

# 원거리와 근거리 지진파의 특성을 고려한 항만 컨테이너 크레인의 지진취약도 분석

## Seismic Fragility Analysis of Container Crane Considering Far-Fault and Near-Fault Ground Motion Characteristics

박주현<sup>1)</sup> · 민지영<sup>2)</sup> · 이종한<sup>3)\*</sup>

Park, Ju-Hyun<sup>1)</sup> · Min, Jiyoung<sup>2)</sup> · Lee, Jong-Han<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>인하대학교 토목공학과 박사과정, <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, <sup>3)</sup>인하대학교 사회인프라공학과 부교수

<sup>1)</sup>Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Inha University, <sup>2)</sup>Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, <sup>3)</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

### / A B S T R A C T /

The recent increase in earthquake activities has highlighted the importance of seismic performance evaluation for civil infrastructures. In particular, the container crane essential to maintaining the national logistics system with port operation requires an exact evaluation of its seismic response. Thus, this study aims to assess the seismic vulnerability of container cranes considering their seismic characteristics. The seismic response of the container crane should account for the structural members' yielding and buckling, as well as the crane wheel's uplifting derailment in operation. The crane's yielding and buckling limit states were defined using the stress of crane members based on the load and displacement curve obtained from nonlinear static analysis. The derailment limit state was based on the height of the rail, and nonlinear dynamic analysis was performed to obtain the seismic fragility curves considering defined limit states and seismic characteristics. The yield and derailment probabilities of the crane in the near-fault ground motion were approximately 1.5 to 4.7 and 2.8 to 6.8 times higher, respectively, than those in the far-fault ground motion.

**Key words:** Container crane, Near-fault ground motion, Far-fault ground motion, Nonlinear analysis, Limit states, Seismic fragility

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 대규모의 지진이 지속적으로 발생하고 있으며, 이로 인하여 구조물의 지진취약성 및 안전성에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 우리나라는 환태평양조산대에 근접해 있어 이전부터 지진의 위협에 안전하지 않았다. 기상청에서 제공하는 지진연보에 따르면 1978년부터 현재까지 지진 발생이 증가하는 추세이며, 2016년에는 무려 252회의 지진이 발생하였다[1]. 특히 2016년 규모 5.8의 경주지진과 2017년 규모 5.4의 포항지진이 연달아 발생하였다. 이러한 지진으로 인해 발생하는 인프라 구조물의 피해는 많은 복구 비용을 발생시키며, 때로는 큰 인명피해를 야기시킬 수 있다.

항만시설물은 국가 물류 시스템의 핵심 요소로서, 항만시설물의 피해는 시설물 및 인명 피해뿐만 아니라, 국가적으로 심각한 경제적·사회적 손실을

야기시킨다. 항만시설물 중 안벽 컨테이너 크레인(Quay container crane)은 선박에 컨테이너를 적하 혹은 양하하는 본선 작업을 수행하는 기본이자 핵심이 되는 장비로, 주로 컨테이너 전용부두에 설치되어 있다. 태풍과 지진 등의 자연재해 발생 시 크레인이 전도되는 경우 인근 시설물 및 인명에 대한 2차 피해가 발생할 수 있다. 1995년 고베 대지진으로 고베항의 컨테이너 크레인의 붕괴가 짧은 시간에 발생하였고, 피해 복구를 위한 많은 경제적 부담과 시간이 소요되어 컨테이너 크레인의 재난 취약성과 중요성이 강조되었다[2].

항만시설물 중 컨테이너 크레인은 실제 안벽에 설치된 레일 위에 위치해 있다. 따라서 컨테이너 크레인의 안전성 평가는 컨테이너 크레인 부재뿐만 아니라 컨테이너 크레인 바퀴의 상승과 탈선현상을 모사할 수 있어야 한다. Soderberg et al.[3]은 컨테이너 크레인의 취약성을 확인하기 위해 손상한 계상태 정의와 컨테이너 크레인의 취약 지점 도출 연구를 수행하였다. Kosbab[4]은 컨테이너 크레인의 경계조건을 힌지 요소(Hinge element), 컨테이너 상승물 모사할 수 있는 갭 요소(Gap element), 컨테이너 크레인의

\*Corresponding author: Lee, Jong-Han

E-mail: jh.lee@inha.ac.kr

(Received November 30, 2022; Revised January 3, 2023; Accepted January 4, 2023)

상승과 탈선을 모사할 수 있는 유연성 경계요소(Flexible rocking model)로 정의하여 비교하였다. 각 경계조건 모델에서 비선형 정적해석을 수행하여 바퀴의 상승과 탈선을 나타낼 수 있는 유연성 경계조건이 실제 컨테이너 크레인의 동적거동을 가장 유사하게 나타냈다. Kim et al.[5]는 컨테이너 크레인의 부반력을 도출하여 크레인 전도의 취약성을 분석하였지만 컨테이너 크레인의 경계조건을 힌지 요소로 설정하여 부재의 파괴만을 확인하였다. Tran et al.[6]은 힌지 경계조건과 바퀴의 상승과 탈선을 모사할 수 있는 경계조건 요소를 정의하고 비선형 정적해석과 동적해석을 수행하여 지진취약도를 분석하였다. 지진취약도 분석 결과, 실제 동적거동을 모사할 수 있는 경계조건이 우수한 결과를 보였다.

따라서 본 연구는 국내에서 운용되는 컨테이너 크레인의 실제 동적거동인 상승과 상승 후 탈선현상을 모사할 수 있는 경계조건을 정의하였다. 비선형 정적해석을 수행하여 컨테이너 크레인의 손상 한계상태를 정의하고 근거리 및 원거리 지진파의 특성을 고려한 부재 파괴와 궤도탈선의 지진취약성에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 컨테이너 크레인의 수치모델링

### 2.1 컨테이너 크레인 개요 및 경계조건 정의

본 연구는 실제 광양항에서 운용되는 Fig. 1과 같은 61 tf급의 컨테이너 크레인을 대표모델로 선정하였다. 컨테이너 크레인의 총 중량은 1200 tf, 크레인의 바퀴에서 최상단까지의 높이는 77.8 m, 크레인의 바퀴 간 길이(Span)는 30.5 m, 앞바퀴와 붐 거더(Boom girder)까지의 길이(Outreach)는 63 m, 뒷바퀴와 트롤리 거더(Trolley girder)까지의 길이(Backreach)는 20 m이다.

컨테이너 크레인은 운영 시와 이동을 제한하는 평상시로 구분할 수 있다. 크레인의 이동을 제한 시에는 컨테이너 크레인이 고정 핀과 결합되어 수직 방향의 거동이 제한된다. 지진은 예측이 어려워 더 위험한 상황 대비를 위해 운영 시로 가정하여 모델링과 수치해석을 진행하였다.

컨테이너 크레인의 동적응답은 크레인의 변위와 응력 변화에 의한 부재 파괴도 중요하지만, 컨테이너 크레인 바퀴의 상승과 궤도탈선 현상에 의한 파괴도 매우 중요한 거동이다. 일반적으로 컨테이너 크레인의 동적거동은

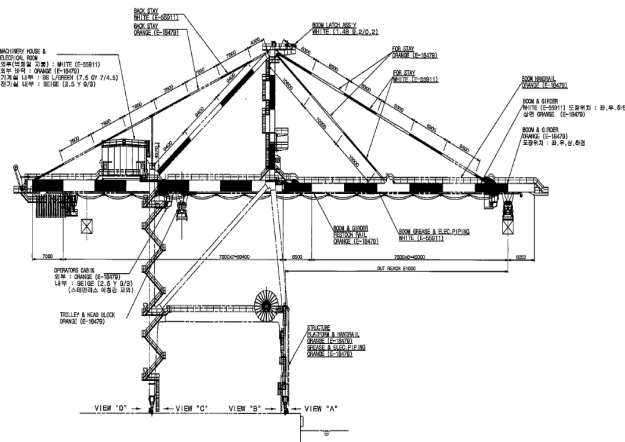


Fig. 1. Container crane at Gwangyang port [7]

트롤리 방향으로 포털 프레임(Portal frame)에 의해 제어된다[4, 8]. 하지만 컨테이너 크레인은 바퀴 지점에서 상승과 탈선의 가능성이 있어 일반적인 골조(Frame) 구조물과는 차별성을 지닌다. 즉, 컨테이너 크레인의 동적 거동은 골조 구조물과는 다르게 바퀴 지점의 상승과 궤도탈선을 모사할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 비선형 스프링 요소와 마찰조건을 사용하여 컨테이너 크레인의 상승과 궤도탈선을 모사하였다. 컨테이너 크레인 바퀴의 상승 현상과 그로 인한 궤도 탈선은 수직력과 수직변위의 관계를 통해 모사하였고, 상승 발생 시에는 수평 구속력을 제거되어 궤도탈선이 가능하도록 설정하였다.

### 2.2 컨테이너 크레인 수치모델링

실제 운용중인 컨테이너 크레인의 설계도면을 바탕으로 Abaqus(2021) 프로그램을 사용하여 2D Frame 요소로 수치모델링을 진행하였다. Fig. 2는 실제 광양항 컨테이너 크레인의 설계도면을 바탕으로 모델링한 수치해석 모델이다. Fig. 2에 가새(Diagonal brace)와 포스테이(Forestay), 백스테이(Backstay)는 트러스 부재로 모델링 하였다. 붐 거더와 연결된 포스테이는 컨테이너 크레인이 미운영 시에는 접힌 상태로 대기하는 것을 고려하여 힌지 연결을 통해 모사해주었다.

컨테이너 크레인의 재료 물성치와 적용 단면은 Table 1에 나타내었다. 국내 컨테이너 크레인은 일본의 강재규격에 따라 설계되고 제작되고 있는 실정이다. 따라서, 일본의 강재규격인 JIS[9]에 따라 컨테이너 크레인 수치해석 모델에 사용된 재료 물성치는 JIS-SM490Y(Box section)와 JIS-

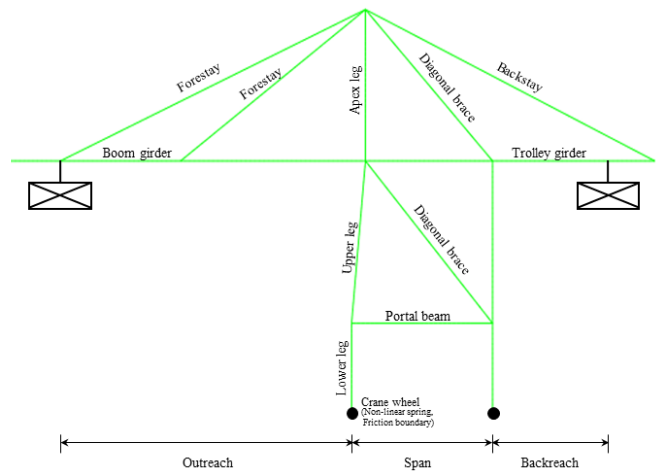


Fig. 2. Numerical model of container crane

Table 1. Material properties of container crane [9]

Type	Density [t/m <sup>3</sup> ]	Young's modulus [GPa]	Yield Strength [MPa]	Member
JIS-SM 490Y	8.05	200	335	Diagonal Brace, Forestay, Backstay
JIS-STK490	8.05	200	313	Lower leg, Upper leg, Apex leg, Portal beam, Boom girder, Trolley girder

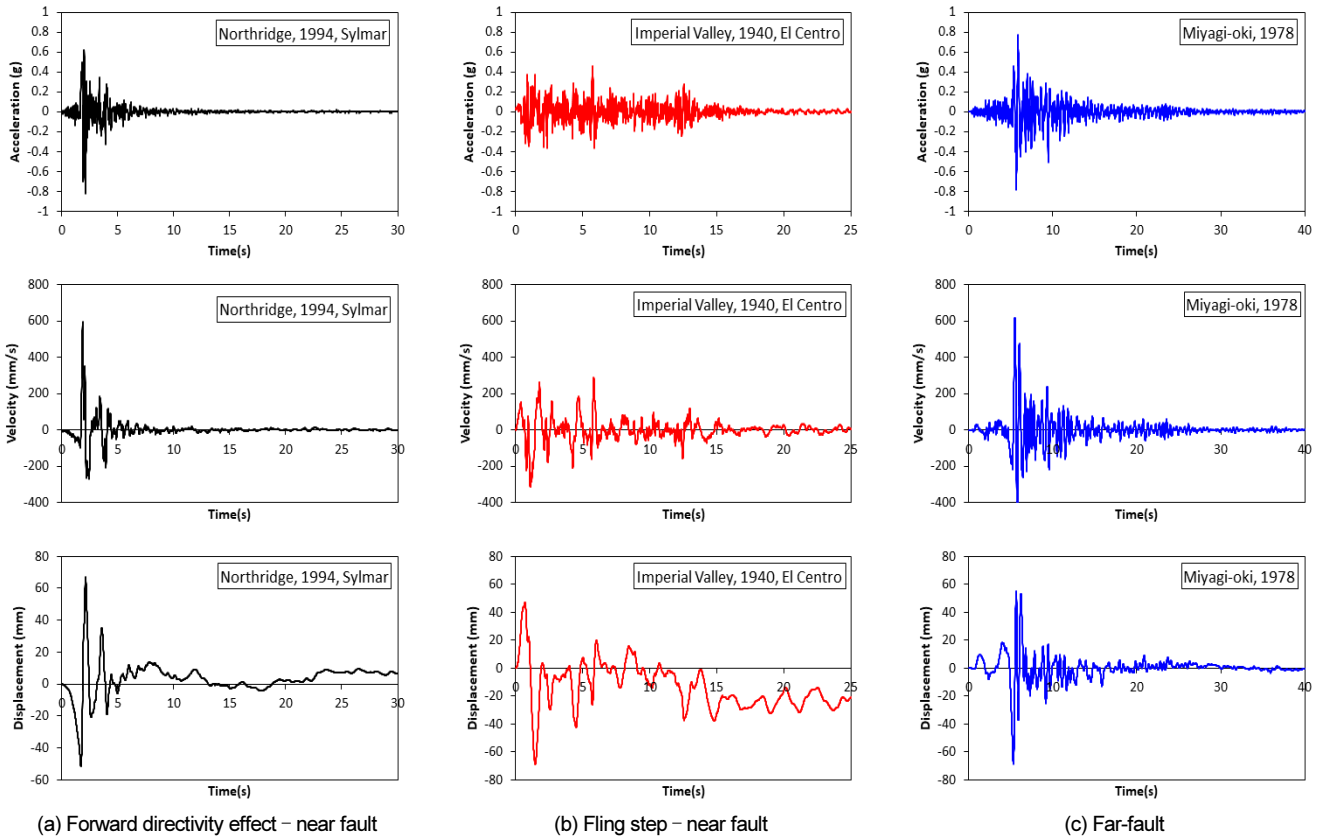


Fig. 3. Typical time histories of near-fault and far-fault ground motions

STK490(Pipe section)을 적용하였으며, 단면은 설계도면을 바탕으로 모델링 하였다. 컨테이너 크레인의 구조물 감쇠는 선행연구들은 바탕으로 감쇠비를 1.5%로 가정하여 1, 2차 고유모드를 고려한 Rayleigh 감쇠를 적용하였다[4, 6].

### 3. 지진특성을 고려한 지진파 선정

지진파는 지진의 규모(Magnitude), PGA(Peak Ground Acceleration), 지속시간, 주기, 주파수 등 다양한 특성을 내포하고 있다. 따라서 구조물의 취약성을 평가하기 위해서 많은 지진파 데이터를 사용하고 지진파의 특성별 분석을 수행하는 것이 효율적이다.

본 연구에서는 컨테이너 크레인의 구조적 특성과 함께 지진파의 특성을 고려한 지진취약도 평가를 위해 근거리 지진파(Near-Fault or Near-Field)는 원거리 지진파(Far-Fault or Far-Field)를 구분하여 고려하였다. 근거리 지진파는 펄스(Pulse) 모양의 큰 속도 성분을 포함하는 특성으로 구조물에 원거리 지진파보다 큰 에너지와 영구변형을 발생시킬 수 있다[10]. 특히, 펄스의 주기와 유사한 고유주기의 구조물인 경우에는 매우 큰 취약성을 보이게 된다[11, 12]. 근거리 지진파에서 이와 같은 큰 속도성분을 갖는 주원인은 단층운동의 방향효과(Forward directivity effect)과 플링스텝(Fling step)이 있다[13, 14]. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 근거리와 원거리 지진파의 가속도, 시간, 변위 시간 그래프 예시이다. 방향효과는 단층의 파단으로 인해 지진파의 전파속도가 전파 속도와 유사할 때 발생하는 현상으로 Fig. 3(a)와 같이 짧은 지속시간의 장주기, 높은 진폭의 충격파를 대동한다

플링스텝은 지각의 변형으로 지반의 영구변형을 유발하는 현상으로, Fig. 3(b)의 일방향의 고진폭 충격파와 변위-시간이력 곡선에서 계단모양의 특징이 있다. Fig. 3(c)는 원거리 지진파로 방향효과와 플링스텝은 나타나지 않았다. 따라서 본 연구는 컨테이너 크레인의 경계조건을 고려한 지진취약도 분석 시 근거리와 원거리 지진특성을 고려하였다.

한반도는 중약진 지진대에 속하고 있어 국내 발생 지진파 데이터를 수집하는데 어려움이 있다. 따라서, 항만 및 어항 설계기준·해설-해양수산부[15]에서는 항만시설물의 지진해석 수행 시 Miyagi-oki 지진파(Ofunato 계측, 1968 Japan, 규모 7.9)와 Tokachi-oki 지진파(Hachinohe 계측, 1978 Japan, 규모 7.4)를 기본적으로 사용하며 추가적으로 계측 및 인공지진파를 사용하라고 제시하고 있다. 따라서 항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 대표 지진파 2개와 국내에서 발생한 경주지진파를 포함하였다. 그 외 지진파는 SAC Steel Project[16]에서 사용한 지진기록 중에서 선정하여 근거리 지진파와 원거리 지진파 각 40개를 정의하였다. 정의된 각 지진파는 Tables 2-3에 요약하였다.

근거리 지진파와 원거리 지진파의 가속도 응답스펙트럼(Sa)과 변위 응답스펙트럼(Sd)은 Fig. 4에 나타내었다. 컨테이너 크레인의 감쇠비 1.5%를 적용하였으며, Fig. 4에서 굵은 실선은 각 40개 지진파의 응답스펙트럼 평균값이다. Fig. 4(a), (b)에서 원거리 지진파 평균값의 가속도 응답스펙트럼 최대값은 1.43 g, 근거리 지진파 평균값의 가속도 응답스펙트럼 최대값은 1.04 g로 원거리 지진파에서 약 1.3배 크게 나타났다. 반면에 가속도 응답스펙트럼에서 주기가 1초대에서는 근거리 지진파가 원거리 지진파에 비해 약 2.1배, 2초대에서는 약 5.2배, 4초대에서는 7.5배 크게 나타났다. 최

**Table 2.** List of near-fault ground motions

No.	Record	Earthquake magnitude	Distance [km]	PGA [g]
1	Erzincan, 1992	6.5	2.0	0.605
2				0.539
3	Gyeongju, 2016	5.8	8.2	0.404
4				0.351
5			5.8	0.285
6				0.257
7	Imperial Valley, 1940	6.9	10.0	0.461
8				0.676
9	Imperial Valley, 1979	6.5	4.1	0.394
10				0.488
11			1.2	0.302
12	Kobe, 1995	6.9	3.4	1.283
13				0.921
14	Loma Prieta, 1989	7.0	3.5	0.418
15				0.473
16	Long Beach, VernonCNDBldg	1.2	1.2	0.174
17				0.135
18	Mendochino, 1992	7.1	8.5	0.755
19				0.485
20	Nahanni, 1985	6.9	9.6	0.088
21				0.083
22			6.1	0.061
23				0.074
24			9.6	0.252
25				0.237
26			6.9	0.174
27				0.211
28	Northridge, 1994	6.7	7.5	0.868
29				0.943
30			6.4	0.927
31				1.330
32	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	0.678
33				0.580
34	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	7.5	0.534
35				0.580
36	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	0.569
37				0.817
38				0.712
39	Simulation, Palos Berdes	7.1	1.5	0.776
40				0.500

대 가속도 응답스펙트럼 이후에 원거리 지진파의 응답 가속도 스펙트럼은 급격한 감소를 하는 반면에 근거리 지진파는 쇠뿔값은 낮게 나타났지만 완만하게 감소되면서 장주기 성분을 많이 보유하고 있는 것으로 확인하였다. Fig. 4(c), (d)에서 나타낸 최대 변위 응답 스펙트럼은 원거리 지진파에서는 0.10 m, 근거리 지진파에서는 0.58 m로 근거리 지진파에서 약 5.8배 크게 나타났다. 주기가 1초 지점에서는 근거리 지진파에서는 0.14 m, 원거리 지

**Table 3.** List of far-fault ground motions

No.	Record	Earthquake Magnitude	Distance [km]	PGA [g]
1	Eastern Tacoma County, 1949	7.1	60.0	0.290
2				0.575
3	Hachinohe, 1978	7.9	187.0	0.210
4				0.378
5				0.138
6	Landers, 1992	7.3	64.0	0.338
7				0.308
8	Miyagi-oki, 1974	7.4	66.0	0.607
9				0.784
10	Olympia, 1949	6.5	56.0	0.895
11				0.821
12	Puget Sound, Wa, Federal, 1949	7.1	61.0	0.369
13				0.303
14	Puget Sound, Wa, Olympia, 1949	7.1	80.0	0.752
15				0.596
16	Saguenay, 1988	5.9	156.0	0.200
17				0.274
18			63.0	0.524
19				0.248
20			118.0	0.183
21				0.227
22			132.0	0.176
23				0.272
24			96.0	0.573
25				0.676
26	98.0	0.714		
27		0.524		
28	118.0	0.651		
29		0.505		
30	132.0	0.781		
31		0.781		
32	Seattle, 1965	7.1	80.0	1.756
33	Simulation, Deep Interplate	7.9	65.0	1.392
34				0.797
35	Valpariso, 1985	8.0	50.0	0.647
36				1.637
37				1.574
38				1.270
39	West. Washington, 1949	6.5	80.0	0.902
40				0.295
				0.389

진파에서는 0.07 m로 약 2.0배, 2초 지점에서는 약 4.6배, 4초에서는 약 6.5배로 크게 나타났다. 근거리 지진파의 변위 응답스펙트럼은 주기가 0초에서 4초까지 거의 선형적으로 증가하였으며, 원거리 지진파의 경우는 0.75초 부근까지 선형적으로 증가하다가 그 후 거의 일정하게 유지하였다. 근거리 지진파와 원거리 지진파의 비교를 통해 가속도 응답 스펙트럼에서는 주기 성분에 따른 차이를 보였다. 하지만 변위 응답 스펙트럼에서는 구



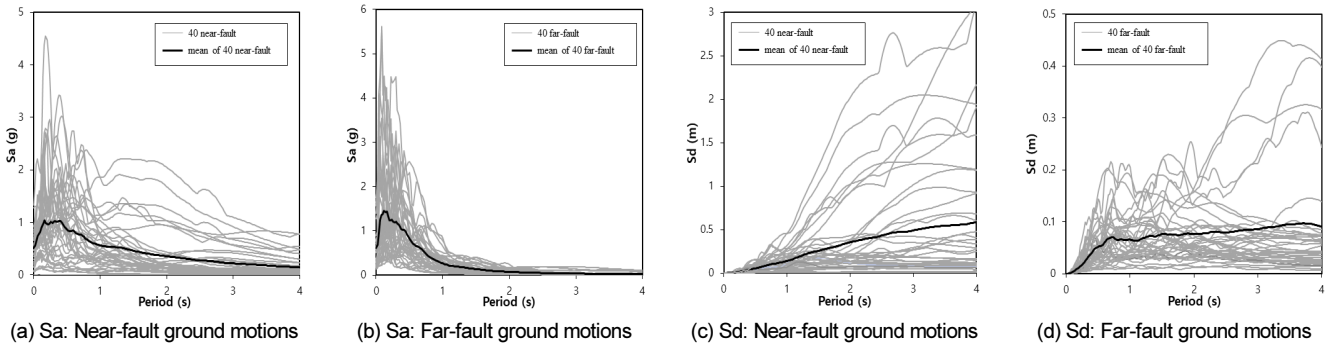


Fig. 4. Comparison of response spectrum

Table 4. Limit state for container crane by HAZUS [18]

Damage State	Damage Ratio [%]
Slight Damage	5
Moderate Damage	25
Extensive/Complete Damage	75

조물의 영구변형에 직접적으로 연관성이 있는 장주기 성분이 근거리 지진파에서 원거리 지진파에 비해 매우 크게 나타났다. 따라서, 근거리 지진파가 원거리 지진파에 비해 구조물에 더욱 파괴적인 손상을 입힐 가능성이 크다고 판단된다.

## 4. 컨테이너 크레인 지진취약도 분석

### 4.1 컨테이너 크레인 손상한계상태 정의

지진취약도 분석은 임의의 진동 크기의 지진하중에 대해 구조물의 특정 손상상태를 가질 확률을 의미한다. 지진취약도 분석의 목적은 확률적인 방법을 통해 대상 구조물의 내진성능을 평가하고 구조물의 지진위험도를 정량화하기 위해서이다. 따라서 구조물의 지진취약도 분석을 위해서는 우선적으로 대상 구조물의 손상 한계상태 정의가 매우 중요하다. 손상 한계상태란 대상 구조물의 손상 정도를 수치적으로 정의하고, 지진취약성을 평가하는 정량적인 지표이다.

구조물의 손상 한계상태 정의하는 방법으로는 변위, 회전, 곡률연성도 등의 방법이 있으며, 현재까지도 최적의 손상 한계상태 정의를 위한 활발한 연구가 진행 중이다. 컨테이너 크레인의 손상 한계상태는 미국의 FEMA (Federal Emergency Management Agency)에서 개발된 지진피해 분석 프로그램인 HAZUS[17]에서 3개의 단계로 Table 4와 같이 정의한다. 하지만 HAZUS의 손상 한계상태 정의는 손상된 부재의 교체 및 수리비용의 비율로 부재의 손상율로 정의하여, 컨테이너 크레인의 형태, 부재별 중요도, 궤도탈선을 고려하지 못하고 있다. 국내 해양수산부의 항만 및 어항 설계기준에서는 안벽과 같은 항만시설물의 손상 한계상태 정의 기준은 정립되었지만, 컨테이너 크레인과 같은 하역장비의 손상 한계상태 기준은 부재하였다. 컨테이너 크레인과 같은 강재구조물의 손상 한계상태 정의 방법은 선행연구[18]에서 응력기반의 부재 손상과 구조물의 변위 기반으로 정의하였다. 따라서 컨테이너 크레인의 손상 한계상태 정의를 위해 비선형 정적

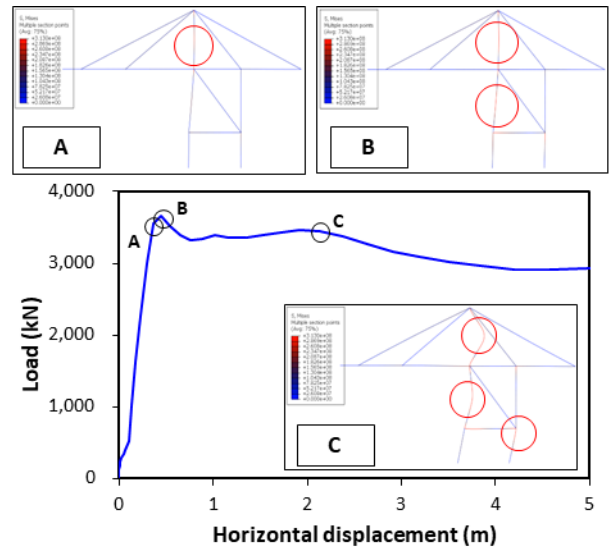


Fig. 5. Load-displacement and deformed of container crane

Table 5. Limit state by Nonlinear static analysis result for container crane

Structural type	Yielding damage [m]	Buckling damage [m]	Derailment [m]
Container Crane	0.368	2.139	0.03

해석을 수행하여 변위에 따른 부재 응력 기반으로 강재 부재의 항복과 좌굴 손상 한계상태로 정의하였다.

Fig. 5는 컨테이너 크레인에 비선형 정적해석을 수행하여 도출한 하중-변위 곡선이다. 컨테이너 크레인은 강재로 구성된 골조 구조물로 수직 부재의 항복에 의한 하중-변위 곡선의 변곡점이 다수 발생하였으며 컨테이너 크레인 변형 형상을 같이 나타내었다. Fig. 5의 A지점에서는 컨테이너 크레인의 Apex leg 부재에서 항복응력이 도달하였으며, B지점에서는 Upper leg 부재에서 부재 항복으로 인한 최대하중의 감소가 발생하였다. 최대하중 이후 하중-변위 곡선에서 2차로 감소하는 C지점에서 항복이 발생되었던 Apex leg와 Upper leg, 컨테이너 크레인 뒷바퀴와 연결된 Lower leg 부재에서 좌굴변형을 확인하였다. 따라서, 비선형 정적해석을 통해 도출한 하중-변위 결과를 바탕으로 본 연구에서는 변위에 따른 부재의 항복과 좌굴 상태를 기반으로 Table 5와 같이 손상 한계상태를 정의하였다. 컨테이너

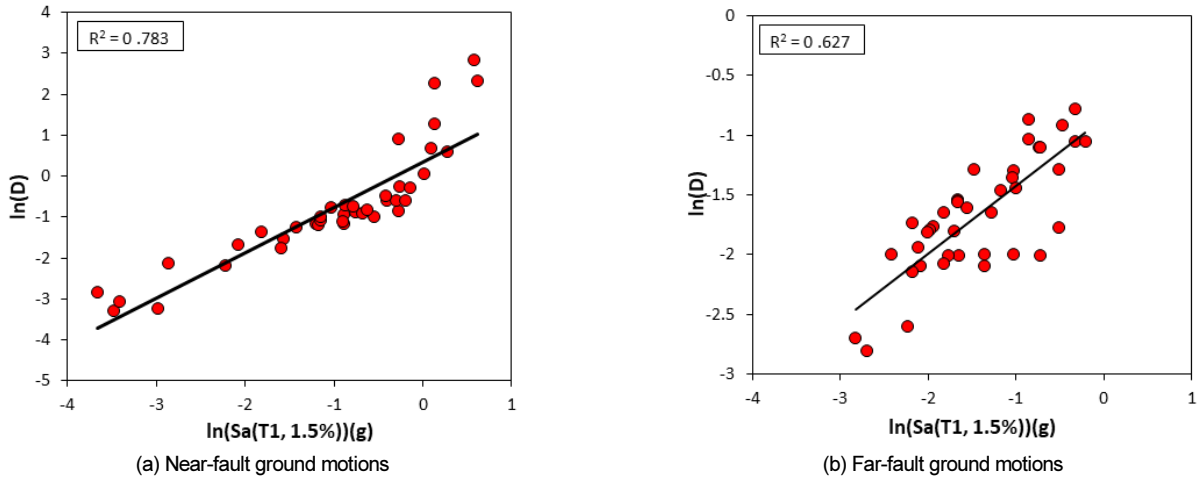


Fig. 6. PSDM of container crane

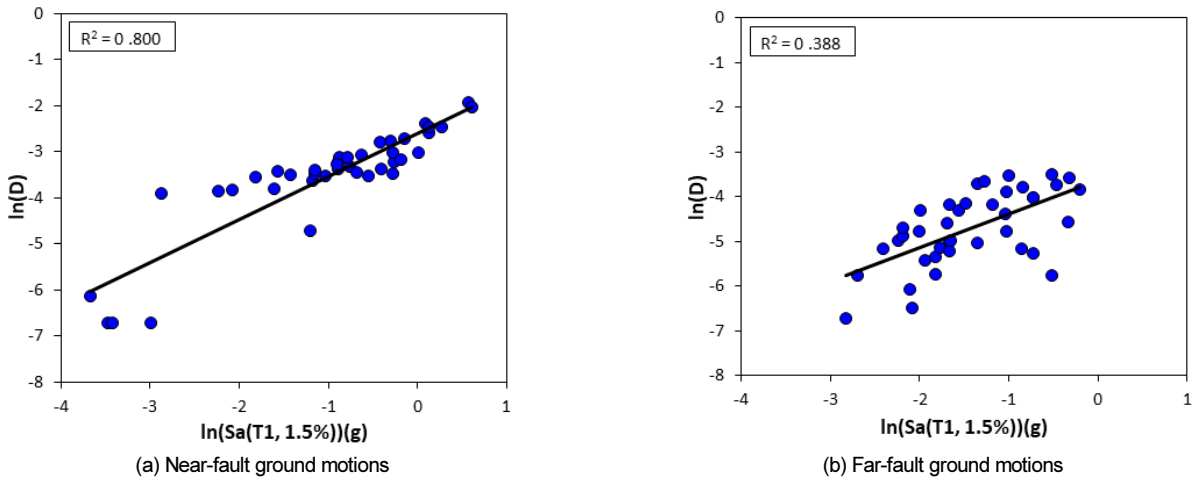


Fig. 7. PSDM of derailment

크레인의 궤도탈선 손상 한계상태는 실제 운용중인 컨테이너 크레인 레일의 수직 높이인 3 cm로 정의하였다.

HAZUS에서는 손상 한계상태 정의를 부재의 손상으로 정의하고 있으나 본 연구에서는 비선형 정적해석 결과를 바탕으로 부재의 응력을 기반으로 변위 손상 한계상태를 정의하였다. 즉, 비선형 정적해석 결과와 각 지점의 부재별 항복과 좌굴현상을 확인하여 정의하였다. 따라서, HAZUS의 부재의 수리비용의 정도로 정의된 손상 한계상태 기준보다 정밀한 한계상태로 판단된다.

### 4.2 지진취약도 분석 절차

지진취약도는 구조물이 임의의 진동 크기를 가지는 지진에 대해 앞서 정의한 손상 한계상태를 초과할 확률을 의미한다. 이러한 확률을 통해 구조물의 지진취약성을 확률적으로 정의할 수 있다. 구조물의 파괴확률은 구조물의 지진응답과 구조물의 한계상태를 특정 지진하중의 강도에서 비교하여 손상 한계상태 초과확률로 정의되며 식(1)과 같이 표현된다.

$$P = P(D \geq C|IM) \tag{1}$$

여기서,  $P$ 는 구조물의 손상확률,  $D$ 는 구조물의 변위응답,  $C$ 는 구조물의 한계상태,  $IM$ 은 특정지진하중의 가속도 응답스펙트럼이다.

구조물의 지진취약도 분석을 위해서는 우선적으로 구조물의 지진응답이 필요하며, 구조물의 지진응답은 무작위성과 불확실성을 포함하고 있어야 한다. 따라서 대상 구조물에 여러 지진하중에 의한 비선형 동적해석 결과를 적용한 평균 응답모델을 확률론적 응답모델(Probabilistic Seismic Demand Model, PSDM)로 나타내야 하며 식(2)와 같다[19]. 도출된 PSDM에 의해 상 구조물의 파괴확률을 정규누적분포를 통해 지진취약도 곡선으로 나타낼 수 있다. PSDM을 사용한 지진취약도 곡선 방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다[20].

$$\ln(\alpha_D) = \ln(a) + b \ln(IM) \tag{2}$$

$$P[D \geq C | IM] = \Phi((\ln(\alpha_C) - \ln(\alpha_D)) / \sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}) \tag{3}$$

여기서,  $\alpha_D$ 는 특정 지진하중의 강도에서 산정되는 평균 응답,  $a$ ,  $b$ 는 선형 회귀변수이다.  $\Phi$ 는 정규 누적 분포 함수(Normal cumulative distribution function)이며,  $\alpha_C$ 는 대상 구조물의 한계상태,  $\beta_{D|IM}$ 은 특정  $IM$ 에서의

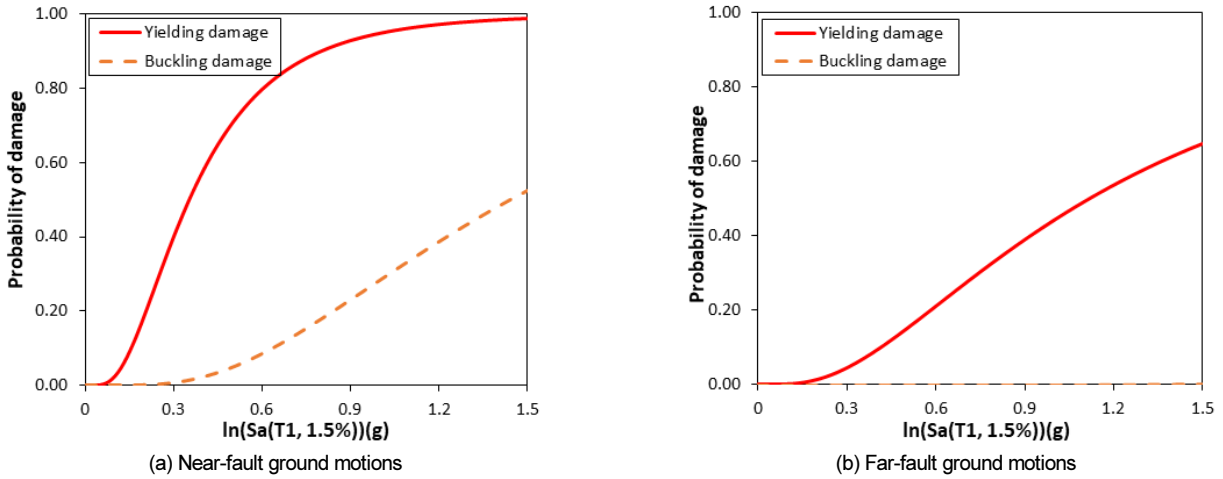


Fig. 8. Fragility curve of container crane

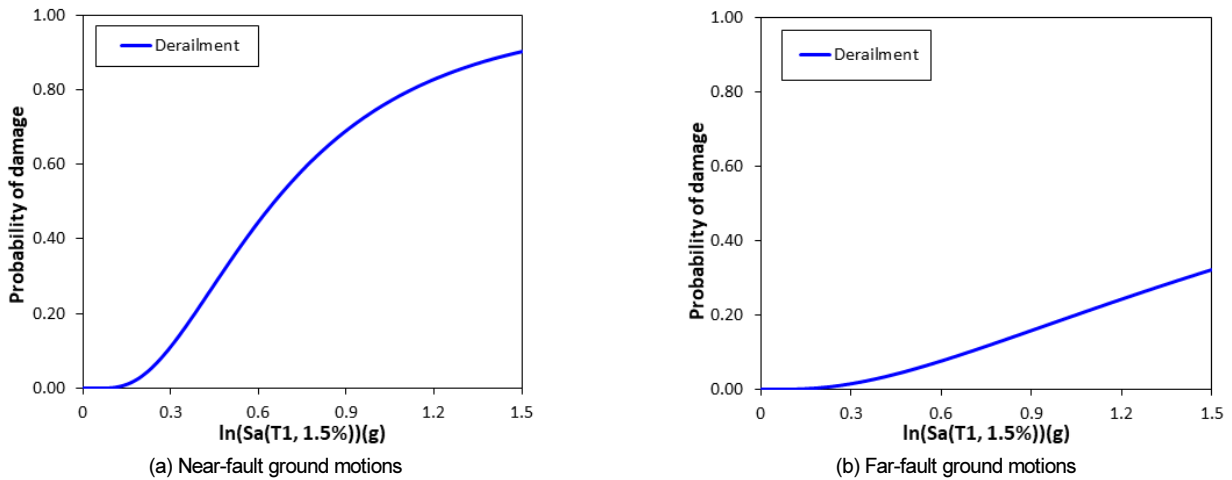


Fig. 9. Fragility curve of derailment

PSDM의 대수표준편차,  $\beta_C$ 는 한계상태와 해석모델에 대한 불확실성으로, 각 0.25, 0.2의 값을 사용하였다[21].

### 4.3 지진특성에 따른 지진취약도 비교분석

정의한 근거리 지진파와 원거리 지진파 각 40개를 적용하여 컨테이너 크레인에 대한 비선형 동적해석을 수행하여 지진응답을 도출하였다. Fig. 6은 컨테이너 크레인의 최상단 지점의 최대 횡변위 응답과 컨테이너 크레인의 1차 고유진동수 값의 Sa를 통해 도출된 PSDM이다. Sa가 증가할수록 컨테이너 크레인의 지진응답은 증가하는 추세를 보였으며, 근거리 지진파에서 원거리 지진파보다 지진응답과 상관성이 높게 나타났다. Fig. 7은 컨테이너 크레인 바퀴의 수직방향의 변위를 통해 나타낸 궤도탈선에 대한 PSDM으로 횡변위 응답과 유사하게 근거리 지진파에서는 Sa가 증가할수록 탈선 응답이 증가하였고 지진응답과 상관성이 높게 나타났다.

Fig. 8은 근거리 지진파와 원거리 지진파에 따른 컨테이너 크레인의 지진취약도 곡선이다. 원거리 지진파보다 근거리 지진파에서 컨테이너 크레인의 취약도가 높게 나타났다. Sa가 0.5 g일 때 근거리 지진파와 원거리 지진에 의한 부재 항복손상 확률은 각 71%, 15%로 근거리 지진파에서 약 4.7배

크게 나타났다. 1.5 g의 Sa 지진이 발생하였을 때는 근거리 지진의 항복 손상 확률은 99%, 원거리 지진에서는 65%로 근거리 지진에서 약 1.5배 크게 나타났다. 좌굴에 의한 붕괴 확률은 Sa가 0.5, 1.5 g 일 때 근거리 지진에서는 각 5, 52%로 나타났으며, 원거리 지진에서는 좌굴에 의한 붕괴가 나타나지 않았다. 또한, 근거리 지진에 의한 부재의 항복 손상 확률 10%는 약 0.15 g의 Sa 지진에서 발생되었지만, 원거리 지진에서는 0.41 g의 Sa에서 발생하였다. 따라서, 컨테이너 크레인의 지진취약도 분석 결과 원거리 지진파와 비교해 근거리 지진에서 취약하게 나타났다.

Fig. 9는 근거리 지진파와 원거리 지진파에 따른 컨테이너 크레인 궤도탈선의 지진취약도 곡선을 나타낸다. 근거리 지진파에 의한 궤도탈선 취약도가 원거리 지진파에 비해 높게 예측되었다. Sa 값이 0.5 g의 지진이 발생했을 때, 근거리 지진파에 의한 궤도탈선의 붕괴 확률은 34%, 1.5 g의 지진에서는 90%로 나타났으며, 원거리 지진파에서는 각 5, 32%로 약 2.8~6.8배 높게 나타났다. 또한 근거리 지진파에 의한 궤도탈선에 의한 붕괴 확률 10%는 약 0.29 g의 Sa를 지닌 지진파에서 나타나는 반면, 원거리 지진파에서는 0.68 g의 Sa를 지닌 지진파에 의해 발생되었다. 실제 컨테이너 크레인의 궤도탈선 동적거동 모사를 진행한 지진취약도 분석 결과 원거리 지진파와 비교해 근거리 지진파에서 궤도탈선 발생 확률이 높게 예측되었다.

## 5. 결론

본 연구는 항만시설물 중 컨테이너 크레인의 구조적 특수성을 반영하여 실제 동적 응답을 고려할 수 있는 수치모델 개발을 진행하였으며, 컨테이너 크레인의 손상 한계상태를 정의하고 지진파의 특성을 고려한 지진취약성 분석을 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

컨테이너 크레인의 경우 안벽 위에 설치된 레일에 연결되어 있어 지진 시 궤도탈선에 대한 고려가 필요하다. 따라서 부재의 손상에 의한 붕괴뿐만 아니라, 컨테이너 크레인 바퀴의 상승과 상승 후 탈선을 모사하였다.

컨테이너 크레인의 손상 한계상태는 비선형 정적해석을 수행하여 강재 부재의 응력 변화를 통해 정의하였다. 최대하중 시점에서 두 개의 수직부재가 항복응력에 도달하는 시점을 부재의 항복손상으로 정의하였다. 하중-변위 곡선의 2차 하강부분에서 부재들의 좌굴변형이 발생하는 시점을 좌굴에 의한 붕괴로 정의하였다. 컨테이너 크레인의 궤도탈선손상은 실제 운용중인 컨테이너 크레인 레일의 수직 높이가 3 cm로 정의하였다.

지진취약도 분석 결과, 컨테이너 크레인의 지진취약도는 Sa 값이 0.5 ~ 1.5 g인 지진이 발생하였을 때, 원거리 지진파에 비해 근거리 지진파에서 부재 항복손상 확률이 약 1.5 ~ 4.7 배로 높게 나타났으며, 좌굴에 의한 붕괴는 근거리 지진파에서만 발생하는 것으로 예측되었다. 궤도탈선 지진취약도는 Sa 값이 0.5 ~ 1.5 g의 지진파일 때, 근거리 지진파가 약 2.8 ~ 6.8배 높은 궤도탈선에 의한 붕괴 확률을 보였다. 컨테이너 크레인의 지진취약도 분석 결과, 원거리 지진파에 비해 장주기 성분을 많이 보유한 근거리 지진파에서 취약하게 예측되었다.

본 연구 결과는 추후 지반, 안벽과 컨테이너 크레인의 상호작용을 고려한 확장 항만시설물의 지진취약성 분석으로 진행할 예정이다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 활용서비스 패키지 구축 및 운용사업(20011780)의 한국건설기술연구원 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### / REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration, Historical earthquake records in Korea (2~1904). Korea Meteorological Administration.
2. Chang SE, Urban disaster recovery: a measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters*, 2010 Aug; 34(2):303-327.
3. Soderberg E, Hsieh J, Dix A, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference; 2009 Jun 28-Jul 2; Oakland, OA, California, 1-11.
4. Kosbab, Seismic performance evaluation of port container cranes allowed to uplift[dissertation]. [Georgia (GA)]:Georgia Institute of Technology; c2010.
5. Kim IH, Gong YS, Sun CH, Seismic fragility analysis for harbor crane. *The Society of Naval Architects of Korea*, 2012 May;5:2242-

- 2245.
6. Tran QH, Huh J, Nguyen VB, Kang C, Ahn JH, Park IJ, Sensitivity Analysis for Ship-to-Shore Container Crane Design. *Applied Sciences*, 2018 Sep;8(9):1667.
7. HJ Shipbuilding and Construction, Gwangyang port 61ton container crane structure and machinery division. c2014.
8. Park JH, Seismic fragility analysis of concrete gravity-type harbor wall and container crane considering soil-structure interaction and seismic characteristics[master's thesis]. [Incheon (ICN)]: Inha University; c2021.
9. Japanese Industrial Standards, JIS G 3106: Rolled steels for welded structure. Japanese Industrial Standards. c2004.
10. Chopra AK, Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, 4th ed. New Jersey: Chopra Prentice Hall, Englewood Cliffs. c2001.
11. Kim HS, Song JG, Effect of near- and far-fault earthquakes for seismic fragility curves of PSC box girder bridges. *EESK J, Earthquake Eng.* 2010 Oct;14(5):53-64.
12. Nguyen V, Huh J, Meisuh B, Kim J, Park I. Seismic response of container crane under near-field and far-field ground motions. *Applied Sciences*. 2021 Feb;11(4):1740.
13. Vafaei D, Eskandari R, Seismic response of mega buckling-restrained braces subjected to fling-step and forward-directivity near-fault ground motions, *The structural design of Tall and Special Buildings*, 2014 Dec;24(9):672-686.
14. Bhandari M, Bharti SD, Shrimali MK, Datta TK, The numerical study of base-isolated buildings under near-field and far-field earthquakes, *Journal of Earthquake Engineering*, 2017 Mar;22(6): 989-1007.
15. Ministry of Oceans and Fishes, Special act on the safety and maintenance of facilities, Ministry of Oceans and Fishes. c2016.
16. Somerville P, Smith H, Puriyamurthala S, Sun J, Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project. c1997.
17. HAZUS, Earthquake Loss Estimation Methodology. Technical Manual, Prepared by the National Institute of Building Sciences for Federal Emergency Management Agency. c1997.
18. Park HS, Choi BH, Kim JJ, Lee TH, Seismic performance evaluation of transmission towers in south Korea. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 2015;28(4):30-37.
19. Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA, Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering*, 2002 Apr;128(4):526-533.
20. An H, Shin S, Lee JH, Seismic fragility analysis of a bridge system considering the correlation of components of the PSC bridge. *EESK J, Earthquake Eng.* 2021 Nov;25(6):267-274.
21. Celik OC, Ellingwood BR, Seismic fragilities for non-ductile reinforced concrete frames-role of aleatoric and epistemic uncertainties. *Struct. Saf.* 2010 Jan;32(1):1-12