항만시설 유지관리 전략수립을 위한 상태기반 성능모델연구

A Study on Performance Model for Establishing Strategies of Port Facilities Maintenance

임종권* · 조인우** · 이정훈*** · 이아련**** · 박미연*****

Lim, Jonggwon*, Cho, Inuh**, Lee, Jeonghun***, Lee, Aryeon****, and Park, Miyun*****

Abstract

Although most domestic ports and port facilities are designed to be used for more than 50 years, it is not easy to perform long-term maintenance of port facilities' service functions under various environments and conditions of use; in other words, obtaining specialized historical data based on the systematic maintenance of port facilities is difficult. Therefore, there is a need to develop maintenance strategies that take into account various internal and external risk factors that are faced, and to study management methods to meet the functional and service requirements that port facilities should provide. In this study, we developed a state-based performance model that enables the establishment of a maintenance strategy through utilization of unit cost information related to the damage type and status by structure type and sea area using the precise safety diagnosis data. It is possible to simulate state transition and state-based performance improvement by programming it. This will be an important basis for technological development for asset management of port facilities.

Key words : Condition-based Performance Model, Strategies of Port Facility Maintenance, Unit Cost, Port Asset

요 지

대부분의 국내 항구 및 항만시설은 50년 이상 사용되도록 설계되어 있지만, 해양환경의 악화, 선박의 대형화 및 취급 물동량의 증가 등 여러 가지 환경 및 사용조건 하에서 초기 건설당시의 요구성능조건, 즉 항만시설의 서비스 기능의 장기간 유지와 항만시설에 대한 체계적인 유지관리기반의 전문화된 이력자료 확보 또한 쉽지 않다. 따라서 직면하고 있는 다양한 내·외부적 위험요인이 고려된 적절한 유지관리 전략 개발과 이를 통한 항만시설이 제공해야 하는 기능 및 서비스 요구사항을 충족시킬 수 있는 관리 방안연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 정밀안전 진단자료의 해석별, 구조형식별 손상형태와 손상수준에 따른 상태등급과 연계된 단위비용 정보 활용을 통하여 유지관리전략수립을 가능하게 하는 상태기반 성능모델을 개발하였고, 이를 프로그램화하여 상태변화추이 및 보수보강으로 인한 상태기반 성능개선을 모사할 수 있도록 하였다. 이는 항만시설 자산관리 차원의 기술 발전에 중요한 기반이 될 것이다.

핵심용어 : 상태기반 성능모델, 항만시설물 유지관리 전략, 단위비용, 항만 자산

*정회원, (주)승화기술정책연구소 사장(E-mail: jklim54@daum.net)

Member, President, S.H Tech&Policy Institute

** (주)승화기술정책연구소 이사(E-mail: inuh_jo@naver.com)

Director, S.H Tech&Policy Institute

*** (주)승화기술정책연구소 과장(E-mail: kula1029@daum.net)

Manager, S.H Tech&Policy Institute

**** (주)승화기술정책연구소 대리(E-mail: sh_dkfus@naver.com)

Assistant manager, S.H Tech&Policy Institute

***** 교신저자, 정회원, (주)승화기술정책연구소 대표이사(Tel: +82-2-2057-2210, Fax: +82-2-2057-2290, E-mail: momo6238@hanmail.net)

Corresponding Author, Member. CEO, S.H Tech&Policy Institute

1. 서 론

국가산업의 발전에 따른 사회인프라 구축을 시작으로 관련 시설물의 수량도 함께 증가했고, 기상이변, 자연재해 등으로 인한 시설물의 손상 및 노후화가 급속도로 진행되고 있어 시설물의 안전뿐만 아니라 사용성, 성능유지를 위한 추가적인 비용규모 또한 비례하여 증가하고 있다.

특히, 사용자의 요구수준이 높아지고 세분화됨에 따라 안전중심의 단순한 시설물 관리체계에서 장기적으로는 유지관리 비용을 절감할 수 있는 성능중심의 시설물 관리체계 기법으로의 전환과 법제화를 통한 실질적인 시설물 유지관리가 필요하게 되었다. 이에 정부는 안전성능, 사용성능, 내구성능으로 세분화된 성능평가 내용을 포함한 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(약칭 ‘시설물 안전법’)을 개정하였고(2018.01.01), 이를 통해 국가 경제 성장 수준에 맞는 적합한 시설 확충과 서비스 수준의 향상을 고려한 시설물 관리, 관리자와 사용자 요구수준을 반영하여 기존의 사후적 대응체계에서 선제적 관리체계로의 전환, 즉 성능중심의 사회간접자본(Social Overhead Capital, SOC) 유지관리체계를 추진하였다.

항만시설의 경우, 증가하는 물동량의 수요를 충족하고 세계시장 흐름의 변화에 대응하기 위한 시설물 유지보수 및 관리, 확충에 대한 중요성이 증가되고 있음에도 불구하고 과거 유지관리 이력데이터가 거의 없고, 이를 관리하는 관리주체들의 데이터 관리에 대한 인식 부족으로 인해 구조물별 또는 시설물별 수명 및 관리주기, 보수시기 및 보수율 등의 내용파악이 어려운 실정이다.

따라서 세부적인 시설물별 내구연한 및 적정 유지관리주기 파악, 성능평가 실시방법 및 절차 등에 대한 필요사항들을 보다 상세하게 제시하여 시설물에 내재되어 있는 위험요인이나 시설물 기능 및 성능저하, 상태 등을 정확하게 조사·평가하고, 적절한 성능확보를 통하여 내구연한 연장 및 안전성 확보, 예산 투입규모 결정 및 예산절감 등 항만시설의 과학적 유지관리 체계화를 유도할 수 있는 기반구축이 시급하다.

이에 본 연구에서는 적정 유지관리전략 수립을 가능하게 하는 상태평가기반 항만시설 성능모델을 개발하여 시설물의 노후화에 선제적으로 대응가능한 방법론을 제시하고자 하였다.

2. 항만 성능관련 유사연구 현황

모든 구조물은 구축이후부터 하중의 증가, 환경적 영향 등에 의해 성능의 저하가 발생하게 된다. 이러한 성능은 구조 측면에서 ‘상태등급’, ‘내하력’, ‘구조신뢰성’ 등을 의미하지만 광의의 의미에서는 구조적 안전성뿐만 아니라, 운영적 측면과 사용성 등을 포함하게 된다. 그러나 현재까지

구조물의 노후화와 관련된 상태변화 및 유지관리비용 측면의 연구가 대부분이고, 운영적 측면과 사용성을 고려한 성능의 정의 및 범위, 내용 등의 연구가 부족한 실정이다.

항만시설에 대한 유지관리비용 추정 및 성능관련모델에 관한 연구는 항만시설의 LCC 연구와 항만구조물 상태등급 열화모델 개발 연구 등이 있으며, 먼저 국내 항만시설의 LCC에 관한 연구는 다음과 같다. Ahn et al. (2007)은 항만구조물 중 방파제의 열화성능을 평가한 후 퍼지·신뢰성 해석에 따른 생애주기비용으로 가치를 분석할 수 있는 VE/LCC 분석모델을 개발하고, 실제 대상 구조물에 적용한 결과 기존의 확정론적 방법보다 효율성이 있다고 보고하고 있다. 그러나 이 논문에서는 구체적인 손실비용의 발생근거가 제시되지 않아 결과값의 타당성 확보가 어렵다는 판단이다.

또한 인벽 구조물 설계에서는 대안별 열화성능 차원의 설계수행을 유도하기 위해 퍼지·신뢰성 이론에 기초한 확률론적 VE/LCC 분석모델을 제안했으며, 제안된 분석모델의 신뢰성과 활용성을 향상시키기 위한 측면에서 실제 대상 구조물에 적용하고 있다. 이 경우 주기성을 파악하려는 노력이 있었지만 지역 환경조건 등에 대한 고려 없이 모든 인벽구조물에 동일하게 적용하고 있는 문제점을 가지고 있다.

Yoon and Ahn (2007)은 VE 대상선정 방법에 의하여 기능분석 프로세스와 재설계 VE 수행절차를 효율적이고 실용적으로 개선하고 실제 최적화시킨 VE 기법을 항만시설공사에 적용시킨 결과 약 46억원의 공사비를 절감하는 효과를 거두었다고 기술하고 있다. 그러나 LCC분석에 대한 구체적인 방안제시가 없어 결과에 대한 신뢰성을 알 수가 없다.

또한, 해양수산부에서는 항만시설에 대한 LCC 분석기술 확보를 위한 연구의 일환으로 항만시설의 관리현황과 구조형식, 그리고 주요 관리상태 및 각 항만시설의 전반적인 현황을 분석하고 진단하는 연구를 수행하였다. 2012년까지 3년간 항만시설 분류체계연구 및 LCC 비용모델 개발연구와 이를 통한 설계단계 LCC 분석 프로그램 개발 및 고도화 연구가 진행되었다. 항만시설에 대한 LCC 분석 연구가 거의 없었던 상황에서 분석에 필요한 기준 설정과 자산관리추진을 위한 위계설정, 주요 항만시설에 대한 유지관리이력 및 진단자료를 조사 분석하여 단위 비용항목 설정연구가 진행되었다. 특히, 국내 국가관리대상 항만시설 이력관리의 통합성과 일관성 확보를 위한 항만이력 DB 구축이 이 연구를 통해 상당부분 구축되었다.

Kim et al. (2012)은 ‘열화요인을 고려한 항만구조물 잔고식의 상태등급 열화모델 개발’에서 생애주기 관리시스템 관점에 기초하여 항만시설물의 상태성능을 예측할 수 있는 항만시설물 열화모델에 대한 연구를 수행하였다. 대상항의 정밀안전진단 상태등급DB를 이용하여 부재별 단변수 회귀분석을 수행하고, 열화인자를 이용하여 다변수 회귀분석을 수행하여 전체 열화모델을 산출하였다. 충분한 DB를 이용하

여 열화모델 산출이 가능했다면 더 정확한 열화모델 수립이 가능했을 것으로 보인다.

3. 열화모델과 유지관리전략수립을 위한 상태기반 성능 모델

공용연수에 따른 구조요소의 성능저하를 표현할 수 있는 모델을 ‘열화모델’이라 정의할 수 있다. 성능은 일반적으로 설계단계 생애주기비용 분석을 위한 열화모델 개발 과정에서는 상태등급을 의미한다. 지금까지의 의사결정은 합리적인 절차 없이 개략적인 유지관리 주기나 비용 추정 등을 통해 해왔었기 때문에 기존에 개발된 생애주기 모델에서는 열화모델이 고려되지 않았었다. 비용 분석을 위한 시스템 개발 시 열화모델의 고려는 합리적인 방법을 통한 유지보수 비용과 주기 산정, 즉 상태등급과 같은 성능지표가 사용자가 목표로 하는 상태/성능 관리 수준까지 저하되었을 때 유지보수를 수행하는 것을 의미하며, 그때까지의 시간이 유지보수 주기이고 유지보수시기의 확률적 또는 확정적 성능회복 비용 추정이 유지보수 비용이다. 비용과 관련된 인자와 성능 인자는 의사결정에 주요 인자이기 때문에 항만에 투입되는 유지관리 비용과 자산가치 변화는 성능과 연계된 의사결정이 이루어져야 한다. 보다 합리적이고 실질적인 항만 관리 의사결정 지원을 위해서는 상태기반 성능모델을 정의하고 상태등급변화의 패턴 등을 고려한 열화모델 분석을 통하여 최적의 관리 대안을 찾을 수 있어야 할 것이다.

3.1 열화모델 연구

열화모델 개발의 주요목적은 전 생애(Whole Life)동안 시설물 안전 유지와 장수명화를 위한 방안 유도를 위한 것이다. 즉 상태등급과 같은 성능지표가 사용자가 목표로 하는 한계상태/성능(Marginal Condition/Performance) 관리 수준에 도달하기 전에 유지보수 또는 보강을 통하여 최적의 비용으로 최대의 성능개선 효과를 확보하기 위한 것이다.

항만시설에서의 열화모델은 항만 시설물의 노후화를 평가하는 기준으로 상태등급의 변화를 시간이력에 따라 통계적 기법을 적용하여 도식화 한 것이다. 프로젝트 수준별 시간 이력에 따른 도식화는 전체적인 경향성을 파악할 수 있어 효과적이거나 세부적이고 구체적인 구조물의 문제점을 판단할 수 없는 단점을 가지고 있다(Fig. 1).

이러한 단점을 해결하기 위해서 세부 부재별 상태등급의 변화특성을 파악하여 구조물의 안전에 치명적인 요소를 미리 발견하고 선제적으로 부위별, 부재별 보수보강이 이루어질 수 있도록 해야 한다. 주변 해역의 환경적 특성을 고려한 세부적인 이력정보 확보와 취급화중에 대한 분석 등 구조물에 미치는 다양한 특성 파악을 통하여 부위, 부재별 열화모델 개발과 보수보강 공법 선정 등 의미 있는 유지보수전략 개발이 가능해진다.

Fig. 1. The Trend of Condition Rating Index on the Project Level

3.2 유지관리전략수립을 위한 상태기반 성능 모델

유지관리전략이란 시설물의 성능과 수명을 향상시키기 위해 취해지는 실제적이고 구체적인 방안이다. 즉, 언제, 어떤 공법으로, 얼마의 비용을 들여 유지관리활동을 할 경우, 최적의 효과를 가져 올 수 있는지의 의사결정을 내리는 것이다.

기존의 열화모델 개발 프로세스는 항만 시설물의 정밀점검 및 정밀안전 진단보고서로부터 상태등급 데이터를 수집하고, 마르코브 체인(Markov Chain) 등의 이론을 이용하여 공용연수에 따라 변화하는 부재별 열화곡선을 개발하는 순으로 구성되었다.

유지관리전략 수립을 위한 성능모델은 공용 중 시설물의 성능(상태) 진단 또는 점검시기, 유지보수 실시여부 및 언제 어떤 공법이 생애주기비용 관점에서 최적일 것인가에 대해 판단가능하게 하는 분석모델이다. 즉, 설계단계에서 추정을 위해 사용되는 유지보수비용은 일상적인 상태 회복 수준의 보수(repair)를 의미하는 것에 비해 유지관리 전략수립을 위한 상태기반 성능 모델은 환경적 특성과 구조적 특성, 그리고 취급화중 및 물동량 등을 고려한, 즉, 개별 시설물이 처하고 있는 다양한 환경과 여건을 고려한 유지관리 의사결정방안인 것이다.

본 연구에서는 기존 연구에서 개발된 다변수 회귀 분석에 의한 열화곡선 방법론을 활용하였으며, 유지관리전략수립이 가능할 수 있도록 직선보간 열화모델을 고려한 상태기반 성능모델을 개발하고자 하였다. Fig. 2는 본 연구의 전체적인 개발흐름을 도식한 것이다.

3.3 초기상태와 공용 중 상태등급변화 패턴의 고려

본 연구에서는 모델 개발을 위해 먼저 남해안 지역에 있는 26개의 안벽 시설물에 대한 DB를 구축하였다. 안벽 구조형식은 잔교식과 중력식(블록과 케이슨)이며, 조사 분석된 26개의 안벽시설물은 상태데이터 분석결과를 참고하여 공용수명 10~15년 경계를 기준으로 시공시점 상태수준과 유지관리 상태수준으로 다시 구분하여 분석하였다(Table 1).

또한, 구조물 완공 후 초기 점검기간 동안 취득한 상태열화

Fig. 2. Process for Condition-based Performance Model Development in Establishing Maintenance Strategy

Table 1. Analysis of Quay wall Facilities in South Coast Area

Sea area	Structural type	# of quay	Construction condition/Maintenance	# of model development application facility
Southern sea	open type quay wall	11	Construction Condition Level	8
			Maintenance Level	3
	gravity type quay wall (block)	10	Construction Condition Level	6
			Maintenance Level	4
	gravity type quay wall (caisson)	5	Construction Condition Level	4
			Maintenance Level	1
Total				26

율과 지속적인 유지보수가 이루어진 경우 또는 이미 보수보강이 이루어진 이후의 상태 열화율의 차이를 고려하여 열화 모델 패턴을 구분하도록 하였다. 다음 Fig. 3은 남해 중력식(케이슨) 안벽의 시공 상태와 유지관리 상태변화율을 비교 제시한 것이다. 시공 상태기준(construction condition based)의 경우 통상 하자담보 책임기간이 만료되는 10년째 되는 해에 정밀안전점검을 수행하며, 이때 주요 보수보강이 세부적으로 이루어지기 때문에 시공이 제대로 되었는지의 여부를 명확히 알 수 있다.

Fig. 3. The Comparison of Condition Index Gap Between 'Construction Condition Based' and 'Maintenance Condition Based' on Gravity Type (caisson) Quay wall of the South Coast

Fig. 4는 시공 상태수준과 유지관리 수준에 따른 시설물 분류기준이고, Fig. 5는 시공상태 수준별(construction condition based)와 유지관리 수준별(maintenance condition based) 열화율을 제시한 것이다. 하자담보기간(10년)이 지난 이후(유지관리 상태기준) 관리책임기관은 주기적인 보수보강을 통하여 시설물의 상태개선과 성능유지를 위해 노력하기 때문에 초기 완공 후 상태변화율과는 다른 패턴을 나타내게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 상태기반성능 모델에서 상태변화율을 적용하였다.

Fig. 4. The Facility Classification Standard Depend on the Level of Construction Condition

Fig. 5. The Deteriorating Curve Application of Both 'Construction Condition Based' and 'Maintenance Condition Based' to Port Facilities

또한, 부재별 손상특성별 상태등급 변화패턴을 파악하기 위해 1, 2종 안벽 시설물에 대해 상태등급 데이터와 손상현황 데이터를 지역별, 시설별, 부재별, 조사연도별, 구조형식별,

조사구간별로 분석하였으며 이를 반영하여 유지관리전략기반 DB를 구축하였다(Table 2).

Table 2. The Example of DB Buildup for Developing Performance Model Based on Condition

Sea area	Facility name	Completion year	Survey year	Type	Survey unit	Survey section	Element	Survey item	Public years	Condition index
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	Cap 2EA	30	3.9
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	Cap 2EA	29	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	Cap 2EA	27	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	Cap 2EA	25	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	wear/erosion	None	30	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	wear/erosion	None	29	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	wear/erosion	None	27	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	wear/erosion	None	25	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Separation(Perfect/ Partial spalling)	None	30	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Separation(Perfect/ Partial spalling)	None	29	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Separation(Perfect/ Partial spalling)	None	27	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Separation(Perfect/ Partial spalling)	None	25	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Failure	Cap 3EA Block 2EA	30	3.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Failure	Cap 3EA Block 2EA	29	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Failure	Cap 3EA Block 2EA	27	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-1	Capping& Body	Failure	Cap 3EA Block 2EA	25	5
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-2	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	None	29	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-2	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	None	27	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-2	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	None	25	3.9
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-4	Capping& Body	Failure	None	29	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2006	Gravity (Block)	1-4	Capping& Body	Failure	None	27	4.4
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2004	Gravity (Block)	1-4	Capping& Body	Failure	None	25	3.9
Southern sea	○○port 5th pier	1979	2009	Gravity (Block)	1-5	Capping& Body	Crack (Normal Crack)	None	29	4.4

3.4 상태등급 변화 유발 인자 조사분석

국내 항만시설물 구조형식은 중력식(블록), 중력식(케이슨), 잔교식으로 각각의 구조형식은 각기 다른 부재로 구성되어 있으며, 부재마다 상이한 열화율을 나타낸다. 또한, 구조물이 위치한 환경(동해, 서해, 남해)과 취급화중(컨테이너, 비컨테이너, 기타)에 따라 상태등급의 열화 정도도 다르게 나타난다. 따라서, 항만시설물의 유지관리 전략수립을 가능하게 하는 성능모델개발을 위해 전문가 설문과 정밀진단보고서상의 주요 열화인자들을 분석하였다.

3.4.1 전문가 설문을 통한 상태등급 변화 주요 열화인자 분석

항만시설물은 염화나트륨을 포함하는 바닷물에 의한 부식과 파랑에 의한 피로하중의 축적, 그리고 태풍에 직접적인 노출 등 다양한 환경적 영향을 받고 있다. 본 연구에서는 항만구조물의 상태변화(열화)를 고려한 성능모델 개발을 위해 항만 관련 업계에 종사하는 실무 전문가를 대상으로 열화 주요 인자에 대한 설문조사를 실시하였다. 설문 조사방법은 형식별(잔교식, 중력식 블록식, 중력식 케이슨), 부재별로 나누어 열화요인이 크다고 판단되는 영향인자에 대해 순위를 매겼다. 26명의 전문가들에게 항만시설물 열화 요인에 대해 설문한 결과(Fig. 6) 기초침하가 23%로 가장 큰 원인하였고, 다음으로 지반지력 17%, 선박충돌 16%, 파랑 13% 순이었다.

Fig. 6. The Expert Analysis Result Regarding to Deteriorating Factors

3.4.2 정밀안전진단보고서 분석을 통한 시설물 상태변화 주요인자의 분석

각 지역별/형식별 항만시설 43개의 정밀안전진단보고서를 토대로 열화인자를 분석하였다. 본 연구의 대상인 남해안 지역 중력식 안벽에 대한 자료 확보가 용이하지 않아 조사, 분석이 가능한 3개 해역의 안벽 시설물을 분석 대상으로 하였다. 동해의 경우, 잔교식 15개, 중력식 8개, 서해안은 잔교식 3개, 중력식 14개, 남해의 경우 잔교식 6개, 중력식

12개를 분석하였다(Table 3).

외관조사 결과 및 손상원인 부분을 43개의 정밀안전진단 보고서에서 분석·정리하였고, 부재별 손상원인은 Fig. 7에 제시하였다.

Fig. 7. The Analysis Result of Precise Safety Inspection Report Regarding to Deteriorating Factors

정밀안전진단보고서 분석결과 선박충돌 23%, 낙하물 충격 21%, 건조수축 19% 준공 시 건조수축 16%, 염해 12%, 기타 9%로 조사되었다. 이 중에서 열화모델 개발에는 주요 영향인자로 선박충돌, 낙하물 충격(물동량 고려), 염해 등을 고려하였다.

3.4.3 상태변화 유발 인자들의 지역적 특성 파악

3면이 바다인 우리나라의 경우 동해, 서해, 남해의 환경적 특성이 서로 다르다. 동해의 경우, 겨울철 파고가 높고 파랑의 영향이 크다. 시설이 파고에 대응하는 방향으로 축조되기 때문에, 이 방향의 파랑 파손으로 인한 시설파해가 많은 편이며 풍량이 타 지역에 비해 커서 기초 구조물의 열화가 빠르게 진행될 가능성이 있다. 서해의 경우, 큰 조수간만의 차로 인해 기초사석 및 구조물의 파손 우려가 있으며, 접안선박의 수직이동으로 방충재 등 부대시설 파손이 다수 발생한다. 특히 인천의 경우 9 m에 달하는 조수간만에 의한 조위차로 인해 콘크리트의 열화가 상대적으로 빠르게 진행된다.

Southern sea

Fig. 8. Southern Sea Area Major Influence Factors Distribution Throughout the Precise Safety Inspection Report

Table 3. The Precise Safety Inspection Report Used to Analyze Deteriorating Factors

Sea area	Type	Type	Inspection report Facility Name	Sea area	Year	Type	Inspection report Facility Name
Eastern sea	2002	Open type	Port of Donghae, Northern wharf stage 1	Western sea	2007	Open type	Port of Mokpo, Wood wharf
	2002		Port of Donghae, Northern wharf stage 2		2007		Port of Mokpo, Coal wharf
	2002		Port of Donghae, Southern wharf stage 1		2007	Gravity type	Port of Wando Normal wharf
	2002		Port of Donghae, wharf stage 2		2007		Port of Mokpo, Daebul wharf
	2002		Port of Donghae, Western wharf		2007		Port of Mokpo, Halla wharf(1)
	2002		Port of Donghae, Central wharf		2007		Port of Mokpo, the new grain wharf
	2010		Port of Donghae, Southern wharf stage 1-1		2007		Port of Mokpo, Ssangyong wharf
	2010		Port of Donghae, Southern wharf stage 1-2		2010		Port of Daesan, wharf 1
	2010		Port of Donghae, Southern wharf stage 2		2010		Port of Wando, passenger wharf
	2010		Port of Donghae, Northern wharf stage 1		2005		Port of Wando, car ferry wharf
	2010		Port of Donghae, Northern wharf stage 2		2005		Port of Wando, lighter's wharf
	2010		Port of Donghae, Western wharf	Southern sea	2007	Open type	Port of Gwangyang, RO/RO wharf
	2010		Port of Donghae, Central wharf		2007		Port of Gwangyang, Nakpo wharf(1)
	2010		Port of Donghae, Central wharf		2007		Port of Gwangyang, Nakpo wharf(2)
	2002	Gravity type	Port of Donghae, Coal wharf		2007		Port of Gwangyang, raw material wharf
	2002		Port of Donghae, Gravity type Western wharf		2003	Gravity type	Port of Geomundo, harborage wharf
	2007		Port of Mukho, stage 3		2009		Port of Jeju, wharf 4
	2007		Port of Sokcho, Government vessels wharf		2009		Port of Jeju, wharf 6
	2007		Port of Sokcho, Normal wharf		2009		Port of Jeju, wharf 7
	2009		Port of Mukho, stage 3		2011		Port of Masan, wharf 3
	2010		Port of Sokcho, Port of Dongmyung lighter's wharf		2007		Port of Gwangyang, Petrochemistry wharf

남해의 경우, 태풍발생 시 길목에 위치하여 외부충격에 의한 시설물 파손 우려가 있으며, 부산항은 컨테이너 선박 대형화에 따라 선박충격 및 파랑침투로 인한 염습에 의해 빠른 부식이 진행될 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 본 연구의 주요 대상지인 남해의 경우 안벽 구조물 파손의 주요 요인은 선박 충격(40%), 낙하물 및 충격하중(26%), 염해(7%) 등의 외부적 영향과 구조물 자체의 건조수축으로 인한 파손(27%)으로 분석되었다.

3.5 유지관리의사결정을 위한 상태평가 수준별 비용단가 연구

유지관리의사결정은 손상으로 인한 시설물 상태저하 평

가와 이에 대한 적절한 보수보강 공법선정을 통하여 시설물의 성능저하를 막고 기능향상을 도모하기 위한 방법이며 최종적으로는 적절한 공법에 대한 비용투자판단이 이루어져야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 전술한 자료를 기반으로 파손 및 손상에 대한 유지관리의사결정을 위한 손상 상태수준별 비용단가 연구를 수행하였다. 항만진단 및 보수보강 전문가들의 협조를 통해 Tables 4 및 5와 같은 기준을 설정하여 항만시설에서 발생할 수 있는 손상 특성과 종류를 상태평가 등급수준과 연계하였으며, 성능개선을 위해 필요한 성능개선 단위비용모델을 제시하였다. 즉, 손상 형태를 구분하고, 손상수준을 정의하여 관련 상태평가등급(시트법 상의 상태

평가기준을 적용)을 부여함으로써 손상수준별 보수보강비용의 연계가 가능하도록 설정하였다. Table 4는 손상수준을 정의하고 이에 따른 상태평가등급과 관련 기준을 설정한 사례이다. 표준분류체계에 따라 각 시설물의 구조부위에서 발생할 수 있는 손상형태를 열거하고, 각 손상형태마다 상태

평가기준 C, D, E를 발생비용의 규모정도를 의미하는 대, 중, 소 항목으로 연결하여 세부 유지관리 비용항목을 결정하도록 하였다.

Table 5는 정밀안전진단 보고서를 이용하여 상태등급 유지 또는 개선 시 보수보강 비용모델을 분석한 것이다.

Table 4. The Example of DB Buildup for Developing Performance Model Based on Condition

Location	Type of damage	Level of condition	Condition grade	Facility condition grade standard
Surface concrete	Failure	Small	C	- The breakage is moderate, but the normal condition with the possibility of further damage, such as rebar corrosion (t=0.2)
		Medium	D	- There is a risk that the safety of the product may be deteriorated due to partial damage to the main part of the facility, or a bad condition (t=0.5)
		Large	E	- Dangerous conditions that can lead to major damage to the main part of the facility, which may lead to facility failure, lack of safety or destruction (t=1.0)
	Crack	Small	C	- overstress cracks and general cracks are somewhat severe (under crack width 7mm/average 5mm)
		Medium	D	- Generally, cracks occur severely and maintenance is required (crack width 8-15mm/ average 10mm)
		Large	E	- A state in which priority maintenance is required by causing large-scale penetration cracks to affect the functionality of the structure (over crack width 16mm/average 20mm)
	wear	Medium	D	- The rebar cover is removed, and the rebar is partially exposed, causing corrosion (t=0.1)
		Large	E	- In the state where the reinforcement of the erosion area is completely exposed and the structural function is lost (t=0.2)

Table 5. The Example of Condition Maintenance / Improvement of Repair/Rehabilitation Cost

Facility division	Location		Type of damage	Level of condition		Repair Cost (₩)			Unit	Ref. value	Initial repair cycle (year)	Repair cycle (year)	Repair rate (%)
						Average	Standard dev.	Cov					Southern sea
Quay	Upper	Surface	Failure	Normal	C	311,631	0	0.000	m²	Upper area	10	9	0.017
(Gravity) Caisson	Structure	Concrete		Concern	D	422,208	0	0.000	m²		15	9	0.057
				Serious	E	603,596	0	0.000	m²		20	9	0.856
				Common	-	445,812	0	0.000	m²		15	9	0.294
			Crack	Normal	C	551,398	92,466	0.168	m²	Upper area	8	8	0.078
				Concern	D	744,472	115,320	0.155	m²		11	8	0.106
				Serious	E	937,555	138,517	0.148	m²		15	8	0.105
				Common	-	744,475	115,434	0.155	m²		11	8	0.048
			Wear	Normal	C	100,582	0	0.000	m²	Upper area	12	8	0.015
				Concern	D	100,582	0	0.000	m²		16	6	0.032
				Serious	E	402,332	0	0.000	m²		20	6	0.020
				Common	-	201,165	0	0.000	m²		16	7	0.177

3.6 유지관리전략수립을 위한 상태기반 성능모델 구현

유지관리전략수립을 위한 상태기반 성능모델의 보다 효율적인 프로세스 표현을 위해 상태변화추이와 보수보강을 통한 성능개선을 모사하는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 특징은 해역별, 구조형식별, 손상 특성을 고려한 모델로서 주기적인 상태등급 개선활동을 고려한 성능개선 관점을 평가하도록 개발하였으며 이때 손상의 수준별 개선을 위해 투자되어야 할 비용 분석이 가능하도록 구현하였다.

Fig. 9는 등급개선 수준을 결정할 수 있는 창으로 보수시기 및 개선요구등급, 보수보강 요구수준에 따른 개선수준 등을 입력할 수 있으며, 제시된 상태등급 그래프에 사용자가 상태등급 개선 시점을 입력하게 되면 추적 조사를 통하여 제시되는 비용모델에 따라 상태등급 변동 시에 발생하는 보수보강 비용을 분석할 수 있다.

Fig. 9. Development of Performance Model to Establish Maintenance Strategy

노후화에 따른 항만시설물의 상태등급 개선 수준 결정단계에서 우선 고려대상은 보수보강에 의해 발생하는 비용분석이다. Fig. 10은 항만시설의 지역 환경적 특성 및 시공수준에 따른 유사 손상이 계속해서 발생하는 특성을 고려하여 과거 진행된 보수보강 사례를 통하여 등급 개선 시 발생하는 비용을 파악할 수 있도록 제시한 예이다.

Fig. 10. The Sample Case of Cost Investment Profile to Improve Condition-based Performance

4. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 기존의 공용중인 항만의 상태기반 성능모델개발을 통하여 유지관리전략 수립을 위한 기반을 마련하고, 이를 통해 투자비용과 투자시기의 결정뿐만 아니라 성능개선을 유도할 수 있는 기반연구를 수행하고자 하였다.

항만시설에 특화된 정보들이 반영된 상태기반 성능모델의 적용을 통하여 시설관리주체가 공통적으로 가지고 있는 문제점, 즉 한정된 자원(인력, 장비), 예산운영 위협 등을

해결하기 위한 합리적인 의사결정체계가 마련되어야 하며, 시설 구성요소나 시설 전체의 손상 및 그 진행 상황을 고려하여 시설의 성능저하수준 결정을 위한 종합적인 평가가 이루어져야 한다. 미래 시설 사용 계획, 예산 및 유지보수 작업계약 상황 등이 고려된 유지보수방법 및 시행시기 결정, 기존의 공용중인 항만의 기본현황 정보로부터 도출되는 위험뿐만 아니라 서비스 수준을 결정하기 위한 성능척도의 판단에 위험도를 고려하는 방법을 모색해야 할 것이다.

본 연구에서 개발된 상태기반 성능모델은 추후 항만 자산 관리에서 항만 서비스수준 결정 시 활용될 수 있을 것이며, 향후 최적의 유지관리 의사결정을 위한 자산관리 체계구축 및 시스템 개발에도 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(생애주기별 항만시설 통합 운영관리를 위한 BIM 기반기술 개발).

This research was a part of the project titled ‘Development of BIM-based technologies for integrated operation and management of port facilities by life cycle’, funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.

References

- Ahn, J.P., Park, J.W., and Yu, D.C (2007) VE/LCC analysis models of breakwaters by fuzzy reliability Approach. *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 8, No. 3, pp. 159-167.
- Kim, S.W, Cha, K.H, Kim, J.H, Park, M.Y., and Kong, J.S. (2012). Development of condition state model for open type wharf considering deterioration factors. *Proceedings of 2012 KSCE Convention*, pp. 2138-2141.
- Yoon, M.H., and Ahn, K.S. (2007). The application plan for value engineering redesign by using the simulation for the port facilities construction project. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 19, No. 6, pp. 533-546.

Received	October 17, 2018
Revised	October 18, 2018
Accepted	November 12, 2018