

병렬 FEM 모형을 이용한 1993년 동해 지진해일 시뮬레이션

Simulation of 1993 East Sea Tsunami by Parallel FEM Model

최병호¹⁾ · 에핌 페리놉스키²⁾ · 홍성진³⁾

Choi, Byung-Ho · Pelinovsky, Efim · Hong, Sung-Jin

국문 요약 >> 지진해일 위험재해도의 작성과 재해경감대책 수립을 위해서는 연안역의 상세한 수심 및 지형을 이용한 시뮬레이션이 요구되고 있다. 본 연구에서는 Beowulf 병렬계산을 통해 동해 전 영역에서 정밀산정이 가능한 병렬유한요소모형을 이용하여 1993년 7월 12일 동해안에 내습한 지진해일에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 계산 결과와 관측치와의 비교결과를 제시한다. 또한, 해안에서의 지진해일고의 통계적 분포에 대해 논하며, 해안에서의 지진해일고의 파고분포가 전반적으로 대수정규분포를 따르는 경향을 제시하였다.

주요어 지진해일, 유한요소모형, 통계해석, 분포함수

ABSTRACT >> The simulation of tsunami using detailed bathymetry and topography is required to establish the countermeasure of disaster mitigation and the tsunami hazard map. In this study, a simulation of the 1993 tsunami event in the East Sea using parallel finite element model, which is possible to simulate with suitable accuracy by the Beowulf parallel computation method, is performed to produce detailed features of coastal inundation. Results of simulation are compared with measured data. The evolution of statistic distribution of tsunami heights is studied numerically and the distribution functions of tsunami heights show a tendency to the log-normal curve along coastal area.

Key words tsunami, finite element model, statistic analysis, distribution function

1. 서론

1993년 7월 12일 동해안에 내습한 지진해일은 일본 서해안에 위치한 오키시리섬(奥尻島) 북서측 외해역에서 발생한 M7.8 규모의 해저지진에 의해 발생하였다. 이 해저 지진에 의한 지진해일은 동해를 가로질러 강원도에서 경상남도까지 약 100km에 걸쳐 피해를 준 것으로 관측되었다. 지진해일 발생 후 한국에서 결성된 지진해일 조사단이 동해안에 급파되어 지진해일의 흔적을 조사하였다.⁽¹⁾ 지진해일 수치 시뮬레이션기법 역시 과거 18여년에 걸쳐 꾸준한 진전을 보이고 있다. 초기에 해안선의 수직벽가정에 의한 시뮬레이션 결과에 실제관측 월파고를 비례상수(월파비

(Runup Ratio)라 칭하기도 함)로서 관련짓는 형태는 컴퓨터의 발전에 따라 해안역의 세격자모형에 의해 직접 범람 시뮬레이션을 수행하는 형태로 발전되고 있다. 따라서, 연안역의 상세한 수심 및 지형(Micro-Topography)을 사용한 범람 시뮬레이션 결과로서 지진해일 위험재해도(Tsunami Hazard Map)의 작성과 재해경감에의 활용사업이 미국과 일본에서는 TIME 계획⁽²⁾, 지진해일 Hazard Map 사업으로 전개되고 있으며, 한국의 경우 역시 시작하는 단계에 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 서로 다른 유한 격자 체계의 모형(Multi-grid Dynamic Nesting Finite Difference Model)에 의한 동해 지진해일 산정과정⁽⁴⁾과 병행하여 유한요소모형(Finite Element Model)에 의한 지진해일 시뮬레이션을 새로이 시작하였는데 근년의 Beowulf 병렬계산을 통해 동해 전 영역의 정밀산정이 가능하게 되었으므로 이 방법을 적용한 지진해일 전파 시뮬레이션을 수행하였다.

¹⁾ 정희원·성균관대학교 토목환경공학과, 정교수

²⁾ 비회원·러시아과학원 응용물리연구소, 책임연구원

³⁾ 비회원·성균관대학교 토목환경공학과, 박사후과정

(대표저자: hongsj@skku.edu)

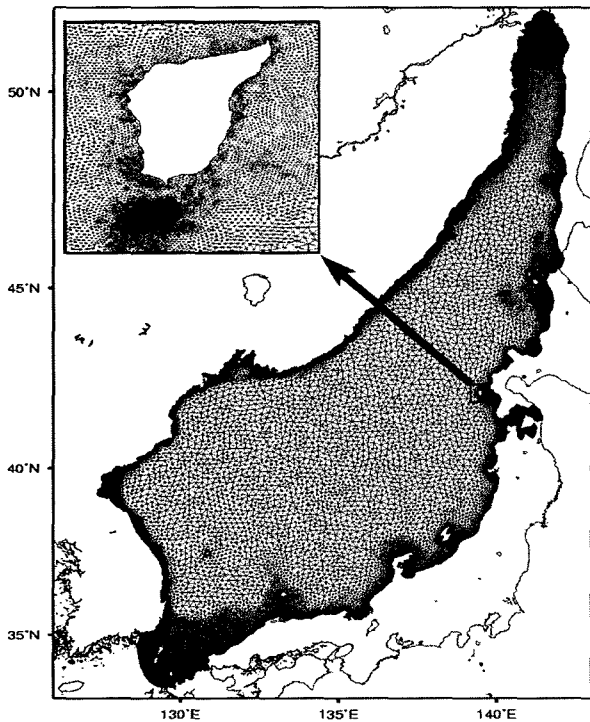
본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

2. 병렬 FEM 모형

2.1 모형 격자 형성

동해의 지진해일 FEM격자는 동해 전체를 Xmgredit⁽⁵⁾를 이용해서 만들고 지진해일 공백역 지역을 약 1분의 세밀한 격자로 만들어 김경옥⁽⁶⁾에 의해 개발된 Femeditor을 이용하여 동해 전체의 FEM격자와 병합하는 방법을 사용하였다. 진원지와 근접한 거리에 위치해 있는 오키시리섬에 대한

자세한 FEM격자(최소격자 200m) 또한 위와 같은 방법으로 격자를 생성하였다. 그림 1은 동해와 오키시리섬의 FEM 격자로서, 오키시리섬의 FEM격자는 절점수가 7100개, 요소수가 14105개이고, 오키시리섬의 격자가 삼입되어 만들어진 동해 전체의 FEM격자는 총절점수가 113793개, 총 요소수가 221202개로서 일본 서해안에 위치한 지진해일 공백역, 대화퇴 그리고 해안선 부근이 자세히 해상된 격자이다.

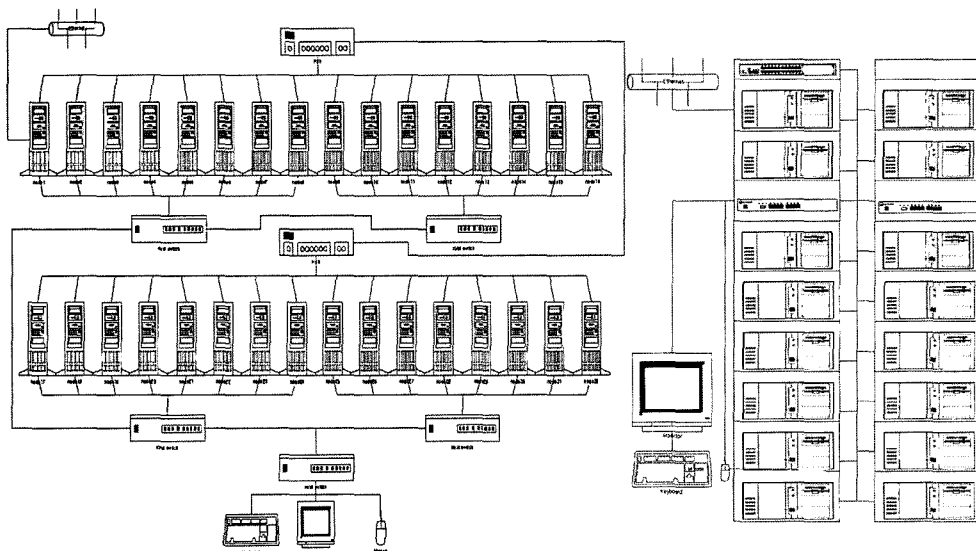


〈그림 1〉 FEM mesh of the East Sea and the Okushiri island.

2.2 병렬 ADCIRC 모형

본 연구에서 사용된 FEM모형인 ADCIRC모형은 지난 20여년에 걸쳐 개발된 2, 3차원 동수역학적 모형이고, 병렬화는 텍사스대학의 Mary Wheeler교수의 그룹⁽⁷⁾이 만든 코드로서 현재는 수질, 생태모형과도 병렬연계하는 연구가 활발히 진행중에 있다. ADCIRC모형에 관해서는 여러 문헌⁽⁸⁻¹⁰⁾에 자세히 언급되어 있으므로 본 논문에서는 재언급하지 않기로 한다.

성균관대학교 토목환경공학과와 해안해양공학 연구실의 64개의 CPU로 구성된 Beowulf 체계(그림 2)를 사용하였으며, 그림 3은 동해 전체를 우선 실험적으로 8개의 구역으로 분할(Domain Partition)한 각각의 격자영역을 나타낸다. 실제로 영역분할은 Metis 및 HSFC(Hibert Space Filling Curve) 기법에 의해 수행될 수 있는데 Metis 기법은 spectral partitioning 방법보다 영역분할 및 속도가 빠르며 행렬처리 및 저장에서 우월한 방법으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾



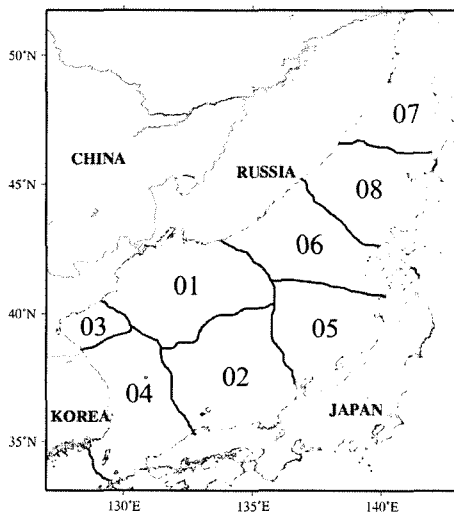
〈그림 2〉 Linux-based parallel clustering computer system (Beowulf system).

3. 초기파형

지진해일의 초기해수면형상은 파형의 형성이 장파의 유속보다 빠른 플레이트의 수직변위 속도에 의한 수직변위의 움직임과 같다고 가정하여 지진동에 의한 해저면 파괴를 3차원 공간상에 재현하는 Manshinha and Smylie⁽¹²⁾에 의해 제시된 방법을 사용하여 결정하였으며, 수심은 최병호 등⁽¹³⁾에 의해 작성된 1분 격자 수심체계를 사용하였다. 1993년 지진해일에 대한 초기수면 산정을 위해 사용된 지진단층파라메타는 Takahashi et al.⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 계수를 사용하였으며 이를 표 1에 제시하였다. Manshinha and Smylie⁽¹²⁾의 방법에 의해 해저지진의 초기수면 변위를 기존 FDM 모형에서 산정하고 이 격자점 자료(structured data)를 FEM 모형에서 사용되는 격자자료(unstructured data)로 변환시켜서 모형 시뮬레이션의 초기조건으로 취했으며, 그림 4는 1993년 지진해일에 대한 초기해수면형상을 나타내는 것으로 초기최대파고는 약 5.5m로 산정된 것을 알 수 있다.

4. 수치시뮬레이션

그림 5는 병렬 ADCIRC 모형(unstructured data)에 의한 시간별 지진해일 전파형상을 보여주고 있으며, 그림 6은 우



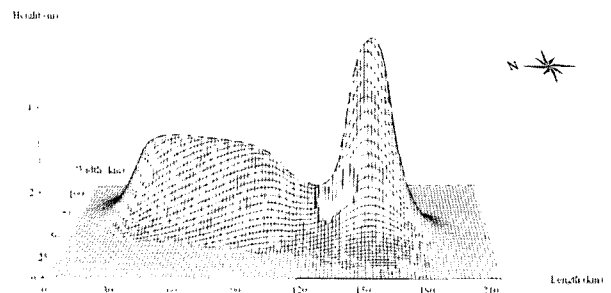
〈그림 3〉 Domain decomposition by Metis (Grid Partition Method) for the modeled region.

리나라 동해안에서 계산된 지진해일 최대파고와 관측값과의 비교를 보여주고 있다. 우리나라 동해안에서 가장 큰 지진해일파고가 관측된 부구지역에서 산정된 최대파고는 1.0m로서 이는 실제 관측치(2.57m; 한국지진해일조사단⁽¹⁾, 1994)와 큰 차이를 보이고 있으나, 월파비(runup ratio : 2.0)를 적용한 파고분포는 그림 6(b)에서 확인 할 수 있듯이 관측된 동해안에서의 파고 분포와 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

5. 해안에서의 지진해일파고의 통계적 분포

5.1 지진해일 파고분포

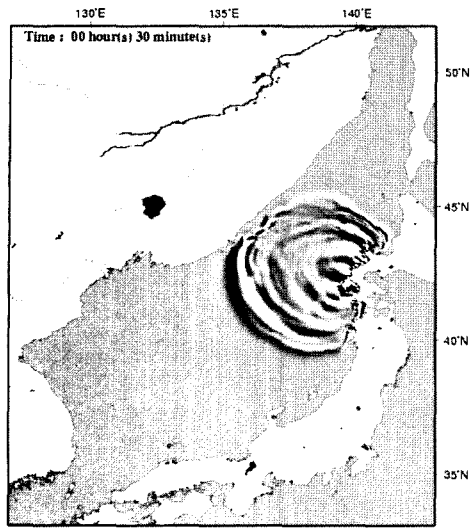
지진해일 파고(최대 지진해일고)의 공간적 분포를 제시하기 위하여 우리나라 동해안 뿐만 아니라 일본 서해안에서의 지진해일 파고분포를 분석하였다. 각 지역에서 최대 지진해일고를 추출하였으며, 추출한 최대 지진해일고의 공간적인 분포를 관측치^(1,15)와 함께 그림 7과 8에 제시하였다. 그림 7에서 계산 결과 값들은 실제 관측치와의 비교를 통하여 공간적인 분포경향을 알기 위해 임의의 월파비율(runup ratio=2.0) 곱하여 표현한 값이다. 이를 통하여, 1993년 지진해일의 경우, 우리나라 동해안 특히 부구지역에서 높은 지진해일고가 산정되는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 파향선추적모형을 이용하여 동해에서의 지진해일 에너지전파에 대한 연구를 한 최병호 등⁽¹⁶⁾의 결과와도 동일한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 한반도 남부에서는 지진해일고가 낮게 산정되었으며, 이는 1993년 지진해일시에 포항의 김조소에서 기록된 경미한 해일고 관측치



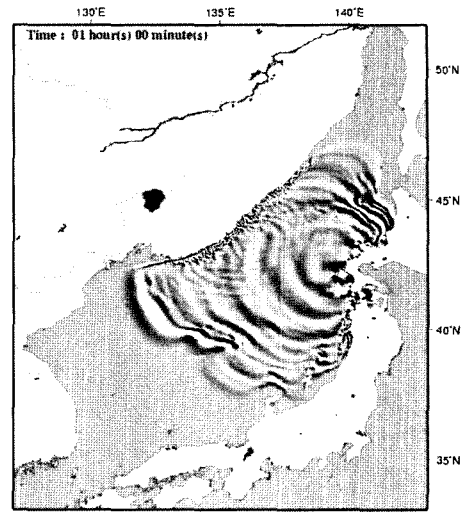
〈그림 4〉 Initial free surface profile of 1993 Tsunami.

〈표 1〉 Fault parameters of the 1993 Hokkaido earthquake (Takahashi et al.⁽¹⁴⁾)

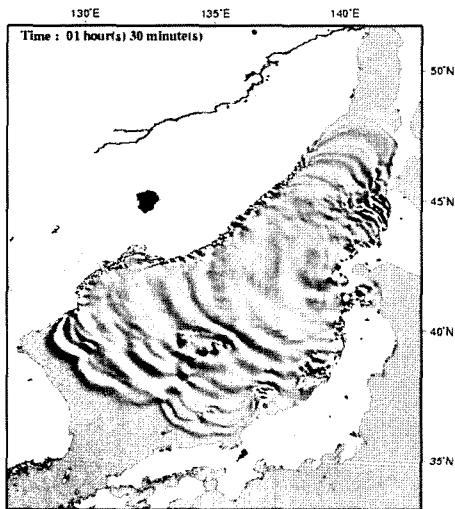
Latitude (°N)	Longitude (°E)	H (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L (km)	W (km)	U (cm)
42.10	139.30	5	163	60	105	24.5	25	1200
42.34	139.25	5	175	60	105	30	25	250
43.13	139.40	10	188	35	80	90	25	571



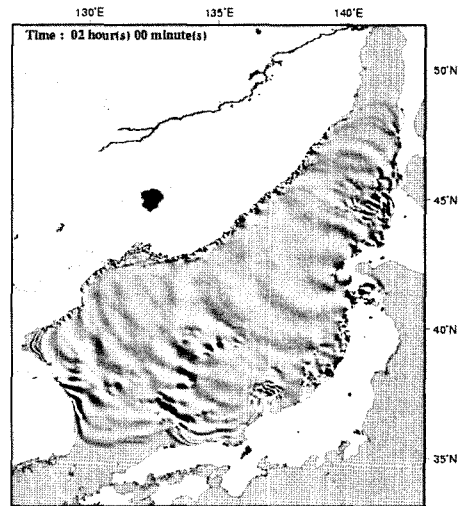
(a) 00 Hour 30 Minute



(b) 01 Hour 00 Minute

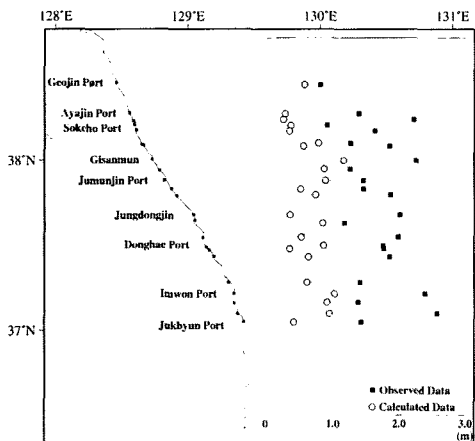


(c) 01 Hour 30 Minute

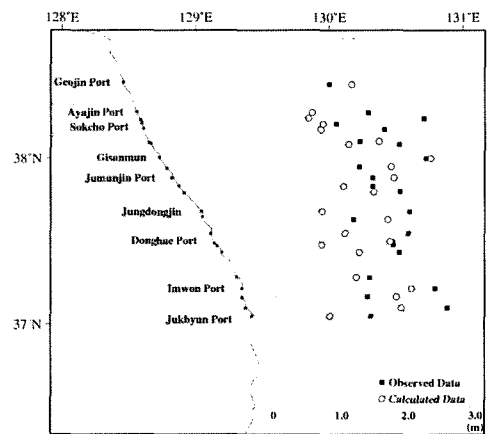


(d) 02 Hour 00 Minute

〈그림 5〉 Snapshots of computed sea elevation for tsunami using FEM model on the 1993 tsunami.

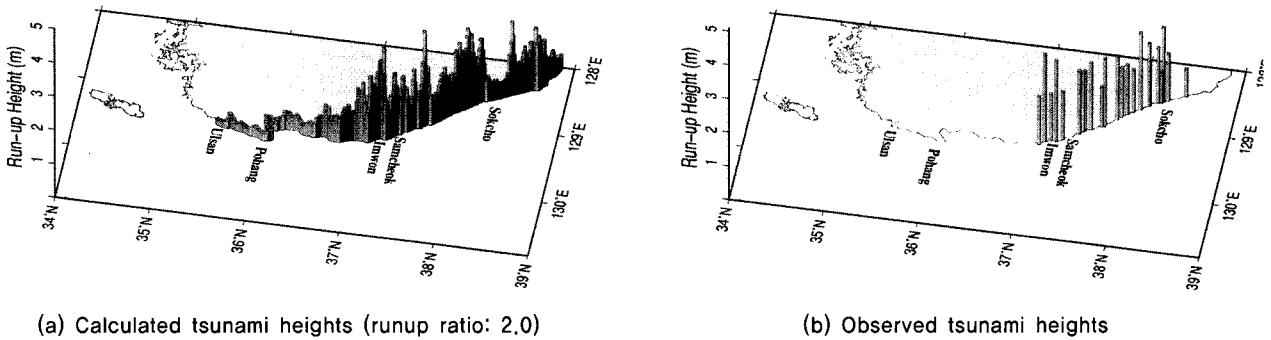


(a) runup ratio : 1.0

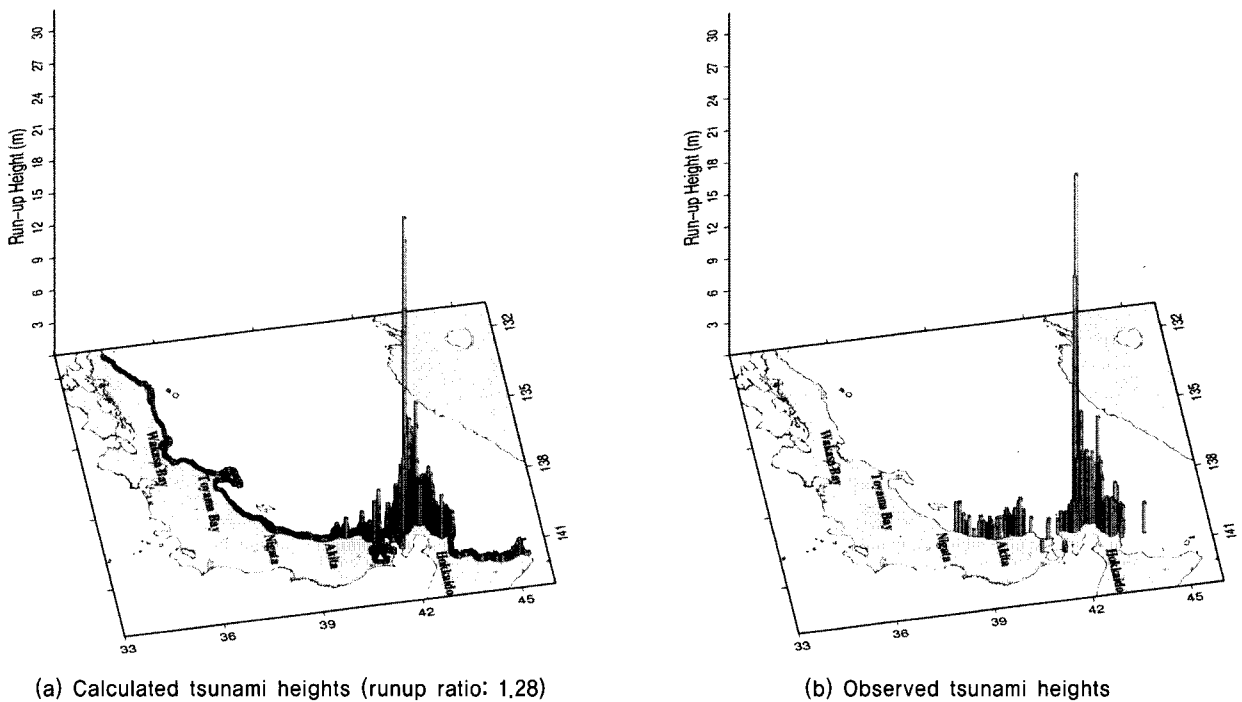


(b) runup ratio : 2.0

〈그림 6〉 Comparison of tsunami heights of ADCIRC models with measured data.



〈그림 7〉 Comparison between measured and calculated data by ADCIRC model in eastern coast of Korea.



〈그림 8〉 Comparison between measured and calculated data by ADCIRC model in western coast of Japan.

가 이를 증명한다.⁽¹⁶⁾

그림 8에서는 일본 서해안에서 산정된 파고들은 실제 관측치와의 비교를 통하여 공간적인 분포경향을 알기 위해 임의의 월파비율(runup ratio=1.28) 곱하여 표현한 값이다. 지진해일 진원지가 일본 서해안에 근접하여 위치하였기 때문에 일본서해안 특히, 북해도 지역과 혼슈 북측해안에서 큰 지진해일파고가 산정된 것을 볼 수 있었으나, 그 중 토야마만과 와카사만은 상대적으로 파고가 작게 산정되는 지역이며, 모두 만이라는 지형적 특성을 가지기 때문이라 생각된다.

5.2 이론적인 통계모형

Van Dorn⁽¹⁷⁾는 1946년과 1957년의 지진해일에 의해 하와이 해안에서 관측된 지진해일파고 관측 값들을 이용하여 지진해일파고의 누적분포함수에 대한 연구를 하였다. 그 연구에

서는 지진해일파고의 공간적인 분포가 대수정규분포(log-normal distribution)에 의해 설명되는 것이 확인되었다.

$$fH = \frac{1}{H\sigma\sqrt{2\pi}\ln 10} \exp\left(-\frac{(\log H - a)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

여기서, H 는 관측된 지진해일파고(해안을 따라 각 지점 별 최대값), a 는 대수파고($\log H$)의 평균값이며, σ 는 대수파고의 표준편차이다. 이는 지진해일파고의 실제분포가 단 2개의 매개변수(a, σ)로 설명되는 특성을 보여주고 있다.

이와 유사한 연구는 1896, 1933, 1946, 1960, 1964 그리고 1968에 발생하였던 지진해일에 대한 일본해안(산리쿠해안 중심)에서의 지진해일파고분포 연구가 Kajiura⁽¹⁸⁾에 의해 이루어 졌으며, 이와 동일한 해석은 1896과 1981사이의 지진해일에 대한 일본과 쿠릴열도의 해안에 대해서도 Go^(19,20)에 의해 수행되었다. 이 이론은 평균적으로 지진해일파고의

공간적인 분포가 대수정규분포 식 (1)에 의해 잘 표현되는 것을 확인하였다.

지진해일파고의 대수정규분포의 이론적 설명은 Go^(19,20)에 제시되어 있다. 이 개념은 해안을 따른 지진해일파고변화는 해안역에서의 해저지형의 특수성에 의해 결정된다는 가정에 기초를 두고 있다. 지진해일파고(H)는 식 (2)와 같이 지진해일 진원지에서의 초기파고(H_0)의 일정비율로써 나타낼 수 있다.

$$H = kH_0 \tag{2}$$

여기서, k 는 전파경로에 따른 수심변화에 의한 변형계수이다 (단순화된 해석에서, 지진해일파의 비선형성과 분산성과 같은 효과는 무시하였다). 만약 전파경로를 독립적인 구역들로 나눈다면, 지진해일변형요소는 각각의 구역에서의 지진해일전파에 대한 지역적 요소들에 의한 결과이다. 이 경우, 식 (2)는 대수함수로서 제시될 수 있다.

$$\log H = \log H_0 + \sum_i \log K_i \tag{3}$$

여기서, i 는 전파경로를 따른 구역들의 개수이다. 지진해일의 초기수면변위(H_0)는 지진해일 진원지로부터 100km의 단위길이로 매끄럽게 변화한다. 다른 한편으로는 파변형계수는 해안역에서 각기 다른 해안저면의 특성에 따라 두드러지게 변화한다. 중심극한정리(Central Limit Theorem)는 불규칙한 변수들의 합은 가우스과정(Gaussian Process)을 따르는 경향이 있다는 것을 말한다. 결과적으로, 식 (1)에 의해 지진해일파고는 대수정규분포 식 (3)을 따른다는 것을 알 수 있다.

다른 모형⁽²¹⁾은 지진해일 진원지로부터의 지진해일 전파에 의한 파에너지의 전개로서 기하학적인 요소를 중요하게 고려한다. 만약 일정한 변화를 갖는 원형 근원지와 직선의 해안선에 의해 제한된 일정한 수심의 구역에서의 기본적인 실험을 고려한다면, 아래의 관계식과 같은 예와 같이 파고는 거리에 따라 감소할 것이라는 것을 알 수 있다.

$$H = H_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^\alpha \tag{4}$$

여기서, R_0 는 지진해일진원의 유효한 반지름이며 α 는 비선형성, 분산과 소산에 의한 감소계수이다 (선형천수이론에서는 기본적으로 α 는 1/2). 파고의 분포밀도함수는 식 (5)와 같이 지진해일흔적이 있는 해안선의 총길이와 지진해일파고가 관측된 해안선길이의 비율이다.

$$f = \frac{1}{\alpha H} \left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{2/\alpha} \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{H_{\max}}{H_{\min}} \right)^{2/\alpha} - 1 \right] \left[\left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{2/\alpha} - 1 \right]}} \tag{5}$$

여기서, H_{\max} 와 H_{\min} 는 각각 관측된 파고의 최대값과 최소값이다. 지진해일이 충분히 큰 경우($H_{\max} \gg H_{\min}$)에는 식 (5)는 파고의 기하학적 분포의 제공식을 따른다.

$$f = \frac{1}{\alpha H} \left(\frac{H_{\max}}{H} \right)^{1/\alpha} \tag{6}$$

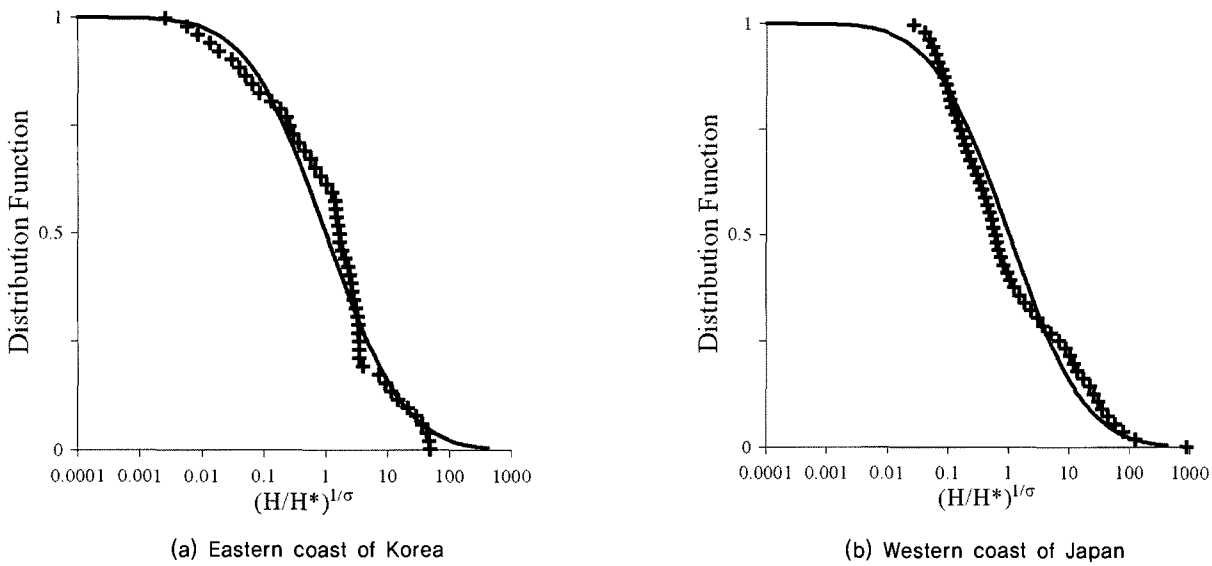
식 (6)은 8m 이상의 파고가 관측된 알라스카(1964년)와 페루(1877년)의 지진해일분포의 해석을 위해 사용되었다.

지진해일파고의 관측이 이루어진 근해 해안에서는 일반적으로 기하학적인 요소가 수심의 변화성과 해안선의 불규칙성보다 더 작은 역할을 한다. 그러므로 파고분포의 대수정규분포식이 해안에서의 지진해일파고분포를 더 잘 표현하는 것을 알 수 있다.

이론적인 관점으로부터, 극치해석 방법은 파괴적인 지진해일의 해석에 적용될 수 있다. 특히, 포아송분포 (Poisson Distribution)는 이러한 문제에 유용하다. 이 통계적 접근은 1993년 지진해일에 의한 우리나라 동해안에서 지진해일을 해석하기 위해 사용되었다.⁽¹⁾

5.3 1993년 지진해일파고의 통계적 분포

5.2에서 언급한 바와 같이 불규칙적인 해저지형에 의해 해안에서의 지진해일고의 밀도분포함수는 대수정규분포를 따른다는 것을 확인 할 수 있었으며^(17,22), 1993년 지진해일에 대한 우리나라 동해안에서의 관측치의 통계적 분포 또한 전반적으로 대수정규분포를 따른다는 것이 Choi et al.⁽²³⁾에 의해 증명되었다. 이에 본 연구에서는 FEM 모형에 의해 산정된 결과값들의 통계적 분포를 산정하였다(그림 9). 우리나라 동해안과 일본 서해안에서의 산정된 결과값들은 대수정규분포를 비교적 잘 따르는 것으로 보여진다. 동해안의 지진해일분포가 대수정규분포를 따른다함은 동해안을 따른 지진해일파고변화는 해안역에서의 해저지형의 특수성에 의해 결정된다는 의미를 갖는 것이며, 이는 일본 서해안에서 발생 가능한 지진해일에 대한 우리나라 동해안에서의 지진해일고의 특성이 해안의 해저지형의 특성에 따라 파고분포가 이루어지므로 과거 지진해일고가 높게 관측된 지역에서는 추후 발생가능한 지진해일에 대한 지진해일고 또한 높게 예측될 수 있음을 보여주고 있다. 그러나, 불균질성 매질(해수)에서의 장파의 전파거동이론과 해저수심의 규칙적 또는



〈그림 9〉 Distribution of calculated tsunami heights by ADCIRC model.

불규칙적 성분의 비선형적 중첩과의 상관성에 대한 연구는 과거에 철저히 분석되지 못하였고 앞으로 충분히 검토되어야 할 과제인 것으로 보여진다.

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 병렬FEM모형(ADCIRC)을 이용하여 1993년 지진해일에 대한 수치시뮬레이션을 수행함으로써 지진해일에 대한 병렬FEM모형의 적용성에 대한 검증은 하였다. 한편, 동해에서 발생하는 지진해일파는 조석에 비해 파장이 매우 짧아 상대적으로 분산항이 강하므로 먼 거리를 전파해 오는 경우에는 파의 분산성을 고려하여 해석되어야 한다는 문제점이 부각되었으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 윤성범 등⁽²⁴⁾은 ADCIRC 유한요소모형의 분산특성을 분석하였으며, 이를 통하여 물리적 분산항을 수치분산항으로 대체 할 수 있는 결과를 얻었으나, 수치적 기법으로 사용되는 음해법에 의해 많은 계산시간과 순수 양해법에 의한 실제 지형의 적용에서의 문제점이 대두되었다. 또한, 궁극적으로 입의 크기로 구성된 유한요소격자를 사용하면서도 순수 양해법을 사용하여 물리적인 분산효과를 적절히 고려할 수 있는 병렬처리용 유한요소모형을 개발하기 위한 연구가 필요하며, 그 일환으로 윤성범 등⁽²⁵⁾은 양해법을 이용한 일차원 지진해일전파 유한요소모형의 분산보정에 대한 연구를 하였으며, 2차원 확정을 진행 중에 있다. 이러한 일련의 연구들을 통하여 추후에 분산성이 고려된 병렬FEM모형을 구성함으로써 연안에서의 좀 더 세밀한 격자체계 및 동해에서의 분산성이 고려된 범람 시뮬레이션이 가능해질 것이라 생각된다. 그러나 현재의 시뮬레이션에서도 분석과정이 철저하

게 고려되지 못했음에도 연안파고가 과소추정되는 문제점에 대한 해결을 위해서는 더 철저한 고찰이 요구된다.

지진해일 파고(최대 지진해일고)의 공간적 분포를 제시하기 위하여 우리나라 동해안과 일본 서해안에 대한 각 지역별 최대 지진해일고의 공간적인 분포를 제시하였다. 또한 지진해일파고의 통계적 분포를 알아보기 위해 지진해일파고의 대수정규분포이론을 이용하여 각 지역별 지진해일 분포도를 제시하였고, 이를 통하여 불규칙적인 해저지형에 의해 해안에서의 지진해일고의 밀도분포함수는 대수정규분포를 따른다는 것을 확인 할 수 있었으며, 또한 각 지역별 지진해일 분포도가 대수정규분포를 따르고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지원 한국지진공학센터의 지원사업으로 수행된 바 이에 사의를 표한다.

참고문헌

1. 한국지진해일 조사단, “일본 북해도 남서부 지진에 의한 한국 동해안 지진조사”, 한국해양해양공학회지, 제6권, 제1호, 1994, pp. 117-125.
2. PMEL, *National tsunami hazard mitigation program TIME (Tsunami Inundation Mapping Efforts)*, <http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/time>, 2005.
3. 행정자치부, “해안재해의 피해조사방법과 범람도제작 및 자료 기반화 지침작성용역”, 보고서, 행정자치부, 서울, 1999, 312pp.
4. 최병호, 홍성진, 이재신, “공백역 지진에 의한 동해안의 지진해일 산정”, 한국지진공학회논문집, 제6권, 제3호, 2002, pp. 73-86.

5. Turner, P.J. and Baptista, A.M., *ACE/gredit Online Documentation*, <http://www.ccalmr.ogi.edu/CORIE/software/ace/docs/gredit>, 2005.
6. 김경옥, "유한요소모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석산정", 석사학위논문, 성균관대학교, 2000, 200pp.
7. Chippada, S., Dawson, C.N., Martinez, M. and Wheeler, M.F., "Parallel computing for finite element models of surface water flow," *Computational Methods in Water Resources XI*, Computational Mechanics Publications, Southampton, U. K., 1996, pp. 63-70.
8. Luettich, R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W., "ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries," *Tech. Report 1*, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 1991. 20314-1000.
9. Westerink, J.J., Luettich, R.A. and Muccino, J.C., "Modeling tides in the western North Atlantic using unstructured graded grids," *Tellus*, Vol. 4, NO. 6A, 1994, pp. 178-199.
10. Kolar, R.L., Westerink, J.J., Canterkin, M.E. and Blain, C.A., "Aspects of nonlinear simulations using shallow-water models based on the wave continuity equation," *Computers Fluids*, Vol. 23, 1994, pp. 523-538.
11. Karypis, G. and Kumar, V., "A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs," *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, 1998, pp. 359-392.
12. Mansinha, L. and Smylie, D.E., "The displacement fields of inclined faults," *Bull. of Amer. Seism. Soc.*, Vol. 61, No. 5, 1971, pp. 1433-1440.
13. 최병호, 김경옥, 엄현민, "한국근해의 디지털 수심표고 데이터베이스", 한국해양해양공학회지, 제14권, 제1호, 2002, pp. 41-50.
14. Takahashi, T., Shuto, N., Imamura, F. and Ortis, M. "Fault model for a tsunami due to the 1993 southwest of the Hokkaido earthquake," *Proc. Coastal Eng. Japan*, Vol. 41, 1994, pp. 251-255.
15. Shuto, N., "Tsunami Engineering Technical Report," *Disaster Control Research Center*, Tohoku University, Vol. 11, No. 2, 1994. pp. 1-120.
16. 최병호, 에픽 페리놉스키, 이제신, 우성범, "공백역 지진에 의한 동해에 연한 해안에서의 지진해일 위험도 산정", 한국지진공학회논문집, 제6권, 제5호, 2002, pp. 1-17.
17. Van Dorn, W.G., "Tsunamis," *Advances in Hydrosience*, Ed. V.T. Chow. Acad. Press, London, Vol. 2, 1965, pp. 1-48.
18. Kajiura, K., "Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan," *Tsunamis-Their Science and Engineering*. Terra Pub., Tokyo, 1983, pp. 131-145.
19. Go, Ch.N., *Statistical properties of tsunami runup heights at the coast of Kuril Island and Japan*, Institute of Marine Geology and Geophysics, Sakhalin, Preprint.1987.
20. Go, Ch.N., "Statistical distribution of the tsunami heights along the coast," *Tsunami and accompanied phenomena, Sakhalin*, Vol. 7, 1997, pp. 73-79.
21. Mazova, R., Pelinovsky, E. and Poplavsky, A., "Physical interpretation of tsunami height repeatability law," *Volcanology and Seismology*, Vol. 8, No. 1, 1989, pp. 94-101.
22. Choi, B.H., Pelinovsky, E., Ryabov, I. and Hong, S.J., "Distribution functions of tsunami wave heights," *Natural Hazards*, Vol. 25, 2002, pp. 1-21.
23. Choi, B.H., Pelinovsky, E., Hong, S.J. and Woo, S.B., "Computation of tsunamis in the East (Japan) Sea using dynamically interfaced nested model," *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, No. 8, 2003, pp. 1383-1414.
24. 윤성범, 임채호, 윤기승, 최병호, "지진해일 전파수치모의를 위한 ADCIRC 유한요소모형의 일차원분산특성 분석", 한국해양해양공학회지, 제15권, 제2호, 2003, pp. 108-115.
25. 윤성범, 임채호, 윤기승, 최병호, "양해법을 이용한 일차원 지진해일전파 유한요소모형의 분산보정", 한국해양해양공학회지, 제16권, 제2호, 2004, pp. 57-63.

부 록 (APPENDIX)

1993년 지진해일에 대한 일본 서해안에서의 관측치를 보고서(Shuto, 1994)로부터 추출하여 향후의 동해지진해일 시뮬레이션모형의 개선을 위한 기초자료로서 정량적으로 도표화시켰다.

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
1	43.2744	140.6361	1.07
2	43.3028	140.6014	1.57
3	43.3653	140.4653	2.47
4	43.3542	140.4597	2.56
5	43.3322	140.4492	2.30
6	43.3319	140.3958	1.70
7	43.3319	140.3778	1.76
8	43.2917	140.3486	2.60
9	43.2167	140.3283	1.95
10	43.1958	140.3464	4.20
11	43.1408	140.4297	4.46
12	43.1236	140.4453	4.79
13	43.1022	140.4619	3.07
14	43.0433	140.5031	2.62
15	43.0433	140.5031	3.04
16	43.0275	140.5281	2.52
17	43.9964	140.5267	2.78
18	42.9950	140.5307	3.56
19	42.9872	140.5183	2.27
20	42.9715	140.4924	3.33
21	42.8794	143.5483	2.43
22	42.8767	140.3628	3.35
23	42.8239	140.3093	2.81
24	42.8257	140.3053	2.73
25	42.7665	140.2553	1.81
26	42.7950	140.2344	2.47
27	42.7833	140.1550	4.65
28	42.7667	140.1507	4.92
29	42.7500	140.1407	2.41
30	42.7428	140.1160	6.17
31	42.7403	140.1131	4.79
32	42.7358	140.1038	3.99
33	42.7322	140.0878	4.85
34	42.7299	140.0847	5.78
35	42.7050	140.0642	5.18
36	42.6858	140.0367	6.46
37	42.6875	140.0147	4.03
38	42.6883	139.9989	3.90
39	42.6856	139.9850	10.05
40	42.6856	139.9894	4.61

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
41	42.6709	139.8840	3.69
42	42.5953	139.8317	5.41
43	42.5256	139.8489	6.58
44	42.4583	139.8500	6.09
45	42.4559	139.8483	4.64
46	42.4547	139.8459	2.30
47	42.3803	139.8194	5.85
48	42.3803	139.8194	5.51
49	42.3781	139.8206	5.94
50	42.3731	139.8175	6.70
51	42.2619	139.7878	6.56
52	42.2197	139.8636	4.94
53	42.2188	139.8633	4.88
54	42.2188	139.8633	4.62
55	42.2200	139.8653	6.10
56	42.2064	139.8842	6.67
57	42.2064	139.8842	6.36
58	42.2064	139.8842	6.03
59	42.1325	139.9314	2.24
60	42.1281	139.9767	2.00
61	42.1281	139.9767	2.43
62	42.0658	140.0683	1.78
63	42.0447	140.0858	1.43
64	41.9664	140.1342	1.96
65	41.9103	140.1439	2.89
66	41.8689	140.1325	1.94
67	41.8669	140.1300	2.64
68	41.8681	140.1236	2.64
69	41.8664	140.1253	2.26
70	41.8664	140.1253	2.53
71	41.8678	140.1236	2.85
72	41.8286	140.1275	2.45
73	41.8036	140.1153	2.43
74	41.7944	140.0767	2.21
75	41.7047	140.0278	1.63
76	41.6483	140.0056	1.56
77	41.5975	139.9864	1.12
78	41.5375	140.0019	1.65
79	41.4517	140.0389	1.13
80	41.4250	140.1064	1.18

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
81	42.2165	139.5624	3.60
82	42.2306	139.5633	6.83
83	42.2331	139.5633	6.78
84	42.2363	139.5633	5.16
85	42.2406	139.5639	4.67
86	42.2434	139.5626	7.28
87	42.2453	139.5601	5.17
88	42.2432	139.5592	6.26
89	42.2414	139.5584	8.30
90	42.2397	139.5563	8.81
91	42.2382	139.5556	8.04
92	42.2369	139.5540	6.83
93	42.2372	139.5536	7.35
94	42.2358	139.5546	8.62
95	42.2350	139.5531	9.79
96	42.2344	139.5520	9.69
97	42.2379	139.5481	9.72
98	42.2338	139.5497	9.76
99	42.2349	139.5487	6.92
100	42.2343	139.5470	5.74
101	42.2338	139.5448	5.68
102	42.2330	139.5436	7.01
103	42.2317	139.5426	6.40
104	42.2309	139.5405	6.99
105	42.2305	139.5408	7.79
106	42.2305	139.5416	9.12
107	42.2294	139.5395	8.97
108	42.2305	139.5385	8.49
109	42.2303	139.5356	7.42
110	42.2314	139.5331	5.78
111	42.2317	139.5289	5.41
112	42.2289	139.5261	5.67
113	42.2325	139.5231	6.83
114	42.2225	139.4975	5.69
115	42.2144	139.4425	5.91
116	42.2111	139.4364	5.79
117	42.1989	139.4258	4.94
118	42.1972	139.4267	6.53
119	42.1961	139.4258	5.95
120	42.1836	139.4172	7.40
121	42.1725	139.4128	5.78
122	42.1692	139.4139	6.32
123	42.1503	139.4172	6.41
124	42.1428	139.4253	7.75
125	42.1358	139.4253	10.85
126	42.1275	139.4261	12.22
127	42.1175	139.4228	17.67
128	42.1103	139.4231	25.31
129	42.1103	139.4231	23.19

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
130	42.1103	139.4231	23.28
131	42.1103	139.4231	31.70
132	42.1089	139.4231	15.88
133	42.1067	139.4258	13.74
134	42.1075	139.4247	14.01
135	42.1050	139.4286	16.19
136	42.0978	139.4281	13.95
137	42.0894	139.4267	19.25
138	42.0794	139.4289	21.80
139	42.0767	139.4258	13.62
140	42.0694	139.4297	22.21
141	42.0681	139.4325	15.49
142	42.0661	139.4367	12.35
143	42.0631	139.4442	8.95
144	42.0619	139.4483	11.35
145	42.0583	139.4486	10.67
146	42.0561	139.4500	15.36
147	42.0558	139.4514	11.90
148	42.0547	139.4508	9.79
149	42.0535	139.4532	6.72
150	42.0556	139.4528	5.33
151	42.0552	139.4527	5.64
152	42.0563	139.4526	4.77
153	42.0597	139.4514	5.64
154	42.0603	139.4514	7.45
155	42.0589	139.4531	4.30
156	42.0608	139.4511	9.45
157	42.0622	139.4522	8.04
158	42.0625	139.4533	6.19
159	42.0627	139.4569	8.60
160	42.0631	139.4531	8.64
161	42.0636	139.4536	10.06
162	42.0647	139.4528	6.87
163	42.0651	139.4576	6.50
164	42.0672	139.4592	4.45
165	42.0681	139.4622	9.75
166	42.0713	139.4664	11.30
167	42.0692	139.4673	7.06
168	42.0683	139.4653	10.27
169	42.0706	139.4744	11.64
170	42.0697	139.4765	10.71
171	42.0698	139.4773	11.31
172	42.0694	139.4796	10.84
173	42.0697	139.4792	16.18
174	42.0694	139.4792	15.84
175	42.0697	139.4794	18.70
176	42.0694	139.4814	19.21
177	42.0699	139.4837	13.60
178	42.0717	139.4856	12.34

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
179	42.0719	139.4881	8.37
180	42.0761	139.4908	6.86
181	42.0769	139.4922	3.81
182	42.0792	139.4931	5.05
183	42.1058	139.5061	5.00
184	42.1208	139.5167	5.36
185	42.1258	139.5314	5.24
186	42.1268	139.5178	3.87
187	42.1294	139.5192	3.73
188	42.1347	139.5221	3.14
189	42.1414	139.5221	4.25
190	42.1464	139.5230	3.94
191	42.1603	139.5197	3.34
192	42.1596	139.5181	3.06
193	42.1703	139.5197	2.25
194	42.1634	139.5201	-
195	42.1744	139.5215	4.06
196	42.1808	139.5231	7.58
197	42.1821	139.5234	5.85
198	42.1852	139.5266	6.45
199	42.1897	139.5294	5.71
200	42.1919	139.5347	6.00
201	42.1864	139.5376	4.68
202	42.2000	139.5450	3.03
203	42.2076	139.5533	1.40
204	42.2086	139.5533	3.48
205	42.2179	139.5571	3.85
206	41.5444	140.9175	0.40
207	41.5267	140.9022	0.75
208	41.4933	140.9075	0.85
209	40.8300	140.8308	1.01
210	41.1325	140.2942	1.85
211	41.0950	140.3153	1.62
212	40.6473	139.9258	1.35
213	40.4125	139.9511	2.17
214	40.3942	139.9836	2.00
215	40.3781	140.0025	1.62
216	40.3350	140.0294	1.72
217	40.3178	140.0281	2.39
218	40.3006	140.0264	3.47
219	40.2650	140.0158	2.77
220	40.2408	140.0133	3.11
221	40.1775	139.9967	1.73

Number	Position		Height(m)
	Latitude (°N)	Longitude (°E)	
222	40.1489	139.9869	2.46
223	40.1261	139.9781	2.17
224	40.0906	139.9603	1.57
225	40.0564	139.9406	1.63
226	39.9944	139.8856	1.74
227	39.9806	139.8694	1.45
228	39.9600	139.8261	1.07
229	39.9583	139.7897	1.35
230	39.9800	139.7361	1.60
231	39.9983	139.7108	1.13
232	39.9428	139.7097	1.95
233	39.9075	139.7339	1.78
234	39.9097	139.7278	1.36
235	39.8619	139.7564	1.42
236	39.8667	139.8372	1.10
237	39.8347	140.0178	1.81
238	39.6686	140.0658	2.05
239	39.6250	140.0658	1.43
240	39.5753	140.0611	2.01
241	39.5389	140.0553	1.18
242	39.4850	140.0458	1.32
243	39.4175	140.0292	1.70
244	39.3869	140.0175	1.45
245	39.3700	140.0139	2.03
246	39.3489	140.0047	1.47
247	39.5025	140.0442	1.20
248	39.3067	139.9817	1.43
249	39.2900	139.9631	1.18
250	39.2900	139.9631	1.18
251	39.2006	139.9006	1.49
252	39.1228	139.8808	1.96
253	39.0681	139.8756	1.38
254	38.9186	139.8286	0.73
255	38.7686	139.7431	0.97
256	38.7822	139.7569	1.83
257	38.7219	139.6950	0.85
258	38.7147	139.6850	1.17
259	38.6436	139.6008	1.73
260	38.5558	139.5467	0.91
261	38.5358	139.5503	2.78
262	38.5358	139.5503	2.57
263	38.4347	139.4864	2.23
264	38.4347	139.4864	2.61