

불규칙파 중에서 전진하는 선박에 대한 시간영역 운동해석

이호영*, 박홍식**, 신현경***

Transient Motion Analyses for a Ship Advancing in Irregular Waves

Ho-Young Lee*, Hong-Shik Park** and Hyunkyung Shin***

요 약

선박이 파랑중에 충격력을 받거나 불규칙한 외력을 받았을 경우에 시간영역에서의 운동방정식을 해석하는 것이 편리하다. 본 연구에서는 주파수영역에서 3차원 Green함수를 이용한 패널방법을 사용하여 부가질량, 파랑감쇠계수, 1차항 파강제력과 시간평균된 표류력을 계산하였고, 기억효과를 포함한 시간영역의 운동방정식에서 Newmark- β 방법을 사용하여 수치적분하였다. 계산 예로 계열 60 선박($C_B=0.7$)을 선정하여 불규칙파중에서 전진할 때의 6자유도 운동, 선수미에서의 가속도, 갑판침수 횡수 및 선저 노출 횡수 등을 계산하였다. 또한 2차항 파강제력을 운동방정식에서 고려하여 파도중에서 추력증가에 대해서 검토하였다.

* Keywords : Time domain(시간영역), 3-Dimensional Panel Method(3차원 패널법), Memory Effect(기억효과), Irregular Wave(불규칙파)

Abstract

When a ship advancing in waves is subjected to impact forces or irregular forces, the motion analyses for ship are convenient for being calculated in the time domain. The added mass, wave damping coefficients, wave exciting forces and mean drift forces are calculated by 3-Dimensional panel method used the translating pulsating Green function in the frequency domain and the motion equations which are considered by the memory effect due to waves are numerically solved by using the Newmark- β method in the time domain. The motion analyses are carried out for a Series 60($C_B=0.7$) moving in irregular waves. The items of calculation are 6-degree motions, accelerations at the fore and after position, numbers of deck wetness and numbers of exposure at ship-bottom, etc. Moreover, the thrust addition in waves is examined by considering the time mean drift forces in the motion equations of time domain.

접수일자: 2000년 11월 16일, 승인일자: 2001년 5월 29일

*정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 연구교수 (E-mail: hyl9930@yahoo.co.kr)

**학생회원, 울산대학교 수송시스템공학부 석사과정 (E-mail: hongshik@ulsan.ac.kr)

***정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 교수 (E-mail: hkshin@uou.ulsan.ac.kr)

1. 서론

항해하는 선박에 작용하는 외력이 불규칙한 경우에 운동특성을 계산하기 위해서는 시간영역해석을 수행하는 것이 편리하다. 시간영역 해석법은 불규칙파 중에서의 선박 운동응답은 물론 함정의 함포 사격 또는 미사일 발사로 인한 충격력 및 어뢰에 의한 충격력의 계산 등에 이용될 수 있다.

Cummins(1962)는 파랑의 기억효과를 포함한 시간영역에서 운동방정식을 정립하였고, 그 이후에 선박의 추파중에서 전복현상을 수치모사하기 위해 시간영역 해석법이 널리 사용되었다. 대표적인 연구로서 De Kat/Pauling(1989)은 주파수 영역에서 스트립(strip)방법을 사용하여 부가질량, 파랑감쇠계수 및 1차항 파강제력을 계산하고, 시간영역에서 운동방정식을 사용하여 선박이 추파중에서 전복하는 현상을 수치 모사하였다. 국내의 연구로는 홍사영 등(1999)은 스트립 방법으로 동유체력을 구하여 충격력에 대한 운동응답을 구한 바 있으나 본 논문에서는 주파수영역에서 3차원 Green함수를 이용한 패널방법을 사용하여 부가질량, 감쇠계수, 1차항 파강제력과 시간평균된 표류력을 계산하고 시간영역에서의 운동방정식을 Newmark- β 방법을 사용하여 수치적분하였다.

시간영역 해석법의 유효성을 검토하기 위하여 이용하여 규칙파중에서의 운동응답을 계산하여, 그 결과를 주파수영역에서 계산한 값과 비교하였다. 또한 불규칙파 중에서의 운동응답과 선수에서의 수직 상대변위를 이용하여 갑판침수, 선저노출 횡수, 충격력의 의한 선박의 운동응답 및 표류력에 의한 추력증가를 수치계산 하였다.

2. 문제의 정식화

표면장력을 무시하고 유체는 비점성, 비압축성이고 유동은 비회전적이라고 가정하면 속도포텐셜 ϕ 가 존재한다.

또한 입사파의 진폭이 작아 선형화된 자유표면 조건을 사용하기로 한다. 좌표계는 Fig.1과 같이 우수직교좌표계를 취하고 연직상방을 z축으로

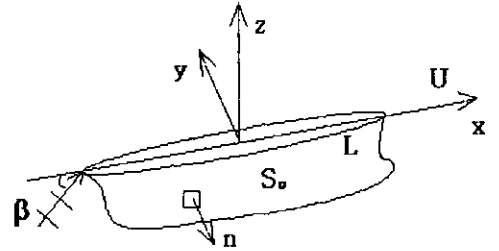


Fig.1 Coordinate system

하고, xy면은 평균수면과 일치하는 것으로 한다. 시간영역에서 운동을 수치모사하기 위해 부가질량, 파랑 감쇠계수, 1차항 파강제력 및 시간 평균된 표류력은 주파수 영역에서 전진하며 동요하는 3차원 그린함수를 이용한 3차원 패널법을 사용하여 계산하였다(Chan 1990, 이호영/염덕준 1994, 이호영등1997). Cummins(1962)가 도출한 시간영역에서 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \ddot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j d\tau + C_{ij} x_j] = F_i, \quad i=1,2,\dots,6 \quad (1)$$

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

- where, M_{ij} : mass matrix
- A_{ij} : added mass matrix
- B_{ij} : wave damping matrix
- C_{ij} : hydrostatic restoring matrix

식(2)로 계산되는 K_{ij} 는 시간기억효과함수이고, F_i 는 외력에 관한 항으로 파강제력과 임의의 충격력을 포함한다. 식(1)을 Fourier 변환하면 $A_{ij}(\infty)$ 는 다음과 같다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_0^\infty K_{ij}(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

여기서 ω_0 는 임의의 주파수이며, 식(3)의 수치

적분을 위해서는 무한대 주파수까지의 모든 주파수에서의 값이 계산되어야 하지만 본 연구에서는 파랑 감쇠계수가 0에 가까운 고주파수 영역까지 계산하고 나머지 부분은 직선으로 외삽하였다.

식(1)에서 우변의 외력에 관한 항에 포함된 1차항 파강제력에 관한 항은 다음 식으로 표현된다.

$$F^{(1)}_{\eta}(t) = Re[\zeta f_{\eta}(\omega_e) e^{i\omega_e t + \epsilon}] \quad (4)$$

$$f^{(1)}_{\eta}(\omega_e) = -\rho \sum_{k=1}^6 \int \int_{S_0} (i\omega_e + U m_j) (\phi_I + \phi_D) e^{i\omega_e t} n_j ds \quad (5)$$

$$\phi_I = \frac{g\zeta}{\omega} e^{kz - ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (6)$$

$$\omega_e = \omega - Uk\cos\beta \quad (7)$$

- where, ζ : wave amplitude
 ϵ : phase angle of wave
 S_0 : body surface
 k : wave number
 ω : wave angular frequency
 β : heading angle(180° head sea)
 ω_e : encounter frequency
 n : normal vector
 $(m_1, m_2, m_3) = (0, 0, 0)$
 $(m_4, m_5, m_6) = (0, n_3, -n_2)$

여기서, ϕ_I 는 무한수심에서의 입사파 포텐셜이고, ϕ_D 는 산란 포텐셜을 의미한다.

식(1)을 수치계산하기 위한 n+1 시간단계에서의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{\eta j} + A_{\eta j}(\infty)) \ddot{x}_j + C_{\eta j} \dot{x}_j] = F_j - \sum_{j=1}^6 \sum_{p=0}^n K_{\eta j}(p)(n-p) \dot{x}_j \Delta t \quad (8)$$

식(8)을 수치적분하기 위해서 Newmark- β 방법을 적용하면 최종 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{\eta j} + A_{\eta j}(\infty)) (\frac{2}{\Delta t})^2 x_j^{n+1} + C_{\eta j} \dot{x}_j^{n+1}] = \sum_{j=1}^6 (M_{\eta j} + A_{\eta j}(\infty)) [(\frac{2}{\Delta t})^2 x_j^n + (\frac{4}{\Delta t}) \dot{x}_j^n + \ddot{x}_j^n] + F_{\eta j} + F_{Bj} - \sum_{j=1}^6 \sum_{p=0}^n K_{\eta j}(p)(n-p) \dot{x}_j \Delta t \quad (9)$$

불규칙파중에서 운동응답을 계산하기 위해서 ITTC 스펙트럼을 사용하여 조우주파수에 관한 스펙트럼으로 변환하고 아래의 식(13)을 이용해서 파형을 생성하였다.

$$S_{\zeta}(\omega) = A/\omega^5 \exp(-B/\omega^4) \quad (10)$$

$$S_{\zeta}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega) \frac{d\omega}{d\omega_e} \quad (11)$$

$$\zeta = \sqrt{2 S_{\zeta}(\omega_e) \Delta \omega_e} \quad (12)$$

$$\zeta(t) = \sum_{m=1}^N \zeta_m \cos(\omega_{em} t + \epsilon_m) \quad (13)$$

- where, $A = 172.5(H_{1/3}^2/T_z^4)$
 $B = 691./T_z^4$
 $H_{1/3}$: significant wave height
 T_z : mean period

선박의 감판침수, 선저노출 횡수를 계산하기 위하여 선체 수선면의 임의의 위치에서 수직상대변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta_r = \zeta_3 - x \zeta_5 + y \zeta_4 - \zeta_w \quad (14)$$

식(14)에서 비정상유동에서 야기되는 dynamic swell-up 현상은 무시하고 선수로 부터 0.15L위치에서 수직상대변위를 계산하였다. 그리고 선박의 임의의 위치에서 일정시간의 충격력을 주었을 경우에 선박의 운동응답을 계산하기 위해 식(1)의 우변에 F_j 에 충격력을 대입하여 계산하였다.

2차항 파강제력은 주파수영역에서 계산되어지며 시간영역에서는 아래와 같이 표현된다.

$$F^{(2)}_{\eta} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^6 \zeta_j \zeta_k \{ T_{\eta k}^c \cos[(\omega_k - \omega_j)t + (\epsilon_k - \epsilon_j)] + T_{\eta k}^s \sin[(\omega_k - \omega_j)t + (\epsilon_k - \epsilon_j)] \} \quad (15)$$

$$T_{jk}^{ic} = T_{kj}^{ic} = 0.5(T_{ij}^{ic} + T_{kk}^{ic}) \quad (16)$$

$$T_{jk}^{is} = T_{kj}^{is} = 0$$

식(16)에서는 Newman(1974)의 근사법을 사용하여 2차항 파강제력을 계산하고 식(8)에 대입하여 전후 방향의 비선형 운동을 수치모사 하였다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 제열 60선박($C_B=0.7$)의 수면 하 선체 표면에 246개의 패널을 분포시켰으며 $Fn=0.2$ 인 맞파도에서의 부가질량, 파랑 감쇠계수, 파강제력 및 시간 평균된 표류력을 계산하였다(이호영/곽영기, 1997).

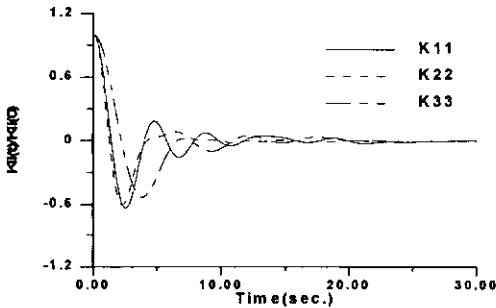


Fig.2 Retardation function

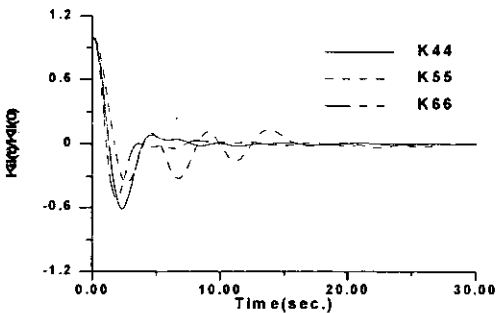


Fig.3 Retardation function

Fig 2,3에 식(3)으로 표현된 시간기억효과함수의 계산결과를 보였다. 계산결과 시간기억효과함수가 시간이 지남에 따라서 0에 수렴되는 것을

알 수 있다.

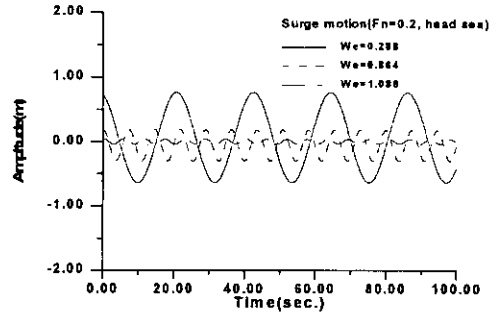


Fig.4 Time histories of surge in regular wave

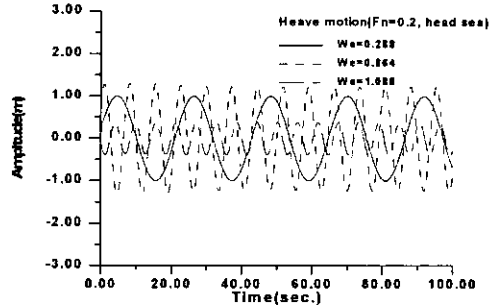


Fig.5 Time histories of heave in regular wave

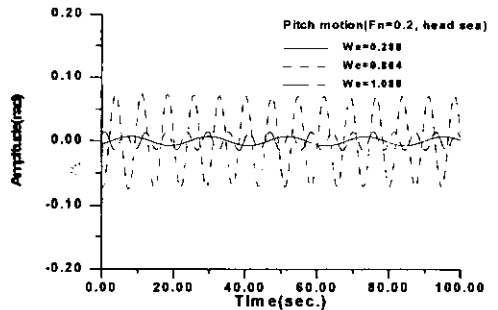


Fig.6 Time histories of pitch in regular wave

Fig.4 - Fig.6은 저주파수영역, 고주파수영역 및 공진주파수 영역의 임의의 주파수를 선택하여 계산한 운동응답을 나타낸 그림이다. 그림에서 알

수 있듯이 시간에 따라 운동이 규칙적으로 그림에서 잘 묘사된다.

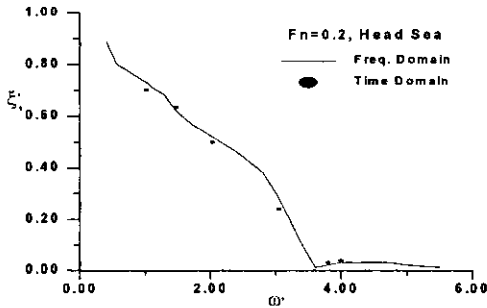


Fig.7 Comparison of surge motion response

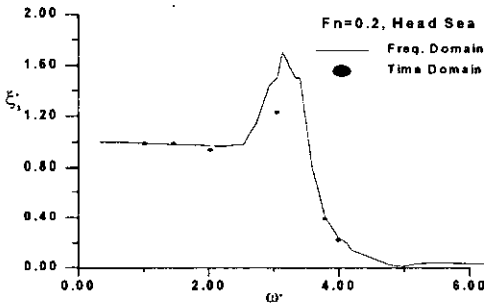


Fig.8 Comparison of heave motion response

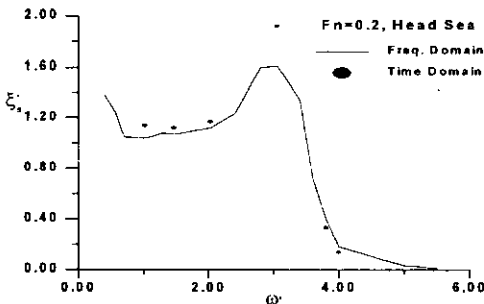


Fig.9 Comparison of pitch motion response

Fig.7 - Fig.9에는 시간영역에서 계산된 운동 응답과 주파수영역에서 계산된 결과를 비교하여 도시하였다. 계산결과로부터 저주파수영역과 고주

파수영역에서는 두 계산값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 상하동요와 종동요의 공진점에서는 시간영역 해석법에 의한 결과가 주파수영역 해석방법에 의한 것 보다 작게 나타나거나 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 기억효과 함수의 계산 오차에 기인한 듯하다.

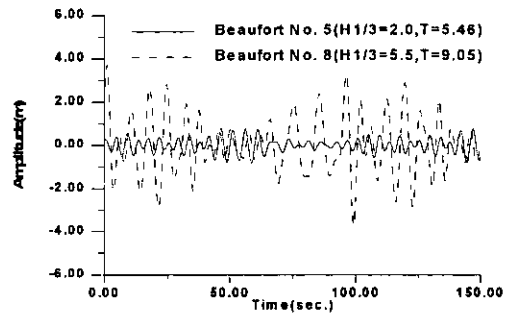


Fig.10 Generation of irregular waves

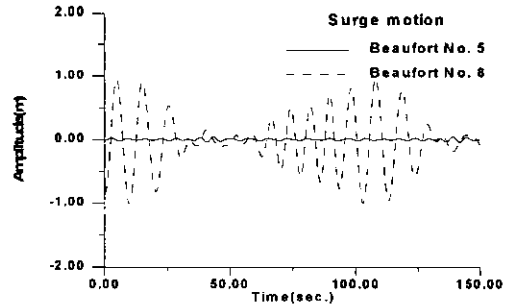


Fig.11 Surge response in irregular waves

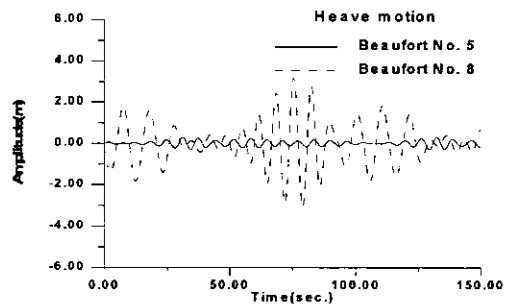


Fig.12 Heave response in irregular waves

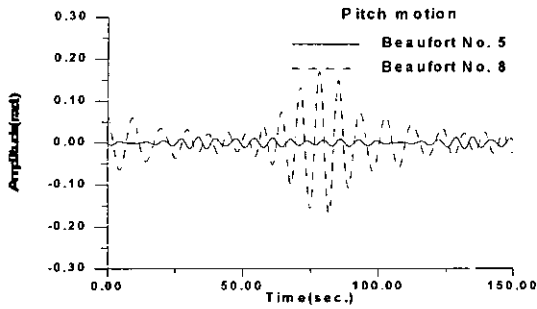


Fig.13 Pitch response in irregular waves

Fig.10은 식(13)을 이용하여 해상상태 5와 8일 때 불규칙파를 생성하였다. Fig.11 - Fig.13은 해상상태 5와 8인 경우에 대하여 전후동요, 상하동요 및 종동요에 대한 운동응답을 계산하여 결과를 도시하였다. 계산 결과로부터 해상상태가 5에서 8로 증가함에 따라 운동응답이 현저히 커지는 것을 알 수 있다.

Fig.14에는 식(14)를 이용하여 계산한 상대변위와 건현과의 차를 이용하여 불규칙파 중에서의 갑판침수 횟수를 계산한 결과를 도시하였다. 해상상태 5에서는 갑판침수가 일어나지 않으나 해상상태 8에서는 갑판침수가 여러 번 발생하는 것을 알 수 있다.

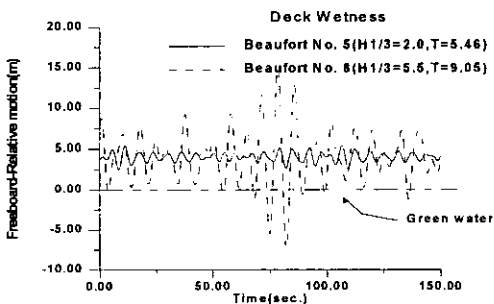


Fig.14 Time history of deck wetness

Fig.15에는 상대변위와 흘수와의 차를 계산하여 일정시간 동안의 선저가 노출되는 횟수를 도시하였다. 선저 노출은 해상상태 8에서 150초 동안에 2번 발생하는 것을 알 수 있다.

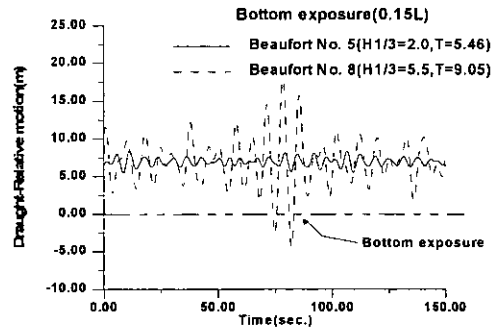


Fig.15 Time histories of bottom exposure

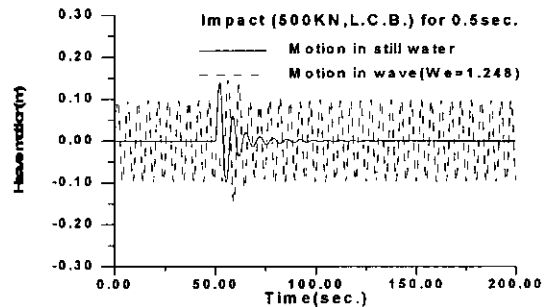


Fig.16 Time histories of heave response in impact force

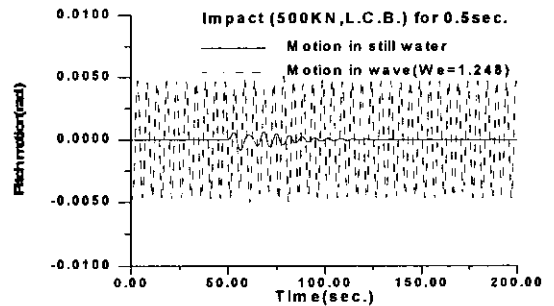


Fig.17 Time histories of pitch response in impact force

Fig.16 - Fig.17에는 L.C.B.에 500KN의 힘을 0.5초 동안 주었을 때의 상하동요와 종동요 응답을 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 파도중에서 충격력이 작용한 후 25초 정도까지 충격력에 의한 영향이 나타나며, 상하운동이 종운

동보다 충격력에 의한 영향이 크다. 그 이유는 충격력의 작용점이 선박의 중력중심까지 거리가 작기 때문이다.

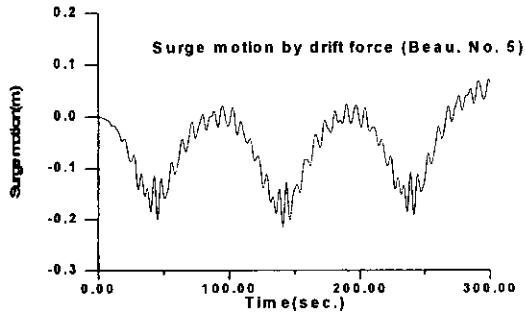


Fig.18 Nonlinear surge motion

Fig.18에는 주파수 영역에서 전후 방향의 시간 평균된 표류력을 고려하고 파도에 의한 부가저항을 극복하기 위해 추력을 증가시켜 시간영역에서 수치모사한 결과를 도시하였다. 추력증가는 2.7KN으로 주었으며 추력증가에 의해 한쪽으로 밀리는 현상은 방지하였으나 시간에 따른 저주파수 운동은 그림에서 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3차원 패널법을 사용하여 선박에 대한 시간영역 운동해석을 수행해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 시간영역해석과 주파수영역해석 결과는 공진 주파수 근처를 제외하고 거의 일치하였다.
- 2) 수직상대변위를 이용하여 불규칙파 중에서의 감관침수횡수와 선저노출 횡수 등을 알 수 있었다.
- 3) 선박에 충격력이 가해졌을 때 선박의 운동 응답을 체계적으로 수치계산 할 수 있었다.
- 4) 전후방향의 표류력을 계산하여 추력증가를 계산하였고, 또한 비선형 운동도 수치모사하였다.

참 고 문 헌

- 홍사영, 김현조, 최윤락, 김진하, 홍석원 1999 "충격하중에 대한 선박의 천이 운동응답 시뮬레이션 연구," 제38차 KTTC WORKSHOP 내항성·조종성·안정성분과논문집, pp9-1-9-11
- 이호영, 염덕준 1994 "파랑중에서 전진동요하는 선박의 측아파수 억제에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제31권, 제4호, pp73-81
- 이호영, 송기종, 염덕준 1996 "초고속 쌍동선에 대한 내항성능 해석방법 비교," 대한조선학회논문집, 제33권, 제2호
- 이호영, 광영기 1997 "파랑중에서 전진하는 선박의 부가저항해석," 한국해양공학회지, 제11권, 제2호, pp91-99
- Cummins, W.E, 1962 "The impulse response function and ship motions," Schiffstechnik, Vol. 47 No. 9
- Newman, W.E. 1962 "Second order, slowly varying forces on vessels in irregular waves," Proc. Int. Symp. Dynamics of Marine Vehicles and Structures in waves, ed. R.E.D. Bishop & W.G. price, pp182-186
- De Kat, J.O. and Pauling, J.R. 1989 "The simulation of ship motions and capsizing in severe seas," SNAME, Vol. 97.
- Chan, H.S. 1990 "A Three-Dimensional Technique for Predicting First- and Second-Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in Waves," Ph. D. Thesis, University of Glasgow



< 이 호 영 >



< 박 흥 식 >



< 신 현 경 >