

기대 총 건설비 및 허용 활동량을 고려한 방파제 케이슨의 최적설계 Optimal Design of Breakwater Caisson Considering Expected Total Construction Cost and Allowable Sliding Distance

김경숙* · 서경덕*

Kyung-Suk Kim* and Kyung-Duck Suh*

요 지 : 본 연구에서는 직립 방파제 케이슨의 활동량 산정 모델과 케이슨 복구비용 계산 모델을 결합하여 기대 총 건설비 산정 모델을 수립하였다. 직립 방파제 케이슨의 최적 단면은 활동량의 허용 범위 내에서 기대 총 건설비가 최소가 되는 단면으로 정의된다. 활동량의 허용 범위는 방파제 수명 동안의 기대 활동량을 0.1 m로 하는 경우와 방파제 수명 동안의 누적 활동량이 0.3 m를 초과하는 확률을 0.1 이내로 하는 경우를 고려하였다. 또한 할인율 개념을 도입하여 미래 가치로 산정된 복구비용을 현재가치로 환산하였다. 작은 재현주기에 대해서 설계된 케이슨의 경우 잦은 복구 활동으로 인해 할인율을 적용했을 때의 기대 총 건설비용이 할인율을 적용하지 않았을 때보다 작아진다. 수심이 얇을 때 본 설계법이 기존의 결정론적 설계법보다 더 작은 단면을 요구하여 경제적인 설계가 가능하다. 한편, 수심이 얇을 때는 전술한 활동량 허용 기준들이 비슷한 결과를 나타내지만, 깊은 수심에서는 전자가 후자보다 더 큰 단면을 요구한다.

핵심용어 : 최적 설계, 케이슨의 활동, 기대 총 건설비, 할인율

Abstract : In this study, a model to calculate the expected total construction cost has been developed by combining a model to calculate the sliding distance of a caisson of a vertical breakwater and a model to calculate the rehabilitation cost of a caisson. The optimal cross-section of a caisson of a vertical breakwater is defined as the cross-section that requires a minimum expected total construction cost within the allowable limit of caisson sliding. Two allowable limits are considered: 0.1 m of the expected sliding distance during the lifetime of the breakwater and 0.1 of the probability that the cumulative sliding distance during the lifetime of the breakwater is greater than 0.3 m. A discount rate has also been introduced to convert the future rehabilitation cost to the present value. The introduction of the discount rate reduces the expected total construction cost for the caissons designed for shorter return periods due to frequent rehabilitations. The present design method requires a smaller cross-section than the conventional deterministic method in shallow water depths, enabling us to design a caisson more economically. On the other hand, the above-mentioned allowable limits of caisson sliding show similar results for smaller water depths, while, for larger depths, the former requires a larger cross-section than the latter.

Keywords : optimal design, sliding of caisson, expected total construction cost, discount rate

1. 서 론

안전계수의 개념에 근거한 종래의 결정론적 설계법은 파괴 정도를 예측할 수 없고 과대설계가 될 수 있으므로, 방파제의 설계에 확률적 개념을 이용한 신뢰성 설계법이 도입되었다. 하지만, 각각의 설계 변수들에 대한 확률적, 통

계적 특성에 대한 자료의 부족과 파괴에 대한 허용 기준의 미비가 신뢰성 설계법의 사용을 제약하는 문제로 대두되고 있다. 설계 변수들의 확률적, 통계적 특성에 대한 자료는 과거의 실험 자료와 현장관측 자료의 해석을 통해 어느 정도 정립이 되었으나, 파괴의 허용 기준에 대해서는 아직 보완되어야 할 부분이 많이 남아 있다. 현재 파괴의 허

*서울대학교 지구환경시스템공학부(Corresponding author: Kyung-Suk Kim, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, San 56-1, Shinlim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul 151-742, Korea. 8129bluesky@hanmail.net)

용 정도를 설정하는 가장 일반적인 방법은 결정론적 설계 방법으로 건설되어 기능이 충분히 발휘되는 방파제에 대하여 다시 신뢰성 해석을 통해 파괴 확률을 산정하고 이를 결정론적 설계법의 안전율과 비교하여 하위수준이나 평균적인 개념으로 결정하는 방법이다. 최근에는 경제성 분석을 이용하는 방법이 제안되고 있으며, 초기 건설비와 방파제가 내용년수 동안 기능을 발휘함에 있어 발생할 수 있는 유지 보수비와 파괴에 따른 손실비 등을 고려하여 이들의 총합이 최소가 되는 단면을 최적 단면으로 정의하고, 이때의 파괴 정도를 목표파괴도로 정의한다. 방파제의 중요도를 설계 단계에서 직접적으로 고려할 수 있으므로, 중요도가 매우 높은 방파제의 경우에는 초기 건설비를 크게 하여 파괴 가능성을 최대한 억제할 수 있으며, 반면에 중요도가 그리 높지 않은 경우에는 초기 건설비와 유지 보수비 등 제반 비용들이 균형적으로 안배되도록 설계하는 방법이다. Voortman et al.(1998), Hussarts et al.(2000), Alfigeme et al.(2000) 여러 연구자들이 기대 총 건설비 최소화 기법을 장래 설계법으로 제시하고 연구하였으며, 국내 연구로는 이(2002)가 있다.

한편, Goda and Takagi(2000)는 Shimosako and Takahashi (1998, 1999)의 연구에 경제성 분석을 더하여 허용 기대 활동량 범위 내에서 기대 총 건설비용이 최소가 되는 최적 단면을 산정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 Hong et al.(2004)이 직립 방파제 케이슨 활동에 대하여 개발한 파향의 변동성을 고려한 레벨3 신뢰성 설계법과 Goda and Takagi(2000)가 제안한 무차원 복구비용 계산 모델을 결합한 후 실질 할인율을 고려하여 기대 총 건설비용을 계산하도록 한다. 또한 현재 가치화 작업시 복구비용을 비반복적인 비용으로 본다. 케이슨 활동에 대한 허용 기준을 Goda and Takagi(2000)와 같이 방파제 수명 동안의 기대 활동량을 0.1 m로 하는 경우와 Goda(2001)처럼 방파제 수명 동안의 누적 활동량이 0.3 m를 초과하는 확률을 0.1 이내로 하는 경우의 결과를 비교해 본다.

2. 기대 총 건설비용 계산

2.1 파괴 정도에 따른 복구비용

총 건설비는 초기 건설비와 복구비용의 합으로 정의된다. 초기 건설비의 산정은 비교적 쉽다. 하지만 파괴에 따른 복구비용은 주어진 단면조건에서 각기 다르게 발생하는 파괴 양상과 이에 따른 파괴 확률에 대해 미래가치로 산정된 복구비용을 현재가치로 환산하여야 하기 때문에 정

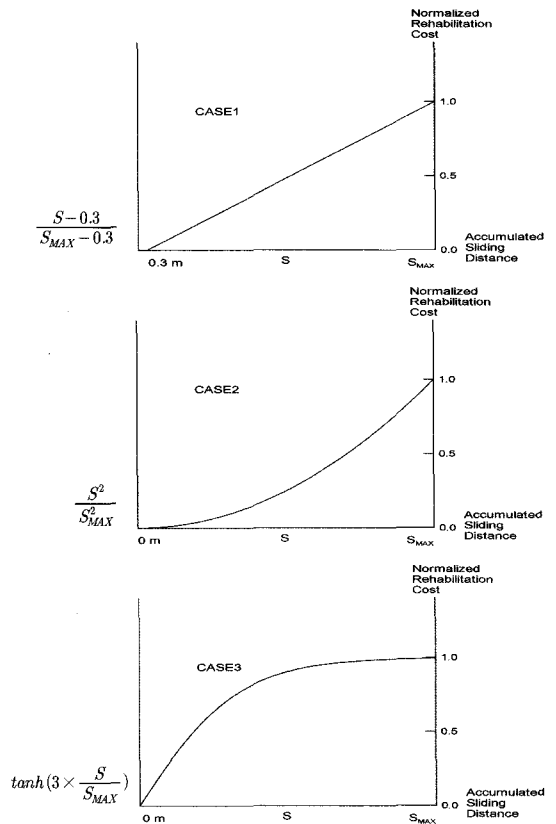


Fig. 1. Three models for estimation of rehabilitation cost as a function of total sliding distance (after Goda and Takagi (2000)).

확한 산정이 곤란하다. 현재 복구비용 계산에 대한 뚜렷한 지침이 없으며 Goda and Takagi(2000)는 Fig. 1과 같이 3가지 모델을 제안했다. 세로축의 복구비용은 초기 건설비용으로 무차원화 한 값이고 가로축은 누적 활동량을 나타낸다. 케이슨이 마운드로부터 이탈하는 기준이 되는 S_{MAX} 는

$$S_{MAX} = b + B/2 \tag{1}$$

로 정의된다. 여기서 b 는 마운드의 후면부 어깨 폭이고 B 는 케이슨의 폭이다.

본 연구에서는 Fig. 1의 3가지 모델 중 Case 1 모델을 수정하여 사용한다. Case 1은 방파제 수명 동안의 누적 활동량 S 가 한계 활동량 0.3 m 이하이면 복구비용이 들지 않고 0.3 m를 넘어서면 복구비용이 선형적으로 증가하는 것으로 가정한다. 즉, 무차원 복구비용 C_r 은

$$C_r = \begin{cases} 0, & S \leq 0.3 \\ \frac{S-0.3}{S_{MAX}-0.3}, & 0.3 < S \leq S_{MAX} \end{cases} \quad (2)$$

이다. S 가 S_{MAX} 를 초과하면, 케이슨이 마운드로부터 이탈한 것으로 본다. 이 경우 복구비용은 S 가 S_{MAX} 의 몇 배인가에 따라 계산 되어진다. 예를 들어 S 가 S_{MAX} 의 2.5배라면 활동에 의해 마운드로부터 이탈한 케이슨을 다시 설치했는데 또 다시 이탈하여 재설치한 후에도 다시 S_{MAX} 의 0.5배만큼 활동이 일어났다고 볼 수 있다. 따라서 복구비용 계산은 케이슨을 새로 설치하는 데 초기 비용과 동일한 비용이 두 번 들고 S_{MAX} 의 0.5배에 해당하는 복구비용을 더해줘야 한다. 방파제 수명 동안에 케이슨이 마운드로부터 이탈하는 횟수 N_f 는 S 를 S_{MAX} 로 나누었을 때 정수 부분에 해당하는 값이다.

$$N_f = INT\left(\frac{S}{S_{MAX}}\right) \quad (3)$$

케이슨 재설치 후에 발생하는 잔여 활동량은

$$S_{res} = S - N_f S_{MAX} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 이는 케이슨이 마운드로부터 이탈하는 기준인 S_{MAX} 에 케이슨의 이탈 회수를 곱한 값을 누적 활동량에서 빼 준 것이다. 잔여 활동량 S_{res} 가 0.3 m 이하이면 복구를 하지 않고 0.3 m 이상이면 복구비용이 선형적으로 증가한다고 가정한다. 즉,

$$C_r = \begin{cases} N_f, & S_{res} \leq 0.3 \\ N_f + \frac{S_{res}-0.3}{S_{MAX}-0.3}, & 0.3 < S_{res} \leq S_{MAX} \end{cases} \quad (5)$$

이다.

이같이 계산된 복구비용 C_r 은 실제 복구비용을 초기 건설비로 무차원화 시킨 값으로 구해진 값에 초기 건설비를 곱하면 실제 복구비용을 구할 수 있다. 실제적으로 방파제의 피해 정도는 다양한 형태로 나타나며 복구 정도에 대해서는 관리자의 주관에 의존하는 경향이 크다. 때문에 Goda and Takagi(2000)가 제시한 Fig. 1이 비용계산에 있어 파괴의 모든 현상을 포함한 절대적인 모델은 아님을 말해준다. 또한 본 연구에서는 케이슨이 마운드로부터 이탈하여 완전 파괴가 일어나는 경우 초기 건설비만큼의 복구비용만 든다고 가정하였는데, 실제로는 항만의 운용 중단 등에 따른 간접 손실비를 추가로 고려해야 할 것이다.

2.2 현재 가치화

구조물의 내용년수 동안 발생하는 총 건설비용에 대한 분석에 있어 필요한 작업은 크게 두 가지로 요약할 수 있다. 하나는 구조물의 전체 내용년수 동안에 걸쳐 발생하는 의미 있는 비용을 항목별로 선정하여 화폐가치로 평가하는 절차와 일정 시점을 기준으로 화폐가치를 환산하는 절차가 필요하다. 본 연구에서는 구조물 내용년수 동안 발생하는 비용은 초기 건설비용과 복구비용만을 고려하도록 한다.

화폐의 가치는 시간에 따라 변화한다. 따라서 일정 시점의 금액을 기준 시점의 화폐가치로 환산하기 위해서 할인율(discount rate)을 사용하게 된다. 즉, 동일한 기준이 되는 시점을 정하고 어떤 조건에 의해 발생하는 현재 비용과 미래 비용을 공통의 시점으로 환산해야 한다. 이같이 발생한 시점이 다른 비용을 동일한 시점의 가치로 환산하는 방법에는 대등 균일 연간 비용법과 현재 가치법이 있다.

대등 균일 연간 비용법이란 생애주기에 발생하는 모든 비용이 매년 균일하게 발생한다고 가정할 경우, 이와 대등한 비용은 얼마인가라는 개념을 이용하여, 균일한 연간 비용으로 환산하는 방법이다. 즉, 어떤 시점의 비용을 매년 균일하게 분할하여 지불한다고 가정할 경우에 이 균일한 비용과 대등한 금액으로 환산하는 방법이다.

현재 가치법은 생애주기에 발생하는 모든 비용을 일정한 시점을 기준으로 환산하는 방법으로 기준시점은 통상적으로 초기 비용이 발생한 시점을 기준으로 한다. 본 연구에서는 기준 시점을 초기 건설비용과 동일한 시점으로 환산하는 현재 가치법을 이용한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PV = \sum_{n=1}^L \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (6)$$

여기서 PV =미래에 발생하는 비용의 현재가치, C_n = n 년 후에 발생하는 비용, r =할인율, L =내용년수이다.

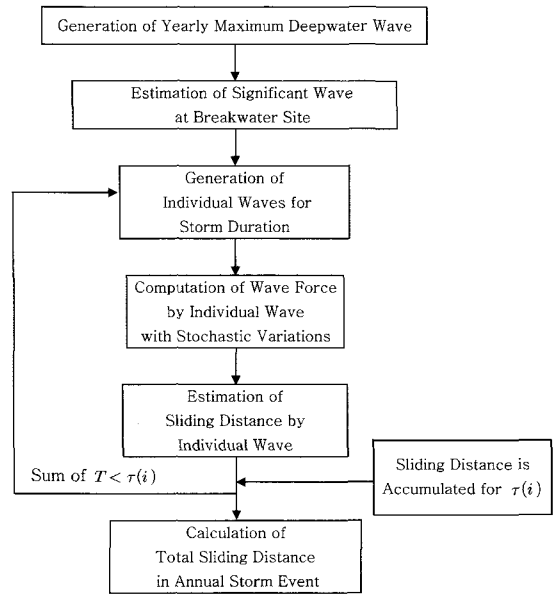
본 연구에서는 물가 상승률과 이자율을 고려한 실질 할인율을 식 (6)의 r 대신 사용하며, 실질 할인율을 산출하는 방법은 식 (7)과 같다.

$$I = \frac{1+i}{1+j} - 1 \quad (7)$$

여기서 I = 실질 할인율, i = 이자율, j = 물가 상승률이 다.

3. 최적설계 계산절차

계산 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 심해파고의 극치 분포 함수로 Weibull 분포를 이용하여 예비 설계 파고를 선택한다. 예비 설계 파고는 재현기간의 변화에 따른 파고로 케이슨 단면 결정을 위한 요소이다. 보통 예비 설계 파고는 방파제 내용년수의 0.5배 내지 2배 범위의 재현주기에 해당하는 범위에서 변화하는 것으로 선택한다. 이 범위 내에서 최적 단면이 결정되지 않을 경우에는, 최적값에 도달할 때까지 예비설계 파고의 범위를 확장하여 계산하도록 한다. 각각의 예비 설계파고에 대한 방파제 케이슨의 단면은 종래의 결정론적 설계법에 의해 안전 계수 1.2를 갖는 단면으로 설계하고, 초기 건설비를 계산한다. 새로운 설계법을 도입함에 있어 종전의 설계법과의 연계성을 고려하는 것이 중요하기 때문에 본 연구에서는 Goda(2001)와 마



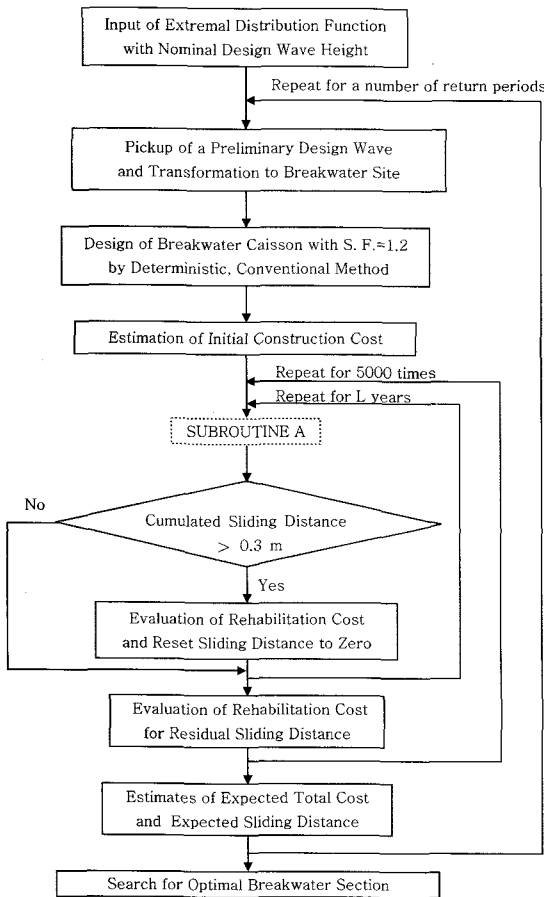
(b) SUBROUTINE A (Computation of total sliding distance)

Fig. 2. Continued.

참가지로 안전 계수를 1.2로 하여 계산했다. 복구비용 계산의 중요 변수라 할 수 있는 케이슨의 활동량에 대한 계산은 Hong et al.(2004)과 동일하게 하였으며 파향의 변동성은 고려하지 않고 s_{max} 가 1000인 경우로 계산하였다. 조위는 LWL(=0.0 m)과 HWL(=0.5 m)사이에서 삼각분포를 따른다고 가정하였고, 파의 주기(T)는 Goda(2001)와 같이 파고(H)와 $T \approx 3.3 H^{0.63}$ 의 관계로 계산하였다. Fig. 2에서 τ 는 폭풍 지속시간이며, 본 연구에서는 2 시간을 사용하였다. Table 1에 활동량 계산에 사용된 설계 변수들의 편의와 편차계수를 나타내었다.

Goda and Takagi(2000)는 충격 쇄파력만을 고려하여 케이슨의 활동량을 해석적으로 구하였다. 본 연구에서 사용한 Hong et al.(2004)의 방법은 충격 쇄파력과 중복파력을 모두 고려하며 케이슨의 활동에 대한 운동 방정식을 시간에 대해 수치 적분하여 활동량을 계산한다. 만일 서로 다른 활동량 계산 방법을 사용한 결과를 비교하면 할인율 적용 여부에 따른 차이를 파악할 수 없기 때문에, 본 연구에서 언급되는 Goda and Takagi의 결과는 활동량은 Hong et al.(2004)의 방법으로 계산하고 할인율은 고려하지 않은 것임을 밝혀 둔다.

복구비용은 Goda and Takagi(2000)가 제안한 무차원 복구비용 계산 모델(Fig. 1) 중 Case1 모델을 수정하여 실질 할인율을 적용하여 계산한다. Goda and Takagi(2000)



(a) Computational flow

Fig. 2. Computational procedure for optimal breakwater design.

Table 1. Characteristics of variations of design factors

Design factors	Bias	Deviation Coefficient	Distribution Function	Remarks
Offshore wave height	0.0	0.1	Normal	Mean by extrm. dist.
Water level	-tide amplit.	*	Triangular	-
Wave deform.	-0.06	0.1	Normal	-
Friction coef.	0.0	0.1	Normal	$\mu = 0.6$ as the base
Individual wave	*	*	Rayleigh	2-hours duration
Wave forces	-0.09	0.1	Normal	-
Storm surge	0.0	0.1	-	Standard is 10% offshore wave height
Significant wave period	0.0	0.1	Normal	-
Period for an individual wave	0.0	0.1	Normal	-

는 할인율을 고려하지 않았기 때문에 방파제 수명 동안의 누적 활동량을 계산하고 이로부터 식 (2)~(5)를 이용하여 복구비용을 산정하였다. 그러나 실질 할인율을 적용하기 위해서는 복구 활동이 발생하는 시점을 찾아내는 것이 중요하다. 본 연구에서는 내용년수 동안에 발생하는 활동량을 누적시키되 그 값이 허용량 0.3 m를 초과하고 S_{MAX} 이하이면 식 (2)의 두 번째 식으로 무차원 복구비용을 계산한다. 복구 활동 이후에는 이전의 누적 활동량은 없다고 보고 다시 활동량을 누적 시킨다. 복구 활동이 발생한 시점에서의 무차원 복구비용에 실질 할인율을 적용하여 현재 가치로 환산한 후 초기 건설비용을 곱하여 복구비용을 계산한다. 본 연구에서는 한 해에 케이슨이 마운드로부터 여러 번 이탈하는 것으로 계산되는 경우 복구비용 계산을 할 때는 케이슨을 1회만 재설치하는 것으로 본다. 예를 들어, 24년까지는 누적 활동량 S 가 0.3 m 이하였다가 25년째에 누적 활동량 S 가 S_{MAX} 의 2.5배가 된다면 복구비용을 케이슨 재설치 비용의 2.5배로 하는 것이 아니라 1회 설치비용으로 계산을 하며 계산상 존재하였던 잔여 누적 활동량은 케이슨을 재설치 함으로써 0이 된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_r = \begin{cases} 0, & S \leq 0.3 \\ \frac{S-0.3}{S_{MAX}-0.3}, & 0.3 < S \leq S_{MAX} \\ 1, & S > S_{MAX} \end{cases} \quad (8)$$

본 연구에서의 복구 활동은 반복 활동이 아닌 비반복 활동에 대한 것이므로 현재 가치화 작업시 비반복 비용으로 계산한다. 최종적으로 내용년수(L)의 마지막 해에 현재 가치화 작업을 통한 잔여량의 복구비용과 앞에서 언급한 케이슨 활동 및 이탈에 대한 복구비용을 합하여 내용년수 동

안의 총 복구비용을 계산한다. 내용년수 동안에 발생하는 총 복구비용은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{reh} = \sum_{f=1}^F C_i \times \frac{C_r}{(1+D)^{n(f)}} + C_i \times \frac{C_{res}}{(1+D)^L} \quad (9)$$

$$C_{res} = \begin{cases} 0, & S_{res} \leq 0.3 \\ \frac{S_{res}-0.3}{S_{MAX}-0.3}, & 0.3 < S_{res} \leq S_{MAX} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 C_i =초기 건설비용, C_{res} =내용년수 마지막 해의 무차원 복구비용, C_{reh} =내용년수 동안 발생하는 총 복구비용, $n(f)$ =f번째 케이슨 복구가 발생한 년 수, F =사용기간 중의 총 케이슨 복구 횟수, S_{res} =내용년수 마지막 해의 잔여 활동량이다.

Monte-Carlo 추출법을 사용하는 본 계산은 파랑, 조위, 파력 등의 불확실성을 고려하기 위해서 여러 번 반복계산을 수행할 필요가 있다. 그래서 여기까지의 과정을 1회의 시행이라 하고, 난수를 바꿔가면서 5000회 반복하여 각 시행에서 구해진 복구비용의 평균치를 구하여 초기 건설비용에 더해줌으로써 기대 총 건설비용을 구한다.

$$E[C_{reh}] = \frac{\sum_{m=1}^M (C_{reh})_m}{M} \quad (11)$$

$$E[C_i] = C_i + E[C_{reh}] \quad (12)$$

여기서 $E[C_i]$ =기대 총 건설비용, M =시행 횟수(본 연구에서는 5000), $E[C_{reh}]$ =기대 복구비용이다.

전술한 계산 과정은 하나의 예비 설계과고에 대한 것이다. 이러한 계산을 여러 예비 설계 과고에 대하여 수행함

으로써 예비 설계 파고와 기대 총 건설 비용간 관계를 도출해 낼 수 있다. 각 파고에 대한 기대 총 건설비용을 그림으로 나타내고 활동량 허용 범위 내에서 기대 총 건설 비용이 최소가 되는 최적 단면을 찾는다.

4. 계산예제

4.1 할인율 영향 검토

계산 조건은 Fig. 3과 같다. 수심에 관계없이 사석 마운드의 두께는 2.5 m, 마운드 보호공의 높이는 1.5 m, 마루 높이 $h_c = 0.6 H_{1/3}$ 이다. 마운드의 어깨폭은 전면부 10 m, 후면부 7.0 m이다. 예비 설계 파고를 비롯한 심해파고의 Weibull 분포의 파라미터들은 $A=1.7, B=2.59, k=1.0$ 이며, 유의 파고의 주기는 $T_{1/3} = 3.3 H_{1/3}^{0.63}$ 의 값을 갖는다. 조차는 0.0 m에서 0.5 m까지 0.5 m의 범위를 갖는다. 바닥경사는 1/100 이고 파의 입사각은 0° 이다. 실질 할인율은 권(2004)이 LCC 분석에 이용한 경제지표 통계자료를 참고로 계산하여 4.6%를 적용하였다. 수심 19 m에서 재현주기 50년에 상응하는 설계파고는 $(H_{1/3})_{0D} = 9.24$ m이고, 파의 주기는 $(T_{1/3})_{0D} = 13.4$ s이다. 고조위일 때 방파제 전면부에서의 유의파고는 9.41 m이다. 이러한 설계파고에 대하여 안전계수 1.2를 갖는 결정론적 설계법에 의한 케이슨의 단면 폭은 21.23 m이다.

Fig. 4는 수심 19 m에서 Goda and Takagi(2000)처럼 할인율을 고려하지 않고 계산한 경우와 할인율을 고려한 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 가로축은 재현주기이며, 오른쪽 세로축은 해당 재현주기에서 기대 총 건설비용을 재현주기 50년에 해당하는 케이슨의 초기 건설비용으로 무차원화한 값이다. 왼쪽 세로축은 각각의 재현주기에 해당하는 예비 설계 파고로 계산되어진 단면의 기대 활동량을 나타낸다.

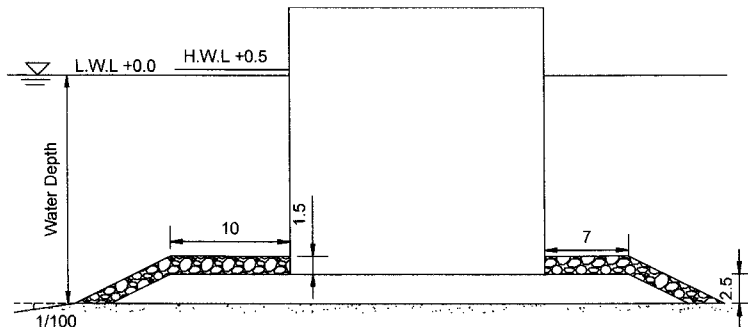


Fig. 3. Cross-section of vertical breakwater for computation (unit : m).

Water Depth : 19 m, Slope : 1/100, Tidal Range : 0.5 m
Real Discount Rate : 4.6%, Cost Model : CASE1

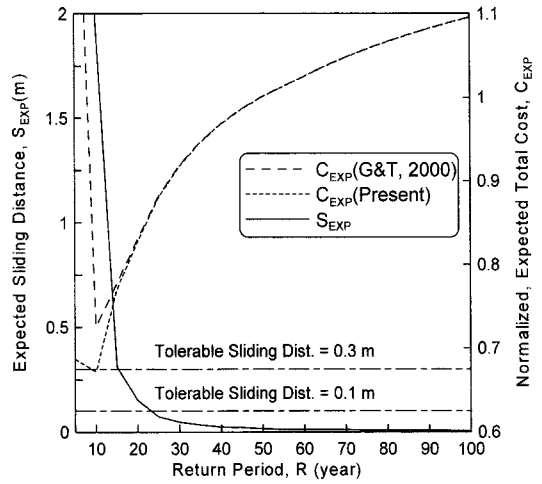


Fig. 4. Curves of expected total cost and expected sliding distance for breakwater design in water depth of 19 m.

할인율을 고려하지 않은 경우 기대 총 건설비용이 최소가 되는 점은 약 10년의 재현주기를 갖는 설계 파고로 설계되어진 단면으로 결정론적 설계법과 비교하여 약 25%의 비용이 감소하며 기대 활동량은 약 1.8 m가 된다. 할인율을 고려한 경우에도 비용이 최소가 되는 점은 재현주기 10년의 설계파고로 설계되어진 단면이다. 이 경우 결정론적 설계법에 비해 비용이 약 30%이상 감소하며 기대 활동량은 약 1.8 m가 된다. 기대 총 건설 비용이 최소가 되는 조건만 고려할 경우 기대 활동량이 너무 클 수도 있으므로 적절한 활동량의 허용 범위 내에서 비용이 최소가 되는 단면을 최적 단면으로 정의한다.

수심 19 m에서는 허용 기대 활동량을 0.3 m로 제한했을 때 할인율을 고려하지 않은 경우와 할인율을 고려한 경

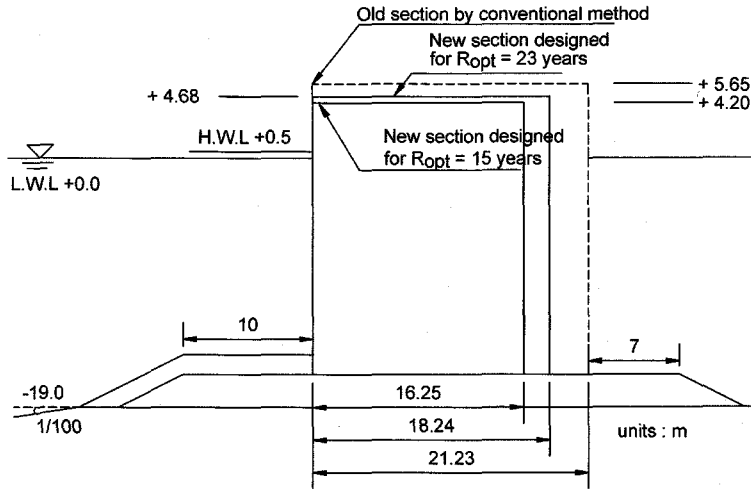


Fig. 5. Comparison of cross-sections designed by conventional and new methods in water depth of 19 m.

Table 2. Comparison of design parameters of conventional and new methods in water depth of 19 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.3$ m	$S_{EXP} = 0.1$ m
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	15	23
Offshore wave height $(H_{1/3})_{0D}$ (m)	9.24	7.19	7.92
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	9.41	6.99	7.81
Crest height h_c (m)	5.65	4.2	4.68
Caisson width B (m)	21.23	16.25	18.24

우 모두 최적 단면은 약 15년의 재현주기를 갖는 설계 파고로 설계되어진 단면이다. 또한 허용 기대 활동량을 0.1 m로 제한했을 때에는 두 경우 모두 약 23년의 재현주기를 갖는 설계 파고로 설계되어진 단면이다. 결정론적 설계법으로 산정된 단면과 각각의 허용 기대 활동량 범위 내에서 비용이 최소가 되는 최적 단면을 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 허용 기대 활동량을 0.3 m로 했을 경우의 단면은 재현주기 15년에 상응하는 설계파고로 계산 되어진 단면으로 결정론적 설계법에 의한 단면보다 23% 감소하였다. 한편 허용 기대 활동량을 0.1 m로 했을 경우에는 결정론적 설계법보다 약 14% 감소하였다. 그 결과는 Table 2와 같다.

Fig. 6은 수심이 14 m인 경우로 비용 계산 곡선의 경우 할인율을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 결과는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 복구비용 계산에 큰 영향을 미치는 케이스의 활동이, 수심 감소에 따른 쇄파의 영향으로, 거의 발생하지 않았기 때문인 것으로 해석되어진다. 허용 기대 활동량을 0.3 m로 제한했을 경우의 최적 단면은 약 7년의 재현주기를 갖는 설계파고로 설계되어진 단면으로, Fig. 7과 Table 3에서 보듯이 결정론적 설계법에

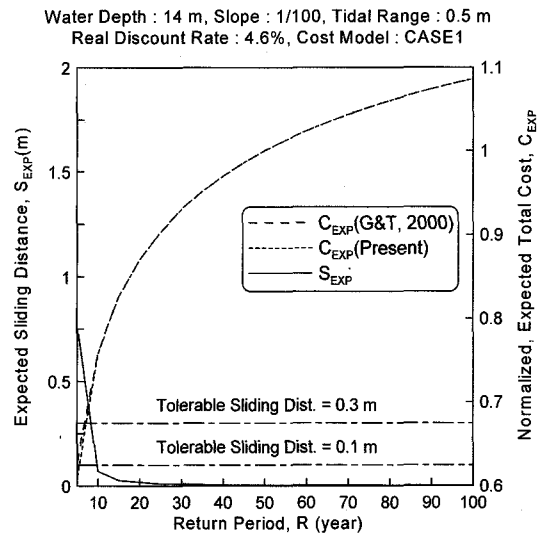


Fig. 6. Curves of expected total cost and expected sliding distance for breakwater design in water depth of 14 m.

의해 계산되어진 단면과 비교해 보았을 때 약 32% 감소하였다. 기대 활동량을 0.1 m로 제한했을 경우에는 약 10

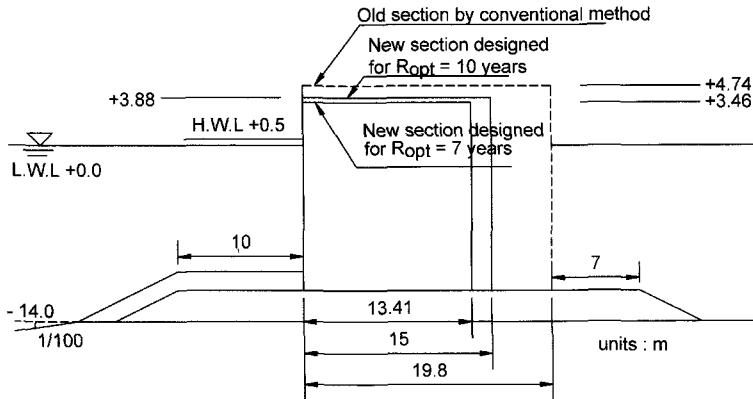


Fig. 7. Comparison of cross-sections designed by conventional and new methods in water depth of 14 m.

Table 3. Comparison of design parameters of conventional and new methods in water depth of 14 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.3 \text{ m}$	$S_{EXP} = 0.1 \text{ m}$
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	7	10
Offshore wave height $(H_{1/3})_{0D}$ (m)	9.24	5.9	6.5
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	7.9	5.77	6.47
Crest height h_c (m)	4.74	3.46	3.88
Caisson width B (m)	19.8	13.41	15

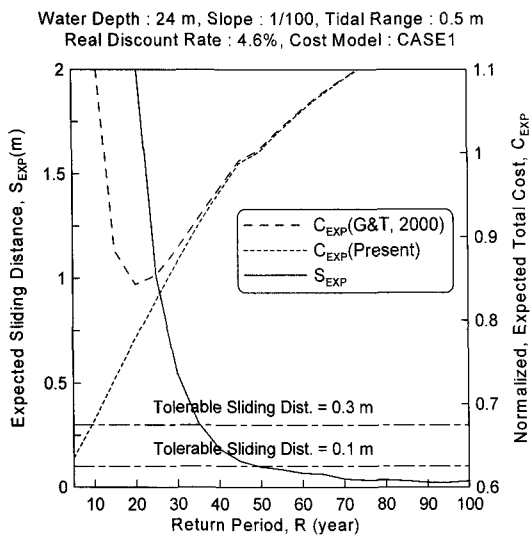


Fig. 8. Curves of expected total cost and expected sliding distance for breakwater design in water depth of 24 m.

년의 재현주기를 갖는 설계파고에 해당하는 단면으로서, 결정론적 설계법에 의해 계산되어진 단면과 비교해 보았을 때 약 24% 감소하였다.

Fig. 8 및 9와 Table 4는 수심 24 m에 대한 결과이다.

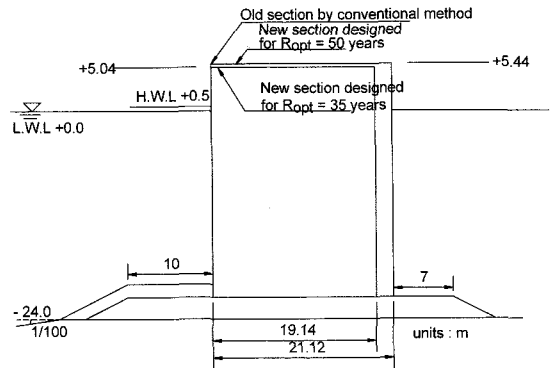


Fig. 9. Comparison of cross-sections designed by conventional and new methods in water depth of 24 m.

허용 기대 활동량을 0.3 m로 제한했을 경우의 최적 단면은 약 35년의 재현주기를 갖는 설계 파고로 설계되어진 단면으로 결정론적 설계법에 의해 계산된 단면보다 9% 감소하였다. 허용 기대 활동량을 0.1 m로 제한했을 경우의 최적 단면은 약 50년의 재현주기를 갖는 설계 파고에 해당되는 단면으로서, 결정론적 설계법으로 계산된 단면과 동일한 단면이다.

할인율을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 결과를 비

Table 4. Comparison of design parameters of conventional and new methods in water depth of 24 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.3$ m	$S_{EXP} = 0.1$ m
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	35	50
Offshore wave height($H_{1/3}$) _{0D} (m)	9.24	8.63	9.24
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	9.07	8.39	9.07
Crest height h_c (m)	5.44	5.04	5.44
Caisson width B (m)	21.12	19.14	21.12

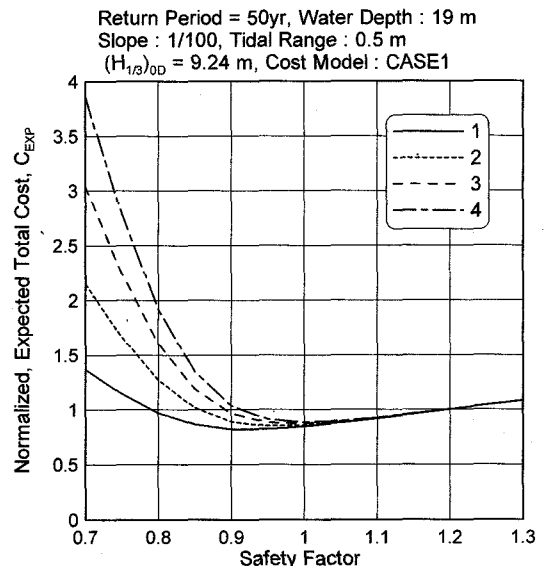
교해보면 예비 설계파고의 재현주기가 클 때 두 결과는 차이를 보이지 않는다. 할인율은 복구비용 계산에 적용되는 것이므로 할인율을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 차이가 없다는 것은 초기에 설계된 단면이 안정하게 설계되어 복구 활동이 발생하지 않았음을 의미한다. 이와 반대로 예비 설계파고의 재현주기가 작은 경우 할인율을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 비용곡선 값이 차이가 나는 것은 복구 활동 발생에 따른 복구비용의 차이에 의한 것이라 할 수 있다.

수심에 따른 결과를 살펴보면 수심이 얇은 경우 할인율의 적용 여부에 따른 차이가 없는 것은 쇄파에 의한 활동량의 감소에 따른 것으로 해석할 수 있다. 수심이 얇은 경우 쇄파의 영향으로 활동이 거의 발생하지 않으며 수심이 깊은 경우에는 활동이 증가하여 복구 활동이 발생한다. 이로 인해 복구 활동에 따른 복구비용이 발생하고, 할인율을 고려한 경우와 할인율을 고려하지 않은 경우의 차이가 나타난다. 한편 Figs. 4~9와 Table 2~4를 종합적으로 분석해보면 수심이 깊은 경우에는 허용 기대 활동량 0.1 m 또는 0.3 m에 해당하는 재현주기가 50년에 가까우며 따라서 케이슨의 단면도 재현주기 50년으로 설계한 결정론적 설계법의 단면과 비슷한 것을 알 수 있다. 반면에 수심이 얇은 경우에는 허용 기대 활동량 0.1 m 또는 0.3 m에 해당하는 재현주기가 50년보다 훨씬 작아지며 따라서 케이슨 단면도 결정론적 설계법으로 설계한 단면보다 작아진다. 결과적으로 활동량의 허용 범위 내에서 기대 총 건설비를 최소로 하는 본 연구의 방법을 사용하면 수심이 얇은 경우 기존의 결정론적 설계법보다 경제적인 설계가 가능하다. 그러나 수심이 아주 깊은 경우에는 본 연구의 방법을 적용했을 때 최적 재현주기가 50년보다 커질 수가 있고 따라서 기존의 설계법보다 더 큰 단면을 요구하게 될 가능성도 있다.

복구비용은 방파제의 파괴에 따른 구조물의 직접적인 재산상의 손실과 항만 운용불가에 따라 사회적으로 발생하는 간접적인 손실 등으로 세분화 되어 산정되어야 하나 본

연구에서는 방파제 케이슨의 직접 설치에 대한 부분만을 고려하였다. 파괴에 따른 직·간접적인 손실을 세분화한 자료가 Hussarts et al.(2000)과 星谷과 石井(1986)에 자세히 언급되어 있으나 간접적인 손실을 정확히 산정하지 못하고 초기 건설비용의 배율 개념으로 나타내었다. 간접비용은 구조물의 중요도와 인명 손실 여부에 따라 매우 다르게 산정될 수 있기 때문에 정확한 산정을 위해서는 경제분야의 전문가의 도움이 필요한 것으로 생각된다. 본 연구에서는 활동량의 허용 범위 내에서의 기대 총 건설비 최소화에 중점을 두었으므로 간접비용의 세부적인 내용에 대해서는 생략하였다.

Fig. 10, 11, 12는 복구비용을 계산함에 있어 변수가 되는 요소들의 영향을 나타낸 것으로 재현주기 변화에 따른 예비 설계파고 대신 안전계수 변화에 따른 결과로 나타내었다. 재현주기 50년에 대한 설계파고를 가지고 안전계수

**Fig. 10.** Variation of expected total cost as a function of safety factor for several rehabilitation costs (not considering discount rate).

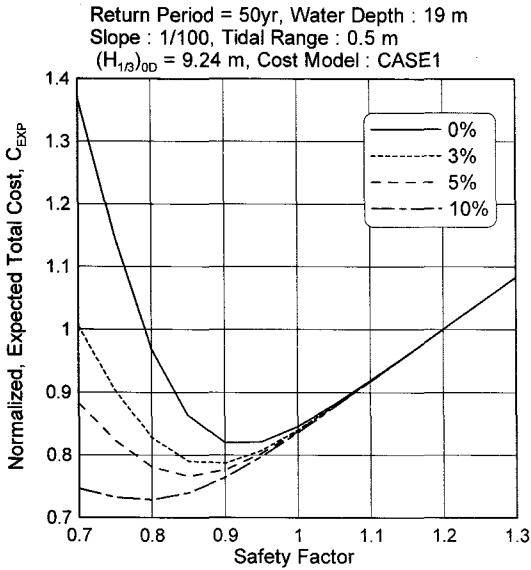


Fig. 11. Variation of expected total cost as a function of safety factor for several real discount rates.

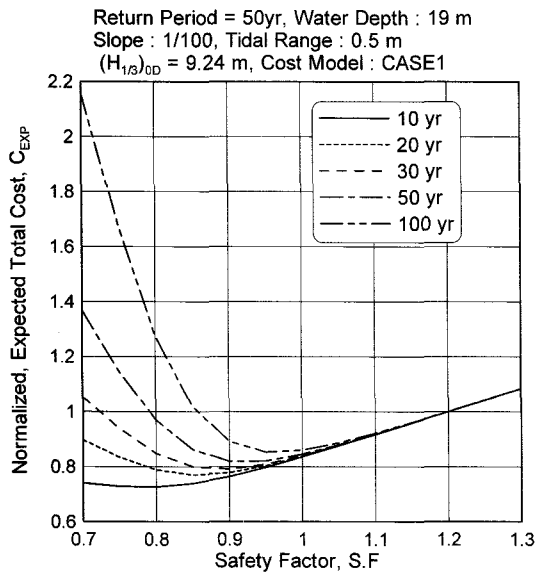


Fig. 12. Variation of expected total cost as a function of safety factor for several lifetimes (not considering discount rate).

의 변화에 따라 계산 되어진 단면들의 기대 총 건설비용을 안전계수가 1.2인 단면의 초기 건설비용으로 무차원화 시킨 값이다.

Fig. 10은 케이슨이 이탈하였을 때의 복구비용이 초기 건설비용의 1, 2, 3, 4배 일 때 무차원 기대 총 건설비를 나타내며 할인율은 고려하지 않았다. 예상되는 바와 같이 복

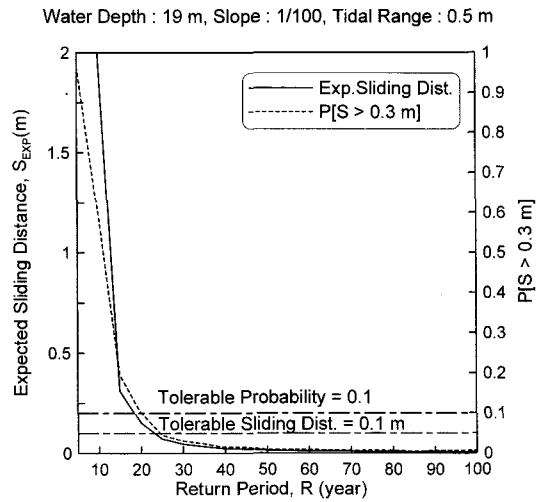


Fig. 13. Comparison of designs based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1 in water depth of 19 m.

구 활동에 드는 비용이 증가할수록, 기대 총 건설비용이 크게 산정된다. 이러한 경향은 안전율이 작을수록 더 현저하게 나타나는데, 안전율이 작으면 복구 활동이 더 빈번하게 발생하고 따라서 복구비용 증가에 따른 기대 총 건설비 증가가 뚜렷해진다.

Fig. 11은 실질 할인율의 변화에 따른 영향을 나타낸 것이다. 동일한 복구 활동에 대해서 할인율이 작아질수록 현재가치는 증가하므로, 실질 할인율이 감소할수록 기대 총 건설비용은 크게 산정된다. 또한 안전율이 작을 때 복구 활동이 빈번히 발생하여 실질 할인율 차이에 따른 기대 총 건설비의 차이가 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 12는 내용년수의 변화에 따른 영향을 해석한 결과로 복구비용은 초기 건설비용과 동일하다고 가정했으며 할인율은 고려하지 않았다. 내용년수가 증가함에 따라 기대 총 건설비도 증가함을 알 수 있다. 이는 내용년수가 증가하게 되면 케이슨의 활동이 증가하게 되고 이에 따른 복구 활동의 증가로 복구비용의 증가가 발생하기 때문이다. 또한 안전율이 감소할수록, 즉 초기에 산정된 단면이 작을수록, 내용년수 변화에 따른 차이가 뚜렷해짐을 알 수 있다.

4.2 활동량 허용 기준에 따른 결과 검토

앞 절에서의 결과를 보면 최적 단면 선정이 비용 극선 보다는 활동량의 허용 기준을 얼마로 하느냐에 따라서 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. Shimosako and Takahashi (1998, 1999)는 내용년수 동안의 허용 기대 활동량을 0.3 m로 제안했으며 Goda and Takagi(2000)는 0.1 m를 제안

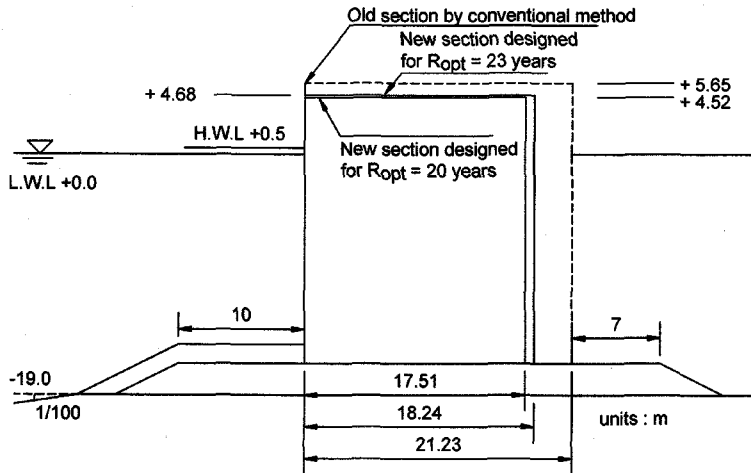


Fig. 14. Comparison of cross-sections designed by conventional method and new methods based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1 in water depth of 19 m.

Table 5. Comparison of design parameters of conventional method and new methods based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1 in water depth of 19 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.1$ m	$P[S > 0.3$ m] = 0.1
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	23	20
Offshore wave height $(H_{1/3})_{0D}$ (m)	9.24	7.92	7.68
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	9.41	7.81	7.54
Crest height h_c (m)	5.65	4.68	4.52
Caisson width B (m)	21.23	18.24	17.51

하였다. 이후 Goda(2001)는 내용년수 동안의 누적 활동량이 0.3 m를 초과하는 확률(이하 $P[S > 0.3$ m]) 0.1을 한계 허용 확률로 제안하였다. 본 절에서는 허용 기준을 Goda and Takagi(2000)가 제안한 기대 활동량 0.1 m와 Goda(2001)가 제안한 $P[S > 0.3$ m]를 0.1로 했을 때의 결과를 비교하여 본다. 계산조건은 4.1 절과 동일하다.

Fig. 13은 수심 19 m일 때의 결과를 비교한 것이다. 왼쪽의 세로축은 기대 활동량을 나타내며, 오른쪽은 내용년수 동안의 누적 활동량이 0.3 m를 초과하는 확률을 나타낸다. 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하는 경우 최적 단면은 약 23년의 재현주기에 해당하는 단면이다. $P[S > 0.3$ m]가 0.1인 값을 허용 기준으로 하였을 경우 최적 단면은 약 20년의 재현주기에 해당하는 단면이다. 이와 같은 활동량 허용 기준에 해당하는 단면들과 기존의 결정론적 설계법으로 설계된 단면을 Fig. 14에 제시하였다. 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하였을 경우 결정론적 설계법에 의한 단면보다 14% 단면 감소 결과를 보였으며, $P[S > 0.3$ m] = 0.1인

경우에는 18%의 단면 감소 결과를 보였다. 그 결과는 Table 5와 같다.

Fig. 15와 Fig. 17은 다른 수심에서의 결과를 나타낸 그래프이다. 수심 14 m일 때의 Fig. 15를 보면 허용 기대 활동량을 0.1 m로 한 경우 최적 단면은 약 10년의 재현주기에 해당된다. $P[S > 0.3$ m] = 0.1인 경우의 최적 단면 역시 약 10년의 재현주기에 해당된다. Fig. 16은 이 단면들을 그림으로 나타낸 것으로 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하였을 경우와 $P[S > 0.3$ m] = 0.1인 경우 모두 결정론적 설계법에 의한 단면보다 24% 감소 결과를 보였다. 그 결과는 Table 6과 같다. 수심 24 m일 때의 Fig. 17을 보면 허용 기대 활동량을 0.1 m로 한 경우 최적 단면은 약 50년의 재현주기에 해당되며, $P[S > 0.3$ m] = 0.1인 경우 최적 단면은 약 40년의 재현주기에 해당된다. Fig. 18은 이 단면들을 그림으로 나타낸 것으로 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하였을 경우에는 결정론적 설계법에 의한 단면과 동일한 결과를 보였으며, $P[S > 0.3$ m] = 0.1인 경우에는 5%의

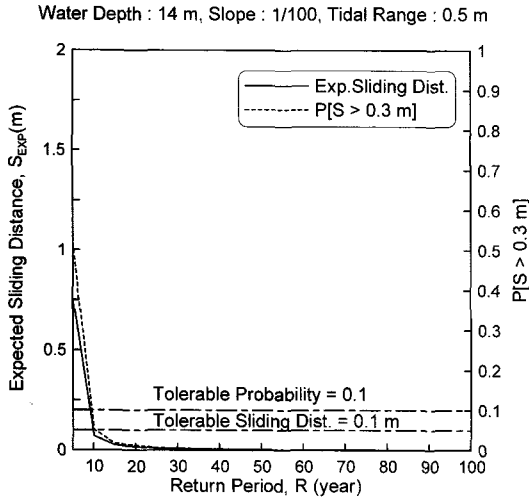


Fig. 15. Comparison of designs based on $S_{EXP}=0.1$ m and $P[S > 0.3 \text{ m}] = 0.1$, in water depth of 14 m.

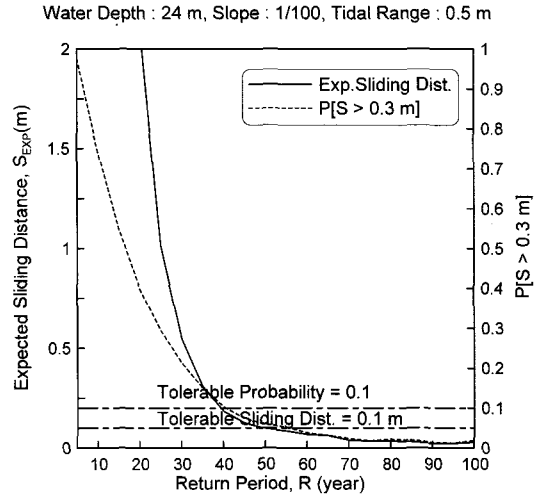


Fig. 17. Comparison of designs based on $S_{EXP}=0.1$ m and $P[S > 0.3 \text{ m}] = 0.1$, in water depth of 24 m.

단면 감소 결과를 보였다. 그 결과는 Table 7과 같다.

Figs. 13~18 및 Table 5~7을 종합적으로 분석해 보면, 앞절에서 얻어진 결과와 마찬가지로, 수심이 깊은 경우에

는 새로운 설계법에 의한 케이슨 단면이 기존의 결정론적 설계법으로 설계한 단면과 큰 차이를 보이지 않는 반면, 수심이 얇은 경우에는 새로운 설계법이 더 작은 단면을 요

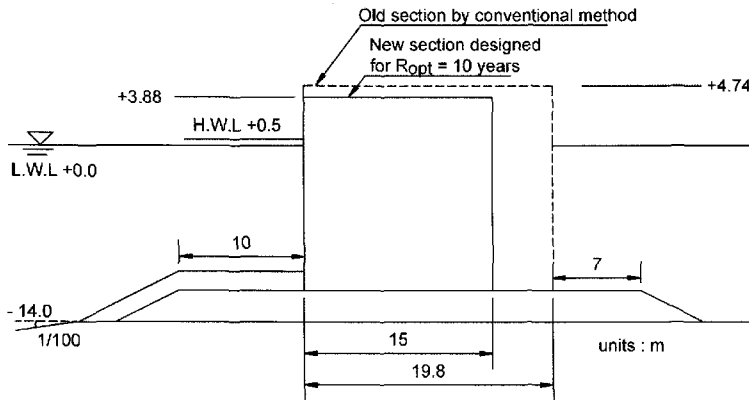


Fig. 16. Comparison of cross-sections designed by conventional method and new methods based on $S_{EXP}=0.1$ m and $P[S > 0.3 \text{ m}] = 0.1$ in water depth of 14 m.

Table 6. Comparison of design parameters of conventional method and new methods based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3 \text{ m}] = 0.1$ in water depth of 14 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.1$ m	$P[S > 0.3 \text{ m}] = 0.1$
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	10	10
Offshore wave height $(H_{1/3})_{OD}$ (m)	9.24	6.5	6.5
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	7.9	6.47	6.47
Crest height h_c (m)	4.74	3.88	3.88
Caisson width B (m)	19.8	15	15

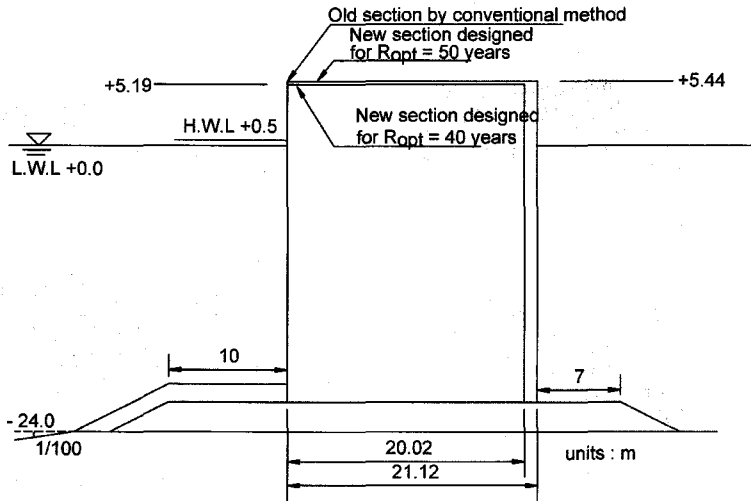


Fig. 18. Comparison of cross-sections designed by conventional method and new methods based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1 in water depth of 24 m.

Table 7. Comparison of design parameters of conventional method and new methods based on $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1 in water depth of 24 m

Item	Conventional	$S_{EXP} = 0.1$ m	$P[S > 0.3$ m] = 0.1
Safety factor	1.2	1.2	1.2
Return period R (year)	50	50	40
Offshore wave height $(H_{1/3})_{0D}$ (m)	9.24	9.24	8.86
Local wave height $H_{1/3}$ (m)	9.07	9.07	8.64
Crest height h_c (m)	5.44	5.44	5.19
Caisson width B (m)	21.12	21.12	20.02

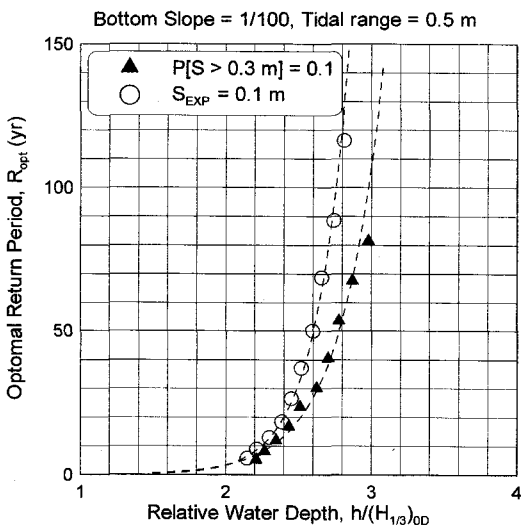


Fig. 19. Optimal return period versus relative water depth for $S_{EXP} = 0.1$ m and $P[S > 0.3$ m] = 0.1.

구함으로써 경제적인 설계가 가능함을 보인다.

Fig. 19는 허용 기준 $S_{EXP} = 0.1$ m 또는 $P[S > 0.3$ m] = 0.1에 대하여 수심에 따른 최적 재현주기를 나타내고 있다. 점선으로 나타낸 곡선은 지수함수로 나타낸 회귀 곡선이다. 예를 들어 수심 $h \approx 2.8(H_{1/3})_{0D}$ 일 때 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하였을 경우 최적 재현주기는 약 120년이며, 이때의 최적 단면은 재현주기 120년에 상응하는 예비 설계파고로 계산되어진 단면이다. 한편 $P[S > 0.3$ m] = 0.1인 경우 최적 재현주기는 약 55년으로 이 때의 최적 단면 또한 재현주기 55년에 상응하는 예비 설계파고로 계산 되어진 단면이다. $h \approx 2.4(H_{1/3})_{0D}$ 까지는 두 그래프의 최적 재현주기가 비슷한 값을 보이나 그 이상의 수심에 대해서는 허용 기대 활동량을 0.1 m로 하였을 때의 최적 재현주기가 더 크게 나타난다. 다시 말해서, 수심이 심해 설계파고의 2.4배 보다 작을 때는 활동량에 대한 두 가지 허용 기준이 거의 비슷한 결과를 나타내지만, 이보다 큰 수심에서는 $S_{EXP} = 0.1$ m의 기준이 $P[S > 0.3$ m] = 0.1의 기준보다 더 큰 단면을 요구한다.

5. 결 론

Hong et al.(2004)의 신뢰성 설계기법에 Goda and Takagi (2000)가 제안한 복구비용 계산 모델과 실질 할인율을 적용하여 직접 방파제 케이슨의 최적 단면을 계산하는 모델을 개발하였다. 최적 단면은 케이슨 활동량의 허용 범위 내에서 기대 총 건설비용이 최소가 되는 단면으로 정의하였다.

재현주기가 큰 설계파고에 대해서 설계된 케이슨은 방파제의 수명(50년) 동안 복구 활동이 거의 발생하지 않기 때문에 할인율을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 차이가 거의 없지만, 작은 재현주기에 대해서 설계된 케이슨의 경우에는 잦은 복구 활동으로 인해 할인율 적용 여부의 차이가 나타나며, 예상되는 바와 같이 할인율을 적용했을 때 기대 총 건설비용이 작아진다. 수심 변화에 따른 결과를 살펴보면 수심이 깊은 경우에는 본 설계법에 의한 케이슨 단면이 기존의 결정론적 설계법으로 설계한 단면과 큰 차이를 보이지 않는 반면, 얕은 수심에서는 본 설계법이 더 작은 단면을 요구하므로 경제적인 설계가 가능하다. 복구비용이 증가함에 따라, 할인율이 감소함에 따라, 그리고 방파제의 수명이 증가함에 따라 기대 총 건설비용이 크게 산정되며, 이러한 경향은 안전율이 감소할수록, 즉 초기에 산정된 단면이 작을수록, 뚜렷해진다.

케이슨의 최적 단면은 기대 총 건설비의 최소점보다는 활동량의 허용치에 의해 지배를 받아서 경제성에 대한 고려가 케이슨 설계에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 미래의 비용으로 케이슨 재설치에 필요한 직접 비용만을 고려하였는데, 항만 운용 중지 등에 의한 간접비용을 추가 한다면 경제성에 대한 고려가 설계에 영향을 미칠 수도 있을 것이다. 케이슨 활동에 대한 허용 기준으로 방파제 수명동안의 기대 활동량을 0.1 m 이내로 하는 경우와 누적 활동량이 0.3 m를 초과하는 확률을 0.1 이내로 하는 경우를 비교하였는데, 수심이 심해 설계파고의 2.4배 보다 작을 때는 두 기준이 거의 비슷한 결과를 나타내지만, 이보다 큰 수심에서는 전자가 후자보다 더 큰 단면을 요구한다.

감사의 글

이 논문은 해양수산부의 ‘차세대 항만설계기술 개발’ 과제, 대우 건설 주식회사의 ‘방파제의 신뢰성 설계기술

개발’ 과제, 그리고 두뇌 한국 21 사업의 지원을 받았음.

참고문헌

권혁미 (2004). 대도시 아스팔트 포장공법에 대한 LCC분석 모델 개발 및 VE평가에 관한 연구. 석사학위 논문, 한양대학교.

이철웅 (2002). 기대 총 건설비 최소화 기법에 의한 혼성제 직접 케이슨의 설계. 대한토목학회논문집, 22(6-B), 819-831.

Alfageme, S.A., Headland, J.R. and Kotulak, P. (2000). Dike design optimization and reliability analysis. Proc. of Coast. Struc. '99, ASCE, 295-299.

Goda, Y. (2001). Performance-based design of caisson breakwaters with new approach to extreme wave statistics. Coast. Engrg. J., 43(4), 289-316.

Goda, Y. and Takagi, H. (2000). A reliability design method of caisson breakwaters with optimal wave heights. Coast. Engrg. J., 42(4), 357-387.

Hong, S.Y., Suh, K.D. and Kweon, H.M. (2004). Calculation of expected sliding distance of breakwater caisson considering variability in wave direction. Coast. Engrg. J., 46(1), 119-140.

Hussarts, M., Vrijling, J.K., Van Gelder, P., de Looft, H. and Blonk, C. (2000). The probabilistic optimization of revetment on the dikes along Frisian coast. Proc. of Coast. Struc. '99, ASCE, 325-329.

Shimosako, K. and Takahashi, S. (1998). Reliability design of composite breakwater using expected sliding distance. Rep. of the Port and Harb. Res. Inst., 37(3), 3-30(in Japanese).

Shimosako, K. and Takahashi, S. (1999). Application of deformation-based reliability design for coastal structures. Proc. of Coast. Struc. '99, ASCE, 363-371.

Voortman, H.G., Kuijper, H.K.T. and Vrijling, J.K. (1998). Economic optimal design of vertical breakwaters. Proc. 26th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 2124-2137.

星谷 勝, 石井 清 (1986). 構造物の信頼性設計法. 鹿島出版會.

Received August 1, 2005

Accepted December 6, 2005