

설계조위와 관련된 약최고고조위의 시 · 공간적 편차

Spatio-temporal Variability of AHHW in Relation with the Design Sea Level

강주환* · 주양미* · 조홍연** · 권혁민***

Ju Whan Kang*, Yang-Mi Joo*, Hongyeon Cho** and Hyuck-Min Kweon***

요 지: 설계조위 산정에 종종 이용되고 있는 약최고고조위는 발생빈도가 불분명할 뿐 아니라 평균해수면 상승에 따른 시간적 편차 및 해역별 조위특성 차이에 기인한 공간적 편차 등의 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 해역별로 주요 4대분조 및 연주소 등의 비율을 조사하였고 확률분포함수에 의한 해석을 시행하였다. 시간적 편차문제는 최신조위자료를 활용함으로써 쉽게 해결될 수 있다. 공간적 편차문제를 해결하기 위하여 연주조를 고려함으로써 하절기에 형성되는 약최고고조위를 대안으로 제시하였다. 분석결과 남해안에서 10 cm 이상, 동해안에서 15~25 cm 정도의 설계조위 증분이 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어: 약최고고조위, 해수면 상승, 공간적 편차, 연주소, 확률분포함수

Abstract: The approximately highest high water(AHHW), which has been used frequently as a basis of the design sea level, has not only ambiguous return period but also spatio-temporal problems induced by sea level rise and the spatial variability of tidal characteristics. The ratios of 4 major constituents with other constituents were investigated. In addition, tidal data were analyzed by probability density function. The temporal variability may be cured by using the latest tidal data. And the AHHW at summer was examined to lessen the spatial variability. The results show that the design sea levels need to increase by 10 cm or more at the Southern Coast and by 15~25 cm at the East Coast.

Keywords: AHHW, sea level rise, spatial variability, annual constituent, probability density function

1. 서 론

해양수산부(MOF, 2005)에 따르면 폭풍해일 대책에 대한 설계조위 산정방법으로 ‘1) 기왕고극조위 또는 이것에 약간의 여유를 더한 조위’ 또는 ‘3) 해일 수치모형실험 등에 의해 해일고를 추산하는 경우는 약최고고조위와 해일고를 더한 조위’ 등을 포함해 약최고고조위와 관련된 4가지 항목을 제시하고 있다. 그런데 이 내용은 일본 항만협회에서 제시한 내용(MLIT, 2008)과 거의 동일하며 일본에서 제시한 삭망평균고조면 대신 우리나라에서는 약최고고조위로 치환한 차이 정도만 있는 상태이다. 또한 교량의 수면상 높이를 표시하는 기준 역시 약최고고조위를 채용하는 것으로 되어 있다. 이와 같이 설계조위 산정에 있어 같은 맥락의 상반된 조위면인 약최저저조위(approximately lowest low water; ALLW)와 함께 약최고고조위(approximately highest high water; AHHW)는 대표적인 기준조위면으로 활용되고 있다.

평균해수면(mean sea level; MSL)으로부터 주요 4대분조(M2+S2+K1+O1)의 진폭만큼 증감시킨 두 조위면은 대조(M2+S2) 이상으로 드물게 발생하는 고/저조위면의 개념을 내포하고 있으며, 한국해양학회(KSO, 2005)에서 발간한 해양과학용어사전에 따르면 “주요 4대분조 각각에 의한 최고 수위 상승치가 동시 발생했을 때의 고조위로서, 해륙의 경계인 해안선으로 채택함”으로 기술되어 있다. 상기 해양수산부(MOF, 2005)의 1)항과 3)항을 관련지어 해석하면 특정 해역에서의 기왕고극조위는 ‘매우 높은 조위상황’인 약최고고조위가 발생한 상황에 폭풍해일이 겹친 상황을 상정하고 있는 것으로 파악된다. 이렇듯 설계조위 산정시 대표적인 조위면으로 사용되고 있는 약최고고조위와 약최저저조위는 주요 4대분조로 설정된다는 확정적인 개념에 근거하긴 하지만, 발생빈도가 명확한 대조평균고(저)조위와 소조평균고(저)조위, 또는 일본의 경우처럼 삭망평균고(저)조위와는 달리 어느 정도 빈도로 발생하는 것인지 불분명하다. 단지 국토해양부(MLTM,

*목포대학교 토목공학과 (Corresponding author : Ju Whan Kang, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam 534-729, Korea, Tel:+82-61-450-2473, Fax:+82-61-452-6468, jwkang@mokpo.ac.kr)

**한국해양과학기술원 해양환경보전연구부, 책임연구원 (Marine Environment and Conservation Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

***경주대학교 철도건설환경공학과 (Dept. of Railway Construction Environmental Engineering, Gyeongju University, Gyeongbuk, Korea)

2009)에서 고시된 행정규칙 제2조(정의)에 따르면 “약최고고조면이라 함은 일정 기간 조석을 관측하여 분석한 결과 가장 높은 해수면을 말한다.”로 막연하게 매우 높은 조위로 기술되어 있다.

또한 4대분조 진폭도 변동이 있을 수 있지만 평균해수면의 변화는 전지구적 현상으로서 최근 자료에 의하면 서해안, 남해안, 동해안 각 지역에서 평균적으로 각각 3.0, 3.6, 4.9 mm/yr의 상승률을 보이고 있다(KHOA, 2012). 이에 따라 평균해수면 뿐 아니라 약최고고조위와 약최저저조위 역시 상승추세를 보이게 된다. 그러나 기준조석의 약최저저조위로 설정되는 기본수준면의 경우 개정될 경우 해도의 수심변경 등 방대한 후속작업이 수반되므로 빈번한 개정이 용이치 않은 실정이다. 반면 약최고고조위로 설정되는 설계조위 산정은 기준조석 설정시기 이후의 평균해수면 변화가 반영되어야 하므로 적절한 시기에 개정작업이 요구된다. 본 연구에서 해석대상으로 선정한 조위관측소는 서해안의 인천(IC), 군산(GS), 목포(MP), 남해안의 여수(YS), 통영(TY), 부산(BS), 동해안의 포항(PH), 속초(SC) 등 8곳으로 각 조위관측소별 기준조석 설정현황을 Table 1에 제시하였다.

이와 같이 기준조석으로부터 산정된 약최고고조위는 해안 및 항만구조물 설계시 가장 기본적인 정보임에도 불구하고 평균해수면 상승과 궤를 함께 하여 지속적인 상승추세를 보이고 있으므로 설계기준으로 설정하기에 다소 합당치 않은 측면이 있다. 더불어 약최고고조위는 발생빈도가 명확하지 않을 뿐 아니라 해역별로 큰 차이를 보이고 있는 점도 비과학적인 측면이 되고 있다. Jeong et al.(2005)은 조위관측소 조위자료 분석결과 약최고고조위 초과확률이 인천의 0.2%로부터 포항의 14.9%까지 매우 큰 편차를 보이고 있음을 언급하였고, 이에 따라 해역마다 구조물에 대한 조위설계빈도가 다르게 반영되고 있음을 지적한 바 있다. 최근 포항 및 부산 등지의 해안지역에서 방파제 및 호안의 월파가 빈번히 발생하여 대책을 요구하는 목소리가 높아진 것도 이와 무관하지 않은 것으로 판단된다.

이와 같이 약최고고조위는 해안구조물 설계시 빈번하게 사용되는 개념이지만 상기와 같은 문제제기는 Jeong et al. (2005)을 제외하고는 전무한 실정이며, 단지 조위에 대한 빈

도분포를 쌍봉형으로 가정하여 제시한 연구(Cho et al., 2004; Kweon et al., 2006) 등을 통해 임의의 조위면에 대한 초과확률을 간접적으로 확인할 수 있는 정도이다. 본 연구에서는 설계기준으로서 약최고고조위면에 대한 제반 문제점에 대한 정량적인 해석을 시행하였고 이를 개선할 수 있는 방안에 대해서도 고찰하였다.

2. 약최고고조위 시 · 공간적 변화상

2.1 시간적 변화양상

조위관측소별 약최고고조위의 변화양상을 고찰하고자 1980년대 이후의 변화양상을 평균해수면 및 4대분조 변화와 함께 Fig. 1에 도시하였다. 결측이 많았던 해는 배제되었으며, 목포의 경우 조석환경변화(Kang, 1999) 시기를 배제하기 위하여 기준조석 설정시기 이후에 해당하는 1999년 이후 자료를 대상으로 선정하였다. 이들의 변화양상을 파악하기 위하여 선형회귀분석을 시행하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 이를 보면 평균해수면의 경우 남해안인 통영에서 1.7 mm/yr로 가장 적은 폭의 상승률을 보이는 반면 포항에서 6.1 mm/yr로 최대의 상승을 보이고 있으며 여타 해역에서는 대략 2~4 mm/yr 정도의 상승추세를 보이고 있다. 이러한 수치는 최근의 해수면 상승률을 조사한 국립해양조사원(KHOA, 2012) 결과와도 일맥상통하고 있다. 반면 4대분조 진폭은 군산을 제외한 전체 해역에서 감소추세를 보이고 있으며 특히 남해안에서의 감소추세가 두드러지게 나타나고 있다.

이와 같은 평균해수면 및 4대분조 진폭 변화에 따라 약최고고조위 역시 목포와 남해안인 여수 및 통영에서만 약간의 감소추세를 보이고 있는 반면 다른 모든 지역에서 증가추세를 보이고 있다. 특히 2000년 이후의 평균해수면 증가추세가 뚜렷한 포항의 약최고고조위 증가추세가 매우 두드러지게 나타나고 있다. 남해안을 중심으로 20~30년간 지속되고 있고 현재도 진행중인 4대분조 진폭의 감소추세에 대한 원인은 밝혀진 바 없으며 본 연구의 범위를 벗어난 사항이다. 그러나 4대분조 진폭의 감소추세가 계속 지속될 수는 없을 것이고 언젠가는 상승추세로 반전될 수 있으며 그 경우 약최고고조위의 상승추세는 더욱 가속화될 것으로 예상할 수 있다. 이러한

Table 1. Representative tide

Station	Period	MSL(cm)	AHHW(cm)
West	IC 1975.6-1977.5	463.5	927.0
	GS 1980.3-1982.3	371.3	742.5
	MP 1999.1-2002.12	243.0	486.0
South	YS 1983.1-1984.12	180.8	361.6
	TY 1976.1-1976.12	141.0	282.0
	BS 1974.1-1974.12	64.9	129.8
East	PH 1973.1-1975.12	12.3	24.6
	SC 2011.5-2012.4	19.5	39.0

Table 2. Rate of variation (mm/yr)

Station	MSL	Maj. Const.	AHHW
IC	3.9	-1.3	2.6
GS	1.9	3.8	5.7
MP	2.2	-2.5	-0.3
YS	1.8	-3.5	-1.7
TY	1.7	-2.5	-0.8
BS	3.2	-1.8	1.4
PH	6.1	0.0	6.1
SC	2.3	-0.3	2.0

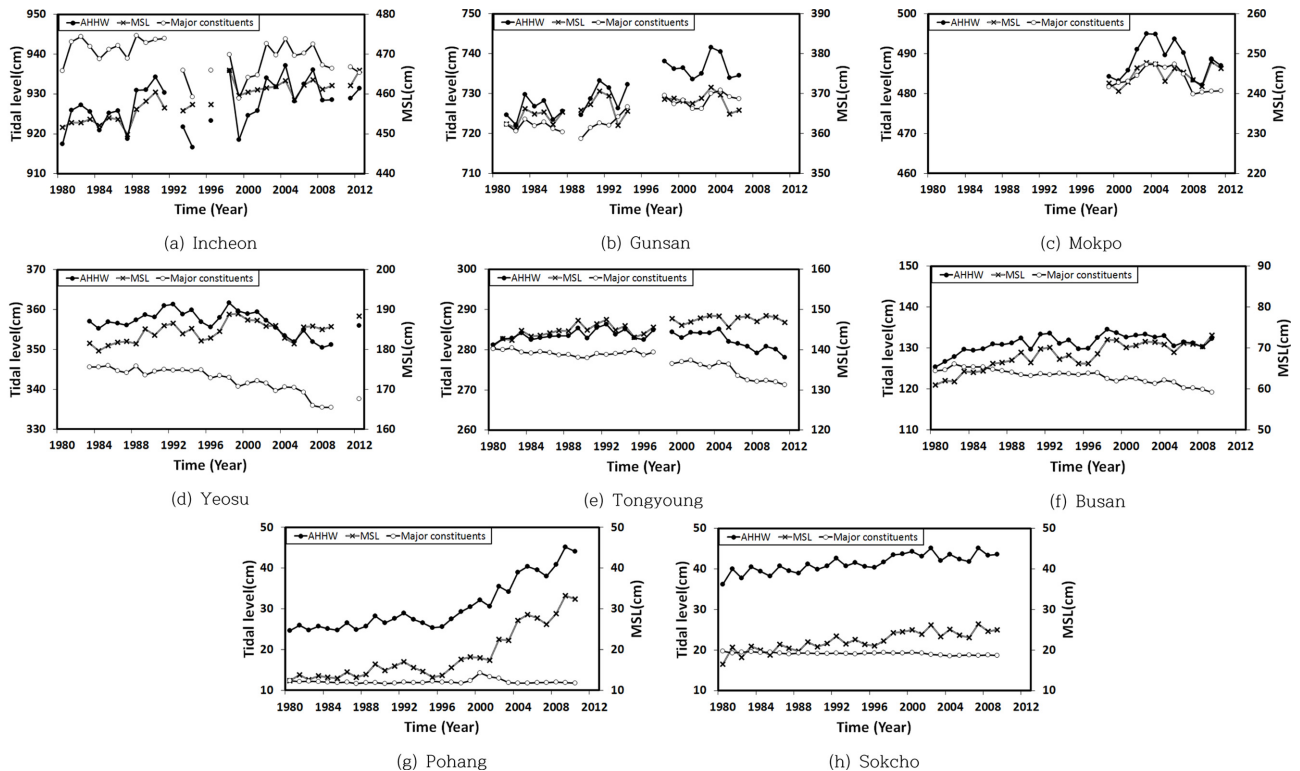


Fig. 1. Variations of AHHW, major constituents and MSL.

배경하에 Table 1에 제시된 바와 같이 기준조석 설정시기가 30년을 훨씬 초과하고 있는 조위관측소에 대해서는 약최고고조위 및 약최저저조위 등의 기준조위면에 대한 개정작업의 필요성이 제기되고 있다.

2.2 초과확률의 공간적 편차

분조별 변화 및 특히 평균해수면 상승과 맞물려 향후 약최고고조위는 지속적인 상승이 예상되고 있으며, 공간적으로도 분조조건과 평균해수면 상승률에 차이가 있어 모든 조위관측소에서 서로 다른 특성을 보이고 있다. 이와 같은 공간적 편차양상을 파악하기 위하여 먼저 국내 대표적인 조위관측소의 조위자료를 분석하여 관측소별 약최고고조위 초과확률을 산정하였다. 전술한 바와 같이 기준조석에서 제시된 약최고고조위는 조위관측소별로 산정시기가 동일하지 않으므로 일관성 있는 비교를 위하여 모든 조위관측소에서 동일한 시기의 조위자료를 수집하였다. 국내 관측소 전체적으로 결측치가 가장 적은 2001~2005년 자료(Cho et al., 2011; Fig. 1 참조)를 선택하였으며, 조화분석을 통해 평균해수면 및 4대분조의 진폭을 산정한 후 이로부터 약최고고조위를 산정할 수 있다. 기준조석에서 제시되는 공식적인 약최고고조위와 구분하기 위하여 이렇게 산정된 약최고고조위 및 평균해수면을 각각 약최고고조위(05)와 평균해수면(05)로 표기하기로 한다. 약최고고조위(05)는 Table 1에 제시된 해양조사원에서 기준조석을 통해 산정된 공식적인 약최고고조위와는 일치하지 않지만 동일한 시기의 일관성 있는 자료로서 본 논

문에서는 기준조석 대신 약최고고조위(05) 자료를 해석하고자 한다.

5년간 매시별 예측치 조위자료 중 약최고고조위(05)를 초과하는 조위자료의 개수를 파악하여 초과확률을 산정하였다. 그 결과를 Table 3에 제시하였는데 조차가 클수록 초과확률이 작음을 확인할 수 있으며, 1시간 자료의 초과확률이 서해안의 경우 0.1~0.3% 정도이며 남해안은 0.8~1.9% 정도로 약간 큰 값을 보이는 반면 동해안에서 8% 이상이며 특히 포항에서 19% 정도의 초과확률을 보이고 있는데, 이는 Jeong et al.(2005)이 조위분포함수로부터 계산된 초과확률과 대체적으로 부합하는 수치이다. 또한 1시간 자료 중 고조위 자료만을 선별한 후 약최고고조위(05)의 초과확률을 Table 3에 함께 제시하였는데, 이 역시 인천의 경우 1.16%(연 8회)에서

Table 3. Exceedance probability(%) of AHHW(05)

St.	AHHW(05) (cm)	Hourly data			HWL data		
		Total	Exceed	Prob.	Total	Exceed	Prob.
IC	931.4	43824	47	0.11	3527	41	1.16
GS	737.0	43824	101	0.23	3523	75	2.13
MP	491.3	43824	128	0.29	3537	91	2.57
YS	355.4	43824	337	0.77	3530	210	5.95
TY	283.9	43824	351	0.80	3532	213	6.03
BS	132.5	43824	816	1.86	3530	395	11.19
PH	36.0	43824	8323	18.99	3825	1049	27.43
SC	43.2	43824	3668	8.37	3513	639	18.19

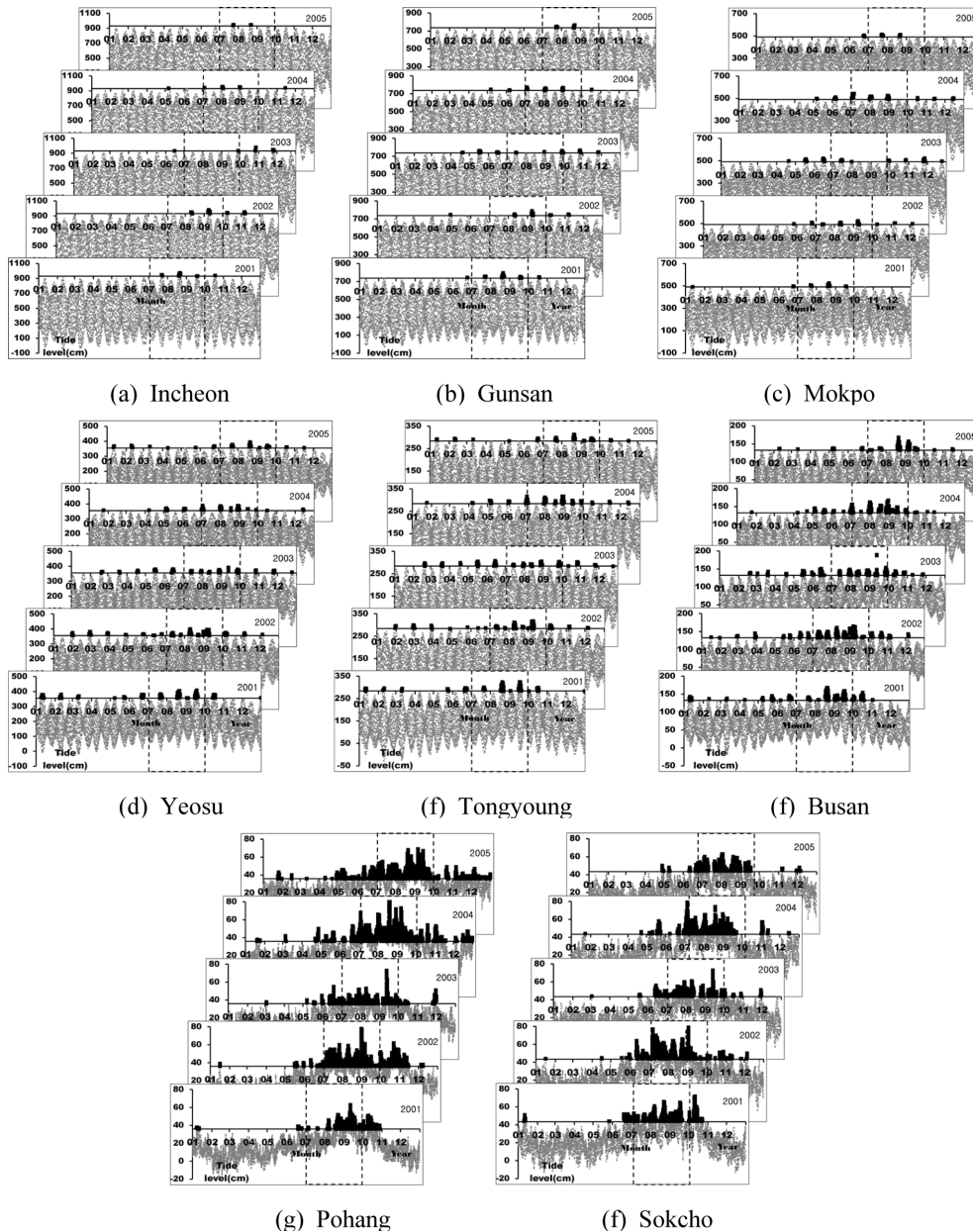


Fig. 2. exceedance of AHHW(05) during 2001~2005.

포항의 27.43%(연 210회)까지 다양한 분포를 보이고 있다. 즉, 전술한 바와 같이 약최고고조위는 ‘매우 높은 조위 상황’이라는 의미가 해석별로 초과확률에 큰 차이를 보이고 있다는 것은 특기할 만하며, 설계조위 산정에 일괄적으로 적용되기에는 다소 비과학적인 측면으로 간주될 수 있다. 이와 같이 약최고고조위라는 조위면은 확률적인 기반에서 설정된 것이 아니기에 신뢰성 설계와 같이 초과확률개념이 수반되는 해석에 사용하기에는 다소 부적절한 측면이 인정되고 있다.

이렇게 해석별로 약최고고조위(05) 초과확률에 적지 않은 차이를 보이는 원인을 파악하기 위하여 Table 3에 제시된 자료에서 매년 매시별 조위자료에 대한 약최고고조위(05) 초과여부를 Fig. 2에 제시하였다. 수평축이 약최고고조위에 해당되고 이 선을 초과하는 조위를 진하게 표기하였는데, 맨 앞이 2001

년 상황이고 5년간의 자료가 순차적으로 뒤에 이어 도시되어 있다. 서해안의 경우 하절기 중 일부 대조기 고조시에, 남해안의 경우 하절기의 거의 모든 대조기 고조시를 포함하여 여타 계절에서도 일부 대조기 고조시에 초과되는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 동해안에서 더욱 심해져 하절기 내내 소조기 고조시에도 초과되고 있음을 보이고 있다. 이와 같이 하절기에 집중적으로 초과되는 이유는 주로 연주조인 Sa분조에 기인하는 것으로 파악된다. 즉, Fig. 2에서도 나타나고 있는 바와 같이 평균해수면이 하절기에 높게 형성되는 연중변화와 관련되어 고조위 역시 하절기에 높게 나타나고 있는 것이다. 이를 확인하기 위하여 해석기간 5년간을 평균한 월별 평균해수면의 최대 및 최소값을 조사하여 Sa분조 진폭(H_{ss})의 두 배 결과와 함께 Table 4에 제시하였는데 양자가 거의 부합하는 결과를 보이고 있다.

Table 4. Monthly variation of MSL (2001~2005) (cm)

St.	Max(month)	Min(month)	Max-Min	2H _{Sa}
IC	482.0(8)	444.7(2)	37.3	39.0
GS	388.0(8)	352.0(2)	36.0	38.0
MP	266.6(9)	228.9(2)	37.7	39.2
YS	204.2(9)	169.6(2)	34.6	34.0
TY	164.6(9)	133.9(3)	30.7	29.8
BS	84.2(8)	60.1(3)	24.1	23.6
PH	38.1(8)	11.6(2)	26.5	25.8
SC	39.0(8)	12.7(2)	26.3	24.8

2.3 분조별 특성

각 조위관측소별로 분조의 진폭비를 2001년~2005년 자료로부터 취득하여 Table 5에 제시하였다. 총 102개 분조의 진폭이 산정되었는데, 전체분조의 진폭에 대한 각 분조별 진폭비가 해역별로 뚜렷하게 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 4대분조의 진폭은 서해안에서 월등히 크고 남해안, 동해안으로 갈수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 수심이 복잡한 곳에서 주로 M2분조와 S2분조의 비선형성에 의해 유발되는 천해조(M4, S4, M6, MS4, 2MS2, 2MN2, 2SM2)의 비율은 서해안 6%, 남해안 4%, 동해안 2% 정도를 보이고 있다. 특히 천해조가 매우 발달되어 조위예측률이 가장 떨어지는 목포(Lee, 1994)에서는 복잡한 수심과 조간대 발달에 기인한 비선형 효과로 인해 M2분조 및 S2분조 등이 에너지 전이에 의해 진폭이 감소하는 동시에 천해조의 진폭은 증가하는 현상(Aubrey et al., 1985)이 발생하여 주변에 비해 작은 4대분조 진폭합과 함께 천해조 비율이 11%에 이르고 있는 것으로 추정된다. 이렇듯 4대분조와 4대분조에서 파생된 천해조를 합할 경우 전체분조 진폭합에 대한 비율이 대부분의 서해안과 남해안에서 60%대를 보이고 있는 반면 동해안에서는 30~40% 정도에 불과한 비율을 보이고 있다.

한편 계절별 평균해수면 변화를 반영하고 있는 계절조로서 연주조(Sa)와 반년주조(Ssa)의 진폭의 합은 서해안과 서남해안에서 약 20 cm 전후인 반면 동남해안과 동해안에서 약 15 cm 전후 정도를 보이고 있다. 이에 따라 전체분조 진폭합

에 대한 계절조 진폭비는 서해안에서 3~5% 정도이고 남해안에서는 7~12% 정도이지만 동해안에서는 4대분조 진폭이 매우 작은 관계로 계절조 진폭합이 30%를 초과하고 있다. 특히 포항에서는 연주조인 Sa분조 진폭이 4대분조의 진폭합을 초과하고 있다. 이러한 세 종류 분조, 즉 4대분조와 4대분조에서 파생된 천해조 및 계절조 등을 제외한 나머지 89개 분조 진폭합의 전체분조 진폭합에 대한 비율은 전체 해역에서 30% 정도의 큰 차이가 없는 분포를 보이고 있다.

이와 같이 약최고고조위(05) 설정과 관련된 4대분조의 진폭비는 천해조가 발달된 목포를 제외한 대부분의 서남해안 해역에서 60% 정도를 보이고 있는 반면 부산에서 50% 정도로 떨어지고 동해안에서는 계절조가 차지하는 비율이 큰 만큼 40% 이하로 작게 나타나고 있다. 이에 따라 Table 3에서 제기된 해역별 초과확률의 차이가 발생하는 것으로 파악된다. 즉, 서해안에 비해 남해안과 동해안으로 갈수록 4대분조 진폭은 크게 감소하는데 반해 계절조의 진폭은 약간 감소하기 때문에 약최고고조위(05)가 차지하는 비중은 서해안에 비해 동해안에서 매우 작게 나타나고 있다. 반면 계절조 비중은 동해안에서 상대적으로 크게 나타나 계절조(특히 연주조)가 최대가 되는 하절기 약최고고조위(05) 초과확률이 매우 크게 나타나고 있다.

Table 1에 제시된 시기에 설정된 약최고고조위와 함께 당시의 약최저저조위인 기본수준면은 현재 관측되는 자료에도 변함없이 적용되고 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 평균해수면의 상승추세와 함께 4대분조 진폭의 변화로 인해 설계조위의 기준 역할을 하는 약최고고조위 초과확률이 남해안을 제외한 모든 해역에서 해가 갈수록 증가하고 있음을 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 즉, Fig. 3에 1980년 이후 각 조위관측소에서 고조위(HWL) 중 약최고고조위 초과확률을 연도별로 정리하였는데 전체해역에서 증가경향을 확인할 수 있으며 특히 부산과 동해안에서 뚜렷한 증가경향을 보이고 있다. 고조위 자료 중 7월~9월의 하절기의 고고조위 자료(SHHWL; 하절기 일 최고조위)에 국한하여 약최고고조위 초과확률을 구한 결과에 대해서도 함께 제시하였는데 고조위 결과와 유사하게 증가경향을 보이고 있다. 태풍발생시기와도 일치하는 하계고고조위가 약최고고조위를 초과할 확률이 서해안 및 남해안에서 각각 10%

Table 5. Amplitude of each constituent (cm)

St.	Major				Shallow water				Seasonal			Others	Total
	M2	S2	K1	O1	M4	MS4	...		Sa	Ssa			
IC	286.7	114.9	39.4	29.1	470.1(61%)	6.6	5.9	34.2	46.5(6%)	19.5	2.1	21.6(3%)	764.8(100%)
GS	221.0	85.9	35.0	26.6	368.5(60%)	10.9	7.8	20.5	39.2(6%)	19.0	2.6	21.6(4%)	610.3(100%)
MP	142.6	48.7	30.8	23.7	245.8(51%)	21.7	16.6	14.8	53.1(11%)	19.6	3.2	22.8(5%)	485.6(100%)
YS	95.0	43.9	18.9	12.9	170.7(58%)	1.5	1.3	9.8	12.6(4%)	17.0	2.6	19.6(7%)	292.3(100%)
TY	76.4	35.5	14.8	9.8	136.5(58%)	1.5	1.1	7.4	10.0(4%)	14.9	2.0	16.9(7%)	235.2(100%)
BS	37.9	17.9	4.4	1.6	61.8(52%)	0.7	0.5	3.3	4.5(4%)	11.8	2.2	14.0(12%)	118.3(100%)
PH	3.4	0.8	4.0	4.2	12.4(29%)	0.1	0.0	0.5	0.6(2%)	12.9	2.3	15.2(36%)	42.2(100%)
SC	6.9	2.5	5.0	4.6	19.0(37%)	0.2	0.1	0.5	0.8(2%)	12.4	3.1	15.5(30%)	51.1(100%)

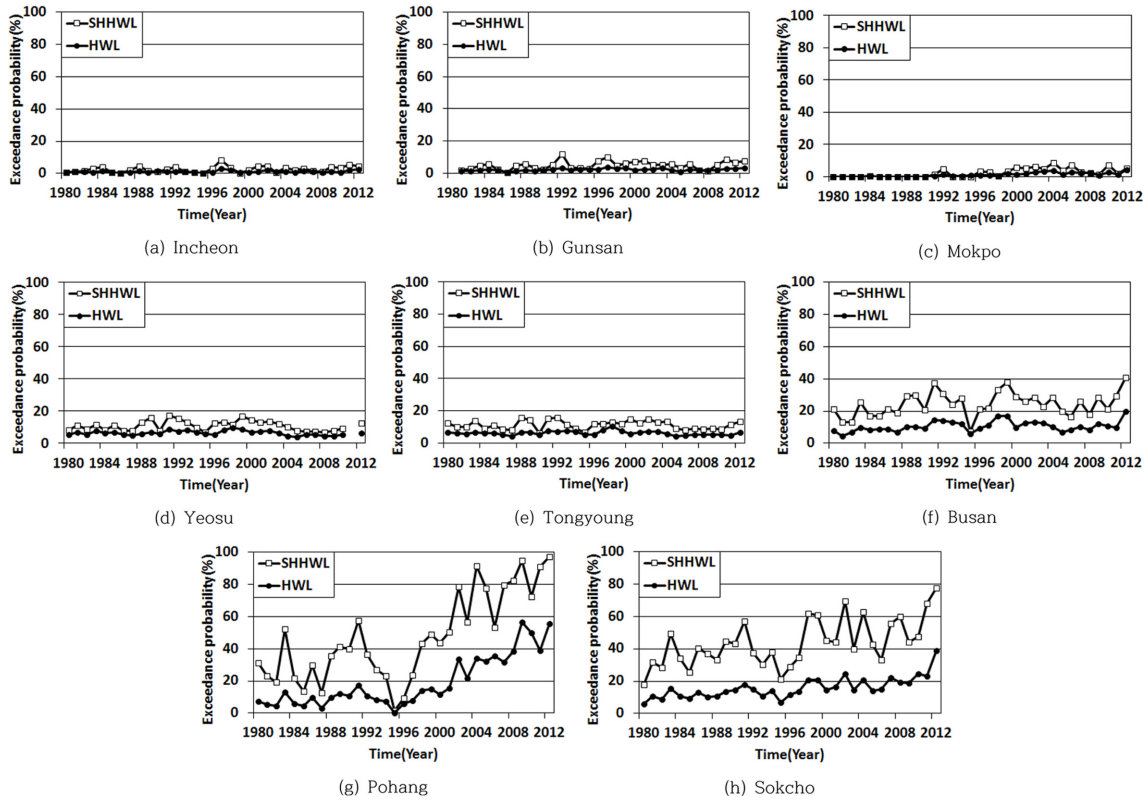


Fig. 3. exceedance probability of high water to AHHW.

미만과 10~20% 정도임에 비해 부산의 경우 최근 40% 가까운 확률을 보이고 있다. 또한 동해안의 경우 70% 이상의 확률을 보이고 있어 ‘매우 높은 조위’로 설정된 약최고고조위의 의미를 무색하게 하는 결과를 보이고 있다. 즉, 태풍발생이 하절기인 7월~9월에 주로 발생함을 감안할 때 하절기 태풍내습시 해당일의 최고조위가 약최고고조위를 초과할 확률이 서해안과 남해안은 부산을 제외하고 10% 전후 정도임에 비해 동해안의 경우 최근에는 70% 이상이며 포항의 경우 100%에 가까운 확률을 보이고 있어 거의 매번 고고조위가 약최고고조위를 초과하고 있음을 의미하고 있다. 따라서 설계조위를 설정할 경우 이러한 지역적 및 계절별 특성이 반영되어야 할 것이다.

3. 조위발생 확률분포함수

3.1 쌍봉형확률분포함수

전술한 5년간(2001~2005)의 자료에 대한 해석을 일반화시키기 위하여 조위발생에 대한 연속적인 확률분포함수를 도출하였다. 즉, Cho et al.(2004) 및 Kweon et al.(2006)이 제안한 쌍봉형 확률분포함수 형태에 가중계수를 포함시킨 형태를 적용하여 조위관측소별로 초과확률 산정을 비롯한 제반 해석을 수행하고자 한다. 쌍봉형 확률분포함수란 평균과 분산이 서로 다른 2개의 정규분포함수의 합의 형태로서, 확률밀도함수(probability density function; PDF)는 식 (1)에 제시하였고 이를 적분한 형태인 누적분포함수(cumulative distribution function; CDF)는 식 (2)와 같다.

$$p_T(x) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right] + \frac{\alpha_2}{\sigma_2\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{\alpha_1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)\right] + \frac{\alpha_2}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-\mu_2}{\sqrt{2}\sigma_2}\right)\right] \quad (2)$$

여기서 α_1 , α_2 는 2개 정규분포의 상대적 가중치($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$), μ_1 , μ_2 는 각각 평균에 해당하는 매개변수로서 쌍봉형 분포함수의 첨두점이 위치하는 조위와 유사한 값이고 σ_1 , σ_2 는 각각 표준편차에 해당하는 매개변수이다.

매개변수 추정은 Cho et al.(2004)과 동일한 방법으로 수행하였다. 즉, 임의의 비선형함수로 표시되는 함수와 조위자료의 확률밀도함수의 불일치도(오차제곱합)를 최소화하는 함수를 목적함수로 선정하여 수행되었다. 초기 매개변수 값을 이용하여 다음 단계의 매개변수 값을 반복적으로 추정하는 기법은 비선형 최적화 매개변수 추정에 범용적으로 이용되는 Newton 방법을 수정한 Levenberg-Marquardt 방법(Bazaraa et al., 1993)을 이용하였다. 산정된 매개변수 값은 Table 6과 같다.

3.2 누적분포함수

산정된 매개변수로부터 얻어진 누적분포함수를 관측자료에 의한 누적분포함수와 함께 Fig. 4에 제시하였다. 8개 모든 지점에서 비교적 잘 일치하고 있으며 Table 7에 제시된 바와 같이 분포함수로부터 계산된 약최고고조위(05) 초과확률 역시 Table 3에 제시된 관측결과와 유사하게 나타나고 있다. 단지 서해안에 위치한 지점에서는 관측치에 비해 다소 높은 수치를 보이고 있으나, 이는 꼬리부분에서 형성되는 확률분포 차

이(관측치는 상한이 있는 반면 분포함수는 상한이 없음)에 기인하는 것으로 판단된다.

이렇게 도출된 누적분포함수를 이용하면 특정 조위에 대한

Table 6. Parameters for the PDF

	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\mu 1$	$\mu 2$	$\sigma 1$	$\sigma 2$	RMS(cm)
IC	0.54	0.46	287.79	659.29	139.55	115.12	0.0068
GS	0.51	0.49	225.71	515.45	96.89	95.83	0.0060
MP	0.46	0.54	150.38	326.22	79.72	69.64	0.0035
YS	0.54	0.46	132.41	245.86	55.15	51.97	0.0033
TY	0.45	0.55	97.18	188.21	40.08	45.33	0.0043
BS	0.56	0.44	50.37	97.34	23.06	20.60	0.0031
PH	0.70	0.30	17.91	35.95	11.00	8.41	0.0022
SC	0.89	0.11	21.98	40.77	12.84	9.09	0.0024

Table 7. High water levels(cm) corresponding to exceedance probabilities

St.	AHHW(05) exceedance probability					
	Level(cm)	Prob.	10%	5%	1%	0.5%
IC	931.4	0.42	749.4	801.4	891.7	923.5
GS	737.0	0.51	594.7	637.2	711.5	737.7
MP	491.3	0.48	388.9	418.6	471.5	490.3
YS	355.4	0.81	287.0	310.2	350.8	365.2
TY	283.9	0.96	229.5	248.8	283.1	295.3
BS	132.5	1.94	112.9	122.3	138.6	144.3
PH	36.0	18.43	40.6	44.7	51.7	54.1
SC	43.4	8.49	40.7	47.0	55.4	58.3

초과확률을 계산할 수 있다. 즉, 초과확률 0.5%, 1%, 5%, 10% 등에 해당하는 조위를 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 추정하였다. 그 결과를 Table 7에 제시하였고 Fig. 4에도 나타내었다. Table 3에서도 제기되었듯이 대부분의 서해안과 남해안 지역에서 약최고고조위(05) 초과확률이 1%에 미달하고 있는 반면 부산과 포항 및 속초 등에서는 해당 초과확률이 매우 크게 나타남을 재확인할 수 있다.

4. 설계조위 반영 방안

4.1 연주소 고려

전술한 바와 같이 설계조위 산정에 이용되고 있는 약최고고조위는 해역별로 초과확률편차가 매우 클 뿐 아니라 해수면 상승으로 인해 지속적인 증가추세를 보이고 있어 발생빈도의 공간적 및 시간적 일관성이 결여되어 있다. 즉, Table 5에 제시된 바와 같이 4대분조 진폭합의 전체분조 진폭합에 대한 비율은 동해안에서 30~40%이고 남해안 및 서해안의 경우 50~60%에 이르고 있어 약최고고조위 초과확률의 공간적 편차를 초래하는 주원인이 되고 있다. 특히 동해안과 같이 조차가 작은 경우 연주소 및 반년주조의 영향으로 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 하계에는 약최고고조위 초과확률이 매우 높아져 설계조위로서의 의미를 부여하기 어려운 실상이다. 이러한 문제점을 완화시키기 위한 한 가지 방안으로 설계에 반영되는 기존의 약최고고조위를 하계에 형성되는 약최고고조위로 대체하는 방안에 대하여 검토하였다.

Fig. 2 및 Table 4에 제시된 바와 같이 평균해수면은 대략

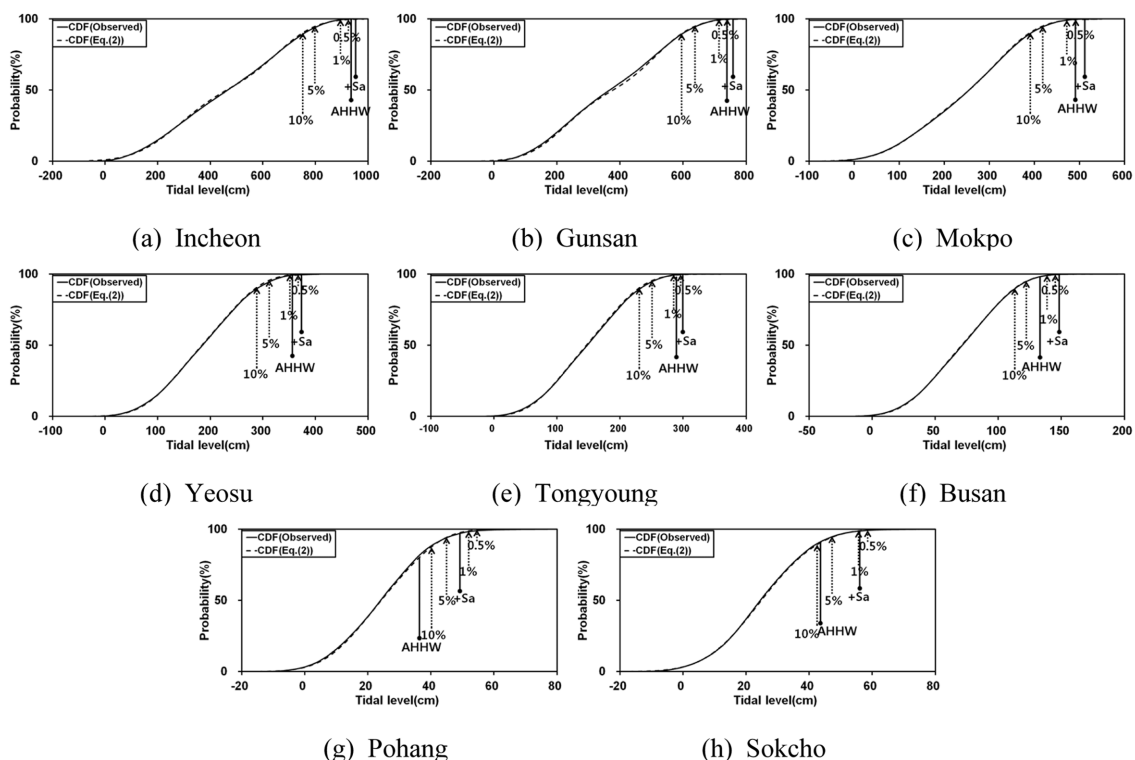


Fig. 4. Cumulative distribution function.

연주조인 Sa분조 진폭만큼 하절기에 높아지고 동절기에 낮아지는 연중변화를 보인다. 따라서 주로 8~9월에 형성되는 연최고평균해수면은 연평균해수면에 비해 대략 Sa분조 진폭만큼 높게 형성된다. 따라서 하계약최고고조위라 함은 식 (3)에 보인 바와 같이 일반적인 약최고고조위에 Sa분조 진폭을 추가한다는 의미가 된다. 이 시기는 태풍발생시기와도 일치하는 시기여서 고극조위는 이 시기에 주로 발생하게 되므로 특히 동해안과 같이 여타 분조에 비해 계절조의 비중이 큰 해역일수록 설계조위에 반영되는 약최고고조위 대신 하계의 평균해수면이 감안된 조위가 더욱 적합하다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\text{하계약최고고조위} &= \text{연최고평균해수면} + 4\text{대분조} \\ &= \text{연평균해수면} + \text{Sa} + 4\text{대분조} \\ &= \text{약최고고조위} + \text{Sa}\end{aligned}\quad (3)$$

4.2 초과확률 개선

기존 약최고고조위라 함은 기준조석으로부터 산정되는 것으로서 Fig. 1에 보인 바와 같이 현재 조위상황에 대한 반영이 미흡한 경우가 적지 않은 실정이다. 기준조석과 관련하여 약최저저조위는 기본수준면이므로 이를 변경하기는 쉽지 않은 반면 약최고고조위는 굳이 기준조석 자료로부터 산정될 당위성은 크지 않다. 따라서 설계조위에 반영되는 약최고고조위 산정시 평균해수면 및 4대분조 진폭은 Table 1에 제시된 기준조석 설정시기의 자료로부터 산정하는 것보다 최근까지 평균해수면 및 분조진폭 변화가 포함될 수 있도록 최신자료로부터 산정함으로써 2.1절에 제시된 시간적 변화에 따른 괴리를 좁힐 수 있게 된다.

또한 2.2절에 제시된 공간적 편차문제는 4.1절에 제시한 바와 같이 하절기 평균해수면을 반영함으로써 개선될 수 있다. 이러한 맥락으로 약최고고조위(05)에 연주조를 포함시킨 경우에 대한 초과확률을 산정한 결과를 Table 8에 제시하였다. 기준조석에 의한 약최고고조위(AHHW) 및 약최고고조위(05)의 경우 지역별 초과확률에 대한 표준편차가 16.1 cm와 6.43 cm로

분포의 편차가 매우 크게 나타나고 있지만 연주조를 포함시킨 경우 표준편차가 0.61 cm로 감소하여 공간적 편차가 크게 개선되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 하계고고조위(SHHWL)가 약최고고조위를 초과할 확률이 40%에 이르는 부산과 70%를 상회하는 동해안의 경우 기존 약최고고조위의 설계조위 반영은 서해안 지역과 비교하여 문제점이 있는 것은 주지한 바와 같다. 이러한 해역에서 Sa분조를 고려함으로써 약최고고조위 초과확률을 대폭 낮출 수 있어 부산의 경우 초과확률이 Table 8에 제시된 바와 같이 1.94%에서 0.5% 정도로 낮아져 Sa분조를 고려하지 않은 상태의 서해안 지역 초과확률과 비슷한 수준이 되어 공간적 편차가 크게 개선되고 있다. 즉, 부산을 포함하여 동해안 지역에서는 설계조위와 관련되어 약최고고조위 산정시 Sa분조를 포함시키는 방안을 적극 검토할 필요가 있다.

또한 서해안 지역에서는 약최고고조위(05) 초과확률이 0.5% 이하이며 Fig. 3에 제시된 하계고고조위 초과확률 역시 5~10% 정도의 미미한 수준이므로 기존 방법과 동일한 약최고고조위를 사용하되 평균해수면 변화가 고려되는 등 최신조위자료로 갱신된 약최고고조위를 사용하는 정도의 개선책이 강구될 수 있다.

남해안인 여수와 통영의 경우 Fig. 3에 보인 바와 같이 하계고고조위의 약최고고조위 초과확률이 20% 가까이 되어 서해안과 부산의 중간 정도 성향을 보이고 있다. 또한 Table 8에 제시된 약최고고조위(05) 초과확률 역시 0.5%를 상회하고 있어 Sa분조를 감안할 필요성이 제기된다. 따라서 남해안의 경우 Sa분조를 반영하되 부산에서의 반영후 초과확률인 0.5% 정도까지만 반영하는 방안을 제안한다. 즉, Table 8에 보인 바와 같이 Sa분조 진폭(H_{sa})을 반영률(k)의 조정을 통해 초과확률이 0.5%가 되는 만큼의 Sa분조 진폭을 반영하도록 한다.

따라서 Table 8에 제시된 바와 같이 2001년~2005년 자료를 통해 설계에 반영되는 약최고고조위를 재산정한 결과 ($+k \cdot H_{sa}$)를 기준조석에 따른 약최고고조위(AHHW)와 비교해보면 서해안 전체지역과 남해안의 여수의 경우에는 5 cm 미만의 추가가 필요한 반면 통영과 부산의 경우 10~15 cm의 추가가 필요하다. 특히 동해안의 경우에는 최소한 15~25 cm의 추가분이 필요한 것으로 나타났는데, 이러한 사항은 2005년 당시 5개년 자료를 토대로 일부 지역에서의 결과에 한정된 것이므로 정성적인 의미가 있다. 또한 이러한 내용은 2005년을 기준으로 작성된 것이기에 Table 2를 감안하거나 각 지역별로 최신 조위자료를 통해 2005년 이후 해수면 상승률을 추가하여 재산정할 필요가 있다.

한편, 동해안의 포항과 속초의 경우 Sa분조를 고려함에 따라 초과확률이 대폭 낮아지긴 하였지만 여타해역의 초과확률에 비해서는 아직 다소 높은 수준이다. 따라서 동해안 지역 역시 1을 초과하는 k 값을 도입함으로써 부산에서의 반영후 초과확률인 0.5% 수준에 맞출 수 있다. 설계조위와 관련되어 약최고고조위는 그 발생빈도가 불분명하다고 하였는데, 이렇게

Table 8. Tidal levels and corresponding exceedance probability (%)

St.	AHHW		AHHW(05)		+H _{sa}		+k·H _{sa}		k
	Level	Prob.	Level	Prob.	Level	Prob.	Level	Prob.	
IC	927.0	0.46	931.4	0.42	950.9	0.26	931.4	0.42	0.00
GS	742.5	0.44	737.0	0.51	756.0	0.30	737.0	0.51	0.00
MP	486.0	0.59	491.3	0.48	510.9	0.22	491.3	0.48	0.00
YS	361.6	0.60	355.4	0.81	372.4	0.34	365.2	0.50	0.58
TY	282.0	1.06	283.9	0.96	298.8	0.40	295.3	0.50	0.77
BS	129.8	2.55	132.5	1.94	144.3	0.50	144.3	0.50	1.00
PH	24.6	46.35	36.0	18.43	48.9	2.02	48.9	2.02	1.00
SC	39.0	14.58	43.4	8.49	55.8	0.92	55.8	0.92	1.00
Mean		8.33		4.01		0.62		0.73	
S.D.		16.1		6.43		0.61		0.51	

함으로써 전체 해역에서 약최고고조위의 초과확률을 Table 7에 제시된 0.5% 수준으로 치환할 수 있는 방법에 대해서도 추후 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결론 및 토의

우리나라와 같이 동해안과 서해안의 조위특성이 판이하게 다른 해역에서 설계조위 산정은 해역의 특성이 충분히 반영되어야 한다. 즉, 인천과 군산 등 서해안의 경우 천문조가 극대화된 상태에서 주로 비태풍에 의한 비교적 작은 해일고가 접친 상태에서 극치해면이 발생함이 일반적이며 동절기 해일강도가 지배적인 특성이 있다. 반면, 남해안과 동해안으로 갈수록 조차가 작아지므로 조석의 영향 보다는 하절기 중 특히 태풍시기의 해일강도에 의한 극치해면 발생이 주로 나타나는 특성이 있다(Kang et al., 2011). 또한 설계조위로 활용되고 있는 약최고고조위는 해역별로 초과확률에 매우 큰 차이가 존재하고 있는 동시에 지구온난화에 따른 전지구적 평균해수면 상승에 따라 공간적/시간적 편기문제가 내재되어 있다.

따라서 설계조위에 반영되는 약최고고조위를 일률적으로 설정할 것이 아니라 해역별 조석환경을 비롯한 제반특성을 감안해 설정할 필요성이 제기된다. 본 고에서는 그 해결방안의 하나로 약최고고조위 산정시 하절기에 높게 형성되는 평균해수면을 고려하여 주요 4대분조에 연주조를 포함시키는 방법에 대하여 검토하였다. 하계약최고고조위를 적용하기 전에도 초과확률이 0.5%에 미달하는 서해안에서는 최신 조위자료를 통해 약최고고조위를 산정함으로써 지구온난화에 따른 평균해수면 변화를 적절히 반영하는 정도면 충분하다. 반면, 남해안 및 동해안에서는 최신 조위자료를 통한 평균해수면 변화 반영은 물론이고 여기에 연주조가 포함된 하계약최고고조위를 설계조위에 반영하는 방법에 대하여 검토하였다. 그 결과 부산의 경우 초과확률이 0.5% 정도로 크게 낮아졌으며 여타 남해안 지역에서는 부산결과에 준해서 초과확률이 0.5% 정도에 해당하는 크기의 연주조 진폭만을 반영하는 방안을 제시하였다. 그 결과 특히 남해안과 동해안에서 최소한 10 cm 이상 최대 25 cm 정도의 설계조위 증분이 필요한 것으로 나타났다.

또한 제안된 방식의 설계조위에 반영되는 약최고고조위의 초과확률이 전반적으로 대략 0.5% 정도임을 감안하여 0.5% 초과확률에 해당되는 조위를 약최고고조위를 대신하여 설계조위에 반영하는 조위로 채택하는 방안에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 주요사업 ‘태풍해일 침수범람 예측 및 재해도 작성기술 개발’ 사업의 지원으로 수행되었습니다.

다. 또한 본 연구는 지식경제부 기술혁신사업의 연구비 지원(20103020070080)에 의해 수행되었습니다.

References

- Aubrey, D.G. and Speer, P.E. (1985). A study of nonlinear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems, Part*: observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 185-205.
- Bazaraa, M.S., Sherali, H.D. and Shetty, C.M. (1993). *Nonlinear programming: Theory and algorithms*, John-Wiley & Sons.
- Cho, H.Y., Jeong, S.T. and Oh, Y.M. (2004). Estimation of probability density function of tidal elevation data. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 16(3), 152-161. (in Korean)
- Cho, H.Y., Ko, D.H. and Jeong, S.T. (2011). Missing pattern of the tidal elevation data in Korean coasts. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 23(6), 496-501. (in Korean)
- Jeong, S.T., Cho, H.Y., Jeong, W.M. and Yang, J.S. (2005). Analysis on the occurrence probability distribution of tidal levels using harmonic constants. *Journal of the Korean Society of Civil Eng.*, 25(1B), 51-57. (in Korean)
- Kang, J.W. (1999). Changes in tidal characteristics as a result of the construction of sea-dike/sea-walls in the Mokpo coastal zone in Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(4), 429-438.
- Kang, J.W., Kim, Y.S., Cho, H.Y. and Shim, J.S. (2011). Characteristics of nearshore surge-intensity. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 23(6), 458-465. (in Korean)
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). Thematic diagram for the information of ocean science. (in Korean)
- Korean Society of Oceanography (2005). *Dictionary of ocean science*. (in Korean)
- Kweon, H.M., Park, H.S., Ahn, K. and Cheon, S.H. (2006). Comparisons of the expected overtopping probability along Korean coast utilizing by reliability analysis. *Journal of the Korean Society of Civil Eng.*, 26(4B), 399-404. (in Korean)
- Lee, S.W. (1994). *Hydraulic notes on the Korean Harbors*. Jipmoondang. (in Korean)
- Ministry of land, infrastructure, transport and tourism (2009). *Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan* (Japanese version)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009). Matters about MSL, datum level and A.H.H.W. regarding waterway surveying. *Administration Regulation 2009-22*. (in Korean)
- Ministry of Oceans and Fisheries (2005). *Design criteria for harbors*. (in Korean)

원고접수일: 2014년 3월 14일

게재확정일: 2014년 4월 8일