한국해양공학회 2001년도 추계학술대회 논문집 PP. 164~168

파중 진행하는 선박의 3차원 시간영역 운동해석

홍도천* · 하태범 · 김대헌 · 송강현
충남대 첨단수송체연구소* · 한국선급기술연구소

3_D Time-Domain Analysis on the Motion of a Ship Advancing in Waves

DO-CHUN HONG*, TAE-BUM HA, DAE-HEON KIM AND KANG-HYEN SONG
*Center for Advanced Transportation Vehicles, Chungnam National University, Taejon, Korea**
Korean Register Of Shipping, Taejon, Korea

KEY WORDS : 3-D time-domain ship motion 3차원 시간영역 선체운동, memory effect functions 이력함수, constant added mass coefficients무한주파수 부가질량계수, Newmark-ß method

ABSTRACT: *The motion of a ship advancing in regular waves is analyzed in the time-domain using the convolution integral of the radiation forces. The memory effect functions and infinite frequency added masses are obtained from the solution of the three dimensional improved Green integral equation in the frequency domain by making use of the Fourier transformation. The ship motions in regular waves have been calculated by both the time and frequency domain methods. It has been shown that they agree very well with each other. The present time-domain method can be used to predict the time histories of unsteady motions in irregular waves. It can also be used to calculate the hydrostatic and Froude-Krylov forces over the instantaneous wetted surface of the ship hull to predict large ship motions, in a practical sense, advancing in large amplitude waves.*

1. 서 론

규칙파 중 진행하는 선박은 입사파에 의하여 기진되어 입사파의 주파수에 선박의 전진효과가 더해진 조우주파수로 6자유도 동요를 하면서 전진을 한다. 전진속도가 상대적으로 작은 경우, 또는 세장선의 경우에는 고주파수 가정에 의한 스트립 방법에 의하여 선체운동을 구할 수 있다(Salvesen et. al. 1970). 한편 시계열 입력 또는 출력이 요구되는 선체운동 문제에서는 impulse response 이론에 의하여 정립된 시간영역 운동방정식이 쓰이고 있다(Cummins, 1962). 선형문제에서는 이와 같은 주파수영역 해석법과 시간영역 해석법이 수학적으로 동일하므로 시간영역 운동방정식에 나오는 제 계수를 주파수영역에서 구한 파감쇠계수 및 부가질량계수의 Fourier 변환으로부터 구할 수 있다. 최근 스트립 방법을 사용한 실용적인 시간영역 운동해석 및 파 하중 해석기법이 등장한 바 있으며 이와 유사한 가정에 입각한 실용적 3차원 패널 방법도 DNV 및 MIT등지에서 개발된 바 있다(Fonseca and Guedes Soares 1998; Huang and Sclavounos 1988). 본 논문에서는 규칙파중을 진행하는 선체에 작용하는 유체력을 주파수영역 3차원 속도 포텐셜을 사용하여 구한후 이로부터 시간영역 6자유도 운동방정식에 나오는 제 계수를 구하여 시계열 운동응답을 구하는 방법을 소개하였다. 여기서 주파수영역 제 계수의 계산이 improved Green integral equation의 해를 사용하여 수행되므로 기존 적분방정식의 특이파수현상에 의한 장애는 발생하지 않는다(Hong, 1987). 한편 엄밀한 의미의 주파수영역 3차원 속도 포텐셜은 전진하며 동요하는 3차원 source에 의한 Green 함수를 사용하는 경계치 문제를 풀어서 구할 수 있으나 이러한 엄밀한 3차원 적분방정식은 계산시간 및 해법상의 난점으로 아직 실용화에 이르지 못하고 있으므로 여기서는 고주파수 가정에 입각한 간략화된 적분방정식을 사용하였다(Brard 1948; Hong 1998; Hong 2000).

2. 선형 비정상 포텐셜 문제

유체는 비 점성, 비 압축성이며 자유표면 F 와 선체의 접수면 S 그리고 무한수심 사이의 구간 V 를 점하고 여기에 중력이 작용하고 있다. 크기가 $O(\varepsilon)$인 미소진폭 a_0 를 가진 입사파, Airy wave가 무한 원방에서 오며 선

박은 크기가 $O(\varepsilon)$인 일정한 수평방향 속도 $\vec{u}$ 로 전진하며 6자유도 운동을 한다. z'축을 연직 상방으로 하고 $(x'\ y')$평면을 정수면과 일치시킨 고정 직각 좌표계 (x', y', z')에서 $\vec{u}$를 양의 x'방향으로 취한다. 한편 선체운동과 파 하중등은 통상 원점 o가 평균위치에 있는 선체의 수선면 상에 있고 z 축은 연직 상방을 가리키며 x'축과 x축 및 y'축과 y축의 방향이 각각 일치하는 이동 직각 좌표계 (x, y, z)에서 표시된다. x축이 선체의 길이방향과 평행하며 $+x$방향이 선미에서 선수를 향한다. 두 좌표계가 시간 $t=0$에서 일치한다고 보면 다음관계식이 성립한다.

$$x' = x + ut, \qquad \vec{u} = u\vec{e_1} \tag{1}$$

고정좌표계 (x', y', z')에서 원 진동수 ω_0 를 갖는 입사파는 다음식으로 주어진다

$$\Phi_0 = -\frac{a_0\, g}{\omega_0} Re\{e^{k_o[z' + i(x'\cos\beta + y'\sin\beta)]} e^{-i\omega_0 t}\} \tag{2}$$

여기서 g는 중력가속도, $k_0 = \omega_0^2/g$는 파수이고 β는 x'축으로부터 잰 파의 입사각이다.
입사파를 이동좌표계 (x, y, z)에서 나타내면 다음과 같다.

$$\Phi_0 = -\frac{a_0\, g}{\omega_0} Re\{ie^{k_o[z \pm i(x\cos\beta + y\sin\beta)]} e^{-i\omega t}\} \tag{3}$$

$$\omega = |\omega_o - u\, k_o \cos\beta| \tag{4}$$

S 상에서 V 를 향한 법선 벡터를 $\vec{n}$, 평균위치에서의 S 및 $\vec{n}$ 을 S_0, $\vec{n_0}$ 라하고 S_0와 평면 $z=0$ 가 만나는 선을 평균위치에 있는 선체의 흘수선(Waterline) W라 한다. 선체는 (4)식으로 주어지는 조우주파수 ω로 $O(\varepsilon)$인 미소진폭 단순조화운동을 한다. 유동을 비 회전이라 하면 유속은 Laplace방정식을 만족시키는 속도포텐셜 Φ로부터 구할 수 있다.

속도포텐셜은 선박의 일정속도의 전진에 의하여 생기는 정상포텐셜 Φ_W 와 입사파에 기인한 비정상 포텐셜 Φ의 합이다. 전진속도의 크기도 $O(\varepsilon)$이라 하면 선형화된 Φ_W와 Φ문제는 각각 독립적으로 다룰 수 있다. 이 경우 정상 포텐셜 Φ는 부가저항에 관여하지 않게되므로 본 연구에서 제외시킨다. 비정상 포텐셜 Φ는 다시 복소수로 표시된 입사파 Ψ_0, 산란파 Ψ_7 및 선체의 6자유도 운동에 의한 방사파 Ψ_R 로 나눌 수 있다.

$$\Phi(x, y, z; t) = Re\{(\Psi_0 + \Psi_R + \Psi_7)e^{i\omega t}\} \tag{5}$$

방사파 및 산란파 포텐셜을 구하는 문제는 참고문헌에 자세히 나와있다(Hong 1998).

3 시간영역 운동방정식

규칙파 중 진행하는 선체가 안정적인 조화운동을 할 경우 시간영역 운동방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{6}\Big[(m_{jk} + a_{jk})\ddot{x}_k(t) + \int_{-\infty}^{t} k_{jk}(t-\tau)\dot{x}_k(\tau)\,d\tau + c_{jk}\,x_k(t)\Big] = f_j(t), \quad j=1\ldots,6 \tag{6}$$

위에서 m_{jk}는 선체의 inertia이고 $x_k(k=1,2,3)$는 선박의 전후, 좌우 및 상하 동요의 변위를 나타내고 $x_k(k=4,5,6)$는 이동좌표계 (x, y, z)에 고정된 회전중심 O 에 대한 회전운동으로서 횡, 종 및 선수요의 각변위를 나타내며 $\ddot{x}(t)$ 및 $\dot{x}(t)$는 각각 가속도 및 속도를 표시한다.
일반적으로 (6)식의 우변에는 입사파에 대한 impulse response 함수의 convolution 적분에 의한 시간영역 기진력이 주어지지만 본 논문에서는 특정 주파수 ω에서의 입사파와 산란파에 의한 기진력을 사용한다. c_{jk}는 복원력계수이다.
이력함수 $k_{jk}(t)$는 주파수영역 3차원 파감쇠계수 $b_{jk}(\omega)$의 Fourier 변환으로서 다음과 같이 표시된다.

$$k_{jk}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} b_{kj}(\omega)\cos\omega t\,dt \tag{7}$$

a_{jk}는 시간에 무관한 무한주파수 부가질량계수이다. 기존 적분방정식이 특이파수현상 때문에 고주파수에서의 속도포텐셜을 구하는데 매우 어려움을 겪었음에 반하여 본 논문에서는 improved Green integral equation을 사용하기 때문에 이러한 장애가 없으며 따라서 고주파수에서의 부가질량계수를 직접 구하여 사용할 수 있으며 파감쇠계수의 무한주파수까지 적분도 직접 수행된다.
어떤 순간 t_1 과 $t_2 = t_1 + \delta t$ 에서의 속도, 변위 및 가속도는 Newmark-ß (β=1/4)법을 사용하여 다음과 같이 관련지울 수 있다.

$$x(t_2) = x(t_1) + \dot{x}(t_1)\,\delta t + [\ddot{x}(t_1) + \ddot{x}(t_2)]\,\delta t^2/4 \tag{8}$$

$$\dot{x}(t_2) = \dot{x}(t_1) + [\ddot{x}(t_1) + \ddot{x}(t_2)]\,\delta t/2 \tag{9}$$

적절한 초기값과 함께 (8),(9)식을 (6)식에 대입하면 각 순간에서의 운동을 구할 수 있다.

4. 계산 예

수치모형으로는 길이 L, 넓이 B, 깊이 D가 각각 200, 50, 30m인 Caisson이 선정되었다. 물체의 밀도는 균일하다고 가정하여 Caisson의 1/2이 물에 잠긴 상태이고 물체의 회전중심 O는 AP로부터 110m 앞, Caisson의 바닥 면으로부터 10m 위에 정하였다. 무게중심은 물체의 부피중심과 일치하며 AP로부터 100m 앞, Caisson의 바닥 면으로부터 15m 위에 위치한다. 물체의 부심은 AP로부터 100m 앞, Caisson의 바닥 면으로부터 7.5m 위에 위치한다. 이러한 caisson에 대하여 전진속도 5 m/s, 입사각 150도 에 대한 계산이 수행되었다. 조우주파수 ω가 0.01~3.5 rad/sec 구간에서 주파수영역 계산이 수행되어 부가질량 및 감쇠계수가 구하여졌다. $\omega = 3.5$ $rad/\sec$ 이상의 고주파수에서는 제 계수의 값이 매우 작으므로 계산시간의 단축을 위하여 무한주파수까지 extrapolation을 하였다(van Oortmerssen 1976). 이력함수는 0.01초 간격으로 계산하였으며 운동방정식을 푸는 과정에서의 time step은 0.01초이며 60초까지 time marching이 수행되었다.
선체운동의 시간영역 및 주파수영역 계산치 비교는 입사파의 파장이 선체길이 200m 와 비슷한 경우인 ω=0.7 rad/sec에서 행하여졌다.

제 계수는 선체질량 m을 사용하여 다음과 같이 무차원화 되었다.

$$Ma_{jk} = m_{jk} / m$$

$$B_{jj} = b_{jj} / (m\sqrt{g/L}) \quad j = 1,2,3$$

$$B_{jj} = b_{jj} / (mL^2\sqrt{g/L}) \quad j = 4,5,6$$

무차원 부가질량 값 및 파 감쇠계수 값들이 (Fig.1) -(Fig.4)에 소개되었다.

이력함수는 다음과 같이 무차원화되어 (Fig.5)-(Fig.8)에 소개되었다.

$$K_{jj} = k_{jj} / (mg/L) \quad j = 1,2,3$$

$$K_{jj} = k_{jj} / (mL^2 g/L) \quad j = 4,5,6$$

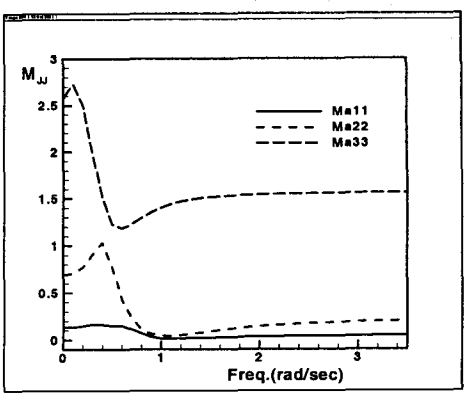

Fig.1 Non-dimensional added mass coefficients

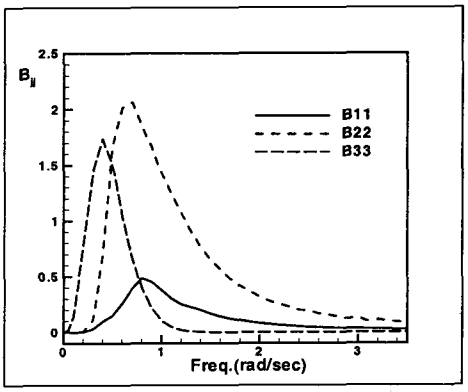

Fig.2 Non-dimensional damping coefficients for uncoupled translational motions

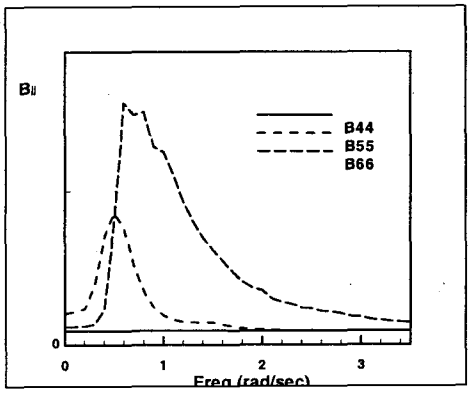

Fig.3 Non-dimensional damping coefficients for uncoupled rotational motions

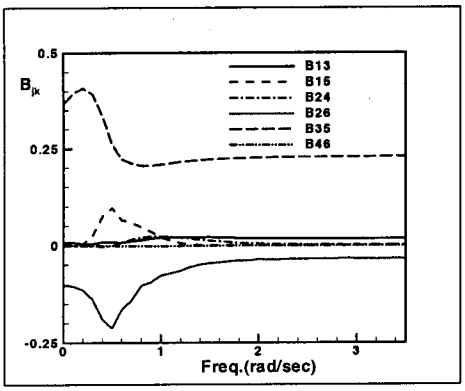

Fig.4 Non-dimensional damping coefficients for coupled motions

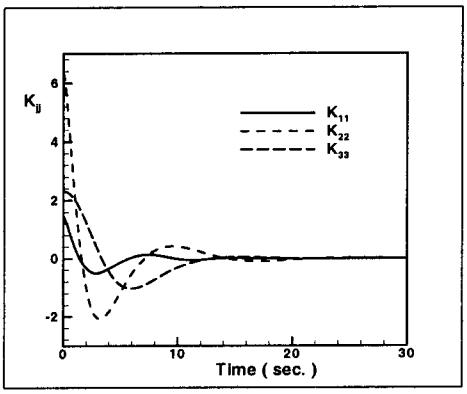

Fig.5 Non-dimensional memory effect functions for uncoupled translational motions

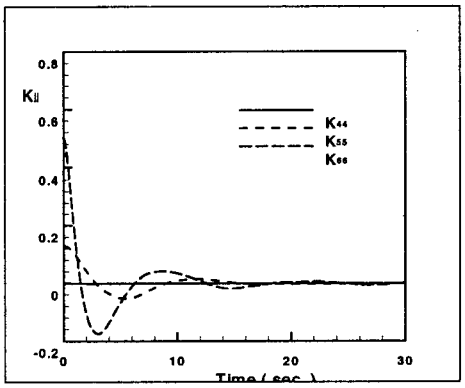

Fig.6 Non-dimensional memory effect functions for uncoupled rotational motions

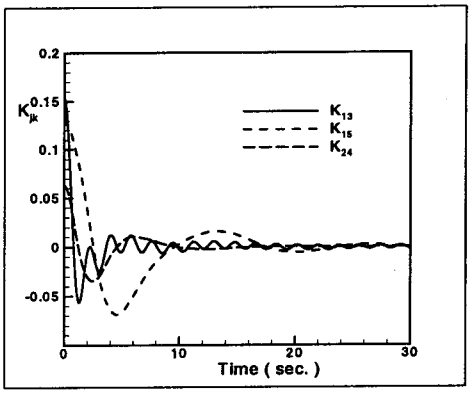

Fig.7 Non-dimensional memory effect functions for coupled motions (translational contribution)

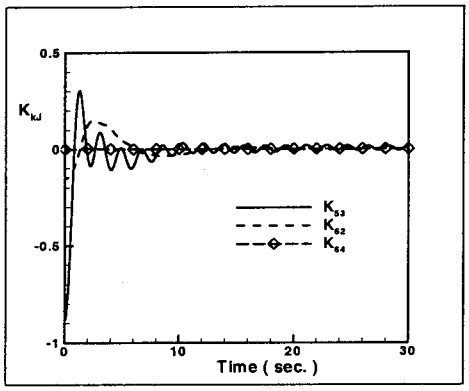

Fig.8 Non-dimensional memory effect functions for coupled motions (rotational contribution)

시간영역 가속도는 다음과 같이 무차원화 되어 (Fig.9) (Fig.11)에 주파수영역 계산값과 같이 비교, 소개되었다

$$A_k = \ddot{x}_k / a_0 \quad k=1,2,3$$

$$A_k = \ddot{x}_k / (a_0 k_0) \quad k=4,5,6$$

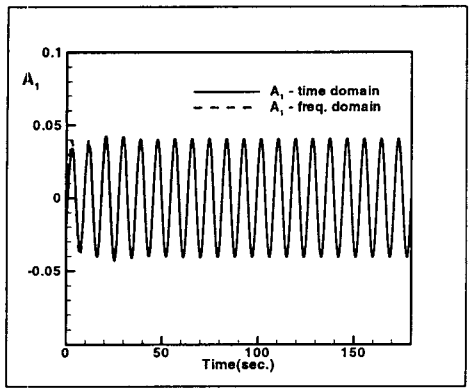

Fig.9 Time and frequency domain accelerations of surge motions

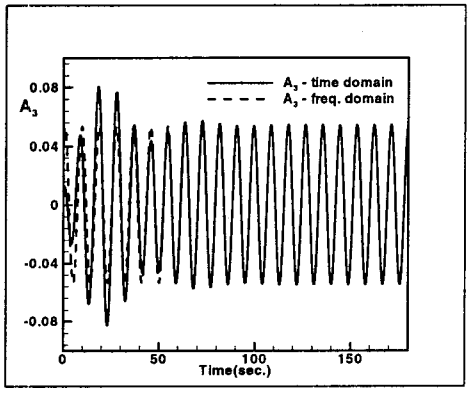

Fig.10 Time and frequency domain accelerations of heave motions

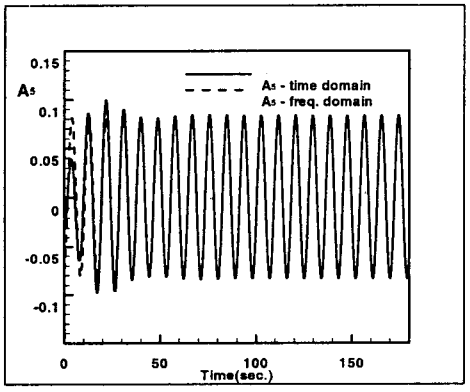

Fig.11 Time and frequency domain accelerations of pitch motions

5. 토 론 및 결 론

운동의 시간영역 계산값과 주파수영역값이 일치하는 것으로 보아 본 시간영역 계산기법의 높은 신뢰도를 확인할 수 있었다.

본 기법을 불규칙파에 대하여 적용하면 시간영역 응답을 직접 산출할 수 있다.

본 시간영역기법을 대진폭 규칙파에 적용하여 입사파 및 부력에 대한 비선형 효과를 고려한 운동 및 파 하중을 산출할 수 있다.

참 고 문 헌

홍도천 외(1998), "저속선박의 3차원 파랑하중 계산기법 개발", 충남대 산기연/한국선급 공동연구보고서

Brard, R.(1948), "Introduction à l'étude théorique du tangage en marche", Bulletin de l'ATMA, Vol. 47

Cummins, W. E.(1962), "The Impulse Response Function and Ship Motions", DTMB Report No. 1661, USA

Fonseca, N. and Guedes Soares C.(1998), "Time-Domain Analysis of Large_Amplitude Vertical Ship Motions and Wave Loads", JSR, Vol.42, No.2, pp 139-153

Hong D.-C.(2000), "The Exact Formulation of the Green Integral Equation Applied to the Radiation-Diffraction Problem for a Surface Ship Advancing in Waves", 한국해양공학회 논문집, pp 23-28

Huang, Y. and Sclavounos, P. D.(1998), "Nonlinear Ship Motions", JSR, Vol.42, No.2, pp 120-130

Salvesen N., Tuck E. O. and Faltinsen O.(1970), "Ship Motion and Sea Loads", Trans. SNAME, vol. 78

van Oortmerssen, G.(1976), "The Motion of a Moored Ship in waves", NSMB Publication No. 510 Wageningen, The Netherlands