한국해안 · 해양공학회논문집
제 21 권 제 6 호, pp. 480~494, 2009년 12월

한국 연안 극치 파고 분포의 확산모수 특성
Characteristics of Spread Parameter of the Extreme Wave Height Distribution around Korean Marginal Seas

정신택* · 김정대* · 고동휘* · 김태헌*
Shin Taek Jeong*, Jeong Dae Kim*, Dong Hui Ko* and Tae Heon Kim*

요 지 : 장기간의 극치 파랑자료는 연안 및 항만구조물의 계획 및 설계에서 매우 중요한 인자이다. 그러나, 한국 연안 심해파는 관측 자료가 한정되어 있으므로 기상정보로부터 사후추정한 장기간의 파랑자료를 이용하고 있다. 한국해양연구원(2005)에서는 1979년부터 2003년까지의 한국연안 106개 지점의 극치 파랑 자료를 제시하였다. 본 연구에서는 이 자료를 활용하여 최적 극치분포 함수를 분석하고, Goda(2004)가 제안한 확산모수를 산정하였다. 산정된 확산모수는 모멘트법으로 산정한 결과와 잘 일치하였다. 그러나, 확산모수가 외국사례보다 큰 1.0에서 2.8에 이르고 있기 때문에 차후 설계파에 대한 검토가 필요하다.

핵심용어 : 극치 파랑자료, 최적 극치분포 함수, 확산모수, 모멘트법

Abstract : Long term extreme wave data are essential for planning and designing coastal structures. Since the availability of the field data for the waters around Korean peninsula is limited to provide a reliable wave statistics, the wave climate information has been generated by means of long-term wave hindcasting using available meteorological data. KORDI(2005) has proposed extreme wave data at 106 stations off the Korean coast from 1979 to 2003. In this paper, extreme data sets of wave(KORDI, 2005) have been analyzed for best-fitting distribution functions, for which the spread parameter proposed by Goda(2004) is evaluated. The calculated values of the spread parameter are in good agreement with the values based on method of moment for parameter estimation. However, the spread parameter of extreme wave data has a representative value ranging from about 1.0 to 2.8 which is larger than some foreign coastal waters, it is necessary to review deep water design wave.

Keywords : extreme wave data, best-fitting distribution functions, spread parameter, method of moment

1. 서 론

파랑은 항만 및 연안구조물의 설계시 또는 방재시 가장 중요한 환경요소이다. 해안구조물은 50년 또는 100년 같이 주어진 재현주기에 상응하는 파고에 대하여 설계되어진다. 재현주기별 파고를 추산하기 위하여 세계 여러 지역에서 극치파 분석을 수행하고 있다. 최근 확률론적 개념이 도입된 신뢰성 설계기법이 도입되면서 설계 입력변수의 확률분포에 대한 정보가 중요한 위치를 차지하게 되었다. 관측기기를 사용하거나, 축적된 기상 자료로부터 사후 추정하여 얻은 현장 파랑 자료는 아직까지는 비교적 단기간의 현장 파랑 정보만을 얻을 수 있기 때문에 기존의 이용 가능한 자료로부터 구조물의 내구연도를 고려하여 설계파고를 결정하여야 한다.

Vledder 등(1993)은 극치파에 대한 IAHR Working group을 통해 극치파고 분석은 다양한 추정방법에도 불구하고 극치파고 추정시 단지 약간의 차이만이 발견되었으며, 자료 선택 방법 및 장기간에 걸친 신뢰성 있는 자료가 가장 큰 영향을 미친다고 기술하고 있다.

폭풍파의 발생 확률은 극치파고의 확률 밀도함수를 이용하여 산정할 수 있다. 조위 발생 빈도, 케이슨과 사석기초 간의 마찰력 등 기타 설계 변수의 불확실성은 각각의 확률분포를 이용하여 산정된다. 그러나, 파력발전장치나 방파제

*원광대학교 토목환경도시공학부(School of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University, 344-2, Shinyong-Dong, Iksan, 570-749, stjeong@wonkwang.ac.kr)

등의 연안 구조물 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 주하중, 즉 폭풍파고의 극치분포함수의 적절한 선택이다. 최근, Shimosako and Takahashi(1999), Takahashi 등(2001)이 토목구조물들에 신뢰성 기법을 이용한 설계기법을 적용하고 있다. 이러한 신뢰성 설계시에는 여러 설계 변수들을 다양하게 조합하여 수치 모의하는 과정이 요구된다.

극치파고는 규모, 형상 그리고 위치 매개변수 값의 조합을 가진 다양한 분포함수에 의하여 추정되어진다. 이들 매개변수는 대상영역의 설계파고를 결정하는데 없어서는 안 되는 것들이지만, 이들 매개변수의 정보만으로 극치파고에 대한 세부적인 분포 특징을 파악하기에는 부족하다. Goda (2004)는 확산모수(50년 빈도 설계파고의 10년 빈도 설계파고에 대한 비)를 도입하여 극치분포 함수의 꼬리부분에 대한 정보를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

김(2003)과 정 등(2004)은 한국해양연구원(2003)의 파랑모델 산출자료를 이용하여 한국연안 심해파의 극치분포 특성을 분석하였고, 김동현 등(2007)은 확산모수와 케이슨방파제 기대활동량을 이용한 개정 설계파 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 한국해양연구원(2005)에서 산정한 파랑자료를 이용하여 Goda(2004)가 제안한 확산모수를 산정하고, 기존의 극치해석에 의하여 산정한 값과 비교 검토를 통하여 그 활용성을 검토하였다. 이 확산모수는 세계 각지 극치파고의 특성 비교에 있어서 좋은 정보가 된다.

2. 파고분포의 확산모수

분포형의 함수형태는 일반적으로 규모, 형상 그리고 위치의 3개 매개변수로써 표현되나, 이들 매개변수는 확률밀도함수의 오른쪽 꼬리부분 형태를 묘사하는 데는 효과적이지 못하다. Goda(2004)는 오른쪽꼬리 부분을 더 잘 표현하기위해서, 10년 재현파고 H_{10}에 대한 50년 재현파고 H_{50}의 비 γ_{50}을 새로운 확산모수(spread parameter)로 도입하였다. 즉,

$$\gamma_{50} = H_{50}/H_{10} \tag{1}$$

이다. 우리나라나 일본과 같이 50년 빈도 설계파고를 사용하는 국가의 경우, 방파제 설계시 확산모수 γ_{50}을 사용하지만 100년 빈도 설계파고를 사용하는 국가의 경우, 동일한 방법으로 확산모수 $\gamma_{100}=H_{100}/H_{10}$을 활용할 수 있다.

3. 극치분포함수의 특성

극치분포 해석에 사용되는 극치분포함수는 연구영역(홍수량, 강우량, 풍속, 파고 분석 등)에 따라 매우 다양하게 제안되어 있으며, 분석하고자 하는 극값의 성격 또는 지역적 특성에 따라 범용적으로 사용되는 극치분포 함수가 다른 양상을 보이고 있다. 그러나, 어떤 극치분포 함수를 사용한다 할지라도 원하는 신뢰도를 확보한다면, 기본적으로 분석 과정상의 문제는 발생하지 않는다. 일반적으로 해양 구조물 설계시 사용하는 극치분포의 종류에는 Fisher-Tippett type I(FT-I)분포, Fisher-Tippett type II(FT-II)분포, 그리고 Weibull 분포 등이 있으나, 본 연구에서는 한국해양연구원(2005)에서 개정 설계파의 확률분포 산정에 이용한 Weibull 분포함수를 대상으로 분석하였다. 분포형에 대한 확률밀도함수, 누가분포함수, 그리고 매개변수 추정 방법 등은 Kite(1988), 국립방재연구소(1998), Rao and Hamed(2000), 김정대(2003), 정 등(2004)의 자료를 이용하였다.

Weibull 분포의 누가분포함수와 확률밀도함수는 각각 다음 식 (2), (3)과 같이 주어진다(Johnson and kotz, 1970).

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta}\right\} : x_0 \leqq x < \infty \tag{2}$$

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta}\right\} \tag{3}$$

여기서, α는 규모매개변수(Scale parameter), β는 형상매개변수(Shape Parameter), x_0는 위치매개변수(Location Parameter)이다. 형상매개변수, β를 Goda(2000)는 0.75, 1.0, 1.4, 2.0으로 미리 가정하였다.

매개변수를 추정하는 방법으로 모멘트법(Method of Moments), 최우도법(Method of Maximum Likelihood), 그리고 확률가중모멘트법(Method of Probability Weighted Moments)을 사용한다. 한국해양연구원(2005)에서는 확률가중모멘트법을 이용하여 빈도별 설계파고를 산정하였다.

4. 규모 및 위치 매개변수가 설계파고에 미치는 영향

규모 및 위치 매개변수는 길이 차원을 가지고 있다. Fig. 1은 Weibull 분포에 대하여 형상매개변수는 β=1로 고정하고, 규모 매개변수 α, 위치 매개변수 x_o를 변화시키면서 확산모수 γ_{50}과 50년 빈도 설계파고 H_{50}을 도시한 것이다. Fig. 1에서 H_{50}=8 m인 경우, α와 x_o는 다양한 조합이 가능하다. 즉, α=0.8 m, x_o = 4.8704 m, α=1.0 m, x_o = 4.088 m, α=1.25 m, x_o = 3.11 m, α=1.5 m, x_o = 2.132 m 총 4가지의

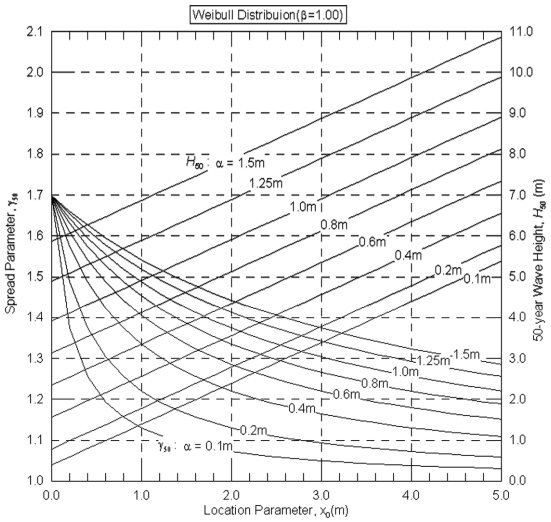

Fig. 1. Variations of γ_{50} and H_{50} of Weibull distribution for β=1, various values of α, and x_o.

경우 모두 설계파고가 8 m가 된다. 그러나, 확산모수 γ_{50}은 1.1918, 1.2518, 1.336, 1.4322로 각각 다른 값을 갖는다. 이러한 경우 확률분포함수의 오른쪽 꼬리 형태가 상이하여, 방파제의 성능 설계시 단면의 형태가 일정하지 않게 된다. 또 다른 문제는 규모 및 위치 매개변수의 변동성 때문에 이들 매개변수들만으로는 확률분포함수의 오른쪽 꼬리 형태의 거동을 판단하는 것이 힘들다.

5. Weibull 분포형의 초과 확률

확산모수가 Weibull 분포형에 미치는 영향은 Fig. 2와 같

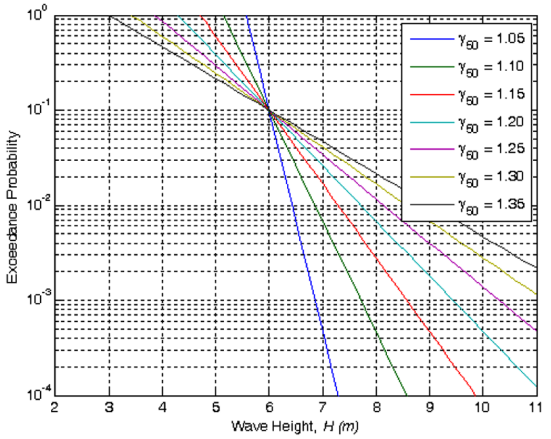

Fig. 2. Exceedance probability curves of Weibull distribution with γ_{50} ranging from 1.05 to 1.35.

다. Fig. 2에는 확산모수 γ_{50}이 1.05에서 1.35가지 0.05씩 증가하고, 10년 빈도 파고 H_{10}이 6.0 m 일 때 Weibull 분포의 초과확률 곡선 7종류가 도시되어 있다. 확산모수가 작은 경우에는 극값의 변화도 미세하다. 그러나, 확산모수가 커지면 극값의 변화가 점차 커진다. 이와 같은 결과로부터 확산모수를 무시하고 확률분포형을 규정하는 경우 극치확률분포형의 오른쪽 꼬리부분을 정밀하게 묘사하는 것이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

6. 모멘트법을 이용한 확산모수 산정

확산모수는 수집된 자료로부터 최적의 극치분포함수 형태를 결정함으로써 구할 수 있다. 극치분포함수를 결정하는 방법은 최우도법, 최소자승법, 모멘트법, 확률가중모멘트법 등이 있으나, 본 연구에서는 모멘트법을 이용하였다. 모멘트법을 이용하는 경우 표본자료의 평균과 표준편차를 산정하여 매개변수와의 관계를 도출할 수 있다.

Weibull 분포 표본자료의 평균 x_{mean}을 구하는 과정은 다음과 같다.

$$x_{mean} = E(X)$$

$$= \int_{x_o}^{\infty} x \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-x_o}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_o}{\alpha}\right)^{\beta}} dx$$

$y = \left(\frac{x-x_o}{\alpha}\right)^{\beta}$ 으로 치환하면

$$\begin{cases} y^{\frac{1}{\beta}} = \dfrac{x-x_o}{\alpha} \\ x_o + \alpha y^{\frac{1}{\beta}} = x \\ \dfrac{\alpha}{\beta} y^{\frac{1-\beta}{\beta}} dy = dx \end{cases}$$

의 관계가 있다. 따라서

$$x_{mean} = \int_0^{\infty} \left(x_o + \alpha y^{\frac{1}{\beta}}\right) \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{y^{\frac{1}{\beta}}}\right) e^{-y} \frac{\alpha}{\beta} y^{\frac{1-\beta}{\beta}} dy$$

$$= \int_0^{\infty} \left(x_o + \alpha y^{\frac{1}{\beta}}\right) e^{-y} dy$$

$$= x_o \int_0^{\infty} e^{-y} dy + \alpha \int_0^{\infty} y^{1/\beta} dy$$

$$= x_o + \alpha \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

가 된다.

표본자료의 표준편차 σ를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\sigma^2 = E(X^2) - \mu^2$$

$$= \int_{x_o}^{\infty} x^2 \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-x_o}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_o}{\alpha}\right)^{\beta}} dx - \mu^2$$

$$= \int_0^{\infty} (x_o + \alpha y^{1/\beta})^2 e^{-y} dy - \mu^2$$

$$= x_o^2 \int_0^{\infty} e^{-y} dy + 2x_o\alpha \int_0^{\infty} y^{1/\beta} e^{-y} dy + \alpha^2 \int_0^{\infty} y^{2/\beta} e^{-y} dy - \mu^2$$

$$= x_o^2 + 2x_o\alpha\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) + \alpha^2\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right) - \mu^2$$

$$= x_o^2 + 2x_o\alpha\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) + \alpha^2\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right) - x_o^2 - 2x_o\alpha\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) - \alpha^2\Gamma^2\left(\frac{1}{\beta}+1\right)$$

$$= \alpha^2\left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta}+1\right)\right]$$

자료에 적합한 위치, 규모 및 형상 매개변수가 결정되면 역함수를 이용하여 빈도별 설계파고를 계산할 수 있다. 즉, 자료의 통계치인 평균과 표준편차를 이용하여 설계파고를 계산할 수 있다(Haan, 2002). 전술한 바와 같이 모멘트법을 이용하여 표준편차 σ, 평균 x_{mean}을 산정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = c_1 k \alpha \tag{4}$$

$$x_{mean} = c_2 \alpha + x_0 \tag{5}$$

Weibull분포의 계수 c_1 및 c_2는 다음과 같다.

$$c_1 = \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta}+1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\beta}+1\right)\right]^{1/2} \tag{6}$$

$$c_2 = \Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) \tag{7}$$

식 (4)의 계수 k는 표본으로부터 모멘트법으로 산정한 결과와, 실제 모집단과의 차이를 수정하는 계수로서 Goda (2000)는 식 (4)의 수정계수 k를 표본의 수 N을 고려하여 Monte Carlo simulation을 이용하여 다음과 같이 산정하였다.

따라서, 식 (4)와 (5)로부터 극치분포함수의 규모 및 위치 매개변수 추정치는 다음 식으로부터 산정할 수 있다.

$$\hat{\alpha} = \sigma/(c_1 k) \tag{8}$$

$$\hat{x}_0 = x_{mean} - c_2\sigma/(c_1 k) \tag{9}$$

Table 1. Mean of the sample standard deviation to the population value

분포형 / 자료갯수, N	Weibull			
	β= 0.75	β= 1.00	β= 1.40	β= 2.00
10	0.870	0.925	0.954	0.971
14	0.898	0.941	0.967	0.980
20	0.923	0.958	0.977	0.986
30	0.944	0.971	0.985	0.991
40	0.957	0.978	0.989	0.993
60	0.970	0.984	0.992	0.995
100	0.980	0.990	0.995	0.997
140	0.985	0.993	0.996	0.998
200	0.989	0.995	0.997	0.999

규모 및 위치 매개변수 추정치가 결정되면 재현기간 R에 해당하는 극값 x_R은 각 확률분포형의 역함수를 이용하여 식 (10)으로 부터 산정할 수 있다.

$$x_R = \hat{\alpha} y_R + \hat{x}_0 \tag{10}$$

여기서, y_R은 확률분포형에 의하여 결정되는 값으로, Weibull 분포형의 경우, $y_R=[\ln R]^{1/\beta}$가 된다. 식 (8) 및 (9)를 이용하여 규모 및 위치 매개변수를 결정한 후, 이 값들을 식 (10)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$x_R = \sigma/c_1 k \cdot y_R + x_{mean} - c_2\sigma/c_1 k$$
$$= x_{mean} + (y_R - c_2)\cdot\sigma/c_1 k \tag{11}$$

분산계수는 식 (1)을 이용하여 산정할 수 있으므로, 식 (11)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{50} = H_{50}/H_{50}$$
$$= \frac{[x_{mean} + (y_{50} - c_2)\cdot\sigma/c_1 k]}{[x_{mean} + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/c_1 k]}$$
$$= \frac{[1 + (y_{50} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}$$
$$= \frac{[1 + (y_{50} - c_2 + y_{50} - y_{10})\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}$$
$$= \frac{[1 + (y_{50} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]} + \frac{(y_{50} - y_{10})\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}$$
$$= 1 + \frac{(y_{50} - y_{10})\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot\sigma/(x_{mean} c_1 k)]}$$
$$= 1 + \frac{(y_{50} - y_{10})\cdot X/(c_1 k)}{[1 + (y_{10} - c_2)\cdot X/(c_1 k)]} \tag{12}$$

단, $X = COV = \frac{\sigma}{x_{mean}}$

7. 파랑자료

한국해양연구원(2005)은 해양수산부의 의뢰를 받아 우리나라 전 해역에 대한 장기 파랑 자료를 산출하여 연안 및 해상 구조물의 설계, 운영, 해안선 변형, 연안 방재 대책 등에 활용할 수 있는 기본 파랑정보 데이터베이스를 수립하였다. 태풍에 대한 자료를 바탕으로 태풍시 해상풍을 개선하여 태풍에 의한 이상 파랑 정밀 추산을 수행하여 1951년 이후의 주요 태풍에 대해서도 별도의 파랑 산출에 의해 매 18 km 격자에 대해 매시간의 태풍 파랑 데이터베이스가 만들어졌다. 우리나라의 남해와 동해 및 서해 남부 등 대부분이 태풍에 의해 설계파가 결정되기 때문에 태풍에 대한 파랑의 정확한 산출을 위해 태풍시 해상풍의 추산이 매우 중요하다. 태풍의 경우는 바람의 공간적 변화가 매우 크고 이동 속도가 빨라 시간적 변화도 매우 커 작은 시간 간격 및 공간 격자에서의 해상풍을 정확하게 산출하기 위해 미육군 공병대, Ocean Weather사 등 전문기관과의 협력 연구를 통하여 최신 태풍시 해상풍 정밀 추산 기술을 이전받아

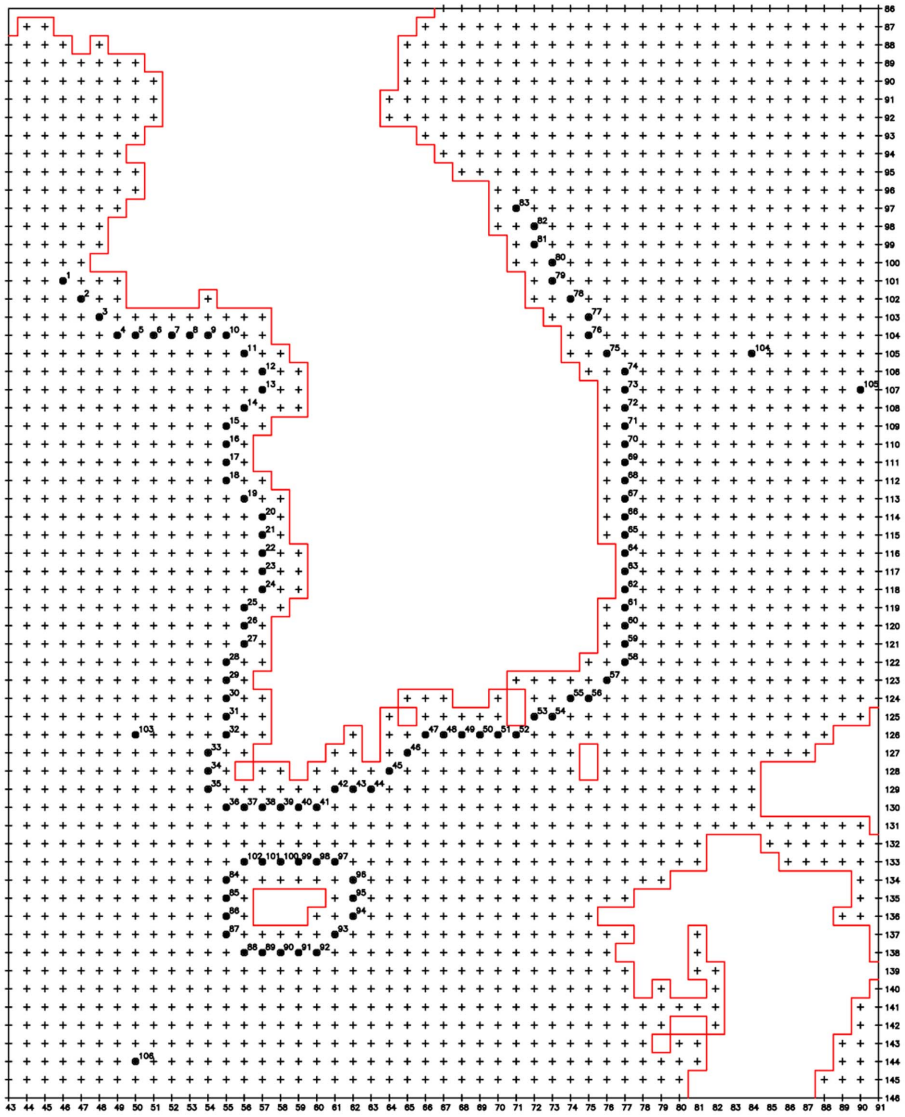

Fig. 3. Location numbers of the estimated wave heights off the Korean coast.

사용하였다. 비태풍에 대해서는 유럽중규모기상예보센터(ECMWF) 해상풍 자료를 이용하여 연속적으로 파랑을 산출하여 전 해상에 약 18 km 간격의 격자에 대해 1979년부터 2003년 사이의 25년 동안 매시간 간격의 파고, 주기, 파향 등 파랑정보가 생산되어 데이터베이스화하였다.

Fig. 3은 한국해양연구원(2005)이 수립한 심해파랑 극치분석에 의한 설계파 추산을 수행한 106개 연안 격자점의 위치도이며, 주요 연안 격자점에서 16 방향별 10, 20, 30, 50, 100년 재현기간 설계파 파고 및 주기를 산출하여 제공하고 있다. 그러나, 105 지점은 자료가 누락되어 있다.

각 격자점에서는 25년 동안 추정된 25개의 자료가 아닌 재현기간별 설계파고를 제공하기 때문에 10, 20, 30, 50, 100년 빈도 설계파고를 이용하여 Weibull 분포의 매개변수들을 산정한 다음 분석을 실시하였다. 매개변수 추정은 비선형 최적화 매개변수 추정에 범용적으로 이용되는 Newton 방법을 수정한 Levenberg-Marquardt 방법(Bazaraa et al., 1993)을 이용하였다. 전체적인 과정은 최소자승법을 이용한 비선형 Curve Fitting 방법에 해당한다.

8. 설계파랑에 대한 확산모수의 산정

전술한 105개 연안 격자점에서 16방향별 10, 20, 30, 50, 100년 재현기간의 설계파, 총 8,400개의 자료를 이용하여 다음과 같은 과정으로 분석을 실시하였다.

1) 105개 격자점별 80개 설계파고 수집

2) Levenberg-Marquardt 방법으로 Weibull분포의 매개변수 산정

3) 식 (1)을 이용하여 확산모수 산정

4) 식 (4), (5)를 이용하여 표준편차 σ, 평균 x_{mean}을 산정

5) $X = COV = \frac{\sigma}{x_{mean}}$을 산정, 단, 수정계수 k=1을 이용

6) 식 (12)를 이용하여 확산모수 산정

7) 3)단계에서 확률가중모멘트법으로 산정한 확산모수와 6)단계에서 모멘트법으로 산정한 확산모수를 비교 평가

이러한 과정을 통하여 분석한 결과를 정리하면 Table A.1~A.3과 같다. Table A.1은 재현주기별 파고를 이용한 식 (1)을 이용하여 산정한 결과, Table A.2는 모멘트법에 의한 계산 식 (12)를 이용하여 산정한 결과, Table A.3은 Table A.1과 Table A.2의 상대오차이다. Table A.2에서 확산모수가 없는 경우(Table A.2에 '-'로 표시)는 매개변수를 최적화하는 과정에서 수렴하지 않는 자료로 총 58개(0.7%)이다. Table A.3을 분석한 결과 총 8,342개 자료중 8,282개(99.28%)가 상대오차 1% 이하이나, 41개(0.49%)는 1~5%, 19개(0.23%)는 10% 이상의 상대오차를 보이고 있다. 특히 상대오차가 큰 자료는 서해상에 위치한 19와 26 지점이다. 이러한 원인이 발생한 이유는 서해안의 대부분의 지점들이 심해역이 아닌 수심 20~30 m의 천해역에 해당하기 때문에 설계파 산정시 내재되어 있는 원인으로 판단된다. 즉, 지점 19는 기본수준면 기준 수심 21 m, 지점 26은 13 m로서 이들 지점은 수심과 조류의 영향으로 굴절 및 회절 현상이 발생한 천해에서의 설계파이기 때문에 자료의 질을 향상시키는 노력이 필요하다.

Fig. 4~6은 10년과 50년 빈도 설계파들을 이용하여 산정한 서해, 남해(제주도 포함), 동해에서의 확산모수 및 평균치를 보여주고 있다. 그림에서 방향 1은 N 방향을, 시계방향으로 회전하여 16번은 NNW 방향을 의미한다.

Fig. 4에 도시된 서해안의 확산모수중 1.9보다 큰 값은 지점 3, 4 및 지점 11, 12에 해당한다. 이들은 공통적으로 육

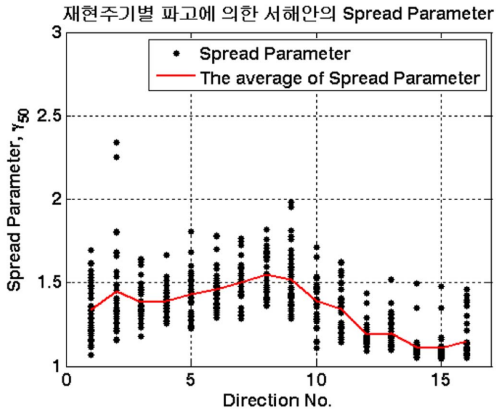

Fig. 4. Spread parameter, γ_{50} calculated from 2005 wave data for Korean west coast.

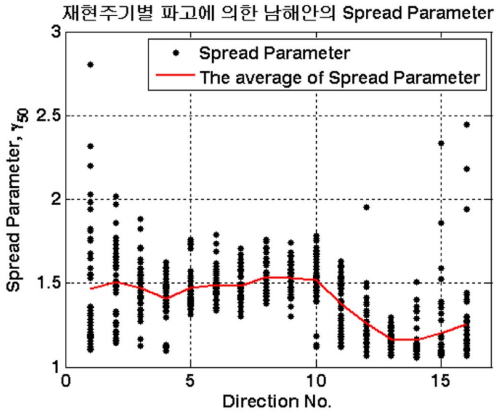

Fig. 5. Spread parameter, γ_{50} calculated from 2005 wave data for Korean south coast.

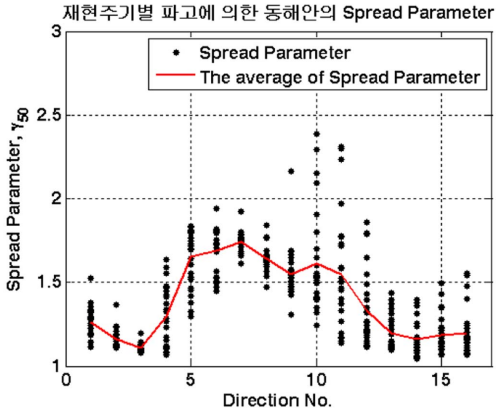

Fig. 6. Spread parameter, γ_{50} calculated from 2005 wave data for Korean east coast.

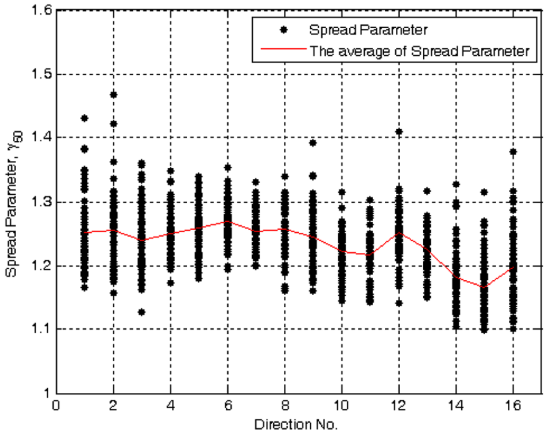

Fig. 8. Scatter plot of spread parameter, γ_{50} calculated from 2003 wave data for Korean coast.

지에서 바다쪽으로 발생한 풍파의 방향이다. Fig. 5에 도시된 남해안 자료를 분석한 결과 1.9보다 큰 확산모수를 보이는 지점은 38, 39, 90, 91, 99, 100 지점들로 이들 모두 육지에서 바다쪽으로 발생한 풍파의 방향과 일치하는 특징을 보이고 있다. 동해안의 자료 Fig. 6에서도 역시 동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 확산모수가 2보다 큰 78, 79, 80, 81, 82 지점의 경우 심해파향은 SW 및 SSW로서 이들 모두 육지에서 바다쪽으로 발생한 파랑이다.

Fig. 7에 105개 지점의 파향별 확산모수의 빈도를 서해, 남해(제주도 포함), 동해별로 표시하였다. 서해의 경우 확산모수가 대부분 1.5이하이나, 남해 및 동해의 경우에는 1.5를 초과하는 빈도가 매우 크다. 이는 서해의 경우 많은 지점에서 서에서 북서방향의 결합된 설계파가 비태풍시의 설계파에 의하여 결정되었지만, 남해 및 동해의 경우 모든 설

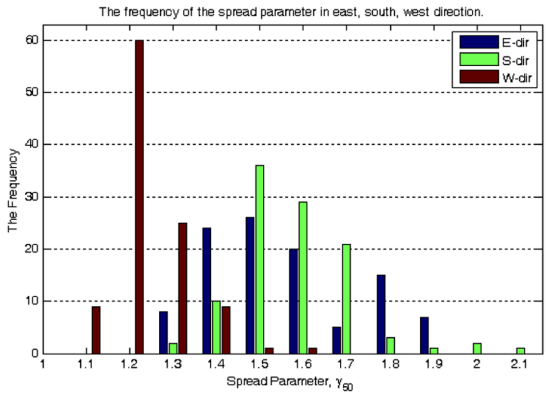

Fig. 7. Frequency of spread parameter, γ_{50} calculated from 2005 wave data for Korean coast.

계파는 태풍에 의하여 결정되기 때문이다. Goda(2004)는 태풍 발생을 고려한 남태평양 해역과 태풍 영향이 없는 일본해 해역에서 확산모수를 산정하여 각각 1.243과 1.1306의 값을 얻었다. 따라서 우리나라 연안격자점에서의 설계파도 이러한 경향은 일치하고 있다.

확산모수는 위치, 규모 및 축척 매개변수로 표현 불가능한 확률밀도함수의 꼬리부분을 표현할 수 있다. 즉, 확산모수 값이 크면 극치 확률밀도함수의 오른쪽이 긴 꼬리를 가지며 50년 빈도를 초과하는 큰 파고의 확률이 증가하여 방파제 등 연안 구조물의 파괴확률이 증가한다.

2005년 자료를 이용하여 산출된 확산모수의 값은 최소 1.0, 최대 2.8로 편차가 상당히 크다. 한편, 김(2003)은 한국해양연구원(2003)의 파랑정보시스템(http://wave.kordi.re.kr)에서 제공한 HYPA 모델 결과, 즉 한국 연안 67지점 16방향 총 1,072개소의 설계파 자료를 분석하여 확산모수를 도시하여 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다. 대부분의 확산모수 값은 1.1에서 1.4정도의 범위를 가진다. Goda(2004)는 확산모수가 1.1에서 1.3정도의 범위를 가진다고 밝힌 바 있다. 따라서, 2005년 개정된 설계파고에 대한 차후 추가적인 연구 및 분석이 요구된다.

9. 결 론

극치 확률밀도함수의 오른쪽 꼬리 부분의 성질을 표현하는 새로운 확산모수가 50년 설계파고와 10년 설계파고의 비(Goda, 2004)로서 정의되었으며, 이를 γ_{50}이라 부른다. 이 확산모수는 기존의 위치, 규모, 그리고 형상 매개변수로 표

현하지 못했던 극치 확률밀도함수의 다른 특징을 내포하고 있다. 즉, 확산모수 값이 크면 극치 확률밀도함수의 오른쪽이 긴 꼬리를 가지며 50년 빈도를 초과하는 큰 파고의 확률이 증가하여 방파제 등 연안 구조물의 파괴확률이 증가한다.

Goda(2004)가 제안한 식 (1)은 50년 빈도 설계파고를 10년 빈도 설계파고로 나누어 확산모수를 산정한다. 이 식을 이용할 경우 최적 극치분포 함수의 매개변수들을 사전에 산정하여야 한다. 반면에, 식 (12)를 이용하는 경우에는 10년 및 50년 빈도 설계파고를 이용하지 않고 매개변수를 직접 이용하여 확산모수를 산정할 수 있다.

본 연구에서는 한국해양연구원(2005)에서 산정한 16 방향별, 105개 한국 연안 격자점에서의 극치분석 결과를 대상으로 2가지 방법 즉, 식 (1)과 식 (12)를 이용하여 확산모수를 산정하였다(Table A.1과 A.2 참조). 이들 결과의 상대오차는 Table A.3에 제시하였다. 이들 자료를 분석한 결과, 99.3%에 해당하는 자료가 상대오차 1% 이하로 판명되어 식 (12)의 적용 가능성을 확인하였다.

Fig. 4~6은 식 (1)을 이용하여 산정한 서해, 남해(제주도 포함), 동해에서의 확산모수 및 평균치를 보여주고 있다. 그림에서 방향 1은 N 방향을, 시계방향으로 회전하여 16번은 NNW 방향을 의미한다. Fig. 4에 도시된 서해안의 확산모수중 1.9보다 큰 값은 지점 3, 4 및 지점 11, 12에 해당한다. 이들은 공통적으로 육지에서 바다쪽으로 발생한 풍파의 방향이다. Fig. 5에 도시된 남해안 자료를 분석한 결과 1.9보다 큰 확산모수를 보이는 지점은 38, 39, 90, 91, 99, 100 지점들로 이들 모두 육지에서 바다쪽으로 발생한 풍파의 방향과 일치하는 특징을 보이고 있다. 동해안의 자료 Fig. 6에서도 역시 동일한 경향을 보이고 있다. 즉, 확산모수가 2보다 큰 78, 79, 80, 81, 82 지점의 경우 심해파향은 SW 및 SSW로서 이들 모두 육지에서 바다쪽으로 발생한 파랑이다.

Fig. 7은 105개 지점의 파향별 확산모수의 빈도를 서해, 남해(제주도 포함), 동해별로 표시한 결과이다. 서해의 경우 확산모수가 대부분 1.5이하이나, 남해 및 동해의 경우에는 1.5를 초과하는 빈도가 매우 크다. 이는 서해의 경우 많은 지점에서 서에서 북서방향의 결합된 설계파가 비태풍시의 설계파에 의하여 결정되었지만, 남해 및 동해의 경우 모든 설계파는 태풍에 의하여 결정되기 때문이다. Goda(2004)는 태풍 발생을 고려한 남태평양 해역과 태풍 영향이 없는 일본해 해역에서 확산모수를 산정하여 각각 1.243과 1.1306의 값을 얻었다. 따라서 우리나라 연안격자점에서의 설계파도 이러한 경향은 일치하고 있다.

2005년 자료를 이용하여 산출된 확산모수의 값은 최소 1.0, 최대 2.8로 편차가 상당히 크다. 한편, 김(2003)은 한국해양연구원(2003)의 파랑정보시스템(http://wave.kordi.re.kr)에서 제공한 HYPA 모델 결과, 즉 한국 연안 67지점 16방향 총 1,072개소의 설계파 자료를 분석하여 확산모수를 도시하여 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다. 대부분의 확산모수 값은 1.1에서 1.4정도의 범위를 가진다. Goda(2004)는 확산모수가 1.1에서 1.3정도의 범위를 가진다고 밝힌 바 있다. 따라서, 2005년 개정된 설계파고에 대한 차후 추가적인 연구 및 분석이 요구된다.

25년 동안 추정된 파랑자료를 확보하는 경우, 식(4)의 수정 계수 를 표본의 수를 고려하여 산정하는 작업이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

국립방재연구소 (1998). 강우분석 프로그램의 개발.

김동현, 윤길림, 심재설 (2007). 확산모수와 케이슨방파제 기재활동량을 이용한 개정 설계파 분석. 한국해안·해양공학회지, 19(2), 146-150.

김정대 (2003). 한국연안 심해파의 극치분포 특성, 석사학위논문, 원광대학교.

정신택, 김정대, 조홍연 (2004). 한국 연안 심해 설계파고의 극치분포 특성. 한국해안·해양공학회지, 16(3), 130-141.

한국해양연구원 (2003). 파랑모델 산출자료(http://wave.kordi.re.kr/).

한국해양연구원 (2005). 전해역 심해설계파 추정 보고서 II.

해양수산부 (2000). 해상파랑관측 및 조사.

Bazaraa, M.S., Sherail, H.D. and Shetty, C.M. (1993). *Nonlinear programming : theory and algorithms*, Second Edition, John-Wiley & Sons.

Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*, World Scientific.

Goda, Y. (2004). Spread parameter of extreme wave height distribution for performance-based design of maritime structures. J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., 130(1), 29-38.

Goda, Y., Konogaya, O., Takeshita, N., Hitomi, H., and Nagai, T. (2000). Population distribution of extreme wave heights estimated through regional analysis, *Proc. Coastal Engrg.*, pp. 1078-1091.

Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of extremes*, Columbia University Press, New York.

Haan, C.T. (2002). Statistical methods in hydrology, Iowa State Press.

Johnson, N.L. and Kotz, S. (1970). Continuous univariate distribution-1, Houghton Mifflin Company, Boston.

Kite, G.W. (1988). Frequency and risk analysis in hydrology.

Rao, A.R. and Hamed, K.H. (2000). Flood frequency analysis, CRC Press LLC.

Shimosako, K. and Takahashi, S. (1999). Application of reliability design method for coastal structures-expected sliding distance method of comosite breakwaters. Proc., Coastal Structures, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 363-371.

Takahashi, S., Shimosako, K. and Hanzawa, M. (2001). Performance design for maritime structures and its application to vertical breakwaters. Proc., Advanced Design of Maritime Structures, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, pp 63-73.

Vledder, G. van, Goda, Y., Hawkes, P., Mansard, E., Martin, M.H., Mathiesen, M., Peltier, E. and Thompson. E. (1993). Case studies of extreme wave analysis: a comparative analysis, Proc. 2nd Int. Symp. Ocean Wave Measurement and Analysis, ASCE, pp. 978-992.

원고접수일: 2009년 11월 26일
수정본채택: 2009년 12월 20일
게재확정일: 2009년 12월 21일

부록 : 전해역 심해설계파(한국해양연구원, 2005)를 이용하여 산정한 확산계수

Table A.1. Spread parameters around Korean marginal seas using equation (1)

Case No.	Grid No.	γ_{50}, 재현주기별 파고에 의한 계산															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	046101	1.069	1.804	1.456	1.667	1.565	1.783	1.746	1.554	1.297	1.106	1.173	1.113	1.145	1.125	1.074	1.091
2	047102	1.409	1.685	1.355	1.291	1.807	1.779	1.749	1.661	1.308	1.150	1.164	1.135	1.142	1.122	1.082	1.070
3	048103	1.361	2.252	1.636	1.402	1.685	1.701	1.723	1.677	1.329	1.146	1.141	1.145	1.125	1.128	1.082	1.092
4	049104	1.569	2.342	1.497	1.417	1.604	1.607	1.664	1.680	1.283	1.229	1.174	1.158	1.178	1.118	1.085	1.063
5	050104	1.693	1.803	1.608	1.396	1.540	1.582	1.584	1.691	1.385	1.282	1.204	1.172	1.177	1.144	1.043	1.256
6	051104	1.620	1.658	1.623	1.380	1.518	1.477	1.591	1.682	1.367	1.268	1.203	1.155	1.176	1.053	1.049	1.065
7	052104	1.614	1.484	1.547	1.360	1.481	1.445	1.585	1.708	1.460	1.294	1.238	1.158	1.167	1.052	1.054	1.076
8	053104	1.504	1.538	1.459	1.330	1.325	1.458	1.598	1.760	1.610	1.277	1.233	1.177	1.209	1.093	1.098	1.051
9	054104	1.530	1.347	1.432	1.270	1.279	1.371	1.605	1.817	1.776	1.223	1.227	1.179	1.225	1.096	1.071	1.132
10	055104	1.477	1.377	1.327	1.348	1.228	1.481	1.763	1.722	1.667	1.229	1.195	1.145	1.257	1.106	1.061	1.063
11	056105	1.233	1.286	1.329	1.349	1.235	1.365	1.554	1.818	1.980	1.365	1.196	1.092	1.125	1.058	1.060	1.105
12	057106	1.209	1.161	1.230	1.325	1.234	1.333	1.480	1.635	1.954	1.711	1.199	1.120	1.119	1.079	1.060	1.100
13	057107	1.289	1.157	1.179	1.253	1.242	1.330	1.508	1.655	1.758	1.655	1.200	1.134	1.099	1.102	1.160	1.098
14	056108	1.332	1.212	1.256	1.299	1.270	1.345	1.477	1.650	1.535	1.528	1.259	1.170	1.113	1.068	1.071	1.360
15	055109	1.117	1.226	1.303	1.348	1.312	1.437	1.443	1.544	1.695	1.357	1.500	1.173	1.097	1.076	1.070	1.104
16	055110	1.156	1.206	1.283	1.364	1.302	1.454	1.444	1.411	1.548	1.473	1.625	1.149	1.094	1.107	1.173	1.051
17	055111	1.163	1.209	1.254	1.422	1.299	1.380	1.419	1.485	1.593	1.479	1.395	1.150	1.102	1.083	1.094	1.075
18	055112	1.262	1.254	1.358	1.435	1.389	1.424	1.448	1.473	1.642	1.525	1.497	1.167	1.122	1.095	1.095	1.116
19	056113	1.550	1.311	1.360	1.435	1.380	1.351	1.351	1.460	1.550	1.311	1.360	1.435	1.380	1.351	1.351	1.460
20	056114	1.282	1.262	1.311	1.414	1.380	1.309	1.283	1.360	1.427	1.534	1.500	1.137	1.123	1.102	1.120	1.425
21	057115	1.311	1.298	1.382	1.515	1.409	1.291	1.302	1.358	1.423	1.479	1.618	1.289	1.132	1.101	1.103	1.387
22	057116	1.335	1.294	1.366	1.486	1.459	1.320	1.325	1.401	1.431	1.464	1.572	1.206	1.113	1.102	1.120	1.215
23	057117	1.357	1.338	1.335	1.385	1.460	1.403	1.309	1.410	1.343	1.490	1.545	1.187	1.121	1.073	1.079	1.146
24	057118	1.467	1.323	1.340	1.268	1.458	1.352	1.433	1.401	1.360	1.369	1.384	1.229	1.158	1.099	1.092	1.301
25	056119	1.514	1.455	1.324	1.369	1.556	1.516	1.450	1.383	1.422	1.468	1.560	1.183	1.175	1.112	1.100	1.114
26	056120	1.436	1.395	1.330	1.379	1.521	1.493	1.476	1.395	1.436	1.395	1.330	1.379	1.521	1.493	1.476	1.395
27	056121	1.486	1.405	1.330	1.329	1.433	1.454	1.428	1.409	1.375	1.389	1.383	1.186	1.183	1.134	1.097	1.109
28	055122	1.245	1.566	1.341	1.412	1.514	1.544	1.476	1.367	1.406	1.398	1.459	1.288	1.262	1.104	1.088	1.096
29	055123	1.230	1.394	1.327	1.386	1.505	1.474	1.509	1.445	1.436	1.372	1.408	1.231	1.256	1.101	1.090	1.114
30	055124	1.216	1.347	1.313	1.377	1.505	1.524	1.518	1.449	1.414	1.393	1.393	1.234	1.257	1.104	1.091	1.131
31	055125	1.199	1.408	1.311	1.341	1.440	1.495	1.479	1.460	1.459	1.447	1.401	1.251	1.312	1.094	1.088	1.136
32	055126	1.219	1.409	1.390	1.411	1.382	1.455	1.426	1.511	1.475	1.487	1.354	1.221	1.250	1.095	1.092	1.081
33	054127	1.148	1.454	1.473	1.397	1.445	1.405	1.434	1.540	1.507	1.440	1.320	1.175	1.325	1.103	1.089	1.108
34	054128	1.154	1.492	1.440	1.455	1.449	1.410	1.479	1.555	1.577	1.403	1.377	1.119	1.289	1.094	1.090	1.104
35	054129	1.126	1.676	1.459	1.445	1.414	1.432	1.543	1.597	1.588	1.523	1.393	1.168	1.307	1.096	1.092	1.104
36	055130	1.588	1.677	1.544	1.522	1.439	1.457	1.488	1.629	1.623	1.558	1.484	1.140	1.247	1.095	1.099	1.141
37	056130	1.814	1.659	1.823	1.480	1.407	1.467	1.473	1.530	1.622	1.622	1.525	1.257	1.195	1.124	1.096	1.443
38	057130	2.197	1.642	1.883	1.480	1.347	1.453	1.576	1.559	1.626	1.696	1.541	1.198	1.188	1.075	1.523	2.184
39	058130	1.756	1.755	1.411	1.411	1.380	1.396	1.493	1.534	1.582	1.677	1.499	1.243	1.104	1.404	2.332	1.077
40	059130	1.679	1.486	1.301	1.340	1.390	1.352	1.477	1.500	1.553	1.601	1.527	1.200	1.161	1.144	1.073	1.275
41	060130	1.209	2.017	1.507	1.362	1.387	1.349	1.399	1.495	1.511	1.645	1.567	1.256	1.183	1.510	1.104	1.167
42	061129	1.101	1.463	1.705	1.354	1.459	1.339	1.304	1.381	1.470	1.581	1.216	1.272	1.299	1.134	1.119	1.106
43	062129	1.111	1.627	1.529	1.298	1.411	1.372	1.329	1.380	1.420	1.518	1.170	1.216	1.214	1.332	1.100	1.154
44	063129	1.157	1.861	1.553	1.368	1.347	1.404	1.362	1.403	1.362	1.547	1.307	1.167	1.142	1.102	1.105	1.106
45	064128	1.185	1.478	1.495	1.333	1.359	1.445	1.449	1.441	1.409	1.545	1.124	1.326	1.105	1.137	1.131	1.112
46	065127	1.181	1.213	1.168	1.381	1.456	1.569	1.534	1.564	1.448	1.186	1.194	1.119	1.110	1.121	1.098	1.077
47	066126	1.225	1.154	1.313	1.393	1.403	1.581	1.621	1.682	1.303	1.118	1.178	1.190	1.106	1.118	1.099	1.081
48	067126	1.193	1.195	1.381	1.402	1.385	1.520	1.583	1.648	1.413	1.131	1.180	1.141	1.084	1.128	1.105	1.105
49	068126	1.175	1.207	1.410	1.442	1.371	1.447	1.497	1.619	1.609	1.442	1.186	1.189	1.150	1.162	1.134	1.104
50	069126	1.209	1.163	1.442	1.428	1.342	1.506	1.545	1.625	1.666	1.417	1.176	1.383	1.166	1.113	1.088	1.126
51	070126	1.198	1.144	1.551	1.384	1.315	1.616	1.578	1.683	1.666	1.422	1.143	1.254	1.172	1.077	1.096	1.115
52	071126	1.282	1.260	1.274	1.113	1.708	1.563	1.573	1.705	1.609	1.456	1.123	1.219	1.110	1.508	1.357	1.401

Table A.1. Spread parameters around Korean marginal seas using equation (1)

Case No.	Grid No.	γ_{50}, 재현주기별 파고에 의한 계산															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
53	072125	1.209	1.154	1.385	1.119	1.729	1.600	1.627	1.706	1.543	1.423	1.278	1.093	1.172	1.233	1.172	1.162
54	073125	1.137	1.462	1.344	1.126	1.758	1.620	1.640	1.704	1.662	1.486	1.168	1.065	1.069	1.108	1.095	1.166
55	074124	1.188	1.172	1.124	1.099	1.759	1.687	1.604	1.713	1.566	1.459	1.348	1.335	1.120	1.169	1.377	1.267
56	075124	1.531	1.334	1.124	1.130	1.736	1.739	1.706	1.759	1.507	1.440	1.232	1.415	1.218	1.361	1.320	1.219
57	076123	1.557	1.315	1.127	1.123	1.748	1.786	1.674	1.750	1.568	1.425	1.233	1.272	1.199	1.289	1.389	1.235
58	077122	1.223	1.108	1.125	1.158	1.733	1.807	1.766	1.772	1.617	1.407	1.195	1.318	1.243	1.311	1.224	1.200
59	077121	1.199	1.107	1.108	1.122	1.749	1.801	1.763	1.764	1.542	1.493	1.333	1.199	1.278	1.363	1.348	1.256
60	077120	1.522	1.160	1.104	1.123	1.767	1.814	1.773	1.642	1.502	1.542	1.138	1.175	1.346	1.396	1.276	1.224
61	077119	1.278	1.160	1.096	1.102	1.803	1.804	1.769	1.631	1.572	1.503	1.267	1.347	1.438	1.257	1.497	1.401
62	077118	1.338	1.129	1.090	1.114	1.808	1.814	1.772	1.594	1.566	1.526	1.455	1.326	1.374	1.381	1.355	1.543
63	077117	1.321	1.130	1.093	1.267	1.831	1.819	1.728	1.643	1.555	1.556	1.780	1.429	1.268	1.377	1.430	1.480
64	077116	1.320	1.118	1.089	1.230	1.833	1.812	1.732	1.651	1.546	1.601	1.719	1.487	1.396	1.238	1.100	1.555
65	077115	1.378	1.119	1.085	1.446	1.815	1.800	1.741	1.661	1.525	1.801	1.731	1.138	1.191	1.173	1.138	1.180
66	077114	1.288	1.113	1.081	1.413	1.798	1.795	1.749	1.668	1.528	1.646	1.584	1.263	1.148	1.143	1.119	1.245
67	077113	1.227	1.125	1.085	1.476	1.793	1.566	1.757	1.639	1.505	1.699	1.507	1.203	1.132	1.114	1.151	1.108
68	077112	1.258	1.128	1.080	1.473	1.792	1.525	1.754	1.645	1.479	1.539	1.370	1.219	1.313	1.156	1.142	1.089
69	077111	1.246	1.131	1.104	1.450	1.763	1.528	1.744	1.654	1.479	1.394	1.503	1.219	1.101	1.111	1.105	1.076
70	077110	1.196	1.126	1.097	1.427	1.717	1.525	1.774	1.652	1.480	1.351	1.522	1.242	1.109	1.082	1.117	1.082
71	077109	1.227	1.127	1.198	1.372	1.703	1.499	1.788	1.650	1.445	1.319	1.402	1.214	1.098	1.095	1.103	1.067
72	077108	1.284	1.182	1.123	1.589	1.645	1.446	1.674	1.620	1.470	1.413	1.468	1.206	1.110	1.112	1.112	1.119
73	077107	1.328	1.166	1.093	1.639	1.556	1.505	1.799	1.623	1.491	1.435	1.503	1.269	1.102	1.051	1.234	1.181
74	077106	1.331	1.160	1.093	1.552	1.605	1.475	1.750	1.632	1.448	1.407	1.500	1.393	1.118	1.052	1.070	1.079
75	076105	1.298	1.237	1.098	1.465	1.695	1.495	1.715	1.668	1.458	1.400	1.973	1.546	1.099	1.046	1.075	1.078
76	075104	1.187	1.236	1.103	1.325	1.519	1.704	1.660	1.472	1.424	1.514	1.588	1.650	1.115	1.082	1.096	1.095
77	075103	1.146	1.188	1.107	1.285	1.533	1.704	1.684	1.690	1.427	1.530	1.774	1.789	1.219	1.054	1.133	1.143
78	074102	1.115	1.161	1.106	1.172	1.464	1.723	1.614	1.652	1.691	1.907	2.298	1.797	1.129	1.092	1.177	1.163
79	073101	1.254	1.151	1.120	1.108	1.379	1.722	1.672	1.608	1.580	2.094	2.233	1.859	1.129	1.126	1.195	1.155
80	073100	1.193	1.190	1.105	1.082	1.418	1.734	1.736	1.843	1.686	2.151	2.310	1.149	1.118	1.117	1.212	1.170
81	072099	1.192	1.208	1.111	1.081	1.324	1.731	1.731	1.535	1.663	2.385	1.174	1.117	1.108	1.111	1.181	1.139
82	072098	1.195	1.229	1.131	1.069	1.299	1.756	1.711	1.568	1.647	2.292	1.167	1.129	1.130	1.117	1.146	1.205
83	071097	1.357	1.369	1.142	1.086	1.452	1.686	1.922	1.665	2.167	1.241	1.151	1.187	1.144	1.130	1.167	1.171
84	055134	1.356	1.656	1.715	1.465	1.514	1.430	1.457	1.630	1.744	1.766	1.630	1.215	1.155	1.091	1.078	1.082
85	055135	1.267	1.591	1.546	1.456	1.430	1.466	1.411	1.546	1.686	1.782	1.475	1.186	1.190	1.095	1.080	1.098
86	055136	1.317	1.604	1.590	1.424	1.369	1.400	1.420	1.518	1.633	1.753	1.468	1.309	1.248	1.090	1.080	1.104
87	055137	1.248	1.729	1.642	1.556	1.422	1.440	1.420	1.500	1.611	1.714	1.513	1.222	1.219	1.098	1.084	1.156
88	056138	1.765	1.709	1.627	1.495	1.420	1.468	1.423	1.477	1.514	1.674	1.398	1.255	1.169	1.096	1.087	1.117
89	057138	1.649	1.752	1.587	1.470	1.365	1.501	1.409	1.443	1.531	1.662	1.390	1.186	1.238	1.136	1.094	1.388
90	058138	2.803	1.654	1.497	1.496	1.341	1.501	1.452	1.421	1.480	1.521	1.386	1.192	1.180	1.090	1.589	2.446
91	059138	2.314	1.487	1.336	1.508	1.395	1.484	1.475	1.397	1.458	1.510	1.435	1.151	1.215	1.092	1.858	1.940
92	060138	1.362	1.512	1.424	1.509	1.417	1.480	1.455	1.421	1.433	1.453	1.522	1.220	1.244	1.230	1.276	1.301
93	061137	1.338	1.320	1.335	1.487	1.572	1.483	1.466	1.605	1.528	1.395	1.360	1.149	1.125	1.054	1.087	1.095
94	062136	1.119	1.266	1.480	1.626	1.514	1.430	1.477	1.477	1.412	1.480	1.290	1.201	1.267	1.114	1.065	1.139
95	062135	1.153	1.250	1.504	1.589	1.516	1.469	1.429	1.436	1.433	1.388	1.252	1.274	1.126	1.081	1.139	1.069
96	062134	1.190	1.658	1.423	1.598	1.481	1.468	1.387	1.454	1.433	1.475	1.487	1.954	1.238	1.338	1.321	1.162
97	061133	1.307	1.605	1.417	1.570	1.532	1.471	1.384	1.400	1.478	1.547	1.531	1.255	1.068	1.114	1.182	1.429
98	060133	1.547	1.972	1.584	1.525	1.450	1.483	1.475	1.427	1.446	1.513	1.493	1.371	1.073	1.080	1.076	1.277
99	059133	2.031	1.550	1.627	1.493	1.482	1.532	1.470	1.443	1.476	1.535	1.606	1.504	1.107	1.064	1.087	1.270
100	058133	1.981	1.770	1.565	1.482	1.513	1.497	1.424	1.461	1.458	1.546	1.604	1.477	1.161	1.135	1.122	1.296
101	057133	1.825	1.755	1.518	1.497	1.542	1.551	1.454	1.550	1.577	1.583	1.596	1.268	1.138	1.106	1.099	1.193
102	056133	1.944	1.640	1.540	1.489	1.528	1.436	1.472	1.531	1.683	1.688	1.538	1.200	1.219	1.100	1.094	1.195
103	050126	1.183	1.329	1.642	1.539	1.541	1.516	1.478	1.670	1.814	1.462	1.248	1.160	1.283	1.114	1.065	1.060
104	084105	1.144	1.169	1.093	1.335	1.813	1.941	1.781	1.568	1.309	1.398	1.174	1.122	1.342	1.063	1.071	1.107
105	090107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	050144	1.208	1.441	1.456	1.380	1.399	1.402	1.452	1.453	1.558	1.530	1.496	1.414	1.230	1.161	1.078	1.097

Table A.2. Spread parameters around Korean marginal seas using equation (12)

Case No.	Grid No.	γ_{50}, 모멘트법에 의한 계산															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	046101	1.070	1.805	1.456	1.666	1.563	1.782	1.747	1.553	1.297	1.107	1.174	1.113	1.146	1.125	1.073	1.091
2	047102	1.409	1.684	1.355	1.290	1.808	1.779	1.749	1.661	1.309	1.150	1.164	1.135	1.141	1.121	1.082	1.071
3	048103	1.343	2.250	1.636	1.403	1.685	1.701	1.723	1.677	1.329	1.150	1.141	1.145	1.125	1.128	1.082	1.093
4	049104	1.572	2.338	1.498	1.418	1.604	1.607	1.664	1.680	1.294	1.229	1.173	1.158	1.179	1.117	1.086	1.062
5	050104	1.703	1.802	1.609	1.395	1.540	1.581	1.584	1.691	1.372	1.283	1.204	1.172	1.177	1.144	1.042	1.266
6	051104	1.631	1.655	1.622	1.382	1.517	1.477	1.591	1.681	1.358	1.268	1.203	1.155	1.175	1.055	1.047	1.064
7	052104	1.613	1.486	1.547	1.359	1.483	1.444	1.583	1.708	1.455	1.295	1.237	1.157	1.167	1.053	1.054	1.076
8	053104	1.502	1.537	1.458	1.329	1.323	1.459	1.599	1.760	1.610	1.280	1.235	1.177	1.210	1.094	1.097	1.052
9	054104	1.528	1.347	1.432	1.271	1.279	1.371	1.605	1.816	1.775	1.232	1.226	1.180	1.223	1.095	1.069	1.125
10	055104	1.477	1.376	1.327	1.349	1.227	1.480	1.763	1.720	1.667	1.233	1.195	1.145	1.256	1.105	1.060	1.062
11	056105	1.234	1.288	1.329	1.348	1.234	1.364	1.554	1.817	1.979	1.346	1.205	1.092	1.125	1.057	1.059	1.104
12	057106	-	-	-	1.324	1.234	1.333	1.480	1.634	1.953	1.711	1.206	1.120	1.118	1.079	1.060	1.099
13	057107	-	-	1.193	1.254	1.243	1.329	1.507	1.657	1.759	1.656	1.207	1.134	1.099	1.102	1.161	1.097
14	056108	1.333	1.220	-	1.299	1.271	1.346	1.477	1.650	1.535	1.526	1.258	1.169	1.113	1.068	1.071	1.361
15	055109	1.116	-	1.303	1.374	1.313	1.437	1.442	1.543	1.694	1.355	1.495	1.173	1.097	1.076	1.071	1.103
16	055110	1.156	-	1.283	1.366	1.301	1.455	1.444	1.412	1.548	1.465	1.627	1.148	1.093	1.107	1.173	1.050
17	055111	1.163	-	1.255	1.421	1.299	1.380	1.418	1.485	1.593	1.475	1.389	1.150	1.102	1.083	1.094	1.075
18	055112	1.262	-	1.358	1.435	1.390	1.425	1.447	1.472	1.643	1.523	1.494	1.168	1.122	1.095	1.095	1.116
19	056113	1.552	-	1.361	1.436	1.381	1.351	1.350	1.459	1.588	1.604	1.630	1.150	1.134	1.105	1.068	1.163
20	056114	-	-	-	1.415	1.381	1.309	1.283	1.359	1.426	1.523	1.497	1.138	1.122	1.102	1.120	1.424
21	057115	-	-	1.383	1.514	1.408	1.290	1.304	1.358	1.423	1.480	1.617	1.278	1.333	1.101	1.102	1.387
22	057116	-	-	1.368	1.486	1.459	1.320	1.325	1.402	1.431	1.464	1.570	1.202	1.114	1.101	1.120	1.216
23	057117	-	1.338	1.334	1.384	1.459	1.402	1.308	1.410	1.343	1.490	1.546	1.190	1.121	1.073	1.079	1.147
24	057118	1.467	1.322	1.341	1.268	1.460	1.351	1.433	1.400	1.359	1.369	1.381	1.228	1.158	1.099	1.092	1.301
25	056119	1.513	1.455	1.325	1.370	1.556	1.515	1.451	1.383	1.423	1.468	1.559	1.189	1.174	1.111	1.101	1.113
26	056120	1.435	1.394	1.329	1.379	1.521	1.494	1.476	1.395	1.380	1.435	1.480	1.189	1.191	1.129	1.106	1.112
27	056121	1.487	1.405	1.332	1.329	1.434	1.454	1.427	1.410	1.375	1.390	1.381	1.186	1.183	1.133	1.098	1.109
28	055122	1.245	1.565	1.341	1.412	1.515	1.545	1.475	1.368	1.406	1.398	1.459	1.289	1.262	1.104	1.088	1.097
29	055123	1.230	1.395	1.327	1.386	1.506	1.475	1.509	1.445	1.436	1.373	1.408	1.231	1.256	1.101	1.090	1.114
30	055124	1.217	1.346	1.311	1.377	1.505	1.524	1.517	1.449	1.414	1.393	1.392	1.234	1.257	1.104	1.091	1.131
31	055125	1.199	1.408	1.311	1.342	1.439	1.496	1.480	1.460	1.459	1.447	1.401	1.251	1.312	1.094	1.088	1.137
32	055126	1.219	1.411	1.390	1.412	1.380	1.456	1.426	1.511	1.475	1.486	1.354	1.221	1.250	1.250	1.095	1.082
33	054127	1.148	1.455	1.472	1.397	1.444	1.405	1.434	1.540	1.507	1.440	1.320	1.175	1.325	1.103	1.089	1.108
34	054128	1.154	1.492	1.439	1.456	1.449	1.411	1.479	1.555	1.577	1.402	1.377	1.119	1.289	1.095	1.090	1.104
35	054129	1.125	1.676	1.458	1.445	1.414	1.432	1.543	1.597	1.587	1.523	1.393	1.169	1.307	1.095	1.093	1.104
36	055130	1.584	1.678	1.545	1.523	1.440	1.457	1.487	1.629	1.623	1.558	1.484	1.141	1.247	1.095	1.099	1.141
37	056130	1.816	-	1.823	1.479	1.407	1.467	1.474	1.530	1.622	1.622	1.525	1.257	1.195	1.125	1.096	1.434
38	057130	2.198	-	1.882	1.479	1.347	1.453	1.575	1.559	1.626	1.696	1.541	1.198	1.188	1.075	1.501	-
39	058130	-	1.755	1.412	1.411	1.380	1.396	1.493	1.534	1.582	1.677	1.498	1.243	1.104	1.374	2.390	1.077
40	059130	1.666	1.482	-	1.340	1.390	1.352	1.477	1.499	1.553	1.600	1.528	1.200	1.161	1.140	1.180	1.275
41	060130	1.207	-	1.507	1.363	1.387	1.348	1.399	1.495	1.511	1.646	1.568	1.258	1.120	1.482	1.103	1.166
42	061129	1.098	-	1.704	1.355	1.458	1.339	1.304	1.381	1.470	1.581	1.216	1.282	1.299	1.132	1.117	1.105
43	062129	1.113	-	-	1.298	1.409	1.372	1.329	1.380	1.420	1.518	1.169	1.217	1.214	1.330	1.101	1.153
44	063129	1.159	-	1.554	1.367	1.345	1.404	1.363	1.403	1.362	1.548	1.304	1.158	1.143	1.101	1.104	1.106
45	064128	1.184	1.469	-	1.333	1.356	1.445	1.449	1.441	1.409	1.546	1.124	1.326	1.104	1.136	1.133	1.112
46	065127	1.179	1.213	1.164	1.380	1.455	1.569	1.533	1.564	1.448	1.178	1.194	1.120	1.111	1.122	1.099	1.078
47	066126	1.222	1.156	-	1.393	1.403	1.581	1.621	1.682	1.297	1.116	1.178	1.190	1.106	1.112	1.101	1.079
48	067126	1.195	1.194	-	1.403	1.384	1.520	1.583	1.648	1.413	1.134	1.181	1.144	1.086	1.129	1.107	1.102
49	068126	1.172	1.206	-	1.442	1.370	1.447	1.497	1.619	1.609	1.442	1.185	1.189	1.152	1.162	1.134	1.105
50	069126	1.207	1.161	-	1.428	1.342	1.506	1.545	1.625	1.665	1.416	1.176	1.383	1.164	1.113	1.089	1.125
51	070126	1.199	1.144	1.552	1.383	1.315	1.616	1.578	1.683	1.666	1.421	1.144	1.254	1.173	1.078	1.094	1.115
52	071126	1.283	1.259	1.270	1.118	1.708	1.563	1.573	1.705	1.609	1.457	1.125	1.219	1.109	1.508	1.357	1.401
53	072125	1.208	1.154	1.382	1.119	1.729	1.600	1.627	1.706	1.565	1.424	-	1.091	1.173	1.230	1.173	1.163

Table A.2. Spread parameters around Korean marginal seas using equation (12)

Case No.	Grid No.	γ_{50}, 모멘트법에 의한 계산															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
54	073125	1.139	1.461	1.345	1.133	1.758	1.620	1.641	1.704	1.662	1.486	1.167	1.065	1.069	1.106	1.095	1.163
55	074124	1.186	1.171	1.125	1.102	1.760	1.687	1.604	1.713	1.565	1.460	1.342	1.335	1.121	1.169	1.377	1.267
56	075124	1.531	1.334	1.130	1.131	1.736	1.739	1.706	1.759	1.506	1.440	1.232	1.415	1.219	1.361	1.319	1.219
57	076123	1.558	1.315	1.133	1.129	1.748	1.786	1.674	1.750	1.567	1.424	1.233	1.271	1.198	1.289	1.390	1.234
58	077122	1.224	-	-	1.163	1.733	1.807	1.766	1.771	1.617	1.406	1.198	1.318	1.243	1.312	1.225	1.200
59	077121	1.200	1.113	1.114	1.128	1.749	1.801	1.763	1.764	1.542	1.493	1.317	1.199	1.279	1.363	1.346	1.256
60	077120	1.522	1.161	1.109	1.124	1.767	1.814	1.773	1.642	1.502	1.541	1.139	1.176	1.347	1.395	1.276	1.225
61	077119	1.278	1.160	1.101	1.108	1.803	1.804	1.769	1.631	1.572	1.503	1.266	1.348	1.439	1.255	1.495	1.402
62	077118	1.338	1.128	1.089	1.119	1.809	1.814	1.773	1.594	1.566	1.526	-	1.328	1.375	1.382	1.356	1.544
63	077117	1.321	1.130	1.089	1.256	1.831	1.819	1.728	1.643	1.555	1.556	1.781	1.428	1.256	1.378	1.431	1.480
64	077116	1.321	1.119	-	-	1.834	1.811	1.732	1.651	1.546	1.602	-	1.488	1.395	1.237	1.102	1.555
65	077115	1.378	1.119	-	-	1.815	1.801	1.741	1.661	1.525	1.800	1.730	1.140	1.191	1.174	1.138	1.180
66	077114	1.288	1.113	-	-	1.798	1.795	1.749	1.668	1.528	1.645	1.581	1.261	1.148	1.144	1.222	1.244
67	077113	1.226	1.125	1.090	1.475	1.793	1.565	1.757	1.640	1.505	1.699	1.504	1.203	1.133	1.114	1.151	1.108
68	077112	1.258	1.127	1.080	1.471	1.793	1.525	1.754	1.646	1.479	1.540	1.366	1.219	1.313	1.155	1.140	1.091
69	077111	1.246	1.131	1.104	1.448	1.763	1.527	1.744	1.655	1.478	1.395	1.499	1.218	1.103	1.111	1.105	1.075
70	077110	1.196	1.126	1.098	1.426	1.716	1.525	1.774	1.652	1.479	1.350	1.520	1.243	1.110	1.083	1.117	1.083
71	077109	1.227	1.127	1.188	1.370	1.702	1.498	1.788	1.650	1.445	1.319	1.399	1.216	1.098	1.094	1.103	1.066
72	077108	1.284	1.181	1.134	1.587	1.644	1.446	1.674	1.620	1.470	1.413	1.468	1.214	1.111	1.112	1.112	1.119
73	077107	1.327	1.167	1.089	1.638	1.555	1.505	1.799	1.623	1.492	1.435	1.502	1.264	1.103	1.051	1.234	1.180
74	077106	1.331	1.160	-	-	-	1.475	1.751	1.631	1.447	1.407	1.500	1.392	1.118	1.050	1.070	1.080
75	076105	1.298	1.237	1.103	1.463	1.694	1.494	1.716	1.669	1.458	1.399	1.972	1.544	1.101	1.047	1.074	1.079
76	075104	1.187	1.236	1.103	1.312	1.518	1.704	1.660	1.473	1.424	1.513	1.587	1.653	1.106	1.081	1.096	1.095
77	075103	1.145	1.188	1.108	1.271	1.531	1.704	1.684	1.690	1.427	1.531	1.772	1.791	1.212	1.053	1.133	1.143
78	074102	1.115	1.161	1.105	1.170	1.462	1.722	1.614	1.652	1.692	1.907	2.304	1.825	1.127	1.092	1.177	1.164
79	073101	1.254	1.150	1.120	1.107	1.376	1.722	1.672	1.608	1.581	2.094	2.262	1.893	1.128	1.126	1.196	1.156
80	073100	1.192	1.189	1.105	1.086	1.416	1.734	1.736	1.843	1.687	2.151	2.402	1.149	1.119	1.117	1.211	1.171
81	072099	1.193	1.208	1.111	1.082	1.319	1.731	1.731	1.536	1.664	2.388	1.174	1.119	1.110	1.110	1.181	1.140
82	072098	1.195	1.230	1.131	1.070	1.292	1.756	1.711	1.569	-	-	1.168	1.131	1.132	1.118	1.146	1.205
83	071097	1.358	1.370	1.142	1.086	1.450	1.685	1.921	1.665	-	1.241	1.152	1.184	1.144	1.130	1.166	1.173
84	055134	1.351	1.656	1.715	1.466	1.513	1.430	1.456	1.630	1.744	1.766	1.630	1.207	1.155	1.092	1.078	1.082
85	055135	1.271	1.590	1.546	1.457	1.430	1.466	1.411	1.547	1.686	1.782	1.472	1.191	1.190	1.095	1.081	1.102
86	055136	1.314	1.605	1.590	1.424	1.369	1.401	1.420	1.518	1.633	1.753	1.465	1.305	1.247	1.090	1.080	1.110
87	055137	1.252	1.729	1.642	1.556	1.422	1.440	1.420	1.500	1.611	1.713	1.510	1.222	1.220	1.098	1.083	1.156
88	056138	1.765	1.710	1.627	1.495	1.420	1.468	1.424	1.477	1.514	1.674	1.392	1.255	1.169	1.096	1.087	1.124
89	057138	1.649	1.752	1.586	1.470	1.364	1.501	1.408	1.443	1.531	1.661	1.386	1.186	1.238	1.136	1.094	1.378
90	058138	2.839	-	1.497	1.496	1.340	1.501	1.452	1.422	1.480	1.522	1.383	1.192	1.180	-	1.593	2.448
91	059138	2.364	-	1.332	1.508	1.395	1.484	1.475	1.397	1.457	1.510	1.434	1.151	1.215	1.092	1.874	1.977
92	060138	1.339	-	1.423	1.509	1.417	1.480	1.455	1.422	1.433	1.453	1.523	1.220	1.243	1.230	1.276	1.313
93	061137	1.324	1.314	1.331	1.487	1.572	1.483	1.466	1.604	1.528	1.396	1.357	1.155	1.130	1.054	1.087	1.068
94	062136	1.119	-	1.481	1.626	1.514	1.403	1.476	1.477	1.422	1.480	1.281	1.206	1.268	1.115	1.066	1.146
95	062135	1.152	1.245	1.504	1.588	1.515	1.469	1.429	1.436	1.433	1.388	1.252	1.265	1.125	1.081	1.118	1.068
96	062134	1.193	1.658	1.423	1.598	1.481	1.468	1.387	1.454	1.433	1.474	1.486	1.955	1.241	1.341	1.321	1.162
97	061133	1.297	-	1.417	1.570	1.532	1.471	1.384	1.400	1.478	1.546	1.531	1.256	1.069	1.103	1.162	1.413
98	060133	1.413	1.973	1.585	1.525	1.450	1.483	1.475	1.426	1.446	1.514	1.493	1.371	1.072	1.084	1.064	1.262
99	059133	2.077	-	1.626	1.493	1.482	1.532	1.470	1.443	1.476	1.534	1.606	1.504	1.107	1.064	1.063	1.264
100	058133	1.992	1.770	1.565	1.482	1.513	1.498	1.424	1.461	1.457	1.546	1.604	1.475	1.162	1.134	1.122	1.285
101	057133	1.831	1.756	1.518	1.497	1.542	1.552	1.453	1.550	1.577	1.583	1.596	1.260	1.139	1.105	1.099	1.202
102	056133	1.946	1.641	1.540	1.489	1.528	1.436	1.472	1.531	1.682	1.688	1.538	1.201	1.218	1.100	1.093	1.202
103	050126	1.183	1.324	1.641	1.539	1.541	1.515	1.478	1.669	1.814	1.459	1.245	1.160	1.283	1.114	1.065	1.060
104	084105	1.144	1.169	1.093	1.326	1.813	1.942	1.781	1.568	1.303	1.396	1.177	1.122	1.342	1.063	1.071	1.107
105	090107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	050144	1.208	1.441	1.457	1.380	1.399	1.402	1.452	1.454	1.558	1.529	1.493	1.412	1.229	1.160	1.078	1.096

Table A.3. Relative errors of spread parameters

Case	Grid	상대오차(%)															
No.	No.	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	046101	0.0935	0.0554	0.0000	0.0600	0.1280	0.0561	0.0572	0.0644	0.0000	0.0903	0.0852	0.0000	0.0873	0.0000	0.0932	0.0000
2	047102	0.0000	0.0594	0.0000	0.0775	0.0553	0.0000	0.0000	0.0000	0.0764	0.0000	0.0000	0.0000	0.0876	0.0892	0.0000	0.0934
3	048103	1.3403	0.0889	0.0000	0.0713	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3478	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0915
4	049104	0.1908	0.1711	0.0668	0.0705	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8501	0.0000	0.0853	0.0000	0.0848	0.0895	0.0921	0.0942
5	050104	0.5872	0.0555	0.0622	0.0717	0.0000	0.0633	0.0000	0.0000	0.9475	0.0779	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0960	0.7899
6	051104	0.6744	0.1813	0.0617	0.1447	0.0659	0.0000	0.0000	0.0595	0.6627	0.0000	0.0000	0.0000	0.0851	0.1896	0.1910	0.0940
7	052104	0.0620	0.1346	0.0000	0.0736	0.1349	0.0693	0.1263	0.0000	0.3436	0.0772	0.0808	0.0864	0.0000	0.0950	0.0000	0.0000
8	053104	0.1332	0.0651	0.0686	0.0752	0.1512	0.0685	0.0625	0.0000	0.0000	0.2344	0.1619	0.0000	0.0826	0.0914	0.0912	0.0951
9	054104	0.1309	0.0000	0.0000	0.0787	0.0000	0.0000	0.0000	0.0551	0.0563	0.7305	0.0816	0.0847	0.1635	0.0913	0.1871	0.6222
10	055104	0.0000	0.0727	0.0000	0.0741	0.0815	0.0676	0.0000	0.1163	0.0000	0.3244	0.0000	0.0000	0.0796	0.0905	0.0943	0.0942
11	056105	0.0810	0.1553	0.0000	0.0742	0.0810	0.0733	0.0000	0.0550	0.0505	1.4116	0.7469	0.0000	0.0000	0.0946	0.0944	0.0906
12	057106	-	-	-	0.0755	0.0000	0.0000	0.0000	0.0612	0.0512	0.0000	0.5804	0.0000	0.0894	0.0000	0.0000	0.0910
13	057107	-	-	1.1735	0.0797	0.0805	0.0752	0.0664	0.1207	0.0569	0.0604	0.5800	0.0000	0.0000	0.0000	0.0861	0.0912
14	056108	0.0750	0.6557	-	0.0000	0.0787	0.0743	0.0000	0.0000	0.0000	0.1311	0.0795	0.0855	0.0000	0.0000	0.0000	0.0735
15	055109	0.0896	-	0.0000	1.8923	0.0762	0.0000	0.0693	0.0648	0.0590	0.1476	0.3344	0.0000	0.0000	0.0000	0.0934	0.0907
16	055110	0.0000	-	0.0000	0.1464	0.0769	0.0687	0.0000	0.0708	0.0000	0.5461	0.1229	0.0871	0.0915	0.0000	0.0000	0.0952
17	055111	0.0000	-	0.0797	0.0704	0.0000	0.0000	0.0705	0.0000	0.0000	0.2712	0.4320	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	055112	0.0000	-	0.0000	0.0000	0.0719	0.0702	0.0691	0.0679	0.0609	0.1313	0.2008	0.0856	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	056113	0.1289	-	0.0735	0.0696	0.0724	0.0000	0.0741	0.0685	2.3929	18.266	16.564	24.782	21.693	22.262	26.498	25.537
20	056114	-	-	-	0.0707	0.0724	0.0000	0.0000	0.0736	0.0701	0.6958	0.2004	0.0879	0.0891	0.0000	0.0000	0.0702
21	057115	-	-	0.0723	0.0661	0.0710	0.0775	0.1534	0.0000	0.0000	0.0676	0.0618	0.8607	15.078	0.0000	0.0907	0.0000
22	057116	-	-	0.1462	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0713	0.0000	0.0000	0.1274	0.3328	0.0898	0.0908	0.0000	0.0822
23	057117	-	0.0000	0.0750	0.0723	0.0685	0.0713	0.0765	0.0000	0.0000	0.0000	0.0647	0.2521	0.0000	0.0000	0.0000	0.0872
24	057118	0.0000	0.0756	0.0746	0.0000	0.1370	0.0740	0.0000	0.0714	0.0736	0.0000	0.2172	0.0814	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	056119	0.0661	0.0000	0.0755	0.0730	0.0000	0.0660	0.0689	0.0000	0.0703	0.0000	0.0641	0.5046	0.0852	0.0900	0.0908	0.0898
26	056120	0.0697	0.0717	0.0752	0.0000	0.0000	0.0669	0.0000	0.0000	4.0580	2.7875	10.135	15.979	27.707	32.240	33.453	25.449
27	056121	0.0672	0.0000	0.1502	0.0000	0.0697	0.0000	0.0701	0.0709	0.0000	0.0719	0.1448	0.0000	0.0000	0.0883	0.0911	0.0000
28	055122	0.0000	0.0639	0.0000	0.0000	0.0660	0.0647	0.0678	0.0731	0.0000	0.0000	0.0000	0.0776	0.0000	0.0000	0.0000	0.0912
29	055123	0.0000	0.0717	0.0000	0.0000	0.0664	0.0678	0.0000	0.0000	0.0000	0.0728	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30	055124	0.0822	0.0743	0.1526	0.0000	0.0000	0.0000	0.0659	0.0000	0.0000	0.0000	0.0718	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31	055125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0745	0.0695	0.0668	0.0676	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0880
32	055126	0.0000	0.1417	0.0000	0.0708	0.1449	0.0687	0.0000	0.0000	0.0000	0.0673	0.0000	0.0000	0.0000	12.400	0.2740	0.0924
33	054127	0.0000	0.0687	0.0679	0.0000	0.0693	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34	054128	0.0000	0.0000	0.0695	0.0687	0.0000	0.0709	0.0000	0.0000	0.0000	0.0713	0.0000	0.0000	0.0000	0.0913	0.0000	0.0000
35	054129	0.0889	0.0000	0.0686	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0630	0.0000	0.0000	0.0855	0.0000	0.0913	0.0915	0.0000
36	055130	0.2525	0.0596	0.0647	0.0657	0.0694	0.0000	0.0672	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0876	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37	056130	0.1101	-	0.0000	0.0676	0.0000	0.0000	0.0678	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0889	0.0000	0.6276
38	057130	0.0455	-	0.0531	0.0676	0.0000	0.0000	0.0635	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.4657	-
39	058130	-	0.0000	0.0708	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0668	0.0000	0.0000	2.1834	2.4268	0.0000
40	059130	0.7803	0.2699	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0667	0.0000	0.0625	0.0654	0.0000	0.0000	0.3509	9.0678	0.0000
41	060130	0.1657	-	0.0000	0.0734	0.0000	0.0742	0.0000	0.0000	0.0000	0.0608	0.0638	0.1590	5.6250	1.8893	0.0907	0.0858
42	061129	0.2732	-	0.0587	0.0738	0.0686	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7800	0.0000	0.1767	0.1791	0.0905
43	062129	0.1797	-	-	0.0000	0.1419	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0855	0.0822	0.0000	0.1504	0.0908	0.0867
44	063129	0.1726	-	0.0644	0.0732	0.1487	0.0000	0.0734	0.0000	0.0000	0.0646	0.2301	0.7772	0.0875	0.0908	0.0906	0.0000
45	064128	0.0845	0.6127	-	0.0000	0.2212	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0647	0.0000	0.0000	0.0906	0.0880	0.1765	0.0000
46	065127	0.1696	0.0000	0.3436	0.0725	0.0687	0.0000	0.0652	0.0000	0.0000	0.6791	0.0000	0.0893	0.0900	0.0891	0.0910	0.0928
47	066126	0.2455	0.1730	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4626	0.1792	0.0000	0.0000	0.0000	0.5848	0.1817	0.1854
48	067126	0.1674	0.0838	-	0.0713	0.0723	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2646	0.0847	0.2622	0.1842	0.0886	0.1807	0.2722
49	068126	0.2560	0.0829	-	0.0000	0.0730	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0844	0.0000	0.1736	0.0000	0.0000	0.0905
50	069126	0.1657	0.1723	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0601	0.0706	0.0000	0.0000	0.1718	0.0000	0.0918	0.0889
51	070126	0.0834	0.0000	0.0644	0.0723	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0704	0.0874	0.0000	0.0853	0.0928	0.1828	0.0000
52	071126	0.0779	0.0794	0.3150	0.4472	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0686	0.1778	0.0000	0.0902	0.0000	0.0000	0.0000
53	072125	0.0828	0.0000	0.2171	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.4058	0.0702	-	0.1833	0.0853	0.2439	0.0853	0.0860

Table A.3. Relative errors of spread parameters

Case No.	Grid No.	상대오차(%)															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
54	073125	0.1756	0.0684	0.0743	0.6178	0.0000	0.0000	0.0609	0.0000	0.0000	0.0000	0.0857	0.0000	0.0000	0.1808	0.0000	0.2580
55	074124	0.1686	0.0854	0.0889	0.2722	0.0568	0.0000	0.0000	0.0000	0.0639	0.0685	0.4471	0.0000	0.0892	0.0000	0.0000	0.0000
56	075124	0.0000	0.0000	0.5310	0.0884	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0664	0.0000	0.0000	0.0000	0.0820	0.0000	0.0758	0.0000
57	076123	0.0642	0.0000	0.5296	0.5314	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0638	0.0702	0.0000	0.0787	0.0835	0.0000	0.0719	0.0810
58	077122	0.0817	-	-	0.4299	0.0000	0.0000	0.0000	0.0565	0.0000	0.0711	0.2504	0.0000	0.0000	0.0762	0.0816	0.0000
59	077121	0.0833	0.5391	0.5386	0.5319	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.2149	0.0000	0.0782	0.0000	0.1486	0.0000
60	077120	0.0000	0.0861	0.4509	0.0890	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0649	0.0878	0.0850	0.0742	0.0717	0.0000	0.0816
61	077119	0.0000	0.0000	0.4541	0.5415	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0790	0.0742	0.0695	0.1594	0.1338	0.0713
62	077118	0.0000	0.0887	0.0918	0.4468	0.0553	0.0000	0.0564	0.0000	0.0000	0.0000	-	0.1506	0.0727	0.0724	0.0737	0.0648
63	077117	0.0000	0.0000	0.3673	0.8758	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0561	0.0700	0.9554	0.0726	0.0699	0.0000
64	077116	0.0757	0.0894	-	-	0.0545	0.0552	0.0000	0.0000	0.0000	0.0624	-	0.0672	0.0717	0.0808	0.1815	0.0000
65	077115	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0555	0.0000	0.0000	0.0000	0.0556	0.0578	0.1754	0.0000	0.0852	0.0000	0.0000
66	077114	0.0000	0.0000	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0608	0.1898	0.1586	0.0000	0.0874	8.4288	0.0804
67	077113	0.0816	0.0000	0.4587	0.0678	0.0000	0.0639	0.0000	0.0610	0.0000	0.0000	0.1995	0.0000	0.0883	0.0000	0.0000	0.0000
68	077112	0.0000	0.0887	0.0000	0.1360	0.0558	0.0000	0.0000	0.0608	0.0000	0.0649	0.2928	0.0000	0.0000	0.0866	0.1754	0.1833
69	077111	0.0000	0.0000	0.0000	0.1381	0.0000	0.0655	0.0000	0.0604	0.0677	0.0717	0.2668	0.0821	0.1813	0.0000	0.0000	0.0930
70	077110	0.0000	0.0000	0.0911	0.0701	0.0583	0.0000	0.0000	0.0000	0.0676	0.0741	0.1316	0.0805	0.0901	0.0923	0.0000	0.0923
71	077109	0.0000	0.0000	0.8418	0.1460	0.0588	0.0668	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2144	0.1645	0.0000	0.0914	0.0000	0.0938
72	077108	0.0000	0.0847	0.9700	0.1260	0.0608	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6590	0.0900	0.0000	0.0000	0.0000
73	077107	0.0754	0.0857	0.3673	0.0611	0.0643	0.0000	0.0000	0.0000	0.0670	0.0000	0.0666	0.3956	0.0907	0.0000	0.0000	0.0847
74	077106	0.0000	0.0000	-	-	-	0.0000	0.0571	0.0613	0.0691	0.0000	0.0000	0.0718	0.0000	0.1905	0.0000	0.0926
75	076105	0.0000	0.0000	0.4533	0.1367	0.0590	0.0669	0.0583	0.0599	0.0000	0.0715	0.0507	0.1295	0.1817	0.0955	0.0931	0.0927
76	075104	0.0000	0.0000	0.0000	0.9909	0.0659	0.0000	0.0000	0.0679	0.0000	0.0661	0.0630	0.1815	0.8137	0.0925	0.0000	0.0000
77	075103	0.0873	0.0000	0.0903	1.1015	0.1306	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0653	0.1129	0.1117	0.5776	0.0950	0.0000	0.0000
78	074102	0.0000	0.0000	0.0905	0.1709	0.1368	0.0581	0.0000	0.0000	0.0591	0.0000	0.2604	1.5342	0.1775	0.0000	0.0000	0.0859
79	073101	0.0000	0.0870	0.0000	0.0903	0.2180	0.0000	0.0000	0.0000	0.0633	0.0000	1.2821	1.7961	0.0887	0.0000	0.0836	0.0865
80	073100	0.0839	0.0841	0.0000	0.3683	0.1412	0.0000	0.0000	0.0000	0.0593	0.0000	3.8301	0.0000	0.0894	0.0000	0.0826	0.0854
81	072099	0.0838	0.0000	0.0000	0.0924	0.3791	0.0000	0.0000	0.0651	0.0601	0.1256	0.0000	0.1787	0.1802	0.0901	0.0000	0.0877
82	072098	0.0000	0.0813	0.0000	0.0935	0.5418	0.0000	0.0000	0.0637	-	-	0.0856	0.1768	0.1767	0.0894	0.0000	0.0000
83	071097	0.0736	0.0730	0.0000	0.0000	0.1379	0.0593	0.0521	0.0000	-	0.0000	0.0868	0.2534	0.0000	0.0000	0.0858	0.1705
84	055134	0.3701	0.0000	0.0000	0.0682	0.0661	0.0000	0.0687	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6628	0.0000	0.0916	0.0000	0.0000
85	055135	0.3147	0.0629	0.0000	0.0686	0.0000	0.0000	0.0000	0.0646	0.0000	0.0000	0.2038	0.4198	0.0000	0.0000	0.0925	0.3630
86	055136	0.2283	0.0623	0.0000	0.0000	0.0000	0.0714	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2048	0.3065	0.0802	0.0000	0.0000	0.5405
87	055137	0.3195	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0584	0.1987	0.0000	0.0820	0.0000	0.0923	0.0000
88	056138	0.0000	0.0585	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0702	0.0000	0.0000	0.0000	0.4310	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6228
89	057138	0.0000	0.0000	0.0631	0.0000	0.0733	0.0000	0.0710	0.0000	0.0000	0.0602	0.2886	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7257
90	058138	1.2681	-	0.0000	0.0000	0.0746	0.0000	0.0000	0.0703	0.0000	0.0657	0.2169	0.0000	0.0000	-	0.2511	0.0817
91	059138	2.1151	-	0.3003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0686	0.0000	0.0697	0.0000	0.0000	0.0000	0.8538	1.8715
92	060138	1.7177	-	0.0703	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0703	0.0000	0.0000	0.0657	0.0000	0.0805	0.0000	0.0000	0.9139
93	061137	1.0574	0.4566	0.3005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0623	0.0000	0.0716	0.2211	0.5195	0.4425	0.0000	0.0000	2.5281
94	062136	0.0000	-	0.0675	0.0000	0.0000	1.9244	0.0678	0.0000	0.7032	0.0000	0.7026	0.4146	0.0789	0.0897	0.0938	0.6108
95	062135	0.0868	0.4016	0.0000	0.0630	0.0660	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7115	0.0889	0.0000	1.8784	0.0936
96	062134	0.2515	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0678	0.0673	0.0512	0.2417	0.2237	0.0000	0.0000
97	061133	0.7710	-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0647	0.0000	0.0796	0.0935	0.9973	1.7212	1.1323
98	060133	9.4834	0.0507	0.0631	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0701	0.0000	0.0661	0.0000	0.0000	0.0933	0.3690	1.1278	1.1886
99	059133	2.2147	-	0.0615	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0652	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.2578	0.4747
100	058133	0.5522	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0668	0.0000	0.0000	0.0686	0.0000	0.0000	0.1356	0.0861	0.0882	0.0000	0.8560
101	057133	0.3277	0.0569	0.0000	0.0000	0.0000	0.0644	0.0688	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6349	0.0878	0.0905	0.0000	0.7488
102	056133	0.1028	0.0609	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0595	0.0000	0.0000	0.0833	0.0821	0.0000	0.0915	0.5824
103	050126	0.0000	0.3776	0.0609	0.0000	0.0000	0.0660	0.0000	0.0599	0.0000	0.2056	0.2410	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
104	084105	0.0000	0.0000	0.0000	0.6787	0.0000	0.0515	0.0000	0.0000	0.4605	0.1433	0.2549	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
105	090107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106	050144	0.0000	0.0000	0.0686	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0688	0.0000	0.0654	0.2009	0.1416	0.0814	0.0862	0.0000	0.0912