

◎ 論 文

海洋圓柱 構造物에 作用하는 波力에 관한 研究[†]

吳世旭* · 閔丙亨** · 韓健模*** · 李承輝****

A Study on the Wave Forces Acting on the Multiple Piles of Oceanic Circular Cylinder

S.W. Oh, B.H. Min, K.M. Han and S.H. Lee

Key Words : Circular Cylinder(圓柱), Cx(荷重係數), K-C(Keulgan-Carpenter), Force Coefficient(힘의 係數), Incident Wave(入射波), Space Ratio(距離比), Diffraction Theory(回折理論)

Abstract

Experimental studies are conducted for the wave forces acting on the vertically mounted circular piles in the waves.

Two-three-cylinder arrays are equally spaced and the spacings(S/D) as well as the incident angles of various waves are changed to study their separate effects on the wave forces.

The numerical results based on the diffraction theory are in good agreement with the experimental results, and the diffraction theory well predicts the trend of the wave forces when the spacings and the incident angles are changed.

1. 緒 論

最近 200海里 經濟水域의 設定과 領海의 擴大로 世界의 動向은 海洋空間의 占有에 沒頭하고 있다.

이러한 海洋의 占有은 가장 重要한 石油資源을 主로 하여 海洋鑛物資源의 開發 確保 또는 魚類를 主로 하는 水産資源의 保護增産을 위한 海洋資源의 有效利用의 重要한 측면 때문에 今日の 世界情勢를 反映시켜 주고 있다.

그리하여 우리나라가 7鑛區와 인도네시아의 마두라 油田 그리고 南極基地의 設치와 개발에 박차를

가하고 있는 것처럼 海洋資源의 開發利用은 世界의 各國들이 계속 進展시켜 가고 있다.

이와 같은 海洋開發을 推進하는데 개발의 거점으로 役할을 하는 것은 海洋構造物의 設置가 제일 必要하다고 말할 수 있다.

이런 海洋構造物을 設置할 海洋空間은 自然條件이 가장 어려운 환경에 있다.

이러한 海洋開發에서 어려운 自然條件을 이겨 나가는데 가장 重要한 것은 安全이므로 合理的인 海洋構造物의 設計法確立이 要望된다.

이러한 情勢아래 우리나라는 지금에야 綜合的인

[†] 1987年度 韓國海洋工學會 春季學術大會 發表(1987. 6)

* 正會員, 東亞大學校 工科大学 機械工學科

** 正會員, 東亞大學校 工科大学 土木工學科

*** 正會員, 東亞大學校 工科大学 海洋工學科

**** 正會員, 東亞大學校 工科大学 附設 海洋資源研究所

海洋法을 개정 보완할 움직임이 보이고 있다.

1975년까지는水深 30m 以内に 建設하는 固定式의 海上作業臺를 對象으로 하여 「海上作業場의 設計要領」¹⁾이 日本이나 美國을 비롯한 世界土木學會에서 出版되어 活潑하게 活用되었다.

이러한 設計指針이나 設計要領은 從來의 研究를 積重시킨 結果가 되었다.

그러나 이 가운데에는 水深이 깊은 地域에서는 未解決된 많은 問題를 包含하고 있다.

따라서 이러한 未解決된 問題點으로 인하여 Texas Tower No. 4의 倒塌²⁾라고 하는 큰 被害의 原因이 되었다. 이 경우의 被害原因은 波力과 共振現象에 의한 것이다.

波에 따른 波力の 發生과 波力에 따른 構造物의 變形이라는 學術領域의 問題로 取扱되지 않으면 안 된다.

本 研究는 깊은 水深의 地點에 設置하는데 따른 海洋構造物의 設計外力에 重要한 影響을 주는 波力 特性을 고려하고자 한다. 따라서 이러한 海洋構造物에 있어서는 그의 지지방법에는 浮體式 海洋構造物과 接地域 海洋構造物의 2種類로 分類할 수 있다.

本 研究는 石油의 生産用 플랫폼(platform)에서 많이 쓰고 있는 接地域 海洋構造物을 對象으로 한다. 이 接地式 海洋構造物의 材料로서 비교적 강성이 큰 이유로 圓柱鋼管(pile)을 일반적으로 많이 사용하지만, 本 研究는 P.V.C판과 알루미늄판을 모델로 하여, 圓柱構造物에 作用하는 波力特性을 2次元 水理 模型實驗에 의해서 究明하고자 한다.

2. 從來의 研究

圓柱構造物에 作用하는 波力의 特性에 대해서 Mac Camy와 Fuch³⁾의 單圓柱에 대한 回折理論과 Morison 등의 實驗式을 된주로 특히 圓柱형상을 중심으로 많은 研究가 행해져 왔다.

그리고 中村,⁴⁾ 掘川⁵⁾에 의해 微小振幅波 理論에 있는 線型回折理論에 기인한 것에서 波의 非線型性의 影響에 대해 計算이나 實驗을 하였다.

Keulegan-Carpenter⁶⁾는 U형관을 사용하여 standing wave가 圓柱에 가하는 荷重을 實驗에 의해 究明하였으며, Morison式의 係數들(관성계수 C_m 과 저항계수 C_D)이 하나의 無次元數 즉 K-C(Keulegan-Carpenter)의 함수인 것을 밝혔다.

Spring과 Monkmeier⁷⁾, Chakrabarti⁸⁾는 2개의 圓柱에 作用하는 波力을 回折理論에 의해 구하였으며,

McIver와 Evans⁹⁾는 같은 問題에 대하여 더욱 단순화된 計算式을 유도하였다.

Chakrabarti¹⁰⁾는 비교적 큰 K-C에 있어서 C_m, C_D 값을 複數圓柱에 대하여 實驗으로 구하였으며, 또한 荷重을 위주로 그 荷重係數를 구하였다.

海水에 잠긴파일(pile)은 보통 4개 또는 그 이상의 複數로 되어 있으며, 그 백치에 있어서도 이러한 諸條件들을 充分히 고려하여야 할 것이다.

本 研究에서는 2개, 3개의 圓柱構造物을 단순화시켜 圓柱의 直徑, 圓柱間의 距離 및 波의 條件(波向, 波高, 週期, S/D 등)을 變化시켜 가면서 實驗을 행하고, 回折理論에 따른 여러가지 形態를 가진 圓柱構造物에 波가 入射할 때 波의 進行方向이 일정하다고는 할 수 없어 實際設計에 대한 條件들을 數直的으로 計算하고, 또한 模型實驗과의 結果를 서로 비교 檢討하여 圓柱徑의 比 S/D, 波의 入射角, 총 波力에 대한 것을 밝혀 실제로 自然條件과 海洋空間에 적절한하게 그리고 安全하게 設置하는데 그 目的이 있다.

3. 圓柱構造物에 作用하는 波力特性

3.1 單圓柱의 경우

MacCamy와 Fuchs³⁾의 回折理論에 의하면 單圓柱에 作用하는 波進行方向의 波力 F_x 는 Fig. 1에 의해서 다음과 같은 式으로 표시될 수 있다.

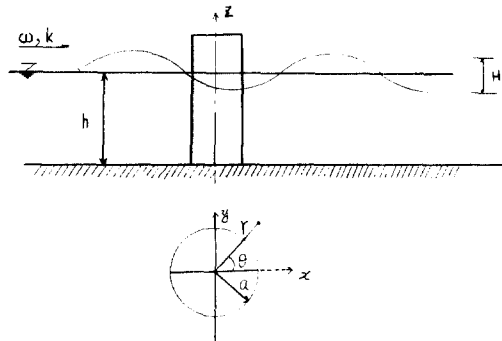


Fig.1 Geometry of the problem and coordinate system

$$F_x = \frac{\pi}{2} \rho g H a^2 \tanh K h \exp \{-i(\omega t - \alpha)\} C_x \quad (1)$$

여기서

ρ : 물의 密度

g : 重力加速度

H : 波高

a : 圓柱의 半徑

K : wave number ; $gK \tanh Kh = \omega^2$

h : 水深

ω : 波의 각진동수 = $\frac{2\pi}{T}$

α : 시간 t 의 기준에 따른 位相

C_x : 荷重係數 (進行方向)

$$C_x = \frac{4}{\pi} \frac{1}{K^2 a^2} \frac{1}{\sqrt{J_1'(Ka)^2 + Y_1'(Ka)^2}}$$

J_1 : Bessel function of the first kind of order 1

Y_1 : Bessel function of the second kind of order 1

T : 週期

J_1 과 Y_1 의 性質인

$$\lim_{Ka \rightarrow 0} J_1'(Ka) = \frac{1}{2}$$

$$\lim_{Ka \rightarrow 0} Y_1'(Ka) = \frac{2}{\pi(ka)}$$

를 利用하면 C_x 는 작은 Ka 에 대하여 다음과 같은 수렴치를 가짐을 알 수 있다.

$$\lim_{Ka \rightarrow 0} C_x = 2$$

3.2 複數圓柱의 경우

Chakrabarti⁴⁾의 回折理論에 따르면 F_x 와 F_y (波 進行에 대하여 垂直方向의 波力)는

$$F_x^p = \frac{\pi}{2} \rho g H a^2 \tanh Kh \exp\{-i(\omega t - \alpha)\} C_x^p \quad (2)$$

$$F_y^p = \frac{\pi}{2} \rho g H a^2 \tanh Kh \exp\{-i(\omega t - \beta)\} C_y^p \quad (3)$$

여기서

$$C_x^p = \frac{1}{Ka} |i(A_p^{-1} - A_p^{-1}) H_1(Ka) + i \sum_q \sum_{n=-N}^N A_q^n \{H_{n+1}(Kr_{pq} \exp(i\theta_{pq}) - H_{n-1}(Ks) \exp(i\theta_{pq})\} J_1(Ka) \exp(in\theta_{pq})|$$

$$C_y^p = \frac{1}{Ka} |-(A_p^{-1} + A_p^{-1}) H_1(Ka) + \sum_q \sum_{n=-N}^N A_p^n \{H_{n+1}(Kr_{pq} \exp(i\theta_{pq}) + H_{n-1}(Kr_{pq}) \exp(-i\theta_{pq})\} J_1(Ka) \exp(in\theta_{pq})|$$

여기서

$A_p^{-1} \cdot A_p^{-1}$ 다음과 같은 $2 \times (2N+1)$ 개의 연립 1次方程式을 풀면 구할 수 있다.

$$\sum_{q^2} \sum_{n=-N}^N [A_q^n H_{n-m}^{-}(Kr_{pq}) J_m^{-}(Ka) \exp\{i(n\theta_{pq} - m\theta_{qq})\} + A_p^n H_m'(Ka)] = - \int_{m'}^1 (Ka) \exp(ikr_{op} \cos\theta_{op}) \exp\left(\frac{i}{2} m\pi\right) \quad (4)$$

m : $-N, -(N-1), \dots, 0, \dots, N-1, N$,

P : 1, 2

$\gamma_{op}, \gamma_{pq}, \theta_{op}, \theta_{pq}, \dots, \theta_{qp}$ 의 關係는 Fig. 2에 示여져 있다.

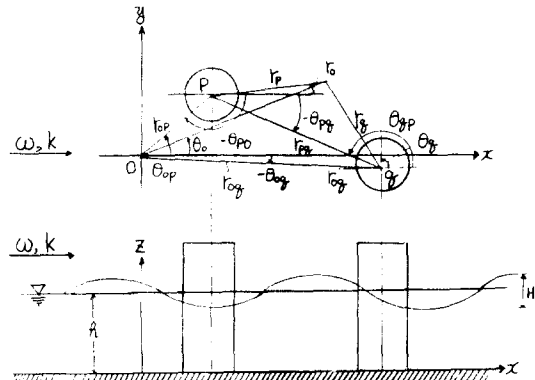


Fig. 2 Geometry of the problem, the coordinate system

4. 數值解析

4.1 數值解析方法 및 結果

回折理論에서 級數를 $n = \pm N$ 으로 포함시키면 $P \times (2N+1)$ 形態의 A_q^n 方程式(4)이 풀어진다.

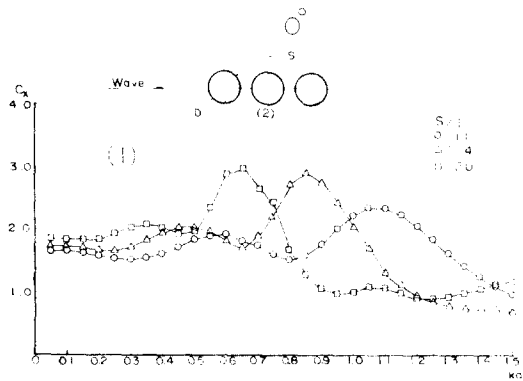
Bessel 함수와 Hankel 함수는 ascending power series¹¹⁾를 使用하여 計算한다.

이러한 考察은 25항 $H_0(10)$ 에 의한 計算으로 5個의 有效數字가 확실히되는 것을 알 수 있다.

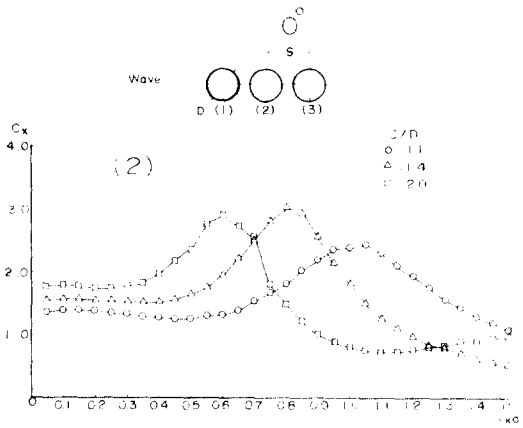
많은 變數를 簡略化하여 얻은 效果는 space ratio (S/D)가 減少될 경우 더욱 뚜렷하여진다.

Table 1 Effect of N on C_x for No.2 cylinder in the three-cylinder array; $\theta = 90^\circ$, $Ka = 0.243$ ($d = 76\text{mm}$, $t = 0 \text{ sec}$, $h = 0.37\text{m}$)

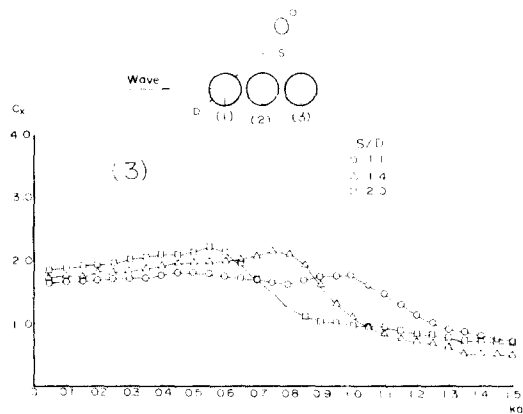
S/D	$N=2$	$N=3$	$N=5$	$N=7$
1.1	3.69854	3.82387	3.86599	3.87129
1.2	3.29623	3.34049	3.35030	3.35090
1.3	3.03952	3.05846	3.06166	3.06178
1.4	2.86163	2.87083	2.87209	2.87212
1.5	2.73114	2.73606	2.73661	2.53662
1.6	2.63138	2.63420	2.63447	2.63447
1.7	2.55265	2.55436	2.55450	2.55450
1.8	2.40094	2.49004	2.49011	2.49011
1.9	2.43633	2.43706	2.43711	2.43711
2.0	2.39215	2.39266	2.39269	2.39269
2.1	2.35453	2.35489	2.35491	2.35491
2.2	2.32209	2.32236	2.32237	2.32237
2.3	2.29384	2.29404	2.29405	2.29405
2.4	2.26900	2.26916	2.26917	2.26917
2.5	2.24700	2.24712	2.24712	2.24712



(a)

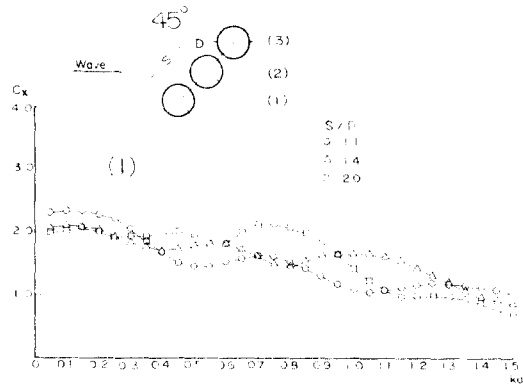


(b)

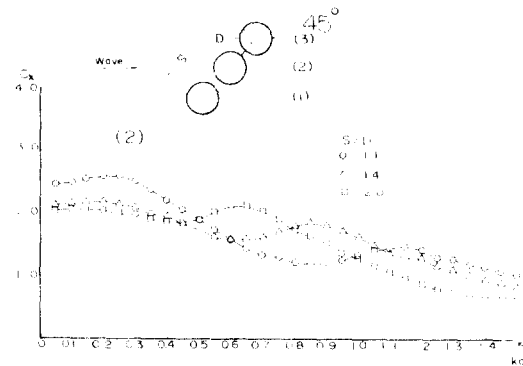


(c)

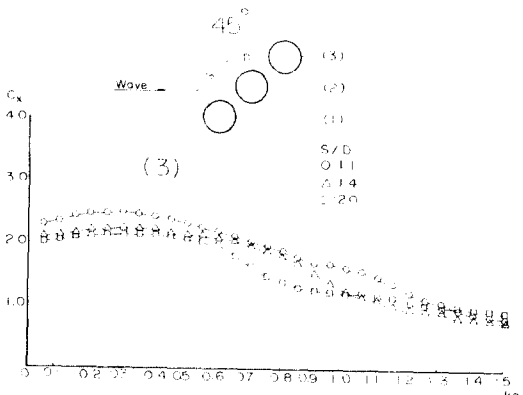
Fig. 3 The Wave force coefficient C_x versus Ka for $\theta=0^\circ$ obtained by the diffraction theory; (a) No. 1 Cylinder, (b) No. 2 Cylinder, (c) No. 3 Cylinder



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 The wave force coefficient C_x versus Ka for $\theta=45^\circ$ obtained by the diffraction theory; (a) No. 1 Cylinder, (b) No. 2 Cylinder, (c) No. 3 Cylinder

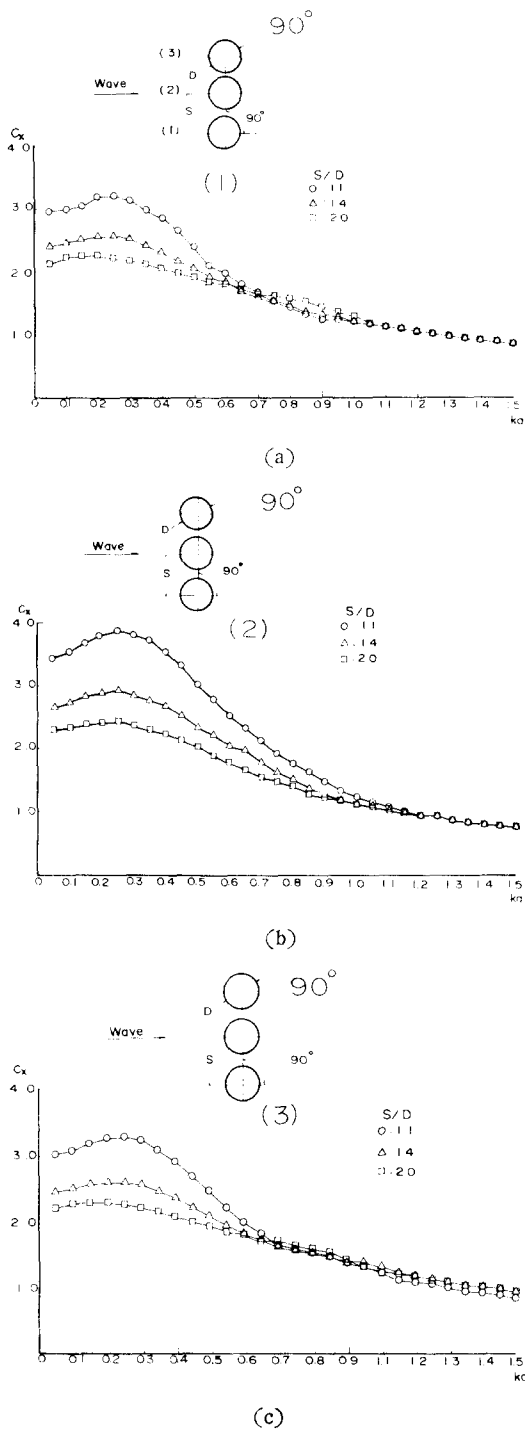


Fig. 5 The wave force coefficient C_x versus ka for $\theta=90^\circ$ obtained by the diffraction theory, (a) No. 1 Cylinder, (b) No. 2 Cylinder, (c) No. 3 Cylinder

Table 1은 일반적인 wave에 대하여 直角方向으로 設置된 3개 圓柱에서 S/D의 變化에 의한 效果를 나타낸 것이다.

따라서 本 實驗에서 N은 다음과 같이 選擇하였다.

S/D=1.1에서 7

S/D=1.2~1.4에서 5

S/D=1.5~1.8에서 3

S/D>1.8에서 2

Fig. 3~5는 斜角 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 의 ka 와 S/D에 대한 3실린더 배치와 C_x 의 의존성을 나타낸다.

여기서 θ 는 No. 1 실린더에서 시계바늘 반대방향

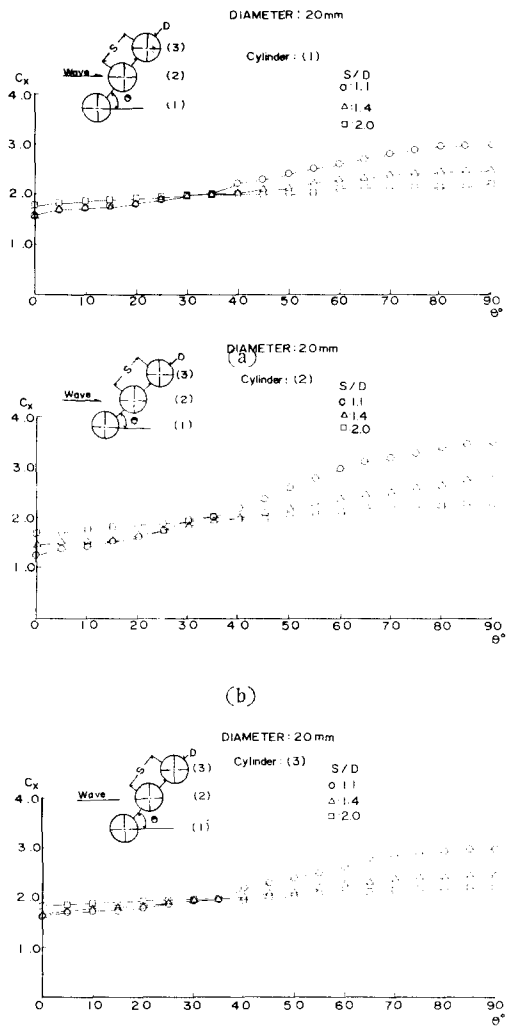


Fig. 6 The wave force coefficient C_x versus θ for $ka=0.06301$ corresponding to the set-up of $a=10mm$, $t=0.8sec$, and $h=0.6m$.

으로 入射한 方向에서 測定된 실린더배치 角이다.

θ 와 S/D 에 의존하는 어떤 값 $(Ka)_m$ 에 대해 最大 C_x 값이 존재한다는 것을 주의해야 한다.

$\theta=90^\circ$ 인 경우 특별한 形態가 보이고 S/D 가 주어진 範圍에 대해 $(Ka)_m$ 은 대략 0.25이고, 이것은 깊은 水深에서 $D=5m$ 에 대해 $T=6sec$ 의 경우와 대응한다.

$\theta=0^\circ$ 의 경우 No. 1과 No. 2 실린더에 대한 最大 C_x 값은 동일하지만, No. 3 실린더보다는 크다.

다시 말하면, $Ka < 0.3$ 인 경우 No. 2 실린더가 S/D 의 變化에 가장 민감하다.

$\theta=45^\circ$ 인 경우가 가장 둔감하다.

Fig. 6은 $C_x = \theta$ 를 나타낸 것이다. 이들 좌표에서 사용된 Ka 는 $t=0.8sec$, $a=20mm$, $h=0.6m$ 인 경우이다.

이것은 水槽 tank의 實驗裝置들 중의 한 部分에서 測定한 것이다.

S/D 가 감소할 경우 C_x 는 $\theta=90^\circ$ 가까이에서는 증가하고 $\theta=0^\circ$ 가까이에서는 감소함을 명확히 보여준다.

이 特性은 No. 2 실린더에서 가장 明確함을 알 수 있다.

5. 水理實驗

5.1 實驗裝置 및 方法

Fig. 7에서 보는 바와 같이 길이 $25.2m \times$ 높이 $1.0m \times$ 넓이 $0.6m$ 이고, 그 한쪽 면의 一部分을 아크릴板을 붙인 2次元 造波 水槽를 使用하였다.

실험모델은 造波機에서 $10m$ 떨어진 곳에 設置하였다.

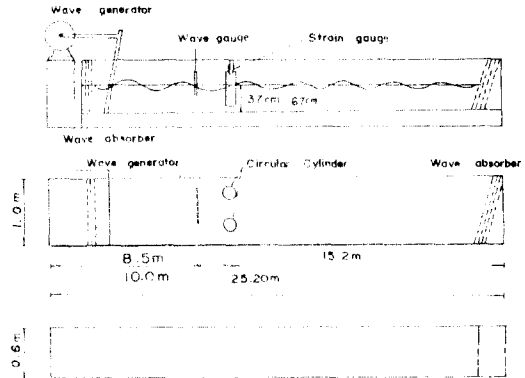


Fig. 7 Schematic representation of the experiment

또한 方向을 자유로이 선택할 수 있도록 回轉板을 設置하고, 波高測定은 容量式 波高計를 使用하였으

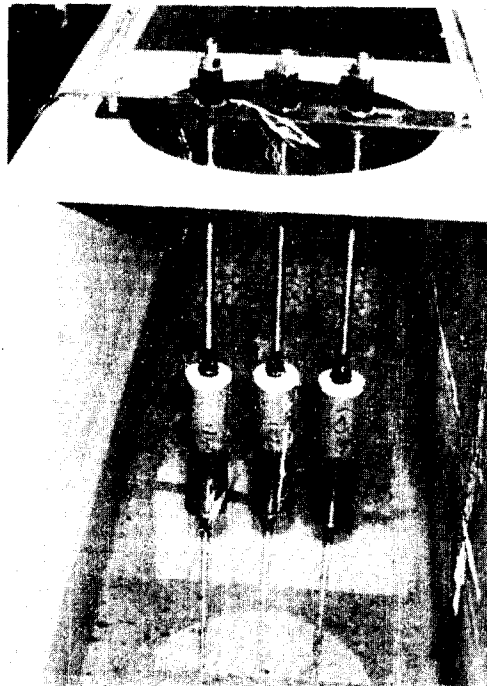
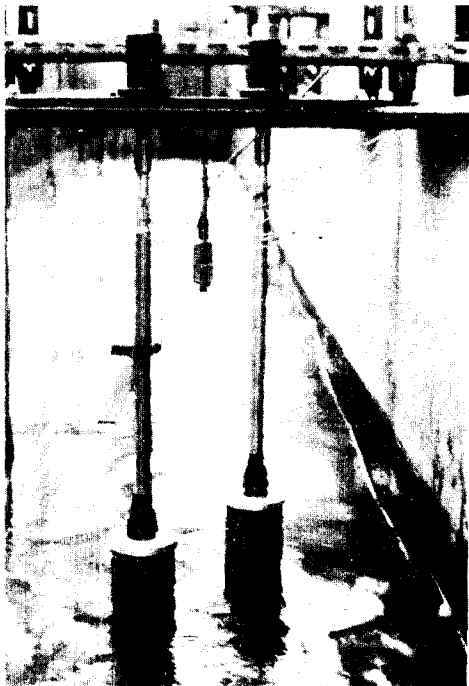


Fig. 8 Experimental set-up

며, 波高計는 造波板에서 8.5m 떨어진 地點에 設置해서 水面變動을 測定하였다.

總波力은 모델 파일의 表面에 부착된 4個의 스트레인 게이지에 의해 測定되고, 이들중 2個는 波力の 直角方向, 또 다른 2個는 橫方向으로 設置되어 있다.

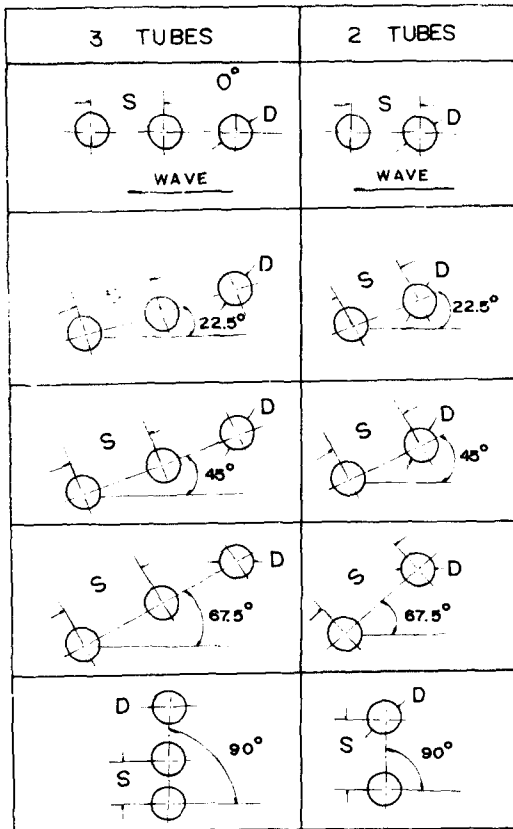
모델(물에 잠긴部分)은 P.V.C관(φ40mm)과 알루미늄관(φ20mm)으로 만들었고, 또 水面위의 部分은 鍍銀管(φ76mm, φ40mm, φ20mm)으로 만들었다.

Fig. 8은 그 裝置를 나타낸 것이다.

먼저 파일의 몇몇 位置에 이미 알고 있는 荷重을 作用시켜서 여기에 대응하는 荷重點은 線型化된 平面波 理論을 使用하여 計算했고, 주어진 h에 대한 平均荷重點을 算出하기 위해 주어진 週期 T와 波高 H보다 높게 平均點을 잡았다. Table 2에 보는 바와 같이 pipe를 2個와 3個로 實驗했으며, 한가지 배열로 동일하게 設置했다.

S/D(1.1~3)의 範圍에 대해 角度를 다섯가지로 變

Table 2 Different test positions and spacing of tubes



形시켰다(0°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°).

또한 이들 각 角의 경우는 波力效果를 研究하기 위해서였다.

Kc는 3개의 관지름(φ76mm, φ40mm, φ20mm)과 h = 4cm~12cm, t = 0.8sec~1.6sec에 의해서 1.7~27로 變한다.

(2)식과 마찬가지로 C_x는 다음과 같이 計算된다.

$$C_x = \frac{|F_x^*|}{\frac{\pi}{2} \rho g H a^2 \tanh K h} \quad (5)$$

Kc number는

$$Kc = \frac{U_m t}{d} \quad (6)$$

로 정의된다.

(6)식에서 U_m은 임의의 流體粒子的 수평속도이고, 따라서 Kc는 관의 point에 따라 變한다.

結果의으로 엄밀한 의미에서 힘계수(force coefficient)와 Kc의 關係는 波의 一部分에서나 均일하게 振動하는 波動에서 구해져야 한다.

本 研究에서는 (5)식의 C_x와 自由表面에서 생기는 最大値의 關係를 in-stead로 研究하였다.

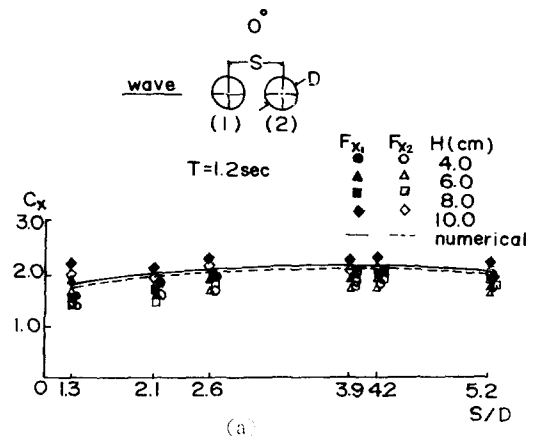
이 問題가 實驗裝置의 단순성에 따른 손실이다.

6. 考 察

Fig. 9(a)~(e)는 2개 실린더로서 週期가 1.2sec일 때 回折理論을 적용시킨 理論值 C_x와 實驗值 C_x을 測定한 값을 比較한 것이다.

이 結果 理論值와 實驗值가 잘 일치하고 있다.

波의 進行方向에 대한 角度가 45° 보다 클 때 C_x는 S/D가 감소할 수록 커지고, 그것이 45° 보다 작을 때 C_x는 S/D가 감소할 수록 작아진다.



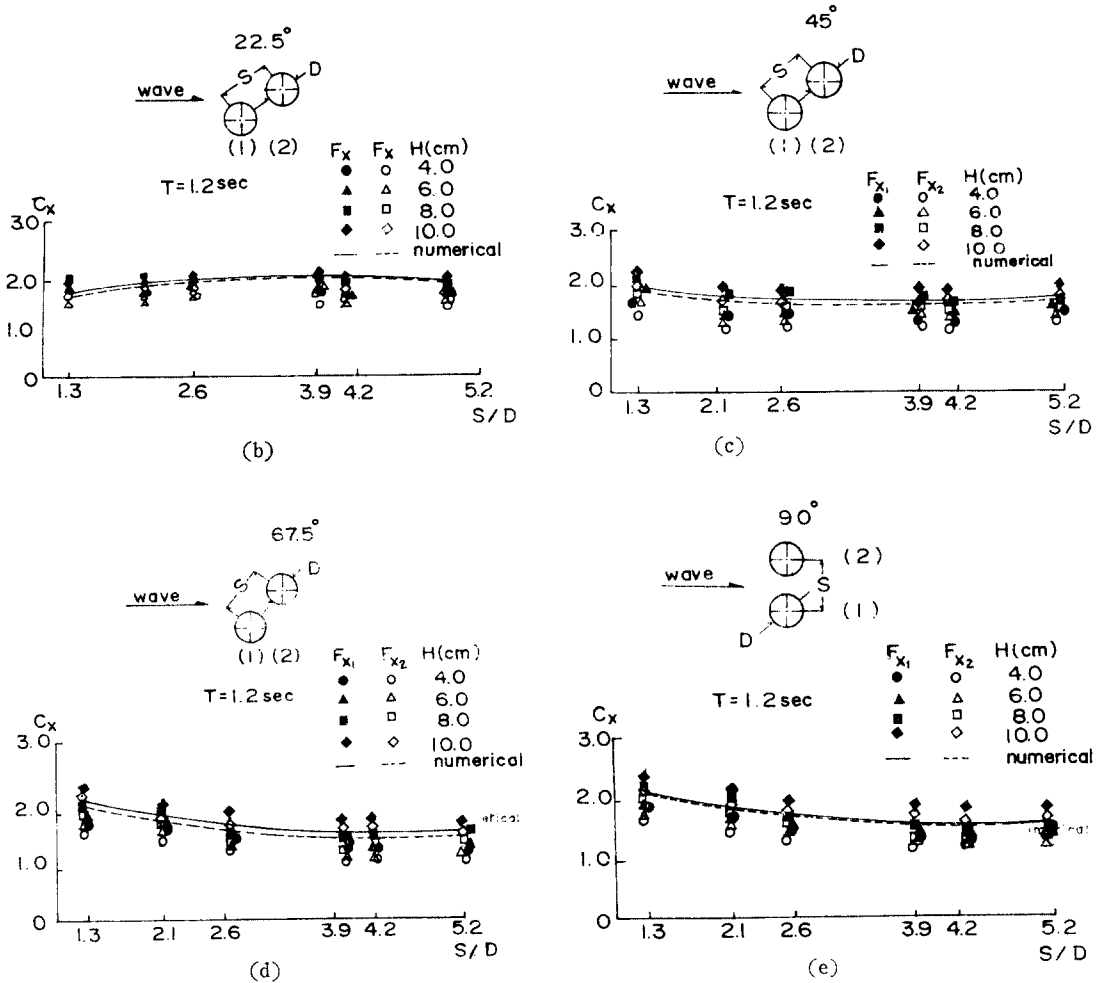


Fig. 9 C_x for two-cylinder array versus S/D for $t=1.2sec$; (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=22.5^\circ$, (c) $\theta=45^\circ$, (d) $\theta=67.5^\circ$, (e) $\theta=90^\circ$: symbols are from experimental results, -from diffraction theory for No. 1 cylinder, and from diffraction theory for No. 2 cylinder.

Fig. 10 (a)~(e)는 3개 실린더중 2번 실린더에 대한 것이다.

여기서 관찰해 보면 2개 실린더와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

$\theta > 45^\circ$ 일 때 C_x 는 S/D 가 감소할 수록 작아진다.

$\theta < 45^\circ$ 일 때 C_x 는 S/D 가 감소할 수록 커진다.

이 경향은 Chakrabarti가 $\theta=90^\circ$ 일 때 이미 관찰을 했다.

그 基本이치의 경향에 관하여 더욱 흥미있게 研究할 것이다.

Fig. 11 (a)~(j)는 Kc number에 대한 C_x 값이다.

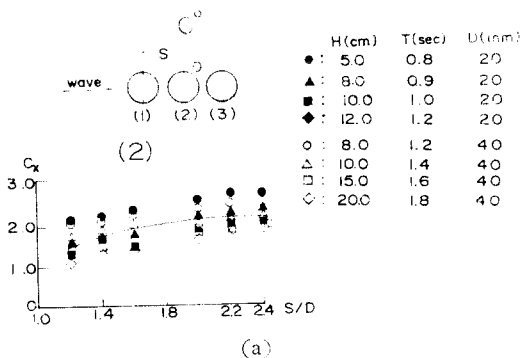
Kc number는 3.1에 언급했고, 여기서는 線形波理論計算으로 自由表面에서의 값을 구했다.

距離가 작은 경우에는 낮은 Kc 에서 C_x 값이 角度

가 될 수록 증가한다.

또 角度가 작을 수록 Kc 와 C_x 값이 감소한다.

이 경향도 Chakrabarti가 $\theta=90^\circ$ 일 때 研究를 했다.



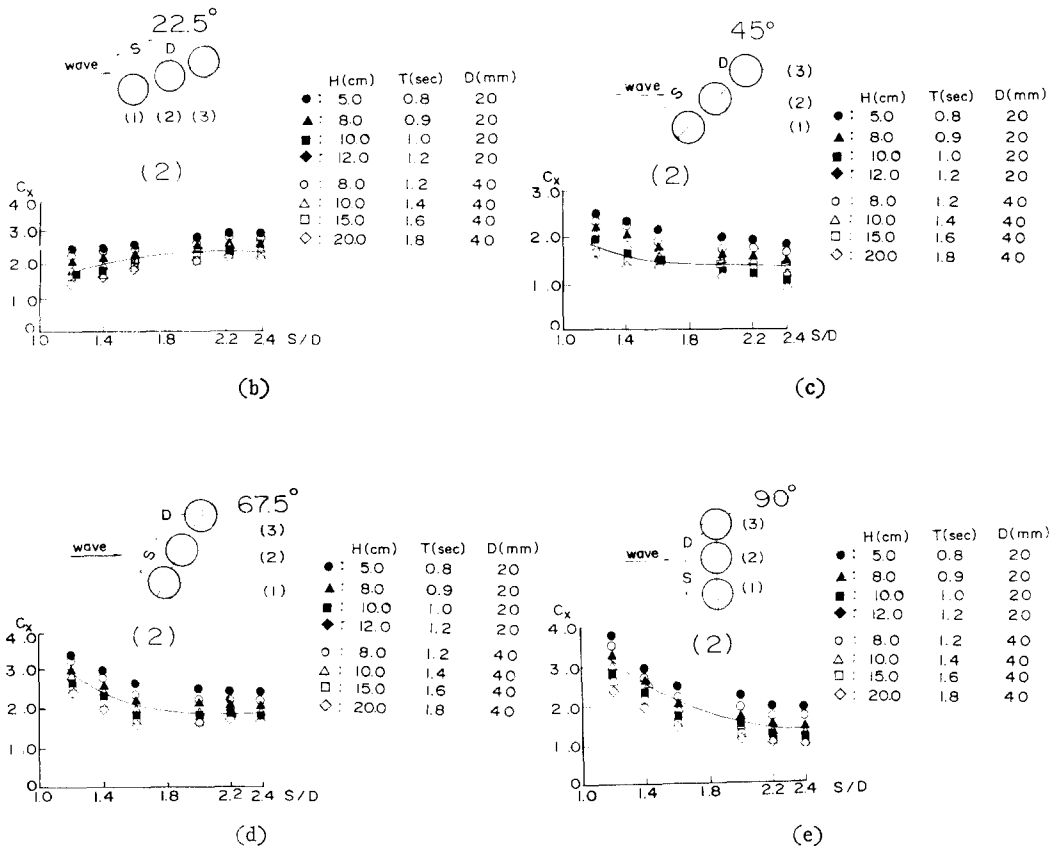
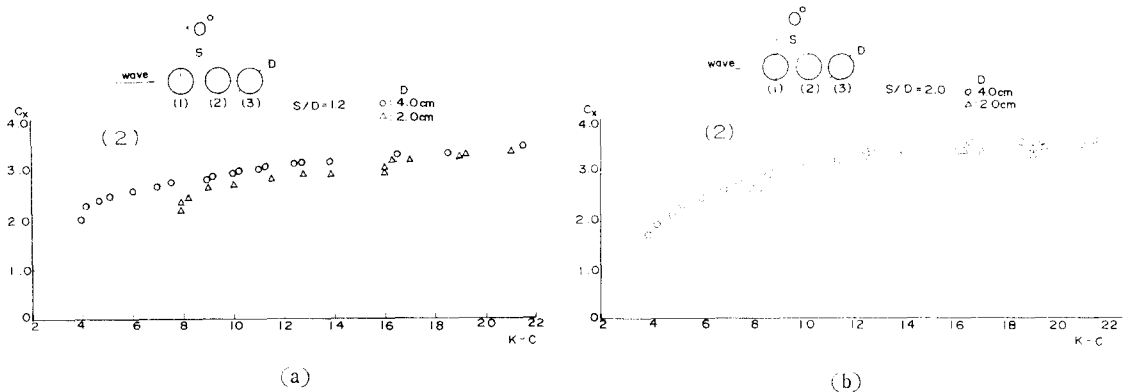


Fig. 10 C_x for No. 2 cylinder in the three-cylinder array versus S/D ; (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=22.5^\circ$, (c) $\theta=45^\circ$, (d) $\theta=67.5^\circ$, (e) $\theta=90^\circ$

- for $h=5\text{cm}$, $t=0.8\text{sec}$, $d=20\text{mm}$; △ for $h=10\text{cm}$, $t=1.4\text{sec}$, $d=40\text{mm}$;
- ▲ for $h=8\text{cm}$, $t=0.9\text{sec}$, $d=20\text{mm}$; □ for $h=15\text{cm}$, $t=1.6\text{sec}$, $d=40\text{mm}$;
- for $h=10\text{cm}$, $t=1.0\text{sec}$, $d=20\text{mm}$; ◇ for $h=20\text{cm}$, $t=1.8\text{sec}$, $d=40\text{mm}$;
- for $h=8\text{cm}$, $t=1.2\text{sec}$, $d=40\text{mm}$; - diffraction theory for the set-up



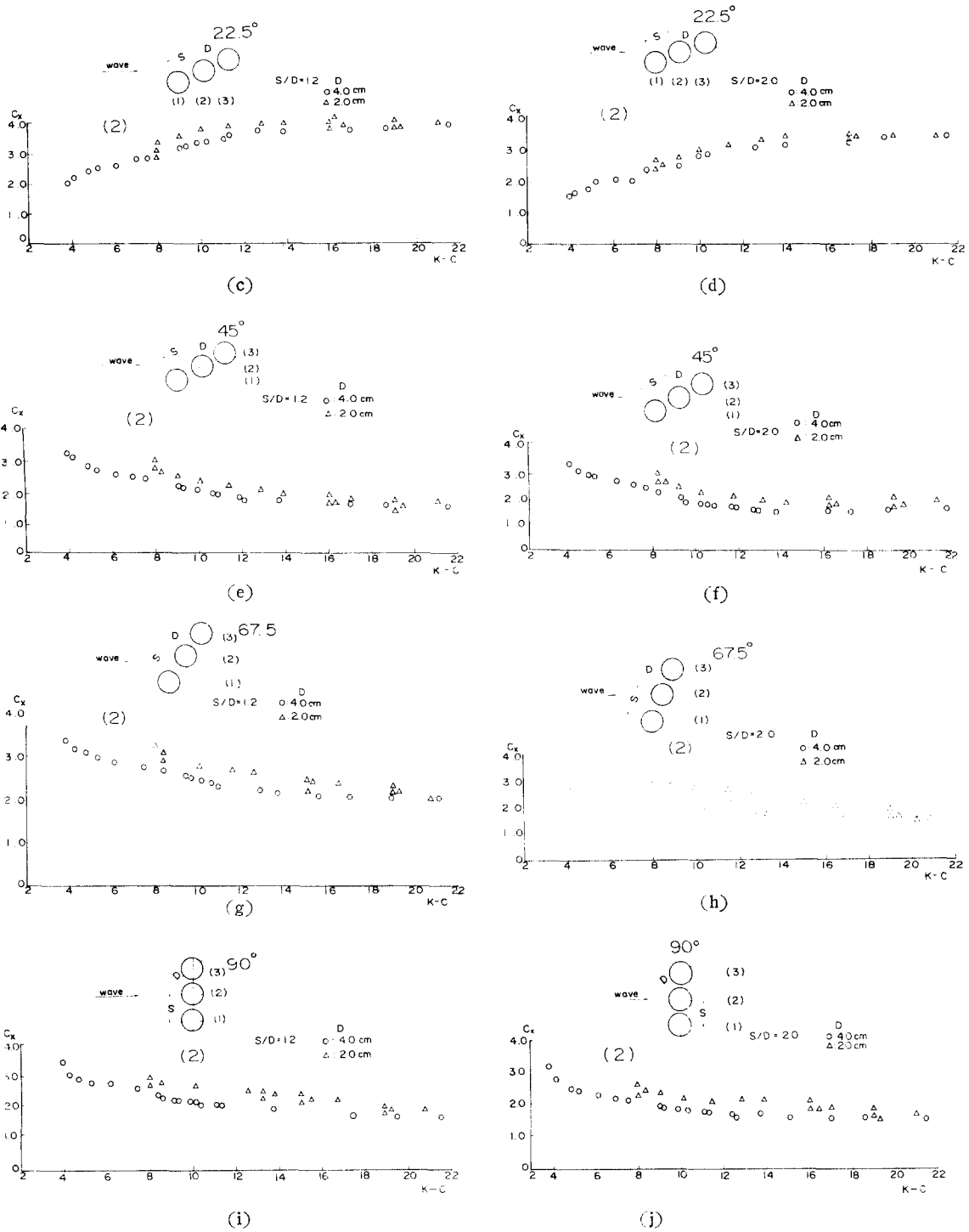


Fig. 11 C_x for No. 2 cylinder in the three-cylinder array versus K_c for $h=5\sim 10$ cm, $t=0.8\sim 1.0$ sec in $d=20$ mm, and $h=8\sim 20$ cm, $t=1.2\sim 1.8$ sec in $d=40$ mm; (a) $\theta=0^\circ$, $S/D=1.2$; (b) $\theta=0^\circ$, $S/D=2.0$; (c) $\theta=22.5^\circ$, $S/D=1.2$; (d) $\theta=22.5^\circ$, $S/D=2.0$; (e) $\theta=45^\circ$, $S/D=1.2$; (f) $\theta=45^\circ$, $S/D=2.0$; (g) $\theta=67.5^\circ$, $S/D=1.2$; (h) $\theta=67.5^\circ$, $S/D=2.0$; (i) $\theta=90^\circ$, $S/D=1.2$; (j) $\theta=90^\circ$, $S/D=2.0$

7. 結 論

本 論文은 海洋圓柱 構造物에 作用하는 波力에 對하여 複數圓柱인 2本圓柱와 3本圓柱에 關한 研究이다.

複數圓柱의 角度(θ), 波高(H), 週期(T), 直徑(D), 距離(S)를 變化시켜 가면서 여러가지 波를 맞이할 때 發生되는 荷重을 스트레인 게이지를 使用하여 測定하고 이것을 回折理論에 따른 數值解析 結果와 比較 檢討한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 荷重係數 C_x 는 複數圓柱에 對하여 入射波의 角度가 45° 보다 클 때 圓柱間 距離比 S/D 가 減少할수록 커진다.

2) 荷重係數 C_x 는 入射角이 45° 보다 작을 때 S/D 가 減少할수록 작아진다.

3) 荷重係數 C_x 는 낮은 距離比에서 角度가 45° 이상에서는 Kc number가 增加할수록 減少하고 角度가 45° 이하에서는 Kc number가 增加할수록 C_x 값이 增加한다.

4) 多圓柱에서는 圓柱間 間격 S 가 작아질 때 波의 流體力은 $\theta < 45^\circ$ 에서 減少되고, $\theta > 45^\circ$ 에서 增加된다.

本 研究에서 얻어진 結果는 最近 깊은 水深의 位置에 建設하는 海洋圓柱 構造物의 建設, 土木設計, 防災工學 등에 對한 靜的인 安全性과 動的인 安定性을 높이는 데 그 效果性이 있다고 思料된다.

附 記

本 論文은 1986年度 文敎部 學術研究 助成費에 對하여 研究되었음.

參 考 文 獻

- 1) 土木學會, “海洋鋼構造物設計指針(案)”解説, 1973.
- 2) 土木學會, “海上作業足場の 設計要領”, 1976.
- 3) MacCamy, R. C. and Fuchs, R. A., “Wave Forces on piles”, A Diffraction Theory. Tech. Mem., No. 69, BEB, pp.1~17. 1954.
- 4) 中村宏, 阿部宣行, “海中の近接した2個の冷却水取水塔に作用する波力”, 第20回 海岸工學 講演會論文集, pp.31~35. 1973.
- 5) 堀川清司, 渡邊晃, 勝井秀博, “圓柱に作用する碎波力に關する研究”, 第20回 海岸工學講演會論文集, pp.37~42, 1973.
- 6) Keulegan, G. H., and Carpenter, L. H., “Forces on Cylinder and Plates in an Oscillating Fluids”, J. Research, National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5, Mag., pp.423-440, 1968.
- 7) Spring, B. H., and Mon Kmeyer, P. L., “Interaction of Plane Waves with a Row Cylinder,” Proco. Third Spec. Conf. Civil Eng. in the Oceans, ASCE Newyork, Del., 1975.
- 8) Chakrabarti, S. K., “Wave Forces on Mutiple Vertical Cylinders,” J. Waterway No. 1, 104, pp.147-161, 1978.
- 9) McIver. P. and Evans, D. V., “Approximation of Wave Forces on Cylinder Arrays.” Appl. Ocean Research, Vol. 6 No. 2, pp.101-107, 1974.
- 10) Chakrabarti, S. K., “Wave Forces on Vertical Array of Tubes,” Proc. Civil Engin. in the Ocean, ASCE, Sept., pp.241-259, 1979.
- 11) Abramowitz, M., and Stegun, I. A., Handbook of Mathematical Function, National Bureau of Standards, Washington, D. C., 1964.