

# 횡파 중 수중함 단면에 대한 운동 특성

이호영\* · 곽영기\*

\*목포대학교 선박해양시스템전공

## Motion Characteristics for Submarine Sections in Beam Sea

HO-YOUNG LEE\* AND YOUNG-KI KWAK\*

\*Department of in Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea

**KEY WORDS:** Cauchy's Integral Method 코시 적분법, Nonlinear Free Surface Condition 비선형 자유표면 조건, Submarine Section 수중함 단면, 3 Degrees of Freedom Motion 3자유도 운동, Snorkel 스노클

**ABSTRACT:** The motion response results of a submerged submarine section in waves are presented. The numerical method is based on Cauchy's integral and 3 degrees-of-freedom motions of submarine sections are calculated in two dimensions, in regular waves. The fully nonlinear free surface and body boundary conditions are applied to the present problem, and the viscous effects on the submarine are modeled by Morison's formulas. The motions of submarine sections in beam sea are directly simulated and the effects of wave frequency, snorkel depth, and bridge are discussed.

### 1. 서 론

국내에서도 1200톤급과 1800톤급 수중함이 건조되고 있고, 독 일로부터 설계기술을 도입하여 선형개발 및 추진기 연구 등을 통하여 설계 개선작업을 하고 있는 상황이다. 연근해에 투입되는 중소형 수중함은 디젤 수중함인데, 장점은 제작 단가가 적으며 운용능력도 단기간 내에 가능하다. 그러나 수중 항속능력이 핵추진 수중함에 비해 떨어지는 단점이 있다(손호재와 박창수, 2000). 디젤 수중함은 임무 수행 중에 축전지를 충전하기 위해 주기적으로 자유표면 아래에서 스노클(snorkel) 작업을 수행하여야 한다. 스노클링은 자유표면 아래에서 낮은 속도로 진행하면서 공기를 수중함에 흡입하여 디젤 기관을 작동하여 축전지를 충전시킨다. 그러나 해상상태, 수중함의 잠행 깊이와 bridge의 유무에 따라 수중함이 해상 위로 부상하거나, 횡 운동이 심하게 일어 날 수 있다.

위와 같이 스노클 중의 부상은 비선형 현상이며, 이는 수중함이 부상하면서 물체표면과 자유표면의 상대적인 위치가 상당히 달라져서 결과적으로 시간 평균된 부양력이 시간에 따라 변하므로 기존의 선형 해나 주파수 영역 해법은 사용하기 힘들다.

이호영과 황중홍(1998)는 스노클 상태를 해석하기 위해 2차원 경계적분법을 사용하여 초기 연구로 전진속도를 0 으로 하고 원형 실린더로 단순화해서 횡파 중에서 3자유도 운동응답 계산을

수행하였다. 본 논문은 수중함 단면에 부가물인 bridge를 추가하고, 점성 감쇠력은 Morison 식을 사용하여 bridge가 수중함의 운동에 미치는 영향을 검토하였다.

### 2. 수치 계산

좌표계는 x 축을 정수면에 두고 y축은 윗방향으로 하는 공간고정 좌표계이다(Lee, 1998). 수심은 무한하며 표면장력은 무시하고, 유체는 비점성, 비압축성 유체이며 유체입자의 비회전 운동을 가정하면 복소포텐셜이 존재한다. 속도포텐셜  $\phi(x, y, t)$ 과 유동함수  $\psi(x, y, t)$ , 모두 Laplace 방정식을 만족한다. C 는  $\phi$ 가 주어진  $C_\phi$ (자유표면과 정합면),  $\psi$ 가 주어진  $C_\psi$ (물체표면)으로 구성된다. 코시(Cauchy) 이론으로부터 Fredholm 제 2종 적분방정식을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\alpha\psi(x_0, y_0; t) + \text{Re} \left[ \int_C \frac{\phi + i\psi}{z - z_0} dz \right] = 0, \text{ for } z_0 \in C_\phi \quad (1)$$

$$\alpha\phi(x_0, y_0; t) + \text{Im} \left[ i \int_C \frac{\phi + i\psi}{z - z_0} dz \right] = 0, \text{ for } z_0 \in C_\psi \quad (2)$$

$\alpha$  는  $z_0$  에서 C의 두 경계선 사이의 각(solid angle) 이다. 운동하는 물체에 대한 물체 표면조건과 자유표면 조건은 완전한 비선형 경계조건을 사용하였다(이호영 등, 2000).

제1저자 이호영 연락처: 전라남도 무안군 청계면 도림리 61  
061-450-6457 ocean-ship@hanmail.net

내부영역의 해와 정합하기 위해 외부영역의 해는 Wehausen and Laitone(1960)의 2차원 과도 그린함수를 사용하고, 그린 제 2정리를 도입하여 코시-리만관계를 사용하면 구해진다(Lee, 1998). 운동방정식의 도입은 이호영과 황종훈(1998)을 참고하면 다음과 같다.

$$(m+A_{11})\ddot{x}_G+A_{12}\ddot{y}_G+A_{13}\ddot{\theta}=F_1+D_1 \quad (3)$$

$$A_{21}\ddot{x}_G+(m+A_{22})\ddot{y}_G+A_{23}\ddot{\theta}=F_2-mg+D_2 \quad (4)$$

$$A_{31}\ddot{x}_G+A_{32}\ddot{y}_G+(I+A_{33})\ddot{\theta}=F_3+D_3 \quad (5)$$

여기서,  $A_{ij} = \int_{C_a} \rho \frac{\partial \phi_i}{\partial x} n_j dC$  (6)

$$F_i = \int_{C_b} \rho \frac{\partial \phi_i}{\partial x} + \frac{1}{2} w \cdot w^* + gy n_i dC \quad (7)$$

여기서  $A_{ij}$ 는 동유체력 계수를 나타내고,  $F_i$ 는 감쇠계수, 정력학적 힘 및 파장제력 항을 모두 나타내며,  $D_i$ 는 유체의 점성에 기인한 항력을 나타낸다. 유체의 항력은 Morison 식을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$D_1 = -\frac{1}{2} \rho C_D (b+bg+d) |u| |u| - \frac{1}{2} \rho C_D (b-bg) u |u| \quad (8)$$

$$D_2 = -\frac{1}{2} \rho C_D (2a) |v| |v| \quad (9)$$

$$D_3 = -\frac{1}{2} \rho C_D (b+bg+d)^2 |u| |u| + \frac{1}{2} \rho C_D (b-bg)^2 u |u| - \frac{1}{2} \rho C_D (b+bg+d)^3 |\theta| |\theta| - \frac{1}{2} \rho C_D (b-bg)^3 \theta |\theta| \quad (10)$$

- 여기서,  $a$ ; 단축 반경
- $b$ ; 장축 반경
- $bg$ ; 부심과 무게중심간의 거리
- $l$ ; bridge 길이

여기서  $C_D$ 는 항력 계수이며 타원형 실린더의 원주 끝은 1.17, bridge 끝은 2.01로 산정하였다(박노식과 구종도, 1996). Morison 식을 적용할 때 힘의 작용점은 유동의 박리가 시작되는 bridge와 타원형 실린더의 끝점으로 하였고, 유효 기준면적은 일정하게 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

운동응답 계산은 타원형실린더(장축반경( $a$ ) 1m, 단축반경( $b$ ) 0.8m)와 bridge 길이 0.3m, 물체의 잠행 깊이 -2m 인 경우에 주파수, bridge 등에 의한 영향을 검토하였다.

계산에서 물체에 대한 부심과 무게중심간의 거리(BG)는 0.1m이며, 관성반경은  $0.8b$  이다. 반원형태인 정합면의 반경은 2.5파

장이며 계산 영역에서 원의 중점 아래에 구조물이 위치하고 총 계산 영역의 길이는 5파장이다. 수치계산 시간은 계산이 불안정적으로 되지 않는 한 과도효과가 충분히 소멸될 14주기까지 계산하였다. 조파기는 plunger 형태의 조파기를 계산 영역에 설치하여 주파수에 따라 조파기 깊이와 진폭을 변화시켰으며, 물체를 제거한 조파기 만의 계산에서 주파수를 변화시키면서 조파기 깊이와 조파기 진폭에 따른 파랑 진폭을 계산하였다.

Fig. 1은 파 진폭 ( $A=0.2912m$ )인 경우, Fig. 2는 파 진폭 ( $A=0.1932m$ )인 경우 일정한 시간에 bridge의 유무에 따른 물체의 운동과 그 순간 자유표면의 모습을 보여주고 있다. Bridge가 있는 경우에 음의 표류운동과 강한 부양운동을 보여 주고 있다. Fig. 3은 파 진폭( $A=0.3044m$ )인 경우 타원형 실린더 물체의 시간에 따른 운동을 보여주고 있으며, Fig. 4는 파 진폭( $A=0.104m$ )인 경우 bridge가 있는 경우의 시간에 따른 물체의 운동과 그 순간 자유표면의 모습을 보여주고 있다. Fig. 3은 시간이 지남에 따라 아래로 가라 앉는 것을 보여주고 있으며, Fig. 4는 시간이 지남에 따라 부양하면서 시계방향으로 횡 운동을 하며 Bridge 끝이 자유표면과 만나는 것을 보여주고 있다. 물체가 아래로 가라앉는 경우는 음의 부양력을 가진 경우이며 이는 횡운동이 아주 커지면서 일어나는 현상이다.

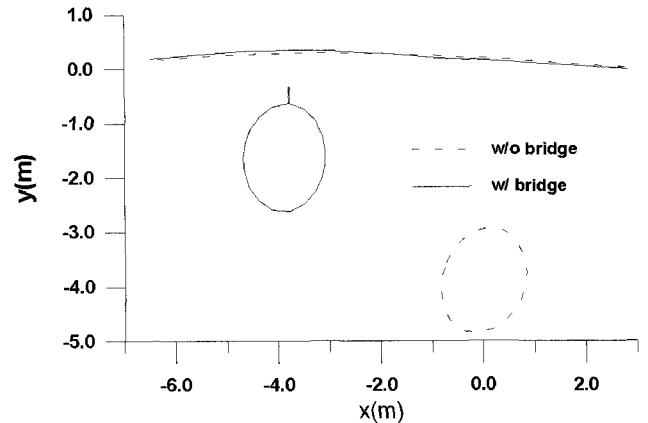


Fig. 1 Waves and body motions ( $\omega=1.5, t=6.475T$ )

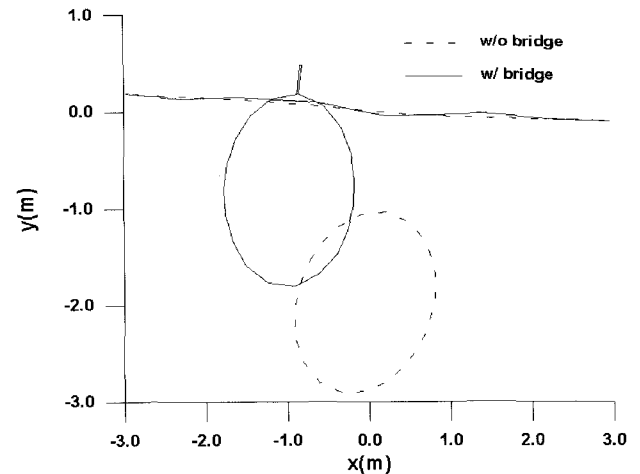


Fig. 2 Waves and body motions( $\omega=1.7, t=6.375T$ )

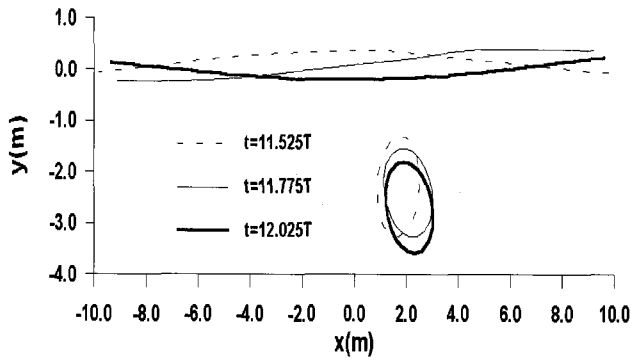


Fig. 3 Waves and body motions ( $\omega=1.4$ )

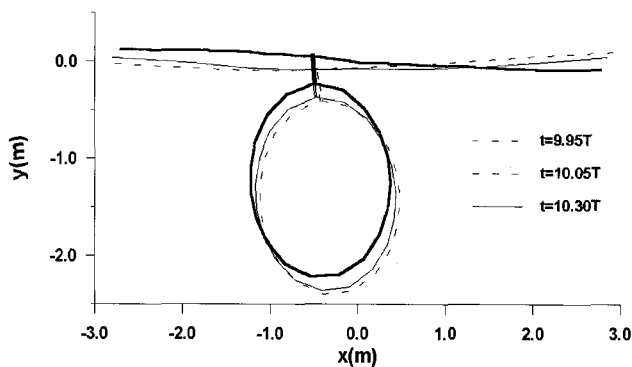


Fig. 4 Waves and body motions ( $\omega=2.5$ )

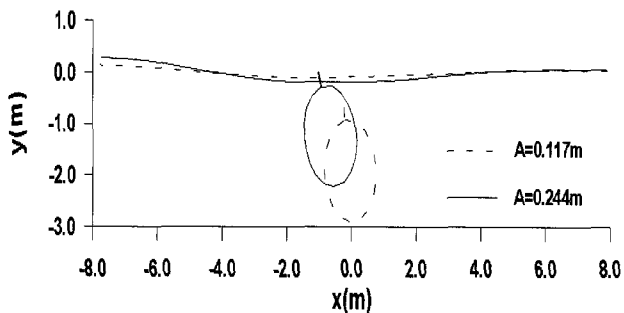


Fig. 5 Waves and body motions ( $\omega=1.981, t=6.050T$ )

Fig. 5는 bridge가 있는 경우 진폭비가 변함에 따른 물체의 운동과 자유표면의 변형을 보여주고 있다. 진폭비가 커지면 부양운동과 음의 방향의 표류운동이 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6, 7, 8은 bridge의 유무에 따른 x,y축의 무차원화된 외력과 횡동요 모멘트를 보여주고 있다. 힘과 모멘트의 무차원화는  $0.5\pi ab\omega^2 A$ ,  $0.5\pi a^2 b\omega^2 A$  이다. bridge가 있는 경우 bridge와 점성 효과 때문에 sway힘은 크고, heave 힘은 약간 작으며 roll 모멘트도 또한 작다.

Fig. 9, 10, 11은 시간에 따른 sway, heave, roll 운동을 보여주고 있다. 점성효과를 고려한 경우에 sway 운동은 약간 작아지며, heave 운동은 부양운동에서 약간 차이가 나지만 동요운동은 거의 같은 것을 알 수 있으며, roll 운동은 운동 진폭이 확연히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 Bridge의 유무, 점성을 무시한 경우, 점성효과를 고려한 경우의 무게중심의 운동 궤적을 보여 주고 있다. 점성을 고려한 경우가 표류운동이 약간 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 잠행 깊이가 변함에 따른 무게중심의 궤적을 보여 주고 있으며, Fig. 14는  $\omega=1.6$ 인 경우의 무게중심의 궤적을 보여 준다. bridge가 없는 경우에 양의 표류운동이 일어나며 잠행 깊이가 깊어지면 운동이 줄어드는 것을 알 수 있고 bridge가 있으면 음의 표류운동이 일어나며 부상운동도 커진다.

Fig. 15는 bridge의 유무, 잠행 깊이의 변화에 따른 무차원화된 roll 운동을 보여주고 있다. Roll 운동은 계산된 마지막 4주기를 peak to peak 방법으로 계산하였다.(엄덕준 등, 1993). 잠행 깊이가 커지거나 bridge가 있으면 파 입자 운동 궤적의 적어짐과 점성효과 때문에 운동이 줄어들며 파주파수 1.6 부근의 운동의 증가는 공진효과 때문이다.

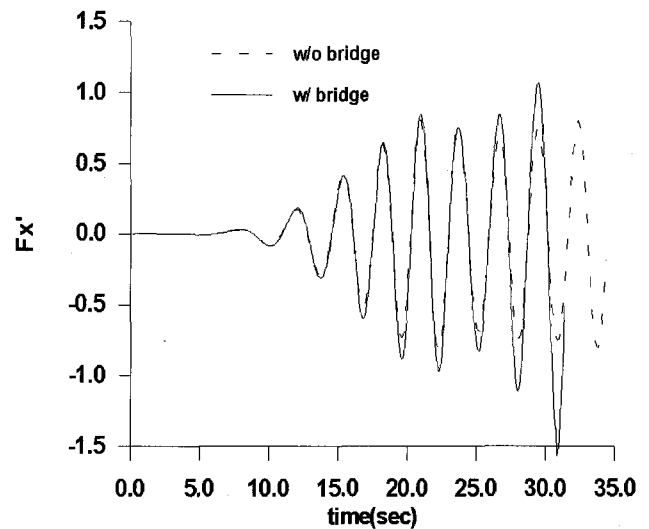


Fig. 6 Sway forces ( $\omega=2.2, A=0.0857m$ )

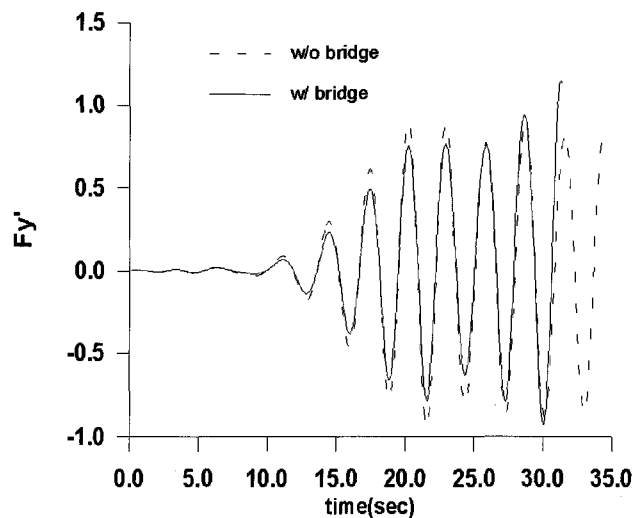


Fig. 7 Heave forces ( $\omega=2.2, A=0.0857m$ )

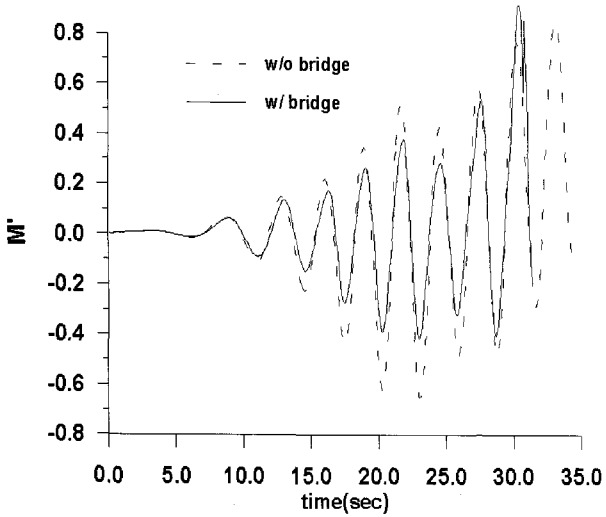


Fig. 8 Roll moments ( $\omega=2.2, A=0.0857m$ )

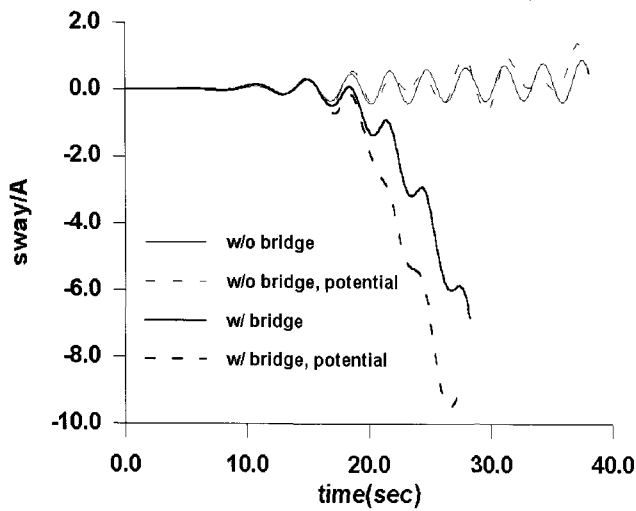


Fig. 9 Time history of sway motion ( $\omega=1.981, A=0.117m$ )

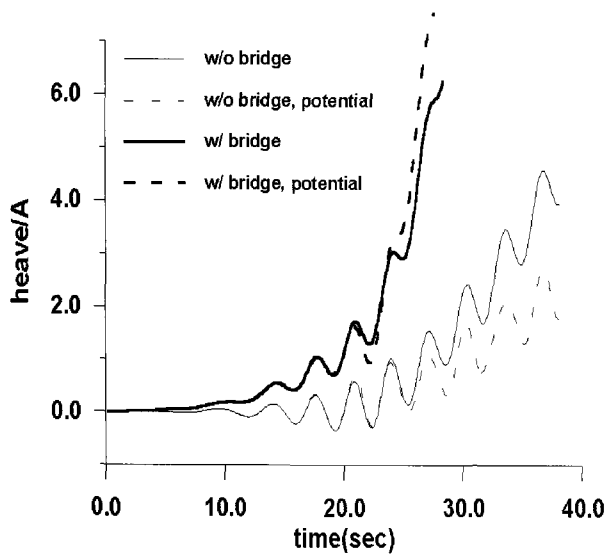


Fig. 10 Time history of heave motion ( $\omega=1.981, A=0.117m$ )

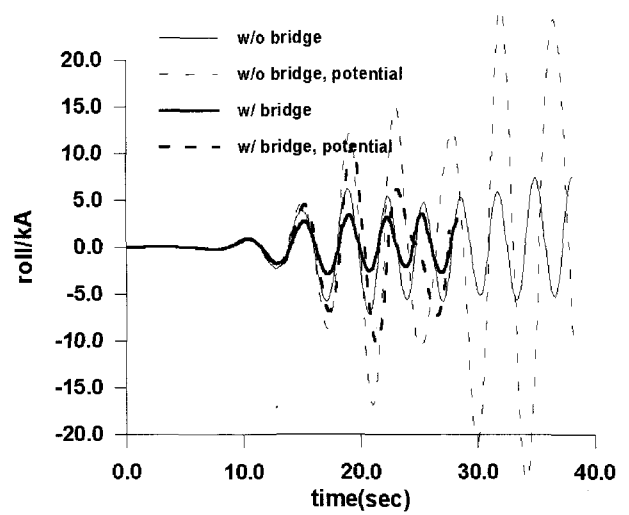


Fig. 11 Time history of roll motion ( $\omega=1.981, A=0.117m$ )

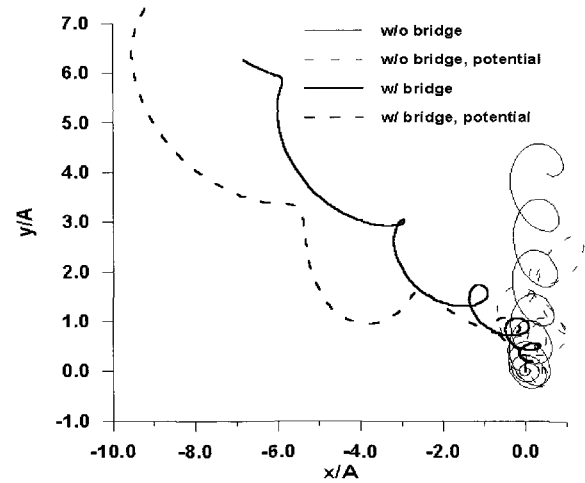


Fig. 12 Trace of gravity center ( $\omega=1.981, A=0.117m$ )

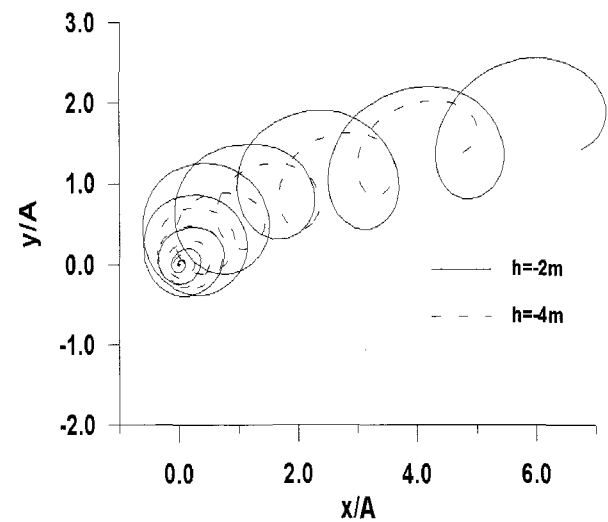


Fig. 13 Trace of gravity center ( $\omega=1.5, A=0.2912m$ )

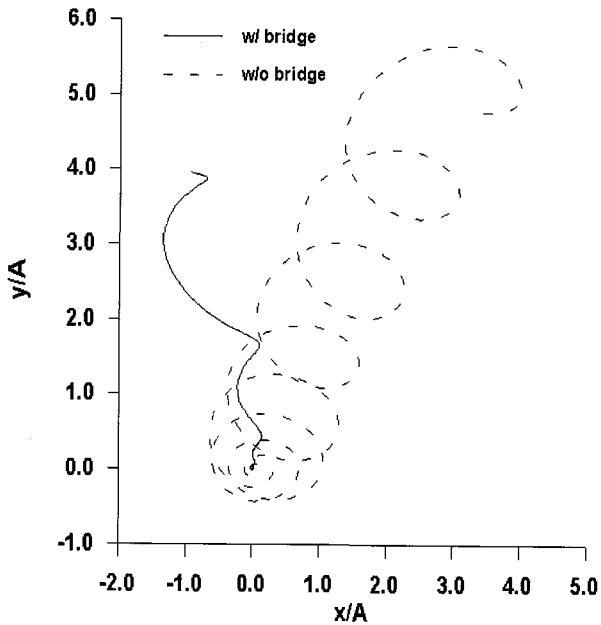


Fig. 14 Trace of gravity center ( $\omega=1.6$ ,  $A=0.1774m$ )

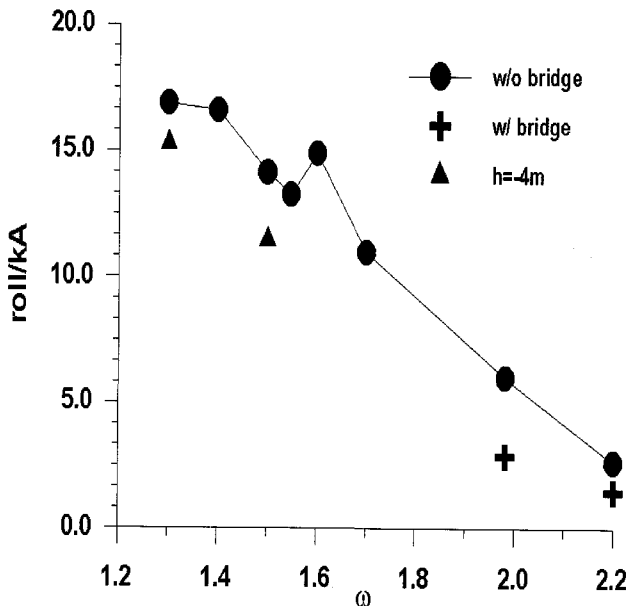


Fig. 15 Roll responses

### 4. 결 론

본 연구에서는 타원형 형태인 수중함 단면에 부가물의 취부 여부에 따른 운동 특성을 계산하였다. 부가물의 점성 효과는 모리슨 식에 의해 산정되었고, 스노클 현상을 단순화 시켜 해석하기 위해 전진속도를 무시하였다.

계산에로서 파랑 중에서의 증립 부양상태인 잠수된 수중함 단면에 대한 자유수면 아래의 비선형 운동응답이 계산되었다. 계산 결과 bridge가 존재하면 강한 부양운동과 음의 표류운동이 일어난 것을 알 수 있고, bridge가 없는 경우는 양의 표류운동과 부양운동이 일어났다. 잠수 깊이의 증가는 sway, heave, roll 운동을 감소시키며, 점성을 고려하면 특히 roll 운동이 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다.

추후의 연구에서 파랑 중 시간영역에서 전진속도를 갖는 3차원 수중함에 대해 부상하는 과정을 수치 모사할 예정이다.

### 참 고 문 헌

박노식, 구종도 (1996). 선체와 해양구조물의 운동학, 연경문화사, 서울.

손호재, 박창수(2000). 잠수함공학 개론, 대영사, 서울.

염덕준, 이호영, 이정목 (1993). "정현파 중에서 운동모형 시험에 대한 오차분석", 대한조선학회논문집, 제30권, 제3호, pp 75-89.

이호영, 황종홍 (1998). "정현파 중에서 잠수된 원형실린더의 비선형 운동에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제35권, 제1호, pp 32-42.

이호영, 임춘규, 신현경 (2000). "천수에서 2차원 수치파 수조에 대한 계산", 한국해양공학회지, 제14권, 제1호, pp 1-5.

Lee, H.Y. (1998). "A Numerical Study of Nonlinear Free Surface Flows Generated by Motions of Two Dimensional Cylinders", Journal of Ocean Engineering Technology, Vol 12, No 1, pp 85-98.

Wehausen J.V. and Laitone, E.V. (1960). Surface Waves, Encyclopedia of Physics, Vol 9, Springer-Verlag.

2005년 5월 31일 원고 접수  
 2005년 10월 5일 최종 수정본 채택