

마루높이 設定 基準을 위한 기대월파확률 추정 Scenario

A Scenario for the Standard Basis of Crest Elevation Estimation along Korean Coast based on Expected Overtopping Probability

권혁민* · 김건오**

Kweon, Hyuck Min · Kim, Gun Oh

Abstract

The importance of reasonable treatment of tide characteristics has been shown by Kweon, *et al.* (2005, 2006) for the crest elevation estimation because of a big difference of tidal elevation along Korean coast. For the procedure of crest elevation design, the expected overtopping probability (EOP) was estimated by Kweon, *et al.* (2006). The comparisons on each sea showed that EOP was lower east, south and west sea in order. The results involved the assumption that the tide and design level wave height meet any time in a year. However, big waves mainly occur in summer or winter in Korean coast, the study focuses on the encounter probability of big waves and seasonal tide level. A theory of the encounter probability is not derived by the present study but it shows reasonable acceptability of the proposed scenario in which the expected overtopping probability could be an index for the crest elevation estimation in Korean coast. The calculation based on the scenario gives the possibility range for the crest elevation estimation which has no tendency of each sea along Korean peninsular. The range is within the expected overtopping probability of 1% in the whole coast of Korea.

Keywords : crest elevation estimation, seasonal tide level, scenario, expected overtopping probability

요 지

조위발생빈도분포가 상이한 우리나라 해역에 위치한 해안구조물의 마루높이를 설정하는 문제에 있어서 조위의 합리적인 취급이 중요하다. 권혁민 등(2005, 2006)은 해역별 기대월파확률 계산결과로서 조위발생빈도분포의 편차가 크면 클수록 작아지는 경향이 명백함을 보였다. 이는 년 단위 조위의 발생빈도분포가 년 최대파고 급의 파 발생빈도분포와 년 중 언제든지 조우할 수 있다는 가정을 내포하고 있다. 본 연구에서는 파와 조위의 조우 가능성을 년 최대 파급의 파가 발생할 수 있는 여름철 또는 겨울철을 대상으로 계절별 일 최대 조위발생빈도분포를 불확정요소로 취급하여 계산했다. 계산결과, 우리나라 전 해역의 기대월파확률이 1%미만으로 수렴됨이 확인되어 이를 시나리오로 제안하고자 한다. 본 시나리오에 의하면 기대월파확률이 동일하도록 마루높이의 설정이 우리나라 전 해역을 대상으로 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 마루높이는 전 해역에 대하여 계절별 일 최대조위의 평균값으로부터 설정이 가능한 것으로 추정된다.

핵심용어 : 마루높이 산정, 계절적 조위 높이, 시나리오, 기대월파확률

1. 서 론

최근 들어 지구적 차원에서 기상이변으로 인한 재해가 대규모화 하고 있다. 이에 대하여 기존의 공학적 개념으로 대응하기가 어려워 파괴를 야기할 수 있는 외력조건을 Scenario화하는 기법이 재해 평가에 있어서 광범위하게 추천되고 있다. 본 연구는 해안구조물의 월파확률에 대한 평가를 조위와 파랑의 조합을 Scenario화하여 신뢰성 해석을 통한 기대월파확률을 계산하여 합리적인 마루높이 설정을 위한 기초자료를 생산하고자 한다.

국내는 신뢰성 해석에 의한 구조물의 마루높이에 대한 연

구가 Kweon·Suh(2003)에 의해 처음 시도되었다. Kweon·Suh는 조위변화를 정현함수로 표현하여 결국 각 조위의 발생빈도가 균등하다는 조건에서 계산했다. 하지만, 권혁민 등(2005)은 해역의 조위발생빈도분포는 균등화하지 않으므로 실패역의 조위 자료로부터 임의의 분포특성을 정식화한 후 계산하여 조위발생빈도분포 특성이 월파확률에 영향을 미침을 보였다. 이철웅(2003)은 확률변수의 불확실성을 고려할 수 있는 신뢰성 해석기법을 이용하여 경시식 해안 구조물에 발생하는 월파현상을 해석하고 현행의 결정론적 설계방법에서 사용되는 허용 월파랑의 개념을 도입하여 구조물의 마루높이 변화에 따른 파괴확률에 대한 기초연구를 수행하였다.

*정회원 · 교신전자 · 경주대학교 철도건설환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : hmkweon@gyeongju.ac.kr)

** (주)헤인E&C 흥만부 대리 · 공학석사 (E-mail : waguno@paran.com)

권혁민 등(2005)은 실해역의 조위발생빈도 분포를 고려한 기대월파확률을 산정함과 동시에 현행 설계방법에 의해 결정된 마루높이에 대한 평가를 시도했다. 오정은 등(2005)은 마루높이와 평균월파랑의 관계 및 월파확률, 월파부피와의 상호관계를 분석하여 마루높이 결정에 수심과 경사각 및 파장의 변동성 등에 따른 월파확률과 평균월파랑 그리고 최대월파부피의 특성을 통합적으로 적용시킴으로서 좀 더 합리적으로 마루높이를 결정할 수 있음을 제안했다. 또한 오정은 등(2007)은 마루높이의 결정을 위해, 허용월파기준들과 그 관계를 분석하여 해안구조물의 설계를 위해서는 평균월파랑과 더불어 월파확률과 월파부피의 개념을 수심조건에 따라 함께 고려하는 것이 필요함을 보였다. 이철웅(2005)은 유의파고에 대한 극치분포를 이용한 해석의 결과와 주기-파고 결합분포를 이용한 해석의 결과를 비교하였고, 스펙트럼의 폭에 따른 영향을 변화시켜 분석하였다. 또한 제체의 마루높이를 변화시키면서 파괴확률을 산정했다. 권혁민 등(2006)은 우리나라 실해역의 조위발생빈도분포 특성을 고려하여 기존의 마루높이 설정방법에 대한 기대월파확률을 평가하여 우리나라 해역별 기대월파확률 특징에 대해 비교분석을 했고, 그 결과를 그래프로 표현하여 마루높이를 더 높여도 기대월파확률은 기대이상으로 저감시킬 수 없음을 시각화하여 이를 비교함으로써 과대설계를 피할 수 있다고 제안했다. 또한 우리나라 실해역의 조위발생빈도분포 특성이 상이하여 기능성 측면에서 해역별로 크게 차이가 발생함을 보였다.

연안구조물의 설계에 있어 마루높이 설정은 파랑 에너지의 반사와 축조비용에 직접적인 관계가 있으므로 합리적인 평가가 불가결하다. 하지만 오정은 등(2005, 2007)과 이철웅(2005)은 우리나라 실해역의 조위발생빈도가 상이한 조위조건 및 지역 특성에 대해서는 언급하지 않았다.

본 연구는 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도 분포와 해역별 최대파고의 년 최대 극치분포를 조합하여 기

대월파확률을 분석하고 우리나라 실해역 조건에 대한 방파제의 마루높이와 비교·분석하고자 한다.

2. 기대월파확률 계산을 위한 Scenario

확률론적 이론의 실제적 연구사례로서 권혁민 등(2006)은 우리나라 실해역의 년 평균 조위값을 기준으로 하는 조위발생빈도에 의한 기대월파확률 특성을 비교·분석했다. 권혁민 등은 기존의 마루높이 설정 방법을 통해 서해안에 위치한 인천의 경우가 동해안에 위치한 속초의 경우보다 기대월파확률이 훨씬 작음을 보였다. 서해안의 경우 조위가 낮아짐에 따라 마루높이가 커져 주기가 긴 경우에도 월파를 할 수 없는 경우가 계산결과에 영향을 주었다. 우리나라 해역별 기대월파확률은 기존의 마루높이에 대하여 동해안이 가장 크고 남해안, 서해안 순으로 나타남을 보였다.

권혁민 등의 결과는 년 단위의 조위를 대상으로 하였으므로 최대유의파가 연중 어떠한 시각에도 동일한 확률로 조위와 조우할 수 있다는 가정이 포함되어 있다. 하지만, 년 최대 유의파는 여름철 폭풍 또는 겨울철 계절풍에 의해 주로 발생하므로 이를 고려하여 기대월파확률을 계산하는 것이 실해역의 조건에 유사하다고 할 수 있다.

본 연구는 계절별 조위의 특성을 검토한 후 계절별 년 최대 유의파 발생 빈도를 조사하여 조우 가능성이 가장 큰 특정 계절을 대상으로 하는 새로운 계산결과를 통하여 마루높이 설정과정을 하나의 시나리오로 제안하고자 한다.

2.1 월 평균조위의 변동성

기대월파확률 계산에 있어서 큰 영향인자인 조위발생과 최대유의파발생의 조우 가능성을 알아보기 위하여 전 해역의 계절별 조위 변동특성을 조사했다. 조사지역은 속초, 묵호, 울릉도, 후포, 포항, 울산, 부산, 가덕도, 거제도, 마산, 통영,

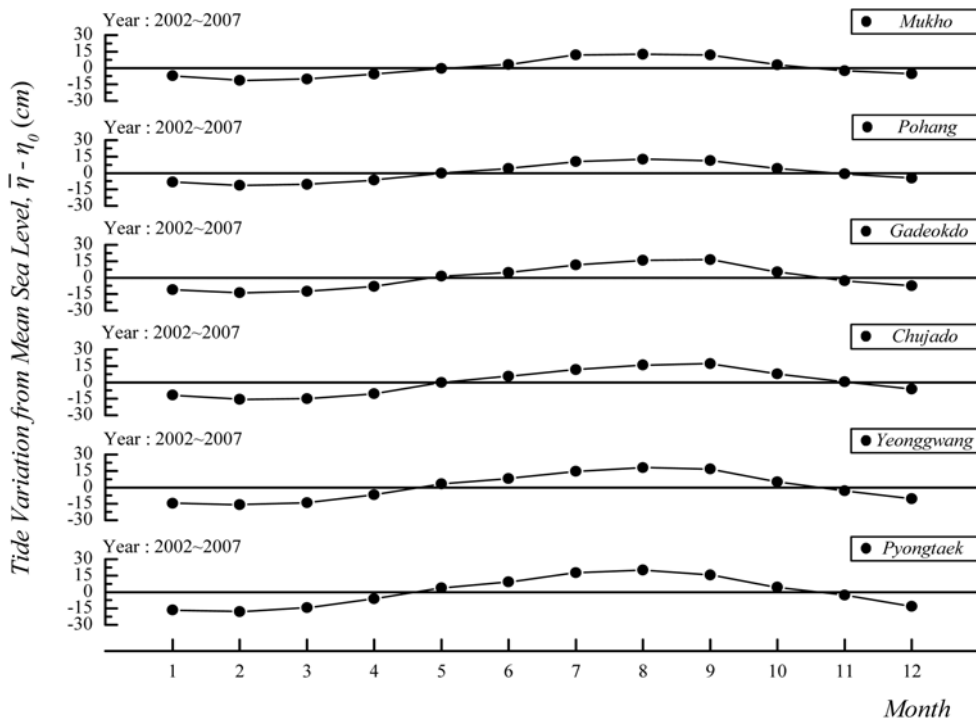


그림 1. 우리나라 연안의 월 평균조위의 변동

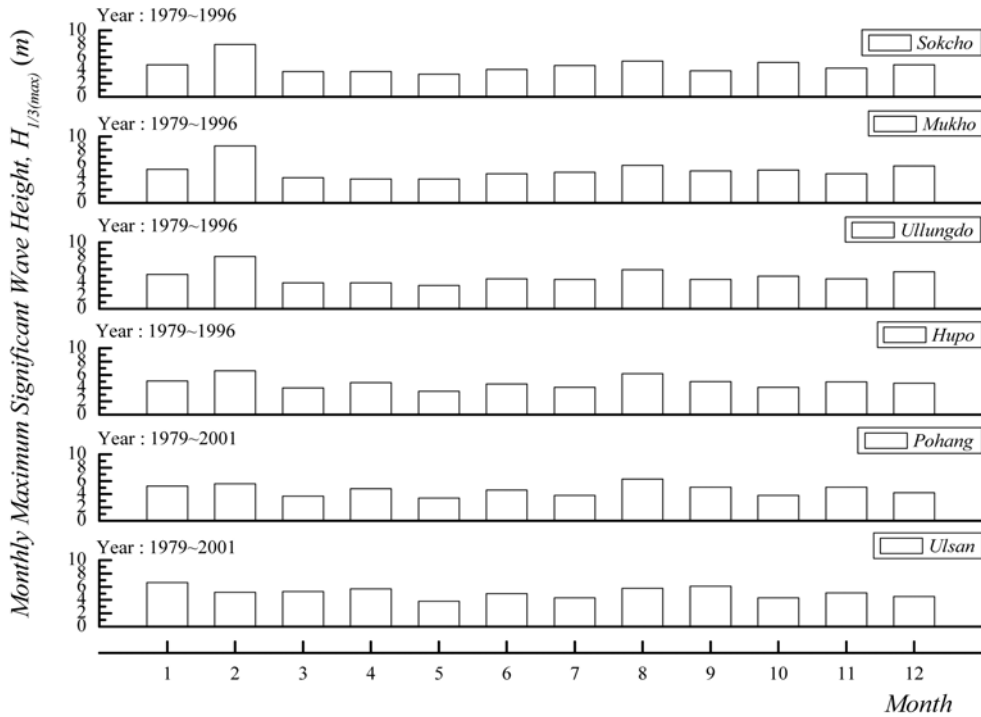


그림 2. 월별 최대유의파고

여수, 고흥, 거제도, 완도, 제주, 성산포, 서귀포, 모슬포, 추자도, 진도, 대흑산도, 목포, 영광, 위도, 장항, 보령, 안흥, 평택, 대신, 안산, 인천 등 총 32개 연안이다. 자료는 국립해양조사원이 2002년~2007년 가용한 조위관측소에서 1시간 간격으로 취득한 수위변동 값을 기초로 분석되었다. 그림 1은 조사대상 중 일부 연안의 월 평균조위의 변동을 보인 것이다.

그림 1에서 각 연안의 0값은 평균해수면(η_0)이며 세로축은 이로부터 월별 평균값($\bar{\eta}$)의 차이 ($\bar{\eta} - \eta_0$)를 보인 것이다.

우리나라 연안의 월별평균조위 변동은 그림 2에 보인 바와 같이 여름철인 7, 8, 9월 달에 차이가 동일하게 평균해수면보다 크게 나타난다. 10월 달에 7, 8, 9월 달보다 $\bar{\eta}$ 가 크게 나타나는 지역은 울릉도, 거제도 등 2개 연안이다. 전 자료 중 최대 차이 $\bar{\eta} - \eta_0$ 는 장항연안으로 8월 달이 46.7 cm로 조사됐다. 우리나라 연안의 평균조위는 전해역에 걸쳐 여름철이 년 평균해수면보다 큰 값을 보이고 있음을 확인했다.

2.2 월별 최대 유의파고

우리나라 해역의 년 최대 유의파의 발생은 계절별 경향을 뚜렷하게 보인다. 조사를 위하여 장기 파랑 산출집(1997, 해양수산부), 해상파랑관측 및 조사 보고서(1999, 2001, 2002 해양수산부)의 심해파랑모델(HYPA 모델)을 통한 파랑산출 결과 값을 분석한 결과, 서남해안의 경우 여름철에 년 최극조위 및 년 최대유의파의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 하지만, 동해안의 경우는 겨울철 계절풍 또는 여름철 태풍의 영향으로 최대파가 지역별로 다르게 나타난다. 그림 2는 동해안의 월별 최대유의파고를 비교한 것이다.

그림 2에 보인 바와 같이 포항이남 해역은 서남해역과 동일하게 여름철 파고가 겨울철 파고와 유사하거나 비교적 크게 나타나고 있다.

일부지역(위도 약 37° 이상)의 최대 유의파고 발생빈도는

겨울철과 여름철이 흡사한 경향을 보였으나, 겨울철의 내습빈도가 여름철보다 조금 더 우세한 것으로 나타남을 알 수 있었다. 또한 우리나라 해역은 전반적으로 겨울철 계절풍의 영향보다 여름철 태풍의 영향을 더 많이 받는 것으로 보여진다. 따라서 본 연구에서는 여름철을 분석대상 계절로 선정하였으며, 동해안의 북부해역은 겨울철과 여름철의 일 최대조위발생빈도분포를 분석했다. 또한 해역별 최대파고의 년 최대파고의 극치분포는 정신택 등(2004)이 수행한 한국해양 연구원의 파랑모델(HYPA Model) 추산결과를 이용하여 우리나라 연안의 심해파에 대한 극치분석 결과를 사용했다.

3. 여름철 조위발생 확률밀도함수 추정

권혁민 등(2006)은 년 평균 조위자료를 사용하여 기대월과 확률을 비교·분석했고, 본 연구는 조위와 극치파고의 조위를 대상으로 한 Scenario에 대하여 기대월과확률을 계산했다. 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도분포를 분석하고, 해역별 최대파고의 년 최대 극치분포와 조합하여 우리나라 해역의 계절별 기대월과확률을 비교·분석했다. 과거 수년의 조위관측 자료를 통하여 년 최대 조위발생빈도를 분석하고 이를 계절단위로 나누어 년 최대 조위발생빈도분포가 가장 높은 계절을 분석 대상으로 선정했으며, 선정된 계절 동안의 일 최대 조위발생빈도분포를 분석했다.

분석 조위자료는 국립해양조사원의 홈페이지(www.nori.go.kr)에서 제공하는 각 관측소의 검조기록부 중 동해안 북부지역은 여름철과 겨울철, 동해안 남부지역과 서남해안은 여름철의 각각 3개월간의 일 최대 조위관측 자료를 모두 사용했고, 동해안의 6개 지점과 남해안 15개 지점, 서해안의 15개 지점의 조위 자료를 사용했다. 이 중 동해안은 관측소 6곳은 R^2 이 90%이상으로 표현이 가능하나 서남해안 관측소의 자료는 R^2 이 80%미만으로 표현의 정도가 매우 낮아, 남해

안 6곳과 서해안 10곳은 분석대상에 포함시키지 않았으며, 제외된 관측소는 대부분 누적 표본수가 2000개 미만으로 관측누적 년도가 짧거나, 결측치가 많은 것으로 나타났다. 동해안은 남북지역의 해역구간별 특성에 차이가 있다는 것을 표현하기 위해 동해안 북부지역인 묵호와 속초지역은 여름철과 겨울철 모두 분석 대상으로 했다.

지점별 조위자료는 상대적인 비교의 편의성을 위하여 평균값이 0이 되도록 변환했으며, 변환된 자료의 히스토그램을 이용하여 빈도 분포함수의 형태를 분석했다. 이때 히스토그램의 계급값인 조위 값은 cm 단위로 표현했다.

분석에 사용된 쌍봉(double peak)형 확률밀도함수는 권혁민 등(2006)에 의해 제안된 2개의 정규분포함수의 합인 형태로 표시된 쌍봉형 확률밀도함수를 변형하여 사용했다. 사용된 정규분포의 함수는 각 경우에 대하여 면적비가 같지 않아도 된다. 수위 변동량 η 의 재현성을 높이기 위하여 각각의 정규분포가 미치는 영향 정도도 변수화하여 추정했다. 식 (1)은 본 연구에서 사용한 조위발생빈도분포의 확률밀도 함수를 보인 것이다.

$$P(\eta) = \alpha_D \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta - \mu_D}{\sigma_D}\right)^2\right] + \alpha_U \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta - \mu_U}{\sigma_U}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서,

$$\alpha_D = \frac{a_1}{\sqrt{2\pi}}, \quad \alpha_U = \frac{a_2}{\sigma_U \sqrt{2\pi}}$$

는 각각 저수위, 고수위 분포함수의 영향을 나타내 주는 모형 변수이며, $\mu_D, \mu_U, \sigma_D, \sigma_U$ 는 각각 저수위, 고수위 분포함수의 평균과 표준편차를 나타낸다. 단, 모형 변수는 $a_1 + a_2 = 1$ 의 관계를 만족시키며 η 는 조위자료로부터 평균값을 각각 뺀 조위 값의 시계열이다.

위의 식 (1)을 사용하여 추정된 매개변수 값은 표 1, 표 2, 표 3과 같고, 계절별 일 최대 조위발생빈도분포함수는 그림 4에 보인다.

동해안(속초지역)과 남해안(통영지역) 및 서해안(인천(월미도)지역)은 그림 3에서 보인 바와 같이 계절별 일 최대 조위발생빈도분포 특성이 상이함을 알 수 있다. 또한 표준편차는 서해안이 가장 크며 남해안, 동해안 순이다. 동해안의 북부지역인 속초와 묵호의 겨울철이 여름철보다 작게 나타남을 알 수 있다. 자료에 대한 분포함수의 상관도 R^2 은 대부분 지역이 90%이상을 상회하고 있으며, 동해안의 속초와 묵호의 상관도 R^2 은 겨울철이 여름철보다 작게 나타났다.

표 1. 동해안 지역의 조위발생 확률밀도함수의 모수 추정값

	α_D	α_U	μ_D	μ_U	σ_D	σ_U	R^2
속초 지역	0.04010	0.00625	0.78871	4.25935	8.02678	12.44595	0.99512
속초 지역(겨울)	0.02844	0.02061	0.70563	0.47075	6.60407	0.53832	0.99154
묵호 지역	0.04449	0.00545	1.38675	-6.02835	8.75235	1.30744	0.99034
묵호 지역(겨울)	0.03672	0.01532	0.50934	3.08816	7.11931	9.17754	0.98837
울릉도 지역	0.03291	0.00342	-1.07839	9.17449	9.62460	27.30526	0.98776
후포 지역	0.02459	0.03388	1.70021	0.45387	4.12030	8.82372	0.94491
포항 지역	0.01332	0.03148	-5.47303	2.32361	5.46402	10.22677	0.98925
울산 지역	0.01903	0.02729	8.88296	-4.03730	8.90207	8.36305	0.99476

표 2. 남해안 지역의 조위발생 확률밀도함수의 모수 추정값

	α_D	α_U	μ_D	μ_U	σ_D	σ_U	R^2
부산 지역	0.01936	0.01419	11.45131	-14.14473	12.57519	11.06259	0.97024
가덕도 지역	0.01540	0.01204	16.67455	-20.18234	15.51117	13.82053	0.92878
통영 지역	0.00820	0.01142	-32.05700	20.58344	17.79593	22.75681	0.88768
여수 지역	0.00900	0.00612	23.27280	-42.45557	30.17040	21.84572	0.94435
거문도 지역	0.01014	0.00586	17.24719	-39.55731	29.18158	18.72919	0.87905
서귀포 지역	0.00775	0.01146	-28.22441	17.83603	18.59841	22.65591	0.92845
제주 지역	0.00651	0.01234	-25.17380	12.29322	17.2306	23.50677	0.97267
완도 지역	0.00513	0.00892	-45.78473	18.41036	19.71172	34.14966	0.88271
추자도 지역	0.01186	0.00461	7.71118	-29.12910	28.63583	14.13043	0.92622

표 3. 서해안 지역의 조위발생 확률밀도함수의 모수 추정값

	α_D	α_U	μ_D	μ_U	σ_D	σ_U	R^2
대흑산도 지역	0.00485	0.01000	-28.23765	16.14394	26.42264	27.34767	0.95312
목포 지역	0.00726	0.00211	4.59386	-9.99150	48.64616	21.83395	0.95669
군산(외항) 지역	0.00469	0.00350	60.54835	-46.5889	38.76732	62.37468	0.81891
군산 지역	0.00443	0.00302	70.26615	-62.92912	45.06868	66.54774	0.86813
인천 지역	0.00465	0.00343	54.03211	-49.98631	43.18498	56.60939	0.89830

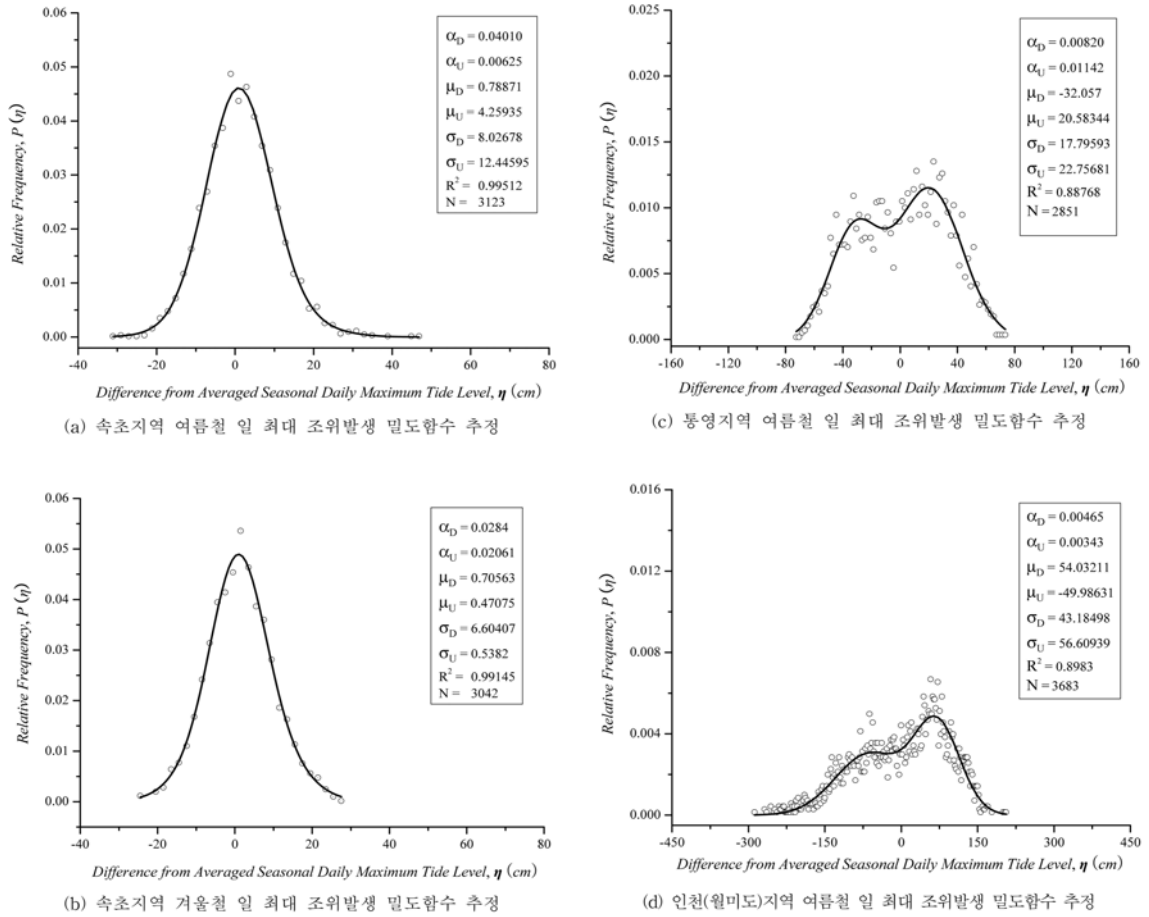


그림 3. 우리나라 해역의 일 최대 조위발생 확률밀도함수 추정

표 4. 대상 지점별 평균해수면과 계절별 일 최대조위평균 값의 차

지점	평균해수면 MSL (cm)	계절별 일 최대조위 평균 ASDRTL (cm)	차 ASDRTL- MSL (m)	
동해안	속초	19.6	45.1	0.255
	묵호	18.8	39.5	0.207
	울릉도	16.2	40.5	0.243
	후포	13.9	30.1	0.162
	포항	12.3	35.7	0.234
	울산	30.4	60.1	0.297
남해안	부산	64.9	124	0.591
	가덕도	95.3	177	0.817
	통영	141	254.6	1.136
	여수	180.8	321.7	1.409
	거문도	170	270.6	1.006
	서귀포	151.6	353	2.014
	제주	142	251.7	1.097
	완도	200.2	302.4	1.022
	추지도	167.8	292	1.242
서해안	대흑산도	185.3	332.5	1.472
	목포	243	399.4	1.564
	군산(외항)	362.3	641.6	2.793
	군산	362.3	620.5	2.582
인천(월미도)	463.5	804.1	3.406	

결정론적 방법에 의한 마루높이 설정에 있어서 설계조위는 약최고고조위 또는 약최고만조위를 사용하고 있다. 하지만, 권혁민 등(2006)은 통계적으로 가장 안정적이면서 산출이 수월한 평균해수면을 기준으로 하는 마루높이 설정방법을 제안한 바 있다. 본 연구는 동일한 방법으로 계절별 일 최대 조위(ASDRTL, Averaged Seasonal Daily Maximum Tide Level)를 기준으로 하는 방법을 제안하고자 하며 이때 평균 해수면과 계절별 일 최대조위의 평균값의 차는 표 4와 같다.

표 4에 보인 바와 같이 서해안이 가장 크고 남해안, 동해안 순으로 나타나는 경향을 보인다. 차는 동해안이 최대 약 0.30 m 이하, 남해안이 서귀포 2.014 m로 최대, 서해안은 인천 3.406 m로 최대 차를 각각 보인다.

4. 기대월파확률 계산

4.1 계산방법

본 연구에서는 권혁민 등(2006)의 계산방법을 준용했다. 본 계산은 우리나라 평균조위 값을 기준으로 하였으며, 기존의 마루높이 설계방법에 의한 마루높이에 대해서도 기대월파확률의 평가를 수월하게 할 수 있도록 설계조위와 평균조위의 차를 변수화 했다. 이의 관계를 보이면 식 (2)와 같다.

$$h_c = \alpha + \beta H'_0 \quad (2)$$

여기서, h_c 는 계절별 일 최대 조위평균(ASDRTL)으로부터 마루까지 높이, α 는 마루높이 조절변수, β 는 환산심해파고

H'_0 의 배율 값이다. 마루높이 h_c 는 권혁민 등(2006)이 정의한 평균해수면이 기준이 아니고 계절별 일 최대 조위평균 ASDMTL로부터 새롭게 정의되었다.

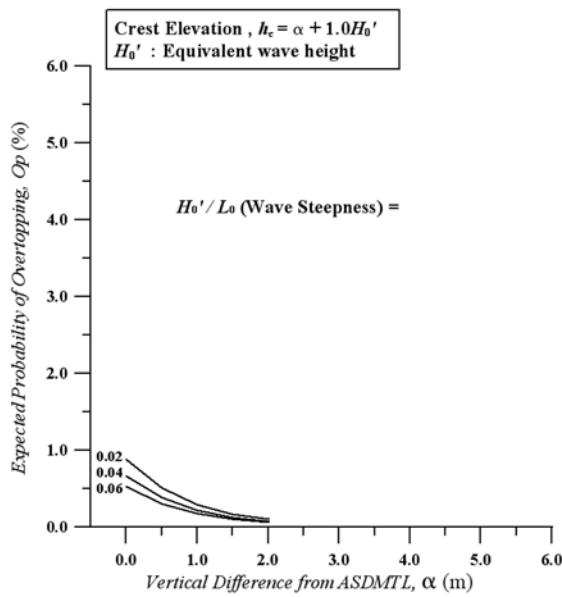
계절별 기대월파확률을 계산하기 위하여 권혁민 등(2005)의 방법을 준용하여 사용기간(life cycle) 50년 동안 재현기간(return period) 50년에 해당하는 매년의 설계파를 하나의 폭풍사상으로 간주하고 정신택 등(2004)이 제안한 극치분포로부터 선택된 파에 대하여 개별파를 Rayleigh분포에 의한 파고주기 결합분포를 계산해 두고 각각의 파에 대한 조위를 대응시켜 계절별 기대월파확률을 계산했다. 계절별 기대월파확률은 각각의 파에 대한 조위 조건을 두고, 처오름 높이를 계산해두고, 정해진 마루높이에 대하여 하나의 폭풍사상에 대한 월파확률을 계산했다. 사용기간 50년 동안 50개의 월파확률을 구하여 이를 산술평균하여 평균월파확률을 계산했다.

최종적으로 계절별 기대월파확률을 계산하기 위하여 충분히 수렴하는 100회를 반복하여 각각 평균월파확률 α 값을

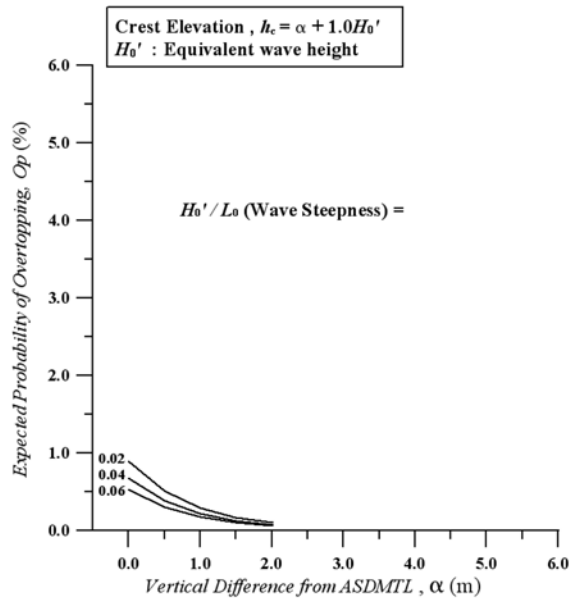
구하고 이를 다시 산술평균했다. 본 연구에서는 이러한 계산 과정을 식 (2)에 보인 값과 파형경사를 변화시키면서 계절별 기대월파확률 값을 계산했다. 환산심해파형경사는 풍파영역인 0.02와 0.04에 대하여 계산했다.

4.2 기대월파확률의 계산 결과

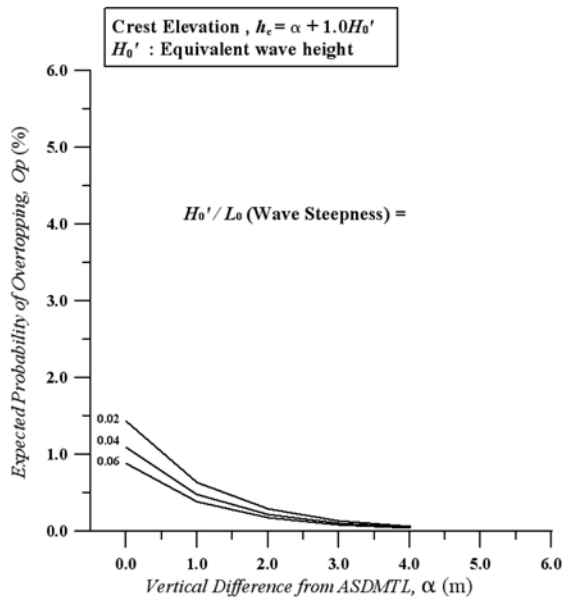
기존의 마루높이 설정은 설계파와 설계조위의 정보에 의해 정해진다. 본 연구는 권혁민 등(2005)의 계산방법을 준용하여 설계조위와 평균조위의 차 α 를 변수로 하여 식 (2)에 보인 바와 같이 마루높이 h_c 의 증감에 따른 기대월파확률 값을 알 수 있도록 정리했다. 단, 권혁민 등(2005)의 계산은 년 단위 평균수위를 기준으로 하였으나 본 연구에서는 계절별 일 최대조위의 평균값을 기준으로 계산하였다. 환산심해파형경사 H'_0/L_0 와 α 값의 변화에 따른 기대월파확률을 보이면 그림 4와 같다. 파형경사 H'_0/L_0 는 풍파영역에 해당하는 0.02~0.04범위에 해당하는 기대월파확률을 보였으며 최근 우



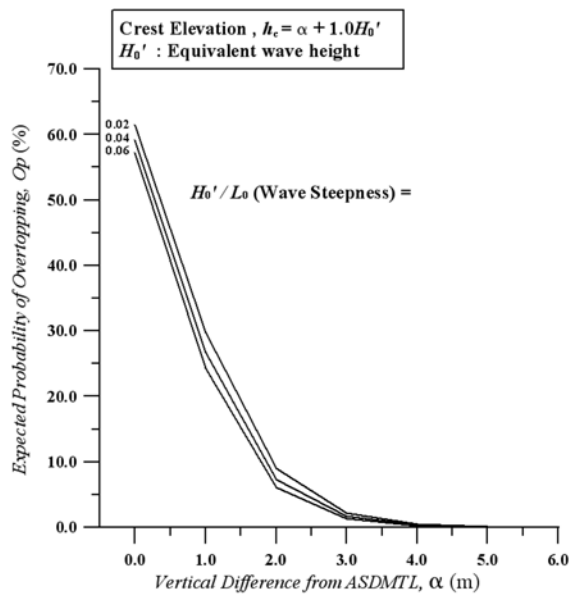
(a) 속초 지역의 여름철 기대월파확률(Tetrapod 사면)



(b) 속초 지역의 겨울철 기대월파확률(Tetrapod 사면)



(c) 통영지역의 여름철 기대월파확률(Tetrapod 사면)



(d) 인천(월미도) 지역의 여름철 기대월파확률(Tetrapod 사면)

그림 4. 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도분포에 따른 테트라포드 피복 사면의 기대월파확률

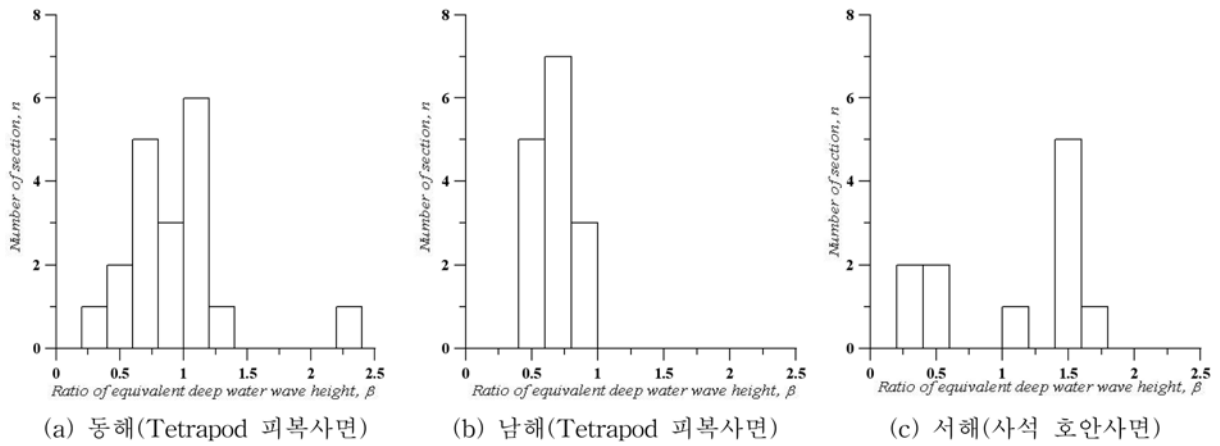


그림 5. 우리나라 해역별 β 값의 분포

표 5. 각 지역 β 값의 변화에 따른 기대월파확률

	지역	MSL (m)	Approx. HHW (m)	Approx. HHW-MSL, α (m)	$\beta=0.8$ 일때의 월파확률 (Op%)		$\beta=0.9$ 일때의 월파확률 (Op%)		$\beta=1.0$ 일때의 월파확률 (Op%)	
					H_0'/L_0 (=0.02)	H_0'/L_0 (=0.04)	H_0'/L_0 (=0.02)	H_0'/L_0 (=0.04)	H_0'/L_0 (=0.02)	H_0'/L_0 (=0.04)
동해	속초	0.20	0.392	0.196	2.921	2.212	1.448	1.093	0.7182	0.5412
	묵호	0.19	0.376	0.188	1.534	1.181	0.833	0.638	0.4612	0.3517
	울릉도	0.16	0.324	0.162	2.046	1.569	1.085	0.827	0.5844	0.4439
	후포	0.14	0.278	0.139	1.693	1.307	0.931	0.714	0.5222	0.3983
	포항	0.12	0.246	0.123	4.119	3.101	2.005	1.507	0.9537	0.7166
	울산	0.30	0.608	0.304	3.039	2.294	1.486	1.120	0.7217	0.5431
남해	부산	0.65	1.298	0.649	2.856	2.157	1.399	1.054	0.6824	0.5136
	가덕도	0.95	1.906	0.953	1.906	1.454	0.990	0.751	0.5212	0.3944
	통영	1.41	2.820	1.410	1.572	1.203	0.387	0.293	0.4555	0.3457
	여수	1.81	3.616	1.808	1.853	1.404	1.093	0.821	0.4717	0.3555
	거문도	1.70	3.400	1.700	1.386	1.046	0.688	0.519	0.3444	0.2590
	제주	1.42	2.840	1.420	1.658	1.264	0.865	0.657	0.4585	0.3468
서해	완도	2.00	4.004	2.002	1.047	0.790	0.521	0.392	0.2619	0.1967
	대흑산도	1.85	3.706	1.853	3.493	2.643	1.675	1.258	0.7739	0.5818
	군산(외항)	3.62	7.246	3.623	2.281	1.747	1.093	0.821	0.5085	0.3819
	인천(월미도)	4.64	9.270	4.635	0.746	0.584	0.387	0.293	0.2039	0.1536
	평균	1.32	2.646	1.323	2.134	1.622	1.055	0.797	0.5402	0.4077

리나라 설계파고가 크게 설정되는 경향을 감안하여 0.06까지 계산하여 보였다.

식 (2)에서 환산심해파고 H_0' 의 배율 값 β 는 1.0으로 전 해역에 대하여 동일하게 적용했다. β 값을 1.0을 적용한 것에 대해서는 4.3절에 자세히 설명하고자 한다.

동해안(속초), 남해안(통영), 서해안(인천)의 결과를 보면 그림 4과 같이 H_0'/L_0 가 작을수록 기대월파확률 값이 크게 나타난다. 또한 α 값의 증가에 따른 기대월파확률 값은 서해안의 경우가 동해안의 경우보다 급격히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 서해안이 동해안보다 조위발생빈도분포의 표준편차가 크기 때문이다. 동해안 북부지역인 속초는 겨울철과 여름철의 기대월파확률 값이 비슷한 수준으로 나타났다.

4.3 마루높이 설정을 위한 기대월파확률의 계산 비교

연안 구조물의 설계에 있어서 마루높이 설정은 파랑 에너

지의 반사와 축조비용에 직접적인 관계가 있으므로 합리적인 평가가 필수 불가결하다. 하지만, 우리나라는 동남서 해역의 조위발생빈도가 상이하어 이를 하나의 기준으로 설명하기가 쉽지 않다. 기존의 방법은 설계조위와 설계파가 결정되면 결정론적인 방법으로 이를 평가하여 마루높이를 설정했다. 하지만 각 해역의 조위 및 파랑 특성이 상이하어 가능성 측면에서 크게 차이가 발생하게 된다.

이영렬(2004)은 전국항만구조물도집(해운항만청, 1992)을 이용하여 지정항만 및 어항의 일부에 대하여 마루높이를 조사했다. 조사방법은 해역별로 구분하여 동해와 남해는 Tetrapod 피복방파제, 서해는 사석 호안을 대상으로 했다. 동해안은 7개항(거진항, 삼척항, 죽변항, 후포항, 도동항, 강구항, 감포항) 총 19개 단면, 남해 3개항(여수신항, 거문도항, 제주항) 총 15개 단면, 서해는 3개항(인천항, 평택항, 군산내항) 총 11개 단면에 대해 조사하여 H_0' 배율 값 β 의 분포를 분석했다.

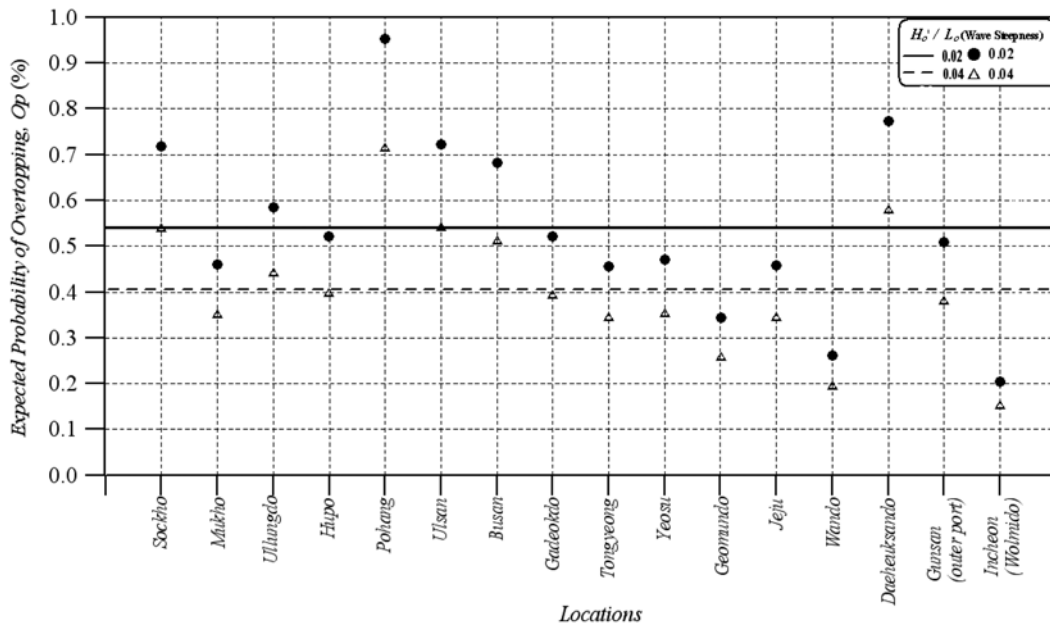


그림 6. 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생시 파형경사에 따른 기대월파확률 비교

그림 5은 조사 대상지의 β 값의 분포를 표현했다.

동해안에 위치한 Tetrapod 피복사면의 마루높이는 그림 5에서 보인 바와 같이 환산심해파고 H_0' 의 약 1.0~1.2배 사이가 가장 많음을 알 수 있다. β 값은 0.6~0.8에 해당하는 단면은 5개 조사되었다. 남해안의 β 값이 0.6~0.8에 해당하는 경우가 7개로 가장 많음을 알 수 있고, 서해안은 사석 호안사면의 β 값은 1.2이상인 7개로 가장 많이 나타나고 있다. 또한 동해안의 β 값의 평균은 약 0.95이며 남해안은 약 0.69, 서해안은 약 1.06이다. 본 연구의 β 값 설정은 우리나라 해역의 β 값의 평균인 약 0.9를 사용하지 않고, 활용의 편리성을 위해 값은 1.0으로 표현했다. 또한 각 지역에 β 값을 조절하여 기대월파확률을 산출하여 표 5에 나타냈다.

본 연구의 Scenario를 통해 얻어진 우리나라 해역의 계절별 기대월파확률을 기존의 마루높이에 대하여 비교·분석한 결과는 그림 6과 같다.

상기한 그림 6은 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생시 파형경사에 따른 기대월파확률을 표현했다. 이는 각 지역별 기존의 마루높이 설정방법에 따라 표현한 것이다. α 값의 결정은 Approx. HHW-MSL을 계산하여 사용했으며 $\beta=1.0$ 에 대한 기대월파확률이다. 본 연구에서는 그림 5는 우리나라 각해역의 여름철 및 겨울철 기대월파확률이며, 동해안은 6곳, 남해안은 7곳, 서해안은 3곳을 대상으로 분석한 것이다.

본 연구에서는 Scenario형 조위발생빈도분포와 극치파고 및 파고주기 결합분포에 의한 주기의 조위에 따른 초오름이 기존의 방식으로 설계한 마루높이를 월파하는 경우에 대하여 평가를 수행했다. Scenario에 의하면 서해안의 경우가 동해안보다 기대월파확률이 높게 계산된다. 그리고 본 Scenario에 의한 평가결과 전해역에 걸쳐 약 0.2%에서 1.0%대를 보이고 있고 파형경사 0.02값의 평균값은 약 0.5402%이며, 0.04값은 0.4077%로 나타난다. 또한 기대월파확률의 최대는 약 0.95%로 보인다. 따라서 기대월파확률에 의한 기준설정이 가능하다고 판단할 수 있다.

5. 우리나라 해역의 새로운 마루높이 설정방법 제안

네덜란드를 비롯하여 유럽 각국에서는 불규칙파의 초오름 높이를 2%초과치 $R_{2\%}$ (개개의 초오름 높이를 크기의 순으로 나열 할 때의 큰 쪽에서 2%에 해당하는 값들의 평균치)를 대표치로 해서 사용하고 제방의 마루높이를 초오름 높이 $R_{2\%}$ 를 기준으로해서 결정하고 있다. 한편 권혁민 등(2006)의 연구 결과에 의하면 년 평균 조위발생빈도와 우리나라 연안의 심해파에 대한 극치분석 값을 조합한 결과는 전 해역의 기대월파확률 값은 0.8%미만이다. 또한 본 연구의 시나리오에 의한 결과는 그림 6에서 나타난 바와 같이 전 해역에 걸쳐 기대월파확률 값이 1%를 초과하지 않음을 보였다. 따라서 우리나라 해역의 파형경사 0.02와 0.04의 평균 기대월파확률 값을 새로운 마루높이 결정 방법으로 제안하고자 한다.

본 연구에서는 그림 6에 보인 각 지역별 기대월파확률의 평균값과 동일하도록 마루높이를 조절하여 기준을 설정하고자 한다. 조절정수 A 는 식 (3)에 보인다.

$$A = \alpha + \alpha' \quad (3)$$

우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도에 따른 기대월파확률 α 값을 파형경사 0.02와 0.04의 평균값인 0.5402%와 0.4077%에 근사하도록 일률적으로 값을 계산하여 식 (3)과 같이 표현했다. 식 (3)에서 A 는 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도에 따른 기대월파확률 값의 파형경사 0.02와 0.04값을 평균하여 각 지역별로 일괄적으로 평균에 근사하도록 산출한 값이다. 또한 식 (4)과 같이 β 값은 1.0으로 고정하여 사용했으며, 계산된 h_c 값의 변화 없이 대상지역의 파형경사 0.02와 0.04의 평균값에 근사하도록 α' 값을 사용하여 조절했다. 산출한 α' 값은 마루높이 설정에 따른 조절변수로 사용되었으며, α' 값이 양수값은 평균값에 대하여 마루높이가 낮음을 나타내며, 음수값은 그 반대임을 의미한다. 식 (3)을 마루높이 h_c 를 관계식 (2)에 대입하면 식 (4)와 같이 된다.

표 6. 우리나라 16개 지점별 조절정수 A ($\beta=1.0$)

	지역	MSL (m)	Approx. HHW (m)	Approx. HHW-MSL, α (m)	월파확률($Op\%$)		조절변수 α' , (m)	조절정수 A, (m)	월파확률($Op\%$)	
					H_0'/L_0 (=0.02)	H_0/L_0 (=0.04)			H_0'/L_0 (=0.02)	H_0/L_0 (=0.04)
동해	속초	0.20	0.392	0.196	0.7182	0.5412	0.255	0.451	0.5405	0.4068
	묵호	0.19	0.376	0.188	0.4612	0.3517	-0.160	0.028	0.5409	0.4124
	울릉도	0.16	0.324	0.162	0.5844	0.4439	0.118	0.280	0.5403	0.4108
	후포	0.14	0.278	0.139	0.5222	0.3983	-0.039	0.100	0.5411	0.4131
	포항	0.12	0.246	0.123	0.9537	0.7166	0.477	0.600	0.5405	0.4063
	울산	0.30	0.608	0.304	0.7217	0.5431	0.288	0.592	0.5407	0.4067
남해	부산	0.65	1.298	0.649	0.6824	0.5136	0.232	0.881	0.5409	0.4068
	가덕도	0.95	1.906	0.953	0.5212	0.3944	-0.041	0.912	0.5404	0.4090
	통영	1.41	2.820	1.410	0.4555	0.3457	-0.215	1.195	0.5405	0.4105
	여수	1.81	3.616	1.808	0.4717	0.3555	-0.143	1.665	0.5404	0.4074
	거문도	1.70	3.400	1.700	0.3444	0.2590	-0.417	1.283	0.5405	0.4070
	제주	1.42	2.840	1.420	0.4585	0.3468	-0.228	1.192	0.5408	0.4094
	완도	2.00	4.004	2.002	0.2619	0.1967	-0.672	1.330	0.5401	0.4068
서해	대흑산도	1.85	3.706	1.853	0.7739	0.5818	0.351	2.204	0.5405	0.4065
	군산(외항)	3.62	7.246	3.623	0.5085	0.3819	-0.046	3.577	0.5406	0.4062
	인천(월미도)	4.64	9.270	4.635	0.2039	0.1536	-0.687	3.948	0.5402	0.4093
평균		1.32	2.646	1.323	0.5402	0.4077	-0.058	1.265	0.5406	0.4084

표 7. β 값의 변화에 따른 조절정수 A

	지역	Approx. HHW-MSL, α (m)	$\beta=0.8$ 일때의 월파확률($Op\%$)			$\beta=0.9$ 일때의 월파확률($Op\%$)		
			조절정수 A, (m)	H_0'/L_0 (=0.02)	H_0/L_0 (=0.04)	조절정수 A, (m)	H_0'/L_0 (=0.02)	H_0/L_0 (=0.04)
동해	속초	0.196	0.477	2.130	1.611	0.477	1.056	0.796
	묵호	0.188	-0.233	2.133	1.650	-0.125	1.055	0.810
	울릉도	0.162	0.101	2.136	1.638	0.201	1.056	0.805
	후포	0.139	-0.095	2.133	1.652	0.007	1.055	0.811
	포항	0.123	0.704	2.134	1.604	0.672	1.055	0.793
	울산	0.304	0.663	2.132	1.607	0.647	1.054	0.793
남해	부산	0.649	0.942	2.135	1.610	0.930	1.055	0.795
	가덕도	0.953	0.819	2.156	1.646	0.882	1.055	0.801
	통영	1.410	1.046	2.135	1.640	1.130	1.055	0.805
	여수	1.808	1.662	2.135	1.620	1.679	1.055	0.797
	거문도	1.700	1.306	2.135	1.615	1.310	1.055	0.796
	제주	1.420	1.087	2.135	1.631	1.153	1.055	0.802
	완도	2.002	1.352	2.134	1.615	1.356	1.055	0.796
서해	대흑산도	1.853	2.379	2.133	1.600	2.322	1.055	0.793
	군산(외항)	3.623	3.677	2.133	1.602	3.650	1.055	0.792
	인천(월미도)	4.635	3.917	2.140	1.642	3.942	1.056	0.804
평균		1.323	1.238	2.136	1.624	1.265	1.055	0.799

$$h_c = (\alpha + \alpha') + \beta H_0' = A + \beta H_0' \quad (4)$$

상기한 바와 같이 식 (4)로 우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도에 따른 기대월파확률 값을 마루높이 조절정수 A를 사용하여 파형경사 0.02와 0.04를 정리하면 표 6과 같다.

또한 표 7에서는 표 5에 나타난 β 값 0.8과 0.9의 기대월

파확률 평균값을 사용하여 조절정수 A를 산출했다.

우리나라 해역의 계절별 일 최대 조위발생빈도에 따른 기대월파확률 값의 파형경사 0.02와 0.04를 값에 따른 각 지역을 비교하면 포항의 기대월파확률이 0.9537%와 0.7166%로 가장 높고 다음으로 서해안의 대흑산도와 울산 순으로 나타났다. 또한 파형경사 0.02와 0.04에 따른 기대월파확률 값의 해역별 평균값으로 비교하면 동해안 0.6602%와

표 8. 마루높이 설정을 위한 조절정수 A

	지역	$H_0/L_0 (=0.02)$		$H_0/L_0 (=0.04)$	
		A (m)	기대월파확률 (Op%)	A (m)	기대월파확률 (Op%)
동해	속초	0.471	0.4735	0.216	0.4736
	묵호	0.151	0.4738	-0.214	0.4737
	울릉도	0.484	0.4740	0.064	0.4738
	후포	0.245	0.4734	-0.046	0.4734
	포항	0.711	0.4736	0.471	0.4740
	울산	0.724	0.4737	0.439	0.4740
남해	부산	1.013	0.4740	0.729	0.4739
	가덕도	1.061	0.4740	0.747	0.4735
	통영	1.359	0.4743	1.018	0.4736
	여수	1.803	0.4740	1.057	0.4739
	거문도	1.404	0.4741	1.144	0.4736
	제주	1.374	0.4739	0.992	0.4739
	완도	1.451	0.4738	1.190	0.4739
서해	대흑산도	2.331	0.4742	2.054	0.4741
	군산(외항)	3.675	0.4740	3.461	0.4741
	인천(월미도)	4.039	0.4739	3.847	0.4742
평균		1.3935	0.4739	1.0731	0.4738

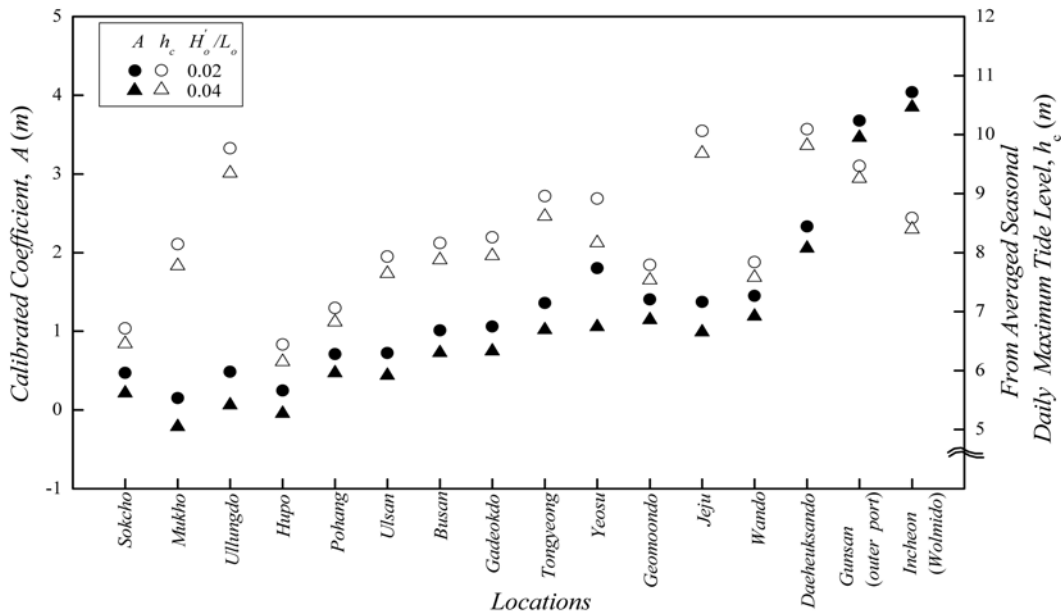


그림 7. 동일한 기대월파확률 적용 시 우리나라 해역의 조절정수 및 마루높이

0.4991%, 남해안 0.4565%와 0.3445% 서해안 0.4954%와 0.3724%로 나타나며 서해안과 남해안은 서로 흡사한 평균값과 두 해역의 평균값은 모두 0.5%이하와 0.4%이라는 공통적인 특성을 보였다. 동해안의 경우 평균값으로 0.6602%와 0.4991%로 서남해안의 평균값과 다소 높은 평균값을 보였다.

한편 마루높이 설정의 기준을 제안하기 위하여 상기한 파형경사 0.02와 0.04의 평균 기대월파확률 값을 평균한 값을 산출하여 기준으로 했다. 파형경사 0.02와 0.04의 기대월파확률 값을 평균한 값 약 0.47395%가 되며 이를 따라 우리나라 16개 지점을 대상으로 기대월파확률 값의 평균값과 각각의 파형경사 값이 서로 대응하는 값을 산출했다. 표 8과

같이 표현했다.

표 8에 보인 바와 같이 동해안 지역은 A값이 1 m 미만이며, 남해안은 2 m 미만, 서해안은 약 4 m 미만으로 나타났다. 동일한 월파확률이라도 파향경사에 따라 서로 다른 A값을 보였다. 또한 표 6에서 보인 마루높이 설정을 위한 조절변수 α'의 경우 음수로 나타난 지역은 4.3절에서 기술한 바와 같이 값을 1.0으로 산정되었기 때문이며, 표 8의 결과는 식 (4)를 사용하여 그림 7과 같이 도시된다.

그림 7은 동일한 기대월파확률 값을 적용시켰을 경우 각 대상지역의 파형경사 0.02와 0.04에 따른 조절정수와 마루높이이다. 조절정수는 서해가 가장크고 남해안 동해안 순으로 나타나는 경향이 뚜렷하게 보인다. 이는 우리나라 해역별 파

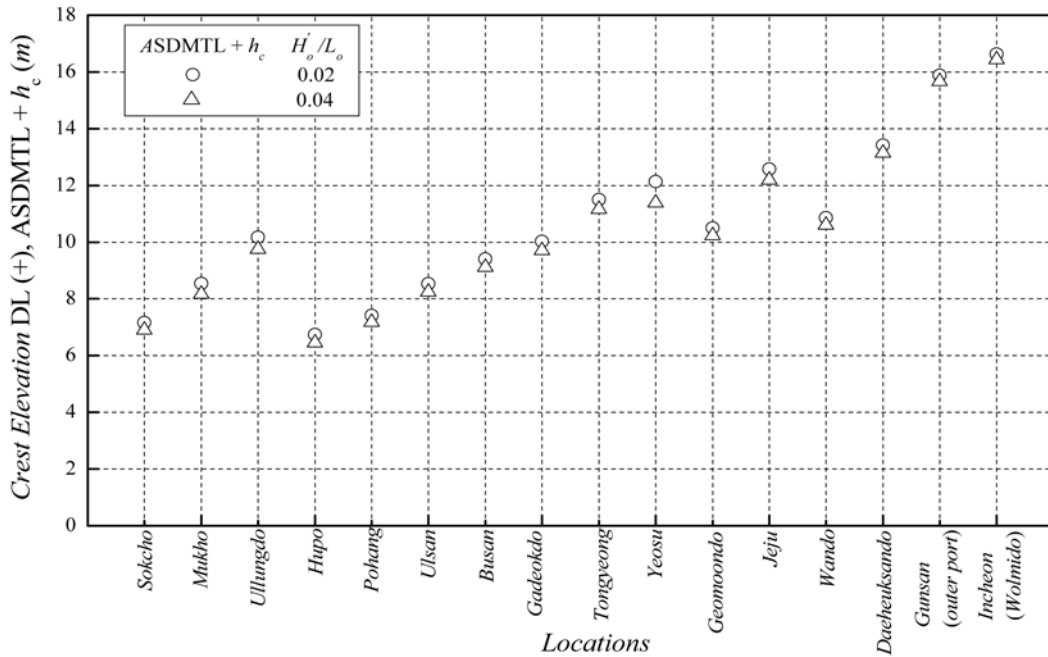


그림 8. 동일한 기대월파확률을 허용할 경우에 있어서 각 해역의 경사식 방파제 마루높이의 위치

형경사에 따른 기대월파확률 비교(권혁민 등, 2006)에서 서해안이 다른 지역보다 기대월파확률이 작게 나타나는 경향과 상이한 결과임을 알 수 있다. 즉, 설계과급 파와 조우할 가능성이 높은 계절별 조위특성을 고려하면 서해안의 경우는 마루높이가 상대적으로 높게 추정됨을 알 수 있다. 이는 우리나라와 같이 조위발생빈도분포 특성이 해역별로 상이한 지역에 있어서 월파를 방지해야 하는 계절을 대상으로 하는 마루높이 설정의 하나의 방법으로써 생각할 수 있다. 마루높이 h_c 는 그림 7에 보인 바와 같이 서해안 지역이 뚜렷이 크게 나타나는 경향을 보이고 있지 않다. 이는 본 연구에서 제안하는 마루높이 h_c 설정을 위한 시나리오가 전 해역에 특정한 경향을 보이지 않음으로써 조위발생빈도분포 특성이 상이한 해역에 대하여 비교적 합리적인 기준이라고 할 수 있다.

울릉도, 제주, 대흑산도는 기존의 결정론적 설계기준으로 볼 때, 다른 지역에 비하여 월파확률이 높음을 의미하며 마루높이 h_c 가 약 10 m에 이르는 것으로 계산된다. 본 계산결과를 이용하면 예를 들어 인천의 마루끝단 수직위치를 구하고자 할 경우는 먼저 환산심해파에 의한 파형경사 0.02에 대하여 h_c 가 그림 7에서 8.7m 그리고 일 최대조위 평균 값이 표 4에서 ASDMTL이 DL (+)8.041 m이므로 두 값을 더하면 마루끝단의 수직위치는 DL (+)16.741 m가 된다. 그림 8은 각 해역에 있어서 파형경사에 따른 마루높이를 보인 것이다. 이때, 사면은 TTP로 2층 피복된 경우이다.

그림 8에 보인 바와 같이 우리나라 전해역의 경사식 방파제의 기대월파확률이 동일하도록 조절된 마루높이의 위치는 대체로 동해안보다 서해안의 경우가 크게 나타난다. 이는 서해안의 조차가 크게 나타나는 것과 같다. 동해안의 경우는 울릉도가 약 DL (+)10 m로 크게 나타나고 있다. 남해의 경우는 제주가 크게 나타나고 있다. 서해는 대흑산도가 11 m를 상회하는 큰 값으로 나타난다.

6. 결론 및 추후연구

계절별 조위발생 빈도분포를 확인하여 고파랑 내습시 일 최대조위 분포와 연동하는 신뢰성 해석을 월파확률에 관하여 수행하였다. 본 연구에서 제안한 시나리오를 이용하면 전 해역을 고파랑 및 고수위가 동반하는 경우에 대하여 유사한 월파확률을 가지는 마루높이를 정할 수 있다. 본 연구에서 제안한 시나리오에 의하면 전 해역에 걸쳐 기대월파확률이 약 0.18%에서 0.95%내외를 보이고 있어 약 1.0%내외를 보이고 있다. 이러한 결과에 기초하여 본 연구는 전 해역을 동일한 수준의 기대월파확률을 가지도록 조절하는 것이 가능함을 보였으며 마루높이를 설정하는 방법을 구체적으로 제안했다. 본 연구는 테트라포드를 전사면 피복제로 사용한 경사식 방파제 또는 경사식 호안을 대상으로 했으나 동일한 방법으로 케이슨 식, 혼성식 방파제, 호안에 대해서도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

추후 연구로써 조위의 계절별 또는 월별발생빈도와 최대유 의파의 월별발생빈도의 조우확률 분포를 고려한 정밀한 기대월파확률계산이 기대된다.

참고문헌

- 권혁민, 이영렬, 조홍연(2005) 실해역의 조위발생빈도분포를 고려한 기대월파확률. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1B호, pp. 1-8.
- 권혁민, 박현석, 안경모, 천세현(2006) 신뢰성 해석에 의한 우리나라 해역별 기대월파확률 특성. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, pp. 399-404.
- 박현석(2005) **신뢰성 해석에 의한 해역별 기대월파확률 비교**, 석사학위논문, 경주대학교.
- 오정은(2005) **월파에 대한 호안의 신뢰성 해석**, 석사학위논문, 서울대학교.
- 오정은, 서경덕(2007) 마루높이 설계에 대한 허용월파기준, 2007 **대한토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 3671-3674.

- 이영렬(2004) 신뢰성 해석에 의한 경사식 방파제의 기대월파확률에 관한 연구, 석사학위논문, 경주대학교.
- 이철웅(2003) 월파에 대한 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석, 한국해안해양공학회지, 한국해안해양공학회, 제15권, 제4호, pp. 214-223.
- 이철웅(2005) 처오름의 신뢰성 해석에 대한 파고-주기결합분포의 영향, 한국해안해양공학회지, 한국해안해양공학회, 제17권, 제3호, pp. 178-187.
- 정신태, 김정대, 조홍연(2004) 한국 연안 심해 설계파고의 극치 분포 특성, 한국해안해양공학회지, 한국해안해양공학회, 제16권 3호, pp. 130-141.
- 한국항만협회(2005) 항만어항 설계기준 신뢰성 설계기법 검토 용역 최종보고서.
- 해양수산부(1999) 항만 및 어항 설계기준 (상권), pp. 173-176, 701-704.
- 해양수산부(2001) 경사식 방파제의 최적설계기술개발(II). pp. 319-365.
- 合田良實・永井康平 (1974) 波浪の統計的性質に関する調査・解析. 港灣技術研究所報告.第13卷 第1號, pp. 3-39, 300-305.
- 合田良實 (1989) 土木講座 海岸・港灣, 止揚社, p. 300.
- Ang, Alfredo, H.-S., and Tang, Wilson, H. (1976) Probability concepts in engineering planning design, Vol. 2.
- Goda, Y. (1985) Random seas and design of maritime structure. University of Tokyo press, pp. 151, 211.
- Günbak, A.R. (1979) Wave mechanics principles on the design of rubble mound breakwater, the Norwegian institute of technology, Trondheim, Norway.
- Kweon, H.M. and Suh, K.D. (2003) Reliability analysis of the expected overtopping probability of rubble mound breakwater. ISOPE, pp. 493-496.

(접수일: 2009.2.2/심사일: 2009.3.26/심사완료일: 2009.6.2)