

경험모의기법을 이용한 한반도 주변 해역에서의 극치해면 분석 Extreme Sea Level Analysis in Coastal Waters around Korean Peninsula Using Empirical Simulation Technique

서경덕* · 양영철* · 전기천** · 이동영**

Kyung Duck Suh*, Young Chul Yang*, Ki Chun Jun** and Dong Young Lee**

요 지 : 해양 및 해안의 구조물 설계 시 극치해면 연구가 필수적이다. 본 논문에서는 한반도 주변의 무역항과 연안항 총 52개 항에서 수치모의 된 폭풍해일 자료를 연최대치 시계열 방법, 부분 시계열 방법, 경험모의기법을 이용하여 빈도분석을 수행한 후 비교하였다. 연최대치 시계열 방법과 부분 시계열 방법에서 매개변수 추정을 위해 최우도법을 사용하였다. 분포는 Generalized Pareto 분포를 사용하였고 적합성은 5% 유의수준으로 χ^2 및 K-S 검정을 수행하였다. 또한, 경험모의기법에 조석을 추가하여 극치해면을 산정하였으며 정 등(2008)이 제시한 극치해면과 비슷한 값을 나타내었다.

핵심용어 : 극치해면, 폭풍해일고, EST 기법, 빈도분석

Abstract : The estimation of the extreme sea level is necessary in the design of offshore or coastal structures. In this paper, the storm surge data calculated numerically at 52 harbors around the Korean Peninsula are analyzed by using annual maximum series (AMS), peaks over threshold (POT) and empirical simulation technique (EST). The maximum likelihood method was used to estimate the parameters in both AMS and POT models. The Generalized Pareto distribution was used and Chi-square and Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit tests were performed with the acceptable significance level 5%. The extreme sea levels were also evaluated by EST including tide effect, showing similar results as given by Jeong et al. (2008).

Keywords : extreme sea level, storm surge, empirical simulation technique, frequency analysis

1. 서 론

태풍으로 인한 피해로는 강한 바람, 단시간의 집중호우, 전체적인 해면상승을 일으키는 해일을 들 수 있다. 이런 피해들은 일반적으로 동시에 발생하기 때문에 그로 인한 인명과 재산 피해가 크다. 우리나라에서도 태풍 매미에 의해 마산과 부산지역에서 해일 피해를 입었다. 해일로 인한 피해로는 연안의 구조물과 정박한 선박들의 피해와 침수 피해가 있다. 이러한 피해를 방지하기 위해서는 현 방재 시설의 안정성을 평가하거나 구조물 설계 시에 필요한 극치해면에 대한 연구가 필수적이다. 그러나 우리나라에서는 피해에 대한 집계와 피해 복구 등 단기적인 시각

의 접근이 대부분이다. 극치해면에 대한 타당한 예측이 없다면 과대 설계를 통한 예산 낭비나 과소 설계를 통한 인적, 물적 피해를 피할 수 없게 된다. 이러한 중요성에도 불구하고 우리나라 주변 해역에 대한 연구가 부족한 이유는 다음과 같다. 만약 충분한 기간의 관측된 연 최대 극치해면 값이 있다면 극치분석을 통해 극치해면을 추정하면 되지만 태풍시의 악기상에서 관측이 쉽지 않아서 광역에서의 폭풍해일고, 유속, 파고 등의 관측 자료가 부족한 실정이다. 이용할 수 있는 자료는 국립해양조사원에서 제공하는 연안에 위치한 36개의 검조소가 있지만 20년 이상의 자료는 23개뿐이다. 따라서 기상자료로부터 태풍상황을 모의하여 수치데이터를 얻어야 하는데 여기에도 문

*서울대학교 건설환경공학부(Corresponding author: Kyung-Duck Suh, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, kdsuh@snu.ac.kr)

**한국해양연구원 연안방재연구사업단(Coastal Engineering Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute)

제가 있다. 먼저, 폭풍해일이 발생하는 이유는 두 가지 물리현상에 의한 것이다. 하나는 태풍의 중심기압이 현저히 낮아서 그 부분의 해수면이 상승하기 때문이다. 이것을 역기압 효과(inverse barometer effect)라고 부른다. 다른 하나는 심해에서 천해로 불어온 바람의 응력과 해저지형의 관계로 인해 해수가 집중되기 때문이다. 이처럼 폭풍해일 고를 산정하기 위해서는 태풍 시의 기압장과 바람장을 정확히 재현해야 한다. 최근에는 슈퍼컴퓨터를 통해서 산정을 하기 위해 노력하고 있지만 아직도 어려운 과업이다.

일단 자료가 있다고 해도 어떤 방법을 통하여 극치해면을 산정할 지 문제가 된다. 미국에서는 두 가지 방법이 대표적으로 사용되고 있다. 먼저, 부족한 자료를 극복하여 공간에서의 극치해면 추정을 위해서 Pugh and Vassie(1978)가 결합확률법(Joint Probability Method)을 도입하였다. 그리고 결합확률법의 단점인 태풍의 매개변수들 간의 상관관계가 없고 독립이라는 것을 보완하기 위해서 미공병단 항만수리연구소와 Wyoming 대학의 Borgman 교수 등의 공동 연구로 개발된 경험모의기법(Empirical Simulation Technique, EST)이 있다. EST 기법은 열대성 폭풍과 관련된 공학적인 설계나 사업평가를 수행할 경우에 기존에 적용해오던 단순한 빈도분석에 의한 설계의 개념을 탈피하여 재현기간에 해당하는 평균값과 표준편차를 구하여 평균값에 대한 오차와 불확실성을 동시에 고려하는 경험적-통계적 방법이다.

극치해면에 대한 연구로 심 등(1992)은 극치확률법과 결합확률법을 이용하여 극치해면을 산정하였고, 최와 고(1996)는 결합확률법을 이용하여 공간적 극치 해면 분포도를 작성하였으며, 정 등(2008)은 최근의 검토소 자료를 추가하여 극치확률법을 통해 극치해면을 산정한 후 심 등(1992)의 결과와 비교하였다. 하지만, 아직까지 우리나라 주변해역에서 EST 기법을 폭풍해일고에 대해서 적용한 예가 없기 때문에 적용성에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 EST 기법과 매개변수적 방법인 연최대치 시계열 방법, 부분 시계열 방법으로 빈도분석한 폭풍해일고를 비교하였다. 또한, EST 기법의 입력벡터에 조석을 추가하여 극치해면을 산정한 후 정 등(2008)의 결과와 비교하여 EST 기법의 적용성에 대해 검증하였다.

2. 분석 대상 및 자료

2.1 분석 대상

대상 지역은 우리나라 무역항 28개와 연안항 24개 총

52개이다. 각 항의 이름과 위치는 Table 1과 같다. 열 방향으로 인천항부터 서귀포항까지가 무역항이고 용기포항부터 성산포항까지가 연안항이다. Table 1을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다. 무역항과 연안항이 표의 순서대로 서해에서부터 해안을 따라서 동해까지 표시된 후 제주도의 항들이 표시되었다.

2.2 태풍 시의 해상풍과 기압 및 폭풍해일고 계산

모의된 태풍은 1951~2006년간 북서태평양에서 발생한 태풍 중에서 우리나라에 영향을 준 태풍만 고려하기 위하여 제주도를 중심으로 500 km 반경을 통과한 태풍 201개를 선별하였다. 각 태풍이 발생했을 당시의 해상풍은 Kang et al.(2002)이 제시한 Primitive Vortex Model (PVM)을 적용하여 추정하였고, 한국해양연구원에서 개발된 2차원 폭풍해일모델(KORDI-S, 이 등, 2008)을 이용하여 폭풍해일고를 계산하였다. 공간격자의 간격은 경도 1/60도, 위도 1/60도이다. 자료는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 각 태풍의 이동경로에 따른 중심기압 자료와 다른 하나는 각 태풍이 발생하였을 때 모든 항에서의 10분 간격의 폭풍해일고, 1시간 간격의 최대 풍속과 해면기압 자료이다.

3. EST 기법

EST 기법은 위험도 해석과 연관하여 빈도해석과 오차 해석을 시스템 일생 동안에 걸쳐 수행하기 위한 방법이다. 미공병단 항만수리연구소와 Wyoming 대학의 Borgman 교수 등의 공동 연구로 개발되었다. EST 기법은 열대성 저기압에 의해 발생할 수 있는 인명 및 재산피해는 물론 태풍이 통과하면서 나타날 수 있는 해일 및 연안침식 등 여러 가지 영향을 평가하는 데 적용되고 있다. EST 기법의 일반성으로 인해 강우유출과 같은 수문현상의 해석에도 적용되고 있다(Scheffner et al., 1999). EST 기법의 전체적인 과정은 Fig. 2에 나타내었다.

EST 기법의 유일한 가정은 미래의 사건이 통계적으로 과거의 사건과 크기와 빈도가 비슷하다는 것이다. EST 기법은 특정한 장소에 영향을 준 과거의 사건들의 분석으로부터 시작된다. 사건들 중 선택된 데이터베이스를 이용하여 사건의 영향과 특성을 매개화한다. 태풍을 정의하는 매개변수들은 입력벡터들로 간주된다. 그리고 태풍의 영향을 응답벡터로 나타낸다. 응답벡터에는 폭풍해일고, 침수, 해안선/모래 언덕 침식 등이 있다. 이러한 입력벡터와

Table 1. Name and location of harbors

Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Name	Latitude (°)	Longitude (°)
Incheon	37.45	126.60	Jeju	33.52	126.53
Pyeongtaek	36.98	126.83	Seogwipo	33.24	126.57
Daesan	37.00	126.35	Yongipo	37.95	124.73
Taeon	36.91	126.23	Yeonpyeongdo	37.66	125.71
Boryeong	36.41	126.49	Daecheon	36.33	126.50
Janghang	36.01	126.69	Biin	36.13	126.50
Gunsan	35.99	126.71	Songgong	34.85	126.23
Mokpo	34.78	126.38	Daeheuksando	34.70	125.44
Wando	34.32	126.76	Hongdo	34.68	125.19
Yeosu	34.75	127.75	Paengmok	34.37	126.13
Gwangyang	34.91	127.68	Chuja	33.96	126.30
Samcheonpo	34.93	128.07	Galdu	34.30	126.53
Tongyeong	34.84	128.42	Hwaheungpo	34.31	126.68
Gohyeon	34.89	128.62	Sinma	34.45	126.82
Jangseungpo	34.87	128.72	Nokdongsin	34.53	127.12
Okpo	34.89	128.70	Geomundo	34.04	127.31
Masan	35.19	128.58	Narodo	34.47	127.45
Jinhae	35.14	128.69	Busannam	35.09	129.03
Busan	35.11	129.06	Guryongpo	35.98	129.56
Ulsan	35.52	129.39	Hupo	36.68	129.46
Pohang	36.05	129.38	Jumunjin	37.89	128.83
Samcheok	37.44	129.19	Ulreung	37.46	130.88
Donghae	37.49	129.14	Aewol	33.47	126.33
Mukho	37.55	129.11	Hanrim	33.42	126.26
Okgyeo	37.62	129.06	Hwasun	33.23	126.33
Sokcho	38.21	128.60	Seongsanpo	33.48	126.93

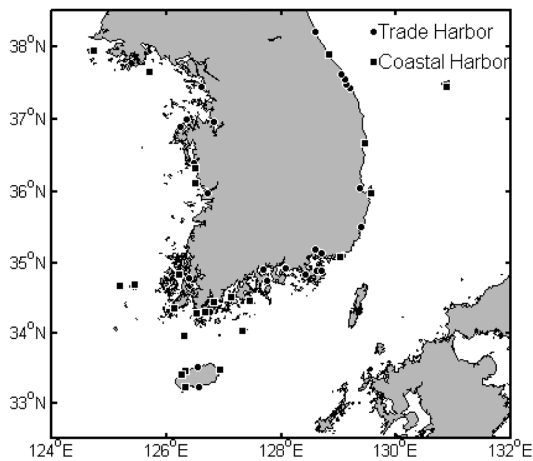


Fig. 1. The location map of harbors.

응답벡터들은 태풍과 관련된 영향의 생애주기 모의를 위한 기초로 사용되며 Training Set이라 부른다. Table 2는 갈두항의 Training Set을 보여준다. 이 데이터베이스에 EST 기법을 사용하여 모의된 다양한 생애주기 시나리오

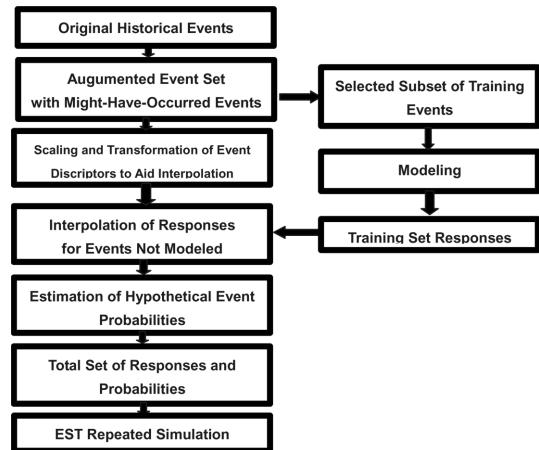


Fig. 2. Overall procedure of EST (Scheffner et al., 1999).

때문에 평균 빈도 값과 평균값에 대한 편차를 함께 계산한다. 이 평균값과 표준편차를 이용해 발생 빈도 관계를 만든다. 기존의 매개변수적 빈도분석이 불확실성을 고려하지 못하는 것을 보완했다고 볼 수 있다. 또 빈도분석 결

Table 2. Training set of Galdu harbor

Typhoon number	Input vectors				Response vector
	Distance from the eye of the storm (km)	Wind speed at site (m/s)	Pressure deficit at site (hPa)	Forward speed of the eye of the storm (km/h)	Storm surge (cm)
5111	96.0	20.7	20.6	27.6	47.4
5114	108.5	15.4	11.0	58.9	24.5
5201	181.2	8.1	1.7	40.1	7.9
5204	245.3	5.7	6.4	29.6	5.5
5209	117.5	23.3	22.0	46.6	61.7
5211	231.4	13.3	11.5	38.1	20.8
5309	293.6	4.0	7.2	35.4	5.6
5508	0.6	8.5	7.0	32.2	8.7
5512	227.6	10.0	10.4	19.3	16.0
5609	257.3	11.5	15.0	44.1	10.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0209	290.6	9.5	13.6	46.9	8.2
0215	245.3	10.6	14.2	77.6	15.3
0306	227.0	4.4	7.9	20.8	6.5
0314	279.1	4.4	7.8	29.5	7.9
0415	266.3	8.7	8.8	32.9	12.9
0515	165.6	19.2	16.4	45.6	69.6
0601	136.5	10.7	12.2	4.6	3.5
0603	207.9	4.4	8.0	14.1	9.8

과를 경제성 평가를 위한 모델의 직접적인 입력 자료로 사용하기도 한다. EST 기법은 어떤 주거나 빈도와 관련된 현상에 적용할 수 있는 일반적인 과정이기 때문에 폭 넓게 이용될 수 있다.

4. 빈도분석 결과

4.1 매개변수적 빈도분석과의 비교

매개변수적 방법에서는 수치모의 된 폭풍해일고 자료만 사용하였다. 매개변수적 방법으로는 기본적으로 설계시에 많이 쓰이는 연최대치 시계열(Annual Maximum Series, AMS)과 데이터의 길이가 짧을 때 자료의 수를 늘리기 위해 사용하는 부분시계열(Peaks Over Threshold, POT)을 사용하였다. 태풍의 경우 사상들이 서로 독립적이기 때문에 부분시계열을 사용하는 데 문제가 없다. 또한, 태풍의 특성상 한 해에 강한 태풍이 여러 개 올 수 있고 어느 해에는 발생하지 않거나 약한 태풍이 올 수 있기 때문에 연최대치를 뽑으면 극치 값들이 빠지거나 작은 값들이 포함되어 극값을 산정하는 데 정확성이 떨어질 수 있다. 하지만 연최대치 시계열 방법이 가장 많이 사용되므로 연최대치 자료를 뽑아서 빈도분석을 하였다. 데이터의 길이는 56년이지만 1988년에 발생한 태풍 중 우

리나라에 영향을 준 태풍이 없기 때문에 55개 자료를 사용하였다. 부분 시계열 방법에서는 평균적으로 일 년에 2개의 태풍이 발생하였다고 가정하여 각 지점에서 큰 값부터 순서대로 112개의 자료를 사용하였다.

매개변수를 추정하는 방법 중 모멘트법은 이상치가 있는 경우 적용성이 떨어지고 변동성이 큰 단점이 있어서 최우도법과 확률가중 모멘트법이 더 효율적인 방법으로 채택되고 있다. 확률가중 모멘트법의 경우 가장 큰 자료에 큰 가중치를 주기 때문에 재현기간이 큰 경우에 모멘트법이나 최우도법보다 지나치게 높은 극값을 산정하는 경우가 있다(한국건설교통기술평가원, 2008). 따라서 본 연구에서는 최우도법을 사용하여 매개변수를 추정하였다. 분포는 Gamma, Gumbel, Weibull, Generalized Extreme Value 그리고 Generalized Pareto 분포 중에서 적합도가 뛰어난 Generalized Pareto (GPA) 분포를 적용하였다. GPA 분포의 누적확률함수는 식 (1)과 같다.

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x - \varepsilon) \right]^{1/k} \quad (1)$$

여기서, k 는 형상모수, α 는 규모모수, ε 는 위치모수이다. 변수 x 의 범위는 $k \leq 0$ 일 때는 $\alpha \leq x < \infty$ 이고, $k > 0$ 일 때는 $\alpha \leq x \leq \varepsilon + \alpha/k$ 이다. 특별히 k 가 0일 때는 지수분포가 되

Table 3. Parameter estimates of AMS/GPA distribution

Name	Parameter			Name	Parameter		
	Location	Scale	Shape		Location	Scale	Shape
Incheon	7	31.9474	-0.0660	Jeju	6.3	18.7500	0.1917
Pyeongtaek	7.9	34.9019	-0.1830	Seogwipo	5.9	23.4141	0.2986
Daesan	6.9	19.8646	0.0677	Yongipo	7.6	19.7447	0.2189
Taeon	6.8	18.5835	0.1421	Yeonpyeongdo	7.8	26.5898	0.1204
Boryeong	7.3	35.7029	0.0953	Daecheon	7	32.6731	0.1266
Janghang	5.7	36.9204	-0.0433	Biin	6.9	31.3993	0.1177
Gunsan	5.6	37.2950	-0.0887	Songgong	5.7	25.4773	0.1768
Mokpo	4.4	36.4059	0.2064	Daeheuksando	6.7	14.5756	0.2424
Wando	8.2	38.1785	0.2084	Hongdo	6.9	15.3747	0.2363
Yeosu	6.8	38.4917	0.0804	Paengmok	7.4	18.5411	0.0154
Gwangyang	9.7	51.2789	0.0594	Chuja	6.3	20.1620	0.2842
Samcheonpo	7	41.8264	0.0235	Galdu	7.5	24.5897	0.0081
Tongyeong	5.4	34.7578	-0.1279	Hwaheungpo	7.3	29.9163	0.1005
Gohyeon	5.8	31.3148	-0.2026	Sinma	9.1	42.4995	-0.0943
Jangseungpo	3.9	24.9112	-0.0842	Nokdongsin	8.3	44.9088	0.1856
Okpo	4	25.9917	-0.0953	Geomundo	4.9	24.3673	0.1496
Masan	7.1	42.6959	-0.1791	Narodo	6.5	33.8573	0.1188
Jinhae	5.3	32.2234	-0.1972	Busannam	3.8	21.1225	-0.0437
Busan	3.9	24.1836	-0.1005	Guryongpo	3.4	11.1859	0.0081
Ulsan	3.9	16.2856	-0.1381	Hupo	3	9.9445	0.0613
Pohang	3.4	14.3369	-0.1368	Jumunjin	2.4	8.1259	-0.0487
Samcheok	2.7	8.7221	0.0512	Ulreung	2.7	10.4603	0.0924
Donghae	2.7	8.6401	0.0497	Aewol	6.5	19.0779	0.2861
Mukho	2.7	8.7608	0.0678	Hanrim	6.5	18.9259	0.3131
Okgyeo	2.7	8.6527	0.0587	Hwasun	6.2	22.3638	0.1985
Sokcho	2.4	8.3160	0.0371	Seongsanpo	5.4	21.1077	0.1268

고, k 가 1일 때는 $\alpha \leq x \leq \varepsilon + \alpha$ 에서의 균일분포가 된다.

각 지점에서 추정된 모수는 Table 3과 Table 4에 나타내었다. Table 3에는 연최대치 자료에 대한 GPA 분포의 모수를 나타내었고, Table 4에는 부분 시계열 방법에 사용된 자료에 대한 GPA 분포의 모수를 나타내었다.

분포의 적합성을 검토하기 위해서 χ^2 검정과 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정을 수행하였다. 그 결과 연최대치 시계열 자료는 GPA 분포를 5% 유의수준에서 잘 만족하였고 부분 시계열 자료는 평택, 통영, 고현, 마산, 진해, 부산, 울산, 신마항을 제외한 44개 항에서 GPA 분포를 5% 유의수준에서 잘 만족하였다.

연최대치 시계열과 부분 시계열로 분석된 매개변수적 빈도분석과 EST 기법에 의한 빈도분석 결과를 Table 5에 정리하여 비교하였다. 일례로 Fig. 3에는 갈두항의 폭풍해일고 빈도분석 결과를 도시하였다. 52개 항의 폭풍해일고 빈도분석 결과는 양(2009)의 논문 부록에 주어져 있다. Fig. 4에는 지역별로 서해, 남해와 제주, 동해로 구분하여

재현주기 50, 100년 폭풍해일고를 비교하였다. Fig. 4에서 보듯이 EST 기법의 결과가 연최대치 시계열 방법보다는 대체로 크다. EST 기법의 결과와 부분 시계열 방법의 결과가 재현주기 50년에서는 비슷하였지만, 재현주기 100년에서는 폭풍해일고가 큰 경우 부분 시계열 방법의 결과가 전반적으로 컸다. 추정된 재현주기 100년의 폭풍해일고를 비교한 결과 모든 항에서 연최대치 시계열로 분석된 값이 가장 작았다. 총 52개 중 22개의 항에서 연최대치 시계열로 분석된 재현기간 100년의 폭풍해일고가 56년 중 가장 큰 폭풍해일고보다 작았다. 연최대치 시계열 방법과 부분 시계열 방법의 결과를 비교해 보니 대부분의 지점에서 부분 시계열 방법의 결과가 컸다. 입력자료를 비교해 보니 부분 시계열 방법에 비해 연최대치 시계열 방법에서 큰 폭풍해일고가 빠지는 것보다 연최대치 시계열 방법에 비해 부분 시계열 방법에 작은 폭풍해일고가 많이 포함되었다. 일례로 갈두항에서 식 (1)과 Table 3과 4의 모수들을 이용하여 구한 누적분포함수는 Fig. 5와 같

Table 4. Parameter estimates of POT/GPA distribution

Name	Parameter			Name	Parameter		
	Location	Scale	Shape		Location	Scale	Shape
Incheon	12.6	12.9035	-0.3622	Jeju	8	8.0021	-0.1756
Pyeongtaek	Invalid	Invalid	Invalid	Seogwipo	7.6	9.3029	-0.1607
Daesan	10.3	9.0584	-0.1876	Yongipo	10	9.1712	-0.0662
Taeon	10.5	7.8457	-0.1613	Yeonpyeongdo	11.8	11.1691	-0.1912
Boryeong	10.4	15.1432	-0.2796	Daecheon	10.3	13.3210	-0.2791
Janghang	9.2	14.9720	-0.4242	Biin	10	13.2157	-0.2671
Gunsan	9.3	14.4583	-0.4901	Songgong	9.5	9.5854	-0.2592
Mokpo	10	12.4934	-0.3042	Dacheuksando	9	5.9140	-0.1567
Wando	11.3	12.6483	-0.3764	Hongdo	9.4	5.8518	-0.2017
Yeosu	9.9	13.1014	-0.3900	Paengmok	9.3	7.8130	-0.3369
Gwangyang	13.9	17.1030	-0.4290	Chuja	8.1	8.9912	-0.0892
Samcheonpo	10.8	13.3981	-0.4673	Galdu	9.6	9.7996	-0.3905
Tongyeong	Invalid	Invalid	Invalid	Hwaheungpo	9.8	9.4024	-0.4917
Gohyeon	Invalid	Invalid	Invalid	Sinma	Invalid	Invalid	Invalid
Jangseungpo	7.4	7.7305	-0.5347	Nokdongsin	11.6	14.8633	-0.3936
Okpo	7.7	8.1561	-0.5340	Geomundo	7.7	8.8125	-0.2836
Masan	Invalid	Invalid	Invalid	Narodo	9.6	10.8087	-0.4229
Jinhae	Invalid	Invalid	Invalid	Busannam	6.4	6.6171	-0.5135
Busan	Invalid	Invalid	Invalid	Guryongpo	4.3	4.3471	-0.3549
Ulsan	Invalid	Invalid	Invalid	Hupo	4.1	3.1113	-0.4662
Pohang	4	6.1507	-0.4124	Jumunjin	3.1	3.0203	-0.4730
Samcheok	3.5	2.9792	-0.4417	Ulreung	3.8	3.8093	-0.3272
Donghae	3.5	2.7984	-0.4885	Aewol	8.1	8.1877	-0.1198
Mukho	3.5	2.8555	-0.4803	Hanrim	7.7	8.7079	-0.0676
Okgyeo	3.4	3.1363	-0.4102	Hwasun	7.9	8.5798	-0.2586
Sokcho	3.1	3.1893	-0.4046	Seongsanpo	7.7	7.9574	-0.2860

다. 그러나 부분 시계열 방법으로 재현기간 n 년의 태풍이 발생할 누적확률분포는 식 (2)에 의해서 결정된다.

$$F(x_{(n)}) = 1 - \frac{1}{\lambda n} \tag{2}$$

여기서 λ 는 연 평균 태풍 수이다. 52개 지점에서 λ 는 2이다. 한편 연최대치 시계열 방법에서는 λ 는 1을 사용한 다. 갈두항에서 재현기간 20년의 폭풍해일고를 Fig. 5에 나타내었다.

EST 기법으로 구한 결과 중 자료의 기간(56년)에 가까운 재현기간 50년의 폭풍해일고와 56년 중 가장 큰 폭풍해일고를 비교한 결과 모든 항에서 비슷하였다. 가장 큰 차이가 나는 지점은 삼천포항과 나로도항으로 수치모의 된 폭풍해일고를 기준으로 EST 기법의 결과가 약 32% 컸다. 이를 통해 EST 기법에서는 입력자료 중에 가장 큰 값을 그 기간에 한 번 발생할 수 있는 사건으로 간주한다는 가정을 확인할 수 있었다. Fig. 4에서 남해와 제주 지역에서 재

현기간 50년의 경우 EST 기법과 연최대치 시계열 방법의 차이가 큰 이유도 여기서 찾을 수 있다.

부분 시계열 방법으로 구한 재현기간 50년의 폭풍해일고와 56년 중 가장 큰 폭풍해일고를 비교한 결과 35개의 항(79.5%)에서 부분 시계열 방법의 결과가 컸다. 재현기간 50년의 폭풍해일고가 수치모의 된 폭풍해일고 중 가장 큰 해일고의 95%보다 큰 경우는 39개 항(88.6%)에 달했다. 이를 통해 EST 기법의 결과가 크게 과대 산정하는 것은 아니라는 것을 알 수 있다.

EST 기법의 장점으로는 표준편차를 들 수 있다. 예를 들어, 갈두 지점에서 56년간 최대 폭풍해일고는 111 cm로 태풍 VERA(8613)에 의해 발생하였고, 그 다음으로는 91.9 cm로 태풍 IRVING(7910)에 의해 발생하였다. EST 기법의 재현기간 50년의 폭풍해일고는 139.5 cm, 부분 시계열 방법으로 구한 경우는 136.08 cm이고 연최대치 시계열 방법으로 구한 경우는 102.19 cm이다. EST 기법과 부분 시계열 방법의 결과는 조금 크게 여겨진다. 하지만,

Table 5. Comparison of estimated storm surges for different return periods ((): standard deviation, unit: cm)

Name	Return period					
	50			100		
	EST	AMS	POT	EST	AMS	POT
Incheon	180.06 (36.59)	149.59	165.86	230.83 (61.70)	178.93	219.78
Pyeongtaek	228.51 (32.95)	207.41	NaN ¹⁾	265.97 (45.90)	260.18	NaN
Daesan	102.16 (20.26)	75.17	76.56	126.59 (31.25)	85.49	92.47
Taeon	85.52 (16.47)	62.57	64.09	105.70 (25.10)	69.61	76.18
Boryeong	144.57 (15.79)	123.90	152.51	161.85 (20.33)	140.40	194.48
Janghang	181.32 (32.50)	163.08	222.84	217.92 (47.51)	193.85	307.93
Gunsan	196.31 (33.11)	180.02	261.63	235.31 (48.47)	217.74	375.64
Mokpo	131.72 (22.03)	102.11	135.62	157.97 (31.46)	112.60	174.75
Wando	147.72 (25.89)	110.32	167.87	179.07 (39.77)	121.22	224.55
Yeosu	179.03 (27.35)	136.00	178.75	209.77 (35.72)	154.95	241.60
Gwangyang	260.29 (57.13)	188.70	261.54	329.36 (83.74)	216.29	361.11
Samcheonpo	215.13 (35.21)	163.33	228.76	255.37 (47.53)	189.56	323.10
Tongyeong	240.66 (59.49)	181.84	NaN	319.91 (99.26)	223.39	NaN
Gohyeon	251.66 (64.87)	192.70	NaN	326.54 (89.46)	244.19	NaN
Jangseungpo	153.62 (36.66)	119.33	162.58	195.31 (49.43)	144.05	238.68
Okpo	157.15 (38.95)	127.22	171.05	202.27 (53.18)	154.25	251.07
Masan	325.37 (71.39)	249.08	NaN	408.66 (100.87)	312.58	NaN
Jinhae	248.66 (61.26)	195.34	NaN	324.97 (95.73)	247.12	NaN
Busan	155.97 (36.73)	119.79	NaN	197.53 (46.74)	145.51	NaN
Ulsan	122.24 (34.08)	88.38	NaN	165.18 (52.78)	108.71	NaN
Pohang	89.99 (12.40)	77.58	88.71	104.19 (16.40)	95.38	121.67
Samcheok	41.86 (7.83)	33.62	48.33	51.71 (12.15)	38.48	66.80
Donghae	41.06 (6.86)	33.41	52.10	48.99 (10.08)	38.26	73.99
Mukho	39.30 (5.97)	32.80	51.85	46.78 (9.10)	37.35	73.30
Okgyeo	39.70 (5.55)	32.94	46.32	46.53 (8.12)	37.61	62.94
Sokcho	35.08 (2.78)	32.68	46.02	38.54 (4.17)	37.61	62.47
Jeju	74.16 (14.83)	57.91	64.74	92.96 (22.95)	63.66	77.98
Seogwipo	76.78 (12.58)	59.93	71.05	91.32 (18.23)	64.49	85.35
Yongipo	76.59 (10.34)	59.49	59.38	88.14 (13.30)	64.88	68.20
Yeonpyeongdo	113.14 (16.79)	90.75	94.29	133.45 (25.42)	101.79	114.25
Daecheon	130.96 (19.67)	107.80	135.14	156.05 (29.90)	121.01	171.98
Biin	122.18 (19.90)	105.33	129.82	148.25 (34.78)	118.52	164.26
Songgong	98.90 (18.82)	77.64	94.53	122.30 (28.65)	85.96	118.54
Daeheuksando	57.09 (8.81)	43.53	48.92	68.06 (12.78)	47.14	57.83
Hongdo	59.25 (9.20)	46.15	53.83	69.77 (12.73)	50.05	64.85
Paengmok	100.34 (16.91)	77.80	95.54	120.25 (23.53)	89.84	124.33
Chuja	68.12 (10.92)	53.90	59.30	82.14 (16.94)	58.08	69.00
Galdu	139.5 (27.51)	102.19	136.08	174.06 (42.81)	118.66	183.19
Hwaheungpo	147.21 (28.28)	104.07	174.72	182.37 (44.01)	117.58	249.45
Sinma	217.45 (26.76)	210.15	NaN	246.32 (33.81)	254.17	NaN

Table 5. (Continued)

Name	Return period					
	50			100		
	EST	AMS	POT	EST	AMS	POT
Nokdongsin	164.73 (20.04)	133.20	205.20	187.97 (27.69)	147.33	277.77
Geomundo	97.32 (21.15)	77.06	91.33	124.01 (32.22)	85.99	116.25
Narodo	157.70 (33.08)	112.43	163.23	200.19 (54.70)	126.58	224.26
Busannam	128.74 (36.59)	93.91	130.63	172.61 (53.45)	111.54	189.25
Guryongpo	56.08 (7.58)	46.48	54.84	64.81 (10.02)	53.97	72.35
Hupo	43.18 (13.39)	37.59	54.55	60.46 (21.07)	42.90	76.33
Jumunjin	43.64 (6.43)	37.42	53.11	51.01 (8.74)	44.35	74.99
Ulreung	43.99 (5.85)	37.04	44.69	50.15 (7.22)	41.93	58.07
Aewol	66.64 (10.11)	51.41	58.41	79.45 (15.16)	55.32	68.69
Hanrim	63.23 (8.04)	49.19	54.75	72.46 (10.52)	52.65	63.19
Hwasun	84.62 (10.33)	67.04	83.88	96.41 (13.69)	73.71	105.31
Seongsanpo	87.55 (15.75)	70.50	83.73	106.14 (22.27)	79.03	106.50

¹⁾NaN=Not a Number

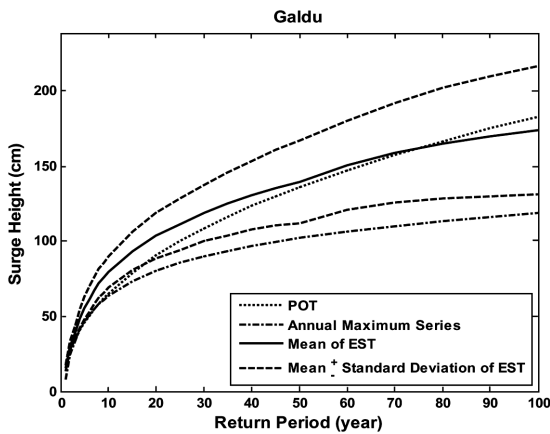


Fig. 3. Quantile of EST, POT/GPA and AMS/GPA distribution (Galdu).

EST 기법의 평균값에서 표준편차를 뺀 값은 111.99 cm 이다. EST 기법의 경우 이러한 오차 범위가 있기 때문에 대상 지점에 따라 적절한 값을 사용할 수 있는 장점이 있다. 반대로 설계자의 판단에 따라 설계 값이 바뀌므로 설계자의 충분한 경험을 요구하게 된다.

4.2 타 연구의 극치해면과의 비교

극치해면을 산정하기 위해서는 EST 기법의 입력벡터에 조석을 포함시켜야 한다. 각 태풍이 1) 평균고조위, 2) 평균해면, 3) 평균저조위, 4) 평균해면 상태에서 올 수 있다고 가정하고 조석과 폭풍해일고를 더하여 반응벡터를 구성하였다. 즉, Training Set이 4배로 커지게 되었다. Table 6

에 EST 기법으로 구한 극치해면의 평균값과 표준편차를 재현기간별로 나타내었다. 총 52개 항 중에서 송공항과 갈두항은 조석 자료를 구할 수 없어서 제외하였다. 정 등 (2008)이 극치확률법을 이용하여 23개 검조소에서 산정한 극치해면 결과 중 본 연구의 52개 항에 가까운 17개 지점을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 재현빈도가 50년인 경우는 주로 극치확률법으로 구한 결과가 EST 기법의 결과보다 크고, 재현빈도 100년인 경우는 두 결과가 비슷하며, 재현빈도 200년의 경우는 주로 EST 기법의 결과가 더 크다. 분석에 사용된 자료로 정 등(2008)은 관측 자료를 사용하였고 본 연구에서는 수치모의의 된 자료를 사용하였다. 또한 각 항에서 자료의 길이가 다르기 때문에 빈도분석 결과가 서로 다를 것이다. 하지만 이런 차이에도 불구하고 두 결과가 비슷하다는 것은 EST 기법의 결과가 타당하다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

해안 및 해양의 구조물 설계를 위해서 극치해면 산정은 필수적인 과정이다. 본 연구에서는 태풍에 의해 발생하는 폭풍해일고 빈도분석을 EST 기법에 의하여 수행하였다. 또한 일반적으로 사용되는 매개변수적 방법인 연최대치 시계열 방법과 부분 시계열 방법으로 빈도분석 후 EST의 결과와 비교 분석하여 EST의 적용성에 대해 검토하였다. 분포는 χ^2 검정과 K-S 검정을 이용하였을 때 적합도가 뛰어난 Generalized Pareto 분포를 사용하였고 최우도법을 사용하여 매개변수를 추정하였다. 본 연구의 결

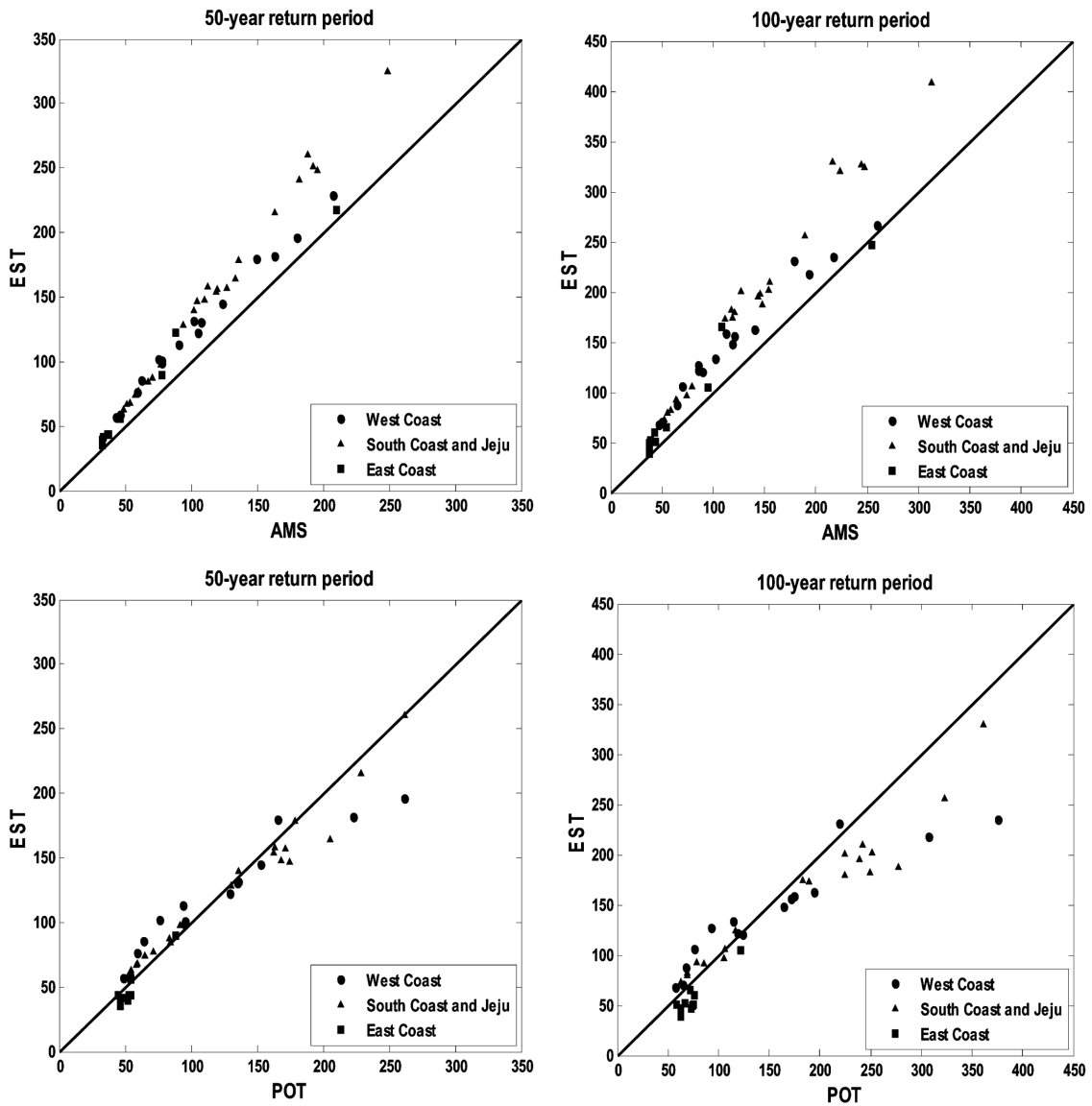


Fig. 4. Comparison of estimated storm surges for different return periods (unit: cm).

과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 연최대치 시계열 방법의 결과가 세 방법 중 가장 작았다. 재현기간 100년의 해일고가 56년간 수치모의된 가장 큰 폭풍해일고보다 22개의 항(42.3%)에서 작게 계산되었다. 전술한 3가지 방법으로 구한 재현기간 100년의 결과를 비교한 결과 비교 가능한 모든 항에서 연최대치 시계열 방법이 제일 작았다. 연최대치 시계열 방법의 결과가 EST 기법의 결과보다 작은 이유는 다음과 같다. EST 기법에서는 재현기간 동안에 발생할 태풍의 수를 구하여

Training Set을 기반으로 Training Set보다 더 큰 데이터 베이스를 구성하게 된다. 따라서 연최대치 시계열 방법에서는 큰 해일고의 수가 적어서 GPA 분포의 꼬리부분이 얇게 결정되고, EST 기법은 큰 폭풍해일고가 더 많기 때문에 경험적 산정식으로 구한 누적분포함수의 꼬리부분이 두꺼워지기 때문이다.

2) 비교가능한 모든 지점에서 부분 시계열 방법의 결과가 연최대치 시계열 방법의 결과보다 컸다. 일반적으로 연최대치 시계열 방법의 특성상 큰 폭풍해일고를 포함시키

Table 6. Extreme sea level and standard deviation estimated by EST for different return periods ((): standard deviation, unit: cm)

Name	Return period				
	10	30	50	100	200
Incheon	794.39 (12.22)	876.08 (35.50)	931.52 (60.89)	1031.98 (97.90)	1154.89 (147.93)
Pyeongtaek	819.96 (17.67)	914.68 (34.00)	964.15 (48.07)	1043.18 (78.87)	1149.27 (138.39)
Daesan	690.66 (6.02)	745.5 (32.21)	799.01 (57.64)	890.39 (84.32)	994.44 (125.14)
Taeon	642.92 (5.71)	699.11 (33.45)	753.34 (53.56)	838.81 (77.51)	933.87 (117.93)
Boryeong	660.13 (10.52)	720.27 (22.96)	758.06 (41.28)	830.49 (73.99)	923.26 (117.96)
Janghang	654.62 (15.73)	730.64 (23.71)	767.87 (39.51)	832.71 (65.41)	913.49 (96.95)
Gunsan	639.76 (17.02)	720.02 (24.16)	756.25 (36.42)	820.38 (63.02)	898.04 (93.25)
Mokpo	432.53 (8.16)	476.72 (16.06)	499.91 (22.56)	536.17 (36.20)	579.86 (52.54)
Wando	357.78 (7.64)	400.47 (14.45)	420.9 (18.51)	449.7 (26.55)	481.58 (39.93)
Yeosu	330.87 (7.35)	380.15 (18.86)	407.49 (24.48)	443.81 (31.87)	483.97 (45.28)
Gwangyang	371.1 (12.35)	440.99 (26.74)	478.82 (34.63)	533.88 (51.39)	597.18 (75.87)
Samcheonpo	317.8 (9.61)	382.63 (24.60)	416.97 (31.06)	463.31 (43.49)	514.89 (60.68)
Tongyeong	278.39 (10.10)	351.66 (28.20)	389.86 (35.60)	441.26 (49.60)	502.66 (80.30)
Gohyeon	227.41 (13.46)	302.57 (26.38)	340.8 (35.59)	392.37 (46.99)	444.48 (61.49)
Jangseungpo	190.9 (8.00)	231.47 (15.14)	253.36 (21.22)	285.93 (28.75)	317.62 (36.98)
Okpo	208.54 (9.22)	250.31 (15.01)	273.54 (23.41)	309.01 (31.91)	344.82 (39.49)
Masan	259.18 (19.49)	358.88 (30.89)	400.25 (37.09)	454.95 (51.57)	515.79 (74.60)
Jinhae	233.02 (14.39)	303.5 (23.69)	337.32 (32.10)	388.1 (46.72)	445.69 (71.22)
Busan	149.91 (8.09)	194.73 (15.94)	216.19 (19.56)	244.28 (26.35)	273.06 (34.60)
Ulsan	87.94 (5.29)	120.01 (12.26)	138.5 (17.34)	166.64 (26.28)	198.01 (37.72)
Pohang	58.41 (8.26)	90.48 (7.02)	98.59 (6.68)	107.44 (7.51)	115.2 (8.97)
Samcheok	41.53 (1.99)	52.06 (3.65)	57.35 (4.97)	65.18 (7.85)	74.4 (11.55)
Donghae	44.32 (2.09)	55.14 (3.47)	60.05 (4.70)	67.5 (7.19)	76.37 (10.73)
Mukho	43.97 (2.05)	54.08 (3.13)	58.46 (4.09)	64.45 (5.95)	71.8 (9.31)
Okgyeo	44.13 (2.12)	54.11 (2.96)	58.16 (3.66)	63.8 (5.36)	70.3 (7.94)
Sokcho	45.21 (1.86)	52.84 (2.18)	55.72 (2.54)	59.36 (3.16)	63.19 (4.56)
Jeju	238.42 (3.23)	258.12 (8.20)	271.23 (13.61)	293.24 (21.96)	318.88 (31.40)
Seogwipo	254.94 (4.09)	276.13 (8.07)	288.1 (12.08)	308.14 (19.65)	332.29 (31.63)
Yongjipo	339.11 (2.99)	365.05 (14.44)	388.97 (23.99)	428.56 (35.80)	469.28 (49.77)
Yeonpyeongdo	612.15 (4.75)	661.71 (31.65)	712.67 (52.20)	794.84 (75.46)	880.08 (105.64)
Daecheon	663.67 (9.25)	726.75 (30.28)	775.51 (50.82)	856.49 (74.95)	949.6 (113.87)
Biin	611.45 (10.34)	662.53 (20.05)	695.93 (37.52)	760.66 (67.83)	843.97 (103.54)
Daehuksando	312.75 (2.82)	334.55 (11.66)	354.42 (21.60)	388.09 (32.26)	425.84 (44.48)
Hongdo	286.79 (2.69)	304.25 (9.38)	320.85 (19.04)	353.07 (31.55)	388.76 (41.93)
Paengmok	325.25 (4.62)	357.45 (13.00)	376.48 (18.22)	406.19 (28.75)	442.92 (45.89)
Chuja	281.15 (2.90)	298.49 (7.34)	310.36 (12.92)	334.04 (25.59)	367.41 (41.49)
Hwaheungpo	349.56 (7.05)	396.08 (16.16)	418.44 (20.74)	450.74 (30.41)	489.14 (46.87)
Sinma	389.33 (12.01)	448.61 (20.33)	478.18 (27.67)	520.48 (39.40)	569.36 (60.80)

Table 6. (Continued)

Name	Return period									
	10		30		50		100		200	
Nokdongsin	383.22	(9.69)	435.74	(18.87)	461.41	(24.35)	499.38	(35.24)	540.14	(50.27)
Geomundo	287.91	(4.25)	314.15	(10.70)	329.56	(16.06)	357.84	(30.92)	400.8	(56.34)
Narodo	340.49	(7.18)	388.03	(19.13)	416.53	(27.79)	458.74	(39.36)	504.81	(55.58)
Busannam	139.63	(6.36)	174.9	(12.66)	193.46	(17.88)	222.61	(27.57)	258.23	(42.92)
Guryongpo	42.05	(4.64)	58.47	(3.62)	62.99	(3.82)	68.15	(4.36)	72.97	(5.69)
Hupo	39.27	(1.62)	48.24	(3.77)	54.71	(7.33)	66.9	(11.26)	79.27	(13.36)
Jumunjin	46.2	(2.52)	57.61	(3.62)	62.48	(4.70)	69.26	(6.29)	76.46	(8.54)
Ulreung	42.17	(2.64)	54.75	(3.22)	58.55	(3.16)	62.76	(3.54)	66.68	(4.48)
Aewol	220.54	(3.17)	239.85	(7.59)	252.07	(12.56)	272.4	(20.24)	296.71	(29.55)
Hanrim	239.71	(3.14)	257.24	(7.47)	269.39	(13.04)	291.3	(21.50)	317.4	(31.79)
Hwasun	258.91	(4.71)	284.83	(9.25)	297.79	(12.45)	316.61	(18.01)	338.59	(27.85)
Seongsanpo	226.15	(3.91)	246.61	(8.74)	261.57	(15.95)	287.23	(25.25)	316.72	(34.26)

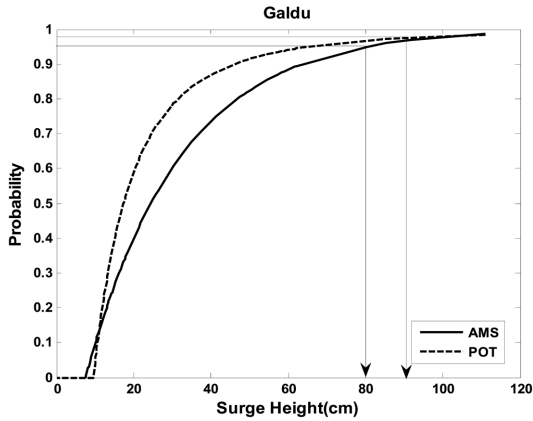


Fig. 5. Cumulative distribution function of AMS/GPA and POT/GPA and storm surge height of 20-year return period (Galdu).

지 못하는 것과 부분 시계열 방법에서 재현기간 n 년 태풍의 누적확률분포를 구하는 식이 다른 것에서 원인을 찾을 수 있다. 하지만 입력 자료를 비교해 본 결과 큰 폭풍

해일고들은 연최대치 시계열 방법에도 포함이 되었기 때문에 후자에 의한 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

3) EST 기법의 경우 자료 기간 중의 가장 큰 폭풍해일고를 그 기간에 한 번 발생할 수 있는 사건으로 가정한다. 각 지점에서 비교해본 결과 56년 동안의 최대 폭풍해일고 값은 EST 기법에 의해 추정된 재현기간 50년 폭풍해일고와 유사하였다. 하지만 부분 시계열 방법의 50년 폭풍해일고가 56년 동안의 최대 폭풍해일고의 95% 이상인 지점이 39개 항(88.6%)이었으므로 EST 기법의 결과가 크게 과대 산정하는 것은 아니라는 것을 알 수 있다. 하지만, EST 기법에 사용되는 자료의 기간이 충분히 길지 않으면서 큰 폭풍해일고가 있는 경우 과대 산정할 수 있다. EST 기법을 사용하기 위해서는 큰 자료를 포함시킬지 여부를 데이터의 길이와 최근 강해지는 태풍의 추세를 고려하여 신중히 선택해야 한다. EST 기법은 평균값과 표준편차를 계산하기 때문에 과대 산정으로 여겨질 때는 설계자의 판단에 따라 표준편차를 고려하여 대상 지점에 적절한 설계 값을 정할 수 있다. 그리하여 EST 기

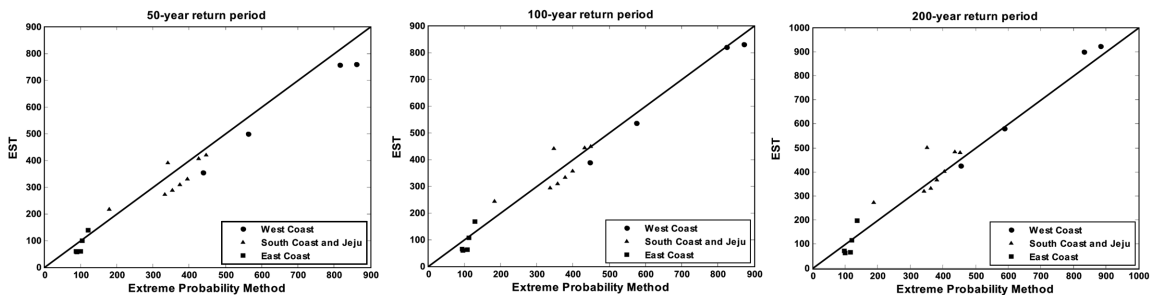


Fig. 6. Comparison of estimated extreme sea levels for different return periods (unit: cm).

법을 사용하기 위해서는 설계자의 충분한 경험이 요구된다.

4) 이전의 극치해면 연구인 정 등(2008)의 결과와 비교할 때 재현기간별로 약간의 차이가 있긴 하지만 전체적으로 큰 차이가 나지는 않는다. 약간의 차이가 나는 것은 분석에 사용된 데이터가 다름에서 원인을 찾을 수 있다. 차후에 설계 시 극치해면 값을 사용할 수 있도록 Table 6을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 및 한국해양수산기술진흥원의 “항만 구조물 신뢰성 설계법 개발” 연구과제(PM48400)와 “해일피해 예측 정밀격자 수치모델 구축 및 설계해면 추산” 과제의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소에서 수행되었습니다.

참고문헌

국립해양조사원 (2008). <http://www.nori.go.kr>.
 심재설, 오병철, 김상익 (1992). 검조기록을 이용한 극치해면 산정. 한국해양해양공학회지, 4(4), 250-260.
 양영철 (2009). 경험모의기법을 이용한 한반도 주변 해역에서의 폭풍해일고 빈도분석. 석사학위논문, 서울대학교.

이종찬, 권재일, 박광순, 전기천 (2008). 해일고 산정 수치모의 실험, 태풍매미. 한국해양해양공학회지, 20(1), 93-100.

정신태, 김정대, 고동휘, 윤길림 (2008). 한국 연안 최극 고조위의 매개변수 추정 및 분석. 한국해양해양공학회지, 20(5), 482-490.

최병호, 고진석 (1996). 한반도 주변 해역의 극치해면 및 해류 추정 방법. 한국해양해양공학회지 정기학술강연회 발표논문 초록집, 15-18.

한국건설교통기술평가원 (2008). 이상홍수 평가기술 개발. Kang, S.W., Jun, K.C., Park, K.S. and Bang, G.H. (2002). A Comparison of Typhoon Wind Models with Observed Winds. J. Korean Soc. Oceano., 7(3), 100-107.

Pugh, D.T. and Vassie, J.M. (1978). Extreme sea level from tide and surge probability. Proc. 16th I.C.C.E.

Scheffner, N.W., Clausner, J.E., Adele Militello, Borgman, L.E., Edge, B.L. and Grace, P.J. (1999). Use and Application of the Empirical Simulation Technique: User's Guide. Technical Report CHL-99-21, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

원고접수일: 2009년 2월 24일

수정본채택: 2009년 6월 17일

게재확정일: 2009년 6월 23일