

# 쓰나미 피해범위의 간이평가법



송 병 응

다산컨설팅 지반부 이사  
(soilsong@nate.com)

지난 3월 11일 오후 2시 46분 三陸(Sanriku)앞바다에서 규모 9.0의 지진이 발생하였고 잠시 후 쓰나미(津波)가 발생하여 아직도 피해 규모를 정확히 파악할 수도 없을 정도로 많은 피해를 일으켰다. 피해자들에게는 잊을 수 없이 많은 안타까움과 고통이 따르겠지만, 앞으로 다른 곳에서도 발생할 수 있는 문제이므로 학문을 연구하는 연구자들은 반드시 대책을 수립하지 않으면 안 된다. 이번 기회를 통하여 우리 학회 회원님들께 쓰나미에 대해서 설명 드리고자 한다. 본 글은 일본 国土技術研究センター(2007)의 자료를 대부분 정리하여 작성한 글임을 밝혀둔다.

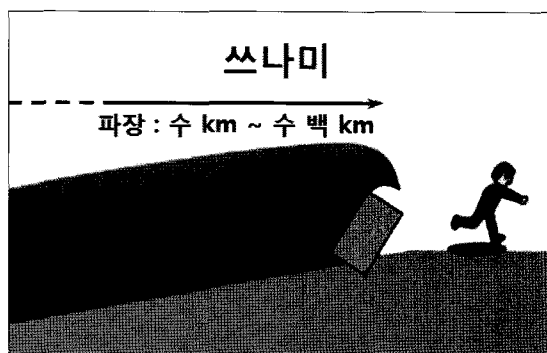
## 1. 쓰나미의 정의

필자도 지금까지 “쓰나미”라는 단어를 듣고 우리말로 “지진해일” 정도로 알고 있었다. 이번 기사 작성을 위해 자료를 조사하다 흥미로운 사실을 알게 되었다. 일반적인 파도와 달리 쓰나미는 근해를 항해하는 선박에는 피해가

거의 없지만, 항구에서는 큰 피해를 유발하는 것에 유래되었다고 한다. 즉, 일본어로 쓰(津)란 ‘항구’ 이고 나미(波)란 ‘파도’ 를 의미하므로 항구에서 발생하는 파도라고 해석된다.

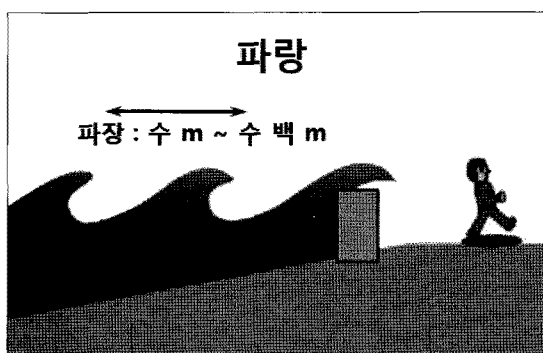
다른 말로는 우미다찌(海立)라고 하여 “바다가 일어난다”, 신세끼(震汐)라고 하여 “지진 후 조수”라고 불렀다. 한편, 발음은 같지만 한자가 다른 쓰나미(海嘯)라고 하여 “만조(滿潮) 때, 얇은 해안이나 삼각형 모양으로 벌어진 하구부(河口部)에서 일어나는 거센 파도(하구부에서 바닷물이 역류되어 나타나는 현상) 등 다양하게 부르기도 하였지만 현재는 쓰나미(津波)라고 하여 국제적으로 통용하여 사용하고 있다(ウィキペディア, 2011).

그림 1은 우리가 일반적으로 알고 있는 파랑과 쓰나미의 차이점에 대하여 설명하고 있다. 파랑은 파장이 쓰나미에 비하여 매우 짧으므로 파에 작용하는 힘이 작아 연안에 도달해도 연안에서 파쇄 되므로 큰 피해가 없지만, 쓰나미는 파장이 매우 큰 거대한 물로 된 장벽이 장시간 작용하므로 내륙까지 상륙가능하며 침수속도도 빠르다(気象庁, 2011 加筆).



(a) 쓰나미

거대한 물의 벽이 되어 장시간 힘이 걸리는 쓰나미는 육상의 구조물을 파괴하면서 내륙까지 짧은 시간에 침수.



(b) 파랑

쓰나미와 높이는 같지만 파랑은 파장이 짧으므로 각각의 파에 의해 작용하는 힘이 작아 연안에서 파쇄 됨.

그림 1. 쓰나미와 파랑의 개념도(氣象庁, 2011 加筆)

## 2. 2011 동일본대지진에 의한 쓰나미 피해

아직까지도 2011 동일본대지진에 의한 쓰나미 피해 규모는 파악되지 않고 있다. 이 지진에 대한 이름조차 며칠 전까지 “2011 동북지방태평양지진”이라고도 부르기도 했으나 최근에 “2011 동일본 대지진”으로 명칭을 수정하였다. 이렇게 지진이 발생한지 한 달 정도 됐지만 아직도 피해 복구는 고사하고 피해 상황을 집계하기도 곤란할 만큼 사정이 어려운 실정임을 실감하게 된다. 더욱이 후쿠시마 원자력발전소에서 누출되는 방사선 때문에 피해 현장에서 현황 조사 수행에 대한 일정을 결정하기도 곤란하다.

지금까지 알려진 쓰나미 피해 관련 자료는 인터넷을 통하여 그림 2와 같이 정리하였다. 그림 2 (a)에 의하면 미야기현 나토리시는 바닷가에 방풍림을 설치한 지역으로 밀려오는 쓰나미의 위력에 무기력하게 보인다. 그림 2 (b)는 미야기현 기센누마시에서 쓰나미에 침수됐지만, 주변 석유탱크에서 석유 누출 및 화재가 발생하였고 그 누출된 기름이 주로 목재로 구성된 일반주택에 달라붙어 화재가 확대됐다. 그림 2 (c)는 미야기현 히가시마쓰시마시에서 와유조선이 주택가까지 떠밀려온 사진이며, 그림 2 (d)는 아오모리현 하찌노헤시 미나토쵸에서 어선이 안벽을 타고 올라온 사진이다. 그림 2를 통하여 쓰나미의 위력을 간접적으로나마 실감할 수 있다(産經ニュース, 2011; AFP BB News, 2011, 朝日新聞社, 2011).

## 3. 쓰나미의 전달 및 변이과정

지금까지 쓰나미의 정의 및 전달된 쓰나미 피해가 발생한 현장에 대하여 언급하였다. 그러면 쓰나미의 전달 및 변이과정에 대하여 알아보려고 한다. 国土技術研究センター(2007)에 의하면 쓰나미의 전달 및 변이과정은 다음과 같은 세 가지 특징을 갖고 있으며 그림 3으로 나타내었다.

- ① 심해에서 발생한 쓰나미는 선형분산효과를 나타내면서 천해영역으로 진행한다.
- ② 천해영역에서 쓰나미는 파고수심비(파고에 대한 수심 비율)가 크게 되는 영역(수심이 얇아지는 영역)으로 진행하면서 비선형효과를 나타내며, 파의 봉우리가 높아지면서 동시에 파의 전면구배가 급하게 된다. 이것을 전경화(前傾化: 전면부가 경사지게 되는 현상)라고 한다.
- ③ 더욱이 파고수심비가 크게 되는 수심이 얇은 해역이나 하천입구로 진행되는 쓰나미는 파형 및 수심 등의 조건에 의해서 비선형효과가 분산효과로 바뀌는 Soliton 분열(3.4절 참조)과 같은 파상단파(波狀段波)를 형성한다.

그림 3에서 나타낸 심해영역에서의 분산과정, 천해영역에 진입하면서 발생하는 비선형장파, 육상에 근접하여 나타나는 비선형 장파의 분산 및 Soliton 분열에 대하여 언급하고자 한다.



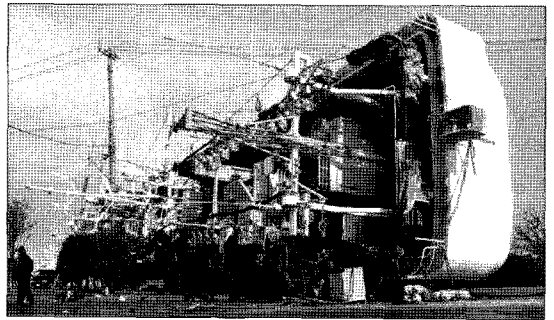
(a) 미야기현 나토리시(産經ニュース, 2011)



(b) 미야기현 기센누마시(朝日新聞社, 2011)



(c) 미야기현 히가시마쓰시마시(AFP BB News, 2011)



(d) 아오모리현 하찌노헤시 미나토쵸(朝日新聞社, 2011)

그림 2. 2011 동일본대지진에 의한 쓰나미 피해사례

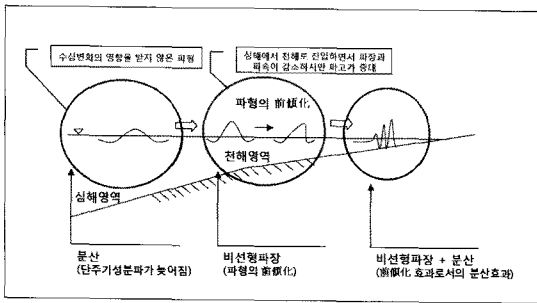


그림 3. 쓰나미전달 및 변이과정  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

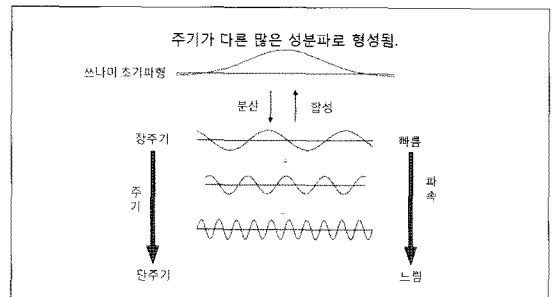


그림 4. 쓰나미를 형성하고 있는 파의 성분과 전파특성 모식도  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

### 3.1 심해영역에서의 분산과정

수심에 대한 파장의 비율이 극단적으로 작은 쓰나미와 같은 장파(長波)는 파형의 곡률이 작고, 연직방향 가속도가 무시할 수 있으므로 장파(長波)이론에 의해 표현할 수 있다. 특히, 심해에서는 선형장파이론이 적용가능하다. 그렇지만 초기파형에 단주기성분이 포함된 경우 및 먼 곳에서 발생된 쓰나미와 같이 전파거리가 긴 경우에는 그 작은

곡률의 영향을 무시할 수 없다. 곡률의 영향은 일반적으로 분산효과로 불리지만 단주기파일수록 장주기파에 비하여 전파속도가 늦다(그림 4). 이와 달리 주기를 가진 다양한 파에 의해 형성된 쓰나미는 그림 5처럼 그 전파에 따라 단주기파가 쓰나미 본체에서 점차 후방에 남겨지고 파의 에너지가 광범위하게 분포하게 되며, 쓰나미의 수위가 내려가고 주기가 길게 되도록 작용한다. 이것이 선형쓰나미의 분산효과이다(国土技術研究センター, 2007 加筆).

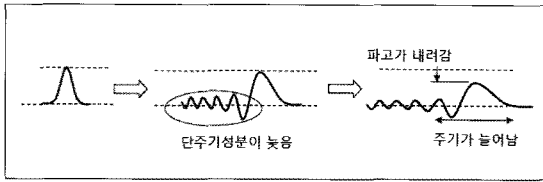


그림 5. 분산효과에 의한 쓰나미 변형의 모식도  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

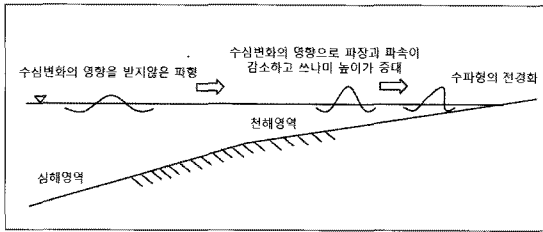


그림 6. 비선형장파이론에 의한 쓰나미파형의 변화  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

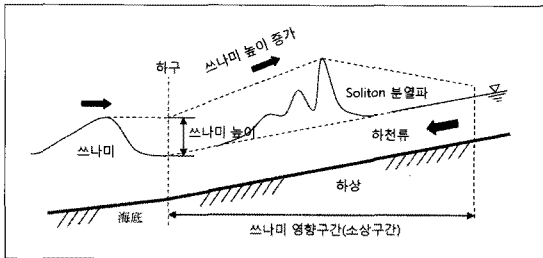


그림 7. 비선형분산장파이론에 의한 쓰나미 높이의 변화  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

### 3.2 천해영역에서 비선형장파

쓰나미는 천해영역 및 하천영역에서 파고수심비가 심해영역에 비하여 크게 나타나므로 수심이 얇아지면서 파

장, 파속이 감소하고 쓰나미 높이가 높아진다. 수심변화에 의해 쓰나미 높이가 높아지고, 고수위 부분의 수면형상과 저수위 부분의 수면형상의 이동속도차가 크게 발생함에 따라 파의 봉우리가 전경화(前傾化)하는 것을 비선형효과라고 부른다.

### 3.3 해안가 및 하천입구에서 비선형분산장파

쓰나미가 수심이 얇은 해역이나 하천으로 전파하는 경우에는 파형 및 수심 등의 조건에 따라 단주기 복수파로 분열하고 파고가 증폭한다. 이러한 현상을 Soliton분열이라고 부른다. 한편, 이는 비선형분산장파이론(非線型分散長波理論)에 의해 표현할 수 있다(그림 7). Soliton분열과 같은 파상단파(波狀段波)는 쓰나미가 수심이 얇은 장소를 소상(溯上: 상류로 역류하는 현상)하는 경우에 발생하기 쉽고 동시에 그 Soliton분열이 진행하게 된다.

한편, 쓰나미 선단부에서 파의 형태는 쓰나미가 수심이 얇은 해역을 전파할 때 그림 8과 같이 Soliton분열로 파상단파(波狀段波)가 형성된 경우와 Soliton분열이 발생하지 않아 감쇄하는 쇠파단파(碎波短波)를 형성하는 경우 등이 있다.

### 3.4 Soliton분열의 발생과 전달과정

그림 9는 Soliton분열의 발생과 전달과정의 개요를 나타내고 있고 이를 다음과 같이 설명할 수 있다.

- ① 천해영역에서 비선형효과로 쓰나미는 전경화하고, 그 파형전면에서 단주기 성분이 전체 중에서 탁월하

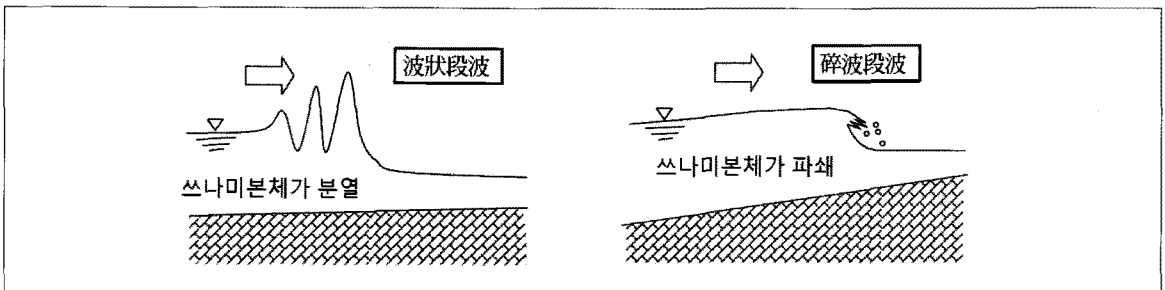


그림 8. 파상단파와 쇠파단파의 비교

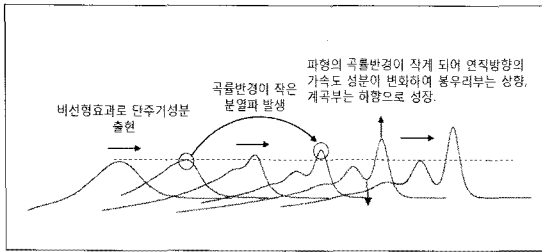


그림 9. Soliton분열의 메커니즘과 파형의 변형 개념도  
(国土技術研究センター, 2007 加筆)

게 된다.

- ② 단주기성분이 탁월하면 선형이 후방으로 늘어나는 분산효과도 발현된다.
- ③ 쇄파조건에 도달할 때까지 충분한 시간이 있으면 분산효과와 비선형효과의 상호작용으로 단주기 분열파가 발생한다. 이것을 Soliton분열이라고 부른다.
- ④ Soliton분열로 발생된 분열파의 파장은 쓰나미 본체와 비교하여 극단적으로 작고, 파형의 곡률반경이 작으므로 연직방향의 가속도 성분이 크게 된다.
- ⑤ 연직방향의 가속도성분이 증가함에 따라 봉우리부는 상승하고, 계곡부는 하강하게 된다.

한편, 電力土木技術協會(2011)에 의하면 Soliton 분열은 비선형성과 분산성의 효과로 1개의 파봉이 다수의 파로 분열하는 현상이라고 하였다. 이러한 현상은 1983년 일본 혼슈 아키타현 지진(일본명: 일본해중부지진)이 발생했을 때 처음으로 확인 되었다.

## 4. 쓰나미의 높이 및 소상(遡上)거리 간이 추정법

### 4.1 간이추정법의 적용조건

하상의 수심  $h_0$ , 하상구배  $i$  및 하구에서 쓰나미의 높이  $H_0$ 를 입력치로 해서 하천을 소상하는 쓰나미의 높이 및 소상거리를 개략적으로 추정할 수 있다(国土技術研究センター, 2007). 각각의 조건에 대하여 설명하면 아래와

같다.

- ① 하상의 수심  $h_0$  : 하구에서 식망평균만조위로부터 평균하상까지의 수심
- ② 하상구배  $i$  : 하구부근에서 평균하상구배
- ③ 하구에서 쓰나미 높이  $H_0$  : 중앙방재회의 및 지방자치단체의 기존자료로 추정되는 하구부근에서 예상 쓰나미 높이

단, 하천의 흐름은 전구간에서 등류(等流)로 가정해서 하구에서의 식망평균만조위에서 상류 방향으로 하상과 평행하게 하천수위를 설정하는 것으로 한다. 이 간이추정법으로 쓰나미의 소상이 상정되는 범위의 하천조건이 대략 다음의 경우에는 적용할 수 있다.

- (1) 하구주변구역에 쓰나미의 거동에 영향을 미치는 특이한 지형 및 시설이 없는 하구(리아스식 해안 및 방파제 등이 없는 곳)
- (2) 하도(河道)가 해안선에 대하여 거의 직각인 하천
- (3) 하도가 거의 직선인 하천
- (4) 하도 횡단형상이 단단면(單断面)인 하천
- (5) 하도 폭이 거의 일정한 하천
- (6) 하상구배가 거의 일정한 하천
- (7) 하구부가 사주(砂州: 파도와 연안류에 의해 가늘고 길게 형성된 퇴적 지형)에 의해 퇴적되지 않은 하천

### 4.2 Soliton분열의 영향

간이추정법은 원칙적으로 Soliton분열을 고려하지 않고 적용하는 것이지만, 다음의 두 가지 조건을 만족하는 경우에는 Soliton분열을 고려하여 적용하여도 좋다.

- ① 수심이 얕아지는 곳이 연속되는 구간에서 쓰나미가 소상하는 경우
- ② 쓰나미 높이  $H_0$ 와 수심  $h_0$ 의 비가 0.83보다 작은 장소

### 4.3 Soliton분열의 영향을 고려하지 않은 경우 추정식과 추정 쓰나미 높이

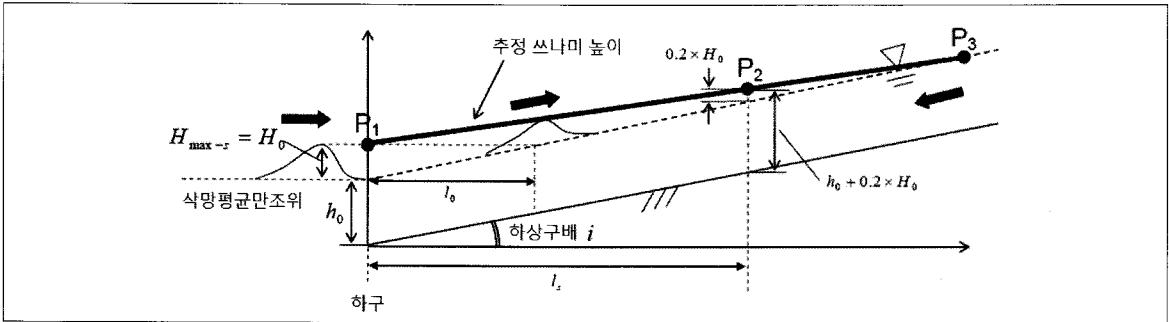


그림 10. Soliton분열을 고려하지 않은 추정식의 개념도(国土技術研究センター, 2007 加筆)

Soliton분열의 영향을 고려하지 않은 경우 하천내에서 최고 쓰나미 높이  $H_{max-s}$  및 쓰나미 높이가 하구에서 최대 쓰나미 높이의 20% 높이가 되는 곳까지 감쇄하는 지점의 하구에서의 거리  $l_s$ 는 식 (1) 및 식 (2)로 추정하는 것으로 한다.

① 하천내에서 최고 쓰나미 높이  $H_{max-s}$ 의 추정식

$$H_{max-s} = H_0 \quad (1)$$

② 쓰나미 높이가 하구에서 쓰나미 높이의 20% 높이가 될 때까지 감쇄한 지점의 하구에서의 거리  $l_s$ 의 추정식

$$l_s = 1.2 \times l_0 \times (H_0/h_0)^{-1/3} \quad (2)$$

여기서,  $h_0$ 는 하구수심(m),  $H_0$ 는 하구에서 쓰나미 높이(m),  $H_{max-s}$ 는 하구내에서 최고 쓰나미 높이(m),  $l_0$ 는 하구 지점에서 하상에서  $h_0+H_0$ 의 높이인 점  $P_1$ 에서 상류로 수평한 직선을 그어 하천수위와 교점에 도달할 때까지의 거리(m),  $l_s$ 는 쓰나미 높이가 하구에서 쓰나미 높이의 20% 높이가 될 때까지 감쇄한 지점의 하구에서의 거리(m),  $i$ 는 하상구배(예: 1/5,000 등)를 나타낸다(그림 10 참조).

쓰나미 높이의 추정은 우선 식 (2)에서  $l_s$ 를 구한다. 추정된 지점에서 의 높이가 되는 점  $P_2$ 를 구한다. 점  $P_1$ 에서 점  $P_2$ 까지를 직선으로 연결하고 그 연장선과 하천수위가 교차하는 점을  $P_3$ 로 정한다. 각각의 지점  $P_1, P_2, P_3$ 를 직선으로 연결한 선이 추정쓰나미의 높이가 된다.

#### 4.4 Soliton분열의 영향을 고려한 경우 추정식과 추정 쓰나미 높이

Soliton분열의 영향을 고려한 경우 하천내에서 최고 쓰나미 높이  $H_{max-s}$  및 쓰나미 높이가 하구에서 최대 쓰나미 높이의 20% 높이가 되는 곳까지 감쇄하는 지점의 하구에서의 거리  $l_d$ 는 식 (3) 및 식 (4)로 추정하는 것으로 한다.

① 하천내에서 최고 쓰나미 높이  $H_{max-d}$ 의 추정식

$$H_{max-d} = 1.1 \times H_0 \times (H_0/h_0)^{-1/2} \quad (3)$$

② 쓰나미 높이가 하구에서 쓰나미 높이의 20% 높이가 될 때까지 감쇄한 지점의 하구에서의 거리  $l_d$ 의 추정식

$$l_d = 1.5 \times l_0 \times (H_0/h_0)^{-1/3} \quad (4)$$

여기서,  $h_0$ 는 하구수심(m),  $H_0$ 는 하구에서 쓰나미 높이(m),  $H_{max-d}$ 는 하구내에서 최고 쓰나미 높이(m),  $l_0$ 는 하구지점에서 하상에서  $h_0+H_0$ 의 높이인 점  $P_1$ 에서 상류로 수평하게 직선을 그어 하천수위와 교점에 도달할 때까지의 거리(m),  $l_d$ 는 쓰나미 높이가 하구에서 쓰나미 높이의 20% 높이가 될 때까지 감쇄한 지점의 하구에서의 거리(m),  $i$ 는 하상구배(예: 1/5,000 등)를 나타낸다(그림 11 참조).

쓰나미 높이의 추정은 우선 식 (3)에서  $H_{max-d}$ 를 구하고, 하구지점에서 하상에서  $h_0+H_{max-d}$ 인 높이를 점  $P_1$ 으로 한다. 식 (4)에서  $l_d$ 를 구한다. 추정된  $l_d$ 지점에서

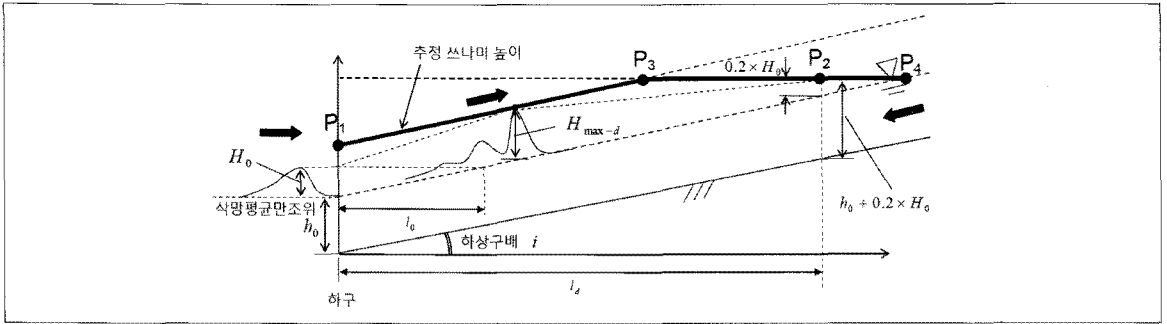


그림 11. Soliton분열을 고려한 추정식의 개념도(国土技術研究センター, 2007 加藤)

$h_0 + 0.2 \times H_0$ 의 높이가 되는 점  $P_2$ 를 구한다. 점  $P_1$ 에서 상류방향으로 하상과 평행하게 직선을 긋는다. 다음 점  $P_2$ 에서 하류방향으로 수평선을 그린다. 이 때 만나는 점이  $P_3$ 가 된다. 점  $P_3$ 에서 상류방향으로 수평선을 그어 하상 수위와 만나는 점이  $P_4$ 가 된다. 각각의 지점  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 를 직선으로 연결한 선이 추정쓰나미의 높이가 된다.

들이 많으리라 생각이 든다. 하지만, 역사적으로도 한반도에서 큰 지진피해가 발생한 기록도 있으며, 울릉도 및 동해안에서 쓰나미에 의한 피해사례도 이미 보고되어 있다. 이러한 점을 고려하면 앞으로는 연구자나 실무종사자 모두 쓰나미에 대한 피해 예방 및 대책에 관하여 함께 고민해야 하지 않을까라고 생각한다.

일본의 한 학자가 쓴 글이 생각난다. “자연재해는 우리가 방심할 때 찾아온다.”

## 5. 결론

지금까지 쓰나미의 정의 및 지난달 2011 동일본대지진에 의해 쓰나미 피해가 발생한 지역 피해 사례, 쓰나미의 전달 및 변이과정과 쓰나미 발생 시 육지로 밀려들어 오는 거리와 높이를 추정하는 방법에 대하여 정리하였다. 하지만, 필자가 정리한 자료를 이용하여 지난달 후쿠시마에서 발생한 쓰나미의 피해 범위를 추정하여도 실제 발생한 피해 범위 보다 작을 것으로 판단된다.

비록 우리학회가 흙을 주제로 연구하는 사람들이 모인 곳이어서 항만분야에서 자세하게 다루는 분야를 취급하기는 곤란하지만, 쓰나미에 의한 피해를 줄이려고 노력해야 하는 부분은 우리학회 연구자와 기술자들에게도 남겨진 숙제가 아닐까 생각한다. 특히, 우리나라도 일본과 같이 원자력 발전소를 해안가에 설치하여 운영 중에 있으므로, 일본의 피해사례를 타산지석으로 삼아 우리나라의 기존 시설에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

아직까지도 지진에 의한 피해사례가 미미한 한국에서 이러한 쓰나미 피해가 그렇게 크게 느껴지지 않는 회원님

## 참고문헌

1. 朝日新聞社(2011), <http://www.asahi.com/>
2. 위키백과(2011), <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%B4%A5%E6%B3%A2>.
3. 気象庁(2011), <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/faq/faq26.html>
4. 国土技術研究センター(2007), 津波の河川遡上解析の手引き(案).
5. 電力土木技術協会(2011), <http://www.jepoc.or.jp/tecinfo/tec00185.htm>
6. 毎径ニュース(2011), <http://sankei.jp.msn.com/affairs/photos/110312/dst11031205280062-p1.htm>.
7. AFP BB News(2011), <http://www.afpbb.com/>