

운전성 유지를 위한 파이프랙의 한계상태와 지진취약도

Limit States and Corresponding Seismic Fragility of a Pipe Rack for Maintaining Operation

김주람¹⁾ · 홍기중^{2)*} · 황진하³⁾

Kim, Joram¹⁾ · Hong, Kee-Jeung^{2)*} · Hwang, Jin-Ha³⁾

¹⁾국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 ²⁾국민대학교 건설시스템공학부 교수 ³⁾한국건설생활환경시험연구원 광주전남센터 선임연구원

¹⁾Graduate Student, Department of Civil Engineering, Kookmin University. ²⁾Professor, Department of Civil Engineering, Kookmin University.

³⁾Researcher, Gwangju & Jeonnam Center of Korea Conformity Laboratories

/ A B S T R A C T /

Unlike other facilities, maintaining processes is essential in industrial facilities. Pipe racks, which support pipes of various diameters, are important structures used in industrial facilities. Since the transport process of pipes directly affects the operation of industrial facilities, a fragility curve should be derived based on considering not only the pipe racks' structural safety but also the pipes' transport process. There are several studies where the fragility curves have been determined based on the structural behavior of pipe racks. However, few studies consider the damage criteria of pipes to ensure the transportation process, such as local buckling and tensile failure with surface defects. In this study, an analysis model of a typical straight pipe rack used in domestic industrial facilities is constructed, and incremental dynamic analysis using nonlinear response history analysis is performed to estimate the parameters of the fragility curve by the maximum likelihood estimation. In addition, the pipe rack's structural behavior and the pipe's damage criteria are considered the limit state for the fragility curve. The limit states considered in this paper to evaluate fragility curves are more reasonable to ensure the transportation process of the pipe systems.

Key words: Industrial facility, Process, Operation, Pipe rack, Pipe, Fragility, Limit state

1. 서론

최근 전 세계적 지진피해 사례가 증가하면서, 국내도 지진의 안전지대가 아니라는 인식과 함께 다양한 주요 시설물의 내진설계기준과 내진성능평가를 점검하고 개선할 필요성이 제고되고 있다. 특히, 자동화를 위한 로봇, 지능화를 위한 첨단반도체, 배터리 및 에너지 관련 제품들의 생산에 필요한 산업시설의 중요성은 다가오는 미래에 더욱 높아지고 있다.

산업시설의 일부 공정에서, 지진 또는 다른 재해로 인해 비정상적인 멈춤 또는 사고가 발생한다면, 해당 공정뿐만 아니라 산업시설의 전체적인 생산활동에 악영향을 미칠 수 있다. 이는 경제적 손실뿐만 아니라 폭발 등의 사고로 이어질 수 있기 때문에, 정상적인 운전성을 유지하도록 산업시설의 구조적 안전성 확보가 필요하다. 하지만 산업시설의 운전성 유지를 확보하기 위한 내진설계 및 내진성능평가에 관한 연구는 아직 타구조물에 비해 상

대적으로 미비한 상황이다. ASCE 7에서는 파이프랙을 포함한 다양한 구조물의 내진설계를 위한 응답수정계수를 제시하고 있으며, 국내에서도 이를 참고하여 내진설계를 수행하고 있다[1, 2]. 그러나, 이러한 내진설계는 공정의 운전성을 유지하기에 충분하지 않으며, 이를 개선할 수 있는 내진성능목표를 설정할 필요가 있다. 이를 개선하기 위해, 산업시설 사업주의 공정 운전성 유지에 대한 요구를 만족시킬 수 있는 설계 개념이 최근에 제시되어 관련 기준을 제정하는 노력이 이루어지고 있다[3].

파이프랙(배관지지대)은 산업시설에 일반적으로 존재하는 구조물로서, 적재된 파이프 또는 기타 설비를 지지하고 있다. 지금까지 파이프랙의 지진취약도 함수 도출을 위한 한계상태는 대부분 파이프랙의 구조 손상에 초점을 맞추고 있다[4-6]. HAZUS Earthquake Model Technical Manual (2022)의 5장에서 건물의 재료와 형상에 따라 한계상태를 최대층간변위비 또는 최대회전변위비로 제시하고 있다[7]. Luigi와 George의 연구에서는 파이프랙의 구조손상 뿐만 아니라 “Canadian Standard Association, Oil and Pipeline Systems (CSA-Z662, 2019)”[8] 및 “European Committee for Standardization, Silos, tanks and pipelines, Eurocode 8, part 4 (EN 1998-4, 2006)”[9]을 참고하여 파이프 변형을 고려한 다양한 한계상태를

*Corresponding author: Hong, Kee-Jeung

E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr

(Received September 18, 2023; Revised October 4, 2023; Accepted October 4, 2023)

Table 1. Specific building types and fragility curve parameters in HAZUS Earthquake model technical manual (2022)

Label	Description	Height				Drift ratio of Damage state			
		Range		Typical		Slight	Moderate	Extensive	Complete
		Name	Stories	Stories	Meter				
S1L	Steel Moment Frame	Low-Rise	1 - 3	2	7.32	0.0060	0.0120	0.0300	0.0800
S1M		Mid-Rise	4 - 7	5	18.29	0.0040	0.0080	0.0200	0.0533
S1H		High-Rise	8 +	13	47.55	0.0030	0.0060	0.0150	0.0400
S2L	Steel Braced Frame	Low-Rise	1 - 3	2	7.32	0.0050	0.0100	0.0300	0.0800
S2M		Mid-Rise	4 - 7	5	18.29	0.0033	0.0067	0.0200	0.0533
S2H		High-Rise	8 +	13	47.55	0.0025	0.0050	0.0150	0.0400

사용하여 지진취약도를 구하였다[6]. 파이프 변형 한계상태는 파이프의 누출을 막기 위해 제시된 기준이므로[8], 이는 파이프 수송기능의 유지 여부를 나타내는 한계상태로 생각할 수 있다. 파이프의 수송기능을 확보하는 것은 전체 공정의 운전성 유지에 매우 중요하므로, 파이프랙의 구조적 거동 뿐만 아니라 누출에 영향을 미치는 파이프 자체의 변형을 함께 고려하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 파이프랙의 지진취약도 함수 도출을 위한 한계상태를 파이프랙의 구조거동 성능수준 및 파이프 자체의 변형 성능수준으로 나누어 각각 제시한다. 또한, 이들에 기초한 지진취약도를 각각 구하여 비교하고, 이들 중 가장 보수적인 경우를 고려하여 지진취약도를 제시한다.

2. 지진취약도 한계상태

2.1 파이프랙 손상기반 한계상태

앞 장에서 언급한 바와 같이, HAZUS Earthquake Model Technical Manual (2022)의 5장에서 건물의 재료와 형상에 따라 한계상태를 최대층간변위비 또는 최대횡변위비로 제시하고 있으나[7], 파이프랙의 한계상태를 별도로 다루고 있지 않다. 일반적으로 구조적 안전성 확보를 위해 파이프랙의 중방향은 가새를 포함하고 있기 때문에 HAZUS에서 제시하고 있는 건물 종류 중 철골가새골조(Steel Braced Frame, S2)으로 분류하고, 횡방향은 파이프의 진로와 간섭을 피하기 위해 가새를 사용하지 않으므로 철골모멘트골조(Steel Moment Frame, S1)로 분류할 수 있다. 또한, HAZUS에서는 구조물 높이에 따른 상세 분류를 제시하고, 각 분류에 따른 손상상태별 전체 높이에 대한 횡변위비를 제시하고 있다(Table 1). 손상상태는 크게 네 가지(Slight, Moderate, Extensive, Complete)로 구분되며, S1에 대한 정성적인 손상상태 정의는 Table 2와 같다. 경제적인 설계를 위해, 지진 시 파이프랙이 충분히 연성거동하도록 하여 붕괴 없이 파이프를 지지하는 것을 목표로 설계하는 것이 바람직하다. 이를 참고하여 파이프랙의 붕괴방지(Complete) 손상상태를 지진취약도의 한계상태로 취급할 수 있다.

2.2 파이프 손상기반 한계상태

본 연구에서는 파이프 수송기능의 유지 여부를 나타내기 위해, Luigi와 George의 파이프 변형(누출)을 고려한 한계상태[6]를 사용하여 지진취약도를 구하고, 2.1 절에서 구한 지진취약도와 비교하고자 한다.

현재 국내에서는 “가스도매사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설 기

Table 2. Materials of pipe rack and pipe

Steel Moment Frame (S1)	
Damage	Description
Slight	<ul style="list-style-type: none"> Minor deformation of joint Minor cracks in some welds
Moderate	<ul style="list-style-type: none"> Some steel members may yield, resulting in observable permanent rotation in the connections Some welded connections may exhibit large cracks through the weld etc.
Extensive	<ul style="list-style-type: none"> Most steel members exceeded their yield capacity, resulting in significant permanent lateral deformation of the structure.
Complete	<ul style="list-style-type: none"> A significant portion of the structural elements have exceeded their ultimate capacity or some critical structural element or connection has failed, resulting in dangerous permanent lateral displacement, partial collapse or collapse of the building. Approximately 3~8% of the total area of the damaged S1 building are expected to collapse.

술, 검사, 정밀안전진단 기준(KGS FS451, 2017)”에서 허용응력에 기반하여 파이프의 설계 및 평가가 이루어지고 있다[10]. 허용응력 기반 평가는 보수적인 측면에서 장점을 갖지만, 비경제적인 뿐만 아니라 파이프의 정상적인 작동 여부를 확인하기 어렵다는 한계를 갖는다. 이러한 측면에서 “Canadian Standard Association, Oil and Pipeline Systems (CSA-Z662, 2019)”[8] 및 “Det Norske Veritas, Submarine Pipeline Systems (DNV-OS-F101, 2011)”[11]의 해외 문헌들에서는 파이프 설계 및 평가에서 응력뿐만 아니라 변형률을 지표로 사용하고 있다. CSA-Z662에서는 지진하중이 작용할 때, 파이프의 사용성 측면의 한계상태를 국부좌굴과 표면 결함이 존재하는 경우 인장 파괴(이하 ‘표면결함 인장파괴’로 칭함)로 나누어서 제시하고 있다[8]. 따라서, 본 논문에서도 파이프의 수송 기능 유지를 위한 한계상태로 파이프의 국부좌굴 및 표면결함 인장파괴를 사용한다.

2.2.1 국부좌굴

외부 하중으로 인해 압축력이 작용하는 동안 파이프에 국부좌굴이 발생할 수 있다. 연성이 큰 파이프의 경우, 국부좌굴이 발생해도 파이프 내 물질 이동에 큰 영향이 발생하지 않지만, 반복적인 하중으로 인해 좌굴 영역에 변형이 집중되거나 피로 균열로 인한 손상이 발생할 수 있다. 따라서 CSA-Z662에서는 한 가지 또는 두 가지 하중이 작용하는 경우에 따라 발생할 수 있는 국부좌굴 및 축방향 압축변형의 방지를 위해 각각 압축변형률을 제한

한데[8]. 식 (1)은 두 가지 하중이 작용하는 경우 제시되는 식이며, 여기서 ϕ_{ec} 는 압축에 대한 저항계수, ϵ_c^{crit} 는 임계압축변형률, ϵ_{cf} 는 축방향 및 원주 방향의 압축변형률이다. 일반적으로 파이프 내 유해물질이 없는 강관의 경우 압축에 대한 저항계수는 0.8로 가정할 수 있고, 임계압축변형률은 CSA-Z662에서 제시한 식 (2)와 (3)에 따라 산정한다. $(P_i - P_e)D/(2tf_y)$ 가 0.4 미만인 경우, 식 (2)를 적용하며, 이상인 경우는 식 (3)을 적용하여 임계압축변형률을 계산한다. 여기서, P_i 는 내압, P_e 는 외압, t 는 배관의 두께, D 는 배관의 직경, E_s 는 탄성계수, f_y 최소항복강도이다.

$$\phi_{ec}\epsilon_c^{crit} \geq \epsilon_{cf} \quad (1)$$

$$\epsilon_c^{crit} = \frac{0.5t}{D} - 0.0025 + 3000 \left[\frac{(P_i - P_e)D}{2tE_s} \right]^2 \text{ for } \frac{(P_i - P_e)D}{2tf_y} < 0.4 \quad (2)$$

$$\epsilon_c^{crit} = \frac{0.5t}{D} - 0.0025 + 3000 \left[\frac{0.4f_y}{E_s} \right]^2 \text{ for } \frac{(P_i - P_e)D}{2tf_y} \geq 0.4 \quad (3)$$

2.2.2 표면결함으로 인한 인장 파괴

파이프의 인장 파괴는 일반적으로 발생하기 쉽지 않다. 하지만 용접 등으로 표면에 결함이 발생하는 경우, 결함 부근에서 인장력으로 인해 급격한 파괴가 발생할 수 있다[12]. 따라서 CSA-Z662에서도 표면결함이 존재하는 경우 인장변형률을 식 (4)로 제한하고 있다[8]. 여기서 ϕ_{et} 는 인장에 대한 저항계수, ϵ_t^{crit} 는 임계인장변형률, ϵ_{tf} 는 축방향 및 원주방향의 인장변형률이다. 일반적으로 강관의 인장에 대한 저항계수는 0.7로 가정할 수 있으며, 임계인장변형률은 식 (5)를 통해 산정할 수 있다.

$$\phi_{et}\epsilon_t^{crit} \geq \epsilon_{tf} \quad (4)$$

$$\epsilon_t^{crit} = A(\delta, \lambda, \xi, \eta)B(\lambda)C(\xi, \eta) \quad (5)$$

식 (5)의 각 함수는 식 (6)으로 정의된다[13]. 여기서 δ 는 Crack Tip

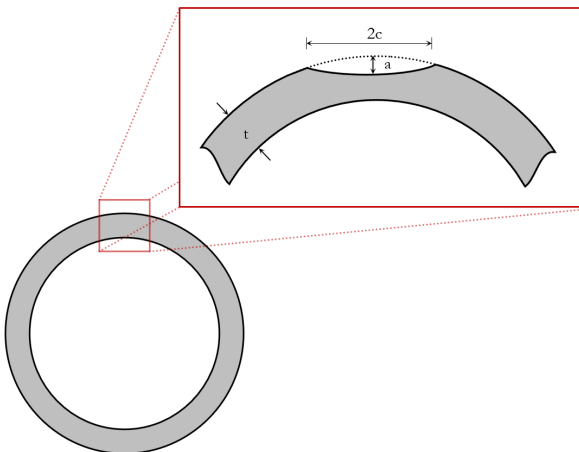


Fig. 1. Example of pipe surface defects

Opening Displacement (CTOD) 시험 값으로, 강재는 일반적으로 0.1~0.3의 값을 갖는다. 또한, λ 는 항복강도에 대한 인장강도 비, ξ 및 η 는 두께에 대한 결함 크기의 비이다. 여기서 파이프 표면에 발생하는 결함의 크기는 Fig. 1과 같이 결함의 전체 길이를 $2c$, 깊이를 a 로 정의한다.

$$A(\delta, \lambda, \xi, \eta) = \delta^{2.36 - 1.58\lambda - 0.101\xi\eta} \quad (6a)$$

$$B(\lambda) = 1 + 16.1\lambda^{-4.45} \quad (6b)$$

$$C(\xi, \eta) = -0.157 + 0.289\xi^{-0.241}\eta^{-0.315} \quad (6c)$$

3. 해석 예제

3.1 모델 검증

본 연구에서는 모델 검증을 위해 Danesi et al.에 의해 연구된 카리브해에 위치한 정유소의 15 m 규모 파이프랙을 활용하였다[14]. 참고문헌과 동일하게, 파이프랙 뿐만 아니라 파이프 및 공기냉각기를 모델링에 포함하였으며, 정유소에 위치한 파이프랙임을 감안하여 1~3층 높이의 기둥에는 콘크리트 내화처리를 포함하였다. Fig. 2의 (a)는 참고문헌에서 모델링한 파이프랙, (b)는 본 연구에서 모델링한 검증용 파이프랙 모델이다. 두 모델의 고유치해석 결과는 Table 3와 같이 Danesi et al.과 본 연구의 검증용 모델 (verifi. model)의 1차 모드의 횡방향(transverse direction) 주기가 일치하지만, 종방향(longitudinal direction)의 주기는 각각 Danesi et al. 모델의

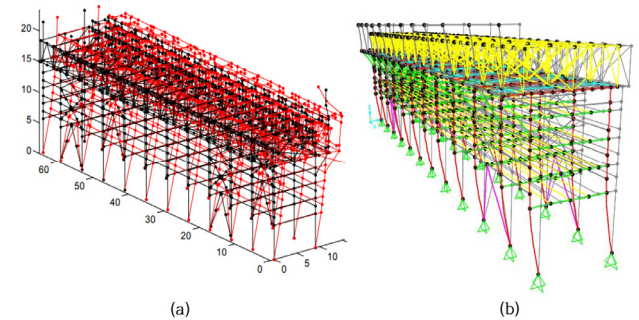


Fig. 2. Pipe rack models for verification: (a) model in Danesi et al. and (b) verification model in this study

Table 3. Modal analysis results for verification

Mode Number	Period [s]		Effective mass			
	Danesi et al.	verifi. model	transverse		longitudinal	
	Danesi et al.	verifi. model	Danesi et al.	verifi. model	Danesi et al.	verifi. model
1	0.881	0.881	0.902	0.984	0.006	0.000
:	:	:	:	:	:	:
7	0.468	:	0.003	:	0.856	:
:	:	:	:	:	:	:
11	:	0.302	:	0.000	:	0.928

7차 모드 주기가 0.468초이며, 검증용 모델의 11차 모드 주기는 0.302초로 서로 상이하다. 이는 파이프 및 상부에 적재된 공기냉각기에 관한 모델링 정보가 부족하여 일부 차이가 발생한 것으로 판단된다. 결론적으로, 지진에 취약한 횡방향 질량참여율이 90% 이상 차지하는 1차 모드의 주기가 일치한다는 것은 모델이 적절하게 구축되었음을 의미한다.

3.2 직선형 파이프랙 해석 예제

본 연구에서는 앞서 검증한 방식의 모델링 과정과 동일한 방식으로 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 직선형 파이프랙의 모델을 구축하였다. Fig. 3과 같이 가로 3 m, 높이 6 m 규모의 파이프랙을 해석 예제 모델로 선정하였으며, 일반적으로 40~50 m 간격으로 존재하는 종방향 가새를 포함할 수 있도록 종방향의 단위 길이는 60 m로 가정하였다. 파이프랙 하단과 기초의 연결은 힌지로 가정하였고, 파이프 내부 유체의 질량은 없는 것으로 가정한다. 비선형 동적해석을 통해 파이프 자체의 거동을 확인하기 위해 파이프를 프레임요소로 모델링하여 파이프랙 모델과 함께 고려하였다.

파이프랙에 적재되는 파이프의 지지방식은 모든 방향을 구속하는 앵커(Anchor) 지지방식, 축방향 거동을 허용하는 가이드(Guide) 지지방식, 축방향 거동을 제한하는 스톱퍼(Stopper) 지지방식, 수직 거동을 허용하는 스프링(Spring) 지지방식으로 구분할 수 있다. 본 연구에서, 모든 파이프는 앵커 지지부로 파이프랙 위에 지지되는 것으로 가정하였다. 파이프의 앵커 지지부를 모사하기 위해 5 cm 정육면체 프레임요소를 사용하였으며, 이의 재료물성치는 파이프랙과 동일한 것으로 가정하였다. 앵커 지지부는 파이프 축방향 3 m 간격으로 배치하였다. 또한, 실제 파이프의 단부는 종방향으로 단락되지 않고 타 파이프 또는 설비와 연결되어 있지만, 모델링의 편의를 위해 파이프의 단부를 자유단으로 가정하였다.

본 연구에서 사용된 파이프랙 및 파이프의 제원은 각각 KS D 3503[15]에서 제시하고 있는 SM275와 KS D 3632[16]에서 제시하는 SNT275를 사용하였으며, 구체적인 물성치는 Table 4와 같다. 파이프의 직경에 따라 동적거동의 차이가 있을 것으로 예측되므로, 파이프의 직경(6 in, 10 in, 14 in, 22 in, 26 in)을 임의로 선정하여 파이프랙의 2층과 3층에 각각 균등한 간격으로 배치하였다.

직선형 파이프랙의 고유치 해석결과는 Table 5와 같다. 앞서 진행한 검증용 모델과 달리 1차 모드의 주기가 감소한 이유는 파이프랙의 전체적인 크기가 낮아지면서 강성이 증가하고, 이로 인해 1차 모드의 주기가 짧아졌을 것으로 판단된다. 지진하중 발생 시 종방향보다 횡방향이 상대적으로 취

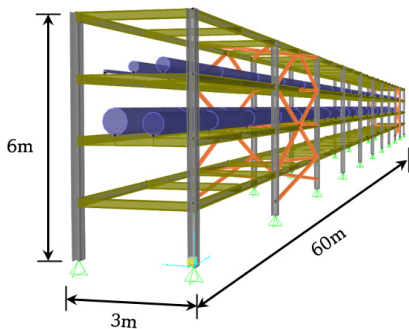


Fig. 3. Straight pipe rack model

Table 4. Materials of pipe rack and pipe

Material property Data			
Property	Unit	Pipe rack	Pipe
Modulus of Elasticity	GPa	210	
Poisson ratio	-	0.3	
Coefficient of Thermal Expansion	-	0.0000120	
Shear Modulus	GPa	80.769	
Weight per Unit Volume	kg/m ³	7854.6	
Minimum Yield Stress	MPa	275	
Minimum Tensile Stress	MPa	410	

Table 5. Result from modal analysis on the straight pipe rack

Mode Number	Period [s]	Effective mass		
		longitudinal	transverse	vertical
1	0.274703	0.00000	0.90916	4.41E-07
2	0.271013	1.74E-10	2.97E-19	0.00000
3	0.237908	8.35E-16	0.00017	4.36E-08
4	0.197665	1.10E-05	3.69E15	1.96E-14
:	:	:	:	:

약하기 때문에, 횡방향에 대해 동적증분해석을 진행하여 취약도를 구한다.

4. 지진취약도

4.1 입력지진파

Fig. 4의 막대 그래프 및 꺾은선 그래프는 각각 실제 관측된 입력지진파의 규모와 최고지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 의미한다. 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 파이프랙 모델을 사용하므로 국내에서 관측된 지진파를 사용하는 것이 타당하지만, 국내 관측 자료가 부족하여 다양한 지진세기 자료를 얻기 어렵다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 국외에서 관측된 지진 기록으로부터 입력지진파의 불확실성을 고려하기 위해 규모 및 PGA 수준이 다양하도록 임의의 30개의 지진파를 선정하였다. Fig. 4의 막대그래프 중 파란색 막대는 선정된 30개의 지진파이다. 이때, 선정된 입력지진파의 응답스펙트럼은 Fig. 5에 도시하였으며, 입력지진파 별로 스펙트럼 가속도의 크기뿐만 아니라 진동수 성분

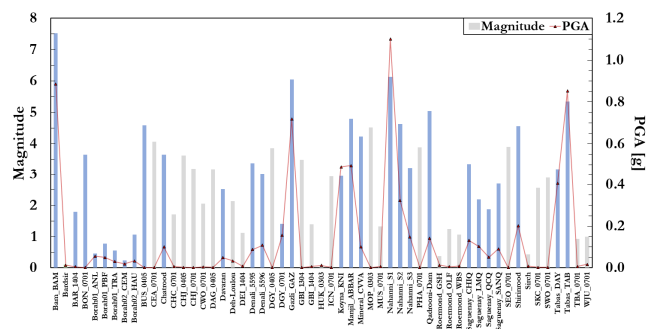


Fig. 4. Magnitude and PGA of ground motions

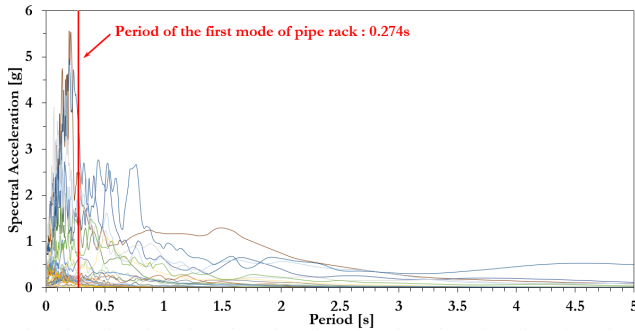


Fig. 5. Response spectral accelerations of ground motions

도 상당히 다양함을 알 수 있다. 이로 인해, 파이프랙의 횡방향 첫 번째 모드의 주기인 0.274초를 갖는 단자유도 시스템에 대한 응답스펙트럼 값은 최소 0.012 g에서 최대 3.584 g로 상당히 넓은 범위에 분포한다.

4.2 증분동적해석(Incremental Dynamic Analysis)

IDA는 구조물의 변위응답이 정의된 한계상태에 도달할 때까지 입력지진파의 크기를 점진적으로 증가시키며 비선형 동적해석하는 방법이다. 점진적인 세기 지표 증가에 대한 구조물의 응답을 자세하게 도출할 수 있기 때문에 비선형 동적해석 중 신뢰도가 높은 해석 방법 중 하나이다. 또한, 확인하고자 하는 한계상태까지 해석을 진행함으로써 해석자에 의해 한계상태를 정의할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 한계상태를 고려하여 ‘파이프를 지지하고 있는 파이프랙’(이하 파이프랙-파이프 시스템이라 칭함)의 지진취약도를 구하기 위해 IDA를 사용한다.

IDA를 진행하기에 앞서, 2장에서 다룬 파이프랙 및 파이프의 성능수준을 통해 파이프랙-파이프 시스템의 한계상태를 정의한다. 첫 번째로, 파이프랙의 성능수준 기반 한계상태는 Table 6과 같다. 본 연구에서 다루는 파이프랙의 횡방향은 철골모멘트골조 중 중저층(Low-Rise) 구조물이므로, HAZUS에 제시된 SIL에 해당한다. 파이프랙이 HAZUS의 SIL에 대해 제시한 Complete 성능수준 횡변위비 0.08에 도달하면, 2.1절에서 언급한 바와 같이 파이프랙 총 면적의 3~8%에 영구적인 구조적 붕괴가 발생하여 파이프랙이 파이프 및 기타설비를 지지하는데에 한계가 있는 것으로 취급한다.

Table 6. Limit states due to drift ratio of a piperack

Label	Drift ratio			
	Slight	Moderate	Extensive	Complete
S1L	0.0060	0.0120	0.0300	0.0800

두 번째로, 파이프의 성능수준에 기반하여 파이프랙 지진취약도의 한계상태를 정의한다. 식 (2)와 (3)을 이용하여 임계압축변형률을 산정하기 위해, 파이프의 내압 및 외압을 먼저 정해야 한다. 내압이 외압보다 클 경우 국부좌굴의 영향을 감소시키는 역할을 하며, 반대의 경우 작은 외력에도 국부좌굴이 일어나기 쉽다. 하지만 파이프를 프레임요소로 모델링한 본 연구에서는 파이프의 내압 및 외압을 해석에 반영할 수 없으므로, 보수적인 평가를 위해 내압과 외압의 차이는 존재하지 않는 것으로 가정한다. 따라서 임계압축변형률은 파이프의 직경 대비 두께에 의존적인 경향을 보인다. 직경 별 파이프 모델의 국부좌굴에 대한 한계변형률은 Table 7과 같다.

임계인장변형률을 산정하기 위해서 표면결함의 크기를 가정해야 한다. 일반적으로 용접에 의해 발생할 수 있는 표면결함 크기를 고려하였으며, 이로부터 식 (6)에 제시된 함수들을 정의할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 사용한 강재에 대해 CTOD Test를 시행하지 않았으므로, 일반적으로 0.1~0.3의 범위를 갖는 강재의 δ 를 Cha[13]에서 가정한 값과 동일하게 중앙값에 해당하는 0.2로 가정하였다. 이를 통해 파이프 직경에 따른 인장변형률 한계는 Table 8과 같이 구해진다.

이제 임계인장변형률을 산정하기 위해서 표면결함의 크기를 가정해야 한다. 일반적으로 용접에 의해 발생할 수 있는 표면결함 크기를 고려하였으며, 이로부터 식 (6)에 제시된 함수들을 정의할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 사용한 강재에 대해 CTOD Test를 시행하지 않았으므로, 일반적으로 0.1~0.3의 범위를 갖는 강재의 δ 를 Cha[13]에서 가정한 값과 동일하게 중앙값에 해당하는 0.2로 가정하였다. 이를 통해 파이프 직경에 따른 인장변형률 한계는 Table 8과 같이 구해진다.

Table 7. Limit state due to local buckling based on pipe damage

		Unit	Pipe size				
			6 in	10 in	14 in	20 in	26 in
Parameter	t	mm	3.2	6	6	9	12
	D	mm	76.3	267.4	355.6	558.8	660.4
	ϵ_c^{crit}	-	0.0184	0.008719	0.005936	0.005553	0.006585
	ϕ_{ec}	-	0.8				
Limit State	Compressive strain	-	0.01478	0.00698	0.00475	0.00444	0.00527

Table 8. Limit state due to tensile strain based on pipe damage

		Unit	Pipe size				
			6 in	10 in	14 in	20 in	26 in
Parameter	t	mm	3.2	6	6	9	12
	c	mm	10				
	a	mm	4				
	ϵ_t^{crit}	-	0.007119	0.015698	0.015698	0.021842	0.027569
	ϕ_{et}	-	0.7				
Limit State	Tensile strain	-	0.00468	0.01099	0.01099	0.01529	0.0193

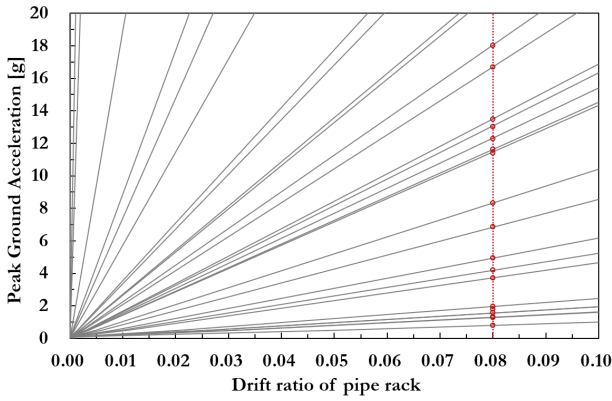


Fig. 6. IDA curves due to drift ratio of a pipe rack

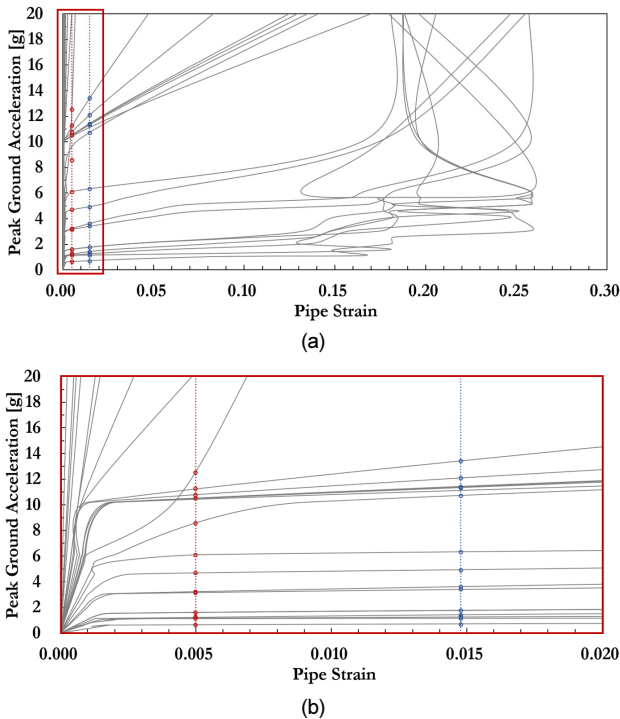


Fig. 7. IDA curves due to damage of a 6-inch pipe: (a) original curves and (b) magnified curves

4.1에서 언급한 30세트 입력지진파를 사용하여 IDA를 진행하였으며, 해석 결과를 세가지지표-손상지표 그래프(IDA curve)에 도시하였다. 본 연구에서는 PGA를 세가지지표로 사용한다. 또한, 손상지표로는 파이프랙 성능수준 기반의 경우 횡변위비를, 파이프 성능수준 기반의 경우 파이프의 변형률을 손상지표로 사용한다. Fig. 6은 파이프랙 성능수준 기반의 IDA curve와 파이프랙의 횡변위비 한계상태를 도시한 그래프이다. 30개 중 18개의 입력지진파에서 한계상태에 도달하였으며, 그 외는 한계상태에 도달

하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 입력지진파의 주기성분이 파이프랙 횡방향 주기 근처에서 발생하면 작은 세기의 입력지진파에 대해서도 한계상태에 도달하게 되지만, 입력지진파의 주기성분이 파이프랙 횡방향 주기와 매우 떨어져 발생하면 큰 세기의 지진파에 대해서도 한계상태에 도달하지 못하는 것을 보여준다.

입력지진파 방향이 파이프랙의 횡방향이므로, 횡방향 모멘트가 파이프 변형률에 지배적인 영향을 미칠 것으로 판단하여 파이프에 발생하는 축력은 고려하지 않았다. Fig. 7a는 6 in 파이프를 대상으로 Fig. 6의 IDA curve와 동일한 수직축 스케일의 IDA curve를 도시하였으며, Fig. 7a의 붉은 박스부분을 확대하여 Fig. 7b로 나타내었다. 이 그림에서 인장변형률 한계상태는 0.005이며 압축변형률 한계상태는 0.015로 표시되어 있다. 이 해석에서는 파이프의 축력을 고려하지 않고 있기 때문에, 파이프의 인장변형률과 압축변형률은 대칭하여 동일한 절대값을 가지므로 하나의 IDA curve로 이들 변형률을 표현할 수 있다. 파이프의 변형률은 파이프랙 응답과 달리 비선형으로 증감하였다.

4.3 최우도추정법

식 (9)와 같이 지진취약도가 대수정규분포(log-normal distribution)를 따르는 함수라고 가정한다면, 대수정규분포의 두 모수인, 중앙값(θ) 및 대수표준편차(β)를 산정하여 지진취약도 곡선을 정의할 수 있다[17, 18]. 식 (9)에서 $F(a)$ 는 파괴확률이며, a 는 임의의 지반운동 세기수준을 의미한다. 두 모수는 최우도추정법을 통해 산정할 수 있다. 최우도추정법이란, 우도함수가 최대가 되는 모수를 추정하는 방법으로, 본 연구에서의 우도함수는 식 (10)과 같다. 여기서 a_i 는 i 번째 가해지는 지진운동 세기를 의미하고, x_i 는 한계상태 도달 여부(도달 시 $x_i = 1$, 그렇지 않을 경우 $x_i = 0$), N 은 총 입력 지진 개수이다. 우도함수를 각 모수로 미분하여 0이 되는 값으로부터, 대수정규분포의 중앙값과 대수표준편차는 식 (11)과 (12)로 구할 수 있음을 쉽게 증명할 수 있다. 최우도추정법을 통해 추정된 한계상태별 모수는 Table 9와 같다.

$$F(a) = \Phi\left[\frac{\ln(a/\theta)}{\beta}\right] \tag{7}$$

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1 - x_i} \tag{8}$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln a_i \tag{9}$$

$$\hat{\beta} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln a_i - \theta)^2} \tag{10}$$

Table 9. Parameter of fragility curve according to limit states

limit state	Pipe rack	6-inch pipe		14-inch pipe		26-inch pipe	
	Drift ratio	Tensile	Compressive	Tensile	Compressive	Tensile	Compressive
θ	1.597	1.365	1.371	1.590	1.683	1.332	1.628
β	0.993	0.999	0.977	0.780	0.812	0.599	0.668

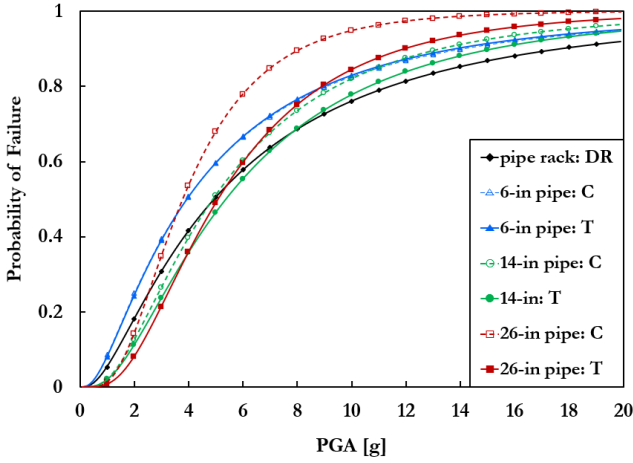


Fig. 8. Fragility curves due to pipe damage and pipe rack collapse with different pipe sizes

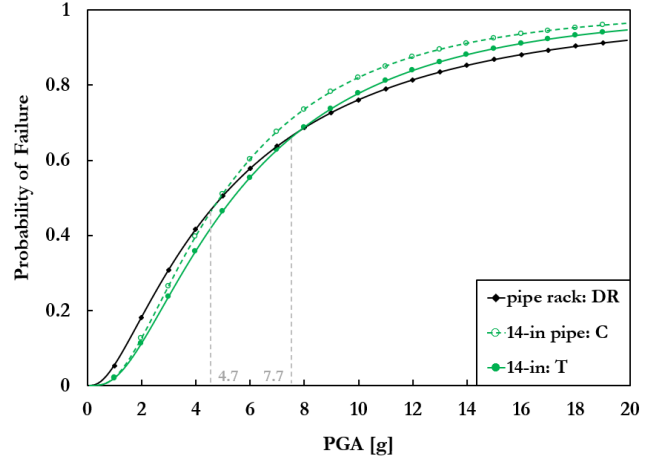


Fig. 10. Fragility curves due to pipe damage and pipe rack collapse with 14-in pipe

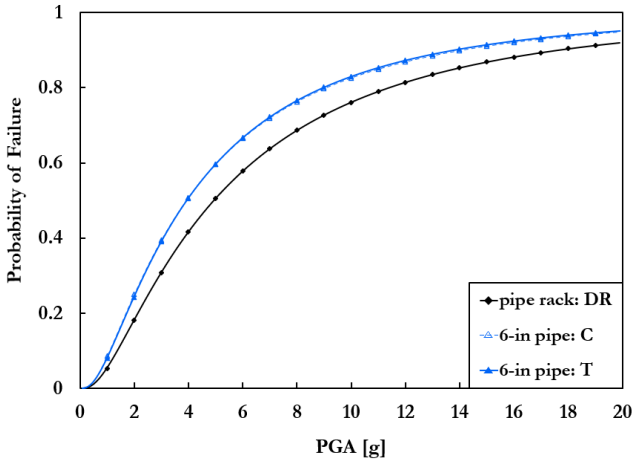


Fig. 9. Fragility curves due to pipe damage and pipe rack collapse with 6-in pipe

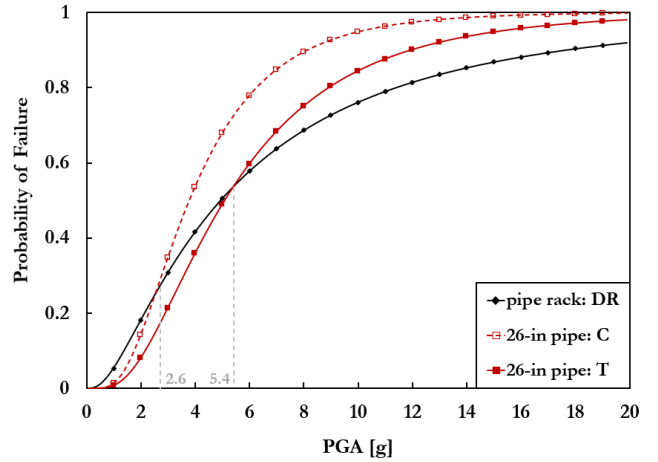


Fig. 11. Fragility curves due to pipe damage and pipe rack collapse with 26-in pipe

추정된 모수로부터 도출한 지진취약도를 한계상태에 따라 각각 도출하여 Fig. 8에 도시하였다. 여기서, 검정색 실선은 파이프랙 횡변위비(DR, Drift Ratio) 기반 지진취약도이다. 또한, 푸른색, 녹색, 붉은색은 각각 파이프의 6 in, 14 in, 26 in의 변형률을 한계상태로 고려한 지진취약도이며, 실선과 점선은 각각 표면결함 인장파괴(T) 및 국부좌굴(C)에 대한 지진취약도이다. 직경이 작고 두께가 얇은 6 in 파이프는 Fig. 9와 같이 입력지진 PGA 전 범위에서 파이프랙 보다 파괴할 확률이 높다. 또한, 6 in 파이프에서는 표면결함 인장파괴에 의한 파괴확률이 국부좌굴에 의한 파괴확률과 입력지진 PGA 전체 범위에서 거의 유사하거나 약간 크다. 따라서 파이프랙 또는 6 in 파이프의 한계상태를 각각 고려한 지진취약도에서는 표면결함 인장파괴에 의한 파괴확률이 가장 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 10는 14 in 파이프의 표면결함 인장파괴 및 국부좌굴을 고려한 지진취약도를 파이프랙 횡변위비를 고려한 지진취약도와 비교한다. 14 in 파이프의 표면결함 인장파괴에 대한 파괴확률은 7.7 g 이하에서 파이프랙 파괴확률보다 낮은 확률을 보였지만, 7.7 g 이상의 PGA에서는 더 큰 파괴확률을 보였다. 또한, 입력지진 PGA 전반에 걸쳐 표면결함 인장파괴보다 국부좌굴에 대한 위험이 큰 것으로 나타났다. 이는 표면결함 인장파괴보다 국

부좌굴이 더 작은 PGA에서 발생하고 있다는 의미이며, 아래 Fig. 12에서도 이를 확인할 수 있다.

Fig. 11은 26 in 파이프의 표면결함 인장파괴 및 국부좌굴을 고려한 지진취약도를 파이프랙 횡변위비를 고려한 지진취약도와 비교한다. 26 in 파이프의 국부좌굴로 인한 파괴확률은 PGA가 약 2.6 g 이상일 때 파이프랙 파괴확률보다 높았으며, 인장균열에 의한 파괴확률은 PGA가 약 5.4 g 이상인 경우에 파이프랙 파괴확률보다 높다. 14 in 파이프와 같이, 26 in 파이프도 두께에 비해 표면결함 깊이가 작기 때문에 표면결함 인장파괴보다 국부좌굴에 더 취약하다. 앞에서도 언급한 바와 같이, 이는 표면결함 인장파괴보다 국부좌굴이 더 작은 PGA에서 발생하고 있다는 의미이며, 아래 Fig. 12에서도 역시 이를 확인할 수 있다.

Fig. 12는 각 입력지진파에 대해 파이프랙 붕괴, 파이프 국부좌굴 또는 파이프 표면결함 인장파괴가 발생하는 PGA를 나타낸 그래프이다. 여기서 검정색 마름모는 파이프랙의 붕괴 시 PGA를 나타내며, 푸른색 삼각형, 녹색 원, 붉은색 사각형은 각각 6, 14, 및 26 in 파이프의 국부좌굴 또는 표면결함 인장파괴 시 PGA를 나타낸다. 파이프는 표면결함 인장파괴(T)와 국부좌굴(C)로 구분하여 각각 속을 채우거나 비운 기호로 구분하였다.

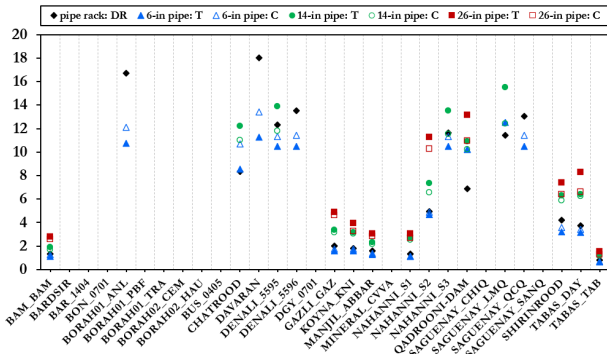


Fig. 12. PGA at collapse of the pipe rack or at transportation loss of each pipe

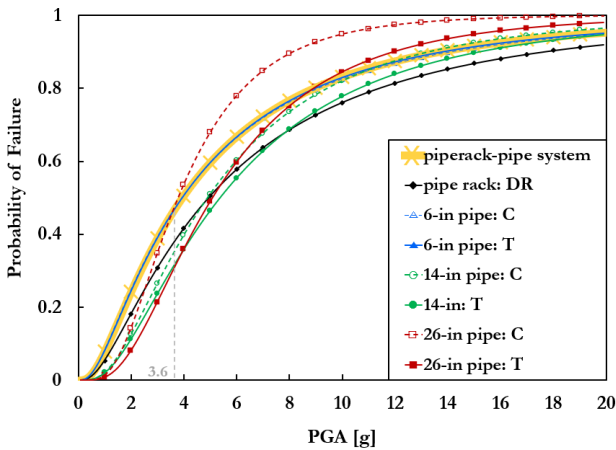


Fig. 13. Fragility curve of transportation function

파이프랙에 적재되는 파이프들은 다양한 목적에 따라 서로 다른 직경을 포함하는 경우가 많으므로, 이 중 하나의 파이프라도 누출이 발생한다면 파이프랙-파이프 시스템(파이프랙이 6, 14, 26 in 파이프들을 지지하고 있는 시스템)의 수송기능 손실이 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 즉, Fig. 12에서 작은 PGA에서 가장 먼저 한계상태에 도달한 경우에 의해 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 손실이 발생하는 것으로 취급하여 지진취약도를 구할 수 있으며, 이를 Fig. 13에 황색 하이라이트된 실선으로 나타내었다. 이 지진취약도는 6 in 파이프의 표면결함 인장파괴에 대한 지진취약도와 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 Fig. 12에서 보인 바와 같이, 단지 3개 지진파(CHATROOD, QADROONI_DAM, SAGUENAY_LMQ)에서만 파이프랙 붕괴가 먼저 발생하였고 대부분의 지진파에서 6 in 파이프의 표면결함 인장파괴가 가장 먼저 발생하였기 때문이다. 한편, 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 유지를 위해 파이프랙 붕괴가 파이프의 표면결함 인장파괴 또는 국부좌굴보다 먼저 발생하지 않도록 파이프랙을 설계하는 것이 바람직하다.

Fig. 13의 26 in 파이프의 국부좌굴에 대한 지진취약도는 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 손실에 대한 지진취약도보다 3.6 g 이상에서 더 크게 나타나고 있다. 여기서, 26 in 파이프의 국부좌굴에 대한 지진취약도는 26 in 파이프의 국부좌굴에 한정된 파괴만을 고려하여 구한 지진취약도이다. 반면, 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 손실에 대한 지진취약도를 구하기 위해서는 이와 관련된 다양한 한계상태를 모두 고려하여 결정하는

것이 적절하므로 Fig. 13에서 황색 하이라이트된 지진취약도를 사용하는 것이 합리적이다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 국내 산업시설에서 주로 사용되는 일반적인 직선형 파이프랙에 대한 해석모델을 구축하고, 이에 대한 비선형응답이력해석인 증분 동적해석을 수행하여 지진취약도 함수의 모수를 최우도법으로 추정하였다. 이때, 파이프랙의 구조거동 뿐만 아니라 파이프의 변형률 손상기준을 함께 지진취약도의 한계상태로 고려하였다. 이를 통해 도출된 결과와 향후 연구항목은 아래와 같다.

- 1) 14 in 및 26 in 파이프와 같이, 직경이 상대적으로 큰 파이프들은 표면결함 깊이의 영향이 더 작아지므로, 표면결함 인장파괴 이전에 국부좌굴이 발생할 확률이 높다. 반면, 6 in 파이프와 같이 직경이 작은 파이프는 큰 파이프에 비해 표면결함 깊이의 영향이 더 크므로, 국부좌굴 이전 또는 유사한 시기에 표면결함 인장파괴가 발생할 확률이 높다.
- 2) 또한, 14 in 및 26 in 파이프와 같이 직경이 상대적으로 큰 파이프들에서 입력지진 PGA의 일부 구간에서 파이프랙의 붕괴 발생 확률이 파이프의 표면결함 인장파괴 및 국부좌굴 발생 확률보다 높다.
- 3) 파이프랙에 적재되는 다양한 직경의 파이프들 중 하나의 파이프라도 누출이 발생하거나 파이프랙이 붕괴된다면 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 손실이 발생하므로, 이 둘 중 가장 먼저 한계상태에 도달한 경우에 의해 파이프랙-파이프 시스템의 수송기능 손실에 대한 지진취약도를 정의하였다.
- 4) 파이프랙-파이프 시스템 수송기능 손실의 PGA를 나타낸 결과, 대부분의 입력지진파에서 6 in 파이프의 표면결함 인장파괴가 가장 먼저 발생하였으며, 일부 입력지진파에서 파이프랙의 붕괴가 가장 먼저 발생하였다. 파이프랙-파이프 시스템 수송기능 유지를 위해 파이프의 손상보다 파이프랙의 붕괴가 먼저 발생하지 않도록 파이프랙을 설계하는 것이 바람직하다.
- 5) 직선형 파이프뿐만 아니라, 다양한 방향에서 연결되는 파이프를 고려하여 외부 하중에 취약한 파이프의 엘보(elbow) 변형률을 검토할 필요가 있다.
- 6) 본 연구에서는 파이프 지지부의 구속조건을 고정단으로 가정하여 수행하였으나, 파이프 지지 조건에 따라 파이프의 거동에 상당한 차이가 발생할 수 있으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 연구(과제번호 RS-2021-KA163132)의 일환으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-16: Minimum

- Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures; c2018.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, KDS 41 17 00: Seismic Building Design; c2022.
 3. Kim IH, Hong KJ, Kim JH, Cho SG, Lee JH, Improvement in Design Load and Target Seismic Performance for Industrial and Environmental Facilities, *KSCE*, 2022 Dec;42(6):763–773.
 4. Puttatt J, Sesimic fragility assessment of a pipe rack structure in a petrochemical complex by incremental dynamic analysis, *Journal of Structural Engineering (Madras)*, 2020 Dec;47(5):408–415.
 5. Kazantzi AK, Karaferis ND, Melissianos VE, Bakalis K, Vamvatsikos D, Seismic Fragility Assessment of Building-type Structures in Oil Refineries, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2022 Aug;20(12): 6853–6879.
 6. Luigi DS, George K, On the seismic fragility of pipe rack–piping system considering soil–structure interaction, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020 Feb;18:2723–2757.
 7. FEMA, HAZUS Earthquake Model Technical Manual; c2022.
 8. Canadian Standard Association, CSA Z662: Oil and Gas Pipeline System; c2019.
 9. European Committee for Standardization, Silos, tanks and pipelines, Eurocode 8, part 4, CEN/TC 250, EN 1998–4, Brussels; c2006.
 10. Korean Gas Safety Corporation, KGS FS451: Code for facilities, Technology, Inspection and Safety Diagnosis of Pipelines outside Manufacturing Plants and Supply Station for Wholesale Gas Business; c2017.
 11. Det Norske Veritas, DNV–OS–F101: Submarine Pipeline Systems; c2011.
 12. Kim JR, Park YH, The Influence of the Weld Defect on Tensile Capacity Subjected to Static Loading, *JAIK*, 2002 Dec;18(12):59–66.
 13. Cha JY, Evaluation of Limit State for Pipelines using Strain–Based Design [Master/s thesis], Korea University; c2014.
 14. Danesi RJ, Seismic risk of industrial plants: Assessment of a petrochemical pipe rack using incremental dynamic analysis; c2015
 15. Korean Agency for Technology and Standard, KS D 3503: Rolled steels for general structure; c2023.
 16. Korean Agency for Technology and Standard, KS D 3632: Carbon steel tubes for building structure; c2019.
 17. Han MS, Hong KJ, Cho SG, Weighted latin hypercube sampling to estimate clearance–to–stop for probabilistic design of seismically isolated structures in nuclear power plants, *EESK* 2018 Mar;22(2): 63–75.
 18. Sin YS, Song JG, Seismic fragility analysis lightning arrester considering various damage states, *EESK* 2014 Jan;18(1):19–28.