

항만 구역 지진피해예측 평가방안에 관한 예비 연구

A Preliminary Study of the Seismic Damage Estimation for Harbor Sites

최승호¹⁾ · 김한샘²⁾ · 유승훈³⁾ · 정충기⁴⁾ · 장인성⁵⁾

Choi, Seung Ho · Kim, Han Saem · Yoo, Seung Hoon · Chung, Chung Ki · Jang, In Sung

국문 요약 >> 본 연구에서는 항만 구역의 지진피해예측 평가체계를 구축하기 위해 필요한 지진피해예측 관련 시스템 및 내진설계 현황 및 항만구조물의 지진피해 사례를 조사하였으며, 더불어 주요 항만 구역의 구조물의 현황 및 특성을 조사, 분석하였다. 이를 토대로 지반 정보와 항만 구조물의 지진 취약도를 고려한 항만 구역(구조물)의 지진피해예측 간이 평가방안을 개발하였다.

주요어 항만 구조물, 지진 피해, 내진설계기준, 내진성능 평가방법, 지진피해 예측

ABSTRACT >> In this study, the state of the art and characteristics of major Korean port structures were investigated and analyzed. Damage of port structures during earthquakes, evaluation systems of seismic damage and seismic designs have also been investigated. Based on the research, a methodology of seismic damage estimation was proposed considering geotechnical information and the characteristics of the fragility of port structures.

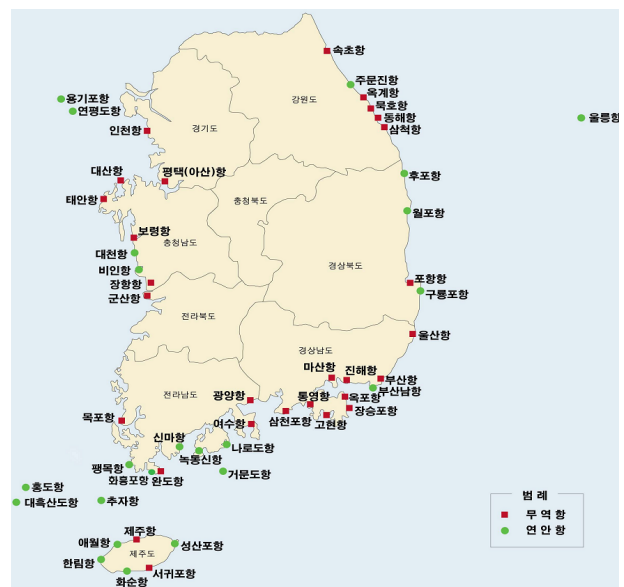
Key words Harbor structure, Earthquake damage, Seismic guidelines, Seismic performance analysis, Seismic damage estimation, Seismic damage estimation class

1. 서론

최근 우리나라에서도 비교적 강한 규모의 지진이 발생하고 있다. 2004년 5월 경북 울진 동쪽 약 80km 해역에서 규모 5.2의 중규모 지진은 1978년 기상청에서 계기지진을 관측한 이후 한반도 남한에서 일어난 지진 중 가장 큰 지진으로 보고되고 있다. 또한 아이티(Haiti), 인도네시아(Indonesia) 지진 등의 외국의 지진피해 소식은 지진에 대한 우려와 관심을 증대시키고 있어 사회기반시설의 지진방재에 대한 준비가 더욱 절실하게 요구되고 있다. 이에 따라 국가 주요시설에 대한 지진 발생 및 예상 피해 규모를 사전에 예측 할 수 있는 시스템의 개발이 시도되고 있다. 인천국제공항 등의 일부 주요 시설물들의 경우, 가속도계 설치를 통한 지진계

측시스템을 적용하고 있다.

항만은 다양한 구조물들이 복잡하게 구성된 사회기간시설물로서 수출입 물류의 중추적인 역할을 담당하며 우리나라 해안에 고르게 분포하고 있다.(그림 1) 하지만 항만에 대해서는 지진계측 및 피해예측에 대한 연구가 미흡한 실정이



〈그림 1〉 국내 주요 항만 분포도

1) 서울대학교 건설환경공학부 석사과정

2) 서울대학교 건설환경공학부 박사과정
(교신저자: adoogen@snu.ac.kr)

3) 서울대학교 건설환경공학부 석사과정

4) 정회원·서울대학교 건설환경공학부 교수

5) 한국해양연구원 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 12. 9 / 수정일 1차: 2011. 3. 29, 2차: 2011. 3. 31 / 게재확정일 : 2011. 3. 31)

며, 지진에 의해 손상되기 쉬운 지반특성과 구조물 특성을 갖고 있어 지진에 대한 적절한 대응방안의 수립이 매우 필요한 시설물이다.

이에 본 연구에서는 지진피해예측 관련 기존 연구 현황 및 항만구조물의 지진피해 사례를 조사하고, 주요 항만 구역 구조물의 현황 및 특성을 토대로 대상 항만 구조물을 조사, 분류하였다. 특히 현재 국내에서 적용하고 있는 항만구조물의 내진설계 및 내진 성능 평가 그리고 시설물 안전점검 등 구조물의 지진 피해 평가와 관련된 사항들을 분석하였다. 또한, 기존에 있는 항만구조물이 위치한 구역의 지반 정보와 해당 구조물의 지진에 대한 민감한 정도를 추정할 수 있는 구조물 취약도 요소(내진성능 평가자료, 설계자료, 안전 점검 결과 등)를 검토하였다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 지진 피해를 예측할 수 있는 간이 평가방안을 개발하고자 한다.

2. 지진피해예측 평가방안 구축을 위한 문헌 연구

2.1 항만 구조물 지진 피해 사례

외국의 대표적인 항만구조물의 지진 피해 사례는 표 1에 나타나 있다. 파일손상, 지반침하, 호안이동, 구조물 비틀림, 안벽이동, 크레인 손상 및 건축물 피해 등의 다양한 피해 양상을 보이며, 특히 컨테이너 터미널 안벽과 같은 중요 안벽, 인명사고와 직결되는 구조물, 2차 재해를 유발할 수 있는 항만구조물의 피해가 많았다. 지진 피해 사례를 분석한 결과 지진이 항만구조물에 미치는 영향은 지진으로 인해 유발되

는 파랑(Water Wave)과 수위상승으로 인한 부가적인 동수압에 따른 항만구조물과의 상호작용, 그리고 지진 경험 구조물의 연이은 지진에 대한 성능 저하 등 복합적인 체계를 이루고 있다. 또한 진앙에서 동일한 거리에 있는 지역이라도 지진 세기 및 파형에 대한 지반 특성의 영향, 지반 위에 축조된 구조물의 진동 감쇠성에 대한 영향, 진동을 받을 때 지반강도 감소 영향 등에 의해 피해결과의 차이가 발생함을 알 수 있다.⁽¹⁾

2.2 지진피해예측 시스템 구축 현황

지진은 일단 발생하면 인명피해는 물론 공공시설물의 파괴와 화재 같은 이차적인 재해를 동반하는 복합적인 재난이다. 이러한 재난에 효과적으로 대응하기 위해서는 유관기관 간의 신속하고 효율적인 재해관련 정보교류를 하고 재해요소에 대해 철저히 분석을 하고 평가를 해야 한다. 이를 지원하는 효율적이고 체계적인 재해정보시스템의 구축 및 운영이 지진 재해의 피해를 줄이는 중요한 요소로 작용할 수 있다.⁽²⁾ 지진의 피해를 종합적으로 평가하고 의사결정지원을 수행하는 대표적인 시스템을 살펴보면 국내의 소방방재청 재해평가시스템⁽³⁾, 일본의 UrEDAS⁽⁴⁾, 미국의 HAZUS⁽⁵⁾, REDARS⁽⁶⁾ 등이 있다. 우리나라의 경우 미국의 HAZUS와 일본의 재해방지시스템을 주요 대상으로 하여 재해정보시스템의 특성을 분석하고 국내의 적용성 여부를 검토하였으며, 최근에는 소방방재청에서 지진재해대응 시범시스템 구축사업을 추진하는 등 국내 현황에 적합한 시스템 구축을 위한 연구가 수행되고 있다.⁽⁷⁾ 소방방재청의 재해평가시스템은 도시지역내의

〈표 1〉 대표적인 항만구조물의 지진피해 사례(Seismic Guidelines For Ports, ASCE, 1998)

지진(항만) 위치	일시	지진규모(Mw)/ 항만 PGA(g)	피해내용	원인
Loma Prieta, California,USA(Oakland)	'89.10.17	6.9/0.25-0.30	-7번가 터미널 : 파일손상, 제방이동 -Mattson 터미널 : 파일과 슬래브 사이 균열, 파일 균열 -Middle Harbor 터미널 : 지역침하(0.5-2ft) -액상화 : 터미널 지역에 부분적으로 발생	A,B,C
Guam(Apra Harbor)	'93.8.8	7.7/0.20-0.30	-해군시설 : 기둥 및 파일손상, Sheet-pile 격벽과 호안이동(3ft) -일반시설 : 일부 컨테이너 비틀림	A,B
Northridge, California, USA(L.A)	'94.1.17	6.7/0.15-0.20	-Berths 121-126 of U.S.A. President Line 터미널 : 선실의 이동(0.5ft), 주변 액상화 -하부구조 : 해안선 파열, 크레인 손상	A,B
Hyogoken, Nambu, Japan(Kobe)	'95.1.17	6.8/0.20-0.70	-국제선적 : 해안지역 액상화로 인한 컨테이너 터미널 피해, 케이스 안벽 이동(2.5ft 상승), 크레인 손상, 탈선, 전복, 구부러짐 -국내선적 : 많은 피해, 손상(강 파일의 휨, 콘크리트 파일 피해) -하부구조 : 건축물 피해, 해안선의 광범위한 피해	A,B,E
Chi-Chi, Taiwan	'99.9.21	7.7/0.4이상	-북쪽 터미널 : 액상화, 탱크 sloshing 파손, 지반침하, 과도한 사면활동	A,B

* Note A : 과잉토압(Large Lateral Pressure from Backfills), B : 액상화(Liquefaction), C : 지반활동(Localized Ground Movement), D : 활동(Massive Submarine Sliding), E : 구조물 진동(Structural Vibrations), F : 쓰나미(Tsunami)

〈표 2〉 대표적인 지진피해예측 시스템

구분	내용(특징)	비고
소방방재청 재해평가시스템	- 미국의 HAZUS와 일본의 재해방지시스템을 토대로 시스템 구축 - 빌딩구조물을 시스템 구축의 주요 목표대상으로 함 - 건물의 피해도 예측, 위험건물 및 대피시설물 선정 등의 종합방재 업무시스템 역할	한국
UrEDAS	- 일본 전역의 지진 및 지진피해 이력과 지반특성을 데이터베이스로 구축 - 지진의 발생 위치와 규모를 실시간으로 계측, 정보화	일본
HAZUS	- GIS기반의 자연재해 손실추정 프로그램 - 건물군, 지형도, 지진 및 지진피해 이력 토대로 지진으로 인한 재해 피해 규모 추정 - 구조물별 특성정보가 충분하게 고려되지 못함	미국
REDARS	- 지진 발생 후 도로체계(교량 및 도로)의 상태를 알려주는 경보시스템 - 지진 피해 복구를 위한 의사결정에 기여하는 지진 피해 복구시스템	

빌딩구조물을 시스템 구축의 주요 목표대상으로 하고 있으며, 건물의 피해도 예측, 위험건물 및 대피시설물 선정 및 검색 등의 종합방재 업무시스템 역할을 수행하고 있다.⁽⁸⁾ 일본의 경우 일본 전역에서 발생한 지진 및 지진피해 이력 그리고 그 위치의 지반특성을 데이터베이스(DB)로 구축하고 지진의 발생 위치와 규모를 실시간으로 정보화하는 UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System)를 구축하였다. 미국의 경우 지진 피해 예측에 관한 연구를 수행하여 지진 재해 평가 시스템을 구축하고 지진지해 대응 계획을 수립하는데 활용하고 있다. 대표적으로 HAZUS(Hazard U.S.)는 미국의 FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Sciences)에 의해 1997년에 처음 개발된 시스템으로 GIS(Geographic Information System) 기반의 광범위한 데이터베이스(지진피해 통계수치를 이용한 건물 타입별 취약도 등)를 내장하고 있으며, 역사 지진이나 가상지진, 혹은 실측지진의 발생위치와 규모 및 단층 등의 입력치를 토대로 지반응답해석(Ground Shaking and Ground Failure) 등을 통해 거주지역, 상업시설 및 학교건물의 피해예측 뿐만 아니라 병원, 소방서 및 도로 등의 필수 시설의 피해도 예측이 가능하다. 또한 재난 대피시설 및 재난 피해가구(Displaced Households) 추정 등의 사회적 고려요소 및 복구비용 산정 등의 경제적 손실 규모 등을 예측한다. 그러나 HAZUS는 미국의 재해재난 예측을 목적으로 미국의 기본 입력 자료를 반영하여 개발되었기 때문에 미국 이외의 지역에서 사용하기에는 제약이 따른다. 또한 거주지 등의 광범위한 지역을 대상으로 대략적인 피해예측 추정에는 유리하나 항만 등의 특정 구역 및 특수구조물에 대한 적용에는 한계가 있다. 그 외에 미국의 REDARS(Risk from Earthquake Damage to Road Way System)는 지진 재해 발생 시 교량 및 도로 시스템의 피해상태를 종합적으로 알려주고 복구를 위한 의사결정을 지원하는 목적으로 구

축되었으며, 미국 서부지역(L.A와 캘리포니아)의 고속도로를 대상으로 한다. 적용된 지진피해 예측기법은 액상화(Liquefactions), 지층면 파괴(Surface Fault Rupter), 지반운동(Ground Motions)의 지진위험도(Seismic Hazards)를 기반으로 도로 시스템의 지진피해 상태를 예측하며, 지진피해로 교통체계 서비스에 영향을 주는 정도와 이로 인한 경제적 비용손실을 예측한다.

2.3 기존 항만 구조물의 내진설계기준, 내진성능 평가 및 안전점검

항만 구조물에 대한 지진피해예측 방안을 구축하기 위해서는 기존 항만 구조물에 대한 주요 안전관리 항목인 항만에 대한 내진 설계기준, 내진성능 평가 및 안전점검 등을 살펴 볼 필요가 있다.

시설물의 내진설계는 ‘자연재해대책법(1997)’에 의해 시설물이 지진에 대해 안전하게 설계되도록 법으로 제도화되면서 본격화되었다. 댐이나 원자력 관련시설물 등의 몇몇 주요시설물은 그 이전부터 개별적인 기준에 따라 내진설계가 적용되었으나 내진설계가 적용되지 않았던 시설물은 ‘내진성능기준(1997)’에 부합되는 새로운 내진설계기준을 마련하거나 다른(기능상 유사한) 시설물의 설계기준을 따라 내진설계를 수행하고 있다. 항만시설은 ‘항만 및 여항 설계기준’(국토해양부, 2005)⁽¹⁶⁾에서 제시하는 방법에 따라서 내진설계를 수행하여야 한다. 단, 도로, 철도시설 및 이와 관련된 교량 등의 부속시설과 건축물 등은 별도의 해당기준에 준하여 내진설계를 수행한다. 그리고 항만시설은 ‘기능수행수준’과 ‘붕괴방지수준’의 두 가지 내진성능수준을 만족하도록 설계되어야 한다. 기능수행수준은 설계지진 작용시 구조물이나 시설물에 발생한 변형이나 손상은 그 구조물이나 시설물의 기능을 차질 없이 수행할 수 있는 범위 내로 제한되는 성능수준을 의미한다.⁽⁹⁾ 붕괴방지수준은 상당한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 그 수준과 범위는 구조물

이나 시설물이 붕괴 또는 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지할 수 있거나 긴급보수를 통해 단시간에 항만구조물로서의 기능을 발휘할 수 있는 성능수준을 의미한다. 지진세기가 작고 빈번하게 발생하는 작은 지진에 대해서는 ‘기능수행수준’을 만족하도록 설계되어야 하고, 지진세기가 크지만 드물게 발생하는 큰 지진에 대해서는 ‘붕괴방지수준’을 만족하도록 설계하여야 한다. 이때 항만시설은 내진등급에 따라 표 3에 규정한 평균재현주기를 갖는 설계지반운동에 대하여 기능수행수준과 붕괴방지수준을 만족할 수 있도록 설계하여야 한다.

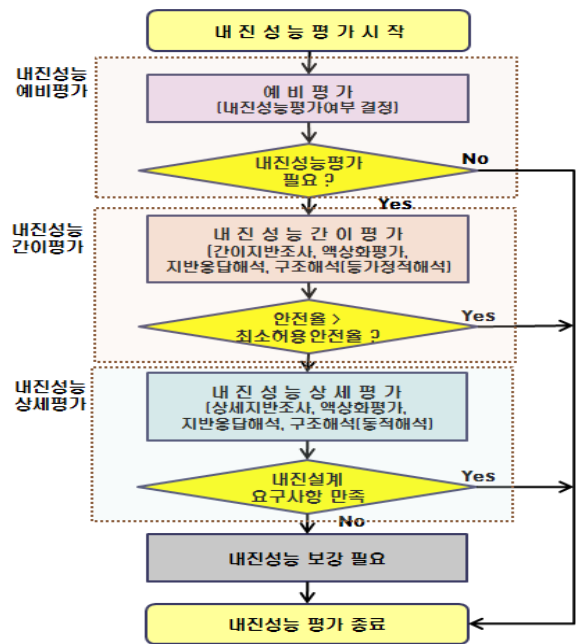
항만시설의 내진성능 평가를 위한 고려 사항으로는 대상으로 하는 지진규모 및 세기, 건설지점의 지반조건, 시설물의 내진등급 및 내진성능 목표 등이 있다. 그리고 내진성능 평가에 대한 검토항목으로는 구조물의 전체 안정성, 기초지반의 활동, 전도 등에 대한 안정성, 액상화 현상이 기초지반의 안정성 및 상부구조물에 미치는 영향, 구조물의 부재응력, 기능상으로 본 구조물 각 부재와 인접하는 구조물이나 지반과의 상대변위 등이 있다.^{(10),(11)}

항만구조물의 내진성능평가를 위한 기본적인 조사부터 최종적인 종합 평가를 수행하기까지의 전체적인 흐름은 그림 2와 같다. 항만구조물의 내진성능 평가는 예비평가, 간이평가 및 상세평가의 3단계로 구분되며 항만구조물의 예비평가, 간이평가, 상세평가의 비교는 표 4와 같다.⁽¹²⁾ 간이평가와 상세평가에는 내진해석이 필요하며, 내진해석 절차는 입

력 지반운동 결정, 입지조건 검토, 지반조사 실시 등의 순서로 이루어지며 해석방법은 구조물별로 정의한다. 먼저 내진성능 평가의 경제적 효율성을 높이기 위해 본격적인 내진성능 평가를 수행하기 전 단계로서 예비평가를 실시한다. 예비평가는 공사지, 준공도, 시방서 등의 기존자료를 기초로 간이평가 실시 여부를 결정한다. 그리고 간이평가에서는 등가정적해석, 상세평가에서는 유한요소해석 또는 유한차분해석에 의한 동적 해석이 필요하다. 등가정적해석에는 항만구조물의 뒤채움, 사석, 잔류토, 기반암, 안벽 구조 항만구조물 설계시 지반조사 및 문헌을 통하여 산정되었던 설계자료를 주로 활용하여도 무방하지만, 상세평가에서는 현재 항만구조물 상태에 대해서 현장지반조사 및 실내실험을 수행하여 지반물성을 추정하여야 한다. 항만구조물에 대한 내진성능

〈표 3〉 내진성능수준(건설교통부, 1997)

성능목표	1등급	2등급
기능수행	평균재현주기 100년 (10년내 초과확률 10%)	평균재현주기 50년 (5년내 초과확률 10%)
붕괴방지	평균재현주기 1000년 (100년내 초과확률 10%)	평균재현주기 500년 (50년내 초과확률 10%)



〈그림 2〉 항만구조물의 내진성능 평가 흐름도

〈표 4〉 예비평가, 간이평가, 상세평가의 비교(해양수산부, 2001)

구분	예비평가	간이평가	상세평가
시추조사		기존의 N치가 없거나, 추정이 불가능한 경우에 시추 조사를 하거나 SPT 또는 CPT 수행,	2개 이상 해석 단면에 대한 시추조사 1단면당 육상시추 2공, 해상시추 1공
현장시험	설계자료 및 구조물의 중요도 등으로 예비평가 수행 : 내진설계여부, 정적안정성 평가 결과, 구조물의 중요도 등을 참고	재료 성능 저하 조사 : 기존의 안전진단 보고서를 참조할 수 있으며, 확보가 어려운 경우 반발강도평가, 중성화평가, 주요 부위 철근부식도 평가 수행	SASW, S.P.S. 검증, 또는 다운홀 시험 등
실내실험		실내시험은 수행하지 않으며 SPT 또는 CPT의 결과를 이용하여 경험식으로 추정	삼축압축실험(등가정적해석용), 공진주 실험(지반응답해석용), 반복삼축실험(액상화 상세평가용)
해석방법 (구조물별로 상이)		등가정적해석	등가정적해석, 동적해석, 3-D해석
해석 프로그램	해당사항 없음	지반응답 해석 프로그램, 구조해석 프로그램	액상화해석 프로그램, 지진응답해석 프로그램, 구조해석프로그램, 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램 등

〈표 5〉 기존건축물의 내진성능 평가 및 향상요령(한국시설안전공단, 2004)

등급	종합평가지수	상태	조치
A등급	0.95이상	전반적으로 내진성능이 기준에 만족하는 최상의 상태	일상적인 유지관리
B등급	0.90이상 0.95미만	구조의 강도와 강성에 관한 내진성능은 기준에 만족하나 상세나 인접성 등이 기준에 미달한 상태	간단한 보완이나 보수에 의해 기능수행성능을 확보하고 장기적인 계획을 수립하여 보수/보강을 실시
C등급	0.85이상 0.90미만	구조의 강도나 강성이 부분적으로 기준에 미달하여 보수/보강이 필요한 상태	일반적인 내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능을 향상
D등급	0.80이상 0.85미만	건축물이 층 단위로 구조의 강도나 강성이 기준에 미달하여 단위층의 전체에 걸쳐 보수/보강이 필요한 상태	정밀한 구조해석과 내진보강설계에 의한 보강을 실시하여 내진성능 향상
E등급	0.80미만	건축물의 전반에 걸쳐 내진성능이 기준에 미달하여 전체구조의 성능 개량이나, 철거가 필요한 상태	정밀한 구조해석과 경제성분석에 의해 전체 구조의 성능 개량이나 철거를 판단하고, 필요한 경우에는 내진보강설계에 의한 구조의 성능을 개량하여 내진성능을 향상

평가에서는 내진성능 간이평가 결과가 최소허용안전율을 만족하면 내진성능 평가를 종료하며, 최소허용안전율에 미달하면 내진성능 상세평가를 시행하게 된다. 그리고 내진성능 상세평가 결과가 해당 구조물의 내진설계 요구사항을 만족하면 내진성능 평가를 종료하며, 내진설계 요구사항을 만족하지 못할 경우는 내진성능 보강여부를 결정함을 알 수 있다. 그러나 항만구조물의 현행 내진성능 평가를 통해서도 해당 구조물이 현재 내진성능을 충족하는 여부는 알 수 있지만, 어느 정도의 내진성능 상태를 보유하고 있는지, 구체적인 내진성능 평가 등급을 산정 할 수 없고 이에 대한 구체적인 기준이 마련되어 있지 않다. 반면 기존 건축물의 내진성능평가에서는 표 5⁽¹³⁾와 같이 내진성능 평가에 의해 5단계의 내진성능 등급 판정이 가능하므로 지진피해 예측을 보다 상세하게 판단 할 수 있으며, 내진성능 보강여부 결정이나 기타 안전관리에도 보다 효과적으로 이용될 수 있다.

항만구조물은 시간이 경과함에 따라 노후화 등 다양한 원인에 의해 성능저하가 발생하여 구조물 원래의 기능을 발휘하지 못하는 경우가 있다. 이와 같이 성능저하가 발생한 구조물의 현재 상태를 점검하고 평가하며, 구조물의 잔존수명을 예측하는 등의 행위를 안전점검이라 한다.⁽¹⁴⁾ 항만구조물의 안전점검은 기존 구조물의 기능을 보전, 향상시키고 부분적인 기능을 갱신하기 위한 조치를 위하여 필요한 것으로 항만구조물의 지진피해예측 수행시 ‘구조물 상태’를 평가하기 위해 정밀점검과 정밀안전진단의 결과가 반영된다. 정밀점검은 시설물의 현 상태를 정확히 판단하고 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하며, 구조물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위하여 면밀한 외관조사와 간단한 측정시험장비로 필요한 측정 및 시험을 실시한다. 정밀점검의 과업은 구조물 결함의 진단 및 신규 발생을 파악하여 시설물의 주요 부재별 상태를 외관조사 및 현장 재료시험(비파괴 현장시험 등) 결과 분석을 통하여 평가하고 이전의 안전점검 실시결과의 상태평가와 비교

검토하여 시설물 전체에 대한 상태 평가를 결정한다. 또한 구조물에 중대한 결함이 발생하는 등 필요한 경우에는 해당 부위에 대하여 구조기반수리해석 등의 안전성평가를 실시한다.

반면 정밀안전진단은 정밀한 외관조사와 시험측정장비 및 기기를 사용하여 시설물의 물리적·기능적 결함을 발견하고 그에 대한 신속하고 적절한 조치를 하기 위하여 구조적 안전성 및 결함의 원인 등을 검토·분석·평가함과 더불어 보수보강방법을 제시하는 등의 행위로서 이루어진다. 정밀안전진단의 과업은 정밀점검으로 쉽게 발견할 수 없는 결함부위 발견 및 구조물 전체 부재별 상태를 평가하고 시설물 전체에 대한 상태평가를 결정하기 위하여 정밀한 외관조사와 각종 측정·시험장비에 의한 측정·시험(콘크리트 시험, 균열 깊이 조사, 수중조사 등)을 실시한다. 또한 정밀안전진단에서는 시설물의 결함 정도에 따라 필요한 조사·측정·시험, 구조계산, 수치해석 등을 실시하고 분석·검토하여 안전성평가 결과를 결정하며 필요한 경우에는 구조물의 사용성, 내진성능 등도 평가한다. 정밀점검 및 정밀안전진단의 평가결과는 상태평가 및 안전성평가 등을 종합적으로 평가하여 해당 구조물의 안전등급을 표 6과 같이 5개의 등급으로 지정한다. 그리고 정밀점검 및 정밀안전진단의 실시주기는 해당 구조물의 안전등급에 따라 표 7과 같은 실시주기에 의해서 정기적으로 실시한다.⁽¹⁵⁾

3. 지진피해예측 간이 평가 방안

3.1 대상 항만 구조물 분류

항만 구조물은 주로 해안의 연약지반에 위치하며, 그 종류가 다양하기 때문에 실질적인 지진 피해 예측을 수행하기 위해서는 해당지역의 위치, 지반조건, 액상화 가능성 여부, 구조물 특성 등과 더불어 구조물의 중요성을 종합적으로 고려해야 한다. 항만시설의 분류는 항만구조물의 기능에 의거

〈표 6〉 항만의 정밀점검 및 정밀안전진단의 안전등급(한국시설안전공단, 2009)

안전등급	설 명
A(우수)	문제점이 없는 최상의 상태
B(양호)	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 발휘에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부 보수 필요 상태
C(보통)	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나, 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D(미흡)	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수보강이 필요하며, 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E(불량)	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위협이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

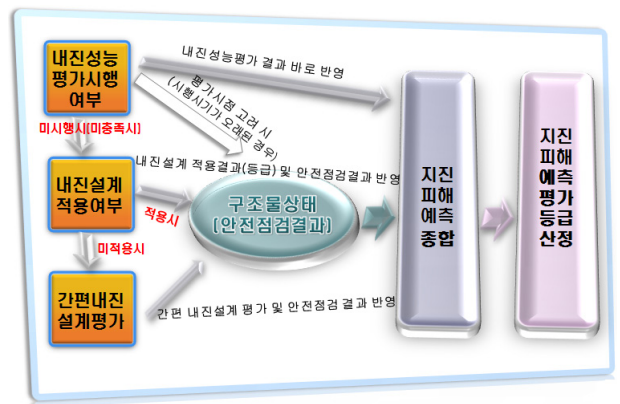
〈표 7〉 항만의 정밀점검 및 정밀안전진단 실시 시기(한국시설안전공단, 2009)

안전등급	정밀점검		정밀안전진단
	건축물	그 외 시설물	
A등급	4년에 1회 이상	3년에 1회 이상	6년에 1회 이상
B-C등급	3년에 1회 이상	2년에 1회 이상	5년에 1회 이상
D-E등급	2년에 1회 이상	1년에 1회 이상	4년에 1회 이상

〈표 8〉 지진피해예측 평가를 위한 대상 항만구조물 분류(한국항만협회, 2008)

구분	갑문	계류시설 (안벽, 물양장, 부잔교)	외곽시설 (방파제, 호안)	건축물 (터미널, 창고, 상옥)	크레인	교량	기타 (초대형탱커, 통제실 등)
계	2	431	164	85	224	29	89
총계	802개(인천항만공사 등 16개 항만청의 안전관리 대상 항만 시설물 현황)						

하여 외곽시설, 계류시설 및 부대시설로 나눌 수 있다. 그리고 항만시설의 등급은 해당 구조물의 중요성을 고려하여 내진 1등과 내진 2등급으로 구분한다. 내진 1등급 구조물은 구조물이 피해를 입으면 많은 인명과 재산상의 손실을 줄 염려가 있는 경우, 지진재해 복구에 중요한 역할을 담당하는 구조물, 또는 국방상의 필요성에 의하여 분류되는 구조물이다. 내진 1등급 구조물로는 갑문시설, 피해를 입으면 심각한 환경오염을 줄 염려가 있는 유해물 시설이나 위험한 부두시설 등이 있다. 내진 2등급 구조물은 지진피해시 사회경제적 손실을 최소화 할 수 있거나 시설물의 기능상 재해 복구시까지 그 기능이 중단되더라도 큰 무리가 없다고 판단되는 구조물로서 외곽시설 중 침식대책시설, 매몰대책시설, 소형선 부두시설 및 부잔교 등이 있다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 우리나라 전체 안전관리대상 항만시설물⁽¹⁷⁾을 대상으로 하여 ‘항만 및 어항시설의 내진설계 표준서’를 토대로 구조물 특성, 기초타입, 지반특성 및 중요성을 고려하여 표 8에 제시된 바와 같이 1)갑문, 2)계류시설(안벽, 물양장, 부잔교), 3) 외곽시설(방파제, 호안), 4)건축물(터미널, 창고, 상옥), 5)크레인, 6)교량, 7)기타(초대형 탱커, 통제실, 타워, 파이프라인 등)로 분류하였다.



〈그림 3〉 항만구조물 지진피해예측 평가 개요

2장에서 살펴본 기존 항만 구조물에 대한 지진피해 사례, 지진피해 예측 시스템 현황, 내진설계 기준, 내진성능 수준, 내진성능 평가방법 및 안전점검 방법의 문헌 연구 결과를 토대로 3.1절에서 분류된 항만 구조물을 대상으로 지진피해예측 간이 평가 개요를 수립하였다. 항만구조물의 정확한 지진피해예측 평가를 위해서는 모든 항만구조물에 대해서 내진성능평가를 실시하는 것이 가장 이상적이지만 항만 구조물은 종류가 많고 그 구조가 다양하므로 비용과 시간의 문제로 인하여 간편하고 경제적인 지진피해예측 평가의 개발이 필요하다. 그림 3은 항만구조물을 내진성능평가의 시행여부, 내진설계 적용여부 및 구조물상태(안전점검결과)를

3.2 지진피해예측 간이 평가방안 개요

고려하여 항만구조물의 지진피해예측을 간략하게 수행하여 지진피해예측 간이 평가 등급을 산정하는 흐름을 보여준다. 본 지진피해예측 평가를 통해 최종적으로 항만구조물별 평가등급 산정이 가능하며, 평가등급이란 특정 지진동 수준에 대한 내진성능 사전 자료에 따른 피해 등급을 의미한다. 평가 등급은 안전, 불안전 또는 서비스 가능 여부 등의 기준에 따라 점수화된다. 본 연구는 이러한 평가 등급 결정을 위한 간이 평가방안을 제안하고 있으며, 이를 위한 등급은 향후 연구를 통해 보완될 예정이다.

평가는 다음과 같은 세 가지 경로로 수행된다. 첫째, 항만 구조물이 내진성능평가가 수행되었고 내진성능을 충족하면 그 결과를 항만구조물의 지진피해예측 간이 평가에 바로 반영하여 지진피해예측 간이 평가 등급을 산정한다. 이때 상세한 내진성능 등급 판정이 필요한 경우에는 구조물의 현재 상태(노후화 등)를 평가하여 평가 등급 산정에 반영한다. 둘째, 내진성능평가 결과를 미충족한 항만구조물의 경우나 내진성능평가가 미시행된 경우의 항만구조물에 대해서는 내진설계의 적용여부를 판단한다. 이때 내진설계가 적용된 경우는 내진설계의 적용결과(등급) 및 구조물의 현재 상태(노후화 등)를 평가하고 종합하여 항만구조물의 지진피해예측을 종합하고 지진피해예측 간이 평가 등급을 산정한다. 셋째, 내진설계가 미적용된 구조물에 대해서는 지역계수, 지반의 지진민감도, 구조물 형식 및 구조물 상태 평가를 수행하여 항만구조물의 지진피해예측 종합 및 평가 등급을 산정하는 한편 내진설계 평가를 실시한다. 아울러 개발된 평가방

안은 지진피해예측의 대상이 되는 구역이 꼭 항만이 아니더라도 지반 정보와 대상 구조물의 지진 취약도 요소를 알 수 있는 구역(구조물)이라면 주어진 지반정보와 구조물 취약도 요소를 토대로 공항 및 산업단지 등의 특정 구역(구조물)에 대해서도 본 연구에서 개발된 지진피해예측 간이 평가방안의 매뉴얼을 적용할 수 있다.

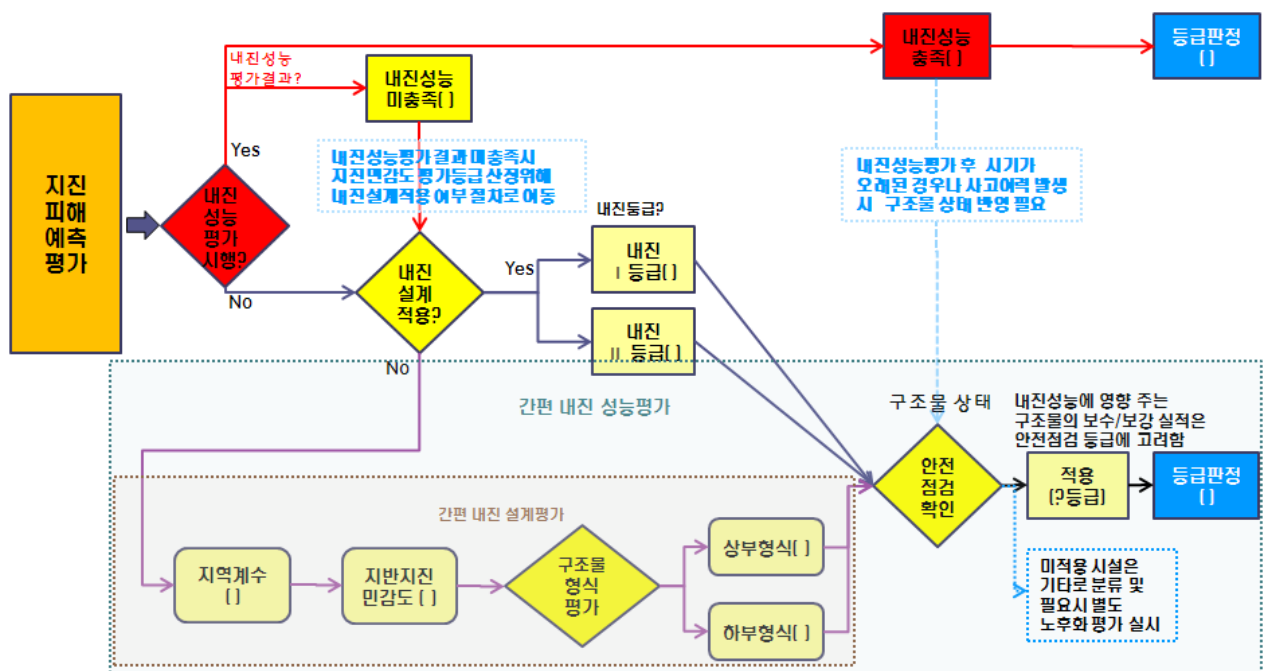
3.3 지진피해예측 간이 평가방안

본 절에서는 지진피해예측 간이 평가 개요를 바탕으로 개발된 지진 피해예측 평가를 간략하게 수행 할 수 있는 매뉴얼을 소개하고자 한다.(그림 4)

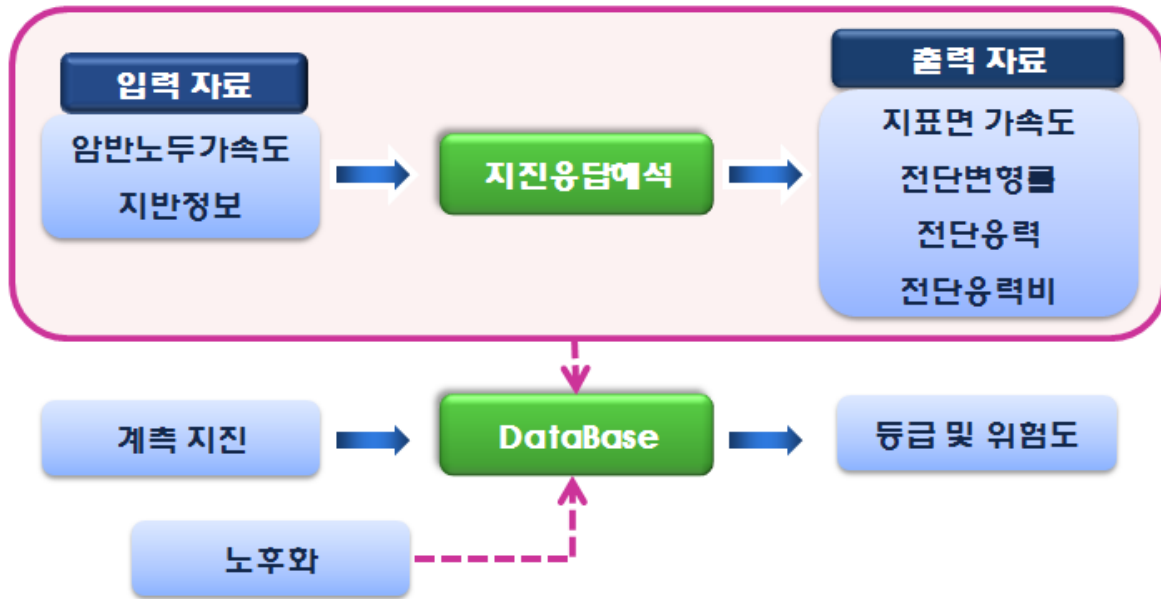
3.3.1 내진성능평가가 시행(충족)된 구조물의 경우

항만구조물에 대한 지진피해예측 간이 평가는 평가 대상 항만구조물의 내진성능평가 시행 여부를 우선적으로 검토한다. 검토결과 내진성능평가 실적이 있는 구조물은 내진성능을 충족하는 경우 그 결과를 평가점수로 환산하여, 최종적인 지진피해예측 간이 평가에 반영하게 되며 세부적인 평가방안은 다음과 같다.

항만시설의 내진성능평가에서는 시설물의 내진등급 및 내진성능목표, 지진구역과 지반조건에 따라 설계지진하중을 결정하고, 현재 시설물의 상태가 설계지진 하중에 안전한지 여부를 결정한다. 따라서 내진성능평가 기준을 만족한 구조물은 계측 및 평가된 지진의 세기가 설계지진하중보다 작을



〈그림 4〉 항만구조물 지진피해예측 간이 평가 매뉴얼



〈그림 5〉 항만구조물 지진피해예측 간이 평가 방안

경우에는 안전한 것으로 판단할 수 있으며, 설계지진하중 이상의 지진하중에 대해서는 두 값의 비교를 통해 그 결과를 점수화하여 지진피해예측 간이 평가에 반영하게 된다.

일반적으로 지진 계측은 자유장 암반 노두에 설치한 가속도계를 통해 이루어진다. 암반에서 관측된 지진파는 지표면으로 전달되는 과정에서 상부 지반 특성에 따라 증폭 정도가 달라진다. 따라서 해당 시설물이 위치한 지반에서 발생 가능한 지표면 최대가속도를 의미하는 설계지진하중과 직접적으로 크기 비교가 불가능하며, 두 값의 비교를 위해서는 같은 위치의 값으로의 변환이 필요하다.

설계지진하중과 계측지진하중의 비교를 통한 위험도 예측을 위해 본 연구에서는 지진응답해석을 이용한 데이터베이스(DataBase, DB) 구축을 실시한다. 그림 5와 같이 암반노두가속도와 지반 물성치 등의 입력자료는 지진응답해석을 통해 깊이별 가속도, 전단변형률, 전단응력 등의 출력자료로 산출되며 깊이별 가속도를 통해 지표면 최대가속도를 알 수 있다. 다양한 암반노두가속도 수준에 대해 지진응답을 실시하고 각각의 암반노두가속도에 대응하는 지표면 최대가속도를 산출하여 DB화 한다. 지진 발생시에는 계측된 지진하중을 DB에 저장된 데이터를 참조하여, 대응하는 지표면 최대가속도를 결정 후 이를 설계지진하중과 비교하고 등급화 한다.

3.3.2 내진성능평가 미시행(미충족)된 구조물의 경우

한편 내진성능평가가 미시행된 구조물 및 내진성능평가 결과가 미충족으로 판단된 구조물에 대해서는 내진설계 적

용여부를 판단한다. 내진설계가 적용된 구조물은 먼저 설계시 책정된 설계지진하중을 확인한다. 설계지진하중 확인 이후에는 내진성능평가 시행 구조물과 마찬가지로 그림 5의 절차에 따라 각 수준별 암반노두가속도에 대해 지진응답해석을 실시하고 이에 대응하는 지표면 최대가속도를 결정하여 DB화 한다. 이후 지진 발생 시 DB에 저장된 지표면가속도 값을 이용하여 발생 가능한 지표면 최대 가속도를 결정한다. 내진성능평가가 미 실시 되었기 때문에 구조물상태(노후화 상태)를 고려하여 구조물에 시행된 안전점검 이력(정밀점검 혹은 정밀안전진단의 수행여부 및 등급에 따라 평가 점수 부여)을 평가에 반영한다. 정밀점검은 시설물의 현 상태를 정확하게 판단하고 최초 혹은 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하며, 구조물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위하여 면밀한 외관조사와 간단한 측정시험 장비로 필요한 측정 및 시험을 실시한다. 정밀안전진단은 정밀한 외관조사와 시험-측정 장비 및 기기를 사용하여 시설물의 물리적-기능적 결함을 발견하고 그에 대한 신속하고 적절한 조치를 하기 위하여 구조적 안전성 및 결함의 원인 등을 검토함과 더불어 적절한 보수보강 방법을 제시하는 등의 행위로서 이루어진다. 안전점검이 수행된 구조물의 경우는 실시된 안전점검 결과의 등급을 고려하여 최종적인 지진피해예측 간이 평가를 수행하게 된다. 또한 구조물의 내진성능에 영향을 주는 구조물의 보수 및 보강 실적은 구조물 상태평가에 별도로 고려해 준다. 한편 안전점검이 수행되지 않은 구조물에 대해서는 안전점검 미적용 시설로 분류하여 최종적인 지진피해예측 간이 평가를 산정하

〈표 9〉 지역계수의 산정(건설교통부, 1997)

지진 구역	행정구역	구역계수 (재현주기 500년)	위험도계수 (재현주기별)
I	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시	0.11g	0.57 (100년)
	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부		1.00 (500년)
II	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07g	1.40 (1000년)

- (지역별 진도, g 값) = (지진구역 계수) × (위험도 계수)
 - 산출된 값(계수)을 평가지수로 환산하여 산정

〈표 10〉 지반의 분류(항만 및 어항의 내진설계 표준서, 1999)

지반 등급	지반종류(호칭)	평균지반특성(상부 30m)	
		전단파속도(m/s)	SPT-N (타격횟수/300mm)
S _A	경암지반	1500초과	-
S _B	보통암 지반	760 ~ 1500	
S _C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암지반	360 ~ 760	> 50
S _D	단단한 토사 지반	180 ~ 360	15 ~ 50
S _E	연약한 토사 지반	180미만	< 15
S _F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반		

는데, 필요한 경우에는 현장 안전점검을 별도로 시행하여 그 결과를 최종적인 지진피해예측 간이 평가에 반영된다. 해당구조물의 노후화가 심하거나 사고이력이 있는 경우에는 설계지진하중을 보다 낮은 수준으로 평가한다.

3.3.3 내진성능평가 미시행 및 내진설계 미적용 구조물

내진성능 평가가 수행되지 않고 내진설계가 적용되지 않은 구조물은 본 연구에서 제안한 간편 내진설계 평가를 적용한다. 간편 내진설계 평가는 먼저 해당 항만이 위치한 지역의 지역계수를 산정한다. 지역계수는 항만 구조물이 위치한 해당 지역의 구역계수에 재현 주기별 위험도 계수를 곱한 값으로써 표 9를 이용하여 점수로 산정 할 수 있다.⁽¹¹⁾ 지역계수가 산정된 이후에는 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반의 지진민감도 평가가 수행된다. 지반의 지진민감도 평가는 SPT-N치나 전단파속도 등의 지반조사 자료를 토대로 해당지반을 표 10과 같이 6개 종류로 분류하고 점수로 산정 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 여기서 지반종류 S_F는 부지의 특성 조사가 요구되며, 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay 와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한

지반, 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반(지층의 두께, H>3m), 매우 높은 소성을 갖는 점토지반(H>7m이고 PI>75), 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토(H>35m) 지반이 S_F에 해당된다.⁽¹⁷⁾ 이때 해당지반의 지진민감도 평가를 상세히 수행 할 필요가 있는 경우에는 기존에 수행된 액상화 평가 결과나 지반응답해석 등의 자료가 있을 시 이를 참고 할 수 있고 참고 자료가 없는 경우에는 ‘표준관입시험을 이용한 액상화 간편예측법’을 제안한 Seed and Idriss의 방식과 일본항만협회(日本港灣協會)의 ‘표준관입시험과 입도분포를 이용한 액상화 간편예측법’을 이용할 수 있다.⁽¹⁸⁾

지반의 지진민감도 평가 후에는 구조물의 형식 평가가 수행된다. 구조물 형식 평가는 상부구조 형식 평가와 지반구조 형식 평가로 구성되어 있다. 상부구조 형식 평가는 상부구조물의 구조물별 상세 유형과 구조물 취약도 등의 내진특성에 영향을 주는 구조물별 세부 특성이 고려되어 점수로 평가된다. 지진피해예측 간이 평가 대상 전체 항만구조물을 표 11과 같이 구조물별 상세 유형과 내진특성에 영향을 주는 특성에 의하여 분류하였다. 반면 지반구조 형식 평가는 기초의 종류에 따른 상대적인 지진에 대한 민감도를 평가하고, 구조물의 내진성능에 영향을 주는 설계특성(하중 등)의 요소가 고려된다. 현재 항만의 구조물 형식에 따른 지진 취약도를 평가하는 기준은 구축되지 않았으나 대표적인 주요 항만 구조물에 대해 취약도 곡선을 개발하고 지진 취약도 평가기준을 제안함으로써 항만구조물의 세부특성별 지진 취약도를 평가 할 필요가 있다. 내진설계 등급에 따른 평가 이후에는 구조물상태(노후화 측면)를 고려하여 구조물에 시행된 안전점검 이력(정밀점검 혹은 정밀안전진단의 수행여부 및 등급에 따라 평가점수 부여)을 고려함으로써 구조물의 간편 내진 성능 평가를 수행하고 개별 평가점수를 통계처리하여 구조물의 지진피해예측 간이 평가등급을 산정한다.

〈표 11〉 구조물 상부 형식 및 세부특성 분류

종류	상부형식	상부형식(세부특성)
갑문	- 중력식 슬라이딩게이트, - 라멘식	갑거의 톤수(5만톤,1만톤)
	- 독립기초식	갑문배치(단비실,복비실,복식,계단식,병렬)
방파제	- 경사제	사석식,블록식
	- 직립제	케이슨식,블록식,셀블록식,콘크리트 단괴식
	- 혼성제	케이슨식,블록식,셀블록식,콘크리트 단괴식
	- 중력식 특수방파제	이형케이슨제,직립소파 블록제,기타
	- 소파블록 피복제	
계류시설 (안벽,물양장, 부잔교)	- 중력식	콘크리트블록식,콘크리트셀블록식,케이슨식.....
	- 널말뚝식	보통식,선반식,자립식,타이로드식,.....
	- 잔교식	연직말뚝식,경사말뚝식,원통식,각통식,교각식
	- 계단식	횡계단식,중계단식
건축물 (여객터미널, 창고,상옥)	- 돌핀식	말뚝식,강재셀식,케이슨식
	- 경량철골조, - 콘크리트슬라브조, - 철골조, - 철골조합석스트레이트, - 철골트러스, - 연직캔틸레버	건축물 높이(층수:1층,2층,3층) 건축물 바닥면적(1000㎡,2000㎡.....)
교량	- 교각형식(강상형,빔형,라멘형,박스형)	교대형식(중력식,구주식,교각식,벽식....)
		교량(경간)길이:00미터
크레인	- Box식, -Pipe식, -형강식, 기타	Boom 길이(최대선회반경)
		고정장치 설치유무(설치,미설치)
기타	-	-

4. 결론

항만구역의 구조물 특성, 지반특성, 지역성 등을 고려한 종합적인 지진피해예측 시스템의 개발을 위해서 본 연구에서는 주요 항만 구조물을 일반 및 세부 타입별로 분류하였으며(표 8, 표 11), 항만 구조물의 지진피해예측 평가를 위하여 항만구조물에 대한 내진성능평가 시행 여부 및 결과, 내진설계 적용 여부 및 적용 등급, 구조물상태(안전점검결과), 지역계수, 지반의 지진민감도, 구조물 형식평가 요인을 도입하였다. 개발된 지진피해예측 간이 평가방안을 항만구역에 적용함으로써 항만구조물의 지진피해예측의 평가 등급이 결정되며, 이를 통해 지진 발생시 항만구조물의 지진피해를 예측 할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 지진 발생 시의 항만 구역(구조물)의 피해 정도를 예측함으로써 지진에 의한 2차 피해를 대비한 대응방안을 강구 할 수 있으며, 지진 발생 후 항만 구역의 복구 시의 중요한 참고 자료로써 활용이 가능하다.

그러나 개발된 평가방안은 곧바로 실무에 적용하기에는 다음과 같은 제약사항이 따른다. 개발된 평가방안에서는 구조물의 취약도 함수에 의한 지진피해 상태의 확률적인 평가를 적용하지 못하고 있다. 또한 합리적인 지진피해예측 평가를 위한 세부 평가요인별 가중치 값(Weight)을 부여하지

나 종합 산정을 위한 확률통계적 방법에 대한 연구가 좀 더 보완되어야 한다.

향후 항만 구역 및 구조물에 대한 추가적인 문헌연구, 항만구조물에 대한 취약도 함수 개발, 전문가 자문 및 확률통계기법을 고려한 평가점수 종합 및 지진 피해 예측 평가등급 선정 등을 지속적으로 연구하고 보완함으로써 제안된 평가방안의 완성도를 높일 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구원이 주관하는 ‘항만 지진응답 예측시스템 구축 및 활용기술 개발’ 사업 결과의 일부로서, 국토해양부와 서울대학교 공학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Werner, S.D., “Seismic Guidelines For Ports,” ASCE, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12, 2(1)-2(17), 1998.
2. 강수영, 김광희, 김동춘, 유해수, 민동주, 석봉출, “지진재해예측을 위한 HAZUS와 ShakeMap의 한반도에서의 적용가능성 연구,” 한국지리정보학회지, 제10권, 41, 2007.

3. 소방방재청, 지진재해대응 시범시스템 구축 제안요청서, 2005.
4. Nakamura, Y., "Research and Development of Intelligent Earthquake Disaster Prevention System UrEDAS and HERAS," *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, Japan Society of Civil Engineers, No.531/ I-34, 1-33, 1996.
5. NIBS, *Earthquake Loss Estimation Technology HAZUS, User's Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997.
6. Werner, S.D., Lavoie, J.P., Eguchi, R.T., Taylor, CE., and Moore, J.E., "REDARS1: Demonstration Software for seismic Risk Analysis of Highway System," *Research Progress and Accomplishments 2001-2003*, MCEER-03-SP01, Red Jacket Quadrangle, Buffalo, Newyork, 17-23, 2003.
7. 이상호, 김봉근, 정동균, "도로교의 GIS 기반 지진피해평가체계 구축을 위한 데이터베이스 설계," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 136, 2006.
8. 윤의택, 류혁, 강태섭, 김재관, 박창업, "서울시 모델 구역 지진피해 추정 연구," 한국지진공학회 논문집, 제9권, 41, 2005.
9. 김익현, "주요 토목시설물의 내진설계기준 현황," 대한토목학회지, 제58권, 제7호, 18, 2010.
10. 해양수산부, 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서, 1999.
11. 건설교통부, 내진설계기준 연구(II), 1997.
12. 해양수산부, 항만구조물의 내진성능 평가지침서, 2001.
13. 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침·건축물, 2004.
14. 강성후, 토목구조물의 안전진단과 사례, 구미서관, 서울, 35, 2001.
15. 한국시설안전공단, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침항만, 2009.
16. 국토해양부, 항만 및 여항 설계 기준, 2005.
17. 한국항만협회, 2008년 안전관리 대상 항만시설물 현황, 2008.
18. 권오순, 박우선, 윤길림, "지진으로 인한 안벽의 액상화 위험도 평가," 한국해양공학학회지, 제12권, 28-30, 2000.