

면진 원전 면진-비면진구간 연결 배관의 내진성능 평가

Seismic Performance Evaluation of Piping System Crossing the Isolation Interface in Seismically Isolated NPP

함대기¹⁾ · 박준희¹⁾ · 최인길¹⁾

Daegi Hahm¹⁾ · Junhee Park¹⁾ · In-Kil Choi¹⁾

¹⁾한국원자력연구원

¹⁾Korea Atomic Energy Research Institute

/ A B S T R A C T /

A methodology to evaluate the seismic performance of interface piping systems that cross the isolation interface in the seismically isolated nuclear power plant (NPP) was developed. The developed methodology was applied to the safety-related interface piping system to demonstrate the seismic performance of the target piping system. Not only the seismic performance for the design level earthquakes but also the performance for the beyond design level earthquakes were evaluated. Two artificial seismic ground input motions which were matched to the design response spectra and two historical earthquake ground motions were used for the seismic analysis of piping system. The preliminary performance evaluation results show that the excessive relative displacements can occur in the seismically isolated piping system. If the input ground motion contained relatively high energy in the low frequency region, we could find that the stress response of the piping system exceed the allowable stress level even though the intensity of the input ground motion is equal to the design level earthquake. The structural responses and seismic performances of piping system were varied sensitively with respect to the intensities and frequency contents of input ground motions. Therefore, for the application of isolation system to NPPs and the verification of the safety of piping system, the seismic performance of the piping system subjected to the earthquake at the target NPP site should be evaluated firstly.

Key words: Seismic Isolation, Interface Piping System, Seismic Performance, Nuclear Power Plants, Earthquake Response Analysis, Finite Element Analysis

1. 서론

원자력발전소에 면진장치를 설치하게 되면 발전소의 지진력에 대한 안전성을 향상시킬 수 있기 때문에, 최근 면진장치를 원전에 적용하기 위한 연구가 국내 연구진을 중심으로 활발하게 진행 중에 있다[1-5]. 그러나 이 경우 지진에 의한 하중을 면진장치가 담당하면서 면진장치 설치 전보다 큰 변위가 발생하게 됨에 따라 변위증가에 따른 일부 설비의 지진리스크가 증가할 수도 있다. 특히 면진-비면진 건물 간을 관통하는 연결 배관의 경우에는 큰 상대변위의 발생으로 인하여 일반 원전과 동일하게 설계할 경우 요구되는 내진성능을 만족하지 못할 가능성이 존재한다. 따라서 면진원전 배관 계통의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 주요 연결 배관에 대한 내진

성능 검증 과정이 필수적으로 요구된다고 할 수 있다.

한편, 원자력 발전소의 배관 계통에 대한 내진성능을 평가하기 위한 연구는 국내외의 연구진들에 의해 실험적/이론적으로 활발히 진행되어왔다. JNES (Japan Nuclear Energy Safety)와 NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation) 간의 다년간에 걸친 공동연구에 의해 대구경 장경간의 배관계통에 대한 실험적 연구가 수행되었으며[6,7], 국내에서도 한국원자력연구원과 부산대학교에 의해 다지점 진동대를 이용한 배관 계통의 내진성능 평가 연구가 실험적으로 수행된 바 있다[8]. 그러나 면진-비면진 건물 사이를 관통하는 면진-비면진구간 연결 배관과 같이 대규모의 상대변위 발생이 예상되는 경우에 대한 내진성능 평가는 최근까지도 그 연구가 미흡한 상황이라 할 수 있다.

이 논문에서는 면진원전의 면진-비면진 건물 연결 배관의 내진성능 검증 기법을 개발하여 선정된 대표 배관에 적용함으로써 해당 배관에 대한 지진응답 해석 및 내진성능 평가를 수행하였다. 내진성능 평가는 내진설계의 개념과 달리 설계규모를 상회하는 지반운동에 대해서도 어느 정도의 성능

*Corresponding author: Hahm, Deagi

E-mail: dhahm@kaeri.re.kr

(Received 20 February 2014; Accepted 15 April 2014)

을 보유하고 있는가에 대한 검증도 필요하다. 이 논문에서는 설계규모 지진 뿐만 아니라 설계지진 규모를 상회하는 대규모 지진에 대한 내진성능 평가를 수행하였으며, 설계 스펙트럼에 부합하도록 생성된 인공지진 가속도 시간이력 외에도 실제 계기기록 지진 가속도 시간이력에 대해서도 응답 해석을 통한 성능 평가를 실시하였다.

2. 평가대상 배관 선정 및 유한요소 모델링

대표 배관의 지진응답 해석 및 성능평가를 수행하기 위하여 대상 배관을 선정하였다. 선정된 해석 대상 배관은 신고리 2호기에 실제 적용되고 있는 배관계통으로 ASME CLASS1 SA312 GRADE TP316 SCH. 160의 직경 3인치인 스테인리스 배관이며, 직관부, 곡관부(elbow), 지지부(support) 등으로 구성되어 있다. 이 배관계통은 증기터빈의 주배관 비상 차단 시 연결 관로로 활용되며, 이상 진동, 지진력 등의 극한하중 작용 시 그 중요성이 큰

요소이기 때문에 안전성 측면에서 중요한 배관 중 하나이다. 모든 해석 시 배관은 상온의 물로 만관이 되어 있는 상태에서 약 19 MPa로 가압된 상태를 가정하였다. Fig. 1은 해석 대상 배관의 설치도면(iso-drawing)을 나타낸다. 해석을 위해서 종방향으로 길이가 17.8 m이고, 2인치와 3인치 배관으로 구성된 일부 구간을 분리하여 선정하였다. 이 배관에는 7개의 곡관부(elbow)와 2개의 이경관부(reducer)가 사용되었다. 모든 배관 부품 및 구성요소는 ASME Sec III, “Boiler and Pressure Vessel Code, 2007”[9]에 의해 설치되고 용접되었음을 가정하였다. 유한요소 해석 모델의 검증을 위하여 2기의 진동대를 이용하여 수행된 진동대 성능평가 실험 결과와 응답을 비교하였다. 진동대 실험 시에는 배관계통의 하단부와 상단부를 각기 다른 진동대에 연결하고 높은 위치에 설치된 배관에 보다 큰 지반가속도가 작용하는 것을 모사할 수 있도록 하였다. 격간건물의 벽체를 모사한 총 3기의 기준프레임을 좌측 진동대에 2기, 우측 진동대에 1기 설치하여 고정단 연결부, 걸쇠 지지부(hanger support), 단순 지지부(support)를 설치할 수

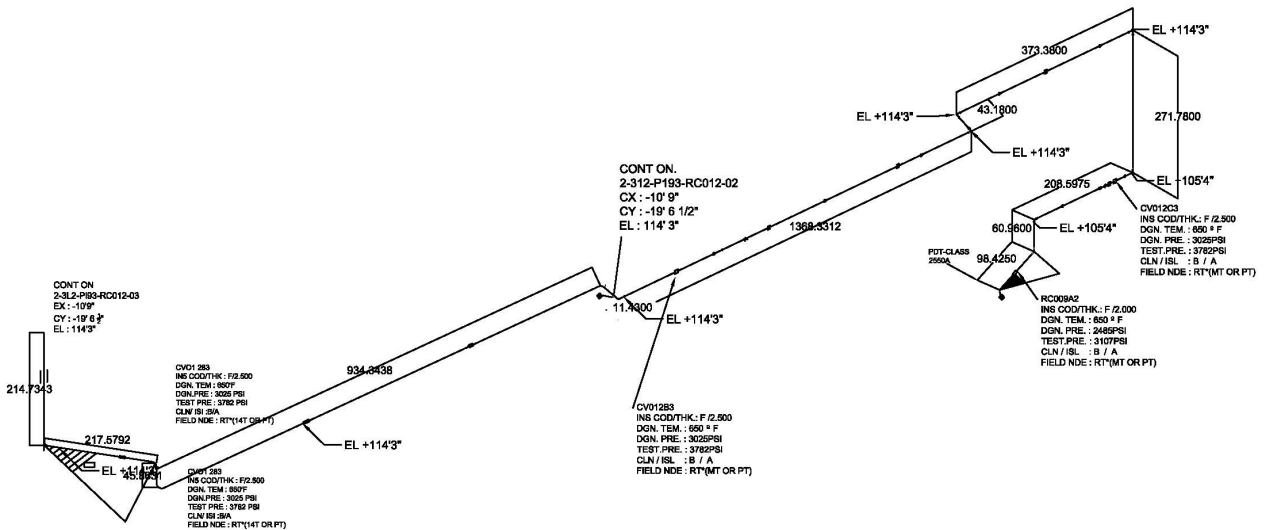


Fig. 1. Iso-drawing of Target Piping System

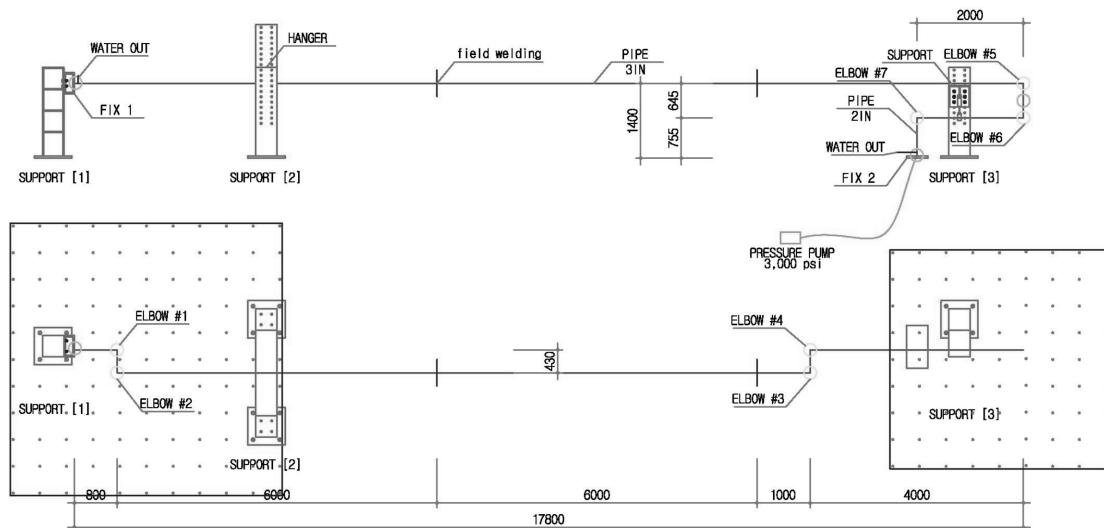


Fig. 2. Floor Plan & Side Plan of Target Piping System

있도록 하였다. 이 논문에서 사용된 대표 배관의 상세 도면 및 형상은 Fig. 2에 나타난 것과 같다.

해석모델은 ABAQUS의 보 요소(beam element)를 사용하였다. 보 요소의 적용은 실제 배관계통이 길고 복잡한 형상으로 구성되며, 일반적인 설계현장에서도 보 요소를 이용한 해석이 주를 이루기 때문이다. ABAQUS에서 배관해석에 적용할 수 있는 보 요소는 FRAME3D, PIPE31, ELBOW31, B33 등이다. 본 논문에서는 ABAQUS의 다양한 보 요소 중 해석의 효율성과 내압 상태의 적용가능성 여부 등을 고려하여 PIPE31 요소(2-절점 선형 배관 요소)를 적용하였다. PIPE31 요소는 일반적인 용도의 3D Euler-Bernoulli 보 요소(ABAQUS의 경우, B33 요소)와 유사하나 소성거동, 내, 외압에 의한 원주방향 응력(hoop stress)의 영향을 고려할 수 있다.

해석 시 적용된 단면 제원은 설계기준[9]에서 제시하고 있는 값을 적용하였으며, 재료 물성치 중 탄성계수와 감쇠비(damping ratio)를 제외한 모든 동적 특성치는 설계기준에 의하여 결정하였다. 탄성계수는 재료실험 결과를 바탕으로 산출한 값을 사용하였고 감쇠비(damping ratio)는 진동대 실험 결과[8,10]를 참조하여 적용하였다. 관내부에 존재하는 물의 관성력이 고려될 수 있도록 모델링하였으며, 작용하는 수압(20 MPa)을 경계조건으로 적용하였다. 해석에 사용된 단면 제원 및 물성치를 Table 1 및 Table 2에 정리하여 나타내었다.

선정된 배관 계통의 극한 내진성능 평가를 위하여, 비선형 재료 모델을 도입하였다. 비선형 재료 모델은 재료실험 및 배관요소의 정적하중 재하 실험의 결과를 바탕으로 하였으며, 재료실험결과 측정된 데이터로부터 공칭 응력, 공칭변형률을 계산하고 진응력, 진변형률을 산정하였다. 탄성계수는 Fig. 3의 응력-변형률도의 직선구간(80 MPa 이하)의 측정값을 회귀분석을 통하여 199 GPa로 결정하였다. 연강의 경우 재료적 특성으로 인해 항복 응력이 명확히 나타나지 않으며, 이 때에는 일반적으로 응력-변형률 곡선에서 총 변형률의 0.2% 지점에서 탄성한도선과 평행한 직선을 그어 곡선과 만나는 점을 항복점으로 하는 0.2% 오프셋(offset)법을 사용하여 항복 응력을 결정할 수 있다(Fig. 3)[11]. 이 방법을 적용하여 결정된 항복응력 값은 231 MPa이다. 진응력-진변형률 관계를 이용한 다중선(Multilinear Kinematic Hardening) 재료모델은 Fig. 4와 같다. 변형률 10% 이하는 진응력-진변형률 곡선을 잘 따라가도록 재료모델을 구성하였으며, 변형률 10%를 초과하는 구간에서는 비교적 간단하게 모델링하였다. 재료실험결

Table 1. Dimension of Example Piping System Model

Pipe size	External diameter	Internal diameter	Nominal thickness
[in]	[mm]	[mm]	[mm]
2	60.3	42.8	8.74
3	88.9	66.6	11.13

Table 2. Material Properties of Example Piping System Model

Mass density (N/mm ³)			Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Material damping [%]
Strainless steel	Steel	Water			
8.0E-9	7.8E-9	1.0E-9	199,000	0.3	4.0

과로부터 손상모델은 150% 변형률을 한계로 한 인장연성 파괴(ductile fracture) 모델을 사용하였다. 변형 경화는 등방성 경화 법칙(isotropic hardening rule)을 적용하였으며, 다수의 해석결과 힘과 인장이 주된 응력으로 판단되므로 전단에 의한 파괴는 고려하지 않았다.

해석 모델의 고유진동수 측정결과[8,11]와 해석에 의한 고유진동수는 Table 3에 정리된 것과 같다. 실험 여건상 초기 형상 및 결합 등의 영향이 반영되지 못하였으나 각 모드별 진동수가 비슷한 수준으로 나타났다. 실험 및 계측에 대한 자세한 정보는 참고문헌[11]을 통해 확인할 수 있다. 고차 모드에서의 고유진동수가 정확하게 예측되지는 못하였으나 전체적으로는 유사한 경향을 나타내는 것으로 판단된다. Fig. 5는 유한요소해석에 의한 변위 산정 결과와 진동대 실험 가진 시 센서에 의해 계측된 변위를 비교한 것이

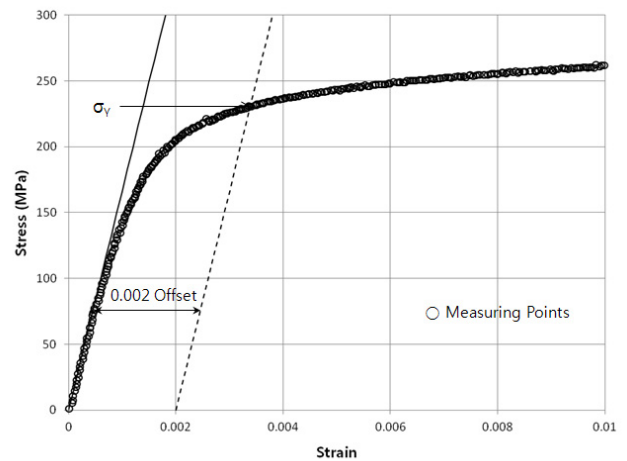


Fig. 3. Definition of Elastic Modulus and Yield Point

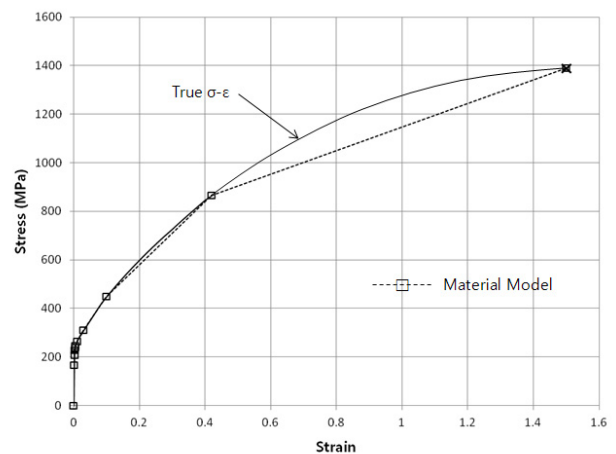


Fig. 4. Material Model for Finite Element Analysis

Table 3. Natural Frequency of Example Piping System Model

Component	Mode [N] / Resonant Frequency [Hz]				Damping [%]
	1	2	3	4	
Experiment	1.96	2.23	3.70	6.69	3.56
Analysis	1.81	2.04	4.71	5.51	4.00
Exp./Analysis	1.08	1.09	0.79	1.21	0.89

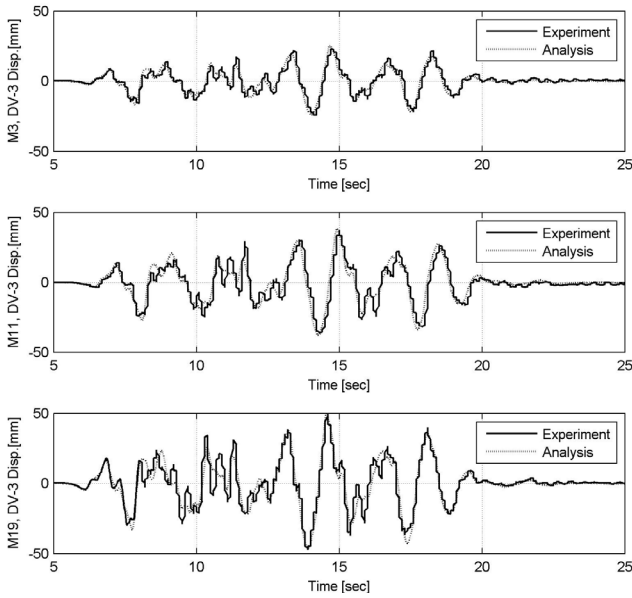


Fig. 5. Comparison of Displacement Response of Experiment and Finite Element Analysis Results

다. 센서에 의한 계측이 가능한 범위에서 비교적 다양한 가진 수준의 해석결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이로부터 대상 배관의 해석 모델은 실제 모델의 동적거동을 분석하기에 충분한 것으로 판단하였다.

3. 보조건물 모델링 및 응답 평가

면진장치가 설치된 구조물 즉, 면진시스템을 모델링하기 위해서는 구조적 특성이 서로 다른 면진장치와 상부구조물을 각각 모델링하여야 한다. 면진장치는 무길이 요소(zerolength element)를 사용하여 모델하지만 모델링의 상세여부에 따라 솔리드요소를 사용하여 유한요소로 모델링하거나 보요소와 질량을 사용하여 간단하게 모델링할 수도 있다. 이 논문에서 보조건물의 모델링 및 응답 평가 위해 사용된 구조해석 소프트웨어는 SAP2000이다. SAP2000에 탑재된 면진장치 요소는 고무계 면진장치 및 마찰형 면진장치 요소가 있다[12]. 본 연구에서는 고무계 면진장치 요소와 감쇠기 요소를 사용하여 면진장치를 모델링하였다. 감쇠기 요소를 추가로 설치할 경우 면진장치의 이력거동은 Fig. 6과 같이 실제 면진장치의 이력거동과 유사하게 나타난다.

면진구조물은 설계 시 면진장치의 고유진동수와 상부구조물의 고유진동수에 의하여 지진응답이 크게 달라진다. 일반적으로 면진 건물의 목표고유진동수는 0.33Hz 보다는 높고 구조물 고유진동수의 1/3보다는 낮은 범위 내에서 결정되나, 본 연구에서 고려하고 있는 면진 원전의 경우, 목표고유진동수를 낮게 책정하게 되면 면진-비면진 구간에서의 과도한 상대변위 발생으로 인해 각 구간을 연결하는 배관, 케이블, 덕트 등의 안전성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 면진시스템의 목표진동수를 1.0Hz로 설정하였다. 보다 효율적인 면진 시스템의 구성을 위해서는 목표고유진동수 최적화에 대한 추가적인 연구 수행이 필요할 것이다. 면진장치의 상부구조물은 고유진동수가 6.2Hz인 신고리 3&4호기의 보조건물을 예제모델로 선정하여 Fig. 7과 같이 모델링 하였다. 2장에서 대상 배관으로

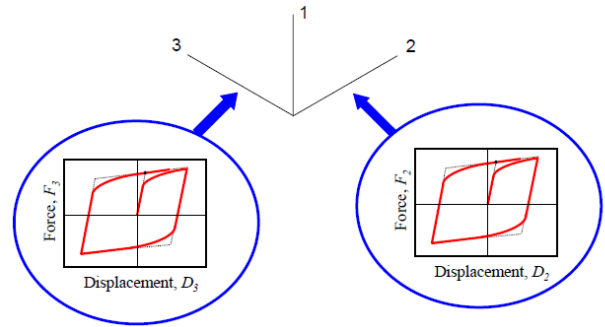


Fig. 6. Modeling of Seismic Isolator Behavior

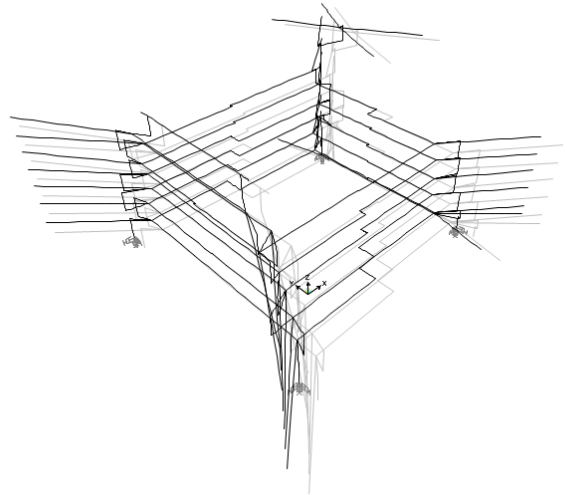


Fig. 7. Lumped Mass Model of Auxiliary Building

선정하여 모델링된 배관은 한 쪽 끝단이 면진 건물인 보조건물의 100ft 높이에, 다른 한 끝단은 비면진 건물인 터빈건물의 기초부 높이(foundation level)에 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 배관의 양 끝단 중 터빈 건물에 고정된 지점에는 지반운동 가속도가 그대로 입력되는 것으로 하였으며, 보조건물의 100ft 높이에 연결된 지점에는 해당 지점의 보조건물 응답가속도 시간이력에 해당하는 지반운동이 입력되도록 하였다.

면진시스템은 지반조건에 따라 응답의 증감이 다르게 나타난다. 지반이 단단한 곳에 위치한 적층고무 면진시스템은 지진력 저감효과가 나타나지만 지반이 연약한 곳에 위치할 경우 지진동은 저진동수 영역에서 응답이 증가하게 되므로 지진력 저감효과를 기대할 수 없다. 이처럼 면진시스템은 입력지진동의 특성에 따라 그 효과가 다르게 나타나므로 본 연구에서는 다양한 입력스펙트럼 형상을 고려하여 입력지진동을 선택하였다.

면진된 구조물의 비선형지진해석을 수행하기 위하여 Fig. 8과 같이 4개의 입력지진동을 사용하였다. 원전의 설계 시 사용되는 NRC Reg. Guide 1.60에 의한 지진동[13]과, 국내 지반의 고진동수성분을 고려한 등재해도 스펙트럼(UHS), 그리고 면진된 구조물의 저진동수 영역에서 지진응답을 분석하기 위하여 가속도의 증폭이 저진동수 영역에서 큰 Chi-chi(TCU-360) 지진, 그리고 면진된 구조물의 목표고유진동수 영역에서 큰 에너지를 가지는 Sylmar90 지진을 입력지진동으로 선정하였다. 설계 시와는 달리, 면진-비면진 건물 간 연결 배관의 내진성능 평가는 설계지진 규모 이상의 지반운

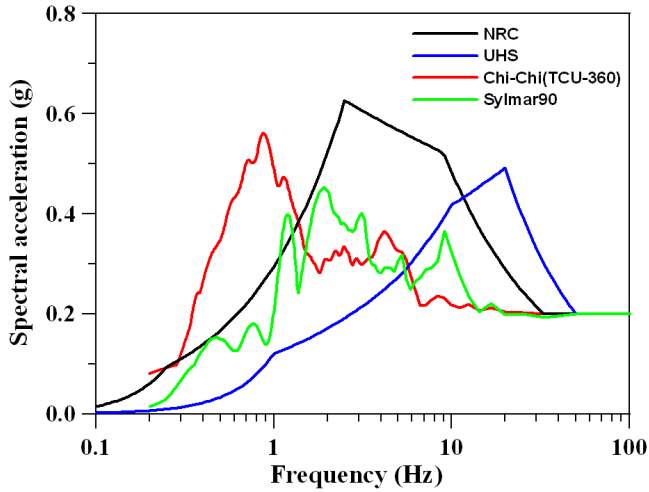


Fig. 8. Spectral Acceleration of Input Ground Motions (0.2g PGA)

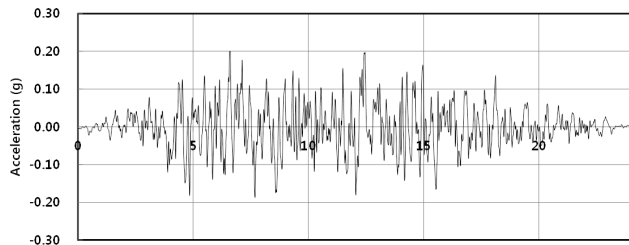


Fig. 9. Artificial Earthquake Acceleration Time History Fitted to NRC Design Response Spectrum (PGA 0.2g)

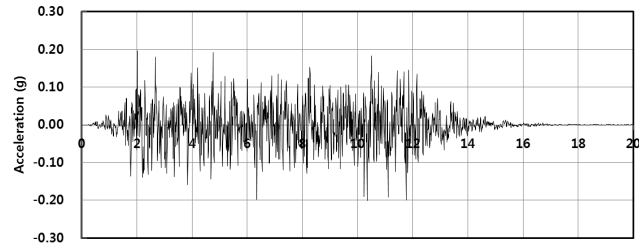


Fig. 10. Artificial Earthquake Acceleration Time History Fitted to UHS Design Response Spectrum (PGA 0.2g)

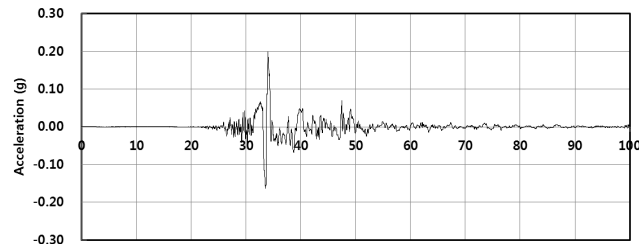


Fig. 11. Historical Earthquake Acceleration Time History of Chi-Chi Earthquake (PGA 0.2g)

동에 대해서도 응답 수준 및 건전성의 평가가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 0.2g PGA로 정규화한 4가지 종류의 지반운동 가속도 이외에, 0.5g PGA로 정규화한 4가지 종류의 지반운동 가속도를 추가로 고려하였다. 각

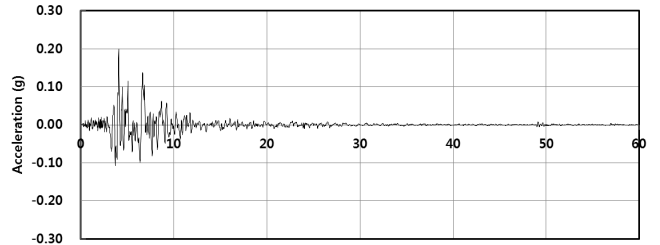
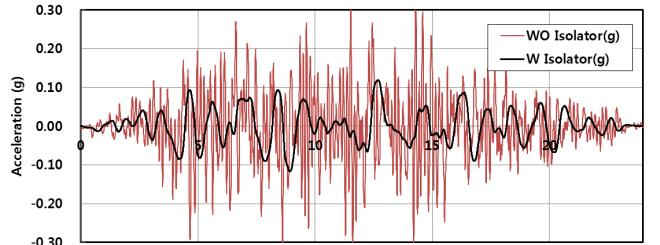
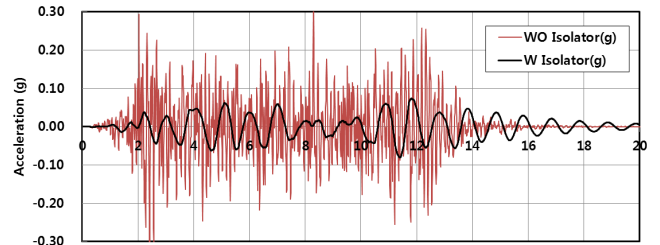


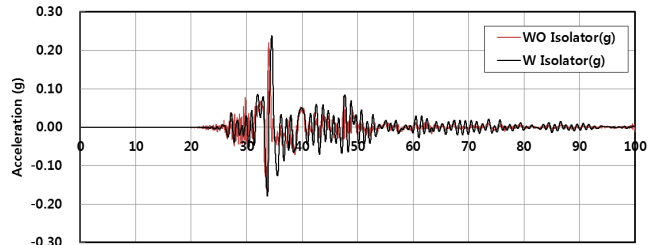
Fig. 12. Historical Earthquake Acceleration Time History of Sylmar (PGA 0.2g)



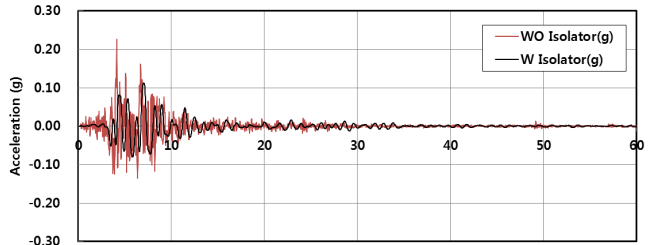
(a) NRC Response Spectrum, PGA 0.2g



(b) UHS Response Spectrum, PGA 0.2g



(c) Chi-Chi Earthquake



(d) Sylmar Earthquake

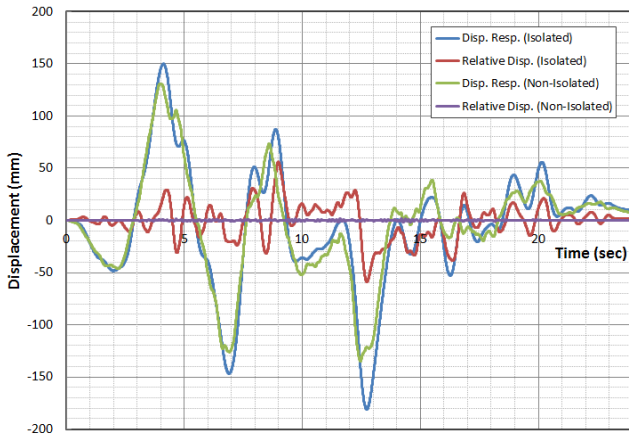
Fig. 13. Acceleration Response at 100ft Floor of Auxiliary Building (PGA 0.2g)

각의 가속도 시간이력은 Fig. 9~12에 나타내었다. 면진장치를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우의 가속도 시간이력을 지반운동 별로 비교하면 Fig. 13에 나타난 것과 같다. 면진장치를 적용한 경우 해석 대상 배관에 입력되는 가속도 시간이력 값이 현저히 줄어들게 됨을 알 수 있다.

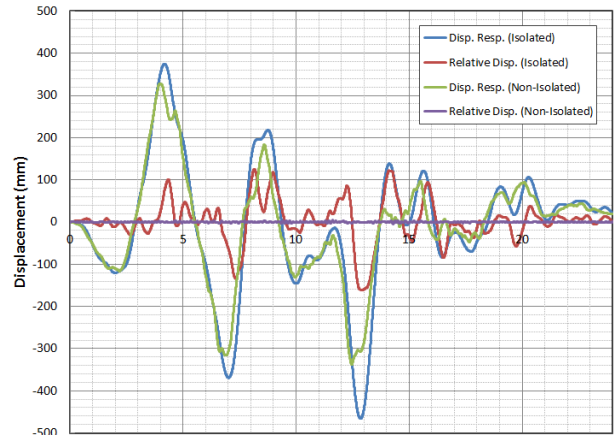
4. 대상 배관의 지진응답 해석 및 내진성능 평가

비면진-비면진구간 연결 배관에 요구되는 변위흡수 요구량은 비면진 시 절대변위와 지반 변위 간의 차로써 표현되는 반면, 면진-비면진구간 연결 배관의 경우에는 면진시 절대변위로부터 지반 변위를 빼 준 값이 변위흡수 요구량으로 결정된다. 이 때에는 구조물 자체의 변위는 면진장치에 의하여 지진에너지가 흡수됨으로 인해 현저히 줄어들게 되나, 유연한 면진장치로

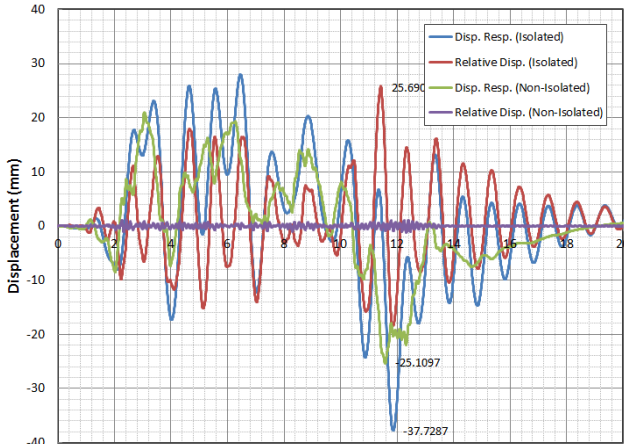
인해 면진장치에 큰 변위가 발생하게 될 가능성이 높다. 따라서 배관의 곡관부(elbow), 티(tee) 등에서 흡수하여야 할 상대변위가 과다하게 발생할 우려가 있다. 반면, 비면진-비면진 간 배관의 경우에는 구조물에 바로 지진력이 전달됨으로 인해 구조물 자체의 변위는 면진 건물에 비하여 크게 발생하나 구조물 자체의 강성이 면진장치에 비하여 현저히 크기 때문에 면진 장치가 장착된 경우에 비하여 적은 상대변위가 발생하게 될 가능성이 높으며, 배관에서 흡수하여야 할 상대변위도 상대적으로 줄어들게 된다. 2장 및 3장에



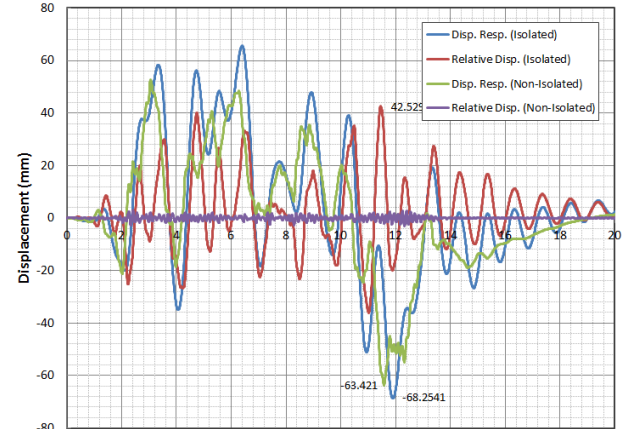
(a) 0.2g, NRC Response Spectrum



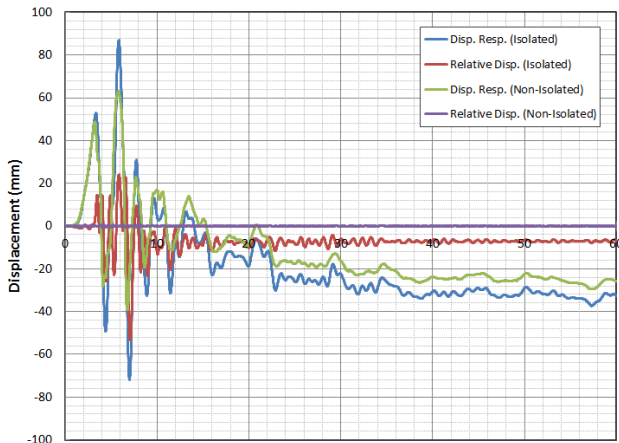
(b) 0.5g, NRC Response Spectrum



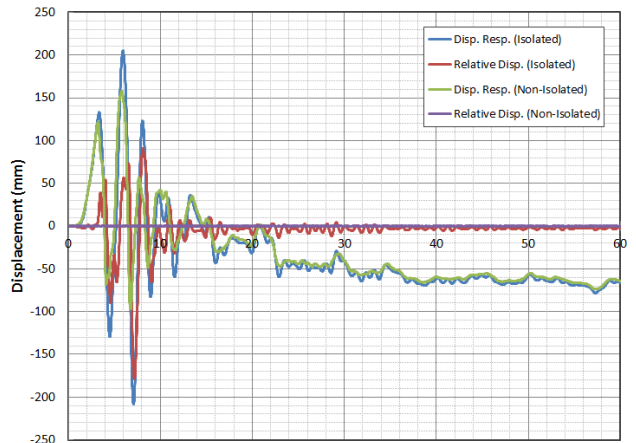
(c) 0.2g, UHS Response Spectrum



(d) 0.5g, UHS Response Spectrum

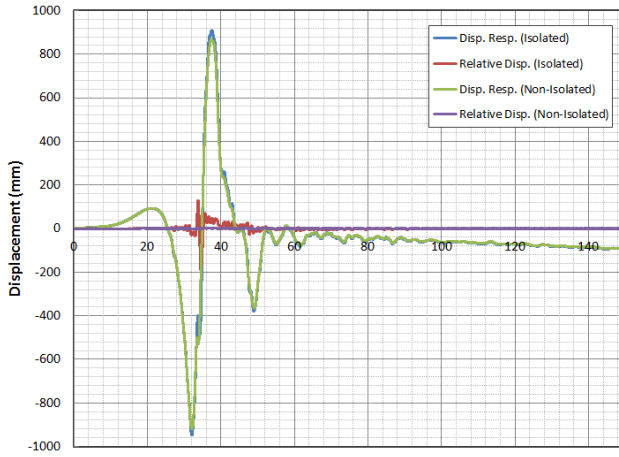


(e) 0.2g, Sylmar Earthquake

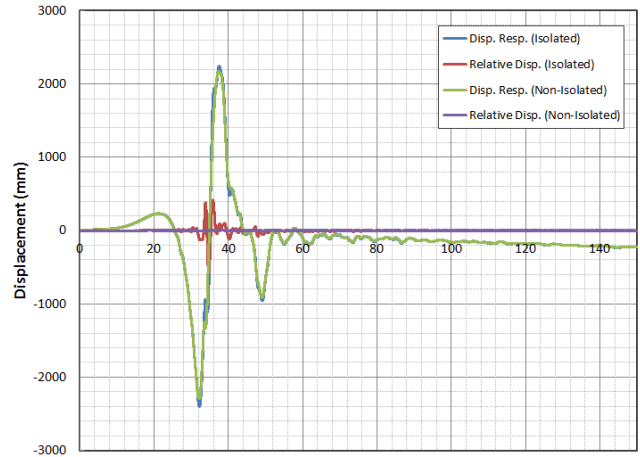


(f) 0.5g, Sylmar Earthquake

Fig. 14. Relative Displacements of Piping System Crossing the Isolation Interface (Continued)



(g) 0.2g, Chi-Chi Earthquake



(h) 0.5g, Chi-Chi Earthquake

Fig. 14. Relative Displacements of Piping System Crossing the Isolation Interface

서 모델링 된 면진-비면진 구간 연결 배관 시스템에 대하여 지진응답 해석 및 내진성능 평가를 수행한 결과를 본 장에 제시하였다.

Fig. 14(a), (b)는 각각 0.2g, 0.5g 규모의 NRC 인공지진 가속도 시간이력에 대한 면진-비면진구간 연결배관의 절대변위 및 변위흡수 요구량을 나타낸다. 면진 건물의 절대변위와 비면진 건물의 절대변위 간 차는 크지 않으나 면진-비면진 간 상대변위는 둘 간의 최대변위 차에 비하여 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 각 변위 시간이력 간의 위상 차이에 의하여 발생하는 결과라 할 수 있다.

Fig. 14(c), (d)는 각각 0.2g, 0.5g 규모의 UHS 인공지진 가속도 시간이력에 대한 배관의 절대변위 및 변위흡수 요구량을 나타낸다. UHS 가속도 시간이력은 상대적으로 단주기 성분이 우세하여, NRC 지진에 비해 전반적으로 변위 응답 진동수가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 면진장치의 변위가 NRC 지진의 경우에 비하여 적으면서도 면진장치의 변위와 절대변위 응답 간 차이가 크지 않은 것으로 보아 면진장치가 적극적으로 응답 제어에 개입하고 있는 것으로 유추할 수 있다. 이러한 경향은 0.5g의 큰 지반운동 가속도 규모에 대해서도 동일하게 나타났다.

Fig. 14(e), (f)는 각각 0.2g, 0.5g 규모로 스케일된 Sylmar 인공지진 가속도 시간이력에 대한 배관의 절대변위 및 변위흡수 요구량을 나타낸다. 여기서 주목할만한 점은 다른 지진에 비하여 지반운동 종료 시 잔류변위가 상대적으로 크게 나타났다는 점이다. 이는 가속도 시간이력의 특성과 면진장치의 비선형 거동 특성에서 기인하는 현상이라고 볼 수 있을 것이다.

Fig. 14(g), (h)는 각각 0.2g, 0.5g 규모로 스케일된 Chi-Chi 인공지진 가속도 시간이력에 대한 배관의 절대변위 및 변위흡수 요구량을 나타낸다. 장주기 성분이 매우 탁월하여 매우 큰 두 개의 침두 변위값을 제외하고는 큰 응답이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 특히, 면진, 비면진의 경우에 따른 절대변위의 차이가 거의 없으며 그럼에도 면진장치의 상대변위는 다른 지진파의 경우에 비하여 매우 크게 발생하고 있는 것으로 보아, 면진장치가 효율적으로 작용하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이는 장주기 지반운동 특성 상 면진장치를 설치하게 될 경우 면진장치가 구조물을 장주기화하여 공진 등의 좋지 못한 효과를 유발할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 15는 면진배관의 변위흡수 요구량 최대값을 가속도 별로 나타낸 그

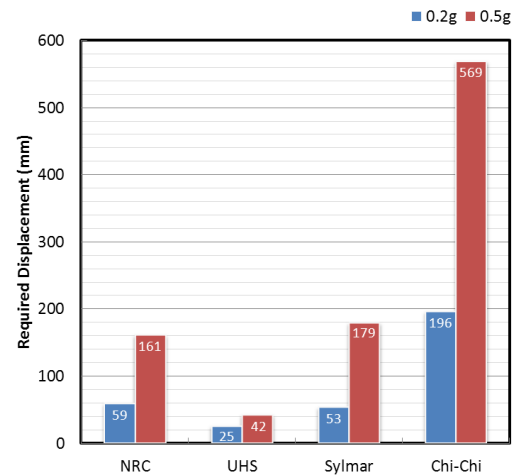
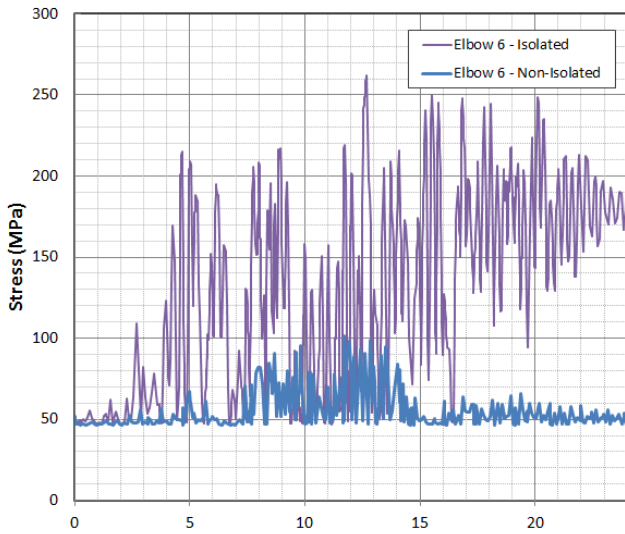


Fig. 15. Comparison of the Displacement Absorbing Requirements

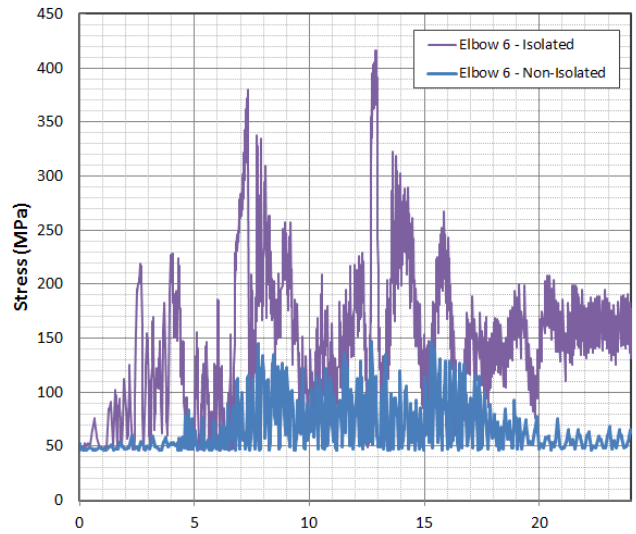
래프이다. 그림을 통하여 볼 때, 동일한 PGA의 경우에도 입력 지진파의 주파수 성분 특성에 따라 0.2g PGA의 경우 약 8배, 0.5g PGA의 경우 약 13배 이상의 변위흡수 요구량 차이가 나타남을 알 수 있다. 0.5g PGA 지반운동의 경우, Chi-Chi > NRC > Sylmar > UHS 순으로 많은 변위 흡수량을 요구하는 것으로 나타났으며, 장주기 주파수 특성이 상대적으로 탁월한 경우 면진장치의 변위 증가로 배관에서 큰 상대변위 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 16(a)-(h)은 각각 0.2g, 0.5g 규모의 NRC 인공지진 가속도 시간이력에 대한 배관 곡관부(elbow)의 응력 응답 이력, 0.2g, 0.5g 규모의 UHS 인공지진 가속도 시간이력에 대한 배관 곡관부(elbow)의 응력 응답 이력, 0.2g, 0.5g 규모의 Sylmar 지진 가속도 시간이력에 대한 배관 곡관부(elbow)의 응력 응답 이력, 그리고 0.2g, 0.5g 규모의 Chi-Chi 지진 가속도 시간이력에 대한 배관 곡관부(elbow)의 응력 응답 이력을 나타낸다. Fig. 17은 지반운동 가속도 증가에 따른 면진배관의 최대 응력 응답을 나타내는 그래프이며, Fig. 18, 19는 각각 0.2g, 0.5g의 지반운동 가속도에 대한 최대 응력 응답을 나타내는 그래프이다.

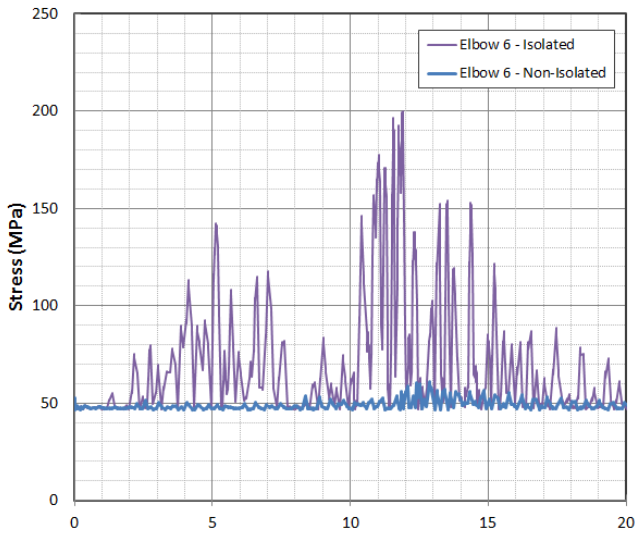
면진 배관의 경우, 지반운동의 주파수 성분 특성에 따라 응력 응답의 경



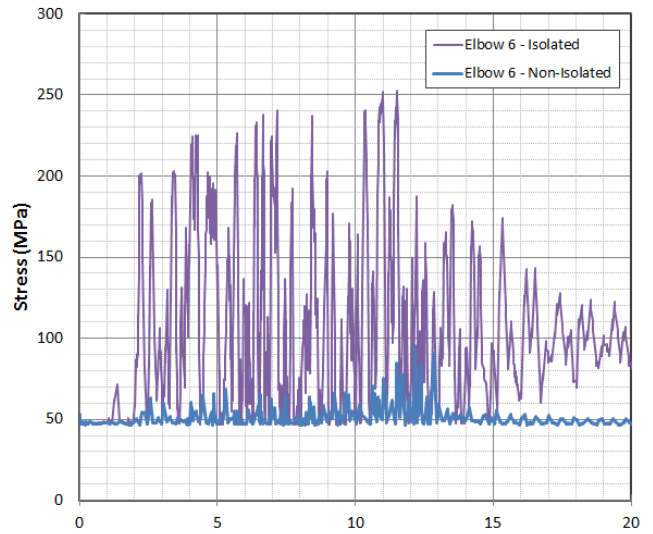
(a) 0.2g, NRC Response Spectrum



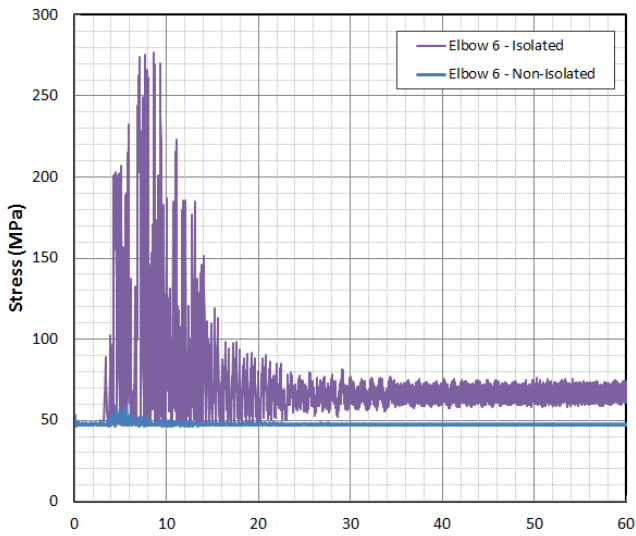
(b) 0.5g, NRC response Spectrum



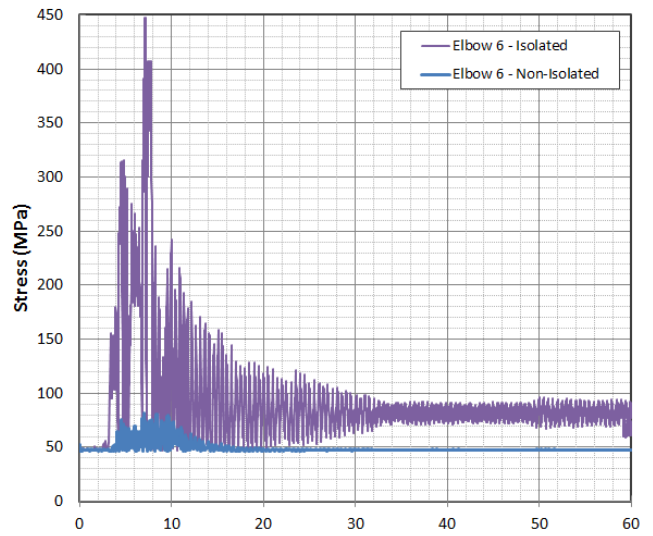
(c) 0.2g, UHS Response Spectrum



(d) 0.5g, UHS Response Spectrum



(e) 0.2g, Sylmar Earthquake



(f) 0.5g, Sylmar Earthquake

Fig. 16. Stress Response Time History at Critical Elbow of Piping System (Continued)

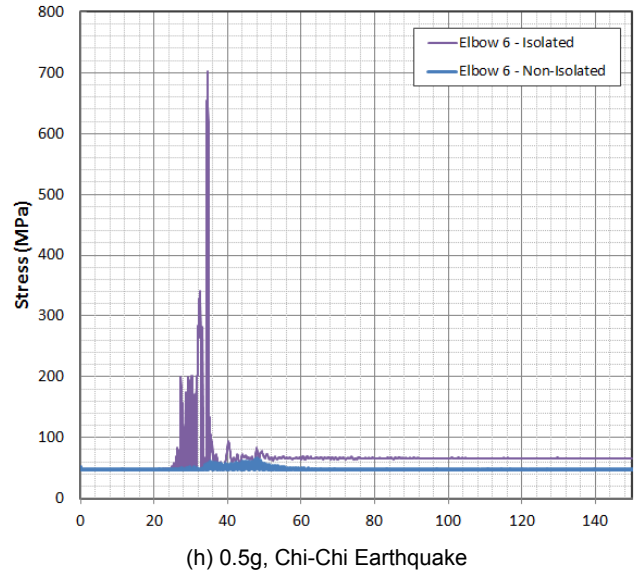
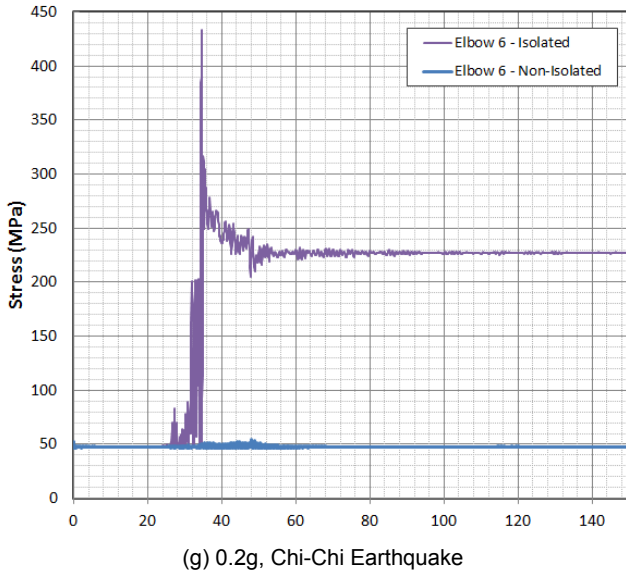


Fig. 16. Stress Response Time History at Critical Elbow of Piping System

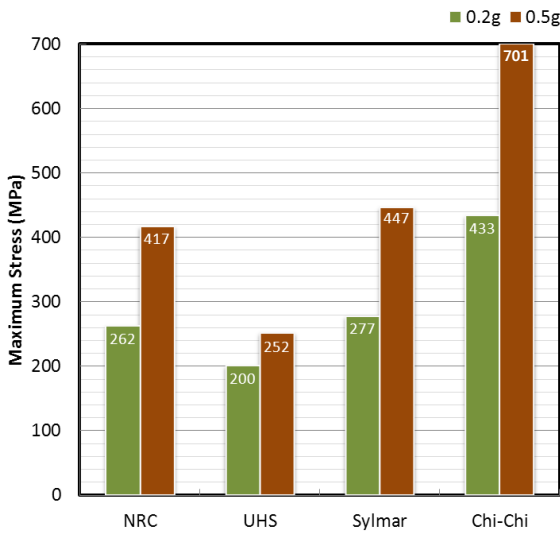


Fig. 17. Comparison of Maximum Stress Response of Isolated Piping System(0.2g vs. 0.5g)

항이 명확히 드러남을 볼 수 있다. 또한, 면진 배관의 경우, UHS 지반운동의 경우에 가장 작은 응력 응답 수준을 가지며, 이는 UHS 지진에 대한 면진 배관의 변위흡수 요구량이 가장 작기 때문이라고 할 수 있다. UHS 지반운동의 경우에는 PGA가 0.2g에서 0.5g로 증가하여도 응력 응답 수준이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 UHS 지반운동의 장주기 성분이 상대적으로 적은 반면, 고진동수 성분이 높기 때문인 것으로 판단된다. 비면진 배관의 경우, 0.5g PGA에서는 입력 지반운동의 주파수 특성에 무관하게 비슷한 응력 응답 수준을 보였다.

Chi-Chi 지진은 장주기 성분이 탁월하여 매우 큰 응력 응답 수준을 보였으며, 0.2g PGA 지반운동에 대해서도 허용응력 한계인 350MPa를 넘어서는 응력이 발생하였다. 따라서 장주기 성분 지반운동이 예측될 경우에는 지반운동 규모가 작을 경우에도 면진 배관의 경우 특수한 변위 흡수 기법의 도

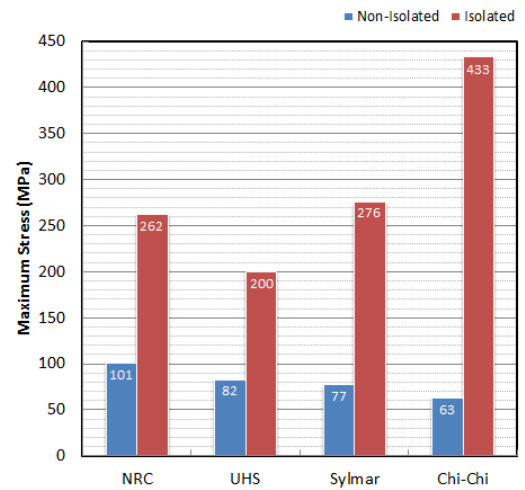


Fig. 18. Comparison of Maximum Stress Response (0.2g)

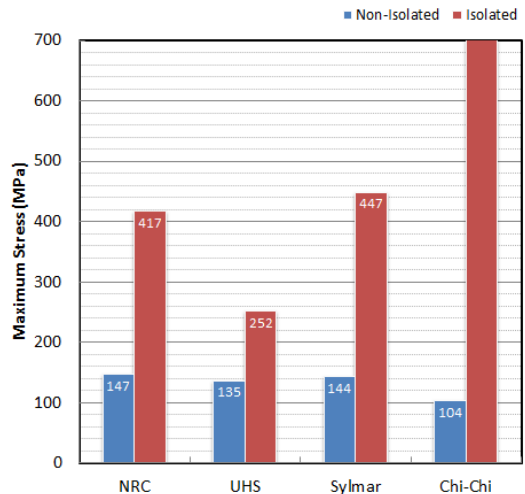


Fig. 19. Comparison of Maximum Stress Response (0.5g)

입 또는 변위 흡수 능력 향상을 위한 배관 경로/서포트의 변경이 필요함을 알 수 있다. 0.5g PGA 지반운동에 대해서는 면진 배관의 경우, UHS 지반 운동의 경우를 제외하고 모두 350MPa을 넘어서는 응력이 발생하였다. 이로부터 설계 기준을 넘어서는 강진 지반운동에 대하여 면진 배관의 성능 및 여유도를 확보하기 위해서는 면진 배관에 대한 상세 성능 평가가 선행되어야 하며, 과도한 상대변위를 효율적으로 흡수할 수 있는 추가적인 변위 흡수 대책 마련이 반드시 필요할 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

면진원전의 면진-비면진구간 연결 배관의 예비 내진성능 평가를 위하여 대표 배관을 선정하고 해당 배관에 대한 지진응답 해석을 수행하였다. 해석 대상 배관은 신고리 2호기에 적용된 직경 3인치의 주배관 비상 차단 배관으로 선정하였으며, 이에 대한 유한요소 모델을 도출하였다. 기존에 수행되었던 실험 결과와의 비교를 통해 개발된 유한요소 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 해석 대상 배관은 면진 원전의 면진 건물과 비면진 건물에 각각 양 끝단이 연결된 것으로 가정하였으며, 양 지점에 해당 층응답 및 지반운동 가속도를 입력하여 지진응답 해석 및 내진성능 평가를 수행하였다. 면진 측 지점에 입력될 층응답 가속도 시간이력을 도출하기 위하여, 면진장치 상부의 보조건물과 면진장치를 유한요소로서 모델링하였으며, 면진 건물에 대한 예비 지반운동 해석을 통해 배관이 연결된 절점에서의 가속도 응답 시간 이력을 도출하였다.

설계규모 지진뿐만 아니라 설계지진 규모를 상회하는 대규모 지진에 대한 성능평가도 동시에 수행하였으며, 설계 스펙트럼에 부합하도록 생성된 인공지진 가속도 시간이력 외에도 실제 계기기록 지진 가속도 시간이력에 대해서도 응답 해석을 통한 성능 평가를 실시하였다. 면진원전의 면진-비면진구간 연결 배관에 대하여 예비 성능평가를 수행한 결과, 면진원전 배관의 경우 면진장치가 설치되지 않은 경우에 비하여 현저히 큰 상대변위가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 장주기 성분이 큰 지반운동에 대해서는 지반운동 규모가 설계지반운동 규모에 불과할 때에도 허용응력 수준을 상회하는 응력이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 한편, 단주기 성분이 큰 UHS 지반운동과 같은 경우에는 설계규모를 상회하는 0.5g PGA 지반운동에 대해서도 허용 한계 응력을 넘어서는 응답이 발생하지 않았다. 이러한 결과는 지진파의 주파수 특성, 규모 등에 따라 배관이 보유하게 되는 내진성능이 현저하게 다를 수 있음을 의미하는 결과라 할 수 있다. 따라서 향후 원전에 면진장치를 적용하고 면진-비면진 구간의 연결 배관에 대한 안전성을 검증하기 위해서는, 해당 사이트의 지반운동 특성을 정확하게 판단할 필요가 있으며, 설계규모 지진하중뿐만 아니라 설계하중을 초과하는 지진하중에 대하여서도 면밀한 성능평가를 수행할 필요가 있을 것이다. 경우에 따라서는 과도한 상대변위를 흡수하기 위한 추가적인 대책, 즉 배관 경로의 우회/연장, 서포트 변경, 또는 특수한 변위흡수 장치의 도입 등이 필요할 것으로 판단된다.

/ REFERENCES /

1. Kim HU, Evaluation of the Applicability of Existing Design Formula for Seismic Isolation to Nuclear Power Plants, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2012;16(6):29-36.
2. Jung HJ, Eem SH, Kim MK, Choi IK, Seismic Fragility Evaluation of Isolated NPP Containment Structure Considering Soil-Structure Interaction Effect, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(2):53-59.
3. Kim JH, Kim MK, Choi IK, Response of Base Isolation System Subjected to Spectrum Matched Input Ground Motions, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(2):89-95.
4. Kim HU, Joo KH, Noh SH, Jung CG, Behavior Analysis of a Seismically Isolated NPP Structure by Varying Seismic Input Generation Method and Strong Ground Motion Duration, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(4):187-195.
5. Hong KJ, Lee JH, Kim JK, Characteristics of Earthquake Responses of an Isolated containment Building in Nuclear Power Plants According to Natural Frequency of Soil, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(6):245-255.
6. Zhang T, Brust FW, Shim DJ, Wikowski G, Nie J, Hofmayer C, Analysis of JNES Seismic Tests on Degraded Piping, NUREG/CR-7015; BNL-NUREG-91346-2010; Brookhaven National Laboratory; c2010.
7. DeGrassi G, Nie J, Hofmayer C, Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program, NUREG/CR-6983, BNL-NUREG-81548-2008; Brookhaven National Laboratory; c2010.
8. Cheung JH, Gae MS, Seo YD, Choi HS, Kim MK, Seismic Capacity Test of Nuclear Piping System using Multi-platform Shake Table, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(1): 21-31.
9. ASME, ASME CODE Section III, Division I, Subsection NB, ASME standard; c2007.
10. Kim IT, Kim KJ, Seo YD, Choi SJ, Kim MH, Choi HS, Moon SJ, Ultimate-level Seismic Performance Evaluation of a Piping System, KAERI/CM-1402/2010; Korea Atomic Energy Research Institute; c2010.
11. Lemaitre J, Chaboche JL, Shrivastava B, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press; c2002.
12. Computer and structures Inc, SAP2000: Analysis Reference; Berkeley; 1995.
13. U.S. NRC, Design Response Spectra for Sesimc Design of Nuclear Power Plants, U.S. NRC Regulatory Guide 1, 60; c1973.