

퍼지 신뢰성 이론에 의한 방파제의 VE/LCC 분석모델

VE/LCC Analysis Models of Breakwaters by Fuzzy Reliability Approach

안종필* 박주원** 유덕찬***

Ahn, Jong-Pil Park, Ju-Won Yu, Deog-Chan

요 약

항만구조물의 계획 및 설계과정에서 VE/LCC 분석을 통한 최적의 경제적인 의사결정이 더욱더 요구되고 있는 추세이나, 최근의 VE/LCC 설계자료를 분석해 보면 항만구조물의 열화성능에 대한 확률적 불확실성을 고려한 포괄적인 분석은 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 본 연구에서는 퍼지신뢰성 이론을 도입하여 항만구조물 중 방파제의 열화성능을 평가한 후 퍼지신뢰성 해석에 따른 생애주기비용으로 가치를 분석할 수 있는 VE/LCC 분석 모델을 개발하였고, 분석모델의 신뢰성과 활용성을 향상시키기 위한 측면에서 실제 대상 구조물에 적용한 결과, 기존의 확정론적 방법에서 고려되지 않는 데이터의 불확실량과 주관적 가치분석을 본 연구의 퍼지론적 방법에서 보다 합리적으로 반영할 수 있었고, 가치지향적 설계대안의 선정과 생애주기비용의 평가 및 유지관리조치를 위한 예산의 분배 등에 유리한 방법으로 평가되었다.

키워드 : 퍼지신뢰성 이론, 방파제, VE/LCC분석, 열화성능평가, 확정론적 방법, 퍼지론적 방법

1. 서론

항만 물동량의 증가에 따라 항만건설이 급격히 증가하고 있으며 점차 대형화, 고급화 및 첨단화되는 추세이다. 항만시설물 중 항내의 정온도를 유지하여 선박이 안정되게 정박하게 하고, 항만시설물을 파랑과 표사로부터 보호하기 위한 시설물인 방파제의 성공적인 축조를 위해서는 구조물의 설계에 앞서 충분한 내구성, 안전성, 경제성 및 환경성 등의 확보와 이를 위한 적절한 유지관리에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다.

건설교통부에서는 건설기술관리법 시행령에 의거하여 총공사비가 100억원 이상인 항만건설공사의 기본설계 및 실시설계를 함에 있어 설계 대상시설물의 주요기능별로 설계내용에 대한 대안별 경제성 및 현장 적용의 타당성을 검토하도록 규정하고 있으며, 2005년도부터 국내에서 시행중인 BTL(Build Transfer Lease)방식 민간투자 시설사업은 유지관리운영권 설정기간을

20년으로 설정함으로써 설계과정에서의 VE/LCC 분석과 같은 최적의 경제적인 설계가 더욱더 요구되고 있는 추세이다.

최근 정부에서 발주한 부산신항, 제주외항, 광양항, 울산항, 평택항 및 인천항 등의 VE/LCC 설계자료를 분석해 보면 대안 선정에 있어 공법, 건설비용, 유지관리비용 및 시공면적 등을 중심으로 단순히 전문가의 경험과 직감에 의존하여 이루어져 왔으며, 항만구조물의 열화성능에 대한 확률적 불확실성을 고려한 포괄적인 분석은 충분히 이루어지지 않은 실정이다(안종필 외 2004).

이와 같은 불확실성을 고려한 VE/LCC 분석방법으로 신뢰성 해석 방법(정평기 서종원 2005)이 유용하게 사용되고 있는데, 신뢰성해석 방법으로도 항만구조물에 대한 모든 불확실성을 반영하기에는 많은 어려움이 따른다. 그 이유는 신뢰성해석 방법으로 다룰 수 있는 불확실성의 범위가 매우 제한적이고, 항만구조물에 대한 정보들이 반드시 객관적이고 정량적인 통계자료로 주어지지 않는다는 데 있다.

특히 항만구조물의 VE/LCC 분석에서는 객관적이고 정량적인 정보보다는 주관적이고 정성적으로 다루어야 할 정보가 많은 뿐더러, 전문가의 경험에 의해 주관적으로 표현되기가 쉽기 때문에 최근 교량구조물 등에 적용되고 있는 퍼지신뢰성해석

* 일반회원, 조선대학교 토목공학과 교수, 공학박사
jpan@mail.chosun.ac.kr

** 일반회원, (주)서림 대표이사, 공학박사 ceo@csmeng.co.kr

*** 일반회원, 보성건설(주) 상무이사, 공학박사
dcyoo08@hanmail.net

(Fuzzy Reliability Analysis)방법의 도입이 필요하다(이증빈 2003)

따라서 본 연구에서는 항만구조물 중 방파제의 건설공사에서 합리적인 투자 의사결정과 설계대안 선택을 위한 기법으로서 물리적 열화성능을 고려한 객관적 신뢰성해석에 평가자의 주관이나 과거경험에 기초한 주관적 신뢰성해석을 동시에 반영한 퍼지신뢰성기반 생애주기비용분석에 의한 설계 VE절차의 방법론을 제시하였다. 또한 제안된 방법론의 실무활용성과 분석결과의 신뢰도를 향상시키기 위한 측면에서 퍼지 신뢰성기반 VE/LCC 분석모델을 실제 대상사업에 적용하여 기존의 확정론적 방법과의 상관관계를 규명하고 타당성을 검토하였다.

2. 열화성능평가 및 퍼지신뢰성 해석이론

2.1 퍼지확률 및 파괴가능성 이론

항만구조물은 열화 및 손상요인이 매우 다양하고 많기 때문에 실제 전문가의 경험적 판단 아래 정성적으로 신뢰성평가가 이루어지는 경우가 대부분이다. 본 연구에서는 퍼지신뢰성해석 모델개발에 관한 기초단계로서 그림 1과 같이 퍼지확률 및 파괴가능성이론을 도입하여 퍼지신뢰성 해석을 수행하였다.

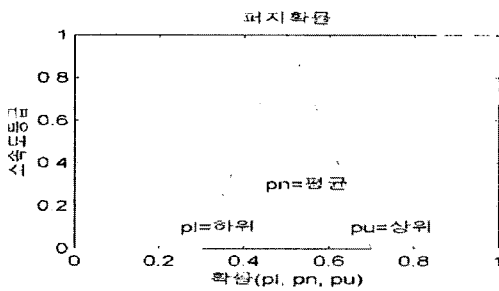


그림 1a. 퍼지확률(fuzzy probability)

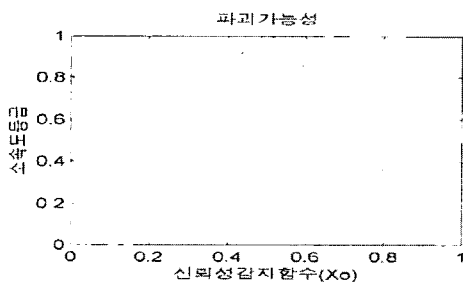


그림 1b. 파괴가능성(failure possibility)

파괴가능성은 항만구조물의 신뢰성평가를 통일적으로 표현하는 척도로 정의할 수 있고 자연언어변수를 사용한 [0,1]상의 퍼

지집합으로 표현된다. 이 때 파괴가능성의 소속도함수 (membership function)는 퍼지집합의 등급을 1로 하는 매개변수, 즉 최대 소속도함수의 등급이 주어진 매개변수를 전문가의 공학적 판단에 의한 주관적판단의 불확실 범위로 표현되는 퍼지성계수 m 으로 나타내면 식(1)과 같이 정의된다.

$$\mu(X) = \frac{1}{1 + 20 \times |X - X_0|^m} \quad (1)$$

2.2 열화성능을 고려한 퍼지신뢰성 해석이론

현행 건설교통부에서 제정한 항만구조물 유지관리지침에 의하면 시설물별 상태등급을 산정할 때 공용수명기간 중에 발생하는 손상과 열화조건에 따른 구조적 그리고 물리적 열화성능 및 불확실량은 고려하지 않고 진단평가자의 주관적 판단에 의존할 뿐 실질적인 구조적 열화성능평가는 이루어지지 못하고 있다. 이러한 평가방법은 정성적인 평가에 머물고 있어 항만구조물의 보수보강 우선순위 결정을 위한 설계VE의 객관적 의사결정을 저해한다. 따라서 본 연구에서는 항만구조물의 열화부식의 역학적 특성에 의한 객관적 신뢰성지수와 파괴가능성을 도입한 주관적 신뢰성지수를 동시에 고려한 열화성능함수로 나타내었으며, 퍼지신뢰성 해석에 의한 열화성능함수는 식(2)와 같이 산정할 수 있다(유덕찬 2007).

$$\psi_{\beta_x}(t) = \beta_{X_0} / \beta_X(t) = 1 - kt^a \quad (2a)$$

$$k = (1 - \beta_{X_0}) / t_0^a \quad (2b)$$

따라서 식(2)와 같은 평가자의 언어변수에 의한 주관적 열화성능함수를 이용하면, 객관적 신뢰성해석 방법에 평가전문가의 언어적이고 정성적 주관이 동시에 고려된 주관적 퍼지신뢰성 해석 이론을 도출할 수 있으며, 이를 단계별로 요약하면 표 1과 같이 된다.

또한 표 1의 열화성능을 고려한 퍼지신뢰성 해석 이론에 따른 신뢰성 지수별 및 열화성능 함수별 항만구조물의 상태등급 평가 기준을 나타내면 표 2와 같이 된다. 이 때 퍼지 신뢰성지수(0)와 열화성능함수(0)는 주관적 신뢰성지수(0)에 의해 계산된다(안종필 외 2006).

3. 열화성능을 고려한 VE/LCC 분석모델

3.1 열화성능을 고려한 VE 분석모델

항만시설물과 같은 공공사업의 인프라시설물은 시간경과에 따른 열화환경 때문에 구조성능이 저하하여 이에 따른 보수·보

표 1. 열화성능을 고려한 퍼지신뢰성 해석 이론

방법	해석 단계	단계별 선정식
객관적 신뢰성 해석	단계 1	한계상태 함수 설정 $g(\cdot) = R(t) - S(t)$
	단계 2	최적신뢰성지수 선정 (β_o) $\beta_o = -\alpha_s \Omega_s + \sqrt{(\alpha_s \Omega_s)^2 + 2 \ln \left(\frac{g(c_d) \sqrt{1 + \Omega_s^2}}{\sqrt{2\pi k_c \alpha_s \Omega_s}} \right)}$
	단계 3	열화에 의한 감소 객관적 신뢰성지수 선정 ($\Delta\beta$) $\Delta\beta = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \frac{R_o}{R(t)}$
	단계 4	점검시점의 객관적 신뢰성지수 선정 ($\beta(t_o)$) $\beta(t_o) = \beta_o - \Delta\beta$
주관적 신뢰성 해석	단계 5	객관적 신뢰성지수를 주관적 신뢰성지수로 변환 (X_o) $X_o = \frac{1}{1 + (k \times \log(1/P_f))^c}$
	단계 6	퍼지적 열화성능평가 ($\psi_{\beta_x}(t)$) $\psi_{\beta_x}(t) = \beta_x / \beta_{x(t)} = 1 - kt^a$
	단계 7	열화에 의한 주관적 신뢰성지수 선정 ($\Delta\beta_F$) $\Delta\beta_F = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \left(\frac{1}{\psi_{\beta_x}(t)} \right)$
	단계 8	점검시점의 주관적 신뢰성지수 선정 ($\beta_F(t_o)$) $\beta_F(t_o) = \beta_o - \Delta\beta_F$

■ β_o =AFOSM, FOSM 및 총기대비용 최소화 신뢰성해석방법 중에서 Kanda의 방법을 사용함(Kanda, J, 2001)

표 2. 퍼지신뢰성에 의한 상태등급 평가기준

상태 등급	판정 구분	퍼지신뢰성지수 ($\beta_F(t_o)$)	열화성능함수 ($\psi_{\beta_x}(t)$)	유지관리대책
A	매우 우수	$3.00 < \beta_F(t_o)$	$1.0 < \psi_{\beta_x}(t)$	보수 불필요
B	우수	$3.0 < \beta_F(t_o) \leq 2.5$	$1.0 < \psi_{\beta_x}(t) \leq 0.80$	일상적 유지관리
C	양호	$2.5 < \beta_F(t_o) \leq 2.0$	$0.80 < \psi_{\beta_x}(t) \leq 0.65$	예방보수 또는 적정보수
D	적합	$2.0 < \beta_F(t_o) \leq 1.5$	$0.65 < \psi_{\beta_x}(t) \leq 0.50$	보강 필요
E	부적합	$1.5 > \beta_F(t_o)$	$0.50 > \psi_{\beta_x}(t)$	교체

강 및 교체가 필수적인데, 기존VE에서는 가치분석을 경제성과 기능성 중심으로만 평가하고 있어 자산가치 평가에 포괄성이 결여되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 대안 선정 시에 열화성능에 따른 생애주기동안의 유지관리조치공법과 조치시기를 고려한 VE분석이 이루어져야 한다. 본 연구에서 개발한 항만구조물의 열화성능을 고려한 VE 분석모델을 요약하면 그림 2와 같다.

3.2 시간의존적 LCC분석 모델

퍼지신뢰성 해석에 의한 열화성능평가와 대안별 상대 LCC지수를 이용한 시간의존적 LCC 분석모델은 식(3)과 같이 된다(유덕찬, 2007).

$$C(t) = C_o - a_c t^2 \quad 0 \leq t < t_i \quad (3a)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - t_i)^2 \quad t_i \leq t < t_o \quad (3b)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t)^2 \quad t_o \leq t < t_f \quad (3c)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t_f)^2 \quad t_f \leq t < t_s \quad (3d)$$

$$C(t) = C_o - a_c (t - \Delta t_s)^2 \quad t_s \leq t < t_d \quad (3e)$$

3.3 시간의존적 자산가치분석 모델

방파제 등과 같은 기반시설물은 이용자에게 편익을 제공하기 위하여 생애주기 동안 지속적인 관리가 수행되어야 한다. 이러한 유지관리는 사회기반시설물을 자산으로 여기는 관리주체의 입장에서 그 가치를 객관적으로 평가하여 합리적으로 수행하는 것이 매우 중요하다.

목적	최저 생애주기비용(LCC)으로 최상의 가치추구	
평가기준	성능과 경제성	
대상 선정	분석 대상 선정	대안 도출
	평가 절차	성능평가 경제성 평가(LCC) 비용최소화 가치평가
최적안 선정	경제적 최적안 평가	
주요방법론 및 평가항목	* LCC : 시설물의 수명전반에 걸쳐 발생하는 제비용의 합, 즉 총비용을 일정한 시점으로 등기환산한 가치로써 경제성을 평가하는 방법 * 초기 공사 비용, 유지 관리비용 → 생애주기 비용(Life Cycle Cost)	

그림 2a. 기존 VE 분석방법

본 연구에서는 방파제의 열화율, 대안별 설계VE 시의 상대치지수를 이용하여 생애주기 동안의 시간의존적 자산가치 분석 모델을 설정하였으며, 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.(유덕찬 2007).

$$V_e(t) = V_{eo} - a_v t^2 \quad 0 \leq t < t_i \quad (4a)$$

$$V_e(t) = V_{eo} - a_v (t - t_i)^2 \quad t_i \leq t < t_o \quad (4b)$$

$$V_e(t) = V_{eo} - a_v (t - \Delta t)^2 \quad t_o \leq t < t_f \quad (4c)$$

$$V_e(t) = V_{eo} - a_v (t - \Delta t_f)^2 \quad t_f \leq t < t_s \quad (4d)$$

$$V_e(t) = V_{eo} - a_v (t - \Delta t_s)^2 \quad t_s \leq t < t_d \quad (4e)$$

목적	생애주기비용(LCC)과 열화성능을 고려한 최상의 자산가치 추구	
평가기준	성능과 경제성 및 열화성능	
평가절차	대상 선정	분석 대상 선정 대안 도출
	분석 평가	성능평가 + 열화성능 평가 자산가치 평가(LAV) + 열화성능 통합 가치평가
최적안 선정	열화성능/경제 통합 최적안	
주요방법론 및 평가항목	* LAV: 시설물의 생애주기 동안에 걸친 자산가치를 정량화하여 열화환경에 미치는 열화성능의 영향을 평가하고, 열화성능에 맞는 유지관리 공법을 선정하는 자산가치 평가 방법 * 유지관리조치에 따른 보수·보강공법 비용, 구조물의 열화환경 및 성능분석 →생애자산관리(Life Asset Management)	

그림 2b. 열화성능을 고려한 VE 분석방법

3.4 VE/LCC분석 프로그램의 흐름도

방파제의 VE/LCC 분석을 위해 본 연구에서 개발한 MATRAB 용 “일명 CALIFE 프로그램”은 사용자가 입·출력 데이터를 최대한 편리하게 통제할 수 있도록 구성하였으며, 그림 3은 CALIFE 프로그램 및 시스템의 흐름을 나타낸 것으로서, 초기 입력화면에서 VE/LCC 분석 및 결과의 저장을 흐름대로 표현한 것이다.

4. 적용 예 및 고찰

4.1 VE/LCC분석 적용대상

본 연구에서 제안된 퍼지 신뢰성 기반 VE/LCC 분석모델의 타당성을 검토하기 위한 분석대상은 “OOO항 방파제 축조공사”의 방파제로서, 비교대안에 대한 일반사항을 표 3에 정리하였다.

4.2 정성적 평가

(1) 성능평가 항목선정 및 가중치 산정
표 4의 성능평가 항목선정 및 표 5와 그림 4의 성능평가 항목

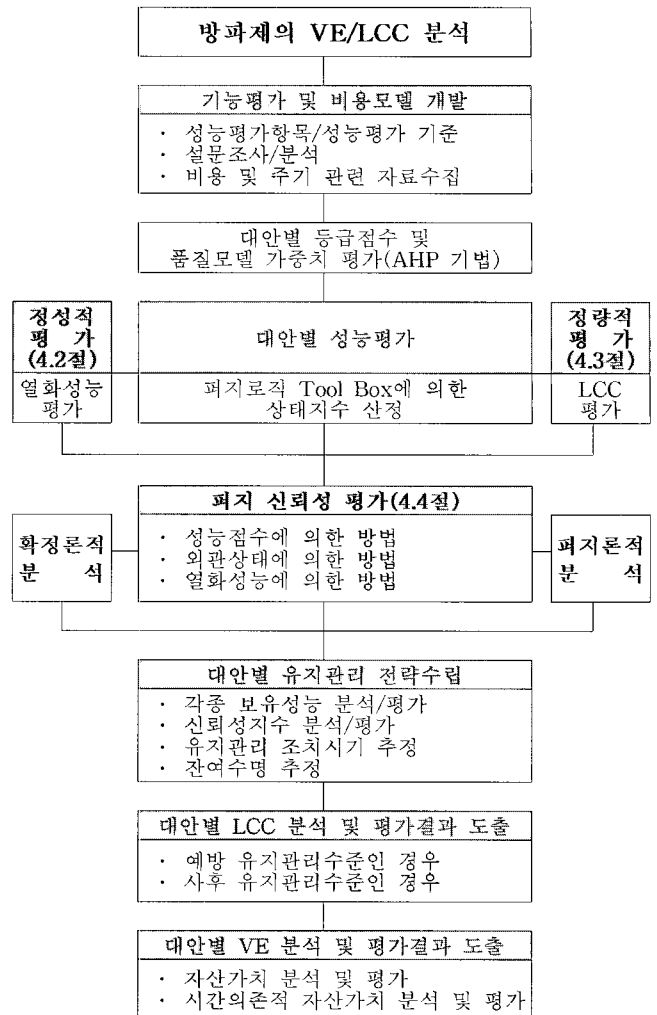


그림 3. 방파제의 VE/LCC 분석 프로그램 흐름도

별 가중치 산정을 위하여 VE팀리더가 대상사업의 현황 설명을 수행하였으며, 이에 항만전문가 7인(설계 분야 3인, 시공분야 2인, 유지관리분야 2인) 및 VE분석자 4인의 총 11인을 대상으로 설문조사가 수행되었다.

수행된 설문조사 분석결과인 성능평가기준항목에 대한 중요도를 바탕으로 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법을 사용하여 가중치를 산정하였다. AHP 분석결과와 일관성 검증은 Satty가 제안한 일관성 비율(consistency ratio: C.R.)로 검증할 수 있으며, Satty는 C.R.의 값이 10%이내인 경우에 상대비교 분석결과 가중치의 일관성에 무리가 없는 것으로 기술하였다. 표 5에서 C.R.값이 0.0023로 분석결과와 일관성을 유지하고 있음을 알 수 있다(Saaty 1980).

(2) 등급부여 및 성능평가

각 성능평가항목에 대한 대안별 등급점수(RD)의 산정은 먼저 VE팀 리더가 팀원을 대상으로 하여 각각의 대안별 현황 및 분석

표 3. 방파제의 대안별 일반사항

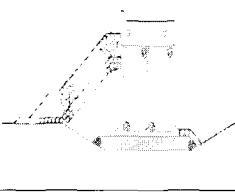
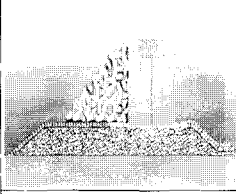
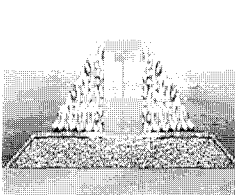
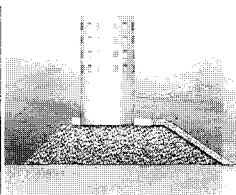
구분	원안 : TTP 피복 케이슨 직립제	대안1 : 외측 TTP 피복 케이슨 혼성제
단면형상		
기술 및 사용성 측면	<ul style="list-style-type: none"> 내파안정성 우수 유지관리 용이 공중이 복잡하고 시공성이 다소 불량 	<ul style="list-style-type: none"> 내측직립으로 해수소통구 통수능력이 증대 파고 전단을 우수
경제 및 환경성 측면	<ul style="list-style-type: none"> 항내측 친수점이 양호 내측선박 접안이 가능 주변 생태환경에 미치는 환경적 악영향은 보통임 	<ul style="list-style-type: none"> 시공은 다소 난이하나 유지관리 용이 방파제 축조 후 항로 영향성은 적음
구분	대안2 : 내외측 TTP 피복 케이슨 혼성제	대안3 : 곡면 슬릿 케이슨
단면형상		
기술 및 사용성 측면	<ul style="list-style-type: none"> 대형시공장비가 필요 기상악화시 항외측 입사파랑 반사효과 탁월 	<ul style="list-style-type: none"> 항내측 진입과 소파효과 기대됨 내측 수역 잠식이 적음으로 유리
경제 및 환경성 측면	<ul style="list-style-type: none"> 경관 우수성은 보통임 환경영향은 보통임 시공성이 좋고 경제적 단면 시공이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> 경관면에서 보통임 대형 시공장비, 시공성 난이 등 초기 경제성은 보통임

표 4. 방파제의 성능평가 항목 선정결과

평가항목	성능정의
반사파제한성	공법적용으로 인한 개량효과 고려
시공적정성	시공안정성 확보 및 시공 중의 피해 최소화 와 최적 공사관리 시스템 구축에 의한 공기단축 형식 선정
사용편리성	내입해성 향상, 내구년수 증대를 위한 신뢰성 및 염해성 고려 선정
유지관리용이성	유지관리가 용이하고 최소화할 수 있으며 동시에 수명연장이 가능한 구조 선정
초기비용경제성	최적화 설계 및 부식방지, 초기투자비, 유지관리비를 고려한 형식 선정
경관우수성	변화성 있는 단면을 설치하고 상부폭 확대로 경관성 있는 시설물 및 조형을 고려한 형식 선정
항로영향성	구조물 주위를 운행하는 선박 등에 대한 영향을 검토하여 선정
생태조화성	환경 악영향을 최소화하며 친환경 및 생태보호적 공법도입을 고려한 형식 선정

자료를 제시하고, 이에 항만전문가 및 VE분석자는 각각의 대안들에 대한 장·단점분석을 통하여 등급점수를 부여하였다.

다음으로 표 6의 성능평가 항목별로 각 설문자가 부여한 등급과 표 5의 품질모델 가중치를 이용하여 전술한 그림 2의 VE분석 절차에 따라 대안별 성능평가를 수행하였으며, 그 결과를 표 7에 나타내었다.

표 5. AHP 분석에 의한 방파제의 가중치 선정결과

평가항목	A	B	C	D	E	F	G	H	가중치	확정치
반사파제한성	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.1918	19
시공적정성		1.00	3.00	1.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.1918	19
사용편리성			1.00	0.33	0.50	1.00	0.50	0.50	0.0575	6
유지관리용이성				1.00	2.00	3.00	2.00	2.00	0.1920	19
초기비용경제성					1.00	2.00	1.00	1.00	0.1031	11
경관우수성						1.00	0.50	0.50	0.0576	6
항로영향성							1.00	1.00	0.1031	10
생태조화성								1.00	0.1031	10
$\lambda_{max}=8.023$ C.I.=0.0033 C.R.=0.0023									1.0000	100

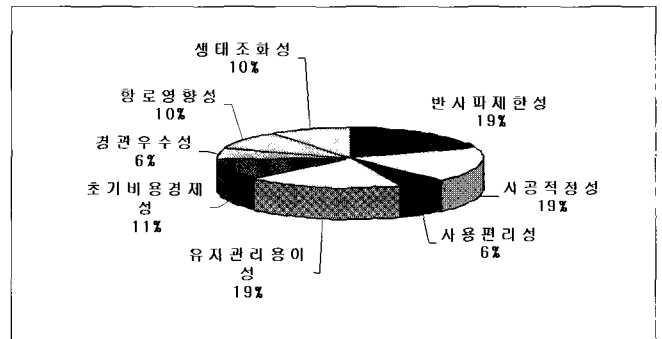


그림 4. 방파제의 평가항목별 가중치 선정결과

표 6. 성능평가 항목별 등급점수(R)

구분	퍼지론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제한성	9.4	9.6	8.6	7.8
시공적정성	9.6	9.4	8.6	7.5
사용편리성	8.4	9.6	8.2	7.6
유지관리용이성	9.4	8.9	8.6	8.2
초기비용경제성	8.2	8.7	8.3	7.7
경관우수성	8.8	9.5	8.6	8.2
항로영향성	7.9	9.8	8.2	7.8
생태조화성	8.2	8.8	8.0	7.5
구분	확정론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제한성	9	8	8	8
시공적정성	9	9	8	8
사용편리성	7	8	8	8
유지관리용이성	9	9	9	8
초기비용경제성	7	8	8	8
경관우수성	9	9	10	9
항로영향성	8	10	8	10
생태조화성	7	9	8	9

• 퍼지론적 방법 : Matlab Fuzzy Toolbox 사용

표 7에서 보는 바와 같이 각 평가항목에 대한 대안별 성능점수를 본 연구의 퍼지론적 방법과 기존의 확정론적 방법에 따라 산정한 결과는 퍼지론적 방법에서 대안1의 기능점수가 89.12로 가장 높게 분석되었고, 확정론적 방법에서도 대안1의 기능점수가 89.99로서 가장 높게 분석되었다. 특히 퍼지론적 방법에 있어 대안1의 성능향상지수(PII; Performance Improvement

표 7. 대안별 성능평가 결과

구분	퍼지론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제 한성	15.93	17.09	15.70	15.43
시공적정성	15.93	17.09	15.70	15.43
사용편리성	4.77	5.12	4.70	4.62
유지관리용이성	15.95	17.11	15.71	15.45
초기비용경제성	8.56	9.18	8.43	8.29
경관우수성	4.77	5.13	4.71	4.63
항로영향성	8.56	9.18	8.43	8.29
생태조화성	8.56	9.18	8.43	8.29
합 계	83.06	89.12	81.82	80.46
구분	확정론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제 한성	17.26	19.18	17.26	15.34
시공적정성	17.26	15.35	15.34	13.43
사용편리성	4.02	5.74	5.17	5.17
유지관리용이성	17.28	17.28	15.36	17.28
초기비용경제성	7.21	10.31	8.25	8.25
경관우수성	5.17	4.60	5.18	4.02
항로영향성	8.24	9.28	7.21	7.12
생태조화성	7.21	8.24	7.21	7.12
합 계	83.69	89.99	81.01	77.94

Index)가 11.0%로서 원안의 3.5% 및 대안2의 2.0%에 비해 우수함을 알 수 있다.

(3) 열화성능평가

본 연구에서는 방파제의 VE/LCC 분석에 있어 물리적 열화성능을 고려한 객관적 신뢰성해석에 평가자의 주관이나 과거경험에 기초한 주관적 신뢰성해석을 동시에 반영한 퍼지 신뢰성기반 생애주기비용분석에 의한 설계 VE절차의 방법론을 검증하기 위해 성능

표 8. 성능평가 항목별 열화성능 평가결과

구분	퍼지론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제한성	14.52	15.14	14.40	14.27
시공적정성	14.52	15.14	14.40	14.27
사용편리성	4.35	4.53	4.31	4.27
유지관리용이성	14.54	15.15	14.42	14.28
초기비용경제성	7.81	8.13	7.74	7.67
경관우수성	4.35	4.54	4.32	4.28
항로영향성	7.80	8.13	8.13	7.67
생태조화성	7.80	8.13	8.13	7.67
합 계	75.72	78.72	75.08	74.46
구분	확정론적 분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
반사파제한성	14.68	15.14	14.48	14.27
시공적정성	14.68	15.14	14.48	14.27
사용편리성	4.34	4.53	4.34	4.27
유지관리용이성	15.16	15.16	14.50	14.29
초기비용경제성	8.14	8.14	7.78	7.67
경관우수성	4.54	4.54	4.34	4.28
항로영향성	8.13	8.13	7.78	7.66
생태조화성	8.13	8.13	7.78	7.66
합 계	76.52	78.92	75.51	74.36

평가 항목별에 따른 표 5의 품질모델 가중치와 표 6의 등급점수를 기준으로 하여 전술한 그림 2의 통합VE분석 절차에 따라 대안별 열화성능평가를 수행하였으며, 그 결과를 표 8에 나타내었다.

표 8에서와 같이 퍼지론적 방법에서는 대안1의 열화성능점수가 78.72로서 가장 높게 분석되었고, 확정론적 방법에서도 대안1의 열화성능점수가 78.92로 가장 높게 분석되었다. 또한 퍼지론적 방법에 의한 결과에서 원안, 대안2 및 대안3의 열화성능점수가 각각 75.72, 75.08 및 74.46의 순서이고, 확정론적 방법에 의한 결과에서도 원안, 대안2 및 대안3의 열화성능점수가 각각 76.52, 75.51 및 74.36의 순서로서 열화성능점수의 분석에 있어 두 가지 방법론의 결과가 상호 유사함을 알 수 있다. 특히 퍼지론적 방법에 있어 대안1의 성능향상지수가 5.0%로서 원안의 1.0% 및 대안2의 1.0%에 비해 열화성능평가에서 다소 유리함을 알 수 있다.

4.3 정량적 평가

본 연구에서 방파제의 LCC분석을 위한 기본적인 데이터인 비교안별 유지관리물량은 설계된 대안에 대하여 물량을 산출하여 분석하였고(현대건설주식회사 외 2003), 단위유지관리비용 및 각종주기관련데이터는 항만구조물 신뢰성 해석관련자료(한국해양연구원 2000)의 연구데이터를 활용하였다.

본 절은 적용대상 방파제의 정량적 평가결과로서 항만구조물의 LCC 분석모델에 따라 퍼지론적 LCC 분석을 수행하였고, 퍼지신뢰성 해석에 기초한 LCC 결과 값을 표 9에 나타내었다. 또한 그림 5는 퍼지 신뢰성해석에 기초한 LCC분석을 통하여 산정된 대안별 시간의존적 LCC의 예측곡선을 나타낸 결과이다. 이때 직접 손실비용 및 간접 손실비용은 생애주기 동안 4번의 유지관리조치(보수)를 취하는 것으로 산정하였다.

표 9 및 그림 5에서 알 수 있듯이 대안1의 상대LCC지수가 1.00 및 비용절감지수(CII)가 12.10%로서 가장 높게 분석되었다. 또한 대안3 및 원안의 상대LCC지수가 각각 1.09(CII=3.81%), 1.12(CII=0.96%)의 순으로 비용절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

다음의 표 10은 방파제의 대안별 성과측정 및 경제성 평가를

표 9. 방파제의 대안별 LCC분석 결과

구분	LCC 분석 결과(단위: 천원/m)			
	원안	대안1	대안2	대안3
초기투자비용	110,670	120,440	132,010	116,560
직접손실비용	745,960	685,000	707,330	600,970
간접손실비용	1,236,720	1,052,520	1,247,480	1,315,640
합 계	2,093,350	1,857,960	2,113,820	2,033,170
상대 LCC 지수	1.12	1.00	1.14	1.09

주) 1. 초기투자비용= 설계비+감리비+공사비+초기점검비
 2. 직접손실비용= 보수·보강 및 교체비용
 3. 간접손실비용= 항만 사용자비용

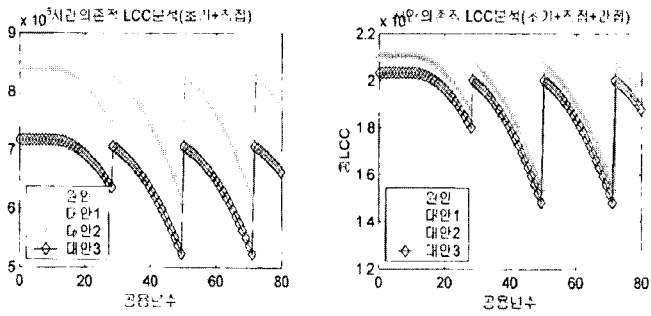


그림 5. 방파제의 대안별 LCC분석 결과

분석한 결과이다. 표 11에서와 같이 성과측정 평가에 있어 신규 투자대비 회수배율 1안을 분석한 결과 대안1은 2.12배, 대안3은 0.69배, 원안은 0.18배, 대안2는 0.0배의 순으로 분석되었고, 신규투자비용의 차 대비 회수배율 2안을 분석한 결과 대안1이 22.11배, 대안3은 5.22배, 원안은 0.96배, 대안2는 0.00의 순으로 분석되었다. 한편 대안별 경제성평가인 ECI 결과는 대안1이 12.0%, 대안3이 4.0%, 원안이 1.0%, 대안2는 0.0%의 순으로 대안1이 모두 우수하게 분석되었다.

표 10. 성과측정 및 경제성 평가 분석결과

구 분	원안	대안1	대안2	대안3
LCC차	20,470	255,860	0	80,650
회수배율 1안	0.18	2.12	0	0.69
회수배율 2안	0.96	22.11	0	5.22
경제성평가	1.0	12.0	0	4.0

주) 대안 2의 대안별 성과측정 및 경제성평가는 0으로 선정됨
 $LCC차(DLCC) = LCC_{max} - LCC_{alt} = 0$
 $경제성평가(ECI) = 100\% \cdot (LCC_{alt} / LCC_{max}) \cdot 100 = 0$

4.4 퍼지 신뢰성 평가

(1) 퍼지 신뢰성해석 결과

전술한 정성적 및 정량적 평가결과를 바탕으로 최적의 설계를 선정하기 위하여 퍼지 신뢰성해석을 수행하기 위한 모델은 표 1에 제시한 바와 같으며, 제시한 열화성능함수를 사용하여 퍼지 신뢰성해석을 수행한 결과를 표 11에 정리하였다.

표 11에서 확률론적 방법에 따른 최적 신뢰성지수0는 총기대비용 최소화 신뢰성 해석방법 중에서 Kanda의 방법(Kanda, J 2001)을 사용하여 구한 결과이고, 퍼지론적 방법에 따른 퍼지 신뢰성지수0는 열화성능함수를 사용하여 퍼지 신뢰성해석을 수행한 결과이다. 대안별 상태등급 평가를 위한 퍼지 신뢰성지수는 대안1이 2.4552, 원안이 2.3014, 대안2가 2.2697, 대안3이

표 11. 퍼지 신뢰성해석 결과의 비교

구분	대안별 신뢰성지수			
	원안	대안1	대안2	대안3
확률론적 분석(β_0)	2.3439	2.5035	2.3103	2.2733
퍼지론적 분석($\beta_F(t_0)$)	2.3014	2.4552	2.2697	2.2352

2.2352의 순서로 분석되었다.

(2) 미래의 유지관리전략

열화성능함수를 고려한 퍼지 신뢰성해석 수행결과를 바탕으로 미래에 발생할 대안별 유지관리전략을 분석한 결과를 표 12에 정리하였다.

표 12. 대안별 유지관리전략 분석 결과의 비교

구 분	방파제의 대안별 결과분석			
	원안	대안1	대안2	대안3
보수·보강전의 잔여수명(년)	7.65	10.19	7.21	6.74
보수·보강후의 잔여수명(년)	29.17	31.31	28.79	28.48
잔여수명의 증가분(년)	21.52	21.12	21.59	21.66
보유 구조성능지수	0.7572	0.7892	0.7508	0.7438
손상 신뢰성지수	2.3014	2.4552	2.2697	2.2352
손상 파괴확률	0.0107	0.0070	0.0116	0.0127
1차보수시기(년)	29.17	31.31	28.79	28.48
2차보수시기(년)	50.69	52.43	50.39	50.07
3차보수시기(년)	72.21	73.55	71.98	71.73

표 12의 결과에서와 같이 기존의 확정론적 방법에 의한 VE/LCC 분석에서는 미래에 발생할 유지관리 및 사용자비용을 예측하기에 어려움이 따랐으나, 본 연구의 퍼지 신뢰성해석에 의한 VE/LCC 분석에서는 성능점수가 고려된 열화성능등급을 예측함으로써 관리주체가 대안별 구조신뢰성 및 유지관리조치를 비교하여 시간의존적 가치 및 생애주기비용을 분석할 수 있으므로 보다 실용적이고 합리적인 방법임을 알 수 있다.

(3) 가치분석 결과

표 13에서는 퍼지 신뢰성해석에 의한 가치분석결과를 대안별로 정리하여 나타내었다. 표 13에서 보는 바와 같이 가치향상지수(VII; Value Improvement Index)는 모든 대안의 최소치 대비 대안1이 19.59%, 대안3이 3.00%, 원안이 1.84%씩 각각 향상된 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 방파제의 형식 선정 시 열화성능함수를 고려한 퍼지신뢰성 기반 VE/LCC 분석모델을 이용하여 대안별 통합 가치평가를 수행하였으며, 그 결과를 종합하여 정리하면 표 14와 같다.

표 13. 대안별 가치점수 및 가치향상지수

구 분	V.I	Value Diagram
반사파제 완성	17.33	
시공적정성	17.33	
사용편리성	5.19	
유지관리용이성	17.35	
초기비용경제성	9.31	
경관우수성	5.20	
항로영향성	9.31	
생태 조화성	9.31	
합 계	90.35	

대안1 : 외측 TTP 퍼복 케이스 혼성제			
구분	V.I	Value Diagram	
반사파제 한성	20.35		
시공적정성	20.35		
사용편리성	6.09		
유지관리용이성	20.38		
초기비용경제성	10.94		
경관우수성	6.10		
향로영향성	10.94		
생태 조화성	10.94		
합 계	106.10		VII=19.59(%)
대안2 : 내외측 TTP퍼복 케이스 혼성제			
구분	V.I	Value Diagram	
반사파제 한성	17.02		
시공적정성	17.02		
사용편리성	5.09		
유지관리용이성	17.04		
초기비용경제성	9.14		
경관우수성	5.10		
향로영향성	9.14		
생태 조화성	9.14		
합 계	88.71		VII=0.00(%)
대안3 : 국면 슬릿 케이스			
구분	V.I	Value Diagram	
반사파제 한성	17.53		
시공적정성	17.53		
사용편리성	5.25		
유지관리용이성	17.55		
초기비용경제성	9.42		
경관우수성	5.25		
향로영향성	9.42		
생태 조화성	9.42		
합 계	91.38		VII=3.00(%)

방파제의 대안별 퍼지신뢰성 기반 VE/LCC 분석결과 표 14에서와 같이 대안1이 모든 대안에 비해 가치향상측면과 LCC측면에서 비교적 유리한 것으로 최종 결론지을 수 있었고, 기존의 확정론적 방법에서도 유사한 결과를 나타내어 본 연구 결과를 검증할 수 있었다.

표 14. 퍼지신뢰성에 의한 VE/LCC 분석 종합결과

구분		원안	대안1	대안2	대안3
정성적 평가	성능점수	83.06	89.12	81.82	80.46
	일화성능점수	75.72	78.72	75.08	74.46
정량적 평가	상대 LCC지수	1.12	1.00	1.14	1.09
	신뢰성지수	2,3014	2,4552	2,2697	2,2352
퍼지신뢰성평가	가치향상지수(%)	1.84	19.59	0.00	3.00
	종합 평가		최적안		

5. 결 론

본 연구에서는 퍼지신뢰성 이론을 도입하여 항만구조물 중 케이스식 방파제의 열화성능을 평가한 후 퍼지신뢰성 해석에 따른 생애주기비용으로 통합 가치를 분석할 수 있는 VE/LCC 분석 모델을 개발하였고, 구축된 VE/LCC 분석 프로그램의 신뢰성과 활용성을 향상시키기 위한 측면에서 실제 대상 구조물에 적용하

여 정성적 성능평가와 정량적 LCC평가 및 퍼지신뢰성 이론에 따른 통합 가치분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 케이스식 방파제의 최적인 선정에 위한 VE/LCC 분석에서 퍼지론적 방법과 확정론적 방법의 결과가 서로 유사하게 나타났고, 확정론적 방법에서 고려되지 않는 데이터의 불확실량과 주관적 가치분석을 퍼지론적 방법에서 보다 합리적으로 반영할 수 있었다.

(2) 방파제의 설계 VE 업무를 수행함에 있어 대안 평가 시 제안된 퍼지 신뢰성 해석에 의한 VE/LCC분석의 의사결정방법을 효율적으로 활용함으로써 가치지향적 설계대안의 선정과 생애주기비용의 평가 및 유지관리조치를 위한 예산의 분배 등에 크게 기여할 것으로 기대된다.

(3) 케이스식 방파제를 포함한 항만구조물의 자산관리체계는 공학적, 회계학적 및 경영학적 분석체계가 종합적으로 구축되어야 하는데, 향후 사회간접자본 시설의 자산관리 체계가 D/B화된다면 본 연구결과를 이용하여 항만구조물의 잔여수명 예측과 유지관리 전략분석 및 자산가치 평가 등 자동화식 의사결정 체계를 확립할 수 있을 것으로 예측된다.

참고문헌

1. 유덕찬(2007), “퍼지신뢰성 이론에 의한 항만구조물의 VE/LCC 분석에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 박사학위논문.
2. 안종필 · 박주원 · 유덕찬(2006), “하수관거의 퍼지 신뢰성 기반 LCC 및 가치분석모델”, 한국구조물 진단학회 봄 학술발표회 논문집, 제10권 제1호, pp. 387-397.
3. 안종필 · 박경호 · 유덕찬(2004), “VE/LCC 개념을 도입한 항만구조물의 최적형식선정”, 2004년도 대한 토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 5586-5591
4. 이증빈(2003), “교량 구조시스템의 유지관리를 위한 퍼지신뢰성 해석모델”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 제7권 제2호, pp. 41-52.
5. 정평기 · 서종원(2005), “생애주기비용에 기초한 항만시설의 다단계 설계 의사 결정(I)”, 대한토목학회논문집, 제25권 제5D호, pp. 697-705.
6. 정평기 · 서종원(2005), “생애주기비용에 기초한 항만시설의 다단계 설계 의사 결정(II)”, 대한토목학회논문집, 제25권 제5D호, pp. 707-719.
7. 현대건설주식회사, 대림산업주식회사, 극동건설주식회사(2003) “울산신항 남방파제 축조공사 VE/LCC 보고서”.
8. 한국해양연구원(2000), “항만구조물 신뢰성해석 관련자료(1)(2).
9. Hines, J(1997), “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering”, Wiley Inter · Science

10. Kanda, J, and Adachi, T.(2001), "Influence of Probability Distribution of Load on Optimum Reliability", Reliability Engineering and System Safety, Elsevier 73, pp. 197-204.
11. Saaty, T.L., Rogers, P.C. and Pell, R.(1980), "Portfolio selection through hierarchies", Journal of portfolio Management 6, pp. 16-21.
12. Takashi, N.(2003), "Reliability Based Design Method for Flexural Design of Caisson Type Breakwaters", Journal of The Japan Society of Civil Engineering, No.696, I-58, pp.173-184.
13. Zadeh, L.(1965), "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8.

논문제출일: 2006.08.11

심사완료일: 2007.05.21

Abstract

In this study, the concepts of integrated VE analysis assessment is introduced in order to achieve "Design for Deterioration performance" in design VE phase. For this purpose, a framework for fuzzy reliability based LCC and value analysis model using fuzzy logic based approach for breakwaters projects is suggested. It is anticipated that the methodology proposed in this paper can also be utilized in the design and maintenance phase of other facilities where decision making is made for the fuzzy reliability based life cycle cost and value analysis.

Keywords : VE(Value Engineering), LCC(Life Cycle Cost), Fuzzy Reliability Based VE/ LCC Analysis
