



모듈 해석 기술

CAE Technology of Automotive Module



정원태 • 현대모비스
Wontae Jeong • Hyundai Mobis



안병재 • 현대모비스
Byungjae Ahn • Hyundai Mobis

1. 서론

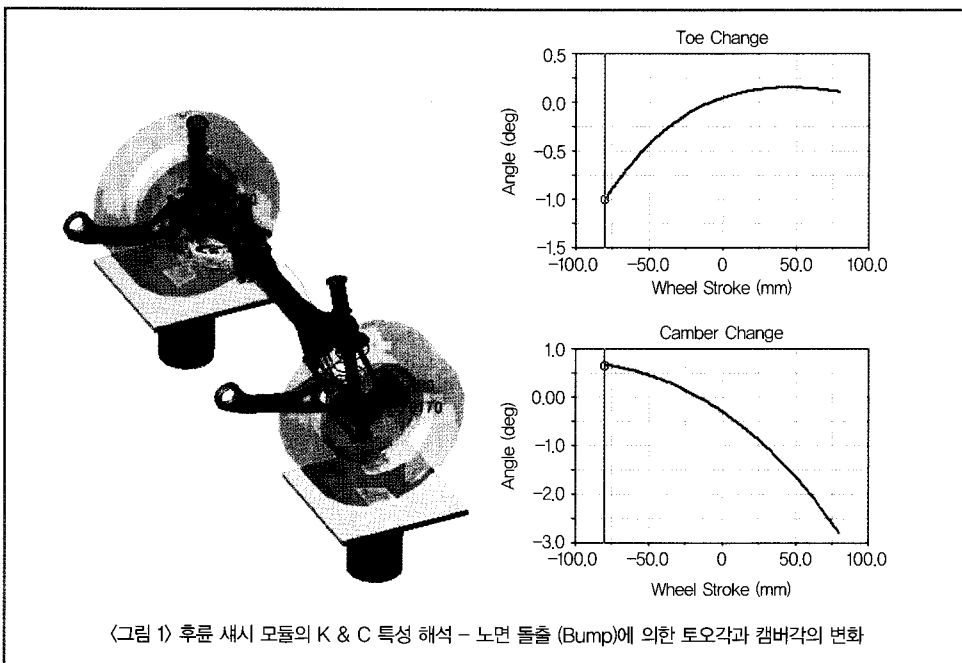
모듈화는 코스트다운, 개발 기간 단축, 품질 향상 등의 장점이 있지만, 이 장점을 자동차 업체와 모듈 업체가 실제로 향유하기 위해서는 다음과 같은 역량이 필요하다. 우선 요소 부품의 개발 능력, 이를 통합하는 모듈 개발 능력, 차량 상태에서의 성능을 평가할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 또한 단축된 개발 기간에 대응할 수 있는 모듈의 선행 개발 능력과 모듈 업체 수준에서 신기술을 개발하고 적용시키는 능력을 갖추어야 한다.

현재 차량 개발 프로세스는 시작차 없이 설계 검증을 수행하여 차량 개발 비용과 기간을 단축시키는 프로토타입(Protoless) 개발로 나아가고 있으며 이를 위해서는 모듈 업체가 다양한 평가에 대하여 신뢰도 높은 해석 기술로 사전 검증을 수행하여, 설계 단계에서 문제점을 찾고 개선안을 제시할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 본 특집에서는 모듈 개발 시 사전 평가 및 문제점 개선을 위한 핵심적인 도구로 자리매김한 해석 기술을 소개하고자 한다.

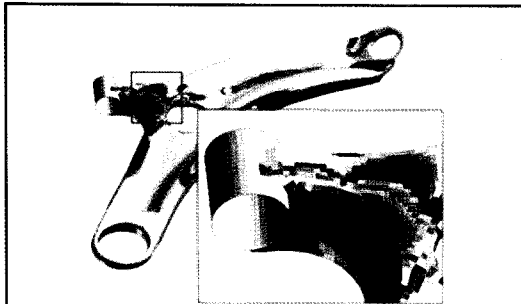
2. 새시 제동 모듈 해석 기술

새시 모듈은 주행 중에 노면으로부터 진동이나 충격이 차체에 전달되는 것을 감소시켜 승객에게 안락한 승차감을 제공하고, 선회, 제동, 구동 시의 차량의 조정 안정성을 확보하는 역할을 수행하는 동시에 내구성을 갖추어야 한다. 현가시스템의 성능은 K & C (Kinematic & Compliance) 특성 해석을 통해 검토하는데, Kinematic 해석은 조인트로 연결된 기구들의 상대 운동을 구하는 것이며, Compliance 해석은 부시, 스프링, 빔 요소에 의한 미소 변위를 구하는 것이다. K & C 해석을 통해 설계 단계에서 부품의 배치, 체결위치 및 체결 부시의 강성을 결정한다. <그림 1>은 노면 돌출(Bump)에 의한 후륜 타이어의 토오각과 캠버각의 변화량을 나타낸 것이다.

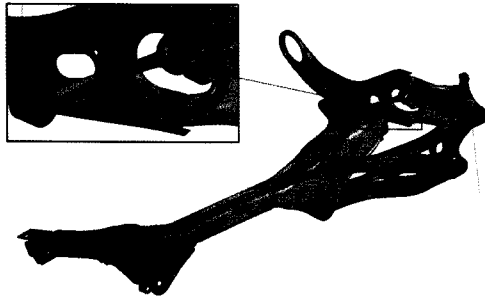
새시 모듈을 구성하는 각 부품들의 강도 및 내구 해석은 차량의 컨셉 및 특성이 결정된 후, 각 부품들의 상세 설계 단계에서 이루어지는데, 설계 스펙의 만족 여부 확인과 최적의 치수와 형상을 제시하는 최적안 도출을 목표로 한다. 개발 단계의 후반부로 갈수록, 설계 자유도가 줄어들고, 설계 변경 비용이 증가하므로, 도면 출도 이전에 반드시 해석적으로 스펙 만족 여부를 확인하고, 불만족 시 재설계를 수행하는 것을 개발 프로세스로 규정하고 있다. 모듈 수준의 내구 해석은 시작차로 실차 주행을 하여 얻어진 노면 하중 데이터를 이용한다. 가혹 노면 주행 시 타이어 휠에 가해진 하중이력은 작용 하중 계산을 통하여 각 부품의 연결점에서의 하중이력으로 변환된다. 각 부품 연결점의 하중이력을 이용하여 부품 별로 내구 해석을 수행하여 내구 취약부를 파악하고 내구 수명을 얻는다. 시작차를 이용한 새시 모듈 내구 시험의 결과를



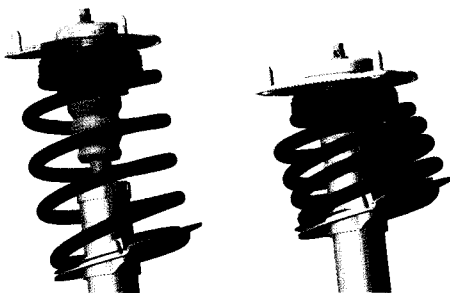
<그림 1> 후륜 새시 모듈의 K & C 특성 해석 - 노면 돌출 (Bump)에 의한 토오각과 캠버각의 변화



〈그림 2〉 전문 로어 컨트롤암의 내구해석
- 내구 수명 분포와 취약부



〈그림 3〉 멀티 링크 타입 후륜 새시 모듈의
정강도 해석 시 응력 결과



〈그림 4〉 휠 스트로크에 따른 사이드 로드 스프링의 변형 해석
(좌: 변형 전, 우: 변형 후)

이전 해석 결과와 지속적으로 비교하여 해석신뢰도를 높이는 데에 사용한다. 〈그림 2〉는 전문 로어 컨트롤 암에 가해지는 가혹 노면 내구 하중이력과 판재의 피로물성을 이용하여 내구 해석을 수행하고, 내구 수명의 분포를 나타낸 것이다.

모뎀 정강도 해석은 차량의 주행 중 지면을 통해 과도한 하중이 들어올 경우의 안정성을 확보하기 위한 해석이다. 이 해석은 전문·후륜의 모듈을 구성하고, 타이어나부터 극한 하중이 차량의 전방, 후방, 내향, 외향, 상향의 각 방향으로 들어왔을 때, 모듈 각 부품들의 좌굴과 부분적인 파단 여부를 검증하는 것으로 모뎀 정강도 평가에 대응한다. 〈그림 3〉은 멤버와 너클, 5개의 링크로 구성된 후륜 새시 모듈에 대해서, 타이어 접지점에서 차량의 후방으로 큰 하중이 작용할 때의 응력 분포를 예측한 것이다.

사이드 로드 스프링은 서스펜션 작동 시 댐퍼가 받는 횡력(Side Load)을 최소화시킴으로써 현가 특성을 획기적으로 향상시키는 새로운 개념의 스프링이다. 사이드 로드 스프링의 설계 시에는 스프링 장착각 및 시트 각도를 고려하여 댐퍼 피스톤의 사이드 로드 해석을 수행하고, 그 결과를 이용하여 스프링에서 발생하는 횡력을 최소화 하는 방향으로 스프링의 권선과 변화하는 형상을 설계한다. 〈그림 4〉는 사이드로드 스프링의 압축 시의 하중에 의한 변형을 나타낸 것이다.

자동차의 성능이 일정 수준 이상 넘어서게 되면, NVH(Noise, Vibration, Harshness) 특성이 중요한 고려사항이 되는데, 제동 모듈에서는 저더(Judder) 현상과 스켈(Squeal) 소음이 주요한 문제가 되고 있다. 저더는 제동 토크 변동(BTV, Brake Torque Variation)이 새시 전달계를 거쳐 조향 휠 회전 방향의 진동을 발생시키는 현상으로 알려져 있다. 최적화 기법, DOE(Design of Experiment) 분석 등을 해석에 적용해 제동 토크 변동을 억제하는 제동계의 개선안, 전달 특성을 개선하는

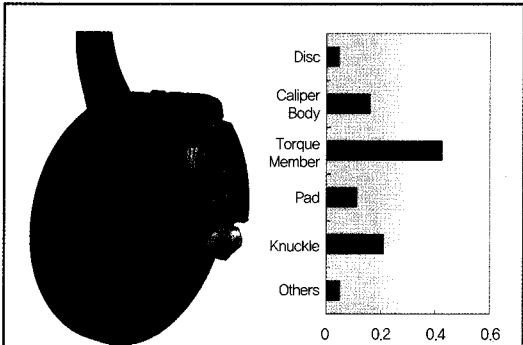
새시 전달계 개선안을 제시하여 저더 현상을 최소화하는 데에 기여하고 있다.

또 다른 문제인 스켈 소음을 해결하기 위해서는 시스템의 불안정성을 계산하는 복소 고유치 해석(Complex Eigenvalue Analysis)을 적용하고 있다. 기존에는 시간과 비용이 많이 들어가는 실차 평가나 브레이크 노이즈 다이내모 평가를 이용하였지만 복소 고유치 해석 기법을 도입함으로써 시간, 비용적 이득과 더불어 시스템 특성에 대한 보다 깊은 통찰이 가능해졌다. 스켈 현상 자체가 조건에 따라 민감하게 변화하고, 재현성이 부족하기 때문에 신뢰할 수 있는 모델의 개발이 쉽지 않다. 해석 모델의 신

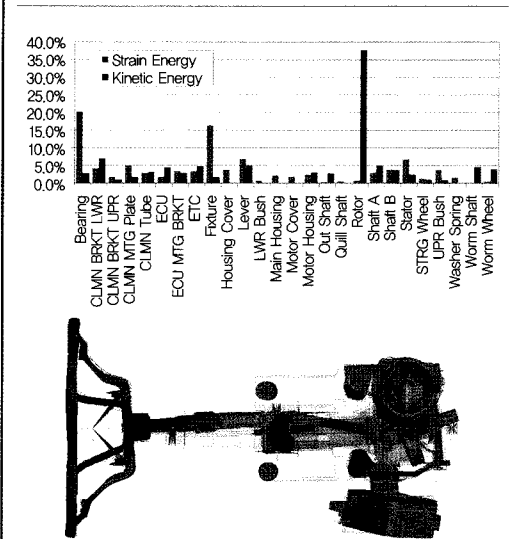
퇴성을 확보하기 위해서는 단품의 모달(Modal) 평가를 수행하고 모델의 튜닝을 통해 단품 단위의 정확도를 확보해야 한다. 그리고 부품 간의 연결 특성을 평가를 통해 확인하고 적절하게 모델링하여야 한다. 또한, 스킵 현상에 에너지를 공급하는 마찰재의 이방성 특성을 정확하게 반영하기 위해서, 초음파 장비 등으로 영울을 방향별로 측정하여 모델에 반영하는 것이 중요하다. 복소 고유치 해석은 스킵 발생 시 단품별 기여도 분석과 부품별 진동 모드를 식별할 수 있어, 정확하고 신속한 개선안 도출을 할 수 있다. <그림 5>에서는 해석을 통한 주요 부품 별 스킵 기여도 분석 결과를 보여주고 있으며, 토크멤버가 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 각 부품들의 모드 형상을 분석을 통하여 개선안을 도출할 수 있다.

MDPS(Motor Driven Power Steering)는 EPS(Electronic Power Steering)라고도 불리며, 유압 대신 모터를 이용하여 조향 시스템을 구동하는 장치로써, 점점 차량 탑재가 늘어나고 있는 추세에 있다. 조향 휠을 급격하게 조작하는 경우 모터에 의한 고조파 성분의 전자기력이 커지게 되며, 이에 의한 가진력이 조향 시스템 진동 특성과 결합하여 귀에 거슬리는 소음을 빈번히 발생시킨다. MDPS 작동을 해석은 수십 종의 부품으로 구성된 시스템에서 문제 원인을 쉽게 찾아내는 것을 가능하게 하며, 적은 시간과 비용을 들여 개선안을 도출할 수 있게 하는 유용한 방법이다. <그림 6>은 해석을 통하여 MDPS 시스템을 구성하는 부품들의 시스템 진동에 대한 기여도 및 모드 형상을 분석한 예로 기여도가 큰 부품과 문제 부위를 비교적 쉽게 파악할 수 있도록 해준다.

MDPS 작동을 해석은 크게 2 단계로 구성된다. 먼저 모터에 의한 가진력을 계산하고, 다음으로 1kHz 미만 영역에서 기어와 베어링 등의 연결 특성을 진동 모델에 적용하여 시스템의 진동 레벨을 계산한다. 차량 부품으로 사용하는 모터의 수가 증가하는 추세에 따라, 모터 가진에 의한 진동 소음을 저감하기 위한 해석의 중요성은 계속 증대될 것으로 판단된다.



<그림 5> 부품 별 스킵 기여도 분석



<그림 6> MDPS 작동음 해석 결과
(위 : 부품 별 진동 에너지, 아래 : 진동 모드 형상)

3. 각핏 모듈 해석 기술

각핏 모듈은 주요 골격을 이루는 카울 크로스 멤버 외에 인패널, 글로브박스, 공조시스템 그리고 전장품인 오디오와 조수석 에어백 등으로 구성되어 있다. 각핏 모듈은 각 부품의 기본 성능 외에 모듈 상태

에서 범규들과 상품성 성능을 만족해야 하고, 각핏 모듈 해석의 목적은 제품 제작·조립 전에 사전 검증과 설계 개선을 통해 최적의 성능을 확보하는 데 있다.

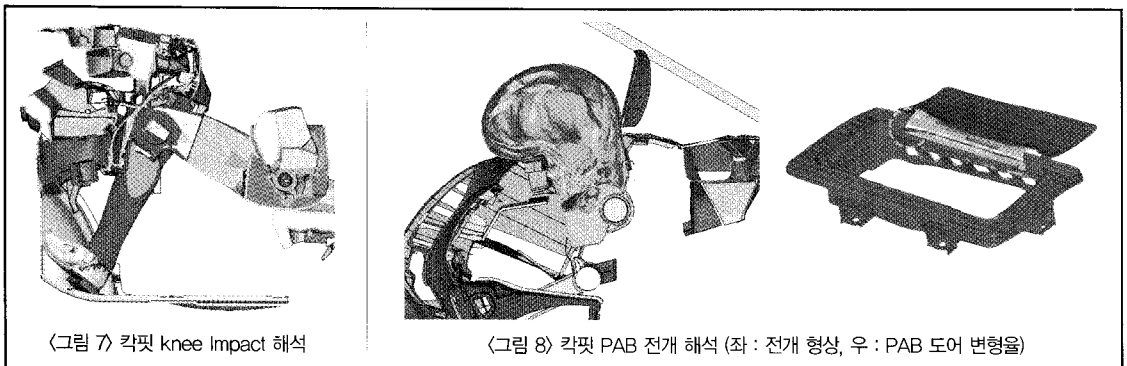
각핏 헤드 임팩트(Head Impact) 해석은 승객의 머리에 상당하는 6.8 kg의 강체구가 각핏에 충돌 시 감가속도의 범규 만족 여부를 평가하며, 니 임팩트(Knee Impact) 해석은 차량이 고정벽에 40kph로 충돌하는 상황에서 <그림 7>과 같이 승객 무릎이 각핏 모듈에 부딪혀 받는 하중이 10kN을 넘지 않는지를 검토한다. 소비자들에게 충돌성능이 공표되는 북미 NCAP(New Car Assessment Program) 시험에 무릎 하중 항목이 추가되어 (2010년 9월 이후 생산차량 적용) 니 임팩트 해석은 그 중요성이 점차 커지고 있다. 각핏 PAB(Passenger Airbag) 전개 해석은 <그림 8>과 같이 조수석에 장착되는 Invisible PAB 전개 시 인패널이나 PAB door에 파손이 발생되지 않도록 사전에 이를 검토하는 것이다. PAB는 상온 조건 외 저온 및 고온에서 전개할 때 문제가 많이 발생하는데, 이를 해석하기 위해서는 PAB 전개와 같이 고속 하중이 작용하는 상태에서 각 온도 조건에 따른 재료의 물성치 확보가 중요하다.

각핏 모듈은 충돌 성능뿐만 아니라 제상 성능과 같은 공조 성능의 역할도 중요하다. 겨울철 차량 전면 유리의 서리 제거를 위한 제상 모드 작동 시의 제상 균일성과 신속성을 예측하는 제상 해석을 통해 공조 성능을 판단할 수 있다.

이와 같이 각핏 모듈에는 다양한 기능의 부품이 조합되어 각 기능별 해석이 요구되며 이러한 모듈 해석기술을 이용해 조기 품질 달성 및 개발 기간 단축 성과를 얻고 있다.

4. 에어백 해석 기술

에어백 모듈의 해석은 주로 전개성(Deployment)과 보호영역(Coverage)에 대한 평가이다. 전개성은 다양한 온도 조건에 노출되더라도 에어백이 전개될 때 의도한 전개라인을 제외한 모듈 구조물의 손상 없이 비정상적인 전개나 걸림이 발생하지 않도록 전개 성능을 확보하는 것을 목표로 한다. 해석 툴(Tool)의 개스 유동 구형 개선에 따라서 실제 전개 성능 예측의 정확도가 향상되고 있다.



<그림 7> 각핏 knee Impact 해석

<그림 8> 각핏 PAB 전개 해석 (좌: 전개 형상, 우: PAB 도어 변형율)

보호영역의 해석은 <그림 9>와 같이 에어백이 전개되었을 때 승객을 충분히 보호할 수 있는 영역을 확보하고 있는가를 평가하는 것으로, 정면 에어백보다는 측면 및 커튼형 에어백에 주로 많이 적용하고 있다. 여성운전자에서부터 평균적인 성인남자와 체구가 큰 성인남자에 이르기까지 다양한 체형의 승객에 대한 보호영역 확보 여부를 예측한다.

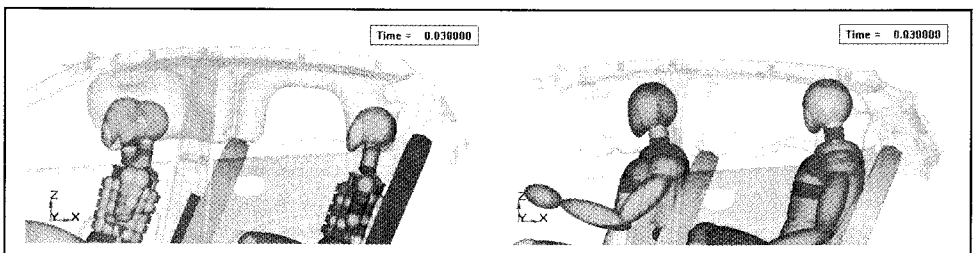
Drop Tower 해석·시험 Correlation을 수행하여 단품 수준에서 해석 모델의 신뢰성을 확보한 후, Body Block 해석과 커튼에어백의 전복사고 시 이탈경감 해석을 수행하여 모듈 단위의 성능 만족 여부를 사전 검증하고 있다.

<그림 10>과 같이 에어백을 포함한 구속장치 시스템 해석은 각종 설계인자에 따른 여러 충돌 모드와 승객 상해 경향을 파악하고 최적의 성능을 발휘할 수 있는 조합을 제시하고 있다. 최근 북미 충돌범규 및 상품성 평가 강화에 따른 성능 요구는 계속 증대하고 있어 해석의 역할은 그 어느 때 보다 커지고 있다.

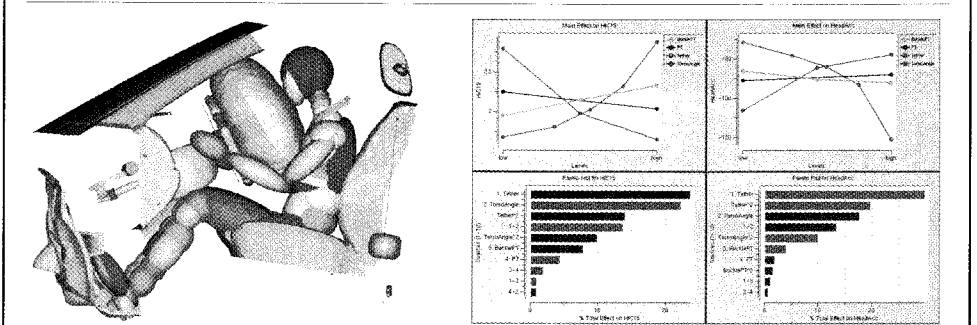
5. 프론트 엔드 모듈 및 램프 모듈 해석 기술

FEM(Front End Module)은 라디에이터와 헤드램프가 장착되는 캐리어(Carrier)와 차량 저속 충돌 시 충돌 에너지를 흡수하는 범퍼로 구성된다. 캐리어는 기본적으로 정하중 및 동하중 강성을 만족해야 하며, 범퍼의 경우 보행자보호 및 저속 충돌과 관련된 범규와 상품성을 모두 만족해야 한다.

후드 래치(Hood Latch) 정강도 해석은 캐리어 후드 래치 장착 부위에 수직방향으로 5,340N의 하중이 작용할 때, 캐리어의 파손 여부를 검토하는 해석이다. 현재 스틸 재질로만 이루어진 스틸 캐리어 외



<그림 9> 보호영역 해석 (좌: 성인 여성, 우: 성인 남성)



<그림 10> 운전석 승객 해석 및 구속장치 설계인자 최적 해석

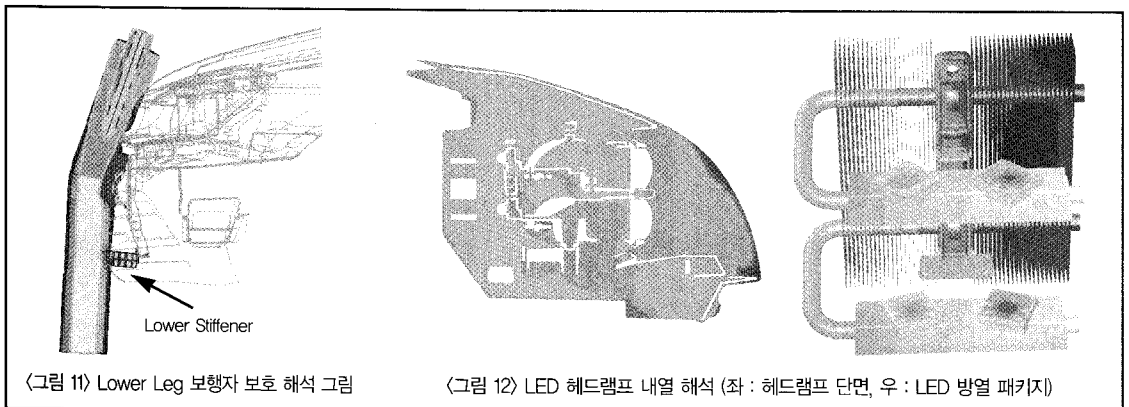
에, 경량화를 위해 플라스틱과 스틸을 혼합 사용한 하이브리드(Hybrid) 캐리어, 유리섬유 강화소재인 LFT(Long Fiberglass Thermoplastics)만을 사용한 캐리어 그리고 GMT (Glass Mat Thermoplastics) 캐리어 등이 있으며, 다양한 소재의 캐리어 개발을 위해서는 소재 물성 연구와 함께 수준 높은 해석 기술이 필요하다.

보행자 보호 해석은 Lower Leg 충돌 시 발생하는 감속도, 전단변위, 굽힘각 등의 상해치를 예측한다. 유럽에서는 범규 및 Euro NCAP 상품성 평가, 국내에서는 KNCAP 상품성 평가에 보행자 보호를 적용하고 있어 그 중요성이 커지고 있다. 충돌 속도가 40kph의 고속이므로 <그림 11>과 같이 범퍼 및 Lower Stiffener의 고속 변형 특성이 매우 중요한데, 이를 실제와 보다 가깝게 구현하기 위해 플라스틱 소재의 고속 인장 특성을 해석에 적용하고 있다. 보행자 보호를 고려하면, 범퍼를 전반적으로 약화시키는 방향으로 설계해야 한다. 하지만 4kph의 저속 충돌 시 차량 전방부 변형에 대한 범규도 동시에 만족해야 하므로 해석을 통해 두 성능을 모두 만족시키는 최적안을 도출하고 있다.

FEM 해석기술은 신 소재를 이용한 캐리어 개발, 보행자 보호와 저속 충돌 성능을 동시에 만족하는 최적 설계에 있어 그 활용 가치가 높으며, 제품 원가 절감 및 개발 기간 단축에도 많은 기여를 하고 있다.

일반적인 외장용 등화장치는 크게 헤드램프, 리어콤비램프, 포그램프로 나눌 수 있으며, 최근에는 LED 기술의 발전으로 리어콤비램프는 물론 헤드램프에도 LED가 적용되는 추세이다. 차량용 램프의 주요부(렌즈, 리플렉터, 베젤 등)는 플라스틱 소재로 열에 취약하며, 열전도도가 낮아, 국부적으로 최대 온도가 발생하는 특성이 있다. 따라서 장시간 램프 작동 시 발생하는 열에 의해 램프 각 부위가 변형, 변색되지 않도록 내열 성능의 확보가 중요하다. LED 헤드램프의 경우 발열량은 적으나 추가적인 전자 부품의 냉각을 고려해야 하는 어려움이 있다. 기존의 개발 방식은 경험과 반복적인 시험에 의존해 평가품을 만든 이후에나 개선 활동이 가능했으나, CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석의 적용은 램프 내열 성능을 예측하고 조기에 내열 성능을 확보하는 것을 가능하게 하였다.

램프의 내열 성능 못지 않게 헤드램프 렌즈 내부에 발생하는 습기의 응축을 방지하는 습기 성능 확보 역시 중요하다. 습기 성능은 복잡한 물리적 현상으로 인해 사전 예측에 어려움이 있지만, 현재 국내·외에서 해석 기술의 개발이 활발히 진행되고 있다.



<그림 11> Lower Leg 보행자 보호 해석 그림

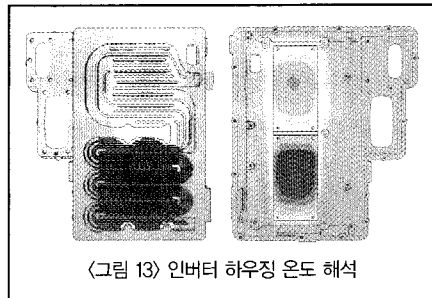
<그림 12> LED 헤드램프 내열 해석 (좌 : 헤드램프 단면, 우 : LED 방열 패키지)

헤드램프의 내구 해석은 차량 주행 중에 노면으로부터 전달되는 진동에 대한 램프 부품 체결부의 안정성과 내구성 검증을 위해 제품의 공진 특성을 반영하여 진동 하중에 의한 수명을 예측하는 해석이다. 해석 신뢰도의 향상을 위해 플라스틱에 대한 내구 물성치 확보와 진동시험 결과와의 지속적으로 비교를 수행하고 있다.

6. 하이브리드 차량 부품 및 전장 해석 기술

친환경, 고연비 선호 추세로 인해 최근의 하이브리드 차량의 부품 개발 분야는 경쟁이 매우 치열해지고 있다. 기능, 성능, 환경, 내구 분야의 다양한 해석이 필요하지만 여기서는 열 해석과 진동 해석에 대해서 간략히 소개하도록 하겠다.

하이브리드 시스템의 화학-전기-기계에너지의 변환 과정에서 발생하는 과도한 열은 소자의 손상이나 영구 자석의 성능 저하로 이어질 수 있으므로 CFD 해석을 통한 방열 성능의 조기 확보가 중요하다. 방열 성능 예측이 필요한 부품에는 배터리, 인버터, 모터 등이 있다. 인버터에는 전력 소자에 의해 열이 발생하는데 일반적으로 냉각수 채널을 사용하는 수냉 방식의 열교환을 통하여 방열 성능을 확보한다. <그림 13>은 인버터의 냉각 성능을 해석한 결과로 냉각수 채널이 포함된 하우징 부의 온도 분포를 나타내고 있다. 해석을 이용한 성능 예측 및 개선안 도출을 통해 유로의 위치와 형상 등을 최적화함으로써 원하는 방열 특성을 만족시킬 수 있다. 부품 모듈화 추세에 따라 배터리 패키지 내에 인버터·컨버터를 배치하는 사례가 늘고 있을 뿐 아니라 배터리 고성능화에 따른 발열량이 증가하고 있어 배터리 패키지의 안정적인 냉각 성능 확보를 위한 해석기술의 중요성이 더욱 커지고 있다.



<그림 13> 인버터 하우징 온도 해석

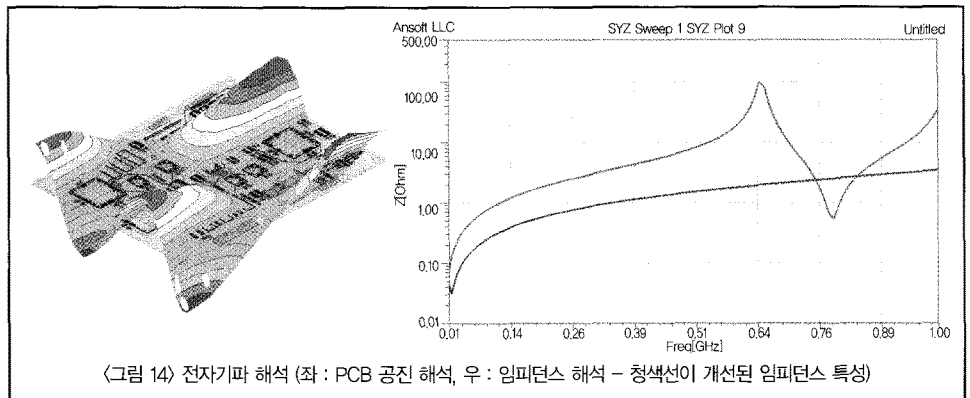
하이브리드 차량은 저소음 특성을 지니고 있지만, 엔진 소음이 감소함에 따라 모터 소음과 다른 작동 소음에 대한 관심이 증가하고 있다. 모터 소음의 경우 로터를 회전시키는 전자기력이 스테이터(Stator)에 작용하여 소음 진동의 가진원 역할을 하게 되는데 회전수의 배수 성분 별로 다른 하중 분포를 가하게 된다. 모터의 성능 설계와 하우징의 설계 등이 소음 특성에 모두 영향을 미치는데, 성능 상의 영향을 줄이고 소음을 개선하고자 할 때는 하우징에 개선의 초점을 맞추게 된다. 이 경우 소음 방사에 효과적인 가진력 성분을 확인한 후, 하우징 표면의 진동을 감소시키고, 연결된 부품으로의 진동 전달을 억제하는 방향으로 설계를 개선하여야 한다.

오디오나 AVN(Audio Video Navigation)과 같은 멀티미디어 제품과 차량 제어 장치, 안전 장치의 각종 주요 전자제어기(ECU, Electrical Control Unit)는 각 국의 법적인 규제와 자동차 메이커 내부의 스펙을 만족해야 하고, 이를 위해서는 전장 해석 기술의 지원이 필수적이다. 전장품 개발 시 개념 설계 단계에서부터 해석 기술을 적용하고 있는데, 설계자가 회로도를 작성하고, PCB(Printed Circuit Board) Artwork을 완료하면 평가품 없이 해석을 수행하고 개선 방안을 도출함으로써 개발 기간의 단축과 조기

품질 확보를 꾀하고 있다.

전장 해석 항목은 크게 PCB 상태의 PI(Power Integrity, 전원 무결성) 및 SI(Signal Integrity, 신호 무결성)로 구분할 수 있다. 전원 무결성 해석에는 주파수에 따른 불연속점 없이 낮은 임피던스를 갖도록 튜닝하는 Z-parameter(임피던스) 해석, 전원과 그라운드간의 구조적인 공진을 해석하는 공진(Resonance)해석, 디커플링 커패시터의 위치 및 개수를 최적화하는 Decoupling Capacitor Optimization 해석 등이 있다. 신호 무결성 해석에는 신호의 전달 특성을 해석하는 S-parameter 해석, 동시에 연관된 신호들이 스위칭할 때 전원의 안정성을 알아보는 SSN(Simultaneous Switching Noise)해석, 디지털 신호의 충실도를 보는 Eye-open해석 등이 있다. <그림 14>는 PCB의 공진 해석과 임피던스 해석의 예를 들고 있다.

최근 하이브리드 차량 개발 시 고전압·고주파 해석 요구가 증가하여 대응 해석기술의 개발과 PCB를 포함한 기구부의 전자기적 성능 예측을 위한 3차원 해석 기법을 개발하는데 역량을 집중하고 있다.



7. 결론

본문에서 살펴본 바와 같이 모듈의 완성도를 높이기 위해서는 해석 기술의 뒷받침이 매우 중요하다. 해석 기술의 영역 확대 및 수준 향상은 모듈화의 확대, 차량 개발 기간의 단축, 완성도 향상에 크게 기여하고 있다. 설계 초기 단계에 엔지니어링 역량을 집중하여 개발 단계 후반부에 발생할 수 있는 설계 변경, 개선 활동을 줄여 개발 기간과 비용을 줄이는 업프론트 엔지니어링(Upfront Engineering)개념도 해석 기술의 발전에 기반하고 있다.

차량 개발, 모듈 개발에 있어서 해석의 역할은 지속적으로 확대될 것이 확실하고, 해석 역량과 설계 역량의 총합은 향후 모듈 업체의 기술경쟁력의 척도가 될 것으로 보인다. 해석 적용 부품·모듈의 확대, 해석 평가 항목 및 선행 해석의 확대, 해석 신뢰성의 향상, 다양한 성능을 동시에 만족하는 최적안 도출 역량은 모듈 업체 간의 경쟁에 있어 핵심 성공 요인이 될 것이다.

<정원태 선임연구원 : wtjeong@mobis.co.kr>