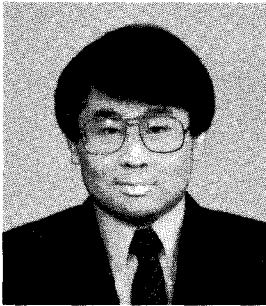


設計海面과

暴風海溢

徐承男 (海洋研究所·工博)



방 파제는 외해에서 침입하는 파랑을 막아 항내 정온을 유지하고 계류선박과 항내 시설을 보호하는 외곽시설이다. 그러므로, 방파제 설계시 파력에 충분히 견디어낼 수 있도록 계획지점의 파력을 정밀하게 산정해야 한다. 한편, 파력은 파랑의 특성 파고·파향·주기에 대한 함수이므로 결국 합리적인 파랑 산정이 방파제 설계에 가장 중요한 항목이라 할 수 있다.

파랑의 성장 및 감쇄에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 수심, 해조류, 쇄파를 생각할 수 있다. 수면위를 부는 바람의 에너지가 파랑에 전달되면 파랑은 발달하게 되며, 특정 파랑이 가질 수 있는 에너지 보다 큰 에너지를

얻게 되면 이를 소산시키기 위해 파랑은 부서지기 시작한다. 이러한 쇄파 현상은 심해에서도 발생하나, 천해지역의 경우 파랑이 수심의 0.8배에 달하면 쇄파 현상이 나타난다.

바람에 의한 에너지 공급이 없는 경우 심해에서 천해로 진행하는 파랑의 파고는 임계수심까지 서서히 감소한 후 임계수심을 지나서 해안에 가까이 올수록 비교적 급격하게 증가한다. 이와같이 수심은 파랑의 변화에 큰 영향을 준다. 그러면 파랑의 성장 및 감쇄에 중요한 수심은 어떻게 정의되는가를 살펴보자.

어느 한 지점에 수 많은 파랑이 지날 때 해저면으로부터 수면까지 높이를 재어 평균한 값을

수심으로 간주한다. 수심 또는 평균해면은 시간에 따라 변할 수 있으며, 설계시 기준이 되는 해면을 설계 해면으로 부른다. 우리나라에서 사용되는 설계해면은 대조평균 만조위에 기상조 또는 폭풍해일에 의한 해면 상승을 합해 사용하도록 되어 있으나 폭풍해일에 대한 체계적인 연구가 시작되는 단계이므로 기상조에 의한 해면 상승을 고려한 예는 드문 것으로 알고 있다.

설계파는 발생가능한 최대파이며, 이러한 악기상의 조건하에는 강한 비바람이 동반된다. 강한 바람에 의해 표층수가 바람부는 방향으로 밀려가게 되고, 이 표층수의 흐름이 더 이상 진행할 수 없는 해안에 도착하면 해수면이 상승하기 시작한다. 강한 바람이 지속적으로 불게 되면 수면 상승속도가 늦어지며, 점차 해수가 주변의 낮은 곳으로 이동하게 되어 결국 평형상태에 도달하게 된다. 기상조에 의한 수면상승이 수심의 상당부분을 차지하여 이를 무시할 수 없는 경우 기상조를 고려하여 설계해면을 산정해야 한다.

남·서해안은 폭풍해일 다발지역으로 설계파가 작은 어항은 월파 현상이 심한 것으로 1989년 수행된 어항설계 천해파 추정사업의 현지 답사로부터 조사되었다.

월파는 설계해면과 밀접한 관계가 있으므로 기상조에 의한 해면의 상승의 원인 및 특성을 파악하여 이를 밝히고자 한다. 월파의 허용 정도에 따라 천단고의 높이가 결정된다. 즉 월파가 허용되면 설계파의 0.6배를 택하고 반면에 월파를 허용치 않으면 1.25배를 곱한 값을 사용한다.

따라서 설계파가 작은 어항은 천단고 역시 작으며, 이러한 어항이 천해지역에 위치하여 해일에 의한 수면 상승이 천단고에 견줄 수 있는 경우 심한 월파현상을 유발하게 된다. 본고에서는 기상조에 발생원인과 우리나라의 현황을 소개하고, 그 대책을 간략하게 소개하기로 한다.

폭풍해일의 특성

규칙적인 천체운동에 의해 해수면이 주기적으로 승강하는 천문조와는 달리 폭풍해일은 기상착란에 의해 해면이 상승 또는 하강하는 현상이다. 특히 태풍과 발달한 온대성 저기압과 같이 강한 저기압에 의해 발생되며, 해면이 상승하는 것은 다음 두 요인에 의해 결정된다.

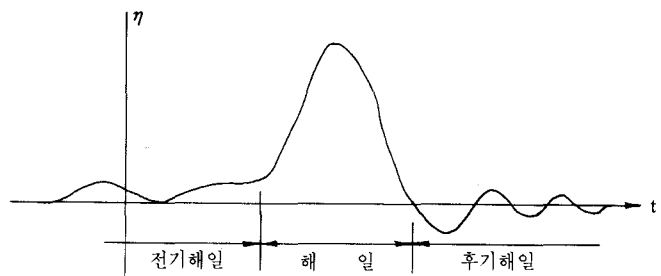
첫째 요인은 저기압의 강력한 바람에 의해 표층수가 이동하여 해면이 변화되는 것이고, 둘째로 저기압의 중심기압이 주변 기압보다 낮아 이 기압차이로 인해 해수면이 상승하는 것이다. 기압의 차이에 의한 해면 상승은 수심에 무관하나 표층수 이동에 따른

해면 상승은 수심에 반비례한다.

그러므로 수심이 낮은 천해지역은 해일이 자주 발생하며 만과 같이 기상조 발달에 도움이 되는 지형에서는 큰 해일이 발생하게 된다.

폭풍해일은 실측해면 기록으로부터 천문조위를 제한한 부분을 말한다. 천문조는 여러해에 걸쳐 해면을 관측하여 천체의 운동에 의한 각 분조의 성분을 최소자승법을 사용하여 얻어진다. 간단한 차이가 큰 지역에서는 조석과 해일의 상호작용을 무시할 수 없으며 해일에 의해 조석이 변하게 된다. 이러한 경우 장기간의 자료를 통해 추정된 조위는 비교적 짧은 기간에 걸쳐 나타난 기상착란중의 천문 조위와 상당한 차이를 보이게 된다. 따라서, 실측 해면 자료로부터 천문조위를 빼어 폭풍해일을 추산할 때 비선형성의 상호작용을 고려하는 것이 바람직하다.

폭풍해일은 양 또는 음의 값을 가질 수 있으며, 실제 해면이 추정조위보다 큰 경우를 양의 해일, 낮은 경우를 음의 해일이라 부른다. 양의 해일은 해안의 범람을 일으켜 재해를 가져오므로



<그림 1> 만에 발생한 폭풍해일의 해면 모식도

오랫동안 관심의 대상이 되어왔다. 그러나, 음의 해일 역시 재해를 일으킬 수 있음을 상기시키고자 한다. 특히 원자력 발전소와 같은 임해공업시설의 취수구가 해면이 낮아져 그 기능을 상실하는 경우 취수장치의 가동이 불가능하므로 심각한 재해를 유발시킬 수 있다.

해일도 일종의 파랑이므로 장애물을 만나면 반사와 굴절현상을 보이며, 만 입구에 다다른 해일은 일부에너지가 반사되어 외해로 빠져나가게 된다. 그러나, 대부분의 에너지는 만내에 상당기간 동안 (수시간에서 수일) 머무르게 된다. 이 에너지의 스펙트럼은 광범위한 주파수에 걸

쳐 나타나며, 이 중 만의 고유진동수와 같은 주파수의 에너지는 공명에 의해 증폭된다.

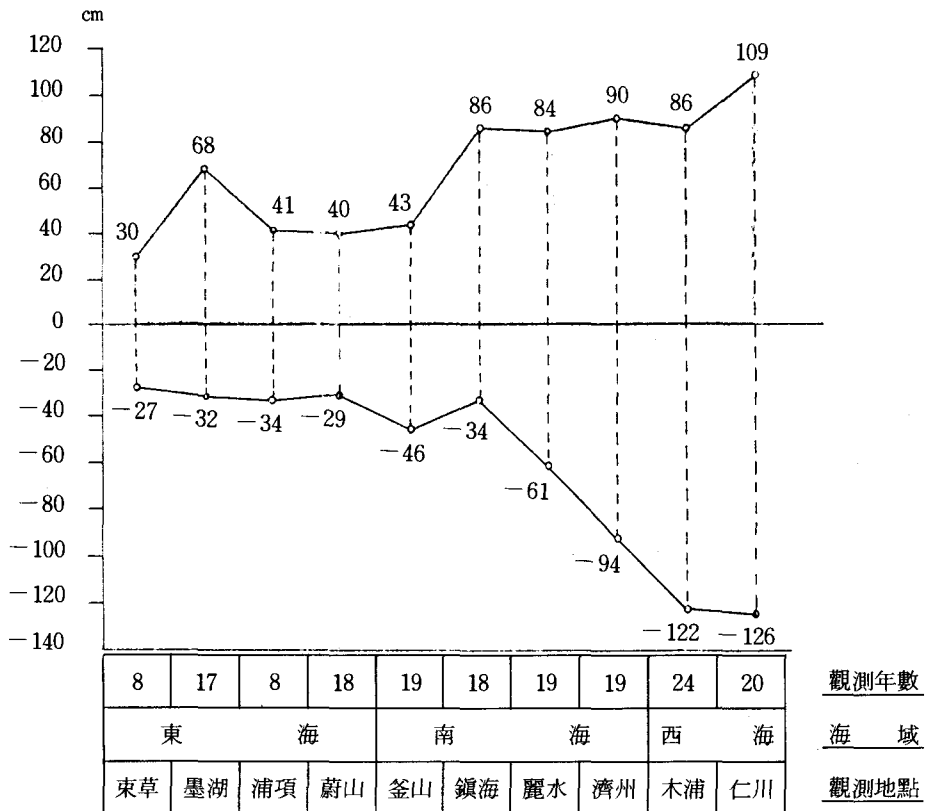
그림 1에 도시된 바와 같이 후기 해일의 진동은 증폭된 고유진동이 서서히 감쇄하여 나타난다고 설명할 수 있다. 전기해일은 저기압의 중심부가 멀리 떨어져 있어 그 세력이 직접 미치지 못하나, 저기압으로부터 발생한 너울의 전파속도가 저기압의 이동속도보다 빠르기 때문에 천해지역에 먼저 도달하게 되며 이들이 쇄파되면서 수면상승을 가져온다. 이 기간의 수면 상승은 서서히 진행되며 파랑의 쇄파에 의한 상승을 wave setup이라 한다.

한편, 저기압의 중심권이 가까

이 있어 그 세력을 직접 받는 경우 수심은 급격히 상승하게 되고 저기압 중심이 통과하면 수면의 급격한 하강이 나타나게 된다. 따라서, 좁은 의미의 폭풍해일은 이 부분만을 가르킨다.

해일은 전파되는 동안 지형의 변화에 따라 변형되므로 복잡한 해안선을 갖는 지역에서는 수치계산방법으로 이를 산정해야 한다. 해일의 운동을 지배하는 식으로는 연속 방정식과 운동방정식이고 이들로부터 수위 η 와 유속 성분 u, v, w 을 구하게 된다.

이미 언급한 바와 같이 해일은 장파이므로 수심방향의 성분 w 의 변화는 거의 없다. 그러므로 수심에 대해 적분함으로 W 성분



〈그림 2〉 한국 연안의 최고 최저 기상조 (추, 1987)

을 제거한 2차원식이 많이 사용된다. 이렇게 유도된 해일 지배 방정식은 조석 방정식과 거의 같기 때문에 조석 모델을 약간 수정하면 이를 해일모델로 바로 사용할 수 있다.

해안선이 직선이고 등심선이 단조로운 지역에서는, 2차원식을 더욱 다루기 쉬운 1차원식으로 전환시킬 수 있으며, 1차원식은 계산속도가 매우 빠른 장점을 갖게 된다. 한 걸음 더 나아가, 지속적으로 부는 바람의 세기가 일정하고, 지구자전에 의한 전향력을 무시할 수 있다면 수위의 차이로 생기는 압력 경도력은 바람에 의한 수면 전단응력과 흐름을 방해하려는 저면 전단응력 사이에 균형이 이루어진다.

이들의 관계식으로부터 수위 η 을 구할 수 있다. 해수 흐름의 원인은 바람에 있기 때문에 저면 전단응력은 수면전단응력에 비례한다. 그리고, 전단응력은 풍속의 제곱에 비례하므로 결국 수위는 취송거리에 비례하고 수심에 반비례하며 풍속의 제곱에 비례하게 된다. 이를 Colding 식이라 하며, 풍향에 대한 보정과 기압감소에 따른 수위상승 및 wave setup 을 고려한 다음 경험식이 개략적인 계산에 많이 사용되고 있다.

$$\eta = a\Delta p + b(U_{\max})^2 \cos\theta = c\eta_w$$

여기서 a =약 0.99 값을 갖는 상수

Δp =주변 기압과 저기압 중심 기압의 차이

b =지역에 따른 상수로 취송거리에 수심에 의해 정해짐

U_{\max} =최대풍속

θ =최고 해일발생 풍향과 주 풍향간의 각

c =비례 상수

η_w = wave setup

수치모델의 결과를 종합하면 외력인 해상풍의 계산이 해일 모델의 정확도에 상당한 영향을 주는 것으로 지적되었다. 태풍의 중심이 가까이 지나가는 경우 단순한 파라미터 모델로 해상풍을 추정하여도 큰 문제가 없으나 태풍 중심이 멀리 떨어져 있거나 저기

지금까지 보고된 폭풍해일의

표1. 어청도 해상에서 관측한 파라자료

날 짜	일 시	유의파고 (m)	주기 (sec)	조 위 (m)	중심기압 (mb)
'89. 8. 29	0	0.29	3.37		
'89. 8. 29	3	0.28	4.27	5.20	
'89. 8. 29	6	0.23	4.13	3.14	
'89. 8. 29	9	0.33	3.12	1.59	1,000
'89. 8. 29	12	0.56	3.66	3.69	
'89. 8. 29	15	0.75	4.00	4.60	
'89. 8. 29	18	1.33	4.92	2.45	
'89. 8. 29	21	1.42	5.12	1.07	996
'89. 8. 30	0	3.65	8.00	3.67	
'89. 8. 30	3	4.41	9.14	5.58	
'89. 8. 30	6	4.14	9.14	3.60	
'89. 8. 30	9	3.73	8.53	1.39	996
'89. 8. 30	12	3.25	8.53	3.10	
'89. 8. 30	15	2.66	8.00	5.07	
'89. 8. 30	18	1.99	7.11	3.05	
'89. 8. 30	21	1.83	6.40	0.97	996
'89. 8. 31	0	1.60	6.10	2.84	
'89. 8. 31	3	1.27	6.10	5.65	
'89. 8. 31	6	1.14	6.10	4.08	
'85. 8. 13	12	0.36	3.56	4.06	
'85. 8. 13	15	0.27	14.22	3.65	
'85. 8. 13	18	0.26	14.22	1.89	
'85. 8. 13	21	0.42	14.22	2.01	980
'85. 8. 14	0	0.67	12.80	4.44	
'85. 8. 14	3	0.97	4.57	4.92	
'85. 8. 14	6	1.84	5.12	3.01	
'85. 8. 14	9	5.28	8.53	1.98	985
'85. 8. 14	10	5.86	9.14	2.35	
'85. 8. 14	12	4.51	9.14	3.79	
'85. 8. 14	15	3.38	7.53	4.79	
'85. 8. 14	18	2.67	8.53	2.75	
'85. 8. 14	21	2.13	8.53	0.96	985
'85. 8. 15	0	1.80	8.00	3.10	
'85. 8. 15	3	1.40	7.11	5.75	
'85. 8. 15	6	1.01	6.74	4.15	
'85. 8. 15	9	0.75	5.57	1.66	985

압에 의한 바람 및 기압을 파라미터 모델로 계산한 결과가 관측치와 상당한 차이를 나타냈다. (해양연구소 1987) 그러므로, 폭풍해일 모델의 정확도를 증진시키기 위한 노력과 아울러 해상풍 모델의 정확도를 함께 높이기 위한 노력이 이루어져야 할 것이다.

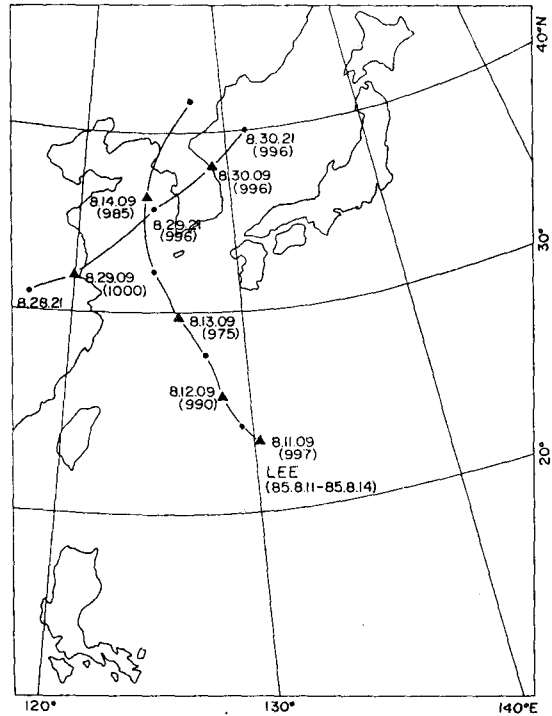
우리나라의 폭풍해일

지난 20여년간의 수로국 검조 자료를 분석하여 추(1987)는 폭풍해일을 계산하였다.

50cm를 넘는 기상조 현상의 발생빈도는 동해에서 서해로 갈수록 높다. 서해에는 겨울철에 많이 발생되고 남해에는 여름과 가을의 태풍철에 주로 해일이 발생한다.

그림2에 도시된 것과 같이 수십이 깊은 동해는 30 ~ 68cm, 남해는 43 ~ 90cm 그리고 천해인 서해는 86 ~ 109cm로 해면이 상승하였다. 한편 음의 해일은 서해에서 뚜렷이 나타나서 최고 약 120cm의 해면이 하강했으며 이는 대륙성 고기압이 확장할 때 발생되었다. 황(1971)은 12년간(1959 ~ 1970) 해면자료를 분석하여 남해안과 남서해안은 태풍에 의해 해일이 발생하고 서해안은 동기나 춘기의 온대성 저기압에 의해 주로 발생하는 것을 밝혀냈다. 오등(1988)은 1981 ~ 1986년 사이의 남해에서 관측한 수로국 검조자료를 사용하여 폭풍해일을 조사하였다.

1985년 대한해협을 통과하여 동해로 진행한 Brenda에 의한 해일이 여수에서 최고 70cm를 기록했으며, 조사기간 동안에 발생한 해일의 최고치는 여수에서 항



<그림 3> 어청도 해상을 통과한 저기압 경로도

시 나타나므로 이 지역은 해일의 피해를 줄이기 위한 대책을 세워야 할 것으로 사료된다.

과거 폭풍해일을 수치모델로 재현하기 위한 시도가 최(1985)에 의해 처음 시도되었고, 1978년 발생한 두 개의 태풍에 의한 해일을 계산하여 관측치와 비교하였다.

해양연구소(1985, 1986, 1987, 1987)에서 해난재해 예보시스템 연구의 일환으로 수치모델을 이용하여 계산하였고 기상연구소(1989)에서도 1986년 Vera와 1987년 Thelma에 의한 해일을 수치모델로 재현하였다. 현재까지 사용된 격자망은 너무 커서 복잡한 남서해안의 해일을 추정하는 데 정밀도가 떨어지는 문제점이 지적되었다.

연안의 해일을 정확히 계산하

기 위해서는 더욱 세밀한 격자망이 필요한 것으로 보고되었다(기상연구소, 1989).

1989년 8월 30일 03시경 서해 중부 지방에 강한 비바람과 함께 해일이 발생하였다.

어청도항의 방파제는 일제시대에 축조된 것으로 만조시에 발생한 해일로 해면이 상승하여 월파가 심하게 일어났으며, 이에 의해 항내에 계류된 선박의 계류선이 끊어져 선박간의 충돌로 많은 피해가 발생하였다. 해일로 인한 수면 상승은 평시에는 도달할 수 없는 지점까지 파랑의 도달을 허용하여 가옥의 피해는 물론 십여척의 어선을 육상에 올려 놓았다.

한편, 1985년 8월 14일 어청도 서쪽 해상을 지난 태풍 Lee에 의한 피해는 미미한 것으로 보도되었다. 그림3에 두 기상이변의 진

행경로와 중심기압이 도시되었다. 태풍 Lee의 중심 기압은 985mb이고 89년 저기압은 996mb로 밝혀져 Lee의 풍속에 더 클 것으로 추정된다.

1985년 어청도 등대 서쪽해상 2km 지점에 해양연구소가 부이식 파고계(wave rider)를 운영하여 파고를 측정하였고 1989년에는 해운항만청에서 동지점에 파고계를 설치하여 파고를 측정하였다.

표1에 기재된 자료에서 알 수 있듯이 관측된 최대파고는 85년 8월 14일 10시에 5.9m, 주기 9.1초였고 89년 8월 30일 03시에 4.4m, 주기 9.1초로 측정되었다. 따라서, 기압과 파고자료로부터 태풍 Lee의 세력이 더욱 강한 것으로 판단된다.

한편, 최대파가 나타난 시각의 조위는 Lee의 경우 2.4m로 창조시였고 반면에 89년 저기압은 5.6m의 만조시에 최대파가 발생하였다. 저기압의 세력은 태풍이 커서 기상조의 크기도 태풍시에 컸으리라 추정되나 이것은 천문조의 차이 3.2m에는 미치지 못할 것으로 사료된다. 따라서, 89년 저기압이 보다 많은 월파를 야기시켜 큰 피해를 입혔을 것이라 추정된다.

해일의 대책과 결론

돌발적인 자연재해인 폭풍해일을 인공구조물을 설치하여 이 구조물에만 의존하여 방비하는 것 보다는 신속한 대피법 등 다른 방법을 함께 사용하는 재해방지책이 효과적인 것으로 보고되었다.

폭풍해일에 의한 재해는 해면 상승으로 인한 범람뿐 아니라 파

랑에 의한 동력학적인 힘도 고려되어야 한다. 해일을 막기 위한 구조물로는 연안에 제방 또는 호안을 쌓거나 외해에 해수의 유입을 줄이기 위해 좁은 개구부가 있는 방파제를 축조한다. 제방 또는 호안이 축조되면 해안에의 접근이 용이하지 못하므로 최근에는 외해 방파제를 쌓는 쪽으로 기울어지고 있다.

일본의 경우, 나고야시는 약 8.25km에 달하는 외해 방파제를 1964년에 완공하였다. 수치실험에 따르면 방파제가 없는 경우 해면이 약 3.55m가 되나, 두개의 좁은 개구부를 가진(개구부의 폭 350m와 50m) 방파제가 있음으로써 해면이 3.0m로 낮아지는 것으로 추정되었다. 또한 방파제 축조로 인해 파랑의 침입과 발달을 억제할 수 있어 연안 제방 천단고를 약 1.0m에서 1.5m까지 낮출 수 있는 것으로 추정되었다.

구조물 설계에 필요한 설계해면은 다음 세 방법중 하나를 택해 사용하는 것이 상례이다.

- 1) 충분한 양의 과거 실측자료로부터 구한 최고해면
 - 2) 실측자료에 극치통계를 이용하여 계산한 극치해면
 - 3) 수치 실험에 의한 해면 추정
- 2)와3)의 경우 대조평균 만조위에 추정된 기상조를 더한 설계해면이 너무 커서 이를 적용함이 적합치 않을 때 최대 기상조가 만조시 나타날 확률을 고려하여 조정하는 것이 바람직하다.

우리나라 남서 해안은 폭풍해일이 자주 발생하며 최고 1m까지 해면이 상승하는 것으로 조사되었다. 따라서, 이 해역에 위치한 어항의 설계해면을 보다 합리적으로 추정하는 것이 효율적인

어항 관리면에서 바람직하다.

남서 해역 전 지역에 대해 일시에 기상조를 추정하는 것 보다는 월파가 심한 항부터 단계적으로 설계해면을 추정하여 기술축적을 하며 도출된 단점을 지속적으로 보완하는 방안이 좋을 것으로 사료된다. ㉔

참고 문헌

- 기상연구소, 1989, 한국 근해 해양기상 특성과 예보기술 개발에 관한 연구(III).
 최병호, 1985, 동지나 해의 1978년 하계 태풍해일의 추정, 한국해양학회지, 20, 1 - 11.
 오임상, 김성일, 봉종현, 1988, 한국 남해를 통과하는 태풍에 의한 폭풍해일 연구, 한국기상학회지, 24(3), 72 - 84.
 추교승, 1987, 한국 연안에서 발생한 폭풍 지진 해일 현상에 대하여, 강릉대성문화사.
 해양연구소, 1985, 해안·재해예보시스템 연구(I), BSPG - 56 - 87 - 1.
 해양연구소, 1986, 해안·재해예보시스템 연구(II), BSPG - 33 - 121 - 1.
 해양연구소, 1987, 해안·재해예보시스템 연구(III), BSPG - 47 - 164 - 1.
 해양연구소, 1988, 해안·재해예보시스템 연구(IV), BSPG - 61 - 203 - 1.
 황진풍, 1971, 한국해안에 있어서 기상착란에 의한 해면 변화, I, 태풍 빌리호(1970)와 남·서해안의 이상고조현상, 한국해양학회지, 6(2), 92 - 98.
 수산청(1989) 어항설계 천해파 추정(2) 보고서.