

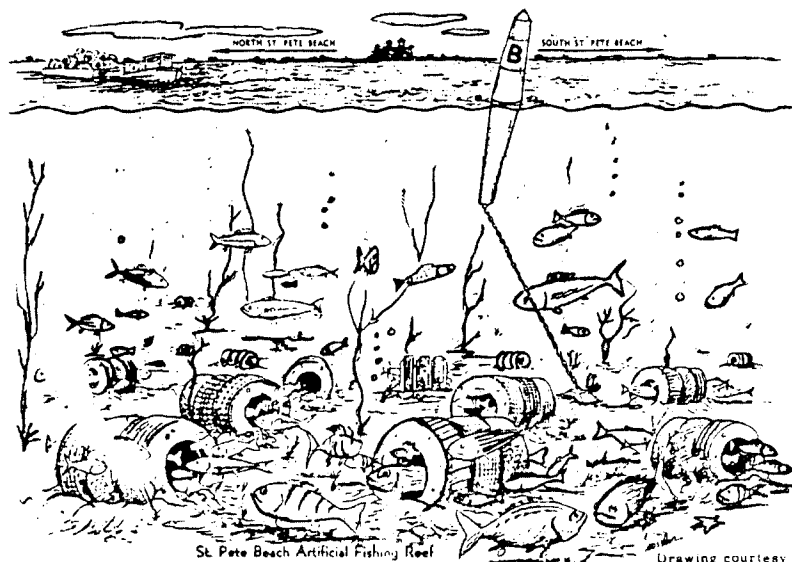
페타이어를 이용한 漁類棲殖 構造物

陸軍士官學校 土木工學科
助教授 金 泰 麟

1. 序 論

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 좋은 漁場을 이루고 있으며 국민의 食生活중 魚類의 비중이 커서 매년 어획량의 需要가 증가하고 있다. 또한 국민 생활이 향상됨에 따라 바다낚시를 즐기는 스포츠인수도 크게 늘어날 것으로 전망된다. 근래에 인구의 증가와 산업의 발달은 기존의 근해어류서식처를 파괴하거나 오염시키고 있어 수산자원의 보존 및 개발 문제가 대두되고 있다. 인공어류서식구조물(Artificial Reefs)은 하나의 적극적인 방책으로서 해안지역 또는 근해에 양호한 어장을 조성하고 기존의 海床水産생물을 増産시키며 상업용 또는 스포츠 바카 낚시를 유지하여 지역경제에 기여하는 등의 효과를 거둘 수 있다.

구조물의 재료로서는 폐기된 자동차, 전차, 선박, 벽돌, 나무, 인공리초, 페타이어, 암석, 콘크리트 블록 등이 다양하게 사용된다. 자동차의 급격한 증가와 함께 페타이어는 손쉽게 획득할 수 있는 양질의 재료로 등장하였다. 미국의 경우



St. Pete Beach Artificial Fishing Reef

Drawing courtesy of
the City of St. Petersburg Beach, Fla.

그림 1 페타이어로 설치된 인공어류서식처 (美 Mexico만
St. Petersburg Beach, Florida)

매년 약 2億개의 페리이어중 10%만이 재사용되고 나머지는 폐기되고 있어 이를 浮遊防波堤 (Floating Breakwater) 나 어류서식구조물 등의 材料로 이용하는 방안이 연구되고 있다. 타이어는 여러가지 形狀으로 구성되어 海床에 設置되면 유기물 및 플랑크톤이 신속히 殖生하여 외양어류들의 좋은 서식처를 이룬다. (그림 1 참조)

인공어류서식구조물에 대한 연구는 美國의 海洋生物들과 關係기관에 의해서 1960년대 이후 진척되어 왔으나 (1, 2, 3, 4) 주로 해양생태학적 연구에 국한되었다. 특히 Parker 등(3)은 다양한 재료들을 사용했을 경우의 건설비용 비교하고 어류서식처로서 적합한 타이어구조물의 구성형태 (Configurations)를 제안하였다. 대부분의 어류서식구조물이 波浪과 潮流의 영향이 적은 지역 (Sheltered area)에 施設되어 온 관계로 구조물의 안정에 대한 工學的研究은 매우 부진하였다. 구조물이 海床에서 沈沈을 유지하기 위한 방법에는 두가지가 있다. 첫째는 앵커 (Anchor) 시설을 하여 구조물을 고정시키는 방법이고, 둘째는 구조물의 自重을 증가시켜 海床물길과 구조물간의 마찰력이 커져 沈沈을 유지하는 방법이다. 타이어구조물의 경우 타이어를 묶어 海床에 設置한 앵커에 고정시키는 방법은 施工이 곤란하고 앵커나 연결로우프가 파괴되는 경우 타이어가 流失되기 때문에 타이어의 內留 공간에 돌이나 콘크리트블록 등을 채워 自重을 증가시켜 海床에 位置시키는 後者의 方法이 권장되고 있다.

本稿는 여러 形態의 타이어 구조물이 주어질 海床 및 波浪條件下에서 沈沈하게 設置되는데 필요한 무게 (Ballast)를 決定하는데 要求되는 영향係數들을 實驗的으로 決定한 結果를 요약한 것이다. 연구의 중점을 타이어구조물의 최대波力係數 (Maximum Force Coefficients) 및 抵抗力 및 慣性力係數 (Drag & Inertial Coefficients), 그리고 海床물길간의 底面마찰係數 (Bottom Friction Coefficients)를 결정하는데 두었으며 이를 實驗結果를 이용한 안정한 구조물의 신속한 設計를 제안하였다.

2. 理論的 背景

海床에 施設되는 구조물이 作用하는 力은 지구의 자전의 영향을 무시하면 波浪 및 潮流에 의한 힘 및 海床물길과의 마찰력이라고 볼 수 있다. 波浪 및 潮流에 의한 힘은 일반적으로 Morison 식(5)에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$F = C_D \frac{\rho}{2} A U |U| + C_I \rho V \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

여기서 F = 물체에 미치는 힘, ρ = 海水의 밀도, A = 海水의 流動방향으로의 물체의 투영면적 (projected Area), V = 물체의 容積, U = 물체의 속도, C_D = 抗力係數, C_I = 慣性力係數이다. 式(1)은 波力이 潮流에 있어서의 抗力 (Drag Force)와 이상유체의 不定流에 있어서의 慣性력 (Inertial Force)의 벡터합으로 나타낼 수 있다고 가정할 것이며 C_D 및 C_I 를 실험적으로 적절히 決定함으로써 일반적인 3차원 물체에 미치는 힘의 時間的 變化를 예측하려고 널리 쓰이고 있다.

靜力學的 設計 (Static Design)도 만족하려면 設計者는 구조물에 미치는 波力의 時間的 變化보다도 最大波力에 더 관심을 갖게 된다. Sarpkaya (6), Grace (7) 등은 이를 위해 最大波力係數 C_f 를 定義하여 최대파력을 다음과 같이 提示하였다.

$$F_{max} = C_f \frac{\rho}{2} A U_{max}^2 \quad (2)$$

여기서 U_{max} = 最大流速이다. 일반적으로 최대파력은 유속이 최대가 되는 순간에 발생하지 않으나 式(2)는 최대파력을 최대유속의 冪으로서 表示하려고 효과적으로 쓰이고 있다.

海床위에 놓여진 물체에 작용하는 마찰력 F_f 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_f = f \cdot W_{sub} \quad (3)$$

여기서 f = 저면마찰계수, W_{sub} = 물체의 水中重量이다. 구조물이 安穩을 유지할 條件은 다음과 같다.

$$F_{max} \leq F_f \quad (4)$$

라이어의 重量은 1.14 ~ 1.16 이고 水中重量은 空氣中重量의 13% ~ 16%에 불과하므로 자중에 의해 안정을 유지하기는 不可能하다. 따라서 라이어내부에 콘크리트나 암석, 기타 물질을 넣어 W_{sub} 를 증가시키게 된다.

3. 實驗設備 및 測定

實驗은 美 Oregon 州에서 造波水路에서 실시하였으며 일곱가지 形狀으로 구성된 각각의 라이어구조물에 대하여 주기 1.98초 ~ 9.88초, 波高는 碎波高 (Breaking Wave Height) 의 25%로부터 75% [Dean(9)의 Case 4 ~ Case 8 에 해당]에 이르는 16組의 規則波들을 통과시켜 총 656回 (Runs)의 측정을 실시하였다. 波高, 波力 및 流速은 運轉室 (Control Room)에 비치된 기록지 (Strip Charts) 및 자기 테이프 (Magnetic tape)에 연속적으로 기록되었다.

가. 라이어 구조물 : 실험에 사용된 라이어들은 外徑 (內徑) 30 (14.6) cm, 39 (19.7) cm, 45 (33) cm, 그리고 108 (60) cm의 6種이었다. 처음 4種은 實驗水路에서, 나중 2種의 厚板 라이어는 現地 海洋 실험에 사용되었다. 일곱가지 形狀의 모양과 諸元은 表 1에 주어질바와 같다. 表 1에서 D는 라이어의 外徑이며 D'은 波高가 진행하는 方向으로 낸 구조물의 길이이다.

表 1. 라이어 구조물의 形狀 및 투영면적 (A)

Configuration	D=1.0 ft		D=1.283 ft		D=1.479 ft		D=1.896 ft		Average	
	D/D	A/A ₀ D ²	D/D	A/A ₀ D ²	D/D	A/A ₀ D ²	D/D	A/A ₀ D ²	D/D	A/A ₀ D ²
	1.0	0.348	1.0	0.321	1.0	0.337	1.0	0.332	1.0	0.335
	1.0	0.348	1.0	0.321	1.0	0.337	1.0	0.332	1.0	0.335
	0.292	0.760	0.267	0.747	0.282	0.810	0.277	0.673	0.280	0.748
	1.0	0.695	1.0	0.642	1.0	0.674	1.0	0.663	1.0	0.669
	1.0	0.695	1.0	0.642	1.0	0.674	1.0	0.663	1.0	0.669
	0.584	0.760	0.535	0.747	0.564	0.810	0.554	0.673	0.559	0.748
	1.0	1.390	1.0	1.283	1.0	1.348	1.0	1.326	1.0	1.337
	1.0	1.390	1.0	1.283	1.0	1.348	1.0	1.326	1.0	1.337
	1.146	0.760	1.070	0.747	1.128	0.810	1.108	0.673	1.118	0.748
	2.72	3.463	-	-	2.72	3.458	-	-	2.72	3.461
	2.72	3.463	-	-	2.72	3.458	-	-	2.72	3.461
	-	-	3.70	4.70	-	-	-	-	3.70	4.70
	1.0	0.691	-	-	-	-	1.0	0.547	1.0	0.619
	0.854	0.750	-	-	-	-	0.824	0.650	0.839	0.70
	-	-	-	-	-	-	1.165	1.771	1.165	1.771

나. 장비 및 측정 : Oregon 州에서의 조파수로는 총연장 104.3 m, 폭 3.7 m, 조파水路에서의 깊이 4.6 m로서 造波機 (Wave Generator)는 150馬力 한지형으로서 波高 1.5 m까지의 獨立波 (Solitary Wave) 및 規則波 (Regular Wave), 그리고 不規則波 (Random Wave)를 생성할 수 있다.

主水路의 中央部에는 實驗台 (Dynamometer Table)를 設置하여 그 周圍에 固着된 라이너구조물이 받는 波力이 실험대의 周圍에 부착된 Strain Gage에 나타나도록 하였다. (그림 2 참조)

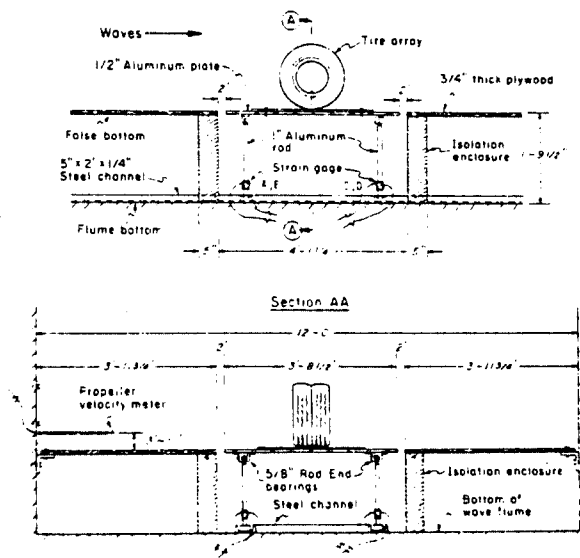


그림 2. 實驗台 (Dynamometer Table)

波形은 음향식 波高計 (Sonic Wave Profiler)로 측정하였으며 구조물의 中央部와 같은 높이에서의 流速은 水路側壁으로부터 60cm 떨어져 설치된 渦輪式流速計로 측정하였다.

4. 실험 결과

가. 最大波力係數 (C_f)

式 (2)로부터 최대파력계수는 다음과 같이 결정된다.

$$C_f = \frac{F_{max}}{\rho A U_{bmax}^2} \quad (3)$$

여기서 F_{max} = 실험된 최대파력, U_{bmax} = 구조물의 중심부 높이에서 실험된 最大流速이다. 最大波力係數 C_f 는 波浪의 特性和 구조물의 形狀에 따라 다르다는 것이 알려져 있으며 이를 나타내는 無次元수는 다음과 같이 定義되는 Keulegan-Carpenter 數로 알려져 있다. (6, 7, 8)

$$K-C = \frac{U_{bmax} \cdot T}{D'} \quad (4)$$

여기서 $T =$ 波浪의 주기이다. 그림 3은 실험결과와 일부를 보여주는 바 최대 파력계수는 $K-C$ 의 수가 증가함에 따라 역지수함수의 증가를 보여주며 最大 40에서 最少 1.1의 값을 갖는다.

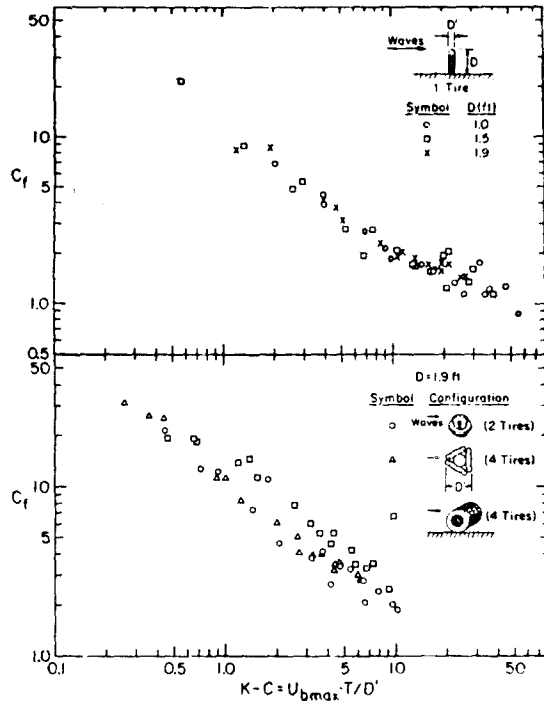


그림 3. 최대파력계수와 Keulegan-Carpenter 수와의 관계

그림 3에서 $K-C > 10$ 의 범위에서 전대수직상의 C_f 의 기울기가 감소함을 보여주는데 이는 실험에서 얻지 못한 큰 $K-C$ 값에 해당하는 C_f 값을 추정하는데 좋은 참고가 된다.

그림 4는 실험에서 얻은 모든 경우에 대하여 C_f 의 대표값을 나타내는 곡선들을 함께 나타낸 것이다. 일반적으로 특정한 구조물의 형상에 대하여 사용된 카이어의 고기에 따른 C_f 의 증가는 무시할 정도이다. 그림 4의 오른쪽의 곡선들(부표식)들은 해상에 늘인 실린더에 대하여 Grace(7)와 Hawaii 연해의 실험자료로부터 얻은 값을 참고로 나타낸 것이며 α 는 波峯線과 실린더軸이 이루는 각을 나타낸다. 10개 및 20개의 카이어로 구성된 장미형(Rosette Type) 구조물들의 최대파력계수 C_f 의 기울기는 다른 구조물들에 대한 C_f 의 기울기보다 현저히 완만한 특성을 보여준다.

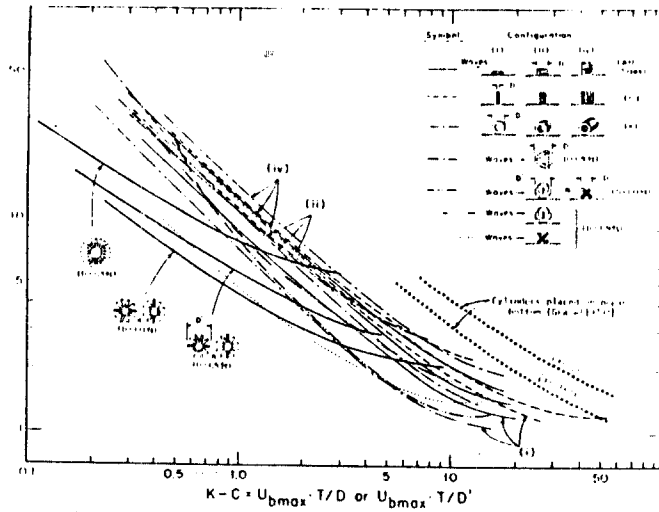


그림 4. 최대과력계수와 Keulegan-Carpenter 수의 관계







4. 마찰계수 (f)

마찰계수 f 는 Waters 박사의 실험을 15 cm 두께로 균일하게 깔아 인공해상을 형성한 후 물속에서 카이어 구조물을 그 위에 얹어 놓고 수평방향으로 끌었을 때 구조물이 움직이기 시작하는 순간의 힘 F_H 을 구조물의 수중중량 W_{sub} 으로 나눔으로써 결정하였다. 즉

$$f = \frac{F_H}{W_{sub}} \quad (5)$$

실험에 사용된 細砂는 美 Oregon 州 Warrenton 海濱에서 채취하였으며 어류서식 구조물의 施設이 계획된 隣近의 Umpqua 近海의 海床堆積土와 비슷한 粒度 分布를 갖고 있다. 체분석 실험결과 시도의 96%가 #60 체를 통과하고 #140 체에 殘留하였다. 실험결과를 表 2에 收錄하였다.

表2. 細砂과 라이어구조물간의 저면마찰계수

Configuration	Bottom Resistance Coefficient (f)				
	D=1.0 ft	D=1.3 ft	D=1.5 ft	D=1.9 ft	Average
	1.06	0.95	1.01	0.96	1.01
	1.00	0.80	0.90	0.87	0.92
	1.01	0.85	0.95	0.91	0.96
	1.05	0.85	0.95	0.88	0.96
	0.96	0.80	0.87	0.81	0.88
	1.00	0.84	0.91	0.85	0.92
	0.96	0.95	0.95	0.85	0.93
	0.87	0.86	0.80	0.75	0.82
	0.92	0.90	0.87	0.80	0.87
	0.95	0.80	0.80	-	0.88
	1.01	0.85	0.87	-	0.94
	1.19	1.05	-	1.04	1.12
	1.28	1.15	-	1.10	1.19
	-	0.08	-	0.85	0.85

5. 結果의 적용

實驗結果를 이용하여 안정한 라이어구조물을 設計하기 위해 필요한 사항은 設計波浪의 深海波高(H) 및 週期(T), 구조물이 설치되는 지점의 수심(h) 과 海床퇴적물의 특성, 그리고 사용될 라이어의 크기 및 구조물의 모양이다. 設計波浪(Design Wave)은 고려하고 있는 海上에 극심한 暴風波가 내습할때의 有義波高(Significant Wave Height, H_s)나 波高가 높은 것으로부터 써어 관측된 파장수의 10%에 해당하는 波高들의 平均치(H_{1/10})를 사용할 수 있다. 深海波高 H_s은 淺水(Shoaling) 및 撓折(Refraction)을 고려하여 구조물이 설치되는 지점에서의 파고(H)로 환산되어야 한다.

海床에서의 流速(U)은 適切한 波浪理論을 利用하여 설치지점의 波高(H) 및 週期(T)로부터 決定될 수 있으며 海床가카에서의 最大流速을 위하여는 線形理論(Linear Wave Theory)이 滿足한 予測을 하였으므로 알려져 있다. (7) 線形이론에 의한 海床에서의 最大流速 U_{max}은 다음과 같이 주어진다.

$$U_{max} = \frac{\pi H}{T} \sinh^{-1}\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (6)$$

여기서 $L = L_0 \tanh \frac{2\pi}{L} h$ 는 수심 h 에서의 波長이며 洩海波長 $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$,
 $g =$ 重力加速度이다. 그림 5 는 선형이론에 따른 무차원 海床最大流速
 $U_{bmax}/(L_0/T)$ 의 값을 相對波高 H/L_0 및 상대수심 h/L_0 의 함수로 나타내고 있다.

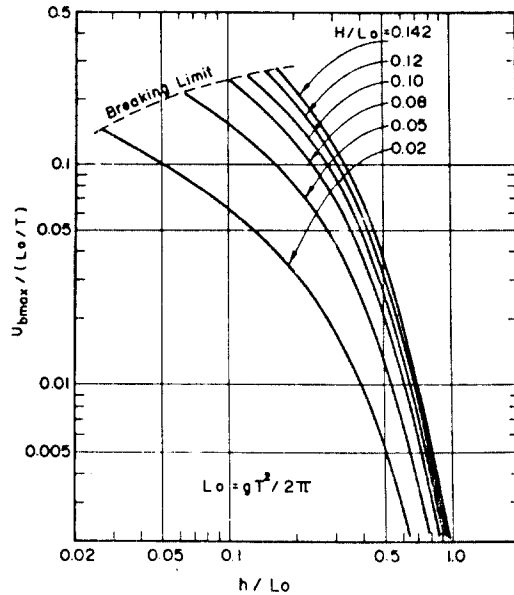


그림 5. 線形波浪理論 (Linear Wave Theory) 에 의한
 무차원 海床最大流速과 相對수심 (h/L_0) 및 相對波高
 (H/L_0) 의 關係

타이어구조물의 설계계산결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 設計波高 (H) 및 週期 (T) 및 水深 (h) 으로부터 그림 5 를 利用하여 海床
 最大流速 U_{bmax} 을 구한다. 潮流速 (Current Velocity) 이 있는 경우에는
 그림 5 에서 얻은 U_{bmax} 이 潮流速 을 더한 값을 사용한다.
- (2) 구조물의 形狀 및 설치방향에 따라 K-C 수 (Keulegan-Carpenter Number) 를
 계산하고 그림 4 및 表 2 에서 최대波力계수 C_f 및 마찰계수 f 를 구한다.
- (3) 式 (2) 으로부터 最大波力 F_{max} 을 구한다.
- (4) $W_{sub} = F_{max}/f$ 으로부터 타이어구조물의 소요수중중량 W_{sub} 을 구한다.
- (5) 구조물의 안정을 위해 차려주어야 할 무게 W_B 를 다음과 같이 결정한다.

$$W_B (\text{타이어당}) = \frac{\text{소요 } W_{sub}}{\text{타이어수}} \quad \text{--- 타이어의 수중중량} \quad (7)$$

6. 結 論

테라이어로 구성된 인공어류서식구조물 (Artificial Reefs) 의 안전한 설계를 위한 공학적 연구가 수행되었다. 대규모 造波水路實驗 (Large-scale Wave Flume Experiment) 에 의해 일함모양의 테라이 구조물에 대한 최대파영계수, 抵抗力 및 慣性力係數 (本橋에서는 그結果의 收錄을 생략하였음) 및 底面摩擦係數가 決定되었다. 最大波力係數는 Keulegan-Carpenter수가 증가함에 따라 最大 40으로부터 最少 1.1까지 逆指數函數로 變化하였다. 細砂와 테라이 구조물간의 마찰계수는 0.75 ~ 1.20의 값을 나타냈으며 테라이의 크기가 증가함에 따라 마찰계수의 값은 減少하는 경향을 보여 주었다. 실험결과를 이용하여 設計波高 (H) 및 週期 (T), 水深 (h) 및 海床物質의 特性이 알려진 지역에서 테라이에 搭載할 所要 무게 (Ballast) 를 決定하는 節次가 提議되었다.

References

1. Stemile, F. W. Jr. and R. B. Stone. 1973. Bibliography on artificial reefs. Coastal Plains Center for Marine Development Services, Wilmington, N. C., U. S. A., 129p.
2. Carlisle, J. G. Jr. and Tuner, C. H. and E. E. Ebert. 1964. Artificial habitat in the marine environment. The Resources Agency of California, Fish Bullitin 124.
3. Parker, R. O. Jr. and Buchanan, C. C. and F. W. Stemile Jr. 1974. How to build marine artificial reefs, Fishery Facts 10, U. S. Department of Commerce, National Ocean and Atmospheric Administration/ National Fishery Service, Seattle, Wa., U. S. A., December.
4. Aska, D. Y., Editor. 1978. Artificial reefs in Florida, Florida Sea Grant College, Report No. 24, May.
5. Moriser, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W. and S. A. Schaaf. 1950. The forces exerted by surface waves on piles. Petroleum Transactions, A. I. M. E., Vol. 189.
6. Sarpkaya, T. 1976. Vortex shedding and resistance in harmonic flow about rough cylinders at high Reynolds numbers. Report No. NPS-59 SL-76021, U. S. Naval Post Graduate School, Monterey, Cal., U. S. A.
7. Grace, R. A. 1976. Near bottom water motion under ocean waves. Proceedings of the 15th Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii, July, pp. 2371-2380.
8. Keulegan, G. H. and L. H. Carpenter. 1958. Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 60, No. 5.
9. Dean, R. G. 1974. Evaluation and development of water wave theories for engineering application. Special Report No. 1, U. S. Army Engineering Research Center, Port Belvoir, Va., Vols. I & III.