요구가 빠르게 변함에 따라 이에 맞는 타이어를 개발하기 위하여 CAE의 적용이 필수적인 요소가 되고 있는 것이다.

본 글에서는 이러한 배경들을 바탕으로, 현재 타이어에 적용되는 CAE 기법의 특징과 이를 이용한 CAE 해석 사례, 그리고 향후 CAE 발전 동향을 살펴보고자 한다.

1. 타이어 CAE 해석

1.1. 타이어 CAE 해석의 특징

타이어 CAE 해석에는 일반적인 CAE 해석과는 다른 특징이 존재한다. 타이어 CAE 해석에서는 여러

가지 비선형 요소가 존재하며, 이런 비선형성은 해의 수렴에 악영향을 끼칠 뿐만 아니라 해석 시간을 증가시키는 원인이 되기도 한다.

타이어 CAE 해석 시 고려해야 할 비선형성은 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 그 첫 번째는 기하학적 비선형으로, 타이어에 가해지는 하중에 의한 타이어의 대변형이다. 이것은 <그림 1>에 나타나 있는데, 타이어에 가해지는 하중으로 인해 지면과 닿기 전과 후, 그 형상이 비선형적으로 크게 변화하게 된다.

두 번째는 타이어에 사용되는 고무의 재료 특성상 비선형성이 존재한다. <그림 2>는 타이어의 승용차용 타이어의 일반적인 구조와 사용되는 재료들에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 타이어의 대부분은 고무로 구성되어 있다. 그런데, 타이어에 사용되는 고무는 비선형적인 대변형(초탄성) 거동을 하기 때문에, 해석자는 이것을 고려하여야 한다. 이러한 비선형성을 반영하기 위해 타이어 해석에서는 Strain Energy Density 함수로부터 유도된 Mooney-Rivlin 모델을 주로 사용한다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_1 - 3) + \frac{1}{D} (J - 1)^2$$

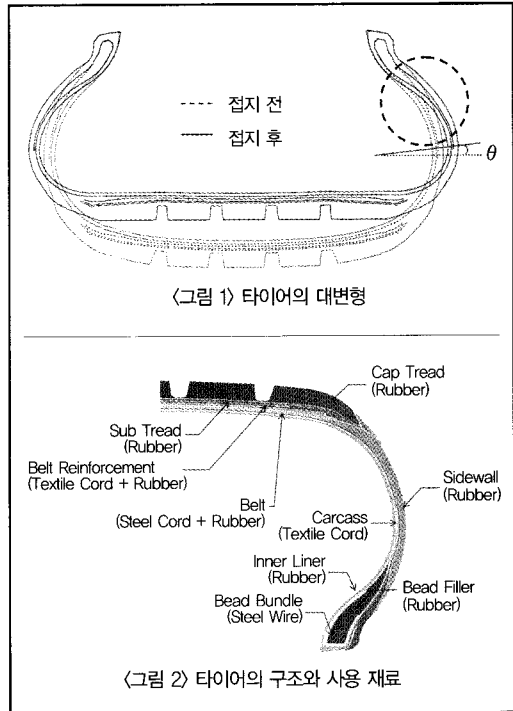
여기서, W 는 변형에너지를, C_{10} 과 C_{01} , D 는 재료 상수를 의미하며, \bar{I} 는 Deviatoric Strain Invariant이고 J 는 Elastic Volume Ratio를 나타낸다.

또한, 고무의 점탄성을 고려해야 할 필요성도 있다. 고무의 변형 때문에 발생하는 이력 손실에 의해 에너지 발산이 일어나게 되며, 이것은 다시 재료 내부의 열원으로 작용하게 된다. 주행 중인 타이어에는 변형과 회복이 반복적으로 일어나는데, 이러한 반복적인 변형으로 인해 타이어의 내부 온도가 상승하게 된다. 내부 온도의 상승은 타이어에 사용되는 재료 물성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이 점탄성을 고려하기 위한 간단한 모델로는 Maxwell이나 Kelvin 모델이 있다.

마지막으로 타이어 CAE 해석에는 상태변화 비선형이 존재한다. 이것은 접촉(Contact) 문제와 관련된 것으로, 서로 이웃하여 접촉된 두 개의 파트는 고정되지 않고 미끄러질 수 있다. 대부분의 문제에서는 이런 미끄러짐을 무시할 수 있으나, 물체가 움직이거나 마찰이 수반되는 문제에서는 미끄러짐의 고려 여부에 따라 해가 달라질 수 있기 때문에 이를 무시할 수 없다. 이러한 이유로 접촉되는 이들 두 파트 사이에는 비선형 경계 조건으로 접촉 조건이 부여된다. 타이어 CAE 해석의 경우에는 휠과 타이어, 타이어와 지면 사이에서 이러한 접촉 조건이 부여된다.

1.2. 개발 프로세스 상에서 CAE 해석의 역할

CAE 해석 분야가 타이어 개발 과정에 적용되기 이전에는 설계 및 제조, 시제품 평가를 반복적으로 수행하여 목표 성능에 맞는 타이어를 개발하였다. 이런 일련의 과정은 개발시간이 늘어나게 될 뿐만 아니



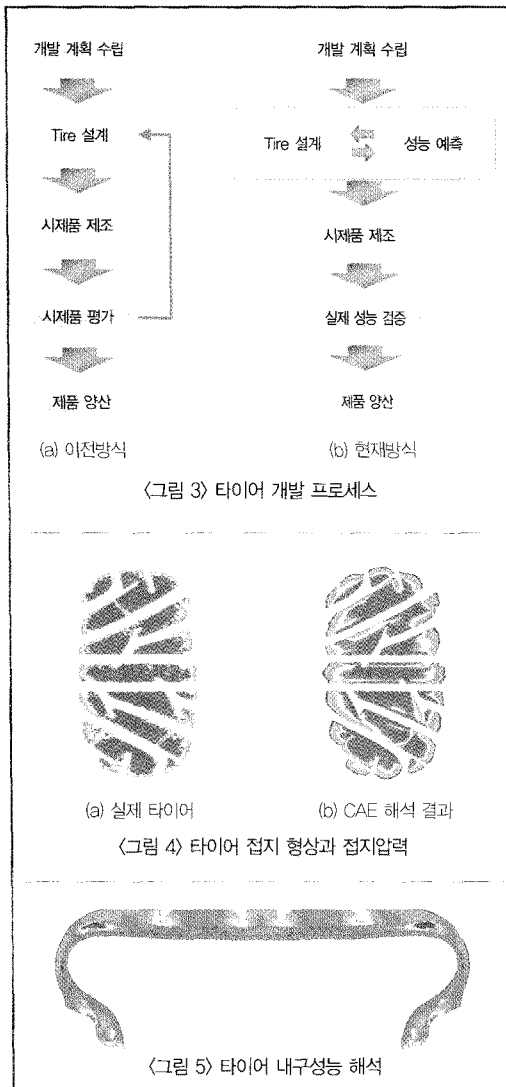
<그림 1> 타이어의 대변형

<그림 2> 타이어의 구조와 사용 재료

라 비용이 높아지는 문제점이 있었다. 그러나 CAE 해석 분야가 개발 과정에 적용되기 시작하면서 타이어를 설계함과 동시에 그 성능을 제조 전에 예측할 수 있게 되었다. 결과적으로 <그림 3>에 나타난 바와 같이, 설계, 시제품 제조 및 시험에 이르는 반복되는 과정을 줄일 수 있게 되어 개발시간 단축 및 제조·시험비용 감소라는 두 가지 목적을 동시에 달성할 수 있게 되었다.

1.3. 타이어 CAE 해석 응용 사례

현재 CAE 해석은 타이어의 정적·동적 상태, 그리고 다양한 노면 조건에서의 특성 해석에 활용되고 있다. 예를 들어 마른 노면이나 젖은 노면, 혹은 눈이 쌓인 노면에서 가속하거나 선회, 정지하는 등의 여러 가지 주행 조건에 따른 타이어 성능들이 CAE를 이용하여 예측되고 있다. 본 장에서는 수 많은 타이어 성능들 중에서 일부 성능들에 대한 CAE 적용 사례를 보이고자 한다.



● 접지형상 및 접지압력

(Contact Shape and Contact Pressure)

타이어가 지면과 접지되는 부분의 형상을 접지 형상이라고 하는데, 이 접지 형상은 타이어의 성능을 대변해 주는 중요한 요소가 된다. 그 이유는 접지 형상에 따라서 핸들링, 마모와 수막 (Hydroplaning) 등의 타이어 성능들이 크게 달라지기 때문이다. 따라서 이를 정확하게 예측해야만 원하는 성능의 타이어를 최종적으로 제조할 수 있게 된다. <그림 4>는 실제 타이어와 CAE 해석에 의해 예측된 타이어의 접지 형상을 보여주고 있다. 두 개의 접지 형상과 더불어 색으로 구분되는 접지압력 분포가 거의 같게 나타남을 알 수 있다.

● 내구 성능 (Durability)

타이어가 어느 순간 파손되어 제 기능을 수행하지 못하면 물질적 피해와 더불어 인명피해를 가져올 수 있기 때문에 타이어의 내구성은 반드시 확보되어야 할 성능 중 하나이다. 타이어의 내구성은 실제 시험을 통해서도 확인 할 수 있지만, CAE 해석을 통하면 좀 더 쉽고 빠르게 성능을 예측할 수 있다. <그림 5>는 FE 해석을 통해 얻은 타이어 단면의 응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 붉은 색은 해당 부위에 높은 응력이 걸리고 있음을 나타내며, 이는 곧 내구 성능이 불리함을 의미한다. 설계자는 이렇게 해석을 통해 내구 성능을 예측함으로써 문제 발생 가능성을 미리 제거하여 타이어의 안전성을 확보할 수 있게 된다.

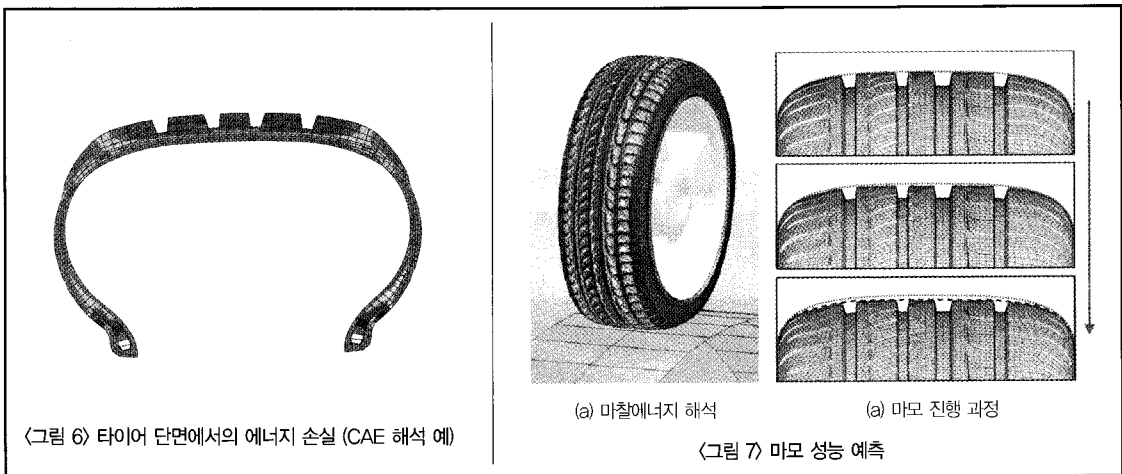
● 회전 저항 (Rolling Resistance)

현재 자동차 업계에는 지구 온난화 방지를 위해 CO₂ 배출을 줄이고자 하는 범규 제정과 더불어 연비 저감에 대한 요구가 증대되고 있다. 연비는 엔진 구동 및 전달계에서 발생하는 차량 자체의 에너지 손실 영향을 크게 받는다. 차량 자체의 손실보다는 상대적으로 더 작은 양이지만, 타이어에서도 주행 조건에 따라 에너지 손실 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 타이어 측면에서 볼 때, 이러한 손실이 발생하는 것은 3가지 정도의 요인에 기인한 것으로 판단된다. 주행 중인 타이어에서 발생하는 반복적인 변형, 노면과의 마찰, 공기 저항이다. 이렇게 타이어에서 발생하는 에너지 손실을 회전저항이라고 부른다.

타이어의 경우, 주행 중에 발생하는 반복적인 변형이 타이어에서 발생하는 회전저항의 90% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있으며, 회전저항 해석도 이에 대한 관점에서 진행되게 된다. 예측 절차를 살펴 보면, 우선 타이어의 3차원 변형해석을 통해 응력과 변형을 분포를 계산하고 그에 따른 에너지 손실을 계산한다. 최종적으로는 이렇게 예측된 결과를 활용하여 에너지 손실을 최소화하는 방향으로 타이어 설계가 진행된다. <그림 6>은 해석을 통해 얻어진 타이어 단면에서의 에너지 손실의 한 예를 보여주고 있다. 이러한 에너지 손실 분포는 타이어의 단면 구조나 재료 물성에 따라 다양한 형태로 나타나게 된다. 타이어 단면이 붉은 색에 가까워 질수록 그 부위에서 변형에 의한 에너지 손실이 크다는 것을 의미한다.

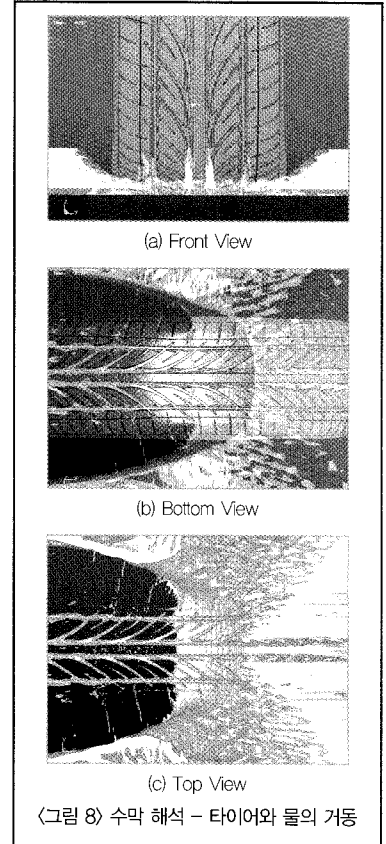
● 마모 (Wear)

타이어의 마모 성능은 타이어의 수명과 직접 관련되기 때문에 중요한 성능으로 꼽을 수 있다. 타이어와 지면 사이에서 발생하는 마찰력으로 인해 타이어가 지면 위를 굴러갈 수 있는데, 이 때 발생하는 마찰에너지가 타이어의 마모 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 마모 성능 예측은 유한요소 해석을 이용하여 다양한 구동 조건에 따른 마찰에너지를 계산한 후, 이 결과들을 종합하여 최종적으로 각 부위에서의 마모량을 예측한다. <그림 7>은 다양한 구동 조건에 따른 마찰 에너지 해석과 그 결과를 종합한 마모량 변화를 나타내고 있다.



● 수막 (Hydroplaning)

수막 현상이란 타이어가 우천으로 인해 젖은 노면을 고속으로 주행할 때 물의 유체역학적인 압력에 의해 타이어가 지면 위로 떠오르는 현상을 말한다. 수막 현상이 발생되면 운전자가 차량을 제어할 수 없게 되어 큰 사고가 발생할 수도 있다. 소비자들 또한 안전성을 요구함에 따라 수막 성능을 예측하고 그 성능을 향상시키고자 하는 노력이 필요하게 되었다. 수막 해석은 위에서 보인 해석들과는 달리 유체의 거동 또한 고려하여야 하기 때문에 단순히 유한요소 해석만을 이용하여 해결할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위하여 유체 해석을 위한 유한 체적법(FVM)을 도입하였고, 이 유한요소법과 유한 체적법을 함께 연계하여 (Coupling) 해석하는 방법이 사용된다. <그림 8>은 수막 해석을 통해 보여지는 타이어와 물의 흐름을 나타내고 있다. 그림에 나타난 것처럼 물과 타이어 사이의 관계가 사실적으로 잘 표현되고 있음을 잘 알 수 있다.



2. 제조업계의 최신 시뮬레이션 경향

CPDA* (Collaborative Product Development Associates)의 조사 결과를 보면, 미국 내 여러 분야의 제조업계에서 기업의 이윤을 증대시키기 위해 추진되고 있는 다양한 해석과 시뮬레이션의 적용 사례들을 살펴 볼 수 있다. 이들의 조사 결과로부터 현재 제조업계의 시뮬레이션 관련 이슈와 경향을 살펴 보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

2.1. 요구사항 관리와 성능 검증

기존의 시뮬레이션은 제품 성능 예측 및 검증 위주로 수행되어 왔다. 그러나, 부족 설계 및 과도 설계로 인한 품질 저하 및 비용 발생을 억제하기 위해서는 소비자나 시장의 요구사항을 관리하여 시뮬레이션으로부터 초기 컨셉 단계의 설계 품질을 확보하는 것이 필수적이다. 또한 다양한 요구사항의 상세 분류 및 성능과의 검증을 위한 연결들은 시스템적인 차원에서 관리되어야 한다. 이러한 요구에 의해 PDM(Product Data Management)과 연계된 시뮬레이션 관리 체계가 대두되고 있다.

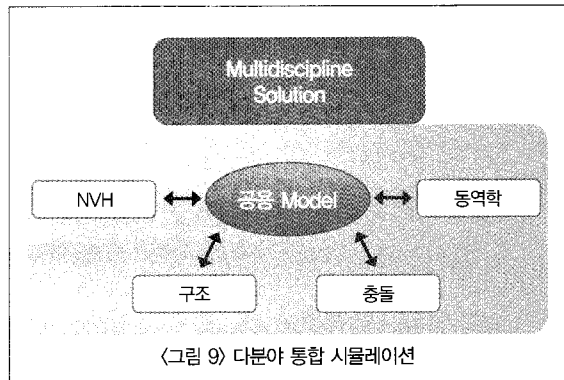
* CPDA (<http://www.cpd-associates.com/>) : Engineering (Manufacturing) 관련 S/W 및 Technology 분석 기관

2.2. 지식의 획득과 재사용, 표준적인 시뮬레이션 프로세스

초기 설계단계에서의 시뮬레이션에 의한 조기 성능 확보를 통해 제품 개발 전 과정에서의 비용 절감 달성이 가능해짐에 따라, 시뮬레이션의 확대 적용 및 이로부터 지식을 획득하고 다시 시뮬레이션 및 제품 개발에 재사용하려는 다양한 연구가 수행되고 있다. 시뮬레이션 전문가로부터 지식을 추출하여 표준적인 프로세스를 도출하고, 이로부터 템플릿(Template)에 기반한 해석 모델 생성 및 실행을 위한 자동화된 모듈로의 개발이 진행되고 있다. 시뮬레이션 프로세스의 템플릿화와 해석 결과로부터 획득된 지식의 효율적 관리와 재 사용을 위하여 CAE(Computer Aided Engineering)에 특화된 별도의 관리 시스템 구축이 필요하다.

2.3. 다분야 통합

다분야 통합 시뮬레이션이란 NVH, 충돌, 구조, 차량 동역학 등 다분야에 걸치거나 다양한 물리적 영향을 가지는 수학적 모델들에 대하여 하나의 통합 시뮬레이션을 수행하는 것으로(그림 9), 개별 솔루션 작업 환경 하에서 오는 중복 모델링 작업, 모델 변환 및 데이터 전달, 이로 인한 재 작업등을 피하고, 실제적으로 설계에 효과를 주기에는 너무 긴 작업 시간을 단축하고자 하는 노력들이 수행되고 있다. 이는 단일 솔루션을 사용하여 현재의 설계를 단지 검증하고 조사하는 수준의 기존 역할을 탈피하고, 미래에 요구되는 통합적인 설계 목표를 달성하는 시뮬레이션



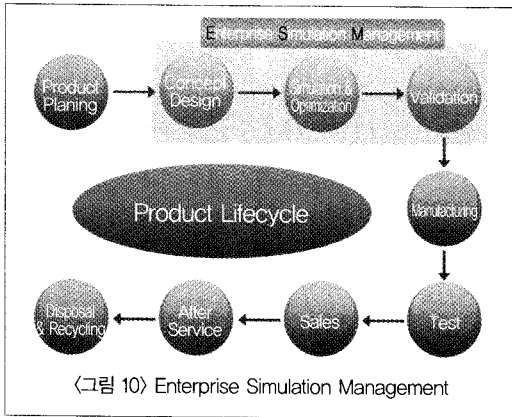
의 역할을 수행하기 위한 것이다. 단일 솔루션으로부터 다분야 통합 시뮬레이션으로의 진화를 위해서는 공통되는 프레임 워크에서 다분야에 사용될 수 있는 공통 모델을 가지고 다분야 해석을 수행할 수 있는 통합된 솔루션을 확보하거나, SDM (Simulation Data Management)을 통한 단일 솔루션 결과들의 연계가 필요하다.

2.4. 데이터 저장소

성능 또는 품질은 이전 프로젝트의 시뮬레이션, 시험, 운영데이터의 결과들의 재 분석을 통해 향상될 수 있다. 최소한의 비용을 통해 이를 구현하기 위해서는 프로젝트를 통해 산출된 결과와 설계, 시뮬레이션, 시험, 운영 데이터간에 완전한 통합을 이루어야 한다. 제품이 출시되거나 테스트를 시작하면 엄청난 양의 운영 데이터가 모이고, 이러한 데이터들은 내구성, 피로도, 복합적인 작용 효과 등 성능 예측을 검증하는 데 쓰일 수 있다. 그러므로 시뮬레이션 결과들을 분석하기 위해 데이터에 접근하는 기능의 고도화는 더 나은 품질, 유지비용 감소, 후속프로젝트개발의 핵심 인자가 된다.

지금까지 CPDA 조사를 토대로 현 제조업계의 CAE 동향을 살펴 보았다.

결과적으로 현재의 CAE 경향을 자세히 살펴보면 효율적인 시뮬레이션 적용 및 운영, 시뮬레이션으로부터의 지식 창출 및 재 사용 프로세스 구축으로 귀착됨을 알 수 있다. 이와 같이 시뮬레이션을 통해



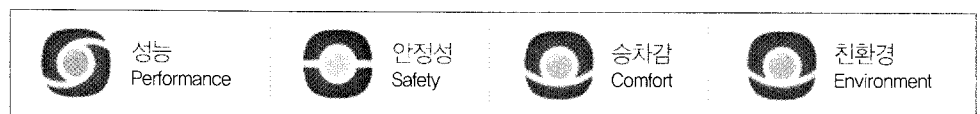
서 구해진 지식 및 Data를 저장하고 재사용할 수 있도록 하는 시뮬레이션 관리 시스템 구축에 대한 연구가 제조업계 전반의 중요한 흐름으로 세계적으로 새롭게 대두되고 있다. 최종적으로 이러한 시스템을 통해서 제품 개발과 연계된 시뮬레이션을 하나의 해석 전문가 영역에서 국한하지 않고 전사적으로, 전체 제품 개발 사이클에 걸쳐서, 쉽게 접근하고 수행 할 수 있는 시스템으로의 확장이 요구되고 있으며, 이것을 Enterprise Simulation Management (ESM) 라고 부른다. ESM의 개념을 〈그림 10〉에 나타내었다.

3. 결론

지금까지 CAE를 이용한 타이어 CAE 해석 특징과 사례, 그리고 발전 방향에 대해 살펴보았다. 현재, CAE를 이용한 타이어 특성 해석은 컴퓨터와 해석 기법이 더욱 발달됨에 따라 다양한 성능들에 대해 매우 높은 예측력을 보여주고 있다. 이렇게 컴퓨터와 해석 기법들이 발달함에 따라 CAE 해석뿐만 아니라 NVH, 동역학과 같은 분야에서도 CAE가 적극 활용되고 있는 추세이다. 이와 같이 다양한 CAE 적용 분야를 통합하고 과정을 표준화하여 제품 개발에 효율적으로 사용하려는 움직임이 SDM이나 ESM과 같은 시스템이다. 향후, 이런 통합 시스템을 통해 전반적인 제품 성능을 빠르고 정확하게 예측함으로써 개발 시간과 프로세스를 더욱 단축시킬 수 있을 것이며, 소비자의 다양한 기호가 반영된 더욱 진보된 타이어들이 등장할 것으로 기대된다.

4. 후기

당사의 타이어 CAE 해석 연구는 성능·안정성·승차감·친환경 최적화를 위한 KONTROL Technology 구축을 위해 추진되고 있습니다.



〈곽현구 대리 : hgkwak@hankooktire.com〉