2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준형원전 안내구조물지지계통의 불규칙 난류하중에 대한 구조해석

Structural Analysis of the KSNP Guide Structure Support System for Random Turbulence Loading

정승하, 박건우, 이대희, 최택상
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국표준형원전의 원자로내부구조물 중 하나인 안내구조물지지계통은 평판, 원통, 플랜지 및 지지보 등으로 구성된 복잡한 구조물이며, 정상운전 동안 원자로 냉각재 유동으로 인한 불규칙 난류하중을 받게 된다. 본 논문에서는 이러한 불규칙 난류하중에 대한 안내구조물지지계통의 구조 응답을 얻기 위한 구조해석을 수행하였다. 안내구조물지지계통의 적절한 유한요소 모델을 작성한 다음, 불규칙 난류하중을 정의하는 파워스펙트럼밀도 및 공간적 상관관계를 모델에 적용하여 구조물의 반력, 변위 그리고 응력 등 응답을 평가하였다. 모든 응답 결과에서 Fully Correlated 조건이 Partially Correlated 조건보다 높은 값을 가져 불규칙 난류하중에 대한 안내구조물지지계통의 설계하중으로 Fully Correlated 응답 결과가 보수적으로 적당하다는 것을 확인하였다.

Abstract

The Guide Support Structure System (GSSS) which is one of the KSNP reactor internals consists of top plate, cylinder, flange and grids. This structure is excited by a random turbulence loading due to reactor coolant flow under the normal operating condition. In this paper, the structural analysis of the GSSS has been carried for random turbulence excitation. First, an appropriate finite element model was developed and the power spectrum density and the spatial correlation, which are defining the random turbulence loading, were applied on the model. Finally, the responses of reaction loads, displacements and stresses were evaluated. Because the response results of the fully correlated condition have higher value than those of the partially correlated condition, the response results of the fully correlated condition can be applied conservatively as a design load of the GSSS for the random turbulence loading.

1. 서 론

한국표준형원전의 원자로내부구조물은 크게 노심의 상향 거동을 방지하고 제어봉집합체(Control Element Assembly, 이하 CEA)의 운동을 안내하는 상부안내구조물(Upper Guide Structure), 노심을 감싸고 있는 노심지지배럴(Core Support Barrel) 및 노심을 하단에서 지지하는 하부지지구조물(Lower Support Structure)로 구분된다. 안내구조물지지계통(Guide Structure Support System, 이하 GSSS)은 그림 1 에서 보는 것처럼 상부안내구조물의 최상단에 위치하며, 원자로용기 상부덮개를 씌울 때 CEA Extension Shaft 가 상부덮개 내부의 나팔형 노즐 안으로 들어가도록 안내하는 역할을 하며, 상부안내구조물을 인양하기 위하여 인양장치를 체결하려고 할 때 CEA Extension Shaft 를 정열하는 역할을 한다. 또한, 상부안내구조물이 인양되어 저장대에 안착되어 있을 때는 CEA 가 흔들리지 않도록 지지한다. 발전소 운전동안 GSSS 가 받는 동하중은 펌프맥동하중, 불규칙 난류하중, 지진하중 및 배관파단하중이며 이중 불규칙 난류하중이 가장 크게 작용한다. 본 논문에서는 이 불규칙 난류하중에 대한 GSSS 의 응답을 평가하였다. 구조물의 유한요소 모델을 작성한 다음, 이 모델에 불규칙 난류하중을 정의하는 파워스펙트럼밀도(Power Spectral Density, 이하 PSD)와 공간적 상관관계(Spatial Correlation)를 적용하여 동적 구조해석을 수행하였다.

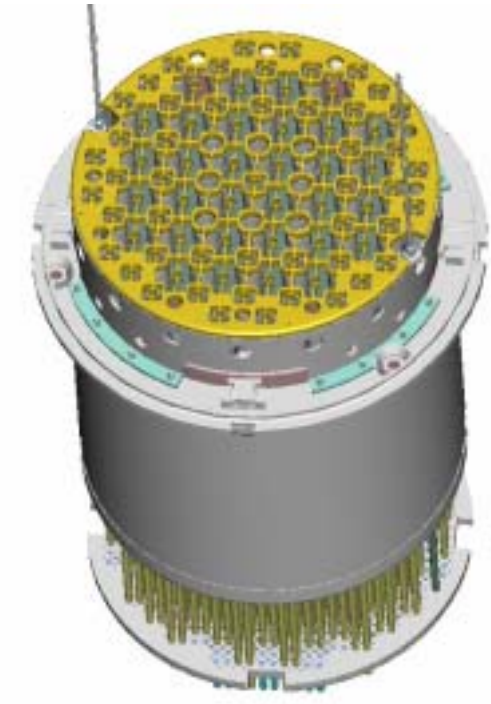


그림 1. 상부안내구조물 집합체

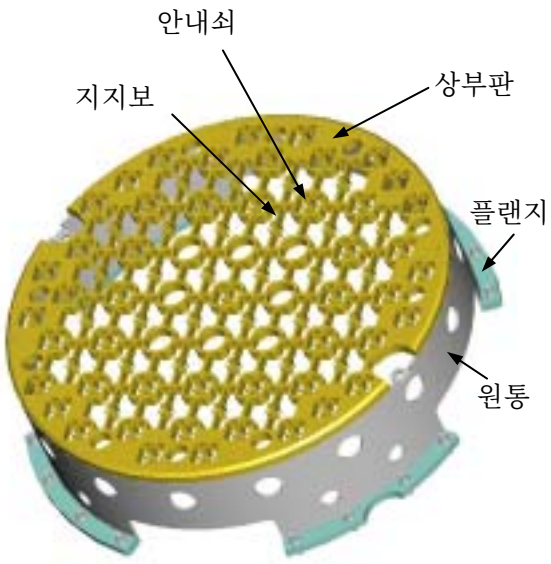


그림 2. 안내구조물지지계통

2. GSSS 구조 및 유한요소모델

GSSS 는 그림 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 크게 상부판(Top Plate), 원통(Cylinder) 및 플랜지

(Flange)로 구성되어 있다. 상부판에는 CEA 를 안내하기 위하여 지지보(Grid)와 안내쇠(Guide Tip)를 포함하여 복잡하지만 규칙적인 구조로 되어있으며, 원통에는 원자로 냉각수의 횡방향 유동을 허용하기 위하여 다수의 구멍이 있다. 플랜지는 4 개로 나뉘어 원통하단에 용접되어 있으며 각각 4 개의 볼트로 상부안내구조물 상부플랜지에 체결된다.

GSSS 의 해석을 위하여 그림 3 과 같은 1/2 대칭모델을 개발하였다. 그림 3 에서 보는 것처럼 형상이 복잡한 상부판은 단순화하여 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 코드의 쉘요소와 보요소를 이용하여 모델링하였고, 안내쇠는 무게를 계산하여 관련 절점에 집중질량요소로 구현하였다. 전체 모델에서 쉘요소는 184 개, 보요소는 58 개, 그리고 집중질량요소는 22 개이다.

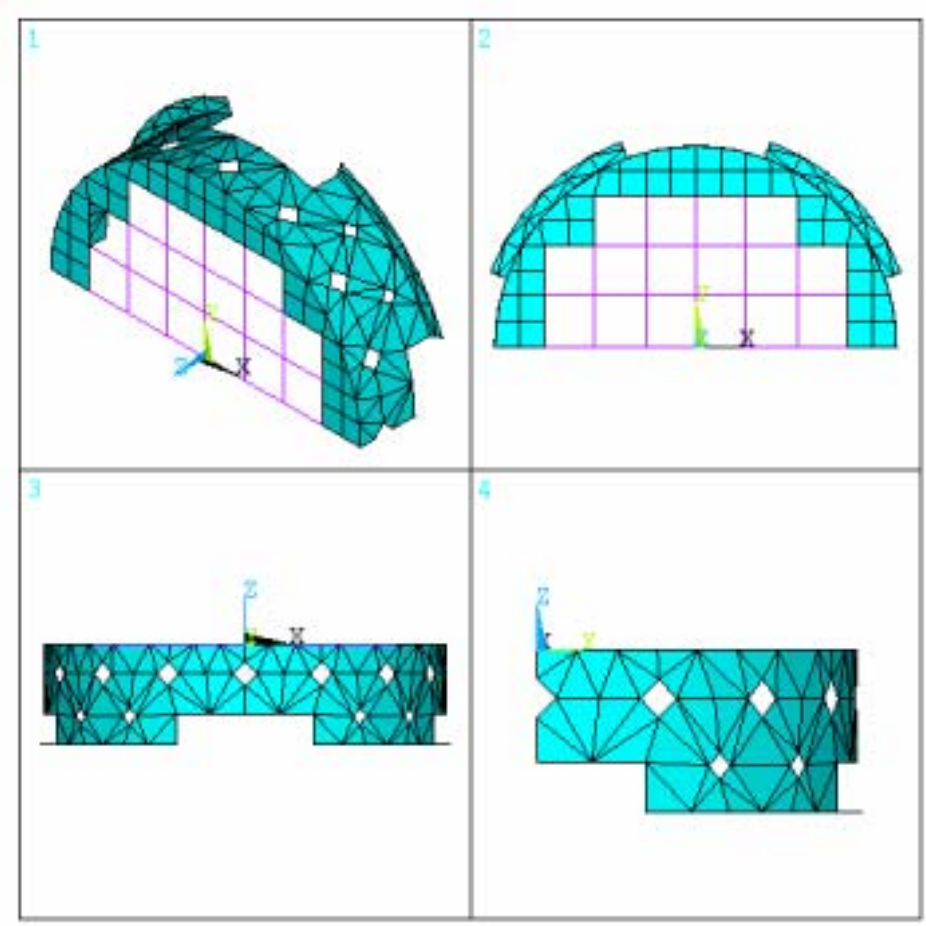


그림 3. GSSS 유한요소 모델

재료의 물성치는 343°C 에서 Type 304 스테인레스강의 물성치를 사용하여, 탄성계수는 17.3×10^{4} MPa, 포아송비는 0.3, 그리고 밀도는 8.0×10^{-3} g/mm^3 를 적용하였다. 그리고 GSSS 는 수중에서 거동하므로 동수력학적 부가 질량을 고려하였다. 유한요소모델에 대한 경계조건은 GSSS 플랜지가 16 개의 볼트로 상부안내구조물 상부플랜지와 체결되어 있으므로 1/2 대칭 유한요소모델에서는 8 곳에 X, Y, 및 Z 방향을 구속하였다. 아울러, 대칭면에서 대칭경계조건이 적용되었다.

3. 불규칙 난류하중 입력

하중의 불규칙성으로 인하여 불규칙 난류하중은 하중의 확률론적 크기를 PSD 로 정의한다. 본 논문에서는 영광 4 호기에서 수행했던 포괄적진동시험(Comprehensive Vibration Assessment Program) 및 원자로내부구조물 모형 시험 등으로 측정하여 생산한 그림 4 와 같은 압력 PSD 를 적용하였다.

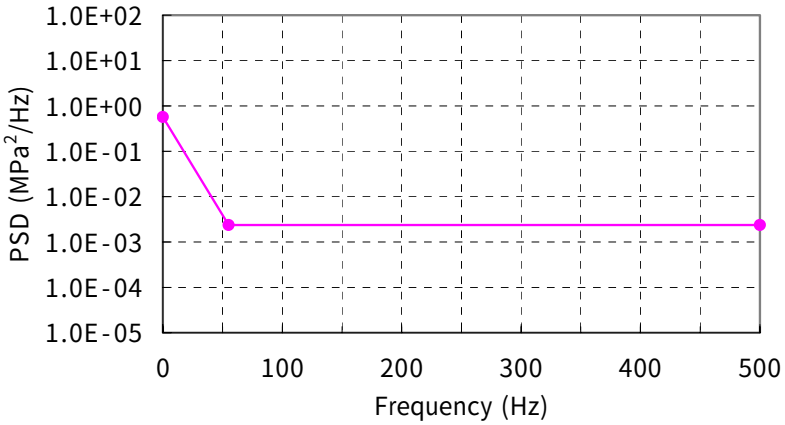


그림 4. GSSS 의 불규칙 난류에 대한 압력 PSD

실제 유한요소 모델에는 이 압력 PSD 를 각 절점에 해당되는 면적을 곱한 힘(Force) PSD 로 변환하여 적용하였다. 즉, 각 절점의 좌표축 X, Y 및 Z 에 투영되는 면적을 아래의 식들로 구하여 각 좌표축 방향으로 해석을 수행하였다.

$$A_X = \frac{W_n}{\rho_{cyl} \bullet t_{cyl}} \left|\cos\theta\right| \tag{1}$$

$$A_Y = \frac{W_n}{\rho_{cyl} \bullet t_{cyl}} \left|\sin\theta\right| \tag{2}$$

$$A_Z = \frac{W_n}{\rho_{pl} \bullet t_{pl}} \tag{3}$$

여기서, A_X, A_Y, A_Z 는 각 절점의 좌표축 X, Y 및 Z 에 대한 투영 면적,

W_n 은 해당 절점의 무게,

ρ_{cyl}, t_{cyl} 은 원통의 밀도 및 두께, ρ_{pl}, t_{pl} 은 상부판의 밀도 및 두께,

$$\cos\theta = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}, \quad \sin\theta = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad (0 \le \theta \le \pi),$$

x, y 는 해당 절점의 X 축과 Y 축 좌표.

아울러, 불규칙 난류하중에 대한 구조물의 공간적 상관관계는 원통과 상부판에 대하여 식 (4)와 (5) 같은 Coherence 면적으로 각각 정의한다. 원통에 대한 Coherence 면적은 다음과 같이 원주방향으로 정의한다. 즉,

$$A_c = L_z \, L_\theta \tag{4}$$

여기서, L_z = 수직 Coherence 길이
= 안내지지구조물계통의 외경과 원자로용기 내경의 최대 반경방향 간극
L_θ = 원주방향 Coherence 길이
= 0.25 × GSSS 원통의 원주

상부판에 대한 Coherence 면적은 다음과 같이 정사각형 형상으로 정의한다. 즉,

$$A_c = L_x \, L_y \tag{5}$$

여기서, L_x = X 축 방향의 Coherence 길이,

L_y = Y 축 방향의 Coherence 길이로 $L_x = L_y$

4. 구조해석 및 결과

4.1 PSD 의 적용

구조해석 범용프로그램인 ANSYS 의 동적 해석법 중의 하나인 PSD 스펙트럼 해석법을 적용하여 구조해석을 수행하였다. 우선 GSSS 의 모드해석을 수행한 후 모드참여계수와 유효질량 등을 참고하여 주파수 39 Hz 에서 288 Hz 에 해당하는 30 개의 고유진동 모드를 PSD 스펙트럼 해석에 고려하였다. 그리고 주파수에 따른 불규칙 난류하중의 압력 PSD 곡선을 입력하고, X, Y 및 Z 축 방향으로 절점의 투영 면적을 입력하여 각 절점별로 힘 PSD 가 가진(Excitation)되도록 하였다.

4.2 Coherence 면적의 적용

우선 Coherence 면적을 고려하지 않은 각 절점의 PSD 하중이 전부 Correlated 상태가 된 조건에서 해석(이하 Fully Correlated 해석)을 수행하였다. 그리고 GSSS 의 원통과 상부판에 대하여 각각 정의된 Coherence 면적을 적용하여 각 절점의 PSD 하중에 대한 공간상의 부분적인 상관 관계를 고려한 해석(이하 Partially Correlated 해석)을 수행하여 그 결과를 비교하였다.

ANSYS 코드에서는 공간적 상관관계 (Spatial Correlation) 를 그림 5 와 같이 가진 절점들 간의 거리와 *RMIN* 과 *RMAX* 값에 따라 가진 절점들간의 상관관계가 Uncorrelated, Partially Correlated 혹은

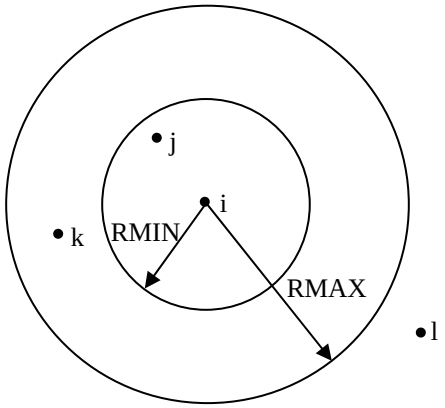
Fully Correlated 가 될 수 있도록 가진 PSD 를 만들 수 있으며, 두 가진점 1 과 2 에 대하여 PSD 는 식 (6)으로 정의된다[1]:

$$[S(\omega)] = S_o(\omega)\begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} \\ \alpha_{12} & 1 \end{bmatrix} \qquad (6)$$

여기서 $$\alpha_{12} = \begin{cases} \dfrac{RMAX - D_{12}}{RMAX - RMIN} & \text{if RMIN} < D_{12} < \text{RMAX} \\ 1 & \text{if } D_{12} \le \text{RMIN} \\ 0 & \text{if } D_{12} \ge \text{RMAX,} \end{cases}$$

D_{12} = 두 가진점 1 과 2 사이의 거리,

$S_o(\omega)$ = 입력 PSD.



Node i excitation is fully correlated with node j excitation.

Node i excitation is partially correlated with node k excitation.

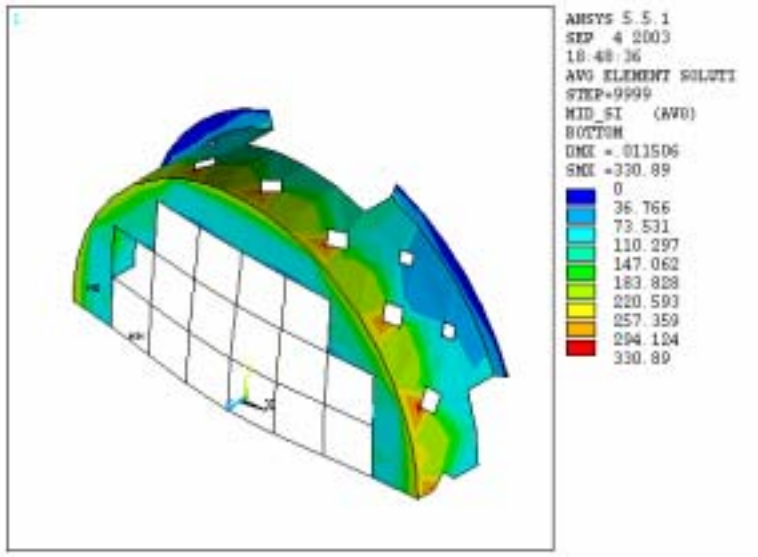
Node i excitation is uncorrelated to node l excitation.

그림 5. PSD 가진점의 공간적 상관관계 정의

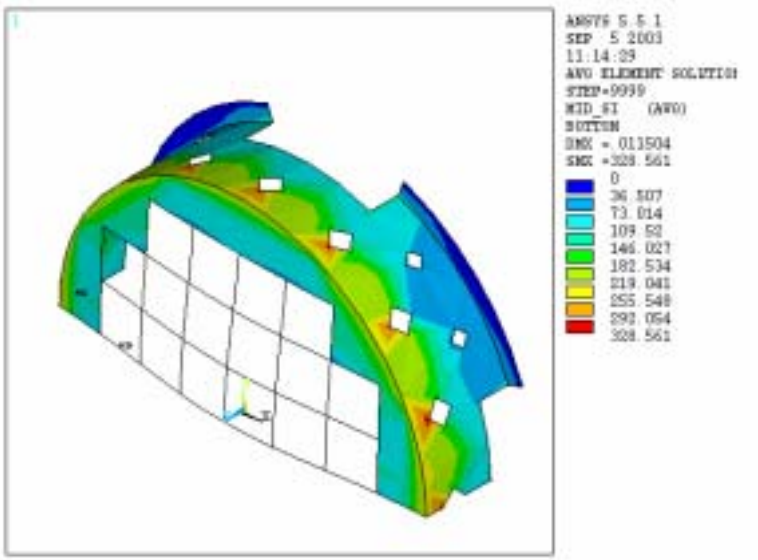
각 좌표축으로 동일한 Coherence 길이를 가진 상부판의 절점들에 대해서는 RMIN = RMAX = 각 축방향의 Coherence 길이를 적용하여 가진 PSD 의 공간적 상관관계를 정의하였다. 그러나, 원주방향과 수직방향으로 서로 다른 Coherence 길이를 가진 원통의 절점들에 대해서는 위와 같은 방법으로 가진 PSD 의 공간적 상관관계를 정의할 수 없다. 따라서 수직방향 Coherence 길이와 원통의 높이를 비교하여 원통의 높이를 3 등분하고, 원주방향으로 원주길이의 0.25 배인 Coherence 길이를 적용하여 1/2 대칭모델의 원주 길이를 절반으로 나누어 전체 원통면적을 6 개로 분할하였다. 그리고, 각각의 분할면적에 해당되는 절점들에 가진 PSD 를 적용하였으며, 이 경우 각 분할 면적 내에 위치한 절점들은 Fully Correlated 상태이고 서로 다른 분할 면적 내에 위치한 절점들은 Uncorrelated 상태가 된다. 세 좌표축의 결과는 SRSS 법으로 최종 조합하였다.

4.3 불규칙 난류하중 해석 결과

ANSYS 코드를 이용한 불규칙 난류하중에 대한 최종 해석 결과는 확률 분포 1σ 의 응답을 얻게 된다[1]. 그 대표적인 결과로 GSSS 구조물의 응력 선도(Stress Contour)를 그림 6 에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Fully Correlated 해석 경우가 응력값이 높았으나, 전반적인 분포는 유사하였다.



a) Fully Correlated 해석



b) Partially Correlated 해석

그림 6. GSSS 1σ 응력 분포 선도

ANSYS 코드의 1σ 응답 결과를 99.7%의 확률분포를 고려하기 위하여 이 값에 3 배를 곱한 3σ 결과 값을 평가에 사용하였다[2]. 그 중에서 대표적인 결과로 볼트와 상부안내구조물 플랜지의 최대 하중 및 원통과 상부판의 최대 응력을 표 1 에 정리하였다. 여기서 볼트와 상부안내구조물 플랜지의 최대 하중은 하중의 각 성분별 최대값을 정리한 값이며, 원통과 상부판의 최대 응력은 최대 응력강도(Stress Intensity)가 발생한 요소의 응력 성분을 정리한 값이다. 모든 응답 결과에서 Fully Correlated 해석 경우가 높은 값을 보였으며, 볼트 반력과 상부안내구조물 플랜지 하중의 최대 값은 공간적 상관관계의 고려 여부에 따라 최대 30%에서 최소 13%의 차이를 보였다. 상대적으로 응력은 최대 4%의 작은 차이를 보였다.

표 1. GSSS 불규칙 난류하중 응답 결과

a) 볼트 최대 하중

Case \ 하중	Shear (N)	Tension (N)	Moment (N-m)
Fully Correlated 해석	4,679	4,359	363
Partially Correlated 해석	3,274	3,759	312

b) 상부안내구조물 플랜지 최대 하중

Case \ 하중	Horizontal (N)	Vertical (N)	Moment (N-m)
Fully Correlated 해석	56,374	64,558	35,155
Partially Correlated 해석	39,489	55,916	24,626

c-1) 원통 쉘요소의 최대응력

Case \ 응력	Surface	Sx (kPa)	Sy (kPa)	Sxy (kPa)
Fully Correlated 해석	Top	2,179	7,253	441
	Bottom	2,089	7,771	1,241
Partially Correlated 해석	Top	2,158	7,205	420
	Bottom	2,000	7,743	1,234

c-2) 상부판 보요소의 최대 응력

Case \ 응력	Axial (kPa)	Shear (kPa)	Bending (kPa)
Fully Correlated 해석	607	586	13,135
Partially Correlated 해석	517	586	13,121

그리고, 불규칙 난류하중으로 인한 상부판의 수평방향 최대 변위는 Fully Correlated 해석 경우에 0.0126 mm 이고, Partially Correlated 해석 경우에 0.0086 mm 이다.

볼트에 대한 인장력(Tension)과 모멘트(Moment)를 각 볼트 별로 구하여 위치에 따른 응답하중의

변화를 그림 7 에 나타내었다. 그림 6 과 표 1 의 경향과 동일하게 Fully Correlated 해석 경우가 하중값이 높았으나, 분포 경향은 동일하였다.

GSSS 원통과 상부판에 대한 응력 결과를 비교하여 보면 원통은 공간적 상관관계의 고려 여부에 따라 어느 정도 차이를 보였으나, 상부판은 차이가 거의 없었다. 이것은 상부판에 대한 Coherence 길이가 415.5 mm 로 상부판에 속한 거의 모든 절점들의 거리가 이보다 작아 Fully Correlated 상태가 되었기 때문으로 판단된다.

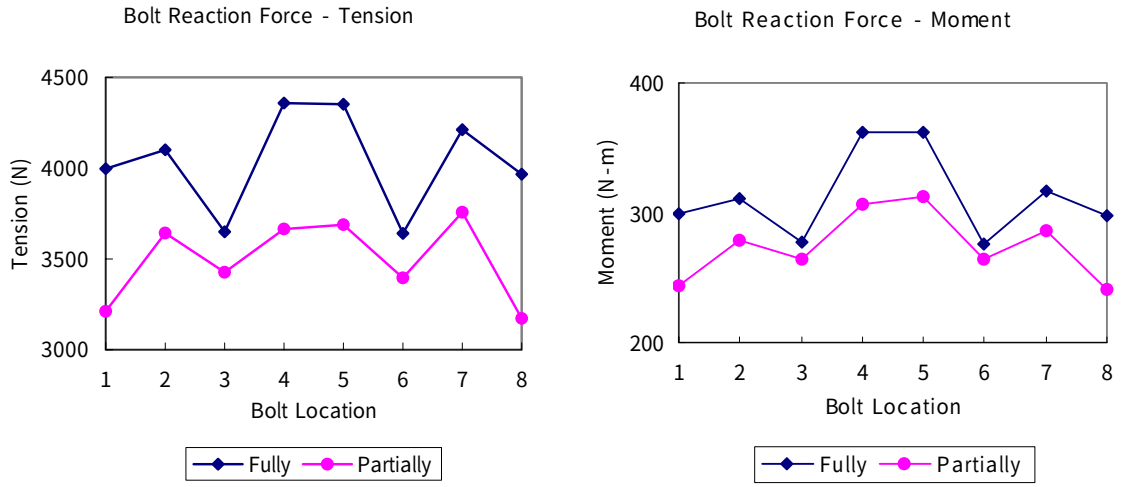


그림 7. 볼트 하중의 분포 비교

5. 결론

이 논문에서는 GSSS 의 원자로 냉각재 유동으로 인한 불규칙 난류하중에 대한 구조해석을 수행하여 그 응답을 평가하였다. 불규칙 난류하중의 확률론적 분포를 정의하는 PSD 곡선을 이용하여 PSD 스펙트럼 해석을 수행하였으며, 공간적 상관관계의 고려 유무에 따른 응답값의 변화를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모든 응답 결과에서 Fully Correlated 해석 경우가 높은 값을 보였으며, 응답 하중은 공간적 상관관계의 고려 여부에 따라 어느 정도 차이를 보였으나 상대적으로 응력은 작은 차이를 보였다. 그리고, 구조물 전체에 대한 응답 결과의 분포는 동일한 경향을 보였다. 따라서, Fully Correlated 해석의 응답 결과를 불규칙 난류하중에 대한 GSSS 의 설계하중으로 보수적으로 적용할 수 있을 것이다.
2) 공간적 상관관계의 고려 여부에 따라 GSSS 원통의 응력 결과는 어느 정도 차이를 가지나, 상부판은 일부 절점을 제외하고는 모든 절점들 간의 거리가 Coherence 길이보다 작아 Fully Correlated 상태에 가깝게 되어 응력 결과의 차이가 거의 없었다.

6. 참고문헌

(1) ANSYS User's Manual, ANSYS, Inc., Release 5.6, 1999.

(2) W. T. Thomson, Theory of Vibration with Applications, 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc., 1981.