

# 船舶의 航行安全支援을 위한 波浪推算에 관한 研究

신 승 호\* · 橋本典明\*\*

\*\*\* 일본 항만공학기술연구소 해양수공부

## Ocean Wave Forecasting and Hindercasting Method to Support for Navigational Safety of Ship

Seung-Ho Shin\* · Noriaki Hashimoto\*\*

\*, \*\* Dr. eng., Marine environment and Engineering Dept., Port and Airport Research Institute, 239-0826, Japan

**요 약** : 해상수송의 안전성을 개선하는 하나의 수단으로서, 해상풍 정보로부터 예정 항로상에서 조우하게될 파랑정보를 높은 정밀도로 예측하여 단시간에 본선에 제공할 수 있는 시스템을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 이의 제1단계로서 대양에서의 다방향 불규칙파 예측을 위한 파랑추산모델을 제시하였다. 검토방법으로는 과거 실제 해역에서 발생한 황천에 기인한 선박 침몰사고를 대상으로 선박의 항행 일정에 따른 해상풍의 분석 및 파랑추산시뮬레이션을 수행하였으며, 이로부터 사고 선박이 조우한 海象을 평가하고 모델의 재현성 및 정도를 검토하였다.

연구의 결과, 사고 선박은 침몰사고의 원인이 Okhotsk해에서 발달한 저기압에 의해 급속히 성장한 고파랑 해역을 회피하지 못하여 발생한 것에 있음을 명백히 하였으며, 본 계산에 이용한 제3세대 파랑추산모델(WAM)로부터의 결과는 실제 관측 파랑의 유의파고, 주기, 방향 스펙트럼 등 항행관련의 파랑제원과 잘 부합되었으며, 실용 선박에서의 예측시스템 구축에 적용성이 양호한 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 황천, 해난사고, 제3세대 파랑추산모델, 해상풍, 유의파고, 주기, 방향 스펙트럼

**Abstract** : In order to improve navigational safety of ships, an ocean wave prediction model of high precision within a short time, dealing with multi-directional random waves from the information of the sea surface winds encountered at the planned ship's course, was introduced for construction of ocean wave forecasting system on the ship. In this paper, we investigated a sea disaster occurred by a stormy weather in the past. We analyzed the sea surface winds first and then carried out ocean wave hindercasting simulations according to the routes of the sunken vessel.

From the result of this study, we concluded that the sea disaster was caused by rapidly developed low pressure system in Okhotsk Sea and the predicted values by the third generation wave prediction model(WAM) was agreed well with the observed significant wave height, wave period, and directional wave spectrum. It gives a good applicability for construction of a practical on-board calculation system.

**Key words** : Stormy weather, Sea disaster, The third generation wave prediction model(WAM), Sea surface wind, Significant wave height, Wave period, Directional wave spectrum.

## 1. 緒 論

선박의 항행은 열차, 자동차, 항공기 등과는 달리 항행관제 등으로부터의 지원이 거의 없는 상황에서 당직자에 의해 실시되고 주변에는 시시각각 변화하는 자연적인 장애가 존재한다는 것에 그 특징이 있으며, 해난방지를 위해서는 해난에 직접적인 원인이 되는 불안정한 환경을 사전에 조사·검토하여 이의 정보를 제공할 필요가 있다.

선박은 정온수역이 확보된 항 내 혹은 만 내를 제외하면 파랑 중을 항행하고 있으며, 선박 운항에 있어서 파랑은 우선적으로 고려되어야 할 자연환경요소이다. 파랑이 선박의 운항에 미치는 영향에는 파랑에 의한 선속의 저하(위험이 감지됨으로

인한 인위적인 감속을 포함), 파랑에 의한 선체의 응답특성 그리고 이에 수반되는 위험의 발생(green water flooding, slamming 등) 등이 있다(일본조선학회, 1998).

Table 1은 해양안전심판원(2002)이 발표한 1997~2001년의 해난사고 종류별 원인현황 통계자료를 재정리한 것이다. 표에서 나타난 바와 같이 해난 사고 중에서 파랑과 관련된 사고의 경우는 전체 해난사고 발생건수의 7.5%에 이르고 있으며, 막대한 물적 손해뿐만 아니라 인명에 치명적인 위험이 되는 침몰사건의 경우는 운항과실에서 황천대비 대응불량으로 5.4%와 기타 기상 등 불가항력으로 2.1%을 합해 전체 침몰사건 258건 중 28.3%가 파랑과 관련한 해상(海象)이 중요한 요인이 되고 있어 선박의 건조기술이 향상된 오늘에 이르러서도

\* 중식 회원, shinsh@pari.go.jp +81-46-844-5045

\*\* hashimoto@pari.go.jp +81-46-844-5049

항행의 안전이라는 측면에서 파랑은 결코 소홀할 수 없는 대 상임을 알 수 있다.

Table 1 Statistical report about sea disasters (1997~2001).

사고종류 사고원인		충돌	접촉	좌초	화재	침몰	기관 손상	조난	사상	기타	계 (건수)	비(%)
운 항 파 설	위반/미준 수 및 소홀/태만	884	20	132	17	43	8	2	39	32	1177	50.5
	방천대비· 대응불량	6	-	17	1	60	1	2	6	32	125	5.4
	기타	255	3	25	4	35	9	-	10	18	359	15.4
계		1,145	23	174	22	138	18	4	55	82	1,661	71.3
취 급 불 량 및 결 함	취급불량 /노후 등	5	1	4	178	12	164	-	4	8	376	16.1
	선체·기관 설비결함	5	-	3	5	43	10	5	1	7	79	3.4
	계	10	1	7	183	55	174	5	5	15	455	19.5
기 타	시설 및 관리부적절	15	2	12	4	40	1	-	2	26	102	4.4
	기상 등 불기항역	19	3	5	-	13	-	-	1	8	49	2.1
	기타	22	1	3	10	12	1	1	6	6	62	2.7
계		56	6	20	14	65	2	1	9	40	213	9.2
합 계		1,211	30	201	219	258	194	10	69	137	2,329	100

※해양안전심판원 2002통계(사건에 복수의 원인이 있는 경우에는 모든 원인을 중복계상)

일반적으로 선박 운항에 있어서는 출발지로부터 목적지까 지의 최적인 항로가 요구된다. 여기서 「最適」이란 의미는 개개 선박의 운항 목적에 따라 다르지만, 통상 「最短 항해시 간」을 가리키는 경우가 많다. 하지만, 최단의 항해시간은 이미 「안전」이라는 측면을 전제로 한 것이며 「안전하고도 최 단인 항로」의 선정을 위해서는 선박의 항행과 관련한 임의 시각, 임의 해역에 있어서의 상세한 파랑정보의 입수가 불가 결하고, 이러한 정보를 토대로 각종 선체운동이 예측 가능하 여 감속이나 변침 혹은 항로변경이라고 하는 바람직한 조건 (操船) 가이드라인을 설정할 수 있다.

본 연구는 해상수송의 안전성을 개선하는 하나의 수단으로 서, 예보되는 해상풍 정보로부터 예정된 항로상에 있어서의 고정도 파랑정보를 본선에서 단시간에 예측할 수 있는 시스템 을 개발하는 것을 최종목표로 하고, 이의 제1단계로서 대양 에서의 다방향 불규칙파에 대한 파랑예측계산법의 확립을 위 해 현재 주목받고 있는 제3세대 파랑추산모델을 검토하는 것 으로 하였다.

검토방법으로는 과거 실제 해역에서 발생한 황천에 의한 선 박 침몰사고를 선정하여, 해당 선박의 항행 일정에 따른 파랑 추산을 연속적으로 행함으로서 사고 선박이 침몰에 이르기까 지 조우한 海象을 평가하였으며, 이와 더불어 모델의 예측 정 도 및 본선에서의 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 波浪推算모델의 展開와 第3世代 모델

### 2.1 波浪推算모델의 展開와 非線形 에너지 傳達

대양에서의 파랑예보에 관한 연구와 실용화는 제2차 세계대

전 중 노르망디 상륙작전의 일환으로 행해진 연구성과를 토대 로 하여 전후 발표된 Sverdrup and Munk(1947)의 연구로부터 시작되었다. 불규칙하게 변동하는 해양파의 정량적인 기술 을 위해 유의파의 개념을 도입하고 풍속, 취송시간, 취송거리, 수심 등과 관계를 구체적으로 제시하였다는 면에서 획기적인 것이었으며, 이후 Bretschneider(1952, 1958), Wilson(1961, 1965)에 의해 개량되어 보다 정밀화된 SMB법, Wilson IV법이 라고 하는 파랑 예측식이 제안되게 이르렀고 지금도 각방면에서 널리 이용되고 있다.

한편, 불규칙한 파랑을 가상적인 평균량인 유의파로 다루는 것이 아니라 불규칙성을 직접 고려한 해양파 스펙트럼을 토대 로 파랑을 추산하는 방법인 PNJ법이 Pierson, Neumann and James(1955)에 의해 제안되어 파랑 스펙트럼법의 모태가 되 었으나 현재는 그다지 사용되고 있지 않다(光易, 1995).

그러나, 이들 파랑 추산 식은 모두 시간, 공간적으로 일정한 바람이 지속되는 이른바 정상상태에 달한 파의 파고 및 주기와 풍속, 취송거리 혹은 취송시간과의 관계를 기초로 하고 있 으며 따라서, 일정한 바람이 계속 불고 취송거리가 한정된 단 순한 조건에서는 실용상 충분한 정도로 간단히 파의 추산이 가능하지만, 바람장이 시간적, 공간적으로 변동하는 경우에 있어서는 적용이 어려운 것이 단점이다.

PNJ법을 시작으로 하는 스펙트럼법은 Hasselmann(1960)에 의해 식(1)과 같은 해양파의 스펙트럼에 관한 에너지평형방정 식이 발표됨에 따라 시간, 공간적으로 변화하는 파랑의 스펙 트럼을 수치적으로 해석하는 방법으로서의 전환을 맞이하게 되 었다.

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + C_g \nabla E(f, \theta) = S \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 주파수  $f$ , 방향각  $\theta$ 의 방향 스펙트럼,  $C_g$ 는 성 분파의 군속도,  $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y$ ,  $S$ 는 파랑 스펙트럼을 구 성하는 성분파에 대한 에너지 유출입 관계를 구체적으로 표현 한 것으로서, 식의 가장 큰 문제가 된다.

$S$ 로 표현되는 source항은, Phillips(1957)의 공명기구와 Miles(1957)의 불안정 기구로 구성되어 바람으로부터 파로 전 달되는 에너지 수송( $S_{in}$ )을 표현한 항, 실험과 경험식을 바탕 으로 쇄파나 해저마찰 등에 의한 에너지 소산( $S_{ds}$ )을 표현한 항, Hasselmann(1962)이 이론적으로 제시한 성분파간의 비선 형 상호작용에 의한 에너지 교환을 나타내는 전달함수( $S_{nl}$ )의 합( $S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$ )으로, 식의 형태는 다음 절에서 다루기 로 한다.

한편, source항의 비선형 에너지 전달함수( $S_{nl}$ )의 효과는 Fig.1과 같이 유한 취송거리에서의 대표적인 파랑 스펙트럼인 JONSWAP 스펙트럼의 경우, 스펙트럼의 peak 주파수( $f_p$ )보 다 약간 저주파대 측으로 에너지가 수송되어 peak 주파수를 저주파대 측으로 이동시키는 방향으로 작용하며, 충분히 발달

하여 취송거리와 무관하며 풍속조건에 대응하고 에너지 밀도의 집중도가 그다지 크지 않은 PM 스펙트럼의 경우는 고주파수대로부터 peak 주파수대 부근으로 에너지가 수송되어 peak 가 더욱 발달하는 형태로 작용한다(Sell and Hasselmann, 1972). 이와 같이 비선형 에너지 전달함수는 스펙트럼의 형상에 따라 작용 형태가 다르며 파랑 스펙트럼의 자기안정성과 파랑의 발달에 따른 peak 주파수의 변화에 있어서 중요한 역할을 하고 있으나, 함수  $S_{nl}$ (후술하는 식(8)) 자체의 적분에 막대한 노력이 필요하기 때문에 스펙트럼 형상을 변화시킨 계산은 오랜 기간 거의 이루어지지 못하였다(1960년대~1970년대 초에 개발된 제1세대 모델에서는 무시, 1970년대~1980년대 초 개발된 제2세대 모델에서는 간접적으로 고려하고 있다, 光易, 1995).

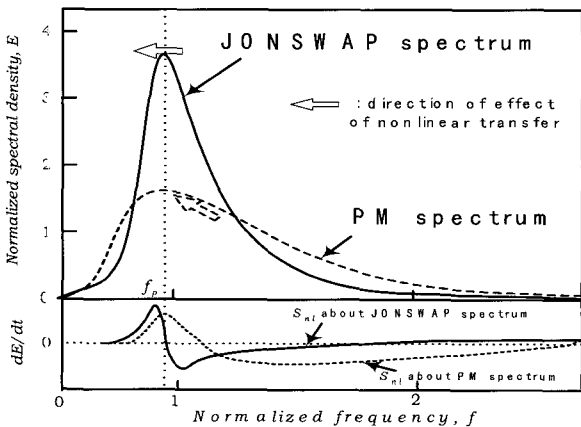


Fig. 1 Wind waves spectral shapes and nonlinear energy transfer.

최근 이러한 문제점을 해결하기 위해, 구미의 파랑연구자들을 중심으로 한 WAMDI group(WAVE Modelling Development and Implementation Group)은 비선형 에너지 전달함수를 정밀하게 다룬 제3세대 추산모델(WAM 모델, WAMDI Group, 1988, Komen et al., 1994)을 개발하여 성과를 올리고 있으며, 이는 전자계산능력의 향상과 더불어 Hasselmann(1985)에 의해  $S_{nl}$ 를 근사적이긴 하지만, 양적(explicit)으로 계산하는 방법이 제안되었다는 것에 의한 것이다.

橋本 등(1999a, 2000)은 일본 항만구조물 내파설계 등의 실무에서 지금까지 사용되어왔던 제1세대 파랑추산법(MRI)을 대체하기 위하여, 일본 주변해역을 대상으로 MRI모델과 WAM모델을 상세히 비교 검토하여 WAM모델의 방향스펙트럼 재현성이 특히 우수함을 명백히 밝혔다.

제3세대 파랑추산 모델의 비선형 에너지 전달함수와 관련한 모델의 추가 개량을 위한 연구는 현재 활발히 진행되고 있는 중이며(小松 등, 1993, 橋本 등, 1999b, 1999c), WAM 모델을 토대로 확장된 천해역 파랑추산모델(SWAN, Holthuijsen 등, 2000)도 제안되어 이와 관련한 검토도 진행되고 있다(예를 들면, 橋本 등, 2002)

2.2 第3세대 波浪推算모델(WAM)의 概要

WAMDI Group(1988)에 의해 개발된 제3세대 파랑추산모델(WAM)은 그 후에도 많은 개량을 더하여 현재는 WAM Cycle-4로 불리는 모델이 최신의 모델이다. WAM에서는 직교 좌표계와 구면 좌표계에 대한 2개의 기초 방정식이 마련되어 있으며 심해조건에서 흐름이 없는 경우, 구면 좌표계로 나타낸 기초방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\phi} \cos \phi E) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} E) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} E) = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

$$\dot{\phi} = \frac{C_g \cos \theta}{R} \quad (3)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{C_g \sin \theta}{R \cos \phi} \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = \frac{C_g \sin \theta \tan \phi}{R} \quad (5)$$

여기서,  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $\theta$ 는 각각 위도, 경도 및 파향을 나타내고,  $R$ 은 지구의 반경이다. 에너지 source항,  $S_{in}, S_{ds}, S_{nl}$ 은 각각

$$S_{in} = B \cdot E \quad (6)$$

$$S_{ds} = -\gamma_d \cdot E \quad (7)$$

$$S_{nl}(\mathbf{k}_4) = \omega_4 \int \dots \int Q(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times \{n_1 n_2 (n_3 + n) - n_3 n (n_1 + n_2)\} d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 \quad (8)$$

로 표현되며,  $S_{in}$ 에서  $B$ 는 Janssen(1991)의 quasi-linear 이론에 기초한 계수로서 이 이론의 채용에 의해 동일한 바람장이 부여된 경우에도 해면의 상태에 의존하여 바람으로부터 파로의 에너지 수송이 달라져 파령(wave age)이 작은 파일수록 에너지 전달이 활발히 일어나는 등 보다 현실적인 물리적 현상이 표현되도록 배려하고 있다. 그러나 WAM에서는 식(6)에 제시한 바와 같이 Phillips(1957)의 공명기구와 관련된 항을 무시하고 있으므로 계산 초기상태에서 파랑 스펙트럼의 에너지가 0이면 그곳에서는 파가 발생하지 않는 것에 주의가 필요하다.

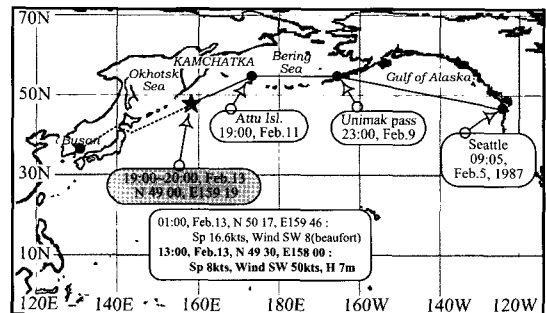


Fig. 2 Ocean route of a sunken container carrier "H".

에너지 소산항을 표현한 식 (7)에서 계수  $\gamma_d$ 는 고주파수 영역에서 백파 등의 쇄파에 의해 적절한 에너지 균형을 얻을 수 있도록 Komen 등(1984)의 이론을 직접 도입하고 있어 제1세대 파랑추산모델과는 달리 포화상태의 평형 스펙트럼을 가정하고있지 않다.

식 (8)의 적분방정식으로 표현되는 비선형 에너지 전달함수 내  $n_i = n(\mathbf{k}_i) = E(\mathbf{k}_i)/\omega_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) 은 파의 작용밀도 (wave action density)이며,  $Q$ 는 스펙트럼의 상호작용계수,  $\mathbf{k}$  는 파수 벡터,  $\omega$ 는 각주파수이고  $\delta$ 는 delta함수로서 비선형 상호작용의 공명조건을 나타내어,

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_a = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \quad (9)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_a = \omega_3 + \omega_4 \quad (10)$$

를 만족하는 4개 성분파간의 공명으로부터 에너지 수송이 일어난다. 이러한 공명조건에 따른 계산방법 및 식(6)~(8)의 상세는 橋本 등(1999a, 2000)을 참조하였다.

### 3. 海難事故에 대한 波浪推算시뮬레이션

황천에 의한 대양에서의 선박 침몰사고는 대부분의 경우 승무원 전원이 실종되어, 실제 사고를 당한 선박이 조우한 海象은 당시의 천기도 등의 자료를 토대로 간접적으로 추정할 수 밖에 없다. 본 장에서는 1987년 2월 북태평양 Kamchatka반도의 남단 전면 해상에서 발생한 한국선적 컨테이너 전용선 H호의 침몰 사건을 중심으로 대양에서의 파랑추산시뮬레이션 (ocean wave hindercasting simulation)을 행하여, 사고의 주된 요인이라 추정되는 H호의 航路上 遭遇波浪을 직접 분석함으로써 본 모델의 대양에서의 파랑추산정도와 그의 적용성을 검토해 보기로 한다.

#### 3.1 檢討條件

##### (1) 침몰사고의 개요

해양안전심판원 재결서(1987, 1988)에 의하면 H호는 적재능력 18,846톤의 1,150TEU인 컨테이너 전용선(GT 17,676톤)으로서 북미항로를 취항하는 원양 컨테이너 전용선이며 1979년 건조이래 한국선급과 미국선급의 2중 선급을 유지하며 소정의 선박검사를 받아왔다. Fig.2에 나타난 바와 같이, H호는 1987년 2월4일 05시(이하 GMT) Seattle에 입항하여 해당 선박의 총강력상 안전범위 이내의 컨테이너를 적재하고 2월 5일 09:05에 Seattle을 출항하여 부산항으로 향하였으며, 본사에 매일 1회 정오위치, 속력, 연료소모량, 기관회전수 등의 운항관련 정보를 보고하였다. 본선은 2월 9일 23:00 Unimak pass를 통과하였으며 2월 11일 19:00경에는 Attu Isl. 북단을 지나는 등 2월 12일까지는 평균속력 16.9kts로 비교적 순조로운 항해를 하여 2월 17일 17:00 부산 도착 예정임을 본사에 통보하였다.

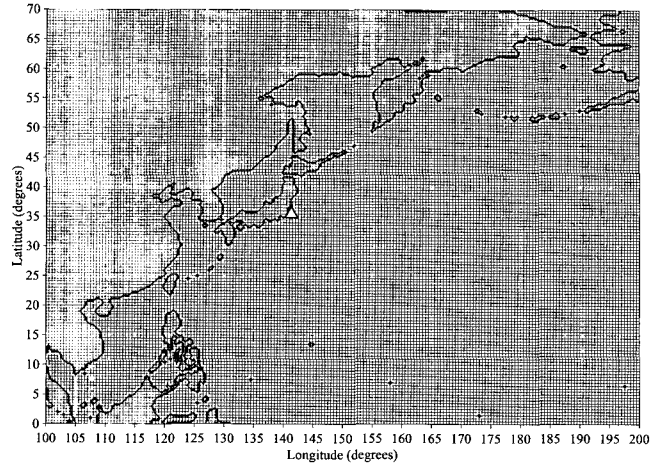


Fig. 3 Calculated region and grids( $\Delta x = \Delta y = 0.5^\circ$ ).

H호는 사고 당일인 2월 13일 01:00, N 50°17', E 159°46'에서 선속 16.6kts, 바람 SW 8(Beaufort scale)의 전문을 보냈으며, 같은 날 13:00에 N 49°30', E 158°46'에서 원침로 230도, 선속 8kts, 파고 7m, 바람 SW 50kts의 황천 속에서 격심한 피칭과 레이싱, 기관 회전수 90의 내용이 담긴 마지막 전문을 보내고, 이후 연락이 두절되었다.

당 재결서에서는 H호의 침몰시각을 2월13일 19시에서 20시 사이로 추정하였으며, 해난의 원인을 동계 중위도 저기압 영향권 내에서 대양 불규칙파에 의해 전복한 것으로 선체강도, 선박의 유지상태, 황천항법의 선택 등 인위적인 요인은 침몰의 원인에 기여하지 않았다고 보고하고 있다.

##### (2) 조우파랑의 재현기간과 범위

파랑추산시뮬레이션에 있어서의 파랑 재현기간은 컨테이너 전용선 H호가 미국 동부를 출항한 1987년 2월 5일 이전인 2월 3일 0시(GMT)부터 침몰 추정일인 2월 13일을 포함한 2월 23일 0시까지로 하였으며, 파랑 재현의 공간적 범위는 N 0~70°, E 100~200(160W)°로 설정하고 0.5°격자 해상도로 계산하였다(Fig.3).

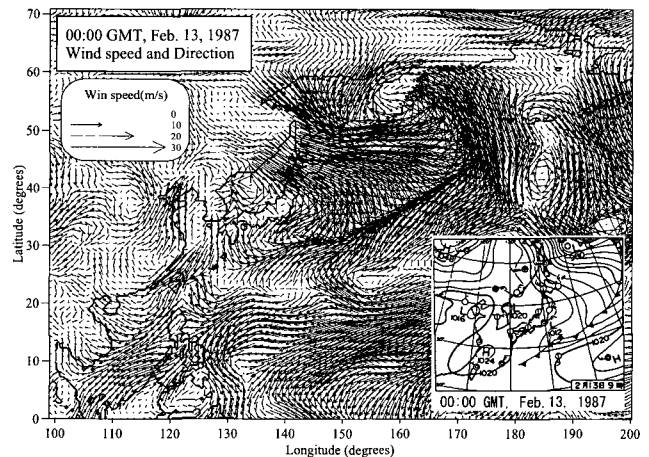


Fig. 4 Example of input Wind data(U10) - 0:00GMT, Feb.13 1987.

3.2 計算條件

(1) 바람의 입력

파랑추산을 실시함에 있어 불가결한 입력정보인 바람은 모델 자체의 정도 이상으로 파랑의 추산 정도를 좌우한다. 지금까지는 기압배치, 전선, 태풍의 중심기압이나 위치 등을 나타낸 천기도로부터 경도풍 추산모델 혹은 경계층 모델을 이용하여 바람을 추산해왔다. 하지만, 최근에는 바람정보를 포함한 각종 고정밀도의 기상자료를 유상이긴 하지만 입수할 수 있게 되었다. 이러한 기상자료를 제공하는 대표적인 기관에 유럽 중기규모 기상예보센터(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)가 있다. 본 계산에 있어서는 ECMWF의 바람데이터(공간 해상도 1.125°)를 입력자료로 이용하였다.

입력풍(U10 : 해면 10m높이에서의 풍속)은 1987년 2월 3일 0:00으로부터 2월 23일 0:00까지 매 6시간 간격으로 입력하였으며, 바람의 입력시간 및 위치 이외에서의 입력풍은 파랑추산모델내의 계산 시간간격과 공간 격자에 맞추어 내삽된다.

Fig.4는 입력된 바람의 예(1987년 2월 13일 0:00)를 나타낸 것으로서 같은 시각의 천기도와의 비교를 통하여 전선 및 저기압으로 인해 발달된 해상풍뿐만 아니라 육지역에서의 바람도 잘 재현되어 있음을 확인할 수 있다.

(2) 파랑추산모델의 계산조건

Table 2 Calculated conditions of the model.

항 목	내 용
좌표계 및 계산 영역 공간격자	구면좌표계(N 0~70°, E 100~200°) $\Delta x = \Delta y = 0.5^\circ$ , 201×141개
입력풍의 갱신 계산시간간격	$\Delta x = \Delta y = 1.125^\circ$ , 6시간 간격, U10(m/s) $\Delta t = 900s$ , $\Delta t_s$ (Source함수계산간격)=900s
방향스펙트럼	주파수영역(분할) 0.042~0.453Hz(배율1.1의 대수간격25분할) 파향영역(분할) 0~360°( $\Delta\theta=22.5^\circ$ , 16분할)

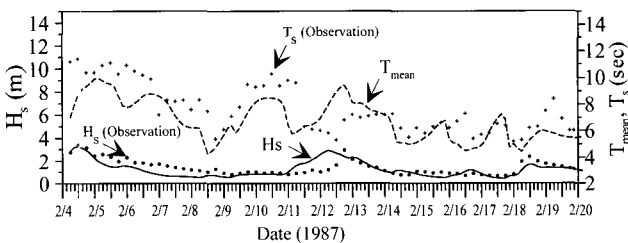


Fig. 5 Comparison of significant wave height and period recorded at N 35°53' 46'', E 140°45' 32'' (shown in figure 3, Δ).

1987년 2월3일~2월23일의 20일간에 걸친 재현기간중의 파랑 계산은 Table 2에 제시한 계산조건으로 전 기간에 걸쳐 연속으로 행하였으며 단, 유빙 및 해류 등의 흐름에 대한 효과는 고려하지 않았다. 계산 결과는 매 1시간마다 적분계수를 취합하여, 변화하는 바람장에 대해 시시각각 계산된 파랑의 방향스펙트럼을 매 6시간 간격으로, 또한 각 공간 격자점에서의

방향스펙트럼을 토대로 유의파고(Hs), 평균주기(Tm), 평균파향 등도 동시에 출력하도록 하였다.

3.3 모델의 推算 精度 檢討

(1) 현지 관측데이터

일본 국토교통성의 Kashima 전면 해상의 파랑관측시스템으로 관측된 유의파고와 주기를 토대로 본 계산의 파랑 재현 기간에 대한 파랑추산의 정도를 검토하였다.

태평양 연안의 Ibaraki현 Kashima 항 전면 해상의 수심 23.4m에 설치된 관측점은 N 35°53' 46'', E 140°45' 32'' (Fig.3의 Δ표)에 위치하고 있으며, 파고계로서는 초음파식 파고계(USW, Ultra Sonic Wave gauge)를 사용하고 있다.

관측된 파랑제원은 2시간 간격의 우수(偶數) 시각 정시 10분 전부터 10분 후까지 20분간에 걸쳐 파랑을 계측하고 이를 토대로 산정된 유의파고(Hs)와 유의파 주기(Ts)이다.

(2) 관측된 유의파 제원에 대한 모델의 추정정도 검토

Fig.5는 본 계산의 추정 정도를 검토하기 위하여 파랑추산 기간과 동일한 기간에 있어서의 파랑제원(유의파 제원)을 비교한 것이다.

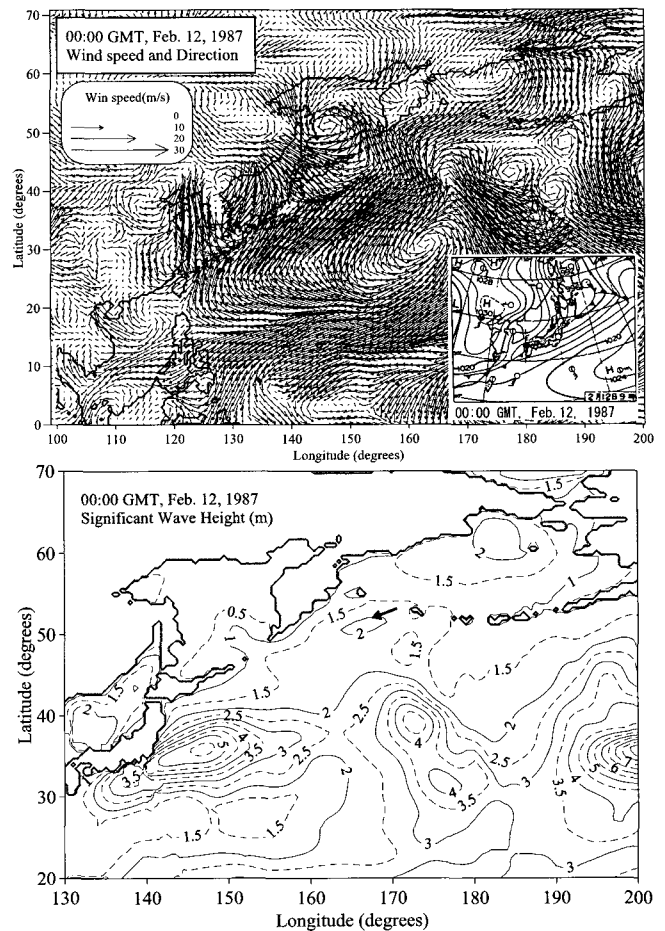


Fig. 6 Wind data and significant wave height - 0:00GMT Feb.12, 1987.

Kashima에서의 같은 기간 중 관측치는 2월 4일, 2월 12일, 2월 18일에 높은 파고를 기록하고 있으며, 특히 2월 4일의 경우는 일본 동북 전면 해상에서 유의파고 4~5m의 고파랑에 의해 일본 어선 Sohomaru가 침몰되어 선원 23명 중 16명이 실종되는 되는 해난사고가 있었다.

2월 4일부터 2월 20일에 걸친 유의파고에 대한 계산치와 관측치는 전 관측기간에 대해 양호하게 일치함을 확인할 수 있다.

한편, 12일의 경우는 파랑추산에 의한 유의파고가 Kashima 전면 해상에서의 관측치에 비해 약 1m정도 작게 평가하고 있다.

계산을 위해 입력된 해상풍 데이터를 분석해 보면, 관측지점이 있는 Kashima 전면 해상에서는 12일 0:00 남서풍이 불고 있으나(Fig.6 상단 참조), 12일 12:00의 해상풍에서는 0:00과는 정반대의 북동풍이 불고 있었다. 따라서, 동 지점의 12일 파랑추산에 있어서는 같은 지점에 대하여 본 계산의 해상풍 입력 갱신 시간 간격인 6시간 사이에 풍향이 정반대인 값을 나타냄으로 인해, 900sec 간격의 파랑 계산시 내삽되는 해상풍이 실제 바람의 변화를 제대로 반영하지 못해 과소평가된 것으로 사료된다.

#### 4. 波浪推算結果에 따른 海象의 分析과 討議

##### 4.1 2월 12日까지의 航程과 海象

H호는 3장에서 전술한 바와 같이 1987년 2월 5일 09:05 미국 동부 Seattle을 출항한 후, Unimak pass, Bering해, Attu Isl.을 통과하여 일본 Tsugaru해협을 향하던 2월 12일까지는 평균속력 16.9kts로서 비교적 순조로운 항해를 하였으며(해양안전심판원 재결서, 1987), H호의 항행일정에 따른 파랑추산의 결과에서도 유의파고 1.5~2.0m, 평균주기 7~8sec의 비교적 순탄한 항정이 되고 있었음을 확인할 수 있었다.

2월 11일 19시경 본선은 Attu Isl. 북단을 지나면서 진침로 250°로 변침하여 Kamchatka반도 남동 해상을 연하는 항행을 개시하였는데, 이때, Sakhalin 동편 연안의 Okhotsk해에는 약한 저기압(1000mb)이 형성되기 시작하였다.

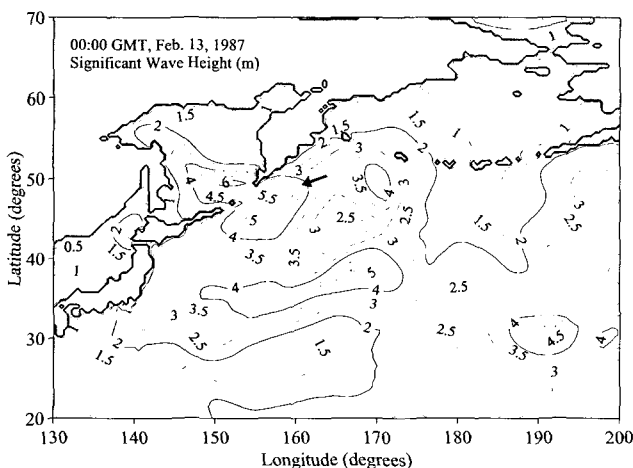


Fig. 7 Significant wave height - 0:00GMT, Feb.13, 1987.

Fig. 6은 2월 12일 0:00의 천기도, 해상풍과 본 파랑추산으로 산정된 유의파고 분포를 제시하고 있다. Okhotsk해 서편(Sakhalin 동측 인근 해상)에서 형성된 저기압은 서서히 발달(992mb)하면서 반시계 방향의 경도풍을 발달시키고 있음을 알 수 있으며(Fig.6 상단), 이로 인해 동 시간대에 항행하고 있던 H호(Fig.6의 화살표는 재결서를 토대로 한 H호의 선위 및 침로)는 풍속 7~8m/s, 선수의 방향의 바람을 경험하였을 것으로 여겨진다. 파랑의 계산 결과로부터 유의파고 1.5~2.5m, 주기 7~8sec의 해상이었음을 알 수 있다(Fig.6 하단).

한편, Okhotsk해 서편에서 형성되었던 저기압은 서서히 발달하면서 동측으로 이동하고 2월 12일 12:00에는 Okhotsk해 중앙에 위치하여 Okhotsk해로부터 태평양으로 향하는 강한 동풍을 발생시켰으며, 이로 인해 12일 18:00에는 Okhotsk해 내에 유의파고 3~4m, 평균주기 6~7sec의 파랑을 발생시켰다.

##### 4.2 2월 13日의 航程과 海象

2월 11일부터 2월 13일 0:00까지 Okhotsk해에서 발달한 저기압은 Okhotsk해로부터 태평양으로 향하는 강한 동풍을 지속적으로 발생시켰으며(Fig.3의 2월 13일 0:00 해상풍 및 천기도 참조), 부가하여 Okhotsk해로부터 Kamchatka반도 남단 해상까지의 약 1,500해리에 걸친 취송거리가 확보됨에 따라 Okhotsk해 및 Kamchatka반도 주변 해역에는 고파랑 해역이 점차 확대되었다.

Fig.7은 13일 0:00의 유의파고 분포도를 제시하였다. Okhotsk해로부터 성장하여 태평양측으로 진행하는 고파랑의 양상을 유의파고 분포도로부터 알 수 있으며, 2월 13일 1:00, N 50°17', E 150°46'의 위치(Fig.7의 화살표)에서 본사에 타전한 "속력 16.6kts, 기관회전수 113.9, 남서풍 풍력 8 등"으로부터 확인되는 海象과 본 파랑추산의 해상풍(Fig.3) 및 유의파고 분포(Fig.7)는 잘 대응하고 있다.

본선으로부터의 마지막 전문은 2월 13일 13:00에 N 49°30', E 158°46'에서 원침로 230도, 선속 8kts, 파고 7m, 바람 SW 50kts(풍력계급 10, 25~28m/s)의 황천 속에서 격심한 피칭과 레이싱, 기관 회전수 90의 내용이었다. 같은 날인 13일 12:00의 해상풍 및 파랑추산결과와 H의 위치는 Fig.8에 제시하였으며, 같은 시각 H호의 남방 110해리 위치 N 47°40', E 158°40'에서 황천항해를 하던 O호(GT 29,307ton, DWT 46,745ton, 1983년 건조)의 위치를 함께 표기(○을 중첩한 화살표)하였다.

H호의 전방에서 13일 12:00경 황천해역의 중심을 선행 항해 하던 O호의 海象觀測에 의하면 2월 13일 13:00~17:00까지가 최악의 상태로 풍력 8, 해면 9이상, 파고 15m, 파장 약 200m, 순간 최대풍속 40m/s의 海象을 보고하였다.

Fig.8의 상단에 제시한 13일 12:00의 해상풍 위치 및 세력으로 볼 때, 전선을 동반하고 태풍급으로 발달한 저기압의 중심은 Kamchatka반도에 상륙하고 있음을 알 수 있고, 이로 인해 남반원 1200해리 해상까지 폭풍역을 형성하고 있으며, 그 결

과 Kamchatka반도 남단해상에 유의파고 8m이상의 황천해역이 형성되고 있음을 알 수 있다.

해양안전심판원 재결서, 1988로부터).

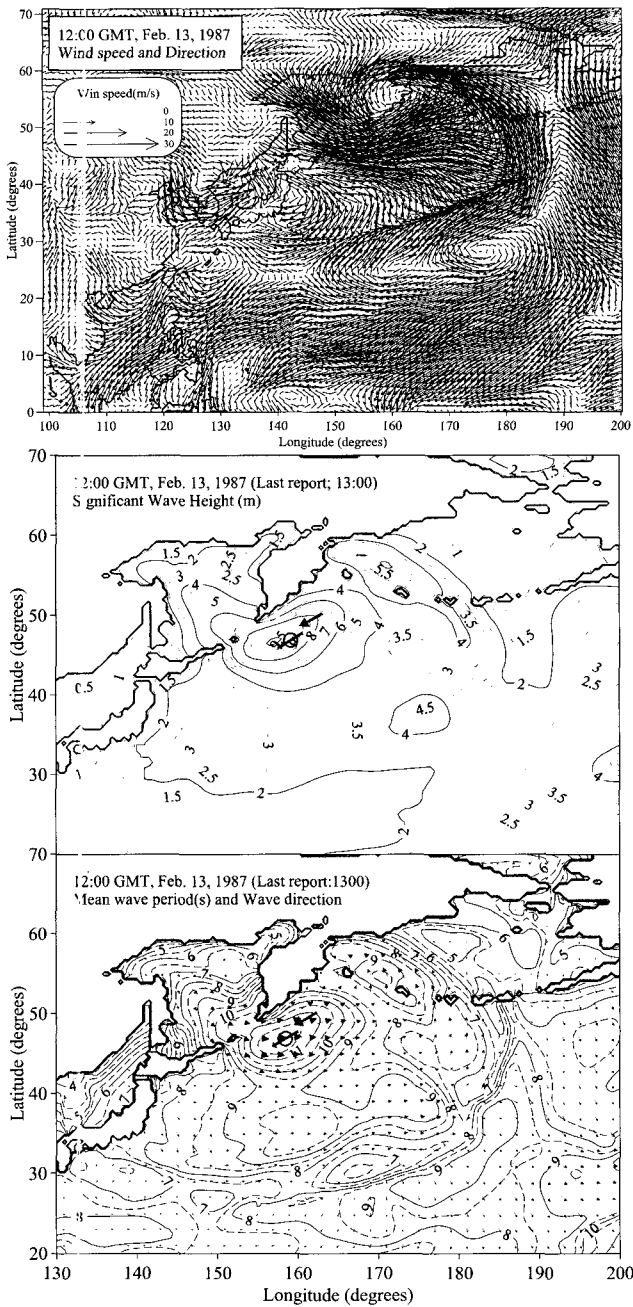


Fig. 8 Wind, significant wave height, mean wave period and wave direction - 12:00 GMT, Feb.13, 1987.

시간이 경과되면서 海象은 더욱 악화되었으며 유의파고 10m이상 파장 약 225m(평균주기 12sec로부터 산정)에 휘말린 H호는 보침이 어려운 대황천속에서 전복되었으리라 추정된다(예상 시각 13일 19:00~20:00). Fig.9는 13일 18:00의 시간에 대해 추산된 유의파고, 평균주기 및 평균파향을 나타낸 것으로서, 추정 침몰위치에 유의파고 10.5m, E방향의 평균주기 12.6sec의 고파랑이 존재했음을 확인할 수 있다(추정위치는

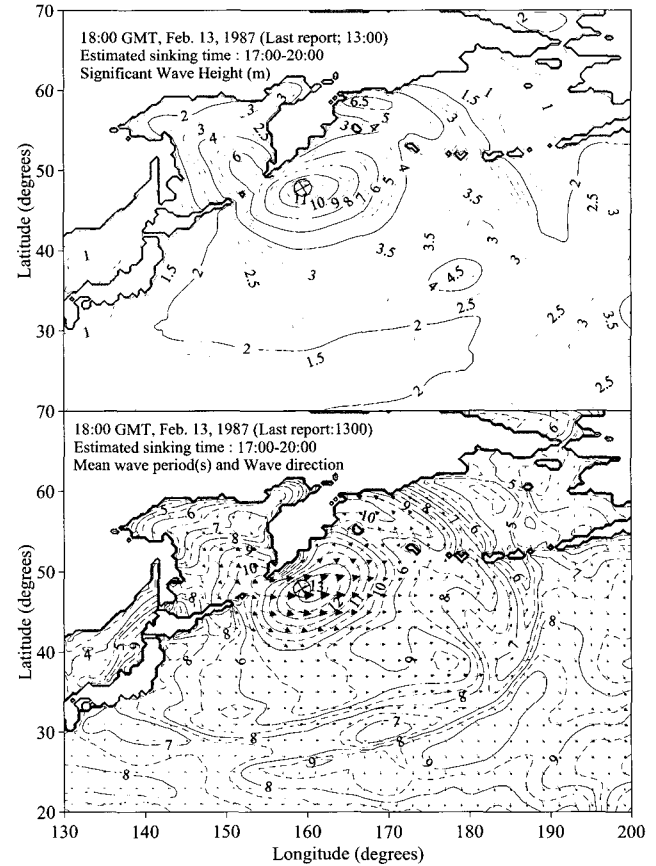


Fig. 9 Significant wave height, mean wave period and direction -18:00 GMT, Feb.13, 1987(estimated sinking time:17:00-20:00).

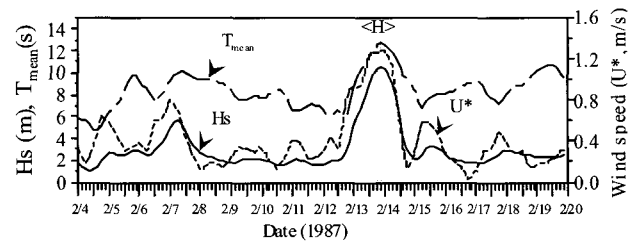


Fig. 10 Time series of Winds, Significant wave height and period at disaster point (N 49°00', E 159°19').

Table 3 Maximum wave height according to exceedance probability,  $\mu$ .

$\mu(\%)$	60	10	5	2.5	1
$(H_{max})_{\mu}(m)$	19.68	22.46	23.32	24.13	25.15

#### 4.3 事故地點의 海象과 遭遇波浪

Fig.10은 H호의 침몰위치로 추정되는 N 49°00', E 159°19'의 해상에서 2월 4일 0:00~2월 20일 0:00의 시계열 파랑추산결과(유의파고(Hs), 평균주기(Tmean), 해상풍의 마찰속도(U\*))를 나타낸 것이며, 그림의 <H>는 재결서(1988)에서 제

시하고 있는 선박 H호의 추정 침몰시간대를 표기한 것이다.

우선, 사고 지점에서의 해상풍은 12일 15:00을 기점으로 마찰속도 0.5m/s이상의 강풍으로 성장하고 있으나 파랑은 이보다 늦은 13일 0:00을 기점으로 유의파고 5m이상으로 성장함을 알 수 있고, 14일 0:00을 최대풍속을 기점으로 풍속은 급감하여 14일 14:00경에는 다시 0.5m/s 이하로 감소하였음을 알 수 있다. 유의파고가 최대치를 기록한 시간대는 13일 21:00로서 10.6m를 나타내었다.

한편, 유의파고가 10m를 넘는 시간대는 13일 18:00~14일 0:00으로 기록되었는데, 이때의 평균주기기는 약 12.6sec(심해파 파장 약 248m)이다. Goda(1985)는 먼바다 파랑의 파고 출현확률이 Rayleigh분포를 따른다고 가정하고 유의파고(Hs)에 대한 초과확률이  $\mu$ 인 최고파고( $H_{max}$ ) $\mu$ , 즉 확률밀도곡선에 대해 그 파고보다 큰 범위를 적분한 값이  $\mu$ 인 파고를 식(11)과 같이 제시하였다.

$$\frac{(H_{max})_{\mu}}{H_s} \approx 0.706 \sqrt{\ln \left[ \frac{N_0}{\ln 1/(1-\mu)} \right]} \quad (11)$$

여기서,  $N_0$ 는 파군중의 파의 수를 나타낸다. Table 3은 식(11)을 이용하여 사고 지점에 있어서 평균 유의파고 10.44m이었던 13일 18:00~14일 0:00의 시간대에서 초과확률이  $\mu$ 로 되는 최고파고( $H_{max}$ ) $\mu$ 를 구한 것으로서 같은 시간대, 같은 위치에 존재하게 되는 선박은 극단적인 파랑을 경험하였으리라 사료된다.

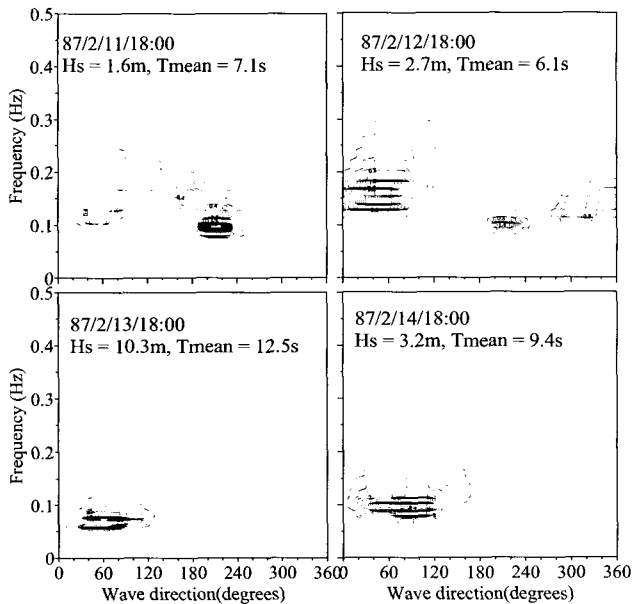


Fig. 11 Time series of directional wave spectra at the disaster point (N 49°00', E 159°19').

Fig.11은 파랑추산으로 검토된 사고 지점에 있어서의 2월 11일 18:00~14일 18:00까지의 방향 스펙트럼의 변화를 24시간 간격으로 나타낸 것이다.

Okhotsk해 서편에 약한 저기압이 형성되어 사고 해역에

SSW방향의 약한 바람이 불던 2월 11일 18:00은 부근해역의 지속적인 한 방향의 해상풍이 존재하지 않고 시시각각 변화하였는데 이러한 바람의 영향으로 2방향에 걸친 파향을 가지며, 비교적 주파수대 폭이 넓은 파랑 스펙트럼을 나타내고 있지만, 12일부터 형성되어 발달하기 시작한 지속적인 강풍의 영향으로 해당 지점에서의 파랑 스펙트럼은 주파수대의 폭이 좁아지며 파향에 있어서는 집중해 가는 경향이 나타나 있고, 13일 18:00에는 주파수대 및 파향이 집중된 형태로 발달되는 양상이 잘 표현되어 있음을 알 수 있다.

## 5. 結 論

해상수송의 안전성을 개선하는 하나의 수단으로서, 본선에서의 파랑예보시스템 구축하기 위한 제1단계로서 다방향 불규칙파에 대한 파랑추산모델을 검토하였다.

검토방법으로는 실제 해역에서 발생한 황천에 의한 선박 침몰사고를 대상으로 선박의 항행 일정에 맞춘 파랑추산을 행함으로써 사고 선박이 조우한 海象을 재평가하였으며, 이와 더불어 모델의 예측 정도를 분석하였다.

Table 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 해난 사고의 70%가 human error에서 발생하는 것은 충분히 납득할 수 있는 상황이다. 그러나, 본 연구에서 다른 H호 사고의 경우는 경험 풍부한 선장에 맡겨진, 선박 검사상 구조적 결함이 없는 선박이었음에도 불구하고 사고 해역에서의 고파랑의 급작스런 발달에 의해 "위험반경" 내에 포착되어 발생한 해난사고라고도 평가될 수 있을 것이다. 특히, Fig.10에서 나타난 바와 같이 사고해역 부근의 海象은 단 하루만에 대황천으로 급변하고 있어 신속한 해상정보를 입수하지 못하는 본선으로서는 피할 수 없는 사고였다고도 할 수 있다.

본 파랑추산은 기본적으로 해상풍 입력자료를 전제로 하며, 해상풍은 기상관련 기관으로부터 혹은 천기도 등의 관련 기상자료의 해석을 통해 제공받을 수 있다. 본 연구의 계산을 토대로 비교적 염가로 단시간에 걸친 항로상의 고정밀도 파랑예측이 가능함과 실용상 충분한 정도의 정밀도를 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 파랑 추산기법을 이용하여 본선에서 항로에 대한 海象을 사전에 파악할 수 있게되면 선박의 운항, 조선에 관한 지침 및 판단자료로 연결되어 안전 운항에 크게 기여하리라 사료된다.

## 參 考 文 獻

- [1] 해양안전심판원(1987), "기선 H호 침몰사건", 동해심 재결서 1987-022호.
- [2] 해양안전심판원(1988), "기선 H호 침몰사건", 중해심 재결서 1988-001호.
- [3] 小松幸生, 草場忠夫, 増田 章(1993), "風波成分波間の非線形エネルギー傳達-新しく開發した效率的な計算法について-", 九州大學應用力學研究所報 75, pp.121-146.



- [4] 日本造船學會(1998), "船舶海洋工學における波浪情報の諸問題", 波浪評價検討専門委員會 成果報告書, p.359.
- [5] 橋本典明, 川口浩二, 眞期俊行, 永井紀彦(1999a), "第3世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討", 港灣技術研究所報告 38-4, pp.3-47.
- [6] 橋本典明, 眞期俊行, 吉松みゆき(2000), "波浪推算法による颱風9918號の異常波浪の再現", 港灣技研資料 No.970, p.33.
- [7] 橋本典明, 鶴谷廣一, 中川康之(1999b), "有限水深域における海洋波の非線形相互作用に関する數値計算", 日本土木學會 海岸工學論文集 43, pp.191-195.
- [8] 橋本典明, 川口浩二, 鈴木正芳(1999c), "海洋波の非線形相互作用における離散相互作用近似の擴張", 日本土木學會 海岸工學論文集 43, pp.231-235.
- [9] 橋本典明, I.J. Haagsma, L.H. Holthuijsen(2002), "有限水深域における非線形エネルギー輸送の高精度計算法のSWANへの導入", 日本土木學會 海岸工學論文集 49, pp.196-200.
- [10] 光易 恒(1995), "海洋波の物理", 岩波書店, p.210.
- [11] Bretschneider, C.L.(1952), "The generation and decay of wind waves in deep water", Trans. A. G. U., 33(3), pp.381-389.
- [12] Bretschneider, C.L.(1958), "Revision in wave forecasting; deep and shallow water", proc. 6th conf. Coastal Eng., pp.30-67.
- [13] Goda, Y.(1985), "Random Seas and Design of Maritime Structures", Univ. of Tokyo press p323.
- [14] Hasselmann, K.(1960), "Grundgleichungen der Seegangsvorhersage", Schiffstechnik, 7, pp.191-195.
- [15] Hasselmann, K.(1962), "On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum", Part I. General theory, J. Fluid Mech., 12, pp.481-500.
- [16] Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett(1985), "Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave model", J. Phys. Oceanogr. 15, pp.1378-1391.
- [17] Holthuijsen, L.H., N. Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftenburg and E.E. Kriez(2000), "SWAN CycleIII version 40. 11, USER MANUAL", Delft University of Technology, p.124.
- [18] Janssen, P.A.E.M.(1991), "Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting", J. Phys. Oceanogr. 21, pp.1631-1642.
- [19] Komen, G.J., Hasselmann, S. and Hasselmann, K.(1984), "On the existence of a fully developed wind sea spectrum", J. Phys. Oceanogr. 3, 14, pp.1271-1285.
- [20] Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen(1994), "Dynamics and Modelling of Ocean Waves", Cambridge University press, p.532.
- [21] Miles, J.W.(1957), "On the generation of surface waves by shear flows", J. Fluid Mech., 3, pp.185-204.
- [22] Phillips, O.M.(1957), "On the generation of surface waves by turbulent wind", J. Fluid Mech., 2, pp.417-445.
- [23] Pierson, W.J., G. Neumann and R.W. James(1955), "Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics", H. O. Pub. 603, U. S. Navy Hydrographic Office, p.284.
- [24] Sell, W. and Hasselmann, K.(1972), "Computation of nonlinear energy transfer for JONSWAP and empirical wind wave spectra", Rep. Inst. Geophys., Univ. Hamburg, pp.1-6.
- [25] Sverdrup, H.U. and Munk, W.H.(1947), "Wind sea and swell, Theory of relation for forecasting", U.S. Navy Hydrographic Office, Washington, No.601, p.40.
- [26] WAMDI group(1988), "The WAM model - a third generation ocean wave prediction model", J. Phys. Oceanogr. 18, pp.1775-1810.
- [27] Wilson, B.W.(1961), "Deep water wave generation by moving wind system", proc. ASCE, 87(WW2), pp.113-141.
- [28] Wilson, B.W.(1965), "Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959", Deut. Hydrogr. Zeit., 18, pp.114-130.

원고접수일 : 2003년 3월 31일

원고채택일 : 2003년 5월 6일