

제동 장치의 CAE 경향

A Trend of Brake System CAE



김 성 훈
한국 엠에스씨 소프트웨어
Sung Hoon Kim /MSC.Software



권 병 천
한국 엠에스씨 소프트웨어
Byung Chung Kwon /MSC.Software

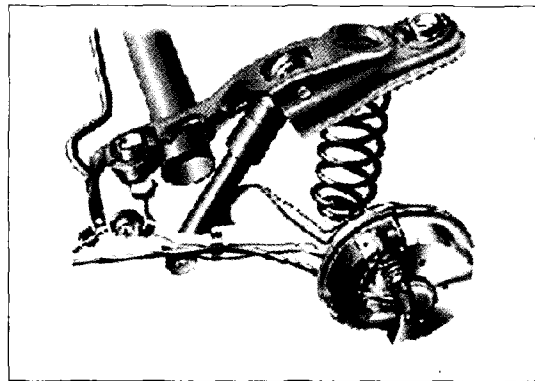
1. 서론

제동 장치(Brake)는 차량의 속도를 감속 혹은 정지 시키거나, 멈춰있는 차량이 움직이는 것을 방지하는데 사용되며 승객의 안전을 위해 매우 중요시되는 장치이다. 일반적인 제동 장치는 차량의 운동에너지를 열 에너지로 변환하는 것으로 차량의 속도의 제함과 질량에 비례하는 제동용량이 필요하며, 최근의 엔진 및 서스펜션 기술의 진보와 도로 환경의 정비와 발전에 힘입어 차량이 고속화 되면서 제동장치에 대한 요구 성능은 엄해지고 있다.

특히, 제동장치는 승객의 안전과 매우 밀접한 관련이 있는 부품이므로 제동 시스템에 관련된 부품들의 설계에서는 상당히 가혹하고 엄격한 사양에 부합하도록 하여야 한다. 따라서 부품 강도의 분석을 위한 구조 해석은 이미 오래 전부터 산업계에서 수행되어 왔으며, 최근에는 차량의 고급화에 따른 제동 소음이나 조

작감 등에 대한 감성영역의 요구조건도 만족시켜야 하므로 진동 및 소음 측면에 대한 해석의 수행 또한 불가피하게 되었다.

본 원고에서는 현재 산업계에서 수행하고 있는 제동 장치의 각종 해석 사례들을 통하여 현재의 해석에 대한 경향과 미래에 대해 알아보도록 한다.



<그림 1> Brake System of Vehicle.



2. CAE의 적용사례

브레이크는 제동압력에 의해 마찰재를 차륜과 함께 회전하는 드럼 혹은 디스크에 밀착시켜 자동차를 정지 혹은 감속시키는 장치로 효과적인 제동을 위해 마찰재와의 접촉부에서는 상당히 큰 압력이 작용하므로 제동 장치를 구성하는 부품들의 강성 및 강도내구 설계가 필수적이다. 또한 최근들어 Brake의 성능과 별개로 제동시 발생하는 진동 및 소음에 대한 조건들을 만족하는 설계기술이 요구됨에 따라 다양하고 체계적인 해석을 통해 부품설계로부터 시스템설계에 이르기까지 설계의 신뢰성을 높이고 표준화된 설계기술을 확보하는 것이 필요하다.

제동장치의 전통적인 해석 방법에는 제동압력에 따른 각 부품의 강도를 평가하기 위한 선형 정적 해석 등이 수행되어 왔으며 최근에는 소음 및 진동에 대한 분석을 위한 고유진동 Mode 및 공진 주파수 등을 구하는 진동해석과 제동시 운동에너지의 전환에 따른 열 에너지에 따른 구조물의 열 변형을 고려한 열응력 해석등도 진행되고 있다.

또한, 종래에는 해석자가 모든 해석을 수행하는 것으로 인식되어 왔지만 설계자가 쉽게 해석을 수행할 수 있는 기술들도 속속들이 연구되고 있으며, 현장에 적용되는 사례가 늘고 있다.

현재 산업계에서 수행되고 있는 해석의 종류는 다음과 같다.

브레이크의 비선형 접촉 해석

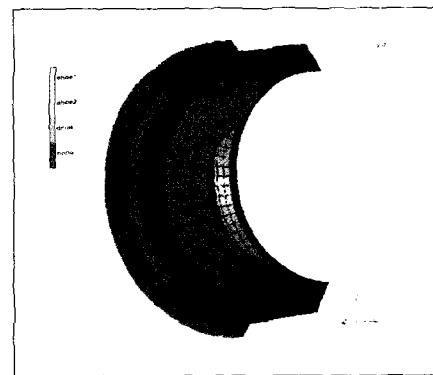
브레이크 시스템은 접촉, 열적, 마찰 등 복잡한 물리적 현상이 내재된 대표적인 비선형적인 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 적합한 비선형 해석

소프트웨어의 이용이 필수적이다. 그러나 아직 브레이크 시스템에 대한 상용 비선형 소프트웨어의 성공적인 적용 사례가 많지 않고 전체 브레이크 시스템을 구성하는 모델은 엄청난 양의 전산처리비용을 요구하고 있다. 따라서 현재 자동차 업계에서는 접촉 및 하중의 선형화를 통한 정적 해석이 대부분이다.

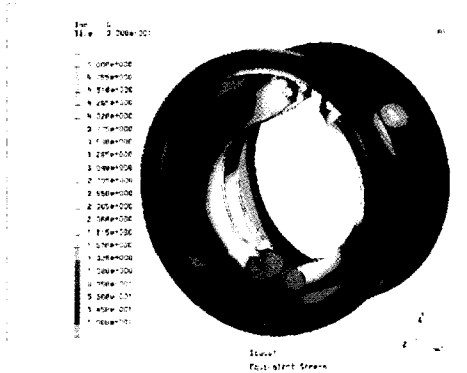
<그림 2>는 기존 선형 정적 해석의 수행에서 발전된 Disk 와 Pad 혹은 Drum 과 Lining 사이의 접촉현상을 고려한 비선형 해석사례를 보여주고 있다. 현재의 비선형 해석수행은 정적(Static)해석에 그치고 있으나, Computer의 성능과 해석 프로그램들의 발전으로 인하여 접촉을 고려한 동적 비선형 (Dynamic Nonlinear Transient)해석의 수행도 멀지 않은 미래에 가능하리라 보여진다.

<그림 2>에서는 드럼 브레이크 해석 모델을 보여주고 있는데 드럼브레이크 부품(슈, 마찰재, 드럼)들을 단계적 모델링 한 후 연결부 및 접촉관계를 정의하여 시스템 모델을 구성하였으며 정적상태에서 캠에 하중을 가하여 해석을 MSC.Marc 를 이용하여 해석을 수행하였다.

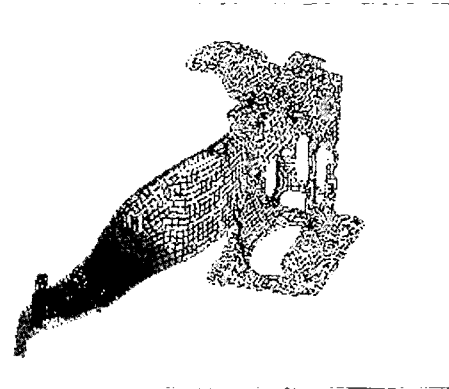
<그림 3>은 비선형 접촉 해석의 결과를 보이고 있는데 캠(Cam)에 접촉하는 롤러의 모델링 방법과 마



<그림 2> FE-Model of Drum Brake Analysis



〈그림 3〉 The Result of Nonlinear Contact Analysis of Drum Brake.



〈그림 4〉 Pedal Analysis with Vertical Panic Load

모에 의한 라이닝 반경에 따라 해석결과가 민감하게 변함을 알 수 있었으며, 변형률 분포와 제동력에 대해 실험결과와 유사한 결과를 얻었다.

해석에서 습득된 신뢰성 있는 드럼브레이크의 시스템 모델링 방법과 파악된 중요 설계 변수들을 고려하여 각 부품 설계시부터 시스템의 응력결과를 고려한 설계가 가능하게 되었으며, 더 나아가 내구수명 예측 및 스틱소음 저감 설계기술로까지 발전이 가능할 수 있을 것이다.

Pedal의 강도 분석

일반적으로 제동 장치의 작동은 운전자가 발로 페달 (Pedal)을 밟는 것으로 시작된다. 그런데 페달의 강도가 충분하지 못하여 운전자가 급정지를 하게되는 패닉 (Panic)상황에서의 하중을 견디지 못하고 페달이 파손되면 승객은 심각한 상황에 직면하게 된다. 따라서 제동장치의 시스템 중 페달에 수평 및 수직 패닉 하중을 가하고 페달의 변형 및 강도를 검토하는 해석을 수행하였다.

페달은 지렛대의 원리로 작동하는데 지지점이 고정되어 있는 Front Dash Board 와 연관된 변형을 고려하지 않으면 정확한 강도 및 변형의 예측이 어렵기 때문에 Front Dash Board 까지도 모델링하는 것이 필요하다.

〈그림 4〉는 Pedal 및 Member 를 같이 모델링한 후, 수직 하중에 대한 변형 결과를 보여주고 있다.

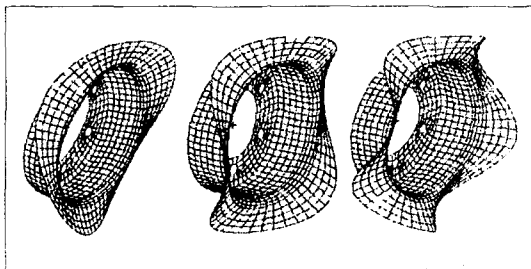
운전자의 브레이크에 대한 불평거리 중 약 80%가 브레이크 소음이라 한다. 실제로 브레이크 소음은 제동 성능과는 관계가 적은 품질 문제지만 소비자들은 그 소음으로 인해 자신들의 차량에 무슨 문제가 있지 않을까 하고 염려하고 불안해 한다. 심지어 소비자들은 마찰재 마모 성능의 저하를 감수하면서까지 더 조용한 마찰재 제품을 선호하는 것을 볼 때 소음에 대해서 얼마나 민감한가를 따지는 것은 그리 어려운 것이 아니다.

브레이크 소음의 발생 매커니즘은 아직까지 명확하게 규명되지는 않았지만 Stick-Slip 마찰 현상에 의한



자려진동(Friction Induced Self-Excited Vibration)과 브레이크 공진계의 기하학적 불안정(Geometric Induced Instability)이 그 대표적인 원인인 것으로 알려져 있다. 소음원의 개선 방향은 마찰재의 재질변경으로 인한 자려진동의 감소와 브레이크 구성부품들의 동특성 최적화로 시스템의 기하학적 불안정성을 제거하는 것으로 구별할 수 있다. 자려진동은 마찰계수의 속도 의존성과 관계있으며 속도 증가에 따른 마찰계수 하락의 기울기(μ -Velocity Negative Gradient)가 클수록 소음에 취약한 것으로 보고되어 있다. 기하학적 불안정성은 시스템의 공진계를 구성하는 부품들(디스크, 캘리퍼, 패드, 마운팅부 등)의 동특성과 밀접한 관계를 가지며 소음의 주파수 영역대에 따른 다양한 접근과 개선책이 보고되고 있다.

현재 국내에서는 브레이크 소음의 대처 방안으로 용이하다는 이유를 들어 마찰재의 재질개선을 우선시키고 있다. 그러나, 브레이크 공진계에 대한 동특성 최적화와 마찰재 개선의 병행을 통해 적극적으로 소음에 대처하는 기법의 개발이 시급하다고 볼 수 있다.



(그림 5) Pedal Analysis with Vertical Panic Load

(그림 5)는 유한 요소 해석을 통하여 Brake의 스켈(Squeal) 소음의 원인중, 마찰에 의한 자려진동을 분석하기는 용이하지 않기때문에 브레이크 시스템의 기하학적 불안정 개선에 초점을 둔 해석 사례를 보이고 있다. MSC.Nastran을 이용한 고유 진동 모드 해석을 통하여 제동 시스템의 각 부품들의 동특성을 규명

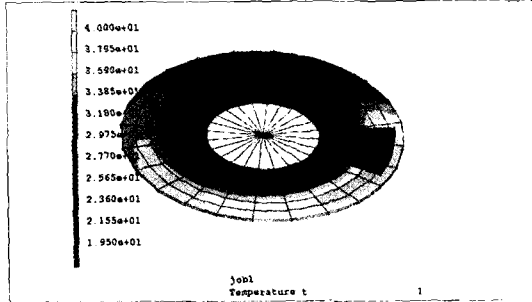
하도록 하며 민감도해석을 수행하여 설계변경 지침으로 사용한 사례이다. 하지만 이상에서 보여진 단품수준의 고유진동해석은 부품 상호간의 연관성을 배제하므로 선진 업체들과 마찬가지로 부품 상호간의 관계를 고려한 연성고유 진동해석의 수행이 향후 수행되어야 할 것이다.

저더소음 저감을 위한 열변형 해석

브레이크는 차량의 운동에너지를 열에너지로 전환하여 운동하는 차량을 정지시키므로 브레이크의 부품들은 열에 대하여 자유로울 수가 없다. 특히 최근에 문제시되는 브레이크의 진동 소음 중 저더(Judder)소음의 경우는 그 원인 중의 하나가 적열점과 같은 브레이크의 불균일한 열변형에 있다고 알려져 있으므로 산업계에서도 브레이크의 열변형 해석을 수행하고 있다.

실제적인 제동 메커니즘을 해석에 적용하기 위해서는 운동에너지가 마찰에 의해 열에너지로의 전환되는 과정의 구현이 필요하다. 그러나 해석상으로 이를 표현하기가 매우 어렵기 때문에 실존하는 모든 요인들을 적용하여 해석모델을 생성하기 보다는 접촉면상에 제동에 의해 감소되는 운동에너지의 전부 혹은 일부가 환산된 열 에너지의 입열 조건을 적용하여 열 변형해석을 수행하는 등가 열변형 해석의 수행이 대부분이다.

물론 이런 등가 열변형 해석도 열전달과 열변형을 함께 고려한 해석이기는 하지만 향후에는 실제적인 접촉면의 크기 변화 및 압력의 변화를 고려한 동적 비선형 접촉 열변형 해석이 필요할 것이다. 이런 동적 비선형 접촉해석은 많은 CPU Time 을 필요로 하므로 현재 업계에서 적용되지는 않지만 Computer 의 성능증가에 따라 충분히 적용가능성이 있는 해석이다. 물론 이 해석을 수행으로 마찰 특성 및 차량 특성등에 의한 저더 소음 특성의 규명이 가능할 것으로 예측된다.



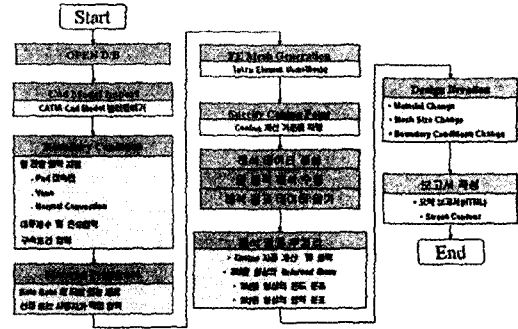
(그림 6). Temperature Distribution of Disk

(그림 6)은 Solid Disk Type 브레이크의 제동 과정의 동적 비선형 접촉 열변형 해석의 결과로 Disk의 온도 분포를 보이고 있다.

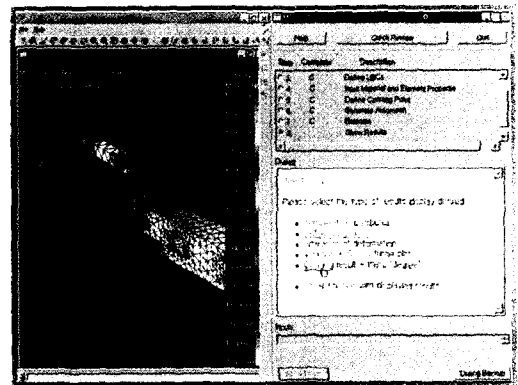
설계자를 위한 해석 자동화 프로그램의 개발

일반적으로 해석은 해석 전문 엔지니어가 수행해야 하는 것으로 인식되어 왔으나 해석 자동화 기법들의 개발을 통하여 일반 설계자들이 쉽게 해석을 실행할 수 있게 되므로 설계시, 해석의 활용도를 높일 수 있게 되었다. 실제로 Ford사에서 스켈 예측 해석의 자동화와 국내 H사에서 저더의 한 원인이 되는 Corning 열 변형 해석을 자동화하는 작업을 수행하였으며 향후 이런 시도가 꾸준히 늘어나는 추세다.

(그림 7)은 Disk Brake의 코닝 열변형 자동 해석 프로그램의 Flow-Chart를 보이고 있는데, Brake Disk의 코닝 열변형 해석에서는 열전달과 응력 문제를 동시에 고려하는 난이도가 있는 해석이지만 설계자가 MSC. Acumen을 이용하여 개발된 Knowledge-Based Navigation System을 통하여 전 해석과정을 직접 수행할 수 있도록 개발하여 초기 설계 과정에 활용하여 설계 변경의 최소화 및 최적 설계가 가능하도록 하였다. 개발된 자동 해석 프로그램의 활용으로 5시간을 소비하는 해석을 비전문가도 0.5시간에 해석 수행을 완료할 수 있었다.



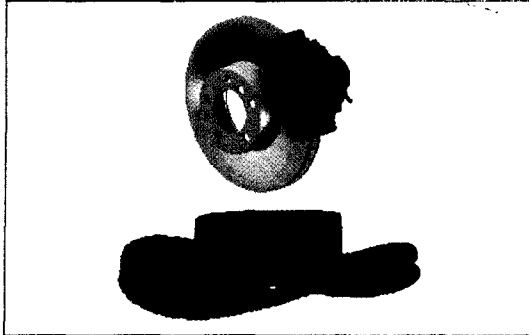
(그림 7) Flowchart of Disk Brake Coming Thermal Deformation



(그림 8) Knowledge-based Navigation System

설계자에 의한 CAD 상의 해석

일반적으로 해석의 수행을 위해서는 CAD 프로그램과 별도로 Patran과 같은 Pre/Post 프로그램에서 요소 분할, 물성치 입력, 경계조건 등을 작성하여야 한다. 이를 위해서 설계자는 새로운 프로그램의 사용법을 익혀야 하고 형상정보를 Interface하는 불편함에 직면하게 되며 때로는 형상 정보의 Interface과정 중에 중요한 Data의 손실이 발생하여 해석의 수행자체가 불가능해지거나 상당한 어려워지는 경우도 발생한다. 이런 문제점들을 해소하기 위해 최근 몇몇 CAD 프로그램내에서 자체적인 유한 요소 해석 Solver를



<그림 9> Disk Brake Modal Analysis in the Integrated CAE and CAD System

개발, 내장하고 있다. 하지만 CAD 상에 개발된 유한 요소 해석 Solver 의 성능에는 많은 제약조건들이 있으므로 이를 보완하는 것이 필요하다.

이같은 유한 요소 Solver 문제점의 보완을 위하여 MSC 사와 Dassault 사의 합작으로 3 차원 CAD 인 Catia 에 유한요소 해석 Solver 인 MSC.Nastran 을 이용한 해석의 수행이 가능하도록 하는 프로그램을 출시하였다. <그림 9>는 Catia V5i 를 이용한 Disk Brake 모델과 고유진동 모드 해석 결과를 보여주고 있다.

기타 해석

주로 구조적인 문제에 대한 해석 사례들을 기술하였으나, 이 외에도 제동장치의 가장 중요한 문제중의 하나인 열 유동 문제의 분석을 위한 유동 해석도 수행되고 있으나 차량의 속도, 노면의 상황, 풍향 및 풍속 등의 영향을 동시에 고려하며 제동장치 주변형상까지 고려한 해석을 수행하기 위해서는 상당한 복잡한 해석이다. 하지만 전체적인 제동 시스템에 대한 유동 영향의 평가를 위해서 필요한 해석으로 인식되고 있다.

이외에도 제품 생산을 위한 주조해석이나 강도 해석 결과를 이용한 내구해석, 유압 호스의 금구 및 재질에 따른 누유(Leakage)해석 등이 업계에서 수행되고 있다.

3. 맺음말

이상 현재 수행중인 다양한 해석 사례들을 기술하였으나, 강도, 진동, 유동 및 열변형 문제들을 별개로 고려한 해석이 대부분이다. 하지만 향후에는 복잡한 물리현상들을 동시에 고려하는 연성 해석의 수행이 필요할 것이며, 가능할 것으로 예측된다.

급속한 Hardware 의 발달 및 프로그램의 병렬처리 기능 개발에 힘입어 대형 해석모델에 대한 해석 수행이 가능할 것이며 단품 수준의 해석이 아닌 전체적인 시스템 혹은 모듈 측면의 해석이 가능할 것이다.

또한 설계자 지향적인 자동 해석 프로그램의 개발을 통하여 해석의 수행이 이제 해석자 만의 전유물이 아닌 설계자가 쉽게 해석을 수행하므로써 해석이 설계에 더 많은 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

(김성훈 연구원 : shkim@mscsoftware.co.kr)