

초기설계 단계에서의 스트럿 설계 고찰

이화준^{†*}, 장학수^{*}, 전호환^{**}

삼성중공업 여객선설계팀^{*}, 부산대학교 조선해양공학과^{**}

Study on the Shaft-Strut Design in the Initial Design Stage

Hwa Joon Lee^{†*}, Hag Soo Jang^{*} and Ho Hwan Chun^{**}

Cruise & Ferry Design Team, Samsung Heavy Industries CO., Ltd.^{*}
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University^{**}

Abstract

For passenger vessels, twin shaft types in propulsion system is generally adopted to provide a high-speed performance in low draught due to restricted operating condition in harbors or water channels. Struts of twin open shaft type support the shafts, bearings, and propellers. Therefore, strut design is needed to consider not only hydrodynamic performance but also structural and noise/vibration performance.

In this paper, considerations in strut design at the initial design stage have been discussed based on existing references, numerical calculations, and their comparisons. Also, the strut design of a RoPax ferry has been carried out at the initial design stage, for an example.

※Keywords: Shaft-Strut Design(스트럿 설계), Initial Design Stage(초기설계단계), Passenger Vessel(여객선), RoPax(카페리), Hydrodynamic Performance(유체역학적성능), Structural Strength(구조강도), Noise and Vibration(소음진동)

1. 개요

여객선은 일반적으로 선체 외부로 노출된 2축의 축계를 채택하므로, 축계의 지지를 위한 Shaft-Strut(이하, 스트럿)의 설치가 필수적이다.

접수일: 2004년 5월3일, 승인일: 2004년 9월 14일

†주저자, E-mail: hwajoon.lee@samsung.com

Tel: (055) 630-6524

스트럿은 축계를 구속시켜주는 베어링을 지지하는 구조적인 역할을 담당할 뿐 아니라, 프로펠러의 앞에 위치하여 프로펠러 위치에서의 반류를 결정하는 주요 인자가 되므로 추진성능 및 프로펠러의 캐비테이션 특성 결정에도 지대한 영향을 준다. 따라서 스트럿 설계는 여객선의 성능결정에 매우 중요한 요소가 된다. 그러나 스트럿은 선박의 초기설계 단계에서 프로펠러 및 축계와 함께 결정되어야 하므로, 구체적인 실험결과나 해석결과를 사용하여 설계하기에는 시기상의 어려움과

앞서 언급한 각종 성능을 종합적으로 고려해야 하는 문제가 있다.

스트럿의 설계에 관한 연구결과를 살펴보면, Saunders(1957)와 Mandel(1955)은 유체역학적인 고려에서, Losee(1957)는 구조적인 관점에서의 설계지침을 제시하였다. 그리고 Hamalainen/van Heerd(1998)는 실적선 설계를 토대로 스트럿의 설계과정을 소개하였으며, Hackett/Jonk(1999)는 스트럿의 다양한 유체역학적 특성을 실험결과를 토대로 제시하였다. 한편, 국내에서는 조무웅(1980), 이진성/고주혁(1987) 등이 Losee의 연구결과를 바탕으로 스트럿의 설계에 대한 구조적 설계지침을 제시하였다.

본 고찰에서는 스트럿 설계에서 핵심이 되는 주 스트럿에 대하여 문헌조사, 수치계산, 해석 결과와의 비교를 수행하였다. 그리고 수행결과를 바탕으로 초기설계 단계에서 스트럿을 설계하기 위하여 스트럿 형상의 결정, 스트럿 캐비테이션 개선 등의 유체역학적 방법과 Losee의 계산을 이용한 구조역학적 방법 등의 설계 방안을 마련하였고, 설계된 스트럿은 실적선의 모형시험을 통한 검증을 수행하여 설계방안이 타당함을 보였다.

2. 스트럿 일반

스트럿의 종류

스트럿은 Single arm 스트럿과 Double arm 스트럿으로 대별하며, Double arm 스트럿은 다시 Barrel에의 부착 방법에 따라 Fig. 1과 같이 Radial 스트럿과 Tangential 스트럿으로 구분한다. Radial 스트럿은 스트럿 arm의 중립축과 Barrel의 중심축, 즉 축계의 중심축을 일치시키는 것이며, Tangential 스트럿은 스트럿 Arm의 외곽선을 Barrel에 접하도록 설치하는 것이다. 항정은 Radial 유형이 널리 사용되지만, 여객선은 Wake의 극값을 낮추어 프로펠러 변동압력을 감소시키려는 목적에서 Tangential 유형을 많이 채택한다.

프로펠러의 바로 앞에 위치하는 주 스트럿은 강도상의 문제로 Single arm을 사용하는 경우는 드물고, Double arm 스트럿을 사용하는 것이 일반적이다. 그리고 Double arm 스트럿에 대한 유형의 선정과

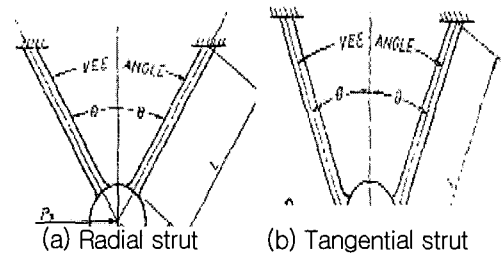


Fig. 1 Main strut

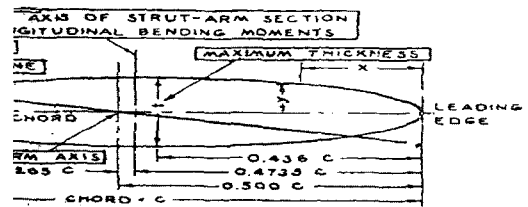


Fig. 2 EPH section

적용은 다음의 유체역학적 특성과 구조역학적 특성을 고려하여 결정되어야 한다.

스트럿의 단면

스트럿의 단면은 저항성능 및 구조적인 강도 관점에서 매우 중요하므로, 선택에 신중을 기하여야 한다. Fig. 2는 대표적인 스트럿 단면인 EPH 단면의 기하학적인 형상을 보인다. EPH 단면은 Ellipse, Parabola, Hyperbola의 수식으로 정의되며, 강도와 캐비테이션 성능이 우수한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다

스트럿의 각도

스트럿은 기하학적으로 Fig. 3과 같이 정의되는 각도로 표현되어진다. Rake angle은 축의 중심선과 스트럿의 중립축 사이의 각도로 정의되며, 설계 시에는 선체에 가능한 수직하게 하여 스트럿 Arm의 길이를 최소화함으로써 강도상 유리한 설계가 가능하도록 해야 한다. 다른 한편으로, 이러한 Rake angle은 프로펠러와의 거리를 증가시켜 프로펠러 면에서의 유동을 개선하려는 목적과 스트럿 Arm에 작용하는 하중을 감소시켜 스트럿 캐비테이션을 감소시키려는 의도에서 사용되기도 한

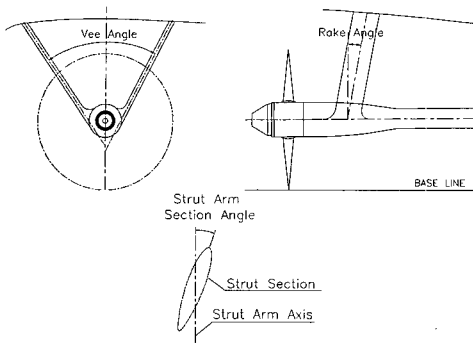


Fig. 3 Angles of strut

다. Vee angle은 두개의 스트럿의 중립축 사이의 각도로 정의되며, 스트럿 Arm의 길이를 최소화하는 강도 관점과 유동의 심한 압축에 의한 반류의 증가를 최소화하려는 목적을 절충하여 결정한다. 스트럿 Arm 단면각은 축계의 축 중심선과 스트럿 단면의 코드선과의 각도로 정의하며, 선미 유동의 흐름에 스트럿 단면을 일치시켜 프로펠러 면에서 보다 균일한 유동을 얻고, 스트럿 자체의 캐비테이션을 방지하려는 목적에서 적용하며, 일반적으로 모형시험을 통하여 결정한다.

3. 유체역학적 특성

주 스트럿은 프로펠러의 바로 앞에 위치하여 반류분포에 직접적인 영향을 끼치므로, 반류특성을 고려한 설계가 요구된다. 즉, 프로펠러 면에서의 반류분포가 균일하고 피크값이 낮아지도록 스트럿을 설계하는 것이 프로펠러의 효율 증가 및 불균일 반류분포에 의한 프로펠러 캐비테이션과 프로펠러에 의한 선체 변동압력의 저하 측면에서 유리하다. 기존의 연구결과에 따르면, Saunders는 Tangential과 Radial 스트럿 사이의 유동 특성은 차이가 미미하나, Tangential 유형이 스트럿 Arm 사이의 간격을 보다 넓게 확보할 수 있는 이점이 있음을 지적하였다. 즉, Tangential 유형이 Radial 유형보다 스트럿 Arm 사이에서 보다 넓은 간격을 확보하여 스트럿 사이의 유동이 압축되는 현상을 보다 효과적으로 방지할 수 있다. 특히, Fig. 4와 같이 스트럿을 갖는 선박에서 반류분포의 피크값

은 일반적으로 프로펠러 허브 상부에 위치하므로, 스트럿 사이의 유동 압축을 방지하여 보다 낮은 피크값을 확보할 수 있다.

한편, Tangential 유형은 기하학적 구조상 Barrel과의 연결부에서 Twisting angle이 형성되며, 그로 인한 스트럿 내측의 유동 박리가 우려되었다. 따라서 상용프로그램인 Fluent를 이용한 수치계산을 수행하여 스트럿 내측의 유동박리를 조사하였다(김정중 2003).

Fig. 5는 Gridgen에 의해 생성한 격자에 대하여 Fluent solver를 사용한 선체표면의 압력 분포

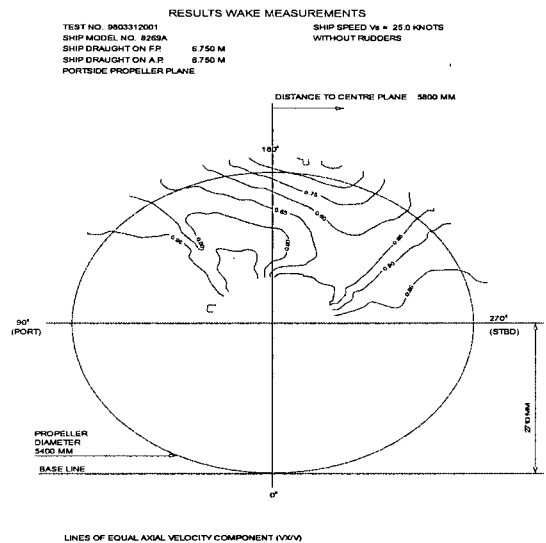


Fig. 4 Wake distribution

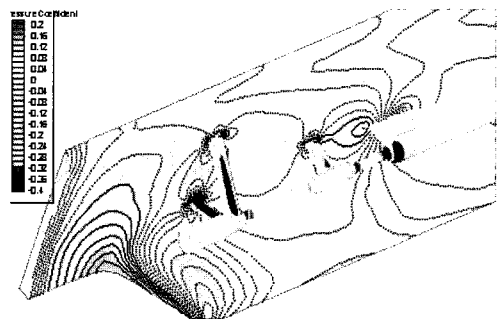


Fig. 5 Distribution of surface pressure

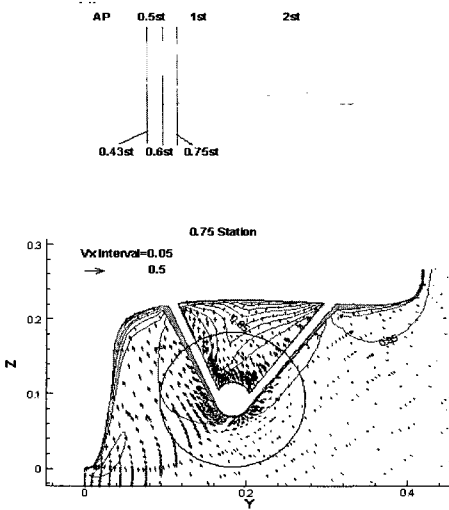


Fig. 6 Distribution of tangential velocity

계산 결과를 보인다. 수치계산은 Fig. 6과 같이 스트럿 Arm과 Barrel과의 연결부에서 발생하기 쉬운 유동의 박리를 관찰하기 위한 시도이며, Fig. 6과 같이 유동의 흐름을 관찰하여 연결부 형상을 개선하기 위한 초기검토가 시도되었으나, 계산 결과의 정확성이 떨어져서 지속적인 계산 방법의 개선이 요구되었다.

4. 구조역학적 특성

스트럿의 구조적 특성은 FEM을 이용한 구조 및 진동해석을 수행하여 평가할 수 있다. 그러나 초기설계 단계에서는 이러한 해석을 수행할 시간적 여유가 없으므로, 기존의 경험식에 근거한 평가를 사용한다. Losee는 EPH 단면을 사용한 Radial 및 Tangential 유형의 스트럿에 대한 구조 및 진동에 대한 평가 방안을 제시하였다. 그는 단면계수 및 Column force에 대하여 스트럿이 갖고 있는 크기와 필요한 크기를 계산을 통하여 비교하였고, 스트럿의 고유진동수와 프로펠러의 회전수를 비교하여 스트럿의 구조 및 진동 평가를 수행하였다. 이러한 평가방법은 미 해군의 Design Data Sheet에 반영되어 현재까지도 지속적으로 사용되고 있다.

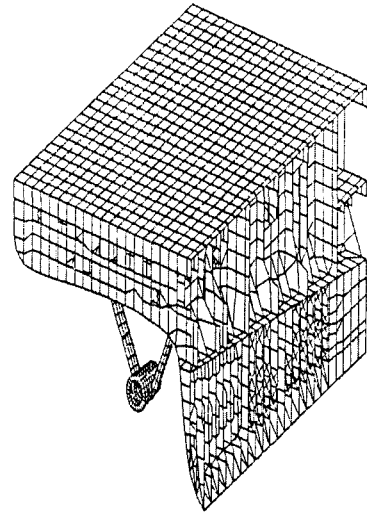


Fig. 7 Mesh for structural analysis

Losee 계산 방법의 타당성을 검토하기 위하여 FEM 구조해석 결과(Song/Lee 1999)가 있는 Ro-Pax 실적선에 대한 강도계산을 수행하였다. 실적선은 Tangential 유형 스트럿이 사용되었으며, 종방향 단면계수에 대한 안전계수는 Fig. 7과 같은 격자를 사용한 FEM 계산결과 대비 Losee의 계산 결과의 차이가 5% 수준으로 나타나 초기설계 단계에서 Losee 계산방법의 적용이 가능하다고 판단되었다. 물론, Radial 유형 및 Tangential 유형에 대한 더욱 많은 비교계산이 수행되어야 하겠지만, 현재는 자료 부족으로 더 이상의 비교는 어렵고 지속적인 평가가 수행되어야 하겠다.

그러나 스트럿의 진동평가는 Radial 유형에 대한 실적선 계산결과와의 비교에서 Losee의 계산 결과가 10배 이상의 큰 차이를 보여서 물리적으로도 설계에 적용하기에는 곤란하다고 판단되었던다.

한편, 일반선에는 적용하고 있지 않지만, ABS 나 LR에서는 고속정과 같은 특수선에서 스트럿의 강도에 대한 기준을 제시하고 있다. 그러나 이들 선급에서 적용하는 스트럿은 Radial 유형에 대한 기준만이 제시되고 있는 실정이다.

5. 여객선의 스트럿 설계

본 논문에서는 이상에서 검토된 내용을 바탕으로 초기설계 단계에서 Ro-Pax 선박의 스트럿을 설계한 과정을 소개하고자 한다. 본 선박의 주요 제원은 Table 1과 같다.

본 선박의 스트럿은 초기설계 시 최우선적으로 스트럿 단면의 선택에 주의를 기울였다.

먼저 Table 2와 같이 EPH 단면과 MARIN 단면의 특성을 검토하여 캐비테이션 성능은 MARIN 단면이 우수하지만, EPH 단면이 강도면에서 유리함을 알 수 있었다. 또한, EPH 단면은 단면의 전연을 수정하여 Fig. 8과 같이 Cavitation inception angle을 검토한 결과 MARIN 단면보다 우수한 캐비테이션 특성을 갖도록 하는 설계가 가능하였다.

이와 같이 스트럿 단면은 수정된 EPH 단면으로 설계하고, Main 스트럿의 유형 선택을 검토하였다. 먼저, 본 선박은 항만에서의 조종성 증대를 위하여 대용량의 Stern thruster를 설치하여 선미 Center skeg의 폭이 커서 스트럿 Vee angle을 과도하게 키우면 선체와 Skeg가 만나는 부위에서 Throttle 현상이 발생할 우려가 있다. 따라서 유체 역학적 관점에서는 Tangential 유형으로 하는 것이 주어진 Vee angle의 범위에서 스트럿 Arm 사이의 간격을 보다 확보하여 유동의 압축을 방지할 것으로 판단하였으며, Vee angle은 61°로 설계하였다. 한편, 구조적인 견지에서도 Losee의 계산방법으로 계산한 결과 같은 크기를 갖는 경우에 Tangential 유형이 약간 우수한 것으로 판단되었다.

Table 2 Comparison of strut section

단면형상	EPH		MARIN
두께비, c/t	6	5	4.3
Chord [m]	1.0	1.0	1.0
Thickness [m]	0.167	0.2	0.234
단면적 [m ²]	= 0.747×c×t		= 0.7041×c×t
	0.1247	0.1494	0.1648
종립축 위치 (from L.E., m)	= 0.4735×c		= 0.441×c
	0.4735	0.4735	0.441
종방향 관성 모멘트 [m ⁴]	= 0.0443×c ³ ×t		= 0.04101×c ³ ×t
	0.0074	0.0089	0.0096
종방향 단면계수 (from L.E., m ³)	= 0.0842×c ² ×t		-
	0.0141	0.0168	0.0172
Cavitation Inception Angle	-	4 deg.	5 deg.

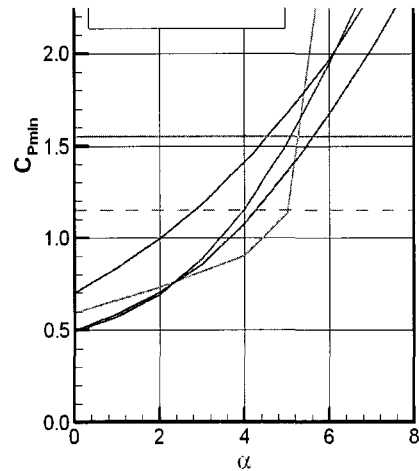


Fig. 8 Strut cavitation bucket

Table 1 Particulars

유형	780P Ro-Ro Ferry
L.O.A.	187 m
Breadth	28.4 m
Draught	6.75 m
Gross Tonnage	34,000 Tons
Service Speed	25 knots

따라서, 본선의 주 스트럿은 Tangential 유형으로 설계하고, 스트럿 자체의 캐비테이션 발생 억제 및 스트럿 캐비테이션으로 인한 추진효율의 저하를 방지하기 위하여 모형시험에서 Fig. 9와 같이 스트럿 Alignment test를 수행하여 스트럿을 유동에 맞게 최적화 하였다. Fig. 9의 시험과정을 거치지 않는 경우에는 스트럿 단면과 유입유동의 불일치로 받음각이 커져서 스트럿 캐비테이션이 발생하는 문제에 직면할 우려가 있다. 최적화된

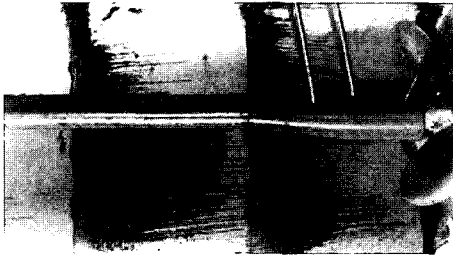


Fig. 9 Strut alignment test

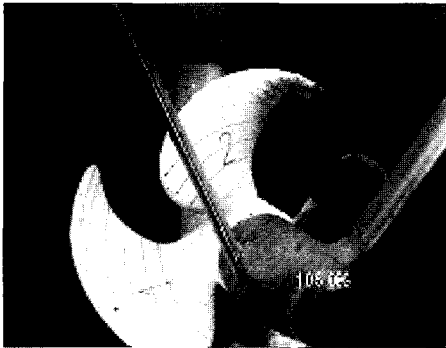


Fig. 10 Cavitation observation test

스트럿은 Fig. 10과 같이 Cavitation observation test를 통하여 스트럿 Arm 주위에서 캐비테이션이 발생하지 않음을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 여객선의 초기설계 시 스트럿 설계에 대하여 검토하고, 실적선 설계과정을 소개하였으며, 상기의 검토를 통하여 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

- 여객선과 같이 승객의 안락한 승선감이 중요한 선박에서는 균일한 반류분포 및 낮은 피크값을 확보하기 위하여 Tangential 유형의 주 스트럿이 채택되었다.
- 초기설계 단계에서 설계된 스트럿은 수치계산을 통한 유동의 검토는 그 가능성은 보여 주었으나 지속적인 개선이 필요하다.
- Losse의 방법에 따른 스트럿의 강도 계산은 구조해석 결과와 비교하여 신뢰성을 가지며, 초기설계에서 유용한 방안으로 판단하였다.

한편, 주 스트럿의 형상 차이에 대한 더욱 상세한 연구를 위하여 반류특성 수준파악과 구조해석을 수행하고 있으며, 향후에는 초기설계 단계에서 소음/진동관점에서의 최적화 방안에 대해 연구하는 것이 요구되어진다.

참 고 문 헌

- 김정중, 2003, 선체 부가물 주위의 점성유동 특성 연구, 삼성중공업 조선플랜트연구소
- 이진성, 고주혁 1987, Shaft Strut의 설계, 기술현대
- 조무용, 1980, Shaft Strut의 설계에 대하여, KTMI Engineering.
- Hackett, J.P. and Jonk, A. 1999, "Propeller shaft strut design", Trans. of SNAME, Vol. 107, pp. 101~126.
- Hamalainen, R. and van Heerd, J. 1998, "Hydrodynamic development for a large fast monohull passenger ferry", Annual meeting of SNAME, No. 16, SD.
- Losee, L.K., 1957, Shaft struts DDS 4301-2, Design Data Sheet.
- Mandel, P., 1953, "Some hydrodynamic aspects of appendage design", Trans. of SNAME, Vol. 61, pp.464~515.
- Saunders, H.E., 1957, "Hydrodynamics in ship design", SNAME.
- Song, Y.S. and Lee, J.Y., 1999, "Structural strength assessment of shaft strut & rudder horn (HN1279)", SHI, Shipbuilding & Plant Research Institute



< 이 화 준 >

< 장 학 수 >

< 전 호 환 >