

## 조석환경변화를 고려한 목포항의 고극조위 산정 Frequency Analysis of Extreme High Water Level at Mokpo Harbor Considering Tidal Environment Changes

강주환\* · 문승록\*

Ju Whan Kang\* and Seung Rok Moon\*

**요 旨** : 영산강하구언과 영암 및 금호방조제 건설과 같은 대규모 간척사업에 따라 목포해역에는 조석확폭현상이 발생되어 저지대 침수를 야기한 바 있다. 목포항에서의 조위자료를 검토해 보면 방조제 건설단계별로 평균만조위 뿐 아니라 고극조위가 'jump'된 현상을 볼 수 있다. 따라서 기존 설계조위를 전면적으로 재검토해야 할 필요성이 제기되어왔다. 이 때 빈도해석에 이용되는 자료는 현재상태인 금호방조제 건설이후의 자료에 국한되어야 한다. 그러나 고극조위 극치분석에 사용될 수 있는 자료는 아직까지 6년 정도에 불과하기 때문에 정상적인 빈도해석에는 문제가 있는 것이다. 본 연구에서는 수치모형을 이용해 과거자료를 현재자료로 변환시켜 적용하는 방안을 제안하였으며, 이에 따라 32년간의 변환된 자료와 6년간의 최근자료 등 총 38년간의 풍부한 자료를 이용하여 정상적인 빈도해석이 가능하게 되었다.

**핵심용어** : 고극조위, 목포해역, 하구언/방조제, 빈도해석, 수치모의

**Abstract** □ Mokpo coastal zone suffers from increase of tidal amplitude by the reclamation projects of Youngsan River Seadike, Youngam and Keumho Seawalls, resulting inundation of lower lands. Tidal records at Mokpo harbor show jumps just after each construction not only in the mean high water level but also in extreme one. Thus the design water levels must be newly estimated by a frequency analysis with the data of period after the last construction. But this period is at most 6 years yet, which restrains the normal frequency analysis. In this paper, new approach of converting the past data to the present one by a numerical model is proposed. Converted 32 years and observed 6 years data enables normal frequency analysis.

**Keywords** : Extreme high water level, Mokpo coastal zone, Seadike/Seawall, Frequency analysis, Numerical simulation

### 1. 서 론

목포해역에는 1981년과 1991년 및 1994년에 영산강 하구언과 영암방조제 및 금호방조제가 각각 완공된 바 있으며, 이들 하구언과 방조제의 위치를 전반적인 목포해역의 지형을 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 화원만도와 압해도 사이의 2개 섬으로 분리된 3개 수로를 남쪽부터 순차적으로 목포구, 중구, 북구라 하는데, 목포구의 단면적이 월등히 커서 내측 수역과의 해수교환은 주로 목포구를 통해 이루어지고 있다. 방조제 개발처럼

대규모 간척사업은 인근 해역에 여러 측면의 변화를 수반하게 되는데, 목포해역도 예외는 아니어서 조석확폭현상에 의해 목포 저지대 침수와 같은 즉각적이고도 가시적인 변화를 초래한 바 있다(강주환, 1996). 이 외에도 오염확산양상의 변화(강주환과 임병선, 1998) 및 낙조우세의 둔화(강주환 등, 1998)에 따른 유사이동 양상의 변화가 점진적으로 진행되고 있다. 특히 조석확폭현상에 따른 고조위 상승은 연안 시설물의 침수방지 최저표고를 전면적으로 재산정해야 함과 동시에 월류 및 침수피해에 대한 대비책의 조속한 마련이라는 당면 과

\*목포대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-Gun, Cheon Nam 534-729, Korea)

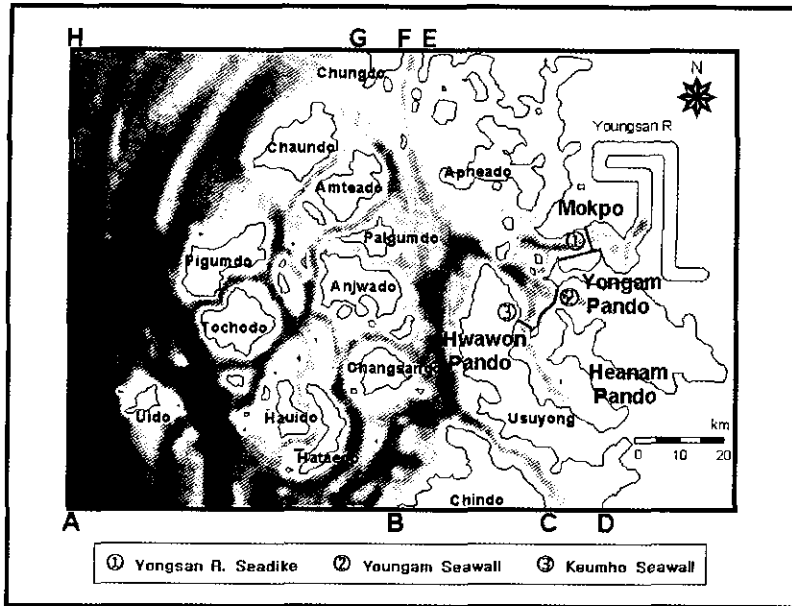


Fig. 1. Mokpo coastal zone.

제를 제기하고 있다.

이를 위한 가장 기본적으로 검토되어야 하는 사항 중의 하나가 변화된 조석환경을 감안한 고극조위의 산정이다. 그러나 이를 산정하기 위해서는 장기간의 조위관측자료가 축적되어야 하는데, 금호방조제 축조 이후의 기간이 6년여에 불과해 동기간 동안의 자료를 이용한 신뢰성 있는 고극조위 산정은 어려운 실정이다. 하구언 건설 이전 기간까지 포함한 총 자료는 해석에 충분한 기간이 되고 있으나, 전술한 바와 같이 건설에 따라 급격한 조석환경변화가 이루어져 건설전후 기간의 각 자료들이 서로 연계성을 유지하지 못하고 있다. 이에 최근 목포항에서의 이상조위가 잦아지자 관계당국에서는 이러한 연계성 상실을 무시한 채 고극조위를 재산정(목포지방 해양수산청, 1998; 행정자치부, 1998)한 바 있으나, 그 신뢰도에 의문이 제기되고 있는 실정이다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 목포해역의 조석환경 변화가 고려된 고극조위 산정을 위해 변화양상이 뚜렷한 영산강 하구언 건설이전(62~80), 하구언 건설이후(81~90), 영암방조제 건설이후(91~93) 및 현재상태인 금호방조제 건설이후(94~99)로 시기를 구분하였다. 우선 자료수가 비교적 풍부한 하구언 건설이전의 목포항 고극조위 자료에 대한 극치분석을 실시한 후, 각 빈도의 목포항 고극조위를 유발하는 외해에서의 조위 상태를 파악하였다. 해당 빈도의 조위상태를 하구언이나 방조제 건설이후의 외

해 경계조건으로 부여하면 수치해석을 통해 각 시기별 목포항 고극조위를 산정할 수 있게 된다.

## 2. 목포해역의 조석환경 변화

연안에서 내륙쪽으로 갈수록 천수효과와 조석파 에너지의 수렴에 기인하여 조석파의 진폭이 점차 증가하다가 감소하천의 상류부 부근에 이르러서는 바닥마찰에 의한 에너지 소산 때문에 점차 감소하는 것이 일반적인 경향이다. 기존의 연구성적을 분석하면 하구언 건설이전에 목포항의 조차가 목포구보다 오히려 작았었는데(이석우, 1994), 이는 목포구가 조석파의 완충기능을 하고 있다는 'tidal choking effect' 때문이다(Kang, 1999). 하구언 건설이후 목포구의 이 효과가 상당히 감소하여 건설이전에 비해 목포항의 조차가 커지게 되었으며, 영암 및 금호 방조제 건설로 인해 이러한 효과가 거의 소멸되어 현재는 목포구의 조차에 비해 목포항의 조차가 월등히 큰 상태가 된 것이다. 이러한 변화는 목포항의 조위관측 자료를 도시한 Fig. 2에 잘 나타나 있는데, 평균 고조위는 영산강 하구언 건설이전에 비해 금호방조제 건설이후 약 30 cm의 상승을 보이고 있으며, 특히 고극조위의 경우는 하구언 건설 후 30 cm, 영암방조제와 금호방조제 건설 후 각각 16 cm와 14 cm의 증가로 영산강 하구언 건설이전에 비해 금호방조제 건설이후 약

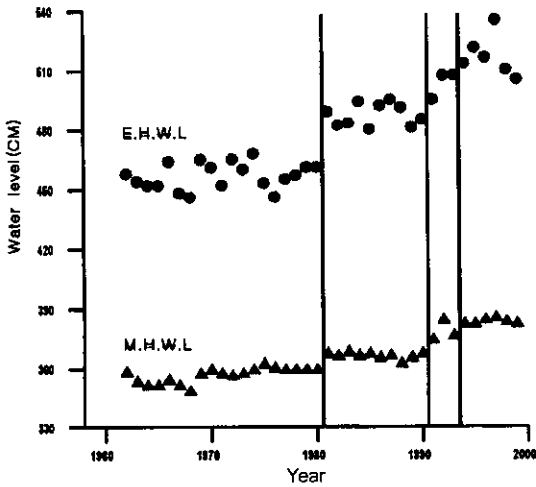


Fig. 2. Trends of M.H.W.L. and E.H.W.L. at Mokpo Harbor.

60 cm 이상 증가하였다.

### 3. 시기별 극치분석

고조위 극치분석시 사용되는 자료로 고조위 또는 고

조위 편차의 연최대치나 연초과치를 대상으로 할 수 있는데, 고조위 편차의 경우 조위편차를 극치분석하여 빈도별 조위편차를 구할 수 있으나, 여기에 가산할 기준조위(삭방평균고조위)의 결정은 하구언과 방조제 건설 전·후에 큰 차이를 보이므로 그 기준이 모호하여 이를 배제하였다. 또 자료를 검토한 결과 연최대치와 연초과치 자료간의 질적 차이가 크지 않아 본 연구에서는 편의상 연최대치 자료만을 대상으로 하였다. 하구언과 방조제 건설시기에 따른 고조위의 연최대치 자료를 Table 1에 제시하였는데, 1962년부터 1982년까지의 자료는 영산강하구언 공사로 인한 조석체계 변화로 기본수준면을 1982년에 약 20 cm가 하강하였음을 감안하여 고조위 연최대치에 20 cm를 가산시켜 최근 기본수준면의 높이로 환산하였다.

고조위 극치분석에 사용될 수 있는 방법에는 Gumbel-Chow, Log-Normal, Gumbel, Weibull, Jenkinson 방법 등이 있는데, 본 연구에서는 서론에서 언급한 기존 연구와의 비교를 위해서 기존 연구에서 선정했던 방법 중 비교 가능한 자료 범위 내에서 가장 정확하다고 판단되는 방법인 Log-Normal 방법을 선택하였다. 즉, 각 방

Table 1. Annual max. water level

Before Youngsan R. Seadike		After Youngsan R. Seadike		After Keumho Seawall	
Year	E.H.W.L. (cm)	Year	E.H.W.L. (cm)	Year	E.H.W.L. (cm)
1962	458	1981	489	1994	513
1963	454	1982	482	1995	521
1964	452	1983	483	1996	516
1965	452	1984	494	1997	535
1966	464	1985	480	1998	510
1967	448	1986	492	1999	505
1968	446	1987	495	Mean	516.7
1969	465	1988	491	$\sigma$	10.5
1970	461	1989	481		
1971	452	1990	485		
1972	465	Mean	487.2		
1973	460	$\sigma$	5.7		
1974	468				
1975	453				
1976	446				
1977	455				
1978	457				
1979	461				
1980	461				
Mean	456.7	Mean	503.0		
$\sigma$	6.6	$\sigma$	6.9		

Table 2. Result of frequency analysis

Case(yrs)	Freq.(yr)	G-C	L-N
BD (19)	10	465.3	465.2
	20	469.0	467.7
	50	473.8	470.4
	100	478.6	472.3
AD (10)	10	494.6	494.5
	20	497.7	496.6
	50	501.9	498.9
	100	505.9	500.5
AYA (3)	10	512.0	512.0
	20	515.9	514.5
	50	521.0	517.5
	100	526.0	519.4
AKH (6)	10	530.3	530.1
	20	536.2	534.0
	50	543.8	538.4
	100	551.4	541.4

범으로 산정한 하구언 건설이전 10년 빈도와 20년 빈도의 고극조위를 Table 1에 제시된 하구언 건설 이전의 2위와 1위 값과 각각 비교하고, 하구언 건설이후의 10년 빈도 조위도 Table 1의 해당 기간의 1위 값과 비교한 결과, Table 2에 제시된 바와 같이 Log-Normal 방법의 오차가 0.2~0.5 cm로 가장 작았다. Table 2는 뚜렷한 고극조위 변화 양상을 보이는 영산강 하구언 건설이전(1962~1980), 하구언 건설이후(1981~1990), 영암방조제 건설이후(1991~1993), 금호방조제 건설이후(1994~1999)의 자료로 구분하여 각각의 고극조위를 Gumbel-Chow 방법과 Log-Normal 방법을 사용하여 빈도별 고극조위를 산정한 결과인데, 여기서 하구언 건설 이전의 시기만이 극치분석시 권장 자료기간인 19개년 이상에 해당할 뿐 다른 시기는 그 기간에 미달하므로 제시된 값의 신뢰성은 적지만 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 수치모형을 이용한 시뮬레이션

본 연구에 사용된 모형은 목포해역에 여러 번 적용(강주환, 1995; 강주환, 1996; 강주환 등, 1998; Kang, 1999)되어 검증된 바 있다. 조건대 모의가 포함된 본 모형은 복잡한 영역의 수치해석에 특히 장점이 있다고 알려진 완전음해법을 채택하였고 음해법에 수반되는 행렬식의 효율적 계산을 위한 PCGS(Preconditioned Conjugate Gradient Squared)방법을 사용한 모형이다. 이러한 수치

해석기법은 Bayliss 등(1983)이 파랑변형문제에 관한 완경사방정식(Mild Slope Equation)의 유한차분해석에 도입한 것이 표시로서 후에 Panchang등(1991)이 이를 보완한 바 있으며, 천수방정식의 해석에도 Wilders등(1988)에 의해 연구된 바 있다.

Fig. 1에 제시된 목포해역을 500 m 격자 간격으로 160 × 110 격자망을 설정하였고 외해경계조건은 이전 연구(강주환, 1993)와 동일한 방법으로 부여하였다. 단, 이전 연구에서는  $M_2$ 분조 만을 부여한 반면 본 연구에서는 다음에 기술되는 방법을 적용하였다. 각 건설시기별 고극조위를 산정하기 위하여, 먼저 자료기간이 풍부한 하구언 건설이전 자료에 대하여 Log-Normal 방법으로 극치분석을 하여 목포항에서의 빈도별 고극조위를 구한다. 고극조위가 발생하는 경우는  $M_2$ 분조와  $S$ 분조가 동일 위상이 되는 대조시에 기상조가 포함된 경우라 생각할 수 있으므로, 이전 연구에서 기설정된 외해경계지점의  $M_2$ 분조의 진폭을 일정 비율로 증가시키면 목포구 외곽에서 고극조위 발생시의 조위 상황을 재현시킬 수 있을 것이다. 물론 이렇게 부여한 경계조건에 따라 계산된 결과가 전체 영역에서 고극조위 발생시와 동일한 상황이 될 것을 기대하기는 어려울 것이다. 그러나 본 연구의 관심대상인 목포항에서의 조위상황은 목포항으로 통하는 입구인 목포구 바로 외곽에서의 조위상황에 크게 의존하고 있을 것이므로 목포구 외곽에서만 적절한 조위가 형성되도록 하면 된다. 즉,  $M_2$  경계조건의 진폭을 일정 비율로 증가시켜 가며 하구언 건설이전 재현기간별 목포항에서의 고극조위를 유발시키는 경계조건을 시행착오를 통해 찾게 된다. 이렇게 찾아진 빈도별  $M_2$ 분조의 진폭을 Table 3에 제시하였다. 하구언 건설전의 각 빈도별 고극조위를 유발한 상황을 경계조건 부여를 통해 하구언 건설후에 동일하게 재현시킨 결과 10년 이내의 저빈도에서는 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이 경우 10년간의 자료로부터 계산된 극치분석 결과이기 때문에 고빈도의 비교는 큰 의미가 없겠지만 시뮬레이션 결과와 극치분석 결과와의 차이가 2~4 cm로 비교적 양호한 결과를 보이고 있다. 영암방조제 건설이후 기간은 3년에 불과하기 때문에 극치분석 자체가 무의미하다고 판단되고 금호방조제 건설이후도 6년간의 자료로부터 얻어진 빈도해석결과는 별 의미가 없을 것이다. 특히 Table 1에서 볼 수 있듯이 1997년의 고극조위가 나머지 자료에 비해 상당히 큰 값이 발생하였기 때문에 이렇게 큰 값을 포함한 6년간의 자료로부터 계산된 고빈도의 고극

Table 3. Comparison of the Results

Case	Frequency	M <sub>2</sub> ratio	Simulation Freq. anal. (cm)	Diff.(cm)
BD	2.33	208%	457.2	+0.5
	10	217%	465.1	-0.1
	20	219.8%	467.9	+0.2
	50	222.5%	471.0	+0.6
	100	224%	472.6	+0.3
AD	2.33	208%	486.8	-0.4
	10	217%	496.7	+2.2
	20	219.8%	499.6	+3.0
	50	222.5%	502.3	+3.4
	100	224%	504.5	+4.0
AYA	2.33	208%	506.7	
	10	217%	519.0	
	20	219.8%	522.0	
	50	222.5%	526.5	
	100	224%	528.5	
AKH	2.33	208%	517.1	+0.4
	10	217%	530.1	+0.2
	20	219.8%	534.1	-1.2
	50	222.5%	538.0	-4.2
	100	224%	540.2	-8.9

Table 4. Transformed data

Year	E.H.W.L.(cm)	Year	E.H.W.L.(cm)
1962	526.0	1981	525.0
1963	522.4	1982	517.7
1964	520.5	1983	518.7
1965	520.5	1984	530.1
1966	531.5	1985	515.6
1967	516.9	1986	528.1
1968	515.0	1987	531.2
1969	532.4	1988	527.0
1970	528.8	1989	516.7
1971	520.5	1990	520.8
1972	532.4	1991	507.8
1973	527.9	1992	520.5
1974	535.2	1993	520.5
1975	521.4	1994	513.0
1976	515.0	1995	521.0
1977	523.3	1996	516.0
1978	525.1	1997	535.0
1979	528.8	1998	510.0
1980	528.8	1999	505.0

조위는 실제보다 상당히 크게 평가되었으리라 짐작할 수 있으며, 수치해석결과와의 비교를 보아도 저빈도에 비해 고빈도의 값이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 연구의 최대 관심사는 금호방조제 건설이후인 현재 상황의 빈도별 고극조위 산정에 있다. 전술한 바 있듯이 현재 상황에 해당되는 자료는 6년에 불과하기 때문에 하구언 건설이전 자료를 포함한 모든 자료를 현재 상황으로 변환시켜 총 38(19+10+3+6)년의 자료

를 이용하여 극치분석을 시행하였다. 이를 위해 각 시 기별로 특정 고극조위값을 유발하는 경계조건 증가 비율을 그림으로 작성하여 Fig. 3에 제시하였다. 이 그림을 통해 금호방조제 건설이전까지의 3단계 기간에 대한 1962~1993년 자료를 현재 상황으로 변환시킬 수 있다. 예를 들어 하구언 건설이전에 해당되는 1969년과 1972년에 발생한 465 cm의 고극조위는 Fig. 3에 의하면 외해경계조건으로 M<sub>2</sub>분조를 약 217%로 증가시킨 것에 해당하며, 이는 현재 상황인 금호방조제 건설이후의 532cm로 변환되는 것이다. 이와 같은 방법으로 과거 모든 자료를 현재 상황으로 변환할 수 있으며, 이를 Table 4에 제시하였다. 이렇게 변환된 자료는 동일한 자료로 간주될 수 있으며 최종적으로 총 38년간의 자료로부터 빈도해석을 통해 현재 상황의 고극조위를 산정할 수 있다.

이렇게 산정된 빈도별 고극조위를, 자료의 이질성을 무시한 채로 빈도해석을 시행한 기존 연구결과(목포지방 해양수산청, 1998; 행정자치부, 1998)와 함께 Table 5에 제시하였다. 이를 보면 본 연구에서 추정한 각 빈도별 고극조위의 값이 기존 연구결과에 비해 매우 크게 나옴을 알 수 있는데, 기존 연구가 조석확폭이전의 모든 자료를 아무런 가공없이 현재 자료와 함께 빈도해석을 한 결과임을 감안하면 당연한 결과일 것이다. 목포항 시설물 표고인 500 cm는 영산강 하구언 건설이전엔 100

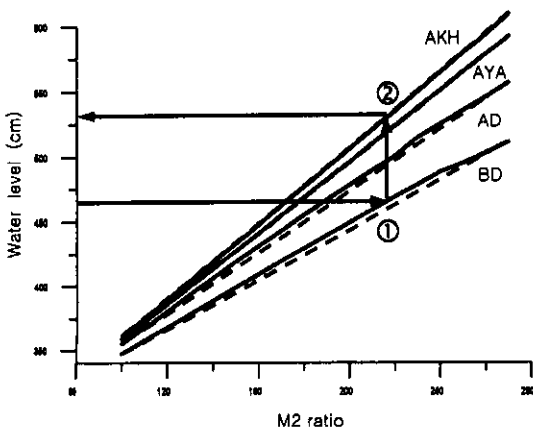


Fig. 3. Tidal level corresponding to M<sub>2</sub> ratio.

Table 5. Estimated E.H.W.L. at Mokpo Harbor

Source	Period	Frequency(yr)			
		10	20	50	100
Report 1 <sup>a</sup>	1962~1997	-	512.9	522.8	529.5
	1981~1997	-	519.3	525.1	529.1
Report 2 <sup>b</sup>	1981~1997	-	523.6	530.2	534.6
Present study	1962~1999	532.0	534.8	537.9	540.0

a : 목포지방해양수산청(1998), b : 행정자치부(1998).

년 빈도를 훨씬 초과하는 높이였으나 금호방조제 건설 후에는 매년 이를 10 cm 이상 초과하고 있음을 볼 수 있어 이에 대한 재검토가 필요한 실정이다. 특히 1997년에 발생한 관측최고극조위인 535 cm와 1974년의 환산최고극조위인 535.2 cm는 기존연구에 따르면 100년 빈도를 훨씬 초과하고 있지만, 본 연구에 의하면 20년 빈도를 약간 상회하는 정도임을 보이고 있어 향후 이 정도의 조위발생 가능성은 얼마든지 있음을 알 수 있다. 또한 상기 결과는 본 연구에서 빈도해석방법으로 채택한 Log-Normal 방법에 의한 것으로서, Gumbel-Chow 방법과 같은 여타 방법에 의한 결과는 이 방법에 비해 그 결과가 다소 크게 나타나는 경향이 있다. 본 연구에서 Log-Normal 방법을 채택한 이유는 전술한 바와 같이 저빈도에서 실제 관측결과와 가장 일치하기 때문이었다. 따라서 본 연구 결과는 다른 빈도해석 방법을 사용할 경우 고빈도에서 더욱 큰 값이 산정될 수도 있을 것이다.

또 한가지 특기할 사항은 하구언 건설이전 목포구의 'tidal choking effect'가 충분히 기능을 하고 있었던 시기에는 목포구 외곽에서 상당히 높은 고극조위가 발생해도 거기에 비례하여 목포항의 조위가 높아지지 않았던 것이 하구언과 방조제 건설후 목포구의 그 기능이 상실된 현재 상황에서는 외해의 고조위가 여과없이 목포항에 직접적으로 영향을 미치게 되어 과거에 비해 해일이 발생할 경우 목포항의 재난 발생 위험이 매우 커졌다는 사실이다. 이러한 사실에 대한 근거는 Fig. 3에도 나타나 있는데, 하구언 건설이전에는 경계조건으로 부여되는 목포구 외곽의 조위가 상승하는 비율에 비해 목포항의 상승비율이 조위가 크면 클수록 점점 작아지는 비선형 형태이었던 반면 하구언과 방조제 건설에 따라 점점 선형에 가까워져 현재 상황은 외해 조위가 높아지는 선형적인 형태가 되었음을 보여주고 있다. 따라서 이러한 결과는 강주환(1996)이 예측했던 것처럼 하구언과 방조제 건설에 따라 목포항에서의 해일에 대한 취약성은 매우

심각해진 상태가 되었음을 시사하고 있다.

## 5. 결 론

목포해역에 건설된 영산강 하구언과 영암 및 금호방조제로 인하여 고극조위가 큰 폭으로 증가하였음을 기왕의 자료를 통해 확인할 수 있었으며, 이에 따라 빈도별 고극조위의 재산정이 시급한 실정이다. 이에 따라 최근 시행된 기존 연구결과는 목포해역의 조석환경변화를 감안하지 않은 채 이질적인 자료로부터 단순한 빈도해석을 실시하였기에 신빙성이 결여되어 있어, 본 연구에서는 조석환경변화를 감안해 수치해석을 병행한 극치분석 방법을 제안하였다. 도출된 결과는 매우 만족스러운 수준이었으며, 하구언과 방조제 건설에 의해 목포구의 'tidal choking effect' 현상이 소멸되어 목포항의 고극조위가 크게 상승한 것으로 나타났다. 더욱이 목포해역의 고극조위에 관한 조석환경은 빈도가 키질수록 과거에 비해 더욱 심해질 수 있는 상태로 바뀌었기 때문에 향후 목포항 부근의 해일피해가 크게 우려된다.

## 참고문헌

- 강주환, 박상현, 이길성, 1993. 음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석, 대한토목학회 논문집, 13(3): 119-127.
- 강주환, 1995. 음해조석모형의 목포항 인근해역에의 적용, 해안·해양공학회지, 7(4): 321-328.
- 강주환, 1996. 하구언 및 방조제 건설에 따른 목포해역의 환경변화, 대한토목학회 논문집, 16(II-6): 611-619.
- 강주환, 송재준, 오남선, 1998. 낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석, 대한토목학회 논문집, 18(II-2): 185-193.
- 강주환, 임병선, 1998. 방조제 건설로 인한 목포해역에서의 오염확산양상 변화, 대한토목학회 논문집, 18(II-6): 613-622.
- 목포지방 해양수산청, 1998. 목포항 수리현상 조사 및 방제

- 대책 수립 보고서.
- 이석우, 1994. 한국항만수리지, 집문당, pp. 93-116.
- 행정자치부, 1998. 석해안 해수범람 흔적조사 및 종합대책 수립 보고서.
- Bayliss, A., Goldstein C.I. and Turkel E., 1983. An Iterative Method for the Helmholtz Equation *J. of Computational Physics*, 49.
- 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 Shelf Science*, 37, pp. 429-438.
- Panchang, V.G., Pearce, B.R, Wei, G. and Cushman-R. B., 1991. Solution of the Mild-Slope Wave Problem by Iteration *Applied Ocean Research*, 13(4).
- Wilders, P., van Stun, L., Stelling, G.S. and Fokkema G.A., 1988. A Fully Implicit Splitting Method for Accurate Tidal Computations Int'. *J. for Numerical Methods in Engineering*, 26.