

# Nonlinear Seismic Response Analysis of APR 1400 MS Line of Base-Isolated NPP



윤다운 부산대학교 지진방재연구센터  
김성완 부산대학교 지진방재연구센터

전범규 부산대학교 지진방재연구센터  
김민규 한국원자력연구원

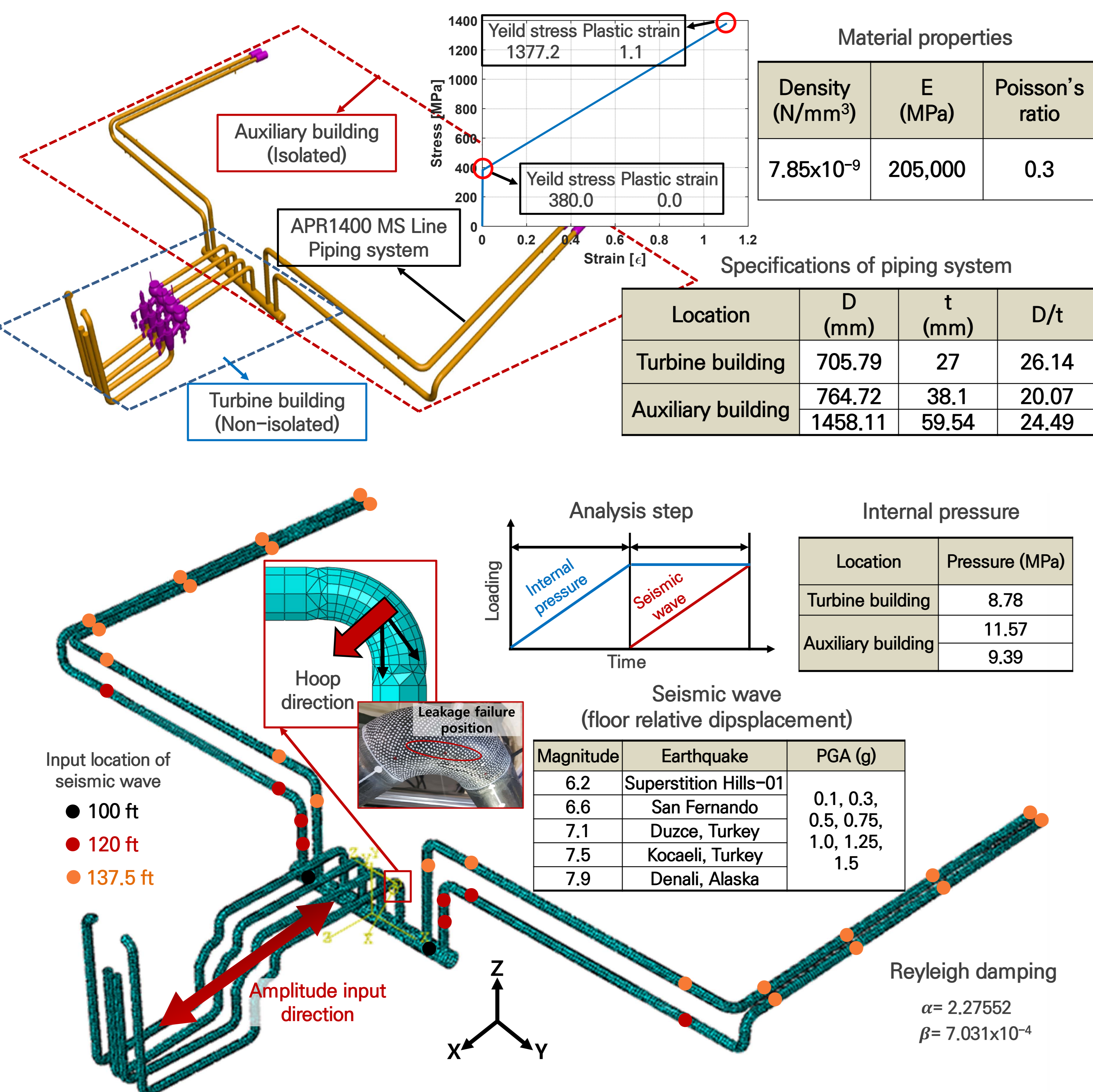


## ABSTRACT

본 연구에서는 NPP(Nuclear Power Plant) 배관시스템의 비선형 지진응답해석을 수행하였다. 해석을 위한 유한요소모델은 면진시스템이 설치된 Auxiliary building과 일반 구조물에 해당하는 Turbine building에 다중 지지되어 배치되는 APR1400 MS line을 참조하였다. 입력지진은 선행연구를 참고하여 LRBs(Lead Rubber Bearings)가 적용된 Base-isolated NPP의 층 변위응답을 사용하였다. 또한 Magnitude 및 PGA(Peak Ground Acceleration) 크기에 따라 변수해석을 수행하였다. 배관시스템의 취약부인 Elbow의 응력-변형률의 관계로 손상지수를 계산하여 설계기준 및 Elbow 실험결과와 비교하였다.

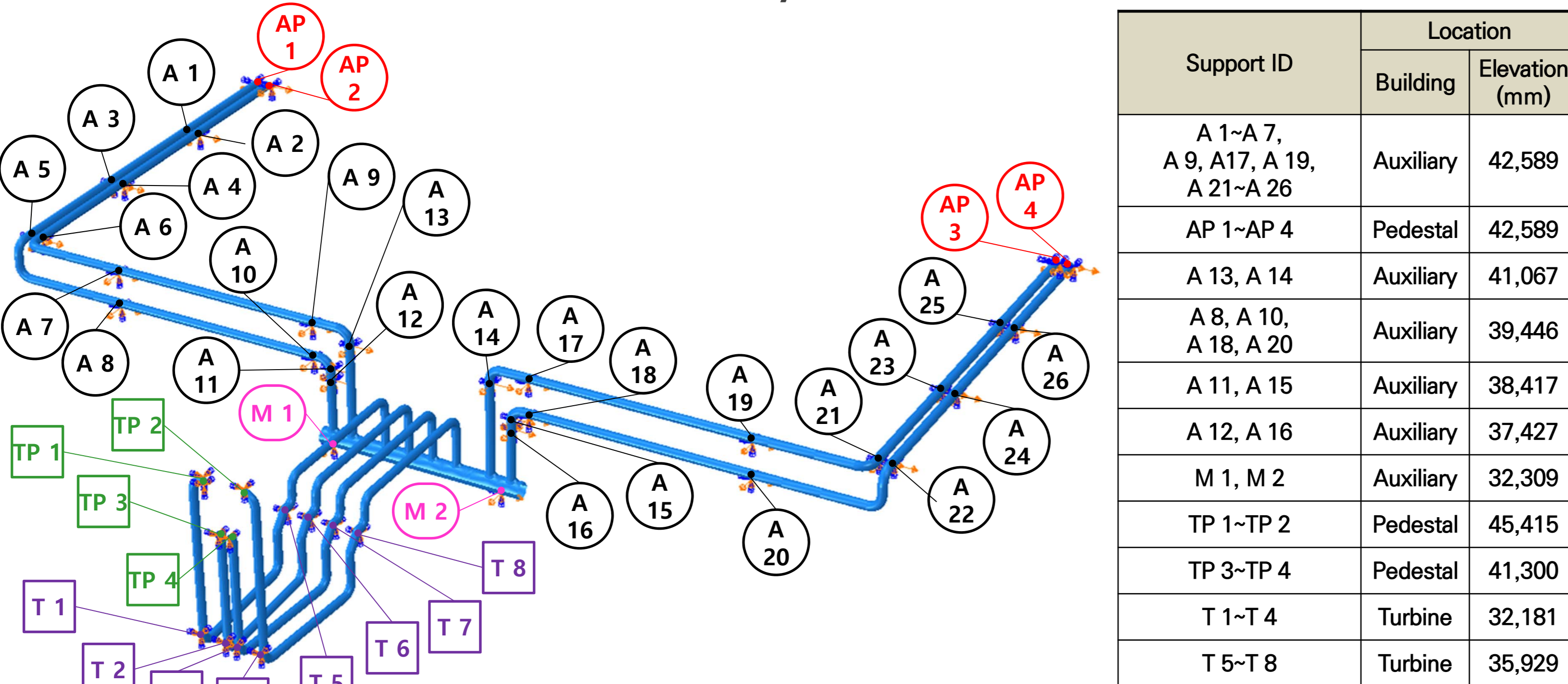
## Finite element model & analysis

### Finite element model

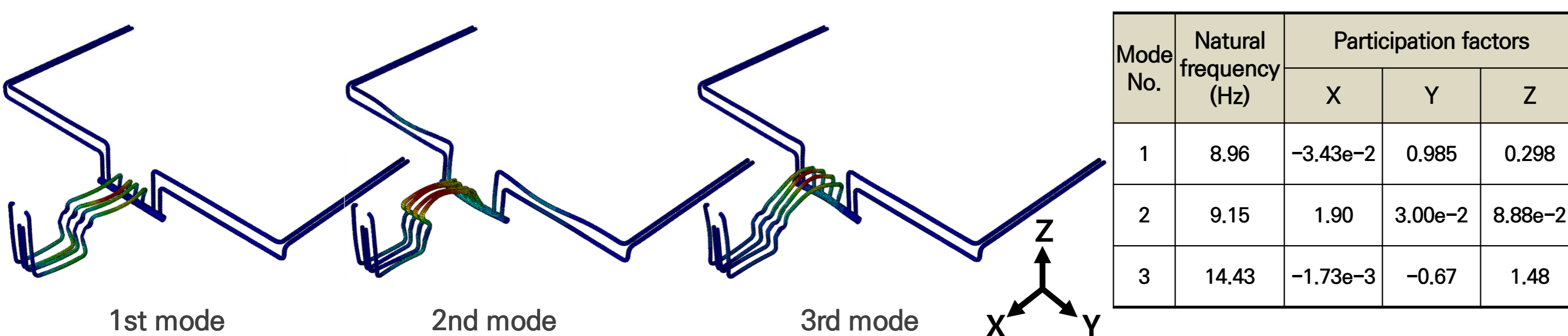


- 배관의 재료는 ASME B36.10M의 탄소강 SA106, Grade B 사용
- Shell 요소(S4R)로 구성, 모델의 간소화를 위해 배관 시스템 취약부인 Elbow의 요소 크기를 작게 구성
- 사전 연구(배관요소시험 결과)를 참고하여 Elbow 45° 방향의 로컬좌표를 설정하고 Crown의 Hoop 방향에 대한 응력-변형률 응답 산출
- 내압은 ASME BPVC Section III를 참고하여 직경과 두께에 따른 내압을 계산하여 적용
- 입력지진은 선행 연구에서 도출된 지반과 지진격리된 구조물의 층 상대변위응답 시간이력을 사용, Elbow에 In-plane 방향에 대한 하중이 작용하도록 가력방향을 지정
- 해석 단계로 Step1에서 내압을 가압하고 Step2에서 내압을 유지하여 해석 수행

### Boundary conditions

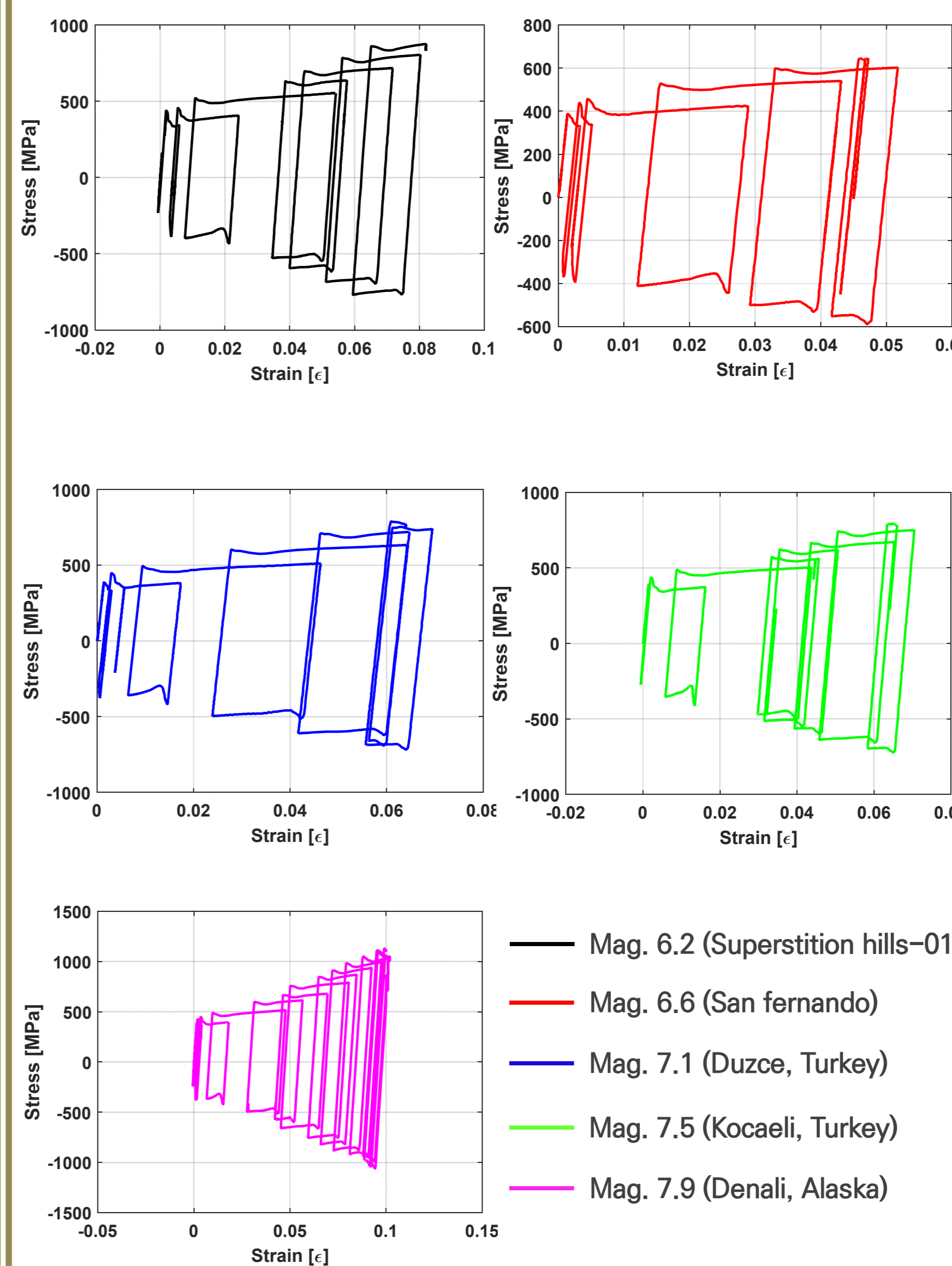


### Mode shape



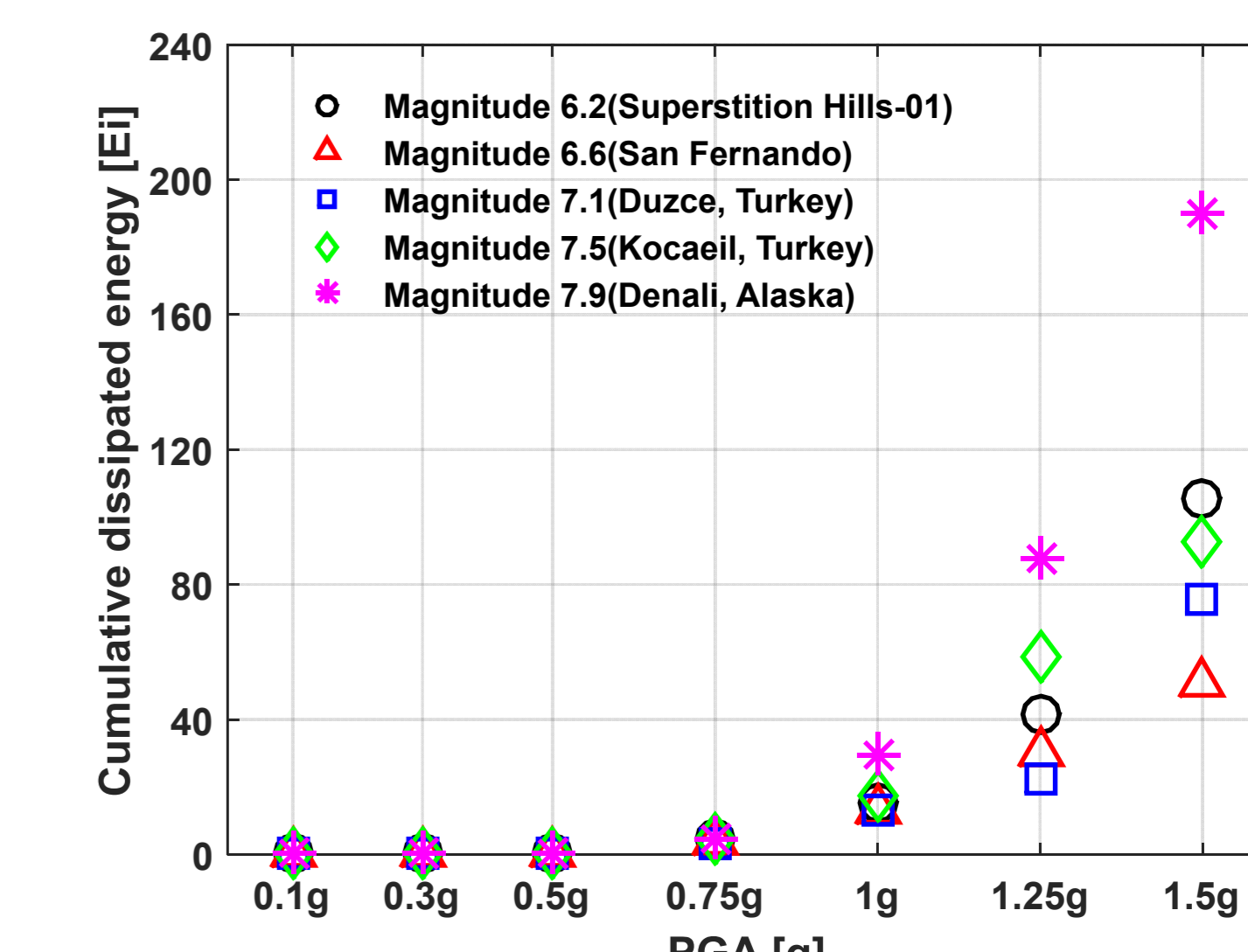
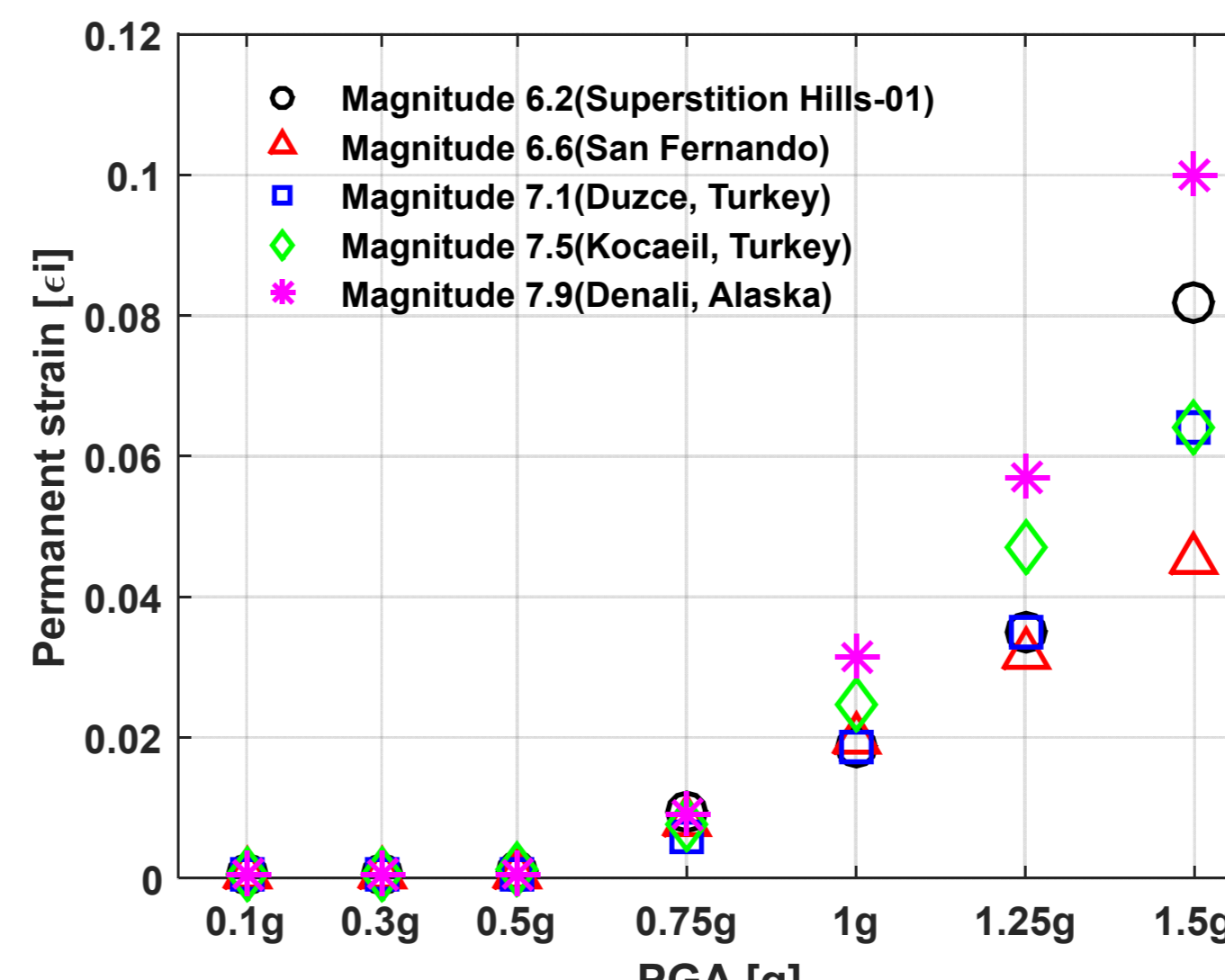
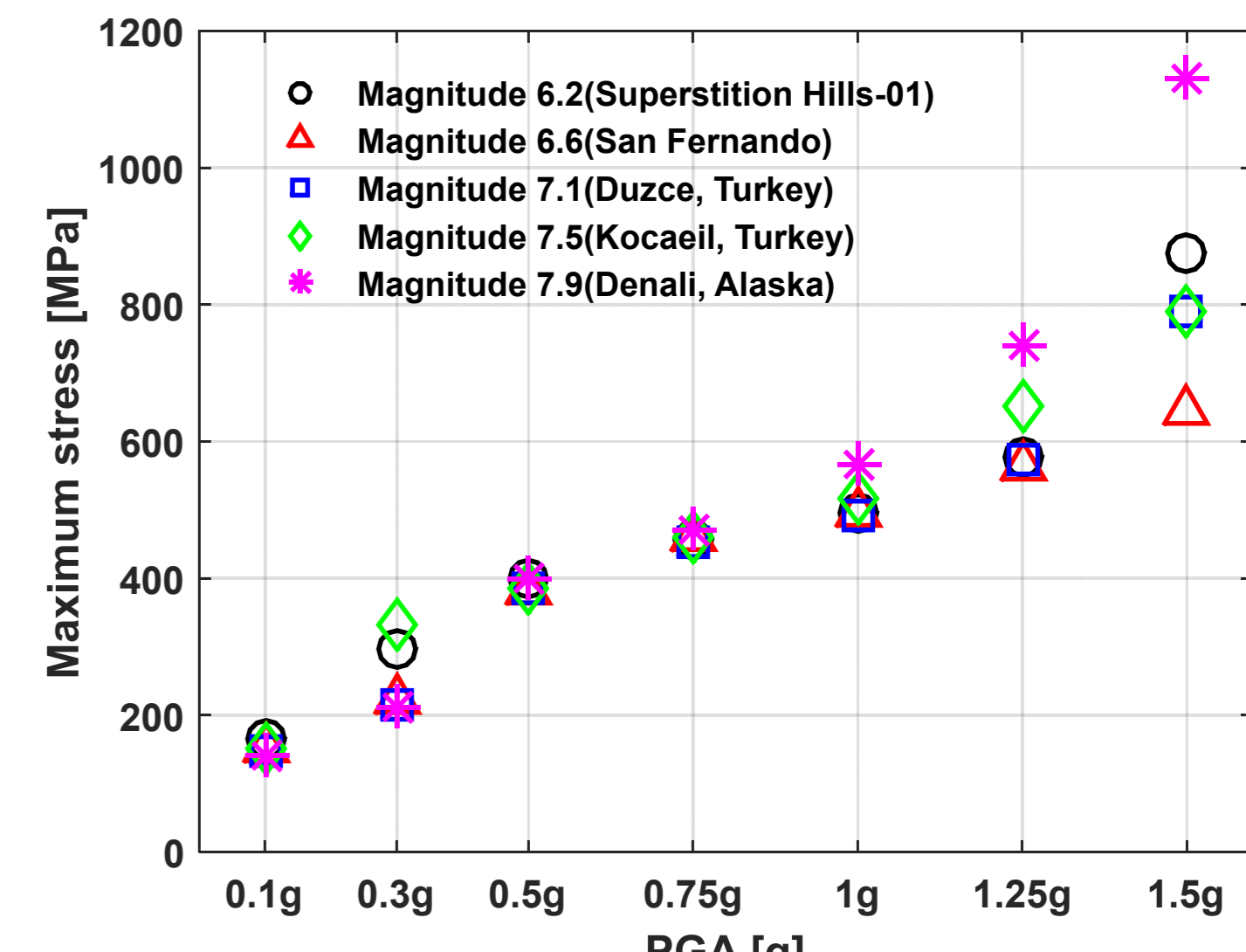
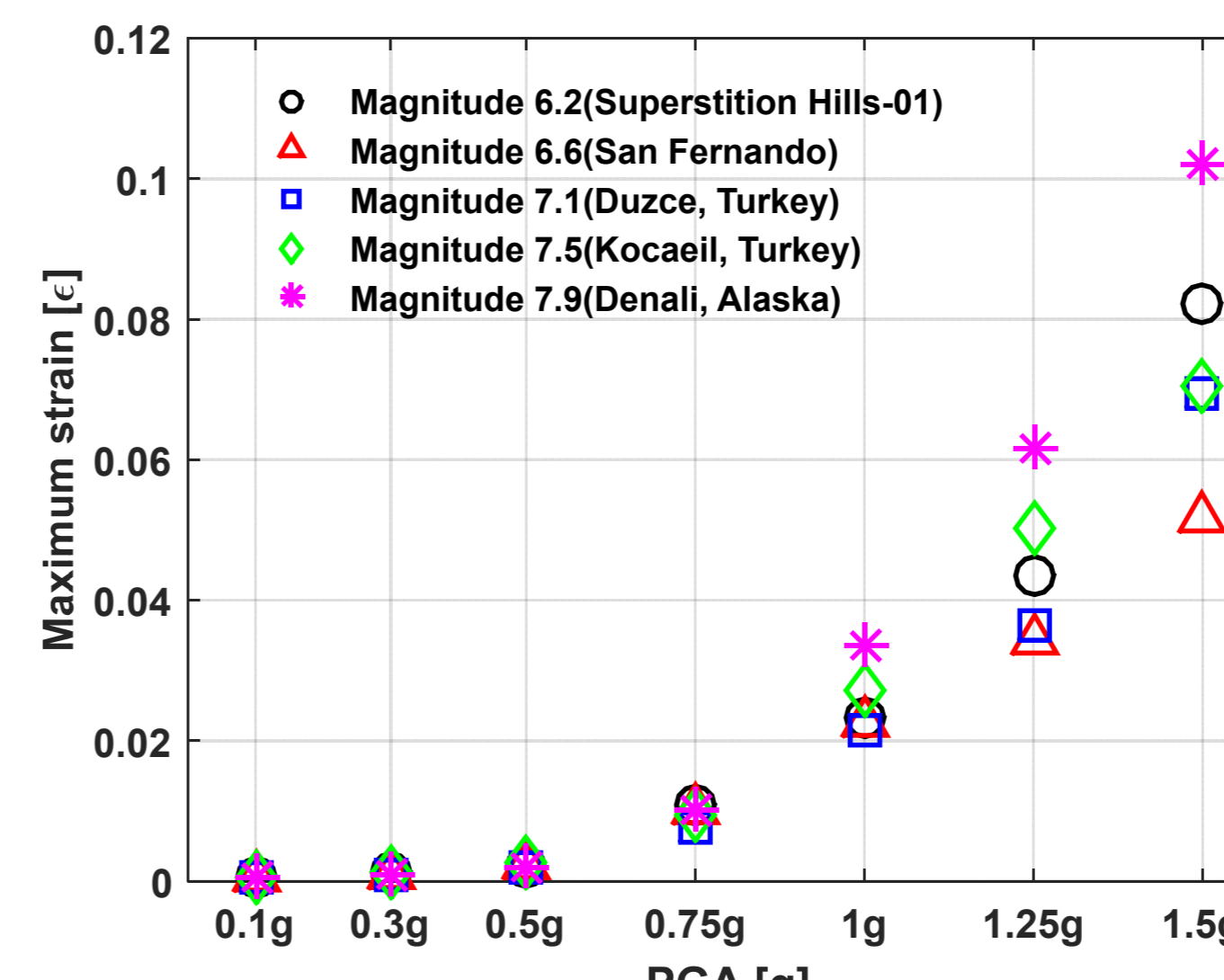
## Analysis results

### Stress-strain relationship (PGA 1.5g)

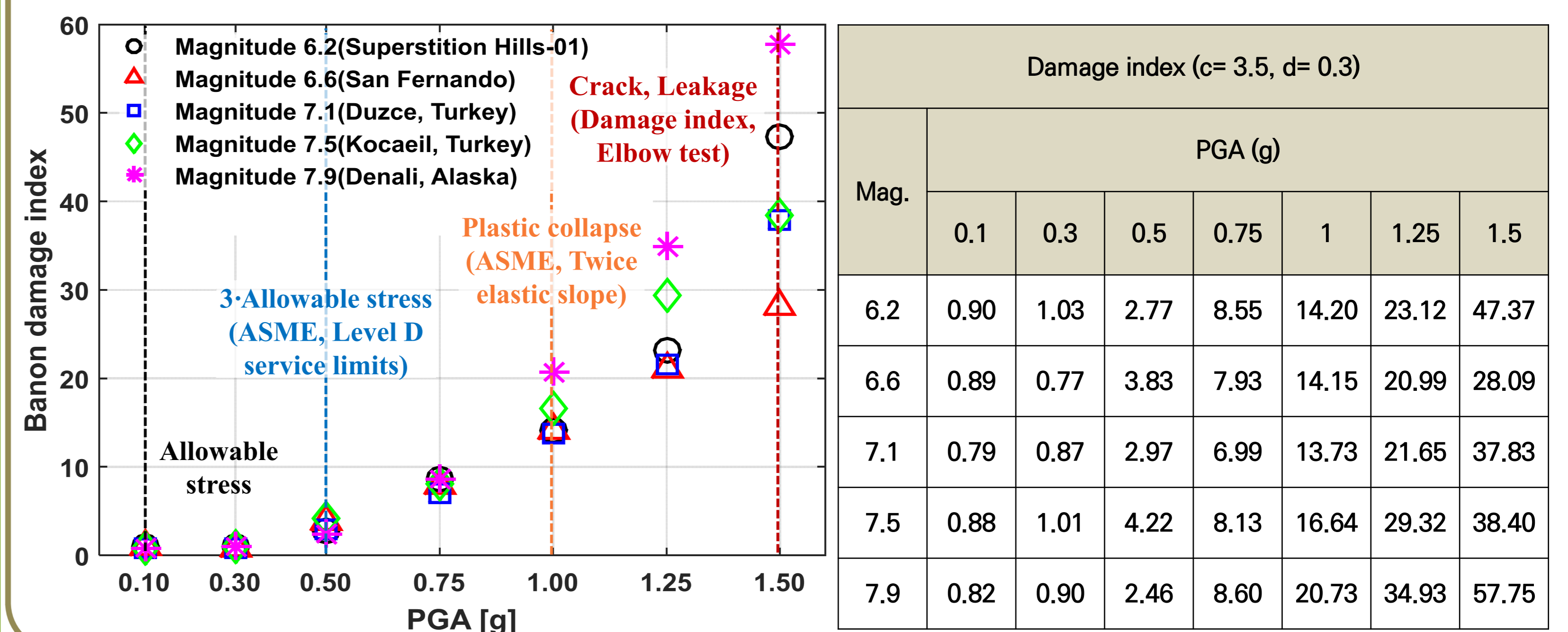


### Finite element analysis results

Mag.	EQ	PGA (g)	Energy	Max. ε	Max. σ (MPa)
6.2	Superstition Hills-01	0.10	0.0007	0.001	164.65
		0.30	0.0026	0.001	295.17
		0.50	0.1483	0.002	399.41
		0.75	4.5273	0.011	454.70
		1.00	15.578	0.023	494.35
		1.25	41.777	0.044	578.66
6.6	San Fernando	0.10	0.0007	0.001	149.90
		0.30	0.0000	0.001	220.41
		0.50	0.4456	0.002	380.91
		0.75	3.9116	0.010	461.18
		1.00	12.936	0.022	496.79
		1.25	30.410	0.034	564.46
7.1	Duzce, Turkey	0.10	0.0000	0.001	148.87
		0.30	0.0005	0.001	213.43
		0.50	0.1896	0.002	386.30
		0.75	2.9411	0.008	453.45
		1.00	12.865	0.022	491.83
		1.25	22.645	0.036	573.63
7.5	Kocaeli, Turkey	0.10	0.0005	0.001	149.98
		0.30	0.0015	0.001	333.35
		0.50	0.6479	0.003	386.88
		0.75	4.4118	0.010	458.19
		1.00	17.233	0.027	515.56
		1.25	58.902	0.050	651.95
7.9	Denali, Alaska	0.10	0.0001	0.001	141.48
		0.30	0.0007	0.001	211.03
		0.50	0.0979	0.002	400.30
		0.75	4.8860	0.010	469.95
		1.00	29.401	0.033	565.06
		1.25	87.592	0.062	739.51
1.50	189.59	0.102	1130.00		



### Banon damage index



## Conclusions

Base-isolated NPP의 배관시스템인 APR1400 MS line을 대상으로 비선형 지진응답해석을 수행하고 결과를 분석하였다. 인공지진의 변수해석을 통하여 배관 지진취약부인 Elbow의 응답을 이용하여 설계기준 및 실험결과와 비교하였다. PGA의 크기가 0.1 g일 때 응력의 응답은 허용응력 이상이며, 인공지진의 PGA가 0.5g 일 때 ASME level D limits를 초과하고, 1.0g일 때 collapse point (TES method) 이상인 경우가 나타났다. 선행연구에서 원자력 탄소강관의 누수균열은 응력-변형률의 상관관계에 따른 Banon의 손상지수가 35.25로 정의되었다. 따라서 PGA가 1.5g일 때 균열에 의한 누수가 발생할 수 있을 것으로 추정하였다. 추후 더 많은 변수 해석을 통하여 지진취약도 분석을 통한 내진성능평가를 수행할 예정이다.