

## 해양구조물 설계에 있어서 쇄파파력의 영향분석

조 규 남\* · 윤 재 준\*\*  
(95년 10월 30일 접수)

A Study on the Impact Wave Forces for Design of Offshore Structures

Kyu Nam Cho\* · Jae Joon Yoon\*\*

**Key Words** : Breaking wave(쇄파), Wave force(파력), Offshore structure(해양구조물), Early design(초기설계), Impact force(충격하중)

### Abstract

The importance of the impact force on the vertical offshore circular structure member in the surf zone due to the breaking wave has been recognized recently. In this paper characteristics of breaking wave forces and the corresponding estimation procedures for them are investigated.

For the characterization of the wave forces, three parts, drag force, inertia force, impact force are categorized and identified, respectively. Among them the impact force is mainly studied and the concise form of the force is proposed with the application scheme for the design of offshore circular structure member. The resulting form proposed here for impact force is well coincided with former research results by other people.

Except the impact force, so called Morison equation can be employed for the common offshore structure design. The drag force and inertia force are represented as conventionally for the profile except the breaking part. In the numerical example, for typical sea condition and the member size, the proposed procedures for the breaking wave forces calculation are demonstrated. It is found that the impact force is the most dominant one comparing with inertia and drag forces in the surf zone.

\* 홍익대학교 조선해양공학과

\*\* 홍익대학교 조선해양공학과

## 1. 소 개

Harsh Environments에 대처하여 설계되는 해양 구조물은 육상구조물에 비교하여 볼 때 그 구조역학적 해석기술의 정도가 높으며 심도있는 연구가 수행되어져 왔다. 해양구조물의 설계/해석 및 용접의 관점에 있어서 다른 구조물과 다른점은 원형관 이음부와 고장력강의 사용으로 대별된다. 원형구조 부재에 작용하는 외력은 일반적인 경우는 보편적으로 연구되어져 왔으나<sup>1,2)</sup> 쇄파대 내에서의 충격 하중과 이 충격 하중의 구조물에 대한 영향에 관한 연구는 최근에서야 연구 관심사로 부각되었다<sup>3-5)</sup>. 그러나 그 실용성은 아직 입증되어 있지 못하고 있는 실정이다. 연안에 세워지는 해안구조물의 경우나 외해의 쇄파대 형성 지역에 세워지는 해양구조물의 설계 및 해석에 있어서는 쇄파에 대한 연구가 필수적이며<sup>5)</sup>, 급증하는 해양공간 이용에 대한 수요는 특히 쇄파에 의한 충격하중 산정 방법 및 이에 따른 설계 기법 개발의 필요성을 증대시키고 있다. 구조물에 악 영향을 주는 것은 분쇄하기 시작한 권파가 부딪칠 경우 나타나는 강대한 충격 파력의 발생이다. 충격하중의 산출기법과 이를 위한 심해파의 특성파악, 그리고 쇄파이론 모델의 적용기법 등의 개발은 연안구조물과 해양구조물의 최적 설계에 필수적이며 향후 급증하는 해양공간 이용과 다목적 해양기지 건설 등을 위해서 시급히 수행되어야 할 연구과제이다<sup>6,8)</sup>.

## 2. 쇄파의 특성

수심이 원만하게 얕아지는 해안으로 파가 진입해오면, 파장, 파속이 감소하고 파고는 점점 증대한다. 파고가 어느 한계치를 넘게되면 파형을 유지할 수 없게 되어 점점 파가 부서지면서 파고는 급격히 감소한다. 이러한 현상을 쇄파 현상이라고 하는데 이러한 쇄파는 크게 3가지형으로 분류되어 각각 붕괴파, 권파, 쇄기파라고 부른다. 권파는 수심이 비교적 얇고 해저경사가 급한 곳에서 부서지는 경우에 보이는 것으로서 파랑의 전면이 점차로 높이 솟아나서 결국 파봉이 전체로써 전방에 메어 치듯 부수어진다. 구조물에 악 영향을 주는 것은

분쇄하기 시작한 권파가 부딪칠 경우에 나타나는 강대한 충격파의 발생이다. 따라서 파고가 얼마만큼 크게 되어야 파랑이 부수어지는가 하는 것은 상당히 중요하며 많은 이론적 연구가 진행되고 있기도 하지만 워낙 쇄파현상이 극소한 원인에 좌우되기 때문에 현지관측이나 실험에 많이 의존한다. 규칙파의 경우에는 쇄파지점은 거의 일정한데 파고가 부서지기 시작하는 지점을 쇄파지점, 그 지점의 수심을 쇄파 수심, 거기서의 파고를 쇄파고라고 한다. 임의 수심에 대해 부서지기 시작하는 파고를 쇄파한계라고 부른다. 쇄파이론 모델에 의한 파고 변화의 계산은 일반적으로 전자계산기에 의해 연산할 필요가 있으나, 대표적으로 畠田가 제안한 약산식을 사용한다<sup>2,9)</sup>.

### 2.1 쇄파고의 산정

쇄파고의 산정은 아래의 방법에 따라 수행된다.

$$\begin{aligned}
 H_0' &= K_d \cdot K_r \cdot H_0 \\
 T_{1/3} &= T_{(1/3)0} \\
 H_0' &: \text{회절, 굴절을 고려한 환산 심해파} \quad (1) \\
 T_{1/3} &: \text{환산 심해파 주기} \\
 H_0 &: \text{설계 심해파 (유의파고)} \\
 K_d &: \text{회절 계수} \\
 K_r &: \text{굴절 계수} \\
 T_{(1/3)0} &: \text{설계 심해파 주기} \\
 L_0 &: \text{설계 심해 파장} \\
 h &: \text{설계 수심}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{\max} &= \min\{(\beta_0 H_0', \\
 &\quad + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0', 1.8 K_s H_0'\} \\
 &\quad \text{for } h/L_0 < 0.2
 \end{aligned}$$

$$H_{\max} = 1.8 K_s H_0' \quad \text{for } h/L_0 > 0.2$$

여기서,

$K_s$  = shoaling coefficient

$$\beta_0 = 0.052 (H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta]$$

$$\beta_1 = 0.63 \exp[3.8 \tan \theta]$$

$$\beta_{\max} = \max\{1.65, 0.53(H_0'/L_0)^{-0.29}\} \exp[2.4 \tan \theta]$$

2.2 쇄파 파장의 산정

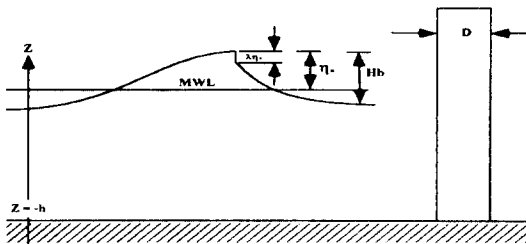
미소 진폭파일 때 파장, 주기, 수심은 다음과 같은 관계식을 이용한다.

$$L_b = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_b}\right) \quad (2)$$

$T$  = 파의주기  $h$  = 수심  $L_b$  = 천해파장

3. 원기둥에 작용하는 쇄파파력의 모델

쇄파대내에 구조물이 있는 경우에는 대단히 충격적인 파력이 작용하는 것으로 예상된다. 일반적으로 원기둥에 작용하는 쇄파 모델을 <그림 1>과 같이 가정하고 이 때의 직방향 파력을 식 (3)과 같이 나타냈다.



<그림 1> 원기둥에 작용하는 전형적인 쇄파 모델

$$F_T = \int_{-h}^{\eta} \frac{\rho}{2} C_D D u^2 dz + \int_{-h}^{\eta} \rho C_M \frac{\pi}{4} D^2 \frac{du}{dt} dz + \int_{(1-\lambda)\eta_0}^{\eta_0} dF_I \quad (3)$$

여기서, 첫번째 항은 항력을 나타내고, 두번째항은 관성력, 그리고 마지막항이 쇄파에 의한 충격파력을 나타낸다. 또한,  $\eta_0$ ,  $\lambda$ 는 <그림 1>에 보이는 바와 같이 쇄파의 전면 직립부에 대한 값이며,  $C_D$ 는 항력계수,  $C_M$ 는 관성력계수,  $u$ 는 수평 물입자 속도,  $D$ 는 해당직경을 의미한다.

3.1 충격 파력 계산을 위한 제안식

식 (3)에서 우변 제 3항은 충격 파력을 나타낸다. 이항은 다음과 같이 해양구조물의 운송시의 슬래밍 해석을 위해 사용했던 식을 적용하여 충격 파력을 계산할 수 있다<sup>(4),5),7)</sup>.

$$F_I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_S \cdot D \cdot u^2 \quad (4)$$

식(4)의  $C_S$ 값은 슬래밍 계수이며 부재의 해수면과의 접촉시 최대값  $\pi$ 를 가지며 침수 단면의 증가에 따라 변한다. 보수적인 초기 설계를 위하여 충격하중 계산시 이 값을 최대값  $\pi$ 로 취할 수 있다<sup>(7),12)</sup>.

3.2 일반적인 점성력 및 항력의 계산

식(3)에서 우변 제1항과 2항은 각각 항력 및 관성력을 나타낸다. 부재가 수면에 직립한 경우, 항력 및 관성력의 합은 물입자 운동 수평성분을 이용하여 파의 작용범위에 걸쳐 적분함으로써 구할 수 있다. 그 때의 최대 파력은 근사적으로 다음식과 같이 표시된다<sup>(1),2),8)</sup>.

$$(F_T)_{\max} = (F_D)_{\max} + \frac{(F_M)_{\max}^2}{4(F_D)_{\max}} : 2(F_D)_{\max} > (F_M)_{\max} \text{ 일때}$$

$$(F_T)_{\max} = (F_M)_{\max} : 2(F_D)_{\max} < (F_M)_{\max} \text{ 일때}$$

(5)

여기서,  $(F_T)_{\max}$ 는 항력과 관성력의 합의 최대값,  $(F_D)_{\max}$ ,  $(F_M)_{\max}$ 는 각각 항력, 관성력의 최대값이다. 해저로부터 수면위까지 직립한 단일 원기둥에 대해,  $(F_D)_{\max}$ ,  $(F_M)_{\max}$  을,

$$(F_D)_{\max} = \omega_0 \cdot C_D \cdot D \cdot H^2 \cdot K_D \quad (6)$$

$$(F_M)_{\max} = \omega_0 \cdot C_M \cdot D^2 \cdot H \cdot K_M \quad (7)$$

과 같이 표시하고  $K_D$ ,  $K_M$ 의 값을 기존의 선도에서 구할 수 있다<sup>(10-12)</sup>.

다른 방법으로 항력과 관성력을 잘 알려진

Morison 방정식을 이용하여 구할 수 있으며 이 경우 더 현실적인 계산이 되겠다. 식(3)으로 표시된 전체 파력을 구하는 방법은 쇄파대내에 위치한 원형 해양구조물부재의 항력, 관성력, 충격파력등 외력 산정을 위해서 매우 효과적인 방법이다.

#### 4. 해양구조물 설계에 있어서 쇄파파력의 영향 분석

##### 4.1 쇄파파력 산정 순서

쇄파대내에서 각종 파력을 받는 수직 원형 해양구조물부재의 파력산정순서는 다음과 같다.

- 1) 굴절, 회절 또는 다른 영향을 받을 때의 쇄파고를 식 (1)과 같이 산정한다.
- 2) 각종 파라미터, 즉 파장, 파속, 해저경사도, 쇄파의 부서지는 높이등을 산정한다.
- 3) 항력과 관성력을 Morison 식을 이용하여 산정한다. 여기서 보수적인 설계를 위하여, 각 파력의 최대값 개념으로 항력과 관성력을 식 (5)을 이용하여 계산할 수 있다.
- 4) 충격파력을 식 (4)에 의하여 산정한다.
- 5) 3)항과 4)항을 사용하여 전체 파력을 산정한다.
- 6) 수직원형 해양구조물부재에 작용하는 전체 파력이 산정되면 이에 기준하여 구조물을 설계한다.

##### 4.2 실제 계산을 통한 쇄파파력의 영향 분석

<표 1>에 주어진 환경 상태에 대해서 위의 과정을 따라 파력등을 계산하면 다음과 같은 결과가 나온다<sup>12)</sup>.

<표 1> Design Condition Case

Significant wave height	14.3 m
Significant wave period	15 sec
Refraction Coefficient	0.9
Diffraction Coefficient	0.9
Design water depth	8 m
Sea bottom slope	1/20
Member Diameter	7 m
Shoaling Coefficient	1.0

· 전체 충격파력계산 ,  $\eta_0 = 6.64$ ,  $\lambda = 0.39$  에 대해서

$$\begin{aligned}(F_I)_{\max} &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_s \cdot D \cdot u^2 \times \eta_0 \times \lambda \\ &= \frac{1}{2} \times 1025 \times \pi \times 7 \times 15^2 \times 6.64 \times 0.39 \\ &= 6578 \text{ KN} = 671 (\text{Ton})\end{aligned}$$

· 항력과 관성력의 계산

$$\begin{aligned}(F_D)_{\max} &= \omega_0 \cdot C_D \cdot D \cdot (H_b)_{\max}^2 \cdot K_D \\ &= 1.025 \times 1.0 \times 7 \times 8.85^2 \times 0.6 \\ &= 338 (\text{Ton})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(F_M)_{\max} &= \omega_0 \cdot C_M \cdot D^2 \cdot (H_b)_{\max} \cdot K_M \\ &= 1.025 \times 2.0 \times 7^2 \times 8.85 \times 0.14 \\ &= 124 (\text{Ton})\end{aligned}$$

For  $2(F_D)_{\max} > (F_M)_{\max}$  ,

$$\begin{aligned}(F_D + F_M)_{\max} &= (F_D)_{\max} + \frac{(F_M)_{\max}^2}{4(F_D)_{\max}} \\ &= 349 (\text{Ton})\end{aligned}$$

· 수직 원형 해양구조물부재에 작용하는 전체 파력 산정

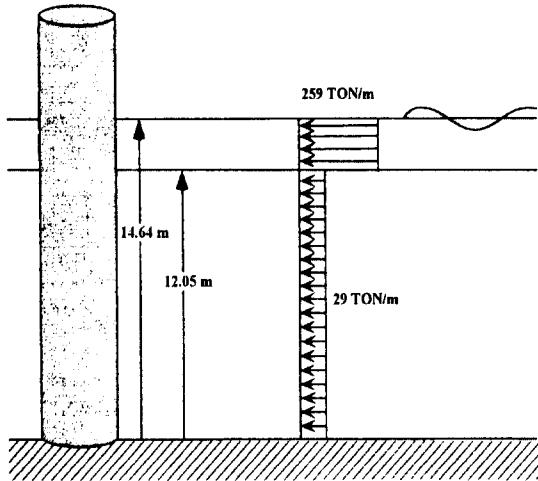
$$\begin{aligned}(F)_{\max} &= (F_D + F_M)_{\max} + (F_I)_{\max} \\ &= 349 + 671 = 1020 (\text{Ton})\end{aligned}$$

위의 파력을 수직으로 세워진 원형 해양구조물에 작용시켜 구조물의 굽힘모멘트, 전단력 등 내부하중을 산정해 보기로 하자.

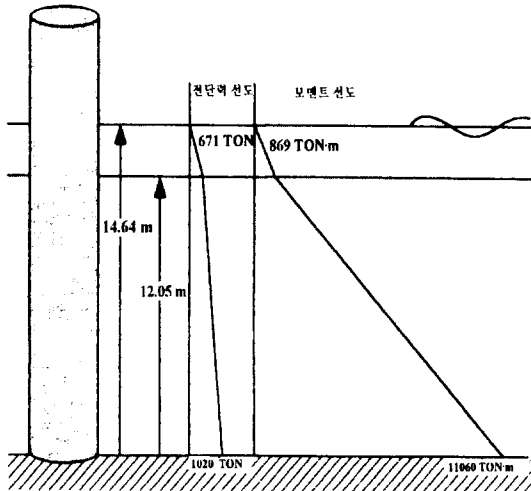
항력 및 관성력의 경우, 적용범위 계산은  $h + \eta_0(1 - \lambda)$ 에 의해서 산정되며 상응되는 값을 계산하면 12.05m이다. 충격파력의 경우는  $h + \eta_0(1 - \lambda)$ 부터  $h + \eta_0$ 까지 이며 상응되는 값은 12.05m에서 14.64m이다.

원형단면의 해양구조물을 외팔보로 생각하여 위의 하중을 분포시키면 <그림 2>와 같이 된다. 외팔보의 경우 굽힘모멘트선도와 전단력선도를 작성

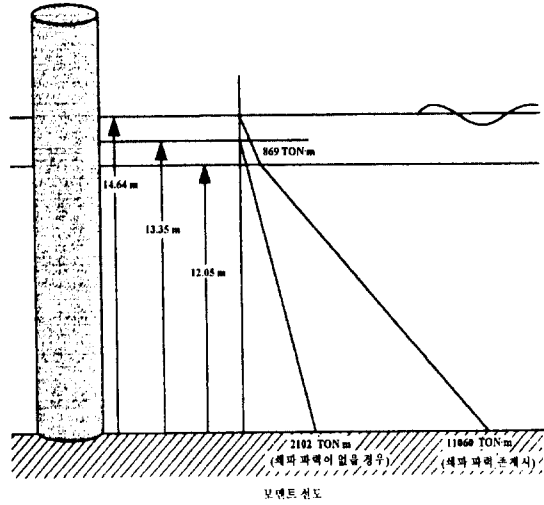
하면 <그림 3>과 같이 되어 굽힘모멘트의 값이 상당히 증가하였음을 알 수 있으며, 단순히 충격하중을 고려하지 않은 경우의 굽힘모멘트값과 충격하중을 포함시킨 굽힘모멘트 값의 비교는 <그림 4>에 나타내었다.



<그림 2> 쇄파발생시 원형단면 해양구조부재에 작용하는 각 하중



<그림 3> 쇄파발생시 원형단면 해양구조부재에 발생하는 전단력 및 굽힘모멘트의 선도



<그림 4> 쇄파파력 유무에 따른 원형 해양구조 부재에 발생하는 굽힘 모멘트의 비교

원형 해양구조부재의 설계시 굽힘모멘트에 의한 굽힘응력과 전단 응력에 관한 사항은 잘 알려진 다음 식에 의해서 산출된다<sup>13)</sup>.

$$\sigma_x = \frac{Mc}{I}$$

$$\tau_{xy} = \frac{4}{3} \frac{P}{A}$$

(하중 P가 외팔보 끝에 수직으로 작용시)

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

(8)

결국 구조부재에 발생하는 주응력 산정시 매우 중요한 굽힘모멘트의 값이 쇄파파력으로 인하여 매우 심각하게 증가하므로 쇄파파력 발생 지역에서의 해양구조물 설계에서는 이 쇄파파력의 정확한 산출이 필수적이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 해양구조물 설계를 위한 해상상태의 특성규명과 환산 설계 심해파 산정기법 및 쇄파 모델의 원형 해양구조물 설계에의 적용문제에

대한 기본적인 연구와 Morison식으로 표현된 일반적인 파력과 쇄파대 내의 충격 파력의 연관성 및 충격 파력의 산출방법 개발 등 응용 연구결과를 보여주고 있다.

특히 쇄파파력의 산정에 대한 지침을 주고 있으며, 이 지침은 해양구조물의 초기 설계시에 적용하여 사용할 수 있겠다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있겠다.

첫째, 쇄파발생지역에서의 해양구조물 설계시에는 쇄파파력의 규명이 매우 중요하다.

둘째, 쇄파파력에 의해 발생하는 하중은 일반적으로 생각하는 파랑 하중과 비교해 볼 때 매우 크게 나타나므로 주요한 설계하중으로 취급해야 한다.

셋째, 해양구조물의 초기 설계에 있어서 본 논문에서 제시된 각종 하중 산정 방법은 초기 설계시 유용하게 적용될 수 있겠다.

- 9) Yoshimi Goda, "Wave Forces on a Vertical Circular Cylinder : Experiments and a Proposed Method of Wave Force Computation", Report of PHRI, 1984
- 10) SNAK, "Introduction to Ship Design and Offshore Structures Design", Dongmyungsa, 1993
11. 김원만 譯, "수리공식집", 건우사, 1983
12. K.N.Cho, "Design of Offshore Circular Structure Member Subjected to Breaking Wave Forces", Proceedings of 9th Technical Exchange and Advisory Meeting 1995, Hiroshima, Japan
- 13 S. Timoshenko, D. Young, "Elements of Strength of Materials", McGraw Hill

## 참 고 문 헌

- 1) C. A. Brebbia, S. Walker, "Dynamic Analysis of Offshore Structures", Newnes-Butterworths
- 2) Yoshimi Goda, "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo Press, 1985
- 3) O. Faltinsen, et al., "Water Impact Loads and Dynamic Response of Horizontal Circular Cylinders in Offshore Structures", OTC 2741
- 4) B. L. Miller, "Wave Slamming Loads on Horizontal Circular Elements of Offshore Structures", RINA 1977
- 5) P. Kaplan, M. N. Silbert, "Impact Forces on Platform Horizontal Members in the Splash Zone", OTC 2498
- 6) K. N. Cho, "Design and Analysis of Offshore Structures", Iljungsa, 1994
- 7) Y. S. Yi, K. N. Cho, "Impact Due to Slamming", HMRI Report, 1988
- 8) D. Y. Kim, K. N. Cho, "Design of Observatory Tower", HMRI Report, 1992