

설계불규칙파중에서 선박의 횡동요에 관한 연구

한주철* · 이승건** · 하태필***

*부산대학교 조선해양공학과

A Study on the Roll Motion of a Ship in a Transient Irregular Wave

Ju-Chull Han* · Seung-Keon Lee** · Tae-Phil Ha***

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

요 약 : ISSC 스펙트럼을 기초로 종래의 불규칙파가 아닌 새로운 과도 불규칙파를 설계하였다. 이 설계불규칙파를 장수조에서 조파기를 사용하여 발생시키고, 파고계와 6자유도계를 설치하여서 모형선의 횡동요 운동을 계측하였다. 모형선의 최대 횡동요각의 실험값과 이론값을 비교하여 단기 해상에서 발생 가능한 횡동요 피크치를 추정하는 방법에 관하여 검토하였다.

핵심용어 : 유의파고, 평균주기, 설계불규칙파, ISSC 스펙트럼, 횡동요운동

Abstract : A transient irregular wave was designed based on ISSC spectrum. The designed wave was generated in the towing tank and the roll motion of a model was measured. A method to predict the maximum roll motion, expected in the short-term sea state, was investigated with comparison of the theoretical and experimental results.

Key words : Transient irregular wave, ISSC spectrum, Rolling motion, Significant wave height, Mean period

1. 서 론

조선공학이 발전할수록 여러 분야에서 선박의 이용은 매년 증가 추세에 있고, 이에 따라 해상에서의 횡동요운동은 승선자의 안락함과 안전, 화물 손상의 관점에서 중요한 의미를 갖는다. 그리고 이러한 횡동요를 발생시키는 해양파는 순간적으로 배를 전복시킬 정도의 큰 파를 형성하기도 한다. 불규칙파의 특성으로부터 위상을 조절하여서 최대횡동요를 발생시키는 설계 불규칙파를 사용하면 짧은 시간내에 최대파고와 선박의 최대횡동요각을 추측할 수 있어 기존의 연구방법과 비교하였을 때 매우 유용하다. 본 논문에서는 ISSC스펙트럼으로부터 Transient Wave를 생성하여 선박의 횡동요운동을 이론적으로 시뮬레이션 하였고, 토잉탱크내에서 직접 불규칙파의 데이터를 조파기에 입력하여서 파고와 모형선의 횡동요운동을 계측하였고 이론과 실험 각각의 불규칙파의 최대파고와 횡동요운동의 최대각을 비교하여 보았다.

$$S(\omega) = 0.11 \frac{H_{1/3}^2 T}{2\pi} \left(\frac{T\omega}{2\pi}\right)^{-5} \exp\left(-0.44 \left(\frac{T\omega}{2\pi}\right)^{-4}\right) \quad (1)$$

ω 는 원진동수로서 $2\pi/T$ 이다. 해면의 높이 ζ 는 수많은 조화 파형의 합의 극한으로서 다음식과 같이 된다.

$$\zeta(t) = \lim_{\omega_n \rightarrow \infty, \delta\omega \rightarrow 0} \sum_{n=1}^{\infty} \cos[\omega_n t + \epsilon(\omega_n)] [2S_{\zeta}(\omega_n) \delta\omega]^{1/2} \quad (2)$$

식(2)에서 ω_n 은 $n \times \omega$ (n 은 정수), $\epsilon(\omega_n)$ 은 위상차이고 $[2S_{\zeta}(\omega_n) \delta\omega]^{1/2}$ 은 성분파의 진폭이다. 스펙트럼에서 성분파들의 진폭을 표현할 때에 $\delta\omega \rightarrow 0$ 이고 파 성분의 수가 ∞ 이면 정확하게 표현 가능하지만, 파 성분의 수를 20개로 가정하여도 해양파를 수학적으로 표현하는 데 무리가 없다.

3. 설계 불규칙파

소성파의 위상을 랜덤으로 취하여 불규칙파의 최대파고가 발생하기까지는 실험적으로 상당히 긴 시간이 걸려서 효율적이지 않다. 그러나 위상을 조절하여서 횡동요운동의 식으로부터 최대 횡동요각이 식(25)의 $t'=0$ 에서 발생하도록 하면 이론적으로 유

2. ISSC 스펙트럼

유의파고 $H_{1/3}$, 평균주기 T 를 갖는 ISSC 스펙트럼(N. Eartrop, 1998)은 다음과 같다.

* 대표저자 : 한주철(정회원), louisdiior@hanmail.net, 051)510-2735
** 종신회원, leesk@pusan.ac.kr, 051)510-2441

의파고와 평균주기를 가지는 불규칙파의 최대파고를 생성가능하며 시뮬레이션으로 최대횡동요각도 알 수 있고 실험적으로도 조파기에 데이터를 입력하여서 모형선이 최대파고가 발생하는 지점에 위치시켜서 최대횡동요각을 측정할 수 있다. 따라서 새로운 방식을 통하여 짧은 시간에 선체에 발생하는 최대파고와 선체의 최대횡동요각을 찾을 수 있어서 매우 유용한 방법이 될 수 있다. 설계불규칙파를 생성하는 목적은 단기 해상중에서 선박이 횡동요 피크치가 생길 것 같은 불규칙파를 설계하고 횡동요 운동의 시뮬레이션을 수행하여 최대 횡동요각을 찾는 것이다.

3.1 선형 횡동요 운동방정식

6자유도 운동이 연성이 없다고 가정하면 선형 횡동요 운동방정식(R. Battachayya, 1978)은 아래와 같다.

$$I \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + B_e \frac{\partial \phi}{\partial t} + W \overline{GM} \phi = M \quad (3)$$

ϕ : 횡동요각

I : 부가관성 모멘트를 포함한 횡동요관성모멘트

B_e : 등가선형감쇠계수

W : 중량

\overline{GM} : 복원력계수

M : 횡동요외력모멘트

횡동요외력모멘트는 산란에 의한 성분은 무시하여 입사파의 속도포텐셜에 외력인 Froude-Kryloff힘만을 고려하였다. 선체의 횡방향에서 진행하여 오는 횡파(Beam seas)를 생각하고 수면과 선체중심선과의 교점을 원점으로 하여 x 축을 선체의 폭방향으로 y 축을 선체의 연직 아래 방향으로 한다. 규칙파의 속도포텐셜은 아래와 같다.

$$\Phi = \frac{\omega}{k} \zeta_0 e^{-ky} \sin(kx - \omega t) \quad (4)$$

식(4)으로부터 파에 의한 변동압력은 다음과 같다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho g \zeta_0 e^{-ky} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

ω : 규칙파의 원진동수

κ : 규칙파의 파수

ζ_0 : 규칙파의 진폭

또한 식(4)으로부터 파면은 다음과 같다.

$$\zeta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \zeta_0 \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

그리고 선체단면에서 바깥 방향의 법선벡터를 \vec{n} 으로 하였을 때 입사파의 압력에 의한 횡동요모멘트의 식은 다음과 같다.

$$M = \int_C p (mx - ly) ds \quad (7)$$

$$lds = -dy \quad (8)$$

$$mds = dx \quad (9)$$

$$M = \int_{-B/2}^0 px dx + \int_0^{B/2} px dx + \int_0^d py dy + \int_d^0 py dy \quad (10)$$

여기에 위의 압력공식을 다음과 같이 대입한다.

$$p = \rho g \zeta_0 e^{-xy} \{ \cos(kx) \cos(\omega t) + \sin(kx) \sin(\omega t) \} \quad (11)$$

$$M = M_C \cos(\omega t) + M_S \sin(\omega t) \quad (12)$$

횡동요모멘트의 식은 코사인항과 사인항으로 분리할 수 있고, 각각의 계수항은 다음의 적분식으로 정리된다.

$$M_C = \rho g \zeta_0 \left[\int_{-B/2}^0 x e^{-xy} \cos(kx) dx + \int_0^{B/2} x e^{-xy} \cos(kx) dx + \int_0^d y e^{-xy} \cos(kx) dy + \int_d^0 y e^{-xy} \cos(kx) dy \right] \quad (13)$$

$$M_S = \rho g \zeta_0 \left[\int_{-B/2}^0 x e^{-xy} \sin(kx) dx + \int_0^{B/2} x e^{-xy} \sin(kx) dx + \int_0^d y e^{-xy} \sin(kx) dy + \int_d^0 y e^{-xy} \sin(kx) dy \right] \quad (14)$$

위에서 코사인항은 서로 상쇄되면서 $M_C=0$ 이다. 결국 사인항인 M_S 의 값만 유효하여 아래와 같은 수식으로 표시된다.

$$M_S = 2 \rho g \zeta_0 \left[\int_0^{B/2} x e^{-xy} \sin(kx) dx - \int_0^d y e^{-xy} |\sin(kx)| dy \right] \quad (15)$$

일반적으로 선체의 중앙단면부의 형상은 장방형에 가까우므로 선체형상을 Boxbarge로 가정하여서 횡동요모멘트를 추정할 수 있고, 위의 적분식에서 $y=d$ 로, $x=B/2$ 로 할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_S &= 2 \rho g \zeta_0 e^{-xd} \int_0^{B/2} x \sin(kx) dx - 2 \rho g \zeta_0 \sin\left(\frac{xB}{2}\right) \int_0^d y e^{-xy} dy \\ &= 2 \rho g \zeta_0 e^{-xy} \left\{ \left[\frac{-x \cos(kx)}{k} \right]_0^{B/2} - \int_0^{B/2} \frac{-\cos(kx)}{k} dx \right\} \\ &\quad - 2 \rho g \zeta_0 \sin\left(\frac{xB}{2}\right) \left\{ \left[\frac{-ye^{-xy}}{x} \right]_0^d - \int_0^d \frac{-e^{-xy}}{x} dy \right\} \quad (16) \end{aligned}$$

위 식을 적분하고 정리하면 아래와 같다.

$$M_S = 2\rho g \zeta_0 e^{-xd} \left[-\frac{B}{2x} \cos\left(\frac{xB}{2}\right) + \frac{\sin\left(\frac{xB}{2}\right)}{x^2} \right] - 2\rho g \zeta_0 \sin\left(\frac{xB}{2}\right) \left[\frac{-de^{-xd}}{x} - \frac{e^{-xd}}{x^2} + \frac{1}{x^2} \right] = \frac{2\rho g \zeta_0}{x^2} \left[e^{-xd} \left\{ -\frac{xB}{2} \cos\left(\frac{xB}{2}\right) + (2+xd) \sin\left(\frac{xB}{2}\right) \right\} - \sin\left(\frac{xB}{2}\right) \right] \quad (17)$$

3.2 횡동요운동과 횡동요외력

앞절에서의 횡동요외력모멘트 성분인 우변은 sin 성분만 남아 선형횡동요운동방정식은 다음과 같다.

$$I \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + B_e \frac{\partial \phi}{\partial t} + W \overline{GM} \phi = M_S \sin(\omega t) \quad (18)$$

ϕ 를 식(19)로 가정하면 식(20)과 식(21)을 구할 수 있다.

$$\phi = \phi_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (19)$$

$$\dot{\phi} = -\omega \phi_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \quad (20)$$

$$\ddot{\phi} = -\omega^2 \phi_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (21)$$

식(18)의 운동방정식에 다시 대입하여서 전개한다.

$$-I\omega^2 \phi_0 \cos(\omega t) \cos(\varepsilon) - \sin(\omega t) \sin(\varepsilon) - B_e \omega \phi_0 \sin(\omega t) \cos(\varepsilon) + \cos(\omega t) \sin(\varepsilon) + W \overline{GM} \phi_0 \cos(\omega t) \cos(\varepsilon) - \sin(\omega t) \sin(\varepsilon) = M_S \sin(\omega t) \quad (22)$$

여기서 우변에는 sin 성분만 있으므로, 좌변의 $\cos(\omega t)$ 의 계수는 0이 되어야 한다.

$$-I\omega^2 \cos(\varepsilon) - B_e \omega \sin(\varepsilon) + W \overline{GM} \cos(\varepsilon) = 0 \quad (23)$$

단순한 tan 식으로 표시하면

$$\tan(\varepsilon) = \frac{W \overline{GM} - I\omega^2}{B_e \omega} \quad (24)$$

여기서 위상차 ε 을 알 수가 있다. 시간 t 를 t' 의 식으로 변환하여 표시하면

$$t' = t + \frac{\varepsilon}{\omega} \quad (25)$$

식(25)를 대입하여 파면, 횡동요운동, 횡동요외력의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\zeta = -\zeta_0 \cos(\omega t' + \varepsilon) \quad (26)$$

$$\phi = \phi_0 \cos(\omega t') \quad (27)$$

$$M = M_S \sin(\omega t' - \varepsilon) \quad (28)$$

시각 $t' = 0$ 에서 횡동요운동이 최대가 된다.

3.3 설계 불규칙파

ISSC 스펙트럼의 식으로부터 불규칙파의 시계열을 생성한다. 스펙트럼으로부터 불규칙파를 생성하기 위해서는 주파수 범위를 일정 간격으로 분할하고 각각의 분할폭의 중심 주파수에서 규칙파를 적당한 위상으로 중첩하여 위상은 최대횡동요운동이 최대가 되도록 취한다. 위상과 파면의 관계식은 다음과 같다.

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2 S(\omega_i) \Delta \omega} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (29)$$

4. 실험결과

Design Wave로부터 설계불규칙파를 생성하고 지정된 위치에서의 설계불규칙파의 시계열을 구한다. 설계불규칙파를 만들기 위하여 모형선이 있는 위치에 파고계를 설치하고 파고를 계측한다. 계측된 파고의 시계열을 역으로 재생하고 그것을 조파신호로 하여 조파기를 움직이면 파고계를 설치한 위치에서 원하는 설계불규칙파를 만들 수 있다.

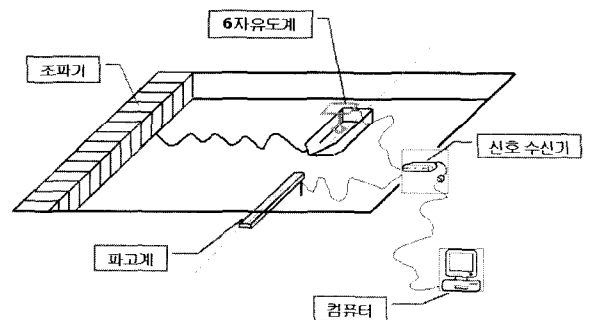


Fig. 1 System of Experiment

실험은 6자유도계를 장착한 모형선을 조파기로부터 8m 거리에 위치시키고 동일 선상에 파고계를 설치하고 이들로부터 받는 신호를 컴퓨터에서 데이터를 받도록 하였다. 측정값의 정확도를 위하여 실험을 수행하기 이전에 Calibration을 실시하게 되

는데 여기서는 파고와 횡동요각을 계측하는 장비가 사용되어진다. 파고의 경우는 일정한 간격(1 cm)으로 파고계를 설치하여 각각의 전기적 신호를 읽어서 기록해 둔다. 이 결과를 근사법에 의하여 1차식으로 나타내면 실험에서 파고계에 작용하는 파고에 의하여 얻어지는 전기적 신호로부터 파고를 읽을 수 있다. 횡동요각에서는 디지털틀계측기를 6자유도계에 부착하여서 얻어지는 각도(1°~30°)의 전기적 신호를 일정 간격으로 컴퓨터에서 읽는다. 이것을 수식(1차식)으로 근사하면, 이후에 실험에서 얻어지는 횡동요각을 실시간으로 읽을 수 있다. 신뢰도를 더욱 향상시키기 위하여 모형선에 6자유도계와 디지털틀계측기를 장치하고, 모형선의 현측에 일정한 간격의 각각의 경사각의 표시를 한 후, 실제 수조에서 모형선을 표시된 경사각까지 기울인 이후에 컴퓨터에서 읽은 횡동요각과 디지털틀계측기의 값이 모형선에 표시한 횡동요각과 맞는지 확인을 하면 된다.

Table 1 Principal dimension of ship

	Model	Ship
LENGTH O. A.	2 m	35.350 m
LENGTH B. P.	1.5 m	26.500 m
BREADTH (MLD)	0.39 m	6.900 m
DEPTH (MLD)	0.147 m	2.600 m
DESIGN DRAFT (MLD)	0.125 m	2.210 m
DISPLACEMENT	46.36 kg	256 ton

실험에서 사용한 모형선의 실선은 69 ton 급 근해 안강망 어선을 사용하였고, 주요 제원은 Table 1과 같다(모델 축척비=1:17.7). 수조는 길이, 폭, 깊이가 각각 100 m, 8 m, 3.5 m 이며 6자유도계는 좌우 최대각 30도까지 측정 가능한 6-DOF Motion Measuring Device이다. 모형선의 Heave는 Free 상태로 하였고 실험전에는 파고계와 6자유도계의 Calibration을 하여서 신호값과 실제값의 오차가 없도록 하였다. 횡동요각과 파고는 AD Converter 장치로 아날로그 신호로 0.01 sec 간격으로 측정하였다. 유의파고 7 cm에서 평균 주기 2 sec, 3 sec의 파고와 횡동요각의 결과를 각각 비교해 본다.

4.1 생성파와 횡동요각의 비교

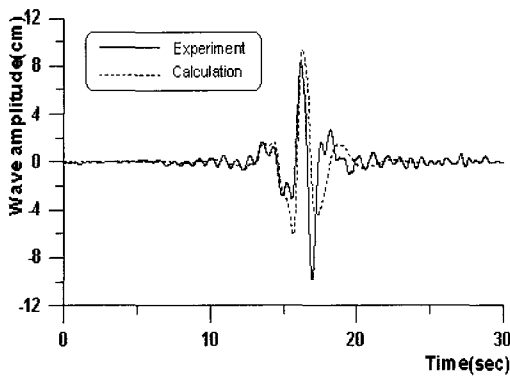


Fig. 2 Wave amplitude ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 2 sec)

Fig.2는 유의파고 7cm, 평균주기 2sec에서 실험값인 실선이 이론값 점선보다 최대진폭값이 근사하게 나타났고 이러한 오차의 원인으로서는 조파기 성능의 한계로 파의 고주파 영역을 정확하게 표현할 수 없는 영향이 있기 때문이다.

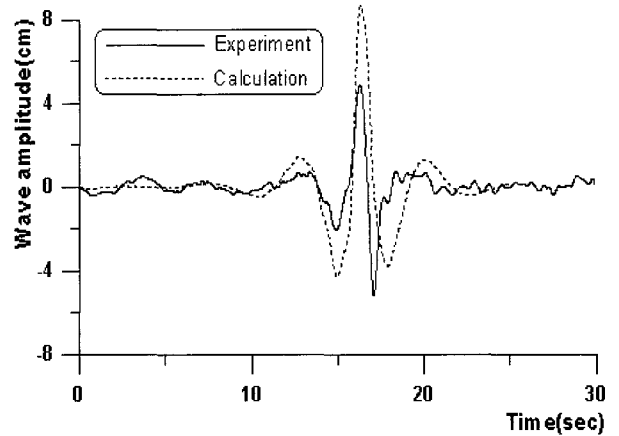


Fig. 3 Wave amplitude ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 3 sec)

Fig.3은 유의파고 7 cm, 평균주기 3 sec에서 실험값인 실선이 이론값 점선보다 최대진폭값이 차이가 크게 나타났는데 그것은 평균파 주기가 증가되어 3 m인 수조의 깊이보다 긴 장파들이 진행하면서 심해조건을 만족하지 못하여 천수의 영향으로 감소되었다.

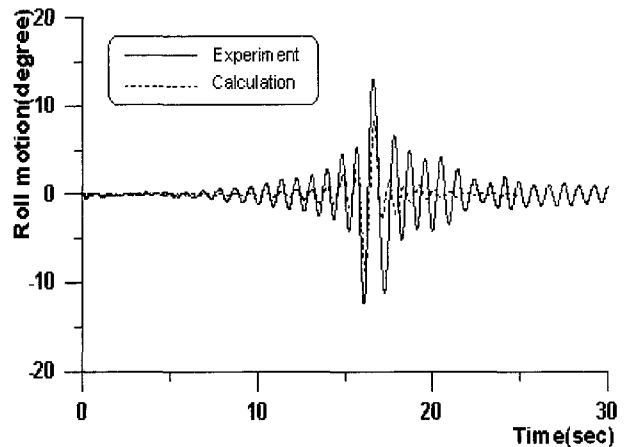


Fig. 4 Roll motion ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 2 sec)

Fig.4는 유의파고 7 cm, 평균파주기 2 sec에서 실험과 이론에서 횡동요각을 비교한 것인데 실선인 실험의 횡동요 피크값이 점선인 이론값보다 더 크게 나타났는데 이것은 Fig.2의 이론과 실험에서 구한 파고의 차이에서 생기는 오차일 수 있고, 이론에서의 Boxbarge로부터 실선의 Damping 계수를 구하는 추정식의 계수가 실제 모형선의 값과 차이가 있을 수 있으며 비선형 감쇠 계수를 포함하지 않아서 생기는 오차일 수 있다.

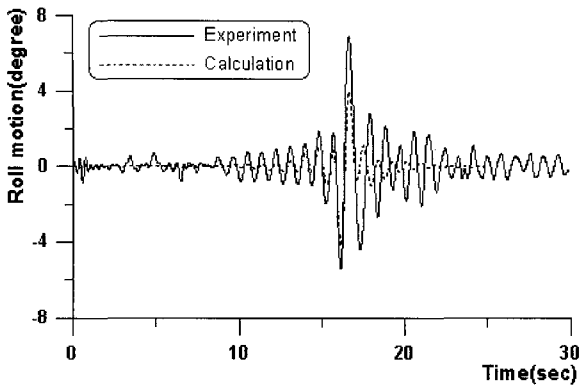


Fig. 5 Roll motion ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 3 sec)

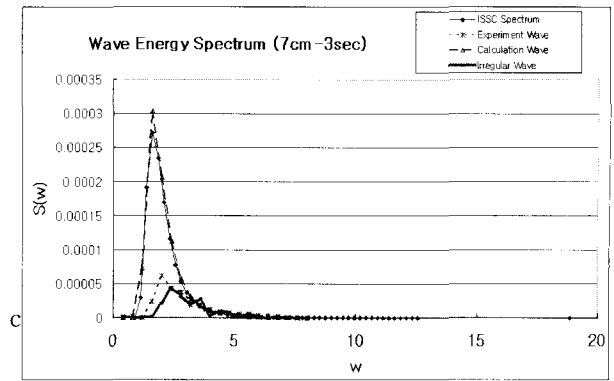


Fig. 7 Wave spectrum ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 3 sec)

Fig.5는 유의파고 7 cm, 평균파주기 3 sec에서 최대 횡동요각의 비교이며, Fig.4와 같은 이유로 실험값과 이론값의 오차를 보았다. Diffraction 힘의 도입과 순간 흡수를 고려한 비선형 계수들을 포함하게 되면 실험과 더 가까운 값을 얻을 것으로 기대된다

4.2 파 스펙트럼의 비교

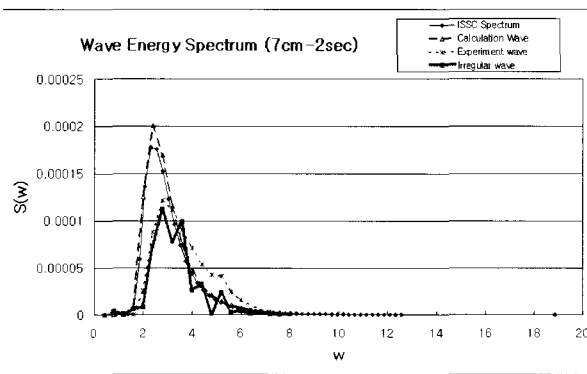


Fig. 6 Wave spectrum ($H_{1/3}$: 7 cm, T: 2 sec)

Fig.6은 ISSC 스펙트럼, 스펙트럼으로부터 생성된 이론적인 불규칙파(Calculation Wave)의 스펙트럼, 이론적인 불규칙파를 실험에서 조파기에 입력하여 측정한 파(Experiment Wave)의 스펙트럼, 그리고 위상을 랜덤으로 하였을때 장시간 측정한 불규칙파(Irregular Wave)의 스펙트럼을 비교하였다. Calculation Wave를 푸리에 변환을 통하여 얻은 스펙트럼 값이 ISSC 스펙트럼 값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. Experiment Wave의 스펙트럼은 이론의 값과 피크값이 차이가 나타나는데 이것은 천수의 영향으로 장주기 파가 감소되고, 파가 진행하면서 원래 가지고 있던 파의 에너지가 감소되어서 전체적으로 이론값보다는 작은 값을 보인다.

Fig.7에서 ISSC 스펙트럼과 Calculation Wave의 값은 잘 일치함을 알 수 있으나 실험값인 Experiment Wave의 스펙트럼과는 큰 차이를 보여준다. 평균주기의 증가에 따른 장주기 파의 천수 영향이 더 크게 작용한 것이 이유가 될 수 있다. Irregular Wave의 스펙트럼은 앞의 경우와 마찬가지로 실험값의 스펙트럼과 비슷하게 나타나지만 이론값과는 차이가 있다.

4.3 횡동요각의 최대치 비교

유의파고는 7 cm, 평균파주기는 2 sec, 3 sec으로 하였을 때의 각각의 이론과 실험값에서 비교를 하였다. 최대 파고값(H_{max})과 최대 횡동요각(Rollmax)의 이론치와 실험치를 유의파고($H_{1/3}$)와 평균주기별(T)로 비교한 그래프는 다음과 같다.

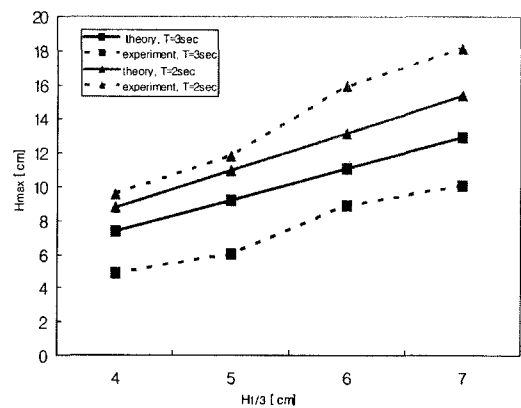


Fig. 8 Comparison of maximum wave height

Fig.8에서 유의파고를 4 cm에서 7 cm로 증가함에 따라 최대 파고가 증가하였고, 일정한 유의파고에서 평균파주기를 0.2 sec에서 0.3 sec로 증가함에 따라 최대파고가 감소하였다.

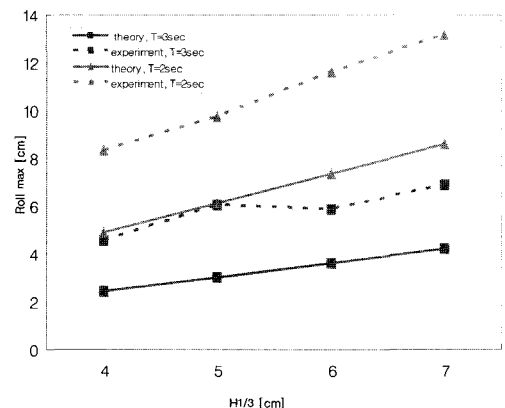


Fig. 9 Comparison of maximum roll angle

Fig.9에서 유의파고를 4 cm에서 7 cm로 증가함에 따라 최대 횡동요각이 증가하였고, 일정한 유의파고에서 평균파주기를 0.2 sec에서 0.3 sec로 증가함에 따라 최대횡동요각이 감소하였다.

5. 결 론

본 논문에서 제안하는 방법으로 설계 불규칙파의 위상을 조절 하여 짧은 시간내에 파도 불규칙파를 생성할 수 있고, 이에 상응 하는 최대 횡동요각을 찾을 수 있다. 본 연구 결과, 이론적 추정 치와 실험치의 차이는 이론식이 Boxbarge 근사에 의한 것파 조 파 과정에서의 오차 등으로 생각된다. 앞으로는 실제 선형에 대 한 이론의 개발과 실험 정도의 향상에 중점을 두어야 할 것이다.

6. 후 기

본 연구는, 첨단 조선공학 연구센터를 통한 한국 과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Bhattacharyya, R.(1978) "Dynamics of Marine Vehicles" A Wiley-Interscience Publication.
- [2] Bartrop, N.(1998) "Floatig Structures: a guide for design and analysis" CMPT.

원고접수일 : 2004년 2월 5일

원고채택일 : 2004년 5월 6일