

결합확률을 이용한 설계파랑산정

- 고흥 내발항의 경우 -

황 철 민 / 해양수산부 어촌어항과 토목사무관
조 진 훈 / 농업기반공사 수리시험장 책임연구원

내발항은 전남 고흥군 도화면 내발리에 위치한 어항으로서 원래 발포진이라 불리웠으며 예로부터 포구로써 이용도가 높은 지역이다. 어항으로써 개발된 것은 1973년 2종 어항으로 지정된 이후부터이며, 1991년 1종 어항으로 승격된 이후 본격적인 개발계획이 수립되었다. 이러한 개발계획에 의해 물양장 및 남방파제, 파제제가 설치되었으나, 폭풍시 파랑의 내습에 대한 항내 정온도가 확보되지 않아 수리모형실험을 통한 안정성 검토가 계획되었으며 이를 위하여 천해설계파를 재산정하였다.

설계파랑산정은 농업기반공사 농어촌연구원과 영국 월링포드수리연구소(HR Wallingford)가 공동으로 수행하였다. 본 과업을 위하여 월링포드 수리연구소의 수치모델인 SEAWORK를 사용하였다. 극치해면은 내발항과 가까운 거리에 위치하고 있는 여수측후소에서 관측한 수위자료를 바탕으로 추정하였다. 재현빈도별로 결정된 파랑과 극치해수면 추정결과를 결합

확률 기법에 적용하여 내발항의 설계파랑을 결정하였다.

설계파랑산

바람 조건

설계파랑산정을 위한 태풍자료로서 미 해군에서 운영하는 지구열대 및 아열대 발생 열대성저기압 기상자료 데이터베이스(GTECCA)를 이용하였다. 이 자료는 일기도와 관측자료(최근에는 위성관측자료 이용)를 비교 분석한 것으로, 최대시간평균풍속, 태풍중심의 이동속도, 중심기압 및 위치 등의 정보를 포함하고 있다.

태풍자료와 관련하여 고려해야 할 또 다른 하나의 중요한 인자는 태풍의 진로이다. 한반도 남해안에서 태풍에 의한 대부분의 피해는 대략 남쪽으로부터(남동~남서 방향) 해안선을 향해 접근하는 태풍에 기인하는 것으로 판단되

므로 대략 남쪽 방향으로부터 상륙하는 태풍만 선택하여 분석하였다. 이와 같이 선정된 태풍 자료로부터 시간평균풍속의 극치분석을 수행하였다. 극치분석 방법으로는 3인자 Weibull 분포 및 Gumbel 분포에 따른 극치분석 방법을 적용하였다. 두 가지 방법으로 극치분석한 결과를 평균하여 사용하였으며, <표-1>에 재현기간별 풍속을 정리하였다.

<표-1> 재현기간별 시간최대평균풍속

재현기간(년)	1	10	20	50	100	200
풍속(m/s)	20	35	42	51	57	63

외해파랑 예측

내발항의 극치 파랑을 예측하기 위한 극치 풍속을 세 단계로 나누어 분석하였으며, 각 단계별 세부 내용은 다음과 같다.

1) Young's 법

Young(1988)은 몇 개의 인자를 사용하여 태풍 때문에 발생하는 유의파고(H_s)를 예측하는 parametric 모델을 제안하였다. 식 (1)은 Young이 제안한 공식으로서 최대시간평균풍속(V_{max} (m/s)), 유효취송거리(F)를 사용하여 태풍의 영향권 내에서 발생하는 최대 H_s 를 예측할 수 있다.

$$\frac{gH_s(max)}{V_{max}^2} = 0.0016 \left(\frac{gF}{V_{max}^2} \right)^{0.5} \dots\dots (1)$$

식 (1)에서 최대시간평균풍속 V_{max} 는 태풍자료로부터 직접 얻을 수 있으며 유효취송거리(F)는 다음의 과정을 통하여 계산할 수 있다. 먼저 식 (2)로부터 태풍의 유효반경(R')을 계산한다.

$$R' = 22.5 \times 10^3 \log R - 70.8 \times 10 \dots\dots (2)$$

여기서 R 은 태풍의 반경이다. 위에서 계산된 R' 을 이용하여 식 (3)으로부터 유효취송거리(F)를 계산한다.

$$F/R' = aV_{max}^2 + bV_{max}V_{fm} + cV_{fm}^2 + dV_{max} + eV_{fm} + f \dots\dots\dots (3)$$

여기서 V_{fm} 은 태풍의 진행속도(m/s)이며, $a = -2.175 \times 10^{-3}$, $b = 1.506 \times 10^{-2}$, $c = -1.223 \times 10^{-1}$, $d = 2.19 \times 10^{-1}$, $e = 6.737 \times 10^{-1}$, $f = 7.980 \times 10^{-1}$ 이다.

2) JONSEY를 이용한 외해파랑 계산

Young의 parametric method에 의하여 계산된 심해파(H_s)는 내발항 주위에 산재한 섬들에 의한 파랑에너지 감쇄를 고려하여 조정되어야 한다. 이와 같은 효과를 고려하기 위하여 월링포드수리연구소의 외해파랑 계산모델인 JONSEY모델을 이용하였다.

JONSEY모델은 풍속, 지속시간, 방향 그리고 일정한 각을 가지고 측정된 취송거리로 나타내는 파랑발생 영역을 입력자료로 이용한다. 이러한 정보를 이용하여 계산된 파랑스펙트럼으로부터 H_s , 평균주기(T_m) 그리고 피크주기(T_p)를 계산한다.

본 연구에서는 먼저 전취송거리(>500km)와 <표-1>의 풍속을 이용하여 JONSEY모델을 적용하였다. 주어진 풍속에 대해서 취송시간은 Young's 법으로 구한 H_s 가 일치될 때까지 반복계산하여 조정하였다. 이와 같은 과정을 거치고 나면 무한 취송거리일 때 태풍에 의한 대응풍속과 지속시간을 계산할 수 있으며, 그 결과는 <표-2>와 같다.

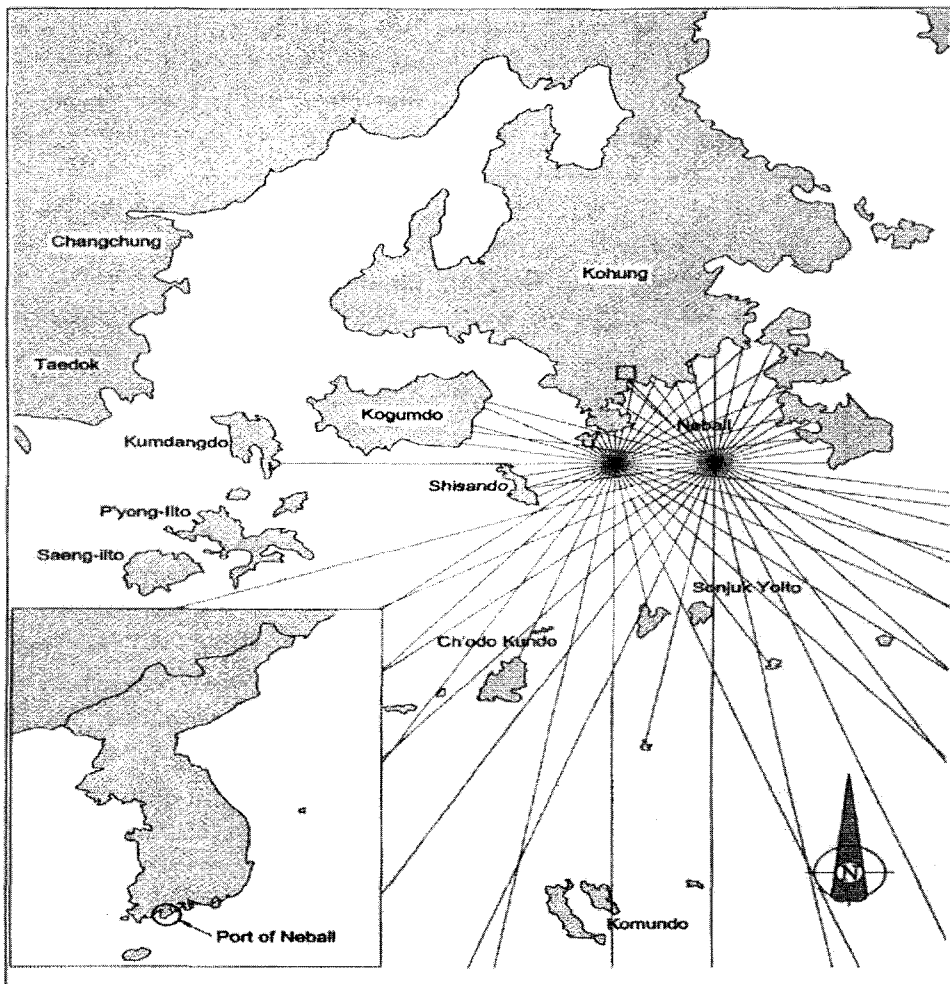
〈표-2〉 대응풍속과 지속시간

재현기간(년)	1	10	20	50	100	200
풍속(m/s)	20	35	42	51	57	63
지속시간(시간)	15.5	14.5	14.5	13.5	13.2	13.2

3) 내발향의 파랑

취송거리는 북위 34° 24' 30"에 위치한 내발향 외해의 두 지점을 기준으로 하여 5° 간격으

로 모델경계 안쪽에 위치한 지점에서 측정하였다(그림-1). 취송거리는 이 지역에 산재한 여러 개의 섬들을 고려하여 결정하였다. 예를 들면, 길게 연장된 (>200km) 두 개의 연속된 취송거리를 측정하였는데, 두 취송거리 사이에 섬이 위치하는 경우에는 파랑에너지 감쇄를 고려하여 취송거리를 감소시켰다. 또한 측정한 여러 개의 취송거리와 방향이 각각 다르기 때문에 이 지역의 파랑조건을 대표할 수 있도록



〈그림-1〉 내발향 위치 및 취송거리측정을 위한 방사망 구성

취송거리를 다시 조정하였다.

〈표-2〉의 바람조건(풍속, 지속시간)을 이용하여 계산된 최대파랑조건은 바람조건과 동일한 재현기간을 가지는 것으로 가정하였다. JONSEY모델의 계산결과는 〈표-3〉과 같다.

〈표-3〉 외해에서의 최대 파랑(비쇄파조건)

재현기간(년)	1	10	20	50	100	200
H _s (m)	3.42	5.74	7.07	8.5	9.62	10.57

내해파랑 조건

1) OUTRAY 모델

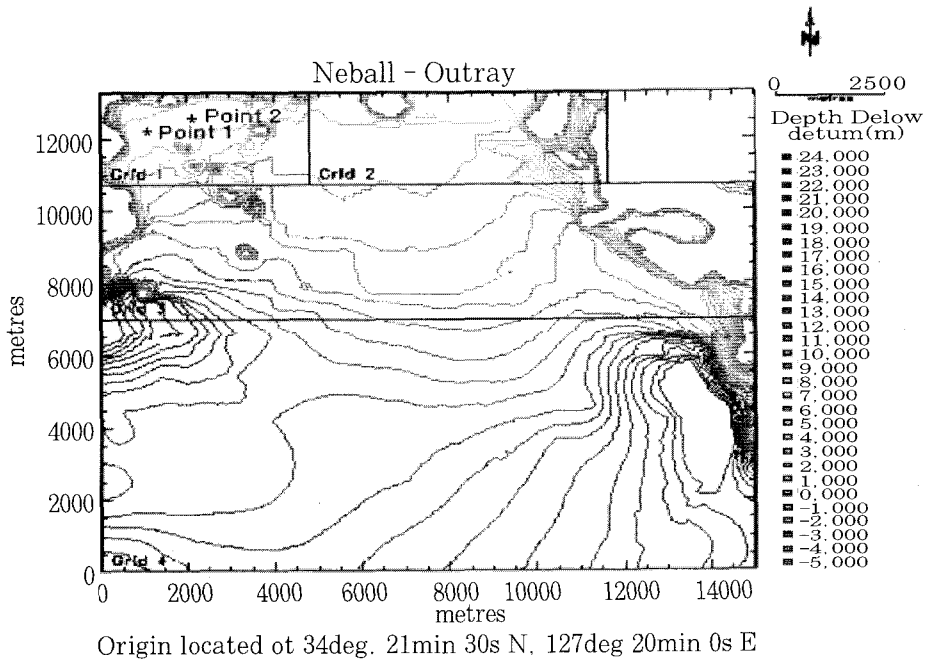
OUTRAY모델은 윌링포드 수리연구소에서 개발한 후방파향선법(back-tracking) 파랑변형모델로서 파랑의 굴절과 천수효과를 계산한

다. 〈그림-2〉는 OUTRAY 모델에 이용되는 지형자료와 4개의 계산격자망을 나타낸다. 계산절점 간격은 지형이 급하게 변하는 곳의 해상도를 높일 수 있도록 큰 계산격자망에서 작은 계산격자망으로 변화도록 하였다.

OUTRAY 모델의 계산은 최고 파랑조건이 발생할 것으로 생각되는 두 지점, Point 1(1255m, 12005m)과 Point 2(2600m, 12305m)에 대하여 실행하였다. 모델 계산결과를 보면 Point 1이 모든 방향에 대해서 최고 파랑조건을 보여주고 있기 때문에 이 점을 이후 실제 계산의 파랑조건 분석에 이용하였다.

2) MULTJON

MULTJON 모델은 JONSEY 모델과 OUTRAY 모델의 계산결과를 처리하는 후처리모델이다. OUTRAY 모델에서 계산된 전달



〈그림-2〉 OUTRAY 격자망

합수와 JONSEY 모델에서 계산된 방향 스펙트럼을 곱한 MULTJON 모델의 계산결과는 특정 지점에서의 내해 파랑조건을 나타낸다. 내발항에 대한 MULTJON 모델의 계산결과는 <표-4>와 같다.

<표-4> 내해에서의 최대파랑(비쇄파조건)

재현기간(년)	1	10	20	50	100	200
H _s (m)	2.34	4.36	5.34	6.61	7.54	8.33
T _m (s)	6.3	7.9	8.5	9.2	9.7	10.1
T _p (s)	8.2	10.1	11.0	11.4	12.0	12.5

OUTRAY 모델은 쇄파현상을 고려하지 않으므로 <표-4>의 파고는 수심이 얇은 곳에서는 그대로 유지되지 않을 것이다.

극치 해수위

1) 여수항의 극치 해수위

여수항의 극치 해수위는 내발항으로부터 북동쪽으로 약 45km 떨어진 여수(34° 45' N, 127° 46' E)의 시계열 수위 10년치를 사용하여 분석하였다. Weibull과 Gumbel 극치분포를 사용하여 여수항의 극치 해수위에 대한 상위 10개 및 상위 50개의 관측치를 분석하였으며 <표-5>는 재현기간별 극치 해수위를 보여주고 있다.

<표-5> 여수항에서의 극치 해수위

재현기간(년)	0.016*	1	10	20	50	100	200
수위(mCD)	3.5*	3.97	4.06	4.09	4.13	4.16	4.19

* Direct counting from data

2) 내발항의 극치 해수위

여수에 대한 극조위를 CIRIA(1996)에 기술된 방법을 사용하여 내발항의 극치 해수위로 전환하였으며, 그 방법을 기술하면 아래와 같다.

$$\frac{\text{극조위} - \text{MHWS}}{\text{대조차}} = \text{일정}$$

이 상수는 두 지역 사이에서 일정하다고 가정하였다.

여수항

대조 평균 고조(MHWS) = 3.19m CD,
대조차 = 2.87m

내발항

MHWS = 3.3m CD, 대조차 = 2.9m

이와 같은 방법으로 내발항의 극치 해수위를 추정하여 <표-6>에 정리하였다. 내발항의 HHW 값은 3.7m CD이다. 내발항의 HHW가 여수항에서 발생한 것과 같은 정도의 초과 확률로 발생한다고 가정하는 것이 합리적이므로 내발항에서의 HHW는 여수에서와 동일한 재현기간을 가진다.

<표-6> 내발항에서의 극치해수위

재현기간(년)	0.016*	1	10	20	50	100	200
수위(mCD)	3.7*	4.09	4.18	4.21	4.25	4.28	4.31

결합확률

1) 배경

너무 높은 항내 파랑 때문에 발생하는 계류선박 또는 해안보호 구조물이 입는 피해는 대

부분 높은 파랑과 해수위가 동시에 일어났을 때 발생한다. 이것은 해수위가 높아 수심이 깊을 때는 수심이 얇을 경우 쇄파될 수 있는 파랑이 부서지지 않고 그대로 진입하여 해안구조물 또는 선박에 직접 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 해안공학 문제를 취급할 때 고조위와 높은 파랑이 동시에 발생하는 경우의 수, 또는 결합확률을 고려하는 것이 중요하다.

일반적으로 완전한 결합확률 연구 분석에는 충분한 양(보통 3년 또는 그 이상의 시계열 자료)의 연속적인 파고와 조위 관측자료가 필요하다. 변수들 사이의 어떤 의존성은 정밀한 방식에 의해 정량화할 수 있다. 비록 많은 양의 시계열 조위 자료가 제공될지라도 파랑 자료가 연속적이지 않다면 이 분석방법에 적용할 수 없다. 본 과제에서는 결합확률을 구하기 위해 적절한 의존도를 가정하고 실용적인 방법(CIRIA(1996))을 적용하였다.

2) 결합확률 의존도

결합확률방법의 실용적인 응용방법은 두 변수사이의 의존성을 상관도(cf)를 사용하여 표현하는 것이다. 예를 들어, 두 변수 사이 상관성이 없는 독립적인 사상인 경우, 결합확률 재현기간 동안 1회 발생할 확률(P)은 $P(\text{해수위}) * P(\text{파고}) = P(\text{결합확률 재현기간 동안 1회 발생 확률})$ 로 표현된다. 1일 2회 발생하는 고조가 1년에 707회 발생한다고 할 때, 어느 임의의 고조가 년중 최고일 확률은 $1/707$ 이며, 이 때 발생하는 파고가 10년 빈도 파고일 확률은 $1/(707 \times 10)$ 이므로 두 변수가 독립사상인 경우에 1년 빈도 해수위와 10년 빈도 파고가 동시에 발생할 확률은 $P(1년 빈도 해수위) * P(10년 빈도 파고) = 1/707 * (1/(707 * 10)) = 2 * 10^{-7}$ 또는 결합확률 재현기간 = $1/$

$(707 * 2 * 10^{-7}) = 7070$ 이다. 만일 두 변수 사이에 상관도(cf)를 고려하면 결합확률기간 동안 1회 발생할 확률(P)은 $P(1년 빈도 해수위) * P(10년 빈도 파고) * cf = P(\text{결합확률 재현기간 동안 1회 발생 확률})$ 이 되며 위의 예에서 발생확률(P)는 $1/707 * 1(707 * 10) * 280 = 5.6 * 10^{-5}$ 또는 결합확률 재현기간 = 25년(상관도 280에 대해)으로 표현된다.

내발항에 대하여 결합확률을 적용하는 경우, 태풍으로 인하여 발생하는 파고와 해수위 조건 사이에 존재하는 상관성에 따라 해수면의 높이가 달라지게 된다. 이 지역의 10년 빈도 해수면상승(surge)은 대략 0.75m(여수에서 측정된 자료)의 범위에 있으며, 대조차는 대략 3.0m이다. 그러므로, 태풍에 의한 해수면상승은 총 해수위에 크게 영향을 미칠 수 있으며, 파랑과 해수위 사이에 상관성이 높게 나타날 것으로 추정되어 상관도 280을 적용하였다.

3) 분석 결과

서로 다른 결합확률 초과빈도에 대한 파고와 조위의 결합은 매우 직접적인 방법으로 결정할 수 있다. 상관도 280을 적용하여 추정된 극치 파랑과 극치 해수위의 계산결과를 <표-7>에 나타내었다.

쇄파조건

1) Owen's 쇄파조건

OUTRAY에 의해 계산한 파랑은 비쇄파 조건으로 추정된 것이다. 그러므로 이와 같은 조건의 파랑을 적용할 때에는 쇄파에 대한 고려가 필요하다. 본 과제에서 쇄파고는 해변경사를 1 : 100으로 가정하고, Owen(1980)의 방

〈표-7〉 결합확률 계산결과

결합확률을 적용한 재현 기간 (년)	수 위		비쇄파 파랑조건			
	수위재현 기간 (년)	수 위 (m ACD)	파랑재현 기간 (년)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)
50	0.4	4.00	50	6.61	9.2	11.4
	1	4.09	20	5.34	8.5	11
	5	4.16	4.5	3.5	7.3	9.4
	10	4.19	2	2.95	6.9	8.9
	50	4.25	0.4	2	5.8	7.7
100	0.4	4.00	100	7.54	9.7	12
	1	4.09	40	6.25	9.0	11.2
	5	4.16	9	4.25	7.9	10
	10	4.19	4	3.5	7.3	9.4
	50	4.25	0.8	2.15	6.1	8.1
200	100	4.28	0.4	2	5.8	7.7
	0.4	4.00	200	8.33	10.1	12.5
	1	4.09	80	7.25	9.5	11.8
	5	4.16	16	4.9	8.2	10.7
	10	4.19	8	4.1	7.8	9.9
500	50	4.25	1.6	2.75	6.5	8.6
	100	4.28	0.8	2.15	6.1	8.1
	200	4.31	0.4	2	5.8	7.7
	0.4	4.00	500	9.5	10.5	13.1
	1	4.09	200	8.33	10.1	12.5
	5	4.16	40	6.25	9	11.2
	10	4.19	20	5.34	8.5	11
	50	4.25	4	3.5	7.3	9.4
	100	4.28	2	2.95	6.9	8.9
	200	4.31	1	2.34	6.3	8.2
	500	4.34	0.4	2	5.8	7.7

법을 사용하여 계산하였다.

$$H_{sb} = (0.58 - (2 * h_s / gT^2))h_s \dots\dots (4)$$

여기서, H_{sb} = 쇄파고(m), h_s = 수심(m), g = 중력가속도(m/s/s), T = 평균 파랑 주기(s)

만약 파랑이 부서진다면 식(4)를 이용하여 파고를 계산할 수 있으며, 이 결과를 비쇄파 파고와 비교하여 쇄파되지 않은 파고가 H_{sb} 를 초과한다면 파랑은 쇄파되며, H_{sb} 가 적용하게 된다.

2) 설계조건

계산결과의 활용은 3차원 평면 수리모형의 경계조건, 기존 방파제 위치에서의 수리학적 조건, 잠재적인 새로운 구조물의 설계조건을 결정하기 위한 것이었다. 〈표-7〉의 결합확률 결과와 Owen의 방법을 적용하여 계산하는 쇄파조건을 사용하여, 각 활용목적에 따라 설계조건을 결정하고 〈표-8〉과 〈표-9〉에 나타내었다. 〈표-7〉의 해수위와 파고 조합으로부터 선정된 값들이 실제 설계조건을 결정하기 위하여 각각 검토되었다. 그러므로 실제 설계에 적용할 가장 나쁜 조건의 조합을 결정할 수 있었다. 본 과업에서는 극치 해수위의 변동이 매우 작으므로 모든 경우를 검토할 필요성은 없었다. 파랑과 해수위의 조합을 포함하고 있는 〈표-8〉과 〈표-9〉의 결과는 일반적으로 실제 설계에 있어 파고가 높은 경우를 나타내고 있다. 50년 빈도의 파고 3.67m는 결합확률을 적용하지 않은 기존의 방법에 의하여 계산된 결과보다 약 40여 cm 큰 값이다. 따라서 본 방법에 의하여 계산된 결과를 기준으로 수리모형실험을 실시하는 경우 항내정온도가 불안정할 수 있으며 이에 대한 방안을 강구해야 할 것이다.

요 약

내발항은 1종 어항으로 승격된 이후 물양장 및 남방파제, 파제제가 설치되었으나, 폭풍시

〈표-8〉 평면모형의 설계파 조건(쇄파조건, 지반고 : -3.6m CD)

재현기간(년)	50	100	200	500	1000
수위(m CD)	4.00	4.00	4.00	4.09	4.09
H _s	4.27	4.28	4.29	4.34	4.35
T _m	9.2	9.7	10.1	10.1	10.4
T _p	11.4	12.0	12.5	12.5	12.7

〈표-9〉 기존방파제에서의 설계파 조건(쇄파조건, 지반고 : -2.5m CD)

재현기간(년)	50	100	200	500	1000
수위(m CD)	4.00	4.16	4.19	4.19	4.19
H _s	3.67	3.72	3.73	3.75	3.77
T _m	9.2	7.9	7.8	8.5	9.0
T _p	11.4	10.0	9.9	11.0	11.2

파랑의 내습에 대한 항내 정온도가 확보되지 않아 수리모형실험을 위하여 기존의 천해설계파를 재산정하였다. 본 과업을 위하여 월링포드 수리연구소의 수치모델인 SEAWORK를 사용하였다. 극치해면은 내발항과 가까운 거리에 위치하고 있는 여수측후소에서 관측한 수위 자료를 바탕으로 추정하였으며, 재현빈도별로 결정된 파랑과 극치해수면 추정결과를 결합확률 기법에 적용하여 내발항의 설계파랑을 결정하였다.

해수위가 높아 수심이 깊을 때는 수심이 얇을 경우 쇄파될 수 있는 파랑이 부서지지 않고 그대로 진입하여 해안구조물 또는 선박에 직접 영향을 미치게 되므로 고조위와 높은 파랑이 동시에 발생하는 경우의 수, 또는 결합확률을 고려하는 것이 중요하다. 일반적으로 완전한

결합확률 연구 분석에는 충분한 양(보통 3년 또는 그 이상의 시계열 자료)의 연속적인 파고와 조위 관측자료가 필요하나 내발항의 경우 충분한 관측자료가 없으므로 결합확률을 구하기 위해 적절한 의존도를 가정하고 실용적인 방법(CIRIA(1996))을 적용하였다.

위와 같은 방법에 의하여 50년, 100년, 200년 및 500년 빈도의 파랑을 계산하였다. 여기서 계산된 결과는 기존의 방법에 의하여 계산된 결과보다 더 큰 값을 나타내었다. 따라서 본 방법에 의하여 계산된 결과를 기준으로 수리모형실험을 실시하는 경우 항내정온도가 불안정할 수 있으며 이에 대한 방안을 강구해야 할 것이다.㉠