

실선시험기법을 이용한 다방향파중에서의 선박의 응답추정법

조 효 제* · 강 일 권** · 김 중 철***

(98년 2월 2일 접수)

Ship Response Estimation Method in Multi-directional Waves using Real Sea Experiments

Hyo-Jae Jo* · Il-Kweon Kang** · Jong-Chul Kim***

Key Words : Real Sea Experiment(실해역 실험), Multi-directional Wave(다방향파), Frequency Transfer Function(주파수 전달함수), Following Sea(추파)

Abstract

In this study, the frequency transfer function of motions are predicted from the result of a full-scale seakeeping trials. Because the real sea has the characteristics of multi-directional waves, we compare the results in the one directional waves with ones in the directional waves. For calculation of the frequency transfer function in the directional waves, Takezawa's inverse estimation method was introduced and the frequency ranges were divided into three parts in order to consider following seas.

The full-scale seakeeping trials was executed in the south sea of Korea using the stern trawler. Those results show that analysis method of the multi-directional waves is more reliable than that of one directional waves, and confirm the possibility of applying this method to the full-scale seakeeping trials.

1. 서 론

선박 고유의 운동특성치는 주파수 전달함수(Frequency Transfer Function)로 표현할 수 있는데, 일반적으로 이론해석, 수조모형 시험 및 실선시험 등으로부터 얻어진다. 그러나, 실선의 주파수 전

달함수는 모형선이나 이론추정으로 얻어지는 전달함수와는 부가물이나 화물의 적재 상태 등의 차이로 인하여 다소 다른 값을 가질 수 있고, 따라서 실선 고유의 주파수 전달함수는 실선시험 결과로부터 정밀하게 추정하는 것이 가장 바람직하다.

실선 운동성능 실험을 통하여 주파수 전달함수

* 종신회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

** 경상대학교 해양과학대학

*** 국방과학연구소

를 추정할 경우 실제 해상 파랑에 대한 정확한 정보가 필수적으로 요구되나, St. Denis & Pierson 이 선박운동 추정에 실제해상의 파랑을 단방향파로 가정하여 적용한 이후 근래에까지 단방향파 해석방법이 보편적으로 적용되고 있는 실정이다^{1),2)}.

그러나, Longuet-Higgins가 다방향파 측정기법에 대한 연구를 시작한 이래, 방향파 관측기법이 지속적으로 연구되어 Heave/Pitch/Roll 부이식 관측방법, 어레이식 관측방법(Wave Measuring Arrays), 레이더 파고 관측방법(Radar Techniques) 및 항공기를 이용한 사진촬영 방법 등이 발달되어, 실제의 해상상태는 다방향의 파랑성분이 중첩된 다방향파(Multi-Directional Waves)임이 확인되었다^{3),4)}. 따라서, 실선 운동성능 실험분석시 실험해역의 파랑을 단방향파로 가정하고 주파수 전달함수를 추정하는 방법은 상당한 오차를 포함하고 있을 것으로 판단된다.

다방향파를 적용한 주파수 전달함수 도출기법에 대한 연구는 Takezawa, Mynett등이 다방향 수조 모형 시험 결과를 분석하는 기법으로 제시하고 있으나, 다방향파의 주 진행방향이 향파(Head Seas)인 경우로 제한되어 있는 실정이다^{5),6)}. Kim등은 다방향파중에서의 실선 운동을 이론적으로 시물레이션 하여 그 결과로부터 주파수 전달함수를 추정하는 기법을 제시하고, 추파중에서의 전달함수까지도 추정할 수 있음을 보여주었다⁹⁾.

본 연구에서는 Kim등이 제시한 방법에 실험역 실선 실험결과를 직접 적용하여 실선의 주파수 전달함수를 추정하였다. 추정 기법으로는 Takezawa의 역추정법을 이용하여 전 입사각에 적용할 수 있도록, 주파수 영역을 3영역으로 구분하여 취급함으로써 추파(Following Seas)범위를 포함한 주파수 전달함수의 도출이 가능하도록 하였다. 실험역 실험은 소형 선미식 트롤선을 이용하여 우리 나라 남해안에서 수행하였고, 명확한 응답특성을 파악하기 위하여 비교적 거친 해상상태를 선정하였다. 해상 파랑을 단방향로 간주하여 응답함수를 추정하는 기존의 방법과 본 연구에 의한 추정방법을 비교하기 위하여 기존의 단방향파 분석방법과 다방향파 분석방법을 적용하여 그 결과를 비교검토 하였다.

2. 다방향파의 표현

실제 해상의 파랑은 단방향파(장파정파)라는 가정과는 달리 주요한 방향을 가진 주방향파(Dominant Waves)와 각 방향의 성분파(Component Waves)가 공존하고 있어 다방향파로 가장 유사하게 표현할 수 있다. 따라서, 다방향파는 서로 다른 방향 및 주파수성분을 가진 규칙파들의 선형 중첩으로 표현 가능하므로 임의의 위치에서의 수면변위 $\zeta(x, y, t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다^{7),8)}.

$$\zeta(x, y, t) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A \cos \{kx \cos \theta + kysin \theta - \omega t + \varepsilon(\omega, \theta)\} \quad (1)$$

여기서, $A = \sqrt{2S(\omega, \theta) du d\theta}$, $S(\omega, \theta)$ 는 파랑의 방향스펙트럼, k 는 파수(Wave Number)이며, $\varepsilon(\omega, \theta)$ 는 $0 \sim 2\pi$ 사이에서 임의로 분포하는 위상각이다.

실제 파랑의 방향성 효과를 고려하기 위하여, 1차원 파랑 스펙트럼에 방향 분포도를 표시하는 분포함수(Spreading Function)를 도입하면 다방향파의 스펙트럼은 다음 식과 같이 표현된다.

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) \cdot D(\omega, \theta) \quad (2)$$

여기서, $S(\omega)$ 은 1차원 파랑 스펙트럼, $D(\omega, \theta)$ 는 방향 분포함수이며, θ 는 성분파의 각도이다. 식(2)에서 방향 분포함수의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 감마와 코사인 함수로써 다음 식과 같이 표현된다.

$$D(\theta) = \frac{\Gamma(s+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(s+1/2)} \cos^{2s}(\theta - \theta_0) \quad (3)$$

여기서, θ_0 는 진행파의 주방향, s 는 에너지의 방향별 분포를 나타내는 파라메타이다.

3. 다방향파중에서의 주파수 전달함수 도출방법

3.1 주파수 전달함수의 표현

다방향파에서의 선박운동 응답 스펙트럼 $S_R(\omega_e)$ 은

$$S_R(w_e) = \int_x |H(w_e, x)|^2 S_w(w_e, x) dx \quad (4)$$

이다⁵⁾. 여기서 $H(w_e, x)$ 는 방향 주파수 전달함수, x 는 선박의 진행방향과 파랑의 성분파가 이루는 입사각을 나타낸다.

식(4)을 이산화(Discrete)시키면 다음과 같이 표현된다.

$$S_R(w_e) = \sum_{i=1}^{N_x} |H_i(w_e)|^2 S_{w_i}(w_e) \Delta x \quad (5)$$

각 방향별 항해 시험자료를 이용하면, 방향별 진행수에 따라 $(N_x) \times (N_x)$ 개의 매트릭스형태로 파랑 스펙트럼을 표현할 수 있어 응답 스펙트럼은 다음 식과 같이 된다.

$$\{S_R\} = [S_w] \{H^2\} \Delta x \quad (6)$$

여기서, $\{S_R\}$ 및 $\{H^2\}$ 는 N_x 개의 파입사각에 대한 주행시의 운동 스펙트럼 및 주파수 전달함수로서 벡터 형태로 표현된다.

따라서, 주파수 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\{H^2\} = [S_w]^{-1} \{S_R\} \frac{1}{\Delta x} \quad (7)$$

식(7)을 이용하면 실선의 주파수 전달함수는 측정된 운동 응답 스펙트럼 및 파랑의 방향스펙트럼을 입력으로 하여 구할 수 있다. 하지만, 정방향으로 표현된 방향 스펙트럼의 성분에 약간의 오차라도 포함되면 수치계산시 해에 미치는 영향이 크므로 역행렬법 또는 가우스자이달법(Gauss Seidal Method)등의 수치기법을 직접 적용하는 것은 많은 오차를 포함하고 있어 적합하지 않다.

3.2 역추정법에 의한 주파수 전달함수 도출 방법

실선시험을 통하여 도출하는 주파수 전달함수 $\{H^2\}$ 와 이론계산에 의한 주파수 전달함수 $\{H_0^2\}$ 간에 상관계수 α 를 도입하면, 다음 식과 같이 표현할 수 있다⁵⁾.

$$\{H^2\} = \{H_0^2\} \cdot \alpha \quad (8)$$

실선의 응답스펙트럼과 이론계산의 응답스펙트럼과의 차이 ϵ 는

$$\{\epsilon\} = \{S_R\} - [S_w] \{H_0^2\} \cdot \alpha \cdot \Delta x \quad (9)$$

로 주어진다. 차이가 최소로 되기 위한 조건은 $d\epsilon^2 / d\alpha = 0$ 이므로,

$$\frac{d\epsilon^2}{d\alpha} = -2\{H_0^2\}^T [S_w]^T \{S_R\} \Delta x + 2\alpha \{H_0^2\}^T [S_w]^T [S_w] \{H_0^2\} (\Delta x)^2 \quad (10)$$

따라서, 상관계수 α 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\{H_0^2\}^T [S_w]^T \{S_R\}}{\{H_0^2\}^T [S_w]^T [S_w] \{H_0^2\} (\Delta x)} \quad (11)$$

3.3 영역별 스펙트럼

전진속도를 가진 실선에 있어서, 파의 입사 각도가 $90^\circ \sim 270^\circ$ 사이에서는 절대 주파수와 조우 주파수가 1대 1 대응관계이므로, 조우 주파수에 대해 측정된 실선 응답 스펙트럼과 절대 주파수에 대한 파랑 스펙트럼은 조우 주파수의 함수형태로 표시 가능하다. 그러나, 파의 입사각이 추파일 경우에는 주파수에 따라 3영역으로 나누어 나타낸다⁹⁾.

측정된 실선시험 자료중 조우 주파수에 대한 실선 운동응답 스펙트럼 $S_R(\omega_e)$ 은 3영역에서 각각 주어진 스펙트럼의 합이 되므로 각 영역에 대한 주파수 전달함수를 구하기 위해서는 파랑 스펙트럼과 실선의 응답 스펙트럼을 각 영역별의 스펙트럼(에너지)으로 분할하여야 한다.

즉, 응답의 전 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_R^T = S_R^I + S_R^{II} + S_R^{III} \quad (12)$$

실선 운동성능 시험을 통한 응답 스펙트럼의 영역별 에너지는 스트립 방법으로 추정된 주파수 전달함수와 측정된 다방향 파랑 스펙트럼을 적용한 전 응답 스펙트럼과 각 영역별 응답 스펙트럼을 이용하여 영역별 응답 스펙트럼을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$S_R^I = \frac{S_{RE}^I}{S_R^I} S_R^I \quad (13.a)$$

$$S_R^{II} = \frac{S_{RE}^{II}}{S_R^I} S_R^I \quad (13.b)$$

$$S_R^{III} = \frac{S_{RE}^{III}}{S_R^I} S_R^I \quad (13.c)$$

여기서, S_{RE}^I 은 영역 I(II,III)의 추정된 응답스펙트럼, S_R^I 은 영역 I(II,III)의 측정된 응답스펙트럼, S_{RE}^I 는 추정된 전 응답스펙트럼, S_R^I 는 측정된 전 응답스펙트럼이다.

그러므로, 각 영역별 실선 운동 응답스펙트럼과 파랑스펙트럼이 얻어지면, 식(8)~식(11)을 이용하여 다방향파 분석에 의해 주파수 전달함수를 구할 수 있다.

4. 실선실험

4.1 실선실험의 개요

실선실험은 소형 선미트롤선인 부경대학교 실습선 부산404호(총톤수 160톤)를 이용하여 남해제도 남방 10 mile (위도 34° 40.0'N, 경도 127° 58.0'E)에서 수행하였다. 실험 선박은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 직립선수, 환형단면의 선형을 지닌 선박으로 1.2m의 선미트림을 가지며, 주요요목은 Table 1과 같다. 실험시의 해상상태는 11m/s의 풍속, 유의

파고 2.5m, 평균주기 3.8초로 관측되었고, 선속은 11.2k't(Fn=0.33)로 일정하게 유지하였다. 선체운동 계측시 파랑에 대한 선박의 상대침로는 180도(180도를 향파로 뚝)부터 45도 간격으로 8침로에 대하여 각각 10분간 항주하면서 계측하였다. 해상상태는 충분히 발달된 상태로 약 2시간 정도의 실험중에는 정상적인 상태를 유지하는 것으로 간주할 수 있었다.

실선 운동 계측은 중동요와 횡동요를 계측하였으며, 계측장치는 전자식 경사계를 사용하여 선체 중앙부의 선저로부터 1.5m 상방에 설치하였다. 계측된 값은 0.25초 간격으로 샘플링하여 개인용 컴퓨터에 수록하였다.

Table 1 Principal Dimensions of a Ship

Length. P. P.	30.3 (m)
Breadth(mld)	6.6 (m)
Draft (Fore)	1.6 (m)
Draft (After)	2.8 (m)
Displacement	218.0 (ton)
GM	0.45 (m)
Main Engine	750 (HP)

4.2 실선실험의 계측 결과 해석

계측된 값들 중에 향파중의 중요운동에 대한 시간

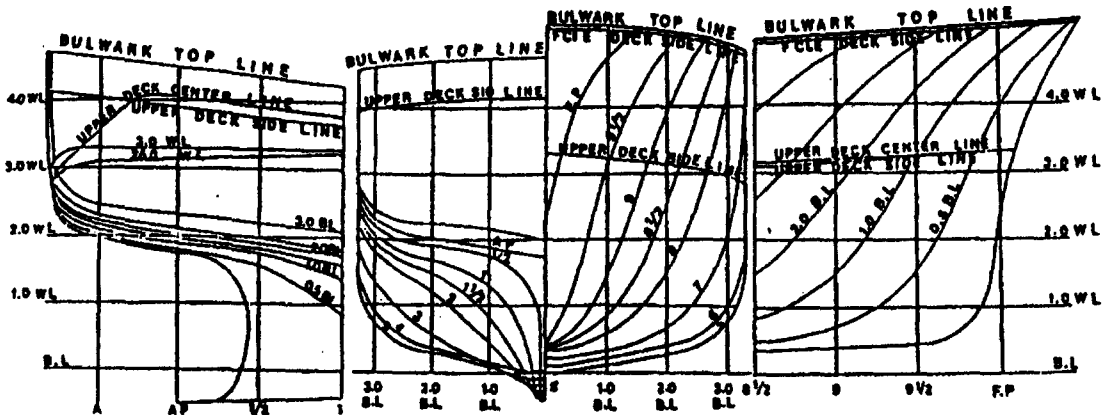


Fig.1 Body Plan and Contour

력 및 통계적 특성을 Fig.2에 나타내었다. Fig.2(b)는 Pitch운동의 시간변동에 따른 Histogram과 정규분포, Fig.2(c)는 중동요 진폭의 Histogram과 Rayleigh분포를 비교하여 나타내었다. 이에 의하면 계측결과는 정규분포 및 Rayleigh분포에 잘 따르고 있어, 실험실 시험에서 얻어진 결과는 통계적으로 정상성을 얻을 수 있는 불규칙 현상으로 간주할 수 있다.

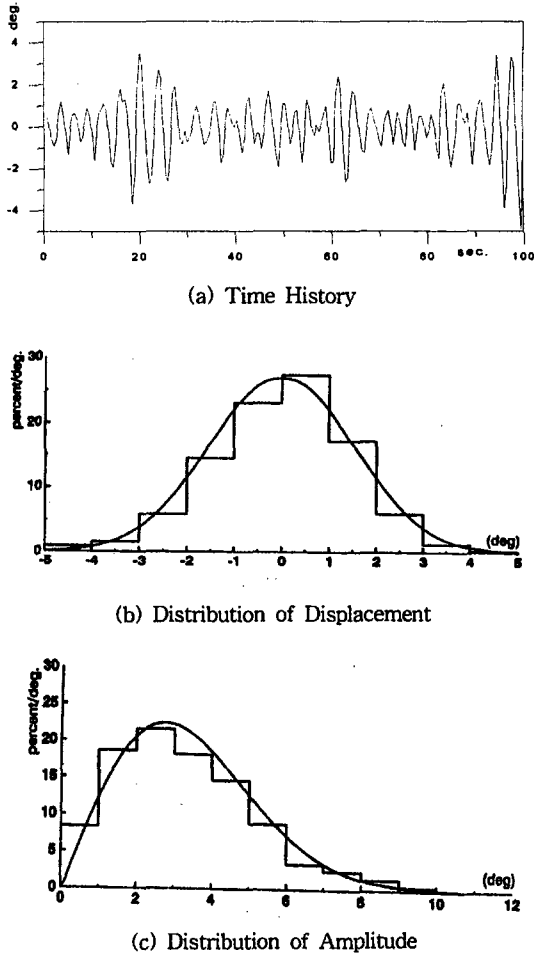


Fig. 2 A Sample of Statistical Characteristics of Pitch Motion of Ship at Head Seas

Fig.3은 실선계측으로부터 얻어진 Pitch운동의 응답 스펙트럼을 파와 만남각별로 나타내었다. 스펙트럼 해석에는 FFT법을 사용하였고, 삼각 Lag

윈도우를 사용하여 평활화 하였다. Fig.3에 의하면 향파에서 큰 응답을 주며 횡파중에도 비교적 큰 중동요가 발생하는 것으로 보아 다방향파의 영향이 포함되어 있음을 추정할 수 있다. 그러나 실험실 시험에 있어서 파와의 만남각을 정확하게 측정하여 실험을 수행한다는 것은 극히 힘든 일이며, 파향도 수조실험과 같이 재현성이 불가능하므로 다소의 오차가 있을 것으로 생각되지만, 경향적인 타당성이 인정되어 본 논문에서는 이 결과를 이용하여 다음 장과 같이 실선의 주파수 응답함수를 추정하였다.

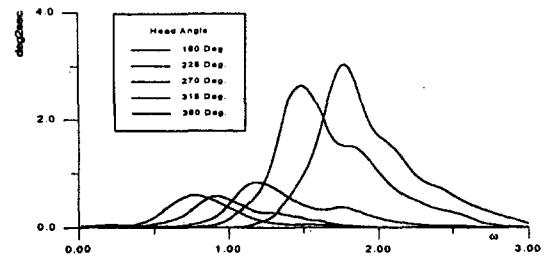


Fig. 3 Response Spectra of the Pitch Motion of Ship According to Head Angle

5. 실선의 주파수 전달함수의 추정 및 고찰

선박의 주파수 전달함수는 전장에서와 같이 실선실험 결과로부터 얻어진 응답 스펙트럼을 이용하여 3장에서 설명한 해석법에 따라 추정할 수 있다. 이때 실험중의 해상상태는 정밀하게 측정하여 실험역의 다방향파 특성을 보다 정확하게 파악하여야 하지만, 본 실험에서는 실험장비가 미비하여 목적의 결과를 이용하여 다방향파의 특성을 추정하는 것으로 하였다. 해석시 해상상태의 1차원 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼으로 간주하고, (3)식의 방향분포 파라메타(s)는 일반해상상태를 대표하는 1로 하였다.

그리고, 역추정법에 의해 주파수 전달함수를 구하기 위한 상관계수(α)는 이론적 계산에 의한 전달함수를 사용하였다. 이론계산은 Fig.1 및 Table 1의 실험선박을 대상으로 스트림 방법을 이용하여

운동응답을 계산하였다.

따라서, 실선실험으로부터 얻어진 응답스펙트럼과 목적결과를 이용한 방향파 스펙트럼과 이론계산에 의한 전달함수로부터 상관계수를 추정할 수 있고, 이를 (8)식에 대입함으로써 다방향파 분석에 의한 주파수 전달함수를 구할 수 있다.

본 논문에서 다루고 있는 다방향파 분석방법과 기존의 단방향파 분석방법에 의한 주파수 전달함수를 비교하기 위하여, 실험역을 다방향파 및 단방향파를 적용하여 각각의 Pitch운동 주파수 전달함수를 구하여 비교하였다. 전달함수는 $\theta/k\zeta_a$ 로 무차원화 하여 각 입사각별로 Fig.4~Fig.8에 비교하여 나타내었다. 여기서 k 및 ζ_a 는 파수 및 파의 진폭을 나타낸다.

Fig.4는 횡파중에서의 전달함수로 실선은 스트림 방법으로부터 구한 이론값이고, ● 및 △는 실험역 실험값으로부터 각각 다방향파 및 단방향파 분석법에 의해 구한 전달함수를 나타내고 있다. 이에 의하면 두 방법으로 구한 전달함수는 비교적 이론치와 근사한 값을 주고 있지만, Pitch 운동의 공진점 부근에서는 단방향파 분석방법에 의한 값이 다소 적게 나타나고 있다. 이는 동일한 응답스펙트럼을 가지고 전달함수를 추정할 경우, 다방향파 분석법에서는 주방향 입사파 이외에도 주변 입사파의 영향이 고려된 응답 스펙트럼으로 간주하여 분석하므로 주방향에 대한 전달함수가 단방향파 분석법에 의한 것보다 크게 나타나는 것으로 생각된다.

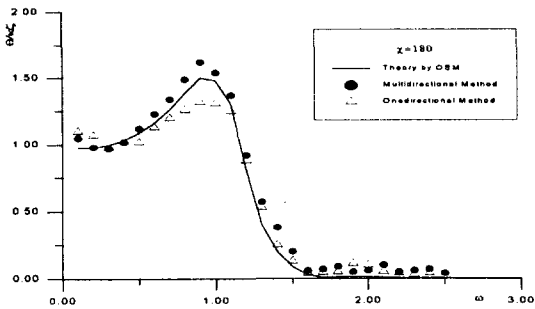


Fig.4 Comparison of Frequency Transfer Functions for Pitch ($\chi=180^\circ$)

Fig.5는 횡사파중에서의 전달함수를 나타내고 있

으며, Fig.4와 마찬가지로 이론치와 근사한 경향을 주고 있지만 다방향파 분석법에 의한 것이 전반적으로 크게 평가되고 있다. 이는 Fig.3에서 보여주는 바와 같이 주방향 입사각이 225° 인 경우, 실험에 의한 응답 스펙트럼이 다소 크게 평가되어 그 영향으로 전달함수가 과대 평가되어진 것으로 생각된다. 또한, 실제적으로 실험에서 정확하게 입사각을 맞춘다는 것은 힘든 일이다. 따라서 입사각 오차도 전달함수 추정에 그대로 반영될 것으로 사료된다.

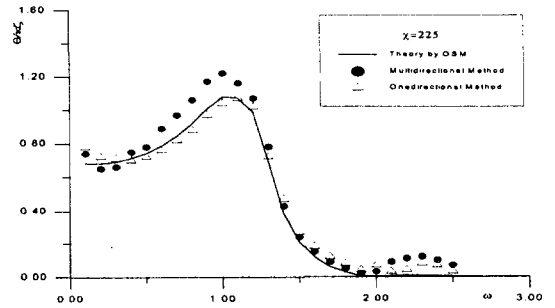


Fig.5 Comparison of Frequency Transfer Functions for Pitch ($\chi=225^\circ$)

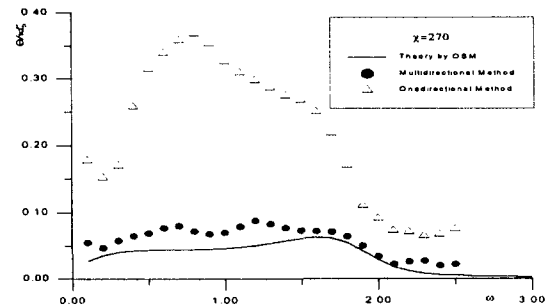


Fig.6 Comparison of Frequency Transfer Functions for Pitch ($\chi=270^\circ$)

Fig.6은 횡파중에서의 Pitch운동의 주파수 전달함수를 나타낸 것이다. 횡파의 경우에는 단방향파 분석법이 전달함수를 상당히 과대 평가하는 경향을 보이고 있다. 이는 단방향파로 입사각이 횡파일 때는 Pitch운동이 작게됨에도 불구하고, 실험역은 다방향파로 주변 입사파의 영향으로 Pitch운동의

응답스펙트럼이 크게 나타나며, 이를 단방향파 분석법에 적용하게 되면 전달함수의 과대 평가로 이어진다는 것을 보여주고 있다. 따라서 특히 횡파중에서의 Pitch운동의 전달함수 추정에는 다방향파 분석법의 효용성이 강조된다.

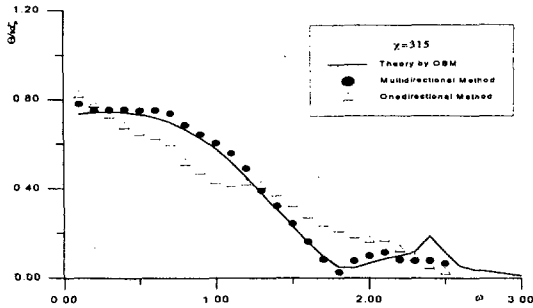


Fig.7 Comparison of Frequency Transfer Functions for Pitch ($\chi=315^\circ$)

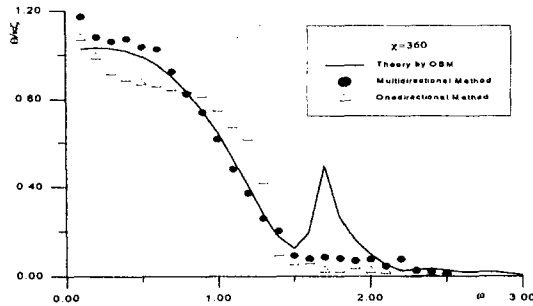


Fig.8 Comparison of Frequency Transfer Functions for Pitch ($\chi=360^\circ$)

Fig.7 와 Fig.8 는 추사파 및 추파중에서의 각각의 전달함수를 나타내고 있다. 이에 의하면 본 논문에서 제안하는 추파중에서의 영역별 스펙트럼 분할법에 의해서 전달함수를 잘 추정할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나 단방향파 분석법에 의한 전달함수는 주파수 1.0이하에서는 다소 작게, 이상에서는 다소 크게 평가되고 있다. 이러한 특징은 다방향 성분파의 주파수 전달함수로 인한 응답성분이 포함되는 데도 불구하고, 단방향파 분석시에는 이러한 성분파에 의한 영향은 고려하지 않을 뿐만 아니라 방향별 전달함수가 주파수에 따라 급격

하게 변하는 것 등의 복합적인 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 이론에 의한 전달함수는 고주파수에서 Peak가 나타나는데 비해 실험에서는 나타나지 않는다. 이는 실험에 의한 응답스펙트럼 추정시 평활화로 인한 고주파수 응답의 소실에 의한 것이나, 아니면 실선의 실제의 전달함수에는 이와 같은 Peak가 발생하지 않을 가능성이 있다는 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 실선 실험을 토대로 구한 실선 응답 스펙트럼으로부터 다방향파 분석법을 이용하여 실선의 주파수 전달함수를 추정하는 기법을 개발하였다.

둘째, 실선 실험으로부터 전달함수를 추정할 경우 실험해역의 파랑을 단방향파로 가정하면 입사파의 주방향에 따라 주파수 전달함수는 상당한 오차를 포함할 수 있다.

셋째, 입사파의 주방향이 추파인 경우에도 주파수를 3영역으로 구분하여 처리함으로써 전 범위의 파 입사각에 대하여 주파수 전달함수를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 실험역 파랑관측용 기자재의 미비로 파랑Data에 오차를 포함하고 있으며, Pitch운동에 국한하여 실선의 주파수 전달함수를 추정하였지만, 추후 다방향 파고측정장비를 이용하여 실제 해상에서의 좀더 정밀한 측정결과를 본 연구 방법을 적용하고, 6자유도 운동에 대한 주파수 전달함수를 종합적으로 추정할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 1996년도 교육부 학술진흥재단이 지원한 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- 1) Bruce L. Hutchison, "Seakeeping Studies : A Status Report", SNAME Transaction, Vol.

- 98, 1990
- 2) Allen H. Magnuson, "Seakeeping Trials of the BH.7 Hovercraft", David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1975
 - 3) M.J. Tucker, "Interpreting Directional Data from Large Pitch-Roll-Heave Buoys", Ocean Engineering, Vol.16, NO.2, pp.173-192, 1989
 - 4) Mitsuyasu, Tsuyosh Uji, "A Comparison of Observed and Calculated Directional Spectra in the East China Sea", Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.45, pp.338-349, 1989
 - 5) Takezawa, S., Hirayama, T., Acharyya, S., "Towed Ship Motion Test in Directional Spectrum Waves in a Long Tank(Part 3)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.167, pp.113-123, 1989
 - 6) A.E. Mynett, J.Bosma, et. al, "Laboratory Simulation of Ship Motion in Directional Sea", BOSS, pp.755-772, 1988
 - 7) Yu-xiu, Shu-xue Liu, et. al, "Numerical Simulation of Multi-Directional Random Seas", Proc. Conf. International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.26-32, 1991
 - 8) 조효제, "계류식 부유 해양구조물의 응답 특성에 미치는 다방향파의 영향에 관한 연구", 동경대 박사학위 논문, 1991
 - 9) 김종철등, "다방향파를 고려한 실선 주파수 전달함수 도출기법 연구", 대한조선학회 논문집, 제31권, 제4호, pp.51-57, 1994