

# 1 너울에 대해서

너울성 거대 파랑의 내습은

극히 보기 드문 확률로

기상조건이 갖추어지고

취송거리가 자극히 길어졌을 경우에

발생하므로 해일 등의

돌발 재해와 같은 특별한 대책이 요구된다.

토야마만은 갑자기 깊어지는 만으로

「아이가메(藍瓶)」라고 불리는

복잡한 해저지형을 나타내는 지역도 있어,

연안의 파랑 변형에

해저지형의 영향이 강하게

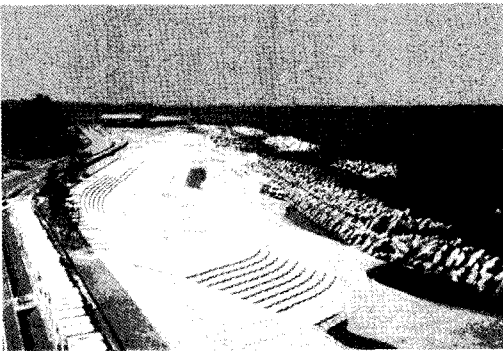
나타나고 있음이 예상된다.

## 1. 서론

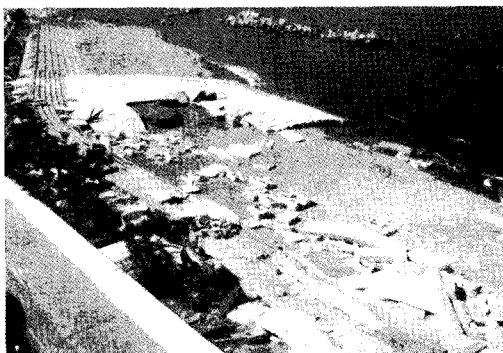
2008년 2월말에 동해 주변에 여러 저기압이 발달하여 통과하면서 동해에 높은 파도가 발달, 토야마(富山)만·사도(佐渡)섬의 해안을 중심으로 인명 손실을 포함한 심각한 피해가 발생했다. 수산관계 피해는 30개 어항, 6개 어항 해안에 이르러 267억엔의 피해가 보고 되었다. 겨울 동해측의 연안에서는 주로 북서 계절풍에 의해 발달한 높은 파도가 가장 많이 불지만, 토야마만이나 사도섬의 본토측 해안에서는 노토(能登)반도나 사도섬의 차폐(遮蔽)효과로 높은 파도는 내습하지 않는다. 한편 토야마만 등에서는 옛부터 너울성 파랑이 내습하여 이번과 같은 막대한 피해를 가져오는 것으로 알려져 있다. 이러한 너울성 파랑은 상정의의 시각에서 내습하는 파랑이므로 들러 돌아오는 파랑이라고도 불리고 있다. 뉴젠(人畜)어항해안 등에서 너울성 파랑에 의한 심각한 피해를 가져온 예로서는 1970년 1월말의 피해 사례가 있으며, 대규모 해안 재해는 약 40년만의 일이다. <그림-1>, <그림-2>는 뉴젠 어항 해안의 재해 전과 재해 후의 상황을 나타낸 사진이다. 이 지구에서는 소파블록의 산란과 테라스형 해안 호안이 파괴됨과 동시에 해안 배후에는 대량의 월파에 의해 막대한 피해가 발생하였다.

이번 너울성 파랑에 의한 피해는 광범위하여 수산청을 비롯한 각 행정기관에서 재해조사 및 복구대책을 위한 위원회 등이 조직되었다. 또한 위원회 등에서 논의된 내용을 공유하여 각각의 대책에 활용함과 동시에 향후

연대하여 대처할 기술적 과제에 대해서 논의할 목적으로 고파(高波)정보공유 WG가 설치되어, 보다 넓은 시점에서 검토가 추진되었다. 본 원고에서는 이러한 위원회·WG의 논의 몇 가지를 소개하고 특징적인 파랑의 발생·내습의 메커니즘이나 재해요인 등에 대해서 서술하고자 한다.



〈그림-1〉 뉴젠어항 해안의 상황(재해 전)

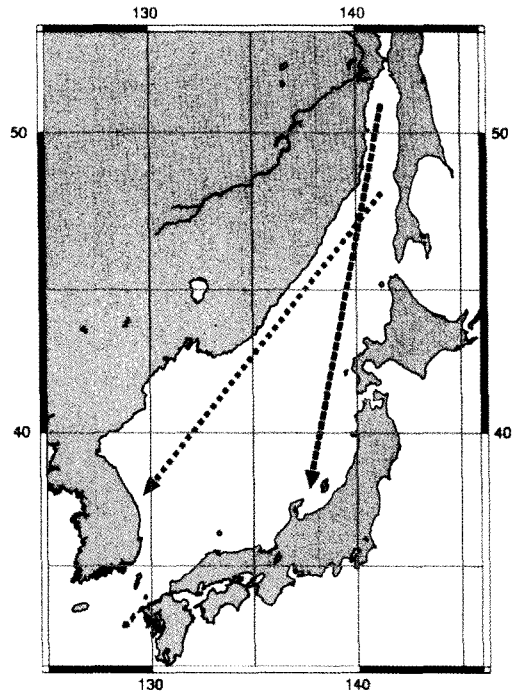


〈그림-2〉 뉴젠어항 해안의 상황(재해 후)

## 2. 너울의 발생과 발달

풍파의 발달에는 풍속, 취송거리, 바람의 계속시간 등이 영향을 주지만, 파고의 증가에는 풍속의 증가가 보다 강하게 영향을 주며, 주기의 증가에는 취송거리의 증가가 보다 강하게 영향을 준다. 이번 관측된 너울성

파랑은 주기가 긴 것이 특징이며, 이 정도의 높은 너울성 파랑이 발달하려면 1,000m규모의 긴 거리에 걸쳐서 강풍이 계속 불어야 한다.



〈그림-3〉 동해의 너울성 거대 파랑의 발달

〈그림-3〉은 토야마만을 포함한 동해의 형상을 나타낸 것이다. 토야마만에서는 동절기 북서에서의 파랑은 취송거리가 짧으며, 노토반도에서 차단되는데 반해 북북동에서의 파랑은 예외적으로 긴 취송거리를 얻어 만을 직사 하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 토야마만에 내습하는 너울성 파랑은 파고나 주기뿐만 아니라 물결 방향도 특수한 경우가 많다. 이 때문에 통상의 파랑에 대해 차폐역이 되는 연안에서 설계파가 작게 설정되어 있는 지역에서 특히 위험성이 높아지게 된다. 이번 파랑 재해에서는 한국 동해안에서도 피해가 보고되고 있지만, 이 지역도 동절기 계절풍에 의한 파랑은 직

사하지 않는 지역이며, <그림-3>에서 점선으로 가리킨 것 같은 경로로 너울성 파랑이 전파된 것이라고 생각된다.

너울성 거대 파랑의 내습은 극히 보기 드문 확률로 기상조건이 갖추어지고 취송거리가 지극히 길어졌을 경우에 발생하므로 해일 등의 돌발 재해와 같은 특별한 대책이 요구된다. 과거의 재해 경험이나 교훈은 잘 교화되어 있으므로 평소의 교육이나 훈련을 충실해 두는 것이 중요하다. 파도의 변형은 해저지형의 영향을 받는데, 특히 주기가 긴 파에 대해서 평상시 문제가 되지 않는 앞바다 지형의 영향도 강하게 받기 때문에 지형에 의한 파도의 집중을 고려한 대책이 필요한 것도 해일 대책과 같다.

위원회나 WG에서는 특징적인 풍역(風域)을 형성한 기상 요란(擾亂)<sup>1)</sup>의 특징이나 너울성 파랑의 특징을 파악하기 위해서 각종 모델을 이용한 파랑 추산이 실시되었다. 광범위하게 걸친 기상이나 바람의 장소를 정밀히 재현하여 노토반도나 사도섬의 차폐효과 등을 대표하는 해역이나 육역의 지형 영향을 고려하기 위해서 최신의 기상모델인 MM5 모델 등이 이용되어 고정밀도로 상세한 검토를 했다. 이들로 인해 이번 너울성 파랑에서 동해 및 일본 남해안을 통과한 4개의 저기압이 충돌하여 동해 북동에서 강풍이 장시간 계속되었던 것을 재현하고 있다.

또 파랑의 추산에는 WW3(Wave Watch III)라고 불리는 최신의 모델이 이용되었다. 계산 결과에 의하면 2월 23일에는 북서 풍파의 영향이 현저했지만, 24일 0시경부터는 풍파에 남하한 너울성 파랑이 겹치는 등의 영향으로 사도섬의 북부바다에서 파고 및 주기가 증대해 시간의 경과와 함께 토아미만으로 향한 긴 주기의

파랑이 한층 더 남하한 상황이 확인되었다.

### 3. 조위와 장주기 변동

파랑재해는 파고나 주기 등의 파랑제원 뿐만이 아니라, 조위의 영향도 강하게 받는다. 고파에 의한 재해가 발생한 2월 24일 전후에서는 동해에 광범위하게 걸친 조위 편차가 +20cm~30cm정도이며, 특히 아키타(秋田)에서 사도섬 주변에 걸쳐 높은 조위 편차가 확인되었다.

너울성 파랑은 주기가 긴 것이 특징이지만, 전파거리가 길어지기 때문에 이에 더하여 개개의 물결의 주기가 갖추어지는 경향이 있어 파군(波群)<sup>2)</sup>이 명확한 것으로 알려져 있다. 즉, 고파는 수파가 연속하여 1~2분 간격으로 파군이 내습하며 고파 사이에는 비교적 작은 파고 물결이 연속된다. 이와 같이 파군 구조가 강해지면 물결의 비선형성에 의해 파군의 주기에 대응한 장주기 변동이 크게 발달한다. 장주기 변동은 해안 부근의 수위를 현저하게 변동시키므로 해안 피해에 있어서는 중요한 요소가 된다. 이번 고파 재해에 있어서도 수십 초부터 몇 분 주기의 장주기 변동이 관측되어 향후, 이들을 반영한 해안보전 대책의 검토가 중요하게 여겨진다.

고파 발생 기간에 각지에서 관측된 수위 데이터를 보면 높은 조위에 더하여 몇 분 부터 수십 분 주기의 장주기파가 발달하고 있는 것도 확인되었다. 장주기파의 파고는 토아미만내에서는 30cm정도, 니가타니시(新潟西), 사카타(酒田)에서는 40cm정도였다. 이쿠지(生地)나 다나카(田中)의 데이터에도 80s정도와 140s정도로 통상의 파랑보다 길고, 조위 변동보다는 짧은 주기의

1) 요란(disturbance) : 규모가 작은 저기압, 저기압성 발달이 예상되는 영역, 날씨의 악화와 관련된 기류나 기압 등의 불균형으로 정상상태에서 흐트러진 상태

2) 파군(wave group) : 진행 방향, 파장, 파고 등이 비슷한 일련의 파랑집단

변동이 생기고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 변동의 진폭을 유의 파고로 환산하면 약 수십 cm 정도에 이른다. 이러한 장주기 변동은 2007년 9월의 세이쇼(西湘) 우회도로 폭락 재해시에도 관측되어 통상의 조위에 더하여 장주기 변동이 중요하다는 것도 너울성 파랑에 의한 재해의 특징이다.

#### 4. 지형이 복잡한 해안에서의 파도 변형과 월파

토야마만은 갑자기 깊어지는 만으로 「아이가메(藍瓶)」라고 불리는 복잡한 해저지형을 나타내는 지역도 있어, 연안의 파랑 변형에 해저지형의 영향이 강하게 나타나고 있음이 예상된다. 위원회에서 토야마만 주변의 파랑 변형 계산 결과를 분석한 바, 해저 골짜기의 영향으로 골절에 의한 파도의 집중이 발생하여 파고가 커지는 것이 확인된 곳으로 시모니카와(下新川) 해안의 요시하라(吉原) 지구나 미즈하시(水橋), 이와세(岩瀬), 토야마항, 요카타(四方), 에비에(海老江), 토야마 신항 등이 있었다. 또 이들 지점만큼은 현저하지 않지만, 정선(汀線)에서 급경사가 되는 지형의 영향으로 급격하게 파가 커지는 경향이 쿠로베(黒部)로부터 나메리카와(滑河) 이북의 영역을 제외한 전역에서 볼 수 있었다. 이 경향은 주기가 길수록 파고 증대의 정도가 커지고 있는 것을 알 수 있었다.

뉴젠이나 나메리카와에서는 과거에도 너울성 파랑의 피해가 반복 발생하고 있지만, 파랑 변형의 계산 결과에서는 이러한 지역의 파고 증폭 기구에는 해저 골짜기에 의한 파의 수렴에 따라 영향은 적고, 해안선 부근의 급경사 지형에 의한 파고 증대의 메카니즘이 지배적이라고 추정되었다. 그렇지만, 뉴젠, 나메리카와의 어

항 주변의 해저 지형도를 보면, 직전의 급경사와 뒤엎힌 복잡한 지형을 하고 있고, 위원회의 검토로 이용한 20m메쉬(mesh)의 지형 데이터에서는 완전하게는 재현할 수 없는 복잡한 지형도 영향을 준다.



〈그림-4〉 뉴젠어항 해안 전면의 해저지형

〈그림-4〉에 나타난 뉴젠 아시자키 지구 전면의 해안 지형을 보면 피해가 집중한 지역은 동쪽으로 퍼지는 완경사의 해저사면과 서쪽의 급경사면의 경계 부근에 위치하고 있는 것을 알 수 있다. 너울성 파랑은 약간 동쪽 치우쳐 내습하였기 때문에 해안에서 파가 굴절하고, 파랑 에너지가 경계 부근에 집중되었다고 사료된다. 또 파랑이 해안에 대해서 기울어 입사(入射)하였기 때문에 쇄파대에서는 연안류가 발달하였으나, 경사 급변형지역에서는 복잡한 해변류장이 발달, 이것이 입사파와 간섭하여 파고가 증폭된 것으로 사료된다. 게다가 파군(波群)에 의해 여기(勵起)된 장주기파가 연안 방향으로 존재해 해안선 부근의 해면 변동을 일으켜 이것에 의해 월파가 격렬해진 것으로 사료된다. 이러한 여러 현상은 폭넓은 주기대의 변동 성분이 비선형에 간섭하여 생

3) 해수면과 육지면의 경계선

4) 분자 원자 원자핵 등이 외부로부터 에너지를 얻어 처음보다 높은 에너지를 가지는 상태가 되는 것

므로 현상의 이해는 부분적으로 밖에 진행되지 않았다. 향후 수치 모델이나 모형실험 등을 통해서 또한 상세한 지형이 유체 운동에게 미치는 영향을 검토하는 것이 필요하다.

위원회에서는 뉴젠 어항 해안의 재해에 대해서 호안 배후로의 월파·월류의 상황을 검토하기 위해 불규칙 파에 의한 수치파동수조(CADMASSURF)에 의한 수치 계산이 실시되었다. 수치 모델에 의해서 일단 수심부, 환경사 호안 법선 등의 수위를 계산, 호안파랏펍상의 수위 및 유속에 의해 호안 배후에의 월파 유량을 구했다. 그 결과 호안 전면의 수위는 2~3분 정도의 주기로 변동, 그 수위가 파크에 달하는 타이밍에 월파가 발생한 것으로 확인되었다. 또, 3분에 1회 정도의 빈도로 월파가 발생하며, 또한 10분에 1회 정도는 비교적 큰 월파·월류가 발생하고 있어 이 비율은 현재의 월파상황 비디오 등으로 월파가 발생하는 빈도와 대체로 일치하였다. 이 검토 결과는 파군에 의한 장주기 변동의 고려가 중요하다는 것을 재차 시사하고 있다.

## 5. 맺음말

위원회 등에서 분석이나 논의를 통해서 너울성 파랑에 의한 일련의 재해에서 평상시 파랑 재해가 발생하기

어려운 지역에 재해가 발생한다는 것과 피해가 특정 거주지에 국소 집중하는 경향에 있다는 것, 파의 변형이 앞바다 해저지형의 영향을 강하게 받는 것 등, 너울성 거대 파에 의한 해안 재해의 특징이 드러났다. 한편, 파의 전파 속도는 자동차의 스피드 정도이며, 북쪽에서 남쪽으로 수 시간의 시간차이로 파랑이 내습하기 때문에 파랑 정보의 공유나 피해 상황의 전달이 유용한 것도 확인되었다.

고파 발생 메커니즘을 공유하기 위한 WG에서는 한 발 떨어진 입장에서 현상의 해명과 향후 대책 방향성이 검토되었다. 그 중에서는 비선형 효과를 포함한 최신의 수치 모델에 의한 파랑의 추산결과도 재차 논의되어 예·경보 시스템을 포함한 향후의 방재 체제의 바람직한 모습이 구체적으로 검토되었다. 이러한 일부는 벌써 실현을 향해서 움직이기 시작한 것도 있어 위원회 등에 의한 검토가 실시되고 있다. 그렇지만 한편으로 방재의 기초 정보가 되는 파랑 관측 체제나 그것을 현장의 방재에 활용하는 골조에 대해서는 충분한 상황이라고 말할 수 없다. 해상정보 취득에 지속적으로 노력함과 동시에 파랑의 내습상황을 온라인으로 보고·공유할 수 있는 네트워크 만들기 등을 검토하는 것이 너울성 파랑을 비롯한 파랑의 방재에 대해 특히 유효하다고 생각된다. ▲

