

Presented by
오민혁 전성현

Dec 09, 2025

피아노 현의 떨림과 주변 공간에서의 음파 분석

말할 수 없는 비밀



목차

Contents

1	2	3	4
TOPIC/CONCEPT 프로젝트 주제 선정 이유 및 소개, 해석 목적	MATHEMATICS 피아노 현의 진동과 공기중으로의 확산과 관련한 수식과 모델	MODELING/RESULT 컴솔 모델링 가정, 과정, 결과	ANALYSIS 계산된 소리와 실제 소리와 의 차이점, 주파수 오차 등 분석

Topic.



피아노

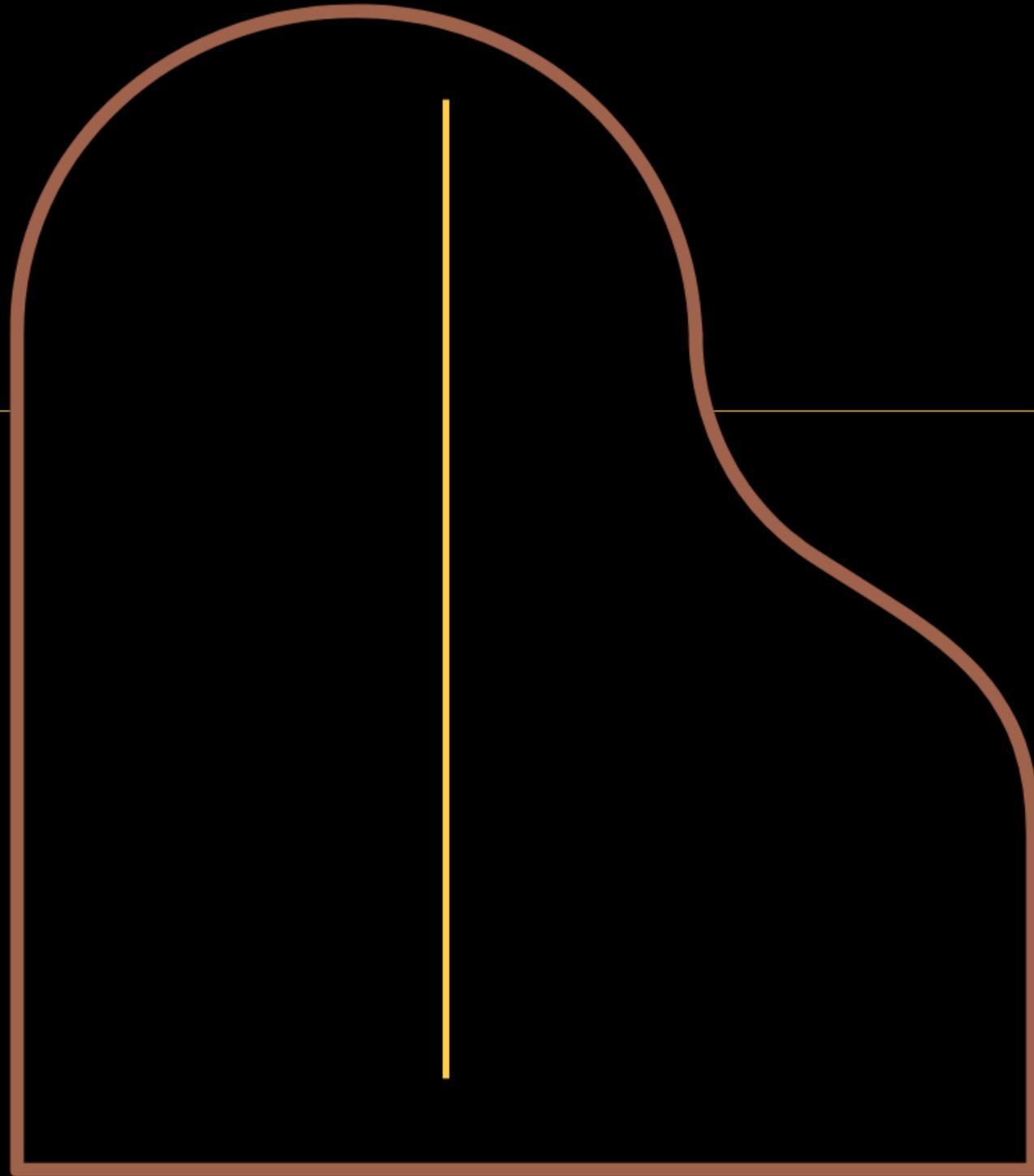
= 현(장력이 크게 걸린 얇은 강철 부품)
+ 해머(건반을 누르면 현을 때리는 부품)

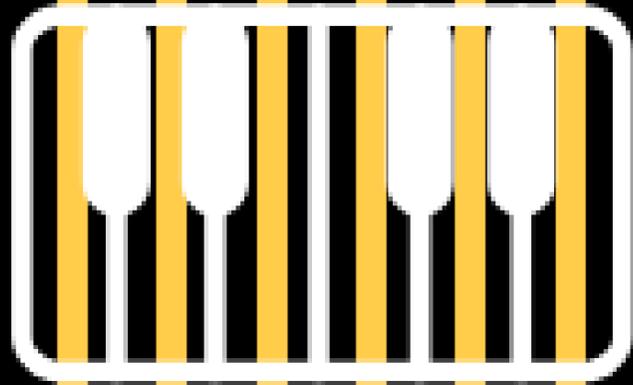
고체역학과 음향학(공기 중의 파동)을 모두 다룰 수 있는
의미 있는 소재라고 생각

Why we chose this topic



Concept.





Concept.



Todo:

피아노 현의 움직임 구현 및 검증

각각의 현이 만들어내는 배음의 조화를 기반으로 한 최적 수음 위치 설계

>> 마이크의 위치가 녹음된 피아노 소리의 해상도와 품질에 매우 중요함

What we want to analyze

Mathematics.

Governing eq. of the Beam

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \alpha \rho A \frac{\partial u}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial t} \left(-T \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right) - T \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} = F(y, t)$$

u: 현이 진동할 때의 변위

y: 현이 놓인 방향으로의 위치

t: 시간



Mathematics.

Inertia Term

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

ρ : 밀도 (kg/m^3)
 A : 현의 축방향 단면적 (A)

Linear Density

$$-T \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

T : 장력 (N)

Eigenfreq. of real string

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4}$$

E : Young's Modulus (GPa)
 I : Moment of Inertia (kgm^2)

Mathematics.

Mass damping term

$$\alpha \rho A \frac{\partial u}{\partial t}$$

α : 질량 비례 감쇠 계수 (현 외부에서의 감쇠 표현)
현이 실제로는 강체에 붙어있는 것이 아님
>> 현을 붙잡고 있는 고정 장치를 통해
향판(Soundboard)으로 전달되어 에너지 손실

Stiffness damping term

$$\beta \frac{\partial}{\partial t} \left(-T \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right)$$

β : 강성 비례 감쇠 계수 (현 내부에서의 감쇠 표현)

External force

$$F(y, t)$$

F: 특정 y m 지점에서 t 초동안 가해지는 힘



Mathematics.

Eigenfreq. of Ideal string

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

f: 주파수 (Hz)
 L: 현의 길이 (m)
 T: 현의 장력 (N)
 μ: 선밀도 (kg/m)

Linear Density

$$\mu = \rho \cdot A = \rho \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

ρ: 밀도 (steel: 7850kg/m³)
 A: 현의 축방향 단면적
 d: 현의 직경

Eigenfreq. of real string

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \sqrt{1 + \frac{EI}{T} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}$$

$$f_n = n f_1 \sqrt{1 + B n^2}$$

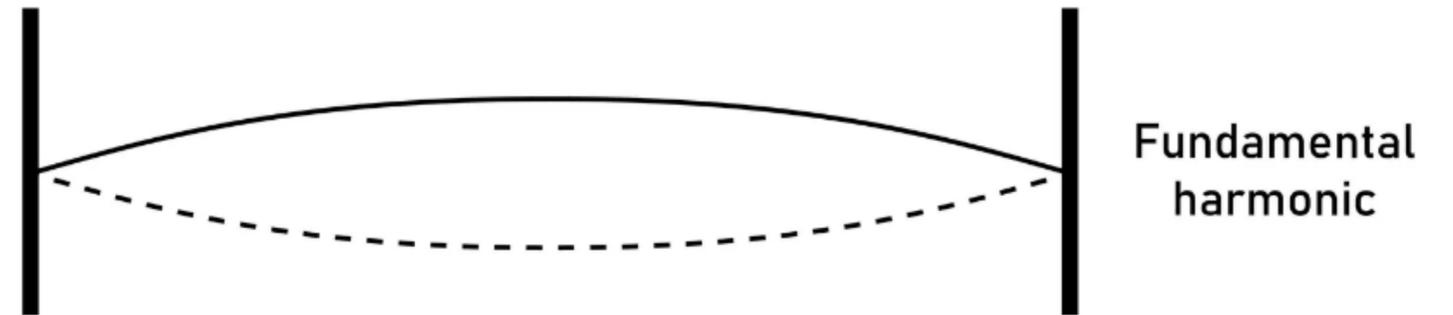
f_n: n번째 모드의 고유 진동수
 f₁: 이상적인 현의 고유 진동수
 n: 모드 번호 (n=1,2,3 ...)
 EI: 현의 강성
 >> 실제보다 현의 진동수가 높게 나옴 (비조화성)

Mathematics.

Standing Waves

정상파:
진폭·파장·주기가 같은 두 파동이 반대 방향으로 진행해 중첩되어 매질 분자가 정지하는 점(마디)과 가장 크게 진동하는 점(배)이 고정되는 파동

마디: 진폭이 항상 0인 지점
배: 진폭이 최대인 지점
>> 배를 가격해야 좋은 현의 울림이 생김



Mathematics.

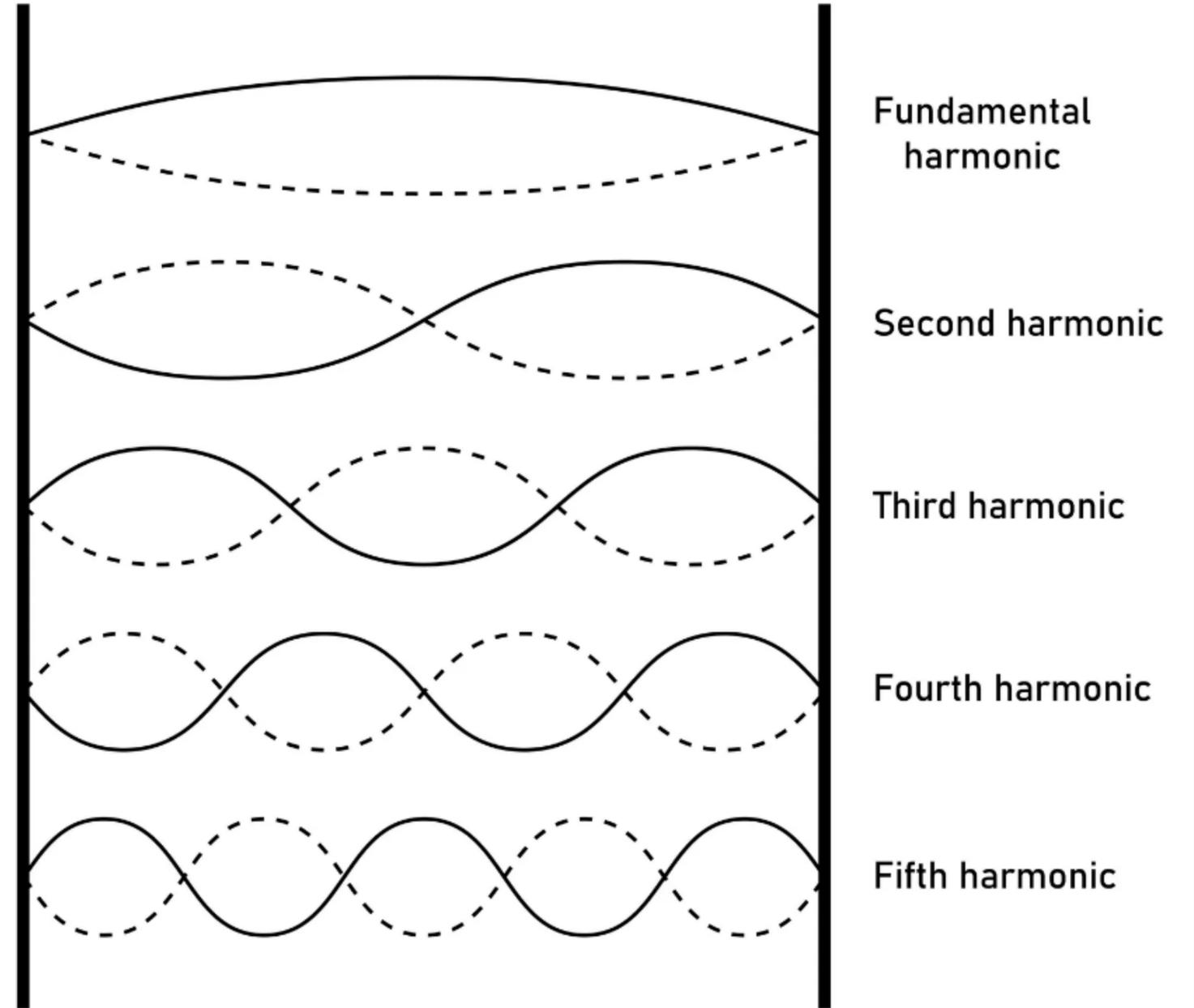
Modes

1차 모드 (n=1, 기본음 Fundamental):
우리가 듣는 가장 주된 음정 (예: C5 음을 내는 현을 치면 C5 음이 들림)
가장 천천히 진동

2차 모드 (n=2, 2배음 2nd Harmonic):
1차 모드보다 2배(정확히는 2배보다 약간 높은) 빠른 주파수 발생

3차 모드 (n=3, 3배음 3rd Harmonic):
1차 모드보다 약 3배 빠른 주파수 발생

>> n이 커질 수록 현이 더 잘게 쪼개져서 빠르게 진동



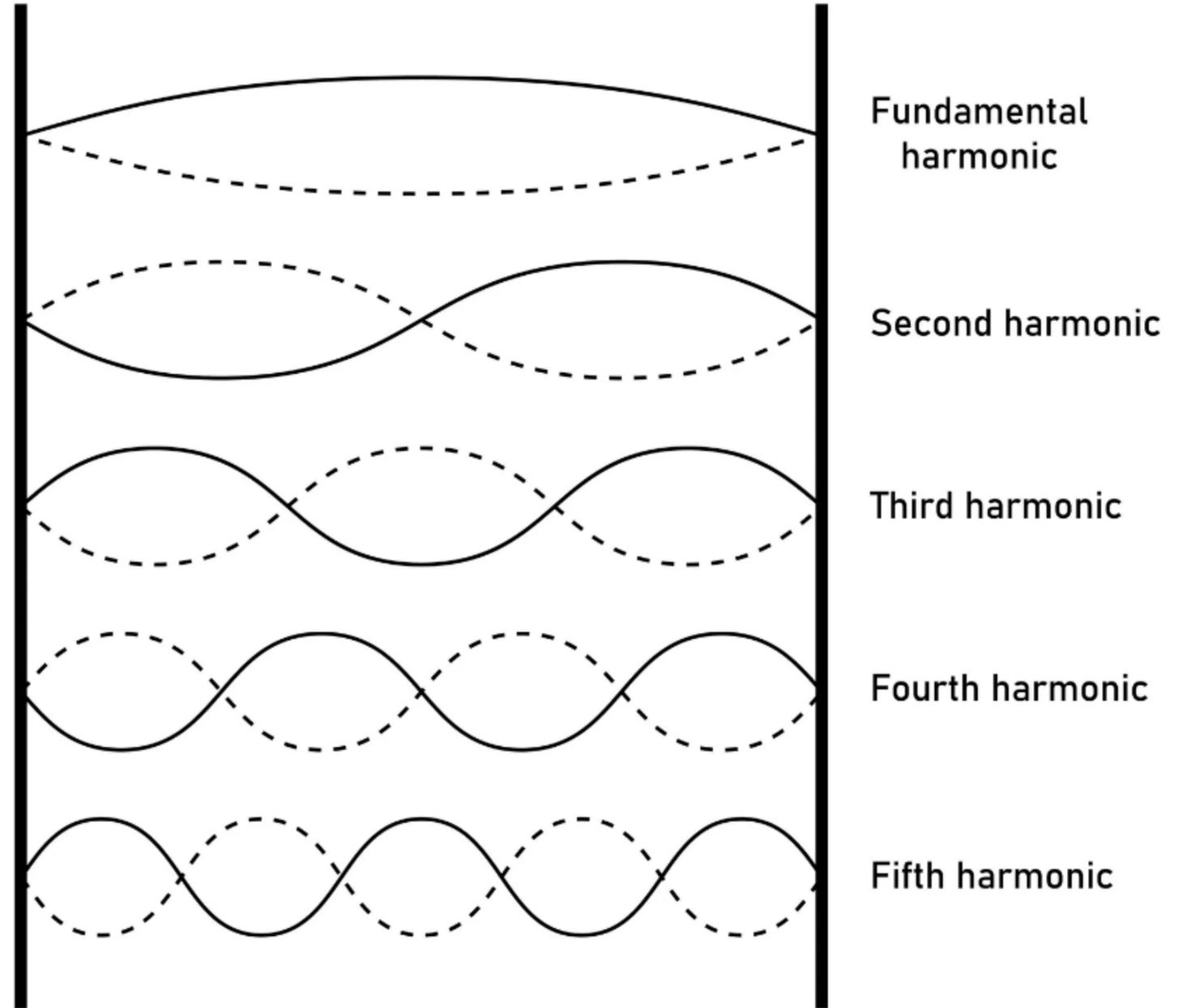
Mathematics.

Mode in piano strings

피아노 현: 양단 고정 (Fixed-Fixed) 상태
 >> 양 끝의 변위가 0이 되는 정상파로만 진동

해머: 짧게 끊어진 펄스는 다양한 주파수 성분의 합으로 표현 (FT)
 >> 이 광대역 에너지가 현에 전달되면 현이 가진 진동수와 맞는 주파수 성분들이 공진(Resonance)을 일으킴

>> 오른쪽과 같이 다양한 모드 발생



Mathematics.

Governing Eq. of the air

$$\frac{1}{c_{air}^2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} - \nabla^2 u_2 = 0$$

c: 음속 (m/s)

u₂: 음압 (Pa)

B.C.

$$\mathbf{n} \cdot \nabla u_2 = -\rho_{air} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

n: 법선 벡터

ρ_{air}: 공기의 밀도

현이 가속도를 내며 튀어나가면 그 힘만큼 공기 입자를 밀어내어 음압을 만들

Modeling.

- 1 Parameters
- 2 Geometry
- 3 Materials & Physics
- 4 Solver & Results



Modeling.

Parameters

- F_max: 가해지는 힘
- t_contact: 힘이 가해지는 시간
- p_val: sin 함수의 지수 (해머의 물성 간단히 모델링)
- load_contact: 힘이 가해지는 면적
- L: 현의 길이
- T: 현에 걸리는 장력
- d: 현의 직경
- E: Young's modulus
- v: Poisson's ratio
- ρ : 현의 밀도
- α : 질량감쇠
- β : 강성감쇠
- 벽반사율

Name	Expression	Unit	Description
F_max	50 [N]	N	
T_contact	3 [ms]	s	
p_val	2		
SineH	$F_max * (\sin(\pi * t / T_contact))^{p_val} * (t \geq 0 \ \&\& \ t \leq T_contact)$	N	
PulseH	$70[N] * \text{rect1}(10*t + 0.01[1/s]) * (t < 0.11)$		

Description	Value
Specify	Young's modulus and Poisson's ratio
Young's modulus	User defined
Young's modulus	200e9
Poisson's ratio	User defined
Poisson's ratio	0.3
Density	User defined
Density	7850

Description	Value
Damping type	Rayleigh damping
Mass damping parameter	0.1
Stiffness damping parameter	1e-5
Input parameters	Alpha and beta

Description	Value
Cross section definition	Common sections
Section type	Circular
Diameter	1[mm]

Description	Value
Initial axial force	986
Initial bending moment	0
Initial axial strain	0
Initial curvature	0

Modeling.

Modeling Approximation

2D Modeling

>> 피아노 현과 주변 공간에 대한 모델링만 필요

Beam & Air

>> 피아노의 현을 강성과 장력이 존재하는 Beam으로 모델링

>> 현 주변을 공기 중으로 모델링

Soundboard (향판)

>> 피아노 현의 에너지를 증폭하고 Sustain을 감쇠하는 요소

>> 2D에서 구현하기 힘들므로 α 값과 Flux Condition을 이용하여 감쇠 튜닝



Modeling.

1-string Geometry

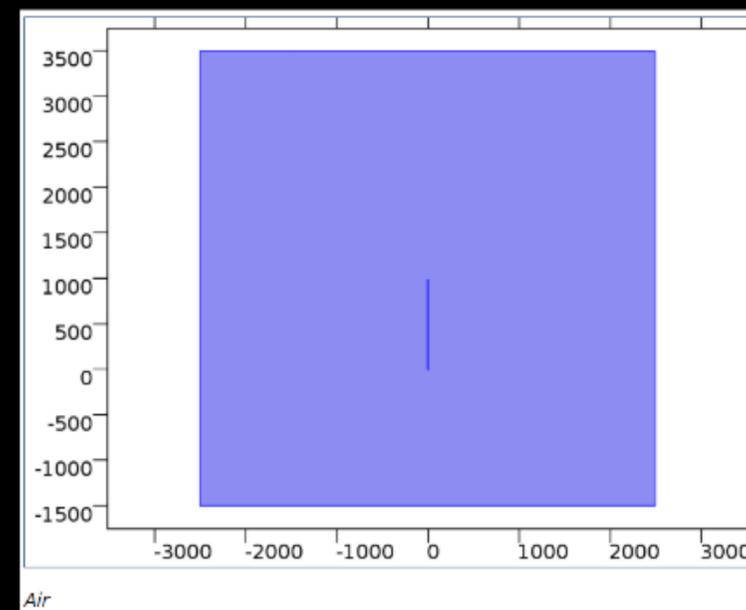
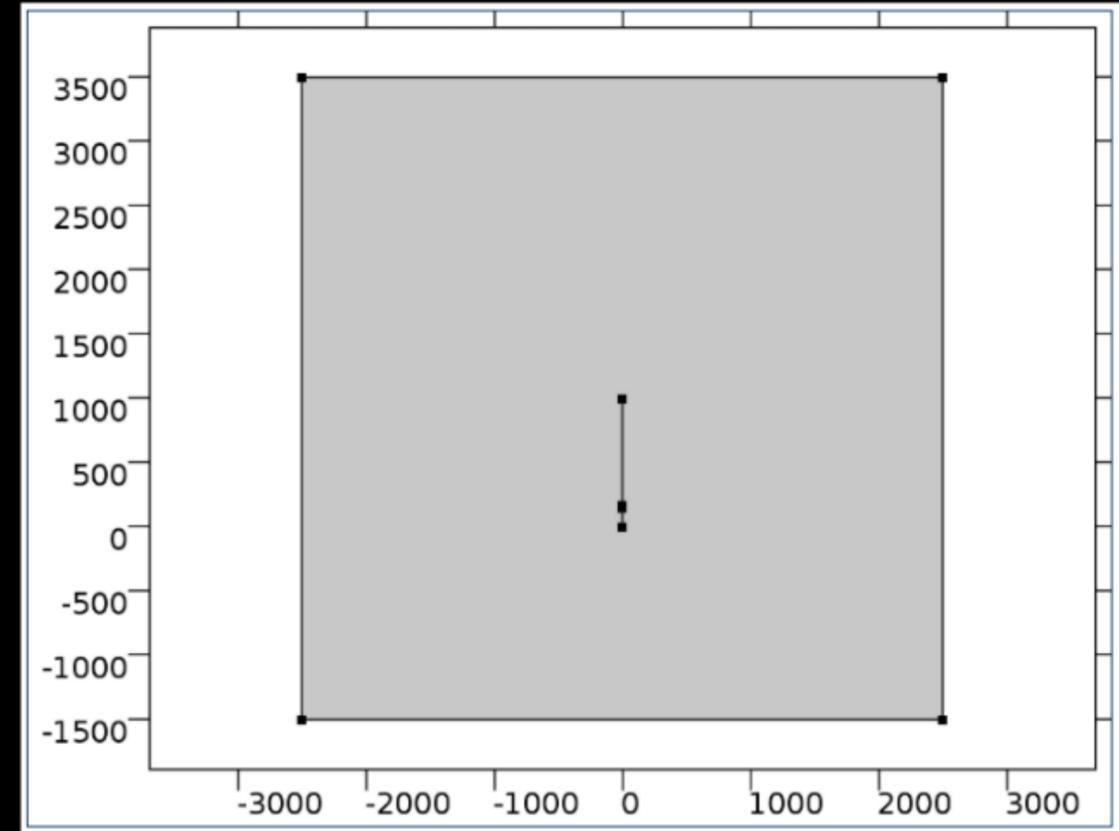
1-string modeling

>> Physics 검증을 위해 현 1개만 모델링

50x70 large 2D room

>> 소리가 잘 퍼지는지 시각적으로 보기 위해 넓은 방 모델링

>> Reverb를 적당히 주기 위한 room의 B.C. 설정



Modeling.

Beam

Elastic Material (Steel for piano string)

>> $E = 200e9$ GPa

>> $\nu = 0.3$

>> $\rho = 7890$ kg/m³

Constraint

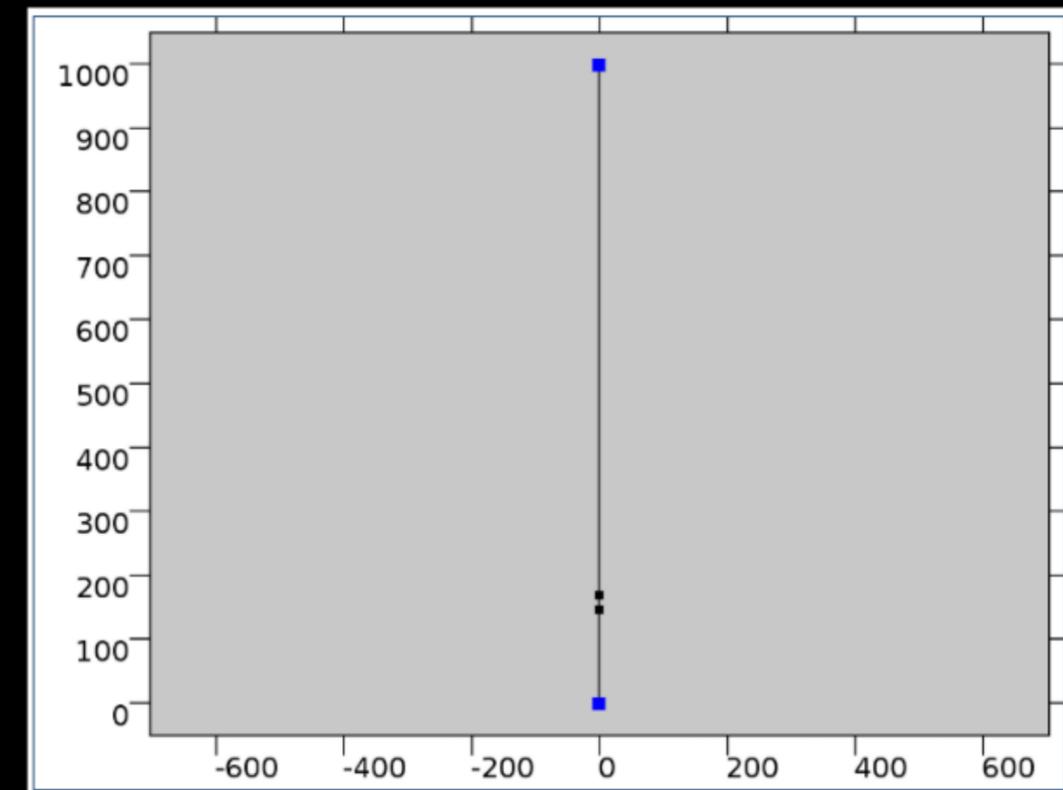
>> Fixed-Fixed Beam

>> $T \approx 900$ N

Boundary Load

>> \sin^2 pulse (해머의 물성과 움직임을 고려해 충격량 형상 결정)

>> vs Gaussian, square pulse



Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)
 >> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Coefficient Form PDE 1

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Domain 1

EQUATIONS

$$e_a \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u_2}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u_2 - \alpha u_2 + \gamma) + \beta \cdot \nabla u_2 + a u_2 = f$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Diffusion coefficient	{{1, 0}, {0, 1}}
Absorption coefficient	0
Source term	0
Mass coefficient	1 / (343[m/s])^2
Damping or mass coefficient	0
Conservative flux convection coefficient	{0, 0}
Convection coefficient	{0, 0}
Conservative flux source	{0, 0}

Variables

Name	Expression	Unit	Description	Selection
domflux.u2x	-u2x	1/m	Domain flux, x component	Domain 1
domflux.u2y	-u2y	1/m	Domain flux, y component	Domain 1

Shape Functions

Name	Shape function	Unit	Description	Shape frame	Selection
u2	Lagrange (Quadratic)	1	Dependent variable u2	Material	Domain 1

Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)

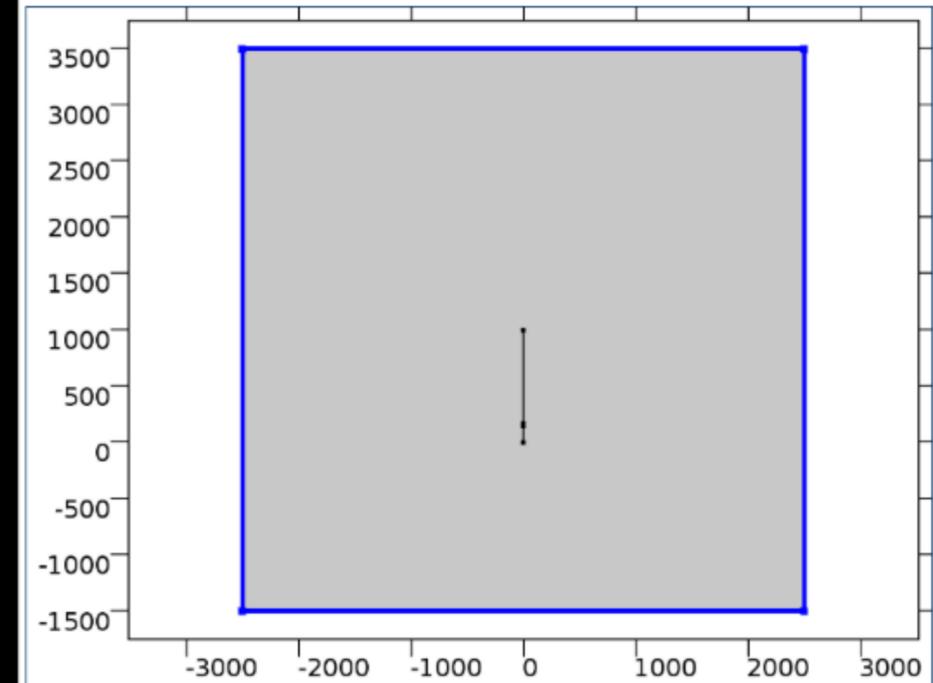
>> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Boundary flux ($- 0.05 / c$) * u_{2t}

>> u_{2t} = 음압의 미분값

>> 벽에서의 에너지 흡수 및 반사를 나타냄

2.5.4. Flux/Source 2



Flux/Source 2

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Boundaries 1-3, 7

EQUATIONS

$$-\mathbf{n} \cdot (-c \nabla u_2 - \alpha u_2 + \gamma) = g - q u_2$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Boundary flux/source	$-(0.05 / 343[\text{m/s}]) * u_{2t}$
Boundary absorption/impedance term	0

Variables

Name	Expression	Unit	Description	Selection
c.g_u2	$-0.05 * u_{2t} / 343[\text{m/s}]$	1/m	Boundary flux/source	Boundaries 1-3, 7

Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)

>> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Boundary flux ($-0.05 / c$) * u_{2t}

>> u_{2t} = 음압의 미분값

>> 벽에서의 에너지 흡수 및 반사를 나타냄

Flux from Beam

>> 문제점 : 현의 진동에 따른 공기가 떨림을 Multiphysic로 표현 안됨 (1D -2D차원 불일치)

>> 진동에 따라 공기중으로 flux를 내보내도록 source 정의.

2.5.5. Flux/Source 1

Flux/Source 1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Boundaries 4-6

EQUATIONS

$$-\mathbf{n} \cdot (-c \nabla u_2 - a u_2 + \gamma) = g - q u_2$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Boundary flux/source	$(-1.2[\text{kg}/\text{m}^3] * \text{comp1.beam.u_tt}) * (\text{abs}(x) < 1[\text{mm}]) * (1.0[\text{mm}])$
Boundary absorption/impedance term	0

Variables

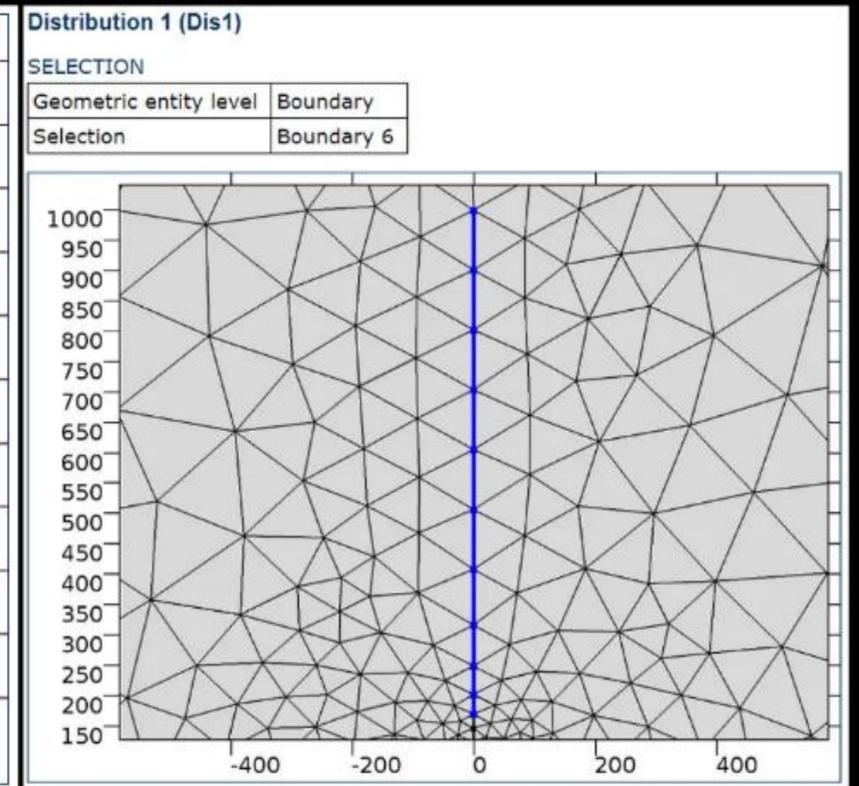
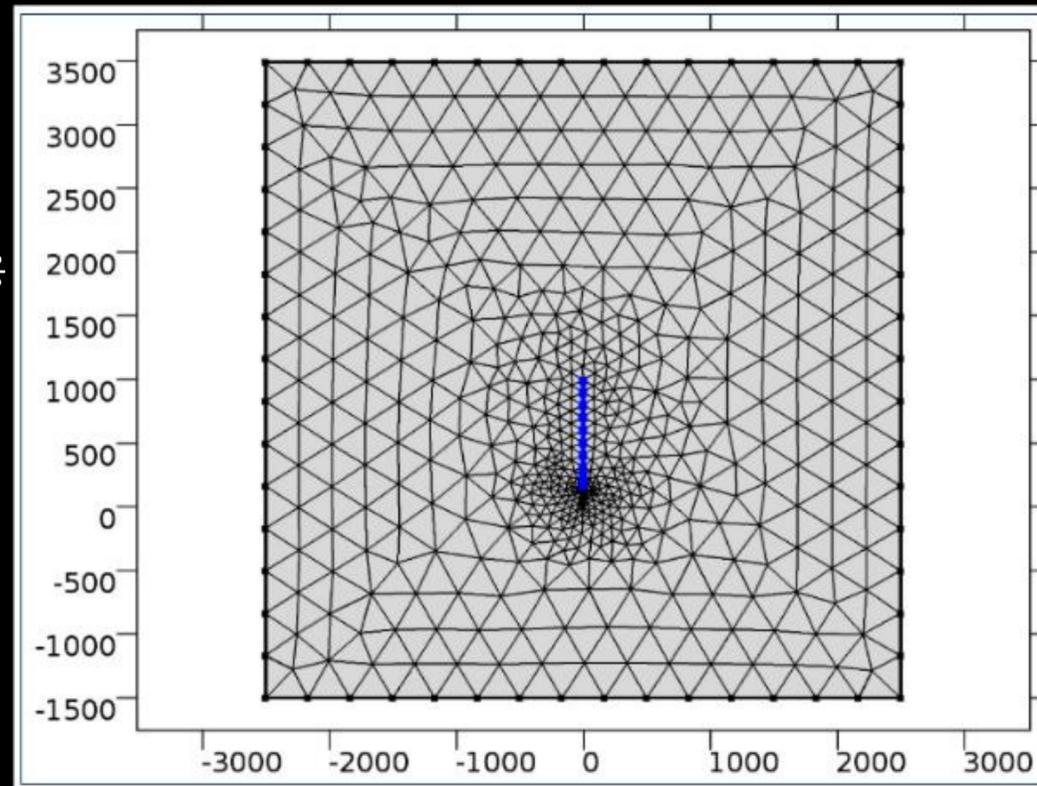
Name	Expression	Unit	Description	Selection
c.g_u2	$(-1.2)[\text{kg}/\text{m}^3] * \text{beam.u_tt} * (\text{abs}(x) < 1[\text{mm}]) * 1[\text{mm}]$	1/m	Boundary flux/source	Boundaries 4-6

Modeling.

Mesh

Distribution of Beam
 >> 20 nodes ~ 100 nodes

Free Triangular
 >> 파동방정식을 해석하는 데에 있어서는 삼각형 요소를 사용하는 것이 더욱 유리함
 >> Normal ~ Extremely Fine



Modeling.

Solver Configuration

Time range: 0 to 1, step size = 14400Hz

- >> 1초까지의 분석으로 모델이 잘 작동하는지 우선적으로 검증
- >> 표준 오디오 형식에 맞추기 위해 step size를 14400Hz로 설정

Include geometric nonlinearity: On

- >> 현에 강한 장력이 걸리고 있는 상황이므로 변위에 따른 장력 변화가 큼
- >> 이 옵션을 켜야 실제 현의 거동을 잘 나타낼 수 있게 됨 (고조파 성분 등)

Solver: Generalized Alpha

- >> 파동방정식을 해석하는 데에 있어 가장 적합한 Solver

Maximum step: 5e-5

- >> 20000Hz 정도의 주파수 영역까지는 계산 가능

3.1. TIME DEPENDENT

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	On

Times	Unit
range(0, 1/14400, 1)	s

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Beam (beam)	physics
Coefficient Form PDE (c)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

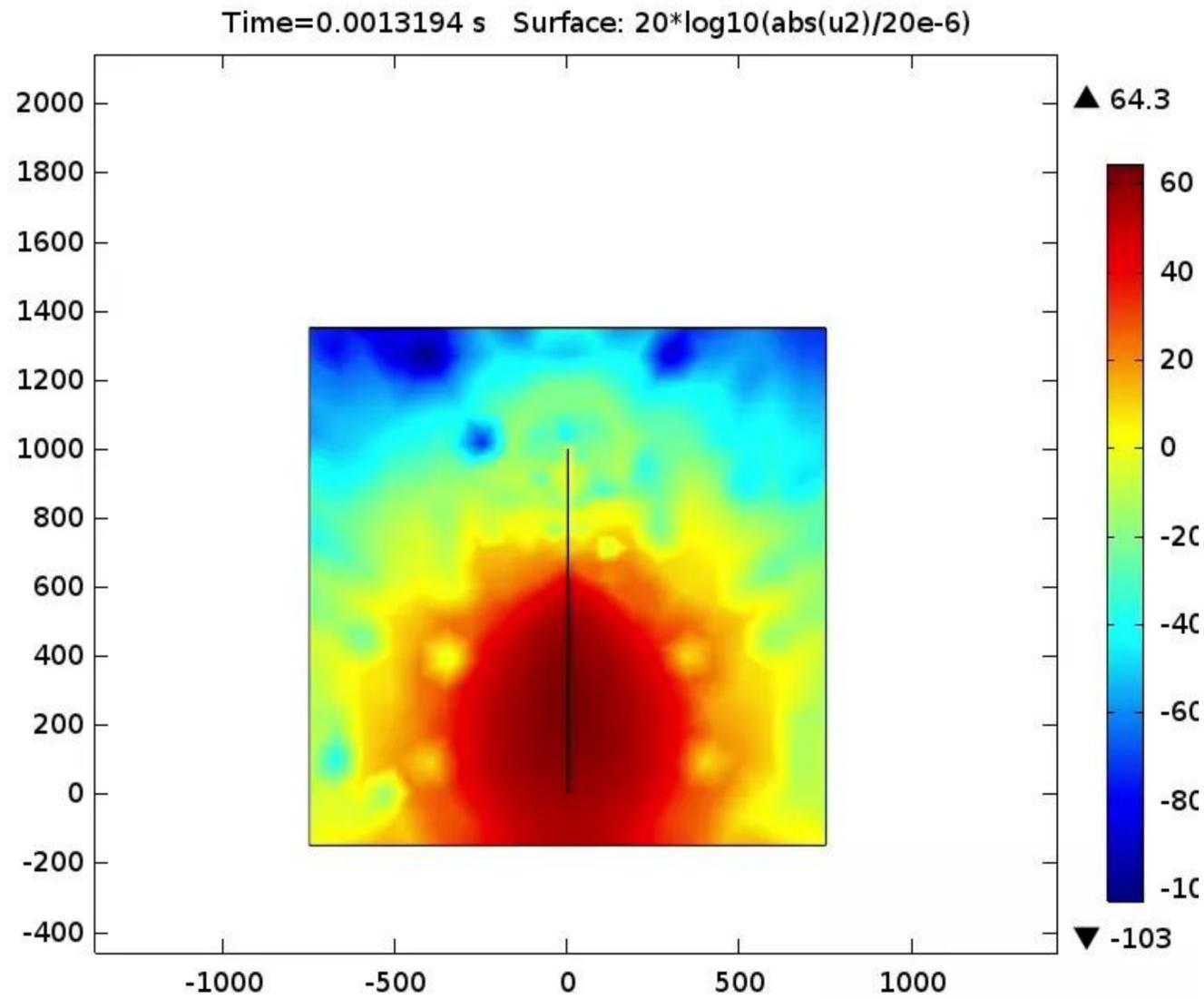
ABSOLUTE TOLERANCE

Description	Value
Tolerance	0.005

TIME STEPPING

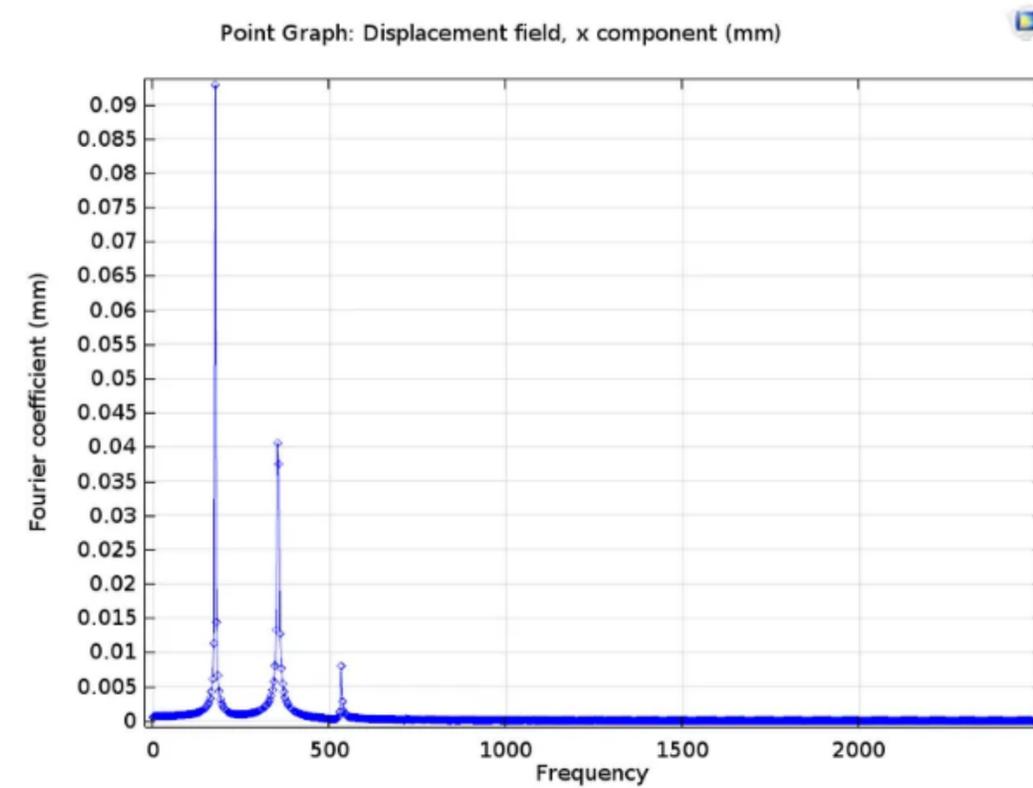
Description	Value
Method	Generalized alpha
Steps taken by solver	Intermediate
Maximum step	5e-5
Maximum step	On

Results.

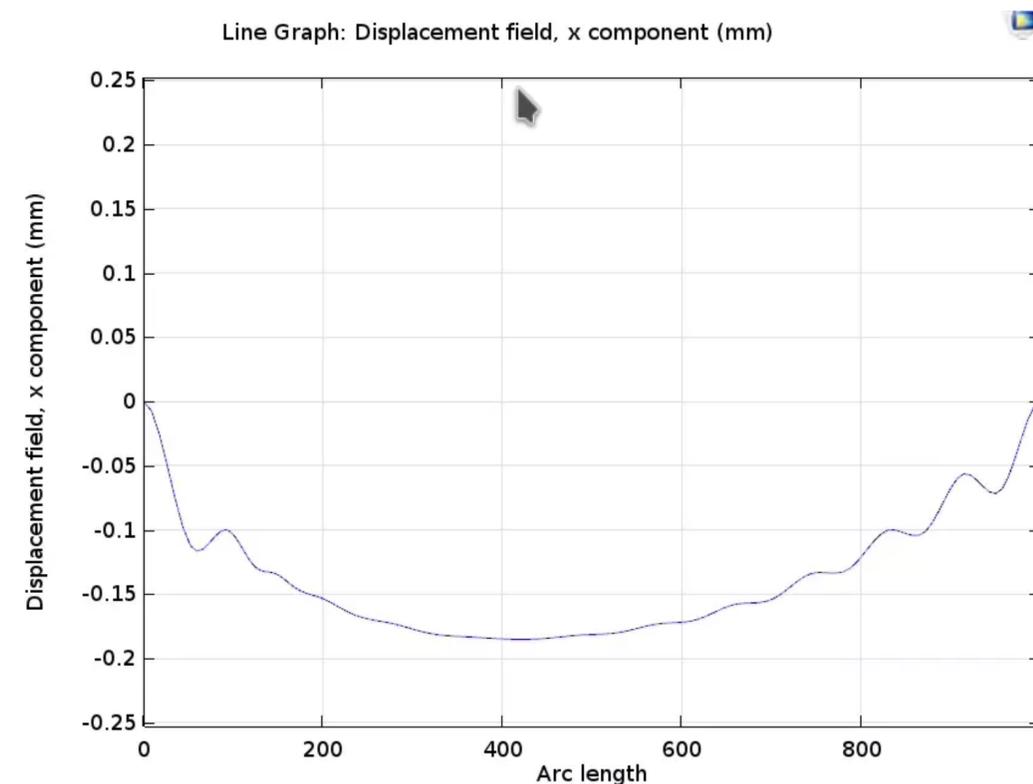


Result of 1-string piano modeling

dB Graph of the room



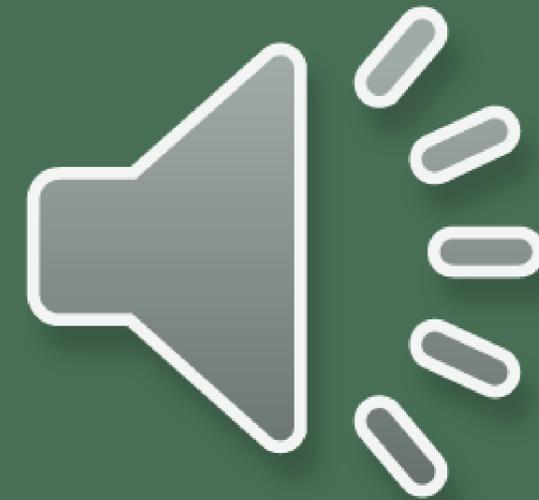
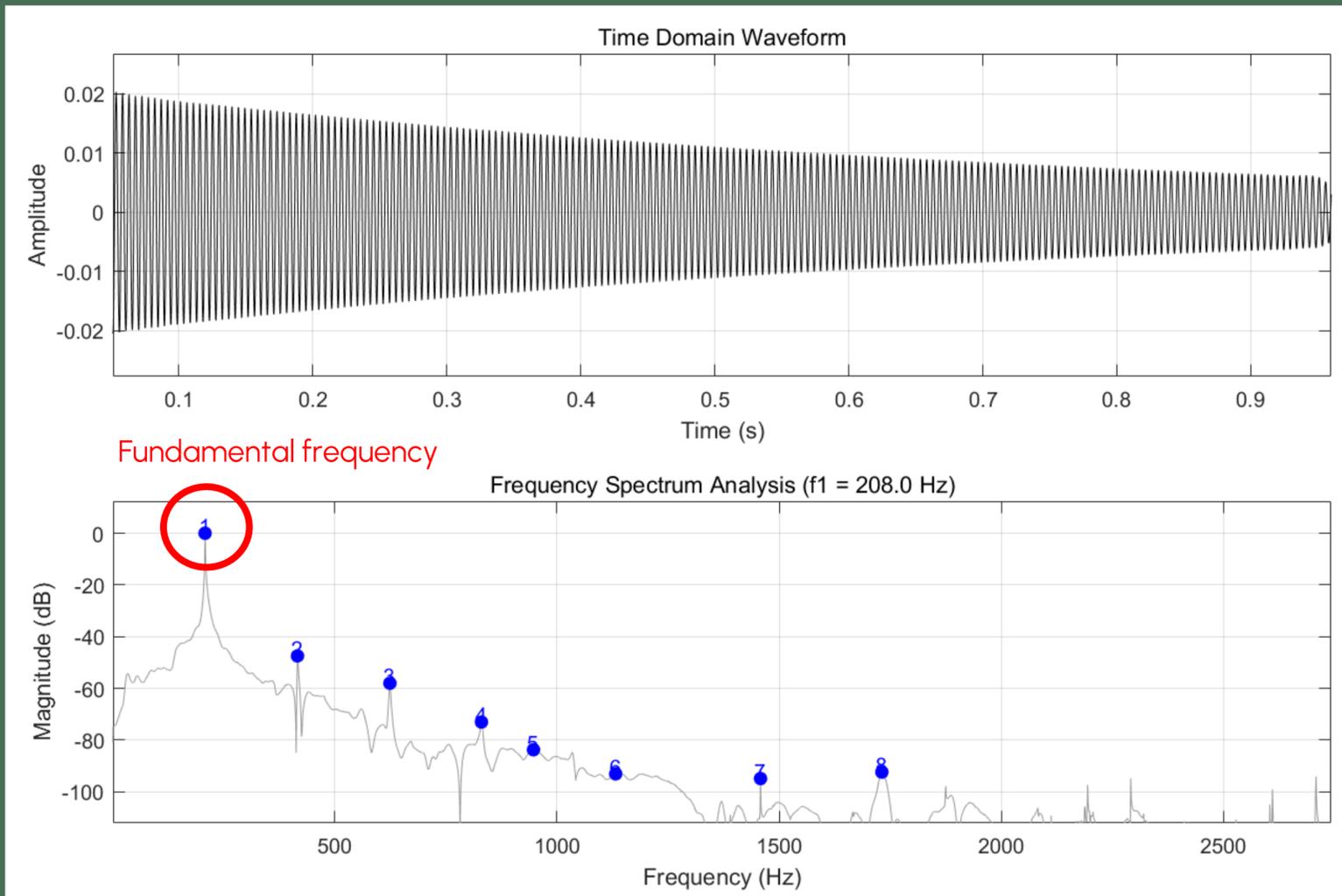
Frequency graph of Displacement



Displacement field of x components

Results.

Tone Balance



Results.

Pitch Correction

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

수식에 의하면 고유 진동수(1차 배음)는 장력의 제곱근에 비례하고, 선밀도의 제곱근과 현의 길이의 두 배에 반비례해야 함

>> 그러나 모델링한 현들에서는 계속 주파수가 낮게 나오는 현상 발생

Mesh를 100개로 쪼개어 진행

>> 고조파 성분이 너무 많고 커져 해석에 어려움 발생

>> 하나의 현을 1초 계산하는 데에 1시간 30분이 넘는 시간 소요

Time step을 10e-6으로 쪼개어 진행

>> 그러나 마찬가지로 1초 계산하는 데에 1시간 30분이 넘는 시간 소요

>> 유의미하게 오차가 줄어들지는 않음

Relative Tolerance, solver, force shape, amplitude 등

어떠한 변수가 얼만큼 오차를 줄여주는지 파악하기 어려움

>> 4현 모델링 시 Fine-tuning 진행

차수	이론주파수	실제주파수	크기 (dB)	비고
1차	208.0 Hz	208.0 Hz	0.0 dB	(기본음)
2차	416.0 Hz	416.0 Hz	-47.5 dB	
3차	624.0 Hz	624.0 Hz	-58.0 dB	
4차	832.0 Hz	830.0 Hz	-73.0 dB	
5차	1040.0 Hz	947.0 Hz	-83.7 dB	
6차	1248.0 Hz	1132.0 Hz	-93.1 dB	
7차	1456.0 Hz	1458.0 Hz	-94.9 dB	
8차	1664.0 Hz	1731.0 Hz	-92.4 dB	

frequency of nth modes (beam mesh 100)

차수	이론주파수	실제주파수	크기 (dB)	비고
1차	141.0 Hz	141.0 Hz	0.0 dB	(기본음)
2차	282.0 Hz	269.0 Hz	-11.4 dB	
3차	423.0 Hz	397.0 Hz	-18.4 dB	
4차	564.0 Hz	526.0 Hz	-29.0 dB	
5차	705.0 Hz	646.0 Hz	-55.9 dB	
6차	846.0 Hz	768.0 Hz	-59.0 dB	
7차	987.0 Hz	956.0 Hz	-74.0 dB	
8차	1128.0 Hz	1131.0 Hz	-60.6 dB	

frequency of nth modes (beam mesh 20)

Modeling.

4-string Geometry

4-string modeling

>> C3, E3, G3, C4 음을 내는 4개의 줄 모델링

>> 고찰에서도 얘기하겠지만 5개 줄 이상을 모델링하는 것은 너무 많은 시간 소요

Grandpiano Boundary Modeling

>> 피아노를 마이킹할 때는 보통 피아노 안쪽에 마이크를 덧대므로 벽에 반사되어 돌아오는 소리의 영향이 적음

>> 피아노 덮개의 힌지는 낮은 음쪽에 달려 있으므로 왼쪽 경계의 반사율을 높여 설정



Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)
 >> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Coefficient Form PDE 1

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Domain 1

EQUATIONS

$$e_a \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u_2}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u_2 - \alpha u_2 + \gamma) + \beta \cdot \nabla u_2 + a u_2 = f$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Diffusion coefficient	{{1, 0}, {0, 1}}
Absorption coefficient	0
Source term	0
Mass coefficient	1 / (343[m/s])^2
Damping or mass coefficient	0
Conservative flux convection coefficient	{0, 0}
Convection coefficient	{0, 0}
Conservative flux source	{0, 0}

Variables

Name	Expression	Unit	Description	Selection
domflux.u2x	-u2x	1/m	Domain flux, x component	Domain 1
domflux.u2y	-u2y	1/m	Domain flux, y component	Domain 1

Shape Functions

Name	Shape function	Unit	Description	Shape frame	Selection
u2	Lagrange (Quadratic)	1	Dependent variable u2	Material	Domain 1

Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)

>> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Left/Right Boundary flux

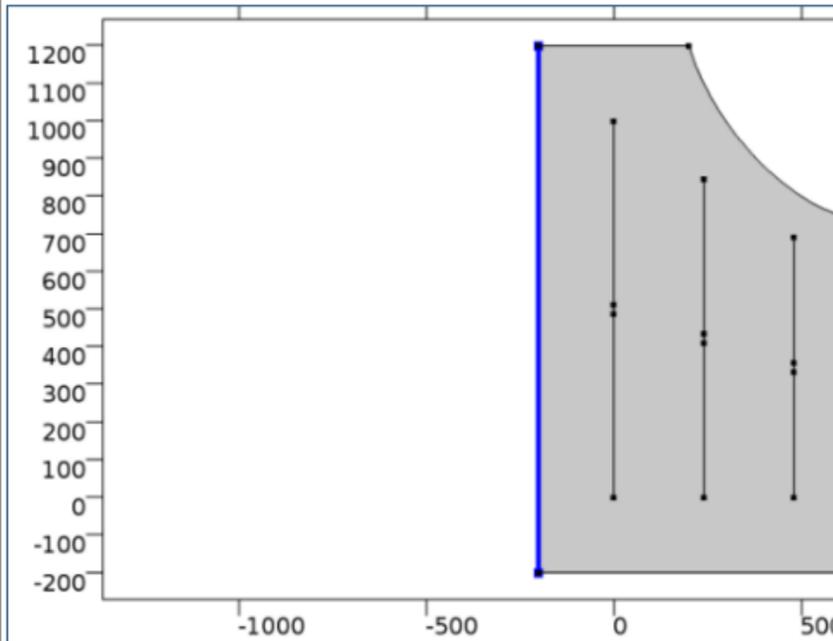
Left : $(- 0.3 / c) * u_{2t}$

Right : $(- 0.8 / c) * u_{2t}$

>> u_{2t} = 음압의 미분값

>> 벽에서의 에너지 흡수 및 반사를 나타냄

2.5.8. Piano Reflection 1



Piano reflection 1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Boundary 1

EQUATIONS

$$-\mathbf{n} \cdot (-c\nabla u_2 - \alpha u_2 + \gamma) = g - q u_2$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

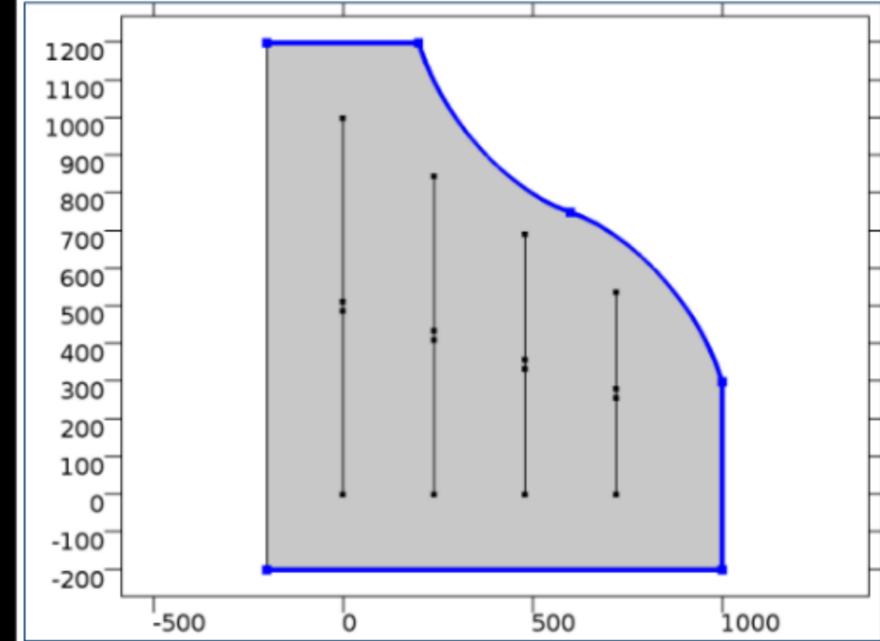
SETTINGS

Description	Value
Boundary flux/source	$-(0.3 / 343[\text{m/s}]) * u_{2t}$
Boundary absorption/impedance term	0

Variables

Name	Expression	Unit	Description	Selection
c.g_u2	$-0.3 * u_{2t} / 343[\text{m/s}]$	1/m	Boundary flux/source	Boundary 1

2.5.9. Piano Reflection 2



Piano reflection 2

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Boundaries 2-3, 16-18

EQUATIONS

$$-\mathbf{n} \cdot (-c\nabla u_2 - \alpha u_2 + \gamma) = g - q u_2$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Boundary flux/source	$-(0.8 / 343[\text{m/s}]) * u_{2t}$
Boundary absorption/impedance term	0

Variables

Name	Expression	Unit	Description	Selection
c.g_u2	$-0.8 * u_{2t} / 343[\text{m/s}]$	1/m	Boundary flux/source	Boundaries 2-3, 16-18

Modeling.

Outer space

Mass coefficient ($1/c^2$)

>> 공기 중 파동의 속도 (20°C)

Left/Right Boundary flux

Left : $(- 0.3 / c) * u_{2t}$

Right : $(- 0.8 / c) * u_{2t}$

>> u_{2t} = 음압의 미분값

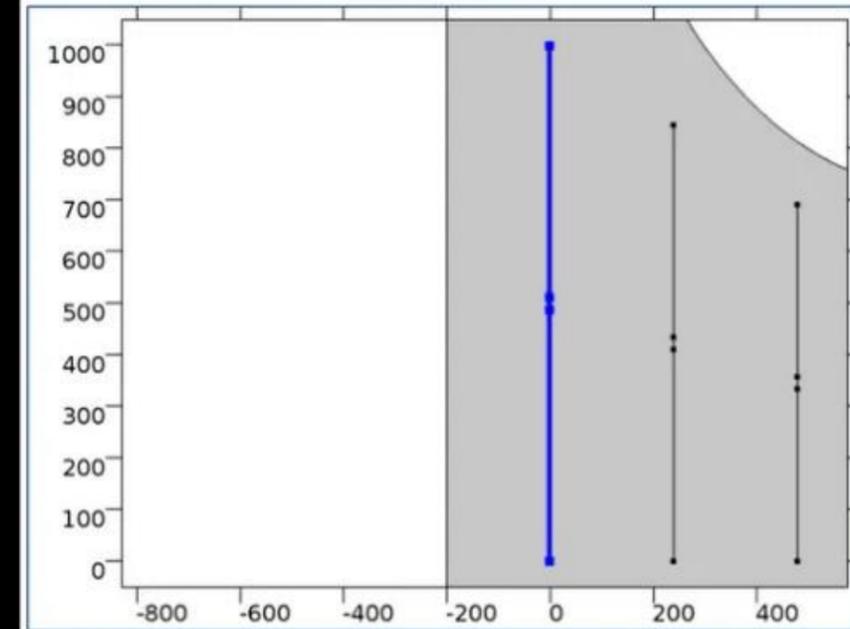
>> 벽에서의 에너지 흡수 및 반사를 나타냄

Flux from Beam

>> 문제점 : 현의 진동에 따른 공기가 떨림을 Multiphysic로 표현 안됨 (1D -2D차원 불일치)

>> 진동에 따라 공기중으로 flux를 내보내도록 source 정의.

2.5.7. C3



C3

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Boundaries 4-6

EQUATIONS

$$-n \cdot (-c \nabla u_2 - a u_2 + \gamma) = g - q u_2$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right]$$

SETTINGS

Description	Value
Boundary flux/source	$(-1.2[\text{kg}/\text{m}^3] * \text{comp1.beam.u_tt}) * (\text{abs}(x) < 1[\text{mm}]) * (1.4[\text{mm}])$
Boundary absorption/impedance term	0

Variables

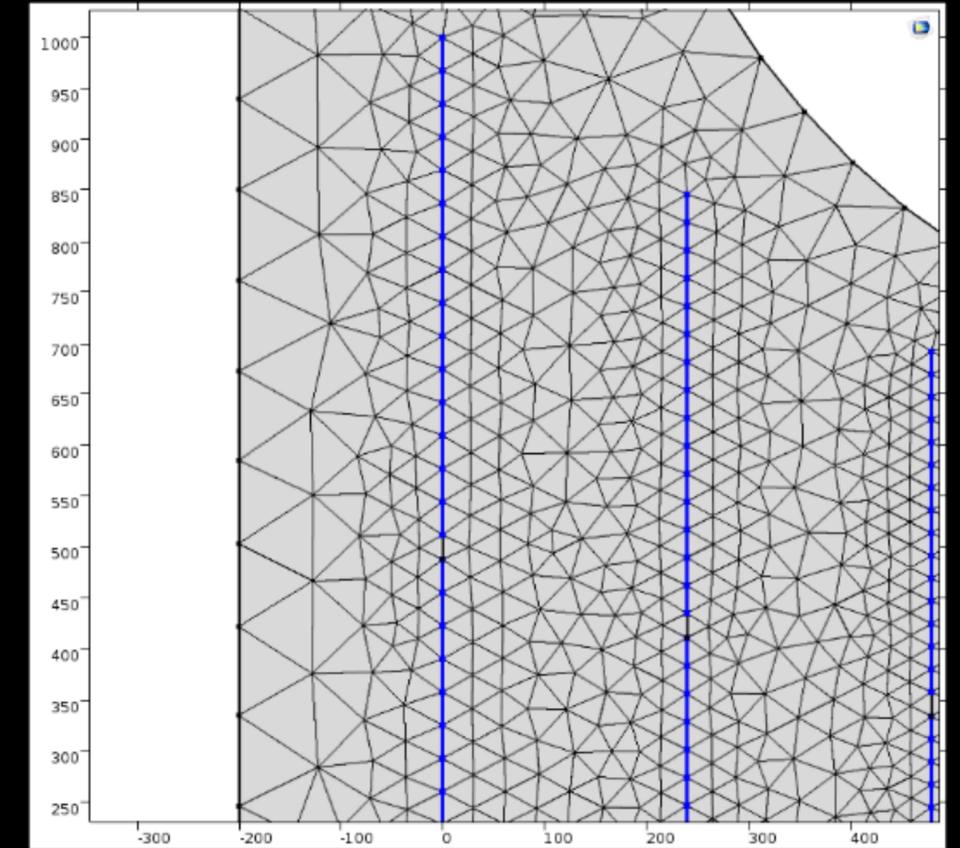
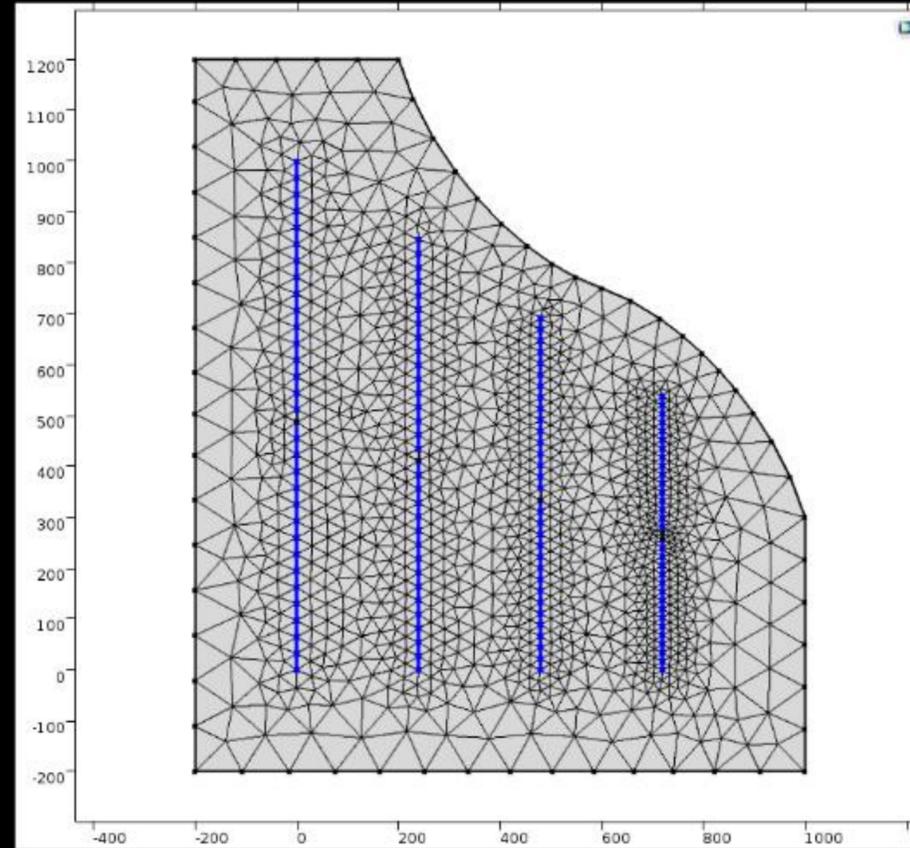
Name	Expression	Unit	Description	Selection
c.g_u2	$(-1.2)[\text{kg}/\text{m}^3] * \text{beam.u_tt} * (\text{abs}(x) < 1[\text{mm}]) * 1.4[\text{mm}]$	1/m	Boundary flux/source	Boundaries 4-6

Modeling.

Mesh

Distribution of Beam
>> 30 nodes

Free Triangular
>> 파동방정식을 해석하는 데에 있어서는 삼각형 요소를 사용하는 것이 더욱 유리함





Modeling.

Solver Configuration

Time range: 0 to 3, step size = 14400Hz

>> 어느정도 소리의 감쇠도 들을 수 있게 3초까지 설정

>> 표준 오디오 형식에 맞추기 위해 step size를 14400Hz로 설정

Include geometric nonlinearity: On

>> 현에 강한 장력이 걸리고 있는 상황이므로 변위에 따른 장력 변화가 큼

>> 이 옵션을 켜야 실제 현의 거동을 잘 나타낼 수 있게 됨 (고조파 성분 등)

Solver: Generalized Alpha

>> 파동방정식을 해석하는 데에 있어 가장 적합한 Solver

Maximum step: 5e-5

>> 20000Hz 정도의 주파수 영역까지는 계산 가능

3.1. TIME DEPENDENT

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	On

Times	Unit
range(0, 1/14400, 1)	s

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Beam (beam)	physics
Coefficient Form PDE (c)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

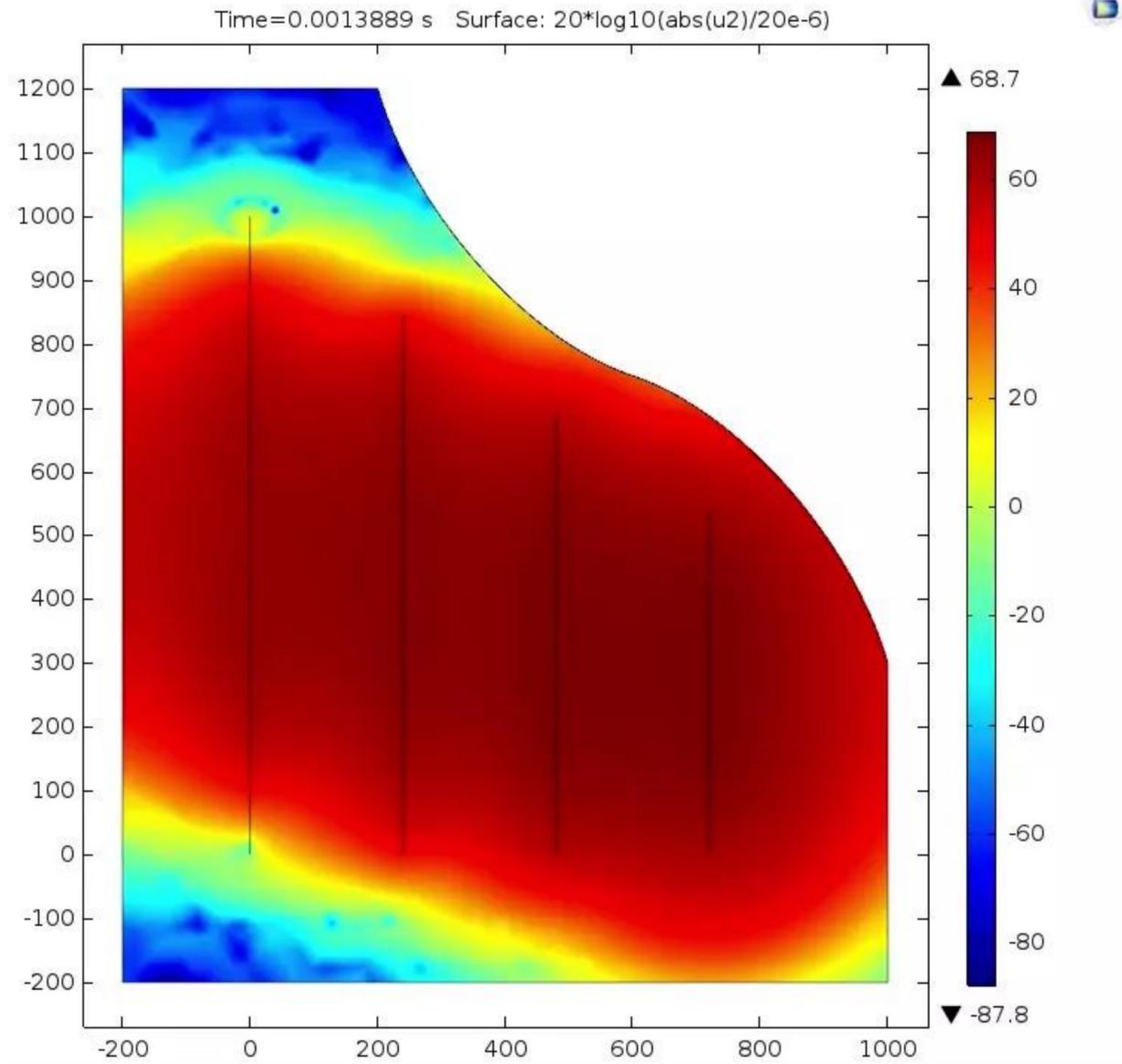
ABSOLUTE TOLERANCE

Description	Value
Tolerance	0.005

TIME STEPPING

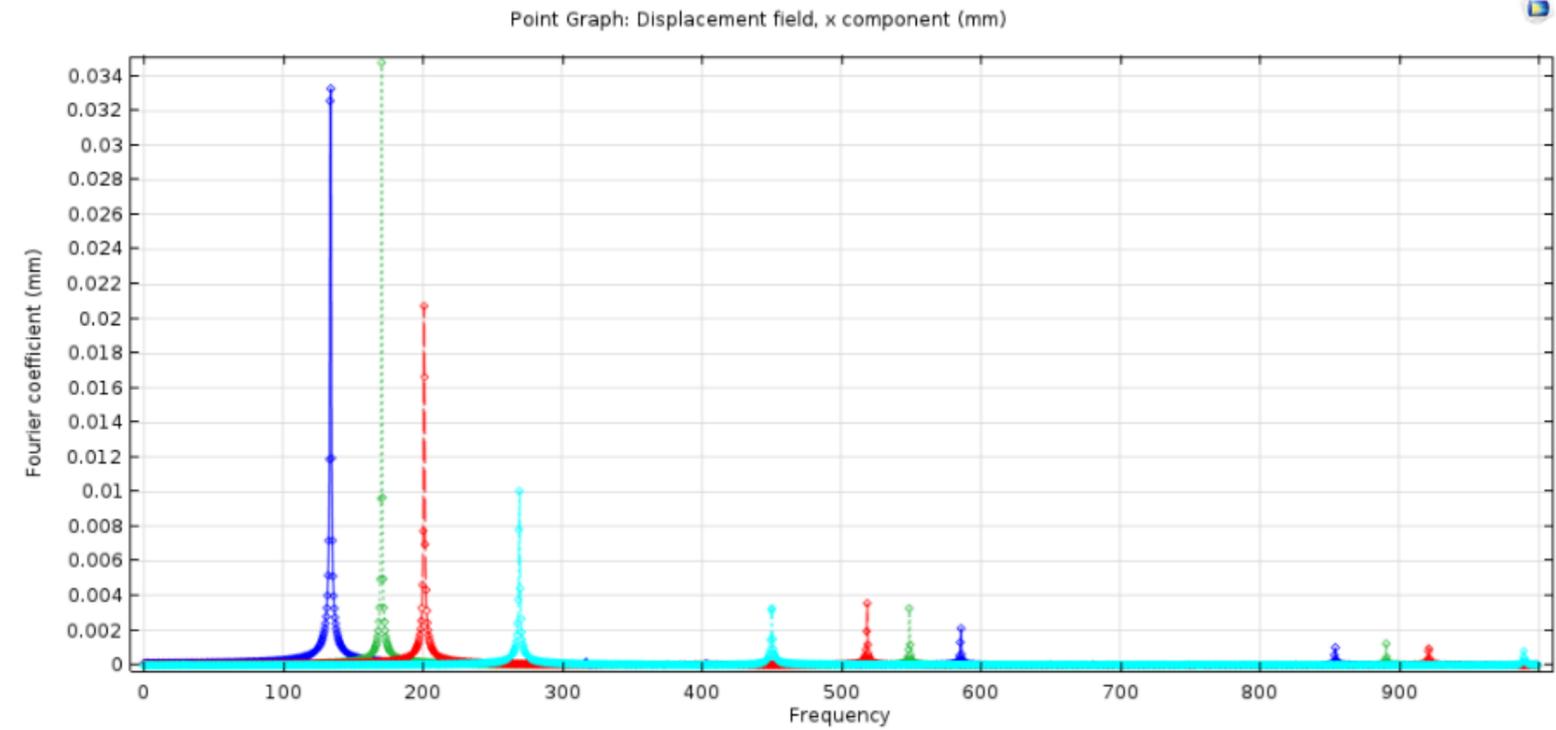
Description	Value
Method	Generalized alpha
Steps taken by solver	Intermediate
Maximum step	5e-5
Maximum step	On

Results.

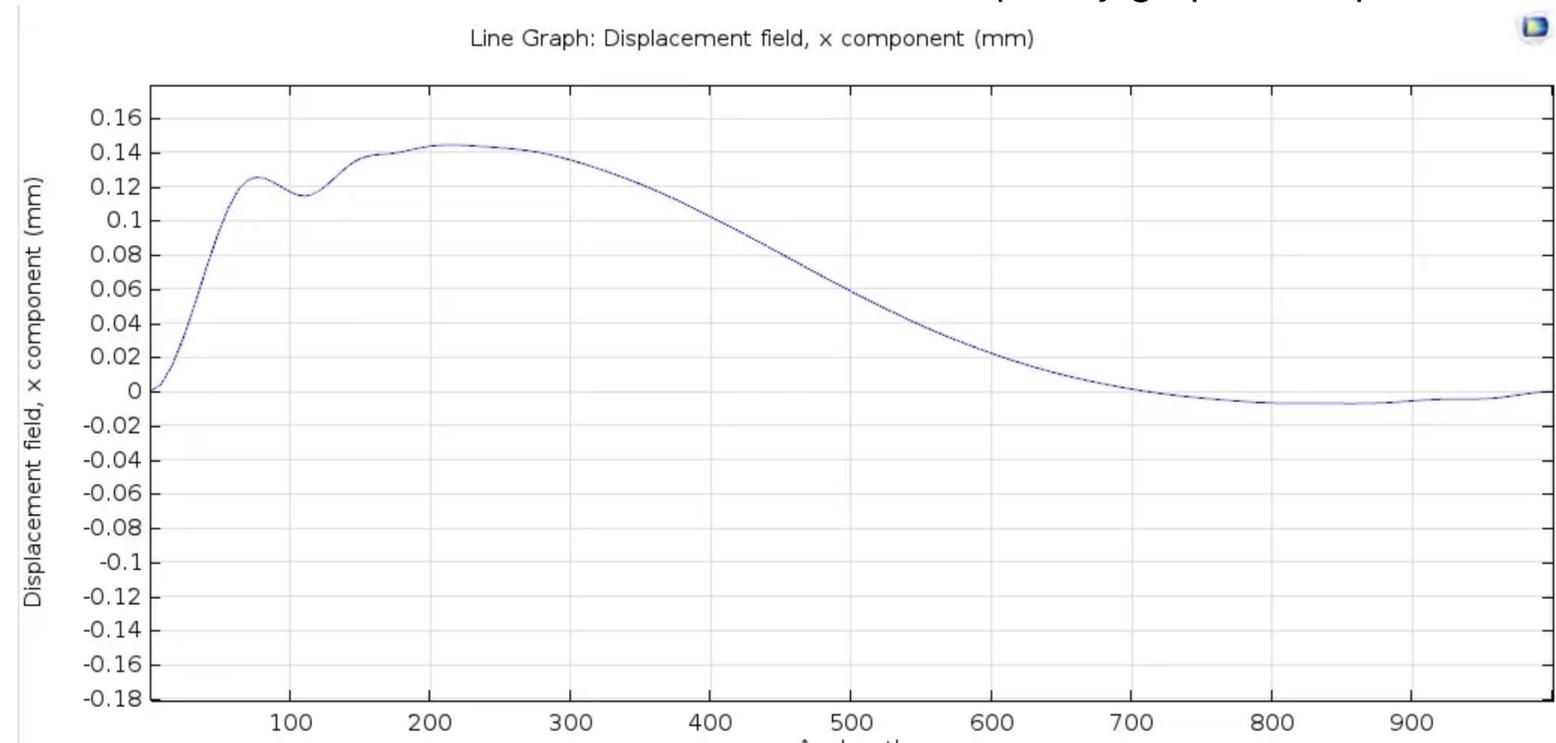


dB Graph inside the piano

Result of 4-string piano modeling



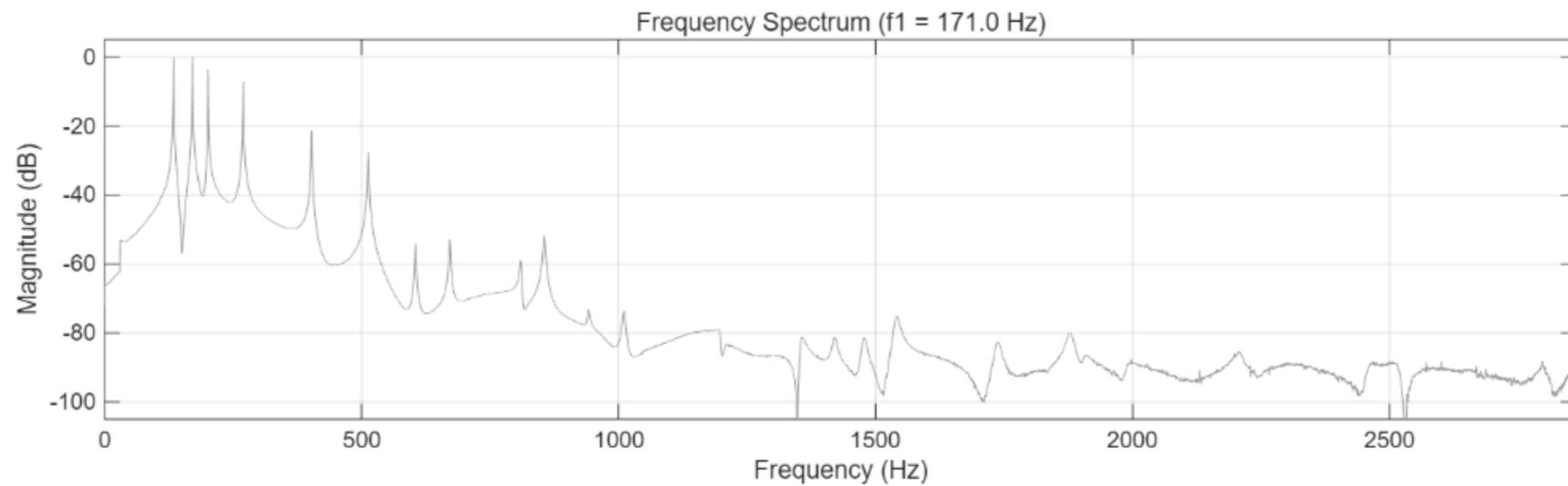
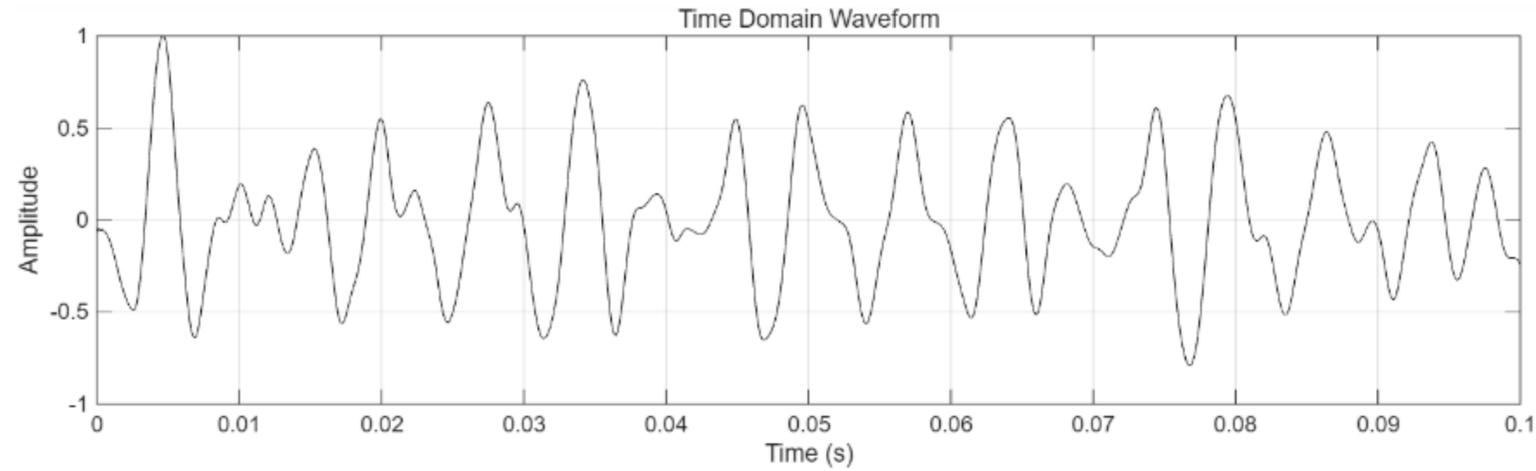
Frequency graph of Displacement



Displacement field of x components



Results.



t-domain analysis vs ω -domain analysis

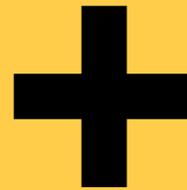


Analysis.

Tone Balance

$$\text{den} = E_{\text{good}} + \alpha_{\text{High}} E_{\text{bad}} + \beta_{\text{Noise}} E_{\text{noise}} + \varepsilon$$
$$\text{scoreHarmonic} = \frac{E_{\text{good}}}{\text{den}}$$

1. THD(전고조파 왜율) 점수

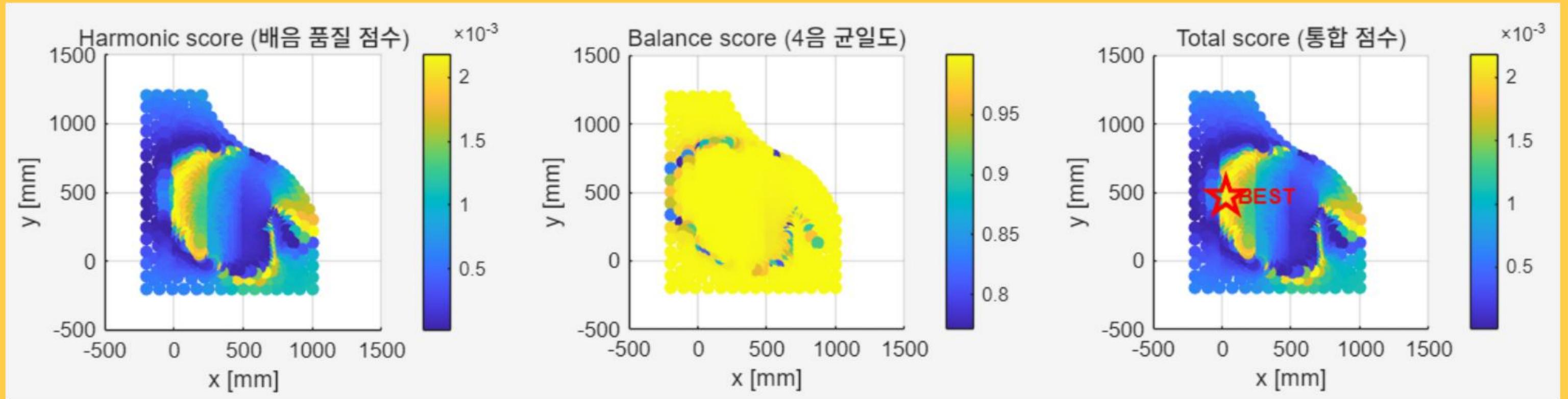


$$\bar{A} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 A_j \quad \sigma_A = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 (A_j - \bar{A})^2} \quad \text{CV} = \frac{\sigma_A}{\bar{A}}$$
$$\text{scoreBalance} = \frac{1}{1 + \text{CV}}$$

2. 각 음압의 균일도 점수

Analysis.

Sound Balance



Results.

Limitation

- 고음 해석 능력 부족 (mesh 사이즈가 크면 고주파 성분 해석 불가)
- 학생 License로는 Time-dependent Acoustic Study를 진행할 수 없었음
- 고유진동수의 이론값과 COMSOL 해석값과의 오차를 극복하지 못함
- 88개의 현에 대해 모두 해석해보지 못함
- 스테레오 마이크에 대한 해석 부족





Q & A



Thank you