

# 추계학적 관점에서 바라본 지진해일



**김 동 균** |  
 홍익대학교 토목공학과 교수  
 kim.dongkyun@hongik.ac.kr

## 1. 무작위과정과 중앙극한이론

미국 유학시절, 아장아장 걸음마를 막 시작하려는 딸 아이를 데리고 미국 텍사스 주에 있는 어린이 박물관을 방문한 나는 아주 재미있는 기구를 발견하였다. 이 기구는 내가 아주 어렸을 때 몇 시간이고 가지고 놀았던 “구슬 야구 장난감”이라는 것을 크게 확대한 것인데 그 구조는 그림 1과 같다. 장난감의 가장 위에서 구슬을 던지면 이 구슬은 그림 속의 화살표처럼 바로 아래에 위치한 플라스틱 못에 튕겨 왼쪽 아니면 오른쪽으로 내려간다. 이 과정은 구슬이 가장 아래에 있는 보관통 (구슬 야구 장난감에서는 1루타, 2루타, 아웃, 파울, 홈런을 결정하는)에 담길 때까지 반복된다. 박물관에 있었던 이 기구는 자동으로 구슬을 위에서 아래로 무수히 떨어뜨렸고, 보관통에 담긴 구슬들은 그림 1과 같이 종 모양 (Bell Shape)을 이루고 있었다. 구슬들이 이러한 종 모양을 가지게 되는 이유는 구슬들이 플라스

틱 못을 맞고 왼쪽 혹은 오른쪽으로 튕겨나갈 확률이 동일하므로, 이 과정이 반복되면서 구슬이 왼쪽 혹은 오른쪽 한쪽 만으로 계속해서 튕겨 내려갈 확률보다는, 왼쪽과 오른쪽으로 골고루 튕겨 내려갈 확률이 더 크므로 결국은 가운데에 위치한 구슬 보관통에 보다 많은 구슬들이 담기게 되기 때문이다.

주사위 던지기, 동전 던지기 등, 독립적인 무작위과정을 반복하여 나온 값들의 평균 (혹은 합)이 종모양의 정상분포를 따른다는 이 이론을 중앙극한정리 (Central Limit Theorem)라 부른다. 중앙극한정리는 자연현상을 모의 하는 데에

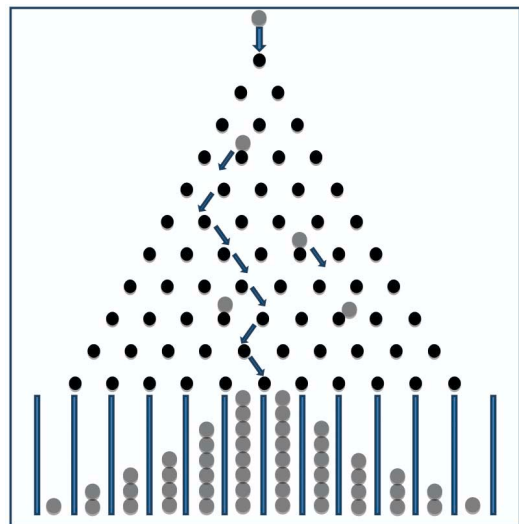


그림 1. 구슬야구장난감의 개념도

특히 자주 사용되고 있으며, 수공학도 그 예외는 아니다. 대표적인 예로, 지표수나 지하수에서 확산되는 오염물질의 농도도 종 모양을 가진 정규 분포를 사용하는데, 이는 오염물질의 입자가 한 시간대에서 다른 시간대로 이동할 때, 왼쪽, 오른쪽, 위, 아래, 앞, 뒤로 움직임 확률이 동일하며, 시간이 경과하여 이러한 과정이 반복되면서 앞서 이야기한 구슬 야구 장난감과 비슷한 현상이 재현되기 때문이다.

## 2. 지진해일과 중앙극한이론

보통 지진해일의 높이를 분석하는 방법은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 결정론적인 방법으로, 컴퓨터를 이용한 수치모의를 통해 모형의 셀에서 시간과 공간에 따라 변화하는 지진해일의 높이를 구체적으로 산정하는 방법이다 (Imamura et al., 1988; Cho and Yoon, 1998; Yoon, 2002; Cho et al., 2007). 이러한 방법은 모형과 모의를 위한 자료가 모의의 결과를 신뢰할 수 있을 정도로 충분히 확보되고 검증된 경우에 자주 활용된다.

두 번째 방법은 추계학적인 방법이다. 다양한 공간적 위치에서 관측한 지진해일의 높이값들에 근거하여 지진해일의 통계분포를 정한 후, 이 분포에 따라 지진해일에 대한 위험도를 산정하는 방법이다. 이러한 방법은 수치모의를 위한 모형과 자료가 충분치 않을 때 자주 활용된다. 지진해일의 추계학적인 분석을 다룬 논문들의 상당수는 지진해일의 높이가 대수정규분포(Log-

normal distribution)을 따른다는 결론을 내렸다. 이러한 선행연구들 중 대표적인 몇 개의 논문들을 표 1에 요약하였다.

지진해일의 높이가 대수정규분포를 따르는 이유를 살펴보면 다음과 같다. 주어진 위치에서의 지진해일의 높이(H)는 지진근원지에서의 해일의 높이(H<sub>0</sub>)와 진원지에서 지진해일이 지나온 경로의 해저면의 지형적 특수성을 나타내는 계수(K)의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$H=KH_0 \quad (1)$$

이러한 과정을 반복하여 지진해일의 전파를 연속적으로 모의하면, n번 전파된 지진해일의 파고는 다음과 같이 표현될 수 있다. (그림 2 참조)

$$H=K_1K_2K_3\cdots K_n=\prod_{i=1}^n K_i H_0 \quad (2)$$

여기에서, K<sub>i</sub>는 i번째 전파된 지진해일의 위치에 해당하는 K의 값이다.

식 (2)의 양변에 자연로그를 취하면

$$\ln(H)=\sum_{i=1}^n \ln(K_i)+\ln(H_0) \quad (3)$$

여기에서, 식 (3)의 우변의 두 번째 항인 ln(H<sub>0</sub>)은 상수이고, 만약 우변의 첫 번째 항  $\sum_{i=1}^n \ln(K_i)$ 의 K<sub>i</sub>가 무작위과정을 통해 모의할 수 있는 값이라면 식 (3)의 좌항인 ln(H), 즉 지진해일의 높이에 자연로그를 취한 값들의 집합은 앞

표 1. 지진해일의 높이가 대수정규분포를 따른다는 선행연구 요약

논문저자 (출판년도)	대상지역 및 시기
Van Dorn (1965)	1946년부터 1957년까지 하와이 군도에서 관측된 지진해일
Kajiura (1983)	1896, 1933, 1945, 1960, 1968년에 일본 해안지역에서 관측된 지진해일
Go (1987, 1997)	1896년, 1981년 쿠릴열도에서 관측된 지진해일
Choi et al. (2006)	2004년 인도양 연안의 965 지점에서 관측된 지진해일 (Sumatra Tsunami)

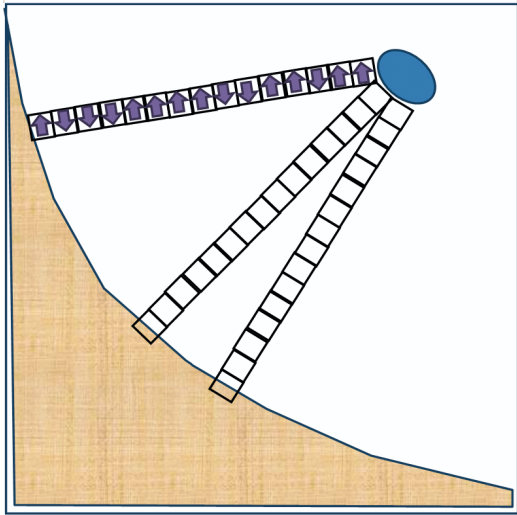


그림 2. 서로 다른 세 개의 경로를 통한 지진해일 전파의 개념도

서 설명된 중앙극한이론에 따라 정규분포를 가지게 된다.

그림 2는 지진해일이 전파되는 무수히 많은 경로 중 세 개를 개념화하여 그린 것이다. 지진해일의 파고에 지대한 영향을 미치는 해저면의 높이는 일종의 규칙성을 가진다기 보다는 무작위적인 양상을 가진다고 가정하자. 이러한 경우, 각 셀에서의 지진해일의 높이에 자연로그를 취한 값은 앞서 설명된 구슬 야구 장난감처럼 바로 이전 셀의 값과 비교하여 무작위적으로 (혹은 동일한 확률로) 한단계 커지거나 한단계 작아질 것이다. 그리고 이러한 과정이 반복되면서 지진해일의 높이가 지속적으로 커지거나 지속적으로 작아질 확률보다는, 중앙값에 머물 확률이 더 높다. 그리고 이러한 무작위 과정이 그림 2의 나머지 두 개의 경로를 포함한 무수히 많은 경로를 통해서도 동일하게 재현된다. 따라서 해안을 따라 관측되는 지진해일의 높이에 자연로그를 취한 값들의 집합은 중앙극한이론에 따라 정규분포를 가지게 되고, 지진해일의 높이는 대수정규분포를 가지게 된다.

이러한 결론을 내리는데 있어 필요한 중요한

가정은 다음과 같다.

- (1) 지진해일고는 해안의 “충분한” 길이를 따라 관측되어야 한다. (구슬야구장난감에서 공의 개수가 충분히 많을 것)
- (2) 지진해일의 근원지와 지진해일의 높이를 관측한 여러 지점들과의 거리가 서로 비슷할 것 (구슬야구장난감에서 공과 보관통 사이의 거리 및 못의 개수가 동일할 것)
- (3) 해저지형의 높이가 규칙성을 가지지 않고 무작위적일 것 (구슬야구장난감에서 구슬이 못을 맞고 왼쪽 혹은 오른쪽으로 튕겨 내려갈 확률이 동일할 것)

만약 이러한 중앙극한이론의 중요한 세 개의 가정이 만족되지 않는다면 특정 지진에 의하여 발생한 지진해일고의 집합의 분포는 대수정규분포에서 멀어질 것이다..

이러한 사실을 확인하기 위하여 그림 3에 검정색 타원으로 보인 해저지진에 대하여 수치모의를 시행하고, 우리나라의 동해안을 따르는 각 모형의 셀에 대하여 최대지진해일고의 최적확률분포에 대하여 조사하였다.

그림 4는 각 해저지진에 대하여 우리나라 동해안을 따라 관측된 최대지진해일고에 대한 최적확률분포를 분석한 것이다. 그림 속 그래프의 ‘+’ 표시는 최대지진해일고의 3차 L-모멘트(x축)와 4차 L-모멘트(y축)의 비의 관계를 나타낸다. 이 표시와 가장 가까운 곡선이 해당 해안의 구간의 최대지진해일고에 대한 최적확률분포이다.

그림 4의 왼쪽 위 그래프는 우리나라의 동해안을 10km의 길이를 가진 39개의 구간으로 나눈 경우의 분석 결과이다. 각 구간에 대한 최대지진해일고의 최적확률분포는 다양하며, 대수정규분포를 가지지 않는 경우가 많다. 이 경우는 앞서 언급된 중앙극한이론의 성립조건 중, 첫 번

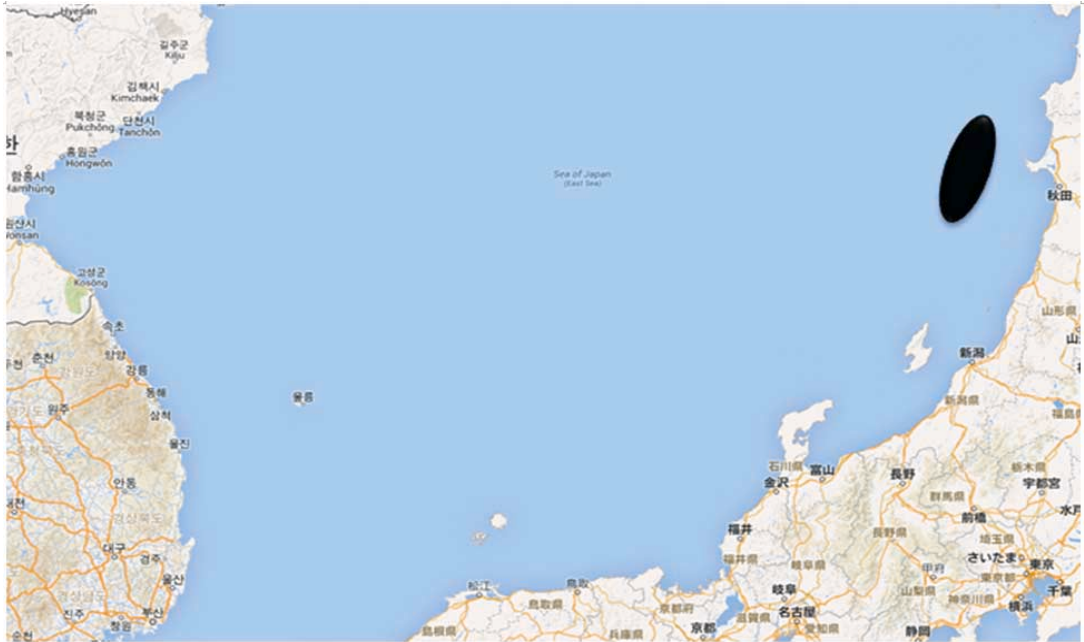


그림 3. 지진해일 수치모의에 사용한 해저지진의 위치

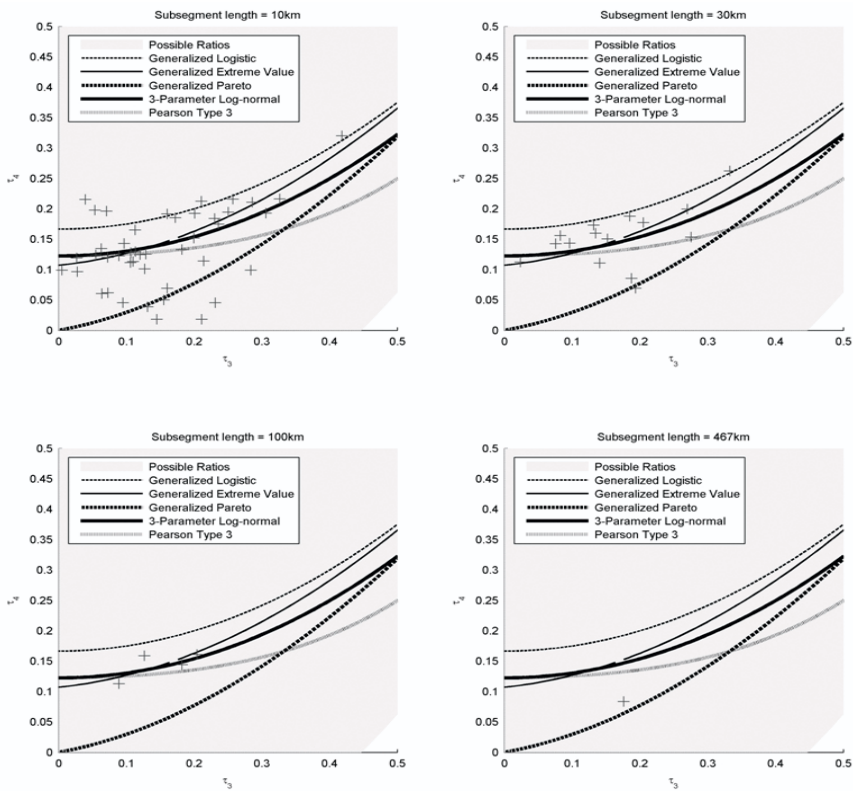


그림 4. 우리나라 남해안을 따른 최대지진해일 높이의 구간별 L-모멘트 비 변화

째 조건이 만족되지 않는 경우이다. 해안의 길이가 짧아 충분한 숫자의 최대지진해일고를 얻지 못한 경우이며, 구슬야구장난감에서 공의 개수가 충분히 많지 않은 경우이다.

그림 4의 오른쪽 위 그래프는 우리나라의 동해안을 30km의 길이를 가진 14개의 구간으로 나눈 경우의 분석결과이다. 각 구간에 대한 최대지진해일고의 최적확률분포가 그림 4의 경우보다 정규대수분포에 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 이는 각 구간의 조건들이 앞서 언급된 중앙극한이론의 성립조건에 수렴하고 있음을 보여준다.


그림 4의 왼쪽 아래 그림은 우리나라의 동해안을 100km의 길이를 가진 4개의 구간으로 나눈 경우이다. 각 구간에 대한 최대지진해일고의 최적확률분포가 앞의 두 경우 보다 더욱 대수정규분포에 수렴하고 있다.

그림 4의 오른쪽 아래 그림은 우리나라의 동해안 전체에 대하여 관측된 최대지진해일고에 대한 분석결과이다. 이 경우, 최적확률분포가 대수정규분포에서 크게 떨어져 있음을 알 수 있는데, 이 경우는 앞서 언급된 중앙극한이론의 성립조건 중 첫 번째와 세 번째 조건은 만족하지만, 두 번

째 조건은 만족하지 않기 때문이다. 즉, 구슬야구장난감에서 각 구슬이 보관통에 도착하면서 때리는 플라스틱 못의 개수가 다른 경우이다.

좀 더 포괄적인 연구를 통해 확실한 결론을 얻을 수 있겠지만, 지금까지의 연구결과를 통해 내릴 수 있는 잠정적인 결론은 다음과 같다.

- (1) 우리나라 동해안의 경우, 지진해일의 전파에 따른 높이의 변화는 무작위과정으로 여길 수 있으며, 중앙극한이론의 적용이 가능하다.
- (2) 해안의 길이가 긴 경우 (>100km), 대수정규분포를 통해 지진해일고를 모의하는 경우 오차가 발생할 수 있다.

본 기사에서는 추계학적 관점에서 바라본 지진해일과 그 정량적 분석 결과를 소개하였다. 좀 더 자세한 연구 결과는 Kim et al. (2013)에 출판예정이다. 본 연구가 각종 제약으로 인하여 수치모의를 통한 지진해일 대비책의 수립이 불가능한 지역의 대비책 수립에 있어 조금이나마 도움이 되기를 간절히 바라며 이 글을 마친다. 

### 참고문헌

1. Imamura, F., Shuto, N. and Goto, C., 1988. Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis. Proceedings of 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Japan, 265-272.
2. Cho, Y.-S. and Yoon, S.B., 1998. A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations. Coastal Engineering Journal, 40 (2), 191-205.
3. Yoon, S.B., 2002. Propagation of tsunamis over slowly varying topography. Journal of Geophysical Research, 107 (10), 4(1)-4(11)

4. Cho, Y.-S., Sohn, D.-H. and Lee, S.-O., 2007. Practical modified scheme of linear shallow-water equations for distant propagation of tsunamis. *Ocean Engineering*, 34 (11-12), 1769-1777.
5. Van Dorn, W.G., 1965. Tsunamis, in: Chow, V.T. (Eds.), *Advances in hydroscience*.
6. Kajiura, K., 1983. Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan, in: Iida, K., and Iwasaki, T. (Eds.), *Tsunamis: Their science and engineering*. Terra Scientific, Tokyo, Japan, 131-145.
7. Go, Ch.N., 1987. Statistical properties of tsunami runup heights at the coast of Kuril Island and Japan. Institute of Marine Geology and Geophysics, Sakhalin, Preprint.
8. Go, Ch.N., 1997. Statistical distribution of the tsunami heights along the coast. *Tsunami and accompanied phenomena, Sakhalin*, 73-79.
9. Choi, B. H., Hong, S. J., and Pelinovsky, E., 2006. Distribution of runup heights of the December 26, 2004 tsunami in the Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33(L13601), 1-4.
10. Kim, D., Kim, B.J., Lee, S.-O., and Cho, Y.-S., 2013. Best-fit distribution and log-normality for tsunami heights along coastal lines, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*.