

발전소 배관계의 내진해석

Seismic Analysis of Power Plant Piping System

김정현* · 이영신† · 김연환**

Jeong Hyun Kim, Young Shin Lee and Yeon Whan Kim

Key Words : seismic analysis (내진해석), power plant piping system (발전소 배관계), floor response spectrum (층응답스펙트럼), operating basis earthquake (운전기준지진), safe shutdown earthquake (안전정지지진)

ABSTRACT

In this study, the seismic analysis of power plant piping system was performed using finite element model. This study was performed by ANSYS 12.1. For qualification of power plant piping system, the response spectrum analysis was performed using the given operating basis earthquake(OBE) and safe shutdown earthquake(SSE) floor response spectrum. The maximum stresses of power plant piping system were 166 MPa under OBE condition and 281 MPa under SSE condition. Thus, it can shown that the structural integrity of power plant piping system has a stable structure for seismic load conditions.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 지진이 발생하고 있으며 그 피해가 점점 커지고 있다. 일반적으로 지진은 지각 변동에 의하여 지반이 흔들리는 현상을 말한다. 지진이 발생하게 되면 설치되어 있는 구조물이 영향을 받게 된다. 이 때 구조물 자체에 손상이 발생되거나 붕괴될 수 있다. 이 때문에 원자력 발전소를 포함한 중요산업 시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심 대상이 되고 있다. 원자력 발전소를 포함한 모든 발

전소는 배관으로 이루어져 있으며 이것이 문제가 되었을 경우 위험한 상황이 발생할 수 있으므로^(1,2) 발전소 내에서 작동되는 구조물들은 엄격한 내진 설계를 요구하고 있고 활발한 연구가 진행중이다.^(3,4)

본 연구에서는 발전소에서 사용되고 있는 배관계의 유한요소해석을 통한 내진 안전성을 검증하고자 한다. 발전소와 같은 산업현장에서 사용되는 배관시스템은 다양한 운행조건에서도 안전성을 확보 할 수 있어야 한다. 대형 배관계는 발전소의 펌프, 보일러, 터빈 등 주요기기를 연결하고 고온 고압의 증기, 유체를 이송하게 된다. 해석 대상이 되는 발전소 배관계는 펌프와 노즐이 위치하고 있으며 재열기 온도 조절 급수 배관중의 일부이다. 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 12.1을 사용하여 유한요소 모델링을 하였으며, 지진에 대한 하중은 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum; FRS)를 사용하였다.

† 교신저자; 정회원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : leeys@cnu.ac.kr

Tel : 042-821-6644 , Fax : 042-821-8906

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원

** 한국전력공사 전력연구원

2 배관계의 내진해석

2.1 해석모델

상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 12.1을 사용하여 해석에 필요한 모델링을 수행하였다. 해석모델은 Fig. 1 과 같으며 유한요소의 특성 및 하중의 작용조건에 따라 단순화를 수행하였다. pipe structure, valve, flange에는 shell63 요소를 사용하였다. shell63 요소는 x, y, z 방향으로의 병진운동과 x, y, z 축에 대한 회전운동 및 6개의 자유도를 가지고 있다. 모델을 지지하고 있는 support 장치는 Combin 14 요소를 통해 Stiffness 와 Damping 효과를 나타내었다. Combin 14 요소는 스프링-댐퍼 요소이며 굽힘과 비틀림은 고려되지 않았다.

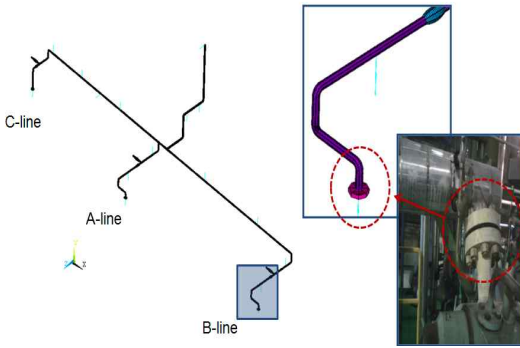


Fig. 1 Model of Power Plant Piping System

2.2 허용응력

본 논문에서 사용된 배관은 carbon steel로 제작되었다. carbon steel의 종류는 여러 가지가 있지만 본 해석에 사용된 것은 탄성계수가 190 GPa 이고 프아송 비는 0.33 이다. 또한 밀도는 7900 kg/m^3 이며 항복응력은 60,000 psi (413 MPa) 이다. 일반적으로 지진하중을 받는 구조물의 부재 응력검토에 적용되는 허용응력은 설계지진 준위에 따라 다르다. AISC 에서 규정한 강 구조물의 허용응력 설계에서 구조물의 자중만을 고려하였을 때, 항복응력의 60% 를 허용응력이라고 규정한다. 발전소 배관의 허용응

력은 247.8 MPa 이며, 자중과 운전기준지진(OBE)가 고려되었을 경우, 자중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.3 배인 322.1 MPa 이다. 자중과 안전정지지진(SSE)가 고려되었을 때 자중이 작용하는 경우의 허용응력에 1.6 배를 고려하며, 이 때 허용응력은 396.5 MPa 이지만 항복응력의 95 %를 초과할 수 없기 때문에 허용응력은 392.4 MPa 이다.

2.3 경계조건

발전소에 설치되어 있는 배관계는 여러 지지 장치들로 지지가 되어 있다. 본 해석에 사용된 배관도 Fig. 2 와 같이 여러 지지 장치에 구속이 되어 있다. Table 1 은 각 지지 장치에 대한 스프링상수 값을 나타낸 것이다.

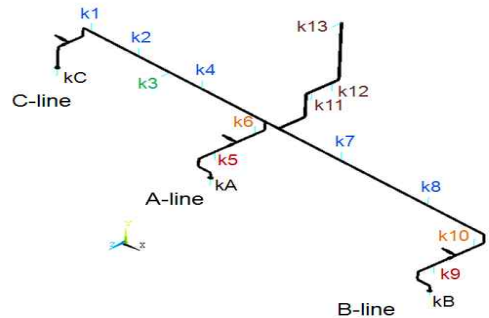


Fig. 2 Boundary conditions of Piping System

Table 1 Spring constant of each supports

NO.	Value	NO.	Value
k1	7 MN/m	k9	10 MN/m
k2	7 MN/m	k10	0.1 MN/m
k3	0.1 MN/m	k11	0.1 MN/m
k4	7 MN/m	k12	0.1 MN/m
k5	0.1 MN/m	k13	0.1 MN/m
k6	0.1 MN/m	kA	0.1 MN/m
k7	7 MN/m	kB	1 kN/m
k8	7 MN/m	kC	0.1 MN/m

24 하중 조건

하중조건은 자중 및 지진하중으로 구분하여 적용하였다. 각 하중 조건은 ASME SEC III Subsection NF⁽⁵⁾와 ASME Section III Division 1 Appendix F⁽⁶⁾를 적용하였다.

지진에 의한 지반의 운동과 같은 동적 하중에 대해 단자유도(1자유도) 구조물이 가지는 응답(변위, 속도, 가속도)은 감쇠율이 일정한 경우에 고유진동주기가 변하게 된다. 서로 다른 고유진동주기를 갖는 단자유도 구조물의 최대 응답을 고유진동주기와 관련하여 그린 그림을 응답스펙트럼(Response spectrum)이라 한다. 따라서 하나의 주어진 지진 가속도 기록에 대해서 응답스펙트럼이 얻어지면 그것을 이용하여 단자유도 구조물이 아닌 다자유도 구조물의 최대 거동도 예측할 수 있다. 각 모드별 최대 거동을 응답스펙트럼으로 구할 수 있으며, 모드별 최대거동을 SRSS 방법을 사용하여 조합하면 구조물의 최대거동을 쉽게 예측할 수 있다. 층응답스펙트럼은 통상 설비가 포함되지 않은 주 구조물의 지반 입력에 대한 지진해석으로부터 각 층의 동적응답을 구한 후 이를 바탕으로 작성하며, 설비의 지지점이 위치하는 높이 마다 각각 다른 층 응답스펙트럼이 주어진다. Fig. 3 는 운전기준지진(OBE) 조건에 따른 수직방향의 층응답스펙트럼이며, Fig. 4 는 안전정지지진(SSE) 조건에 따른 수직방향 층응답스펙트럼을 나타낸다.⁽⁷⁾

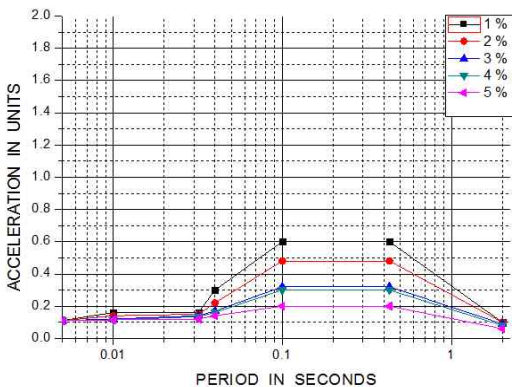


Fig. 3 Floor spectra of OBE for vertical response

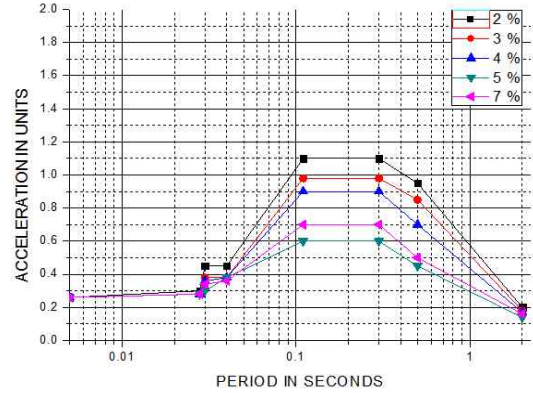


Fig. 4 Floor spectra of SSE for vertical response

Table 2 는 구조물이나 복합재료의 OBE, SSE 하중조건하에서 적용할 수 있는 감쇠율을 나타내고 있다. 해석 대상인 발전소 배관계의 외경은 88.9 ~ 100 mm 이므로 Table 2 의 “Small-diameter piping system, diameter equal to or less than 12 in.” 에 적용하는 감쇠율을 사용하였다. Small-diameter piping system, diameter equal to or less than 12 in. 의 감쇠율은 OBE 하중조건하에서 1%, SSE 하중조건하에서는 2%를 사용하였다.⁽⁸⁾

Table 2 Damping value according to Earthquake load conditions (%)⁽⁹⁾

Structure or component	OBE or 1/2 SSE	SSE
Equipment and large diameter piping systems, pipe diameter greater than 12 in.	2	3
Small-diameter piping systems, diameter equal to or less than 12 in.	1	2
Welded steel structures	2	4
Bolted concrete structures	4	7
Prestressed concrete structures	2	5

2.5 고유진동수 해석결과

발전소 배관계에 대한 내진해석을 수행하기 전 고유진동수 해석을 수행하였다. 고유진동수 해석 결과들과 응답스펙트럼 해석을 통해서 얻어지는 가속도 값을 입력값으로 하여 스펙트럼 해석을 한다.

스펙트럼 해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 mode 수를 고려하게 되는데, 이렇게 함으로써 스펙트럼 해석을 할 때 수 계산에 의존하지 않고 mode 계수가 기준 값 이상이 되는 mode들에 대해서 mode 조합이 이루어지도록 할 수 있게 된다. 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드 계수가 기준 값 이상이 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 모드조합에 대해서 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려할 필요가 있다. 여기서 모드계수 (mode coefficient)는 고유치 해석을 통하여 얻어진 모드들 중 최대 모드 기여 계수로 각 모드들의 모드 기여 계수를 나눈 값을 의미한다. 본 논문에서는 모드 계수를 0.01로 설정하여 해석을 수행하였다.

Table 3 은 발전소 배관계의 고유진동수를 1 차부터 4 차까지 본 결과이고 각각의 모드에 대한 그림은 Fig. 5 에 나타내었다.

Table 3 Natural frequency of Power Plant Piping System

Mode sequence number	Frequency (Hz)
1	0.201
2	0.630
3	0.887
4	1.148

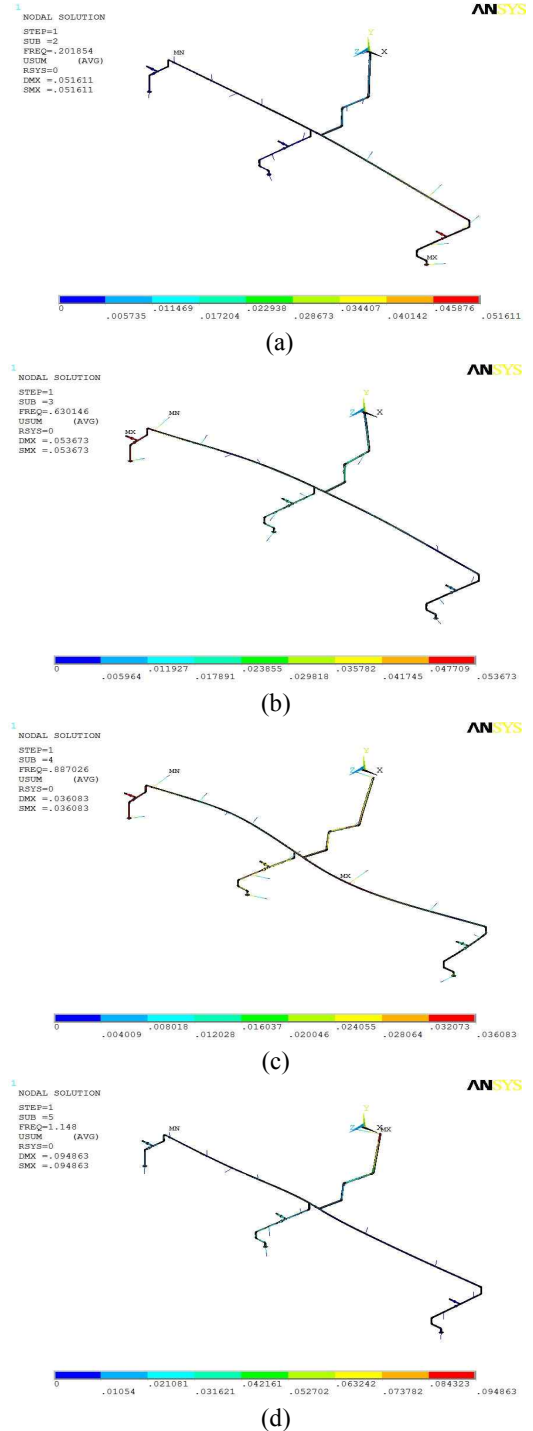


Fig. 5 Mode shape of Power Plant Piping System; (a) 1st mode shape, (b) 2nd mode shape (c) 3rd mode shape, (d) 4th mode shape

3. 내진 해석 결과 및 고찰

3.1 응력해석결과

운전기준지진(OBE) 조건과 안전정지지진(SSE) 조건에서 최대 응력은 배관계의 A-line 위에 있는 배관 쪽에서 공통적으로 발생하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 지진하중 조건에 따른 응력분포를 나타내었다. 운전기준지진(OBE) 하중조건에서 최대응력은 166 MPa 이며 안전정지지진(SSE) 하중조건에서는 281 MPa 이 발생하였다. Fig. 8 과 같이 배관과 배관이 만나 연결되는 모서리 부분이 유한요소모델 생성 시 curve가 아닌 직각으로 표현이 되어 하중이 집중되었기 때문에 이 부분에서 최대 응력이 발생하였다.

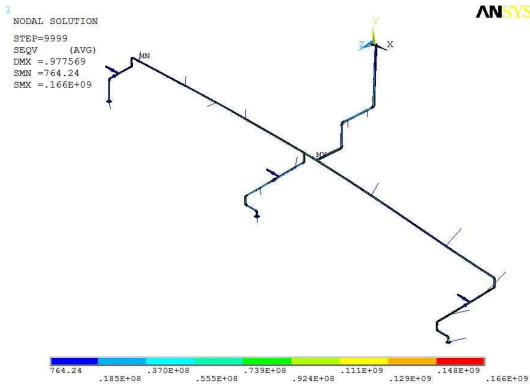


Fig. 6 Distributions of stress under OBE condition; Maximum von Mises stress $\sigma_{max} = 166$ MPa

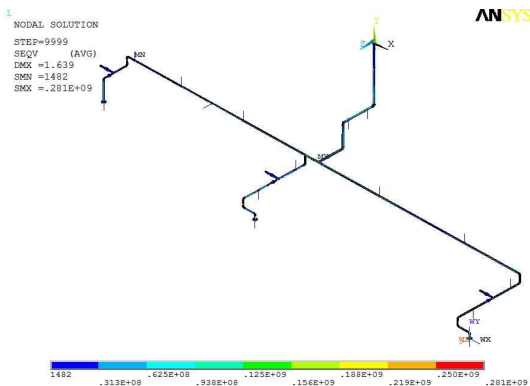


Fig. 7 Distributions of stress under SSE condition; Maximum von Mises stress $\sigma_{max} = 281$ MPa

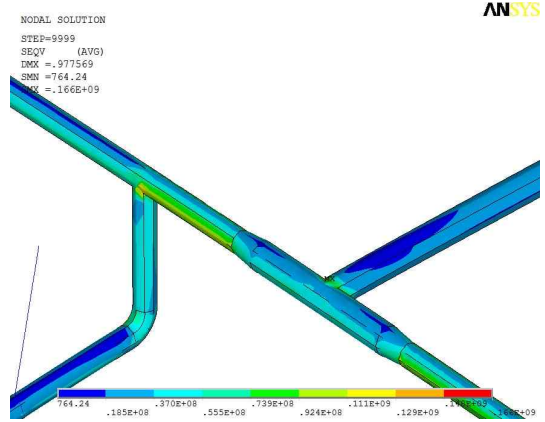


Fig. 8 Detail view of stress distribution under OBE, SSE condition

4. 결 론

본 연구에서는 발전소 배관계를 대상으로 내진해석을 수행하여 안전성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 배관계에 대한 고유치 해석을 수행하여 고유진동수를 확인하고 전체 배관에 대한 굽힘 mode를 확인하였다.

2) 지진에 대한 조건을 부여하여 해석을 수행한 결과, 최대응력은 운전기준지진(OBE) 하중에서 166 MPa 이고 , 안전정지지진(SSE) 하중에서는 281 MPa 이다. 배관 재료의 항복강도가 413 MPa 이기 때문에 안전성을 확보 한 것으로 평가하였다. 최대 응력이 발생된 위치는 두 하중조건에서 공통적으로 나타났다. 두 개의 배관이 만나는 부분이며 유한요소모델에서 curve 가 완벽하게 구현되지 못하고 모서리가 생겨 이 부분에서 하중이 집중되었다.

참 고 문 헌

- (1) Kim. Y. H., Bae. Y. C., Lee. Y. S., 2005 " Countermeasure on High Vibration of Branch Pipe with Pressure Pulsation Transmitted from Main Steam Header" *Journal of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering* V.15, no.8, pp.988~995
- (2) Jung, G. H., Park, B. C., Choi, J. Y. and Kang, Y. J., 1998, "Consideration for Korea Seismic Design System and Standard," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute*, Vol.11, No.1, pp.7~16.
- (3) Frano, R. L. and Forasassi. G, 2009, " Conceptual Evaluation of Fluid-Structure Interaction Effects Coupled to a Seismic Event in an Innovative Liquid Metal Nuclear Reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp.2333~2342
- (4) Lee, W. H., Cho, J. R., Roh, M. D. and Ryu, J. H., 2011, " Seismic Analysis of Nuclear Power Equipment Related to Design," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.35, No.3, pp.317~323.
- (5) ASME Section III Division 1 Subsection NF (1995) "Component Supports"
- (6) ASME Section III Division 1 Appendix F (1995) Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits
- (7) Kim. H. T., Lee. Y. S., 2011, " Seismic and Structure Analysis on a Construction Temporary Rack Paddle of Nuclear Power Plant," *Proceedings of 2011 Spring conference of the KSME*, Vol.A, pp. 232~238
- (8) US NRC Regulatory Guide 1.61 (1973) Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, October
- (9) Hwang, S. H., Choi, J. S., 2002, " Seismic Analysis of the Traveling Water Screen," *Proceedings of 2002 Spring conference of the KSME*, Vol.A, pp. 627~632