

선박의 충돌로 인한 해양구조물의 거동 해석

이호영

울산대학교 수송시스템공학부

Behaviour Analyses of Ocean Structure Due to Ship Collision

HO-YOUNG LEE

School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

KEY WORDS: Time domain 시간영역, Memory effect function 기억효과 함수, Newmark β method, 류막 베타 방법, Elastic collision 탄성충돌, Non-elastic collision 비탄성 충돌, Dolphin mooring system 돌핀 계류 시스템, Ship Collision 선박 충돌

ABSTRACT: When ship claps against the ocean structure sited at shallow water, the time simulation of motion responses of dolphin-moored ocean structure is presented. The equation of motion based on Cummin's theory of impulse responses are employed, and solved in time domain by using the Newmark β method. The added mass and damping coefficients involved in the equations are obtained from a three-dimensional panel method in the frequency domain. The impact forces due to ship collision are modeled as two method, and those are elastic and non-elastic collisions. The mooring forces for dolphin systems of ocean structure are considered as linear spring system.

1. 서 론

앞으로 육지 자원의 고갈과 해양자원을 효율적으로 이용하기 위하여 선진 해양 국가들은 해양공간과 자원을 이용하기 위한 노력을 꾸준히 진행할 것이다. 요즘은 이런 추세에 즈음하여 일본에서는 부유식 해상공항에 대한 연구를 수행하여 대형 부유식 공항에 대한 기초 연구, 초기 설계 및 실제 구조물을 건조하여 실증 실험을 수행한 바 있다. 이와 같은 해양 구조물은 거치른 해양환경의 영향을 받기 때문에 각각의 환경 외력에 대하여 구조물에 미치는 영향을 평가하는 것은 초기 설계단계에서 매우 중요하다.

주요한 해양 환경 외력으로 바람, 조류 및 파도 등이 있는데, 이와 같은 인자에 대한 연구는 이미 꾸준히 진행되어 왔으며 소기의 성과를 거두어 실제 해양구조물의 설계에 적용하고 있다. 그러나 해양구조물에 선박이 갑자기 충돌하는 경우 해양구조물의 안전성에 대한 평가는 매우 중요하며 이에 대한 연구는 좀처럼 보기 힘든 실정이다.

현재의 해양 개발 기술은 석유 관련 산업 위주로 발달하여 수심이 1,000m 이상되는 조건에서도 작업할 수 있는 시추선이 개발되었으나, 해상호텔 및 해양 박물관 등의 목적으로 이용할 구조물에 대한 기술 개발은 아직까지 수행되지 않는 실정이다. 해상호텔 등과 같은 천수역에 설치될 해양구조물은 환경 외력을 가장 효율적으로 견디기 위해 돌핀 계류시스템을 장착한다.

본 논문은 해상호텔에 선박이 갑자기 충돌하는 경우의 충격 거동을 수치모사 하였다. 충격 응답에 관련된 유체력을 계산하기 위해 3차원 패널 방법이 사용되었고 충격 운동은 수평방

향의 3가지 운동에 대하여 계산하였다. 해양구조물에 작용하는 유체력은 주파수 영역에서 부가질량과 조파 감쇠계수를 계산하였고, 돌핀 계류시스템은 1 자유도를 갖는 선형 스프링으로 치환하였다. 선박의 충돌력은 부가질량 값을 고려하여 탄성 충돌 및 비탄성 충돌의 경우로 나누어 충격 외력을 계산하였고 시간 영역의 천이 운동방정식을 사용하여 수치적으로 해양구조물의 거동을 계산하였다.

2. 시간영역에서 운동방정식

해양구조물의 운동을 기술하기 위해 직각 좌표계를 사용하였으며 Fig.1에 도시하였다. 시간영역에서 운동방정식은 해양구조물에 대한 3자유도 운동방정식을 사용한다(Cummins, 1962; 이호영/신현경, 2000). 이 방법에서 주파수영역에서 동유체력은 곱 적분에 의해 고려되고, 유체력이 선형적으로 변한다는 가정에 의해 해양 구조물에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^3 [(m_{ij} + a_{ij}(\infty)) \dot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau + C_{ij}x_j] = F_j \quad (1)$$

where $j=1,2,3$

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

where x_j ; the response amplitudes

m ; mass matrix,

$a(\infty)$; added mass matrix of infinite frequency

B ; damping matrix, C ; Mooring stiffness matrix

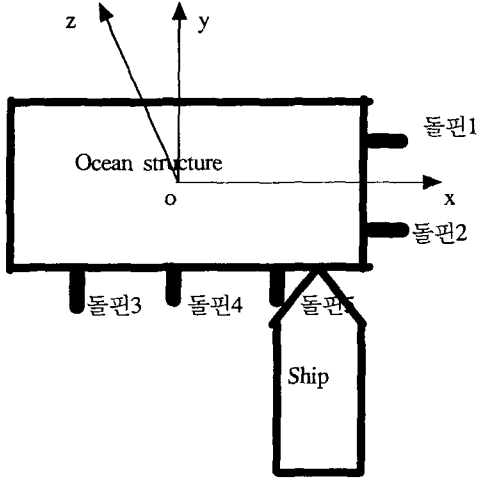


Fig.1 Coordinate system and configuration of ocean structure

위에서 K_{ij} 은 기억효과 함수이고, F_i 는 선박의 충돌에 기인한 충격력을 나타낸다. (1)에서 $i=1, 2, 3$ 은 전후동요, 좌우동요 및 선수동요를 나타낸다. 운동방정식의 자유도 수는 3 자유도이며, (1)에서 주파수 무한대에서 부가질량 계수 $a_{ij}(\infty)$ 는 주파 영역의 부가질량과 조파 감쇠계수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$a(\omega_0)$ 은 임의의 주파수 ω_0 에서 부가질량이다. 기억효과 함수를 계산하기 위해 부가질량과 조파 감쇠계수의 값은 모든 주파수에 대해 계산되어야 하나 고 주파수에서는 계산의 정도가 떨어진다. 그래서 본 논문은 감쇠계수와 부가질량이 0에 가까운 고 주파수까지 계산하고 나머지 부분은 외삽하였다. 돌핀 계류력은 각 지점에서 1 자유도를 가지는 선형 스프링 시스템으로 치환하여 해양구조물의 수평 운동을 고려하면 다음과 같은 탄성 행렬이 도출된다(이호영 등, 2000).

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} nk & 0 & k \sum_{j=1}^n y_j \\ 0 & mk & k \sum_{i=1}^m x_i \\ k \sum_{j=1}^n y_j & k \sum_{i=1}^m x_i & k(\sum_{i=1}^m x_i^2 + \sum_{j=1}^n y_j^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

where (x_i, y_j) ; coordinate of dolphin

여기에서 n 은 y 축과 평행한 면에서 돌핀의 개수이고 m 은 x 축과 평행한 면에서 돌핀의 개수를 나타내며 돌핀 링크의 강성계수 k 는 모든 지점에서 같은 것으로 취급하였다.

식(1)을 시간 전진하기 위해 n 번째 시간 단계에서 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{j=0}^n [(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \dot{x}_j + C_{ij}x_j] = F_i - \sum_{j=1}^n \sum_{p=0}^n K_{ij}(p) x_j(n-p) \Delta t \quad (5)$$

(5)에서 운동방정식은 각 시간 단계에서 수치 적분 기법을 사용함으로 계산되며 뉴마크-베타(Newmark- β) 방법을 사용하였다(이호영/신현경, 2000).

3. 선박의 충격력에 대한 모델링

선박과 해양구조물은 물에서 운동하기 때문에 우선 작은 주파수에서 부가질량을 계산하여야 한다. 본 논문에서는 부가질량은 선박의 조종운동 수치모사에 사용하는 다음과 같은 경험식을 사용하였다(이호영/신상성, 1998).

$$M_x = 2.7 \rho \frac{(C_B L B d)^{5/3}}{L^2} \quad (6)$$

$$m_y = 0.5 \pi \rho L d^2 (1 + 0.16 C_B B/d - 4B/L) \quad (7)$$

where M_x ; surge added mass of ship

m_y ; sway added mass of ocean structure

여기에서 ρ 는 물의 밀도이며, L 은 구조물의 길이이며, B 는 구조물의 폭이며, d 는 구조물의 흘수이며 C_B 는 방형비치계수를 나타낸다. 선박이 일정속도로 진행하다가 해양구조물에 탄성 충돌할 경우를 생각하면 선박은 충돌하고 나서 다시 반대방향으로 운동한다. 이런 경우에 충돌후의 선박속도는 다음과 같이 표현된다.

$$v' = \frac{(M_x + M) - (m_y + m)}{(M_x + M) + (m_y + m)} v \quad (8)$$

여기에서 M 은 선박의 질량이며 m 은 해양구조물의 질량이며, v' 는 충돌후 선박의 속도이며, v 는 충돌전의 선박의 속도이다. 비탄성 충돌은 선박이 해양구조물에 충돌한 후 충돌 시간동안 선박과 해양구조물이 같이 운동하는 경우에 해당된다. 이 경우에 대해 충돌후 선박의 속도는 다음과 같다.

$$v' = \frac{(M_x + M)}{(M_x + M) + (m_y + m)} v \quad (9)$$

이와 같이 충돌후 선박의 속도를 계산하면 충돌 시간동안 해양구조물에 작용한 시간 평균된 충격력은 다음과 같이 충격량 법칙에 의해 표현된다.

$$F_i \Delta t = (M + M_x) v' - (M + M_x) v \quad (10)$$

4. 계산결과 및 고찰

본 계산에 사용된 해양구조물은 연안해역에 설치되는 해상호텔로 가정하였고 선박은 해상호텔에 물자를 수송하는 소형 컨테이너 운반선을 선정하였다. 구체적인 기본제원은 Table 1에 나타내었고, 해역의 수심은 20m 이다.

Table 1 Main particulars of ocean structure and ship

| | Ocean structure | Ship |
|----------------|-----------------|------|
| L(m) | 90 | 100 |
| B(m) | 60 | 15 |
| d(m) | 2 | 5 |
| C _B | 1 | 0.60 |

선박의 충돌로 인한 해양구조물의 충격 운동을 해석하기 위해 요소의 분할은 구조물의 밑면은 x 방향으로 30개 y 방향으로 20개로 분할하였고, 옆면은 x 방향으로 30개 z 방향으로 2개 그리고 y 방향으로 20개 z 방향으로 2개로 분할하였다. 그리고 불규칙파수 현상을 제거하기 위해 윗면에 x 방향으로 3개 y 방향으로 2개의 요소로 분할하였다.

돌핀계류는 Fig.1에서 알 수 있듯이 x축을 따라 오른쪽 면에 2개(y=-20, 20)를 설치하였고, y축에 따라 양쪽에 3개(x=-40, 0, 40)를 설치하였다.

해양구조물에 대한 운동 방정식 (1)의 해를 계산하기 위해 주파수 무한대에서 부가질량과 조파 감쇠계수를 주파수 응답함수로 계산해야 한다. 조파 감쇠계수의 주파수응답함수로서 얻어진 계산 결과를 Fig.2에서 나타내었다. 그림의 B_{ij} 에서 i, j 는 j 방향의 운동에 의한 i 방향의 감쇠계수를 나타낸다. 무차원화는 B₁₁, B₂₂는 LBd 로 나누었고, B₃₃는 L²Bd 로 나누었다. Fig.3은 (2)로부터 계산된 충격 응답함수를 도시하였다. 진후동요, 수평동요 및 선수동요에 대한 충격응답함수는 어느 정도 시간이 지나면 거의 0의 값으로 sinusoidal 하게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

선박의 충돌 위치는 Fig.1에서 보듯이 y축 방향으로 선박이 전진하다가 x=40m 지점에서 갑자기 충돌한다고 가정하였다.

Table 2는 (10)에 의해 계산된 선박의 충격력을 충돌속도(=4kts, 8kts), 탄성충돌 및 비탄성 충돌에 대한 sway 방향의 값을 표기하였다. 표에서 알 수 있듯이 탄성충돌에 의한 충격력이 비탄성 충돌에 의한 충격력보다 값이 큰 것을 알 수 있다.

Table 2 Impact forces due to ship collision

| | Elastic | Non-elastic |
|-------|------------|-------------|
| 4 kts | 14721.1 kN | 7360.6 kN |
| 8 kts | 29442.3 kN | 14721.2 kN |

Fig.4, 5는 탄성충돌 및 비 탄성충돌에 대하여 sway 운동 및 yaw 운동 값을 충돌후 120초 까지 도시하였다. Table 2에서와 같이 탄성충돌에 의한 변위가 비탄성 충돌에 의한 변위 값보다 크며, sway 운동은 시간이 지남에 따라 빨리 감소하나 yaw 운동은 시간이 지남에 따라 빨리 감소하지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig.6은 비탄성 충돌인 경우에 충돌 시간에 따른 sway 운동을

도시하였다. 충돌시간이 커짐에 따라 해양구조물의 변위가 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig.7은 비탄성 충돌인 경우 돌핀 계류 스프링 상수의 값(k=200, 400 tonf)의 변화에 따른 sway 운동을 도시하였다. 본 계산의 경우에 스프링 상수 값의 증가가 운동 변위를 줄이는 것으로 나타났고 운동 주기는 작아진다.

Fig.8은 비탄성 충돌인 경우 해양구조물에 대한 sway 및 yaw 방향의 속도를 도시하였다. 속도값도 변위값과 마찬가지로 sinusoidal 하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 탄성충돌과 비탄성충돌에 대한 계류력의 크기를 돌핀 4에서 시간에 따라 도시하였다. 탄성충돌의 경우가 운동변위가 크기 때문에 계류력의 크기가 커진다.

Fig.10은 비탄성 충돌인 경우 돌핀 스프링 상수값(k=200 tonf, 400 tonf)의 변화에 따른 계류력의 크기를 돌핀 3에서 시간에 따라 도시하였고, 동요주기는 돌핀 스프링 상수가 커지면 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

Fig.11은 비탄성 충돌인 경우 충돌 속도 값(v=4kts, 8kts)의 변화에 따른 계류력의 크기를 돌핀 1에서 시간에 따라 도시하였다. 충돌 속도가 커지면 돌핀 계류 시스템에 작용하는 계류력도 커진다는 것을 확인할 수 있고, 동요하는 주기는 충돌 속도에 관계없는 것을 확인 할 수 있다.

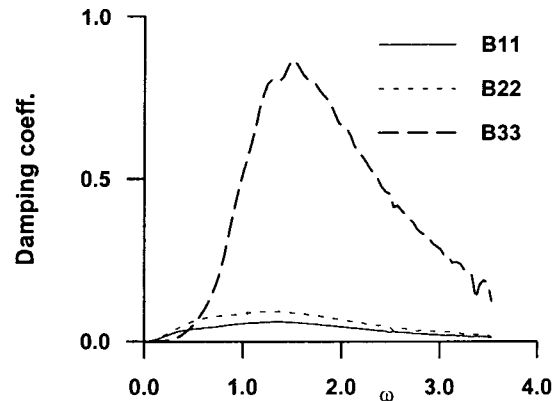


Fig.2 Wave damping coefficients

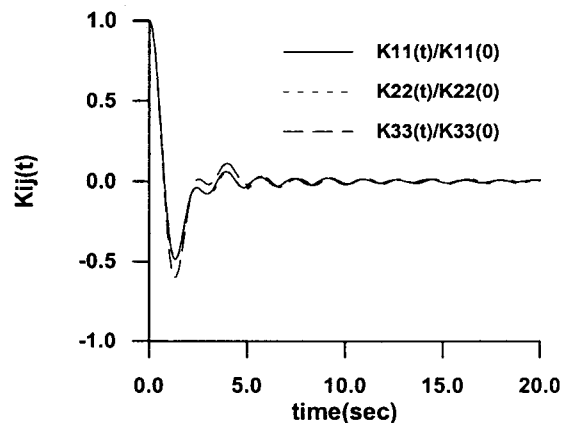


Fig.3 Memory effect functions

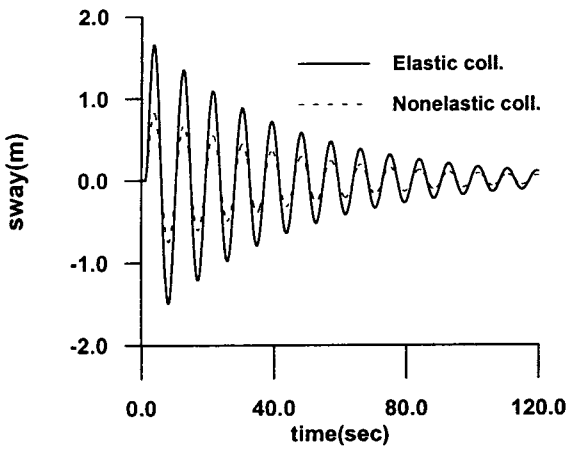


Fig.4 Sway motions(v=4kt, k=200tonf)

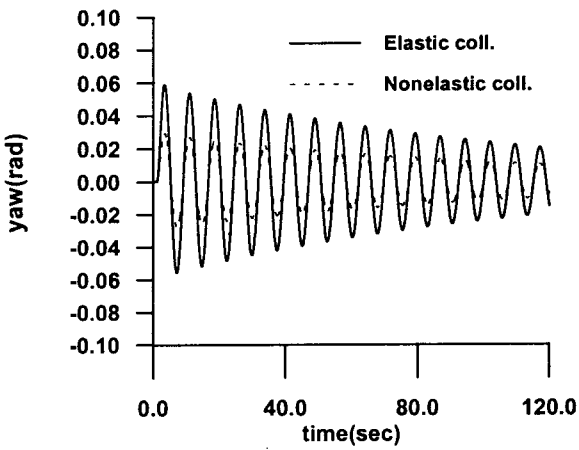


Fig.5 Yaw motions(v=4kt, k=200tonf)

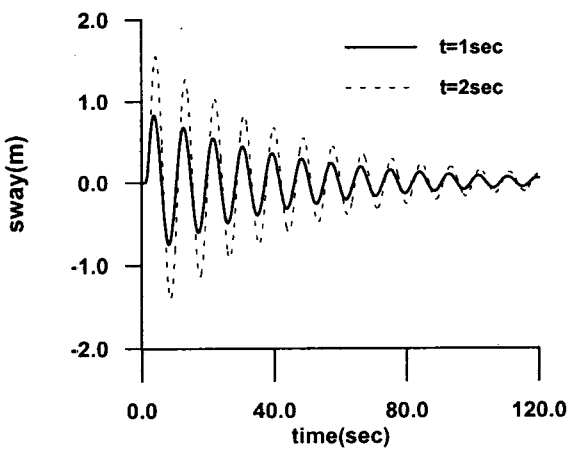


Fig.6 Sway motions(v=4kt, k=200tonf, Non-elastic)

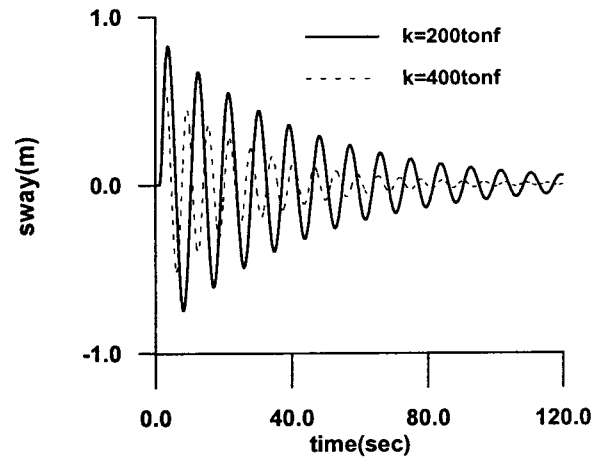


Fig.7 Sway motions(v=4 kts, Non-elastic)

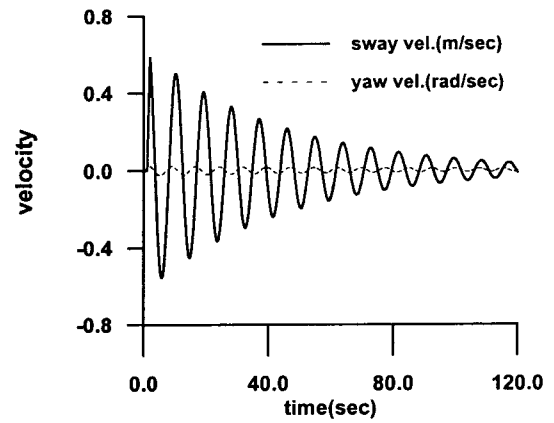


Fig.8 Velocities of ocean structure(v=4kt, k=200tonf, Non-elastic)

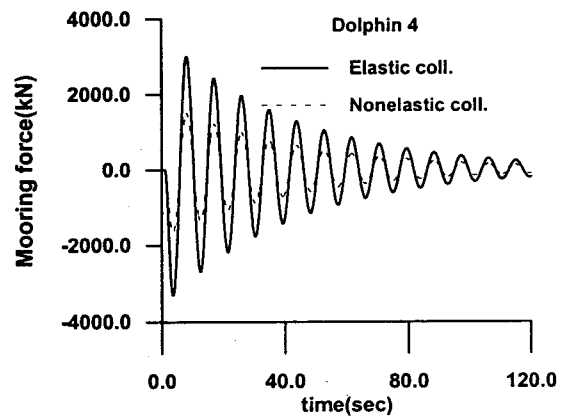


Fig.9 Mooring Forces(v=4kt, k=200tonf)

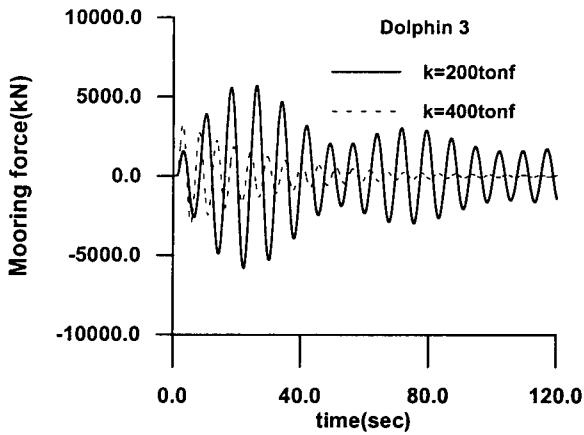


Fig.10 Mooring Forces($v=4kt$, Non-elastic)

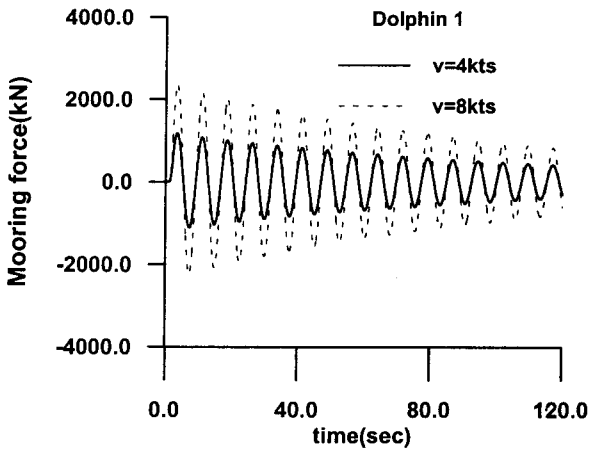


Fig.11 Mooring Forces($v=4kt$, $k=200tonf$, Non-elastic)

4. 결 론

본 논문은 선박의 충돌로 인한 해양구조물의 거동을 해석하기 위해 3차원 패널 방법이 사용되었고, 충격 운동은 수평방향의 3가지 운동에 대하여 수치 모사 하였다. 선박의 충돌에 의한 충격력은 탄성충격과 비탄성 충격으로 모델링 하였고 돌핀 계류시스템의 운동을 허용하기 위해 시간영역의 운동방정식을 사용하여 수치적으로 계산하였다. 이상의 연구로부터 다음 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 시간영역의 운동방정식을 사용하여 탄성 및 비탄성충돌, 충돌속도, 돌핀 스프링 상수, 충돌시간의 크기를 바꾸어가면서 계산을 수행하였다.
- (2) 탄성 충돌보다 비 탄성 충돌에 의한 충격력이 작고 그로인하여 해양구조물의 변위와 계류력이 작게 계산되었다.
- (3) 돌핀 계류계의 스프링 상수가 작아지면 해양구조물의 운동과 계류력이 커지고 운동주기도 길어지는 것을 확인하였다.
- (4) 앞으로 본 논문의 방법과 충격 해석에 쓰이는 MSC/DYTRAN과 같은 범용 구조해석 package와 연계를 시켜서

구조-유체의 연성 문제를 정확하게 해석할 필요성이 대두된다.

참 고 문 헌

- 이호영, 신상성(1998). "선박조종성능 추정을 위한 근사적 기법에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제 35권 제 4호.
- 이호영, 신현경(2000). "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석", 한국해양공학회지 제 14권 제 3호.
- 이호영, 신현경, 염재선(2000). "불규칙파 중에서 돌핀 계류된 바이저식 해상 공장에 대한 비선형 응답 해석", 한국해양공학회지 제 14권 제 4호.
- Cummins, W.E.(1962). "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schifftechnik Bd, pp 101~109.