

# 부표계류 함정의 계류체인 절단원인에 관한 분석적 연구

임봉택  
해군사관학교

An Analytical Investigation on the Cause for Mooring Chain Cut in a Naval Moored to a Buoy

Lim Bong Taeck  
Korea Naval Academy  
E-mail : nalbt@hanmail.net

## 요 약

본 연구에서는 태풍의 내습에 대비하여 부표에 계류하여 피항 중이던 해군함정의 계류체인이 절단된 원인을 분석하였다. 분석해 본 결과, 매우 흥미로운 사실을 확인 할 수 있었다. 즉, 실무부대에서는 계류체인이 절단된 원인을 선체가 받는 풍압력과 유압력 등이 계류체인의 절단강도를 초과하였기 때문인 것으로 알고 있었다. 그러나 본 연구결과에 의하면, 계류체인이 절단된 주요 원인은 선체와 계류체인의 접합 부위에서 발생하는 충격력 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 본 연구에 의한 분석결과가 수리적 분석 측면에서 논리적이며, 절단 사고가 발생한 당시의 목격자들이 진술한 상황과도 일치한 점을 확인할 수 있었다.

## ABSTRACT

This study analyzed the cause for mooring chain cut in a naval ship moored, in preparation for a typhoon approach, to a buoy in a shelter. The result of the analysis led to a very interesting fact. That is, while officers usually understood the cut results from the fact that the wind and the tide were stronger than what the mooring chain can hold, according to the study, it was analyzed the impact power at the point where the mooring chain and the ship's body met was a main factor in the cut. Also, it was confirmed that the analytic result of the study is more logical from the point of mathematical analysis and that the cut corresponds to what the then-witnesses stated about the situation.

## 키워드

부표계류, 계류체인, Swing 회두운동모델, 충격량(력)

## 1. 서 론

본 연구에서는 태풍의 내습에 대비하여 부표에 계류하여 피항 중이던 해군함정의 계류체인이 절단된 원인을 분석하였다.

태풍 내습 시 부표에 계류 중이던 함정의 계류체인이 절단된 원인에 관하여 이미 여러 관련부대(서)에서 나름대로의 분석결과를 제시하고 있다 [1]. 그러나 이 분석결과들은 다음과 같은 측면에서 다소 의문점을 가지고 있다. 각 부대(서)에서 제시하고 있는 자료에서는 계류체인의 절단원인이 바람이나 조류에 의한 선체의 풍압력과 유압

력이 계류체인의 절단인장력을 초과하였기 때문인 것으로 공통적으로 분석하고 있다. 그러나 '03년 9월 태풍 매미가 내습했을 당시에 계류체인이 절단된 함정들의 상황을 고려해 보면, 이러한 분석결과들의 오류를 간단히 확인할 수 있다. 즉, 당시 계류체인의 절단인장력은 함정에 따라 48톤 또는 68톤이었고, 계류부표의 파주력은 26톤 또는 37톤이었다. 따라서 계류체인에 미치는 장력이 절단인장력에 도달하기 전에 부표의 주요상황이 선행되는 것이 일반적이라고 할 수 있는데, 이런 일은 없었다.

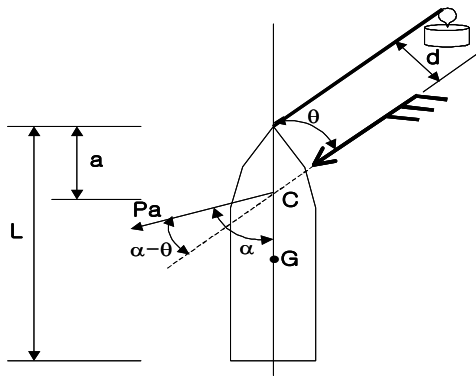
본 연구에서는 이러한 의문점에 대한 해답을

모색하기 위하여 부표계류 시 선체의 Swing 회 두운동 모델을 제시하고 계류체인 의 절단원인 에 대하여 분석해 보고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1 부표계류 함정의 Swing 회두운동 모델

부표에 계류 중인 함정의 회두운동은 풍압중심 점의 위치에 따른 선체의 회두운동과 함수 끝단 이 계류체인으로 부표에 연결됨으로써 선체의 자유로운 회두운동을 제한하는 회두억지력으로 설명될 수 있다. 풍압중심점은 선체의 피풍면적 중심점으로서 그림 1에서 C점이 된다. C점의 위치 는 식(1)에 의해서 산출된다. 그림 1에서 풍압중심 점 C가 선체중심점 G보다 함수 쪽에 있으면 선체는 함수가 풍하방향으로 회두하는 이풍성을 보이고, 반대로 풍압중심점 C가 선체중심점 G보다 함미 쪽에 있으면 선체는 함수가 풍상방향으 로 회두하는 향풍성을 보이게 된다. 또한, 바람에 의해 선체가 받는 풍압력 Pa는 식(2)에 의하여 산출된다. 식(2)에서 풍압합력계수 Ca에 대해서는 여러 연구자들이 선형에 따라 0.5~1.5 범위정도 의 값을 제시하고 있는데, 객선이나 화물선 등 일 반선형은 1.0을 넘지가 않고 대형 탱크선이나 컨 테이너선과 같은 초대형선들은 1.0을 넘는다. 또 한 상대풍향  $\theta$ 에 대해서도 연구자들의 실험결과 에 따라 30~45도 범위정도에서 최대값을 갖는다 고 알려져 있다[2].



단,  $\theta$  : 수풍각, Pa : 합풍압력, L : 전장, C : 풍압 중심점, G : 선체 중심점

그림 1. 풍압력과 풍압중심점

$$C = a/L \quad (1)$$

$$= 0.291 + 0.0023 \cdot \theta$$

$$R_a = C_a \cdot \frac{\gamma_a}{2g} \cdot (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \cdot v^2$$

(2)

- 단,  $R_a$  : 풍압력(kg)  
 $C_a$  : 상대풍향에 대한 풍압계수  
 $\gamma_a$  : 단위체적당 공기무게( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )  
 $g$  : 중력가속도( $9.8 \text{ m/sec}^2$ )  
 $A$  : 선체의 수면상 정면투영면적( $\text{m}^2$ )  
 $B$  : 선체의 수면상 측면투영면적( $\text{m}^2$ )  
 $\theta$  : 상대풍향( deg )  
 $v$  : 상대풍속( m/sec )

한편, 선체의 바람에 의한 회두운동은 함수 끝 단과 계류부표 사이에 연결된 계류체인에 의해서 회두운동이 억제되면서 풍압중심점이 변화되어 반대 방향으로 회두하게 된다. 이러한 선체의 회 두운동은 주기적으로 반복되면서 전체적으로는  $\infty$ 자 형태의 Swing 회두운동을 하게 된다. 그림 2는 이러한 선체의 회두운동 모델을 묘사한 것이 다. 그림 1에서  $\theta$ 는 다양한 조건(전장, 계류체인 조출량, 풍압력의 세기 등)에 따라 다르겠지만, 적 절한 강도 이상의 바람에 의해 계류부표보다 풍 하방향에 위치한 함정의 회두운동을 고려하면 45 도를 넘지 않는다. 따라서 그림 2에서 Swing 각 도는 90도 이내 정도라고 이해하여도 별 무리가 없다[3].

그림 2의 Swing 회두운동 모델에서 선체의 각 위치별 상태(회두운동 방향, 풍압 중심점, 계류체 인의 장력 등)는 서로 차이가 있는데, 이를 상세 히 살펴보면 다음과 같다.

[위치 ①, ②] 우현 함수방향으로 수풍각이 형 성되어 이풍성을 보이면서 좌 회두와 함께 좌현 쪽으로 선체가 압류된다. ①번에서 ②번 상태로 되면서 선체의 수풍면적이 넓어짐에 따라 풍압력 이 점점 증가하고 계류체인에도 장력이 미치기 시작한다. 그러나 ②번에서 ③번 상태로 되면서 수풍면적이 좁아지고 풍압력이 약해지는 회두운 동을 한다.

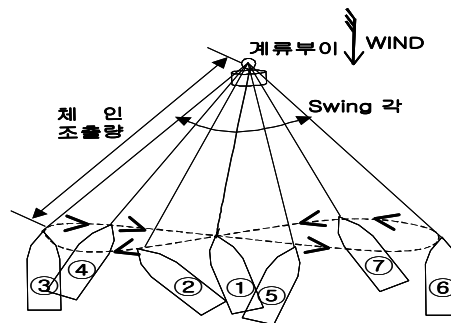


그림 2. Swinging 회두운동 모델

[위치 ③] 초기에는 계류체인이 선체의 이동을 억제하기 때문에 선체의 압류가 제한됨과 동시에, 풍압력도 상당히 높기 때문에 계류체인에 미치는 장력이 최고에 이른다. 이 시기에 바람이 강해서 좌회두와 함께 선체의 압류속도가 크면, 계류체인을 통해 부표 파주부에 장력이 가해지기 전에 선체와 체인의 접점부위에 순간적인 충격력이 가해지게 됨으로써 계류체인이 절단될 수 있다.

[위치 ④, ⑤] ④번에서는 향풍성에 의한 우회두가 지속되면서 우현 쪽으로 선체가 압류되고 계류부이와 가까워지면서 계류체인의 장력은 계속 감소된다. ⑤번 상태가 되면 계류부이와 다시 멀어지면서 계류체인에 장력이 가해지기 시작한다.

[위치 ⑥] 위치 ③의 경우와 바람이나 회두 방향만 반대이고 유사한 특성이 나타난다.

[위치 ⑦] 위치 ④의 경우와 바람이나 회두 방향만 반대이고 유사한 특성을 나타낸다.

2.2 부표계류 함정의 풍압력

부표계류 중인 함정이 받는 외력은 수면상부구조물에 의한 풍압력과 수면하부구조물에 의한 유압력으로 대별된다. 그러나 후자는 전자에 비해 그 영향력이 매우 적기 때문에 무시하여도

별 무리가 없다. 따라서 본 연구에서는 식(2)에 의한 풍압력을 전체외력으로 간주기로 한다. 또한 식(2)에서 변수 값인 풍압합력계수 Ca는 안전을 고려하여 일반선형의 최대값 정도인 1.0으로 정하고, 상대풍향  $\theta$ 를 최대값 45도로 정하면 식(2)에 의한 풍압력은 함정이 받는 최대풍압력을 나타내게 된다[4]. 이상의 기준과 식(2) 및 해군 함종별 자료를 이용하여 풍속에 따른 최대 풍압력을 구하면 그림 3과 같다.

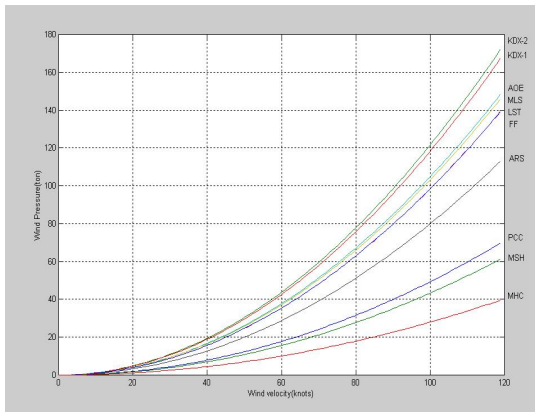


그림 3. 해군함종별 풍속에 따른 풍압력( $\theta=45$ 도)

또한 부표계류 중인 함정이 받는 최소 풍압력은 바람을 정면에서 받을 때이므로 이 경우 식(2)에 의한 최소 풍압력은 그림 4와 같다.

그림 3, 4에서 구한 풍압력을 그림 2의 Swing 회두운동 모델에 적용하여 선체가 받는 풍압력을 해석하여보면 다음과 같다. 먼저 ③번과 ⑥번을 제외한 상태에서는 평균적으로 최소 풍압력을 받는다고 할 수 있다. 물론 이 경우에도 최대 풍압력을 받을 수 있다. 그러나 선체가 풍하방향으로 압류되면서 피풍면적을 최소화하기 위하여 정면을 풍상으로 향하는 회두를 자연스럽게 하기 때문에, 최대 풍압력 지속시간이 짧아 부표의 파주부까지 지속적으로 장력을 미치지 못하는 못하게 된다. 따라서 이 상태에서 부표의 파주부에 지속적인 장력을 미치는 풍압력은 최소 풍압력 또는 이를 약간 상회하는 정도의 풍압력이 될 것이다.

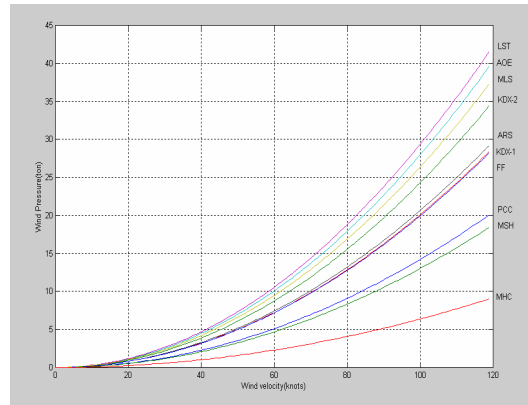


그림 4. 해군함종별 풍속에 따른 풍압력( $\theta=0$ 도)

그러나 ③번과 ⑥번 상태에서는 회두방향이 바뀌면서 그 사이에 상당한 풍압력을 받을 뿐만 아니라, 그 지속시간이 길기 때문에 부표의 파주부까지 충분히 장력을 미치게 된다. 이 경우에 받게 되는 '상당한 풍압력'이란 그림 3에 의한 최대 풍압력에 훨씬 못 미치는 풍압력을 받는다고 보는 것이 일반적이라고 할 수 있다. 즉, ③번과 ⑥번 상태와 같이 계류체인에 상당한 장력이 있는 상태에서 바람을 받게 되면, 선체의 자유로운 회두가 억제되면서 피풍면적을 최소화하는 회두운동 반응이 빨리 일어나기 때문이다. 따라서 이 경우 식(2)에 의한 수풍각  $\theta$ 는 45도까지 발생한다고 보기는 어렵고 약 25도 이내 정도로 제한된다고 볼 수 있다. 그림 5는 식(2)의 수풍각  $\theta$ 를 25도로 조정하여 산출한 풍압력이다. 그림 5는 태풍 매미시 부표계류 중 주묘가 되었던 함정의 상황을 설명하는데 매우 적절한 단서를 제공한다.

당시 이 함정은 추진기를 사용치 않은 상태에서 계류한 부표의 파주력은 37톤, 계류체인의 절단 인장력은 50톤이었으며 풍속은 94노트였다. 만약 이 함정이 받은 최대풍압력을 그림 3에서 산출하면 약 82톤으로 주묘는 물론 계류체인의 절단인장력을 훨씬 초과하게 되어 약 40야드 정도의 주묘만으로 끝날 수 있는 상황이 아니었다. 그

러나 그림 5에 의한 최대 풍압력은 약 43톤으로 부표의 파괴력 37톤을 약간 상회하여 주묘가 일어났으며, 체인의 절단 인장력에 미치지 못하였다는 논리적인 설명이 가능하게 된다.

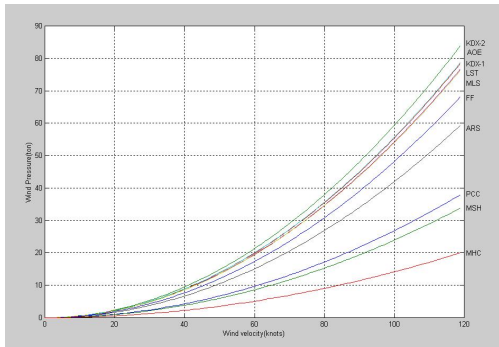


그림 5. 해군함종별 풍속에 따른 풍압력( $\theta=25^\circ$ )

결론적으로 부표계류 중인 함정은 수풍각 45도에서 최대 풍압력을 받을 수 있으나, 계류체인의 절단이나 부표의 주묘를 일으킬 수 있는 상태에서의 최대 풍압력은 수풍각 25도 정도에서 발생한다고 보는 것이 타당할 것이다.

### 2.3 부표계류 시 계류체인 절단 원인분석

아래 표 1은 태풍 매미 시 모 함정의 계류체인이 절단된 상황과 당시의 풍압력을 종합적으로 나타낸 결과이다.

표 1. 해군 모 함정의 계류체인 절단상태

계류부이 파괴력	계류체인 조출량	계류체인 절단인장력	풍속
37.5톤	40m	68톤	90노트
Fig. 14에 의한 최소 풍압력 (풍속 90노트)		Fig. 15에 의한 최대 풍압력 (풍속 90노트)	
12톤		24톤	

표 1은 상당히 흥미로운 결과를 나타내고 있다. 당시 이 함정이 받은 최대 풍압력은 24톤으로 계류체인의 절단인장력에 훨씬 모자라고 부표의 파괴력에도 미치지 못하는 정도이다. 여기서 계류체인 절단력과의 차이가 44톤이라는 점은 풍압력과 유압력의 합력이 절단인장력을 초과하여 절단되었다는 기존의 분석결과들과는 설명이 안 된다. 이 차이는 그림 2의 위치 ③에서 설명한 계류체인에 미친 순간장력, 즉 충격력 외에는 물리적으로 설명이 되지 않는다. 충격력은 물리적으로 물체의 질량과 속도의 곱하기로 나타낼 수 있는데 [5], 여기에서는 풍압력을 계류체에 작용하는 질량, 선체의 압류속도를 속도로 가정하여 선체의 압류속도별 충격력을 구하면 근사적인 값을 산출

할 수 있다. 이 충격력 값은 기존의 분석결과들에서 설명이 안 되는 44톤의 차이 값을 잘 나타내고 있다. 즉, 표 1의 최대 풍압력이 미치고 있는 상태에서 4노트의 압류속도에 의해 순간장력을 받으면, 계류체에 작용하는 충격력은 49.3톤으로 계류체인의 절단인장력을 초과하게 된다[6]. 따라서 표 1에 의한 모 함정의 계류체인 절단상황은, 이 함정이 그림 2의 ③ 또는 ⑥ 위치에서 최대 풍압력이 계류체에 미치고 있는 상태에서 약 4노트 정도의 선체 압류속도에 의한 충격력(순간장력)에 의하여 계류체인이 절단되었다고 보는 것이 타당할 것이다.

이러한 해석은 계류체인 절단 전에 부이의 주묘가 없었다는 점, 최대 풍압력이 계류체인 절단력에 미치지 못했는데도 절단된 점 등과 같은 의문에 해답을 제공할 수 있다. 또한, 당시 함장들이 소감문에서 밝히고 있는 계류체인 절단 상황에 흡수 전방에서 충격음 함께 허공에서 불꽃이 튀는 것을 목격하였다고 기술하고 있다.

## III. 결 론

본 연구에서는 태풍의 내습에 대비하여 부표에 계류하여 피항 중이던 해군함정의 계류체인이 절단된 원인을 분석하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

첫째, 실무부대에서는 부표의 계류체인이 절단된 원인을 선체가 받는 풍압력과 유압력 등이 계류체인의 절단강도를 초과하였기 때문인 것으로 알고 있었다. 그러나 본 연구결과, 계류체인이 절단된 주요 원인은 선체와 계류체인의 접합 부위에서 발생하는 충격력 때문인 것으로 분석되었다. 둘째, 본 연구에 의한 분석결과가 수리적 분석 측면에서 논리적이며, 절단 사고가 발생한 당시의 목격자들이 진술한 상황과도 일치한 점을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 해군 진해기지사령부, “03년 태풍 ”매미“ 피해 분석 및 교훈”, 내부자료, 2003.
- [2] 임봉택, “외력을 고려한 함정의 투묘 및 부이계류에 관한 연구”, 해양연구논총 제34집, 해군인쇄창, pp. 275-277, 2005.
- [3] 윤점동, “선박조종의 이론과 실무“, 세종출판사, pp. 237-239, 2004.
- [4] 明渡範次, “航海力學”, 海文堂, pp. 226-227, 1983.
- [5] 대학물리학교재편찬위원회 역, “대학물리학”, 북스힐, pp. 147-155, 2000.
- [6] 임봉택, “진해군항의 태풍 피할방안과 부두 시설 개선방안에 관한 연구”, 해양연구논총

제36집, 해군인쇄창, pp. 69-70, 2006.