

예인수조에서의 방향 스펙트럼파의 조파 및 계측 기법 비교 연구

이진호*, 하문근*, 박건일*
*삼성중공업

Research on a Comparison of Directional Spectrum Wave Generation and Measurement Method in a Towing Tank

Jin Ho LEE, Mun Kun HA, Gun Il PARK

Jinholee@samsung.co.kr, mkha@samsung.co.kr, gipark@samsung.co.kr

* Samsung Heavy Industry

Kew Words : Directional Spectrum Wave Generation Method, Iteration Method, MLM

, WV LPSRUWDQW WR UHDOLJ H GLUHFWRQDO VSHFWUXP ZDYI
VHDNHSLQJ SHU IRUP DQFH RI PDULQH YHKLFOHV WK SUDF
LWHUDWLRQ PHWKRG LQ WKH YLHZ SH DQG FRPSDUH WKH SU

1. 서론

선박 및 해양 구조물의 내항 성능 파악은 기본 설계단계에서의 운동 안정성 분석 측면에서 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 현재에는 전산기의 급속한 발달로 Panel Method 및 Strip Method 등의 수치 계산법에 의한 내항 성능 해석이 발달되어져 있지만, 실험적 파랑 상태 조건에서의 계산은 여전히 소요되는 시간의 비중이 크다. 또한 시간 영역 해석이 불가피한 비선형 해석의 경우, 계산 알고리즘의 어려움 및 계산 시간의 증가로 실험 수조에서의 검증이 더욱더 요구되어진다. 이러한 요구에 의해, 기존의 2차원 파랑 조파 시설에서 요즈음은 3차원 파랑 조파 시설을 신설 실험 수조에 설치하는 경향이 뚜렷하다. 하지만 대부분의 3차원 파랑 실험 수조가 사각수조의 형태를 가지고 벽면 반사파를 억제 시켜서 원하는 목적파를 생성시키려고 하지만, 예인 장수조에서는 오히려 이러한 반사파를 적극적으로 이용하고 있다.

예인장수조에서의 방향스펙트럼파의 재현은 80년대 후반부에 일본의 요코하마 국립대학(YNU)의 타케자와 교수의 역발상에 의해 이루어졌다[1]. 즉, 기존의 해안 수리분야에서 이러한 파를 발생시키기 위해 제거해야 한다고 여겼던 벽면 반사파를 적극적으로 이용하여 수조 길이방향의 넓은 영역에서 목적하고자 하는 파를 발생시켜 한국의 삼성중공업(SHI) 및 부산대학교(PNU)을 비롯한 일본의 몇개 연구기관에서 이러한 방법으로 원하는 방향 스펙트럼파를 재현시키고

있다.

방향 스펙트럼파란 파의 방향성 및 주파수 성분의 중첩법에 의해 생성되어지는 파로서, 이러한 파를 기존의 이중 중첩법(Double Summation Method)의 삼각함수 중첩법에 의해 재현시키고자 할때, 조파 신호 생성에서 상당한 시간을 소요하게 된다. 이러한 시간의 소요는 조파 이전에 조파 신호 생성을 위해 사용자가 많은 시간을 기다려야 한다는 단점이 있다. 또한 조파 신호 제어 관점에서도 실시간 제어가 아니고, 일회 조파용 신호를 미리 생성시켜놓는 결정론적인 방법으로 대체된다. 이는 무반사 제어 등과 같은 실시간 조파 제어를 이용해야 하는 경우에 상당부분 제약이 가해지게 된다. 이와 같은 단점의 해결책으로서 매 시간 스텝에서의 조파 신호 생성 시간을 짧게 가져 가는 방법을 모색할 수 있다. 현재 시간 단축 조파를 위해 대두되는 방법으로서 디지털 필터에 의한 방법, Walsh 함수법[2] 및 단일 중첩법(Single Summation Method)등이 거론된다. 본 논문에서는 위의 방법 외에 계산 시간을 절약할 수 있는 반복법(Iteration Method)에 의한 조파 신호 생성 방법을 채택하고[3] 기존의 이중 중첩법에 의해 소요되는 계산 시간 및 정도를 비교한다. 반복법은 초기치의 조파 신호 생성이 삼각함수 중첩 계산에 의해 이루어 지면, 다음 시간 스텝에서부터는 이전 스텝의 값만을 이용해서 신호를 매 시간 생성하게 된다. 즉, 매 시간 스텝, 삼각함수 중첩에 의해 계산되어지는 기존의 방법과는 달리 계산 시간을 절약할 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장은 표준 파랑 스펙트럼이 주어졌을 때 이중 중첩법 및 반복법에 의한 조파 신호 생성에 관해서 언급하며, 제3장은 이 두 방법에 의한 계산 결과의 비교 및 고찰, 제 4장은 MLM법을 이용한 삼각형 배열 지점간의 거리 변화에 따른 방향 스펙트럼과의 해석 결과, 제5장은 결론 및 향후 과제로 구성되어진다.

2. 이중 중첩법 및 반복법에 의한 조파 신호 생성

Fig. 1에 수조의 개략도와 좌표 정의를 나타내고 있다. 또한 그림 중의 삼각형은 파고계 배열의 개략도를 나타내고 있다.

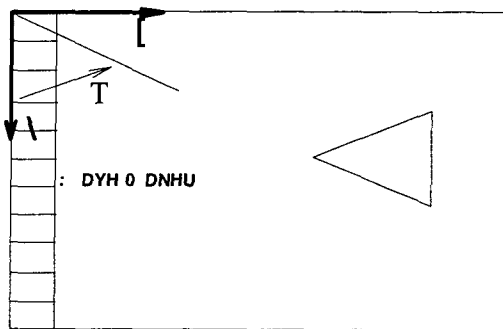


Figure 1: Schematic diagram of the water tank and coordinate system. The origin is at the top-left corner. The x-axis is horizontal to the right, and the y-axis is vertical downwards. A triangle represents the wave gauge array. The text 'DYH 0 DNHU' is located near the y-axis.

실험수조에서 실험역의 파랑 상태를 표현하기 위해 널리 사용되는 방법으로서 파 주파수 및 파방향각의 이중 중첩법을 들 수 있다. 이 방법은 랜덤 방향파 파랑 상태를 표현하는데 물리적으로 타당한 방법으로 아래와 같이 표현된다.

$$K \left[\begin{matrix} 1 & 0 \\ f & f \end{matrix} \right] \frac{\$ Z_L T_M}{L M} V I_4$$

$$4 \frac{Z_L T_M}{L M} F T_M \quad T_M [\dots]$$

$$\$ Z_L T_M \sqrt{6 Z_L' T_M \theta Z \theta T}$$

- Z_L 성분파의 각주파수 UDG
- T_M 성분파의 방향각 U
- N_L 성분파의 파수 $Z_L J$
- \dots_{LM} 성분파의 랜덤 위상
- θZ 랜덤 간격 분할
- $6 Z_L$ 표준 파랑 스펙트럼

$$T_M \quad R^F R \quad T_M$$

$$T_M \delta \Sigma \quad R \quad Q$$

여기서 주의해야 할 점은 생성 랜덤 파랑의 일정 시간 경과에 따른 반복성을 회피하기 위해 파주파수 성분을 랜덤하게 분할한다 파 방향각에 대한 분할은 등간격으로 분할하는데 이것은 파 주파수의 랜덤 분할성에 의한 효과로 성분파의 중첩파형의 반복성의 우려는 피할 수 있기 때문이다 또한 방향 분포 함수 : DYH 6 S) X Q W 식과 같이 표현할 수 있으며 파라미터에 의해 방향 분포의 집중도를 표현할 수 있는데 여기서는 Q 로 가정하여 일반 심해의 해상 상태를 표현해주는 광폭 방향분포를 설정한다

조파 신호를 생성하기 위해서는 조파 시스템이 가지는 입출력 과정을 나타내는 전달 함수를 이용하여 위의 수면 변위를 나타내는 (1)식을 아래와 같이 바꾸어 표현해야 한다.

$$9 \quad U W \quad f \quad f \quad \frac{\$ Z_L T_M}{L M \quad | * Z_L |} V I_4 \quad (6)$$

$$4_2 = Z_i t \quad k_i \cos T_j r B + \dots_{ij} \quad (7)$$

여기서 $G(Z)$ 는 진폭비 특성으로서, 입력 신호 출력 $V(Z)$ 과 진행파 진폭 $A(Z)$ 과의 비를 나타내며, T에 관계없이 일정하다고 보며, 실험에 의해 구하여진 값을 사용할 수 있다. 여기서는 조파 신호 생성 시간의 관점에서 조사하기 때문에 전달 함수 $G(Z)$ 특성에 관한 내용은 생략하여 계산을 수행한다. B는 조파 유니트의 폭, r는 유니트의 번호를 나타낸다.

조파 신호 생성은 (6)식을 이용하여 매시간 스텝에서 삼각함수 중첩법을 적용시켜 계산할 수 있다. 이는 계산 소요 시간을 많이 차지하게 되는 요인이 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 초기 계산에서만 삼각함수 중첩법을 이용하고 다음 시간 스텝에서는 미리 구하여진 값을 이용하여 반복법에 의해 신호 생성 값을 결정한다.

구체적인 전개식은 아래와 같다. 식(6)을 이산화된 시간 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$9 \quad U W \quad f \quad f \quad \frac{\$ Z_L T_M}{L M \quad | * Z_L |} V I_4 \quad (8)$$

$$4_3 = Z_i \theta t \quad k_i \cos T_j r B + \dots_{ij}$$

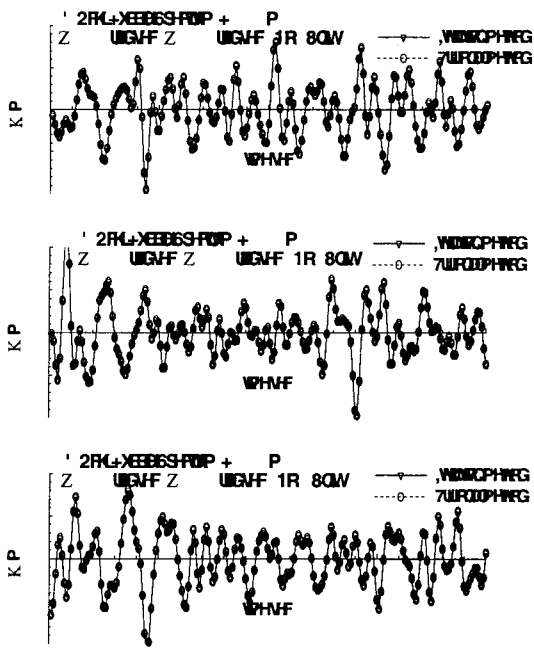


Fig. 2 Comparison of Wave Date by Iteration Method with that of by Trigonal Method

4. MLM법에 의한 방향스펙트럼파의 해석

3절에서는 조파 신호 생성 기법에 관한 비교 연구를 수행했으며, 이 절에서는 방향 스펙트럼파의 해석에 관해서 살펴보기로 한다. 해석을 논하기 이전에 먼저 살펴보아야 할 점은 계측 방법에 관한 것이다. 크게 나뉘어 공간상의 국부적, 광의적인 방법으로 나눌 수 있다. 국부적인 방법으로서 널리 보편적으로 사용되는 것은 파고계 배열을 이용한 것이다. 본 논문에서도 삼각형 배열 지점간의 거리 변화에 따른 해석 결과의 비교를 수행할 것이다. 이외에도 파랑의 kinematic 또는 kinetic 정보를 이용하는 방법을 들 수 있다. 즉, 파고계뿐만 아니라, 유속계, 검력계 등에서 검출된 파랑 관련 정보로부터 계측하는 방법이다. 이러한 국부적인 계측 방법의 장점은 국부 지점의 파랑 정보를 정도 높게 표현할 수 있다는 점이지만, 단점으로는 공간상의 영역이 국부적이라는 데 있다. 다른 방법으로 공간상의 광의영역에서의 계측 방법이다. 인공위성, 레이더, 항공기 상에서의 스테레오 사진법등 여러 종류의 계측방법을 들 수 가 있다. 최근 국내 및 일본에서는 레이더를 이용한 파랑 정보 획득 기술 개발이 활발하게 진행되고 있으며[4], 선박 해양 관련 응용 기술에도 크게 이바지할 것이라 기대된다. 이러한 광의 영역에서의 계측 방법의 단점이라고 하면, 계측 요소 기술 확보의 어려움 및 해석법 또한 국부적 계측에 의한 것보다 복잡해지리라 예상되며, 파랑 정보 획득면에서도

국부적 결과에 비해 정도가 떨어질 염려가 있다. 그러나, 광의영역의 파랑 정보 획득은 국부적인 관점보다 폭넓게 응용할 수 있으며, 예를 들면, 연료절감을 위한 최적 항로 선정 등, 미래 지향적 선박 해양 요소 기술로 꼭 필요한 분야라고 사료된다.

해석법에 관해서도 정통적으로 2차 Fourier Transformation을 이용한 해석이 사용되어져 왔는데, 최근에는 변분법에 기초를 둔 MLM, MEM, 베이즈법 등과 더불어 Wavelet 변환에 의한 파 방향성 해석 기법 또한 연구되어지고 있다[5].

본 연구에서는 3절에서 설정된 방향 스펙트럼을 목적함수로 하여, 삼각형 배열 지점간의 거리 변화에 따라서 수치 계측된 수면 변위 시계열을 MLM방법을 통해 해석하여 고찰한다[6]. 수치 계측법은 (1)식을 이용하여 3점에서의 수면변위의 시계열을 계측한다. 그림 3에서 목적함수로 정의되어진 2차원 방향 분포 함수와 파워 스펙트럼을 볼 수 있다.

Fig. 4에 두 종류의 삼각형 배열을 나타내고 있다.

삼각형 배열 지점간의 떨어진 거리는 방향 스펙트럼의 해석 결과에 영향을 미칠 수 있다. 해석 오차를 최소화하는 최적의 배열 거리를 찾는 것은 발생 파랑의 주기에 따라 달라 질 수 있으며, 또한 배열 지점간 거리뿐만 아니라 배열 형상 및 파고계 개수에 의해 영향을 받으므로[7] 정량적인 결과를 보여주기보다는 정성적인 비교에 국한시켰다. 편의상 Table 2에 각각의 배열에 관한 좌표를 열거했다.

Table 2

Coordinate	Array 1	Array 2
(x_1, y_1)	(10, 4)	(9.4, 4)
(x_2, y_2)	(10.3, 3.9)	(10.3, 3.9)
(x_3, y_3)	(10.3, 4.1)	(10.3, 4.1)

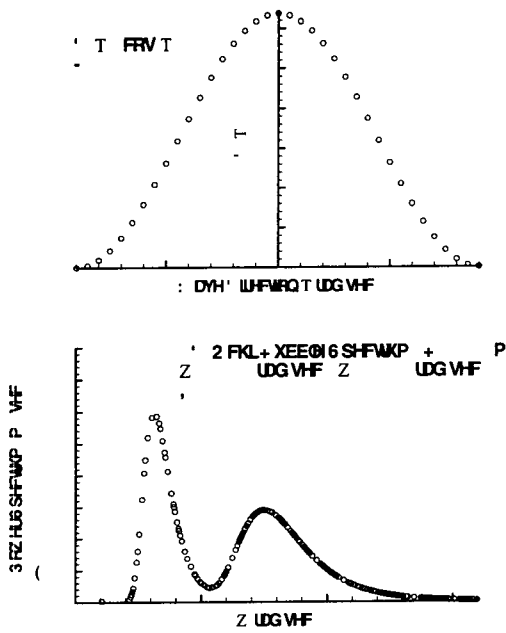


Fig. 3 Target wave spreading function and power

Spectrum

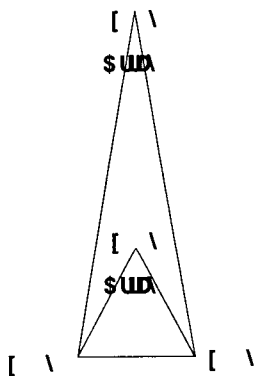


Fig. 4 Two kinds of wave arrays

Fig. 5에서는 (1)식을 통해 계산한 수면 변위의 시계열을 입력 데이터로 해서 FFT를 이용해 해석한 2/3차원 파랑 파워 스펙트럼을 나타낸다. 목적 파워 스펙트럼과 비교한 결과 2차원의 해석 파워 스펙트럼의 결과가 3차원에 비해 목적 파워 스펙트럼에 잘 일치 하고 있음을 알 수 있다. 이는 3차원 파랑의 경우 동일 주파수에서 진행 방향의 다른 성분파가 존재하기 때문에, 발생한 파의 분산이 위치적 정상상태에는 되기 힘들기 때문이다. 그렇지만, 3차원의 경우에도 목적 파워 스펙트럼에 잘 따라 가고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 MLM방법을 통해 그림 4의 두

종류의 삼각형 배열을 통해 추정되어진 파의 방향 분포 함수를 Fig. 6에 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 배열 지점간의 거리에 따라 추정 정도에 차이를 주고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 배열 지점간의 거리는 발생 파랑의 파장과파의 관계에서 정해지지만, 정확한 상관관계를 보여주는 연구 논문은 그 수가 적고, 단지 정성적인 결과를 제시해주는 논문이 대부분이다. 여기서 파악된 결과로는 Array 2보다는 Array1에서 계측한 파형으로부터 해석한 방향 분포 함수가 $\rho 90(\text{deg})$ 부근에서 더 나은 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 배열 지점간의 거리는 발생 파랑의 주기에 따라 시행착오로 결정하는 수 밖에 없지만, 일반적으로 피크 주파수의 파장의 반보다 적은 거리를 설정한다[8]. 여기서 파장이 짧은 피크 주파수는 대략 $7.5(\text{rad}/\text{sec})$ 이므로 심수영역의 가정하에서 파장은 대략 1.1m 정도이다. 그러므로 이것의 반파장은 0.55m 이므로 이보다는 짧은 배열 지점간의 거리를 두어야 할 것이다. Array2의 경우 가장 긴 거리가 0.9m 이므로 방향 분포 함수의 추정에 약간의 정도를 떨어뜨릴 수 있다고 사료된다.

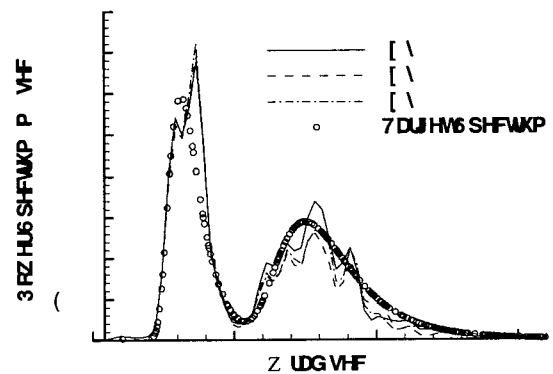
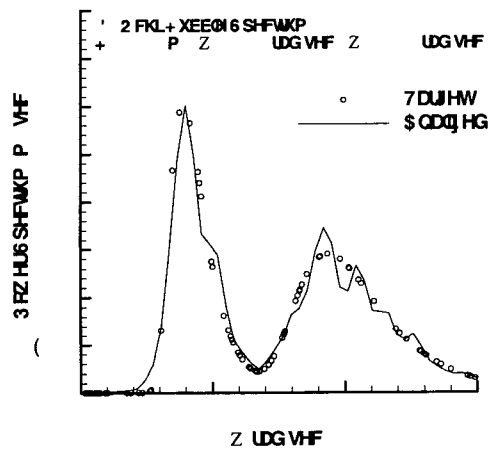
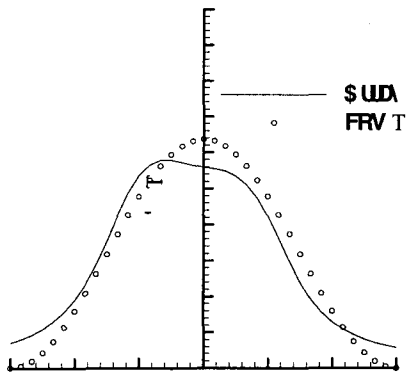
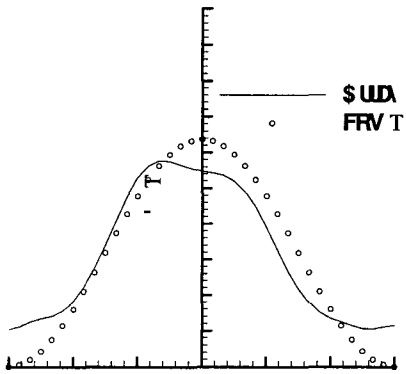


Fig. 5 Comparison of analyzed power spectrum measured numerically with target power spectrum



: DYH' UHFWRQT GHU



: DYH' UHFWRQT GHU

Fig. 6 Comparison of analyzed wave spreading function measured numerically with target spreading function

5. 결론 및 향후과제

지금까지 예인 수조에서의 방향 스펙트럼과의 조파 및 계측 기법의 비교를 수행했다. 결론으로서 다음과 같은 몇가지 사항을 언급할 수 있다.

1. 반복법에 의한 조파는 삼각함수 중첩법에 비해 정도를 보장함과 병행해서 탁월하게 계산 시간을 절약함을 알 수 있다.
2. 파고계 배열의 지점간의 거리에 따라 방향 분포 함수의 추정 결과를 비교한 결과, 발생 파 주기에 따라 적절한 거리를 유지해야 함을 알 수 있다.

앞서 설명한 것과 같이 정도 높은 추정을 위한 파라미터로서 배열 형상 및 파고계 개수 또한 중요하게 작용하기 때문에 향후 과제로서 이러한 파라미터를 고려한 조사도 같이 병행되어야 한다고 본다.

5. 참고 문헌

```

> 7 DNH] 6 . RED\ D V KL
$ ' ' LUHF WLR QDO , U UHJ XODU
7 RZ LQJ - RXUQ WKH 6RFL HW
$ FKL WHF WV 9 RO SS
LQ - DS
> + 0 DHGD³$ SSOLF DWLRQ RI : D
0 X' LUHF W L RQ D O 2 FHDQ
- RXUQ WKH 6RFL HW RI 1 DY
- DSDQ S LQ -
> %HQ 7KDU³ HWKRGOR JLFDO 8QL
5 HWL PH SO JRUL WK P IRU : DYH
%DVLQ DQG &RQVLGHU DWL RQ '
6 1 $- 9 RO
> ) DE LR . 7 DNDVH 7 +
3 DU( YDOX DWL RQ RI 0 DUDUW ±
: DYH 3 DUDP H WHUV ' - RXUQ
6 1 $- 9 RO
> + 6 / HH - 6 3 DUN ³$
6 WXG\ RQ 2 FHDQ : DY H ' L
' LUHF WLR QD 3 UR F 2 I WKH
0 HHWLQ J 6 1
> 0 , VREH ( VWLP D WL RQ 0 HWKRG
6 SHF W UXP : DYHV E\
/ LNHO 0 HW 1 R
LQ -
> , 5 <2 Q WKH P HDVXUHPHQ
Z DYH V' $$$O LHG 2 FHDQ 5
SS
> 7 NH] 6 0 L\ DNDZD
, WDEDV K² 2 Q 7 KH 0 HDV XUHP HQ
: DYH 6 SHF WU D E\ WKH 1 HZ
XVL QJ / D V - RXUQDO RI W
1 DY $UFKL WHF WVRO
LQ -

```