

안벽구조물의 확률론적 VE/LCC 분석모델 적용방안

Application of Probabilistic VE/LCC Analysis Models for Quay Wall Structures

안종필* 이증빈** 박주원*** 유덕찬****
 Ahn, Jong-Pil Lee, Cheung-Bin Park, Ju-Won Yu, Deog-Chan

요 약

최근 가치공학과 생애주기비용 분석의 중요성이 대두됨에 따라 항만구조물의 VE/LCC(Value Engineering/Life Cycle Cost) 분석에 대한 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 반면에 항만구조물의 생애주기비용 산정과 가치분석의 실무 적용에 있어 이론적 모델과 표준지침 및 소프트웨어 등이 정립되어있지 않기 때문에 분석자에 따라 일관성과 전문성에 한계를 나타내고 있다. 특히 생애주기비용의 분석에 있어 현행의 확정론적 방법으로는 파괴손실비용의 산정이 어렵기 때문에 퍼지신뢰성해석에 따라 파괴확률을 파괴손실비용에 반영할 수 있는 확률론적 방법의 도입이 반드시 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안벽구조물의 설계에 있어 대안별 열화성능 차원의 설계를 수행하도록 유도하기 위하여 퍼지신뢰성 이론에 기초한 확률론적 VE/LCC 분석모델을 제안하였으며, 제안된 분석모델의 신뢰성과 활용성을 향상시키기 위한 측면에서 실제 대상 구조물에 적용하였다. 본 연구에서 제안된 방법론은 향후 다양한 분야의 설계 및 유지관리단계에서의 생애주기비용과 가치분석의 의사결정에 활용되어질 것으로 사료된다.

키워드 : 안벽구조물, 퍼지신뢰성이론, VE/LCC분석, 파괴확률, 파괴손실비용.

1. 서론

최근 들어 대규모 시설의 설계와 건설의 효율적 시행을 위해 기획 및 설계단계에서부터 VE/LCC(Value Engineering/Life Cycle Cost) 분석을 적용하도록 제도적인 규제로 권장하고 있다. 안벽구조물의 설계 및 VE/LCC 분석에서 엔지니어가 고려해야 할 가장 중요한 사항으로는 설계규정을 만족하는 구조물의 안전성과 사용성이며, 추가적으로 내구성 및 부수적인 기능을 만족하도록 해야 할 것이다. 다만 이러한 설계조건들은 반드시 비용적인 면을 고려해야 하며 최소한의 비용을 이용하여 구조 성능적인 면을 만족하기 위한 검토가 반드시 필요하다. 또한 이러한 소요비용은 단지 구조물의 초기시공비용만이 아닌 공용수명동안 발생할 수 있는 생애주기비용, 즉 운영 및 유지관리, 보수·보강 및 파괴손실비용 등을 포함한 직·간접손실비용을 최소화 할 수 있도록 고려되어야 할 것이다(안종필 외, 2007).

현재 VE/LCC 분석방법은 크게 확정론적 분석방법과 확률론적 분석방법으로 나눌 수 있다. 확정론적 분석방법은 통계적 데이터나 전문가의 주관적 의견에 의한 확정적인 데이터를 활용하여 분석하는 방법으로 현재 국내에서 사용되고 있다. 확률론적 분석방법은 통계적 데이터나 전문가의 주관적 의견에 의한 확정적인 데이터의 애매성(모호성)을 객관화시킨 분석방법으로 신뢰성해석 방법(Takashi, N., 2001, Takashi, N., 2003) 등이 일부 사용되어지고 있는데, 신뢰성해석 방법으로도 구조물에 대한 모든 불확실성을 반영하기에는 많은 어려움이 따른다.

그 이유는 신뢰성해석 방법으로 다룰 수 있는 불확실성의 범위가 매우 제한적이고, 구조물에 대한 정보들이 반드시 객관적이고 정량적인 통계자료로 주어지지 않는다는 데 있다. 또한 생애주기비용의 분석에 있어 현행의 확정론적 방법으로는 파괴손실비용의 산정이 어렵기 때문에 퍼지신뢰성해석에 따라 파괴확률을 파괴손실비용에 반영할 수 있는 확률론적 방법의 도입이 반드시 필요한 실정이다.

이와 같은 점을 보완하고자 본 연구에서는 안벽구조물의 계획 및 설계에 있어 사전 열화성능 차원의 설계를 수행하도록 유도하기 위하여 퍼지신뢰성 이론에 기초한 확률론적 VE/LCC 분석모델을 제안하였으며, 제안된 분석모델의 신뢰성과 활용성을 향상시키기 위한 측면에서 실제 대상 구조물에 적용하였다. 특히

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

** 일반회원, (주)서림 기술고문, 공학박사 lcc5954@hanmail.net

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

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

퍼지 신뢰성이론에 기초한 확률론적 VE/LCC 분석방법은 구조물의 열화성능을 고려한 확률적 불확실성을 포함하는 생애주기비용 분석을 수행할 수 있고, 가치분석에 필요한 정량적 또는 객관적으로 표현하기 어려운 정보를 객관화시킬 수 있는 특징을 지니고 있다.

2. 안벽구조물의 생애주기비용 분석모델

2.1 생애주기비용 분류항목의 선정

지금까지는 안벽과 관련된 LCC분석 시에 비용분류 체계에 대한 기준이 없이 관련 전문자들 사이에서 다양하게 적용되어 오고 있는 실정이라 LCC분석의 일관성을 위해서는 비용분류체계에 대한 기준이 필요한 것으로 판단된다. 안벽 구성요소별 비용분류체계는 데이터의 현실성과도 밀접한 관계가 있으므로 실용적인 활용을 전제로 하여 구성요소별 비용함수 모델이 정립되어야 한다.

생애주기 동안의 비용분류항목은 신설 안벽의 초기투자비용이나 기존 안벽의 현 시점에서의 유지관리비용 등의 직접손실비용 및 파괴손실비용 등의 간접손실비용 등 모든 범위의 비용을 포함한다. 이러한 기대비용들은 현재가치나 연가가치와 같은 등가가치로 변환하는 과정을 통해 비용 효율적인 의사결정이 가능하게 된다. 표 1은 생애주기 동안의 주요 비용분류항목을 나타내었다.

표 1. 안벽구조물에 대한 생애주기비용 분류항목

분류항목	내 용
1. 초기투자비용	계획, 설계, 건설 및 감리비용
2. 직접손실비용	유지관리비용 (점검 및 보수, 보강비용)
3. 간접손실비용	파괴손실비용 (파괴확률 반영비용)

2.2 생애주기비용 분석조건 및 방법

공용년수의 개념은 구조물의 주요 구성시스템이나 요소가 손상되거나 파손되어 더 이상 그 기능을 발휘하지 못하게 되는데 걸리는 시간을 의미하며, 항만구조물의 공용년수는 항만구조물이 가지고 있는 고유한 특성으로 인하여 정확한 산정이 어렵다. 본 연구에서는 LCC 분석대상인 안벽구조물의 공용년수를 현재의 기술수준과 중요도를 고려하여 80년으로 가정하여 수행하였다.

본 연구의 LCC 분석에 있어 유지보수비를 적용하기 위한 기초자료로서 30개 시설물에 대한 평균 유지보수율인 1.35%를 적

용하였고, 설계비는 기본설계비 효율과 실시설계비 효율을 합산하여 총공사비 대비 3.48%를 적용하였으며, 감리비용은 1.4%를 적용하였다. 또한 실질 할인율은 국내의 LCC 분석 시 가장 많이 사용하는 통계청 자료인 4.5%를 적용하였다.

안벽구조물의 유지관리를 위한 생애주기비용 분석은 여러 가지 방법이 있는데, 본 연구에서는 직접손실비용과 간접손실비용으로 구성되어 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하고, 시간가치를 고려한 생애주기비용분석의 누적 경제성분석 모델(Kong, J.S., Frangopol, D.M., 2003)을 사용하면 식 (1)과 같이 된다.

$$LCC = C_I + C_{INS} + C_{REP} + C_{OPP} + C_{RISK}$$

$$= C_I + \left(\sum_{t=a_1}^A \eta \cdot C_{ins} + \sum_{t=b_1}^B \eta \cdot C_{rep} + \sum_{t=b_1}^B \eta \cdot C_{opp} + \sum_{t=b_1}^B \eta \cdot C_{risk} \right) \quad (1a)$$

$$\eta = \frac{1}{(1+k)^t} \quad (1b)$$

$$C_M = C_{INS} + C_{REP} + C_{OPP} \quad (1c)$$

$$C_F = C_{RISK} = C_f \cdot P_f \quad (1d)$$

여기서, LCC=생애주기비용, C_I=초기투자비용

C_{INS}=점검비용, C_{ins}=점검비용 단가

C_{REP}=보수비용, C_{rep}=보수비용 단가

C_{OPP}=보강비용, C_{opp}=보강비용 단가

C_{RISK}=파괴손실비용, C_{risk}=파괴손실비용단가,

k=실질 할인율 t=공용년수

C_M=유지관리비용, C_F=간접손실비용

C_f=최대파괴손실비용, P_f=파괴확률

2.3 파괴손실비용 산정을 위한 퍼지신뢰성 해석

현행 확정론적 방법에 의한 생애주기비용의 산정에서는 파괴확률을 고려한 파괴손실비용의 반영에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 퍼지신뢰성해석에 의해 산정된 퍼지신뢰성지수를 이용하여 파괴확률을 산정하고, 이를 파괴손실비용에 반영하고자 한다.

안벽구조물의 퍼지신뢰성지수의 산정에 있어 본 연구에서는 Kong, J.S., Frangopol, D.M.(2003)이 개발한 손상된 구조물에 대한 시간이력 신뢰성해석(time variant reliability Analysis)모델을 이용하였으며, 보유성능에 의한 신뢰성지수의 감소(Δβ)는 식 (2)에 의해 계산할 수 있다.

$$\Delta\beta = \frac{1}{\sqrt{(\sigma_{\ln S})^2 + (\sigma_{\ln R})^2}} \ln \frac{R_0}{R(t)} \quad (2)$$

여기서, $\Delta\beta$ 는 손상된 부재요소에 대한 신뢰성지수의 감소이고, σ_{lnS} 는 하중효과에 대한 표준편차를 나타내며, σ_{lnR} 은 저항에 대한 표준편차, R_0 는 원래의 공칭저항 휨강도, $R(t)$ 는 시간이력 저항 휨강도를 의미한다.

항만구조물의 부재요소에 대한 점검시점의 시간이력 퍼지신뢰성지수($\beta(t_o)$)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 최적신뢰성지수(β_{opt})는 Kanda, J, and Adachi, T.(2001)가 제안한 신뢰성 해석으로 산정된다.

$$\beta(t_o) = \beta_{opt} - \Delta\beta \quad (3)$$

여기서, $\beta(t_o)$ 는 손상부재요소의 시간이력 퍼지신뢰성지수이고, β_{opt} 는 최적신뢰성지수이며, $\Delta\beta$ 는 신뢰성지수의 감소이다. 확률적 개념에 의한 구조안전성의 척도인 구조물의 퍼지신뢰성지수($\beta(t_o)$)는 파괴확률(Pf)과 보확률의 관계를 갖으며, 이 때 퍼지신뢰성지수와 파괴확률과의 관계는 표 2와 같이 된다.

표 2. 퍼지신뢰성지수($\beta(t_o)$)와 파괴확률(Pf)와의 관계

$\beta(t_o)$	0	1	2	3	4	5
Pf	5.00E-01	1.59E-01	2.28E-02	1.35E-03	3.17E-05	2.87E-07

3. 안벽구조물의 가치 분석모델

3.1 성능평가 절차 및 방법

안벽구조물의 VE/LCC 분석을 위한 성능평가의 절차는 먼저 성능평가 항목을 선정하고 AHP기법(Saaty, 1980)에 의해 가중치를 산정한 후에 성능점수를 산정하는 단계로 진행되었으며, 그림 1에 정리하였다.

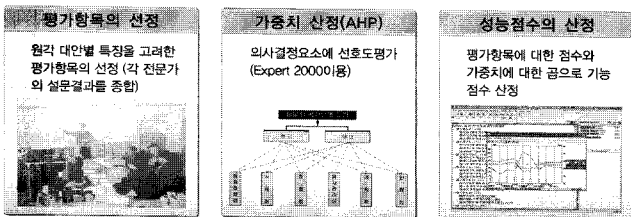


그림 1. 안벽구조물의 성능평가 절차

안벽구조물의 성능평가 기준항목은 지금까지 체계적으로 선정된 문헌분석 기준이 없기 때문에 본 연구에서는 본 적용사례 대상사업의 특성을 고려하여 항만분야의 전문가 6인 및 VE 분석자 4인의 총 10인들과의 인터뷰를 통해 검증받은 후 8가지 항목에 대하여 선정하였으며, 그림 2는 AHP 분석계층도를 보여주고 있다.

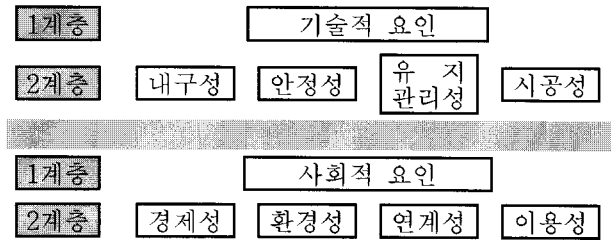


그림 2. AHP 분석계층도

그림 2의 AHP 분석계층에서와 같이 1계층을 기술적 요인과 사회적 요인으로 분류하고 2계층을 내구성안정성, 유지관리성, 시공성, 경제성, 환경성, 연계성 및 이용성으로 분류하여 선정하였다. 또한 이에 따른 안벽구조물의 성능평가 기준항목 및 성능정의를 표 3에 나타내었다.

표 3. 안벽구조물의 성능평가 기준항목 설정

기준항목	성능 정의	
기술적 요인	내구성	◦ 내열해성 향상 및 내구연수 증대를 고려한 안벽 형식 선정
	안정성	◦ 선박접안의 안정성 확보 및 순응성과 최적공사관리 시스템 구축에 의한 공기단축 안벽 형식 선정
	유지관리성	◦ 유지관리 조치행위의 최소화 및 편의성을 고려한 안벽 형식 선정
	시공성	◦ 시공장비 및 적용공법의 편리성 등에 대한 영향을 검토하여 안벽 형식 선정
사회적 요인	경제성	◦ 초기투자비용 및 유지관리비용 절감을 고려한 안벽 형식 선정
	환경성	◦ 시공 중 환경오염 최소화 및 친환경 어초기능 확보를 고려한 안벽 형식 선정
	연계성	◦ 기존부두와 향후 개발계획을 고려한 연계 활용성이 가능한 구조 선정
	이용성	◦ 접안 편의시설 적용 가능성고려 선정

3.2 가치분석을 위한 평가지표

기존의 일반적인 VE/LCC 분석 프로세스는 가치평가를 위한 평가지표가 일원화되지 못하여 분석수행자에 따라 분석결과 지표의 상이성을 나타내고 있다. 따라서 가치평가 절차에서의 일관성 및 효율성을 확보하기 위해서는 합리적인 평가지표가 필요하며, 본 연구에서는 가치분석 평가지표를 표 4와 같이 설정하였다.

표 4. 가치분석을 위한 평가지표

구분	산출식
성능점수 (QPI)	$QPI = \sum(DR \times RI)$
성능지수 (FI)	$FI = FI_{alt} / FI_{min}$
상대 LCC지수 (CI)	$CI = CI_{alt} / CI_{min}$
가치지수 (VI)	$VI = FI / CI$
가치향상지수 (VII)	$VII = (VI_{alt} - VI_{min}) / VI_{min}$

표 4에서 성능점수(QPI)를 산정하기 위한 DR과 RI는 각각

품질모델가중치와 성능등급을 나타내고, 성능지수(FI)를 산정하기 위한 FI_{alt} 및 FI_{min} 은 각각 대안값과 최소값의 가치지수를 나타내며, 가치지수(VI)는 성능지수(FI)와 상대 LCC지수(CI)의 비에 의해 결정된다.

3.3 경제성 및 유지관리 전략분석 방법

대안별 성과측정이란 투자대비 회수배율로서 대안별 사업시행 전·후의 LCC차이를 초기투자비용으로 나뉜 것을 의미한다. 특히 안벽을 신축할 경우에는 회수배율 1안이 되며, 안벽을 보수 및 교체할 경우에는 회수배율2안이 된다. 본 연구에서는 안벽구조물의 대안별 LCC값을 상호 비교하여 성과측정 및 경제성평가를 하고자 하며, 표 5는 성과측정 및 경제성평가의 산출식을 나타내고 있다.

표 5. 성과측정 및 경제성 평가지표

구분	산출식
대안별 LCC차(DLCC)	$DLCC = LCC_{max} - LCC_{alt}$
회수배율 1안(HI1)	$HI1 = DLCC / CO_{alt}$
회수배율 2안(HI2)	$HI2 = DLCC / (CO_{max} - CO_{alt})$
경제성 평가(ECI)	$ECI = 100(\%) - \frac{LCC_{alt}}{LCC_{max}} \times 100$

주) CO_{alt} =대안별 초기투자비용, CO_{max} =대안의 최대값

일반적으로 안벽구조물의 생애주기프로파일(Life Cycle Profile : LCP)은 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 주요 유지관리가 실시되는 시기와 개축시기에 대한 이력을 통계적으로 분석하여 활용하는 방법이며, 두 번째 방법은 안벽의 상태등급 모델을 설정하고 관리수준 목표에 도달했을 때에 유지관리 조치를 부여하는 식으로 LCP를 결정하는 방법이다.

이 방법들은 전문가들의 평가 결과를 기본 데이터로 사용하는 것으로 여러 가지 불확실한 인자와 관리자의 결정을 필요로 하는 인자들이 포함되기 때문에 안벽구조물의 현재 및 미래시점에 대한 외관상태 등급을 반영하지 못하는 경우가 종종 발생하게 된다.

본 연구에서는 안벽구조물의 현재 상태 및 미래상태의 유지관리전략을 결정하기 위한 경제성분석을 실시하는 것을 목표로 하므로 안벽구조물의 현재 상태에 따른 미래조치여부가 보다 용이한 구조성능함수에 기초한 신뢰성지수프로파일(Reliability Index Profile)을 적용하였다.

신뢰성지수프로파일을 적용한 유지관리전략에는 사후유지관리 조치와 예방유지관리 조치로 구분된다. 즉, 대대적인 보수·보

강 및 교체를 하는 주요 구조부재는 사후유지관리 조치를 취하고, 경미한 보수나 수선 등을 요하는 부속 구조부재는 예방유지관리 조치를 취하는 시나리오로 안벽구조물의 구조부재에 맞는 유지관리 전략을 세우고 있다.

본 연구에서 안벽구조물에 대한 1번의 생애주기에서 4번의 보수·보강조치를 취하는 유지관리 전략을 기본으로 하여 안벽 부재 요소의 외관 상태등급과 구조성능지수에 의해 산정한 신뢰성지수를 이용하면 생애주기프로파일의 추정식은 표 6과 같이 된다.

표 6. 시간의존적 생애주기 프로파일 추정식

사후 유지관리	예방 유지관리	공용년수
$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta t^2$	$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta t^2$	$0 \leq t < t_i$
$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta (t - t_i)^2$	$\beta(t) = \beta(t_i) - \alpha_\beta (t - t_i)^2$	$t_i \leq t < t_o$
$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta (t - \Delta t_f)^2$	$\beta(t) = \beta(t_o) + \gamma - \alpha_\beta (t - \Delta t_f)^2$	$t_o \leq t < t_f$
$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta (t - \Delta t_f)^2$	$\beta(t) = \beta(t_f) + \gamma - \alpha_\beta (t - \Delta t_f)^2$	$t_f \leq t < t_s$
$\beta(t) = \beta_o - \alpha_\beta (t - \Delta t_s)^2$	$\beta(t) = \beta(t_s) + \gamma - \alpha_\beta (t - \Delta t_s)^2$	$t_s \leq t < t_d$

여기서, $\beta_{yf} = \beta_d / \beta_o$, $\alpha_\beta = (1 - \beta_{yf}) / t_o^2$, $t_f = t_o + \Delta t$, $t_s = t_o + 2\Delta t$, $t_d = t_o + 3\Delta t$, $\Delta t = t_o - t_i$, $\Delta t_f = t_o + \Delta t - t_n$, $\Delta t_s = t_o + 2\Delta t - t_{s1}$, $\beta_{y1} = \beta_{yf} + \Delta\beta_{yf}$ 이고, β_{yf} =성능지수, β_d =평가시점의 신뢰성지수, β_o =설계시점의 신뢰성지수, α_β =점점시점의 신뢰성 열화율, t =공용년수, t_o =점점시점, t_i =열화 발생 전 시점, t_f =1차 유지관리시점, t_s =2차 유지관리 시점, t_d =3차 유지관리시점, $t_i = t_{f1} = t_{s1}$ =상수, Δt =1차 유지관리 시기(주기), Δt_f =2차 유지관리 시기, Δt_s =3차 유지관리시기, β_{y1} =보강후의 신뢰성향상지수, $\Delta\beta_{yf}$ =신뢰성지수 증가분이다.

또한 보강 조치 후의 신뢰성향상지수(β_{y1})는 유지관리조치수준에 따라 달라지는데, 예방유지관리 조치수준인 경우는 $\beta_{y1} = \beta_{yf} + \Delta\beta_{yf}$, 사후유지관리 조치수준에서는 $\beta_{y1} = \beta$ 를 사용한다.

4. 적용 예 및 고찰

4.1 안벽구조물의 적용 대상

본 연구에서 제안된 안벽구조물의 생애주기비용 및 가치분석 모델의 타당성을 검토하기 위한 분석대상은 "OOO항 안벽 축조 공사"의 안벽구조물을 선정하였으며, 비교대안에 대한 단면형상을 그림 3에 정리하였다.

그림 3에서 원안은 내파안정성이 우수하고, 유지관리가 용이하며, 항내측 친수성이 양호한 소형 케이슨 안벽이고, 대안 1은

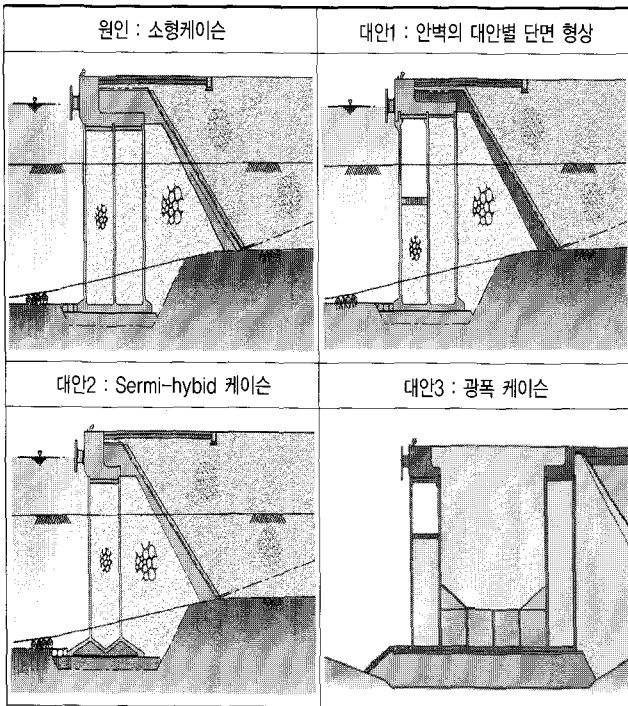


그림 3. 안벽의 대안별 단면 형상

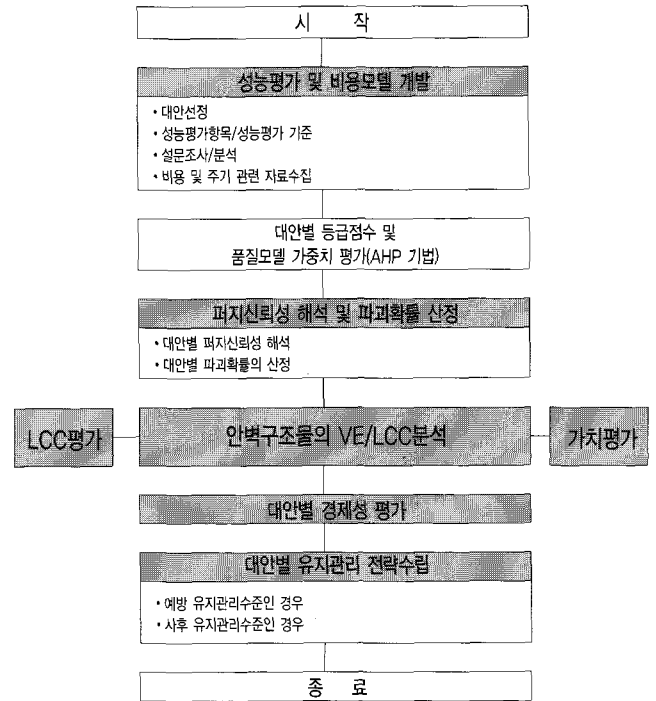


그림 4. 안벽구조물의 VE/LCC 분석 프로그램 흐름도

내측직립으로 해수 소통구 통수능력이 증대되며, 파고 전단율이 우수하고 시공은 다소 난이하나 유지관리가 용이한 소파 대형 케이슨식 안벽이다.

또한 대안 2는 대형 시공 장비가 필요하고, 기상 악화시 항의 측 입사파랑에 대한 반사효과가 탁월하며, 시공성이 좋고 경제적 단면시공이 가능한 Semi-hybrid 케이슨식 안벽이고, 대안 3은 항내측 진입파 소파효과가 기대되며, 내측수역 잠식이 적음으로 유리하고, 대형 시공 장비 및 시공성 난이 등으로 초기 경제성은 보통인 광폭 케이슨식 안벽이다.

4.2 VE/LCC 분석 프로그램의 흐름도

안벽구조물의 확률론적 VE/LCC 분석을 위해 본 연구에서 개발한 MATRAB용 "일명 CALIFE 프로그램"은 사용자가 입·출력 데이터를 최대한 편리하게 통제할 수 있도록 구성하였으며, 그림 4는 CALIFE 프로그램 및 시스템의 흐름을 나타낸 것으로서, 초기 입력화면에서 VE/LCC 분석 및 결과의 저장을 흐름도로 표현한 것이다.

4.3 생애주기비용 분석결과

4.3.1 퍼지신뢰성 해석결과

전술한 Kong, J.S., Frangopol, D.M.(2003)의 손상된 구조물에 대한 시간이력 신뢰성해석(time variant reliability Analysis)모델을 이용하여, 안벽구조물의 대안별 퍼지신뢰성지수($\beta(t_0)$)와 파괴확률(P)을 계산한 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7. 퍼지신뢰성지수 및 파괴확률의 산정결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
신뢰성 지수($\beta(t_0)$)	2.4213	2.6356	2.4179	2.6031
파괴확률(P)	0.0077	0.0042	0.0078	0.0046

표 7에서 보는 바와 같이, 대안별 생애주기비용 분석을 위한 퍼지 신뢰성지수는 대안1=2.6356, 대안3=2.6031, 원안=2.4213 및 대안2=2.4179의 순서로 분석되었고, 파괴확률은 대안1=0.0042, 대안3=0.0046, 원안=0.0077 및 대안2=0.0078의 순서로 분석되었다.

4.3.2 생애주기비용 산정결과

본 적용대상 안벽구조물의 생애주기비용 산정에 있어, LCC분석을 위한 기본적인 데이터인 비교안별 유지관리물량은 설계된 대안에 대하여 물량을 산출하여 분석하였고, 단위유지관리비용 및 각종 주기 관련데이터는 항만공사(2003) 연구자료의 데이터를 활용하였다.

본 연구에서는 전술한 식 (1)의 안벽구조물의 LCC 분석모델에 따라 퍼지신뢰성해석에 따른 파괴확률을 반영한 LCC 분석을 수행하였으며, 확률론적 LCC분석에 의한 생애주기비용 결과 값을 대안별로 비교하여 그림 5 및 표 8에 나타내었다. 이때, 직접손실비용 및 간접손실비용은 생애주기 동안 4번의 유지관리초치(보수)를 취하는 것으로 산정하였다.

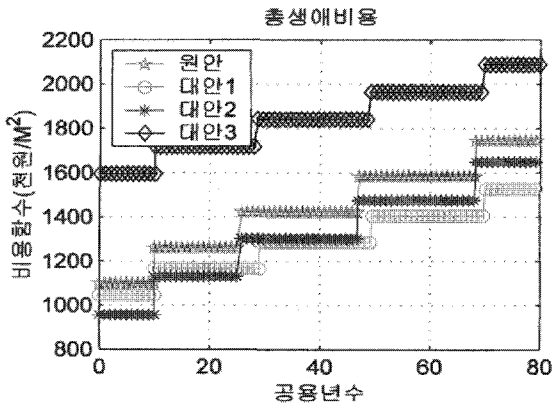


그림 5. 대안별 생애주기비용(LCC) 분석결과

표 8. 대안별 생애주기비용(LCC) 분석결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3	
					초기 투자비용
LCC (억원)	직접손실비용	171	126	170	184
	간접손실비용	473	353	521	308
	합 계	1,743	1,526	1,648	2,087
상대LCC 지수	1.14	1.00	1.08	1.37	

그림 5 및 표 8의 대안별 LCC의 산정결과에서와 같이 대안1의 상대 LCC지수가 1.00로 가장 높게 분석되었고, 대안2와 원안 및 대안3의 상대 LCC지수가 각각 1.08, 1.14 및 1.37의 순으로 분석되었다.

4.4 가치분석 결과

4.4.1 성능평가 항목별 가중치(DR) 산정

전술한 표 3의 성능평가 기준항목에 대한 가중치(DR) 산정을 위하여 설계자가 대상사업의 현황 설명을 수행하였으며, 이에 항만전문가 6인 및 VE분석자 4인을 대상으로 설문조사가 수행되었다. 또한 성능평가 기준항목에 대한 중요도를 바탕으로 AHP (Analytic Hierarchy Process)기법을 사용하여 가중치를 산정하였으며, 그 결과를 표 9 및 그림 6에 정리하였다.

AHP 분석결과의 일관성 검증은 Satty(1980)가 제안한 일관성 비율(consistency ratio: C.R.)로 검증할 수 있으며, Satty는

C.R의 값이 10%이내인 경우에 쌍대비교 분석결과 가중치의 일관성에 무리가 없는 결과임을 말하고 있다. 표 9 및 그림 6에서와 같이 AHP분석에 의한 품질모델 산정결과는 내구성, 안정성, 이용성, 연계성, 유지관리성, 환경성, 시공성 및 경제성의 가중치가 각각 12%, 21%, 12%, 21%, 13%, 7%, 7% 및 7%이고, $\lambda_{max}=8.023$, C.I=0.0036, C.R=0.0027로 분석결과의 일관성을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

표 9. AHP 분석에 의한 가중치 산정결과

평가항목	A	B	C	D	E	F	G	H	가중치	확정치
A 내구성	1.00	0.50	1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	0.1218	12
B 안정성		1.00	2.00	1.00	2.00	3.00	3.00	3.00	0.2191	21
C 이용성			1.00	0.50	1.00	2.00	2.00	2.00	0.1218	12
D 연계성				1.00	3.00	3.00	3.00	3.00	0.2191	21
E 유지관리성					1.00	2.00	2.00	2.00	0.1218	13
F 환경성						1.00	1.00	1.00	0.0654	7
G 시공성							1.00	1.00	0.0654	7
H 경제성								1.00	0.0654	7
$\lambda_{max}=8.025$ C.I=0.0036 C.R=0.0027									1.0000	100

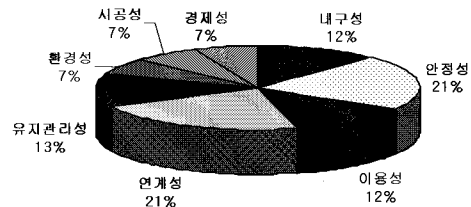


그림 6. 안벽구조물의 평가항목별 가중치 다이어그램

4.4.2 대안별 성능평가 결과

각 성능평가항목에 대한 대안별 성능점수(0)의 산정은 성능평가 항목별에 따라 가중치(0)와 각 설문자가 부여한 성능등급(0)을 이용하여 대안별 성능평가를 수행하여 그 결과를 표 10과 그림 7에 나타내었다.

표 10 및 그림 7에서 보는 바와 같이 대안별 성능평가 결과 대안1=82.83, 대안3=82.12, 원안=78.21 및 대안2=78.13의 순서로서 대안1의 성능점수가 가장 높게 분석되었다.

표 10. 각 평가항목에 대한 대안별 성능평가 결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
내구성	9.53	10.09	9.52	10.00
안정성	17.13	18.15	17.12	17.99
이용성	9.53	10.09	9.52	10.00
연계성	17.13	18.15	17.12	17.99
유지관리성	9.53	10.09	9.52	10.00
환경성	5.12	5.42	5.11	5.38
시공성	5.12	5.42	5.11	5.38
경제성	5.12	5.42	5.11	5.38
합 계	78.21	82.83	78.13	82.12

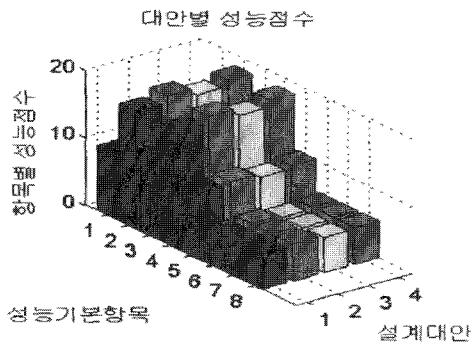


그림 7. 각 평가항목에 대한 대안별 성능점수 다이어그램
(단, 설계대안 1, 2, 3, 4는 원안, 대안1, 대안2 및 대안3임)

4.4.3 대안별 가치점수 산정 및 분석 결과

각 성능평가 항목에 대한 대안별 가치점수 산정결과를 그림 8 및 표 11에 나타내었고, 가치분석을 위한 안벽구조물의 대안별 평가지표 산정결과를 표 12에 나타내었다.

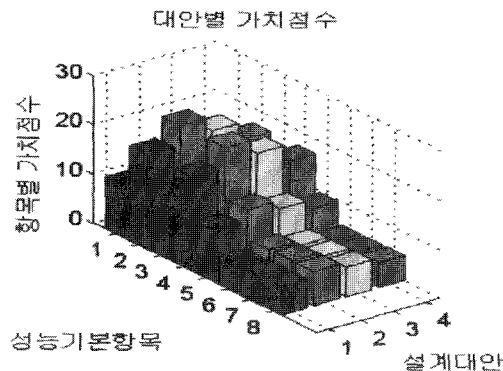


그림 8. 각 평가항목에 대한 대안별 가치점수 다이어그램
(단, 설계대안 1, 2, 3, 4는 원안, 대안1, 대안2 및 대안3임)

표 11. 성능평가 항목에 대한 대안별 가치점수 산정결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
내구성	10.67	12.91	11.27	9.36
안정성	19.19	23.24	20.29	16.84
이용성	10.67	12.91	11.27	9.36
연계성	19.19	23.24	20.29	16.84
유지관리성	10.68	12.92	12.28	9.36
환경성	5.73	6.94	6.06	5.03
시공성	5.73	6.94	6.06	5.03
경제성	5.73	6.94	6.06	5.03
합계	87.59	106.04	92.58	76.85

표 11 및 표 12에서 보는 바와 같이 안벽구조물의 VE/LCC 분석에 따른 가치점수가 대안1, 대안2, 원안 및 대안3안의 순으로 각각 106.04점, 92.58점, 87.59점 및 76.85점으로 분석되었으며, 가치향상지수는 대안3의 최소치 대비 대안1= 37.96%, 대안2=20.43%, 원안=13.94%로 각각 향상된 것으로 분석되었다.

표 12. 가치분석을 위한 평가지표 산정 결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
성능점수(QPI)	78.21	82.83	78.13	82.12
성능지수(FI)	1.0017	1.1141	1.00	1.0969
생애주기비용(LCC)	1,743	1,526	1,648	2,087
상대 LCC지수(CI)	1.1426	1.00	1.0801	1.3677
가치점수	87.59	106.04	92.58	76.85
가치지수(VI)	0.8759	1.0604	0.9258	0.7685
가치향상지수(VII)	0.1394	0.3796	0.2042	0.00

안벽구조물의 형식 선정 시에 폐지신뢰성해석에 기초한 확률론적 VE/LCC 분석을 수행한 결과 대안1이 모든 대안에 비해 LCC측면에서 월등히 유리할 뿐만 아니라 성능면에서도 유리하게 나타났다. 따라서 최종적인 안벽구조물의 VE/LCC 분석결과 가장 유리한 대안으로 대안1을 설계 제한할 수 있게 된다.

따라서 폐지신뢰성해석에 따라 안벽구조물의 생애주기 동안의 직접손실비용(유지관리비용)과 간접손실비용(파괴손실비용)까지 포함한 LCC를 산정하여 가치분석을 수행함으로써 기존의 확정론적 VE/LCC 분석 방법보다 과학적이고 합리적인 유지관리전략을 고려한 설계 대안을 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4.4 경제성 평가 및 유지관리 전략분석

표 13은 전술한 표 5의 성과측정 및 경제성 평가 결과로서 신규투자대비 회수배율1안은 대안1(HI1= 0.54배), 대안2(HI1=0.46배), 원안(HI1=0.31배) 및 대안3(HI1=0.0배)의 순으로 분석되었다.

다음으로 신규투자비용의 차 대비 회수배율2안은 대안1(HI2=1.02배), 원안(HI2=0.69배), 대안 2(HI2= 0.68배) 및 대안3(HI2=0.0배)의 순으로 분석되었다. 또한 대안별 경제성평가(ECI)는 대안1(ECI= 26.89%), 대안 2(ECI=21.03%), 원안(ECI=16.45%) 및 대안3(ECI=0.0%)의 순으로 분석되었다.

표 13. 성과측정 및 경제성평가 분석 결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
대안별 LCC차(DLCC)	343.73	561.65	439.27	0.00
회수배율1안(HI1)	0.3126	0.5362	0.4589	0.00
회수배율2안(HI2)	0.6931	1.0246	0.6880	0.00
경제성 평가(ECI)	16.455	26.888	21.029	0.00

안벽구조물에 대한 VE/LCC 분석결과를 바탕으로 대안별 유지관리전략을 분석한 결과를 표 14에 정리하였다.

표 14의 대안별 유지관리전략 분석결과와 각종 지수 값을 종합 분석해 보면, 대안1의 결과가 유지관리전략 측면에서 가장 유

표 14. 대안별 유지관리전략 분석결과

구분	원안	대안1	대안2	대안3
보수·보강전의 잔여수명(년)	2.61	6.68	2.55	5.95
보수·보강후의 잔여수명(년)	23.68	26.94	23.64	26.36
잔여수명의 증가분(년)	21.07	20.26	21.09	20.41
보유성능지수	0.7821	0.8283	0.7813	0.8212
퍼지신뢰성지수($\beta(t_o)$)	2.4213	2.6356	2.4179	2.6031
파괴확률(P_f)	0.0077	0.0042	0.0078	0.0046
1차보수시기(년)	30.79	34.71	30.74	33.01
2차보수시기(년)	52.01	55.19	51.97	54.62
3차보수시기(년)	73.23	75.67	73.19	75.23

리하게 도출되고 있으며, 이러한 분석을 통하여 보다 합리적인 유지관리전략을 세울 수 있을 뿐만 아니라 경제적 측면의 가치 창출을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 기존의 방법은 단순히 전문가의 설문조사에 의한 AHP 분석결과와 성능평가를 수행하고, 확정론적 방법에 의해 LCC를 산정하여 가치분석을 수행하고 있기 때문에 생애주기 동안에 발생하는 외관상태와 구조적 또는 물리적 열화성능에 대한 유지관리전략 및 유지관리 조치수준을 전혀 세울 수 없어 미래에 발생할 유지관리비용과 파괴손실비용을 미리 예측할 수 없는 단점이 있다.

반면에 본 연구의 퍼지신뢰성해석에 의한 확률론적 VE/LCC 분석모델은 열화성능을 고려한 신뢰성 평가곡선을 미리 예측함으로써 대안별 구조신뢰성 및 유지관리조치에 대해 사후유지관리를 할 것인가 아니면 예방유지관리수준으로 할 것인가 비교 분석할 수 있는 장점이 있고, 대상 안벽구조물의 관리주체가 가치분석을 위한 평가지표를 미리 예측 분석할 수 있기 때문에 보다 실용적이고 과학적인 방법이라고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 안벽구조물의 VE/LCC분석에 있어 퍼지신뢰성해석에 따라 파괴확률을 파괴손실비용에 반영할 수 있는 확률론적 VE/LCC 분석모델을 제안하고, 실제 안벽구조물의 대상사업에 적용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 안벽구조물의 형식선정을 위한 VE/LCC 분석에서 보다 체계적인 비용항목 분류를 통한 생애주기비용의 산정과 AHP기법을 활용한 성능평가를 통해 비용과 성능면에서 가장 유리한 최적대안을 선정할 수 있었다.

(2) 퍼지신뢰성해석에 따라 안벽구조물의 생애주기 동안의 유지관리비용과 파괴손실비용까지 포함한 LCC를 산정하여 가치분석을 수행함으로써 기존의 확정론적 VE/LCC 분석 방법보다

과학적이고 합리적인 유지관리전략을 고려한 설계대안을 선정할 수 있었다.

(3) 안벽구조물의 생애주기비용 산정과 가치분석의 실무 적용에 있어 이론적 모델과 표준지침 및 소프트웨어 등이 정립되어 있지 않기 때문에 분석자에 따라 일관성과 전문성에 한계를 나타내는 문제점을 본 연구모델의 발전을 통해 보완해 나갈 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), 안전점검 및 정밀안전진단세부 지침(항만).
2. 안종필, 박주원, 유덕찬(2007), “퍼지 신뢰성 이론에 의한 방파제의 VE/LCC 분석모델”, 한국건설관리학회논문집, 제8권 제3호, pp.159~167.
3. 유덕찬(2007), “퍼지신뢰성 이론에 의한 항만구조물의 VE/LCC 분석에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 박사학위논문.
4. 김규덕, 손영현, 박주원, 최미라, 이증빈(2007), “철근콘크리트 구조물의 신뢰성 기반 내구성해석 및 설계”, 한국구조물진단학회 봄학술발표회논문집, 제11권 1호, pp.115~122.
5. 한국해양연구원(2000), “항만구조물 신뢰성해석 관련자료 (1)”.
6. 한국해양연구원(2000), “항만구조물 신뢰성해석 관련자료 (2)”.
7. 현대건설주식회사(2003), “광양항 제3단계 컨테이너부두 개발공사 VE/LCC 보고서”.
8. Hines, J(1997), “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering”, Wiley Inter · Science
9. 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.
10. Kong, J.S., Frangopol, D.M.(2003), “Life-Cycle Reliability Based Maintenance Cost Optimization of Deteriorating Structures with Emphasis on Bridges”, Journal of Structural Engineering, Vol 129, No.6, pp.818-828.
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(2001), "Reliability Based Design Way for Caisson Type Breakwaters," Journal of The Japan Society of Civil Engineering, No.689, I-57, pp.173-182.
13. 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.
14. Zadeh, L.(1965), "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8.

논문제출일: 2006.07.24

심사완료일: 2007.07.18

Abstract

It is common that the analysis of VE/LCC is performed in design phase of quay wall structures. The analysis is mainly executed based on experience and engineering sense of expert considering the selection of construction method, construction and maintenance cost. Recently there are increasing demands on the analysis that includes uncertainty and vulnerability of input parameters. For this purpose, fuzzy reliability based probabilistic VE/LCC analysis model for quay wall structures is suggested. In VE/LCC analysis for quay wall structures, the application of probabilistic analysis method give very similar results compare with those of deterministic analysis method. 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 probabilistic life cycle cost and value analysis.

Keywords : VE(Value Engineering), LCC(Life Cycle Cost), probabilistic VE/ LCC Analysis, quay wall structures
