

# 해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 (Hazard Map) 작성기술 개발



**심재설**  
 한국해양과학기술원 특성화연구본부  
 본부장/책임연구원  
 jsshim@kiost.ac



**윤종주**  
 한국해양과학기술원 연안재해재난연구센터  
 직원/연수연구원  
 jjyoon@kiost.ac

## 1. 연구 개요

지구온난화에 따른 기후변화로 인하여 태풍의 강도는 강해지고 발생 빈도는 증가 추세에 있다. 이는 우리나라 및 전 세계 연안국들의 폭풍해일로 인한 침수범람 피해 규모를 증대시키고 있을 뿐만 아니라 향후 그 발생 규모 역시 예측하기 힘든 대형화의 추세에 놓여 있다. 우리나라는 거의 매년 태풍에 의한 연안침수, 시설물의 붕괴, 유실 그리고 해안침식 등의 연안재해로 인해 피해를 입고 있다. 그 중에서도 태풍으로 인한 폭풍해일이 야기하는 연안의 침수범람 피해가 점점 커지고 있는 상황이다. 태풍으로 인한 침수범람 피해는 낮은 기압으로 인한 해수면 상승, 연안쪽을 향하는 강한 바람으로 인한 해수의 밀어붙임, 높은 파도, 그리고 태풍이 몰고 온 막대한 양의 강우로 인해 발생하며, 연안의 밀물 시간과 맞아 떨어지는 경우에는 연안의 큰 피해가 발생할 수도 있다. 과거 1959년 태풍 Sarah, 1997년 Winnie, 2003년

Maemi의 내습시에 발생한 폭풍해일로 인한 피해 사례가 대표적이며, 가장 최근에는 2012년 9월의 태풍 Sanba에 의한 피해가 보고되었다. 이러한 연안재해 피해 이후



〈그림 1〉 2012년 10월 허리케인 ‘Sandy’에 의한 뉴저지 연안 침수범람 발생 예 (Image Credit: U.S. Air Force Photo by Master Sgt. Mark C. Olsen.)

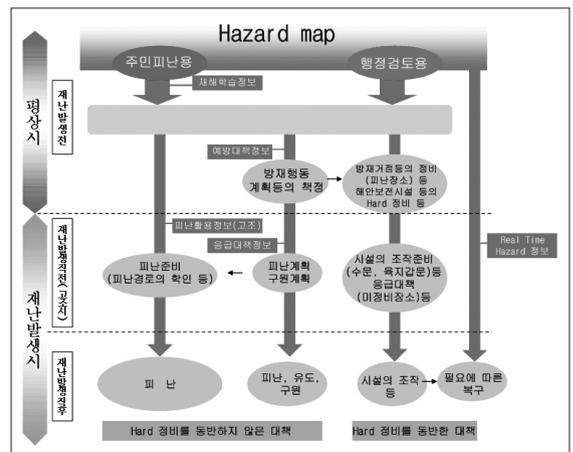
종합적이고 근본적인 대책의 마련이 촉구되어 왔고, 태풍의 내습에 대비하여 다양한 연구와 방재방안이 강구되고 있다.

폭풍 해일에 기인한 연안역에서의 침수범람 피해에 대비하기 위해 한국해양과학기술원(이하 해양과학기술원)은 ‘해일 침수범람지역 예측기술 및 재해도 작성기술 개발’ 연구(2008~2014)를 통해 연안 국지에서의 해일고 및 해일성 침수범람을 수치모형을 통해 정밀 예측하는 시스템을 개발하고 방재방안을 강구하기 위한 연구를 수행 중에 있다. 본 연구는 크게 해일 침수범람지역 예측, 폭풍해일 침수범람 재해도 작성, 침수범람재해 방지시설 연구 등으로 구성되어 있다.

## 2. 국내외 연구동향

연안재해 방재대책 관점에서의 태풍시 폭풍해일고 예보를 위한 연구는 1997년 8월의 백중사리 기간에 서해안 전역에서 발생한 해수범람피해를 겪은 이후에 시도되었다. 이는 해일예측을 위한 시도로서 조석-해일 결합모형, 태풍예측모형, 제한지역 예보시스템 등을 연계하여 한국근해의 실용적인 해일 예비경보체계를 구축하기 위한 것이었다. 태풍시 해일고를 신속하고 정확하게 예측하기 위한 예보시스템의 구축과 운영을 위한 연구는 주요 방재 선진국인 미국, 일본을 비롯한 영국, 네덜란드, 덴마크, 독일 등의 유럽에서 앞서 이루어졌고, 우리나라에서도 해양과학기술원의 ‘운용해양(해양예보) 시스템 연구(2009~2013)’ 등이 수행 중에 있다. 이러한 연구의 최종 목표는 이상해면의 실시간 관측시스템과 연계한 단기 이상해면 예측시스템을 개발하고 사용하는 것이다. 한편 폭풍해일고의 정밀한 수치모의에서 확장하여 이에 따른 침수범람을 모의하고 분석하는 연구는 재난대응 및 피해의 평가체계 구축을 위한 재해도(Hazard Map)의 작성을 위해서 매우 중요하다.

이를 위하여 국토해양부는 2006년 연안관리정보시스템 구축사업의 일환으로 ‘해안침수예상도 작성기준’을 작성하고 2007년 지침(소방방재청 2006-6호, 재해지도 작성 등에 관한 지침)을 확정하였다. 그리고 해안침수예상도 시범제작 사업을 진행하였으며 2006년부터 2008년도에 걸쳐 과거 고평량, 태풍, 백중사리 시 빈번한 피해가 있었던 마산, 군산, 목포 등의 지역을 중심으로 해안침수예상도를 제작하였다. 해안침수예상도에는 50년, 100년 빈도에 해당하는 시나리오를 선정하고 각각의 시나리오에 대한 결과를 이용하여 최대 침수범람구역을 나타내었으며, 여기에는 침수흔적, 예상 침수구역 및 침수수심, 주요 공공시설 및 피난시설의 위치 등의 정보를 포함하였다. 이 연구에 이어서 국토해양부에서는 2009년부터 ‘연안취약성지도 종합기본계획 수립 및 시범제작’ 사업을 수행하면서 주요 침수예상지역을 확장하여 폭풍해일 침수범람 모형을 수립하고 각 시나리오 태풍에 따른 해일고의 산정과 함께 이에 따른 침수예상도를 시범제작하고 있다. 기존의 국내 연구에서는 해안범람피난지도, 폭풍해일방재지도 등과 같이 침수 흔적을 기반으로 한 사례는 있었으나 해안침수예상도와 같이 기후변화를 고려할 수 있는 폭풍해일로 인한 연안범람의 수치



〈그림 2〉 재해도의 활용 방안 예

모형화는 시도된 바 없었기에 이 연구는 중요한 의의를 가진다고 할 수 있다. 그러나 아직까지 국내의 해일 피해에 따른 재해도 작성에 있어서 구체적인 법적 근거는 마련되어 있지 않아서, 각 연구주체에 따라 다양한 형식의 시범 연구 사례만 제시되고 있다.

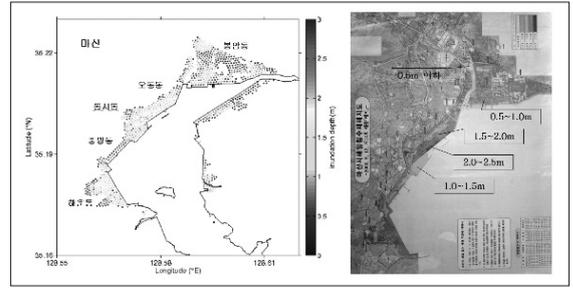
〈표 1〉 우리나라에서의 폭풍해일에 의한 재해도 작성 연구 사례

구분	주요내용	출처	
폭풍 해일 침수 범람 재해도	서해안 해수범람 흔적조사	서해안 5개 시도, 29개 시, 군, 구에 대하여 각 지구별로 침수흔적도는 침수심 1m 단위로, 침수예상도는 0.5m 단위로 작성하고 침수 제반사항 수록	행정자치부, 1998
	자연재해 경감 학술대회	<ul style="list-style-type: none"> <li>해안재해조사 지침서(안)에서 해안재해현상, 피해 파악을 위한 조사 항목 및 방법 설정</li> <li>해안재해지도 작성에 관한 표준방법 확립을 목적으로 해안재해지도 작성지침(안) 마련</li> </ul>	한국해안·해양 공학회, 1999
	해안범람 피난지도	<ul style="list-style-type: none"> <li>해안범람피난지도(부제 : 해안재해지도)의 시범제작을 통해 이상고조, 해일 등으로 범람 발생시 주민 피난정보 제공</li> <li>피난지도는 침수흔적에 기반하여 작성</li> <li>해안재해지도 작성지침(안)을 마련하여 제작주체, 작성방안 및 개정 등의 사항 명시</li> </ul>	행정자치부, 1999
	폭풍해일 방재지도	<ul style="list-style-type: none"> <li>폭풍해일 수치모형 수립 및 과거 해일 산정모의를 통한 모형의 정확성 평가</li> <li>폭풍해일 내습시 국가차원에서 수행할 방재대책을 일본 지역방재계획을 중심으로 우리나라에 맞도록 재설정</li> </ul>	국립방재 연구소, 2002
	재해지도 작성기준 등에 관한 지침	자연재해대책법 등을 근거로 재해 지도를 침수흔적도, 침수예상도(해안침수 예상도, 홍수범람위험도), 재해정보지도로 구분하여 각각의 제작 주체, 작성주기, 작성 및 도식방법 등을 명시	소방방재청 고시 제2006-6호
	충청남도 방재정보 시스템	과거의 자연재해 DB화로 피해예측 및 사전대응이 가능하도록 재해 지도를 제작하고, 충청남도 재난안전대책본부에서 인터넷을 통해 일부지역 시범 서비스	충청남도, 2008
	해안침수 예상도 시범제작	<ul style="list-style-type: none"> <li>연안관리정보시스템 구축사업의 일환으로 해안침수 예상도를 2006년(마산, 군산, 목포지역)과 2007년(부산, 여수, 통영지역)에 시범제작</li> <li>2009년부터 2013년까지 연차별로 남해안 일대부터 서해안까지 해안침수 예상도 시범제작</li> <li>시나리오 폭풍해일 DB 구축을 통한 피해예측정보 가시화 시스템 구축에 활용 및 적용</li> </ul>	해양수산부, 2006; 2007 국토해양부, 2009
	해안침수 예상도 시범제작	<ul style="list-style-type: none"> <li>실시간 폭풍해일 침수범람 예측시스템 구축</li> <li>해안침수예상도 시범 작성(부산, 마산, 여수, 목포)</li> <li>해일피해 방지 시설물(Storm Surge Barrier) 개발 연구</li> </ul>	한국해양 과학기술원, 2008

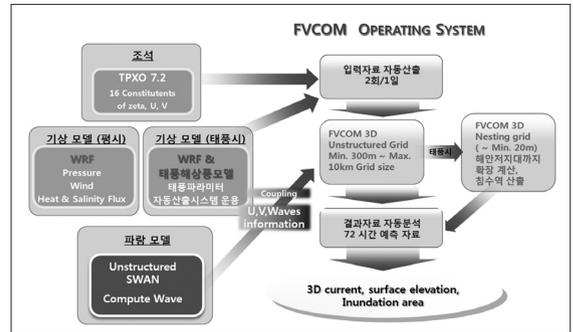
### 3. 해일 침수범람지역 예측

본 연구에서의 해일 침수범람지역 예측은 부산, 마산, 여수 그리고 목포를 그 시범 대상지역으로 연구가 수행되고 있다. 연안에서의 정확한 침수범람지역 예측을 위해서는 정밀한 특히, 연안에서의 해수 침수 범람지역 예측 및 이를 활용한 재해도 작성기술을 위해 최신 기술인 항공 Lidar 측량, 항공사진측량, 위성영상 등 다양한 측량기법을 사용한 정밀한 DEM(Digital Elevation Map)자료를 활용하고 있다. 그리고 침수범람을 일으키는 폭풍해일고를 정밀하게 예측하기 위하여 정밀격자 수치모형에 의한 태풍 해상풍 및 폭풍해일고 산출 시스템을 수립하여 시범 운용 중에 있다. 폭풍해일고의 정밀한 수치모의에서 확장하여 이에 따른 침수범람을 예측하는 연구에서는 태풍 내습 시 조석, 폭풍해일 및 고파랑과의 복합성, 연안 침수역에서의 저면마찰의 영향, 매끄러운 이동경계층 계산기법 등을 고려하여 수치모의를 수행 중에 있다.

폭풍해일고 및 해일침수범람을 정밀하게 산출하기 위한 수치모형으로는 해안선을 정밀하게 나타낼 수 있는 삼각형 가변(Unstructured) 격자망이 적용된 유한체적모형 FVCOM이 적용되었다. FVCOM은 정밀 폭풍해일 산출에 있어서 이미 현업화된 3차원 수치모형이며, 향후 연안 환경, 침퇴적, 생태 모형 등으로도 많은 응용이 가능하다. FVCOM 모형은 유한체적모형으로서 기존의 유한차분모형 또는 유한요소모형과는 다른 적분형태의 지배방정식을 갖는다. 이 적분식은 유한차분법의 흐름계산을 이용하여 수치적으로 풀 수 있지만, 유한요소법과 같은 삼각형 격자망을 이용한다. 유한체적법은 개개의 제한된 요소와 완전한 계산영역으로서 질량보존의 특징을 가지고 있다. 따라서 FVCOM 모형은 유한차분법의 간단한 이산법의 능률성과 유한요소법의 기하학상의 유연성이 잘 조화된 장점이 있으며, MPI 병렬 사용이 가능하여 이를 통한 방대한 모형 계산시간을 효율적으로 사용할 수 있다.



〈그림 3〉 태풍 Maemi 내습 시 최대 침수범람역 및 침수심 분포(좌: 수치모의 결과, 우: 관측 결과)



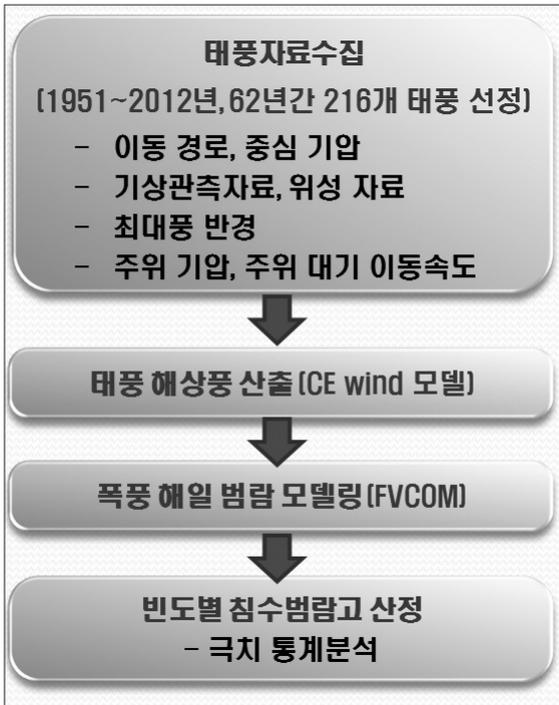
〈그림 4〉 실시간 폭풍해일 침수범람 예측시스템 운용 모식도

〈그림 3〉에는 2003년도 태풍 Maemi 내습시, 경남 마산에서 발생한 침수범람 피해를 수치모형으로 재현한 결과를 나타내었다. 수치모의에 의해 계산된 침수 범람역의 공간분포는 관측치를 정확히 재현하는 것으로 나타났는데, 이러한 수치모형적 접근을 통한 해일침수범람 연구의 활용성은 매우 클 것으로 나타났다. 따라서 정확한 해상풍의 공간분포에 대한 정보를 활용할 수만 있다면, 빠른 시간 내에 해일범람 등의 모의를 통한 연안재난피해 예측시스템의 구축에 있어서 그 활용도가 매우 높다고 할 수 있다. 〈그림 4〉에는 본 연구에서 구축되어 운용중인 실시간 폭풍해일 침수범람 예측시스템의 모식도를 나타내었다. 본 시스템은 평상시(비태풍시)와 태풍 시로 구분되어 운용되고 있으며, 평상 시에는 WRF 기상모델에서 산출된 72시간 기상자료를

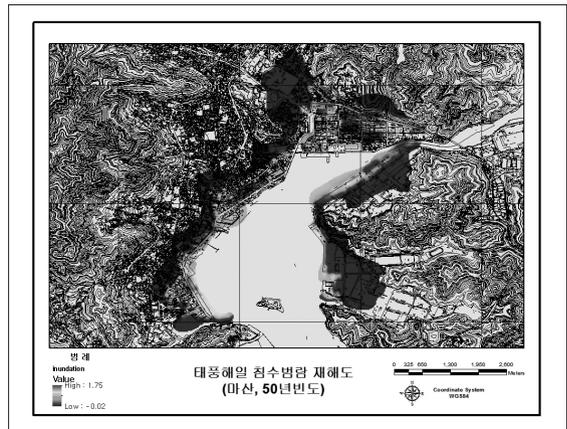
활용하여 폭풍해일고를 산출하며, 태풍 시에는 태풍 해상풍 모델을 활용하여 태풍에 의한 해일고를 산출하게 된다. 그리고 태풍시에는 해일침수범람에 대한 모의를 위하여 해안저지대까지 계산영역을 확장한 네스팅 격자망에 대한 모의가 추가로 수행된다. 해일침수범람의 예측시스템은 태풍정보의 업데이트에 맞추어 신속한 계산이 필수적인데, 본 시스템에서는 태풍정보의 입수에서부터 예측정보의 생산까지 약 1시간 정도 소요되어 비교적 신속한 예측이 가능하다.

#### 4. 폭풍해일 침수범람 재해도 작성

재해도는 폭풍해일에 따른 침수수심 및 피해범위 등 피해지역을 제시하기 때문에 위험단계별 대피계획



〈그림 5〉 빈도별 해일침수범람고 산출 모식도



〈그림 6〉 재해도 작성 예 (마산, 50년 빈도)

수립 및 안전한 대피 경로의 설정에 활용할 수 있다. 재해도 작성과 관련해서는 2006년 소방방재청에서 재해지도작성 등에 관한 지침(소방방재청 고시 제 2006-6호)이 마련되었으나 제도적 개선 및 보완이 필요하며, 국내에서는 태풍 및 폭풍해일, 이상해면 상승에 의한 표준화된 연안 침수범람재해도(Hazard Map) 작성 기술은 미확보된 상태이며, 과거 국내에서 작성된 재해도의 경우 과거 대부분 침수흔적조사 및 측량성과를 이용하여 작성되었다. 이후 1997년 태풍 Winnie에 의한 서해안 침수범람 및 2003년 태풍 Maemi의 내습에 따른 대규모 피해에 따라 재해도 제작 및 작성지침 등의 개발을 위해 정부 및 연구기관을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

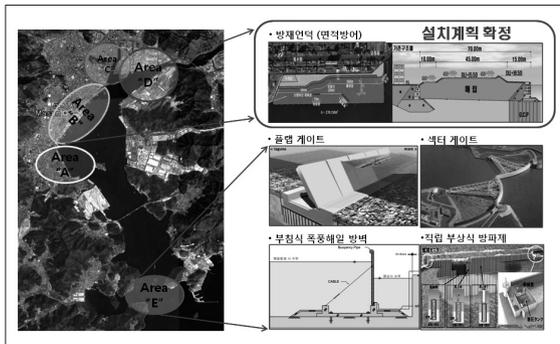
재해도 제작 지침은 우리나라와 같이 매년 태풍의 피해가 발생하고 있는 일본의 선진사례가 일부 도입된 바 있다. 국내에서는 2006년 소방방재청 고시를 통해 재해지도의 구분 및 작성과 관련된 기준이 마련되었고, 이를 근거로 국토해양부에서는 해안침수예상도의 시범 제작을 수행하고 있으며, 해양과학기술원에서도 시범영역에 대한 재해도를 작성하는 연구를 수행 중에 있다(〈그림 5, 6〉).

## 5. 침수범람재해 방지시설 제안

해양과기원에서는 해일 침수범람을 예측하고 재해도를 작성하여 인명과 재산의 피해를 줄이는 연구에서 더 나아가 선제적으로 침수범람을 물리적으로 방어하는 시설을 연구하고 있다. 현재 이렇다 할 재해방지시설이 없는 우리나라의 현실을 감안한다면 우리나라 지역 실정에 맞는 새로운 형태의 해일차단벽(Strom Surge Barrier) 시설의 제안 및 기반기술 확보가 시급한 실정이기 때문이다.

우리나라에서는 마산 등을 비롯하여 2003년 남해동부 연안에 내습한 태풍 Maemi에 의해 막대한 물적, 인적피해가 발생하였다. 이를 계기로 폭풍해일고 산정 및 원인규명의 기술적인 측면 뿐만 아니라 연안방재와 관련된 활발한 연구가 이루어지고 있으나, 각종 연구결과의 활용을 위해서는 보완이 필요한 실정이다. 최종적으로는 국내 연안도시의 취약성을 보완하면서 해일 피해를 막을 수 있는 방어능력을 갖춘 해일 방재구조물의 설치가 필수적이라 할 수 있다. 마산시의 경우 2003년 태풍 Maemi로 인한 피해 이후 해일의 원인 및 피해 영역을 파악한 후 지역적 특성을 고려하여 휴식공간으로도 활용이 가능한 방재언덕과 방조계단, 방호벽 및 방조수문의 설치를 계획 중에 있다(〈그림 7〉).

우리나라는 동해, 남해, 서해의 지형 및 수심 조건 뿐만



〈그림 7〉 마산 내만에 제안되는 폭풍해일 방재구조물 설계안

아니라 해양환경 특성이 해역에 따라 뚜렷한 차이를 보인다. 따라서 각 연안역의 특성에 따른 맞춤형 방재시설 설치계획의 수립이 반드시 필요하다. 해양과기원에서는 이를 위해 주요 항만 및 저지대에 위치한 연안역의 인구 밀집지역 등을 우선적으로 선정하여 재해취약지역에 대한 방재시설 설치계획을 수립하고, 항만의 입지 및 형상, 배수조건, 하천 유입량 분등을 분석하여 게이트(수문 형식), 방재언덕, 방호벽 등의 다양한 방재시설물들의 설계지원을 위한 기반기술 확보 연구를 진행 중에 있다. 그 중에서 마산, 목포 등에 침수범람 방재시설을 개념설계안을 제시하고, 수리모형실험을 통한 적용성 확인 및 주변 수리 해양환경 변화를 파악하기 위한 연구가 현재 활발히 수행되고 있다. 그 중에서도 마산과 같이 만으로 구성된 해역의 침수범람을 방지하기 위한 ‘부침식 폭풍해일 방벽’ 시설은 상당 부분 연구가 진척되어 해당 기술에 대해서는 현재 국내 특허출원된 상태이다. 이러한 방재 시설물들이 향후 실해역에 구축된다면 침수범람을 선제적이고 적극적으로 방어함으로써 연안역의 인명과 재산 피해를 줄이는데 큰 기여를 할 것으로 기대하고 있다. 최근 국토해양부에서는 각종 해양재해로 인한 연안침수, 항만시설물 유실 등에 대비한 종합대비책을 발표하였다. ‘아라미르 프로젝트’라 명명된 이 계획은 과거 태풍이나 해일 등으로 침수피해가 있었거나 앞으로 피해가 예상되는 항만과 배후 도심권 저지대권역에 새로운 방재시설을 설치하여 국민의 생명과 재산을 보호한다는 것을 핵심으로 하고 있다. 이러한 새로운 형태의 재해방지시설물을 계획하는 데는 많은 국제적 시공 및 운영사례를 살펴보고 해당 지역의 지리적, 구조적 여건에 맞는 설계방안을 도출하는 연구가 필수적이다.

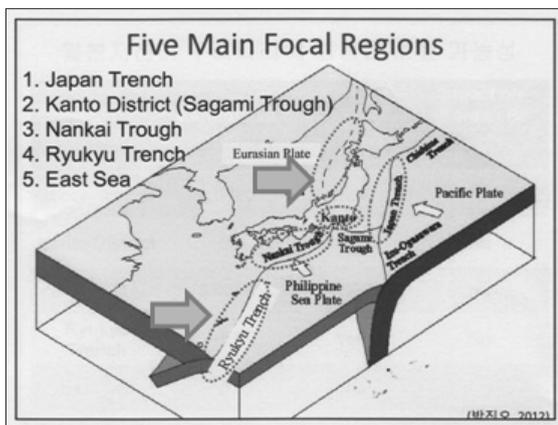
해양과기원은 수행중인 본 연구를 통해 ‘아라미르 프로젝트’에 대한 이론적이고 기술적인 지원을 수행하고 있으며, 항만 및 연안의 주요 시설들에 대한 방재대책을 수립함으로써 연안 저지대의 안전성을 확보하는데 기여하고 있다.

## 6. 결론 및 제언

태풍에 의한 연안역에서의 각종 피해는 해마다 반복되어 발생하고 있다. 특히 태풍에 의한 고파랑 및 연안저지대의 해일침수범람은 직접적인 인명의 피해 및 막대한 양의 재산 피해를 발생시킨다. 본 연구에서는 이러한 해양재난으로부터 안전성을 확보하기 위한 소프트웨어적(해일침수범람 예측시스템 구축), 하드웨어적(해일차단벽 개발) 방재 연구를 동시에 수행 중에 있다. 특히 국내해역의 특성에 맞는 침수범람 방지시설의 개발 연구 및 정밀한 설계 조건의 산정은 무엇보다도 중요하다. 그러나 현재의 전 지구적인 환경변화는 침수범람 방지시설을 구축하기 위한 설계조건 등을 산출하는데 있어 많은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 정확한 방재대책 수립을 위해서는 기존의 연구사업을 통해 도출된 빈도별 폭풍 해일고, 지진 해일고, 설계파고 및 해수면 상승 등의 기후변화 데이터를 종합적으로 검토하여 현지 지형에 적합한 방재시설을 제시하고, 이를 설계하는데 있어서 기반기술을 제공하는 것이 필요하다. 해양과기원은 이를

최종 목표로 하여 국민의 생명과 재산을 보호하는데 합리적이고 지속가능한 방재계획의 수립을 위한 연구를 계속 진행 중에 있다. 특히 연구과제를 통하여 개발된 해일차단벽(Storm Surge Barrier) 시설의 실용화를 최종 목표로 하고 있으며, 목포, 부산, 마산, 여수, 삼척 등의 해일피해 위험지역을 우선 적용 대상으로 하고 있다. 그리고 현재까지 수행된 폭풍해일에 대비한 침수범람 예측 및 방재시설물의 개발 연구에서 확장하여, 지진해일에 대비한 연구도 추가로 진행 중에 있다. <그림 8>에서 나타나는 바와 같이 동해 뿐 아니라 류큐 열도에서의 해저지진 발생가능성이 계속 제기되고 있어, 우리나라의 동해 및 남해안에서의 지진해일 피해의 가능성이 여전히 크기 때문이다.

해양기인성 재해는 그 발생 빈도는 크지 않으나, 재해 발생 시 그 피해가 매우 크다는 특징이 있다. 그러나 해양재난의 심각성에 대한 연안역 주민들의 인식은 매우 낮은 수준이다. 마산항의 경우, 수백억 예산의 해일방재 시설물인 방재언덕의 설치계획에도 불구하고, 정작 해당 지역 주민들은 횡집거리의 조망권 보장을 요구하며 그 설계고를 오히려 낮출 것을 요구하는 사례가 있었다. 장래의 기후변화에 기인한 해양외력의 증가는 가능성이 아닌 사실이다. 이에따른 직접적인 재해방지대책을 위한 지속적인 연구 뿐 아니라 방재대책에 대한 적극적인 홍보 및 대국민 교육에 있어서도 장기적이고 체계적인 접근이 필요할 것으로 본다. 또한 정부뿐만 아니라 직접적인 재해 방지대책을 수립해야할 지방자치단체의 역량을 강화하는 일에도 과감한 투자가 반드시 필요하다.



<그림 8> 주요 해저 지진 발생 가능 지역분포

**저자 약력 심재설**

- 1976-1980 : 연세대학교 토목공학과 학사
- 1980-1984 : 연세대학교 토목공학과 석사
- 1992-1998 : 중앙대학교 토목공학과 박사
- 1985-1998 : 한국해양연구원 연구원
- 1999-2010 : 한국해양연구원 책임연구원
- 2011-2012 : 한국해양연구원 기후연안재해 연구부 부장
- 2012-현재 : 한국해양과학기술원 특성화연구본부 본부장

**저자 약력 윤종주**

- 1995-2002 : 아주대학교 토목공학과 학사
- 2002-2004 : 아주대학교 건설교통공학과 석사
- 2007-2012 : 아주대학교 건설교통공학과 박사
- 2004-2012 : 한국해양연구원 기후연안재해연구부 연구원
- 2012-현재 : 한국해양과학기술원 연안재해재난 연구센터 연수연구원