

전산 해석을 이용한 다중연돌의 유체유발진동

양광혁^{*†}, 박재관^{*}, 김현준^{*}, 백송열^{*}, 박순태^{*}

^{*}삼성엔지니어링 기계설계팀

Evaluation of Wind-Induced Vibration for Multiple Stacks Using Numerical Analysis

Kwangheok Yang^{*†}, Chaegwan Park^{*}, Hyeonjoon Kim^{*}, Songyoul Baek^{*}, Soontae Park^{*}

^{*}Mechanical Engineering Team, Samsung Engineering Co., Ltd.

(Received July 1, 2016; Revised September 2, 2016)

ABSTRACT : Wind-induced vibration is a phenomenon that a structure is oscillated due to wind force such as buffeting, vortex shedding wake and etc., which is one of important characteristics to be considered for design in case that stack has significant slenderness ratio or low natural frequency. International design standards of stack define several criteria for evaluating the suitability of stack design, which describe the required design considerations for each range of design parameters and provide the instruction to verify the stack design against wind-induced vibration simply. However, there is a limitation that they cannot provide quantitative information in case code requirement cannot be satisfied due to constraints of plant space or economical design. In order to overcome the limitation of code, integrated numerical analysis of computational fluid dynamics, harmonic analysis and finite element analysis were proposed to investigate wind-induced vibration for multiple stacks in actual plant. Simulated results of mutual wake interference effect between adjacent stacks were evaluated and compared to the criteria in international standards.

초 록 : 풍진동(Wind-induced vibration)은 바람에 의해 구조물에 진동이 발생하는 현상으로써 세장비가 큰 열기기 Stack 설계시 고려해야 할 중요한 사항이다. 따라서, 국제 규격에는 풍진동에 대한 설계 인자와 각 범위에 대해 필요한 고려 사항을 정의하고 있다. 규격에 의한 설계 검증은 몇몇 인자를 이용하여 간단하게 확인이 가능하다는 장점이 있는 반면, 실제 풍진동에 의한 영향을 정량적으로 평가하지 않기 때문에 실제 필요한 것보다 과도한 설계를 요구할 수 있다는 단점이 있다. 또한 여러 제약조건으로 Code 상의 요구조건을 만족하지 못하는 경우 실제 시스템의 거동을 예측할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 CFD와 FEM 등의 수치적 해석 방법을 통해 풍진동이 실제 Stack에 미치는 영향을 해석하여 설계 적정성을 검증하여 Code 상의 요구 조건과 비교하였다.

Key words : Carbon Dioxide Separation(이산화탄소 분리), Heat Exchanger Network Synthesis technique(열교환망 합성기법), Process Simulation(공정 모사), Membrane Process(분리막 공정)

- 기호설명

CFD : 전산유체역학
FEM : 유한요소해석
 S_c : Scruton 수

† Corresponding author

E-mail address: kh81.yang@samsung.com

전산 해석을 이용한 다중연들의 유체유발진동

- S_s : Strouhal 수
- S_w : 최대인장강도 (Pa)
- TMD : Tuned Mass Damper
- D : Stack 외경 (m)
- E : 탄성계수 (Pa)
- FFT : 고속 푸리에 변환
- I : 면적관성 모멘트 (m^4)
- g : 중력가속도 ($9.8 m/s^2$)
- V_c : 임계속도 (km/h)

1. 서론

풍진동 (Wind-induced vibration)은 반복지속 되는 풍하중에 의해 구조물에 진동이 발생하는 현상으로, 난류에 의한 진동 (Buffeting)과 와류진동 (Vortex shedding), 와류 (Vortex)와 건축물 진동과의 상호작용에 의한 진동, 후류 (Wake)의 진동 등이 이에 포함된다. 원통형상의 구조물에 바람이 부딪치면 후면에 공기흐름의 박리 (Separation)가 일어나면서 와류가 발생한다. 발생한 와류는 주기적으로 생성, 소멸되면서 유체 방향에 90°의 각을 이루는 주기적인 힘을 구조물에 가하게 된다. 이러한 와류진동 (Vortex shedding)에 의한 진동 주기가 구조물의 고유 주파수 (Natural frequency)와 일치하거나 근접하는 경우, 구조물은 공명으로 인한 파손 및 파단에 이를 수 있다. 따라서, 와류진동은 풍하중에 취약한 세장비가 큰, 혹은 고유진동수가 낮은 구조물의 설계에 있어 중요한 고려 인자이다.

특히, 일렬로 배치된 Stack에 대해 풍향이 동일하게 지속 되는 경우 전단 Stack에서 발생한 Vortex가 후단에 영향을 주게 되므로 Stack의 설계 Standard에서는 Stack 간의 간격에 따라 추가적인 고려를 하도록 하고 있다.^[1]

하지만 이러한 설계 기준을 고려하여 Stack 간격을 충분

히 고려 해야 한다면, 플랜트에서 허용되지 않는 과도한 공간을 할당해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 실제 Design을 위한 제한조건이 Code 상의 기준을 만족하지 못하는 경우, 이론 및 계산 모델을 통해 실제 어떤 문제가 발생하는지 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 일렬로 배치된 여러 개의 Stack 간 상호작용과 영향을 평가하기 위해 전산유체역학 (CFD)과 유한요소해석 (FEM) 해석 기법을 이용하였다.

2. 본론

2.1 대상 System

본 연구에서 고려한 해석 대상 시스템은 화공플랜트의 fired heater stack으로써 Fig. 1 과 같이 4대가 일렬로 배치되는 경우를 고려하였다.

Stack의 물성치 및 dimension은 Table 1과 같다. Stack의 내부는 단열을 위해 두께 50mm의 castable이 시공되었으며, stack 전체의 물성치는 castable과 stack casing의 구성비율을 고려하여 산정되었다. Stack의 높이는 19.16m, 외경은 1.764m로 세장비는 약 10.9이고 stack 간 거리는 거리는 10.2m로 stack 외경의 약 5.8배이다.

Table 1 Stack properties and dimension for Calculation Quantity of Stacks

Quantity of Stacks		4
Stack casing	Material	JIS SS400
	Thickness (mm)	8
	Young's Modulus (MPa)	2.1×10^5
	Density (kg/m ³)	7820
Castable	Thickness (mm)	50
	Young's Modulus (MPa)	2.16
	Density (kg/m ³)	900
Stack Height (m)		19.16
Stack Outer Diameter (m)		1.764
Slenderness Ratio of Stack		10.9
Distance between Stacks (m)		10.2

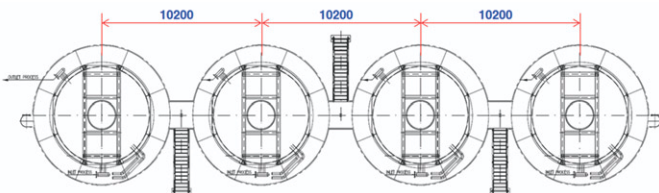


Fig. 1 Plot plan for heater stacks for analysis

2.2 설계 Code 에 의한 평가

국제 표준에서는 Stack 설계 적정성을 검증하는 기준을 포함하고 있다. API 560(2)의 Annex H 에는 대표적인 두 가지 방법인 API method 와 ISO method가 소개되어 있다. API method는 API allowable-stress method을 기반으로 하며, Stack의 Critical velocity를 정해진 범위로 제한하도록 한다. Critical velocity 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$V_c = f \cdot D_{AV} / S_c \quad (1)$$

여기서, f 는 바람에 가로지르는 방향의 진동주기로 식 (2)와 같이 구할 수 있고, D_{AV} 는 위쪽 1/3지점까지의 Stack의 평균 외경, S_c 는 Strouhal 수로 통상 0.2를 적용한다.

$$f = 0.5587 \sqrt{\frac{E \times I \times g}{W \times H^4}} \quad (2)$$

where,

E : Modulus of elasticity, Pa

I : Moment of inertia of stack cross section, m^4

W : Mass per unit height, kg/m

H : Overall stack height, m

g : Acceleration due to gravity, 9.8 m/s^2

ISO method는 EN, CICIND code(1) 와 ASME STS-1(3) 등에서도 사용하는 방법으로 Limit-state

Table 2 Calculation of critical velocity using API method

Material modulus of elasticity at design temperature, GPa	200
Moment of inertia of stack cross-section, m^4	0.111
Acceleration due to gravity, m/s^2	9.806
Mass per unit height of stack including castable, kg/m	630
Overall height of stack, m	19.16
Frequency of transverse vibration of the stack, Hz	8.682
Average stack shell diameter for its top 33% of height, mm	1.76
Strouhal number (-)	0.2
Critical wind velocity, km/h	275.0

principle을 기반으로 하며 아래와 같이 구한 Mass damping factor인 Scruton 수, S_c 를 이용하여 풍진동에 대한 설계 안정성을 평가하는 것이다.

$$S_c = \frac{2 \times m \times \delta}{\rho_{air} \times D^2} \quad (3)$$

where,

m : Average mass per unit length, kg/m

δ : Fundamental structural logarithmic damping decrement, dimensionless

W : Mass per unit height, kg/m

D : Outer Diameter, m

2.1절에서 정의된 대상 시스템에 대해 두 방법을 적용한 결과를 각각 Table 2와 3에 나타내었다. Critical velocity 가 275.0 m/s, Scruton number 15 이상으로 설계기준 상으로 별도의 조치 없이도 풍진동에 대해 안전한 설계임을 알 수 있다.

다만, CICIND에서는 Stack 이 다른 구조물과 인접하는 경우 거리가 15D 이상인 경우 전향이 없다고 보기 때문에 추가 반영해야 할 사항이 없지만, 그 이하의 경우 범위에 따라 TMD (Tuned mass damper)나 Strake 등의 추가 조치를 요구하고 있다. 본 사례의 경우 Stack 사이의 거리가 5.8D로 CICIND에 의하면 Stack에 TMD 를 설치하거나, Stack간 거리를 외경의 15배 이상으로 변경할 필요가 있다.

이러한 Standard 에 의한 설계 검증은 몇몇 인자만을 고려하여 확인이 가능하다는 장점이 있지만, 실제 시스템에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 없고, 현실적으로 적용할 수 없는 과도한 조건을 요구할 수 있다는 단점이 있다.

Table 3 Calculation of Scruton number using ISO method

Average mass per unit length of the stack, kg/m	630
Damping ratio of lined stack with bolted joints, -	0.05
Density of air, kg/m^3	1.25
Diameter of the stack, m	1.76
Scruton number, S_c (-)	16.27

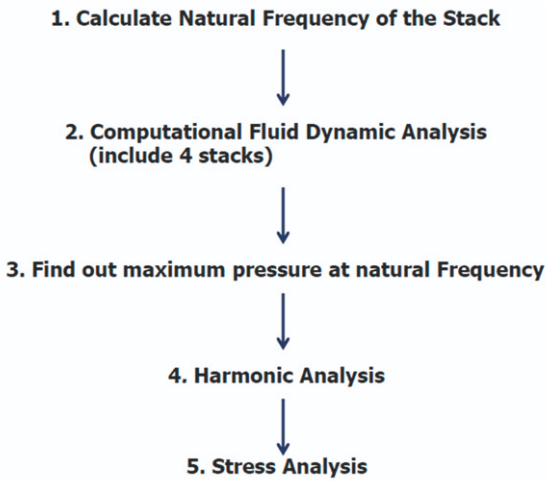


Fig. 2 Simulation procedure for wind-vibration for multiple stacks



Fig. 3 Grid for Calculation of Natural Frequency, Harmonic Analysis and Structural Calculation

2.3 수치해석 방법

Fig. 2 는 대상 시스템에 대한 풍진동에 의한 영향을 수치적으로 해석하기 위해 적용된 절차를 나타내고 있다. 단일 Stack에 대한 격자를 생성하여 물성치를 입력하여 고유진동수를 계산한다.

와류 진동 현상을 모사하기 위해 ANSYS를 이용하여 Stack과 그 주위 영역에 대한 격자를 생성하고 FLUENT를 사용하여 4기의 Stack 주위를 흐르는 공기의 흐름에 대

한 CFD 해석을 수행한다.

3차원 Transient 해석을 통해 시간에 따라 변화하는 와류 및 각 Stack에 작용하는 압력을 계산하게 된다.

CFD로 구한 압력값을 Matlab을 이용하여 FFT 수행하여 주파수분석을 수행하고 주파수 분석값 중 가장 큰 압력값을 구조에 적용하여 주파수별 응답을 구하는 Harmonic Analysis 수행한다. 공진 주파수에서의 최대 변위를 구하고 이때 Stack에 가해지는 최대 응력 값을 구하여 설계 적정성을 평가한다.

Fig. 3은 Stack의 응답 특성 (frequency response)과 구조계산을 위해 사용된 Stack의 격자계를 나타내고 있다. 하나의 stack을 계산 영역으로 고려하여 49,808개의 Element로 구성하였으며, Stiffener를 고려하였다.

Fig. 4는 Stack 주위의 유동 해석을 위해 생성한 3차원 격자계를 보여주고 있다. 계산 영역은 Heater 상부의 Stack과 그 주위로만 한정하여 57.96×12.36×24.13m (L×W×H)의 영역을 고려하였고, 총 434,376개의 Node 및 412,177개의 element로 격자를 구성하였다. 유체의 점성 효과를 고려하기 위해 Stack 주위에 격자를 밀집시켜 구성하였다.

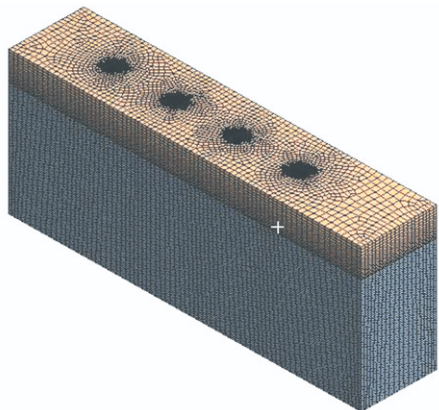


Fig. 4 Grid for CFD Simulation

2.4 해석 결과

Fig. 3의 격자계와 물성치를 이용한 해석을 통해 Stack

Table 3 Input for CFD analysis

Wind Speed at Inlet (m/s)	27.5
Temperature (K)	300
Pressure (kPa)	101.325
Density (kg/m ³)	1.225
Viscosity (kg/m · s)	1.7894 × 10 ⁻⁵
Reynolds Number	3.32 × 10 ⁶
Time range (sec)	0-10
Time interval (sec)	0.01

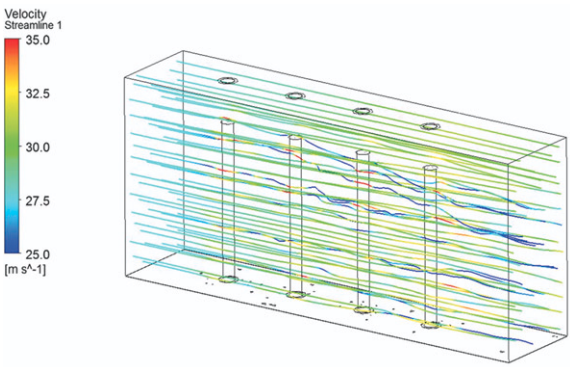
의 고유진동수를 3.96 Hz로 구할 수 있었다.

유동해석을 위한 경계조건은 가장 가혹한 상황을 고려하

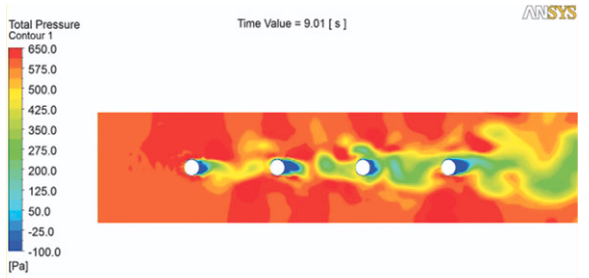
기 위해 Stack열과 동일한 방향으로 수평 성분의 바람만 부는 것으로 가정하였으며, 각 Stack면과 아래쪽 면에 대해서는 Wall 조건을 적용하였으며, Outlet 에서는 압력을 대기압으로 일정하게 주고, 나머지 면에 대해서는 대칭 조건을 가정하였다.

그 외 공기의 물성치 및 계산 입력조건을 Table 2에 나타내었다. Transient 계산시 시간 간격은 0.01초이며, 총 10초 (1000 time step) 의 시간 범위에 대해 계산을 수행하였으며, 난류 해석을 위해 Detached Eddy simulation (DES)모형을 적용하였다. 입구에서의 속도 27.5m/s, 대기압 101.325kPa, 공기온도는 300 K 이며 공기의 물성치는 일정한 값을 입력하였다.

Fig. 5에서는 t=9.01초인 시점에 공기의 유선흐름과

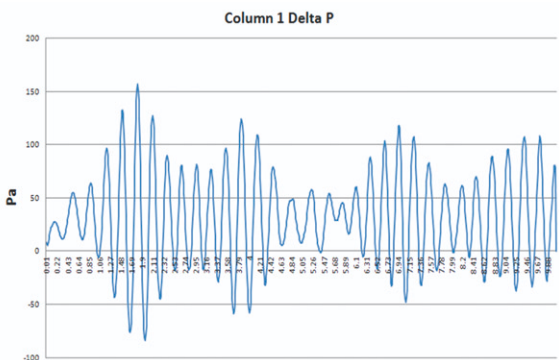


(a) Velocity streamline

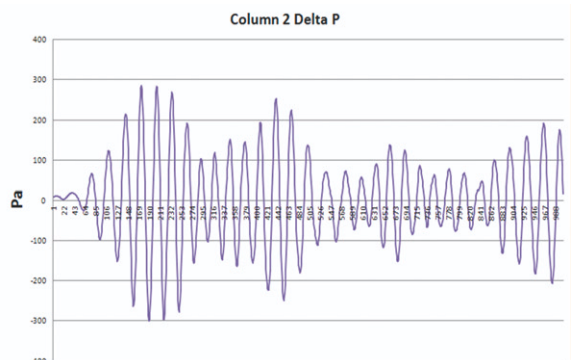


(b) Total pressure distribution at h=10m

Fig. 5 Wind velocity and air pressure distribution at t=9.01 sec

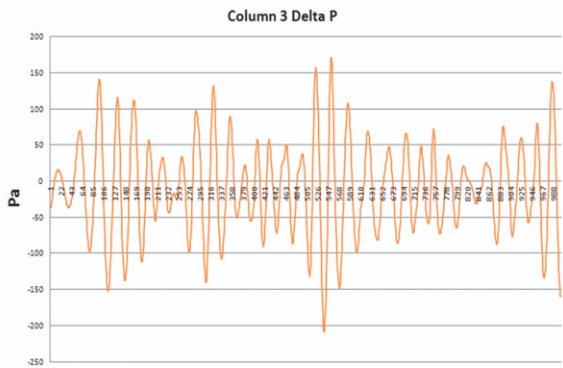


(c) Stack 1

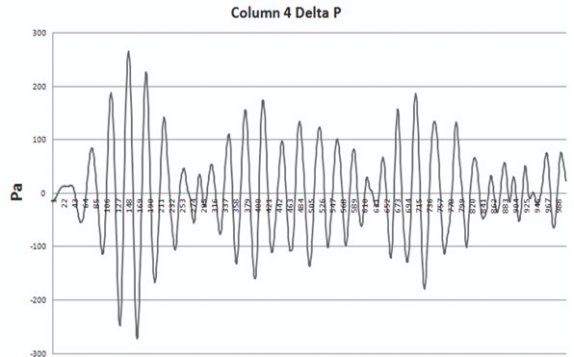


(a) Stack 2

전산 해석을 이용한 다중연들의 유체유발진동

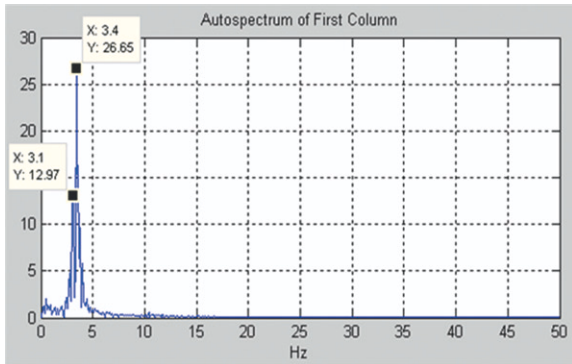


(c) Stack 3

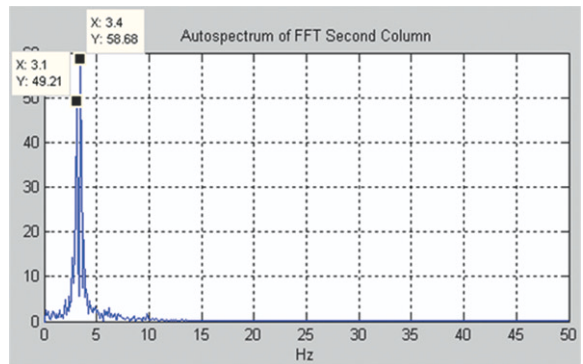


(a) Stack 4

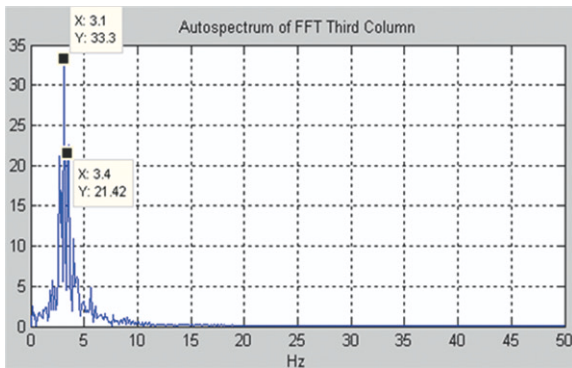
Fig 6. Comparison of Pressure Value for Stack 1 to 4



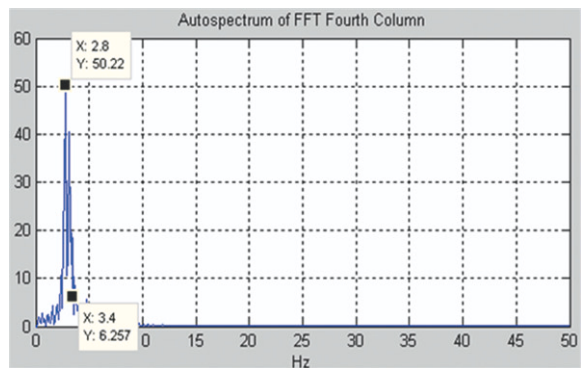
(c) Stack 1



(a) Stack 2



(c) Stack 3



(a) Stack 4

Fig. 7 FFT Analysis Result of Pressure Value of Stacks

Stack 높이가 10m인 지점의 압력분포를 나타내었다. Stack 후단에서의 압력이 낮은 것을 볼 수 있는데 이것은 Stack 전단에서 유동의 박리에 의해 후단의 압력이 낮아 지고 이에 따라 와류가 발생하여 나타나는 현상으로 해석 할 수 있다. 또한 전단에서의 압력이 후단의 stack에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Stack에 가해지는 압력의 정량적인 분석을 위해 유동과 수직방향의 Stack면에서의 압력을 Fig. 6에서와 같이 시간 별로 구하였고, 이에 대한 FFT analysis 를 수행하여 각 주파수별 압력 변화를 도시한 결과를 Fig. 7에 표현하였다.

1, 2번째 Stack 은 3.4 Hz에서 3, 4번째 Stack은 각각 3.1, 2.8 Hz에서 최대값을 가지는 것을 알 수 있고, 최대값의 크기는 2, 3 4번째 Stack이 1번째 Stack 보다 큰 것을 관찰할 수 있고, 특히 2번째 Stack의 경우는 1번째 Stack 의 2.2 배의 값을 가진다. 이것은, 전단 Stack 에서의 와류 생성으로 인해 풍압이 증가하는 현상으로, 설계 Standard 에서 Stack간 간격이 15D이하인 경우 Wind Load 증가분을 고려하기 위해 1이상의 Factor를 고려하는 것과 동일한 결과임을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 FFT 해석에서 구한 최대 압력값을 이용하여 Stack의 응답 특성 (Frequency response) 을 계산한 결과로써 최대 변위가 Stack의 고유 진동수인 3.96 Hz 근처에서 발생하며 이 때 Stack top 에서의 변위는 4.45mm 가 된다.

Stack top에서의 변위가 4.45mm일 때 Stack에 걸리는 최대응력은 Fig. 9에서와 같이 6.29MPa가 나오게 되며, 이는 최대인장강도 400 Mpa 의 약 1.5 %로 SS400의 S-

N curve 에서의 Fatigue limit ($0.4 \times S_u$)인 160MPa보다 훨씬 작은 값이다. 따라서 별도의 피로해석 (Fatigue Analysis) 은 필요 없으며 풍진동에 의한 영향이 미미한 것을 알 수 있다.

3. 결론

일렬로 설치되는 혹은 가까운 주변에 높은 구조물/기기가 위치하는 Heater stack의 풍진동 설계 적정성을 평가하기 위해, API 및 CICIND 기준을 적용하는 것이 일반적이나, 이번 연구에서는 수치 해석을 (CFD, FEM)을 수행하고 정량적 수치를 산출한 후, 다음 결과를 도출하였다.

- API STD 560의 설계 조건은 유효하며, 이 기준을 적용함으로써 Stack 의 풍진동 안정성을 우선적으로 확보할 수 있다.

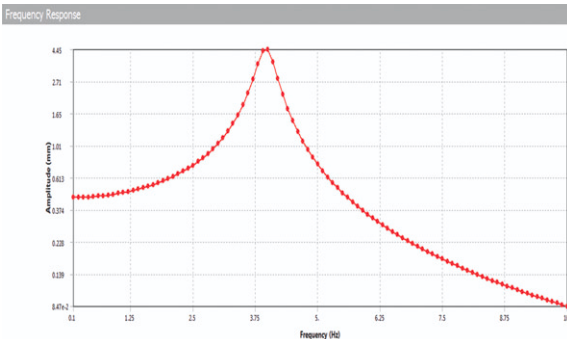


Fig. 8 Frequency Response at End of Stack

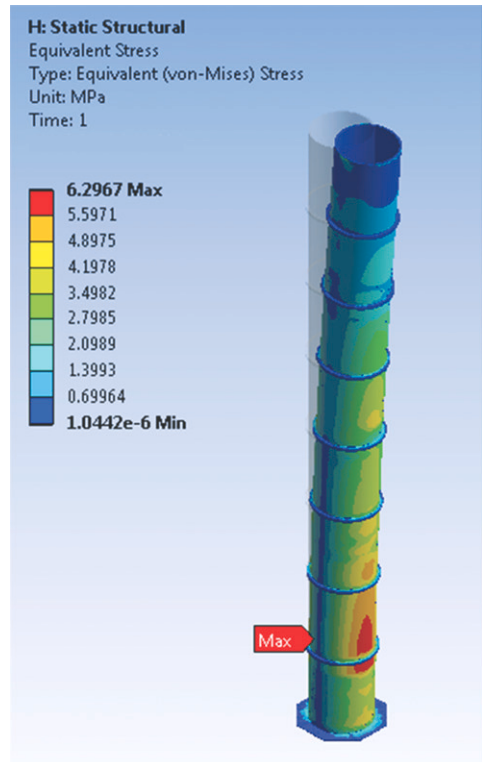


Fig 9. Result of Stress Analysis

전산 해석을 이용한 다중연들의 유체유발진동

- Stack 이 근거리 일렬로 배치되거나 와류 영향을 주는 고층 구조물이 근거리 위치하는 경우, 전단의 Stack이나 구조물에 의해 발생된 와류가 후단의 Stack 진동에 영향을 미치게 된다. 이를 해소하기 위해서는 구조물간 거리를 15D 이상으로 넓히거나 TMD 등을 설치해야 하나, 이는 경제적, 공간적 사유로 인해 제한될 수 있다.
- 본 연구를 통해, 전단 구조물의 와류에 의해 후단 Stack에 진동을 일으키는 주기적 외력이 발생함은 확인했으나, 그 힘을 정량적으로 산출한 결과, Stack에 미치는 영향이 매우 적음을 알 수 있었다.
- Code 기준으로 와류에 의한 진동 발생이 예측되지만,

경제적, 공간적인 제한을 해결할 수 없는 경우, 본 연구와 같은 수치해석을 통해 실제 영향을 정량적으로 해석 함으로서, 구조물의 설계 적정성을 판단 및 입증하는 근거로 활용할 수 있다.

참고문헌

1. CICIND, 2002, CICIND Model Code for Steel Chimneys, Amendment A.
2. API, 2016, Fired Heaters for General Service, API 560 STD, 5th edition.
3. ASME, 2011, Steel Stacks, ASME STS-1 