

## 선박용 유압 조타 시스템의 구조적 안전성 평가

### Structural Safety Evaluation of Hydraulic Steering System for Ship

이문희<sup>1</sup>, 손인수<sup>2\*</sup>, 양창근<sup>3</sup>

Moonhee Lee<sup>1</sup>, Insoo Son<sup>2\*</sup>, Changgun Yang<sup>3</sup>

#### 〈Abstract〉

The optimal shape modeling of core parts through 3D modeling and structural analysis for the development of small and medium-sized ships. The goal is to improve the efficient structure of the hydraulic system for controlling the rudder among the core steering parts in small and medium-sized ships. Through 3D modeling and structural analysis, a new concept of tiller parts and a double-acting hydraulic cylinder control system were proposed and operational structural stability was evaluated. Structural analysis of the three different tiller designs that can be replaceable onto existing fishing vessels was conducted to derive the final shapes. The emphasis was placed on evaluating the structural stability of the key drive components, the tiller, pin, and cylinder rod in the maximum torque condition of the hydraulic cylinder.

*Keywords : Hydraulic steering system, Tiller, Small ship, Rudder*

---

1 정회원, 동의과학대학교 기계계열  
2\* 정회원, 교신저자,  
동의대학교 기계자동차로봇부품공학부  
E-mail: isson92@deu.ac.kr  
3 (주) 대성이엔터

1 Division of Mechanical Engineering, Dong-Eui institute of technology, Korea  
2\* Corresponding Author, Department of Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-Eui University, Korea  
3 Daesung E&T Co., LTD, Korea

## 1. 서론

최근 생산가능 인구의 감소 및 어업 기피 현상으로 어업종사자는 꾸준히 고령화되고 있다. 게다가, 기상 이변으로 수확 어종의 변화 및 어획량 감소 또한 어업종사자의 수입의 불안정성을 높이는 것으로 인식되고 있다. 근해 어업의 생산성을 분석한 논문[1]에 따르면, 일부 어업 생산량 감소를 극복하기 위해서는 소규모, 노후화 어선의 감축과 노동집약적 어선에 의한 생산성 증대 등 효율적 방안도 제시한다[1]. 이러한 어업종사자에게 불리한 어업환경은 연안의 중소형 선박의 관리에 필요한 비용의 충당까지 어려워져, 정비 및 부품교체 시기의 지체 등 선박 노후화로 해상안전사고의 위험을 초래할 수 있다. 최근에는 한국 정부의 노후화된 선박에 대한 현대화 지원사업으로 영세 연안 선박의 부품 교체시기를 앞당겨 해상안전의 확보 등 선박의 현대화가 진행되는 가운데 어선과 같이 중소형 선박 부품을 제조하는 기업은 기존에 적용되고 있는 제품의 단순 교체가 주를 이루는 실정이다. 일부 선박의 방향타, 기저재에 대한 새로운 기술 개발은 진행되었지만[2-5], 최근 소형어선의 핵심부품의 기술개발이 크게 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 중소형 선박의 핵심부품 중 조타기의 타각변경 조작에 따라 방향타가 제어되는 유압 장치에 대하여, 기존의 유압실린더 구동시스템에서 벗어나 효율적인 구조를 개발하고, 구조적 안정성 평가에 중점을 두었다. Fig. 1은 기존의 2개의 단동 유압실린더에 의한 방향타 제어 유압시스템의 예를 3D 모델링으로 표현하였다. 이와는 달리 개발대상 모델은 1개의 복동 유압실린더를 채용하였으며, 방향타의 회전을 제어하는 킬러의 형상을 3가지로 개발하여 수치해석에 의한 안정성을 판단하였다.

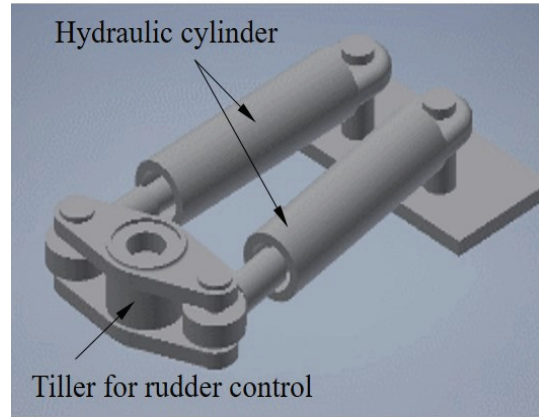


Fig. 1 3D modeling of conventional hydraulic system for rudder control

## 2. 유압 실린더의 사양 결정

### 2.1 유압실린더 기초사양 계산

신개념 선박용 유압식 방향타 제어장치 개발을 위하여 Fig. 2과 같이 양방향 유압실린더를 이용하였으며, 이는 기존 장치와 비교하여 설치공간 확보가 유리하고, 부품감소를 통하여 제작비용이 절감되는 효과가 있다. 특히, 개발하고자 하는 양방향 유압실린더를 이용한 방향타 제어장치는 기존 유압조타기와 교환설치가 가능하며 고장원인 파악 및 수리교체가 쉬운 장점을 가진다.

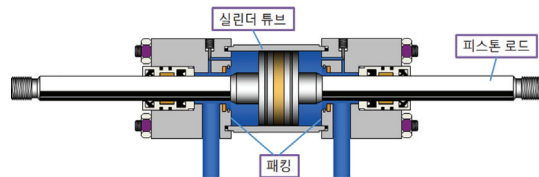


Fig. 2 Two-way hydraulic cylinder

양방향 유압실린더를 이용한 방향타 제어장치 개발을 위하여 먼저 유압실린더 사양 결정을 위한 실린더 동력( $F$ ), 실린더 용량( $V$ ), 토크( $T$ ) 및 실린더 이송속도( $S$ )의 설계계산식은 각각 다음과 같다.

$$F = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)PY \quad 1)$$

$$V = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)S_i \quad 2)$$

$$T = FL \cos 35^\circ \quad 3)$$

$$S = \frac{qN \times 10^4}{60 \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} \quad 4)$$

여기서  $D$ 와 실린더 직경,  $d$ 는 로드 직경,  $P$ 사용 압력,  $N$ 은 RPM 그리고  $Y$ 는 효율(80%)을 나타낸다. 또  $L$ ,  $S_i$  그리고  $q$ 는 각각 킬러(tiller)의 회전반경, 실린더 스트로크(stroke), 그리고 펌프의 변위(displacement)를 의미한다.

식 1)-4)를 계산하여 얻은 실린더 사양은 Table 1에 도시하였다. Table 1에 계산된 결과를 바탕으로 실린더 사양을 선택하였으며, 계산 결과는 향후 구조해석에서 입력 하중의 참고자료로 활용된다.

Table 1. Calculated cylinder specification

Items	Unit	Value	Note
Cylinder power( $F$ )	kgf	1,778.04	-
Cylinder volume ( $V$ )	cc	134	-
Torque( $T$ )	kgf · m	116.5	-
Speed( $S$ )	mm/sec	43.5	$q = 5$ cc/rev

### 2.2 유압실린더 스트로크(stroke)

선박용 방향타 제어장치의 필요 조타각도는 좌우 최대  $35^\circ$  이며(Fig. 3 참조), 따라서 이 장에서는 조타각 변화에 따른 실린더 스트로크 변화를 예측하여 Fig. 4에 도시하였다. 좌우  $35^\circ$  각도에 대하여 최대 스트로크는 약 45.23 mm임을 알 수 있다.

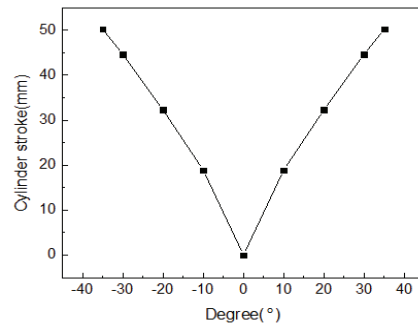


Fig. 4 Cylinder stroke vs. degree

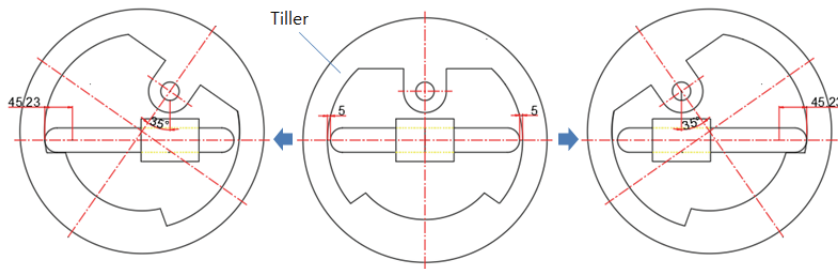


Fig. 3 Change of stroke

### 3. 구조해석을 이용한 킬러의 최적형상 설계

#### 3.1 킬러 형상에 대한 해석

최적의 킬러 형상을 결정하기 위하여 앞에서 설계된 유압실린더 사양을 기초로 3가지 형상의 킬러를 설계하고 구조해석을 통하여 그 안정성을 판단하였다. 모든 해석에 있어서 킬러는 운동 중 가장 하중을 많이 받는 최대 각도 35°인 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

구속조건은 실린더 부분을 완전고정하고 실린더 로드는 축방향 운동을 가능하게 하였으며, 핀은 회전운동이 가능한 구속조건을 부여하였다. 하중 조건은 핀에 결합된 방향타가 해수와 접하여 킬러에 모멘트를 가하는 알고리즘으로 생각하여 해석을 수행하였으며 모멘트 값은 보수적인 평가를 위하여 실린더의 최대 모멘트(116.5 kgf·m)를 적용하였다. 실제 조타 시스템은 킬러와 접촉하는 실린더 로드의 수평방향 운동에 의하여 킬러가 핀을 중심으로 회전운동을 하는 구조이지만, 한계 각도에 도달한 경우에 역으로 방향타에 의하여 킬러가 실린더 로드에게 하중을 전달하기 때문에 위의 하중조건을 선택하였다.

Fig. 5는 원형 킬러 형상으로 방향타와 연결되는 핀 연결부분을 두텁게 한 형상의 유한요소 모델과 구속조건 및 하중조건을 나타낸 것이다. Fig. 6는 Case I 형상의 구조해석 결과를 도시하였으며 해석 결과 최대 변형은 약 0.33 mm를 보였다. 최대 응력은 약 142.22 MPa을 보였으며, 킬러와 실린더 로드의 접합부에서 발행함을 알 수 있다.

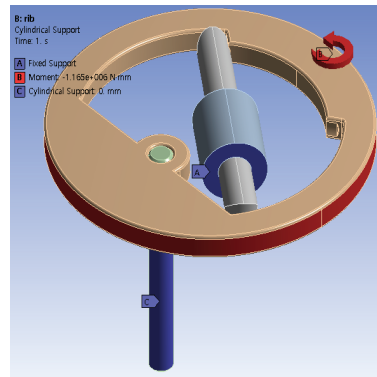
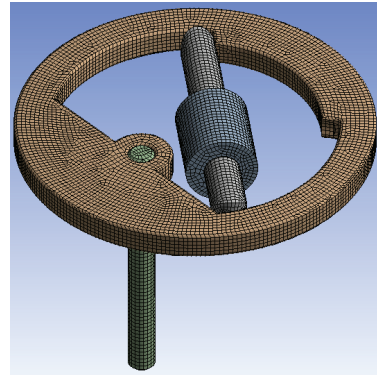


Fig. 5 FE modeling and boundary conditions(Case I)

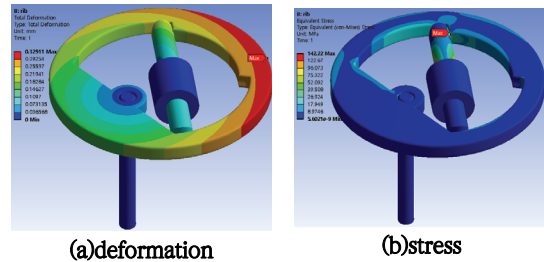


Fig. 6 Results of structural analysis(Case I)

Figs. 7-10는 Case II, III에 대한 모델 및 해석 결과를 도시하고 있으며, 해석 결과 최대 응력은 모두 Case I과 동일한 킬러와 실린더 로드 접합 부분에서 발생하였다. Case II, III는 킬러의 일부분을 제거하여 비교적 심플한 형상으로 설계한 것이다.

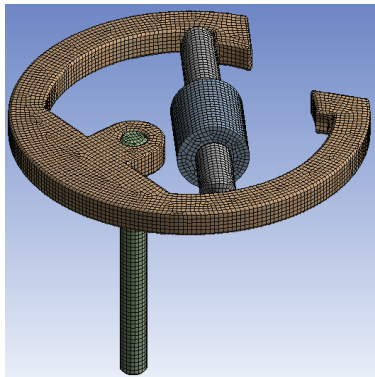


Fig. 7 FE modeling and boundary conditions(Case II)

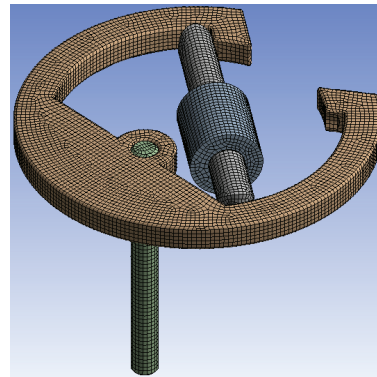


Fig. 9 FE modeling and boundary conditions(Case III)

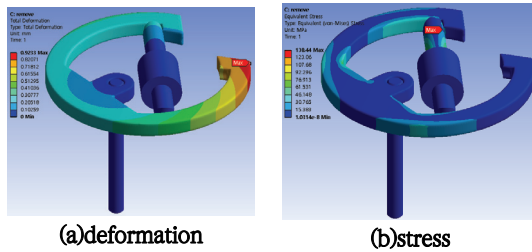


Fig. 8 Results of structural analysis(Case II)

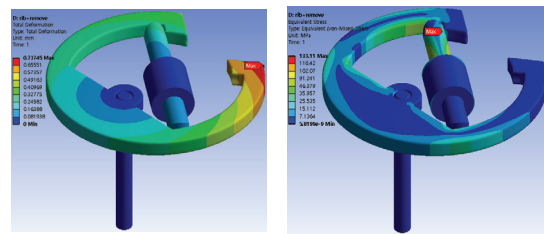


Fig. 10 Results of structural analysis(Case III)

Table 2는 3가지 킬러 형상에 대한 구조해석 결과를 정리하였다. 3가지 형상 모두 재료의 허용강도 (250 MPa)와 비교하여 안정하였으나, Case II, III의 경우 변형이 비교적 높게 나타났으며 Case I의 경우 필요이상의 재료가 사용되어질 우려가 있다. 이러한 결과를 토대로 최종적으로 최적의 킬러 형상을 설계하였다.

Table 2. Results of structural analysis

Items	Max. deformation (mm)	Max. stress (MPa)	Nodes / Elements
Case I	0.329	142.22	192,782/55,027
Case II	0.923	138.44	163,154/46,391
Case III	0.737	133.11	170,417/47,951

### 3.2 킬러의 최적 형상 설계

앞의 3가지 킬러 형상 모두 재료의 허용강도와 비교하여 안정하였으나, 전체 결과를 바탕으로 최적의 킬러 형상을 결정하여 구조적 안정성 판단을 수행하였다.

Fig. 11은 최종 설계된 킬러에 대한 유한요소 모델과 경계조건을 도시하였다. 구속조건 및 하중 조건을 앞의 해석과 동일하게 적용하였으며, 노드와 요소수는 각각 175,250개와 49,292개로 해석을 수행하였다.

Fig. 12은 최종 설계된 킬러의 구조해석 결과를 도시였다. 최대 변형 및 최대 응력은 모두 킬러부분에서 발생하였으며, 그 값은 각각 약 0.36 mm, 121.35 MPa을 나타내었다. Case I의 킬러 형상

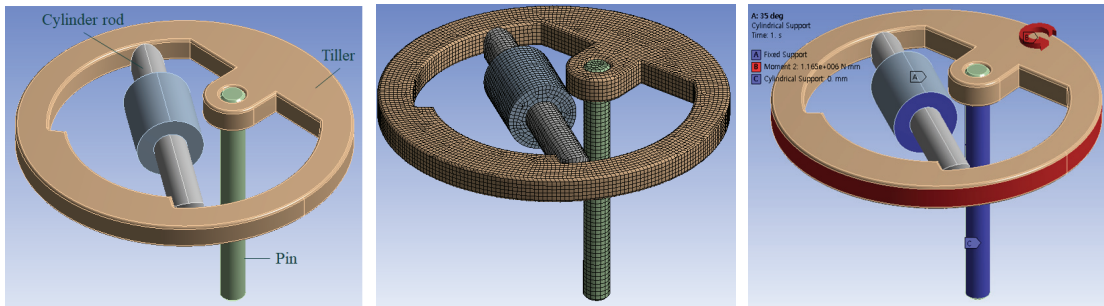


Fig. 11 Modeling and boundary conditions for final design

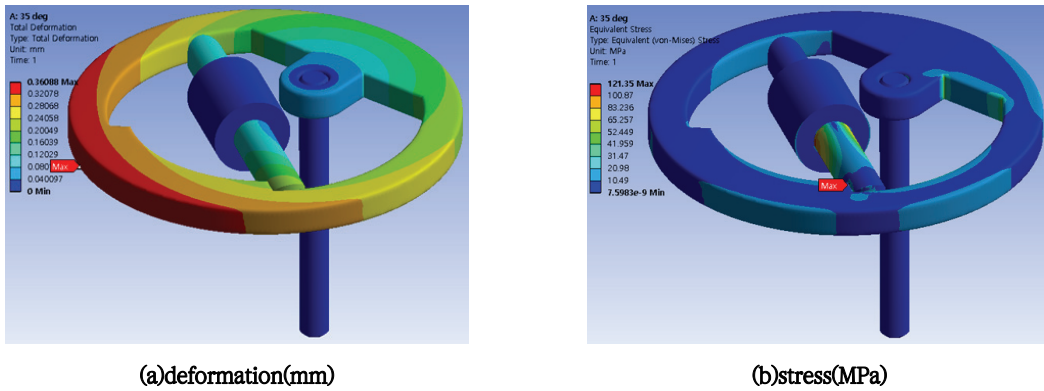


Fig. 12 Results of structural analysis(final design)

에 비하여 최대 변형은 거의 유사하지만, 최대 응력이 약 14.6 %정도 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 13는 조타 시스템의 각 부품에 대한 응력 해석 결과를 도시하였으며, 최대 응력은 다른 형상과 동일하게 톨러에서 발생한다.

Table 3는 각 부품의 재질과 허용강도, 그리고 최대 응력 결과 및 안전계수를 나타낸 것이다. 최소 안전계수는 약 1.9이며, 최대 응력이 발생하는 톨러의 안전계수는 약 2.1을 보여 모든 부품이 구조적으로 안정하다는 것을 알 수 있다.

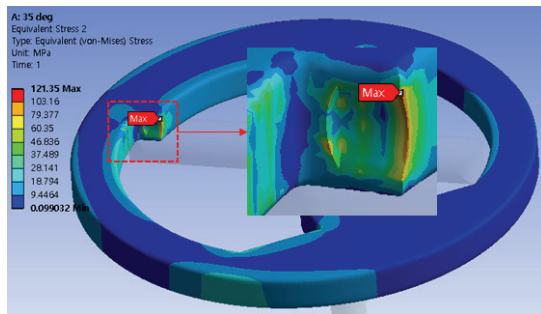
Table 3. Results of structural analysis for final design

Part	Max. stress (MPa)	Material	Yield strength (MPa)	Safety factor
Tiller	121.35	SS 41	250	2.1
Pin	29.83	STS 304	205	6.9
Cylinder rod	108.14	STS 304	205	1.9

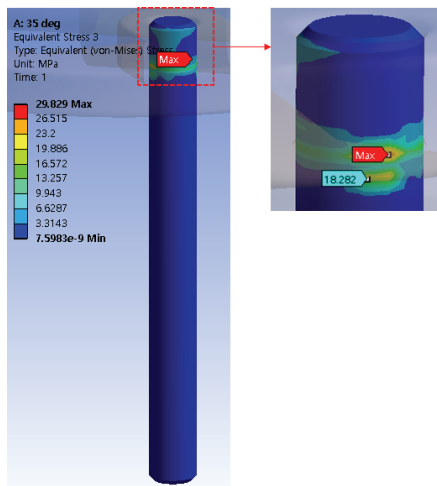
#### 4. 결론

본 연구는 중소형 선박의 핵심조향 부품 중 방향타 제어용 유압장치의 효율적인 구조 개선을 위

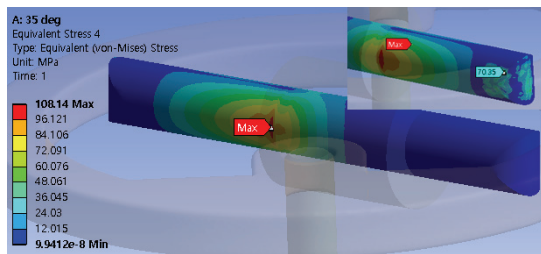




(a)tiller



(b)pin



(c)cylinder rod

Fig. 13 Results of structural analysis for main parts (final design)

한 신개념 톨러부품 및 복동 유압실린더를 이용한 구동상 구조적 안전성 평가를 실시하였다. 기성품인 복동 유압실린더의 토크 성능을 토대로 3가지의 톨러 디자인에 대한 구조해석을 실시하여 최종

형상이 도출되었다. 유압 실린더의 최대 토크 조건에서도 핵심 구동부품인 톨러, 핀, 실린더 로드 의 안정적인 변형 및 허용강도 이내의 안정적인 응력부하가 기대되는 결과를 보였다. 기존의 방향타 제어용 유압시스템을 대체할 수 있는 공간적인 여유, 높은 가격대 성능비, 수리 작업시 편의성을 고려하면 앞으로 경쟁력을 기대할 수 있으리라 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2020년도 동의과학기술대학교 학술연구 지원비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] 심성현, 남종오, “근해어업 생산함수 추정을 이용한 규모수익 및 한계생산성 분석”, *Ocean and Polar Research*, 39(4), pp.301-318, (2017).
- [2] 민계식, 정경남, “선박의 최적 방향타 설계를 위한 실험적 연구”, *대한조선학회논문집*, 37 (2), pp.88-99, (2000).
- [3] 김영복, “방향타를 이용한 선박 횡동요 제어 계 설계에 관한 연구”, *대한기계학회 논문집 A*, 26(2), pp. 329-339, (2002).
- [4] 배상은, 이운식. “탄소나노튜브 면상발열체의 선박 기자재 적용 연구”, *한국산업융합학회 논문집*, 22(6), 673-680, (2019).
- [5] 박충환, 장호윤, 박명식, 임남균. “FRP 복합재료 방향타 장착 근해어선의 해상시운전시험 결과분석”, *한국해양공학회지*, 27(6), pp.112-118, (2013).

(접수: 2020.06.17. 수정: 2020.06.30. 게재확정: 2020.07.17.)