

쓰나미〈地震海溢〉의 理解

李 弘 植〈中央大 土木工學科 工博〉

■ 쓰나미의 발생

우리 나라의 연안지역은 인구나 항만, 어항시설이 많이 존재하는 곳으로서 국민의 생활이나 사회 활동에 중요한 위치를 차지하고 있다. 쓰나미는, 거의 매년 내습해오는 폭풍, 태풍의 성격과는 달리, 그 발생빈도가 낮으며 사전의 예측이 어려운 것이 특징이다.

1983년 5월 26일 우리 나라 동해안일대에 내습했던 쓰나미(지진해일)로 인하여 인명, 가옥, 선박 등의 피해를 입었고, 피해액도 약 4억원으로 추정된 바 있다.

이 쓰나미의 내습전까지만 해도 우리 나라에서는 그다지 커다란 관심이 많지 않았으나, 그 이후부터는 새로운 관심을 갖게 되었고 쓰나미에 관한 연구도 상당히 진행되기 시작하였기 때문에 현재 우리나라에서도 그렇게 생소한 것이라고 여겨지지는 않는다.

지구전체를 보면 쓰나미의 발생지역은 매우 편중되어 있는데 태평양을 둘러싼 해안선에 거의 연접해 있고 환태평양 지진대에서 발생하는 지진에 의한 쓰나미가 지구전체에서 발생하는 쓰나미의 사례를 거의 차지하고 있다.

그 이외에도 환태평양이외의 지역에서 쓰나미의

발생빈도는 적은편이나 지중해 중부의 그리이스 주변해역, 흑해, 포르투갈과 스페인 서방의 대서양 지역에 각각 일련의 쓰나미 기록이 있다.

이 때문에 쓰나미(津波)라는 일본어가 일찍부터 사용되어 정식 국제학술용어로 채택된 이유 중의 하나일지도 모른다. 쓰나미는 해저에서의 지각변동, 화산폭발, 지형붕괴 등의 매우 급격한 지구물리적 충격에 의해 해수면의 변화로 발생하는 파이며, 풍파와는 달리 전파속도가 매우 빠르며 연안에 와서는 파고가 증폭되어 1차, 2차, 3차 등의 고파가 계속 내습하여 연안침수, 구조물, 도로 등의 파괴, 염해의 막대한 피해를 가져온다.

특히 원격지에서 발생된 지진에 의한 쓰나미는 첫번째 파고는 그 에너지가 상당히 감쇄되어 낮을 수 있으나 2차, 3차의 내습파고는 더 높을 수 있으며 그 주기는 지진규모에 따라 몇십분에서 몇시간 대로 내습하는 경우도 있기 때문에 방심하는 사이에 더 큰 피해를 초래할 수도 있다.

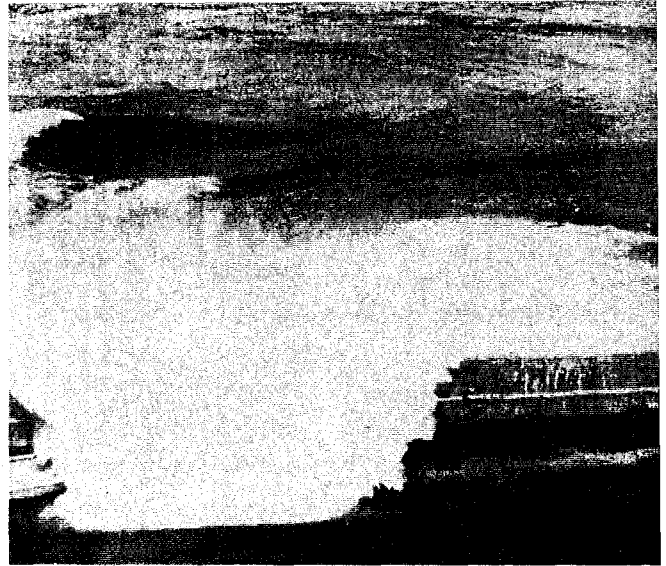
■ 쓰나미 특성

쓰나미는 수심이 깊은 곳에서 얇은 해안선부근에 가까이 오면서 파가 높아지는 증폭효과를 일으키며, 해안선이 동해안과 같이 직선적이고 등심선이 해안선에 거의 평행인 단조로운 경우에는 쓰나미의 높이가 수심에 4승근에 반비례하여 증폭되는 Green 법칙이 있다.

즉, 수심 4000m에서 1m높이인 쓰나미는 그것의 1/16수심(250m)에서는 2m가 되고, 그것의 1/16수심(15.6m)에서는 4m의 파고가 된다. 수심 0인 해안선상에서는 파고가 무한대로 되는 것으로 되나, 실제로는 파고가 대략 수심과 같은 정도면 부서져 버리기 때문에 그것이상의 파고는 되지 않는다.

해안선이 직선상이 아니고 작은 만과 같은 모양으로 된 복잡한 형태의 경우는 증폭효과가 단순하지는 않다.

만끝이 V자형과 같은 경우는 쓰나미가 만의 안쪽끝으로 진행함에 따라 쓰나미의 에너지가 집중하고, 만의 맨 안쪽끝에 위치하고 있는 장소에서 높은 쓰나미가 된다.



〈사진 1〉 쓰나미 등의 高波에 의한 월파
(*日本土木學會 제공)

한편, 만이 외양에 대하여 폐쇄적인 형태를 하고 있는 곳에는 만 고유의 진동주기가 탁월하게 나타나기 쉽다.

외해에서의 쓰나미 주기성분이 이 만의 고유주기에 가까울 때에는 공진이 일어나 쓰나미가 높아지는 경우가 있다.

이 외에도 복잡한 해안선을 갖는 내만, 군도에서는 해저지형조건 혹은 형상에 따라 특정의 쓰나미가 높아지기 쉬운 장소가 나타나는 것도 있으나 이러한 장소를 미리 알아두는 것에는 전자계산기에 의한 수치계산법이 현재 급속히 응용되고 있다.

지진의 규모와 쓰나미의 규모는 아직 불명확한 점이 남아 있기는 하나, 지진의 규모(Magnitude, M)가 6.5이하의 지진이면 쓰나미는 거의 발생하지 않으나 규모가 약 7.0이상의 지진이 발생하면 연안의 재해를 수반할 수 있는 쓰나미가 유발될 가능성이 크다. 현재 사용되고 있는 지진의 규모와 쓰나미의 규모에 관하여 간략히 언급하면, 지진에 의한 Magnitude, M은 일본의 기상청에서 정한 것이 일반적으로 사용되고 있고, M의 결정식과 매우 흡사한 쓰나미의 M에 대하여 아베(Abe)가 정의한 Mt가 있으며 주로 일본부근, 동해의 쓰나미에 대하여 적용

하고 있다.

또, 쓰나미의 규모계급에는 이마무라(伊村)·이이다(飯田)가 제시한 것과 핫토리(羽鳥; Hattori)의 것이 있다.

지진규모가 크면 발생하는 쓰나미도 크다는 것이 일반적이긴 하나 이 양측의 관계는 매우 복잡한 관계를 가지고 있다.

가령 해저에서 7.0규모의 지진이 발생했다고 하여도 과거의 똑같은 지진과 비교하여 매우 적은 규모의 쓰나미가 발생한 경우도 있으며 이와 반대로 지진이 발생하여 쓰나미의 경보가 발령되어도 큰 문 제시되는 쓰나미가 오지 않은 경우도 많다.

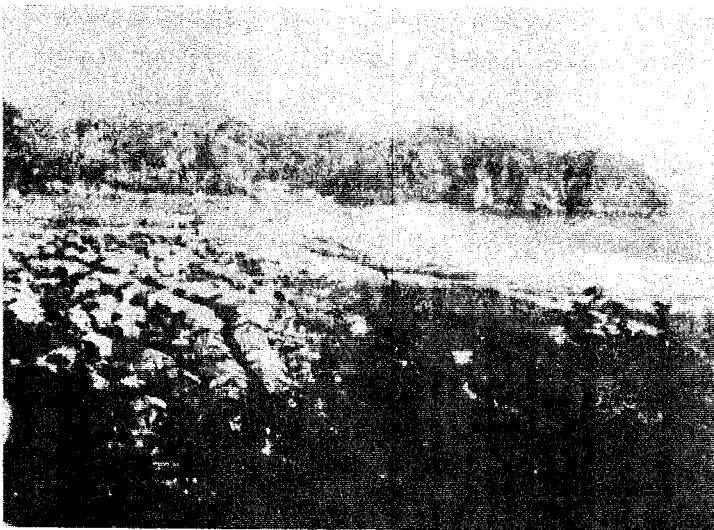
쓰나미의 대표적인 실례로서, 원격지에서 발생한

지진에 의해 발생한 일본의 예를 들 수 있다.

1960년 5월 23일 칠레 해안의 태평양해저에 진원을 둔 Magnitude 8.5의 지진으로 인하여 발생한 쓰나미는 그해 5월 24일 2시경부터 일본해 연안각지에 도달하여 일본북부지방인 삼륙연안에서는 파고가 5~6m에 달했다.

이로 인하여 사망자 119명, 행방불명 20명, 가옥 파괴 3,700호, 유실 1,259호의 대피해를 입었다. 이것은 지진발생시 전혀 진동을 느끼지 않았음에도 불구하고 쓰나미가 내습한 것과 일본에서 지구의 반대쪽(背面)에 위치한 곳에서 발생한 지진이라는 사실에 주목할만 하다.

일본해역 이외에도 Hawaii에서도 큰 피해를 입



(사진 2) 1933년 3월3일의 三陸쓰나미 내습前과 後의 田老町 (*日本土木學會 제공)

었다. 이것이 계기가 되어 현재에는 태평양지역의 지진에 의한 쓰나미에 관하여는 Honolulu에 있는 태평양 쓰나미 정보센터가 주의보를 발령하고 있다.

이 때문에 국제적인 지진, 쓰나미의 Monitoring system이 구성되어 있고, 태평양지역에 32개소의 지진관측소, 64개소의 조위관측소가 운영되고 있다.

우리 나라 동해쪽의 쓰나미사

1983년 5월에 발생했던 쓰나미는 일본 동북부 아키타(秋田; Akita)시 부근의 근해역의 해저에서 발생한 지진에 의한 것이었는데, 그후 이 지진의 공식 명칭은 “일본해중부지진”으로 명명되었다.

일본해(東海)중부지진으로 일본연안지대에서는 100여명에 이르는 사상자를 내고 쓰나미 발생지역은 수심 2,000~3,000m의 심해역으로 보고되고 있다. 중부지진(1983) 이외에도 일본해측에서의 최대급은 1941년 북해도의 도도(渡島)의 지진쓰나미가 있다.

이 때의 북해도지역의 익사자만도 2,000명에 달하

였다는 기록이 있는데, 그 쓰나미에 의해 우리나라의 그 당시 이조실록에도 피해의 기록이 남아 있으며 그 내용은 오늘날 연구하여 재현한 쓰나미의 거동해석결과 잘 일치되고 있다고 보고되고 있다.

이와는 달리 수심 200m 정도의 대륙붕상에서 일어난 것으로는 1883년, 1964년의 지진쓰나미가 있다. 야마가다(山形)현의 연안을 비롯하여 그 지역일대에 막대한 피해가 기록되고 있으며, 특히 주목할 만한 것은 시가지에도 범람하여 47명의 익사자를 낸 것이다.

일본해에서 발생하는 쓰나미는 해저지형상 수심이 급격히 변하고 있으므로 피해는 매우 광범위하게 미칠 수 있으며 진로가 굴절하여 섬·곶 등에 에너지가 집중한다.

또 대륙에서 파의 반사가 반복되며 폐쇄형의 동해(日本海)의 모양으로 인하여 태평양측의 쓰나미에 비하여 지속시간이 길기 때문에 장시간의 감시가 필요하다.

1833년의 쓰나미와 1983년 중부지진의 발생시 일본의 은기(隱岐)지역에서는 지진발생 후 3시간 후에 최대파가 나타났다.

일본해에서 일어나는 지진은 태평양의 지진과는 달리 단층의 경사각이 40°~60°의 고각도이고, 지각의 특성도 달라서 지진의 규모에 비하여 예상보다 쓰나미가 크게 되는 특성이 있다.

■ 쓰나미 대책

쓰나미에 의한 인적·재산적인 손실을 되도록 줄이기 위한 대책으로서 항구적인 대책과 쓰나미 발생 후의 응급대책을 크게 나눌 수 있다.

항구적인 대책으로는 어촌의 고지대이전, 방조제, 쓰나미 방파제, Lock gate 등의 건설을 들 수 있으며, 주민과 선박의 피난, 쓰나미 예보의 발령, 국제적인 연결체제의 확립, 재해 후의 복구기술의 향상 등의 응급대책을 들 수 있다.

항구대책 중 쓰나미에 의한 항내의 수면운동에 관하여 유체역학적으로 계산하여 설계, 건설에 사용되어 방파제와 같은 구조물을 기술적으로 대처할 수 있다. 그러나 긴급시 해수욕객 등의 관광객, 연

안주민의 출어에 대비한 피난유도에는 비교적 경험 이 많지 않으므로 어 우 문제가 명른다.

■ 어촌주거지의 고지대이전

연안의 어촌, 집락전체를 쓰나미 도착 후 영향이 미치지 않는 고지대로 이전하는 방법인데, 특히 만의 형상이 V자형인 곳에서는 전술한 것과 같이 에너지가 집중하여 파도가 높아지고 그 세력이 맹렬하므로 당연히 연안어촌에는 인명, 재산피해가 크지 않을 수 없다.

1960년 칠레지진, 1977년 하와이 지진으로 하와이 연안의 거주집락이 대피해를 입고 나서 고지대로 전면적으로 이전하고 그 지역일대에는 공원으로 조성하였다.

일본의 북부 연안지방에서도 1896년 큰 쓰나미에 의한 피해를 입고 고지대로 일부 이전하여 주거지로 하고 있다.

그러나 고지대로의 이주대책은 평지의 협소, 용수부족, 어업의 지장 등의 이유로 결국은 다시 연안 지역으로 돌아와 생활하게 되며, 어업인들의 자동차보급, 해산물의 대량수송 등에 따라 실제로 연안 지역에 살아야 할 필연성 때문에 어려운 점이 따르고 있다.

■ 쓰나미 방파제의 구축

쓰나미 방파제의 특징으로서는 풍파를 막을 수 있고 만내정박 중의 선박이나 양식장까지도 보호할 수 있는 장점이 있으나, 과대한 건설비용과 만내의 물흐름, 수질의 변화, 주거구역으로의 쓰나미 침수까지를 완전히 막을 수 없는 단점이 있다.

□ 대선도만(大船渡灣)입구의 쓰나미방파제 (Case 1)

1960년 5월 23일 Magnitude 8.5의 칠레지진으로 일본북부지방인 삼륙해안에서는 5~6m의 파고도 도달하였다.

이러한 쓰나미의 방재대책으로 일본운수성의 직할공사로 쓰나미 방파제를 건설하였다. 1963년 4월에 착공하여 1967년 3월에 완성하였다.

방파제의 규모는 길이 736m, 최대수심은 38m이

다. 구조형식은 습석mound상에 Caisson을 놓은 형태로 당시로서는 유사이래에 없는 대수심 방파제이며, 개구부는 잠제형(潛堤形)으로 되어있는 것이 보통의 방파제와 다르다.

완성직후인 1968년에 또 다시 쓰나미(十勝地震에 의한)가 발생하였다. 이 방파제로 발생된 쓰나미의 높이가 약 절반이하로 감소되어 쓰나미방파제의 효과가 성공적이었다.

□ 부석(釜石)항만입구의 쓰나미 방파제(Case 2)
부석만에서도 과거 몇차례씩이나 큰 쓰나미가 내습하여 큰 피해를 입어왔다.

부석만의 입구에 방파제를 건설하기 위하여 1978년부터 일본 운수성의 직할사업으로서 착수하여 1981년부터 본격적으로 공사가 진행되었다.

방파제의 건설지점은 폭 2,100m의 만입구에 최대수심은 63m에 이르고 있다.

여기에 폭 300m, 수심 -19m의 중앙 개구부 이외에도 양측에 각각 90m의 개구부를 남겨놓고, 북방파제 990m, 남방파제 670m가 계획되고 있다.

이 방파제가 완성되면 세계에서도 최대수심의 방파제가 되며, 쓰나미 방지효과, 환경에 미치는 영향, 구조설계법, 시공법 등에 걸쳐 조사연구가 추진되고 있다.

이 방파제의 구조는 습석mound상에 사다리꼴 모양의 이중 횡Slit Caisson을 놓은 것으로 Caisson기면수심이 -27m, 높이는 상부공까지 포함하여 330m의 거대한 콘크리트 구조물이다. 또 기초부를 사다리꼴 형태로 저면의 폭을 넓힌 것은 파나 지진작용시 습석기초에서의 최대반력을 억제하기 위한 것이다.

관광지, 해수욕장의 쓰나미대책 수립

우리 나라의 동해안에는 매년 많은 관광객들이 집중하고 있는데 7~8월의 해수욕장의 인파가 가장 많이 모이고 있다.

쓰나미로부터 주민의 생명, 재산, 공공시설, 산업시설 등의 피해를 막는 것이 방조제, 방파제의 설치라고 하면, 그 지역의 어업인을 포함하여 관광객,

해수욕객을 보호해야 하는 대책이 당연히 고려되어야 한다.

실제로 1983년의 중부지진의 경우 5월이었기 때문에 이러한 경험은 없었으나 만일 7~8월중 이었다면 인명피해는 더욱더 컸을 것으로 보인다.

주민자체의 쓰나미 대책

일반적인 행정적 대책추진이 아닌 주민의 안전을 자신들에 의해 행동하는 대책이 필요하다.

개인이 단독으로 행동하면 피난 중에 혼란을 야기시킬 수 있으며 자연히 인명구조에도 한계가 따른다.

따라서 지역주민이 상호협력하여 방재활동을 할 수 있도록 조직을 구성하고 쓰나미 발생에 따른 방재훈련 등의 활동을 하는 것이 필요하다.

또 쓰나미의 경험이 많지않은 우리 나라의 현실에서 개개인의 쓰나미 의식의 향상을 꾀하는 방재교육의 대책이 중요하다.

소진(燒津)시의 쓰나미 대책

현재 일본에서 가장 유력한 지진발생설은 준하(Suruga)만의 대지진설이다.

이 설의 발표이후 준하만이나 연안부근의 시에서는 쓰나미대책을 포함한 종합적인 지진대책이 추진중에 있다.

특히 이 지역의 환경은 항만, 어항, 하천, 해수욕장 등의 Water front를 가지고 있고 그 중 소진(Yaizu)시는 준하만 서쪽에 위치하고 해안부근에 인구가 집중된 소도시인데 이 도시는 저지대에 밀집시가지가 형성되어 있고 해안선이 평탄하고 해일의 피해를 받기 쉽기 때문에 오래전부터 방조제가 설치되어 있었다. 따라서 예상되는 준하지진의 규모를 M 8.0으로 상정하여 최대 5m의 쓰나미가 내습하는 것에 대하여 대책을 추진하고 있으며 그 내용은

1. 쓰나미에 의한 침수방지를 위한 구조물의 정비
2. 시내 각 곳에 쓰나미 line을 설정하여 침수고를 표시한 표지판의 설치
3. 홍보용 책자가 널리 보급되어 주민에게 인식이 쉽고 이해하기 쉽게 하고 있다.
4. 피난지의 확보

5. 수치Simulation을 행하여 쓰나미 내습후 1분, 5분 등의 시시간격으로 침수지역을 계산하여 피난지로의 안전유도

6. 시내 각 장소의 피난지시를 원활히 전달하기 위하여 동시통보용 무선, 옥외스피커가 설치되었고, 해안가에도 통보를 위한 스피커가 설치되었다.

7. 주민이 주체가 된 쓰나미의 방재훈련 실시 등이다.

■ 등택(藤澤)시의 쓰나미 대책

등택(Fujisawa)시의 해안선은 상모(Sagami)만의 중앙동측에 위치하고 동서에 직선적으로 5.3km의 평탄한 모래사장을 이루고 있어서 해수욕장으로 적합한 지역이다.

또, 등택시 주변에는 고도인 겐창(Kamakura)시, 부사산, 상근(Hakone), 호남해안 등의 유명한 관광지가 있어서 연간 1,200만명의 관광객이 찾아오고 있으며, 여름의 해수욕장에도 약 470만명이 모이고 있다.

이 지역에도 과거 몇차례 쓰나미가 발생하였으나 그 당시에는 해안선 부근에 인구가 적었기 때문에 커다란 인명, 재산피해는 없었다.

그러나 현재에는 해안도로, 해안관광호텔, 휴양소, 주택 등이 몰려있기 때문에 연안주민 및 해수욕객 등에 대한 쓰나미 대책이 준비되어 있다. 그 내용은

1. 방재행정용 통보무선망의 정비
2. 쓰나미 피난지의 확보(7,000명정도 수용가능한 야구장)
3. 쓰나미에 대한 의식의 고양 및 피난 훈련실시
4. 쓰나미 발령시 체제수립
5. 쓰나미 감시소의 개설
6. 쓰나미 내습시 해수욕객의 안전유도를 위한 감시원의 항시 대기 등이다.

■ 맺음말

본고에서는 쓰나미에 관하여 기초적으로 물리적 설명과 대책을 통하여 어항, 어촌관계자에게 널리

주지시키고자 하는 의미에서 작성하였다.

쓰나미 자체의 역학적거동, 단층운동에 의한 지진모멘트, 지진모멘트와 쓰나미규모 등의 학술적인 상세한 언급은 피하였다.

하와이에서 쓰나미의 피해를 입고 나서 하와이를 중심으로 한 환태평양주변의 국가의 연안에서는 다수의 검조소와 지진계가 설치되어 있고, 해면의 이상변동이 발생되면 즉시 본부에 통보되도록 상호진달체계가 오래전부터 수립되고 있다. 그러나 1983년 5월이전에는 우리나라에 닥쳐온 쓰나미를 극소수를 제외하고 아무도 예상하지 못한 것을 부인하기는 힘들다.

불행히도 우리나라 동해안일대에 쓰나미로 인한 피해가 매우 컸고, 더욱이 어촌에서 인명피해도 안타깝게 발생하였다.

동해의 해저 어느곳에, 어느정도 크기의 지진이 언제 발생할 것인가의 예측은 어려운 일이며, 쓰나미의 규모를 정확히 예상하기도 힘든 것은 누구도 부인할 수 없을 것이다.

이러한 쓰나미의 재해를 막기 위하여, 쓰나미 방파제 구축에 의한 항구적인 방법은 엄청난 비용이 들고 설치위치의 최적성의 확인 및 평가도 어렵다.

또한 우리 나라의 동해에서는 쓰나미의 발생빈도가 대평양측에 비하여 높은 것이 아니다.

그러나 언젠가 내습할지도 모른다. 과거의 발생 통계에 기초한 예상도 어디까지나 확률적인 사상이므로 불확실성이 내재되어 있다. 우선 각 개개인에게 있어서 쓰나미의 정확한 이해와 방재의식, 심적의 준비태세가 중요하다고 생각한다. ㉠

<참 고 문 헌>

1. 연안재해의 예지와 방재(일본어), 백아서방.
2. 장미의삼, '항만공학' 공립출판.
3. 해양연구소, '해안재해예보시스템Ⅲ' 과학기술처.
4. 기타 등등.