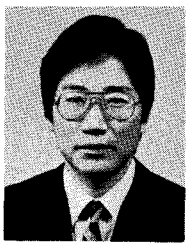
波浪스펙트럼法에 의한 深海波浪推定



姜 始 桓
〈韓國科學技術院海洋研究所 環境工學研究室長〉

序論

일반적으로 海水面의 変位를 포괄적으로 나타내는 海上狀態는 매우 복잡한 양상을 띠고 있으며, 이는 바람, 조석, 海底地震등 여러 物理的要因에 의해 발생된 海波의 복합적인 結果이다.

그 중에서 週期가 1－30sec인 海波는 海上의 바람으로 부터 지속적인 에너지 공급에 의해 發生되는 重力波로써, 가장 큰 에너지를 內包하고 있어서 (Fig. 1) 海上狀態의 主要 決定要因일 뿐만 아니라 沿近海域에서의 動力學的 힘의 根源이라 하겠다.

조석은 長週期的인 海面変位를 나타내는 반면, 地震海溢,즉 쓰나미와 颱風, 暴風時에 發生되는 海溢은 일시적이며 한정된 異常急変이라 하겠다.

海上에서의 波浪 發生과 發達過程은 매우 복잡하여 아직도 이론적으로 완벽하게 규명되지는 않았으나, 지난 30여년 간의 研究結果로써 많은 성과를 거두고 있다.

波浪의 發生은 海洋과 大氣의 相互作用에 의한 微細 構造的인 渦動(Tubulence), 共鳴(Resonance), Energy feed back現象등으로 海上의 바람으로 부터 海水面에 지속적인 에너지를 공급하게 됨으로써 가능하게 된다 (Miles, 1957 : Phillips, 1977) 여러 週期와 波長을 갖는 波浪이 同時에 發生되나 긴 波長의 波는 작은 週期의 波로 부터 에너지를 전달 받아서 점점 더 커지며, 따라서 바람이 強한 海上에서는 수많은 波浪들이 중첩되어 風波(Wind sea)를 형성하게 된다.

오랜시간(6－10시간) 동안 강한 바람이 계속 불면 완전히 發達(Fully developed)된 海上狀態를 나타낸다. 그후에 바람이 약해지게 되면 風波狀態를 유지하고 있던 力學的 에너지 平衡狀態가 깨어지게 되고 자유파로 전파되면서 長週期의 너울(Swell)이 형성되며 때로는 波浪發生 海域으로 부터 멀리 떨어진 海域이나, 沿岸까지도 전파되어 나온다.

실제적인 海上의 바람 分布는 海域別, 時間別 変化가 심하여 觀測된 波浪에너지 스페트럼分布는 Fig. 2에서 처럼 風波와 너울이 복합적으로 나타난다.

한 海域에서의 海波分布特性

은 海上氣象과 周邊의 地理的 與件, 水深 및 海底地形 등에 따라 決定된다고 볼 수 있다. 海上의 氣象과 直結된 風速, 吹送距離에 따라 海波의 發生 및 發達은 크게 좌우되며, 이들의 크기가 增加함에 따라 더 큰 波高와 週期를 갖는 海波가 發生된다.

比較的 一定한 風向을 지닌 持續的인 季節風의 吹送距離는 海域 周邊의 地形的 條件에 따라 決定되며, 그 海上의 海波特性에 큰 影響을 미친다. 即, 例를 들면, 北東~南西 方向으로 길게 位置한 東海는 北東風 또는 南西風에 의해서 가장 긴 吹送距離를 갖게 되며, 東海岸 近海에서는 北東風에 의해서 가장 긴 吹送距離를 나타내게 된다.

이와 마찬가지로 西海岸의 沿近海域에서는 北西風에 의해서 가장 거친 海上 狀態가 惹起 된다. 한편 海域의 水深과 海底地形의 屈曲은 東海와 같은 深海의 경우는 海上의 波浪運動이 海底面에 미치지 못하므로 아무런 영향을 받지 않는다.

그러나 西海와 같이 비교적 水深이 얕은 淺海에서는 海底面에서의 摩擦로 인한 波浪에너지의 減少, 地形의 屈曲에 따른 波浪屈折, 淺水効果 등이 海波特性에 큰 影響을 미치게 된다. 이와 같이 그 海域의 水深에 따라 風波의 發生 및 發達은 크게 制限을 받게 되며, 変形된다.

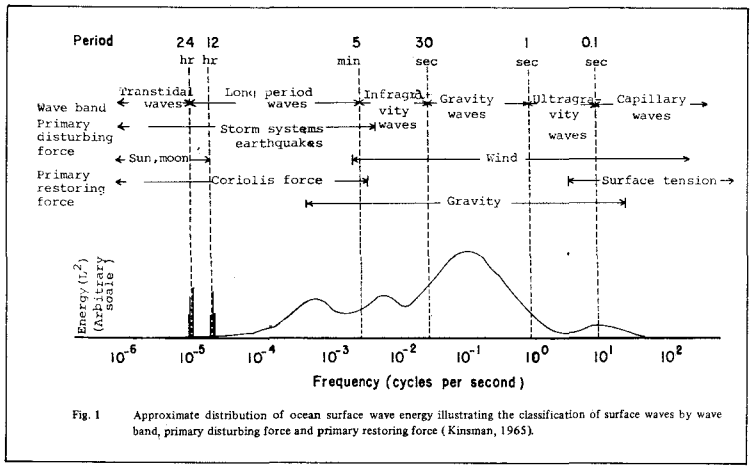


Fig. 1 Approximate distribution of ocean surface wave energy illustrating the classification of surface waves by wave band, primary disturbing force and primary restoring force (Kinsman, 1965).

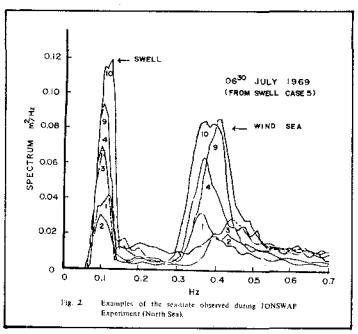


Fig. 2 Examples of the seastate observed during JONSWAP Experiment (North Sea).

波浪 推定法의 發達

海上風에 의한 波浪 発生 力學을 糾明하기 위한 研究는 19세기 頃 Helmholtz가 提示한 Instability理論으로 시작되었다. 그 後, Kelvin-Helmholtz instability, Jeffreys' sheltering hypothesis (Lamb 1945) 等 理論的으로 糾明하기 위한 試図가 오랫동안 계속되었으나 成功的이지는 못하였다.

1950年代에 들어서, 바람에서 海水面으로의 Energy transfer mechanism에 대한 具體的인 理解와 海波 発生에 대한 理論的인 説明이 可能하여졌으나, 諸般 物理的 現象에 대해서는 理論的으로 完全히 定立되어 있지 않았다. 그리하여, 海波를 豫報하기 위해서는 實測海波資料에 의한 半經驗式과 理論的 關係式의 主要基本常數를 海波觀測을 通해 決定하여야 하였다.

波浪의 推定과 豫報의 實用化를 위한 試圖는 1940年代인 第二次 世界大戰 中 上陸作戰을 위해 Sverdrup와 Munk가 風速에 따른 波高를 計算한 것이

嚆矢이다.

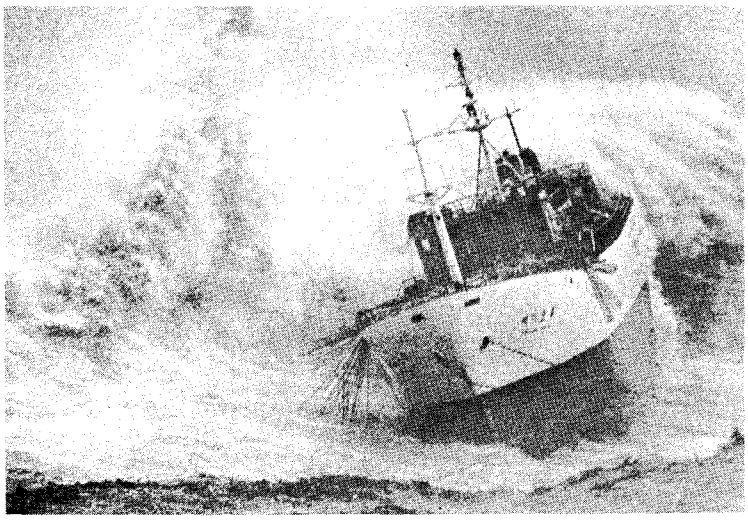
1950年代에 들어서 Bretschneider(1954, 1958)에 의해 風速, 吹送距離, 吹送時間의 Non-dimensional parameter에 의한 有義波法(Significant wave method)이 考案되었다.

여기서 有義波는 觀測된 波群中에서 가장 큰 波長으로 부터 總波數의 1/3에 該當하는 波長까지의 平均値로 定義되며, 이는 訓練받은 海上 觀測者의 目測値의 平均과 近似한 값을 갖는다. 觀測資料의 蓄積에 따라 半經驗式은 改良을 거듭하여 왔다. S-M-B(Svedrup-Munk-Brestschneider)法은 安定된 狀態(Steady state)에서 正確度가 높을 뿐 아니라 函數關係式이 簡單하여 工學的인 應用에 많이 活用되고 있다.

태풍이나 暴風과 같이 風域(Wind field)의 変化가 甚한 境遇는 Wilson(1955, 1965) 이 有義波法을 基礎로 하여 開発한 方法이 使用되며, 이 方法은 주로 沿岸工學에 活用되고 있다.

海上狀態(Sea-state)는 一般的으로 여러 形態의 波들이 重畳되어 相互影響(Wave-wave interaction)을 나타내므로 複雜한 樣相을 띠게 된다.

이러한 海上狀態를 가장 包括的이고 近接하게 表現하는 方法은 Fourier series에 의한 波浪 Spectrum法이다. Pierson *et al.* (1955)는 波浪 Spectrum의 概念을 最初로 導入하여,



P-N-J法에 의한 Parametric spectral model을 開発하였다.

1957年 Gelci等은 波浪 Spectrum의 Energy balance 概念을 適用하여 有限 Spectrum法(Discrete spectral method)에 의한 波浪豫報 技法을 創案함으로써 數値豫報 모델의 基礎을 마련하였다.

그 後, DSA-series 모델은 電算機의 計算能力 및 觀測資料의 增大로 인하여 繼續 補完되었으며, 1970年부터는 프랑스에서 북대서양의 海波豫報에 使用되고 있다.

最近 海波發生에 대한 Phillips, Miles의 理論 및 海波들 間의 非線形 相互干涉(Nonlinear wave-wave interaction)에 의한 Energy ransfer mechanism에 대한 理論(Phillips 1977; Hasselmann 1962)의 定立과 高精密度의 觀測器機 및 技術의 開發에 따른 資料의 蓄積 外에도 電子計算機의 計算處理能力의 增大와 數値計算技法의 發展으로 波浪推定 方法도 急進的으로 發展하였다.

이러한 發展을 바탕으로 하여 Inoue(1967), Barnett(1968), Ewing(1971)等 여러 사람에 의해 Spectral 모델開發에 큰 進展을 갖게 되었다.

1968~1969年에 걸쳐 實施된 大規模의 North Sea 海上觀測事業인 JONSWAP(The Joint North Sea Wave Project)에서 독일, 영국, 네덜란드 및 미국의 여러 研究機關과 學者들이 共同參與하여 보다 精密한 海波觀測資料를 蒐集하였으며(Hasselmann *et al.* 1973) 이를 土臺로 하여 Parametric wave model (Hasselmann *et al.* 1976) 이 開發되었다.

이와 함께 North Sea에 대한 海波數値 모델로써, 영국과 독일이 共同研究한 NORSWAM

project에서 더욱 發展된 Hybrid parametrical wave model (HYPA)이 최근 完成되었다. (Gün- ther *et al.* 1979, 1976, . 1981)

HYPA 波浪 推定 model

HYPA (Hybrid Parametrical Wave Prediction) model은 海上狀態에 대한 지난 20年間의 刮目할 만한 學問的 發展에 힘입어 North Sea에서의 大規模 國際共同 海上觀測事業인 JONSWAP 1973 Experiment 와 NORSWAM Project (1977) 의 結果로 最近에 開發된 海波數値豫報모델이다.

이 Model은 주로 독일의 함부르크大學과 막스푸랑크 氣象硏究所의 Hasselmann group에 의해서 繼續 補完되어 完成되었다. 最近 수년동안 HYPA model에 관한 많은 硏究論文 (Hasselmann *et al.* 1976 ; Günther *et al.* 1979a, 1979b, 1981) 들이 發表되어 왔으므로, 이에 대한 詳細한 內容은 省略하고 모델의 基本構成에 관해서만 簡略히 記述하고자 한다.

HYPA model 의 基本構成은 바람에 의한 海波發生海域의 海上狀態를 數値모델 한 風波 (Wind - sea) model과 海上風이 갑자기 약해진 海域이나 發生海域 밖의 海上狀態를 나타내는 너울 (Swell) model로 區分된다.

이 두 Model을 海上風의 變化와 海上條件에 따라 相互補完的으로 連結함으로써 그리고 波浪에너지 스펙트럼내 에서의 천이에너지를 계산함으로써 보다 실제에 근접한 海上狀態를 구할 수 있게 되었다.

모델의 基本式은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\vec{V}\cdot\frac{\partial F}{\partial \vec{r}}=T \cdots\cdots (3\cdot 1)$$

$T = T_{in}+T_{nl}+T_{dis}$

$F = F(f, \theta, \vec{r}, t)$: Two-dimensional energy density

$\vec{V}$: Group velocity for (f, θ)

$|\vec{V}| = g/4\pi f$

T : Source function

T_{in} : Mean energy input from the atmosphere

T_{nl} : Energy redistribution between different wave numbers by nonlinear interaction

T_{dis} : Enery dissipation

2 -D energy spectrum F 는 周波數 f와 方向 θ의 函數로 다음과 같이 分離된다.

$$F(f,\theta)=\begin{cases} E(f)\cdot\frac{2}{\pi}\cos^2\theta \\ 0 \end{cases}$$

$$\text{for} -\frac{\pi}{2}\leqq\theta\leqq\frac{\pi}{2} \cdots\cdots (3\cdot 2)$$

$$\text{for } |\theta|>\frac{\pi}{2}$$

$E(f)=\int F(f,\theta)\,d\theta$: 1 -D energy spectrum…… (3 · 3)

3 · 1 Parametrical Wind - Sea model

JONSWAP의 硏究結果에 의하면, 風波 (Wind-sea) 의 發生 및 發達過程에서 바람에 의한 에너지 增加와 海波들 間의 非線形 相互作用 (Non-linear wave-wave interactions) 으로부터 Fig. 3 과 같은 安定된 스펙트럼形態를 볼 수 있다.

이러한 스펙트림은 5個의 Parameter, 즉 f_m, α, r, σ_a, σ_b 로써 나타낼 수 있으므로, Spectral energy balance equation 을 各各의 Parameter space로 變形하여, 다음과 같은 Coupled equation으로 나타낼 수 있다

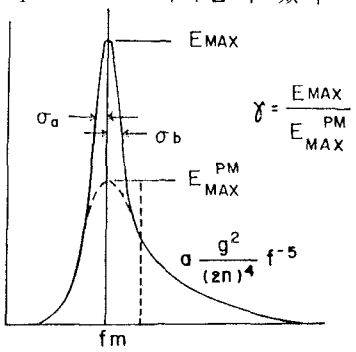


Fig. 3 Mean JONSWAP spectrum with the definition of the wind-sea parameters.

$$\frac{\partial a_i}{\partial t}+D_{ijk}\frac{\partial a_j}{\partial x_k}=S_i \cdots (3\cdot 4)$$

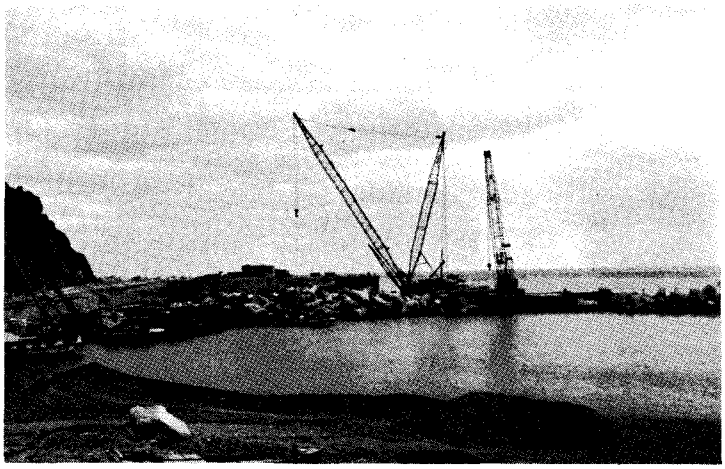
$k = 1, 2$

i, j = 1, 2, 3, 4, 5

$a_1 = f_m$: Peak frequency

$a_2 = \alpha$: Phillips' constant

$a_3 = r$: Peak enhancement factor (=1 for the P-M spectrum)



$a_4 = \sigma_a$. Peak width
$a_5 = \sigma_b$ Parameter

D_{ijk} : Generalized propagation velocity matrix

S_i : The transformed source term for a_i

여기서 Dijk matrix, S_i項은 위의 5個 Parameter의 函數로 表示된다. (Günther *et al.* 1979*a*) 위 式을 使用하여 風波 Spectrum을 數値的으로 구할 수 있으며, Wind-sea model의 適用範圍는 $\nu = f_m\, u/g > 0.13$ (u : 海上 10*m*에서의 風速)이다.

3.2 Swell model

바람이 약한($\nu \leqq 0.13$, 또는 $u < 0.13 g/f_m$) 境遇에는 海波傳播速度(Wave phase velocity)가 風速 u보다 빠르게 되어 바람으로부터 에너지를 吸收할 수 없다. 그러므로, 海波들 間의 非線形 相互作用과 Atmospheric energy input 사이의 Dynamic balance를 維持할 수 없다.

그리하여 海波는 安定된 Spectral shape를 維持하지 못하고 너울(Swell)로써 自由롭게 傳播된다. Spectral energy transport equation에서 Source function T= 0 로 놓고 Characteristic Ray Method(NORSWAM 1977)를 適用하여 너울에 대한 解를 구한다.

3.3 Hybrid model

Hybrid model은 Wind sea와 Swell의 두 모델을 聚合하여 海上狀態를 構成하고 있는 風波 및 너울에 대한 個別的 把握 뿐만 아니라, 두 成分 間의 Spectral energy transfer 가 이루어 지도록 構成되어 있다.

風波와 너울 間의 Energy transfer에 대한 Dynamical criteria는 다음과 같다.

i) $f < f_c$인 領域에 있는 風波의 Spectral energy는 너울로 옮겨진다. 여기서 f_c는 Cut-off frequency로써 다음과 같이 表現된다.

$$f_c = \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{1}{4}} f_m \left[-ln\left\{1 - \left[\left(\frac{f_m}{f_{PM}}\right)^4\right]\right\}\right]^{\frac{1}{4}} \cdots\cdots (3.5)$$

ii) $f > 0.9 f_m$인 領域에 있는 Swell의 Energy는 風波의 領域으로 吸收된다. 이때, 總 에너지는 保存되므로 Peak frequency는 變化한다. (Hasselmann 1963).

iii) $f_w < f < 0.9 f_m$의 周波數 領域에서는 Atmospheric energy input에 의해서 너울의 Energy가 增加된다. 여기서 f_w는 너울의 波速이 海上風의 風速과 一致할 때의 周波數이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_w = \frac{g}{2\pi U \cos\theta}$$

U : 風速

θ : 너울에 대한 相對的 風向

Miles-Phillips의 理論에 의하여 Energy input source function을 다음과 같이 쓸 수 있다(Snyder 1974).

$$S(\theta, f) = \beta(\theta, f)\, F(\theta, f) \cdots\cdots\cdots\cdots (3.6)$$

$$\beta = \begin{cases} 2\pi f \left(\frac{f}{f_w} - 1\right) \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot C \\ 0 \end{cases}$$

for $f > f_w$ ····· (3.7)

$F(\theta, f)$: Swell energy density

ρ_a, ρ_w : 공기, 물의 密度

C : 0.05

지금까지 HYPA model의 主要 基本原理와 構成要素에 대하여 簡略히 說明하였다. Fig. 4에서 5는 독일의 막스푸랑크 氣象硏究所에서 數値計算한 結果를 나타낸 것이다. Fig. 4는 모델에 入力된 北大西洋에서의 風域을, Fig. 5는 風波와 너울 成分으로 分離하였을 때의 海上狀態를 구체적으로 나타낸 것이다. Fig. 6은 한 格子點에서의 에너지 스펙트럼分布와 周波數別(Frequency bin)에 담겨진 Wave energy의 進行方向을 各各 보인 것이다.

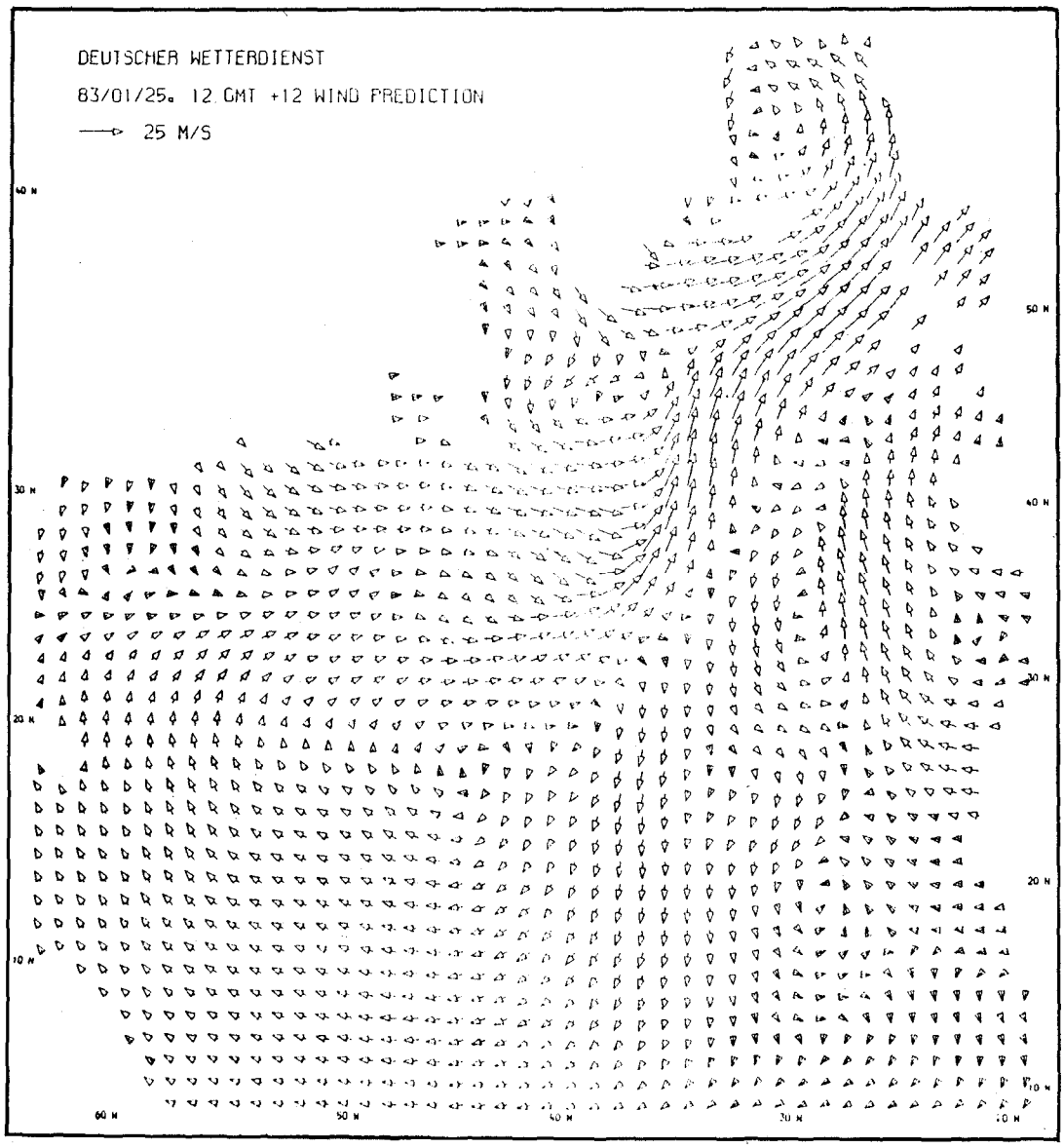


Fig. 4 **Example of wind field input for the HYPA model.**

颱風 BRENDA 경우의 모델 結果 比較

美國의 颱風警報 센타에서 정밀조사된 颱風 Brenda호의 生成, 發達, 消滅시 까지의 進路가 Fig. 7에 있다.

1985년 10월 2일경에 필리핀 東北方 太平洋 海上에서 熱帶性 低氣壓(Tropical storm)이 颱風으로 변하여 매우 빠른 속

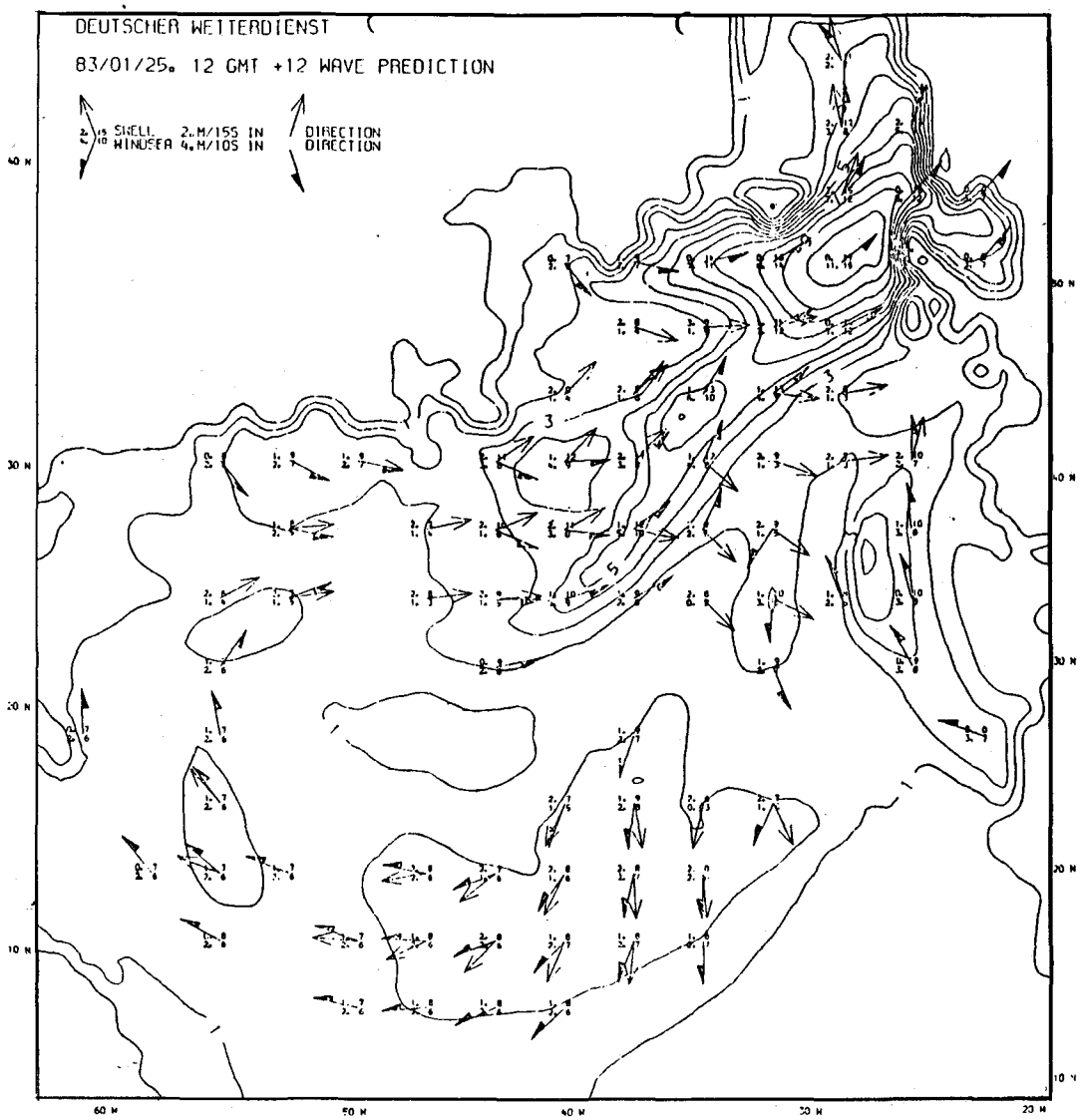


Fig. 5 **Sea-state predicted by HYPA model based on the wind of Fig. 3-2 over the North Atlantic.**

도로 西北方向으로 진행하다가 대만 근해에서 다시 北東쪽으로 꺾이면서 10월5일 경에는 제주도, 남쪽과 大韓海峽을 通過하였다.

金山 近海上에서는 颱風에서 溫帶性 低氣壓(Extratropical storm)으로 바뀌면서 東海上으로 진입하여 10월7일경 흑가이도 近海上에서 완전 消滅되었다.

10월 5～6양일에 걸쳐서 南海岸과 東海岸에서는 큰 파도와 海溢로 인하여 수많은 人命損失은 물론 船舶 및 港灣施設의

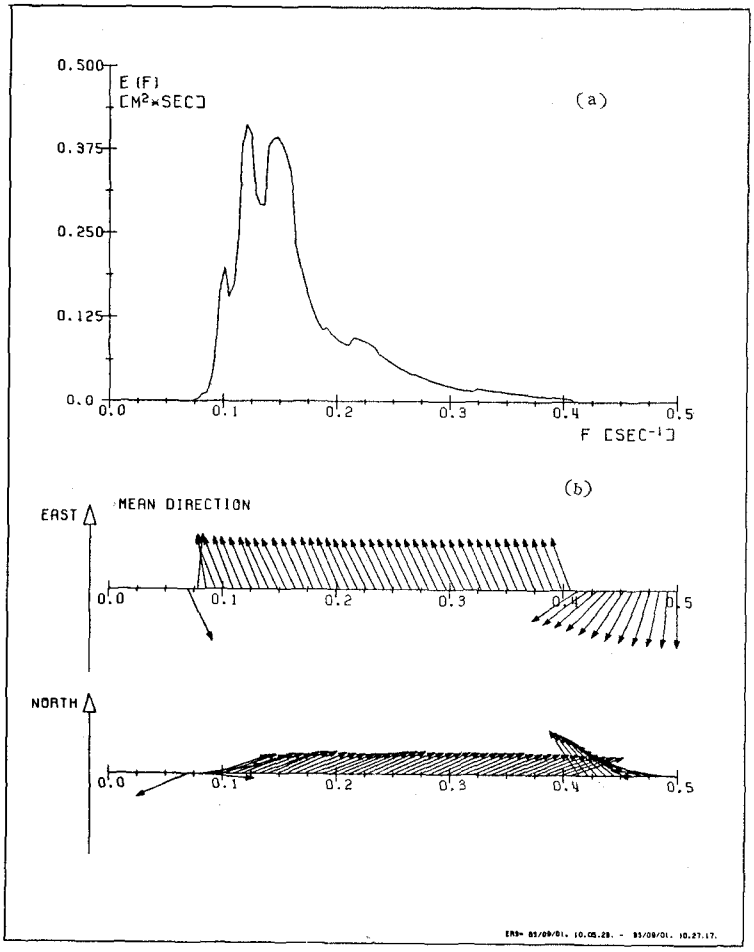


Fig. 6 Distributions of the spectral energy (a) and propagation direction (b) at a specified grid point.

破壞등 막대한 財産上의 被害를 가져왔다. 특히 울릉도의 저동항에서 제일 큰 被害를 냈었다.

颱風 Brenda호 通過시 海上狀態의 變化, 즉 時間別 海域別 波浪分布 상황을 HYPA MODEL로써 再現하였다. 波浪分布의 變化는 매 1시간 간격으로 電算機에 의해서 計算하였으나, 韓半島 沿近海上의 通過 前後상황에 대해서만 Fig. 8, 9, 10 에 나타냈었다.

Fig. 8은 10월 5일 OOGMT (현지시간 5일09시) 颱風中心이 제주도 近海를 通過할 때의 海上의 바람 分布(Fig. 8. a), 有義波高(Fig. 8. b) 分布를 나타내고 있다. 風波(Wind Sea)와 너울(Swell)의 진행 방향은 →와 ⇢의 백터로 표시하였다.

특이한 점은 西海南部 즉 목포 近海에서는 波高 ~5m 의 너울이 北上하고 있으며, 釜山近海에서도 ~3m정도의 너울이 沿岸으로 밀려오고 있음을 나타낸다. Fig. 9는 6일 00GMT (현지시간 6일 09시)경의 海上의 바람과 波高分布를 나타낸 것이다.

東草 近海에서 -7m 가량의 큰 波高가 分布되고 있고, 이는 강한 北東風에 의해 生成된 風波(Wind Sea)로써 바람과 같이 北東쪽으로 부터 東海岸에 전파되고 있음을 보여준다. Fig. 10에서는 6일 12GMT(현재시간 6일 21시)경 세력이 악화되면서 消滅되어 가는 과정에서 나타난 波浪分布로써, 東海上에는 2~3m의 波高가 分布되어 있다.

Fig. 11은 東草 近海上에서의 海上風(a), 有義波高(b), 波浪의 進行方向(c)을 매 시간별로 나타낸 것이다. 6일08시 (현지시간)경에 7.4m의 最大有義波高가 計算되었다.

Fig. 12는 東草항 外海~2km 지점에서 水壓式 計器에 의해서 觀測된 波浪觀測所(海運港灣廳)의 波高資料와 HYPA 모델計算結果를 비교한 것이다.

이와함께 有義波法인 Wilson 모델의 計算結果와 相互比較하였다. 波浪스펙트럼 방법인 HYPA모델의 結果는 觀測치와 매우 근사한 반면, Wilson 모델의 結果는 매우 큰 차이를 보이고 있다.

여기서 Wilson모델의 深海設

計波 算出에 있어서의 適用限界와 制限性을 엿볼 수 있다.

Fig. 13에서는 颱風 Brenda호에 의해서 가장 큰 被害를 냈던 울릉도 저동항 近海에서 時間別 海上風(a), 有義波高(b), 波浪 進行方向(c)에 대한 數値計算 結果를 나타낸 것이다.

HYPA 모델의 結果에 의하면 6일 午前 9시경에 6.4m의 波高가 北東쪽으로 부터 진입함을 나타낸 반면, Wilson모델의 計算結果는 3.4m 未滿의 波高를 나타내었다.

結論 및 提言

韓半島의 位置的 特性으로 인해 우리나라 周邊 海上은 아시아 大陸과 太平洋의 서로 상이한 기상 영향권에 있어 季節別, 海域別氣象條件과 이에 따른 海上狀態의 變化幅이 매우 크다고 하겠다. 그리고 周邊海域도 東海, 南海, 西海로 뚜렷이 구분되여 있어 海域別로 각기 다른 海洋環境 特性을 지니고 있다.

따라서 全國 沿岸과 島嶼地方에 산재한 漁港의 位置的 與件, 季節別 그리고 長期間의 氣象變動에 따라 海上의 거친 파도 發生要因이 다양할 뿐만 아니고 그 變化幅도 매우 크다.

특히 매년 여러차례의 颱風, 暴風(移動性 低氣壓) 그리고 冬季의 강한 季節風등은 海上의 큰파도와 海溢을 誘發시켜 沿岸 및 港灣施設物의 崩壞, 流失등으로 인해 매년 막대한 被害를 입고 있는 실정이다.

이러한 災害被害를 極小化하기 위해서는 沿岸 및 港灣 施設物에 대한 安全性과 經濟性이 고려된 最適 實施設計가 요청되고 있다.

最適設計를 위해서는 最適設計波의 算出이 先行 基本要素이며, 이를 위해서는 各 漁港에 대한 수십년에 걸친 長期 波浪觀測資料의 蓄積이 필수조건이나 현재 우리는 사용될 수 있는 資料가 거의 없는 실정이다.

따라서 最適設計波의 算出은 매우 어려운 과제이며, 장기간의 硏究노력이 요청된다고 하겠다.

現在 先進 外国의 경우에서 가장 신뢰성이 높은 設計波 推定을 위해 사용되고 있는 방법으로서는 過去의 長期間에 걸친 氣象資料를 이용하여 海上의 風域(wind field)에 대한 時間別 變化狀態를 보다 정밀히 分析算出한 후, 이러한 바람資料를 사용하여 보다 발전된 波浪 스펙트럼 推定모델에 의해 長期間의 波浪資料를 算出하는 것이다.

그리고 또한 最適設計波 決定을 위해서는 漁港의 諸般 海洋環境 與件도 고려되어야 할 중요한 要素라고 하겠다.

現在 가장 普遍化되어 널리 사용되고 Wilson法에 의한 深海波浪 推定에는 앞에서 보인 颱風 Brenda의 경우에서 처럼 매우 큰 誤差를 가져올 수 있으므로, 設計波 算出時에는 모델適用의 適否性과 한계성에 대한 면밀한 檢討가 先行되어야 할 것이다.

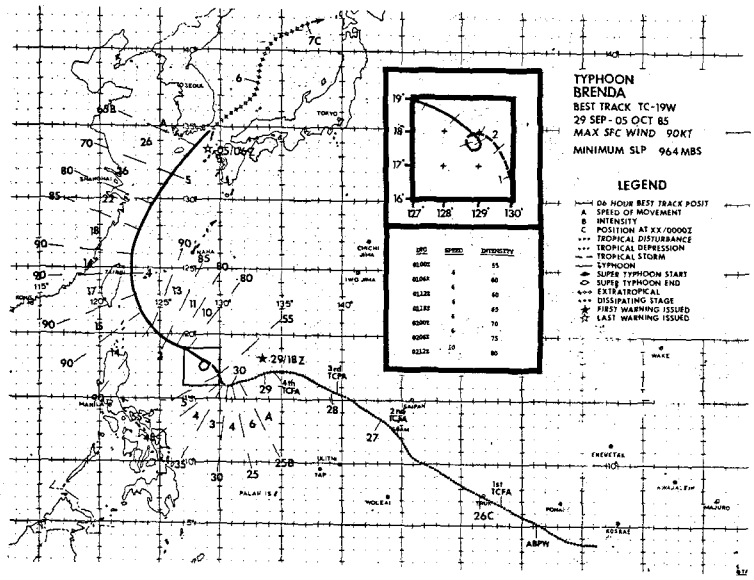


Fig. 7 Tracks of Typhoon BRENDA

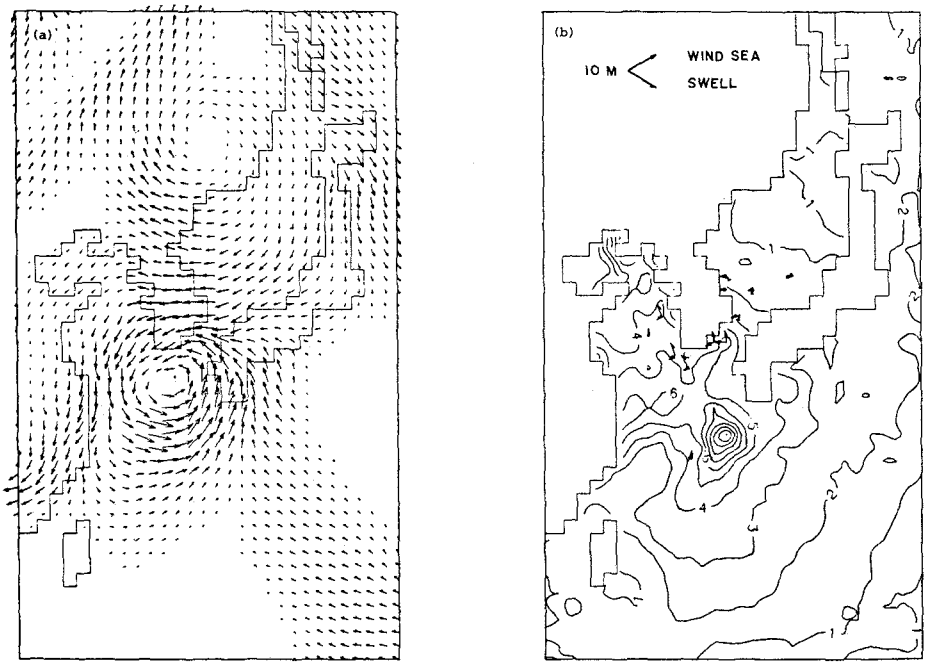
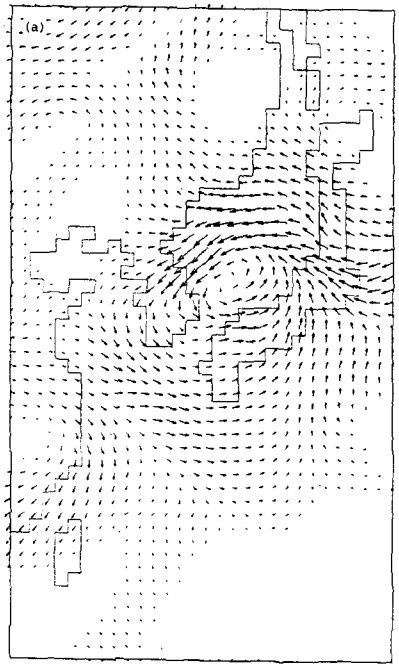
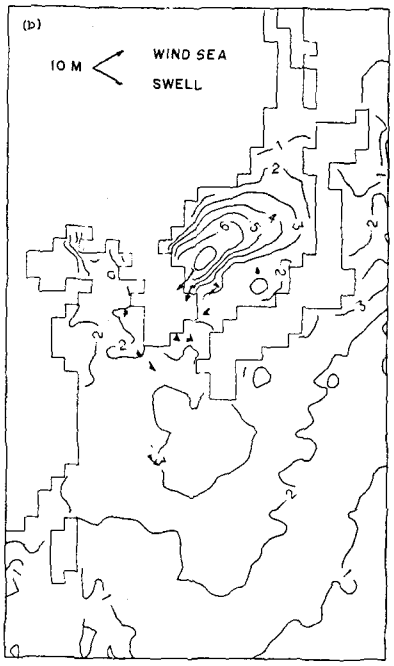


Fig. 8 Sea-state hindcasted by numerical models during the passage of Typhoon BRENDA on 00Z October 5, 1985; (a) sea surface wind field, (b) wave and swell field.

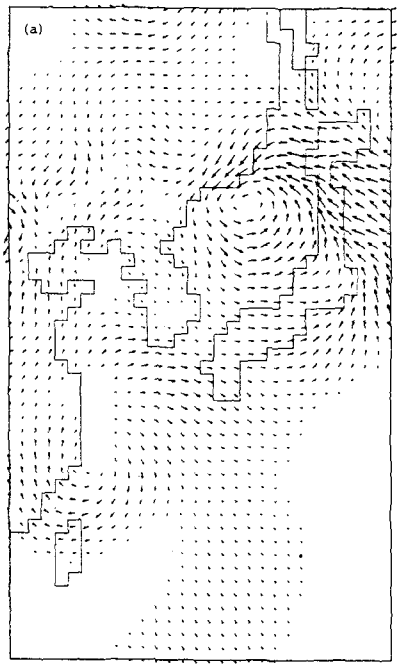


SURFACE WIND (— : 20 m/sec)
DATE : 1985 . 10. 6 00Z

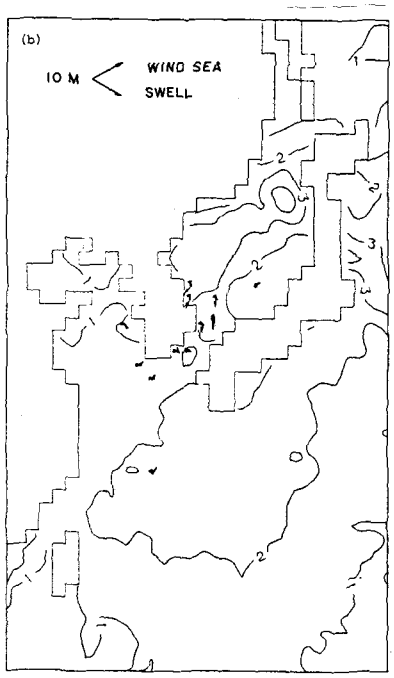


DATE:1985 . 10. 6 00Z

Fig. 9 Sea-state hindcasted by numerical models during the passage of Typhoon BRENDA on 00Z October 6, 1985; (a) sea surface wind field, (b) wave and swell field.



SURFACE WIND (— : 20 m/sec)
DATE : 1985 . 10. 6 12Z



DATE : 1985 . 10. 6 12Z

Fig. 10 Sea-state hindcasted by numerical models during the passage of Typhoon BRENDA on 12Z October 6, 1985; (a) sea surface wind field, (b) wave and swell field.

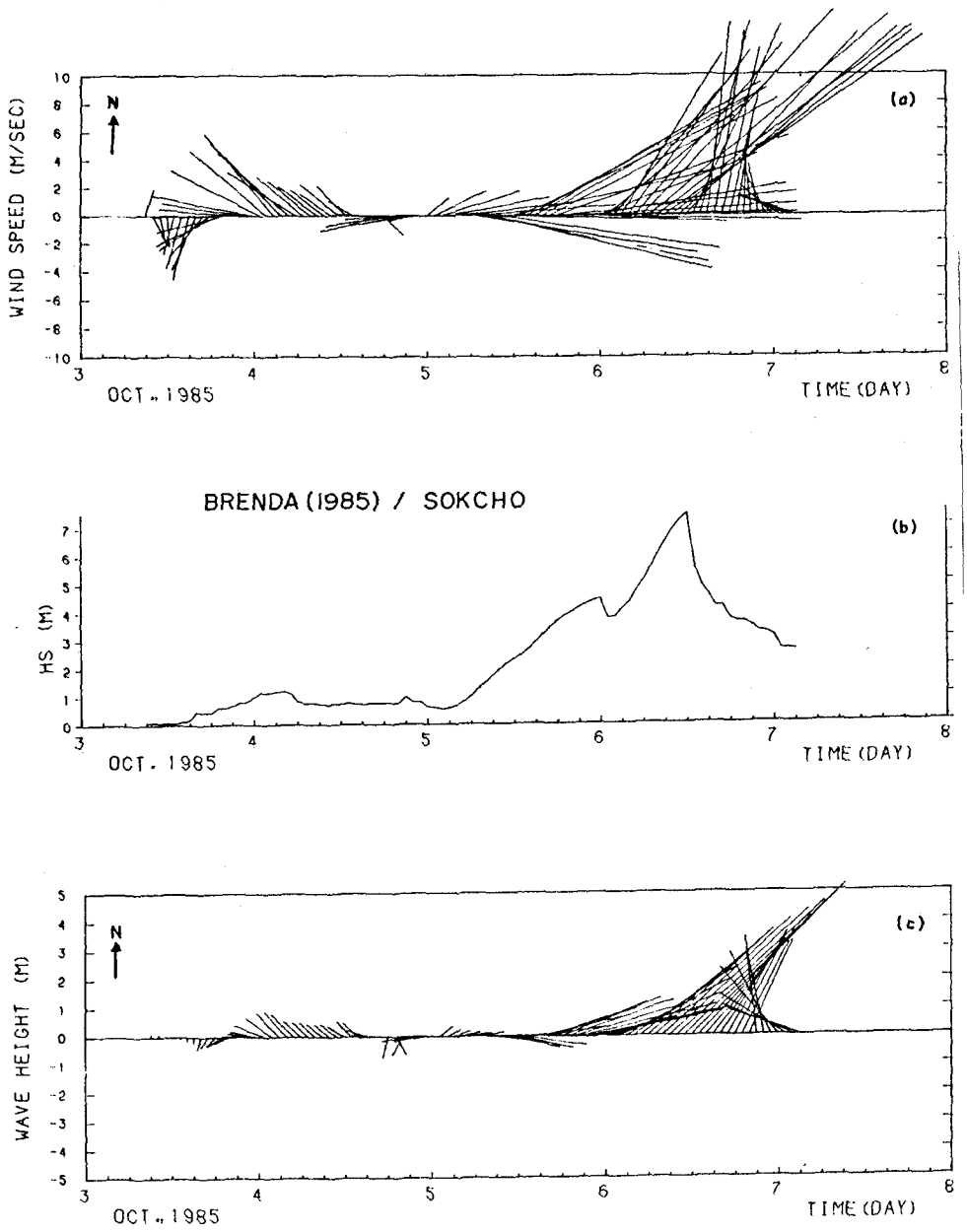
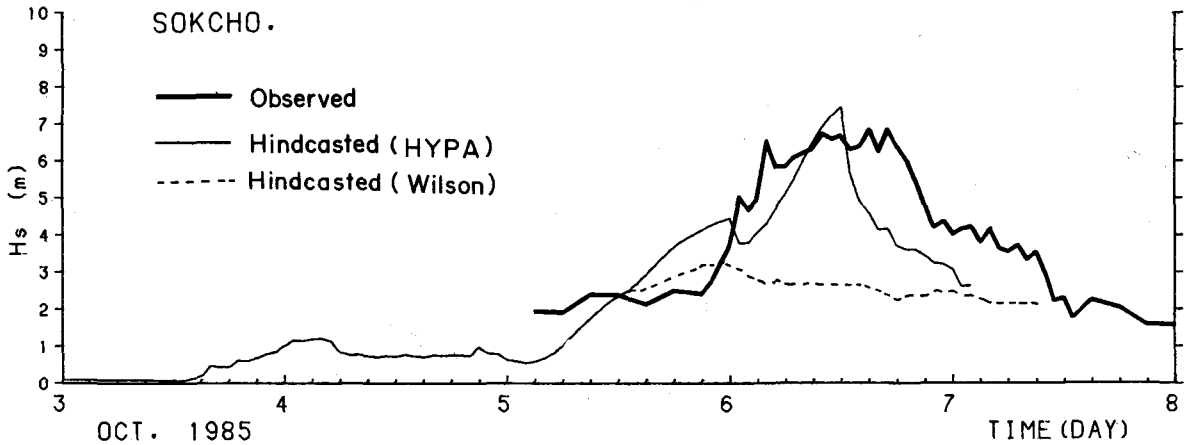


Fig. 11 Wind and wave hindcasted by numerical models during the passage of Typhoon BRENDA at Sokcho ; (a) sea surface wind vector, (b) significant wave, (c) wave vector.



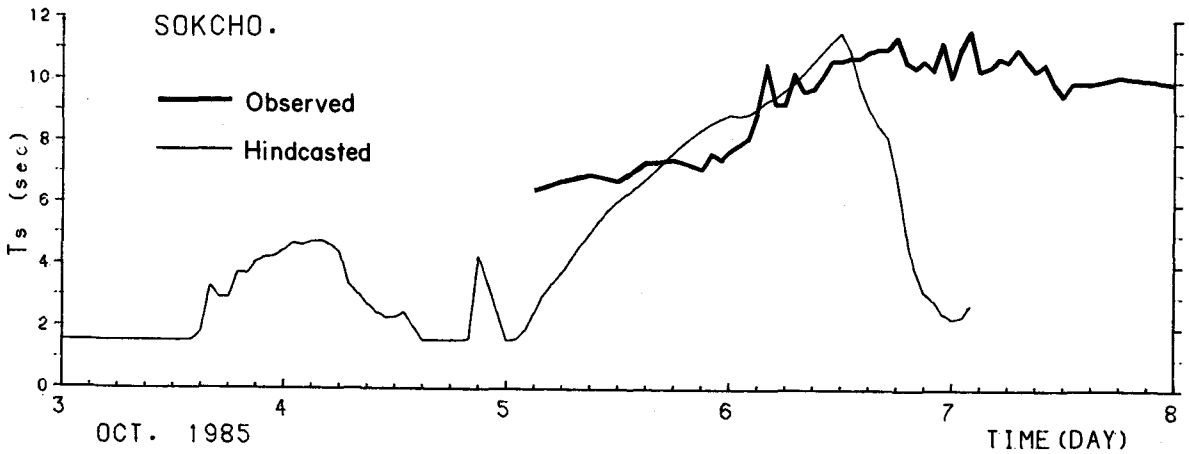


Fig. 12 Comparison of results of wave models with wave observation at Sokcho.

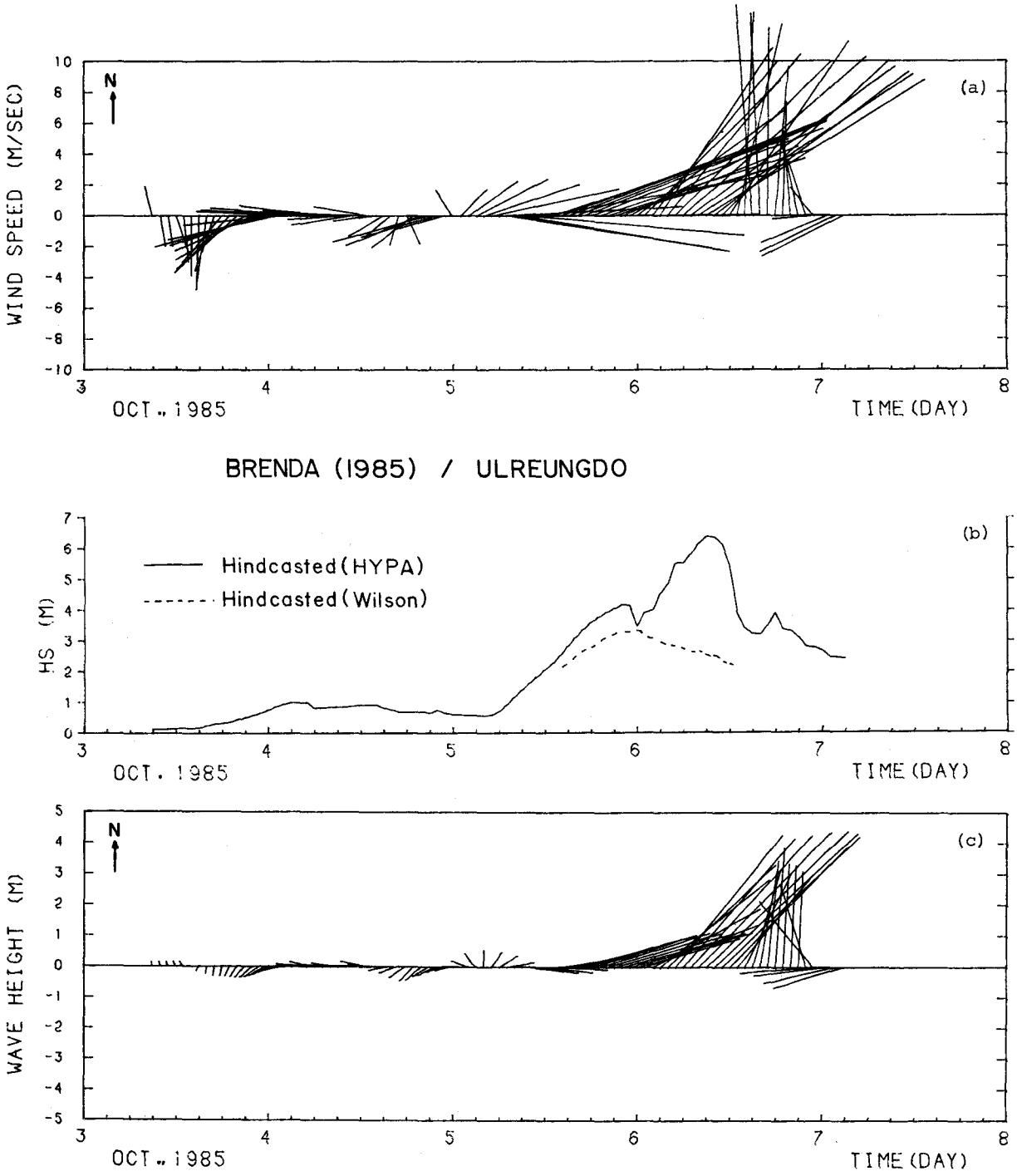


Fig. 13 Comparison of results of wave models with wave observation at Ulreungdo.

參 考 文 獻

Barnett, T.P. 1986. On the generation, dissipation, and prediction of ocean wind waves. J. Geophys. Res., 73: 513-530.

Bretschneider, C.L. 1954. Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction. U.S. Army Corps Engrs., Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 45.

Bretschneider, C.L. 1958. Revision in wave forecasting; deep and shallow water. Proc. 6th Conf. Coastal Engineering: 30-67, ASCE.

Ewing, J.A. 1971. A numerical wave prediction method for the North Atlantic Ocean. Deut. Hydrogr. Z., 24: 241-261.

Gelci, R., H. Caxale, and J. Vassal, 1957. Previsión de la houle. La methode des densites spectro-angulaires. Bulletin d'information du Comite Central d'Oceanographie et d'Etudes des Cotes. IX(8).

Gunther, H., W. Rosenthal, and M. Dunckel. 1981. The Response of surface gravity waves to changing wind direction. J. Phys, Oceano., 11: 718-728.

Gunther, H., W. Rosenthal, and K. Richter, 1979b. Application of the parametrical surface wave prediction model to rapidly varying wind fields during JONSWAP 1973. J. Geophys. Res., 84: 4855-4864.

Gunther, H., W. Rosenthal, T.J. Weare, B.A. Worthington, K. Hasselmann, and J.A. Ewing. 1979. A hybrid parametrical wave prediction model. J. Geophys. Res., 84: 5727-5738.

Hasselmann, K. 1962. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, 1. General theory, J. Fluid Mech., 12: 481-500.

Hasselmann, K. 1963. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, 3. Evaluation of the energy flux and swell-sea interaction for a Neumann spectrum, J. Fluid Mech., 15: 385-398.

Hasselmann, K. T.P. Barnett, E. Bouws, and et al. 1973. Measurement of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.

Hasselmann, K., D.B. Ross, P. Muller, and W. Sell, 1976. A. parametrical wave prediction model. J. Phys. Oceano., 6: 201-228.

Inoue, T. 1967. On the growth of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting. New York Univ.

Kinsman, B. 1965. Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface. Prentice-Hall.

Lamb, H. 1945, hydrodynamics 6th ed., Cambridge Univ. Press.

NORSWARM. 1977. Numerical wave climate study for the North Sea. Rep. EX775, 776, Hydraulics Res. Station. Wallingford, England.

Phillips, O.M. 1977. The dyndmics of the upper ocean, 2nd ed., Cambridge Univ.

Pierson, W.J., G Neumann, and R.W. James. 1955. Observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. U.S. Dept. of the Navy Hydrog. Office. Publ. No. 603.

Snyder, R.L. 1974. A field study of wave-induced pressure fluctuations above surface gravity waves, J. Mar. Res., 32: 497-531.

Wilson, B.W. 1955. Graphical approach to the forecasting of waves in moving fetchs. U.S. Army Corps Engrs., Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 73.

Wilson, B.W. 1965. Numerical prediction of coean waves in the North Atlantic for December, 1959. Deutsche Hydrographische Zeit-Schrift, Jahrgang 18, Heft 3.