

조위변화를 고려한 설계파고 재현빈도 분석 Analysis on the Return Period of the Design-Wave Height due to Tidal-Elevation Changes

조홍연¹, 조범준², 김한나²
Hongyeon Cho¹, Beomjun Cho² and Hanna Kim²

1. 서 론

항만·어항개발 및 연안공간조성을 위한 다양한 시설·구조물 설계에 중요한 인자가 되는 설계파고를 결정하는 과정은 ① 구조물의 중요도를 고려한 내용연수와 재현기간(보통 50년 또는 30년), ② 구조물이 위치하는 지점의 재현기간에 해당하는 설계파고 산정, ③ 산정된 설계파고를 이용한 구조물 단면결정 및 안정성 검토 등의 단계로 구분할 수 있다. 일반적으로 해양구조물 설계를 위한 설계파고의 재현기간은 보통 50년 (또는 30년)을 사용하고 있으며, 구조물 단면결정 및 안정성 검토는 구조물이 건설되는 지점에서 해당 재현기간에 대한 설계파고가 주어지면 단면결정 및 안정성 검토가 가능하다.

최근 확률이론에 근거한 해양 구조물의 신뢰성 설계에 대한 요구가 증가하면서 기존의 결정론적으로 제시되던 또는 통상적으로 이용되는 설계파고 산정 과정도 확률론적인 측면에서 검토·개선되어야 할 부분이 발생하고 있다. 본 연구에서는 해안 구조물 설계를 위한 설계파고 결정과정의 ② 단계에 해당하는 과정을 해안에서 실제 어떤 빈도로 발생하는 환경(파랑변형에 미치는 환경, 특히 조석 환경)을 고려하여 확률론적인 측면에서 검토하고, 기존의 전통적인 방법과 우리나라 해안의 조서변화 특성을 고려한 방법을 이용하여 산정된 설계파고의 크기 및 설계파고의 재현기간 등을 비교·분석하였다. 우리나라의 서해연안은 엄밀한 의미로는 심해조건으로 판단하기에는 한계가 있기

때문에 보다 근본적으로는 ② 단계의 심해 설계파랑 정보를 이용하여 구조물이 건설되는 천해 영역에서의 파랑정보를 추정하는 과정이 적절하지 않을 수도 있으나 본 연구에서는 이 부분에 대한 검토는 생략하고, 조위변화에 의한 영향만을 고려하여 천해 설계파고를 추정하고 조위변화를 일정한 조건(보통 약최고고조위, 약최고만조위, AHHW 조건 또는 평균해수면, MSL 조건)으로 고정하여 설계파고를 산정한 경우를 비교·분석하였다.

2. 이론적인 배경

2.1 재현기간의 의미

해안의 어떤 지점이라 할지라도 해양 또는 해안에서의 50년 빈도(재현기간) 설계 파고는 이론적으로(엄격한 의미로) 해당 지점에서 평균 50년에 1회 정도의 빈도로 발생하는, 다수의 50년 기간 동안에 발생한 최대파고를 평균한 파고를 의미한다. 따라서 무한한 반복시행 개념을 가지고 있는 확률이론에 의하면 해당 해역에서의 상당한 기간의 무수한 파고자료를 50년 간격으로 등분하여, 등분된 기간에서의 최대파고를 평균하면 된다.

그러나 실질적으로 불가능하기 때문에 간접적인 추정에 의존하는 것이 불가피하다. 간접적인 추정은 재현기간 보다 작은 한정된 기간의 관측 또는 Hindcasting 추산 자료를 이용하는 방법으로 해당 지점에서 매년 최대파고를 산정하여 극치해석을 수행(외삽에 의한 방법)하여 50년 재현기간에 해당하는 설계파고를 추정하는 방법이다. 그러나

1 발표자: 한국해양연구원 해양환경·방제연구부 책임연구원

2 한국해양연구원 해양환경·방제연구부 연구원

심해조건에서의 파랑을 천해영역으로 끌고 오는, 즉 파랑변형을 고려하여 50년 심해 설계파고를 50년 재현기간에 해당하는 천해 설계파고로 환산하는 과정에서 발생빈도와 무관한 조위(일정한 특정 조위) 조건에서 파랑변형을 추정하기 때문에 엄밀한 의미로는 그리고 이론적으로도 50년 재현기간을 크게 상회하는 조건이 형성된다. 물론 재현기간 변동에 따른 설계파고의 변화가 둔감할 수도 있고, 민감할 수도 있으나 이론적으로는 파랑 발생빈도가 50년에 1회(사실상 1회도 1년 기간 동안에 약 2-3시간 정도의 지속시간을 의미)이고, 파랑변형에 사용되는 조석조건의 조위는 매년 발생하기는 하지만 파랑 지속시간 관점에서 보면 12시간 주기로 간단하게 가정할 경우 고조 조건은 크게 잡아도 대략 1/10 정도에 해당하므로 고조 조건을 이용한 천해 설계파고는 재현기간 관점에서 보면 50년의 10배에 해당하는 500년 빈도(?)에 해당한다고 간주할 수 있다. 조석 발생은 파랑과는 무관하다고 볼 수 있으므로 파랑이 조석과 만나는 조우(encounter) 확률은 조석에 의한 조위 발생확률로 간주할 수 있으며, 조위는 파랑 전파 과정의 변형에 영향을 미치지만 파랑은 조석에 영향을 미치지 못하는 따라서 조석발생 및 변형은 파랑과 무관한 것으로 가정하였다.

2.2 재현기간 50년의 천해 설계파고

심해파(deep water wave, [수심/파장]>1/2 조건) 조건에서는 모든 조위조건에 대하여 파랑변형에 의한 파고변화 영향이 미미하기 때문에 실질적으로 50년 빈도 설계파고(H_{50D})가 유지된다고 볼 수 있다. 그러나 천해 영역으로 파랑이 전파되어 오는 경우, 50년에 1회 빈도로 발생하는 파고의 평균은 심해에서 50년에 한번 발생하는 파고를 가정하는 경우 조위조건에 의한 파랑변형을 반영하여야 한다. 이론적으로는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\overline{H_{50D}} = \int_{-\infty}^{\infty} H_{50D}(h(\zeta)) \cdot p_T(\zeta) d\zeta$$

여기서, $h(\zeta)$ = 조위(ζ) 변화를 고려한 수심(m), 심해파 조건(평균해수면 기준, 수심 100m 이상)에서는 $H_{D50}(h(\zeta)) = H_{D50}$ (상수) 조건을 적용할 수 있기 때문에 조위조건을 고려하나 안하나 50년 빈도 설계파고는 큰 변화가 없다.

그러나 천해파(shallow water wave) 영역에서는 $H_{D50}(h(\zeta)) = f(H_{D50}, h(\zeta))$ 조건으로 조위에 m이한 수심변화 영향이 파랑변형으로 인한 파고에 영향을 미치기 때문에 50년에 1회 발생하는 천해영역에서의 파고는 파랑에 무관한 조위의 발생확률과 조위에 대한 파랑의 변형정도를 반영하는 것이 타당하다. 조위 조건을 반영한 효과는 파랑의 변형에 영향을 미치는 가장 중요한 인자를 공사 지점의 수심으로 간주하는 경우 조위변화에 의한 수심변화가 파고변화에 미치는 영향을 함수로 표현하여 조위발생 빈도확률을 이용하여 평균 파고를 계산하여야 한다.

조석은 파랑과 무관하게 발생한다는 조건을 적용하면 50년 빈도 설계파고에 천해파 영역에서 약 최고고조위 조건을 적용하는 경우, 약최고고조위 정도의 조위가 연간 발생하는 빈도를 대략 계산하면 월 2회 1시간 정도의 지속시간으로 발생하다고 가정하면 연간 8,760시간 기준으로 하면 24시간 / 8,760시간 = 1/365 확률이다. 따라서 50년 빈도 설계파고가 약최고고조위와 조우하는 확률은 1/365. 따라서 설계재현빈도는 50(년)/(1/365) = 1,825년이 된다. 상식적으로 간단하게 생각할 수 있는 위험조건이기는 하지만 발생빈도가 매우 낮다(재현기간이 매우 크다)는 것은 간단하게 검토할 수 있다. 현재의 방법으로 계산하는 천해 설계 파고가 2,000년 정도에 해당하는 재현빈도를 가진다는 것은 납득하기가 어려운 부분이다. 이론적으로 2,000년 정도이며, 논리적으로도 오류는 없지만 실질적으로 2,000년 빈도라면 심해 설계파고부터가 2,000년 정도로 조정되어야 하기 때문에 큰 의미를 부여하기는 다소 곤란하다. 다만 현재의 방법이 발생빈도 측면에서 한계를 가지고 있다는 것은 명백하다고 판단된다.

실질적으로 조위변화에 의한 재현기간의 변화도 중요하지만 재현기간 변화에 따라 천해 설계파고가 정량적으로 얼마나 영향을 받는가를 검토하는 것이 보다 중요하다. 그러나 사실상 재현기간 변화에 따른 천해 설계파고는 재현기간에 따른 심해 설계파고에 종속되어 있기 때문에 조위발생빈도와 관련지어 설명하는 것은 한계가 있음을 지적한 바 있다.

천해파 영역으로 이동하는 파랑은 지형적인 영향으로 인하여 천수, 굴절, 회절, 반사, 쇄파 등의 영향을 직접적으로 받기 때문에 해안의 지형변

화가 매우 중요한 역할을 하지만 모든 지형변화 조건을 적용하여 검토하는 것은 매우 방대한 작업이므로 본 연구에서는 지형의 선형변화 조건을 가정하고, 파랑변형도 천수변형만을 고려하여 천해 설계파고 변화 양상을 고려하였다. 한편 이론적인 접근에는 한계가 있지만 우리나라 해역 어떤 지점의 천해 설계파고를 실제 조석조건을 무작위로 부여하여 Monte-Carlo 기법으로 추정한다면 파랑변형에 영향을 미치는 지형적인 영향을 반영될 수 있다.

2.3 조위 확률분포함수 및 천수계수

조위 발생빈도에 확률분포 연구는 조흥연 등(2004), 정신탉 등(2008)이 제시한 확률분포함수를 이용하였으며, 심해파 조건에서의 설계파랑이 천해파 영역으로 전파되는 경우의 파고 변화는 천수변화를 이용하여 추정하였다. 또한 파랑이 전파되는 기간 동안(약 1~2시간 정도로 간주)의 조위변화는 일정하다고 가정하였다. 우리나라 연안의 조위 발생 확률밀도 함수는 식 (1)에서 제시한 $p_T(\zeta)$ 항에 해당하며, 조위변화에 따른 설계파고 변화는 특정한 함수로 표현되지는 않으나 본 연구에서 천수효과를 고려한 경우 수심에 따른 파고변화에 해당하는 식 (1)에서의 $H_{50D}(h)$ 항은 선형 또는 2차 다항식으로 근사화한 함수를 이용하였다. 조위 자료의 확률밀도함수는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있으며, 식에 포함되는 매개변수만을 표에 제시하였다(Table 1 참조).

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

$$p_T(\zeta) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{T_1} f(x;\mu_1,\sigma_1) + \frac{1}{T_2} f(x;\mu_2,\sigma_2) \right],$$

$$x_1 \leq x \leq x_2$$

한편 조위 발생빈도를 표현하는 확률밀도분포 함수는 최근 정신탉 등(2008)이 이중절단 방법으로 수정·제안한 함수를 이용하였다.

Table 1. Probability density function of the Tidal Elevation Data($T_1 = T_2 \cong 1.00$).

Location	x_1 (cm)	x_2 (cm)	μ_1 (cm)	μ_2 (cm)	σ_1 (cm)	σ_2 (cm)
Incheon	-534	531	-192	196	148	137
Mokpo	-325	317	-88	76	88	62
Jeju	-211	179	-43	42	47	43
Busan	-111	145	-25	26	24	24
Sokcho	-53	78	-8	8	11	11

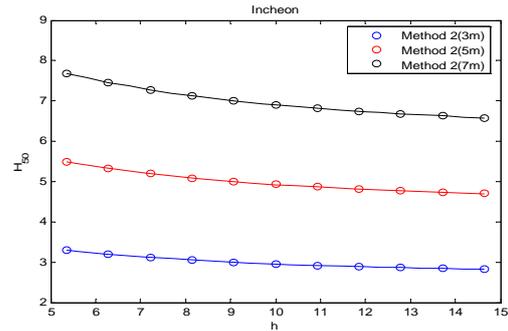


Fig. 1. Design-wave Height Changes (Shoaling Effects only - Incheon).

3. 조위변화를 고려한 설계파고 비교

조위변화를 고려한 경우와 전통적인 방법(약최고고조위 조건을 사용하는 경우의 천해 설계파고)을 이용한 경우의 설계파고를 우리나라 주요 지점의 조위 변화(조위 발생확률 분포) 조건을 고려하여 추정한 결과를 비교·분석하여 제시하였다. 조위변화를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 설계파고는 기본적으로 조위의 변화 정도(조차)와 관심 지점(구조물이 건설되는 지점의 수심)의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

천해 설계파고의 변화는 평균해수면 기준 수심 100m 지점을 기준으로 하고, 수심 12m, 10m, 8m 지점을 비교지점으로 하여 계산하였으며, 기준 심해 설계파고는 3m, 5m, 7m 수준으로 지정하여 분석하였음, 주기변화도 고려하는 것이 적절할 것으로 사료되나 분석하는 경우가 매우 증가할 것으로 예상되어 주기는 10.0(초)를 기준으로 하였다. 따라서 본 연구에서 제시되는 결과는 연안한 지점에서 수심조건(3가지, MSL 기준 수심으로 계산과정에서 조위변동 성분을 추가하여 수심을 조정)과 심해 설계파고(3가지)에 따라 결과가 제시되며, 비교대상 조건도 수심조건에 약최고고조위 조건을 부여한 경우(역시 3가지)와 설계파고

(3가지) 조건에서 결과를 제시하였다(Table 2 참조; M1=기준 방법, M2=조위 발생빈도를 고려한 추정 방법, h=수심, H=심해 설계파고).

Table 2. Comparison of the Design-wave Heights with/without considering the Tidal Elevation Effects.

Condition Unit(m)	Method-1	Method-2
h=12, H=3	2.75	2.81
h=12, H=5	4.59	4.69
h=12, H=7	6.42	6.57
h=10, H=3	2.76	2.89
h=10, H=5	4.61	4.82
h=10, H=7	6.45	6.75
h=8, H=3	2.78	3.01
h=8, H=5	4.64	5.01
h=8, H=7	6.49	7.02

(a) Incheon (MSL=4.64m, AHHW=9.27m)

Condition Unit(m)	Method-1	Method-2
h=12, H=3	2.79	2.83
h=12, H=5	4.64	4.71
h=12, H=7	6.50	6.60
h=10, H=3	2.82	2.90
h=10, H=5	4.70	4.83
h=10, H=7	6.57	6.76
h=8, H=3	2.86	3.01
h=8, H=5	4.77	5.01
h=8, H=7	6.68	7.01

(b) Mokpo (MSL=2.43m, AHHW=4.86m)

Condition Unit(m)	Method-1	Method-2
h=12, H=3	2.82	2.84
h=12, H=5	4.70	4.73
h=12, H=7	6.58	6.62
h=10, H=3	2.86	2.91
h=10, H=5	4.77	4.85
h=10, H=7	6.68	6.79
h=8, H=3	2.93	3.02
h=8, H=5	4.88	5.03
h=8, H=7	6.83	7.04

(c) Jeju (MSL=1.39m, AHHW=2.78m)

Condition Unit(m)	Method-1	Method-2
h=12, H=3	2.85	2.74
h=12, H=5	4.75	4.57
h=12, H=7	6.65	6.40
h=10, H=3	2.91	2.81
h=10, H=5	4.85	4.68
h=10, H=7	6.78	6.56
h=8, H=3	2.99	2.91
h=8, H=5	4.98	4.85
h=8, H=7	6.98	6.79

(d) Busan (MSL=0.65m, AHHW=1.30m)

Condition Unit(m)	Method-1	Method-2
h=12, H=3	2.87	2.47
h=12, H=5	4.79	4.12
h=12, H=7	6.70	5.77
h=10, H=3	2.94	2.53
h=10, H=5	4.90	4.22
h=10, H=7	6.86	5.91
h=8, H=3	3.04	2.62
h=8, H=5	5.06	4.37
h=8, H=7	7.09	6.12

(e) Sokcho (MSL=0.20m, AHHW=0.39m)

4. 설계파고 추정결과 분석

실제 파랑전파과정에서 만나게 되는 조위조건을 확률적으로 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 설계 파고는 조위 조건에 따라 절대적인 수위가 변화하지만 파고변화만을 보면, 인천, 목포, 제주 지점에서는 조위변화를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 높은 파고 추정결과를 보이는 반면, 부산, 속초지점에서는 낮은 파고추정결과를 보이는 것으로 파악되었다. 즉, 서해연안지점에서는 기존의 AHHW 조위로 고정된 방법이 조위가 높기 때문에 절대적인 파고는 높지만 파고추정은 과소 추정하고 있으며, 동해안에서는 과대추정하고 있는 것으로 파악되었다.

5. 결론 및 제언

조위변화를 고려한 연안 설계파고 변화는 조위 조건에 따라 과대추정 또는 과소추정하는 결과를 보이고 있으나 보다 현실적인 조건에 부합되는 추정이 바람직한 추정과정으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 PE-981-1A 연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

정신탉, 조홍연, 김정대, 고동휘. (2008). 이중 절단기법을 이용한 조위자료의 확률밀도함수 추정, 한국해양·해양공학학회논문집, 20(3), 247-254.
조홍연, 정신탉, 오영민. (2004). 조위자료의 확률밀도함수 추정, 한국해양·해양공학회지, 16(3), 152-161.