

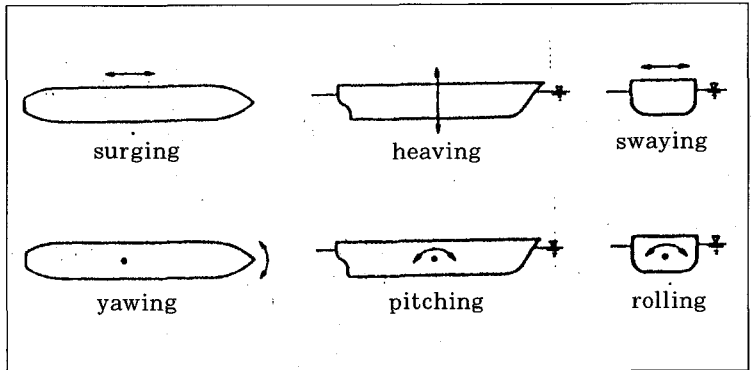
계류 선박의 동요

종래의 항내 정온도는 파고만을 지표로 하여 정온일수 등을 검토하여 왔다. 정온도에 파고가 직접적으로 영향을 주는 것은 당연하지만 앞으로는 파고와 동시에 주기를 고려하는 것이 필요하다.

金 南 亨 / 濟州大 教授

부체의 운동모드와 기본 방정식

항내의 정온도를 최종적으로 평가하는 것은 항만의 안전성 및 경제성이고, 그때에는 항에 계류된 선박의 동요량이 중요한 판단자료가 된다. 그러나, 방파제나 호안과 같이 1개소에 고정된 구조물과 다르고, 수면에 떠있는 선박은 운동의 자유도가 있는 한, 획일적인 계산수순으로 동요량이나 계류력을 추정할 수가 없다. 예를들면, 선박이 파로 움직이지 않도록 하려고 하면 계류삭을 매우 강고한 것으로 해야하고, 계류력도 강대한 것으로 된다. 그러나, 선박이 표류하지 않을 정도로 느슨하게 계류해 놓으면, 동



〈그림 1〉 선체의 6자유도 운동모드

요량이 크게 되지만, 계류력은 작게 된다. 즉, 동요량은 사용하는 계류 장치에 의해 변화하기 때문에 동요량의 해석 결과를 본 뒤 계류 장치의 크기를 변경하고, 동요해석을 반복하는 일이 적지 않다.

이와 같은 선체동요와 계류의 문제를 이해하기 위하여, 먼저 부체의 운동특성을 알

필요가 있다. 부체는 일반적으로, 3방향 병진운동과 3축 주위의 회전운동을 할 수 있다. 즉, 6개 운동의 자유도를 가진다. 이 6종류의 운동 모드는 다음과 같이 불려진다.

- ① surging(전후 흔들림) ...부체의 긴 방향의 병진 운동
- ② swaying(좌우 흔들림) ...부체의 횡방향의 병진 운동

- ③ heaving(상하 흔들림)
...부체의 전체로서 상하운동
- ④ rolling(횡 흔들림)
...부체의 횡방향의 회전운동
- ⑤ pitching(종 흔들림)
...부체의 종방향의 회전운동
- ⑥ yawing(배머리 흔들림)
...중심을 지나는 연직축 주위의 수평회전운동

(그림1)은 이 6종류의 운동 모드를 나타낸다. 또한 영어의 ing는 생략하고 부르는 일도 있다.

이 6종류의 운동은 각각 독립적으로 일어나는 것이 아니라 2~3종류의 운동이 상호 연대하여 일어난다. 즉, 운동이 연성(連成)한다고 한다. 예를 들면, rolling은 swaying과 동시에 발생하고, 나아가 yawing과 연성하는 일이 많다. 또, heaving이 일어나면 pitching도 일어나고, 어떤쪽인가 한쪽을 정지시키는 것은 어렵다. surging만은 배와 같이 가늘고 긴 좌우대칭형의 부체이면 기타의 운동과는 연성하지 않고 독립이다.

파나 바람을 받았을 때의 부체의 운동은 ①~⑥운동 모드마다 운동 방정식을 세워서 푸는 것이지만, 운동이 연성하고 있기 때문에 6차원의 연립2개 미분 방정식으로 된다. 즉,

$$\sum_{j=1}^6 \{ (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_j + N_{kj} \dot{x}_j + C_{kj} \dot{x}_j | \dot{x}_j | + B_{kj} x_j + R_{kj}(x_j) \} = X_k(t) : k=1 \sim 6 \quad (1)$$

여기서, k는 위의 ①~⑥의 운동모드에 각각 대응하고, j는 이것에 연성하는 운동 모드를 나타내고 있고, x_j 가 연성운동의 변위 혹은 회전각이다. M_{kj} 는 부체의 관성력 matrix이고, 부체가 k 방향으로 운동하는 것에 의해 k 방향으로도 관성력이 작용할 때의 질량 혹은 관성 모멘트를 나타낸다. m_{kj} 는 부가 질량계수라고 하며, 부체가 수중에서 k 방향으로 운동하여 파를 만드는 것에 의해 k 방향의 유체저항(아래에서는 회전운동 때는 모멘트에 관해서 말함)을 받을 때, 그 가속도에 비례하는 성분의 계수이다. 이 유체저항 중, 속도에 비례하는 성분의 계수가 조파감쇄계수이고 N_{kj} 로 나타내고 있다. C_{kj} 는 항력으로 나타내도록 비선형감쇄력의 계수이다. 다음의 B_{kj} 는 부체의 변위에 비례해서 작용하는 정적 복원력의 계수이고, R_{kj} 는 계류장치에서의 구속력이다. 이 계류력은 일반적으로 비선형이기 때문에, $R_{kj}(x_j)$ 와 같은 함수표시가 이용 되어진다. 우변의 $X_k(t)$ 는 부체에 작용하는 파, 바람, 흐름 등을 k 방향의

외력을 나타내고, 어느 것도 부체가 고정된 상태일 때에 작용하는 힘으로서 산정한다.

식(1)의 좌변은, 이와 같이 부체의 운동에 의해 생기는 관성력이나 저항력을 나타내고, 이것이 우변의 외력과 평형하여 부체 운동이 규정된다. 수면에 자유롭게 떠 있는 부체이면 계류력이 제로이기 때문에, 외력 $X_k(t)$ 에 따라서 부체의 운동 x_j 가 결정된다. 부체를 완전히 구속해서 $x_j=0$ 으로 하면 외력이 그대로 계류력으로 된다. 단, 통상의 계류장치에서는 부체의 고정 상태에 작용하는 외력을 막아내는 것만의 내력은 가지고 있지 않고, 부체의 운동을 제로로 하는 것이 불가능하다.

외력 $X_k(t)$ 의 속에 부체에 특유한 것으로 파랑 표류력으로 불려지는 것이 있다. 이것은 파가 부체를 천천히 파의 진행방향으로 밀어 넣는 힘을 가르킨다. 비교적 가늘고 긴 형의 부체가 횡방향에서 파를 받는 경우에 있어서는 다음 식과 같이 주어진다.

$$F_D = \frac{1}{16} w_0 H_1^2 B (1 + K_R^2 - K_T^2) \left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L} \right)$$

여기서, w_0 는 해수의 단위

체적중량, H 는 입사파고, B 는 부체의 투영폭, K_R 과 K_T 는 부체의 반사율과 투과율, h 는 수심, L 은 파장이다. 부체가 종방향에서 파를 받는 경우나 3차원 형상의 경우에는 파랑 표류력의 계산이 약간 복잡하게 되지만, 파고의 자승에 비례하는 성질은 변하지 않는다. 이 파랑의 표류력은 먼 바다에서 배를 다점 buoy로 계류할 때나 부방파제 등의 계류력의 최소치를 규정한다. 또, 불규칙파 중 고파의 연결에 수반되어 표류력도 완만하게 변동하고, 이것이 계류선박의 장주기 동요의 하나의 원인이다.

선박계류와 계류계의 고유주기

선박의 계류 방법은, 계류되는 장소에 따라 다르다. 황천시에 먼 바다에서 정박하고 있을 때는, 배의 닻과 기관추력만이 의지함이다. 1점계류 buoy에서는 buoy에 부착된 전용계류삭이 이용되지만, 배만이 아니라 buoy의 운동도 동시에 고려해야 한다. sea-berth나 일반계선안에서는 계류삭과 방현재가 계류장치를 구성한다.

계류삭은 와이어 로프 또는

섬유 로프이고, 선박이 그 톤수에 따라 부착하고 있는 규격·분수가 사용된다. 선박이 보유하고 있는 계류삭은 통상 상태에서 하역을 원활히 행하도록 배를 계선안에 고정하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 그렇게 강고한 것이 아니라, 강풍·고파랑시에 계류삭이 파단되는 일이 있다. 항에 의해서는 황천대책으로서 전용의 계류삭을 준비하는 경우도 있다.

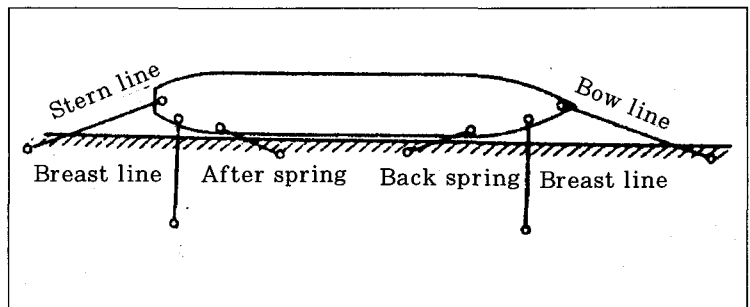
단, 배의 갑판 위의 bitt의 강도의 문제이고, 사용할 수 있는 강도에는 한계가 있다. 계선안에 배를 계류했을 때에는 계류삭의 위치에 의해 <그림 2>에 나타내는 것과 같은 명칭이 붙어 있다. 이 중, Bow(船首)line과 Stern(船尾)line은 주로 surging 방지, Breast line은 swaying과 yawing 방지를 위한 것이다. Spring line은 주로 평상시에 전체를 고정하는 목적으

로 사용하고 황천시에는 풀어주는 쪽이 좋은 것으로 되어 있다.

계류삭 중에서 와이어 로프는 인장하중과 신장률의 관계가 거의 선형이고, 신장률도 비교적 작다. 이것에 대해서 섬유로프(manila삼, 나이론 등)은 신장률도 크고 또한 인장하중과의 관계가 비선형이다. 이 때문에 계류 선박의 수리모형실험에서는 계류삭의 하중·변위곡선을 모형으로 재현하는 데 고심한다.

방현재는 본래 선박의 접안시 충격력을 흡수하고 선박의 판 및 계선안에 손상을 주지 않도록 하는 것을 목적으로 하여 설치되어 있다. 단, 황천시에 계류할 때는 선박의 동요를 제어하는 요소로서 중요하게 된다. 방현재는 압축에 대해서만 기능하고, 더구나 하중과 변위의 관계가 비선형이다.

계류 선박의 운동의 고유주



<그림 2> 선박계류삭의 명칭

〈표 1〉 부체계류력의 복원력

운동모드	부체계유	계류삭	방현재
surging	×	○	×
swaying	×	○	○
heaving	○	×	×
rolling	○	△	×
pitching	○	×	×
yawing	×	○	△

기는 선박의 질량(관성 모멘트)과 복원력에 의해 정해진다. 운동의 모드마다 복원력으로서 작용하는 요소를 〈표 1〉에 나타냈다. heaving과 pitching에 대해서는 계류 장치는 무력하고, 부체로서의 정적복원력만이 유효하다. 따라서 고유 주기는 자유부체로서 수~수십초이다. rolling은 계류삭이나 방현재의 부착 위치에 의해서 어느 정도 억제할 수 있지만, 그 효과는 작고 자유부체로서 고유 주기도 거의 변하지 않는다. 이것에 대해서 surging, swaying 및 yawing은 부체 자체에 복원력이 없고 주로 계류삭의 약한 구속력이 복원력으로 된다. 이 때문에 고유 주기가 수십초~수분으로 길게 된다. 이것에 의해 계류 선박은 바람소리나 파고의 장주기 변동에 동조하여 천천히 또한 크게 동요를 일으킨다. 이것

을 억제하는 데는 계류삭을 강하게 잡아당겨 고유주기를 짧게 하는 것이 유효하다. 단, 동시에 장력이 크게 되어 파단의 위험성이 증대하기 때문에 계류삭의 장력조정을 빈번하게 행할 필요가 있다.

계류 선박의 동요해석

부체의 운동을 해석하는데는 앞의 식 (1)을 풀어야 한다. 파랑중을 항해하는 선박의 경우에는 계류력이 존재하지 않기 때문에, 비선형 감쇄력계수 C_{kj} 의 항을 무시 혹은 근사적으로 선형화하는 것에 의해 운동방정식이 선형방정식으로 된다. 따라서, 불규칙 파랑중의 선박의 운동 등은 파랑 외력을 스펙트럼 주파수 성분마다 분할해서 운동방정식을 풀고, 그 결과를 겹쳐지는 것에 의해 구하는 것이 가능하다. 따라서 계류 선박의 경우에는 비선형인 계류력이 중요한 복원력이고, 또 파고의 자승에 비례하는 파랑표류력도 선체 동요를 규정하기 때문에 선형 중첩의 수법을 사용할 수 없다. 따라서, 계류 선박의 동요 해석에서는 외력 $X_r(t)$ 의 시간적 변화를 입력으로서 주어진 식(1)을 수치적으로 푸는 시계열해석

이 기본이다. 외력으로서의 변동풍하중 및 파랑 스펙트럼에 근거한 $k=1\sim6$ 의 운동 모드마다 선체에 작용하는 풍력 및 파력과 그 모멘트의 시계열을 미리 계산한다. 불규칙 파의 파랑 표류력에 있어서는 1파마다 표류력을 규칙파의 값으로 근사시켜 주는 방법등이 이용된다.

계류선박의 수치해석에 있어서는 여러가지 방법이 개발되어 있고, 예를 들면 Ueda는 스스로의 방법을 사용하여 일본의 항만에 있어서 다수의 사례에 관하여 해석하고 현지 관측이나 모형실험의 결과와 비교해서 수치해석 결과의 타당성을 검증하고 있다.

계류 선박이나 허용 동요량

계선안이나 buoy에 계류된 선박은 바람이나 파랑 때문에 늘 동요를 하고 있고, 동요량을 제로로 하는 것은 불가능하다. 동요량의 허용치는 궁극적으로는 계류삭 등의 내력으로 결정되지만 통상의 상태에서는 하역 작업에 지장을 가져오지 않는 한계치로서 설정된다. 이와 같은 계류선박의 허용 동요량은 하역작업의 형태, 선박의 종류와 크기, 운동의 모드 등에 따라 다르

〈표 2〉 하역작업에서 본 계류선박의 허용최대 동요량(Ueda-Shiraishi:일본항 만기연
보고 제27권 제4호, 1988년 p.54)

선 종	구 동 모 타					
	surging(m)	swaying(m)	heaving(m)	rolling	pitching	yawing
일 반 화 물 선	±1.0	±0.75	±0.5	±2.5	±1.0	±1.5
곡 물 화 물 선	±1.0	±0.5	±0.5	±1.0	±1.0	±1.0
광식물화물선	±1.0	±1.0	±0.5	±3.0	±1.0	±1.0
내 항 탱 커	±1.0	±0.75	±0.5	±4.0	±2.0	±2.0
외 항 탱 커	±1.0	±0.75	±0.5	±3.0	±1.5	±1.5

고 하역 작업의 실태조사에 근거하여 정해져야 한다. 이와 같은 조사는 각국에서 행해지고 있고 일본에서도 Moji·Fujihara, Kubo등이 조사 결과를 보고하고 있다.

계류 선박의 허용 동요량에 관해서는 Bruun에 의한 선종별의 제안치가 자주 인용된다. 나아가 Ueda-Shiraishi는 하역작업을 중단한 약 110에에 있어서 그때의 선박동요량을 수치계산으로 추정하고, 그 결과에서 연역한 허용 동요량의 값을 하역관계자에게 조희해서 약간 수정하여 〈표 2〉에 나타낸 값을 제안하고 있다. 내항탱커와 외항탱커와의 차이는 배의 크기 차이에 의한 것으로 생각된다. 이 표 중의 수치는 어느것도 동요씨물레이션에서 얻어진 동요량의 최대치에 근거한 것이다. 또한, 안벽크레인을 사용하는 컨테이너선의 경우는 허용 동

요량이 상당히 작다.

항내 정온도의 문제는 앞으로 항내의 계선안마다 선박의 동요씨물레이션을 하고 허용 동요량의 수치를 비교하여 동요량이 너무 크면 계류 장치의 개량을 검토하고, 그래도 불충분하면 방파제의 연장이나 항내의 소파시설의 증강등을 실시하는 방향으로 나아가는 것으로 생각된다.

선박 계류에 대한 유의사항

계류 선박의 안전성 문제는 수치시물레이션 혹은 적절한 수리 모형실험에 의하지 않으면 올바른 답을 얻을 수 없다. 단, 이와 같은 검토를 행할 때에도 계류 선박의 동요 특성 등은 어느 정도 이해해 놓을 필요가 있다. 아래에 항내정온도의 관점에서 유의하여야 할 사항을 열거해 놓는다.

① 주기가 긴 파랑은 동요량이 크다.

종래의 항내 정온도는 파고만을 지표로 하여 정온일수등을 검토하여 왔다. 정온도에 파고가 직접적으로 영향을 주는 것은 당연 하지만 앞으로는 파고와 동시에 주기를 고려하는 것이 필요하다. 주기의 영향은 배의 크기나 계선방법등에 의해 변화하지만 일반적으로는 주기가 길수록 동요량이 크게 된다. 따라서, 너울의 영향을 받기 쉬운 항에서는 그 밖의 항보다도 항내파고를 낮게 억제하는 것이 필요하게 된다.

또한, 주기가 수분 이상의 장주기파에 의한 항내 수면의 공진현상은 1960~1970년대에 여러가지 연구가 되었지만, 특정의 항만 이외에는 계류 선박의 안전성을 위협하는 일은 없는 것 같다. 현재는 통상의 파랑중에서 보여지는 고파의

연결현상에 의해 주기 1~수분의 선박동요가 발생하고, 이것이 계류삭과의 조합에 의한 계류 선박의 고유 주기에 동조하여 증폭된다고 생각하고 있다.

② 배는 옆으로부터의 파·바람에 약하다.

파·바람의 외력은 당연하지만 선체의 작용면적에 비례한다. 따라서, 횡파, 횡풍을 받는 장소에 계선안을 설치하는 것은 가능한 피해야 한다. 항만 계획에서 횡파를 피할 수 없을 때에는 그 밖의 계선안보다도 전면 파고가 낮게 되도록 배려한다. 또한, 선박 동요를 수치계산할 때에 파향으로서 $19^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 의 폭을 갖도록 하는 것을 Ueda·Shiraishi이 추천하고 있다.

③ 육지쪽에서의 강한 계절풍을 피한다.

계절풍등 강풍이 부는 방향이 한정되어져 있는 항에서는 배가 그 강풍을 육지쪽에서 받는 위치에 계선안을 계획하지 말아야 한다. 육풍에 대해서는 배는 계류삭, 그것도 주로 Breast line으로 끌어당겨 놓아야 하지만 계류삭의 내력은 그렇게 큰 것은 아니다. 육풍을 받는 위치에 계선안을 할 수 없이 설치해야 하는 경우에는 높이가 충분히 있는

지붕등 바람을 차단할 수 있는 구조물의 설치를 검토할 필요가 있다.

④ 바람은 주파수 스펙트럼을 가지는 변동풍으로서 생각한다.

일반적으로 구조물의 설계에서는 풍하중을 정상의력으로 취급하지만, 부체의 문제에서는 풍속변동의 스펙트럼을 고려하지 않으면 동요량이나 계류력을 상당히 과소평가하기 쉽다. 풍속 스펙트럼으로서는 Davenport에 의한 것이 많이 사용된다. 예비적 검토일 때는 변동풍의 gust을 곱한 최대순간 풍속을 이용하여 계류력 등을 추정하는 것도 있지만 최종적으로 식(1)의 수치시물레이션에 의존해야 한다.

⑤ 배는 공재(空載)상태일 때가 가장 동요량이 크다.

바람에 대해서는 만재보다도 공재 상태쪽이 폭로(暴露)면적이 크기 때문에 동요량이 크게되는 것은 당연하지만 파에 대해서도 공재상태쪽이 동요량이 크다. 이것은 공재시에는 식(1)의 우변의 외력이 작게 되지만, 이 이상으로 선체의 부가질량계수나 조파감소계수등이 감소하기 때문이다.

⑥ 선박동요량은 무계류(無

係留)의 상태를 기본으로 생각한다.

지금까지 설명한 것과 같이 통상의 계류장치에서는 황천시의 선박동요를 억제하는 힘이 약하다. 계류삭이나 방현재를 고안해서도 동요량을 자유부체로서의 값 이하로 하는 것은 상당히 어렵다. 조건에 의해서는 계류에 의해 자유부체 때 보다도 동요량이 약간 증대하는 것도 있다. 또한, Ueda·Kokuma는 방현재의 선정에 관해서 최대 순간 풍속(gust울은 1.3배로서 산정)에 대한 정상 풍하중에 의한 방현재의 변위량과 무계류시의 파랑에 의한 동요량을 각각 추정하고, 양자의 합이 방현재의 허용변위 이하로 되도록 선정하는 것을 추천하고 있다.

어느 것으로 하여도 계류선박의 문제는 일반의 고정구조물의 개념으로 풀 수 없다. 또, 관련있는 요인의 수가 많기 때문에 설계공식 등을 유도하는 것이 어렵다. 여러 비슷한 사례를 조사하고, 시행착오적으로 수치시물레이션 등에서 최적해를 구하는 노력이 필요하다. ㉞