



조타기 틸러의 형태별 가공 공차 정립을 위한 해석적 사전연구 Preliminary Study for Clearance According to Types of the Tiller of the Steering Gear Using the Finite Element Method

이현아* · 지상원*†
 Hyun-Ah Lee* and Sang-Won Ji*†

(Received 15 September 2018, Revision received 11 December 2018, Accepted 09 January 2019)

Abstract: A steering gear with rudder roll stabilization is an integrated device of the steering and rolling inhibiting of a ship. The rotary vane motor is an important part in the rudder roll stabilization system. The fluid flows as the tiller in the rotary vane motor rotates. Therefore, the clearance of the tiller is very important. In general, clearance depends on the designer's know-how. In this research, the finite element method is used to define the clearance according to types of the tiller. Ram type and vane type tillers are selected for this research. Deformation and deformed shape of the tiller is checked by describing the situation analytically in which the tiller is assembled. By comparing the real clearance with the results of the analysis, the guideline to define the clearance of the tiller is suggested.

Key Words : Steering Gear, Rotary Vane Motor, Tiller, Ram, Vane, Finite Element Method, Clearance

1. 서 론

조타기는 선박을 목표로 하는 침로로 항진시키는 기능을 수행하는 기계장치로 신뢰성 있는 동작이 요구된다.^{1,2)} 특히 함안정 조타기(rudder roll stabilization, RRS)는 일반적인 조타 기능과 황천시 횡동요 감쇄기능, 자동항해 기능이 통합된 장비로 횡동요 안정화를 위하여 선체 측면에 설치하여 운용하던 함안정기의 기술을 발전시켜서 조타기능과 함안정기 기능을 통합함으로써 장비의 일원화를 이루어 성능을 획기적으로 개선한 장비이

다.^{3,4)} 타를 구동시키는 액추에이터인 로터리 베인 모터(rotary vane motor)는 기존 램(ram) 실린더 구동방식에 비하여 기계효율(토크효율)이 높아 타의 고속 구동이 요구되는 함안정 조타기에 주로 적용되고 있다.⁵⁻⁷⁾

로터리 베인 모터는 내부 유로로 유입되는 유압유에 의해 베인과 로터(rotor)가 회전하게 되므로 직선운동을 회전운동으로 변환하는 일반 조타기와 달리 별도의 방향전환 장치 없이 로터리 베인 모터에 직결되어 있는 타(rudder)를 회전시키게 된다. 즉, 베인과 로터가 틸러의 역할을 수행하게

*† 지상원(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : 선임연구원, 건설기계부품연구원 유압시스템연구센터
 E-mail : jsw@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2545
 *이현아 : 선임연구원, 건설기계부품연구원 유압시스템연구센터

*† Sang-Won Ji(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : Senior Researcher, Advanced Hydraulic Group, Korea Construction Equipment Technology Institution.
 E-mail : jsw@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2545
 * Hyun-Ah Lee : Senior Researcher, Advanced Hydraulic Group, Korea Construction Equipment Technology Institution.

되고 타축(rudder stock)과의 결합이 직접적으로 이루어지게 되므로 킬러의 가공 정밀도가 조타기의 효율과 안전도에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 가공공차는 설계자의 직관과 노하우에 의존하는 경우가 많고 설계 변경 시 공차를 위한 기준을 새로 정립하는 것이 매우 어렵기 때문에 최근 공차와 시스템의 성능의 상관관계에 대한 연구가 진행되고 있다.^{8,9)}

조타기용 킬러는 유압 액추에이터의 형태에 따라 램 타입과 베인 타입으로 나뉜다.^{10,11)} 본 연구는 유한요소해석 기법을 적용하여 킬러의 형태에 따라 가공공차 선정의 가이드라인을 제시하기 위한 사전연구이다. 킬러가 타에 조립되는 상황을 해석적으로 구현하고 구조해석을 수행하여 조립 시 발생하는 킬러의 변형량과 변형형태를 확인한다. 실제 가공 공차와 해석 결과를 비교함으로써 킬러의 형태에 따라 가공 공차를 설계하기 위한 가이드라인을 제시하고 해석방법의 타당성을 확인한다. 유한요소해석과 같은 시뮬레이션 기법은 실제 시스템의 환경을 완벽하게 모사하는 것에 한계가 있기 때문에 가공공차를 정립하기 위한 방향성을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 조타기 킬러의 형태

2.1 로터리 베인 모터

Fig. 1~3에 함안정 조타기용 로터리 베인 모터의 내부 형상을 나타내었다. 로터리 베인 모터로 유입된 유압유로 인하여 베인과 일체형인 로터가 회전하고 결과적으로 로터와 직결된 타축에 의해 타가 회전하게 된다. 여기서 킬러는 스톱퍼(stopper)로 인하여 좌우 $\pm 180^\circ$ 이내의 제한된 각도로 회전한다. Fig. 1~3에 드러난 바와 같이 로터리 베인 모터의 로터가 램 실린더 조타기의 킬러에 해당되며 타축과 직결되는 구조이다. 따라서 킬러의 안전도 및 가공 공차 등의 가공 정밀도가 로터리 베인 모터의 변형량 및 내부 누유와 효율 등에 영향을 주어 조타기의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다.

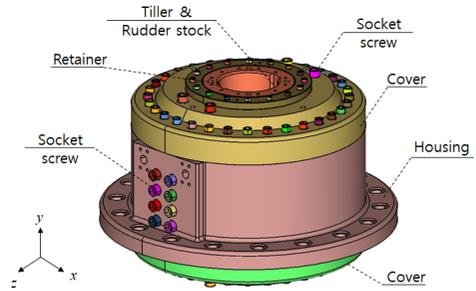


Fig. 1 Outside view of the rotary vane motor

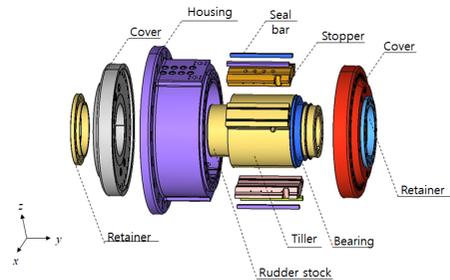


Fig. 2 Inside view of the rotary vane motor

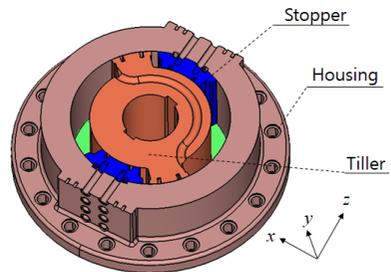
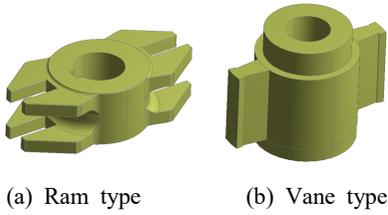


Fig. 3 Cross section view of the rotary vane motor

2.2 킬러의 형태

조타기에 적용되는 유압 액추에이터로는 램 실린더와 로터리 베인모터가 주로 사용된다. 따라서 조타기의 킬러도 적용되는 유압 액추에이터의 형태에 따라 크게 램 타입과 베인 타입으로 분류된다. 함안정 조타기는 고속 구동에 유리한 로터리 베인 모터가 사용되므로 베인 타입 킬러가 주로 적용되고 있다. Fig. 4의 (a)와 (b)에 램 타입 킬러와 베인 타입 킬러의 대표적인 형태를 각각 나타낸다.



(a) Ram type (b) Vane type
Fig. 4 Types of the tiller

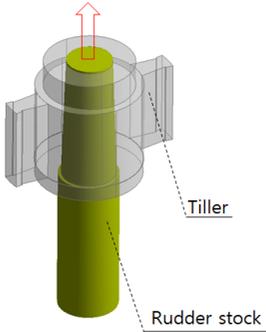


Fig. 5 Assembly of the tiller

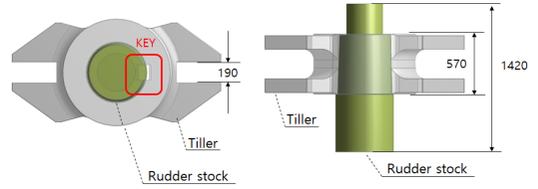
2.3 킬러와 타축의 조립

로터리 베인 모터의 킬러에 타축이 결합된 형상을 Fig. 5에 간략히 나타내었다. 킬러의 내경보다 큰 외경을 가지는 타축을 킬러 내부에 맞춘 후, 킬러의 하단부를 고정하고 타축의 상단부를 일정한 힘으로 당겨서 킬러와 타축이 서로 맞물려서 끼워지도록 한다. 이러한 조립 환경을 해석적으로 모사하여 구조해석을 수행함으로써 억지 끼워맞춤으로 인한 킬러의 변형량과 변형형태를 확인하고 가공공차 선정을 위한 가이드라인을 제시한다.

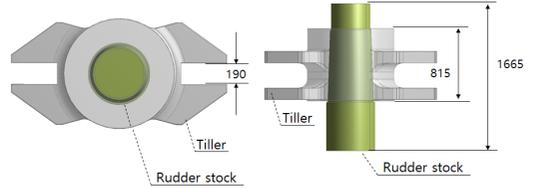
3. 해석 환경

3.1 해석 대상물

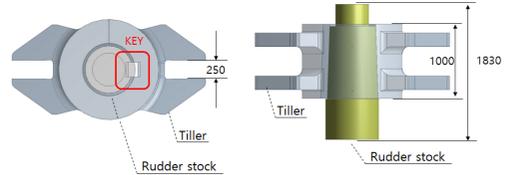
본 연구의 대상이 되는 해석 모델을 Fig. 6과 7에 각각 나타낸다. 일반 조타기에 사용되는 4종의 램 타입 킬러 해석모델을 Fig. 6과 같이 선정하고, 함안정 조타기에 사용되는 2종의 베인 타입 킬러 해석모델을 Fig. 7과 같이 선정한다. 표기의 편의상 램 타입을 크게 Ram 1모델(Fig. 6(a), Fig. 6(b))



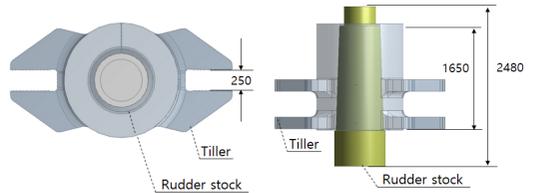
(a) Ram 1A



(b) Ram 1B



(c) Ram 2A



(d) Ram 2B

Fig. 6 3D models of ram type tiller

과 Ram 2모델(Fig. 6(c), Fig. 6(d))로 분류한다. Ram 1과 Ram 2는 포크부 폭이 190 mm와 250 mm로 다르며, Ram 2 모델이 Ram 1 모델에 비하여 약간 크다. 상기와 같은 램 타입 모델은 현재 제작되어 기존의 일반 조타기에 주로 사용되고 있는 상용모델을 선정하였다.

Ram 1과 Ram 2는 다시 키(key)가 있는 모델과 키가 없는 모델로 나뉜다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 보면 킬러의 포크부 폭은 190 mm로 동일하나 Fig. 6(a)는 킬러와 타축 사이에 키(key)가 존재함을

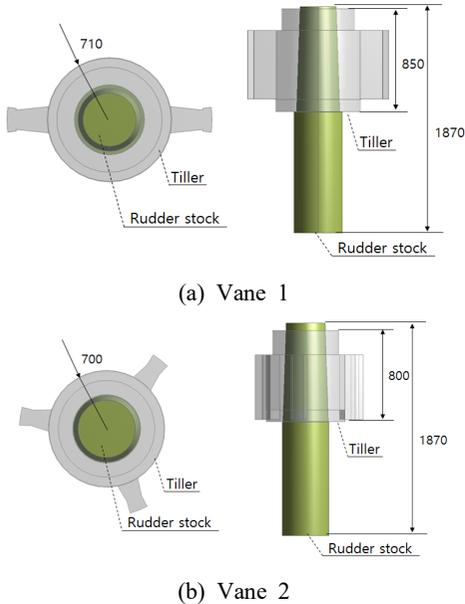


Fig. 7 3D model of vane type tillers

알 수 있다. 키는 킬러의 포크부 한쪽 방향으로만 가공하며 포크부 폭이 동일하더라도 키의 존재 유무에 따라 킬러의 길이가 상이함을 알 수 있다. Ram 2 모델에서도 키가 있는 모델과 키가 없는 모델과의 크기에 차이가 있다. 램 타입 킬러는 크기에 따라 가공 공차를 다르게 선정해야 할 뿐만 아니라, 키의 존재 유무에 따라서도 가공 공차를 달리 선정하여야 한다. 이는 키로 인해 좌우 포크부의 변형량이나 변형 형태가 다를 수 있기 때문이다.

Fig. 7에 나타난 베인 타입 모델은 크게 일체형 포크가 2개인 모델(Fig. 7(a))과 3개인 모델(Fig. 7(b))로 나뉜다. 일체형 포크에 해당하는 베인의 수에 따라 킬러가 회전할 수 있는 한계 각도의 차이가 존재하며 베인의 수에 따른 킬러의 변형량 확인이 요구된다.

3.2 해석 방법

전술한 바와 같이, 조타기에서는 킬러와 타축의 결합을 위해서 타축을 킬러의 하단부에 위치시키고 타축의 상단부를 잡아당겨서 역지 끼워맞춤을 하게 된다. 이와 같은 조립 상황을 해석적으로 모

사하기 위하여 Fig. 8에 킬러와 타축의 결합에 작용하는 각각의 힘을 도시한다.

Fig. 8에서 아랫면의 자유도를 완전 구속하고 타축의 상단면에 외력을 적용한다. 또한 킬러와 타축에 중력 효과를 고려한다.

킬러와 타축을 조립하기 위한 외력의 크기는 킬러에 따라 상이하므로 본 논문에서 선정된 6종의 킬러 모델에 요구되는 조립 외력의 최소치와 최대치를 Table 1에 각각 나타내었다. Table 1에 나타난 조립 외력은 모델의 크기와 과거의 조립 경험을 바탕으로 정립되어 있는 수치이다. Table 1

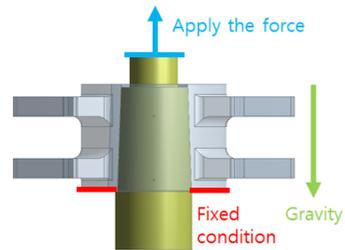


Fig. 8 Loading conditions

Table 1 Push up force for the rudder stock

Model	Force [tonf]	
	min.	max.
Ram 1A	268	469
Ram 1B	739	1081
Ram 2A	591	864
Ram 2B	1511	2336
Vane 1	211	309
Vane 2	192	280

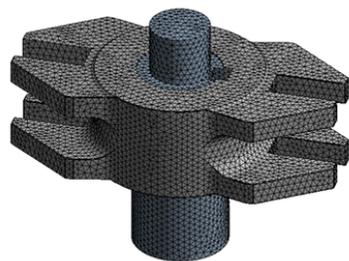


Fig. 9 Finite element model of Ram 1A

Table 2 Information of the FE model

Model	Total number of elements	Total number of nodes
Ram 1A	87,846	134,978
Ram 1B	86,617	132,900
Ram 2A	96,156	146,981
Ram 2B	102,918	156,840
Vane 1	101,102	155,760
Vane 2	98,224	147,054

에서 램 타입의 경우에는 키가 없는 모델이 키가 있는 모델에 비하여 보다 큰 조립 외력이 요구되므로 키의 존재 유무에 따라 조립 시 요구되는 외력의 차이가 크다. 따라서 키의 가공 여부는 설계자의 성향에 따라 결정되는 경우가 많다. 또한, 유사한 크기의 킬러라도 램 타입에 비해 베인 타입의 조립 외력 값이 작은 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 킬러의 구조해석을 통해 최악의 조건을 고려하기 위하여 킬러의 상단부를 잡아당기는 외력은 각 모델별로 Table 1에 나타난 최대 외력을 선정한다.

한편, 킬러의 내면과 타축 외면사이의 마찰계수는 구조물의 재질을 고려하여 선정한다. 일반적으로 조타기의 킬러와 타축은 구상흑연주철 재질을 사용하므로 재질의 대표적인 표면거칠기를 참조하여 0.0061의 조도 계수를 적용한다. 또한 실제 킬러와 타축은 결합 방법으로 드라이 피팅(dry fitting)을 사용하므로 최대 마찰계수는 0.2로 가정한다. 이를 해석에 적용하여 킬러와 타축 사이의 마찰에 의한 상호 반발력이 고려되도록 하였다.¹²⁾

3.3 유한요소모델

구조해석을 수행하기 위한 킬러 모델 Ram 1A의 유한요소모델을 Fig. 9에 나타내었다. 격자계는 HyperMesh¹³⁾를 이용하였으며 모든 요소는 1차 4면체 요소(1st order tetrahedron element)로 구성되었다. 본 논문에서 해석에 적용된 모든 킬러는 Fig. 9에 보인 것과 유사한 수준으로 유한요소모델을 구성하였다. 선정된 6종의 킬러에 대한 유한요소모델 정보를 Table 2에 나타낸다.

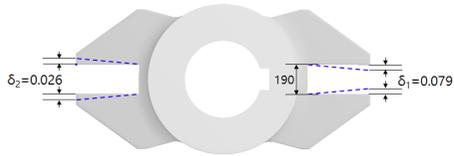
Fig. 6과 7에 나타난 6종의 킬러를 Fig. 9의 유한요소모델과 유사한 수준으로 구성한 후, Fig. 8과 Table 1의 해석 정보를 바탕으로 Ansys¹⁴⁾를 이용하여 구조해석을 수행한다. 수행된 해석 결과로부터 각 모델별 킬러의 변형량과 변형의 형태를 확인한다.

4. 킬러의 종류에 따른 변형과 공차의 상관관계

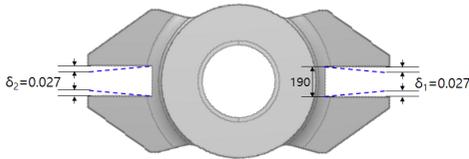
킬러 모델 Ram 1A와 Ram 1B의 변형량과 변형의 형태에 관한 해석결과를 Fig. 10에 각각 나타내었다. 포크 폭에 비해 변형량의 크기가 매우 작으므로 변형의 형태는 점선으로 도형화하여 표현하기로 한다. Fig. 10에서 키가 있는 킬러 모델 Ram 1A와 키가 없는 Ram 1B의 결과를 비교하면 포크의 변형 형태가 상이하다. 즉, 키가 있는 킬러 모델에서 키 방향의 포크는 포크 안쪽 방향으로 변형이 발생하며 키 반대 방향의 포크는 포크가 벌어지는 쪽으로 변형한다. 이는 키로 인하여 킬러 내경에 편심이 발생했기 때문으로 사료되며 포크 좌우측 변형량은 약 3배 정도의 차이를 보인다. 반면, 키가 없는 킬러 모델 Ram 1B의 경우는 킬러가 좌우대칭 형태이므로 각 포크의 변형 방향과 변형량이 동일하게 나타났다.

킬러 모델 Ram 2의 변형량과 변형 형태에 관한 해석결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서도 키가 있는 킬러 모델 Ram 2A의 키 방향 포크는 폭이 줄어드는 방향으로 변형이 발생하였으며, 좌우측 포크의 최대 변형량은 약 3배 정도의 차이를 보이고 있는 등 전술한 Ram 1 모델과 유사한 경향이 확인된다.

Fig. 10과 11의 결과에 따르면 키가 없는 램 타입 킬러는 좌우 포크부 변형량과 변형방향이 동일하므로 포크부 좌우측 가공 공차를 동일하게 선정하는 것이 타당하다고 판단된다. 그러나 키가 있는 램 타입 킬러의 경우에는 좌우측 포크의 변형량이 각각 다르기 때문에 가공 공차에도 차이를 두어야 하며 가공 공차의 방향도 다르게 선정하여야 함을 알 수 있다.

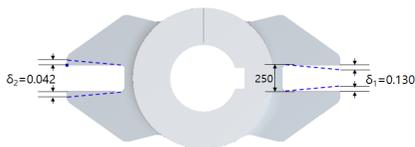


(a) Ram 1A

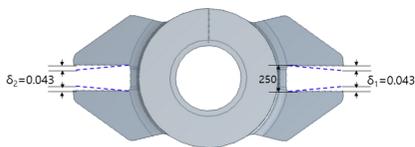


(b) Ram 1B

Fig. 10 Deformation of Ram 1 model



(a) Ram 2A



(b) Ram 2B

Fig. 11 Deformation of Ram 2 model

Fig. 12에 표시된 기호를 이용하여 상용 램 타입 킬러인 Ram 1과 Ram 2 모델의 실제 가공 공차를 Table 3에 나타낸다. Table 3의 실제 가공 공차와 Fig. 10과 11의 변형 해석 결과를 비교하면 가공공차의 방향과 해석된 변형 방향이 서로 일치하나, 해석적으로 구현된 포크부의 변형량과 실제 가공 공차의 수치 사이에 일부 차이가 존재한다.

Table 4에 램 타입 킬러의 구조해석 결과와 실제 가공공차와의 비교 결과를 나타내었다. Table 4의 모든 킬러 모델에서 해석결과의 변형방향과 실제 가공 공차 방향이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 키가 존재하는 Ram 1A 모델의 경우에는 해석 변형량과 실제 공차는 좌우측 모두 약

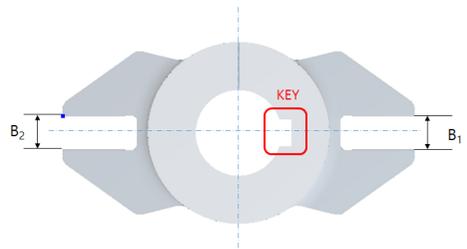


Fig. 12 Drawing of ram models for clearance

Table 3 Actual tolerances of ram type tiller

Model	B_1 [mm]	B_2 [mm]
Ram 1A	$190^{+0.140}_{+0.1}$	$190^0_{-0.040}$
Ram 1B	$190^{+0.040}_0$	$190^{+0.040}_0$
Ram 2A	$250^{+0.246}_{+0.2}$	$250^0_{-0.046}$
Ram 2B	$250^{+0.046}_0$	$250^{+0.046}_0$

Table 4 Comparison of deformation analysis results and actual tolerances for ram type tiller

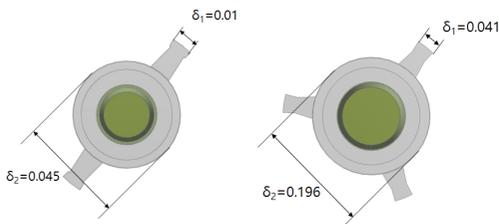
	Ram 1A		Ram 1B		Ram 2A		Ram 2B	
	B_1	B_2	B_1	B_2	B_1	B_2	B_1	B_2
Deformation direction of analysis results	+	-	+	+	+	-	+	+
Direction of actual tolerance	+	-	+	+	+	-	+	+
Analysis results of deformation ratio ($B_1:B_2$)	3.0 : 1.0		1.0 : 1.0		3.1 : 1.0		1.0 : 1.0	
Actual results of tolerance ratio ($B_1:B_2$)	3.5 : 1.0		1.0 : 1.0		5.3 : 1.0		1.0 : 1.0	
The ratio of deformation to tolerance	1.0 : 1.8		1.0 : 1.5		1.0 : 1.9		1.0 : 1.1	

2배 정도의 차이를 보이고 있으나 키가 있는 방향(B_1)과 키가 없는 방향(B_2)과의 변형 비율은 실제 공차와 해석결과가 서로 유사한 경향을 보이는 것으로 확인된다. Ram 2A 모델은 키가 없는 방향

에서는 해석 변형량 수치와 실제 공차의 수치가 서로 양호하게 일치하고 있으나 키가 있는 방향에서는 약 2배 정도의 차이를 보인다. 그러나 키가 없는 Ram 2B 모델의 경우에는 실제 가공 공차와 구조해석으로부터 도출된 변형량 수치가 큰 차이 없이 모두 양호하게 일치하고 있다.

Table 4에 나타낸 각 틸러 모델의 해석 결과치인 변형량이 실제 공차 수치에 비하여 전반적으로 작게 계산되었음을 확인할 수 있다. 따라서 해석적으로 구현된 변형량 수치를 가공 공차의 수치 설계에 수정 없이 적용하는 것은 곤란하다. 그러나 가공 공차의 방향을 선정하거나 키가 있는 방향과 키가 없는 방향에 관한 공차의 비율을 선정하는 경우에는 본 해석 결과가 유효할 것으로 판단된다.

베인 타입 틸러의 일체형 포크부 변형량 해석 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 Vane 1과 Vane 2 모델의 크기가 유사하고, Table 1에 기술된 조립 외력은 서로 큰 차이가 없다. 그럼에도 불구하고 램 타입 모델에서 베인이 2개인 Vane 1 모델과 비교하여 베인이 3개인 Vane 2 모델의 변형량은 약 4배 정도 크게 나타나고 있음을 해석적으로 확인할 수 있다. 따라서 베인 타입의 틸러는 베인의 수에 비례하여 공차를 달리 선정하여야 함을 알 수 있다. 현재 개발 중인 베인 타입 틸러는 최종적으로 가공 공차가 결정되지 않은 상태이므로 실제 가공 공차와 해석적 방법으로 도출된 변형량 사이의 직접적 비교는 곤란한 상황이며 향후 이에 따른 추가적인 연구가 필요하다.



(a) Vane 1 (b) Vane 2
Fig. 13 Deformation of vane models

5. 결 론

본 논문에서는 조타기의 성능과 효율에 큰 영향을 미치는 틸러를 대상으로 타축과의 결합에 의해 발생하는 틸러 변형에 대한 구조해석을 진행하였다. 일반적으로 조타기의 틸러는 크게 램 타입과 베인 타입으로 분류되며 특히 베인 타입 틸러의 경우에는 타축과의 조립 정확도가 내부 누유와 효율에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 틸러에 관한 가공 공차의 선정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 해석적으로 틸러의 조립상황을 구현하여 변형량과 변형 형태를 확인하고 가공 공차 선정 설계에 유효한 방향성을 제시하였다. 그러나 해석적인 조립상황의 구현에 있어 실제 환경을 완벽하게 모사하는 것에는 한계가 있으므로 본 논문에서는 틸러 가공 공차의 선정 설계를 위한 가이드라인 제시에 연구의 목적을 두는 사전 연구를 수행하였다.

이를 위해 조타기에서 현재 사용 중인 4종류의 상용 램 타입 틸러와 개발 중인 2종류의 베인 타입 틸러를 분석 대상으로 선정하였다.

램 타입 틸러의 변형량과 변형의 형태를 계산하기 위해 틸러가 타축과 조립되는 상황을 해석적으로 구현한 후 구조해석을 수행하였고, 이를 실제 가공 공차와 상호 비교하였다. 그 결과 해석을 통해 계산된 변형량이 실제 가공 공차보다 다소 낮은 수치로 도출되었다. 이는 해석적으로 조립상황을 완벽하게 모사하는 데에 한계가 있었기 때문으로 사료된다. 그러나 램 타입 틸러의 포크 변형 형태와 가공 공차의 방향은 서로 일치함이 확인되었으므로 가공 공차의 방향을 선정하는 경우에는 해석적으로 구현된 변형의 형태를 참고하는 것이 유효할 것으로 판단된다. 또한 키가 있는 램 타입 틸러의 경우에는, 키 방향의 포크부와 키 반대방향 포크부와의 가공 공차 비율과 해석으로부터 도출된 변형 비율이 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었으므로 가공공차 선정 시에는 공차 비율을 정하는 설계 기준으로 본 논문에서 제시된 변형 비율을 참고하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

또한 베인 타입 킬러의 경우에는 해석결과에서 램 타입 모델의 포크에 해당하는 베인의 개수에 비례하여 베인의 변형량이 증가하는 것으로 나타났으므로 베인의 수에 따라 가공 공차를 달리 하여야 하는 것으로 확인되었다.

향후 본 논문에서 수행된 해석 기법을 확장하여 킬러와 타축과의 조립 상황을 보다 정밀하게 구현할 수 있는 추가 연구를 통해 개발 중인 베인 타입 킬러의 가공 공차와 변형량 해석결과에 관한 상호 비교 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2,000-4,000톤급 함정의 함안정 조타기용 로터리 베인 모터 개발)

References

1. Korean Register, 2013, "Part 4-Hull Equipment-Rules for the Classification of Steel Ships", pp. 1-6.
2. ICAS, 2010, "S10-Rudders-Sole Pieces and Rudder Horns-Common Structure Rule", pp. 1-16.
3. J. Amersongen, P.G.M. Klugt and H.R. Nauta Lemke, 1990, "Rudder Roll Stabilization for Ships", Automatica, Vol. 26, No. 4, pp. 679-690. (DOI:10.1016/0005-1098(90)90045-j)
4. T. Lauvdal and T. I. Fossen, 1998, "Rudder Roll Stabilization of Ships Subject to Input Rate Saturation Using a Gain Scheduled Control Law", IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, October 27-30. (DOI:10.1016/s1474-6670(17)38426-4)
5. M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi and Y. Volpe, 2013, "A Vane-Motor Automatic Design Procedure", International Journal for Interactive Design and Manufacturing, Vol. 7, No. 3, pp. 147-157. (DOI: doi.org/10.1007/s12008-012-0172-x)
6. J. Jiang, W. Su and A. Liu, 2008, "Direct Drive Electro-hydraulic Servo Rotary Vane Steering Gear", Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, September 15-18. (DOI:10.5739/isfp.2008.369)
7. R. Cui, 2007, "Analysis of Some Key Techniques of Rotary Vane Steering Gear", Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Issue. 2, pp. 27-28.
8. C. K. Yun, K. Y. Bae and J. S. Jeon, 2016, "Study on the Correlation of Leakage by the Variation of Inlet Pressure and Clearance in Hydrostatic Bearing", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 34-39. (DOI:10.9726/kspse.2016.20.6.034)
9. K. J. O, 2012, "Numerical Investigation of Effects of Tip Clearance Height on Fan Performance and Tip Clearance Flow in an Axial Fan of the Cooling Tower", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 44-50. (DOI:10.9726/kspse.2012.16.1.044)
10. <http://www.wartsila.com/encyclopedia/term/steering-gear>.
11. <http://generalcargoship.com/steering-mechanism-vane-type-gear.html>.
12. N. Nithyanantham and P. Suresh, 2016, "Evaluation of Cast Iron Surface Roughness Using Image Processing and Machine Vision System", Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11, No. 2, pp. 1111-1116.
13. Altair, 2018, "HyperMesh 13.0 User Guide", Altair Engineering Inc. USA.
14. Ansys, 2018, "Ansys Mechanical 19.1 User's Guide", Ansys Inc. PA. USA.