

大 洋 波

金 燦 喆*

Abstract

Aspects of ocean waves are described in an introductory manner. The lecture aims to bring forth the importance of understanding the dynamics of ocean interface in connection with any future ocean oriented activities.

1. 序 論

大洋波란 大氣層과 海水層의 境界面上에 進行하는 하나의 振動現象이며, 그 原因에 따라 風波(wind waves), 衝動波(impulsively generated waves), 潮水波(tides) 등으로 區分할수 있다. 다시 말하면 流體面에 外力이 加하여 졌을때 平衡(equilibrium)에 復歸하려는 復原力(restoring force)이 重力에 依함으로서 重力波(gravity waves)라고도 불리우는 流體面의 上下運動이다. 여기에서 우리에게 가장 興味가 있는 것은 風波이고 쉽게 눈에 띄는 反面에 相當 理解가 어려운 現象의 하나이다. 바람에 依한 波動은 風力, 바람이 분 거리와 方向, 분 시간 및 水深 등에 相關關係가 있을 뿐만 아니라 波動이 進行함으로서 樣相을 바꾸고 서로 섞이고 얽히어 實로 千姿萬像을 나타냄으로서 confused, irregular 또는 random 과 같은 말로서 表現이 되는 것이다.

이러한 복잡한 것을 더욱더 相當한 數學的 背景이 必要한 것을 여기에서 소개하는 것은 어려운 것이고 다만 그 문제의 一部分인 風波에 對한 것의 테두리만을 소개함으로서 우리가 海洋進出을 피하는 이때 海洋환경의 理解의 重要性을 지적하는데 도움을 주고자 한다.

2. 理想波(ideal waves)

大洋波를 알려면 우선 理想波를 아는 것이 必要하다. 이를 學問으로서 다루어 온지는 두리 200餘년이 됐고 이에 關한 많은 專門文獻이 있다. 아마도 古典的 數學(classical mathematics) 또는 流體力學의 가장 重要한 面을 찾아낸 것이 理想波 理論이라 말할수 있고, 特히 位相理論(potential theory)이 넓이 利用되고 있으며, 實驗으로서 그 理論이 옳음을 곧 보여 줄수 있는 것이다.

이에 의하면 우선 流體를 非粘性, 非壓縮性, 非廻轉性으로 보아 速度位相(velocity potential)을 정의하여 流體速度 $\mathbf{u} = (u, v, w, t) = \nabla\phi$ 로 선정한다. 그러면 流體의 운동은

$$\nabla^2\phi = 0$$

로서 결정되며, 境界條件으로서는 海底에서는

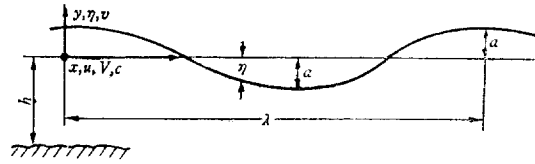
$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = 0$$

가 된다. 水面의 境界條件은 아주 복잡하여 非線型일 뿐만 아니라 適用될 水面이 問題가 풀리기까지는 未知의

* 正會員, 韓國科學技術研究所(造船海洋技術研究室長)

境界라는 까다로운 점이 있다. 이러한 것을 線型化시키고 簡略化하여 세운 것이 바로 理想波 理論이다. 여기에는 波高가 波長에 比하여 아주 작아야 한다는 假定이 들어 간다. 이러한 理論에 依한 結果를 다음에 列記한다.

Potential Theory of Surface Waves



Assumption

- 1. inviscid, irrotational
 - 2. incompressible
 - 3. linear theory
- $$\left. \begin{array}{l} 1. \text{ inviscid, irrotational} \\ 2. \text{ incompressible} \end{array} \right\} \nabla^2 \phi = 0; (u, v) = \nabla \cdot \phi \quad (1)$$

Boundary Condition

- 1. Sea bottom

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ at } y = -h \quad (2)$$

- 2. Free Surface

- a. Kinematic $\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \text{ at } y = \eta \quad (3)$

- b. Dynamic $g\eta - \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) = 0 \text{ at } y = \eta \quad (4)$

- 3. Linearized Conditions

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ at } y = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ at } y = 0 \text{ from (3) and (4)} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (7)$$

A Function Satisfying (5)~(7) is

$$\phi = -ac \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \sin k(x-ct); \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{g}{c^2} \quad (8)$$

Surface Profile is

$$\eta = a \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \cos k(x-ct) \quad (9)$$

Wave horizontal velocity is

$$u = ack \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \cos k(x-ct) \quad (10)$$

Wave vertical velocity is

$$v = ack \frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh} \sin k(x-ct) \quad (11)$$

Wave celerity is

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh kh; \quad c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \text{ for } h \gg \frac{\lambda}{2}; \quad c^2 = gh \text{ for } h \ll \frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

Pressure is

$$p = a\rho g \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \cos k(x-ct) \tag{13}$$

Mass transport is

$$\phi = -\frac{1}{2}k a^2 c \exp(2ky_0); \text{ mean velocity} = k^2 a^2 c \exp(2ky_0) \tag{14}$$

Energy (potential=kinetic added) is

$$E = \frac{1}{2} a^2 \rho g \lambda \text{ per wave length per unit width} \tag{15}$$

Energy transfer rate is

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{2} a^2 \rho g \cdot \frac{1}{2} c \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \tag{16}$$

Damping by viscosity is

$$\frac{da}{dt} = -2\nu k^2 a; \nu = \mu/\rho \tag{17}$$

Orbital path is

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{a \cosh k(y_0+h)}{\sinh kh} \sin k(x_0-ct) \\ Y &= \frac{a \sinh k(y_0+h)}{\sinh kh} \cos k(x_0-ct) \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

where (x_0, y_0) is the initial position.

그림 1 은 波動에 따르는 定義이다. 여기에서 特別히 重要한것은 다음 5 가지이다.

a. 波長 $\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2$

단 : 週期 T 란 하나의 波頂(crest)이 지나간 후부터 다음 波頂이 지나갈때까지의 시간이다.

b. 波速 $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}}$

단 : h 는 水深이다.

특히 深水에서는 $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ 가 되며

淺水에서는 $c = \sqrt{gh}$ 가 된다.

c. 群速 $c_g = \frac{1}{2} c \left[1 + \frac{4\pi h}{\lambda \sinh 4\pi h} \right]$
 $= \frac{1}{2} c \text{ for } h \rightarrow \infty$

단, 群速이란 波動 Energy 가 移動하는 速度를 뜻한다.

d. 廻轉運動 : orbital motion 이란 水中的 粒子가 波動이 지나감에 따라 圓 또는 橢圓 廻路를 廻轉運動하고 原點으로 돌아옴을 말하는 것이다.

e. 水量移動 mass transport 란 粒子 또는 一定量의 물이 廻轉運動에 따라 次々 조금씩 波動의 進行方向으로 움직임을 말한다.

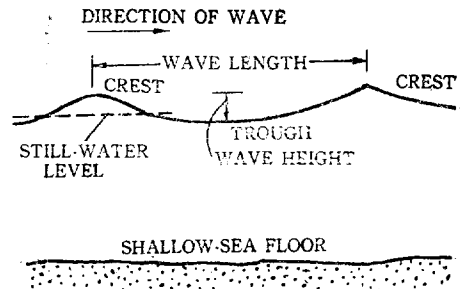


Fig. 1. Definitions [1]

3. 事實波(real waves)

위 理想波에서의 波動은 事實라는 相當히 거리가 멀다고 보아야 하겠다. 事實은 1次元波란 하여도 波高가 波長에 比하여 아주 작을 때는 sine cosine 型을 갖고 있으나 波高가 次次 높아짐에 따라 그림 1과 같은 모양을 갖게 되고 波高波長比가 1/7 가까이 가서는 波頂의 角이 120° 가까이 되며 그 以上이 되면 波頂이 부서지는 것이다. 끝론 海岸 가까이에서 보는 波動은 淺水波로서 非對稱型이고 보통은 흰거품을 내고 부서지는 것으로서 위와 같은 理論으로서는 說明이 안되는 것이다. 그보다도 一般의 경우에 드 波動을 보면 아주 不規則波이고 그림 2의 덴 밑에 그 1 例를 보인다. (實際로는 이보다도 아주 더 不規則의이다.)

그림 2의 5는 1에서 4 까지의 正常波를 疊하여 만들어진 것으로서 不規則波비슷하게 보여진다. 事實上 一次元不規則波란 無限이 많은 單-方向의 週期가 조금씩 다르고 波高가 無限

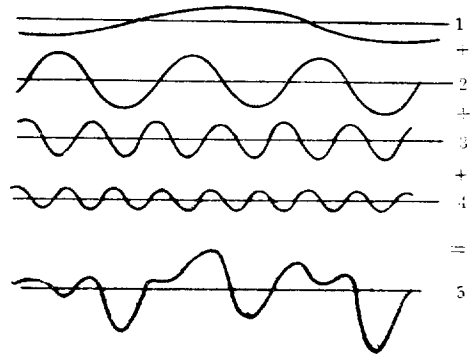


Fig. 2. Wave Pattern Combining four Regular Waves

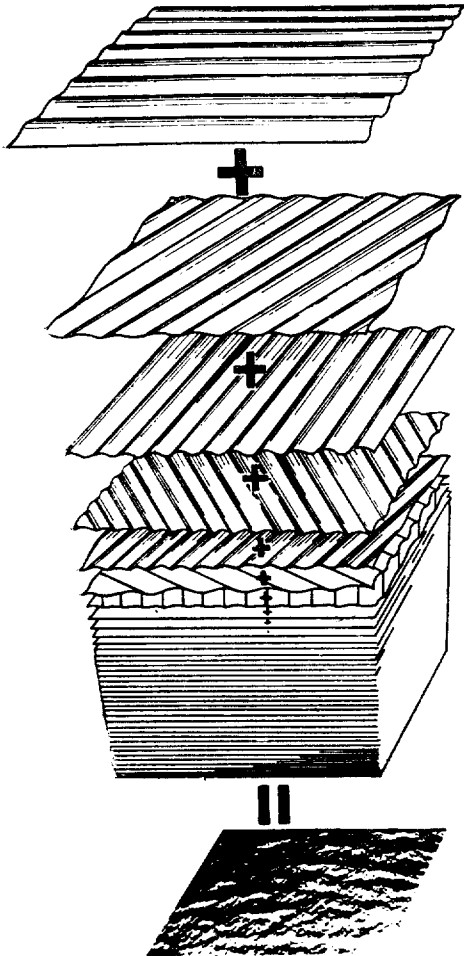


Fig. 3. A Sum of many Simple Sine Waves Makes a Sea

이 작고 位相이 完全히 뒤섞인 正常波가 모인것이라 말할수 있다. 2次元波란 方向이 다른 1次元波가 集合되어 있는 경우이고 그림 3에 그것을 보인다. [3]

이러한 것을 Fourier 表示法이라 할수 있는데 이로서 波高를 表示하는 것은 어렵을 뿐만 아니라 不規則波는 결코 反復하지 않는 것이 原則이므로 Fourier 表示한 뜻이 없다. 따라서 그 自乘函數인 Energy 로서 表示하게 되며 이런 方法을 Spectrum 表示法이라 한다.

正常波의 Energy 는 $\frac{\rho g}{8} (2a)^2$ 로서 주어짐으로 그림 2의 경우에는 全體 Energy 는

$$E_5 = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = \frac{\rho g}{2} (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2)$$

이다. 이와같이 해서 표시된 것이 그림 4의 편 윗 그림이다. 위에서 둘째는 좀더 많은 正常波를 뭉은 것이고 셋째는 無限이 많은 正常波를 뭉은 것이다. 이렇게 하여서 얻어진 것을 wave spectrum 이라 하고 이 도표내의 면적은 그 海面에 있는 Energy 를 표시하며 이는 Energy가 周波數에 따라 어떻게 分布되어 있는가 하는것을 表示해 주는 것이다.

實際로 이것을 求하는 方法은 相當히 복잡하다. $\zeta(\mathbf{x}, t)$ 가 水面을 表示한다면 Fourier-Stieltjes integral 을 써서 表示

$$\zeta(\mathbf{x}, t) = \int_k \int_n dA(\mathbf{k}, n) \exp \{ i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t) \}$$

여기에서

$$dA(\mathbf{k}, \omega)dA^*(\mathbf{k}', \omega') = 0 \text{ if } \mathbf{k}, \omega \neq \mathbf{k}', \omega' = X(\mathbf{k}, \omega)d\mathbf{k}d\omega \text{ if } \mathbf{k}=\mathbf{k}', \omega=\omega'$$

단: *는 conjugate function 을 表示하고 위의 線은 平均値를 뜻한다.

따라서

$$\bar{\zeta}^2 = \iint X(\mathbf{k}, \omega)d\mathbf{k}d\omega$$

여기에서 $X(\mathbf{k}, \omega)$ 函數는 2次元 wave spectrum 이고, 方向性을 無視하면

$$\bar{\zeta}^2 = \int \phi(\omega) d\omega; \phi(\omega) = \int X(\mathbf{k}, \omega) d\mathbf{k}$$

이고 이것이 그림 4의 函數이다.

이러한 方法으로 大洋波를 分析한것이 그림 5이다. 여기에 表面張力波 ripples 는 數十分의 1秒의 週期를 갖고 風短波(chop)는 1~4秒, 風波(wind waves)는 5~12秒, 長波(swell)는 6~16秒, 海邊同調波(surf beats)는 1~3分, 浪波(Tsunami)는 10~20分, 潮水波(Tides)는 12~24時間의 週期를 갖고 있다. 風波와 長波는 海上構造物과 船舶에 至大한 影響을 주며 海邊同調波, 浪波 및 潮水波等은 海岸構造物에 고려되어야 할 是 잘 아는 바이다.

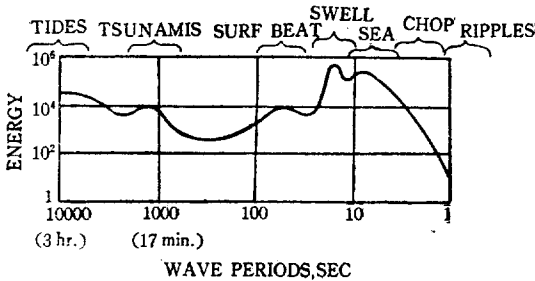


Fig. 5. Ocean Wave Spectrum

風波로, 風波에서 長波로 變한다고 한다. 여기에서 앞서 말한 바와 같이 風力에 따라 바람이 부는 거리(fetch)와 바람이 분 시간(duration)이 充分하면 波浪狀態가 어딘 平衡에 이르는데 이런 狀態를 平衡條件이(equilibrium condition)라 부르고 또한 fully risen sea 라고 한다. 平衡條件[2]은

$$\phi(\omega) = \beta g^2 \omega^{-5}; \beta \approx 1.2 \times 10^{-2}$$

로 주어지더 이 條件이 넘으면 波動이 부서지고 即 바다에는 그 以上の Energy 를 불어 넣을 수 없게된다.

그림 4에서 이것을 설명하면, 바람이 불면 아랫 그림

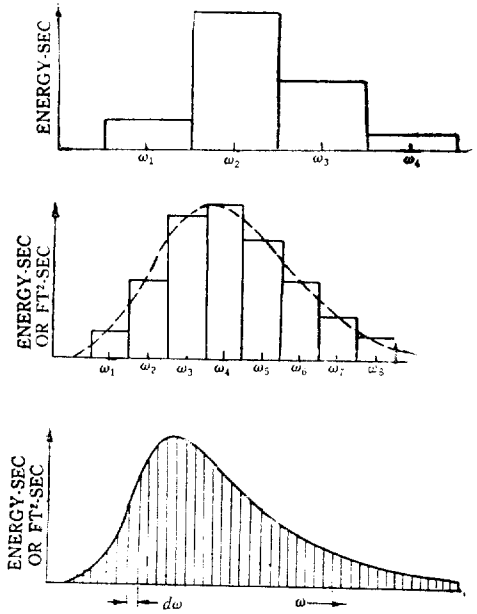


Fig. 4. Development of Wave Spectrum

4. 風波(wind waves)

風波가 바람에 依하여 일어나는 것을 스케치한 것이 그림 6이다. 알려져 있는 事實은 먼 처음에는 表面張力波가 생기고 그에 따라 바람과 波動과 同調現象이 일어나며 또 波動自體內에 靜的動的 不安定現象(instability)이 일어남으로서 이것이 次次 더 많은 바람 Energy 를 吸込하게 되어 風短波로, 風短波에서

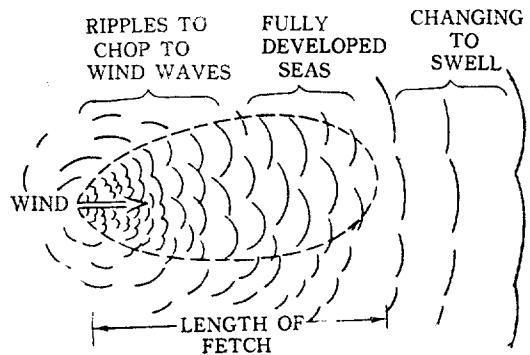


Fig. 6. Conceptual Development of Waves

Table 2. Numerical and Verbal Statements of Sea Condition

WAVE AND SEA SCALE FOR FULLY ARISEN SEA														
SEA STATE	SEA-GENERAL		WIND				SEA							
	DESCRIPTION	(BEAUFORT) WIND FORCE	DESCRIPTION	RANGE (KNOTS)	WIND VELOCITY (KNOTS)	WAVE HEIGHT FEET			SIGNIFICANT RANGE OF PERIODS (SECONDS)	PERIOD OF MAXIMUM ENERGY OF SPECTRUM	T (AVERAGE PERIOD)	WAVELENGTH (NAUTICAL MILES)	MINIMUM FETCH (NAUTICAL MILES)	MINIMUM DURATION (HOURS)
						AVERAGE	SIGNIFICANT	AVERAGE TO HIGHEST						
0	Sea like a mirror.	0	Calm	< 1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
	Ripples with the appearance of scales are formed, but without foam crests.	1	Light Air	1-3	2	0.05	0.08	0.10	1.2-1.5	0.7	0.5	10	5	18 min
1	Small wavelets, short but pronounced, crests have a glassy appearance, but do not break.	2	Light Breeze	4-6	5	0.18	0.29	0.37	0.4-2.8	2.0	1.1	4.7-4.8	8	39 min
	Large wavelets, crests begin to break. Foam of glassy appearance. Perhaps scattered white horses.	3	Gentle Breeze	7-10	8.5	0.6	1.0	1.2	0.6-5.0	3.4	2.4	21	9.3	1.7 hr
2	Small waves, becoming larger, fairly frequent white horses.	4	Moderate Breeze	11-16	10	0.98	1.4	1.8	1.0-6.0	4	2.9	27	13	2.4
					12	1.3	2.2	2.8	1.0-7.0	4.8	3.4	40	15	3.3
3	Moderate waves, becoming larger, fairly frequent white horses.	4	Moderate Breeze	11-16	13.5	1.8	2.9	3.7	1.4-7.6	5.1	3.9	52	24	4.8
					14	2.0	3.3	4.2	1.5-7.8	5.6	4.0	59	28	5.2
4	Moderate waves, taking a more pronounced long form, many white horses are formed. (Chance of some spray).	5	Fresh Breeze	17-21	15	2.7	4.4	5.8	2.0-8.8	6.5	4.6	71	40	6.6
					18	3.8	6.1	7.8	2.5-10.0	7.2	5.1	90	55	8.3
5	Large waves begin to form, the white foam crests are more extensive everywhere. (Probably some spray).	6	Strong Breeze	22-27	19	4.3	6.9	8.7	2.8-10.6	7.7	5.4	99	65	9.2
					20	5.0	8.0	10	3.0-11.1	8.1	5.7	111	75	10
6	Large waves begin to form, the white foam crests are more extensive everywhere. (Probably some spray).	6	Strong Breeze	22-27	22	6.4	10	13	3.4-12.2	8.9	6.3	134	100	12
					24	7.9	12	16	3.7-13.5	9.7	6.8	150	120	14
7	Sea heaps up and white foam from breaking waves begins to be blown in streaks along the direction of the wind. (Spindrift begins to be seen).	7	Moderate Gale	28-33	24.5	8.2	13	17	3.8-13.6	9.9	7.0	154	140	15
					26	9.6	15	20	4.0-14.5	10.5	7.4	168	160	17
8	Moderately high waves of greater length; edges of crests break into spindrift. The foam is blown in well marked streaks along the direction of the wind. Spray affects visibility.	8	Fresh Gale	34-40	28	11	18	23	4.5-15.5	11.3	7.9	212	230	20
					30	14	22	28	4.7-16.7	12.1	8.6	250	280	23
9	Very high waves with long overhanging crests. The resulting foam is in great patches and is blown in dense white streaks along the direction of the wind. On the whole the surface of the sea takes a white appearance. The rolling of the sea becomes heavy and shock-like. Visibility is affected.	9	Strong Gale	41-47	30.5	14	23	29	4.8-17.0	12.4	8.7	258	290	24
					32	16	26	33	5.0-17.5	12.9	9.1	285	340	27
10	High waves. Dense streaks of foam along the direction of the wind. Sea begins to roll. Visibility affected.	9	Strong Gale	41-47	34	19	30	38	5.5-18.5	13.6	9.7	322	420	30
					36	21	35	44	5.8-19.7	14.5	10.3	353	500	34
11	Exceptionally high waves. Sea completely covered with long white patches of foam lying in direction of wind. Every where edges of wave crests are blown into froth. Visibility affected.	10	Whole Gale	48-55	37	23	37	46.7	6.20-5.5	14.9	10.5	375	530	37
					38	25	40	50	6.2-20.8	15.4	10.7	392	600	38
12	Air filled with foam and spray. Sea white with driving spray; visibility very seriously affected.	11	Storm	56-63	40	28	45	58	6.5-21.7	16.1	11.4	444	710	42
					42	31	50	64	7.23	17.0	12.0	492	830	47
13	Air filled with foam and spray. Sea white with driving spray; visibility very seriously affected.	12	Hurricane	64-71	44	36	58	73	7.24-2	17.7	12.5	534	940	52
					46	40	64	81	7.25	18.6	13.1	590	1110	57
14	Very high waves with long overhanging crests. The resulting foam is in great patches and is blown in dense white streaks along the direction of the wind. On the whole the surface of the sea takes a white appearance. The rolling of the sea becomes heavy and shock-like. Visibility is affected.	10	Whole Gale	48-55	48	44	71	90	7.5-26	19.4	13.8	611	1250	63
					50	49	78	99	7.5-27	20.2	14.3	700	1420	69
15	Exceptionally high waves. Sea completely covered with long white patches of foam lying in direction of wind. Every where edges of wave crests are blown into froth. Visibility affected.	11	Storm	56-63	51.5	52	83	106	8-28.2	20.8	14.7	735	1560	73
					52	54	87	110	8-28.5	21.0	14.8	750	1610	75
16	Air filled with foam and spray. Sea white with driving spray; visibility very seriously affected.	12	Hurricane	64-71	54	59	95	121	8-29.5	21.8	15.4	810	1800	81
					56	64	103	130	8.5-31	22.6	16.3	910	2100	88
17	Air filled with foam and spray. Sea white with driving spray; visibility very seriously affected.	13	Storm	72-80	59.5	73	116	148	10-32	24	17.0	985	2500	101
					64	71	112	144	10-32	24	17.0	985	2500	101
18	Air filled with foam and spray. Sea white with driving spray; visibility very seriously affected.	14	Hurricane	82-91	> 64	> 80	> 128	> 164	10-(35)	(26)	(18)			

의 오른쪽에서부터 次次 平衡條件을 채우게 되고 바람이 강하고 거리와 시간이 신장됨으로 左側이 부풀어 오르도록 된다는 것이다. 따라서 그림 7의 윗 그림과 같은 결과가 된다. 그림 8은 윗 식과 實驗測定值의 結果를 比較한 것으로 이 關係를 잘 立證하고 있다고 본다. 이와 反對로 波動의 減衰는

$$\exp(2\nu k^2 t); k = \frac{2\pi}{\lambda}; \nu = \frac{\mu}{\rho}; \mu: \text{viscosity } \rho: \text{density } t: \text{time}$$

에 比例함으로 감소 現象은 그림 7의 아랫 그림과 같이 된다.

成長 或은 減衰中에 있는 Spectrum은 그 表示法조차도 쉽지 않으나 fully risen sea에 對하여서는 여러가지 spectrum이 發表되어 있으며 그 中 몇가지를 소개하면 다음과 같다.

a. Neumann Spectrum $\phi(\omega) = \frac{400}{\omega^6} \exp\left(\frac{-725}{\nu k^2 \omega^2}\right)$

단: $\phi(\omega)$ 는 $8a^2(\omega)$ 이고 νk : 風力 [KTS]이다.

b. Pierson Moskowitz Spectrum $\phi(\omega) = \frac{135}{\omega^5} \exp\left(\frac{-9.7 \times 10^4}{\nu k^4 \omega^4}\right)$

c. Bretschneider Spectrum $\phi(\omega) = \frac{4200 H_s^2}{T_s^2 \omega^5} \exp\left(\frac{-1050}{T_s^4 \omega^4}\right)$

단: H_s, T_s 는 significant wave height와 wave period

d. International Ship Structures Congress Spectrum

$$\phi(\omega) = \frac{2760 H_s^2}{T_s^4 \omega^5} \exp\left(\frac{-690}{T_s^4 \omega^4}\right)$$

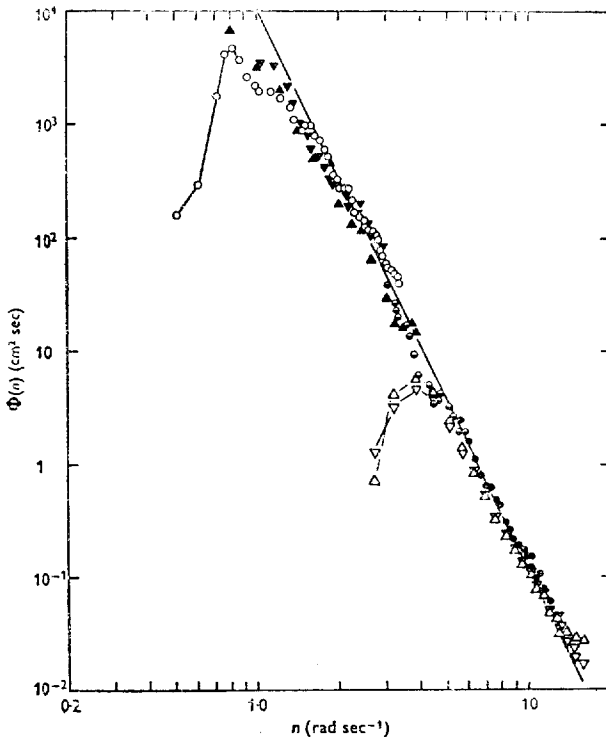


Fig. 8 The Equilibrium Range of Spectrum for Wind Generated Waves

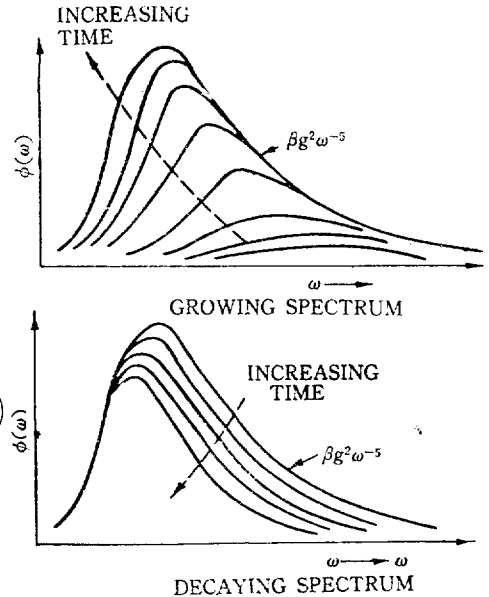


Fig. 7. Schematic Growth and Decay of Wave Spectrum [Barnett's Model]

이들에 따라 海上의 波浪狀態를 數字番號化한 것이 Sea state(海上狀態)라는 것이고 그림 7의 뒷 그림과 비슷하다. 例로서 아래 線에서부터 1, 2, 3, ... 番號를 부쳐서 Sea state No. 라고 한 것이나 다름이 없다. 그에 따른 風速, 바다의 外觀上 狀態, 波高等을 表示한 것을 표 2에 보인다. 이런 것이 構造物의 設計條件이 되는 것이다.

5. 結 言

大洋波에 對해서 別로 體系도 없는 一般의인 言及을 하였다. 海外에서 널리 쓰이고 있는 Sea Spectrum에 對한 테타 整理가 要求된다. 特히 우리나라 近海에서는 fully risen sea 를 期待하기 힘들고 더욱이 淺水波에 對한 問題는 重大하다고 본다. 앞으로 이 方面에 對한 많은 努力이 必要하겠다.

參 考 文 獻

- [1] Bascom, Willard: *Waves and Beaches*, Doubleday, N.Y.
- [2] Phillips, O.M.: *Dynamics of Upper Ocean*, Cambridge University Press, 1936.
- [3] U.S. Naval Oceanographic Office: *Observing and Forecasting Ocean Waves*