
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 31 卷 第 4 號 1994年 11月
 Transactions of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 31, No. 4, November 1994

다방향파를 고려한 실선 주파수 전달함수 도출기법 연구

김종철*, 박일권*, 조효제**, 김진안**

A Study on the Frequency Transfer Function of a Full-Scale Ship Considering the Multi-Directional Waves

by

J. C. Kim*, I. K. Park*, H. J. Jo** and J. A. Kim**

요 약

본 연구는 실선 내파성시험 분석시 시험해역의 파랑을 다방향파로 분석하여 신뢰성 있는 주파수 전달함수를 도출하는 기법에 관한 연구이다. 다방향파에서의 주파수 전달함수를 도출하기 위하여 다방향 수조 모형시험 분석에서 적용하는 Takezawa의 역추정법을 도입하였으며, 실선 상황에 적합하도록 주파수 영역을 3영역으로 구분하여 취급함으로써 추파 범위에서도 주파수 전달함수의 도출이 가능하도록 하였다.

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 수치 시뮬레이션을 수행한 결과, 다방향파 해상에서의 선박운동 응답을 이용한 주파수 전달함수 도출시 단방향파 분석방법보다 다방향파 분석방법이 보다 더 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, the method for calculation of the frequency transfer function of motions based on the multi-directional waves in the analysis of a full-scale seakeeping trials is presented. 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.

To confirm the validity of this method, the numerical simulation was executed. 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.

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('94. 4. 22.)

접수일자 : 1994년 6월 28일, 재접수일자 : 1994년 8월 29일

* 정회원, 국방과학연구소

* 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

1. 서 언

선박 고유의 운동특성치는 주파수 전달함수(Frequency Transfer Function)로 표현할 수 있는데, 이론해석, 수조모형 시험 및 실선시험 등에 의해 그 결과를 획득할 수 있다.

실선 운동성능 시험을 통한 주파수 전달함수 도출 시 실제 해상의 파랑에 대한 정확한 정보가 필수적으로 요구되나, St.Denis & Pierson(1953년)이 선박운동추정에 실제해상의 파랑을 단방향파로 가정하여 적용한 이후 근래에 까지 단방향파 해석방법이 보편적으로 적용되고 있는 실정이다.[1][2]

그러나, Longuet-Higgins(1963년)가 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 시험분석시 시험해역의 파랑을 단방향파로 가정한 주파수 전달함수 도출방법은 상당한 오차를 포함하고 있을 것으로 판단된다.

다방향파를 적용한 주파수 전달함수 도출기법에 대한 연구는 Takezawa(1990년), Mynett (1988년) 등이 다방향 수조모형 시험 결과를 분석하는 기법으로 제시하고 있으나, 다방향파의 주 진행방향이 항파(Head Seas)인 경우로 제한되어 있는 실정이다.[5][6]

본 연구에서는 실선의 주파수 전달함수를 도출하기 위해서 Takezawa의 역추정법을 이용하여 실선상황에 적합하도록, 주파수 영역을 3영역으로 구분하여 취급함으로써 추파(Following Seas)범위를 포함한 주파수 전달함수의 도출이 가능하도록 하였다. 본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 다방향파에서의 운동응답을 수치 시뮬레이션한 후 기존의 단방향파 분석방법과 다방향파 분석방법을 적용하여 그 결과를 비교 검토 하였다.

2. 다방향파의 특성

2.1 다방향파의 표현

실제 해상의 파랑은 단방향파(장파정파)라는 가정

파는 다르게 주요한 방향을 가진 우세파(Dominant Waves)와 각 방향의 성분파(Component Waves)가 공존함에 따라 다방향파로 가장 유사하게 표현할 수 있다. 따라서, 다방향파는 서로 다른 방향 및 주파수 성분을 가진 규칙파들의 선형 중첩으로 표현 가능하므로 임의의 위치에서의 수면변위 $\zeta(x, y, t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.[7][8]

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

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

2.2 방향 스펙트럼

실제 파랑의 방향성 효과를 고려하기 위하여, 단방향 파랑 스펙트럼에 방향 분포도를 표시하는 분포함수(Spreading Function)를 도입하면 다방향파의 스펙트럼은 다음식과 같다.

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

여기서, $S(\omega)$ 은 1차원 파랑 스펙트럼(단방향 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 다음식과 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. 다방향파에서의 주파수 전달함수 도출 방법

3.1 주파수 전달함수의 표현

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

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

이다.[5] 여기서 $H(\omega_e, \chi)$ 는 방향 주파수 전달함수, χ 는 선박 진행방향과 파랑의 성분파가 이루는 입사각도이다.

식(4)를 이산화(Discrete)시키면,

$$S_R(\omega_e) = \sum_{i=1}^{N_x} |H_i(\omega_e)|^2 S_W(\omega_e) \Delta\chi \quad (5)$$

각 방향별 주행 시험자료를 이용하면, 방향별 주행수에 따라 $(N_x) \times (N_x)$ 개의 매트릭스 형태로 파랑 스펙트럼을 표현할 수 있어 다음 식과 같이 된다.

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

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.

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

식(7)을 이용하면 실선의 주파수 전달함수는 측정된 운동 응답 스펙트럼 및 파랑의 방향 스펙트럼을 입력으로 하여 구할 수 있으나, 수치 계산시 정방행렬로 표현된 방향 스펙트럼의 성분에 약간의 오차가 포함되더라도 해에 미치는 영향이 크게 작용하므로 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, 다음식과 같이 표현할 수 있다.[5]

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

실선의 응답스펙트럼과 이론계산의 응답스펙트럼 차이 ε 는

$$\{\varepsilon\} = \{S_R\} - [S_W] \{H_0^2\} \cdot \alpha \cdot \Delta\chi \quad (9)$$

이다. 차이의 최소가 되기 위한 조건은 $d\varepsilon^2/d\alpha = 0$ 이므로,

$$\frac{d\varepsilon^2}{d\alpha} = -2\{H_0^2\}^T [S_W]^T \{S_R\} \Delta\chi + 2\alpha \{H_0^2\}^T [S_W]^T [S_W] \{H_0^2\} (\Delta\chi)^2 \quad (10)$$

따라서, 상관계수 α 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

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

3.3 조우 주파수에 대한 고려

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 응답스펙트럼과 절대 주파수에 대한 파랑 스펙트럼은 조우 주파수의 함수형태로 표시 가능하다.

그러나, 파의 입사각이 추파일 경우에는 Fig. 1에서와 같이 주파수에 따라 3영역으로 나누어진다.

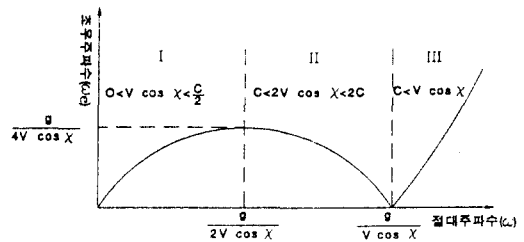


Fig. 1 Variation of encounter frequency with absolute wave frequency in a following sea

따라서, 3영역에 따른 주파수 전달함수는 식(8)로부터 다음과 같이 영역별로 나타낼 수 있다.

영역 I에서, $\{H^2\}^I = \{H_0^2\}^I \cdot \alpha^I \quad (12.a)$

영역 II에서, $\{H^2\}^{II} = \{H_0^2\}^{II} \cdot \alpha^{II} \quad (12.b)$

영역 III에서, $\{H^2\}^{III} = \{H_0^2\}^{III} \cdot \alpha^{III} \quad (12.c)$

3.4 영역별 스펙트럼

측정된 시험자료중 조우 주파수에 대한 실선 운동 응답스펙트럼 $S_R(\omega_e)$ 은 3영역에서 각기 주어진 스펙트럼의 합의 값이 되므로 각 영역에 따른 주파수 전달함수를 구하기 위해서는 파랑 스펙트럼과 실선의 응답 스펙트럼을 각 영역별의 스펙트럼(에너지)으로 분할하여야 한다.

응답의 전 스펙트럼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_R^T = S_R^I + S_R^{II} + S_R^{III} \quad (13)$$

실선 운동성능시험을 통한 응답 스펙트럼의 영역별 에너지는 스트립 방법으로 추정된 주파수 전달함수와 측정된 다방향 파랑 스펙트럼을 적용한 전 응답 스펙트럼과 각 영역별 응답 스펙트럼의 비가 동일하다고 가정하여, 실선에서 측정 분석된 전 응답 스펙트럼을 이용하여 영역별 응답스펙트럼을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$S_R^I = \frac{S_{RE}^I}{S_{RE}^T} * S_R^T \quad (14.a)$$

$$S_R^{II} = \frac{S_{RE}^{II}}{S_{RE}^T} * S_R^T \quad (14.b)$$

$$S_R^{III} = \frac{S_{RE}^{III}}{S_{RE}^T} * S_R^T \quad (14.c)$$

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}^T 는 추정된 전 응답스펙트럼, S_R^T 는 측정된 전 응답스펙트럼이다.

그러므로, 각 영역별 실선 운동 응답 스펙트럼과 파랑 스펙트럼이 획득되면, 식(8)~식(11)을 이용하여 다방향파 분석에 의해 주파수 전달함수를 구할 수 있다.

4. 수치 시뮬레이션에 의한 주파수 전달 함수 도출방법 검증

4.1 다방향파 및 운동응답 수치시뮬레이션

수치 시뮬레이션을 위한 파랑 스펙트럼은 ITTC 스펙트럼을 이용하였으며, 식(3)의 방향 분포함수를 적용하여 방향파의 스펙트럼을 추정하였다. 사용된 해상상태 자료는 Table 1과 같다. Fig.2는 생성된 다방향파의 스펙트럼을 표시한 것이다.

다방향 불규칙파는 식(1)을 이산화 형태로 변형하여 생성하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Table 1 Characteristics of sea condition for the simulation

유의 파 고 (m)	6.0
파 평균 주기(sec)	11.2
방향분포 파라메타(s)	1
방향의 갯 수(개)	7

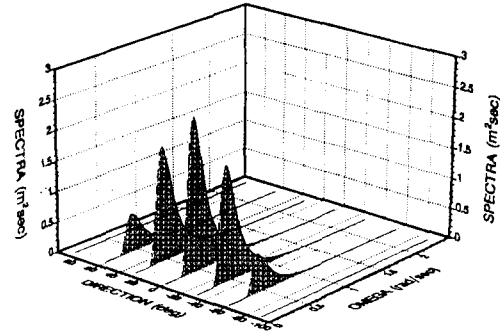


Fig. 2 Directional wave spectrum

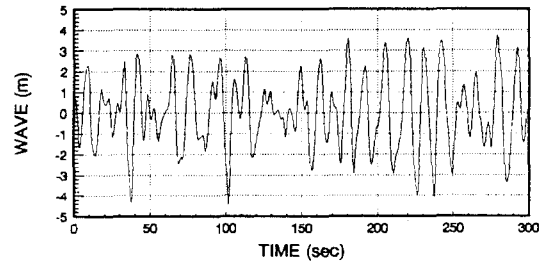


Fig. 3 Time history of simulated directional wave

다방향파에서의 운동응답은 스트립 방법을 이용하여 Table 2와 같은 제원을 가진 선박의 주파수 전달함수를 구한 후, 파랑의 방향 스펙트럼을 적용하여 다방향파에서의 응답 스펙트럼을 Fig.4와 같이 구하였다. 이것을 수치계산하여 운동응답의 Time History를 생성하였다.

따라서, 수치 시뮬레이션된 파랑 및 운동응답 자료를 스펙트럼 분석하여 주파수 전달함수를 구하는 입력자료로 하였다.

Table 2 Principal Dimensions of a Ship

Length(B.P.)	100.0 (m)
Breadth(mld)	13.4 (m)
Draft	5.28 (m)
Displacement	3996 (ton)

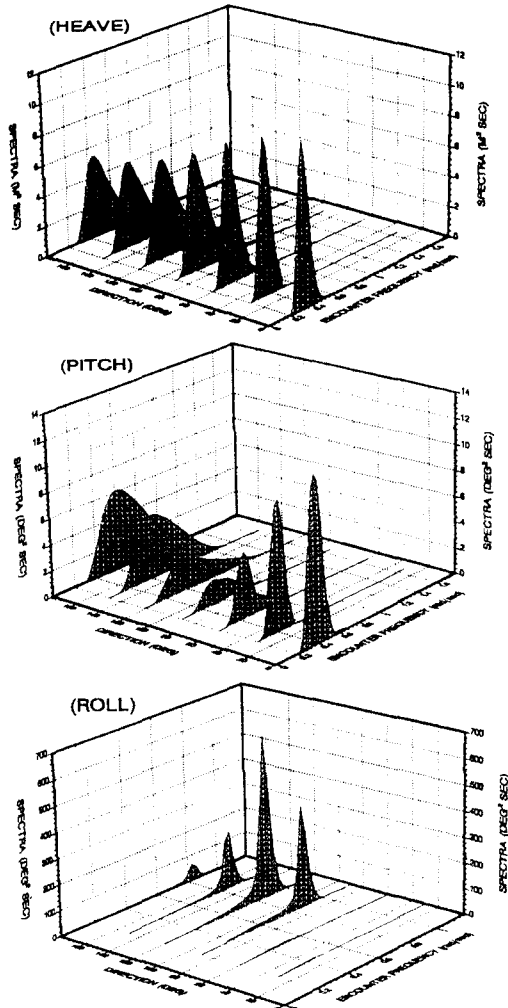


Fig. 4 Estimated response spectra of motions in directional waves

4.2 수치 시뮬레이션에 의한 검증 결과 및 고찰

수치 시뮬레이션된 결과를 입력으로 다방향파 분석

방법 및 단방향파 분석방법을 각각 적용하여 주파수 전달함수를 구하여 Heave, Pitch 및 Roll 운동요소를 각각 Z/ζ , $\theta/(2\zeta/L)$, $\phi/(2\zeta/B)$ 의 단위로 Fig.5~Fig.7에 표시하였다. 여기서 L 및 B는 선박의 수선간장 및 형폭이다.

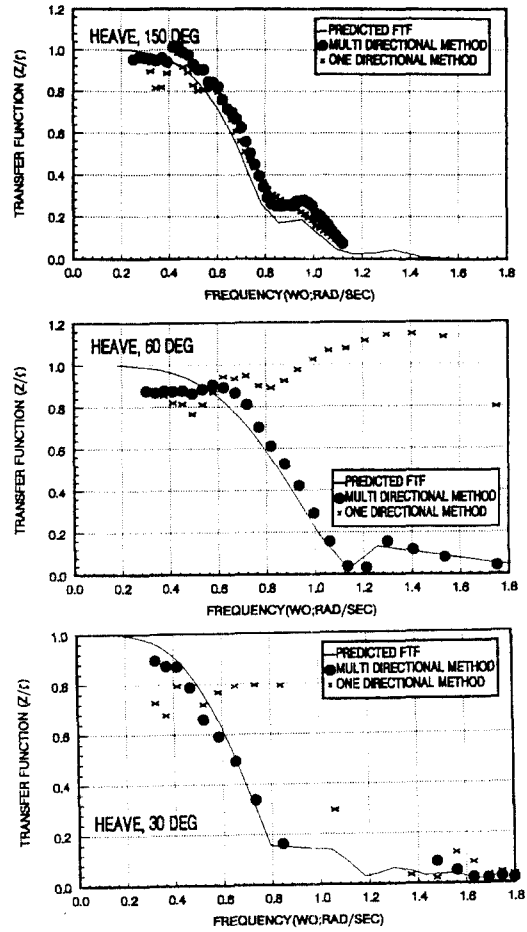


Fig. 5 Comparison of FTFs for heave by numerical simulation

Heave, Pitch 및 Roll 운동요소에 대한 주파수 전달함수를 수치 시뮬레이션의 기준이 된 추정된 값과 비교시 항파 영역에서는 다방향파 분석 및 단방향파 분석방법에 의한 결과가 대체로 일치하고 있으나, 추파 영역에서는 단방향파 분석방법에 의한 결과는 상당한 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다.

또한 각 운동요소별 절대 주파수 전역에 대한 다방향파 및 단방향파 분석방법의 오차 표준편차는

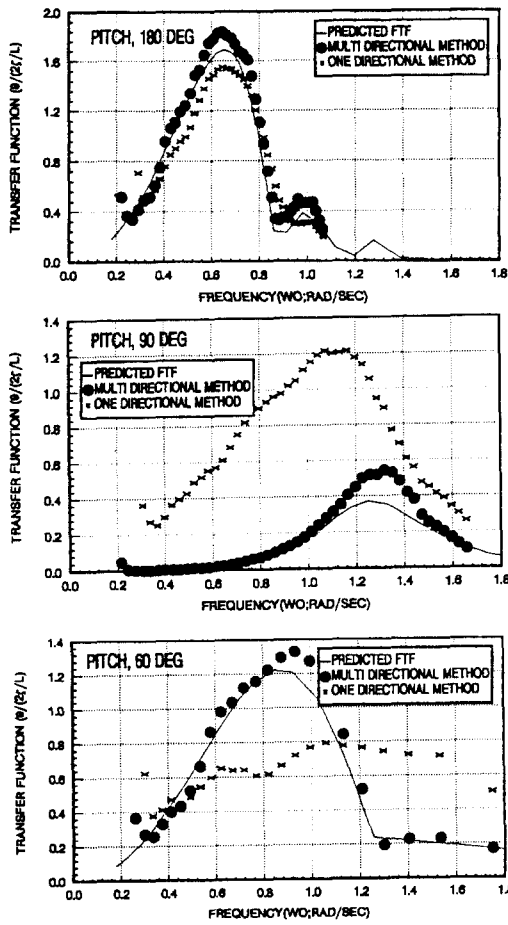


Fig. 6 Comparison of FTFs for pitch by numerical simulation

Fig.8에 표시하였다. Heave에 있어서 파 입사각이 $90^\circ \sim 180^\circ$ 범위에서는 단방향과 분석방법과 다방향과 분석방법의 차이가 없으나, 파 입사각 60° 에서 단방향과 분석방법이 많은 오차를 포함하고 있다. Pitch인 경우에는 파 입사각 90° , Roll에 있어서는 파 입사각 60° 에서 단방향과 분석방법이 큰 오차를 포함하고 있는데, 이러한 범위의 특징은 주파수 전달함수 또는 응답 스펙트럼이 주변 파 입사각의 값과 크게 변화되는 범위이다. 따라서, 이러한 원인은 다방향과 해상에서의 응답에는 주방향의 파랑(우세파) 이외 다방향 성분과의 주파수 전달함수로 인한 응답성분이 포함되어 있는데, 단방향과 분석시에는 이러한 성분과에 의한 영향은 고려하지 않고, 파 입사각에 해당하는 우세파

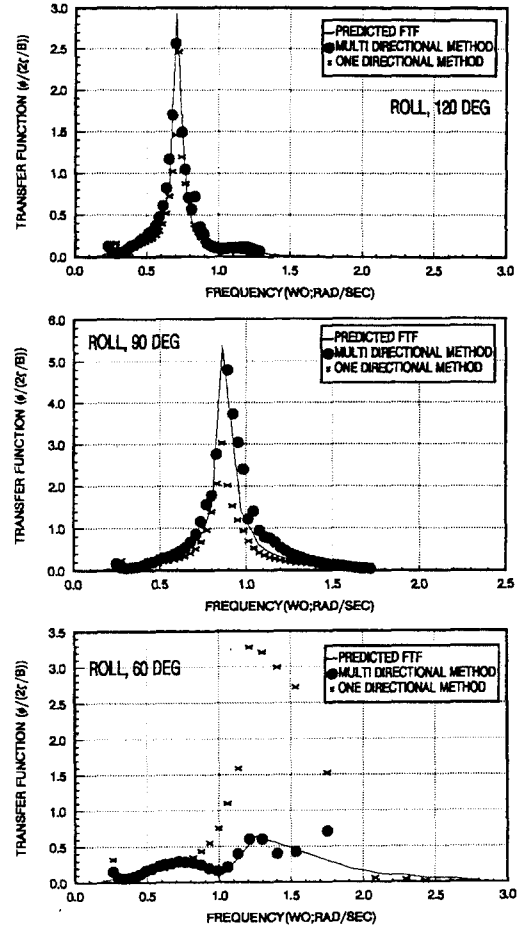


Fig. 7 Comparison of FTFs for roll by numerical simulation

의 주파수 전달함수만이 응답에 영향을 미친 것으로 분석하기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 수행함에 따라 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 실선 내파성능시험 분석시 시험해역의 파랑을 단방향파로 가정하여 도출한 주파수 전달함수는 상당한 오차를 포함하고 있다.

둘째, 실선 내파성능 시험분석시 다방향과 분석방법에 의하여 주파수 전달함수의 도출이 가능하며, 단

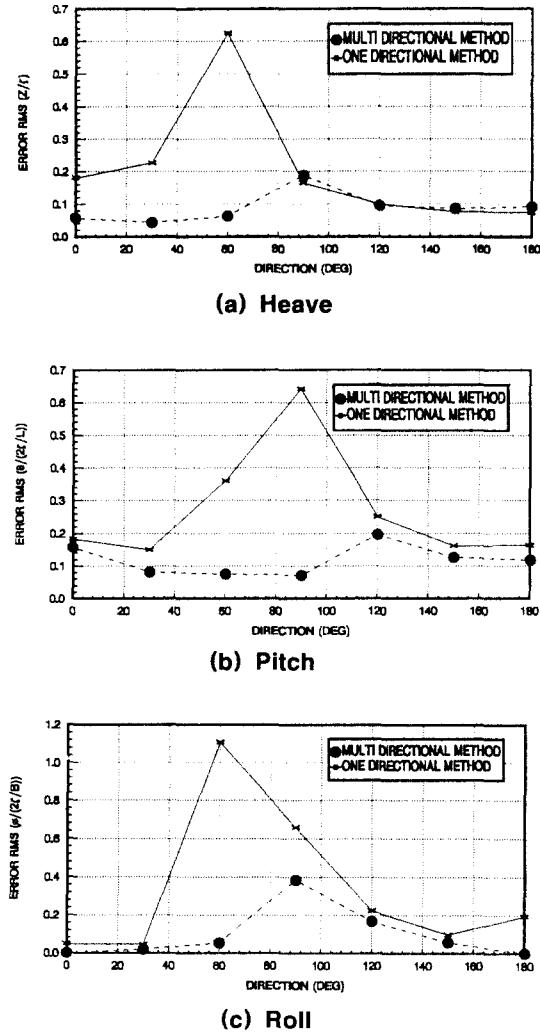


Fig. 8 Comparison of the accuracy of FTFs

방향파 분석방법보다 더 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다.

셋째, 주파수를 3영역으로 구분하여 처리함으로써 전 범위의 파 입사각에 대하여 주파수 전달함수 획득이 가능하다.

따라서, 본 연구에서 수행된 다방향파 분석에 의한

주파수 전달함수의 도출방법은 실선 내파성능 시험평가에 적용 가능성을 일차 확인하였다. 추후, 다방향 파고측정장비를 이용하여 실제 해상에서의 계측결과에 본 연구 방법을 적용하여 비교검증할 예정이다.

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, pp173-192, 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, Vol45, pp338-349, 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,pp755-772, 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 관한연구", 동경대 박사학위 논문, 1991