

M Class – Day 3

진동해석 마스터하기!



CONTENTS

Day 3 – 진동해석 마스터하기!

Session1. 진동해석을 위한 기초사항

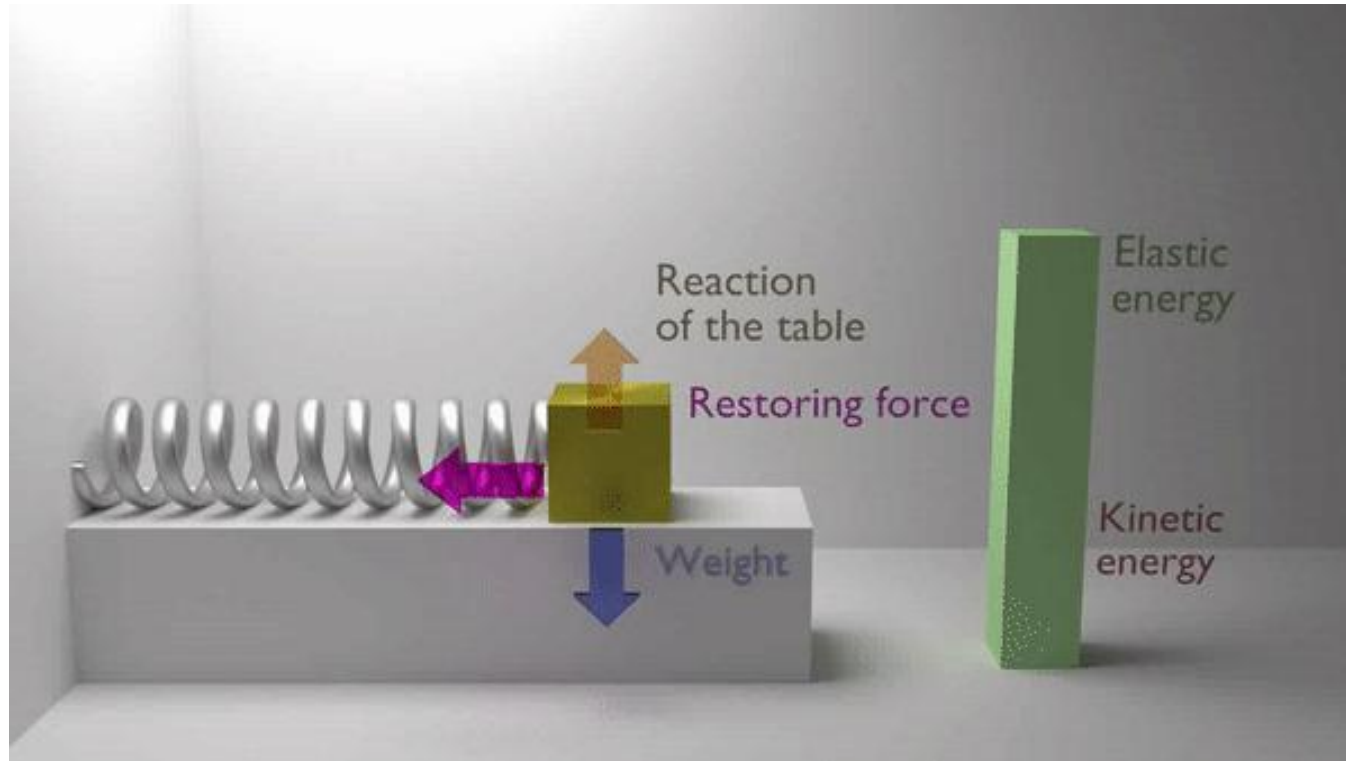
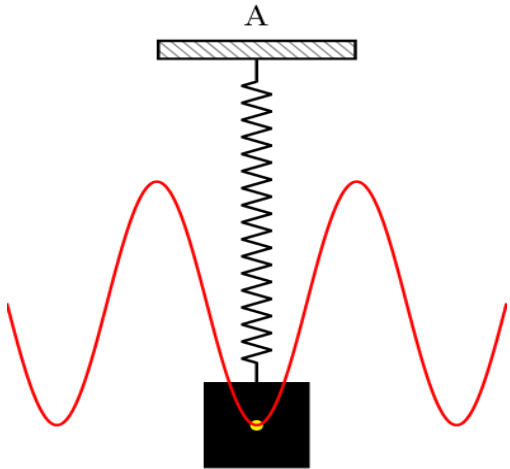
Session2. 제품의 동특성 및 진동응답 평가법 이해하기

Session3. 불규칙한 하중에 대한 안전성 확보 방안 이해하기

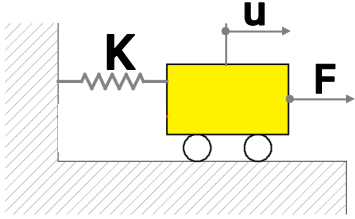
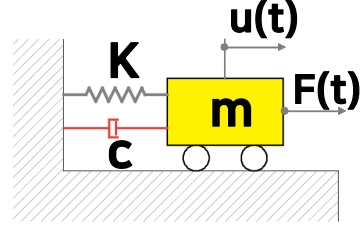
Session4. 진동피로를 고려한 설계제품 내구수명 예측

진동이란

: 진동은 진동이 평형점을 기준으로 발생하는 기계적 현상.

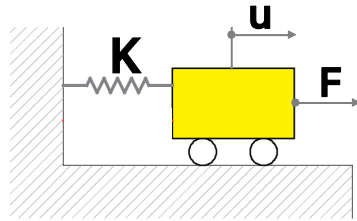


하중에 따른 구분

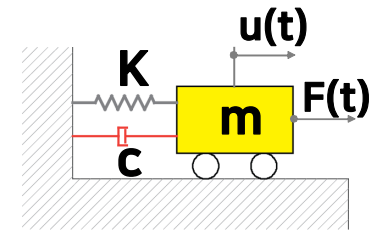
	정적해석	동해석
목적	변형	변형 + 진동 특성
방정식	$F = Ku$	$F(t) = M\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + Ku(t)$
모형		
하중, 응답	시간 흐름에 따른 변화 無	시간 흐름에 따른 변화 有

하중에 따른 구분

정적해석

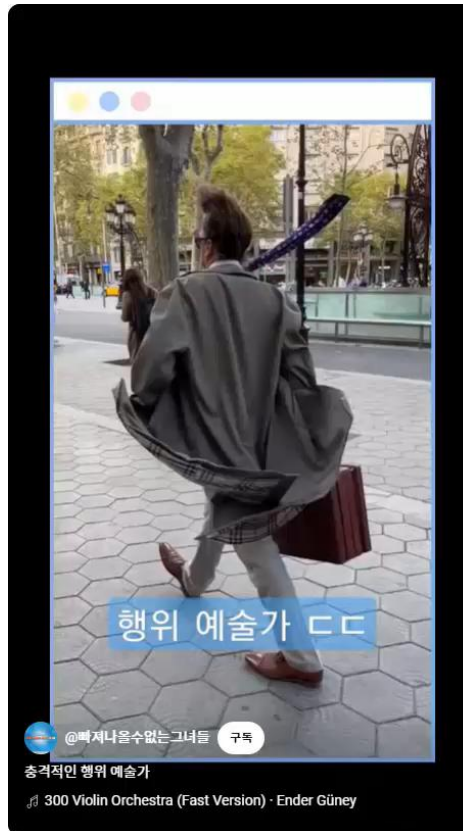


동적해석



일상 생활예시

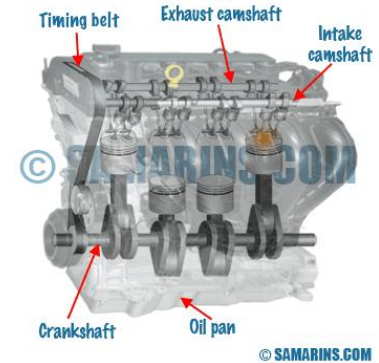
정적해석



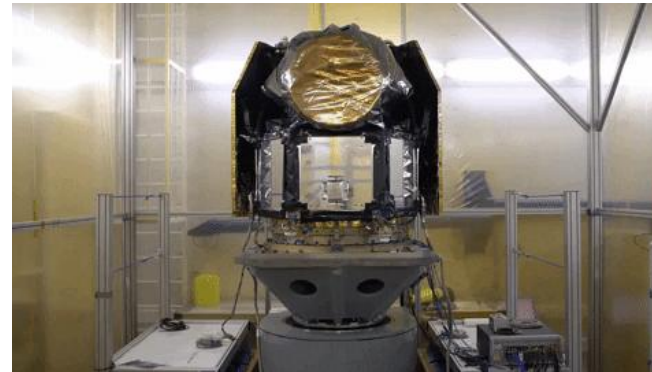
동적해석



<항공>



<자동차>



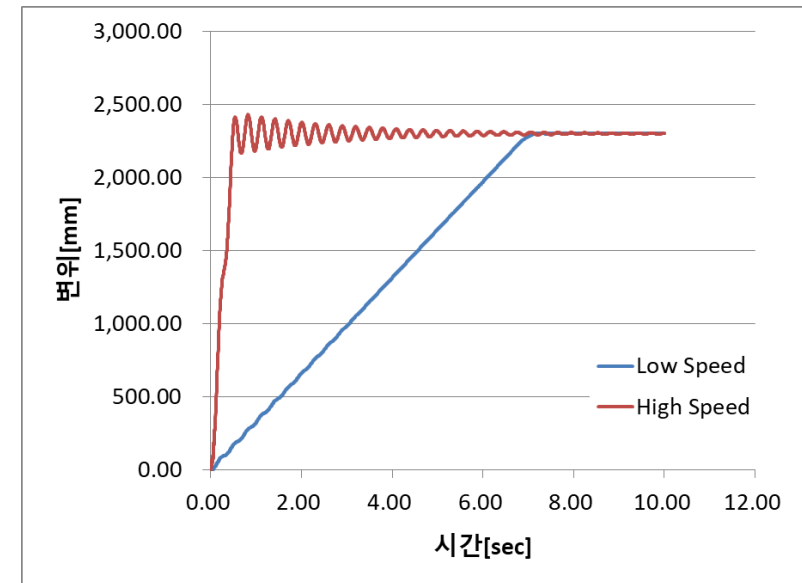
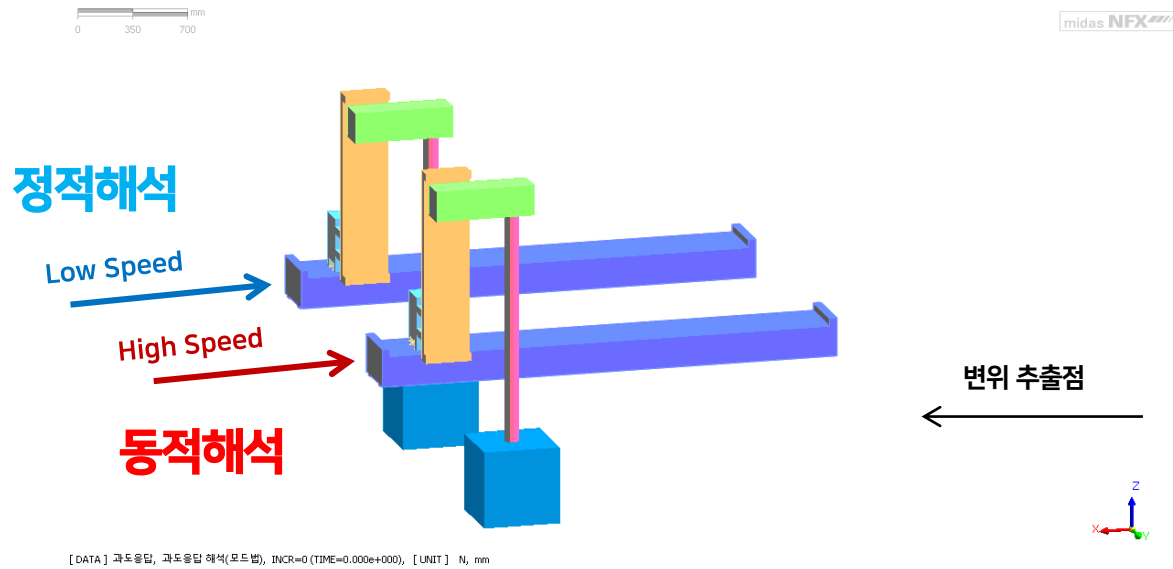
<우주산업>



<가전>

출처 : <https://www.youtube.com/shorts/snzMrTf417k>

하중에 따른 구분



일상 생활예시

출처: dongA.com



타코마교 붕괴 사고



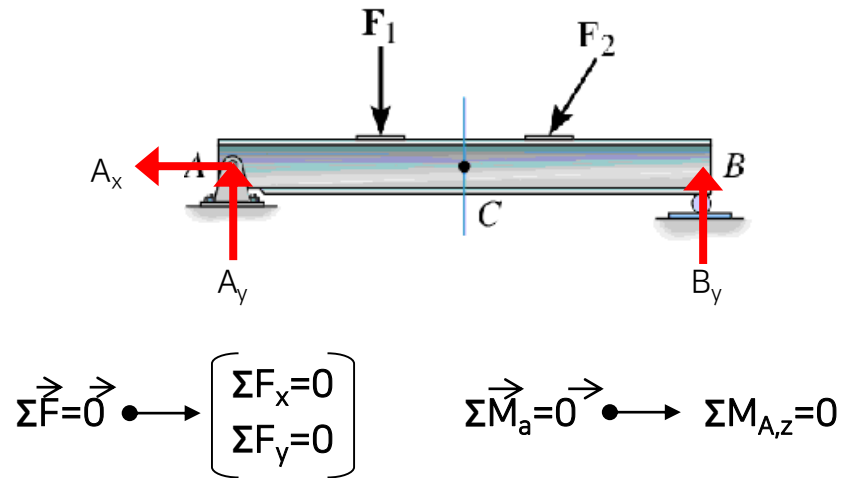
“그것은 단지 교량관계
전문가들도 공기역학적
(aerodynamics) 및 동적
진동의 지식을 급속히
발전하는 구조설계의 지식과
발전을 제때에 결합하여
적용하는 것을 아주 소홀히
한데서 비롯된 것이다.”

구조역학의 역사

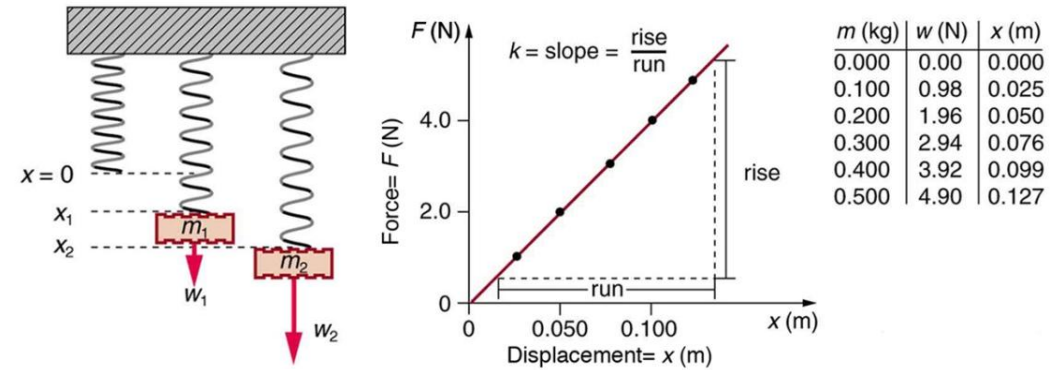


구조역학의 역사

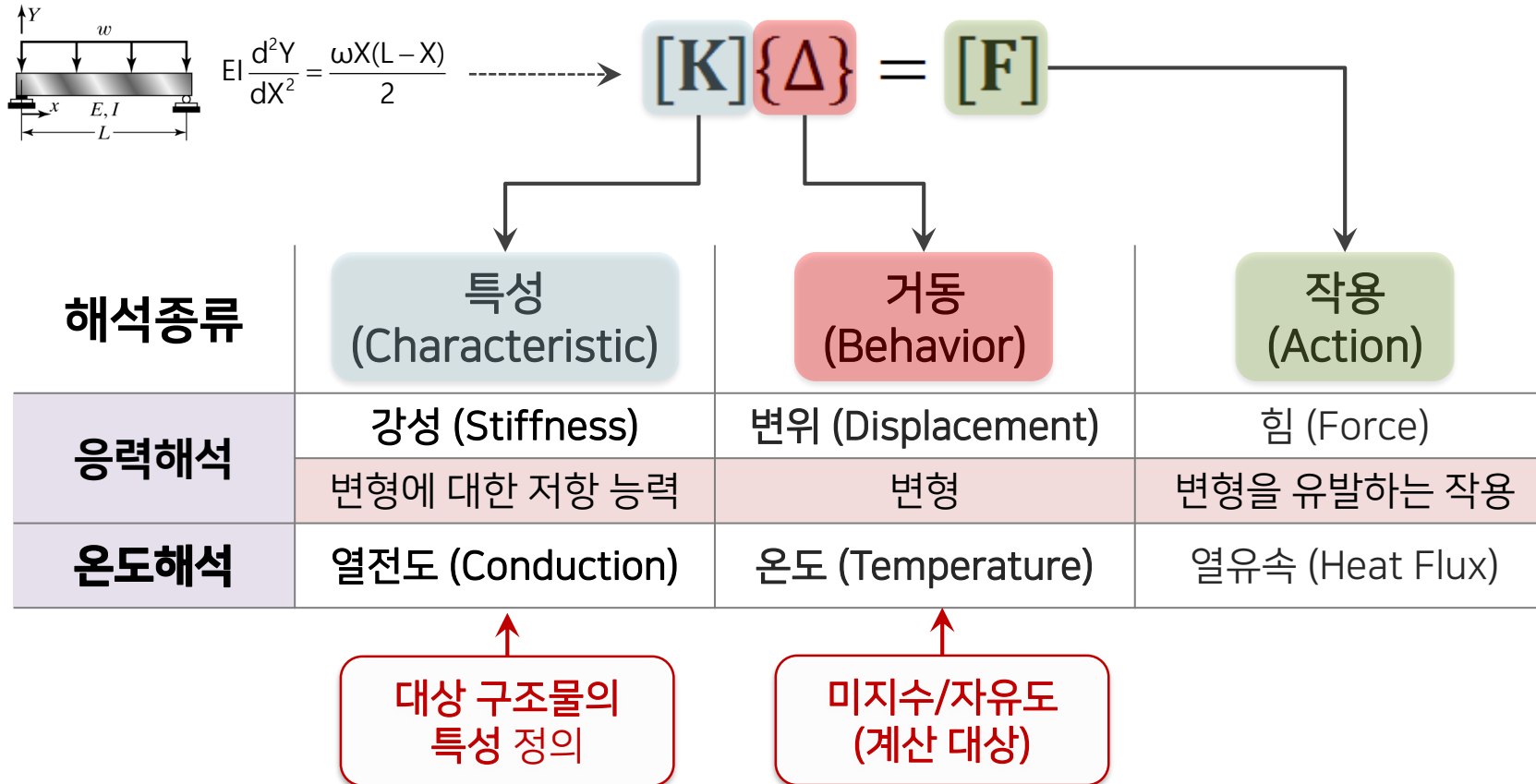
뉴턴의 법칙



후크의 법칙

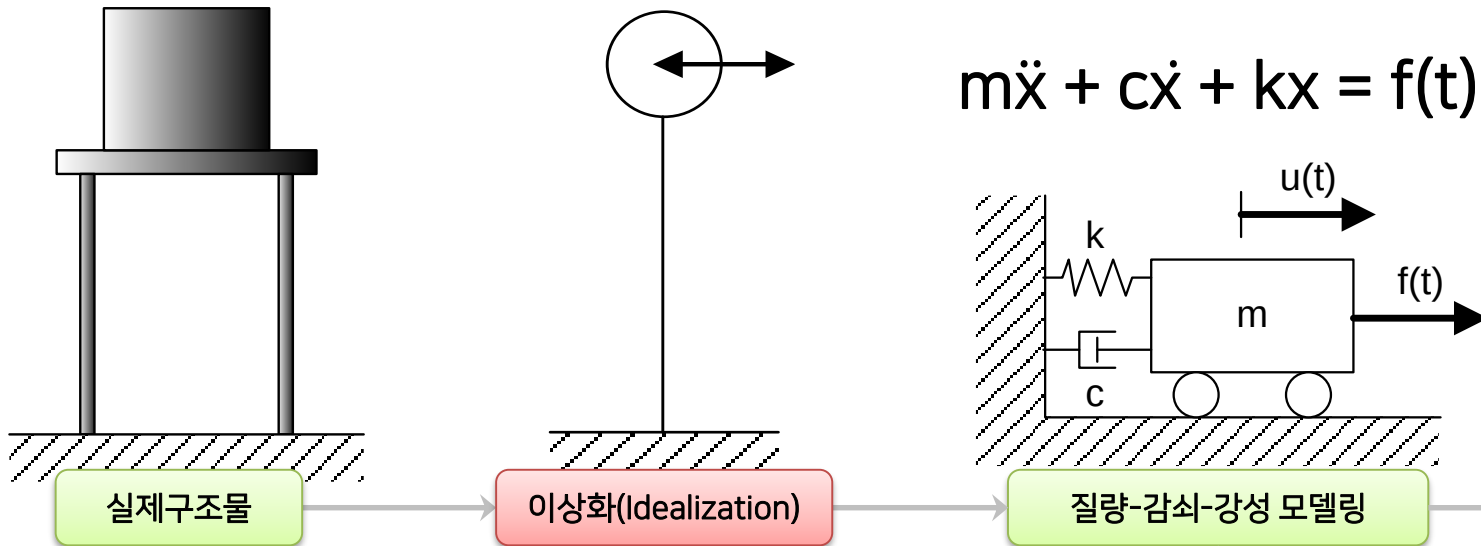


구조해석 운동방정식



구조해석 운동방정식 발전

- 운동방정식을 유도하기 위한 다양한 방법들이 있지만,
이 방법들은 모두 뉴턴의 운동법칙이 기본인 고전역학을 근거로 하므로, 결국 동일한 방정식이 유도



뉴턴의 운동방정식
(Newton's equation of motion)

달랑베르의 원리
(d'Alembert's principle)

가상일의 원리
(Principle of virtual work)

해밀턴의 원리
(Hamilton's principle)

라그랑지의 방정식
(Lagrange's equation of motion)

운동방정식 산정

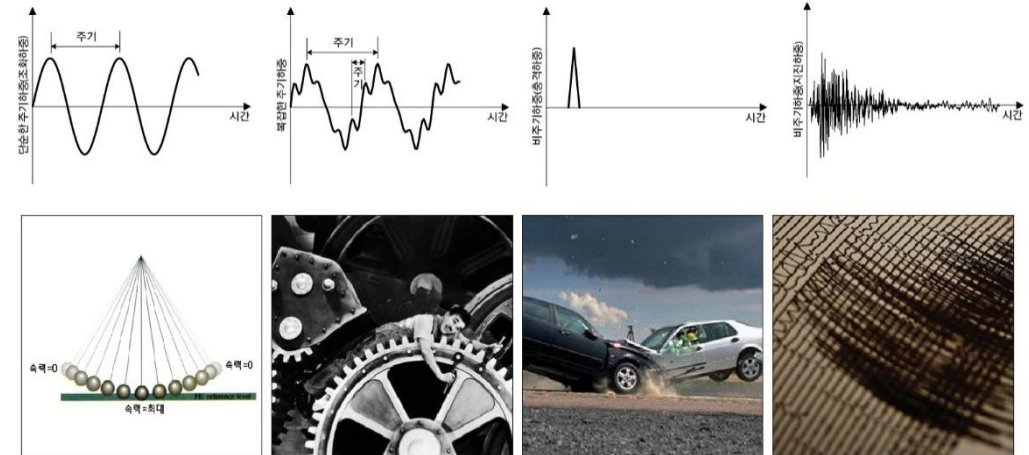
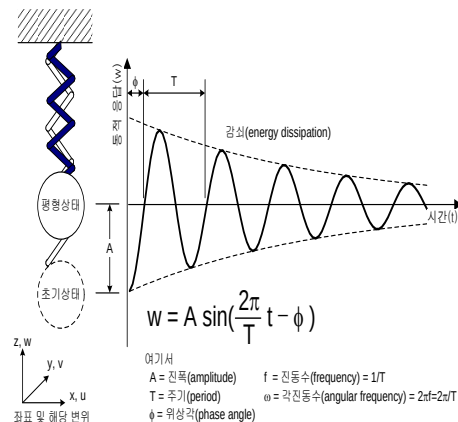
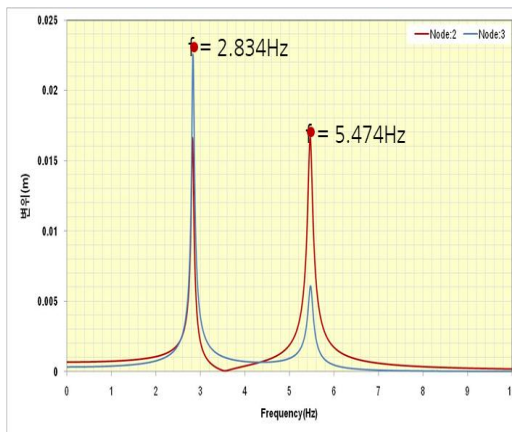
구조해석 운동방정식 이해

(질량)	(감쇠비)	(강성)	(하중)
관성력	감쇠력	복원력	외력

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

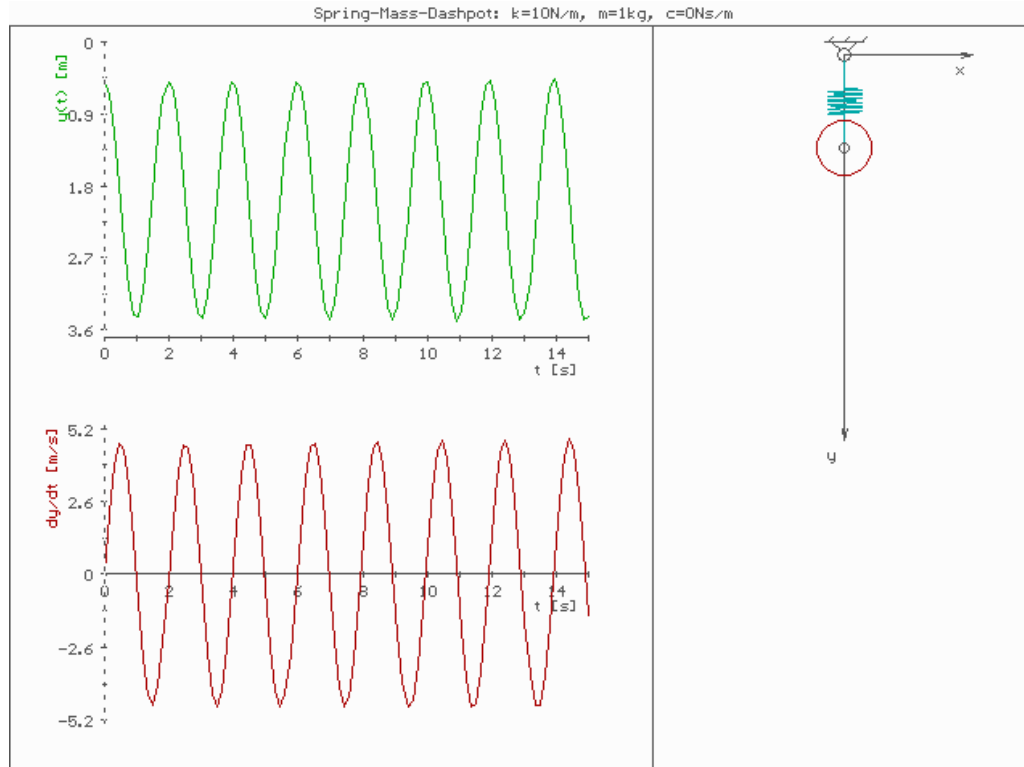
물체의 움직임(동적응답)에 영향을 주는 변수

해석 타입을 결정하는 주요 변수



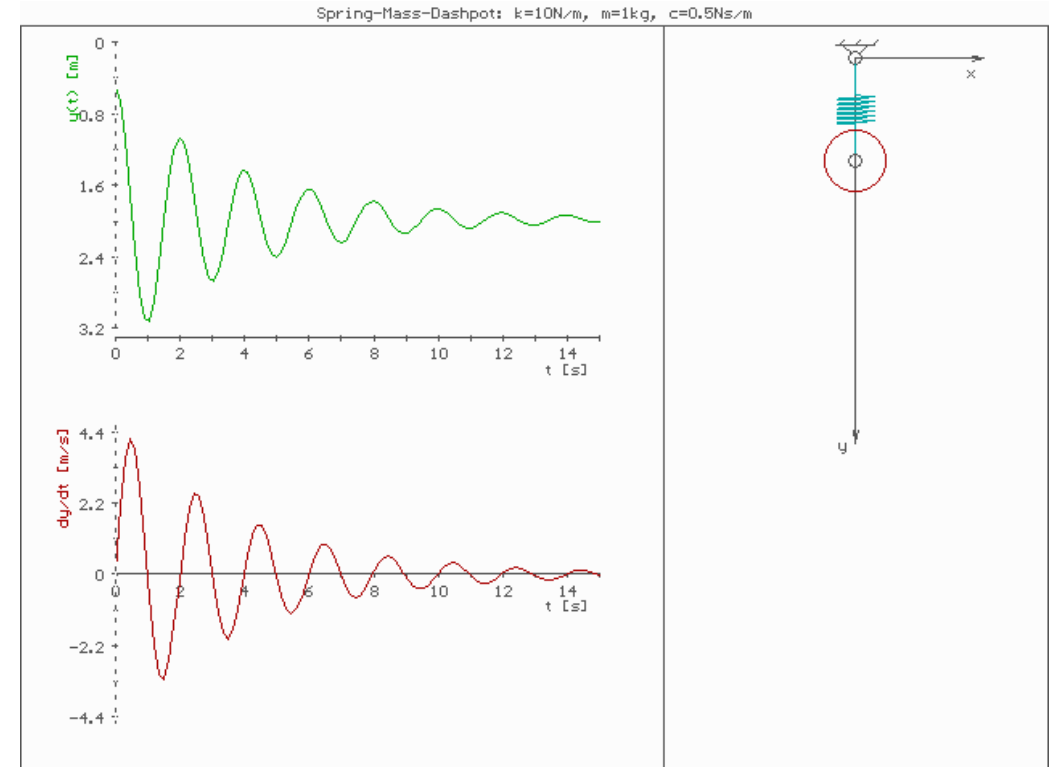
감쇠(Damping) 이해하기

Damping ratio 없는 경우



출처 : <https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>

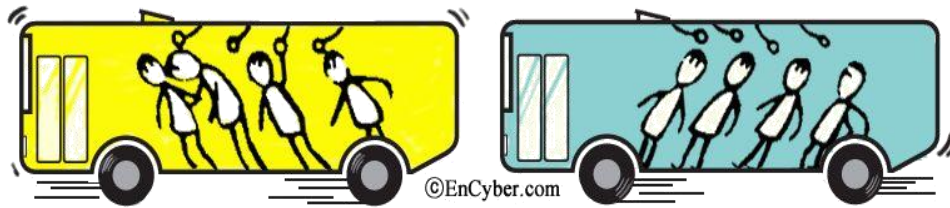
Damping ratio 있는 경우



출처 : <https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>

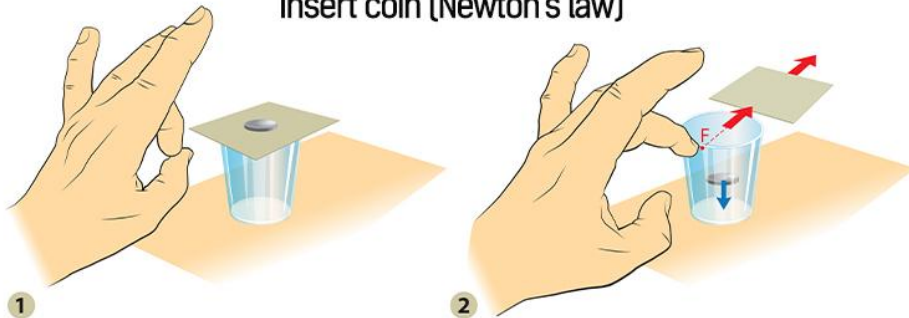
진동해석 관성/감쇠에 대한 이해

관성력

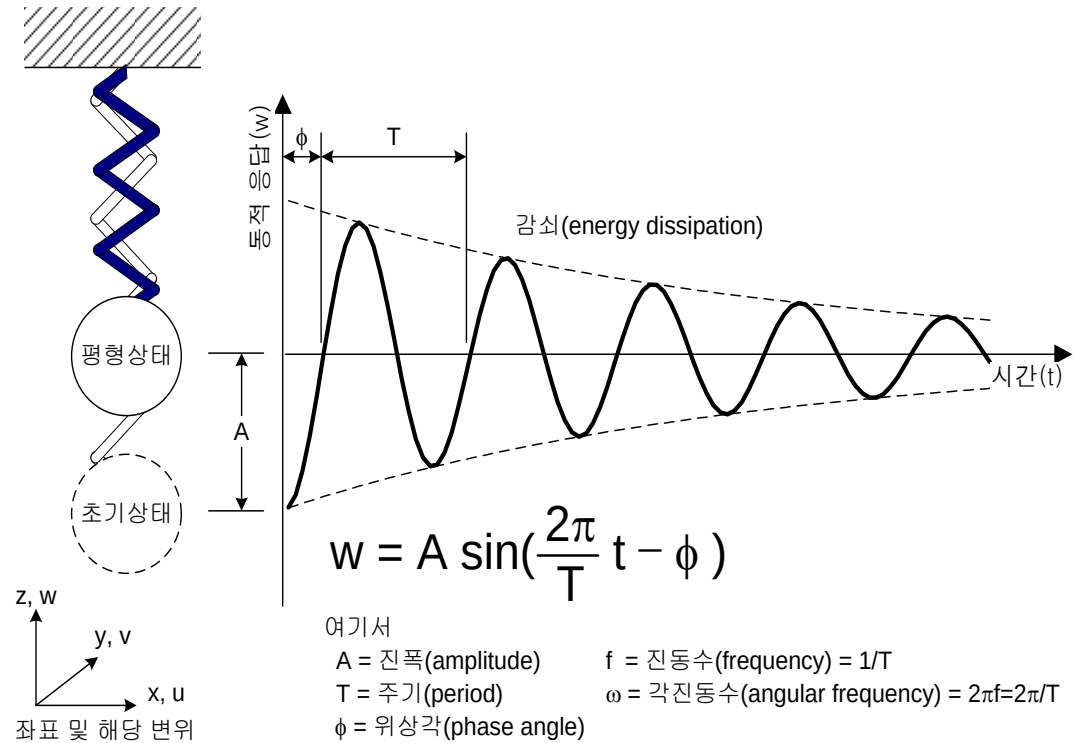


©EnCyber.com

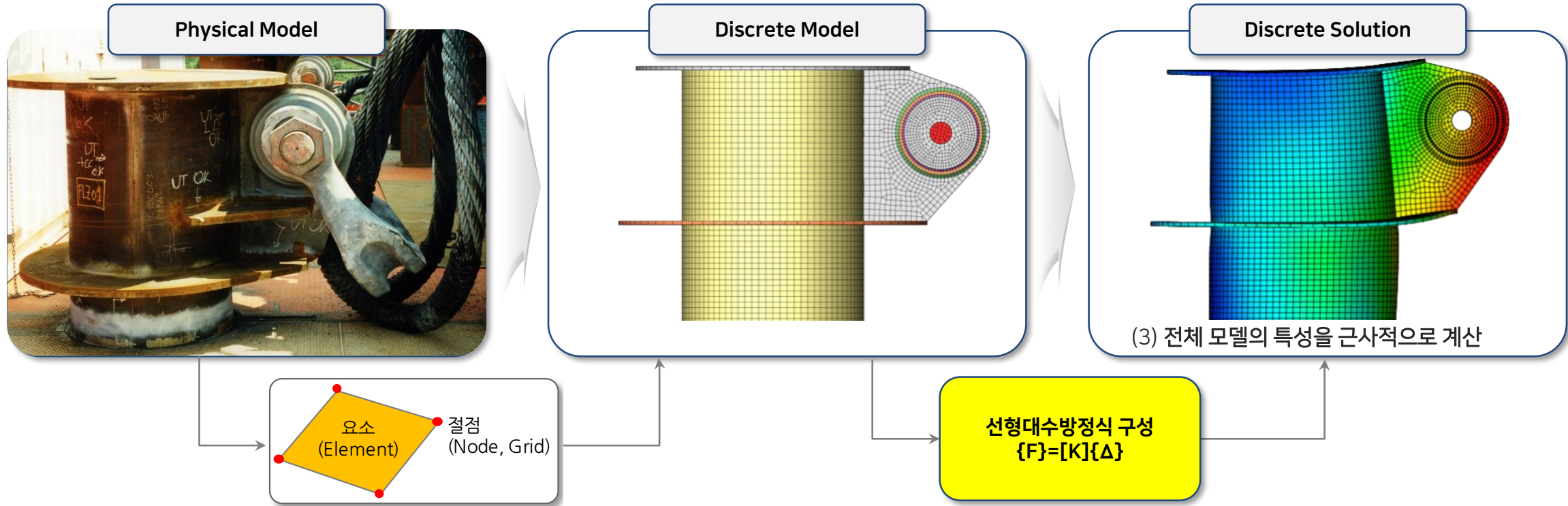
Insert coin (Newton's law)



감쇠력



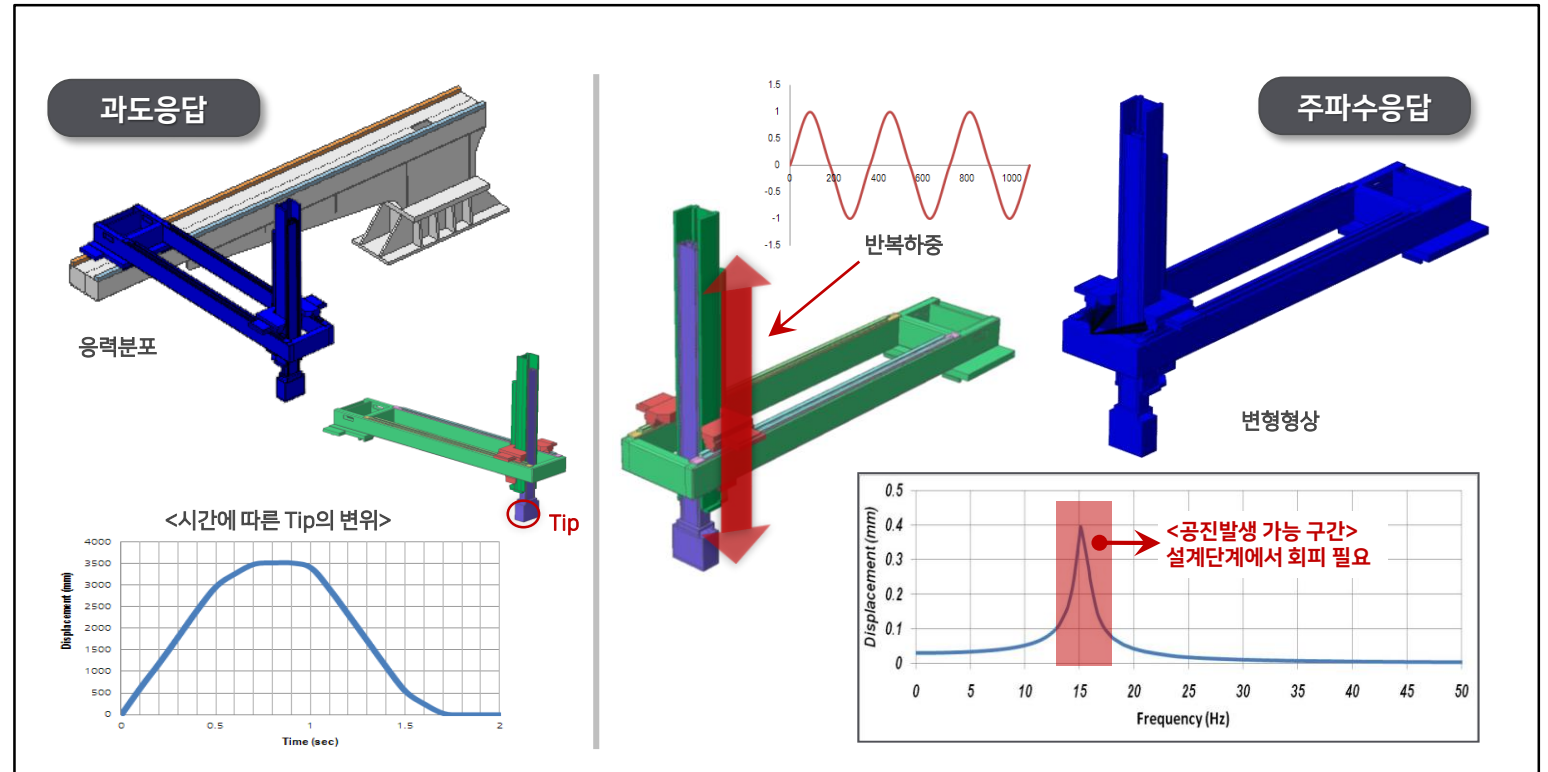
일반적인 구조해석 과정



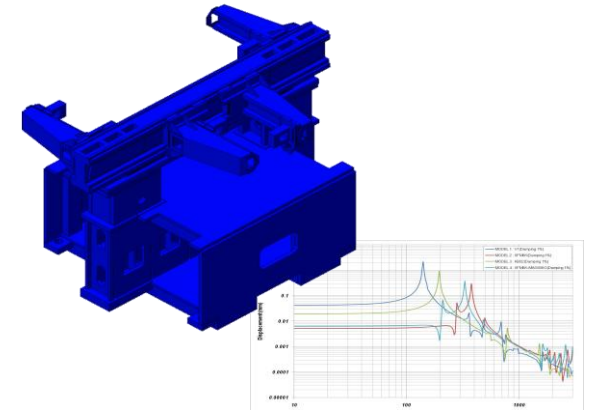
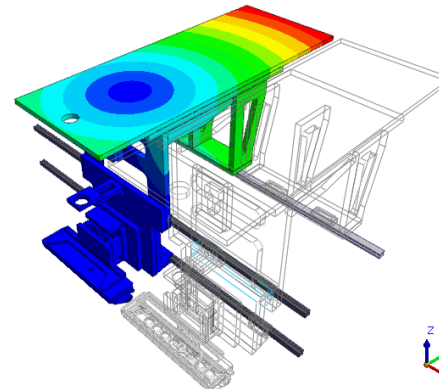
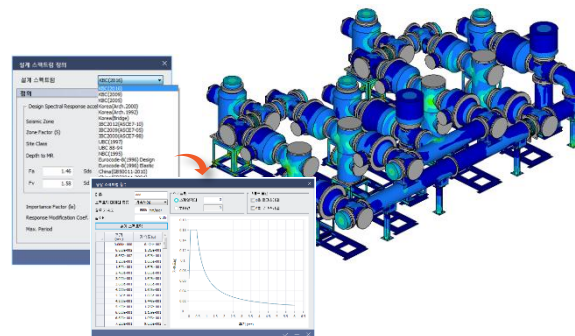
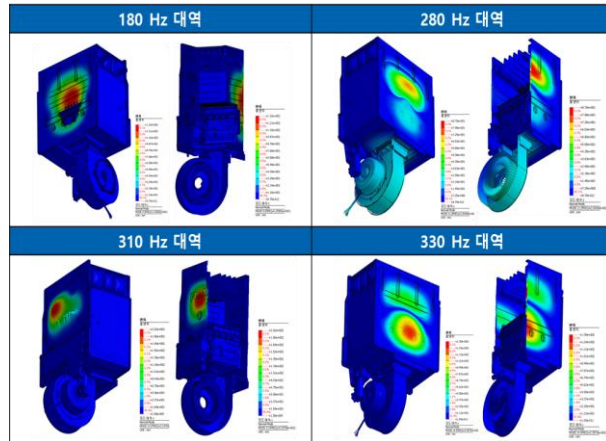
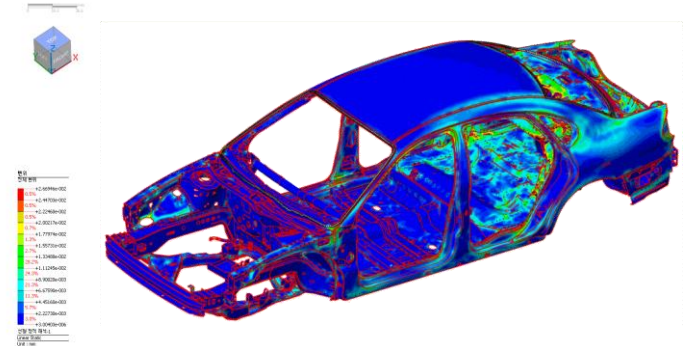
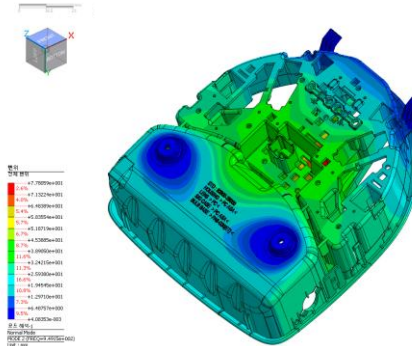
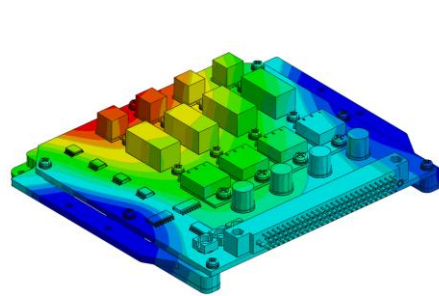
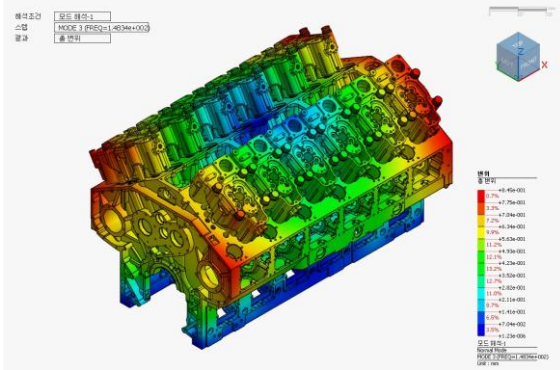
(1) 전체 모델을 우리가 조작할 수 있는 유한개의 요소단위로 분할

(2) 개별 요소단위의 특성을 계산한 후, 전체 요소의 특성을 모두 조합

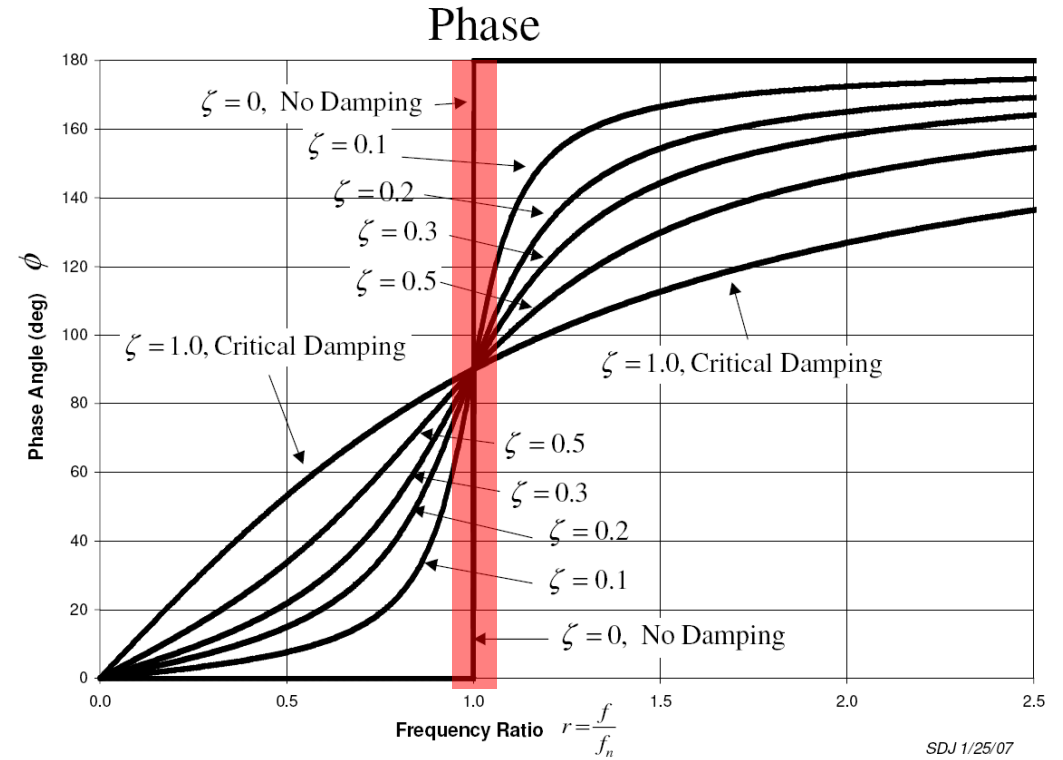
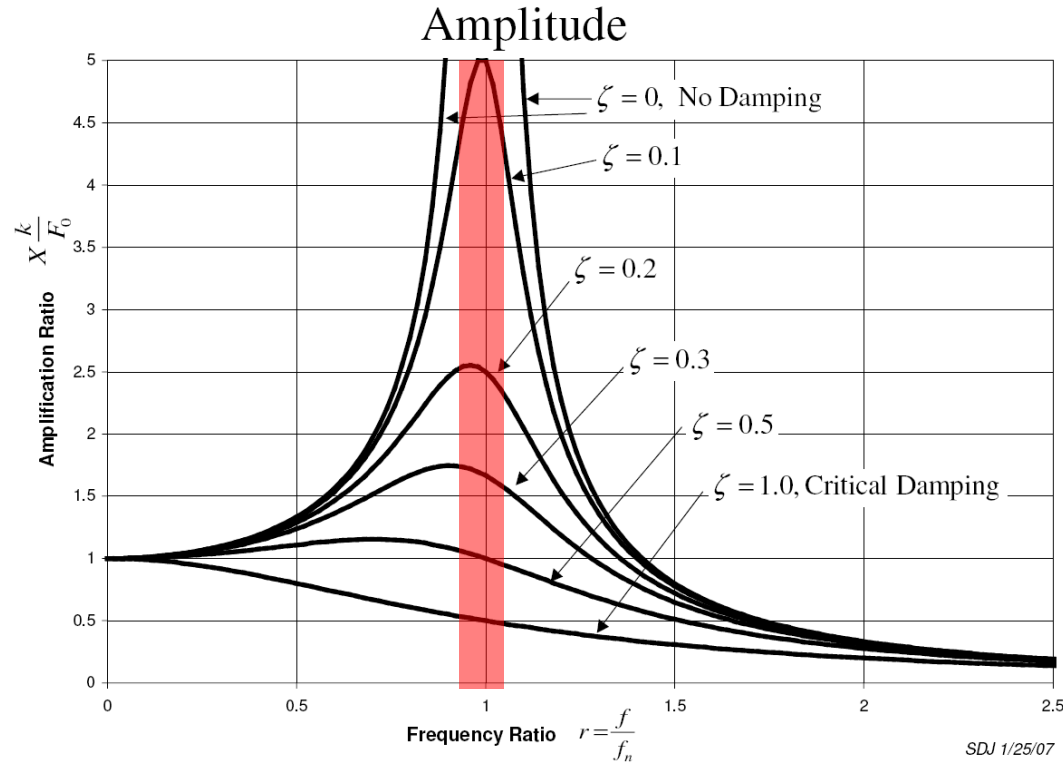
동적 하중이 고려된 구조해석



동적 하중이 고려된 구조해석 예시



공진(Resonance) 이해하기



해석타입의 분류

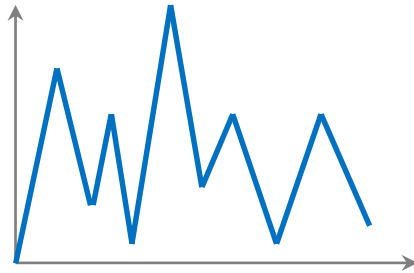


정적하중
(Static load)



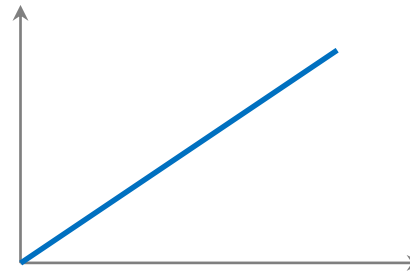
하중조건이나 변형조건 등이
시간에 지남에 따라 변하지 않음

동적하중
(Dynamic load)



하중조건이나 변형조건 등이
시간에 지남에 따라 변함

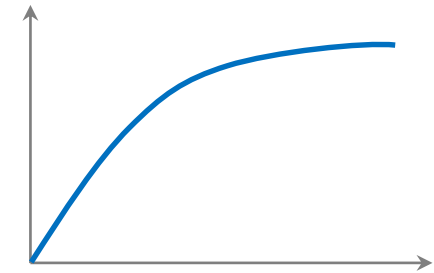
선형 거동
(Linear)



하중조건이나 변형조건 등이
시간에 지남에 따라 변함

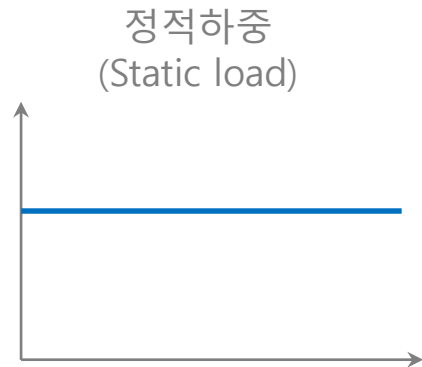


비선형 거동
(Non-Linear)

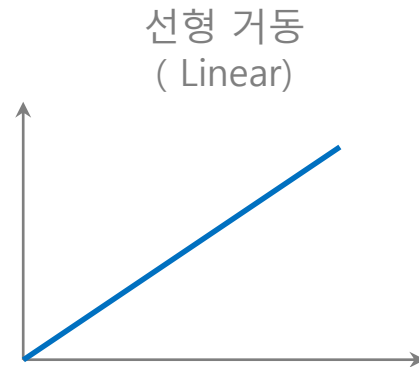


하중조건이나 변형조건 등이
시간에 지남에 따라 변함

해석타입의 선정

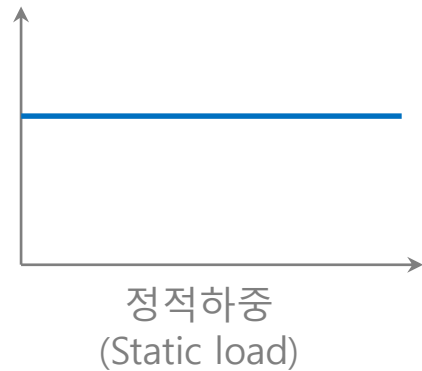


+

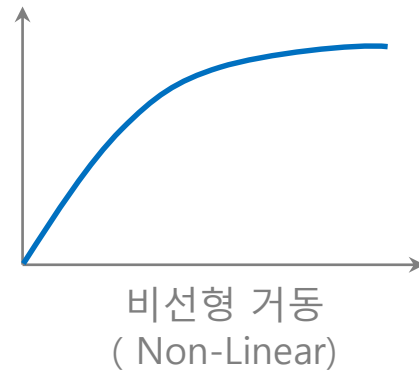


=

선형 정적 해석
(Linear Static Analysis)



+

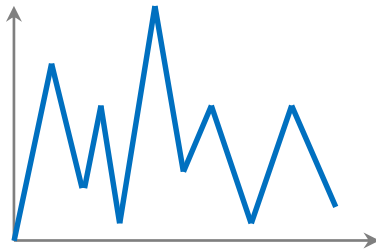


=

비선형 정적 해석
(Non-Linear Static Analysis)

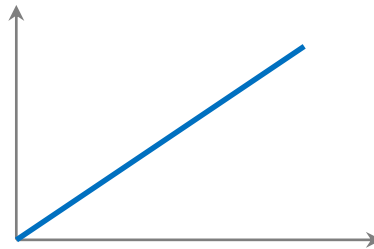
해석타입의 선정

동적하중
(Dynamic load)



+

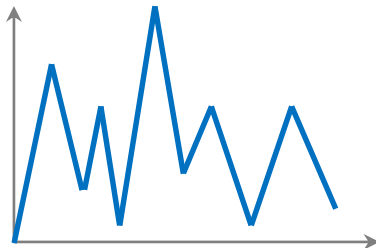
선형 거동
(Linear)



=

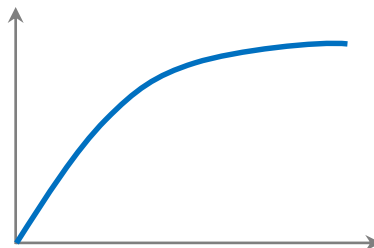
선형 동해석 (Linear Dynamic Analysis)

- 과도응답해석 (Transient Response Analysis)
- 주파수응답해석 (Frequency Response Analysis)
- 랜덤진동해석 (Random Vibration Analysis)
- 응답스펙트럼해석 (Response Spectrum Analysis)



동적하중
(Dynamic load)

+



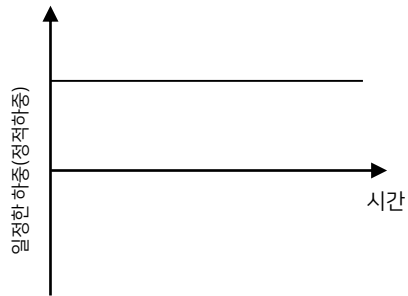
=

비선형 동해석 (Non-Linear Dynamic Analysis)

- 내연적 비선형 과도응답해석
(Implicit Nonlinear Transient Analysis)
- 외연적 비선형 과도응답해석
(Explicit Nonlinear Transient Analysis)

하중에 따른 해석케이스 구분 - 선형해석

Steady state

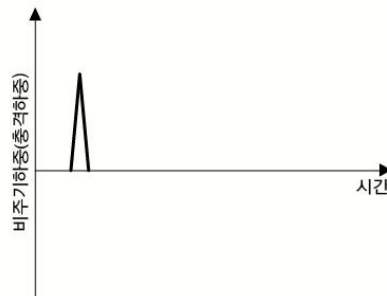


선형정적해석

- 외력(구조하중)에 대한 구조안전성 평가
- 최대 발생 변형 및 응력 결과 확인

구조강성 평가

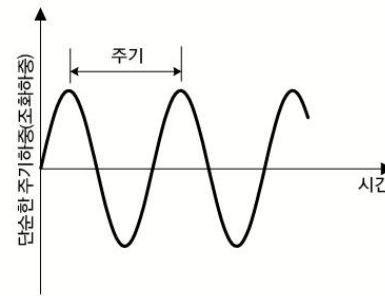
Time domain



과도응답해석

- 이송장비에 대한 최대 관성진동과 안정화시간 확인
- 충격하중에 대한 안전성 확인
- 시간이력 지진하중에 대한 구조계 평가

관성진동 영향 평가

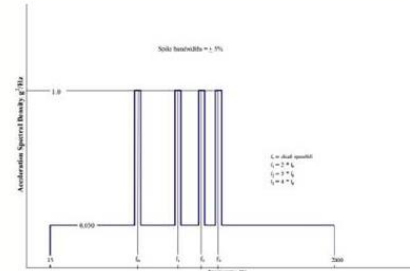


주파수응답해석

- 조화하중에 대한 응답분석
- 반복적인 상황에 대한 공진응답 확인 및 구조평가
- Sine Wave 형태의 하중가력을 통해 공진응답 확인

제품 내구성 평가 (일정한 반복하중)

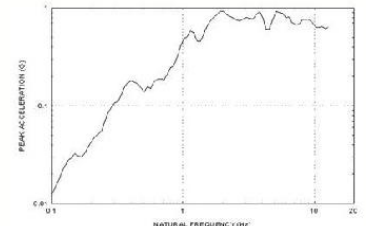
Frequency domain



랜덤응답해석

- 확률과 통계이론을 이용하여 불규칙적인 진동에 대한 평가
- 조화하중 및 PSD 함수로 주파수 응답 확인
- 신뢰수준에 따른 응답 평가

제품 내구성 평가 (확률적인 반복하중)



응답스펙트럼해석

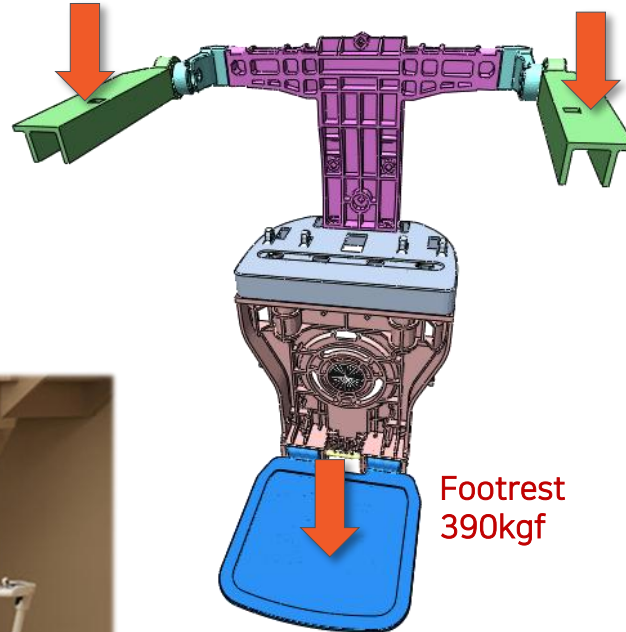
- 지진에 대한 내진평가
- Reg. Guide 따른 응답평가법 제공
- Design Spectrum 생성기능 제공

지진 안전성 평가

Steady State : 구조 강건성 평가



Armrest 65kgf



Armrest 65kgf

Footrest
390kgf

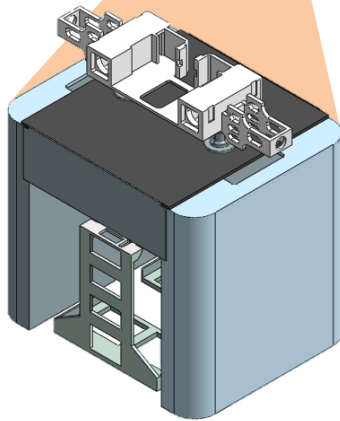
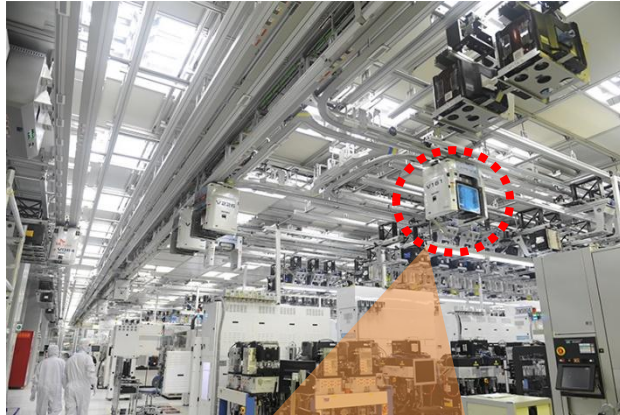
Von Mises 응력분포 (최대 65MPa)



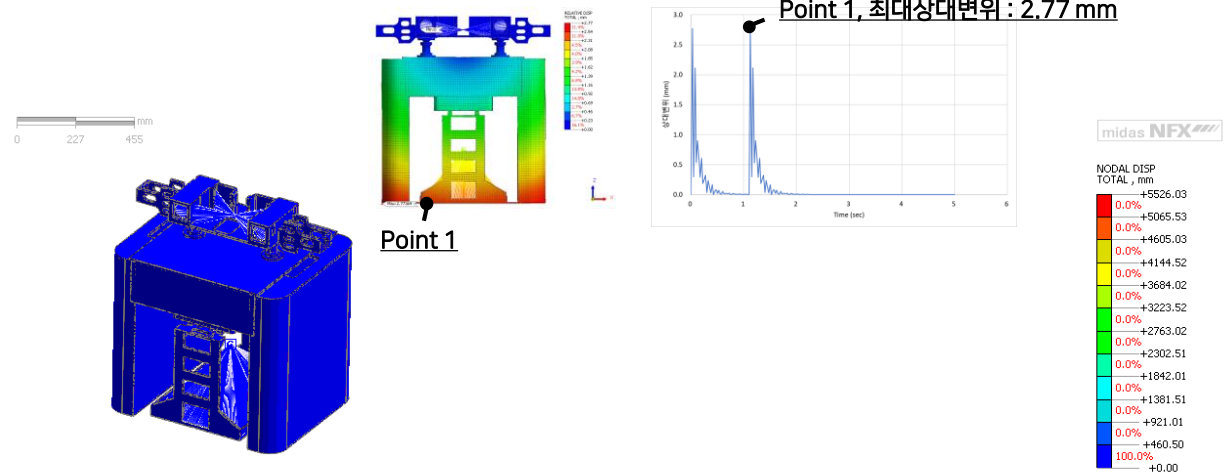
변형 형상 (최대 변위 4.7mm)

최대 변위와 최대응력이
허용범위를 초과하지 않음

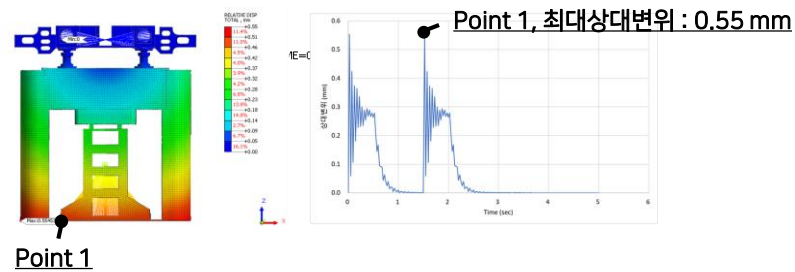
Time domain : 이송 관성진동 및 안정화 시간검토



Case 1 : 가/감속도 : $\pm 50 \text{ m/s}^2$, 운행속도 : 5 m/s



Case 2 : 가/감속도 : $\pm 10 \text{ m/s}^2$, 운행속도 : 5 m/s



Time domain : 배관시스템 지진취약도 평가

[KAERI 연구개발과제] with Midas-IT : 배관시스템 지진취약도 평가모듈 WIZARD 개발

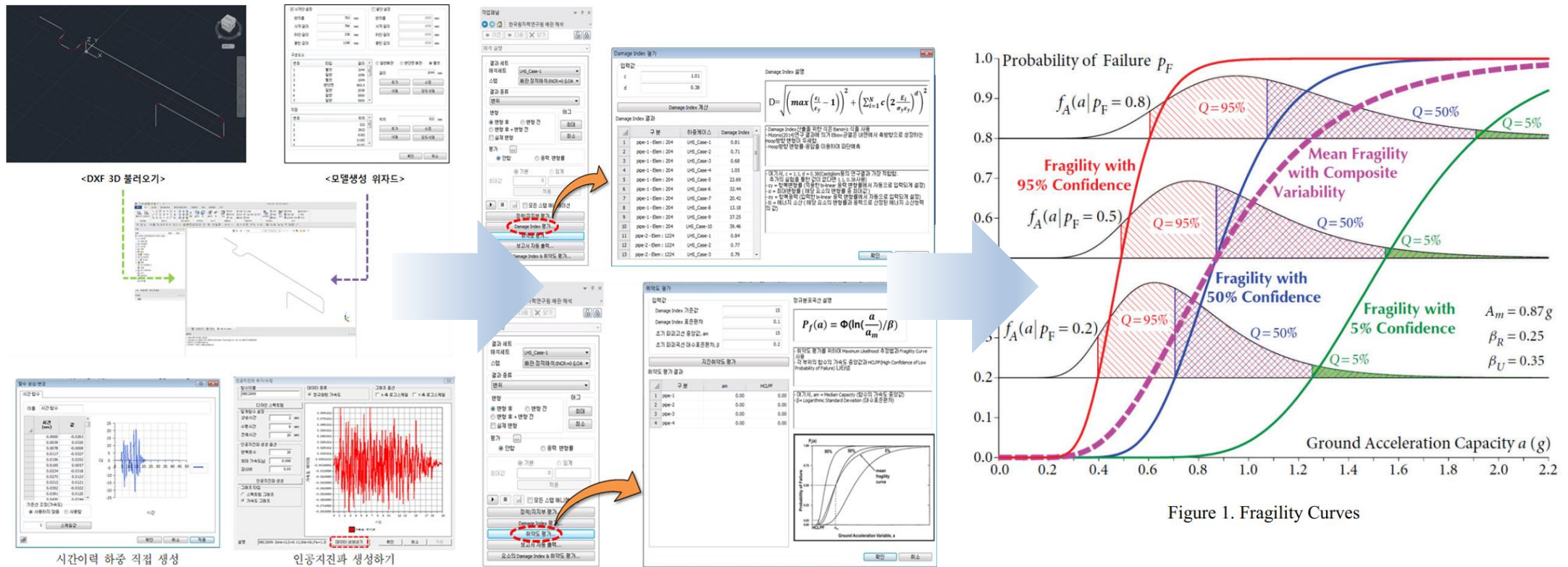
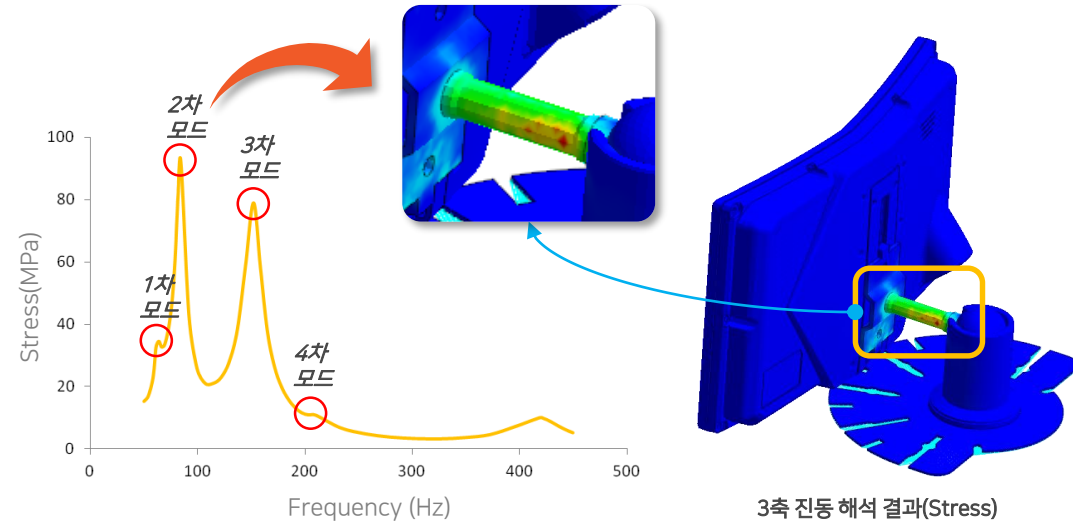
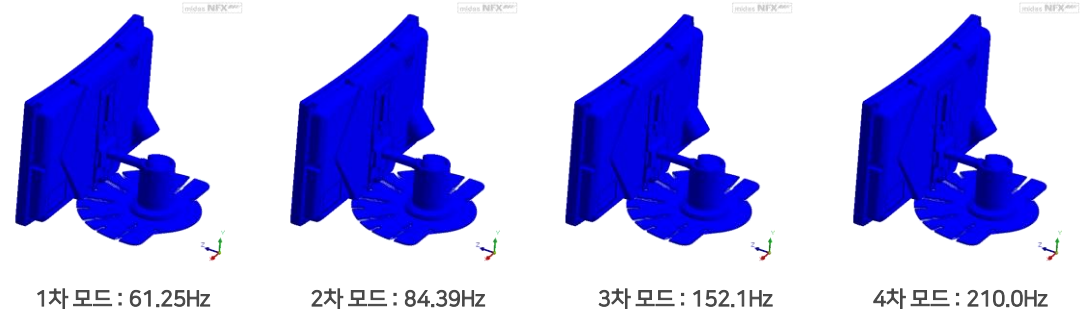
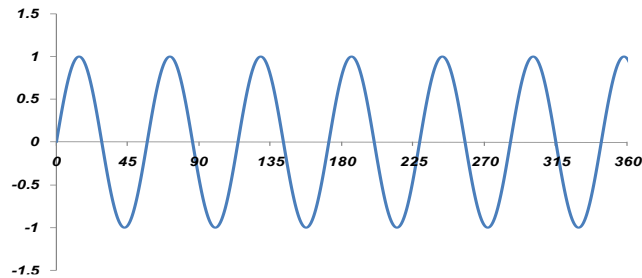
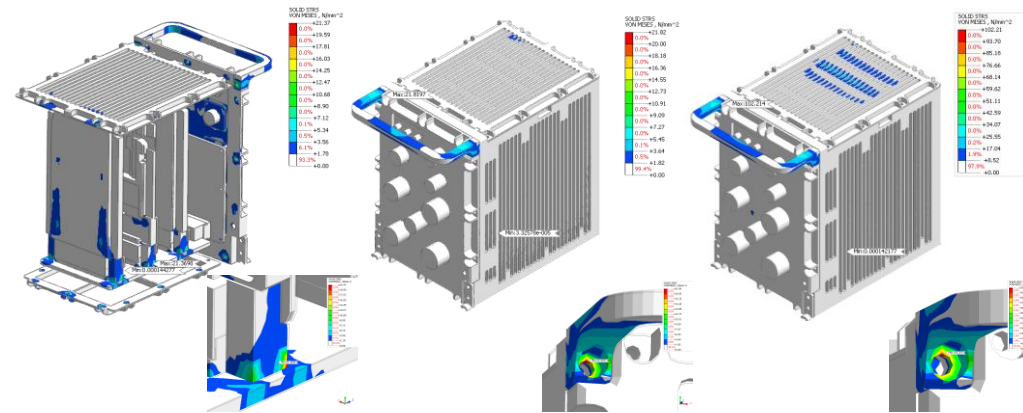
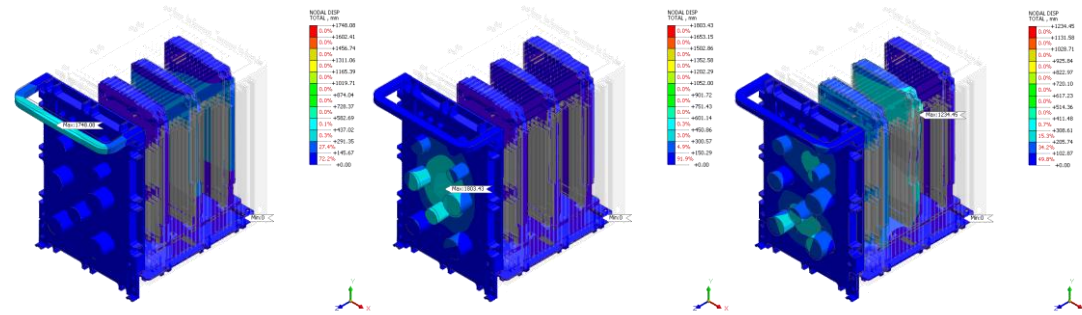
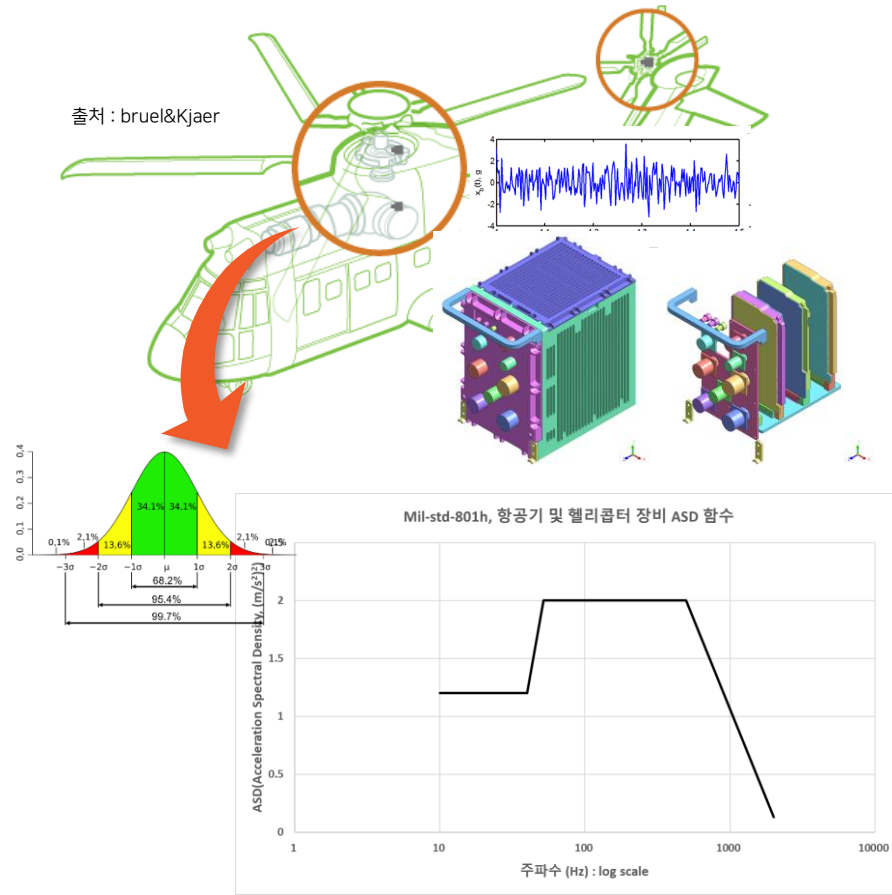


Figure 1. Fragility Curves

Frequency domain : 모니터 공진 안전성 검토 (실내 환경)



Frequency domain : HUMS 진동 내구성 평가 (외부 환경)



Frequency domain : 제품 내진안전성 검토

• Problem

UPS 시스템에 대한 내진성능 평가

• Consulting Solution

UPS 시스템의 해석모델기술 개발을 위해 진동대 시험 및 유한요소수치 해석값과 비교 분석

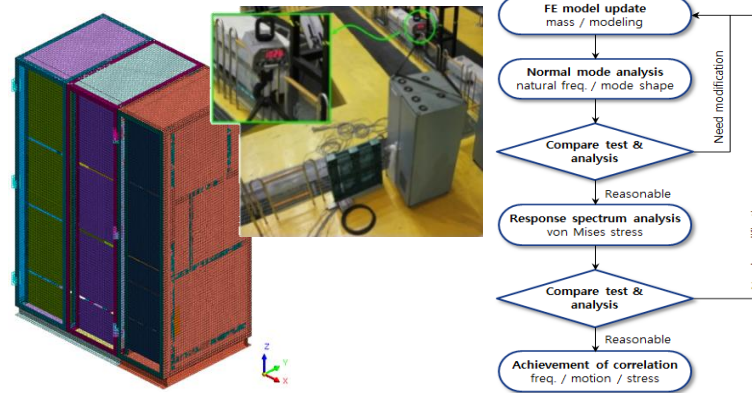
• Design Code

AISC ASD-05
IEEE-693

• Analysis Fields

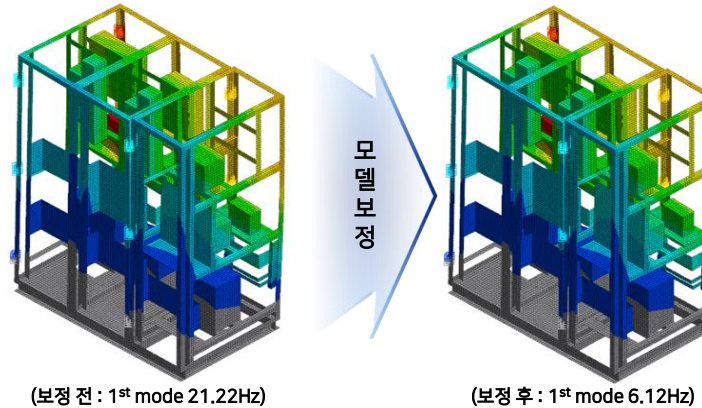
- Linear Static Analysis
- Response Spectrum Analysis

■ Analysis model



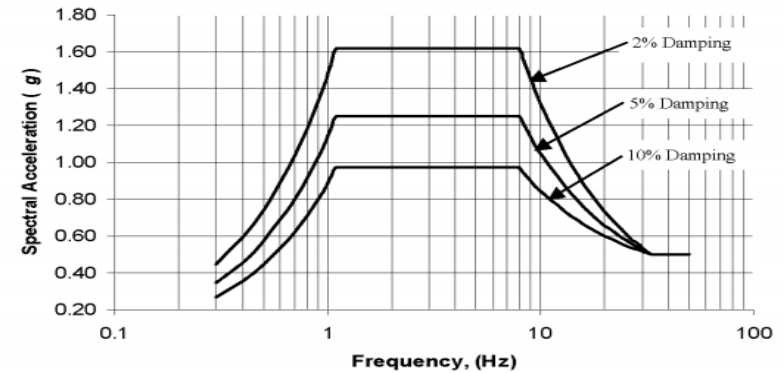
■ Correlation

- 진동대 시험결과 1st mode 4.95 Hz
- 시험결과를 기준으로 해석모델의 강성을 조절

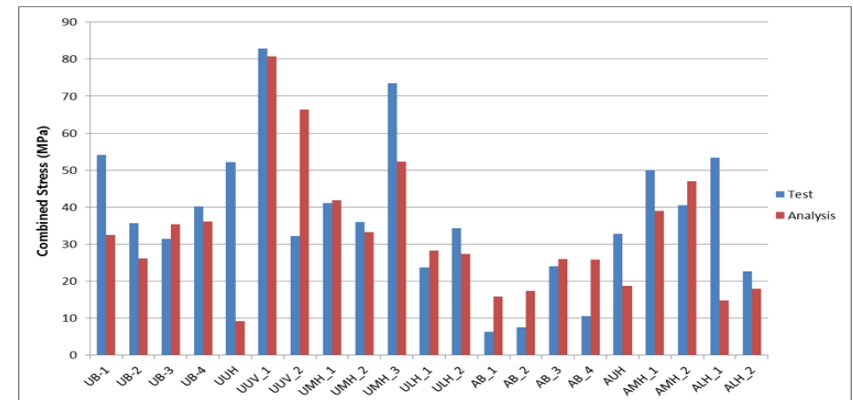


■ Load

• IEEE std 693 기준 적용



■ Result (Strain gage별 시험값과 해석값)



CONTENTS

Day 3 – 진동해석 마스터하기!

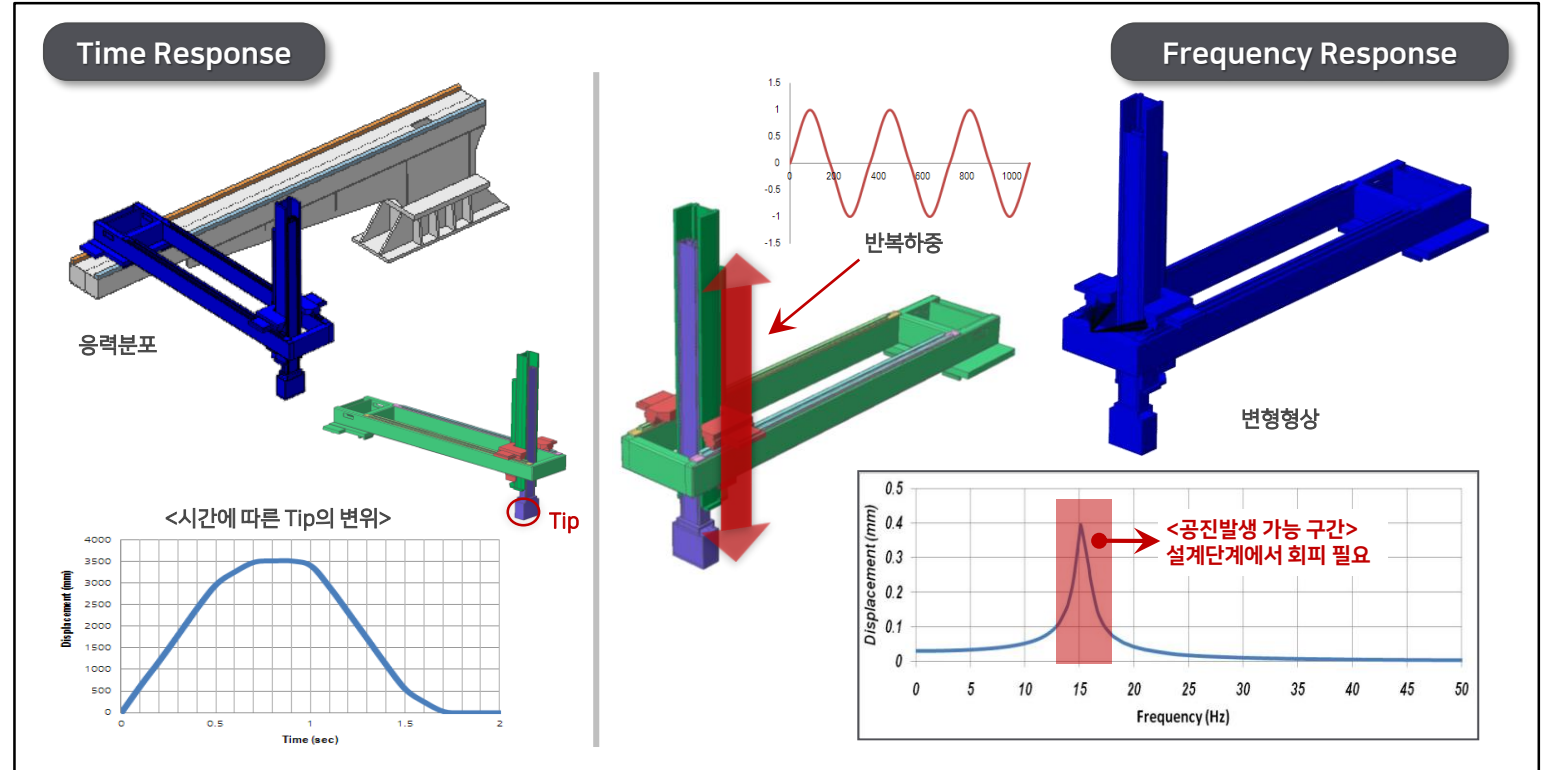
Session1. 진동해석을 위한 기초사항

Session2. 제품의 동특성 및 진동응답 평가법 이해하기

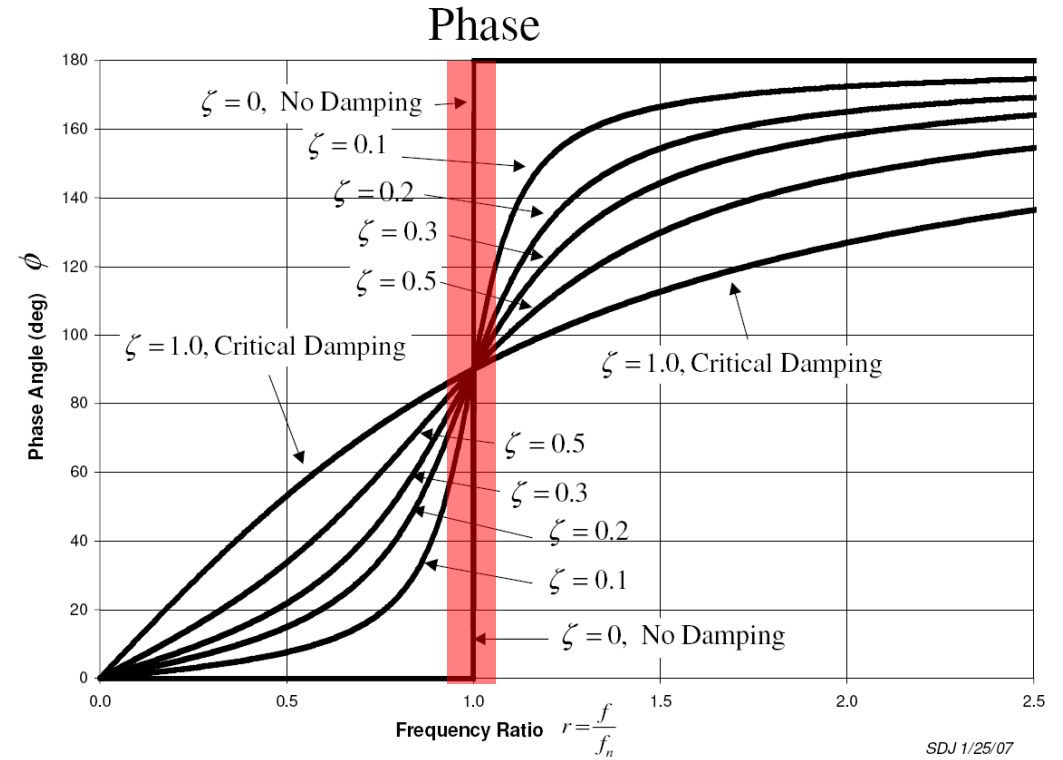
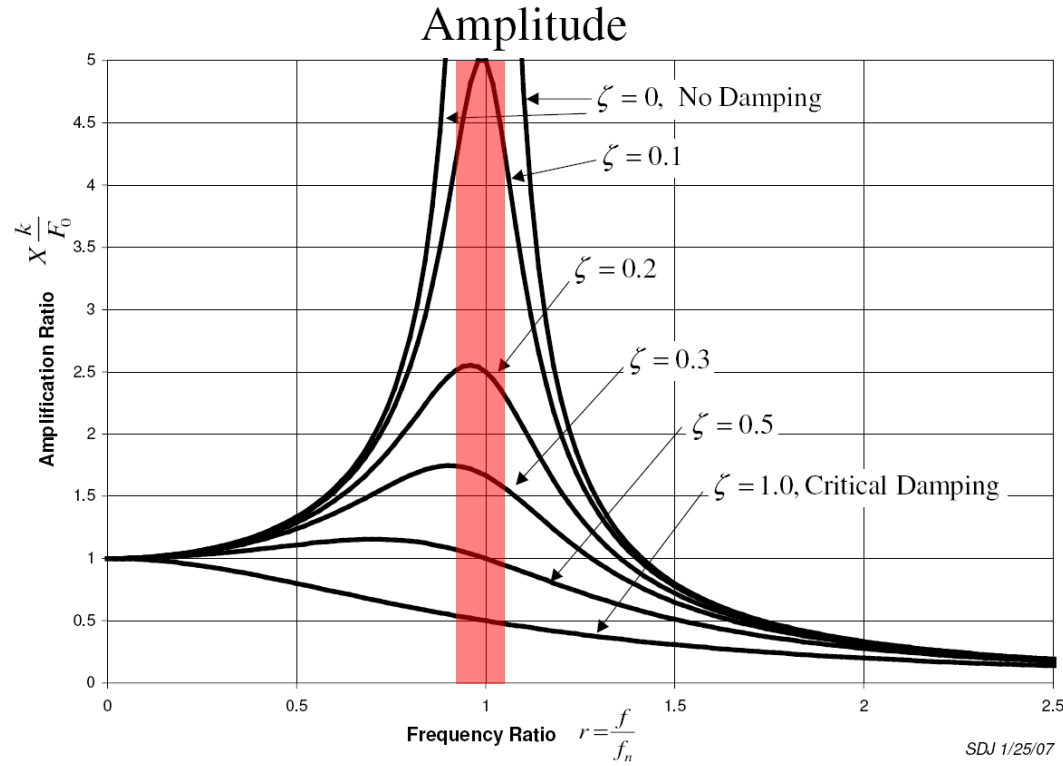
Session3. 불규칙한 하중에 대한 안전성 확보 방안 이해하기

Session4. 진동피로를 고려한 설계제품 내구수명 예측

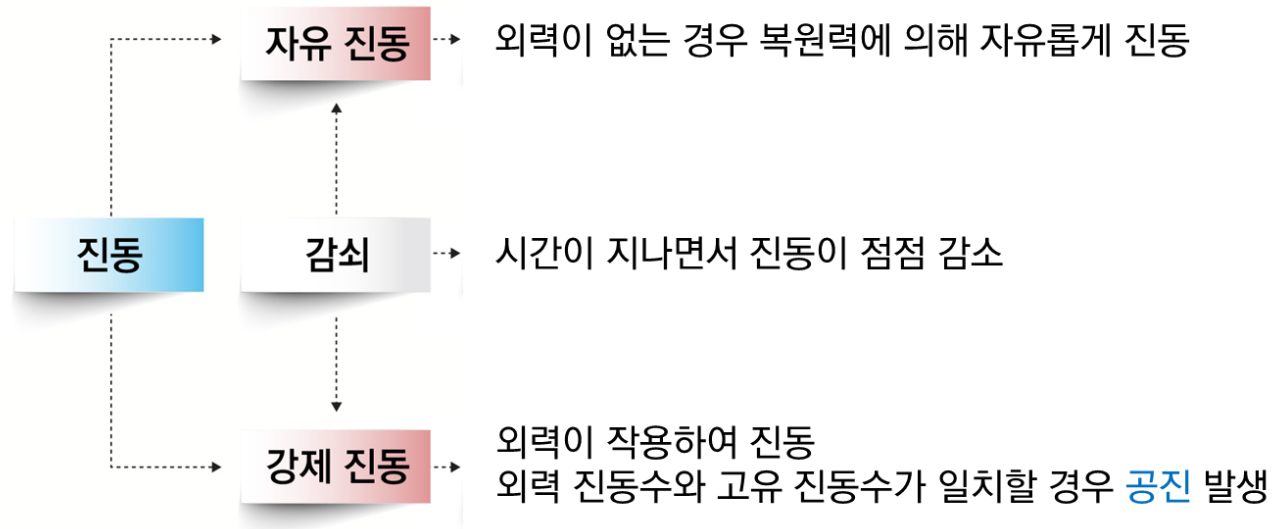
진동해석 예시



공진(Resonance) 이해하기



진동해석 구분



$$m\ddot{x} + \overset{0}{\cancel{c}\dot{x}} + \overset{0}{\cancel{k}x} = f(t)$$

: 모드해석 (Modal analysis)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

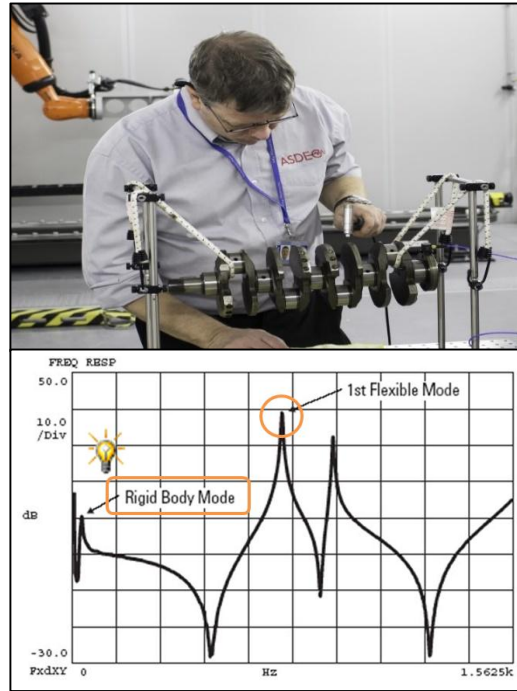
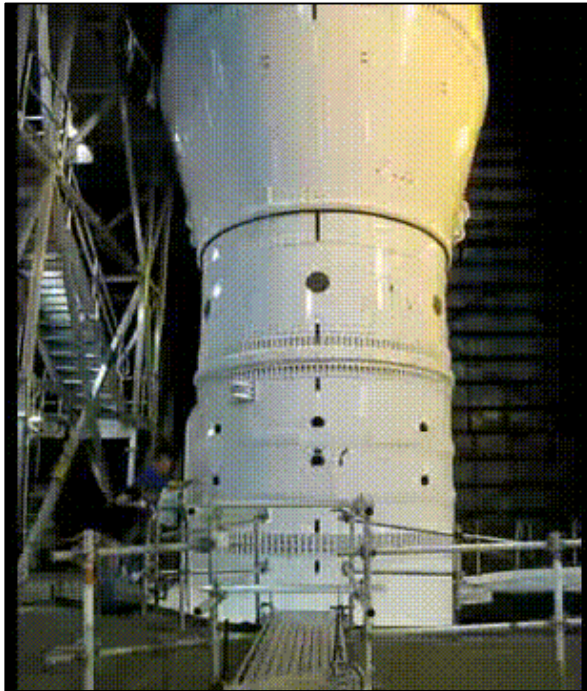
: 선형동해석 (Linear dynamic analysis)

자유진동 예시



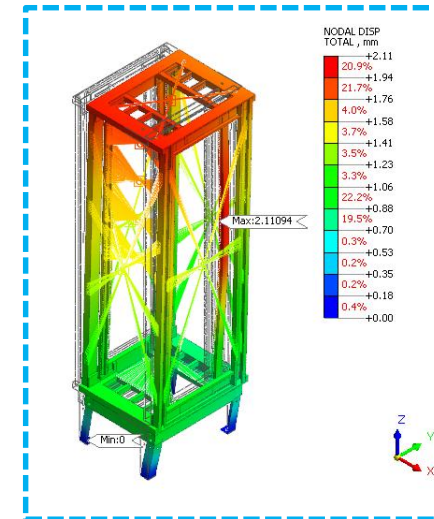
고유진동수 계측 방법

실험에 의한 계측

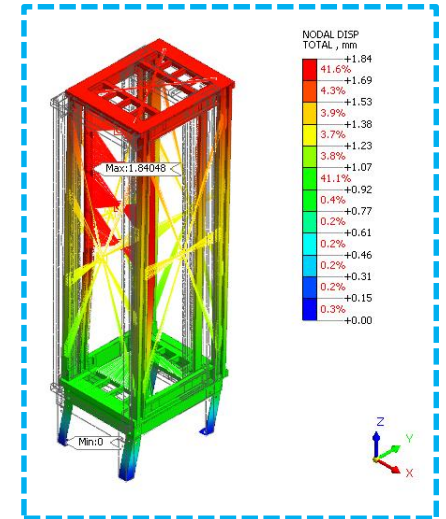


해석에 의한 계측

[1차 모드: Tx 방향]
17.99 Hz



[2차 모드: Tz 방향]
19.25 Hz

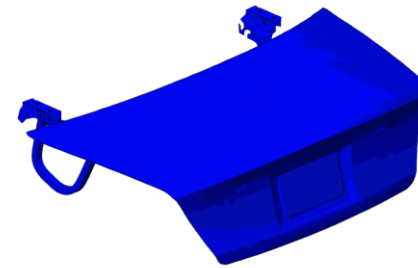
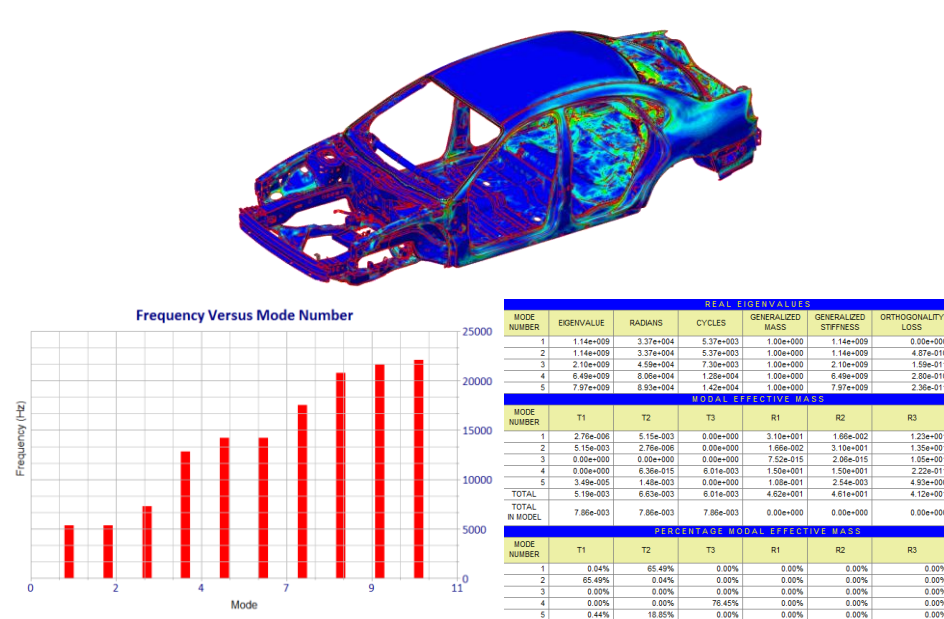


고유진동수(모드) 해석

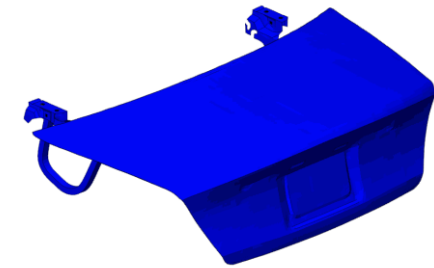
응답구조물의 진동에 대한 고유 특성을 파악하는 것이 주 목적

구조물의 고유진동수(Natural Frequency)와 고유모드(Mode Shape) 산정

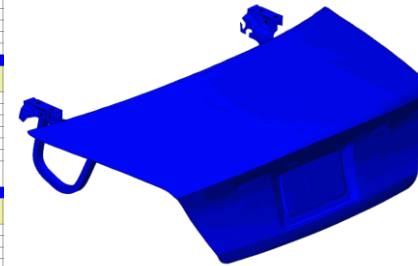
모드해석을 이용하여 공진 여부를 예측하여 문제를 피할 수 있음



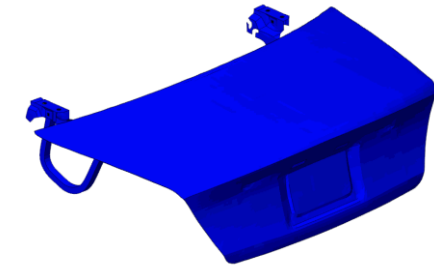
1차 모드 (Torsion)



2차 모드 (Breathing)



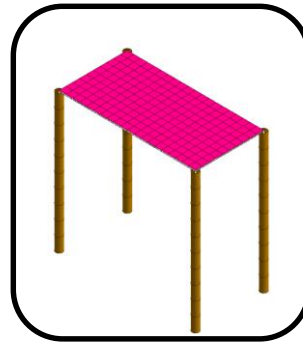
3차 모드 (Lateral)



4차 모드 (Bending)

고유진동수(모드) 해석

초기 모델

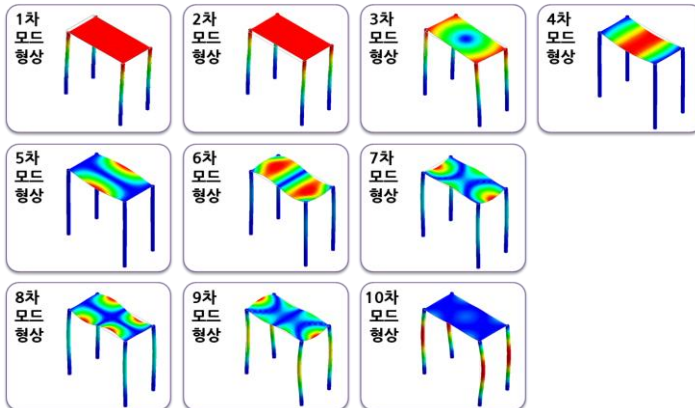


개선 모델



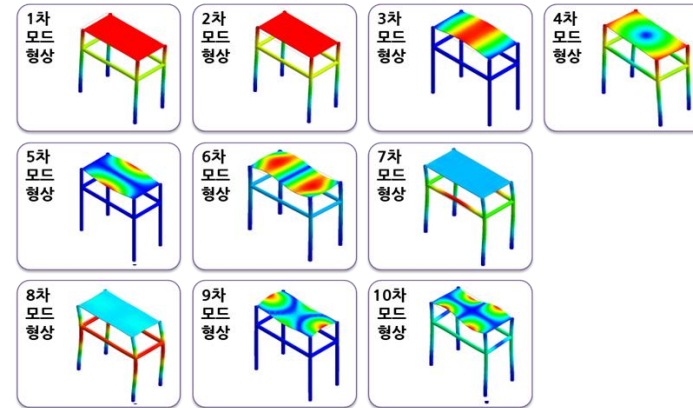
$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{\text{stiffness}}{\text{mass}}}$$

7.15 Hz 7.34 Hz 11.83 Hz 16.43 Hz



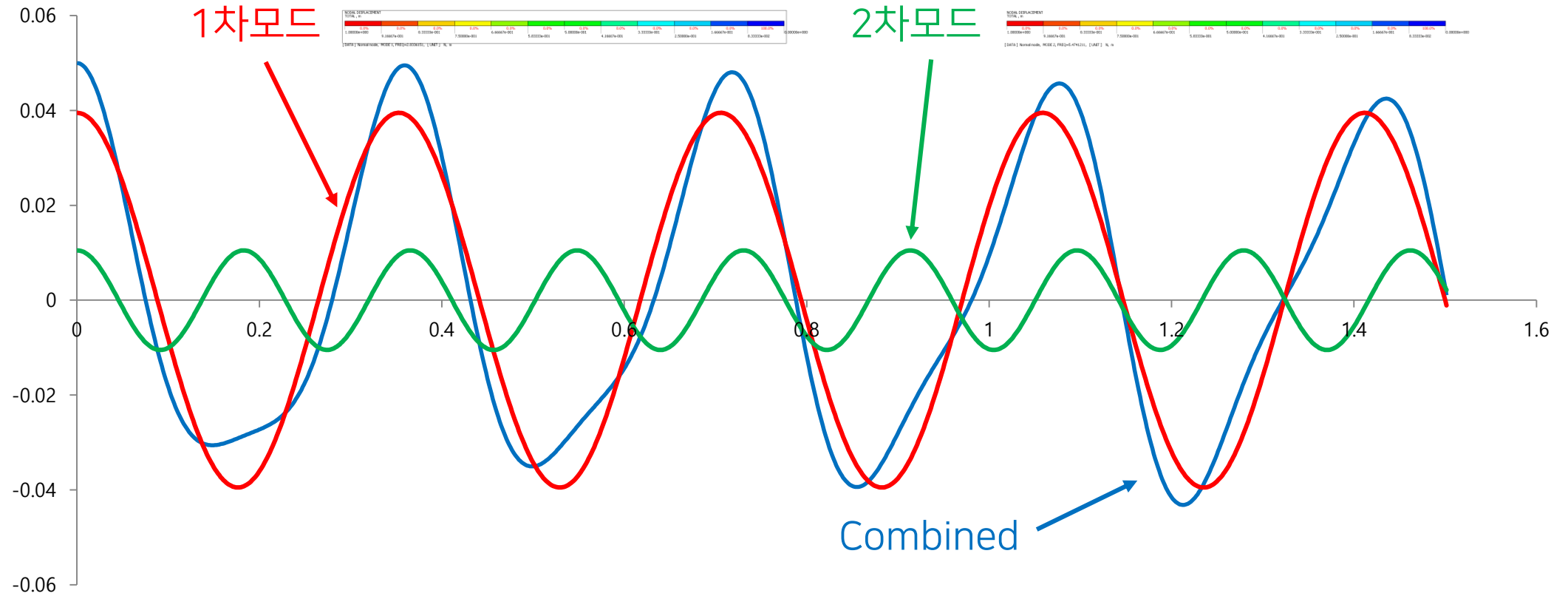
MODE NUMBER	CYCLES	PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS
1	7.155145e+000	T1 89.17%
2	7.336008e+000	T2 0.00%
3	1.182743e+001	T3 0.00%
4	1.642599e+001	R1 0.00%
5	3.941067e+001	R2 2.00%
6	4.946595e+001	R3 0.00%
7	7.859373e+001	T1 0.00%
8	8.857218e+001	T2 0.00%
9	1.003944e+002	T3 0.00%
10	1.074728e+002	R1 0.00%

11.64 Hz 13.21 Hz 16.71 Hz 21.98 Hz



MODE NUMBER	CYCLES	PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS
1	11.6358	T1 99.99%
2	13.20915	T2 0.00%
3	16.71317	T3 0.00%
4	21.97579	R1 0.00%
5	39.78287	R2 2.00%
6	49.54261	R3 0.00%
7	73.93445	T1 0.00%
8	77.46374	T2 0.00%
9	80.67169	T3 0.00%
10	88.07381	R1 0.00%

자유진동의 구성



모드해석의 결과 분석

공진 발생 가능성 검토



고유진동수가 외부하중/가진의 작동주파수 범위 내인지 확인

- 보통 처음 3개의 저차 모드(1차~3차 모드)의 고유진동수를 확인
- 이 3개 모드의 고유진동수가 운영주파수의 범위를 벗어나 있으면 공진에 대해 안전하다고 판단
- 3개 모드의 고유진동수가 운영주파수 범위 내에 있으면 공진 발생 가능
- 이 경우에 하중/가진 방향을 알면, 각 모드에 대한 질량참여율과 방향 검토
 - 하중의 작용방향과 모드의 질량참여율이 높은 방향이 일치하지 않으면 해당 모드는 동적 거동의 안정성을 해치지 않음
 - 두 방향이 동일하면 공진 발생을 피하기 위하여 구조물의 설계 변경 필요
기본적으로 구조물의 고유진동수가 운영주파수의 1/3 이하 또는 3배 이상이 되도록 설계를 변경하는 것이 안전

고유진동수의 조정

- 고유진동수(f)가 강성(k)에 비례하고 질량(m)에 반비례하는 특성 이용
- 구조물의 강성을 증가시키거나 질량을 줄이면 고유진동수가 커짐
- 반대로 강성을 줄이거나 질량을 증가시키면 고유진동수는 낮아짐
- 구조물의 강성을 높이기 위하여 구조물을 보강할 때에는 관심 모드에서 변형에너지가 높은 부분을 찾아서 보강하는 것이 효과적임
- 변형에너지가 높은 부분이 결국 변형이 크게 발생하는 부분이며, 구조물의 강성을 키워주는 보강은 변형에너지를 낮추고, 고유진동수는 높임

모드 형상의 검토

- 모드형상은 변형형상 자체만 의미가 있고, 변형(변위)의 크기 중요하지 않음
- 애니메이션으로 한 주기 동안의 전체 진동거동을 검토하는 것이 좋음
- 주기적으로 진동하는 동적 형상이므로, 정지된 변형형상의 방향은 의미 없음

모드해석의 결과 분석

REAL EIGENVALUES								
MODE NUMBER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	PERIOD	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS	ORTHOGONALITY LOSS	ERROR MEASURE
1	8.346838e+004	2.889089e+002	4.598129e+001	2.174798e-002	1.000000e+000	8.346838e+004	0.000000e+000	1.922874e-008
2	3.120199e+005	5.585874e+002	8.890195e+001	1.124835e-002	1.000000e+000	3.120199e+005	0.000000e+000	5.775159e-009
3	3.277436e+006	1.810369e+003	2.881292e+002	3.470665e-003	1.000000e+000	3.277436e+006	0.000000e+000	5.067234e-010
4	1.227428e+007	3.503466e+003	5.575940e+002	1.793420e-003	1.000000e+000	1.227428e+007	0.000000e+000	1.522893e-010
5	2.565836e+007	5.065408e+003	8.061847e+002	1.240411e-003	1.000000e+000	2.565836e+007	0.000000e+000	6.419652e-011
6	9.567341e+007	9.781279e+003	1.556739e+003	6.423684e-004	1.000000e+000	9.567341e+007	0.000000e+000	1.896701e-011
7	9.826162e+007	9.912700e+003	1.577655e+003	6.338521e-004	1.000000e+000	9.826162e+007	0.000000e+000	1.695068e-011
8	1.726352e+008	1.313907e+004	2.091148e+003	4.782062e-004	1.000000e+000	1.726352e+008	0.000000e+000	1.141514e-011
9	2.674604e+008	1.635422e+004	2.602854e+003	3.841937e-004	1.000000e+000	2.674604e+008	0.000000e+000	7.852702e-011
10	3.627175e+008	1.904514e+004	3.031129e+003	3.299101e-004	1.000000e+000	3.627175e+008	0.000000e+000	3.025844e-009
MODAL EFFECTIVE MASS								
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	0.000000e+000	0.000000e+000	7.145950e-002	0.000000e+000	3.227165e-004	0.000000e+000		
2	0.000000e+000	7.252119e-002	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	3.159873e-004		
3	0.000000e+000	0.000000e+000	2.191738e-002	0.000000e+000	1.752962e-004	0.000000e+000		
4	0.000000e+000	2.206031e-002	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	1.908556e-004		
5	0.000000e+000	0.000000e+000	7.510786e-003	0.000000e+000	9.779994e-005	0.000000e+000		
6	0.000000e+000	7.440166e-003	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	1.029728e-004		
7	0.000000e+000	0.000000e+000	3.824743e-003	0.000000e+000	5.984139e-005	0.000000e+000		
8	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	9.773267e-007	0.000000e+000	0.000000e+000		
9	0.000000e+000	0.000000e+000	2.304209e-003	0.000000e+000	3.962611e-005	0.000000e+000		
10	0.000000e+000	3.725296e-003	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	6.143367e-005		
TOTAL	0.000000e+000	1.057470e-001	1.070166e-001	9.773267e-007	6.952800e-004	6.712456e-004		
TOTAL IN MODEL	1.155000e-001	1.155000e-001	1.155000e-001	1.203125e-006	8.664906e-004	8.672125e-004		
PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS								
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	0.00%	0.00%	61.87%	0.00%	37.24%	0.00%		
2	0.00%	62.79%	0.00%	0.00%	0.00%	36.44%		
3	0.00%	0.00%	18.98%	0.00%	20.23%	0.00%		
4	0.00%	19.10%	0.00%	0.00%	0.00%	22.01%		
5	0.00%	0.00%	6.50%	0.00%	11.29%	0.00%		
6	0.00%	6.44%	0.00%	0.00%	0.00%	11.87%		
7	0.00%	0.00%	3.31%	0.00%	6.91%	0.00%		
8	0.00%	0.00%	0.00%	81.23%	0.00%	0.00%		
9	0.00%	0.00%	1.99%	0.00%	4.57%	0.00%		
10	0.00%	3.23%	0.00%	0.00%	0.00%	7.08%		
TOTAL	0.00%	91.56%	92.66%	81.23%	80.24%	77.40%		

<1차 모드>

Bending Mode

→ Z방향 하중에 가진

Z축

<2차 모드>

Bending Mode

→ Y방향 하중에 가진

Y축

<참고> 앞 페이지와 동일 모델 → 계산 모드 개수를 증가시킴에 따라 질량참여율과 유효질량의 합이 증가

모드해석의 결과 분석

REAL EIGENVALUES								
MODE NUMBER	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	PERIOD	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS	ORTHOGONALITY LOSS	ERROR MEASURE
1	8.346838e+004	2.889089e+002	4.598129e+001	2.174798e-002	1.000000e+000	8.346838e+004	0.000000e+000	1.922874e-008
2	3.120199e+005	5.585874e+002	8.890195e+001	1.124835e-002	1.000000e+000	3.120199e+005	0.000000e+000	5.775159e-009
3	3.277436e+006	1.810369e+003	2.881292e+002	3.470665e-003	1.000000e+000	3.277436e+006	0.000000e+000	5.067234e-010
4	1.227428e+007	3.503466e+003	5.575940e+002	1.793420e-003	1.000000e+000	1.227428e+007	0.000000e+000	1.522893e-010
5	2.565836e+007	5.065408e+003	8.061847e+002	1.240411e-003	1.000000e+000	2.565836e+007	0.000000e+000	6.419652e-011
6	9.567341e+007	9.781279e+003	1.556739e+003	6.423684e-004	1.000000e+000	9.567341e+007	0.000000e+000	1.896701e-011
7	9.826162e+007	9.912700e+003	1.577655e+003	6.338521e-004	1.000000e+000	9.826162e+007	0.000000e+000	1.695068e-011
8	1.726352e+008	1.313907e+004	2.091148e+003	4.782062e-004	1.000000e+000	1.726352e+008	0.000000e+000	1.141514e-011
9	2.674604e+008	1.635422e+004	2.602854e+003	3.841937e-004	1.000000e+000	2.674604e+008	0.000000e+000	7.852702e-011
10	3.627175e+008	1.904514e+004	3.031129e+003	3.299101e-004	1.000000e+000	3.627175e+008	0.000000e+000	3.025844e-009
MODAL EFFECTIVE MASS								
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	0.000000e+000	0.000000e+000	7.145950e-002	0.000000e+000	3.227165e-004	0.000000e+000		
2	0.000000e+000	7.252119e-002	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	3.159873e-004		
3	0.000000e+000	0.000000e+000	2.191738e-002	0.000000e+000	1.752962e-004	0.000000e+000		
4	0.000000e+000	2.206031e-002	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	1.908556e-004		
5	0.000000e+000	0.000000e+000	7.510786e-003	0.000000e+000	9.779994e-005	0.000000e+000		
6	0.000000e+000	7.440166e-003	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	1.029728e-004		
7	0.000000e+000	0.000000e+000	3.824743e-003	0.000000e+000	5.984139e-005	0.000000e+000		
8	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	9.773267e-007	0.000000e+000		
9	0.000000e+000	0.000000e+000	2.304209e-003	0.000000e+000	3.962611e-005	0.000000e+000		
10	0.000000e+000	3.725296e-003	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	6.143367e-005		
TOTAL	0.000000e+000	1.057470e-001	1.070166e-001	9.773267e-007	6.952800e-004	6.712456e-004		
TOTAL IN MODEL	1.155000e-001	1.155000e-001	1.155000e-001	1.203125e-006	8.664906e-004	8.672125e-004		
PERCENTAGE MODAL EFFECTIVE MASS								
MODE NUMBER	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	0.00%	0.00%	61.87%	0.00%	37.24%	0.00%		
2	0.00%	62.79%	0.00%	0.00%	0.00%	36.44%		
3	0.00%	0.00%	18.98%	0.00%	20.23%	0.00%		
4	0.00%	19.10%	0.00%	0.00%	0.00%	22.01%		
5	0.00%	0.00%	6.50%	0.00%	11.29%	0.00%		
6	0.00%	6.44%	0.00%	0.00%	0.00%	11.87%		
7	0.00%	0.00%	3.31%	0.00%	6.91%	0.00%		
8	0.00%	0.00%	0.00%	81.23%	0.00%	0.00%		
9	0.00%	0.00%	1.99%	0.00%	4.57%	0.00%		
10	0.00%	3.23%	0.00%	0.00%	0.00%	7.08%		
TOTAL	0.00%	91.56%	92.66%	81.23%	80.24%	77.40%		

<1차 모드>

Bending Mode

→ Z방향 하중에 가진

Z축

<2차 모드>

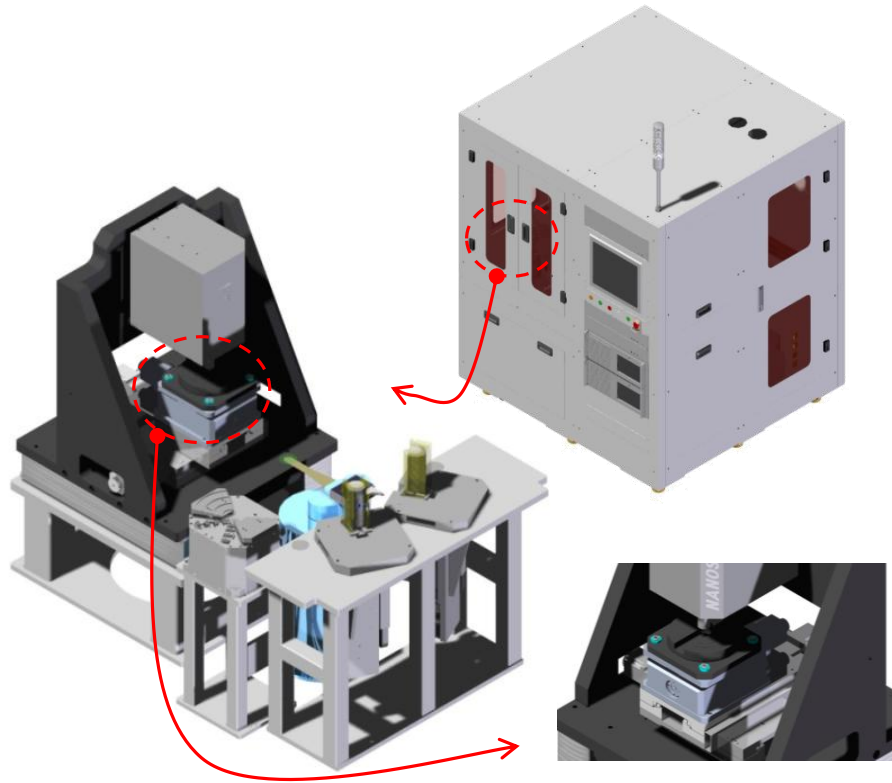
Bending Mode

→ Y방향 하중에 가진

Y축

<참고> 앞 페이지와 동일 모델 → 계산 모드 개수를 증가시킴에 따라 질량참여율과 유효질량의 합이 증가

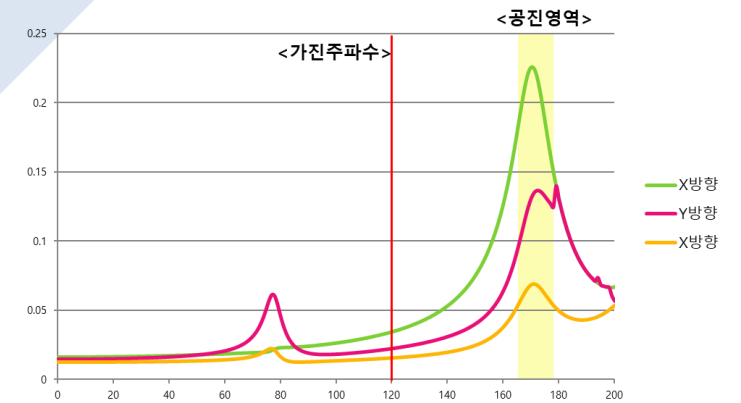
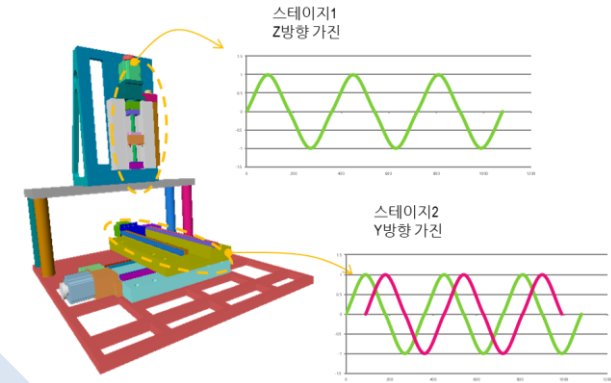
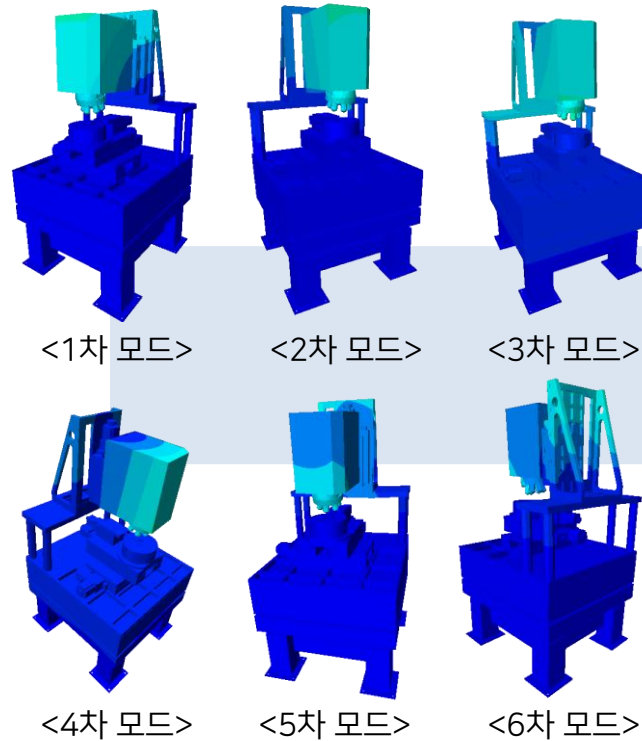
모드해석 사례 : LED 웨이퍼 검사기



- 구조물의 고유진동수는 얼마인가?
→ 공진주파수를 알기 위해 모드해석 수행
- 스테이지 이송 시 안전한가?
→ 모터에 의해 검사기 스테이지 이송 시
진동이 모터 가진 주파수와 일치하는지 검토
주파수 응답해석 수행
- 최대변위가 허용치를 넘을 시, 수정 된 형상과의 비교 검증은?
→ 진동을 줄이는 인자를 찾아 모델을 수정하고
2안 모델을 검증

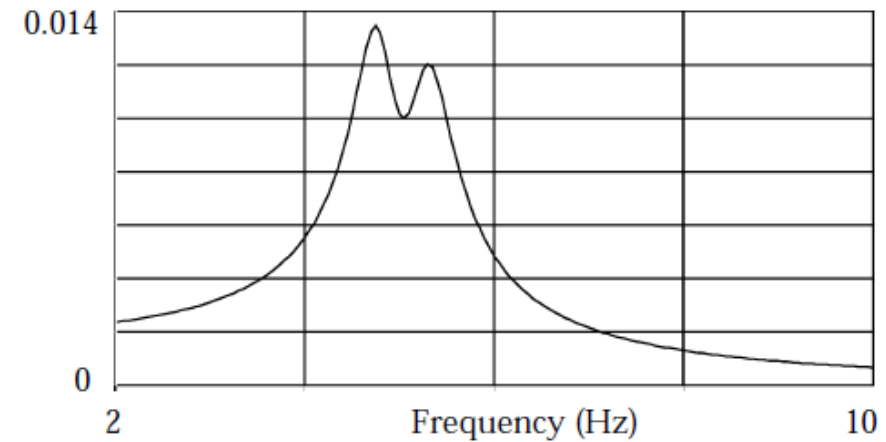
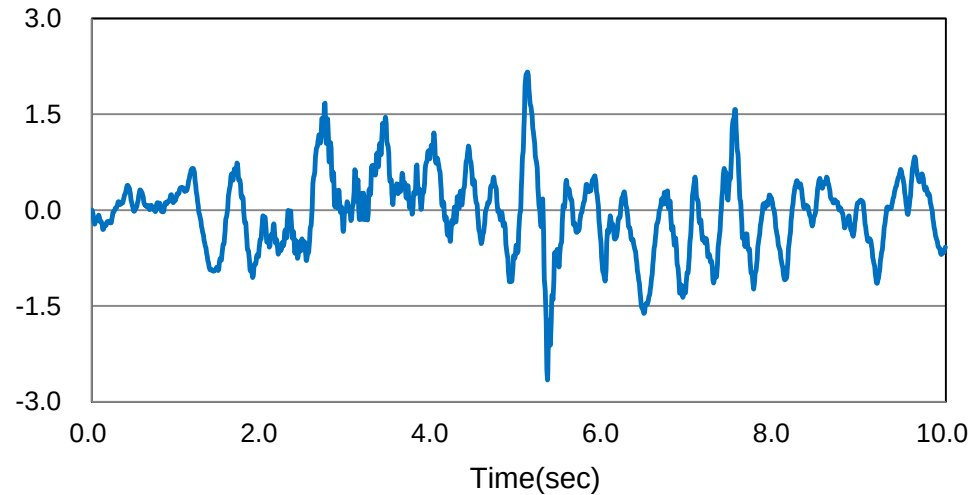
모드해석 사례 : LED 웨이퍼 검사기

모드	고유진동수 (Natural Frequency)
1차 모드	89 Hz
2차 모드	142 Hz
3차 모드	185 Hz
4차 모드	201 Hz
5차 모드	233 Hz
6차 모드	239 Hz
7차 모드	285 Hz
8차 모드	320 Hz
9차 모드	330 Hz
10차 모드	375 Hz



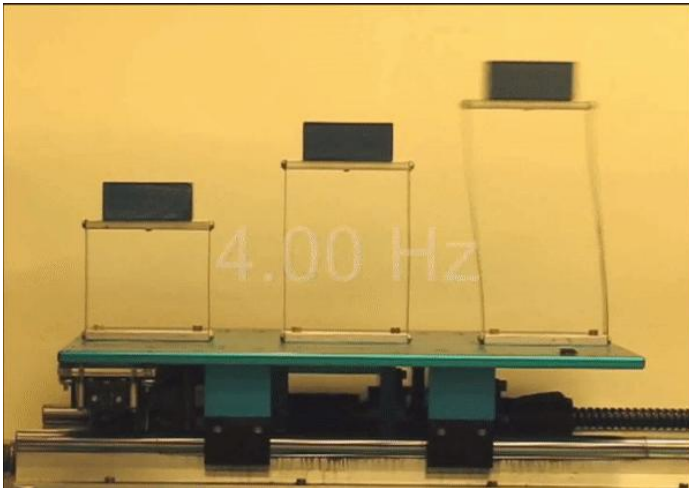
주파수 응답에 대한 이해

하중이 주기적이고 **반복적으로 작용하는 구조물의 거동을 파악**하는 것이 주 목적임
 주파수응답해석은 조화하중에 대해 **주파수 별로 구조물에 발생하는 주요 응답의 진폭과 위상차**를 산정
 시간의 변화로는 효과적으로 예측하는게 어려울 수 있음.

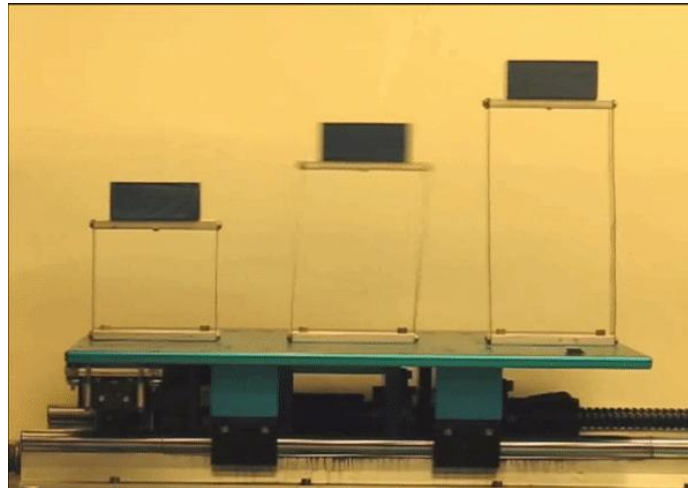


공진현상에 대한 이해

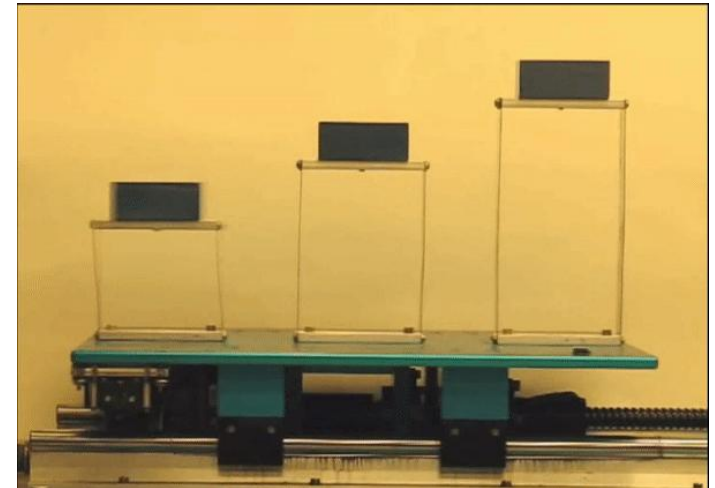
4.00 Hz 진동 결과



6.35 Hz 진동 결과



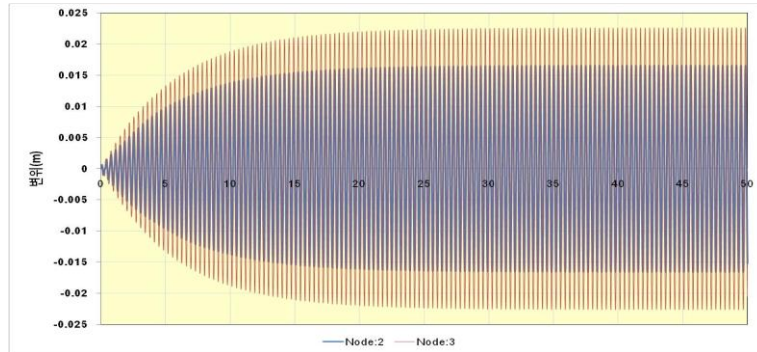
11.35 Hz 진동 결과



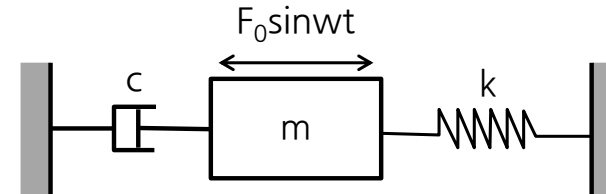
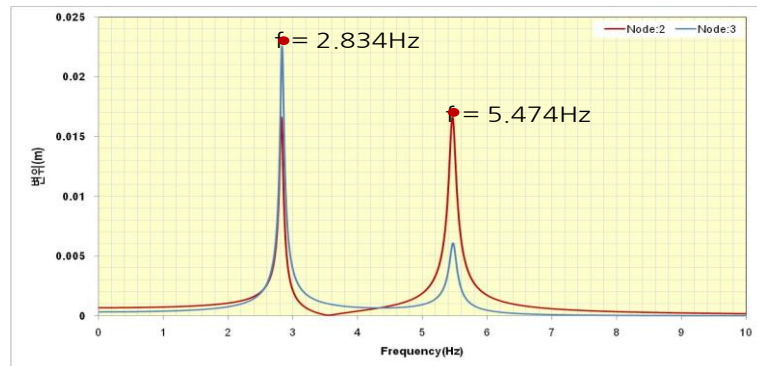
주파수/시간 동적응답에 대한 이해



과도응답 : 시간에 따라 변화하는 가진에 의한 시스템 응답

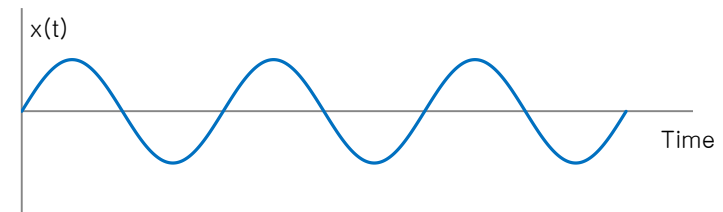


조화응답 : 주기적인 가진에 의한 시스템의 정상상태 응답



$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{F_0}{m}\sin\omega t$$

$$x = Ce^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi) + \frac{F_0}{k} A \sin(\omega t - \phi)$$



주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템



EXH.
MANIFOLD



MUFFLER
FR



CATALYTIC
CONVERTER



MUFFLER
CTR



MUFFLER
RR

배기계의 기능

- 배기가스를 안전하게 차량밖으로 유도
- 엔진의 토출음, 방사음 저감
- 엔진 출력 성능 향상
- 유해한 배기가스를 정화

1. 성능

배기가스의 원활한
흐름 유도

유동해석

2. 정숙성

엔진 토출음/방사음
저감 및 음질향상
행거의 최적 위치 선정

모드해석
주파수응답해석

3. 내구 신뢰성

배기계 내부식성 향상
열피로 열해 방지

선형정적해석
열응력해석
피로해석

4. 환경

Light off time 단축
촉매효율 향상
배기가스 규제 만족

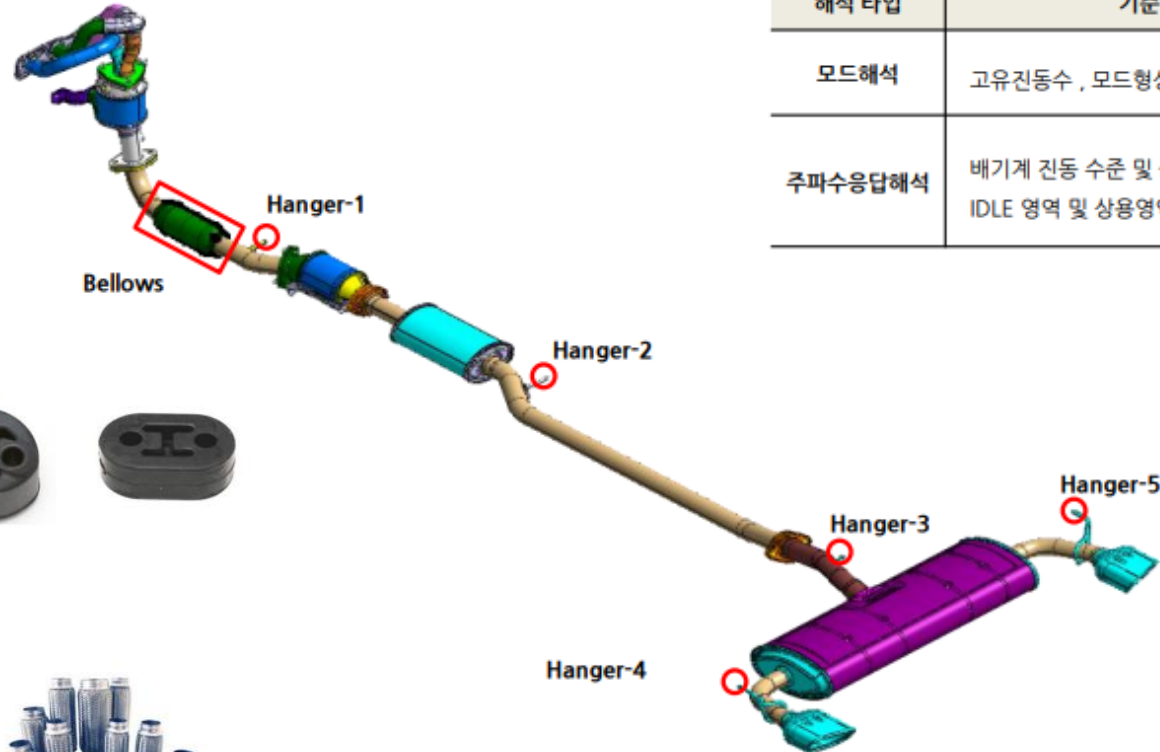
주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템

해석 타입	기준
모드해석	고유진동수, 모드형상 파악
주파수응답해석	배기계 진동 수준 및 공진여부 파악 IDLE 영역 및 상용영역 회피

■ 배기계와 차체의 진동을 분리해주는 고무 행거



■ 엔진과 배기계의 진동을 분리해주는 벨로우즈



주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템

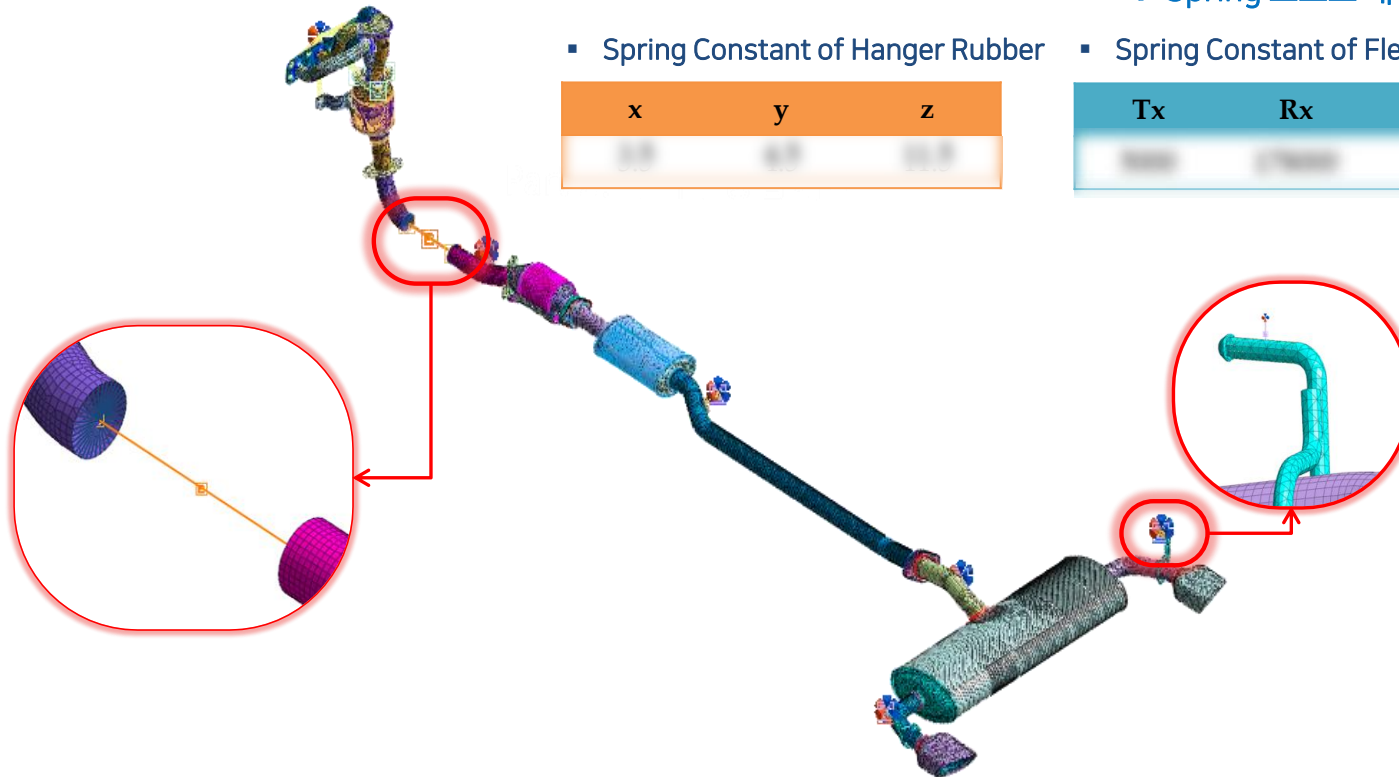
Hangar Rubber, Bellows (Flexible Tube)
→ Spring 요소로 대체

- Spring Constant of Hangar Rubber

x	y	z
1.0	1.0	1.0

- Spring Constant of Flexible Tube

Tx	Rx	Ry	Rz
1.0	1.0	1.0	1.0

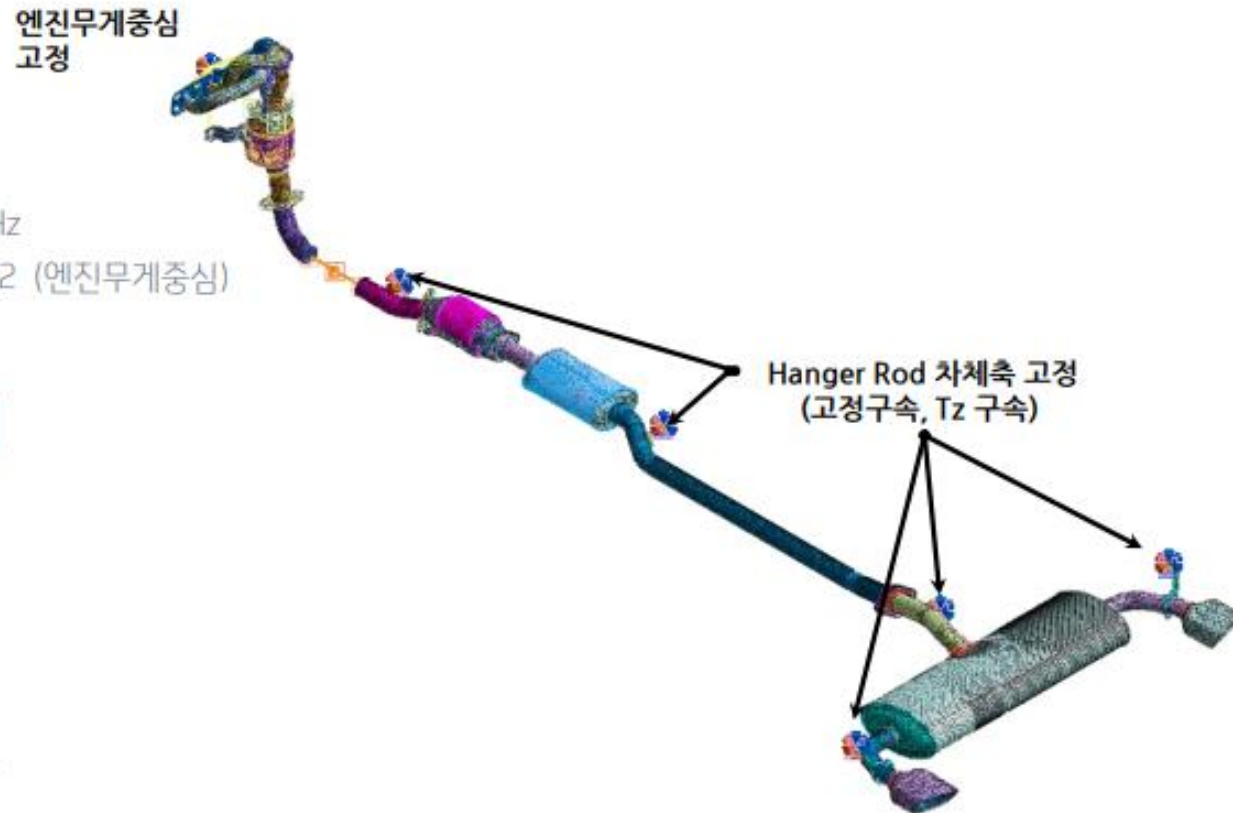


주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템

- 모드해석 : 모드추출영역 1~200Hz
- 주파수응답해석 : 단위가진 1m/s^2 (엔진무게중심)

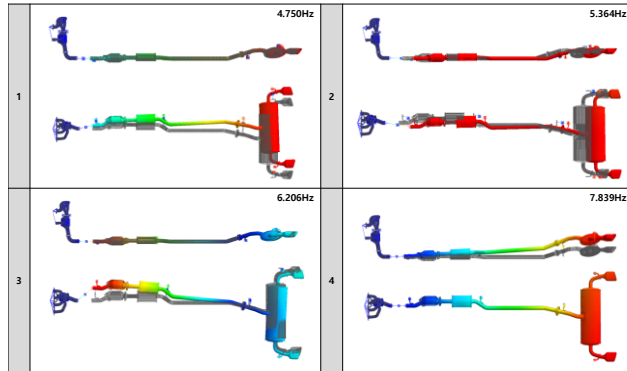
배기계시스템 중량

No	Part	Mass (kg)
1	Exh.Manifold	5
2	WCC COMPL	7
3	PIPE ASSY	3
4	UCC COMPL	6
5	MUFFLER CTR	5
6	MUFFLER RR	15
합계		41

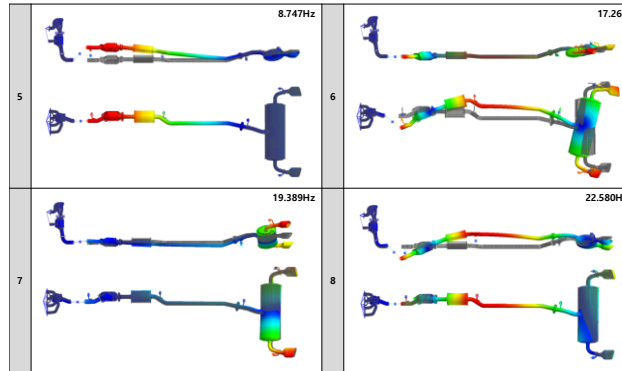


주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템

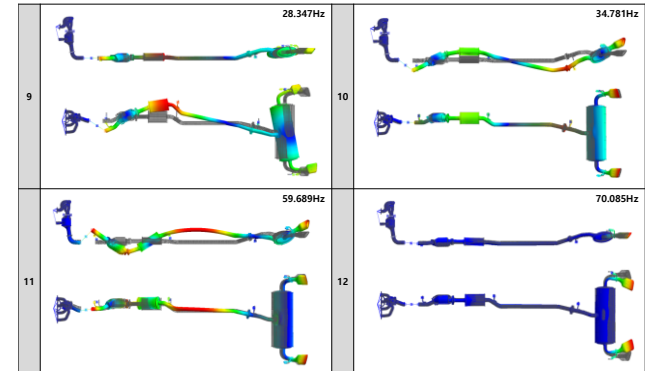
□ 모드형상 (1~4차 모드)



□ 모드형상 (5~8차 모드)

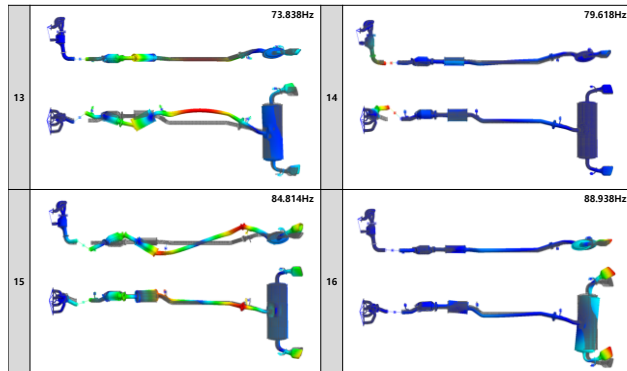


□ 모드형상 (9~12차 모드)

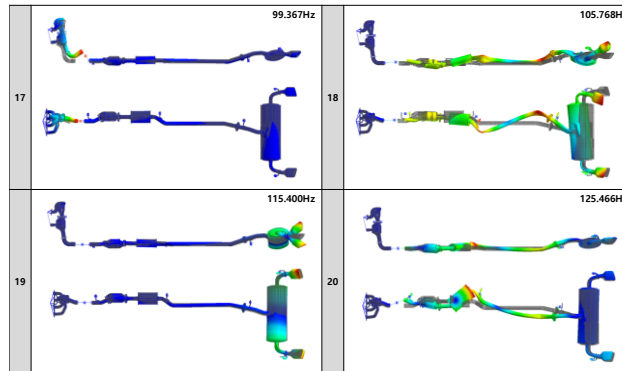


Exhaust System Mode Shape : 1st ~ 24th

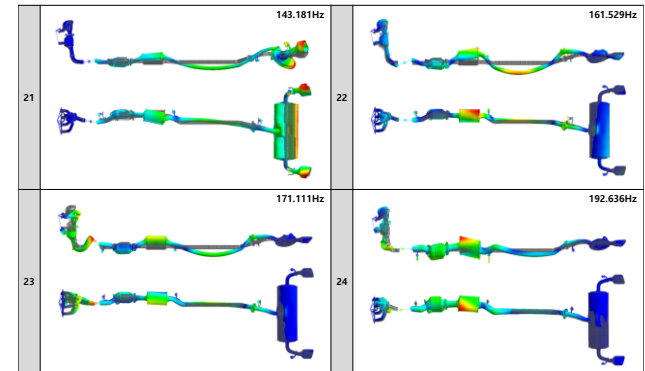
□ 모드형상 (13~16차 모드)



□ 모드형상 (17~20차 모드)

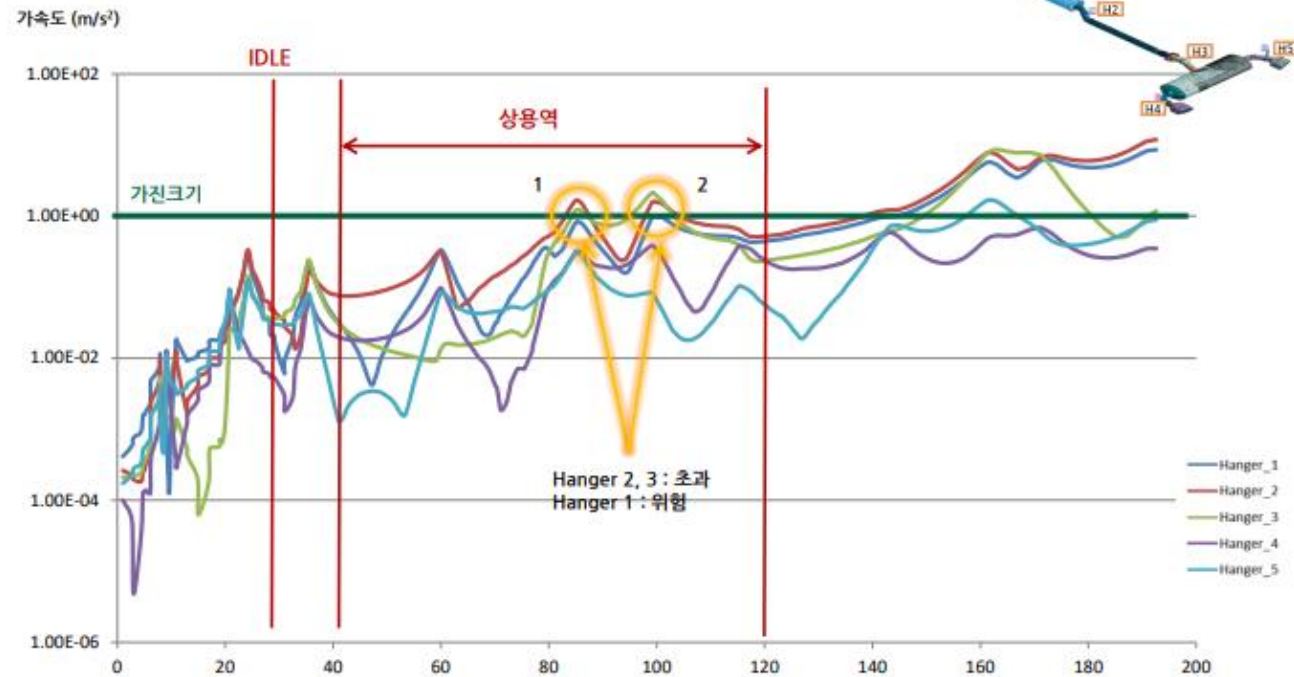


□ 모드형상 (21~24차 모드)

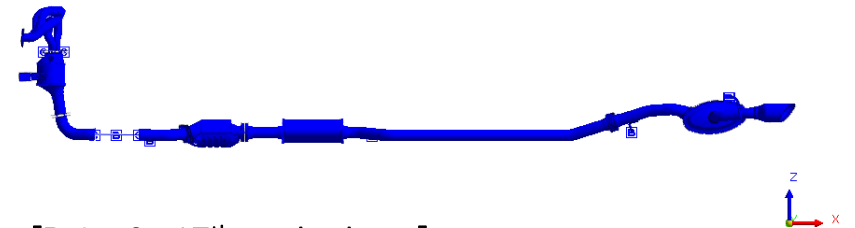


주파수 응답해석 사례 - 배기계 시스템

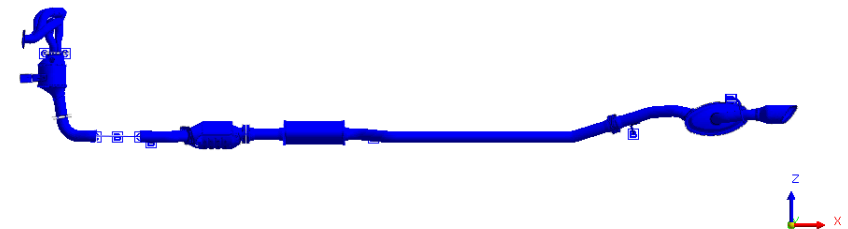
[주파수응답해석 결과]



[Point 1 : 15th mode shape]

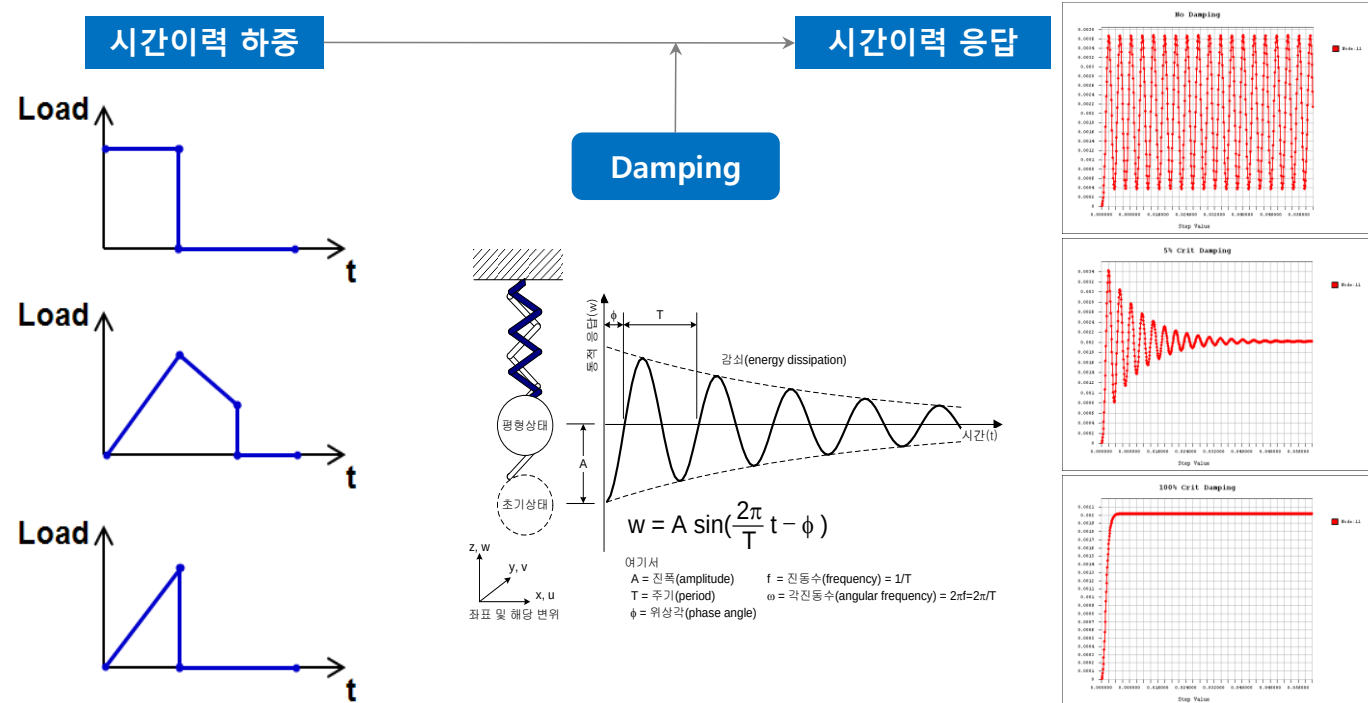


[Point 2 : 17th mode shape]

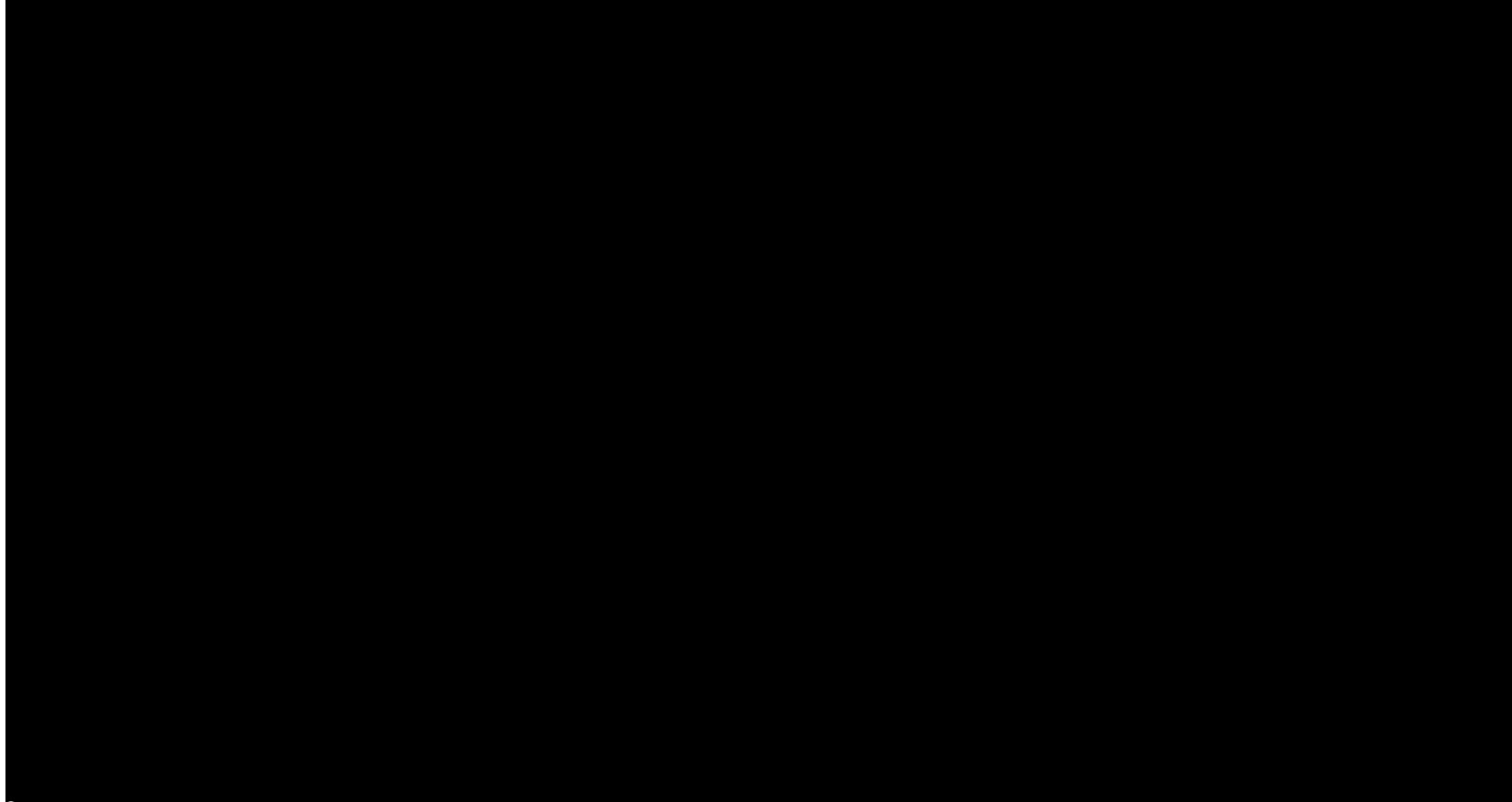


과도 응답에 대한 이해

시간영역에서 수행되는 해석으로, **구조물에 동적 하중이 작용하는 경우에 동적 평형방정식의 해를 구하는 것**
 과도응답해석을 위해 요구되는 하중, 경계조건은 정적 해석과 유사하지만, 하중이 시간의 함수로 정의된다는 점이 다른
 과도응답해석의 하중으로는 **시간에 따라 변하는 힘, 변위** 등을 사용



과도 응답에 대한 이해



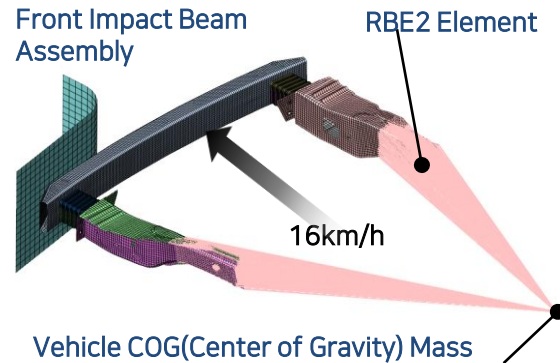
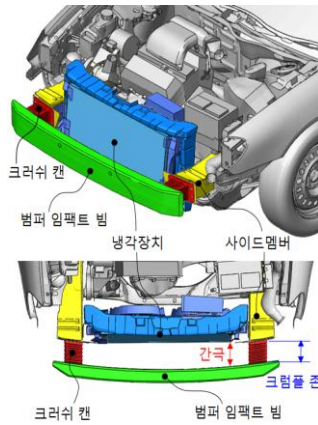
과도 응답해석 사례 - RCAR Low Speed Impact Analysis - Front

해석의 목적

RCAR 기준의 저속 충돌 시험시
손상성에서 좋은 평가를 받아
수리비 등급을 좋게 받는 차를
개발하기 위함

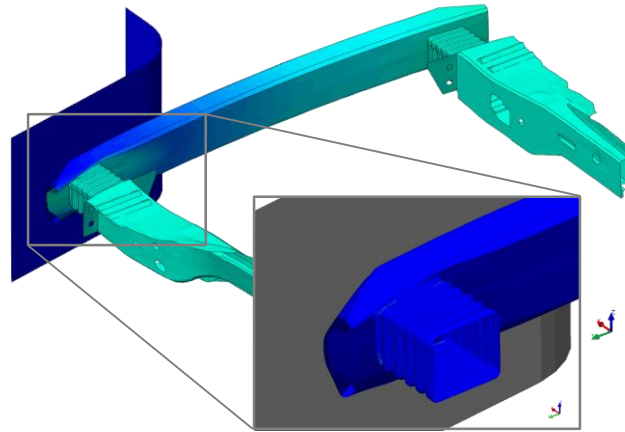
해석 종류 및 모델

- 외연적 비선형 동해석



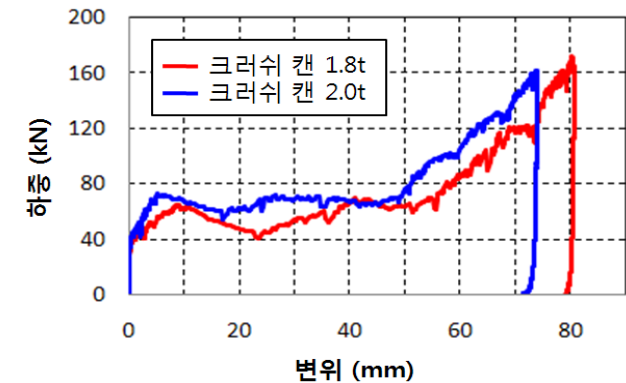
Vehicle COG(Center of Gravity) Mass
→ Total Vehicle Mass : 1,119kg

Displacement (ISO View)



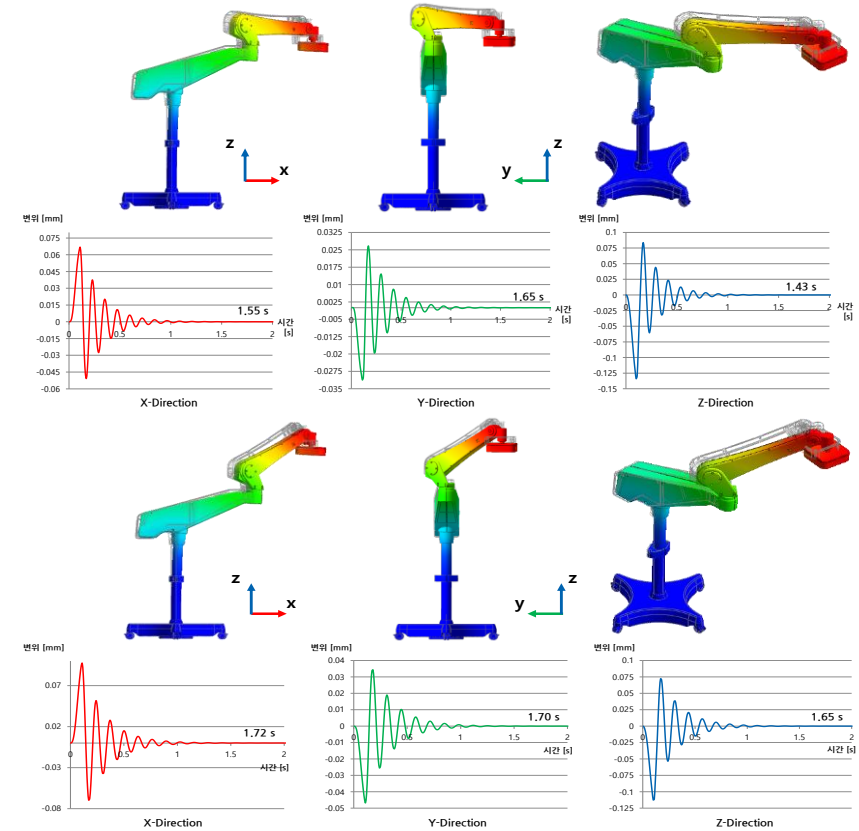
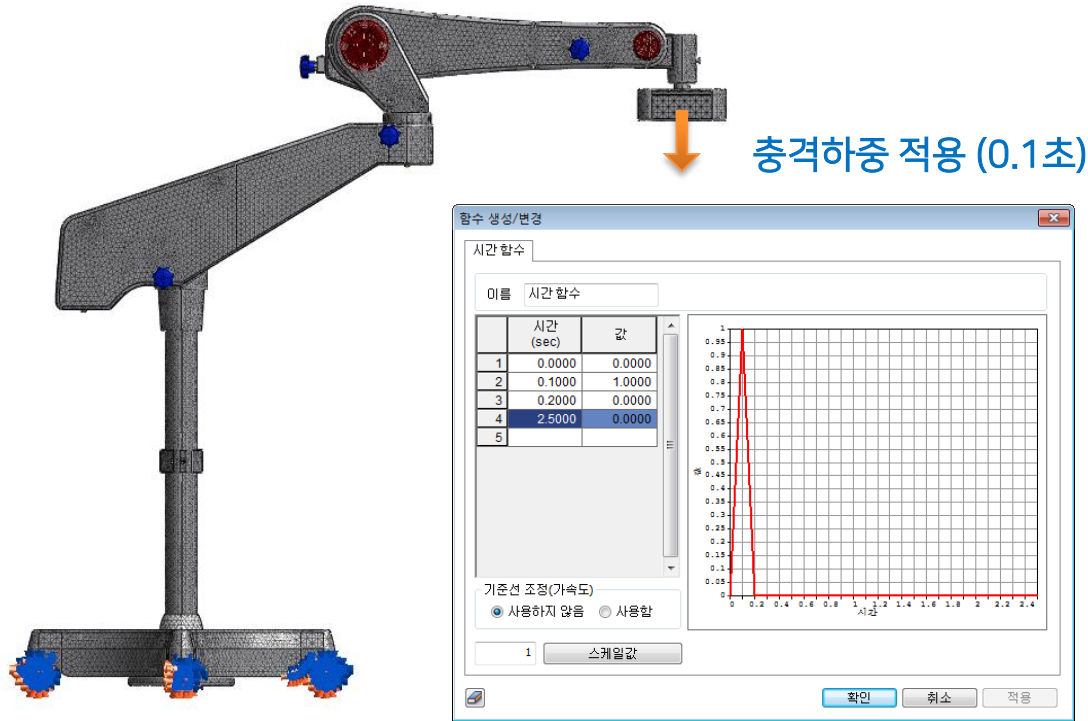
<시험 영상>

Crush CAN의 하중-변위 곡선



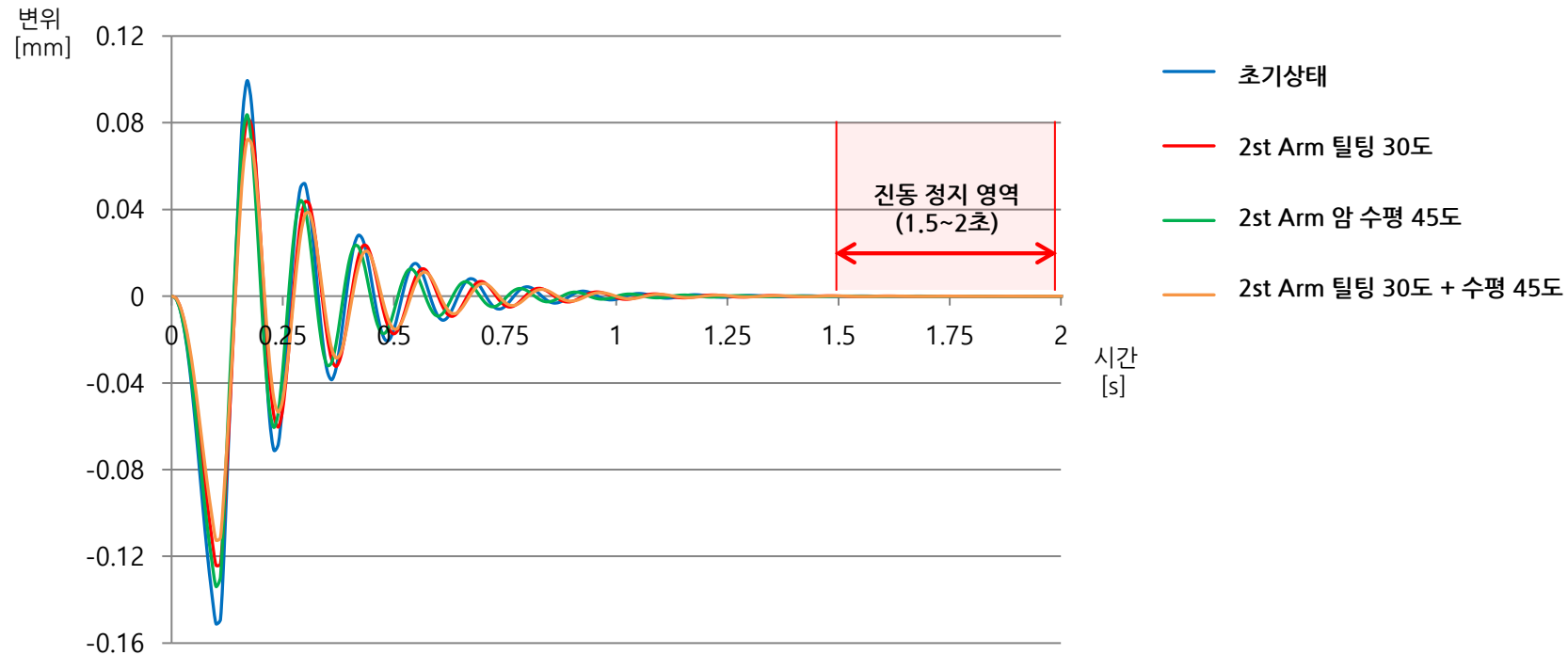
과도 응답해석 사례 - 안과 수술용 현미경 지지대

[Arm 킬딩 각도에 따른 충격 응답확인]



과도 응답해석 사례 - 안과 수술용 현미경 지지대

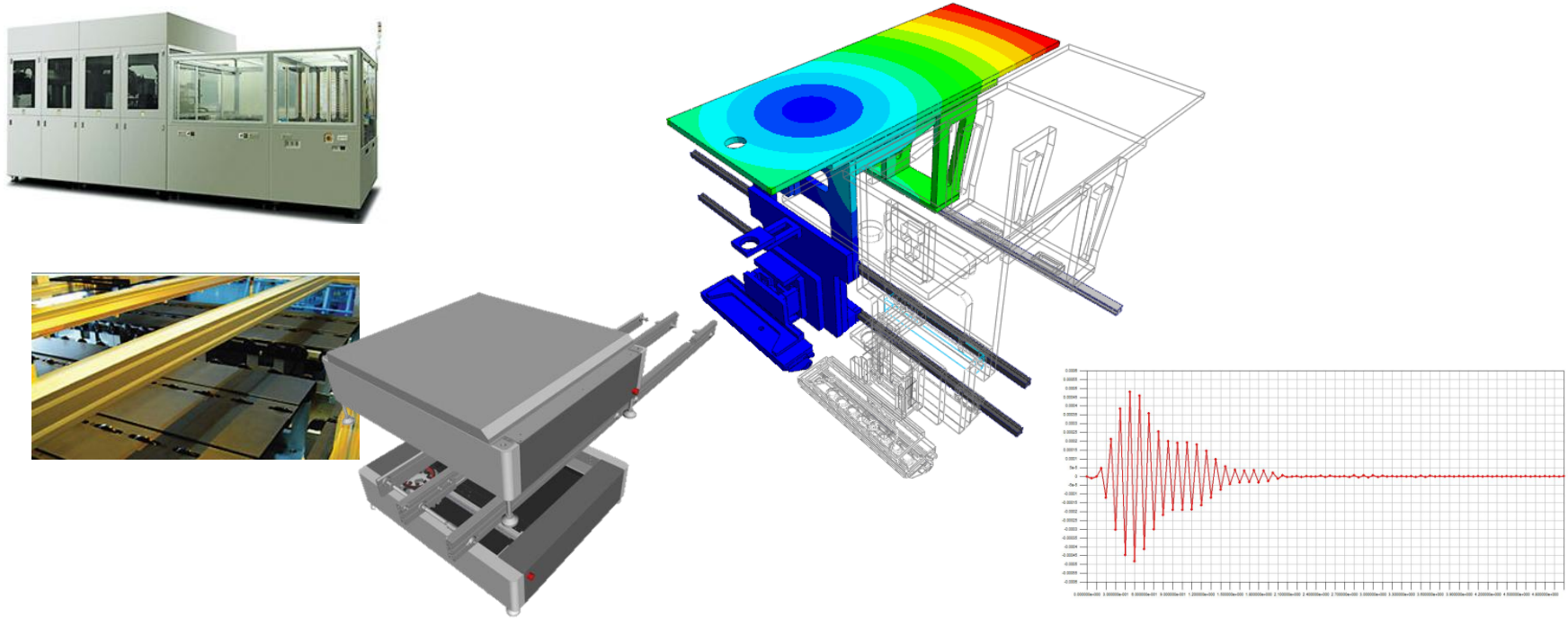
- 정지 속도 : 2st Arm 수평 45도 > 2st Arm 틸팅 30도 + 수평 45도 > 초기상태 > 2st Arm 틸팅 30도
- 진폭 크기 : 초기상태 > 2st Arm 수평 45도 > 2st Arm 틸팅 30도 > 2st Arm 틸팅 30도 + 수평 45도



과도 응답해석 사례 - LCD 레이저 검사기

LCD, Color Filter, 패널 제조공정에서 발생하는 각종 결함을 고속으로 검출하는 장비

→ 장비가 이동 후 원위치로 돌아와서 정지 할 때까지 끝단의 변위를 측정



과도 응답해석 사례 - 충격하중에 의한 크레인 안전성 검토

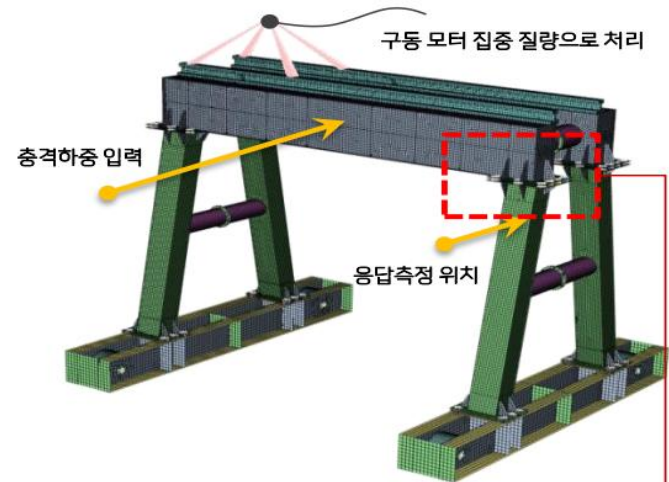
해석의 목적

골리앗 크레인의 주요 연결부의 볼트 풀림 발생시, 충격하중 작용에 따른 구조물의 안전성 검토

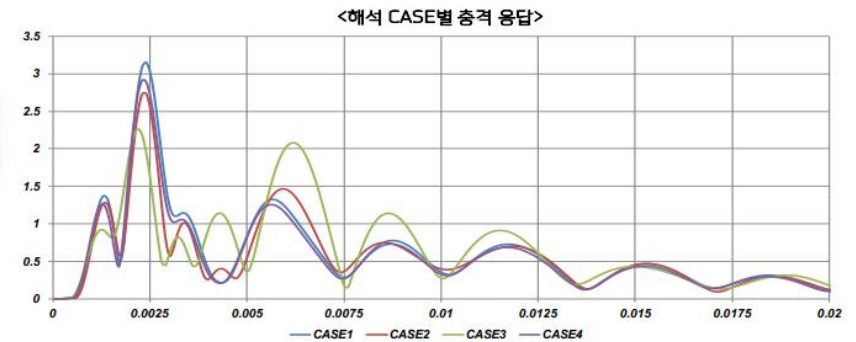
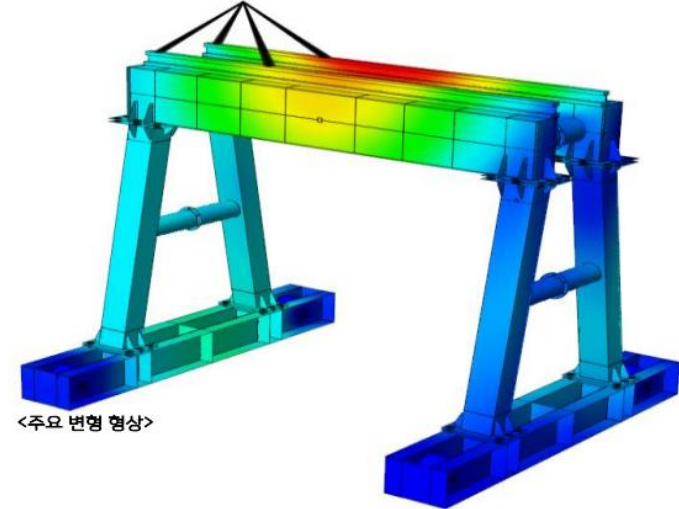
해석 종류 및 모델

- 과도응답해석

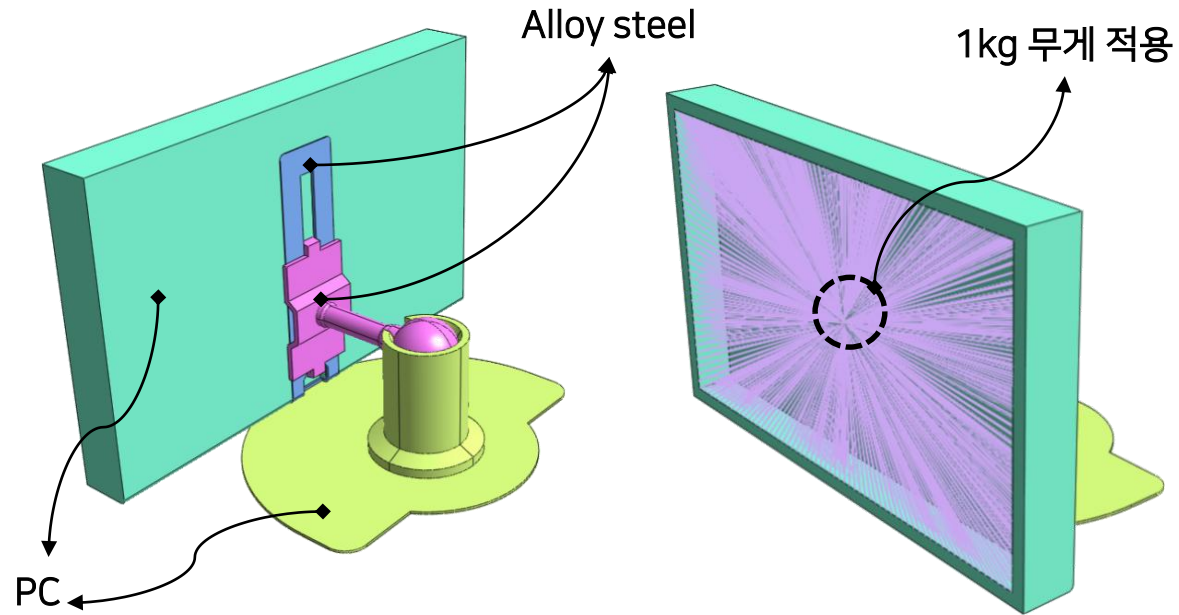
- 모델링 : 3D Hexa, 2D Quad & Tri Element
- 가진하중 : 실험에 적용한 충격하중 입력



- 과도응답해석
응답측정 위치별 가속도 평가



실습모델 설명



- 💡 모드해석 : 구조물의 동특성 확인
- 💡 조화응답 : 반복하중에 대한 주파수응답 확인
- 💡 과도응답 : 충격하중에 대한 과도응답 확인

CONTENTS

Day 3 – 진동해석 마스터하기!

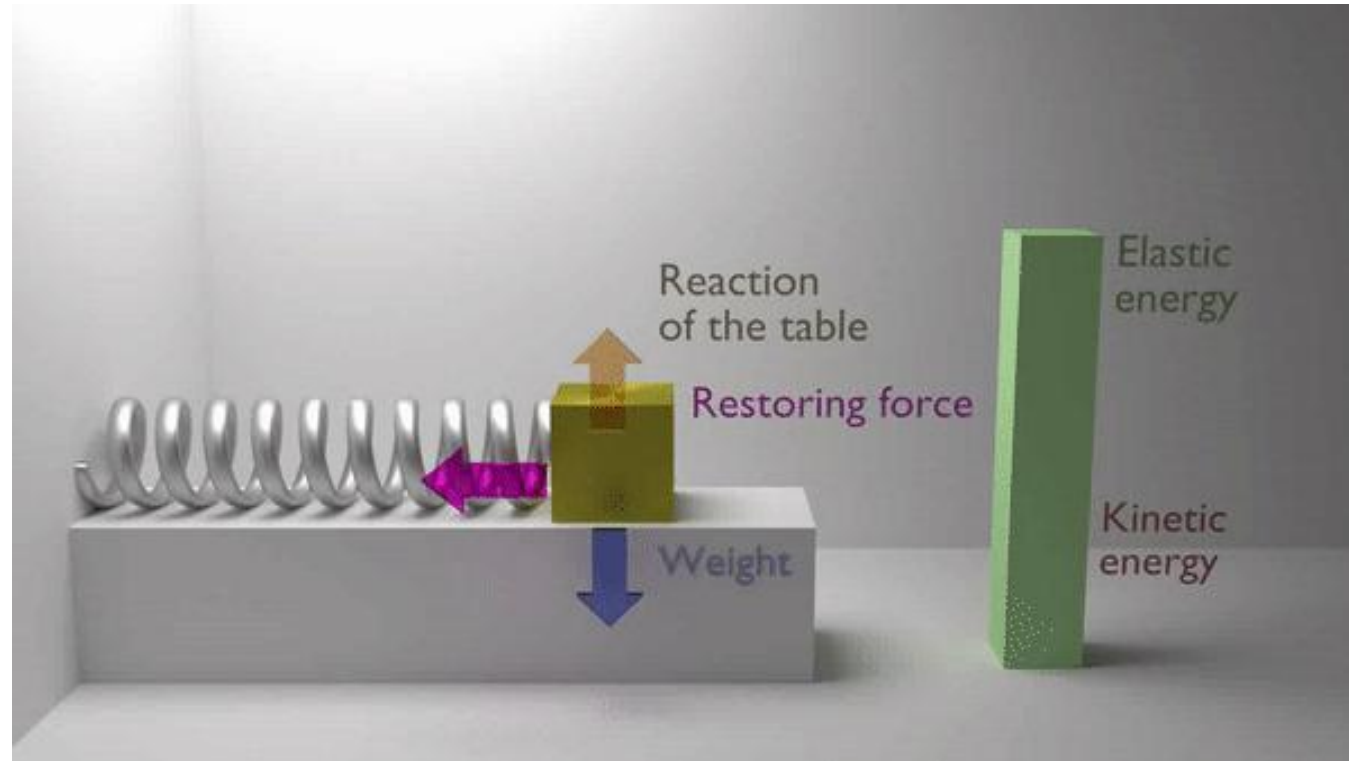
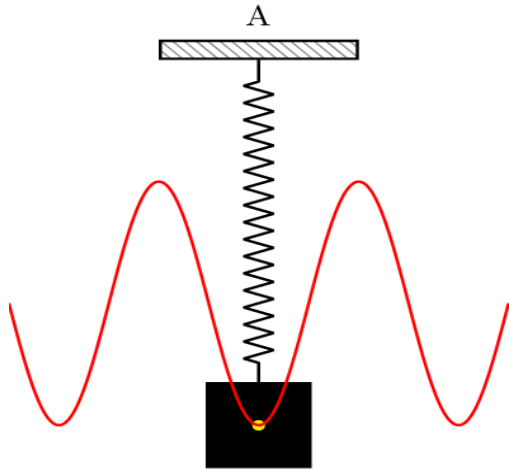
Session1. 진동해석을 위한 기초사항

Session2. 제품의 동특성 및 진동응답 평가법 이해하기

Session3. 불규칙한 하중에 대한 안전성 확보 방안 이해하기

Session4. 진동피로를 고려한 설계제품 내구수명 예측

Remind : 진동이란?

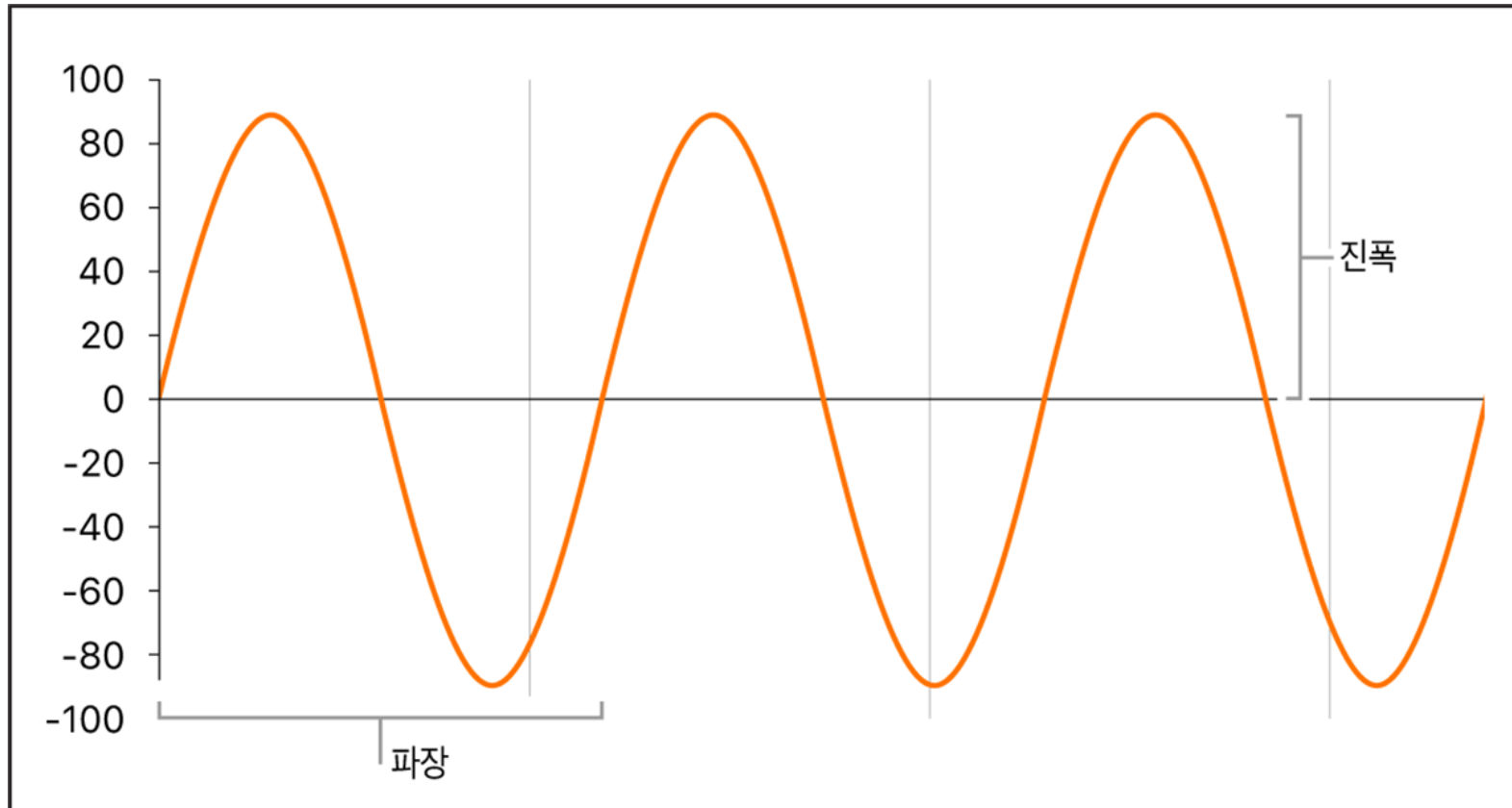


불규칙한 진동이란?

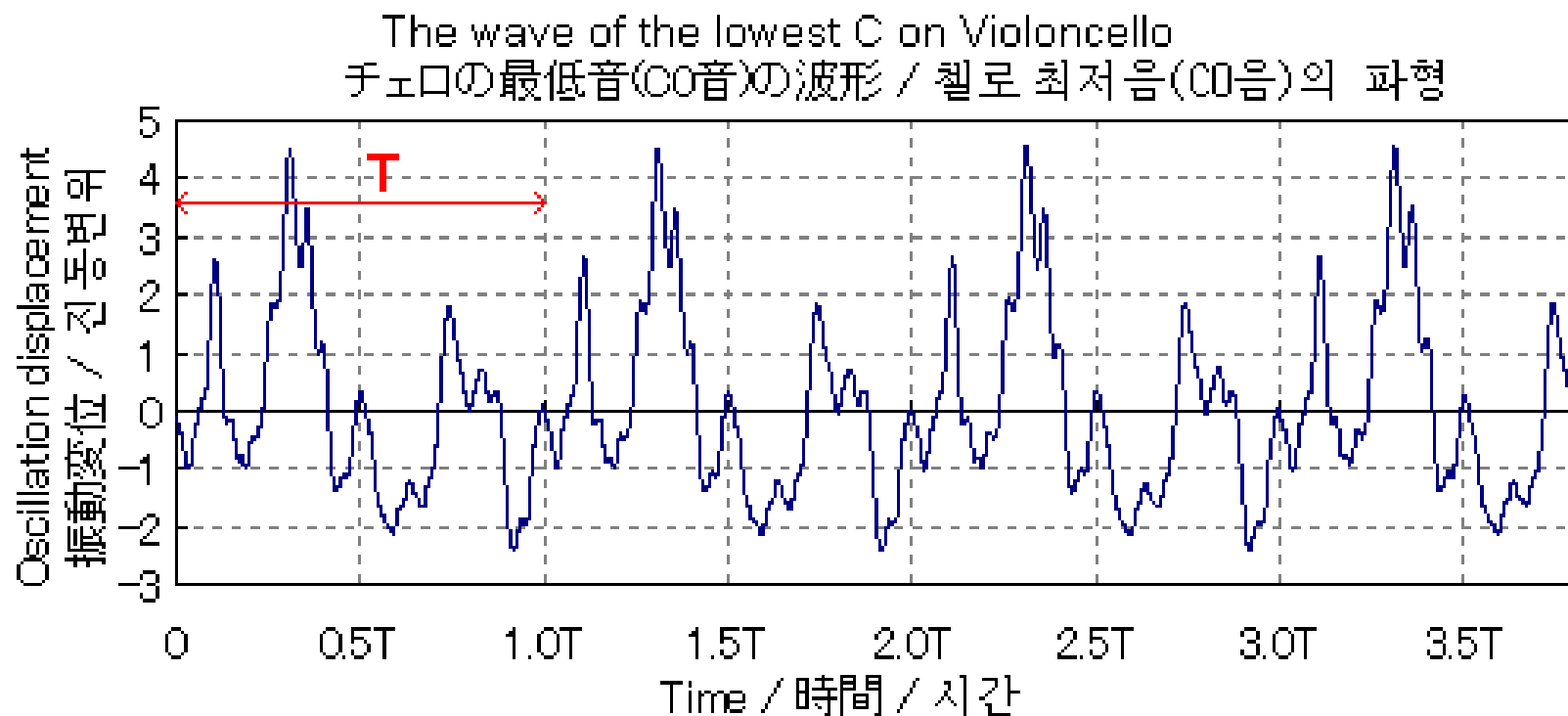


출처 : HTW Berlin

Quiz : 진동의 구분해보기

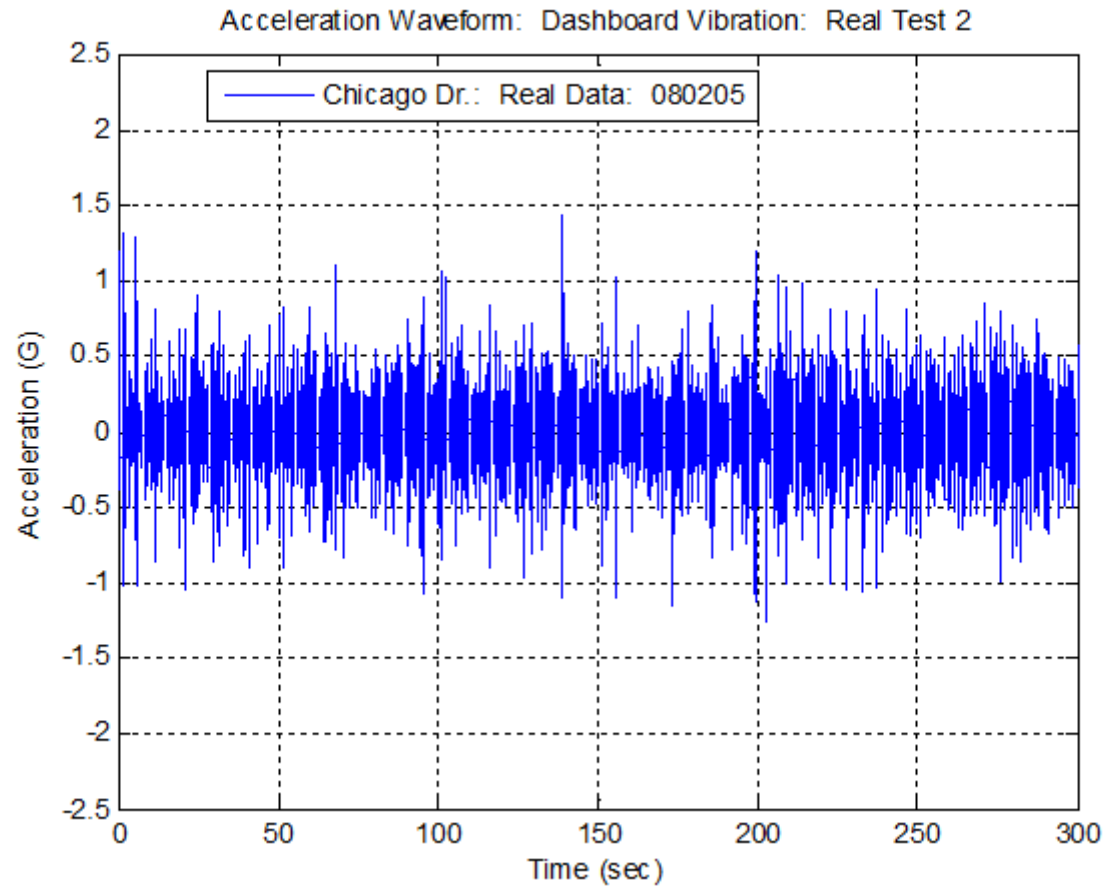


Quiz : 진동의 구분해보기



(T: period / 周期 / 주기, $T = 1 \div 65.4(\text{Hz}) \approx 0.0153(\text{sec./秒/초})$)

Quiz : 진동의 구분해보기



Part 3. 불규칙한 하중에 대한 안전성 확보 방안 이해하기

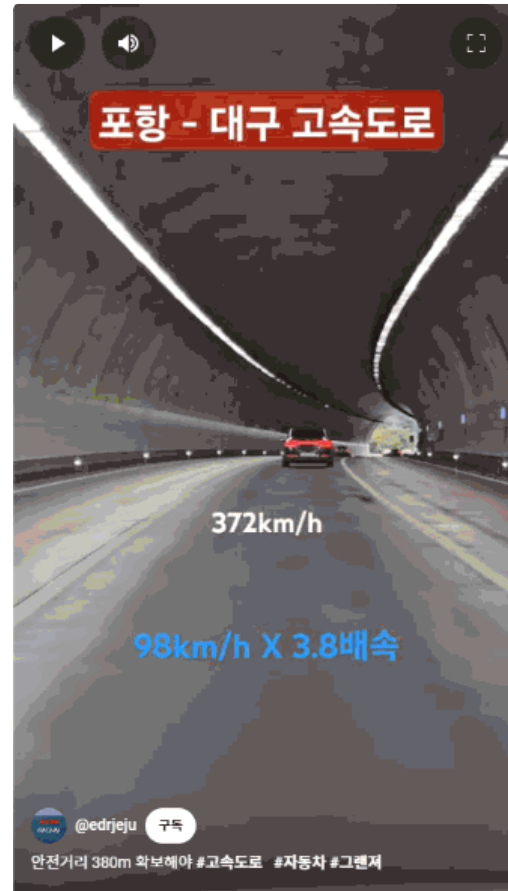
랜덤진동 이해하기



랜덤진동 이해하기



출처 : @drivingmago (Shorts)

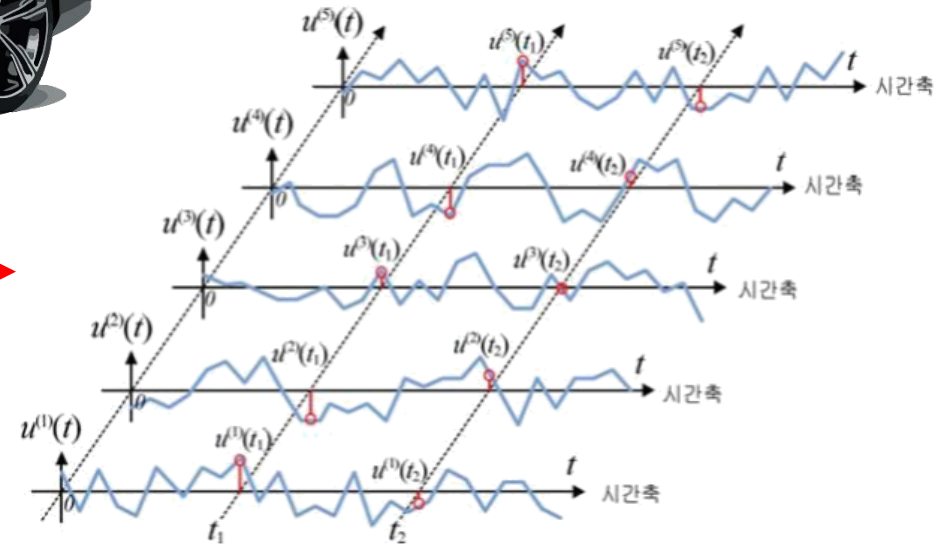


출처 : @edfjeju (Shorts)

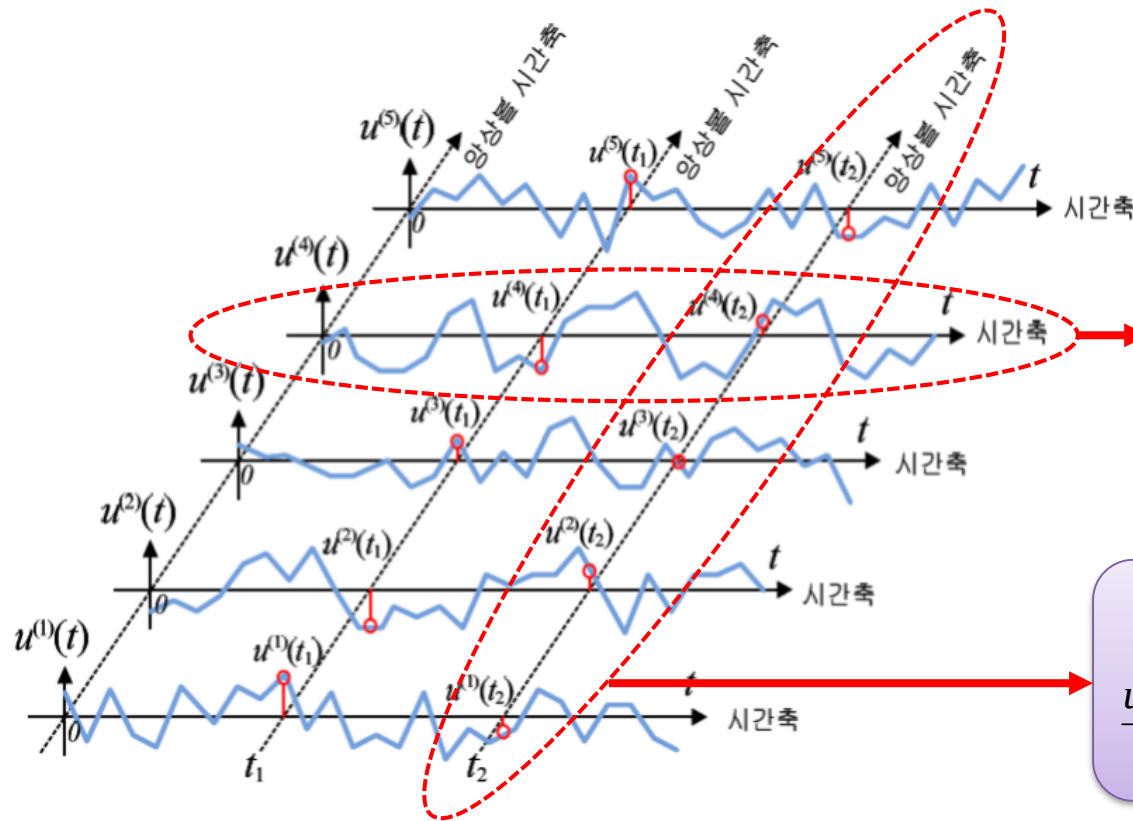


출처 : @만물선생 (Shorts)

랜덤진동 : 불규칙한 진동의 의미



랜덤진동 : 불규칙한 진동의 의미

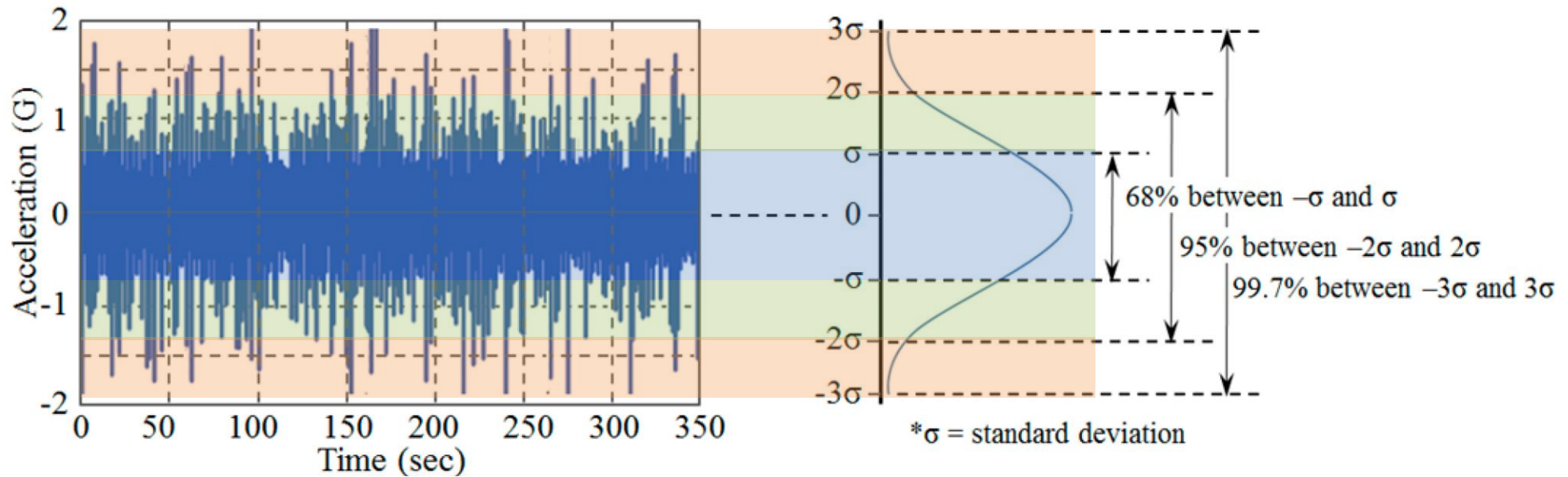


시간 평균 : 시간 축을 따라서 계측된 값들의 평균

t_2 의 앙상블 평균 : t_2 에서 계측된 값들의 평균

$$\frac{u^{(1)}(t_2) + u^{(2)}(t_2) + u^{(3)}(t_2) + u^{(4)}(t_2) + u^{(5)}(t_2)}{5}$$

랜덤진동 불확실성에 대한 반영



랜덤진동 크기(Amplitude) 이해



진동의 크기(Amplitude)는??

랜덤진동 크기(Amplitude) 이해

출처 : Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea

leaf-spring 5-ton truck



(a)

Air-ride 5-ton truck

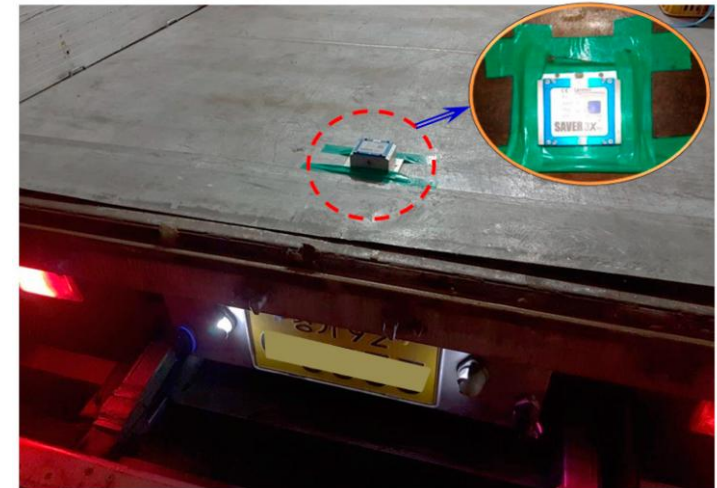


(b)

Leaf-spring 11-ton truck



(c)

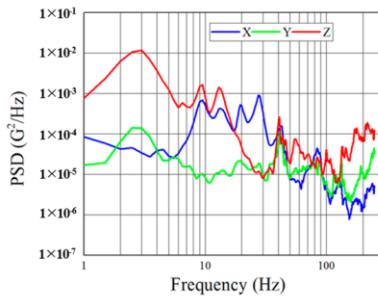


랜덤진동 크기(Amplitude) 이해

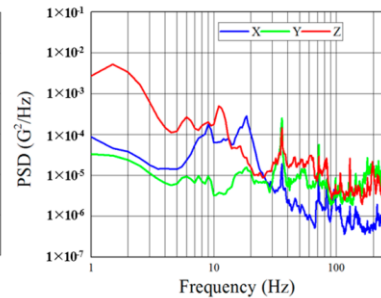
출처 : Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea

Triaxial
vibration

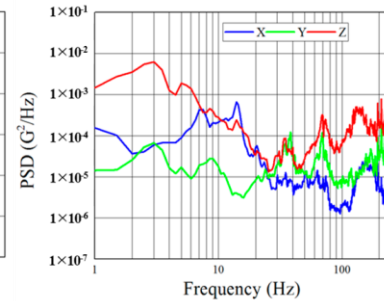
leaf-spring 5-ton truck



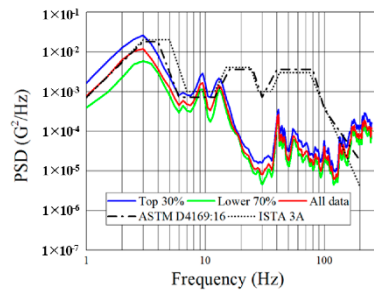
Air-ride 5-ton truck



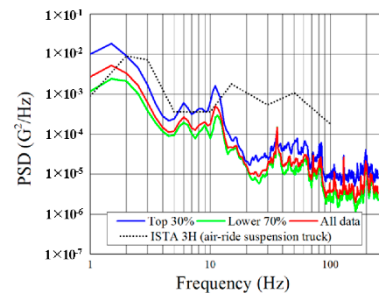
Leaf-spring 11-ton truck



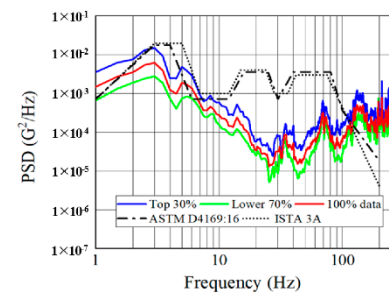
Vertical
vibration



(a)

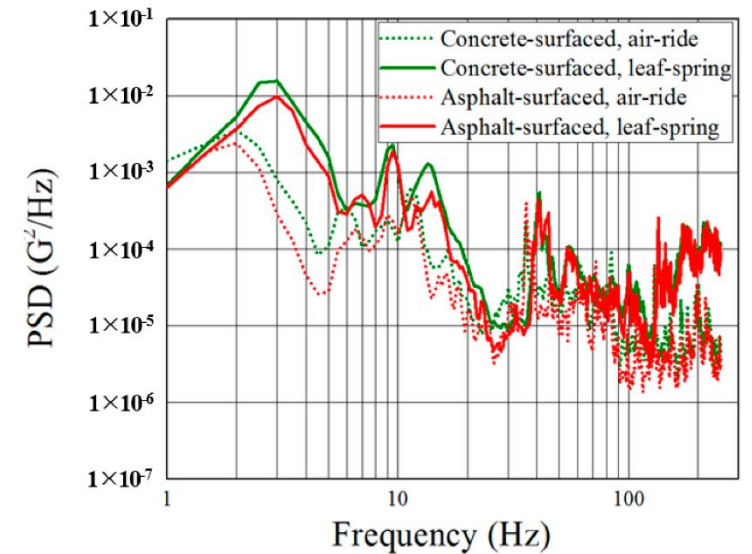


(b)



(c)

Asphalt vs Concrete surface



랜덤진동 크기(Amplitude) 이해

출처 : Mil-std-810g

Composite Wheeled vehicle

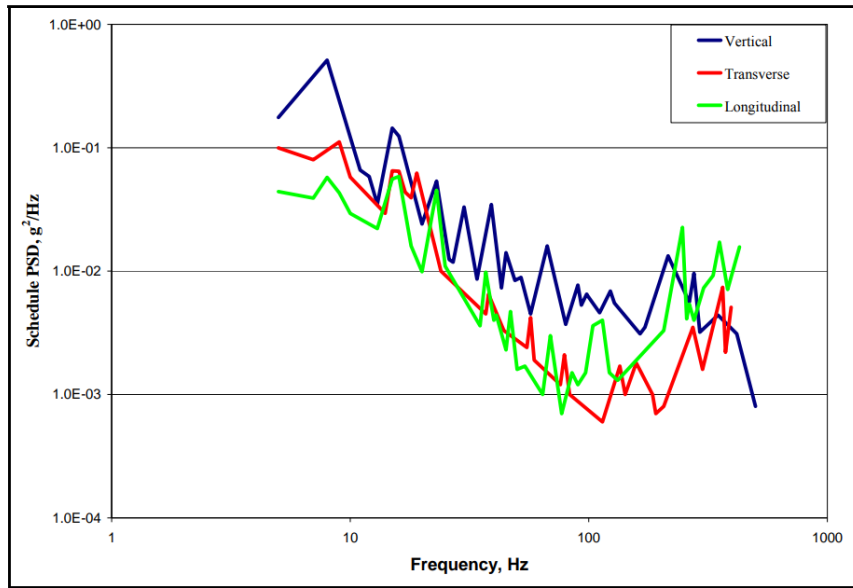


Figure 514.6C-3 – Category 4 - Composite wheeled vehicle vibration exposure.

Generalized Gunfire

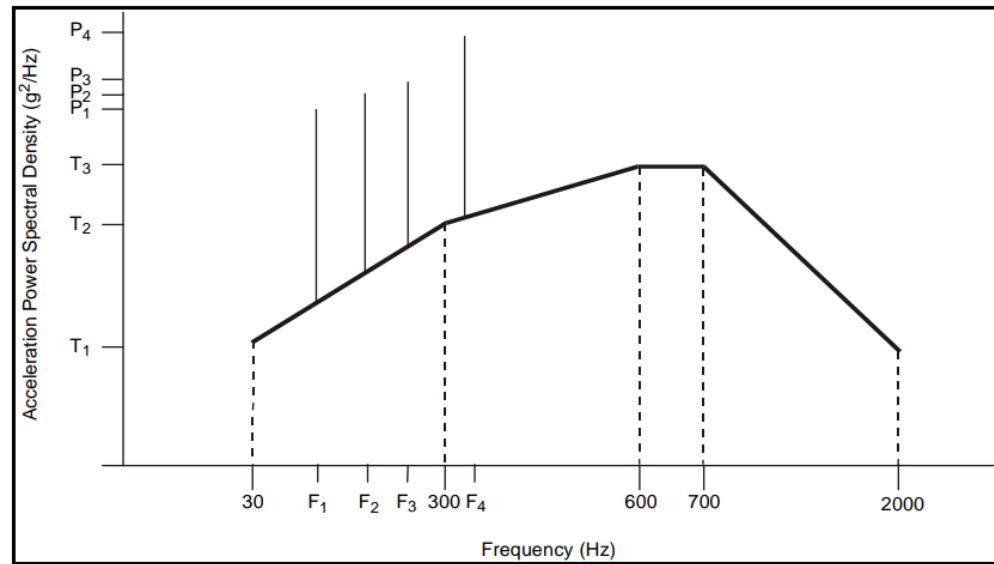


FIGURE 519.6D-1. Generalized gunfire induced vibration spectrum shape.



랜덤진동 적용 대상

출처 : 위키디아



출처 : 위키디아

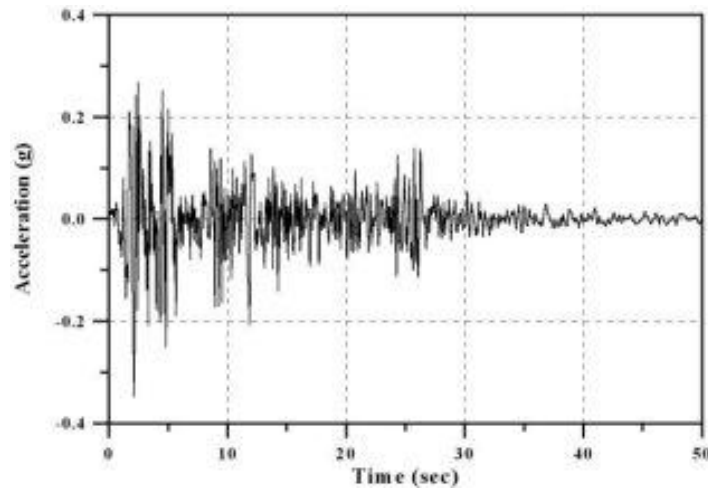


출처 : Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea

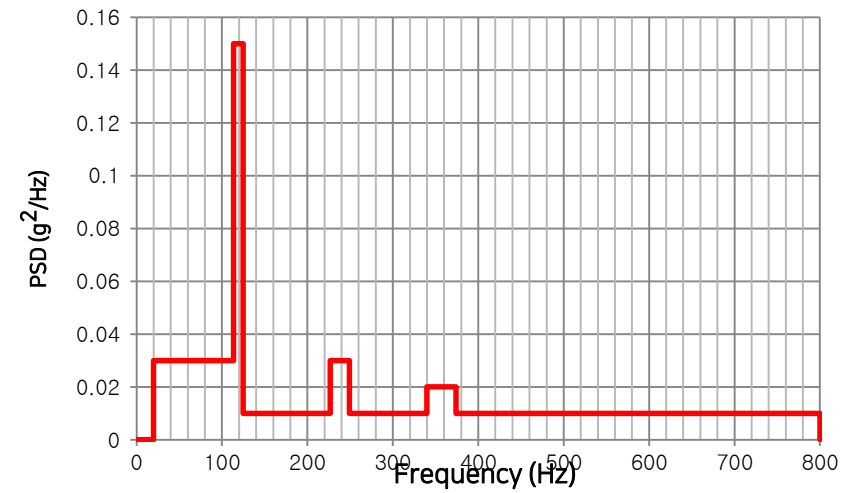


출처 : 은산해운항공㈜

PSD(Power Spectrum Density) : 파워스펙트럼 밀도



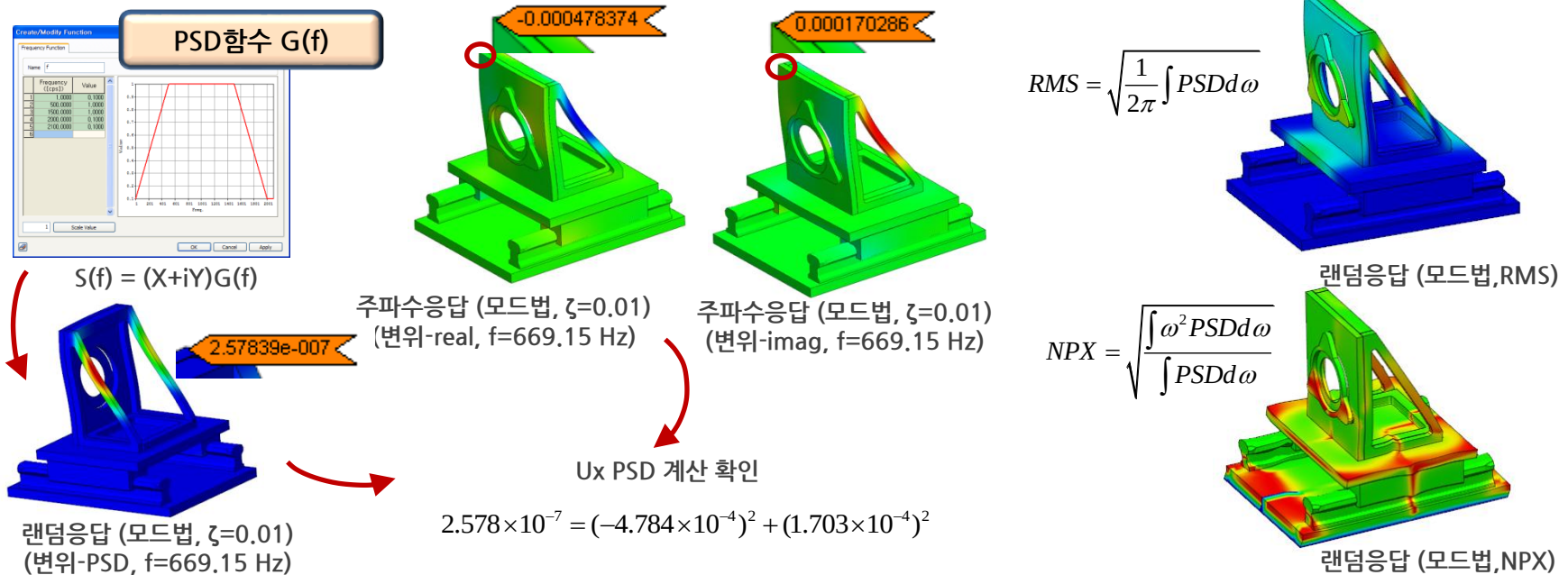
시간에 따라 측정된 랜덤 가속도



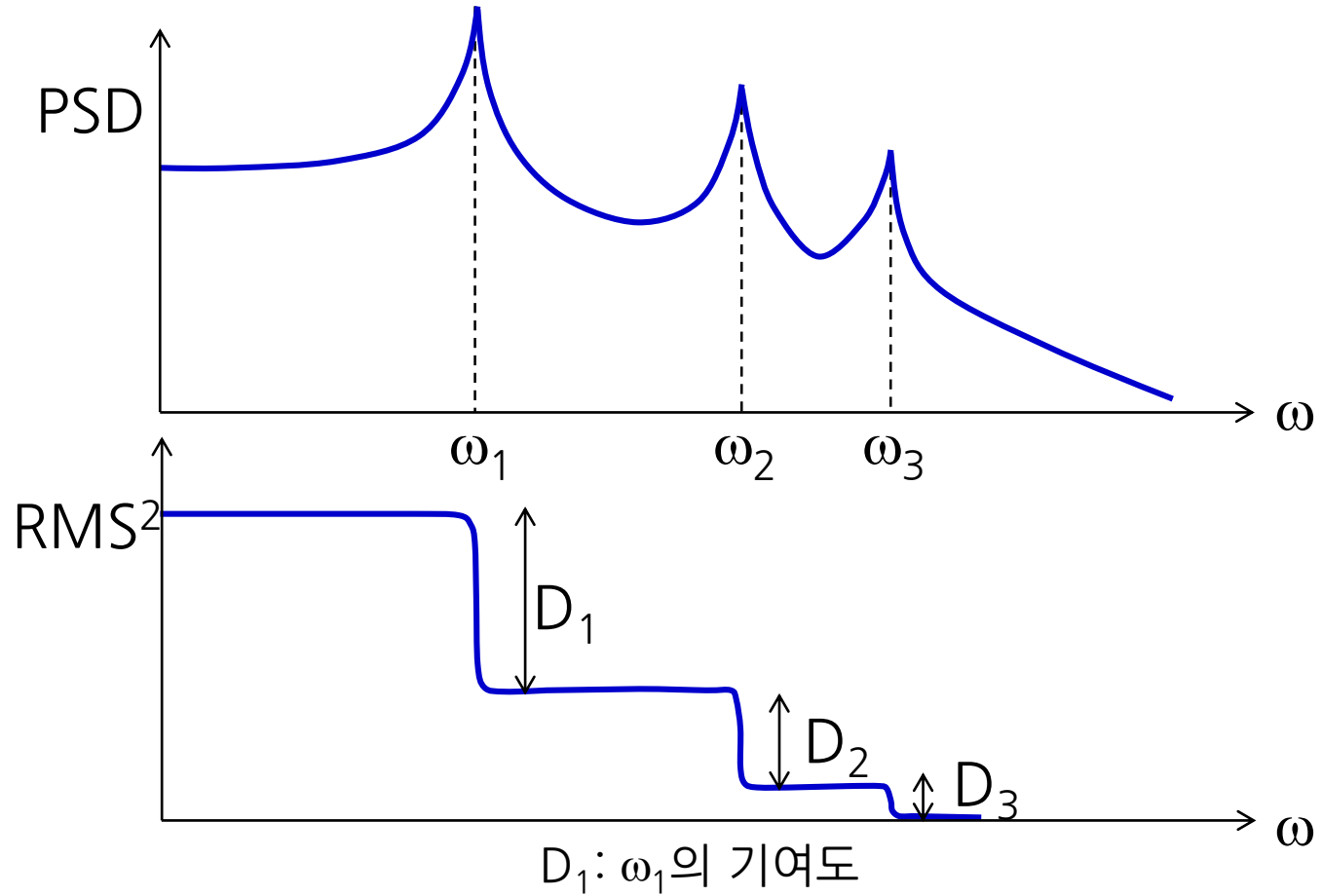
파워 스펙트럼 밀도 함수

랜덤진동 PSD 계산 과정

- 하중PSD에 대한 응답 PSD 계산
 - 주파수 응답해석(직접법, 모드법) 후 결과의 PSD 조합 (감쇠 포함)
 - 접촉, 해석 주파수 선택, (cross) PSD 정의



랜덤진동 PSD 계산 과정



랜덤진동 PSD 계산 과정

- 응답 PSD
 - 랜덤응답²의 주파수별 분포
- RMS (Root-mean-square)
 - 확률분포의 **표준편차**와 등가
 - 반응 PSD의 68.3%면적에 해당하는 반응
- NPX (# of positive zero crossing)
 - 랜덤응답이 제로 축을 음에서 양으로 통과하는 통계적 숫자
 - **공칭 주파수**

Amplitude

$$S_{jj} = \sum_a \sum_b H_{ja} H_{jb}^* S_{ab}$$

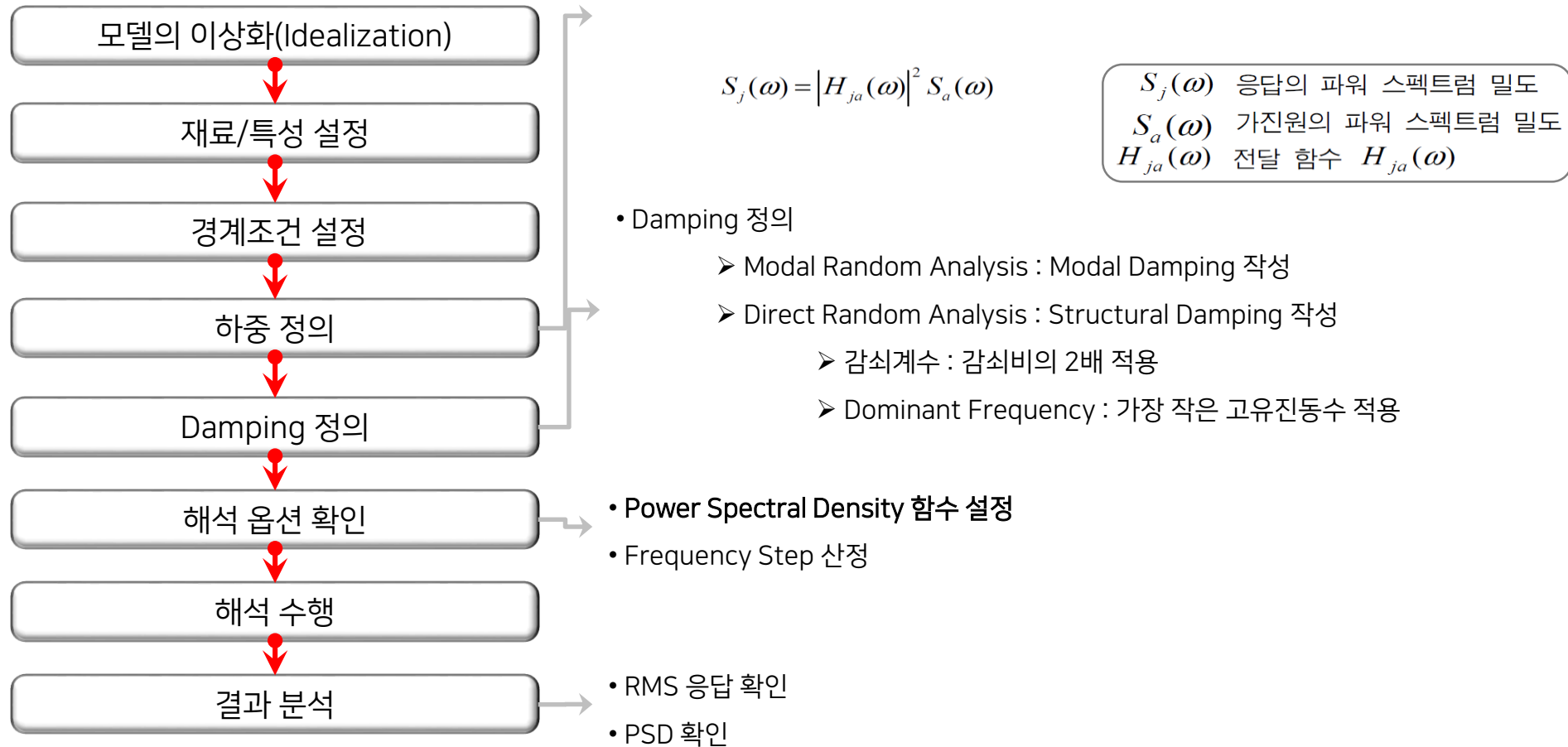
Probability

$$S_{\text{RMS}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega} = \sqrt{m_0}$$

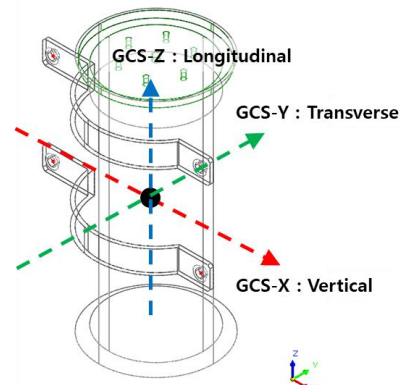
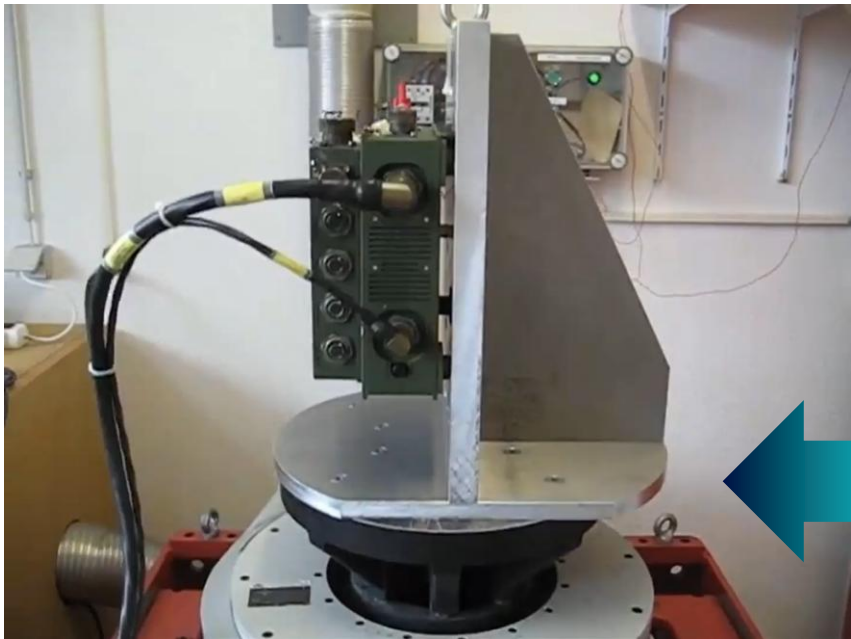
Fatigue life

$$N_0 = \left(\frac{\int_0^{\infty} \omega^2 S_j(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S_j(\omega) d\omega} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

랜덤진동 PSD 계산 과정



제품 고정 브라켓류 Mil-std-810g 랜덤해석



[수송진동 하중 적용위치 및 좌표계]

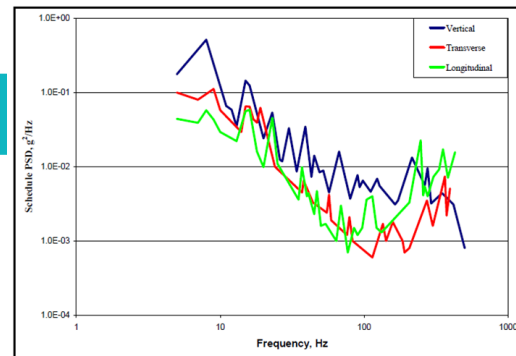
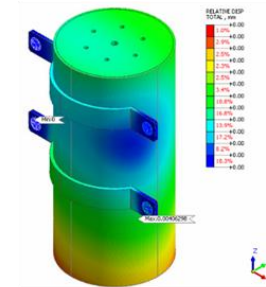


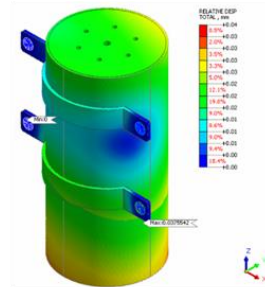
Figure 514.6C-3 - Category 4 - Composite wheeled vehicle vibration exposure.

[MIL-STD-810G 수송진동 하중]

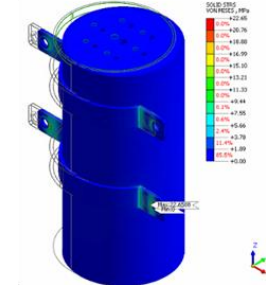
3-sigma, Vertical 변위결과



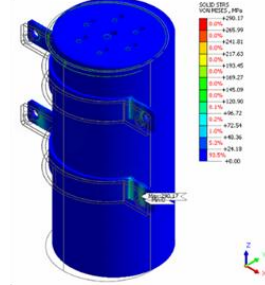
3-sigma, Transverse 변위결과



3-sigma, Vertical 응력결과



3-sigma, Transverse 응력결과



실습모델 설명

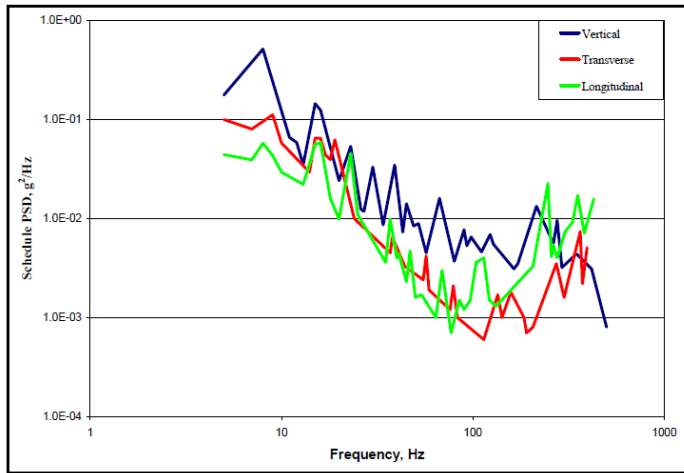
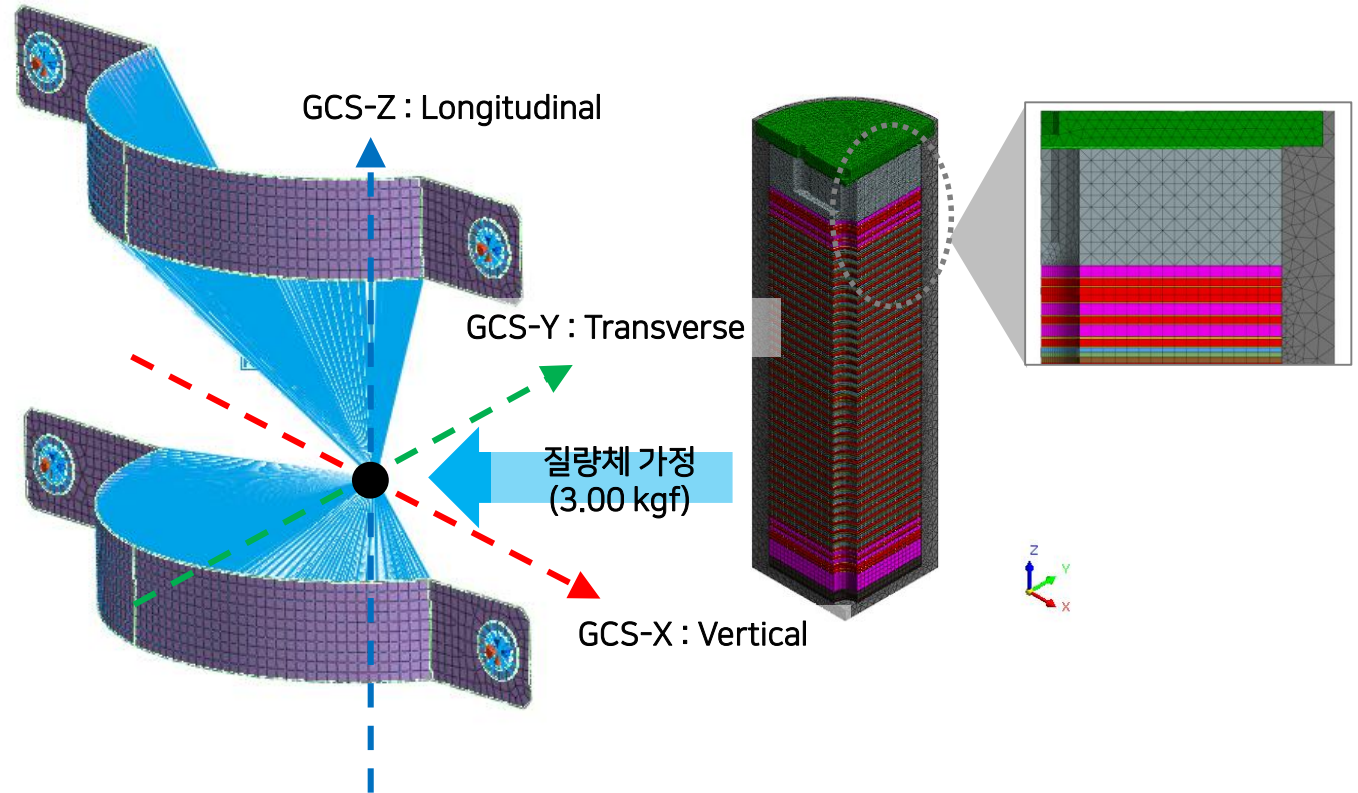


Figure 514.6C-3 - Category 4 - Composite wheeled vehicle vibration exposure.

[MIL-STD-810G 수송진동 하중]

Steel (Thickness : 1.5mm)



CONTENTS

Day 3 – 진동해석 마스터하기!

Session1. 진동해석을 위한 기초사항

Session2. 제품의 동특성 및 진동응답 평가법 이해하기

Session3. 불규칙한 하중에 대한 안전성 확보 방안 이해하기

Session4. 진동피로를 고려한 설계제품 내구수명 예측

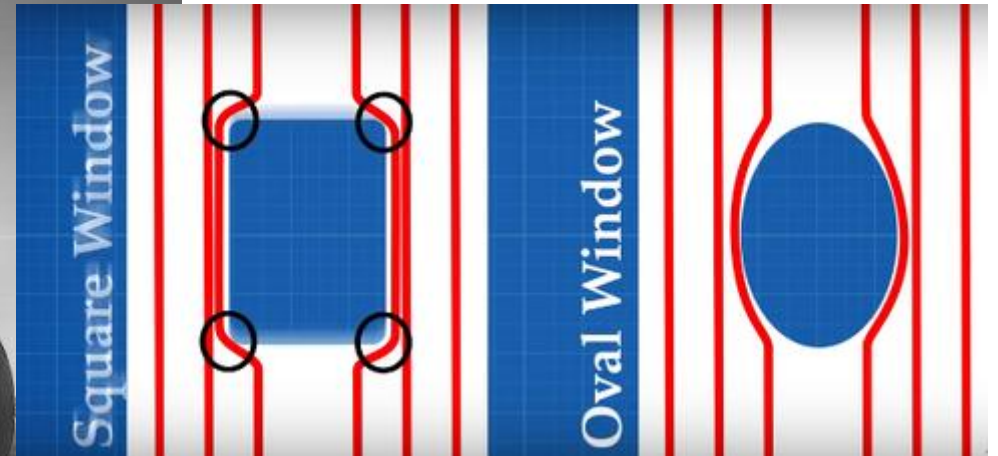


진동피로에 의한 사고사례

추락한 카미트 여객기 모습 (1952년)

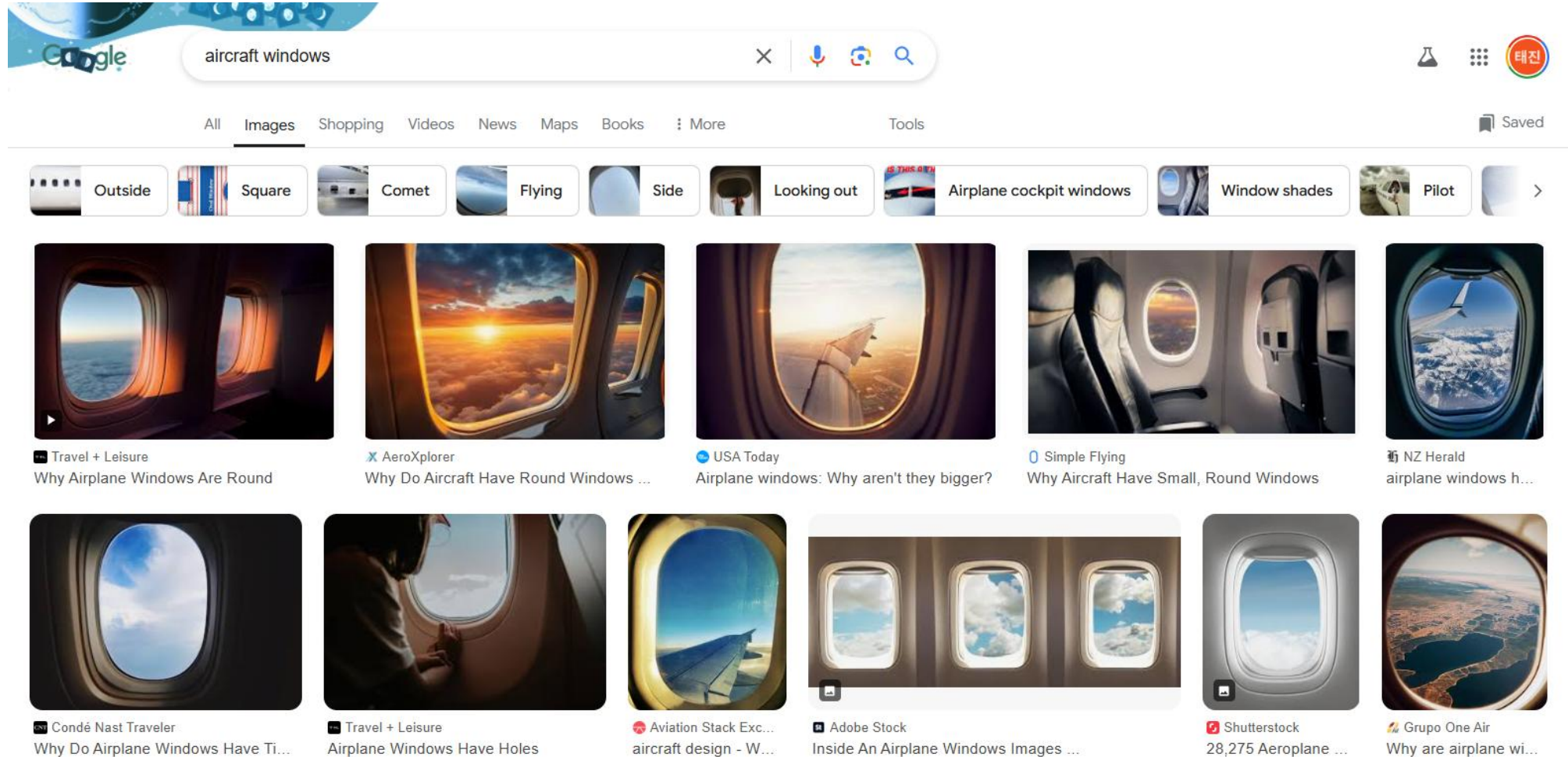


네모난 창문 때문에???

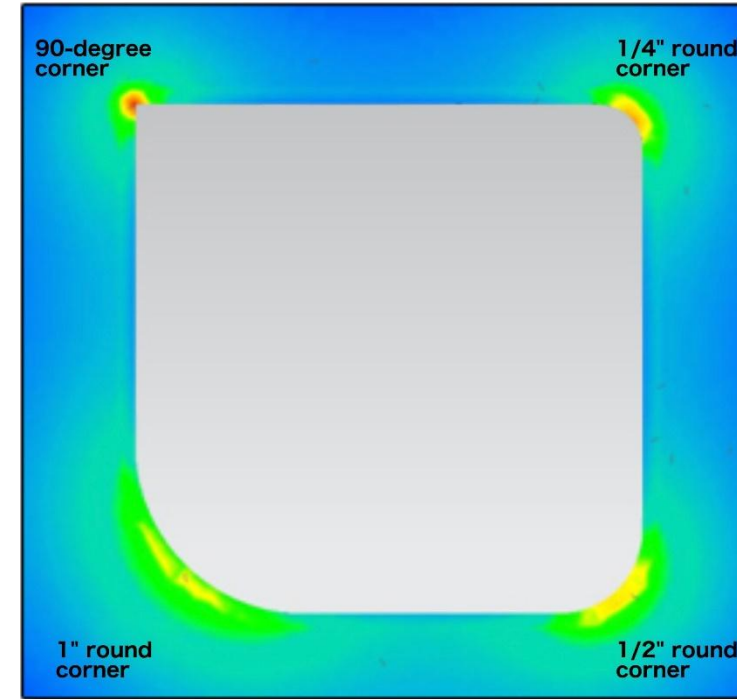
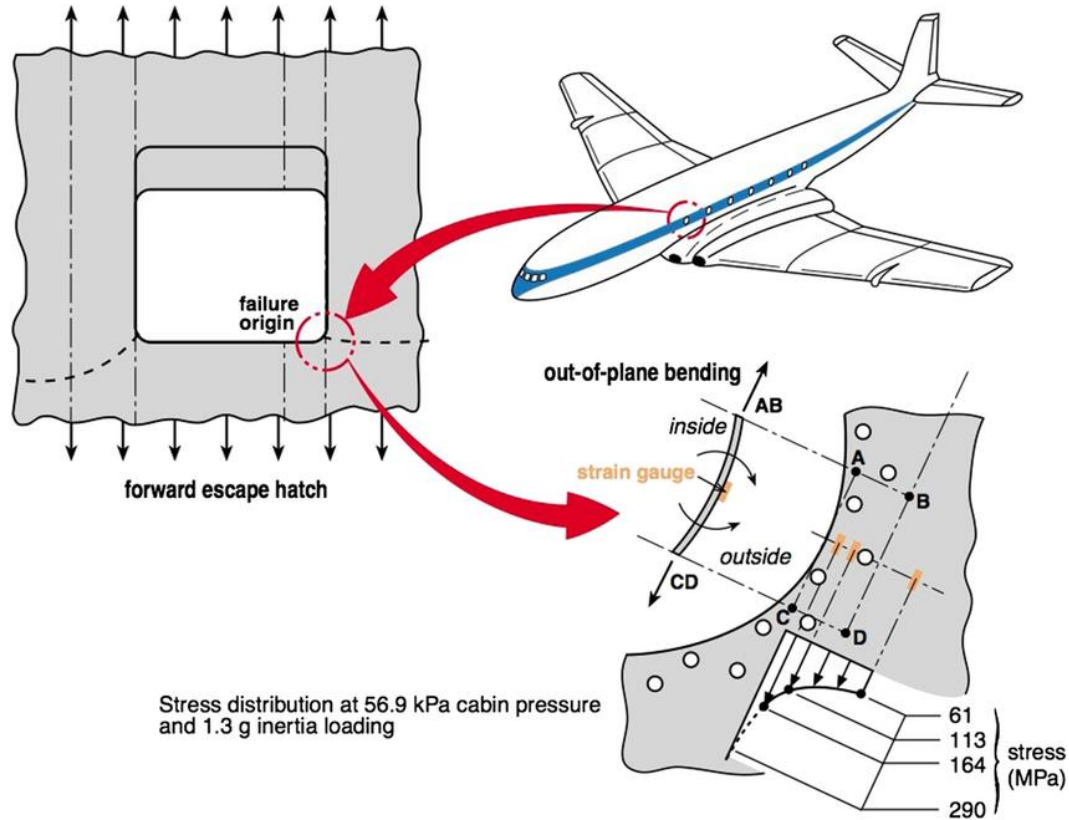


출처 : <https://mkclindia.wordpress.com/>

진동피로에 의한 사고사례



진동피로에 의한 사고사례



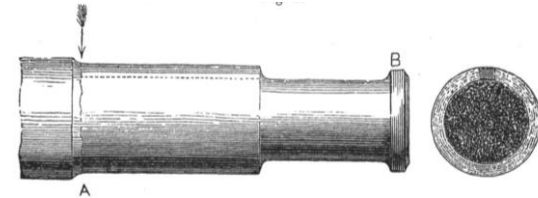
피로해석의 시작

- 19세기(1842) 프랑스 기관차 사고에 대한 William Rankine 조사결과



“비연속부위에 응력 집중에 의한 파괴로 보인다”

“반복 하중에 의한 균열이 관찰된다”



No way!

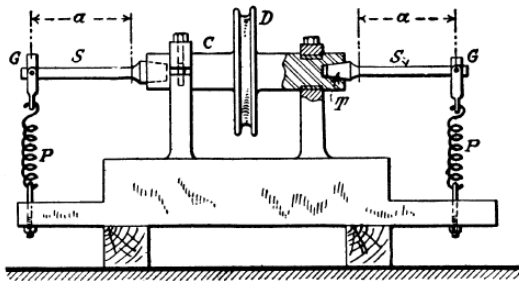


William Rankine

피로해석 발전

August Wöhler (1860-70)

: 반복응력/응력진폭/피로한계/S-N선도



Griffith (1920)

: 금속 표면 처리 피로파괴

Miner (1945)

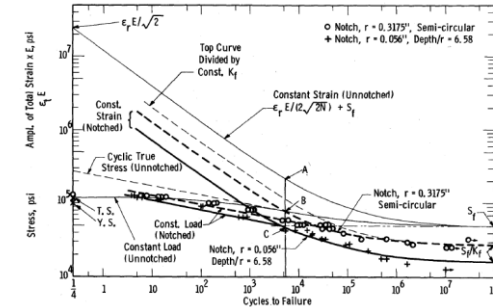
: 누적 피로손상과 손실된 일과의 연관성

Coffin (1954) & Manson (1953)

: 열응력에 의한 피로파괴

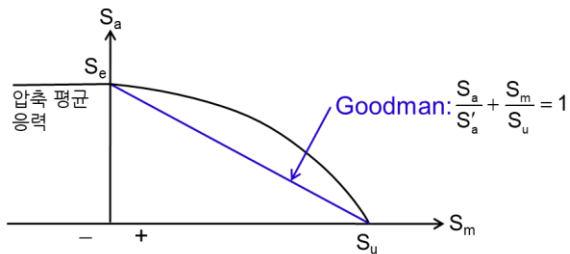
Peterson (1963)

: 변형률-수명 관계식



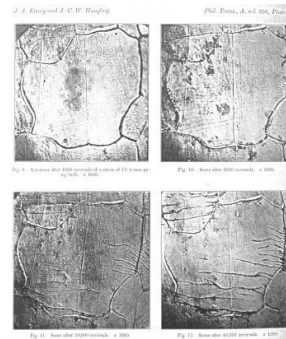
John Goodman (1890)

: 평균 응력효과 실험 고찰



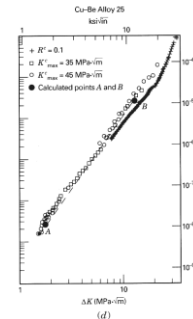
Ewing & Humfrey (1903)

: 평균 응력효과 실험 고찰



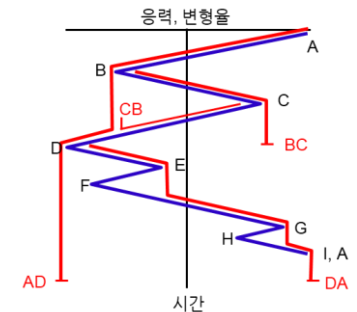
Paris (1963)

: 균열증가와 응력확대계수 관계 규명

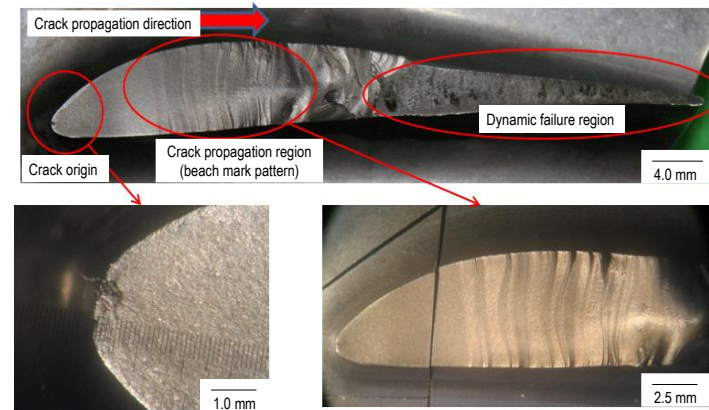


Endo (1968)

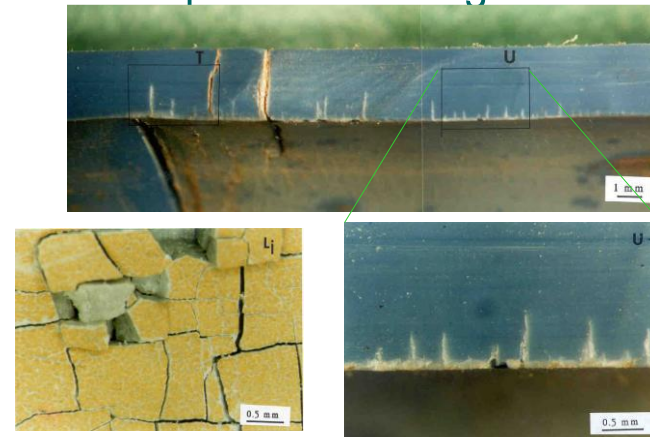
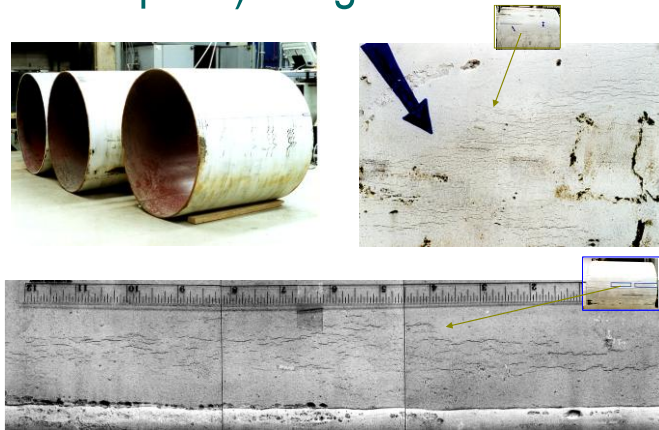
: 가변하중 고려



설계자 관점 피로해석 필요성



Example 1) Fatigue fracture of a blade of the compressor of the gas turbine

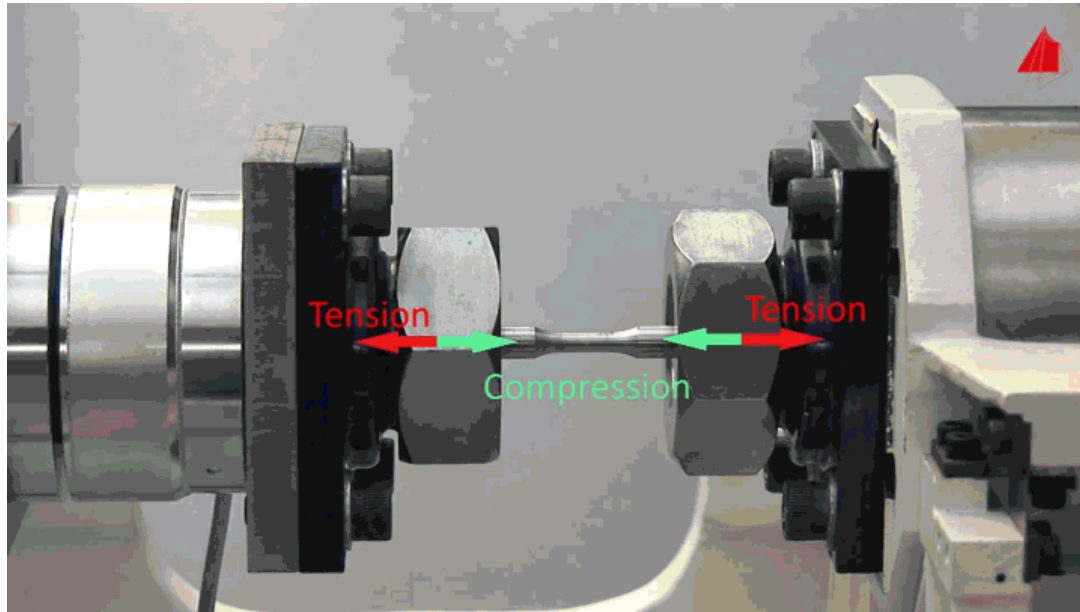


Example 2) Stress corrosion cracking of a gas pipe in various materials

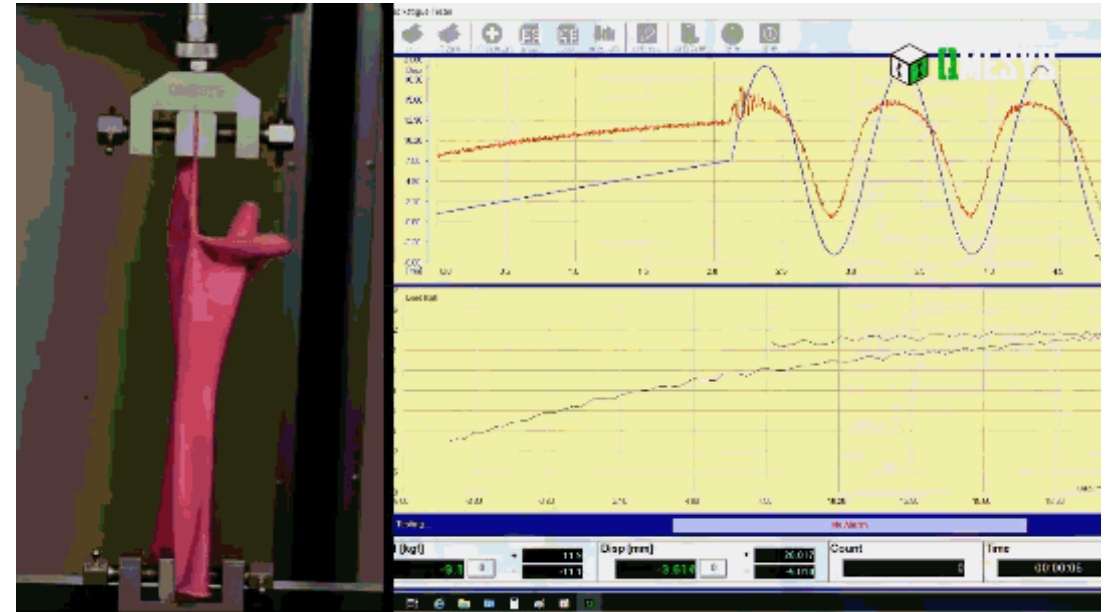
설계자 관점 피로해석 필요성



반복하중에 의한 피로파괴



출처 : HTW Berlin

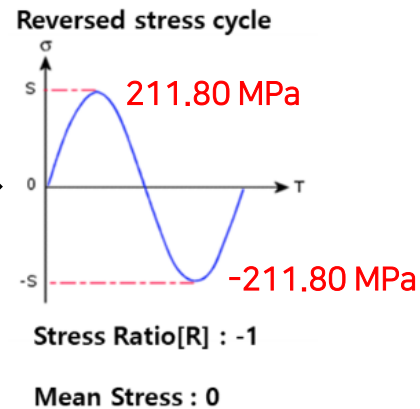
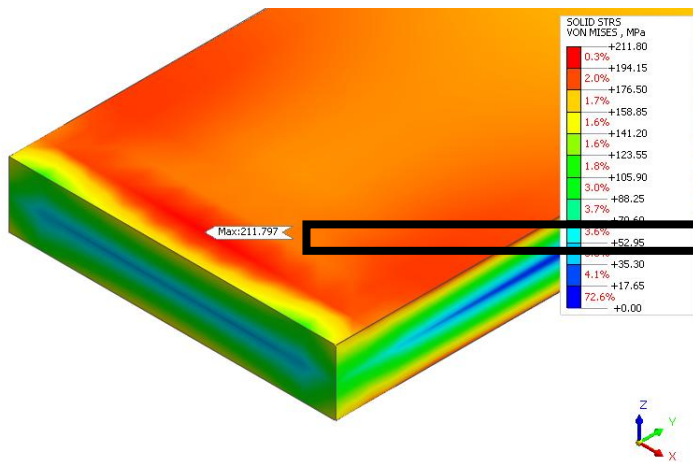


출처 : 큐머시스

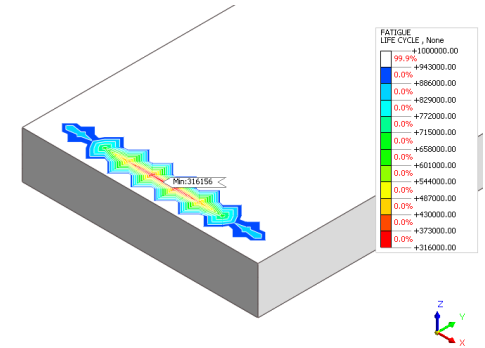
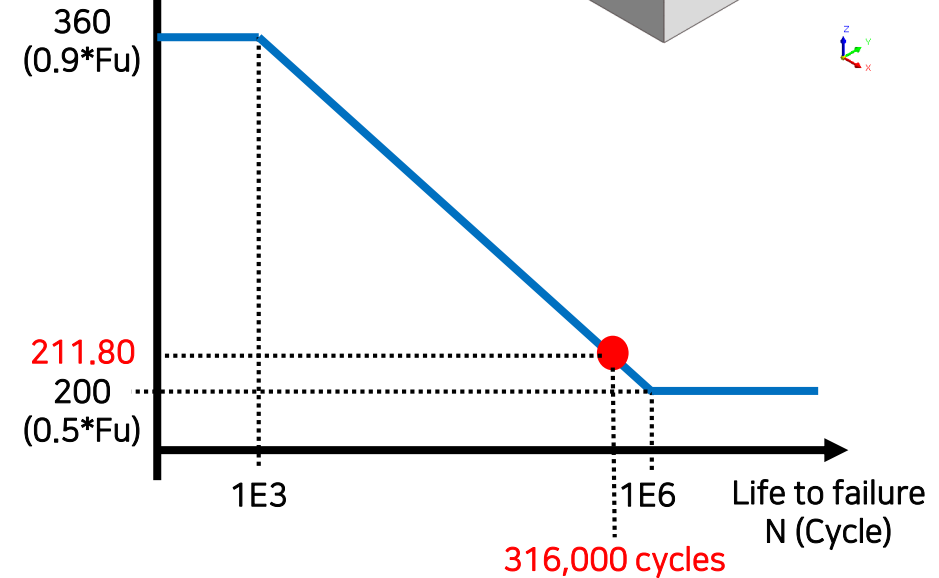
단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (CAE)

하중이력 S-N 법 해석결과

최대 응력 211.80 MPa, Stress Ratio, $R=-1$ (인장/압축), 보정계수 없음
S-N curve 대입시 316,000 Cycles 피로수명 확인



Alternative Stress
S (MPa)

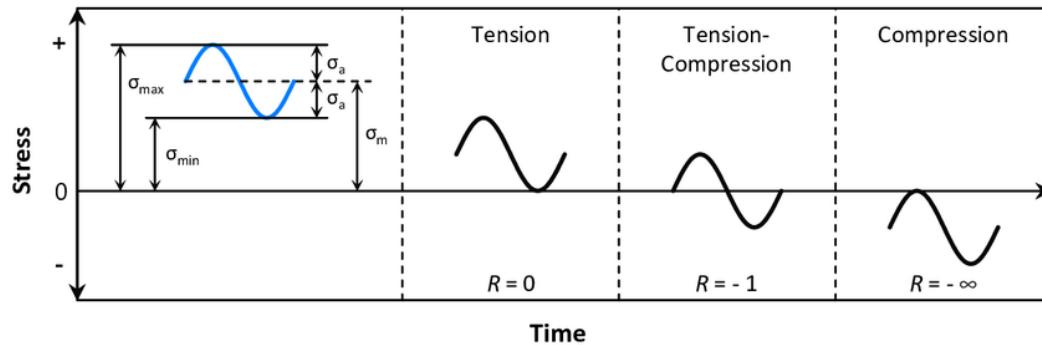


단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (CAE)

하중 이력 및 평균응력 보정법에 따른 차이점 비교

하중이력 가정 (인장, 인장/압축, 압축) Stress Ratio, R 에 따른 차이 확인

평균응력 보정법 (Goodman, Gerber 등) 에 따른 차이 확인

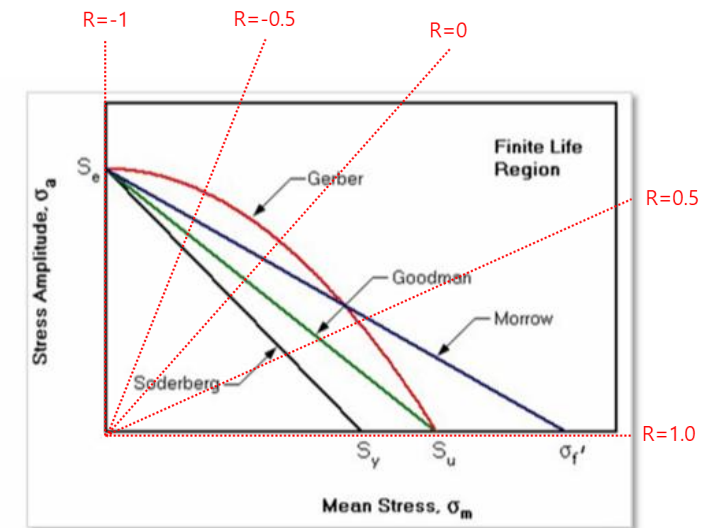


$$\text{Goodman} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1$$

$$\text{Gerber} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1$$

$$\text{Soderberg} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1$$

$$\text{Morrow} : \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_f} = 1$$

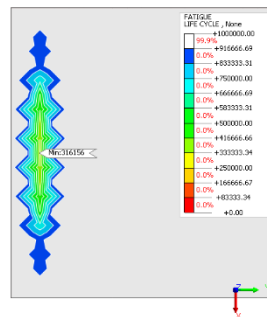
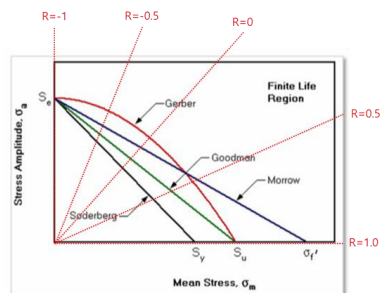


단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (CAE)

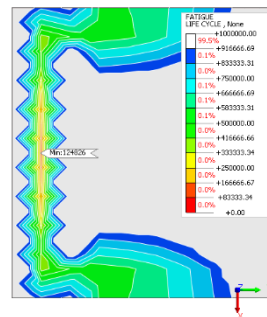
하중 이력 및 평균응력 보정법에 따른 차이점 비교

하중이력 가정 (인장, 인장/압축, 압축) Stress Ratio, R 에 따른 차이 확인
 평균응력 보정법 (Goodman, Gerber 등) 에 따른 차이 확인

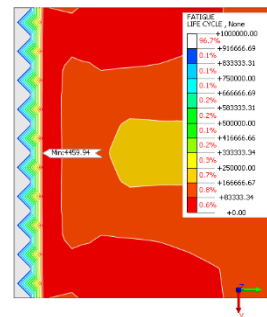
(Unit : Cycles)	R = -1.0	R = -0.33	R = 0.0
None	316,000	316,000	316,000
GoodMan	316,000	7,134	0
Gerber	316,000	124,826	4,459
Sorderberg	316,000	0	0



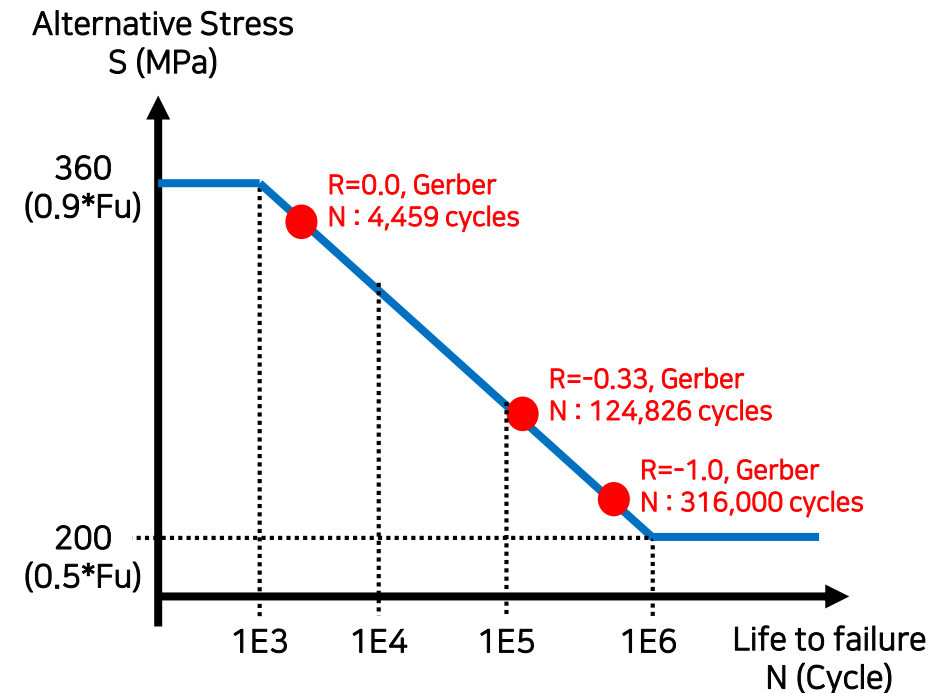
R=-1.0, Gerber
N : 316,000 cycles



R=-0.33, Gerber
N : 124,826 cycles



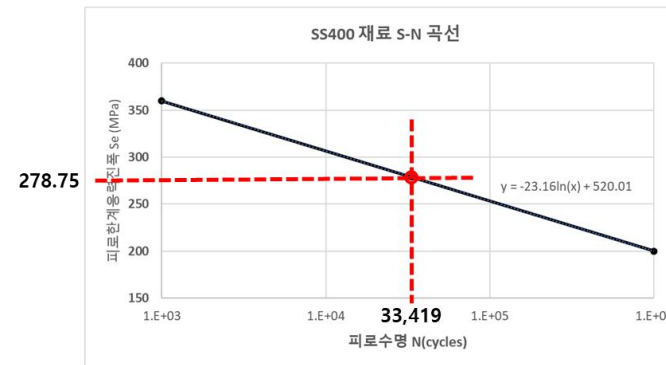
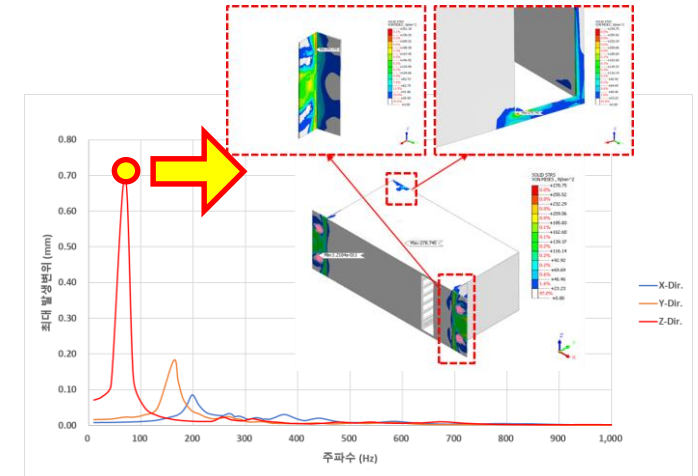
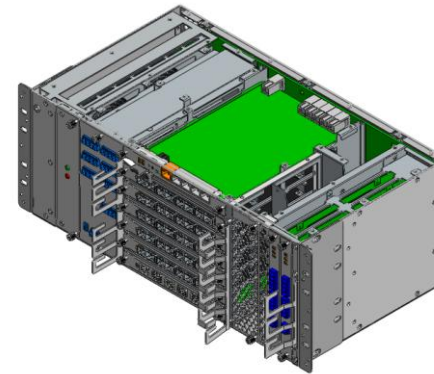
R=0.0, Gerber
N : 4,459 cycles



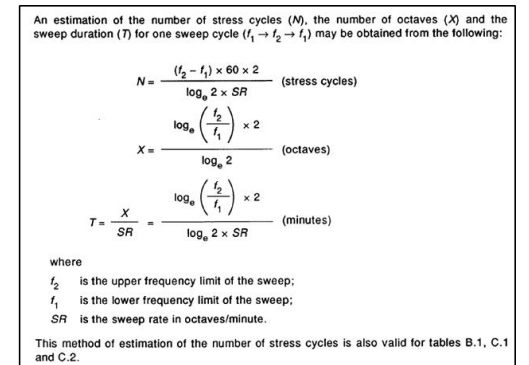
BBU 통신장비 내구성 검증해석



출처 : ETS Solutions Asia



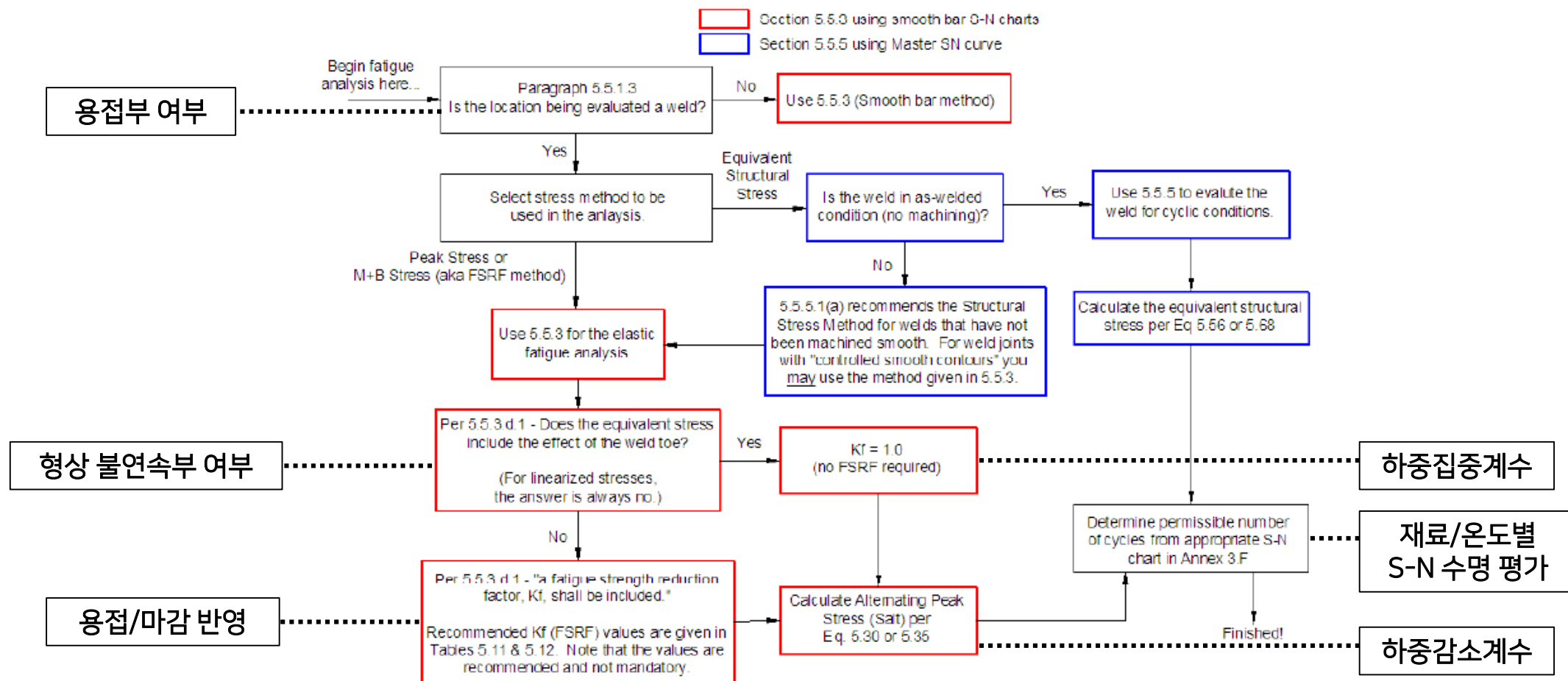
[최대 발생응력 피로수명 검토결과]



[IEC-60068-2-6, A4.3, 요구수명 계산근거]

33,419 Cycles > 24,237 Cycles(IEC-60068-2-6) ... O.K.

단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (ASME)



단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (ASME)

Fatigue S-N curve (Carbon steel, Low alloy, High alloy $\leq$ Tensile 552 MPa)

1. Parameters

- 1) E_{FC} = 195 GPa
- 2) E_T = 202 GPa (Modulus of elasticity at the average temp.)
- 3) S_a = 105.90 MPa (Stress amplitude)
- 4) X = 5.5389

note) X 는 S_a 범위에 따라 정의

- $48 \leq S_a < 214$

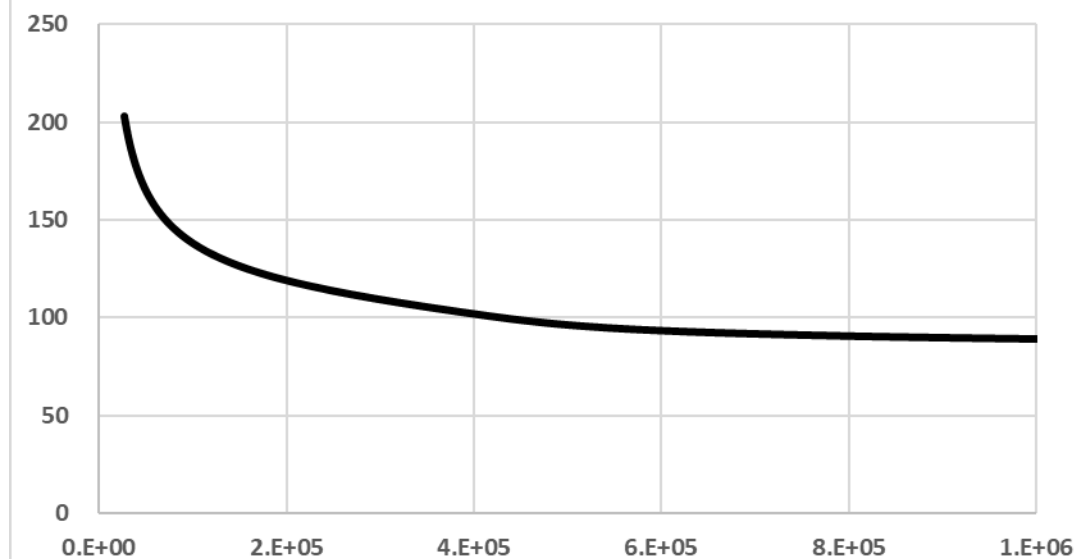
C	1	2.25E+00
C	2	-4.64E-01
C	3	-8.31E-01
C	4	8.63E-02
C	5	2.02E-01
C	6	-6.94E-03
C	7	-2.08E-02
C	8	2.01E-04
C	9	7.14E-04
C	10	0.00E+00
C	11	0.00E+00

- $214 \leq S_a < 3999$

C	1	8.00E+00
C	2	5.83E-02
C	3	1.50E-01
C	4	1.27E-04
C	5	-5.26E-05
C	6	0.00E+00
C	7	0.00E+00
C	8	0.00E+00
C	9	0.00E+00
C	10	0.00E+00
C	11	0.00E+00

- 5) Y = 14.83
- 6) C_{us} = 6.8948 (Conversion factor)
- 7) N = 3.46.E+05 cycle

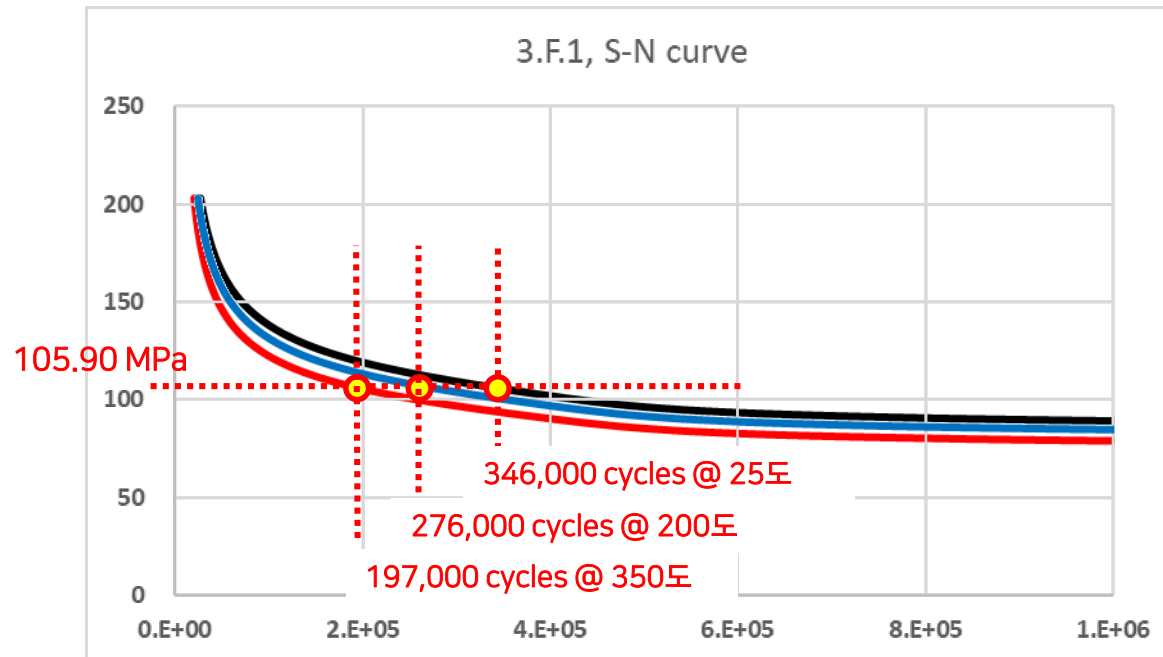
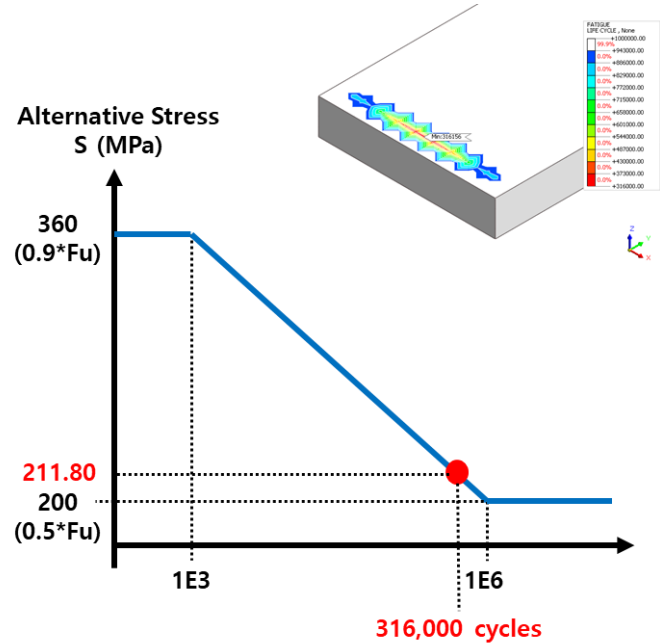
3.F.1, S-N curve



단일응답에 대한 내구수명 예측방법 (ASME)

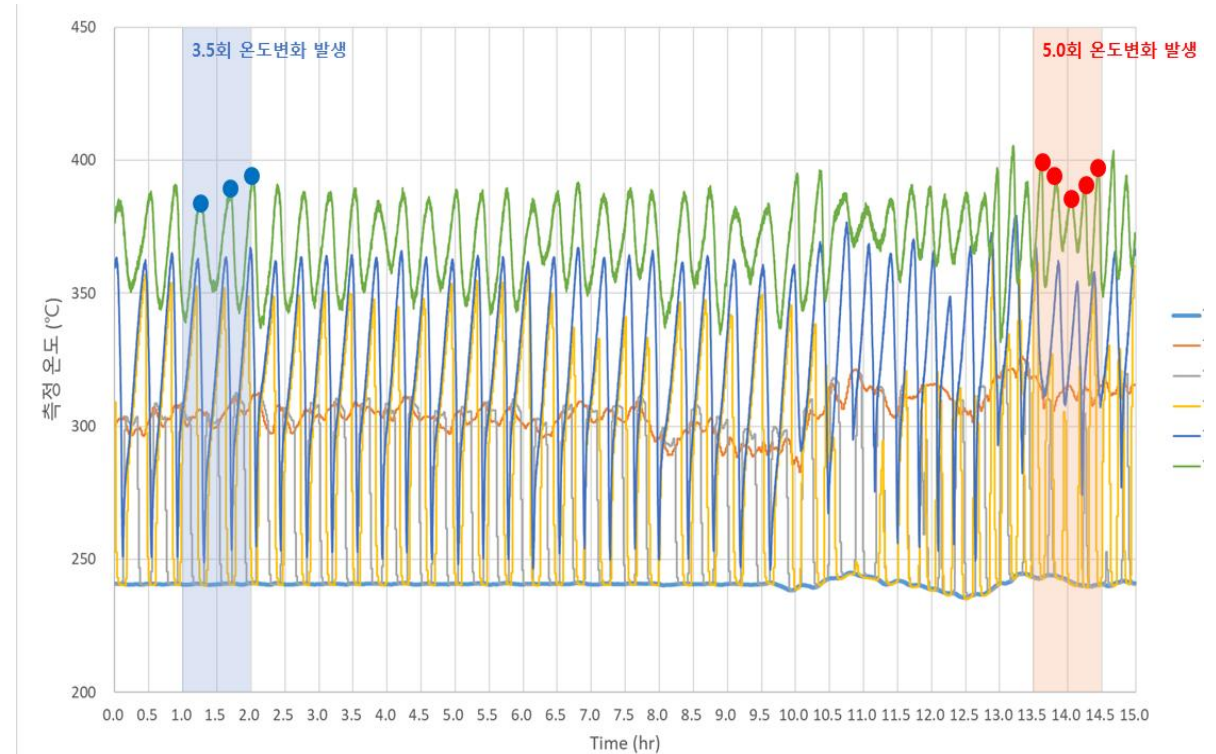
온도별 비응점부 S-N 법 수명예측 결과

재료 온도에 따라 S-N curve 기울기가 달라지며, 수명값에 차이가 발생하므로 상세 온도기반 데이터 적용 필요



ASME 기반 용접부 피로평가

: 비정상 운영하중(Operation loading)에 의한 보일러 과열기 노즐 열피로파손 문제 수명확인



용접부 피로해석 하중감소계수

: 형상에 의한 집중계수 없으며, Low carbon steel 및 마감이 좋지 않은 Fillet 용접부 가정

$$S_{alt,k} = \frac{K_f \cdot K_{e,k} \cdot \Delta S_{P,k}}{2}$$

$$K_{e,k} = 1.0 \quad \text{for} \quad \Delta S_{n,k} \leq S_{PS} \quad (5.31)$$

$$K_{e,k} = 1.0 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left(\frac{\Delta S_{n,k}}{S_{PS}} - 1 \right) \quad \text{for} \quad S_{PS} < \Delta S_{n,k} < mS_{PS} \quad (5.32)$$

$$K_{e,k} = \frac{1}{n} \quad \text{for} \quad \Delta S_{n,k} \geq mS_{PS} \quad (5.33)$$

Table 5.11 – Weld Surface Fatigue-Strength-Reduction Factors

Weld Condition	Surface Condition	Quality Levels (see Table 5.12)						
		1	2	3	4	5	6	7
Full penetration	Machined	1.0	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
	As-welded	1.2	1.6	1.7	2.0	2.5	3.0	4.0
Partial Penetration	Final Surface Machined	NA	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
	Final Surface As-welded	NA	1.6	1.7	2.0	2.5	3.0	4.0
	Root	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4.0
Fillet	Toe machined	NA	NA	1.5	NA	2.5	3.0	4.0
	Toe as-welded	NA	NA	1.7	NA	2.5	3.0	4.0
	Root	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4.0

Table 5.13 – Fatigue Penalty Factors For Fatigue Analysis

Material	K_e (1)		T_{max} (2)	
	m	n	(°C)	(°F)
Low alloy steel	2.0	0.2	371	700
Martensitic stainless steel	2.0	0.2	371	700
Carbon steel	3.0	0.2	371	700
Austenitic stainless steel	1.7	0.3	427	800
Nickel-chromium-iron	1.7	0.3	427	800
Nickel-copper	1.7	0.3	427	800

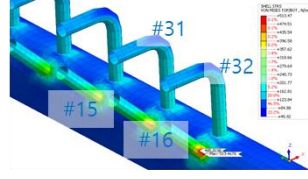
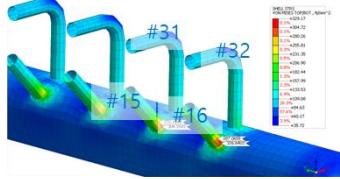
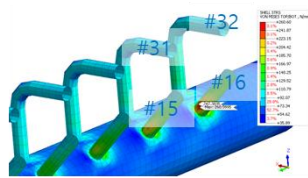
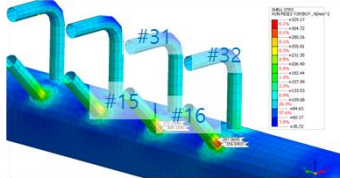
Notes:

1. Fatigue penalty factor
2. The fatigue penalty factor should only be used if all of the following are satisfied:
 - The component is not subject to thermal ratcheting, and
 - The maximum temperature in the cycle is within the value in the table for the material.

용접부 피로평가 결과

: 응력편차, 하중집중계수(1.0), 하중감소계수 및 재료계수 반영하여 피로수명 계산

: Rainflow 기법에 의해 운영시 발생하는 최대 응력편차를 통해 계산

Condition	Input data	Max. stress on nozzle(외기온도 25도)	Max. stress on nozzle(외기온도 -10도)
Operating Max.	1) S/H 온도 : 366.41 °C 2) Gas side 온도 : 504.38 °C 3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C	 #16 nozzle : Max. stress : 485.82 MPa(513.47 MPa)	 #16 nozzle : Max. stress : 545.41 MPa(572.34 MPa)
Operating Min.	1) S/H 온도 : 234.91 °C 2) Gas side 온도 : 504.38 °C 3) 수냉벽체 온도 : 247.00 °C	 #16 nozzle : Max. stress : 247.38 MPa(260.60 MPa)	 #16 nozzle : Max. stress : 287.07 MPa(316.64 MPa)

외기 온도조건	최대온도 발생응력 $S_{T,max}$ (MPa)	최소온도 발생응력 $S_{T,min}$ (MPa)	응력편차 S_{dT} (MPa)	재료 허용응력 S_{ps} (MPa)	$K_{e,k}$	K_f	m	n	대체 응력 S_{alt} (MPa)	Fatigue limit cycle	Life time (years)	
											3.5회/hr	5회/hr
25도	485.82	229.42	256.4	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	217.94	1.43.E+04	0.47	0.33
-10도	545.41	287.07	212.7	390.0	1.0	1.7	1.7	0.3	219.59	1.40.E+04	0.46	0.32

Fatigue S-N curve (Carbon steel, Low alloy, High alloy <= Tensile 552 MPa)

1. Parameters

- E_{FC} = 195 GPa
- E_T = 180 GPa (Modulus of elasticity at the average temp.)
- S_a = 127.50 MPa (Stress amplitude)
- X = 4.9346

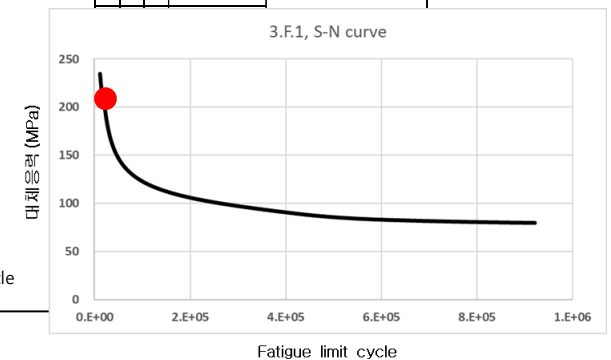
note) X는 S_a 범위에 따라 정의

- $48 \leq S_a < 214$

C	1	2.25E+00
C	2	-4.64E-01
C	3	-8.31E-01
C	4	8.63E-02
C	5	2.02E-01
C	6	-6.94E-03
C	7	-2.08E-02
C	8	2.01E-04
C	9	7.14E-04
C	10	0.00E+00
C	11	0.00E+00

- $214 \leq S_a < 3999$

C	1	8.00E+00
C	2	5.83E-02
C	3	1.50E-01
C	4	1.27E-04



- Y = 20.03
- C_{us} = 6.8948
- N = 8.60.E+04 cycle

랜덤하중에 대한 수명예측 방안

- 양상불 시간축을 따른 많은 샘플
각 샘플이 시간의 랜덤 함수

- 정해진 시간 $t = t_1$ 에서
 $U_1 = U(t_1)$ 은 랜덤변수
- 일반적으로 $U_1 \neq U_2$

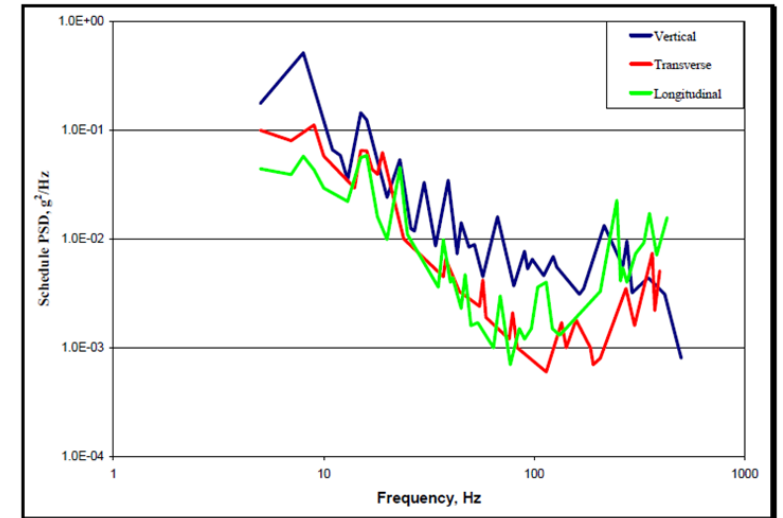
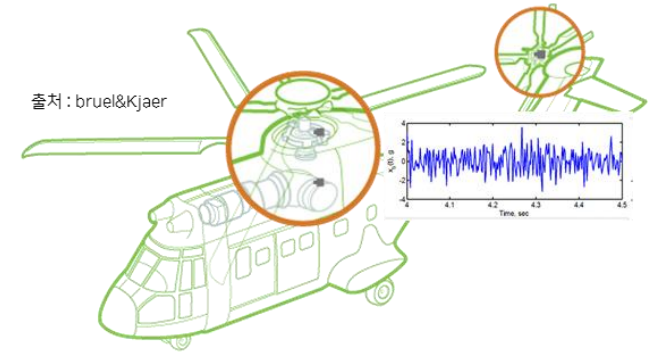
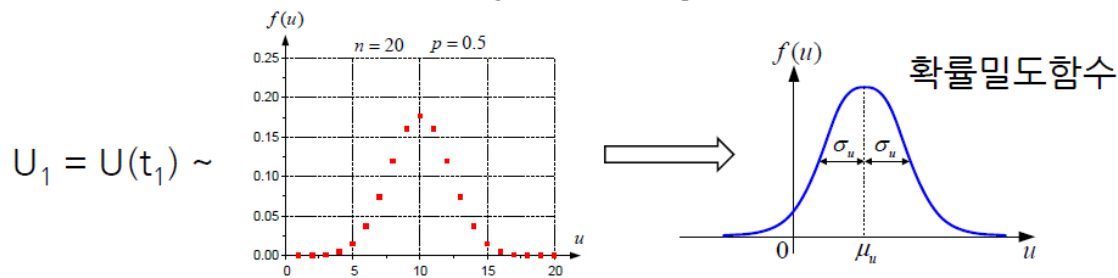
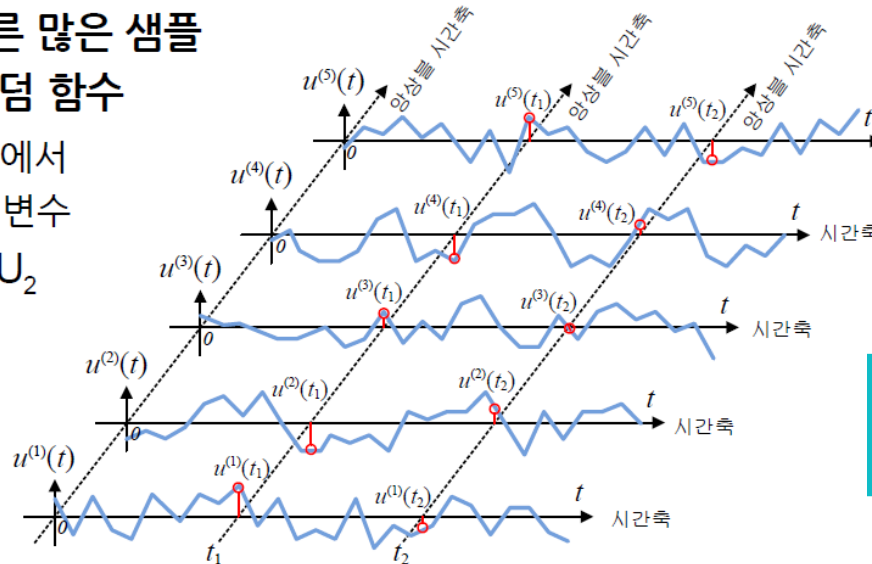


Figure 514.6C-3 – Category 4 – Composite wheeled vehicle vibration exposure.

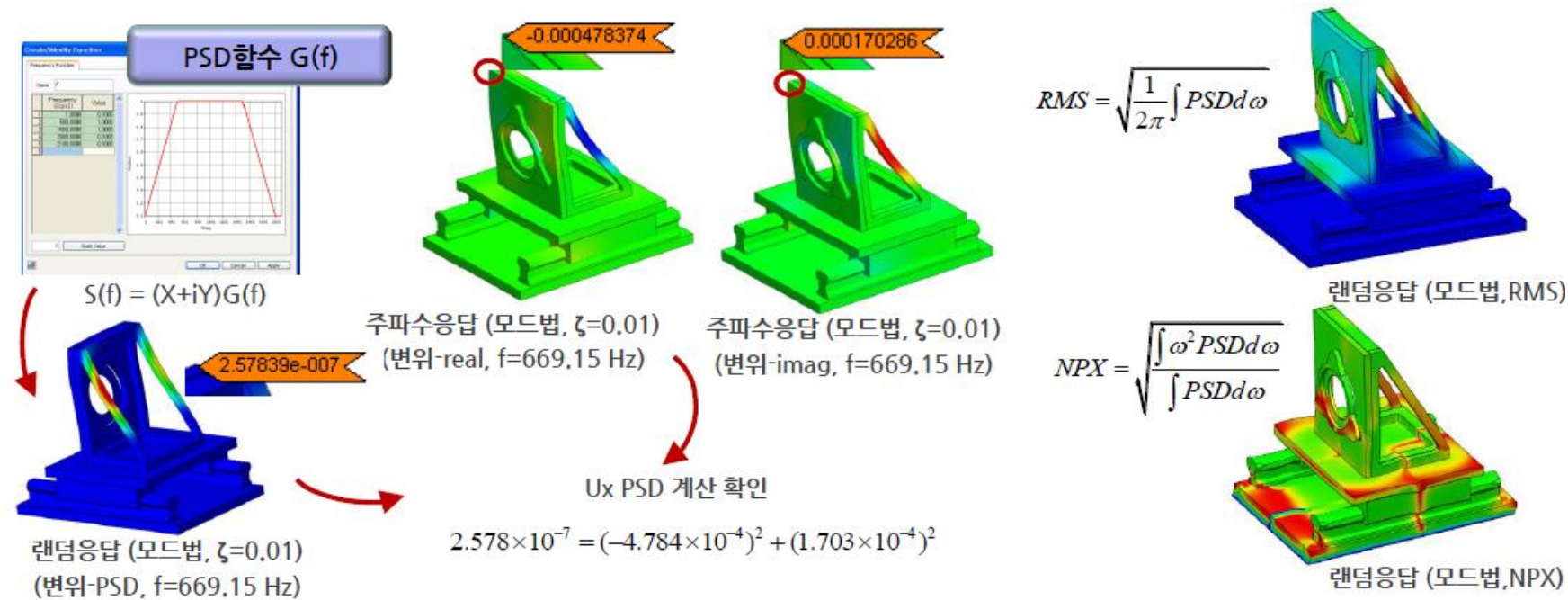
[MIL-STD-810G 수송진동 하중]

랜덤하중에 대한 수명예측 방안

랜덤해석 주요 결과

RMS : 확률분포의 표준편차 / 신뢰 수준별 Response

NPX : 랜덤응답이 제로 축을 음에서 양으로 통과하는 통계적 숫자



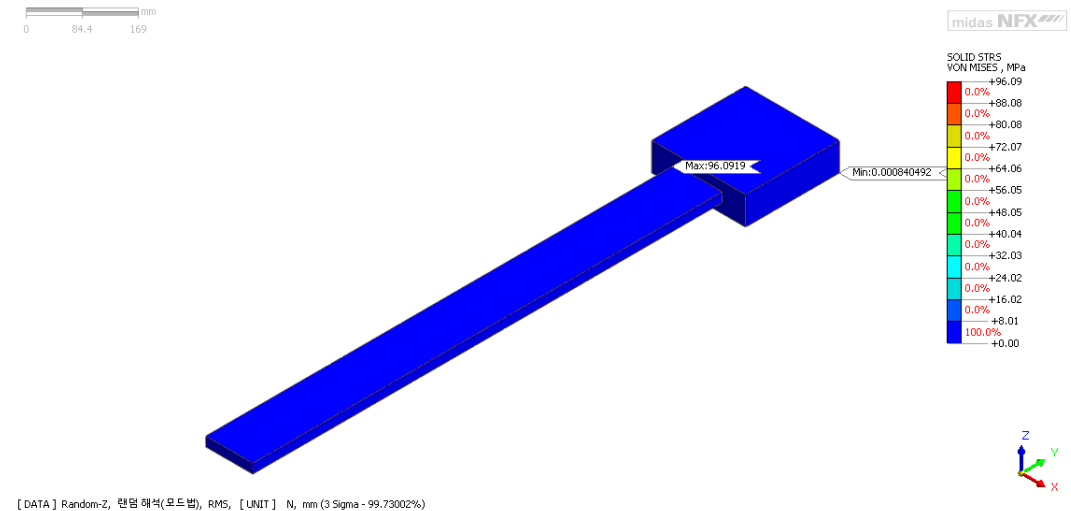
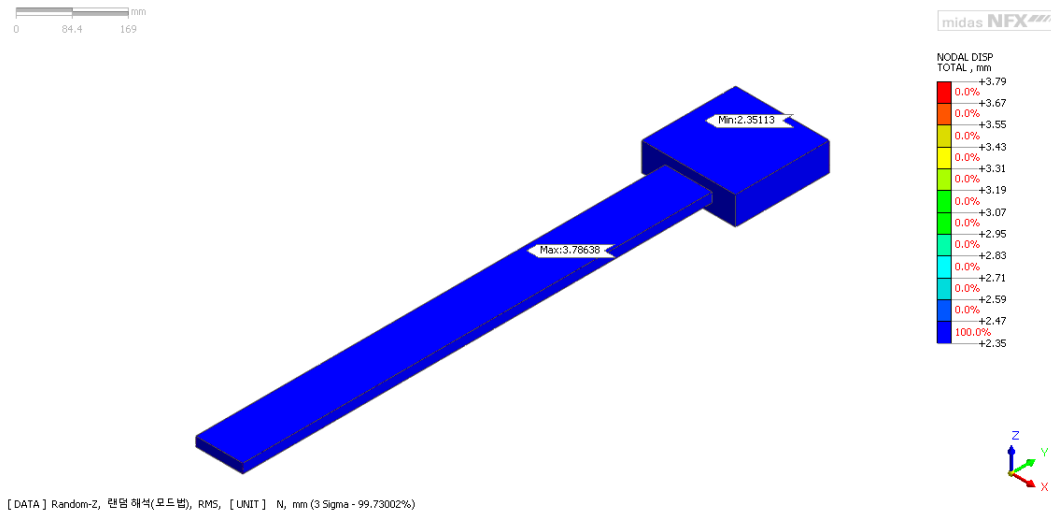
랜덤하중에 대한 수명예측 방안

랜덤응답해석 결과

RMS 1-Sigma(발생확률 : 68.3 %) / 최대 변위 : 1.26 mm, 최대 응력 32.03 MPa → 빈번하게 발생하는 일반적인 하중

RMS 2-Sigma(발생확률 : 27.1 %) / 최대 변위 : 2.53 mm, 최대 응력 64.06 MPa

RMS 3-Sigma(발생확률 : 4.33 %) / 최대 변위 : 3.79 mm, 최대 응력 96.09 MPa → 매우 드물게 발생하는 극단적인 하중



랜덤하중에 대한 수명예측 방안

랜덤응답해석 결과

RMS 1-Sigma(발생확률 : 68.3 %) / 최대 변위 : 1.26 mm, 최대 응력 32.03 MPa → 빈번하게 발생하는 일반적인 하중

RMS 2-Sigma(발생확률 : 27.1 %) / 최대 변위 : 2.53 mm, 최대 응력 64.06 MPa

RMS 3-Sigma(발생확률 : 4.33 %) / 최대 변위 : 3.79 mm, 최대 응력 96.09 MPa → 매우 드물게 발생하는 극단적인 하중



랜덤하중에 대한 수명예측 방안

이상적인 조건에 대한 계산방법

랜덤 응력을 정규 분포로 가정

정규 분포를 3단계로 구분

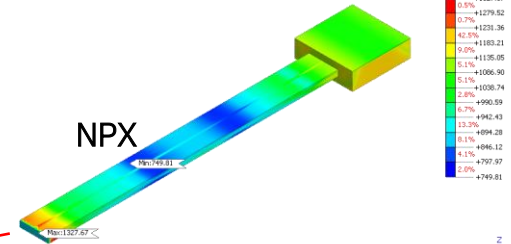
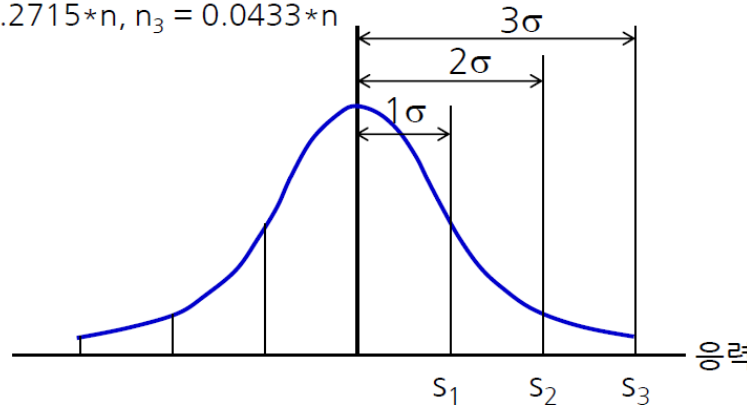
- $1\sigma = 68.52\%$, $2\sigma = 27.15\%$, $3\sigma = 4.33\%$

NPX를 사용하여 하중 반복 횟수 계산

- $n = \text{NPX (cycles/sec)} * \text{Event Duration (secs)}$
- $n_1 = 0.6852 * n$, $n_2 = 0.2715 * n$, $n_3 = 0.0433 * n$

누적손상 계산

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3}$$



진동피로 해석기법

피로 해석

해석 데이터
 해석 방법: 랜덤하중을 이용한 진동피로
 해석 세트: 랜덤Z
 응력 옵션: 동가응력(Von Mises)
 응력 종류: 평균 (선택됨), 최대, 최소

특성
 특성 정의...

해석기법
☒ Narrow ☒ Steinberg ☒ Dirlik

출력 종류
☒ 손상도 ☒ 피로 수명

피로 하중
 작용시간: 600

무한 수명: 1e+009

확인 취소 적용

각 해석기법 별 선택 가이드

- 1) Narrow(협소대역법)
: PSD 함수의 폭이 좁을 때(뾰족할 때) 사용
 - 2) Steinberg
: PSD 함수의 경향이 정규분포와 비슷할 때 사용
 - 3) Dirlik
: 범용적으로 사용
- [추천] 모두 선택 후 가장 보수적인 결과를 보이는 것을 채택한다.

PSD 곡선을 얻기 위한 실험에서의 가진 시간을 입력한다.
 (입력 시간의 단위는 프로그램의 단위계를 따른다)

2) 시험조건

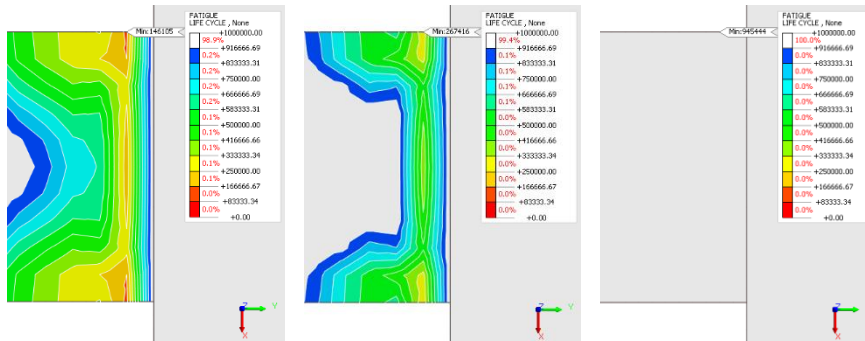
- ① 가진 시간: 각 축당 20시간

랜덤하중에 대한 수명예측 방안

진동피로 해석기법별 차이점 비교

해석기법 (Narrow, Steinberg, Dirlik) 에 따른 차이 확인
보수적인 값 사용 추천

(Unit : Cycles)	Narrow	Steinberg	Dirlik
Random	146,104	267,416	954,444



Narrow

$$p(S)_{NB} = f(m_0)$$

$$p(S)_{NB} = \left[\frac{S}{4m_0} e^{-\frac{S^2}{8m_0}} \right]$$

Steinberg

$$S_{eqStein} = f(m_0)$$

$$S_{eqStein} = \left[0.683 \cdot (2 \cdot \sqrt{m_0})^m + 0.271 \cdot (4 \cdot \sqrt{m_0})^m + 0.043 \cdot (6 \cdot \sqrt{m_0})^m \right]^{\frac{1}{m}}$$

Dirlik

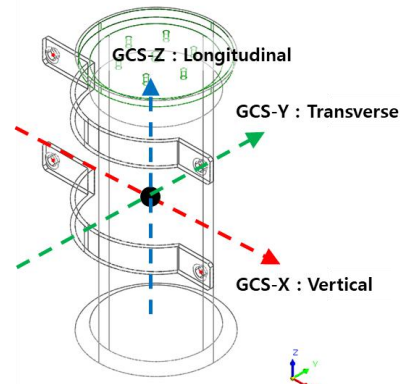
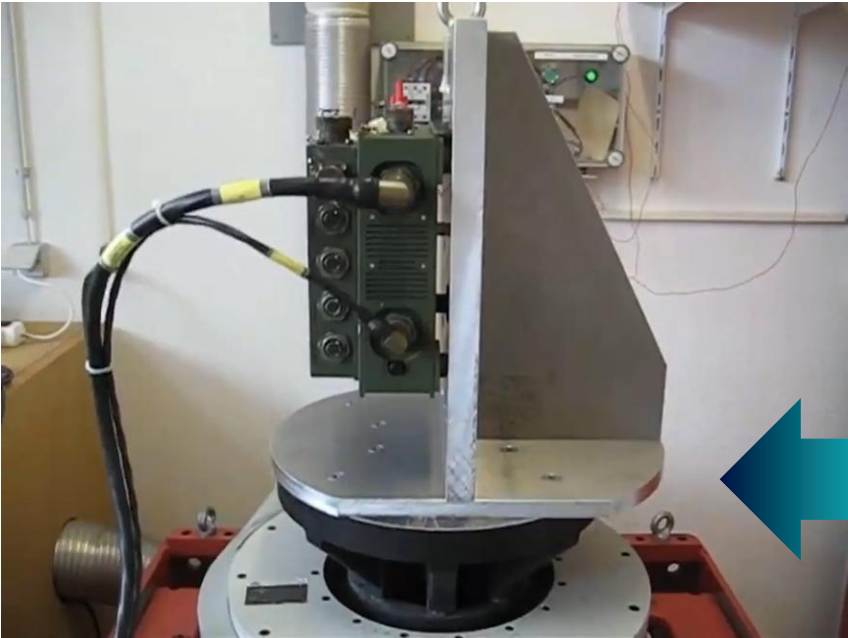
$$p(S)_D = f(m_0, m_1, m_2, m_4)$$

$$p(S)_D = \frac{\frac{D_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{D_2 Z}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + D_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}}}{2(m_0)^{1/2}}$$

$$\text{where; } Z = \frac{S}{2(m_0)^{1/2}} \quad \gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}} \quad x_m = \frac{m_1}{m_0} \left[\frac{m_2}{m_4} \right]^{1/2} \quad D_1 = \frac{2(x_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2} \quad D_2 = \frac{(1 - \gamma - D_1 + D_1^2)}{1 - R}$$

$$D_3 = 1 - D_1 - D_2 \quad Q = \frac{1.25(\gamma - D_3 - (D_2 R))}{D_1} \quad R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1 - \gamma - D_1 + D_1^2}$$

제품 고정 브라켓류 Mil-std-810g 랜덤피로 검토



[수송진동 하중 적용위치 및 좌표계]

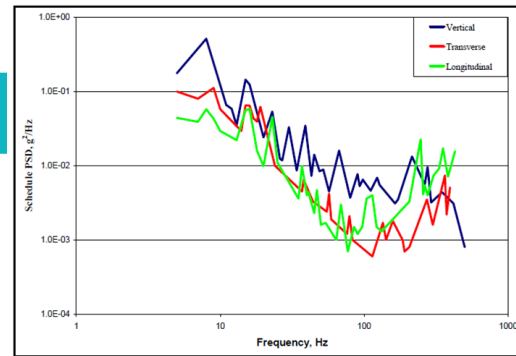
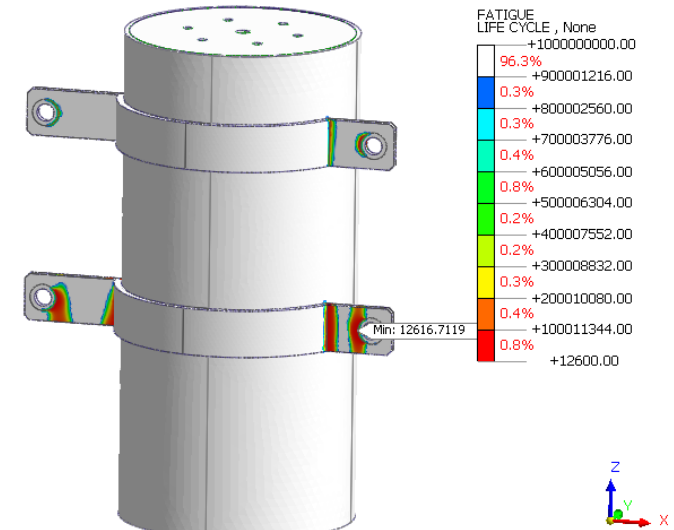


Figure 514.6C-3 - Category 4 - Composite wheeled vehicle vibration exposure.

[MIL-STD-810G 수송진동 하중]

수송진동 12,616s(3.5hr) 노출시 파손

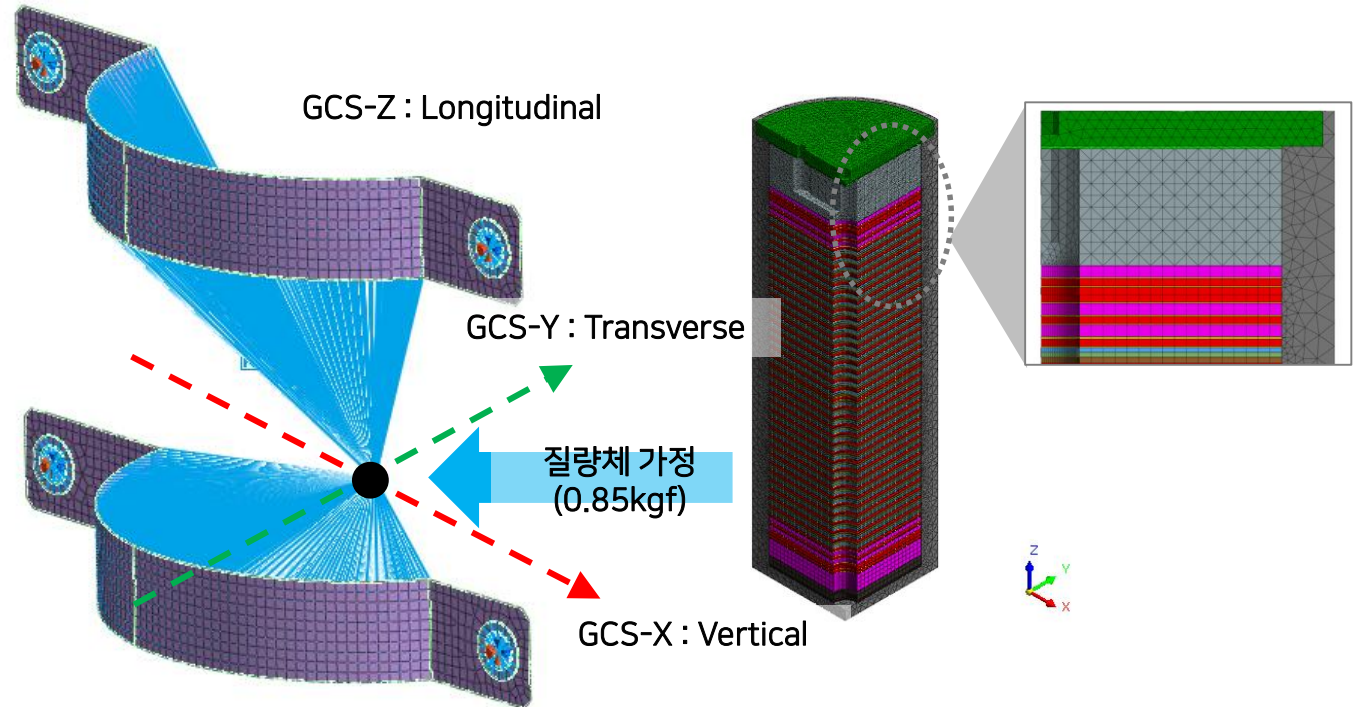


실습모델 설명

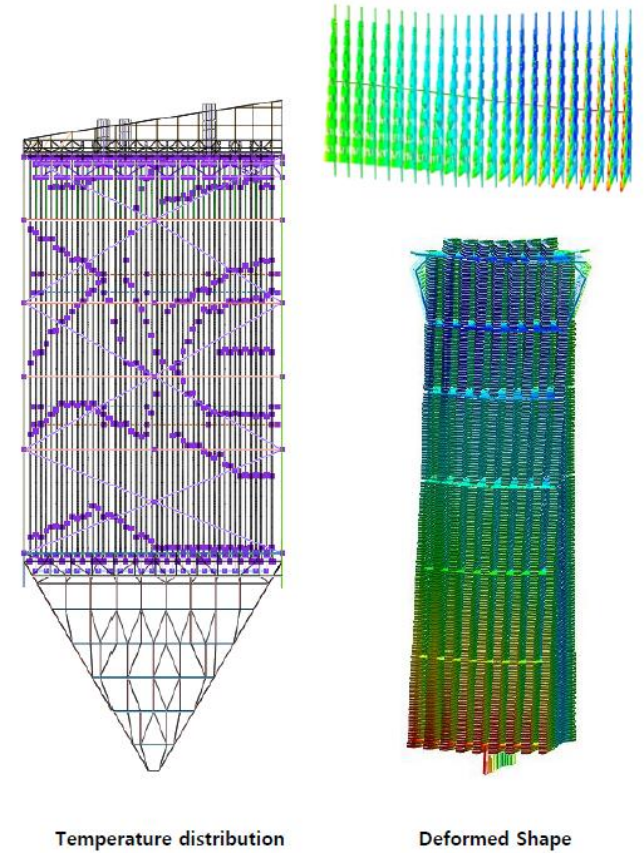
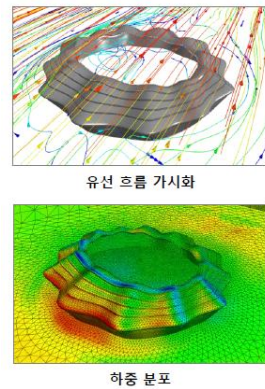
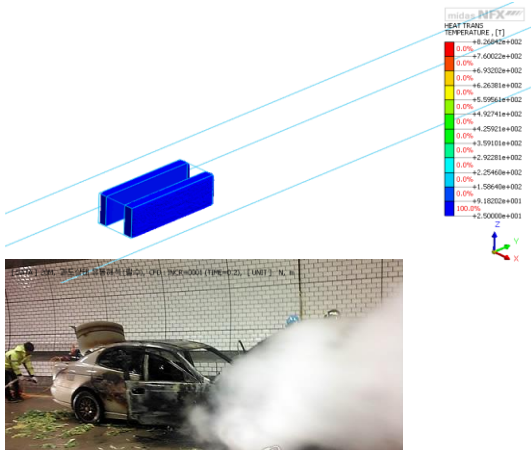
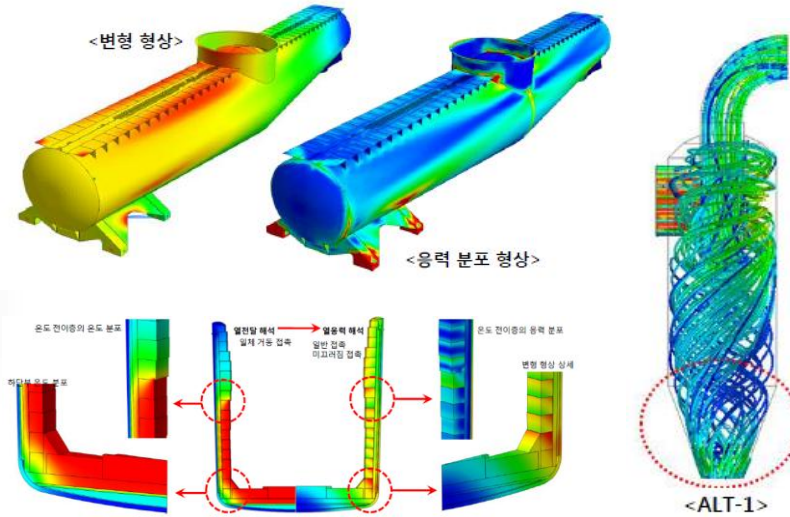
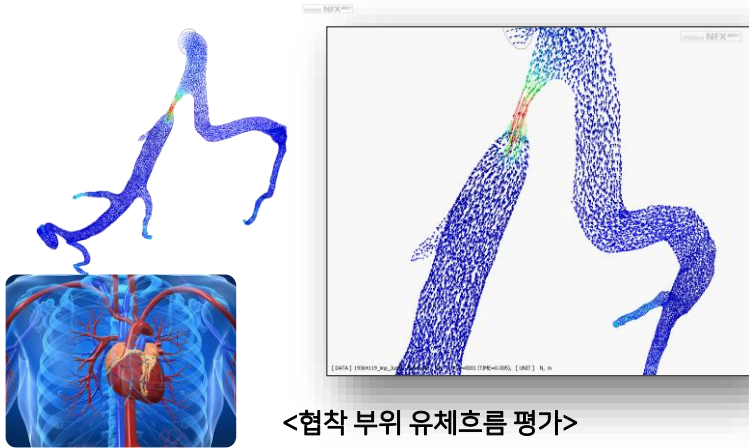
[Steel S-N Curve]

- 피로한계응력 : 200 MPa ($0.5 \cdot F_u$)
- 피로한계수명 : 1,000,000 Cycles

Steel (Thickness : 1.5mm)



다양한 CAE 적용사례



유한요소 해석 소프트웨어가 문제를 풀어주지 않습니다.

단지 엔지니어가 문제를 풀 수 있도록 도와줍니다.

Try to be an engineer, not a technician

15일간 모든 기능을 무료로 경험해 보세요!



CAE 지식 채널

반·디·통

CAE에 대해 더 알고 싶다면?
CAE 지식 공유 채널 '반디통'
바로가기 > <https://www.banditong.com/>

국내 기술로 개발한 CAE 제품을 한눈에!
CAE 통합 솔루션 'MTS'
바로가기 > <https://www.midasmts.com/>

Thank you

-기술 상담 및 제품 문의-

Call : 1577-6648

E-mail : mts@midasit.com

