

人工波浪豫報 模型의 比較

Comparison of Manual Wave Prediction Models

趙 鏞 七* 譯

1. 要 約

3個 波浪豫報模型에 대한 比較가 1972年 Ontario 湖에서 2個 深海場所로부터 waverider資料를 利用해서 實行하였다.

Sverdrup-Munk-Bretschneider(SMB)模型을 JONSWAP模型과, 또한 比較的 新模型인 Donelan模型과도 比較하였으며, 限定된 吹送距離에서 擬似的 不變狀態의 推移를 研究하였다.

有義波高의 特性과 피이크, 波力스펙트럼(spectrum)의 周期를 豫報하는데 있어 그 正確性은 3個 模型을 比較하여 알 수 있었다.

그중에서 Donelan模型의 正確性이 다른 2個模型보다도 優秀하였다. 그것은 Donelan模型은 吹送分布區域을 알고 있는 곳의 內海에서 優勢한 波力의 方向도 豫報할 수 있으므로 深海에서 不變하고 限定된 吹送分布區域에서는 技術의 適用이 利用될 수 있을 것이다.

2. 緒 論

北美에서 海岸工學의 大部分은 아직도 波高 파라미터(parameter)를 豫報하는데 SMB方法에 依存하고 있다.

SMB模型은 1940年에 開發하여 1970年까지 改善하였으며 單一值의 波高 및 周期를 算出하는데 技術便覽으로서 適用되어 왔다.

다음 2個의 파라미터, 有義波高, H , 및 周期, T 는 海岸保護構造物의 設計와 海岸保護로, 海上 및 其他 海岸技術工事に 一般적으로 使用하여 왔다.

이 研究의 目的은 波浪을 豫報하는데 最近의 接近方法이 精度를 改善하는지의 與否를 決定키 위한

것이다. 2個의 模型을 SMB方法과 比較하였다.

첫째는, 現在 一般적으로 使用하고 있는 Jonswap 實驗(9)으로 얻은 模型이며

둘째는, Canada의 國立海岸研究院에서 開發한 Donelan模型(6)이다.

Donelan模型은 波浪方向의 豫報를 할 수 있는 第一簡單한 模型이며 그것은 既知의 吹送分布區域인 水面에서 優勢한 波力方向을 豫報할 수 있다.

이 研究는 同一한 假定에 依據한 것이며 Jonswap 및 Donelan의 兩者模型은 類似한 理論에 依據하고 있다.

3. 資 料

1972年 Ontario湖에 3個의 waverider와 11個 氣象浮標를 Fig.1의 位置에 設置하고, 深海波의 樣狀을 測定할 수 있도록 3個의 waverider位置에 裝置하였다.

波浪資料는 平均水面높이 H_s 의 샘플링頻度時 3時間 間隔으로 20分間 蒐集하였다. 水面標高의 스펙트럴密度의 變化는 $0.05H_s$ 와 $0.5H_s$ 사이의 頻度離散值 約 60일때, Canada의 海洋環境資料所에서 Cooley-Tukey의 記數法을 使用해서 計算하였다.

이 研究에서의 比較는 2個의 各其 相違한 露出器에 의한 波浪資料이며 水面上의 風速資料를 使用한 것이다.

吹送距離는 Ontario湖 6,560ft(2km) 格子(14)에 設置한 디지털(digital) 水深測量計의 資料로 計算하였다. 海岸線 位置는 隣接한 格子點間에 一次線形 補間法으로 概算하였다.

4. 波浪豫報模型

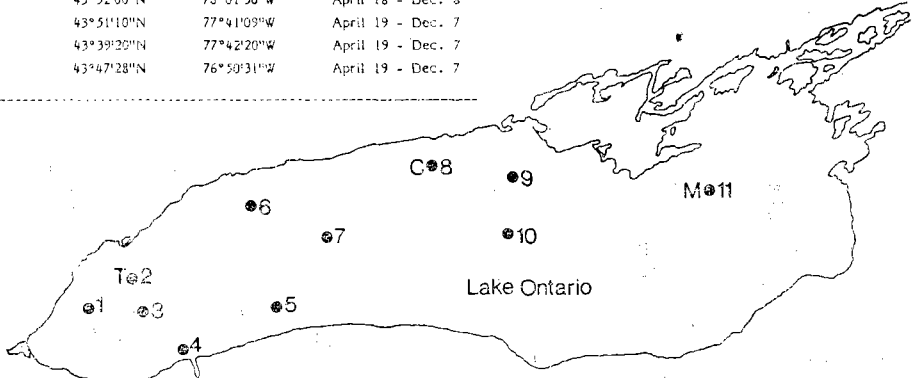
SMB

$H_o = H_s$, 그리고 $T_p = T$ 로 假定하고 Bretschneider

* 拔萃 : The Journal of Waterway, Port, Coastal Engineering, February, 1983: ASCE
By Craig T. Bishop

METEOROLOGICAL BUOYS

Station Number	Latitude	Longitude	Period of Deployment
1	43°25'38"N	79°30'51"W	April 6 - Dec. 11
2	43°30'53"N	79°19'01"W	April 6 - Dec. 11
3	43°24'23"N	79°17'20"W	April 10 - Dec. 9
4	43°17'31"N	79°07'55"W	April 10 - Dec. 11
5	43°26'03"N	78°43'40"W	April 11 - Dec. 12
6	43°43'56"N	78°49'23"W	April 11 - Dec. 8
7	43°08'48"N	78°29'30"W	April 18 - Dec. 8
8	43°52'00"N	78°01'30"W	April 18 - Dec. 8
9	43°51'10"N	77°41'09"W	April 19 - Dec. 7
10	43°39'20"N	77°42'20"W	April 19 - Dec. 7
11	43°47'28"N	76°59'31"W	April 19 - Dec. 7



Location	Latitude	Longitude	Period of Deployment	Depth of Water (ft)
Toronto (T)	43°31'N	79°19'W	March 11 - Nov. 30	354
Cobourg (C)	43°49'05"N	78°02'05"W	April 12 - Dec. 4	230
Main Duck Island (M)	43°47'45"N	76°49'39"W	April 19 - Nov. 21	226

Fig. 1. 氣象 및 waverider浮標의 位置(1972)

(3)에 의해 주어진 SMB와 美國 海岸技術研究所(15)는 다음과 같이 나타냈다.

$$H_c = 0.283g^{-1} U^2 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gx}{U^2} \right)^{0.42} \right] \quad (1)$$

$$T_p = 7.54g^{-1} U \tanh \left[0.077 \left(\frac{gx}{U^2} \right)^{0.25} \right] \dots \quad (2)$$

記號는 最後章 Appendix 11를 參照하고, 有效吹送距離의 計算은 Shore Protection Manual (15)를 推薦하나 이 計算의 適用性은 論點이 되고 있으며 (13), 그리고 (16)은 지금 더 以上 勸奨하고 있지 않다.

Jonswap

Jonswap(9) 方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$H_c = 0.0016g^{-0.57} U x^{0.5} \dots \dots \dots (3)$$

$$T_p = 0.286g^{-0.07} U^{0.33} x^{0.33} \dots \dots \dots (4)$$

이 方程式의 誘導는 簡單한 幾何學的의 圖形의 吹送距離를 使用하였다.

Donelan

Donelan (6)의 方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$H_c = 0.00366g^{-0.02} U^{1.24} F^{0.33} (\cos\theta)^{1.24} \dots \dots (5)$$

$$T_p = 0.54g^{-0.77} U^{0.54} F^{0.23} (\cos\theta)^{0.54} \dots \dots \dots (6)$$

θ = 風向과 波浪方向間의 角度

이들의 公式은 1976年과 1977年에 Ontario湖에서 塔에 配置된 14個 波浪觀測機를 使用해서 誘導되었다.

그러므로 Donelan公式은 相違된 場所와 各其 다른 年의 資料에 의해 誘導되었으며 波浪豫報模型을 試驗使用한것보다도 廣範圍하게 相違한 器具를 使用하였다.

Donelan은 다른 簡單한 波浪豫報模型과는 달리

바람과 波浪方向이 一致하는 것으로는 믿지 않고 있다.

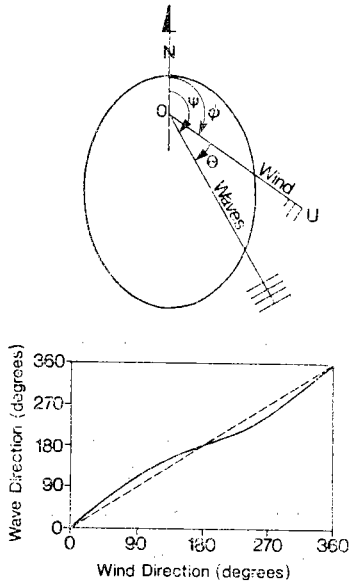


Fig. 2. 風向(Donelan(6))對 타원형 호수의 岫점에서 피이크파랑 에너지方向에 대한 關係 風向(實線) 對 피이크파랑에너지方向은 點線으로 比較된다. 湖水의 形狀(타원 이심률=0.700)에 대하여 差違는 20°가 最大임.

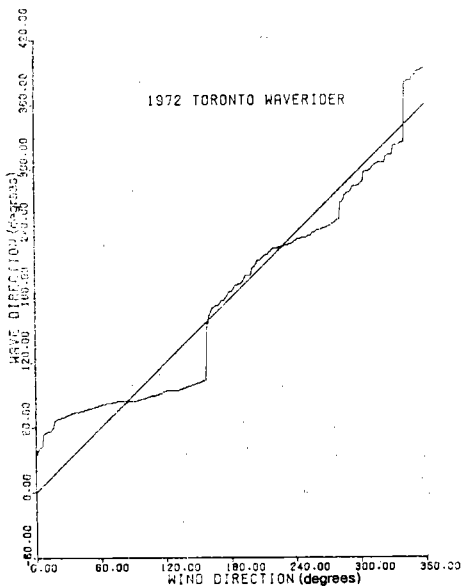
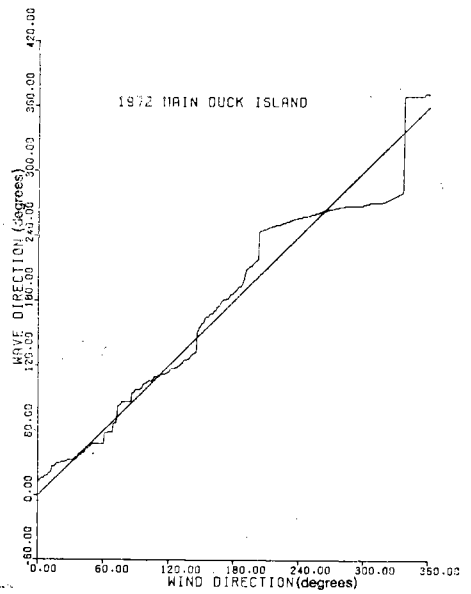
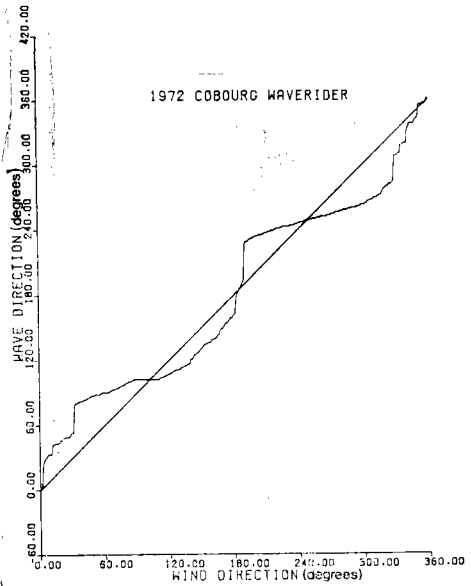


Fig. 3. 3個 waverider의 위치에 대하여 피이크파랑에너지 對 풍향관계

스펙트럴피이크에 가까운 頻度の 波浪 “限定된 吹送距離(6) 또는 非定常波(11)의 狀態”는 離岸風의 角度(off-wind angles) 時에 進行하는 것이 나타났다.

Kitaigorodskii(12)에 의한 摩擦速度보다도 높이 33ft(10m)일 때의 바람의 構成 $U\cos\theta$ 를 包含시켜

修正提示한 次元의 論理를 使用함에 있어 Donelan 및 其外(7)은 다음의 關係를 決定하였다.

$$1.85T_p g^{0.77} U^{-0.54} = (\cos\theta)^{0.54} F^{0.23} \dots\dots\dots(7)$$

피이크周期 및 波浪接近方向 θ 는 右側方向
 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \dots\dots\dots(8)$

에 대하여 最大일 때 方程式(7)이 주어졌다.

Donelan의 模型을 使用하기 前에 피이크波力方向, ϕ 對 風向, ϕ 의 關係를 關心되는 地點에 대하여 決定하여야 한다. 海岸의 位置를 알게되면 吹送分布區域, 限定된 吹送距離條件에 대한 點의 關係 $\phi-\psi$ 는 方程式(7)의 右邊을 最大로 하므로서 決定되며, 또는 同等하게 다음과 같이 表示된다.

$$[(\cos\theta)(F_\phi^{0.42})] \dots\dots\dots(9)$$

이것은 限定된 吹送條件에 대하여 單 한번의 주어진 位置만으로 프로그램의 計算 또는 컴퓨터를 使用해서 完수할 수 있다. Donelan 및 其外(7)은 加重平均吹送距離가 約 $30^\circ(\phi \pm 15^\circ)$ 以上の 1° 增加때에 實驗한 波浪의 資料가 잘 맞음을 알았다.

離心率 0.7인 隋圓形 湖水的 焦點(0點)에서 피이크波力方向, ψ 와 風向, ϕ 간의 關係結果를 Fig.2에 表示하였다.

Donelan의 吹送距離平均의 節次採用으로 觀測한 3個所에서의 waverider位置에 대한 ϕ 對 θ 의 關係는 Fig.3에 表示하였다.

5. 風速補正

各其 氣象學의 浮標에서 風速 U 는 平均水面上的 높이 $Z=13ft(4.0m)$ 에서 觀測하였으나, 3個 波浪의 豫報方程式은 모두 33ft(10m) 높이의 바람資料를 使用하여 誘導하였다. 그러므로 觀測된 風速은 偏倚되지 않은 로그(logarithmic)바람形狀을 根據로 하여 補正係數를 곱한 것이다. (方程式(5) 參照)

$$U_z = U_{33} \left\{ 1 + \left[\ln \left(\frac{Z}{33} \right) \right] \frac{(C_D)^{1/2}}{k} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

風速에서 普通 從屬되는 끌음係數(drag coefficient), C_D 가 있으며 資料에 裝置($26 \leq U_{33} \leq 52fps(15.8m/s)$)하여 使用한 風力의 範圍가 없다면 C_D 의 合理的인 값은 0.0015이다.

von Karmans의 定數 $k=0.4$, 方程式(10)은 다음과 같다.

$$U_z = U_{33} \left[1 + 0.0968 \ln \left(\frac{Z}{33} \right) \right] \dots\dots\dots(11)$$

높이 13ft(4.0m)에서 $U_{33}/U_{13}=1,099$ 가 되며 結果의으로 資料데이프에서 時間的 平均風速은 이 研

究에서 그것을 使用하기 前에 1.1을 곱하였다.

6. 節 次

바람資料는 氣象의 上層바람의 浮標에 의한 것으로서 加重平均하여 얻어지며 Toronto의 2 浮標와 Main Duk의 11의 浮標로부터 얻었다.

限定된 吹送距離에 限해서만 擬似的 不變狀態의 推移를 調查하였다. 그러므로 風速資料는 다음의 規範에 맞지 않은 바람의 周期는 除外시키고 選拔하였다.

① 最小速度: 時間的 風速은 最小速度 U_{min} 을 超過함이 必要하다. 現場觀測에서 (4)의 公式은

$$\frac{U}{C} \leq 0.83 \dots\dots\dots(12)$$

일때, 波浪이 充分히 發達된 것이 얻어질 수 있을을 觀測하였다. Donelan (6)은 이 條件을 離岸風의 角度에 包含시키는 것으로 適用하였다.

$$\frac{U}{C} \cos\theta \leq 0.83 \dots\dots\dots(13)$$

波浪이 萬若

$$U \leq 0.00325 \sqrt{F_{max}g} \dots\dots\dots(14)$$

이런 充分히 發達되는 것을 알았다.

여기서 F_{max} =關心되는 地點에서 可能한 가장 긴 吹送거리 $U_{min}=26fps(8m/s)$ 값은 Ontario湖에서는 充分히 發達되어 얻어지는 波浪條件은 除外시키기로 하였다.

② 風速의 不變: 어느時間동안 風速이 萬若 다음과 같으면 不變하다고 考慮하였다.

$$\left| \frac{U_i - U}{U} \right| < U_{it} \dots\dots\dots(15)$$

U 는 前數字의 平均, $NCON$ =繼續의이며 받아들일 수 있는 有用한 每時間마다의 時間, U_{it} =引入 파라미터

③ 風向의 不變: 어느時間에 風向이 萬若 다음과 같다면 不變하다고 考慮하였다.

$$|D_i - \bar{D}| < D_{crit} \dots\dots\dots(16)$$

\bar{D} =前數字의 平均

$NCON$ =繼續의이며 받아들일 수 있는 有用한 每時間마다의 값 ($NCON \geq 2$)

D_{crit} =指定된 引入파라미터

④ 不變風의 期間: 限定된 期間의 波浪發生條件보다도 限定된 吹送距離를 確實케 하기 위하여, 有用한 繼續의인 時間資料가 어느 最小限의 期間을 超過하는 것이 必要하다. 이 最小限의 期間은 吹送

Table-1. Toronto Waverider H[교($D_{crit} = 22.50$, $U_{st} = 0.25$, $NF = 15$)에 대한 출력의 표준 세그먼트(segment)

Month/ day/ hour (1)	NCON, in hours (2)	TDIFF, in degrees Fahren heit (3)	U, in feet per secon (4)	ϕ , in de- grees (5)	ϕ , in de- grees (6)	x , in miles (7)	F_i miles/hours (8)	TMD in hours (9)	TMJ, in hours (10)	TMB, in hours (11)	HD, in feet (12)	HJ, in feet (13)	HB, in feet (14)	TD, in sec- onds (15)	TJ, in sec- onds (16)	TB, in sec- onds (17)	g_x/U^2 (18)	gF/U^2 (19)	U/C (20)
4/22/8	4	-3.26	45.59	128	94	27.00	112.52	14.78	4.61	3.97	6.00; 4.72(measured)	4.85	5.61	5.64; 4.88(measured)	5.01	5.17	2,208	9,200	1.82
4/22/9	5	-3.19	45.46	131	94	25.90	112.52	15.10	4.49	3.85	5.71; 5.18	4.76	5.51	5.52; 5.23	4.94	5.11	2,129	9,247	1.70
4/22/10	6	-2.95	45.46	132	94	25.59	112.52	15.21	4.45	3.82	5.64; 5.64	4.72	5.48	5.48; 5.59	4.92	5.10	2,102	9,245	1.59
4/22/11	7	-2.95	45.30	134	95	25.02	108.94	14.98	4.39	3.76	5.44; 6.10	4.65	5.41	5.39; 5.94	4.87	5.07	2,071	9,020	1.49
4/22/12	8	-2.70	45.36	134	95	25.02	108.94	14.97	4.39	3.76	5.44; 6.46	4.65	5.41	5.39; 6.13	4.88	5.07	2,066	8,999	1.45
4/22/13	9	-2.45	45.53	133	95	25.30	108.94	14.83	4.42	3.78	5.58; 6.82	4.69	5.44	5.44; 6.31	4.90	5.09	2,074	8,930	1.41
4/22/14	10	-2.36	45.62	136	96	24.49	105.21	14.64	4.32	3.68	5.31; 7.18	4.62	5.41	5.33; 6.50	4.85	5.06	1,999	8,587	1.37
4/22/15	11	-1.17	45.26	136	96	24.49	105.21	14.70	4.33	3.70	5.28; 7.05	4.59	5.35	5.30; 6.61	4.84	5.04	2,030	8,721	1.43
avg		-2.63	45.46	133	95	25.35	109.35	14.90	4.43	3.79	5.54; 6.13	4.69	5.44	5.44; 5.90	4.90	5.09			
4/22/19	5	-1.06	40.67	122	94	29.66	112.52	15.19	5.10	4.55	5.64; 6.76	4.53	5.05	5.49; 6.61	4.98	4.93	3,045	11,552	1.20
4/22/20	6	-1.26	39.20	121	94	30.19	112.59	15.42	5.22	4.70	5.44; 6.69	4.43	4.85	5.41; 6.50	4.94	4.84	3,340	12,448	1.18
4/22/21	7	-1.31	37.75	119	93	31.49	114.85	15.91	5.44	4.96	5.31; 6.26	4.33	4.72	5.35; 6.61	4.95	4.77	3,752	13,686	1.12
avg		-1.21	39.20	121	94	30.45	113.30	15.51	5.25	4.74	5.48; 6.56	4.43	4.89	5.42; 6.57	4.96	4.85			
4/25/5	3	-1.12	27.49	357	32	9.86	23.35	5.82	2.78	2.41	1.74; 1.84	1.77	2.03	2.97; 3.18	3.04	3.12	2,219	5,253	1.69

Table-2. 不變風浪의 濺報에 대한 標準誤差 및 偏差(BIAS)

Station (1)	D_{err} in degrees (2)	U_{st} (3)	NF, in degrees (4)	NPTS (5)	CHARACTERISTIC WAVE HEIGHT								PERIOD									
					Donelan				JONSWAP				SMB				Donelan		JONSWAP		SMB	
					Stan- dard error, in feet (6)	BIAS, in feet (7)	Stan- dard error, in feet (8)	BIAS, in feet (9)	Stan- dard error, in feet (10)	BIAS, in feet (11)	Stan- dard error, in seconds (12)	BIAS, in seconds (13)	Stan- dard error, in seconds (14)	BIAS, in seconds (15)	Stan- dard error, in seconds (16)	BIAS, in seconds (17)						
Toronto	22.50	0.075	15	83	0.62	-0.095	0.82	0.11	0.92	0.59	0.47	-0.14	0.63	0.18	0.61	0.26						
	22.50	0.15	15	89	0.66	-0.062	0.92	0.14	0.98	0.59	0.55	-0.19	0.74	0.14	0.66	0.21						
	22.50	0.25	15	79	0.59	-0.026	0.89	0.20	0.95	0.59	0.50	-0.16	0.71	0.20	0.63	0.22						
	22.50	0.35	15	77	0.66	-0.079	0.89	0.15	0.92	0.56	0.53	-0.18	0.74	0.18	0.65	0.18						
	11.25	0.25	15	66	0.56	-0.089	0.69	0.13	0.92	0.66	0.47	-0.16	0.56	0.17	0.59	0.29						
	33.75	0.25	15	71	0.62	-0.020	0.92	0.26	0.92	0.59	0.53	-0.19	0.73	0.22	0.63	0.16						
	22.50	0.25	1	80	0.59	+0.023	0.85	0.17	0.98	0.56	0.47	-0.12	0.69	0.17	0.66	0.19						
Main Duck Island	22.50	0.25	7	79	0.59	+0.001	0.85	0.16	0.98	0.59	0.49	-0.14	0.68	0.16	0.66	0.20						
	22.50	0.075	15	54	0.89	-0.39	0.85	0.30	0.66	0.11	0.57	-0.37	0.82	-0.14	0.68	-0.18						
	22.50	0.15	15	69	0.89	-0.33	0.95	-0.12	0.79	0.23	0.52	-0.31	0.77	0.023	0.59	-0.11						
	22.50	0.25	15	74	0.85	-0.28	0.85	-0.10	0.72	0.22	0.54	-0.27	0.70	0.061	0.55	-0.090						
	22.50	0.35	15	74	0.92	-0.32	0.89	-0.11	0.75	0.21	0.54	-0.29	0.70	0.068	0.55	-0.092						
	11.25	0.25	15	54	1.02	-0.31	1.08	-0.46	0.85	-0.033	0.67	-0.32	0.97	-0.28	0.84	-0.30						
	33.75	0.25	15	74	0.92	-0.18	1.08	+0.11	0.95	0.36	0.62	-0.30	0.74	0.13	0.59	-0.11						
22.50	0.25	1	80	0.89	-0.15	0.95	-0.18	0.82	0.15	0.58	-0.20	0.84	-0.033	0.68	-0.15							
22.50	0.25	7	76	0.85	-0.25	0.89	-0.17	0.75	0.17	0.52	-0.24	0.74	0.004	0.59	-0.12							

距離와 前者바람의 資料를 無視하고 吹送距離對通 過時間을 計算하였다. 結果의 方程式은 다음과 같다.

$$\text{Donelan } t_{min} = 30.1g^{-0.28}U^{-0.54}F^{0.77} (\cos\theta)^{-0.54} \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{JONSWAP } t_{min} = 65.6g^{-0.38}U^{-0.38}x^{0.87}\dots(18)$$

$$\text{SMB } t_{min} = 6.59 \frac{U}{g} \exp\left\{\left\{0.0161 \left[\ln\left(\frac{gx}{U^2}\right)\right]^2 - 0.369 \ln\left(\frac{gx}{U^2} + 2.202\right)\right\}^{1/2} + 0.880 \ln\left(\frac{gx}{U^2}\right)\right\} \dots\dots\dots(19)$$

3個 豫報模型에 대한 같은 경우의 數字를 마련하기 위하여 3個公式로 計算된 t_{min} 의 가장 작은 값의 不變風의 期間을 基準으로 하여 결정하였다. 3個模型에 대해서 波浪의 豫報는 가장 큰 t_{min} 보다도 가장 작은 바람의 資料를 基準으로서 選擇한 것은 그것보다도 더 認知할 수 있을만큼 變化하지 않으므로 t_{min} 값은 큰것보다 작은 값을 취하였다. 그러므로 Donelan의 t_{min} 는 其外 2個의 公式에서 計算한 t_{min} 보다도 一般的으로 超過하지만 그것은 波浪의 吹送距離(F)가 x보다도 크므로, Donelan의 波浪豫報는 超過된 SMB, 또는 JONSWAP의 推算值 t_{min} 의 有用한 風速時間數 다음에는 大略 不變하였다. 여기에 計算한 最小期間은 事實上的 計算 時間이 零일때 平穩한 水表面으로 推定하였으므로 最小期間의 上限線推算이다.

豫報와 觀測된 波浪資料의 比較는 단지 波浪資料가 2個의 基準에 適應되었을 경우, 즉

7. 最小波高 및 周期

觀測한 有高波義는 1ft(0.3m)보다 더 커야하고 觀測한 피이크波力의 時間 T_p 값은 3秒를 超過하여야 한다.

8. 波浪資料의 間隔

波浪資料繼續值의 時間 間隔은 3時間을 超過하지 않아야 한다.

각기 有用할 수 있는 時間의 바람資料에 대하여 波浪의 파라미터는 각기 3個 模型을 使用하여 豫報하였으며, 이것은 바람資料의 繼續인 有用時間에 대한 U, X, F 및 θ 의 平均值를 使用해서 計算하였다. 만약 觀測한 波浪資料도 有用이 된다면 각기 有用時間의 바람 資料에 符合되는 波浪의 파라미터는 一次線形 補間法에 의해 算定할 수 있다.

Table-1은 氣象學의 資料, 波浪豫報 및 波浪資料의 數值와 計算한 無次元의 變數를 有用할 수 있는 時間에 대하여 記載하였다.

“颱風—平均” 比較는 豫報한 有義波高와 피이크 周期對 符合된 觀測值를 記載하였다. 引込한 變數值, $-U_{st} D_{crit}$ 및 NF—風向에 대한 어느 側의 度數(JONSWAP 및 SMB模型) 또는 吹送距離를 數學的으로 平均(cosine은 不使用)한 波浪方向(Donelan 模型)을 表現했다.

圖示된 點은 統計學的 標準誤差와 偏差를 表現하였다.

7. 結 果

Fig.4,5 및 6에서는 다음의 引込值로서 計算하였다.

- (1) D_{crit} : 11.25°, 22.50°, 33.75°
- (2) U_{st} : 0.075, 0.15, 0.25, 0.35
- (3) NF: 1°, 7°, 15°

Fig.4에서는 代表的으로 2個所가 主體를 離脫한 것들이 있으나 이들의 點은 모든 數字와 Toronto의 結果表에서 除外시켰다.

Table-2는 Toronto와 Main Duck Island에 대하여 不變狀態로 計算된 結果이다. Toronto에서는 Donelan의 豫報가 最善이며 Main Duck Island에서는 SMB의 豫報가 最善이다. D_{crit} , U_{st} 및 NF로서 變更되어지는 結果는 그렇게 敏感하지 않다는 것은 興味있는 事實이다. 그러므로 吹送距離平均法은 重要한 것은 아니다.

代表的인 圖解結果를 Fig.5 및 6에 表現하였다.

Table-2에서 平均하여 얻어진 3個模型에 대하여 代表的인 豫報의 正確度를 Table-3에 總括하였다.

波高와 周期를 豫報하는데 있어 3個模型의 正確度는 平均해서 Donelan模型이 最少值의 標準誤차가 나타나며 JONSWAP模型은 最小偏差를 나타내고 있다. (偏差度에서는 Donelan이 第2位) 周期豫報에 있어 Donelan模型은 낮으며 JONSWAP는 많은 傾向이다. SMB模型은 波高豫報가 많아지는 傾向이다. 이 SMB方法에 대한 傾向은 Brebner 및 Le Méhauté를 위시한 많은 사람들에 의해 認知되고 있다.

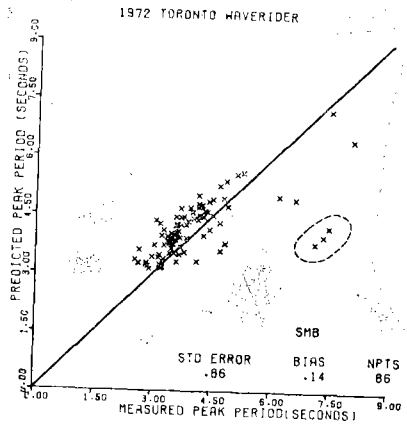
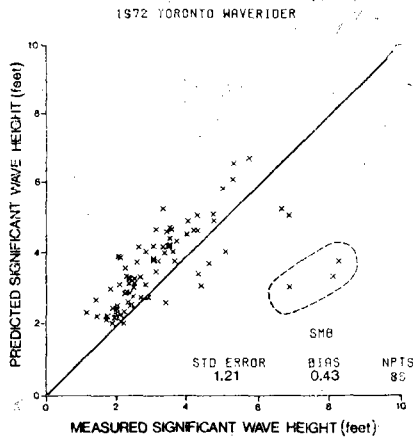
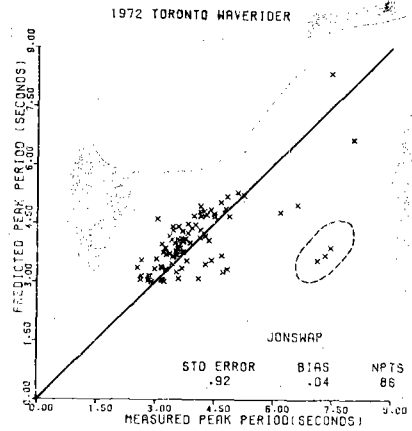
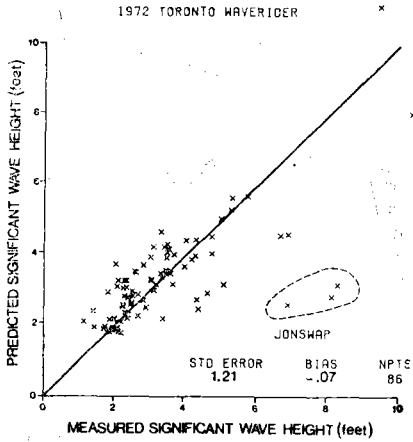
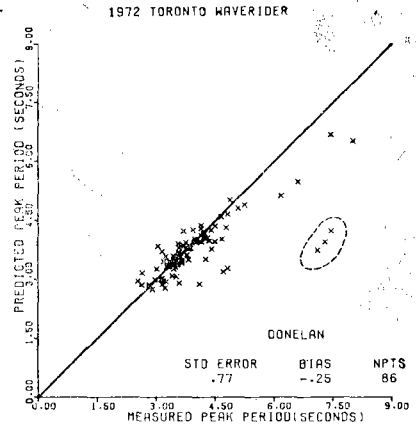
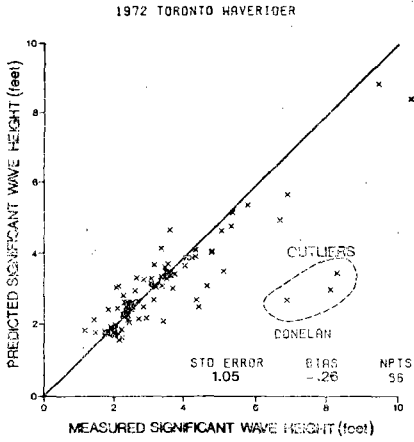


Fig. 4. 3個 極外點($D_{crit}=22.50$, $U_{st}=0.075$, $NF=15$)을 포함한 Toronton에서의 豫報 對 觀測한 폭풍풍랑 파라미터의 비교

人工波浪豫報 模型의 比較

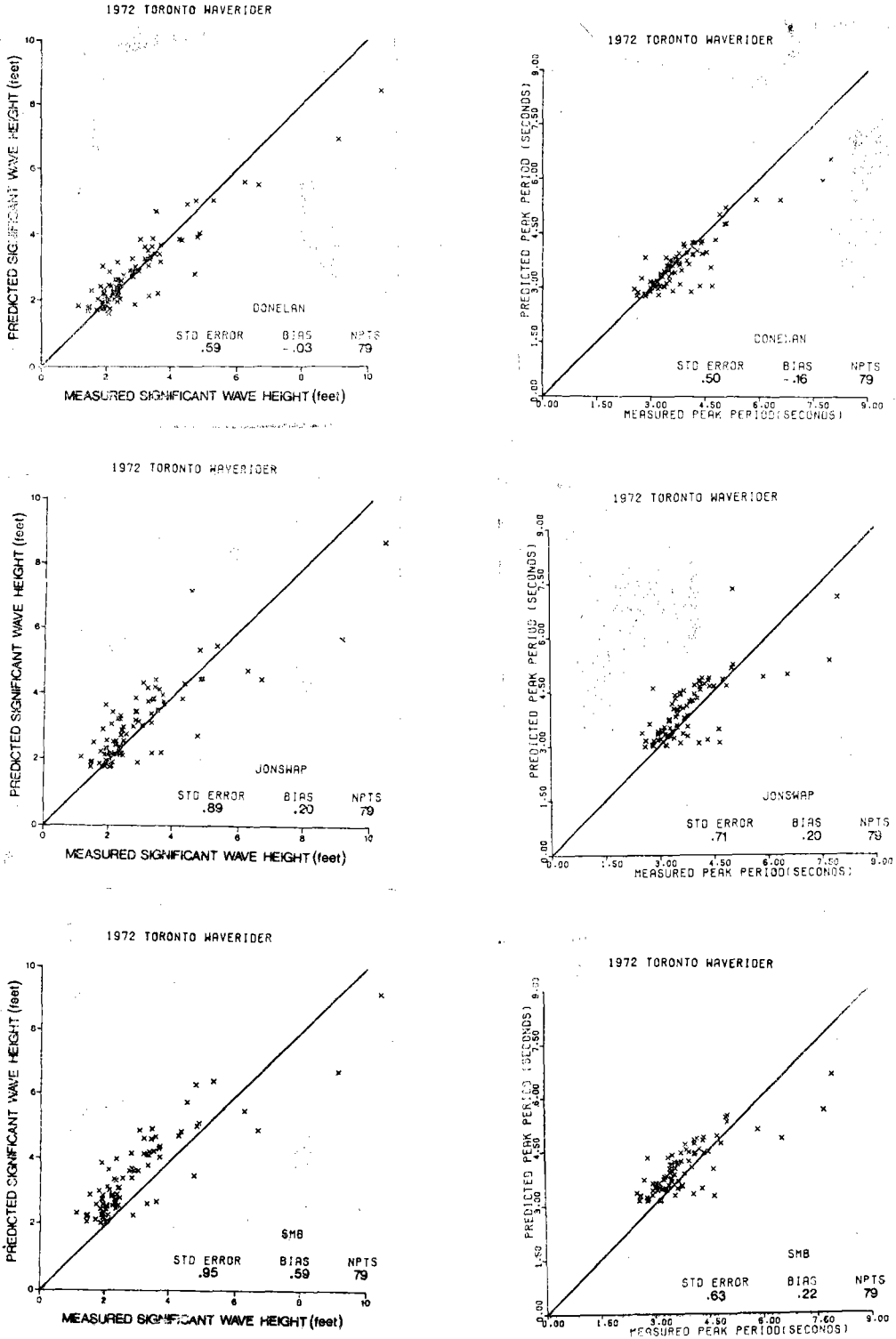


Fig. 5. 極外點($D_{crit}=22.50$, $U_{st}=0.25$, $NF=15$)이 除外된 Toronto에서의 豫報 對 觀測 한 풍랑 파라미터의 比較

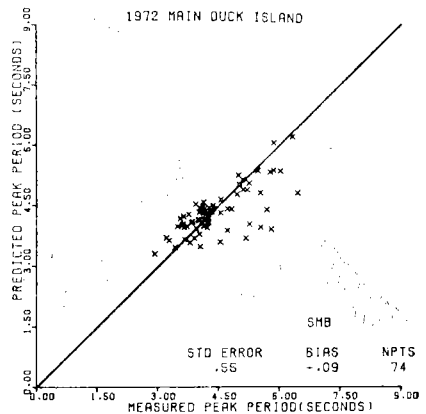
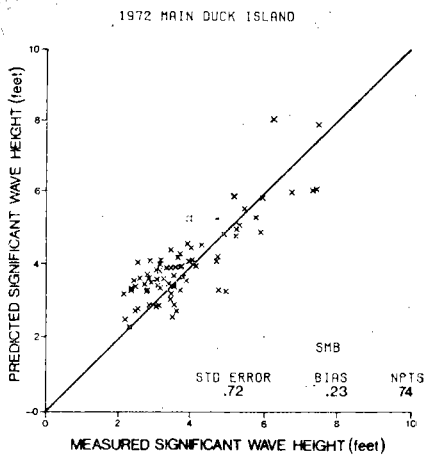
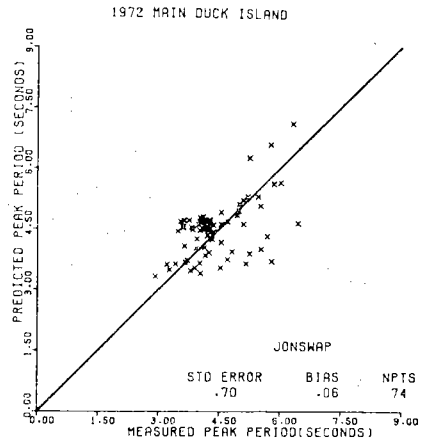
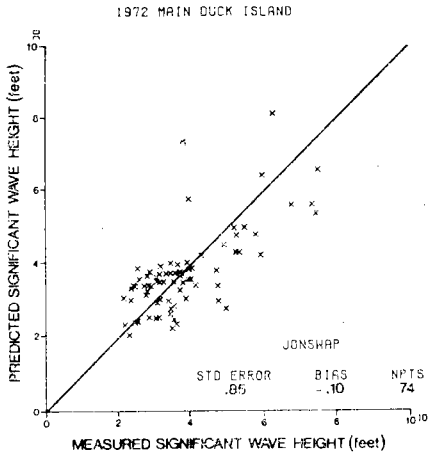
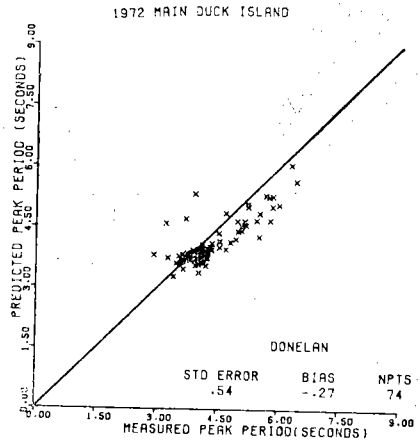
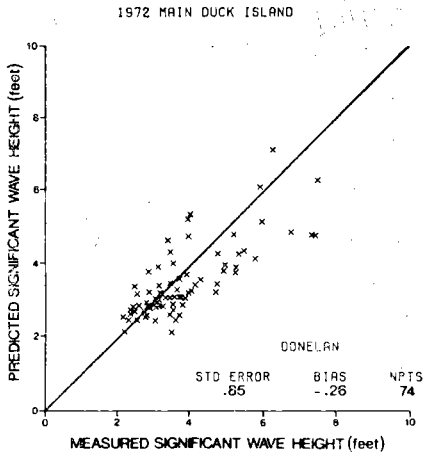


Fig. 6. Main Duck Island ($D_{crit}=22.50$, $U_{st}0.25$, $NF=15$)에서의 豫報 對 觀測한 풍랑 파라미터의 비교

Table-3. 3個模型의 代表的인 豫報 精度

Model (1)	Station (2)	Characteristic Wave Height		Period	
		Standard error, in feet (3)	BIAS, in feet (4)	Standard error, in seconds (5)	BIAS, in seconds (6)
Donelan	Toronto	0.60	-0.04	0.50	-0.16
JONSWAP		0.85	+0.17	0.69	+0.18
SMB		0.95	+0.59	0.64	+0.21
Donelan	Main Duck Island	0.90	-0.28	0.57	-0.29
JONSWAP		0.95	-0.17	0.79	-0.02
SMB		0.80	+0.18	0.63	-0.14

8. 技術的 利用

波浪豫報에 대하여 風速과 風向, 吹送分布區域을 알게 되면 Donelan의 模型이 JONSWAP나 SMB模型보다도 波高와 周期의 파라미터를 僅少하나마 더 正確하게 推算될 것으로 보인다. 其外에 波浪方向에 의한 波浪의 追加의인 情報가 얻어진다. 그러나 正確性的의 改善과 情報의 增加는 吹送分布區域에 關係해서 必要한 追加費用을 들이므로써 얻을 수 있다.

一般的인 海岸技術設計의 立場에서 "最惡"의 方向(즉, 길고 깊은 吹送距離)으로부터 不變風速에 의한 限定된 吹送距離의 設計波高 및 周期에 대하여 Donelan模型은 同時에 發生하는 바람과 波浪方向을 推定하므로써 簡單하게 할 수 있다. (方程式 5 및 6, $\theta=1$ 을 使用)

이들의 方程式은 SMB模型(15)과 類似한 노모그래프(6)로 變形시킬 수 있으나 大部分의 科學技術者는 大體的으로 吹送距離值(ft, or m)와 風速值(ft/s, or m/s)로서 有義波高 및 周期를 얻기 위하여 實際公式의 使用을 택할 것이다.

9. 結 論

3個波浪模型의 豫報를 1972년에 Ontario湖의 2個所에서 觀測한 限定된 吹送距離 및 擬似的 不變狀態의 波浪資料로서 比較하였다. Donelan, JONSWAP 및 SMB模型의 正確성은 有義波高를 豫報하는데 0.8ft(0.25m), 그리고 피이크波力 스펙트라

($1.0ft(0.3m) \leq H_e \leq 10ft(3.0m), 3s \leq T_p \leq 8s$)의 標準誤差로서 比較될 수 있는 것 같다.

Donelan模型의 正確성이 其他 2個模型것 보다 어느정도 良好하며 그외에 Donelan模型은 單純히 符合된 바람과 波浪方向을 推定하는 것보다도 피이크波力의 推算을 갖추게 된다. 그러므로 이 模型은 특히 不變의 限定된 吹送距離의 技術의 適用에 有用하다.

Appendix 1. —References

1. Baird, W.F., and Glodowski, C.W., "Estimation of Wave Energy Using a Wind Wave Hindcast Technique," *Proceedings of the International Symposium Wave and Tidal Energy*, Canterbury, England, 1978, pp.F3-39 to F3-54.
2. Brebner, A., and Le Méhauté, B., "Wind and Waves at Cobourg, Lake Ontario," Queen's University Civil Engineering Research Report 19, Kingston, Ontario, 1961.
3. Bretschneider, C.L., "Wave Forecasting Relations for Wave Generation," *Look Lab/Hawaii*, Vol. 1, No.3, 1970.
4. Bretschneider, C.L., "Prediction of Waves and Currents," *Look Lab/Hawaii*, Vol.3, 1973, pp.1-17.
6. Donelan, M.A., "Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods and Directions," *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, National Research Council, Canada, 1980, pp.47-61.
7. Donelan, M.A., Hamilton, I., and Hui, W. H., "Directional Spectra of Wind-Generated Waves," National Water Research Institute, Burlington, Ontario, 1982.
9. Hasselmann, K., et al., "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)," *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, Supplement A. Vol.8, No.12, 1973.
11. Hasselmann, D.E., Dunkel, M., and Ewing, J.A., "Directional Wave Spectra Observed During JONSWAP 1973," *Journal of Physical Oceanography*, Vol.10, 1980, pp.1264-1280.

12. Kitaigorodskii, S.A., "Applications of the Theory of Similarity to the Analysis of Wind-Generated Wave Motion as a Stochastic Process," Bulletin of Academy of Science, USSR Geophysical Series, No.1, 1962, pp, 105-117.
13. Resio, D.T., and Vincent, C.L., "A Comparison of Various Numerical Wave Prediction Techniques," *Proceedings of the 11th Offshore Technology Conference*, 1979, pp.2471-2481.
15. "Shore Protection Manual," United States Army, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Va., 1977.
16. Vincent, C.L., "Wind Wave Forecasting in Fetch Limited Exposures," *Proceedings of the 2nd Conference on Floating Breakwaters*, Ocean Engineering Program, University of Washington Seattle, Wash., 1981.

side of the wind or wave direction over which the fetch is arithmetically averaged;

U =wind speed measured at a height of 33ft (10m) above mean water level;

U =average wind speed over NCON hours;

U_i =wind speed for hour i ;

U_{min} =specified input criterion for minimum wind speed;

U_{st} =specified input criterion for wind speed steadiness;

U_z =wind speed at height Z above mean water level;

T =significant wave period;

T_p =period of the peak of the wave energy spectrum;

TDIFF=water temperature minus air temperature;

TD,TJ,TB=periods predicted by the Donelan, JONSWAP, and SMB models;

TMD,TMJ,TMB=values of t_{min} predicted by Donelan, JONSWAP, and SMB models;

t_{min} =minum duration of wind to ensure fetch-limited waves;

x =fetch in the wind direction, arithmetically averaged over $(2NF+1)$ degrees in this study;

Z =height above mean water level at which wind speed is measured;

ϕ =direction of approach of the wind;

ϕ =direction of approach of the peak energy waves;

θ =angle between the directions of the wind and the waves,

$\phi-\phi$; and

k =von Karman's constant=0.4.

Appendix 2.—Notation

The following symbols are used in this paper:

C =group velocity of waves;

C_D =aerodynamic drag coefficient;

d =water depth;

D =average wind direction over NCON hours;

D_{crit} =specified input criterion for wind direction steadiness;

D_i =wind direction for hour i ;

F =fetch in the wave direction, arithmetically averaged over $(2NF+1)$ degrees;

g =gravitational acceleration;

H_c =characteristic wave height;

H_s =significant wave height;

HD,HJ,HB=characteristic wave heights predicted by the Donelan, JONSWAP, and SMB models;

L_p =wavelength corresponding to the peak period T_p ;

NCON=number of consecutive acceptable hours of wind data;

NF=number of degrees on either