

● 論 文

곡면 해양구조물에 작용하는 동파력 고찰

조 철 회*
(95년 9월 11일 접수)

Dynamic Wave Pressure Study on a Recurved Offshore Structure

Chul H. Jo Ph.D*

Key Words : Dynamic Wave Force(동파력), Recurved Structure(곡면 구조물), Initial Shock(1차 충격), Secondary Pressure(2차 압)

Abstract

This study is to investigate the dynamic pressure caused by breaking waves on a recurved offshore structure. A physical modelling was performed in a two-dimensional wave flume. The measurements from the physical modelling were compared with several known equations. The shock and secondary pressures were found to be dependent on water depth, breaking wave height and the size of the air pocket. The maximum pressure was recorded near the still water level and the secondary pressures near the recurved section showed negative values. The study concludes that the maximum shock pressures on the recurved structure were found to be less than those experienced in a vertical offshore structure.

1. 서 론

쇄파(Breaking waves)가 곡면 구조물에 도달한 후 1차 충격이 짧은 시간 가해지고 이 1차 충격 후 바로 2차 충격이 그 뒤를 따르며 이 2차 충격은 1차 충격보다 비교적 긴시간동안 유지된다. 이제까지 알려진 공식은 수직 구조물에 작용하는 1차 충격을 추정하는 것이고, 곡면 구조물에 작용하는

동파력이나 2차 충격을 예측하는 데는 한계를 지니고 있다. 이 연구를 통해 1, 2차 동파력의 크기를 직접 측정하고, 최대 동파력이 작용하는 위치를 조사하였을 뿐만 아니라, 이제까지 알려진 동파력 공식과 실측값을 비교하였다.

현재까지 곡면 구조물에 작용하는 동파력 연구는 많이 진행되지 않았으며 주로 수직 구조물에 작용하는 파력 연구 및 그 결과가 주로 알려져 있

* 정회원-현대중공업 해양사업본부

다. 곡면 구조물에 작용하는 파력을 이론상으로 예측하기란 상당한 어려움이 수반된다. 동파력에 작용하는 변수는 여러 가지이고 이 변수들을 종합하여 한개의 식으로 표현하기란 쉽지 않기 때문이다. 본 논문에서는 이제까지 알려진 수직 구조물에 적용되는 이론식을 사용하여 실험에서 측정된 동파력이 이론과 얼마나 차이를 갖는지 비교하였다. 물론 곡면 구조물에 알려진 파력 공식이 없으므로 수직 구조물에 적용되는 이론들을 이용하였다.

실험은 24개 종류로 나누어, 각 종류별로 3회의 반복 실험이 실시되었다. 실험에 사용된 wave tank는 2-dimensional wave flume이었고 실험에 사용된 파고는 0.058 m 에서 0.098 m, 파 주기는 1.5 에서 2.25 sec 범위 안에서 발생시켰다.

2. 공식 비교

Table 1은 수직 구조물에 작용되는 동파력 추정 공식을 요약해 놓았다. Bagnold (1939)의 공식은 구조물과 쇄파 사이에 갇혀있는 공기 pocket의 응축에 의해 발생하는 충격압을 예측할때 사용할 수 있다. 그러나 가장 널리 사용되고 있는 공식은

Table 1. Summary of Formulas

Author	Formula	Unit
Bagnold(1939)	$P_m = 0.54 \rho \frac{h}{D_i} C^2 - P_0$	(lb/ft ²)
Minikin(1950)	$P_m = 101 Y (d_w + D) \frac{d_2}{D} \frac{H_b}{L_d}$	(lb/ft ²)
Nabai(1960)	$P_m = 300 (0.051 \frac{d_w^2}{D} \frac{H}{L})^{\frac{1}{3}}$	(g/cm ²)
Garcia(1968)	$P_m = 50 Y^{\frac{2}{3}} E_0^{\frac{1}{3}}$	(lb/in ²)
Kamel(1970)	$P_m = \left(\frac{\rho_{sw} C_{sw}}{\rho C_w + \rho_{sw} C_{sw}} \right) \rho$	(lb/ft ²)

Minikin (1950)공식이라 할 수 있다. Minikin (1950) 공식에 따르면 최대 파력은 SWL 근방에서 발생하고 SWL 상하로 갈수록 파력은 포물선형의 형태로 약해진다. 그러나 이 공식 또한 한계가 있다. 이 공식은 차원이 동일하지 않고 구조물 부근의 해저면 모양에 따라 차원이 변화하기 때문이다. Garcia

(1968)에 의해 실시된 실험을 통해 밝혀진 사실은 최대 동파력은 SWL과 쇄파 파봉 사이에서 발생된다는 것이었다. 또한 Garcia (1968)로부터 유도된 파력은 Minkin (1950) 공식으로 유도된 파력과 비슷한 결과를 보여준다.

Garcia (1968)와 Minkin (1950) 그리고 미국 국방해안 공학 연구소 (U.S Army Coastal Engineering Research Center, 1984)의 연구결과를 요약하면 최대 파의 충격압은 수직 구조물이나 곡면 구조물의 SWL 근방에서 발생함을 알 수 있고 2차 파압력의 진행시간이나 그 크기는 모두 비슷하다고 밝히고 있다.

3. 이론전개

쇄파 파력은 운동량 방정식이 적용될 수 있고 그 기본식은 다음과 같이 전개될 수가 있다.

$$F = m a = d(\mu)/dt \tag{1}$$

물체의 질량은 일정하고 이 질량은 밀도 ρ 와 면적 A, 그리고 길이 l을 곱한 것과 같고, 작용하는 힘(F)는 평균압(p)과 작용 면적(A)을 곱한 것이라 할 수 있다. 그러므로 식 (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Pdt = d(\rho l u) \tag{2}$$

작용하는 압력이 상당히 높지 않다면 유체의 압축성은 무시될 수 있다. Kamel (1970)과 Kirkgoz (1982)의 논문에 따르면 큰 차이를 갖는 충격압이 구조물에 작용할 때는 유체의 탄성 (elasticity)을 고려해야하므로 다음과 같은 식이 유도될 수 있다.

$$E = dp / (dl / l) = dp / (d\rho / \rho) \tag{3}$$

(2)를 전개하면 식 (4)가 만들어 진다.

$$P / l dt = u d\rho + \rho du \tag{4}$$

(3)과 (4)를 종합하여 식 (5)가 된다.

$$P / l dt = u \rho/E dp + \rho du \tag{5}$$

정상 상태의 유체의 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$-dp = \rho u du \quad (6)$$

식 (6)과 (5)를 결합하면 식 (7)이 만들어 진다.

$$P / I dt = -\rho^2 / E u^2 du + \rho du \quad (7)$$

파가 갖고 있는 운동량이 초기에 구조물에 충격을 가한 후 최대압(P_m)이 발생하는 시간을 t_m 이라 한다면 그 현상은 Figure 1과 같이 나타날 수 있다. 이때 초기 파속을 U , 파가 쇠파될때 파속을 U_b 그리고 모든 에너지를 손실한 후 u 는 0이 된다.

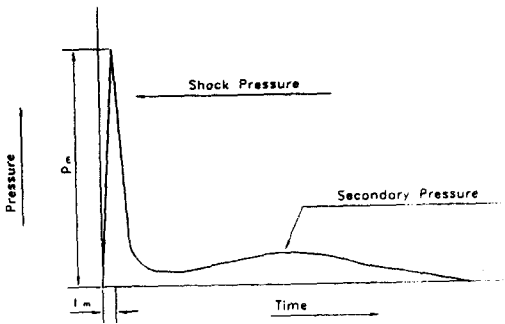


Figure 1. Typical Pressure-Time Curve.

식 (7)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{t_m} \frac{P}{I} dt = - \int_{U_b}^0 \frac{\sigma^2}{E} u^2 du + \int_{U_b}^0 \sigma du \quad (8)$$

P 와 t 는 선형 관계가 성립된다고 가정하고 초기 압력이 구조물에 작용될 때를 $t=0$ 로 하고 최대압이 작용할때 $t=t_m$ 이라 한다면, 식 (9)가 성립된다.

$$\frac{1}{2} \frac{P_m}{I} t_m = \frac{\sigma^2}{3} E U_b^3 - \sigma U_b \quad (9)$$

파압이 구조물에 작용할 때를 고려하여 부호를 바꾸고 식 (9)를 다시 쓰면 식 (10)이 전개될 수 있다.

$$P_m t_m = 2I \left(\sigma U_b - \frac{\sigma^2}{3E} U_b^3 \right) \quad (10)$$

파의 운동을 고려할때 식 (10)의 괄호안에 있는 탄성 부분을 생략하면 식 (11)이 전개될 수 있다.

$$P_m t_m = 2I \rho U_b \quad (11)$$

4. 모형 실험 장치

Physical Modelling은 Froude 상사칙(Froude's scaling law)을 기준으로 제작, 설치되었다. 곡면형 구조물은 Virginia Beach에 사용된 Heimbaugh et al.(1988)의 실제 구조물 형상대로 제작되었고 1:5 scale로 축소시켜 만들어졌다. 모형 실험은 2차원 파동 수조에서 실시되었고 수조의 크기는 길이가 36.6m, 폭 0.61m, 깊이 0.91m였고 Figure 2는 physical model의 실험 장치를 보여준다. 쇠파를 발생시키기 위해 모형 구조물 앞에는 1:10의 저면 경사를 갖는 사면을 만들었다. 수조는 투명한 플라스틱으로 만들어져 있어, 파의 운동을 잘 관찰할 수 있었고, 모형 구조물의 표면은 steel plate로 썬워 많은 실험을 통한 마모나 표면 상태가 바뀌어지는 문제를 없었다. 구조물에 작용하는 파압 측정을 위해 transducer 5개를 구조물의 지정된 위치에 설치하였다. Figure 3은 모델 구조물의 형상, 크기 그리고 transducer가 설치된 위치를 보여준다. Transducer는 Statham PA285TC 절대압 측정기였고 압력 측정범위는 0~344.75 KN/m²로 100% over Pressure 측정기능을 가졌으며 고유 주파수는 8,000 Hz였다.

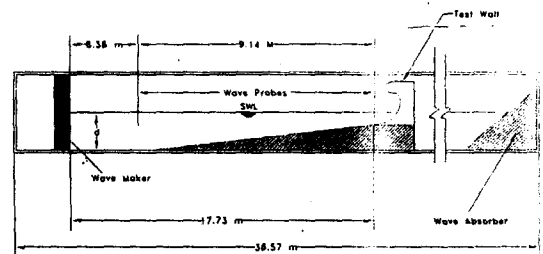


Figure 2. Physical Modelling Set-up.

파는 Seasim 조파기를 사용하였다. 이 Seasim 조파기는 Spectrum Random signal발생이 가능했고, Servo Control Amplifier LSC 24-48 RSW 30-60 paddle이 장착되었다. 파의 특성은 Seasim 자동 보정 파고 측정기와 2개의 파고계를 통해 측정하였다. Wave probe 한개는 조파기로부터 약 8 m 떨어진 곳에 또 다른 하나는 곡면 구조물 모델로부터 0.2032m 떨어진 곳에 위치 시켰다. Figure 2

를 통해 각종 실험장치의 위치를 알 수 있다. 파의 특성과 파압 data는 HP data acquisition system으로 모아졌다. Data 처리에 사용된 장비는 HP 3852A Unit과 HP 44702 high speed voltmeter, HP 44711A multi-plexer 그리고 HP 9000 series 300 컴퓨터였다.

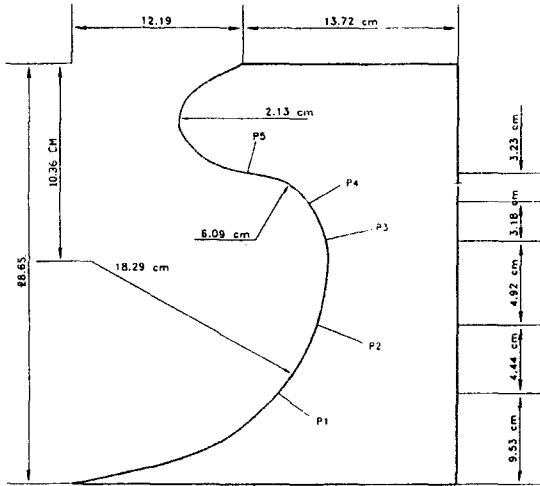


Figure 3. Schematic Diagram of Model Recurved Structur

5. 실험 방법

실험은 24개 종류로 구성되었으며 각 종류별로 세차례의 실험이 실시 됐다. 실험시 수심은 0.61 m 와 0.62 m 두 가지 였다. 실험 종류별로 사용된 입사파의 조건은 Table 2에 수록하였다. 실험에서 측정된 파고(H)를 갖고 USACERC (1984)에 발표된 식을 사용, 파속(L), 파장(C), 심해파의 파고(H_b)와 파장(L_b)을 계산하였다.

모형 구조물 앞에 설치된 파고계를 통해 쇄파 파고(H_b)를 측정하고 모형에 설치된 transducer를 통해 동파력을 측정한 후 조파기를 정지시켰다. 그 후 다음 실험을 위해 flume 내의 파도가 안정될때 까지 기다렸고, 구조물의 표면을 잘 세척하여 thermal drift 현상이 일어나지 않게 하였다. 각 실험이 끝나면 wave probe와 transducer의 손상여부를 점검하고 재차 calibration를 하여 실험에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하기 위해 만전을 기 했다.

실험에 나타난 충격압은 0.01초 사이에 나타나므로 인해 high sampling rate로 data를 받아들여

Table 2. Wave Data Used in Physical Modelling

Test No.	Period T(sec)	Water Depth d(m)	Water Depth at Wal d _w (m)	Wave Length L(m)	Deep Wave Length L ₀ (m)	Wave Celerity C(m/s)	Wave Height H(m)	Braking Wave Height H _b (m)	Deep water Height H _b (m)
1	1.50	0.61	0.044	3.01	3.51	2.00	0.066	0.065	0.072
2	1.50	0.61	0.044	3.01	3.51	2.00	0.078	0.068	0.085
3	1.50	0.61	0.044	3.01	3.51	2.00	0.091	0.081	0.100
4	1.75	0.61	0.044	3.71	4.78	2.12	0.061	0.063	0.066
5	1.75	0.61	0.044	3.71	4.78	2.12	0.073	0.078	0.080
6	1.75	0.61	0.044	3.71	4.78	2.12	0.087	0.097	0.095
7	2.00	0.61	0.044	4.39	6.25	2.19	0.058	0.067	0.062
8	2.00	0.61	0.044	4.39	6.25	2.19	0.069	0.080	0.074
9	2.00	0.61	0.044	4.39	6.25	2.19	0.084	0.072	0.090
10	2.25	0.61	0.044	5.06	7.91	2.25	0.053	0.067	0.055
11	2.25	0.61	0.044	5.06	7.91	2.25	0.061	0.072	0.064
12	2.25	0.61	0.044	5.06	7.91	2.25	0.070	0.084	0.073
13	1.50	0.62	0.054	3.04	3.51	2.03	0.070	0.071	0.077
14	1.50	0.62	0.054	3.04	3.51	2.03	0.084	0.064	0.092
15	1.50	0.62	0.054	3.04	3.51	2.03	0.098	0.078	0.107
16	1.75	0.62	0.054	3.76	4.78	2.15	0.064	0.082	0.070
17	1.75	0.62	0.054	3.76	4.78	2.15	0.077	0.081	0.084
18	1.75	0.62	0.054	3.76	4.78	2.15	0.090	0.096	0.098
19	2.00	0.62	0.054	4.46	6.25	2.23	0.061	0.076	0.065
20	2.00	0.62	0.054	4.46	6.25	2.23	0.072	0.090	0.077
21	2.00	0.62	0.054	4.46	6.25	2.23	0.091	0.097	0.097
22	2.25	0.62	0.054	5.14	7.91	2.29	0.053	0.065	0.055
23	2.25	0.62	0.054	5.14	7.91	2.29	0.0676	0.076	0.070
24	2.25	0.62	0.054	5.14	7.91	2.29	0.073	0.085	0.076

야 하였고 이 조건을 만족시키기 위해 data 전송시 1000 Hz를 사용하였다.

6. 모형 실험 결과 분석

모형 구조물에 작용하는 동파력의 정도는 실험 조건에 따라 다르지만 최대 동파력이 발생하는 시간이나 구조물에 작용하는 위치 그리고 2차 파압 현상등 거의 같은 형태의 현상 및 결과를 보여 주었다. Transducer 3번, 4번, 5번의 2차 파압은 흡입 현상으로 말미암아 negative로 측정되었으며 최대 동파력은 예상했던 대로 정수면 부분에서 주로 발생하였다.

실험을 통해 입증되었듯이 파고 및 수심이 증가할 수록 동파력이 증가하고 1차 동파력이 짧은 시간에 걸쳐 구조물에 작용한 후 바로 2차 파압이 발생되었다. 2차 파압은 주로 transducer 3번, 4번 및 5번에서 나타났으며 구조물이 곡면으로 이루어져 있으므로 흡입력 현상이 발생하여 파압의 수치가 negative를 보여주었다.

7. 기존 이론과 비교

현재까지 알려진 이론들은 수직 구조물에 작용하는 파력 추정시 적용되는 것들이고 이 공식들이 곡면 구조물에 적용될 수 있는지와 그 적용범위 또는 어떤 가이드라인이 소개된 적은 없다. 이 논문에서는 현재까지 알려진 수직 구조물 파력식 Minikin (1950), Nagai (1960), Garcia (1968) 그리고 Kamel (1970)의 이론 및 공식을 이용하여 동파력을 계산 하였고 이 계산값들을 실험치와 비교하였다. Table 3에 각종 이론에 의한 최대 충격압을 요약해 놓았고, Figure 4, 5, 6, 7 에서는 이론치와 실험치를 비교하여 도표화하였다.

Figure 4에 나타나있듯이 Minikin 공식으로 유도된 값들이 실험치와 가장 유사함을 보여준다. Nagai 공식으로 계산된 값들은 주로 파고 H와 깊은 관계를 갖고, Garcia공식은 deep water의 파 에너지와 많은 관계가 있음을 알 수 있다. Kamel 식은 air pocket값을 고려 안 한 이유로 Figure 7에서 보여 주듯이 실험치보다도 큰 값들을 나타낸다.

Table 3에서는 air pocket이 파도와 구조물 사이에 발생하므로 충격에 의한 동파력을 줄일수 있다는 것을 알수있다. 곡면 구조물은 특히 형상이 갖는 특성으로 인해, 수직 구조물보다 많은 air pocket을 발생시키므로 동파력을 줄일 수 있다.

Table 3. Comparison of Maximum Shock Pressure, P_{max} , on Wall

Test Series	Measured (kN/m ²)	Minikin (kN.m ²)	Nagai (kN.m ²)	Garcia (kN.m ²)	Kamel (kN.m ²)
1	0.97	2.19	3.40	64.68	2676.71
2	1.31	2.26	3.59	72.05	2676.71
3	1.79	2.73	3.78	80.28	2676.71
4	1.66	1.87	3.14	67.45	2839.93
5	0.69	2.32	3.33	76.65	2839.93
6	2.21	2.88	3.53	85.95	2839.93
7	1.45	1.44	2.67	70.69	2933.78
8	1.38	1.71	2.83	79.50	2933.78
9	1.21	1.54	3.03	90.60	2933.78
10	1.14	1.19	2.40	70.72	3011.30
11	1.10	1.28	2.52	78.13	3011.30
12	1.24	1.50	2.63	85.21	3011.30
13	1.79	2.82	3.78	67.39	2717.52
14	1.66	2.54	4.02	75.87	2717.52
15	3.72	3.10	4.23	83.91	2717.52
16	1.86	2.56	3.30	70.19	2876.65
17	3.03	2.53	3.51	79.22	2876.65
18	2.34	2.99	3.70	87.77	2876.65
19	1.66	1.91	2.97	72.99	2986.82
20	1.52	2.26	3.14	81.67	2986.82
21	1.66	2.44	3.39	95.32	2986.82
22	1.72	1.44	2.62	70.72	3064.35
23	3.65	1.59	2.84	83.02	3064.35
24	2.41	1.78	2.92	87.57	3064.35

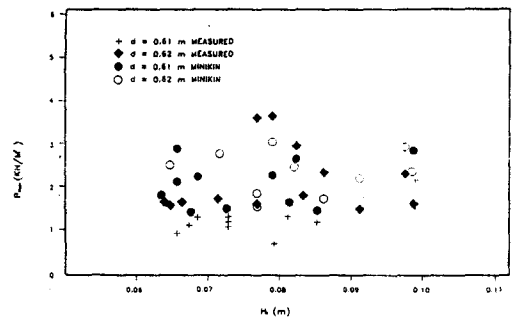


Figure 4. Maximum Shock Pressure vs Breaking Wave Height

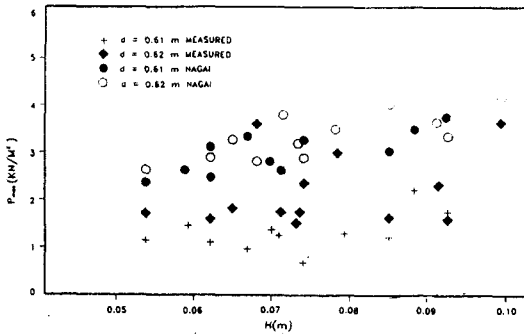


Figure 5. Maximum Shock Pressure vs. Wave Height (Compared with Nagai, 1960).

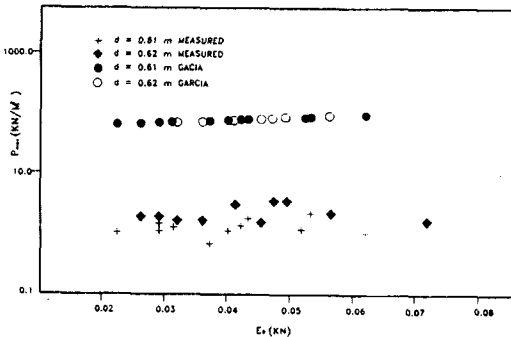


Figure 6. Maximum Shock Pressure vs. Deep Water Wave Energy(Compared with Garcia, 1968)

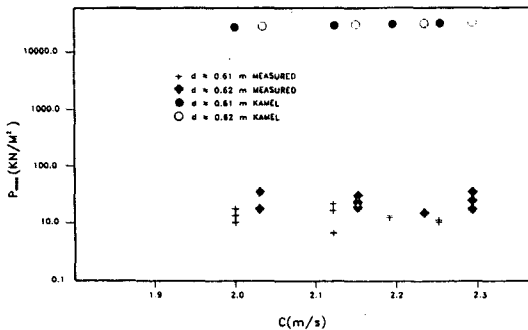


Figure 7. Maximum Shock Pressure vs. Wave Celerity(Compared with Kamel, 1968)

기 이론에 쓰인 기호는 다음과 같다.

- P_m : 충격파압
- H_b : 쇄파 파고
- E_0 : 심해파 에너지
- C : 파속
- H : 파고
- H_0 : 심해 파고
- L_0 : 심해 파장
- L : 파장
- P_s : 2차 파압
- D_T : 공기층 두께

8. 결 론

쇄파에 의해 해양구조물에 발생하는 동파력은 처음 충격 당시 짧은 시간안에 최대값이 발생하고 바로 연이은 2차 파력이 발생된다. 2차 파력은 1차 파력보다 그 크기는 작지만 지속 시간이 길다.

동파력값은 주로 파고(H), breaking 파고(H_b) 그리고 수심(d)에 따라 결정된다. 최대 동파력은 정수면 부근에 설치된 transducer 1 부근에서 발생되었고, 쇄파 파고에 따라 그 값이 변화했다. 쇄파 파고가 증가하면 동파력도 증가하고 그 최대치는 정수면의 조금 위쪽에서 발생되었다.

구조물이 꼭면을 갖는 형태라면 air pocket이 형성되고 이 현상으로 구조물에 작용하는 파력을 줄일수 있다는 것이 입증되었다.

모형에 의한 실험결과와 이제까지 알려진 수직 구조물 파력계산식에서 유도된 파력값을 비교해 본 결과 Minikin 공식에 의한 계산치가 실험결과와 가장 근사한 것으로 판명되었다.

Transducer 3-5번에 측정된 2차 파력은 규칙적으로 negative값을 나타냈으며 꼭면 구조물의 특성에 기인한 흡입력에 그 원인이 있다고 결론지어 진다.

References

[1] Bagnold, R.A. : "Report on Wave Pressure Research", Journal of the Institution of Civil Engineers, No. 12, London, pp. 202 -

- 226, 1939.
- [2] Garcia, W.J : "An Experimental Study of Breaking Wave Pressure", Reserch Report H - 68 - 1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., pp. 3 - 57, 1968.
- [3] Heimbaugh, M.S., Grace, P.J., Ahrens, J.P. and Davidson, D.D. : "Physical Models TEsts of Irregular Wave Overtopping and Pressure Measurements", CERC- 88-1, U.S. Army Waterways Experment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss., pp. 6-30, 1988.
- [4] Kamel, A : "Shock Pressure on Coastal Structures", Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 96, pp. 689-699, WW3, Aug. 1970.
- [5] Kirkgoz, M.S. : "Shock Pressure of Breaking Waves on Vertical Walls", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 108, WW1, pp. 81-95, Feb. 1982.
- [6] Minikin, R.R : "Winds, Waves, and Maritime Structures", Griffin, London, pp. 28- 48, 1950.
- [7] Nagai, S. : "Shock Pressures Exerted by Breaking Waves on Breakwaters", Journal of the Waterways and Harbors Division", ASCE, WW2, pp. 1-38, June 1960.
- [8] U.S. Army Coastal Engineering Research Center : "Shore Protection Manua", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1984.