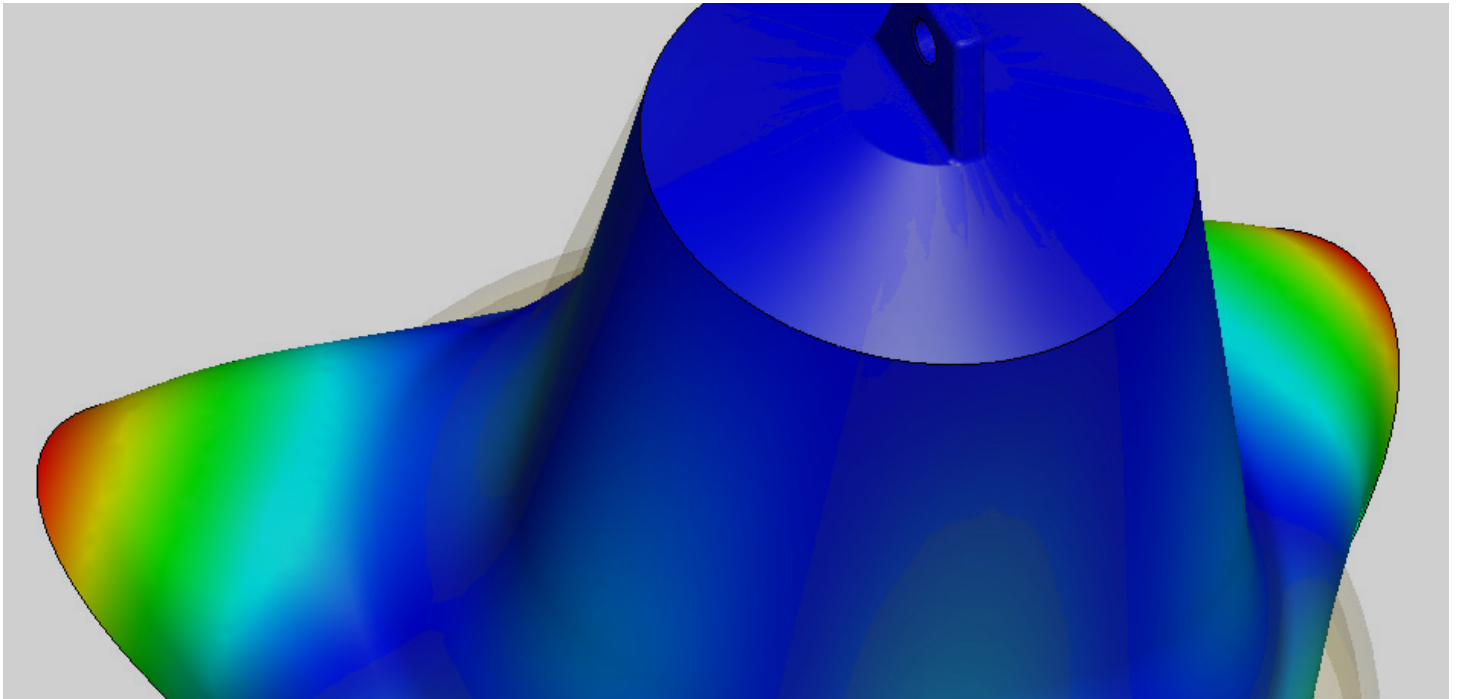

실제의 진동 해석을 이용한 설계 능력화

개요

많은 기계 설계자들이 설계의 생성, 테스트, 수정 및 재테스트를 위한 기존의 방식을 대신하여 시간을 절약하고 비용 효율을 높일 수 있는 대안으로서 진동 시뮬레이션을 흔히 사용하고 있습니다. 동적 하중에 대한 응답에 영향을 미치는 요인들을 컴퓨터 모델을 통해 식별함으로써 엔지니어는 부품을 전혀 가공하지 않고도 올바른 개선 방향의 결정을 위해 필요한 데이터를 얻을 수 있습니다. 또한 진동 해석을 이용하면 필요한 실제 프로토타입의 수를 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라 관련 비용을 크게 절감할 수 있습니다.



동적 시뮬레이션 소개

동적 시뮬레이션은 기계 엔지니어들에게 더 나은 제품을 개발할 수 있는 수단을 제공합니다. 제품의 설계와 관련하여 흔히 제기되는 운영상의 질문은 다음과 같습니다.

- 밀링 기계에 부착된 고정구의 흔들림으로 인해 도구에 얼마나 큰 오류가 발생할 수 있는가?
- 신형 테니스 라켓 또는 골프 클럽을 통해 느껴지는 진동을 줄임으로써 선수의 피로를 줄일 수 있는가?
- 전자 제품을 운송할 때 노면의 요철로 인한 진동 때문에 부품이 느슨해질 수 있는가?
- 무게나 비용 면에서 과다 설계를 수반하지 않는 자동차 엔진 마운트의 두께는 얼마인가?
- 진동으로 인한 이탈 없이 유정 시추 기계의 스피들 속도가 안전 운영 영역에서 유지될 것인지 여부를 예측하는 것이 가능한가?
- 시스템 또는 구조물이 MIL 스펙, Telcordia GR-63 또는 Uniform Building Code(UBC) 진동/지진 요구 사항을 충족해야 하는가?

종전까지만 해도 이러한 유형의 질문에 답을 하려면 수작업 계산과 몇 번의 개발/테스트/재설계 사이클을 통해 해답을 구해야만 했으나, 이제는 동적 시뮬레이션을 이용해 추측에 의한 작업 없이 초기 설계 단계를 진행할 수 있게 되었습니다.

변화하는 하중 또는 동적 하중에 노출된 부품 또는 어셈블리는 단순히 거슬리는 수준에서부터 심각하게 위험한 방식으로까지 반응 또는 진동할 수 있습니다. 다음은 이에 관한 세 가지의 실제 사례입니다. 잘못 설계된 무선 드릴의 진동 문제는 소비자가 제품을 반환할 정도의 사태로 이어지지는 않을지 모르나 친구들에게 구매를 말리는 결과를 초래할 수 있습니다. 테스트 드라이브 도중 노면에서 전달되는 불편한 진동은 잠재 고객이 등을 돌리고 판매 기회가 상실되는 결과를 부를 수 있습니다. 민감한 전자 장치의 기계적 하우징 또는 용접 연결부에 운송 중 진동으로 인해 응력이 발생할 경우 상당히 치명적인 결과가 초래될 수 있습니다.

진동 해석의 주 목적은 시간에 따라 변화하는 입력으로 인해 파트가 실제로 고장나거나 사용자가 수용할 수 없는 상태가 발생하는지 확인하는 것입니다. 이러한 지식을 이용하면 프로토타입 또는 실제 구조물을 제작하기 전에 설계를 개선할 수 있습니다. 아래의 페이지에는 진동의 검사를 위한 몇 가지 접근 방식과 더불어 설계의 성공에 미치는 영향에 대한 설명이 제시되어 있습니다.

.....

진동 해석의 주 목적은 시간에 따라 변화하는 입력으로 인해 파트가 실제로 고장나거나 사용자가 수용할 수 없는 상태가 발생하는지 확인하는 것입니다.

세 가지 유형의 진동에 대한 설명

진동의 기본적 개념과 진동의 시뮬레이션에 사용되는 기법에 관한 사례를 들어 보겠습니다. 고양이가 새를 기다리기 위해 기둥 위에 세워 둔 새 모이통에 올라가 있는 것이 눈에 거슬리는 상황입니다. 만일 기둥을 살짝 민다면 모이통의 속도와 변위가 기둥을 미는 동작의 속도와 크기에 선형적으로 비례하여 변화할 것입니다(그림 1a). 반면, 진폭은 같더라도 기둥을 더 빠른 속도로 흔들기 시작하면 결국 기둥의 윗부분이 채찍처럼 휘청거리기 시작할 것이며, 고양이를 떨어뜨린다는 목적을 달성할 수 있을 것입니다(그림 1b).

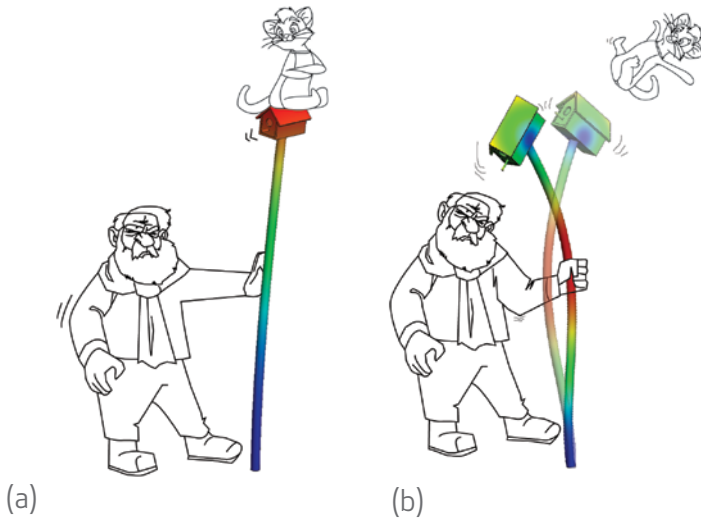


그림 1: 천천히 흔들리는 기둥(a)과 보다 빠른 동작에 의해 유발되는 휘핑 동작(b)의 비교

이러한 휘핑 효과는 흔들는 속도가 새 모이통 시스템의 공진을 유발했다는 것을 말해 줍니다. 즉, 고양이에게는 안된 일이지만 출력(a)이 입력(b)에 비해 불균형적으로 높아졌습니다.

앞뒤로 움직이는 모션은 진동 중에 발생하는 사건을 간략한 보기로 표시해 줍니다. 시스템에 공진을 일으키는 시간변동적 입력은 극적이고 때로 치명적인 응답을 불러 일으킵니다. 단, 비슷한 크기의 입력이 다른 속도로 나타나 공진이 일어나지 않는다면 우려할 만한 결과는 생기지 않습니다. 이 개념은 복잡성과 관계없이 모든 시스템에 적용됩니다. 결론적으로 진동 해석을 사용하면 진동으로 인해 제품에 경미한 문제 또는 치명적인 문제가 발생하는 시점을 알 수 있습니다.

진동은 세 가지 방식으로 설명될 수 있으며, 주로 입력의 특성 또는 형태에 따라 그 양상이 달라집니다.

1. 물리적 영역 또는 시간적 영역에서는 실제의 변화를 실시간으로 볼 수 있습니다. 시간적 영역에서의 시뮬레이션은 흔히 과도 해석이라는 이름으로 지칭됩니다. 전술한 새 모이통 예제의 경우, 기둥을 흔들는 동작의 분당 진동수를 세고 기둥을 미는 동작의 폭을 측정하여 데이터를 수집하는 것이 가능하며, 이렇게 얻은 데이터를 시뮬레이션에 입력할 수 있습니다. 또한 실제 새 모이통을 이용해 보고 측정한 바와 마찬가지로 시뮬레이션에서도 입력 속도가 증가하면 끝단 속도와 변위가 증가한다는 것을 알 수 있습니다. 아울러 흔들는 동작을 멈춘 후 자연스러운 감쇠력에 의해 기둥이 멈출 때까지 걸리는 시간 또는 진동 수를 출력 값으로 도출할 수 있습니다.

진동 해석을 사용하면 진동으로 인해 제품에 경미한 문제 또는 치명적인 문제가 발생하는 시점을 알 수 있습니다.

동적 이벤트를 기술하는 과도 방법에서는 어떤 파라미터(속도, 크기, 방향, 입력의 개수)도 실시간 이벤트인 것처럼 변경할 수 있습니다. 이러한 이벤트에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 연속적인 응답으로 표시되는 것이 아니라 특정 시간 간격별로 출력됩니다(디지털과 아날로그 사이의 딜레마). 또한 시간의 길이가 증가함에 따라 이러한 문제를 해결하기 위해 소요되는 시간과 리소스도 함께 늘어나며, 변화 및 변화에 대한 응답을 모두 캡처하려면 시간 단위가 충분히 작아야 합니다. 필요한 시간 단계의 수를 결정하기 위한 일반적 지침은 응답의 고점 또는 저점 당 다섯 개를 사용하는 것입니다. 이 수치는 아래의 그림 2에서 보듯 이벤트의 과도 해석 도중 빠르게 증가할 수 있습니다.

동적 이벤트를 기술하는 과도 방법에서는 어떤 파라미터(속도, 크기, 방향, 입력의 개수)도 실시간 이벤트인 것처럼 변경할 수 있습니다.

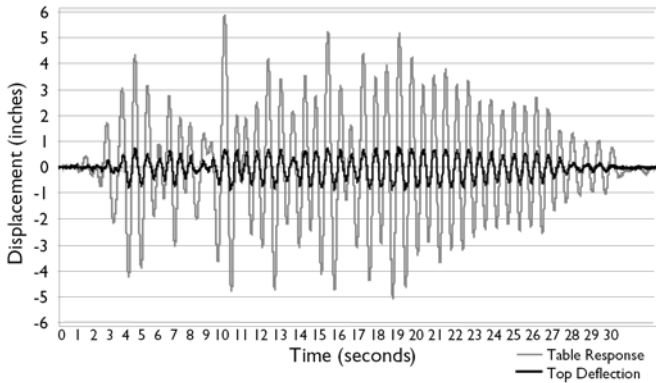


그림 2: 셰이커 테이블 테스트를 위한 과도 해석 입력

- 진동수 영역 접근 방식에서는 정해진 진동수의 입력에 대응되는 출력의 크기만을 측정할 수 있습니다. 또한 모든 입력이 본질적으로 주기적 또는 싸인 곡선적이고 해당 진동수에서 일정한 진폭을 갖는다는 가정이 필수적으로 적용됩니다. 이처럼 단순화된 출력은 입력 폭, 방향 또는 입력의 수는 변하지 않고 입력 값의 속도만이 변할 경우 가장 효율적입니다. 이 방식은 셰이커 테이블(그림 3)의 사례에서와 같이 전체 작동 범위에 걸쳐 입력 진동수를 바꾸어 가면서 최대 응답 값을 식별하고자 할 때 공통적으로 사용됩니다.

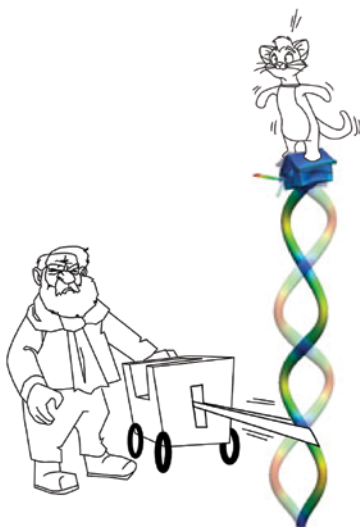


그림 3: 고양이 떨어뜨리기 문제의 새 모이통에 적용된 가변 진동수의 자동 셰이커 장치

입력 값은 단일 진동수에서의 피크 하중, 변위 또는 가속도가 될 수도 있고 진동수에 따라 입력의 크기가 어떻게 변화하는지를 말해 주는 복잡한 함수 또는 테이블이 될 수도 있습니다.

3. 진동의 해석을 위한 세 번째 방법은 통계 및 확률의 영역과 관련이 있습니다. 이 접근 방식은 널리 사용되다 보니 임의 진동이라는 잘못된 이름으로 종종 불리곤 합니다. 임의 진동 해석은 입력 값의 속도 또는 진동수 및 진폭이 반복되는 상황보다는 예측 가능한 평균 하중 값을 갖는 상황에서 필요합니다. 결론적으로 주어진 진동수에서 확률상 가능한 입력 에너지의 양을 구하기 위해서는 주어진 시간 범위에 걸쳐 수학적으로 대표성이 있는 입력 값을 구성해야 합니다.

모든 관심 진동수 수준에서의 여러 가지 추정 에너지를 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 곡선 또는 표에 나타낼 수 있습니다. 입력이 주어진 범위만큼 변화할 때 시스템에서 응력 또는 변위의 증가 또는 감소가 나타난다는 것을 알 수 있듯이, 이러한 문제의 출력 결과를 사용하기 위해서는 비교 연구 방식을 사용하는 것이 최선의 방법입니다. PSD 곡선 또는 표는 비록 다른 두 가지 방식에 비해 분명 어렵 짐작에 의존하는 부분이 많기는 하지만 지진 또는 노면 요철의 사례에서 보았듯이 입력의 변화에 대한 시스템의 응답을 설명할 수 있는 유일한 방법입니다(그림 4).

모든 관심 진동수 수준에서의 여러 가지 추정 에너지를 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 곡선 또는 표에 나타낼 수 있습니다.

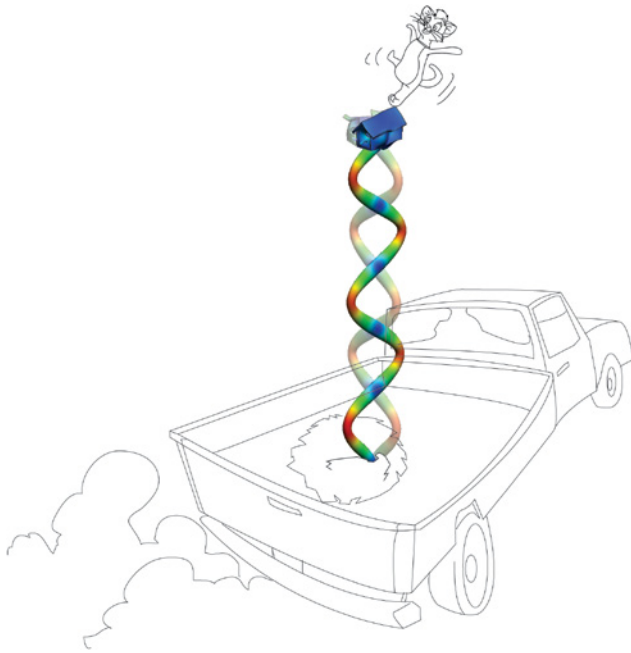


그림 4: 고양이 떨어뜨리기 문제의 새 모이통에 적용된 가변 진동수의 자동 셰이커 장치

진동 시뮬레이션의 기초 정의

정적 해석과 동적 해석

정적 해석은 하중이 일정한 상황 또는 최대값에 이를 때까지 매우 서서히 증가하다가 일정하게 유지되는 상황을 가정으로 사용하며, 따라서 가진된 시스템의 속도 및 가속도를 비롯한 모든 관성 효과는 미미한 것으로 간주될 수밖에 없습니다. 즉, 정적 해석은 일정한 응력 및 변위 값을 제공합니다.

문제는 대부분의 실제 사례에서 하중은 서서히 적용되지도 않을 뿐더러 시간 또는 진동수에 따라 변화한다는 것입니다. 또한 관성 및 감쇠력이 고려되어야 하고, 시뮬레이션의 유의성을 위해 동적 해석이 필요합니다. 지진 또는 충격 발생 시 구조물이 겪을 수 있는 변형을 촉발하기 위해 정적인 힘을 적용하는 것은 흔히 잘못 사용되는 방법 중 하나입니다. 이러한 이벤트는 각 부품의 한 지점 또는 중력 중심이 아니라 시스템의 모든 질량에 대해 작용하는 가속 또는 감속과 관련이 있습니다. 그 외에도, 지진 또는 셰이커 테이블 하중의 사례에서 만일 시스템이 최초 적용된 힘에 반응함에 따라 적용된 하중이 역전될 경우, 동적 시뮬레이션을 사용하지 않고서는 그로 인해 유발된 부품의 가속도를 예측하기란 극히 어려울 수 있습니다. 한마디로 정적 단순화는 결론을 크게 왜곡할 수 있습니다. 즉, 정적 단순화는 보존적인지 아니면 비보존적인지의 문제와 관련하여 일관성이 결여되기 때문에 대부분의 경우 적절치 못합니다.

모든 동적 시스템의 기초 요소는 시스템의 고유진동수 또는 모드입니다.

일반적 모달 해석

모든 동적 시스템의 기초 요소는 시스템의 고유진동수 또는 모드입니다. 모든 물체는 일체의 하중과 상관없이 독립적으로 공진 또는 고유 진동수를 갖습니다. 이러한 현상은 충돌 후 또는 변위력이 급속히 제거된 후 시스템이 자유 진동하는 동안 관찰할 수 있습니다. Hz(초당 사이클) 단위로 정의되는 낮은 쪽 고유 진동수는 달성되어야 할 최소한의 에너지 양을 필요로 하는 변형된 형상(모드 형상)을 띕니다. 막대기와 비슷하게 길고 얇은 모양을 하고 있는 캔틸레버의 경우(그림 5), 더 높은 고유 진동수를 나타내는 (b)에서보다 최저 고유 진동수를 나타내는 (a)에서 파트를 변형하는 데 필요한 에너지가 분명 더 적을 것입니다.

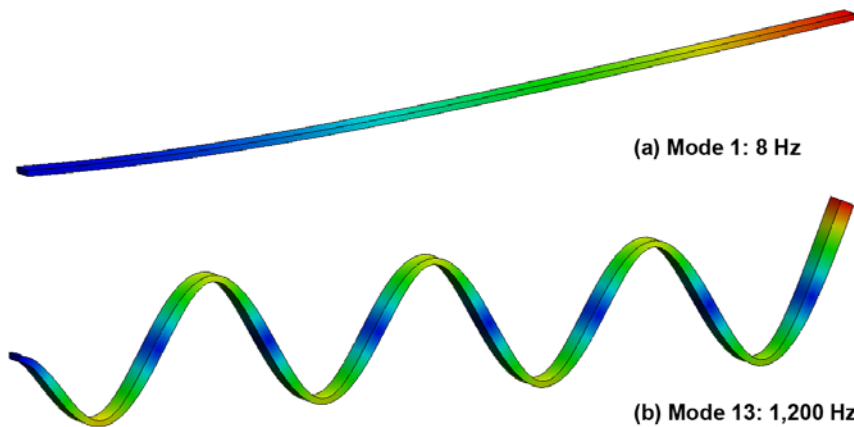
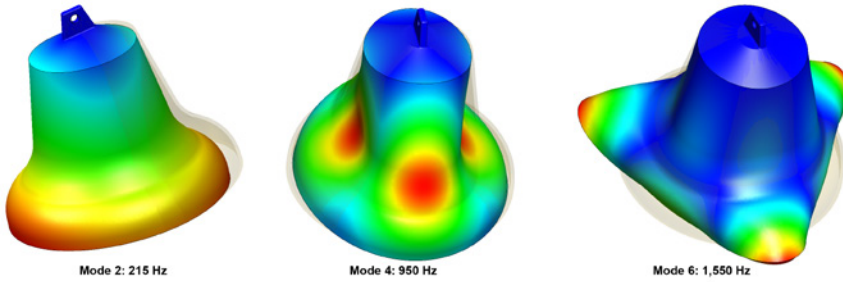


그림 5: 얇은 빔의 두 가지 고유 진동수

결론적으로 설계자는 최초 몇 개의 모드에만 관심을 갖는 것이 보통인데, 그 이유는 이 범위 내에서 대부분의 작용이 일어나기 때문입니다. 더 높은 진동수에서 공진이 일어날 경우, 그로 인한 진폭은 일반적으로 낮은 주파수에서보다 더 작습니다. 단, 작은 응력이 피로 파손을 일으킬 수 있는 장기적 진동의 경우, 높은 진동수에서의 응답이 여전히 유의할 수 있으며 검사되어야 합니다.

종의 움직임은 흥미로운 모드 연구 사례 중 하나입니다. 울리는 종의 흔들거림 효과를 시각화하면 여러 가지 음조별로 모서리가 물리적으로 파문을 일으키는 모습을 과장된 모션으로 볼 수 있습니다. 종의 음색과 종소리의 지속 시간은 지오메트리, 주조의 정밀도 및 재질에 따라 달라집니다. 아래의 그림 6에서 보듯 종의 전체적인 음향은 상이한 각각의 움직임(모드) 패턴에 의해 동시적으로 생성되는 음조가 집합된 결과물입니다.



동적 솔루션의 필요 여부를 결정하는 중요한 요인은 입력 주파수 또는 펄스 지속시간입니다.

그림 6: 울리는 종의 모드 형상. 실제 음조는 각각의 모션에 의해 발생한 음조들이 겹쳐진 결과물입니다.

동적 솔루션의 필요 여부를 결정하는 중요한 요인은 입력 주파수 또는 펄스 지속시간입니다. 일반적으로 입력의 진동수가 부품 또는 시스템의 최저 고유 진동수와 유사하거나 그보다 클 경우, 설계자는 동적 해석을 수행해야 합니다. 동적 입력이 펄스일 경우에는 시뮬레이션을 통해 펄스의 지속 시간을 고유 진동수의 시간 길이와 비교해 보아야 하는데, 그 이유는 그 모드 형상이 그 펄스에 의해 가진될 수 있기 때문입니다.

진동수의 시간 길이는 해당 진동수의 역수입니다. 예를 들어, 10Hz 짜리 파형의 시간 길이는 1/10(0.1)초입니다. 펄스의 지속 시간이 해당 고유 진동수의 시간 길이와 비슷할 경우, 동적 해석을 사용하는 방안을 고려해 보아야 합니다.

시간 기반 분석

시간 기록(과도) 해석은 단시간 동안의 펄스에 의한 응력 또는 변형의 크기를 구하고자 할 때 흔히 사용됩니다(그림 7). 만일 펄스가 공진 진동수를 유발하는 경우, 그로 인한 응력 또는 변형이 동일한 크기의 정적 하중에 비해 커질 수 있습니다. 단, 이 때에는 실제 시간 길이가 중요한 요소가 됩니다. 만일 동일한 하중이 훨씬 빠르게 적용되었다가 제거될 경우, 시스템이 반응할 시간을 갖기도 전에 하중이 적용되었다가 사라지게 되고 아무런 문제도 발생하지 않습니다. 반면, 만일 하중이 훨씬 느린 속도로 적용될 경우 응답이 정적 상태에 접근하게 되고 별다른 것 없는 응답이 나타날 수 있습니다. 과도 해석은 이 세 가지 상황을 모두 해결해 줍니다.

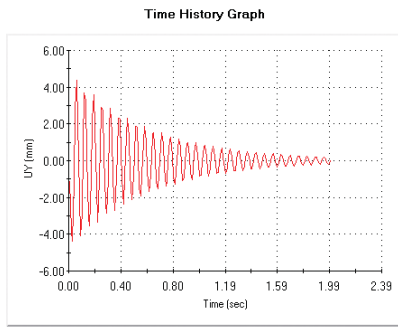


그림 7: 구조물의 단일 지점에 적용되는 변위 대 시간 및 순간 하중으로 인한 초기 변위가 표시된 도표의 샘플

조화(진동수 응답) 해석

조화 해석은 하나 이상의 고유 진동수로 적용되는 힘이 오래도록 계속되는 상황에서의 구조 해석을 위한 중요한 도구 중 하나입니다(그림 8).

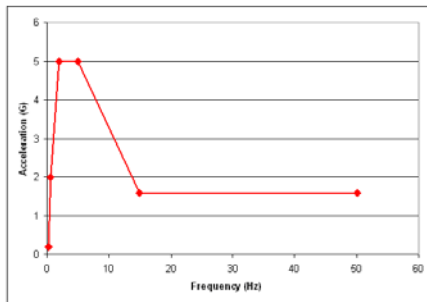


그림 8: 전자제품 테스트를 위한 가속도 대 진동수 스펙트럼

연속적인 에너지 방출로 인한 재해의 전형적인 예로는 1940년 개통 4개월 후 붕괴된 워싱턴주 Puget Sound의 Tacoma Narrows 현수교 사건을 꼽을 수 있습니다. 당시 다리가 붕괴된 원인은 비용 절감 차원에서 교량 데크 보강재의 양을 4단위 이상 줄이도록 원래의 설계를 변경했기 때문이었습니다. 문제의 발단은 그날 이른 아침 시속 35-46마일의 바람이 불면서 교량이 3-5피트 높이의 상하 변위를 일으키며 물결처럼 움직이기 시작한데서 시작되었습니다. 그 후 수 시간 후 바람의 영향이 바뀌면서 비틀림 모드가 가진되기 시작했고, 이 모드가 증폭되면서 노면의 콘크리트 조각이 파손되기에 이르렀습니다. 결국은 전체 구간이 마구 부러지기 시작했고, 큰 조각들이 강으로 떨어졌습니다. 다행히 오전 10시에 당국이 교량을 폐쇄할 때까지 사상자는 발생하지 않았습니다.

임의 진동 입력은 한정된 시간 동안 지속되는 이벤트에서 파생되지만 이 이벤트의 세부 사항은 시간 종속적입니다.

임의 진동 해석

임의 진동 입력은 한정된 시간 동안 지속되는 이벤트에서 파생되지만 이 이벤트의 세부적 부분은 시간 종속적입니다(그림 9). 또한 평가 대상 시간의 길이가 길수록 진동수 영역의 통계적 표본 추출 결과가 개선됩니다. 결과적으로 동적 해석에 투입되는 데이터는 기본적으로 입력 이벤트에 의해 가진된 모든 진동수 수준에서 산출된 총 에너지의 요약 값과 같습니다. 노면 지오메트리의 편차 또는 지진력의 임의 값은 그러한 입력 값의 예에 해당합니다.

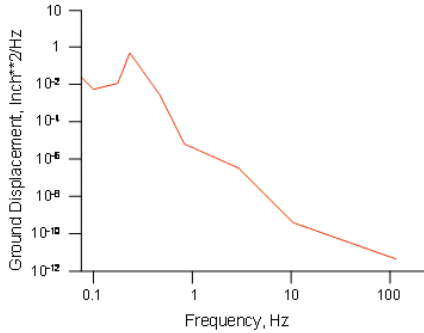


그림 9: 파괴된 현장의 건물 근처에서 측정된 지면의 변위를 나타내는 PSD 곡선

동적 해석 수행을 위한 접근 방식

기계 엔지니어는 사용 가능한 세 가지 선형 동적 소프트웨어 시뮬레이션 방식(시간 기록(과도) 해석, 조화 해석 또는 임의 진동 해석) 중 어느 것이 자신의 엔지니어링 문제 해결에 적합한지를 결정해야 합니다. 전술한 바와 같이 해석 요구 사항을 나타내는 최고의 지표는 자신이 가지고 있는 입력 데이터의 형식입니다. 단, 위의 세 가지 중 어느 것을 사용하든 소프트웨어의 실행은 적절한 CAD 모델을 개발하고, 관련 공진 진동수의 식별을 위한 진동수 해석을 설정 및 실행하고, 이어 선택된 동적 해석을 설정 및 실행하는 순서로 진행할 것을 권장합니다.

적절한 CAD 모델의 개발

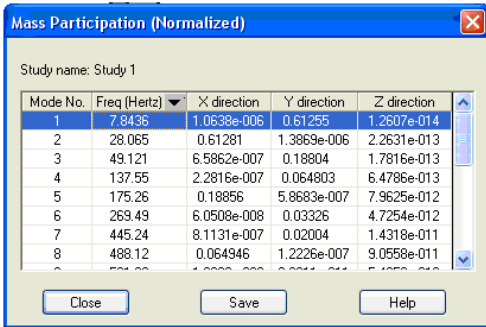
동적 시뮬레이션은 일반적으로 시간이 많이 소모되고 메모리도 많이 사용합니다. 이 두 가지 이유로 단순하고 효율적인 CAD 모델을 개발해도 성공적일 때가 있습니다. 그리고 이러한 해석에 있어서는 모델 유형의 선택(빔/라인 모델, 쉘/곡면 모델 또는 솔리드 모델)에 관한 지침을 고려하는 것이 그보다 더 중요한 문제가 됩니다. 응력 해석 결과를 얻기 위해서는 CAD의 세부 정보가 중요하며, 변위 또는 가속도 데이터의 경우에는 보다 단순한 CAD 모델만으로도 충분할 수 있습니다. 또한 지오메트리를 생성할 때 여러 가지 해석의 상대적 근사치 수준을 염두에 두어야 합니다. 과도 해석은 필터링 또는 단순화 없이 "실제" 입력을 사용하기 때문에 상세한 솔리드 모델의 큰 리소스 요구 사항이 도움이 될 수 있습니다. 반면, 조화 해석은 단순화된 데이터 세트를 사용하고 임의 진동 해석이 원래의 시간 기반 입력 데이터를 추가로 단순화하기 때문에 고도로 상세한 CAD 설명의 값이 급속히 감소하기 시작합니다.

.....
동적 시뮬레이션은 일반적으로 시간이 많이 소모되고 메모리도 많이 사용합니다. 이 두 가지 이유로 단순하고 효율적인 CAD 모델을 개발해도 성공적일 때가 있습니다.

진동수 해석의 실행

동적 해석은 일반적으로 시스템의 고유 진동수에 기초를 두고 있습니다. 이러한 진동수는 시간 변동 응답에 대한 상세 해석을 진행하기 전에 반드시 식별(즉, 모달 응답의 결정)되어야 합니다. 대다수의 소프트웨어 시뮬레이션 도구는 이러한 응답을 동적 해석을 실행하기 전에 찾을 수 있도록 되어 있으며, 아니면 세 가지 동적 해석 순서 중 하나를 실행할 때 첫 번째 단계로서 자동 완료되도록 할 수도 있습니다.

진동수 해석의 출력 결과(그림 10)에는 모달 형상, 모달 진동수 및 질량 분배 요소가 포함되어 있습니다. 이 마지막 출력 결과는 각각의 계산된 모드가 얼마나 유의하게 동적 해석에 참여할 수 있을지에 대한 지표가 됩니다.



Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	7.8436	1.0638e-006	0.61255	1.2607e-014
2	28.065	0.61281	1.3869e-006	2.2631e-013
3	49.121	6.5862e-007	0.18904	1.7816e-013
4	137.55	2.2816e-007	0.064803	6.4786e-013
5	175.26	0.18856	5.8683e-007	7.9625e-012
6	269.49	6.0508e-008	0.03326	4.7254e-012
7	445.24	8.1131e-007	0.02004	1.4318e-011
8	488.12	0.064946	1.2226e-007	9.0558e-011

그림 10: 일반적인 모달 진동수 목록 및 질량 분배 요소

진동수 결과 검토

시스템의 첫 번째 동적 시뮬레이션을 실행하기 위해서는 동적 해석이 필요한지 여부를 결정하기에 앞서 항상 모달 응답을 해결하고 검토해야 하며, 만일 필요하다면 어느 동적 해석을 사용할 것인지를 결정해야 합니다.

만일 관심 범위 또는 작동 범위 내에 공진 진동수가 없을 경우, 아마도 후속 동적 해석이 필요하지 않다는 판단을 내릴 수 있을 것입니다. 그리고 진동수가 작동 입력 범위 내에 있다 하더라도 하중의 적용으로 인해 실제로 가진될 형상을 해당 진동수가 대변하는지를 확인해야 합니다. 예를 들어, 횡하중으로 인해 공진 진동수가 유발될 수 있더라도 해당 진동수에서의 모드 형상은 세로 방향일 수 있습니다. 이러한 경우, 하중의 동적 요소가 결과에 미치는 영향이 극히 적습니다.

작동 주파수가 여러 개의 고유진동수와 모드형상으로 가진될 가능성이 높은 경우, 먼저 계산된 고유진동수를 작동 주파수 위쪽으로 밀어 올리도록 설계를 변경해야 합니다. 이 작업을 모달 회피라 합니다. 공통적인 기법으로는 무게 감소 또는 재분배, 강화 피처 추가 또는 재질 변경 등이 있습니다.

만일 전체 운영 속도 범위가 첫 번째 공진 진동수를 밀도록 설계를 수정할 수 없는 경우에는 낮은 모드를 더 낮게 밀어 내리는 것이 타당한 경우가 종종 있습니다. 낮은 속도에서의 가진은 낮은 에너지와 대응되며, 따라서 결과적으로 진동이 최소화됩니다. 대다수의 설계자들은 기계의 속도가 빨라지면서 기계에 떨림이 발생하다가 작동 속도에 이르러 현저하게 느낄 수 있는 진동이 모두 소멸되는 현상을 통해 이러한 효과를 알고 있습니다. 만일 고유 진동수가 허용 가능한 수준으로 회피될 수 있도록 설계를 수정할 수 없다면 아마도 동적 해석을 수행해 보아야 할 것입니다.

작동 주파수가 여러 개의 고유진동수와 모드형상으로 가진될 가능성이 높은 경우, 먼저 계산된 고유진동수를 작동 주파수 위쪽으로 밀어 올리도록 설계를 변경해야 합니다.

동적 해석의 설정

모달 솔루션은 후속 동적 해석에 있어 빌딩 블럭과 같기 때문에 시스템의 특성을 파악할 수 있을 만큼 충분한 모드가 식별되었는지를 확인해야 합니다. 즉, 최대 작동 진동수보다 최소 두 배 이상 높은 고유 진동수가 포함되기에 충분한 모드를 계산해야만 합니다. 예를 들어, 입력 진동수의 범위가 0에서 50Hz까지일 경우, 100Hz가 포함될 수 있을 만큼 충분한 모드가 고유 진동수 목록에 포함되어야 합니다.

아울러 이러한 지침 이외에도 지정된 입력 방향에 대한 질량 분배 요소를 검토해야 하며, 포함된 질량 분배 요소가 최소 0.8(80%)까지 추가되어야 합니다. 이렇게 하려면 최대 입력 속도의 두 배가 넘는 모드를 포함시켜야 하며, 그렇지 못할 경우 너무 적은 수의 모드가 포함되었다고 볼 수 있습니다. 또한 포함된 모드의 수를 최대 입력 진동수의 두 배 미만으로 줄이면 안됩니다. 이렇게 하면 해당 진동수에서 솔루션이 응답을 무시할 수 있으며, 결국 낮은 진동수의 결과와 통합되어 출력을 수용 가능한 범위 너머로 밀어 낼 수 있습니다.

동적 해석에 필요한 입력에는 부하 크기, 방향, 관심 위치, 감쇠 및 주파수 범위 또는 시간 길이 등이 있습니다. 출력 값을 이용하면 응력, 가속도 및 변위와 같은 파라미터를 시스템의 알려진 한계와 비교할 수 있는 능력을 얻을 수 있습니다. 그리고 실패가 발생할 수 있는지 여부 및 비용 절감이 가능한지 여부를 판단할 수 있습니다.

과도 해석을 수행하려면 정적 해석의 경우와 정확히 똑같이 하중과 구속조건이 적용되어야 하며, 단지 하중이 시간에 따라 변하도록 정의되어야 한다는 것만 다를 뿐입니다.

조화 해석을 사용할 때에는 적용된 하중으로 시스템을 진동시켜야 합니다. 또한 진동수의 변화에 따라 진폭이 증가 또는 감소하도록 하중 테이블 또는 함수를 정의할 수 있습니다. 아니면 구속조건 중 하나에서 시스템을 진동시킬 수 있는데, 이를 기저 가진이라 합니다. 이는 수학적으로 셰이커 테이블 테스트와 유사합니다.

비록 임의 응답 해석의 설정이 조화 해석의 준비와 유사하기는 하지만 하중 또는 기저 가진에 대한 입력은 PSD 대 Simple Force, 변위, 속도 또는 가속도를 기준으로 설명됩니다. 임의 진동 해석의 출력은 RMS(제곱 평균) 및 응답(변위, 속도, 가속도 및 응력)의 PSD 값을 제공합니다. 이 데이터는 실제로 주어진 진동수에서 예상 응답의 최대 가능값을 나타냅니다. 입력은 통계적 샘플링이므로 출력이 더 이상 정확해질 수 없습니다. 하지만 이것은 임의 이벤트에서 신뢰할 수 있는 설계 데이터를 얻을 수 있는 가장 효율적인 방식입니다.

.....
동적 해석에 필요한 입력에는 부하 크기, 방향, 관심 위치, 감쇠 및 주파수 범위 또는 시간 길이 등이 있습니다.

감쇠

동적 해석은 모달 감쇠 계수가 없을 경우 보통 유의하지 않습니다. 감쇠(ζ)는 진동 모션으로 인해 시스템에서 상실된 에너지의 양을 나타냅니다. 감쇠가 없다면 한번 가진된 시스템은 영구히 진동할 것입니다. 다양한 감쇠 소스로 인해 재질의 영향, 마찰력, 소음, 그리고 유체 상호 작용과 같은 환경 영향 등을 비롯한 감쇠 요인이 발생합니다. 이 계수는 일반적으로 가볍게 감쇠되는 시스템(단일 강 파트)의 경우 0.01에서 크게 감쇠되는 시스템의 경우 0.15에 이릅니다. 감쇠에 관한 다른 데이터가 없을 경우, 2%(0.02)가 일반적으로 선택되는 기본 값입니다. 유효한 감쇠 계수는 실제적인 설계 선택의 지침으로서 매우 중요합니다.

그림 11은 시스템의 일반적인 게인(Gain)을 여러 진동수별로 보여 주며, 1이라는 X 값은 처음 고유 진동수에서 시스템의 가진을 나타냅니다($\omega =$ 가진 진동수, $\omega_n =$ 고유 진동수). 보다시피 감쇠 계수(ζ)가 0일 경우 동적 증폭(게인)은 이론적으로 무한할 수 있으며, 게인은 감쇠가 증가함에 따라 급속히 감소합니다. 이러한 결과를 놓고 볼 때 위의 특성은 의사 결정에 크게 영향을 미친다고 할 수 있습니다. 또한 간단한 테스트도 감쇠를 판정하는 데 도움이 될 수 있습니다.

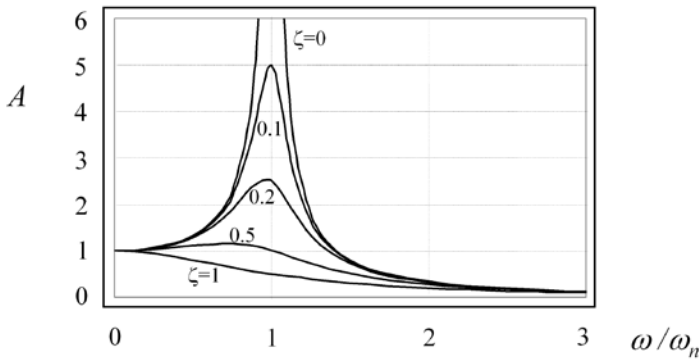


그림 11: 여러 감쇠 계수 하에서 시스템이 공진할 때의 시스템 게인

.....
다양한 감쇠 소스로 인해 재질의 영향, 마찰력, 소음, 그리고 유체 상호 작용과 같은 환경 영향 등을 비롯한 감쇠 요인이 발생합니다.

비선형 동적 해석

동적 해석에 있어 고려해야 할 또 하나의 사항은 지금까지 설명된 모든 시뮬레이션 기법에 선형 해석의 모든 규칙이 적용되며, 따라서 선형 해석에 속한다는 사실입니다. 만일 재질 자체가 비선형 속성을 나타내거나 부품 사이에 비선형 접촉이 발생하거나 시스템이 비선형 해석을 필요로 할 만큼 큰 변위를 겪을 경우 비선형 동적 해석을 수행해야 합니다. 대부분의 비선형 동적 솔루션은 물리적 또는 시간적 영역에서 작동하는 데, 그 이유는 모달 진동수의 기본적 수학적 접근 방식이 비선형 동작과 잘 맞지 않기 때문입니다.

맺음말

대부분의 제품에는 구동 파트가 있으며 단순한 운송 도중에도 외부의 힘에 의해 힘이 가해지거나 움직입니다. 이는 동적 시뮬레이션이 모든 예측 시뮬레이션 프로그램의 자연스러운 확장 선상에 있다는 것을 의미합니다. 진동 또는 충돌에 대한 제품의 반응에 관한 데이터를 조기에 확보하면 그에 따라 이른 시점에 설계 변경 의사 결정을 내릴 수 있습니다. 이러한 통찰력은 개발 프로토타입의 필요성을 줄일 뿐 아니라, 프로토타입 및 테스트 계획의 효과를 최대한 높여 줍니다.

예를 들어, 어느 통신함 제조업체가 4-6주를 투자하여 3축 방향의 지진파 진동 테스트를 위한 프로토타입 한 개를 개발, 운송 및 테스트했으나 첫 번째 테스트에서 용접 부분이 일부 파손되었다고 가정하겠습니다. 이렇게 되면 이후의 모든 테스트 결과는 폐기될 수밖에 없으며, 비용도 중요하지만 더 큰 문제는 프로젝트 시간이 허비되었다는 것입니다. 결국 회사는 이러한 문제에 대비하여 Harmonic-Response 해석을 이용해 가상 셰이커 테이블 테스트를 수행하기 시작했고, 실패 가능성이 높은 영역을 식별할 수 있었으며, 이렇게 얻은 데이터를 통해 효율적이고 비용 대비 효과가 높은 수정 요구 사항을 식별해냄으로써 실패의 확률을 줄일 수 있었습니다. 아울러 실패를 일으킬 가능성이 가장 높은 테스트가 맨 나중에 오도록 프로토타입 테스트의 순서를 계획할 수 있게 되었습니다. 결과적으로 이 회사는 수정된 파괴검사 프로그램을 이용해 시간, 비용 또는 노력의 낭비를 거의 또는 전혀 없애고 최대한의 이익을 얻을 수 있었습니다.

본 백서에 설명된 기법들은 각종 주요 설계 시뮬레이션 도구를 통해 쉽게 접할 수 있습니다. 나아가 일부 버전은 Dassault Systèmes SolidWorks Corp.의 SolidWorks® 3D CAD 소프트웨어와 같이 흔히 사용되는 CAD 시스템에 통합되어 공급되기도 합니다. 동적 시뮬레이션은 향상된 제품의 설계를 가능하게 해 주므로 각자의 응용 분야에 맞춰 이 기술을 보다 심층적으로 탐색해 보는 것이 좋습니다. 끝으로 진동 해석에 관한 세 가지의 권위 있는 문헌을 아래와 같이 소개합니다.

참조

Elements of Vibration Analysis; Leonard Meirovitch; McGraw-Hill, Inc., 1986.
Mechanical Vibrations (fourth edition); Singiresu S. Rao; Pearson Education, Inc., 2005.
A Finite Element Dynamic Primer; D. Hitchings (ed.); NAFEMS 1992.

본사
Dassault Systèmes SolidWorks Corp.
175 Wyman Street
Waltham, MA 02451 USA
전화: +1-781-810-5011
이메일: info@solidworks.com

아시아/태평양 지사
전화: +65-6511-7988
이메일: infoap@solidworks.com

한국 지사
전화: +82 (0)2 3270 8500
이메일: infokorea@solidworks.com

